Online edition: ISSN 2435-760X Print edition: ISSN 0288-8408

地震予知連絡会会報

〈第 107 巻〉

令和4年3月

国土地理院

REPORT OF THE COORDINATING COMMITTEE FOR EARTHQUAKE PREDICTION

VOL. 107

MARCH, 2022

EDITED BY GEOSPATIAL INFORMATION AUTHORITY OF JAPAN

地震予知連絡会会報(第107巻)

この会報は、地震予知連絡会(第232回・第233回)に提出された資料を取りまとめたものです。

目 次

1 - 1	日本とその周辺の地震活動(2021年5月~10月)(気象庁)1
1 - 2	日本周辺における浅部超低周波地震活動(2021年5月~10月)(防災科研)5
1 - 3	日本全国の地殻変動
1 - 4	全国 GNSS 観測点のプレート沈み込み方向の位置変化40
2 - 1	北海道地方とその周辺の地震活動(2021年5月~10月)(気象庁)45
2 - 2	北海道地方の地殻変動
3 - 1	東北地方とその周辺の地震活動(2021年5月~10月)(気象庁)56
3 - 2	日本海溝沿いの海底地殻変動観測結果(海上保安庁)79
3 - 3	東北地方の地殻変動
4 - 1	関東・中部地方とその周辺の地震活動(2021年5月~10月)(気象庁)116
4 - 2	神奈川県西部地域の地下水位観測結果(2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)
4 - 3	関東甲信地方の地殻変動
4 - 4	2021 年 8 月茨城県沖の震源分布(防災科研)171
4 - 5	2021 年 10 月 7 日千葉県北西部の地震による高周波エネルギー輻射量(防災科研)173
5 - 1	伊豆地方の地殻変動
6 - 1	東海地方の地殻変動
6 - 2	東海・南関東地域におけるひずみ観測結果(2021 年 5 月~ 10 月)
6 - 3	東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント
	(2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)(産総研・防災科研)240
6 - 4	東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)(64)
7 - 1	岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果(産総研)276
7 - 2	北陸・中部地方の地殻変動
7 - 3	能登半島の最近の地殻変動について
7 - 4	非定常 ETAS モデルから見える能登半島群発地震活動の地域的変化
8 - 1	近畿・中国・四国地方とその周辺の地震活動(2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)
8 - 2	近畿地方の地殻変動
8 - 3	南海トラフ周辺の地殻活動(2021年5月~10月)(気象庁)333

8 - 4	南海トラフ周辺における最近の傾斜変動(2021 年 5 月~ 2021 年 10	月)
		(防災科研)372
8 - 5	南海トラフ沿いの海底地殻変動観測結果	… (海上保安庁)389
8 - 6	南海トラフ沿いの長期的スロースリップの客観検知	(気象研)395
8 - 7	内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測	(気象研)398
8 - 8	紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2021年5月~2021年	₹10月)
		(産総研)402
8 - 9	近畿地域の地下水位・歪観測結果(2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)	(産総研)413
9 - 1	西南日本における深部低周波微動活動 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)(防災科研)417
9 - 2	中国・四国地方の地殻変動	(地理院)423
9 - 3	西南日本における短期的スロースリップイベント (2021 年 5 月~ 20.	21年10月)
		(防災科研)441
9 - 4	鳥取県・岡山県・島根県における温泉水変化(2021 年 5 月~ 2021 年	10月)
		鳥取大・産総研)447
10 - 1	九州地方とその周辺の地震活動(2021年5月~10月)	(気象庁)450
10 - 2	沖縄地方とその周辺の地震活動(2021 年 5 月~ 10 月)	(気象庁)459
10 - 3	九州・沖縄地方の地殻変動	(地理院)464
11 - 1	その他の地域の地震活動(2021 年 5 月~ 10 月)	(気象庁)475
11 - 2	世界の地震活動(2021 年 5 月~ 10 月)	(気象庁)481
11-3	2021 年 7 月 29 日アラスカ沖で発生した地震による津波の観測記録	(防災科研)508
11 - 4	ハイチの地震 SAR 干渉解析結果	(地理院)510
12 - 1	第 232 回地震予知連絡会重点検討課題「地震発生予測に向けた沈み	込み帯での
	地震準備・発生過程の物理モデル」の概要(海洋	牟研究開発機構)513
12 - 2	エネルギー収支を考慮した地震発生シナリオ構築の新手法	(気象研)515
12 - 3	南海トラフ周辺におけるスロースリップイベントと	
	地震発生準備過程の数値モデリング:近年の観測研究を踏まえて…	(防災科研)522
12 - 4	SSE 後の沈み込み帯地震の発生確率に対する単純な物理モデルでの	評価
	:ヒクランギ巨大地震への適用(海洋研究開発	巻機構・京 大)525
12 - 5	第 233 回地震予知連絡会重点検討課題「予測実験の試行 08 - 試行か	ら実施への
	移行」について」の概要(東北大・海洋	牟研究開発機構)532
12-6	地殻変動予測:東北沖地震の余効変動	(地理院)535
12 - 7	群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法(6)	:これまでの
	取りまとめと今後の課題	(気象研)539
12-8	階層的時空間 ETAS モデルなどによる短・中・長期の地震確率予測	と検証評価
		(統数研)547
12-9	気象庁震度データベースを用いた地震予測と 2015-2021 年の予測の言	平価
		…(滋賀県立大)556

連絡会記事	
運営要綱	
委員名簿	
投稿規定	

CONTENTS (Vol. 107)

1 - 1	Seismic Activity in and around Japan (May – October 2021) ······ (JM	/AA)·····1
1 - 2	Activity of Shallow Very-low-frequency Earthquakes in and around Japan	
	(May – October, 2021)	ED)5
1 - 3	Crustal Deformations of Entire Japan	SI)10
1 - 4	Position Change in the plate subduction direction of the nationwide GNSS points (MI	XI)40
2 - 1	Seismic Activity in and around the Hokkaido District (May – October 2021) ········· (JM	A)45
2 - 2	Crustal Deformations in the Hokkaido District	SI)51
3 - 1	Seismic Activity in and around the Tohoku District (May – October 2021) ······· (JM	A)56
3 - 2	Seafloor movements along the Japan Trench observed by seafloor geodetic observations	
		G)79
3 - 3	Crustal Deformations in the Tohoku District	SI)84
4 - 1	Seismic Activity in and around the Kanto and Chubu Districts (May – October 2021)	
		.)116
4 - 2	Temporal Variation in the Groundwater Level in the western part of Kanagawa Prefecture,	
	Japan (May 2021 – October 2021) ······ (HSRI, AIST	r)·····162
4 - 3	Crustal Deformations in the Kanto District (GS	[)168
4 - 4	Hypocenter distribution off Ibaraki Prefecture in August, 2021 (NIED) 171
4 - 5	High-frequency energy release from the NW Chiba-prefecture earthquake	
	on October 7, 2021) 173
5 - 1	Crustal Deformations in the Izu peninsula and its Vicinity	[)177
6 - 1	Crustal Deformations in the Tokai District	[)193
6 - 2	Observation of Crustal Strain by Borehole Strainmeters in the Tokai and Southern Kanto D	istricts
	(May – October 2021) ······ (JMA, MR	[)224
6 - 3	Short-term slow slip events in the Tokai area, the Kii Peninsula and the Shikoku District, Ja	apan
	(from May 2021 to October 2021) ······ (AIST, NIED) 240
6 - 4	The Variation of the Groundwater Level, Discharge Rate, Tilt meter, Three-Component Str	ain,
	and Subsidence in the Tokai, Kanto District and Izu Peninsula, Japan.	
	(from May 2021 to Oct. 2021) (64)	r)·····269
7 - 1	Observation of Tectonic Activities around the Active Faults in Eastern Gifu Region	
	(May, 2021 ~ October, 2021)	r)·····276
7 - 2	Crustal Deformations in the Hokuriku and Chubu Districts	[)278
7 - 3	Recent crustal deformation in Noto Peninsula	.)289
7 - 4	Changing features revealed from the non-stationary ETAS model	
	in regional earthquake swarm activity of the Noto Peninsula	[)292

8 - 1	Seismic Activity in and around the Kinki, Chugoku and Shikoku Districts
	(May–October 2021)······297
8 - 2	Crustal Deformations in the Kinki District
8 - 3	Crustal Activity around the Nankai Trough (May - October 2021)(JMA)333
8 - 4	Recent Continuous Crustal Tilt Observation around the Nankai Trough
	(May 2021 – October 2021) ······372
8 - 5	Seafloor movements along the Nankai Trough observed by seafloor geodetic observations
	(JCG)
8 - 6	Objective detection of long-term slow slip events along the Nankai Trough
8 - 7	Continuous Observations of Crustal Deformations in and around Intraplate Seismic Gaps
8 - 8	The variation of the strain, tilt and groundwater level in the Shikoku District and
	Kii Peninsula, Japan(from May 2021 to October 2021)······402
8 - 9	Observational Results of Groundwater Levels and Crustal Strains in the Kinki District, Japan
	(May 2021 – October 2021) ······413
9 - 1	Activity of deep low-frequency tremor in southwest Japan (May, 2021 – October, 2021)
	······ (NIED)·····417
9 - 2	Crustal Deformations in the Chugoku and Shikoku Districts
9 - 3	Short-term slow slip events with non-volcanic tremor in southwest Japan
	(May 2021-October 2021) ······441
9 - 4	Temporal Variation in the hot spring water in the Tottori Prefecture, Okayama Prefecture
	and Shimane Prefecture, Japan (May 2021 – October 2021) (Tottori Univ., AIST)447
10 - 1	Seismic Activity in and around the Kyushu District (May - October 2021)(JMA)450
10-2	Seismic Activity around the Okinawa District (May - October 2021) ·······(JMA) ·····459
10 - 3	Crustal Deformations in the Kyushu and Okinawa Districts
11 - 1	Seismic Activity in Other Regions around Japan (May – October 2021) ·······(JMA) ·····475
11 - 2	Seismic Activity in the World (May – October 2021) ······481
11 - 3	Ocean-bottom observation of trans-Pacific tsunamis caused by the earthquake off Alaska coast
	on the 29th July 2021
11-4	The 2021 Haiti Earthquake: Crustal deformation detected by ALOS-2 data
12-1	Physical models of preparation and generation processes of megathrust earthquakes
	in subduction zone aiming for their forecast
12-2	A new method to generate rupture scenarios for megathrust earthquakes taking the energy
	balance into account
12 - 3	Numerical modeling of slow slip events in the earthquake preparation process around
	the Nankai region, based on the recent advance in observational studies

12-4	Simple Physical Model for the Probability of a Subduction-Zone Earthquake Following
	Slow Slip Eventsand Earthquakes: Application to the Hikurangi Megathrust, New Zealand
12-5	Summary of "Trials of experimental forecasts of crustal deformation and seismicity #08
	: Moving towards the prospective tests
12-6	Experimental forecast of postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake
12 - 7	Earthquake forecasting method by supposing swarm-like activity to be possible foreshocks (6)
	: summary so far and future issues
12-8	Prediction and validation of short- medium- and long-term earthquake probabilities using
	a hierarchical space-time ETAS (HIST-ETAS) models, etc
12-9	Earthquake forecasting by using the seismic intensity database of Japan Meteorological Agency
	and evaluation of the forecasts for 2015-2021
12-10	Seismic activities and seismotectonics in the northern Noto Peninsula(Kanazawa Univ.)564

1-1 日本とその周辺の地震活動(2021年5月~10月) Seismic Activity in and around Japan (May – October 2021)

気象庁

Japan Meteorological Agency

今期間,日本とその周辺で M5.0 以上の地震は 70回, M6.0 以上の地震は 11回発生した.このうち最大は,2021 年 5 月 1 日 10時 27 分に宮城県沖で発生した M6.8 の地震であった.2021 年 5 月 ~ 10 月の M5.0 以上の地震の震央分布を第 1 図 (a) 及び (b) に示す.

主な地震活動は以下のとおりである.

(1) 北海道地方とその周辺の地震活動(本巻「北海道地方とその周辺の地震活動」の頁参照)

2021 年 5 月 16 日 12 時 23 分に十勝沖の深さ 8km で M6.1 の地震(最大震度 3)が発生した.この地震は陸のプレートの地殻内で発生した.この地震の発震機構(CMT 解)は、東西方向に圧力軸を持つ型であった.

(2) 東北地方とその周辺の地震活動(本巻「東北地方とその周辺の地震活動」の頁参照)

2021 年 5 月 1 日 10 時 27 分に宮城県沖の深さ 51km で M6.8 の地震(最大震度 5 強)が発生した. この地震は,発震機構(CMT 解)が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した.

2021 年 5 月 14 日 08 時 58 分に福島県沖の深さ 46km で M6.3 の地震(最大震度 4)が発生した. この地震は,発震機構(CMT 解)が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した.

2021 年 10 月 6 日 02 時 46 分に岩手県沖の深さ 56km で M5.9 の地震 (最大震度 5 強) が発生した. この地震は,発震機構 (CMT 解)が北北西 – 南南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレー ト内部で発生した.

(3) 関東・中部地方とその周辺の地震活動(本巻「関東・中部地方とその周辺の地震活動」の頁参照) 石川県能登地方では、2018 年頃から地震回数が増加傾向にあり、2020 年 12 月から地震活動が活 発になっている。2020 年 12 月から 2021 年 10 月までに震度 1 以上を観測した地震は 51 回(震度 5 弱:1回,震度 4:1回,震度 3:7回,震度 2:10回,震度 1:32回)発生した。このうち最大規 模の地震は 2021 年 9 月 16 日 18 時 42 分に発生した M5.1 の地震(最大震度 5 弱)であった。この 地震の発震機構は北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であった。

2021 年 8 月 4 日 05 時 33 分に茨城県沖の深さ 18km で M6.0 の地震(最大震度 3)が発生した. この地震は,発震機構(CMT 解)が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した.

2021年9月14日07時46分に東海道南方沖の深さ385kmでM6.0の地震(最大震度3)が発生した. この地震は太平洋プレート内部の深いところで発生した.発震機構(CMT解)は、太平洋プレートの沈み込む方向に圧力軸を持つ型である.この地震により、震央付近よりも震央から離れた地域で大きな揺れとなる「異常震域」と呼ばれる現象を観測した. 2021年9月29日17時37分に日本海中部の深さ394kmでM6.1の地震(最大震度3)が発生した. この地震は、太平洋プレート内部で発生した.この地震の発震機構(CMT解)は太平洋プレート の沈み込む方向に圧力軸を持つ型である.この地震により、震央付近よりも、震央から離れた地域 で大きな揺れとなる「異常震域」と呼ばれる現象を観測した.

2021年10月7日22時41分に千葉県北西部の深さ75kmでM5.9の地震(最大震度5強)が発生した. この地震は,発震機構が東西方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレートとフィリピン海プレートの境界で発生した.

(4) 近畿・中国・四国地方とその周辺の地震活動(本巻「近畿・中国・四国地方とその周辺の地震 活動」の頁参照)

2021 年 6 月 19 日 07 時 39 分に愛媛県南予の深さ 42km で M4.7 の地震(最大震度 4)が発生した. この地震の発震機構は東西方向に張力軸を持つ正断層型で,フィリピン海プレート内部で発生した.

(5) 九州地方とその周辺の地震活動(本巻「九州地方とその周辺の地震活動」の頁参照)

2021年10月6日17時12分に大隅半島東方沖の深さ43kmでM5.4の地震(最大震度4)が発生した. この地震は,発震機構(CMT解)が東西方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で,フィリピン海プレー ト内部で発生した.

(6) 沖縄地方とその周辺の地震活動(本巻「沖縄地方とその周辺の地震活動」の頁参照)

2021 年 8 月 5 日 06 時 50 分に台湾付近の深さ 10km (CMT 解による) で M6.3 の地震(日本国内 で観測された最大の揺れは震度 3)が発生した.発震機構(CMT 解)は、南北方向に張力軸を持 つ正断層型で、陸のプレートの地殻内で発生した地震である.

2021 年 10 月 24 日 14 時 11 分に台湾付近の深さ 73km で M6.3 の地震(日本国内で観測された最大の揺れは震度 2)が発生した.この地震はフィリピン海プレート内部で発生した.発震機構(CMT 解)は,西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型である.

なお、本巻の気象庁作成資料は、特段の断りがない限り、国立研究開発法人防災科学技術研究所、 北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児 島大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、国立研究開発法人海洋研究開発機構、 公益財団法人地震予知総合研究振興会、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所及び気 象庁のデータを用いて作成している.また、2016年熊本地震合同観測グループのオンライン臨時 観測点(河原,熊野座)、米国大学間地震学研究連合(IRIS)の観測点(台北、玉峰、寧安橋、玉里、 台東)のデータを用いて作成している.

2016年4月1日以降の震源では、Mの小さな地震は、自動処理による震源を表示している場合がある.自動処理による震源は、震源誤差の大きなものが表示されることがある.

2020年9月以降に発生した地震を含む図については、2020年8月以前までに発生した地震のみ による図と比較して、日本海溝海底地震津波観測網(S-net)や紀伊水道沖の地震・津波観測監視 システム(DONET2)による海域観測網の観測データの活用、震源計算処理における海域速度構造 の導入及び標高を考慮した震源決定等それまでのデータ処理方法との違いにより、震源の位置や決 定数に見かけ上の変化がみられることがある.

2021年11月30日現在,次の期間の地震について,暫定的に震源精査の基準を変更しているため, その前後の期間と比較して微小な地震での震源決定数の変化(増減)が見られる.

① 2020 年 9 月 1 日から 10 月 23 日まで、② 2021 年 1 月 9 日から 3 月 7 日まで、③ 2021 年 4 月 19 日以降

震源の深さを「CMT 解による」とした場合は,気象庁 CMT 解のセントロイドの深さを用いている.



日本とその周辺の地震活動(2021年5月~7月、M≧5.0)





第1図(b) つづき(2021年8月~10月, M≧ 5.0, 深さ≦ 700km)

Fig. 1(b) Continued (August –October 2021, $M \ge 5.0$, depth ≤ 700 km).

1-2 日本周辺における浅部超低周波地震活動(2021 年 5 月 ~ 10 月) Activity of Shallow Very-low-frequency Earthquakes in and around Japan (May – October, 2021)

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

日本周辺で発生する浅部超低周波地震の活動を防災科研 Hi-net に併設された高感度加速度計(傾 斜計)の記録のアレイ解析¹⁾によって調べた.2003年6月1日から2021年10月31日までの期間 におけるイベントの空間分布を第1図に,時空間分布図を第2図にそれぞれ示す.Hi-netの震源カ タログにはないイベントを図中に赤色および桃色丸印でそれぞれ示す.これらの地震の多くは浅部 超低周波地震とみられるが,特に2011年3月11日に発生した平成23年(2011年)東北地方太平 洋沖地震の発生以降は,通常の地震と考えられるイベントも混在する.

2021 年 5 月 1 日から 10 月 31 日までの 6 ヶ月間においては,8 月および 9 月に十勝沖で超低周波 地震が検出されたものの目立った活動とはならなかった。その他の地域では、少なくともアレイ解 析では報告すべき超低周波地震は検出されなかった。

しかしながら,防災科研では5月下旬から7月中旬に日向灘以南で超低周波地震が発生している ことを F-net の記録波形から確認していた.そこで,既知の地震・超低周波地震と類似したイベン トを連続波形の中から波形相関によって検出し,位置決定する解析²⁾も行った.この解析によるイ ベントの空間分布を第3図に,時空間分布図を第4図にそれぞれ示す.5月下旬に種子島東方沖の 北緯 30.5度,東経132度付近で始まった超低周波地震活動は,約1週間ほどで日向灘の南部にあ たる北緯 31.5度付近にまで移動・拡大(いわゆるマイグレーション)した.また,6月以降は北緯 30度以南の奄美大島近海においても断続的な活動が見られた.その後,北緯30度以北の活動は6 月下旬に,30度以南の活動も7月中旬には終息した.

> (浅野 陽一) ASANO Youichi

参考文献

1) Asano et al. (2008), Earth Planets Space, 60, 871-875.

2) Asano et al. (2015), Geophys. Res. Lett., 42, doi:10.1002/2014GL062165.



- 第1図 検出されたイベントの震央分布(2003年6月1日から2021年10月31日).検出イベントを防災科研Hinetの手動または自動験測震源と照合し、対応する地震が見出されたイベントを灰色で、それ以外を桃色(2021年4月30日以前)、および赤色(5月1日以降)の点でそれぞれ示す.これらは主として周期10秒以上に卓越する超低周波地震を表すが、東北地方太平洋沖地震の発生以降は、除去しきれない通常の地震を含む.期間内に発生したM7以上の地震の震央を黄色星印で併せて示す(ただし、2011年3月11日から2015年までの東日本は東北地方太平洋沖地震の本震のみ図示).
- Fig. 1 Spatial distribution of detected events. Gray dots denote events identified with regular earthquakes listed in the NIED Hi-net catalogue. Pink and red dots denote other events in the periods of June 1, 2003 April 30, 2021 and May 1 October 31, 2021, respectively. These events are mainly very-low frequency earthquakes (VLFEs); however, this also contains miss-identified regular earthquakes just after the M 9 Tohoku earthquake due to incompleteness of the regular earthquake catalog. Earthquakes with larger magnitudes than 7.0 are shown by yellow stars.



- 第2図 (a) 2003 年6月1日から 2021 年10月31日までの期間,(b) 2021 年5月1日から10月31日までの期間に 検出されたイベントの時空間分布.検出されたイベントを防災科研 Hi-net 手動または自動検測震源と照合 し、対応する地震が見出されたイベントを灰色丸印で、それ以外を赤色丸印で示す.
- Fig. 2 Spatiotemporal distribution of detected events in the period of (a) June 1, 2003 October 31, 2021 and (b) May 1 October 31, 2021, respectively. Gray and red dots denote events identified with regular earthquakes and other events that are mainly VLFEs. Other symbols are the same as shown in Fig. 1.



- 第3図 2010年1月1日から2021年8月2日までの期間内に波形相関解析によって検出された超低周波イベントの震央分布.検出イベントを防災科研 Hi-net の手動または自動験測震源と照合して通常の地震を除去した後に、それ以外を超低周波イベントとして桃色(2021年4月30日以前)、および赤色(5月1日以降)の 点でそれぞれ示す.
- Fig. 3 Spatial distribution of VLFEs in the period of January 1, 2010 August 2, 2021. Events relocated by using the waveform correlation technique are plotted by pink or red dots, which denote VLFEs in the periods of January 1, 2010 April 30, 2021 and May 1 August 2, 2021, respectively. Bold dashed line denotes the Nankai trough and the Japan trench.



- 第4図 第3図と同じ期間内に検出された超低周波イベントの時空間分布. 超低周波イベントを赤色の点で示す.
 (a) および(b) に緯度分布の,(c) および(d) に経度分布の時間変化をそれぞれ示す. また,(a) および(c) に 2010年1月1日以降,(b) および(d) には 2021年5月1日以降の分布をそれぞれ示す.
- Fig. 4 Spatiotemporal distribution of VLFEs shown in Fig. 3 for the periods of (a)(c) January 1, 2010 August 2, 2021 and (b)(d) May 1 June 2, 2019. (a)(b) and (c)(d) show spatiotemporal distribution in latitude and longitude, respectively.

1-3 日本全国の地殻変動 Crustal Deformations of Entire Japan

国土地理院 Geospatial Information Authority of Japan

1. 日本全国の地殻変動

[GEONET による全国の地殻水平変動]

第1~6図は、GEONETによる GNSS 連続観測から求めた最近1年間及び3か月間の全国の水 平地殻変動である.固定局(☆の点)は、長崎県五島列島の福江観測点である.国土地理院ではア ンテナ交換や観測点周辺の樹木の伐採等の保守を行っており、これに伴うオフセットの補正を後日 F5 解が得られてから行っている.基準期間と比較期間を含む期間中にアンテナ交換が行われ、そ れによるオフセットを補正した観測点の変動ベクトルは、補正誤差が含まれる可能性があるため、 白抜きの矢印で示し区別している.

(1年間)

第1図の最近1年間の北海道・東北地方の図においては、2011年3月11日に発生した平成23 年(2011年)東北地方太平洋沖地震(M9.0,最大震度7)の後に続く余効変動が顕著であり、宮 城県周辺には2021年3月20日及び2021年5月1日に発生した宮城県沖の地震に伴う地殻変動が 重畳していると考えられる.また、福島県の太平洋岸で2021年2月13日に発生した福島県沖の地 震に伴う地殻変動が見られる.そのほか、道東地方では千島海溝沿いの太平洋プレートの沈み込み に伴う北西向きの変動が見られる.

第2図の日本列島中央部の図においては、東北地方太平洋沖地震後の余効変動の影響が見られ、 宮城県周辺には2021年3月20日及び2021年5月1日に発生した宮城県沖の地震に伴う地殻変動 が重畳していると考えられる.また、福島県の太平洋岸で2021年2月13日に発生した福島県沖の 地震に伴う地殻変動が見られる.さらに、東海地方から四国にかけて、フィリピン海プレートの沈 み込みに伴う北西向きの変動が見られる.そのほか、小笠原村の硫黄島(いおうとう)では、火山 性の地殻変動が見られる.

第3図の日本列島西部の図においては、中国・四国地方の西部から九州地方にかけて、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う変動が見られる。そのほか、九州地方では定常状態と比べて僅かに南北に開く成分が大きく、2016年4月に発生した平成28年(2016年)熊本地震の余効変動が重畳していると考えられる。また、与那国島では、2021年5月下旬から6月にかけて与那国島近海で発生した地震活動に伴う地殻変動が見られる。

(3か月)

第4~6図は、最近3か月間の水平変動ベクトル図である.

第4図の北海道・東北地方では、東北地方太平洋沖地震後の余効変動の影響が見られる。そのほ か、道東地方では千島海溝沿いの太平洋プレートの沈み込みに伴う北西向きのベクトルが見られる。 第5図の日本列島中央部では、東北地方太平洋沖地震後の余効変動の影響が東北地方を中心に見 られる。紀伊半島から四国にかけては南海トラフ沿いのプレートの沈み込みに伴う北西向きの変動 が見られる.そのほか、小笠原村の硫黄島で火山性の地殻変動が見られる.

第6図の九州以西の図では、中国・四国地方の西部から九州地方にかけて、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う変動が見られる.

[GEONET による2期間の地殻変動ベクトルの差]

第7~9図は,最近3か月間の水平方向の地殻変動について,年周変化やプレート運動等の定常 的な変動の影響を取り去った変動を見るため,1年前の同時期の水平変動ベクトルに対する差を示 す図である.これらの図においては,前の期間に生じた地殻変動は,逆向きに表示される.また, 最近の3か月間又は1年前の同時期にアンテナ交換を行った観測点の変動ベクトルは,白抜きの矢 印で示している.

第7図の北海道・東北地方の図では、特段の変化は見られない.

第8図の日本列島中央部の図では、小笠原村の硫黄島で島内の火山性の地殻変動速度が変化した 影響が見られる.

第9図の九州以西の図では、特段の変化は見られない.

[GNSS 連続観測から推定した日本列島のひずみ変化]

第10~12 図は、GNSS データから推定した日本列島の最近1年間のひずみ変化を示す図である. 第10 図は日本全国のひずみ変化である.北海道南部から中部・北陸地方にかけて、東北地方太 平洋沖地震後の余効変動の影響によるひずみが見られるほか、宮城県を中心とする範囲において、 2021 年 2 月 13 日に発生した福島県沖の地震並びに 2021 年 3 月 20 日及び 2021 年 5 月 1 日に発生 した宮城県沖の地震の影響によるひずみが見られ、九州地方では熊本地震の余効変動によるひずみ が見られる.また、石川県能登地方では、2020 年 12 月から活発になっている地震活動とほぼ同期 した地殻変動の影響によるひずみが見られる.第11~12 図は、第10 図を地方ごとに拡大した図 である.

第13 図は,第10 図との比較のために,地震や余効変動の影響が少なかった 1998 年10 月からの 1 年間のひずみ変化を,定常時のひずみ変化とみなして示したものである.定常時における東日本 のひずみは概ね東西方向の縮みとなっている.

[験潮]

第14~27 図は,毎年1回報告している,加藤&津村(1979)の方法による全国の験潮場における上下変動である.最新のデータは2020年12月である.

第14~15 図は、北海道から津軽海峡にかけての験潮場のデータである.東北地方太平洋沖地震 を境に稚内と忍路が沈降したように見えるが、これは、解析に用いられた観測点のうちの多くを占 める津軽海峡付近の観測点が隆起したために、この海域に適用する補正値の算出に誤差が生じたこ とによる見かけ上の変化と考えられる.

第16~17 図は本州の日本海側の験潮場のデータである.深浦から男鹿にかけて、東北地方太平 洋沖地震に伴う変化(隆起)が見られるが、東北地方から北陸にかけて隆起している験潮場が多い ため,第15 図のデータと同様,この海域の地震前後の変動には系統誤差が含まれるものと思われる. 中国地方の験潮場に見られる僅かな沈降は、この系統誤差による見かけの変動と考えられる.その ほかの地域については、特段の傾向の変化は見られない. 第18~19 図は、東北地方から房総半島にかけての海域の験潮場のデータである。東北地方太平 洋沖地震に伴う上下変動が大きいため、この海域における東北地方太平洋沖地震後の補正量の算出 には、2014年12月までは2点(銚子漁港,勝浦)、2015年1月から2019年2月においては4点(八 戸港,鹿島港,銚子漁港,勝浦)、2019年3月以降は3点(八戸港,鹿島港,勝浦)のみを用いている。 ただし、これらの観測点も数 cm 沈降したので、その影響による系統誤差が含まれる可能性がある。 東北地方沿岸の験潮場で、東北地方太平洋沖地震に伴う大きな沈降と、その後の隆起が見られる。

第20~21 図は、関東から伊豆半島にかけての海域に属する験潮場のデータである。横須賀と油 壺は東北地方太平洋沖地震前に長期的に沈降していたが、地震後は停滞しているように見える.な お、この地域は東北地方太平洋沖地震後に余効変動によって広く隆起したことが GNSS 観測から 分かっている.この海域に含まれる験潮場の多くが隆起したことにより、この海域に適用する補正 値の算出に誤差が生じ、隆起が系統的に小さく計算されている可能性がある.

第22~23 図は,東海地方から紀伊半島にかけての験潮場のデータである.清水港は東北地方太 平洋沖地震前に長期的に沈降していたが,地震後は停滞しているように見える.

第24~25図は、中国・四国地方から九州地方にかけての験潮場のデータである。特段の傾向の 変化は見られない。

第26~27 図は、九州地方の験潮場のデータである。特段の傾向の変化は見られない。



第1図 GNSS 連続観測から求めた 2020 年 10 月~ 2021 年 10 月の水平変動

Fig. 1 Horizontal displacements at GNSS sites during October 2020 – October 2021. (🛪 , Reference station is Fukue)



第2図 GNSS 連続観測から求めた 2020 年 10 月~2021 年 10 月の水平変動

Fig. 2 Horizontal displacements at GNSS sites during October 2020 – October 2021. (🛪 , Reference station is Fukue)







第4図 GNSS 連続観測から求めた 2021 年7月~2021 年10月の水平変動

Fig. 4 Horizontal displacements at GNSS sites during July 2021 –October 2021. (🛪 , Reference station is Fukue)



第5図 GNSS 連続観測から求めた 2021 年7月~2021 年10月の水平変動

Fig. 5 Horizontal displacements at GNSS sites during July 2021 –October 2021. (🛪 , Reference station is Fukue)



全国の地殻水平変動 3か月(3)



Fig. 6 Horizontal displacements at GNSS sites during July 2021 –October 2021. (🛪 , Reference station is Fukue)



2期間の地殻変動ベクトルの差 3か月(1)

Fig. 7 Differences of horizontal displacements at GNSS sites between July 2020 - October 2020 and July 2021 -October 2021

第7図 GNSS 水平変動の差(3か月間)



2期間の地殻変動ベクトルの差 3か月(2)

Fig. 8 Differences of horizontal displacements at GNSS sites between July 2020 – October 2020 and July 2021 – October 2021

第8図 GNSS 水平変動の差(3か月間)



2期間の地殻変動ベクトルの差 3か月(3)

第9図 GNSS 水平変動の差(3か月間)

Fig. 9 Differences of horizontal displacements at GNSS sites between July 2020 – October 2020 and July 2021 – October 2021

GNSS 連続観測から推定した日本列島のひずみ変化

基準期間:2020/10/02 - 2020/10/16 [F5:最終解]

- 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響によるひずみが見られる.
- 平成 28 年(2016 年) 熊本地震の余効変動の影響によるひずみが見られる.
- 2021年2月13日の福島県沖の地震の影響によるひずみが見られる。
- 2021年3月20日の宮城県沖の地震の影響によるひずみが見られる。
- 2021年5月1日の宮城県沖の地震の影響によるひずみが見られる。
- ・石川県能登地方で2020年12月から活発になっている地震活動とほぼ同期した地殻変動の影響によるひずみが見られる.



海底地形データは ETOPO1 (Amante, C.&B.W.Eakins(2009)) を使用した.

第10図 GNSS 連続観測データから推定した日本列島の水平歪(2020年10月~2021年10月)

Fig. 10 Horizontal strain in Japan derived from continuous GNSS measurements during October 2020 –October 2021.

GNSS 連続観測から推定した各地方のひずみ変化(1)

- 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響によるひずみが見られる.
- 2021 年 2 月 13 日の福島県沖の地震の影響によるひずみが見られる。
- 2021年3月20日の宮城県沖の地震の影響によるひずみが見られる。
- 2021年5月1日の宮城県沖の地震の影響によるひずみが見られる。
- 石川県能登地方で 2020 年 12 月から活発になっている地震活動とほぼ同期した地殻変動の影響によるひずみが見られる.



基準期間:2020/10/02 - 2020/10/16 [F5:最終解] 比較期間:2021/10/02 - 2021/10/16 [F5:最終解]

- 図は GNSS 連続観測による 1 年間の変位ベクトルから推定した各地方の地殻水平ひずみである.
- 海底地形データは ETOPO1 (Amante, C.&B.W.Eakins(2009)) を使用した.
- 第11 図 GNSS 連続観測データから推定した北海道・東北および関東・中部・近畿地方の水平歪(2020 年 10 月) ~ 2021 年 10 月)
- Fig. 11 Horizontal strain in Hokkaido, Tohoku, Kanto, Chubu and Kinki districts derived from continuous GNSS measurements during October 2020 –October 2021.

GNSS 連続観測から推定した各地方のひずみ変化(2)

・ 平成28年(2016年)熊本地震の余効変動の影響によるひずみが見られる。



基準期間:2020/10/02-2020/10/16 [F5:最終解] 比較期間:2021/10/02-2021/10/16 [F5:最終解]

・図は GNSS 連続観測による1年間の変位ベクトルから推定した各地方の地殻水平ひずみである.

・海底地形データは ETOPO1 (Amante, C.&B.W.Eakins(2009)) を使用した.

第12 図 GNSS 連続観測データから推定した中国・四国・九州及び南西諸島地方の水平歪(2020 年 10 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 12 Horizontal strain in Chugoku, Shikoku, Kyushu and Nansei-islands areas derived from continuous GNSS measurements during October 2020 –October 2021.

GNSS 連続観測から推定した日本列島のひずみ変化 定常時・比較用



基準期間:1998/10/02 – 1998/10/16 [F5:最終解] 比較期間:1999/10/02 – 1999/10/16 [F5:最終解]

第13図 GNSS 連続観測データから推定した日本列島の水平歪【定常時・比較用】

・ 海底地形データは ETOPO1 (Amante, C.&B.W.Eakins(2009)) を使用した.





加藤&津村(1979)の解析方法による、各験潮場の上下変動(1)

第14図 加藤・津村(1979)の方法による験潮場の上下変動

Fig. 14 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).



加藤&津村(1979)の解析方法による,各験潮場の上下変動(2)

第15図 加藤・津村(1979)の方法による験潮場の上下変動

Fig. 15 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).



加藤&津村(1979)の解析方法による、各験潮場の上下変動(3)

第16図 加藤・津村(1979)の方法による験潮場の上下変動

粟島田

由柏崎

小木曲

⇔富山

輪島

Fig. 16 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).


加藤&津村(1979)の解析方法による,各験潮場の上下変動(4)

三国 。 ^{企西郷} •上保3 ● 田後 (海 ~ (気象 舞鶴 浜田

- ・2011年3月以降の小さな変化は、同じ海域に属する北日本 の観測点の隆起が解析において影響した見かけのものと考え られる.
- . 験潮場名は海岸昇降検知センターの登録名による.
- ・ グラフの縦軸は最初のプロット点(⊙印)の値を0cmとして いる
- ・最新データ 2020 年 12 月.

第17図 加藤・津村(1979)の方法による験潮場の上下変動

Fig. 17 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).



加藤&津村(1979)の解析方法による、各験潮場の上下変動(5)

第18図 加藤・津村(1979)の方法による験潮場の上下変動

Fig. 18 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).



加藤&津村(1979)の解析方法による、各験潮場の上下変動(6)

第19図 加藤・津村(1979)の方法による験潮場の上下変動

Fig. 19 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).



加藤&津村(1979)の解析方法による、各験潮場の上下変動(7)

第20図 加藤・津村(1979)の方法による験潮場の上下変動

Fig. 20 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).



加藤&津村(1979)の解析方法による、各験潮場の上下変動(8)

第21図加藤・津村(1979)の方法による験潮場の上下変動

位置図

──田真鶴 □田初島

ſ

内浦 申伊東 岡田町

南伊豆

田子

Fig. 21 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).



加藤&津村(1979)の解析方法による、各験潮場の上下変動(9)



Fig. 22 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).



加藤&津村(1979)の解析方法による、各験潮場の上下変動(10)

第23図 加藤・津村(1979)の方法による験潮場の上下変動

尾鷲

位置図

——^田浦神 串本

田淡輪~ 白和歌山 甲海南〈

白浜田

Fig. 23 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).



加藤&津村(1979)の解析方法による,各験潮場の上下変動(11)

Fig. 24 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).



加藤&津村(1979)の解析方法による,各験潮場の上下変動(12)

第 25 図 加藤・津村 (1979)の方法による験潮場の上下変動

土佐清水

í

Fig. 25 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).

位置図



加藤&津村(1979)の解析方法による,各験潮場の上下変動(13)

第26図 加藤・津村(1979)の方法による験潮場の上下変動

油洼

位置図

Fig. 26 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).



加藤&津村(1979)の解析方法による、各験潮場の上下変動(14)

第27図 加藤・津村(1979)の方法による験潮場の上下変動

Fig. 27 Vertical movements of the tide stations derived with the method by Kato and Tsumura (1979).

1-4 全国 GNSS 観測点のプレート沈み込み方向の位置変化 Position Change in the plate subduction direction of the nationwide GNSS points

気象庁気象研究所 Meteorological Research Institute, JMA

日本海側の観測点を領域固定¹⁾して,太平洋側の GNSS 観測点のプレート沈み込み方向(N65W) の位置変化について確認した.データは国土地理院 GEONET の GNSS 座標値 F5 解を使用した. 確認した観測点と領域固定した観測点の配置を第1図に,位置変化を第2a図(東日本)と第2b図 (西日本)に示す.GNSS 座標値データからは GEONET 観測点のアンテナ交換などに伴うオフセッ ト²⁾と主な地震に伴うオフセット,年周・半年周成分を除いた.座標変化からは適当な一次トレン ドを差し引いている.主な変化①~⑧について報告する.

①三陸地域

三陸に位置する第2a図の地点Fに,2004年頃を境にしたトレンドの変化が見られる.三陸地域では1994年三陸はるか沖地震 (M7.6)の余効変動が顕著であり,2004年頃まで東西の伸び変化が続いていたと考えられる.

②東北地方南部から関東地方北部

東北地方南部に位置する第2a図の地点HとIに,2003年頃から南東向き変化が見られる.地点 Iでは2008年頃から変化が加速し,茨城県北部の地点Jでも2008年茨城県沖の地震の余効変動が 長く続いている.これらの変化は,2011年東北地方太平洋沖地震の震源域の一部での地震前の非 地震性すべりに対応している可能性がある.

③房総地域

房総半島に位置する第2a図の地点Lに房総半島沖のスロースリップに伴う変化が見られる.図中の発生時期は1996年5月,2002年10月,2007年8月,2011年10月,2014年1月,2018年6月である.

④伊豆半島

伊豆半島南部に位置する第2b図の地点Nでは,2000年の伊豆諸島北部(三宅・神津)の地震火 山活動後も南東向きの変化が継続していた.

⑤東海地域

東海地域に位置する第 2b 図の地点 O に,2000 ~ 2005 年及び 2013 ~ 2016 年に東海地域長期的 スロースリップに伴う変化が見られる.2005 ~ 2010 年は 1997 ~ 1999 年と比較してやや南東向き の傾向が見られる.

⑥紀伊水道

紀伊水道付近に位置する第 2b 図の地点に 1996 ~ 1997 年(地点 R と S), 2000 ~ 2003 年(地点 R, S, T), 2014 ~ 2016 年(地点 S)の長期的スロースリップに伴う南東向き変化が見られる. また,地点 S では 2020 年に小さな変化が見られる.

⑦四国地域

豊後水道付近に位置する第2b図の地点Vに,1997年,2003年,2010年,2019年の豊後水道長期的スロースリップに伴う変化が見られる.また,2014年と2015年後半から小さな変化が見られる. 四国中部に位置する地点Uに,2019年頃から四国中部の長期的スロースリップに伴う小さな変化 が見られる.

⑧八重山諸島

八重山諸島に位置する第 2b 図の地点 c に,約半年周期のスロースリップに伴う変化が見られる.

謝辞

調査には国土地理院 GEONET の GNSS 座標値データ,アンテナ交換等のオフセット量を使用さ せていただきました.

参考文献

1) Kobayashi (2017), Earth Planets Space, 69, 171.

2) 岩下·他 (2009), 国土地理院時報, 118, 23-30.



第1図 調査対象観測点(A-Z, a-c)と領域固定に用いた観測点 日本海側の記号(☆など)は、直線で区分けされた領域の領域固定に使用した観測点.

Fig. 1 Observation points (A-Z, a-c) and points used for region fixing.



第 2a 図 プレート沈み込み方向の位置変化(東日本;1996 年から 2021 年 10 月) 沈み込みと逆方向が上向き.地点番号は,第1 図の観測点記号に GEONET 観測点番号を付加したもの. J1:2003 年十勝沖地震 (M8.0), J2:2004 年新潟県中越地震 (M6.8), J3:2004 年 11 月 29 日釧路沖の地震 (M7.1), J4:2005 年 8 月 16 日宮城県沖の地震 (M7.2), J5:2008 年 5 月 8 日茨城県沖の地震 (M7.0), J6:2011 年東北地 方太平洋沖地震 (M9.0), J7:2015 年 2月 17日三陸沖の地震 (M6.9), J8:2021 年 2月 13日福島県沖の地震 (M7.3).

Fig. 2a Position Change in the plate subduction direction (eastern Japan).



第 2b 図 プレート沈み込み方向の位置変化(西日本:1996年から2021年10月)
 沈み込みと逆方向が上向き.地点番号は、第1図の観測点記号にGEONET 観測点番号を付加したもの.
 J1:1996年10月19日日向灘の地震(M6.9), J2:2001年12月18日与那国島近海(M7.3), J3:2002年3月31日台湾付近の地震(M7.2), J4:2004年9月5日三重県南東沖の地震(M7.4), J5:2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0), J6:2016年熊本地震(M7.3), J7:2019年5月10日日向灘の地震(M6.3).

Fig. 2b Position Change in the plate subduction direction (western Japan).

2-1 北海道地方とその周辺の地震活動(2021年5月~10月) Seismic Activity in and around the Hokkaido District (May – October 2021)

気象庁 札幌管区気象台 Sapporo Regional Headquarters, JMA

今期間,北海道地方とその周辺で M4.0 以上の地震は 106 回, M5.0 以上は 10 回, M6.0 以上は 1 回発生した. このうち最大は,2021 年 5 月 16 日に十勝沖で発生した M6.1 の地震であった. 2021 年 5 月~10 月の M4.0 以上の地震の震央分布を第 1 図 (a) 及び (b) に示す. 主な地震活動は以下のとおりである.

- (1)日高地方中部の地震(M4.6,最大震度4,第2図)
 2021年5月14日20時46分に日高地方中部の深さ20kmでM4.6の地震(最大震度4)が発生した.この地震は地殻内で発生した.この地震の発震機構(CMT解)は、北東-南西方向に圧力軸を持つ逆断層型である.
- (2) 十勝沖の地震(M6.1,最大震度3,第3図)
 2021年5月16日12時23分に十勝沖の深さ8kmでM6.1の地震(最大震度3)が発生した.
 この地震は陸のプレートの地殻内で発生した.この地震の発震機構(CMT 解)は、東西方向に圧力軸を持つ型である.
- (3) 上川地方中部の地震(M5.4,最大震度3,第4図)
 2021年6月20日20時08分に上川地方中部の深さ158kmでM5.4の地震(最大震度3)が発生した.この地震は太平洋プレート内部で発生した.この地震の発震機構は、西北西-東南東方向に圧力軸を持つ型である.
- (4) 十勝地方南部の地震(M4.7,最大震度3,第5図)
 2021年10月10日23時16分に十勝地方南部の深さ51kmでM4.7の地震(最大震度3)が発生した.この地震の発震機構(CMT解)は、北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した.



北海道地方とその周辺の地震活動(2021年5月~7月、M≧4.0) 2021 05 01 00:00 -- 2021 07 31 24:00

第1図(a) 北海道地方とその周辺の地震活動(2021年5月~7月, M ≥ 4.0, 深さ≤ 700km)
 Fig. 1(a) Seismic activity in and around the Hokkaido district (May – July 2021, M ≥ 4.0, depth ≤ 700km).



第1図(b) つづき(2021年8月~10月, M≧4.0, 深さ≦700km) Fig. 1(b) Continued (August – October 2021, M≧4.0, depth ≦700km).

5月14日 日高地方中部の地震



2021年5月14日20時46分に日高地方中部の深 さ20kmでM4.6の地震(最大震度4)が発生し た。この地震は地殻内で発生した。この地震の

発震機構(CMT解)は、北東-南西方向に圧力軸 を持つ逆断層型である。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地震 の震源付近(領域 a)では、M4.0以上の地震が 今回の地震を含め4回発生しており、その内3 回は2011年9月7日~2011年9月26日にかけて 発生している。

1919年以降の活動をみると、今回の地震の震 央周辺(領域b)では、M6.0以上の地震が2回 発生している。2018年9月6日の「平成30年北 海道胆振東部地震」(M6.7、最大震度7)によ り、北海道では死者43人、負傷者782人、住家全 半壊2,129棟などの被害が生じた(総務省消防庁 による)。



震央分布図 (1919年1月1日~2021年5月31日、 深さ0~40km、M≧5.0)

第2図 2021年5月14日 日高地方中部の地震 Fig. 2 The earthquake in the central part of Hidaka region on May.14, 2021.

5月16日 十勝沖の地震



第3図 2021年5月16日 十勝沖の地震 Fig. 3 The earthquake off Tokachi on May.16, 2021.

情報発表に用いた震央地名は〔釧路沖〕である。

2021年5月16日12時23分に十勝沖の深さ8km でM6.1の地震(最大震度3)が発生した。この 地震は、陸のプレートの地殻内で発生した。こ の地震の発震機構(CMT解)は東西方向に圧力 軸を持つ型である。

2001年10月以降の活動をみると、今回の地震 の震源付近(領域b)では、M6.0以上の地震が今 回の地震を含め4回発生しており、そのうち3 回は2003年から2004年にかけて発生している。 今回M6.0以上の地震が発生したのは2004年11月 11日以来である。

1919 年以降の活動をみると、今回の地震の震 央周辺(領域 c)では、M6.0以上の地震がしばし ば発生している。2003 年 9 月 26 日の「平成 15 年(2003 年)+勝沖地震」(M8.0、最大震度 6 弱) では、十勝港で 255cm の津波を観測するなど、主 に北海道から四国の太平洋沿岸で津波を観測し た。この地震により、北海道では行方不明者 2 人、負傷者 847 人、住家被害 2,065 棟などの被害 が生じた(「日本被害地震総覧」による)。





6月20日 上川地方中部の地震

2021年6月20日20時08分に上川地方 中部の深さ158kmでM5.4の地震(最大震 度3)が発生した。この地震は太平洋プ レート内部で発生した。この地震の発震 機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持 つ型である。

1997年10月以降の活動を見ると、今回 の地震の震源周辺(領域b)では、M5.0 以上の地震が発生したのは、2011年10月 21日に発生したM6.3(最大震度3)の地 震以来である。

1919年以降で深さ100~300kmの活動を 見ると、今回の地震の震央周辺(領域 c) では、M5.0以上の地震が時々発生してお り、最大の地震は1942年3月6日に発生 したM6.5の地震(最大震度4)である。

領域
b
内の
M
T
図





第4図 2021年6月20日 上川地方中部の地震

Fig. 4 The earthquake in the central part of Kamikawa region on Jun.20, 2021.

10月10日 十勝地方南部の地震



2021年10月10日23時16分に、十勝地方 南部の深さ 51km で、M4.7 の地震(最大震度 3)が発生した。この地震の発震機構(CMT 解)は、北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断 層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境 界で発生した。

2001年10月以降の活動をみると、今回の 地震の震源付近(領域b)では、M5.0以上の 地震がしばしば発生している。2012 年8月 25 日には M6.1 の地震(最大震度 5 弱)が発 生した。

1919年1月以降の活動をみると、今回の地 震の震央周辺(領域 c)では、1970年1月 21 日に発生した M6.7 の地震(最大震度5) により、負傷者 32 人、住家全壊 2 棟などの 被害が生じた(「日本被害地震総覧」による)。

領域b内のM-T図及び回数積算図



領域c内のM-T図



2021 年 10 月 10 日 十勝地方南部の地震 第5図

Fig. 5 The earthquake in the southern part of Tokachi region on Oct.10, 2021.

2-2 北海道地方の地殻変動 Crustal Deformations in the Hokkaido District

国土地理院 Geospatial Information Authority of Japan

[北海道太平洋岸 GNSS 連続観測時系列]

第1~4図は,根室から鹿部にかけての北海道太平洋側における2003年十勝沖地震(M8.0)後 及び2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)後の余効変動の推移を示す時系列グラフである.第1 図に観測点の配置と,アンテナ交換等の保守の履歴を示す.

第2~4図は、北海道の猿払観測点を固定局として、定常状態にあると仮定した1997年10月~2002年10月の期間について推定された一次トレンド成分を、各基線の地殻変動時系列から除去した時系列グラフである。2003年9月26日の十勝沖地震と2004年11月29日の釧路沖の地震(M7.1)の余効変動が地震直後に始まり、減衰しながらも長期にわたって続いた様子を見ることができる。(7)~(10)の水平成分には、2008年9月11日の十勝沖の地震(M7.1)及び2009年6月5日の十勝沖の地震(M6.4)による地殻変動とその余効変動も見られる。2003年・2008年・2009年の地震の余効変動を見分けるのは難しいが、全体としては、余効変動は着実に減衰傾向にあった。ただし、 十勝地方から釧路にかけての地域(5)~(8)の上下変動は、十勝沖地震以前の沈降に対する相対的な隆起傾向が、少なくとも、2011年の東北地方太平洋沖地震の直前まで継続していた。2011年以降は、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による跳びとその後の余効変動が見られる。(7)~(12)では東北地方太平洋沖地震以後に地震前の変化に対する相対的な隆起傾向が見られていたが、2015年頃から鈍化している。(9)では、2016年1月14日に発生した浦河沖の地震(M6.7)による地殻変動,(11)では2018年9月の北海道胆振東部地震による地殻変動が見られる。 北海道太平洋岸 GNSS連続観測時系列(1)



配点図

点番号	点 名	日付	保守内容	L L
950119	根室2	2012/01/26	アンテナ更新	9
		2019/02/20	受信機交換	
960519	根室4	2009/12/22	レドーム開閉	
		2012/10/03	アンテナ更新	
940009	浜中	2012/10/04	アンテナ更新	9
		2021/10/09	受信機交換	
960515	標茶	2003/10/03	凍上対策	
		2009/12/23	レドーム開閉	
		2012/11/13	アンテナ更新	9
940010	釧路市	2003/11/07	凍上対策	
		2010/12/14	レドーム開閉	9
		2012/09/26	アンテナ更新	
		2020/11/03	受信機交換	
950112	音別	2012/02/14	アンテナ更新	
		2017/06/07	アンテナ交換	9
		2019/02/18	受信機交換	
950134	中札内	2009/11/08	周辺伐採	9
		2010/06/08	周辺伐採	
		2010/12/05	レドーム開閉	
		2012/11/07	アンテナ更新	
		2021/10/12	受信機交換	

各観測局情報

点番号	点 名	日付	保守内容	
950138	大樹	2012/01/17	アンテナ更新	
		2016/02/17	アンテナ交換	
		2018/02/19	受信機交換	
		2019/02/06	受信機交換	
940019	えりも1	2010/12/16	レドーム開閉	
		2012/11/08	アンテナ更新	
		2017/01/27	アンテナ交換	
		2020/11/06	受信機交換	
950142	三石	2012/02/17	アンテナ更新	
		2019/02/05	受信機交換	
950136	苫小牧	2012/08/22	アンテナ更新	
		2014/11/12	アンテナ交換	
		2015/06/16	周辺伐採	
		2021/10/04	受信機交換	
950147	鹿部	2012/08/28	アンテナ更新	
		2017/11/22	受信機交換	
950101	猿払	2012/02/10	アンテナ更新	
		2019/02/13	受信機交換	

第1図 北海道地方東部・太平洋岸における GNSS 連続観測結果(観測点配置図・保守状況)

Results of continuous GNSS measurements along the eastern region and the Pacific coast of Hokkaido (Site location Fig. 1 map and maintenance history).

北海道太平洋岸 GNSS連続観測時系列(2)

1次トレンド除去後グラフ

期間:2003/09/27~2021/10/09 JST 計算期間:1997/10/01~2002/10/01



北海道地方東部・太平洋岸における GNSS 連続観測結果:固定点猿払に対するトレンド成分を除去した時 第2図 系列

Fig. 2 Results of continuous GNSS measurements along the eastern region and the Pacific coast of Hokkaido: (detrended time series relative to the Sarufutsu station) (1/3).

北海道太平洋岸 GNSS連続観測時系列(3)

1次トレンド除去後グラフ

期間:2003/09/27~2021/10/09 JST 計算期間:1997/10/01~2002/10/01



北海道地方東部・太平洋岸における GNSS 連続観測結果:固定点猿払に対するトレンド成分を除去した時 第3図 系列

Fig. 3 Results of continuous GNSS measurements along the eastern region and the Pacific coast of Hokkaido: (detrended time series relative to the Sarufutsu station) (2/3).

北海道太平洋岸 GNSS連続観測時系列(4)

1次トレンド除去後グラフ

期間:2003/09/27~2021/10/09 JST 計算期間:1997/10/01~2002/10/01



第4図 北海道地方東部・太平洋岸における GNSS 連続観測結果:固定点猿払に対するトレンド成分を除去した時 系列

Results of continuous GNSS measurements along the eastern region and the Pacific coast of Hokkaido: (detrended Fig. 4 time series relative to the Sarufutsu station) (3/3).

3-1 東北地方とその周辺の地震活動(2021 年 5 月~ 10 月) Seismic Activity in and around the Tohoku District (May – October 2021)

気象庁 仙台管区気象台 Sendai Regional Headquarters, JMA

今期間,東北地方とその周辺で M4.0 以上の地震は 98 回, M5.0 以上の地震は 11 回発生した. このうち最大は,2021 年 5 月 1 日に宮城県沖で発生した M6.8 の地震であった. 2021 年 5 月~10 月の M4.0 以上の地震の震央分布を第 1 図 (a) 及び (b) に示す.

主な地震活動は以下のとおりである.

(1) 宮城県沖の地震(M6.8,最大震度5強,第2図(a)~(f))

2021年5月1日10時27分に宮城県沖の深さ51kmでM6.8の地震(最大震度5強)が発生した. この地震は,発震機構(CMT解)が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した.今回の地震は,2021年に発生した3月20日の宮城県沖の地震(M6.9,最大震度5強)の震央の南東約40km,4月18日の宮城県沖の地震(M5.8,最大震度4)の震央の南西約20kmで発生しており,これらの地震後のまとまった地震活動を含む震源分布は,1978年宮城県沖地震(M7.4)の地震時すべり分布の西側の一部に及んでいる.

(2) 福島県沖の地震(M6.3, 最大震度 4, 第 4 図 (a),(b))

2021 年 5 月 14 日 08 時 58 分に福島県沖の深さ 46km で M6.3 の地震(最大震度 4)が発生した. この地震は,発震機構(CMT 解)が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレー トと陸のプレートの境界で発生した.この地震は,2003 年 3 月 3 日の地震(M5.9,最大震度 4) とともに新たな相似地震グループの最新の地震として検出された.

(3) 岩手県沖の地震(M5.0, 最大震度 3, 第 5 図 (a),(b))

2021 年 6 月 9 日 22 時 05 分に岩手県沖の深さ 38km で M5.0 の地震(最大震度 3)が発生した. この地震は,発震機構(CMT 解)が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した. この地震は, 2006 年 3 月 12 日の地震(M5.0,最大震度 3) とともに新たな相似地震グループの最新の地震として検出された.

(4) 福島県会津の地震(最大 M4.7,最大震度 3,第6図)

2021 年 7 月 18 日 18 時 50 分に福島県会津の深さ 4km で M4.7 の地震(最大震度 3)が発生した. また,同日 19 時 11 分に福島県会津の深さ 4km で M4.6 の地震(最大震度 3)が発生した.これ らの地震は地殻内で発生した.発震機構は,18 時 50 分に発生した地震は西北西-東南東方向 に圧力軸を持つ型である.また,19 時 11 分に発生した地震は西北西-東南東方向に圧力軸を 持つ横ずれ断層型である.その後,まとまった地震活動がみられ,7月 18 日から7月 24 日の 間に震度1以上を観測した地震が10回(震度 3:2 回,震度 2:2 回,震度 1:6 回)発生した. (5) 青森県東方沖の地震(M5.2, 最大震度4, 第7図)

2021年7月26日11時16分に青森県東方沖の深さ52kmでM5.2の地震(最大震度4)が発生した. この地震は,発震機構(CMT解)が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した.

(6) 福島県沖の地震(M4.5, 最大震度 4, 第 8 図)

2021 年 7 月 27 日 05 時 19 分に福島県沖の深さ 81km で M4.5 の地震 (最大震度 4) が発生した. この地震は,発震機構 (CMT 解) が西北西 – 東南東方向に張力軸を持つ正断層型で,太平洋プレー ト内部 (二重地震面の下面) で発生した.

(7) 福島県沖の地震(M5.1,最大震度4,第9図)

2021 年 8 月 22 日 11 時 24 分に福島県沖の深さ 60km で M5.1 の地震 (最大震度 4) が発生した. この地震は,発震機構が北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレート内部で発 生した.

(8) 岩手県沖の地震(M5.9, 最大震度 5 強, 第 10 図)

2021年10月6日02時46分に岩手県沖の深さ56kmでM5.9の地震(最大震度5強)が発生した. この地震は,発震機構(CMT解)が北北西-南南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレー ト内部で発生した.この地震の発生以降,この地震の震源付近では10月31日までに震度1以 上を観測した地震が4回(震度5強:1回,震度3:1回,震度2:2回)発生した.

(9) その他の地震活動

発生年月日	震央地名	規模(M)	深さ(km)	最大震度	
2021 年					
5月5日	福島県沖	5.1	36	3	(第3図)
10月19日	青森県東方沖	5.4	38	3	(第 11 図 (a),(b))
10月27日	福島県沖	5.0	23	3	(第 12 図 (a),(b))



第1図(a) 東北地方とその周辺の地震活動(2021年5月~7月, M≧4.0, 深さ≦700km) Fig. 1(a) Seismic activity in and around the Tohoku district (May – July 2021, M≧4.0, depth ≦700km).



第1図 (b) つづき (2021 年8月~10月, M \ge 4.0, 深さ \le 700km) Fig. 1(b) Continued (August – October 2021, M \ge 4.0, depth \le 700km).



5月1日 宮城県沖の地震

2021 年 5 月 1 日 10 時 27 分に宮城県沖の深 さ 51km で M6.8 の地震(最大震度 5 強)が発 生した。この地震は発震機構(CMT 解)が西 北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型 で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で 発生した。この地震により負傷者4人などの 被害が生じた(5月10日17時00分現在、総 務省消防庁による)。

1997年10月以降の活動をみると、今回の 地震の震源付近(領域 b)では、「平成 23 年 (2011年)東北地方太平洋沖地震」(以下、「東 北地方太平洋沖地震」)の発生以降、地震活動 が活発になり、M5.0以上の地震の発生回数が 増加している。このうち、2021 年3月 20 日 には M6.9 の地震(最大震度 5 強)が発生し、 負傷者 11人、住家一部破損2棟などの被害が 生じた(総務省消防庁による)。

1919年以降の活動をみると、今回の地震の 震央周辺(領域 c) では「東北地方太平洋沖 地震」のほか、1978年6月12日には「1978 年宮城県沖地震」(M7.4、最大震度5)が発生 し、死者 28 人、負傷者 1,325 人、住家全壊 1,183 棟等の被害が生じる(被害は「日本被 害地震総覧」による)など、M7.0以上の地震 がしばしば発生している。





第2図(a) 2021年5月1日 宮城県沖の地震 Fig. 2(a) The earthquake off Miyagi Prefecture on May 1, 2021.



第2図(b) つづき Fig. 2(b) Continued.

2021 年 5 月 1 日 宮城県沖の地震 - 近地強震波形による震源過程解析(暫定)-

2021 年 05 月 01 日 10 時 27 分(日本時間)に宮城県沖で発生した地震(M_{JMA}6.8)について、国立研 究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網(K-net, KiK-net)の近地強震波形記録を用いた震源過程 解析を行った。

破壊開始点は、気象庁による暫定震源の位置(38°10.4′N、141°44.4′E、深さ51km)とした。 断層面は、気象庁 CMT 解の2枚の節面のうち、低角に傾斜した節面(走向186°、傾斜20°、すべ り角74°)を仮定して解析した。最大破壊伝播速度は3.2 km/sとした。理論波形の計算には Koketsu et al. (2012)の結果から設定した地下構造モデルを用いた。

主な結果は以下のとおり(この結果は暫定であり、今後更新することがある)。

・主な破壊領域は走向方向に約30km、傾斜方向に約15kmであった。

- ・主なすべりは破壊開始点から北東側のやや浅い領域に広がり、最大すべり量は 0.5m であった(周辺の構造から剛性率を 65GPa として計算)。
- ・主な破壊継続時間は約15秒であった。
- ・モーメントマグニチュード (Mw) は 6.6 であった。

結果の見方は、https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/world/about srcproc.html を参照。



星印は破壊開始点を示す。青色の×は小断層の中心位置を示す。灰色の丸は 今回の地震(MJMA6.8)発生(5/110:27)から5/224時までに発生した震源(M1.0 以上)を示す。青線はプレート境界を示す。

S 解析に用いた断層パラメータを震源 球の赤線で示す。

第2図(c) つづき Fig. 2(c) Continued.



観測波形(黒:0.05Hz-0.2Hz)と理論波形(赤)の比較





謝辞 国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網(K-net, KiK-net)を使用しました。

参考文献

Koketsu, K., H. Miyake and H. Suzuki, Japan Integrated Velocity Structure Model Version 1, paper no. 1773. Paper Presented at the 15th World Conference on Earthquake Engineering, International Association for Earthquake Engineering, Lisbon, 24-28 Sept. 2012.

第2図(d) つづき Fig. 2(d) Continued.

5月1日宮城県沖の地震



1978年宮城県沖地震(M7.4)、2005年8月16日(M7.2)、2021年3月20日(M6.9)、 2021年5月1日(M6.8)の地震時すべり分布の比較

星印は、2021/5/1宮城県沖の地震の破壊開始点(5/1 10:27 Mj6.8の震央)を示す。青色の×は、2021/5/1宮 城県沖の地震の震源過程解析で設定した小断層の中心位置を示す。灰色の丸は、2021/5/1宮城県沖の地 震発生(5/1 10:27)から5/2 24時までに発生したM1.0以上の地震の震央を示す。

色付きの点線は以下の地震時すべり分布のコンターであることを示す。 薄紫色: 1978年宮城県沖地震[Yamanaka and Kikuchi (2004):コンター間隔は0.5m] 緑色: 2005年8月16日宮城県沖の地震[山中 (2005):コンター間隔は0.3m]

青色: 2021年3月20日宮城県沖の地震〔気象庁による近地強震波形解析:コンター間隔は0.15m〕

赤色: 2021年5月1日宮城県沖の地震[気象庁による近地強震波形解析:コンター間隔は0.12m]

第2図(e) つづき Fig. 2(e) Continued.





第2図(f) つづき Fig. 2(f) Continued.


5月5日 福島県沖の地震

2021年5月5日03時10分に福島県沖の深さ 36kmでM5.1の地震(最大震度3)が発生した。こ の地震の発震機構(CMT解)は南北方向に圧力軸 を持つ型である。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の 震源付近(領域b)では、「平成23年(2011年) 東北地方太平洋沖地震」(以下、「東北地方太平洋 沖地震」)の発生以降、地震活動が活発になり、 2014年12月25日にM5.6の地震(最大震度3)が発 生するなど、M5.0以上の地震がしばしば発生して いる。



1919年以降の活動をみると、今回の地震の震央 周辺(領域 c)では、1938年11月5日17時43分に M7.5の地震(最大震度5)が発生した。この地震 により、宮城県花淵で113cm(全振幅)の津波を 観測した。この地震の後、福島県沖で地震活動が 活発となり、同年11月30日までにM6.0以上の地震 が26回発生し、このうち7回は津波を観測した。 これらの地震により、死者1人、負傷者9人、住 家全壊4棟、半壊29棟などの被害が生じた(「日 本被害地震総覧」による)。



第3図 2021年5月5日 福島県沖の地震

Fig. 3 The earthquake off Fukushima Prefecture on May 5, 2021.

-65 -

5月14日 福島県沖の地震



2021 年 5 月 14 日 08 時 58 分に福島県沖の深さ 46km で M6.3 の地震(最大震度4)が発生した。 この地震は発震機構(CMT 解)が西北西-東南東 方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレー トと陸のプレートの境界で発生した。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地震 の震源付近(領域b)では、「平成23年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」(以下、「東北地方 太平洋沖地震」)の発生以降、地震活動が活発に なり、M5.0以上の地震がしばしば発生している。 このうち、2021年2月13日に発生したM7.3の 地震(最大震度6強)では、死者1人、負傷者 186人、住家全壊69棟、半壊729棟、一部破損 19,758棟などの被害が生じた(総務省消防庁に よる)。



1919年以降の活動をみると、今回の地震の 震央周辺(領域 c)では「東北地方太平洋沖 地震」の発生以前から M7.0以上の地震が時々 発生している。このうち、1938年11月5日 17時43分に発生した M7.5の地震では宮城県 花淵で113cm(全振幅)の津波を観測した。 この地震の後、同年11月30日までに M7.0以上の地震が2回発生するなど、福島県沖で地 震活動が活発となった。これらの地震により、 死者1人、負傷者9人、住家全壊4棟、半壊 29棟などの被害が生じた(被害は「日本被害 地震総覧」による)。



第4図 (a) 2021 年5月14日 福島県沖の地震 Fig. 4(a) The earthquake off Fukushima Prefecture on May 14, 2021.



67

6月9日 岩手県沖の地震



2021年6月9日22時05分に岩手県沖の深さ 38kmでM5.0の地震(最大震度3)が発生した。 この地震は発震機構(CMT解)が西北西-東南 東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プ レートと陸のプレートの境界で発生した。

1997年10月以降の活動を見ると、今回の地 震の震源付近(領域b)では、M5.0以上の地震 が時々発生している。このうち、2011年6月 23日に発生したM6.9の地震(最大震度5弱) では住家一部破損1棟などの被害が生じた (総務省消防庁による)。また、「平成23年 (2011年)東北地方太平洋沖地震」(以下、「東 北地方太平洋沖地震」)の発生以降、地震の発 生数が増加している。

1919年以降の活動を見ると、今回の地震の 震央周辺(領域 c)では、M6.0以上の地震が 時々発生しており、1995年1月7日には「平 成6年(1994年)三陸はるか沖地震」の最大余 震であるM7.2の地震(最大震度5)が発生し た。

領域c内のM-T図

1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

8





第5図(a) 2021年6月9日 岩手県沖の地震 Fig. 5(a) The earthquake off Iwate Prefecture on June 9, 2021.

8

7

6



69

第5図(b) つづき Fig. 5(b) Continued.

7月18日 福島県会津の地震



第6図 2021年7月18日 福島県会津の地震

Fig. 6 The earthquake in Aizu region of Fukushima Prefecture on July 18, 2021.

2021年7月18日18時50分に福島県会津の深さ4kmで M4.7の地震(最大震度3)が発生した。また、同日19時11 分に福島県会津の深さ4kmでM4.6の地震(最大震度3)が 発生した。これらの地震は地殻内で発生した。発震機構は、 18時50分に発生した地震は西北西-東南東方向に圧力軸 を持つ型である。また、19時11分に発生した地震は西北西 -東南東方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型である。その 後、まとまった地震活動がみられ、7月18日から24日の間 に震度1以上を観測した地震が10回(震度3:2回、震度 2:2回、震度1:6回)発生した。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の震源付近 (領域 a) では、M4.0以上の地震がまれに発生しており、 2001年3月9日にM4.0の地震(最大震度2)が発生した。

領域a内のM-T図及び回数積算図



1919年以降の活動をみると、今回の地震の震央周辺 (領域b)では、1949年12月26日08時17分と24分に今 市地震(M6.2、M6.4)が発生し、死者10人、負傷者163 人、家屋全壊290棟等の被害が生じた。また、2004年10 月23日に「平成16年(2004年)新潟県中越地震」(M6.8) が発生し、死者68人、負傷者4,805人、家屋全壊3,175 棟等の被害が生じた。(被害はいずれも「日本被害地震 総覧」による)。







2021年7月26日11時16分に青森県東方沖の 深さ52kmでM5.2の地震(最大震度4)が発生 した。この地震は発震機構(CMT解)が西北西 -東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太 平洋プレートと陸のプレートの境界で発生し た。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地 震の震源付近(領域b)では、M5.0以上の地震 がしばしば発生している。このうち、2012年 5月24日に発生したM6.1の地震(最大震度5 強)では、非住家建物19カ所でガラス破損な どの被害が生じた(被害は総務省消防庁によ る)。

1919年以降の活動をみると、今回の地震の 震央周辺(領域 c)では、M7.0以上の地震が 時々発生している。このうち、1968年5月16 日に発生したM7.5の地震は、「1968年十勝沖地 震」(M7.9、最大震度5)の最大余震である。

「1968年十勝沖地震」では、青森県八戸[火力 発電所]で295cm(平常潮位からの最大の高さ) の津波を観測したほか、死者52人、負傷者330 人、住家全壊673棟などの被害が生じた(被害 は「日本被害地震総覧」による)。また、領域 c内では他に、「昭和57年(1982年)浦河沖地 震」(M7.1、最大震度6)が発生している。

領域 b 内のM-T図及び回数積算図



領域c内のM-T図



第7図 2021年7月26日 青森県東方沖の地 Fig. 7 The earthquake east off Aomori Prefecture on July 26, 2021.

