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

地震予知連絡会会報

〈第 110 巻〉

令和5年9月

国土地理院

REPORT OF THE COORDINATING COMMITTEE FOR EARTHQUAKE PREDICTION

VOL. 110

SEPTEMBER, 2023

EDITED BY GEOSPATIAL INFORMATION AUTHORITY OF JAPAN

地震予知連絡会会報(第110巻)

この会報は、地震予知連絡会(第238回・第239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(2022年11月~2023年4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(2022年11月~2023年5月)(防災科研)4
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(気象研)20
2 - 1	北海道地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年4月)(気象庁)25
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(2022年11月~2023年4月)(気象庁)40
3 - 2	東北地方の地殻変動
3 - 3	日本海溝沿いの海底地殻変動観測結果(海上保安庁)62
4 - 1	関東・中部地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年4月)・・・・(気象庁)・・・・・67
4 - 2	関東甲信地方の地殻変動
4 - 3	神奈川県西部地域の地下水位観測結果(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
	······(温泉地学研・産総研) ·····96
5 - 1	東海地方の地殻変動
5 - 2	東海・南関東地域におけるひずみ観測結果(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
	(気象庁・気象研)…114
5 - 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
	(2022年11月~2023年4月)(産総研・防災科研)129
5 - 4	東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果
	(2022年11月~2023年4月)(67)(産総研)177
6 - 1	岐阜県東部・長野県西部における地殻活動観測結果(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
	(産総研)182
6 - 2	Double-Difference 法による 2023 年 5 月 5 日能登地方の震源分布(防災科研)185
6 - 3	2023年5月5日石川県能登地方の地震による高周波エネルギー輻射量(防災科研)189
6 - 4	北陸・中部地方の地殻変動
6 - 5	能登半島の地殻変動(2023年5月)(京大防・金沢大・東北大)215
7 - 1	近畿・中国・四国地方とその周辺の地震活動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
	(気象庁)223
7 - 2	近畿地方の地殻変動
7 - 3	南海トラフ周辺の地殻活動(2022年11月~2023年4月)(気象庁)233
7 - 4	南海トラフ浅部の微動活動(2023年2月-2023年4月)(防災科研)278
7 - 5	南海トラフ沿いの海底地殻変動観測結果(海上保安庁)281
7 - 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)287
7 - 7	南海トラフ周辺における最近の傾斜変動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
	(防災科研)290

7 - 8	内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測(気象研)307			
7 - 9	紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)			
	(産総研)311			
7 - 10	近畿地域の地下水位・歪観測結果(2022年11月~2023年4月)(産総研)…322			
7 - 11	下里水路観測所における SLR 観測(海上保安庁)326			
8 - 1	西南日本における深部低周波微動活動(2022年11月~2023年4月)…(防災科研)329			
8 - 2	中国・四国地方の地殻変動			
8 - 3	西南日本における短期的スロースリップイベント			
	(2022年11月~2023年4月)(防災科研)340			
8 - 4	鳥取県における温泉水変化(2022年11月~2023年4月)(鳥取大・産総研)346			
9 - 1	九州地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年4月)(気象庁)348			
9 - 2	沖縄地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年4月)(気象庁)353			
9 - 3	九州・沖縄地方の地殻変動			
10 - 1	世界の地震活動(2022年11月~2023年4月)(気象庁)370			
10 - 2	トルコの地震 SAR 干渉解析結果			
10 - 3	2023 年 2 月 6 日に発生したトルコ中部地震の余震活動について(統数研)426			
10 - 4	測地 VLBI 観測(国際・国内超長基線測量)			
10 - 5	気象庁震度データベースを用いた地震予測			
	(2022年の予測結果の評価と発生確率値の更新)(滋賀県立大)436			
10 - 6	最近の能登半島群発地震活動の時空間的特徴と			
	2023 年 5 月 5 日 M6.5 地震について(統数研)443			
11 - 1	第 238 回地震予知連絡会重点検討課題			
	「人工知能による地震研究の深化」の概要			
11 - 2	人工知能による複数観測点を用いた地震・測地イベント検知手法開発(統数研)453			
11 - 3	機械学習を併用した自動震源決定による微小地震の検出(気象研)455			
11 - 4	地震動予測への機械学習技術の適用(防災科研)459			
11 - 5	深層学習に基づく地震計古記録からの低周波微動の検出(地震研)462			
11 - 6	Instantaneous Tracking of Earthquake Growth With Elasto-Gravity Signals in Japan			
	and Application to Historical Data from the Tohoku Oki Earthquake(京大防)465			
11 - 7	第 239 回地震予知連絡会重点検討課題「群発地震」の概要(産総研)472			
11 - 8	能登半島北東部で長期間継続する地震活動(金沢大)474			
11 - 9	奥能登での群発的地震活動発生域周辺の			
	3次元比抵抗構造解析の現状(京大防・金沢大・兵庫県立大)476			
11 - 10	2020 年長野・岐阜県境付近の群発地震活動			
11 - 11	北海道北部の群発地震活動と稠密 GNSS 観測から			
	推定された浅部ゆっくりすべり			
11 - 12	室内実験における流体圧入で誘発される微小破壊の研究(京大防)484			
	連絡会記事			
	運営要綱			
	委員名簿			
	投稿規定			

CONTENTS (Vol. 110)

1 - 1	Seismic Activity in and around Japan (November 2022 – April 2023)(JMA)1			
1 - 2	Activity of Shallow Very-low-frequency Earthquakes in and around Japan			
	(November, 2022 – May, 2023)4			
1 - 3	Crustal Deformations of Entire Japan			
1 - 4	Position Change in the plate subduction direction of the nationwide GNSS points (MRI)20			
2 - 1	Seismic Activity in and around the Hokkaido District			
	(November 2022 – April 2023)			
2 - 2	Crustal Deformations in the Hokkaido District			
3 - 1	Seismic Activity in and around the Tohoku District			
	(November 2022 – April 2023)			
3 - 2	Crustal Deformations in the Tohoku District			
3 - 3	Seafloor movements along the Japan Trench observed by seafloor geodetic observations			
	(JCG)62			
4 - 1	Seismic Activity in and around the Kanto and Chubu Districts			
	(November 2022 – April 2023)			
4 - 2	Crustal Deformations in the Kanto District91			
4 - 3	Temporal Variation in the Groundwater Level in the western part of Kanagawa Prefecture, Japan			
	(November 2022 – April 2023)			
5 - 1	Crustal Deformations in the Tokai District102			
5 - 2	Observation of Crustal Strain by Borehole Strainmeters in the Tokai and Southern Kanto Districts			
	(November 2022 – April 2023)114			
5 - 3	Short-term slow slip events in the Tokai area, the Kii Peninsula and the Shikoku District, Japan			
	(from November 2022 to April 2023)129			
5 - 4	The Variation of the Groundwater Level and Subsidence in the Tokai, Kanto District and			
	Izu Peninsula, Japan. (from Nov. 2022 to Apr. 2023) (67)			
6 - 1	Observation of Tectonic Activities in Eastern Gifu and Western Nagano Regions			
	(November, 2022–April, 2023)			
6 - 2	Hypocenter distribution during the event at the Noto Peninsula on May 5 2023			
	based on double-difference relocation			
6 - 3	High-frequency energy release from the Noto district, Ishikawa-prefecture earthquake			
	on May 5, 2023			
6 - 4	Crustal Deformations in the Hokuriku and Chubu Districts			
6 - 5	Crustal deformation in the Noto Peninsula (May 2023)			
7 - 1	Seismic Activity in and around the Kinki, Chugoku and Shikoku Districts			
	(November 2022–April 2023)			
7 - 2	Crustal Deformations in the Kinki District			
7 - 3	Crustal Activity around the Nankai Trough (November 2022–April 2023)(JMA)233			
7 - 4	Shallow tectonic tremor activity in the Nankai trough, southwest Japan			
	(February, 2023–April, 2023)278			
7 - 5	Seafloor movements along the Nankai Trough observed by seafloor geodetic observations			
	(JCG)281			
7 - 6	Objective detection of long-term slow slip events along the Nankai Trough(MRI)287			
7 - 7	Recent Continuous Crustal Tilt Observation around the Nankai Trough			
	(November 2022 – April 2023)			

7 - 8	Continuous Observations of Crustal Deformations in and around Intraplate Seismic Gaps			
7 - 9	The variation of the strain, tilt and groundwater level in the Shikoku District and			
	Kii Peninsula, Japan (from November 2022 to April 2023)(AIST)			
7 - 10	Observational Results of Groundwater Levels and Crustal Strains in the Kinki District, Japan			
	(November 2022 – April 2023)			
7 - 11	Continuous SLR observation at Shimosato Hydrographic Observatory(JCG)			
8 - 1	Activity of deep low-frequency tremor in southwest Japan			
	(November, 2022 – April, 2023)			
8 - 2	Crustal Deformations in the Chugoku and Shikoku Districts			
8 - 3	Short-term slow slip events with non-volcanic tremor in southwest Japan			
	(November 2022-April 2023)			
8 - 4	Temporal Variation in the hot spring water in the Tottori Prefecture, Japan			
	(November 2022 – April 2023)			
9 - 1	Seismic Activity in and around the Kyushu District (November 2022-April 2023)			
	(JMA)			
9 - 2	Seismic Activity around the Okinawa District (November 2022 - April 2023)(JMA)			
9 - 3	Crustal Deformations in the Kyushu and Okinawa Districts			
10 - 1	Seismic Activity in the World (November 2022 - April 2023)(JMA)			
10 - 2	The 2023 Turkey Earthquake: Crustal deformation detected by ALOS-2 data(GSI)416			
10 - 3	Aftershock activity of the 6th February 2023 Central Turkey earthquakes(ISM)			
10 - 4	The Results of VLBI Observation for Geodesy			
10 - 5	Earthquake forecasting by using the seismic intensity database of Japan Meteorological Agency			
	(Evaluation of forecast results for 2022 and update of occurrence probability values)			
	(Univ.Shiga Pref.)436			
10 - 6	Space-time features of the Noto Peninsula swarm activity and the May 5, 2023 earthquake			
	(ISM)			
11 - 1	Evolution of Seismology with Artificial Intelligence			
11 - 2	Development of seismic and geodetic event detection methods using multiple observation			
11 0	stations by artificial intelligence			
11 - 3	Detection of micro-earthquakes by automatic hypocenter determination			
11 4	combined with machine learning			
11 - 4	Application of Machine Learning Techniques to Ground-Motion Prediction(NIED)			
11 – 5	Detection of Low-Frequency Tremors in Historical Seismograms Using Deep Learning			
11 ($(ERI) \cdots 462$			
11 - 6	Instantaneous Tracking of Earthquake Growth With Elasto-Gravity Signals in Japan			
11 7	and Application to Historical Data from the Tonoku Oki Earthquake(Kyoto Univ.)			
11 - /	Earthquake swarm (AIST) 4/2			
11 - 8	A long-lasting seismic activity in the northeastern Noto Peninsula(Kanazawa Oniv.)			
11 – 9	in the Northeastern Note Daringula (Kusta Univ. Kongroup Univ. Univ. of Users)			
11 10	Earth such a success the horder between Negare and Cify methods in 2020 (EBI) 470			
11 - 10 11 - 11	Earthquake swarm hear the border between Nagano and Ghu prefectures in 2020(EKI)			
11 - 11	in northern Holkaido Japan			
11 - 12	A constic emission activity induced by fluid injection in the laboratory experiment			
11 12	(Vyota Univ.) 404			

1-1 日本とその周辺の地震活動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Seismic Activity in and around Japan (November 2022 – April 2023)

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 57回, M6.0 以上の地震は 4回発生した.このうち最大は,2022年11月14日17時08分に三重県南東沖で発生した M6.4の地震であった.2022年11月~2023年4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)
 2023年2月25日22時27分に釧路沖の深さ63kmでM6.0の地震(最大震度5弱)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)は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ型である.

(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)

2023 年 3 月 28 日 18 時 18 分に青森県東方沖の深さ 28km で M6.2 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.

(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 発になり、2021 年 7 月頃からさらに活発になっている。2023 年 4 月中もその傾向は継続している。 2020 年 12 月から 2023 年 4 月までに、震度 1 以上を観測した地震が 312 回発生した。活動の全期間 (2023 年 4 月末まで)を通じて最大規模の地震は、2022 年 6 月 19 日 15 時 08 分に深さ 13km で発生 した M5.4 の地震(最大震度 6 弱)である。

2022 年 11 月 9 日 17 時 40 分に茨城県南部の深さ 51km で M4.9 の地震(最大震度 5 強)が発生した. この地震は,発震機構が北北西-南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.

2022年11月14日17時08分に三重県南東沖の深さ362kmでM6.4の地震(最大震度4)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、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.この地震では、震央から離れた東北地方及び関東地方で強い 揺れを観測しており、この現象は「異常震域」と呼ばれている.

(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)

特に目立った地震活動はなかった.

(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)

2022 年 12 月 13 日 23 時 25 分に奄美大島近海の深さ 18km (CMT 解による) で M6.0 の地震(最 大震度 4)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型である.

(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)

2023年5月1日12時22分に沖縄本島近海の深さ13km(CMT解による)でM6.4の地震(最大震度2) が発生した.この地震は,発震機構(CMT解)が北西-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.この地震の震央付近では,4月27日から地震 活動がやや活発になり,4月27日から5月7日までに震度1以上を観測する地震が8回(震度2:3回, 震度1:5回)発生した.

(7) その他の地域の地震活動

特に目立った地震活動はなかった.

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)、2022年能登半島における合同地震観測グループによるオンライン臨時観測 点(よしが浦温泉、飯田小学校)、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.

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(2022年11月~2023年1月、M≧5.0)

発霊機構は気象庁によるCMT解 ※深さはCMT解による 図中の吹き出しは、陸域M5.0以上・海域M5.5以上(ただし、台湾付近はM5.5以上)

第1図(a) 日本とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年1月, M≧5.0, 深さ≦700km)

Fig.1(a) Seismic activity in and around Japan (November 2022 - January 2023, $M \ge 5.0$, depth ≤ 700 km).



日本とその周辺の地震活動(2023年2月~4月、M≧5.0)

※深さはCMT解による 図中の吹き出しは、陸翊が5.0以上・海域が5.5以上(ただし、台湾付近はか5.5以上)

第1図(b) つづき(2023年2月~4月, M ≧ 5.0, 深さ≦ 700km) Fig.1(b) Continued (February - April 2023, M ≧ 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(2022年11月~2023年5月) Activity of Shallow Very-low-frequency Earthquakes in and around Japan (November, 2022 – May, 2023)

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2023年5月8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.

2022年11月1日から2023年5月8日までの約6ヶ月間においては、11月中旬から下旬に十勝沖で、 4月中旬以降は日向灘及びその周辺域で超低周波地震活動が検出された.このうち、日向灘及びそ の周辺域の活動については、九州よりも南に観測点が無いというカバリッジの問題からアレイ解析 による位置決定精度が十分ではない.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て位置決定する解析²⁾も行った.解析期間は2010年1月 1日から2023年5月21日までとした.この波形相関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.4月中旬に種子島東方沖で始まった超低周波地震活動の活 動は、経過時間とともに北東方向に拡大し、5月には足摺岬の南に到達した.

> (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2023年5月8日).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、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(2022 年10月31日以前)、および赤色(11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 October 31, 2022 and November 1 May 8, 2023, 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 2023 年5月8日までの期間,(b) 2022 年11月1日から 2023 年5月8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 May 8, 2023 and (b) November 1, 2022 May 8, 2023, 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2023年5月21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(2023年3月31日以前)、および赤色(4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 May 21, 2023. 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 March 31, 2023 and April 1 May 21, 2023, respectively. Bold dashed line denotes the Nankai trough and the Ryukyu 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 2023年4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 May 21, 2023 and (b) (d) April 1 May 21, 2023. (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

[GNSS]

第1~7図は、GEONET による GNSS 連続観測から求めた最近3か月間及び1年間の全国の水平 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.

[GNSS 3か月]

第1~3図は、最近3か月間の水平変動ベクトル図である.

第1図の北海道・東北地方では、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)の余効変動の影響が見られる.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2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で見られる. 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. 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3図の日本列島西部の図では、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.

[GNSS 差の差 3か月]

第4~6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4図の北海道・東北地方の図では、2022年3月16日に発生した福島県沖の地震に伴う地殻変 動の影響が見られる。

第5図の日本列島中央部の図では、2022年3月16日に発生した福島県沖の地震に伴う地殻変動 の影響が見られるほか、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6図の日本列島西部の図では、2022年1月22日に発生した日向灘の地震に伴う地殻変動の影響 が見られる. [GNSS 1年間]

第7図の最近1年間の全国の図においては、東北地方太平洋沖地震の後に続く余効変動が顕著で ある.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、 東海地方から九州にかけては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.

[GNSS ひずみ変化]

第8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.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,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.

第9図は,第8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.



第1図 GNSS 連続観測から求めた 2023 年1月~2023 年4月の水平変動

Fig. 1 Horizontal displacements at GNSS sites during January 2023–April 2023. (💢, Reference station is Fukue)

- 11 -



第2図 GNSS 連続観測から求めた 2023 年1月~2023 年4月の水平変動

Fig. 2 Horizontal displacements at GNSS sites during January 2023–April 2023. (💢, Reference station is Fukue)



第3図 GNSS 連続観測から求めた 2023 年 1 月~ 2023 年 4 月の水平変動

Fig. 3 Horizontal displacements at GNSS sites during January 2023–April 2023. (💢, Reference station is Fukue)



第4図 GNSS 水平変動の差(3か月間)

Fig. 4 Differences of horizontal displacements at GNSS sites between January 2022 – April 2022 and January 2023 – April 2023.



2期間の地殻変動ベクトルの差 3か月(2)

第5図 GNSS 水平変動の差(3か月間)

Fig. 5 Differences of horizontal displacements at GNSS sites between January 2022 - April 2022 and January 2023 - April 2023.



2期間の地殻変動ベクトルの差 3か月(3) 5-- 2022-01-08 「E 5:最終解] 基準期間: 2022-12-25 -- 2023-01-08 「E

第6図 GNSS 水平変動の差(3か月間)

Fig. 6 Differences of horizontal displacements at GNSS sites between January 2022 – April 2022 and January 2023 – April 2023.





Fig. 7 Horizontal displacements at GNSS sites during April 2022 – April 2023. (📩, Reference station is Fukue)

GNSS 連続観測から推定した日本列島のひずみ変化

・ 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.



基準期間:2022/03/25 - 2022/04/08 [F5:最終解] 比較期間:2023/03/25 - 2023/04/08 [F5:最終解]



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:1998/03/25 – 1998/04/08 [F5:最終解] 比較期間:1999/03/25 – 1999/04/08 [F5:最終解]

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



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(N68W) 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2023年4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2023年4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(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Seismic Activity in and around the Hokkaido District (November 2022 – April 2023)

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 95 回, M5.0 以上は 11 回発生した.このうち最大は,2023 年 3 月 28 日に青森県東方沖で発生した M6.2 の地震であった.

2022 年 11 月~ 2023 年 4 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) 北海道東方沖の地震(M5.4,最大震度3,第2図(a),(b))

2022 年 11 月 6 日 13 時 23 分に北海道東方沖の深さ 52km 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)は北西 – 南東方向に圧力軸を持つ逆断層型である.

(2) 上川地方北部の地震(M4.5,最大震度3,第3図)

2023 年 1 月 17 日 16 時 37 分に上川地方北部のごく浅い場所で M4.5 の地震(最大震度 3)が発生 した. この地震は地殻内で発生した. この付近では 1 月 13 日から 18 日までに, この地震を含め震 度 1 以上を観測した地震が 5 回(震度 3:1 回,震度 2:2 回,震度 1:2 回)発生した.

(3) 十勝地方中部の地震(M4.9, 最大震度 3, 第 4 図)

2023 年 2 月 20 日 03 時 55 分に十勝地方中部の深さ 118km で M4.9 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(二重地震面の下面)で発生した.発震機構は太平洋プレートの傾 斜方向に張力軸を持つ型である.

(4) 釧路沖の地震(M6.0, 最大震度 5 弱, 第 5 図)

2023 年 2 月 25 日 22 時 27 分に釧路沖の深さ 63km で M6.0 の地震(最大震度 5 弱)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)は西北西-東南東方向に圧力軸 を持つ型である.

(5) 釧路沖の地震(M5.0,最大震度3,第6図)

2023 年 3 月 7 日 07 時 24 分に釧路沖の深さ 20km 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)は北北西 – 南南東方向に圧力軸を持つ逆断層型である.

(6) 日高地方東部の地震(M4.8, 最大震度 4, 第 7 図 (a),(b))

2023 年 3 月 11 日 05 時 12 分に日高地方東部の深さ 49km で M4.8 の地震(最大震度 4)が発生した. この地震は,発震機構が西北西-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.



北海道地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年1月、M≧4.0)

第1図(a) 北海道地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年1月, M ≧ 4.0, 深さ≦ 700km) Seismic activity in and around the Hokkaido district (November 2022 – January 2023, $M \ge 4.0$, depth ≤ 700 km). Fig.1(a)



第1図(b) つづき(2023年2月~4月, M≧4.0, 深さ≦700km) Fig.1(b) Continued (February – April 2023, $M \ge 4.0$, depth ≤ 700 km).

11月6日 北海道東方沖の地震



2022 年 11 月6日 13 時23分に北海道東方 沖の深さ 52km 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、北西-南東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 b)では、M5.0以 上の地震が度々発生しており、最大規模の 地震は、2000 年 1 月 28 日に発生した M7.0 の地震(最大震度 4)で、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 震が時々発生しており、M8.0以上の地震が 2回発生している。1994年10月4日に発 生した「平成6年(1994年)北海道東方沖 地震」(M8.2、最大震度6)では、根室市花 咲で168cm(平常潮位からの最大の高さ)の 津波を観測するなど、北海道から沖縄県に かけて津波を観測した。この地震により、 北海道では負傷者436人、住家被害7,519 棟などの被害が生じた(「平成6・7年災害 記録(北海道)」による)。



第2図(a) 2022年11月6日 北海道東方沖の地震 Fig.2(a) The earthquake east off Hokkaido on November 6, 2022.

146°

148°E

	気象庁CMT (手動)	防災科研 (F-net)	USGS (W-phase)	
ー元化震源 Mj5.4 深さ52km	W T E	· ·	(なし)	
Mw	s 5.3	5.2	_	USGS震源 深さ24km
深さ	39km	32km	—	M5.2
	Global CMT	GEOFON		
	(なし)			
Mw	_	5.2		
深さ	_	30km		

11月6日 北海道東方沖の地震(各機関のMT解)

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

防災科研(AQUA)

周辺の気象庁CMT解



http://www.hinet.bosai.go.jp/AQUA/aqua_catalogue.php?LANG=ja

第2図(b) つづき Fig.2(b) Continued.



1月17日 上川地方北部の地震

第3図 2023年1月17日 上川地方北部の地震

Fig.3 The earthquake in the northern part of Kamikawa region on January 17 2023.


2月20日 十勝地方中部の地震

第4図 2023年2月20日 十勝地方中部の地震 Fig.4 The earthquake in the central part of Tokachi region on February 20, 2023.





2023年2月25日22時27分に釧路沖の深さ 63kmでM6.0の地震(最大震度5弱)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)は西北西-東 南東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、M5以上の 地震が時々発生しており、2004年11月29日 のM7.1の地震(最大震度5強)では、負傷者 52人、住家全壊1棟、一部破損4棟の被害 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3回発生している。最大規模の地震は 「1973年6月17日根室半島沖地震」(M7.4、 最大震度5)で、負傷者28人、住家被害5,153 棟などの被害が生じた。また、根室市花咲 で280cm(平常潮位からの最大の高さ)の津 波を観測した(「昭和48・49年災害記録 北 海道」による)。



第5図 2023年2月25日 釧路沖の地震 Fig.5 The earthquake off Kushiro on February 25, 2023.





震央分布図

第6図 2023年3月7日 釧路沖の地震 Fig.6 The earthquake off Kushiro on March 7, 2023.

2023年3月7日07時24分に釧路沖の深さ20km 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)は北北西-南南東方向 に圧力軸を持つ逆断層型である。

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、M5程度の地震が時々 発生しており、2003年9月29日にはM6.5の地震 (最大震度4)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 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) 十勝沖地震」(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、北 海道から四国の太平洋沿岸を中心に津波を観測 した。この地震により、行方不明者 2 人、負傷者 849 人、住家被害 2,073 棟などの被害が生じた (総務省消防庁による)。





でM5.0の



3月11日 日高地方東部の地震

第7図(a) 2023年3月11日 日高地方東部の地震 Fig.7(a) The earthquake in the eastern part of Hidaka region on March 11, 2023.



3月11日 日高地方東部の地震(相似地震)

2023年3月11日の日高地方東部の地震(M4.8、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、

年 年 ※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[溜渕ほか、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。



強震波形 相関解析 観測点名:浦河町潮見 2009/09/08 01:24:26 M4.8 2023/03/11 05:12:39 M4.8 -





※変位波形は加速度記録を気象庁59型地震計相当に変換したもの

第7図(b) つづき Fig.7(b) Continued.

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

[釧路沖の地震(2月25日) M6.0 GNSS]

第1~2図は,2023年2月25日に発生した釧路沖の地震の地殻変動に関する資料である。第1 図上段に示す震央周辺の6観測点の基線について,第1図下段及び第2図に3成分時系列グラフを 示している。この地震に伴う顕著な地殻変動は見られない。

[GNSS 2003 年 9 月 26 日の十勝沖地震以降の地殻変動時系列]

第3~4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3 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.(4) 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(2)~(3)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。(2)~(4)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。(4)では、2016年1月14日に発生した浦河沖の地震(M6.7)による地殻変動が見られる。



Fig. 1 Results of continuous GNSS measurements before and after the M6.0 earthquake off the coast of Kushiro on February 25, 2023: baseline map (upper) and 3 components time series (lower).

釧路沖の地震(2月25日 M6.0)前後の観測データ

成分変化グラフ



第2図 釧路沖の地震(2023年2月25日, M6.0)前後の観測データ:3成分時系列グラフ



北海道太平洋岸 GNSS連続観測時系列(1)



配点図

点畨号	点名	日付	保守内容
960519	根室4	2009-12-22	レドーム開閉
		2010-02-26	受信機交換
		2012-10-03	アンテナ更新
		2016-11-25	受信機交換
940010	釧路市	2003-11-07	凍上対策
		2010-12-14	レドーム開閉
		2012-09-26	アンテナ更新
		2020-11-03	受信機交換
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
950101	猿払	2012-02-10	アンテナ更新
		2019-02-13	受信機交換

各観測局情報

第3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)

Fig. 3 Results of continuous GNSS measurements along the eastern region and the Pacific coast of Hokkaido (Site location 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



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

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

3-1 東北地方とその周辺の地震活動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Seismic Activity in and around the Tohoku District (November 2022 – April 2023)

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 94 回, M5.0 以上の地震は 10 回発生した. このうち最大は, 2023 年 3 月 28 日に青森県東方沖で発生した M6.2 の地震であった.

2022 年 11 月~2023 年 4 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) 福島県沖の地震(M5.1, 最大震度 4, 第 6 図 (a),(b))

2023 年 1 月 25 日 10 時 00 分に福島県沖の深さ 55km で M5.1 の地震(最大震度 4)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)は北北東-南南西方向に圧力軸 を持つ逆断層型である.この地震の震源付近では,2022 年 3 月 16 日に M7.4 の地震(最大震度 6 強) が発生した後,地震活動が活発になった.今期間の活動状況をみると,当初と比べると低下してい るものの,地震回数の多い状態が続いた.

(2) 宮城県沖の地震(M5.3, 最大震度 4, 第 7 図)

2023 年 3 月 27 日 00 時 04 分に宮城県沖の深さ 60km で M5.3 の地震(最大震度 4)が発生した. この地震は発震機構(CMT 解)が北西-南東方向に圧力軸を持つ型で,太平洋プレート内部で発 生した.

(3) 青森県東方沖の地震(M6.2, 最大震度 4, 第 8 図 (a),(b))

2023 年 3 月 28 日 18 時 18 分に青森県東方沖の深さ 28km で M6.2 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.

(4) 福島県沖の地震(M5.0, 最大震度 4, 第 9 図 (a),(b))

2023 年 4 月 17 日 02 時 25 分に福島県沖の深さ 46km で M4.8 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.

(5) その他の地震活動

発生年月日	日 時分	震央地名	規模 (M)	深さ(km)	最大震度	
2022年11月	17日09時28分	青森県東方沖	5.0	64	3	(第2図)
11 月	30日12時45分	福島県沖	5.1	42	3	(第3図(a),(b))
2023年1月	3日16時08分	岩手県沖	5.1	37	3	(第4図)
1月	20日14時48分	宮城県沖	5.0	46	3	(第5図(a),(b))



第1図(a) 東北地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年1月, M ≧ 4.0, 深さ≦ 700km)
 Fig.1(a) Seismic activity in and around the Tohoku district (November 2022 – January 2023, M ≧ 4.0, depth ≦ 700km).



第1図(b) つづき(2023年2月~4月, M≧4.0, 深さ≦700km) Fig.1(b) Continued (February – April 2023, M≧4.0, depth ≦700km).

11月17日 青森県東方沖の地震

2020年12月21日 43km M6.5

 \bigcirc

м

7.0

6.0

5.0

震央分布図

(1997年10月1日~2022年11月30日、

深さ0~120km、M≧3.0)

2022年11月の地震を赤色〇で表示

図中の発震機構は CMT 解

ŝ

41° N

Δ

(5

青森県

今回の地震

2022年11月17日 64km M5.0

 \bigcirc

В

.

2004年4月23日 66km M4.9

60.66

2022年11月17日09時28分に青森県東方沖の深 さ64kmで M5.0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以上の地震は時々 発生していたが、M5.0以上の地震は今回の地震が 初めてである。

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、1968年5月16日09時48分に 「1968年十勝沖地震」(M7.9、最大震度5)が発 生した。この地震により、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)。





第2図 2022年11月17日 青森県東方沖の地震

Fig.2 The earthquake east off Aomori Prefecture on November 17, 2022.





2022年11月30日12時45分に福島県沖 の深さ42km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 回の地震の震央付近(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」) の発生前はM5.0以上の地震がしばしば 発生していた。「東北地方太平洋沖地 震」の発生以降は地震の発生数が増加 し、M5.0以上の地震が度々発生してい る。

1919年以降の活動をみると、今回の 地震の震央周辺(領域d)では、「東北 地方太平洋沖地震」の発生前からM7.0 以上の地震が時々発生しており、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、宮城県花淵で 113cm(全振幅)の津波を観測した。

領域 b 内のM-T図及び回数積算図 (深さ0~60km)



第3図(a) 2022年11月30日 福島県沖の地震

Fig.3(a) The earthquake off Fukushima Prefecture on November 30, 2022.



※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[溜渕ほか、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3図(b) つづき Fig.3(b) Continued

1月3日 岩手県沖の地震



領域 a 内の断面図 (A - B 投影) R Δ (km) 20 20 2017年9月27日 2011年6月23日 M6.1 M6.9 40 60 60 2023年1月3日 ··· M5.1 b 80 今回の地震 -100 100 2021年10月6日 M5.9 120 120

震央分布図 (1919年1月1日~2023年1月31日、 深さ0~120km、M≧6.0)



2023年1月3日16時08分に岩手県沖の深さ 37km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(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」)の発生前はM5.0以上の地震が 時々発生していた。「東北地方太平洋沖地震」 の発生以降は地震の発生数が増加し、M5.0以 上の地震がしばしば発生している。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)。

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4図 2023年1月3日 岩手県沖の地震 Fig.4 The earthquake off Iwate Prefecture on January 3, 2023.



「東北地方太平洋沖地震」





| 宮城県沖の地震

2023年1月20日14時48分に宮城県沖の深 さ46km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、M5.0以上の地 震の発生数が増加した。2015年5月13日には M6.8の地震(最大震度5強)が発生し、住家 一部破損3棟の被害が生じた(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 棟などの被害が生じる(被害は「日本被害地 震総覧」による)など、M7.0以上の地震が時々 発生している。

領域 b 内のM-T図及び回数積算図





第5図(a) 2023年1月20日 宮城県沖の地震

Fig.5(a) The earthquake off Miyagi Prefecture on January 20, 2023.



1月20日 宮城県沖の地震(相似地震)

※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。



強震波形 相関解析 観測点名:大船渡市猪川町(CA6) 2018/03/23 06:32:20 M5.1 2023/01/20 14:48:27 M5.0





※変位波形は加速度記録を気象庁59型地震計相当に変換したもの

第5図(b) つづき Fig.5(b) Continued



福島県沖の地震

2023年1月25日10時00分に福島県沖の深 さ 55km で M5.1 の地震(最大震度4)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) は北北東-南南西方向に圧力 軸を持つ逆断層型である。この地震の震源付近 (領域b)では、2022年3月16日にM7.4の地 震(最大震度6強)が発生し、地震活動が活発 になった。2023年1月の活動状況をみると、当 2021年2月13日 本平洋沖地震」初と比べると低下しているものの、地震回数の 55km W7.3 」2011年2月11日 タいいや話よびがない、 多い状態が継続している。

> 1997 年 10 月以降の活動をみると、この地震 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」)の発生前は M5.0 以上の地震が時々 発生していたが、「東北地方太平洋沖地震」の発 生以降は地震の発生数が増加し、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、今回の地震活動 の震央周辺(領域 c)では、「東北地方太平洋沖 「東北地方本 地震」の発生以前から M7.0 以上の地震が時々発 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、宮城県花 淵で113cm(全振幅)の津波を観測した。



第6図(a) 2023年1月25日 福島県沖の地震

The earthquake off Fukushima Prefecture on January 25, 2023. Fig.6(a)



1月25日 福島県沖の地震

第6図(b) つづき Fig.6(b) Continued



領域 a 内の断面図 (A - B 投影)



震央分布図 (1919年1月1日~2023年3月31日、

深さ0~120km、M≧6.0) 2011 年3月10日以前に発生した地震を灰色. 2011 年3月11日以降に発生した地震を黒色で表示

0

С

0 8 æ

Q

滋

978年6月12日 M7.4 「1978年宮城県沖地震」

800

-000 0

2011年3月9日 M7.3

2011年3月11日 <u>M9.0</u>

9.0

8.0

7.0

S 00



2023年3月27日00時04分に宮城県沖の深 さ 60km で M5.3 の地震(最大震度4)が発生 した。この地震は発震機構(CMT 解)が北西-南東方向に圧力軸を持つ型で、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」)の発生以前は M5.0 以上の 地震は発生していなかった。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 12 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 棟などの被害が生じる(被害は「日本被害地 震総覧」による)など、M7.0以上の地震が時々 発生している。







0 40°

2003年5月26日 M7.1

38*

2011年4月7日 M7.2 5

今回の地震

の震央位置

The earthquake off Miyagi Prefecture on March 27, 2023. Fig.7

00

ବ୍ଦିଂତ

õ



第8図(a) 2023年3月28日 青森県東方沖の地震

Fig.8(a) The earthquake east off Aomori Prefecture on March 28, 2023.



Fig.8(b) Continued

4月17日 福島県沖の地震

震央分布図

(1997年10月1日~2023年4月30日、 深さ0~120km、M≧3.0) 2011 年 3 月 10 日以前に発生した地震を水色、 2011年3月11日以降に発生した地震を灰色、

2023年4月に発生した地震を赤色で表示



領域 a 内の断面図(A-B投影)



2023年4月17日02時25分に福島県沖の深 さ 46km で M4.8 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」)の発生以前は M5.0 以上の 地震が時々発生していた。「東北地方太平洋沖 地震|の発生以降は地震の発生数が増加して 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「東北地方太平洋沖 地震」の発生前から M7.0 以上の地震が時々発 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、宮城 県花淵で 113cm (全振幅)の津波を観測した。





1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

第9図(a) 2023年4月17日 福島県沖の地震 The earthquake off Fukushima Prefecture on April 17, 2023. Fig.9(a)

0

1938年11月6日

à

の震央位置

- 53 -

8.0

0 7.0 6.0

143°I

1938年11月5日 17時43分 M7.5





強震波形相関解析 観測点名:浪江町幾世橋(8B4)





第9図(b) つづき Fig.9(b) Continued

3-2 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

「GNSS 東北地方太平洋沖地震後の変動ベクトル及び等変動量線図】

第1~3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 の変動を、福江観測点を固定局として示したものである。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1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165cmで ある.

第2~3 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。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牡鹿観測点は、2022年3月16日の福島県沖の地震に伴って約 2cm 隆起し、累計で約77cmの隆起となっている。

[GNSS 連続観測 東北地方太平洋沖地震後]

第4~6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4図の地図に示した太平洋岸の観測点8点について、第5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4~5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3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.

上下成分については,(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.



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1図 2011年東北地方太平洋沖地震後の累積地殻変動(水平)

Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (horizontal). Fig. 1



第2図 2011年東北地方太平洋沖地震後の累積地殻変動(上下)

Fig. 2 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (vertical).



第3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. 3 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (vertical, contour).



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4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. 4 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5図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(1/2)

Fig. 5 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (1/2).

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6図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(2/2)

※グラフの縦軸は2011-03-10の値を0cmとした.

Fig. 6 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (2/2).

3-3 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。

Site name	Lat.	Lon.	Velocity		Period	Data
	$(^{\circ}N)$	$(^{\circ}E)$	(cm/s)	yr) (deg)		
(1) KAMN	38.89	143.36	5.3	291.8	03/12/2019 - 03/06/2023	11
(2) KAMS	38.64	143.26	6.9	298.6	03/12/2019 - 03/06/2023	13
(3) MYGI	38.08	142.92	7.7	283.4	03/10/2019 - 03/06/2023	16
(4) MYGW	38.15	142.43	2.9	140.3	03/09/2019 - 03/06/2023	16
(5) FUKU	37.17	142.08	1.4	195.8	03/09/2019 - 03/05/2023	15
(6) CHOS	35.50	141.67	0.8	303.5	03/14/2019 - 03/08/2023	12
(7) BOSN	34.75	140.50	2.6	356.8	03/05/2019 - 02/17/2023	15
(8) SAGA	34.96	139.26	3.1	345.8	03/15/2019 - $10/12/2022$	15
GEONET					03/08/2019 - 03/08/2023	



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.

- 63 -

Site name	Lat.	Lon.	Movement		Period
	$(^{\circ}N)$	$(^{\circ}E)$	(cm) (deg)		
(1) KAMN	38.89	143.36	50.6	295.8	04/03/2011 - 03/06/2023
(2) KAMS	38.64	143.26	105.4	296.0	04/04/2011 - $03/06/2023$
(3) MYGI	38.08	142.92	104.5	289.0	03/28/2011 - 03/06/2023
(4) MYGW	38.15	142.43	17.6	178.4	03/27/2011 - $03/06/2023$
(5) FUKU	37.17	142.08	90.2	126.3	03/29/2011 - 03/05/2023
(6) CHOS	35.50	141.67	51.6	114.7	04/17/2011 - $03/08/2023$
(7) BOSN	34.75	140.50	9.0	311.1	04/18/2011 - $02/17/2023$
(8) SAGA	34.96	139.26	37.6	346.4	05/07/2011 - $10/12/2022$
GEONET					04/01/2011 - 03/05/2023



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 Tohokuearthquake 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

65

1

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.


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

4-1 関東・中部地方とその周辺の地震活動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Seismic Activity in and around the Kanto and Chubu Districts (November 2022 – April 2023)

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 109 回, M5.0 以上の地震は 8 回発生した. このうち最大は, 2022 年 11 月 14 日に三重県南東沖で発生した M6.4 の地震であった.

2022 年 11 月~ 2023 年 4 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 M4.5,最大震度 4,第2図 (a) ~ (d))

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 発になり、2021 年 7 月頃からさらに活発になっている。2023 年 4 月中も活発な状態が継続している。 2020 年 12 月から 2023 年 4 月までに震度 1 以上を観測した地震は 312 回(震度 6 弱:1 回, 震度 5 強:1 回, 震度 5 弱:1 回, 震度 4:8 回, 震度 3:35 回, 震度 2:65 回, 震度 1:201 回)発生し た.活動の全期間(2023 年 4 月末まで)を通じて最大規模の地震は、2022 年 6 月 19 日 15 時 08 分 に深さ 13km で発生した M5.4 の地震(最大震度 6 弱)である。観測点補正値の適用及び Double-Difference 法¹⁾ による震源分布をみると、各クラスタ内の震源深さが時間経過とともに浅くなって おり、特に領域 b は最近では主に浅いところで活動がみられる。非定常 ETAS 解析による背景地震 活動度 µ (t) は、2021 年の初めから高くなりはじめ、最近も高い状態が続いている。

(2) 茨城県南部の地震(M4.9,最大震度 5 強,第 4 図 (a) ~ (e))

2022年11月9日17時40分に茨城県南部の深さ51kmでM4.9の地震(最大震度5強)が発生した.この地震は,発震機構が北北西-南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.

「城里町小勝」では周辺の観測点よりも大きな震度を観測した.過去データをみると常に大きな 震度が観測されるわけではない.今回を含めて過去の茨城県南部の地震では,震央の直上よりも北 側で震度が大きい傾向がみられ,特に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地震 でその傾向が強い.今回の地震では,「城里町小勝」では水平成分で8Hz付近の高周波が卓越し, その振幅が上下成分よりも数十倍大きく,また,周辺の観測点でも同様に高周波(3Hz~10Hz)で 上下成分よりも水平成分が顕著に大きい特徴がみられるが,震央の南側の観測点ではそのような特 徴はみられない.

(3) 三重県南東沖の地震(M6.4,最大震度 4,第5図 (a) ~ (c))

2022年11月14日17時08分に三重県南東沖の深さ362kmでM6.4の地震(最大震度4)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、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.この地震では、震央から離れた東北地方及び関東地方で強い揺れを 観測しており,この現象は「異常震域」と呼ばれている.

(4) 千葉県北東部の地震(M4.1, 最大震度 4, 第 6 図 (a), (b))

2022年12月19日00時02分に千葉県北東部の深さ27kmでM4.1の地震(最大震度4)が発生した. この地震は,発震機構が北北西-南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.

(5) 父島近海の地震活動(最大 M5.7,最大震度 4,第 11 図 (a),(b))

父島近海では、2023 年 3 月 31 日から地震活動が活発になり、4 月 30 日までに震度 1 以上を観測 した地震が 20 回(震度 4:1回,震度 3:2回,震度 2:2回,震度 1:15回)発生した.このうち 最大規模の地震は 3 月 31 日 14 時 52 分に深さ 68km (CMT 解による)で発生した M5.7 の地震(最 大震度 2)である.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 西北西-東南東方向に圧力軸を持つ型である.

(6) 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	
2022 年					
11月3日	千葉県北西部	4.9	68	3	(第3図)
2023 年					
1月16日	小笠原諸島西方沖	5.9	422	3	(第7図)
1月29日	神奈川県西部	4.9	144	3	(第8図)
3月2日	八丈島近海	5.0		3	(第9図)
3月24日	茨城県北部	4.7	83	4	(第 10 図)
3月2日 3月24日	八丈島近海 茨城県北部	5.0 4.7	83	3 4	(第 9 (第 10

参考文献

Waldhauser, F. and W. L. Ellsworth. (2000), *Bull. Seismo. Soc. AM.*, **90**, 1353-1367.
 A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Faulst, California.



関東・中部地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年1月、M≧4.0) 2022 11 01 00:00 -- 2023 01 31 24:00

第1図(a) 関東・中部地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年1月, M ≥ 4.0, 深さ≤ 700km)
 Fig.1(a) Seismic activity in and around the Kanto and Chubu districts (November 2022 – January 2023, M ≥ 4.0, depth ≤ 700km).



