

令和3年8月27日

地震予知連絡会

地殻活動モニタリングに関する検討結果等について

－地震予知連絡会 第232回定例会（2021年8月）－

地震予知連絡会は8月27日、第232回定例会を開催し、令和3年5月～令和3年7月の地殻活動を主としたモニタリング結果に対する検討を実施しました。また、重点検討課題「地震発生予測に向けた沈み込み帯での地震準備・発生過程の物理モデル」についての検討を実施しました。

本定例会はWEB会議形式で実施されました。記者会見につきましても、新型コロナウイルスの感染拡大防止対応のため、WEB会議形式で実施いたします。

添付資料を含む一式の資料については、後日以下のURLに掲載いたします。

<https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/activity/232/232.html>



■地殻活動モニタリングの検討結果

1. 1 地殻活動の概況

(1) 全国の地震活動について

日本とその周辺で2021年5月から7月までの3か月間に発生したM5.0以上の地震は29回であった。このうち、最大震度5弱以上を観測した地震は1回発生した。最大震度5弱以上を観測した地震は、5月1日の宮城県沖の地震（M6.8、最大震度5強）で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した地震である（気象庁・資料2頁）。

(2) 日本周辺における浅部超低周波地震活動

2021年5月から7月までの間に掲載基準を満たす超低周波地震活動は検出されなかった。ただし、波形相関解析により、日向灘～奄美大島沖において5月下旬から7月中旬に断続的な超低周波地震活動があったことを確認した（防災科学技術研究所・資料3-4頁）。

(3) 日本列島のひずみ変化

GNSS連続観測によると、最近1年間の日本列島のひずみには、東北地方太平洋沖地震及び熊本地震の余効変動の影響が見られる。また、福島県沖の地震、宮城県沖の地震及び石川県能登地方の地震活動の影響が見られる。（国土地理院・資料5頁）。

1. 2 プレート境界の固着状態とその変化

(1) 駿河トラフ・南海トラフ・南西諸島海溝周辺

○西南日本の深部低周波微動・短期的スロースリップ活動状況

短期的スロースリップイベントを伴う顕著な微動活動が、紀伊半島北部から中部（5月9日～16日）、四国中部から豊後水道（7月16日～8月1日）において発生した。これ以外の主な深部低周波微動活動は、東海地方（4月30日～5月4日）、紀伊半島中部（4月27日～5月4日）、四国東部（5月20日～6月2日）で観測された（防災科学技術研究所・資料6-8頁）。

○南海トラフ孔内観測で捉えた浅部ゆっくりすべり

南海トラフ孔内（間隙水圧）観測で、2021年8月4日頃から数日間、SSEに起因すると考えられるゆっくりとした間隙水圧変動が観測された（海洋研究開発機構・資料9頁）。

○紀伊半島西部・四国東部の非定常的な地殻変動

GNSS連続観測により、紀伊半島西部・四国東部で2020年夏頃から観測されている非定常的な地殻変動は、最近では鈍化している（国土地理院・資料10頁）。

○四国中部の非定常的な地殻変動

GNSS連続観測により、四国中部で2019年春頃から開始した非定常的な地殻変動が引き続き捉えられた。プレート間のすべりを推定した結果、四国中部で最大16cmのすべりが推定された（国土地理院・資料11頁）。

○九州地域の非定常的な地殻変動

GNSS連続観測により、九州南部で2020年夏頃から観測されている非定常的な地殻変動は、最近では鈍化している（国土地理院・資料12頁）。

1. 3 その他

(1) 宮城県沖の地震（5月1日 M6.8）

2021年5月1日10時27分に宮城県沖の深さ51kmでM6.8の地震（最大震度5強）が発生した。この地震は、発震機構（CMT解）が西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した（気象庁・資料13頁）。

この地震に伴い、震央西の宮城県のGNSS連続観測点で東南東方向に最大約1cmの地殻変動が観測された。また、牡鹿半島周辺で小さな沈降が観測された。GNSS観測による地殻変動からプレート境界のすべりを推定した結果、牡鹿半島の沖合で、最大20cm弱のすべりが推定された（国土地理院・資料14-16頁）。

3月20日と5月1日の地震に伴うプレート境界でのすべり分布を比較するため、2005年8月16日の宮城県沖の地震（M7.2）についてプレート境界でのすべりを推定した結果、

最大約 40cm のすべりが推定された（国土地理院・資料 17 頁）。

（2）茨城県沖の地震（8 月 4 日 M6.0）

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

（3）石川県能登地方の地震活動

2021 年 7 月 11 日 09 時 15 分に石川県能登地方の深さ 13km で M3.9 の地震（最大震度 4）が発生した。この地震は地殻内で発生した。この地震の発震機構は東西方向に圧力軸を持つ逆断層型であった。今回の地震の震源付近では 2011 年 12 月 17 日に M4.3 の地震（最大震度 3）が発生したほか、2018 年頃から地震回数が増加傾向にあり、2020 年 12 月からより活発になっている。2021 年 6 月 26 日には M4.1 の地震（最大震度 3）が発生した。2020 年 12 月から 2021 年 7 月末までに震度 1 以上を観測した地震は 16 回発生した（気象庁・資料 19 頁）。

この地震活動の開始以降、震源域に近い能登半島の GNSS 連続観測点で南南西方向に最大約 1 cm の地殻変動や、最大約 2 cm の隆起などの地殻変動が観測されている（国土地理院・資料 20-21 頁）。

（4）与那国島近海の地震活動

GNSS 連続観測によると、5 月下旬から 6 月にかけて与那国島近海で発生した地震活動（最大の地震は 5 月 27 日 8 時 54 分、5 月 28 日 1 時 18 分、M4.9）に伴い、与那国島で南方向に約 1 cm の小さな地殻変動が観測された（国土地理院・資料 22 頁）。

■重点検討課題の検討 概要

モニタリング手法の高度化の検討を目的に、地震予知研究にとって興味深い現象や問題等を「重点検討課題」として選定し、集中的な検討を行っています。

<第 232 回定例会 重点検討課題>

課題名 「地震発生予測に向けた沈み込み帯での地震準備・発生過程の物理モデル」
について（資料 25 頁）

コンビーナ 堀 高峰委員（海洋研究開発機構）

報告課題、報告者

1. エネルギー収支を考慮した地震発生シナリオ構築の新手法（資料 26 頁）

野田 朱美（気象研究所）

2. 南海トラフ周辺におけるスロースリップイベントと地震発生準備過程の
数値モデリング：近年の観測研究を踏まえて（資料 27 頁）
松澤 孝紀（防災科学技術研究所）
3. SSE 後の沈み込み帯地震の発生確率に対する単純な物理モデルでの評価
：ヒクラング巨大地震への適用（資料 28 頁）
堀 高峰（海洋研究開発機構）
金子 善宏（京都大学）

議論概要については、地震予知連絡会ウェブサイトの活動報告に掲載いたします。

地震予知連絡会 <https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/>

（問い合わせ先）

○地震予知連絡会事務局

国土地理院地理地殻活動研究センター 研究管理課長 矢来 博司

研究管理課長補佐 平岡 喜文

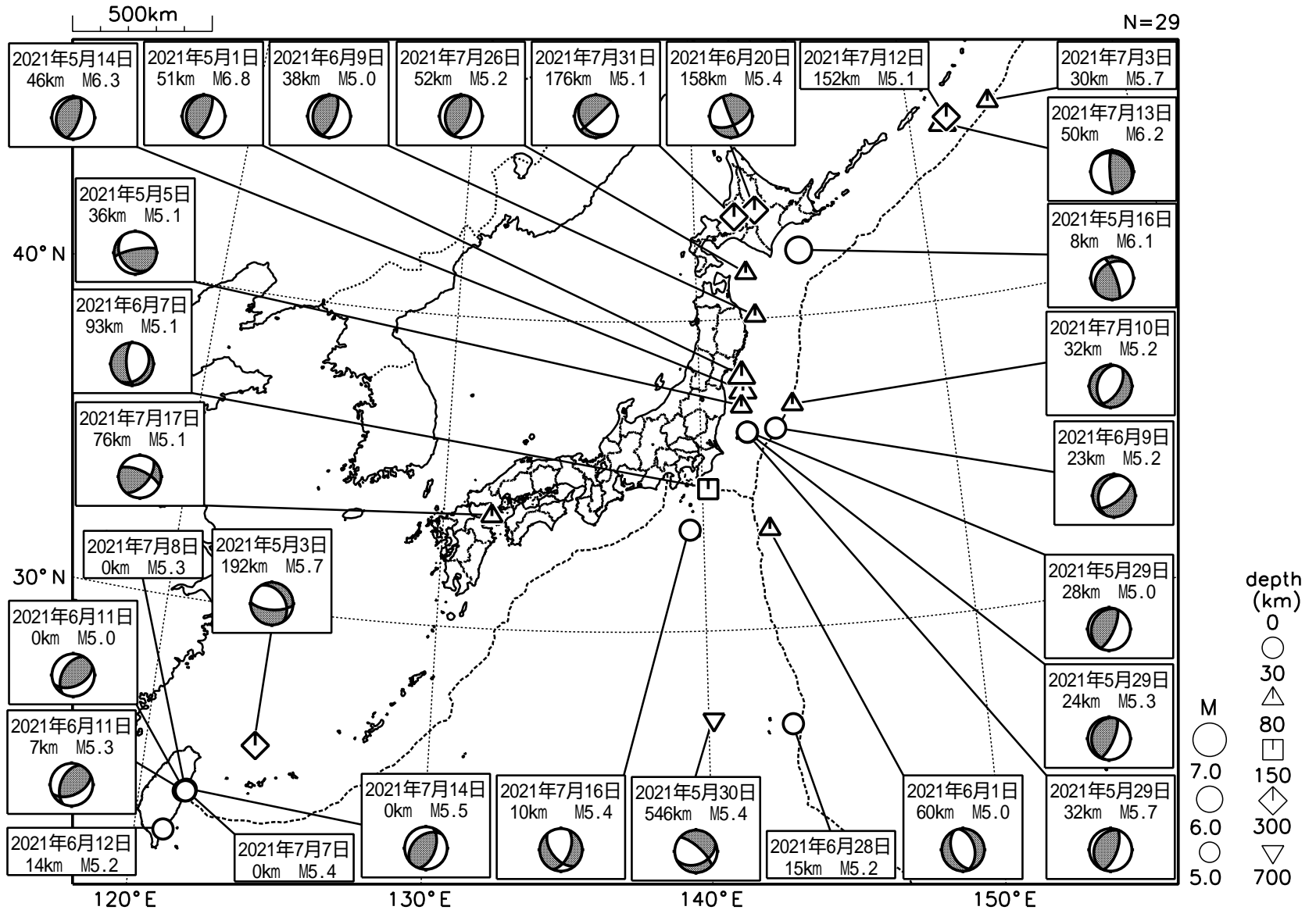
Tel : 029-864-5969（直通） Fax : 029-864-2655



地殻活動モニタリングに 関する検討

日本とその周辺の地震活動 (2021年5月~7月、M 5.0)

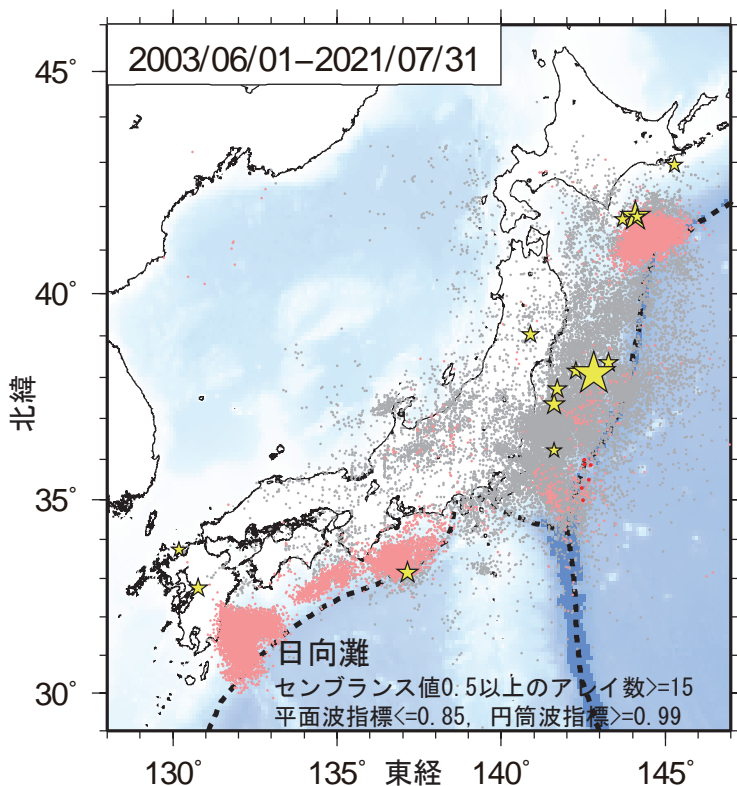
2021 05 01 00:00 -- 2021 07 31 24:00



発震機構は気象庁によるCMT解
 深さはCMT解による

気象庁作成

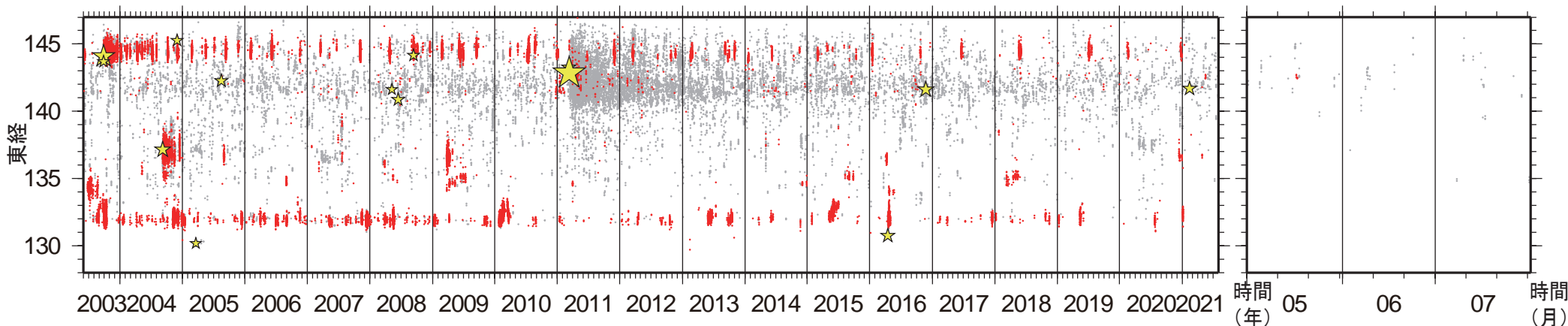
日本周辺における浅部超低周波地震活動（2021年5月～7月）



● 期間内に掲載基準を満たす超低周波地震活動なし

補足) 5月下旬から7月に日向灘～奄美大島沖において断続的に超低周波地震活動が発生したが、本解析では掲載基準外または解析領域外であった。

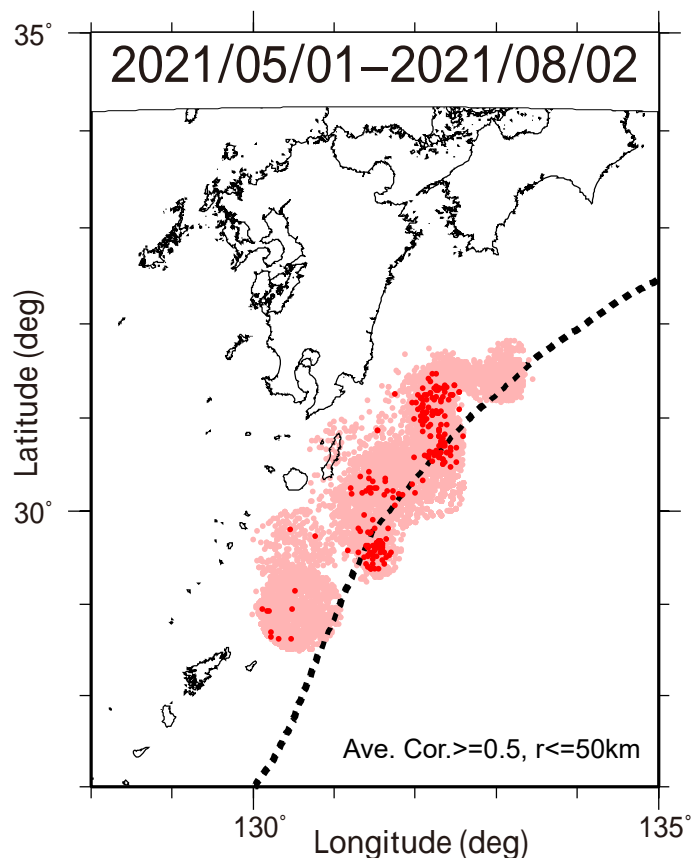
第1図. 2003年6月1日から2021年7月31日までの期間にアレイ解析によって検出されたイベントの震央分布. 検出イベントを防災科研 Hi-net の手動または自動検測震源と照合し, 対応する地震が見出されたイベントを灰色で, それ以外を桃色 (2021年4月30日以前), および赤色 (5月1日以降) の点でそれぞれ示す. これらは主として周期10秒以上に卓越する超低周波地震を表すが, 東北地方太平洋沖地震の発生以降は, 除去しきれない通常の地震を含む. 期間内に発生したM7以上の地震 (ただし, 2011年～2015年の期間は東北地方太平洋沖地震の本震のみ) の震央を黄色星印で示す.



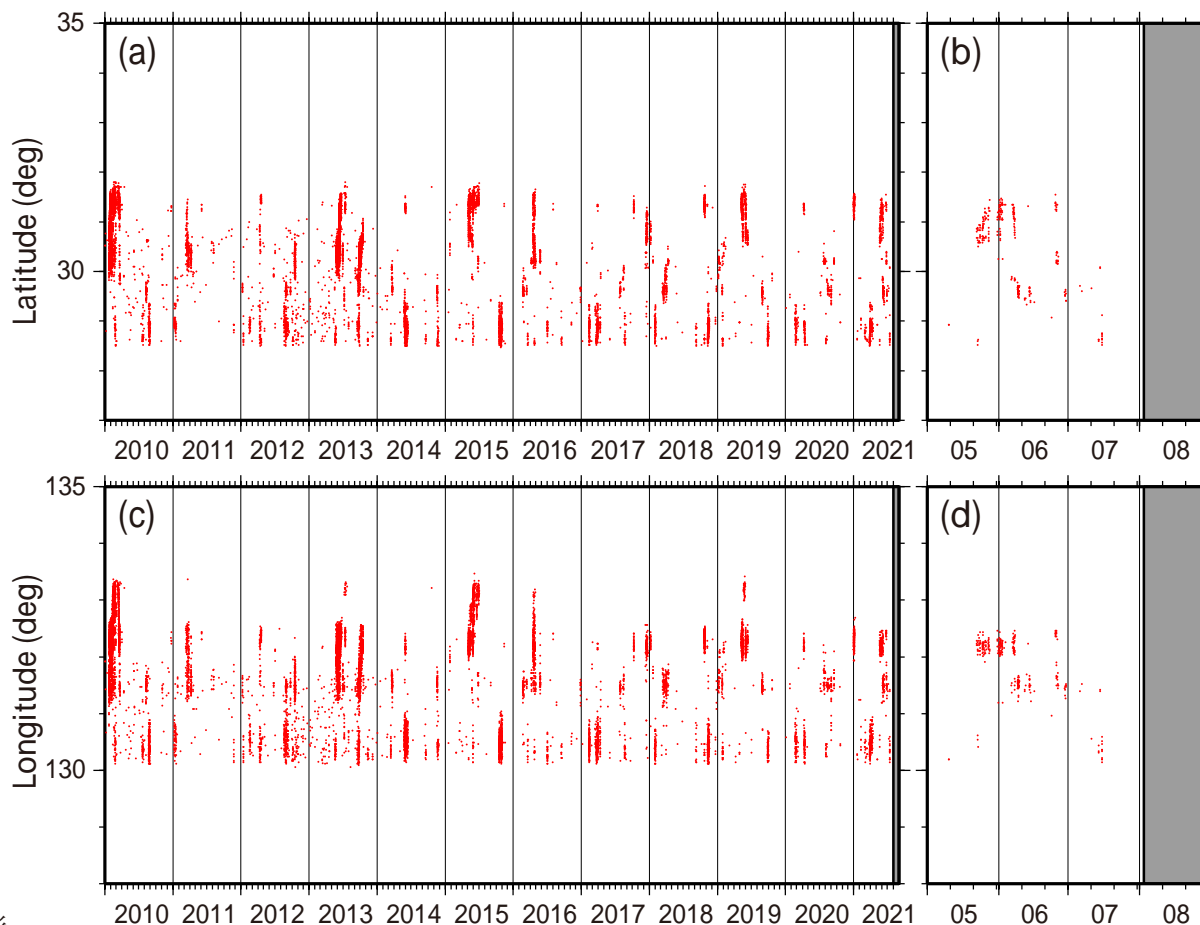
第2図. 2003年6月1日から2021年7月31日までの期間 (左) および直近約3か月間 (右) に検出されたイベントの時空間分布. 検出されたイベントを防災科研 Hi-net 手動または自動検測震源と照合し, 対応する地震が見出されたイベントを灰色で, それ以外を赤色の点でそれぞれ示す. その他は第1図に同じ.

