

令和3年5月28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231回定例会（2021年5月）－

地震予知連絡会は5月28日、第231回定例会を開催し、令和3年2月～令和3年4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「地震動・津波即時予測技術の高度化－東北地方太平洋沖地震から10年でどこまで進展したか－」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/231/231.html>



### ■地殻変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2月から2021年4月までの3か月間に発生したM5.0以上の地震は30回であった。このうち、最大震度5弱以上を観測した地震が3回発生した。また、期間外の2021年5月1日に宮城県沖で最大震度5強の地震が発生した（気象庁・資料3頁）。

##### (2) 日本周辺における浅部超低周波地震活動

2021年2月から4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（防災科学技術研究所・資料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、福島県沖の地震および宮城県沖の地震の影響が見られる（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

主な深部低周波微動活動は、東海地方（2月18～22日、4月30日～5月4日）、紀伊半島中部（4月27日～5月4日）、紀伊半島南部（2月23～27日）、四国東部（1月27日～2月3日、3月16～24日）、四国中部（4月9～11日）、四国西部から豊後水道（3月22～28日頃）で観測された（防災科学技術研究所・資料6頁）。

#### ○紀伊半島西部・四国東部の非定常的な地殻変動

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、最近は鈍化している（国土地理院・資料7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13cmのすべりが推定された（国土地理院・資料8頁）。

#### ○九州北部、南部の非定常的な地殻変動

2020年夏頃から九州北部で観測されている非定常的な地殻変動は、最近は鈍化している。一方、GNSS連続観測により、九州南部で2020年夏頃から開始した非定常的な地殻変動は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、日向灘南部で最大13cmのすべりが推定された（国土地理院・資料9頁）。

## 1. 3 その他

### (1) 福島県沖の地震（2月13日 M7.3）

2021年2月13日23時07分に福島県沖の深さ55kmでM7.3の地震（最大震度6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、太平洋プレート内部で発生した。この地震により、宮城県の石巻港（国土交通省港湾局）で最大22cmの津波を観測したほか、宮城県から福島県の沿岸で津波を観測した（気象庁・資料10－12頁）。

この地震に伴い、震央西の福島県のGNSS連続観測点で西方向に最大約2cmの地殻変動が観測された。震源断層モデルを推定したところ、北東－南西走向で南東に傾き下がる断層面上における逆断層すべりが求まった（国土地理院・資料13－14頁）。

また、三次元地震波速度構造及び観測点補正値を用いて震源の再決定を行った結果からも、2月13日から14日の地震は太平洋プレート内の地震活動であったことが示唆された（防災科学技術研究所・資料15頁）。

### (2) 宮城県沖の地震（3月20日 M6.9）

2021年3月20日18時09分に宮城県沖の深さ59kmでM6.9の地震（最大震度5強）が発生した。この地震は、発震機構（CMT解）が西北西－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16－18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2cmの地殻変動が観測された。また、宮城県北部を中心とした小さな沈降と牡鹿半島で小さな隆起が観測された。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、牡鹿半島沿岸から沖合にかけて、最大約60cmのすべりが推定された（国土地理院・資料19－21頁）。

### （3）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22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23－25頁）。

### （4）宮城県沖の地震活動

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26頁）。

三次元地震波速度構造及び観測点補正值を用いて震源の再決定を行った結果からも、3月20日及び5月1日の地震は、いずれも陸側プレートと太平洋プレートの境界部で発生した地震活動であったと考えられる。それぞれの地震に関して強震波形記録を用いた震源過程解析を行った結果、3月20日の地震については、破壊開始点付近と破壊開始点の南側の領域に大きなすべり（最大1.1m）が推定された。また、5月1日の地震では、破壊開始点付近に大きなすべり（最大1.6m）が推定された（防災科研・資料27－29頁）。

2011年東北地方太平洋沖地震の余効滑りは10年たっても継続しており、特に3月20日の地震のすぐ北側で大きくすべっていた。3月20日の地震によってせん断応力が増加したと推測される領域内で5月1日の地震が発生しており、またこれら二つの地震によって周辺の数十kmの範囲のプレート境界でせん断応力が増加しているものと推測される（東北大学・資料30頁）。

### （5）ケルマデック諸島の地震（3月5日 Mw8.1）

2021年3月5日04時28分（日本時間、以下同じ）にケルマデック諸島の深さ29kmでMw8.1の地震が発生した。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、太平洋プレートとインド・オーストラリアプレートとの境界で発生した。

この地震により、日本国内では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側沿岸で津波を観測した。また、今回の地震が発生する約 1 時間 50 分前の 02 時 41 分に、今回の地震の震央近傍の深さ 43km で Mw7.4 の地震が発生した。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、太平洋プレートとインド・オーストラリアプレートとの境界で発生した(気象庁・資料 31 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 231 回定例会 重点検討課題>

課題名 「地震動・津波即時予測技術の高度化－東北地方太平洋沖地震から 10 年でどこまで進展したか－」について (資料 34-35 頁)

コンビーナ 干場 充之委員 (気象研究所)

報告課題、報告者

1. 気象庁の緊急地震速報と津波警報・注意報の高度化 (資料 36 頁)  
桑山 辰夫 (気象庁)
2. リアルタイム GNSS 解析による地震像の即時把握 (資料 37 頁)  
村松 弘規 (国土地理院)  
太田 雄策 (東北大学)
3. 地震動即時予測の研究：最近 10 年の進展から (資料 38 頁)  
干場 充之 (気象研究所)
4. 津波即時予測手法の進展 (資料 39 頁)  
谷岡 勇市郎 (北海道大学)

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 測量新技術研究官 岡谷 隆基

Tel : 029-864-5903 (直通) Fax : 029-864-2655



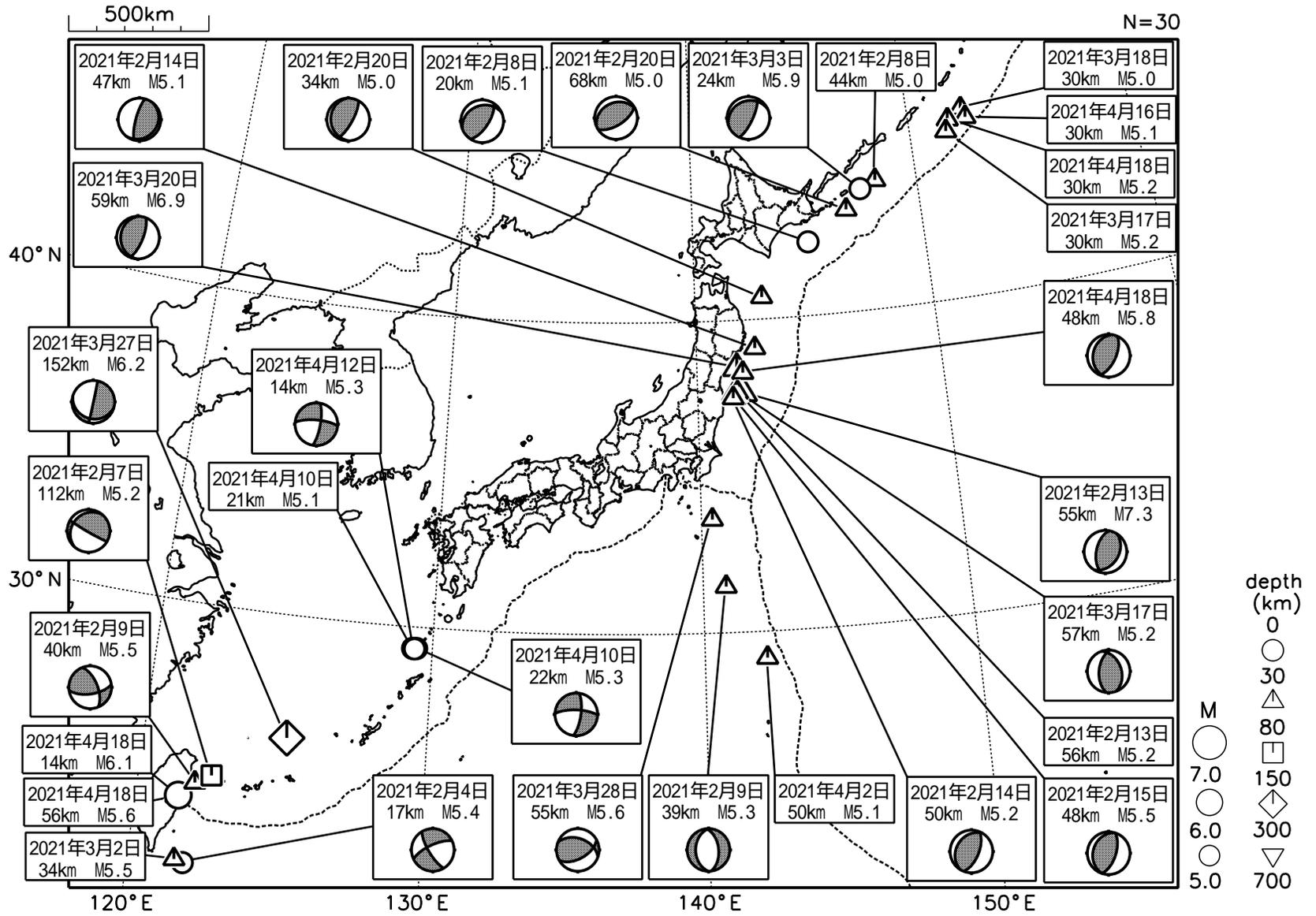
## 地震予知連絡会第27期委員名簿（令和3年5月28日現在）

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	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教授
委	員	西村 卓也	京都大学防災研究所准教授
委	員	松本 聡	九州大学大学院理学研究院教授
委	員	中尾 茂	鹿児島大学大学院理工学研究科理学専攻教授
委	員	尾形 良彦	統計数理研究所名誉教授
委	員	汐見 勝彦	国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門 副部門長
委	員	堀 高峰	国立研究開発法人海洋研究開発機構 海域地震火山部門・地震津波予測研究開発センター長
委	員	今西 和俊	国立研究開発法人産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 総括研究主幹
委	員	平田 直	地震調査研究推進本部地震調査委員会委員長 南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会会長 地震防災対策強化地域判定会会長 国立研究開発法人防災科学技術研究所 参与
委	員	石川 直史	海上保安庁海洋情報部技術・国際課地震調査官
委	員	中村 雅基	気象庁地震火山部地震火山技術・調査課長
委	員	干場 充之	気象庁気象研究所地震津波研究部長
委	員	畑中 雄樹	国土地理院地理地殻活動研究センター長
委	員	黒石 裕樹	国土地理院地理地殻活動研究センター地理地殻活動総括研究官
名	誉 委 員	茂木 清夫	東京大学名誉教授
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

# 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2月～4月、M 5.0）

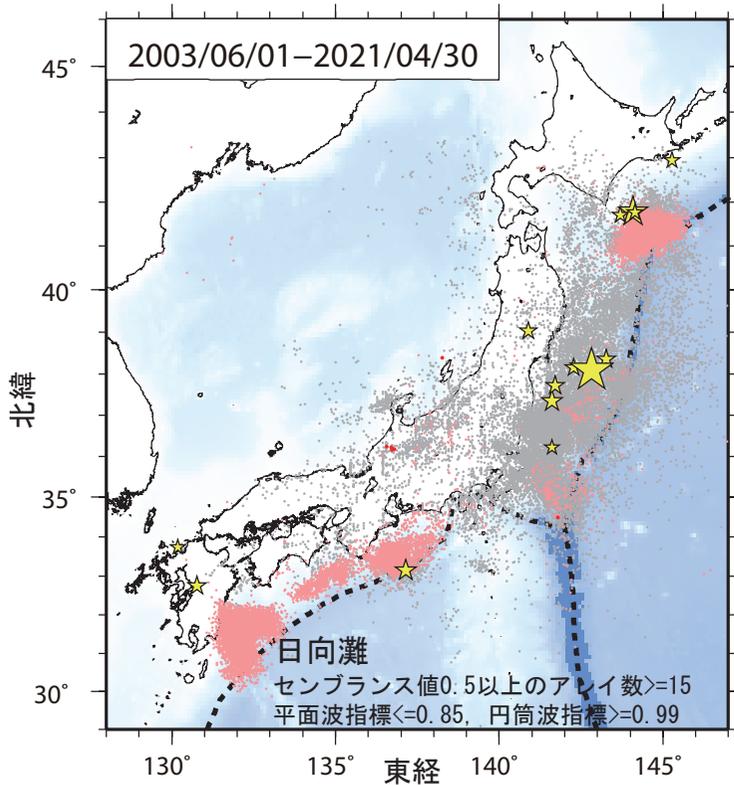
2021 02 01 00:00 -- 2021 04 30 24:00



発震機構は気象庁によるCMT解  
 深さはCMT解による

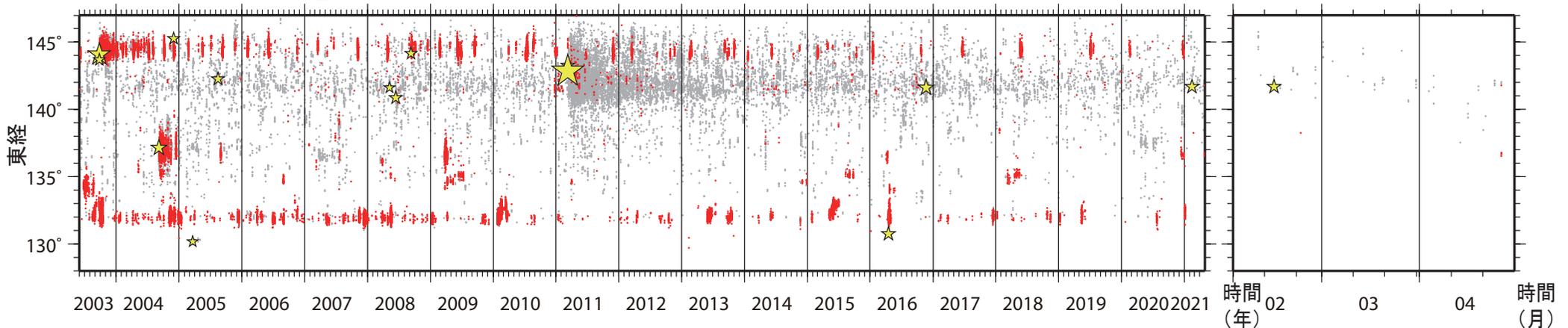
気象庁作成

# 日本周辺における浅部超低周波地震活動（2021年2月～4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) 3月上旬から4月中旬に種子島～奄美大島の東方沖において超低周波地震活動が発生したものとみられるが、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4月30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1月31日以前）、および赤色（2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.



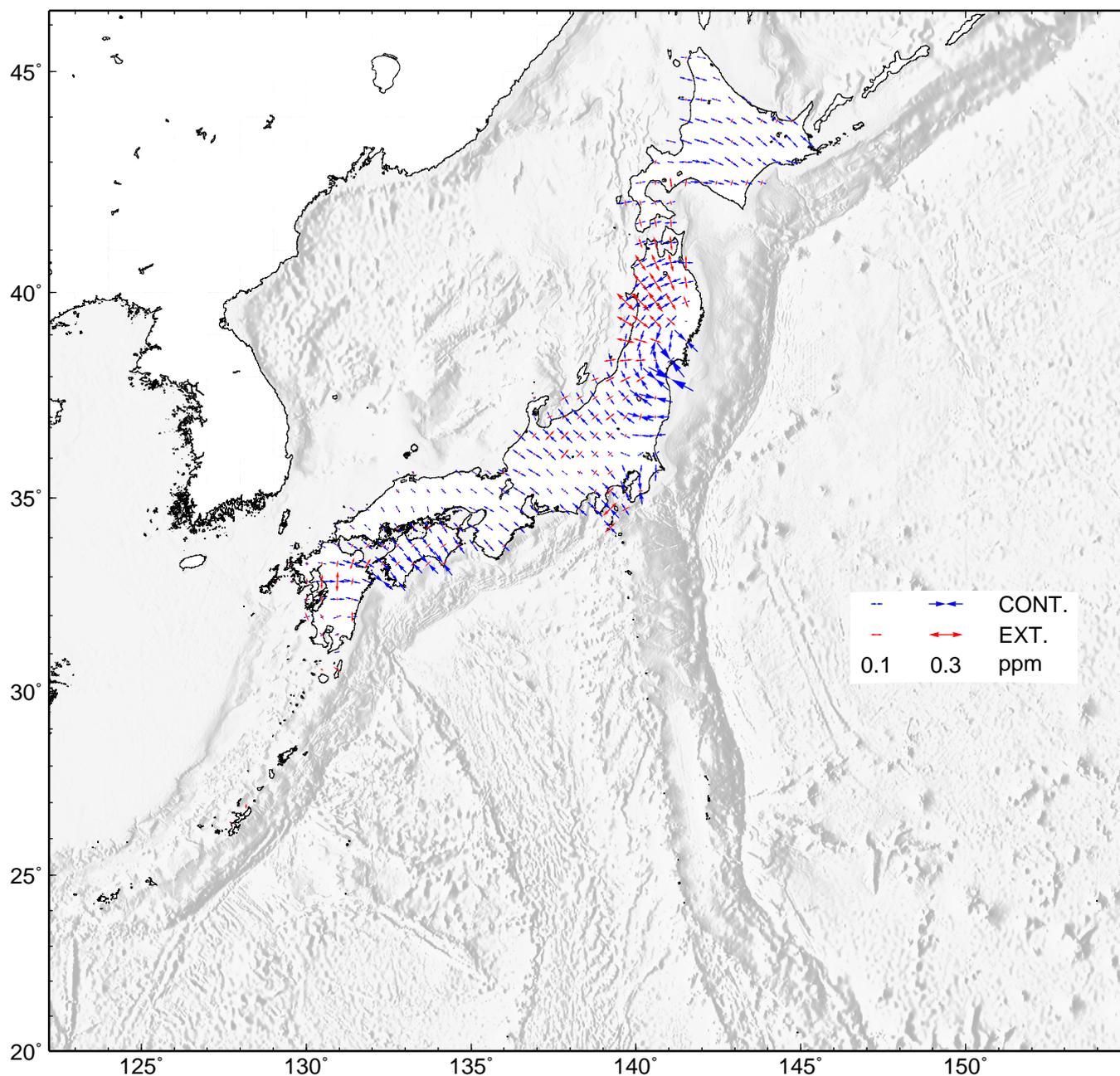
第2図. 2003年6月1日から2021年4月30日までの期間（左）および直近約3か月間（右）に検出されたイベントの時空間分布. 検出されたイベントを防災科研 Hi-net 手動または自動検測震源と照合し、対応する地震が見出されたイベントを灰色で、それ以外を赤色の点でそれぞれ示す. その他は第1図に同じ.

## 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。

基準期間：2020/04/10 – 2020/04/24 [F 5：最終解]

比較期間：2021/04/10 – 2021/04/24 [F 5：最終解]



- ・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。

国土地理院

# 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2月～4月) その1

- 主な微動活動：東海地方，2月18～22日，4月30日～5月4日。  
紀伊半島中部，4月27日～5月4日。紀伊半島南部，2月23～27日。  
四国東部，1月27日～2月3日，3月16～24日。四国中部，4月9～11日。  
四国西部から豊後水道，3月22～28日頃。

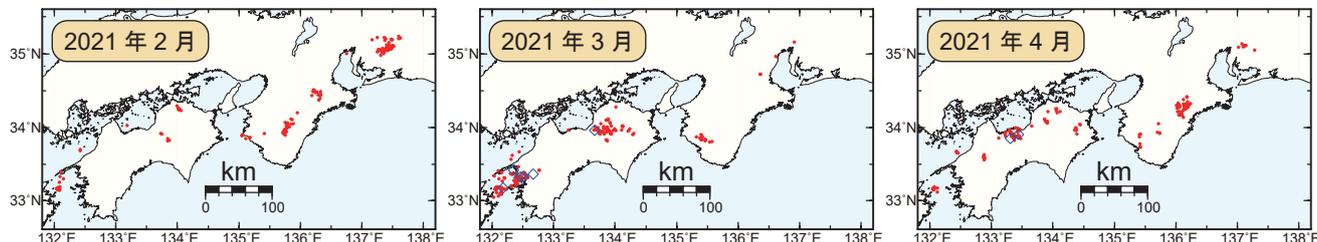


図1. 西南日本における2021年2月～4月の毎月の深部低周波微動活動。赤丸はエンベロープ相関・振幅ハイブリッド法 (Maeda and Obara, 2009) およびクラスタ処理 (Obara et al., 2010) において，1時間毎に自動処理された微動分布の重心である。青菱形は周期20秒に卓越する深部超低周波地震 (Ito et al., 2007) である。