第1図(b) つづき(2023年2月~4月, M≧4.0, 深さ≦700km) Fig.1(b) Continued (February – April 2023, M≧4.0, depth ≦700km).

石川県能登地方の地震活動



地震回数が増加傾向にあり、2020年12月から地 震活動が活発になり、2021年7月頃からさらに 活発になっている。2023 年4月中も活発な状態 が継続している。2023 年4月中の最大規模の地 震は、6日に発生した M3.3の地震(最大震度1) である。なお、活動の全期間を通じて最大規模の 地震は、2022 年 6 月 19 日に発生した M5.4 の地 震(最大震度6弱)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、期間別・震度別地震発生回数のグラフ及び

N=15186

2000

1500

1000

5000

1000

8000

6000

4000

2000

1000

800

600

400

200

2000

1500

1000

500

4000

3000

2000

1000

312



第2図(a) 石川県能登地方の地震活動

Fig.2(a) Seismic activity in Noto region of Ishikawa Prefecture.

計

201

65 35 8

石川県能登地方の地震活動(観測点補正)

臨時観測点を除いた観測点限定(Δ90km程度以内)による再計算震源【②】を用いて 求めた観測点補正値を、震源の再計算へ適用した。

〇計算に用いた震源:2018年1月1日~2023年1月31日、深さ0~25km、M≧1.0

(震源計算にあたり観測点の標高は考慮していない)
○下図の描画条件:2022年7月1日~2023年1月31日、深さ0~25km、M≧1.0、10月7日以降(臨時観測点活用開始)は赤丸

臨時観測点を含む観測点限定による再計算震源【①】



第2図(b) つづき Fig.2(b) Continued.



地震予知連絡会会報第 110 巻 2023 年 9 月発行

- 72 -

石川県能登地方の地震活動(非定常ETAS解析)

非定常ETASモデル(Kumazawa and Ogata, 2013)による背景地震活動度 μ (t), 余震誘発強度 K_0 (t)を推定した。

$$\lambda_{\theta}(t|H_{t}) = \mu(t) + \sum_{\{i:t_{i} < t\}} \frac{K_{0}(t_{i})e^{\alpha(M_{i}-M_{c})}}{(t-t_{i}+c)^{p}}$$

 $\lambda_{\theta}(t|H_t)$:強度関数、 $\mu(t)$:背景地震活動度、 $K_0(t)$:余震誘発強度

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. 37-32

 ○震央分布図中の各領域a~dにおける、2018年1月1日~2023年4月30日、M1.5以上、 深さ25km以浅の震源データを使用した。領域bは浅部のみも使用した。μ、K₀の初期 値及びα、c、pは、2021年4月末までの震央分布図全体の震源を用いて、定常ETAS 解析により求めた。

○下の各グラフ・図は、2020年7月1日~2023年4月30日を表示。

震央分布図 (2018年1月1日~2023年4月30日、 ₃ 深さ0~25km、M≧1.5)





第2図(d) つづき Fig.2(d) Continued.



11月3日 千葉県北西部の地震

2022年11月3日19時04分に千葉県北西部の深さ 68km で M4.9 の地震(最大震度3)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。また、この地震の震源付近では、同日19時 02 分に深さ 68km で M4.0 の地震(最大震度 2)、20 時 16分に深さ71kmでM4.5の地震(最大震度2)が発生

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 c)は、地震活動が活発な領域であり、 2005年7月23日にM6.0の地震(最大震度5強)、2021 年10月7日にM5.9の地震(最大震度5強)が発生す るなど、M5.0以上の地震が時々発生している。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、地震活動が一

1919年以降の活動をみると、今回の地震の震央周辺 (領域 d) では、M6.0 以上の地震が時々発生している。 1956年9月30日に発生したM6.3の地震では、負傷者 4人などの被害を生じた(被害は「日本被害地震総覧」

> =2052 3000

2020

2000

1000

5

2



The earthquake in the north-western part of Chiba Prefecture on November 3, 2022. Fig.3



11月9日 茨城県南部の地震

2022 年 11 月9日 17 時 40 分に茨城県南部の深さ 51km で M4.9 の地震(最大震度5強)が発生した。こ の地震は、発震機構が北北西-南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。また、この地震の震源付近では、 11 月 11 日にも M3.7 の地震(最大震度3)が発生した。 今回の地震により、軽傷1人の被害が生じた(11 月

16 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)は、地震活動が活発な領域であり、

「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、地震活動がよ り活発になっている。この領域では、M5.0程度の地震 が時々発生しており、最近では2020年4月12日に M5.0の地震(最大震度4)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 c)では、M6.0以上の地震が時々発生している。 1923 年 1 月 14 日に発生した M6.0の地震では、負傷者 1人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) 2022年11月9日 茨城県南部の地震 Fig.4(a) The earthquake in the southern part of Ibaraki Prefecture on November 9, 2022.



11月9日 茨城県南部の地震(相似地震)

2022年11月9日の茨城県南部の地震(M4.9、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、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(グループC:今回の地震を含め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[溜渕ほか、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 Kanamor(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

強震波形 相関解析 観測点名:熊谷市桜町(E2A) 2005/12/28 18:46:06 M4.8-

2003/12/28 18:46:06 M4.8 2022/11/09 17:40:12 M4.9





第4図(b) つづき Fig.4(b) Continued.

11月9日 茨城県南部の地震(「城里町小勝」の震度)

今回の地震では「城里町小勝」で周辺の観測点よりも大きな震度を観測した(下記(1))。地震発生の翌日に実施した現地調査では震度観測点の観測環境に異常は認められなかった。また、過去に観測された「城里町小勝」 の震度は、その周辺で観測された震度に比べて特に大きい傾向ではなかった(下記(2))。

(1)今回の地震の震度分布

2022年11月09日17時40分頃茨城県南部の地震(M4.9、深さ51km)

・城里町小勝(震央距離38km):計測震度 5.1
①笠間市石井:計測震度 3.6 (+1.5)
②笠間市笠間:計測震度 3.4 (+1.7)
③城里町阿波山:計測震度 3.4 (+1.7)
④城里町石塚:計測震度 3.5 (+1.6)
⑤常陸大宮市野口:計測震度 3.6 (+1.5)
⑥茂木町茂木:計測震度 3.0 (+2.1)
⑦茂木町北高岡矢天場:計測震度 2.4 (+2.7)
⑧笠間市中央:計測震度 3.3 (+1.8)
⑨水戸市内原町:計測震度 3.2 (+1.9)



(2)「城里町小勝」から15km以内の震度観測点との計測震度の差を調査

<使用したデータ>

・2018年3月7日12時(「城里町小勝」移設以降)~2022年11月8日、M4.0以上、「城里町小勝」から震央距離75km以上の地震 ・計測震度1.5以上の「城里町小勝」から15km以内の周辺9観測点の計測震度0.5以上

(例)2020年6月1日 茨城県北部の地震(M5.2、深さ97km)における周辺15km以内の計測震度

•城里町小勝(震央距離31km):計測震度3.2 ①笠間市石井:計測震度3.5(-0.3) ②笠間市笠間:計測震度3.3(-0.1) ③城里町阿波山:計測震度3.2(0) ④端陸大宮市野口:計測震度3.2(0) ⑤常陸大宮市野口:計測震度3.6(-0.4) ⑥茂木町花高岡矢天場:計測震度1.9(+1.3) ⑧笠間市中央:計測震度3.2(0) ⑨水戸市内原町:計測震度2.9(+0.3)





第4図(c) つづき Fig.4(c) Continued.



11月9日 茨城県南部の地震(周辺地震の震度分布の比較)

第4図(d) つづき Fig.4(d) Continued.

11月9日 茨城県南部の地震(震度観測点の加速度波形、スペクトル)



第4図(e) つづき Fig.4(e) Continued.

- 79 -

11 月 14 日 三重県南東沖の地震

N=38940

B

М

震央分布図

(1997年10月1日~2022年11月30日、

深さ0~700km、M≧3.0)

2022 年 11 月の地震を<mark>赤色</mark>で表示

図中の発震機構は CMT 解

200km

35° N

2003年11月12日 395km

M6.5

2022年11月14日17時08分に三重県南東沖の深さ 362km で M6.4 の地震(最大震度 4)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、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。今回の地震では、震央から離れた東北地 方及び関東地方で強い揺れを観測しており、この現象 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、M5.0以上の地震が時々発生し ており、2003年11月12日にM6.5の地震、2019年7 月28日にM6.6の地震(ともに最大震度4)が発生し た。

1919年以降の活動をみると、今回の地震の震央付近 から小笠原諸島西方沖にかけて、M7.0以上の深い地震



第5図(a) 2022年11月14日 三重県南東沖の地震

Fig.5(a) The earthquake south-east off Mie Prefecture on November 14, 2022.

(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5図(b) つづき Fig.5(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5図(c) つづき Fig.5(c) Continued.

12月19日 千葉県北東部の地震

N = 46138

2002年5月4日 32km M4.8

 \bigcirc

2007年8月16日 31km M5.3

2014年1月2日 26km M5.0

Ó.

2018年6月12日 17km M4.9

141°F

м

7.0

6.0

5.0

4.0

3.0

震央分布図 (1997年10月1日~2022年12月31日、

深さ0~100km、M≧2.0)

2022年12月の地震を赤色で表示

140° 30

50km

今回の地震

2022年12月19日

27km M4.1

 \mathcal{O}

2011年12月3日 22km M5.2

2007年8月18日 20km M5.2

1.39°.30

140°F

36° N

35° 30

35° N

情報発表に用いた震央地名は〔千葉県東方沖〕である。

2022 年 12 月 19 日 00 時 02 分に千葉県北東 部の深さ 27km で M4.1 の地震(最大震度 4) が発生した。この地震は、発震機構が北北西 - 南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)では、M4.0からM5.0 程度の地震が時々発生している。2018年6月 12日には、深さ17kmでM4.9の地震(最大震 度3)が発生し、領域bではまとまった地震 活動がみられた。その地震活動と同期して、 フィリピン海プレートと陸のプレートの境界 においてゆっくりすべりが発生している(第 319回地震調査委員会資料より)。

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。1987年12月17日に発生 した M6.7の地震(最大震度 5)では、死者 2 人、負傷者161人、住家全壊16棟、住家半壊 102棟、住家一部破損72,580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6図(a) 2022年12月19日 千葉県北東部の地震

Fig.6(a) The earthquake in the north-eastern part of Chiba Prefecture on December 19, 2022.

12月19日 千葉県北東部の地震(相似地震)

2022年12月19日の千葉県北東部の地震(M4.1、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、 既往の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C:今回の地震を含め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 Kanamor(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集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

強震波形 相関解析 観測点名:東金市東新宿(523) 2014/01/07 22:11:48 M3.8-







第6図(b) つづき Fig.6(b) Continued.



1月16日 小笠原諸島西方沖の地震

2023年1月16日13時49分に小笠原諸島西 方沖の深さ422kmでM5.9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、 太平洋プレートが沈み込む方向に圧力軸を持 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、M6.0 以上の地 震が時々発生している。また、今回の地震の震 源から約 250km 深いところでは、2015 年 5 月 30 日に M8.1 の地震(最大震度 5 強)が発生し、 軽傷 8 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、M7.0以上の地震が 時々発生している。1984 年3月6日には M7.6 の地震が発生し、死者1人、負傷者1人などの 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



第7図 2023年1月16日 小笠原諸島西方沖の地震 Fig.7 The earthquake west off Ogasawara Islands on January 16, 2023.

1月29日 神奈川県西部の地震



第8図 2023年1月29日 神奈川県西部の地震 Fig.8 The earthquake in the western part of Kanagawa Prefecture on January 29, 2023.



3月2日 八丈島近海の地震

Fig.9 The earthquake near Hachijojima Island on March 2, 2023.

第9図 2023年3月2日 八丈島近海の地震



3月24日 茨城県北部の地震

2023 年 3 月 24 日 16 時 25 分に茨城県北部の 深さ83kmでM4.7の地震(最大震度4)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北西-南東方向に張

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 がまれに発生している。2013年1月28日には M4.8の地震(最大震度5弱)が、2019年6月17 日には M5.1 (最大震度 4) が発生した。

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 M5.0 以上の地震が時々発 生している。1930 年6月1日に発生した M6.5 の地震(最大震度5)では、がけ崩れなどの被 害が生じた(被害は「日本被害地震総覧」によ



1990 2000 2010 2020

6

5

Fig.10 The earthquake in the northern part of Ibaraki Prefecture on March 24, 2023.

第10図 2023年3月24日 茨城県北部の地震

父島近海の地震活動





	気象庁CMT	防災科研 (F-net)	USGS (W-phase)		
ー元化震源 M5.7 深さ80km	W-P T-E		PT		
Mw	s 5.4	5.4	5.35	USGS震源 深さ74km	
深さ	68km	56km	70.5km		
	Global CMT	GEOFON			
	(掲載なし)	(掲載なし)			
Mw					
※さ	km	km			
	防災科研(F-net): https://www.fnet.bosai.go.jp/event/joho.php?LANG=ja USGS(W-phase): https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/ Global CMT: https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html GEOFON MT: https://geofon.gfz-potsdam.de/eginfo/list.php?mode=mt				

2023年3月31日 父島近海の地震(各機関のMT解)

第 11 図 (b) つづき Fig.11(b) Continued.

4-2 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

[茨城県南部の地震(11月9日) M4.9 GNSS]

第1図は、2022年11月9日に発生した茨城県南部の地震の地殻変動に関する資料である。上段 に示す震央周辺の2観測点の基線について、下段に3成分時系列グラフを示している。この地震に 伴う顕著な地殻変動は見られない。

[関東周辺 GNSS 連続観測時系列]

第2~4図は, 房総半島から三浦半島にかけての地域の GNSS 連続観測時系列である. 第2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3~4図は, 房総半島から三浦半島にかけての4観測点について, 岐阜県の白鳥観測点を固定 局として, 2019年1月~2021年1月の期間で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. 左列は2015年1月以降の約8年間の長期, 右列が最近約2 年間の短期の時系列グラフである.

第3図の(1)白鳥-銚子基線と(2)白鳥-千葉大原基線では,2018年6月に房総半島沖で発生したスロースリップイベントに伴う地殻変動が見られる.右列の最近約2年間では特段の変動は見られない.

第4図の(3)白鳥-丸山基線と(4)白鳥-三浦2基線では、特段の変動は見られない。



茨城県南部の地震(11月9日 M4.9)前後の観測データ

第1図 茨城県南部の地震(2022年11月9日, M4.9)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 M4.9 earthquake in the southern Ibaraki Prefecture on November 9, 2022: baseline map (upper) and 3 components time series (lower).



関東周辺 GNSS連続観測時系列(1)

配点図

各観測局情報

点番号	点 名	日付	保守内容
93022	銚子	2020-01-30	受信機交換
950226	千葉大原	2020-01-29	受信機交換
950227	丸山	2018-08-06	受信機交換
		2019-01-28	受信機交換
960759	三浦2	2017-01-24	アンテナ交換
		2020-02-06	受信機交換
		2020-06-08	周辺伐採
		2022-06-29	受信機交換
950282	白鳥	2019-10-09	受信機交換

第2図 関東周辺における GNSS 連続観測結果(観測点配置図・保守状況)

Fig. 2 Time series of continuous GNSS measurements along the Kanto (site location map and history of the site maintenance).

関東周辺 GNSS連続観測時系列(2)

計算期間: 2019-01-01~2021-01-01

1次トレンド除去後グラフ(長期)

1次トレンド除去後グラフ(短期)



第3図 関東周辺における 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:白鳥) Fig. 3 Time series of continuous GNSS measurements along the Kanto with reference to the Shiratori station (detrended time series with seasonal terms removed) (1/2).

関東周辺 GNSS連続観測時系列(3)

計算期間: 2019-01-01~2021-01-01



第4図 関東周辺における 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:白鳥) Fig. 4 Time series of continuous GNSS measurements along the Kanto with reference to the Shiratori station (detrended time series with seasonal terms removed) (2/2).

4-3 神奈川県西部地域の地下水位観測結果(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Temporal Variation in the Groundwater Level in the western part of Kanagawa Prefecture, Japan (November 2022 – April 2023)

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. 2022年11月~2023年 4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,2022年11月~2023年4 月に深さ30km以浅でM4以上の地震は第2表に示した1個である.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3表の3個である.同期間では,11月3日の千葉県北 西部の地震(M4.9)の際に,大井観測点において5cm程度のコサイスミックと見られる水位の上 昇が観測された.

(板寺一洋・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.



- 第1図 神奈川県温泉地学研究所の地下水観測点の分布(●).1:大井,2:小田原,3:南足柄,4:湯本,5:真鶴,
 6:二宮の各観測点.
- Fig.1Distribution 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.

OBSERVATION WELL	ALTITUDE (m)	DEPTH OF WELL (m)	DEPTH OF SCREEN (m)	DEPTH OF WATER LEVEL SENSOR (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1表:地下水観測点の概要¹⁾ Table 1: List of the groundwater observation stations.¹⁾



第2図 2022年11月-2023年1月の観測結果.

Fig.2 Observation results from November 2022 to January 2023.



第3図 2023年2月-2023年4月の観測結果.

Fig.3 Observation results from February 2023 to April 2023.



第4図 2022年5月-2023年4月の観測結果.

Fig.4 Observation results from May 2022 to April 2023.

第2表:第1図の範囲内で深さ30km 以浅かつ M4 以上の地震

Table 2 : List of the earthquake whose depth and magnitude were less than 30 km and more than 4, respectively within the area of Figure 1.

No.	Date and Time	Region Name	M ^{*1}	Depth km	JSI ^{*2}
1	2023/1/11 12:19	Kanagawa-ken-seibu	4.1	13	1-2

*1: Magnitude.

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

第3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 3: List of the earthquakes whose seismic intensities were possibly 2 or greater at some of the observation stations.

No.	Date and Time	Region Name	M ^{*1}	Depth km	JSI ^{*2}
1	2022/11/3 19:04	Chiba-ken Hokuseibu	4.9	68	1-2
2	2022/11/14 17:08	Mie-ken Nanto-oki	6.4	362	1-2
3	2023/3/12 20:21	Kanagawa-ken Seibu	2.9	12	1-2

*1: Magnitude.

*2: JMA seismic intensity in and around the observation stations.
5-1 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

[東海地方の非定常水平地殻変動(短期的 SSE)]

第1図は,2023年3月下旬~4月上旬頃に紀伊半島北部から東海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.

上段は、2023年3月20日~4月10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~2023年4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。紀伊半島北 部から東海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13mmと推定 され、モーメントマグニチュードは6.1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。中段の 2枚の図は、左が基準期間と比較期間の間のオフセットをランプ関数で推定し、有意と判断された 観測点だけを取り出した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。

[GNSS 上下 御前崎]

第2~5図は、掛川~御前崎間における電子基準点の GNSS 連続観測による比高変化である.

第2図は、電子基準点間の比高変化である.日々の座標値から計算した月平均値をプロットして 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.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、GNSS連続観測の結果は灰色でプロットした水準測量の長 期的な沈降傾向と整合している.なお、前回まで(5A)において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の影響が含まれていたが、今回、地震前後に電 子基準点と周辺の水準点で行われていた水準測量の結果を用いて、電子基準点の局所的な沈降量を 推定し、補正を行った.

第3~4図は、御前崎地域の GNSS 連続観測による比高変化時系列である。第3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4図の比高変化グラフは、左列が1999年4月以降の約24年間の長期、右列が最近約2年間の 短期の時系列グラフである.(5)については、2009年8月11日の駿河湾の地震に伴う御前崎A観 測点の局所的な沈降量を水準測量の結果を用いて補正している。掛川A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。

第5図に,各電子基準点の掛川A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。

[GNSS 駿河湾]

第6~7図は, 駿河湾とその周辺の GNSS 連続観測による基線長変化時系列である. 第6図に基 線図と, アンテナ交換等の保守の履歴を示す.

第7図の基線長変化グラフは, 左列が2013年4月以降の約10年間の長期, 右列が最近約2年間の短期の時系列グラフである. 傾向に特段の変化は見られない.

[東海地方の地殻変動]

第8~10図は、三隅観測点を固定局として示した、東海地方の地殻変動である.

第8~9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 10 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。 GNSSデータから推定された

東海地方の深部低周波地震(微動)と同期したスロースリップ(暫定)



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。

観測

計算



- 第1図 東海地方の深部低周波微動と同期したスロースリップ(暫定)
- Fig. 1 Estimated slip distribution on the plate interface beneath the Tokai region (preliminary results).

電子基準点の上下変動 御前崎

御前崎周辺の長期的な沈降傾向に変化は見られない.



第2図 御前崎 電子基準点の上下変動

Fig. 2 Vertical displacements of GEONET stations in the Omaezaki region.





配点図(基線図)

各観測局情報

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	93094	浜岡1	2003-02-10	レドーム設置
		2003-05-12	アンテナ交換、受信機交換			2003-05-16	アンテナ交換、受信機交換
		2008-07-25	受信機交換			2010-02-23	レドーム開閉、受信機交換
		2010-02-24	レドーム開閉、受信機交換			2012-11-22	アンテナ交換
		2010-10-08	周辺伐採			2012-12-21	周辺伐採
		2010-11-12	周辺伐採			2017-11-08	受信機交換
		2012-11-20	アンテナ交換	960625	浜岡2	2001-03-15	受信機交換
		2017-01-25	移転(掛川→掛川A)	.		2003-06-19	アンテナ交換
		2021-11-13	受信機交換	.		2008-01-29	レドーム開閉、受信機交換
		2023-02-26	アンテナ更新			2012-11-28	アンテナ交換、受信機交換
93093	大東1	2003-02-10	レドーム設置			2014-08-11	周辺伐採
		2003-03-04	アンテナ交換、受信機交換			2016-05-20	アンテナ交換
		2006-06-19	周辺伐採	.		2019-11-19	受信機交換
		2010-02-24	レドーム開閉、受信機交換			2022-02-07	周辺伐採
		2010-10-12	周辺伐採			2023-03-03	周辺伐採
		2012-11-20	アンテナ交換	091178	御前崎A	2003-02-11	レドーム設置
		2017-11-09	受信機交換			2003-02-28	アンテナ交換
960622	小笠	2003-05-27	アンテナ交換	.		2010-03-17	移転(御前崎→御前崎A)
		2010-02-23	レドーム開閉、受信機交換			2012-11-28	アンテナ交換、受信機交換
		2012-11-28	アンテナ交換			2019-10-09	受信機交換
		2017-11-08	受信機交換			2020-12-16	受信機交換

第3図 御前崎における GNSS 連続観測結果(観測点配置図・保守状況)

Fig. 3 Time series of continuous GNSS measurements in the Omaezaki region (site location map and history of the site maintenance).

比高変化グラフ(長期) 期間: 1999-04-01~2023-04-22 JST 期間: 2021-04-01~2023-04-22 JST **cm**___(1) 掛川A(161216)→大東1(93093) 比高 基準値:-38.053m (1) 掛川A(161216)→大東1(93093) 比高 基準値:-38.073m сm 0 -2 -4 -2 -6 -8 -3 2003 2007 2011 2015 2019 2023 2021-07-01 2022-01-01 2022-07-01 2023-01-01 (2) 掛川A(161216)→小笠(960622) 比高 基準値:-43.700m (2) 掛川A(161216)→小笠(960622) 比高 基準値:-43.745m cm **cm** 10 2 0 -2 -4 -6 -2 -8 -10 -3 2003 2007 2011 2015 2021-07-01 2022-01-01 2022-07-01 2019 2023 2023-01-01 (3) 掛川A(161216)→浜岡1(93094) 比高 基準値:-34.434m (3) 掛川A(161216)→浜岡1(93094) 比高 基準値:-34.493m **cm** 10 cm 3 6 2 0 -2 -4 -6 -2 -8 -10 -3 2003 2007 2011 2015 2019 2023 2021-07-01 2022-01-01 2022-07-01 2023-01-01 (4) 掛川A(161216)→浜岡2(960625) 比高 基準値:-31.110m (4) 掛川A(161216)→浜岡2(960625) 比高 基準値:-31.175m cm 12 cm 3 10 4 2 0 -2 -4 -6 -8 -2 -10 -12 -3 2003 2007 2011 2015 2019 2023 2021-07-01 2022-01-01 2022-07-01 2023-01-01 (5) 掛川A(161216)→御前崎A(091178) 比高 基準値:-2.342m (5) 掛川A(161216)→御前崎A(091178) 比高 基準値:-2.329m cm 15 cm 12 2009-08-11 M6.5 6 3 0 -3 -6 -9 -2 -12 -3 -15 2021-07-01 2022-01-01 2022-07-01 2003 2007 2011 2015 2019 2023 2023-01-01 ●----[F5:最終解] ●----[R5:速報解]

御前崎 GNSS連続観測時系列(2)

比高変化グラフ(短期)

Fig. 4 Results of continuous GNSS measurements in the Omaezaki region (relative height).

御前崎地域の GNSS 連続観測結果(比高) 第4図

電子基準点による比高変化 月平均値・10日間平均値 F5 解版



月平均値



ブ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 04/01~04/08,10 日間平均値は 03/30~04/08 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. 月平均値の回帰モデルは,2009 年 8 月 11 日に発生した駿河湾の地震前,および,2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地 震後の各期間について作成. 2009年8月11日の駿河湾の地震に伴う電子基準点「御前崎」の局所的な変動について,地震前後の水準測量で得られた「御前崎」周辺の 水準点との比高の差を用いて補正を行った. .

第5図 電子基準点 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)

Fig. 5 Results of vertical GNSS measurements in the Omaezaki region (Time series of 1 month and 10 days running mean).



駿河湾周辺 GNSS連続観測時系列(1)

基線図

各観測局情報

点番号	点 名	日付	保守内容
93077	静岡清水市1	2012-12-10	アンテナ更新・受信機交換
		2015-10-10	アンテナ交換
		2020-12-15	受信機交換
		2022-04-25	受信機交換
		2022-04-28	受信機交換
		2023-01-25	アンテナ更新
051144	戸田B	2012-10-12	アンテナ更新
		2016-11-05	周辺伐採
		2016-11-21	受信機交換
000842	岡部A	2012-11-21	アンテナ更新
		2016-11-22	受信機交換
93085	西伊豆	2012-12-03	アンテナ更新・受信機交換
		2021-11-14	受信機交換
93091	静岡相良1	2012-11-22	アンテナ更新・受信機交換
		2019-11-19	受信機交換
		2023-03-07	周辺伐採
93086	南伊豆2	2012-12-03	アンテナ更新・受信機交換
		2019-11-22	受信機交換

第6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. 6 Results of continuous GNSS measurements around the Suruga Bay (Baseline map and history of the site maintenance).

基線変化グラフ(長期) 基線変化グラフ(短期) 期間: 2013-04-01~2023-04-22 JST 期間: 2021-04-01~2023-04-22 JST cm (1) 静岡清水市1(93077)→戸田B(051144) 斜距離 基準値:25588.551m (1) 静岡清水市1(93077)→戸田B(051144) 斜距離 基準値:25588.532m cm 3 8 6 2 4 2 0 0 -2 -1 -4 -6 -2 -8 -3 2014 2016 2018 2020 2022 2021-07-01 2022-01-01 2022-07-01 2023-01-01 cm (2) 岡部A(000842)→西伊豆(93085) 斜距離 基準値:52877.646m (2) 岡部A(000842)→西伊豆(93085) 斜距離 基準値:52877.600m cm 3 8 2 6 4 2 0 ٠, 0 -2 --1 -4 -6 -2 -8 -3 2021-07-01 2022-01-01 2022-07-01 2023-01-01 2014 2016 2018 2020 2022 cm (3) 静岡相良1(93091)→南伊豆2(93086) 斜距離 基準値:66342.156m (3) 静岡相良1(93091)→南伊豆2(93086) 斜距離 基準値:66342.106m ст З 8 2 6 4 2 0 0 -2 22.45 -1 -4 -6 -2 -8 -3 2014 2016 2018 2020 2022 2021-07-01 2022-01-01 2022-07-01 2023-01-01 cm (4) 戸田B(051144)→南伊豆2(93086) 斜距離 (4) 戸田B(051144)→南伊豆2(93086) 斜距離 基準値:40683.232m 基準値:40683.217m ст З 8 6 2 4 2 0 0 -2 -1 -4 -6 -2 -8 -3 2014 2016 2018 2020 2022 2021-07-01 2022-01-01 2022-07-01 2023-01-01 cm (5) 静岡清水市1(93077)→静岡相良1(93091) 斜距離 (5) 静岡清水市1(93077)→静岡相良1(93091) 斜距離 基準値: 49356.715m ст З 基準値: 49356.715m 8 6 2 4 2 0 0 id sing 1.9 2.0 2.00 -2 -4 -6 -2 -8 -3 2020 2022 2021-07-01 2022-01-01 2022-07-01 2023-01-01 2014 2016 2018 ●----[F5:最終解] ●----[R5:速報解]

駿河湾周辺 GNSS連続観測時系列(2)



Fig. 7 Results of continuous GNSS measurements around the Suruga Bay (baseline length).



・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8回 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. 8 Transient horizontal deformation of recent 1 year and every 3 months in the Tokai region.



東海地方の非定常上下地殻変動【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9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)

Transient vertical deformation of recent 1 year and every 3 months in the Tokai region. Fig. 9

東海地方の非定常地殻変動時系列【固定局:三隅】 速報解含む 2011-01-01~2023-04-22 (1) 田原(950306) ٠ 950306 (Tahara Á (3)9 35 (6)025043 092 -5 -10 50 km 34 137 138 139 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 202 (2) 水窪 A (020847) (3) 本川根 (93079) (4) 静岡清水市2 (950296) 20 020847 (MisakuboA 93079 (Ho 950296 (ShizuokaShimizushi2 15 15 10 -5 -5 -10 -10 -18 EW NS 11 2012 2013 2014 2015 2 1 2012 2013 20 11 2012 2013 2014 20 (5) 鳳来(93099) (6) S 掛川 (02S043) (7) 榛原 (93092) 20 20 93099 (Hourai 02S043 (S-Kakega 93092 (Haib 15 15 10 10 -5 -10 • E) • EW 2012 2013 2014 2015 20 (8) 湖西 (93104) (9) 浅羽 (93095) (10) 浜岡2 (960625) 93104 (Kosai 93095 (Asaba 960625 (Hamaoka2 13 15 10 10 -5 -5 -10 EW NS. 20 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 Time (vr) 2012 2013 2014 2015 2016 2017 20 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2019 2020 202 2023 ・GEONET による日々の座標値(F5 解、R5 解)を使用している。
 ・2008 年 1 月 1 日~2011 年 1 月 1 日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ている。
 ・平成 23 年 (2011 年)東北地方太平洋沖地震による地殻変動の影響は取り除いている。

・平成 28 年(2016 年) 熊本地震による固定局三隅の地殻変動は補正している。



Fig. 10 Time series of transient deformation at selected stations in the Tokai region.

5-2 東海・南関東地域におけるひずみ観測結果(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Observation of Crustal Strain by Borehole Strainmeters in the Tokai and Southern Kanto Districts (November 2022 – April 2023)

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2016年以降の変化を第2図に, 2022年11月から2023年4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⁾.

2022年11月3日から5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,浜松宮口,売木岩倉,新城浅谷で観測された.(第3図(a),第4図(b),(c),(d),(h),(i)の*1)(本巻※参照).

2022 年 12 月 17 日から 21 日にかけて,三重県から奈良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,田原福江,田原高松で観測された.(第 3 図 (a),第 4 図 (j)の*2)(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(2022年11月~2023年4月)」(気象庁)

参考文献

- 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).

ひずみ計の配置図



Fig. 1 Observation points (borehole strainmeters).

- 115 -



第2図(a),(b) 2016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 2016 (daily mean values).



- 第3図(a),(b) 2022年11月~2023年4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.
- 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 November 2022 to April 2023 (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.



- 第3図(c),(d) 2022年11月~2023年4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.
- 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 November 2022 to April 2023 (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.



- 第4図(a) 左:2016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:2022年11~2023年4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.
- Fig. 4 (a) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2016 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes November 2022 to April 2023 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters.



- 第4図(b) 左:2016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:2022年11~2023年4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.
- Fig. 4 (b) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2016 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes November 2022 to April 2023 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters.



- 第4図(c) 左:2016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:2022年11~2023年4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.
- Fig. 4 (c) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2016 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes November 2022 to April 2023 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters.



- 第4図(d) 左:2016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:2022年11~2023年4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.
- Fig. 4 (d) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2016 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes November 2022 to April 2023 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters.



- 第4図(e) 左:2016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:2022年11~2023年4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.
- Fig. 4 (e) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2016 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes November 2022 to April 2023 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters.



- 第4図(f) 左:2016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:2022年11~2023年4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.
- Fig. 4 (f) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2016 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes November 2022 to April 2023 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters.



- 第4図(g) 左:2016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:2022年11~2023年4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.
- Fig. 4 (g) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2016 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes November 2022 to April 2023 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters.



- 第4図(h) 左:2016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:2022年11~2023年4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.
- Fig. 4 (h) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2016 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes November 2022 to April 2023 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters.



第4図(i) 左:2016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:2022年11~2023年4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.





- 第4図(j) 左:2016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:2022年11~2023年4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.
- Fig. 4 (j) (Left) Strain changes observed by multi-component borehole strainmeters since January 2016 (daily mean values). Principal strain, maximum shear strain and dilatation are calculated with strain values obtained from each component.
 (Right) Strain changes November 2022 to April 2023 (hourly values where changes due to barometric pressure, tidal effects, geomagnetic effects and rain effects are corrected) observed by multi-component borehole strainmeters.

5-3 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(2022 年 11 月 ~ 2023 年 4 月)

Short-term slow slip events in the Tokai area, the Kii Peninsula and the Shikoku District, Japan (from November 2022 to April 2023)

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 Prevention

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.

2022年11月3日から11月5日にかけて,東海地域で深部低周波地震が観測された(第1図). 第2図は周辺の産総研・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. 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, 2022年10月25日から11月2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3図は第2図[A]の変化を説明する短期的SSEの断層モデルの推定結果(Mw 5.8)である。今回の活動域付近における最近の短期的SSEは、2022年3月17日から3月20日(Mw 5.9;第3図の灰色矩形1)、2022年10月11日午後から10月23日午前(順にMw 5.8, 5.8, 5.9;同 2-4)である。

2022年11月8日から11月10日にかけて,紀伊半島で深部低周波地震が観測された(第4図). 第5図は周辺の産総研・防災科研の観測点における歪・傾斜・地下水位の観測結果である.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,2022年11月1日から11月7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6図は第5図[A]の変化を説明する短期的SSEの断層モデルの推定結果(Mw 5.8)である。今回の活動域付近における最近の短期的SSEは、2022年2月4日から2月7日午前(Mw 5.6;第6図の灰色矩形1)、2022年5月20日午後から5月30日(順にMw 5.8, 5.9, 5.8;同 2-4)、2022年9月30日午後から10月1日(Mw 5.6;同 5)である。

2022年11月17日から11月26日にかけて,四国地域で深部低周波地震が観測された(第7図). 第8図は周辺の産総研・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,2022年11月10 日から11月16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 9-12 図はそれぞれ第 8 図 [A]-[D] の変化を説明する短期的 SSE の断層モデルの推定結果(順 に Mw 5.6, 5.9, 5.8, 5.6) である。今回の活動域付近における最近の短期的 SSE は、2022 年 7 月 8 日 午後から 7 月 11 日と 7 月 15 日から 7 月 16 日午前(順に Mw 5.5, 5.6; 第 9-12 図の灰色矩形 1, 2), 2022 年 9 月 4 日から 9 月 7 日(順に Mw 5.7, 5.8; 同 3, 4) である。

2022年12月17日から12月21日にかけて,紀伊半島で深部低周波地震が観測された(第13図).

第 14 図は周辺の産総研・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,2022 年 12 月 10 日から 12 月 16 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15,16 図はそれぞれ第14 図 [A],[B] の変化を説明する短期的 SSE の断層モデルの推定結果(順 に Mw 5.5,5.6) である.今回の活動域付近における最近の短期的 SSE は,2022 年 2 月 4 日から 2 月 7 日午前(Mw 5.6;第15,16 図の灰色矩形 1),2022 年 5 月 20 日午後から 5 月 30 日(順に Mw 5.8,5.9,5.8;同 2-4),2022 年 9 月 30 日午後から 10 月 1 日(Mw 5.6;同 5),2022 年 11 月 8 日から 11 月 10 日(Mw 5.8;同 6) である.

2022 年 12 月 30 日午後から 12 月 31 日午前にかけて,紀伊半島で深部低周波地震が観測された(第 17 図). 第 18 図は周辺の産総研・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,2022 年 12 月 24 日から 12 月 30 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 19 図は第 18 図 [A] の変化を説明する短期的 SSE の断層モデルの推定結果(Mw 5.3)である. 今回の活動域付近における最近の短期的 SSE は,2022 年 2 月 4 日から 2 月 7 日午前(Mw 5.6;第 19 図の灰色矩形 1),2022 年 5 月 20 日午後から 5 月 30 日(順に Mw 5.8,5.9,5.8;同 2-4),2022 年 9 月 30 日午後から 10 月 1 日(Mw 5.6;同 5),2022 年 11 月 8 日から 11 月 10 日(Mw 5.8;同 6), 2022 年 12 月 17 日から 12 月 21 日(順に Mw 5.5,5.6;同 7,8)である.

2023年2月15日から2月17日午前にかけて、四国地方で深部低周波地震が観測された(第20図). 第21図は周辺の産総研・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、2023年2月7日から2月14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 22 図は第 21 図 [A] の変化を説明する短期的 SSE の断層モデルの推定結果(Mw 5.7)である. 今回の活動域付近における最近の短期的 SSE は, 2022 年 3 月 19 日午後から 3 月 21 日午前(Mw 5.8; 第 22 図の灰色矩形 1), 2022 年 6 月 4 日午後から 6 月 5 日午前(Mw 5.3; 同 2), 2022 年 9 月 4 日 から 9 月 7 日(順に Mw 5.7, 5.8; 同 3, 4), 2022 年 11 月 17 日から 11 月 26 日(順に Mw 5.6, 5.9, 5.8, 5.6; 同 5-8)である.

2023 年 3 月 7 日午後から 3 月 9 日午前にかけて,紀伊半島で深部低周波地震が観測された(第 23 図).第 24 図は周辺の産総研・防災科研の観測点における歪・傾斜・地下水位の観測結果である. 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, 2023 年 3 月 1 日から 3 月 7 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 25 図は第 24 図 [A] の変化を説明する短期的 SSE の断層モデルの推定結果(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 は、2022 年 2 月 4 日から 2 月 7 日午前(Mw 5.6;第 25 図の灰色矩形 1)、2022 年 5 月 20 日午後から 5 月 30 日(順に Mw 5.8, 5.9, 5.8;同 2-4)、2022 年 11 月 8 日から 11 月 10 日(Mw 5.8;同 5)、2022 年 12 月 17 日から 12 月 21 日(順に Mw 5.5, 5.6; 同 6, 7)、2022 年 12 月 30 日午後から 12 月 31 日午前(Mw 5.3;同 8)である.

2023年3月26日から4月7日にかけて,愛知県から紀伊半島で深部低周波地震が観測された(第

26 図). 第 27 図は周辺の産総研・気象庁・防災科研の観測点における歪・傾斜・地下水位の観測結果である. 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,2023 年 3 月 18 日から 3 月 25 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 28-31 図はそれぞれ第 27 図 [A]-[D] の変化を説明する短期的 SSE の断層モデルの推定結果(順 に Mw 5.5, 5.9, 5.6, 5.3) である。今回の活動域付近における最近の短期的 SSE は、2022 年 5 月 20 日午後から 5 月 30 日(順に Mw 5.8, 5.9, 5.8; 第 28-31 図の灰色矩形 1-3), 2022 年 10 月 11 日午後 から 10 月 23 日午前(順に Mw 5.8, 5.9; 同 4-6), 2022 年 12 月 17 日から 12 月 21 日(順に Mw 5.5, 5.6; 同 7, 8) である。

2023年4月1日午後から4月4日午前にかけて,四国地域で深部低周波地震が観測された(第 32回).第33回は周辺の産総研・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,2023年 3月25日から4月1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34図は第33図[A]の変化を説明する短期的SSEの断層モデルの推定結果(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は、2022年7月26日午後から7月28日(Mw 5.4; 第34図の灰色矩形1)、2022年9月4日から9月7日(順にMw 5.7, 5.8;同2,3)、2022年11月17 日から11月26日(順にMw 5.6, 5.9, 5.8, 5.8; 同 4-7)である.

2023 年 4 月 21 日午後から 4 月 24 日午前にかけて,紀伊半島で深部低周波地震が観測された(第 35 図).第 36 図は周辺の産総研・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,2023 年 4 月 15 日から 4 月 21 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 37 図は第 36 図 [A] の変化を説明する短期的 SSE の断層モデルの推定結果(Mw 5.7)である. 今回の活動域付近における最近の短期的 SSE は, 2022 年 5 月 20 日午後から 5 月 30 日(順に Mw 5.8, 5.9, 5.8;第 37 図の灰色矩形 1-3), 2022 年 12 月 17 日から 12 月 21 日(順に Mw 5.5, 5.6;同 4, 5), 2023 年 3 月 26 日から 4 月 7 日(順に Mw 5.5, 5.9, 5.6, 5.3;同 6-9)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-G [Tamura et al., 1991] によ り計算し,GOTIC2 [Matsumoto et al., 2001] 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 Matsumoto et al. [2010] の手法で理論潮汐歪を用いてキャリブレーションを行っている.

断層面の推定は、板場ほか [2012] の手法を用いて次の 2 段階で行う.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 [弘瀬ほか,2007] 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(Okada [1992]による)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 2σ 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.

(落唯史・矢部優・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

- 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.
- 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.
- 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.
- Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- 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.



第1図 東海地域における低周波地震(気象庁一元化カタログによる)の時空間分布(2022/10/25 ~ 2022/11/09). Fig. 1 Space-time distribution of low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Tokai region from October 25 to November 09, 2022.



第2図 東海地域における歪・傾斜の観測結果と低周波地震の検出数(2022/10/25~2022/11/09).

Fig. 2 Observed strain and tilt data and detected number of low-frequency earthquakes in the Tokai region from October 25 to November 09, 2022.



第2図 つづき Fig.2 Continued



- 第3図 第2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.(図によっては気象庁・静岡県の観測点や(b3)体積歪の結果はない場合がある.)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. 3 Inferred fault models for Fig. 2[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.



第4図 紀伊半島における低周波地震(気象庁一元化カタログによる)の時空間分布 (2022/11/01 ~ 2022/11/14). Fig. 4 Space-time distribution of low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Kii Peninsula from November 01 to 14, 2022.






第5図 つづき Fig.5 Continued



第6図 第5図[A]を説明する断層モデル. 各図の説明は第3図を参照. Fig. 6 Inferred fault models for Fig. 5[A]. See also the caption of Fig. 3.



第7図 四国西部における低周波地震(気象庁一元化カタログによる)の時空間分布(2022/11/10 ~ 2022/11/29). Fig. 7 Space-time distribution of low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Western Shikoku from November 10 to 29, 2022.



第8図 四国西部における歪・傾斜の観測結果と低周波地震の検出数(2022/11/10 ~ 2022/11/29).

Fig. 8 Observed strain and tilt data and detected number of low-frequency earthquakes in the Western Shikoku from November 10 to 29, 2022.



第8図 つづき Fig.8 Continued



第9図 第8図 [A]を説明する断層モデル. 各図の説明は第3図を参照. Fig. 9 Inferred fault models for Fig. 8[A]. See also the caption of Fig. 3.

- 144 -



第10図 第8図 [B] を説明する断層モデル. 各図の説明は第3図を参照. Fig. 10 Inferred fault models for Fig. 8[B]. See also the caption of Fig. 3.