7月27日 福島県沖の地震

Μ

7.0 0

6.0 0 5.0

4.0

3.0

2006年3月29日

76km M4.8

()

в

20

40

60

80

2021年7月27日05時19分に福島県沖の深さ 81kmでM4.5の地震(最大震度4)が発生した。 この地震は、発震機構(CMT解)が西北西-東 南東方向に張力軸をもつ正断層型で、太平洋 プレート内部(二重地震面の下面)で発生し た。

1997年10月以降の地震活動をみると、今回 の地震の震源周辺(領域 b) ではM4.0以上の 地震が時々発生している。



領域
b
内の
M
ー
T
図
及
び
回
数
積
算
図

1919年以降の地震活動をみると、今回の地 震の震央周辺(領域 c) では、M6.0以上の地 震がしばしば発生しており、1938年11月5日 17時43分にはM7.5の地震(最大震度5)が発 生した。この地震により、宮城県花淵で113cm (全振幅)の津波を観測した。その後、福島 県沖で地震活動が活発となり、この地震を含 め同年11月5日から11月30日までにM6.0以上 の地震が26回発生し、このうち7回は津波を 観測した。これらの地震により、死者1人、 負傷者9人、住家全壊4棟、半壊29棟などの 被害が生じた(被害は「日本被害地震総覧」 による)。





震央分布図

(1997年10月1日~2021年7月31日、

深さO~120km、M≧3.0)

___今回の地》

2021年7月27日

81km M4.5

🕖 смт

a

2020年2月12日

87km M5.4

Α

(km)

n

20

40

60

80

C CMT

Δ

50km

38° N

37° N

140°E

2021年7月に発生した地震を赤色で表示

141°E

領域a内の断面図(A-B投影)

Ŕ





第9図 2021年8月22日 福島県沖の地震

1938年11月6日

2016年11月22日 M7.4

Fig. 9 The earthquake off Fukushima Prefecture on August 22, 2021.

1938年11月5日

2021 年8月22日11時24分に福島県沖の深 さ60kmでM5.1の地震(最大震度4)が発生 した。この地震は発震機構が北西-南東方向 に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレート 内部で発生した。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地 震の震源付近(領域b)では、「平成23年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」(以下、「東北地 方太平洋沖地震」)の発生以降、地震活動が活 発になり、M5.0以上の地震がしばしば発生し ている。このうち、2021年2月13日に発生し たM7.3の地震(最大震度6強)では、死者1 人、負傷者186人、住家全壊69棟、半壊729 棟、一部破損19,758棟などの被害が生じた(総 務省消防庁による)。



1919年以降の活動をみると、今回の地震の 震央周辺(領域 c)では「東北地方太平洋沖 地震」の発生以前から M7.0以上の地震が時々 発生している。このうち、1938年11月5日 17時43分に発生した M7.5の地震では宮城県 花淵で113cm(全振幅)の津波を観測した。 この地震の後、M6.0以上の地震の発生回数が 増加するなど、福島県沖で地震活動が活発と なった。これらの地震により、死者1人、負 傷者9人、住家全壊4棟、半壊29棟などの被 害が生じた(被害は「日本被害地震総覧」に よる)。



2014年7月12日

10月6日 岩手県沖の地震



2021年10月6日02時46分に岩手県沖の深さ 56kmでM5.9の地震(最大震度5強)が発生した。 この地震の発震機構(CMT解)は北北西-南南東方 向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレート内 部で発生した。この地震により軽傷3人、住家一部 破損1棟の被害が生じた(10月13日17時現在、 総務省消防庁による)。この地震の発生以降、この 地震の震源付近では10月31日までに最大震度1 以上を観測した地震が4回(震度5強:1回、震度 3:1回、震度2:2回)発生している。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の 震源付近(領域b)では、「平成23年(2011年) 東北地方太平洋沖地震」(以下、「東北地方太平洋沖 地震」)の発生以降、地震活動が活発になり、M5.0 以上の地震がしばしば発生している。2011年6月 23日に発生したM6.9の地震(最大震度5弱)では 住家一部破損1棟などの被害が生じた(総務省消 防庁による)。

1919年以降の活動をみると、今回の地震の震央 周辺(領域 c)では、M6.0以上の地震が時々発生 しており、1995年1月7日には「平成6年(1994 年)三陸はるか沖地震」の最大余震であるM7.2の 地震(最大震度5)が発生した。



第10図 2021 年 10 月 6 日 岩手県沖の地震 Fig. 10 The earthquake off Iwate Prefecture on October 6, 2021.

10月19日 青森県東方沖の地震



2021年10月19日21時36分に青森県東方沖の 深さ38kmでM5.4の地震(最大震度3)が発生 した。この地震の発震機構(CMT解)は、北北 東-南南西方向に張力軸を持つ正断層型で、 太平洋プレート内部で発生した。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地 震の震源付近(領域b)では、M5.0以上の地震 が時々発生している。

1919年以降の活動をみると、今回の地震の 震央周辺(領域 c)では、M7.0以上の地震が 時々発生している。このうち、1968年5月16 日に発生したM7.5の地震は、「1968年十勝沖地 震」(M7.9、最大震度5)の最大余震である。 「1968年十勝沖地震」では、青森県八戸[火力 発電所]で295cm(平常潮位からの最大の高さ) の津波を観測したほか、死者52人、負傷者330 人、住家全壊673棟などの被害が生じた(被害 は「日本被害地震総覧」による)。また、領域 c内では他に、「昭和57年(1982年)浦河沖地 震」(M7.1、最大震度6)が発生している。

領域 b 内のM-T図及び回数積算図



第 11 図 (a) 2021 年 10 月 19 日 青森県東方沖の地震 Fig. 11(a) The earthquake east off Aomori Prefecture on October 19, 2021.



10月19日 青森県東方沖の地震(震源分布)

震央分布図中の青線 (Kita et al., 2010 及びNakajima and Hasegawa, 2006)と緑線 (Iwasaki et al., 2015及びLindquist et al., 2004)は 太平洋プレート上面の等深線を示す。

第 11 図 (b) つづき Fig. 11(b) Continued.

10月27日 福島県沖の地震



2021年10月27日01時27分に福島県沖の深さ 23kmでM5.0の地震(最大震度3)が発生した。こ の地震の発震機構 (CMT解) は東北東-西南西方 向に圧力軸を持つ型であった。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地震 の震源付近(領域 a)では、「平成23年(2011年) 東北地方太平洋沖地震」(以下、「東北地方太平 洋沖地震」)の発生以降、地震活動が活発になり、 M5.0以上の地震が時々発生している。2016年11 月22日に発生したM7.4の地震(最大震度5弱) では、仙台港で144cmの津波を観測したほか、負 傷者21名、住家一部破損9棟などの被害が生じ た(総務省消防庁による)。

1919年以降の活動をみると、今回の地震の震 央周辺(領域 c) では、1938年11月5日17時43分 にM7.5の地震(最大震度5)が発生した。この地 震により、宮城県花淵で113cm(全振幅)の津波 を観測した。この地震の後、福島県沖で地震活 動が活発となり、この地震を含め同年11月5日か ら11月30日までにM6.0以上の地震が26回発生 し、このうち7回は津波を観測した。これらの 地震により、死者1人、負傷者9人、住家全壊4 棟、半壊29棟などの被害が生じた(「日本被害地 震総覧」による)。



領域c内のM-T図



第12図(a) 2021年10月27日 福島県沖の地震

Fig. 12(a) The earthquake off Fukushima Prefecture on October 27, 2021.



10月27日 福島県沖の地震(一元化震源の再計算)

※青線 (Nakajima and Hasegawa, 2006)と緑線 (Iwasaki et al., 2015、Lindquist et al., 2004)は太平洋プレート上面の等深線を示す。



第 12 図 (b) つづき Fig. 12(b) Continued.

3-2 日本海溝沿いの海底地殻変動観測結果 Seafloor movements along the Japan Trench observed by seafloor geodetic observations

海上保安庁 Japan Coast Guard

海上保安庁では、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震後の地殻変動を把握するため、日本 海溝沿いに設置されている海底基準点において、海底地殻変動観測を実施している。第1図及び 第2図に、最近約4年間の平均変位速度と東北地方太平洋沖地震後の累積変位量を、国土地理院の GNSS観測結果(F5解)とともにそれぞれ示す。第3図には変位時系列を示す。



第1図 日本海溝沿いの直近約4年間の水平移動速度【北米プレート固定】

Fig. 1 Horizontal seafloor crustal movements along the Japan Trench in recent 4 years with respect to the stable part of the North American plate.

					40°N +
Site name	Lat.	Lon.	Movement	Period	
	(°N)	(°E)	(cm) (deg)		
(1) KAMN	38.89	143.36	41.1 294.9	04/03/2011 - 08/21/2021	— 38°N (3)
(2) KAMS	38.64	143.26	91.9 289.1	04/04/2011 - 08/22/2021	
(3) MYGI	38.08	142.92	90.2 291.0	03/28/2011 - 08/22/2021	
(4) MYGW	38.15	142.43	22.7 167.3	03/27/2011 - 08/21/2021	(5)
(5) FUKU	37.17	142.08	97.4 127.2	03/29/2011 - 08/20/2021	
(6) CHOS	35.50	141.67	57.9 115.7	04/17/2011 - 08/23/2021	
(7) BOSN	34.75	140.50	4.9 61.6	04/18/2011 - $08/19/2021$	
(8) SAGA	34.96	139.26	27.1 353.5	05/07/2011 - $06/19/2021$	36°N -
GEONET				04/01/2011 - 08/20/2021	
					(6) terrestrial GNSS seafloor GNSS- 50 cm
					34°N ↓

第2図 東北地震後の日本海溝沿いの累積水平移動量【北米プレート固定】

Fig. 2 Cumulative horizontal seafloor crustal movements after the Tohoku earthquake with respect to the stable part of the North American plate.



第3図 GNSS-A 観測時系列【北米プレート固定】

- ※ 各図の右列は、4.1年の時間窓による回帰直線から求めた変動速度
- ※ 縦のバーは速度推定の 95% 信頼区間,横のバーは速度推定のデータ期間
- Fig. 3 GNSS-A time series data with respect to the stable part of the North American plate.
 - * Plots on the right columns indicate velocities, derived by linear regression using a 4.1 year rolling time window.
 - X The vertical bars indicate 95% confidence intervals, the horizontal bars indicate data periods for estimating the velocities.



83

- ※ 各図の右列は,4.1年の時間窓による回帰直線から求めた変動速度
- ※ 縦のバーは速度推定の 95% 信頼区間,横のバーは速度推定のデータ期間

Fig. 3 GNSS-A time series data with respect to the stable part of the North American plate (continued).

3-3 東北地方の地殻変動 Crustal Deformations in the Tohoku District

国土地理院 Geospatial Information Authority of Japan

《2021年5月1日に発生した宮城県沖の地震に伴う地殻変動》

[地殻変動ベクトルと GNSS 連続観測時系列]

第1~7図は、2021年5月1日に発生した宮城県沖の地震の地殻変動に関する資料である.

第1図上段は,GNSS連続観測結果による水平変動ベクトル図である.固定局は大潟観測点(新 潟県)である.下段は,震源近傍の2観測点の3成分時系列グラフである.この地震に伴い,S石 巻牧浜観測点で東南東に約1cm等,宮城県を中心に広い範囲で地殻変動が観測された.

第2図上段は,GNSS連続観測結果による上下変動ベクトル図である.固定局は大潟観測点(新 潟県)である.下段は,震源近傍の2観測点の3成分時系列グラフである.この地震に伴い,女川 観測点で約1cmの沈降等,牡鹿半島周辺で地殻変動が観測された.

[すべり分布図]

第3図は、電子基準点で得られた地殻変動に基づき、プレート境界面を5km×5kmの小断層に 分割して推定したすべり分布モデルに関する資料である。推定においては、すべりの空間分布にラ プラシアン平滑化を適用し、そのハイパーパラメータはABIC(赤池ベイズ情報量基準)を用いて 決定した.本震から北側に広がる余震の分布と整合する場所にすべりが分布し、モーメントマグニ チュードは7.0 (剛性率 60GPa を仮定)となった。地震に伴う地殻変動について、観測値とすべり モデルからの計算値を、それぞれ黒色と赤色のベクトルで表現することとし、第3図左には水平成 分、第3図右には上下成分を示す。

第4~5図は, 推定したすべり分布モデルについて, 2005年8月16日及び2021年3月20日に 発生した宮城県沖の地震の場合と比較する資料である. 推定においては, いずれも同一の解析条件 を適用した. また, 同一の凡例を用いてすべり量と地殻変動量を表し, 地殻変動については第4図 に水平成分, 第5図に上下成分を示す. 2005年8月16日の地震については震央から西側に広がる 余震の分布と整合する場所にすべりが分布している. それらすべり域に比べると, 2021年3月20 日と5月1日に発生した地震のすべりの中心は, 陸よりに推定されている.

「震源断層モデル】

第6~7図は、電子基準点で得られた地殻変動に基づき、半無限均質弾性体中の矩形断層一様す べりを仮定し、MCMC(マルコフ連鎖モンテカルロ)法を用いて推定した震源断層モデルに関す る資料である.推定においては、断層の長さに対する幅の比を Strasser et al. (2010)による経験的 スケーリング則で固定し、Strasser et al. (2010)による地震規模と断層面積に関する経験的スケー リング則に近づくよう拘束を加えた.

第6図は,計算の結果,北東-南西走向で北西に傾き下がる断層面上における逆断層運動として 推定された震源断層モデルである.推定された断層面の水平位置は,震源分布と整合しており,断 層面の上端は深さ約46kmに位置する.モーメントマグニチュードは6.9 (剛性率60GPaを仮定) となった.

第7図下段は、コーナープロットと呼ばれる、モデルの2つのパラメータ間の相関関係を示す2 次元ヒストグラムである.ほとんどの組において、同心円状のガウス分布に近い分布を示し、パラ メータはほぼ独立に推定されていることを示す.一部の組では相関が見られるが、与えられた拘束 条件のもとで、各パラメータがよく推定されている.

《2021年10月6日に発生した岩手県沖の地震》

[GNSS 連続観測時系列]

第8図は、2021年10月6日に発生した岩手県沖の地震の地殻変動に関する資料である.

第8図上段は,GNSS連続観測基線図である.固定局は大潟観測点(新潟県)である.下段は, 震源近傍の2観測点の3成分時系列グラフである.この地震に伴う顕著な地殻変動は見られない.

《東北地方太平洋沖地震後の地殻変動》

[地殻変動ベクトル]

第9~13 図は、東北地方太平洋沖地震後における水平・上下の地殻変動について、全期間の累 積及び最近3か月間の変動を、福江観測点を固定局として示したものである。第9~11 図に示す 地震後の累積の図には、2011年4月7日宮城県沖の地震(M7.2、最大震度6強、深さ約66km、逆 断層・スラブ内地震、地殻変動 GNSS で水平約3cm 西南西と約5cm の隆起)、2011年4月11日福 島県浜通りの地震(M7.0、最大震度6弱、深さ約6km、正断層、地殻変動 GNSS で約30cm 水平と 約50cm の沈降、SAR で約2m)、2011年6月23日岩手県沖の地震(M6.9、最大震度5弱、地殻変 動東方向に約1.5cm)、2011年7月10日三陸沖の地震(M7.3、深さ34km、最大震度4、地殻変動 西方向に約5mm、左横ずれ)、2011年9月17日岩手県沖の地震(M6.6、最大震度4、プレート境 界逆断層、地殻変動東方向に数mm)等の影響が震源近傍の観測点で見られる.

第9図は地震後の全期間における水平変動の累積を示している.東日本全体で東北地方太平洋沖 地震の震源域に向かう余効変動が観測されている.岩手川崎A観測点における変動量は約160cm である.

第10~11 図は、地震後の全期間における上下変動の累積を、それぞれ、変動ベクトル図及び等 値線図で示したものである。岩手県三陸北部沿岸と奥羽脊梁山脈付近で沈降が見られる一方、岩手 県南部から千葉県の太平洋沿岸では隆起傾向が見られる。M牡鹿観測点の約71cmの隆起のうち、 約5cmと約1cmの隆起及び約1cmの沈降は、それぞれ2011年4月7日と2021年3月20日及び 2021年5月1日の宮城県沖の地震によるものである。

第12図の最近3か月間の水平ベクトルには、東北地方を中心に東北地方太平洋沖地震の震源域 に向かう変動が見られ、余効変動が継続していることが分かる.この期間における岩手川崎A観測 点の変動量は0.8cmとなっている.

第13図に最近3か月間の上下変動を示す.ノイズレベルを超える変動は見られない.

[GNSS 連続観測時系列]

第14~19図は、東北地方太平洋沖地震後の東日本における GNSS 連続観測時系列である。第 14 図の地図に示した太平洋岸の観測点10点と、その西側の観測点10点の合計20観測点について、 第15 図以降に東北地方太平洋沖地震後の期間の時系列を示す。各成分の縦軸は、本震直前の値を ゼロとしており、地震時及び地震後の累積の変動量を表している.

第15~19図の各観測点の時系列では,東北地方太平洋沖地震の余効変動が減衰しながらも継続 している様子が見られる.また,第14図の地図に示した各地震の影響が,震源近傍の観測点で見 られる.

第15~17 図上段に示す太平洋岸の10 観測点では,(2) 岩泉2 観測点と(3) 山田観測点を除き, 地震直後から隆起が継続している.なお,岩泉2 観測点及び山田観測点についても,2013 年以降 はそれまでの沈降傾向が反転し,隆起となっている.

第17図下段から第19図の西側の観測点10点では、地震直後からの沈降、又は隆起が減衰しな がらも継続している.

[成分変位と速度グラフ]

第20~25図は、三隅観測点に対する宮古、山田、矢本、相馬1、銚子、皆瀬観測点の変位と変 動速度を時系列で示したものである。水平変動速度は、銚子観測点の東西成分では元の速度に戻り つつあるが、それ以外の観測点では、徐々に減衰しつつあるものの地震前の速度には戻っておらず、 余効変動が継続していることが分かる。上下変動速度は、銚子観測点では元の速度に戻りつつある が、そのほかの宮古、山田、矢本、相馬1観測点は隆起傾向、皆瀬観測点は沈降傾向が継続している。

第20図の三隅-宮古基線及び第21図の三隅-山田基線の東西成分の速度に2015年初頭に見られる一時的な変化は、2015年2月17日に発生した三陸沖の地震及び2015年5月13日に発生した 宮城県沖の地震によるものである.

第22図の三隅-矢本基線及び第25図の三隅-皆瀬基線の東西成分の速度に2021年初頭に見られる一時的な変化は、2021年3月20日に発生した宮城県沖の地震によるものである.また、三隅-矢本基線の東西成分の速度に2021年春頃に見られる一時的な変化は、2021年5月1日に発生した宮城県沖の地震によるものである.

第23 図の三隅-相馬1基線の東西成分・南北成分の速度に2016年末頃に見られる一時的な変化は、2016年11月22日に発生した福島県沖の地震によるものである.また、東西成分の速度に2021年初頭に見られる一時的な変化は、2021年3月20日及び2021年5月1日に発生した宮城県沖の地震によるものである.

第24 図に示される三隅-銚子基線の変化のうち,南北成分の速度に2011 年秋,2014 年初頭及び2018 年夏に見られる一時的な変化は,それぞれ2011 年 10 月下旬頃から11 月上旬頃まで,2014年1月上旬頃及び2018 年 6 月頃に発生した長期的 SSE に伴う地殻変動の影響である.また,東西成分の速度に2012 年 3 月頃に見られる一時的な変化は,2012 年 3 月 14 日に発生した千葉県東方沖の地震(M6.1)によるものである.

[変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配(北海道~関東地方)]

第26~28 図は、GEONET の最終解(F5)から得られる変位速度分布から、プレート収束方向 に関する水平勾配を計算し、北海道地方から関東地方まで千島海溝と日本海溝の平均走向に沿った 水平勾配の分布を示したものである。各観測点について最近5年間の時系列から年周・半年周成分 と地震時等のオフセットを推定、除去し、最近1年間における水平、上下方向の変位の線形速度を 求め、プレート収束方向に沿った帯状領域毎に、水平方向(プレート収束方向)及び上下方向の変 位速度の空間分布から水平勾配を計算する。 この地域にある観測点は陸側プレート上だけに分布しているため、一般に、地震間でプレート間 固着していると、海溝に近いほど陸向きの速度が大きくかつ沈降速度が大きくなる.

第26図は,最近1年間における帯状領域毎の水平勾配のプロファイルである.水平方向の勾配は, 東北地方太平洋沖地震の震源に近いところでは海溝側ほど大きいが,それ以外の場所では逆向きに なっている.一方,上下方向では,東北地方から関東地方にかけた広い範囲で海溝側ほど隆起する 傾向が見られる.

第27図は,水平勾配の時空間変化である.2011年以降,水平方向は北緯38°~41°付近,上 下方向は37°~40°付近で負から正に変化し,東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響と考えら れる.一方,北緯36°~38°付近の水平方向では,東北地方太平洋沖地震の後に一時正となった後, 負に変化しており,余効変動(粘性緩和)の影響とともに固着の回復が重なって見えている可能性 がある.

第28図の東北地方太平洋沖地震の前,及び直後の時期の結果と比較すると,第26図の最近の結 果では,東北地方太平洋沖地震の余効変動は小さくなっているとしても,これらの図と比べ第26 図の図では,広い範囲においていまだ地震前の状態には戻っていないことが分かる.



宮城県沖の地震(5月1日 M6.8)前後の観測データ

_この地震に伴い小さな地殻変動が観測された.

第1図 宮城県沖の地震(2021年5月1日, M6.8)に伴う地殻変動:(上図)水平変動,(下図)3成分時系列 グラフ

Fig. 1 Crustal deformation associated with the M6.8 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on May 1, 2021: horizontal displacement (upper) and 3 components time series (lower).



宮城県沖の地震(5月1日 M6.8)前後の観測データ

<u>_この地震に伴い小さな地殻変動が観測された</u>.

第2図 宮城県沖の地震(2021年5月1日, M6.8)に伴う地殻変動:(上図)上下変動,(下図)3成分時系列 グラフ

Fig. 2 Crustal deformation associated with the M6.8 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on May 1, 2021: vertical displacement (upper) and 3 components time series (lower).

2021年5月1日宮城県沖の地震のすべり分布

基準期間:2021/04/21 09:00:00~2021/05/01 08:59:59[F5:速報解]]ST 比較期間:2021/05/02 09:00:00~2021/05/08 08:59:59[F5:速報解]JST 固定局:大潟(950241)



幸福線は1976年呂城宗戸地震の身に975月(14間4月44日2004)。定戸城線は2003年8月16日呂城宗戸の地震の長線断層モアル(1 ☆印は震央、青丸は本震発生(5/1 10:27)から 5/1 24 時までに発生した震源を示す(気象庁一元化震源を使用)。

- ・ プレート面を 5kmx5km の小断層に分割してすべり分布を推定
- ・ プレート面は Kita et al. (2010, EPSL)および Nakajima and Hasegawa (2006, GRL)による
- ・ ラプラシアン平滑化を採用し、ハイパーパラメータは ABIC により決定
- M_wの計算においては、剛性率を 60 GPa と仮定

第3図 宮城県沖の地震(2021年5月1日, M6.8) すべり分布と地殻変動

Fig. 3 Slip distribution on the plate interface and crustal deformation of the M6.8 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on May 1, 2021.



(参考) 2005 年 8 月 16 日 及び 2021 年 3 月 20 日 宮城県沖の地震のすべり分布との比較

- ・ プレート面を 5kmx5km の小断層に分割してすべり分布を推定
- ・ プレート面はKita et al. (2010, EPSL)及びNakajima and Hasegawa (2006, GRL)による
- · ラプラシアン平滑化を採用し、ハイパーパラメータは ABIC により決定
- Mwの計算においては、剛性率を 60 GPa と仮定

第4図 宮城県沖の地震のすべり分布と地殻変動(水平)の比較

Fig. 4 Comparison of slip distribution and horizontal deformation among three earthquakes off the coast of Miyagi Prefecture.



(参考) 2005 年 8 月 16 日 及び 2021 年 3 月 20 日 宮城県沖の地震のすべり分布との比較

等値線は 1978 年宮城県沖地震のすべり分布 (Yamanaka et al. 2004)。矩形破線は 2005 年 8 月 16 日 宮城県沖の地震の震源断層モデル (国土地理院)。 ☆印は震央、青丸は本震発生 (5/1 10:27) から 5/1 24 時までに発生した震源を示す (気象庁一元化震源を使用)。

- ・ プレート面を 5kmx5km の小断層に分割してすべり分布を推定
- ・ プレート面は Kita et al. (2010, EPSL)及び Nakajima and Hasegawa (2006, GRL)による
- · ラプラシアン平滑化を採用し、ハイパーパラメータは ABIC により決定
- ・ Mwの計算においては、剛性率を 60 GPa と仮定

92

第5図 宮城県沖の地震のすべり分布と地殻変動(上下)の比較

Fig. 5 Comparison of slip distributions and vertical deformation among three earthquakes off the coast of Miyagi Prefecture.

2021年5月1日宮城県沖の地震の震源断層モデル





図1 推定された震源断層モデル。

- (上) 矩形実線は震源断層モデルを地表に投影した位置で、太い実線が断層上端。矢印は観測値(黒) 及び計算値(赤)の水平成分。等値線は1978年宮城県沖地震のすべり分布(Yamanaka et al. 2004)。矩形破線(細字)は2005年8月16日宮城県沖の地震の震源断層モデル(国土地理院)。矩形破線(太字)は2021年3月20日宮城県沖の地震の震源断層モデル(国土地理院)。
- (下)傾斜方向(A-B)に射影した断層面(太線)及び震源分布(点)。傾き下がる方向を正にとっている。
 実線はプレート境界面 (Nakajima and Hasegawa 2006, Kita et al. 2010)。

☆印は震央、点は本震発生(5/1 10:27)から 5/6 8 時までに発生した震源(気象庁一元化震源を使用)。

表1 推定された震源断層モデルパラメータ

	経度	緯度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜	すべり角	すべり量	М	
	[°]	[°]	[km]	[km]	[km]	[°]	[°]	[°]	[m]	IVIW	
	142.089	38.198	46.0	28.1	33.7	234.6	17.8	132.4	0.58	6.93	
	(0.031)	(0.047)	(3.6)	(2.7)	(3.3)	(14.7)	(2.4)	(18.6)	(0.11)	(0.02)	
· マルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法を用いてモデルパラメータを推定した。											
· 位置は断層の左上端を示す。括弧内は誤差(1σ)を示す。											
	・ Mwと断層面積がスケーリング則(Strasser et al. 2010)に近づくよう拘束										
	・断	 断層長さと断層幅の比はスケーリング則(Strasser et al. 2010)で固定 Mwの計算においては、剛性率を 60 GPa と仮定 									
	• Mw										

第6図 宮城県沖の地震(2021年5月1日, M6.8)の震源断層モデル

Fig. 6 Rectangular fault model of the M6.8 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on May 1, 2021.

【参考】鉛直成分



矢印は観測値(黒)及び計算値(赤)の鉛直成分。

【参考】事後確率分布(コーナープロット)



第7図 宮城県沖の地震(2021年5月1日, M6.8)の震源断層モデルモデルパラメータのコーナープロット Fig. 7 Corner plot of estimated parameters for the MCMC rectangular fault modeling in Fig.6.



岩手県沖の地震(10月6日 M5.9)前後の観測データ

第8図 岩手県沖の地震(2021年10月6日, M5.9)前後の観測データ:(上図)基線図,(下図)3成分時系列 グラフ

Fig. 8 Results of continuous GNSS measurements before and after the M5.9 earthquake off the coast of Iwate Prefecture on October 6, 2021: baseline map (upper) and 3 components time series (lower).



東北地方太平洋沖地震(M9.0)後の地殻変動(水平)一累積一

第9図 2011年東北地方太平洋沖地震後の累積地殻変動(水平)

Fig. 9 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (horizontal).



第10図 2011 年東北地方太平洋沖地震後の累積地殻変動(上下)

Fig. 10 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (vertical).



第11 図 2011 年東北地方太平洋沖地震後の累積地殻変動(上下、コンター)

Fig. 11 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (vertical, contour).



東北地方太平洋沖地震(M9.0)後の地殻変動(水平)-3か月-

第12図 2011年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(最近3か月、水平)

Fig. 12 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake for recent three months (horizontal).



第13図 2011 年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(最近3か月、上下)

Fig. 13 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake for recent three months (vertical).


平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(時系列) 配点図



第14図 東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動(時系列) 配点図及び保守状況

Fig. 14 Time series of crustal deformation before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Site location map and history of maintenance).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(1)



成分変化グラフ

第15図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(1/5)

Fig. 15 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (1/5).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(2)



成分変化グラフ

第16図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(2/5)

Fig. 16 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (2/5).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(3)



成分変化グラフ

第17図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(3/5)

Fig. 17 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (3/5).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(4)



成分変化グラフ

第18図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(4/5)

Fig. 18 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (4/5).

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(5)



成分変化グラフ

第19図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(5/5)

Fig. 19 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (5/5).





Fig. 20 Crustal deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Miyako station.





Fig. 21 Crustal deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Yamada station.











Fig. 23 Crustal deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Souma-1 station.

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動 <u>東西成分及び上下成分については東北地方太平洋沖地震発生前の変動速度に戻りつつあるが、南北成分については戻っていない.</u> 2011年10月下旬頃、2014年1月上旬頃、2018年6月上旬頃に房総半島で発生したスロースリップ現象に伴う地殻変動の影響が見られる。 2012年3月14日に発生した千葉県東方沖の地震に伴う地殻変動の影響が見られる. 三隅(950388) -- 銚子(93022) 間の成分変位と速度グラフ(F5版) 東西成分変位量 (プロット最終日:2021/10/09) 0.10 0.00 -0.20 E -0.30 -0.40 过-0.50 树-0.60 -0.70 -0.80 -0.90 2004 2006 2008 2010 2018 2020 2022 2012 2014 2016 (プロット最終日:2021/09/08) 東西成分速度 0.30 0.25 2008/01/01 inear Trend (2006/01/01 -0.20 型 0.05 型 0.00 -0.05 -0.10 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020 2022 南北成分変位量 (プロット最終日:2021/10/09) 0.30 0.25 0.20 E 0.15 0.10 -0.05 -0 10 -0.15 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020 2022 南北成分速度 (プロット最終日: 2021/09/08) 0.15 Trend 0.10 <u>۴</u> 0.05 <u>م.</u> و ≝-0.05 -0.10 -0.15 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020 2022 比高成分変位量(プロット最終日 : 2021/10/09 0.08 0.06 0.04 0.02 E 0.02 -0.02 코-0.04 粼-0.06 -0.08 -0.12 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020 2022 比高成分速度 プロット最終日 2021/09/08 0.30 (₩ 0.20 ₩ 0.10 £ 0.00 2008/01/0 -0.30 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020 2022 ※成分変化率は60日間のデータを1日ずつずらして計算(プロットの位置は計算に用いた期間の中間)







平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動 <u>東北地方太平洋沖地震発生前の変動速度には戻っていない</u> 2015年5月13日に発生した宮城県沖の地震に伴う地殻変動の影響が見られる。



Fig. 25 Crustal deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Minase station.



データ期間内に発生した地震や保守作業によるオフセットは除去している。

- 幅±30kmの各帯状領域内の観測点から変位速度の空間勾配を計算している(速度の基準は三隅)。水平 成分は、プレート収束方向(北海道:N120°E、東北~関東地方:N105°E)の速度から計算している。 速度勾配は、海溝側ほど海溝方向、隆起の速度が大きくなる場合を正(海側)にとっている。
- 本解析は、海洋研究開発機構 飯沼卓史氏から提供頂いたプログラム(Iinuma 2018)を使用している。

第26図 変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配

Fig. 26 Spatial (trench-parallel) variations of the displacement rate gradients in the direction of plate convergence: horizontal and vertical rate components are shown with bars in red and blue, respectively.



変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配の時系列 (北海道~関東地方)

• 各帯状領域の中心線が経度140°と交わる点の緯度を、横軸にとっている

海溝側ほど海溝方向、隆起の速度が大きくなる場合を正にとっている。

第27図 変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配(時系列)

Fig. 27 Spatio-temporal variations of the displacement rate gradients in the direction of plate convergence: horizontal (vertical) rate components are shown on top (bottom) panel.

変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配 (北海道~関東地方)比較用



- 左の図は、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前の5年間の期間で推定した変位速度の 空間勾配を表す。
- 右の図は、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震直後の1年間の期間で推定した変位速度の 空間勾配を表す。

第28図 変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配(比較用)

Fig. 28 Spatial (trench-parallel) variations of the displacement rate gradients in the direction of plate convergence: (left) for five-year period of time before, and (right) for one year right after, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

4-1 関東・中部地方とその周辺の地震活動(2021 年 5 月~ 10 月) Seismic Activity in and around the Kanto and Chubu Districts (May – October 2021)

気象庁

Japan Meteorological Agency

今期間,関東・中部地方とその周辺でM4.0以上の地震は140回,M5.0以上の地震は24回発生した. このうち最大は,2021年9月29日に日本海中部で発生したM6.1の地震であった. 2021年5月~10月のM4.0以上の地震の震央分布を第1図(a)及び(b)に示す. 主な地震活動は以下のとおりである.

(1) 石川県能登地方の地震活動(今期間の最大 M5.1,最大震度 5 弱,第 3 図 (a) ~ (i))

石川県能登地方では、2018年頃から地震回数が増加傾向にあり、2020年12月から地震活動が 活発になっている。2020年12月から2021年10月までに震度1以上を観測した地震は51回(震 度5弱:1回,震度4:1回,震度3:7回,震度2:10回,震度1:32回)発生した。このうち 最大規模の地震は2021年9月16日18時42分に発生したM5.1の地震(最大震度5弱)であった。 この地震の発震機構は北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であった。今回の地震活動は概ね 4つのクラスターを形成して発生している。南のクラスター(領域b)では、2018年頃から断続 的にまとまった活動がみられ、2020年11月末頃から深いところで発生するようになった。その後、 西(領域 c),北(領域 a),東(領域 d)の各クラスターの順に活発になり、M1.0以上の地震数 の積算は北のクラスター(領域 a)が最も多い。非定常ETAS解析による背景地震活動度の時間 変化は、活動域全体では2021年に入って高くなり始め、西(領域 c),北(領域 a),東(領域 d) の各クラスターでは期間の終わりにかけて鈍化傾向であるが、高い状態である。

(2) 八丈島近海の地震(M5.4, 最大震度 4, 第 4 図 (a), (b))

2021 年 7 月 16 日 13 時 19 分に八丈島近海の深さ 10km (CMT 解による) で M5.4 の地震(最 大震度 4) が発生した. この地震はフィリピン海プレートの地殻内で発生した. この地震の発震 機構は東西方向に張力軸を持つ型であった.

(3) 茨城県沖の地震(M6.0,最大震度3,第5図(a)~(e))

2021 年 8 月 4 日 05 時 33 分に茨城県沖の深さ 18km で M6.0 の地震(最大震度 3) が発生した. この地震は,発震機構(CMT 解)が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した.今回の震央付近では,2021 年 8 月 3 日から 4 日までに震度1以上を観測する地震が14回(震度 3:1回,震度 2:4回,震度 1:9回)発生した.茨城県沖では群発的な地震活動が時々発生するほか,前震活動を伴った M7 クラスの地震が概ね 20 年に1 度発生している.その M7 クラス地震の interseismic 期間の後半に群発的な地震活動が多い傾向が見られる.

(4) 東海道南方沖の地震(M6.0,最大震度3,第7図(a),(b))
2021 年9月14日07時46分に東海道南方沖の深さ385kmでM6.0の地震(最大震度3)が発

生した. この地震は太平洋プレート内部の深いところで発生した. 発震機構(CMT 解)は,太 平洋プレートの沈み込む方向に圧力軸を持つ型である. この地震により,震央付近よりも震央か ら離れた地域で大きな揺れとなる「異常震域」と呼ばれる現象を観測した.

(5) 岐阜県飛騨地方の地震(M5.3・M4.9・M4.7,最大震度4,第8図(a)~(e))

2021年9月19日17時18分に岐阜県飛騨地方のごく浅い場所でM5.3の地震(最大震度4)が 発生した.この地震の発震機構は北西-南東方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型である.この地震 の後,同19日17時19分にM4.9の地震(最大震度3),19時04分にM4.7の地震(最大震度3) が発生した.これらの地震は地殻内で発生した.今回の地震の震央付近では,地震活動が活発に なり9月28日までに震度1以上を観測する地震が32回(震度4:1回,震度3:2回,震度2:8回, 震度1:21回)発生した.この付近では,1998年(最大M5.6),2020年(最大M5.5)の活動等, 時々活発な地震活動がある.

(6) 日本海中部の地震(M6.1,最大震度3,第9図)

2021年9月29日17時37分に日本海中部の深さ394kmでM6.1の地震(最大震度3)が発生した. この地震は、太平洋プレート内部で発生した.この地震の発震機構(CMT 解)は太平洋プレートの沈み込む方向に圧力軸を持つ型である.この地震により、震央付近よりも、震央から離れた地域で大きな揺れとなる「異常震域」と呼ばれる現象を観測した.

(7) 千葉県北西部の地震(M5.9,最大震度5強,第10図(a)~(m))

2021 年 10 月 7 日 22 時 41 分に千葉県北西部の深さ 75km で M5.9 の地震(最大震度 5 強)が 発生した.この地震は,発震機構が東西方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレートとフィ リピン海プレートの境界で発生した.この地震は 2005 年 7 月 23 日の地震(M6.0,最大震度 5 強) とともに新たな相似地震グループの最新の地震として検出された.また,今回の地震は,周辺で 発生した 1928 年の M6.2,1956 年の M6.3,1980 年の M6.0,2005 年の M6.0 の 4 つの地震と変位 波形が似ている.今回の地震活動の震源を再決定した詳細な震源分布は,太平洋プレート上面の 傾きと調和的である.

(8) 東海道南方沖の地震(M5.6,最大震度 3,第11 図)

2021 年 10 月 21 日 17 時 36 分に東海道南方沖の深さ 356km で M5.6 の地震(最大震度 3)が発生した. この地震は太平洋プレート内部で発生した.発震機構(CMT 解)は、北北西-南南東方向に圧力軸を持つ型である.この地震により、震央付近よりも、震央から離れた地域で大きな揺れとなる「異常震域」と呼ばれる現象を観測した.

(9) 茨城県南部の地震(M4.5,最大震度 4,第 12 図 (a), (b))

2021年10月28日09時55分に茨城県南部の深さ45kmでM4.5の地震(最大震度4)が発生した. この地震は,発震機構が北西一南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,フィリピン海プレートと陸 のプレートの境界で発生した.この地震は既往の相似地震グループの最新の地震として検出された. (10) その他の地震活動

発生年月日	震央地名	規模 (M)	深さ (km)	最大震度	
2021 年					
6月7日	千葉県南東沖	5.1	93	3	(第2図)
8月27日	茨城県沖	5.1	40	3	(第6図)



関東・中部地方とその周辺の地震活動(2021年5月~7月、M≧4.0)

図中の吹き出しは、陸域M4.5以上・海域M5.0以上 ※深さはCMT解による

第1図(a) 関東・中部地方とその周辺の地震活動(2021年5月~7月, M ≧ 4.0, 深さ≦ 700km)

Fig. 1(a) Seismic activity in and around the Kanto and Chubu districts (May – July 2021, $M \ge 4.0$, depth ≤ 700 km).



関東・中部地方とその周辺の地震活動(2021年8月~10月、M≧4.0)

第1図(b) つづき(2021年8月~10月, M≧4.0, 深さ≦700km)

Fig. 1(b) Continued (August – October 2021, $M \ge 4.0$, depth ≤ 700 km).

6月7日 千葉県南東沖の地震



第2図 2021年6月7日 千葉県南東沖の地震

Fig. 2 The earthquake southern east off Chiba Prefecture on June 7, 2021.

石川県能登地方の地震活動



石川県能登地方(拡大図の矩形内)では、2018年頃 から地震回数が増加傾向にあり、2020年12月から地 震活動が活発になっている。2021年9月16日18時42 分にはM5.1の地震(最大震度5弱)が発生した。この 地震は地殻内で発生した。この地震の発震機構は北西 -南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であった。

2020年12月以降の領域別の地震活動をみると、12 月末頃から活発化した領域bの活動は4月以降鈍化 傾向であるが、10月末はやや増加した。領域bに続き 活発化した領域cの活動も9月に入りやや低下して いる。それに対し、遅れて活発化した領域a及び領域 dの活動は依然として活発であり、特に領域aの活動 は活発である。矩形領域内で震度1以上を観測した地 震の回数は以下の表のとおり。

期間別 ·	震度別の)地震発生	回数表
-------	------	-------	-----

世日月月	震度					
ガ旧	1	2	3	4	5弱	計
2020年12月1日 ~2021年9月30日	24	8	4	1	1	38
2021年10月1~31日	8	2	3	0	0	13
2021年11月1~4日	0	5	1	0	0	6
計	32	15	8	1	1	57



第3図(a) 石川県能登地方の地震活動

Fig. 3(a) Seismic activity in Noto region of Ishikawa Prefecture.



石川県能登地方の地震活動(過去の地震活動)

第3図(b) つづき Fig. 3(b) Continued.



石川県能登地方の地震活動(地震活動の詳細、カタログDD法による再計算震源)

第3図(c) つづき Fig. 3(c) Continued.





石川県能登地方の地震活動(2020年12月前後における震源深さの確認)

第3図(e) つづき Fig. 3(e) Continued.



石川県能登地方の地震活動(カタログDD法による再計算震源分布) 期間:2018年1月1日~2021年9月23日、M≧1.0

Fig. 3(g) Continued.



石川県能登地方の地震活動(非定常ETAS解析)

<文献>Kumazawa, T., Ogata, Y., 2013. Quantitative description of induced seismic activity before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake by nonstationary ETAS model. J. Geophys. Res.118, 6165–6182.

第3図(h) つづき Fig. 3(h) Continued.



石川県能登地方の地震活動(非定常ETAS解析)

背景地震活動度 µ(t) の分布

Fig. 3(i) Continued.



<u>太平洋</u> プレート

2021 年7月16日13時19分に八丈島近海の 深さ 10km (CMT 解による) で M5.4 の地震(最 大震度4)が発生した。この地震はフィリピン 海プレート内で発生した。この地震の発震機構 は東西方向に張力軸を持つ型であった。

今回の震央付近(領域 a) では、2021 年7月 15日から17日にかけて震度1以上を観測する 地震が14回(震度4:1回、震度2:3回、 震度1:10回)発生した。この地震活動は、7 月18日以降、低調に推移している。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地 震の震央付近(領域 a)では過去に何度かまと まった活動が発生している。2002 年8月~11 月の活動では、地震活動は初めに八丈島付近で 始まり、その後西移動し、全体で震度1以上を 観測する地震が 36 回発生した。その他にも、 2015年7月の活動では全体で11回、2016年9 月の活動では全体で6回の震度1以上を観測 する地震が発生した。

2010

25

震度3

0

0

0

0

震度4

(

0

7月

震度2

С

3

0

2015

329

400

300

200

100

150

100

- 50

30

合計

2

11

1

14



33

八丈島

140°E

震央分布図

海溝軸

¥

138°E

34°

海溝軸

'ィリピン海 プレート

100km

142°E

第4図(a) 2021年7月16日 八丈島近海の地震

Fig. 4(a) The earthquake near Hachijojima Island on July 16, 2021.

	気象庁CMT	防災科研 (F-net•手動)	USGS (Mww)	
ー元化震源 Mj5.4 深さ16km			P T	34) (133, 62, -142)
Mw	5.4	5.4	5.42	USGS震源 M5.5
深さ	10km	5km	11.5km	深さ11km
Global CMT		GEOFON		-
Mw	5.4	5.4		
深さ	12km	10km		

7月16日 八丈島近海の地震(各機関のMT解)



防災科研(AQUA)

第4図(b) つづき Fig. 4(b) Continued. 防災科研(F-net):http://www.fnet.bosai.go.jp/event/joho.php?LANG=ja USGS(W-phase):https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/ Global CMT:http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html GEOFON MT:http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/list.php?mode=mt AQUA:https://www.hinet.bosai.go.jp/AQUA/aqua_catalogue.php?LANG=ja



8月4日 茨城県沖の地震



2021 年 8 月 4 日 05 時 33 分に茨城県沖の 深さ 18km で M6.0 の地震(最大震度3)が 発生した。この地震は、発震機構(CMT 解) が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断 層型で、太平洋プレートと陸のプレートの 境界で発生した。今回の震央付近(領域 a) では、2021 年 8 月 3 日から4 日までに震度 1 以上を観測する地震が14回(震度3:1 回、震度2:4回、震度1:9回)発生した。

1997 年 10 月以降の活動をみると、今回の 地震の震央付近(領域 a) では、M5.0 以上 の地震が時々発生している。また、2008 年 5月8日に M7.0 の地震(最大震度 5 弱)が 発生し、負傷者 6 人などの被害が生じた(総 務省消防庁による)。

1919 年以降の活動をみると、今回の地震 の震央周辺(領域b)では、M7.0以上の地 震が時々発生している。このうち、2011 年 3月11日15時15分に茨城県沖で発生した M7.6の地震(最大震度6強)は、東北地方 太平洋沖地震の最大余震である。 震央分布図



1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

第5図(a) 2021年8月4日 茨城県沖の地震 Fig. 5(a) The earthquake off Ibaraki Prefecture on August 4, 2021.

茨城県沖の地震活動(地震活動の詳細)



第5図(b) つづき Fig. 5(b) Continued.



第5図(c) つづき Fig. 5(c) Continued.

茨城県沖の群発的な活動は M7クラス地震1サイクルの後半に多い

茨城県沖では群発的な地震活動が時々発生するほか,前震活動を伴ったM7クラスの地震が概ね20年に1度発生している。そのM7クラス地震の interseismic 期間の後半に群発的な地震活動が多い傾向が見られる。



図1 群発的な活動のMT図,回数積算図

図2中の領域aの地震(M≧4.0)を抜き出し,クラスタリング処理(r=30km, t=1day, N≧3)を施したデータセットのMT図と回数積算図を示した。(M7クラスの活動を赤で表示)



図2 茨城県沖の地震活動(1960年~2021年8月31日, M≧4.0, 一元化震源)

第5図(d) つづき

Fig. 5(d) Continued.

茨城県沖のクラスター活動のCMT解

2011年3月の一時期(灰色:2011年3月)には境界型ではない解が散見されるが、 そのほかは全て、プレート境界型と矛盾がない解。



第5図(e) つづき Fig. 5(e) Continued.

4

1960

1970

-135 -

1990

2000

2010

2020

1980

8月27日 茨城県沖の地震

(1997年10月1日~2021年8月31日、 深さ0~120km、M≥3.0) 2021 年8月の地震を赤く表示 今回の地震 50km 2000年7月21日 2021年8月27日 2021年8月27日 05時46分 41km M4.5 05時49分 40km M5.1 49km M6.4 Ø CMT (2003年11月15日 48km M5.8 37° N a 福島県 栃木県 CMT CMT 2004年4月4日 49km M5.8 36° 30 🕖)смт 8 茨城県 м 7.0 36° 6.0 2005年10月19日 48km M6.3 2020年5月11日 2011年3月11日 47km M5.8 M7.6 5.0 43km 4.0 Q \bigcirc)_{CMT} CMT) CMT 3.0 140°È 140°.30 141°.30 領域 a 内の断面図(A - B 投影) B 今回の地震 ^{(km) 人} 2021年8月27日 10 10 05時49分 M5.1 20 20 2021年8月27日 30 30 05時46分 M4.5 40 40 50 50 60 60 2005年10月19日 M6.3 70 70 80 80 2000年7月21日 M6.4 90 90 100 100 110 110 120 120 50km L 領域b内のM-T図及び回数積算図 1000 м 東北地方太平洋沖地震 8 発生 800 7 600 6 400 5 200

震央分布図

2021 年 8 月 27 日 05 時 49 分に茨城県沖の 深さ 40km で M5.1 の地震(最大震度3)が 発生した。この地震は、発震機構が北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平 洋プレートと陸のプレートの境界で発生し た。また、この地震の発生の3分前(05 時 46 分)にも、今回の地震とほぼ同じ場所で M4.5 の地震(最大震度3)が発生していた。

1997年10月以降の活動をみると、今回の 地震の震源付近(領域b)では、M5.0以上 の地震が時々発生している。また、2005年 10月19日にM6.3の地震(最大震度5弱) が発生し、負傷者2人の被害が生じた(総 務省消防庁による)。

1919年以降の活動をみると、今回の地震 の震央周辺(領域 c)では、M7.0以上の地 震が時々発生している。このうち、2011年 3月11日15時15分に茨城県沖で発生した M7.6の地震(最大震度6強)は、東北地方 太平洋沖地震の最大余震である。



第6図 2021年8月27日 茨城県沖の地震

2005

3

2000

Fig. 6 The earthquake off Ibaraki Prefecture on August 27, 2021.

2010

2015

2020




第7図(a) 2021年9月14日 東海道南方沖の地震

Fig. 7(a) The earthquake south off Tokaido on September 14, 2021.

(参考資料)

【参考】 震央付近の場所よりも震央から離れた場所で大きな震度を観測する 地震について

震源が非常に深い場合、震源の真上ではほとんど揺れないのに、震源から遠くはなれた 場所で揺れを感じることがあります(次ページ参照)。この現象は、「異常震域」という名 称で知られています。原因は、地球内部の岩盤の性質の違いによるものです。

プレートがぶつかり合うようなところでは、陸のプレートの地下深くまで海洋プレート が潜り込んで(沈み込んで)います。通常、地震波は震源から遠くになるほど減衰するもの ですが、この海洋プレートは地震波をあまり減衰せずに伝えやすい性質を持っています。こ のため、沈み込んだ海洋プレートのかなり深い場所で地震が発生すると(深発地震)、真上 には地震波があまり伝わらないにもかかわらず、海洋プレートでは地震波はあまり減衰せ ずに遠くの場所まで伝わります(下図)。その結果、震源直上の地表での揺れ(震度)が小 さくとも、震源から遠く離れた場所で震度が大きくなることがあります。



図 深発地震と異常震域

第7図(b)	つづき
Fig. 7(b)	Continued.

◇ 異常震域のあった過去の地震の震度分布図の例



2007 年 7 月 16 日の京都府沖の地震 (M6.7、震源の深さ 374km)



2016年1月12日の北海道北西沖の地震 (M6.2、震源の深さ265km)



2019 年 7 月 28 日の三重県南東沖の地震 (M6.6、震源の深さ 393km)



2012年1月1日の鳥島近海の地震 (M7.0、震源の深さ 397km)



2019 年 7 月 13 日の奄美大島北西沖の地震 (M6.0、震源の深さ 256km)



2020 年 12 月 1 日のサハリン西方沖の地震 (M6.7、震源の深さ 619km)

※震度分布図は気象庁の震度データベース検索

(気象庁ホームページ:<u>https://www.data.jma.go.jp/eqdb/data/shindo/</u>)にて検索したものを使用。 ※震度分布図の地図に国土交通省国土数値情報のデータを使用している。

第7図(b) つづき Fig.7(b) Continued.

9月19日 岐阜県飛騨地方の地震 (長野・岐阜県境付近の地震活動)



図中の茶色の細線は、地震調査研究推進本部の長期評価による 主要活断層帯を示す。



2021年9月19日17時18分に岐阜県飛騨地方 のごく浅い場所でM5.3の地震(最大震度4、図 中①)が発生した。この地震の発震機構は北西-南東方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型である。 この地震の後、同19日17時19分にごく浅い場 所でM4.9の地震(最大震度3、図中②)が発生 した。また、19時04分には深さ4kmでM4.7の 地震(最大震度3、図中③)が発生した。この地 震の発震機構は北西-南東方向に圧力軸を持つ 横ずれ断層型である。これらの地震は地殻内で 発生した。今回の地震の震央付近では、地震活動 が活発になり9月28日までに震度1以上を観測 する地震が32回(震度4:1回、震度3:2回、 震度2:8回、震度1:21回)発生した。

1997 年 10 月以降の活動をみると、領域 a では 時々活発な地震活動がある。1998 年の活動では、 8 月 12 日に M5.0 (最大震度 5 弱)の地震が発生 している。また、2020 年の活動では、4 月 23 日 に発生した M5.5 (最大震度 4)の地震を含め、 震度 1 以上を観測する地震が 169 回発生してい る。

1919 年以降の活動をみると、今回の地震の震 央周辺(領域 b)では、M5程度の地震が時々発 生しているものの、M6.0 以上の地震は発生して いない。



領域 a 内のM-T図及び回数積算図



長野・岐阜県境付近の地震活動(今回の地震活動)

第8図(b) つづき Fig. 8(b) Continued.



長野・岐阜県境付近の地震活動(2020年、2021年の活動比較)

第8図(c) つづき Fig. 8(c) Continued.



第8図(d) つづき

Fig. 8(d) Continued.



長野・岐阜県境付近の地震活動(ETAS解析、b値)

第8図(e) つづき Fig. 8(e) Continued.

9月29日 日本海中部の地震



²⁰²¹ 年 9 月 29 日 17 時 37 分に日本海中部の 深さ 394km で M6.1 の地震(最大震度 3) が発 生した。この地震は、太平洋プレート内部で発 生した。この地震の発震機構(CMT 解)は太平 洋プレートの沈み込む方向に圧力軸を持つ型 である。

今回の地震により、北海道から関東地方にか けての太平洋側を中心に震度1以上の揺れを 観測している。今回の地震のように、震央付近 よりも震央から離れた地域で強い揺れを観測 している現象は「異常震域」と呼ばれている。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地 震の震源付近(領域b)では、2005年10月23 日に日本海中部で発生した地震(M6.1、最大震 度2)、2007年7月16日に京都府沖で発生し た地震(M6.7、最大震度4)がある。

1919 年以降の活動をみると、今回の地震の 震央周辺(領域 c)では、M6.0 以上の地震が 時々発生しており、1969 年4月1日の地震 (M6.5)では、北海道から関東地方の太平洋側、 及び鹿児島県で震度3~1を観測した。



第9図 2021年9月29日 日本海中部の地震

Fig. 9 The earthquake in the central part of Japan Sea on September 29, 2021.

10月7日 千葉県北西部の地震

(1)概要

2021年10月7日22時41分に千葉県北西部の深さ75kmでM5.9の地震が発生し、埼玉県川口市、宮代町及 び東京都足立区で震度5強を観測したほか、東北地方から近畿地方にかけて震度5弱~1を観測した。 また、千葉県北西部と東京都23区で長周期地震動階級2を観測したほか、関東地方で長周期地震動階級 1を観測した。この地震は、発震機構が東西方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートとフィリ ピン海プレートの境界で発生した。

気象庁はこの地震に対して、最初の地震波の検知から3.7秒後の22時41分28.5秒に緊急地震速報(警報)を発表した。

この地震により、重傷者6人、軽傷者41人などの被害が生じた(2021年10月15日17時00分現在、総務 省消防庁による)。被害状況を表1-1に示す。

この地震の発生以降10月31日までに、震源付近では最大震度1以上を観測した地震が8回(震度5強: 1回、震度2:3回、震度1:4回)*発生している。

気象庁は、震度5強を観測した震度観測点について点検を実施し、震度観測点の観測環境が地震によって変化していないことを確認した。また、震度観測点周辺の被害や揺れの状況について確認した。

※ 10月8日05時11分及び10月9日11時16分の東京湾の地震(いずれも最大震度2)を含む。

	人的被害					住家被害			
都道府県名	死者	行方不明	負修 	易者 ──	合計	全壊	半壊	一部 破損	合計
	人	人	人	人	人	棟	棟	棟	棟
茨城県				1	1				
埼玉県			3	10	13				
千葉県			2	12	14				
東京都			1	4	5				
神奈川県				14	14				
合 計			6	41	47				

表 1 – 1 2021年10月7日の千葉県北西部の地震による被害状況 (2021年10月15日17時00分現在、総務省消防庁による)

上の表の被害の他、建物火災1件(東京都)、製油所火災1件(千葉県)、エレベーター閉じ込め5件、 鉄道(案内軌道式鉄道)の脱輪等の被害も発生した。

第10図(a) 2021年10月7日 千葉県北西部の地震

Fig. 10(a) The earthquake in the north-western part of Chiba Prefecture on October 7, 2021.

(2)地震活動

ア. 地震の発生場所の詳細及びその後の地震活動

2021年10月7日22時41分に千葉県北西部の深さ75kmでM5.9の地震(最大震度5強)が発生した。この 地震は、発震機構が東西方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートとフィリピン海プレートの境 界で発生した。この地震の発生以降、この地震の震源付近(領域b)では地震活動がやや活発になり、 10月31日までに最大震度1以上を観測した地震が8回(震度5強:1回、震度2:3回、震度1:4回) *発生している。

1997年10月以降の活動を見ると、今回の地震の震源付近(領域b)では、M5.0以上の地震が時々発生している。2005年7月23日のM6.0の地震(最大震度5強)では、負傷者38人、住家一部破損12棟、建物 火災3件、エレベータ閉じ込め47件などの被害が生じた(総務省消防庁による)。

※ 10月8日05時11分及び10月9日11時16分の東京湾の地震(いずれも最大震度2)を含む。



第 10 図 (b) つづき Fig. 10(b) Continued.

イ.発震機構

1997年10月から2021年10月までに発生した地震の発震機構を図2-4に示す。今回の地震の震源付近では、主に逆断層型の地震が発生している。

また、図2-5に、今回の地震が発生して以降の発震機構の分布と地震の型の分布を示す。



正断層型

逆断層型

今回の地震



35.4

35.3

139.9

140°

140.1°

140.2°

140.3°

140.4*

140 5

図 2-5 発震機構分布図(左)と矩形内の発震機構の型の分布(右) 2021年10月7日~10月31日、 深さ50km~100km、M≧3.5 逆断層型の地震を青色、正断層型の地震を赤色、横ずれ断層型を緑色で表示した。

ウ. 過去の地震活動

1919年以降の活動をみると、今回の地震の震央周辺(領域 c) で、最近発生したM6.0以上の地震は、2005年7月23日のM6.0の地震であり、さらにその前は1980年9月25日のM6.0の地震(最大震度4)である。また、1950年代にはM6.0以上の地震が3回発生しており、地震活動がやや活発であった。



表 2 – 1 領域 c 内に発生したM6.0以上の地震及び今回の地震の被害内容 被害内容は日本被害地震総覧(2013)による(2005年7月23日の地震及び今回の地震の被害内容は総務省消防庁による)

年月日	マグニチュード	最大震度	人的被害	物的被害
1928年5月21日	6.2	5	なし	土壁の亀裂・崩壊、高さ約20mの煙突が倒れる
1951年1月9日	6.1	4	なし	壁土落下、家屋小被害
1952年5月8日	6.0	4	なし	なし
1956年9月30日	6.3	4	負傷者4名	建造物、配電線などに軽微な被害あり
1980年9月25日	6.0	4	死者2名 負傷者73名	ガラス破損、ガス漏れ、エレベータ停止など
2005年7月23日	6.0	5 強	負傷者38名	住家一部破損12棟、建物火災3件、エレベータ閉じ込め47件など
2021年10月7日	5.9	5 強	負傷者47名	建物火災1件、製油所火災1件、エレベーター閉じ込め5件、鉄 道(案内軌道式鉄道)の脱輪など

第10図(d) つづき

Fig. 10(d) Continued.

(3) 震度と加速度

2021年10月7日22時41分に発生した地震(M5.9)により、埼玉県川口市、宮代町及び東京都足立区 で震度5強を観測したほか、東北地方から近畿地方にかけて震度5弱~1を観測した。

この地震の震度分布図を図3-1に、震度5弱以上を観測した地点の計測震度及び最大加速度を表 3-1に示す。また、各震度観測点の距離別分布を図3-2に示す。



第10図(e) つづき Fig. 10(e) Continued.

		観測点名	震度	計測	最大加速度(gal = cm/s/s)				震央
都道府県	市区町村				ᅀᆥ	南北	東西	上下	距離
				辰戊	百成	成分	成分	成分	(km)
埼玉県	川口市	川口市三ツ和*	5強	5.0	152.3	95.4	124.0	39.1	41.5
埼玉県	宮代町	宮代町笠原 *	5強	5.0	144.7	70.8	144.2	17.1	58.5
東京都	足立区	東京足立区伊興 *	5強	5.1	182.7	74.7	176.4	20.8	36.3
埼玉県	加須市	加須市大利根 *	5弱	4.5	107.2	104.4	73.3	15.1	72.4
埼玉県	鴻巣市	鴻巣市中央 *	5弱	4.7	119.6	47.9	113.4	21.7	74.0
埼玉県	久喜市	久喜市青葉 *	5弱	4.6	81.7	58.3	78.7	24.4	64.4
埼玉県	久喜市	久喜市鷲宮 *	5弱	4.5	102.3	48.2	92.3	22.5	68.6
埼玉県	川口市	川口市中青木分室 *	5弱	4.8	125.6	70.5	119.1	17.3	41.8
埼玉県	川口市	川口市安行領家 *	5弱	4.6	153.3	145.5	90.9	19.4	41.5
埼玉県	草加市	草加市中央 *	5弱	4.7	123.5	121.7	100.5	29.1	36.9
埼玉県	蕨市	蕨市中央 *	5弱	4.5	78.5	68.7	71.1	17.8	45.7
埼玉県	八潮市	八潮市中央 *	5弱	4.5	78.5	56.7	68.1	16.3	34.7
埼玉県	三郷市	三郷市中央 *	5弱	4.6	119.2	75.3	93.4	37.5	33.0
埼玉県	幸手市	幸手市東 *	5弱	4.7	99.3	57.0	98.6	26.2	63.5
埼玉県	吉川市	吉川市きよみ野 *	5弱	4.8	112.1	72.2	101.6	27.3	40.2
埼玉県	さいたま市緑区	さいたま緑区中尾*	5弱	4.7	130.0	127.6	46.1	18.3	48.5
千葉県	千葉市中央区	千葉中央区中央港	5弱	4.5	145.1	137.2	101.5	60.3	1.0
千葉県	千葉市中央区	千葉中央区千葉市役所 *	5弱	4.7	150.1	137.0	119.4	44.9	1.6
千葉県	船橋市	船橋市湊町 *	5弱	4.6	147.4	139.4	147.3	35.6	15.4
千葉県	松戸市	松戸市西馬橋 *	5弱	4.6	94.7	72.0	75.1	15.2	29.8
千葉県	流山市	流山市平和台 *	5弱	4.6	94.5	71.2	76.6	18.2	34.2
東京都	大田区	東京国際空港	5弱	4.5	153.6	142.8	107.7	39.4	29.1
東京都	大田区	東京大田区本羽田 *	5弱	4.6	142.6	128.6	130.1	28.3	33.5
東京都	大田区	東京大田区多摩川 *	5弱	4.5	91.2	83.3	87.0	41.4	36.5
東京都	足立区	東京足立区神明南 *	5弱	4.7	124.3	80.6	115.3	19.9	32.7
東京都	町田市	町田市本町田 *	5弱	4.5	171.2	106.9	151.6	44.1	60.0
神奈川県	横浜市鶴見区	横浜鶴見区馬場 *	5弱	4.5	129.9	128.7	65.8	24.8	42.2
神奈川県	横浜市神奈川区	横浜神奈川区広台太田町 *	5弱	4.9	218.6	181.1	157.4	51.4	44.5
神奈川県	横浜市中区	横浜中区山手町	5弱	4.5	104.9	89.3	77.1	32.9	44.0
神奈川県	横浜市港北区	横浜港北区日吉本町 *	5弱	4.8	205.6	192.2	139.0	60.9	42.3
神奈川県	横浜市緑区	横浜緑区鴨居 *	5弱	4.7	131.6	126.6	109.8	42.0	48.8
神奈川県	川崎市川崎区	川崎川崎区宮前町 *	5弱	4.7	149.3	107.3	125.2	50.8	36.4
神奈川県	川崎市川崎区	川崎川崎区中島 *	5弱	4.5	117.8	105.3	77.9	26.2	35.6

表 3 一 1	2021 年 10 月 7 日 22 時 41 分	千葉県北西部の地震の計測震度および最大加速度(震度5弱以上)

観測点名の*印は、地方公共団体または国立研究開発法人防災科学技術研究所の震度観測点を示す。

第 10 図 (f) つづき

Fig. 10(f) Continued.



図 3 - 2 2021 年 10 月 7 日 22 時 41 分 千葉県北西部の地震(M5.9、深さ 75km、最大震度 5 強)の 震度観測点における計測震度の距離別分布 図中のシンボルの中の数字は震度階級

第 10 図 (g) つづき Fig. 10(g) Continued.

(4)長周期地震動

ア. 観測した長周期地震動階級

2021年10月7日22時41分に発生した千葉県北西部の地震(M5.9)により、千葉県北西部と東京都23区で長周期地震動階級2を観測したほか、関東地方で長周期地震動階級1を観測した。



長周期地震動階級の凡例: 🔜 階級1 🔜 階級2 💻 階級3 📰 階級4

図4-1 長周期地震動階級1以上を観測した地域の分布図

長周期地震動 階級	人の体感・行動	室内の状況	備考
長周期地震動 階級1	室内にいたほとんどの 人が揺れを感じる。驚 く人もいる。	プラインドなど吊り下げ もの大きく揺れる。	_
長周期地震動 階級2	室内で大きな揺れを感 じ、物につかまりたい と感じる。物につかま らないと歩くことが難 しいなど、行動に支障 を感じる。	キャスター付き什器がわ すかに動く。棚にある食 器類、書棚の本が落ちる ことがある。	1
長周期地震動 階級3	立っていることが困難 になる。	キャスター付き什器が大 きく動く。固定していな い家具が移動することが あり、不安定なものは倒 れることがある。	間仕切壁など にひび割れ・ 亀裂が入るこ とがある。
長周期地震動 階級4	立っていることができ す、はわないと動くこ とができない。揺れに ほんろうされる。	キャスター付き什器が大 きく動き、転倒するもの がある。固定していない 家具の大半が移動し、倒 れるものもある。	間仕切壁など にひび割れ・ 亀裂が多くな る。

表 4 一 1 長周期地震動階級関連解説表

※ 長周期地震動階級に関する詳細は、「地震・火山月報(防災編)」令和2年12月号の付録10「長周期地震 動階級関連解説表」を参照のこと。

第 10 図 (h) つづき Fig. 10(h) Continued.



10月7日 千葉県北西部の地震(相似地震)

2021年10月7日の千葉県北西部の地震(M5.9、最大震度5強)について強震波形による相関解析を行った結果、2005年7月23日の地震(M6.0、最大 震度5強)とともに新たな相似地震グループの最新の地震として検出された(グループD)^{※1}。

震央分布図 (1988年10月1日~2021年10月7日、深さ0~100km、M≧3.5)

発生間隔と推定年平均すべり量※2

 ※1 各観測点の波形の比較で得られたコヒーレンスの中央値が0.95以上の場合に相似地震として検出し、相似地震のグループ分けはコヒーレンスを用いて機械的に行っている[溜測ほか、2014]。
 ※2 すべり量推定には、モーメントマグニチュードと地震モーメントの関係式 [Hanks and Kanamori (1979)]及び 地震モーメントとすべり量の関係式 [Nadeau and Johnson (1998)]を使用。得られた 積算すべり量と経過時間から最小自乗法を用いてグループ毎の年平均すべり量を求めた。





第10図(i) つづき



1928年、1956年、1980年、2005年の波形図は気象 庁,2006(地震予知連絡会会報,75)より引用

2005年、2021年の変位波形は、1倍強震計相当の周波数特性を 再現するフィルターを加速度記録に通して求めた。

第 10 図 (j) つづき Fig. 10(j) Continued.

2021/10/07 M5.9

1956/09/30 M6.3 1928/05/21 M6.2

上下 2005/07/23 M6.0-

成分 1980/09/25 M6.0

U

D

U

my manne





156



Fig. 10(1) Continued.

10月7日 千葉県北西部の地震(一元化震源の再計算) 2021年10月7日22時41分~10月21日24時00分、深さ50~80km、M≧1.0



■ 赤丸はM3.9の長線を示 9

・断面図中の点線は太平洋プレート上面の等深線モデル2つ(※2)の深さ60km~70kmの概ねの位置を示す
 ※2)緑点線: Iwasaki et al., 2015、Lindquist et al., 2004

※2)青点線:Nakajima and Hasegawa, 2006, 弘瀬•他, 2008, Nakajima et al., 2009

第 10 図 (m) つづき Fig. 10(m) Continued.

800

600

400

200

2020

凡例

🔵 震度 3

- 震度 2

🔵 震度 1

c



10月21日 東海道南方沖の地震

第11図 2021 年10月21日 東海道南方沖の地震 Fig. 11 The earthquake south off Tokaido on October 21, 2021.

-159 -

10月28日 茨城県南部の地震





領域 a 内の断面図 (A-B投影)

2021年10月28日09時55分に茨城県南部 の深さ45kmでM4.5の地震(最大震度4)が 発生した。この地震は、発震機構が北西一南 東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、フィリピ ン海プレートと陸のプレートの境界で発生 した。

1997年10月以降の活動をみると、今回の 地震の震源付近(領域b)は活動が活発な領 域で、「平成23年(2011年)東北地方太平洋 沖地震」発生以降、地震活動がより活発にな った。最近では2020年12月17日にM4.6の 地震(最大震度4)が発生した。また、2014 年9月16日にM5.6の地震(最大震度5弱) が発生し、負傷者10人、住家一部破損1,060 棟等の被害を生じた(総務省消防庁による)。

1919年以降の活動をみると、今回の地震の 震央周辺(領域 c)では、M6.0以上の地震が 時々発生している。



2021 年 10 月 28 日 茨城県南部の地震 第 12 図 (a) Fig. 12(a) The earthquake in the southern part of Ibaraki Prefecture on October 28, 2021.