日向灘およびその周辺域における超低周波地震活動（2021年5-7月）

- 波形相関解析 [Asano et al. (2015)] によって既知の地震・超低周波地震の類似イベントを検出
- 日向灘～奄美大島沖において、5月下旬から7月中旬に断続的な超低周波地震活動（北緯30度以北における活動は6月中に終息）



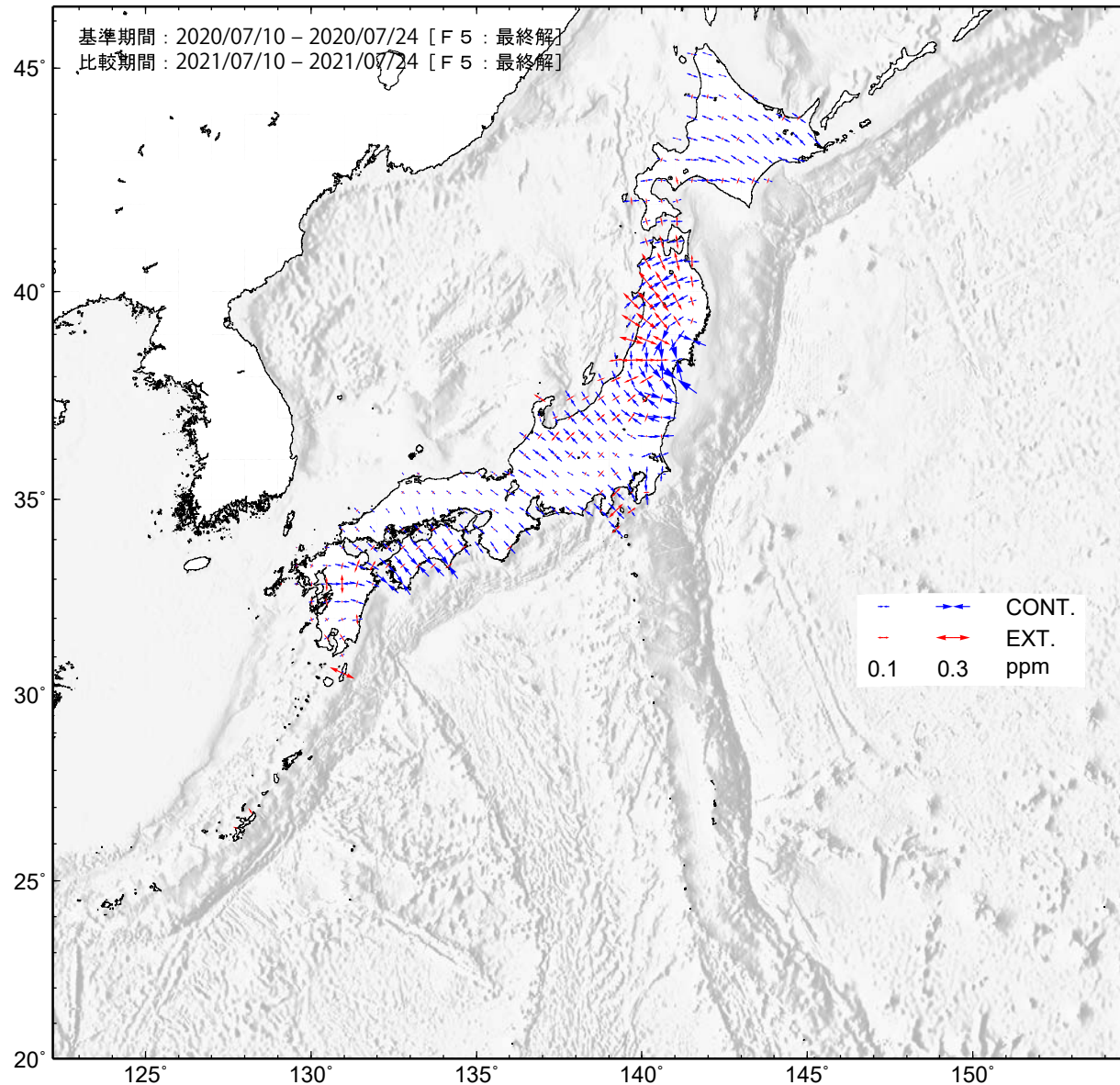
第1図. 2010年1月1日から2021年8月2日までの期間内に波形相関解析 [Asano et al. (2015)] によって検出された超低周波イベントの震央分布. 検出イベントを防災科研 Hi-net の手動または自動検測震源と照合して通常の地震を除去した後に, それ以外を超低周波イベントとして桃色 (2021年4月30日以前), および赤色 (5月1日以降) の点でそれぞれ示す.



第2図. 第1図と同じ期間内に検出された超低周波イベントの時空間分布. 超低周波イベントを赤色の点で示す. (a)および(b)に緯度分布の, (c)および(d)に経度分布の時間変化をそれぞれ示す. また, (a)および(c)に2010年1月1日以降, (b)および(d)には2021年5月1日以降の分布をそれぞれ示す.

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



- GNSS 連続観測による変位ベクトルからひずみ変化図を作成した。
- 海底地形データは ETOPO1 (Amante, C.&B.W.Eakins(2009)) を使用した。

西南日本の深部低周波微動・短期的スロースリップ活動状況 (2021年5月～7月) その1

- 短期的スロースリップイベントを伴う顕著な微動活動：
紀伊半島北部から中部，5月9～16日．四国中部から豊後水道，7月16日～8月1日．
- 上記以外の主な微動活動：東海地方，4月30日～5月4日．
紀伊半島中部，4月27日～5月4日．四国東部，5月20日～6月2日．

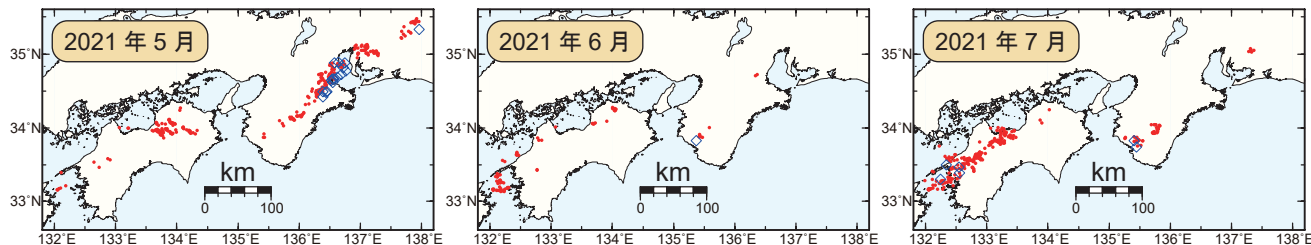


図1. 西南日本における2021年5月～7月の毎月の深部低周波微動活動．赤丸はエンベロープ相関・振幅ハイブリッド法 (Maeda and Obara, 2009) およびクラスタ処理 (Obara et al., 2010) において，1時間毎に自動処理された微動分布の重心である．青菱形は周期20秒に卓越する深部超低周波地震 (Ito et al., 2007) である．

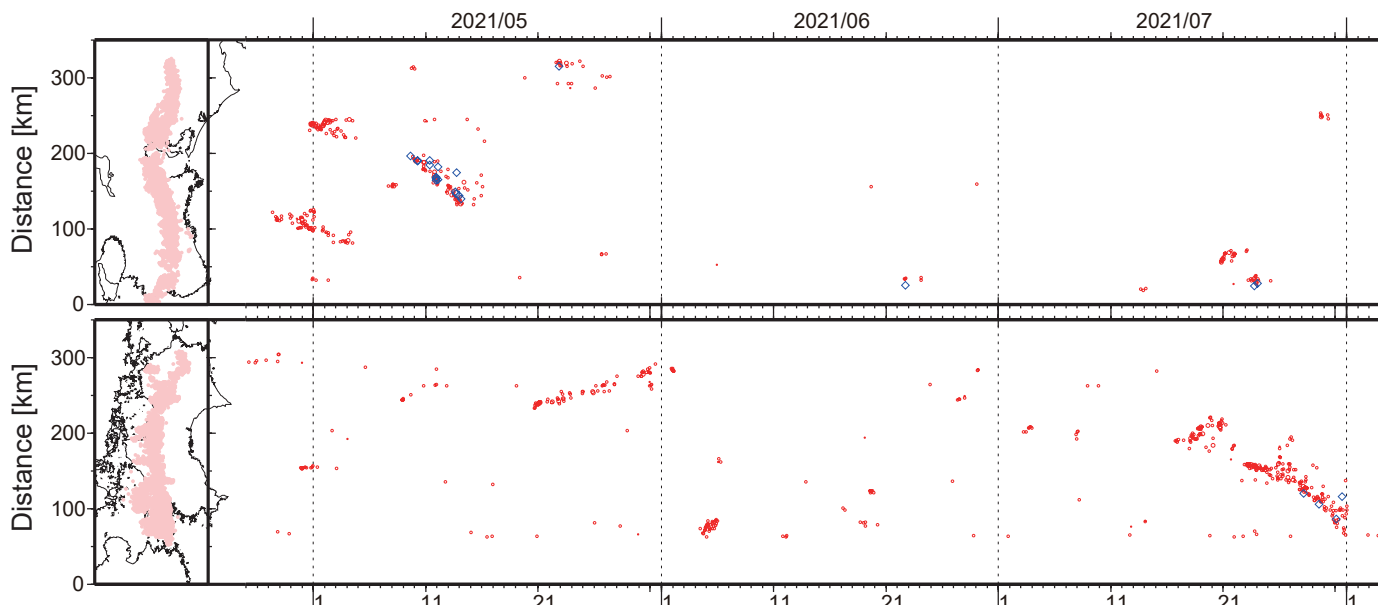


図2. 2021年4月25日～8月3日の深部低周波微動 (赤) および，深部超低周波地震 (青菱形) の時空間分布．

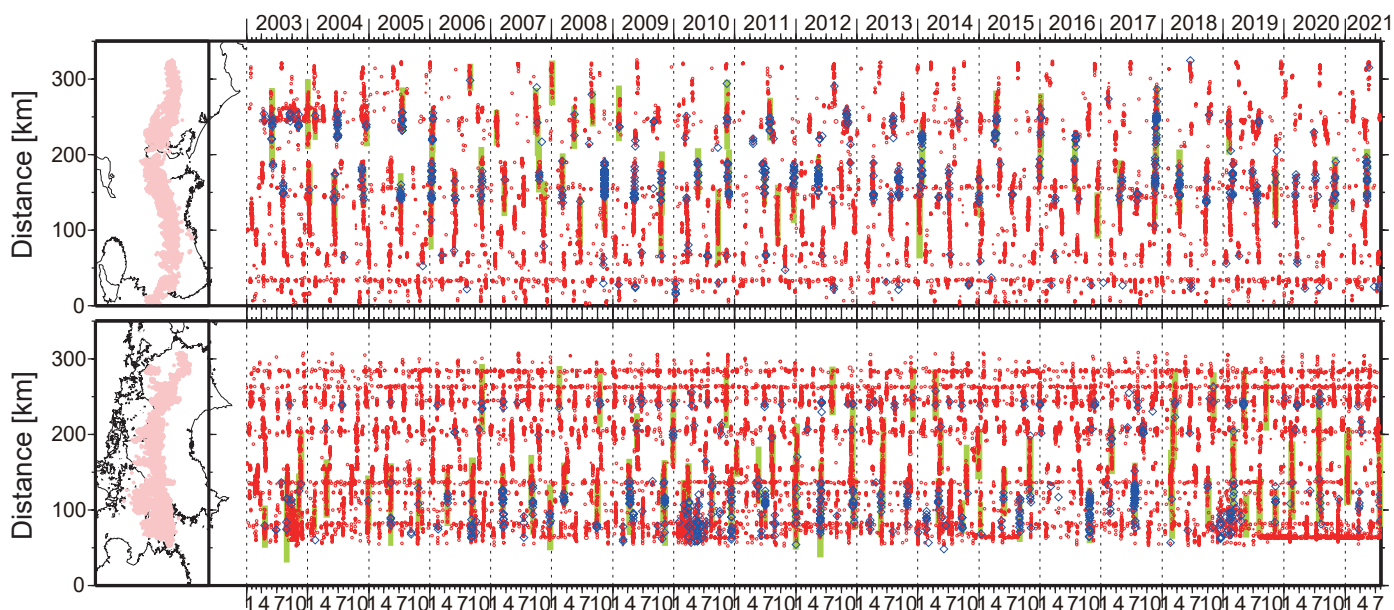


図3. 2003年1月～2021年8月3日までの深部低周波微動 (赤) および，深部超低周波地震 (青菱形) の時空間分布．緑太線は，傾斜変動から検出された短期的スロースリップイベント．

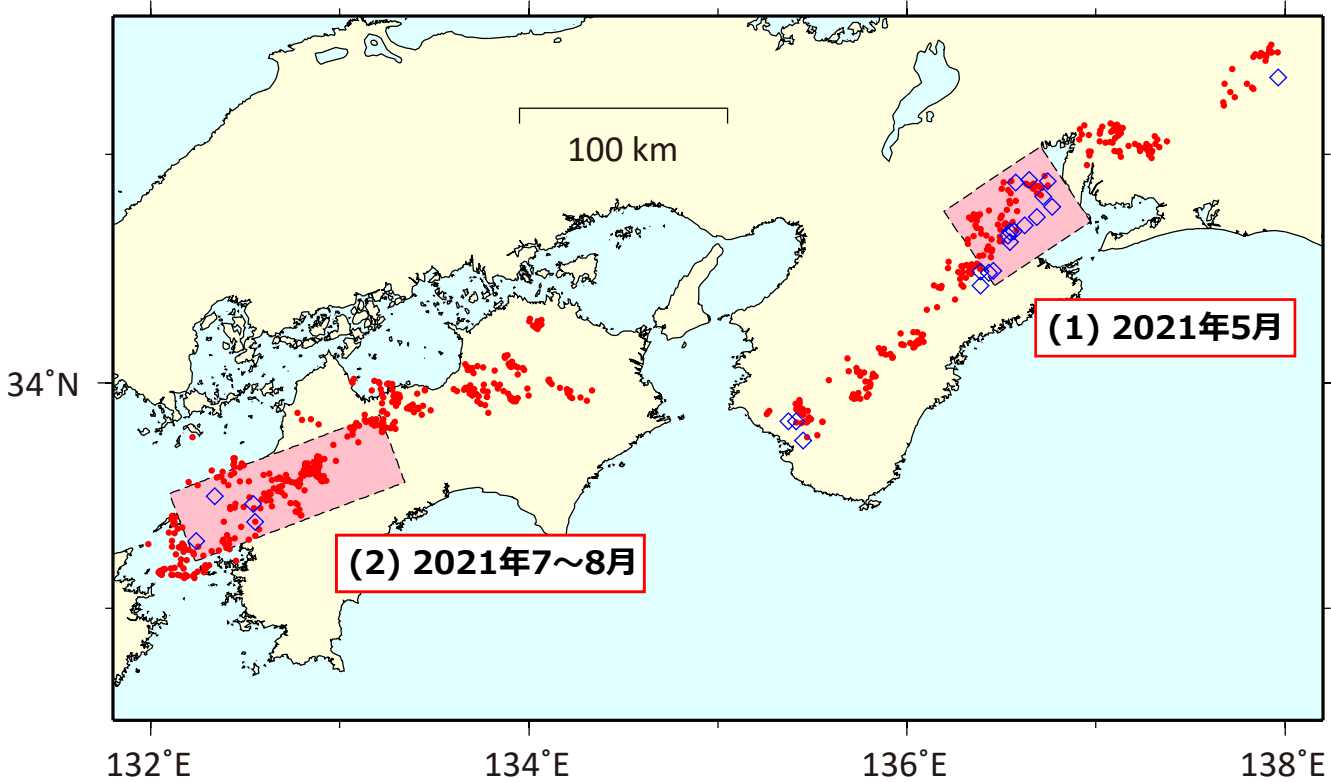


図1：2021年5月1日～7月31日の深部低周波微動（赤点），深部超低周波地震（青菱形），短期的スロースリップイベント（SSE：ピンク四角）。

1. 2021年5月 紀伊半島北部（Mw 6.0）

2020年10～11月（Mw 5.8）以来約6ヶ月ぶり

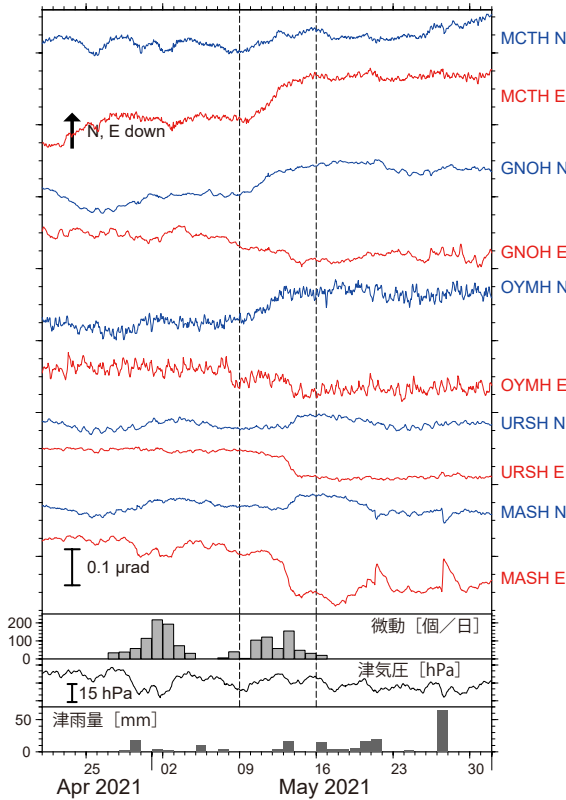


図2：2021年4月21日～5月31日の傾斜時系列。上方への変化が北・東下がりの傾斜変動を表し，BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答成分を除去した。5月9日～15日の傾斜変化ベクトルを図3に示す。紀伊半島北部～愛知県での微動活動度・気象庁津観測点の気圧・雨量をあわせて示す。