[B] 2022/11/18PM-20

(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11図 第8図[C]を説明する断層モデル. 各図の説明は第3図を参照. Fig. 11 Inferred fault models for Fig. 8[C]. See also the caption of Fig. 3.



[D] 2022/11/24PM-26

第12図 第8図[D]を説明する断層モデル. 各図の説明は第3図を参照. Fig. 12 Inferred fault models for Fig. 8[D]. See also the caption of Fig. 3.



第13図 紀伊半島における低周波地震(気象庁一元化カタログによる)の時空間分布(2022/12/10 ~ 2022/12/24). Fig. 13 Space-time distribution of low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Kii Peninsula from December 10 to 24, 2022.



第14図 紀伊半島における歪・傾斜の観測結果と低周波地震の検出数(2022/12/10~2022/12/24).

Fig. 14 Observed strain and tilt data and detected number of low-frequency earthquakes in the Kii Peninsula from December 10 to 24, 2022.







第15図 第14図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第3図を参照. Fig. 15 Inferred fault models for Fig. 14[A]. See also the caption of Fig. 3.

[B] 2022/12/19-21



(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16図 第14図 [B] を説明する断層モデル. 各図の説明は第3図を参照. Fig. 16 Inferred fault models for Fig. 14[B]. See also the caption of Fig. 3.



第 17 図 紀伊半島における低周波地震(気象庁一元化カタログによる)の時空間分布 (2022/12/24 ~ 2023/01/05).
 Fig. 17 Space-time distribution of low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Kii Peninsula from December 24, 2022 to January 05, 2023.



第 18 図 紀伊半島における歪・傾斜の観測結果と低周波地震の検出数(2022/12/24 ~ 2023/01/05). Fig. 18 Observed strain and tilt data and detected number of low-frequency earthquakes in the Kii Peninsula from December 24, 2022 to January 05, 2023.



[A] 2022/12/30PM-31AM

(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19図 第18図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第3図を参照. Fig. 19 Inferred fault models for Fig. 18[A]. See also the caption of Fig. 3.



第 20 図 四国西部における低周波地震(気象庁一元化カタログによる)の時空間分布(2023/02/07 ~ 2023/02/23). Fig. 20 Space-time distribution of low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Western Shikoku from February 07 to 23, 2023.



第21図 四国西部における歪・傾斜の観測結果と低周波地震の検出数(2023/02/07 ~ 2023/02/23).

Fig. 21 Observed strain and tilt data and detected number of low-frequency earthquakes in the Western Shikoku from February 07 to 23, 2023.



[A] 2023/02/15-17AM

第 22 図 第 21 図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 3 図を参照. Fig. 22 Inferred fault models for Fig. 21[A]. See also the caption of Fig. 3.











[A] 2023/03/07PM-09AM



第25図 第24図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第3図を参照. Fig. 25 Inferred fault models for Fig. 24[A]. See also the caption of Fig. 3.



第26図 東海地域~紀伊半島における低周波地震(気象庁一元化カタログによる)の時空間分布(2023/03/18~ 2023/04/14).

Fig. 26 Space-time distribution of low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Tokai region and the Kii Peninsula from March 18 to April 14, 2023.



第27図 東海地域 ~ 紀伊半島における歪・傾斜・地下水位の観測結果と低周波地震の検出数 (2023/03/18 ~ 2023/04/14).

Fig. 27 Observed strain, tilt and groundwater level data and detected number of low-frequency earthquakes in the Tokai region and the Kii Peninsula from March 18 to April 14, 2023.



第 27 図 つづき Fig. 27 Continued



第 27 図 つづき Fig. 27 Continued

[A] 2023/03/26-28



第 28 図 第 27 図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 3 図を参照. Fig. 28 Inferred fault models for Fig. 27[A]. See also the caption of Fig. 3.



第 29 図 第 27 図 [B] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 3 図を参照. Fig. 29 Inferred fault models for Fig. 27[B]. See also the caption of Fig. 3.

[C] 2023/04/01-04





第 30 図 第 27 図 [C] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 3 図を参照. Fig. 30 Inferred fault models for Fig. 27[C]. See also the caption of Fig. 3.



第 31 図 第 27 図 [D] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 3 図を参照. Fig. 31 Inferred fault models for Fig. 27[D]. See also the caption of Fig. 3.







 Fig. 33
 Observed strain and tilt data and detected number of low-frequency earthquakes in the Western Shikoku from March 25 to April 10, 2023.



[A] 2023/04/01PM-04/04AM

(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 34 図 第 33 図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 3 図を参照. Fig. 34 Inferred fault models for Fig. 33[A]. See also the caption of Fig. 3.



第 35 図 紀伊半島における低周波地震(気象庁一元化カタログによる)の時空間分布(2023/04/15 ~ 2023/04/30). Fig. 35 Space-time distribution of low-frequency earthquakes by JMA unified hypocenter catalog in the Kii Peninsula from April 15 to 30, 2023.




Fig. 36 Observed strain and tilt data and detected number of low-frequency earthquakes in the Kii Peninsula from April 15 to 30, 2023.







[A] 2023/04/21PM-04/24AM

第 37 図 第 36 図 [A] を説明する断層モデル. 各図の説明は第 3 図を参照. Fig. 37 Inferred fault models for Fig. 36[A]. See also the caption of Fig. 3.

5-4 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2022年11月~2023年4月)(67) The Variation of the Groundwater Level and Subsidence in the Tokai, Kanto District and Izu Peninsula, Japan. (from Nov. 2022 to Apr. 2023) (67)

產業技術総合研究所

Geological Survey of Japan, AIST

2022年11月~2023年4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3地域および第2図に示す地域に分けて,6ヶ 月間の観測データを示し.また掛川における沈下等の観測結果についても示す(第3~7図).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.
- 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.

産業技術総合研究所地下水観測井配置図 (南関東地域テレメータ連続観測)



第2図 関東地域の産業技術総合研究所地下水等観測井の配置図

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 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Fig.3 Observed groundwater levels and others in the central Tokai district from









第5図 掛川における沈下等の観測結果(2022年11月~2023年4月)

Observed subsidence data and others at the Kakegawa observation well Fig.5 from Nov. 2022 to Apr. 2023.

(2022/11/01 00:00 - 2023/05/01 00:00 (JST)) 大室山北 雨量 [mm] 60 ٥ 大室山北 水位 (MR-AR) [m] 8 <mark>ใ</mark>@ \ ストレーナGL-130〜146m 冷川南 水位 (BAYTAP) [m] 10 ストレーナGL-130~147m 03 04 05 2023





181

Т

第7図 関東地域の地下水等の観測結果 (2022年11月~2023年4月)

Fig.7 Observed groundwater levels and others in the Kanto district from Nov. 2022 to Apr. 2023.

6-1 岐阜県東部・長野県西部における地殻活動観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Observation of Tectonic Activities in Eastern Gifu and Western Nagano Regions (November, 2022 ~ April, 2023)

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

1. 観測概要

産業技術総合研究所は岐阜県東部の宮川及び長野県西部の王滝において地殻活動総合観測設備を 設置している(第1図). 宮川では深度約300mの孔井を掘削し,深度256.78~267.66mの滞水層 の地下水位の計測を行なっており,王滝では深度約815mの孔井を掘削し,深度645.24~663.35m の滞水層の地下水位の計測を行なっている.

2. 観測結果概要

宮川・王滝の水位(第2図,第3図):

潮汐変化を書く. 宮川では降雨の影響が大きい. 2022 年 11 月 14 日三重県南東沖の地震 Mw6.1 及び 2023 年 1 月 10 日インドネシアの地震 Mw7.6 では地下水位の変化は見られない.

(木口努・今西和俊・松本則夫)



第1図岐阜県東部の宮川及び長野県西部の王滝の観測点位置Fig.1Location map of the observation boreholes at Miyagawa and Outaki.



第3図 宮川と王滝における水位観測結果(2年間)

Fig.3 Results of groundwater levels at Miyagawa and Outaki (for 2 years).

6-2 Double-Difference 法による 2023 年 5 月 5 日能登地方の震源分布 Hypocenter distribution during the event at the Noto Peninsula on May 5 2023 based on double-difference relocation

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2023 年 5 月 5 日 14 時 42 分頃に M_{JMA}6.5 の能登地方の地震が発生した.21 時 58 分頃には最大余 震が発生した.周辺の本震以降 2023 年 5 月 9 日正午における Hi-net ルーチン震源を初期震源とし 三次元地震波速度構造¹⁾を平均化した層構造を用いて波形相関データを用いた Double-Difference 法 (DD 法)²⁾による精密震源再決定を行った.本震の余震も最大余震の余震も共にそれぞれの南東傾 斜の面に沿って分布している一方,本震と最大余震の間では両者を埋めるような地震活動が発生し ていた.

> (松原 誠) MATSUBARA Makoto

謝辞

解析に気象庁,京都大学,東京大学の観測点のデータも使用させて頂きました.

参考文献

- Matsubara, M. et al. (2022), *Earth, Planets and Space*, 74:171 doi:10.1186/s40623-022-01724-0, Seismic velocity structure along the Sea of Japan with large events derived from seismic tomography for whole Japanese Islands including reflection survey data and NIED MOWLAS Hi-net and S-net data
- 2) Waldhauser F. and W. L. Ellsworth (2000), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1353-1368, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault



- 第1図 DD法²⁾により再決定した2023年5月5日石川県能登地方の地震の震源域周辺における震央分布.右図矩形領域内の深さ30km以浅の地震について再決定をした.色は震源時を示し,5/5の14:00(赤)~21:57(緑),21:57(水色)~5/9の12:00(紫)としている.
- Fig. 1 Hypocenter distribution around the eastern tip of the Noto Peninsula determined with double-difference method²⁾ using three-dimensional seismic velocity structure¹⁾ at depths of 0-30 km. Colors denote the origin time.

_5/5



第2図 A-Bに沿った矩形領域内の震源分布. Fig. 2 Cross section along A-B in the box.



-5/6 -5/7 -5/8 5/9

第3図 C-Dに沿った矩形領域内の震源分布.

15

Fig. 3 Cross section along C-D in the box.



第4図 幅2km 毎の断面図.

Fig. 4 Cross section for the direction of C-D with the width of 2 km in the box.

6-3 2023 年 5 月 5 日石川県能登地方の地震による高周波エネルギー輻射量 High-frequency energy release from the Noto district, Ishikawa-prefecture earthquake on May 5, 2023

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2023 年 5 月 5 日 14 時 42 分頃,石川県能登地方の深さ 12km 付近を震源とする M_J6.5 (Hi-net 震源の深さ 11km, Hi-net マグニチュード M_{Hi}6.3)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.TGIH 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、その部分の記録については、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て補間し 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図橙丸.深さ 10km) に固定した.解析に使用した各パラメータは、V_P=6.00km/s、V_S=3.30km/s、散乱係数 g₀=1.5×10⁻²km⁻¹、内部減衰 Q_i⁻¹=1.6×10⁻³、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日以内にM_{Hi}5.0以上の地震は5回発生しており、最大余震は本震の7.3 時間後に発生したM_{Hi}6.0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35%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 NCER は42% である.

第2図b, cには、2007年3月に発生した能登半島地震(M_{Hi}6.9)と、2022年6月に発生した石 川県能登地方の地震(M_{Hi}5.6)についての解析結果も併せて示す。2007年能登半島地震では、本震 後10日間の余震によるNCERは2.3%であり、典型的な本震一余震型の推移を示した。一方、2022 年石川県能登地方の地震では、10日間の余震によるNCERは42%に達し、本震の19時間後に本震 とほぼ同規模(M_{Hi}5.5)の地震を伴うなど、本震の規模の割に余震活動が非常に活発であった。今 回の能登地方の地震も、2022年石川県能登地方の地震と同様に余震活動が非常に活発であり、典型 的な本震一余震型ではなく、本震に匹敵する大きな地震を含む群発型に近い地震活動を示している。

> (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 震源に基づく石川県能登地方の地震の震央(黄星印),および本震後10日間に発生した地震(黒丸)の震央分布.三角および橙丸印は、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.白星印は2007年能登半島地震と2022年石川県能登地方の地震の震央.
- Fig. 1 Location of Hi-net epicenters of the 2023 Noto district, Ishikawa-prefecture earthquake (yellow star) and its aftershocks occurring within 10 days (black circles). Triangles and orange circle represent Hi-net (KiK-net) stations and the assigned energy release point, respectively. White stars represent epicenters of the 2007 Noto peninsula and the 2022 Noto district, Ishikawa-prefecture earthquakes.





- 第2図(a)本震発生後10日間における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=1.95M_{Hi}+2.19と している.(b)本震発生直後からの4-20Hz帯域の積算エネルギー輻射量の推移.赤,黒,灰色の線はそ れぞれ今回の石川県能登地方の地震,2007年能登半島地震,および2022年石川県能登地方の地震に伴い 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}6.0)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=1.95M_{Hi}+2.19 using earthquakes within the range of 1.5<=M_{Hi}<4.5 occurred inside of the red rectangle area in Fig. 1. (b) Cumulative 4 20 Hz energy release by the aftershocks for each of the 2023 Noto district, Ishikawa-prefecture earthquake (red), the 2007 Noto peninsula earthquake (black), and the 2022 Noto district, Ishikawa-prefecture earthquake (grey). Red arrow indicates occurrence of the largest aftershock (M_{Hi}6.0) 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).

6-4 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

[石川県能登地方の地震(5月5日) M6.5 GNSS]

第1~3図は、2023年5月5日に発生した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連続観測結果による水平変動ベクトル図、下段は上下変動ベクトル図である.固定局は白鳥観測点(岐阜県)である.2022年7月下旬に臨時に設置した2点の可搬型GNSS連続観測装置(REGMOS)で特に顕著な地殻変動が観測され、M珠洲笹波観測点で南西方向に9 cm 程度の水平変位、震央の東側のM珠洲狼煙で13 cm程度の隆起など、能登半島北東部で地殻変動が 観測された.

第2~3図は,第1図のベクトル図に示された震央周辺の7観測点の3成分時系列グラフである。 地震に伴い,各成分で変位が見られる.

[石川県能登地方の地震 SAR]

第4~6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. 解析に用いたデータの諸元は、第4図右表に示すとおりである.北行軌道及び南行軌道から高分解 能モードでの観測が実施された.

第4図は、北行軌道と南行軌道のSAR干渉解析結果を用いて、2.5次元解析(Fujiwara et al., 2000)を行い、得られた準上下変動成分(上段)と準東西方向成分(下段)である.準上下成分では、震央のやや西側で20cm程度の隆起が検出された.準東西成分では、隆起のピークよりも西側で、最大10cm程度の西向きの成分が検出された.

第5図は準東西成分の拡大図である.山地で局所的な変動が多数見られる.

第6図は,第4図の2.5次元解析結果の元となった,北行軌道及び南行軌道からの観測データを 用いた SAR 干渉解析結果である.データの諸元は右下の表に示すとおりである.左上が北行軌道, 右上が南行軌道の SAR 干渉解析結果であり,それぞれ震央付近で衛星に近づく地殻変動が検出さ れた.

[能登地方の地震 震源断層モデル]

第7~12図は、電子基準点及びSAR干渉解析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、モーメントマグニチュードと断層面積がスケーリング則(Thingbaijam et al., 2017) に近づくよう拘束した.

第7~9図は、断層の各パラメータをフリーにして推定した結果である.計算の結果、東北東-西南西走向で南南東に傾斜する断層面でやや走向方向のすべりを含む逆断層運動が推定された.推 定された断層面の水平位置は震源分布と概ね整合している.断層面の上端は深さ約0.2km、傾斜角 は約74度と推定され、中段のA-B断面図に示されるように、震源分布よりもかなり浅く、高角となっ た.モーメントマグニチュードは6.25 (剛性率30GPaと仮定)となり、地震波形からの推定結果と 整合している.

第9図は、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、特に走向及び傾斜が深さ と逆相関を示している.

第10~12 図は、震源分布を参考に、断層上端の深さを5kmに固定して推定した結果である.計算の結果、北東-南西走向で南東に傾斜する断層面での逆断層運動が推定された.推定された断層面の水平位置は震源分布と概ね整合している。断層の傾斜角は約39度と推定され、中段のA-B断面図に示されるように、震源分布とも概ね整合している。モーメントマグニチュードは6.26(剛性率30GPaと仮定)となり、地震波形からの推定結果と整合している。

第12図のコーナープロットは、深さを除き、ほとんどの組において同心円状のガウス分布に近い 分布を示しており、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.

[石川県能登地方の地震活動 GNSS]

第13~18 図は,石川県能登地方で2020年12月頃から見られている地殻変動に関する資料である. 2020年12月から能登地方で地震活動が活発になっており,この地震活動とほぼ同期して能登半島 北部で地殻変動が観測されている.

第13回は、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9月1日~2020年9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.固定局は舳倉島観測点である。2020年11月1日~11月7日に対する2023年4月16日~4月 22日の約2年6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1cmを超える移動、珠洲観測点で南南東に1cmを超える移動及び4cm程 度の隆起等、能登半島北部で変動が見られる。

第14回は,第15回の回中に示した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・年周・半年周成分を除去している.2020年12月頃から変動がゆっくりと進行している.なお,珠洲観測点で2022年6月19日のM5.4の地震時に北向きにごくわずかな変位が見られるが,珠洲観測点が局所的に変位した可能性がある.

第15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.

この地殻変動をより詳細に把握するため、震源域付近に2点の可搬型 GNSS 連続観測装置 (REGMOS)を2022年7月下旬に設置し、観測を開始している。第16~18図は、その観測結果を 示す資料である。

第16図下段は、上段に示した2点の REGMOS の3成分時系列である. 2点共に設置後からわず かな隆起が継続している. また、震源域東側のM珠洲狼煙では東方向、震源域中央のM珠洲笹波で は北方向のわずかな変動が見られる.

第17図の基線長変化グラフでは、(2)M珠洲笹波-珠洲の基線でわずかな伸びが継続している.

第18図は2022年9月上旬から2023年4月下旬までの約8ヶ月間の地殻変動を示すベクトル図で, 上段が水平変動,下段が上下変動である.水平変動ではごくわずかではあるが震源域から広がるような変動が,上下変動では震源域付近で2cm程度の隆起が観測されている.



石川県能登地方の地震(5月5日 M6.5)前後の観測データ(暫定) <u>この地震に伴い地殻変動が観測された.</u>

第1図 石川県能登地方の地震(2023年5月5日, M6.5)前後の観測データ:水平(上図)及び上下(下図)変動 Fig. 1 Results of continuous GNSS measurements before and after the M6.5 earthquake in the Noto region of Ishikawa Prefecture on May 5, 2023: horizontal (upper) and vertical (lower) transient displacement.

石川県能登地方の地震(5月5日 M6.5)前後の観測データ(暫定)



成分変化グラフ

第2図 石川県能登地方の地震(2023年5月5日, M6.5): 3 成分時系列グラフ

Fig. 2 Results of continuous GNSS measurements before and after the M6.5 earthquake in the Noto region of Ishikawa Prefecture on May 5, 2023: 3 components time series (1/2).

石川県能登地方の地震(5月5日 M6.5)前後の観測データ(暫定)



成分変化グラフ

第3図 石川県能登地方の地震(2023年5月5日, M6.5): 3成分時系列グラフ

Fig. 3 Results of continuous GNSS measurements before and after the M6.5 earthquake in the Noto region of Ishikawa Prefecture on May 5, 2023: 3 components time series (2/2).

令和5年5月8日

「だいち2号」観測データの干渉解析による 石川県能登地方の地震(2023年5月5日)に伴う地殻変動(2.5次元解析)

珠洲市北部で最大約20cmの隆起、最大約10cmの西向きの変動(暫定値)が見られま す。山地等では局所的な変動も見られます。

準上下方向

表示範囲



本解析で使用したデータの一部は、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す。 対流圏遅延補正には、気象庁数値予報格子点データを使用しています。

第4図 石川県能登地方の非定常的な地殻変動(SAR 干渉解析結果)

Fig. 4 Result of Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry using ALOS-2 data.

令和5年5月8日

「だいち2号」観測データの干渉解析による 石川県能登地方の地震(2023年5月5日)に伴う地殻変動(2.5次元解析)

珠洲市内の山地等では局所的な変動が多数見られます(白矢印)。



本解析で使用したデータの一部は、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す。 対流圏遅延補正には、気象庁数値予報格子点データを使用しています。

第5図 石川県能登地方の非定常的な地殻変動(SAR 干渉解析結果)

Fig. 5 Result of Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry using ALOS-2 data.

参考資料

令和5年5月8日

「だいち2号」観測データの干渉解析による 石川県能登地方の地震(2023年5月5日)に伴う地殻変動

珠洲市北部において、北行軌道の観測では最大約20cm、南行軌道の観測では最大10cm (暫定値)の衛星に近づく変動が見られます。 珠洲市内の山地等では数cm程度の局所的な変動が多数見られます。



本解析で使用したデータの一部は、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す。 対流圏遅延補正には、気象庁数値予報格子点データを使用しています。

第6図 石川県能登地方の非定常的な地殻変動(SAR 干渉解析結果)(参考資料)

Fig. 6 Result of Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry using ALOS-2 data (reference data).

2023年5月5日能登半島の地震活動の震源断層モデル(暫定)

基準期間: 2023/04/28 09:00:00~2023/05/05 08:59:59[R5:速報解]JST 比較期間: 2023/05/06 09:00:00~2023/05/10 08:59:59[R5:速報解]JST 固定局:小松(950255)



図 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。
- (下)傾斜方向(A-B)に射影した断層面(太線)及び震源分布(点)。横軸は傾き下がる方向を正にとっている。

☆印は震央、点は震源分布(気象庁一元化震源)、2023 年 5 月 05 日 14 時 42 分~5 月 5 日 23 時 59 分。

表	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	Ν.4
[°]	[°]	[km]	[km]	[km]	[°]	[°]	[°]	[m]	IVIW
137.238	37.578	0.2	5.6	10.6	74.2	63.9	110.3	1.7	6.25
(0.003)	(0.002)	(0.2)	(0.4)	(0.2)	(2.5)	(1.4)	(1.1)	(0.2)	

· 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(1*σ*)を示す。

・ M_wと断層面積がスケーリング則(Thingbaijam et al., 2017)に近づくように拘束した。

M_wの計算においては、剛性率を30 GPaと仮定

第7図 石川県能登地方の地震(2023年5月5日, M6.5)の震源断層モデル

Fig. 7 Rectangular fault model of the M6.5 earthquake in the Noto region of Ishikawa Prefecture on May 5, 2023.

【参考】鉛直成分



矢印は観測値(黒)及び計算値(赤)の鉛直成分。

第7図 つづき Fig.7 Continued.

【参考】干涉 SAR



第8図 石川県能登地方の地震(2023年5月5日, M6.5)の震源断層モデル Fig. 8 Rectangular fault model of the M6.5 earthquake in the Noto region of Ishikawa Prefecture on May 5, 2023.



第9図 石川県能登地方の地震(2023 年 5 月 5 日, M6.5)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. 9 Corner plot of estimated parameters for the MCMC rectangular fault modeling in Fig.7.

【参考】2023 年 5 月 5 日能登半島の地震活動の震源断層モデル(暫定)

基準期間: 2023/04/28 09:00:00~2023/05/05 08:59:59[R5:速報解]JST 比較期間: 2023/05/06 09:00:00~2023/05/10 08:59:59[R5:速報解]JST 固定局:小松(950255)



図 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。
- (下)傾斜方向(A-B)に射影した断層面(太線)及び震源分布(点)。横軸は傾き下がる方向を正にとっている。

☆印は震央、点は震源分布(気象庁一元化震源)、2023 年 5 月 05 日 14 時 42 分~5 月 5 日 23 時 59 分。

表 推	定された	震源断層モ	ミデルパラ	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	N/I
[°]	[°]	[km]	[km]	[km]	[°]	[°]	[°]	[m]	IVIW
137.242	37.566	5.0	4.2	9.5	51.4	38.7	103.2	2.6	6.26
(0.002)	(0.002)		(0.3)	(0.2)	(1.9)	(0.4)	(1.6)	(0.2)	

・ 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。上端深さは 5km に固定。

・ M_wと断層面積がスケーリング則(Thingbaijam et al., 2017)に近づくように拘束した。

M_wの計算においては、剛性率を30 GPaと仮定

第10図 石川県能登地方の地震(2023年5月5日, M6.5)の震源断層モデル(参考資料)

Fig. 10 Rectangular fault model of the M6.5 earthquake in the Noto region of Ishikawa Prefecture on May 5, 2023 (reference data).

【参考】鉛直成分



矢印は観測値(黒)及び計算値(赤)の鉛直成分。

第 10 図 つづき Fig. 10 Continued.

【参考】干涉 SAR



第11図 石川県能登地方の地震(2023年5月5日, M6.5)の震源断層モデル(参考資料)
Fig. 11 Rectangular fault model of the M6.5 earthquake in the Noto region of Ishikawa Prefecture on May 5, 2023 (reference data).

【参考】コーナープロット



第 12 図 石川県能登地方の地震 (2023 年 5 月 5 日, M6.5) 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. 12 Corner plot of estimated parameters for the MCMC rectangular fault modeling in Fig.10 (reference data).



石川県能登地方の地殻変動(暫定)

第13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)(暫定)

Fig. 13 Horizontal (upper) and vertical (lower) transient displacement in the Noto region of Ishikawa Prefecture (preliminary results).
石川県能登地方の地殻変動(暫定)

成分変化グラフ(一次トレンド・年周成分・半年周成分除去後) 期間: 2019-09-01~2023-04-22 JST 計算期間: 2017-09-01~2020-09-01



第14図 石川県能登地方の非定常的な地殻変動(3成分時系列)(暫定)

Fig. 14 Time series of transient displacement in the Noto region of Ishikawa Prefecture (preliminary results).





※電子基準点「珠洲」の位置が、地震(2022-06-19 M5.4)に伴いごくわずかに変化した可能性がある。

第15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)(暫定)

Fig. 15 Transient displacement in the Noto region of Ishikawa Prefecture: baseline map (upper) and baseline length time series (lower) (preliminary results).





Fig. 16 Transient displacement in the Noto region of Ishikawa Prefecture observed by Removable GNSS Monitoring System (REGMOS): baseline map (upper) and 3 components time series (lower) (preliminary results).



石川県能登地方の地殻変動(暫定) - 可搬型GNSS連続観測装置(REGMOS)による観測結果

第17図 石川県能登地方の非定常的な地殻変動:REGMOSによる観測結果(基線図及び斜距離)(暫定)

Fig. 17 Transient displacement in the Noto region of Ishikawa Prefecture observed by REGMOS: baseline map (upper) and baseline length time series (lower) (preliminary results).



石川県能登地方の地殻変動(暫定) - 可搬型GNSS連続観測装置(REGMOS)設置後の地殻変動 — ベクトル図(水平)



Fig. 18 Horizontal (upper) and vertical (lower) transient displacement in the Noto region of Ishikawa Prefecture after installation of REGMOS (preliminary results).

6-5 能登半島の地殻変動(2023 年 5 月) Crustal deformation in the Noto Peninsula (May 2023)

京都大学防災研究所 金沢大学理工研究域 東北大学大学院理学研究科 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ. College of Science and Engineering, Kanazawa Univ. Graduate School of Science, Tohoku Univ.

能登半島の群発地震に伴う地殻変動について、ソフトバンク株式会社(以下、ソフトバンク)が設置・ 運用している GNSS 観測網(独自基準点)と周辺の国土地理院 GEONET 観測点、及び京都大学防災 研究所と金沢大学理工研究域の臨時 GNSS 観測点のデータを合わせて解析した結果について報告する.

2023 年 5 月 5 日の地震(M6.5)時には,石川県珠洲市北部沿岸の観測点で隆起と西方向への地 殻変動が観測された(第1図b).主な観測点での変動量は,SZHKで南西方向に約 6cm,下方向に 18cm(隆起).SZMT 観測点で西南西方向に約 10cm,上下方向に 18cm(隆起).BR13 観測点で北 西方向に約 3cm,上下約 3cm(隆起)となっている.

約3ヶ月間毎の変位のスナップショット(第2図)を見ると,2022年6月19日のM5.4の地震 以降2023年5月5日のM6.5の地震までは、それ以前に比べて変動速度が低下する傾向にあった(第 2図h-j).2022年9月下旬から2023年1月上旬まで(第2図i)は、変動の中心が地震活動の活発 な海岸線付近に位置しており、M6.5の地震の直前の約4ヶ月以前(第2図j)においては、能登半 島北東部全体が北西方向に移動していたように見えるが、ノイズの影響も否定できないため検討が 必要である。時系列データを見ても、多くの観測点で変動は停滞する傾向にある(第3図,第4図) が、能登半島北岸に位置する観測点では地殻変動が継続していたように見える(第3図b,dなど).

なお、本資料では、京都大学防災研究所において米国ジェット推進研究所(JPL)の精密暦及び 速報暦を用いて GipsyX Ver1.4 の精密単独測位法(PPP)により計算した日座標値を用いた.

> (西村卓也・平松良浩・太田雄策) NISHIMURA Takuya, HIRAMATSU Yoshihiro, and OHTA Yusaku

謝辞

本研究で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは、ソフトバンク株式会社お よび ALES 株式会社より東北大学大学院理学研究科が提供を受けたものおよび、「ソフトバンク独 自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じて、ソフトバンク株式 会社および ALES 株式会社より提供を受けたものを使用しました.国土地理院の電子基準点 RINEX データ、気象庁一元化震源データを使用しました.京都大学及び金沢大学の GNSS 観測点の設置 にあたり、珠洲市教育委員会、珠洲市企画財政課、珠洲市産業振興課、珠洲市総務課、能登町教 育委員会及び奥能登国際芸術祭実行委員会にお世話になりました.観測及び解析には JSPS 科研費 JP22K19949 の助成及び文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第 二次)」の支援を受けました.ここに記して感謝の意を表します.



- 第1図 ソフトバンク、大学、国土地理院の GNSS 観測点統合解析結果.赤丸は気象庁一元化震源(M≥2,深さ≤20km)を表す.(a)解析に用いた GNSS 観測点の ID. BR から始まる観測点がデータ提供を受けたソフトバンクの観測点.SZOT, SZMS, SZMT, SZID 及び SZHK, NTYD は、それぞれ京大防災研と金沢大の観測点.P111と数字4桁は、GEONET 観測点.(b) 2023 年 5 月 5 日の地震(M6.5)に伴う地震時地殻変動ベクトル図(速報暦使用、固定局 1158).赤青の四角は上下変動を表す.
- Fig. 1 Result of the combined analysis of SoftBank Corp., Universities, and GSI GNSS stations in the Noto Peninsula. Red dots represent epicenters of earthquakes (M ≥ 2 and Depth ≤ 20 km) determined by JMA. (a) Station ID of the GNSS stations. Stations with ID are operated by SoftBank. SZOT, SZMS, SZMT, and SZID are operated by Kyoto Univ. SZHK and NTYD are operated by Kanazawa Univ. (b) Coseismic displacement of the M6.5 earthquake on May 5, 2023 using the JPL rapid orbit. The reference station is GEONET 1158. Blue and Red rectangles represent vertical displacement.



- Fig. 2 Detrended crustal movement vectors at GNSS stations in each period. Blue and Red rectangles represent vertical displacement. Red dots represent epicenters of earthquakes (M ≥ 2 and Depth ≤ 20 km) determined by JMA. (a) From December 1-10, 2020 to March 3-12, 2021 (107 days). (b) From March 3-12, 2021 to June 5-14, 2021 (95 days). (c) From June 5-14 to September 8-17, 2021 (96 days). (d) From September 8-17 to December 8-17, 2021 (91 days).



- 第2図 (続き) (e) 2021 年 12 月 8-17 日から 2022 年 3 月 8-17 日まで (90 日間). (f) 2022 年 3 月 8-17 日から 6 月 8-17 日まで (92 日間). (g) 2022 年 6 月 9-18 日から 6 月 21-30 日まで (12 日間). 2022 年 6 月 19 日 M5.4 の地震を含む期間. (h) 2022 年 6 月 21-30 日から 9 月 21-30 日まで (92 日間).
- Fig. 2 (Continued) (e) From December 8-17, 2021 to March 8-17, 2022 (90 days). (f) From March 8-17 to June 8-17, 2022 (92 days). (g) From June 9-18 to June 21-30, 2022 (12 days including an M5.4 earthquake). (h) From June 21-30 to September 21-30, 2022 (92 days).



- 第2図 (続き)(i) 2022 年9月 21-30 日から 2023 年1月 1-10 日まで(102 日間).(j) 2023 年1月 1-10 日から4 月 25-5 月4 日まで(114 日間).
- Fig. 2 (Continued) (i) From September 21-30, 2022 to January 1-10, 2023 (102 days). (j) From January 1-10 to April 25-May 4, 2023 (114 days).



第3図 各観測点の日座標値変化(精密暦使用). 各観測点の位置は第1図a参照. (a)0253. (b)9095. (c)SZOT. (d) SZHK. (e)SZMS. (f)BR1U.

Fig. 3 Daily GNSS coordinate of selected stations calculated using the JPL final orbit. Refer to Fig. 1(a) for station locations. (a)0253. (b)9095. (c)SZOT. (d)SZHK. (e)SZMS. (f)BR1U.



第3図 (続き) (g)BR16. (h)BR30. (i)BR17. (j)BR13. Fig. 3 (Continued) (g)BR16. (h)BR30. (i)BR17. (j)BR13.



第4図 各基線における日座標値変化.速報暦に基づく日座標値を使用. 2023 年 5 月 5 日の地震(M6.5)に伴うステップが各基線に認められる.トレンド補正及びノイズ軽減処理は行なっていない. (a) 1158-SZOT. (b) 1158-SZMT. (c) 1158-SZHK. (d) 1158-BR13. (e) 1158-SZMS. (f) 1158-BR30.

Fig. 4 Daily GNSS coordinate of selected baselines calculated using the JPL rapid orbit. A step associated with the M6.5 earthquake is recognized for each baseline. Pre-event trend correction and noise reduction are not applied. (a)1158–SZOT. (b)1158–SZMT. (c)1158–SZHK. (d)1158–BR13. (e)1158–SZMS. (f)1158–BR30.

7-1 近畿・中国・四国地方とその周辺の地震活動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Seismic Activity in and around the Kinki, Chugoku and Shikoku Districts (November 2022–April 2023)

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7回発生した.これらのうち, 規模が最大の地震は,2022 年 12 月 18 日に日向灘で発生した M5.4 の地震であった.

2022年11月~2023年4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.



近畿・中国・四国地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年1月、N≧4.0)

第1図(a) 近畿・中国・四国地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年1月, M≧4.0, 深さ≦700km) Fig.1(a) Seismic activity in and around the Kinki, Chugoku and Shikoku districts (November 2022 – January 2023, M≧4.0, depth ≦ 700 km)



第1図(b) つづき(2023年2月~4月, M≧4.0, 深さ≦700km) Fig.1(b) Continued (February – April 2023, M≧4.0, depth ≦700km).

7-2 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 電子基準点の上下変動]

第1~2図は,紀伊半島の電子基準点間の比高変化を示したものである. GNSS 連続観測結果は 長期的には潮岬周辺が沈降する傾向を示している.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, GNSS 連続観測の結果は灰色でプロットした水準測量の長期的 な沈降傾向と整合している.

[南海トラフ周辺 GNSS 連続観測時系列]

第3~6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3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4~6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隆起が見られ,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 に伴う南東へのわず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. 2022 年 1 月 22 日の日向灘の地震に伴い,(10) ~ (12) では微小な南東向き の変動が見られる. 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]

第7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.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ている.上図は最近の1年間の水平成分、下図は同期間の上下 成分である.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、九 州において熊本地震の余効変動、四国において四国中部の長期的 SSE、九州南部において日向灘南 部の長期的 SSE による地殻変動が見られる.それら以外には、特段の変動は見られない.

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.



(最新のプロット点:4/1~4/8の平均値)

- ・各プロットの色は配色図の電子基準点の色と対応する。
- ・灰色のプロットは電子基準点の最寄りの水準点の水準測量結果を示している(固定: J4810)。

※1 2023年1月16日に電子基準点「那智勝浦3」のアンテナ交換及びレドーム交換を実施した。

第1図 紀伊半島 電子基準点の上下変動(水準測量と GNSS)(1)

Fig. 1 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 連続観測のブロット点は、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:4/1~4/8の平均値)
- ・各プロットの色は配色図の電子基準点の色と対応する。
- ・灰色のプロットは電子基準点の最寄りの水準点の水準測量結果を示している(固定:9190)。
- ※1 2018年8月3日に電子基準点「白浜」周辺の樹木を伐採した。
- ※2 2019年1月29日に電子基準点「白浜」周辺の樹木を伐採した。
- ※3 2021年1月12日に電子基準点「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年11月に一等水準点「9190」を再設した。

第2図 紀伊半島 電子基準点の上下変動(水準測量と GNSS)(2)

Fig. 2 Vertical displacements of GEONET stations in the Kii Peninsula (leveling and GNSS measurements) (2).



南海トラフ周辺 GNSS連続観測時系列(1)

各観測	局情報

只甭亏	ふしん おうしん おうしん おうしん おうしん おうしん おうしん おうしん おう	日1寸	保守内谷	只 雷 亏	一只
960636	度会	2010-02-09	受信機交換・レドーム開閉	031122	室
		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		
		2022-08-02	受信機交換	031121	室
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	950445	豸
		2023-01-17	アンテナ更新		
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	940085	土佐
		2021-01-09	アンテナ更新・レドーム交換		
		2021-12-01	受信機交換	021059	宿
		2022-07-04	アンテナ交換・受信機交換		
031112	白浜	2010-01-22	受信機交換		
		2012-11-13	アンテナ更新	950437	征
		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	950476	Ť
		2021-01-10	アンテナ更新・レドーム交換		
		2021-02-06	周辺伐採		
				950388	Ξ

点番号	点名	日付	保守内容
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
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	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
		2021-12-11	受信機交換
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
		2021-12-10	受信機交換
		2022-07-14	受信機交換
		2023-02-08	アンテナ更新
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3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. 3 Time series of continuous GNSS measurements along the Nankai Trough (site location map and history of the site maintenance).



- 第4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. 4 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).



- 第5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. 5 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6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. 6 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).



南海トラフ沿いの非定常地殻変動(1年間)【固定局:三隅】

※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。

Fig. 7 Horizontal (upper) and vertical (lower) transient displacement along the Nankai Trough during April 2022 - April 2023.

第7図 GNSS 連続観測から求めた 2022 年4月~2023 年4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)

7-3 南海トラフ周辺の地殻活動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Crustal Activity around the Nankai Trough (November 2022 - April 2023)

気象庁

Japan Meteorological Agency

1. 南海トラフ周辺の地殻活動(第1図~第13図)

2022 年 11 月~2023 年 4 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 以上の地震は以下のとおりであった.

・2022 年 12 月 18 日 03 時 06 分 日向灘(フィリピン海プレートと陸のプレートの境界の地震) M5.4

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.

・2022 年 11 月 1 日から 11 月 12 日まで, 東海(第 4 図 (a), (b)). 周辺の複数のひずみ計で変化あり. ・2022 年 11 月 8 日から 11 月 11 日まで, 紀伊半島中部(第 5 図 (a), (b)). 周辺の複数のひずみ計 で変化あり.

・2022 年 11 月 16 日から 11 月 30 日まで,四国西部(第 6 図 (a),(b)).周辺の複数のひずみ計で変 化あり.

・2022 年 12 月 12 日から 12 月 22 日まで,紀伊半島北部(第 7 図 (a), (b)).周辺の複数のひずみ計で変化あり.

・2022 年 12 月 30 日から 12 月 31 日まで,紀伊半島西部(第 8 図 (a), (b)).周辺の複数のひずみ計で変化あり.

・2023 年 2 月 15 日から 2 月 19 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.

・2023 年 3 月 7 日から 3 月 9 日まで,紀伊半島中部(第 10 図 (a),(b)).周辺の複数のひずみ計で 変化あり.

・2023 年 3 月 26 日から 4 月 9 日まで,紀伊半島北部から東海(第 11 図 (a), (b)).周辺の複数のひずみ計で変化あり.

・2023 年 4 月 1 日から 4 月 7 日まで,四国中部(第 12 図 (a),(b)).周辺の複数のひずみ計及び傾 斜計で変化あり.

・2023 年 4 月 21 日から 4 月 25 日まで,紀伊半島北部(第 13 図 (a),(b)).周辺のひずみ計及び傾斜計で変化あり.

プレート境界とその周辺の地震活動(第14図,第15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 14 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15図は、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16図,第17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16 図は、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17 図 (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(2022), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和4年11月地震・火山月報(防災編), 22.
- 2) 気象庁(2022), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和4年12月地震・火山月報(防災編), 16.
- 3) 気象庁(2023), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和5年1月地震・火山月報(防災編), 19.
- 4) 気象庁(2023), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和5年2月地震・火山月報(防災編), 15.
- 5) 気象庁(2023), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和5年3月地震・火山月報(防災編), 21.
- 6) 気象庁(2023), 南海トラフ周辺の地殻活動, 令和5年4月地震・火山月報(防災編), 17.
- 7) 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.





第1図(a) 南海トラフ周辺の月別震央分布(2022年11月)

Fig.1(a) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (November 2022).



・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(2022年12月)

Fig.1(b) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (December 2022).



第1図(c) つづき(2023年1月)

Fig.1(c) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (January 2023).



第1図(d) つづき(2023年2月)

Fig.1(d) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (February 2023).



第1図(e) つづき(2023年3月)

Fig.1(e) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (March 2023).





Fig.1(f) Monthly epicenter distribution in and around the Nankai Trough (April 2023).



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(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(2022年11月~2023年1月).

Fig.2(a) Seismic activity of Low-Frequency Events from the Tokai region to the Bungo Channel (November 2022 – January 2023).

深部低周波地震(微動)活動(2013年2月1日~2023年1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(2013年2月~2023年1月). Fig.2(b) Continued (February 2013 – January 2023).



В

Feb

Mar

Apr

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(2023年2月~4月).

-240

Fig.2(c) Seismic activity of Low-Frequency Events from the Tokai region to the Bungo Channel (February – April 2023).

深部低周波地震(微動)活動(2013年5月1日~2023年4月30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(2013年5月~2023年4月). Fig.2(d) Continued (May 2013 – April 2023).



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(2022年11月~2023年1月) Fig.3(a) Focal mechanism solutions for major earthquakes in and around the Nankai Trough (November 2022 – January 2023).



南海トラフ沿いとその周辺の初動発震機構解(2)

(下半球投影)

第3図(b) つづき(2022年11月~2023年1月) Fig.3(b) Continued (November 2022 – January 2023).



第3図(c) つづき (2023年2月~4月) Fig.3(c) Continued (February – April 2023).



南海トラフ沿いとその周辺の初動発震機構解(2)

第3図(d) つづき (2023年2月~4月) Fig.3(d) Continued (February – April 2023).
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

11月1日から12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4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.4(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in Tokai region and strain changes, and the estimated slow slip region.



第4図(b) つづき Fig.4(b) Continued.

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

11月8日から11日にかけて、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。



第5図(a) 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.5(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in central part of Kii Peninsula and strain changes, and the estimated slow slip region.



紀伊半島中部で観測した短期的ゆっくりすべり(11月9日~10日)



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

11月16日から30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。



第6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.6(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(11月17日~26日)





四国西部で観測した短期的ゆっくりすべり(11月17日~26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。



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

12月12日から22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。



第7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.7(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(12月17日~21日)

熊野磯崎、田辺本宮、串本津荷、西尾善明及び津安濃は産業技術総合研究所のひずみ計である。

第7図(b) つづき

- 255

Fig.7(b) Continued.