10月28日 茨城県南部の地震(相似地震)

2021年10月28日の茨城県南部の地震(M4.5、最大震度4)について強震波形による相関解析を行った結果、既往相似地震グループの 最新の地震として検出された(グループK:今回の地震を含めM4.5~4.6の3地震)*1。

※1 各観測点の波形の比較で得られたコヒーレンスの中央値が0.95以上の場合に相似地震として検出し、相似地震のグループ分けはコヒーレンスを用いて機械的に行っている[溜測ほか、2014]。
※2 すべり量推定には、モーメントマグニチュードと地震モーメントの関係式 [Hanks and Kanamori (1979)] 及び 地震モーメントとすべり量の関係式 [Nadeau and Johnson(1998)] を使用。得られた 積算すべり量と経過時間から最小自乗法を用いてグループ毎の年平均すべり量を求めた。

●波形例



第 12 図 (b) つづき Fig. 12(b) Continued.

4-2 神奈川県西部地域の地下水位観測結果(2021 年 5 月~ 2021 年 10 月) Temporal Variation in the Groundwater Level in the western part of Kanagawa Prefecture, Japan (May 2021 – October 2021)

神奈川県温泉地学研究所・産業技術総合研究所

Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture and Geological Survey of Japan, AIST

1. はじめに

神奈川県温泉地学研究所では、神奈川県西部地震の予知研究の一環として、第1図・第1表に示 した6箇所に地下水位観測施設を整備し地下水位の連続観測を行っている. 2021年5月~2021年 10月の観測結果を報告する.

2. 観測

第1図の6箇所の観測点では、地下水位の他、気圧・降水量が1秒サンプリングで観測され、神 奈川県温泉地学研究所にリアルタイム送信されている。通常の解析には、これをもとに作成した1 分値や1時間値を用いている。

3. 結果

結果を第2,3図(原則1時間値,真鶴・二宮のみ24時間平均値)と第4図(原則0時の瞬時値) に示す.第1図の範囲内(北緯35~35.5度,東経138.9~139.4度)で,2021年5月~2021年 10月に深さ30km以浅でM4以上の地震はない.同期間中に観測点で震度2以上の揺れをもたらし た可能性のある地震は第2表の7個である.同期間では、5月1日の宮城沖の地震(M6.8;第2表), 9月29日の日本海中部の地震(M6.1;第3表),10月7日の千葉県北西部の地震(M5.9;第2表)の 際に、大井観測点において、それぞれ1cm程度、2cm程度、6cm程度のコサイスミックと見られ る水位の変化(上昇)が観測された.

(板寺一洋・原田昌武・松本則夫)

参考文献

1) 横山尚秀・小鷹滋郎・板寺一洋・長瀬和雄・杉山茂夫, 1995, 神奈川県西部地震予知のための 地下水位観測施設と地下水位解析, 温泉地学研究所報告, 26, 21-36.





Fig. 1 Distribution of groundwater observation stations of Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture (●). 1:Ooi, 2:Odawara, 3:Minami-ashigara, 4:Yumoto, 5:Manazuru, 6:Ninomiya.

第1表 地下水観測点の概要¹⁾

 Table 1
 List of the groundwater observation stations.

		DEPTH	DEPTH	DEPTH OF
OBSERVATION	ALTITUDE	OF	OF	WATER
WELL	(m)	WELL	SCREEN	LEVEL SENSOR
		(m)	(m)	(m)
001	47	300	270-300	15
ODAWARA	22	300	270-300	15
MINAMI-ASHIGARA	143	150	120-150	32
YUMOTO	67	300	250-300	20
MANAZURU	40	300	250-300	43
NINOMIYA	51	500	450-500	13



第2図 2021年5月-2021年7月の観測結果.

Fig. 2 Observation results from May 2021 to July 2021.



第3図 2021年8月-2021年10月の観測結果.

Fig. 3 Observation results from August 2021 to October 2021.



第4図 2020年11月-2021年10月の観測結果.

Fig. 4 Observation results from November 2020 to October 2021.

第2表 観測点周辺で震度2以上の地震をもたらした可能性のある地震

Table 2	List of the earthquakes whose seismic intensities were possibly 2 or greater at	t
	some of the observation stations.	

No	Date and Time	Region Name	M*1	Depth	151*2
110.	Date and Time	Region Name		km	JJI 2
1	2021/5/1 10:27	Miyagi-ken Oki	6.8	51	1-2
2	2021/5/14 8:58	Fukushima-ken Oki	6.3	46	1-2
3	2021/5/14 18:37	Tokyo-to 23ku	4.1	72	1-2
4	2021/6/7 3:11	Chiba-ken Toho-oki	5.1	93	1-2
5	2021/6/20 2:20	Shizuoka-ken Toubu	3.5	12	1-2
6	2021/9/29 23:39	Shizuoka-ken Toubu	3.5	6	1-4
7	2021/10/7 22:41	Chiba-ken Hokuseibu	5.9	75	1-2

*1: Magnitude.

*2: JMA seismic intensity in and around the observation stations.

第3表 第2表の地震以外で大井観測点にコサイスミックと見られる水位の変化を もたらした地震

Table 3List of the earthquakes which induced coseismic changes in groundwater level in
the Ooi observation station, excluding earthquakes listed in Table 2.

No.	Date and Time	Region Name	M*1	Depth km	JSI*2
1	2021/9/29 17:37	Nihon-kai Chubu	6.1	394	-

*1: Magnitude.

*2: JMA seismic intensity in and around the observation stations.

4-3 関東甲信地方の地殻変動 Crustal Deformations in the Kanto District

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

《2021 年 10 月 7 日に発生した千葉県北西部の地震》 [GNSS 連続観測時系列]

第1~2図は、2021年10月7日に発生した千葉県北西部の地震の地殻変動に関する資料である. 第1図下段~第2図は、第1図上段に示す、震源近傍の6観測点の基線3成分時系列グラフである. この地震に伴う顕著な地殻変動は見られない.



第1図 千葉県北西部の地震(2021年10月7日, M5.9)前後の観測データ:(上図)基線図,(下図)3成分時系 列グラフ

Fig. 1 Results of continuous GNSS measurements before and after the M5.9 earthquake in the north-western part of Chiba Prefecture on October 7, 2021: baseline map (upper) and 3 components time series (lower).

千葉県北西部の地震(10月7日 M5.9)前後の観測データ

この地震に伴う顕著な地殻変動は見られない.

成分変化グラフ



千葉県北西部の地震(2021年10月7日, M5.9)前後の観測データ:3成分時系列グラフ 第2図

Fig. 2 Results of continuous GNSS measurements before and after the M5.9 earthquake in the north-western part of Chiba Prefecture on October 7, 2021: 3 components time series.

4-4 2021 年 8 月茨城県沖の震源分布 Hypocenter distribution off Ibaraki Prefecture in August, 2021

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2021 年 8 月初旬に茨城県沖において活発な地震活動があり,特に 8 月 3 日から 4 日にかけては 震度 1 以上の地震が 14 回観測された¹⁾. 8 月 4 日 5 時 33 分には深さ 18 km で *M_{MA}* 6.0,最大震度 3 の地震が発生し,その発震機構解から太平洋プレートと陸のプレートとの境界で発生したと考え られた¹⁾が,震源近傍における気象庁一元化震源による震源分布の深度断面図では地震活動がプ レート境界付近とさらに浅部の 2 つのクラスターに分かれているように見える(第 1 図 b). ここで, S-net 及び Hi-net の読取値データを使用し,S-net の各観測点には堆積層補正²⁾を適用し,震源決定 コードとして NonLinLoc³⁾を使って震源の再決定を実施した.震源決定に使用した P 波速度構造は この領域で実施された構造探査の結果⁴⁵⁾を参照し,北緯 36.2 度に沿った沈み込む太平洋プレート の境界面の深さ⁶⁷⁾をもとに簡略化した 3 次元構造を設定した.震源計算時の走時残差から求めた 観測点補正値を適用して得られた結果を第 1 図に示す.特に 8 月初旬の活発な地震活動は,第 1 鹿 島海山近傍で得られた構造探査結果⁸⁾と比較すると,沈み込む太平洋プレートと陸側プレートの境 界域付近に発生しており,海溝軸近傍で陸側プレート下に沈み込みつつある第 1 鹿島海山の西側に ある既に海底下に沈み込んだ海山の陸側に集中していることがわかった.

> (西澤 あずさ) NISHIZAWA Azusa

参考文献

- 1) https://www.jma.go.jp/jma/press/2109/08a/2108kanto-chubu.pdf
- 2) 西澤あずさ・他 (2020), 日本地震学会 2020 年秋季大会講演予稿集, S23P-03.
- Lomax et al., (2000), in Advances in Seismic Event Location, Thurber, C.H., and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, 101-134.
- 4) Mochizuki et al. (2008), Science, 321(5893), 1165-1166, doi:10.1126/science.1160250.
- 5) Nakahigashi et al. (2012), Earth Planets Space, 64, 1194–1197.
- 6) Iwasaki et al. (2015), AGU Fall meeting abstracts, T31B2878.
- 7) Lindquist et al. (2004), Eos Trans. AGU, 85(19), 186, https://doi.org/10.1029/2004EO190003.
- 8) Nishizawa et al. (2009), Earth Planets Space, 61, e5–e8



- 第1図 a) 2021 年 8 月 1 日から年 8 月 31 日まで期間の再決定された地震の震央分布図(赤丸). 黄星印は 2021 年 8 月 4 日 5 時 33 分 M_{JAA} 6.0 の地震の位置. 黒破線はプレート境界面の深さ⁶⁷⁷. 五角形は S-net の観測点位置, 五角形を結ぶ線は S-net のケーブルルートを示す. 黒逆三角形は Nishizawa et al. (2009)の構造探査に用いた海底地震計の位置⁸⁾. b) a 図の XY 測線から 10 km 以内で発生した地震の深さ分布(赤丸). 灰色丸は気象庁一元化震源. c)bの断面図に P 波速度構造断面図⁸⁾ をのせたもの. 震源は第1 鹿島海山西方のプレート境界付近の沈み込んだ海山の陸側に分布している.
- Fig. 1 a) Epicentral distribution (red circles) during Aug. 1-31, 2021, off Ibaraki Prefecture. Yellow star denotes $M_{JMA}6.0$ earthquake and a dashed line stands for depth of the top of the subducting Pacific plate⁶⁾⁷⁾. Pentagons are S-net stations and the curved line connecting pentagons is the S-net cable route. Black inverted triangles indicate positions of the ocean bottom seismograph on the seismic refraction profile⁸⁾. b) Cross section of the hypocenter distribution (red circles) within 10 km from the blue line XY in a). Gray circles are hypocenters from JMA unified hypocenter catalog. c) P wave velocity model⁸⁾ across Daiichi-Kashima Seamount superimposed on the hypocenter distribution in b).
4-5 2021 年 10 月 7 日千葉県北西部の地震による高周波エネルギー輻射量 High-frequency energy release from the NW Chiba-prefecture earthquake on October 7, 2021

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2021 年 10 月 7 日 22 時 41 分頃,宮城県沖の深さ 75km 付近を震源とする M₃5.9 (Hi-net 震源の深 さ 73km, Hi-net マグニチュード M_H6.4)の地震が発生した.本稿では同地震発生後の地震活動について,連続地震波形エンベロープ解析から得られた 4-20Hz 帯域のエネルギー輻射量推定結果を報告する.

解析に先立ち,第1図に示す Hi-net(KiK-net)地震観測点(赤三角)の速度波形記録に 4-20Hz 帯域のバンドパスフィルタを施し、3 成分波形を2 乗和して1秒ごとに平均値をとり、密度 2800kg/m³をかけてエネルギー密度の次元をもつエンベロープを作成した.また、コーダ波規格化 法¹⁾を用いて N.NRTH 観測点を基準点とするサイト増幅補正を行った.使用した観測点の一部で は本震時に強震動による波形の飽和²⁾が見られたため、本震については Hi-net に併設されている KiK-net 地中強震計の加速度記録を積分して速度に変換し、Hi-net 記録と同様の処理を行った.得 られた地震波形エンベロープにエンベロープインバージョン解析³⁾を施し、高周波エネルギー輻射 量の時間変化を推定した.エネルギー輻射点は余震域の中心付近(第1図中赤丸)に固定した.解 析に使用した各パラメータは、V_p=6.58km/s、V_s=3.80km/s、散乱係数 g₀=1.5 × 10²km⁻¹、内部減衰 $Q_i^{-1}=1.0 \times 10^3$ 、ガウス型ランダム不均質媒質の速度揺らぎ強度 ε =0.146、相関距離 *a*=5km と定めた.

第2図aに、4-20Hz帯域でのエネルギー輻射量の推移とHi-netマグニチュードに基づくM-T図 を示す.本震発生から10日以内ではM_H4.0以上の地震は2回発生しており,最大余震は本震の1.6 日後に発生したM_H4.1の地震である.本震に対する最大余震による高周波エネルギー輻射量の割 合はおよそ0.04%である.第2図b,cに,余震による積算高周波エネルギー輻射量と,同量を本 震による高周波エネルギー輻射量で規格化した値(NCER)の推移をそれぞれ示す.本震発生から 10日後までの余震による積算エネルギー輻射量は,本震の高周波エネルギー輻射量の0.25%である.

第2図b,cには、今回の地震とほぼ同じ場所で2005年7月に発生した千葉県北西部の地震(M_{Hi}6.4) と、今回の地震と同じプレート境界型で2021年3月に発生した宮城県沖の地震(M_{Hi}7.0) につい ての解析結果も併せて示す.2005年千葉県北西部の地震は、本震の2分後にM_{Hi}5.1の最大余震を 伴い、24時間以内にM_{Hi}4.0以上の地震が3回発生するなど、余震による積算エネルギー輻射量の 絶対値および本震に対する相対値(22時間後時点で6.3%)は、いずれも今回の地震よりも高い. 一方、2021年宮城県沖の地震については、余震による積算エネルギー輻射量の本震に対する相対 値は今回の地震と同程度(10日後時点で0.27%)である.

> (澤崎 郁 (防災科研)) SAWAZAKI Kaoru

参考文献

- 1) Phillips, W., and K. Aki (1986), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **76**(3), 627-648. Site amplification of coda waves from local earthquakes in central California.
- 2) 汐見勝彦,小原一成,笠原敬司 (2005), *地震*,第2輯, **57**(4), 451-461. 防災科研 Hi-net 地震 計の飽和とその簡易判定.
- 3) Sawazaki, K., H. Nakahara, and K. Shiomi (2016), *Earth Planets Space*, **68**(1), 183. Preliminary estimation of high-frequency (4-20 Hz) energy released from the 2016 Kumamoto, Japan, earthquake sequence.



第1図 Hi-net 震源に基づく千葉県北西部の地震の震源(黄星印),および本震後10日間に発生した地震(黒丸)の震源分布.三角および赤丸印は、高周波エネルギー輻射量推定に使用したHi-net(KiK-net)観測点,および設定したエネルギー輻射点の位置を示す.

Fig. 1 Location of Hi-net hypocenters of the 2021 NW Chiba prefecture earthquake (yellow star) and its aftershocks occurring within 10 days (black circles). Triangles and red circle represent Hi-net (KiK-net) stations and the assumed energy release point, respectively.



- 第2図 (a) 本震発生後 10 日間の 4-20Hz 帯域のエネルギー輻射量の推移(黒線, 左縦軸), および Hi-net マグニチュードに基づく M-T 図(灰色丸, 右縦軸). エネルギー輻射量 W と M_{Hi} との関係は, 第1 図の点線で囲まれた領域で発生した 1.5<=M_{Hi}<4.5 の地震について最小二乗法により推定し, logW=1.81M_{Hi}+2.61 としている.
 - (b) 本震発生直後からの 4-20 Hz 帯域の積算エネルギー輻射量の推移.赤,黒,灰色の線はそれぞれ今回の 千葉県北西部の地震,2005 年千葉県北西部の地震(22 時間後まで),および 2021 年宮城県沖の地震に 伴い発生した余震による積算エネルギー輻射量.最大余震(M_{Hi}4.1)の発生時刻(括弧内)を赤矢印で 示す.
 - (c) 図 (b) の積算エネルギー輻射量をそれぞれの「本震」によるエネルギー輻射量で規格化した相対積算エネルギー輻射量(NCER)の推移.
- Fig. 2 (a) Time-lapse change in the 4 20 Hz energy release rate (black curve, left ordinate) and the M-T plot of Hi-net magnitude (gray circles, right ordinates). The relationship between the energy release W and M_{Hi} was estimated as logW=1.81M_{Hi}+2.61, where earthquakes within the range of 1.5<=M_{Hi}<4.5 occurred inside of the dashed rectangle area in Fig. 1 were used for the estimation.</p>
 - (b) Cumulative 4 20 Hz energy release by the aftershocks for each of the 2021 NW Chiba prefecture earthquake (red), the 2005 NW Chiba prefecture earthquake (black), and the 2021 off-Miyagi prefecture earthquake (grey). Red arrow indicates occurrence of the largest aftershock (M_{Hi}4.1) with the lapse time after the mainshock in the bracket.
 - (c) Same to Fig. 2(b) except that the cumulative energy releases are normalized by the energy released by their "mainshock" (Normalized Cumulative Energy Release; NCER).

5-1 伊豆地方の地殻変動

Crustal Deformations in the Izu peninsula and its Vicinity

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

[伊豆半島・伊豆諸島の水平上下変動]

第1~2図は、伊豆半島及び伊豆諸島の水平・上下変動のベクトル図である。特段の変動は見られない。

[伊豆東部地区 GNSS 連続観測時系列]

第3~6図は、初島観測点を始点とした2006年3月1日以降の伊豆半島東部のGNSS連続観 測3成分時系列グラフである.すべての基線で2015年7月頃に急激な隆起、2018年4月頃に急激 な沈降が見られるが、初島観測点の受信状況の悪化による見かけ上の変化と見られ、2018年8月 10日に実施した周辺樹木の剪定後は以前の値に戻っている.また、2006年3~4月の地震活動、 2009年12月17~21日にかけての伊豆半島東方沖の地震活動、及び2011年3月11日の東北地方 太平洋沖地震に伴う変動がどの基線にも見られる.2011年7月17~18日と9月18~23日の伊 豆東部での群発的な地震活動に伴うごく僅かな膨張性の地殻変動の影響が、(3)、(4)、(8)の基線で 見られる.(4)の上下変動の時系列に2012年3月頃に見られる変化は、冷川峠A観測点の周辺で2 月下旬から3月上旬にかけて行われた樹木の伐採の影響による見かけ上の変化と考えられる.また、 2019年と2020年において春頃から秋頃にかけて沈降した後に隆起する変化が見られるが、冷川峠 A観測点の受信状況の悪化による見かけ上の変化の可能性がある.(8)の上下変動の時系列に2016 年3月頃から沈降が見られていたが、12月上旬に伊東八幡野観測点周辺の樹木の伐採が行われた 後は以前の値に戻っており、観測点周辺の樹木の繁茂による見かけ上の変化と考えられる.

[伊豆諸島地区 GNSS 連続観測時系列]

第7~13 図は、伊豆諸島北部と伊豆半島の間の GNSS 連続観測基線図と斜距離及び比高の時系 列グラフである。各段の左が1996年4月以降の長期,右が最近2年間の短期の時系列グラフである。

第8図上段の基線(1)~(3)では、2000年6~7月の三宅島の火山性地殻変動及び神津島東方沖 で進行したダイクの貫入によると思われる斜距離の変化が見られる.

第8~9図の伊豆大島島内の基線(6)~(11)の斜距離には,伊豆大島の膨張収縮に伴う基線の伸び縮みが見られる.三原山を挟む基線(9),(11)の斜距離には,2021年6月頃からは膨張傾向が見られる.

第9図の新島~神津島1Aの基線(12)では,2000年の活動以降,斜距離の伸びが継続していたが, 2015年1月頃から伸びが停滞し,2015年後半からは縮みの傾向が見られる.ただし,2019年6月 頃から再び伸びの傾向が見られる.

第 10 図の式根島~神津島1 Aの基線 (17) でも,2000 年の活動以降,斜距離の伸びが継続していたが,2015 年 1 月頃から伸びが停滞し,2015 年後半から縮みの傾向が見られる.逆に,利島~新島の基線 (15) では2015 年後半から伸びの傾向が見られる.

第11~13 図の比高変化グラフでは,新島~式根島の基線(16) で2015 年後半から沈降の傾向が 見られていたが,最近2年間では特段の変動は見られない.また,利島~新島の基線(15) で2016 年頃から沈降の傾向が見られている.そのほかは伊豆大島の膨張収縮に伴う上下変動以外には,特 段の変動は見られない.新島を含む(1),(14),(15),(16)の上下成分(比高)は,2007 年後半と 2014 年初めに新島の隆起,2010 年後半,2015 年後半と2020 年後半に新島の沈降を示しているが, これらは新島観測点周辺の樹木の生長,その後枝払い(2007 年 12 月 19 日,2010 年 9 月 15 日弱剪定, 2010 年 12 月 7 日強剪定,2014 年 1 月 26 日,2015 年 11 月 30 日,2021 年 3 月 8 日)による見かけ 上のものである.式根島観測点では,2010 年 12 月 8 日及び2018 年 3 月 15 日に樹木の剪定を行った.

[水準測量 静岡市~熱海市~横浜市]

第14回は,静岡市から熱海市を経由して横浜市に至る国道一号線沿いの路線の水準測量結果である.最近の1年間では,横浜市側に対する静岡市側の沈降が見られる.

伊豆半島・伊豆諸島の水平上下変動 GNSS連続観測

ベクトル図 (水平) -3か月-



第1図(a) GNSS 観測による伊豆地方の水平変動(3か月)

Fig. 1(a) Horizontal displacements of Izu Region by GNSS continuous measurements (3 months).

ベクトル図 (上下) -3か月-



第1図 (b) GNSS 観測による伊豆地方の上下変動(3か月)

Fig. 1(b) Vertical displacements of Izu Region by GNSS continuous measurements (3 months).

伊豆半島・伊豆諸島の水平上下変動 GNSS連続観測

ベクトル図 (水平) -1か月-



第2図(a) GNSS 観測による伊豆地方の水平変動(1か月)

Fig. 2(a) Horizontal displacements of Izu Region by GNSS continuous measurements (1 month).



第2図(b) GNSS 観測による伊豆地方の上下変動(1か月)

Fig. 2(b) Vertical displacements of Izu Region by GNSS continuous measurements (1 month).



伊豆東部地区 GNSS連続観測時系列 (1)

伊豆東部地区周辺の各観測局情報

点番号	点 名	日付	保守内容
95105	初島	2009/07/17	周辺伐採
		2010/02/02	レドーム開閉
		2013/01/08	アンテナ更新
		2015/10/20	周辺伐採
		2017/01/31	受信機交換
		2018/08/10	周辺伐採
161217	湯河原A	2009/02/24	レドーム開閉・受信機交換
		2012/12/11	アンテナ更新
		2016/10/22	湯河原観測停止
		2016/12/16	湯河原A観測開始(移転)
		2017/05/02	アンテナ交換
92106	宇佐美	2010/01/21	レドーム開閉
		2012/12/06	アンテナ更新
		2018/01/18	受信機交換
131194	中伊豆A	2008/01/19	レドーム開閉
		2012/12/05	アンテナ更新
1		2013/06/24	中伊豆観測停止
		2013/07/11	中伊豆A観測開始(移転)
			· · · ·

点番号	点 名	日付	保守内容
000841	冷川峠A	2008/01/19	レドーム開閉
		2008/05/15	アンテナ交換
		2012/2下~3上	周辺伐採
		2012/10/24	アンテナ更新
		2018/11/15	受信機交換
		2021/05/28	周辺伐採
		2021/09/17	周辺伐採
101183	伊東A	2008/09/18	アンテナ交換
		2010/01/21	レドーム開閉
		2011/11/01	移転(伊東→伊東A)
		2012/10/24	アンテナ更新
		2018/01/18	受信機交換
		2019/04/12	アンテナ交換
149084	M汐吹公園	2018/12/18	受信機交換
149085	M川奈小	2018/12/18	受信機交換
		2020/12/25	受信機交換
93062	伊東八幡野	2006/07/07	周辺伐採
		2011/01/11	レドーム開閉
		2012/12/05	アンテナ更新
		2016/12/08	周辺伐採
		2020/06/10	周辺伐採
		2020/07/08	周辺伐採
		2020/12/14	受信機交換
02P113	P伊東	2010/09/29	アンテナ交換

第3図 伊豆半島東部 GNSS 連続観測結果(基線図及び保守状況)

Fig. 3 Results of continuous GNSS measurements in the eastern Izu Peninsula (baseline map and maintenance history).

伊豆東部地区 GNSS連続観測時系列 (2)

成分変化グラフ



第4図 伊豆半島東部 GNSS 連続観測結果(2006年3月以降・3成分)

Fig. 4 Results of continuous GNSS measurements in the eastern Izu Peninsula from March 2006 (3 components) (1/3).

伊豆東部地区 GNSS連続観測時系列 (3)

成分変化グラフ



第5図 伊豆半島東部 GNSS 連続観測結果(2006年3月以降・3成分)

Fig. 5 Results of continuous GNSS measurements in the eastern Izu Peninsula from March 2006 (3 components) (2/3).

伊豆東部地区 GNSS連続観測時系列 (4)

成分変化グラフ



第6図 伊豆半島東部 GNSS 連続観測結果(2006年3月以降・3成分)

Fig. 6 Results of continuous GNSS measurements in the eastern Izu Peninsula from March 2006 (3 components) (3/3).



伊豆諸島地区 GNSS連続観測時系列(1)

※2003年3月5日に基準局92110(つくば1)のアンテナおよびレドームの交換を実施し、解析値に補正をしています。

第7図 伊豆諸島北部 GNSS 連続観測結果(基線図及び保守状況)

Fig. 7 Results of continuous GNSS measurements in the northern part of the Izu Islands (baseline map and maintenance history).

伊豆諸島地区 GNSS連続観測時系列(2)



第8図 伊豆諸島北部 GNSS 連続観測結果(斜距離)

Fig. 8 Results of continuous GNSS measurements in the northern part of the Izu Islands (distance) (1/3).

伊豆諸島地区 GNSS連続観測時系列(3)



第9図 伊豆諸島北部 GNSS 連続観測結果(斜距離)

Fig. 9 Results of continuous GNSS measurements in the northern part of the Izu Islands (distance) (2/3).

伊豆諸島地区 GNSS連続観測時系列(4)



第 10 図 伊豆諸島北部 GNSS 連続観測結果(斜距離)

Fig. 10 Results of continuous GNSS measurements in the northern part of the Izu Islands (distance) (3/3).

伊豆諸島地区 GNSS連続観測時系列(5)

期間: 1996/04/01~2021/10/23 JST 期間: 2019/10/01~2021/10/23 JST (1) 南伊豆2(93086)→新島(93057) (1) 南伊豆2(93086)→新島(93057) 比高 cm 比高 基進値: -62. 344m cm 基準値:-62.286m 20 6 2009/08/11 M6 15 10 5 0 0 -2 -10 -15 2011/03/11 M9.0 -20 -6 1998 2000 2002 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020 2020/1/1 5/1 9/1 2021/1/1 5/1 9/1 (2) 南伊豆2(93086)→三宅4(960600) 比高 基準値:-43.969m (2) 南伊豆2(93086)→三宅4(960600) 比高 基準値:-43.944m cm cm 6 75 2011/03/11 M9.0 50 2009/08/11 5 25 0 0 -25 -2 *3 -50 -75 -6 1998 2000 2002 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020 2020/1/1 5/1 9/1 2021/1/1 5/1 9/1 (3) 南伊豆 2 (93086)→神津島 1 A (141202) 比高 (3) 南伊豆2(93086)→神津島1A(141202) 比高 基準値:-36.999m 基準値:-36.916m cm cm 40 6 30 20 2009/08/11 M6 5 ÷ 10 0 0 -10 -2 -20 -30 2014/09/19 神津島1より移転 -6 1998 2000 2002 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020 2020/1/1 5/1 9/1 2021/1/1 5/1 9/1 (4) 南伊豆2(93086)→大島1(93051) 比高 基準値:15.212m cm (4) 南伊豆2(93086)→大島1(93051) 比高 基準値:15.237m cm 18 15 12 9 6 2009/08/11 MG.5 0 -2 2011/03/11 M9.0 -12 -15 -18 -6 2014/07 伊豆大島北部地) 1998 2000 2002 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020 2020/1/1 5/1 9/1 2021/1/1 5/1 9/1 (5) 南伊豆2(93086)→大島2(93055) 比高 (5) 南伊豆2(93086)→大島2(93055) 比高 基準値:-6.030m 基準値:-6.053m cm 15 cm 6 12 2009/08/11 M6.5 9 2 0 _0 -2 2011/03/11 M9 0 -12 -6 -15 1998 2000 2002 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020 2020/1/1 5/1 9/1 2021/1/1 5/1 9/1 (6) 大島1(93051)→大島3(960594) 比高 基準値:3.257m (6) 大島1(93051)→大島3(960594) 比高 基準値:3.293m cm cm 18 15 12 9 6 2009/08/11 M6.5 0 -2 2011/03/11 M9 0 2014/07 伊豆大島北部地震活動 -6 1998 2000 2002 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018 2020 2020/1/1 5/1 9/1 2021/1/1 5/1 9/1

比高変化グラフ(長期)

比高変化グラフ(短期)

第 11 図 伊豆諸島北部 GNSS 連続観測結果(比高)

●----[F5:最終解] ●----[R5:速報解]

Fig. 11 Results of continuous GNSS measurements in the northern part of the Izu Islands (relative height) (1/3). 伊豆諸島地区 GNSS連続観測時系列(6)



第 12 図 伊豆諸島北部 GNSS 連続観測結果(比高)

Fig. 12 Results of continuous GNSS measurements in the northern part of the Izu Islands (relative height) (2/3).

伊豆諸島地区 GNSS連続観測時系列(7)



第 13 図 伊豆諸島北部 GNSS 連続観測結果(比高)

Fig. 13 Results of continuous GNSS measurements in the northern part of the Izu Islands (relative height) (3/3).



第14図 水準測量による静岡市~熱海市~横浜市間の上下変動

192

Fig. 14 Results of leveling survey along the leveling route from Shizuoka city to Yokohama city via Atami city.

6-1 東海地方の地殻変動 Crustal Deformations in the Tokai District

国土地理院 Geospatial Information Authority of Japan

《森~掛川~御前崎間の上下変動》

[電子基準点の上下変動 水準測量と GNSS 連続観測]

第1図は,電子基準点間の比高変化について,水準測量の結果とGNSS連続観測結果とを比較したものである.両者はほぼ同様の傾向を示しており,最新のデータは従来の長期的な沈降傾向に沿っている.

[高精度比高観測点の上下変動]

第2~5図は、掛川~御前崎間における高精度比高観測(GNSS連続観測)の結果である.

第2図は、高精度比高観測点間の比高変化について、水準測量の結果とGNSS連続観測結果を比較したものである。両者はほぼ同様の傾向を示しており、最新のデータは従来の長期的な沈降傾向に沿っている。なお、(2)のH下板沢-H下朝比奈2の基線で2016年半ばに見られる隆起は、H下朝比奈2観測点周辺の樹木の繁茂による見かけ上のものである。また、全基線で2020年春以降に沈降を示しているが、10月1日にH下板沢観測点周辺の樹木の伐採が行われた後は以前の値に戻っており、観測点周辺の樹木の繁茂による見かけ上の変化と考えられる。

第3図(b)の比高変化グラフでは、H下板沢観測点に対して御前崎側の観測点が長期的な沈降の 傾向にあることが見てとれる.なお、(3)H下板沢-H下朝比奈2の基線で2016年半ばに見られ る隆起は、H下朝比奈2観測点周辺の樹木の繁茂による見かけ上のものである.また、全基線で 2020年春以降に沈降を示した後に以前のレベルに戻っているが、これらはH下板沢観測点周辺の 樹木の生長、その後枝払い(2020年10月1日)による見かけ上のものである.

第4図に,各高精度比高観測点のH下板沢観測点に対する比高変化について,1か月ごと及び10 日ごとの平均値を示している.各図の右に各点の上下変動速度(マイナスは沈降)が記されている. 特段の傾向の変化は見られない.なお,全基線で2020年春以降に沈降を示した後に以前のレベル に戻っているが,これらはH下板沢観測点周辺の樹木の生長,その後枝払い(2020年10月1日) による見かけ上のものである.

第5図左は、H細谷観測点に対する各点の比高について、1か月平均値と3か月前の1か月平均 値との差を、最近3年間について示したものである。特段の傾向の変化は見られない。なお、上か ら4段目と6段目の図において、98H023(H下板沢)はH下板沢観測点周辺の樹木の生長による 見かけ上の変化と考えられる。

第5図右は、同様にH細谷観測点に対する各点の比高の1か月平均値の前月との差を、最近1年 間について示したものである。特段の傾向の変化は見られない。

[森~掛川~御前崎間の上下変動 水準測量]

第6~10図は東海地方(森町~御前崎市間)の水準測量結果である.最新の観測は2021年5~6月である.

第6図の最上段は,最新の観測結果と1年前の同時期の観測結果の差による各水準点の上下変動 である.最新の結果は御前崎側で沈降が見られる.

第7図は,掛川市(140-1)から見た御前崎市(2595)の上下変動時系列である.上のプロット が生の観測値による時系列,下のプロットが年周成分を除去した後の時系列である.2000年夏以 前の SSE 開始よりも前の沈降の速度と比較して,SSE 進行期にある 2000 年秋頃から 2005 年夏頃 までと 2013 年初頭から 2017 年春頃までは沈降速度が速かったが,SSE が停止した 2017 年春頃以 降は,2000 年夏よりも前の沈降速度にほぼ戻ったように見える.

第8回は、前の観測結果について、最新の変動が従来のトレンド(傾き)上にのっているかどう か等を、できるだけ定量的に評価するための資料である。2000年秋~2005年夏のSSE進行期とそ の開始前及び停止後、さらに2013年初頭からのSSE再開後の進行期及び停止以降の5つの期間に 分けて、トレンドを推定した後、年周成分を推定した。上段の時系列は、前の年周成分を除去して いない時系列のうち1995年以降のものである。破線は、5期間に分けて推定した回帰曲線である。 2段目の表に回帰モデルの数値を示した。期間(2)のSSE進行期は、傾きが約-8.2mm/年と沈降 速度が速くなったが、その後の期間(3)については約-4.6mm/年と期間(1)の沈降速度に近くなっ ている。2013年初頭以降の期間(4)のSSE再開後は傾きが約-6.1mm/年と沈降速度が速くなり、 期間(5)の停止以降は約-4.8mm/年で期間(1)の沈降速度に近くなっている。

一番下の段に,期間(2)から期間(5)にかけての時系列の拡大図を示した.回帰モデルからの 残差による標準偏差を細い破線で示してある.長期的な傾向に特段の変化は見られない.

第9図は,森町(5268)を基準とした掛川市(140-1)と御前崎市(2595)の変動時系列グラフである. 森町に対する掛川市及び御前崎市の長期的な沈降傾向に特段の変化は見られない.

第10回は,掛川から御前崎検潮所に至る各水準点の上下変動時系列である。御前崎検潮所附属 水準点は,2009年8月駿河湾の地震時に局所的に沈下したものと考えられる。

(御前崎先端部)

第 11 ~ 12 図は, 御前崎先端部の変動を見るために小さな環で行っている水準測量の結果である. 最近は概ね半年に 1 回の頻度で実施している.

第11 図の最上段は,今回 2021 年 6 月の最新の結果と前回 2020 年 11 月の結果の差による上下変 動観測結果で,特段の変化は見られない.

第12回は,網平均を行った結果を最近の4つの期間について示したもので,1977年からの上下 変動の累積を比較のために最下段に示す.(4)に示した最近の短期的な変動は御前崎先端側が僅か に隆起傾向であるが,季節的な誤差の影響の範囲内であると考えられる.

[御前崎周辺 GNSS 連続観測時系列]

第13~17 図は御前崎とその周辺の GNSS 連続観測結果である. 三ヶ日観測点から榛原(はいばら)観測点に至る東西方向の基線も併せて示している.

第14 図の(4),(5)において2009年の夏に見られる跳びは,2009年8月11日に発生した駿河湾の地震に伴う御前崎A観測点の局所的な地盤変動によるものである.2011年3月11日に発生した 東北地方太平洋沖地震に伴い,第14図の(5)に地震時と地震後の基線の短縮が見られる.なお,(1),(2) において2017年1月の掛川A観測点への移転前後で傾向に変化が見られるが,原因は不明である.

第 15 図の (8) において 2009 年 8 月頃から,掛川観測点が東向きに動いたような基線長の変化が

見られた後,10月に戻った.同様の変化はピラーに内蔵された傾斜計にも見られるが,GNSSの 上下成分には見られない.2010年夏にも同様の東向きの変化が見られた後,9月28日以降戻って いる.2009年も2010年も大雨後に戻っているが,原因は不明のままである.2011年及び2012年 にはこのような変化はなかったが,2013年以降,再び同様の変化が見られるようになった.なお, 2017年1月30日に掛川Aへの移転を行った.その後は特段の変化は見られない.

第17図の(6)において2014年6月頃から静岡相良1観測点が隆起する向きの変化が見られたが, 8月に観測点周辺の樹木を伐採した後に戻っており,観測点周辺の樹木の生長に伴う受信環境の悪 化による影響であった可能性がある.また,2016年6月頃からも隆起する向きの変化が見られた後, 2017年2月に周辺の樹木を伐採後に戻っており,同様に樹木繁茂による影響の可能性がある.一 部の観測点では2010年2~3月頃にレドームの開閉を行ったことによる見かけ上の変動が含まれ ている場合があるので,第13図下段の観測局情報を参照する必要がある.最近のデータには,特 段の傾向の変化は見られない.

[駿河湾周辺 GNSS 連続観測時系列]

第18~22 図は, 駿河湾とその周辺の GNSS 連続観測時系列である. 傾向に特段の変化は見られない. 第19 図の(1)において, 2020 年7月, 8 月に斜距離の縮みが見られるが, 伊豆半島の大気 擾乱による一時的な変化であると考えられる.

[東海地方の地殻変動・非定常地殻変動]

第 23 ~ 27 図は, 白鳥観測点(第 23 ~ 24 図)及び, 三隅観測点(第 25 ~ 27 図)を固定局として示した, 東海地方の地殻変動である.

第23 図上段は最近の1年間の水平変動である.比較のために,東北地方太平洋沖地震前において SSE のなかった2つの時期における変動速度を中段に,SSE が発生していた時期の変動速度を 下段に示している.最近の東海地方の地殻変動には西向きの変動が広く見られ,SSE の発生してい なかった時期の特徴に近い.

第24図は、上下成分について同様の比較を示すものである。水平よりもばらつきが大きい。

第25~26図は、東北地方太平洋沖地震前の2008年1月~2011年1月の期間の変動を定常変動 と仮定し、それからの変動の差を非定常変動として示した図である.水平成分及び上下成分のそれ ぞれについて、最近の約1年間の図と3か月ごとの図を示す.特段の変動は見られない.

第 27 図は,東海地方の GNSS 連続観測点の非定常地殻変動の 3 成分時系列である.東北地方太 平洋沖地震の余効変動の影響は小さくなってきている.(7)の榛原観測点で 2016 年 6 月頃から上下 成分に変化が見られていたが,2017 年 2 月 4 日に周辺樹木の伐採を行った後は元に戻っている.

[静岡県浜松市~御前崎~静岡市間の上下変動 水準測量]

第28図は,東海地方で1年に1回行っている水準測量の結果である.浜松市舞阪検潮所から国 道一号線沿いに御前崎市を通り,静岡市交70-1に達する路線の結果である.最新の結果では,御 前崎市付近で沈降が見られる.

御前崎 電子基準点の上下変動 水準測量と GNSS 連続観測 従来の傾向に変化は見られない.



第1図 御前崎 電子基準点の上下変動(水準測量と GNSS)

Fig. 1 Vertical displacements of GEONET stations in the Omaezaki region (leveling and GNSS measurements).

御前崎 高精度比高観測点の上下変動 水準測量と GNSS 連続観測





第2図 御前崎地域の高精度比高観測点の上下変動(水準測量とGNSS)

Fig. 2 Vertical displacements of high precision vertical observation sites in the Omaezaki region (leveling and high precision vertical GNSS measurements).



御前崎 高精度比高観測時系列 (GNSS)





●----[HTI:最終解] ●----[HTR:速報解]

第3図(b)御前崎地域の高精度比高観測GNSS観測結果

Fig. 3(b) Time series of the height changes at precision vertical GNSS measurements sites in the Omaezaki region.

高精度比高観測による比高変化 月平均值·10日間平均值



月平均值

1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022

固定局:98H023

10 日間平均値



固定局:98H023

・ プロット位置は平均を求めた期間の中央.

・ 最新のプロット点は、月平均値は10/01~10/09、10日間平均値は09/30~10/09の平均.
・ 平均に用いたデータ数が少ない場合(月平均:25未満、10日平均:8未満)は白抜き.
・ 月平均値は、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震前後で期間を分けて回帰モデルを作成.
・ ※ 2020年10月1日:98H023(固定局)で周辺樹木伐採.

第4図 御前崎地域の高精度比高観測 GNSS 観測結果(1 か月間及び 10 日間移動平均・時系列)

Results of high precision vertical GNSS measurements in the Omaezaki region (Time series of 1 month and 10 days Fig. 4 running mean).

高精度比高観測点の上下変動 3か月・1か月

傾向の変化は見られない.



固定局:98H025

第5図 御前崎地域の高精度比高観測 GNSS 観測結果(点毎の3か月間及び1か月間の変動量)

Fig. 5 Results of high precision vertical GNSS measurements in the Omaezaki region (Height change every three months and 1 month at each site).

森~掛川~御前崎間の上下変動



第6図 水準測量による森町~掛川市~御前崎市間における上下変動

Fig. 6 Vertical displacements from Mori town to Omaezaki city via Kakegawa city.

水準点2595(御前崎市)の経年変化

掛川市に対して御前崎市の沈降の傾向に変化はない。





Fig. 7 Time series of height change of BM2595 (Omaezaki) as referred to BM140-1 (Kakegawa).



水準点2595(御前崎市)の経年変化 スロースリップイベント期間で分けた回帰モデル

 ・ スロースリップイベントの (1) 開始以前, (2) 進行期, (3) 停止期, (4) 進行期, (5) 停止以降の 5 期間で それぞれ回帰モデルを推定している.

傾き (mm/yr)

-2.57

-8.15

-4.60

-6.12

-4.78

振幅 (mm)

5.37

3.80

1.45

1.74

2.28

位相 (deg)

-79.0

-95.7

-103.6

-70.5

-100.7

標準偏差 (mm)

5.39

3.24

2.53

2.09

1.93

• (1)~ (5)の各期間の1次トレンド+年周を破線で表示している.

期間

1995年10月-2000年7月

2000年10月-2005年7月

2005年10月-2012年10月

2013年1月-2017年3月

2017年4月-2021年6月

No.

期間(1)

期間(2)

期間(3)

期間(4)

期間(5)

期間 (2)~期間 (5)の拡大図																	
.90																	
20	6	2															
30			0														
150					- K	Č.		0									
60							6		e o	~							
.70									0								
80											;;;	Ľ.		3			
90												č		•	×,		
000																	Ť,e
10												15 20	16 20	17 20			

・ 各期間の回帰モデル(1次トレンド+年周)を実線で表示している.

・ 回帰モデルからの残差による標準偏差を破線で示している.

第8図 水準点2595(御前崎市)の経年変化 スロースリップイベント期間で分けた回帰モデル

Fig. 8 A regression model for the period before, during and after the slow slip event.

水準点(140-1・2595)の経年変化

長期的な傾向に変化は見られない.



Fig. 9 Time series of height change from BM 5268 (Mori) to BM140-1 (Kakegawa) and BM2595 (Omaezaki).

204 -

1962年を基準とした掛川~御前崎間の各水準点の経年変化





第10図 水準点140-1(掛川市)を基準とした掛川~御前崎間の各水準点の高さの経年変化

Fig. 10 Time series of height changes of benchmarks between Kakegawa and Omaezaki as referenced to BM140-1 (Kakegawa).



第11図 水準測量による御前崎先端部の上下変動(1)

Fig. 11 Vertical crustal deformation by the precise leveling survey around Omaezaki (1/2).



御前崎地方の上下変動(2)

第12図 水準測量による御前崎先端部の上下変動(2)

Fig. 12 Vertical crustal deformation by the precise leveling survey around Omaezaki (2/2).



御前崎周辺 GNSS連続観測時系列(1) ^{基線図}

点番号	点 名	日付	保守内容	点番号	点名	日付	保守内容
161216	掛川A	2003/02/12	レドーム設置	93092	榛原	2001/03/21	アンテナ交換
		2003/05/12	アンテナ交換			2002/10/07	周辺伐採
		2008/07/25	受信機交換			2003/02/11	レドーム設置
		2010/02/24	レドーム開閉			2003/03/03	アンテナ交換
		2012/11/20	アンテナ更新			2003/09/09	周辺伐採
		2017/01/30	移転(掛川→掛川A)			2012/11/21	アンテナ更新
970819	静岡森2	2003/06/19	アンテナ更新			2014/08/11	周辺伐採
		2008/01/29	レドーム取り外し・再取り付け			2016/04/18	アンテナ交換
		2008/01/29	受信機交換			2017/02/04	周辺伐採
		2012/10/12	アンテナ更新・受信機交換			2018/11/10	周辺伐採
		2020/11/06	受信機交換			2021/02/10	アンテナ更新
93093	大東1	2003/02/10	レドーム設置			2021/02/10	レドーム交換
		2003/03/04	アンテナ交換	93096	袋井	2003/02/15	レドーム設置
		2010/02/24	レドーム開閉			2003/03/03	アンテナ交換
		2012/11/20	アンテナ更新			2003/05/20	アンテナ高変更
		2017/11/09	受信機交換			2003/11/21	レドーム開閉
93094	浜岡1	2003/02/10	レドーム設置			2011/01/12	レドーム開閉
		2003/05/16	アンテナ交換			2012/11/19	アンテナ更新
		2010/02/23	レドーム開閉			2016/03/05	アンテナ交換
		2012/11/22	アンテナ更新			2020/12/16	受信機交換
		2017/11/08	受信機交換	93097	浜北	2003/02/14	レドーム設置
091178	御前崎A	2003/02/11	レドーム設置			2003/02/28	アンテナ交換
		2003/02/28	アンテナ交換			2010/02/25	レドーム開閉
		2010/03/24	移転(御前崎→御前崎A)			2012/11/15	アンテナ更新
		2012/11/28	アンテナ更新			2017/11/15	受信機交換
		2019/10/09	受信機交換			2021/02/18	アンテナ更新
		2020/12/16	受信機交換			2021/02/18	レドーム交換
93091	静岡相良1	2001/03/20	アンテナ交換	93103	三ヶ日	2003/02/15	レドーム設置
		2003/02/12	レドーム設置			2003/05/19	アンテナ交換
		2003/03/07	アンテナ交換			2010/03/04	レドーム開閉
		2008/01/30	受信機交換			2012/11/13	アンテナ更新
		2012/11/22	アンテナ更新			2016/11/23	受信機交換
		2019/11/19	受信機交換				

御前崎周辺の各観測局情報

※2003年3月5日に基準局92110(つくば1)のアンテナおよびレドームの交換を実施し、解析値に補正をしています。

第13図 御前崎周辺 GNSS 連続観測点観測結果(基線図及び保守状況)

Fig. 13 Results of continuous GNSS measurements in the Omaezaki region (baseline map and history of the site maintenance).


御前崎周辺 GNSS連続観測時系列(2)

第 14 図 御前崎周辺 GNSS 連続観測点観測結果(斜距離)(1)

Fig. 14 Results of continuous GNSS measurements in the Omaezaki region (baseline length) (1/2).



御前崎周辺 GNSS連続観測時系列(3)

第 15 図 御前崎周辺 GNSS 連続観測点観測結果(斜距離)(2)

Fig. 15 Results of continuous GNSS measurements in the Omaezaki region (baseline length) (2/2).



御前崎周辺 GNSS連続観測時系列(4)

第 16 図 御前崎周辺 GNSS 連続観測点観測結果(比高)(1)

Fig. 16 Results of continuous GNSS measurements in the Omaezaki region (relative height) (1/2).



御前崎周辺 GNSS連続観測時系列(5)



Fig. 17 Results of continuous GNSS measurements in the Omaezaki region (relative height) (2/2).

駿河湾周辺 GNSS連続観測時系列(1)



基線図

点番号	点 名	日付	保守内容
93081	静岡3	2012/09/04	受信機交換
		2012/11/22	アンテナ更新・受信機交換
		2014/08/11	周辺伐採
		2019/01/25	周辺伐採
93085	西伊豆	2012/12/03	アンテナ更新・受信機交換
990838	南伊豆1A	2012/10/22	アンテナ更新
		2018/01/19	受信機交換
990840	焼津A	2012/11/29	アンテナ更新・受信機交換
		2014/06/04	周辺伐採
		2015/06/04	アンテナ交換
		2019/11/19	受信機交換
960620	賀茂	2012/10/22	アンテナ更新・受信機交換
		2019/10/24	受信機交換
		2020/11/14	アンテナ更新・レドーム交換
091178	御前崎A	2012/11/28	アンテナ更新・受信機交換
		2019/10/09	受信機交換
		2020/12/16	受信機交換

各観測局情報

第18図 駿河湾周辺 GNSS 連続観測点観測結果(基線図及び保守状況)

Fig. 18 Results of continuous GNSS measurements around the Suruga Bay (Baseline map and history of the site maintenance).

駿河湾周辺 GNSS連続観測時系列(2)



第 19 図 駿河湾周辺 GNSS 連続観測点観測結果(斜距離)(1)

Fig. 19 Results of continuous GNSS measurements around the Suruga Bay (baseline length)(1/2).

駿河湾周辺 GNSS連続観測時系列(3)



第 20 図 駿河湾周辺 GNSS 連続観測点観測結果(斜距離)(2)

Fig. 20 Results of continuous GNSS measurements around the Suruga Bay (baseline length) (2/2).

駿河湾周辺 GNSS連続観測時系列(4)



第 21 図 駿河湾周辺 GNSS 連続観測点観測結果(比高)(1)

Fig. 21 Results of continuous GNSS measurements around the Suruga Bay (relative height) (1/2).

駿河湾周辺 GNSS連続観測時系列(5)



第 22 図 駿河湾周辺 GNSS 連続観測点観測結果(比高)(2)

Fig. 22 Results of continuous GNSS measurements around the Suruga Bay (relative height) (2/2).



第23 図 GNSS 観測による東海地方の最近1年間の水平変動及びスロースリップ開始前・進行期・終息後の 水平変動速度(白鳥固定)

Fig. 23 Horizontal deformation of recent 1 year in the Tokai region based on GNSS measurements and horizontal deformation rates before (middle left), during (lower) and after (middle right) the Tokai slow slip (fixed Shirotori).



第24図 GNSS 観測による東海地方の最近1年間の水平変動及びスロースリップ開始前・進行期・終息後の 上下変動速度(白鳥固定)

Fig. 24 Vertical deformation of recent 1 year in the Tokai region based on GNSS measurements and vertical deformation rates before (middle left), during (lower) and after (middle right) the Tokai slow slip (fixed Shirotori).



・GEONET による日々の座標値(F5 解、R5 解)を使用している。 ・非定常地殻変動時系列のうち、各日付 土 6 日の計 13 日間の変動量の中央値をとり、その差から1 年間と3 か月間の変動量を表示して ※非定常地殻変動時系列:

2008 年 1 月から 2011 年 1 月のデータから平均変動速度、年周/半年周成分を推定して、元の時系列データから除去した時系列。

第25図 GNSS 観測による東海地方の最近1年間と3か月ごとの非定常地殻変動(水平変動)

Fig. 25 Transient horizontal deformation of recent 1 year and every 3 months in the Tokai region.

いる。



・非定常地殻変動時系列のうち、各日付 ± 6日の計 13 日間の変動量の中央値をとり、その差から1年間と3か月間の変動量を表示している。 ※非定常地殻変動時系列:

2008 年1月から 2011 年1月のデータから平均変動速度、年周/半年周成分を推定して、元の時系列データから除去した時系列。

第26図 GNSS 観測による東海地方の最近1年間と3か月ごとの非定常地殻変動(上下変動)

Fig. 26 Transient vertical deformation of recent 1 year and every 3 months in the Tokai region.



第 27 図 東海地方の非定常地殻変動時系列

Fig. 27 Time series of transient deformation at selected stations in the Tokai region.



第28図 浜松市~御前崎市~静岡市間の上下変動

Fig. 28 Vertical displacements from Hamamatsu city to Shizuoka city via Omaezaki city.

6-2 東海・南関東地域におけるひずみ観測結果(2021 年 5 月~ 10 月) Observation of Crustal Strain by Borehole Strainmeters in the Tokai and Southern Kanto Districts (May – October 2021)

気象庁 Japan Meteorological Agency 気象研究所 Meteorological Research Institute, JMA

東海から南関東地域における埋込式体積ひずみ計¹⁾,多成分ひずみ計²⁾の配置と区域分けを第1 図に示す.体積ひずみ(多成分ひずみ計は面積ひずみへの換算値)の2014年以降の変化を第2図に, 2021年5月から10月までの変化を第3図に示す.多成分ひずみ計の同期間の変化を第4図に示す. 主ひずみの方向と大きさ,最大せん断ひずみ及び面積ひずみは,広域ひずみに換算している³⁾.

2021年4月30日から5月4日にかけて,愛知県で発生したと考えられる短期的ゆっくりすべり に伴う変化が,蒲郡清田,浜松佐久間,売木岩倉,新城浅谷,田原高松で観測された.(第3図(a), 第4図(c),(h),(i),(j)の*1)(本巻※参照).

2020 年 5 月 9 日から 14 日にかけて,三重県で発生したと考えられる短期的ゆっくりすべりに伴う変化が,田原高松で観測された.(第 3 図 (a),第 4 図 (j)の*2)(本巻※参照).

2021 年 5 月 22 日から 23 日にかけて,長野県で発生したと考えられる短期的ゆっくりすべりに 伴う変化が,浜松春野,浜松佐久間,売木岩倉で観測された.(第 3 図 (a),第 4 図 (b), (c), (h)の *3)(本巻※参照).

2021 年 9 月 16 日から 17 日にかけて,愛知県で発生したと考えられる短期的ゆっくりすべりに 伴う変化が,浜松佐久間,売木岩倉,新城浅谷で観測された.(第 3 図 (a),第 4 図 (c), (h), (i)の *4)(本巻※参照).

2021 年 9 月 21 日から 22 日にかけて,愛知県で発生したと考えられる短期的ゆっくりすべりに 伴う変化が,浜松佐久間,売木岩倉,新城浅谷で観測された.(第 3 図 (a),第 4 図 (c), (h), (i)の *5)(本巻※参照).

大島津倍付では、火山活動に伴う地殻変動が観測されている(第2図(b),第3図(c)).

また,東伊豆奈良本と大島津倍付では,地中温度の上昇を主因とする見かけ上の縮みトレンドが 続いている(第2図(b))⁴⁵.

この他,各図に記述したように,降水による影響と見られる変化,季節要因による変化,地点特 有の局所的変化などが見られた.

※:「南海トラフ周辺の地殻活動(2021年5月~10月)」(気象庁)

参考文献

1) 二瓶信一・上垣内修・佐藤 馨:埋込式体積歪計による観測, 1976年~1986年の観測経過, *験震時報*, **50**, 65-88 (1987).

- 2) 石井紘ほか:新しい小型多成分ボアホール歪計の開発と観測,地球惑星科学関連学会 1992 年合同大会予稿集, C22-03 (1992).
- 3) 上垣内修ほか:気象庁石井式歪計の応答特性解析, 1999 年度日本地震学会秋季大会予稿集, B72 (1999).
- 4) 気象庁:東海·南関東地域における歪観測結果 (2006 年 5 月~ 2006 年 10 月), 連絡会報, 77 (2006).
- 5) 気象庁:東海·南関東地域における歪観測結果 (2006 年 11 月~2007 年 4 月), 連絡会報, 78 (2007).



第1図 観測点の配置図 ●:体積ひずみ計,▲:多成分ひずみ計(気象庁),△:同(静岡県)

Fig. 1 Observation points (borehole strainmeters).

226



第2図(a),(b) 2014年1月以後の東海・伊豆・南関東地域における区域別体積ひずみ(V)及び面積ひずみ(S)の変化(日平均値).各図下部に区域を代表する 気圧変化と降水量を示す.

Fig. 2(a), (b) Changes in crustal volume strain (V) and area strain (S) for Tokai, Izu and Southern Kanto Districts shown in Fig.1 since January 2014 (daily mean values).



- 第3図(a),(b) 2021年5月~10月の東海・伊豆・南関東地域における区域別体積ひずみ(V)及び面積ひずみ(S)の変化(時間値:気圧・潮汐・降水補正した値). 各図下部に区域を代表する気圧変化と降水量を示す.地点名の下のD strain/day及び/M はそれぞれ1日あたりのトレンド変化量をDとして補正していること及び縮尺を1/M 倍にして表示していることを示している.ゆっくりすべりが発生している期間を表示するため,4月21日から表示している.
- Fig. 3(a), (b) Changes in crustal volume strain (V) and area strain (S) for Tokai, Izu and Southern Kanto Districts shown in Fig.1 from May to October 2021 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects and rain effects are corrected). "D strain/day" and "/M" below station names indicate the amount of trend correction and the magnification factor (1/M), respectively. The start date of the figure is set to April 21 to include the period of slow slip event.



- 第3図(c),(d) 2021年5月~10月の東海・伊豆・南関東地域における区域別体積ひずみ(V)及び面積ひずみ(S)の変化(時間値:気圧・潮汐・降水補正した値). 各図下部に区域を代表する気圧変化と降水量を示す.地点名の下のD strain/day及び/M はそれぞれ1日あたりのトレンド変化量をDとして補正していること及び縮尺を1/M 倍にして表示していることを示している.ゆっくりすべりが発生している期間を表示するため、4月21日から表示している.
- Fig. 3(c), (d) Changes in crustal volume strain (V) and area strain (S) for Tokai, Izu and Southern Kanto Districts shown in Fig.1 from May to October 2021 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects and rain effects are corrected). "D strain/day" and "/M" below station names indicate the amount of trend correction and the magnification factor (1/M), respectively. The start date of the figure is set to April 21 to include the period of slow slip event.



- 第4図(a) 左:2014年1月以後の多成分ひずみ計変化(日平均値). 主ひずみ・最大せん断ひずみ・面積ひずみは各方向成分から計算されている. 右:2021年5月~10月の多成分ひずみ計変化(時間値:気圧・潮汐・地磁気・降水補正した値). 各図下部に気圧変化と降水量を示す. ゆっくりすべりが発生している期間を表示するため,4月21日から表示している.
- Fig. 4(a) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2014 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes from May to October 2021 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters. The start date of the figure is set to April 21 to include the period of slow slip event.



- 第4図(b) 左:2014年1月以後の多成分ひずみ計変化(日平均値). 主ひずみ・最大せん断ひずみ・面積ひずみは各方向成分から計算されている. 右:2021年5月~10月の多成分ひずみ計変化(時間値:気圧・潮汐・地磁気・降水補正した値). 各図下部に気圧変化と降水量を示す. ゆっくりすべり が発生している期間を表示するため,4月21日から表示している.
- Fig. 4(b) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2014 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component. (Right) Strain changes from May to October 2021 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are

(Right) Strain changes from May to October 2021 (nourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects ar corrected) observed by multi-component borehole strainmeters. The start date of the figure is set to April 21 to include the period of slow slip event.



第4図(c) 左:2014年1月以後の多成分ひずみ計変化(日平均値).主ひずみ・最大せん断ひずみ・面積ひずみは各方向成分から計算されている. 右:2021年5月~10月の多成分ひずみ計変化(時間値:気圧・潮汐・地磁気・降水補正した値).各図下部に気圧変化と降水量を示す.ゆっくりすべりが発生している期間を表示するため,4月21日から表示している.





- 第4図(d) 左:2014年1月以後の多成分ひずみ計変化(日平均値). 主ひずみ・最大せん断ひずみ・面積ひずみは各方向成分から計算されている. 右:2021年5月~10月の多成分ひずみ計変化(時間値:気圧・潮汐・地磁気・降水補正した値). 各図下部に気圧変化と降水量を示す. ゆっくりすべり が発生している期間を表示するため,4月21日から表示している.
- Fig. 4(d) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2014 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes from May to October 2021 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters. The start date of the figure is set to April 21 to include the period of slow slip event.



- 第4図(e) 左:2014年1月以後の多成分ひずみ計変化(日平均値).主ひずみ・最大せん断ひずみ・面積ひずみは各方向成分から計算されている. 右:2021年5月~10月の多成分ひずみ計変化(時間値:気圧・潮汐・地磁気・降水補正した値).各図下部に気圧変化と降水量を示す.ゆっくりすべり が発生している期間を表示するため,4月21日から表示している.
- Fig. 4(e) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2014 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component. (Right) Strain changes from May to October 2021 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters. The start date of the figure is set to April 21 to include the period of slow slip event.



第4図(f) 左: 2014年1月以後の多成分ひずみ計変化(日平均値). 主ひずみ・最大せん断ひずみ・面積ひずみは各方向成分から計算されている.
 右: 2021年5月~10月の多成分ひずみ計変化(時間値:気圧・潮汐・地磁気・降水補正した値). 各図下部に気圧変化と降水量を示す. ゆっくりすべりが発生している期間を表示するため,4月21日から表示している.





- 第4図(g) 左:2014年1月以後の多成分ひずみ計変化(日平均値).主ひずみ・最大せん断ひずみ・面積ひずみは各方向成分から計算されている. 右:2021年5月~10月の多成分ひずみ計変化(時間値:気圧・潮汐・地磁気・降水補正した値).各図下部に気圧変化と降水量を示す.ゆっくりすべり が発生している期間を表示するため,4月21日から表示している.
- Fig. 4(g) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2014 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes from May to October 2021 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters. The start date of the figure is set to April 21 to include the period of slow slip event.



- 第4図(h) 左: 2014年1月以後の多成分ひずみ計変化(日平均値). 主ひずみ・最大せん断ひずみ・面積ひずみは各方向成分から計算されている.
 右: 2021年5月~10月の多成分ひずみ計変化(時間値:気圧・潮汐・地磁気・降水補正した値). 各図下部に気圧変化と降水量を示す. ゆっくりすべりが発生している期間を表示するため,4月21日から表示している.
- Fig. 4(h) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2014 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes from May to October 2021 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters. The start date of the figure is set to April 21 to include the period of slow slip event.



- 第4図(i) 左:2014年1月以後の多成分ひずみ計変化(日平均値). 主ひずみ・最大せん断ひずみ・面積ひずみは各方向成分から計算されている. 右:2021年5月~10月の多成分ひずみ計変化(時間値:気圧・潮汐・地磁気・降水補正した値). 各図下部に気圧変化と降水量を示す. ゆっくりすべり が発生している期間を表示するため,4月21日から表示している.
- Fig. 4(i) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2014 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component. (Right) Strain changes from May to October 2021 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters. The start date of the figure is set to April 21 to include the period of slow slip event.



- 第4図(j) 左:2014年1月以後の多成分ひずみ計変化(日平均値). 主ひずみ・最大せん断ひずみ・面積ひずみは各方向成分から計算されている. 右:2021年5月~10月の多成分ひずみ計変化(時間値:気圧・潮汐・地磁気・降水補正した値). 各図下部に気圧変化と降水量を示す. ゆっくりすべり が発生している期間を表示するため,4月21日から表示している.
- Fig. 4(j) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2014 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes from May to October 2021 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters. The start date of the figure is set to April 21 to include the period of slow slip event.

6-3 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Short-term slow slip events in the Tokai area, the Kii Peninsula and the Shikoku District, Japan (from May 2021 to October 2021)

產業技術総合研究所 Geological Survey of Japan, AIST 防災科学技術研究所 National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

歪・傾斜・地下水位の変化から短期的 SSE の断層モデルを推定したイベントについて,その解 析結果を報告する.

2021年05月10日から15日にかけて,三重県において深部低周波地震活動が観測された(第1 図).第2-4図は三重県・滋賀県・奈良県・愛知県の産総研・気象庁・防災科研の観測点における 歪・傾斜・地下水の観測結果である.歪・傾斜の結果はBAYTAP-Gにより気圧応答成分,潮汐成 分およびホワイトノイズ成分を取り除き,また地下水の結果は時系列解析プログラム MR-AR によ り気圧応答成分・潮汐成分・降雨応答成分を取り除き,2021年05月05日から05月09日午前のデー タを用いて1次トレンドを除去したものである.

第 5-7 図は第 2-4 図 [A], [B], [C] の変化を説明する短期的 SSE の推定結果(順に Mw 5.8, 5.6, 5.5) である。今回の活動域付近における最近の短期的 SSE の活動は、2020 年 11 月 01 日 (Mw 5.6 : 第 2-4 図の灰色矩形 1), 2020 年 11 月 02 日から 04 日午前 (Mw 5.7 : 同 2), 2021 年 02 月 18 日午後から 21 日午前 (Mw 5.7 : 同 3), 2021 年 02 月 23 日午後から 28 日午前 (Mw 5.6 : 同 4), 2021 年 04 月 29 日午後 -05 年 02 日 (Mw 5.7 : 同 5), 2021 年 04 月 30 日午後から 05 月 04 日 (Mw 5.8 : 同 6) である.

2021年05月21日から05月27日にかけて、愛媛県・徳島県において深部低周波地震活動が観測された(第8図).第9図は愛媛県・徳島県・香川県・高知県の産総研・防災科研の観測点における歪・傾斜の観測結果である.これらの結果はBAYTAP-Gにより気圧応答成分、潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除き、2021年05月13日から20日午前のデータを用いて1次トレンドを除去したものである.

第10図は第9図 [A]の変化を説明する短期的 SSE の推定結果(Mw 5.6)である.今回の活動域 付近における最近の短期的 SSE の活動は,2020年07月31日午後から08月03日(東)(Mw 5.6: 第10図の灰色矩形1),2021年10月22日午後から23日(Mw 5.8:同2),2021年04月09日から 11日午前(Mw 5.6:同3)である.

2021 年 07 月 18 日から 08 月 01 日にかけて,愛媛県において深部低周波地震活動が観測された (第 11 図).第 12,13 図は愛媛県・滋賀県・高知県・徳島県の産総研・防災科研の観測点における歪・ 傾斜の観測結果である.歪・傾斜の結果は BAYTAP-G により気圧応答成分,潮汐成分およびホワ イトノイズ成分を取り除き,2021 年 07 月 11 日から 17 日のデータを用いて 1 次トレンドを除去し たものである. 第 14-18 図は第 12, 13 図 [A], [B], [C], [D], [E] の変化を説明する短期的 SSE の推定結果(順に Mw 5.6, 5.6, 6.1, 5.5, 5.9) である.今回の活動域付近における最近の短期的 SSE の活動は,2020 年 07 月 31 日午後から 08 年 03 日 (東) (Mw 5.6 : 第 14-18 図の灰色矩形 1),2021 年 01 月 19 日から 21 日午前 (Mw 5.7 : 同 2),2021 年 01 月 21 日午後から 23 日 (Mw 5.8 : 同 3),2021 年 01 月 24 日から 28 日午前 (Mw 5.6 : 同 4),2021 年 03 月 23 日 -24 日 (Mw 5.7 : 同 5),2021 年 04 月 09 日から 11 日午前 (Mw 5.6 : 同 6),2021 年 05 月 20 日午後から 22 日 (Mw 5.6 : 同 7) である.

2021 年 07 月 20 日から 07 月 24 日にかけて,奈良県・和歌山県において深部低周波地震活動が 観測された(第 19 図).第 20 図は奈良県・和歌山県の産総研の観測点における歪の観測結果である. これらの結果は BAYTAP-G により気圧応答成分,潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除き, 2021 年 07 月 13 日から 20 日午前のデータを用いて 1 次トレンドを除去したものである.

第 21,22 図は第 20 図 [A], [B] の変化を説明する短期的 SSE の推定結果(順に Mw 5.6, 5.5)である. 今回の活動域付近における最近の短期的 SSE の活動は,2021 年 02 月 23 日午後から 26 日午前 (Mw 5.8:第 21,22 図の灰色矩形 1),2021 年 03 月 16 日午後から 17 日午前 (Mw 5.4:同 2),2021 年 04 月 29 日午後から 05 月 02 日 (Mw 5.7:同 3)である.

2021 年 09 月 16 日から 22 日にかけて,愛知県において深部低周波地震活動が観測された(第 23 図).第 24,25 図は愛知県・静岡県・長野県・三重県の産総研・気象庁・静岡県・防災科研の観測 点における歪・傾斜の観測結果である.歪・傾斜の結果は BAYTAP-G により気圧応答成分,潮汐 成分およびホワイトノイズ成分を取り除き,2021 年 09 月 01 日から 07 日のデータを用いて 1 次ト レンドを除去したものである.

第26図は第24,25図 [A]の変化を説明する短期的SSEの推定結果(Mw 5.4)である.今回の活動域付近における最近の短期的SSEの活動は、2021年05月09日午後から17日(Mw 5.8,5.6,5.5:第26図の灰色矩形1,2,3)、2021年04月30日から05月04日(Mw 5.8:同4)、2021年02月18日 午後から28日午前(Mw 5.7,5.6:同5,6)、2020年09月04日(Mw 5.6:同7)である.

解析方法

短期的 SSE の断層面推定には,各観測点の水平歪 4 成分,体積歪,地下水圧,もしくは傾 斜 2 成分の記録を用いる.地下水圧は,O1 および M2 分潮の振幅を BAYTAP-G¹⁾により計算し, GOTIC2²⁾により推定した地球固体潮汐および海洋荷重潮汐(O1 および M2 分潮)との振幅比を用 いて,体積歪に変換する.歪・地下水・傾斜ともに,観測波形から BAYTAP-G により,気圧応答 成分,潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除く.また,イベント直前の期間を用いて1次ト レンドも取り除く.微動活動も参考にして,数時間~半日単位で活動開始・終了時期を判断し,そ の期間の変化量を短期的 SSE による変化量とする.その際,歪については理論潮汐歪を用いてキャ リブレーション³⁾を行っている.