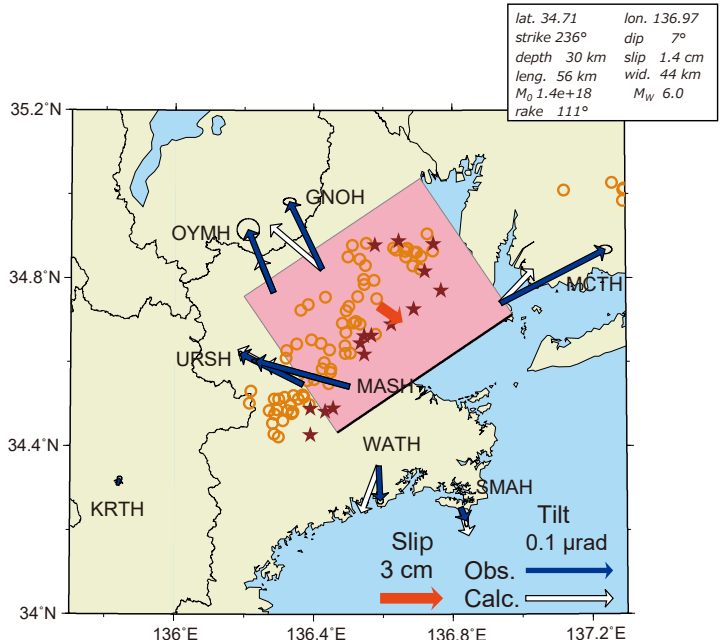


図3：2021年5月9日～15日に観測された傾斜変化ベクトル（青矢印），推定されたスロースリップイベントの断層モデル（赤矩形・矢印），モデルから計算される傾斜変化ベクトル（白抜き矢印）を示す。1時間ごとの微動エネルギーの重心位置（橙丸），深部超低周波地震の震央（茶星印）もあわせて示す。すべり角はプレート相対運動方向に固定している。

謝辞

気象庁のWEBページで公開されている気象データを使用させて頂きました。記して感謝いたします。

2. 2021年7~8月 四国中西部 (Mw 6.0) 2021年1月 (Mw6.2) 以来約6ヶ月ぶり

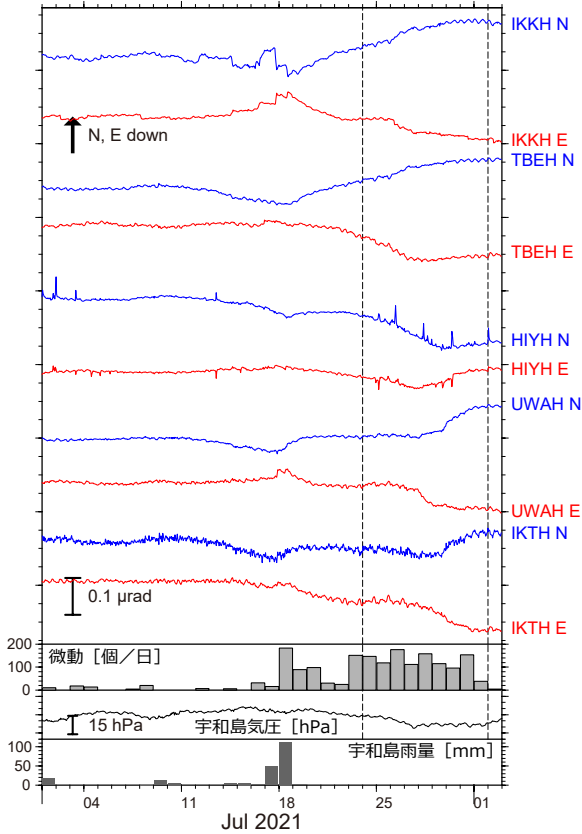


図4: 2021年7月1日~8月2日の傾斜時系列. 上方への変化が北・東下りの傾斜変動を表し, BAYTAP-G により潮汐・気圧応答成分を除去した. 7月24日~8月1日の傾斜変化ベクトルを図5に示す. 四国中西部での微動活動度・気象庁宇和島観測点の気圧・雨量をあわせて示す.

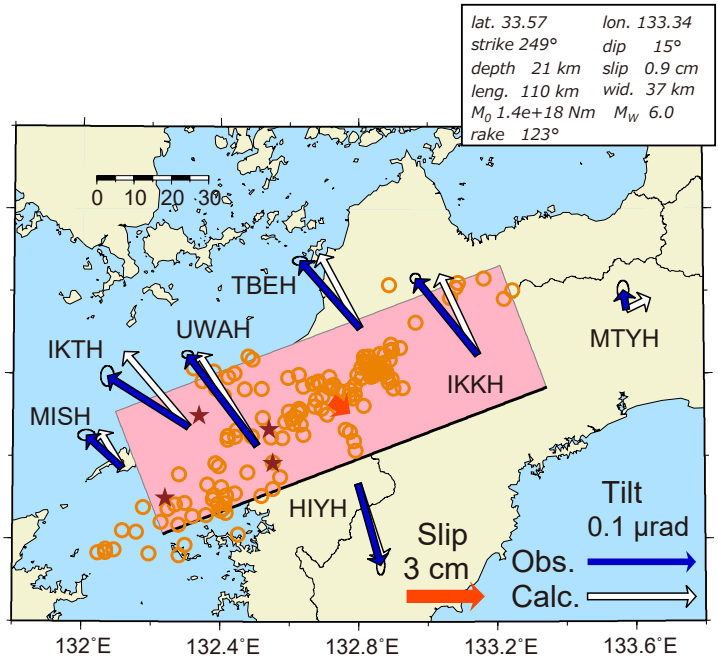

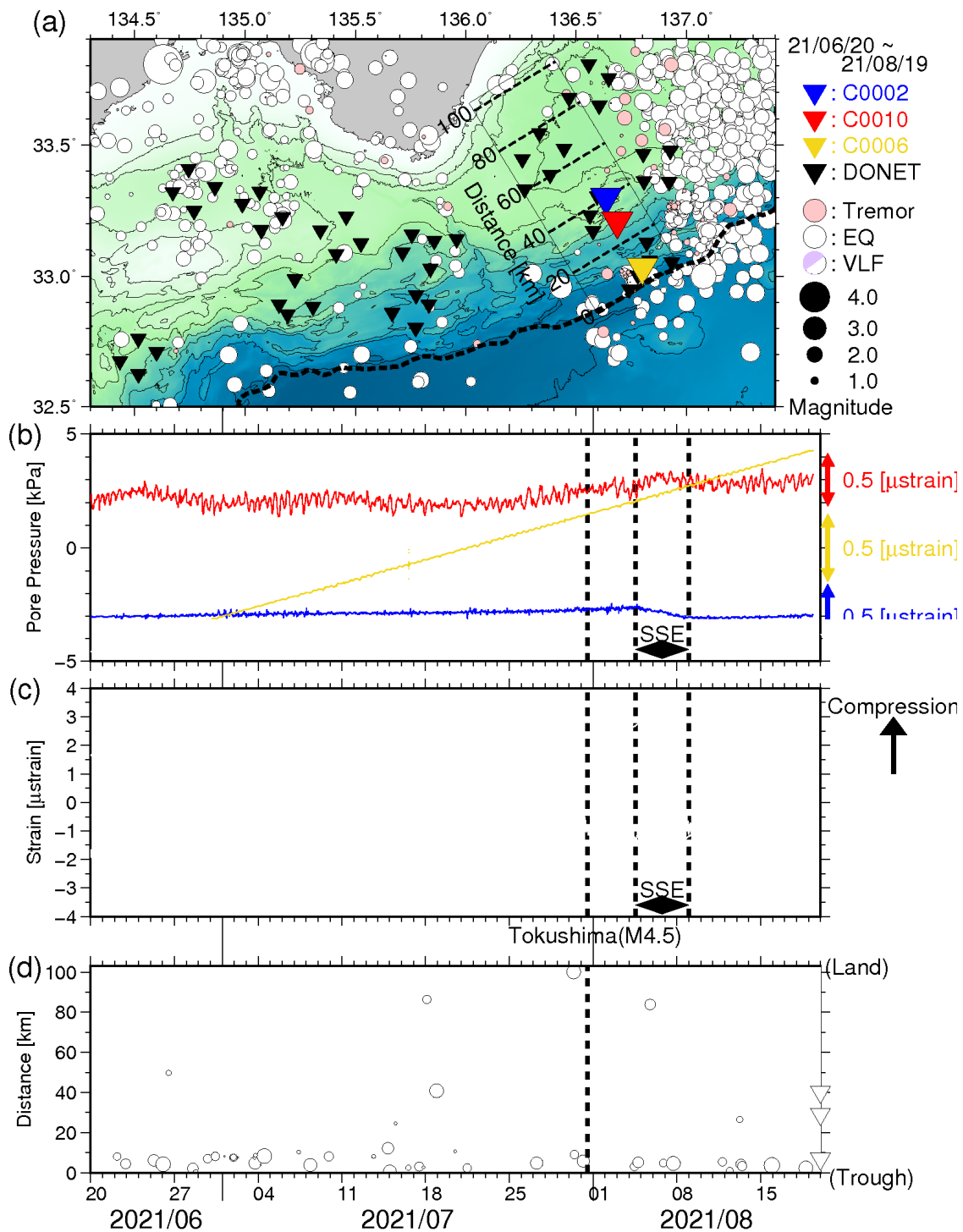


図5: 7月24日~8月1日に観測された傾斜変化ベクトル (青矢印), 推定されたスロースリップイベントの断層モデル (赤矩形・矢印), モデルから計算される傾斜変化ベクトル (白抜き矢印) を示す. 1時間ごとの微動エネルギーの重心位置 (橙丸), 深部超低周波地震の震央 (茶星印) もあわせて示す. すべり角はプレート相対運動方向に固定している.

南海トラフ孔内観測で捉えた浅部ゆっくりすべり

2021年8月4日頃から開始したSSEについて (速報)

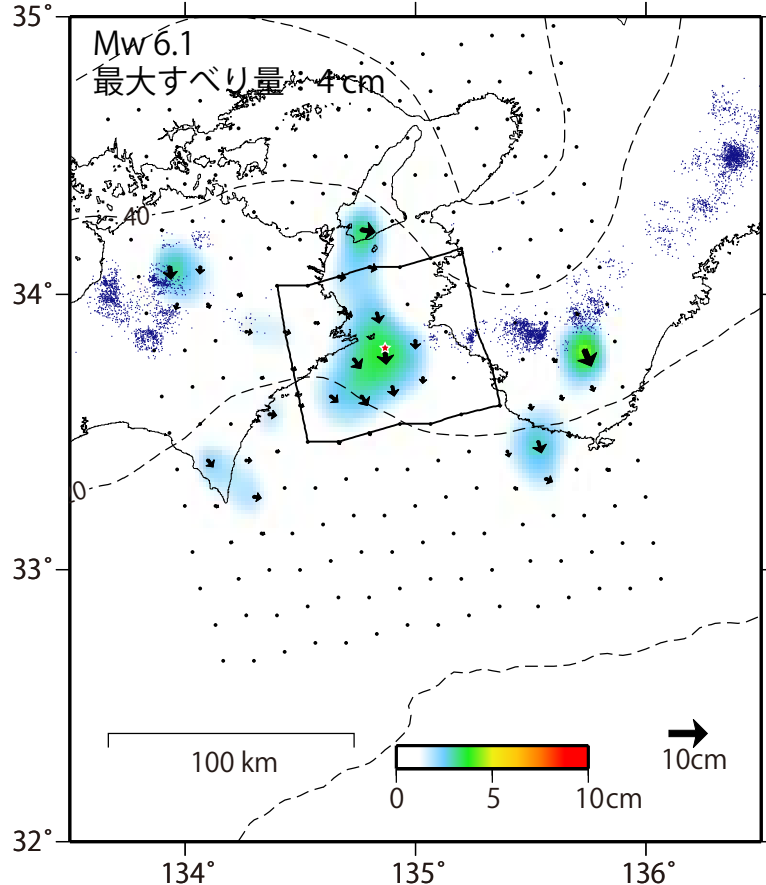
国立研究開発法人海洋研究開発機構 



海洋研究開発機構では、南海トラフに設置された3点の孔内観測点 (C0002・C0010・C0006 : 図a) とDONET海底観測点によって南海・東南海地震震源域近傍のSSE及び低周波微動のモニタリングを実施している。2021年8月4日頃から数日間、C0002とC0010の2か所でゆっくりとした間隙水圧変動が観測された (図b)。2か所の変動パターンが2020年3月の変動と類似しており (ただし、今回の方が期間が短く、振幅も小さい)、SSEに起因すると考えられる。

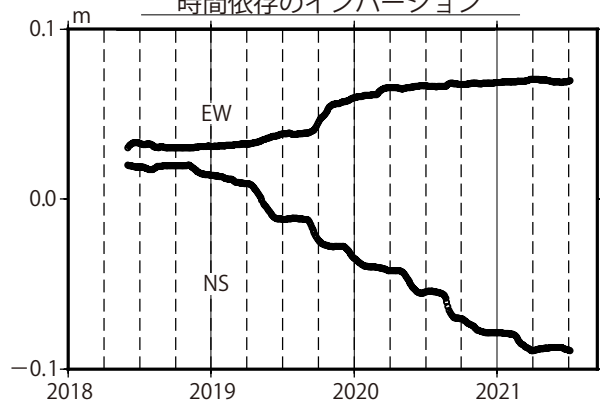
GNSSデータから推定された紀伊水道の長期的ゆっくりすべり（暫定）

推定すべり分布
(2020/6/1 - 2021/7/5)

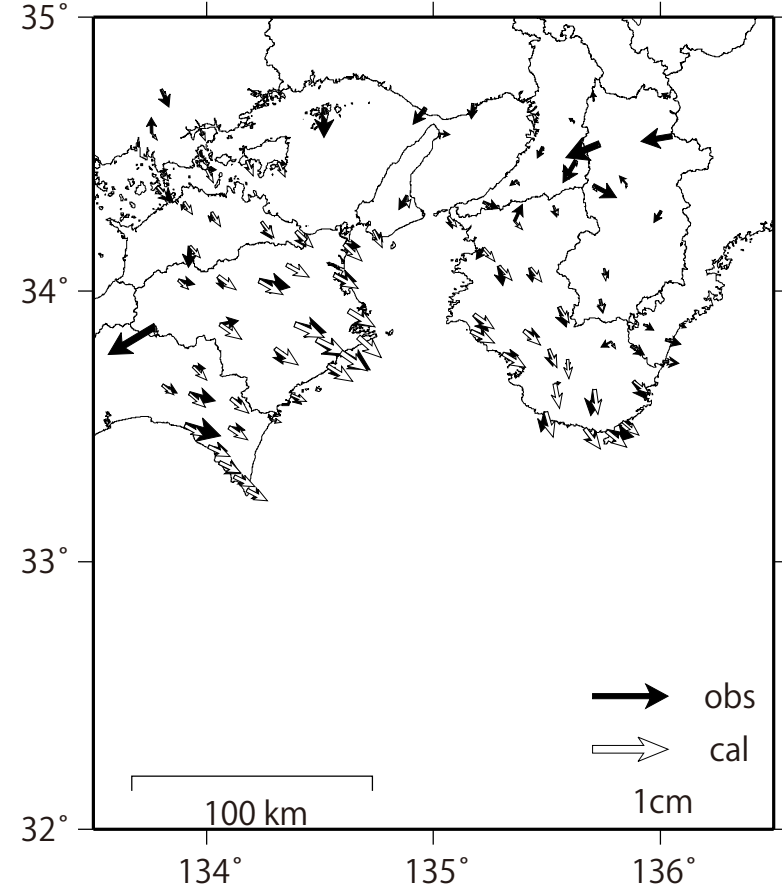


推定したすべり量が標準偏差 (σ) の3倍以上のグリッドを黒色表示している。

グリッド (★) におけるすべりの時間変化
時間依存のインバージョン



観測値 (黒) と計算値 (白) の比較
(2020/6/1 - 2021/7/5)



使用データ：F5解 (2018/1/1 - 2021/6/26) + R5解 (2021/6/27 - 2021/7/5)

※電子基準点の保守等による変動は補正済み

トレンド期間：2017/1/1 - 2018/1/1

(年周・半年周成分は2017/1/1 - 2021/7/5のデータで補正)

モーメント計算範囲：左図の黒枠内側

観測値：3日間の平均値をカルマンフィルターで平滑化した値

黒破線：フィリピン海プレート上面の等深線 (弘瀬・他、2007)

すべり方向：東向きから南向きの範囲に拘束

青丸：低周波地震 (気象庁一元化震源) (期間：2020/6/1 - 2021/7/5)

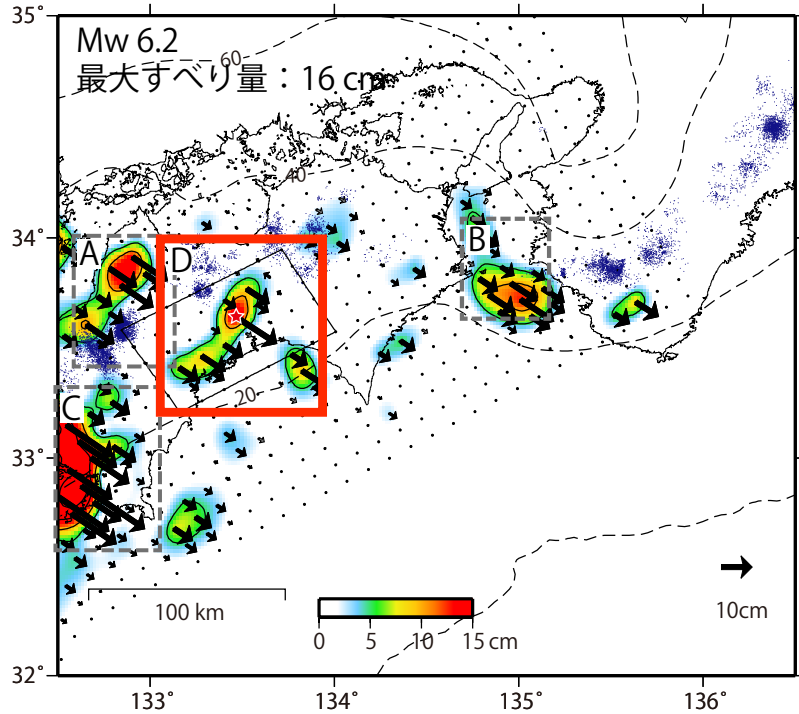
固定局：網野

※ Mw及び最大すべり量はプレート面に沿って評価した値を記載。

(前回までの資料は水平面に投影したすべり量で評価。今期間について、前回と同じ方法で評価した場合、Mwは6.1、最大すべり量は4 cm。)

GNSSデータから推定された四国中部の長期的ゆっくりすべり（暫定）

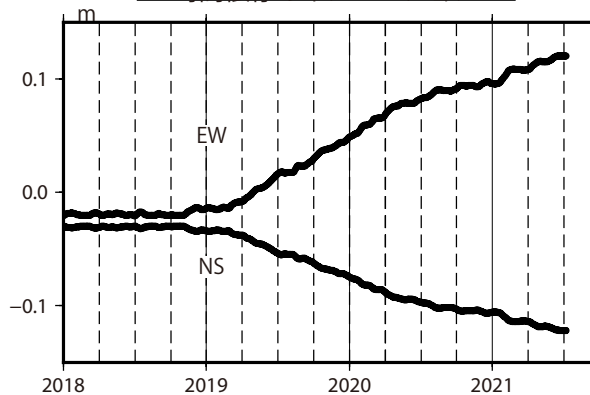
推定すべり分布
(2019/1/1 - 2021/7/7)