紀伊半島北部で観測した短期的ゆっくりすべり(12月17日~21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7図(b) つづき Fig.7(b) Continued.

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

12月30日から31日にかけて、紀伊半島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。





第8図(a) 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.8(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in western part of Kii Peninsula and strain changes, and the estimated slow slip region.



紀伊半島西部で観測した短期的ゆっくりすべり(12月30日~31日)

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

2月15日から19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。



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.



地震予知連絡会会報第110巻

2023 年 9 月発行

第9図(b) つづき Fig.9(b) Continued.

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

3月7日から9日にかけて、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。



第 10 図 (a) 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.10(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in central part of Kii Peninsula and strain changes, and the estimated slow slip region.



紀伊半島中部で観測した短期的ゆっくりすべり(3月7日~9日)

第10図(b) つづき Fig.10(b) Continued.

紀伊半島北部から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

3月26日から4月2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。 また、4月2日から3日及び4月6日から9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。



第 11 図 (a) 紀伊半島北部から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.11(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in northern part of Kii Peninsula to Tokai region and strain changes, and the estimated slow slip region.

紀伊半島北部から東海で観測した短期的ゆっくりすべり(3月26日~4月7日)

長野県から三重県で観測されたひずみ変化



豊橋多米、西尾善明、津安濃、熊野磯崎、及び津安濃は産業技術総合研究所のひずみ計である。

第11図(b) つづき Fig.11(b) Continued.

1



紀伊半島北部から東海で観測した短期的ゆっくりすべり(3月26日~4月7日)

第11図(b) つづき Fig.11(b) Continued.



紀伊半島北部から東海で観測した短期的ゆっくりすべり(3月26日~4月7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。 地震予知連絡会会報第110巻

2023 年 9 月発行

第11図(b) つづき Fig.11(b) Continued.

四国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1日から7日にかけて、四国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。



第 12 図 (a) 四国中部の深部低周波地震活動とひずみ・傾斜変化、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 central part of Shikoku region and strain/tilt changes, and the estimated slow slip region.



- 268 -

第 12 図 (b) つづき Fig.12(b) 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

4月21日から25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及び傾斜計で 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。



第 13 図 (a) 紀伊半島北部の深部低周波地震活動とひずみ・傾斜変化 Fig.13(a) Activity of deep low-frequency earthquakes in northern part of Kii Peninsula and strain/tilt changes.

- 269 -

三重県で観測されたひずみ・傾斜変化



津安濃、松坂飯高及び熊野磯崎は産業技術総合研究所のひずみ・傾斜計である。

第13図(b) つづき Fig.13(b) Continued.



・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 14 図 (a) プレート境界とその周辺の地震活動 Fig.14(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 (1997年10月1日~2023年4月30日、M≧1.5、2023年2月以降の地震を赤く表示)





※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14図(b) つづき Fig.14(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

震央分布図(1987年9月1日~2023年4月30日、M≥3.2、2023年2月~4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。



震央分布図内の時空間分布図

第15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.15 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

2023年4月30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	地 プ		プ		全		全		全	全
地震活動指数		4	4	4	3		4		4		3		5	4
平均回数		16.4	18.2	26.7	5.7 13.8		13.2		13.2		18.0		19.7	21.6
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 E	3	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(90日		360日	90日
深さ		0~ 30km	0~ 60km	0~ 30km	0~ 60kr	, n	0~ 60k	~ 0 km 60		~ (m	0~ 60km		0~ 100km	0~ 100km
領域		南海ト	南海トラフ沿い		①日向		2紀伊	③和歌				1	5紀伊半	டுராத
		⑧東側	10西(則	維		半島	≦島□□					島	0 de
		全	全	1	全		地	地		地		プ		プ
地震活動指数		7	4		4		1	4		6			6	5
平均回数		12.8	14.4	2	20.8		22.8 4		1.5	.5 3			27.8	28.3
Mしきい値		2.5	2.5	2	2.0		1.5 1		.5	5 1.5			1.5	1.5
クラスタ 除去	距離	10km	10kn	n 10	10km		3km 3		km	n 3kı			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	1	0~ 20km	0 20	~)km	(2	0~ 20km		20~ 100km	20~ 100km

*基準期間は、全領域1997年10月1日~2023年4月30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。





第16図 南海トラフ周辺の地震活動指数の表

Fig.16 Table of seismic activity levels in and around the Nankai Trough.



第 17 図 (a) 南海トラフ周辺の地震活動指数の推移

Fig.17(a) Time series of seismic activity levels in and around the Nankai Trough.



第 17 図 (b) つづき Fig.17(b) Continued.



2023年04月30日



第 17 図 (c) つづき Fig.17(c) Continued.

7-4 南海トラフ浅部の微動活動(2023 年 2 月 –2023 年 4 月) Shallow tectonic tremor activity in the Nankai trough, southwest Japan (February, 2023–April, 2023)

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

西南日本の南海トラフ沈み込み帯に発生する深部低周波微動¹⁾は,沈み込みプレート境界におい て巨大地震発生領域よりも深部側で発生し,しばしば短期的スロースリップイベント²⁾や超低周波 地震³⁾を伴う.浅部側でも類似の現象が発生することがあり,室戸沖から紀伊半島南東沖にかけて の広い領域で,短期的スロースリップや超低周波地震を伴う微動活動が観測されている⁴⁵⁾.本稿で は2023年2月から2023年4月の期間に発生した微動活動について報告する.

防災科学技術研究所の運用する地震・津波観測監視システム DONET1 および DONET2 の広帯域 地震計記録を使用し,エンベロープ相関解析^{1,6)}によって南海トラフ浅部域の微動活動を調べた. 2023年2月から2023年4月にかけての微動の震央分布と検出数,プレート沈み込みの傾斜方向お よび走向方向に投影した時空間分布を第1図に示す.本解析期間において,

- ・2023年2月21-23日頃,室戸沖で小規模な活動(検出数5)
- ·2023 年 3 月 16-18 日頃,三重県南東沖で小規模な活動(検出数 9)
- ・2023年4月14日,室戸沖で小規模な活動(検出数6)

が観測された.3月の三重県南東沖の活動では超低周波地震と同期して発生する微動も見られた.

南海トラフ浅部域における 2015 年 10 月から 2023 年 4 月までの期間全体の微動活動を第 2 図に 示す.前回の活動として,三重県南東沖では 2020 年 12 月から 2021 年 2 月にかけて,室戸沖では 2022 年 1 月から 2022 年 3 月にかけて,それぞれ大規模な活動があったが,本解析期間の微動活動 はいずれも低調であったと言える.

> (太田和晃・松澤孝紀・汐見勝彦) OHTA Kazuaki, MATSUZAWA Takanori, and SHIOMI Katsuhiko

参考文献

- 1) Obara (2002), *Science*, **296**, 1679-1681.
- 2) Obara et al. (2004), Geophys. Res. Lett., 31, L23602.
- 3) Ito et al. (2007), *Science*, **315**, 503-506.
- 4) Araki et al. (2017), Science, 356, 1157-1160.
- 5) Yokota and Ishikawa (2020), Sci. Adv., 6, eaay5786.
- 6) Ide (2010), Nature, 466, 356-359.



- 第1図 検出された微動活動.(a) 2023 年 2 月 1 日から 2023 年 4 月 30 日における微動の震央分布.矩形領域内の 微動を色付きの丸で,領域外の微動を白抜きの丸で示す.色は微動の地震波輻射エネルギーを表す.灰色 の点は本解析期間以前(2015 年 10 月 1 日から 2023 年 1 月 31 日)の微動を表す.DONE1 の観測点を四角 印で,DONET2 の観測点を菱形印で示す.X軸とY軸はそれぞれプレート沈み込みの走向方向,傾斜方向 を表す.点線は海溝軸を表す.(b)微動の検出数の日別のヒストグラムと累積の検出数.(c)プレート沈み 込みの傾斜方向へ投影した震央の時空間分布.シンボルは(a)と対応する.(d)プレート沈み込みの走向方 向に投影した震央の時空間分布.シンボルは(a)と対応する.
- Fig. 1 Detected tremor activity. (a) Tremor epicenters from February 1, 2023, to April 30, 2023. The colored circles show tremor events in the rectangular area, and the open circles show those outside. The color denotes the seismic energy of tremor events. Grey dots show the past tremor activity (October 1, 2015–January 31, 2023). Squares denote DONET1 stations. Diamonds denote DONET2 stations. The X-axis and Y-axis show the along-strike direction and along-dip direction, respectively. The dashed line shows the trench axis. (b) Daily histogram of detected tremor events and the cumulative number of tremor events. (c) Space-time plot of tremor epicenters projected in the along-dip direction. Symbols are as in (a). (d) Space-time plot of tremor epicenters projected in the along-strike direction. Symbols are as in (a).



第2図 全期間の微動活動(2015年10月から2023年4月). プレート沈み込みの走向方向へ投影した震央の時空 間分布.シンボルは図1dと対応する.



7-5 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.
	Data	Period	Velocity	Lon.	Lat.	Site name
			cm/yr) (deg)	(°E)	(°N)	
36°N	20	08/13/2018 - 09/09/2022	.4 311.9	138.13	34.08	(9) TOK1
0011	19	11/28/2018 - 12/04/2022	.2 304.8	137.60	33.88	(10) TOK2
	17	03/02/2019 - 02/18/2023	.0 297.9	137.39	34.18	(11) TOK3
	10	02/20/2020 - 09/09/2022		137.55	33.09	(12) ZENW
	19	02/16/2019 - 02/20/2023	.8 292.5	137.00	33.67	(13) KUM1
	20	11/27/2018 - 12/05/2022	.4 285.8	136.67	33.43	(14) KUM2
	19	03/03/2019 - 01/19/2023	.1 281.1	136.36	33.33	(15) KUM3
	13	02/21/2020 - 02/23/2023		136.64	33.08	(16) KUM4
34°N ·	21	11/21/2018 - 12/15/2022	.7 296.3	135.57	33.16	(17) SIOW
	13	03/18/2020 - 12/15/2022		135.99	32.98	(18) SIO2
	19	11/23/2018 - 12/05/2022	.0 299.5	134.94	33.35	(19) MRT1
	22	02/14/2019 - 01/19/2023	.2 289.6	134.81	32.87	(20) MRT2
	15	08/10/2019 - 01/19/2023		135.35	32.80	(21) MRT3
	18	05/03/2019 - 02/25/2023	.1 298.2	133.67	32.82	(22) TOS1
	19	02/15/2019 - 02/24/2023	.2 317.4	134.03	32.43	(23) TOS2
32°N	16	05/04/2019 - 02/25/2023	.1 297.0	133.22	32.37	(24) ASZ1
	16	11/26/2018 - 12/07/2022	.1 304.8	133.58	31.93	(25) ASZ2
	17	11/25/2018 - 12/07/2022	.1 288.3	132.42	32.38	(26) HYG1
	18	05/04/2019 - 03/03/2023	.4 302.1	132.49	31.97	(27) HYG2
10		03/03/2019 - 03/03/2023				GEONET



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 in recent 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】 ※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.

× 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.

% The horizontal axes are rotated 300° clockwise from the north.

283









第2図 つづき Fig.2 Continued.





.024



(22) TOS1

第2図 つづき Fig.2 Continued. (21) MRT3

(23) TOS2

Velocity [m/y]

Velocity [m/y]





- 286

Т

Fig.2 Continued.

7-6 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.また、2023 年 3 月より領域内の共通ノイズ除去手法を変更し た.

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.



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 –2022

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2023年3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.

7-7 南海トラフ周辺における最近の傾斜変動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Recent Continuous Crustal Tilt Observation around the Nankai Trough (November 2022 – April 2023)

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2022年11月から2023年4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(リニアトレンド補正を施したチャンネルはチャンネル名の右肩に 星印が付いている).

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.

・2022年11月16日~11月26日頃 四国西部(第2図(a),(b))

·2023 年 3 月 26 日~3 月 30 日頃 紀伊半島北東部(第 2 図 (f))

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. et al. (1991), *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516. A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion
- 防災科学技術研究所(2023),西南日本における短期的スロースリップイベント(2022年11月 ~ 2023年4月),予知連会報,本号.
- 防災科学技術研究所(2023),西南日本における深部低周波微動活動(2022年11月~2023年4月),予知連会報,本号.



- 第1図 傾斜観測点(丸印)の配置.シンボルの色で分けた観測点グループ毎に図2で傾斜記録を表示している. 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.



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.



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、観測点名に星印が付記されたデー タ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.



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, 観測点名に星印が付記されたデー タ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(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.

7-8 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 5×10⁻⁶strain 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 5×10⁻⁶strain 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), https://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,

https://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)2020年5月~2023年4月,(下)2022年11月~2023年4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 May 2020 to April 2023. (Lower) Changes in the same values from November 2022 to April 2023. The changes in strain and water level every winter were caused by the pumping of groundwater to melt snow near the station.



- 第3図 敦賀観測点における(上)2020年5月~2023年4月,(下)2022年11月~2023年4月のひずみ・傾斜変 化(時間値).
- Fig. 3. (Upper) Changes in crustal strain and tilt at Tsuruga from May 2020 to April 2023. (Lower) Changes in the same values from November 2022 to April 2023.

7-9 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) The variation of the strain, tilt and groundwater level in the Shikoku District and Kii Peninsula, Japan (from November 2022 to April 2023)

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,2022年11月~2023年4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.

ITA の Gladwin 式 歪計は故障のため,2022/12/20 に観測終了した(第10図). ANK の Gladwin 式 歪計は故障のため,2022/11/25 に観測終了した(第21図). KOC の Gladwin 式 歪計は故障のため,2022/11/30 に観測終了した(第25図). MAT の Gladwin 式 歪計は故障のため,2023/01/06 に観測終 了した(第33図).

(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.

Table 1 List of the observation sites.

3文字コー (変更無し)	ド 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2図 TYS における歪観測結果 (2022年11月~ 2023年4月)

Fig. 2 Observed strains at the TYS observation site from November 2022 to April 2023.



- 第4図 NSZ における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年4月)
- Fig. 4 Observed strains at the NSZ observation site from November 2022 to April 2023.





Fig. 3 Observed tilts and groundwater levels at the TYS observation site from November 2022 to April 2023.



- 第5図 NSZ における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年 11 月~2023 年 4 月)
- Fig. 5 Observed tilts and groundwater levels at the NSZ observation site from November 2022 to April 2023.





Fig. 6 Observed strains at the TYE observation site from November 2022 to April 2023.



- 第8図 ANOにおける歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
- Fig. 8 Observed strains at the ANO observation site from November 2022 to April 2023.





Fig. 7 Observed tilts and groundwater levels at the TYE and the TYH observation site from November 2022 to April 2023.





- 第9図 ANO および HKS における傾斜・地下水位観 測結果 (2022 年 11 月~2023 年 4 月)
- Fig. 9 Observed tilts and groundwater levels at the ANO and the HKS observation site from November 2022 to April 2023.



- 第10図 ITA における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
- Fig. 10 Observed strains at the ITA observation site from November 2022 to April 2023.



第12図 MYM における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)

Fig. 12 Observed strains at the MYM observation site from November 2022 to April 2023.



第11図 ITA における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年11月~2023年4月)

Fig. 11 Observed tilts and groundwater levels at the ITA observation site from November 2022 to April 2023.



第13図 MYM における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年11月~2023年4月)

Fig. 13 Observed tilts and groundwater levels at the MYM observation site from November 2022 to April 2023.





Fig. 14 Observed strains at the ICU observation site from November 2022 to April 2023.



- 第16図 HGM における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
- Fig. 16 Observed strains at the HGM observation site from November 2022 to April 2023.





Fig. 15 Observed tilts and groundwater levels at the ICU observation site from November 2022 to April 2023.





- 第17図 HGM における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年11月~2023年4月)
- Fig. 17 Observed tilt and groundwater levels at the HGM observation site from November 2022 to April 2023.



第18図 KST における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)

Fig. 18 Observed strains at the KST observation site from November 2022 to April 2023.



第 20 図 BND における歪・地下水位観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)

Fig. 20 Observed strains and groundwater level at the BND observation site from November 2022 to April 2023.



第19図 KST における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年11月~2023年4月)

Fig. 19 Observed tilts and groundwater levels at the KST observation site from November 2022 to April 2023.



- 第21図 ANK における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
- Fig. 21 Observed strains at the ANK observation site from November 2022 to April 2023.


第 22 図 ANK における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)

Fig. 22 Observed tilts and groundwater levels at the ANK observation site from November 2022 to April 2023.



上: tiltは1次トレンドを除去 下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分を除去後、tiltは1次トレンドも除去

第 24 図 MUR における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)

Fig. 24 Observed tilts and groundwater levels at the MUR observation site from November 2022 to April 2023.



- 第23図 MUR における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
- Fig. 23 Observed strains at the MUR observation site from November 2022 to April 2023.



- 第25図 KOCにおける歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
- Fig. 25 Observed strains at the KOC observation site from November 2022 to April 2023.



第 26 図 KOC における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年 11 月~2023 年 4 月)

Fig. 26 Observed tilts and groundwater levels at the KOC observation site from November 2022 to April 2023.



- 第 28 図 SSK における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年 11 月~2023 年 4 月)
- Fig. 28. Observed tilts and groundwater levels at the SSK observation site from November 2022 to April 2023.



- 第 27 図 SSK における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
- Fig. 27 Observed strains at the SSK observation site from November 2022 to April 2023.



- 第29図 TSS における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
- Fig. 29. Observed strains at the TSS observation site from November 2022 to April 2023.

- 319 -



第 30 図 TSS における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年 11 月~2023 年 4 月)

Fig. 30. Observed tilts and groundwater levels at the TSS observation site from November 2022 to April 2023.



第32図 UWA における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年11月~2023年4月)

Fig. 32. Observed tilts and groundwater levels at the UWA observation site from November 2022 to April 2023.



第31図 UWA における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)

Fig. 31. Observed strains at the UWA observation site from November 2022 to April 2023.



- 第33図 MAT における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
- Fig. 33. Observed strains at the MAT observation site from November 2022 to April 2023.



第 34 図 MAT における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)

Fig. 34. Observed tilts and groundwater levels at the MAT observation site from November 2022 to April 2023.



- 第 36 図 NHK における傾斜・地下水位観測結果 (2022 年 11 月~2023 年 4 月)
- Fig. 36. Observed tilts and groundwater levels at the NHK observation site from November 2022 to April 2023.



- 第35図 NHK における歪観測結果 (2022 年 11 月~ 2023 年 4 月)
- Fig. 35. Observed strains at the NHK observation site from November 2022 to April 2023.

7-10 東海近畿地域の地下水位・歪観測結果(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Observational Results of Groundwater Levels and Crustal Strains in the Kinki District, Japan (November 2022 – April 2023)

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

2022 年 11 月~2023 年 4 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, なかった.

第2~5図には、2022年11月~2023年4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). 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).

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3図 tkz, hrb, sed の 2022 年 11 月~ 2023 年 4 月の観測結果. Fig. 3. Observation results at tkz, hrb and sed from November 2022 to April 2023.









第5図 ohr, hno, hts の地下水位・地殻歪の 2022 年 11 月~ 2023 年 4 月の観 測結果.

Fig. 5. Observation results at ohr, hno and hts from November 2022 to April 2023.

7-11 下里水路観測所における SLR 観測 Continuous SLR observation at Shimosato Hydrographic Observatory

海上保安庁 Japan Coast Guard

我が国の海図の原点を世界測地系に基づいて維持するため、1982 年から海洋測地本土基準点とし て位置づけられる第五管区海上保安本部下里水路観測所(第1図;北緯 33.578 度,東経 135.937 度, 楕円体高 101.6 m)において、測地衛星「あじさい」、「LAGEOS-I」及び「LAGEOS-II」等に対す る人工衛星レーザー測距(SLR: Satellite Laser Ranging)観測を実施している.

取得したデータは、国際レーザー測距事業(ILRS)に提供するとともに、世界中のSLR 局で取 得されたデータと合わせて解析することにより、地球の重心に対する下里の位置を決定している.

第2図に,測地衛星「LAGEOS-I」及び「LAGEOS-II」の測距データを用いて解析した下里レーザー 不動点の位置変化を,GNSS 観測点である IGS 観測点「SMST」の位置変化とともに示す. SLR デー タの解析には,C5++ ソフトウェア(Otsubo et al., 2016 EPS)を,GNSS 解析には RTKLIB version 2.4.2 (Takasu, 2013)をスタティック PPP モードで使用した.



- 第1図 下里水路観測所の位置
- Fig. 1 Site location of the Shimosato Hydrographic Observatory (SHO)



- 第2図 ITRF 2014の速度を適用した上で求めた下里レーザー不動点の変位(黒丸)及びレンジバイアスの値(1か 月解)並びにGNSS観測点「SMST」の変位(黄丸,1日解).変位量は,解が比較的安定している2005年 1月の局位置解(北緯33.57769313度,東経135.93703761度,楕円体高101.644 m)を基準とし,局地直交 座標系において示している.ITRF 2014における地震に伴う変位は補正していない.エラーバーは1 σの 範囲を示す.青線は、2004年紀伊半島南東沖地震(M 7.4及び M 6.9,2004年9月5日)及び2011年東北 地方太平洋沖地震(M 9.0,2011年3月11日)の発生日を示す.黄破線,赤破線及び紫破線は、それぞれ GNSS アンテナ・レドーム,SLR 観測装置及びSLR キャリブレーションターゲットの更新日のうち主要な ものを示す.
- Fig. 2 Time series of the SHO displacement (black circles), range bias (black squares), and the displacement of GNSS observation site SMST (yellow circles), aligned to the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) 2014. Displacements are shown in local ENU coordinates, relative to the station position in January 2005 (33.57769313°N, 135.93703761°E, 101.644 m). Displacements due to earthquakes in ITRF 2014 are not corrected. Error bars indicate the range of 1σ. Blue lines indicate the dates of the southeastern off Kii-peninsula earthquakes (M 7.4 and M 6.9, 09/05/2004) and the Tohoku-oki earthquake (M 9.0, 03/11/2011). Dashed lines indicate major updates of the GNSS antennae and radome (yellow), SLR observation equipment (red), and the calibration target (purple).

8-1 西南日本における深部低周波微動活動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Activity of deep low-frequency tremor in southwest Japan (November, 2022 – April, 2023)

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。2022 年 11 月から 2023 年 4 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。

- ・2023 年 3 月 25 日~4 月 9 日頃,紀伊半島北部から東海地方.この活動は三重県北部で開始し, 沈み込むプレートの浅い側への活動域の移動がみられた.その後北東方向への活動域の拡大がみ られ、4 月 1 日~9 日頃には愛知県西部において活動がみられた(第2,4 図).この領域での顕 著な微動活動は、2022 年 9~10 月以来となる(第3 図).
- ・2022年11月17日~28日頃,豊後水道から四国西部.この活動は豊後水道で開始した後,東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活動は,豊後水道については2022年8月以来,四国西部については2022年7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,紀伊半島中部では2022年12月16日~21日頃に(第4図),紀伊半島南部では2022年11月8日~11日頃に(第4図),四国東部では2023年3月15日~19日頃に(第5図),四国中部では2022年12月21日~26日頃(第5図)および,2023年2月17日~19日頃(第5図),2023年4月2日~5日頃(第5図)に,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 (2023), 予知連会報, 110,「西南日本における短期的スロースリップイベント (2022 年 11 月~ 2023 年 4 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 earthquakes⁴⁾ in southwest Japan from November 2022 to April 2023. 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 amplitude⁶⁾ and clustering process⁷⁾. 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1月から約20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 20 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 2022 年11 月から 2023 年4 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 November 2022 to April 2023. 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 2022 年 11 月から 2023 年 4 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 November 2022 to April 2023. 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.

8-2 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

[四国中部の非定常水平地殻変動(長期的 SSE)]

第1~3 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. 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. 今回からデータの処理方法等を変更している.固定局を網野(960640)から上対馬(950456)に変 更した.また,気象庁の短期的 SSE のカタログを用いて短期的 SSE による変動を除去,東北地方 太平洋沖地震及び熊本地震の粘性緩和による変動を補正している.それらの補正後,2017 年 1 月 1 日~2018 年 1 月 1 日の期間で推定したトレンドを除去している.また,固定局の上対馬(950456) に起因する誤差の影響を避けるため,非定常的な地殻変動から共通誤差成分を同時推定している. 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1図は、下段に示した8観測点の観測値と計算値を比較した時系列図である.2019年春頃から 南東向きの変動が見られる.計算値は観測値をよく説明できていることが分かる.

第2図左上の図は、2019年1月1日~2023年4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 37cm、モーメ ントマグニチュードは 6.6 と求まった.なお、データの処理方法の変更に伴い、推定結果のノイズ が増加しており、実際にはすべりが生じていないと考えられる周辺領域でもすべりが推定されてい る.解析方法等について、今後更に改良を行う予定である.

第2図右上の図は、観測値と計算値の比較の水平変動ベクトル図である.なお、この図で表示している観測値は入力データから別途作成したもので、すべりの推定では除去している共通誤差成分が含まれており、観測値全体に北西向きのわずかな変動が重畳している.次回以降は、観測値と計算値で表示条件を揃える予定である.

第2図右下の図は, 推定すべり分布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. 2019 年春頃からモーメントの増大が見られる.

第3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.

「室戸岬周辺 電子基準点の上下変動〕

第4~5図は,室戸岬周辺の電子基準点間の比高変化を示したものである.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,GNSS連続観測の結果は,灰色でプロットした水準測量の長 期的な沈降傾向と整合している.

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___





Fig. 1 Observed (black dots) and calculated (red line) time series of transient crustal deformations at the GNSS stations in the central part of Shikoku.

336

四国中部の長期的ゆっくりすべり(暫定)

推定すべり分布 (2019/1/1-2023/4/7)



hw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)及びすべリ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で表示している。 使用データ:6EONETによる日々の座標値(F5解、R5解)

F5解(2019/1/1-2023/03/25)+R5解(2023/03/26-2023/4/7) トレンド期間:2017/1/1-2018/1/1(年周・半年周成分は補正なし) 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(Hirose et al.,2008) すべり方向:プレートの沈み込み方向に拘束 青丸:低周波地震(気象庁一元化震源)(期間:2019/1/1-2023/4/7) 固定局:上対馬



*電子基準点の保守等による変動は補正済み

* 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震及び平成28年(2016年)熊本地震の粘弾性変形は補正している (Suito, 2017,水藤, 2017)。

*気象庁カタログ(2017年以降)の短期的SSEを補正している。

第2図 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)

Fig. 2 Estimated slip distribution on the plate interface beneath the central part of Shikoku (preliminary results).



第3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. 3 Time evolution of the estimated slip by the time dependent inversion method.

室戸岬周辺の長期的な沈降傾向に変化は見られない.



「固定局:安芸(950442)」

- ・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:4/1~4/8の平均値)
- ・各プロットの色は配色図の電子基準点の色と対応する。
- ・灰色のプロットは電子基準点の最寄りの水準点の水準測量結果を示している(固定:5164)。

第4図 室戸岬周辺電子基準点の上下変動(水準測量とGNSS)(1)

Fig. 4 Vertical displacements of GEONET stations around Cape Muroto (leveling and GNSS measurements) (1).



「固定局:徳島海南(950424)」

- ・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:4/1~4/8 の平均値)
- ・各プロットの色は配色図の電子基準点の色と対応する。
- ・灰色のプロットは電子基準点の最寄りの水準点の水準測量結果を示している(固定:5113)。

※1 2012年10月23日に電子基準点「室戸2」のアンテナ及び受信機交換を実施した。
※2 2015年10月1日に電子基準点「室戸2」の受信機交換を実施した。
※3 2018年2月13日に電子基準点「室戸2」のアンテナ及び受信機交換を実施した。
※4 2019年1月16日に電子基準点「徳島海南」の受信機交換を実施した。
※5 2019年7月11日に電子基準点「徳島海南」のアンテナ交換を実施した。
※6 2023年2月13日に電子基準点「徳島海南」のアンテナ交換を実施した。
第5図 室戸岬周辺電子基準点の上下変動(水準測量とGNSS)(2)

Fig. 5 Vertical displacements of GEONET stations around Cape Muroto (leveling and GNSS measurements) (2).

8-3 西南日本における短期的スロースリップイベント(2022年11月~2023年4月) Short-term slow slip events with non-volcanic tremor in southwest Japan (November 2022-April 2023)

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2022 年 11 月から 2023 年 4 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⁾参照されたい.

(1) 2022 年 11 月 四国西部

2022年11月16日~11月26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 6.2に推定され、すべり域は同期間の微動および超低周波地震⁵⁾(VLFE)の震央とよく一致している.2021年12月~2022年1月に同地域でMw 6.0の短期的SSEが発生している⁶⁾.

(2) 2023 年 3 月 紀伊半島北部

2023 年 3 月 26 日~3 月 30 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 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 5.9 に推定 され,すべり域は同期間の微動および VLFE の震央とよく一致している. 2022 年 9 月~ 10 月に同 地域で Mw 6.0 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 (2023), 予知連会報, 本号.
- 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 (2022), 予知連会報, 108, 486-494.
- 7) 防災科学技術研究所 (2023), 予知連会報, 109, 488-495.



- 第1図 2022年11月1日~2023年4月30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 November 1, 2022, to April 30, 2023. Red dots and blue diamonds show epicenters of tremors and VLFEs, respectively.



- 第2図 2022年11月1日から12月1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.11月16日~11月26日の傾斜変化量をSSEによるものと仮定した.四国西部~中部 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. 2. Time series of tiltmeter records, daily tremor counts, atmospheric pressure change, and daily precipitation in the western Shikoku region from November 1, 2022, to December 2, 2022. '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 windows indicated by the broken lines are assumed to be caused by an SSE. The atmospheric pressure and precipitation were observed at the JMA Uwajima meteorological observatory. The displayed tilt records are detided and their atmospheric pressure responses are corrected with BAYTAP-G⁴.



- 第3図 2022 年11月四国西部の短期的 SSE の断層モデル.第2図の破線で示された期間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 VLFE の震央を橙円と茶星印で示した.
- Fig. 3. Observed tilt change vectors for the time windows indicated in 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, that occurred in the time periods.



- 第4図 2023年3月4日~4月3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. 3月26日~3月30日の傾斜変化量をSSEによるものと仮定した.紀伊半島~愛知県での微動活動度・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. 4. Same as Fig. 2 but for the records observed in the northern Kii peninsula from March 4, 2023, to April 3, 2023. The tilt changes from March 26 to March 30 are assumed to be caused by an SSE. The atmospheric pressure and precipitation were observed at the JMA Tsu meteorological observatory.



lat. 34.83	lon. 136.78		
strike 204°	dip 21°		
depth 30 km	slip 1.3 cm		
leng. 45 km	wid. 36 km		
M ₀ 8.5e+17	M _W 5.9		
rake 80°			

第5図 2023年3月紀伊半島北部の短期的 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 March 2023 short-term SSE in the northern Kii peninsula.

8-4 鳥取県における温泉水変化(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Temporal Variation in the hot spring water in the Tottori Prefecture, Japan (November 2022 – April 2023)

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3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°C)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.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).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.

三朝温泉,奥津温泉,鷺の湯温泉の観測は 2021 年 11 月で終了したため,第 108 巻の資料からグ ラフを掲載していない. 吉岡温泉の観測は 2021 年 4 月 28 日に終了したため,第 107 巻の資料から グラフを掲載していない.

3. 結果(第2図)

結果(原則として1時間値)を第2図に示す.気圧や気温の記録は,鳥取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上げた.鳥取温泉の水位は測定範囲の下限値を超えていたため,2022年2月1日に水位計の位置を2m下げたが,2022年5月以降測定範囲の上限まで度々上昇している.

2022 年 11 月~2023 年 4 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, なかった. 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, なかった.

(野口 竜也・香川 敬生・西田 良平・北川 有一)



- 第1図 鳥取気象台(□)と温泉水観測点(●)の分布.1:鳥取温泉,2: 岩井温泉,6:湯谷温泉
- Fig. 1. Location of Tottori Local Meteorological Observatory (□) and hot spring water observation stations (●). 1:Tottori, 2:Iwai, 6:Yudani





Fig. 2. Observation results at Tottori (1), Iwai (2) and Yudani (6) from November 2022 to April 2023.

9-1 九州地方とその周辺の地震活動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Seismic Activity in and around the Kyushu District (November 2022 - April 2023)

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 26 回, M5.0 以上の地震は 3 回発生した. こ のうち最大のものは,2022 年 12 月 13 日に奄美大島近海で発生した M6.0 の地震である. 2022 年 11 月~2023 年 4 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) 奄美大島近海の地震(M6.0, 最大震度 4, 第 2 図 (a), (b))

2022 年 12 月 13 日 23 時 25 分に奄美大島近海の深さ 18km (CMT 解による) で M6.0 の地震(最 大震度 4)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型である.

(2) 日向灘の地震(M5.4, 最大震度4, 第3図)

2022 年 12 月 18 日 03 時 06 分に日向灘の深さ 34km 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)が北西-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.



第1図(a) 九州地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年1月, M ≧ 4.0,

Seismic activity in and around the Kyushu district (November 2022– January

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

深さ≦ 700km)

Fig.1(a)

100km N=13 on 200 ĺ 34° N 8 31° N ∆∆ 0 a 0 $\mathbb{A}_{\mathbb{O}}$ depth (km) 0 ○ 30 ▲ 80 □ 150 300 ⊽ 700 A Start M 7.0 6.0 5.0 4.0 28° N ß 2023年2月17日 24km M5.3 0 'Δ Δ

九州地方とその周辺の地震活動(2023年2月~4月、M≧4.0)

2023 02 01 00:00 -- 2023 04 30 24:00

2023, M \geq 4.0, depth \leq 700 km).

第1図(b) つづき(2023年2月~4月, M≧4.0, 深さ≦700km) Fig.1(b) Continued (February – April 2023, $M \ge 4.0$, depth ≤ 700 km).

図中の吹き出しは、陸域M4.0以上・海域M5.0以上

130° E

133° E

127°E

地震予知連絡会会報第 110 巻 2023 年 9 月発行

349

2015

1890 1900 1910 1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

N=879

2020

N = 76

N=81

1000

800

600

400

200

6

5

3

2

8



12月13日 奄美大島近海の地震

2022年12月13日23時25分に奄美大島近海の深さ18km (CMT解による)でM6.0の地震(最大震度4)が発生し た。この地震の発震機構(CMT解)は、東西方向に圧力

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程度の地震は時々発生している が、M6.0以上の地震は発生していなかった。

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、M6.0以上の地震が時々発生している。 1911年6月15日にはM8.0の地震が発生し、死者7人、負 傷者26人、住家全壊418棟などの被害が生じた(被害は 「日本被害地震総覧」による)。



6.0

5.0

5

第2図(a) 2022年12月13日 奄美大島近海の地震

(震源要素は、1885年~1918年は茅野・宇津(2001)、

26° N

The earthquake in and around Amami-oshima Island on December 13, 2022. Fig.2(a)

12月13日 奄美大島近海の地震(各機関のMT解)				
	気象庁CMT (手動)	防災科研 (F-net)	USGS (W-phase)	
ー元化震源 Mj6.0 深さ37km	N W W P E	· ·	Т	(115, 16, -4)
Mw	s 5.6	5.8	(209, 89, -106)	USGS震源 深さ10km
深さ	18km	8km	14km	M5.7
	Global CMT	GEOFON		
)	
Mw	5.8	5.6		
深さ	12km	19km		

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

防災科研(AQUA)

(なし)

周辺の気象庁CMT解



http://www.hinet.bosai.go.jp/AQUA/aqua_catalogue.php?LANG=ja

第2図(b) つづき Fig.2(b) Continued.





12月18日 日向灘の地震

2022年12月18日03時06分に日向灘の深さ34km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)が北西-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。

1994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以上の地震が今回 の地震を含め2回発生している。1996年12月3日 に発生したM6.7の地震(最大震度5弱)では、宮 崎県の日南市油津、高知県の土佐清水で12cm(平 常潮位からの最大の高さ)の津波を観測した。

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。1931年11月2日に発生したM7.1の地震で は、死者1人、負傷者29人などの被害が生じたほ か、高知県の室戸岬で85cm(全振幅)の津波を観測 した(被害は「日本被害地震総覧」による)。



第3図 2022年12月18日 日向灘の地震

M<u>6.5</u>

32°N 今回の地

2022年12月18日

1996年12月3日

M6.7

1929年5月22日 M6.9

131°F

31° N

M5.4

宮崎県

The earthquake in the Hyuganada Sea on December 18, 2022. Fig.3

132° E

9-2 沖縄地方とその周辺の地震活動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Seismic Activity around the Okinawa District (November 2022 - April 2023)

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 113 回, M5.0 以上の地震は 14 回発生した. このうち最大は,2022 年 12 月 13 日に奄美大島近海で発生した M6.0 の地震であった. 2022 年 11 月~2023 年 4 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) 与那国島近海の地震(M5.0, 最大震度 3, 第 2 図 (a) ~ (c))

2023 年4月10日03時45分に与那国島近海の深さ49kmでM5.0の地震(最大震度3)が発生した.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.

(2) 沖縄本島近海の地震(M6.4,最大震度2,第3図(a),(b))

2023 年 5 月 1 日 12 時 22 分に沖縄本島近海の深さ 13km (CMT 解による) で M6.4 の地震(最大 震度 2)が発生した.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,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.


沖縄地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年1月、M≧4.0) 2022 11 01 00:00 -- 2023 01 31 24:00

第1図(a) 沖縄地方とその周辺の地震活動(2022年11月~2023年1月, M ≧ 4.0, 深さ≦ 700km) Fig.1(a) Seismic activity around the Okinawa district (November 2022 - January 2023, M ≧ 4.0, depth ≦ 700km)



第1図(b) つづき(2023年2月~4月, M≧4.0, 深さ≦700km) Fig.1(b) Continued (February - April 2023, M≧4.0, depth ≦700km)

4月10日 与那国島近海の地震



2023年4月10日03時45分に与那国島近海の深さ 49km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)が北北西-南南東方向に圧 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。

2000年7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、2004年10月15日にM6.6の地震(最 大震度5弱)が発生するなど、M5.0以上の地震が時々 発生している。

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、M7.0以上の地震が4回発生して いる。1947年9月27日に発生したM7.4の地震(最大 震度5)では、石垣島で死者1人、西表島で死者4人 などの被害が生じた(「日本被害地震総覧」による)。 1966年3月13日に発生したM7.3の地震(最大震度5) では、与那国島で死者2人、家屋全壊1棟、半壊3棟 などの被害が生じ、沖縄・九州西海岸で小津波が観測 された(被害及び津波の観測は「日本被害地震総覧」 による)。2001年12月18日に発生したM7.3の地震(最 大震度4)では、与那国島で12 cm、石垣島で4 cmの 津波が観測された。





第2図(a) 2023年4月10日 与那国島近海の地震 Fig.2(a) The earthquake near Yonagunijima Island on April 10, 2023



第2図(b) つづき Fig.2(b) Continued.



4月10日 与那国島近海の地震(相似地震とその付近の地震活動)



沖縄本島近海の地震活動



2023年5月1日12時22分に沖縄本島近海の深さ 13km (CMT解による)でM6.4の地震(最大震度2)が 発生した。この地震は、発震機構(CMT解)が北西-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 震の震央付近(領域a)では、4月27日から地震活動 がやや活発になり、4月27日から5月7日までに震 度1以上を観測する地震が8回(震度2:3回、震度 1:5回)発生した。

2000年7月以降の活動をみると、今回の震央付近 (領域 a)では、2010年2月27日にM7.2の地震が発生 し、軽傷者2人、住家一部損壊4棟などの被害が生じ た(総務省消防庁による)。また、この地震により南 城市安座真で13cm、南大東島漁港で3cmの津波を観 測した。

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以上の地震が時折発生している。



1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

第3図(a) 2023年5月1日 沖縄本島近海の地震 Fig.3(a) The earthquake near Okinawajima Island on May 1, 2023

-		気象庁CMT	防災科研 (F-net)	USGS (W-phase)	
	ー元化震源 M6.4 深さ18km	W T P E	(掲載なし)	Т	
	Mw	5.8		5.9 US	GS震源 \$10.8km
	深さ	13km		13.5km	_ 10.0km
		Global CMT	GEOFON		
	Mw	5.8	5.9		
	深さ	15km	20km		
防災科	·研(AQUA)	防災科研(F-net) : h USGS(W-phase) : ht Global CMT: https:/ GEOFON MT: https:/ 防災科研(AQUA) : h 周辺の	https://www.fnet.bosai tps://earthquake.usgs. /www.globalcmt.org/C //geofon.gfz-potsdam.c https://www.hinet.bos) 	.go.jp/event/joho.php?LANG=ja gov/earthquakes/map/ :MTsearch.html de/eqinfo/list.php?mode=mt ai.go.jp/AQUA/aqua_catalogue. 译の分布図	a php?LANG=ja
		Period	:2013/05/01 00:0020	023/05/01 12:22	
	(掲載なし)	26'			M 8 7 6 5
		25.		29' 130'	- 50 - 30 - 20 - 10 0 Depth(km)

2023年5月1日12時22分 沖縄本島近海の地震Mj6.4(各機関のMT解)

第3図(b) つづき Fig.3(b) Continued.

9-3 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

「沖縄本島近海の地震(5月1日) M6.4 GNSS]

第1図は2023年5月1日に発生した沖縄本島近海の地震の地殻変動に関する資料である.

上段は GNSS 連続観測結果による水平変動ベクトル図で,固定局は沖永良部島の和泊観測点(鹿 児島県)である.下段は,震央近傍の2観測点の3成分時系列グラフである.この地震に伴い,沖 縄本島の複数の観測点でごくわずかな地殻変動が観測された.地震時の変位の他は,特段の変化は 見られない.なお,観測された地殻変動は,地震規模(例えば,気象庁 CMT 解では Mw5.8)から 想定される地殻変動よりも有意に大きいことが特徴として挙げられる.

[九州地域の非定常水平地殻変動(長期的 SSE)]

第2~4図は、2022年春頃初頭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.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.この解析では、東北地方太平洋沖地震以前の2006年1月1日~2009年1月1日の期間で 一次トレンドを推定し除去、東北地方太平洋沖地震、熊本地震の粘弾性変形をモデル計算(Suito,2017; 水藤,2017)により除去している.また、固定局の三隅(950388)に起因する誤差の影響を避けるため、 非定常的な地殻変動から共通誤差成分を同時推定している.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2図は、下段に示した4観測点の観測値と計算値を比較した時系列図である.九州南部で2023 年初頭から南向きの変動が見られる.計算値は観測値をよく説明できていることが分かる.

第3図左の図は,2022年7月1日~2023年4月6日の期間で推定されたすべり分布を示している. 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9cm, モーメントマグニチュー ドは 6.3 と求まった.

第3図中央の図は,観測値と計算値の比較の水平変動ベクトル図である.九州南部の南向きの変 動がよく説明できている.

第3図右の図は, 推定すべり分布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. 2020年春頃からの前回のイベントに伴うモーメント増大が 2021年夏頃に停滞し,その後収束していたが, 2023年初頭から再びモーメントの増大が見られる.

第4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 年春頃からのすべりが 2021 年夏頃に停滞し、その後停止していたが、2023 年初頭から再びすべりが見られる.

[先島諸島の地殻変動 GNSS]

第5~7図は, GNSS 連続観測によって観測された先島諸島の非定常地殻変動についての水平変 動ベクトル図及び3成分時系列グラフである.2023年3月から4月にかけて, 波照間島観測点が南 南東に約1cm変動したのをはじめ,石垣島と西表島でも南南東方向のわずかな変動が観測された. この地域では,今回と同様の非定常地殻変動が半年程度の間隔で発生しており,プレート境界でス ロースリップが発生しているものと考えられている.