断層面の推定は次の2段階で行う⁴⁾. 1段階目では, 断層面の位置(0.1°間隔)とすべり量(1-50 mm)を可変とする. 幅・長さともに 20 km に固定した断層面をフィリピン海プレート境界面⁵上 で動かし,各位置での最適なすべり量を探す. 結果を示す図には,それぞれの位置で残差を最小に するすべり量を与えたときの,観測値とそのすべり量による計算値⁶⁰との残差の総和の分布を示し ている. これにより,短期的 SSE が生じている可能性が高い領域を絞り込むとともに,次の2段

階目で推定された結果の任意性を確認することができる.2段階目では、1段階目で絞り込んだ領域付近で、断層面の位置(0.1°間隔)・すべり量(1-50 mm)・長さ(10-80 kmの間で1 km間隔) および幅(10-50 kmの間で1 km間隔)を可変として残差を最小にする解を求める.ただし、計算 に使用している観測点数が少ない場合や、断層面と観測点配置の関係によっては解の任意性が高く なるので注意が必要である.

なお,残差はノイズレベルによって規格化している.これは異種の観測値を統合するための処置 である.ノイズレベルの定義は,気圧応答,潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除いた後(微 動活動が活発な期間および周辺の日雨量 50 mm を超える時期を除く)の 24 時間階差の 2 σである. 深部低周波微動の検出・震源決定には,エンベロープ相関法を用いている.

> (矢部優・落唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・木口努・木村尚紀・木村武志・ 松澤孝紀・汐見勝彦)

謝辞

短期的 SSE の断層モデル推定には、気象庁、静岡県の多成分歪計および体積歪計の記録を使用 しました.気象庁の歪計データを解析する際には、気象庁によるキャリブレーション係数を使用し ました.微動の解析には、気象庁、東京大学、京都大学、名古屋大学、高知大学、九州大学の地震 波形記録を使用しました.低周波地震の震央位置表示には、気象庁の一元化カタログを使用しまし た.ここに記して感謝します.

参考文献

- 1) Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro (1991), A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe, GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, *J. Geod. Soc. Japan*, 47, 243-248, 2001.
- Matsumoto, N., O. Kamigaichi, Y. Kitagawa, S. Itaba, and N. Koizumi (2010), In-situ Calibration of Borehole Strainmeter Using Green' s Functions for Surface Point Load at a Depth of Deployment, Eos, Trans. AGU, Abstract G11A-0626.
- 4) 板場智史,松本則夫,北川有一,小泉尚嗣,松澤孝紀,歪・傾斜・地下水統合解析による短期的 スロースリップイベントのモニタリング,日本地球惑星連合 2012 年大会,千葉,5月,2012.
- 5) 弘瀬冬樹, 中島淳一, 長谷川昭 (2007), Double-Difference Tomography 法による西南日本の 3 次元 地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, *地震 2*, **60**, 1-20.
- 6) Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.



第1図 紀伊半島から東海地方における深部低周波地震(気象庁一元化カタログによる)の時空間分布 (2021/05/01 ~ 2021/05/25).

Fig. 1 Space-time distribution of deep low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Kii Peninsula and the Tokai region from May 01 to 25, 2021.



第2図 紀伊半島における歪・傾斜・地下水の観測結果と深部低周波地震の検出数(2021/05/01 ~ 2021/05/25). Fig. 2 Observed strain, tilt, and groundwater level data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Kii Peninsula from May 01 to 25, 2021.




Fig. 3 Observed strain and tilt data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Kii Peninsula from May 01 to 25, 2021.



第4図 東海地方における歪・傾斜の観測結果と深部低周波地震の検出数(2021/05/01 ~ 2021/05/25).

Fig. 4 Observed strain and tilt data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Tokai region from May 01 to 25, 2021.

[A] 2021/05/09PM-12



(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布

- 第5図第2-4図[A]を説明する断層モデル、以下の凡例の説明は以降の同様の図に共通、黒・緑・青の丸印はそれぞれ産総研・気象庁および静岡県・防災科研 Hi-netの観測点、緑の小さな丸印は気象庁の推定した低周波地震、(a)1段階目の結果、灰色の濃淡は残差の総和で、赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面の位置(大きさは20x20 km で固定)、(b1)2段階目の結果、赤色矩形が残差の総和が最小となる断層面. 矢印は傾斜の観測値と計算値の比較、灰色矩形は最近周辺で発生した短期的 SSE の推定断層面(番号との対応は本文参照). (b2)主歪の観測値と(b1)に示した断層モデルから求めた計算値との比較. (b3)体積歪の観測値と(b1)に示した断層モデルから求めた計算値との比較.
- Fig. 5 Inferred fault models for Fig. 2-4 [A]. The legends below are applicable for all corresponding figures. The black, green and blue circles show the observation sites of AIST, JMA (or Shizuoka Prefecture) and NIED Hi-net. The green small circles show hypocenters of the low-frequency earthquake (LFE) estimated by JMA. (a) The result of the first step. The length and width of the rectangular fault patch are fixed as 20 km and 20 km, and only the slip amount that minimizes the sum of residuals is estimated on each fault patch. The gray scale shows the distribution of sum of residuals and the red rectangle shows the place of the fault patch with the minimum residual. (b1) The result of the second step. The red rectangle shows the estimated fault model. The observed and calculated tilt changes are also shown on the map by the red and the blue arrows. The gray rectangles show the fault models of the recent events (see main text). (b2) The observed and calculated principal strain changes. (b3) The observed and calculated volumetric strain changes.

[B] 2021/05/13-14AM





第6図 第2-4図[B]を説明する断層モデル. 各図の説明は第5図を参照.

Fig. 6 Inferred fault models for Fig. 2-4 [B]. See also the caption of Fig. 5.

[C] 2021/05/14PM-17

(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



第7図 第2-4図[C]を説明する断層モデル. 各図の説明は第5図を参照.

Fig. 7 Inferred fault models for Fig. 2-4 [C]. See also the caption of Fig. 5.





Fig. 8 Space-time distribution of deep low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Shikoku region from May 13 to 30, 2021.



第9図 四国地方における歪・傾斜の観測結果と深部低周波地震の検出数(2021/05/13 ~ 2021/05/30).

Fig. 9 Observed strain and tilt data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Shikoku region from May 13 to 30, 2021.

[A] 2021/05/20PM-22

(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



第 10 図 第 9 図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照. Fig. 10 Inferred fault models for Fig. 9 [A]. See also the caption of Fig. 5.





Fig. 11 Space-time distribution of deep low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Shikoku region from July 11 to August 04, 2021.









Fig. 13 Observed strain and tilt data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the western Shikoku region from July 11 to August 04, 2021.

[A] 2021/07/18-19AM



(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布

第 14 図 第 12,13 図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照. Fig. 14 Inferred fault models for Fig. 12, 13 [A]. See also the caption of Fig. 5.

[B] 2021/07/19PM-21AM



(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布

第15図第12,13図[B]を説明する断層モデル. 各図の説明は第5図を参照. Fig. 15 Inferred fault models for Fig. 12, 13 [B]. See also the caption of Fig. 5.

[C] 2021/07/21PM-27



第 16 図 第 12,13 図 [C] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照. Fig. 16 Inferred fault models for Fig. 12, 13 [C]. See also the caption of Fig. 5.

[D] 2021/07/28



第 17 図 第 12,13 図 [D] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照. Fig. 17 Inferred fault models for Fig. 12, 13 [D]. See also the caption of Fig. 5.

[E] 2021/07/29-08/01AM



第 18 図 第 12,13 図 [E] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照. Fig. 18 Inferred fault models for Fig. 12, 13 [E]. See also the caption of Fig. 5.



第19図 紀伊半島における深部低周波地震(気象庁一元化カタログによる)の時空間分布(2021/07/13~2021/08/01).

Fig. 19 Space-time distribution of deep low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Kii Peninsula from July 13 to August 01, 2021.



第20図 紀伊半島における歪の観測結果と深部低周波地震の検出数(2021/07/13~2021/08/01).

Fig. 20 Observed strain data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Kii Peninsula from July 13 to August 01, 2021.



[A] 2021/07/20PM-22AM





[B] 2021/07/22PM-24AM





第23図 東海地方における深部低周波地震(気象庁一元化カタログによる)の時空間分布(2021/09/01 ~ 2021/09/26).

Fig. 23 Space-time distribution of deep low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Tokai region from September 01 to 26, 2021.



第24図 東海地方における歪の観測結果と深部低周波地震の検出数(2021/09/01~2021/09/26).

Fig. 24 Observed strain data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Tokai region from September 01 to 26, 2021.



第25図 東海地方における歪・傾斜の観測結果と深部低周波地震の検出数(2021/09/01 ~ 2021/09/26).

Fig. 25 Observed strain and tilt data and detected number of deep low-frequency earthquakes in the Tokai region from September 01 to 26, 2021.

[A] 2021/09/21-22

(a) 断層の大きさを固定した場合の断層モデルと残差分布



第 26 図 第 24, 25 図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 5 図を参照. Fig. 26 Inferred fault models for Fig. 24, 25 [A]. See also the caption of Fig. 5.

6-4 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果 (2021年5月~2021年10月)(64) The Variation of the Groundwater Level, Discharge Rate, Tilt meter, Three-Component Strain, and Subsidence in the Tokai, Kanto District and Izu Peninsula, Japan. (from May 2021 to Oct. 2021) (64)

產業技術総合研究所 Geological Survey of Japan, AIST

2021年5月~2021年10月の半年間の東海・関東・伊豆地域の地下水等の観測結果を報告する. 本報告では,観測井配置図(第1図)の図中の枠で示す4地域および第2図に示す地域に分けて表 示する.6ヶ月間のデータを3ヶ月毎に示すとともに2年間の観測データを参考として示す(第3 ~20図).また,浜岡・掛川における沈下等の観測結果(第21,22図)についても示す.なお図 中の印で, \$は保守を,*は雨量補正不十分を,@は解析による見かけ上のギャップを,#はバッ テリー消耗を,?は原因不明をそれぞれ表す.

- 東海地域中部:静岡栗原1の水位上が2015年4月中旬に井戸管の広い部分まで上昇したのでそ れ以降の水位変化が小さくなっている.
- 東海地域南部:御前崎のガス流量システムを2017年2月16日に更新した.2020年10月30日 ~11月6日の御前崎の水位の異常はガス流量計の故障が原因と思われる.
- 東海地域西部:特記すべき変化はない.
- 伊豆半島東部地域:特記すべき変化はない.

関東地域:つくば 2,3,4 の水位が例年春から秋に低下するのは、周囲の揚水によると考えられる.

これらのデータは WellWeb (http://www.gsj.jp/wellweb) にて公開している.

(木口 努・松本則夫・北川有一・板場智史・落 唯史・佐藤 努・矢部 優)





第1図 伊豆・東海地域の産業技術総合研究所地下水 等観測井の配置図

Fig. 1 Location of the groundwater observation wells in and around the Tokai and Izu district.



Fig. 2 Location of the groundwater observation wells in the Kanto district.



第3図 東海地域中部の地下水等の観測結果 (2021 年 5月~2021 年 7月)

Fig. 3 Observed groundwater levels and others in the central Tokai district from May 2021 to Jul. 2021.



第4図 東海地域中部の地下水等の観測結果 (2021 年 8月~2021 年 10月)

Fig. 4 Observed groundwater levels and others in the central Tokai district from Aug. 2021 to Oct. 2021.



第5図 東海地域南部の地下水等の観測結果 (2021 年 5月~2021 年 7月)

Fig. 5 Observed groundwater levels and others in the southern Tokai district from May 2021 to Jul. 2021.



第7図 東海地域西部(豊橋・豊橋多米)の地下水等 の観測結果(2021年5月~2021年7月)

Fig. 7 Observed groundwater levels and others at the Toyohashi and Toyohashi-tame observation sites in the western Tokai district from May 2021 to Jul. 2021.



第6図 東海地域南部の地下水等の観測結果 (2021 年 8月~2021 年 10月)

Fig. 6 Observed groundwater levels and others in the southern Tokai district from Aug. 2021 to Oct. 2021.



第8図 東海地域西部 (豊橋・豊橋多米)の地下水等 の観測結果 (2021 年 8 月~2021 年 10 月)

Fig. 8 Observed groundwater levels and others at the Toyohashi and Toyohashi-tame observation sites in the western Tokai district from Aug. 2021 to Oct. 2021.



第9図 東海地域西部(豊橋多米)の歪等の観測結果 (2021年5月~2021年7月)

Fig. 9 Observed strain and others at the Toyohashi-tame observation site in the western Tokai district from May 2021 to Jul. 2021.



第10図 東海地域西部(豊橋多米)の歪等の観測結果 (2021年8月~2021年10月)

Fig. 10 Observed strain and others at the Toyohashi-tame observation site in the western Tokai district from Aug. 2021 to Oct. 2021.





第11図 伊豆半島東部の地下水等の観測結果 (2021年 5月~2021年7月)

May 2021 to Jul. 2021.

Fig. 11

5月~2021年7月)8月~2021年Observed groundwater levels and others in the
eastern Izu peninsula district fromFig. 12Observed ground
eastern Izu peninsula district fromObserved ground
eastern Izu peninsula

第12図 伊豆半島東部の地下水等の観測結果 (2021年 8月~2021年10月)

Fig. 12 Observed groundwater levels and others in the eastern Izu peninsula district from Aug. 2021 to Oct. 2021.



第13図 関東地域の地下水等の観測結果 (2021 年 5 月 ~ 2021 年 7 月)

Fig. 13 Observed groundwater levels and others in the Kanto district from May 2021 to Jul. 2021.



Fig. 14 Observed groundwater levels and others in the Kanto district from Aug. 2021 to Oct. 2021.



第15図 東海地域中部の地下水等の観測結果 (2019年 11月~2021年10月)

Fig. 15 Observed groundwater levels and others in the central Tokai district from Nov. 2019 to Oct. 2021.



第16図 東海地域南部の地下水等の観測結果 (2019年 11月~2021年10月)

Fig. 16 Observed groundwater levels and others in the southern Tokai district from Nov. 2019 to Oct. 2021.



第17図 東海地域西部 (豊橋・豊橋多米)の地下水等 の観測結果 (2019年11月~2021年10月)

Observed groundwater levels and others at the Fig. 17 Toyohashi and Toyohashi-tame observation sites in the western Tokai district from Nov. 2019 to Oct. 2021.



- 第18図 東海地域西部 (豊橋多米)の 歪等の 観測結果 (2019年11月~2021年10月)
- Observed strain and others at the Toyohashi-tame Fig. 18 observation site in the western Tokai district from Nov. 2019 to Oct. 2021.



伊豆半島東部の地下水等の観測結果(2019年 第19図 11月~2021年10月)

Observed groundwater levels and others in the Fig. 19 eastern Izu peninsula from Nov. 2019 to Oct. 2021.



第20図 関東地域の地下水等の観測結果 (2019年11 月~2021年10月)

Observed groundwater levels and others in the Fig. 20 Kanto district from Nov. 2019 to Oct. 2021.



第21図 浜岡における沈下等の観測結果 (2019年11 月~2021年10月)

Fig. 21 Observed subsidence data and others at the Hamaoka observation well from Nov. 2019 to Oct. 2021.



- 第 22 図 掛川における沈下等の観測結果 (2019 年 11 月~2021 年 10 月)
- Fig. 22 Observed subsidence data and others at the Kakegawa observation well from Nov. 2019 to Oct. 2021.

7-1 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月) Observation of Tectonic Activities around the Active Faults in Eastern Gifu Region (May, 2021 ~ October, 2021)

産業技術総合研究所 Geological Survey of Japan, AIST

1. 観測概要

産業技術総合研究所は跡津川断層沿いの宮川において地殻活動総合観測設備を設置している(第 1図). 宮川は深度約300mの坑井を掘削し, 坑底に3成分ひずみ計・高感度地震計(1Hz, 3成分速度計) を設置. 深度 256.78 ~ 267.66mの滞水層での地下水位の計測も行なっている.

2. 観測結果概要

宮川(第2図,第3図):水位, 歪計は潮汐変化を書く. 降雨の影響が大きい. 2021年7月29 日アリューシャン列島の地震 Mw8.2,8月13日サウスサンドウィッチ諸島の地震 Mw8.3,9月29 日日本海中部の地震 Mw6.2及び10月7日千葉県北西部の地震 Mw6.0では地下水位の変化は見ら れない. 歪計は2021年6月22日以降,故障により欠測.



(木口努・今西和俊・松本則夫)

第1図 跡津川断層沿いの宮川における地殻活動総合観測点位置

Fig. 1 Location map of the observation borehole at Miyagawa along the Atotsugawa fault.











Fig. 3 Results of strain meters at Miyagawa (for 2 years).

7-2 北陸・中部地方の地殻変動 Crustal Deformations in the Hokuriku and Chubu Districts

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

《2021年9月16日に発生した石川県能登地方の地震》

[GNSS 連続観測時系列]

第1図は、2021年9月16日に発生した石川県能登地方の地震の地殻変動に関する資料である.

第1図上段は, GNSS 連続観測基線図である.固定局は舳倉島観測点(石川県)である.下段は, 震源近傍の2観測点の3成分時系列グラフである.この地震に伴う顕著な地殻変動は見られない.

《2020年12月以降の石川県能登地方の地震活動》

[地殻変動ベクトルと GNSS 連続観測時系列]

第2~6図は、石川県能登地方で2020年12月頃から見られる地殻変動に関する資料である。12 月から能登地方で地震活動が活発になっており、最大の地震は9月16日のM5.1の地震である。 この活発な地震活動とほぼ同期して能登半島で地殻変動が観測された。

第2図は、一次トレンド除去後の非定常地殻変動ベクトル図である.2019年9月1日~2020年 8月31日の期間を定常変動とし、一次トレンドを推定した。固定局は舳倉島観測点である.2020 年11月1日~11月7日に対する2021年10月17日~10月23日の約12か月の期間での非定常的 な地殻変動を表し、上段が水平成分、下段が上下成分を示す.能都観測点で南南西方向に約1 cm、 珠洲観測点で2cmを超える隆起等,能登半島で変動が見られる.

第3図は,第2図の図中に示した4観測点の非定常地殻変動3成分の時系列グラフである.同様 に一次トレンドを除去している.2020年12月頃から変動がゆっくりと進行している.

第4図下段は、上段図中の6基線の斜距離の非定常変動成分を示す.非定常地殻変動は2020年 12月以降一様ではなく、基線によっても異なる傾向をもって続いている.

第5図は、図中に緑色の基線で構成される2つの三角形領域について、期間全体を2等分し、上 段に前半、下段に後半の期間におけるひずみ変化を示す図である.これらの活動以前の状況とは異 なり、内陸にある領域では、いずれの期間とも伸びの傾向が続いている.

第6図は,第5図と同じ2つの三角形領域について,2020年11月1日~11月10日を基準期間 とした,ひずみ変化の時系列グラフである.2020年12月以降,内陸にある領域では面積ひずみの 増加傾向が続いている.

[「だいち2号」による SAR 干渉解析結果]

第7図は,「だいち2号」(ALOS-2) PALSAR-2 データの干渉解析結果に関する資料である. ノ イズレベルを超える変動は見られない.

[非定常地殻変動のモデル推定]

第8~9図は、観測された地殻変動データを元に、モデルを推定した結果である.変動が検

出された観測点の密度が低く,分布も偏っているため,モデルを特定することは困難であるが,こ こでは,球状圧力源を仮定した場合(第8図下段),開口割れ目を仮定した場合(第9図上段)及 び逆断層を仮定した場合(第9図下段)の3種類のモデルの推定を試みた.いずれの場合でも,観 測値をある程度説明することはできる.



石川県能登地方の地震(9月16日 M5.1)前後の観測データ <u>この地震に伴う顕著な地殻変動は見られない</u>

基線図

第1図 石川県能登地方の地震(2021年9月16日, M5.1)前後の観測データ:(上図)基線図,(下図)3成分時 系列グラフ

Fig. 1 Results of continuous GNSS measurements before and after the M5.1 earthquake in the Noto region of Ishikawa Prefecture on September 16, 2021: baseline map (upper) and 3 components time series (lower).


石川県能登地方の地震活動時の観測データ(暫定)

第2図 石川県能登地方の非定常的な地殻変動(水平及び上下変動)

Fig. 2 Horizontal(upper) and vertical(lower) transient displacement in the Noto region of Ishikawa Prefecture.

石川県能登地方の地震活動時の観測データ(暫定)

ー次トレンド除去後グラフ

期間: 2019/09/01~2021/10/23 UTC 計算期間: 2019/09/01~2020/09/01





Fig. 3 Time series of transient displacement in the Noto region of Ishikawa Prefecture.



石川県能登地方の地震活動時の観測データ(暫定)

第4図 石川県能登地方の非定常的な地殻変動(基線図及び斜距離)

Fig. 4 Transient displacement in the Noto region of Ishikawa Prefecture: baseline map (upper) and baseline length time series (lower).



石川県能登地方の地震活動時のひずみ変化図

基準期間:2020/11/01~2020/11/10[F5:最終解] 比較期間:2021/03/01~2021/03/10[F5:最終解]

第5図 石川県能登地方のひずみ変化

Fig. 5 Horizontal strain in the Noto region of Ishikawa Prefecture derived from continuous GNSS measurements during November 2020 - March 2021 (upper) and March 2021- July 2021 (lower).



石川県能登地方の地震活動時のひずみ変化グラフ



Fig. 6 Time series of strain changes in two triangular regions (upper map) in the Noto region of Ishikawa Prefecture.



石川県能登地方の地震活動(最大地震 6月 26 日 M4.1) 「だいち 2 号」による SAR 干渉解析結果

ノイズレベルを超える変動は見られません。

観測データは、地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループを通して、JAXA から提供されたものです。

第7図 石川県能登地方の地震(2021年6月26日, M4.1) SAR 干渉解析結果

Fig. 7 Synthetic Aperture Rader (SAR) interferograms. Ascending orbit pairs (upper) and descending orbit pairs (lower).

石川県能登地方の非定常地殻変動のモデルについて

2020 年 12 月頃から石川県能登地方で観測されている非定常地殻変動について、1)球状圧力源、 2)開口割れ目、3)逆断層を仮定したモデル推定を行った。その結果、いずれのメカニズムでも観測 データをある程度説明できることを確認した。



変動ベクトル図。計算期間において一次トレンドを除去。青丸は 2020 年 11 月 1 日~2021 年 7 月 28 日までの気象庁一元化震源(M>=1、深さ 20km 以浅)



図 1. 推定した地殻変動モデル(球状圧力源)と観測・計算値の比較。黒丸が推定された球状圧力 源位置を表す。

経度(゜)	緯度(゜)	深さ(km)	dV (10 ⁶ m ³)
137. 233	37. 488	13.6	22. 1
0.014	0.014	1. 9	4.8
*下段は誤	差(1sigma)		

第8図 石川県能登地方の非定常地殻変動のモデル(1)観測された地殻変動と球状圧力源モデルによる計算値

Fig. 8 Crustal deformation at the GNSS stations in the Noto region of Ishikawa Prefecture (1). Observation (upper) and calculated deformation with a spherical source model assumed (lower).



図2. 推定した地殻変動モデル(開口割れ目)と観測・計算値の比較。矩形領域が推定された開口割

れ目の位置を表す。

経度(゜)	緯度(゜)	深さ(km)	長さ(km)	幅(km)	走向(゜)	傾斜(。)	開口量(m)
137. 223	37. 492	14. 2	5	5	104	48	0.8
0.015	0. 018	5. 2	-	-	17	12	0.5
* *大字は因定値 下段は誤差(1sigma)							

*太字は固定値、下段は誤差(1sigma)

3) 逆断層



図3. 推定した地殻変動モデル(逆断層)と観測・計算値の比較。矩形領域が推定された逆断層の 位置を表す。

137. 219 37. 5	16.3	5	5	273	1	90	1.9
0.017 0.0	4.6	-	-	14	8	-	0.9

*太字は固定値、下段は誤差(1sigma)

第9図 石川県能登地方の非定常地殻変動のモデル (2) 開口割れ目モデルと逆断層モデルによる計算値

Fig. 9 Crustal deformation at the GNSS stations in the Noto region of Ishikawa Prefecture (2). Calculated deformation with an open crack (upper) and a thrust fault assumed (lower).

7-3 能登半島の最近の地殻変動について Recent crustal deformation in Noto Peninsula

京都大学防災研究所附属地震予知研究センター Research Center for Earthquake Prediction Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.

2021年7月11日9時16分頃に石川県能登地方でM3.9(最大震度4)の地震が発生した. 震央 付近に展開された国土地理院電子基準点のデータを解析すると,地震活動の活発化に伴って2020 年12月頃から非定常地殻変動が進行していた可能性が示唆され(図1),特に珠洲観測点で2cmを 超える隆起が特徴的である.現在までの非定常地殻変動の約半分は,2020年12月から2021年1 月に生じたものであり,特に7月のM3.9地震に関連して変化しているようには見えないが,2021 年8月現在でも進行中のように見える.群発地震発生域を中心とした等方的な膨張に見えるため(図 2),茂木モデルを仮定してMatsu'ura and Hasegawa(1987)のインバージョン手法で約8.5ヶ月の地 殻変動の力源を推定すると,珠洲市付近のドーナツ状を示す地震群の北西部付近の深さ14kmに体 積変化量が2.6×10⁷m³と推定された(図2).非火山地域でこのような大きな体積膨張がGNSSデー タから推定された例は極めて珍しいと思われるため,今後の活動が注目される.

なお、本解析で用いている GNSS 日座標値は、国土地理院から公開される RINEX データから、 京都大学防災研究所附属地震予知研究センターにおいて、米国ジェット推進研究所の精密暦を用い て GipsyX ソフトウェアのバイアス整数化精密単独測位法により推定したものである.

> (西村 卓也) NISHIMURA Takuya

謝辞

国土地理院の GNSS データ,気象庁一元化震源データ,東京大学地震研究所大の TSEIS を使用 させていただきました.

参考文献

1) Matsu'ura and Hasegawa (1987), *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **47**, 179-187. A Maximum-Likelihood Approach to Nonlinear Inversion under Constraints.



 第1図 能登半島での群発地震震源域付近の GNSS 観測点の非定常地殻変動. 2017-2019 年のデータから1次・年周・ 半年周成分を推定して除去した.参照点は 071158(志賀 A). (a) 950253 (珠洲) 観測点. (b) 020971 (輪島 2) 観測点. (c) 960574 (能都) 観測点. (d) 群発地震震源域 (37.4°N-37.6°N, 137.1°E-137.4°E) での 20km 以浅、 M1.5 以上の地震の積算回数 (TSEIS を使用).

Fig. 1 Episodic crustal deformation at GNSS stations near the source region of an earthquake swarm in Noto Peninsula. Linear, annual, and semi-annual components are estimated during 2017–2019 and are removed in the time-series plots. A reference station is 071158 (Shiga-A). (a) Daily coordinates at 950253 (Suzu) station. (b) 020971 (Wajima2) station. (c) 960574 (Noto) station. (d) Cumulative number of M ≥ 1.5 and Depth ≤ 20km earthquakes in the source region of the earthquake swarm (37.4°N-37.6°N, 137.1°E-137.4°E). From 2020/11/1-10 To 2021/7/14-23 (GipsyX RCEP-KU solution) Estimated Mogi Source: 137.242±0.010°E 37.469±0.014°N Depth: 14.6±2.9 km DV 2.6±0.9 x 10⁷ m³



第2図 非定常地殻変動から推定した力源モデル.青丸が推定された茂木(球状圧力源)モデルの位置.赤丸は 2021年1月1日から8月5日までの気象庁一元化震源(M≥1,深さ20km以浅).

Fig. 2 Estimated source model for the episodic crustal deformation. The blue circle represents the estimated Mogi (point inflation source) source. The red dots show epicenters of $M \ge 1$ and Depth ≤ 20 km earthquakes determined by the Japan Meteorological Agency.

7-4 非定常 ETAS モデルから見える能登半島群発地震活動の地域的変化 Changing features revealed from the non-stationary ETAS model in regional earthquake swarm activity of the Noto Peninsula

東京大学地震研究所 統計数理研究所 Earthquake Research Institute, University of Tokyo The Institute of Statistical Mathematics

石川県能登半島では 2018 年ごろから地震回数が増加傾向にあり(第1-III図),2020 年 11 月末 から地震活動が活発化して現在に至っている.これらの活動は大きく4つの震央クラスターに分か れ(第1図(I)),従来から活動していた領域B(第1図(II))では2020 年 11 月末に 14km 以深 へ移動した.以降,他3領域でC,A,D順に発化している(第1図(III)).2021 年 11 月 6 日時点 での最大地震は2021 年 9 月 16 日に領域Dで発生した MJ 5.1 である.GNSS 観測では2020 年 11 月末頃から非定常な変化(第1図(VI))が見られ,輪島2-珠州観測点および珠洲-舳倉島観測 点の基線距離で約1cm程度の増加,及び珠州観測点の舳倉島との比高ではバラツキ誤差が大きい が3cm程度の隆起が観測されている(第1図(VI)).

領域 A ~ D の群発地震活動に非定常 ETAS モデル¹⁾を当てはめた(第1図(IV)). このモデルは 従来の ETAS モデルの背景強度 μ と余震的誘発率 K_0 のパラメータが,次のように時間 t に依存す ると仮定し、これらをベイズ法で推定した.

$$\lambda_{\theta}\left(t|H_{t}\right) = \mu\left(t\right) + \sum_{\{i:t_{i} < t\}} \frac{K_{o}(t_{i})e^{\alpha\left(M_{i} - M_{c}\right)}}{\left(t - t_{i} + c\right)^{p}}.$$
(1)

背景強度 μ (t) は対象領域全般のゆっくりした応力変化や流体貫入による断層弱化などに起因すると考えられる.余震的誘発率 K₀(t_i) は主に領域内の先行地震による連鎖効果の変化 (余震的誘発率)を示す.

領域 B は深さ 14km を境に Bs (0 ~ 14km) と Bd (14 ~ 30km) に分けて解析した(第1図(II)). 浅部 Bs の活動は初め領域の中央付近に分布していたが、2020年に入って活動が北東の方向へと移 動し、2020年11月30日に活動が深部 Bd へ移動した際に静穏化した(第1図(IV)).同時に深部 Bd では、浅部 Bs 中央部分の地震群を囲むように、ドーナツ状に活発化し(第2-II図),背景強度 は現在に至るまで増加傾向にある(第1図(IV)).これらの詳細な活動の時空間的特徴は第2図 および第3図を参照.

領域 B の深部(Bd)の活発化以降一ヵ月以上経って,他の領域にも少しずつ地震活動が現れる ようになり(M1以上に限定した場合,以降で最初の地震はA:1月2日,C:1月20日,D:1月 12日),さらに領域 Bd の活発化から2ヵ月から3ヵ月遅れて領域 C の活動度が上がり,次いで領 域A および D の地震活動度が順次上昇した(第1図(III)). 領域 C の背景強度は 2020 年 6 月~8 月のピーク時から現在は鈍化し横ばい状態である. 領域 A では 4 領域の群発活動の中で最も活動度が高く, M1 以上の地震数は全体の約半数を占め, M4 以上の地震は全て今年の 6 月以降 11 月 6 日までに計 6 回発生して, その内 3 回は 10 月以降に起こっており,背景強度も 2021 年 9 月のピーク時から依然として高い値を維持している(第 2 図 A 域). 領域 D は今年の 8 月から急速に活発度が上がり,9月 16 日に最大地震の M5.1 が発生した. この時に背景強度がピークに達している.累計地震数は他領域と比べて高くないが,背景強度は依然として高い状態を保っている(第 2 図 D 域). 各領域の背景強度の変化(第 1 図 (V)),および各領域の背景強度と余震強度の相対的な時空間変化パターンを見たのがそれぞれ第 2 図と第 3 図である. ここで特筆すべき特徴は B 領域内における浅部と深部の震央分布間(第 1 図 (II))の特徴と誘発係数 *K*⁰ 値の相違の明瞭な対応関係(第 3 図 B 域) であろう.

各領域の地殻変化を良く反映していると思われる以下の GNSS 観測時系列を図示した(第1図 (VI)). すなわち,領域Aを跨ぐ珠洲-舳倉島基線,領域Bの珠洲-舳倉島比高,領域BとCを 跨ぐ珠洲-輪島基線である.領域A,D,Bの背景強度変化の仕方は珠洲観測所の比高時系列に相 似し,領域Cの背景強度変化は珠洲-輪島基線距離の時系列に相似し,いずれもGNSS時系列が 背景強度変化に先行している.すなわち領域Cの領域直上を跨ぐ珠洲-輪島2のトレンドを除去 した基線距離変化は最初急速に増えた後ゆっくり増加し,これに対して遅れてC地域の背景強度 が同様な形で変化している.また珠洲観測所の舳倉島比高変化のトレンドを除去時系列は、ゆっく り増加して頭打ちしているが、A地域、D地域およびB地域深部のμ値変化が時間遅れで同様に 変化している.

本解析に関して気象庁震源カタログ,地震活動可視化システム TSEIS,および国土地理院地殻変動情報表示の GEONET データを使用した.

(熊澤貴雄,尾形良彦)

参考文献

 Kumazawa T, Ogata Y (2013), Quantitative description of induced seismic activity before and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake by nonstationary ETAS models, *J Geophys. Res. Solid Earth* 118 (12): 6165–6182. http://doi.wiley.com/10.1002/2013JB010259



- 第1図 石川県能登半島の群発地震活動とGNSS時系列.(I)赤丸は2018年以降,深さ30kmまでの震央分布.矩形A,B,C,Dは解析の領域分け.黒丸はこれらの領域の最近接の電子基準点を示す.(II)領域B内の深さ別震央分布.(III)領域別の2020年6月1日からのM1.0以上の地震累積数.(IV)非定常ETASモデルによる解析結果.解析には2018/1/1から2021/11/6まで,深さ30km以浅の地震を使った.赤線と青線はそれぞれ背景強度と余震誘発強度の時間変化,及び其々の95%信頼区間(点線). 灰色のスパイク状曲線は非定常ETASモデルの強度変化.各パネルの下部の灰色点はM-Tプロット.(V)各領域での背景強度変化の絶対スケール比較.(VI)各領域直上を跨ぐGNSS基線の距離や珠洲観測所の比高変化(日単位)の時系列.それぞれ2018年から2020年10月末(縦破線)までの定常(一次)トレンドを除去した.GNSSデータは国土地理院ホームページから11月10日に取得.
- Fig. 1 Swarm seismic activity and GNSS time series in the Noto Peninsula, Ishikawa Prefecture, Japan, and analyzed results by the non-stationary ETAS model. (I) Red circles indicate the distribution of epicenters down to 30 km depth since 2018. Rectangles A, B, C and D are regions considered in the analyses. Black disks indicate GNSS stations around the regions. (II) Classified epicenters at depth 14 km in region B. (III) Cumulative numbers of earthquakes of M1.0 or greater in respective regions, measured from June 1, 2020. (IV) Non-stationary ETAS analysis results: The red and blue lines show the time variation of the background intensity and aftershock-induced intensity, respectively, with their 95% confidence intervals (dotted lines). Gray dots at the bottom of each panel are M-T plots. (V) Comparison of the background intensity rate changes in respective regions. (VI) Daily time series of the distances of the GNSS baselines and depth changes at Suzu station relative to Hekura-jima station, where the both baseline-distance time series here are those removed the stationary trend in the time span from 2018 to the end of October 2020 that is indicated by vertical dashed line): the GNSS data were obtained from the GSI URL Website on 2021/11/10.



- 第2図 背景強度(µ値)の時空間変化.第1図で得られた背景強度を重ねて表示し,強度に従って彩色. 点線枠 は領域区分を表す.(上段)水平分布.(下段)東西方向の時間分布.領域 A, C, D のみ.(他領域と重複す るので領域 B は省いた)
- Fig. 2 Spatio-temporal distribution of background intensity (μ value). The background intensities obtained in Fig. 1 are superimposed and colored according to the intensity values. The dotted frame indicates the considerer regions. (Upper panel) Horizontal intensity distribution. (Lower panel) Intensity distribution in the east-west direction against time for the regions A, C, D; region B is omitted.



第3図 誘発係数 (K₀値)の時空間分布.第2図と同様.B 領域の浅部と深部 (第1-II 図参照) での系統的なスケー ルの違いが特徴的である.

Fig. 3 Spatio-temporal distribution of triggering coefficients (K_0 values). Explanations are same as those in Fig. 2. The systematic difference in scale between the shallow and deep parts of region B (see Fig. 1-II) is characteristic.

8-1 近畿・中国・四国地方とその周辺の地震活動(2021年5月~2021年10月) Seismic Activity in and around the Kinki, Chugoku and Shikoku Districts (May-October 2021)

気象庁 大阪管区気象台

Osaka District Meteorological Observatory, JMA

今期間,近畿・中国・四国地方とその周辺で M4.0 以上の地震は 16 回発生した. このうち最大は, 2021 年 7 月 17 日に伊予灘で発生した M5.1 の地震であった.

2021 年 5 月~10 月の M4.0 以上の地震の震央分布を第 1 図 (a) 及び (b) に示す. 主な地震活動は以下のとおりである.

(1) 愛媛県南予の地震(M4.7,最大震度4,第2図)

2021 年 6 月 19 日 07 時 39 分に愛媛県南予の深さ 42km で M4.7 の地震(最大震度 4)が発生した. この地震の発震機構は東西方向に張力軸を持つ正断層型で,フィリピン海プレート内部で発生した.

(2) 徳島県南部の地震(M4.5,最大震度4,第3図)

2021 年 7 月 31 日 13 時 09 分に徳島県南部の深さ 45km で M4.5 の地震(最大震度 3)が発生した. この地震の発震機構は東西方向に張力軸を持つ正断層型で,フィリピン海プレート内部で発生した.

(3) 広島県北部の地震(最大 M4.4, 最大震度 4, 第 4 図)

2021 年 8 月 2 日 09 時 37 分に広島県北部の深さ 6km で M4.4 の地震(最大震度 4)が発生した. また,18 日 01 時 31 分にも深さ 6km で M4.3 の地震(最大震度 4)が発生した.これらの地震は 地殻内で発生した.これらの地震の発震機構は,西北西-東南東方向に圧力軸を持つ横ずれ断層 型である.

(4) 滋賀県北部の地震(M4.6,最大震度 4,第5図 (a),(b))

2021 年 8 月 16 日 05 時 03 分に滋賀県北部の深さ 13km で M4.6 の地震(最大震度 4)が発生した. この地震の発震機構は東西方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型である.また,18 日 01 時 31 分に も深さ 13km で M4.3 の地震(最大震度 3)が発生した.これらの地震は地殻内で発生した.

(5) 和歌山県北部の地震(M3.3,最大震度4,第6図)

2021年10月15日07時57分に和歌山県北部の深さ5kmでM3.3の地震(最大震度4)が発生した. この地震は地殻内で発生した.この地震の発震機構は,東西方向に圧力軸を持つ逆断層型である.



近畿・中国・四国地方とその周辺の地震活動(2021年5月~7月、M≧4.0)

第1図(a) 近畿・中国・四国地方とその周辺の地震活動(2021年5月~7月, M≧4.0, 深さ≦700km) Fig. 1(a) Seismic activity in and around the Kinki, Chugoku and Shikoku districts (May – July 2021, M≧4.0, depth ≦700 km)



第1図(b) つづき(2021年8月~10月, M ≥ 4.0, 深さ≤ 700km)
Fig. 1(b) Continued (August – October 2021, M ≥ 4.0, depth ≤ 700 km).

6月19日 愛媛県南予の地震



第2図 2021年6月19日の愛媛県南予の地震

Fig. 2 The earthquake in Nanyo region, Ehime Prefecture on June 19, 2021.

7月31日 徳島県南部の地震



第3図 2021年7月31日の徳島県南部の地震

Fig. 3 The earthquake in the southern part of Tokushima Prefecture on July 31, 2021.

広島県北部の地震 8月2日、18日

М

7.0

6.0

5.0

4.0

3.0

2.0

1.5

どちらの地震も情報発表に用いた震央地名は〔島根県東部〕である。

2021年8月2日09時37分に広島県北部の深さ 6kmでM4.4の地震(最大震度4)が発生した。また、 18日01時31分にほぼ同じ場所を震源とするM4.3 の地震(最大震度4)が発生した。これらの地震 は地殻内で発生した。これらの地震の発震機構は、 西北西-東南東方向に圧力軸を持つ横ずれ断層 型である。2日の地震後の地震活動はあまり活発 ではなかったが、18日の地震後の地震活動はやや 活発となり、19日07時15分にはM3.5の地震(最大 震度3)が発生した。

1997年10月以降の活動を見ると、今回の地震の 震央付近(領域 a) ではM3.0以上の地震が時々発 生している。

1919年以降の活動を見ると、今回の地震の震央 周辺(領域b)では、M6.0程度の地震が時々発生 している。「平成12年(2000年)鳥取県西部地震」 (M7.3)では、重傷39人、軽傷143人などの被害が 生じた(総務省消防庁による)。

震央分布図

(1919年1月1日~2021年8月31日、

N = 106

2000年10月6日

M7.3 「平成12年(2000年) <u>鳥取県西部地震」</u>

M

7.0

6.0

5.0

4.5

N=83

(1)



領域a内のM-T図及び回数積算図

広島県

1.3.3° F

震央分布図

(1997年10月1日~2021年8月31日、

深さO~30km、M≧1.5

2016年6月20日 6km M3.9

2001年5月16日

8km M3.0

2010年4月3日

7km M3.5

2021 年8月の地震を赤色で表示)

島根県

20km

2009年11月27日

а

回の地震①

2021年8月2日

6km M4.4

 $\langle \rangle$

2021年8月18日

6km M4.3

Ð

今回の地震②

2005

8km M3.3

瓶山

35° 40

35°20

35° N

м

7

6

5

4

3

2

м

4

3

2

0

2000

2021 年 8 月 2 日, 8 月 18 日の広島県北部の地震 第4図

Fig. 4 The earthquake in the northern part of Hiroshima Prefecture on August 2 and August 18, 2021.

滋賀県北部の地震 8月16日



橙色の線は地震調査研究推進本部の長期評価による活断層を示す 領域a内のM-T図及び回数積算図



領域b内のM-T図 (2021年8月1日~8月31日、M≧0.5)

м 5 5 3 3 2 0 Aua

※宇津徳治, 日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表:1885年~1980年, 震研彙報, 57, 401-463, 1982. 宇津徳治,日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表:1885年~1980年(訂正と追加),震研彙報,60, 639-642, 1985. 茅野一郎・宇津徳治、日本の主な地震の表、「地震の事典」第2版、朝倉書店、2001、657pp.

Fig. 5(a) The earthquake in the northern part of Shiga Prefecture on August 16, 2021.

2021年8月16日05時03分に滋賀県北部の深さ 13kmでM4.6の地震(最大震度4)が発生した。こ の地震は地殻内で発生した。この地震の発震機構 は、東西方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型である。 また、同日08時17分にほぼ同じ場所を震源とする M4.4の地震(最大震度3)が発生した。

1997年10月以降の活動を見ると、今回の地震の 震央周辺(領域 a) ではM4.0程度の地震が時々発 生している。

1885年以降の活動を見ると、今回の地震の震央 周辺(領域 c) では、M5.0以上の地震が時々発生 している。1909年8月14日には江濃地震(姉川地 震M6.8)が発生し、死者41人、負傷者784人、住家 全壊978棟などの被害が生じた(「日本被害地震総 覧」による)。



橙色の線は地震調査研究推進本部の長期評価による活断層を示す 領域c内のM-T図

N=14

8

7 7 6 6 5 5 1890 1900 1910 1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

8

第5図(a) 2021 年8月16日の滋賀県北部の地震



8月16日 滋賀県北部の地震(地震活動の詳細)

第5図(b) つづき Fig. 5(b) Continued.

10月15日 和歌山県北部の地震



2021年10月15日07時57分に和歌山県北部の深 さ5kmでM3.3の地震(最大震度4)が発生した。 この地震は地設内で発生し、発震機構は東西方向 に圧力軸を持つ逆断層型である。今回の地震の震 源とほぼ同じ場所では5日03時21分にM3.0の地 震(最大震度3)が発生しているが、今回の地震 後も含め地震活動はあまり活発ではない。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の 震央周辺(領域 a)では、M4.0程度の地震が時々 発生しており、2021年3月15日にはM4.6の地震 (最大震度5弱)が発生している。

1919年以降の活動をみると、今回の地震の震央 周辺(領域b)では、M5.0を超える地震が時々発 生しており、最近では2011年7月5日にM5.5の地 震(最大震度5強)が発生し、住家一部破損21棟 などの被害が生じている(総務省消防庁による)。



第6図 2021年10月15日の和歌山県北部の地震

Oct

Fig. 6 The earthquake in the northern part of Wakayama Prefecture on October 15, 2021.

8-2 近畿地方の地殻変動

Crustal Deformations in the Kinki District

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

[紀伊半島西部・四国東部の非定常水平地殻変動(長期的 SSE)]

第1~7図は,2020年夏頃から紀伊半島西部・四国東部で見られている非定常的な地殻変動に 関する資料である.

第1図は、一次トレンド・年周・半年周成分除去後の非定常地殻変動ベクトル図である.2017 年1月1日~2017年12月31日の期間を定常変動とし、一次トレンド、年周、半年周成分を推定 した.固定局は京都府の網野観測点である.2020年5月29日~6月4日に対する2021年10月13 日~19日の約1年5か月の期間での非定常的な地殻変動を示している.紀伊半島西部から四国東 部にかけて東向きに僅かな変動が見られる.

第2~3 図は,第1 図の図中に示した6 観測点の非定常地殻変動3 成分の時系列グラフである. 同様に一次トレンド・年周・半年周成分を除去している.(1)~(6)のいずれの観測点でも2020年 夏頃から東向きの変動が見られていることが分かる.なお,(3)においては2020年5月以降のデー タを削除している.これは,2020年5月頃から阿南2 観測点が東向きと沈降の向きの変動が見ら れた後,2020年12月23日及び2021年2月6日に周辺樹木を伐採後に戻っており,阿南2 観測点 周辺の樹木の生長による見かけ上の変化と考えられるためである.

第4~7図は、非定常的な地殻変動を基に、時間依存インバージョンでプレート境界面上のす ベリ分布を推定した結果に関する資料である.この解析では、年周・半年周成分を2017年1月~ 2021年10月で推定、一次トレンドは2017年1月1日~2018年1月1日の期間を定常変動と仮定 して推定している.すべりの推定では、東西、南北の各成分が東向き、南向きとなるように拘束し ている.

第4図(a)は,2020年6月1日~2021年10月10日の期間で推定されたすべり分布を示している. 紀伊水道ですべりが推定された. 推定されたすべりの最大値は8cm,モーメントマグニチュードは 6.2と求まった.

第4図(b)は、観測値と計算値との比較である、観測値をよく説明できていることが分かる.

第5図は,紀伊半島及び四国地域の観測点における観測値と計算値の時間変化を示した図である. 2020年夏頃から見られる東向きの変動がよく説明できていることが分かる.

第6図は、紀伊水道に位置するグリッドのすべりの時間変化を示した図である. 2020 年夏頃からすべりが見られる.

第7図は、今回のイベントとの比較のために、2019年春頃~2020年春頃に発生した前回の長期 的SSEについて、今回まで連続した時間依存インバージョンによりすべり分布を推定した結果で ある.上段の図は、中段でグリッド位置が実線で囲まれた領域のモーメントの時系列グラフである. 図中で(B)と示した期間に前回のイベントが発生し、モーメントの増大が収束した後、2020年夏 頃から今回のイベントが発生したように見える.中段は第4図の左図と同一である.下段の左図は、 前回のイベントについて期間(B)で推定されたプレート境界上のすべり分布、右図は(A)と(B)合 わせた全期間で推定されたすべり分布を示している.今回のイベントは前回と同様の場所ですべり が生じ、すべりの方向には少し違いが見られる.

[紀伊半島 電子基準点の上下変動 水準測量と GNSS 連続観測]

第8~9図は,紀伊半島の電子基準点間の比高変化について,水準測量の結果とGNSS連続観測 結果とを比較したものである.両者はほぼ同様の傾向を示しており,最新のデータは潮岬周辺が沈 降する長期的な傾向に沿っている.各図の左下に長期間の変動グラフを示す.潮岬側の沈降が長期 的に継続しており,灰色でプロットしたGNSS連続観測の最近の結果も整合している.なお,前 回までは(2)において串本観測点を示していたが,今回からばらつきのより少ないP串本観測点の 結果を示している.

[水準測量]

第10図は、和歌山県新宮市から串本町に至る南北の路線の水準測量結果である。新宮市に対する串本町側の長期的な沈降が見られる。

第11図は、和歌山県田辺市から串本町に至る南北の路線の水準測量結果である.最新の1年間の結果では特段の変動は見られない.

第12~13 図は,水準測量による紀伊半島東岸及び西岸の上下変動の経年変化を,それぞれ,和 歌山県新宮市及び田辺市を固定して示す図である.半島先端部の沈降が長期的に継続している.

第14回は,奈良県十津川村から和歌山県新宮市に至る路線の水準測量結果である.長期的には 十津川村に対して新宮市側が沈降しているが,最新の1年間の結果では特段の変動は見られない.

[南海トラフ周辺 GNSS 連続観測時系列]

第15~18 図は、紀伊半島から四国、九州東部にかけての太平洋沿岸の GNSS 連続観測時系列である。第15 図に観測点の配置と、アンテナ交換等の保守の履歴を示す。

第16~18 図は、島根県の三隅観測点を固定局として、定常状態にあると仮定した 2006 年1月 ~ 2009 年1月の期間で推定された一次トレンド成分及び年周・半年周成分を,各基線の地殻変動 時系列から除去した時系列グラフである.なお、三隅観測点のみ、熊本地震の地震時の地殻変動を 補正している.2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震による変動とその後の余効変動が全基線 で見られる. また, 四国西部から九州東部にかけての (10) ~ (12) では東西成分で 2016 年 4 月の熊 本地震による変動とその後の余効変動が見られる. そのほか, (4), (5) では, 2015 年~2016 年初 頭及び 2019 年~ 2020 年初頭にかけて,紀伊水道 SSE に伴う東南東への変動が見られる.また (9) ~ (12) では、2010 年~ 2011 年初頭に豊後水道での長期的 SSE に伴う南東への変動及び隆起が顕 著である.なお,(9) ~(11) では,2014 年半ば及び 2015 年半ば~ 2016 年に微小ながら南東への変 動と降起が見られ、豊後水道周辺での小規模な長期的 SSE に伴う変動と考えられる。また、2018 年6月以降に (10),(11) で微小な東向きの変動,(12) では微小な南向きの変動が見られ,日向灘北 部の長期的 SSE に伴う変動と考えられる.さらに,2018 年 12 月~2019 年中頃にかけて,(9)~ (12)で東向き又は南東向きの変動と隆起が見られ、豊後水道での長期的 SSE に伴う変動と見られ る.加えて(8)では2019年春頃から,四国中部での長期的SSEに伴う東への僅かな変動が見られる. (3) では、2020年5月頃から阿南2観測点周辺の樹木の生長に伴う見かけ上の変動が見られ、2020 年12月23日と2021年2月6日に行なった周辺樹木の伐採後,元に戻っている. それら以外には, 最近のデータには特段の傾向の変化は見られない.

[南海トラフ沿いの地殻変動・非定常地殻変動]

第19~25図は、三隅観測点を固定局として示した、南海トラフ沿いの地殻変動である.

第19図上段は最近の1年間の水平変動である.図中に示した日付を含む13日間の中央値を用いて変動量を求めている.東海・紀伊半島・四国・九州の太平洋側ではフィリピン海プレートの沈み込みに伴う北西方向の地殻変動が見られる.比較のために、1年前の1年間の水平変動を下段に示している.最近の1年間の地殻変動は1年前とほぼ同様であり、特段の変化は見られない.

第20図は、上下成分について同様の比較を示すものである.水平よりもばらつきが大きい.御前崎、潮岬、室戸岬のそれぞれの周辺で沈降が見られる.比較のために、1年前の1年間の上下変動を下段に示している.最近の1年間の地殻変動は1年前とほぼ同様であり、特段の変化は見られない.

第21~22 図は、最近の3か月間の水平変動と上下変動について、1年前の同期間の変動と比較 したものである。1年間の図と比べると、ばらつきが大きいが、特段の変化は見られない。

第23 図は、地震や長期的 SSE 等の影響が少なかった 2006 年1月~2009 年1月の3 年間での水 平変動速度及び上下変動速度を示したものである。東海・紀伊半島・四国・九州の太平洋側ではフィ リピン海プレートの沈み込みに伴う北西方向の地殻変動が顕著で、御前崎、潮岬、室戸岬周辺で沈 降、その内陸側で隆起の傾向が見られる。

第24~25 図は,第23 図に示した2006年1月~2009年1月の期間の変動を定常変動と仮定し, それからの変動の差を非定常変動として示した図である.水平成分及び上下成分のそれぞれについ て,第24 図に最近の1年間,第25 図に最近の3か月間の図を示す.中部地方で東北地方太平洋沖 地震の余効変動である東向きの変動が見られるほか,第24 図の1年間の図では九州において熊本 地震の余効変動が見られる.それら以外には,特段の変動は見られない.第25 図の3か月間の図 では,特段の変動は見られない.



基準期間:2020/05/29~2020/06/04[F5:最終解] 比較期間:2021/10/13~2021/10/19[R5:速報解]

計算期間:2017/01/01~2017/12/31



第1図 紀伊半島西部・四国東部の非定常水平地殻変動

Fig. 1 Transient horizontal deformation in the western Kii Peninsula and the eastern Shikoku.

紀伊半島西部・四国東部 GNSS連続観測時系列(1)





●----[F5:最終解] ●----[R5:速報解]

第2図 紀伊半島西部·四国東部 GNSS 連続観測時系列

Fig. 2 Results of continuous GNSS measurements in the western Kii Peninsula and the eastern Shikoku with respect to the Amino station(1/2).

紀伊半島西部・四国東部 GNSS連続観測時系列(2)

1次トレンド・年周成分・半年周成分除去後グラフ



●----[F5:最終解] ●----[R5:速報解]

第3図 紀伊半島西部·四国東部 GNSS 連続観測時系列

Fig. 3 Results of continuous GNSS measurements in the western Kii Peninsula and the eastern Shikoku with respect to the Amino station(2/2).





地震予知連絡会会報第 107 巻 2022 年 3 月発行

使用データ:F5解 (2018/1/1 - 2021/9/26) + R5解 (2021/9/27 - 2021/10/10) ※電子基準点の保守等による変動は補正済 トレンド期間:2017/1/1 - 2018/1/1 (年周・半年周成分は 2017/1/1 - 2021/10/10 のデータで補正) モーメント計算範囲:左図の黒枠内側 観測値:3日間の平均値をカルマンフィルターで平滑化した値 黒破線:フィリピン海プレート上面の等深線(弘瀬・他、2007) すべり方向:東向きから南向きの範囲に拘束 青丸:低周波地震(気象庁一元化震源) (期間:2020/6/1 - 2021/10/10) 固定局:網野

第4図(a) 紀伊水道において推定される長期的ゆっくりすべり(暫定)

Fig. 4(a) Estimated slip distribution on the plate interface beneath the Kii-channel (preliminary results).

第4図(b) 観測値(黒)と計算値(白)の比較

Fig. 4(b) Comparison of observed (black) and calculated (white) displacements.



紀伊水道地域の観測点の座標時系列(黒丸)と計算値(赤線)

第5図 紀伊水道地域の座標時系列(黒丸)と計算値(赤線)

Fig. 5 Observed (black dots) and calculated (red line) deformations at the GNSS stations around the Kii-channel.



紀伊水道の長期的ゆっくりすべり タグリッドにおけるすべりの時間変化

第6図 時間依存インバージョンで推定されたプレート間滑りの時間変化

Fig. 6 Time evolution of the estimated slip by the time dependent inversion method.



第7図 時間依存インバージョンで推定されたモーメントの時間変化

Fig. 7 Time evolution of moment by the time dependent inversion method.

紀伊半島 電子基準点の上下変動(1)

潮岬周辺の長期的な沈降傾向に変化は見られない.



- GNSS 連続観測のプロット点は、GEONET による日々の座標値(F5:最終解)から計算した値の月平均値である。
 (最新のプロット点: 10/1~10/9の平均値)
- 水準測量の結果は、最寄りの一等水準点の結果を表示しており、GNSS 連続観測の全期間の値との差が最小となるように描画している。
- ・「水準測量による長期間の上下変動」のグラフにおける、各プロットの色は配点図の水準点の色と対応する。また、灰 色のプロットは GEONET の月平均値を示している。

第8図 紀伊半島 電子基準点の上下変動(水準測量と GNSS)(1)

Fig. 8 Vertical displacements of GEONET stations in the Kii Peninsula (leveling and GNSS measurements) (1).

紀伊半島 電子基準点の上下変動(2)

潮岬周辺の長期的な沈降傾向に変化は見られない.



- GNSS 連続観測のプロット点は、GEONET による日々の座標値(F5:最終解)から計算した値の月平均値である。
 (最新のプロット点:10/1~10/9の平均値)
- 水準測量の結果は、近傍の一等水準点の結果を表示しており、GNSS 連続観測の全期間の値との差が最小となるように描画している。
- ・「水準測量による長期間の上下変動」のグラフにおける、各プロットの色は配点図の水準点の色と対応する。また、灰 色のプロットは GEONET の月平均値を示している。
- ※1 2018/8/3に電子基準点「白浜」周辺の樹木を伐採した。
- ※2 2019/1/29に電子基準点「白浜」周辺の樹木を伐採した。
- ※3 2021/1/12に電子基準点「すさみ2」のアンテナ更新及びレドーム交換を実施した。
- ※4 1966/11に一等水準点「9190」を再設した。

第9図 紀伊半島 電子基準点の上下変動(水準測量と GNSS) (2)

Fig. 9 Vertical displacements of GEONET stations in the Kii Peninsula (leveling and GNSS measurements) (2).


第10図 新宮市~串本町間の上下変動

Fig. 10 Results of leveling survey along the leveling route from Shingu city to Kushimoto town.

和歌山県田辺市~串本町間の上下変動



第11図 田辺市~串本町間の上下変動

Fig. 11 Results of leveling survey along the leveling route from Tanabe city to Kushimoto town.



第12図 水準点4810(新宮市)を基準とした紀伊半島東側の各水準点の高さの上下変動時系列

Fig. 12 Time series of height changes of benchmarks along the leveling route on the east side of the Kii Peninsula referred to BM4810 (Shingu).



第13図 水準点9184(田辺市)を基準とした紀伊半島西側の各水準点の高さの上下変動時系列

320

Fig. 13 Time series of height changes of benchmarks along the leveling route on the west side of the Kii Peninsula referred to BM9184 (Tanabe).



第14図 十津川村~新宮市間の上下変動

321

Fig. 14 Results of leveling survey along the leveling route from Totsukawa village to Shingu city.



南海トラフ周辺 GNSS連続観測時系列(1)

各観測局情報

点番号	点名	日付	保守内容
960636	度会	2010/02/09	受信機交換・レドーム開閉
		2012/11/07	アンテナ更新
		2014/08/12	アンテナ交換・受信機交換
		2017/11/27	受信機交換
950315	三重熊野	2011/01/14	受信機交換・レドーム開閉
		2012/10/31	アンテナ更新
		2021/01/17	受信機交換
940070	串本	2012/11/14	アンテナ更新・受信機交換
		2017/01/22	アンテナ交換
		2021/01/09	アンテナ更新・レドーム交換
031112	白浜	2010/01/22	受信機交換
		2012/11/13	アンテナ更新
		2018/01/10	受信機交換
		2018/08/03	周辺伐採
		2019/01/29	周辺伐採
950422	阿南2	2012/12/04	アンテナ更新・受信機交換
		2015/11/17	アンテナ交換
		2018/04/02	アンテナ交換・受信機交換
		2019/12/04	受信機交換
		2020/12/23	周辺伐採
		2021/01/10	アンテナ更新・レドーム交換
		2021/02/06	周辺伐採
031122	室戸4	2010/01/26	受信機交換
		2012/10/22	アンテナ更新
		2017/05/23	受信機交換
		2018/01/30	受信機交換

点畨号	点名	日付	保守内容
031121	室戸3	2010/01/25	受信機交換
		2012/10/22	アンテナ更新
		2017/01/18	受信機交換
950445	須崎	2012/10/11	アンテナ更新・受信機交換
		2017/06/23	アンテナ交換
		2019/11/28	受信機交換
940085	土佐清水	2012/11/15	アンテナ更新・受信機交換
		2019/11/26	受信機交換
021059	宿毛	2012/11/16	アンテナ更新・受信機交換
		2015/11/19	アンテナ交換
950437	御荘	2008/01/28	周辺伐採
		2011/10/06	周辺伐採
		2012/12/05	アンテナ更新・受信機交換
		2015/10/05	周辺伐採
		2016/07/19	アンテナ交換
950476	北川	2012/11/22	アンテナ更新・受信機交換
		2014/12/18	アンテナ交換
		2019/11/28	受信機交換
950388	三隅	2012/10/29	アンテナ更新・受信機交換
		2014/10/01	周辺伐採
		2019/11/13	受信機交換

第15図 南海トラフ周辺における GNSS 連続観測結果(観測点配置図・保守状況)

Fig. 15 Time series of continuous GNSS measurements along the Nankai Trough (site location map and history of the site maintenance).



1 次トレンド・年周成分・半年周成分除去後グラフ ^{期間: 2005/01/01~2021/10/23} JST 計算期間: 2006/01/01~2009/01/01



第 16 図 南海トラフ周辺における GNSS 連続観測結果:1次トレンド及び年周・半年周成分を除去した時系列 (固定局:三隅)

Fig. 16 Time series of continuous GNSS measurements along the Nankai Trough with reference to the Misumi station (detrended time series with seasonal terms removed) (1/3).



1次トレンド・年周成分・半年周成分除去後グラフ 期間: 2005/01/01~2021/10/23 JST 計算期間: 2006/01/01~2009/01/01



第 17 図 南海トラフ周辺における GNSS 連続観測結果:1次トレンド及び年周・半年周成分を除去した時系列 (固定局:三隅)

Fig. 17 Time series of continuous GNSS measurements along the Nankai Trough with reference to the Misumi station (detrended time series with seasonal terms removed) (2/3).



第18 図 南海トラフ周辺における GNSS 連続観測結果:1次トレンド及び年周・半年周成分を除去した時系列 (固定局:三隅)

Fig. 18 Time series of continuous GNSS measurements along the Nankai Trough with reference to the Misumi station (detrended time series with seasonal terms removed) (3/3).



南海トラフ沿いの水平地殻変動【固定局:三隅】

- 第 19 図 南海トラフ沿いの水平地殻変動(1 年間):(上図) 最近 1 年間(2020 年 10 月~2021 年 10 月),(下図) 1 年前の1 年間(2019 年 10 月~2020 年 10 月).(固定局:三隅)
- Fig. 19 Horizontal deformation along the Nankai Trough based on GNSS measurements (1 year). October 2020 October 2021 (upper) and October 2019 October 2020 (lower) (☆ represents the reference station Misumi).



南海トラフ沿いの上下地殻変動【固定局:三隅】

- 第 20 図 南海トラフ沿いの上下地殻変動(1 年間):(上図) 最近 1 年間(2020 年 10 月~2021 年 10 月),(下図) 1 年前の1 年間(2019 年 10 月~2020 年 10 月).(固定局:三隅)
- Fig. 20 Vertical deformation along the Nankai Trough based on GNSS measurements (1year). October 2020 October 2021 (upper) and October 2019 October 2020 (lower) (🛪 represents the reference station Misumi).



南海トラフ沿いの水平地殻変動【固定局:三隅】

第 21 図 南海トラフ沿いの水平地殻変動(3か月間):(上図)最近 3か月間(2021年7月~2021年10月),(下図) 1年前の3か月間(2020年7月~2020年10月)(固定局:三隅)

Fig. 21 Horizontal deformation along the Nankai Trough based on GNSS measurements (3 months): July 2021 - October 2021 (upper) and July 2020 – October 2020 (lower) (🛪 represents the reference station Misumi).



南海トラフ沿いの上下地殻変動【固定局:三隅】

Vertical deformation along the Nankai Trough based on GNSS measurements (3 months): July 2021 - October 2021 Fig. 22 (upper) and July 2020 – October 2020 (lower) (☆ represents the reference station Misumi).

第 22 図 南海トラフ沿いの上下地殻変動(3か月間):(上図)最近3か月間(2021年7月~2021年10月),(下図) 1年前の3か月間(2020年7月~2020年10月)(固定局:三隅)



南海トラフ沿いの地殻変動速度【固定局:三隅】 2006年1月-2009年1月

第23図 GNSS 連続観測から求めた2006年1月~2009年1月の水平及び上下変動速度

Fig. 23 Horizontal (upper) and vertical (lower) crustal deformation rates along the Nankai Trough based on GNSS measurements during January 2006 – January 2009 (🛪 represents the reference station Misumi).



南海トラフ沿いの非定常地殻変動(1年間)【固定局:三隅】

・GEONET による日々の座標値(F5 解、R5 解)を使用している。

・非定常地殻変動時系列のうち、各日付 ± 6日の計 13 日間の変動量の中央値をとり、その差から1年間の変動量を表示している。 ※非定常地殻変動時系列:

・2006年1月から2009年1月のデータから平均変動速度、年周・半年周成分を推定して、元の時系列データから除去した時系列。

第 24 図 GNSS 連続観測から求めた 2020 年 10 月~ 2021 年 10 月の南海トラフ沿いの非定常地殻変動(水平及び 上下変動)

Fig. 24 Horizontal (upper) and vertical (lower) transient displacement along the Nankai Trough during October 2020 – October 2021.



南海トラフ沿いの非定常地殻変動(3か月間)【固定局:三隅】

・GEONET による日々の座標値(F5 解、R5 解)を使用している。

・非定常地殻変動時系列のうち、各日付 ± 6日の計 13日間の変動量の中央値をとり、その差から3か月間の変動量を表示している。 ※非定常地殻変動時系列:

・2006 年1月から 2009 年1月のデータから平均変動速度、年周・半年周成分を推定して、元の時系列データから除去した時系列。

第 25 図 GNSS 連続観測から求めた 2021 年 7 月~ 2021 年 10 月の南海トラフ沿いの非定常地殻変動(水平及び 上下変動)

Fig. 25 Horizontal (upper) and vertical (lower) transient displacement along the Nankai Trough during July 2021 – October 2021.

8-3 南海トラフ周辺の地殻活動(2021 年 5 月~10 月) Crustal Activity around the Nankai Trough (May - October 2021)

気象庁 Japan Meteorological Agency

1. 南海トラフ周辺の地殻活動(第1図,第2図)

2021 年 5 月~10 月の南海トラフ沿いとその周辺地域の震央分布図を第 1 図に,東海地域から 豊後水道にかけての深部低周波地震の震央分布図を第 2 図に示す.また,主な地震の発震機構解 を第 3 図に示す.詳細は,地震・火山月報(防災編)を参照^{1)~6}.

【南海トラフ周辺】

今期間, M5.0 以上の地震は発生しなかった.

以下の期間でまとまった深部低周波地震(微動)活動と短期的ゆっくりすべりが観測された.

・2021 年 4 月 27 日から 5 月 5 日まで,紀伊半島北部から紀伊半島中部(第 4 図 (a), (b)).周辺の複数のひずみ計で変化あり.

・2021 年 4 月 29 日から 5 月 6 日まで, 東海(第 5 図 (a) ~ (c)). 周辺の複数のひずみ計で変化あり. ・2021 年 5 月 7 日から 5 月 16 日まで, 紀伊半島北部(第 6 図 (a) ~ (c)). 周辺の複数のひずみ計 で変化あり.

・2021 年 5 月 22 日から 5 月 28 日まで, 東海(第 8 図 (a), (b)). 周辺の複数のひずみ計で変化あり.

・2021年6月4日から6月6日まで,四国西部(第9図(a),(b)).周辺の複数のひずみ計で変化あり.

・2021 年 7 月 16 日から 8 月 1 日まで,四国中部から四国西部(第 10 図 (a) ~ (c)).周辺の複数のひずみ計で変化あり.

・2021 年 7 月 20 日から 7 月 25 日まで,紀伊半島中部から紀伊半島西部(第 11 図 (a), (b)).周 辺の複数のひずみ計で変化あり.

・2021 年 9 月 15 日から 9 月 23 日まで, 東海(第 12 図 (a), (b)). 周辺の複数のひずみ計で変化あり.

なお,明瞭な地殻変動は観測されなかったが,以下の期間でまとまった深部低周波地震(微動) 活動が観測された.

・2021年5月19日から5月28日まで、四国東部(第7図).

2. プレート境界とその周辺の地震活動(第13図~第14図)

想定南海トラフ地震は、陸側のプレートと沈み込むフィリピン海プレートの境界で発生する地 震である.ここでは、震源の深さと発震機構解の型からプレート境界付近で発生した地震及び発 震機構解を抽出し、プレート境界付近の地震活動の推移を示す.

第 13 図 (a), (b) は, Hirose et al.(2008)⁷⁾及び Baba et al.(2002)⁸⁾ によるフィリピン海プレート上面の深さから± 6km の地震を抽出し地震活動の推移を見たものである.

第14回は,想定南海トラフ地震の発震機構解と類似の型の地震を抽出したものである.プレー ト境界で発生したと考えられる地震の他,その震源の深さから考えて明らかに地殻内やスラブ内 で発生したと推定される地震も含まれている.

3. 南海トラフ周辺の地震活動の推移(第15図~第16図)

想定南海トラフ地震は、陸側のプレートと沈み込むフィリピン海プレートの境界で発生する地 震であるが、南海トラフ周辺では、日向灘を除きプレート境界で発生する地震が少ない. ここで は、南海トラフ周辺を個々の領域に分け、地殻内の地震とフィリピン海プレート内、もしくは浅 い地震から深い地震まで全ての深さの地震について地震活動の推移を示す. 第15回は、それぞ れの領域について直近の地震活動指数を表にまとめたものである. 第16回(a)~(c)は、それら の地震活動指数の変化を示すグラフである.