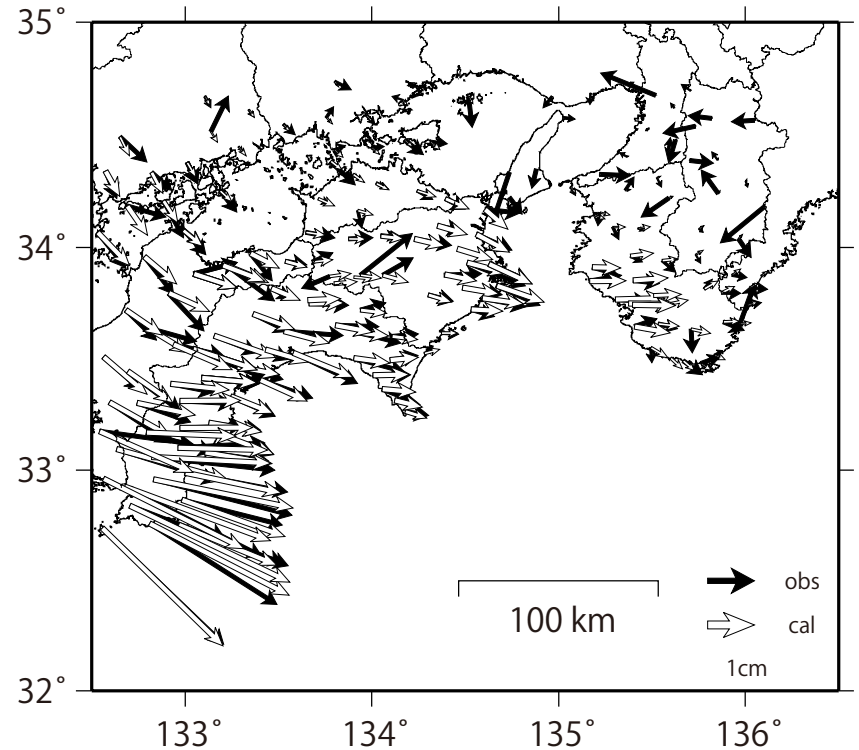
推定したすべり量が標準偏差 (σ) の3倍以上のグリッドを黒色表示している。

- A 四国西部の短期的ゆっくりすべり
- B 紀伊水道の長期的ゆっくりすべり
- C 豊後水道の長期的ゆっくりすべり
- D 四国中部の長期的ゆっくりすべり

グリッド (★) におけるすべりの時間変化
時間依存のインバージョン



観測値 (黒) と計算値 (白) の比較
(2019/1/1 - 2021/7/7)



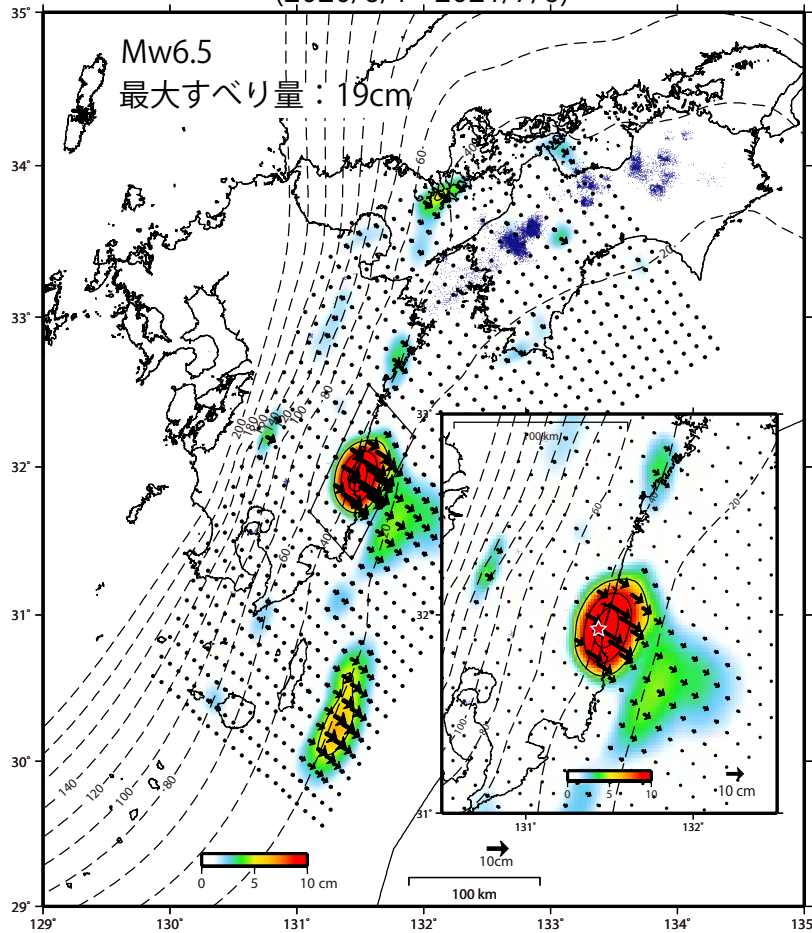
使用データ：F5解 (2019/1/1 - 2021/6/26) + R5解 (2021/6/27 - 2021/7/7)
 ※電子基準点の保守等による変動は補正済み
 トレンド期間：2017/1/1 - 2018/1/1
 (年周・半年周成分は2017/1/1 - 2021/7/7のデータで補正)
 モーメント計算範囲：左図の黒枠内側
 観測値：3日間の平均値をカルマンフィルターで平滑化した値
 黒破線：フィリピン海プレート上面の等深線 (弘瀬・他、2007)
 すべり方向：プレートの沈み込み方向と平行な方向に拘束
 青丸：低周波地震 (気象庁一元化震源) (2019/1/1 - 2021/7/7)
 固定局：網野

※ Mw及び最大すべり量はプレート面に沿って評価した値を記載。
 (前回までの資料は水平面に投影したすべり量で評価。今期間について、
 前回と同じ方法で評価した場合、Mwは6.2、最大すべり量は16cm。)

GNSSデータから推定された日向灘南部の長期的ゆっくりすべり (暫定)

推定すべり分布

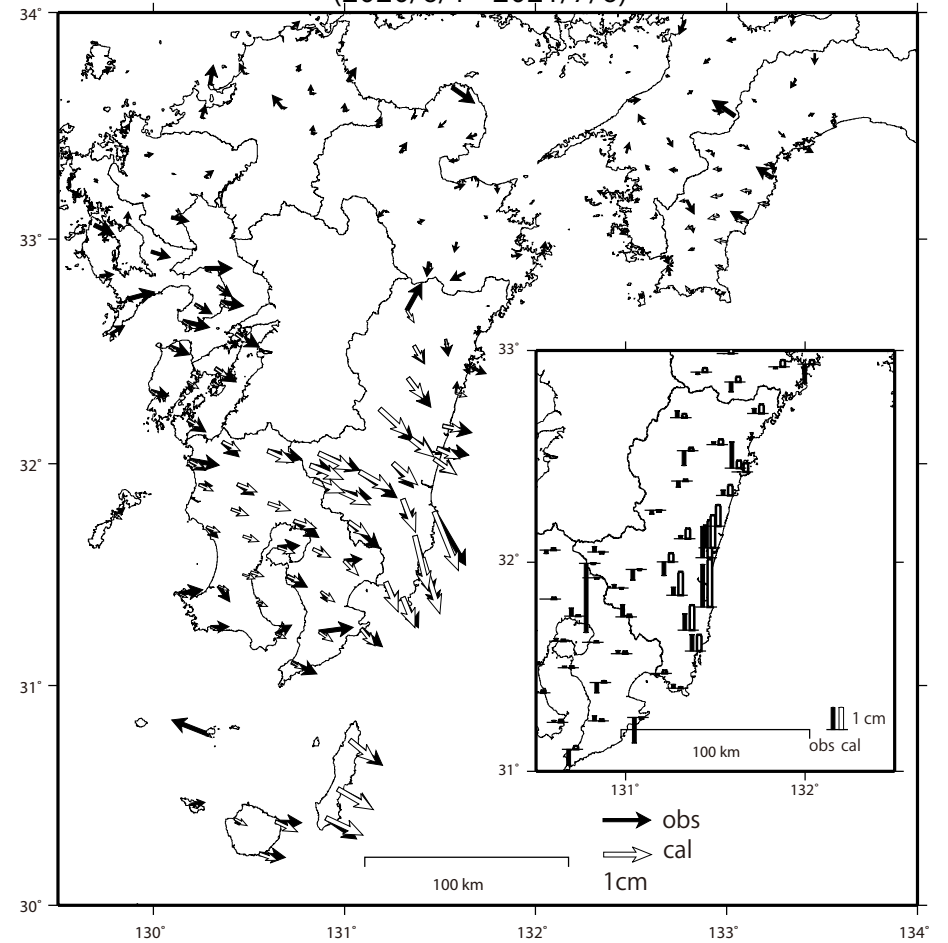
(2020/6/1 - 2021/7/6)



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。

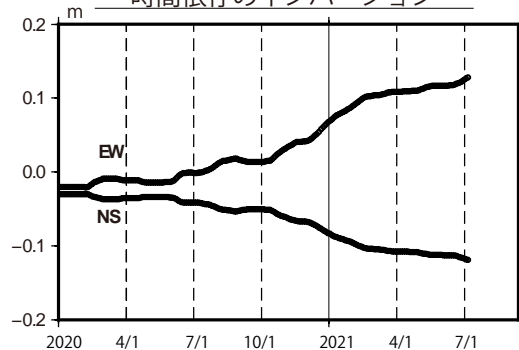
観測値 (黒) と計算値 (白) の比較

(2020/6/1 - 2021/7/6)



グリッド (★) におけるすべりの時間変化

時間依存のインバージョン



使用データ: F5解 (2020/1/1 - 2021/6/25) + R5解 (2021/6/26 - 2021/7/6)

※ 電子基準点の保守等による変動は補正済み

トレンド期間: 2012/1/1 - 2013/3/1 (年周・半年周成分は補正無し)

※平成28年(2016年)熊本地震の余効変動等が顕著に見られる観測点は除外している。

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で平滑化した値

黒破線: フィリピン海プレート上面の等深線 (弘瀬・他, 2007)

すべり方向: プレートの沈み込み方向と平行な方向に拘束

青丸: 低周波地震 (気象庁一元化震源) (期間: 2020/1/1 - 2021/7/6)

固定局: 三隅

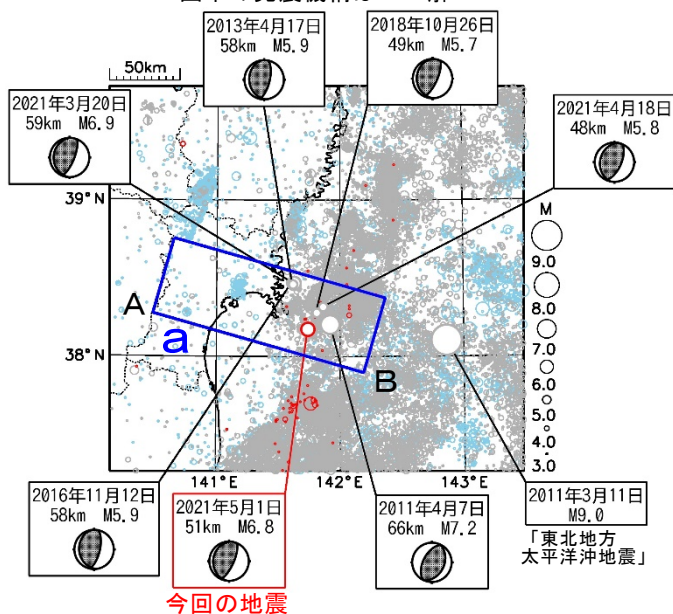
※ Mw及び最大すべり量はプレート面に沿って評価した値を記載。

(前回までの資料は水平面に投影したすべり量で評価。今期間について、前回と同じ方法で評価した場合、Mwは6.5、最大すべり量は17cm。)

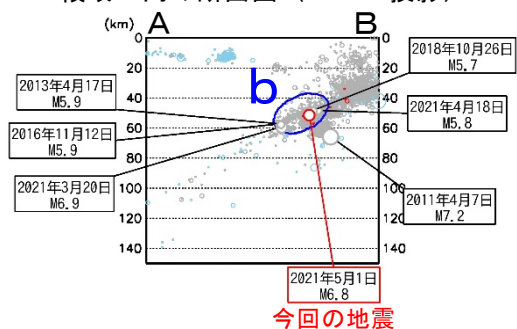
5月1日 宮城県沖の地震

震央分布図

(1997年10月1日～2021年5月31日、
深さ0～150km、 $M \geq 3.0$)
2011年3月10日以前に発生した地震を青色○、
2011年3月11日以降に発生した地震を灰色○、
2021年5月に発生した地震を赤色○で表示
図中の発震機構はCMT解



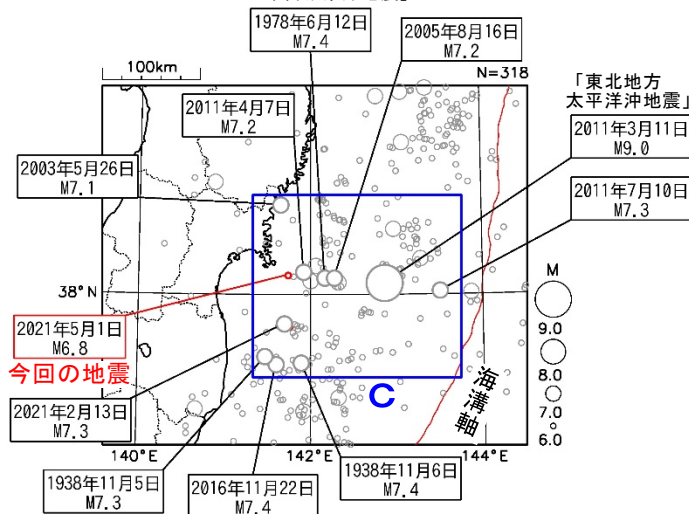
領域 a 内の断面図 (A-B 投影)



震央分布図

(1919年1月1日～2021年5月31日、
深さ0～150km、 $M \geq 6.0$)
2021年5月に発生した地震を赤色○で表示

「1978年宮城県沖地震」

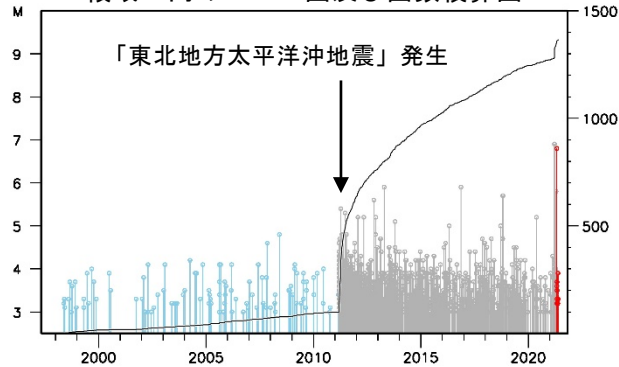


2021年5月1日10時27分に宮城県沖の深さ51kmでM6.8の地震 (最大震度5強) が発生した。この地震は発震機構 (CMT解) が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した。この地震により負傷者4人などの被害が生じた (5月10日17時00分現在、総務省消防庁による)。

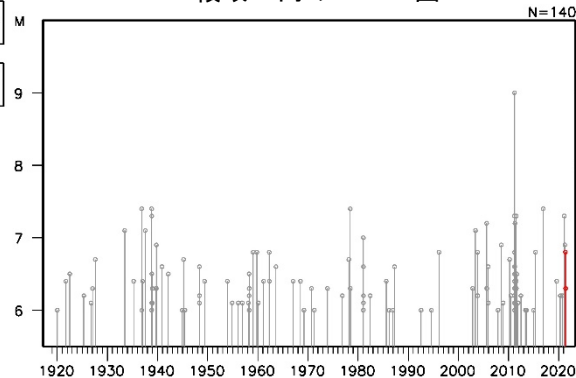
1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の震源付近 (領域b) では、「平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震」 (以下、「東北地方太平洋沖地震」) の発生以降、地震活動が活発になり、M5.0以上の地震の発生回数が増加している。このうち、2021年3月20日にはM6.9の地震 (最大震度5強) が発生し、負傷者11人、住家一部破損2棟などの被害が生じた (総務省消防庁による)。

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

領域 b 内の M-T 図及び回数積算図



領域 c 内の M-T 図

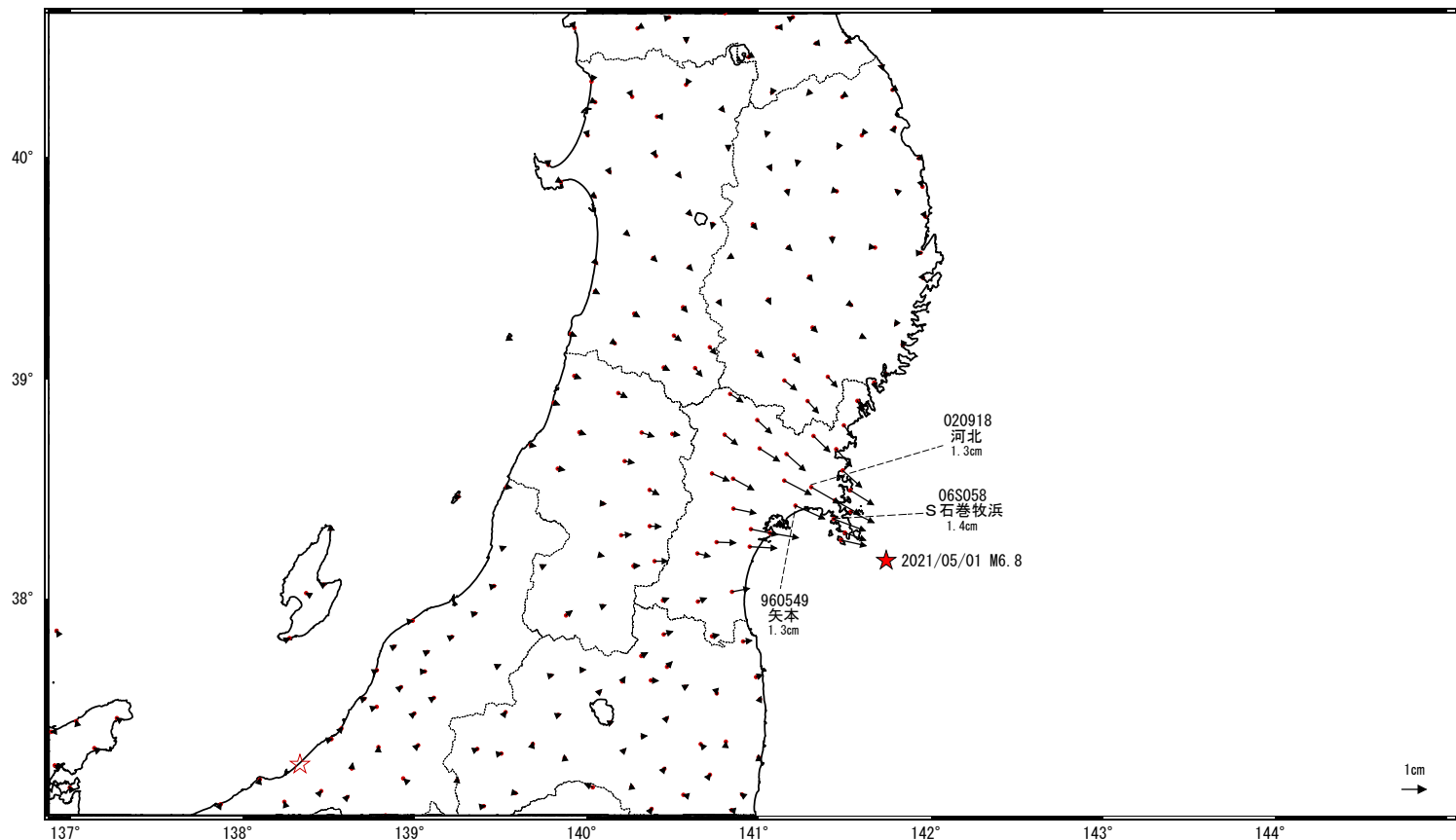


宮城県沖の地震(5月1日 M6.8)前後の観測データ

この地震に伴い小さな地殻変動が観測された。

地殻変動(水平)