[沖縄本島北西沖の地震活動 GNSS]

第8回は、2022年1月下旬から沖縄本島北西沖で発生している地震活動に伴う地殻変動に関する 資料である。1月30日頃から沖縄本島北西沖で活発な地震活動が見られており、この活動域での最 大の地震は3月17日及び6月3日のM5.9の地震であった。この地震活動とほぼ同期して沖縄県久 米島で地殻変動が観測されている。

第8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.2022年1月22日~1月 28日に対する2023年2月2日~2月8日の期間の地殻変動を表す.固定局は与論観測点である. 久米島の具志川観測点で南東方向に約2cmの地殻変動が観測されている.下段は震源近傍の2観測 点の3成分時系列である.地殻変動が2022年1月下旬以降ゆっくり進行していたが,2022年11月 頃から停滞していることが分かる.



沖縄本島近海の地震活動(最大地震 5月1日 M6.4)の観測データ

この地震活動に伴いごくわずかな地殻変動が観測された.

第1図 沖縄本島近海の地震(2023年5月1日, M6.4)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 M6.4 earthquake around the Okinawajima island on May 1, 2023: baseline map (upper) and 3 components time series (lower).



九州地域の観測点の座標時系列(黒丸)と計算値(赤線)

<u>時間依存のインバージョン</u>

第2図 九州地域の観測点の非定常地殻変動時系列:観測値(黒丸)と時間依存インバージョンによる計算値(赤線) Fig. 2 Observed (black dots) and calculated (red line) time series of transient crustal deformations at the GNSS stations in the Kyusyu district.



第3図 日向灘南部において推定される長期的ゆっくりすべり(暫定)

Fig. 3 Estimated slip distribution on the plate interface beneath the southern part of Hyuga-nada (preliminary results).

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

第4図 時間依存インバージョンで推定された日向灘南部のプレート間滑りの時間変化

Fig. 4 Time evolution of the estimated slip beneath the southern part of Hyuga-nada by the time dependent inversion method.



先島諸島の地殻変動(1)



Fig.5 Transient displacement on the Sakishima Islands: horizontal displacement (upper) and time series of transient displacement (lower).

先島諸島の地殻変動(2)

成分変化グラフ



第6図 先島諸島の地殻変動:3成分時系列グラフ

Fig. 6 Transient displacement on the Sakishima Islands: 3 components time series.

先島諸島の地殻変動(3)

成分変化グラフ



第7図 先島諸島の地殻変動:3成分時系列グラフ

Fig. 7 Transient displacement on the Sakishima Islands: 3 components time series.



地殻変動(水平)(一次トレンド除去後)



第8図 久米島周辺の地殻変動:(上図)水平変動,(下図)3成分時系列グラフ

Fig.8 Transient displacement around the Kumejima Island : horizontal displacement (upper) and time series of transient displacement (lower).

10-1 世界の地震活動(2022 年 11 月~ 2023 年 4 月) Seismic Activity in the World (November 2022 – April 2023)

気象庁

Japan Meteorological Agency

今期間,世界でM6.0以上の地震は71回発生し,M7.0以上の地震は12回発生した.このうち最大は, 2023年2月6日(日本時間)にトルコの深さ18kmで発生したMw7.8(気象庁による)の地震であった. 2022年11月~2023年4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(2023 年 5 月 9 日現在).また,時刻は日本時間である.

(1) インドネシア,ジャワの地震(Mw5.6,第4図(a),(b))

2022 年 11 月 21 日 15 時 21 分にインドネシア,ジャワの深さ 10km で Mw5.6 の地震(Mw は Global CMT によるモーメントマグニチュード)が発生した. この地震の発震機構(Global CMT によ る)は、北東-南西方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型である. 今回の地震により、インドネシアで 少なくとも死者 334 人などの被害が生じた.

(2) トルコの地震(Mw7.8, 第9図(a)~(g))

2023年2月6日10時17分にトルコの深さ10kmでMw7.8の地震が発生した.この地震の発震機構は, 南北方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型である.同日19時24分には,トルコの深さ10kmでMw7.6 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.今 回の地震活動により,死者51,089人,負傷者118,700人などの被害が生じた(2023年3月2日時点). 今回の地震活動域は,ユーラシアプレートとアラビアプレートの境界に位置する地域である.

(3) その他の地震活動

発生年月日	震央地名	規模 (Mw)	深さ (km)	
2022 年				
11月9日	フィジー諸島南方	7.0	660	(第2図)
11月11日	トンガ諸島	7.3	25	(第3図(a)~(d))
11月22日	ブーゲンビル-ソロモン諸島	7.0	14	(第5図(a)~(d))
2023 年				
1月8日	バヌアツ諸島	7.0	29	(第6図(a)~(d))
1月10日	インドネシア,タニンバル諸島	7.6	105	(第7図(a),(b))
1月18日	モルッカ海北部	7.0	29	(第8図(a),(b))
3月16日	ケルマデック諸島	6.9	10	(第10図(a),(b))
3月16日	パプアニューギニア,ニューギニア	7.1	70	(第11図(a)~(d))
4月14日	インドネシア,ジャワ	7.1	594	(第12図(a)~(d))
4月24日	ケルマデック諸島	7.1	43	(第13図(a)~(d))
4月25日	インドネシア、スマトラ南部	7.0	34	(第 14 図 (a) ~ (d))



第1図(a) 世界の地震活動(2022年11月~2023年1月, M ≧ 6.0, 深さ≦ 700km) Fig.1(a) Seismic activity in the World (November 2022 –January 2023, M ≧ 6.0, depth ≦ 700 km).

世界の地震活動(2023年2月~4月、M≧6.0) 震源は米国地質調査所(US65、2023年5月22日現在)、吹き出しのMw(モーメントマグニチュード)は気象庁による。



気象庁が遠地地震に関する情報を発表した地震及び顕著な災害があった地震に吹き出しを付けた。

第1図(b) つづき(2023年2月~4月, M≧6.0, 深さ≦700km)

Fig.1(b) Continued (February – April 2023, $M \ge 6.0$, depth ≤ 700 km).

11月9日 フィジー諸島南方の地震

2022 年 11 月 9 日 18 時 51 分(日本時間、以下同じ)にフィジー諸島南方の深さ 660km で Mw7.0(Mw は Global CMT によるモーメントマグニチュード)の地震が発生した。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。この地震の発震機構(Global CMT による 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。

気象庁は、この地震に対して同日 19 時 20 分に遠地地震に関する情報(津波の心配なし)を発表した。 今回の地震の震源付近(領域 b)では、今回の地震の発生前後で活発な地震活動があり、同日 18 時 38 分には Mw6.8、同日 19 時 14 分には Mw6.6、14 日 14 時 04 分には Mw6.0 の地震が発生するなど、M6.0 以上の地震が4回発生した。

1970年以降の活動をみると、今回の地震の震源付近(領域b)では、今回の地震活動が発生するまで に M6.0以上の地震は6回発生している。2002年8月19日には Mw7.6の地震が発生した。



※震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2022年12月7日現在)。ただし、発震機構及びMwは、2022年11月12日の地震は気象庁(速報値)、その他の地震はGlobal CMTによる。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2図 2022年11月9日フィジー諸島南方の地震(Mw7.0)

Fig.2 The Earthquake south of Fiji Islands (Mw7.0) in November 9 2022.

11月11日 トンガ諸島の地震

2022 年 11 月 11 日 19 時 48 分(日本時間、以下同じ)にトンガ諸島の深さ 25km で Mw7.3(Mw は気象 庁によるモーメントマグニチュード)の地震が発生した。今回の地震の震央付近(領域 a)では、太平 洋プレートがインド・オーストラリアプレートの下に沈み込んでいる。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地震 であると考えられる。

気象庁は、この地震に対して、同日 20 時 37 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、米国領サモアのパゴパゴで 0.12m などの津波を観測した。

2000 年以降の活動をみると、今回の震央付近(領域 a) では、M6.0 以上の地震が度々発生している。 2009 年 9 月 30 日には Mw7.9 の地震が発生し、死者 192 人以上などの被害を生じた。また、日本を含む 太平洋広域で津波を観測し、トンガ諸島のタファヒでは最大 22.35m(遡上高)を観測した。 1970 年以降の活動をみると、今回の震央周辺では、M7.0 以上の地震が時々生している。





[※]震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2022年12月7日現在)。ただし、発震機構とMwは、今回及び2009年9月30日の地 震は気象庁、その他の地震はGlobal OMTによる。プレート境界の位置と進行方向はBird(2003)より引用。2009年9月30日の地 震の被害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」、津波の観測値は米国海洋大気庁(NOAA)による。 *参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/20016C000252.

第3図(a) 2022年11月11日トンガ諸島の地震(Mw7.3)

Fig.3(a) The Earthquake in the Tonga Islands (Mw7.3) in November 11, 2022.

11月11日 トンガ諸島の地震の発震機構解析

2022 年 11 月 11 日 19 時 48 分(日本時間)にトンガ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。





セントロイドは、南緯 19.2°、西経 172.2°、深さ 61km となった。

W-phase の解析では、震央距離10°~90°までの45 観測点の上下成分、
 33 観測点の水平成分を用い、100~500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	$1.09 \times 10^{20} \text{Nm}$	$28.2^{\circ} / 40.8^{\circ} / 91.8^{\circ}$	205. 8° / 49. 3° / 88. 4°

(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) つづき Fig.3(b) Continued.

2022 年 11 月 11 日 トンガ諸島の地震 遠地実体波による震源過程解析(暫定)-

2022 年 11 月 11 日 19 時 48 分(日本時間)にトンガ諸島で発生した地震について、米国大学間地震 学研究連合(IRIS)のデータ管理センター(DMC)より広帯域地震波形記録を取得し、遠地実体波を 用いた震源過程解析(注1)を行った。

破壊開始点は、米国地質調査所 (USGS) による震源の位置 (19°19.1′S、172°06.0′W、深さ25km) とした。断層面は、気象庁 CMT 解の2枚の節面のうち、北北東-南南西走向の節面(走向206°、傾 斜47°、すべり角92°)を仮定して解析した。最大破壊伝播速度は3.0km/sとした。理論波形の計 算には CRUST2.0 (Bassin et al., 2000) および IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991)の地下構造 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40km、傾斜方向に約30kmであった。
- ・主なすべりは破壊開始点周辺から深い領域に広がり、最大すべり量は 1.4m であった(周辺の構造から剛性率を 60GPa として計算)。
- ・主な破壊継続時間は約20秒であった。
- ・モーメントマグニチュード (Mw) は7.4 であった。





 (注1)解析に使用したプログラム
 M. Kikuchi and H. Kanamori, Note on Teleseismic Body-Wave Inversion Program, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/
 作成日: 2022/12/9

第3図(c) つづき

Fig.3(c) Continued.



観測波形(上:0.01Hz-0.5Hz)と理論波形(下)の比較





 震央距離 30° ~100°^{*1}の 43 観測点^{*2} (P 波: 43、SH 波: 0)を使用。

 ※1: 近すぎると理論的に扱いづらくなる波の計算があり、逆に遠すぎる
 と、液体である外核を通るため、直達波が到達しない。そのため、
 評価しやすい距離の波形記録のみを使用。

 ※2: IRIS-DMC より取得した広帯域地震波形記録を使用。

参考文献

Bassin, C., Laske, G. and Masters, G., 2000, The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America, EOS Trans AGU, 81, F897.
Kennett, B. L. N. and E. R. Engdahl, 1991, Traveltimes for global earthquake location and phase identification, Geophys. J. Int., 105, 429-465.

作成日:2022/12/9

第3図(d) つづき

Fig.3(d) Continued.

2022 年 11 月 21 日 インドネシア、ジャワの地震

(1) 概要及び最近の地震活動^(注1)

2022 年 11 月 21 日 15 時 21 分 (日本時間、以下同じ) にインドネシア、ジャワの深さ 10km で Mw5.6 の地震(Mw は Global CMT によるモーメントマグニチュード)が発生した。この地震の発震機構(Global CMT による) は、北東-南西方向に圧力軸を持つ横ずれ断層型である。

今回の地震により、インドネシアで少なくとも死者 334 人などの被害が生じた。

今回の地震の震央周辺(図1-1の領域 a)では、北東側のユーラシアプレートに対して、南西側 にあるインド・オーストラリアプレートが北北東方向に移動して沈み込んでおり、地震活動が非常に 活発である(図1-1、図1-2)。今回の地震の震央付近(図1-1の領域 b)では、M5程度の 地震が時々発生している(図1-3)。

2000年以降の活動を見ると、今回の地震の震央付近(図1-1の領域 a)では M6.0以上の地震が時々発生しており、2006年5月27日には Mw6.4の地震が発生し、死者5,749人、負傷者38,568人などの被害が生じた。また、2006年7月17日にも Mw7.7の地震が発生し、死者665人、負傷者9,275人などの被害を生じた。



図1-1 震央分布図(2000年1月1日~2022年11月30日、深さO~100km、M≧6.0) 2022年11月の地震を赤く表示。



 ^(注1) 震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2022年12月7日現在)。ただし、発震機構とMwは、2009年9月2日の地震は気象 庁、それ以外の地震はGlobal CMTによる。プレート境界の位置と進行方向はBird(2003)*より引用。今回の地震の被害は、 OCHA(UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs:国連人道問題調整事務所、2022年12月6日現在)、その他 の地震の被害は、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。
 *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4図(a) 2022年11月21日インドネシア,ジャワの地震(Mw5.6)

Fig.4(a) The Earthquake in Java, Indonesia (Mw5.6) on November 21, 2022.

(2) 今回の地震の発震機構^(注2)

今回の地震の震央周辺の発震機構の分布をみると、インド・オーストラリアプレートの沈み込みに 伴い、逆断層型の地震が多く発生している(図2-1)。また、ジャワ島内陸部で発生する地震を含 めて、概ね北北東-南南西方向に圧力軸を持つ型が多い(図2-2)。今回の地震の発震機構の圧力 軸の向きは北東-南西方向であり、その傾向と調和的である。



(1980 年 1 月 1 日~2022 年 11 月 30 日、深さ O~100km、 M≧4.5)

(3) 過去に発生した主な地震^(注3)

1904年以降の活動を見ると、今回の地震の震央周辺では、M7.0以上の地震が度々発生しており、死者1,000人以上となるような大きな被害をもたらす地震が多く発生している(図3-1、図3-2)。



または被害が死者 1,000 人以上の地震。

^(注2) 震源要素及び発震機構は Global CMT による。震源の位置はセントロイドの位置。プレート境界の位置と進行方向は Bird (2003) より引用。

(注3) 震源要素は、2018年までは ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue Version 9.1 (1904-2018)、2019年以降は米国 地質調査所 (USGS) による (2022年12月7日現在)。ただし吹き出しを付けた地震の Mw は、2004年12月26日の地震は USGS、 それ以外の地震は Global CMT によるモーメントマグニチュード。地震の被害は、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。

第4図(b) つづき

Fig.4(b) Continued.

11月22日 ブーゲンビルーソロモン諸島の地震

2022 年 11 月 22 日 11 時 03 分(日本時間、以下同じ)にブーゲンビル-ソロモン諸島の深さ 14km で Mw7.0 (Mw は気象庁によるモーメントマグニチュード)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型である。この地震の発生後、同日 11 時 37 分には Mw6.0 の地震が発生するなど、地震活動が活発になった。

気象庁は、この地震に対して、同日 11 時 23 分に北西太平洋津波情報を、同日 11 時 29 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、ソロモン諸島のホニアラで 0.03m の津波を観測した。

2000年以降の活動をみると、今回の地震の震源付近(領域 a)では、インド・オーストラリアプレートの沈み込みに伴い、地震活動が活発である。2016年12月9日には Mw7.8の地震が発生し、死者1人の被害を生じたほか、ニューカレドニア島のヤンゲンで0.43mの津波を観測した。

1980年以降の活動をみると、今回の震源付近(領域b)では、M7.0以上の地震が度々発生している。 2007年4月2日にはMw8.1の地震が発生し、津波が発生したほか、死者54人などの被害を生じた。



※震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2022年12月7日現在)。ただし、発震機構とMwは、2010年4月11日、2016年12 月9日、2017年1月22日及び今回の地震は気象庁、その他の地震はGlobal CMTによる。2016年12月9日の地震及び今回の地震 の津波の観測値は米国海洋大気庁(NOAA)、被害は OCHA(UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs:国連人道 問題調整事務所)による。2007年4月2日の地震の被害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5図(a) 2022年11月22日ブーゲンビルーソロモン諸島の地震(Mw7.0)

Fig.5(a) The Earthquake in the Bougainville - Solomon Islands (Mw7.0) on November 22, 2022.

11月22日 ブーゲンビルーソロモン諸島の地震の発震機構解析

2022 年 11 月 22 日 11 時 03 分(日本時間) にブーゲンビル-ソロモン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。



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	4. 56×10^{19} Nm	12.9° /22. 3° /-168. 1°	271. 8° \checkmark 85. 5° \checkmark -68. 2°

2. W-phase の解析

W-W-P S セントロイドは、南緯 9.8°、東経 159.5°、深さ 24km 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、
 18 観測点の水平成分を用い、100~500 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	3.60 $\times 10^{19}$ Nm	$13.9^{\circ} / 27.8^{\circ} / -168.0^{\circ}$	273. 2° / 84. 4° / -62. 7°

(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。



第5図(b) つづき Fig.5(b) Continued.

账

18

2022 年 11 月 22 日 ブーゲンビル-ソロモン諸島 遠地実体波による震源過程解析(暫定)ー

2022 年 11 月 22 日 11 時 03 分(日本時間)にブーゲンビル-ソロモン諸島で発生した地震について、 米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ管理センター(DMC)より広帯域地震波形記録を取得し、 遠地実体波を用いた震源過程解析(注1)を行った。

破壊開始点は、米国地質調査所(USGS)による震源の位置(9°48.7′S、159°35.2′E、深さ14km) とした。断層面は、気象庁 CMT 解の2枚の節面のうち、北北東-南南西走向の節面(走向13°、傾斜 22°、すべり角-168°)を仮定して解析した。最大破壊伝播速度は 2.7km/s とした。理論波形の計算 には CRUST2.0 (Bassin et al., 2000) および IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991) の地下構造モ 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20kmであった。

- ・主なすべりは破壊開始点周辺に広がり、最大すべり量は 2.5m であった(周辺の構造から剛性率 を 50GPa として計算)。
- 主な破壊継続時間は約10秒であった。



-5

·10



(注1)解析に使用したプログラム M. Kikuchi and H. Kanamori, Note on Teleseismic Body-Wave Inversion Program, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/ 作成日:2023/1/13

第5図(c) つづき

Continued. Fig.5(c)



観測波形(上:0.01Hz-0.5Hz)と理論波形(下)の比較

Kennett, B. L. N. and E. R. Engdahl, 1991, Traveltimes for global earthquake location and phas identification, Geophys. J. Int., 105, 429-465. 作成日:2023/1/13

第5図(d) つづき

Fig.5(d) Continued.

1月8日 バヌアツ諸島の地震

2023 年1月8日21時32分(日本時間、以下同じ)にバヌアツ諸島の深さ29kmでMw7.0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。この地震はインド・オーストラリア プレートと太平洋プレートの境界で発生した。発震機構(気象庁によるCMT 解)は東北東-西南西方 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 22 時 01 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、今回の地震の震央周辺(領域 a) では M7.0以上の地震が時々発生している。2009年10月8日には、07時03分に Mw7.6の地震が、07時18分に Mw7.8の地震が、さらに08時13分に Mw7.4の地震が発生し、バヌアツのポートビラで0.29mの津波を観測した。





[※]震源要素は米国地質調査所 (USGS) による (2023年2月6日現在)。ただし、吹き出しのある地震のうち、「GCMT」が付いた地震 の発震機構と Mw は Global CMT、その他の地震は気象庁による。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、2023年2月6日現在)による。ブレート境界の位置と進行方向は Bird (2003) *より引用。津波の高さは米国海洋大気庁 (NOAA) による (2023年2月6日現在)。 *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.6(a) The Earthquake in the Vanuatu Islands (Mw7.0) on January 8, 2023.

第6図(a) 2023年1月8日バヌアツ諸島の地震(Mw7.0)

1月8日 バヌアツ諸島の地震の発震機構解析

2023 年1月8日21時32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 14.9°、東経 166.8°、深さ 32km 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)
7.0	4. 31×10^{19} Nm	153.2° / 56. 7° / 79. 5°	351.9° / 34. 7° / 105. 5°

2. W-phase の解析

W P E

セントロイドは、南緯15.1°、東経166.7°、深さ24kmとなった。

W-phaseの解析では、震央距離10°~90°までの23観測点の上下成分、
 17観測点の水平成分を用い、100~500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	$4.58 \times 10^{19} \mathrm{Nm}$	$161.0^{\circ} \checkmark 57.1^{\circ} \checkmark 86.9^{\circ}$	$346.7^{\circ} / 33.0^{\circ} / 94.8^{\circ}$

(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 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) つづき Fig.6(b) Continued.

2023年1月8日 バヌアツ諸島 - 遠地実体波による震源過程解析(暫定)-

2023年1月8日21時32分(日本時間)にバヌアツ諸島で発生した地震について、米国大学間地震 学研究連合(IRIS)のデータ管理センター(DMC)より広帯域地震波形記録を取得し、遠地実体波を 用いた震源過程解析(注1)を行った。

破壊開始点は、米国地質調査所 (USGS) による震源の位置 (14°56.2′S、166°52.6′E、深さ28km) とした。断層面は、気象庁 CMT 解の2枚の節面のうち、南北走向の節面(走向352°、傾斜35°、す べり角106°)を仮定して解析した。最大破壊伝播速度は2.8km/sとした。理論波形の計算には CRUST2.0 (Bassin et al., 2000) および IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991)の地下構造モデルを 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40km、傾斜方向に約20kmであった。
- ・主なすべりは破壊開始点周辺に広がり、最大すべり量は 0.9m であった(周辺の構造から剛性率 を 45GPa として計算)。
- ・主な破壊継続時間は約20秒であった。
- ・モーメントマグニチュード (Mw) は7.0 であった。





 (注1)解析に使用したプログラム
 M. Kikuchi and H. Kanamori, Note on Teleseismic Body-Wave Inversion Program, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/
 作成日: 2023/02/02

第6図(c) つづき Fig.6(c) Continued.



観測波形(上:0.01Hz-0.5Hz)と理論波形(下)の比較





震央距離 30°~100°^{*1}の 41 観測点^{*2}(P波: 41、SH波: 0)を使用。 ※1:近すぎると理論的に扱いづらくなる波の計算があり、逆に遠すぎる と、液体である外核を通るため、直達波が到達しない。そのため、 評価しやすい距離の波形記録のみを使用。 ※2: IRIS-DMCより取得した広帯域地震波形記録を使用。

参考文献

Bassin, C., Laske, G. and Masters, G., 2000, The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America, EOS Trans AGU, 81, F897.

Kennett, B. L. N. and E. R. Engdahl, 1991, Traveltimes for global earthquake location and phase identification, Geophys. J. Int., 105, 429-465. 作成日:2023/02/02

第6図(d) つづき

Fig.6(d) Continued.

1月10日 インドネシア、タニンバル諸島の地震

2023年1月10日02時47分(日本時間、以下同じ)にインドネシア、タニンバル諸島の深さ105km でMw7.6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。この地震はユーラシアプレートに沈み込むインド・オーストラリアプレート内部で発生したと考えられる。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逆断層型である。

気象庁は、この地震に対して、同日 03 時 30 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、インドネシア、タニンバル諸島のセイラで 0.09m などの津波を観測した。ま た、今回の地震により死者1人、負傷者1人などの被害が生じた。

1980年以降の活動をみると、今回の地震の震源付近(領域b)ではM7.0以上の地震がまれに発生している。



※震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2023年2月6日現在)。ただし、吹き出しのある地震のうち、「GCMT」が付いた地震の 発震機構とMw及び1996年2月17日の地震のMwはGlobal CMT、その他の地震は気象庁による。津波の高さは米国海洋大気庁 (NOAA)による(2023年2月6日現在)。今回の地震の被害は、OCHA(UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs:国連人道問題調整事務所、2023年1月11日現在)による。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.

Fig.7(a) The Earthquake in the Tanimbar Islands, Indonesia (Mw7.6) on January 10, 2023.

第7図(a) 2023年1月10日インドネシア,タニンバル諸島の地震(Mw7.6)

1月10日 インドネシア、タニンバル諸島の地震の発震機構解析

2023 年 1 月 10 日 02 時 47 分(日本時間) にインドネシア、タニンバル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 7.4°、東経 130.1°、深さ 88km 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)
7.6	3.30×10^{20} Nm	97. 1° /41. 0° /52. 4°	322. 8° / 58. 7° / 117. 9°

2. W-phase の解析

W T E

セントロイドは、南緯7.4°、東経130.1°、深さ101km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、
 42 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)
7.6	$3.68 imes 10^{20} \mathrm{Nm}$	95. 5° / 41. 5° / 51. 1°	$322.6^{\circ} / 58.9^{\circ} / 119.1^{\circ}$

(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、解析には金森博士及び Rivera 博士に頂いたフロクラム 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) つづき Fig.7(b) Continued.

1月18日 モルッカ海北部の地震

2023 年1月18日15時06分(日本時間、以下同じ)に、モルッカ海北部の深さ29kmでMw7.0(Mw は気象庁によるモーメントマグニチュード)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横ずれ断層型である。

気象庁は、この地震に対して、同日 15 時 30 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。今回の地震の震央付近(領域 c)では、この地震の発生後に地震活動が活発になり、M5.0以上の地震が 11 回発生している。なお、今回の地震による現地の被害は報告されていない。

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以上の地震が時々発生しており、2007年1月21日に発生した Mw7.5の地震では死者3人、負傷者4人などの被害が生じた。



※最振奏茶は不見地員調員前(GOSA)による。CO26 キア月2日現在)。にたして、吹き出しのある地震のうち、での加引」が引た地震 の発震機構と Mw は Global CMT、その他の地震は気象庁による。今回の地震の被害は OCHA (UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs:国連人道問題調整事務所)による。2007 年 1 月 21 日の地震の被害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8図(a) 2023年1月18日モルッカ海北部の地震(Mw7.0)

Fig.8(a) The Earthquake in the northern part of Molucca Sea (Mw7.0) on January 18, 2023.
1月18日 モルッカ海北部の地震の発震機構解析

2023 年1月18日15時06分(日本時間)にモルッカ海北部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 2.8°、東経 127.1°、深さ 30km 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)
7.0	$3.96 \times 10^{19} \mathrm{Nm}$	35.4° /78.1° /166.9°	128.2° /77.2° /12.3°

2. W-phase の解析



セントロイドは、南緯 2.7°、東経 127.2°、深さ 51km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 38 観測点の上下成分、
 35 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	3.84×10^{19} Nm	$32.8^{\circ} / 77.1^{\circ} / 155.8^{\circ}$	$128.5^{\circ} / 66.5^{\circ} / 14.1^{\circ}$

(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8図(b) つづき Fig.8(b) Continued.

2023年2月6日 トルコの地震

(1) 概要及び最近の地震活動^(注1)

2023年2月6日10時17分(日本時間、以下同じ)にトルコの深さ10kmでMw7.8の地震(Mwは気象庁によるモーメントマグニチュード、今回の地震①)が発生した。この地震の発震機構(気象庁によるCMT解)は、南北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10時47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、キプロスのパラリムニで0.25mなどの津波を観測した。

今回の地震①の震央付近(図1-3の領域b)では、この地震の発生後に地震活動が活発になり、 今回の地震①の約9時間後の同日19時24分には、トルコの深さ10kmでMw7.6の地震(Mw は気象庁 によるモーメントマグニチュード、今回の地震②)が発生した。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る。気象庁はこの地震に対して、同日19 時52分に遠地地震に関する情報(津波の心配なし)を発表した。

今回の地震活動により、死者 51,089人、負傷者 118,700人などの被害が生じた(2023 年 3 月 2 日時点)。

今回の地震活動域は、ユーラシアプレートとアラビアプレートの境界に位置する地域である。1970 年以降の活動をみると、今回の地震の震央周辺(図1-1の領域 a) では、M6.0 以上の地震が時々 発生している。2020年1月25日には Mw6.8の地震が発生し、死者41人、負傷者約1,600人などの 被害が生じた。



⁽注1) 震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2023年3月6日現在)。ただし、吹き出しのある地震のうち、発震機構とMwは、今回の地震①及び②、2011年10月23日の地震及び2017年11月13日の地震は気象庁、1970年3月29日の地震、1971年5月23日の地震及び1975年9月6日の地震はISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue Version 9.1 (1904-2018)、その他の地震はGlobal CMTによる。津波の高さは米国海洋大気庁(NOAA)による。被害は、今回の地震及び2020年1月25日の地震はOCHA (UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs:国連人道問題調整事務所、2023年3月2日現在)、その他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)*1、活断層はStyron and Pagani (2020)*2より引用。

*¹参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.

*²参考文献 Styron, R. and Pagani, M. (2020) The GEM Global Active Faults Database. Earthquake Spectra, 36(1), pp. 160-180, doi:10.1177/8755293020944182

第9図(a) 2023年2月6日トルコの地震(Mw7.8)

Fig.9(a) The Earthquake in Turkey (Mw7.8) on February 6, 2023.



(2) 今回の地震の発震機構^(注2)

今回の地震の震央周辺の発震機構の分布をみると、概ね北北東-南南西方向に圧力軸を持つ横ず れ断層型の地震が多く発生している(図2-1、図2-2、図2-3)。今回の地震①及び②の発震 機構は、これまでの地震の傾向と調和的である。



^(注2) 震源要素及び発震機構は、今回の地震①及び②は気象庁、その他の地震はGlobal CMTによる。震源の位置はセントロイドの位置。プレート境界の位置はBird (2003)*1、活断層はStyron and Pagani (2020)*2より引用。

*1参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.

*2参考文献 Styron, R. and Pagani, M. (2020) The GEM Global Active Faults Database. Earthquake Spectra, 36(1), pp. 160-180, doi:10.1177/8755293020944182.

第9図(b) つづき

Fig.9(b) Continued.

(3)過去に発生した主な地震^(注3)

1904 年以降の活動をみると、トルコ国内では、M7.0以上の地震が時々発生しており、大きな被害を 伴っている。1939 年 12 月 27 日には M7.8 の地震により、死者 32,968 人などの被害が生じた。また近 年では、1999 年 8 月 17 日の Mw7.6 の地震により、死者 17,118 人、負傷者約 50,000 人などの被害が 生じた。



第9図(c) つづき Fig.9(c) Continued.

^(注3) 震源要素は、2018 年までは ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue Version 9.1 (1904-2018)、2019 年以降は米国 地質調査所(USGS)による(2023 年3月6日現在)。ただし Mw は、1976 年11 月 24 日及び 1999 年8月17 日の地震は Global CMT、今回の地震①及び②は気象庁によるモーメントマグニチュード。地震の被害は、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。



第9図(d) つづき Fig.9(d)

Continued.



2月6日 トルコの地震(今回の地震活動)

第9図(e) つづき Fig.9(e) Continued.



2月6日 トルコの地震(大森・宇津公式、G-R式、余震確率)

第9図(f) つづき Fig.9(f) Continued.



2月6日 トルコの地震(今回の地震よる周辺の静的応力変化) (1)Mw7.8の地震によるMw7.6の地震への影響<△CFFの水平分布>



3月16日 ケルマデック諸島の地震

2023 年 3 月 16 日 09 時 56 分(日本時間、以下同じ)にケルマデック諸島の深さ 10km 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。この地震はインド・オーストラリ アプレートに沈み込む太平洋プレート内部で発生した。発震機構(気象庁による CMT 解)は東西方向 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 10 時 23 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、ラウル島(ニュージーランド)のボートコーブで 0.11m、フィッシングロックで 0.1mの津波を観測した。

1980年以降の活動をみると、今回の地震の震源付近(領域 b)では M7.0以上の地震が時々発生している。2021年3月5日04時28分には Mw8.1の地震が発生し、マレ(ニューカレドニア)で1m^{*1}、ノーフォーク島(オーストラリア)で0.56mなどの津波を観測した。また、日本国内でも、岩手県の久慈港や東京都の父島二見で最大19cmの津波を観測したほか、北海道から千葉県にかけての太平洋沿岸で津波を観測した。また、この地震の約1時間50分前の02時41分には Mw7.4の地震が発生し、ラウル島のフィッシングロックで0.31mなどの津波を観測した。



※震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2023年4月4日現在)。ただし、発震機構とMwは、吹き出しのある地震のうち、 「GCMT」が付いた地震及び2023年3月4日の地震はGlobal CMT、その他の地震は気象庁による。津波の高さは米国海洋大気庁 (NOAA)による(2023年4月7日現在)。ブレート境界の位置と進行方向はBird(2003)*2より引用。

*1マレの津波の高さは目視による。

*2参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.

第10図(a) 2023年3月16日ケルマデック諸島の地震(Mw6.9)

Fig.10(a) The Earthquake in the Kermadec Islands (Mw6.9) on March 16, 2023.

3月16日9時56分 ケルマデック諸島の地震の発震機構解析

2023 年 3 月 16 日 9 時 56 分(日本時間) にケルマデック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。



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	$3.30 \times 10^{19} \text{Nm}$	25. 9° $/ 80. 8^{\circ}$ $/ -52. 5^{\circ}$	127.6° / 38. 4° / -165. 1°

2. W-phase の解析

W-P T E セントロイドは、南緯 30.7°、西経 176.0°、深さ 12km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 15 観測点の上下成分、
20 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	4.55 $ imes$ 10 ¹⁹ Nm	23. 5° / 85. 4° / -60. 5°	121. 6° / 29. 9° /-170. 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) つづき Fig.10(b) Continued.

4月3日 パプアニューギニア、ニューギニアの地震

2023年4月3日03時04分(日本時間、以下同じ)にパプアニューギニア、ニューギニアの深さ70km でMw7.1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。この地震の発震機構(気象庁によるCMT解)は、南北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 03 時 31 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、この地震により、死者 8 人、負傷者 11 人などの被害が生じた。

1980年以降の活動をみると、今回の地震の震央付近(領域 a) では、M6.0以上の地震が時々発生している。1998年7月17日に Mw7.0の地震が発生し、死者2,700人、負傷者数千人の被害が生じた。

1904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、M8.0以上の地震が5回発生している。1996年2月17日にはMw8.2の地震が発生し、父島(東京都)で104cm、串本(和歌山県)で96cm (ともに平常潮位からの最大の高さ)など、日本でも津波を観測した。



※上図内の震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2023年5月9日現在)。ただし、吹き出しのある地震のうち、「GCMT」が付い た地震の発震機構と Mw は Global CMT、その他の地震は気象庁による。プレート境界の位置は Bird (2003)*より引用。今回の地震 の被害は、OCHA (UN Office for the Coordination Humanitarian Affairs:国連人道問題調整事務所、2023年5月9日現在)右下 図内の震源要素は、2019年までは ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue Version 10 (1904-2019)、2020年以降は米 国地質調査所(USGS)による(2023年5月9日現在)。ただし Mw は、1996年2月17日の地震は Global CMT、今回の地震は気象庁に 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.

第 11 図 (a) 2023 年 4 月 3 日パプアニューギニア, ニューギニアの地震 (Mw7.1) Fig.11(a) The Earthquake in New Guinea, Papua New Guinea (Mw7.1) on April 3, 2023. 4月3日 パプアニューギニア、ニューギニアの地震の発震機構解析

2023年4月3日03時04分(日本時間)にパプアニューギニア、ニューギニア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 W W W W W MW Mo

	5		
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	5.69 $\times 10^{19}$ Nm	60.3° / 84. 3° / -22. 9°	152.8° / 67. 2° / -173. 8°

2. W-phaseの解析 N

W-W-S セントロイドは、南緯 4.4°、東経 143.2°、深さ 71km となった。

セントロイドは、南緯 4.4°、東経 143.2°、深さ 58km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 27 観測点の上下成分、
23 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	5.69 $ imes$ 10 ¹⁹ Nm	59. 3° / 82. 6° / -27. 0°	153. 1° / 63. 2° /-171. 7°

(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11図(b) つづき Fig.11(b) Continued.

2023 年 4 月 3 日 パプアニューギニア、ニューギニアの地震 - 遠地実体波による震源過程解析(暫定)-

2023年4月3日03時04分(日本時間)にパプアニューギニア、ニューギニアで発生した地震について、米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ管理センター(DMC)より広帯域地震波形記録を取得し、遠地実体波を用いた震源過程解析(注1)を行った。

破壊開始点は、米国地質調査所(USGS)による震源の位置(4°17.5′S、143°9.3′E、深さ63km) とした。断層面は、気象庁 CMT 解の2枚の節面のうち、北北西-南南東走向の節面(走向153°、傾 斜67°、すべり角-174°)を仮定して解析した。最大破壊伝播速度は2.6km/sとした。理論波形の計 算には CRUST2.0 (Bassin et al., 2000)および IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991)の地下構造 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40km、傾斜方向に約20kmであった。

- ・主なすべりは破壊開始点からやや深い領域に広がり、最大すべり量は 1.6m であった(周辺の構造から剛性率を 70GPa として計算)。
- ・主な破壊継続時間は約10秒であった。
- ・モーメントマグニチュード (Mw) は7.2 であった。





M. Kikuchi and H. Kanamori, Note on Teleseismic Body-Wave Inversion Program, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/ 作成日:2023/05/01

第11図(c) つづき Fig.11(c) Continued.



第11図(d) つづき

Fig.11(d) Continued.

9

4月14日 インドネシア、ジャワの地震

2023年4月14日18時55分(日本時間、以下同じ)にインドネシア、ジャワの深さ594kmでMw7.1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、ユーラシアプレートに沈み込むインド・オーストラリアプレート内部で発生した。発震機構(気象庁によるCMT解)は概ね鉛直方向に圧力軸を持つ型である。

気象庁は、この地震に対して、同日 19 時 21 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、死者 1 人などの被害が生じた。

1980年以降の活動をみると、今回の地震の震源付近(領域 b)ではM6程度の地震が時々発生しており、M7.0以上の地震は発生していなかった。



断面図で震源が線状分布しているのは、震源の深さを 10km または 33km に固定して、震源を決定しているためである。

震央分布図

※震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2023年5月9日現在)。ただし、発震機構とMwは、吹き出しのある地震のうち、 「GCMT」が付いた地震はGlobal CMT、その他の地震は気象庁による。今回の地震の被害は、OCHA(UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs: 国連人道問題調整事務所、2023年5月9日現在)による。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 12 図 (a) 2023 年 4 月 14 日インドネシア,ジャワの地震 (Mw7.1) Fig.12(a) The Earthquake in Java, Indonesia (Mw7.1) on April 14, 2023.

4月14日 インドネシア、ジャワの地震の発震機構解析

2023 年 4 月 14 日 18 時 55 分(日本時間) にインドネシア、ジャワ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。



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. 01×10^{19} Nm	94. 9° /29. 1° /-107. 8°	295. 0° /62. 5° /-80. 4°

2. W-phase の解析

W-P-E-S-

セントロイドは、南緯 6.3°、東経 112.2°、深さ 611km となった。

W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 47 観測点の上下成分、
 23 観測点の水平成分を用い、100~500 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	5. 13×10^{19} Nm	97. 8° / 29. 6° / -104. 9°	294. 7° / 61. 5° / -81. 7°

(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 12 図 (b) つづき Fig.12(b) Continued.

2023 年 4 月 14 日 インドネシア、ジャワの地震 - 遠地実体波による震源過程解析(暫定)-

2023 年4月14日18時55分(日本時間)にインドネシア、ジャワで発生した地震について、米国 大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ管理センター(DMC)より広帯域地震波形記録を取得し、遠 地実体波を用いた震源過程解析(注1)を行った。

破壊開始点は、米国地質調査所(USGS)による震源の位置(6°1.5′S、112°1.9′E、深さ594km) とした。断層面は、気象庁 CMT 解の2枚の節面のうち、東西走向の節面(走向95°、傾斜29°、す べり角-108°)を仮定して解析した。最大破壊伝播速度は 3.9km/s とした。理論波形の計算には CRUST2.0 (Bassin et al., 2000)および IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991)の地下構造モデルを 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20km、傾斜方向に約20kmであった。

- ・主なすべりは破壊開始点からやや深い領域に広がり、最大すべり量は 0.4m であった(周辺の構造から剛性率を 120GPa として計算)。
- ・主な破壊継続時間は約10秒であった。
- ・モーメントマグニチュード (Mw) は7.1 であった。

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



(注て) 解析に使用したフロクラム M. Kikuchi and H. Kanamori, Note on Teleseismic Body-Wave Inversion Program, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/ 作成日: 2023/04/26

第 12 図 (c) つづき Fig.12(c) Continued.



Kennett, B. L. N. and E. R. Engdahl, 1991, Traveltimes for global earthquake location and phase identification, Geophys. J. Int., 105, 429-465. 作成日:2023/04/26

第12図(d) つづき

Fig.12(d) Continued.

4月24日 ケルマデック諸島の地震

2023 年4月24日09時41分(日本時間、以下同じ)にケルマデック諸島の深さ43kmでMw7.1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、太平洋プレートとインド・オースト ラリア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 10 時 03 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、ラウル島(ニュージーランド)のフィッシングロックで 0.11m、ボートコーブで 0.09m などの津波を観測した。

1980年以降の活動をみると、今回の地震の震源付近(領域b)ではM7.0以上の地震が時々発生している。2021年3月5日04時28分にはMw8.1の地震が発生し、マレ(ニューカレドニア)で1m^{*1}、ノーフォーク島(オーストラリア)で0.56mなどの津波を観測した。また、日本国内でも、岩手県の久慈港や東京都の父島二見で最大19cmの津波を観測したほか、北海道から千葉県にかけての太平洋沿岸で津波を観測した。また、この地震の約1時間50分前の02時41分にはMw7.4の地震が発生し、ラウル島のフィッシングロックで0.31mなどの津波を観測した。今回の地震の震源周辺(領域a)では、最近では、2023年3月16日にMw6.9の地震が発生し、ラウル島(ニュージーランド)のボートコーブで0.11mなどの津波を観測した。



※震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2023 年5月9日現在)。ただし、発震機構とMwは、1986 年 10 月 20 日の地震及び 2023 年3月4日の地震は Global CMT、その他の地震は気象庁による。津波の高さは米国海洋大気庁(NOAA)による(2023 年5月9日現 在)。プレート境界の位置と進行方向は Bird(2003)*²より引用。

*²参考文献 Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, Geochemistry Geophysics Geosystems, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.

Fig.13(a) The Earthquake in the Kermadec Islands (Mw7.1) on April 24, 2023.

^{*1}マレの津波の高さは目視による。

第13図(a) 2023年4月24日ケルマデック諸島の地震(Mw7.1)

4月24日 ケルマデック諸島の地震の発震機構解析

2023 年 4 月 24 日 09 時 41 分(日本時間) にケルマデック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 29.9°、西経 177.5°、深さ 46km となった。



W-phase の解析では、震央距離 10°~90° までの 36 観測点の上下成分、
 21 観測点の水平成分を用い、100~500 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	$6.08 \times 10^{19} \text{Nm}$	$17.3^{\circ} \ / \ 62.4^{\circ} \ / \ 91.9^{\circ}$	193. 1° / 27. 6° /86. 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 13 図 (b) つづき Fig.13(b) Continued.