参考文献

- 1) 気象庁 (2021), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和3年5月地震・火山月報(防災編), 19.
- 2) 気象庁 (2021), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和3年6月地震・火山月報(防災編), 17.
- 3) 気象庁 (2021), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和3年7月地震・火山月報(防災編), 23.
- 4) 気象庁 (2021), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和3年8月地震・火山月報(防災編), 19.
- 5) 気象庁 (2021), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和3年9月地震・火山月報(防災編), 18.
- 6) 気象庁 (2021), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和3年10月地震・火山月報(防災編), 26.
- Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa. (2008), *J. Geophys. Res.*, **113**, doi:10.1029/2007JB005274. Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography.
- Baba, T., Y. Tanioka, P. R. Cummins, and K. Uhira. (2002), *Phys. Earth Planet. Inter.*, **132**, 59-73. The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model.



南海トラフ沿いの地震活動 2021年5月

・発震機構解の横に「S」の表記があるものは、精度がやや劣るものである。

第1図(a) 南海トラフ周辺の月別震央分布(2021年5月)

Fig. 1(a) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (May 2021).



南海トラフ沿いの地震活動 2021年6月

・発震機構解の横に「S」の表記があるものは、精度がやや劣るものである。

第1図(b) つづき(2021年6月)

Fig. 1(b) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (June 2021).



・発震機構解の横に「S」の表記があるものは、精度がやや劣るものである。

第1図(c) つづき(2021年7月)

Fig. 1(c) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (July 2021).



南海トラフ沿いの地震活動 2021年8月

・発震機構解の横に「S」の表記があるものは、精度がやや劣るものである。

第1図(d) つづき(2021年8月)

Fig. 1(d) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (August 2021).





・発震機構解の横に「S」の表記があるものは、精度がやや劣るものである。

第1図(e) つづき(2021年9月)

Fig. 1(e) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (September 2021).





光辰版牌件の換に 01 の及記が の 0 0 0 6、 相反が 1 1 5

第1図(f) つづき(2021年10月)

Fig. 1(f) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (October 2021).



May

Jun

Jul

深部低周波地震(微動)活動

第2図(a) 東海地域から豊後水道にかけての深部低周波地震活動(2021年5月~7月).

338

Fig. 2(a) Seismic activity of Low-Frequency Events from the Tokai region to the Bungo Channel (May – July 2021).

深部低周波地震(微動)活動(2011年8月1日~2021年7月31日)

深部低周波地震(微動)は、「短期的ゆっくりすべり」に密接に関連する現象とみられており、プレート境界の状 態の変化を監視するために、その活動を監視している。



※2018年3月22日から、深部低周波地震(微動)の処理方法の変更(Matched Filter法の導入)により、それ以前と比較して検知能力が変わっている。

第2図(b) つづき(2011年8月~2021年7月). Fig. 2(b) Continued (August 2011 – July 2021).



深部低周波地震(微動)活動

点線は、Hirose et al.(2008)、Baba et al.(2002)によるフィリピン海プレート上面の深さ(10kmごとの等深線)を示す。

第2図(c) 東海地域から豊後水道にかけての深部低周波地震活動(2021年8月~10月).

Fig. 2(c) Seismic activity of Low-Frequency Events from the Tokai region to the Bungo Channel (August – October 2021).

深部低周波地震(微動)活動(2011年11月1日~2021年10月31日)

深部低周波地震(微動)は、「短期的ゆっくりすべり」に密接に関連する現象とみられており、プレート境界の状態の変化を監視するために、その活動を監視している。



※2018年3月22日から、深部低周波地震(微動)の処理方法の変更(Matched Filter法の導入)により、それ以前と比較して検知能力が変わっている。

第2図(d) つづき(2011年11月~2021年10月). Fig. 2(d) Continued (November 2011 – October 2021).



第3図(a) 南海トラフ周辺で発生した主な地震の発震機構解(2021年5月~7月) Fig. 3(a) Focal mechanism solutions for major earthquakes in and around the Nankai Trough (May - July 2021).

南海トラフ沿いとその周辺の発震機構解(2)



第3図(b) つづき(2021年5月~7月)

Fig. 3(b) Continued (May - July 2021).



Fig. 3(c) Continued (August – October 2021).

南海トラフ沿いとその周辺の発震機構解(2)





Fig. 3(d) Continued (August – October 2021).

南海トラフ沿いとその周辺の発震機構解 (3)



- 第3図(e) つづき(2021年8月~10月)
- Fig. 3(e) Continued (August October 2021).

紀伊半島北部から紀伊半島中部の深部低周波地震(微動)活動と 短期的ゆっくりすべり

4月27日から5月5日にかけて、紀伊半島北部から紀伊半島中部で深部低周波地震(微動)を観測した。

深部低周波地震(微動)活動とほぼ同期して、周辺に設置されている複数のひずみ計で地殻変動を 観測した。これらは、短期的ゆっくりすべりに起因すると推定される。

深部低周波地震(微動)活動



第4図(a) 紀伊半島北部から紀伊半島中部の深部低周波地震活動とひずみ変化、及び推定されるゆっくりすべり 領域

Fig. 4(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in northern to central part of Kii Peninsula and strain changes, and the estimated slow slip region.

紀伊半島北部で観測した短期的ゆっくりすべり(4月29日~5月2日)



三重県から和歌山県で観測されたひずみ変化

熊野磯崎、田辺本宮、串本津荷及び津安濃は産業技術総合研究所のひずみ計である。

346

Fig. 4(b) Continued.

東海の深部低周波地震(微動)活動と 短期的ゆっくりすべり

4月29日から5月6日にかけて、東海で深部低周波地震(微動)を観測した。 深部低周波地震(微動)活動とほぼ同期して、周辺に設置されている複数のひずみ計で地殻変動を 観測した。これらは、短期的ゆっくりすべりに起因すると推定される。

深部低周波地震(微動)活動



第5図(a) 東海の深部低周波地震活動とひずみ変化,及び推定されるゆっくりすべり領域

Fig. 5(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in Tokai region and strain changes, and the estimated slow slip region.

東海で観測した短期的ゆっくりすべり(4月30日~5月4日)



愛知県から静岡県で観測されたひずみ変化



第5図(b) つづき

Fig. 5(b) Continued.

東海で観測した短期的ゆっくりすべり(4月30日~5月4日)



前図に観測されたひずみ観測点での変化量を元にすべり推定を行ったところ、 低周波地震とほぼ同じ場所にすべり域が求まった。

断層モデルの推定は、産総研の解析方法(板場ほか,2012)を参考に以下の2段階で行う。 ・断層サイズを20km×20kmに固定し、位置を0.05度単位でグリッドサーチにより推定する。 ・その位置を中心にして、他の断層パラメータの最適解を求める。

第5図(c) つづき

Fig. 5(c) Continued.

紀伊半島北部の深部低周波地震(微動)活動と 短期的ゆっくりすべり

5月7日から16日にかけて、紀伊半島北部で深部低周波地震(微動)を観測した。 深部低周波地震(微動)活動とほぼ同期して、周辺に設置されている複数のひずみ計で地殻変動を 観測した。これらは、短期的ゆっくりすべりに起因すると推定される。

深部低周波地震(微動)活動



- 第6図(a) 紀伊半島北部の深部低周波地震活動とひずみ変化、及び推定されるゆっくりすべり領域
- Fig. 6(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in northern part of Kii Peninsula and strain changes, and the estimated slow slip region.

紀伊半島北部で観測した短期的ゆっくりすべり(5月9日~17日)





第6図(b) つづき

Fig. 6(b) Continued.

紀伊半島北部で観測した短期的ゆっくりすべり(5月9日~17日)



前図に観測されたひずみ観測点での変化量を元にすべり推定を行ったところ、 図の場所にすべり域が求まった。

断層モデルの推定は、産総研の解析方法(板場ほか,2012)を参考に以下の2段階で行う。 ・断層サイズを20km×20kmに固定し、位置を0.05度単位でグリッドサーチにより推定する。 ・その位置を中心にして、他の断層パラメータの最適解を求める。

第6図(c) つづき

Fig. 6(c) Continued.
四国東部の深部低周波地震(微動)活動

5月19日から28日にかけて、四国東部で深部低周波地震(微動)を観測した。

深部低周波地震(微動)活動



第7図 四国東部の深部低周波地震活動

Fig. 7 Activity of deep low-frequency earthquakes in eastern part of Shikoku region.

東海の深部低周波地震(微動)活動と 短期的ゆっくりすべり

5月22日から28日にかけて、東海で深部低周波地震(微動)を観測した。 深部低周波地震(微動)活動とほぼ同期して、周辺に設置されている複数のひずみ計で地殻変動を 観測した。これらは、短期的ゆっくりすべりに起因すると推定される。

深部低周波地震(微動)活動



第8図(a) 東海の深部低周波地震活動とひずみ変化,及び推定されるゆっくりすべり領域

Fig. 8(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in Tokai region and strain changes, and the estimated slow slip region.

東海で観測した短期的ゆっくりすべり(5月22日~23日)



浜松春野は静岡県のひずみ計である。

第8図(b) つづき

Fig. 8(b) Continued.

四国西部の深部低周波地震(微動)活動と短期的ゆっくりすべり

6月4日から6日にかけて、四国西部で深部低周波地震(微動)を観測した。 深部低周波地震(微動)活動とほぼ同期して、周辺に設置されているひずみ計で地殻変動を観測した。これらは、短期的ゆっくりすべりに起因すると推定される。

深部低周波地震(微動)活動



- 第9図(a) 四国西部の深部低周波地震活動とひずみ変化、及び推定されるゆっくりすべり領域
- Fig. 9(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in western part of Shikoku region and strain changes, and the estimated slow slip region.

四国西部で観測した短期的ゆっくりすべり(6月4日~5日)



愛媛県から高知県で観測されたひずみ変化

西予宇和、新居浜黒島及び土佐清水松尾は産業技術総合研究所のひずみ計である。

357

Fig. 9(b) Continued.





四国中部から四国西部の深部低周波地震(微動)活動と 短期的ゆっくりすべり

7月16日から8月1日にかけて、四国中部から四国西部で深部低周波地震(微動)を観測した。7月16日 に四国中部で始まった活動は、22日頃からは主に四国西部で見られた。

深部低周波地震(微動)活動とほぼ同期して、周辺に設置されている複数のひずみ計で地殻変動を観測した。これらは、短期的ゆっくりすべりに起因すると推定される。

深部低周波地震(微動)活動



第 10 図 (a) 四国中部から四国西部の深部低周波地震活動とひずみ変化,及び推定されるゆっくりすべり領域 Fig. 10(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in central to western part of Shikoku region and strain changes, and the estimated slow slip region.

四国中部から西部で観測した短期的ゆっくりすべり(7月18日~8月1日)

愛媛県から高知県で観測されたひずみ変化



第 10 図 (b) つづき

359

Fig. 10(b) Continued.

四国中部から西部で観測した短期的ゆっくりすべり(7月18日~8月1日)



前図に観測されたひずみ観測点の変化量を元にすべり推定を行ったところ、 図の場所にすべり域が求まった。

断層モデルの推定は、産総研の解析方法(板場ほか,2012)を参考に以下の2段階で行う。 ・断層サイズを20km×20kmに固定し、位置を0.05度単位でグリッドサーチにより推定する。 ・その位置を中心にして、他の断層パラメータの最適解を求める。

第 10 図 (c) つづき

Fig. 10(c) Continued.

紀伊半島中部から紀伊半島西部の 深部低周波地震(微動)活動と短期的ゆっくりすべり

7月20日から25日にかけて、紀伊半島中部から紀伊半島西部で深部低周波地震(微動)を観測した。20日 に紀伊半島中部で始まった活動は、23日頃から25日にかけて主に紀伊半島西部で見られた。 深部低周波地震(微動)活動とほぼ同期して、周辺に設置されている複数のひずみ計で地殻変動を観測した。これらは、短期的ゆっくりすべりに起因すると推定される。

深部低周波地震(微動)活動



第11図(a) 紀伊半島中部から紀伊半島西部の深部低周波地震活動とひずみ変化,及び推定されるゆっくりすべり 領域

Fig. 11(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in central to western part of Kii Peninsula and strain changes, and the estimated slow slip region.



紀伊半島中部から西部で観測した短期的ゆっくりすべり(7月20日~24日)

第 11 図 (b) つづき

Fig. 11(b) Continued.

東海の深部低周波地震(微動)活動と短期的ゆっくりすべり

9月15日から23日にかけて、東海で深部低周波地震(微動)を観測した。 深部低周波地震(微動)活動とほぼ同期して、周辺に設置されている複数のひずみ計で地殻変動を 観測した。これらは、短期的ゆっくりすべりに起因すると推定される。

深部低周波地震(微動)活動



第 12 図 (a) 東海の深部低周波地震活動ひずみ変化,及び推定されるゆっくりすべり領域 Fig. 12(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in Tokai region and strain changes, and the estimated slow slip region.



東海で観測した短期的ゆっくりすべり(9月16日~22日)

第 12 図 (b) つづき

Fig. 12(b) Continued.



 ・フィリピン海プレート上面の深さは、Hirose et al.(2008)、Baba et al.(2002)による。 震央分布図中の点線は10km ごとの等深線を示す。

・日向灘のM5.5以上の地震、その他の領域のM4.5以上の地震に吹き出しを付している。

・発震機構解の横に「S」の表記があるものは、精度がやや劣るものである。

第13図(a) プレート境界とその周辺の地震活動

Fig. 13(a) Seismic activity around the plate boundary.

プレート境界とその周辺の地震活動 フィリピン海プレート上面の深さから±6km未満の地震を表示している。



震央分布図の各領域内のMT図・回数積算図



※M≧1.5の地震を表示していることから、検知能力未満の地震も表示しているため、回数積算図は参考と して表記している。

第 13 図 (b) つづき Fig. 13(b) Continued.



想定南海トラフ地震の発震機構解と類似の型の地震

(1987年9月1日~2021年10月31日、M≥3.2、2021年8月~10月の地震を赤く表示)

 ・フィリピン海プレート上面の深さは、Hirose et al.(2008)、Baba et al.(2002)による。 震央分布図中の点線は10kmごとの等深 線を示す。

・今期間に発生した地震(赤)、日向灘のM6.0以上、その他の地域のM5.0以上の地震に吹き出しを付けている。

・発震機構解の横に「S」の表記があるものは、精度がやや劣るものである。

・吹き出しの右下の数値は、フィリピン海プレート上面の深さからの差を示す。+は浅い、-は深いことを示す。

・吹き出しに「CMT」と表記した地震は、発震機構解と深さはCMT解による。Mは気象庁マグニチュードを表記している。

・発震機構解の解析基準は、解析当時の観測網等に応じて変遷しているため一定ではない。



第14図 想定南海トラフ地震の発震機構解と類似の型の地震

Fig. 14 Earthquakes whose focal mechanisms were similar to that of the anticipated Nankai Trough earthquake.

南海トラフ巨大地震の想定震源域とその周辺の地震活動指数

2021年10月31日

領域		①静岡県 中西部		②愛知県			③浜名湖 周辺		④駿河 湾		⑤ 東海		⑥東南 海	⑦ 南海
		地	プ	地	プ		プ		全		全		全	全
地震活動指数		3	2	6	4		2		3		4		3	7
平均回数		16.5	18.4	26.6	13.7		13.3		13.2		18.1		19.5	21.5
Mしきい値		1.1		1.1			1.1		1.4		1.5		2.0	2.0
クラスタ 除去	距離	3km		3km			3km		10km		10km		10km	10km
	日数	7 E	3	7	日		7日		10	日	10日		10日	10日
対象期間		60日	90日	60日	30 E	Ξ	360	日	180)日 901			360日	90日
深さ		0~ 30km	0~ 60km	0~ 30km	0~ 60kr	, m	0~ 60k	m	0~ 60ł	~ (m	0~ 60km		0~ 100km	0~ 100km
領域		南海トラフ沿い		1	①日向		2紀伊	13和歌				(15	紀伊半	
		⑧東側	10西(則	難		半島	ŀ	Ц			島		
		全	全	:	È		地	ţ	也	地			プ	プ
地震活動指数		7	1		4		4		4	7			4	3
平均回数		12.4	14.5	2	20.7		22.9	41.6		30.8		27.8		28.1
Mしきい値		2.5	2.5	2	2.0		1.5	1.5		1.5		1.5		1.5
クラスタ 除去	距離	10km	10kn	n 10	10km		3km	3km		3km		3km		3km
	日数	10日	10日	1(0日		7日	7	日	7日			7日	7日
対象期間		720日	360 E	E 60	60日		20日	60日		90日			30日	30日
深さ		0~ 100km	0~ 100ki	0 m 10	~ Okm 2		0~ 20km	0~ 20km		0~ 20km		1	20~ 100km	20~ 100km

*基準期間は、全領域1997年10月1日~2021年10月31日

*領域欄の「地」は地殻内、「プ」はフィリピン海プレート内で発生した地震であることを示す。ただし、震源の深さから便宜的に分類しただけであり、厳密に分離できていない場合もある。「全」は浅い地震から深い地震まで全ての深さの地震を含む。 *③の領域(三重県南東沖)は、2004年9月5日以降の地震活動の影響で、地震活動指数を正確に計算できないため、掲載していない。



*Hirose et al.(2008)、Baba et al.(2002)によるプレート境界の等深線を破線で示す。

第15図 南海トラフ周辺の地震活動指数の表

Fig. 15 Table of seismic activity levels in and around the Nankai Trough.







第 16 図 (b) つづき Fig. 16(b) Continued.

地震活動指数一覧

2021年10月31日



第 16 図 (c) つづき Fig. 16(c) Continued.

8-4 南海トラフ周辺における最近の傾斜変動(2021 年 5 月~ 2021 年 10 月) Recent Continuous Crustal Tilt Observation around the Nankai Trough (May 2021 – October 2021)

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2021年5月から2021年10月にかけての傾斜変動観測結果について報告する.第1図に観測点の 分布,第2図に各観測点での傾斜の時間値を示す.表示している観測データはすべて BAYTAP-G¹⁾ により潮汐及び気圧応答成分を除去し,適宜ステップ補正および先頭2ヶ月のデータで推定したリ ニアトレンド補正を施している.

以下の期間と地域でスロースリップイベントによると考えられる傾斜変動²⁾が確認されている. この変動に伴って、顕著な深部低周波微動の活動³⁾が確認されている.

·2021 年 5 月 9 日~ 5 月 15 日頃 紀伊半島北東部(第 2 図 (f))

・2021 年 7 月 24 日~ 8 月 1 日頃 四国中西部(第 2 図 (a), (b), (c))

その他, 傾斜変動からスロースリップイベントの断層モデルが推定されていない期間においても, 豊後水道から東海地方にかけて微動活動が確認できる³⁾.

なお,雨や気圧変化のような気象要因と考えられる変動や計測機器等の問題と思われる見かけの 傾斜変動はしばしばみられる.その中で明からに計測機器不具合等によると推定される場合には一 定期間その記録は表示しないことがある.

> (関口 渉次) SEKIGUCHI Shoji

謝辞

気象庁が公開している気象台等の気象観測データを使用しました.地図の県境データについては 国土地理院地球地図日本の行政界データをもとに作成したものを使用しました.記して謝意を表し ます.

参考文献

- 1) Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, and M. Ishiguro, 1991, A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.
- 2) 西南日本における短期的スロースリップイベント (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月), *予知連会報*, **本号**.
- 3) 西南日本における深部低周波微動活動 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月), 予知連会報, 本号.





第1図 傾斜観測点配置(丸印).図2では観測点シンボルの色で分けしたグループ毎に記録を示している.使用 した気象庁気象観測点を三角形(黄色)であわせて示す.

Fig. 1 Tilt observation stations (colored solid circles). Tilt data of stations grouped by the symbol color are depicted in Fig 2 (a) - (o). Meteorological stations operated by the Japan Meteorological Agency are also shown by yellow triangles.

(a) Northwest Shikoku



第2図(a) 傾斜の時間値記録(四国北西部)及び気圧・日雨量(宇和島).

Fig. 2(a) Hourly tilt record in northwest Shikoku, and atmospheric pressure and daily precipitation at Uwajima.

(b) Southwest Shikoku



- 第2図(b)傾斜の時間値記録(四国南西部)及び気圧・日雨量(宿毛).なお,星印が観測点名では直線補正が施 されている.
- Fig. 2(b) Hourly tilt record in southwest Shikoku, and atmospheric pressure and daily precipitation at Sukumo. Linear detrend is applied to the channel of which code name ends with asterisk.

(c) Central Shikoku ↑ N,E down SJOH.N SJOH.E MTYH.N MTYH.E GHKH.N Tilt (µrad) GHKH.E INOH.N INOH. 住 SSKH.N SSKH.E 0.5μ rad 1025 1000 re (hP at Kochi 200 - Precipitation (mm) at Kochi 0 05 06 07 08 09 10 2021 SJOH MTYH HKH NOH SSKH ^{Kochi}

第2図(c) 傾斜の時間値記録(四国中部)及び気圧・日雨量(高知).

Fig. 2(c) Hourly tilt record in central Shikoku, and atmospheric pressure and daily precipitation at Kochi.



- 第2図(d) 傾斜の時間値記録(四国東部)及び気圧・日雨量(室戸岬).なお,星印が観測点名では直線補正が施されている.
- Fig. 2(d) Hourly tilt record in east Shikoku, and atmospheric pressure and daily precipitation at Muroto-misaki. Linear detrend is applied to the channel of which code name ends with asterisk.



第2図(e) 傾斜の時間値記録(紀伊半島南西部)及び気圧・日雨量(潮岬).

Fig. 2(e) Hourly tilt record in southwest Kii peninsula, and atmospheric pressure and daily precipitation at Shiono-misaki.



第2図(f) 傾斜の時間値記録(紀伊半島北東部)及び気圧・日雨量(津).

Fig. 2(f) Hourly tilt record in northeast Kii peninsula, and atmospheric pressure and daily precipitation at Tsu.



第2図(g) 傾斜の時間値記録(愛知西部)及び気圧・日雨量(伊良湖).

Fig. 2(g) Hourly tilt record in west Aichi, and atmospheric pressure and daily precipitation at Irako.



第2図(h)傾斜の時間値記録(愛知東部)及び気圧・日雨量(名古屋).

Fig. 2(h) Hourly tilt record in east Aichi, and atmospheric pressure and daily precipitation at Nagoya.



第2図(i) 傾斜の時間値記録(静岡西部)及び気圧・日雨量(浜松).

Fig. 2(i) Hourly tilt record in west Shizuoka, and atmospheric pressure and daily precipitation at Hamamatsu.



第2図(j) 傾斜の時間値記録(静岡中北部)及び気圧・日雨量(静岡).

Fig. 2(j) Hourly tilt record in north-central Shizuoka, and atmospheric pressure and daily precipitation at Shizuoka.



第2図(k) 傾斜の時間値記録(静岡中南部)及び気圧・日雨量(静岡).

Fig. 2(k) Hourly tilt record in south-central Shizuoka, and atmospheric pressure and daily precipitation at Shizuoka.



第2図(1) 傾斜の時間値記録(伊豆)及び気圧・日雨量(網代).

Fig. 2(1) Hourly tilt record in Izu peninsula, and atmospheric pressure and daily precipitation at Ajiro.



第2図(m)傾斜の時間値記録(伊豆半島東部)及び気圧・日雨量(網代). Fig. 2(m) Hourly tilt record in east Izu peninsula, and atmospheric pressure and daily precipitation at Ajiro.



第2図(n)傾斜の時間値記録(関東南西部)及び気圧・日雨量(河口湖).

Fig. 2(n) Hourly tilt record in southwest Kanto, and atmospheric pressure and daily precipitation at Kawaguchiko.



第2図 (o) 傾斜の時間値記録(房総)及び気圧・日雨量(勝浦).

Fig. 2(o) Hourly tilt record in Boso, and atmospheric pressure and daily precipitation at Katsuura.
8-5 南海トラフ沿いの海底地殻変動観測結果 Seafloor movements along the Nankai Trough observed by seafloor geodetic observations

海上保安庁 Japan Coast Guard

海上保安庁では、南海トラフ巨大地震の想定震源域近傍での固着状態ならびに地殻変動を把握す るため、南海トラフ沿いにおいて、海底地殻変動観測を実施している.第1図に、最近約4年間の 観測結果を示す.海底の移動速度は、観測結果をロバスト回帰したものである.陸上の移動速度は 国土地理院 GEONET の同一期間の F5 解を線形回帰したものである.第2図には、変位及び変位速 度(4.1年の移動時間窓でのロバスト回帰)の時系列を示す.

Site name	Lat.	Lon.	Velocity		Period	Data
	(°N)	(°E)	(cm/yr) (deg)			
(9) TOK1	34.08	138.13	1.7	283.8	11/19/2017 - 08/24/2021	18
(10) TOK2	33.88	137.60	3.5	301.2	11/19/2017 - 08/25/2021	18
(11) TOK3	34.18	137.39	4.7	297.8	11/18/2017 - 07/05/2021	16
(12) ZENW	33.09	137.55	-	-	02/20/2020 - 07/06/2021	6
(13) KUM1	33.67	137.00	4.0	288.9	11/18/2017 - 09/12/2021	20
(14) KUM2	33.43	136.67	3.1	317.5	11/17/2017 - 09/12/2021	21
(15) KUM3	33.33	136.36	3.7	295.0	11/17/2017 - 09/13/2021	22
(16) KUM4	33.08	136.64	-	-	02/21/2020 - 09/13/2021	8
(17) SIOW	33.16	135.57	3.4	309.3	11/17/2017 - 09/14/2021	21
(18) SIO2	32.98	135.99	-	-	03/18/2020 - 09/14/2021	8
(19) MRT1	33.35	134.94	4.9	300.4	07/31/2017 - 07/03/2021	21
(20) MRT2	32.87	134.81	3.2	289.5	11/16/2017 - 09/15/2021	25
(21) MRT3	32.80	135.35	-	-	08/10/2019 - 09/15/2021	10
(22) TOS1	32.82	133.67	5.1	308.4	07/30/2017 - 06/28/2021	19
(23) TOS2	32.43	134.03	6.3	297.9	11/13/2017 - 09/15/2021	18
(24) ASZ1	32.37	133.22	5.8	307.5	11/14/2017 - 09/16/2021	19
(25) ASZ2	31.93	133.58	4.5	303.1	06/19/2017 - 06/27/2021	18
(26) HYG1	32.38	132.42	2.9	296.3	06/19/2017 - 06/26/2021	20
(27) HYG2	31.97	132.49	2.7	296.4	06/18/2017 - 06/26/2021	22
GEONET					09/16/2017 - 09/16/2021	



第1図 南海トラフ沿いの海底の水平地殻変動 (直近約4年間の移動速度)【アムールプレート固定】

Fig. 1 Horizontal seafloor crustal movements along the Nankai Trough inrecent 4 years with respect to the stable part of the Amur plate.



第2図 GNSS-A観測時系列【アムールプレート固定】

391

- ※ 各図の右列は、4.1年の時間窓による回帰直線から求めた変動速度
- ※ 縦のバーは速度推定の 95% 信頼区間,横のバーは速度推定のデータ期間
- ※ 水平成分の座標軸は北から時計回りに 300°回転
- Fig. 2 GNSS-A time series data with respect to the stable part of the Amur plate.
- X Plots on the right columns indicate velocities, derived by linear regression using a 4.1 year rolling time window.
- * The vertical bars indicate 95% confidence intervals, the horizontal bars indicate data periods for estimating the velocities.
- % The horizontal axes are rotated 300° clockwise from the north.



第2図 GNSS-A観測時系列【アムールプレート固定】

392

- ※ 各図の右列は,4.1年の時間窓による回帰直線から求めた変動速度
- ※ 縦のバーは速度推定の 95% 信頼区間,横のバーは速度推定のデータ期間
- ※ 水平成分の座標軸は北から時計回りに 300°回転

Fig. 2 GNSS-A time series data with respect to the stable part of the Amur plate (continued).



- 第2図 GNSS-A 観測時系列【アムールプレート固定】
- ※ 各図の右列は,4.1年の時間窓による回帰直線から求めた変動速度
- ※ 縦のバーは速度推定の 95% 信頼区間,横のバーは速度推定のデータ期間
- ※ 水平成分の座標軸は北から時計回りに 300°回転

Fig. 2 GNSS-A time series data with respect to the stable part of the Amur plate (continued).



第2図 GNSS-A 観測時系列【アムールプレート固定】

- Ж
- 各図の右列は、4.1年の時間窓による回帰直線から求めた変動速度 縦のバーは速度推定の 95% 信頼区間、横のバーは速度推定のデータ期間 Ж
- Х 水平成分の座標軸は北から時計回りに 300°回転
- Fig. 2 GNSS-A time series data with respect to the stable part of the Amur plate (continued).

8-6 南海トラフ沿いの長期的スロースリップの客観検知 Objective detection of long-term slow slip events along the Nankai Trough

気象庁気象研究所 Meteorological Research Institute, JMA

GNSS データを用いて南海トラフ沿いの長期的スロースリップ(SSE)による地殻変動を客観的 に検知した.手法はKobayashi (2017)¹⁾と同様で,期間のみを延長した.手法について簡潔に書く と以下の通りである.データは国土地理院 GEONET の GNSS 座標値 F5 解を使用した.GNSS 座標 値データからは GEONET 観測点のアンテナ交換などに伴うオフセットと主な地震に伴うオフセッ ト,年周・半年周成分を除いた.長期的 SSE の影響がほぼ見られない中国地方(九州沿いは九州 北西部)の観測点の共通ノイズを全点から引き去り,領域全体を固定する.各観測点の水平成分か らフィリピン海プレート沈み込みと逆方向(S55E)の成分を計算し,南海トラフ沿いのプレート 等深線 25 km に沿って設定した 0.1 度間隔の地点ごとに設定した 50 × 100 km の矩形範囲内の各観 測点の成分の平均値を求めた.さらに 2004 年三重県南東沖の地震(M7.4),2011 年東北地方太平洋 沖地震(M9.0),2016 年熊本地震(M7.3),2019.1/8 種子島近海の地震(M6.0),および 2019.5/10 日向 灘の地震(M6.3)の余効変動を除去した.求めた地点ごとの時系列と1 年の傾斜期間を持つランプ 関数との相互相関と,対象期間前後の変化量を求めた.なお処理の仕様上,最新期間については, 今後データ追加に伴い解析結果が変わる可能性がある.

非定常変位を示す相関係数 0.6 以上,変化量 2 mm 以上について第 1 図に色を付けて示す.図に示された高相関の時空間分布は,変動源自体ではなく変化が見られた範囲を意味している.高相関の分布はこれまでに知られている長期的 SSE による非定常変位とよく対応している.

また,第2図に2年間あたりの変化量から推定した長期的スロースリップのモーメントマグニ チュード Mw 分布を示す²⁾.上記同様の 0.1 度間隔の地点を中心としたプレート境界上の矩形断層 に一定のすべりを与え,その地点に対応する地表の矩形範囲内の各観測点の理論変位の平均を求め た.2年間の観測変化量が大きい/小さい場合でも,すべりの範囲は理論範囲を計算した矩形断層 にあると仮定すると,矩形断層でのすべり量と観測変化量は比例関係にあるため,2年間の観測変 化量から2年あたりのすべり量を求め,対応する Mw を算出した.継続期間の長い東海地域 T1 な ど一部を除き,観測値から個別に推定された規模との差は概ね Mw 0.2 以内に収まっている.

謝辞

調査には国土地理院 GEONET の GNSS 座標値データ,アンテナ交換等のオフセット量を使用さ せていただきました.

参考文献

1) Kobayashi (2017), Earth Planets Space, 69, 171, doi:10.1186/s40623-017-0755-7.

2) 小林昭夫 (2021), *気象研究所研究報告*, 69, 1-14, doi:10.2467/mripapers.69.1.





第1図 長期的スロースリップ客観検知図(1996年から2021年10月) 右端の縦線は最新データ日を示す.
T1: 東海 2000 ~ 2005年, T2: 東海 2013 ~ 2016年
SH: 志摩半島 2017 ~ 2018年, 2019 ~ 2020年
K1: 紀伊水道 1996 ~ 1997年, K2: 紀伊水道 2000 ~ 2002年, K3: 紀伊水道 2014 ~ 2016年, K4: 紀伊水道 2019年~
S1: 四国西部 2005年, S2: 四国中部 2019年~
B1: 豊後水道 1997 ~ 1997年, B2: 豊後水道 2003年, B3: 豊後水道 2010年, B4: 豊後水道 2014年, B5: 豊後水道 2018 ~ 2019年
H1: 日向灘南部 2020 ~ 2021年
Fig. 1 Spatiotemporal distribution of unsteady displacements caused by the long-term slow slip events. The rightmost vertical line indicates the latest data date.

- T1: Tokai 2000 2005, T2: Tokai 2013 2016
- SH: Shima Peninsula 2017 2018, 2019 2020
- K1: Kii Channel 1996 1997, K2: Kii Channel 2000 2002, K3: Kii Channel 2014 2016, K4: Kii Channel 2019 -
- S1: Western Shikoku 2005, S2: Central Shikoku 2019 -
- B1: Bungo Channel 1997 1997, B2: Bungo Channel 2003, B3: Bungo Channel 2010, B4: Bungo Channel 2014,
- B5: Bungo Channel 2018 2019
- H1: Southern Hyuganada 2020 2021.



第2図 長期的スロースリップの規模分布(1996年から2021年10月) 2年間あたりの変化量から推定したモーメントマグニチュード.イベントの略号は第1図と同じ.

Fig. 2 Moment magnitude distribution of long-term slow slip events. The event abbreviations are the same as in Fig. 1.

8-7 内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測 Continuous Observations of Crustal Deformations in and around Intraplate Seismic Gaps

気象庁気象研究所 Meteorological Research Institute, JMA

気象研究所では、いわゆる「内陸部の地震空白域」の調査研究のため、近畿地方の今津(滋賀 県高島市、35°25′28″N、136°00′42″E)及び敦賀(福井県敦賀市35°37′16″N、136 °04′02″E)に石井式三成分ひずみ計・傾斜計からなる地殻変動観測施設を設置し(第1図)、 1996年5月より連続観測を行っている¹⁾.第2、3図に今津・敦賀観測点の最新3年間、および最 新6ヶ月間の観測データ(時間値)をそれぞれ示す.

今津観測点付近には琵琶湖西岸断層帯の知内,饗庭野断層が存在する²⁾. 断層の傾斜角が 60 度 で西上がりの逆断層とすると,Mw5.1 のすべりがあった際に期待される今津でのひずみ変化は約 5 × 10⁶strain である. 敦賀観測点付近には敦賀断層が存在する³⁾. 断層の傾斜角が 90 度で右横ずれ 断層とすると,Mw5.4 のすべりがあった際に期待される敦賀でのひずみ変化は約 5 × 10⁶strain で ある. これ以上のひずみ変化が見られないことから,この期間にこれらの規模以上のすべりは発生 しなかったと推定される.

参考文献

- 1) 気象研究所,内陸部の地震空白域における地殻変動観測,連絡会報,57,554-558,1997.
- 2) 地震調査委員会,琵琶湖西岸断層帯の評価 (一部改訂),

http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09aug biwako/index.htm, 2009.

- 3) 地震調査委員会,湖北山地断層帯の評価, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/03jun_kohoku/index.htm, 2003.
- 4) 活断層研究会,新編日本の活断層,東京大学出版会,437pp,1991.



第1図 今津・敦賀観測点の位置. 図中の線は活断層研究会 (1991)⁴⁾ による活断層の位置.

Fig. 1 Locational map of crustal deformation observation stations (Imazu and Tsuruga). The lines in the figure are the position of active faults by The Research Group for Active Faults of Japan (1991).



- 第2図 今津観測点における(上)2018年11月~2021年10月,(下)2021年5月~2021年10月のひずみ・ 傾斜変化(時間値).毎年冬のひずみ・水位変化は,観測点付近の融雪のための地下水汲み上げに伴うもの.
- Fig. 2 (Upper) Changes in crustal strain and tilt at Imazu from November 2018 to October 2021.
 (Lower) Changes in the same values from May 2021 to October 2021. The changes in strain and water level every winter were caused by the pumping of groundwater to melt snow near the station.





Fig. 3 (Upper) Changes in crustal strain and tilt at Tsuruga from November 2018 to October 2021. (Lower) Changes in the same values from May 2021 to October 2021.

8-8 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2021 年 5 月~ 2021 年 10 月) The variation of the strain, tilt and groundwater level in the Shikoku District and Kii Peninsula, Japan (from May 2021 to October 2021)

産業技術総合研究所

Geological Survey of Japan, AIST.

産業技術総合研究所(産総研)では,東海・紀伊半島・四国の地下水等総合観測施設 19 点において, 歪・地下水等の観測を行っている. 観測点配置図を第1図に示す.

第2~36 図には、2021年5月~2021年10月における歪(・傾斜)・地下水位の1時間値の生デー タ(上線)と補正値(下線)を示す. 歪・傾斜の図において「N120E」などと示してあるのは、歪・ 傾斜の測定方向が北から120[°]東方向に回転していることを示す.補正値は、潮汐解析プログラム BAYTAP-G¹⁾によって、気圧・潮汐・不規則ノイズの影響を除去した結果である. 歪・傾斜のグラ フについては、直線トレンド(1次トレンド)を除去している. なお、HKSiの補正値は、時系列 解析プログラム MR-AR によって、気圧・潮汐・降雨の影響を除去した結果である.

(北川 有一・板場 智史・松本 則夫・落 唯史・木口 努・矢部 優)

参考文献

1) Tamura et al. (1991), *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516. A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion.

第1表 地下水等総合観測点の一覧.

Table. 1 List of the observation sites.

3文字コード (変更無し)	旧名称		新名称	新名称 ふりがな	市区町村	図
TYS	豊田下山	\rightarrow	豊田神殿	とよたかんどの	愛知県豊田市	2,3
NSZ	西尾善明	変更無し	西尾善明	にしおぜんみょう	愛知県西尾市	4,5
TYE	豊橋東	\rightarrow	豊橋多米	とよはしため	愛知県豊橋市	6,7
HKS	北勢	変更無し	北勢	ほくせい	三重県いなべ市	9
ANO	安濃	\rightarrow	津安濃	つあのう	三重県津市	8,9
ITA	飯高赤桶	\rightarrow	松阪飯高	まつさかいいたか	三重県松阪市	10,11
MYM	海山	\rightarrow	紀北海山	きほくみやま	三重県北牟婁郡紀北町	12,13
ICU	井内浦	\rightarrow	熊野磯崎	くまのいそざき	三重県熊野市	14,15
HGM	本宮三越	\rightarrow	田辺本宮	たなべほんぐう	和歌山県田辺市	16,17
KST	串本津荷	変更無し	串本津荷	くしもとつが	和歌山県東牟婁郡串本町	18,19
BND	板東	\rightarrow	鳴門大麻	なるとおおあさ	徳島県鳴門市	20
ANK	阿南桑野	変更無し	阿南桑野	あなんくわの	徳島県阿南市	21,22
MUR	室戸	\rightarrow	室戸岬	むろとみさき	高知県室戸市	23,24
KOC	高知市	\rightarrow	高知五台山	こうちごだいさん	高知県高知市	25,26
SSK	須崎	\rightarrow	須崎大谷	すさきおおたに	高知県須崎市	27,28
TSS	土佐清水	\rightarrow	土佐清水松尾	とさしみずまつお	高知県土佐清水市	29,30
UWA	宇和	\rightarrow	西予宇和	せいようわ	愛媛県西予市	31,32
MAT	松山	\rightarrow	松山南江戸	まつやまみなみえど	愛媛県松山市	33,34
NHK	新居浜黒島	変更無し	新居浜黒島	にいはまくろしま	愛媛県新居浜市	35,36



- 第1図 地下水等総合観測点の分布図(●, ■, ▲, ▼). 観測点の一覧は第1表に示す. ●はデジタル方式の石 井式歪計・傾斜計を併設している新規観測点, ■は Gladwin 式歪計・ミツトヨ式傾斜計を併設している新 規観測点, ▲はアナログ方式の石井式歪計を併設している既存の観測点. ▼は既存の地下水観測点. 灰色 の領域は短期的 SSE 及び深部低周波微動が定常的に発生していると考えられる地域.
- Fig. 1 Location of the observation sites (●, ■, ▲, ▼). The list of the observation sites is shown in Table.1. Circles (●) show the new observation sites at which the Ishii type multi-component strainmeter and the tiltmeter (digital type) are installed. Squares (■) show the new observation sites at which the Gladwin type multi-component strainmeter and the Mitsutoyo type tiltmeter are installed. The triangle (▲) shows the old observation site at which the Ishii type multi-component strainmeter (analog type) is installed. The reversed triangle (▼) shows the old groundwater observation site. The gray mesh shows the area which is thought that short-term slow slip events and deep low frequency tremors occur stationarily.

第3図 Tilt and groundwater level at TYS (時間値) (2021/05/01 00:00 - 2021/11/01 00:00 (JST))



第2図 TYS における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 2 Observed strains at the TYS observation site from May 2021 to October 2021.



第4図 NSZ における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 4 Observed strains at the NSZ observation site from May 2021 to October 2021.



- 第3図 TYS における傾斜・地下水位観測結果 (2021 年5月~2021年10月)
- Fig. 3 Observed tilts and groundwater levels at the TYS observation site from May 2021 to October 2021.

第5図 Tilt and groundwater level at NSZ (時間値) (2021/05/01 00:00 - 2021/11/01 00:00 (JST))



- 第5図 NSZ における傾斜・地下水位観測結果 (2021 年5月~2021年10月)
- Fig. 5 Observed tilts and groundwater levels at the NSZ observation site from May 2021 to October 2021.

- 404 -



第6図 TYE における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 6 Observed strains at the TYE observation site from May 2021 to October 2021.



第8図 ANO における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 8 Observed strains at the ANO observation site from May 2021 to October 2021.



第7図 TYE および TYH における傾斜・地下水位 観測結果 (2021 年 5 月~2021 年 10 月)

Fig. 7 Observed tilts and groundwater levels at the TYE and the TYH observation site from May 2021 to October 2021.



Fig. 9 Observed tilts and groundwater levels at the ANO and the HKS observation site from May 2021 to October 2021.





Fig. 10 Observed strains at the ITA observation site from May 2021 to October 2021.



第11図 ITA における傾斜・地下水位観測結果 (2021 年5月~2021年10月)

Fig. 11 Observed tilts and groundwater levels at the ITA observation site from May 2021 to October 2021.



第 12 図 MYM における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 12 Observed strains at the MYM observation site from May 2021 to October 2021.

第13図 Tilt and groundwater level at MYM (時間値) (2021/05/0100:00 - 2021/11/01 00:00 (JST))



- 第13 図 MYM における傾斜・地下水位観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)
- Fig. 13 Observed tilts and groundwater levels at the MYM observation site from May 2021 to October 2021.



第14図 ICUにおける歪観測結果 (2021年5月~ 2021年10月)

Fig. 14 Observed strains at the ICU observation site from May 2021 to October 2021.



第16図 HGM における歪観測結果 (2021 年5月~ 2021年10月)

Fig. 16 Observed strains at the HGM observation site from May 2021 to October 2021.



- 第15図 ICU における傾斜・地下水位観測結果 (2021 年5月~2021年10月)
- Fig. 15 Observed tilts and groundwater levels at the ICU observation site from May 2021 to October 2021.

第17図 Tilt and groundwater level at HGM (時間値) (2021/05/01 00:00 - 2021/11/01 00:00 (JST))



第17図 HGM における傾斜・地下水位観測結果 (2021年5月~2021年10月)

Observed tilt and groundwater levels at the Fig. 17 HGM observation site from May 2021 to October 2021.



第18図 KST における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 18 Observed strains at the KST observation site from May 2021 to October 2021.



第 20 図 BND における歪・地下水位観測結果 (2021 年 5 月~2021 年 10 月)

Fig. 20 Observed strains and groundwater level at the BND observation site from May 2021 to October 2021.



- 第 19 図 KST における傾斜・地下水位観測結果 (2021 年 5 月~2021 年 10 月)
- Fig. 19 Observed tilts and groundwater levels at the KST observation site from May 2021 to October 2021.



第 21 図 ANK における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 21 Observed strains at the ANK observation site from May 2021 to October 2021.

第21図 Crustal strains at ANK (時間値) (2021/05/01 00:00 - 2021/11/01 00:00 (JST))



第 22 図 ANK における傾斜・地下水位観測結果 (2021 年 5 月~2021 年 10 月)

Fig. 22 Observed tilts and groundwater levels at the ANK observation site from May 2021 to October 2021.



- 第24図 MURにおける傾斜・地下水位観測結果 (2021年5月~2021年10月)
- Fig. 24 Observed tilts and groundwater levels at the MUR observation site from May 2021 to October 2021.



第23図 MUR における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 23 Observed strains at the MUR observation site from May 2021 to October 2021.



第 25 図 KOC における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 25 Observed strains at the KOC observation site from May 2021 to October 2021.

第25図 Crustal strains at KOC (時間値) (2021/05/01 00:00 - 2021/11/01 00:00 (JST))



第26図 KOCにおける傾斜・地下水位観測結果 (2021 年5月~2021年10月)

Fig. 26 Observed tilts and groundwater levels at the KOC observation site from May 2021 to October 2021.



第 28 図 SSK における傾斜・地下水位観測結果 (2021 年 5 月~2021 年 10 月)

Fig. 28 Observed tilts and groundwater levels at the SSK observation site from May 2021 to October 2021.



第 27 図 SSK における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 27 Observed strains at the SSK observation site from May 2021 to October 2021.



- 第 29 図 TSS における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)
- Fig. 29 Observed strains at the TSS observation site from May 2021 to October 2021.

— 410 —



第 30 図 TSS における傾斜・地下水位観測結果 (2021 年 5 月~2021 年 10 月)

Fig. 30 Observed tilts and groundwater levels at the TSS observation site from May 2021 to October 2021.



- 第32図 UWA における傾斜・地下水位観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)
- Fig. 32 Observed tilts and groundwater levels at the UWA observation site from May 2021 to October 2021.



第 31 図 UWA における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 31 Observed strains at the UWA observation site from May 2021 to October 2021.



第 33 図 MAT における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 33 Observed strains at the MAT observation site from May 2021 to October 2021.

第33図 Crustal strains at MAT (時間値) (2021/05/01 00:00 - 2021/11/01 00:00 (JST))



第 34 図 MATにおける傾斜・地下水位観測結果 (2021 年 5 月~2021 年 10 月)

Fig. 34 Observed tilts and groundwater levels at the MAT observation site from May 2021 to October 2021.



第 36 図 NHK における傾斜・地下水位観測結果 (2021 年 5 月~2021 年 10 月)

Fig. 36 Observed tilts and groundwater levels at the NHK observation site from May 2021 to October 2021.



第 35 図 NHK における歪観測結果 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)

Fig. 35 Observed strains at the NHK observation site from May 2021 to October 2021.

8-9 近畿地域の地下水位・歪観測結果(2021 年 5 月~ 2021 年 10 月) Observational Results of Groundwater Levels and Crustal Strains in the Kinki District, Japan (May 2021 – October 2021)

産業技術総合研究所 Geological Survey of Japan, AIST

2021 年 5 月~2021 年 10 月の近畿地域におけるテレメータによる地下水位およびボアホール型 歪計による地殻歪(水平 3 成分)の観測結果を報告する. 観測点は 12 点(観測井は 14 井戸)であ る(第 1 図). 同期間中に第 1 図で示す範囲内で, M4 以上で深さ 30km より浅い地震は, 無かった.

第2~5図には、2021年5月~2021年10月における地下水位1時間値の生データ(上線)と 補正値(下線)を示す.ボアホール型歪計が併設してある観測点については、同期間における歪3 成分の観測値(生データ)も示す. 歪の図において「N120」などと示してあるのは、歪の方向が 北から120度東方向に回転していることを示す.水位補正値(corrected)は、潮汐解析プログラム BAYTAP-Gによって、気圧・潮汐・不規則ノイズの影響を除去した結果である.なお、hno・sed・ tkz・ysk・yst1・yst2およびyst3は地上より上に水位が来るので、井戸口を密閉して水圧を測定し、 それを水位に換算している.

yst1の地下水位の2019年6月27日以降のデータは水位計の異常のためと思われる(第2図). yst3の地下水位の2021年6月2日以降の故障は水位計本体の故障である(第2図).yskの地下水 位の2021年7月20日から7月26日までの故障はデータ収録装置の故障である(第2図).tkzの 歪の2021年10月21日以降の故障は歪計の故障と思われる(第3図).hrbの地下水位の短期的 な上下変化は口元から雨が流れ込んだためと思われる(第3図).gojの地下水位の2020年6月4 日以降の故障は水位計本体の故障である(第4図).hnoの地下水位の2021年7月16日から7月 29日までの欠測は観測小屋のブレーカーが落ちたことによる電源断のため(第5図).hnoの歪の 2021年7月16日以降の故障は観測小屋のブレーカー断の際に歪計が故障したため(第5図).

これらのデータ(グラフ等)は、http://www.gsj.jp/wellweb/ で公開されている.

(北川 有一・松本 則夫・佐藤 努・板場 智史・落 唯史・木口 努・矢部 優)



- 第1図 地下水観測点分布図(●・■). ■は,地下水位に加えて,ボアホール型歪計で地殻歪を測定している観測点.
 yst:安富, ysk:安富北, tkz:宝塚, hrb:平林, sed:西淡, tnn:天王寺, kry:広陵, goj:五條, ngr:岩出東坂本, ohr:大原, hno:花折, hts:愛荘香之庄.
- Fig. 1 Distribution of groundwater observation stations of Geological Survey of Japan, AIST (● ■). At the stations shown by the solid squares, crustal strains are also observed by borehole strainmeters. yst : Yasutomi, ysk : Ystutomi-kita, tkz : Takarazuka, hrb : Hirabayashi, sed : Seidan, tnn : Tennoji, kry : Koryo, goj : Gojo, ngr : Iwade-higashisakamoto, ohr : Oohara, hno : Hanaore, hts : Aishou-konoshou





- 第2図yst1, yst2, yst3, ysk の 2021 年 5 月~ 2021 年 10 月の観測結果.Fig. 2Observation results at yst1, yst2, yst3 and ysk from May 2021 to October 2021.
- 第3図 tkz, hrb, sed, ikd の 2021 年 5 月~ 2021 年 10 月の観測結果.
- Fig. 3 Observation results at tkz, hrb, sed and ikd from May 2021 to October 2021.







第5図 ohr, hno, hks-iの地下水位・地殻歪の2021年5月~2021年10月の観測結果.

Fig. 5 Observation results at ohr, hno and hks-i from May 2021 to October 2021.

9-1 西南日本における深部低周波微動活動 (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月) Activity of deep low-frequency tremor in southwest Japan (May, 2021 – October, 2021)

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

西南日本の沈み込み帯で発生する深部低周波微動¹⁾は、フィリピン海プレートの走向に平行な 帯状の領域内で時空間的に集中して発生し²⁾、短期的スロースリップイベント³⁾や周期 20 秒に卓 越する超低周波地震⁴⁾を伴うことがある。2021 年 5 月から 10 月までの 6 ヶ月間(第 1, 2 図)で、 短期的スロースリップイベント⁵⁾を伴った顕著な活動は、以下のとおりである。

- ・2021年5月9日~16日頃,紀伊半島北部から中部.この活動は三重県北部で開始し、南西方向への活動域の移動がみられた(第2,4図).この領域での顕著な微動活動は、2000年10~11月以来となる(第2,3図).
- ・2021年7月16日~8月1日頃,四国中部から豊後水道.この活動は愛媛県東部での活動開始後, 21日頃まで東方向に活動域の拡大がみられた.23日頃からは西側の領域で活動が開始し,西方 向への活動域の移動がみられた(第2,5図).この領域での顕著な微動活動は,四国中部につい ては2021年4月以来,四国西部から豊後水道については2021年3月以来となる(第3図).

以上の活動のほか,傾斜変動から短期的スロースリップイベントの断層モデルが推定されていない期間にも,東海地方では4月30日~5月4日頃および9月19日~22日頃に(第4図),紀伊 半島中部では,4月27日~5月4日頃に(第4図),四国東部では5月20日~6月2日頃および 8月22日~28日頃に(第5図),それぞれ微動活動の活発化がみられた.

> (松澤孝紀・田中佐千子(防災科研)・小原一成(東大地震研)) MATSUZAWA Takanori, TANAKA Sachiko, and OBARA Kazushige

参考文献

- 1) Obara (2002), Science, 296, 1679-1681.
- 2) Obara & Hirose (2006), Tectonophysics, 417, 33-51.
- 3) Obara et al. (2004), Geophys. Res. Lett., 31, L23602.
- 4) Ito et al. (2007), Science, 315, 503-506.
- 5) 防災科学技術研究所 (2022), *予知連会報*, 107,「西南日本における短期的スロースリップイベント (2021 年 5 月~ 2021 年 10 月)」.
- 6) Maeda & Obara (2009), J. Geophys. Res., 114, B00A09.
- 7) Obara et al. (2010), Geophys. Res. Lett., 37, L13306.



第1図 西南日本で発生した深部低周波微動及び深部超低周波地震⁴⁾の月別震央分布.赤丸が当該期間の微動の震 央を表す.この震央はエンベロープ相関・振幅分布ハイブリッド法⁶⁾及びクラスタリング処理⁷⁾によって 1時間毎に自動処理された微動分布の重心である.青菱形は深部超低周波地震の震央を示す.

Fig. 1 Monthly epicentral distribution of deep low-frequency tremor and deep very low-frequency earthquakes ⁴⁾ in southwest Japan from May 2021 to October 2021. Red circles indicate epicenters of tremor for the period shown in the upper-left corner. The epicenter is the centroid location from one hour distribution estimated by the hybrid method based on the envelope correlation considering the spatial distribution of amplitude ⁶⁾ and clustering process ⁷⁾. Blue diamonds indicate epicenters of deep very low-frequency earthquakes.



第2図 西南日本で発生した深部低周波微動(赤丸)及び深部超低周波地震(青菱形)の約6ヶ月間の時空間分布. Fig. 2 Space-time plot of deep low-frequency tremor and deep very low-frequency earthquakes along the profile from southwest to northeast in southwest Japan for about six months. Red circles and blue diamonds are the same as in Fig. 1.



- 第3図 西南日本で発生した深部低周波微動(赤丸)及び深部超低周波地震(青菱形)の2003年から約19年間の 時空間分布. 黄緑色太線は,傾斜変動から検出された短期的スロースリップイベントを示す.
- Fig. 3 Space-time plot of deep low-frequency tremor and deep very low-frequency earthquakes along the profile from southwest to northeast in southwest Japan for about 19 years from January 2003. Red circles and blue diamonds are the same as in Fig. 1. Thick light green lines are short-term slow slip events detected by Hi-net tiltmeters.



第4図 2021 年5月から2021 年10月までの期間に東海・紀伊半島地域で発生した,主な深部低周波微動及び深部 超低周波地震の活動における震央分布スナップショット.赤丸が当該期間の微動,青菱形が超低周波地震 を表す.

Fig. 4 Daily epicentral distribution of deep low-frequency tremor and deep very low-frequency earthquakes in Tokai and Kii area for major episodes from May 2021 to October 2021. The time duration of each snapshot is shown in the upper-left corner. Red circles and blue diamonds are the same as in Fig. 1.



- 第5図 2021年5月から2021年10月までの期間に四国地域で発生した,主な深部低周波微動及び超低周波地震の 活動における震央分布スナップショット.赤丸が当該期間の微動,青菱形が超低周波地震を表す.
- Fig. 5 Daily epicentral distribution of deep low-frequency tremor and deep very low-frequency earthquakes in Shikoku area for major episodes from May 2021 to October 2021. The time duration of each snapshot is shown in the upper-left corner. Red circles and blue diamonds are the same as in Fig. 1.

9 – 2 中国・四国地方の地殻変動

Crustal Deformations in the Chugoku and Shikoku Districts

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

[四国西部の非定常水平地殻変動(短期的 SSE)]

第1図は,2021年7月~8月に四国西部で発生した深部低周波地震(微動)に同期して発生した短期的 SSE に関する資料である.

第1図上段は、2021年7月19日~8月1日のGNSSデータから時間依存インバージョンでプレー ト境界面上のすべり分布を推定した結果である。年周・半年周成分を2017年1月~2021年8月で 推定、一次トレンドは2017年1月1日~2018年1月1日の期間を定常変動と仮定して推定し、推 定された一次トレンド・年周・半年周成分を除去して得られた非定常的な地殻変動を用いた。四国 西部の低周波地震の発生領域ですべりが推定されている。すべり量の最大は約9mmと推定され、 モーメントマグニチュードは5.9と求まった。図に示された黒色のグリッドは、推定されたすべり 量が標準偏差の3倍を超えており、推定すべりが有意と判断されるグリッドである。下段の2枚の 図は、左が非定常的な地殻変動、右が推定すべりから計算した地殻変動を示している。地殻変動量 が小さいため、ばらつきが相対的に大きいが、観測値をよく説明できていることが分かる。

[四国中部の非定常水平地殻変動(長期的 SSE)]

第2図~8図は,2019年春頃から四国中部で見られている非定常的な地殻変動に関する資料である.

第2図は、一次トレンド・年周・半年周成分除去後の非定常地殻変動ベクトル図である.2017 年1月1日~2018年1月1日の期間を定常変動とし、一次トレンド、年周、半年周成分を推定した. 固定局は京都府の網野観測点である.2017年12月29日~2018年1月4日に対する2021年10月 13日~19日の約3年10か月の期間での非定常的な地殻変動を示している.四国中部に南東向き に最大2cm程度の変動が見られる.

第3~4図は,第2図の図中に示した8観測点の非定常地殻変動3成分の時系列グラフである. 同様に一次トレンド・年周・半年周成分を除去している.(1)~(8)のいずれの観測点でも2019年 春頃から南東向きの変動が見られる.

第5~8図は、非定常的な地殻変動を基に、時間依存インバージョンでプレート境界面上のす ベリ分布を推定した結果に関する資料である.この解析では、年周・半年周成分を2017年1月~ 2021年10月で推定、一次トレンドは2017年1月1日~2018年1月1日の期間を定常変動と仮定 して推定している.すべりの推定では、すべり方向をプレートの沈み込み方向と平行な方向に拘束 している.

第5図(a)は、2019年1月1日~2021年10月9日の期間で推定されたすべり分布を示している. 同時期に発生している紀伊水道の長期的SSE、豊後水道の長期的SSE、四国西部の短期的SSEに よるすべりとあわせ、四国中部にすべりが推定された. 推定されたすべりの最大値は17cm、モー メントマグニチュードは6.3と求まった.

第5図(b)は、観測値と計算値との比較である、観測値をよく説明できていることが分かる.

第6図は、四国中部地域の観測点における観測値と計算値の時間変化を示した図である. 2019 年春頃から見られる東向きの変動がよく説明できていることが分かる.

第7図は、四国中部に位置するグリッドのすべりの時間変化を示した図である. 2019 年春頃からすべりが見られる.

第8図は、図中の実線で囲まれた領域に位置するグリッドのすべりから求めたモーメントの時系 列グラフである. 2019 年春頃からモーメントの増大が見られる.

[室戸岬周辺 電子基準点の上下変動 水準測量と GNSS 連続観測]

第9~10図は,室戸岬周辺の電子基準点間の比高変化について,水準測量の結果とGNSS連続 観測結果とを比較したものである.両者はほぼ同様の傾向を示しており,最新のデータは室戸岬周 辺が沈降する長期的な傾向に沿っている.各図の左下に長期間の変動グラフを示す.室戸岬先端側 の沈降が長期的に継続しており,灰色でプロットしたGNSS連続観測の最近の結果も整合している.

「水準測量]

第11~14図は、室戸岬周辺の水準測量結果である。

第11 図は,徳島県美波町から東洋町を経由して室戸市に至る路線の水準測量結果である.東洋町に対する室戸岬側の長期的な沈降の傾向に変化は見られない.なお,電子基準点「東洋」(950441)は,隣接する水準点 5122 及び 5123 に対して常に沈降しており,局所的な変動の影響を受けている可能性がある.

第12回は、高知県香南市から室戸市に至る路線の水準測量結果である.室戸岬側の沈降の傾向 に変化は見られない.

第13~14 図は,水準測量による室戸地方の上下変動の経年変化である.第13 図が西岸,第14 図が東岸である.今回の測量結果は,長期的な室戸岬先端の沈降傾向の延長上にあるように見える.

[水準測量 愛媛県八幡浜市~今治市~四国中央市]

第15 図は、愛媛県八幡浜市から四国中央市に至る路線の水準測量結果である.最近の2005~2021年の約15年間には、伊予市に対して今治市付近の沈降が認められる.前回(1996~2005年)及び前々回(1990~1996年)も同様の傾向を示している.

[水準測量 愛媛県宇和島市~高知県土佐清水市]

第16図は、愛媛県宇和島市から高知県土佐清水市に至る路線の水準測量結果である. 基本的には、 土佐清水の足摺岬側が平均 5mm/y 前後の沈降であるが、豊後水道の長期的 SSE 時には高知県宿毛 (すくも)市を中心として約 3cm の隆起が生じることから、上から 3 段目のように長期的 SSE の期 間を含む場合には、宿毛市の隆起が目立つプロファイルとなると考えられる. [参考] 豊後水道の 長期的 SSE:1997 年 8 ~ 12 月. 2003 年 8 ~ 12 月. 2009 年秋~ 2010 年夏. 2018 年春~ 2020 年 1 月.


使用データ:F5解(2021/6/10 - 2021/8/28) ※電子基準点の保守等による変動は補正済み トレンド期間:2017/1/1 - 2018/1/1 (年周・半年周は 2017/1/1-2021/8/28 のデータで補正) モーメント計算範囲:上段の図の黒枠内側 黒破線:フィリビン海プレート上面の等深線(弘瀬・他、2007) すべり方向:プレートの沈み込み方向と平行な方向に拘束 青丸:低周波地震(気象庁一元化震源) コンター間隔:1mm 固定局:三隅

GNSSデータから推定された

第1図 四国西部の深部低周波微動と同期したスロースリップ

Fig. 1 Estimated slip distribution on the plate interface beneath the western part of Shikoku.

四国中部の非定常水平地殻変動(1次トレンド・年周期・半年周期除去後)



第2図 四国中部の非定常水平地殻変動

Fig. 2 Transient horizontal deformation in the central part of Shikoku.

'22/1

'22/1

7

7 '22/1

'22/1

7

7 '22/1

7









(3) 網野(960640)→吾北(970830) 南北

ст 2.0

1.5

1.0

0.5

0.0

-0.5

cm 1.5

1.0

0.5

0.0

-0.5

-1.0 -1.5 <u>----</u> '17/1

2

-2

-4

-6

ст 2.0 1.5

1.0

0.5

0.0

-0.5

-1.0

1.0 0.5

0.0 -0.5

-1.0

-1.5

-2.0 -----'17/1

cm 4

0

-2

-4 -6 -8 Line 17/1

17/1 7 '18/1 7 '19/1 7 '20/1 7 '21/1

-8 -----'17/1

-1.0 -----'17/1

Fig. 3 Results of continuous GNSS measurements in the central part of Shikoku with respect to the Amino station (1/2).

'22/1

'22/1

'22/1

四国中部 GNSS連続観測時系列(2)

1次トレンド・年周成分・半年周成分除去後グラフ 計算期間: 2017/01/01~2018/01/01 期間: 2017/01/01~2021/10/19 JST (5) 網野(960640)→伊野(031119) 東西 基準値:-146951.554m (6) 網野(960640)→須崎(950445) 東西 基準値:-149709.187m ст 2.0 1.5 1.0 0.5 0.0 -0.5 -1.0 -----'17/1 7 '20/1 7 '21/1 7 '22/1 7 '18/1 7 '19/1 7 '20/1 7 '21/1 7 (5) 網野(960640)→伊野(031119) 南北 基準値:-237322.818m (6) 網野(960640)→須崎(950445) 南北 基準値:-252629.109m cm 1.5 1.0 0.5 0.0 -0.5 -1.0 -1.5 -----'17/1 '22/1 '20/1 '21/1 '20/1 '21/1 7 '18/1 '19/1 7 7 7 7 7 7 7 (5) 網野(960640)→伊野(031119) 比高 基進値:5.950m сп F (6) 網野(960640)→須崎(950445) 比高 基準値:129.695m 0 -2 -4 -6 ----17/1 7 '20/1 7 '21/1 7 '22/1 7 '18/1 '19/1 7 '20/1 7 '21/1 7 7 (8) 網野(960640)→P久礼(02P120) 東西 基準値:-178466.415m 基準値:-164419.150m ст 2.0



●----[F5:最終解] ●----[R5:速報解]

ст 2.0

1.5

1.0

0.5

0.0

-0.5

cm 1.5

1.0

0.5

0.0

-0.5

-1.0

-1.5 Li---'17/1

cm 6

4 2 0

-2

-4

ст 2.0

1.5

1.0

0.5 0.0

-0.5

-1.0

cm 1.5

1.0

0.5

0.0 -0.5

-1.0

cm 6

0

-2

-4

-6 -----'17/1

7 '18/1 7 '19/1

-1.0 -----'17/1

7 '18/1 7 '19/1

'18/1

7

7 '19/1

第4図 四国中部の GNSS 連続観測時系列

Fig. 4 Results of continuous GNSS measurements in the central part of Shikoku with respect to the Amino station (2/2).



使用データ: F5解(2019/1/1-2021/9/26)+R5解(2021/9/27-2021/10/9) ※電子基準点の保守等による変動は補正済み トレンド期間: 2017/1/1 - 2018/1/1 (年周・半年周成分は2017/1/1 - 2021/10/9のデータで補正) モーメント計算範囲:左図の黒枠内側 観測値:3日間の平均値をカルマンフィルターで平滑化した値 黒破線:フィリピン海プレート上面の等深線(弘瀬・他、2007) すべり方向:プレートの沈み込み方向と平行な方向に拘束 青丸:低周波地震(気象庁一元化震源) (2019/1/1-2021/10/9) 固定局:網野

※ Mwに換算するプログラムの不具合を修正して計算した値を記載。 (今期間について、修正前のプログラムで評価した場合、Mwは6.2。)

第5図(a) 四国中部において推定される長期的ゆっくりすべり(暫定)

429

Fig. 5(a) Estimated slip distribution on the plate interface beneath the central part of Shikoku (preliminary results).

第5図(b) 観測値(黒)と計算値(白)の比較

Fig. 5(b) Comparison of observed (black) and calculated (white) displacements.

四国中部の観測点の座標時系列(黒丸)と計算値(赤線)

時間依存のインバージョン



第6図 四国中部の観測点の座標時系列(黒丸)と計算値(赤線)

Fig. 6 Observed (black dots) and calculated (red line) deformations at the GNSS stations in the central part of Shikoku.



四国中部の長期的ゆっくりすべり



Fig. 7 Time evolution of the estimated slip by the time dependent inversion method.



四国中部SSEのモーメント[※]時系列(試算)

Mw及び最大すべり量はプレート面に沿って評価した値を記載。 すべり量(カラー)及びすべりベクトルは水平面に投影したものを示す。 推定したすべり量が標準偏差(σ)の3倍以上のグリッドを黒色表示している。

※モーメント 断層運動のエネルギーの目安となる量。 地震の場合の Mw(モーメント・マグニチュード)に換算できる。

第8図 時間依存インバージョンで推定されたモーメントの時間変化

Fig. 8 Time evolution of moment by the time dependent inversion method.

室戸岬周辺 電子基準点の上下変動(1)

室戸岬周辺の長期的な沈降傾向に変化は見られない.



- GNSS 連続観測のフロット点は、GEONET による日々の座標値(F5:最終解)から計算した値の月平均値である。
 (最新のプロット点:10/1~10/9の平均値)
- ・水準測量の結果は、最寄りの一等水準点の結果を表示しており、GNSS 連続観測の全期間の値との差が最小となるように描画している。
- ・「水準測量による長期間の上下変動」のグラフにおける、各プロットの色は配点図の水準点の色と対応する。また、灰 色のプロットは GEONET の月平均値を示している。
- ※1 2021/2/2 に電子基準点「安芸」のアンテナ更新及びレドーム交換を実施した。
- ※2 2021/2/5 に電子基準点「高知田野」のアンテナ更新及びレドーム交換を実施した。

第9図 室戸岬周辺 電子基準点の上下変動(水準測量と GNSS)(1)

Fig. 9 Vertical displacements of GEONET stations around Cape Muroto (leveling and GNSS measurements) (1).

室戸岬周辺 電子基準点の上下変動(2)

室戸岬周辺の長期的な沈降傾向に変化は見られない.



- ・ GNSS 連続観測のプロット点は、GEONET による日々の座標値(F5:最終解)から計算した値の月平均値である。
 (最新のプロット点:10/1~10/9の平均値)
- ・水準測量の結果は、最寄りの一等水準点の結果を表示しており、GNSS 連続観測の全期間の値との差が最小となるように描画している。
- ・「水準測量による長期間の上下変動」のグラフにおける、各プロットの色は配点図の水準点の色と対応する。また、灰 色のプロットは GEONET の月平均値を示している。

※1 2012/10/23 に電子基準点「室戸2 (021055)」のアンテナ及び受信機交換を実施した。
 ※2 2015/10/1 に電子基準点「室戸2 (021055)」の受信機交換を実施した。
 ※3 2018/2/13 に電子基準点「室戸2 (021055)」のアンテナ及び受信機交換を実施した。
 ※4 2019/1/16 に電子基準点「徳島海南(950424)」の受信機交換を実施した。
 ※5 2019/7/11 に電子基準点「徳島海南(950424)」のアンテナ交換を実施した。

第10図 室戸岬周辺 電子基準点の上下変動(水準測量と GNSS)(2)

Fig. 10 Vertical displacements of GEONET stations around Cape Muroto (leveling and GNSS measurements) (2).



第11図 美波町~室戸市間の上下変動

Fig. 11 Results of leveling survey along the leveling route from Minami town to Muroto city.





第12図 香南市~室戸市間の上下変動

436

Fig. 12 Results of leveling survey along the leveling route from Konan city to Muroto city.



1896年を基準とした室戸岬の各水準点の経年変化

Fig. 13 Time series of height changes of benchmarks along the leveling route on the coast of the Muroto Peninsula from BM5172 (Konan) to BM5141 (Muroto) referred to BM5172 (Konan).

437



1896年を基準とした室戸岬の各水準点の経年変化

Fig. 14 Time series of height changes of benchmarks along the leveling route on the coast of Muroto Peninsula from BM5106 (Mugi) to BM5140 (Muroto) referred to BM5106 (Mugi).



第15図 八幡浜市~今治市~四国中央市間の上下変動

439

Fig. 15 Results of leveling survey along the leveling route from Yawatahama city to Shikokuchuo city via Imabari city.