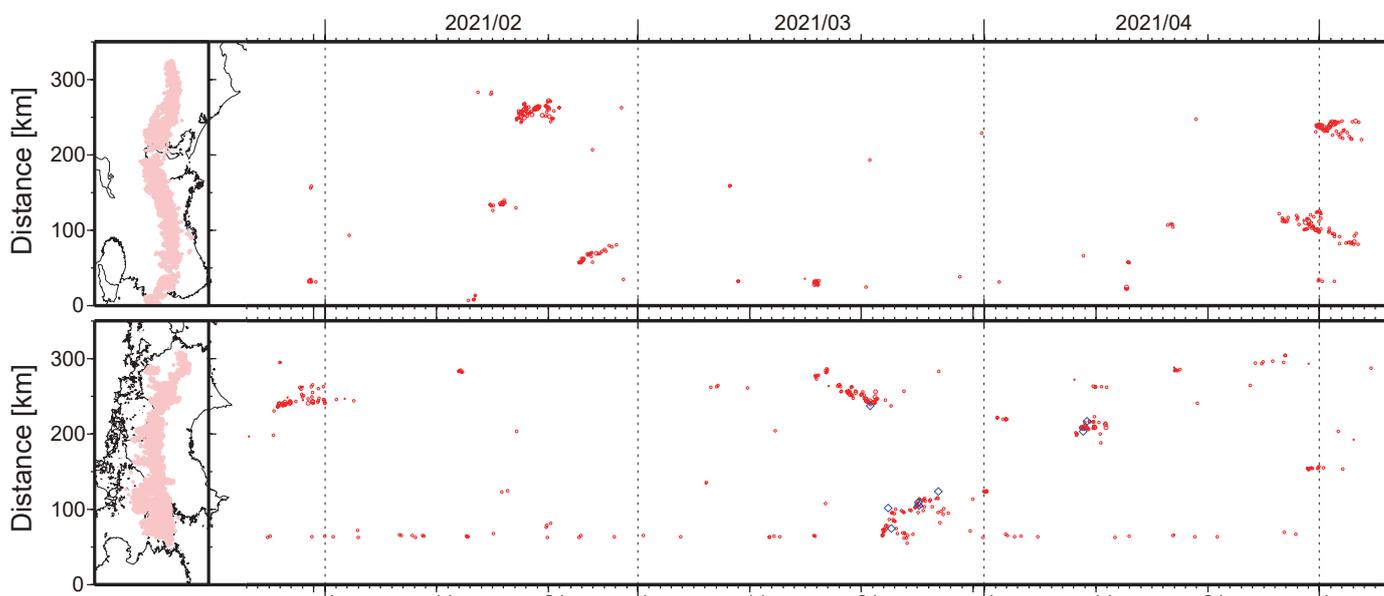


図2. 2020年10月29日～2021年5月6日の深部低周波微動 (赤) および，深部超低周波地震 (青菱形) の時空間分布。

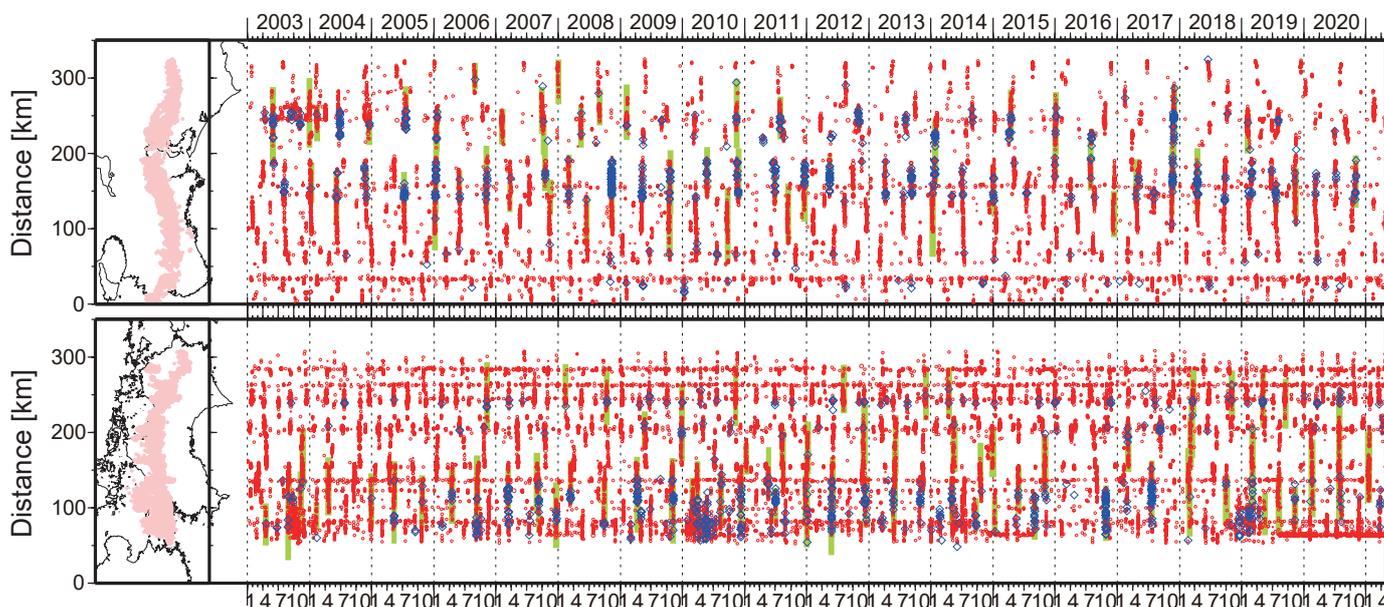
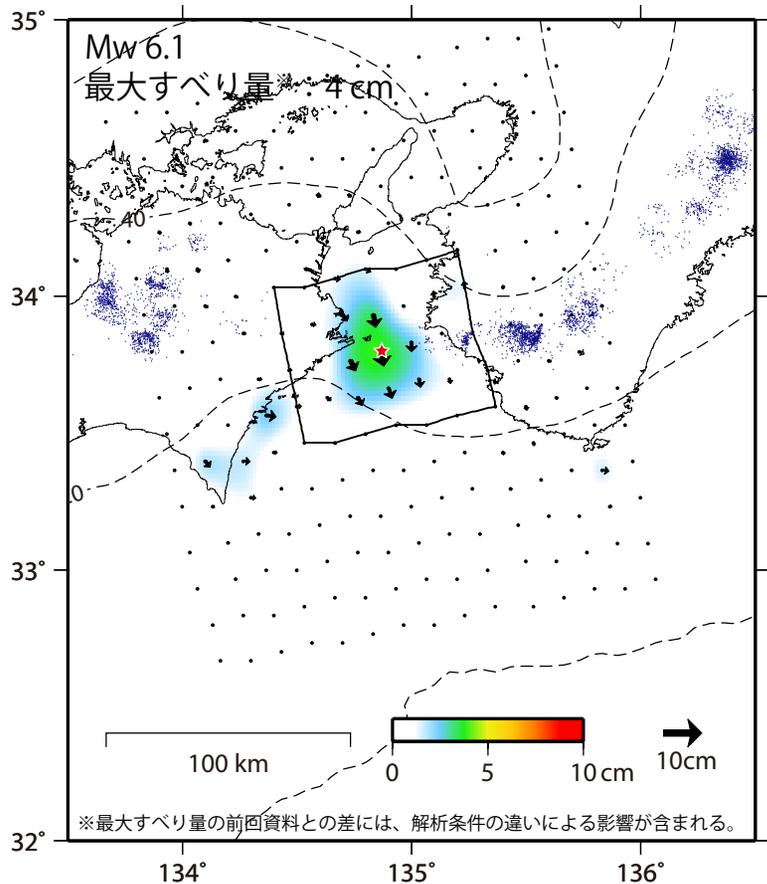


図3. 2003年1月～2021年5月6日までの深部低周波微動 (赤) および，深部超低周波地震 (青菱形) の時空間分布。緑太線は，傾斜変動から検出された短期的スロースリップイベント。

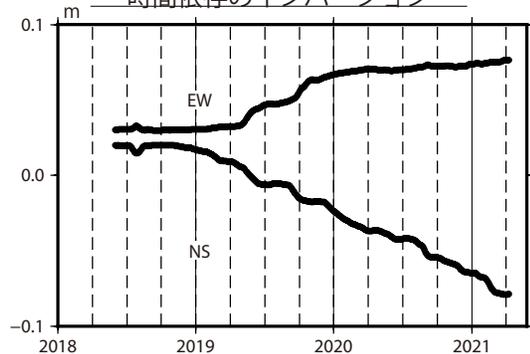
GNSSデータから推定された紀伊水道の長期的ゆっくりすべり（暫定）

推定すべり分布  
(2020/6/1 - 2021/4/9)

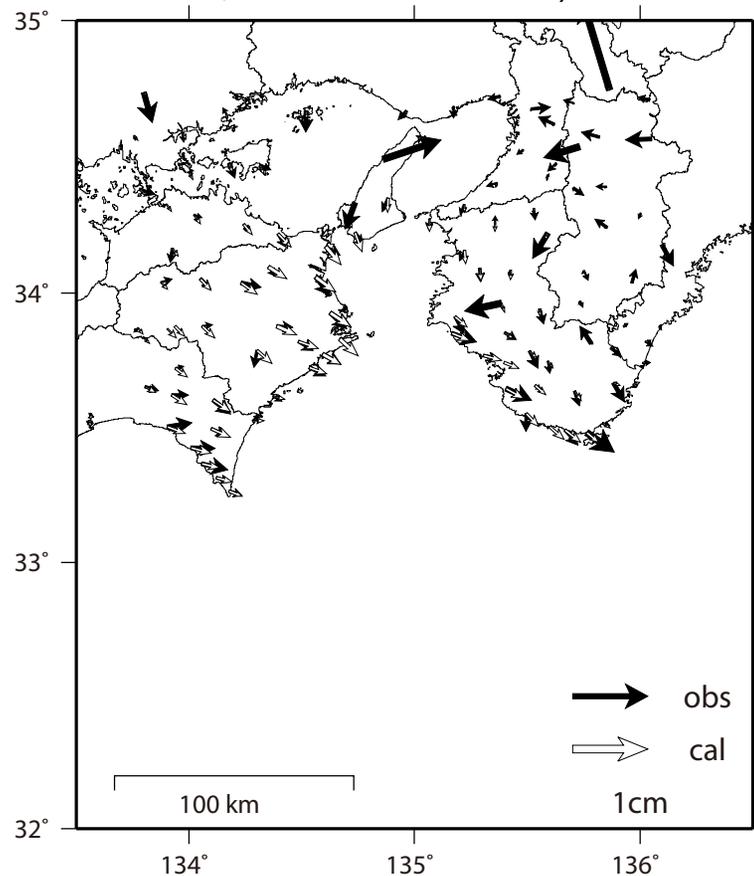


推定したすべり量が標準偏差 ( $\sigma$ ) の3倍以上のグリッドを黒色表示している。

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 - 2021/4/9)



使用データ：F5解 (2018/1/1 - 2021/3/27) + R5解 (2021/3/28 - 2021/4/9)

※電子基準点の保守等による変動は補正済み

トレンド期間：2017/1/1 - 2018/1/1

(年周・半年周成分は 2017/1/1 - 2021/4/9 のデータで補正)

モーメント計算範囲：左図の黒枠内側

観測値：3日間の平均値をカルマンフィルターで平滑化した値

黒破線：フィリピン海プレート上面の等深線 (弘瀬・他、2007)

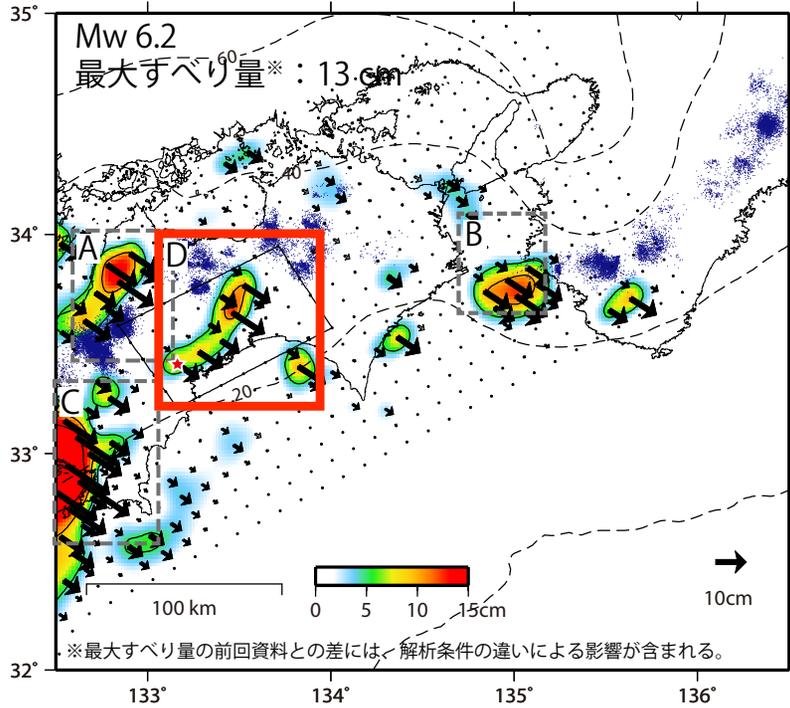
すべり方向：東向きから南向きの範囲に拘束

青丸：低周波地震 (気象庁一元化震源) (期間：2020/6/1 - 2021/4/9)

固定局：網野

# 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）

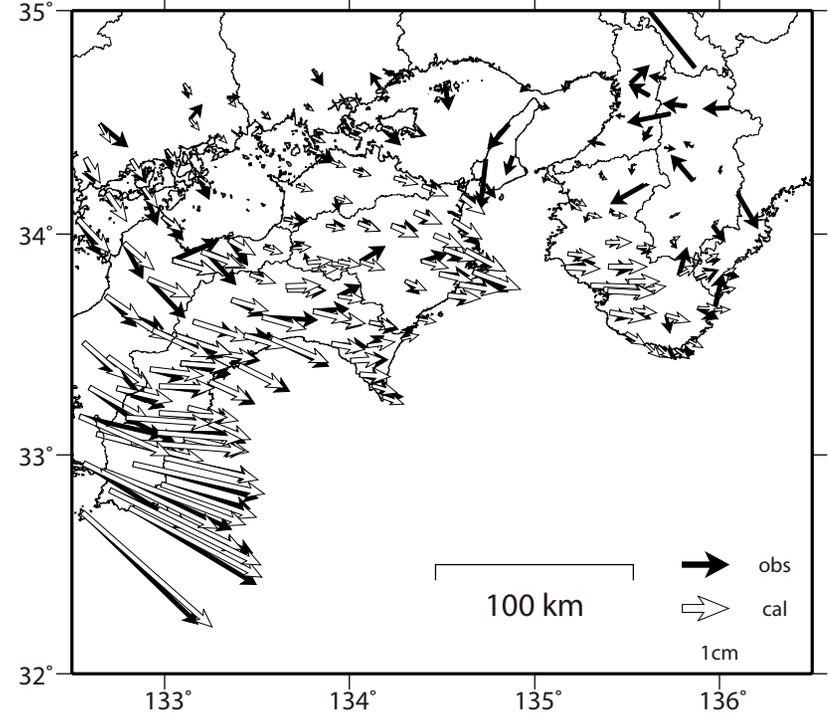
推定すべり分布  
(2019/1/1 - 2021/4/8)



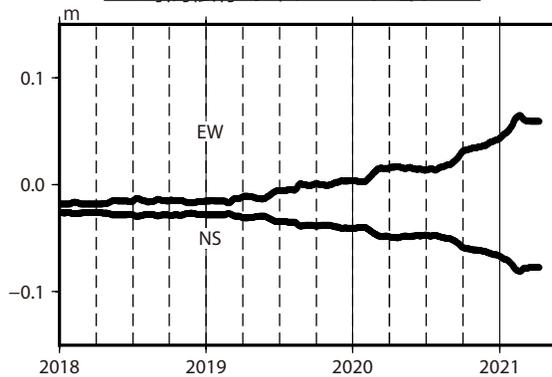
推定したすべり量が標準偏差 ( $\sigma$ ) の3倍以上のグリッドを黒色表示している。

- 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

観測値（黒）と計算値（白）の比較  
(2019/1/1 - 2021/4/8)



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 (2019/1/1 - 2021/3/27) + R5解 (2021/3/28 - 2021/4/8)  
※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 - 2021/4/8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)

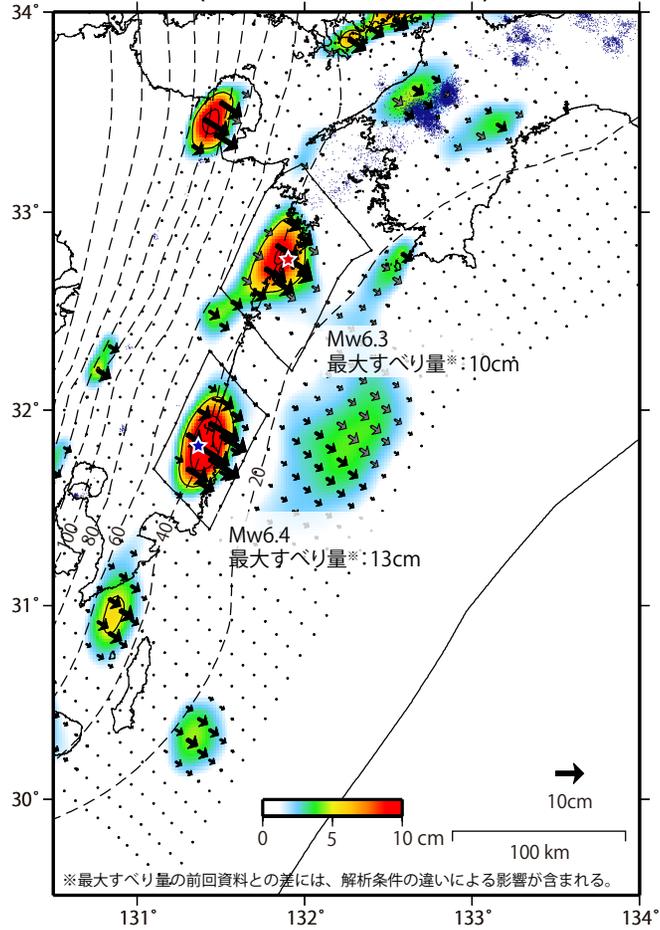
すべり方向：プレートの沈み込み方向と平行な方向に拘束

青丸：低周波地震 (気象庁一元化震源) (期間：2019/1/1 - 2021/4/8)

固定局：網野

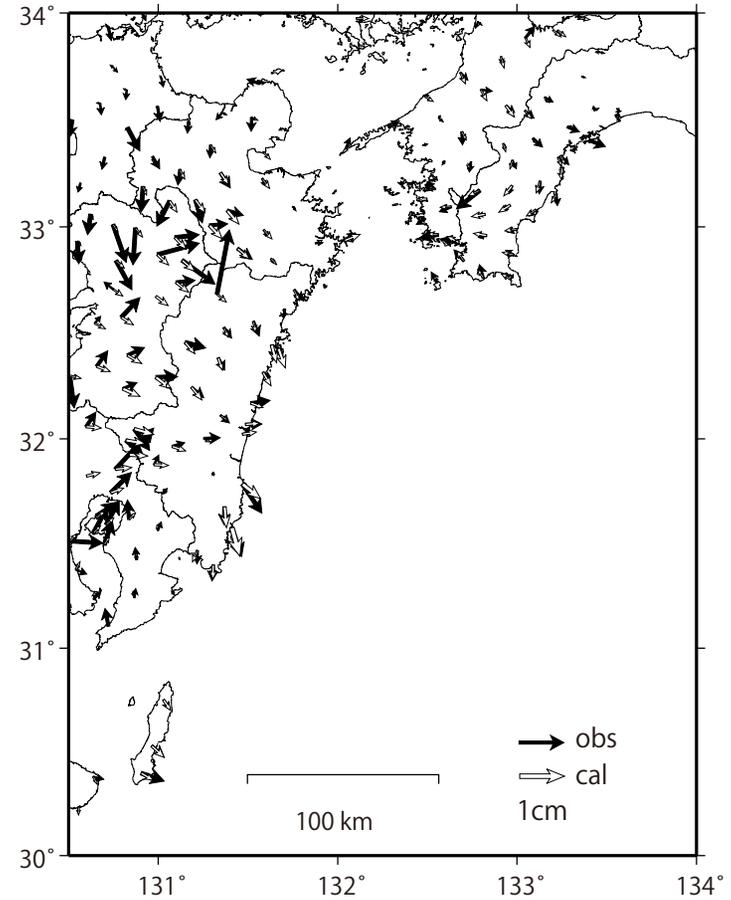
# GNSSデータから推定された日向灘北部、南部の長期的ゆっくりすべり(暫定)

推定すべり分布  
(2020/6/1 - 2021/4/7)

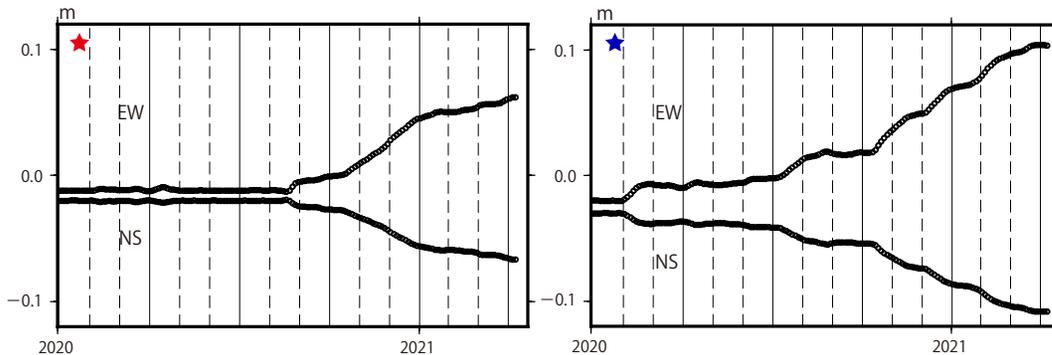


※最大すべり量の前回資料との差には、解析条件の違いによる影響が含まれる。

観測値 (黒) と計算値 (白) の比較  
(2020/6/1 - 2021/4/7)



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 - 2021/3/27) + R5解 (2021/3/28 - 2021/4/7)  
※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、種子島周辺は2017/1/1-2019/1/1、  
それ以外の地域は2017/1/1 - 2021/4/7 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) (期間：2020/6/1 - 2021/4/7)

固定局：三隅

## 2021年2月13日 福島県沖の地震

### (1) 概要

2021年2月13日23時07分に福島県沖の深さ55kmでM7.3の地震が発生し、福島県国見町、相馬市、新地町及び宮城県蔵王町で震度6強を観測したほか、東北地方を中心に北海道から中国地方にかけて震度6弱～1を観測した。また、福島県中通りで長周期地震動階級4を観測したほか、東北地方を中心に北海道から中部地方にかけて長周期地震動階級3～1を観測した。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、太平洋プレート内部で発生した。気象庁はこの地震に対して、最初の地震波の検知から10.0秒後の23時08分10.2秒と33.6秒後の23時08分33.8秒に緊急地震速報（警報）を発表した。

この地震により、宮城県の石巻港で22cm、福島県の相馬で0.2mの津波を観測するなど、宮城県及び福島県で津波を観測した。

この地震の発生後、震源付近では地震活動が活発な状態で推移しており、2月28日までに震度1以上を観測した地震が93回、このうち震度3以上を観測した地震が7回発生している。

この地震により、死者1人、負傷者186人、住家全壊24棟、半壊67棟、一部破損4,545棟などの被害が生じた（2021年2月25日19時00分現在、総務省消防庁による）。

気象庁は、震度5強以上を観測した震度観測点について点検を実施し、震度観測点の観測環境が地震によって変化していないことを確認した。また、被害状況調査を実施し、震度観測点周辺の被害や揺れの状況が気象庁震度階級関連解説表と整合していることを確認した。

被害状況を表1-1に、福島県沖の最大震度別地震回数表を表1-2に、震度1以上の日別地震回数グラフを図1-1に示す。

表1-1 2021年2月13日の福島県沖の地震による被害状況  
(2021年2月25日19時00分現在、総務省消防庁による)

都道府県名	人的被害					住家被害			
	死者	行方不明	負傷者		合計	全壊	半壊	一部破損	合計
			重傷	軽傷					
人	人	人	人	人	棟	棟	棟	棟	
岩手県				1	1				
宮城県			6	58	64		10	474	484
山形県				1	1			7	7
福島県	1		4	96	101	24	57	4,064	4,145
茨城県				3	3				
栃木県				8	8				
群馬県				1	1				
埼玉県			1	1	2				
千葉県			1	1	2				
神奈川県				4	4				
合計	1		12	174	187	24	67	4,545	4,636

表1-2 震度1以上の日別最大震度別地震回数表  
(2021年2月13日23時～2月28日24時)

期間	最大震度別回数										震度1以上を 観測した回数	
	1	2	3	4	5弱	5強	6弱	6強	7	回数	累計	
2/13 23時-24時	11	1	2	0	0	0	0	1	0	15	15	
2/14 00時-24時	27	12	0	1	0	0	0	0	0	40	55	
2/15 00時-24時	7	3	1	0	0	0	0	0	0	11	66	
2/16 00時-24時	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5	71	
2/17 00時-24時	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	73	
2/18 00時-24時	1	4	0	0	0	0	0	0	0	5	78	
2/19 00時-24時	2	0	1	0	0	0	0	0	0	3	81	
2/20 00時-24時	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	82	
2/21 00時-24時	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	83	
2/22 00時-24時	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	84	
2/23 00時-24時	2	1	0	0	0	0	0	0	0	3	87	
2/24 00時-24時	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	88	
2/25 00時-24時	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	88	
2/26 00時-24時	1	3	0	0	0	0	0	0	0	4	92	
2/27 00時-24時	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	94	
2/28 00時-24時	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	
総数	61	25	6	1	0	0	0	1	0		94	