2023 年4月24日 ケルマデック諸島の地震 - 遠地実体波による震源過程解析(暫定)-

2023 年 4 月 24 日 09 時 42 分(日本時間)にケルマデック諸島で発生した地震について、米国大学 間地震学研究連合(IRIS)のデータ管理センター(DMC)より広帯域地震波形記録を取得し、遠地実 体波を用いた震源過程解析(注1)を行った。

破壊開始点は、米国地質調査所(USGS)による震源の位置(29°57.2′S、177°50.2′W、深さ49km) とした。断層面は、気象庁 CMT 解の2枚の節面のうち、北北東-南南西走向の節面(走向202°、傾 斜36°、すべり角98°)を仮定して解析した。最大破壊伝播速度は3.0km/sとした。理論波形の計 算には CRUST2.0 (Bassin et al., 2000)および IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991)の地下構造 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20km、傾斜方向に約20kmであった。

- ・主なすべりは破壊開始点周辺に広がり、最大すべり量は 1.4m であった(周辺の構造から剛性率 を 70GPa として計算)。
- ・主な破壊継続時間は約10秒であった。
- ・モーメントマグニチュード (Mw) は7.1 であった。

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



(注1)解析に使用したプログラム M. Kikuchi and H. Kanamori, Note on Teleseismic Body-Wave Inversion Program,

http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/ 作成日:2023/04/26

第13図(c) つづき Fig.13(c) Continued.

- /



観測波形(上:0.01Hz-0.5Hz)と理論波形(下)の比較

Bassin, C., Laske, G. and Masters, G., 2000, The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America, EOS Trans AGU, 81, F897.

Kennett, B. L. N. and E. R. Engdahl, 1991, Traveltimes for global earthquake location and phase identification, Geophys. J. Int., 105, 429-465. 作成日:2023/04/26

第13図(d) つづき Fig.13(d) Continued.

4月25日 インドネシア、スマトラ南部の地震

2023 年4月25日05時00分(日本時間、以下同じ)にインドネシア、スマトラ南部の深さ34kmで Mw7.0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。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逆断層型である。

気象庁は、この地震に対して、同日 05 時 32 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、タナバラ島(インドネシア)で 0.1mの津波を観測した。

1980 年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 以上の地震が時々発生している。2009 年 8 月 16 日には Mw6.7 の地震が発生し、負傷者 9 人などの被害が生じたほか、パダン(インドネシア)で 0.18mの津波を観測した。また、今回の地震の震央から北西へ約 600km 離れたところでは 2004 年 12 月 26 日に Mw9.1 の地震の地震が発生し、死者 283,000 人以上などの甚大な被害が生じた。



※震源要素は米国地質調査所(USGS)による(2023年5月9日現在)。ただし、発震機構とMwは、2004年12月26日の地震はUSGS、 今回の地震は気象庁、その他の地震はGlobal CMTによる。地震の被害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。津波の高さは米国海洋大気庁(NOAA)による(2023年5月9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.

"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14図(a) 2023年4月25日インドネシア、スマトラ南部の地震(Mw7.0)

Fig.14(a) The Earthquake in the southern part of Sumatra, Indonesia (Mw7.0) on April 25, 2023.

4月25日 インドネシア、スマトラ南部の地震の発震機構解析

2023 年 4 月 25 日 05 時 00 分(日本時間) にインドネシア、スマトラ南部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 0.4°、東経 98.5°、深さ 16km となった。

W-phaseの解析では、震央距離10°~90°までの25 観測点の上下成分、27 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. 02×10^{19} Nm	122. $3^{\circ} \nearrow 81. 2^{\circ} \cancel{84.} 6^{\circ}$	$333.9^{\circ} / 10.3^{\circ} / 121.2^{\circ}$

(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 14 図 (b) つづき Fig.14(b) Continued.

2023 年 4 月 25 日 インドネシア、スマトラ南部の地震 - 遠地実体波による震源過程解析(暫定)-

2023 年4月25日05時00分(日本時間)にインドネシア、スマトラ南部で発生した地震について、 米国大学間地震学研究連合(IRIS)のデータ管理センター(DMC)より広帯域地震波形記録を取得し、 遠地実体波を用いた震源過程解析(注1)を行った。

破壊開始点は、米国地質調査所(USGS)による震源の位置(0°46.8′S、98°32.0′E、深さ15km) とした。断層面は、気象庁CMT 解の2枚の節面のうち、北西-南東走向の節面(走向320°、傾斜17°、 すべり角98°)を仮定して解析した。最大破壊伝播速度は2.6km/sとした。理論波形の計算には CRUST2.0 (Bassin et al., 2000)およびIASP91 (Kennett and Engdahl, 1991)の地下構造モデルを 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40km、傾斜方向に約40kmであった。

- ・主なすべりは破壊開始点周辺に広がり、最大すべり量は 0.8m であった(周辺の構造から剛性率 を 40GPa として計算)。
- ・主な破壊継続時間は約20秒であった。
- ・モーメントマグニチュード (Mw) は7.1 であった。
- 結果の見方は、https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/world/about_srcproc.html を参照。



(注1)解析に使用したプログラム

M. Kikuchi and H. Kanamori, Note on Teleseismic Body-Wave Inversion Program, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI/ 作成日:2023/04/27

第 14 図 (c) つづき Fig.14(c) Continued.



```
観測波形(上:0.01Hz-0.5Hz)と理論波形(下)の比較
```

(秒)

※1:近すきると埋論的に扱いつらくなる波の計算があり、逆に遠すきると、液体である外核を通るため、直達波が到達しない。そのため、 評価しやすい距離の波形記録のみを使用。
※2:IRIS-DMCより取得した広帯域地震波形記録を使用。

参考文献

Bassin, C., Laske, G. and Masters, G., 2000, The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America, EOS Trans AGU, 81, F897.

Kennett, B. L. N. and E. R. Engdahl, 1991, Traveltimes for global earthquake location and phase identification, Geophys. J. Int., 105, 429-465. 作成日: 2023/04/27

第 14 図 (d) つづき Fig.14(d) Continued.

10-2 トルコの地震 SAR 干渉解析結果 The 2023 Turkey Earthquake: Crustal deformation detected by ALOS-2 data.

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

[2023年2月6日トルコの地震 SAR]

第1~9図は、2023年2月6日(UTC)にトルコ共和国で発生した M7.7と M7.6(いずれもトルコ防災危機管理庁; AFADによる値)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9図の表に示すとおりである.

第1~2図は、ペア1の広域観測モードでの観測データの解析結果である。第1図は SAR 干渉解 析結果、第2図はピクセルオフセット法により解析した結果で、上図は衛星視線方向の変動量、下 図は衛星進行方向の変動量を示したものである。

第3~4図は、ペア2の広域観測モードでの観測データの解析結果である。第3図は SAR 干渉解 析結果、第4図はピクセルオフセット法により解析した結果で、上図は衛星視線方向の変動量、下 図は衛星進行方向の変動量を示したものである。

第5図は、ペア3及びペア4の広域観測モードでの観測データの解析結果である.上図はピクセ ルオフセット法により解析した結果のうち、衛星視線方向の変動量を示したもの、下図は SAR 干渉 解析結果である.上図及び下図では、西側がペア3、東側がペア4の解析結果となっており、両者は 衛星視線方向が異なっている.

第6図上図は、ペア5の高分解能モードによる観測データのSAR干渉解析結果である.このペア 5の高分解能モードでの観測データをピクセルオフセット法により解析した結果のうち、衛星視線方向の変動量を第6図下図に、衛星進行方向の変動量を第7図上図に示す.

第6~7図上図は、ペア5の高分解能モードによる観測データの解析結果である。第6図上図は SAR 干渉解析結果、下図はピクセルオフセット法の解析結果のうち衛星視線方向の変動量、第7図 上図はピクセルオフセット法による衛星進行方向の変動量を示したものである。

第7図下図~第8図は、ペア6の広域観測モードによる観測データの解析結果である。第7図下 図はSAR 干渉解析結果、第8図はピクセルオフセット法により解析した結果で、第8図上図は衛星 視線方向の変動量、下図は衛星進行方向の変動量を示したものである。

これらの解析結果から、以下のことが読み取れる.

- ・東アナトリア断層(East Anatolian Fault)及びチャルダック断層(Çaldak Fault)に沿って地殻変動が見られる.地殻変動は地震のメカニズム(左横ずれ)と整合的である.
- ・上記断層の近傍で非干渉領域が見られる.地震に伴って地表面が変化した可能性がある.
- ・変動域では、東アナトリア断層を挟んで最大で 5m を超える変動、チャルダック断層を挟んで最大で 4m 程度の変動が見られる.

2023年2月6日トルコ共和国の地震 だいち2号SAR干渉解析結果

2023年2月6日(UTC)にトルコ共和国でM7.7、M7.6(トルコ防災危機管理庁;AFAD)の地震が 発生しました。日本の地球観測衛星「だいち2号」(ALOS-2)に搭載された合成開口レーダー (PALSAR-2)のデータを使用して画像の分析を行いました。得られた結果は以下のとおりで

- す。
- ・M7.7およびM7.6 (AFADによる)の地震に伴う地殻変動が見られます。
- ・東アナトリア断層(East Anatolian Fault)およびチャルダック断層(Caldak Fault)に 沿って地殻変動が見られます。地殻変動は地震のメカニズム(左横ずれ)と整合的です。
- ・上記断層の近傍で非干渉領域が見られます。地震に伴って地表面が変化した可能性があり ます。
- ・変動域では、東アナトリア断層を挟んで最大で5mを超える変動、チャルダック断層を挟ん で最大で4m程度の変動が見られます。



図1-1.SAR干渉解析結果。震央・余震分布はAFADによる。

第1図 SAR 干涉解析結果(南行軌道)

Fig. 1 Result of Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry using ALOS-2 data from a descending orbit pair.



図1-2. ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(衛星視線方向)。 震央・余震分布はAFADによる、断層線はStyron et al. (2020)より。



図1-3. ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(衛星進行方向)。 震央・余震分布はAFADによる、断層線はStyron et al. (2020)より。

第2図 ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動

Fig. 2 Crustal deformation revealed by pixel offset method.



図2-1.SAR干渉解析結果。震央・余震分布はAFADによる。

第3図 SAR 干涉解析結果(北行軌道)

Fig. 3 Result of Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry using ALOS-2 data from an ascending orbit pair.



図2-2. ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(衛星視線方向)。



図2-3. ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(衛星進行方向)。 震央・余震分布はAFADによる、断層線はStyron et al. (2020)より。

第4図 ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動 Fig 4 Counted of comparison revealed by gived offset method

Fig. 4 Crustal deformation revealed by pixel offset method.



図3-1. ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(衛星視線方向)。 震央・余震分布はAFADによる、断層線はStyron et al. (2020)より。



図3-2. SAR干渉解析結果。震央・余震分布はAFADによる。

- 第5図 ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(上図)とSAR 干渉解析結果(下図)
- Fig. 5 Crustal deformation revealed by pixel offset method(upper).Result of Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry using ALOS-2 data(lower).



図4-2. ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(衛星視線方向)。 震央・余震分布はAFADによる、断層線はStyron et al. (2020)より。

- 第6図 SAR 干渉解析結果(上図)とピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(下図)
- Fig. 6 Result of Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry using ALOS-2 data(upper).Crustal deformation revealed by pixel offset method(lower).



図4-3. ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(衛星進行方向)。 震央・余震分布はAFADによる、断層線はStyron et al. (2020)より。



- 第7図 ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(上図)と SAR 干渉解析結果(下図)
- Fig. 7 Crustal deformation revealed by pixel offset method(upper).Result of Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry using ALOS-2 data(lower).



図5-2. ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(衛星視線方向)。 震央・余震分布はAFADによる、断層線はStyron et al. (2020)より。



図5-3. ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動(衛星進行方向)。 震央・余震分布はAFADによる、断層線はStyron et al. (2020)より。

第8図 ピクセルオフセット法により明らかになった地殻変動

Fig. 8 Crustal deformation revealed by pixel offset method.



図6. 解析エリア

図番号 (解析ペア)	観測日	観測時間 (UTC)	衛星進行 方向	電波照射 方向	観測 モード	入射角 (震央付近)	垂直 基線長
1-1, 1-2, 1-3 (ペア1)	2022-09-16 2023-02-17	9:33頃	南行	右	広域観測 (350km)	41.5°	-49m
2-1, 2-2, 2-3 (ペア2)	2022-09-05 2023-02-20	21:28頃	北行	右	広域観測 (350km)	40. 5°	15m
3-1, 3-2 (ペア3)	2022-09-10 2023-02-11	21:35頃	北行	右	広域観測 (350km)	47. 4°	-233m
3-1, 3-2 (ペア3)	2022-09-11 2023-02-12	9:25頃	南行	右	広域観測 (350km)	47. 4°	464m
4-1, 4-2, 4-3 (ペア4)	2022-04-06 2023-02-08	9:40頃	南行	右	高分解能 (10m)	31. 7°	-435m
5-1, 5-2, 5-3 (ペア5)	2019-09-18 2023-02-15	21:21頃	北行	右	広域観測 (350km)	44. 9°	-16m

表. 使用データ

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9図 解析エリアと使用データ

Fig. 9 Analysis Area and Data source for analysis.
10-3 2023 年 2 月 6 日に発生したトルコ中部地震の余震活動について Aftershock activity of the 6th February 2023 Central Turkey earthquakes

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

1) 2月16日までの余震活動

下限マグニチュード m_b 4.5 として、USGS 暫定版カタログ¹⁾の余震データに、ETAS モデルを当て はめた.後述するように 2月16日の余震活動は少数かつ複雑なので、最大余震 M7.5 から 0.01日の 経過時を起点として、それ以前の地震は ETAS モデルの履歴データとし、それ以後で最近までをター ゲット期間としてデータをあてはめた²⁾.第1図は AIC 値が最小となる ETAS モデルである。余震 減衰係数 p=1.43 である。本震後1週間時点では、この当てはまりが最良である。

2) 2月6日の本震から最大余震までの活動

本震 M7.8 から最大余震 M7.5 までの期間のデータに, ETAS モデルのパラメータに制限をかけた, あらゆる組み合わせで適合度を比較した.ただし,下限 m_b 4.5 を考慮して,本震直後 15.4分(0.01日) 以内のデータは ETAS モデルの履歴データとして,それ以後のから最大余震までをターゲット期間と してデータをあてはめた²⁾.先ず,全区間を通して同一モデルの場合の最良モデルは,原型大森関数 (p=1.0)である.その適合図を第2図の左端に与えている.

次に,本震時から1.1時間(0.046日)の経過時で活動の変化があったとして適合度³⁾を調べたところ, 変化点を考慮した2段階ポアソン過程モデルが,上述の大森モデルより,AICを改善している(第2 図の中央図と左側図).しかし余震数は十分でなく,後述するように,本震直後からの検出率変化を 考慮する必要がある.一応,この変化を相対的静穏化現象であると仮定して,第3b図の時空間プロッ トを見ると,本震付近より南部での静穏化が見られる.

関連して、本震と最大余震のモーメントテンソル^{4.5)} に基づいて、2月16日中のストレス変化(第 3図 c, d, eの Δ CFS)を見た.本震をソースとして最大余震を受け手とすると、第3図 c では Δ CFS が負値となる.しかし深さを増やすと Δ CFS は正値になる(第3図 d).さらに注目すべきは最大余 震のモーメントテンソル解で、ダブルカップル率が異常に小さく 34% である⁵⁾.この様に非ダブル カップル成分 CLVD が高いことは、断層が複雑な破壊を起こしていることを示しているが、これも 深部からの流体貫入によるためであることが示唆される.これらのことから、深部の静的応力と地 震動で流体の影響が示唆され、深部でのスロースリップに誘発されて最大余震が起きたと考えられ る.この前駆的なスロースリップをソースとして、本震のメカニズム解と同様な余震群を受け手とし た Δ CFS 図(第3図 e)によれば、本震の南西部で Δ CFS が負値になり、そこで余震の静穏化(第3 図 b)につながったと説明できる.同様な間接的な誘発は、例えば 1997 年3月と5月の鹿児島県北 西部地震や 2004 年中越地震と 2007 年中越沖地震の双子連鎖地震に見られる⁶⁾.なお本報告では近 似的な矩形断層のモデリングによるものであるが、USGS は詳細な断層破壊モデルによる、本報告と は異なったクーロン応力図から最大余震の直接的な誘発を示唆している⁷⁾.

さらに, USGS より多い余震データ数の, ヨーロッパ地中海地震センター(EMSC)のオンライン データ⁸⁾から最初の1日の特徴を調べた. EMSC カタログでは,通常時はターゲットマグニチュー ドの M3 前後より小さい地震は無視され編集されていないが,2月6日当日には,検出できた地震を 全てリストアップしている様に見える.第4図で本震由来の余震群(黒丸)と最大余震由来の余震群 (灰色丸) に分けて2月6日のデータの特徴を調べた.まず第4図b2に見られるように,最大余震 後に南側のM - T図が極端に薄くなっている.すなわち最大余震が起こってから顕著に南側の活動 が見掛け上落ちている.そこで検出率(欠測率)モデル⁹⁾を推定し,当日のデータと比べた.検出 率モデルのパラメータ変化(第4図 cl-3)から計算されたマグニチュード下限を上げていくと, $M \ge 4.5$ (第4図 d2) では,先ほど USGS のデータで解析した第2図の変化点付近で可なり欠測している.したがって,相対的静穏化の有意性を確認するためには,本震直後の欠測率を加味した均質データを 回復して議論する必要がある.

本解析に気象研究所提供の地殻変動解析支援プログラム MICAP-G を使用した.

(尾形良彦, 熊澤貴雄)

参考文献

- 1) USGS (2023) https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/
- Ogata, Y. (2006) SASeis2006, ISM Computer Science Monographs, No.33, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index j.html
- 3) Kumazawa, T., Ogata, Y. and Toda, S. (2010) J. Geophys.Res., 115, B10312, https://doi. org/10.1029/2010JB007567
- 4) USGS (2023) https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/moment-tensor
- 5) USGS (2023) https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jlqa/moment-tensor
- 6) 尾形良彦 (2018) 予知連会報 79 (7-3), https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou79/07_03.pdf
- 7) USGS (2023, Feb. 28) https://earthquake.usgs.gov/storymap/index-turkey2023.html
- 8) European-Mediterranean Seismological Centre (2023) LASTQUAKE the official EMSC earthquakes app, https://www.emsc-csem.org/
- 9) Ogata, Y. and Katsura, K. (1993) *Geophys. J. Int.* **113**,727-738, https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993. tb04663.x



Best ETAS Estimates (From M7.5 to Feb.15, Mc >= 4.5)

第1図 最大余震 M7.5 直後から2月16日までの余震活動の適合図

Fig. 1 Fitted model to the aftershock activity for the period from immediately after the largest aftershock of M7.5 through February 16.



Best ETAS Estimates (From M7.8 to M7.5, Longitude 35~40, Latitude 35~40, Depth 0~40km, Mc >= 4.5)

- 第2図 本震 M7.8 から最大余震 M7.5 までの活動. 左端は全区間,中央と右端は変化点を考慮. 下段図は上段図の 変換時間に対するもの。
- Fig. 2 Comparison of the models for the activity from the mainshock of M7.8 to the maximum aftershock of M7.5. The leftmost panel shows of the entire section, and the center and rightmost panels show the model with the change points. The lower figures correspond to the same one with the transformed time in the upper figures, respectively.



第3図 M7.8 の本震から M7.5 の最大余震までの余震活動とせん断応力の変化。 a) 震源地の分布, b) 緯度 v.s. 経過時間, c) 本震震源モデルに対する最大余震の受け皿としての静応力変化, d) 本震震源モデルに対する最大余震の深部延長部の静応力変化, e) 最大余震深部のすべりから本震と同じメカニズム解の余震への静的ストレス変化.

すべて ΔFCS では見かけ摩擦係数 μ '= 0.4 である。シナリオの詳細は本文参照。

Fig. 3 Aftershock activity from the main shock of M7.8 to the maximum aftershock of M7.5 and change in shear stresses. a) Distribution of epicenters; b) latitude v.s. elapsed time; c) static stress change of the maximum aftershock as a receiver relative to the mainshock source model; d) static stress change in the deeper extension of the maximum aftershock relative to the mainshock source model; and e) static stress change from the slip on the deeper extension of the maximum aftershock to the same mechanism solution as the mainshock; all Δ FCS is with the apparent friction coefficient μ '= 0.4. See text for scenario details.

- 430 -





Fig. 4 Characteristics of February 6 activity data based on EMSC online data. a) epicenters; b1 and b2) M-T plots; c1, c2, and c3) estimated b-values, magnitudes of 50% detection rate, and standard deviations of magnitude detection (all with 95% error curves); d1 and d2) cumulative number and detection rates of M≥4.5 events; e1 and e2) same as the above but for aftershocks of M≥4.0.

10-4 測地 VLBI 観測(国際・国内超長基線測量) The Results of VLBI Observation for Geodesy

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

[測地 VLBI 観測]

第1~2図は、測地 VLBIの国際観測によって得られた、石岡 VLBI 観測施設の位置及び移動速度 に関する資料である.つくば VLBI 観測局は 2016 年 12 月末で運用終了となり、石岡 VLBI 観測施設 にその役割が引き継がれた.

第1図は,これまでのVLBI観測から得られたつくば局-コキー局 (ハワイ) 間及び石岡局-コキー 局間の基線長の変化を示したものである.つくば局と石岡局の並行観測結果に基づいて,石岡局-コキー局間の基線長をつくば局-コキー局の基線長に換算している.

第1表及び第2表は、地球規模の測地基準座標系(ITRF2014)における、石岡 VLBI 観測施設の 座標値とその変化(速度)である。1980年4月から2022年12月までの全球の VLBI 観測データ(石 岡 VLBI 局は2015年2月~2022年12月)を用いた解析結果を示している。石岡 VLBI 局の速度は、 東北地方太平洋沖地震に伴う非定常的な変動を含んでいる。

第2図は、VLBIの国際観測から求めたアジア・オセアニア地域のプレート運動速度である.国土 地理院は、アジア・オセアニア地域のVLBI 観測を強化するために、2015 年からアジア・オセアニ ア地域を主とした測地 VLBIの国際観測、解析を行っている.今後も引き続き同地域の VLBI 解析の 結果を報告する予定である. 測地VLBI観測(超長基線測量) (1)

Geodetic VLBI observation (1)

VLBIによって観測された基線長の変化

国土地理院は、日本周辺のプレートの広域な相対運動を精密に求めるため、また、国際地球基準 座標系(ITRF)の構築に貢献するため、VLBI による全地球的な観測に参加している.現在国土地 理院が保有する石岡 VLBI 観測施設(以下「石岡局」という.)では、自転速度を求める特別な観測 を含めた国際 VLBI 観測を週に 5~6 回程度実施している.

これまでの VLBI 観測から得られたつくば VLBI 観測局(以下「つくば局」という.) - コキー局 (ハワイ)間及び石岡局-コキー局間の基線長の変化を第 1 図に示す.つくば局-コキー局間の基 線長は、つくば局と石岡局の並行観測結果に基づいて、石岡局-コキー局間の基線長に換算してい る.



第1図 つくば VLBI 観測局-コキー局間及び石岡 VLBI 観測施設-コキー局間の基線長変化 (縦軸は, 2022 年 12 月 21 日時点の基線長 5,744,082.592m からの差を表す.)

Fig. 1 Time series of baseline length between Japan (Tsukuba VLBI station and Ishioka VLBI station) and Hawaii (Koke'e station)

測地VLBI観測(超長基線測量) (2)

Geodetic VLBI observation (2)

VLBI観測局の位置及び速度

VLBI データの全地球的な解析によって求めた石岡 VLBI 観測施設の位置を第1表に,速度を第2 表に示す.石岡 VLBI 観測施設の移動速度は東北地方太平洋沖地震に伴う非定常的な変動も含んだ 値である.

第1表 石岡 VLBI 観測施設の三次元座標値(アンテナ中心 Epoch: 2010.0 下段: Sigma) Table. 1 Three-dimensional positions of Ishioka VLBI station.

	Х	Y	Z
位置 (mm)	-3959635964.85	3296825476.41	3747042656.02
	± 0.68	± 0.67	± 0.70

第2表 石岡 VLBI 観測施設の水平・鉛直方向移動速度(下段: Sigma) Table. 2 Horizontal and vertical velocities of Ishioka VLBI station.

	East	North	Up
速度 (mm/year)	13.99	-14.47	9.53
	±0.04	± 0.04	± 0.11

<解析条件>

使用データ: 1980年4月~2022年12月までのVLBI観測データ(7413観測)

石岡局の観測期間:2015年2月~2022年12月(440観測)

アプリオリ値:ITRF2014 (局位置・速度)・ICRF3 (電波源位置)

拘束条件:NNT, NNR

座標系: ITRF2014

測地VLBI観測(超長基線測量) (3)

Geodetic VLBI observation (3)

```
アジア・オセアニア地域のプレート運動
```

2015 年から,アジア・オセアニア地域の測地 VLBI 観測(AOV)が実施されている. AOV 観測 及びその他の国際観測データの全地球的な解析によって求めたアジア・オセアニア地域周辺のプ レート運動を第2回に示す.



第2図 アジア・オセアニア地域のプレート運動 Fig. 2 Tectonic plate motion of VLBI antennas in the Asia-Oceania region.

<解析条件>

使用データ:1980年4月~2022年12月までのVLBI観測データ(7413観測(内, AOV観測が70 観測))

アプリオリ値:ITRF2014 (局位置・速度)・ICRF3 (電波源位置)

拘束条件:NNT, NNR

座標系: ITRF2014

注:石岡局(ISHIOKA)は平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の余効変動が補正されていない

10 - 5 気象庁震度データベースを用いた地震予測(2022年の予測結果の評価と 発生確率値の更新)

> Earthquake forecasting by using the seismic intensity database of Japan Meteorological Agency (Evaluation of forecast results for 2022 and update of occurrence probability values)

> > 滋賀県立大学

Univ. Shiga Pref.

小泉・今給黎 (2016)¹⁾ や小泉 (2022a, 2022b)^{2).3)} は, 今給黎 (2016)⁴⁾ の原理を用いて, 気象庁震度デー タベース⁵⁾ を用いて 2015 年~ 2021 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, 前年まで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 (固体地球チャンネル)⁶⁾ というウエブサイトでも報告を行っている. 今回は, 主に 2022 年 の予測結果の評価をすると共に発生確率値を更新して 2023 年の予測を行う.

2001 年~2010年,及び,2012年から2022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 定常ポ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と、平均発生間隔T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 \geq t \geq 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2022年の実際の地震発生状況を第1図に、2019-2021年の発生間隔を用いた 1年間の予測と2022年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2020~2022年の発生間隔を用いて発生確率値を更新して得られた1年間と3ヶ月間(90日 ~92日間)の予測である(2023年の予測と考えても良い).

第1図と第2図を2022年の1年間予測として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⁷⁾. 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、2022年の1~3月・4~6月・7~9月・10~12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。また、予報期間が短くなるので適中率も下がる。2015年~2022年の 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図に示す。 2015年~2022年の予知率・適中率・安心率について、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)と予測年の前の3年にした時(B予測)とを比較すると、2015年~2019年 と2022年のB予測の3ヵ月予測の予知率が高く、それ以外の指標には差が無い。2015年~2019年 と2022年のB予測の3ヵ月予測の予知率が高いのは、直近の地震活動の影響を受けて、この期間の B予測の赤予報の数がA予測のそれよりかなり多くなるためである(第6図).また、A予測よりB 予測の方が、指標のばらつきが大きい傾向にある.なお、2001年~2022年に日本で震度4以上を記 録した地震の数を第6表に示す.

> (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 (2022a), 予知連会報, 107, 556-563.
- 3) 小泉尚嗣 (2022b), 予知連会報, 108, 601-607...
- 4) 今給黎哲郎 (2016), 予知連会報, 95, 425-431.
- 5) 気象庁 (2023), http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php, 2023 年 6 月 4 日確認.
- 6) Solid Earth Channel (固体地球チャンネル) (2023), https://www.solid-earth.com/,2023 年 6 月 4 日 確認.
- 7) 宇津徳治 (1977), 地震 2, 30, 179-185.
- 8) 白地図ぬりぬり (2023), https://n.freemap.jp/, 2023 年 6 月 4 日確認.



- 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⁸⁾というプログラムを用いた.他の図も同様である.
 右図:2022年に震度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"⁸. 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 in 2022. White color means the earthquake occurred and black color means the earthquake did not.



- 第2図 左図:2019~2021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:2022年に震度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 2019 to 2021.
 Right: Occurrence of the earthquake whose seismic intensity in JMA scale is four or greater in each prefecture in 2022. 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:2020~2022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 2020 to 2022.



- 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:2020~2022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 2020 to 2022.



第5図 2015年から2022年までの1年予測の評価 上図:予測に用いた地震活動期間を2001~2010年に固定したA予測の評価, 下図:予測に用いた地震活動期間を過去3年間にしたB予測の評価.

Fig.5 Evaluation of the one-year-forecast from 2015 to 2022.
 Upper: Evaluation of the A-forecast, which is based on the seismic activity during the period from 2001 to 2010.
 Lower: Evaluation of the B-forecast, which is based on the seismic activity for the past three years.



第6図 2015年から2022年までの3ヵ月予測の評価 上図:予測に用いた地震活動期間を2001~2010年に固定したA予測の評価, 下図:予測に用いた地震活動期間を過去3年間にしたB予測の評価.

Fig.6 Evaluation of the three-month-forecast from 2015 to 2022.
 Upper: Evaluation of the A-forecast, which is based on the seismic activity during the period from 2001 to 2010.
 Lower: Evaluation of the B-forecast, which is based on the seismic activity for the past three years.

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	如关中国	2001-10 年	2012-14 年	2013-15 年	2014-16 年	2015-17 年	2016-18 年	2017-19 年	2018-20 年	2019-21 年	2020-22 年	
NO.	卻迫府宗	(日)										
1	北海道	61	58	68	61	69	26	27	27	100	91	
2	青森	174	64	64	69	91	137	137	110	91	91	
3	岩手	99	38	58	78	122	137	122	100	73	69	
4	宮城	59	30	52	69	78	78	84	84	64	52	
5	秋田	522	365	548	365	219	365	365	548	219	219	
6	山形	243	548	1,095	548	548	1,096	1,095	1,096	274	274	
7	福島	85	24	37	46	48	44	55	78	64	42	
8	茨城	78	20	32	38	37	38	55	42	37	35	
9	栃木	87	41	44	46	55	69	91	69	52	52	
10	群馬	228	110	122	157	219	274	274	137	110	84	
11	埼玉	130	64	78	69	91	100	219	137	110	100	
12	千葉	114	58	78	84	73	64	78	55	69	73	
13	東京	94	137	137	137	183	365	274	137	100	110	
14	神奈川	215	73	110	110	183	274	548	548	219	219	
15	新潟	34	183	365	365	1,096	548	365	365	274	365	
16	富山	1,826	1,096	1,095	-	-	-	-	1,096	1,096	1,096	
17	石川	174	365	365	548	548	1,096	1,095	1,096	365	100	
18	福井	609	-	-	-	-	1,096	1,095	548	1,096	1,096	
19	山梨	730	219	548	548	1,096	-	-	-	219	183	
20	長野	166	122	156	137	157	122	137	157	274	219	
21	岐阜	261	-	1,095	1,096	548	548	365	219	183	219	
22	静岡	183	274	548	1,096	1,096	-	548	365	219	274	
23	愛知	406	1,096	548	1,096	1,096	548	548	365	1,096	548	
24	三重	522	-	-	1,096	1,096	548	1,095	1,096	1,096	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		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	1,096	1,096	
29	奈良	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	219	219	
31	 	522	1,096	219	69	73	91	1,095	1,096	-	-	
32	島根	457	1,096	1,095	365	548	137	183	183	-	-	
33	尚山	913	548	548	365	548	365	1,095	1,096	-	-	
34	 	730	1,096	548	2/4	365	2/4	548	548	365	274	
35	低岛	1,217	548	365	548	1,096	1,096	548	365	365	365	
36	 	913	548	248	210	1,096	548	1,095	1,096	1,096	1,096	
3/	変成	332	1,096	365	219	2/4	2/4	2/4	274	2/4	565	
38		457	1,096	365	2/4	365	274	548	365	548	548	
39		457	1,096	1,095	219	2/4	274	-	-	1,096	548	
40	価両 <i>仕</i> 空	012	1,096	548	100	110	210	1,095	1,096	1,096	1,096	
41	 	913	1,096	348	157	183	127	-	-	-	1,096	
42	大 呵 能 士	222	-	- 265	0	0	0	1,095	-	-	-	
45	 ★△	201	5/9	549	52	0	10	210	5/19	5/10	5/19	
44	一〇〇〇	261	274	274	100	100	110	156	210	210	274	
+5 46		215	157	122	72	72	01	130	127	61	60	
47	沖縄	457	274	219	219	1.096	1.096	1.095	548	548	548	
	< 1 (170)			/	/	-,	-,	-,	210		210	

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2022年の検証結果.

Table 2	Evaluation of the one-yea	r-forecast of t	he earthqu	ake whose	seismic inte	ensity in Jl	MA scale is four or greater in 2022.
	The forecast is based on the	ne seismic act	ivity during	g the period	l from 2001	to 2010.	_
			赤予報	黄予報	青予報	小計	-
		基金キロ	10	1.4	1	24	'

	赤予報	黄予報	青予報	小計
地震有り	19	14	1	34
地震無し	1	10	2	13
小計	20	24	3	47
適中率	19/20	0.95		
予知率	19/34	0.56		
安心率	2/3	0.67		

第3表 2019~2021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2022年の検証結果.

Table 3 Evaluation of the one-year-forecast of the earthquake in 2022, which is based on the seismic activity from 2019 to 2021.

	赤予報	黄予報	青予報	小計
地震有り	23	5	5	33
地震無し	1	1	12	14
小計	24	6	17	47
			_	
適中率	23/24	0.96		
予知率	23/33	0.70		
安心率	12/17	0.71		

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(4回分)における2022 年の検証結果 Table 4 Evaluation of the three-month-forecast in 2022, which is based on 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	7	34	18	59
地震無し	5	26	98	129
小計	12	60	116	188
適中率	7/12	0.58		
予知率	7/59	0.12		
安心率	98/116	0.84		

第5表 2019~2021年の地震活動に基づく震度4以上の地震の3ヶ月予測(4回分)における2022年の検証結果

Table 5Evaluation of the three-month-forecast in 2022, which is based on the seismic activity during the period from 2019 to
2021.

	赤予報	黄予報	青予報	小計
地震有り	21	21	17	59
地震無し	7	31	91	129
小計	28	52	108	188
適中率	21/28	0.75		
予知率	21/59	0.36		
安心率	91/108	0.84		

第6表 2001年~2022年に日本で震度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 2001 to 2022.

年	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
地震数	37	28	71	105	49	28	57	42	40	37	324	81	64	55	44	192	40	78	40	45	54	51

10-6 最近の能登半島群発地震活動の時空間的特徴と 2023 年 5 月 5 日 M6.5 地震に ついて

Space-time features of the Noto Peninsula swarm activity and the May 5, 2023 earthquake

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

1. はじめに.

石川県能登半島で 2020 年 11 月末から活発化した群発地震はこれまで 4 つの震央クラスタ A ~ D^{1,2,3)}(第1図)に分かれて発生しており,群発期以前から活動の見られた B 地域の浅部(0~14 km)では 2020 年 11 月末により深部へ移動した.以降,暫くして周辺の 3 領域で C, A, D 順に次第に 活発化した^{1,2,3)}.前回の統計数理研究所の報告³⁾では,非定常 ETAS モデル

$$\lambda_{\theta}(t|H_t) = \mu(t) + \sum_{\{i: S \leq t_i \leq t\}} K_0(t_i) e^{\alpha(M_i - M_c)} / (t - t_i + c)^p$$

の背景強度 $\mu(t)$ と GNSS 観測点間の斜距離の加速的増大が,珠洲観測点周辺の上昇時刻に始まって, B 地域の深部(Bd)から他地域の脆性断層内への流体貫入によって破壊に至るシナリオと矛盾しな いことを示した³⁾. また B 地域深部(Bd)での間欠的な群発地震で,背景強度 $\mu(t)$ の増加と後続地 震への余震誘発率 K0(t) との比が大きく異なる場合があり,余震活動を伴わない背景強度 $\mu(t)$ の増 加が地殻変動に大きく寄与している.

前回の報告(2022年11月5日)までは, B地域深部(Bd)及びC地域での背景強度 µ(t)は減少 傾向である.しかし, A地域の背景強度 µ(t)は高いまま推移し, D地域の µ(t)は2022年6月19日の M5.4 発生後,一時的に減少したが従来のレベルまで回復しつつあった.最近,領域の北辺で今年5 月5日に M6.5 の地震が発生した.本報告では,それに至るまでの群発地震の推移と本震以降の活動 について解析した.データは2023年5月8日までのJMAカタログと,4月29日(5月16日に取得) までの GNSS 観測時系列を使用した.

2. 2022 年 11 月後から最近までの群発地震活動と測地変化の解釈について

A ~ D 各地域を通る GNSS 斜距離や珠洲観測点の上昇の変化との対応を考察した(第1図).特 に珠洲 - 舳倉島基線はこの能登半島地域のストレス場の変化と深く関係しているが,斜距離の変動ス ケールより珠洲の上昇スケールが数倍程度であることに注意する. ETAS の背景強度 µ(t) は,線形ス ケール(第2図上段,下段は対数スケール)で見れば,A地域では増大・減少を比較的短周期で繰 り返しているが,全体では緩やかに減少し,D地域ではゆっくりと増大・減少を繰り返している.B 地域では,第1図によると,浅い領域(Bs)に活動が移動してから余震誘発率 K₀(t)と伴に漸増トレン ドの継続が見られ,その東部延長部に向けての震央の移動が顕著である(第4図).また第1図によ ると,珠洲を起点とする他観測点との斜距離や珠洲比高は,M6.5 地震時まで増加のトレンドが見ら れる.ただし,小木一珠洲の2023 年当初の下方へ,そして M6.8 地震の直前に舳倉島-珠洲の斜距 離と比高に飛びが見られるが,これは去年11月の佐渡島の小木観測点と今年4月末の珠洲観測点に アンテナ交換による飛びが見られるので,これらが関わる部分は除外して見た. 5月5日の石川県能登地方の震源断層モデル解⁴⁾の上端の深さを10kmと替えて、深部ゆっくりすべり断層モデルを仮定し、MICAP-Gで計算すると、前述の観測斜距離時系列や上昇の増加性トレンドが説明可能である.またB地域東部への群発地震活動の移動(第4図)は、10km深さ前後での受け手メカニズム解のストレス場をM6.5 震源断層モデル解⁴⁾とほゞ同様とすれば、 $\Delta CFS > 0$ となることで説明可能である.

第2図で、AとD地域の2022年からM6.5本震前までの時空間活動(M≥1)をみると、5月4日 の前震を除いて、静穏化がA地域にも及んで見られる.これに対応して、D地域の背景地震率 $\mu(t)$ が減少している.また、A地域の最近の $\mu(t)$ は減少トレンドであり、これに対応する第2図の発生パ タンは明白である.同様に、 $\mu(t)$ が2022年6月19日のM5.4発生後しばらく経って減少したことに 対応して第2図のD地域に、A地域へも及んで、静穏化が見られる.

後者の静穏化の原因は定かでないが, M6.5 本震直前の周辺の静穏化は深部ゆっくりすべり断層モ デルのストレスシャドーで説明可能である. D地域の累積図のトレンド変化で1ヶ月ほどの静穏化 とその回復は認められる.

3. 能登半島の群発地震の空間 b 値分布および密度分布から分かったこと

A ~ D 地域を含む 20km 深までの全領域の空間 b 値分布を, 2 次元デロネ型関数を用いた ABIC に よる最適なベイズ的平滑化 HIST-PPM⁶⁾ によって計算した.水平面投影だけでなく各領域の南方から 見た経度対深さの垂直面への投影図を与えているが,何れも 2 次元座標の平滑化である.

第3図(b)におけるAとD地域の水平面投影のb値分布の特徴は,密度が疎な周辺部,特に北部の b値は広く1.5以上であり高いが,中・南部では地震分布が高密度(第5図参照)であり,それに見合っ て細かいb値の変動が見られる.第3図(a)における垂直面投影の深さ対経度分布ではD地域の方 がA地域より等高線が急峻な変化になっている.2022年以前のM4.3以上の震源(黄色丸)はb値 分布が低い部分に起きていたが,今回の本震M6.3と最大余震M5.9はb値分布が高い部分に起きた.

地域 B と C,及びそれらの垂直面投影図は独特の変化となっている(第3図(c)参照).第4図から B 地域の浅部(Bs)では顕著な東方へのマイグレーションが見られ、この傾向は 2023 年1月頃から加速化した.M6.5 破壊断層の深部ゆっくりすべり断層を仮定すれば、この移動は流体浸透と正の ΔCFS が相俟って説明可能である.

第5図のAとD地域の水平地震密度分布によると M6.5 は北部の疎な部分に発生している.前日(5 月4日)から直前の M6.5 地震発生前に起きた M \geq 1の地震の位置を×印で示しているが, M6.5 周 辺の四角内(第5図参照)で起きたものは8個あり,その平均b値は 0.85 で標準より低いが,それ らの殆どは元々極めて低いb値の領域(第3図b参照)に起きている.

4. M6.5 地震後の余震の異常時空間パタンとその解釈について

大森宇津モデルを M6.5 本震から最大余震前までで当て嵌めると、下限マグニチュードに関わらず 大変良く当てはまる(第6図).ただし下限マグニチュードを下げると本震直後の地震欠測を贖うた めに c 値は大きくなる.この様な適合曲線の線形変換時間について経度座標をプロット(第6図の 下段図)すると、事前に最大余震周辺での相対的な空白が明瞭に表れる.これは、第6図右側で深 さ対時間図に端的に示されている様に、本震で誘発された最大余震周辺でのゆっくりすべりで M6.5 の余震活動の一部にストレスシャドーが生じたためと解釈できる. 5. 考察

今回の解析は主に M6.5 の断層解を梃に、スロースリップのシナリオを仮定して、事前の測地変化 や群発地震活動の変化パタンが首尾一貫しているかを確かめてみた. 同様な試みの参考文献⁷⁻¹⁵⁾が あるが、内陸部でのスロースリップ自身は微小なのでインバージョンが難しく、そのため大地震予測 に繋がらない. なので、様々な場所のスロースリップをシナリオ化し、測地変化や群発地震活動の 変化の尤もらしさを評価し、確率予測に繋げることが望まれる.

今回の中期予測として、相対的な意味で地震密度分布や地震空白について追及することは意味が あったが、前震と思われる狭い本震近傍領域での時間的なb値の低下はみられなかった. 広域な領 域でのb値の低下などは、もともと地震活動が、b値が低い場所へのマイグレーションした可能性 もある.

謝意.本解析に関して気象庁震源カタログ,地震活動解析ソフト(TSEIS)¹⁶,国土地理院地殻変動 情報表示のGEONET データ,気象研究所の地殻変動解析支援プログラム MICAP-G⁵⁾ および統計数 理研究所のデロネ型三角網配置上の Bayes 型平滑化のプログラム(HIST-PPM)⁶⁾ を使用した.