第16図 宇和島市~土佐清水市間の上下変動

Fig. 16 Results of leveling survey along the leveling route from Uwajima city to Tosashimizu city.

9-3 西南日本における短期的スロースリップイベント (2021年5月~2021年10月) Short-term slow slip events with non-volcanic tremor in southwest Japan (May 2021-October 2021)

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2021 年 5 月から 2021 年 10 月にかけて西南日本の深部低周波微動¹⁾ に同期して発生した短期的 スロースリップイベント^{2,3)} (SSE) について報告する.第 1 図に今回報告する SSE をまとめた.こ れまでのイベントの履歴については,連絡会報¹⁾を参照されたい.

(1) 2021 年 5 月 紀伊半島北部

2021 年 5 月 9 日~15 日に紀伊半島北部の観測点で,深部低周波微動と同期した SSE による傾斜 変化がとらえられた(第 2 図).傾斜変化ベクトル,データから推定された SSE の矩形断層モデル, モデルから計算される傾斜変化ベクトルを第 3 図に示した.SSE の規模は Mw 6.0 に推定された. SSE のすべり域は同期間に発生した微動および超低周波地震⁵⁰ (VLFE)の震央位置とよく一致し ている.2020 年 10 月~11 月に同地域で Mw 5.8 の短期的 SSE が発生している⁶⁰.

(2) 2021 年 7 月~8月 四国中西部

2021 年 7 月 24 日~8 月 1 日に四国中西部の観測点で,深部低周波微動と同期した SSE による傾 斜変化がとらえられた (第 4 図). 傾斜変化ベクトル,データから推定された SSE の矩形断層モデ ル,モデルから計算される傾斜変化ベクトルを第 5 図に示した. SSE の規模は Mw 6.0 に推定された. SSE のすべり域は同期間に発生した微動および超低周波地震⁵⁾ (VLFE)の震央位置とよく一致し ている. 2021 年 1 月に同地域で Mw 6.2 の短期的 SSE が発生している⁷⁾.

> (木村武志) KIMURA Takeshi

謝辞

気象庁のホームページで公開されている気象台等の気象観測データを使用させていただきました. 記して感謝いたします.

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所 (2021), 予知連会報, 107.
- 2) Obara, et al. (2004), Geophys. Res. Lett., 31 (23), doi:10.1029/2004GL020848.
- 3) Hirose and Obara (2005), *Earth Planets Space*, **57** (10), 961-972.
- 4) Tamura et al. (1991), Geophys. J. Int., 104, 507-516.
- 5) Ito et al. (2007), Science, 315, 503-506.
- 6) 防災科学技術研究所 (2021), *予知連会報*, 105, 414-419.
- 7) 防災科学技術研究所 (2021), 予知連会報, 106, 484-487.



- 第1図 2021 年5月1日~2021 年10月31日の期間に検知された短期的SSE(ピンク矩形). 同期間に発生した深 部低周波微動(赤点)及びVLFEの震央(青菱形)を重ねて表示した.
- Fig. 1 Distribution of SSEs detected from May 1, 2021 to October 31, 2021. Red dots and blue diamonds show epicenters of tremors and VLFEs, respectively.



- 第2図 2021年4月21日~5月31日までの傾斜時系列. 観測点位置は第3図に示した. 記録は上方向への変化が 北・東下がりの傾斜変動を表す. 気圧応答・潮汐成分を BAYTAP-G4) により除去し, 直線トレンドを補正 した後の記録を示した. 5月9日~15日の傾斜変化量を SSE によるものと仮定した. 紀伊半島北部での 微動活動度・気象庁津観測点での気圧変化および雨量をあわせて表示した.
- Fig. 2 Time series of tiltmeter records, daily tremor counts, atmospheric pressure change and daily precipitation in the northern Kii peninsula from April 21, 2021 to May 31, 2021. 'N' and 'E' that follow a four-character station code denote the northward and eastward ground down tilt components, respectively. The tilt changes for the time window indicated by the broken lines are assumed to be caused by an SSE. The atmospheric pressure and precipitation were observed at the JMA Tsu meteorological observatory. The displayed tilt records are detided and their atmospheric pressure responses are corrected with BAYTAP-G4).



- 第3図 2021年5月紀伊半島北部の短期的 SSE の断層モデル. 2021年5月9日~15日に観測された傾斜変化ベクトル(青矢印)・このデータから推定された SSE の断層モデル(赤矩形・矢印)・モデルから計算される傾斜変化ベクトル(白抜き矢印)を示す. 同じ期間の微動と深部超低周波地震の震央を橙円と茶星印で示した.
- Fig. 3 Observed tilt change vectors for the time window indicated Fig. 2 (blue arrows), the estimated fault slip (red arrow), rectangular fault location and geometry (pink rectangle) based on the tilt change vectors, and the calculated tilt changes due to the fault models (open arrows). Orange circles and stars show epicenters of the tremor activity and VLFEs, respectively, occurred in the time period.



- 第4図 2021年7月1日~8月2日までの傾斜時系列.図の見方は第2図と同様.観測点位置は第5図に示した. 7月24日~8月1日の傾斜変化量をSSEによるものと仮定した.四国中西部での微動活動度・気象庁宇和島観測点での気圧変化および雨量をあわせて表示した.
- Fig. 4 Same as Fig. 2 but for the records observed in the central and western Shikoku region from July 1, 2021 to August 2, 2021. The tilt changes from July 24 to August 1 are assumed to be caused by an SSE. The atmospheric pressure and precipitation were observed at the JMA Uwajima meteorological observatory.

地震予知連絡会会報第107巻 2022年3月発行



第5図 2021年7月~8月四国中西部の短期的 SSE の断層モデル.図の見方は第3図と同じ.

Fig. 5 Same as Fig. 3 but for the July-August 2021 short-term SSE in the central and western Shikoku region.

9-4 鳥取県・岡山県・島根県における温泉水変化(2021 年 5 月~ 2021 年 10 月) Temporal Variation in the hot spring water in the Tottori Prefecture, Okayama Prefecture and Shimane Prefecture, Japan (May 2021 – October 2021)

鳥取大学工学部・産業技術総合研究所

Faculty of Engineering, Tottori Univ. and Geological Survey of Japan, AIST.

1. はじめに

鳥取県・島根県・岡山県は温泉が多く,その所在も地震活動と関連していると考えられる.この 地方の特徴を生かし,国際ロータリー第2690地区,鳥取県西部地震義援金事業の一環として,温 泉水観測網を山陰地方(鳥取県西部地震周辺及び鳥取県東部・岡山県北部地域)に整備し,地震活 動と温泉水変化との関連を調べている.

2. 観測

現在観測を行っている地点は6点である(第1図).観測方法としては、温泉井に水位計や温度 計(分解能:1/100℃)を設置し、測定値をデータロガーに収録、定期的に現地集録して、鳥取大 学工学部でデータ処理し、温泉データと地震データ等との比較により関係を調べる.なお、鷺の湯 温泉の水温は2020年10月6日以降、計器交換のため分解能:1/10℃での測定となっている.解析 の結果は、速報として観測センターのホームページで公開している(https://onsen-network.tank.jp/). 2020年秋から新しい URL へ変更した.

水位・水温の測定インターバルは 10 秒で1分間の平均値を記録している.温度センサーは,事前の温度検層により,湯谷温泉等を除いて,最も温度変化の大きい位置(深さ)に設置している(鳥取温泉 175m,岩井温泉 150m,三朝温泉 25m,奥津温泉 130m 等).なお,鷺の湯温泉では 2020 年 10 月 6 日以降は,9.8mの位置に設置している.なお,湯谷(第1図の6)では 2012 年度から,その他の点では 2016 年 6 月からデータをテレメーター集録から現地集録に切り替えている.

吉岡温泉の観測は 2021 年 4 月 28 日に終了したため、今回(第 107 巻)の資料からグラフを掲載 しない.

3. 結果(第2~4図)

結果(原則として1時間値)を第2~4図に示す.気圧や気温の記録は,鳥取や松江の気象台の 測定値を用いている.2020年4月中旬以降,岩井温泉の水位は測定範囲の上限(2.0m)まで度々 上昇しているため、2021年8月2日に水位計の位置を1m下げた(グラフでは水位計の出力を表 示しているので、2021年8月2日に1m分のずれがある).2021年7月7日前後の大雨の影響で、 鳥取温泉の水位・水温,岩井温泉の水位、三朝温泉の水温,鷺の湯温泉の水位に変化が出ている. 2021年7月14日以降,奥津温泉の水温は温度計が故障で欠測している(落雷が原因と思われる).

2021 年 5 月~2021 年 10 月の間に, 第 1 図の範囲内(北緯 34.8~35.8 度, 東経 132.4~134.6 度) で深さ 30km 以浅で M4 以上の地震は, 無かった. M4 未満で観測点周辺に震度 2 以上の揺れをもたらした地震は, 2021 年 8 月に 1 回 (震度 2 が 1 回), 2021 年 9 月に 1 回 (震度 2 が 1 回) 発生した.

(野口 竜也・香川 敬生・西田 良平・北川 有一)



- 第1図 鳥取気象台(□)と松江気象台(△)および温泉水観測点(●)の分布.1:
 鳥取温泉,2:岩井温泉,3:三朝温泉,4:奥津温泉,5:鷺の湯温泉,6:
 湯谷温泉
- Fig. 1 Location of Tottori Local Meteorological Observatory (□), Matsue Local Meteorological Observatory (△) and hot spring water observation stations (●). 1:Tottori, 2:Iwai, 3:Misasa, 4:Okutsu, 5:Saginoyu, 6:Yudani



第2図 鳥取温泉(第1図の1)と岩井温泉(2)の2021年5月~2021年10月に おける観測結果.







- 第3図 三朝温泉(3)・湯谷温泉(6)・吉岡温泉(7)・奥津温泉(4)の2021年5 月~2021年10月における観測結果.
- Fig. 3 Observation results at Misasa (3), Yudani (6), Yoshioka (7) and Okutsu (4) from May 2021 to October 2021.
- 第4図 鷺の湯温泉(5)の2021年5月~2021年10月における観測結果.
- Fig. 4 Observation results at Saginoyu (5) from May 2021 to October 2021.

10-1 九州地方とその周辺の地震活動(2021 年 5 月~ 10 月) Seismic Activity in and around the Kyushu District (May - October 2021)

気象庁 福岡管区気象台 Fukuoka Regional Headquarters, JMA

今期間,九州地方とその周辺で M4.0 以上の地震は 39 回, M5.0 以上の地震は 2 回発生した. こ のうち最大は,2021 年 10 月 6 日に大隅半島東方沖で発生した M5.4 の地震であった. 2021 年 5 月~10 月の M4.0 以上の地震の震央分布を第 1 図 (a) 及び (b) に示す. 主な地震活動は以下のとおりである.

(1) 熊本県熊本地方の地震(M4.0, 最大震度4, 第2図)

2021年5月6日09時16分に熊本県熊本地方の深さ14kmでM4.0の地震(最大震度4)が発生した. この地震は陸のプレートの地殻内で発生した.発震機構は南北方向に張力軸を持つ正断層型である.

(2) 熊本県熊本地方の地震(M3.9,最大震度4,第3図(a)~(c))

2021年6月8日16時59分に熊本県熊本地方の深さ11kmでM3.9の地震(最大震度4)が発生した. この地震は陸のプレートの地殻内で発生した.発震機構は南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で ある.この地震の周辺で発生した「平成28年(2016年)熊本地震」(以下,熊本地震)の地震活 動域では,熊本地震の発生直後に小さくなったb値が時間経過とともに大きくなり,最近では主に 活動域の南部でやや小さいb値を示す領域もある.熊本地震の発生以降のp値は,活動域の北部で 大きく,南部ではモデルの合いが悪くなるもののp値が小さい.

(3) 奄美大島北西沖の地震活動(M4.8, 最大震度 1, 第 4 図)

2021 年 7 月 4 日 22 時頃から奄美大島北西沖(奄美大島の西約 100km)で地震活動が活発となり, 7 月 31 日までに最大震度 1 以上を観測した地震が 10 回(最大震度 4:5 回,最大震度 1:5 回)発 生した.このうち最大規模の地震は,7月7日 23 時 55 分に発生した M4.8 の地震(最大震度 1)であっ た.この地震は,発震機構(CMT 解)が北西-南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で,陸のプレー ト内で発生した.今回の地震活動域付近では,数年に一度 M5 クラスを最大規模とするまとまった 活動がある.

(4) 伊予灘の地震(M5.1, 最大震度 4, 第 5 図)

2021 年 7 月 17 日 20 時 50 分に伊予灘の深さ 76km で M5.1 の地震(最大震度 4)が発生した.この地震はフィリピン海プレート内部で発生した.発震機構は東北東-西南西方向に張力軸を持つ型である.

(5) 大隅半島東方沖の地震(M5.4, 最大震度4, 第6図)

2021年10月6日17時12分に大隅半島東方沖の深さ43kmでM5.4の地震(最大震度4)が発生した. この地震は,発震機構(CMT解)が東西方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で,フィリピン海プレート内部で発生した.



図中の吹き出しは、陸域M4.0以上・海域M5.0以上

 第1図(a) 九州地方とその周辺の地震活動 (2021年5月~7月, M≧4.0, 深さ≦700km)
 Fig. 1(a) Seismic activity in and around the Kyushu district (May – July 2021, M≧4.0, depth ≦700 km).



第1図(b) つづき (2021年8月~10月, M≧4.0, 深さ≦700km) Fig. 1(b) Continued (August – October 2021, M≧4.0, depth ≦700 km).

8000

6000

4000

2000

6000

4000

- 2000

5月6日 熊本県熊本地方の地震





Fig. 2 The earthquake in Kumamoto region of Kumamoto Prefecture on May 6, 2021.

6月8日 熊本県熊本地方の地震



2021年6月8日16時59分に、熊本県熊本地方 の深さ11kmでM3.9の地震(最大震度4)が発生 した。この地震は地殻内で発生した。この地震 の発震機構は、南北方向に張力軸を持つ横ずれ 断層型である。

この地震の震央付近(領域 a)では、2021年 1月以降の活動をみると、M4.0前後の地震が 時々発生しており、最大震度4を観測したのは 今回の地震で3回目である。また、6月26日に M4.0の地震(最大震度3)が発生している。

また、領域 a では「平成28年(2016年) 熊本 地震」が発生している。この地震により、熊本 県で死者273人、大分県で死者3人などの被害が 生じた(熊本県は2021年6月11日現在、熊本県 による、その他は2019年4月12日現在、総務省 消防庁による)。

1885年以降の活動をみると、今回の地震の震 央周辺(領域b)では、M5.0以上の地震が時々 発生している。このうち、1889年7月28日には M6.3の地震が発生し、熊本市を中心に熊本県で 死者19人、家屋全倒234棟などの被害が生じた (「日本被害地震総覧」による)。





Fig. 3(a) The earthquake in Kumamoto region of Kumamoto Prefecture on June 8, 2021.

Μ



布田川断層帯・日奈久断層帯周辺のb値分布

・震源データ: 2006年1月1日~2021年7月26日、深さ0~20km、M≧0.5

・b値の計算条件: 0.05°間隔のグリッドを中心とする緯度0.1°×経度0.1°の矩形内のM下限以上(G-R

茶色の線は地震調査研究推進本部の長期評価による活断層を示す。

第3図(b) つづき Fig. 3(b) Continued.



布田川断層帯・日奈久断層帯周辺の地震活動(大森・宇津式フィッティング)

第3図(c) つづき Fig. 3(c) Continued.

奄美大島北西沖の地震活動(奄美大島の西約 100km の地震活動)



2021年7月4日22時頃から奄美大島北西沖(奄美大島 の西約100km)で地震活動が活発となり、7月31日24時 までに震度1以上を観測した地震が10回(震度2:5回、 震度1:5回)発生した。今回の地震活動は、沖縄トラ フ沿いの活動で、陸のプレート内で発生した。このうち、 最大規模の地震は7月7日23時55分に発生したM4.8の 地震(最大震度1)で、発震機構(CMT解)は北西-南 東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型である。

1994年10月以降の活動をみると、今回の地震活動域付近(領域 a)では、数年に一度M5クラスの地震を最大規模とするまとまった活動がある。このうち、2014年7月26日頃から8月下旬の地震活動では、M5.6の地震(最大震度3)を最大として、震度1以上を観測した地震が10回発生した。

1919年以降の活動をみると、今回の地震活動域周辺 (領域b)では、M6.0以上の地震が3回発生している。



第4図 2021年7月4日~ 奄美大島北西沖の地震活動 Fig. 4 Seismic activity northwest off Amami-Oshima Island from July 4, 2021.



7月17日 伊予灘の地震

2021年7月17日20時50分に伊予灘の深さ76kmで M5.1の地震(最大震度4)が発生した。この地震は フィリピン海プレート内部で発生した。この地震 の発震機構は、東北東-西南西方向に張力軸を持 つ型である。

1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の 震源付近(領域b)では、M4.0以上の地震が時々発 生している。このうち、2014年3月14日にM6.2の地 震(最大震度5強)が発生し、負傷者21人などの被 害が生じた(総務省消防庁による)。

1919年以降の活動をみると、今回の地震の震央 周辺(領域 c)では、M6.0程度の地震が時々発生し ている。このうち、1968年8月6日に発生したM6.6 の地震(最大震度5)では、負傷者22人などの被害 が生じた。また、1983年8月26日に発生したM6.6の 地震(最大震度4)では、負傷者1人などの被害が 生じた(いずれの地震の被害も「日本被害地震総 覧」による)。

領域 b 内のM-T 図及び回数積算図





第5図 2021年7月17日 伊予灘の地震

Fig. 5 The earthquake in the Iyonada Sea on July 17, 2021.

2020

N=80

8

10月6日 大隅半島東方沖の地震



第6図 2021年10月6日 大隅半島東方沖の地震

Fig. 6 The earthquake east off the Osumi Peninsula on October 6, 2021.

10-2 沖縄地方とその周辺の地震活動(2021 年 5 月~10 月) Seismic Activity around the Okinawa District (May - October 2021)

気象庁 沖縄気象台 Okinawa Regional Headquarters, JMA

今期間,沖縄地方とその周辺で M4.0 以上の地震は 121 回, M5.0 以上の地震は 16 回発生した. このうち最大は,2021 年 8 月 5 日と 10 月 24 日に台湾付近で発生した M6.3 の地震であった. 2021 年 5 月~ 10 月の M4.0 以上の震央分布を第 1 図 (a) 及び (b) に示す. 主な地震活動は以下のとおりである.

(1) 台湾付近の地震(M6.3, 日本国内の最大震度 3, 第 2 図 (a), (b))

2021 年 8 月 5 日 06 時 50 分に台湾付近の深さ 10km (CMT 解による) で M6.3 の地震(日本国 内で観測された最大の揺れは震度 3) が発生した.発震機構(CMT 解)は,南北方向に張力軸を 持つ正断層型で,陸のプレートの地殻内で発生した地震である.

(2) 台湾付近の地震(M6.3, 日本国内の最大震度 2, 第 3 図)

2021 年 10 月 24 日 14 時 11 分に台湾付近の深さ 73km で M6.3 の地震(日本国内で観測された 最大の揺れは震度 2)が発生した.この地震はフィリピン海プレート内部で発生した.発震機構 (CMT 解)は、西北西 - 東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型である.



沖縄地方とその周辺の地震活動(2021年5月~7月、№24.0)

第1図(a) 沖縄地方とその周辺の地震活動(2021年5月~7月, M ≥ 4.0, 深さ≤ 700km)
 Fig. 1(a) Seismic activity around the Okinawa district (May - July 2021, M ≥ 4.0, depth ≤ 700km).



沖縄地方とその周辺の地震活動(2021年8月~10月、M≧4.0)

第1図(b) つづき(2021年8月~10月, M≧4.0, 深さ≦700km)

Fig. 1(b) Continued (August - October 2021, $M \ge 4.0$, depth ≤ 700 km).
8月5日 台湾付近の地震





震央分布図 (1960年1月1日~2021年8月31日、 深さ0~100km、M≧6.0)



第2図(a) 2021年8月5日 台湾付近の地震 Fig. 2(a) The earthquake near Taiwan on August 5, 2021.

2021年8月5日06時50分に台湾付近の深さ 10km (CMT解による)でM6.3の地震(国内で観測 された最大の揺れは震度3)が発生した。この地 震の発震機構(CMT解)は、南北方向に張力軸を 持つ正断層型で、陸のプレートの地殻内で発生し た。

2009年9月以降の活動をみると、この地震の震 央周辺(領域 a)では、M6.0以上の地震が時々発生 しており、2016年5月12日のM6.5の地震では、日 本国内で震度2を観測している。



1960年以降の活動をみると、今回の地震の震央 周辺(領域b)では、M7.0以上の地震が3回発生 しており、このうち、1966年3月13日のM7.3の地 震では、与那国島で死者2人や家屋の全半壊等の 被害が発生した(被害は、「日本被害地震総覧」 による)。

領域b内のM-T図



(この期間は検知能力が低い)

	気象庁CMT	防災科研 (F-net)	USGS (W-phase)
ー元化震源 M6.3 深さ55km	W P E	•	(295, 60, -57) P
Mw	5.9	5.8	5.8
深さ	10km	5km	10km
	Global CMT	GEOFON	
Mw	5.8	5.8	
深さ	12km	16km	
防災科研(AQUA)	防災科研(F-r USGS(W-pha: Global CMT:h GEOFON MT: AQUA:https:/	het) : http://www.fnet.bos se) : https://earthquake.u http://www.globalcmt.org http://geofon.gfz-potsdau //www.hinet.bosai.go.jp//]辺の気象庁CM Period:2011/08/05 00:00-	ai.go.jp/event/joho.php?LANG=ja Isgs.gov/earthquakes/map/ g/CMTsearch.html m.de/eqinfo/list.php?mode=mt AQUA/aqua_catalogue.php?LANG=ja T解の分布図 -2021/08/05 06:50
(掲載なし)	25° 24° 121°	122'	M 8 7 6 5 5 100 50 30 20 10 10 0 0 Depth(km)

8月5日 台湾付近の地震(各機関のMT解)

第2図(b) つづき Continued. Fig. 2(b)



¹⁰月24日 台湾付近の地震

2021年10月24日14時11分に台湾付近の深さ73km でM6.3の地震(日本国内で観測された最大の揺れ は震度2)が発生した。この地震はフィリピン海 プレート内部で発生した。発震機構(CMT解)は、 西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であ る。

2009年9月以降の活動をみると、この地震の震 源付近(領域b)では、2012年6月10日にM6.0の地 震(日本国内で観測された最大の揺れは震度3) が発生するなど、M5.0以上の地震が時々発生して いる。



1960年以降の活動をみると、今回の地震の震央 周辺(領域 c)では、1986年11月15日にM7.8の地 震(日本国内で観測された最大の揺れは震度 3) が発生した。この地震により、宮古島平良で30cm の津波を観測した。また、1966年3月13日のM7.3 の地震では、与那国島で死者2人や家屋の全半壊 等の被害が発生した(被害は、「日本被害地震総 覧」による)。

領域c内のM-T図



第3図 2021年10月24日 台湾付近の地震



10-3 九州・沖縄地方の地殻変動 Crustal Deformations in the Kyushu and Okinawa Districts

国土地理院 Geospatial Information Authority of Japan

[九州地域の非定常水平地殻変動(長期的 SSE)]

第1~6図は、2020年夏頃から九州南部で見られている非定常的な地殻変動に関する資料である. 第1図は、一次トレンド除去後の非定常地殻変動ベクトル図である.2012年1月1日~2013年 3月1日の期間を定常変動とし、一次トレンドを推定した。固定局は島根県の三隅観測点である. 2020年1月1日~1月7日に対する2021年10月13日~19日の約1年9か月の期間での非定常 的な地殻変動を示している.九州南部の宮崎県南部で南東向きに最大2cm程度の変動が見られる.

第2~第3図は,非定常地殻変動の推定において,平成28年(2016年)熊本地震直後の余効変 動の影響を考慮し,解析手法を再検討した結果を示す資料である.前巻の資料で用いた従来の解析 では,2017年1月1日~12月31日の期間を定常変動とし,一次トレンド,年周,半年周成分を 推定した.

第2図(a)は、九州北部にある米水津観測点の東西成分の時系列について、2012年1月から2013 年3月までの一次トレンドからの相対値として表した図である. 従来の解析及び再検討後の解析に よるものを、それぞれ青色及び黒色の点で示す. 非定常地殻変動は、従来の解析では2020年夏頃 から見られるが、再検討後の解析では認められない. 経時的に低減する余効変動のため、従来の解 析では、推定された一次トレンドには系統的な誤差が含まれ、見かけ上の非定常地殻変動として現 れたものと考えられる.

第2図(b)は、九州地域の非定常水平地殻変動について、従来の解析による結果を左の図に、再 検討後の解析による結果を右の図に示している。再検討後の解析結果から、九州北部で2020年夏 頃から見られていたとされた非定常地殻変動は、ノイズレベルの範囲であることが分かる。なお、 右の図において、余効変動等が顕著に見られる観測点は除外した。

第3図は,第2図(b)に示した,従来の解析及び再検討後の解析による非定常的な地殻変動を基に, 時間依存インバージョンでプレート境界面上のすべり分布を推定した結果に関する資料である.第 3図下段は2020年6月1日~2021年5月4日の期間で推定されたすべり分布を示している.上段 及び中段は,日向灘の北部及び南部におけるすべりのモーメント積算の時間変化を示した図である. 従来の解析で見られていた日向灘北部のプレート境界深部におけるすべりは,ノイズレベルの範囲 であることが分かる.

第4図は,第1図の図中に示した4観測点の非定常地殻変動3成分の時系列グラフである.同様 に一次トレンドを除去している.いずれの観測点でも南東向きの変動が見られており,2021年春 頃に鈍化したまま,現在もその状態が続いているように見える.

第5~8図は、非定常的な地殻変動を基に、時間依存インバージョンでプレート境界面上のすべ り分布を推定した結果に関する資料である.同様に一次トレンドを除去している.すべりの推定で は、すべり方向をプレートの沈み込み方向と平行な方向に拘束している. 第5図(a)は、2020年6月1日~2021年10月7日の期間で推定されたすべり分布を示している. 同時期に発生している種子島周辺の短期的SSEによるすべりとあわせ、日向灘の南部ですべりが 推定された. 推定されたすべりの最大値は20cm、モーメントマグニチュードは6.6と求まった.

第5図(b)は、観測値と計算値との比較である.観測値をよく説明できていることが分かる.

第6図は、九州南部の観測点における観測値と計算値の時間変化を示した図である. 2020 年夏 頃から見られる変動がよく説明できていることが分かる.

第7図は、日向灘南部に位置するグリッドのすべりの時間変化を示した図である. 2020 年夏頃 からすべりが見られており、2021 年春頃に鈍化したまま、現在もその状態が続いているように見 える.

第8図は、図中の太い実線で囲まれた領域に位置するグリッドのすべりから求めたモーメントの 時系列グラフである.2020年夏頃からモーメントの増大が見られており、2021年春頃に鈍化した まま、現在もその状態が続いているように見える.

《2021年5月下旬~6月上旬にかけての与那国島近海の地震活動》

[地殻変動ベクトルと GNSS 連続観測時系列]

第9図は、2021年5月下旬から6月上旬にかけて与那国島近海で発生した地震活動に伴う地殻 変動に関する資料である。5月下旬から6月にかけて与那国島近海で地震活動が発生し、最大の地 震は5月27日及び5月28日のM4.9の地震であった。この地震活動とほぼ同期して与那国島で地 殻変動が観測された。

第9図上段は、GNSS連続観測結果による水平変動ベクトル図である.2021年5月18日~5月 24日に対する6月13日~6月19日の期間の地殻変動を表す.固定局は与論観測点である.下段 は震源近傍の2観測点の3成分時系列である.与那国B観測点で南方向に約1cmの小さな地殻変動 が観測された.地殻変動はゆっくり進行した.なお、観測された地殻変動は、地震活動の規模から 想定される地殻変動よりもかなり大きい.



九州地域の非定常水平地殻変動(1次トレンド除去後)

第1図 九州地域の非定常水平地殻変動

Fig. 1 Transient horizontal deformation in the Kyusyu district.

参考資料





Fig. 2(a) Time series of transient east-west displacements of Misumi-Yonouzu baseline: blue dots show the data processed by the previous method where a linear trend and annual and semiannual components estimated for the period of January to December 2017 are entirely removed, and black dots by an updated method where only a linear trend estimated for the period of January 2012 to February 2013 are entirely removed.



第2図(b) 九州地域の非定常水平地殻変動:異なる定常変動処理の比較

Fig. 2(b) Horizontal deformation in the Kyusyu district : results by the previous and updated methods are shown on the left and right panels, respectively.





468





第4図 九州地域 GNSS 連続観測時系列

Fig. 4 Results of continuous GNSS measurements in the Kyusyu district with respect to the Misumi station.



GNSSデータから推定された日向灘南部の長期的ゆっくりすべり(暫定)

固定局:三隅

470

Fig. 5(a) Estimated slip distribution on the plate interface beneath the southern part of Hyuga-nada (preliminary results).

第5図(b) 観測値(黒)と計算値(白)の比較

Fig. 5(b) Comparison of observed (black) and calculated (white) displacements.



九州地域の観測点の座標時系列(黒丸)と計算値(赤線)



第6図 九州地域の観測点の座標時系列(黒丸)と計算値(赤線)

Fig. 6 Observed (black dots) and calculated (red line) deformations at the GNSS stations in the Kyusyu district.

日向灘南部の長期的ゆっくりすべり 各グリッドにおけるすべりの時間変化 時間依存のインバージョン m m 0.3 0.3 473 472 0.2 0.2 0.1 0.1 0.0 -0.0 2021 10/1 2022 10/1 2022 7/1 10/1 7/1 4/1 7/1 10/1 2021 2020 4/1 4/1 2020 4/1 7/1 m m 0.3 0.3 494 495 0.2 0.2 0.1 0.1 0.0 0.0 2020 4/1 7/1 10/1 2021 4/1 7/1 10/1 2022 2020 4/1 7/1 10/1 2021 4/1 7/1 10/1 2022 m m 0.3 0.3 516 517 0.2 0.2 0.1 0.1 0.0 0.0 7/1 10/1 2021 4/1 7/1 10/1 2022 4/1 7/1 10/1 2021 4/1 7/1 10/1 2022 2020 4/1 2020 ※プレ -トの沈み込み方向と平行な方向の変化を示している。 33°-100 km 32° すべり量(カラー)及びすべりベクトルは水平面に投影したものを示す。 推定したすべり量が標準偏差(σ)の3倍以上のグリッドを黒色表示している。 10cm 10* 0 20° cm 31° 131 132°



Fig. 7 Time evolution of the estimated slip beneath the southern part of Hyuga-nada by the time dependent inversion method.



第8図 時間依存インバージョンで推定されたモーメントの時間変化

Fig. 8 Time evolution of moment by the time dependent inversion method.



与那国島近海の地震活動(最大地震 5月27日、5月28日 M4.9)前後の観測データ この地震活動に伴い小さな地殻変動が観測された。

第9図 与那国島近海の地震活動(2021年5月下旬から6月上旬)に伴う地殻変動: (上図)水平変動,(下図)3成分時系列グラフ

Fig. 9 Transient displacement associated with seismic activity near Yonagunijima Island in late May- early June 2021: horizontal displacement (upper) and time series of transient displacement (lower).

11-1 その他の地域の地震活動(2021 年 5 月~ 10 月) Seismic Activity in Other Regions around Japan (May – October 2021)

気象庁

Japan Meteorological Agency

今期間,その他の地域で発生した主な地震活動は以下のとおりである.時刻は日本時間である.

(1) 千島列島の地震(M6.2, 最大震度 2, 第1図 (a), (b))

2021 年 7 月 13 日 09 時 30 分に千島列島の深さ 50km (CMT 解による) で M6.2 の地震(国内で 観測された最大の揺れは震度 2) が発生した.この地震の発震機構(CMT 解)は東北東-西南西 方向に圧力軸を持つ型であった.

(2) 千島列島の地震(M6.6,最大震度1,第2図(a),(b))

2021 年 9 月 21 日 05 時 25 分に千島列島の深さ 37km (CMT 解による) で M6.6 の地震(国内で 観測された最大の揺れは震度 1)が発生した.この地震の発震機構(CMT 解)は東西方向に圧力 軸を持つ逆断層型であった.

(3) その他の地震活動

発生年月日	震央地名	規模 (M)	深さ (km)	最大震度	
2021 年					
10月12日	北西太平洋(千島列島付近)	6.0	_	_	(第3図)

7月13日 千島列島の地震



第1図(a) 2021年7月13日 千島列島の地震 Fig. 1(a) The earthquake near the Kuril Islands on July 13, 2021.

		気象庁CMT	防災科研 (F-net•手動)	USGS (Mww)	
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	ー元化震源 M6.2 さ30km(固定)			(553. 5, 101) P (152, 65, 8	ŋ
	Mw 深さ	5.7 50km	5.8 56km	5.58 60.5km	USGS震源 M5.6 深さ40km
		Global CMT	GEOFON		
	Mw	5.7	5.8		
	深さ	60km	36km		
			防災科研(F-net):http://www USGS(W-phase):https://earth Global CMT:http://www.globa	.fnet.bosai.go.jp/event/joho.p quake.usgs.gov/earthquakes/i lcmt.org/CMTsearch.html	hp?LANG=ja nap/

7月13日 千島列島の地震(各機関のMT解)

GEOFON MT: http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/list.php?mode=mt AQUA: https://www.hinet.bosai.go.jp/AQUA/aqua_catalogue.php?LANG=ja

防災科研(AQUA)

## (掲載なし)



#### 第1図(b) つづき Fig. 1(b) Continued.

## 9月21日 千島列島の地震



2021 年 9 月 21 日 05 時 25 分に千島列島の 深さ 37km (CMT 解による) で M6.6 の地震(国 内で観測された最大の揺れは震度1)が発生 した。この地震の発震機構(CMT 解)は東西 方向に圧力軸を持つ逆断層型であった。

1997 年 10 月以降の活動をみると、今回の 地震の震央付近(領域a)では、今回の地震 の他に M6.0 以上の地震が時々発生している。 2006年11月15日に発生したM7.9の地震で は、日本国内で震度2の揺れを観測したほか、 三宅島坪田で84cmなど、オホーツク海沿岸か ら太平洋沿岸及び伊豆・小笠原諸島の広い範

1919年以降の活動をみると、今回の地震の 震央周辺(領域b)では、M7.0以上の地震が 時々発生している。2007年1月13日の千島 列島東方(シムシル島東方沖)の地震(M8.2) では、三宅島坪田で 43cm など、北海道日本海 沿岸北部からオホーツク海沿岸、太平洋沿岸 及び伊豆・小笠原諸島で津波を観測した。

N=972







赤色の実線は海溝軸

Fig. 2(a) The earthquake near the Kuril Islands on September 21, 2021.

-		気象庁CMT	防災科研 (F-net)	USGS (W-phase)
ー <del>〕</del> 深さ30	元化震源 M6.6 0km(固定)	W T E	なし	(316, 53, 54) T (187, 59, 128)
	Mw	6.2		6.1
	深さ	37km		41km
		Global CMT	GEOFON	
	Mw	6.2	6.1	
	深さ	41km	38km	
防災科	研(AQUA)	防災科研(F-r USGS(W-phas Global CMT : l GEOFON MT : AQUA : https:/ <b>周辺0</b>	net): https://www.fnet.k se): https://earthquake. https://www.globalcmt.c https://geofon.gfz-potsd //www.hinet.bosai.go.jp/ の気象庁CMT解 Period:2011/09/21 00:0020	Dosai.go.jp/event/joho.php?LANG=ja usgs.gov/earthquakes/map/ org/CMTsearch.html lam.de/eqinfo/list.php?mode=mt /AQUA/aqua_catalogue.php?LANG=ja の分布図
	(掲載なし)	46*		M 8 7 6 5 100
		45*	152*	50 20 10 0 153* 154* Depth(km)

# 9月21日 千島列島の地震(各機関のMT解)

第2図(b) つづき Fig. 2(b) Continued.

## 10月12日 北西太平洋(千島列島付近)の地震



第3図 2021年10月12日 北西太平洋(千島列島付近)の地震

Fig. 3 The earthquake near the Kuril Islands on October 12, 2021.

## 11-2 世界の地震活動(2021 年 5 月~ 10 月) Seismic Activity in the World (May – October 2021)

気象庁 Japan Meteorological Agency

今期間,世界でM6.0以上の地震は66回発生し,M7.0以上の地震は9回発生した.このうち最大は, 2021年7月29日(日本時間)にアラスカ半島の深さ32kmで発生した Mw8.1(気象庁による)の 地震であった.

2021 年 5 月~10 月の M6.0 以上の地震の震央分布を第 1 図 (a) 及び (b) に示す.

主な地震活動は以下のとおりである.特段の断りがない限り, Mw 及び発震機構(CMT 解)は 気象庁,そのほかの震源要素は USGS による(2021 年 11 月 10 日現在).また,時刻は日本時間で ある.

(1) 中国, チンハイ (青海) 省の地震 (Mw7.4, 第2図(a)~(c))

2021 年 5 月 22 日 03 時 04 分に中国のチンハイ(青海)省の深さ 10km で Mw7.4 の地震が発生した. この地震の発震機構は北北西-南南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型である. この地震により,負傷者 18 人などの被害が生じた(2021 年 5 月 28 日現在,国連人道問題調整事務所(OCHA)による). SAR 干渉解析により,今回の地震の活動域(概ね西北西-東南東方向に分布する震央)の北側で衛星から遠ざかる向き,南側で衛星へ近づく向きの地殻変動に伴う位相変化が検出された.

(2) 米国, アラスカ半島の地震(Mw7.8, 第4図(a)~(e))

2021 年 7 月 29 日 15 時 15 分にアラスカ半島の深さ 32km で Mw8.1 の地震が発生した.その後, この地震の活動域内で,8月14日 20 時 57 分に深さ 21km で Mw6.9 の地震が発生した.これらの 地震は共に発震機構が北北西-南南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で,太平洋プレートと北米プ レートの境界で発生した.7月29日の地震では米国アラスカ州サンドポインドで 0.5m などの津波 を観測した(2021 年 9 月 1 日現在,米国海洋大気庁(NOAA)による).今回の地震の震央周辺では, 2020 年 7 月 22 日に Mw7.8 の地震,同年 10 月 20 日に Mw7.6 の地震が発生しており,これらの地 震の活動域と今回の地震の活動域はほとんど重なっていない.

(3) フィリピン諸島、ミンダナオの地震(Mw7.1, 第5図(a), (b))

2021 年 8 月 12 日 02 時 46 分にフィリピン諸島, ミンダナオの深さ 57km で Mw7.1 の地震が発生 した. この地震の発震機構は東西方向に圧力軸を持つ逆断層型である. この地震により, インドネ シアのビトゥン, フィリピンのダバオで微弱な津波を観測した(2021 年 9 月 7 日現在, NOAA に よる).

(4) サウスサンドウィッチ諸島の地震(Mw7.9, 第6図(a), (b))

2021 年 8 月 13 日 03 時 35 分にサウスサンドウィッチ諸島で Mw7.9 の地震が発生した. この地 震の発震機構は,北西 – 南東方向に圧力軸を持つ逆断層型である.また,この地震の発生から 3 分 前に北に約 60km の離れた場所で M7.5 の地震が発生した. Mw7.9 の地震の地震により,サウスサ ンドウィッチ諸島のサウスジョージアで 0.64m などの津波を観測した(2021 年 9 月 7 日現在, NOAA による). Mw7.9 の地震の発生後, 地震活動は活発に推移し, 8 月 23 日 06 時 33 分には Mw7.1 の地震が発生した.

(5) ハイチの地震(Mw7.2, 第7図(a), (b))

2021 年 8 月 14 日 21 時 29 分, ハイチの深さ 10km で Mw7.2 の地震が発生した. この地震の発震 機構は,北北東-南南西方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型であった. この地震により,ハイチの ポルトープランス,メキシコのプエルト・モレロス,及びムヘーレス島で微弱な津波を観測した (2021 年 8 月 28 日現在,NOAA による). この地震により,死者 2,207 人,行方不明者 320 人,負 傷者 12,268 人,家屋破壊約 5 万 3 千棟,家屋損傷約 7 万 7 千棟などの被害が生じた (2021 年 8 月 30 日現在,OCHA による). 今回の地震の震央は,死者約 31 万 6 千人の被害が生じた 2010 年 1 月 13 日の Mw7.1 の地震の震央から西方へ約 100km に位置する.

(6) メキシコ, ゲレロ州沿岸の地震(Mw7.0, 第9図(a), (b))

2021 年 9 月 8 日 10 時 47 分にメキシコ,ゲレロ州沿岸の深さ 20km で Mw7.0 の地震が発生した. この地震は,発震機構が北北東-南南西方向に圧力軸を持つ逆断層型で,ココスプレートと北米プ レートの境界で発生した.この地震により,メキシコのアカプルコで 0.48m の津波を観測した(2021 年 10 月 1 日現在, NOAA による).また,この地震により死者 1 人などの被害が生じた (2021 年 9 月 8 日現在, OCHA による).

(7) バヌアツ諸島の地震(Mw7.3, Mw6.9, 第10図(a)~(c))

2021 年 10 月 2 日 15 時 29 分にバヌアツ諸島の深さ 527km で Mw7.3 の地震が発生した. この地 震の発震機構は,北北西-南南東方向に張力軸を持つ型である. また, 10 月 9 日 19 時 58 分に同 じくバヌアツ諸島の深さ 535km で Mw6.9 の地震が発生した. この地震の発震機構は,西北西-東 南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型である.

(8) その他の地震活動

発生年月日	震央地名	規模 (Mw)	深さ (km)		
2021 年					
7月22日	パナマ南方	6.7	10	(第3図(a),(b)	)
8月18日	バヌアツ諸島	6.9	89	(第8図(a),(b)	)



# 第1図(a) 世界の地震活動(2021年5月~7月, M≧6.0, 深さ≦700km)

Fig. 1(a) Seismic activity in the World (May –July 2021,  $M \ge 6.0$ , depth  $\le 700$  km).



第1図(b) つづき(2021年8月~10月, M≧6.0, 深さ≦700km)

Fig. 1(b) Continued (August –October 2021,  $M \ge 6.0$ , depth  $\le 700$  km).

# 5月22日 中国、チンハイ(青海)省の地震

2021 年 5 月 22 日 03 時 04 分(日本時間、以下同じ)に中国のチンハイ(青海)省の深さ 10km で Mw7.4 の地震が発生した。この地震の発震機構は北北西-南南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型である。気象庁は、この地震に対して、同日 03 時 34 分に遠地地震に関する情報(津波の心配なし)を発表した。この地震により、負傷者 18 人などの被害が生じた。

1980年以降の活動をみると、今回の地震の震源周辺(領域 a) では、2010年4月14日に Mw6.9の地 震が発生し、死者2,220人以上などの被害が生じた。また、1990年4月26日に発生した地震(M6.9) でも死者119人、負傷者2049人などの被害が生じた。

震央分布図



※本資料中、今回の地震及び2010年4月14日の地震(Mw6.9)の発震機構とMwは気象庁による。震源データは米国地質調査所(USGS) による(2021年6月1日現在)。プレート境界の位置はBird(2003)より引用。活断層の位置は中国国家地震局「中国岩石圏動力 学地図集」編集委員会編(1989)を参照。今回の地震の被害は0CHA(UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs: 国連人道問題調整事務所)、1990年4月26日の地震の被害は字津の「世界の被害地震の表」、2010年4月14日の地震の被害は理 科年表による。 参考文献

Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.

中国国家地震局「中国岩石圏動力学地図集」編集委員会編(1989) 中国岩石圏動力学地図集,中国地図出版社.

第2図(a) 2021年5月22日中国, チンハイ(青海)省の地震(Mw7.4)

Fig. 2(a) The Earthquake in Qinghai, China (Mw7.4) on May 22, 2021.

## 5月22日 中国、チンハイ(青海)省の地震の発震機構解析

2021 年 5 月 22 日 03 時 04 分(日本時間)に中国、チンハイ(青海)省で発生した地震について CMT 解析及び W-phase を用いた発震機構解析を行った。



#### 2. ₩-phase の解析



セントロイドは、北緯 34.6°、東経 98.4°、深さ 20km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 53 観測点の上下成分、
48 観測点の水平成分を用い、200~600 秒のフィルターを使用した。
注) W-phase とは P 波から S 波付近までの長周期の実体波を指す。

Mw	Mo	断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)
7.4	$1.61  imes 10^{20} \mathrm{Nm}$	11. 7° $\checkmark$ 81. 1° $\checkmark$ 173. 9°	$102.6^{\circ}$ /84.0° /9.0°

(W-phase に関する参考文献)

Kanamori, H and L. Rivera, 2008, Geophys. J. Int., **175**, 222-238.

解析データには、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ 管理センター(DMC)より取得した広帯域地震波形記録を使用 した。 また、解析には金森博士及びRivera博士に頂いたプログラム を使用した。記して感謝する。



解析に使用した観測点配置

## 第2図(b) 発震機構解析

Fig. 2(b) Moment tensor solution.

# 5月22日 中国、チンハイ(青海)省の地震 (SAR干渉解析)

SAR干渉解析により、今回の地震の活動域(概ね西北西-東南東方向に分布す る震央)の北側で衛星から遠ざかる向き、南側で衛星へ近づく向きの地殻変動に 伴う位相変化が検出された



本解析で用いたSentinel-1データは、Sentinel-1 Scientific Data Hubを通じて提供されたものである。Sentinel-1データの所 有権はESAにある。解析にはGamma®およびRINC(Ozawa et al., 2016)を使用した。また、干渉画像の処理過程において は、SRTM4.1(Jarvis et al., 2008)と全球ジオイドモデルEGM96(Lemoine et al., 1997)を元にしたDEHMを使用した。

第2図(c) SAR 干涉解析

Fig. 2(c) Synthetic Aperture Rader (SAR) interferogram.

7月22日 パナマ南方の地震

2021 年 7 月 22 日 06 時 15 分(日本時間、以下同じ)に中米のパナマ南方の深さ 10km で Mw6.7 の地震 が発生した。この地震の発震機構は北東-南西方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型である。気象庁は、こ の地震に対して、同日06時44分に遠地地震に関する情報(日本への津波の影響なし)を発表した。 2001年以降の活動をみると、今回の地震の震源付近(領域 a)では、M6.0以上の地震がしばしば発生 している。2012年9月5日にはコスタリカでMw7.6の地震が発生し、死者2人などの被害が生じた。 1970年以降の活動をみると、今回の地震の震源周辺(領域b)では、M7.0以上の地震がしばしば発生 している。2017年9月8日に発生したメキシコ、チアパス州沿岸の地震では、この地震により現地で死 者 98 人等の被害が生じたほか、この地震による津波で、メキシコのチアパスで最大 1.76mの津波を観測 した。 震央分布図 (2001年1月1日~2021年7月31日、深さ0~100km、M≧5.0) 2021 年7月の地震を赤く表示 500km N=830 2014年12月8日 2012年9月5日 San 北米プレ・ n. 35km Mw7.6 20km Mw6.5 (GCMT)  $\bigcirc$ ò カリブ  $\bigcirc$ コスタリカ 10 2014年5月13日 10km Mw6.5 ココスプレート ᡲᢣ (GCMT) マ  $\oplus$ 10° N ak. ×, ,b 4 回の地震 2021年7月22日 10km Mw6.7 領域a内のM-T図 南米プレート N= 170  $\oplus$ コロンビア a 0 2015年1月7日 2021年7月18日 8 80 8km Mw6.5 (GCMT) 4km Mw6.2 0° N (GCMT) 7.Ø ナスカプレート Æ  $\oplus$ 60 90° W 80° W プレート境界の位置 ..... 震央分布図 2015 (1970年1月1日~2021年7月31日、深さ0~150km、M≧6.0) 2021 年7月の地震を赤く表示 1000kn 30° air 😚 ;) 死者 184 人 死者 852 人 領域b内のM-T図 2001年1月14日 1992年9月2日 N-170 4 м Mw7 Mw7.6 20° I 今回の地震 2021年7月22日 死者 58 人 Mw6. 7 1995年10月10日 Mw8.0 10° N М b 死者 9500 人 9.0 1985年9月19日 死者 98 人 Mw8.0 8.0 0° N 2017年9月8日 38 7.0 1970 1990 2000 2010 2020 Mw8. 1 6.0 100°W 90° W 80° W 110°W ※本資料中、今回の地震及び2012年9月5日の地震の発震機構とMwは気象庁による。2017年9月8日の地震のMwは気象庁によ る。吹き出しに「(GCMT)」とある地震の発震機構と Mw は Global CMT による。2001 年以前の被害を伴う吹き出しの付いた地震の Mwと被害は、宇津の「世界の被害地震の表」による。その他の震源データは米国地質調査所(USGS)による(2021年8月2日現 在)。プレート境界の位置はBird (2003) より引用。 * 参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252. 宇津徳治(2004)世界の被害地震の表(古代から2002年)まで,宇津徳治先生を偲ぶ会,東京,電子ファイル最終版。 改定・更新版 : http://iisee.kenken.go.jp/utsu/index.html

#### 第3図(a) 2021年7月22日パナマ南方の地震(Mw6.7)

Fig. 3(a) The earthquake south off Panama (Mw6.7) on July 22, 2021.

### 7月22日 パナマ南方の地震の発震機構解析

2021 年 7 月 22 日 06 時 15 分 (日本時間) にパナマ南方で発生した地震について CMT 解析及び W-phase を用いた発震機構解析を行った。



2.1	₩-phase	eの解析
2.	W−phase	eの解析



セントロイドは、北緯 7.4°、西経 82.7°、深さ 16km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 40 観測点の上下成分、
 32 観測点の水平成分を用い、100~300 秒のフィルターを使用した。
 注) W-phase とは P 波から S 波付近までの長周期の実体波を指す。

Mw	Mo	断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)
6.7	$1.59  imes 10^{19} \mathrm{Nm}$	$172.4^{\circ}$ / 89. $3^{\circ}$ / -171. $2^{\circ}$	82. $3^{\circ}$ /81. $2^{\circ}$ /-0. $7^{\circ}$

(W-phase に関する参考文献)

Kanamori, H and L. Rivera, 2008, Geophys. J. Int., **175**, 222-238.

解析データには、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ 管理センター(DMC)より取得した広帯域地震波形記録を使用 した。 また、解析には金森博士及びRivera博士に頂いたプログラム を使用した。記して感謝する。



解析に使用した観測点配置

#### 第3図(b) 発震機構解析

Fig. 3(b) Moment tensor solution.

## 7月29日 米国、アラスカ半島の地震

2021 年7月29日15時15分(日本時間、以下同じ)にアラスカ半島の深さ32kmでMw8.1の地震(Mw は気象庁によるモーメントマグニチュード)が発生した。この地震は発震機構(気象庁によるCMT解) が北北西-南南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと北米プレートの境界で発生した。

気象庁は、この地震により、遠地地震に関する情報を同日 15 時 42 分(日本への津波の有無を調査中) と同日 18 時 02 分(日本沿岸で若干の海面変動あり)に発表した。この地震により米国アラスカ州コデ ィアク島のオールドハーバーで 0.21m、同じくアラスカ州サンドポインドで 0.15m などの津波を観測し た。今回の地震の震央周辺(領域 a)では、2020 年 7 月 22 日に Mw7.8 の地震、同年 10 月 20 日に Mw7.6 の地震が発生している。

2000年以降の活動をみると、今回の地震の震央周辺(領域 a)では、時々M6.0以上の地震が発生している。

1915年以降の活動をみると、アラスカ周辺では、1964年3月28日に最大級規模の地震(アラスカ地震)(Mw9.2)が発生し、死者131人等の被害が生じている。



 ※本資料中、今回の地震、2020年7月22日の地震、及び2020年10月20日の地震の発震機構とMwは気象庁による。1964年3月28日の地震(アラスカ地震)の被害及びMwは宇津の「世界の被害地震の表」による。その他の震源要素について、2017年以前の地震は国際地震センター(ISCGEM)、2018年以降の地震は米国地質調査所(USGS)による(2021年8月2日現在)。津波の高さは、米国海洋大気庁(NOAA)による(2021年8月2日現在)。ブレート境界の位置と進行方向はBird(2003)*より引用。
 *参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
 宇津徳治(2004)世界の被害地震の表(古代から2002年)まで、宇津徳治先生を偲ぶ会、東京、電子ファイル最終版. 改定・更新版:http://iisee.kenken.go.jp/utsu/index.html

第4図(a) 2021年7月29日米国,アラスカ半島の地震(Mw7.8)

Fig. 4(a) The earthquake in the Alaska Peninsula (Mw7.8) on July 29, 2021.

#### 7月29日 米国、アラスカ半島の地震の発震機構解析

2021 年 7 月 29 日 15 時 15 分(日本時間)に米国、アラスカ半島で発生した地震について CMT 解析及び W-phase を用いた発震機構解析を行った。



#### 2. W-phase の解析 ℕ



セントロイドは、北緯 55.6°、西経 156.9°、深さ 24km となった。

W-phase の解析では、震央距離10°~90°までの88 観測点の上下成分、
83 観測点の水平成分を用い、200~600秒のフィルターを使用した。
注)W-phase とはP波からS波付近までの長周期の実体波を指す。

Mw	Mo	断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)
8.2	2. $30 \times 10^{21}$ Nm	64. 0° $/75. 7^{\circ} /92. 5^{\circ}$	234. 0° /14. 5° /80. 3°

(W-phase に関する参考文献)

Kanamori, H and L. Rivera, 2008, Geophys. J. Int., **175**, 222-238.

解析データには、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ 管理センター(DMC)より取得した広帯域地震波形記録を使用 した。 また、解析には金森博士及び Rivera 博士に頂いたプログラム

を使用した。記して感謝する。



解析に使用した観測点配置

#### 第4図(b) 発震機構解析

Fig. 4(b) Moment tensor solution.

## 2021 年 7 月 29 日 15 時 15 分の米国、アラスカ半島の地震 - 体積ひずみ計の記録から推定される Mw -



気象庁が東海地域に設置している埋込式体積 ひずみ計で観測された今回の地震の波形と理論 波形の振幅比較により、地震のモーメントマグニ チュード (Mw)の推定を行った。

理論体積ひずみは気象庁 CMT 解を用い、一次元 地球構造モデル PREM の固有モード周期 45 秒~ 3300 秒の重ね合わせにより計算した。その際に、 スカラーモーメント量を Mw7.9 相当から8.3 相当 まで0.1 刻みで変化させて、それぞれについて観 測波形と比較した。

体積ひずみ計の観測波形と理論波形が最もよ く整合するのは、Mw8.1相当の場合であった。

#### 体積ひずみ計の配置図





理論波形と体積ひずみ観測点8ヵ所の観測波形との比較(下図) データには周期 180-333 秒のバンドパスフィルタを時間軸の正逆両方 向にかけている。



第4図(c) 体積ひずみ計の記録から推定される Mw

Fig. 4(c) The moment magnitude estimated from strain seismograms recorded by the borehole volume strainmeters.

## 8月14日 米国、アラスカ半島の地震

2021年8月14日20時57分(日本時間、以下同じ)にアラスカ半島の深さ21kmでMw6.9の地震(Mw は気象庁によるモーメントマグニチュード)が発生した。この地震は発震機構(気象庁によるCMT解) が北北西-南南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと北米プレートの境界で発生した。 気象庁は、この地震により、遠地地震に関する情報(日本への津波の影響なし)を同日21時24分に発 表した。

今回の地震は、7月29日に発生したMw8.1の地震(深さ35km)の活動域内で発生した。7月29日の 地震では米国アラスカ州サンドポインドで0.5mなどの津波を観測した。

2000 年以降の活動をみると、今回の地震の震央周辺(領域 a) では、M6.0以上の地震が時々発生して おり、2020 年 7 月 22 日に Mw7.8 の地震、同年 10 月 20 日に Mw7.6 の地震が発生している。領域 a 内の 地震の時空間分布をみると、これらの地震の活動域と今回の地震を含む 2021 年 7 月 29 日の地震の活動 域はほとんど重なっていないことが分かる。



※本資料中、今回の地震、2020年7月22日の地震、2020年10月20日の地震及び2021年7月29日の地震の発震機構とMwは気象庁による。その他の震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2021年9月1日現在)。津波の高さは、米国海洋大気庁(NOAA)による(2021年9月1日現在)。プレート境界の位置と進行方向はBird(2003)*より引用。
 *参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/20016C000252.

第4図(d) 2021年8月14日米国,アラスカ半島の地震(Mw6.9)

Fig. 4(d) The earthquake in the Alaska Peninsula (Mw6.9) on August 14, 2021.

8月14日 米国、アラスカ半島の地震の発震機構解析

2021 年 8 月 14 日 20 時 57 分(日本時間) に米国、アラスカ半島で発生した地震について CMT 解析及 び W-phase を用いた発震機構解析を行った。



2.W-phase の解析



セントロイドは、北緯 55.2°、西経 157.7°、深さ 20km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 73 観測点の上下成分、
 59 観測点の水平成分を用い、100~300 秒のフィルターを使用した。
 注) W-phase とは P 波から S 波付近までの長周期の実体波を指す。

Mw	Mo	断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)
7.0	3.55 $\times$ 10 ¹⁹ Nm	59. 0° $/77. 9^{\circ}$ /88. 1°	248. 1° / 12. 3° / 98. 9°

(W-phase に関する参考文献)

Kanamori, H and L. Rivera, 2008, Geophys. J. Int., **175**, 222-238.

解析データには、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ 管理センター(DMC)より取得した広帯域地震波形記録を使用 した。 また、解析には金森博士及び Rivera 博士に頂いたプログラム

を使用した。記して感謝する。



解析に使用した観測点配置

第4図(e) 発震機構解析

Fig. 4(e) Moment tensor solution.

## 8月12日 フィリピン諸島、ミンダナオの地震

2021 年 8 月 12 日 02 時 46 分(日本時間、以下同じ)にフィリピン諸島、ミンダナオの深さ 57km で Mw7.1 の地震が発生した。この地震の発震機構(気象庁による CMT 解)は東西方向に圧力軸を持つ逆断層 型である。

気象庁は、この地震に対して、同日 03 時 10 分、及び 03 時 35 分に北西太平洋津波情報を発表した。 また、同日 03 時 17 分に遠地地震に関する情報(日本沿岸で若干の海面変動あり)を発表した。

この地震により、インドネシアのビトゥン、フィリピンのダバオで微弱な津波を観測した。

2000年以降の活動をみると、今回の地震の震央付近(領域 a)では、M6.0以上の地震が時々発生している。

1910年以降の活動をみると、フィリピン諸島周辺(領域b)では、M7.0以上の地震が時々発生している。1976年8月16日に発生したM8.0の地震では、この地震による津波が発生したほか、死者8000人の被害が生じた。



*参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.

第5図(a) 2021年7月29日フィリピン諸島、ミンダナオの地震(Mw7.1)

Fig. 5(a) The earthquake in Mindanao region, Philippine Islands (Mw7.1) on July 29, 2021.

8月12日 フィリピン諸島、ミンダナオの地震の発震機構解析

2021 年 8 月 12 日 02 時 46 分(日本時間)にフィリピン諸島、ミンダナオで発生した地震について CMT 解析及び W-phase を用いた発震機構解析を行った。



1. CMT 解析

セントロイドは、北緯 5.9°、東経 127.0°、深さ 52km となった。

Mw	Mo	断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)
7.1	$5.32 \times 10^{19} \mathrm{Nm}$	25. 6° /47. 2° /116. 3°	$169.6^{\circ}$ /48.9° /64.5°



セントロイドは、北緯 6.1°、東経 127.1°、深さ 46km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 35 観測点の上下成分、
31 観測点の水平成分を用い、100~300 秒のフィルターを使用した。
注) W-phase とは P 波から S 波付近までの長周期の実体波を指す。

Mw	Mo	断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)
7.1	$6.00 \times 10^{19} \text{Nm}$	$35.9^{\circ}$ / 54. $4^{\circ}$ / 126. $7^{\circ}$	$163.8^{\circ}$ / 49. 3° / 50. 1°

(W-phase に関する参考文献)

Kanamori, H and L. Rivera, 2008, Geophys. J. Int., **175**, 222-238.

解析データには、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ 管理センター(DMC)より取得した広帯域地震波形記録を使用 した。 また、解析には金森博士及び Rivera 博士に頂いたプログラム を使用した。記して感謝する。



解析に使用した観測点配置

#### 第5図(b) 発震機構解析

Fig. 5(b) Moment tensor solution.

## 8月13日 サウスサンドウィッチ諸島の地震

2021 年 8 月 13 日 03 時 35 分(日本時間、以下同じ)にサウスサンドウィッチ諸島で Mw7.9 の地震が 発生した。この地震の発震機構(気象庁による CMT 解)は、北西-南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で ある。また、この地震の発生から 3 分前に北に約 60km の離れた場所で M7.5 の地震が発生した。気象庁 は、この 03 時 32 分に発生した M7.5 の地震に対して、同日 04 時 09 分に遠地地震に関する情報(津波の 心配なし)を発表した。

8月13日のMw7.9の地震により、この震央から西北西方向に約830kmのサウスサンドウィッチ諸島の サウスジョージアで0.64mなどの津波を観測した。

今回の Mw7.9 の地震の発生後、地震活動は活発に推移している。23 日 06 時 33 分には、Mw7.1 の地震 が発生した。この地震の発震機構(気象庁による CMT 解)は、西北西-東南東方向に張力軸を持つ正断 層型である。気象庁は、この Mw7.1 の地震に対して、同日 07 時 05 分に遠地地震に関する情報(日本への津波の影響なし)を発表した。



よる。また、震源要素は、米国地質調査所(USGS)による(2021年9月1日現在)。津波の高さは、米国海洋大気庁(NOAA)による (2021年9月7日現在)。プレート境界の位置と進行方向はBird(2003)*より引用。 *参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.

第6図(a) 2021年8月13日サウスサンドウィッチ諸島の地震(Mw7.9)

Fig. 6(a) The earthquake in the South Sandwich Islands region (Mw7.9) on August 13, 2021.
8月23日 サウスサンドウィッチ諸島の地震の発震機構解析

2021 年 8 月 23 日 06 時 33 分(日本時間)にサウスサンドウィッチ諸島で発生した地震について CMT 解析及び W-phase を用いた発震機構解析を行った。



2. W-phase の解析

W-P-E

セントロイドは、南緯 60.6°、西経 24.3°、深さ 12km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90°までの 28 観測点の上下成分、
16 観測点の水平成分を用い、100~300 秒のフィルターを使用した。
注) W-phase とは P 波から S 波付近までの長周期の実体波を指す。

Mw	Mo	断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)		
7.0	$3.95 \times 10^{19}$ Nm	$34.3^{\circ}$ / $38.0^{\circ}$ / $-85.2^{\circ}$	$208.2^{\circ}$ / 52. $1^{\circ}$ / -93. $8^{\circ}$		

(W-phase に関する参考文献)

Kanamori, H and L. Rivera, 2008, Geophys. J. Int., **175**, 222-238.

解析データには、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ 管理センター(DMC)より取得した広帯域地震波形記録を使用 した。 また、解析には金森博士及び Rivera 博士に頂いたプログラム

また、脾析には金緑博工及びRivera 博士に頂いたフログラム を使用した。記して感謝する。



解析に使用した観測点配置

第6図(b) 発震機構解析

Fig. 6(b) Moment tensor solution.

# 2021 年8月14日 ハイチの地震

#### (1) 概要

2021 年 8 月 14 日 21 時 29 分(日本時間、以下同じ)、ハイチの深さ 10km で Mw7.2 の地震が発生した。 この地震の発震機構(気象庁による CMT 解)は、北北東-南南西方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型であった。

気象庁は、この地震により、遠地地震に関する情報を同日 21 時 55 分(日本への津波の影響なし)に 発表した。

この地震により、ハイチのポルトープランス、メキシコのプエルト・モレロス、及びムヘーレス島で 微弱な津波を観測した (NOAA による^(注1))。

この地震により、死者 2,207人、行方不明者 320人、負傷者 12,268人、家屋破壊約5万3千棟、家屋 損傷約7万7千棟などの被害が生じた^(注2)。



(2) 地震活動

今回の地震の震央は、死者約31万6千人の被害が生じた2010年1月13日のMw7.1の地震の震央から 西方へ約100kmに位置する。今回の地震の発生後は、翌15日12時20分にMw5.7の地震(MwはGlobal CMT による)が発生するなど、数日間は活発に推移したが、次第に収まってきている(8月31日現在)。





第7図(a) 2021年8月14日ハイチの地震(Mw7.2) Fig. 7(a) The earthquake in Haiti (Mw7.2) on August 14, 2021.

#### (3)過去の地震活動

ハイチ周辺は北米プレートとカリブプレートの境界付近に位置し、これまでにもM6.0以上で被害を伴う地震がしばしば発生している。今回の地震の震央周辺では、前述した 2010 年 1 月 13 日の Mw7.1 の地 震で死者約 31 万 6 千人などの被害が生じた。ただし、死者 10 万人以上の被害を伴う地震は世界的にも 稀である。2010 年 1 月 13 日の Mw7.1 の地震は、北米プレートとカリブプレートのプレート境界の近くに 存在するエンリキロ断層で発生したと考えられている。エンリキロ断層では、1700 年代半ばから 1800 年代半ばにかけて、規模の大きな地震が発生している。



過去にエンリキロ断層で発生した主な地震(米国地質調査所の資料による)

年月日	被害等
1751 年 10 月 18 日	ドミニカ共和国で大きな被害
1751 年 11 月 21 日	ポルトープランスで大きな被害
1770年6月3日	ポルトープランスで大きな被害
1860年4月8日	津波を生じる

(注1) NOAA (米国海洋大気庁: National Oceanic and Atmospheric Administration)。津波の高さは2021年8月28日現在のもの。

- (注2)今回の地震の被害は、国連人道問題調整事務所(OCHA)による(2021 年8月 30 日現在)。
- (注3) 今回の地震の発震機構と Nw は気象庁による。また、以下の地震の発震機構と Nw も気象庁による。

2010年1月13日 (Mw7.1)、2018年1月10日 (Mw7.5)、2020年1月29日 (Mw7.7)

- 次の地震の発震機構と Mw は Global CMT による。
  - 2021 年 8 月 15 日 03 時 11 分(Mw5. 4)、同日 12 時 20 分(Mw5. 7)
- 次の地震のMは宇津及び国際地震工学センターの「世界の被害地震の表」による。
- 1907年1月15日 (M6.5)、1918年10月11日 (M7.5)、1946年8月5日 (M8.1)

それ以外の震源要素は、1904 年から 1999 年までは国際地震センター(ISCGEM)、2000 年以降は USGS による。(2021 年 9 月 1 日現在) (注4)過去の地震の被害は、2010 年 1 月 13 日の地震は外務省中米局、それ以外の地震は宇津及び国際地震工学センターの「世界の被害地震 の表」による。

プレート境界の位置はBird (2003) *より引用。

*参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.

宇津徳治(2004)世界の被害地震の表(古代から 2002 年)まで,宇津徳治先生を偲ぶ会,東京,電子ファイル最終版. 改定・更新版 : http://iisee.kenken.go.jp/utsu/index.html

第7図(a) 2021年8月14日ハイチの地震(Mw7.2)

Fig. 7(a) The earthquake in Haiti (Mw7.2) on August 14, 2021.

# 8月14日 ハイチの地震の発震機構解析

2021 年 8 月 14 日 21 時 29 分(日本時間) にハイチで発生した地震について CMT 解析及び W-phase を 用いた発震機構解析を行った。



#### 2. W-phase の解析



Ν

セントロイドは、北緯 18.5°、西経 73.6°、深さ 10km となった。

W-phase の解析では、震央距離10°~90°までの26 観測点の上下成分、
36 観測点の水平成分を用い、100~300秒のフィルターを使用した。
注) W-phase とは P 波から S 波付近までの長周期の実体波を指す。

Mw	Mw         M₀         断層面解1(走向/傾斜/すべり角)		断層面解2(走向/傾斜/すべり角)		
7.2	7.97 $ imes$ 10 ¹⁹ Nm	152. $4^{\circ}$ / 39. $4^{\circ}$ / 152. $7^{\circ}$	264. $2^{\circ}$ /73. $0^{\circ}$ /53. $9^{\circ}$		

(W-phase に関する参考文献) Kanamori, H and L. Rivera, 2008, Geophys. J. Int., **175**,

222-238.

解析データには、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ 管理センター(DMC)より取得した広帯域地震波形記録を使用 した。 また、解析には金森博士及び Rivera 博士に頂いたプログラム

を使用した。記して感謝する。



解析に使用した観測点配置

#### 第7図(b) 発震機構解析

Fig. 7(b) Moment tensor solution.

# 8月18日 バヌアツ諸島の地震

2021 年 8 月 18 日 19 時 10 分(日本時間、以下同じ)バヌアツ諸島の深さ 89km で Mw6.9 の地震(Mw は 気象庁による)が発生した。今回の地震は、太平洋プレートに沈み込むインド・オーストラリアプレー トの内部で発生したと考えられる。この地震の発震機構(気象庁による CMT 解)は北東-南西方向に圧 力軸を持つ横ずれ断層型であった。気象庁はこの地震に対して、同日 19 時 30 分に北西太平洋津波情報、 19 時 34 分に遠地地震に関する情報(日本への津波の影響なし)を発表した。なお、今回の地震による 現地の被害は報告されていない。

バヌアツ諸島周辺は活発な地震活動がみられる領域で、1980年以降の活動をみると、今回の地震の震 源周辺(領域 c) では M7.0以上の地震が5回発生している。また、1999年11月26日に発生した M7.4 の地震では、津波などにより死者10人、負傷者40人の被害が報告されている(「世界の被害地震の表(古 代から2002年まで)」、宇津、2004による)。



*参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.

Fig. 8(a) The earthquake in the Vanuatu islands (Mw6.9) on August 18, 2021.