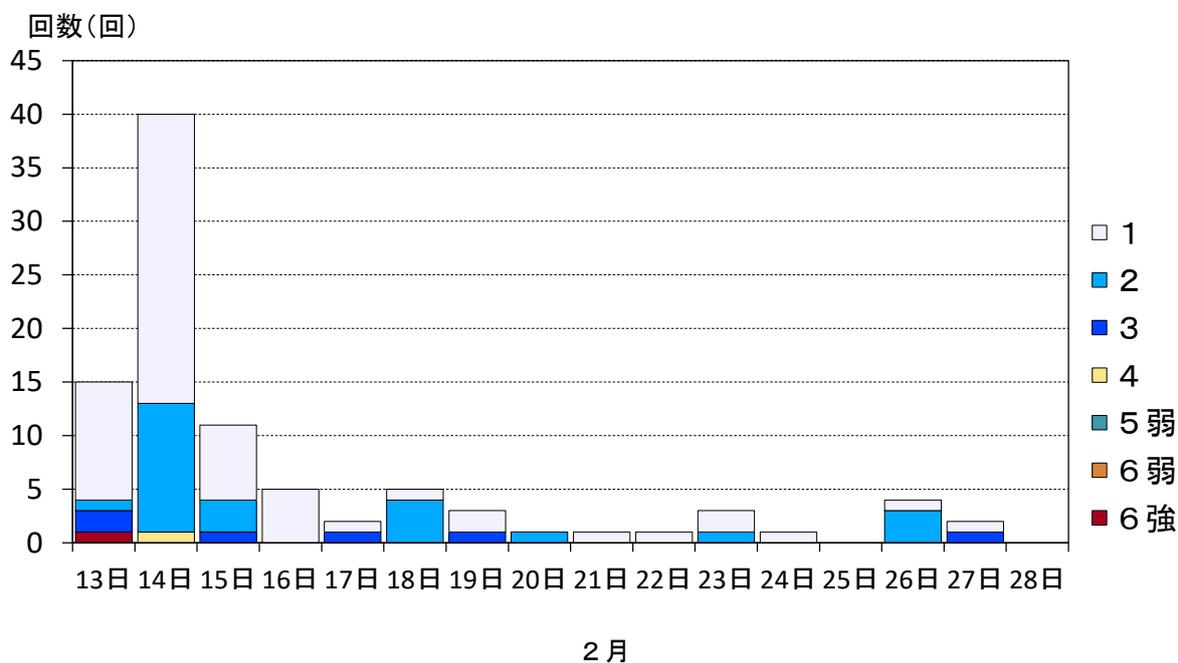


図1-1 震度1以上の日別地震回数グラフ  
(2021年2月13日23時～2月28日24時)

## (2) 地震活動

### ア. 地震の発生場所の詳細及びその後の地震活動

2021年2月13日23時07分に福島県沖の深さ55kmでM7.3の地震（最大震度6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、太平洋プレート内部で発生した。その後、この地震の震源付近（領域b）では地震活動が活発になり、14日16時31分にM5.2の地震（最大震度4）、15日21時26分にM5.5の地震（最大震度3）が発生するなど、2月28日までにM4.0以上の地震が44回発生している。14日のM5.2の地震及び15日のM5.5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、いずれも太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した。

1997年10月以降の活動を見ると、今回の地震の震源付近（領域b）では「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」）の発生以前からM4.0以上の地震がしばしば発生するなど、定常的な活動が見られていた。「東北地方太平洋沖地震」の発生以降は地震活動が活発化し、今回の地震を含めてM6.0以上の地震が5回発生している。

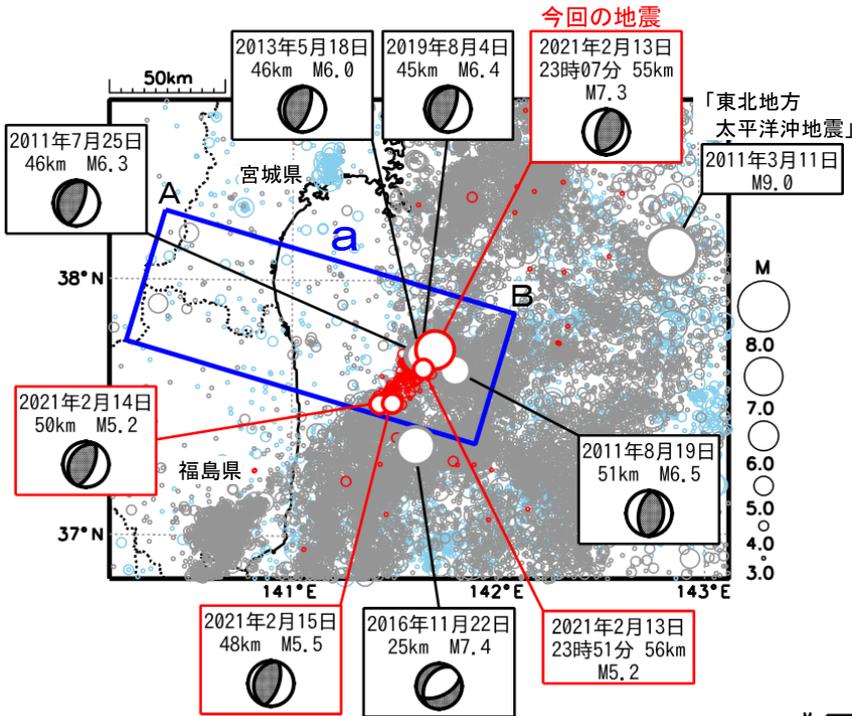


図2-1 震央分布図  
(1997年10月1日～2021年2月28日、深さ0～150km、M≥3.0)  
2011年3月10日以前の地震を薄い青、2011年3月11日以降の地震を灰色、  
2021年2月の地震を赤色で表示  
図中の発震機構はCMT解

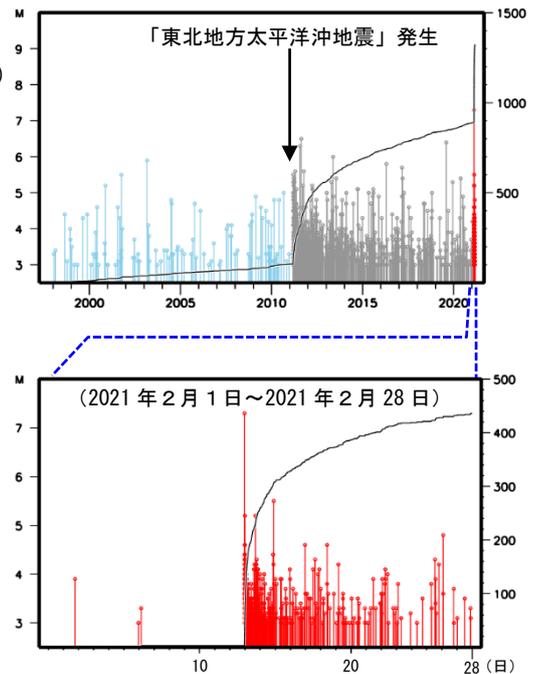


図2-3 領域b内のM-T図  
及び回数積算図

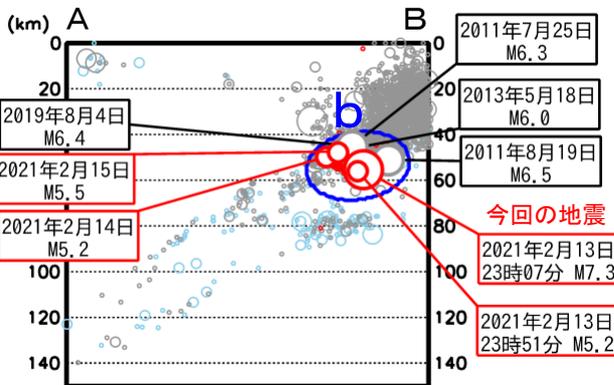


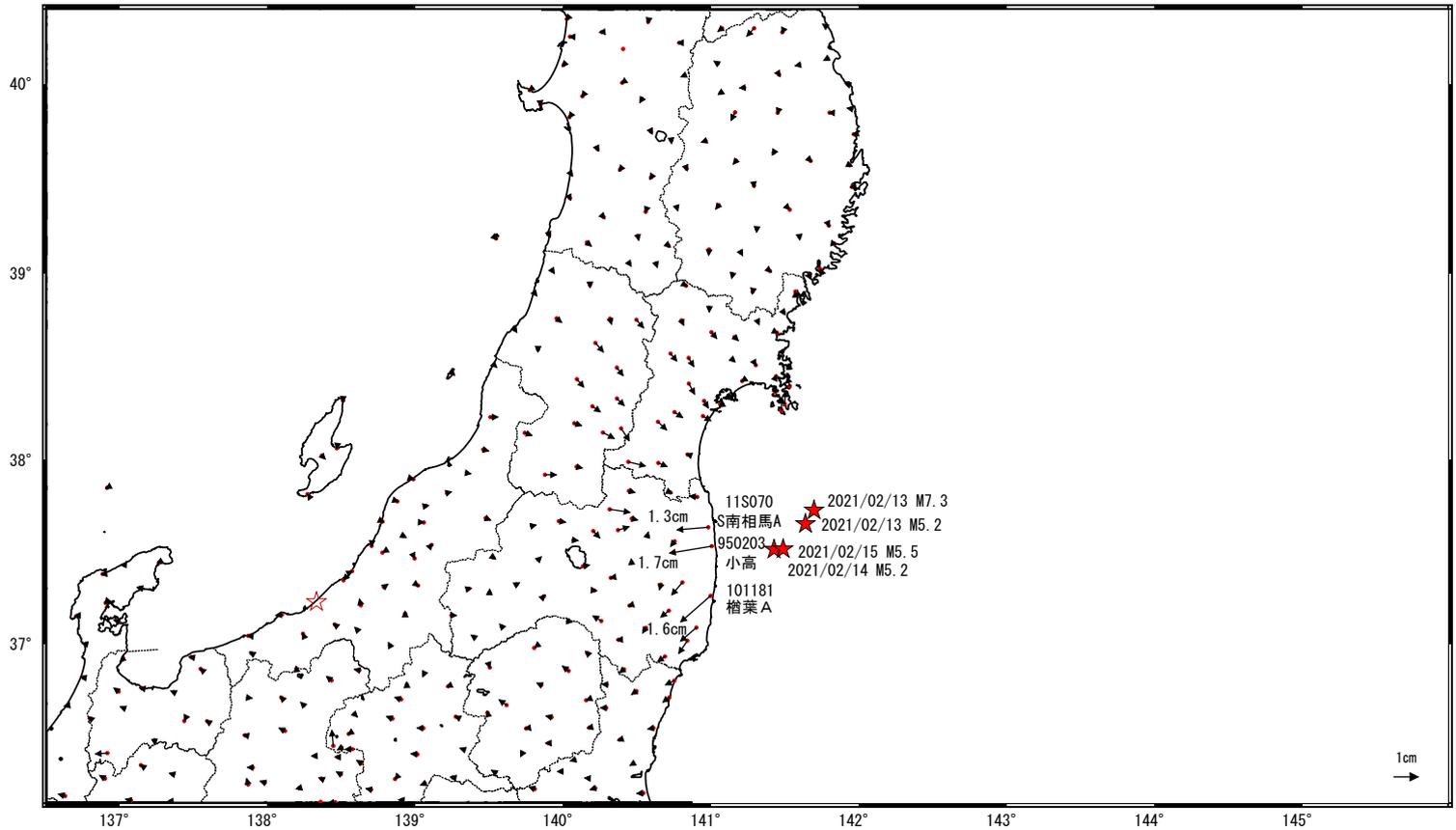
図2-2 領域a内の断面図（A-B投影）

# 福島県沖の地震(2月13日 M7.3)前後の観測データ

この地震に伴い地殻変動が観測された。

地殻変動(水平)

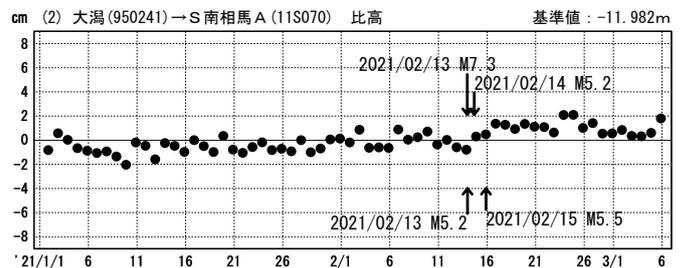
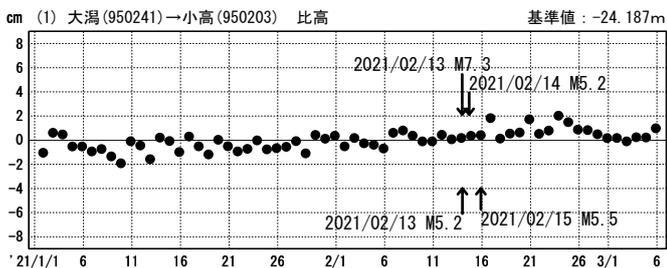
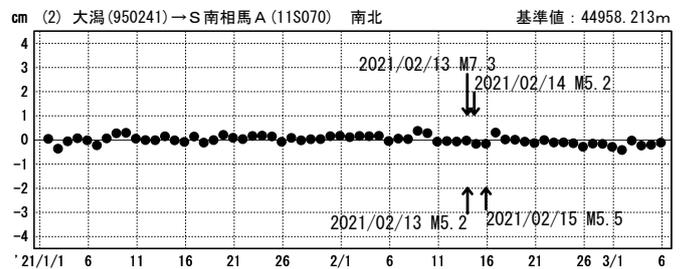
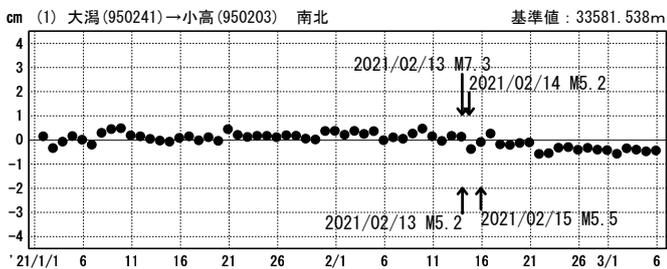
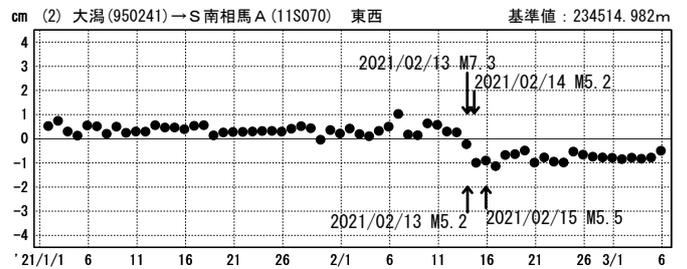
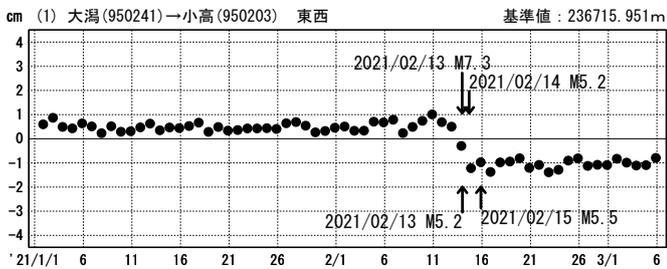
基準期間: 2021/02/06~2021/02/12 [F5: 最終解]  
 比較期間: 2021/02/14~2021/02/20 [F5: 最終解]



☆ 固定局: 大湯(950241)    ★ 震央

期間: 2021/01/01~2021/03/06 JST

期間: 2021/01/01~2021/03/06 JST



●— [F5: 最終解]

# 2021年2月13日福島県沖の地震の震源断層モデル

基準期間:2021/02/06 09:00:00~2021/02/13 08:59:59[F5:最終解]JST  
 比較期間:2021/02/15 09:00:00~2021/02/22 08:59:59[F5:最終解]JST  
 固定局:大湊(950241)

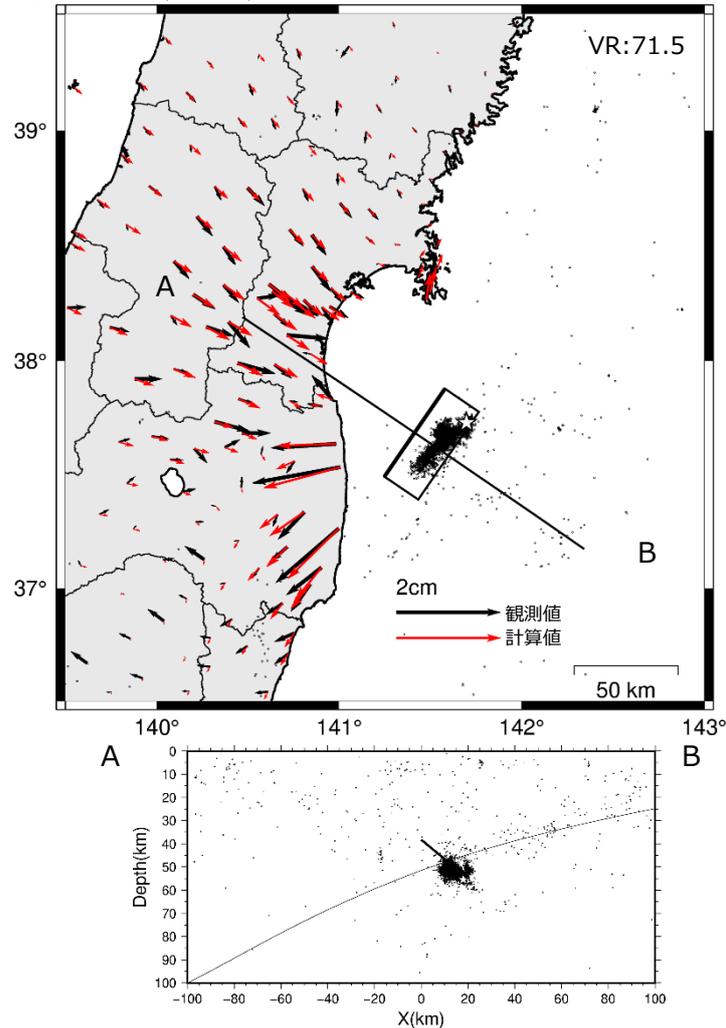


図1 南東傾斜で推定された震源断層モデル。

(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）。傾き下がる方向を正にとっている。実線はプレート境界面（Nakajima and Hasegawa 2006, Kita et al. 2010）。

☆印は震央、点は本震発生(2/13 23:07)から2/17 0時までに発生した震源（気象庁一元化震源を使用）。

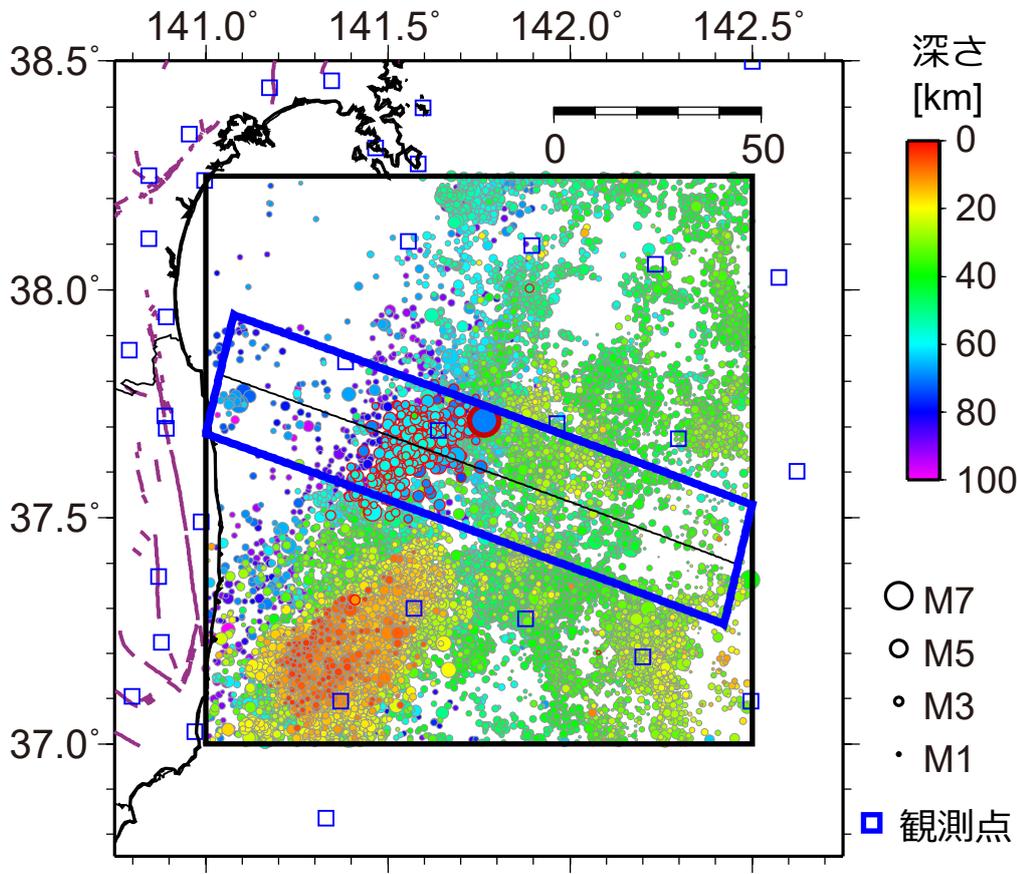
表1 推定された震源断層モデルパラメータ

経度 [°]	緯度 [°]	上端深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [°]	傾斜 [°]	すべり角 [°]	すべり量 [m]	M <sub>w</sub>
141.248 (0.062)	37.492 (0.050)	38.2 (5.5)	51.9 (5.9)	26.0 (3.0)	34.3 (3.0)	40.0 (4.5)	95.9 (8.8)	0.58 (0.11)	7.10 (0.04)

- ・ 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。
- ・ M<sub>w</sub>と断層面積がスケールリング則（Strasser et al. 2010）に近づくよう拘束
- ・ 断層長さに対する断層幅の比を1/2に固定
- ・ M<sub>w</sub>の計算においては、剛性率を75 GPaと仮定

# 三次元地震波速度構造を用いて決定した2021年2月13日 福島県沖の地震周辺の震源分布

- S-netも含めて解析した三次元地震波速度構造や観測点補正值(Matsubara et al., 2019)を用いて2021年2月13日の地震を含む約4年間の地震の震源を再決定
- 2月13~14日の地震活動域はスラブ内の地震であることを示唆