(熊澤貴雄,尾形良彦; KUMAZAWA Takao, OGATA Yosihiko)

参考文献

- 熊澤貴雄,尾形良彦 (2022). 予知連会報 107 (7-4)
 https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou107/07 04.pdf.
- 熊澤貴雄,尾形良彦 (2022). 予知連会報 108 (7-3)
 https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou108/07_03.pdf
- 3) 熊澤貴雄,尾形良彦 (2023). *予知連会報* **109** (7-2) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou109/07 02.pdf
- 4) 地理院 (2023) 令和5年5月5日の石川県能登地方の地震活動の震源断層モデル(暫定), https://www.gsi.go.jp/common/000249465.pdf
- 5) 内藤宏人,吉川澄夫(1999) 地震 第2輯 52(1) DOI https://doi.org/10.4294/zisin1948.52.1_101
- 6) Ogata Y. et al. (2020). *Computer Science Monograph*, No. **35**, 統計数理研究所, https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index j.html
- 7) Ogata, Y. (2007) J. Geophys. Res. 112, B10301, doi:10.1029/2006JB004697.
- 8) 尾形良彦 (2007) 予知連会報 78(7-11) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou78/07_11.pdf
- 9) 尾形良彦 (2008) 予知連会報 79(7-3) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou79/07_03.pdf
- 10) 尾形良彦,遠田晋次 (2008) *予知連会報*, **80** (12-05) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou80/12_05.pdf
- 11) Ogata, Y. (2010). PAGEOPH 167 (8-9) 1115-1127, doi:10.1007/s00024-010-0096-y.
- 12) 熊澤貴雄,尾形良彦 (2010) 予知連会報 84 (3-5) https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou84/03_05.pdf
- 13) Ogata, Y. (2011). Geophys. J. Int. 186(1), 331-348, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05033.x.
- 14) Ogata, Y. and Tsuruoka, H. (2016). Earth Planets Space 68 (44), doi: 10.1186/s40623-016-0410-8
- 15) Kumazawa, T., Ogata, Y. and Toda, S. (2020). *Geophys. J. Int.*, **223**(2), 1304-1312, https://doi.org/10.1093/gji/ggaa356.
- 16) 鶴岡 弘 (1995) 地震研究所技術研究報告 No. 2. 34-42



第1図 各地域の地震活動と地殻変動.

地図パネル (b) の赤矩形は領域分け (A ~ D). 黒丸は GNSS 観測点.パネル (a) の上段は各領域の地震活動 の解析結果の時間変化. 灰色のスパイク状曲線は非定常 ETAS モデルの強度変化,赤曲線は背景強度,青 曲線は余震誘発強度で,いずれも対数スケール.中段は M-T プロット.下段の灰色丸は斜距離変動または 比高変動で,赤曲線は前後の 90 日の移動中央値(2022 年終わりまで)を表す.縦赤点線は 2022 年 6 月 19 日の M5.4 発生時刻を示す.灰色実線は前解報告 3)の終点(2022 年 10 月 22 日).

Fig. 1 Seismicity and crustal changes in each region.
The red rectangles in the panel (b) show the regions A~D. The black circles show the GNSS observation stations. (a) Upper panels: Analysis results of seismic activity in region A~D. The gray spike-shaped curves show the intensity variations of the nonstationary ETAS model (Equation 1). The red curves show the background intensities μ (t), and the blue curves show the aftershock induced intensities K0(t), in logarithmic scale. (a) Middle panels: M-T plots. (a) Lower panels: Most relevant GPS changes for region A~D. Grey circles are the daily variations of diagonal distances and relative heights, with running median of 6 months span in red curves up to the end of 2022. The vertical dotted line shows the time of M5.4 occurrence on June 19, 2022. The gray line is the end point of the previous report3) (October 22, 2022).



第2図 各地域の背景地震強度とA・D地域の時空間地震分布.
 上段の曲線は色別に各地域の背景地震強度を線形スケールで表す. 下段はA地域とD地域の震央分布(左)と時間対経度分布. 色はポアソン密度の対数スケールを表す. それぞれ M≥1の地震活動.
 Fig. 2 Background seismicity and spatio-temporal seismic configuration of regions A and D.

Fig. 2 Background seismicity and spatio-temporal seismic configuration of regions A and D. Upper panel shows the background seismicity of each region in linear scale. Lower panel shows the epicenter distribution in region A and D (left), and time-to-longitude distribution with Poisson intensity in log scle. Cut-off magnitude is M ≥ 1.



第3図 群発地震領域の平滑b值.

各震源位置での色標は平滑化したb値を表す.結果が,地震が密な部分では,色が重なって詳細が見えに くいが,その重なりは底から表面まで時間順である.各パネルの点線・点矩形は地震活動の領域分け.パ ネル(a)はAとD地域の深さ対経度の平滑化b値分布.パネル(b)は全地域(A~D)での緯度対経度分 布で黄色丸はM6.5 地震発生以前のM4.3以上の震源を示し,赤三角は2023年5月5日の本震M6.5(右側) と最大余震(左側)の震源.パネル(c)はBとC地域の深さ対経度の平滑化b値分布.

Fig. 3 b-value pattern in the earthquake swarm region.
 The color at each epicenter shows the b-value of the color bar. The result is that in areas where the seismic activity is dense, the colors overlap and details are difficult to see, but the overlap is in time order from bottom to surface. The red triangle indicates the hypocenter of M6.5 on May 5, 2023 (right side) and its largest aftershock (left side). The yellow circles indicate the hypocenters of M4.3 or higher before the M6.5. Dotted lines and dotted rectangles indicate regions A~D.



第4図 B地域周辺の震央分布移動の時間推移.

B 地域とその東北延長地域(右図の色を付けた領域)を対象とした. 左図は経度対時間分布. 色はカラーバー に対応する. Bd 地域(14km 以深)の活動は灰色で表す. 右図は震央分布.

Fig. 4 Hypocenter migration around area B.

The target area is the region B and north-east extension. Color shows the occurrence time. Left panel is for the longitude-to-time distribution. Gray colored circles correspond to the hypocenters deeper than 14km (Bd). Right panel shows the epicenters.



第5図 AとD地域の地震密度分布. 配色の形式は第2図と同様.ポアソン強度は対数値の色標や等高線に対応し,赤三角は第2図に同じで,×印は5月4日から M6.5 までの震央分布を示す.

Fig. 5 Seismic density distribution in A and D regions.
 Poisson intensity corresponds to the logarithmic color markers and equidistant contour lines of log scale, red triangles are the same as in Figure 2, and X marks the epicentral distribution from May 4 to M6.5.



```
第6図 2023年 M6.5 地震の後続地震 (余震).
```

5月5日中の全ての前震と余震の震央分布 (一列目上図)と E 領域と外側 (F 領域)の深さ対時間の分布 (中, 下図). 本震後の M ≥ 1.5 活動で最大余震の1時間前までを大森宇津式で当て嵌めた. 2 及び 3 列目上段は 累積数及び M-T 図 (左側は通常時間,右側は変換時間). 下段左側は経度対変換時間図,及び右側は緯度 対変換時間.

Fig. 6 Subsequent earthquakes (aftershocks) of the 2023 M6.5 earthquake. Distribution of epicenters of all foreshocks and aftershocks during May 5 (top of first row) and depth vs. time in region E and outside (region F) (middle and bottom rows). M ≥ 1.5 activity after the main shock up to 1 hour before the largest aftershock is fitted with the Omori-Utsu formula; upper rows of columns 2 and 3 show cumulative number and M-T diagram (left side: normal time, right side: conversion time). The left side of the bottom panel shows the longitude vs. conversion time diagram, and the right side shows the latitude vs. transformation time diagram.

重点検討課題の検討

第238回 地震予知連絡会重点検討課題 「人工知能による地震研究の深化」

第239回 地震予知連絡会重点検討課題 「群発地震」

11-1 第238回地震予知連絡会重点検討課題「人工知能による地震研究の深化」の概要

Evolution of Seismology with Artificial Intelligence

平田 直 (東京大学名誉教授)

長尾 大道 (東京大学地震研究所)

Naoshi HIRATA(Professor Emeritus, The University of Tokyo)Hiromichi NAGAO (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

2000年代から始まった現在の第三次人工知能ブームはいまだに止まるところを知らず,人間社会 および生活様式を一変しつつあり,地震学分野においても2017年頃から人工知能の導入が国際的 に急速に進められている.人工知能は定められたルールの下で明確な目的を達成する場合において 大きな威力を発揮することから,特に地震波検測と初動極性判定などにおいてはかなり高精度な深 層学習器が提案されており,その検出力は経験豊かな地震学者の目を上回ることもしばしばである. わが国では,1995年兵庫県南部地震を契機に整備された二千点以上の高感度・広帯域地震計からな る地震観測網に加え,近年ではライフラインなどに設置された振動計やスマートフォンに内蔵され た加速度計の地震研究への利活用が検討され始め,数千万点以上の地震観測点が誕生する「地震超 ビッグデータ」時代の到来を予感させているが,ここから現実的な時間内に情報を余すことなく引 き出すために,人工知能が導入されていくことは自然な流れであると言える.

このような最先端の情報科学技術の地震研究への導入を加速させるため、科学技術振興機構 戦略 的創造研究推進事業 CREST「次世代地震計測と最先端ベイズ統計学とによるインテリジェント地 震波動解析」(iSeisBayes,研究代表者:平田直,研究期間:2017~2022年度)を皮切りに、文部 科学省「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト」(STAR-E プロジェクト,研究期間:2021 ~2025年度)や科研費学術変革領域研究(A)「Slow-to-Fast 地震学」(SF 地震学,研究期間:2021 ~2025年度)など、地震学と情報科学の専門家が参画する「情報×地震」の大型プロジェクトが 発足した.特に、「情報×地震」分野に関する論文出版数や学会発表件数が急増し始めた 2017年度 から開始となった iSeisBayes は、わが国における同分野の牽引に大きく貢献したと言える.

これらの大型プロジェクトでは、地震学の多岐にわたる研究テーマにおいて最先端の情報科学技術の導入が試みられている.しかしながら、地球内部起源の振動現象には、通常の地震以外にも、 低周波微動を含むスロー地震など多種多様な現象が混在しており、それらを分類しながら検出する ためには、これまでに提唱されてきた人工知能技術はまだ十分とは言えない.また、地震活動の時 空間分布や地球内部構造のモデリングにおいては、人工知能が人間の頭脳を凌駕するには、まった く至っていない.これは、現在の深層学習は「人間が理解可能となるように思考過程を示す」こと ができず、得られたモデルの妥当性の検証や、それに基づくモデルの更新が困難であることが大き な要因であり、結論に至るまでの論理が問われることが多い地震研究においては、人工知能の回答 には不満が残る場面もまだ多く見受けられる.今後の「情報×地震」分野のますますの発展に向けて、 情報科学分野で昨今議論されている「説明可能 AI」の進展が待たれるところである.

また,様々な学術分野において情報科学分野の専門家のニーズが極めて高くなっており,彼らの 激しい争奪戦が繰り広げられている.超ビッグデータ時代を迎えつつある地震学の発展に欠かせな い「情報×地震」分野をわが国がリードしていくためにも,今後も数多くの関連プロジェクトを実 施し,情報科学分野の専門家と密な連携を構築しておくことが極めて重要であることを強調したい.

(平田 直・長尾 大道) HIRATA Naoshi, NAGAO Hiromichi

11-2 人工知能による複数観測点を用いた地震・測地イベント検知手法開発 Development of seismic and geodetic event detection methods using multiple observation stations by artificial intelligence

統計数理研究所 矢野 恵佑 The Institute of Statistical Mathematics, Keisuke Yano

現在では稠密な地震計ネットワークから膨大な量の連続地震データが取得されている.例えば、 首都圏稠密地震観測網(MeSO-net)や南カリフォルニア地震観測網のような高密度な地震計ネット ワークは、リアルタイムで地震を監視し、それぞれの観測網からの連続波形が得られている.これ らのデータセットを効率的かつ徹底的に解析することは、地震学ひいてはわが国の防災にとって大 きな利益に繋がる.本発表で紹介した手法の主な目的は,これらの巨大な地震ネットワークデータ セットに対する地震検出技術の改良です.近年,深層学習は,このような膨大なデータを扱い,デー タ処理性能を向上させることができるツールとして,地震学においても関心が高まっている ¹⁾. 畳 み込みニューラルネットワーク(CNN)は、地震解析によく使われる深層学習の機構の一つである. CNN は、P 波到達時間のピッキングと初動極性の判別、地震の検出とその局在、P 波とS 波の両方 の到達時間のピッキング、通常地震と微動の判別にも利用されている。これらの研究は、大規模な 地震データセット解析における CNN の有効性を示している. その他にも, 様々な地震解析のため に、深層学習を用いた研究が数多く開発されている.このように深層学習は今日の事実上のデータ 解析の標準手法の一つであり、地震イベントの検出においても国内外で数多くの成功を収めている. しかし、私たちが研究に着手する以前は、地震学における深層学習の適用のほとんどは、単一の観 測点の波形データのみを利用したものが大半であった.実際の観測波形には地震の他に地表面付近 の局所的な環境雑音が多く存在するため、単一の観測点のみで誤検知を抑えるのは限界があると考 えられる。そこで、私たちは、地震計の空間配置を考慮した畳み込みニューラルネットワークを活 用した地震計アレイでの地震自動検知法を開発した²⁾.開発手法においては、地震計の空間配置を 距離グラフで表し, 距離グラフを活用した深層学習器を考えた.提案手法を MeSO-net の実観測デー タを利用して学習させ、検証用のデータによって、深層学習器の複数観測点への単純な適用や単観 測点での深層学習器の適用と比較した、すると、提案手法がこれらの手法の中で高検知率・低誤検 知率をもつことが確認された。さらに誤検知率を抑えると同時に、人が見落すような非常に微弱な 地震信号を捉えることに成功していることが確認された.

統計数理研究所 矢野 恵佑

謝辞

本研究は JST CREST「次世代地震観測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地 震波動解析」の助成を受けたものである.

参考文献

- 1) Mousavi and Beroza (2022), Science, 377. Deep-learning seismology.
- 2) Yano et al. (2021), *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **126**. Graph-partitioning based convolutional neural network for earthquake detection using a seismic array.



第1図 深層学習器を用いた複数地震観測点からの地震イベント検知法の開発(図は Yano et al. (2021)から引用) Fig. 1 Times New Roman, 9pt. Development of a method for deep-learning based detection of seismic events from multiple seismic stations (Figure taken from Yano et al. (2021))



第2図 開発手法を連続適用した際の出力と新検出

Fig. 2 Output probability sequence and new detections from successive application of the developed methodology

11-3 機械学習を併用した自動震源決定による微小地震の検出 Detection of micro-earthquakes by automatic hypocenter determination combined with machine learning

溜渕 功史・工藤 祥太*・下條 賢梧*(気象庁気象研究所)(*気象庁)
TAMARIBUCHI Koji, KUDO Shota*, and SHIMOJO Kengo* (Meteorological Research Institute)
(*Japan Meteorological Agency)

気象庁が文部科学省と協力して一元的に処理を行っている一元化震源では,平成23年(2011年) 東北地方太平洋沖地震以降,膨大な地震が発生したため,余震域において海域 M ≥ 3,陸域 M ≥ 2 の処理 M 下限を設けた.そのため,それ未満の微小地震は未だ十分にカタログ化されていない. これらの未カタログ地震を検出するため,これまで同時多発地震に対応した自動震源決定手法(PF 法)¹⁾を開発し,2011年3月以降の長期間の地震波形に適用を試みてきた²⁾.しかし,自動震源に は数~10%程度のノイズ等による誤検出が含まれるため,微小地震の検出数を維持したまま誤検 出を効率的に低減することが課題だった.近年,深層学習手法の地震学への適用が進み,深層学習 アプローチによる地震波検測等が数多く提案されている.そこで,それらの技術を PF 法の自動震 源決定に取り入れ,自動震源決定の更なる精度向上を行った.

データは 2011 年 3 月から 2012 年 2 月までの 1 年間の地震波形,約 1400 地点を解析に用いた. 自動震源決定は、(1) 地震波検測、(2) 相組合せ探索(phase association)、(3) 震源計算、(4) 品 質管理の主に 4 つのプロセスからなる.(1) 相読み取りは AR-AIC 等の従来の検測手法を用いて検 測した後、検測時刻周辺 4 秒間の 3 成分地震波形を畳み込みニューラルネットワーク(CNN)に入 力して、P/S/N 確率を得る.モデルは工藤・他(2023)³⁾の約 90 万波形で学習したモデルを使用した. P/S/N 確率のいずれかが閾値以上の場合,それぞれ± 2 秒間に検測されたそれ以外の相を削除した. 閾値は 0.9 とした.例えば P 確率 0.9 以上の場合,± 2 秒以内の S 相を削除した.以下,このプロ セスを CNN デノイザという.(2) 重点サンプリングを用いて最適な相の組合せを探索し(PF 法),(3) 震源決定は気象庁一元化震源と同じプログラム^{4).5)}を用いた.(4) 品質管理では、震源検測値の各 種特徴量(震源誤差,P/S 検測値数等)を入力とし、教師あり学習の一つである LightGBM により 品質ラベル分類を行った.教師データは溜渕・中川(2020)²⁾ で作成した自動地震カタログ(3 月 1 日~16 日の約 2 万イベント)を目視で波形を確認し、4 つのラベルに分類した(A: 震源近傍で誤 検測がない、B: 誤検測数が 1 ~ 2 つ、C: 誤検測数が 3 つ以上、D: ノイズ).検測値だけからは、ラ ベル A、B、C の判別ができず全体の正答率は 81.9% だが、ラベル A、D に限って正答率を算出す ると 97.8% であった.

CNN デノイザの効果を検証するため, 地震多発時(3月11日12-24時)と平常時(3月1日0-12時)のそれぞれ12時間の自動震源を, 震源時5秒以内かつ震央距離50kmの条件で一元化震源と比較した(第1図).その結果,相読み取りの総数は地震多発時も平常時もともに約3割削減されたにも関わらず,一元化震源と一致する自動震源の数はほぼ変わらなかった.これはノイズの誤検測を適切に除去できていることを示している.

2011 年 3 月の期間に得られた自動震源は、112,004 個であった. CNN デノイザ前後の震源分布を 比較すると、島しょ部などで従来見られた誤検出が抑制されている(第 2 図). 品質管理処理によ る分類結果を第 1 表に示す. CNN デノイザ導入前後の個数比は A: -4% であるのに対して D: -78% などとなり, 誤検測がないラベルAもわずかに減少したものの, 誤検測を含むラベルB, C, Dを大 きく減らすことができた.得られたラベルA, Bの自動震源のうち,一元化震源カタログと一致し ない(すなわちカタログ未掲載)の地震は67,438 個であった.一元化震源は本期間で55,112 個(低 周波フラグ除く)だったので,両者をマージすることで従来の倍以上の地震数が得られた.同様に, 2011 年3月から2012 年2月までの長期間に適用した結果,一元化震源は320,427 個(低周波フラ グ除く)だったのに対して,マージ震源は937,140 個となり,従来のカタログの約2倍に相当する 61万個の微小地震活動を新たに検出した.

自動震源(品質管理ラベルA, B)を一元化震源にマージしたカタログの規模別頻度分布を第3 図に示す.地域別にみると、多くの領域でMc (completeness magnitude)が低下した.特に、秋田県 などの東北地方の内陸では最大約8倍の震源数となった.DD法⁶⁰でこれらの地域の相対震源決定 を行うと、より詳細なクラスタ分布を見ることができる(第4図).また、2011年3月12日3時 59分に長野県北部で発生したM6.7(最大震度6強)の地震が発生した領域では、M6.7の地震に先 行して3月11日14時46分以降に微小地震が86個決定された.このように、新たに検出された微 小地震は、より詳細なクラスタ分布や微小な前震活動の把握などに貢献する.

> (溜渕 功史) TAMARIBUCHI Koji

謝辞

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,産業技術総合研究所,国土地理院,海洋研究開発機構,青森県, 東京都,静岡県,横浜市,神奈川県温泉地学研究所,および気象庁の地震波形を使用しました.解 析には東京大学地震研究所共同利用 (2022-F3-12) 大規模地震連続波形データ解析システムを利用し ました.一元化震源を使用しました.

参考文献

- 1) Tamaribuchi (2018), Earth Planets Space, 70, 141.
- 2) 溜渕・中川 (2020), 験震時報, 83, 3.
- 3) 工藤·他 (2023), 験震時報, 86, 4.
- 4) 浜田・他 (1983), *験震時報*, **48**, 35-55.
- 5) 上野·他 (2002), 験震時報, 65, 123-134.
- 6) Waldhauser and Ellsworth (2000), Bull. Seismol. Soc. Am., 90, 1353-1368.
- 7) Woessner and Wiemer (2005), Bull. Seismol. Soc. Am., 95, 684-698.



- 第1図 CNN デノイザ閾値を変えたときの地震波検測数と自動震源の決定数うちー元化震源との一致した震源数の割合. (a) 2011 年 3 月 1 日 00 時~12 時, (b) 2011 年 3 月 11 日 12 時~24 時. 一致とみなす基準は一元化震源と比較して, 震源時 5 秒以内かつ震央距離 50km 以内の自動震源の個数.
- Fig. 1 Number of phase picks and percentage of the number of automatically determined hypocenters coinciding with the JMA unified catalog when the CNN denoiser threshold is changed. (a) 00:00-12:00, March 1, 2011; (b) 12:00-24:00, March 11, 2011. The criterion for matching is the number of automatically determined epicenters within 5 seconds of the origin time and within 50 km of the epicentral distance compared with the JMA unified catalog.



- 第2図 自動震源の比較. 2011年3月1日~3月31日, M全て, 誤決定を含む. (a) 従来手法 (溜渕・中川, 2020), (b) CNN デノイザ後の分布.
- Fig. 2 Comparison of automatically determined hypocenters, March 1 March 31, 2011, M all, including false detections. (a) conventional method (Tamaribuchi and Nakagawa, 2020), (b) distribution after CNN denoiser.

comparison of automatic quarty control results before and after the ertit denoiser.								
	А	В	С	D				
CNN デノイザ導入前	104253	7545	6848	3707				
CNN デノイザ導入後	100265	5882	5055	802				
差	-3988	-1663	-1793	-2905				
割合 (%)	-3.8	-22.0	-26.2	-78.4				

第1表 CNN デノイザ導入前後の自動品質管理結果の比較

Table 1 Comparison of automatic quality control results before and after the CNN denoiser



- 第3図 (a) 自動震源と一元化震源をマージしたマージ震源の震央分布図. 2011 年3月1日から2012 年2月29日, 深さ0-50 km, M全て. (b) (a) の各領域の規模別頻度分布図. 赤色は一元化震源, 黒色はマージ震源. *Mc* は MAXC+0.2⁷ による.
- Fig. 3 (a) Epicentral distribution of the merged catalog, March 1, 2011-February 29, 2012, depth 0-50 km, M all. (b)
 Frequency magnitude distribution for each region in (a). Red indicates the JMA unified catalog, black indicates the merged catalog.



- 第4図 秋田県北部 (第3図の領域6)の震源分布図 (拡大図). 2011年3月1日から4月30日,深さ0-30 km, M全て. (a) 一元化震源 (K フラグ), (b) マージ震源 (K フラグ及び品質管理ラベルA)のDD 法再決定分布.
- Fig. 4 Enlarged epicentral distribution in northern Akita Prefecture (area 6 in Fig. 3), March 1-April 30, 2011, depth 0-30 km, M all. (a) The JMA unified catalog (K flag), (b) the merged catalog (K flag and QC label A) redetermined by the DD method.

11 - 4 地震動予測への機械学習技術の適用 Application of Machine Learning Techniques to Ground-Motion Prediction

防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震による予測対象地点での揺れの強さ,もしくは揺れの時系列を予測することを目的とする地 震動予測は,事前の地震ハザード評価や事中の緊急地震速報,事後の被害推定などにおいて活用さ れている.近年その予測やそれを支える基礎情報の作成などに機械学習が適用されてきている.こ こでは,①少数の説明変数に基づく地震動指標値の予測,②少数の説明変数に基づく地震動時系列 の予測,③時系列情報に基づく地震動指標値の予測,④時系列情報に基づく地震動時系列の予測, ⑤その他関連する研究,の5分野における機械学習の適用状況に関して簡単なレビューを行う.

①少数の説明変数に基づく地震動指標値の予測:地震による任意地点での震度や最大加速度などの揺れの強さ(地震動指標値)を予測することには、これまで地震動予測式と呼ばれる過去の地震動記録に基づいた経験式を用いられてきた.この場合、地震からの距離や地震のマグニチュードなどが説明変数として使われる.この予測問題を教師あり機械学習と見なし、機械学習に基づいて予測モデルを作成することがこれまでに多数行われている^{1,2)}.既存の予測式に比べて、学習したデータの範囲内では予測精度が向上すること³⁾,またより柔軟な予測が可能であること^{4,5)}が示されている.

②少数の説明変数に基づく地震動時系列の予測:地震による任意地点での地震波形などの地震動 時系列の作成には、数値シミュレーションや経験的手法、統計的手法などが用いられてきた.この 問題に対して機械学習モデルの一つである生成モデルの適用が近年進められており、敵対的生成 ネットワークGANの一種であるConditional GANによって過去の地震動波形記録を学習することで、 観測を模倣した疑似データを生成することが試みられている^{6,7)}.別のアプローチとして、Physics Informed Neural Network と呼ばれる物理則を考慮するニューラルネットワーク技術を適用した研究 もある^{8,9,10)}.

③時系列情報に基づく地震動指標値の予測:地震が発生し,ある観測点に到着した地震動のはじ め数秒間から,その地点での最終的な揺れの強さを予測することは,オンサイト緊急地震速報と呼 ばれる.これまでは生波形記録から抽出した特徴変数から最終的な揺れの大きさを予測することが 行われてきた.近年はこのタスクを機械学習で行おうという研究が進められている^{11,12)}.また複数 観測点の記録を使って,複数地点での予測を試みた研究もある¹³⁾.

④時系列情報に基づく地震動時系列の予測:緊急地震速報の研究分野においては近年揺れから揺 れの予測が盛んに研究されており、これにも機械学習が適用されている^{14,15,16)}.また地震動シミュ レーションで得られる長周期波形の情報から短周期波形を取得し、それらを組み合わせることで広 帯域な地震動を作成する研究にも機械学習は適用されている^{17,18)}.

⑤その他関連する研究:観測点毎に異なるサイト増幅特性の推定に機械学習を適用した研究¹⁹⁾ や地震ハザードシナリオの分解・再構築に機械学習を適用した研究²⁰⁾などがある.

以上にまとめたように地震動予測と機械学習を組み合わせた研究によって多くの研究成果が得ら れており、今後のさらなる飛躍が期待される.他方で、地震動の観測データは根本的に不均衡であ り、これが予測モデルに与える影響が懸念される.数値シミュレーションなどを用いたデータ拡 張²¹⁾・物理モデルとのハイブリッド^{22,23)}などの対応が考えられる.

(久保久彦) KUBO Hisahiko

参考文献

- 1) Derras et al. (2012), Adapting the neural network approach to PGA prediction: an example based on the KiK-net data. *Bull Seismol Soc Am*, **102**, 1446–1461.
- 2) Trugman and Shearer (2018), Strong correlation between stress drop and peak ground acceleration for recent M 1–4 earthquakes in the San Francisco Bay area. *Bull Seismol Soc Am*, **108**, 929–945.
- 3) Khosravikia and Clayton (2021), Machine learning in ground motion prediction. *Comput Geosci*, **148**, 104700.
- 4) Okazaki et al. (2021), Ground-motion prediction model based on neural networks to extract site properties from observational records. *Bull Seismol Soc Am*, **111**, 1740–1753.
- 5) Lilienkamp et al. (2022), Ground-motion modeling as an image processing task: introducing a neural network based, fully data-driven, and nonergodic approach. *Bull Seismol Soc Am*, **112**, 1565–1582.
- 6) Florez et al. (2022), Data-driven synthesis of broadband earthquake ground motions using artificial intelligence. *Bull Seismol Soc Am*, **112**, 1979–1996.
- Esfahani et al. (2023), TFCGAN: Nonstationary ground-motion simulation in the time-frequency domain using conditional generative adversarial network (CGAN) and phase retrieval methods. *Bull Seismol Soc Am*, **113**, 453–467.
- 8) Song et al. (2021), A versatile framework to solve the Helmholtz equation using physics-informed neural networks. *Geophys J Int*, **228**, 1750–1762.
- 9) Okazaki et al. (2022) Physics-informed deep learning approach for modeling crustal deformation. *Nat Commun*, 13, 7092.
- 10) Rasht-Behesht et al. (2022), Physics-informed neural networks (PINNs) for wave propagation and full waveform inversions. *J Geophys Res: Solid Earth*, **127**, e2021JB023120.
- 11) Jozinović et al. (2020), Rapid prediction of earthquake ground shaking intensity using raw waveform data and a convolutional neural network. *Geophys J Int*, **222**, 1379–1389.
- 12) Zhang et al. (2022) Learning source, path and site effects: CNN-based on-site intensity prediction for earthquake early warning. *Geophys J Int*, **231**, 2186–2204.
- 13) Münchmeyer et al. (2020), The transformer earthquake alerting model: a new versatile approach to earthquake early warning. *Geophys J Int*, **225**, 646–656.
- 14) Otake et al. (2020), Deep learning model for spatial interpolation of real-time seismic intensity. *Seismol Res Lett*, 91, 3433–3443.
- 15) Datta et al. (2022), DeepShake: Shaking intensity prediction using deep spatiotemporal RNNs for Earthquake Early Warning. *Seismol Res Lett*, **93**, 1636–1649.
- 16) Tamhidi et al. (2022), Conditioned simulation of ground-motion time series at uninstrumented sites using gaussian process regression. *Bull Seismol Soc Am*, **112**, 331–347.
- 17) Paolucci et al. (2018), Broadband ground motions from 3d physics-based numerical simulations using
artificial neural networks. Bull Seismol Soc Am, 108, 1272-1286.

- Okazaki et al. (2021), Simulation of broad-band ground motions with consistent long-period and shortperiod components using the Wasserstein interpolation of acceleration envelopes. *Geophys J Int*, 227, 333–349.
- Pan et al. (2022), Deep-neural-network-based estimation of site amplification factor from microtremor H/V spectral ratio. *Bull Seismol Soc Am*, **112**, 1630–1646.
- Imai et al. (2021), A sample generation of scenario earthquake shaking maps via a combination of modal decomposition and empirical copula toward seismic hazard assessment. *Bull Seismol Soc Am*, **111**, 3341–3355.
- 21) Withers et al. (2020), A machine learning approach to developing ground motion models from simulated ground motions. *Geophys Res Lett*, **47**, e2019GL086690.
- 22) Kubo et al. (2020), Hybrid predictor for ground-motion intensity with machine learning and conventional ground motion prediction equation. *Sci Rep*, **10**, 11871.
- 23) Okazaki et al. (2021), Monotonic neural network for ground-motion predictions to avoid overfitting to recorded sites. *Seismol Res Lett*, **92**, 3552–3564.

11-5 深層学習に基づく地震計古記録からの低周波微動の検出 Detection of Low-Frequency Tremors in Historical Seismograms Using Deep Learning

長尾 大道 (東京大学地震研究所)

Hiromichi NAGAO (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

スロー地震の一種である低周波微動は、プレート境界型大地震との関連が期待されており、地震 波形データからの微動イベントの検出とカタログ化が精力的に進められている.しかしながら、ス ロー地震が稠密な地震観測網であるHi-netデータが持つ豊かな空間相関情報を利用して発見された ことから、微動カタログは直近の約20年分しか作成されていない.スロー地震・低周波微動との関 連が期待されているプレート境界型大地震の発生周期が100~200年程度であることを考えると、 地震観測網設置以前にまで時間軸を引き延ばし、昔の微動カタログを構築することが地震学におい て重要であることは明白である.

そこで本研究では、約50年前に稼働していた東京大学地震研究所和歌山観測所熊野観測点の紙記録(以下,古記録)を画像化したもの¹¹から微動を検出する畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を開発した(第1図).古記録は概ね1日分の地震波形が1枚の紙にペンで直接記録されており、約150秒の波形が下から上に約500本ほど描画されている.CNNとしては残差学習モデル(ResNet)を採用し、まずは実際の紙記録を模した人工波形画像を生成し、それに基づく学習と検証によりResNetの事前学習を行なった.本研究では、画像をCNNに入力する際に縦方向(時系列を分断する方向)に5分割を行なっている.この前処理により、通常の地震波形は1枚もしくは2枚の小画像に収まってしまうものの、数時間継続する微動は5枚の小画像すべてに波形が含まれることを利用して、一部の小画像に対する微動の有無判定に誤りが生じた場合でも、5枚に対する判定結果の多数決によって誤判定を防ぐことが可能となる.事前学習の結果、人工波形画像に基づく検証において正答率100%を達成すると同時に、微動波形と通常の地震波形が重なった場合においても正しく微動波形を検出するという、興味深い結果が得られた².

次に、現代のHi-netデータをやはり古記録を模して大量に画像化し、それを事前学習したCNNに 大量に学習(ファインチューニング)させた³⁾.画像生成にあたっては、微動カタログ⁴⁾を参照し、 熊野観測点近傍のHi-net観測点データから微動を含む画像と含まない画像をそれぞれ生成した.上 述の画像分割処理後の小画像は5万枚以上に及ぶため、CNNの学習にあたってはGPU計算機の利用 が必須となる.Hi-netデータに基づく検証においては、ファインチューニング済みのCNNは正答率 98.64%を達成した.

このようにして構築したCNNを熊野観測点の1966 ~ 1977年の古記録に適用したところ,多数の 古記録からの微動検出には成功したものの(第2図),微動検出がうまくいかなかった例も少なか らず存在した.微動検出の成否を「自然知能」によって分析したところ,紙に波形を描画した際の ペンの太さに依存することが判明した³⁾.今後は,強力なGPU計算機を用いて,一層大量の画像デー タに基づく大規模学習を実施することにより,信頼性の高い微動検出が可能な深層学習器を開発し ていく予定である.

> (長尾 大道) NAGAO Hiromichi

謝辞

本研究は、文部科学省「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト」(STAR-E プロジェクト) (課題番号 JPJ010217)のご支援を受けて実施したものです.また、一部については科学技術振興機 構 戦略的創造研究推進事業 CREST (課題番号 JPMJCR1761, JPMJCR1763),科研費挑戦的研究(萌芽) (課題番号 20K21785)、東大地震研共同利用(課題番号 2022-A-03, 2021-B-01, 2022-B-06)のご支援 を受けております.この場を借りて、御礼申し上げます.

参考文献

- 1) Satake, K., H. Tsuruoka, S. Murotani, and K. Tsumura (2020), *Seismol. Res. Lett.*, **91**(3), 1384-1393. Analog seismogram archives at the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo
- Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, K. Obara, and H. Tsuruoka (2021), *Lecture Notes in Computer Science*, 12705, 31-43. Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images
- Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, K. Obara, and H. Tsuruoka (2023), J. Geophys. Res. Solid Earth, 128(2), e2022JB024842. Detection of deep low-frequency tremors from continuous paper records at a station in southwest Japan about 50 years ago based on convolutional neural network
- 4) Obara, K., S. Tanaka, T. Maeda, and T. Matsuzawa (2010), *Geophys. Res. Lett.*, **37**(13), L13306. Depthdependent activity of non-volcanic tremor in southwest Japan



第1図 地震計古記録から低周波微動を検出するための残差学習に基づく畳み込みニューラルネットワークの構築
 Fig. 1 Development of a convolutional neural network based on residual learning to detect low-frequency tremors in historical seismograms.



- 第2図 開発した畳み込みニューラルネットワークによって古記録から検出された低周波微動の例
- Fig. 2 Examples of low-frequency tremor detections in historical seismograms using the developed convolutional neural network.

11 - 6 Instantaneous Tracking of Earthquake Growth With Elasto-Gravity Signals in Japan and Application to Historical Data from the Tohoku Oki Earthquake.

ROUET-LEDUC Bertrand (DPRI, Kyoto University)

Rapid and reliable magnitude estimation for large earthquakes ($Mw \ge 8$) is key to mitigate the risk associated with strong shaking and tsunamis. Early warning systems based on seismic waves often fail to rapidly estimate the size of very large earthquakes, and tend to saturate and be unable to distinguish between Mw 8 earthquakes and Mw 9 earthquakes. GNSS-based approaches can provide better estimations, but suffer from large uncertainties and latency associated with the slowness of seismic waves, and require to make a priori constraints that may be difficult to determine. The recently discovered speed-of-light Prompt Elasto-Gravity Signals (PEGS) has raised hopes to overcome these limitations, but has never been tested for operational early warning, in part to the very low signal to noise ratio they suffer from. In this research, PEGS is used in real-time to track earthquake growth without delay once the event reached a certain magnitude. A deep learning model is developed that leverages the information carried by PEGS recorded by regional broadband seismometers in Japan before P-waves. After training on a database of synthetic waveforms augmented with empirical noise, the first example of instantaneous tracking of an earthquake source time function is presented on real data. This model unlocks real time access to the rupture evolution of large earthquakes using a portion of seismograms that is routinely treated as noise, and could immediately be used to supplement existing methods, by refining Mw estimates for very large earthquakes.

Because of the rarity of PEGS observations (they are only observed for very large earthquakes), PEGSNet is trained on a database of synthetic PEGS waveforms to which real noise recorded at each station in the seismic network is added. The training database is made of 500,000 synthetic earthquake sources distributed along the Japanese megathrust, with location, strike and dip angles following the Slab2.0 model. Random magnitude and rake angles are drawn. The Gutenberg-Richter distribution for Mw is deliberately not used, to avoid sampling bias during training.

Random source time functions (STF) are generated using a model designed to mimic empirical laws and statistical observations to produce three-component waveforms representing the source characteristics of all expected large megathrust earthquakes along the Japanese subduction zone. Empirical noise recorded at each station is then added to the generated waveforms.

PEGSNet is a deep convolutional neural network (CNN) that combines convolutional layers and fully connected layers in sequence (Fig. 1). Mw is time-dependent, therefore noted as Mw(t), and corresponds to the equivalent time-integrated STF at a given time. In order for PEGSNet to learn Mw(t), it is given the network-wide data for 300 seconds and is tasked with estimating Mw(t) at the end of this 300 seconds window, that parses the data, as explained in Fig. 2.

Figure 3 summarizes the results on the synthetic test set (data the model has never seen in training) for estimating Mw(t) using PEGSnet. For each example in the test set, the end time of the input data is shifted with a time step of 1 s from the earthquake origin time (t=0) to t=315 s, and PEGSNet predicts Mw at each

time step. In other words, a running time window of 315 s parses the data, and is fed to PEGSNet, that makes its Mw(t) estimate for the end of the window.

In addition, PEGSNet makes a prediction only if at least 10 stations are active at a given time and a successful prediction is defined as within \pm 0.4 magnitude units from the ground truth. Figure 3a indicates that PEGSNet is able to track the moment released by earthquakes with final Mw above 8.5/8.6 with good accuracy (above 90%) and low errors (below 0.25 in Fig. 3b), starting roughly after 40 s from origin time. For earthquakes with final Mw between 8.1 and 8.6, early tracking of the moment release is more difficult and only the final Mw can be estimated (with accuracy around 75% and errors above 0.25) after 150 s from origin time. Any predicted Mw below 8.1 is poorly constrained by the data. A conservative lower limit on PEGSNet sensitivity to Mw is between 8.0 and 8.2.

In order to examine the time-dependent performance of PEGSNet more closely, Figure 3c shows all the predictions (on the test set) associated with events with a final Mw of 9.0 \pm 0.05. The system latency of about 30 s is related to the ten-station constraint and to the initial lack of PEGS sensitivity below Mw(t)=8.1. However, after 40 s (when the true Mw is generally above 8.0 according to the STF database) PEGSNet is able to track the evolution of the moment release instantaneously as indicated by the mode of the distribution of the predictions. These results show that PEGSNet is able to exploit the key features of PEGS data: 1) PEGS sensitivity to magnitude for large earthquakes allows the model to distinguish between a Mw = 8 and a Mw = 9 earthquake and 2) the information about Mw is effectively propagated at the speed of light, which results in instantaneous tracking of the moment release. Although P-wave triggering is needed at each station (and therefore some latency in the system exists), the instantaneous information about the source (carried by PEGS at the speed of light) is readily available in the pre P-wave time window. This allows PEGSNet to estimate Mw(t) with zero delay once the magnitude exceeds ~ 8.3.

PEGSNet has been tested on real data from the 2011 Mw=9.0 Tohoku-Oki earthquake (Fig. 4). The raw seismograms are processed as described in Vallée et al.¹ and fed to PEGSNet. As for the test set, a Mw prediction is made at each time step starting at the earthquake origin time. Figure 4a shows the results of this retrospective analysis compared with a "true" STF calibrated against a variety of different data types2. PEGSNet is able to instantaneously track the evolving moment release of the Tohoku earthquake, starting at about 55 s from origin time when Mw is about 8.2. PEGSNet reaches a correct prediction of the final Mw around 150 s when the rupture is over. Note that the predicted values are almost constant after 150 s, although new stations are added to the input data until 176 s after origin time (Fig. 4c). This highlights the robustness of the prediction even with an incomplete dataset. Consistently with synthetic tests (Fig. 3), predictions after 55 s (corresponding to the time the earthquake reaches Mw ~ 8.3) provide robust snapshots of the evolution of the source at that exact time because PEGS carries information about the source at the speed of light.

To assess the robustness of the model's Mw estimation on the Tohoku data, a test is performed in which the P-wave arrivals information is kept but the actual recorded waveforms in the pre P-wave time window is substituted with noise, and the resulting prediction of Mw(t) never exceeds the lower sensitivity limit of PEGSNet (i.e. 8.1) and remains constant at about 6.5, which provides a baseline value for noise.

PEGSNet requires few modifications to be implemented in real time. Predictions are fast to obtain, but some latency may be introduced by the preprocessing step. The model relies on P-wave arrival times which are assumed to be known, but any existing triggering algorithms can be used before feeding the data to the model.

These results provide the first example of instantaneous tracking of moment release for large earthquakes and promote PEGS data as a new class of observables for practical application in early warning systems, which are intrinsically limited by the speed of P-waves. For this reason, to-be-developed holistic approaches to EEWS that leverage the benefit of multiple data types may consider the advantage of including PEGS data.

In general, PEGSNET could come in complement to existing EEW warning systems, and would provide additional and independent estimates for very large magnitudes. Moreover, PEGSNet could immediately prove useful for tsunami early warning for which Mw estimation within a few minutes is vital.

This research has been published in:

Licciardi, A., Bletery, Q., Rouet-Leduc, B., Ampuero, J. P., & Juhel, K. (2022). Instantaneous tracking of earthquake growth with elastogravity signals. Nature, 606(7913), 319-324.

ROUET-LEDUC Bertrand

Other references:

- 1. Vallée, M. et al. Observations and modeling of the elastogravity signals preceding direct seismic waves, *Science*, **358**(6367), 1164-1168 (2017).
- 2. Bletery, Q. et al. A detailed source model for the M w 9.0 Tohoku-Oki earthquake reconciling geodesy, seismology, and tsunami records. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **119**, 7636-7653 (2014).



Figure 1 | **PEGSNet architecture.** The input data for one example consists in a three channel image of shape M x N, where M is the number of time samples and N is the number of seismic stations. Only the vertical component of the input data is displayed for simplicity. Each convolutional block is composed of a convolutional layer (yellow) with a ReLu activation (orange), a spatial dropout layer (light blue). Max pooling layers (red) reduce each dimension of the input data by a factor of two. The number of filters used in each convolutional layer is indicated for clarity. The last convolutional block is connected to dense layers (purple) (using a ReLu activation function), with dropout (light blue). The output layer estimates Mw, latitude (ϕ) and longitude (λ).