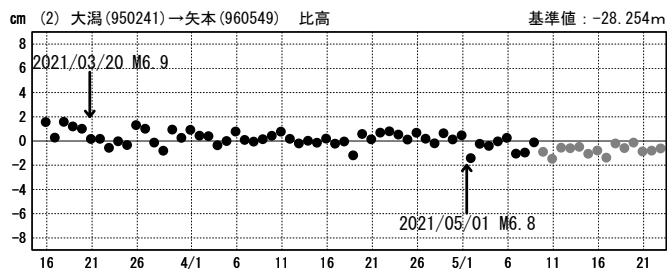
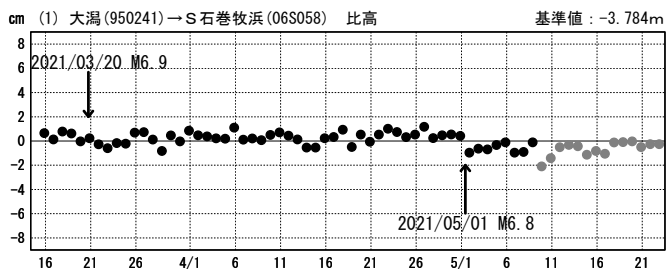
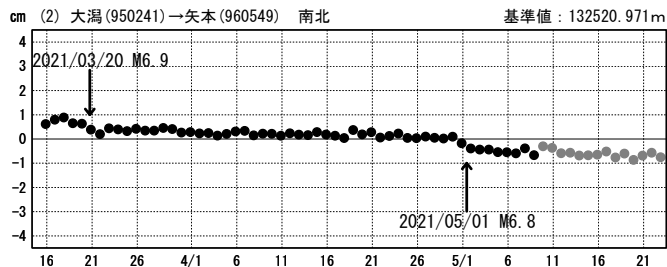
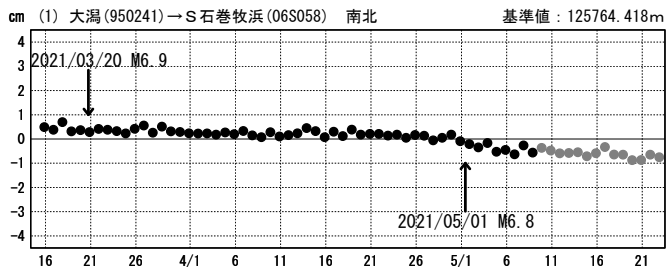
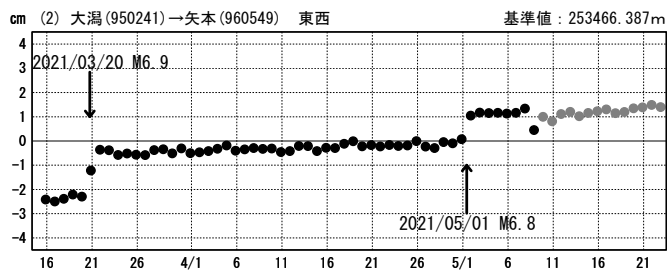
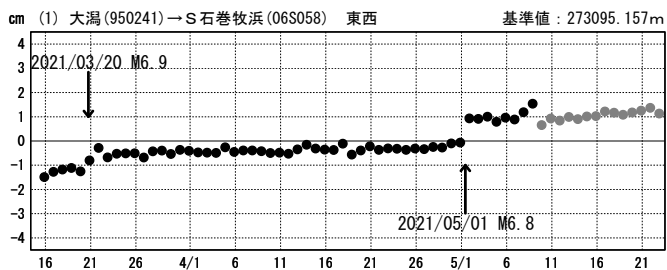
基準期間: 2021/04/24~2021/04/30 [F5:最終解]
比較期間: 2021/05/02~2021/05/08 [F5:最終解]



☆ 固定局: 大湯(950241) ★ 震央

期間: 2021/03/15~2021/05/22 JST

期間: 2021/03/15~2021/05/22 JST



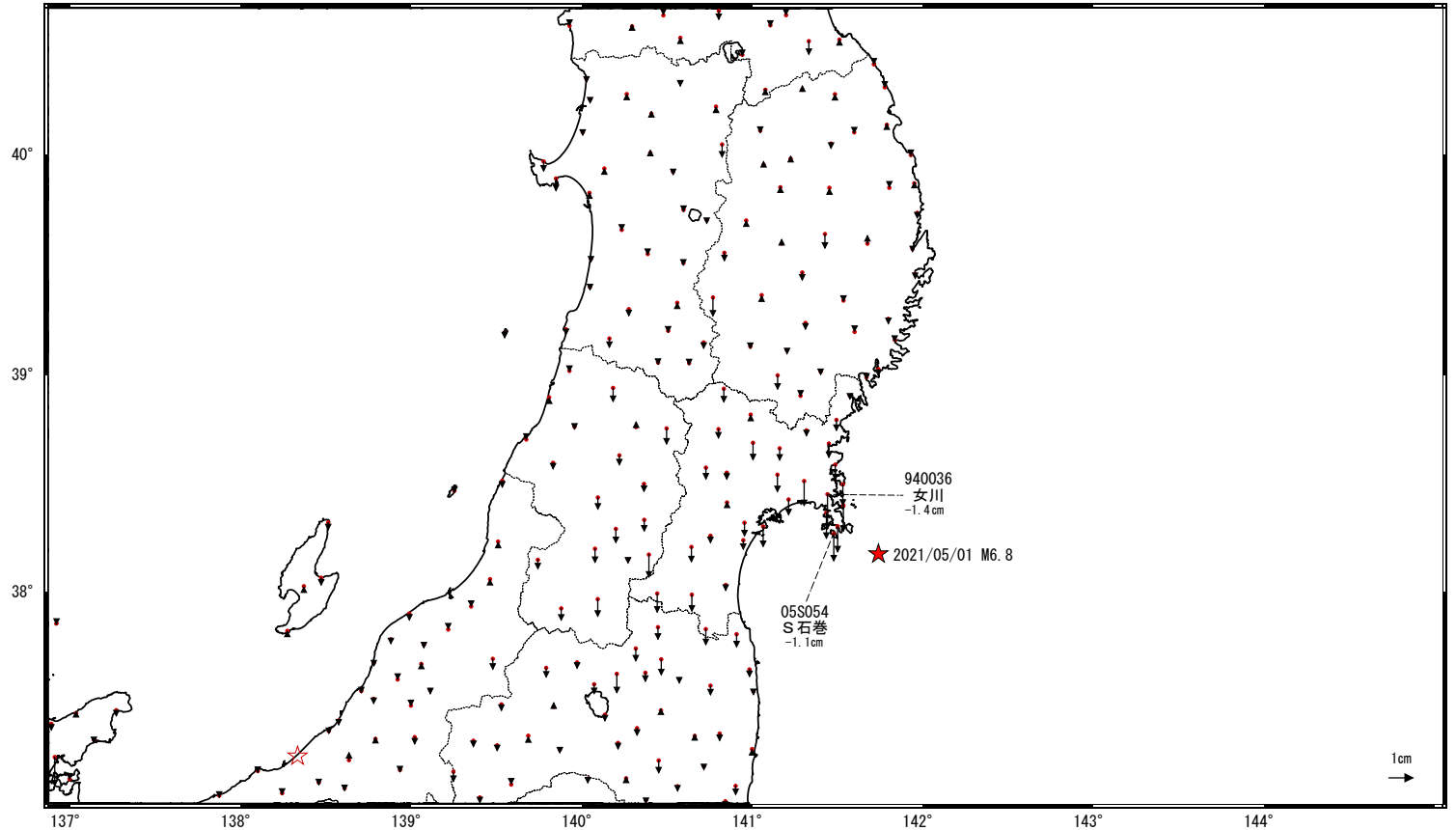
●---[F5:最終解] ●---[R5:速報解]

宮城県沖の地震(5月1日 M6.8)前後の観測データ

この地震に伴い小さな地殻変動が観測された。

地殻変動(上下)

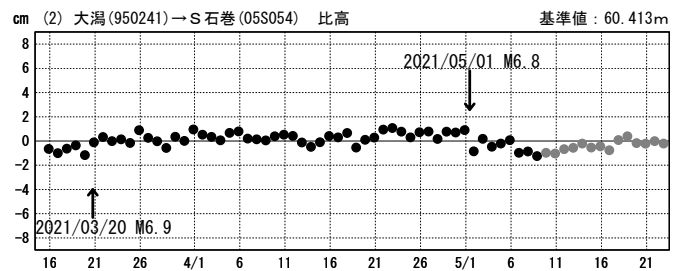
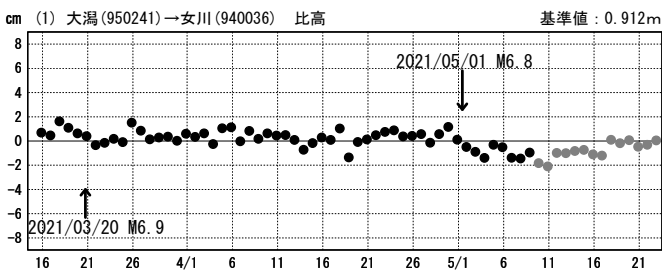
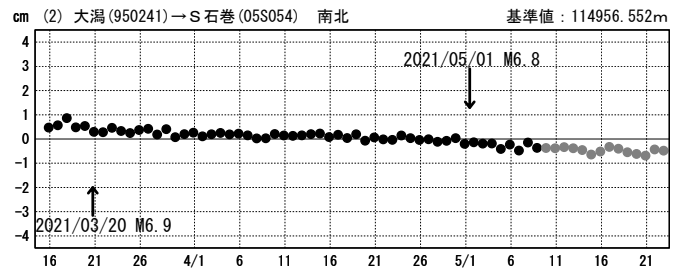
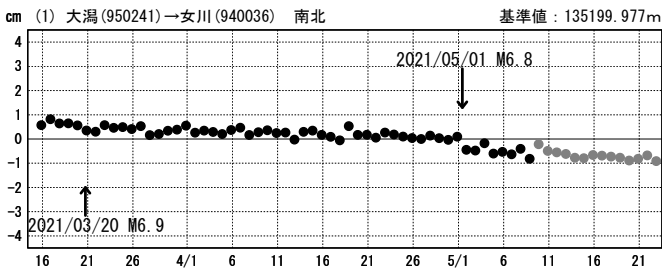
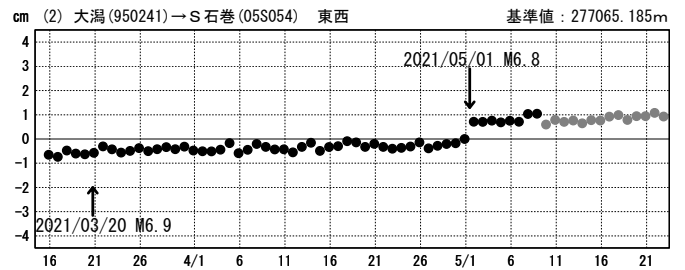
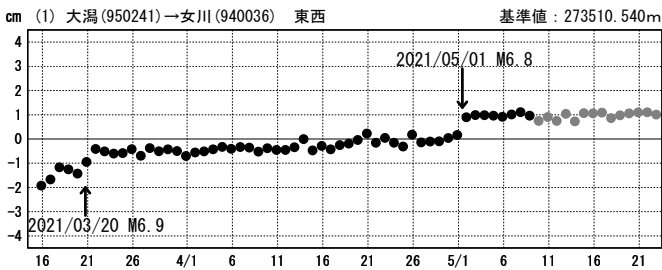
基準期間: 2021/04/24~2021/04/30 [F5:最終解]
比較期間: 2021/05/02~2021/05/08 [F5:最終解]



☆ 固定局: 大湯 (950241) ★ 震央

期間: 2021/03/15~2021/05/22 JST

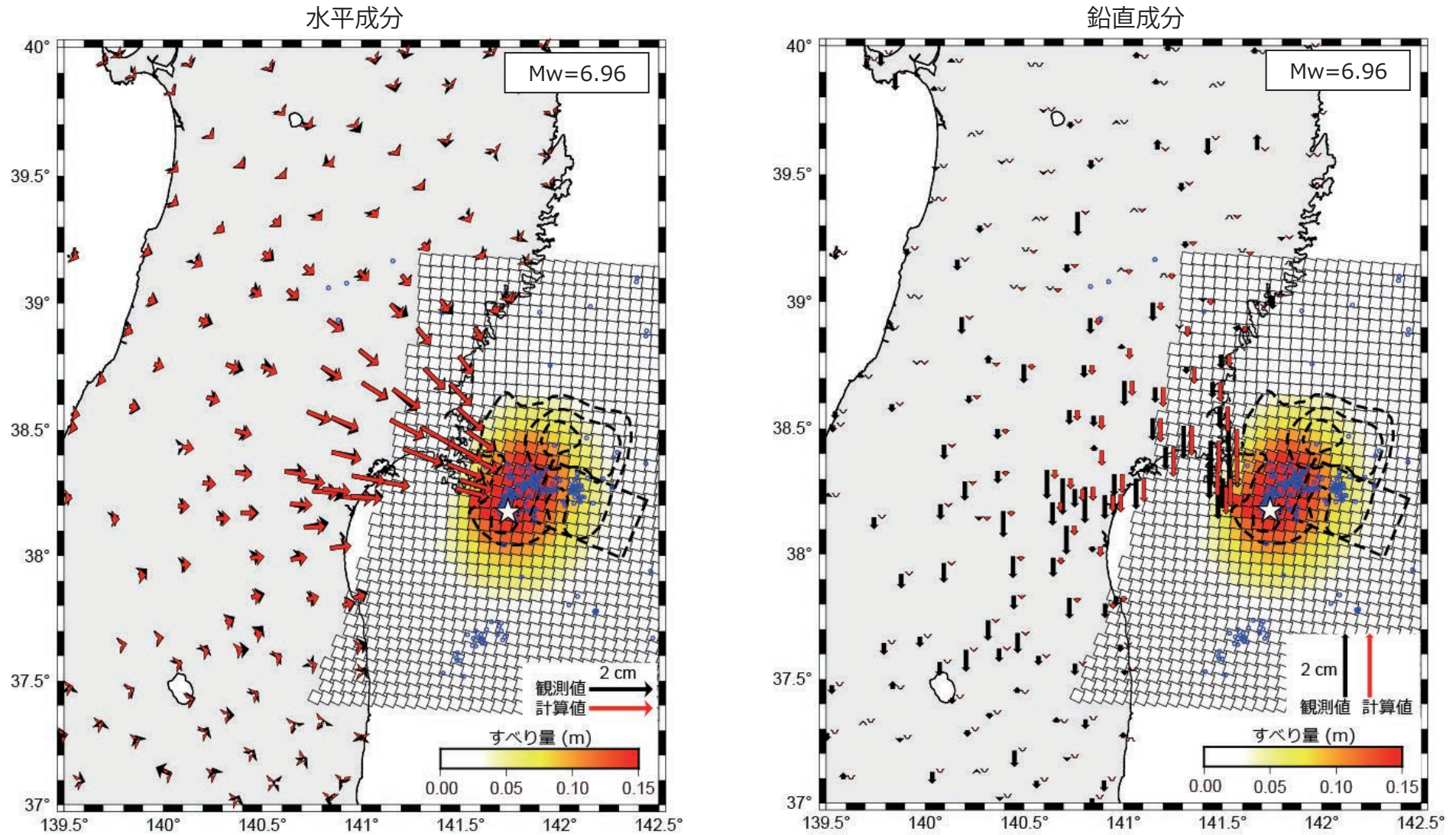
期間: 2021/03/15~2021/05/22 JST



●---[F5:最終解] ●---[R5:速報解]

2021年5月1日宮城県沖の地震のすべり分布

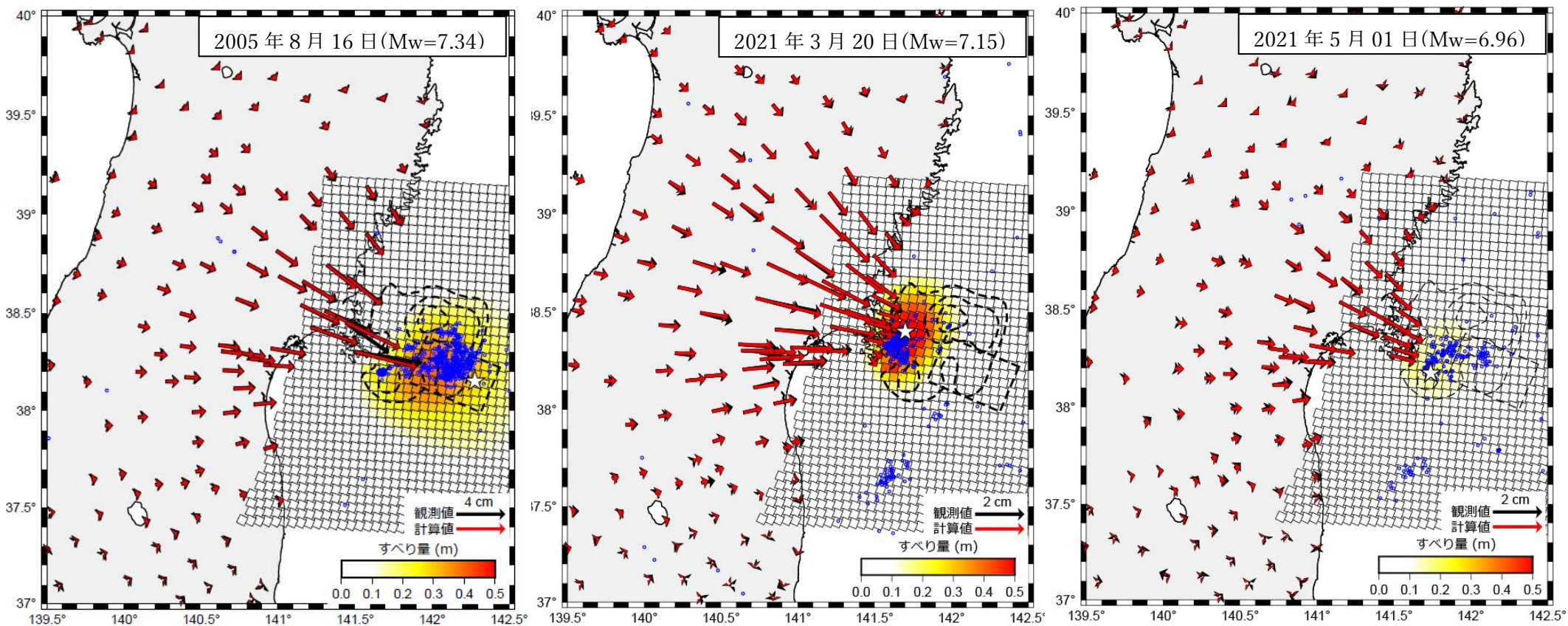
基準期間:2021/04/21 09:00:00~2021/05/01 08:59:59[F5:速報解]JST
 比較期間:2021/05/02 09:00:00~2021/05/08 08:59:59[F5:速報解]JST
 固定局:大湯(950241)