○ 2016/5/12 ~2021/2/13 23:00  
 ○ 2021/2/13 23:00~2021/2/14 24:00  
 ○ 本震

図1 矩形内の三次元地震波速度構造と観測点補正值 (Matsubara et al., 2019)を用いて再決定した震源分布。シンボル内の色は地震の深さを示す。

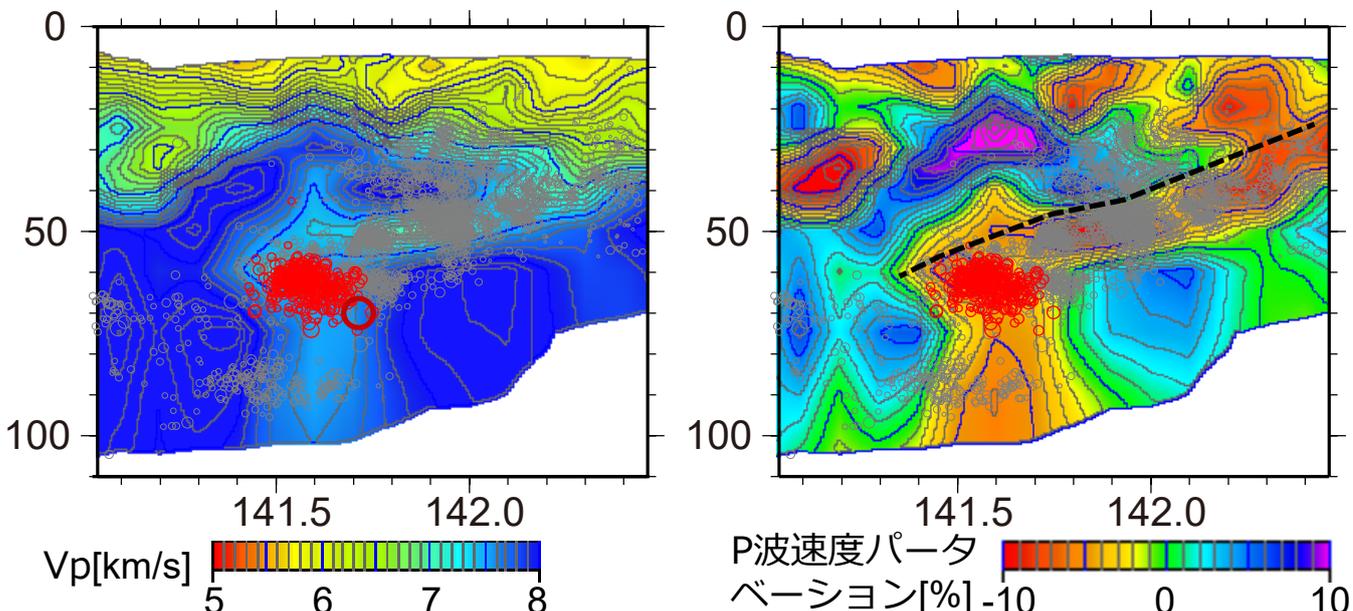


図2 図1の青枠内(中心線から15km以内)で発生した地震の震源分布。背景はMatsubara et al. (2019)のP波速度構造を示す。

謝辞：本解析には、気象庁、東北大学、東京大学、地震予知総合研究振興会のデータも使用させて頂きました。

# 2021年3月20日 宮城県沖の地震

## (1) 概要

2021年3月20日18時09分に宮城県沖の深さ59kmでM6.9の地震が発生し、宮城県で震度5強を観測したほか、東北地方を中心に北海道から近畿地方にかけて震度5弱～1を観測した。また、宮城県北部で長周期地震動階級3を観測したほか、東北地方から中部地方にかけて長周期地震動階級2～1を観測した。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。気象庁はこの地震に対して、最初の地震波の検知から4.6秒後の18時09分58.9秒と6.6秒後の18時10分00.9秒に緊急地震速報（警報）を発表した。

気象庁はこの地震に伴い、同日18時11分に宮城県に津波注意報を発表した。この地震による津波は観測されなかった。

この地震の発生後、震源付近では地震活動が活発になり、3月31日までに震度1以上を観測した地震が29回発生している。

この地震により、負傷者11人、住家一部破損2棟などの被害が生じた（2021年3月29日17時00分現在、総務省消防庁による）。

仙台管区気象台は、震度5強を観測した震度観測点及びその周辺を中心に気象庁機動調査班（JMA-MOT）を派遣し、震度観測点の観測環境調査と周辺の被害調査を実施した。その結果、震度観測点の観測環境が地震によって変化していないこと、及び震度観測点周辺の被害や揺れの状況が気象庁震度階級関連解説表と整合していることを確認した。

被害状況を表1-1に、宮城県沖の地震に対して発表した津波注意報を図1-1に、震度1以上の日別最大震度別地震回数表を表1-2に、震度1以上の日別地震回数グラフを図1-2に示す。

表1-1 2021年3月20日の宮城県沖の地震による被害状況  
（2021年3月29日17時00分現在、総務省消防庁による）

都道府県名	人的被害			住家被害
	負傷者		合計 人	一部破損 棟
	重傷 人	軽傷 人		
岩手県		1	1	1
宮城県	1	8	9	1
福島県		1	1	
合計	1	10	11	2



図1-1 3月20日の宮城県沖の地震に対して発表した津波注意報

表1-2 震度1以上の日別最大震度別地震回数表  
（2021年3月20日18時～3月31日24時）

期間	最大震度別回数										震度1以上を 観測した回数	
	1	2	3	4	5弱	5強	6弱	6強	7	回数	累計	
3/20 18時-24時	13	3	0	0	0	1	0	0	0	17	17	
3/21 00時-24時	7	1	0	0	0	0	0	0	0	8	25	
3/22 00時-24時	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	27	
3/23 00時-24時	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	
3/24 00時-24時	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	28	
3/25 00時-24時	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	
3/26 00時-24時	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	29	
3/27 00時-24時	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	
3/28 00時-24時	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	
3/29 00時-24時	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	
3/30 00時-24時	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	
3/31 00時-24時	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	30	
総数	23	6	0	0	0	1	0	0	0		30	

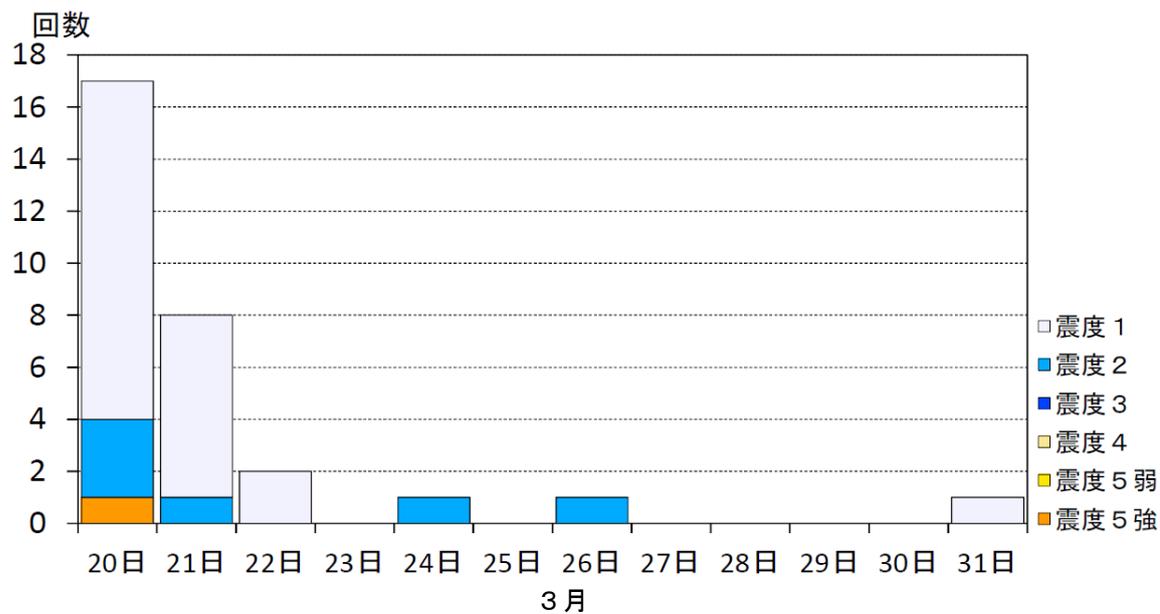


図1-2 震度1以上の日別地震回数グラフ  
(2021年3月20日18時～3月31日24時)

(2) 地震活動

ア. 地震の発生場所の詳細及び余震活動

2021年3月20日18時09分に宮城県沖の深さ59kmでM6.9の地震（最大震度5強）が発生した。この地震は、発震機構（CMT解）が西北西－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。その後、この地震の震源付近（領域b）では地震活動が活発になり、3月31日までにM4.0以上の地震が6回発生している。

1997年10月以降の活動を見ると、今回の地震の震源付近（領域b）では「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以上の地震が発生していなかったが、「東北地方太平洋沖地震」の発生以降は地震活動が活発になり、M5.0以上の地震が時々発生している。

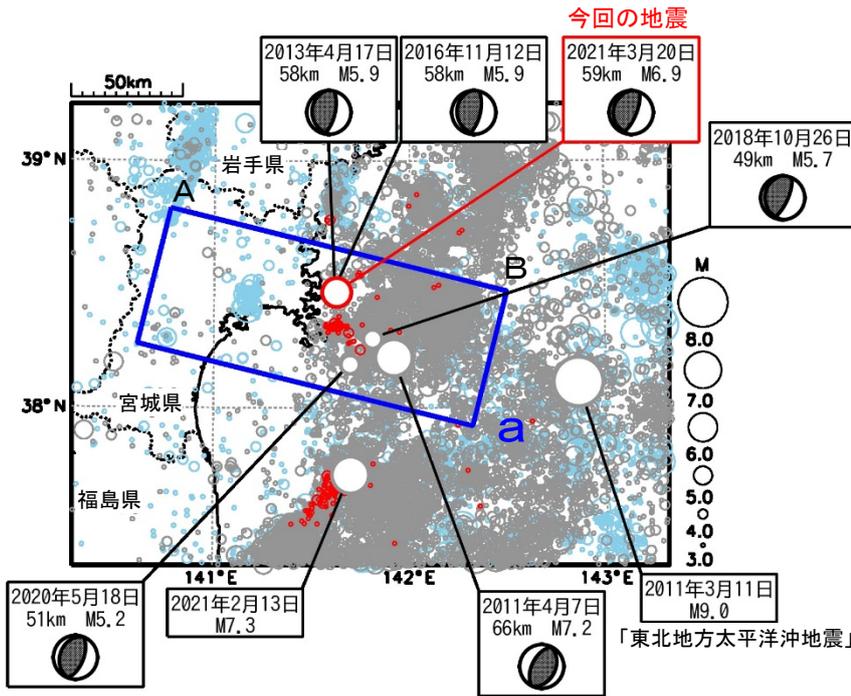
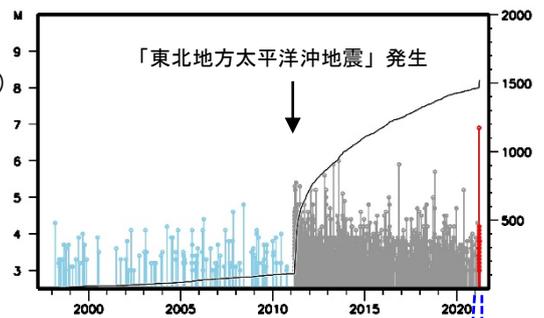


図 2 - 1 震央分布図

(1997年10月1日～2021年3月31日、深さ0～150km、M≥3.0)

2011年3月10日以前の地震を薄い青、2011年3月11日以降の地震を灰色、  
2021年3月の地震を赤色で表示

図中の発震機構はCMT解



(2021年3月1日～2021年3月31日)

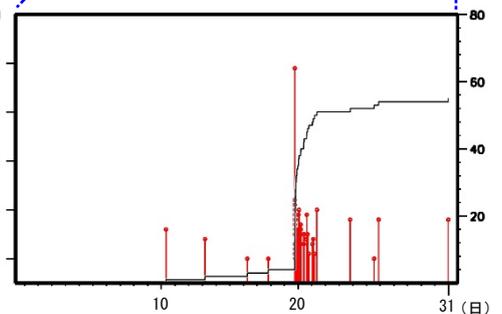


図 2 - 3 領域b内のM-T図  
及び回数積算図

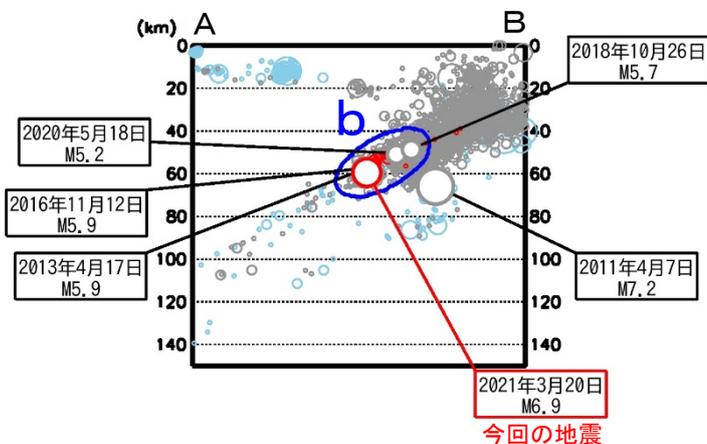


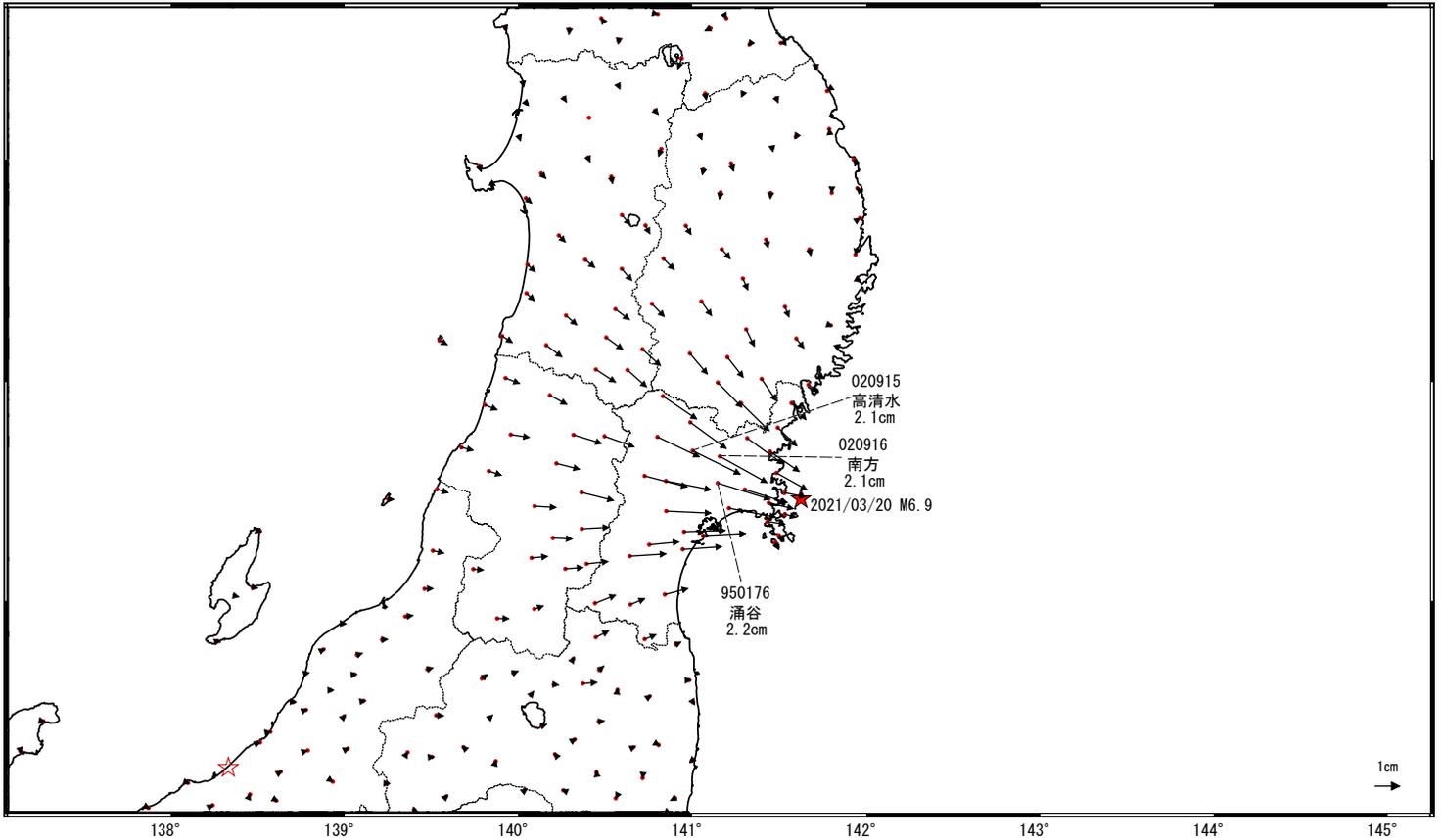
図 2 - 2 領域a内の断面図 (A-B投影)

# 宮城県沖の地震(3月20日 M6.9)前後の観測データ

この地震に伴い地殻変動が観測された。

地殻変動(水平)

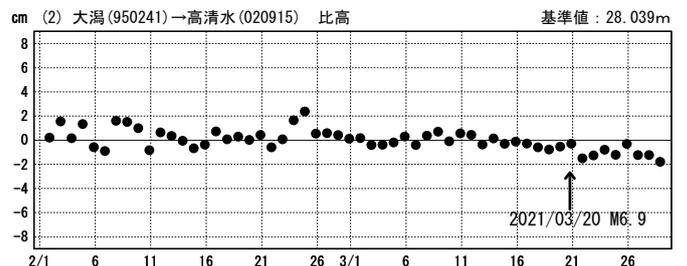
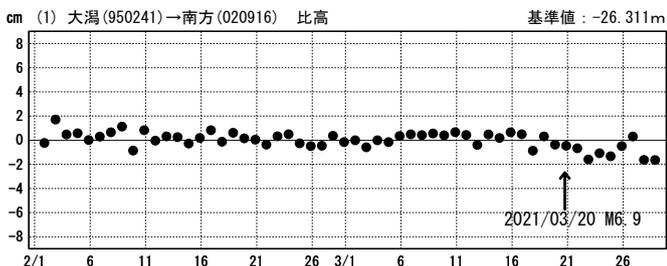
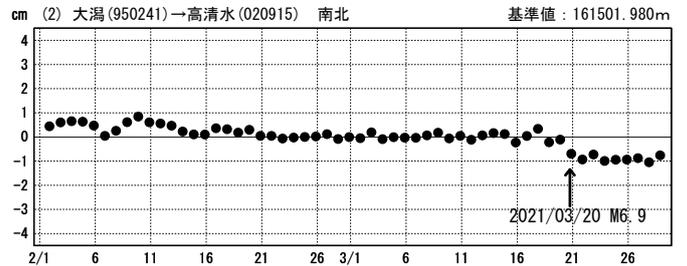
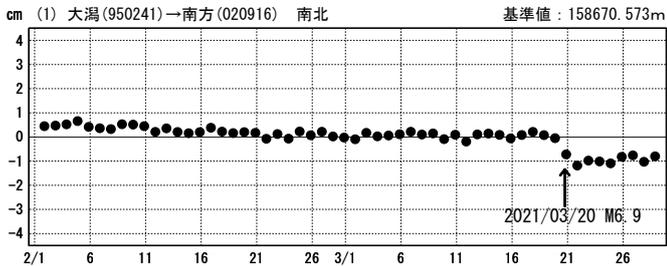
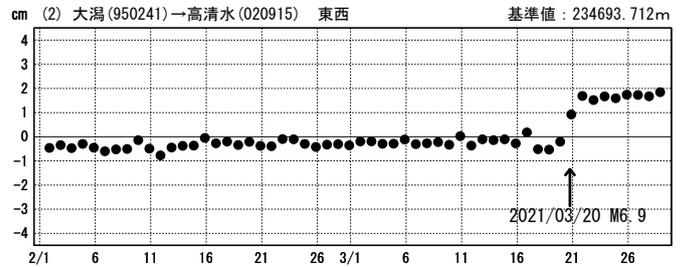
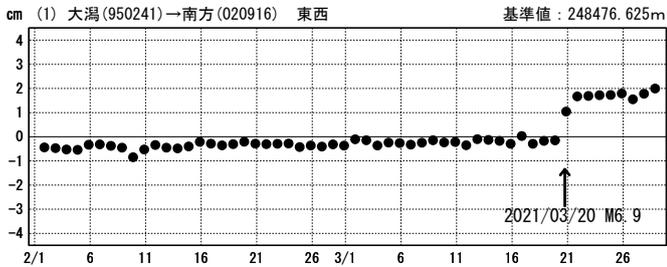
基準期間: 2021/03/13~2021/03/19 [F5: 最終解]  
比較期間: 2021/03/21~2021/03/27 [F5: 最終解]



☆ 固定局: 大湯 (950241)    ★ 震央

期間: 2021/02/01~2021/03/29 JST

期間: 2021/02/01~2021/03/29 JST



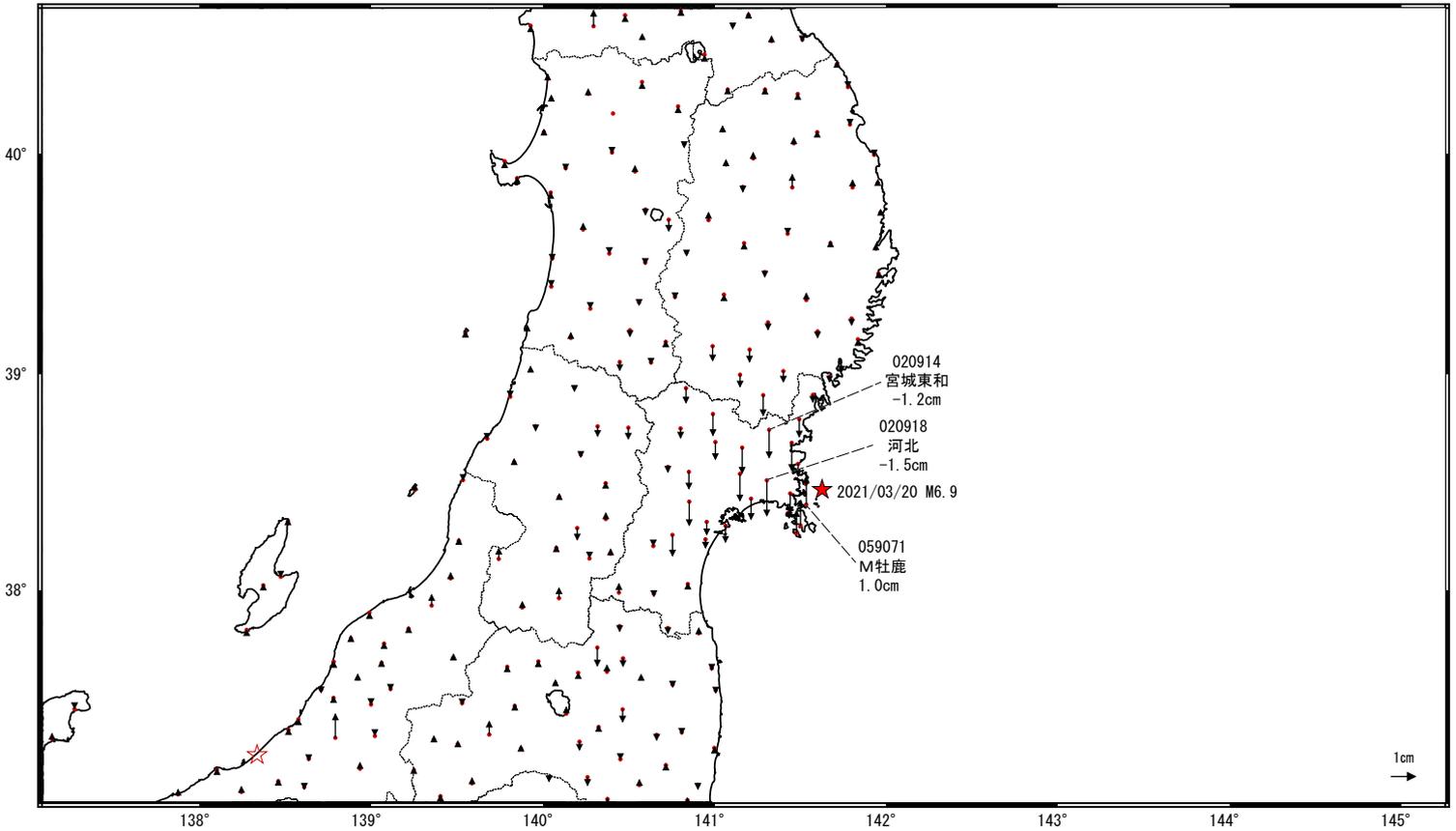
●—[F5:最終解]