第8図(a) 2021年8月18日バヌアツ諸島の地震(Mw6.9)

# 8月18日 バヌアツ諸島の地震の発震機構解析

2021 年 8 月 18 日 19 時 10 分(日本時間)にバヌアツ諸島で発生した地震について CMT 解析及び W-phase を用いた発震機構解析を行った。

	1. CMT∮	解析	セントロイドは、南緯 14.7°、東線	圣167.0°、深さ96kmとなった。
W- V T S		N P T	E	
	Mw	Mo	断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)
	6.9	$3.35 \times 10^{19} \text{Nm}$	$189.6^{\circ}$ /70. $6^{\circ}$ /169. $9^{\circ}$	$283.0^{\circ}$ / 80. $4^{\circ}$ / 19. $7^{\circ}$

2. W-phase の解析



セントロイドは、南緯 14.7°、東経 166.8°、深さ 101km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 43 観測点の上下成分、
36 観測点の水平成分を用い、100~300 秒のフィルターを使用した。
注) W-phase とは P 波から S 波付近までの長周期の実体波を指す。

Mw Mo		断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)	
7.0	$3.39 \times 10^{19} \mathrm{Nm}$	188. $4^{\circ}$ / 69. $4^{\circ}$ / 168. $4^{\circ}$	282. 5° $/$ 79. 2° $/$ 21. 0°	

(W-phase に関する参考文献)

Kanamori, H and L. Rivera, 2008, Geophys. J. Int., **175**, 222-238.

解析データには、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ 管理センター(DMC)より取得した広帯域地震波形記録を使用 した。 また、解析には金森博士及び Rivera 博士に頂いたプログラム を使用した。記して感謝する。



解析に使用した観測点配置

### 第8図(b) 発震機構解析

Fig. 8(b) Moment tensor solution.

#### 9月8日 メキシコ、ゲレロ州沿岸の地震 情報発表に用いた震央地名は [メキシコ、ゲレロ州] である。

2021 年9月8日 10時47分(日本時間、以下同じ)にメキシコ、ゲレロ州沿岸の深さ20kmでMw7.0の地震が発生した。この地震は、発震機構(気象庁による CMT 解)が北北東-南南西方向に圧力軸を持つ逆断層型で、ココスプレートと北米プレートの境界で発生した。気象庁は、この地震に対して、同日11時12分に遠地地震に関する情報(日本への津波の影響なし)を発表した。この地震により、メキシコのアカプルコで0.48mの津波を観測した。また、この地震により死者1人などの被害が生じた(国連人道問題調整事務所(0CHA)による(2021年9月8日現在))。

2001年以降の活動をみると、今回の地震の震央周辺(領域 a)では、M6.0以上の地震が時々発生しており、その内、M7.0以上の地震が今回の地震も含めて4回発生している。

1904年1月以降の地震活動を見ると、今回の地震の震央付近(領域b)では M7.0以上の地震が時々 発生している。1985年9月19日には、M8.0の地震が発生し、死者約9500人などの被害が生じた(米 国地質調査所(USGS)による)ほか、震央から約400km離れたメキシコシティでも長周期地震動により 多くの建物が倒壊・損傷するなどの被害が生じた。



[※]本資料中、今回の地震、及び図中の吹き出しの付いた地震の発震機構と Mw は気象庁による。その他の震源要素について、2000 年以前 の地震は国際地震センター(ISCGEM)、2001 年以降の地震は米国地質調査所(USGS)による(2021 年 10 月 1 日現在)。津波の観測値は、 米国海洋大気庁(NOAA)による(2021 年 10 月 1 日現在)。プレート境界の位置と進行方向は Bird (2003) *より引用。 * 参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/20016C000252.

Fig. 9(a) The earthquake in Guerrero, Mexico (Mw7.0) on September 8, 2021.

第9図(a) 2021年9月8日メキシコ,ゲレロ州沿岸の地震(Mw7.0)

#### 9月8日 メキシコ、ゲレロ州沿岸の地震の発震機構解析

2021 年 9 月 8 日 10 時 47 分(日本時間) にメキシコ、ゲレロ州沿岸で発生した地震について CMT 解析 及び W-phase を用いた発震機構解析を行った。



#### 2. W-phaseの解析 N



セントロイドは、北緯 17.1°、西経 99.6°、深さ 16km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 57 観測点の上下成分、
46 観測点の水平成分を用い、100~300 秒のフィルターを使用した。
注) W-phase とは P 波から S 波付近までの長周期の実体波を指す。

Mw	Mo	断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)
7.1	4. $77 \times 10^{19}$ Nm	$108.9^{\circ}$ /76.7° /90.3°	$287.4^{\circ}$ /13. $3^{\circ}$ /88. $6^{\circ}$

(W-phase に関する参考文献) Kanamori, H and L. Rivera, 2008, Geophys. J. Int., **175**, 222-238.

解析データには、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ 管理センター(DMC)より取得した広帯域地震波形記録を使用 した。 また、解析には金森博士及び Rivera 博士に頂いたプログラム を使用した。記して感謝する。



解析に使用した観測点配置

第9図(b) 発震機構解析

Fig. 9(b) Moment tensor solution.

# 10月2日、9日 バヌアツ諸島の地震

2021 年 10 月 2 日 15 時 29 分(日本時間、以下同じ)にバヌアツ諸島の深さ 527km で Mw7.3 の地震が 発生した(図中①)。この地震の発震機構(気象庁による CMT 解)は、北北西-南南東方向に張力軸を持 つ型である。気象庁は、この地震に対して、同日 15 時 51 分に遠地地震に関する情報(津波の心配なし) を発表した。

また、10月9日19時58分に同じくバヌアツ諸島の深さ535kmでMw6.9の地震が発生した(図中②)。 この地震の発震機構(気象庁による CMT 解)は、西北西-東南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型であ る。気象庁は、この地震に対して、同日20時23分に遠地地震に関する情報(津波の心配なし)を発表 した。

1980年以降の活動をみると、今回の地震の震央周辺(領域 a)では、M7.0程度の地震が深さ100km以 浅で時々発生している。また、今回の地震の震央周辺を含む周囲の地域は、地震活動が活発な地域であ る。2009年9月30日02時48分に発生したサモア諸島の地震(Mw7.9)では、この地震による最大4~ 6mの津波がサモア諸島に到達し死者192人などの被害が生じた他、日本にも父島二見に同日11時59 分に到達し、岩手県の久慈港で36cmの津波を観測した。また、2009年10月8日には、バヌアツで07 時03分にMw7.6の地震が、さらに07時18分にはMw7.8の地震が、08時13分にMw7.4の地震が発生した。

> 震央分布図 (1980年1月1日~2021年10月31日、深さ0~700km、M≧5.0)



*参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.

第10図(a) 2021年10月2日,9日バヌアツ諸島の地震(Mw7.3, Mw6.9)

Fig. 10(a) The earthquake in the Vanuatu islands (Mw7.3, Mw6.9) on October 2, 9, 2021.

# 10月2日 バヌアツ諸島の地震の発震機構解析

2021年10月2日15時29分(日本時間)にバヌアツ諸島で発生した地震について CMT 解析及び W-phase を用いた発震機構解析を行った。



#### 2. W-phase の解析 N



セントロイドは、南緯 21.1°、東経 174.6°、深さ 541km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 43 観測点の上下成分、
 36 観測点の水平成分を用い、100~300 秒のフィルターを使用した。
 注) W-phase とは P 波から S 波付近までの長周期の実体波を指す。

Mw	Mo	断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)
7.3	$1.04  imes 10^{20} \mathrm{Nm}$	33. 7° $/$ 70. 2 $/$ -129. 4°	281. 3° /43. 4° /-29. 6°

(W-phase に関する参考文献)

Kanamori, H and L. Rivera, 2008, Geophys. J. Int., **175**, 222-238.

解析データには、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ 管理センター(DMC)より取得した広帯域地震波形記録を使用 した。 また、解析には金森博士及び Rivera 博士に頂いたプログラム を使用した。記して感謝する。



解析に使用した観測点配置

#### 第 10 図 (b) 発震機構解析

Fig. 10(b) Moment tensor solution.

# 10月9日 バヌアツ諸島の地震の発震機構解析

2021 年 10 月 9 日 19 時 58 分(日本時間)にバヌアツ諸島で発生した地震について CMT 解析及び W-phase を用いた発震機構解析を行った。



#### 2. W-phase の解析



セントロイドは、南緯 21.3°、東経 174.3°、深さ 521km となった。

W-phase の解析では、震央距離10°~90°までの39 観測点の上下成分、
 32 観測点の水平成分を用い、100~300秒のフィルターを使用した。
 注) W-phase とは P 波から S 波付近までの長周期の実体波を指す。

Mw	Mo	断層面解1(走向/傾斜/すべり角)	断層面解2(走向/傾斜/すべり角)
6.9	$2.84\!\times\!10^{19}\mathrm{Nm}$	154. 9° $\checkmark$ 76. 4° $\checkmark$ 156. 0°	250. 9° $\checkmark$ 66. 7° $\checkmark$ 14. 8°

(W-phase に関する参考文献) Kanamori, H and L. Rivera, 2008, Geophys. J. Int., **175**, 222-238.

解析データには、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ 管理センター(DMC)より取得した広帯域地震波形記録を使用 した。 また、解析には金森博士及び Rivera 博士に頂いたプログラム

を使用した。記して感謝する。



解析に使用した観測点配置

第 10 図 (c) 発震機構解析

Fig. 10(c) Moment tensor solution.

# 11-3 2021 年7月29日アラスカ沖で発生した地震による津波の観測記録 Ocean-bottom observation of trans-Pacific tsunamis caused by the earthquake off Alaska coast on the 29th July 2021

防災科学技術研究所

National Research Institution for Earth Science and Disaster Resilience

2021 年 7 月 29 日 15 時 15 分(日本時間) に Mw8.0 の地震がアラスカの沖合で発生した.東京 大学地震研究所の W-Phase CMT 解¹⁾ によると、メカニズムは低角逆断層型で、深さは 45.5 km で あった.太平洋津波警報センター(PTWC)²⁾ によると、この地震に伴い震源域から約 200km 離れ た Sand Point の検潮所では最大 0.2 m の津波など、周辺で津波が観測された.

この地震発生時,日本海溝および南海トラフ周辺に展開された S-net と DONET³⁾の水圧計が津 波による水圧(水位)変動を捉えていた.津波は地震発生から約 5.5-7 時間半後に日本列島周辺に 到達した(第1図).比較的品質の良い S-net および DONET の水圧観測点の波形を第2図に示す. 波形には,600 - 5400秒の帯域のバンドパスフィルタを適用した.また,東京大学地震研究所 W-Phase CMT 解¹⁾の震源情報をもとに,Nakamura and Baba (2016)⁴⁾の手法により計算された津波波 形と比較したところ,観測とよく一致した.水位変動が浅部で増幅される効果も確認できた.観測 された水位変動は,地震発生からおよそ 16-24 時間後に最大 1cm 前後の振幅となった.

> (久保田達矢・近貞直孝・鈴木亘(防災科研)・中村武史(電力中央研究所)) KUBOTA Tatsuya, CHIKASADA Naotaka, SUZUKI Wataru, and NAKAMURA Takeshi

#### 謝辞

東京大学地震研究所の W-Phase CMT 解を使用させていただきました.記して感謝いたします.

#### 参考文献

- 1) https://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/WPHASE/global/
- 2) https://www.tsunami.gov/
- 3) Aoi et al. (2020), Earth, Planets Space, 72, 126. doi:10.1186/s40623-020-01250-x
- 4) Nakamura and Baba (2016), Mar. Tech. Soc. J., 50, 76-86. doi:10.4031/MTSJ.50.3.11



- 第1図 S-net および DONET 観測点の位置(三角印)と津波予想到達時間の分布(赤線).
- Fig. 1 Station location of S-net and DONET (triangles) and travel times of the initial wave of tsunami around Japan (red contours).



- 第2図 600-5400 秒の帯域のバンドパスフィルタを適用した,S-net(左)および DONET(右) 観測点の水圧波形 データ(黒線).観測点名と水深を各図の右側に示す.赤線は,理論的に計算された津波波形を示す.なお, 長距離の津波伝播途中に生じる走時遅れの効果を考慮して計算波形を20分遅らせて描画している.
- Fig. 2 Observed waveforms at pressure gauge stations of S-net (left) and (right). The waveforms are bandpass-filtered in the period 600–5400 s (black lines). The station location and depth are shown in the right of each panel. Red lines are the simulated tsunami waveforms. Taking the arrival delay due to the long-distance propagation of the tsunamis into account, the simulated waveforms are drawn with the 20 min delay.

# 11 - 4 ハイチの地震 SAR 干渉解析結果

# The 2021 Haiti Earthquake: Crustal deformation detected by ALOS-2 data.

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

《2021 年 8 月 14 日のハイチの地震に伴う地殻変動》

[「だいち2号」による SAR 干渉解析結果]

第1~2図は,2021年8月14日(UTC)にハイチ共和国で発生した Mw7.2の地震に関する,「だいち2号」データの解析結果に関する資料である.解析に用いたデータの諸元は,第2図下段の表に示すとおりである.

第1図は北行軌道から,第2図上段の図は南行軌道からの観測データを用いた SAR 干渉解析 の結果を示し,ハイチ共和国の南部を東西に走るエンリキロ-プランタインガーデン(Enriquillo-Plantain Garden)断層帯に沿って地殻変動が見られ,断層帯の南側に比べ北側で変動量が大きい. 顕著な変動域は大きく西側と東側に分かれ,西側では北行軌道で衛星-地表間の距離に最大 80cm 以上の短縮が観測された.第1図において,変動の勾配が大きい領域は,既知の断層帯に対し,東 側ではほぼ沿って分布しているが,西側ではやや北に分布しており,また,西側では地表断層に対 応する可能性がある非干渉領域が見られる.

# 2021 年 8 月 14 日ハイチ共和国の地震 だいち 2 号 SAR 干渉解析結果(暫定)

2021 年 8 月 14 日にカリブ海ハイチで発生した地震(Mw7.2、USGS) について、だいち 2 号のデータの解析を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- 2010 年 1 月 12 日ハイチ共和国の地震の地殻変動域の約 100km ほど西側で大きな地殻変動が見ら れる。
- ハイチ共和国の南部を東西に走る Enriquillo-Plantain Garden 断層帯に沿って地殻変動が見られる。
- 顕著な変動域は大きく西側と東側に分かれている。
- 断層帯の南側に比べて北側で変動量が大きい
- 変動の勾配が大きい領域は、東側ではほぼ既知の断層帯に沿って分布しているが、西側ではやや北に 分布している(図1)。
- 西側の変動域では、地表断層に対応する可能性がある非干渉領域が見られる(図1)。
- 図1において、西側の変動域では、最大80cm以上の衛星に近づく向きの地殻変動が観測された。



図 1. 干渉画像。干渉縞が密な領域は大きな変動があったことを示す。実線は Styron et al. (2020)による断層線。

Fig. 1 Synthetic Aperture Radar (SAR) interferogram from an ascending orbit pair.

第1図 SAR 干涉画像(北行軌道)



図 2. 干渉画像。干渉縞が密な領域は大きな変動があったことを示す。実線は Styron et al. (2020)による断層線。



図 3. 拡大図の位置。

表. 使用データ							
図番号	観測日	観測時間 (UTC)	衛星進行 方向	電波照射 方向	<b>観</b> 測 モード	入射角 (震央付近)	垂直 基線長
1	2020/12/23 2021/08/18	05:02 頃	北行	右	高分解能 (10m)	43°	+8m
2	2019/12/10 2021/08/17	16:42 頃	南行	右	広域観測 (350km)	46°	+165m

本成果は、地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループの活動を通して得られたものである。

#### 第2図 SAR 干涉画像(南行軌道)

Fig. 2 Synthetic Aperture Radar (SAR) interferogram from a descending orbit pair.

# 重点検討課題の検討

第232回 地震予知連絡会重点検討課題 「地震発生予測に向けた沈み込み帯での 地震準備・発生過程の物理モデル」

第233回 地震予知連絡会重点検討課題 「予測実験の試行(08) - 試行から実施への移行」 12 - 1 第 232 回地震予知連絡会重点検討課題「地震発生予測に向けた沈み込み帯 での地震準備・発生過程の物理モデル」の概要

# Physical models of preparation and generation processes of megathrust earthquakes in subduction zone aiming for their forecast

堀 高峰(海洋研究開発機構)

Takane Hori(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

1. はじめに

地震発生予測のためには準備段階からの全過程の理解が必要との考え方のもと、1990年前後か ら「地震発生の物理」の中で物理モデルの研究が進められてきた.その間、2000年代に入り、地 震・地殻変動観測網の発達に伴って、沈み込み帯深部での低周波微動の発見に始まり、沈み込み帯 における大地震前後の多様な振る舞いが明らかになってきた.こうした複雑・多様な現象を説明す るために、様々な物理・化学過程やランダム過程を取り入れた多種多様なモデルが提案されている. このように、ゆっくり地震を含めて、地震発生の全過程の理解は確実に進んできたが、これらの理 解を地震発生予測に活かすという、「地震発生の物理」の当初の観点での進展は十分とは言い難い. そこで、ゆっくり地震を含めた地震発生過程の複雑さ・多様性を踏まえて、予測に活かす観点で物 理モデルを見直し、今後のモニタリングと地震発生予測に活かす道を探るための議論を行うことと した.論点は以下の通りである.

・地震発生の複雑さ・多様性を踏まえると、どのような地震発生予測が実現可能か?

・地震発生予測の観点では、どのような物理モデルが有効といえるか?

・物理モデルを地震発生予測に活かすために、今後、どのような研究が特に必要か?

2. 研究紹介と議論の概要

2-1. エネルギー収支を考慮した地震発生シナリオ構築の新手法

地震発生シナリオ構築の新手法 Energy-based method を提案した.本手法では低い計算コストで 地震シナリオ(すべりモデル)を作成した上で,エネルギーバランスにより地震シナリオの実現性 を評価する.エネルギーバランスの評価のため,新たなパラメータ Residual energy を導入した.正 の Residual energy を示すシナリオは,地震発生の必要条件を満たしている.最初 Residual energy は 負の値を示すが,時間の経過によりエネルギーが蓄積すると Residual energy が増加して正の値とな り,地震が発生する必要条件が満たされるようになる.より現実的なシナリオ構築のためには,過 去の地震履歴を考慮した応力蓄積モデルが必要となる.パラメータの不確定性により決定論的な議 論は難しいが,地震発生ポテンシャルが時間の経過に従い高まっていく様子を可視化できた.今後, 観測データに基づいたモデル更新により,地震シナリオの精度向上を図ることが重要である.

2-2. 南海トラフ周辺におけるスロースリップイベントと地震発生準備過程の数値モデリング: 近年の観測研究を踏まえて

近年の観測研究の進展により明らかになった,南海トラフの様々な場所での長期的スロースリッ プイベント(SSE)の発生を、3次元のプレート形状を導入した数値シミュレーションで再現した. 長期的 SSE の地域的な特徴について,東海,豊後水道,日向灘地域でみられるようなある程度 周期的に発生する長期的 SSE と、四国中部、紀伊水道、紀伊半島北部地域でみられる不定期で間 隔の長い長期的 SSE を、摩擦パラメータの分布を仮定することで、ある程度説明できることを示 した.モデリング結果から、後者の長期的 SSE については、そのすべり域が地震発生準備過程の 後半になるにつれて浅くなる可能性が示唆された.

2-3. SSE 後の沈み込み帯地震の発生確率に対する単純な物理モデルでの評価: ヒクランギ巨 大地震への適用

2016年11月14日にMw7.8 Kaikoura 地震がニュージーランドで発生した.その後,余効すべり だけでなく,固着域の周辺でSSEも発生したため,政府から巨大地震発生可能性を定量的に評価 することがGNSサイエンスに求められた.様々な統計モデルに加えて,地震やSSE等による応力 変化を考慮した物理モデルでの確率評価が実施された.地震時の応力降下量と地震の再来間隔が, 仮定した確率分布に従うように長期間の地震発生カタログをシミュレーションで生成した.それに 対して,今回の地震・余効すべり・SSEによる応力変化を様々なタイミングで与えた場合に,地震 が誘発される確率を算出した.尤もらしい1つの結果よりも,これは「無い」という範囲から上限・ 下限を示すことが,政策判断への活用には重要ということで,応力降下量等の範囲に応じたばらつ きも考慮した.結果として,統計モデルのばらつきの範囲内に物理モデルのばらつきも収まった.

3. 議論とまとめ

地震発生の複雑さ・多様性を踏まえると、どのような地震発生予測が実現可能か?という点については、地震発生のシナリオの想定や長期評価の高精度化としての発生時期の予測を確率分布化することの重要性が指摘された.また、固着・すべりの変化や SSE の繰り返し過程の再現・予測も対象となりうることや、シンプルな地震発生モデルで周辺現象の影響を評価する可能性も示された.

物理モデルを地震発生予測に活かすために、今後、どのような研究が特に必要か?という点では、 応力蓄積過程モデルと摩擦モデル(地震・SSEを含む)等の高度化の必要性が指摘された.そこで は、初期応力や構造不均質の導入も重要となる.また、海域に広げたり、過去に遡ったりするなど、 観測データの充実も必要となる.さらに、確率を用いた定量化をすることが、予測のためにも、そ の結果を他分野も含めて活用するためにも必要となる.

地震発生予測の観点では、どのような物理モデルが有効といえるか?という点では、複数モデル で並行して比較検討することの重要性が指摘された.その意味で、今回紹介されたもの以外でどの ようなモデルがあるか?という問いについては、長期間・大規模シミュレーション結果を学習した サロゲートモデルなど、物理シミュレーションと AI・機械学習等のデータサイエンスの融合も重 要であるとの指摘があった.

# 12-2 エネルギー収支を考慮した地震発生シナリオ構築の新手法 A new method to generate rupture scenarios for megathrust earthquakes taking the energy balance into account

野田 朱美(気象庁気象研究所) NODA Akemi (Meteorological Research Institute)

高精度かつ高密度な GNSS 観測網の配備により,プレート境界の固着(すべり遅れ)の時空間変 化を捉えることが可能になった.そして,すべり遅れの推定結果を活用して,将来発生する地震の モデル(地震シナリオ)を予測する研究が数多く行われている.その手法は大きく2種類,すなわ ち kinematic modeling と dynamic modeling に分類することができる.まず,kinematic modeling とし ては,すべり遅れ速度の推定結果に蓄積年数をかけて地震すべり分布をモデル化する方法がある^例 ^{ネば1)}.この手法は,簡単に地震シナリオ構築ができるという利点がある一方で,断層破壊の際の力 学的プロセスとは必ずしも整合しないという問題がある.対照的に dynamic modeling では,摩擦構 成則に従った動的破壊シミュレーションを通じてモデルが作成される.この際,応力降下量はすべ り遅れ速度から計算されるせん断応力の蓄積に基づいて設定される^{例えば2)}.この手法による地震シ ナリオは必ず断層の破壊力学と整合するが,自発的な断層破壊の時間発展をシミュレートするため に計算負荷が大きいという特徴がある.特に,正確な推定が難しい摩擦パラメターに関して,パラ メター探索のために多数のシミュレーションを実行する場合,この特徴はシナリオ構築の障害とな る.

これらの問題を乗り越えるため,新たなシナリオ構築手法 energy-based method を提案する³⁾.本 手法は従来の kinematic modeling と dynamic modeling の中間に位置し,これらの手法の弱点を補う ことができる.シナリオ構築の手順は2段階で構成される.第1段階としてプレート間すべり遅れ の推定結果を基に地震すべりモデル(シナリオ)を推定し,第2段階としてエネルギーバランスの 観点からシナリオが断層の破壊力学と整合するか否かを判定する.

南海トラフプレート境界を例にとって、シナリオの構築手順を説明する. GNSS データ解析によ るプレート間すべり遅れ速度分布(第1図 a)から、プレート境界のせん断応力の蓄積速度を計算 できる(第1図 b). プレート境界の破壊挙動は、駆動力としてのせん断応力と抵抗力としての摩 擦特性に規定されるという考えに基づき、すべり遅れではなくせん断応力から地震すべりモデルを 推定する. せん断応力の蓄積速度の分布から、4 つの応力蓄積のピーク(M:室戸岬沖, Ki:紀伊水道, Ku:熊野灘, E:遠州灘)が確認できる. これを震源域の最小単位「アスペリティ」と考え、地震は 単独あるいは複数のアスペリティの組合せで発生するという仮定の下,10 通りの組合せのシナリ オを作成した. 第1図(c)は、例として室戸岬沖と紀伊水道のアスペリティの組合せ M-Ki を選ん だ場合の震源域を示す. せん断応力の蓄積速度が0 Pa/yr 以上(応力増加)の領域を震源域として 設定した. 地震時の震源域内の応力降下量(第1図 c)は、せん断応力(第1図 b)が150年蓄積 したものと仮定した. 最後に、仮定した応力降下量を満たす地震すべりモデルをインバージョンで 推定した(第1図 d). このモデルは静的なすべりモデルであるため、dynamic modeling よりも圧倒 的に小さい計算負荷で計算することができる. アスペリティの様々な組合せについて同じ手順を適 用して合計10個の地震シナリオを作成した(第2図).

次に、以上のように構築した各シナリオのエネルギーバランスを評価する。地震発生により解放

される地殻内の歪みエネルギー  $\Delta W$  のうち、一部は断層面での摩擦により散逸し ( $E_D$ )、残りは地 震波の放射エネルギーに変換される⁴⁾. そこで、新たなパラメター residual energy  $E^{res}$ を以下のよう に定義する:

 $E^{res} = \Delta W - E_D$ 

(1)

 $E_{\rm D}$ は  $\Delta W$ の一部に過ぎないという関係から, residual energy が正の値になることが, 地震発生の 必要条件と考えることができる. この基準により断層の破壊力学と整合しないシナリオは排除され る.

解放される歪みエネルギー  $\Delta W$  は第1段階で作成したシナリオの応力降下量と地震すべりモデル から計算される. 散逸するエネルギー  $E_D$  に関しては, 摩擦構成則や経験的なスケーリング則によ り与える必要がある. ここでは, 南海トラフで発生する地震の動的破壊シナリオを検討した Hok et al. (2011)²⁾ のすべり弱化則を用いて散逸するエネルギーを見積もった. 第3図のような線形のすべ り弱化則の場合, residual energy は available energy と fracture energy の差として求めることができる.

作成した 10 個のシナリオの residual energy を求めた結果(第2図),5 個のシナリオが正の residual energy を示し、地震発生の必要条件を満たした。残りの5 個のシナリオはエネルギーバラ ンスの観点から実現しないと考えられる。主に室戸岬沖のアスペリティ M を含むシナリオが正の residual energy を示したが、これはアスペリティ M の応力蓄積速度が大きいことを反映している。

次に、時間の経過とともに各シナリオの residual energy がどのように変化するか調査した.第4 図内の 10 本の曲線は、各シナリオの蓄積時間を変更して計算した residual energy を示している. 蓄積時間 10 年から 200 年の間を 0.1 年間隔に分割し、合計 1901 ケースの residual energy を計算し て各シナリオの曲線をプロットした.計算負荷が dynamic modeling よりも圧倒的に小さいため、こ のような連続的に見える評価が可能となる.蓄積時間 10 年の時点で、既に多くのシナリオで M_w7 クラスの地震となるほどの歪みエネルギーが蓄積されている.しかし、この時点では全てのシナリ オが負の residual energy を示すため、地震発生の必要条件を満たさない.その後、residual energy は 一旦減少するが、蓄積時間が 100 年を超えた頃より急激に増加して正の値を示すようになる.最終 的に、すべてのシナリオが地震発生の必要条件を満たすようになった.このように、すべり遅れが あるだけでは地震は発生せず、断層面の摩擦で散逸するエネルギー以上の歪みエネルギーが蓄積し て初めて地震が発生する.この点で、energy-based method は kinematic modeling と決定的に異なっ ている.

Residual energy の時間推移の特徴を掘り下げるために, 蓄積時間に対する available energy と fracture energy の変化を第5図に分けて示す. Fracture energy は時間に比例して増加するのに対し, available energy は時間の2乗に比例して増加する. そのため, 最初の段階で available energy よりも fracture energy の方が大きくても,時間の経過によりいずれ必ず available energy が fracture energy を 上回り, residual energy が正の値に変わって地震発生の必要条件を満たすようになる.

ところで、第5図の fracture energy は、一般的なすべり量と fracture energy のスケーリング関係 に簡単に焼き直すことができる。すなわち、fracture energy が蓄積時間の1乗に比例する場合に は、震源全体の fracture energy の総和は地震モーメントの1乗に比例し、単位面積当たりの fracture energy は平均すべり量の1乗に比例する。これは、実際の地震データから推定された fracture energy の経験的スケーリング関係^{例えば 5), 6)}と調和的である。ただし、経験的スケーリング関係では、 地震モーメントあるいはすべり量の指数は必ずしも1と一致しない。Fracture energy のスケーリン グ関係における地震モーメントあるいはすべり量の指数が2よりも小さければ、時間の経過によっ て必ず available energy が fracture energy を上回り, 地震発生の必要条件を満たすようになる, という本研究の結論は変わらない. しかし, 指数が1からずれると第5図の破線(fracture energy)の傾きが変化し, 地震発生の必要条件を満たすようになる時間が変わる. そのため, 地震が発生するために必要な蓄積年数を考える上で, fracture energy の経験的スケーリング関係は非常に重要な情報である.

以上のように, energy-based method の理論的な枠組みを合理的に設定することができた. その一 方で,シナリオ構築における具体的なモデル設定については改善の余地が残されている. Energybased method のシナリオ構築には2つのモデル,応力蓄積分布のモデルと摩擦特性のモデルが必要 となる.

応力蓄積分布は地震すべりモデルの空間分布や available energy の見積りに影響する.今後,海底 地殻変動観測の拡充によりすべり遅れ推定の空間解像度が向上することで,より高精度な応力蓄積 分布が得られることが期待される.また,応力蓄積速度を一定と仮定するのではなく, episodic な スロー地震による応力の解放・蓄積も取り入れることで,より現実的なシナリオを構築できると考 えられる.

摩擦特性は fracture energy の見積りに影響し、そのスケーリング関係により地震発生までに必要 な蓄積年数が変化する.本研究ではすべり弱化則を仮定して fracture energy を推定したが、実際の 地震記録に基づくスケーリング関係を使った方が、より安定的な推定が可能になると考えられる. なぜなら、地震波データからすべり弱化の各パラメターを推定しようとすると、強度超過と臨界す べり量の間にトレードオフが生じ、個別のパラメターを精度よく推定することは難しいことが分 かっているためである^{7).8)}.

Energy-based method の枠組みの下,新たな観測データから得られる情報を取り込んで応力蓄積分布と摩擦特性のモデルを更新することで,シナリオをより現実的なものに改良していくことができる. このような柔軟性を備えていることが, energy-based method の利点の1つである.

(野田 朱美) NODA Akemi

### 参考文献

- 1) Baranes et al. (2018), Geophysical Research Letters, 45, 2986–2994. https://doi.org/10.1002/2018gl077329
- 2) Hok et al. (2011), Journal of Geophysical Research, 116, B12319. https://doi.org/10.1029/2011jb008492
- Noda et al. (2021), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126, e2020JB020417. https://doi.org/10.1029/2020JB020417
- 4) Kostrov (1974), Izvestiya, Earth Physics, 1, 23-40.
- 5) Abercrombie & Rice (2005), *Geophysical Journal International*, **162**, 406–424. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02579.x
- 6) Tinti et al. (2005), Journal of Geophysical Research, 110, B12303. https://doi.org/10.1029/2005jb003644
- 7) Guatteri & Spudich (2000), *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90(1)**, 98–116. https://doi.org/10.1785/0119990053
- Kimura et al. (2010), *Journal of Geophysical Research*, **115**, B08302. https://doi.org/10.1029/2009jb006758



- 第1図 南海トラフプレート境界を対象としたシナリオ構築の手順³⁾. (a) GNSS データ解析によるプレート間すべ り遅れ速度分布. (b) プレート境界のせん断応力の変化速度.4つのアスペリティ M (室戸岬沖), Ki (紀 伊水道), Ku (熊野灘), E (遠州灘)の位置を白いベクトルで示す. (c) 蓄積時間 150 年を仮定した場合の シナリオ M-Ki の応力降下量. 灰色の領域は震源域の外側であることを示す. (d) (c) から推定したシナリ オ M-Ki のすべり量分布.右上にモーメントマグニチュードを示す.
- Fig. 1 Procedure for generating an earthquake scenario in the Nankai trough subduction zone³⁾. (a) Interplate slip-deficit rate distribution estimated from interseismic GNSS observation. (b) Distribution of shear stress change rate at the plate interface. The locations of four asperities, M (off Cape Muroto), Ki (the Kii channel), Ku (the Kumano-nada Sea), and E (the Enshu-nada Sea), are indicated by white arrows. (c) Stress drop distribution for scenario M-Ki assuming an accumulation time of 150 years. Gray areas show regions outside the source region. (d) Slip distribution of scenario M-Ki estimated from (c). The moment magnitude is shown in the upper right of each panel.



- 第2図 蓄積時間 150 年を仮定した場合の地震シナリオのすべり分布³⁾. コンターはすべり量を 1m 間隔で示して いる. モーメントマグニチュードを右上に, residual energy を右下に示す(赤文字:正の residual energy, 青 文字:負の residual energy).
- Fig. 2 Slip distributions of scenarios assuming an accumulation time of 150 years³⁾. The contours indicate slip at intervals of 1 m. The moment magnitude is shown in the upper right of each panel. The residual energy is shown in the lower right of each panel (red: positive, blue: negative).



- 第3図 線形のすべり弱化則におけるエネルギーパーティショニングの概念図³⁾. τ₀は初期応力, τ₂とτ₃は静 摩擦応力と動摩擦応力, Δτは応力降下量, Dは最終すべり量, D₂は臨界すべり量をそれぞれ示している.
- Fig. 3 Schematic figure of the energy partitioning in a unit area of a rupture fault for a linear slip-weakening friction law.³⁾  $\tau_0$  is the initial shear stress.  $\tau_s$  and  $\tau_d$  are the static and dynamic frictional stresses, respectively.  $\Delta \tau$  is the stress drop. D is the final slip. D_c is the critical slip distance.



第4図 10個の地震シナリオにおける residual energy の時間推移. 各シナリオの residual energy を色つきの線で示し, 線の色で蓄積時間を表している.丸,三角,四角はそれぞれ蓄積時間 100,150,200 年に対応する.

Fig. 4 Temporal evolution of residual energy for 10 scenarios. Temporal changes in the residual energy of scenarios are shown by colored lines, with color variation denoting the assumed accumulation time. Circles, triangles, and squares indicate the residual energy for accumulation times of 100, 150, and 200 years, respectively.



第5図 シナリオ M-Ki-Ku-E における available energy, fracture energy, residual energy の蓄積時間に対する変化³⁾. Fig. 5 Changes in available, fracture, and residual energy with accumulation time for scenario M-Ki-Ku-E.³⁾

# 12-3 南海トラフ周辺におけるスロースリップイベントと地震発生準備過程の数値 モデリング:近年の観測研究を踏まえて

# Numerical modeling of slow slip events in the earthquake preparation process around the Nankai region, based on the recent advance in observational studies

#### 松澤 孝紀(防災科学技術研究所)

#### MATSUZAWA Takanori (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

南海トラフにおける長期的スロースリップイベント(以下,SSE)は、プレート間地震時に大き なすべりが予想される固着域の深部延長上で発生しており、大地震発生との関係を理解することは 重要な課題である.これまで豊後水道および東海地域において、長期的SSEが繰り返し発生して いることがよく知られ、研究されてきた.これらの地域の長期的SSEは地震波速度構造の解析結 果における高 V_p/V_sの領域と対応することから、高い間隙水圧によりその発生場所が規定されてい る可能性を示唆されていた.しかしながら近年の観測研究の進展に伴い、日向灘、四国西部・中 部、紀伊水道、志摩半島付近でも長期的SSEの発生が報告されている¹⁻³⁾.また、日向灘地域では 2~3年間隔の短い周期で長期的SSEが繰り返していることも指摘されている⁴⁾.このような観測 結果に基づき、南海トラフにおける長期的SSEを、限られた領域で発生する現象ではなく、広く 分布する現象として捉えるとともに、地域的な特徴の差異も含めたSSEのモデル構築を行うことが、 プレート間地震の準備過程とSSEの関係を理解する上で、重要と考えられる.

我々はこれまでカットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存摩擦則を用いた数値シミュレー ションにより、短期的および長期的 SSE の発生をモデリングしてきた^{5,6}. 以下では、先に述べた ような長期的 SSE に関する新たな観測結果を踏まえたモデリング⁷について簡単に紹介する.

本数値モデリングにおいては、これまでの研究⁶と同様のアプローチを適用することで、どこま で特徴を再現できるかを検討した.まず沈み込むフィリピン海プレート上面の3次元形状を観測研 究⁸⁻¹⁰⁾から設定し(第1図)、これを約17万個の三角形要素で表現した.半無限弾性媒質を仮定し て要素上のすべりに対する各要素の応力変化を計算し¹¹⁾、弾性媒質の影響を考慮した.摩擦パラ メターについては、我々の既往の研究⁶による四国のSSEの数値モデルと同様に、豊後水道、東 海、および日向灘に、有効法線応力が固着域と短期的SSE領域の間の一定の値をもつような長期 的SSE領域を、第1図のように設定した.また、短期的SSE領域については、実際の微動の分布 ^{12,13)}に基づきすべり速度・状態依存則のパラメター a-b 値を設定した(第1図).

本モデルによって再現された日向灘の長期的 SSE の例を,第2図に示す.長期的 SSE 領域にお いて,バイラテラルに滑りの伝播する様子がみられる.第3図には,紀伊水道付近および日向灘付 近での地震サイクルの時間スケールでのすべり速度の時間発展を,それぞれ深さ断面で示す.紀 伊水道付近の長期的 SSE のすべり域は,時間の進展に伴う固着域の削剥に対応し,徐々に浅い方 向に広がる傾向がみられた.その後大規模 SSE が発生し,長期的 SSE 領域のすべり速度は遅くな り,次のプレート間大地震発生までの間に明瞭な長期的 SSE はみられなかった.このように長期 的 SSE のすべりの発生間隔があまり一定でなく,固着域の削剥過程に伴って滑り域が浅くなるよ うな特徴は,四国,潮岬付近,志摩半島付近でも同様にみられた. 日向灘においては,数年間隔で長期的 SSE が繰り返し発生する結果が得られた(第3図). これ は観測結果とよく対応している⁴⁾. またすべり速度がやや高い領域が徐々に浅くなり,固着域の 削剥がみられる一方で,長期的 SSE のすべりはほぼ一定の領域で発生しており,地震サイクルに おける変化は顕著でなかった. このようにほぼ一定の領域で長期的 SSE のすべりが繰り返す特徴 は,豊後水道,東海地域についても同様にみられた. これらの領域では,前述のように有効法線応 力の分布により長期的 SSE の領域を設定しており,再現された長期的 SSE はそれに特徴づけられ 発生している. 我々のモデルは,南海トラフで普遍的に発生する長期的 SSE を説明するとともに, 長期的 SSE の地域的な特徴についても,摩擦パラメターの分布を仮定することで,ある程度説明 できることを示した. また,とくに前者の四国や紀伊水道付近,志摩半島付近のタイプの長期的 SSE については,数十年以上の時間スケールで発生挙動の変化がみられる可能性が示唆された.

シミュレーション結果から予測されるような SSE の発生挙動の変化の有無を議論し、モデルを 検証するためには、スロー地震の長期間の活動状況の把握が必要となる.将来にわたってスロー地 震のモニタリングを継続していくことはまず重要であるが、過去のスロー地震活動を明らかにする ことも有用である.例えばアナログ記録の活用¹⁴⁾なども、その一つの可能性であろう.

> (松澤 孝紀) MATSUZAWA Takanori

謝辞

三角形要素上のすべりによる応力変化を計算するグリーン関数については, R. Simpson 博士および W. Stuart 博士のプログラム¹¹⁾を利用させていただいた.本稿で紹介した研究の一部は科研費(16H06477, 19K04044, 20H01987)により補助された.

#### 参考文献

- 1) Ozawa et al. (2017), Earth Planets Space, 69:56.
- 2) 国土地理院 (2021), 予知連会報, 105, 402-413.
- 3) Kobayashi & Tsuyuki (2019), Earth Planets Space, 71:60.
- 4) Takagi et al. (2019), J. Geophys. Res., 124, 3853-3880.
- 5) Matsuzawa et al. (2010), J. Geophys. Res., 115, B12301.
- 6) Matsuzawa et al. (2013), Geophys. Res. Lett., 40, 5125-5130.
- 7) 松澤·芝崎 (2020), 日本地震学会 2020 年秋季大会, 南海トラフおよび日向灘におけるスロースリッ プイベントの数値モデリング 一近年の観測研究との比較一.
- 8) Baba et al. (2006), Tectonophysics, 426, 119-134.
- 9) Shiomi et al. (2008), Geophys. J. Int., 173, 1018-1029.
- 10) Ide et al. (2010), Geophys. Res. Lett., 37, L21304.
- 11) Stuart et al. (1997), J. Geophys. Res., 102, 27623-27633.
- 12) Maeda & Obara (2009), J. Geophys. Res., 114, B00A09.
- 13) Obara et al. (2010), Geophys. Res. Lett., 37, L13306.
- 14) 松澤・武田 (2021), 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, 関東東海地殻活動観測網アナログ地震 計記録の微動解析に向けた自動デジタル化の試み.



- 第1図 数値シミュレーションにおいて仮定したパラメター分布. (a) プレート境界の深さ. (b) 有効法線応力の分布.
   (c) すべり速度・状態依存摩擦則における a-b 値の分布. 赤線 A, B は第3 図で示したすべり速度分布の位置を示す.
- Fig. 1 Parameter distributions assumed in our numerical simulation. (a) Depth of plate interface. (b) Distribution of effective normal stress. (c) a-b value in the rate- and state-dependent friction law. Red lines show the location of cross sections shown in Fig. 3.



第2図 (a)-(d)日向灘地域の長期的 SSE 発生時のすべり速度分布のスナップショット(赤矢印).

Fig. 2 (a)-(d) Snapshots of slip velocity distribution during a long-term slow slip event in the Hyuganada region (red arrows).



- 第3図 すべり速度の時間発展.上部の青矢印は南海トラフにおける大地震発生時を示す.緑矢印は長期的 SSE の 発生領域を示す.(a)紀伊水道を通る測線(第1図(c)の赤線 A)における深さ断面.橙色矢印,および赤 矢印は,それぞれ長期的 SSE,大規模 SSE を示す.(b)日向灘を通る測線(第1図(c)の赤線 B)における 深さ断面.図の下部の青矢印は,日向灘地域での地震発生時を示す.
- Fig. 3 Temporal evolution of slip velocity. Blue arrows on the top of figures show the time of large earthquakes in the Nankai region. Green arrows show the regions of long-term slow slip events (SSEs). (a) Cross section at the Kii Channel region (A in Fig. 1(c)). Orange arrows and a red arrow show the time of long-term SSEs and a large SSE, respectively. (b) Cross section at the Hyuganada region (B in Fig. 1(c)). A blue arrow at the bottom of the figure shows the time of an earthquake at the Hyuganada region.

12 - 4 SSE 後の沈み込み帯地震の発生確率に対する単純な物理モデルでの評価: ヒクランギ巨大地震への適用

# Simple Physical Model for the Probability of a Subduction-Zone Earthquake Following Slow Slip Events and Earthquakes: Application to the Hikurangi Megathrust, New Zealand

堀 高峰(海洋研究開発機構)・金子 善宏(京都大学大学院理学研究科)
 HORI Takane (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology),
 KANEKO Yoshihiro (Kyoto University)

2016年11月14日にニュージーランド南島北端付近でKaikoura地震(Mw7.8)が発生した(第 1図a). この地震の後,Hikurangi沈み込み帯のプレート境界で,余効すべりが発生するとともに, 隣接する固着域の周辺でスロースリップイベント(SSE)も複数発生した(第1図b). この固着域は, プレート境界巨大地震の想定震源域であり,これらの余効すべりやSSEによって,大地震の発生 する可能性が普段よりも高まっていることを,GNSサイエンスがニュージーランド政府に対して 報告した.政府は,固着域を含む地域(NZ中部)で大地震が起こる可能性がどのくらいあるのか を確率を用いて定量化するようにGNSサイエンスに対して要請した. この要請を受けて,GNSサ イエンスは世界各国の地震関係の専門家にヒアリングを行うとともに,ワークショップを通して Expert elicitationを実施した¹⁾. 第2図に確率を定量的に評価する対象領域と,専門家に対する問い を示している. この問いに対して様々な地震統計モデルによる回答が提出されたが,物理的なモデ ルでも同様な推定ができないか?との意見を受けて行われた解析²⁾の概要を,今回の重点検討課題 のテーマである地震発生予測のための物理モデルの例として,以下で紹介する.

物理モデルでの確率評価の対象は、マグニチュード(M)7.8以上の海溝型巨大地震に限定した (なお、地震統計モデルでは 7.0 以上やプレート境界以外の地震も対象となっている). 確率評価は 以下の3つの手順に従って行った.(1) Kaikoura 地震や SSE による,対象巨大地震震源域での応力 変化の推定(第3図).(2)100万年を超える模擬地震カタログの生成(第4図).(3)(1)で推定した 応力擾乱の模擬カタログでの応力変化への適用と,模擬カタログでの巨大地震の発生確率の評価(第 5 図). 第 3 図 a から第 3 図 d は, Kaikoura 地震や SSE による応力変化の空間分布の推定結果を示す. 巨大地震震源域での応力変化は、震源域全体(第3図の黒枠内)での平均値に加えて、より大きな 応力変化が生じている深部 20km(第3図の紫点線枠内)での平均値も用いた.これらの応力変化 の時間変化が第3図e・fに示されている.緑線で示されたすべり欠損による応力蓄積の値は、模 擬カタログ生成時の仮定にもとづいている.第4図に、模擬地震カタログ生成のために仮定した応 力降下量や規模別頻度分布の例と、模擬地震カタログに対応する震源域での応力の時間変化などを 示した.カタログ生成にあたっては,地震によるモーメント解放率を,すべり欠損率から求まるモー メント欠損率とバランスさせるとともに、応力蓄積率は応力降下量の総和を再来間隔の総和で割っ た値で一定とした.こうして生成した模擬カタログに対して,第4図dの赤線で示すタイミングで(1) で推定した応力擾乱を与えた.この擾乱によるその後の応力変化のシナリオは第4図eに示された 3つが想定される(シナリオ1:1年以内などには誘発されない.2:Kaikoura 地震で誘発.3:数ヶ 月以内に SSE による応力変化で誘発される). こうして,応力擾乱によって発生時期が変化を受け たカタログを生成できる.

仮定する応力降下量などのパラメータを変えたそれぞれのカタログにもとづいて、応力擾乱後の1 年毎の地震発生確率を評価した結果を第5図に示す.応力擾乱直後の1年間に数%の発生確率を 示しており、これは擾乱がなかった場合の数倍の発生確率になっている.この確率は、応力擾乱を 加えた上での1年間の応力変化率の、地震時の応力降下量に対する比に相当することがわかった. 最終的に、このモデルから推定された M7.8以上の海溝型巨大地震の発生確率は、Kaikoura 地震後 の1年間で、それ以前の確率の1.3-18倍に増加するという結果が得られた.一方で、発生確率の 絶対値は 0.6-7% と小さい値にとどまった.

物理モデルから得られた結果は、様々な地震統計モデルの結果のばらつきの範囲内に収まった. こうした確率評価を定量的に行う際、政策判断に用いる観点で重要なことは、尤もらしい1つの結 果を出すことよりも、物理的に「あり得ない」範囲を検討した上で、あり得る上限と下限を示すこ とである.その意味では、今回仮定した物理モデル以外の様々なモデルで、こうした評価を近い将来、 準リアルタイムで行うことが望ましい.また、日本では地震の確率評価がわかりにくいということ がよく言われるが、ニュージーランドのカイコウラ地震の場合のように、定量的な値でないと政策 判断に使えず、また、他分野の専門家も地震学の知見を活用することが困難であるということから、 確率評価が求められる.このことは、地震学の知見を防災等に活用する際に重要な観点になると考 える.

(堀 高峰・金子 善宏)HORI Takane・KANEKO Yoshihiro

参考文献

- 1) Gerstenberger, et al. (2017), Published Report to New Zealand Natural Hazards Platform.
- 2) Kaneko et al. (2018), Geophys. Res. Lett., 45, 3932-3941, https://doi.org/10.1029/2018GL077641.
- 3) Wallace et al.(2012), J. Geophys. Res., 117, B02405, https://doi.org/10.1029/2011JB008640.
- 4) Wallace et al. (2018), Geophys. Res. Lett., 45, 4710–4718, https://doi.org/10.1002/2018GL077385.



- 第1図 (a)GPS データから推定された Hikurangi プレート境界でのすべり欠損率の分布(Wallace et al., 2012³⁾).緑のコンタで過去のスロースリップイベント(SSE)の分布を示す.黒の矢印は太平洋プレートに対する上盤プレートの相対速度を示す.緑の星印は Kaikoura 地震の震央.赤線と白線は、2016 年 Kaikoura 地震と 1885 年 Waipara 地震の断層トレースをそれぞれ示す.(b)GPS と InSAR データから時間依存インバージョンで推定された Kaikoura 地震後 1 年間の Hikurangi 沈み込みプレート境界での総すべり量をカラーコンタで示す(Wallace et al., 2018⁴). 点線のコンタは沈み込みプレート境界面の等深度線(km)であり、緑線はKaikoura 地震の断層トレース.(Kaneko et al., 2018²)より).
- Fig. 1 (a) Map of slip-deficit rate on the Hikurangi plate interface estimated from GPS (Global Positioning System) data (Wallace et al., 2012³). Past slow slip events (SSEs) are shown by the green contours. Black arrows indicate motion of the overriding plate relative to the Pacific plate. Green star shows the Kaikoura quake epicenter. Red and white lines show fault traces ruptured during the 2016 Kaikoura and 1855 Wairarapa earthquakes, respectively. (b) Total slip on the Hikurangi subduction interface over the year following the Kaikoura earthquake (yellow to hot colors) estimated from time-dependent inversions of GPS and InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) data (Wallace et al., 2018⁴). Dashed contours indicate depth (in kilometers) to subduction interface. (After Kaneko et al., 2018²).)



**Q1:** What is the probability of occurrence of a magnitude 7.8 earthquake or larger with hypocentre in the region of interest and shallower than 40 km within **one year** from 15 November 2017?

10%_____50%____90%_____

**Q2:** What is the probability of occurrence of a magnitude 7.8 earthquake or larger with hypocentre in the region of interest and shallower than 40 km within **ten years** from 15 November 2017?

10%_____50%____90%_____

**Q3:** What is the probability of occurrence of a magnitude M7 or larger earthquake with hypocentre in the region of interest and shallower than 40 km within **one year** from 15 November 2017?

10%_____50%____90%_____

**Q4:** What is the probability of occurrence of a magnitude M7 or larger earthquake with hypocentre in the region of interest and shallower than 40 km within **ten years** from 15 November 2017?

10%_____50%____90%_____

### 第2図 赤枠が確率評価対象領域。青枠は GeoNet Kaikoura 余震予測領域。専門家に問われた4つの問い. (Gerstenberger et al., 2017¹⁾ より).

Fig. 2 The elicitation region in red as compared to the GeoNet Kaikoura aftershock forecast region in blue. Followings are the four elicitation questions as asked to the experts. (After Gerstenberger et al., 2017¹)



- 第3図 様々な原因による Hikurangi 巨大地震想定震源域(黒線枠内)でのせん断応力変化. (a)Mw7.8 Kaikoura 地震, (b)Kaikoura 地震後1年間のプレート境界での余効すべり, (c)Kapiti スロースリップイベント(SSE), (d) 東海岸 SSE. 黒線枠内は固着域(Wallace et al., 2012³⁾)に対応. 紫点線の四角枠は, 固着域の深部で幅20kmの領域を示す.ここではkaikoura 地震ならびにKapiti SSE による応力変化が大きい. 応力変化のカラースケールは, ±10kPa で飽和させている. (e) と(f) はそれぞれ, 黒枠内と紫枠内での応力の平均値の時間発展を示している. 黒線("Total")は, (a)-(d) に加えてプレート境界でのすべり欠損による応力蓄積をすべて合わせた応力変化である. (e) と(f) は縦軸のスケールが異なることに注意. (Kaneko et al., 2018²⁾ より)
- Fig. 3 Shear stress changes on the Hikurangi megathrust induced from (a) the Mw7.8 Kaikoura earthquake, (b) afterslip on the subduction interface over the 1 year following the Kaikoura earthquake, (c) Kapiti slow slip event (SSE), and (d) East Coast SSE. A region inside the black rectangle corresponds to the locked portion of the megathrust (Wallace et al.,  $2012^{3}$ ). The purple dashed rectangle corresponds to a downdip locked region of 20-km width where the shear stress changes from the Kaikoura earthquake and Kapiti SSE are large. The color scale is saturated at  $\pm$  10 kPa. Time evolution of mean stress changes over (e) the entire locked portion indicated by the black rectangle and (f) the downdip, purple rectangle region. The "total" (in black) corresponds to the sum of transient stress changes from all nearby tectonic sources (i.e., the Kaikoura earthquake and SSEs). Note that the scale of the vertical axes is different. (After Kaneko et al.,  $2018^{2}$ .)



- 第4図 想定地震の震源パラメータと地震時系列の模擬カタログ.(a) 想定地震の応力降下量の分布.(b) b 値を 1.0, 最大マグニチュード(M_{max})を8.6とした場合のグーテンベルク・リヒターの規模と発生頻度の関係.図は, M_{max}の地震1回に対する他の規模の地震の発生率を示している.(c) グーテンベルク・リヒターの関係と Hikurangi 巨大地震震源域でのすべり欠損率から導かれる地震再来間隔 t,の分布.図に示した例では、t,の 最小・最大が M=7.8・8.6 に対応している.(d) 地震時系列の模擬カタログの例を, Hikurangi 巨大地震震源 域の固着部分での応力の時間発展で表している.Δσは地震時の応力降下量であり,t,は再来間隔.赤線は, 近傍でのすべてのテクトニックな原因(第3図 e) による応力の擾乱Δτに対応している.応力擾乱は t_{pert} 年間隔で模擬カタログに与えているが,想定地震の発生から160年以内の場合は取り除いている.(e) 応力 擾乱後に起こりうる3つのシナリオの模式図.黒線は(d)の応力変化の拡大であり,赤線が応力擾乱後の せん断応力の発展の仕方を示している.(Kaneko et al., 2018² より)
- Fig. 4 Earthquake source parameters and synthetic earthquake-time catalogue. (a) Stress drop distribution of earthquakes of interest. (b) Gutenberg-Richter frequency-size relation with b = 1.0 and  $M_{max} = 8.6$ . Earthquake rate relative to that of  $M_{max}$  (assumed to be 1 for illustration) is shown. (c) Time interval required for stress accumulation t_r derived from the Gutenberg-Richter relation and a geodetic slip-deficit rate on the Hikurangi megathrust. In this example, the minimum and maximum t_r correspond to M = 7.8 and 8.6 events, respectively. (d) An example of synthetic earthquake-time catalogue represented by stress evolution on the locked portion of the Hikurangi megathrust.  $\Delta \sigma$  is the stress drop of earthquakes and t_r is the intervent time. Each red line corresponds to total time-dependent stress perturbation  $\Delta \tau$  from all nearby tectonic sources (shown in Fig. 3e), exaggerated for illustration. The stress perturbation is applied to the synthetic catalogue every t_{pert} years. (e) Sketch illustrating three possible scenarios following stress evolution. The black curve is a zoom in of the sawtooth shown in Figure 3d. The red curve shows shear stress evolution following the time-dependent stress perturbation. (After Kaneko et al., 2018²).)



- 第5図 Kaikoura 地震とSSE後に M≥7.8の海溝型巨大地震が発生する1年毎の確率の推定結果.平均応力降下量 Δσや滑り欠損率 V_{pl} などを変えた結果.各点は模擬カタログの 50 ケースに対する平均値,縦の線は標準 偏差を示す.黒線は固着域全体での応力変化の平均の場合,赤線は深部 20km での平均の場合,青線は応 力変化を考慮しないバックグラウンドの1年確率の値.(a)平均応力降下量 2MPa,すべり欠損率 2cm/年, 最大マグニチュード 8.6.(b)平均応力降下量 2MPa,すべり欠損率 1cm/年,最大マグニチュード 8.6.(c) 平均応力降下量 1MPa,すべり欠損率 2cm/年,最大マグニチュード 8.6.(d)平均応力降下量 2MPa,すべ り欠損率 2cm/年,最大マグニチュード 9.0.(Kaneko et al., 2018²⁾を改変)
- Fig. 5 (a–c) Annual probability of a  $M \ge 7.8$  megathrust earthquake following the Kaikoura earthquake and slow slip events for representative cases with different mean stress drop  $\Delta \sigma$  or slip-deficit rate  $V_{pl}$ . Each dot corresponds to mean probability over 50 random realizations of synthetic earthquake-time catalogue, with the vertical line representing the standard deviation. For each panel, three cases are shown: annual probabilities for the mean stress perturbation  $\Delta \tau$ over the entire locked portion (in black) and for  $\Delta \tau$  over the 20-km downdip region (in red) and background annual probability (in blue). (d) The same as Figure 4a except that  $M_{max} = 9.0$ . (Modified from Kaneko et al., 2018²).)
## 12 - 5 第 233 回地震予知連絡会重点検討課題「予測実験の試行 08 - 試行から実施への移行」について」の概要

## Summary of "Trials of experimental forecasts of crustal deformation and seismicity #08: Moving towards the prospective tests

遠田晋次(東北大学災害科学国際研究所)・堀 高峰(海洋研究開発機構) Shinji Toda (International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University), Takane Hori (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

当重点検討課題は、「地殻活動・地震活動のモニタリングとして何が重要かを検討し、今の予測 能力の実力を把握・提示するために、今後、予測実験の試行を行うことが有効である」という平成 25 年度将来検討 WG からの提言を踏まえて始まった。その後、約6年間に7回にわたって実施され、 延べ40人による発表が行われた。

過去8回のキーワード別の話題提供回数は,前震・群発地震(8),余震・ETAS(7),検証・評価法(7),物理モデル・発生メカニズム(5),東北沖余効変動・地殻変動(4),b値変化(3),静穏化(2),震度予測(2),異常組み合わせ(2)である.話題提供数に表されるように,前震・群発地震,ETASモデル,余効変動モデルなどについては,相応に確立された予測手法であり,後ろ向き予測(retrospective forecast)だけではなく一部は今後半年~1年間の予測(prospective forecast)とその後の評価・検証が「試行」されてきた.同時に,物理モデルや新手法,既往モデルの課題や改善案などの提案もあり,最善のモデルを追求する前向きな議論も続けられてきた.

以上を踏まえ、令和3年2月に行われた運営検討部会では、「ある程度確立された手法は、「実験 試行」からモニタリング同様に定期的な「実験実施」に移行してはどうか」という意見が出され、 実用化へ一歩前進することになった.当回では、次回以降のルーチン化への移行を見定めることを 主目的とし、各手法の現状評価と課題抽出、改良への提案等についても議論した.

1) 地殻変動予測:東北沖地震の余効変動

国土地理院の宗包浩志氏からは東北地方太平洋沖地震の余効変動に関する後ろ向き予測 (retrospective forecast) に関しての報告があった. 2015 年 1 月までは Tobita (2016) の手法で指数関 数項と対数関数項,定常変動項の足し合わせで予測できていたが,2015 年 2 月~7 月に広域で何 らかの事象が生じ,従来の設定では予測できないことが示された. しかしながら,2015 年 2 月移 行は補正項を追加することでその後の地殻変動の予測精度の向上がみられるという. 一方で,2021 年 3 月,5 月の宮城県沖の地震の影響によって, 牡鹿半島周辺および福島・宮城県・山形県では予 測から外れる現象も生じており,地域的事象によって残差が大きくなる. これらは 2021 年地震の 余効変動であることが明確だが,予測トレンドからのズレも何らかの異常を検知できるという意味 で重要と考えられる.

2) 気象庁震度データベースを用いた地震予測と 2015-2021 年の予測の評価

滋賀県立大学の小泉尚嗣氏からは、2001年以降の気象庁震度データベースを用いた都道府県別 のプロスペクティブ予測とその評価についての紹介があった. 2001年~2010年の都道府県別の震 度4以上の平均的な地震発生間隔を用いて2020年1月~9月の発生状況を予測すると、結果的 に適中率(確率70%以上で実際に揺れが記録された都道府県数/70%以上の全都道府県数)が 100%となることが示された.予知率(70%以上の予測で揺れが記録された都道府県数/実際に揺 れが記録された全都道府県数)も74%と高かった.地震活動期間を予測年の前3年間にした場合 も同様にスコアは良い.特に地震が発生しないことを予測する「安心率」(確率30%以下)のスコ アが高いことが重要で、巷の科学的根拠に基づかない予測では再現できないと思われる.きわめて シンプルな予測手法にも関わらず、通常の地震活動を用いることにより、ある程度の地震発生予測 が可能であることが再度強調された.一方で、予測期間を3ヵ月に短縮すると、スコアが低下する 場合もありばらつきが大きくなることも紹介され、あくまでも平均的な地震発生の相場観からの予 測であることが確認された.短期では地震発生の相場観が反映されないのかもしれない.

3) 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法(6):これまでの取りまとめと 今後の課題

気象研究所の前田憲二氏からは、前震活動に基づく本震発生予測について、過去2期間に遡って の予測能力評価に関して紹介があった。一定期間内に一定規模以上の地震が設定個数以上発生した 場合(顕著な前震活動),その後の予測期間内に本震(内陸は M≥5,海溝は M≥6)が発生する確 率を過去の地震活動から最適化しアラームを鳴らすという手法である。日本列島で群発的地震活動 が卓越する7地域を選定しているが、予測成績は対象領域や期間によって変化し、全体的に適中率 5~28%、予知率22~68%となった。全体として予測成績はそれほど良いわけではないが、余震 トリガー効果に基づく ETAS モデルよりも優れており、今後ルーチン的かつプロスペクティブに予 測を続けるに十分と思われる。ただし、上記本震 M のため実際にはアラームを出すには地震数が 必要である。毎年の評価には地震活動が比較的活発な地域でも1年では短すぎるかもしれないが、 プロスペクティブ予測を公表し続けることが重要で、上記 ETAS モデルとの比較のように他の予測 手法との比較もモデルの改良や総合評価に役立つと考える。

4) 階層的時空間 ETAS モデルなどによる短期・中期の地震確率予測と検証評価

統計数理研究所の尾形良彦氏からは、ETAS モデルによる内陸地震の予測とその評価結果が示さ れた. ETAS パラメータ決定に 1885 年~1923 年 M  $\geq$  6, 1923 年~ 2018 年 M  $\geq$  4 地震を用い, 2019 年~2021 年 9 月までの 2 年 9 ヵ月を予測するというものである. 具体的には、常時地震活動度  $\mu$ と余震生産性強度 K だけを地域変化させる HIST-ETAS-  $\mu$  K と、それ以外の 3 つのパラメータも 地域変化させる HIST-ETAS-5pa の 2 つのモデルを提案し予測を行っている. ポアッソンモデルも 比較のために検討した結果、対数尤度スコアで ETAS モデルがポアッソンモデルを圧倒し、そのな かでも HIST-ETAS-5pa が一番優れていたことが示された. ただし、今後定期的な予測能力評価を 実施するうえでは、上記前震活動予測と同様、地震数不足の問題を解決する必要がある.

5) 能登半島北部の地震活動と地震テクトニクス

金沢大学の平松良浩氏からは,地震活動,地殻変動に加え,古地震や地形・地質学,地球化学, 重力異常などを考慮した総合的評価の観点から,現在進行中の能登半島北部珠洲市周辺の群発地震 活動について紹介があった.活発化は2018年6月頃から始まり,特に2021年以降に顕著になり, その活動は主として4領域に集中している.2021年の地震活動とほぼ同時に非定常的な地殻変動 も観測されている.今回の活動域の北方沖には,輪島沖セグメント,珠洲沖セグメントの活断層が 分布し,歴史的にも近傍でM6~7程度の地震も発生している.地殻変動を説明する茂木モデル(膨 張源)を仮定するとこれらの活断層へのΔ CFF は増加となることから,これまでの近傍での大地 震にも注意しなければならないと締めくくられた.

以上の報告を受け、45分間の総合討論を行った.現状では、上記1~4に関して、今後1年間 のプロスペクティブ予測と過去1~数年間の評価を定期的実施していくことは可能であることを確 認した.しかし、実施体制が必ずしも整っていない手法もあることもわかった.予測成績の評価に 関しては、CSEPのように地震規模や予測期間、地域選定など予測対象やルールが明確に定まって おらず各手法に任せられている面がある.モデル改良や新たな手法の提案のためには多少の自由度 が必要であるが、対象が異なることの結果として、相矛盾する予測になる場合も十分ありえる.予 測実験におけるルールの明確化も今後の課題である.なお、今後の「予測実験の試行」の実施・報 告については、来年2月の重点検討課題運営部会の方で検討をする予定である.

#### 参考文献

1) Tobita (2016), *Earth Planets Space*, **11**, 22-33. Combined logarithmic and exponential function model for fitting postseismic GNSS time series after 2011 Tohoku-Oki earthquake.

## 12 - 6 地殻変動予測:東北沖地震の余効変動 Experimental forecast of postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake

宗包 浩志・藤原 智(国土地理院)

Hiroshi Munekane and Satoshi Fujiwara (Geospatial Information Authority of Japan)

1. はじめに

国土地理院では平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の余効変動の時系列に対し,ある期間を選んで関数近似を行いその後の余効変動の予測力を評価する予測実験に取り組んでおり,その結果について地震予知連絡会でも報告してきた¹⁾²⁾.その基本的な考え方は,余効変動がすべての観測点・成分で共通な時定数を持つ対数関数・指数関数の混合時空間モデルで表現できる,というものである(Tobita, 2016)³⁾.構築した時空間モデルは,その単純さにも関わらず,複雑な余効変動の振る舞いをよく近似することが示されている¹⁾²⁾³.

最近, Fujiwara et al. (2022)⁴⁾ により, Tobita (2016)³⁾ の手法に基づき時空間モデルを構築し, その 予測と 2020 年までの地殻変動を比較したところ, 2015 年 2 月以降に広域でほぼ一定速度で進行す るずれが見いだされた. また, この一定速度成分も新たな補正項として追加した改良時空間モデル を用いることで,予測精度が向上することも示されている.

本稿では, Fujiwara et al. (2022)⁴⁾ に従って構築した時空間モデルについて,予測精度を定量的に 評価するとともに,予測からのずれをプレート境界でのすべりとして解析した結果についても紹介 する.

2. 改良時空間モデル

Tobita (2016)³⁾の時空間モデルは以下の式で表される.

 $D(t) = a \ln (1 + t/b) + c + d \ln(1 + t/e) - f \exp(-t/g) + Vt,$ (1)

ここで, *D*(*t*) は余効変動時系列の東西, 南北または上下成分, *t* は地震後の日数, ln は自然対数, *b*, *e*, *g* は対数関数または指数関数の緩和時定数, *V* は定常速度である. 緩和時定数は, Tobita(2016)³¹ と同じ4 観測点のデータを用い, 地震後 3.9 年までのデータから決定している. また, *V* は Tobita (2016)³¹ と同じく 1997 年 4 月 1 日から 2000 年 3 月 31 日の観測値の近似直線の傾きの値で固定して いる. 係数 *a*, *d*, *f* は観測点, 成分毎に地震後 3.9 年までのデータのフィッティングにより決定して いる.

第1図(上)は、電子基準点宮古の東西成分の観測値(黒)と予測値(赤)の比較、(下)が残 差である. 2015年に入ってから、残差が大きくなり始め、7月頃から直線的に増加していることが わかる.そこで、この残差を説明するため、式(1)を以下のように改良する.

 $D(t) = \operatorname{aln}(1+t/b) + c + d\ln(1+t/e) - f\exp(-t/g) + Vt + (c'+vt)H'(t - t_0).$ (2)

ここで H はステップ関数であり、 $t_0$  としては 2015 年 7 月とする.ただし、2015 年 2 月から 2015 年 7 月の間は直線で接続する.第1図(上)(下)において、それぞれ式(2)の予測値、残差を緑で示す.式(2)の予測値は観測値をよく説明していることがわかる.

3. 予測力の評価

式 (2) の予測力を評価するため、中部~北海道南部の電子基準点 340 点を用いた検証を行った. まず地震後 3.9 年のデータを用いて係数 *a*, *d*, *f*を推定した. さらに 2015 年から 2019 年のデータを 用いて係数 *c*', *v*を推定した.予測期間として 1 年 10 ヶ月を取り、2021 年 10 月 1 日~7 日におけ るずれの平均値を計算した.

第2図に、ずれの水平成分、上下成分の空間分布を示す.多くの観測点で、水平1cm、上下1.5cm 以下に収まっていることが分かる.ずれが大きい観測点は、牡鹿半島の周辺および福島・宮城〜山 形の範囲に集中して分布している.なお、水平成分で房総半島にもずれが集中している領域がある が、これは房総スロースリップの影響により、係数の決定がうまくいっていないためであると考え られる.ずれの平均値は、東西成分で7.2mm、南北成分で6.5mm、上下成分で12.4mmであった.

第3図に、予測値からのずれをプレート境界でのすべりであると解釈した場合のすべり分布およ びすべりの時系列を示す.すべりは、主に2021年3月および5月に発生した宮城県沖の地震の南 側に広がっている.あわせてすべりが大きかったグリッドにおけるすべり時系列を示す.2021年3 月以降急激なすべりが推定されており、このすべりが宮城県沖の地震の余効すべりである可能性を 示唆する.このように、時空間モデルを用いて時系列を補正することで、余効変動に隠された、よ り小さな現象の評価に役立つ可能性が示唆される.

> (宗包 浩志) MUNEKANE Hiroshi

参考文献

1) 飛田幹男 (2015), *予知連会報*, 95, 12-5, 420-424.

2)藤原智・飛田幹男 (2017), *予知連会報*, 97, 12-5, 481—485

- 3) Tobita (2016), Earth Planet Space, 68:41, https://doi.org/10.1186/s40623-016-0422-4
- 4) Fujiwara et al. (2022), Earth Planet Space, 74:13, https://doi.org/10.1186/s40623-021-01568-0



- 第1図 (上)電子基準点宮古における,座標時系列(東西成分)および時空間モデルによる予測値.黒が観測値, 赤が式(1)による予測値,緑が式(2)による予測値を表す. (下)残差時系列.黒が式(1)による予測値からの残差,緑が式(2)による予測値からの残差を表す.
- Fig. 1 (Upper) Observed GNSS coordinate time series and predicted coordinate timeseries at Miyako station. Black, red, and green dots represent observation, prediction by equation (1), prediction by equation (2), respectively. (Lower) Residuals. Black and green dots represent those obtained with equation (1) and (2), respectively.