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

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

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

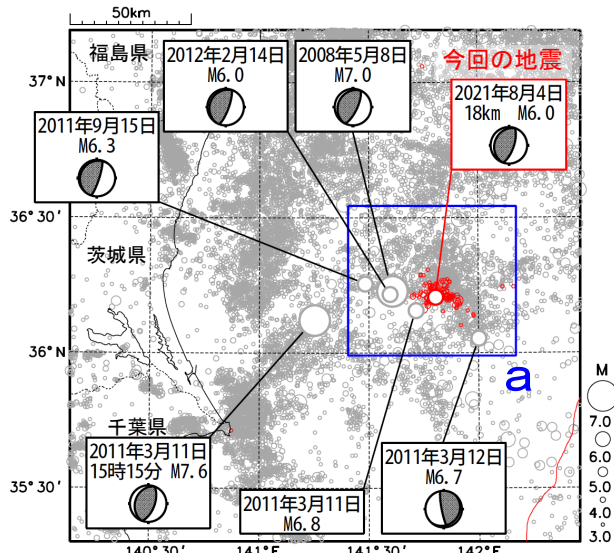


等値線は1978年宮城県沖地震のすべり分布 (Yamanaka et al. 2004)。矩形破線は2005年8月16日宮城県沖の地震の震源断層モデル (国土地理院)。
 ☆印は震央、青丸は本震発生 (5/1 10:27) から 5/1 24 時までに発生した震源を示す (気象庁一元化震源を使用)。

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

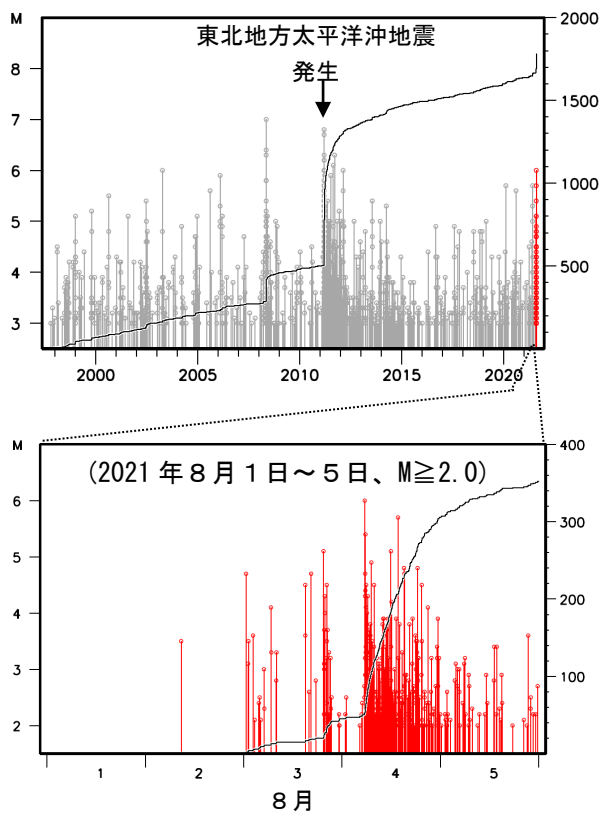
8月4日 茨城県沖の地震

震央分布図
(1997年10月1日～2021年8月5日、
深さ0～120km、 $M \geq 3.0$)
2021年8月の地震を赤く表示
図中の発震機構はCMT解



赤線は海溝軸を示す。

領域a内のM-T図及び回数積算図

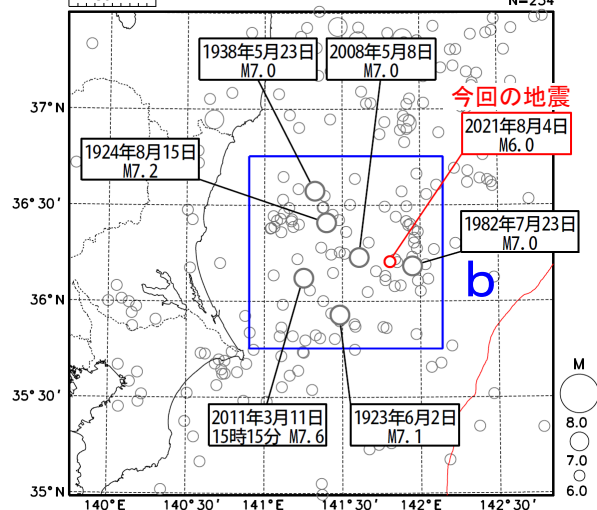


2021年8月4日05時33分に茨城県沖の深さ18kmでM6.0の地震(最大震度3)が発生した。この地震は、発震機構(CMT解)が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した。今回の震央付近(領域a)では、2021年8月3日から8月4日までに震度1以上を観測する地震が14回(震度3:1回、震度2:4回、震度1:9回)発生した。

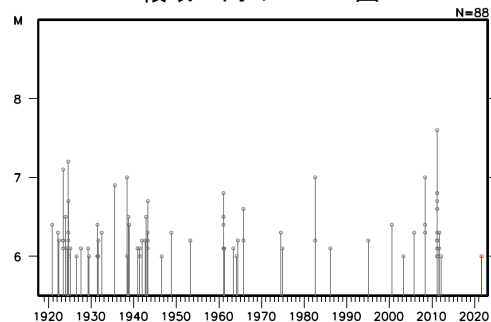
1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の震央付近(領域a)では、M5.0以上の地震が時々発生している。また、2008年5月8日にM7.0の地震(最大震度5弱)が発生し、負傷者6人などの被害が生じた(総務省消防庁による)。

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

震央分布図
(1919年1月1日～2021年8月5日、
深さ0～120km、 $M \geq 6.0$)
2021年8月の地震を赤く表示



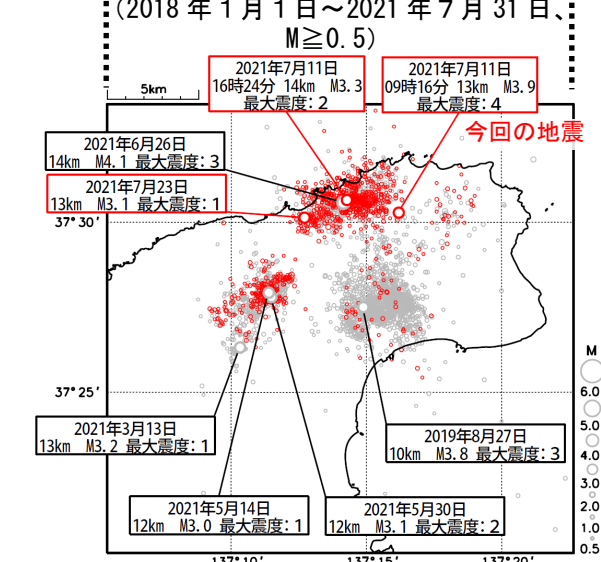
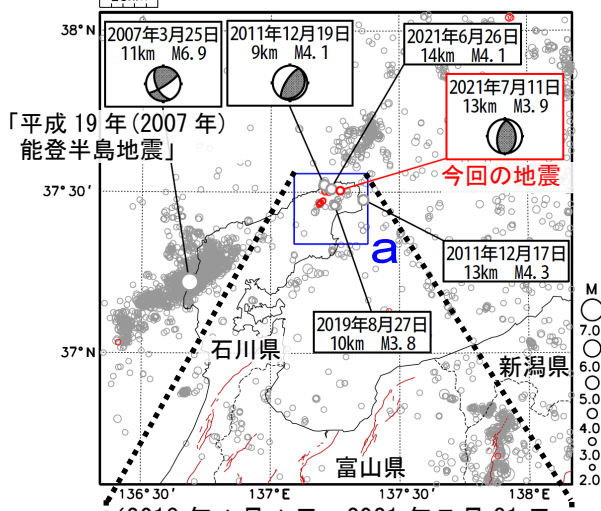
領域b内のM-T図



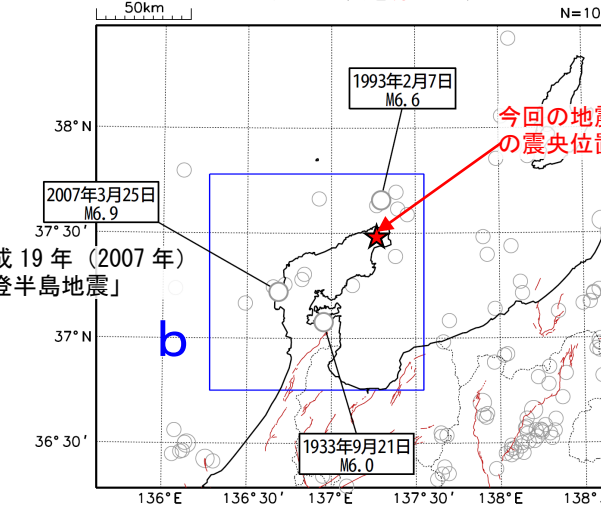
気象庁作成

7月11日 石川県能登地方の地震

震央分布図
(1997年10月1日～2021年7月31日、
深さ0～30km、 $M \geq 2.0$)
2021年7月の地震を赤色で表示



震央分布図
(1919年1月1日～2021年7月31日、
深さ0～50km、 $M \geq 5.0$)
2021年7月の地震を赤色で表示



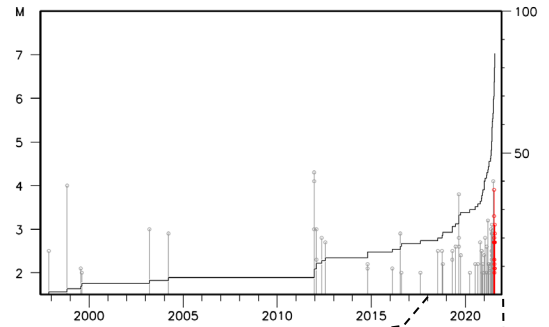
茶線は地震調査研究推進本部の長期評価による活断層を示す。

2021年7月11日09時15分に石川県能登地方の深さ13kmでM3.9の地震(最大震度4)が発生した。この地震は地殻内で発生した。この地震の発震機構は東西方向に圧力軸を持つ逆断層型であった。

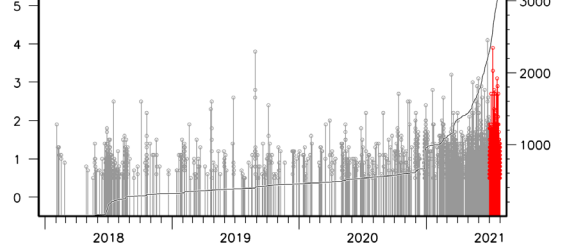
1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の震源付近(領域a)では2011年12月17日にM4.3の地震(最大震度3)が発生したほか、2018年頃から地震回数が増加傾向にあり、2020年12月からより活発になっている。2021年6月26日にはM4.1の地震(最大震度3)が発生した。2020年12月から2021年7月末までに震度1以上を観測した地震は16回(震度4:1回、震度3:1回、震度2:3回、震度1:11回)発生した。

1919年以降の活動をみると、今回の地震の震央周辺(領域b)では、M5.0以上の地震が時々発生している。2007年3月25日には「平成19年(2007年)能登半島地震」が発生し、死者1人、重軽傷者356人、住家全半壊2,426棟などの被害を生じた(総務省消防庁による)ほか、石川県珠洲市で22cmの津波を観測した。

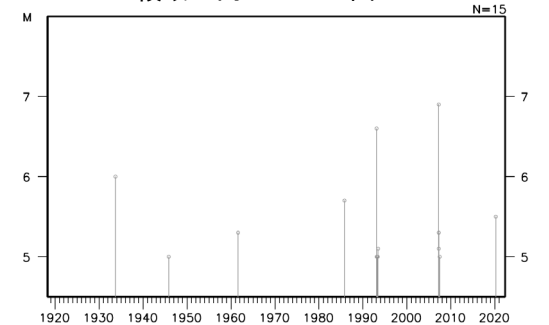
領域a内のM-T図及び回数積算図



(2018年1月1日～2021年7月31日、 $M \geq 0.5$)



領域b内のM-T図



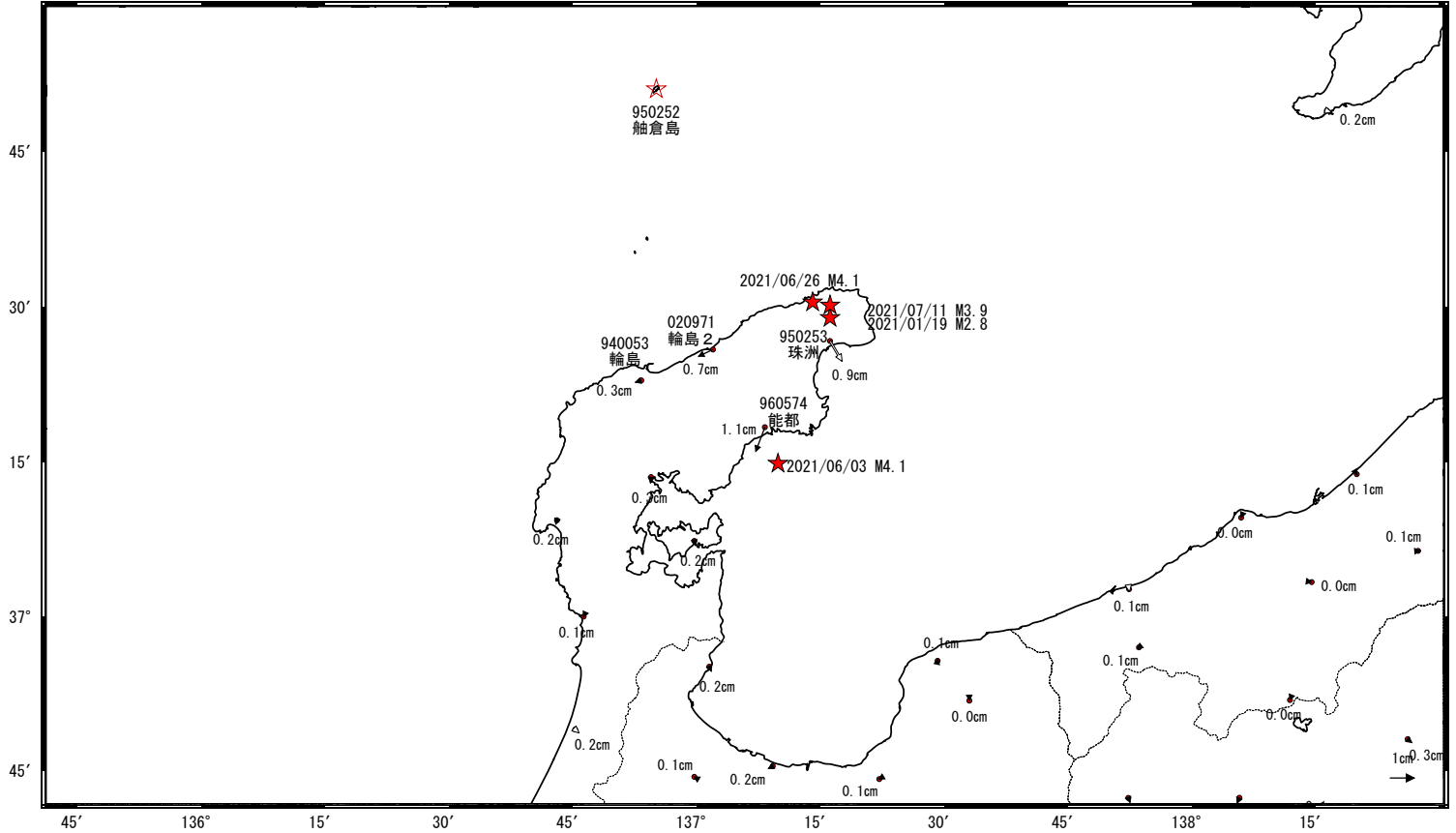
気象庁作成

石川県能登地方の地震活動時の観測データ（暫定）

ベクトル図（水平）（一次トレンド除去後）

基準期間：2020/11/01～2020/11/07[F5:最終解]
比較期間：2021/07/22～2021/07/28[R5:速報解]

計算期間：2019/09/01～2020/08/31

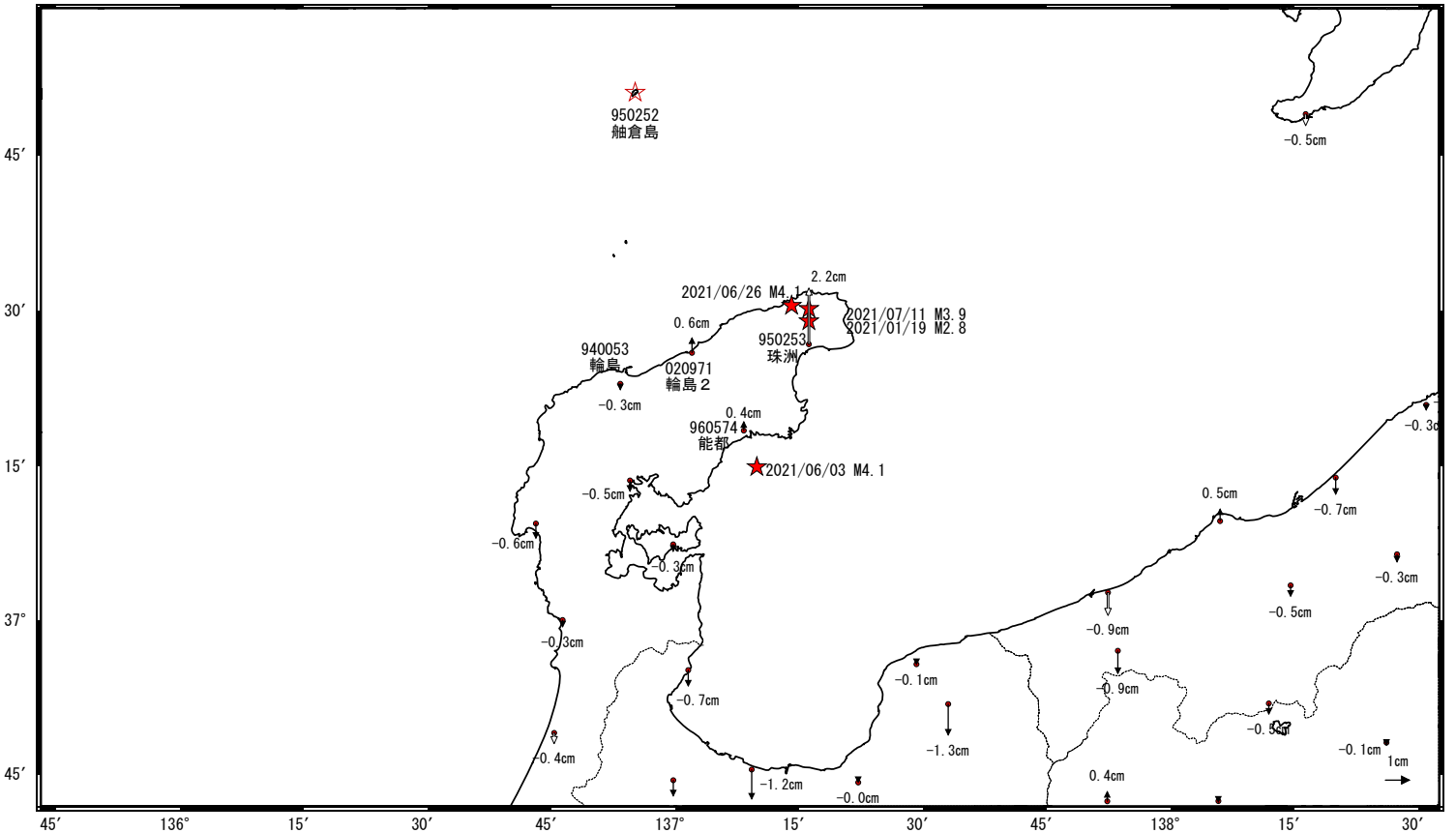


☆ 固定局：舳倉島(950252)