# 宮城県沖の地震(3月20日 M6.9) 前後の観測データ

この地震に伴い、宮城県北部を中心とした小さな沈降と牡鹿半島で小さな隆起が観測された。

## 地殻変動(上下)

基準期間: 2021/03/13~2021/03/19 [F5:最終解]  
比較期間: 2021/03/21~2021/03/27 [F5:最終解]

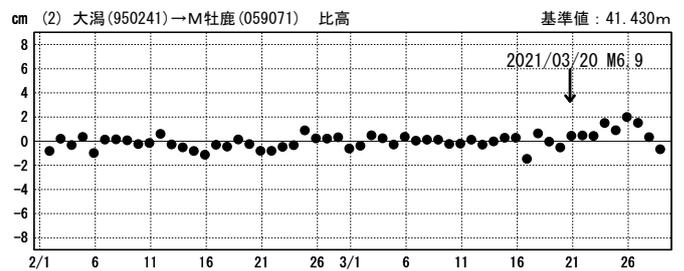
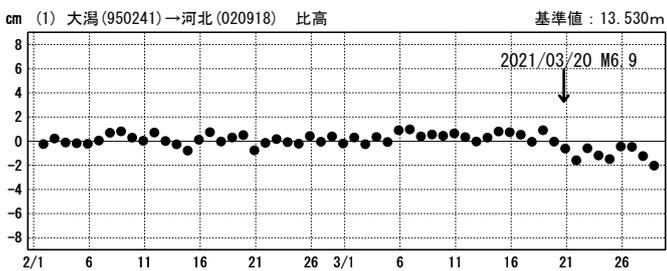
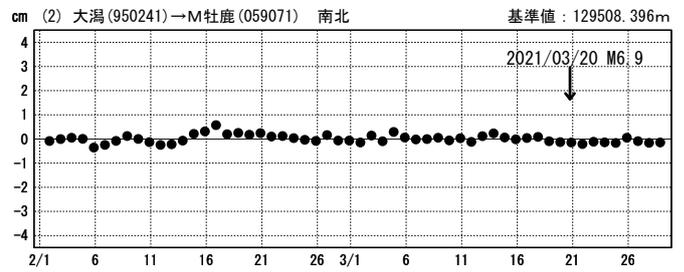
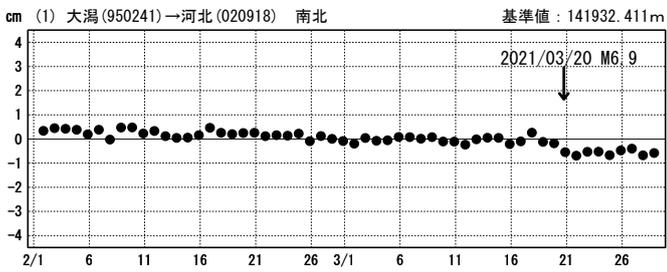
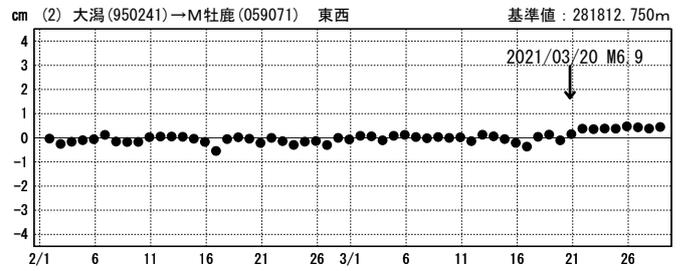
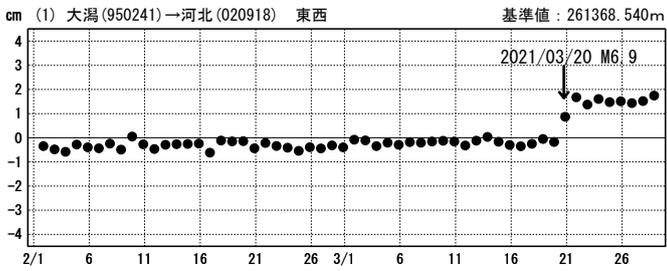


☆ 固定局:大湊(950241)    ★ 震央

## 成分変化グラフ

期間: 2021/02/01~2021/03/29 JST

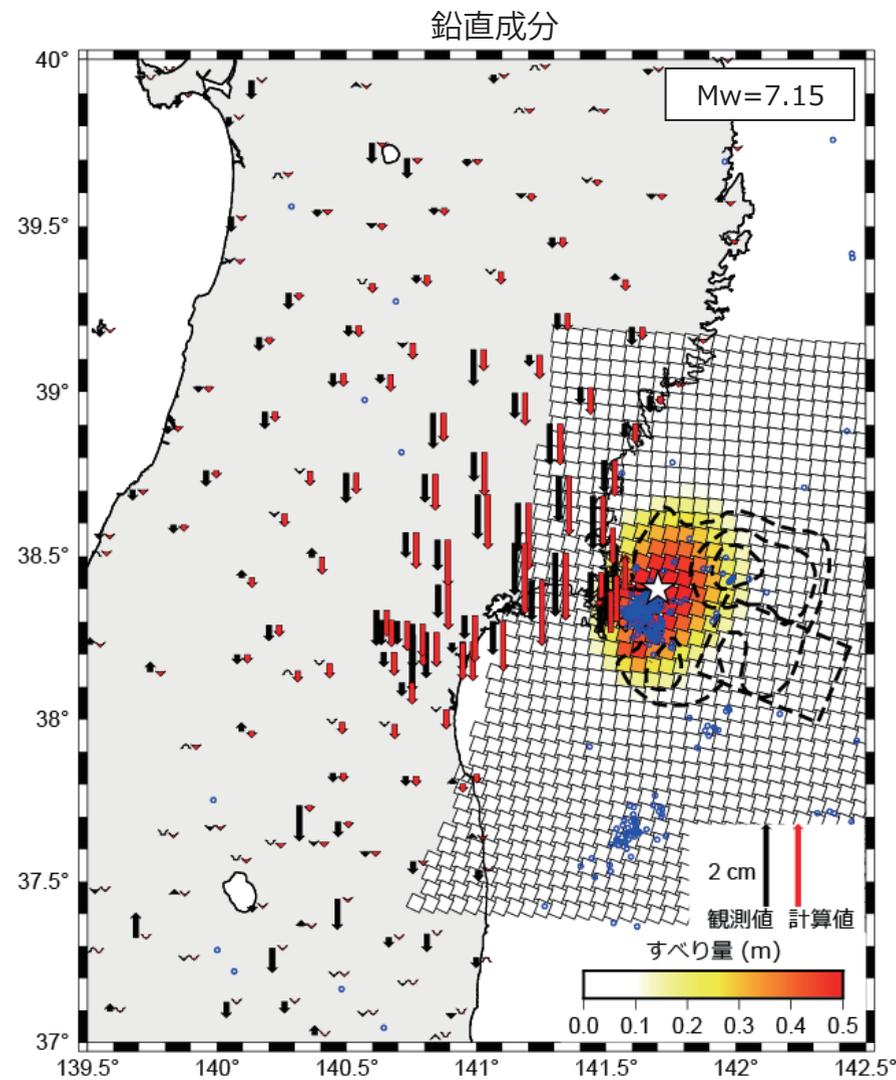
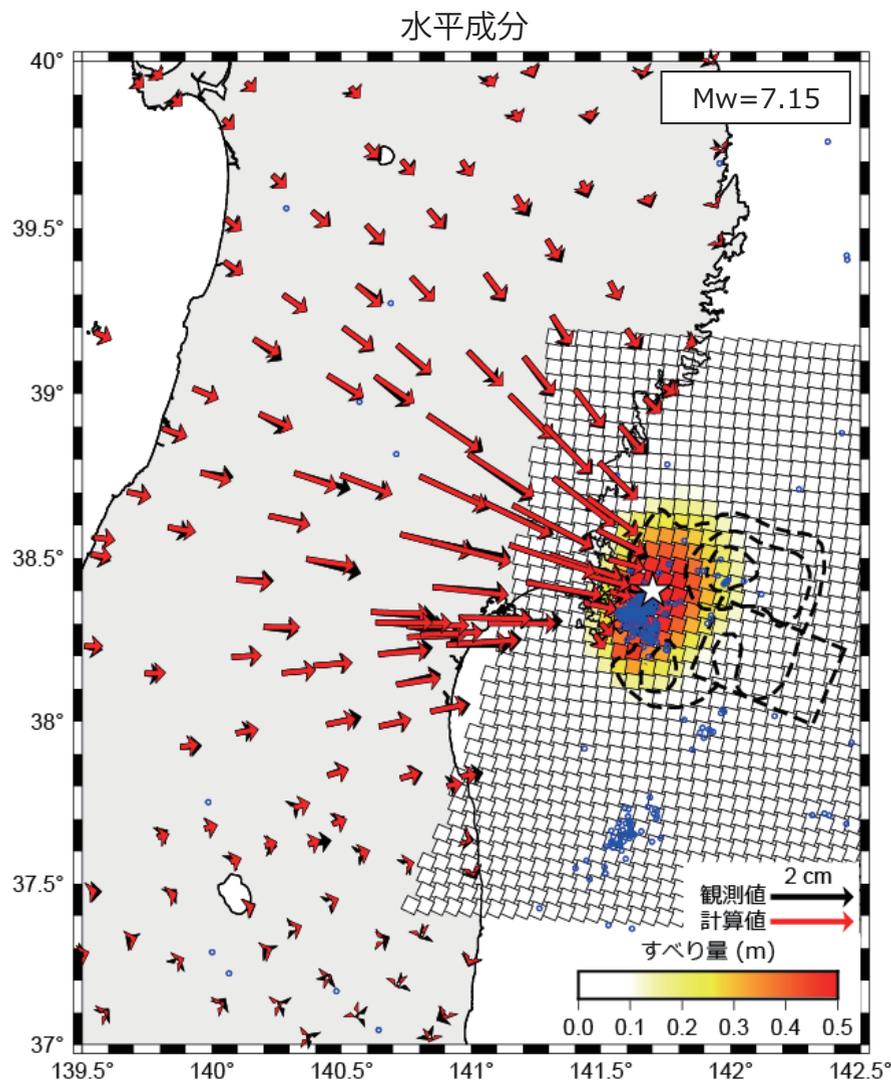
期間: 2021/02/01~2021/03/29 JST



●— [F5:最終解]

# 2021年3月20日宮城県沖の地震のすべり分布

基準期間:2021/03/06 09:00:00~2021/03/20 08:59:59[F5:最終解]JST  
 比較期間:2021/03/21 09:00:00~2021/03/28 08:59:59[F5:最終解]JST  
 固定局:大潟(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)。

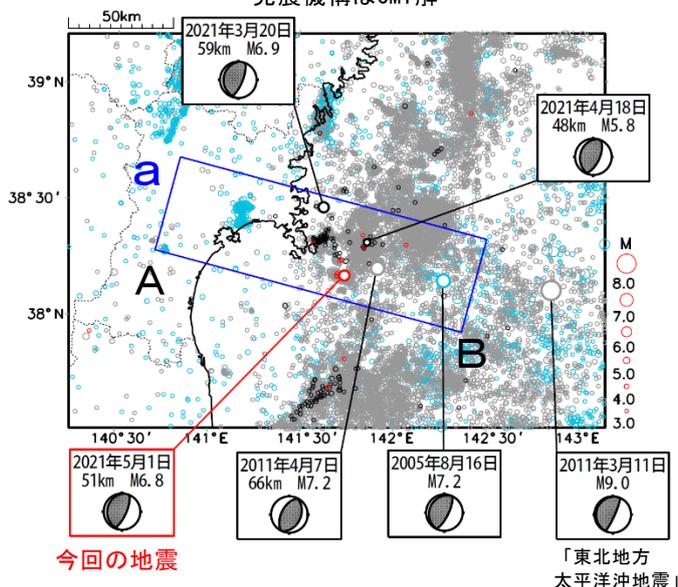
- ・ プレート面を5kmx5kmの小断層に分割してすべり分布を推定
- ・ プレート面はKita et al. (2010, EPSL)およびNakajima and Hasegawa (2006, GRL)による
- ・ ラブラシアン平滑化を採用し、ハイパーパラメータはABICにより決定
- ・  $M_w$ の計算においては、剛性率を60 GPaと仮定
- ・ ☆印は震央、青丸は本震発生 (3/20 18:09) から3/21 11時までに発生した震源を表す (気象庁一元化震源を使用)

# 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10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**水色**、  
2011年3月11日～2021年3月19日の地震を**灰色**  
2021年3月20日～2021年4月30日の地震を**黒色**  
2021年5月に発生した地震を**赤色**で表示  
発震機構はCMT解

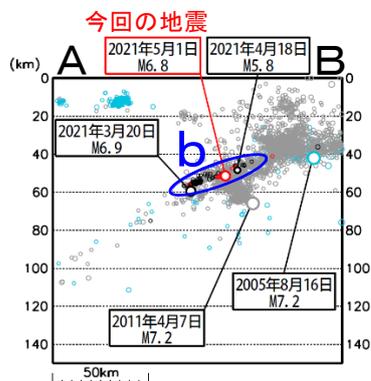


2021年5月1日 10時27分に宮城県沖の深さ51kmでM6.8の地震 (最大震度5強) が発生した。この地震は発震機構 (CMT解) が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した。この地震により、負傷者4人などの被害が生じた (2021年5月10日17時00分現在、総務省消防庁による)。

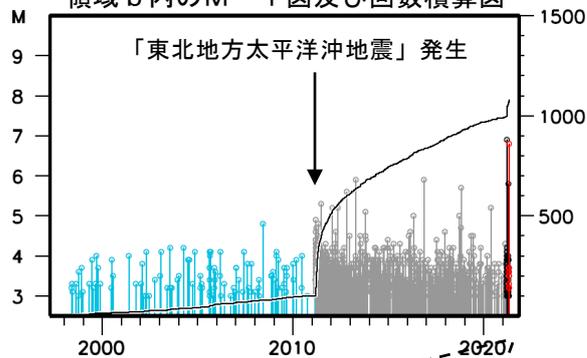
1997年10月以降の活動をみると、今回の地震の震源周辺 (領域b) では、「平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震」 (以下、「東北地方太平洋沖地震」) の発生以降、地震活動が活発になり、M5.0以上の地震が時々発生している。2021年3月20日には今回の震央から北西に約40km離れた場所でM6.9の地震 (最大震度5強) が発生し、さらに地震回数が増加している。

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、M7.0以上の地震が時々発生している。このうち、1978年6月12日に発生した「1978年宮城県沖地震」 (M7.4、最大震度5) では、死者28人、負傷者1,325人、住家全壊1,183棟、半壊5,574棟などの被害が生じた (被害は「日本被害地震総覧」による)。

## 領域a内の断面図 (A-B投影)



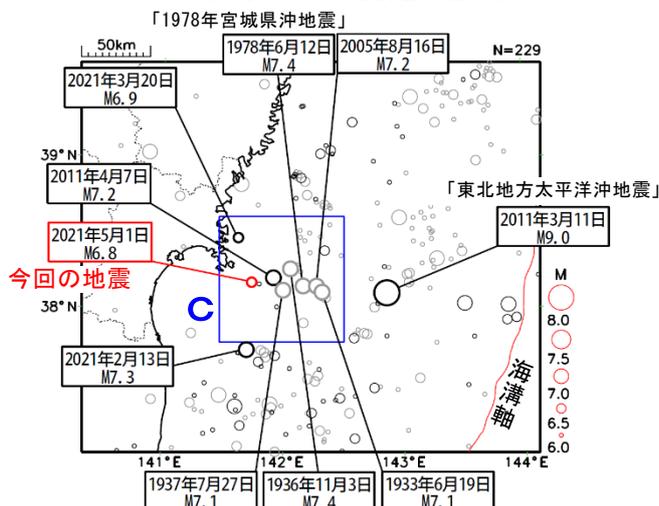
## 領域b内のM-T図及び回数積算図



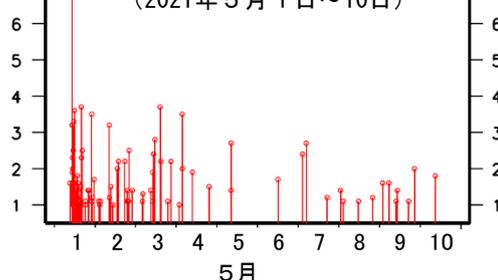
## 震央分布図

(1919年1月1日～2021年5月10日、  
深さ0～150km、 $M \geq 6.0$ )

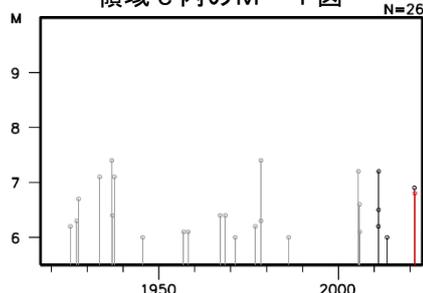
2011年3月11日以降に発生した地震を濃く表示  
2021年5月に発生した地震を**赤色**で表示



## 領域b内のM1.0以上のM-T図 (2021年5月1日～10日)



## 領域c内のM-T図



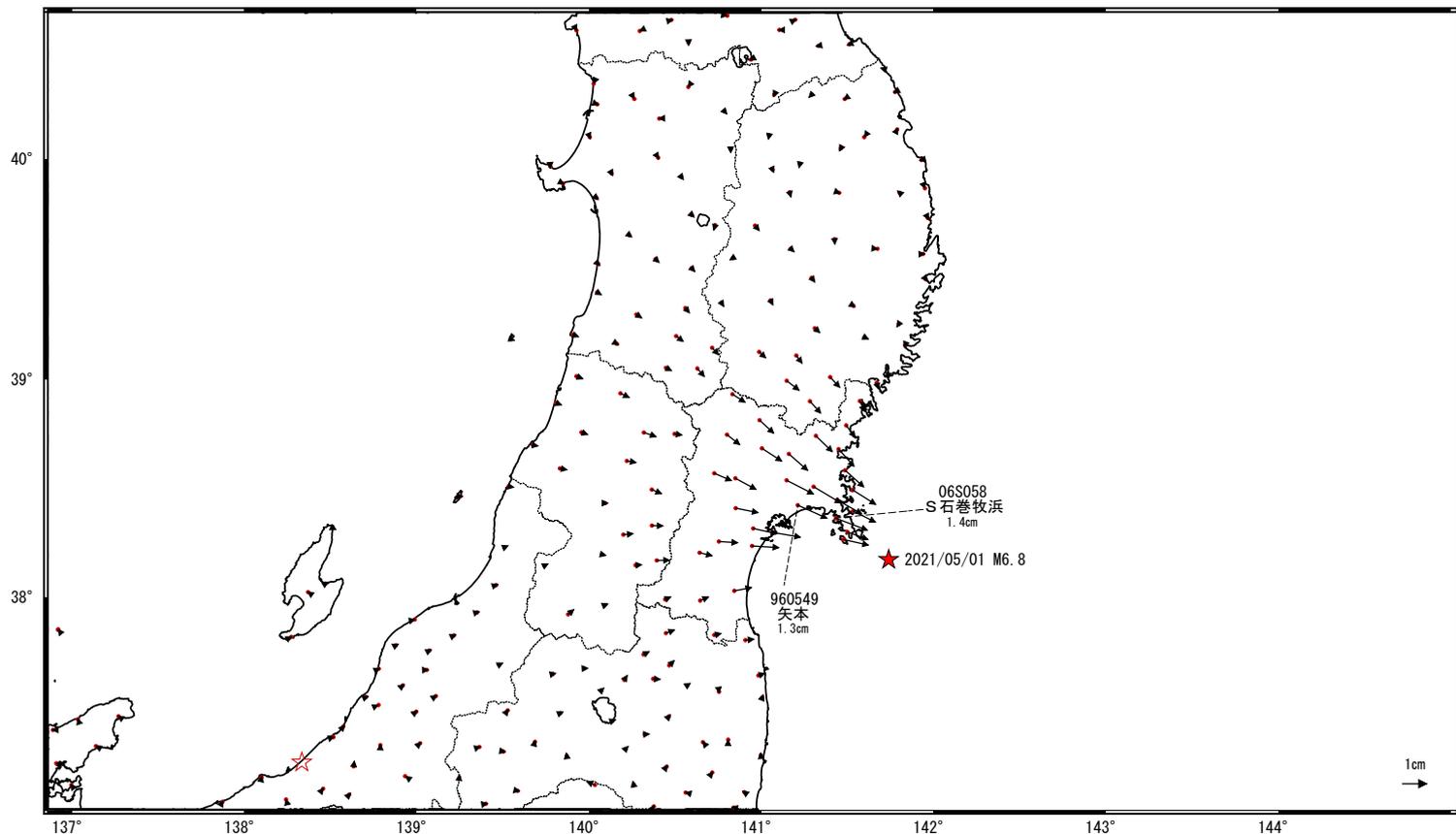
気象庁作成

# 宮城県沖の地震(5月1日 M6.8)前後の観測データ(暫定)

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)