Figure 2 | **PEGSNet training strategy. a**, The input data for one example consists in a three-channel image of shape M x N, where M is the number of time samples and N is the number of seismic stations. Only the vertical component of the input data is displayed for simplicity. Each convolutional block is composed of a convolutional layer (yellow) with a ReLu activation (orange), a spatial dropout layer (light blue). Max pooling layers (red) reduce each dimension of the input data by a factor of two. The number of filters used in each convolutional layer is indicated for clarity. The last convolutional block is connected to dense layers (purple) (using a ReLu activation function), with dropout (light blue). The output layer uses a tanh activation function to predict values of Mw, latitude (φ) and longitude (λ). **b**, The value of the Huber loss is plotted as a function of epochs for the training and validation sets. The red star indicates the epoch with the minimum value of the loss on the validation set and the corresponding model is used for predictions on the test set and real data. **c**, Data from one example from the training database (vertical component). The grey shaded area corresponds to the input data for PEGSNet shown in (a). T₁ and T₂ are the beginning and end of the selected input window. During training, T₁ is selected at random and T₂= T₁ + 315 s. **d**, Moment rate (blue) and Mw(t) (dark grey) for the selected event. Given the randomly selected value for T₁ for this example, the corresponding label is Mw (T₂), i.e. at the end of the selected window. This is compared with the predicted Mw estimated by PEGSNet in a and used for training.



Figure 3 | Timeliness of Mw estimation from PEGS data. Results of predictions on the test set. (a) Model accuracy as a function of time and Mw. For each pixel in the image, accuracy is calculated as the number of successful predictions divided by the total number of samples. A prediction is defined successful if the distance with the ground truth is within ± 0.4 magnitude units. Dashed lines indicates the average values of the ground truth Mw(t) for events with different final magnitude the lower limit of PEGSNet sensitivity is between 8.0 and 8.2. (b) Same as in (a) but the average residuals (|Mw[true]-Mw[pred]|) for each pixel are shown. (c) Probability density of Mw predictions for all the events in the test set with true final Mw of 9 \pm 0.05. The solid red line is the mode of the distribution. The red dashed lines bound the 95-25 interquartile range. The white lines are the mean (solid) and the 95-5 interquartile range (dashed) of the ground truth.



Figure 4 | **Instantaneous moment tracking of the 2011 Mw=9.0 Tohoku-Oki earthquake.** (a) PEGSNet Mw(t) predictions are represented by the mean (solid blue line) and one standard deviation (dashed blue lines) of the posterior distribution of the predictions at each time step. Predictions are displayed only if ten stations are available at a given time. The source time function of the Tohoku-Oki earthquake (orange line) is taken from Bletery et al.². (b) and (c), PEGSNet input data (vertical component) at time steps of 54 and 176 s respectively. The top panels show the waveform of the last stations included in the input data at the corresponding time step.

11 - 7 第 239 回地震予知連絡会重点検討課題「群発地震」の概要 Earthquake swarm

今西 和俊 (産業技術総合研究所)

Kazutoshi Imanishi (Geological Survey of Japan, AIST)

1. はじめに

群発地震とは、本震・余震の区別がはっきりせず、ある地域に集中して地震が頻発する地震活動 のことをさす.通常の地震のように大森公式による地震数の経時的変化は見られず、活動域を拡大 しながら、中には数年以上にわたり継続する場合もある.国内において最も知られている群発地震 は、1965年から数年に渡り活発に続いた松代群発地震であろう.地下からの大量の湧水が観察され るとともに明瞭な隆起変動も観測された.そのほかにも、伊豆半島東方沖や2000年の三宅島噴火 に伴う活動などがあげられる.最近では能登半島北東部において複数のM5クラスの地震を含む活 発な群発地震活動が2年以上継続しており、今後の活動推移は社会的な関心となっている.

群発地震は火山や地熱地帯で多く報告されており、その発生にはマグマや地下水、構造的不均質 などが関与していると考えられてきた.一方で、能登半島北東部の群発地震のように、火山地帯か ら離れた場所でも発生しており、その発生要因は必ずしも明らかになっているとは言えない.地震 災害に関しては、群発地震は一般に地下浅部で起こることが多く、マグニチュードが5程度でも大 きな被害につながる可能性もある.また、周辺に活断層がある場合は、群発地震から大地震へ繋が る可能性もある.2009年ラクイア地震(M6.3)はその一例である.

このような背景を踏まえ,第 329 回の重点検討課題では,これまで発生した群発地震や関連研究 からの知見をレビューし,群発地震の発生メカニズムについて議論を行った.

2. 研究紹介と議論の概要

2-1. 能登半島北東部で長期間継続する地震活動

金沢大学の平松良浩教授から,能登半島北東部における群発地震活動についてレビューしていた だいた.この活動は2020年12月頃から地殻変動と同期して活発化し,能登半島北部珠洲市周辺で 継続する地震活動は主に4つの領域で起こっている.北部,東部の活動域では,地震が複数の面で 発生し,深部側から浅部側に震源が移動している.地震観測,測地観測,電磁気観測等で得られたデー タの解析結果から,一連の地殻活動は流体が駆動している可能性が考えられることが報告された.

2-2. 奥能登での群発地震活動発生域周辺の3次元比抵抗構造解析の現状

京都大学防災研究所の吉村令慧教授には,流体に敏感な物理量である電気比抵抗を臨時の MT 観 測により推定した結果を紹介していただいた.3次元比抵抗構造解析の結果,一連の地震活動が開 始した南部クラスタから北部クラスタに沿って,電気を通しやすい領域(低比抵抗域)が存在する ことが示された.地震活動は低比抵抗域の縁辺部に集中している傾向があり,深部より供給された 流体が一連の地震活動の要因である可能性が示唆された.また現在,陸域・海域の補充観測データ の解析が進められており,比抵抗構造推定の高解像度化や深部の推定確度の向上を目指しているこ と,さらに MT の連続観測により,流体移動に伴う地下構造変化を検出する研究をできないかの可 能性を追求する予定であることも報告された. 2-3. 2020年長野・岐阜県境付近の群発地震活動

東京大学地震研究所の加藤愛太郎教授から,2020年4月に始まった長野・岐阜県境付近の群発地 震活動の詳細な解析結果について紹介があった.深層学習モデルにより走時データを用いてイベン トを自動検出し,hypoDDによる高精度な震源決定を実施,さらに再決定震源の波形記録をテンプ レートとして、マッチドフィルタ法により連続データからイベントを再検出した.その結果、気象 庁一元化カタログの約6倍に相当する20万個の地震カタログを作り出すことに成功し、この群発 地震は主に東西走向もしくは北西-南東走向の高角傾斜の多数の断層面で発生していることが示さ れた.また、活動初期には群発活動域の北方向への拡大が見られ、流体に駆動されたゆっくりすべ りが関与している可能性が指摘された.

2-4. 北海道北部の群発地震活動と稠密 GNSS 観測から推定された浅部ゆっくりすべり

北海道大学の大園真子准教授から,2012年7月に北海道北部で発生した群発地震についてご紹介 いただいた.この活動で興味深いのは,群発地震と同期して約5.5か月に及ぶ非定常な地殻変動が 検出された点である.北海道大学では2007年からこの地域でオフラインのGNSS観測を実施して おり,GEONETデータとの統合解析の結果,深さ3km付近でほぼ水平な逆断層のゆっくりすべり (Mw5.4相当)が生じたと推定した.一方,2022年8月には,2012年の活動域の数km西側で同規 模の群発地震が発生したが,顕著な非定常変動は見られなかった.この違いは何に起因するのか, 詳細な地下構造等の情報が必要であることが言及された.

2-5. 室内実験における流体圧入で誘発される微小破壊の研究

京都大学防災研究所の直井誠助教には,流体圧入の室内実験による最新知見についてご紹介いた だいた.紫外線をあてると発光する特殊な樹脂を用いて水圧破砕を行い,それによって生じる微小 破壊を測定する室内実験を行った.

従来は難しかった AE の震源メカニズム,地震モーメントの推定を実現した.コーナー周波数推 定とあわせて応力降下量に準じるパラメータを推定し,水圧破砕実験では低周波イベントが多発す ることを示した.震源域の高い間隙圧が原因である可能性がある.

3. 議論とまとめ

今回の発表では、高精度な地震波解析により精度の高い震源分布が得られるようになり、群発地 震域内の微細構造(面構造)が見られるようになってきた.これまでとは異なる群発地震の震源像 が見えつつある.

群発地震の駆動源としては、従来から言われていた流体が、様々の観測結果を総合的に考えて有 力と考えられる.それに加えて、ゆっくりすべりも影響を及ぼしていることも明らかになりつつあ る.一方、群発地震の時空間発展やいつ収束するのかという予測の観点では未だ課題が多いのは事 実であり、観測、実験、数値シミュレーション等を有機的に連携させた研究が一層重要である.

11-8 能登半島北東部で長期間継続する地震活動 A long-lasting seismic activity in the northeastern Noto Peninsula

金沢大学 Kanazawa University

能登半島北東部の珠洲市周辺では 2018 年 6 月頃から地震数が増加し,2020 年 12 月頃からより一 層の増加と局所的な非定常地殻変動が観測され,2022 年 6 月 19 日にマグニチュード(M) 5.4 (最 大震度 6 弱),2023 年 5 月 5 日に M6.5 (最大震度 6 強)の地震が発生するなど地震活動の高い状態 が続いている.2021 年以降,この地震活動の震源域が拡大し,主に 4 つの領域(発生順に南部,西 部,北部,東部(北東部))で地震が起こっている.

西部,北部,東部の地震の震源分布は主に南東傾斜の複数の面を成す^{1,2)}. 震源移動から推定される拡散速度は 0.1 m²/s のオーダーであり,活火山下の群発地震と比べるとやや小さい²⁾. 拡散速度が小さいと群発地震の継続期間は長い傾向があり³⁾,西部,北部,東部で推定された小さな拡散速度はこの地域の群発地震が長期間継続していることと整合的である.南部の地震活動は,深さ 15 km 以深での間欠的な地震活動が特徴的であり,間欠的な地震活動時の拡散速度は大きく,このときに大量の流体がより深部の低比抵抗⁴⁾,高 $V_{\rm P}$ ・高 $V_{\rm P}/V_{\rm S}$ な領域⁵⁾ から上昇している可能性を示唆する.この 15 km 以深の地震の震源分布は円環状を成し,15 km 以浅の地震の震源分布は棒状を成す. 南部の地震活動域は低重力異常域に対応しており,地表付近のカルデラ状の凹みが低重力異常の原因と考えられる⁶⁾. これらのことから,南部の地震活動は過去の火山活動に関連した構造を利用して起こっていることが示唆される^{1,2,6)}. 群発地震の震源域の大きさとそこで起こる地震の最大 M には比例関係があり⁷⁾,2023 年 5 月以前の地震については,各領域での震源域の大きさと最大 M はこの比例関係と概ね整合的である.

GNSS データから示される非定常地殻変動分布は時間的に変化しており、地下の地殻変動源の位置が時空間的に変化していることを示す.変動源について唯一的に決定することは困難であるが、地震活動等の結果から、活動初期は開口割れ目、その後位置を変えつつ、開口割れ目と逆断層型の断層すべりが同時に起こるモデルが提唱されている⁸⁾.

2023 年 5 月 5 日の M6.5 の地震は、それ以前の地震活動域の北端付近で発生し、その後の地震活 動域は北側の海域に拡がった。M6.5 の地震の余震は、それ以前の地震が発生していた南東傾斜の 断層の浅部延長上に位置しており、M6.5 地震後の最大地震である 5 月 5 日の M5.9 の地震はそれと は別の断層に位置することが震源分布から示される⁹⁰. これらの地震を起こした断層は既知の能登 半島北岸沖合の活断層とは別であると考えられ、これらの活断層での規模の大きな地震の発生につ いて注意する必要がある.

(金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 平松 良浩)

School of Geosciences and Civil Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University

謝辞

本報告の成果の多くは、科学研究費助成事業(特別研究促進費)「能登半島北東部において継続 する地震活動に関する総合調査」(22K19949)により得られました.現地での調査や観測では石川県、 珠洲市, 能登町, 輪島市の行政や住民, 民間企業の方々にご協力いただきました. 記して感謝します.

参考文献

- 1) 吉田・他(2022), 日本地震学会 2022 年度秋季大会, S08-02, 石川県能登半島北東部の群発地震: マグマ活動に起因する構造と流体供給
- 2) Amezawa et al. (2023), *Geophys. Res. Lett.*, **50**, e2022GL102670, Long-living earthquake swarm and intermittent seismicity in the Northeastern tip of the Noto Peninsula, Japan
- 3) Amezawa et al. (2021), *Earth Planets Space*, **73**, 1–11, Migration diffusivity as a controlling factor in the duration of earthquake swarms
- 4) 吉村・他(2023), 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, SCG56-P08, 奥能登群発地震域周辺の 3 次元比抵抗構造
- 5) 岡田・他(2022),日本地震学会 2022 年度秋季大会,S06-09,石川県能登半島群発地震震源域に おけるS波スプリッティングと地震波速度構造
- 6) 澤田・平松 (2022), 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, SCG52-P16, 能登半島北東部の活発な 地震活動の震源域に見られる低重力異常域の地質構造
- 7) 飯尾 (1983), *地震 2*, **36**, 13–21, 破壊のスケーリング(その 2) 一群発活動の時・空間分布および規模別頻度分布について一
- 8) Nishimura et al. (2023), Scientific Reports, in press, Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan
- 9) 東北大学・金沢大学資料(2023), 地震調査委員会, 2023 年 5 月 5 日石川県能登地方の地震の評価, https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2023/2023 ishikawa 1.pdf

11-9 奥能登での群発的地震活動発生域周辺の 3 次元比抵抗構造解析の現状 Current Status of 3-D resistivity structure analysis around earthquake swarm region in the Northeastern Noto Peninsula

吉村 令慧(京都大学防災研究所)·平松 良浩(金沢大学)· 後藤 忠徳(兵庫県立大学)

Ryokei Yoshimura (DPRI, Kyoto University), Yoshihiro Hiramatsu (Kanazawa University), Tada-nori Goto (University of Hyogo)

石川県珠洲市付近では、2020年末より群発的地震活動と局所的な非定常地殻変動が継続している. この活動は、2018年6月頃に端を発し、2021年9月16日にはM5.1(最大震度5弱)、2022年6月 19日にはM5.4(最大震度6弱)、2023年5月5日にはM6.5(最大震度6強)の地震が発生しており、 現在もその活動は収束を見せていない。

この群発活動が構造的にどのような場所で発生しているのか,また,2007年能登半島地震の発生 域と構造的違いがあるか否かを解明するために,地下比抵抗構造調査を実施・継続している.調査 では,陸上および海底での自然の電磁場変動を広帯域で測定し,地下の電気比抵抗構造をイメージ ングする Magnetotelluric (MT) 探査手法を採用している.地下の比抵抗構造は,地殻内流体の存在 や温度に鋭敏であることが知られており,現在進行中の群発的地震活動の発生場を理解する上で, 有効な探査手法であると考えられる.今回,2021年度に陸上で取得した電磁場データをもとに3次 元逆解析により推定された地下比抵抗構造モデルを吉村・他(2022)¹⁾をもとに紹介する.

我々は、2021年11月から12月および2022年3月から4月にかけて、計32か所(珠洲市,能登 町,輪島市)で広帯域 MT 観測を実施した(第1図).各地点少なくとも1週間のデータを取得し、 人工電磁ノイズの低減する夜間5時間のデータに対しBIRRP²⁾を適用して MT 応答関数を推定し た.推定した MT 応答関数を入力データとして,femtic インバージョンコード³⁾を使用して3次元 地下比抵抗構造モデルを得た(第2図).推定された地下比抵抗構造モデルでは、一連の地震活動 が開始した南側のクラスタから現在最も活動が活発な北側のクラスタにかけて連続する低比抵抗領 域が存在し、多くの地震はこの低比抵抗領域内の縁辺部に位置していることが明らかになった.能 登半島北東部には活動的な火山が存在しないことなどから、この低比抵抗領域は流体に富む、もし くは流体の連結性が高い領域である可能性が高い.また、今回の群発的地震活動がこのような流体 の移動・拡散に伴う現象であるなら、低比抵抗領域内の縁辺部に位置する地震が多いことと整合的 だと考えられる.さらに、2007年能登半島地震のすべり域に見られた高比抵抗領域⁴⁾程ではないが、 地震クラスタの北岸の10km以浅に数kmサイズの相対的に高比抵抗領域がいくつか存在するこ とが確認された.低比抵抗領域と地震クラスタの境界や、高比抵抗領域とM5以上の中規模地震の 対応関係をより明確にするために、2022年度に陸上25点・海底3点の広帯域 MT 観測を追加実施 している.現在、これら補充観測データを含めた解析を進めている.

> (吉村 令慧) YOSHIMURA Ryokei

謝辞

観測の実施にあたっては、地権者様ならびに珠洲市危機管理室・教育委員会・農林水産振興係、 石川県珠洲土木事務所をはじめ関係機関にご協力いただきました。一部の器材は、東京工業大学理 学院火山流体研究センターより借用しました。本研究は、文部科学省「災害の軽減に貢献するため の地震火山観測研究計画」・「特別研究促進費 22K19949」、JSPS 科研費「18H03894」ならびに京都 大学防災研究所「国際共同研究 2020W-02」の助成を受けました。

参考文献

- 吉村令慧・平松良浩・後藤忠徳・乾太生・吉川昌弘・波岸彩子・長岡愛理・中川潤・宮町凜太郎・澤田明宏・深田雅人・杉井天音・張策・山下凪・大島由有希・金沢桃夏・天野玲(2022),第152回地球電磁気・地球惑星圏学会秋季年会,R003-07,奥能登群発地震震源域の3次元比抵抗構造.
- 2) Chave, A.D., and D.J. Thomson (2004), *Geophys. J. Int.*, **157**, 988-1006, Bounded influence estimation of magnetotelluric response functions.
- 3) Usui, Y. (2015), *Geophys. J. Int.*, **202**(2), 828-849, 3-D inversion of magnetotelluric data using unstructured tetrahedral elements: applicability to data affected by topography.
- 4) Yoshimura, R. 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



第1図 2021 年度に実施した広帯域 MT 観測点分布および 2018 年1月~2022 年7月までの震央分布

Fig. 1 Distribution of onshore broadband MT sites conducted in FY2021 and epicentral distribution from January 2018 to July 2022



第2図 2021 年度に実施した陸上広帯域 MT 観測データにより推定された3次元地下比抵抗構造の鉛直断面(4 断面) および 12km 深の水平断面

Fig. 2 Vertical cross sections (4 cross sections) and horizontal cross sections at 12 km depth of three-dimensional resistivity structure estimated from onshore broadband MT survey data conducted in FY2021

11 - 10 2020 年長野・岐阜県境付近の群発地震活動

Earthquake swarm near the border between Nagano and Gifu prefectures in 2020

東京大学地震研究所

Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

2020年3月末から長野・岐阜県境付近において地震活動が開始し,5個のM5以上の地震を含む 活発な地震活動が3カ月程度にわたって継続した. 概ね同じ場所において,1998年にも群発地震が 起きているものの,M5以上の地震は2個で且つ活発な期間は約2ヵ月と,2020年の活動に比べて 活動度は低かった.

近年,深層学習モデルを活用した地震の検出やイベント認定に関する研究が進展している.本 研究では、P波・S波の走時読み取り用の深層学習モデル Phasenet (Zhu et al., 2018)を連続波形 データに適用することで、各観測点におけるP波・S波の走時の時系列データを作成した。それ らの走時の時系列データから、時空間上におけるグリッドサーチに基づくイベント認定アルゴリ ズム REAL (Zhang et al. 2019) を用いてイベント検出をおこなった. その後, hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987)により各々の地震の震源を決定した.それらの地震に対して、相対走時差デー タを波形相関法に基づいて抽出し、GrowClust法(Trugman and Shearer, 2017)を適用することで、 地震クラスターの階層性を考慮した相対震源再決定をおこなった.次に、再決定震源を利用して、 Matched Filter Method を約半年間の連続波形記録に適用することでイベントを再検出(約20万個)し、 より包括的な地震カタログを構築した.震源分布から,群発地震は主に東西走向もしくは北西-南 東走向の高角傾斜の多数の断層面に分布することが分かる。群発地震の活動域は、南側から北側へ と徐々に拡大したものの、活動後半において南側の複数の断層面で再度活動が起きていたように見 える. また,活動域の北側への拡大時における拡大フロントの移動速度を推定したところ,1回目 の拡大時で約150 km/日, 2·3 回目の拡大時には約10 km/日であった.拡大フロントの移動速度は, 沈み込み帯で見られるスロー地震の移動速度と類似しており、流体に駆動されたスロースリップが 群発地震の発生に関与している可能性が考えられる.

> 加藤 愛太郎 (東京大学地震研究所)

謝辞

科学研究費助成事業 / 学術変革領域研究 (A) Slow-to-Fast 地震学(JP21H05205)から補助を頂きま した.また,防災科学技術研究所・気象庁・京大防災研の地震波形データ及び気象庁地震カタログ を使用させて頂きました.ここに記して感謝申し上げます.

参考文献

- Zhu, W., & Beroza, G. C. (2018). PhaseNet: A deep-neural-network-based seismic arrival time picking method. *Geophys. J. Int.*, 216(1), 261–273. https://doi.org/10.1093/gji/ggy423
- 2) Zhang, M., Ellsworth W. L., and Beroza, G. C. (2019), Rapid Earthquake Association and Location,

Seismol. Res. Lett., 90, 2276–2284, doi: 10.1785/0220190052.

- 3) Hirata, N., and Matsu'ura, M. (1987), Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **47**, 50–61.
- 4) Trugman, D. T. and Shearer, P. M. (2017), GrowClust: A Hierarchical ClusteringAlgorithm for Relative Earthquake Relocation, with Application to the Spanish Springs and Sheldon, Nevada, Earthquake Sequences, *Seismol. Res. Lett.* **88**, 379–391.



- 第1図 長野・岐阜県境付近の群発地震活動の再決定震源の分布(震央分布と深さ分布). 各点の色は 2020 年 4 月 20 日からの経過日を表す. 発震機構解とモーメントマグニチュードは防災科研の AQUA カタログを参照.
- Fig. 1 Relocated hypocenters of the earthquake swarm near the border between Nagano and Gifu prefectures in 2020 (Epicentral distribution and depth section). The color of each dot denotes time elapsed from 20th April 2020e. Focal mechanisms and moment magnitudes of larger events are referred from the AQUA catalog constructed by NIED.

11 - 11 北海道北部の群発地震活動と稠密 GNSS 観測から推定された 浅部ゆっくりすべり

Seismic swarm activity and shallow slow slip inferred from dense GNSS network in northern Hokkaido, Japan

大園 真子(北海道大学)

OHZONO Mako (Hokkaido University)

北海道北部中川町周辺では、2012年7月にM4.2をはじめとする群発地震活動が発生した.北海 道大学は臨時の地震観測を実施し、同年10月までの地震活動を詳細に調べた.M4を超える地震は 2013年1月までに5回発生し、ほとんどが深さ5km前後の浅い場所に集中した.活動域近くには 東間寒別断層があるが、震源分布はそれとは一致しない.一方、北海道大学は2007年からこの地 域を東西に横切るGNSS観測網を展開している.この地域のGNSSデータを解析したところ、2012 年の地震活動の時期に合わせて非定常変動が捉えられた.地震活動域の西側では、約5.5ヶ月で最 大約1 cmの東方向への一様な変位が観測された.この変動場は深さ3 kmにほぼ水平の逆断層を仮 定することで概ね説明され、規模は Mw 5.4 相当となる.推定した断層の位置は、この地域周辺に 分布するデタッチメント的な地質構造境界に対応するように見られる.断層パラメターは内陸地震 を対象とするスケーリング則には概ね一致するが、プレート境界で発生するSSEに比べて継続時間 が長い、または規模が小さいという特徴を持つ.群発地震活動と非定常地殻変動の開始のタイミン グ、また非定常変動の終息時期については、GNSS時系列から判断することは難しい¹⁾.

この地域では 2022 年 8 月から再び M4~5 クラスの群発地震が発生している. 震源分布は 2012 年 の活動域よりも若干西側にあり,近傍の GNSS 観測点では 8 月 11 日の地震によるステップ的な地 殻変動が報告されているが,その後の非定常変動については顕著なシグナルは確認されていない. 2022 年 4 月から 2023 年 3 月の「ソフトバンク独自基準点のデータの宇宙地球科学用途利活用コン ソーシアム」による民間 GNSS 観測網のデータを加えた稠密観測網からも,現時点では 2012 年ほ ど顕著な非定常変動は検出されていない. 2012 年と 2022 年の群発地震活動は,活動域が近いものの, 地殻変動時系列は異なる傾向を示すことから,同じ現象が繰り返したと考えるのは難しい. この地 域は地震波速度や流体分布など詳細な地下構造が不明で議論は難しいが,地震活動が比較的活発で ある地域であることから,今後も注視しておく必要がある.

> (大園 真子) OHZONO Mako

謝辞

本研究では国土地理院の GEONET および気象庁の一元化震源のデータを使用しました.本研究 で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは「ソフトバンク独自基準点のデー タの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じて,ソフトバンク株式会社および ALES 株式会社より提供を受けたものを使用しました.記して感謝申し上げます.

参考文献

1) Ohzono et al. (2015), *Geophys. J. Int.*, **200**, 144-148. An intraplate slow earthquake observed by a dense GPS network in Hokkaido, northernmost Japan



- 第1図 (左上)浅部ゆっくりすべりが発生していると考えられる時期(2012年7月15日-2013年1月3日の約5.5ヶ月間)の水平方向の累積地殻変動場. 図中東にある GEONET 観測点(0103)を基準とする. 観測値を黒のベクトルおよび誤差楕円(1 σ)で,また計算値を白のベクトルで示す. 灰色の丸はこの時期に観測された地震の震央分布である.赤の矩形は推定された断層のトレースを示し,実線部分が上端となる.(下)と(右上)震源分布の深さ断面.丸の色は発生した時期に対応する.赤の線は推定された断層の位置を示す.また,白の波線は問寒別断層(TF)の想定される位置を示す.
- Fig. 1 (Upper left) Observed (black) and calculated (white) horizontal displacements during the SSE (July 15, 2012 -January 3, 2013). Error ellipsoids of the observations indicate 1σ. Grey open circles are epicenters of the earthquake swarm observed by temporal dense seismic network since July 15, 2012 until January 31, 2013. A red rectangle denotes the surface trace of the estimated fault. The solid line indicates the upper edge. Grey solid lines are traces of the Quaternary active faults. TF shows the Toikanbetsu active fault. (Bottom) and (Upper right) Cross-section of the hypocenter distribution. Color indicates the timing of the earthquakes. The solid red line corresponds to the location of the estimated SSE fault.

11 - 12 室内実験における流体圧入で誘発される微小破壊の研究 Acoustic emission activity induced by fluid injection in the laboratory experiment

京都大学防災研究所, 直井誠

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University Makoto Naoi

本稿では,流体と破壊の関係を調べるために行った室内水圧破砕実験について報告する.一連の 研究は,シェールガス・オイル開発を念頭に置いた資源開発の効率化を目的としているが,流体起 因で発生した破壊を対象としていることから,群発地震に対して何らかの知見が得られる可能性が ある.

第1図に示すように、65 x 65 x 130 mmの直方体形状に整形した乾燥状態の供試体中央に穿孔した破砕孔に、紫外線照射下で発光する蛍光剤添加樹脂を圧入して水圧破砕を行った.試験後に供試体を切断し、その断面や薄片を用いて造成亀裂を含む流体浸入域を観察するとともに、破壊の時間発展を、供試体周囲に貼り付けた微小破壊センサ(AE センサ)の解析を通じて調べることができる. これまでに Eagle Ford 頁岩¹⁾ や黒髪島花崗岩^{2),3)} などを用いて実験を行ってきた.流体浸入域とAE 震源分布の観察から、Eagle Ford 頁岩を用いた実験では破砕孔から鉛直方向に伸びるシンプルな亀 裂が造成されるのに対し(第2図)、黒髪島花崗岩を用いた場合には三次元的に流体が浸入し、その中心部で鉛直方向に二次元的広がりを持つ亀裂面が造成されたことが示唆される(第3図).

AE センサの記録はその指向性が公表されていない,周波数特性が複雑でかつ設置状況によって 変化するといった困難があり,その波形記録を用いた解析は簡単ではない.本研究ではこれらの困 難を解決する手法を考案し,モーメントテンソル,地震モーメント,コーナー周波数推定を実現す るとともに,得られた震源パラメタと観察された流体浸入域・亀裂形状から亀裂造成過程について 検討を行った.

モーメント・テンソル推定においては、AE 波形記録から実際にセンサに入射した波の振幅を推 定して解析に用いるが、これには AE センサの指向性とその相対感度を推定・補正する必要がある. 本研究では、半円筒形の金属製ブロックを用意し、これを用いて AE センサの指向性を測定した⁴. また、AE センサは固定方法によっては貼り付け毎に感度が顕著に変化し、このことが解析の誤差 要因となり得る.本研究では水圧破砕実験直前に、個々の AE センサから他のセンサに向けて波を 発振する音波透過試験を実施し、得られた振幅値から個々のセンサの相対感度を逆解析することで、 すべての実験における全センサの相対感度を推定し、振幅記録補正に用いた.また、同じ音波透過 試験のデータを用いて供試体の減衰異方性を推定し、これを補正に用いた.

モーメント・テンソルは、手動¹、あるいは深層学習技術^{2),3)}を用いて読み取った P 波初動極性・ 振幅値から逆解析で推定した.解析の結果,花崗岩,頁岩ともに引張成分が卓越する解が支配的と いう結果が得られた.特に頁岩においてはほぼ全ての解が円孔周りの応力場から理論的に予想され る,圧縮軸沿いに破壊面を持つ引張亀裂に対応することが示された¹⁾.花崗岩でも引張型の解が支 配的であったが,特に主亀裂造成が始まるまでは,様々な方向を向いた引張亀裂が生じたことが確 認された.主亀裂造成が始まると,理論的に予想される方位の引張亀裂が多数発生すると同時に, せん断型のイベントが多数発生するといった,顕著な時間変化を示した(第4図).このような違いは, 供試体が内包する既存亀裂と流体の相互作用の強さの違いに起因すると考えられる. 次に、個々のAE 震源の絶対規模、すなわち地震モーメントを推定した。AE センサの周波数特 性はメーカーから公表されているものの、実際の特性は設置方法に依存する。本研究ではレーザー ドップラー速度計を用いることで、実際の破砕実験で採用した手法でセンサを固定した場合の周波 数特性を評価した。これに加えて、モーメント・テンソル解析時にも補正したセンサ指向性・個々 のセンサの相対感度・供試体の減衰特性を補正したうえで、個々のAE センサの記録から P 波の地 動スペクトルを評価し、これに理論スペクトルをフィッティングして地震モーメント及びモーメン トマグニチュード (*M_W*)を評価した。得られた *M_W*の範囲は – 9.1 から – 6.3 である。なお、通常、 地震計を用いた地震モーメント推定で解析に用いられる剪断型破壊の Radiation Pattern 係数は仮定 できないため、本研究ではモンテカルロ法により shear-tensile モデルに基づいた各モーメントテン ソル解のタイプに対応する平均的 Radiation Pattern 係数を推定して解析に用いている。

最後に、AE センサの周波数特性や媒質の伝達関数のモデリング誤差の影響を軽減可能な Multiple Empirical Green Function 法を用いて個々のイベントのコーナー周波数(fc)を推定したところ、全部で 1053 イベントに対して 68.4–1208.0 kHz の値を得た. この結果の解釈においては、測定帯域が狭いこと、剪断型の円形クラックモデルを用いた議論ができないこと、AE の震源メカニズム・規模の時間変化に起因するバイアスが複数かかることなど、誤った解釈につながる問題が多数存在するため慎重な議論が必要であるものの、1)約半数はせん断型破壊に対して繰り返し報告されている応力降下量一定則と調和的な *Mo-fc* 関係を持つイベントであった、2)残る半数は上記スケーリング則から予想されるよりも低周波成分が卓越するイベントであった、という結論が得られた(第5 図). 震源における高い間隙流体圧の存在が、低周波成分が卓越するイベントの発生に寄与したと考えられる.

直井 誠 NAOI Makoto

謝辞

本研究は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(現:独立行政法人エネルギー・金属鉱 物資源機構)(JOGMEC)の委託研究として実施しました.また,科研費(16H04614;21H01191), 京都大学教育研究振興財団,災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)の援助 を受けました.

参考文献

- 1) Naoi et al. (2020), *Geophysical Journal International*, **222**, 769–780. Tensile dominant fractures observed in hydraulic fracturing laboratory experiment using eagle ford shale.
- 2) Tanaka et al. (2021), *Geophysical Journal International*, **226**, 493–510. Preparatory acoustic emission activity of hydraulic fracture in granite with various viscous fluids revealed by deep learning technique.
- 3) Naoi et al. (2022), *Geophysical Journal International*, **231**, 408–425. Source parameter estimation of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in the laboratory
- 4) Yamamoto et al. (2019), *Geophysical Journal International*, **216**, 1507–1516. Moment tensor analysis of acoustic emissions induced by laboratory-based hydraulic fracturing in granite.



- 第1図 蛍光観察と AE 計測による水圧破砕亀裂造成プロセスの可視化実験.上下方向に 5 MPa の一軸圧縮をかけ た状態で供試体中央部の破砕孔から,紫外線照射下で発光する樹脂を注入して水圧破砕を生じさせる.
- Fig. 1 Experimental setting of Hydraulic fracturing. The fracture generation process is investigated by AE measurement and direct observation using fracturing fluid (resin) mixed with a fluorescent substance. Under uniaxial compression of 5 MPa in the vertical direction, the resin that emits bluish-white light under UV irradiation is injected into the hole in the center of the specimen to induce hydraulic fracturing.



- 第2図 イーグルフォード頁岩における実験結果の例¹¹.a)破砕孔での流体圧と AE 積算個数の時間変化.時刻の 原点は破砕時刻(破砕孔圧力がピークに達した時刻)に対応している.b) AE 震源の z 座標の時間変化.c) 破砕後の供試体断面を紫外線照射下で観察したもの.青白く発光している部分が流体の浸入域に対応する. 黄色の点は,断面付近に求まった微小破壊の震源.主破壊(t=0)開始直前に破砕孔付近で AE 活動が始まり, 造成亀裂に対応する薄い二次元状分布を描き出しながら,加速度的に活動域が拡大している.
- Fig. 2 Example of experimental results with an Eagle Ford Shale sample¹⁾. a) Time history of fluid pressure at the fracturing hole and the cumulative number of AEs. The origin time corresponds to the timing of main fracture generation (the time when the fluid pressure reaches the peak value). b) Temporal variation of the *z*-coordinates of the AE hypocenters.
 c) Photograph under UV irradiation for the specimen after the fracturing experiment (cross-section view). The bluish-white parts correspond to the fluid penetration area. The yellow dots indicate the hypocenters of the AE events. AE activity started around the hole immediately before the main fracture generation (*t*=0), and the activity area rapidly expanded, drawing a thin two-dimensional distribution corresponding to the induced fracture.



- 第3図 黒髪島花崗岩供試体における実験結果の例²⁾.実験開始後,破砕孔周辺に流体が徐々に浸透することに伴っ て三次元的に AE 活動が広がり(1st expansion phase),破砕の数十秒前から主亀裂造成に対応する二次元状 AE 分布の拡大(2nd expansion phase)が生じたと解釈している.
- Fig. 3 Example of experimental results with a Kurokami-jima granite specimen²⁾. After starting fluid injection, the AE activity initiated and expanded three-dimensionally (1st expansion phase). A new planar AE distribution emerged from the borehole at $t \sim -20$ s and expanded along the maximum compression axis (2nd expansion phase). The first phase was likely induced by fluid penetration into pre-existing microcracks, such as grain boundaries, and the second phase likely corresponded to the main fracture formation.



- 第4図 黒髪島花崗岩供試体の実験で観察されたモーメント・テンソル解の時間変化²³. a)引張型イベントの開口(閉合)軸の時間変化.はじめは様々な方向の破壊が発生していたが、主破壊の造成(=0)前後には、鉛直方向の亀裂が水平方向に開口するタイプの破壊(円孔周りの応力場から予想される方向の破壊)が多数発生した.b)震源メカニズムのタイプの指標(c値)の時間変化.黒点は開口成分を持つもの、赤点は閉合成分を持つものに対応している.はじめは引張型が支配的だが、主破壊造成前後で剪断型の割合が急増したことがわかる.
- Fig. 4 Temporal changes in moment tensor solutions for an experiment of a Kurokami-jima granite specimen^{2,3)}. a) Temporal changes in φ , the smaller angle between the y-axis and the two candidates of crack-opening axes of each MT solution. In the initial part of the experiment, tensile events in various directions occurred. Around the main fracture generation (*t*=0), many tensile events which opened horizontal directions occurred. This type of focal mechanism corresponds to the theoretically expected stress field around the hole. b) Temporal changes in the *c*-values for the obtained MT solutions (only $c \ge 0$). The black and red dots indicate the solutions with tensile and compressive components, respectively. The tensile events were dominated in the initial part of the experiment, whereas the fraction of shear-type events increased around *t*~0.



- 第5図 震源メカニズムのタイプ(c値)とγ値の関係³⁾.丸は引張成分を持つイベント,四角は圧縮成分を持つイベントに対応する.γ値は破壊の規模と卓越周波数の関係を表す指標で、せん断破壊の場合には、γ値から計算できる⊿σ(図中右縦軸)が0.1-10MPaの範囲に収まることが知られている(応力降下量一定則).本実験でγ値が得られたイベントの半分程度はこの範囲に収まるが、残りの半分はそれより1-2桁小さな値を示している.
- Fig. 5 Relationship between *c*-values and γ -values. Open circles indicate events with a tensile component, and filled squares indicate a compressive component. γ -values represent the relation between source size and dominant frequency of AE events. Many previous studies reported that the stress drop $\Delta\sigma$ that can be calculated from γ -values have values of 0.1-10 MPa for shear events (constant stress drop scaling). Although half of our results showed values in the range, the remaining showed much lower ones.

連絡会記事

第238回地震予知連絡会議事次第

- 日 時:令和5年2月28日 13:00 ~ 17:00
- 場 所:地震予知連絡会大会議室(関東地方測量部内,オンライン会議併用)
- 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237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
 - ・その他
- 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
 - 2) 2023 年 2 月 6 日トルコの地震に関する報告
 - (1) 国土地理院
 - (2) 気象庁
 - (3) 防災科学技術研究所
 - 3) 地殻活動の予測に関する報告
 - (1) 地殻活動の予測実験(1) 内陸地震の短期確率予測と評価について
- 5. 重点検討課題の検討
 - 1) 第238 回地震予知連絡会重点検討課題の検討
 - 「人工知能による地震研究の深化」
 - コンビーナ 平田 直 委員
 - 共同コンビーナ 長尾 大道 様
 - (1) 人工知能による複数観測点を用いた地震・測地イベント検知手法開発 統計数理研究所 矢野 恵佑 様
 - (2) 機械学習を併用した自動震源決定による微小地震の検出 気象研究所 溜渕 功史 様
 - (3) 地震動予測への機械学習技術の適用防災科学技術研究所 久保 久彦 様
 - (4) 深層学習に基づく地震計古記録からの低周波微動の検出

東京大学地震研究所 長尾 大道 様

- (5) Earthquake Early Warning using Elasto-gravity signals 京都大学防災研究所 Bertrand Rouet-Leduc 様
- 2)総合討論
- 3)第239回地震予知連絡会重点検討課題の趣旨説明

課題名「群発地震」

コンビーナ 今西 和俊 委員

6. その他の議事

閉会

第 2 3 9 回 地 震 予 知 連 絡 会 議 事 次 第

- 日 時:令和5年5月31日 13:00 ~ 17:00
- 場 所:地震予知連絡会大会議室(関東地方測量部内,オンライン会議併用)
- 1. 開 会
- 2. 会長選出
- 3. 院長·会長挨拶
- 4. 事務的事項
 - 1) 出席者・資料の確認
 - 2) 第238回の議事録確認
 - 3) 地震予知連絡会 SAR 解析 WG の活動状況
- 5. 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
 - 2) 地殻活動の予測に関する報告
 - (1) 気象庁震度データベースを用いた地震予測(2022 年の予測結果の評価と発生確率値 の更新)
 - (2) 最近の能登半島群発地震活動の時空間的特徴と 2023 年 5 月 5 日 M6.5 地震について
- 6. 重点検討課題の検討
 - 1)第239回地震予知連絡会重点検討課題の検討
 - 「群発地震」

コンビーナ 今西 和俊 委員

- (1) 能登半島北東部で長期間継続する地震活動
 金沢大学 平松 良浩 様
- (2) 奥能登での群発的地震活動発生域周辺の3次元比抵抗構造解析の現状 京都大学防災研究所 吉村 令慧 様
- (3) 2020 年長野・岐阜県境付近の群発地震活動 東京大学地震研究所 加藤 愛太郎 様
- (4) 北海道北部の群発地震活動と稠密 GNSS 観測から推定された浅部ゆっくりすべり 北海道大学 大園 真子 様
- (5) 室内実験における流体圧入で誘発される微小破壊の研究 京都大学防災研究所 直井 誠 様
- 2)総合討論
- 3)第240回地震予知連絡会重点検討課題の趣旨説明
 - 課題名「関東地震 100 周年」

コンビーナ 佐竹 健治 委員

7. 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.
- 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.
- 6. 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.
- 7.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.
- 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4年4月1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 運営	会 『検討部	長 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	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・火山研究部門副研究部門長
委		員	平田	直	地震調查研究推進本部地震調查委員会委員長
					南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会会長
					地震防災对東强化地域判定会会長
禾		日	7.111	古山	果
安禾		貝日	11川 古田	但 欠 准 山	御上休女川 御任 旧報 即 仅 州 · 国际 課 地 辰 詞 重 日
安禾		只日	木田 山村	進也	ス家川地長大山市地長大山汉州 · 詞且誅女 与免亡与免研究所批素法法研究或目
安禾		只日	中们	<u> 地</u>	ス家川 ス家明九川地長伴似明九叩女 国上地理院地理地想活動研究 トンタード
女禾		只日	加中 午本	<u></u> 御 「 「 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	国土地理院地理地取佔動切九センターで
女		只	入木	臣山	国工地理防地理地測地戰測センクー地展調且日
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4年4月1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・火山研究部門副研究部門長
委		員	東田	進也	気象庁地震火山部地震火山技術・調査課長
委		員	中村	雅基	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	矢来	博司	国土地理院地理地測地観測センター地震調査官

第28期 地震予知連絡会

(令和5年5月31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	Â	214	長	小原	一成	東京大学地震研究所教授
副 運智	 営検	え 討音	長 『会長	高橋	浩晃	北海道大学大学院理学研究院教授
委			員	岡田	知己	東北大学大学院理学研究科准教授
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	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	田所	敬一	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教授
委			員	堤 淮	吉之	同志社大学理工学部教授
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・火山研究部門副研究部門長
委			員	平田	直	地震調查研究推進本部地震調查委員会委員長
						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
						東京大学名誉教授
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	東田	進也	気象庁地震火山部地震火山技術・調査課長
委			員	中村	雅基	気象庁気象研究所地震津波研究部長
委			員	山後	公二	国土地理院地理地殻活動研究センター長
委			員	矢来	博司	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28期 運営検討部会

(令和5年5月31日現在)

部	会	長	高橋	浩晃	北海道大学大学院理学研究院教授
委		員	山岡	耕春	名古屋大学大学院環境学研究科教授
委		員	小原	一成	東京大学地震研究所教授
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・火山研究部門副研究部門長
委		員	東田	進也	気象庁地震火山部地震火山技術・調査課長
委		員	中村	雅基	気象庁気象研究所地震津波研究部長
委		員	山後	公二	国土地理院地理地殻活動研究センター長
委		員	矢来	博司	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.
- 8. 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.
 https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/local.html

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

- 2) Myoji et al. (yyyy), *予知連会報*, **100**, 44-55.

(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 1 Times 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110巻〉

令和5年9月 発行

編集・発行者 〒 305-0811 茨城県つくば市北郷1番 TEL (029)864-1111