第2図 予測値からのずれの空間分布.赤丸がずれの大きい観測点が集中している領域を示す.

Fig. 2 Distribution of the differences between observed and predicted coordinates. Red circles denote the areas where notable differences are observed.



- 第3図 予測値からのずれから推定したプレート間すべりおよび顕著なすべりが推定された代表的なグリッドにお けるすべり時系列.
- Fig. 3 Slip distribution estimated with the differences between observed and predicted coordinates, and of slip history at a representative grid where notable slip is observed.

## 12-7 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法(6): これまでの取りまとめと今後の課題

# Earthquake forecasting method by supposing swarm-like activity to be possible foreshocks (6): summary so far and future issues

前田憲二 *・弘瀬冬樹・溜渕功史(気象研究所) (* 気象庁地震火山技術・調査課から併任) MAEDA Kenji*, HIROSE Fuyuki, and TAMARIBUCHI Koji (Meteorological Research Institute)

(*Additional post of Japan Meteorological Agency)

1. はじめに

本報告では前震活動に基づく予測モデル(以下,本予測モデル)¹⁾を用い,前回までの報告²⁾⁻⁶⁾ 以降の約2年間における予測結果を報告するとともに,本予測モデルを構築した当初の期間にお ける予測成績と当初の期間を含め最新の期間(~2021年9月)までの通算の予測成績などを取り まとめた.また,本予測モデルの予測効率を評価するため,定常時空間 ETAS モデル⁷⁾(以下単に ETAS モデルと呼ぶ)に基づく予測成績との比較を行うとともに,ETAS モデルによる合成地震カ タログを作成し,そのカタログと実カタログに本予測モデルを適用したときの成績の比較を行った. 最後に今後の課題についても触れる.

2. 前震活動に基づく予測モデルの成績(過去約2年間,当初最適化期間,および通算)

前回の報告⁶に引き続き 2019 年 11 月 1 日~2021 年 9 月 30 日の約 2 年間の本震発生の予測結果の調査を行った.今期間,ターゲット地震の発生の予測に成功した事例はなかった.各領域における予測結果の状況は以下のとおりである(第 1 図参照).

(a)日本海溝沿い3領域では、ターゲット地震が1回(2021/8/4 M6.0)発生し、その地震前に 地震活動はあったもののM5.0以上の地震は1回のみであり、前震候補とは判定されなかった.逆に、 今期間前震候補は2回発生したが、その後ターゲット地震は発生しなかった.(b)伊豆地域でもター ゲット地震が1回(2020/12/18 M5.0)発生したが、その地震前の活動は低調で、M3.0以上の地震 は15秒前の1回のみであり、前震候補とは判定されなかった.前震候補は今期間4回発生したが、 いずれもその後ターゲット地震は発生しなかった.(c)長野県北中部ではターゲット地震が3回 (2020/4/23 M5.5, 2020/5/19 M5.4, 2021/9/19 M5.3)発生した.このうち、前者2地震の前1日間に 地震活動がみられたが、いずれも前震候補の条件を満たさなかった.また、今期間は群発的活動が 活発で、前震候補となる地震が25回発生したが、いずれもその後ターゲット地震は発生せず、空 振りとなった.(d)九州中部ではターゲット地震は発生せず、また、前震候補は1回発生したが、 その後ターゲット地震は発生しなかった.(e)山陰地方ではターゲット地震も前震候補も発生し なかった.

予測対象領域におけるこれまでの予測成績を第2図にまとめた. 矢印の左側の数値はそれぞれの 領域の最適化期間(図中に表示)における成績を示し,右側の数値は最適化期間を含む2021年9 月30日までの通算の成績を示す. 最適化期間以降に適中した地震は2地震(図中の*参照)のみ であり,いずれの領域においても最適化期間以降の成績は低下したことが分かる.

第1表に最適化期間,通算期間,通算期間に対し再最適化を行った場合の成績の一覧表を記載す

る. 再最適化にあたってはパラメータのうち D, Mf₀, Mm₀ は当初の値に固定し, Tf, Nf, Ta のみ の最適化を行った. ここで, D, Mf₀, Mm₀, Tf, Nf, Ta はそれぞれセグメントサイズ(°), 前震 のマグニチュード下限,本震のマグニチュード下限,前震候補抽出の時間窓(日),前震候補抽出 の地震個数,アラーム期間(日)を表す. 再最適化の前後の成績を比較すると,九州中部と山陰地 域を除き予知率は向上しているものの,適中率は低下したことが分かる. これは,これらの地域で は前震候補の条件を緩めてより多くのアラームを出して予知率を上げた方が,たとえ空振りのア ラームが増えたとしても結果的に尤度が高くなり,  $\Delta$  AIC 値が大きくなるためである.

なお,成績の評価には次の定義による指標を用い,いずれも大きいほど性能が高いことを示す.

- 予知率 (AR) = 予測されたターゲット数 (A) / 全ターゲット数 (C)
- 適中率 (TR) =適中したアラーム数/全アラーム数
- F 値=予知率 (AR) と適中率 (TR) の調和平均= 2/(1/AR+1/TR)
- 確率利得(PG)=アラーム時空間(B)内のターゲット発生率/全時空間(D)内のターゲットの 発生率 = (A/B)/(C/D) = (A/C)/(B/D) = 予知率/警報分率
- Δ AIC =定常ポアソンモデルによる AIC -予測モデルによる AIC

= 2*C*AR*log(PG)+2*C*(1-AR)*log((1-AR)/(1-AR/PG))-2

3. ETAS モデルによる予測結果との比較

本予測モデルの予測効率を評価するため,本予測モデルと,ETAS モデル⁷に基づく予測モデル(以下 ETAS 予測モデル) との予測成績の比較を行った(詳細は Hirose et al.⁸⁾参照).比較は気象庁カ タログから低周波地震以外のすべて地震を用い,そのデータに対し両モデルを作成することで行った.解析領域および対象期間,本予測モデルの最適パラメータ及び予測成績を第2表に示す.また, ETAS 予測モデルによる予測成績は以下の手順で求めた.

- 各領域について定常時空間 ETAS パラメータ θ 及び u(x,y) を求め、それに基づき、緯度・ 経度 0.01 度間隔で、毎日午前 0 時における地震発生強度 λ (t,x,y) [/day/degree²] を計算する.
- ② 予測期間を1日間とし、1日間は $\lambda$ は変化しないものとして、評価空間 D°× D°の セグメントにおける地震発生強度 $\lambda$  (t) [/day] を算出する.
- ③ G-R 則を仮定し、各セグメント内で1日以内にターゲット地震が1個以上発生する確率 P(N≥1)を算出する.
- ④  $P(N \ge 1)$ が、ある閾値  $P_{th}$ 以上となる時空間セルに1日予測のアラームを発出し、アラーム ON/OFF の二値問題にする.
- ⑤ 閾値 P_{th} を 0.0001 ~ 1.0 まで 0.0001 刻みで変更し、Δ AIC が最大となる P_{th} を最適値とし、 その時の予測結果から予測成績を求める.

各領域について、本予測モデルと ETAS 予測モデルの予測成績を比較した図を第3図に示す.図 から分かるように、どの領域についてみても総合的な成績の良否を示す F 値とΔ AIC の指標につ いては、本予測モデルの方が高く、予測効率が良いことを示している.

4. ETAS モデルによる合成地震カタログと自然地震カタログとの比較

本予測モデルが ETAS モデルに基づく予測よりも有利であることを示す別の方法として, ETAS モデルによる合成地震カタログを作成し,そのカタログと実カタログに本予測モデルを適用したと きの成績の比較を行った(詳細は Hirose et al.⁸⁾参照).対象領域は岩手・宮城沖の領域と茨城沖の 領域の2領域とした.それぞれの領域において,気象庁カタログから1961年~2010年の期間の低 周波地震以外のすべてのデータを抽出して実カタログとした.合成カタログを作成するにあたって は、実カタログから推定されたパラメータで表現される定常時空間 ETAS モデル⁷¹を用い,規模分 布は実カタログから復元抽出することで1,000 個の合成カタログを作成した.作成したすべての合 成カタログに対し個別に本予測モデルを適用し,最適パラメータと対応する予測結果を求めるとと もに予測結果の分布を調べた.その結果を第4 図に示す.この図から本予測モデルを実カタログに 適用した場合の成績は、合成カタログに適用した場合に期待される成績の分布より良い方に外れて いることが分かる.また、本震発生時刻を基準としたスタッキングによる本震前の規格化された前 震回数積算図を比較すると、実カタログの方が前震活動の加速は大きかった(第5図).これらこ とは、ETAS モデルでは前震活動の特徴を十分には再現することは困難であり、前震活動の特徴を 比較的効率よく抽出している本予測モデルの方が ETAS モデルよりも予測に有利であることを示し ている.

5. まとめと今後の課題

(まとめ)

- 本予測モデルによる予測成績は地域,期間によって変化するが,これまでの成績は 予知率は22~68%,適中率は5~28% 程度である.
- 定常時空間 ETAS モデルを基にした予測より,本予測モデルの方が平均的に予測成績は 良い.
- 定常時空間 ETAS モデルでは本震前の前震活動の加速を十分に再現していない. (今後の課題)
- ⇒ 複数の最適化期間に基づく予測の期待値とばらつきの調査
- ⇒ 最適値だけでなく '群発度' に応じた確率の計算による発生確率の時間変化の推定
- ⇒ 全国(海域と内陸に分割)の平均モデル,あるいは地域ごとに分割したモデルを寄せ集めた全国版の作成
- ⇒ スロースリップなど他の独立した情報を取り込んだモデルの高度化.

(前田 憲二・弘瀬 冬樹・溜渕 功史) MAEDA Kenji・HIROSE Fuyuki・TAMARIBUCHI Koji

参考文献

- 1) Maeda, K. (1996), The use of foreshocks in probabilistic prediction along the Japan and Kuril trenches, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 242-254.
- 2) 気象研 (2016), 予知連会報, 95, 415-419.
- 3) 気象研 (2016), 予知連会報, 96, 476-480.
- 4) 気象研 (2017), 予知連会報, 98, 465-469.
- 5) 気象研 (2019), 予知連会報, 101, 492-494.
- 6) 気象研 (2020), *予知連会報*, 103, 356-360.
- Ogata, Y., & Zhuang, J. (2006), Space-time ETAS models and an improved extension, *Tectonophys.*, 413, 13-23.
- 8) Hirose, F., Tamaribuchi, K., & Maeda, K. (2021), Characteristics of foreshocks revealed by an earthquake forecasting method based on precursory swarm activity, *JGR*, **126**, https://doi.org/10.1029/2021JB021673.



(a) 日本海溝3領域

第1図 各領域における最近約2年間(2019年11月~2021年9月)の予測結果.予測が適中した地震はなかった. 吹き出しに見逃し及び空振りの数を示す.(a)日本海溝3領域,(b)伊豆領域.(続く)

Fig. 1 Forecast results in each region from 11/1/2019 to 9/30/2021. No target event was forecasted. Number of missed targets and false alarms are shown in balloons.
(a) 3 regions in Japan trench, (b) Izu region. (To be continued)



## (d) 九州中部



(e) 山陰地方



- 第1図 (続き)(c)長野県北中部,(d)九州中部,(e)山陰地方
- Fig. 1 (Continued) (c) North-central part of Nagano, (d) Central part of Kyushu, (e) San'in region.



第2図 各領域及び期間における本予測モデルの予測成績の変化.矢印の左は当初の最適化期間の成績を、右は 2021年9月末までの通算の成績を示す.

Fig. 2 Forecast result variation for each region since the forecast test began. The left side of arrows indicates results for initial optimizing period, and the right for throughout the test period until 9/30/2021.



- 第3図 各領域における本予測モデル(赤実線)と定常時空間 ETAS による予測モデル(黒破線)との予測成績の比較. [Hirose et al.⁸⁾より抜粋,一部改変]
- Fig. 3 Comparison of the forecast performance between the present model (red lines) and the stationary space-time ETAS model (black broken lines) for each region. [Cited and partially modified from Hirose et al.⁸]



- 第4図 本予測手法を1000 個の定常時空間 ETAS 合成カタログに適用した場合の成績の分布と実データに適用した場合の成績の比較.上段:岩手・宮城沖の領域,下段:茨城沖の領域.[Hirose et al.⁸⁾より抜粋]
- Fig. 4 Forecast result distribution derived from applying the present model to the synthetic 1000 catalogs made by the stationary space-time ETAS model, and comparison with the results (white arrows) for the real data. Black arrows indicate the median of results for ETAS catalogs. (top) Off Iwate and Miyagi region, (bottom) Off Ibaraki region. [Cited from Hirose et al.⁸⁾]



第5図 スタッキングにより得られた本震前の規格化された前震回数積算の ETAS 合成カタログ(青線)と実デー
 タ(赤線)との比較.小さな余震は除去されている.(a) 岩手・宮城沖の領域,(b) 茨城沖の領域.[Hirose et al.⁸⁾より抜粋]

Fig. 5 Cumulative number of foreshocks per mainshock obtained by stacking method for synthetic 1000 ETAS catalogs (blue line) and its comparison with that for the real data (red line). Small aftershocks are removed. (a) Off Iwate and Miyagi region, (b) Off Ibaraki region. [Cited from Hirose et al.⁸]

- 第1表 各地域・期間ごとに用いた予測パラメータと予測成績.上段:当初の最適化期間に対するパラメータと成績.
   中段:上段の最適化期間を含み最新の期間(2021年9月30日)までの通算成績.パラメータは上段と同じ.下段:中段の期間と同じ期間に対して再最適化により求めたパラメータを適用したときの成績.ただし,再最適化において D, Mf₀, Mm₀ は当初の値に固定し, Tf, Nf, Ta のみの最適化を行った.ここで, D, Mf₀, Mm₀, Tf, Nf, Ta はそれぞれセグメントサイズ(°),前震のマグニチュード下限,本震のマグニチュード下限,前震候補抽出の時間窓(日),前震候補抽出の地震個数,アラーム期間(日)を表す.
- Table 1Optimum parameters and forecast performance for each region and periods. Top: results for the initially optimized<br/>period. Middle: results for the total period up to 9/30/2021 using the same parameters as the top. Bottom: results<br/>obtained by re-optimized parameters for the middle table. Note that only parameters of Tf, Nf, and Ta are<br/>re-optimized.

※各表中の確率利得は地震が1個以上発生 最適化期間の成績 グメントを対象とした背景地震発生率か										
領域	期間	前震条件と本震M (D,Mf₀,Tf,Nf,Ta), Mm₀	予知率	適中率	確率利得	ΔΑΙC				
日本海溝3領域	1961~2010/12/31	0.5, 5.0, 10, 3, 4, 6.0	11/30= 37(%)	14/50 = 28(%)	382	111				
伊豆地域	1977~2013/6/30	0.2, 3.0, 3, 3, 5, 5.0	44/65 = 68(%)	44/194 = 23(%)	357	468				
長野県北中部	1998~2014/12/31	0.1, 2.0, 1, 5, 5, 5.0	5/11 = 45(%)	8/69 = 12(%)	1503	64				
九州中部	1970~2016/5/31	0.1, 3.0, 10, 3, 12, 5.0	4/13 = 31(%)	3/43 = 7(%)	1032	47				
山陰	1977~2016/12/31	0.1,3.0,1,2,24,5.0 (適中率≧5%を条件)	5/21 = 24(%)	4/37 = 11 (%)	349	48				

## 通算期間の成績

領域	期間	前震条件と本震M 予知率 (D,Mf₀,Tf,Nf,Ta), Mm₀		適中率	確率利得	ΔΑΙϹ
日本海溝3領域	1961~2021/9/30	0.5, 5.0, 10, 3, 4, 6.0	13/49 = 27(%)	16/71 = 23(%)	235	118
伊豆地域	1977~2021/9/30	0.2, 3.0, 3, 3, 5, 5.0	44/66 = 67(%)	44/203 = 22(%)	412	480
長野県北中部	1998~2021/9/30	0.1, 2.0, 1, 5, 5, 5.0	5/18 = 28(%)	8/107 = 7(%)	819	57
九州中部	1970~2021/9/30	0.1, 3.0, 10, 3, 12, 5.0	4/14 = 29(%)	3/55 = 5(%)	899	46
山陰	1977~2021/9/30	0.1,3.0,1,2,24,5.0 (適中率≧5%を条件)	5/23 = 22(%)	4/39 = 10 (%)	342	48

#### 通算期間の再最適化による成績

(※D,Mf₀は固定しTf,Nf,Taを再最適化)

領域	期間	前震条件と本震M (D,Mf₀,Tf,Nf,Ta), Mm₀	予知率	適中率	確率利得	ΔΑΙC
日本海溝3領域	1961~2021/9/30	0.5, 5.0, <mark>3, 2</mark> , 4, 6.0	<b>17/</b> 49 = <b>35(%)</b>	16/ <mark>101</mark> = <mark>16</mark> (%)	190	149
伊豆地域	1977~2021/9/30	0.2, 3.0, <mark>1, 2, 4</mark> , 5.0	<mark>46</mark> /66 = <mark>70(</mark> %)	<mark>60/312 = 19(%)</mark>	329	484
長野県北中部	1998~2021/9/30	0.1, 2.0, <mark>4</mark> , 5, <mark>4</mark> , 5.0	7/18 = <mark>39</mark> (%)	<mark>9/166</mark> = 5(%)	968	83
九州中部	1970~2021/9/30	0.1, 3.0, <mark>7</mark> , 3, 12, 5.0	4/14 = 29(%)	<mark>4/47 = 9(%)</mark>	1041	47
山陰	1977~2021/9/30	0.1,3.0,1,2,24,5.0 (適中率≧5%を条件)	5/23 = 22(%)	4/39 = 10 (%)	342	48

※下段の赤字は中段から変わった数値

## 第2表 定常時空間 ETAS に基づく予測モデルとの比較のため,各領域および期間の新基準データに対し新たに求めた本予測モデルの最適パラメータ及び予測成績.[Hirose et al.⁸⁾より引用]

 Table 2
 Optimum parameters and results obtained by applying the present method to the revised regions and the catalog.

 [Cited from Hirose et al.⁸]

			Parameter						Alarm rate Truth rate					
Area	Period	D (°)	$M_{f0}$	$T_{\rm f}({\rm days})$	$N_{f}$	$T_{a}$ (days)	$M_{m0}$	(%)		(%)		F (%)	PG	$\Delta AIC$
Off Iwate and Miyagi	1961-2010	0.5	5.0	9	3	4	6.0	33.3	(= 8/24)	24.4	(= 10/41)	28.2	340.5	78.3
Off Ibaraki	"	"	"	3	2	1	"	66.7	(= 4/6)	30.8	(= 4/13)	42.1	1567.5	52.5
Central Honshu	1998-2019	0.2	2.0	1	5	5	5.0	40.0	(= 6/15)	9.6	(= 7/73)	15.5	439.9	61.9
Izu Islands	1977-2019	0.2	3.0	1	2	4	5.0	72.3	(= 47/65)	20.1	(= 63/314)	31.4	338.0	499.2

## 12 - 8 階層的時空間 ETAS モデルなどによる短・中・長期の地震確率予測と 検証評価

## Prediction and validation of short- medium- and long-term earthquake probabilities using a hierarchical space-time ETAS (HIST-ETAS) models, etc.

尾形 良彦(統計数理研究所)

YOSIHIKO Ogata (The Institute of Statistical Mathematics)

#### 広域の地震活動度予測のための短期・中期・長期モデルの推定

現在進行中の地震活動の震源データから,各地の時空間地震活動の短期予測を実行できるように するため階層ベイズ型的時空間 Epidemic-Type Aftershock Sequence (HIST-ETAS) モデル^{1,2)}

$$\lambda_{\theta}(t, x, y \mid H_{t}) = \mu(x, y) + \sum_{\{i; t < t_{i}\}} \frac{K_{0}(x_{i}, y_{i})}{(t - t_{i} + c)^{p(x_{i}, y_{i})}} \left[ \frac{(x - x_{i}, y - y_{i})S_{j}^{-1}(x - x_{i}, y - y_{i})^{t}}{e^{\alpha(x_{i}, y_{i})(M_{i} - M_{0})}} + d \right]^{-q(x_{i}, y_{i})}$$

を使う. ここで震央座標  $(x_j, y_j)$  や分散行列  $S_j$  は準リアルタイム (例えば1時間以内) で検出地震 群から AIC で必要に応じてセントロイド型座標に補正される³⁾. 常時活動度の推定されたパラメタ  $\mu$  (x, y) は永年確率の候補として使用される. パラメタ  $K_0$  (x, y) は短期予測に有用な余震生産性の 位置情報になり、本震直後 (たとえば一時間後) からの余震発生の時空間的予測に使用される.

本稿で パラメタ  $\alpha$ , p, q が、上式のように場所 (x, y) に依存する場合は (1) <u>HIST-ETAS5pa モデ</u> <u>ル</u>と呼び、定数の場合は (2) <u>HIST-ETAS- $\mu$ K モデル</u>と呼ぶ. これらのパラメタは局所線形デロネ 関数で表現され、それらの係数の推定はターゲット時間区間  $[S_0, S]$  の気象庁震源データ(例えば 1923 - 2018, M  $\geq$  4.0)にあてはめて、赤池ベイズ情報量規準(ABIC)の最小化によって、最適な ベイズ尤度を求める⁴⁾. 但し先駆区間の情報データで、例えば 1885 - 1922 の宇津カタログで、地 震活動度モデルの長期依存性を担保する. しかる後に、逆問題で局所線形デロネ関数の最適な事後 分布関数の最大(MAP 解)を得る⁴⁾. その係数の条件付強度 $\hat{\lambda}(t,x,y|H_t)$ で短期予測を実施する. 両モデルとも、既に CSEP 検証センター(地震研究所)に予測プログラムを提出し、比較検証が継 続中であるが、それらの時間と空間の精度を上げた予測動画を今回の予知連会議で上映したが、第 3 図にそれらのスナップショットを示した.

同様に,履歴に依存せず時間的に定常だが空間的に非一様な,ポアソン時空間モデルを4種類考慮した(第4図).先ず,直下型が場所を選ばず同じ確率で起きる,内陸部のみで同一値の発生率 でその外域では発生率0の(3)内陸部一様ポアソン過程モデル,次にABIC最小化で求めた局所線 形デロネ関数の(4)空間非一様ポアソン過程モデル,そして(5)HIST-ETAS5paモデルの常時活動 度補正と(6)HIST-ETAS-µKモデルの常時活動度補正の,いずれも空間非一様ポアソン過程モデル である.

以上の6モデル含む計算法は FORTRAN ソフトウェア集⁵⁾として公開されている.

#### 検証評価法と結果

これまでの著者の計算経験によれば,殆どの広域地震活動データからの推定において ABIC に基づくと,HIST-ETAS-µK モデルより,より一般的な HIST-ETAS5pa モデルの方が当て嵌まり良い結果になっている.

しかし、ベイズ適合性の ABIC 最小法で求めた事後分布モデルの最大値解(MAP 解)のパラメタ 値を挿入した予測モデル (MAP 解 plug-in model) が、予測スキルで勝るとは限らない。そこで時刻 S までのデータから求めた各種モデルの MAP 解( $\hat{\theta}$ ) モデルで時間区間 [S, T] での発生予測とそ の結果から計算した<u>対数尤度スコア</u>を評価基準として採用する。これは

 $\log L(\hat{\lambda}; S, T, M_c) = \sum_{\{i; S < t_i < T, M_i \ge M_c\}} \log \lambda(t_i, x_i, y_i, M_i \mid H_{t_i}) - \int_{M_c}^{\infty} \int_{S}^{T} \iint_{Area} \lambda(t, x, y, M \mid H_t) \, dx \, dy \, dt \, dM$ 

ただし

 $\hat{\lambda}(t, x, y, M \mid H_t) = \lambda_{\hat{\theta}}(t, x, y \mid H_t) \times 10^{-b(M_c - 4.0)} \text{ and } H_t = \{(t_j, x_{j,y_j}, M_j); t_j < t, M_j \ge 4.0\}$ 

である. ここで履歴情報  $H_t$ は M4.0 以上の地震の時刻 t までの発生情報である. また G-R 則の b 値が全国一律 0.9 と仮定した中規模以上  $(M \ge M_c)$  の地震予測の結果に対しても比較評価できる. ポアソン過程モデルの場合, 履歴情報  $H_t$  は不要である.

気象庁震源データ(先行情報として宇津カタログを含む)に基づき,2019年以降の地震につい て予測と結果の評価を与えた(第5図).表の評価では,予測確率が変わらない内陸部一様ポアソ ン過程モデル(3)を基準とした対数尤度比スコア⁶で短期予測の結果を評価したが,中期予測で はポアソンモデル同士のみの比較になる.

最近2年9ヶ月間の短期予測結果は (1) HIST-ETAS-*5pa* モデルが M5 クラスまでの地震に対する 予測結果が最も優れており (2) HIST-ETAS-*µK* モデルがそれに次ぐ. 中期予測に限れば, (4) 定常非 一様ポアソンモデルが他より優れており,特に (3) 内陸部均一ポアソンモデルより遥かに優れてい る.

大地震(例えば M₆6.0 以上)のレトロスペクティブ長期予測には常時活動度が高いところに多く 発生しており⁷,見かけでは既にモデル(5)や(6)が有望であるが,今回の3年足らずの検証で は評価すべき予測の地震数が足りなく,数年足らずの予測では長期予測は難しい.

その代わりに,歴史地震に対して「逆予測」を試みる.すなわちポアソン過程の特性から,時間 軸の因果性を無視できる.そこで空間分布モデルとしての逆予測は

$$\log L(\hat{\lambda}; Area, M_c) = \log \prod_{i=1}^{N} \frac{\hat{\lambda}(x_i, y_i, M_i)}{\int_{M_c}^{\infty} \iint_{Area} \hat{\lambda}(x, y, M) \, dx \, dy dM}$$

をスコアとして評価できる.ただし、 $\hat{\lambda}$ は気象庁カタログ(1923 - 2018)から求めたモデルを意味し、 $\{(x_{j}, y_{j}, M_{j}); M_{j} \ge M_{c}\}$ は宇津⁹の直下型被害歴史地震(古代~1884)の配置(第6図)である. こうして当てはまりの性能を比較したスコアの表も第6図にある.結果、HIST-ETAS-5pa時空間モデルの常時地震活動の空間  $\mu_{5pa}(x,y)$ 分布が、非一様ポアソン空間モデル $\hat{\lambda}(x,y)$ を大きく離して、最も良い結果を導いている.M7.5 クラス以上の歴史地震では、小標本の為かスコアの差が小さく、地域的な特徴が見られない.本報告では内陸部直下型の地震予測を議論したが、海域を含む全日本の予測⁸でも同様な検証が可能である.

本解析に関して気象庁震源カタログおよび地震活動可視化システム TSEIS を使用した.

(尾形 良彦) OGATA Yosihiko

#### 文献

- 1) 統計数理研究所 (尾形良彦), 予知連会報 96 (12-23), 2016.
- 2) 尾形良彦. 統計数理 63 (1), https://www.ism.ac.jp/editsec/toukei/pdf/63-1-029.pdf, 2015
- 3) Ogata, Y. Earth, Planets and Space 63 (3), doi:10.5047/eps.2010.09.001, 2011.
- 4) Ogata, Y., et al. Applied Statistics (JRSSC) 52 (4), 499-509, 2003.
- 5) Ogata et al. *ISM Computer Science Monographs* **35**, https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/pdf/csm_035.pdf, 2021.
- 6) Ogata, Y., et al. Bull. Seismol. Soc. Am., 103 (3), doi:10.1785/0120120063, 2013.
- 7) 統計数理研究所(尾形良彦) 予知連会報 97 (1-3), 2017.
- 8) 統計数理研究所(尾形良彦) *予知連会報* 79 (12-1), 2008.
- 9) 宇津徳治, 世界の被害地震の表, http://iisee.kenken.go.jp/utsu/index.html, 1990.



- 第1図 Ogata (1998)の時空間的 ETAS モデルの特徴は、震源カタログの震央をセントロイド型に自動補正することである. 震央座標(x_j, y_j)と分散行列 S_jは、大地震(例えば M5 以上)の後に例えば1時間スパンに検出された全ての地震の震央座標を基に、AIC を用いて同定する. 上図の赤丸はカタログに掲載されている 震央,星印は推定重心座標、点線は行列 S_jに対応する推定楕円である.
- Fig. 1 A characteristic feature of the spatio-temporal ETAS model of Ogata (1998) is the automatic centroidal correction of epicenters in the hypocenter source catalog. The source coordinates  $(x_j, y_j)$  and variance matrix  $S_j$  are identified using AIC based on the source coordinates of all detected earthquakes in a short span, say one hour, after a major earthquake (e.g., M5 or greater). The red circles in the above panels are the epicenters listed in the catalog, the stars are the estimated centroidal coordinates, and the dotted curves are the estimated ellipses corresponding to the matrix  $S_j$ .



- 第2図 各地域の時空間的な地震活動の短期的な予測を可能にするために、階層型ベイズ時空間 (HIST-ETAS) モデ ルを採用した.まず,パラメタ $\mu$  (x, y) は時間に依存しない一定の活動の通年確率の密度関数とする.また、 パラメタ $K_o$  (x, y) は短期予測に有用な余震生産性の位置情報を提供する.パラメタ $\alpha$ , p, q が上式のよう に位置に依存する場合を (1) HIST-ETAS5pa モデル、定数の場合を (2) HIST-ETAS- $\mu$ K モデルと呼ぶ.これ らのモデルの係数の推定を、十分に長い目標時間間隔 [ $S_o$ , S] の気象庁元データ (1923 - 2018, M  $\geq$  4.0) に適 用し、最適なベイズ尤度を赤池ベイズ情報量規準 (ABIC) で決定し、逆問題により局所線形ドローネ関数 の最適事後分布の最大パラメタ (MAP) 解を求める.
- Fig. 2 Hierarchical space-time epidemic-type aftershock sequence (HIST-ETAS) models are adopted to enable efficient short-term forecasts of spatiotemporal seismic activity in each region. First, the parameter  $\mu(x, y)$  does not depend on time is used as a candidate for the perennial earthquake probability. The parameter  $K_0(x, y)$  provides position information for aftershock productivity useful for short-term prediction. When the parameters  $\alpha'$ , p, and q depend on the location as in the above equation, it is called (1) HIST-ETAS5pa model; and when it is a constant, it is called (2) HIST-ETAS- $\mu K$  model. The estimation of the coefficients of these models is applied to the JMA hypocenter data (1923 2018, M  $\geq$  4.0) in a sufficiently long target time interval [ $S_0$ , S], and the optimal Bayesian likelihood is determined by the Akaike Bayesian Information Criterion (ABIC). After that, the maximum a posteriori parameter (MAP) solution of the optimal posterior distribution of the local-linear Delaunay function is obtained by the inverse problem.



- 第3図 HIST-ETAS モデルで短期予測は、既に CSEP 日本(地震研究所)に予測プログラムを提出し、検証が継続 中であるが、それらの時間と空間の精度を上げた予測の動画を今回の予知連会議で上映し、そのスナップ ショットを右側に示す、左側の図は示した時間区間での震央図である。
- Fig. 3 Short-term predictions and verifications the HIST-ETAS models have been ongoing in the CSEP Japan Testing Center at the Earthquake Research Institute, University of Tokyo. Here are snapshots that are taken from the screening predictive videos with improved accuracy of predictions in times and spaces that were carried out at the present CCEP meeting. The figures on the left are the epicentral map for the corresponding time interval.



- 第4図 履歴に依存せず,時間的に定常で,空間的に非一様なポアソン時空間モデルを4種類考慮した.先ず, 「(3)内陸部一様ポアソン過程モデル」は内陸部のみで一定発生率でその外域は0の発生率,「(4)空間非 ー様ポアソン過程モデル」は全ての M ≧ 4 地震データから ABIC 最小化で求めた最適 MAP 解,そして 「(5) HIST-ETAS-µK モデルの常時活動度」を定数倍補正した空間非一様ポアソン過程,最後に「(6) HIST-ETAS5pa モデル」の常時活動度を定数倍補正した空間非一様ポアソン過程である.右側の図 (3) ~ (6) は, 日本の内陸部における4つの対応する空間ポアソン強度率を対数で表したものである.
- Fig. 4 Four nonhomogeneous Poisson space-time models that are time-independent but spatially non-uniform. Those are: (3) inland uniform Poisson process model; (4) non-uniform spatial Poisson process model that minimize the Akaike Bayesian Information Criterion (ABIC); (5) proportionally corrected background  $\mu$  (*x*,*y*) intensities of the HIST-ETAS- $\mu$ K model and (6) HIST-ETAS -5pa model, respectively. The figures (3) - (6) on the right are contours of the 4 corresponding spatial Poisson intensity rates on Japan inland area in logarithmic scale.

時空間点過程モデル	Mc4.0	Mc4.5	Mc5.0	Mc5.5
地震数(2019-2021.sept)	126	42	12	3
(1) HIST-ETAS-5pa	638.7	276.6	55.8	-3.9
(2) HIS-TETAS-µk	551.2	252.5	49.9	-3.2
(3) λ _{inland} : 内陸部 一様 Poisson	0.0	0.0	0.0	0.0
(4) λ(𝔄,𝒴):非一様 Poisson	157.9	105.6	41.7	9.3
<b>(5) μ</b> ( <i>x,y</i> ) <b>-Poisson</b> (HIST-ETAS <b>-5pa</b> )	64.7	85.2	36.3	8.3
<b>(6) μ</b> («.y) <b>-Poisson</b> (HIST-ETAS <b>-μκ</b> )	111.5	91.5	35.3	7.9
1885 1923			2019 2019	021.9.30 9

対数尤度スコア: ln L(S,T | M≧4.0 の履歴)

第5図 一般に HIST-ETAS-μK モデルより,より柔軟な HISTETAS-5pa の方が ABIC に基づく当て嵌まりが良い. しかし, MAP パラメタを挿入した予測モデル (plug-in model) が良い結果になるとは限らない. そこで時刻 S までのデータから求めた各種 MAP 解モデルで時間区間 [S, T] 間での地震発生予測とその結果から計算し た以下の対数尤度スコアの大きさを評価基準として採用した.また全国一律 b = 0.9 と仮定して,中規模 以上の地震の予測の結果も比較した.最近2年9ヶ月の短期予測結果はHIST-ETAS-5paがマグニチュード4.0 から 5.0 まで一番優れており HIST-ETAS-μK がそれに次ぐ. 中期予測に限れば「(4) 定常非一様ポアソンモ デル」が最も優れている.

M≧4

<u></u>

M≧~6 *R* 

'n

Fig. 5 In general, the more flexible HISTETAS-5pa fits better based on ABIC than the HIST-ETAS- $\mu K$  model. However, the predictive model (plug-in model) with the MAP parameter inserted does not always give best forecast. Therefore, the log-likelihood score calculated from the prediction of earthquake occurrence during the time interval [*S*, *T*] and the result of various MAP solution models obtained from the data up to time *S* is adopted as the evaluation criterion. Also, assuming b = 0.9 nationwide, the forecast evaluation results of the higher score were also compared based on the occurrence information of earthquakes of magnitude M4.0 or higher. As for the short-term forecast results for the last 2 years and 9 months, HIST-ETAS-5pa is the best for forecast is concerned, the MAP of non-uniform Poisson model is superior to the other models including the inland uniform Poisson model.

#### Spatial probability density; log-likelihood score

Utsu Historical data;														
magnitude thresholds	Mc 4.0	Mc 6.0	Mc 6.5	Mc 7.0	Mc 7.5									
number of events	206	185	101	50	8									
non-homogeneous (4)	-911.4	-828.0	-411.4	-233.3	-36.4									
HIST-ETAS-µK Background (5)	-826.4	-746.8	-412.2	-207.2	-33.7									
HIST-ETAS-5pa Background (6)	-820.4	-739.4	-408.1	-205.8	-34.8									
uniform in inland Japan(3)	-881.6	-791.7	-432.2	-214.0	-34.2									
uniform in all Japan region	-1210.8	-1087.4	-593.7	-293.9	-47.0									



第6図 被害歴史地震に対する気象庁カタログ(1923 - 2018)による長期的逆予測の性能評価.右上パネルの赤丸 印はM6クラス以上の直下型歴史被害地震⁹による.左上の評価式は気象庁データ(1923-2018, M ≧ 4.0) に基づいて推定した各種非一様ポアソン空間分布モデルによる,歴史地震の配置データに対する当てはま りを比較した評価スコア式.左下の表は各々の結果スコア.HIST-ETAS5paモデルのµ値の空間変化が最 も良い結果となる.M7.5クラス以上の歴史地震では小標本数の為かスコアの差が小さく,発生率の地域差 が明確でない.右下パネルは,M6.8以上の歴史被害地震の発生場所がµ値(色標は M ≧ 4 の地震/km²/ day)の高い地域で発生し易いことを示している.

Fig. 6 Performance evaluation of long-term 'reverse prediction' of historical earthquakes based on the Japan Meteorological Agency hypocenter catalog (1923 – 2018,  $M \ge 4.0$ ). The red circles on the upper right panel are shallow historical damage earthquakes of M6 class or higher ⁹. The upper left panel is an evaluation score statistic to compare the fit of the spatial Poisson models to the coordinate data of historical earthquakes. The lower left panel is the table of the results. The  $\mu$  value change of the HIST-ETAS5pa model gives the best results, but the earthquakes of M7.5 class or above, the difference in scores is small possibly due to a small number of such events; namely, regional differences cannot be seen. The lower right panel shows the location of historical damaging earthquakes of M6.8 or higher and the  $\mu$  value distribution of the HIST-ETAS5pa model (color table indicates expected number of M  $\ge$  4 earthquakes / km² / day).

## 12-9 気象庁震度データベースを用いた地震予測と 2015-2021 年の予測の評価 Earthquake forecasting by using the seismic intensity database of Japan Meteorological Agency and evaluation of the forecasts for 2015-2021

小泉 尚嗣(滋賀県立大学環境科学部)

KOIZUMI Naoji (Sch. Environ. Sci., Univ. Shiga Pref.)

小泉・今給黎(2016)¹⁾や小泉(2021a, 2021b)^{2),3)}は、今給黎(2016)⁴⁾の原理を用いて、気象 庁の震度データベース(気象庁,2021)⁵⁾を用いて2015年~2020年の日本全国47都道府県にお ける震度4以上の地震の予測を行い、同期間の予測結果も評価した.その目的は、「通常の地震活 動から当然予想できる地震発生について、一般市民に「地震の相場観(どの程度の地震なら起きて も当たり前という感覚)」を理解してもらうこと」¹⁾である.また、民間の地震予知・予測情報を 適切に評価する手法を知ってもらうという目的もある.そのため、予測と結果の検証を地震予知連 絡会で毎年行うとともに、Solid Earth Channel (固体地球雑学)⁶⁾というウエブサイトでも報告を行っ ている.今回は、2015年から2021年9月までの予測結果の評価を行う.

2001 年~2010 年,及び,2012 年から2020 年まで,1年ずつずらした3年毎の期間について,各都道府県で震度4以上の揺れを記録した地震の平均発生間隔を第1表に示す.この平均発生間隔で定常ボアッソン過程に従って震度4以上の地震が発生すると仮定する(村上(2019)⁷⁾が,高知県の2つの震度観測点で,震度3以上および震度4以上の地震についてはこの仮定が成立し得ることを示している).この仮定に基づくと,平均発生間隔ての時,時間t以内に震度4以上の地震が1つ以上発生する確率は1-exp(-t/T)となる.確率が70%以上なら赤予報,30%未満なら青予報,30%以上70%未満なら黄予報とする.結果として,t>1.20Tで赤予報,t<0.36Tで青予報,1.20T ≧t ≥ 0.36Tで黄予報となる.2001-2010年の発生間隔を用いた1年間(365~366日間)の予測と2021年1-9月の実際の地震発生状況を第1図に,2018-2020年の発生間隔を用いた1年間の予測と2020年1-9月の実際の地震発生状況を第2図に示す.第3図と第4図は,2001年~2010年及び2018~2020年の地震活動を用いた1年間と3ヶ月間(90日~92日間)の予測である(2021年の予測と考えても良い).2004年新潟県中越地震・2007年新潟県中越沖地震・2007年能登半島沖地震の影響が第3図左図や第4図左図に認められ,2016年熊本地震(の余震)や2018年島根県西部地震の影響が,第3図右図や第4図右図に認められる.

第1図と第2図を2021年の1年間予測として、2021年9月までの結果を評価したのが第2表・ 第3表である。それぞれの表で、赤予報については、適中率(出した予報がどれくらいあたるかの 割合)と予知率(発生した地震の中でどれくらい予測されていたかを示す割合)を計算した⁸。青 予報については、青予報を出して実際に地震が起きなかった割合を仮に「安心率」として評価した。 黄予報については評価していない。

同様に、2021年の1~3月・4~6月・7~9月の各3ヶ月について、震度4以上の地震発生予 測を行ない検証した結果を第4、5表に示す.1年予測の場合に比べて、予測期間が短くなるので 発生確率は小さくなり、結果として、赤予報の割合が減り、青予報の割合が増える。赤予報が減る ので予知率も下がる。2015年~2021年9月の1年予測および3ヶ月予測における予知率・適中率・ 安心率の推移を赤予報の数と共に第5、6回に示す。平均すると、1年間予報で適中率80%・予知 率60%・安心率60%、3ヵ月予報で適中率60-70%・予知率15-40%・安心率85%という結果を出 している.また、2001年~2021年9月に日本で震度4以上を記録した地震の数を第6表に示す. 2015年~2021年9月の予知率・適中率・安心率といった指標について、予測に用いた地震活動 期間を2001~2010年に固定した時(A予測とする)と予測年の前の3年にした時(B予測とす る)で比較すると、3ヶ月予測の予知率を除くとA予測とB予測で差は無いが、3ヶ月予測の予知 率はB予測の方が成績がよい(第6図).その理由は、2011年東北地方太平洋沖地震と2016年熊 本地震の活発な余震活動のため(第6表)、これらの地震の震央近くの都道府県で震度4以上の地 震発生間隔が短くなって(第1表),地震発生確率が高くなる結果、B予測の3ヵ月予報の赤予報が、 A予測のそれに比べて2015年~2019年でかなり多くなるためである(第6図).他方、1年予報 では、A予測とB予測で赤予報数にあまり差は無い(第5図).一般に、赤予報をたくさん出すと 予知率はあがる一方、適中率は下がる傾向にある.B予測の3ヵ月予測で予知率が上がる一方、適 中率があまり下がらないのは、2011年東北地方太平洋沖地震と2016年熊本地震の余震を、B予測 では多く適中させているためと考えられる.なお、各指標のばらつきは、B予測よりA予測の方が 小さい傾向にある(第5,6 図).

> (小泉 尚嗣) KOIZUMI Naoji

#### 謝辞

気象庁震度データベースを作成している気象庁職員および関係者に感謝する.

参考文献

- 1) 小泉尚嗣・今給黎哲郎 (2016), 地震ジャーナル, 62, 35-40.
- 2) 小泉尚嗣 (2021a), *予知連会報*, 106, 535-541.
- 3) 小泉尚嗣 (2021b), *日本地震学会広報紙「なゐふる」*,**127**, https://www.zisin.jp/publications/pdf/nf-vol127.pdf, 2021 年 12 月 5 日確認.
- 4) 今給黎哲郎 (2016), 予知連会報, 95, 425-431.
- 5) 気象庁 (2021), http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html, 2021 年 12 月 5 日確認.
- 6) Solid Earth Channel (固体地球雑学) (2021), https://www.solid-earth.com/,2021 年 12 月 5 日確認.
- 7) 村上英記 (2019), *高知大学理工学部紀要*, http://science.cc.kochi-u.ac.jp/scientific_reports/vol02/201909.html, 2021 年 12 月 5 日確認.
- 8) 宇津徳治 (1977), *地震 2*, 30, 179-185.
- 9) 白地図ぬりぬり (2021), https://n.freemap.jp/, 2021 年 12 月 5 日確認.

#### 第1表 各都道府県において震度4以上を記録した地震の平均発生間隔.「-」は対応する期間に震度4以上を記録 する地震がなかったことを示す.

Table 1Average interval of the earthquake whose seismic intensity in JMA is 4 or greater in each prefecture."- " shows that there was no earthquake whose seismic intensity is 4 or greater.

NO.	都道府県	2001-2010年 平均発生間隔 (日)	2012-2014年 平均発生間隔 (日)	2013-2015年 平均発生間隔 (日)	2014-2016年 平均発生間隔 (日)	2015-2017年 平均発生間隔 (日)	2016-2018年 平均発生間隔 (日)	2017-2019年 平均発生間隔 (日)	2018-2020年 平均発生間隔 (日)
1	北海道	61	58	68	61	69	26	27	27
2	青森	174	64	64	69	91	137	137	110
3	岩手	99	38	58	78	122	137	122	100
4	宮城	59	30	52	69	78	78	84	84
5	秋田	522	365	548	365	219	365	365	548
6	山形	243	548	1,095	548	548	1,096	1,095	1,096
7	福島	85	24	37	46	48	44	55	78
8	茨城	78	20	32	38	37	38	55	42
9	栃木	87	41	44	46	55	69	91	69
10	群馬	228	110	122	157	219	274	274	137
11	埼玉	130	64	78	69	91	100	219	137
12	千葉	114	58	78	84	73	64	78	55
13	東京	94	137	137	137	183	365	274	137
14	神奈川	215	73	110	110	183	274	548	548
15	新潟	34	183	365	365	1,096	548	365	365
16	富山	1,826	1,096	1,095	-	_	-	-	1,096
17	石川	174	365	365	548	548	1,096	1,095	1,096
18	福井	609	-	-	-	-	1,096	1,095	548
19	山梨	730	219	548	548	1,096	-	-	-
20	長野	166	122	156	137	157	122	137	157
21	岐阜	261	-	1,095	1,096	548	548	365	219
22	静岡	183	274	548	1,096	1,096	-	548	365
23	愛知	406	1,096	548	1,096	1,096	548	548	365
24	三重	522	_	-	1,096	1,096	548	1,095	1,096
25	滋賀	913	1,096	1,095	1,096	_	1,096	1,095	1,096
26	京都	913	548	548	548	1,096	365	548	548
27	大阪	913	548	548	365	548	274	548	548
28	兵庫	913	1.096	1.095	1 096	1.096	548	1.095	1.096
29	会良	609	1 096	1 095	1 096	1 096	548	1 095	1 096
30	和歌山	522	274	274	548	548	365	548	548
31	鳥取	522	1 096	219	69	73	91	1 095	1 096
32	鳥根	457	1 096	1 095	365	548	137	183	183
33	岡山	913	548	548	365	548	365	1 095	1 096
34	広島	730	1 096	548	274	365	274	548	548
35	<u> </u>	1,217	548	365	548	1.096	1.096	548	365
36	香川	913	548	548	548	1 096	548	1 095	1 096
37	愛媛	332	1 096	365	219	274	274	274	274
38	高知	457	1,000	365	274	365	548	548	365
39		457	1,000	1 095	219	274	274	_	_
40	福岡	365	1,000	548	100	110	122	1 0 9 5	1 096
41	佐智	913	1,096	548	157	183	219	-	-
42	長崎	1,217	-	_	157	137	137	1.095	-
43	能本	332	274	365	8	.3,	.3,	84	183
44	大分	281	548	548	52	48	48	219	548
45	宮崎	365	274	274	100	100	110	156	219
46	鹿児島	215	157	122	73	73	91	137	137
47	沖縄	457	274	219	219	1,096	1,096	1,095	548

- 第2表 2001 ~ 2010年の地震活動に基づく震度4以上の地震の1年予測における2021年1-9月の検証結果.
- Table 2Evaluation of the one-year-forecast of the earthquake whose seismic intensity in JMA scale is four or greater during<br/>the period from January 2021 to September 2021. The forecast is based on the seismic activity during the period<br/>from 2001 to 2010.

	赤予報	黄予報	青予報	小計
地震有り	20	7	0	27
地震無し	0	17	3	20
小計	20	24	3	47
適中率	20/20	1.00		
予知率	20/27	0.74		
安心率	3/3	1.00		

#### 第3表 2018 ~ 2020年の地震活動に基づく震度4以上の地震の1年予測における2021年1-9月の検証結果.

Table 3Evaluation of the one-year-forecast of the earthquake during the period from January 2021 to September 2021, which<br/>is based on the seismic activity from 2018 to 2020.

	赤予報	黄予報	青予報	小計
地震有り	16	7	4	27
地震無し	2	7	11	20
小計	18	14	15	47
適中率	16/18	0.89		
予知率	16/27	0.59		
安心率	11/15	0.73		

- 第4表 2001 ~ 2010 年の地震活動に基づく震度4以上の地震の3ヶ月予測(3回分)における2021 年1-9月の検 証結果
- Table 4Evaluation of the three-month-forecast during the period from January 2021 to September 2021, which is based on<br/>the seismic activity during the period from 2001 to 2010.

	赤予報	黄予報	青予報	小計
地震有り	6	24	13	43
地震無し	3	21	74	98
小計	9	45	87	141
適中率	6/9	0.67		
予知率	6/43	0.14		
安心率	74/87	0.85		

- 第5表 2018 ~ 2020 年の地震活動に基づく震度4以上の地震の3ヶ月予測(3回分)における2021年1-9月の検 証結果
- Table 5Evaluation of the three-month-forecast during the period from January 2021 to September 2021, which is based on<br/>the seismic activity during the period from 2018 to 2020.

赤予報	黄予報	青予報	小計
7	20	16	43
5	19	74	98
12	39	90	141
7/12	0.58		
7/43	0.16		
74/90	0.82		
	赤予報 7 5 12 7/12 7/43 74/90	<u>赤予報 黄予報</u> 7 20 5 19 12 39 7/12 0.58 7/43 0.16 74/90 0.82	赤予報黄予報青予報72016519741239907/120.587/437/430.1674/90

第6表 2001年~2021年9月に日本で震度4以上を記録した地震の数

Table 6Numbers of the earthquake whose seismic intensity in JMA scale is four or greater in Japan from January 2001<br/>to September 2021.

年	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021.9
地震数	37	28	71	105	49	28	57	42	40	37	324	81	64	55	44	192	40	78	40	45	39



- 第1図 左図:2001~2010年の地震活動に基づく震度4以上の揺れを感じる地震の各都道府県における1年間の 予報.赤:地震あり(確率70%以上),黄色:不明(同30-70%),青:地震無し(同30%未満).なお, この図の作成には、白地図ぬりぬり⁹⁾というプログラムを用いた.他の図も同様である.
   右図:2021年1月~9月に震度4以上の地震を記録した都道府県.白:地震有り,黒:地震無し.
- Fig. 1 Left: One-year-forecast of the earthquake whose seismic intensity in JMA scale is four or greater in each prefecture. Red: The probability is 70% or greater. Yellow: The probability is 30% or greater but smaller than 70%. Blue: The probability is smaller than 30%. Each probability is calculated from the seismic activity during the period from 2001 to 2010. This figure was drawn by the program for map display named "Shiro-chizu nuri nuri" ⁹. The other figures were also drawn by the same program.

Right: Occurrence of the earthquake whose seismic intensity in JMA scale is four or greater in each prefecture during the period from January 2021 to September 2021. White color means the earthquake occurred and black color means the earthquake did not.



第2図 左図:2018~2020年の地震活動に基づく震度4以上の揺れを感じる地震の各都道府県における1年間予報

右図:2021年1月~9月に震度4以上の地震を記録した都道府県.白:地震有り,黒:地震無し.

Fig. 2 Left: One-year-forecast of the earthquake whose seismic intensity in JMA scale is four or greater in each prefecture. The probability is calculated from the seismic activity during the period from 2018 to 2020. Right: Occurrence of the earthquake whose seismic intensity in JMA scale is four or greater in each prefecture from January 2021 to September 2021. White color means the earthquake occurred and black color means the earthquake did not.



- 第3図 震度4以上の揺れを感じる地震の各都道府県における1年間予報. 左図:2001~2010年の地震活動に基づく予報. 右図:2018~2020年の地震活動に基づく予報.
- Fig. 3 One-year-forecast of the earthquake whose seismic intensity in JMA scale is four or greater in each prefecture. Left: The forecast based on the seismic activity during the period from 2001 to 2010. Right: The forecast based on the seismic activity during the period from 2018 to 2020.



- 第4図 震度4以上の揺れを感じる地震の各都道府県における3ヶ月間予報. 左図:2001~2010年の地震活動に基づく予報. 右図:2018~2020年の地震活動に基づく予報.
- Fig. 4 Three-month-forecast of the earthquake whose seismic intensity in JMA scale is four or greater in each prefecture. Left: The forecast based on the seismic activity during the period from 2001 to 2010. Right: The forecast based on the seismic activity during the period from 2018 to 2020.



- 第5図 2015年から2021年9月までの1年予測の評価 a)予測に用いた地震活動期間を2001~2010年に固定した場合,b)予測に用いた地震活動期間を直前の3 年間にした場合
- Fig. 5 Evaluation of the one-year-forecast during the period from 2015 to September 2021.a) The forecast based on the seismic activity during the period from 2001 to 2010 and b) that based on the seismic activity for the last three years.



- 第6図 2015年から2021年9月までの3ヵ月予測の評価 a)予測に用いた地震活動期間を2001 ~ 2010年に固定した場合,b)予測に用いた地震活動期間を直前の3 年間にした場合
- Fig. 6 Evaluation of the three-months-forecast during the period from 2015 to September 2021.a) The forecast based on the seismic activity during the period from 2001 to 2010 and b) that based on the seismic activity for the last three years.

## 12 - 10 能登半島北部の地震活動と地震テクトニクス Seismic activities and seismotectonics in the northern Noto Peninsula

平松 良浩(金沢大学理工研究域地球社会基盤学系) HIRAMATSU Yoshihiro (School of Geosciences and Civil Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University)

能登半島北部珠洲市周辺での地震活動の活発化は2018年6月頃から始まり,2021年以降はA-Dの4つの領域で順に活発化(地震数の増加,マグニチュードの増加)した(図1).有感地震は2021年5月以降に多発するようになった.最初に活動が始まった領域Aは周囲と比べると低重力 異常である.領域Aの地震活動は2021年4月以降低調であったが,10月末から再び活発化した. 領域Bの地震活動は2021年9月以降やや低調となった.領域Cは最も地震活動が活発である.領域Dでは9月16日にマグニチュード5.1の地震が発生した.

震源再決定結果(Double-difference法)によると、領域 B – D の震源分布は南東傾斜の面を形成 しているように見える.防災科学技術研究所 F-net のメカニズム解と上記震源再決定結果から、こ の群発地震の主な地震は概ね北東–南西走向の南東に傾斜した断層面での逆断層型のメカニズムで 発生したと考えられる.b値は各領域で概ね1以上の高い値をとり、時間的に変動している.第1 図の範囲内の 2020 年 12 月以降の全地震の累積エネルギーは Mw 6.7 の地震に相当する.

2020年12月頃からの地震活動の活発化は、この地域での局所的な非定常地殻変動が観測された 時期と同じであり、非定常地殻変動の原因として球状圧力源や断層すべりのモデルが提唱されてい る^{1,2}.2007年能登半島地震の震源下部には流体の存在が指摘されており^{3,4},今回の地震活動に おいても流体が関与した球状圧力源による応力変化(Δ CFF)が地震活動を活発化させた可能性が 高い.

能登半島は海成段丘が発達し、その分布から地塊区分がなされており、特に能登半島北部は南 東へ傾斜する傾動地塊で特徴付けられる⁵⁾. 能登半島北岸沖の海底活断層⁶⁾が傾動地塊の形成に寄 与していると考えられる. 能登半島北部では海底活断層の活動による 1729 年の能登・佐渡の地震 (M6.6-7.0)⁷⁾ や 2007 年能登半島地震(M6.9)⁸⁾を始めとして、歴史的にマグニチュード 6 から 7 程度の地震が発生しており、またマグニチュード 7 程度の地震を起こしうる活断層も存在する(図 2). 非定常地殻変動源による応力変化はこれらの活断層にも影響を及ぼしており、9 月 16 日に発 生した M5.1 の地震より規模の大きな地震の発生について注意する必要がある.

> (平松 良浩) HIRAMATSU Yoshihiro

謝辞

本報告では,気象庁の一元化震源データ,験測値データ,地震波形データ,防災科学技術研究所 Hi-net の地震波形データ,F-net の震源メカニズム解データ,京都大学防災研究所および東京大学地 震研究所の地震波形データ,国土地理院および産業技術総合研究所地質調査総合センターの重力 データを使用しました.広島県立大学の岩田貴樹准教授,京都大学の西村卓也准教授,防災科学技 術研究所の松原誠博士,名古屋大学の田中優作博士からは解析プログラムや研究結果を提供いただ きました.記して感謝します.

参考文献

- 1) 西村ほか (2021), 日本測地学会第 136 回講演会, 57. 能登半島において 2020 年 12 月に開始し た群発地震に同期する地殻変動
- 2) 田中・鷺谷 (2021), 日本地震学会 2021 年度秋季大会, S03-02. 能登半島で発生した群発地震と、 それに伴ってゆっくりと進行する地殻変動
- 3) Kato et al. (2008), *Earth Planets Space*,**60**, 105–110. Three-dimensional velocity structure in the source region of the Noto Hanto Earthquake in 2007 imaged by a dense seismic observation
- 4) Yoshimura et al. (2008), *Earth Planets Space*, **60**, 117–122. Magnetotelluric observations around the focal region of the 2007 Noto Hanto Earthquake (Mj 6.9), Central Japan
- 5) 太田・平川 (1979), 地理学評論, 52, 169-189. 能登半島の海成段丘をその変形
- 6) 井上・岡村 (2010), *海陸シームレス地質情報, 能登半島, 数値地質図* S-1. 能登半島北部周辺 20 万分の1 海域地質図説明書
- 7) Hamada et al. (2016), *Tectonophysics*, **670**, 38–47. Fossil tubeworms link coastal uplift of the northern Noto Peninsula to rupture of the Wajima-oki fault in AD 1729
- 8) Hiramatsu et al. (2008), Earth Planets Space, 60, 903–913. Fault model of the 2007 Noto Hanto earthquake estimated from coseismic deformation obtained by the distribution of littoral organisms and GPS: Implication for neotectonics in the northwestern Noto Peninsula



第1図 珠洲市周辺での 2018 年以降の地震活動.





第2図 能登半島北部での過去の主要な地震と活断層.

Fig. 2 Major past earthquakes and active faults in the northern Noto Peninsula.

## 連絡会記事

#### 第232回地震予知連絡会議事次第

日 時:令和3年8月27日 13:00~17:00 開催形式:WEB 会議形式

- 1. 開 会
- 2. 院長·会長挨拶
- 3. 事務的事項
  - 1) 出席者・資料の確認
  - 2)第231回の議事録確認
  - 3) 地震予知連絡会 SAR 解析 WG の活動状況
  - 4)運営検討部会検討事項報告・今後の重点検討課題の決定について
- 4. 地殻活動モニタリングに関する検討
  - 1)メール審議結果の報告
    - (1) 国土地理院
    - (2) 気象庁
    - (3) 防災科学技術研究所
    - (4) 海洋研究開発機構
- 5. 重点検討課題の検討
  - 第 232 回地震予知連絡会重点検討課題の検討
     「地震発生予測に向けた沈み込み帯での地震準備・発生過程の物理モデル」
     コンビーナ 堀 高峰 委員
    - (1) エネルギー収支を考慮した地震発生シナリオ構築の新手法気象研究所 野田 朱美様
    - (2) 南海トラフ周辺におけるスロースリップイベントと地震発生準備過程の 数値モデリング:近年の観測研究を踏まえて
       防災科学技術研究所 松澤 孝紀様
    - (3) SSE後の沈み込み帯地震の発生確率に対する単純な物理モデルでの評価:ヒクランギ
       巨大地震への適用
       海洋研究開発機構 堀 高峰 委員
       <連名>京都大学 金子 善宏様
  - 2)総合討論
- 3)第233回地震予知連絡会重点検討課題の趣旨説明
  課題名「予測実験の試行(08)-試行から実施への移行」
  コンビーナ 遠田 晋次委員
  堀 高峰委員
- 6. その他の議事
  - 閉 会

#### 第233回地震予知連絡会議事次第

日 時:令和3年11月26日 13:00~17:00 開催形式:WEB 会議形式

- 1. 開 会
- 2. 会長挨拶
- 3. 事務的事項
  - 1) 出席者・資料の確認
  - 2) 第232 回の議事録確認
  - 3) 地震予知連絡会 SAR 解析 WG の活動状況
- 4. 地殻活動モニタリングに関する検討
  - 1)メール審議結果の報告
    - (1) 国土地理院
    - (2) 気象庁
    - (3) 防災科学技術研究所
    - (4) 統計数理研究所
- 5. 重点検討課題の検討
  - 1)第233回地震予知連絡会重点検討課題の検討
    - 「予測実験の試行(08) -試行から実施への移行」
      - コンビーナ 遠田 晋次委員

堀 高峰委員

- (1) 地殻変動予測:東北沖地震の余効変動
  国土地理院 宗包 浩志様
  <連名>国土地理院 藤原 智様
- (2) 気象庁震度データベースを用いた地震予測と2015-2021年の予測の評価 滋賀県立大学 小泉 尚嗣 様
- (3) 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法(6):これまでの取りまとめと今後の課題
  気象研究所*前田憲二様*気象庁地震火山技術・調査課から併任
  <連名>気象研究所 弘瀬 冬樹様、溜渕 功史様
- (4) 階層的時空間 ETAS モデルなどによる短期・中期の地震確率予測と検証評価 統計数理研究所 尾形 良彦 委員
- (5) 能登半島北部の地震活動と地震テクトニクス 金沢大学 平松 良浩様
- 2) 総合討論

3)第234回地震予知連絡会重点検討課題の趣旨説明

課題名「スロー地震の理解の現状」

コンビーナ 小原 一成 委員

6. その他の議事

閉 会

## 地震予知連絡会運営要綱

昭和 44 年 4 月 24 日制定 昭和 51 年 8 月 23 日改正 平成 13 年 1 月 6 日改正 平成 16 年 8 月 23 日改正 平成 25 年 2 月 18 日改正 平成 26 年 2 月 17 日改正

地震の予知・予測により震災軽減に貢献することを目的とし,地震に関する観測・研究を実施し ている関係機関等が提供する情報を交換するとともに,将来発生する地震の予知・予測に関する学 術的検討を行うため,地震予知連絡会(以下「予知連」という.)の運営要綱を下記のとおり定める.

記

- 1. 予知連は、委員 30 人以内で組織するものとし、必要に応じて臨時委員を置くことができる.
- 2. 委員および臨時委員は、学識経験者および関係機関の職員のうちから国土地理院長がそれぞ れ委嘱する.
- 3. 委員の任期は、2年とし、その欠員が生じた場合の補欠委員の任期は、前任者の残任期間とする.
- 予知連に会長を置き、委員の互選によってこれを定める、会長は、会務を総理する、 会長の選出は、新しい期の最初の予知連において行う、 会長の任期は、あらたに会長が定まるまでとする。
- 5. 予知連に副会長を置く. 副会長は,委員の中から会長が指名する.
- 会長に事故あるときは、あらかじめ会長が指名する副会長がその職務を代理するものとし、 早期に会長の選出を行う.
- 特別の事項を調査検討する必要があるときは、予知連に部会を置くことができる。
  部会は、委員及び臨時委員で構成する。
  部会には、部会長を置き、部会長は、会長が指名する。
- 8. 予知連は,必要に応じ,会長が招集する. 部会は,部会長が招集する.
- 9. 会長は、予知連に専門家を招聘し、意見を聴取することができる. 部会長は、部会に専門家を招聘し、意見を聴取することができる.
- 10. 予知連の運営に関し、必要な事項は、予知連の議を経て会長が定める.
- 11. 予知連の庶務は、国土地理院において処理する.

# 委員名簿

# 第27期 地震予知連絡会

(令和3年6月9日現在)

会	長	山岡	耕春	名古屋大学大学院環境学研究科教授
副	会 長	松澤	暢	東北大学大学院理学研究科教授
副 運	会 長 営検討部:	小原 会長	一成	東京大学地震研究所教授
委	員	高橋	浩晃	北海道大学大学院理学研究院教授
委	員	遠田	晋次	東北大学災害科学国際研究所教授
委	員	八木	勇治	筑波大学生命環境系教授
委	員	宮内	崇裕	千葉大学大学院理学研究科教授
委	員	佐竹	健治	東京大学地震研究所教授
委	員	篠原	雅尚	東京大学地震研究所教授
委	員	石山	達也	東京大学地震研究所准教授
委	員	中島	淳一	東京工業大学理学院地球惑星科学系教授
委	員	伊藤	武男	名古屋大学大学院環境学研究科准教授
委	員	久家	慶子	京都大学大学院理学研究科・理学部教授
委	員	西村	卓也	京都大学防災研究所准教授
委	員	松本	聡	九州大学大学院理学研究院教授
委	員	中尾	茂	鹿児島大学大学院理工学研究科理学専攻教授
委	員	尾形	良彦	統計数理研究所名誉教授
委	員	汐見	勝彦	国立研究開発法人防災科学技術研究所
				地震津波防災研究部門副部門長
委	員	堀	高峰	国立研究開発法人海洋研究開発機構
				海域地震火山部門・地震津波予測研究開発センター長
委	員	今西	和俊	国立研究開発法人産業技術総合研究所
				活断層・火山研究部門総括研究主幹
委	員	平田	直	地震調査研究推進本部地震調査委員会委員長
				南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会会長
				地震防災対策強化地域判定会会長
				国立研究開発法人防災科学技術研究所参与
委	員	石川	直史	海上保安庁海洋情報部技術・国際課地震調査官
委	員	中村	雅基	気象庁地震火山部地震火山技術・調査課長
委	員	干場	充之	気象庁気象研究所地震津波研究部長
委	員	畑中	雄樹	国土地理院地理地殻活動研究センター長
委	員	黒石	裕樹	国土地理院地理地殻活動研究センター地理地殻活動総括研究官
名	誉 委 員	大竹	政和	東北大学名誉教授
名	誉 委 員	島崎	邦彦	東京大学名誉教授
名	誉 委 員	平原	和朗	京都大学名誉教授

# 第27期 運営検討部会

(令和3年5月28日現在)

部	会 長	小原 一成	東京大学地震研究所教授
委	員	高橋 浩晃	北海道大学大学院理学研究院教授
委	員	松澤暢	東北大学大学院理学研究科教授
委	員	遠田 晋次	東北大学災害科学国際研究所教授
委	員	篠原 雅尚	東京大学地震研究所教授
委	員	汐見 勝彦	国立研究開発法人防災科学技術研究所
			地震津波防災研究部門副部門長
委	員	堀 高峰	国立研究開発法人海洋研究開発機構
			海域地震火山部門・地震津波予測研究開発センター長
委	員	今西 和俊	国立研究開発法人産業技術総合研究所
			活断層・火山研究部門総括研究主幹
委	員	中村 雅基	気象庁地震火山部地震火山技術・調査課長
委	員	干場 充之	気象庁気象研究所地震津波研究部長
委	員	畑中 雄樹	国土地理院地理地殻活動研究センター長
委	員	黒石 裕樹	国土地理院地理地殻活動研究センター地理地殻活動総括研究官

#### 地震予知連絡会会報投稿規程

平成9年10月13日制定 平成26年7月3日改訂 令和2年2月21日全部改正 令和2年8月28日一部改訂

- 1. 本文は、簡潔明瞭とし、図及び表を主体に説明する.
- 2. 原稿は,基本的に「Word」で作成する.
- 3. 原稿の書式は、別添の記載例に従う.
- 4. 原稿に図及び表を貼り付けない場合は、基の電子ファイル (BMP, EPS, GIF, Illustrator, Excel, PDF, TIFF 等) 及びレイアウトを原稿と併せて提出する.
- 5. 参考文献は必要最小限にとどめる. 雑誌名その他は簡略化する.
- 6. 提出する電子ファイルは、全てウィルスチェックを実施する.
- 7. 電子ファイルは、メール添付又は関係者向け大容量ファイル転送システムを利用 して提出する.
- 本文の末尾に著者名(執筆者氏名又は著作権者となる所属機関内組織名)を明記 する.なお,著作権の扱いについては「『地震予知連絡会会報』の著作権の扱いに ついて」によるものとする.
  - ・メール添付の場合の提出先
    地震予知連絡会事務局:<u>gsi-eqyochi-9jimu@gxb.mlit.go.jp</u>
    ・大容量ファイル転送システム
    - 下記の URL にアクセスし,利用する. <u>https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/local.html</u>

## 1-1 日本語の標題は游明朝, 12pt, 太字(英数字は Times New Roman)

### 英語の標題は必ず併記,Times New Roman, 12pt, Bold

(1 行あけ)

日本語の機関名は游明朝, 10.5pt

英語の機関名は必ず併記, Times New Roman, 10.5pt

(1 行あけ)

余白は上及び下 30mm, 左及び右 23mm とする.

本文(日本語)は游明朝, 10.5pt. 英数字及び記号は Times New Roman, 10.5pt. なお, 游明朝が ない場合は, MS 明朝とし, 事務局で修正する.

読点は全角カンマ「,」,句点は全角ピリオド「.」を使う.

本文中の文献の引用は上付き,半角数字,半角片括弧「1)」とする.参考文献は文末に一括して 記載する.

(1 行あけ)

(著者名又は著作権者となる所属機関内組織名を記載する.名字 名前) MYOJI Namae

(1 行あけ)

謝辞

(1 行あけ)

参考文献

(改ページ)

図及び表

原稿に図を貼り付ける場合,画像は350dpi以上の解像度とする.

図及び表の向きは、極力縦向きとする.

原稿に図及び表を貼り付ける場合は、基の電子ファイルは提出不要とする.

キャプション

第1表 日本語は MS ゴシック, 9pt. 英数字及び記号は Times New Roman, 9pt. 英文を必ず併記.

Table 1Times New Roman, 9pt.

### 地震予知連絡会会報の著作権について

『地震予知連絡会会報』に掲載された記事の著作権は個々の記事の著者に属します.引用として認 められる範囲を超えて,会報の内容を転載・複製される場合は著作権者の許可を得て下さい.

### 地震予知連絡会会報について

国土地理院ホームページでご覧いただけます. https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report.html

地震予知連絡会会報〈第107巻〉

令和4年3月 発行

編集・発行者 国 土 地 理 院 〒 305-0811 茨城県つくば市北郷1番 TEL (029)864-1111