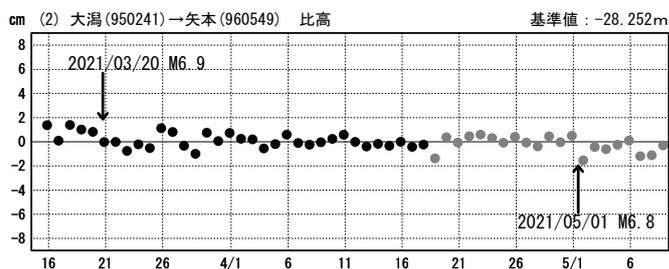
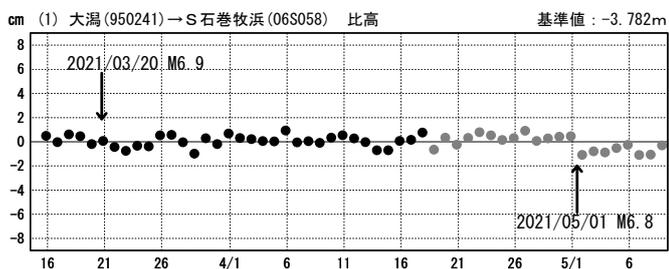
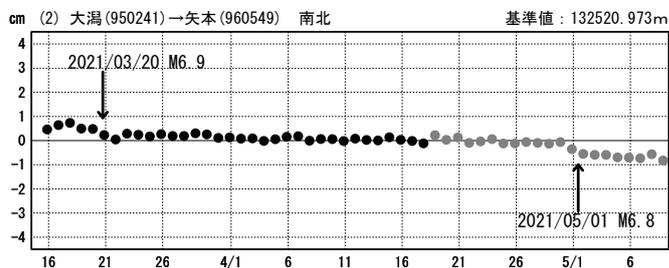
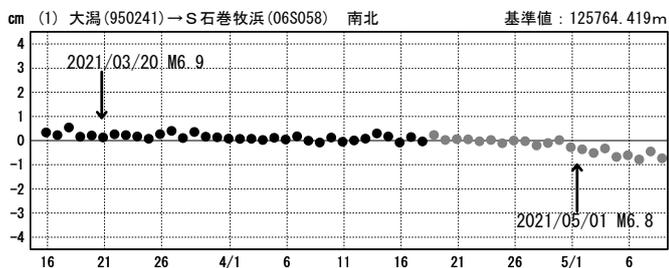
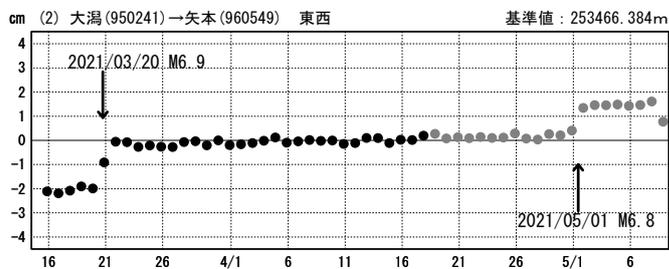
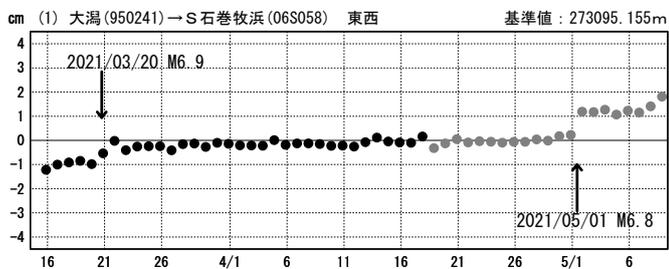
基準期間: 2021/04/24~2021/04/30 [R5: 速報解]  
比較期間: 2021/05/02~2021/05/08 [R5: 速報解]



☆ 固定局: 大湯(950241)    ★ 震央

期間: 2021/03/15~2021/05/08 JST

期間: 2021/03/15~2021/05/08 JST



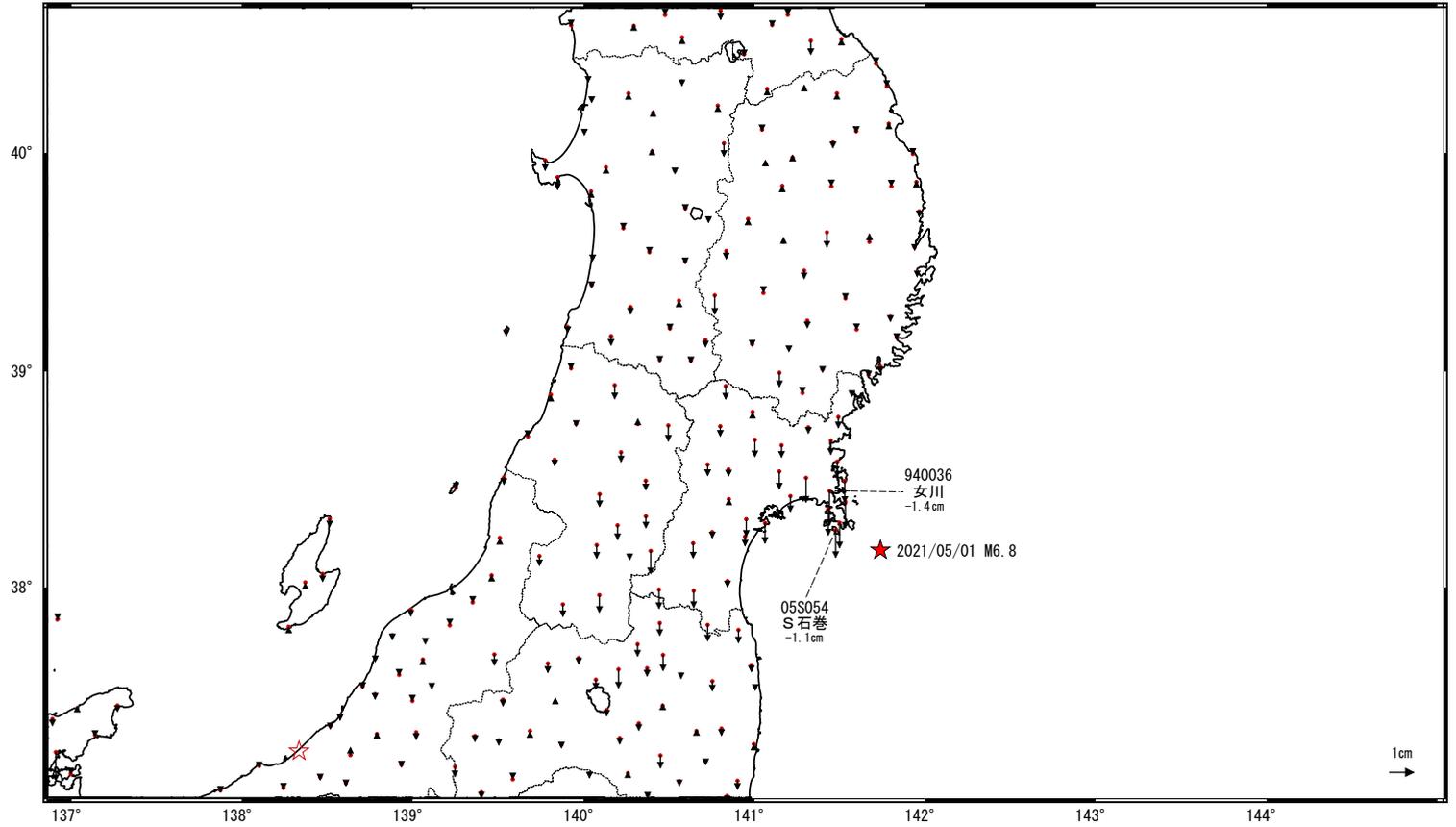
●---[F5:最終解]    ●---[R5:速報解]

# 宮城県沖の地震(5月1日 M6.8)前後の観測データ(暫定)

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)

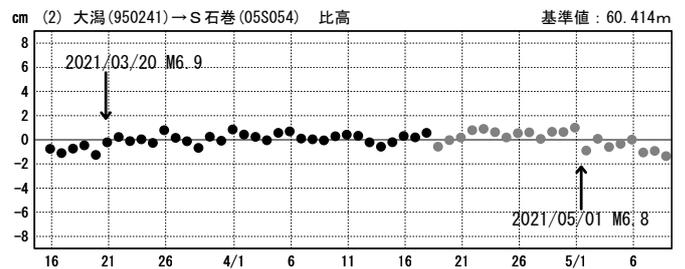
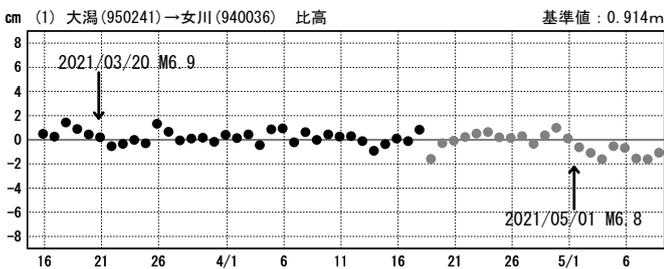
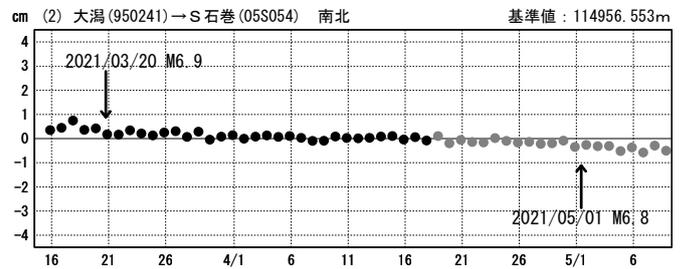
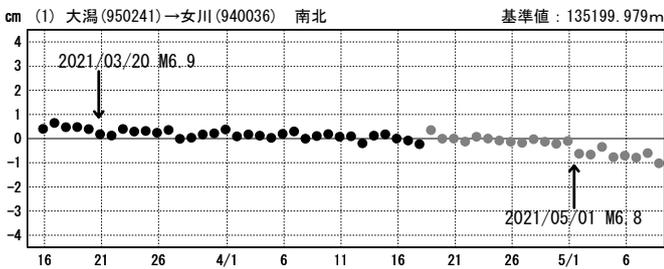
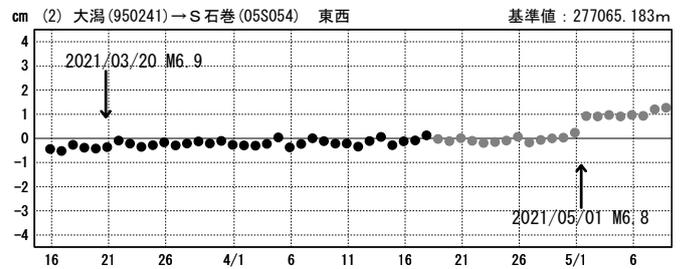
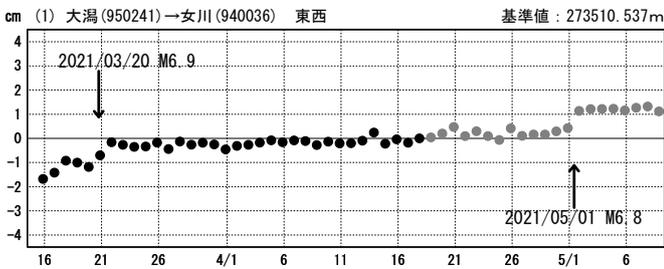
基準期間: 2021/04/24~2021/04/30 [R5: 速報解]  
比較期間: 2021/05/02~2021/05/08 [R5: 速報解]



☆ 固定局: 大湯(950241)      ★ 震央

期間: 2021/03/15~2021/05/08 JST

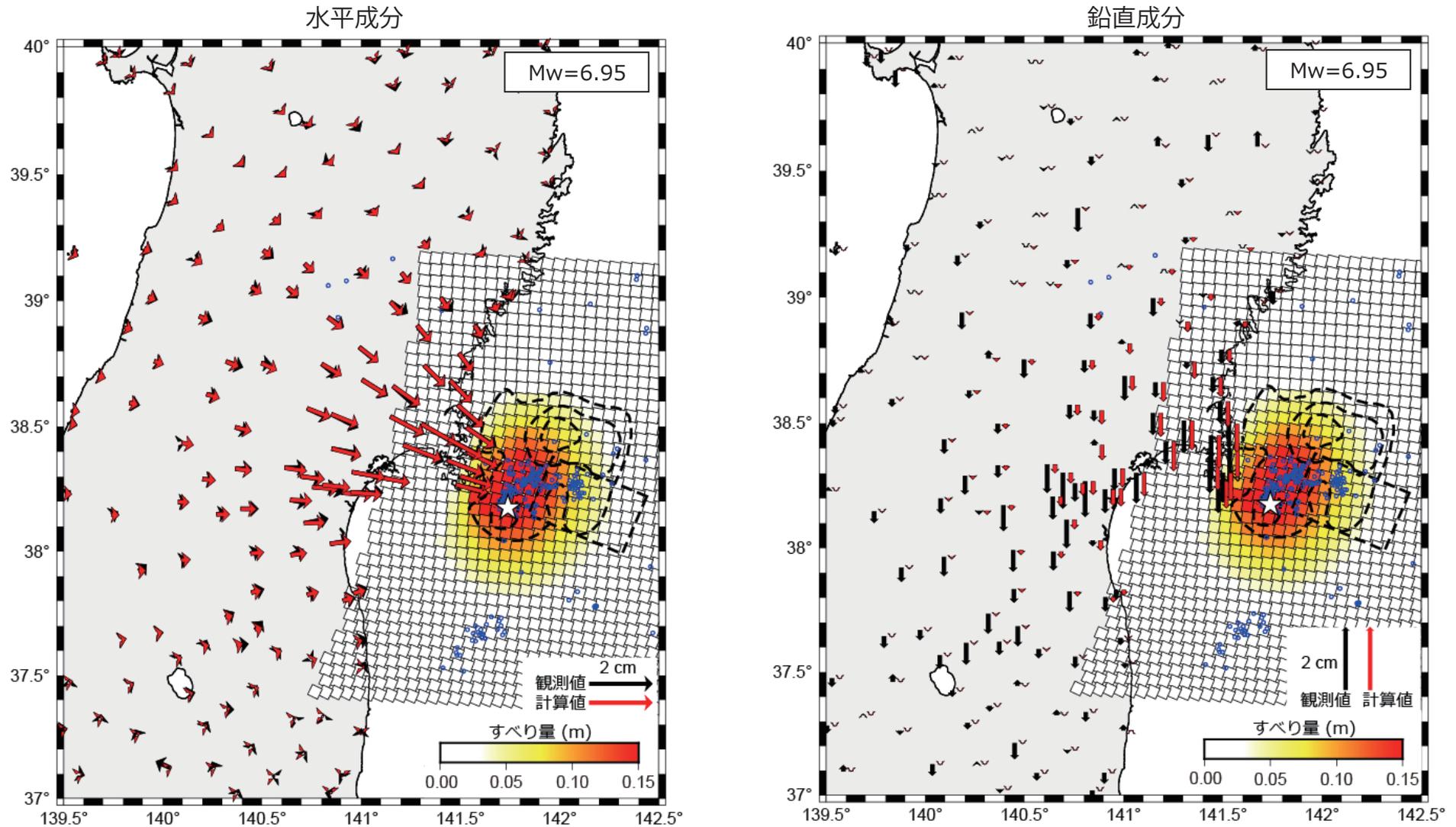
期間: 2021/03/15~2021/05/08 JST



●--- [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（暫定）

基準期間:2021/04/21 09:00:00~2021/05/01 08:59:59[R5:速報解]JST  
 比較期間:2021/05/02 09:00:00~2021/05/08 08:59:59[R5:速報解]JST  
 固定局:大湊(950241)

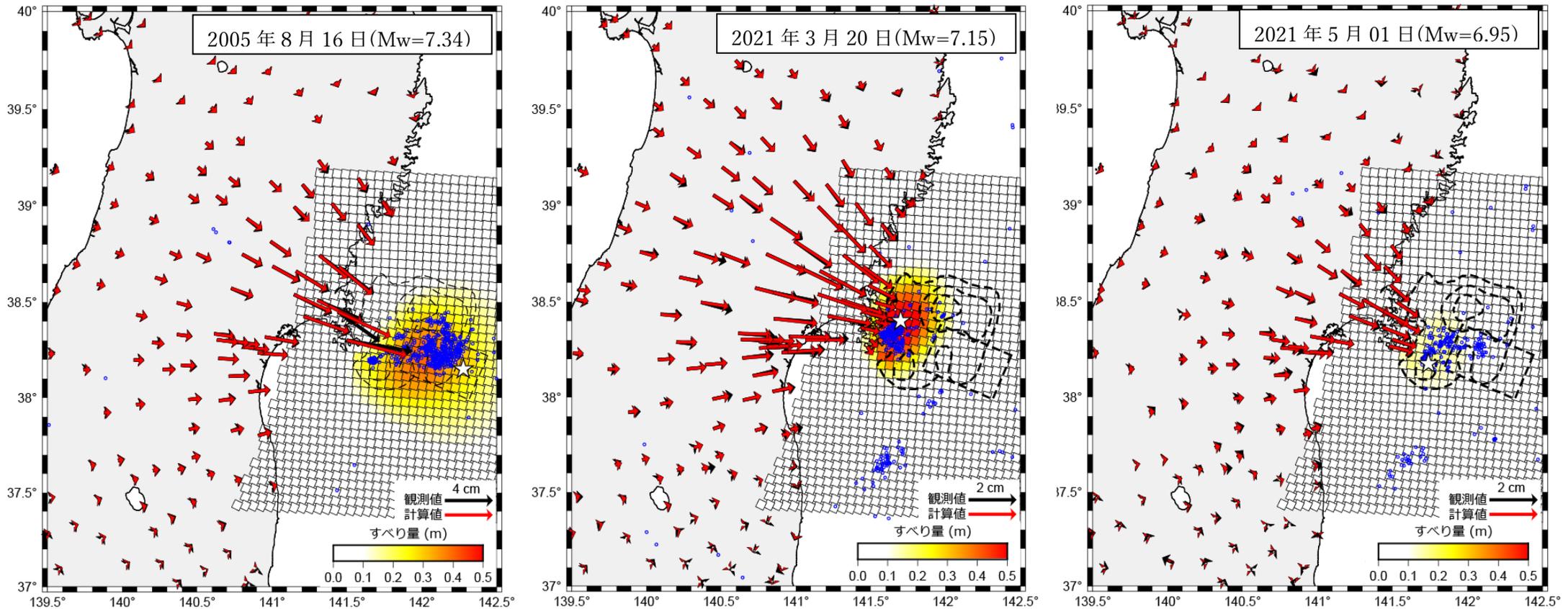


等値線は1978年宮城県沖地震のすべり分布 (Yamanaka et al. 2004)。矩形破線は2005年8月16日宮城県沖の地震の震源断層モデル (国土地理院)。

- ・ 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
- ・ ラブ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
- ・ ☆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)

# 2021年5月1日宮城県沖の地震のすべり分布(暫定)

(参考) 2005年8月16日 及び 2021年3月20日の宮城県沖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)。

- ・ 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<sub>w</sub>の計算においては、剛性率を60 GPaと仮定
- ・ ☆印は震央、青丸は余震の震源を表す(気象庁一元化震源を使用)

# 三次元地震波速度構造を用いて決定した2021年3月20日 と5月1日宮城県沖の地震周辺の震源分布

- S-netも含めて解析した三次元地震波速度構造や観測点補正值(Matsubara et al., 2019)を用いて2021年3月20日,5月1日の地震を含む約5年間の地震の震源を再決定
- 3月20日~の地震活動域はプレート境界の地震であることを示唆

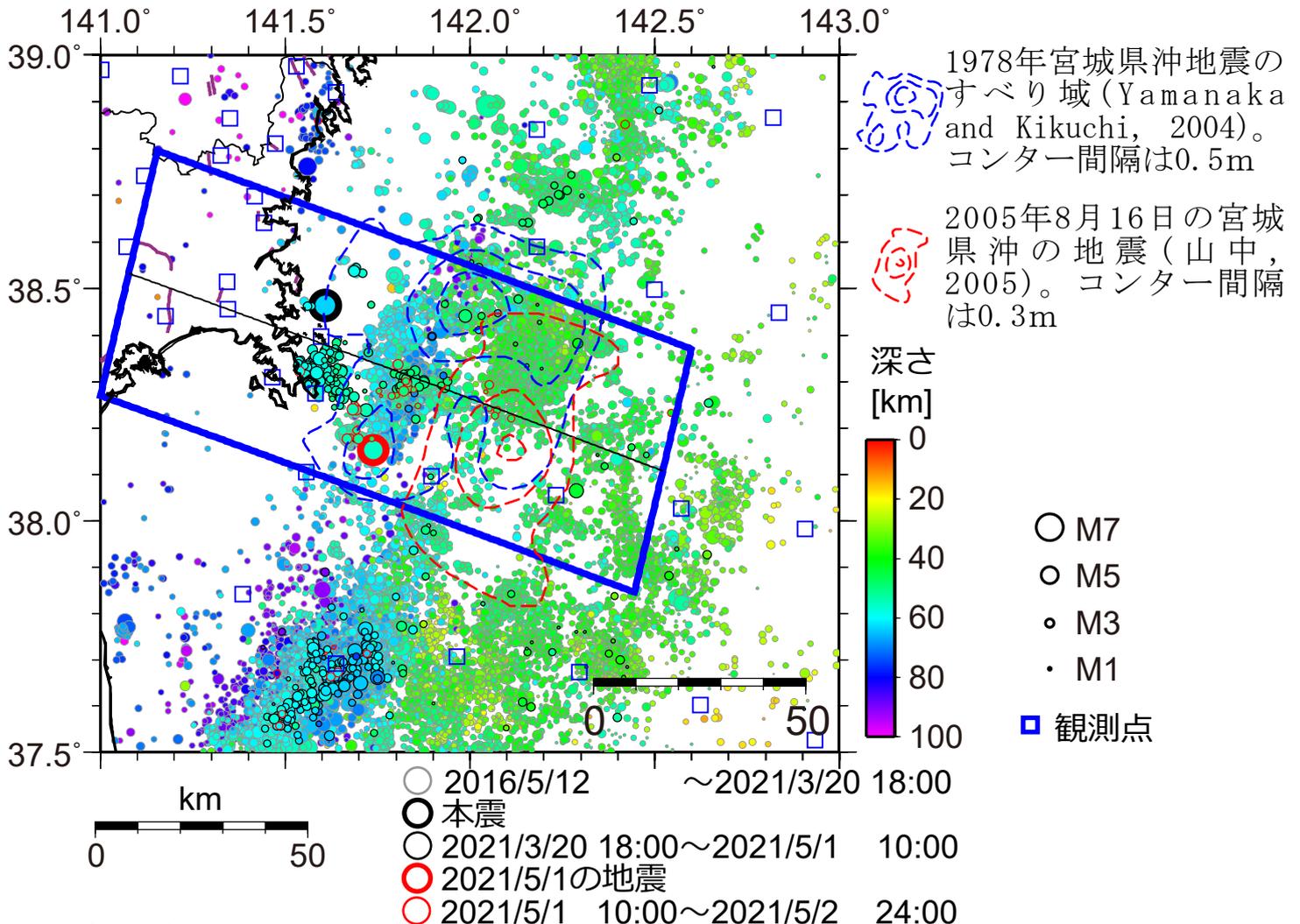


図1 矩形内の三次元地震波速度構造と観測点補正值 (Matsubara et al., 2019)を用いて再決定した震源分布。シンボル内の色は地震の深さを示す。

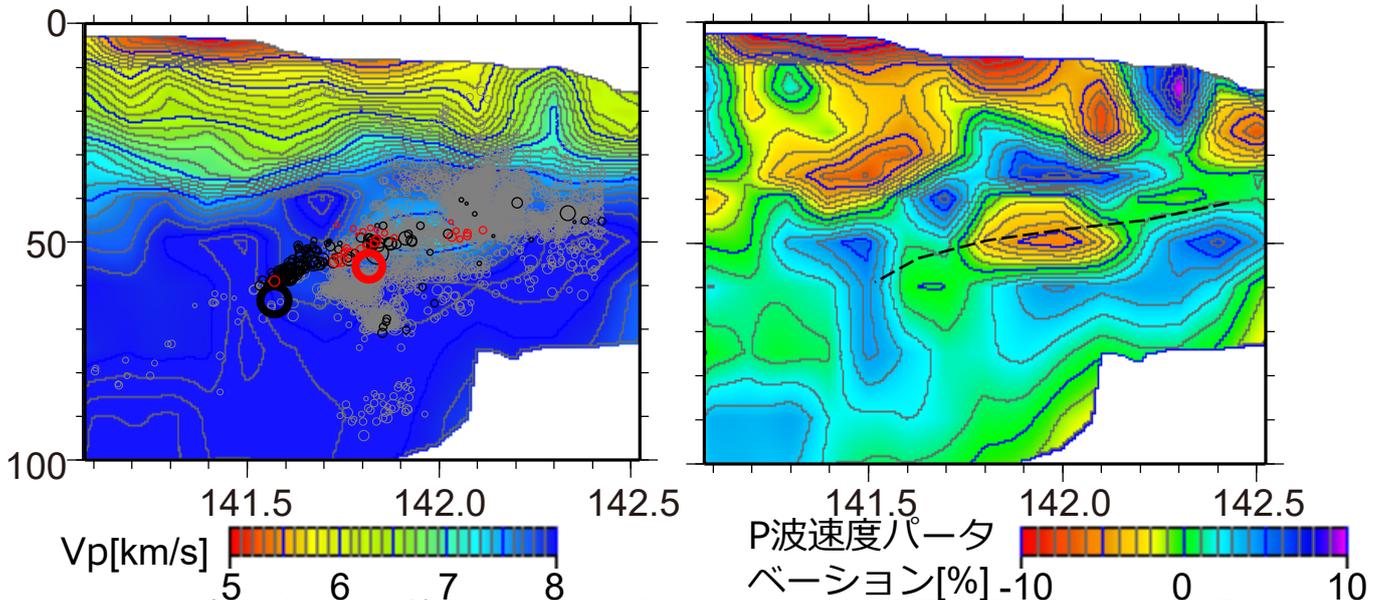


図2 図1の青枠内(中心線から15km以内)で発生した地震の震源分布。背景はMatsubara et al. (2019)のP波速度構造を示す。黒破線は速度構造・震源分布・メカニズム解から推定したプレート境界を示す。