ベクトル図（上下）（一次トレンド除去後）

基準期間：2020/11/01～2020/11/07[F5:最終解]
比較期間：2021/07/22～2021/07/28[R5:速報解]

計算期間：2019/09/01～2020/08/31



☆ 固定局：舳倉島(950252)

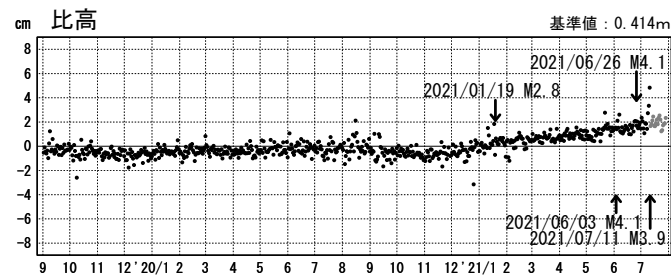
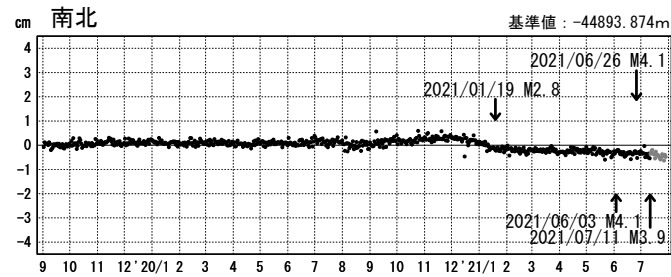
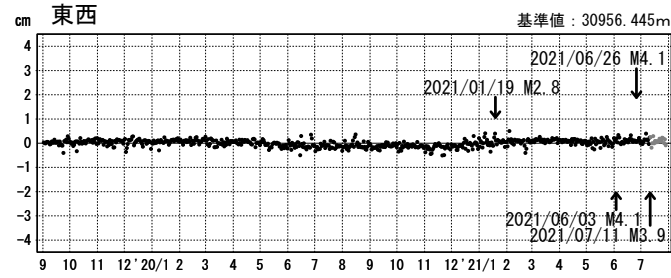
★ 震央

石川県能登地方の地震活動時の観測データ（暫定）

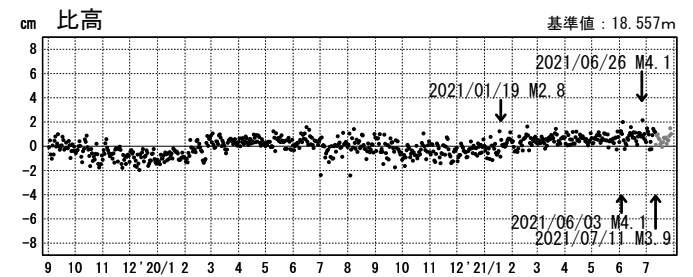
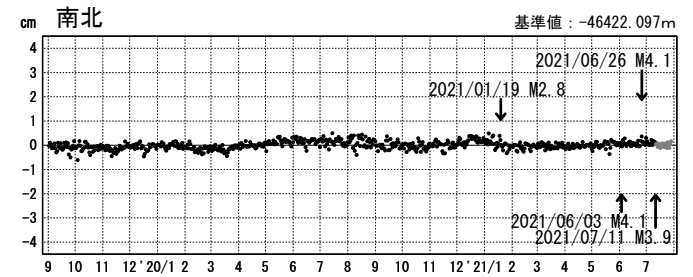
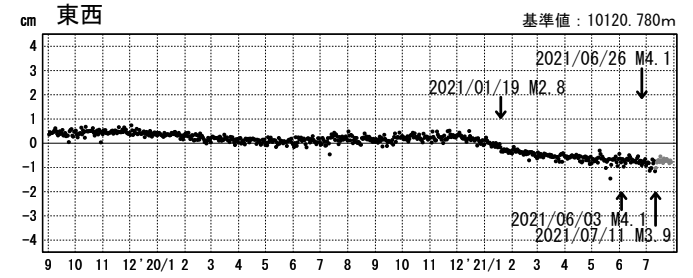
一次トレンド除去後グラフ

期間：2019/09/01～2021/07/28 UTC 計算期間：2019/09/01～2020/09/01

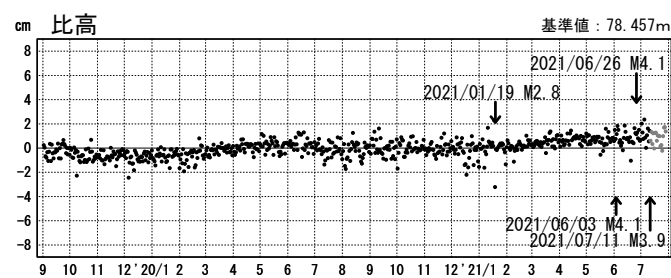
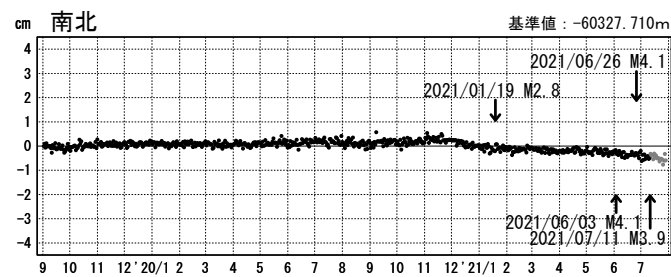
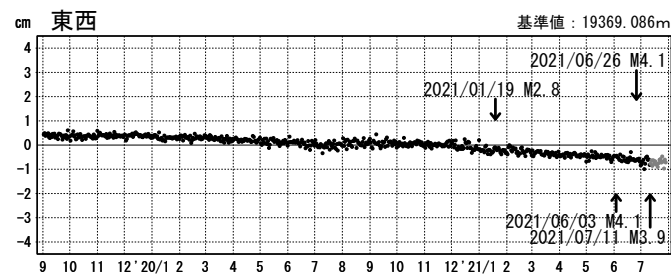
(1) 舢倉島(950252)→珠洲(950253)



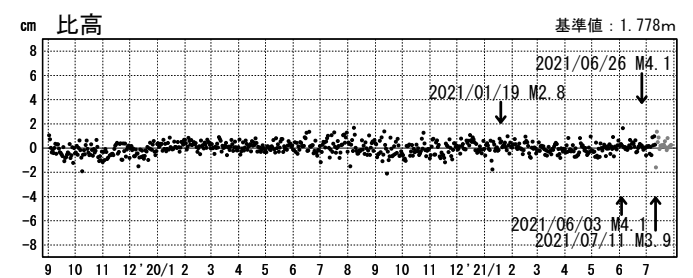
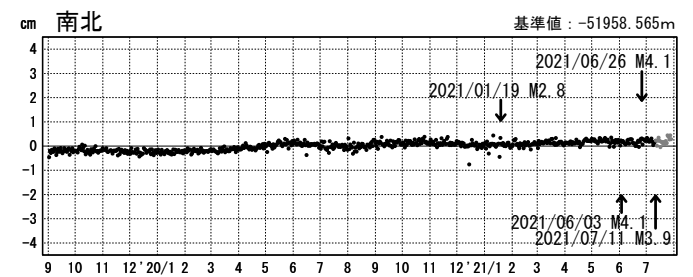
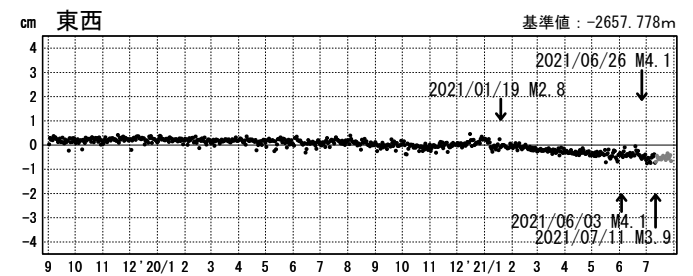
(2) 舢倉島(950252)→輪島2(020971)



(3) 舢倉島(950252)→能都(960574)



(4) 舢倉島(950252)→輪島(940053)



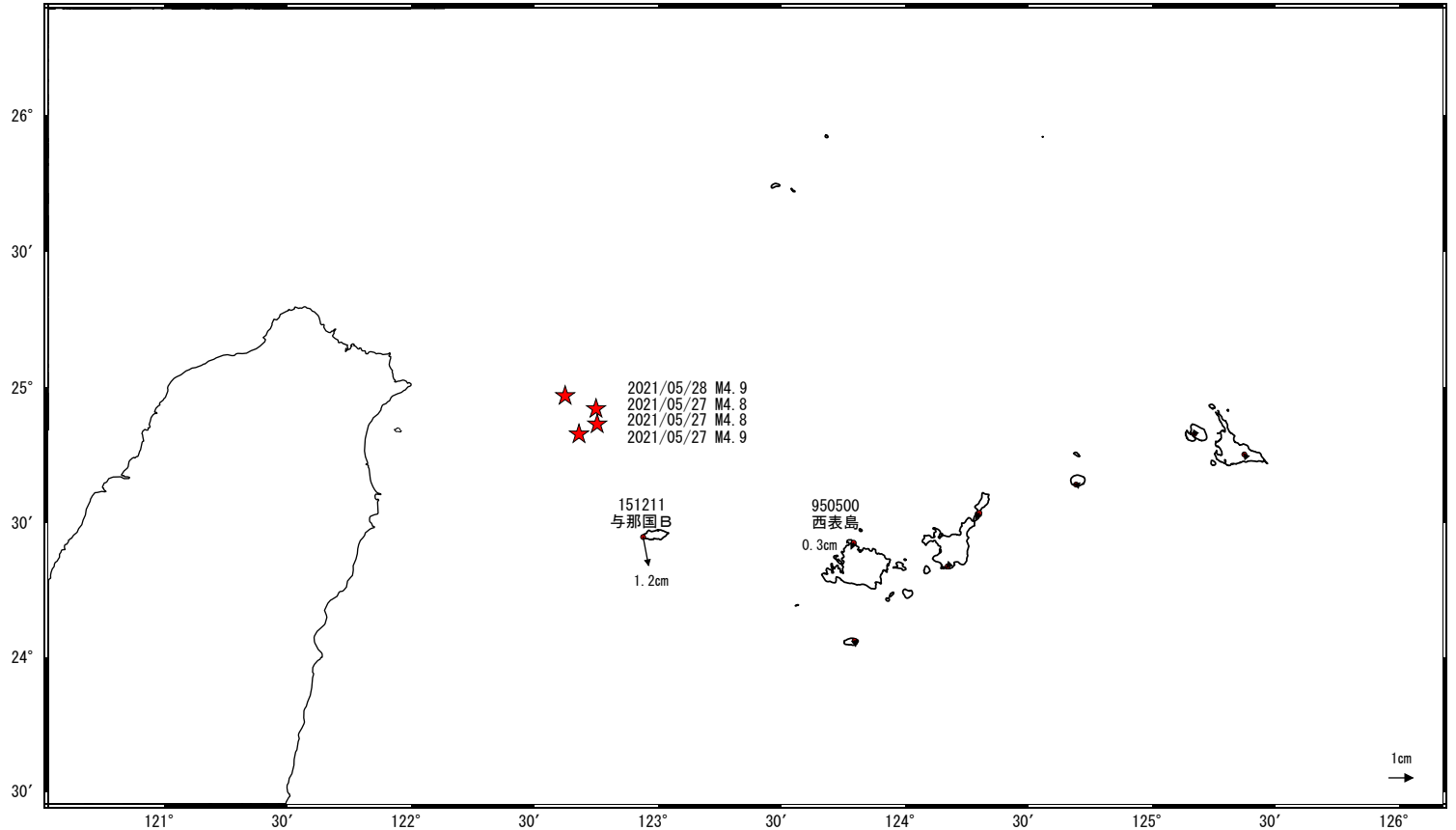
●---[F5:最終解] ●---[R5:速報解]

与那国島近海の地震活動(最大地震 5月27日、5月28日 M4.9)前後の観測データ

この地震活動に伴い小さな地殻変動が観測された。

地殻変動(水平)

基準期間: 2021/05/18~2021/05/24 [F5: 最終解]
 比較期間: 2021/06/13~2021/06/19 [F5: 最終解]



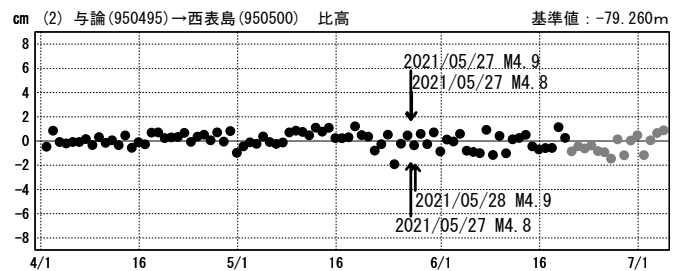
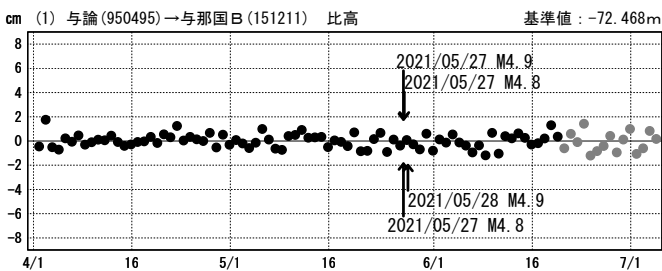
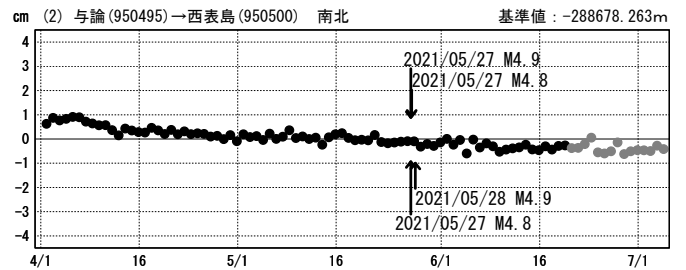
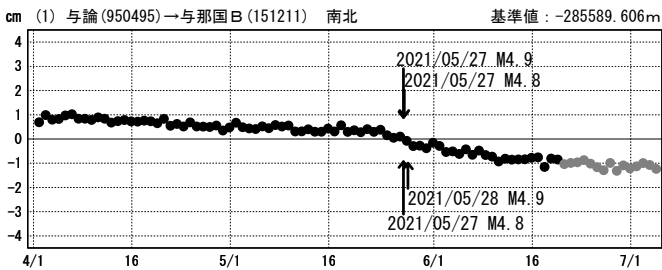
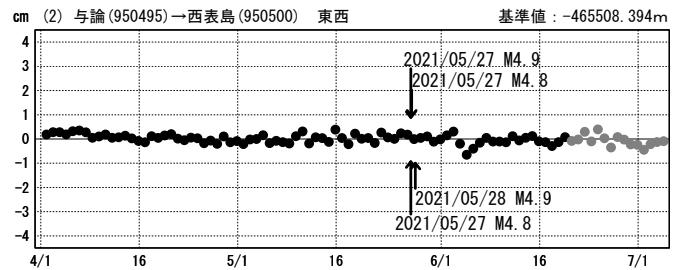
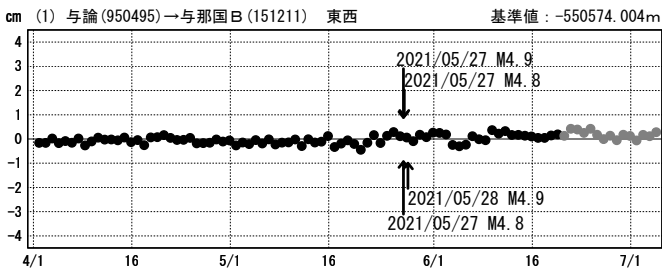
☆ 固定局: 与論(950495)

★ M4.8以上の地震

※ 5月25日から6月にかけて発生した与那国島近海の地震活動に伴う変化

期間: 2021/04/01~2021/07/04 JST

期間: 2021/04/01~2021/07/04 JST



●--- [F5: 最終解] ●--- [R5: 速報解]

重点検討課題の検討

地震発生予測に向けた沈み込み帯での
地震準備・発生過程の物理モデル

話題提供者〔敬称略〕

1. エネルギー収支を考慮した地震発生シナリオ構築の新技术

気象研究所 野田 朱美

2. 南海トラフ周辺におけるスロースリップイベントと地震発生準備過程の数値モデリング：近年の観測研究を踏まえて

防災科学技術研究所 松澤 孝紀

3. SSE後の沈み込み帯地震の発生確率に対する単純な物理モデルでの評価：ヒクランギ巨大地震への適用

海洋研究開発機構 堀 高峰
京都大学 金子 善宏

第 232 回地震予知連絡会 重点検討課題

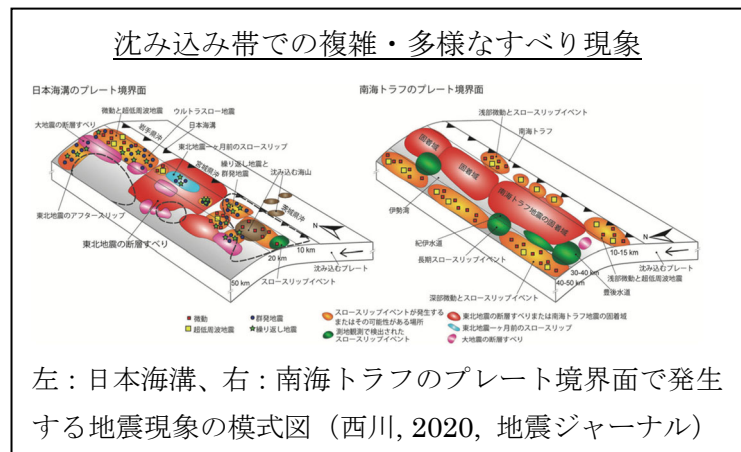
地震発生予測に向けた沈み込み帯での地震準備・発生過程の物理モデル

Physical models of preparation and generation processes of megathrust earthquakes in subduction zone aiming for their forecast

コンビーナ 海洋研究開発機構 堀 高峰

1. 背景

地震発生予測のためには準備段階からの全過程の理解が必要との考え方のもと、1990 年前後から「地震発生の物理」の中で物理モデルの研究が進められてきた。その間、2000 年代に入り、地震・地殻変動観測網の発達に伴って、沈み込み帯深部での低周波微動の発見に始まり、沈み込み帯における大地震前後の多様な振る舞いが明らかになってきた。こうした複雑・多様な現象を説明するために、様々な物理・化学過程やランダム過程を取り入れた多種多様なモデルが提案されている。このように、ゆっくり地震を含めて、地震発生の全過程の理解は確実に進んできたが、これらの理解を地震発生予測に活かすという、「地震発生の物理」の当初の観点での進展は十分とは言い難い。



左：日本海溝、右：南海トラフのプレート境界面で発生する地震現象の模式図（西川, 2020, 地震ジャーナル）

2. 課題

ゆっくり地震を含めた地震発生過程の複雑さ・多様性を踏まえて、予測に活かす観点で物理モデルを見直し、今後のモニタリングと地震発生予測に活かす道を探りたい。

3. 報告

- ①エネルギー収支を考慮した地震発生シナリオ構築の新技术（野田朱美・気象研究所）
- ②南海トラフ周辺におけるスロースリップイベントと地震発生準備過程の数値モデリング：近年の観測研究を踏まえて（松澤孝紀・防災科学技術研究所）
- ③SSE 後の沈み込み帯地震の発生確率に対する単純な物理モデルでの評価：ヒクランギ巨大地震への適用（堀高峰・海洋研究開発機構、金子善宏・京大理）