謝辞：本解析には、気象庁、東北大学、東京大学、地震予知総合研究振興会のデータも使用させて頂きました。

2021年3月20日18時9分頃に宮城県沖で発生した地震（Mj 6.9; 気象庁）について、強震波形記録を用いた震源インバージョン解析を行った。

- 記録：K-NET・KiK-netの16観測点における速度波形三成分のS波部分（0.05–0.5 Hz）
- 解析手法：マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン  
（小断層4 km × 4 km、1.6秒幅のタイムウィンドウを0.8秒ずらして5個並べる）
- 断層面設定：走向192°・傾斜17°（F-netによる）、大きさ48 km × 44 km、破壊開始点は気象庁震源位置  
\* ここで設定した断層面は解析の都合上仮定したものであり、必ずしも実際の断層面を反映しているわけではないことに留意
- 推定結果： $M_0=4.5 \times 10^{19}$  Nm ( $M_w$  7.0)、最大すべり量1.1m、Vftw 3.6 km/s  
すべりの大きい領域は主に破壊開始点付近と破壊開始点の南に位置する。  
各領域における破壊は破壊開始から0–7.5秒後と5–10秒後に生じていた。

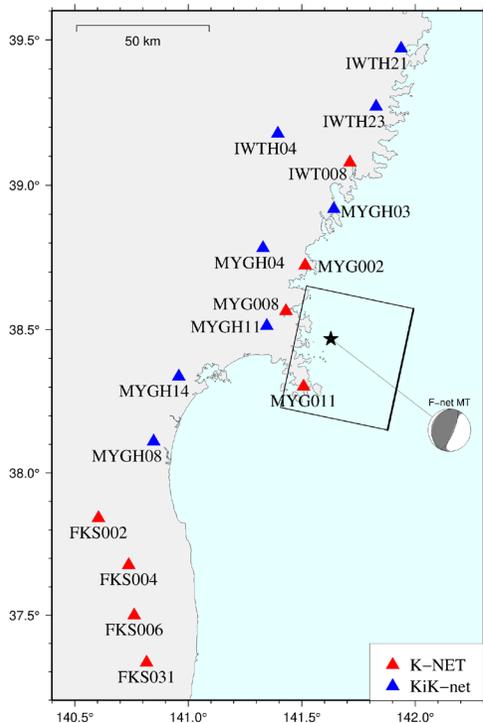


図1：観測点の分布と断層面の地表投影。星印は破壊開始点を示す。

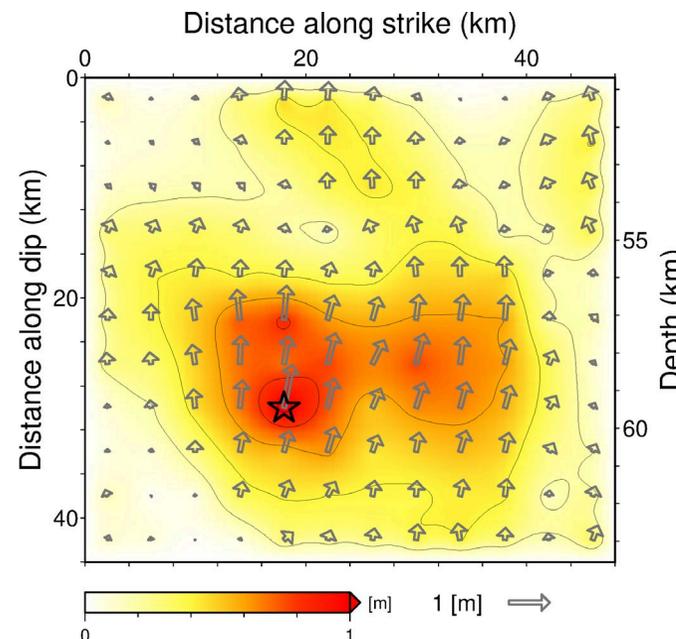


図2：断層面上の最終すべり分布図。ベクトルは上盤のすべり方向とすべり量を、星印は破壊開始点を示す。

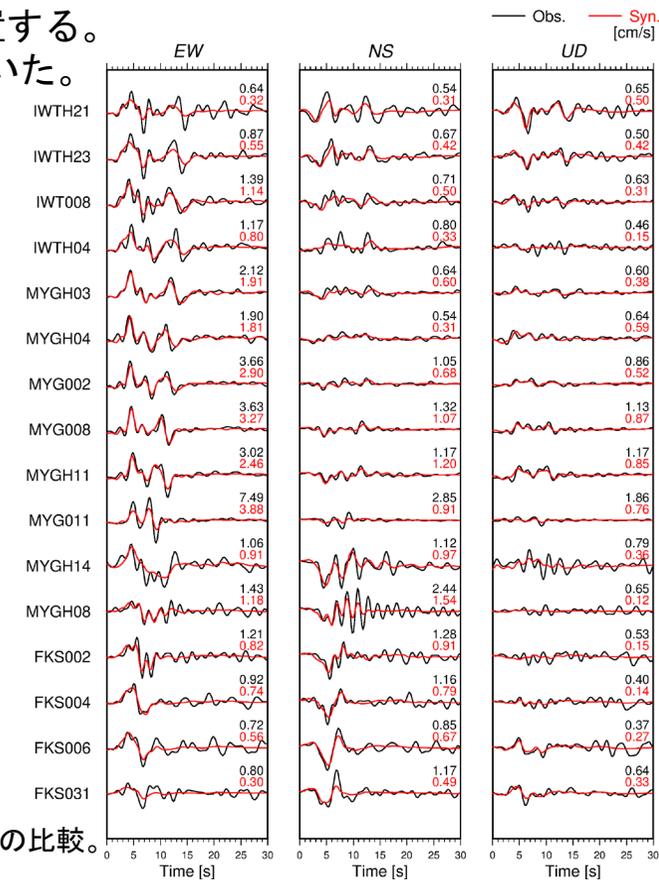


図3：観測波形（黒線）と理論波形（赤線）の比較。波形の右上にそれぞれの最大値を示す。

2021年5月1日10時27分頃に宮城県沖で発生した地震（Mj 6.8; 気象庁）について、強震波形記録を用いた震源イメージング解析を行った。

- 記録：K-NET・KiK-netの16観測点における速度波形三成分のS波部分（0.05–0.5 Hz）
- 解析手法：マルチタイムウィンドウ線形波形イメージング  
（小断層4 km × 4 km、1.6秒幅のタイムウィンドウを0.8秒ずらして3個並べる）
- 断層面設定：走向185°・傾斜24°（F-net）、大きさ32 km × 20 km、破壊開始点は気象庁震源位置（深さ51.42km）  
\* ここで設定した断層面は解析の都合上仮定したものであり、必ずしも実際の断層面と一致するわけではないことに留意
- 推定結果： $M_0=1.1 \times 10^{19}$  Nm ( $M_w$  6.6)、最大すべり量1.6m  
破壊開始点付近において、大きなすべりが推定された。

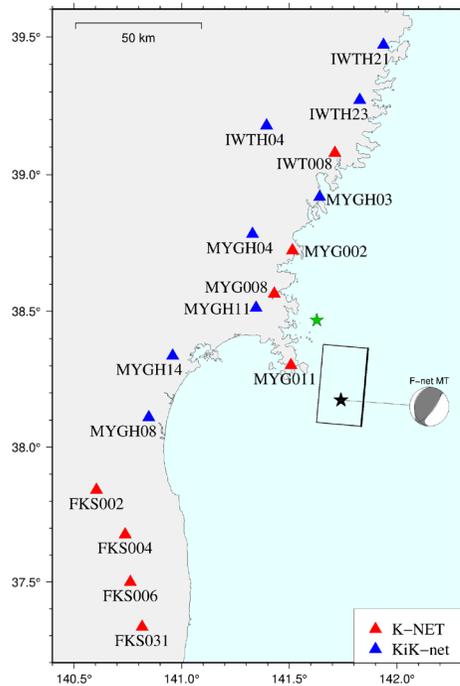


図1：観測点の分布と断層面の地表投影。黒星は2021年5月1日宮城県沖の地震における破壊開始点を、緑星は2021年3月20日宮城県沖の地震における破壊開始点を示す。

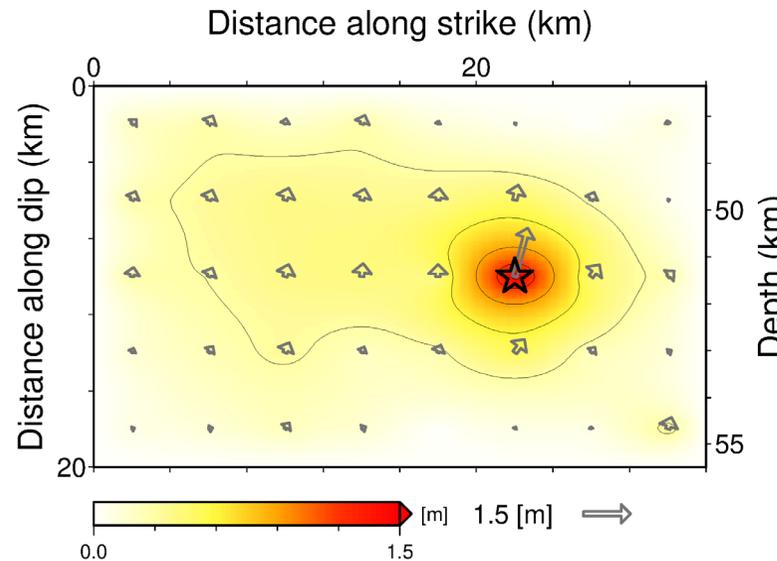


図2：断層面上の最終すべり分布図。ベクトルは上盤のすべり方向とすべり量を、星印は破壊開始点を示す。

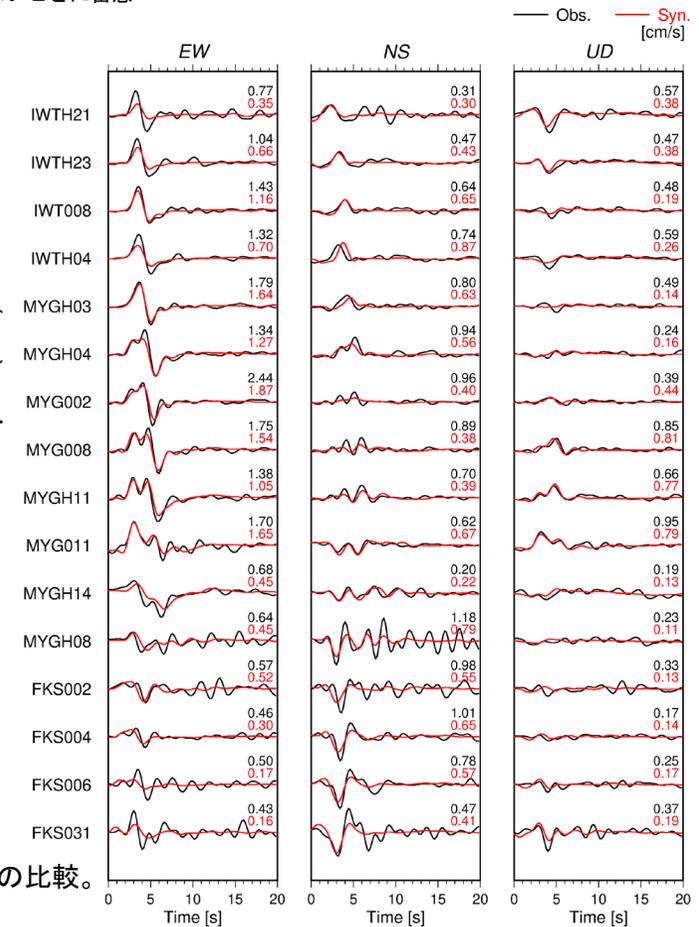
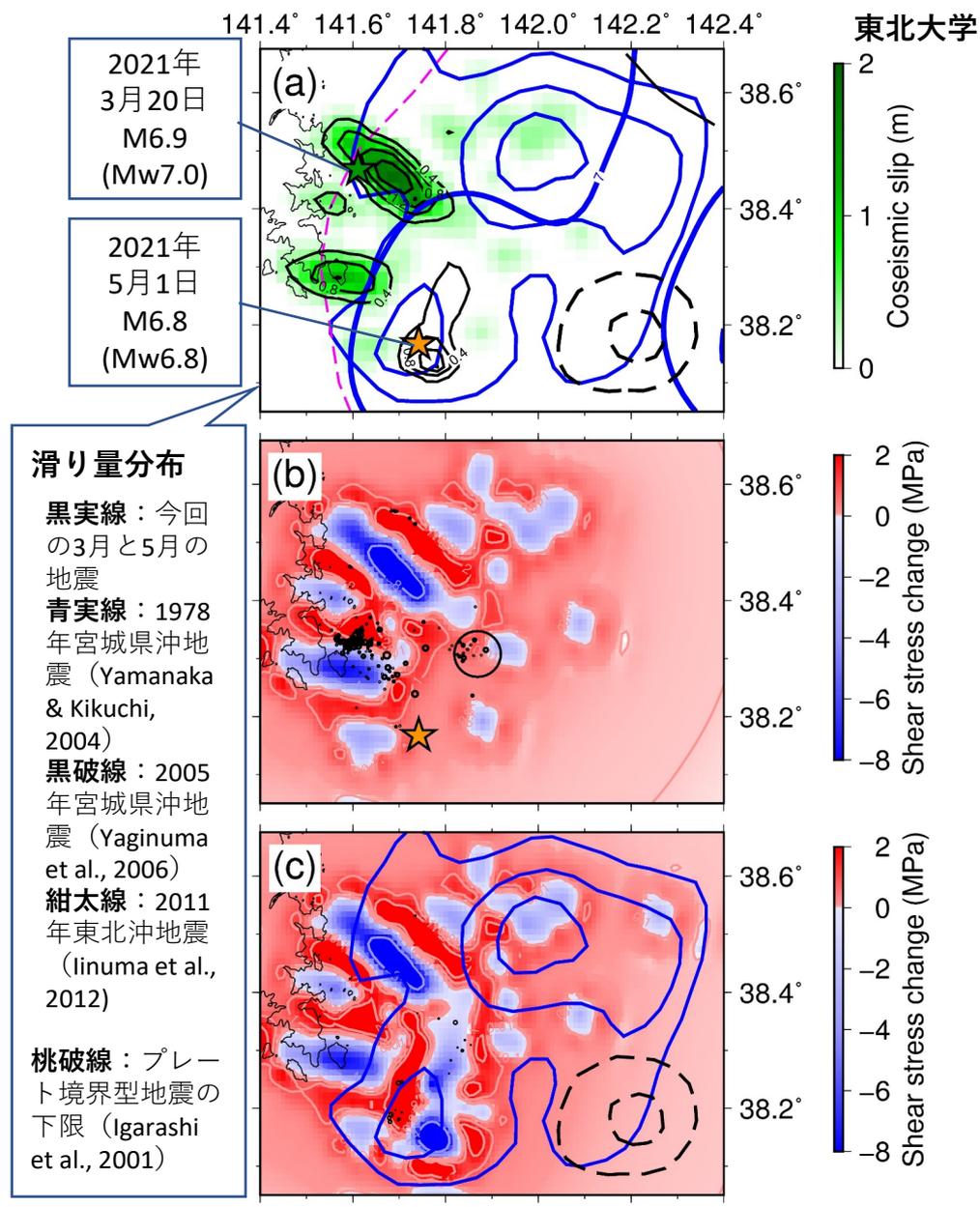
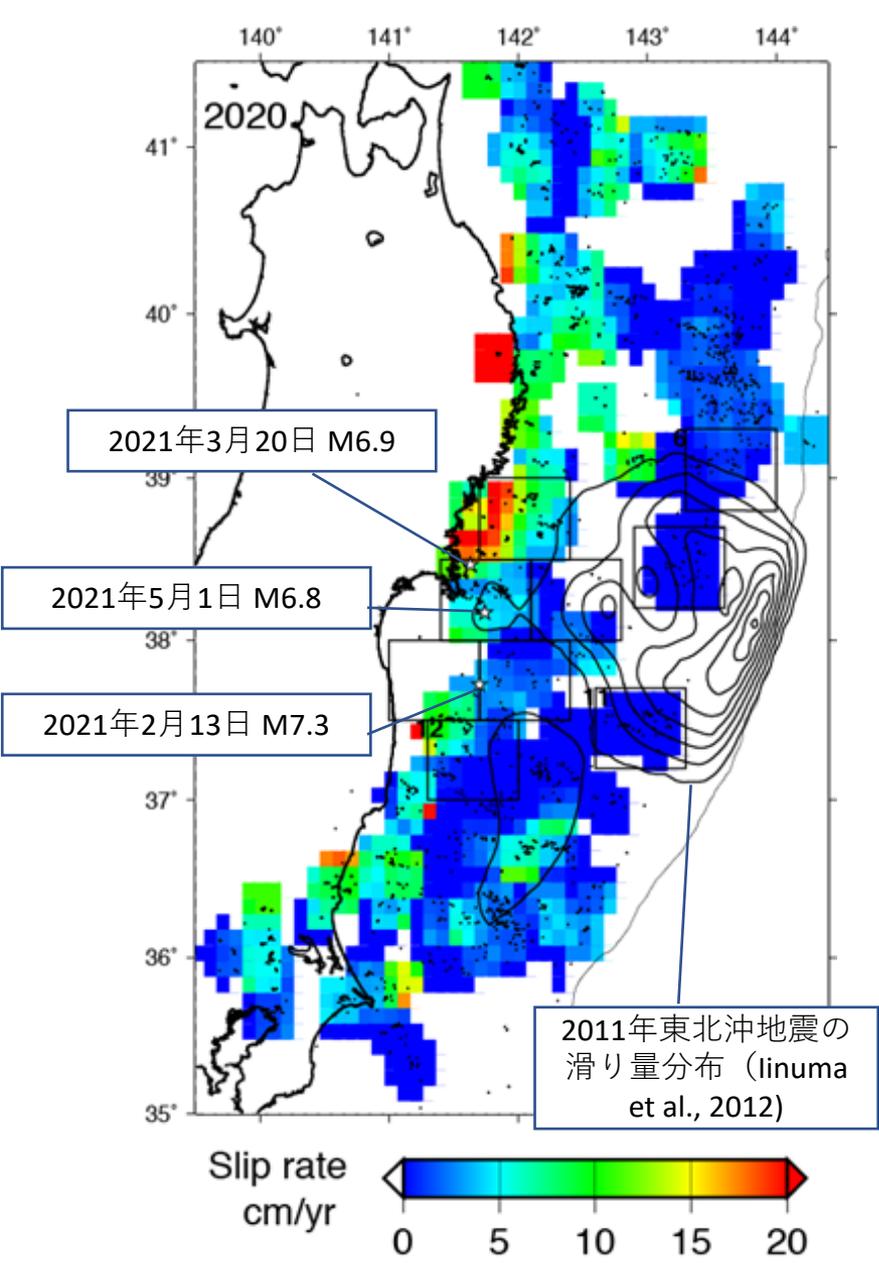


図3：観測波形（黒線）と理論波形（赤線）の比較。波形の右上にそれぞれの最大値を示す。



繰り返し地震から推定された2020年におけるプレート境界滑り速度と最近の大地震

(a) 2021年3月と5月の宮城県沖の地震の滑り量分布 (黒実線) . (b) 3月の地震および (c) 3月と5月の地震によるプレート境界のせん断応力変化.