4. 論点

- ・地震発生の複雑さ・多様性を踏まえると、どのような地震発生予測が実現可能か？
- ・地震発生予測の観点では、どのような物理モデルが有効といえるか？
- ・物理モデルを地震発生予測に活かすために、今後、どのような研究が特に必要か？

エネルギー収支を考慮した地震発生シナリオ構築の新技术

野田 朱美 (気象庁気象研究所)

ポイント

- 地震発生シナリオ構築の新技术 Energy-based method を提案した。本手法では低い計算コストで地震シナリオ(すべりモデル)を作成した上で、エネルギーバランスにより地震シナリオの実現性を評価する(図1)
 - エネルギーバランスの評価のため、新たなパラメータ Residual energy を導入した。正の Residual energy を示すシナリオは、地震発生の必要条件を満たしている
 - 最初 Residual energy は負の値を示すが、時間の経過によりエネルギーが蓄積すると Residual energy が増加して正の値となり、地震が発生するようになる(図2)
- より現実的なシナリオ構築のため、過去の地震履歴を考慮した応力蓄積モデルが必要
 - パラメータの不確定性により決定論的な議論は難しいが、地震発生ポテンシャルが時間の経過に従い高まっていく様子を可視化できた
- 今後、観測データに基づいたモデル更新により地震シナリオの精度向上を図ることが重要

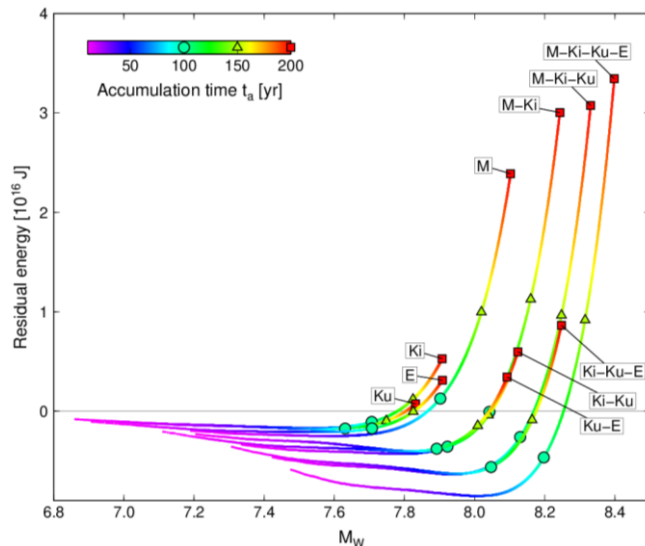
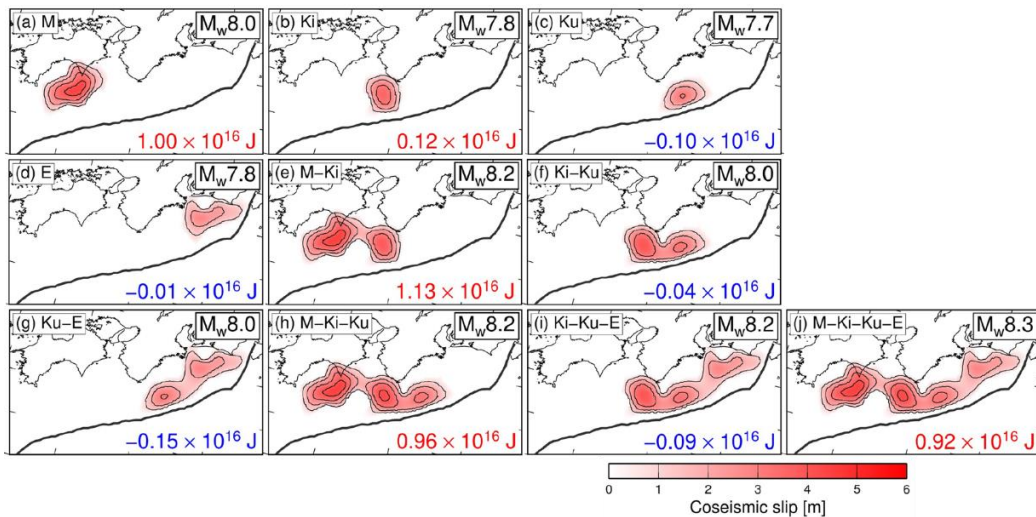


図1:蓄積時間 150 年を仮定した場合の地震シナリオ(地震時すべり分布)。各パネルの右上はモーメントマグニチュード、右下は Residual energy を示す。

図2:地震シナリオのモーメントマグニチュード(横軸)と Residual energy (縦軸)の蓄積時間による変化。

南海トラフ周辺におけるスロースリップイベントと地震発生準備過程の数値モデリング：近年の観測研究を踏まえて

松澤 孝紀（防災科学技術研究所）

- 近年の観測研究の進展により明らかになった，南海トラフの様々な場所での長期的スロースリップイベント(SSE)の発生を，3次元のプレート形状を導入した数値シミュレーションで再現した。
- 長期的 SSE の地域的な特徴について，東海，豊後水道，日向灘地域でみられるようなある程度周期的に発生する長期的 SSE と，四国中部，紀伊水道，紀伊半島北部地域でみられる不定期で間隔の長い長期的 SSE を，摩擦パラメーターの分布を仮定することで，ある程度説明できることを示した。
- モデリング結果から，後者の長期的 SSE については，そのすべり域が地震発生準備過程の後半になるにつれて浅くなる可能性が示唆された。

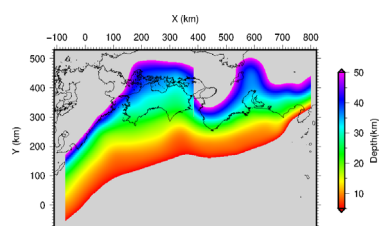


図1 数値シミュレーション対象領域とモデリングしたプレート境界の深さを色で示す。黒線は海岸線を示す。本シミュレーションの対象領域以外は灰色で示す。

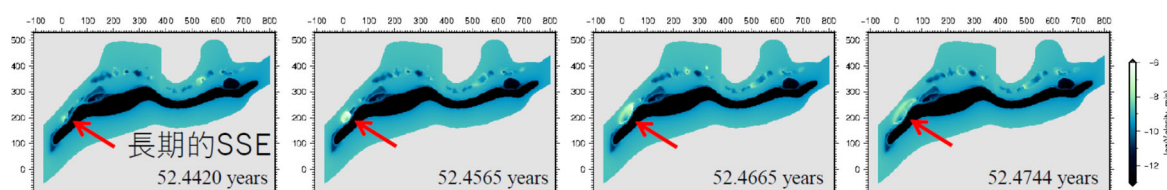


図2 数値シミュレーションにより再現された日向灘における長期的 SSE の例（赤矢印）。色が白に近い部分で，SSE のすべりが発生している。

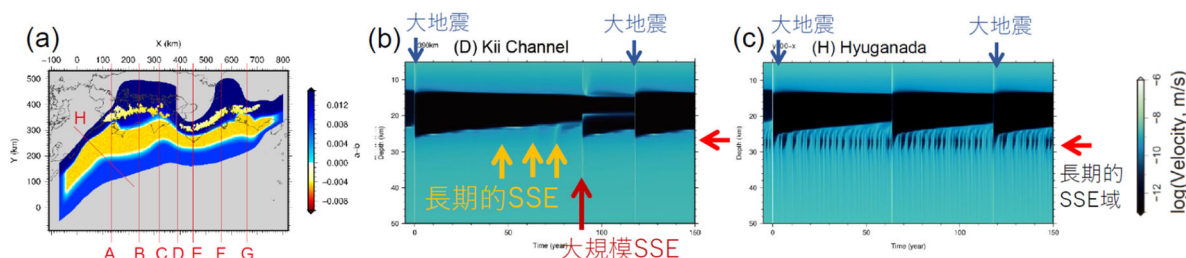


図3 (a)すべり速度の時間発展の図(b, c)で深さ断面を示した測線を示す。(b)紀伊水道付近 ((a)の線 D) でのすべり速度の時間発展。橙および赤矢印は長期的 SSE の発生を示す。(c)日向灘付近でのすべり速度の時間発展 ((a)の線 H)。長期的 SSE 域において，短い間隔で繰り返し長期的 SSE が発生している。

防災科学技術研究所 松澤 孝紀 資料

SSE 後の沈み込み帯地震の発生確率に対する単純な物理モデルでの評価：ヒクランギ巨大地震への適用

堀 高峰 (JAMSTEC)・金子 善宏 (京大理)

- 2016 年 11/14 に Mw7.8 Kaikoura 地震が発生。その後、余効すべりだけでなく、固着域の周辺で SSE も発生したため、政府から巨大地震発生可能性を定量的に評価することが GNS に求められた。
- 様々な統計モデルに加えて、地震や SSE などによる応力変化を考慮した物理モデルでの確率評価を実施。
- 地震時の応力降下量と地震の再来間隔が、仮定した確率分布に従うように長期間の地震発生カタログをシミュレーションで生成。それに対して今回の地震・余効すべり・SSE による応力変化を様々なタイミングで与えた場合に、地震が誘発される確率を算出。応力降下量等の範囲に応じたばらつきを考慮。

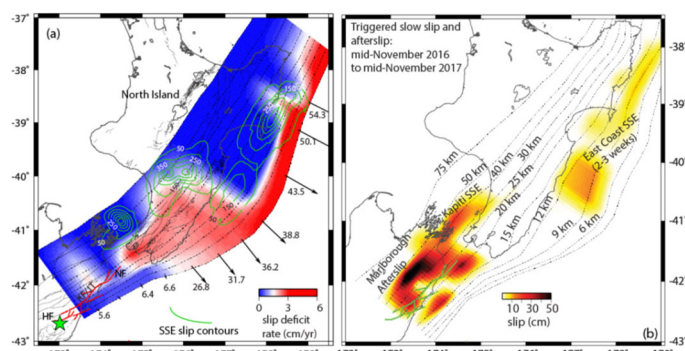


図 1 (a)対象地域のすべり遅れ分布。赤がすべり遅れの領域。(b)対象とした Kaikoura 地震の余効すべりとその後の SSE の分布。

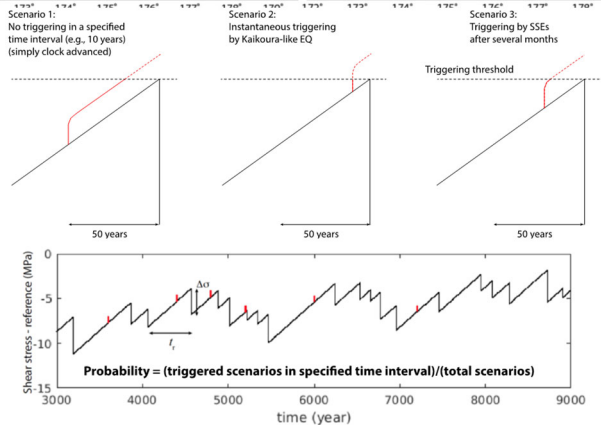


図 2 上：誘発のシナリオ。下：シミュレーション結果。黒線が長期間の地震発生カタログの元になる応力時間変化。そこに今回の応力変化を様々なタイミングで加えた場合に地震が誘発される確率を算出。

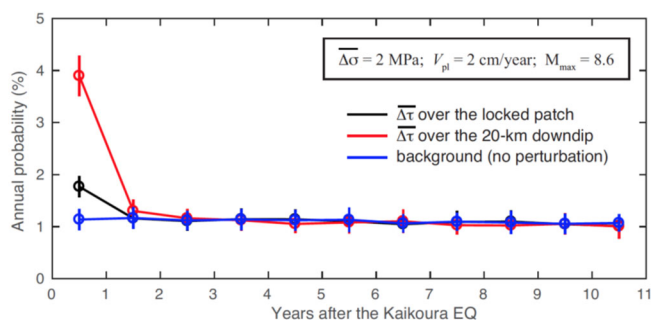


図 3 地震後 10 年間の 1 年ごとの確率の推移。赤：固着域の深部での平均応力変化にもとづく場合。黒：固着域全体の平均応力変化にもとづく場合。青：変化がなかった場合。

第 233 回地震予知連絡会 重点検討課題 趣旨説明

「予測実験の試行（08）－試行から実施への移行」について
Trials of experimental forecasts of crustal deformation and seismicity #8:
Moving towards the prospective tests

コンビーナ 東北大学災害科学国際研究所 遠田晋次
共同コンビーナ 海洋研究開発機構 堀 高峰

1. 背景

当重点検討課題は、「地殻活動・地震活動のモニタリングとして何が重要かを検討し、今の予測能力の実力を把握・提示するために、今後、予測実験の試行を行うことが有効である」という平成 25 年度将来検討 WG からの提言を踏まえて始まった。その後、約 6 年間に 7 回にわたって実施され、延べ 40 人による発表が行われた。「試行」というテーマのもと、相応に確立された予測手法の紹介と、半年～1 年間の予測とその後の観測結果が比較検証された。同時に、物理モデルや新手法、既往モデルの課題や改善案などの提案もあり、実験を進行させつつも地震研究者のコミュニティとして、最善のモデルを追求する前向きな議論が続けられた。さらに、前回の第 229 回地震予知連絡会では、地震活動予測について、各種モデルの長所・短所などの総括と今後の展開が議論された。

以上を踏まえ、令和 3 年 2 月に行われた運営検討部会では、「ある程度確立された手法は、「実験試行」からモニタリング同様に定期的な「実験実施」に移行してはどうか」という意見が出され、実用化へ一歩踏み出すことで合意された。同時に、これまで同様、課題の整理・抽出も行い、既往手法の改良、新手法の提案も引き続き検討することとなった。

2. 課題

過去 8 回のキーワード別の話題提供回数は、前震・群発地震（8）、余震・ETAS（7）、検証・評価法（7）、物理モデル・発生メカニズム（5）、東北沖余効変動・地殻変動（4）、 b 値変化（3）、静穏化（2）、震度予測（2）、異常組み合わせ（2）である。

話題提供数が示すとおり、前震・群発地震、ETAS モデル、余効変動モデルについては、具体的かつ詳細な予測モデルと準定期的な報告が既に行われている。「実験の試行」から「実験の実施」への移行が可能と思われる。特に、時空間 ETAS モデルは学術的信頼度も高く CSEP Japan などでも常時検証されてきた。予知連としても、モニタリング同様に定例報告化が可能と考える。また、今給黎・小泉（2016）による気象庁データベースを用いた震度予測は手法として単純で客観性も担保でき、定型化に適している。

一方で、これらの予測に影響を与える前震の識別、地震サイズ分布（ b 値）の時空間変化、大地震に先行する地震活動静穏化、広域余震の時空間変化などについても今後検討を進めていく必要があり、今回において課題整理を行う。

3. 報 告 (予定)

1) 実験「試行」から実験「実施」へ向けて

- ①地殻変動予測：東北沖地震の余効変動，全国地殻変動平均像からの予測
- ②気象庁震度データベースによる1年間の地域別震度予測
- ③群発的地震活動を前震活動として行う本震の発生予測
- ④階層的時空間 ETAS モデルによる短期・中期予測

2) 「試行」段階で検討された他の予測要素の整理と課題

- ①前震識別， b 値変化，静穏化，広域および長期余震活動，アンサンブルモデルなど。

4. 論 点 (予定)

- 定期予測・検証型の実験報告を「地殻活動モニタリング」の一部として行うか，年1度の重点検討課題で報告するか，別枠の報告時間を設定するか。
- 実施予測モデルの改良，新手法の採用などのプロセスを最新の研究動向に照らして予知連内でどのように進めるべきか。
- 本来の地震予知・予測のターゲットは被害をもたらす大地震であるが，きわめて低頻度である。数カ月～数年といった予測期間では実際のところ検証不能である (図1)。群発地震、前震-本震-余震、本震-余震、それらを総括できる ETAS モデルなど、時空間クラスタリングを説明する経験則・統計則は、どのマグニチュード (M) 範囲で予測を検証できたとするのか。短時間での検証には予測 M を小さくする必要があるが、予測 M を大きくすれば、全地球規模でしか検証できず、さまざまな問題が生じる (図1)。中規模地震，中程度の震度での検証だけで良いか。特に，大地震に先行する静穏化については，長期的モニタリングが必要である。
- 同様に定量化・検証不能という観点だけで，物理モデル・シミュレーション，古地震・地質学的長期予測などの検討・採用を排除して良いか (図1)。
- 手法改良の際には，短期間の前向き予測 (prospective) だけではなく，過去の長期間のデータを用いた後ろ向き評価 (retrospective forecast) も話題として重要ではないか。
- 複数の異常現象や長期・中期・短期予測をかけあわせて確率を評価するなど，既往モデルの組み合わせも検討すべきでは。

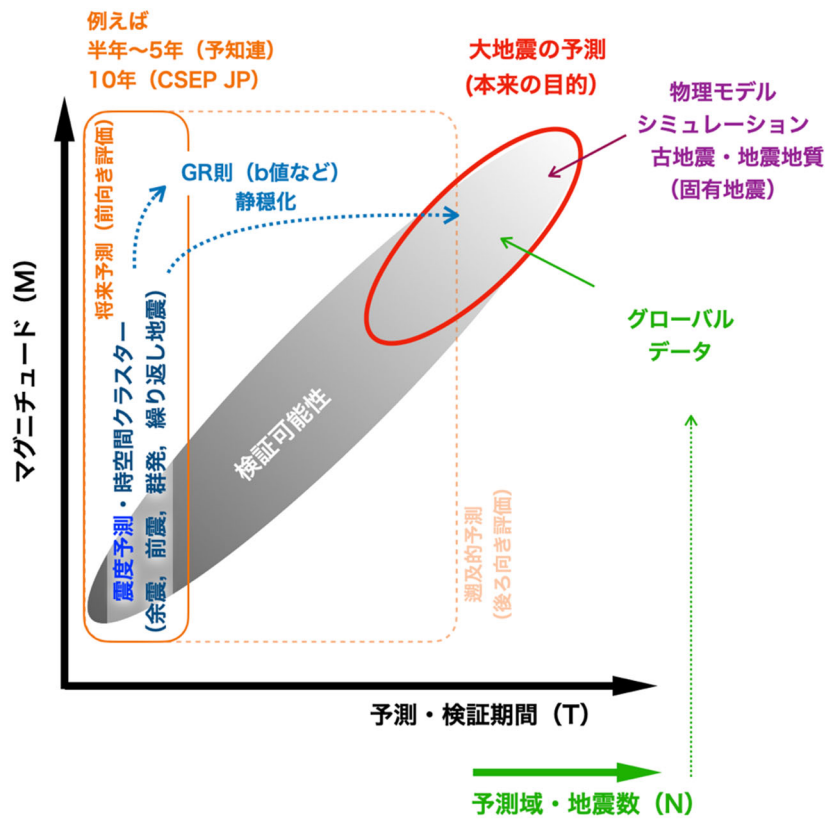


図 1. 地震活動予測と検証可能性に関する概念図

令和3年度第1回 運営検討部会報告

1. 令和4年度前期重点検討課題の選定

令和4年度前期の重点検討課題名（予定）を以下のとおり選定した。

地震予知連絡会	コンビーナ	課 題 名
第235回(2022/05)	石山 委員	東北日本の日本海側の地殻活動(仮)
第236回(2022/08)	篠原 委員	光ファイバーセンシング技術の地震・測地学への応用(仮)