# 3月5日 ケルマデック諸島の地震

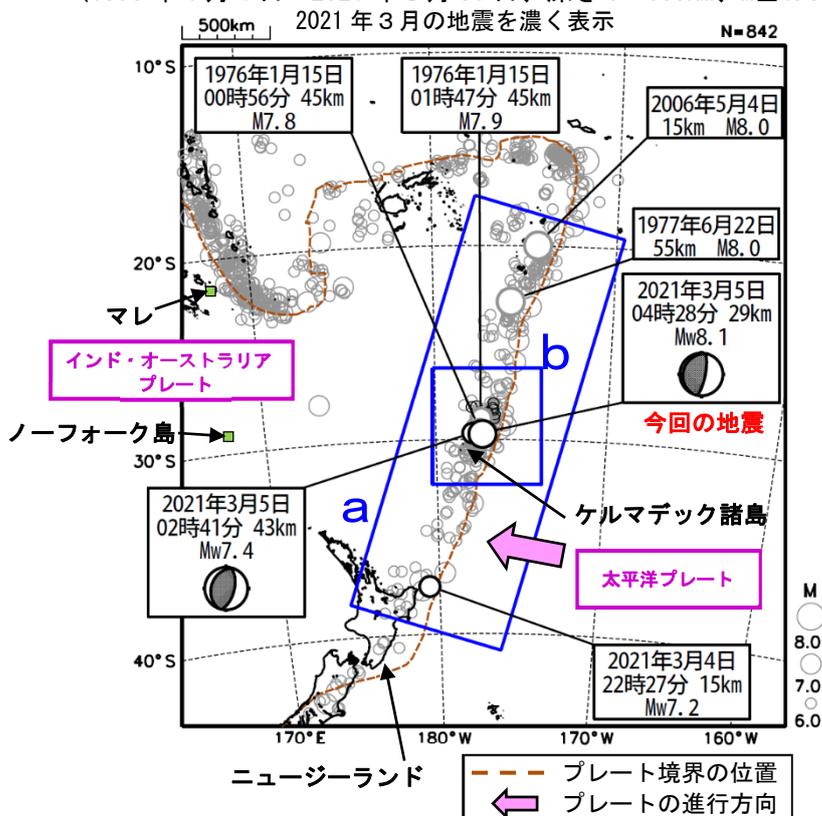
2021年3月5日04時28分（日本時間、以下同じ）にケルマデック諸島の深さ29kmでMw8.1の地震が発生した。この地震は、発震機構が西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートとインド・オーストラリアプレートとの境界で発生した。気象庁は、この地震に対して、同日04時59分（日本への津波の有無を調査中）と、10時08分（日本の沿岸では若干の海面変動あり）に遠地地震に関する情報を発表した。この地震によりマレ（ニューカレドニア）で1m\*\*、ノーフォーク島（オーストラリア）で0.56mなどの津波を観測した。日本国内でも、岩手県の久慈港や東京都の父島二見で最大19cmの津波を観測したほか、北海道から千葉県にかけての太平洋側沿岸で津波を観測した。

また、今回の地震が発生する約1時間50分前の02時41分に、今回の地震の震央近傍の深さ43kmでMw7.4の地震が発生した。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、太平洋プレートとインド・オーストラリアプレートとの境界で発生した。気象庁は、この地震に対して、同日03時24分（日本への津波の影響なし）と、04時10分（現地で津波を観測）に遠地地震に関する情報を発表した。この地震によりフィッシングロック（ニュージーランド）で0.31mなどの津波を観測した。

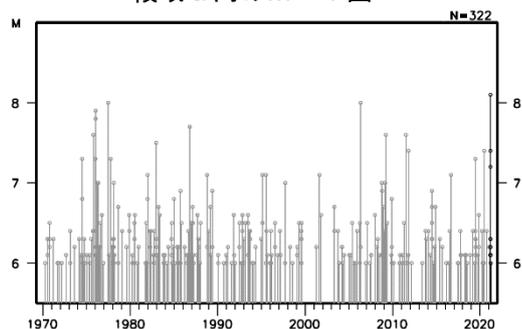
1970年以降の活動をみると、今回の地震の震源周辺（領域b）では、M7.0以上の地震が時々発生している。

震央分布図

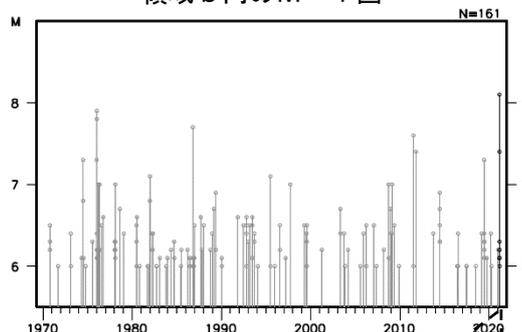
(1970年1月1日~2021年3月31日、深さ0~100km、M≥6.0)



領域 a 内の M-T 図

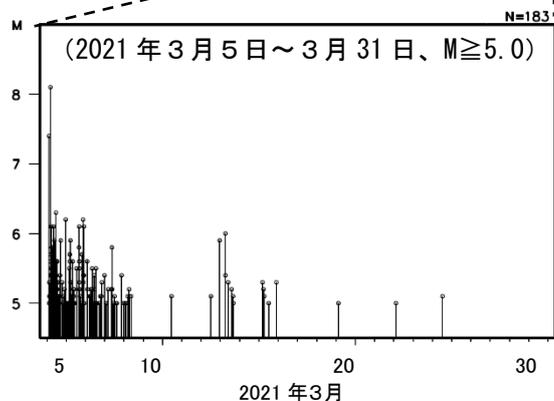
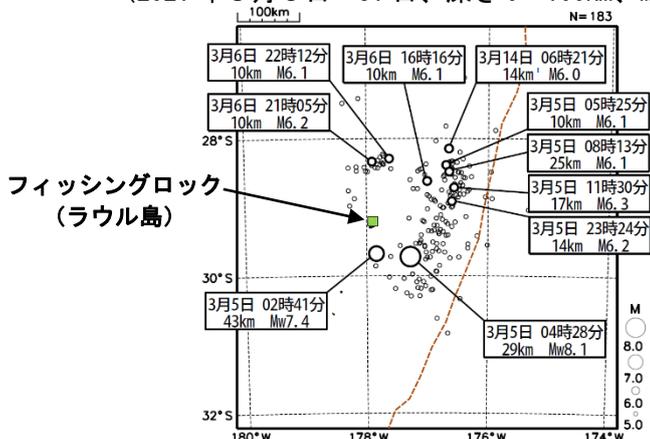


領域 b 内の M-T 図



領域 b 内の震央分布図

(2021年3月5日~31日、深さ0~100km、M≥5.0)



※本資料中、今回の地震及び3月4日22時27分、3月5日02時41分の地震の発震機構と Mw は気象庁による。震源データは2016年まではISCGEM、2017年以降は米国地質調査所 (USGS) による (2021年4月1日現在)。プレート境界の位置と進行方向はBird (2003) より引用。津波の高さは、米国海洋大気庁 (NOAA) による (2021年4月1日現在)。

※マレの津波の高さは目視による。

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

# 重点検討課題の検討

地震動・津波即時予測技術の高度化

－東北地方太平洋沖地震から10年でどこまで進展したか－

話題提供者〔敬称略〕

1. 気象庁の緊急地震速報と津波警報・注意報の高度化

気象庁 桑山 辰夫

2. リアルタイム GNSS 解析による地震像の即時把握

国土地理院 村松 弘規

東北大学 太田 雄策

3. 地震動即時予測の研究：最近10年の進展から

気象研究所 干場 充之

4. 津波即時予測手法の進展

北海道大学 谷岡 勇市郎

## 第 231 回地震予知連絡会 重点検討課題 趣旨説明

地震動・津波即時予測技術の高度化 ―東北地方太平洋沖地震から 10 年でどこまで進展したか―

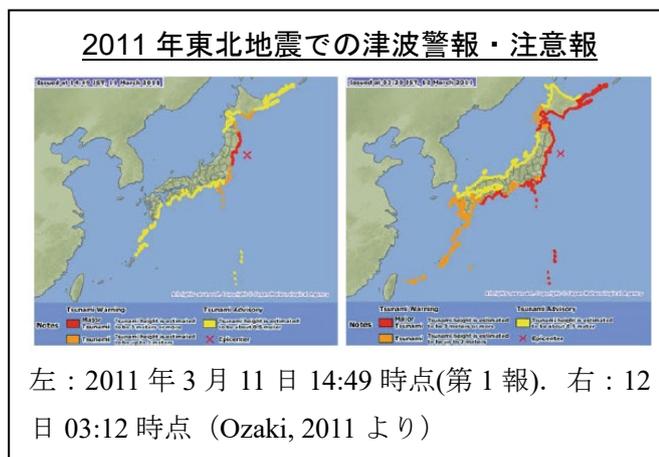
Improvements of earthquake and tsunami early warnings: Ten years after the 2011 Tohoku earthquake

コンビーナ 気象研究所 干場 充之

### 1. 背景

2011 年の東北地方太平洋沖地震(M9.0)では、緊急地震速報は東北地方に対して強く揺れ始める 15 秒以上前に警報を発し、想定していた機能を発揮した。ただし、関東地方に対しては、震度を過小予測した。数百 km に及ぶ震源域を適切に評価できなかつたためである。また、活発な余震活動のため、複数同時に起こった余震を適切に分離出来ずに過大な警報を出すことが起こった。一方、津波については、当初推定された M7.9 に基づき、地震後 3 分で警報第 1 報目を発したが、予想される津波の高さは過小だった。

これらの経験を踏まえて、地震動や津波の即時予測の高度化の研究が進められている。



### 2. 課題

地震動や津波の即時予測をさらに迅速に精度良くするには今後、どのような技術が必要か。特に、発生頻度が少なものの大きな被害をもたらす巨大地震にも有効な即時予測を行うためには何が有効か。

### 3. 報告

- ① 気象庁の緊急地震速報と津波警報・注意報の高度化  
気象庁地震火山部 桑山 辰夫
- ② リアルタイム GNSS 解析による地震像の即時把握  
国土地理院測地観測センター 村松 弘規  
東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター 太田 雄策
- ③ 地震動即時予測の研究：最近 10 年の進展から  
気象庁気象研究所 干場 充之
- ④ 津波即時予測手法の進展  
北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター 谷岡 勇市郎

#### 4. 論 点

- ・地震の震源像を即時把握するにはどのような方法が有効か.
- ・地震動即時予測や津波即時予測の高度化には今後どのような研究が重要か.
- ・現在のモニタリングシステムを踏まえて今後どのような進展が期待できるか.

## 気象庁の緊急地震速報と津波警報・注意報の高度化

桑山 辰夫 (気象庁)

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震で明らかとなった課題に対応するために、緊急地震速報と津波警報・注意報の高度化を進めてきた

### 緊急地震速報の高度化

- IPF 法の導入により、同時発生した複数の地震を精度よく分離・識別
- PLUM 法の導入により、震源域の広い巨大地震の際にも精度よく震度を予測
- 海底地震計の活用により、海域で発生する地震の情報発表を迅速化

### 津波警報・注意報の高度化

- 巨大な地震発生の可能性を識別するロジックや、広帯域地震計の活用、津波警報の定性表現等により、津波の規模の過小評価の防止や伝え方の改善
- 沖合の観測データを監視に活用し、津波の情報をいち早く伝達
- 海底津波計のデータを用いた tFISH を導入し、より精度の高い津波の高さを予測

### 進化し続ける [緊急地震速報]

Further improvement of Earthquake Early Warnings

新手法の導入により、緊急地震速報の精度が向上します。

#### PLUM 法

改進黨例 (平成23年東北地方太平洋沖地震)

30年3月 運用開始

巨大地震が発生した際でも精度良く震度を予測します。

震源域の広い巨大地震に対応できるようなり、震源から離れた場所にいても強い揺れを予測できるようになります。

#### IPF 法

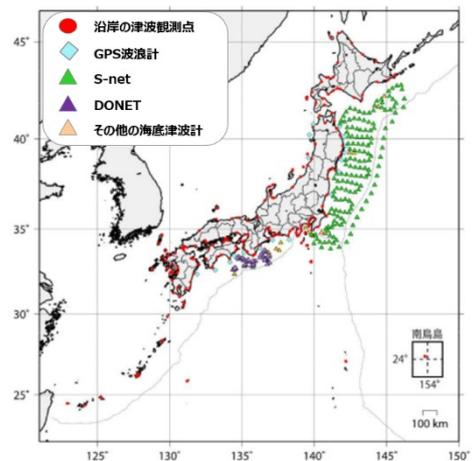
改進黨例 (平成23年3月22日12時36分頃の東北地方太平洋沖地震)

28年12月 運用開始

同時発生した複数の地震をこれまでよりも精度良く分離・識別します。

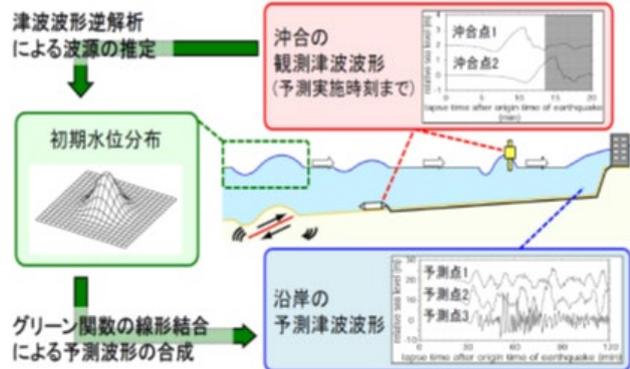
この事例では、2つの地震から適切な震度を予測しましたが、IPF法では地震を識別して適切な処理が行われています。

緊急地震速報の処理手法の高度化  
(PLUM 法と IPF 法の導入)



沖合での観測成果の活用

tsunami Forecasting based on Inversion for initial sea-Surface Height (tFISH)



[Tsunami et al., 2009, 2012, JGR]

tFISH の導入による津波予測の高度化

## リアルタイム GNSS 解析による地震像の即時把握

村松弘規（国土地理院）、太田雄策（東北大学）

電子基準点のリアルタイム解析に基づくリアルタイム断層推定

- 国土地理院と東北大学の共同研究の下で、電子基準点が捉えた地殻変動を用いた即時地震規模(断層モデル)推定にかかるシステムを開発し、2016年より国土地理院で運用中(REGARD: 電子基準点リアルタイム解析システム)
- REGARD は、大規模な地殻変動が発生するような巨大地震をターゲットとしているが、M7程度の地震でも、大きな地殻変動を捕捉できれば地震規模を数分で推定可能(図1)
- 過大な断層モデルを推定してしまうことの予防や、不確実性をより適切に評価可能な断層推定手法(図2)の開発など、システムの精度・信頼度向上に向けた検討を実施

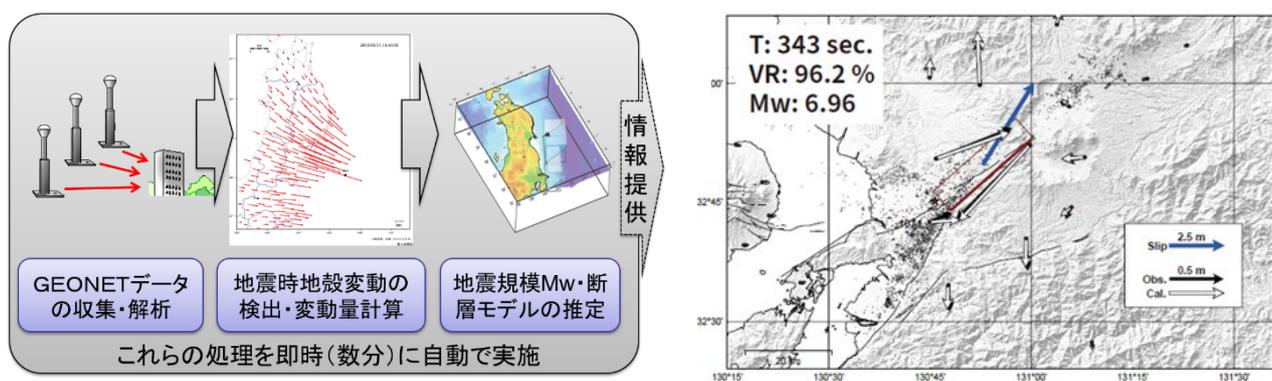


図1：REGARDの概要及び震源断層推定結果(平成28年(2016年)熊本地震の例)

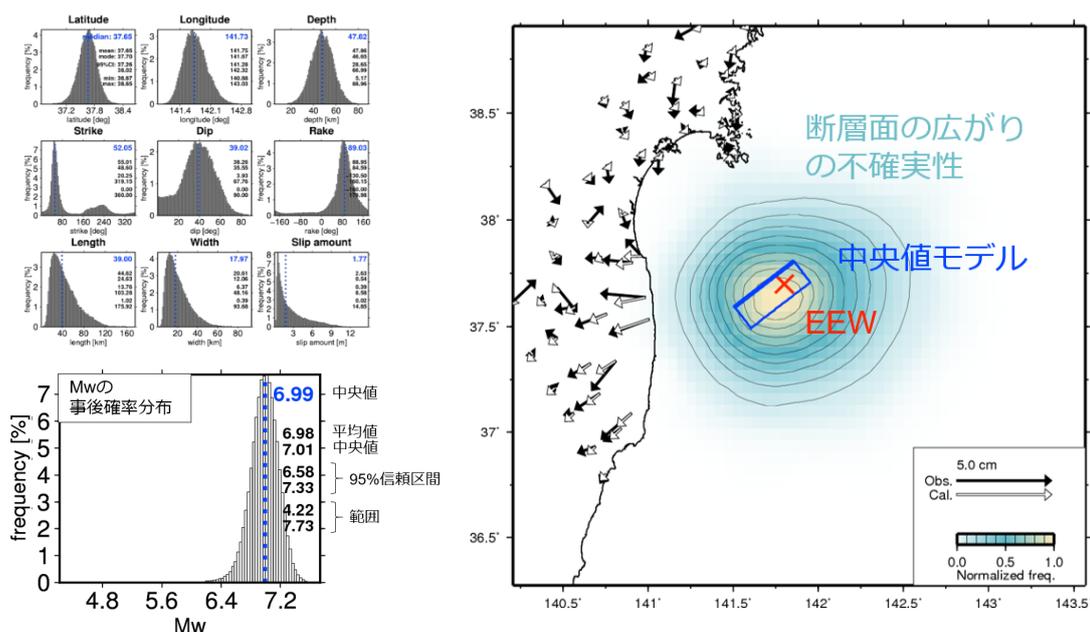


図2：不確実性を考慮した震源断層推定結果の例(2021年2月13日福島県沖の地震)  
左：推定された震源断層パラメータの確率分布 右：推定された断層モデル

# 地震動即時予測の研究：最近 10 年の進展から

干場充之（気象庁気象研究所）

## 2011 年東北地方太平洋沖地震とその後

東北地方に対して強く揺れ始める 15 秒以上前に警報。想定していた機能を発揮。ただし、

- ・関東地方に対しては、数百 km に及ぶ震源域を適切に評価できず震度を過小予測。
- ・複数同時に起こった余震を適切に分離することが出来ずに過大な警報。

これらの教訓を踏まえた研究が世界各地で行われてきている。

## 地震動即時予測の 3 つの原理とそれぞれの研究の進展（図参照）

### 1. 地震波の伝播の予測

(1) 震源パラメータ（震源位置やマグニチュードなど）の即時推定

- ・複数同時の複数の地震が発生した場合にも対応できるアルゴリズムの開発
- ・震源“域”を即時推定する手法
- ・GNSS を活用して飽和しないマグニチュード (Mw) を推定する手法

(2) (震源とマグニチュードにかかわらず) 揺れから揺れを直接予測する手法

### 2. P 波から S 波を予測

- ・S 波群中の P 波を抽出する方法

### 3. 破壊の進展の予測

- ・破壊の進展は予測可能か？の議論は依然継続 → 警報の逐次更新の必要性の認識

## 観測網の充実

(1) 海底地震計の活用

(2) 研究レベルでユニークなもの、

- ・スマホにアプリをダウンロードすることで地震計として活用 → 仮想的な超密観測網
- ・重力波の活用 → P 波よりも早い地震の検知



図 地震動即時予測の 3 つの原理とそれぞれの研究の進展

気象研究所 干場充之 資料

## 津波即時予報手法の進展

岡岡勇市郎（北海道大学理学研究院・地震火山研究観測センター）

S-net（高密度観測網）が設置されたことにより、海底圧力観測データのみから津波即時予測を実施する手法が世界に先駆けて開発されてきた。

データ同化手法（図1）、AI技術を用いた手法（図2）とも地震発生後10分前後で津波浸水予測が実現可能な手法の開発である。

- 上記いずれのデータ同化手法の計算結果も利用可能な即時浸水予測

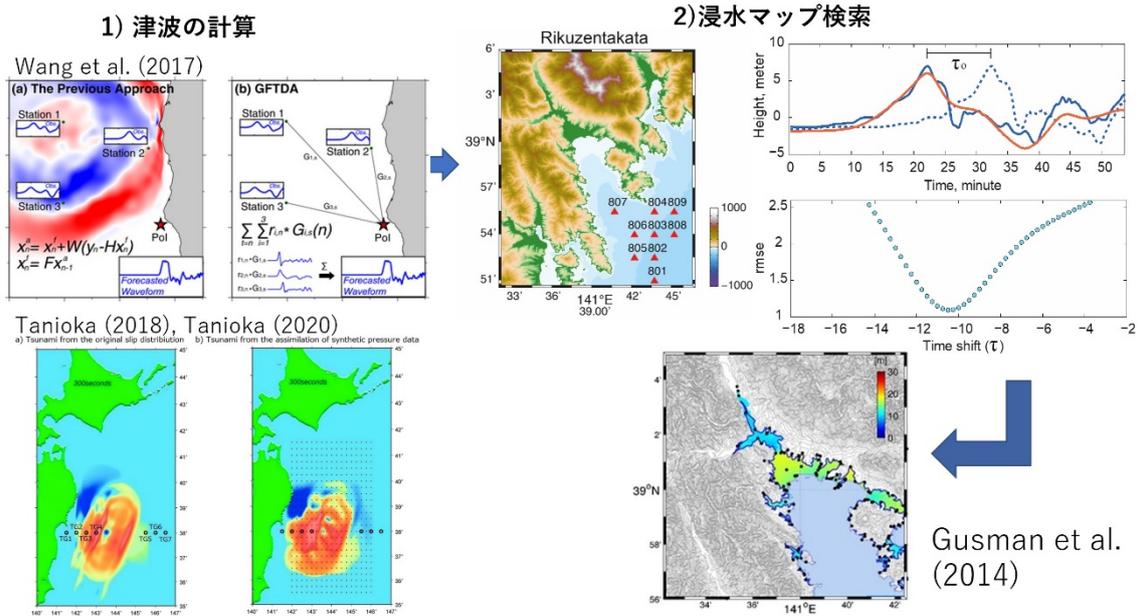


図1 データ同化手法を用いた津波即時浸水予測手法

- Convolutional Neural Networksを利用し、観測津波波形(S-net) から津波即時予測を行う。東北大・富士通グループ (Makinoshima et al., 2021)

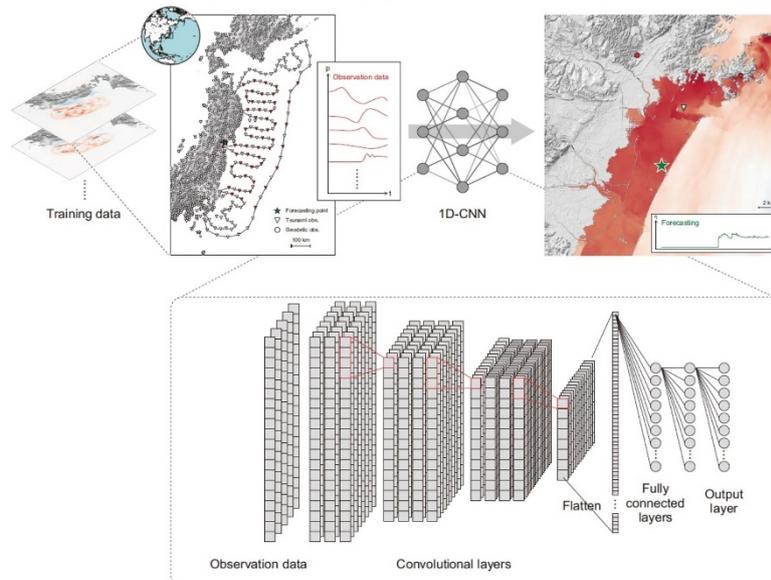


図2 AIを活用した津波即時浸水予測手法

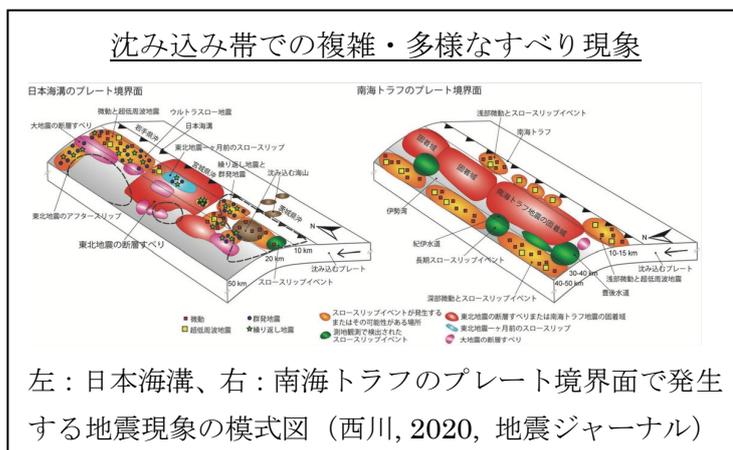
## 第 232 回地震予知連絡会 重点検討課題 趣旨説明

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。



### 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 (予定)

- ①沈み込み帯における大地震準備・発生過程の物理モデル
- ②大地震発生前後の多様性の物理モデル
- ③地震ならびにゆっくり地震の発生過程の物理モデル

### 4. 論点 (予定)

- ・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？