

# 能登半島群発地震の地殻変動に基づく 力源モデルと推移シナリオ

西村卓也<sup>1</sup>・平松良浩<sup>2</sup>・太田雄策<sup>3</sup>

<sup>1</sup>京都大学防災研究所

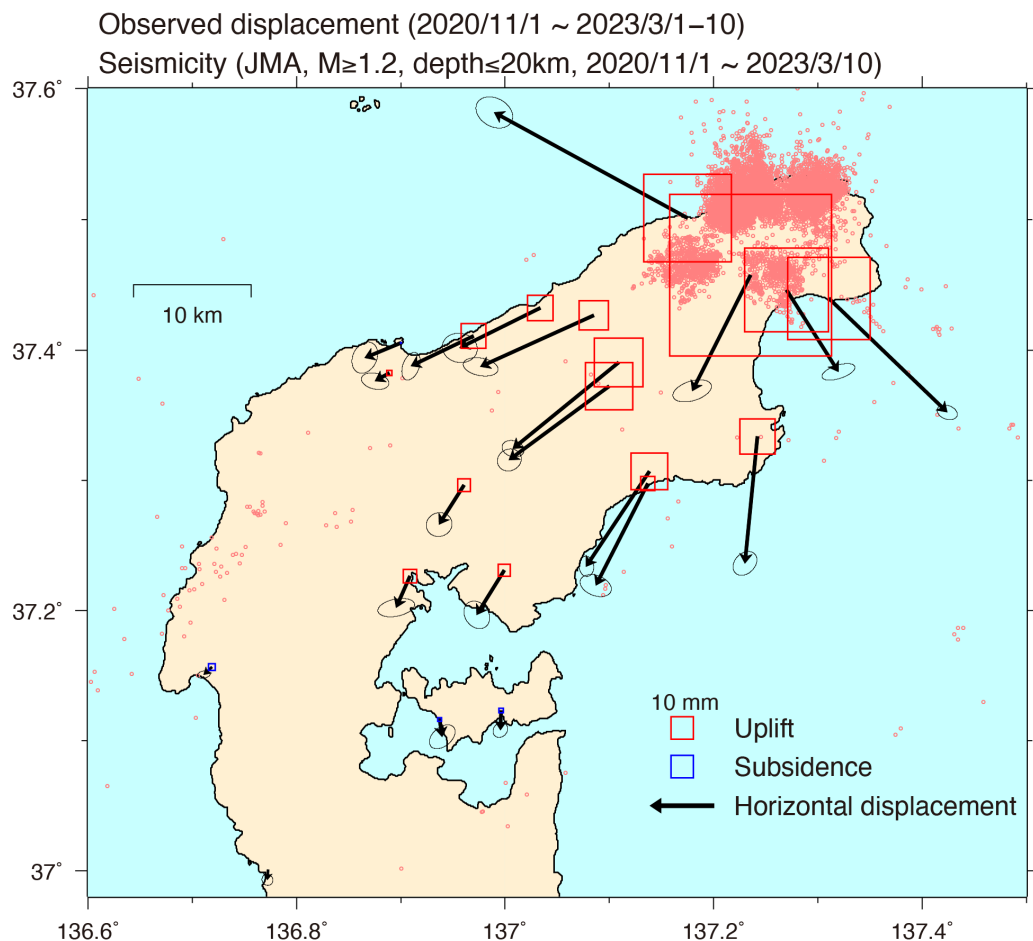
<sup>2</sup>金沢大学理工研究域

<sup>3</sup>東北大学大学院理学研究科

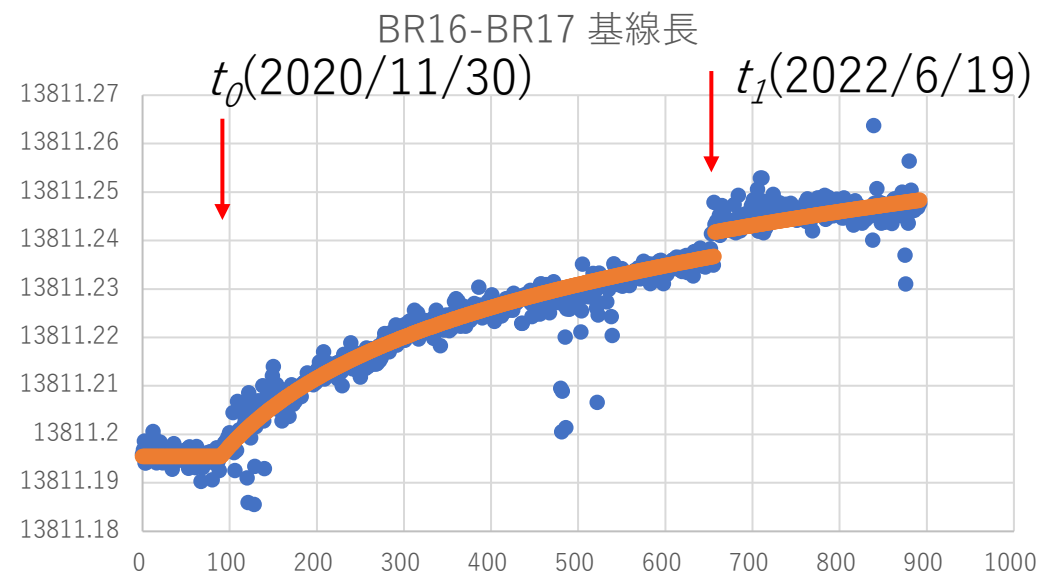
謝辞：本研究で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは、「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じてソフトバンク株式会社とALES株式会社より提供を受けたものを使用しました。国土地理院の電子基準点RINEXデータ、気象庁一元化震源データを使用しました。京都大学及び金沢大学のGNSS観測点の設置にあたり、珠洲市教育委員会、珠洲市企画財政課、珠洲市産業振興課、珠洲市総務課、能登町教育委員会及び奥能登国際芸術祭実行委員会にお世話になりました。本研究はJSPS科研費 JP22K19949の助成及び文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第二次）」の支援を受けました。ここに記してこれらの機関に感謝いたします。

# GNSSにより観測された地殻変動

2020年11月から2023年3月までの累積非定常地殻変動



- 水平変位の特徴：放射状に群発地震震源域から遠ざかる。最大約3cmの変動
- 上下変位の特徴：約2年間で最大7cmの隆起。震源域から約20kmの範囲内で有意な隆起



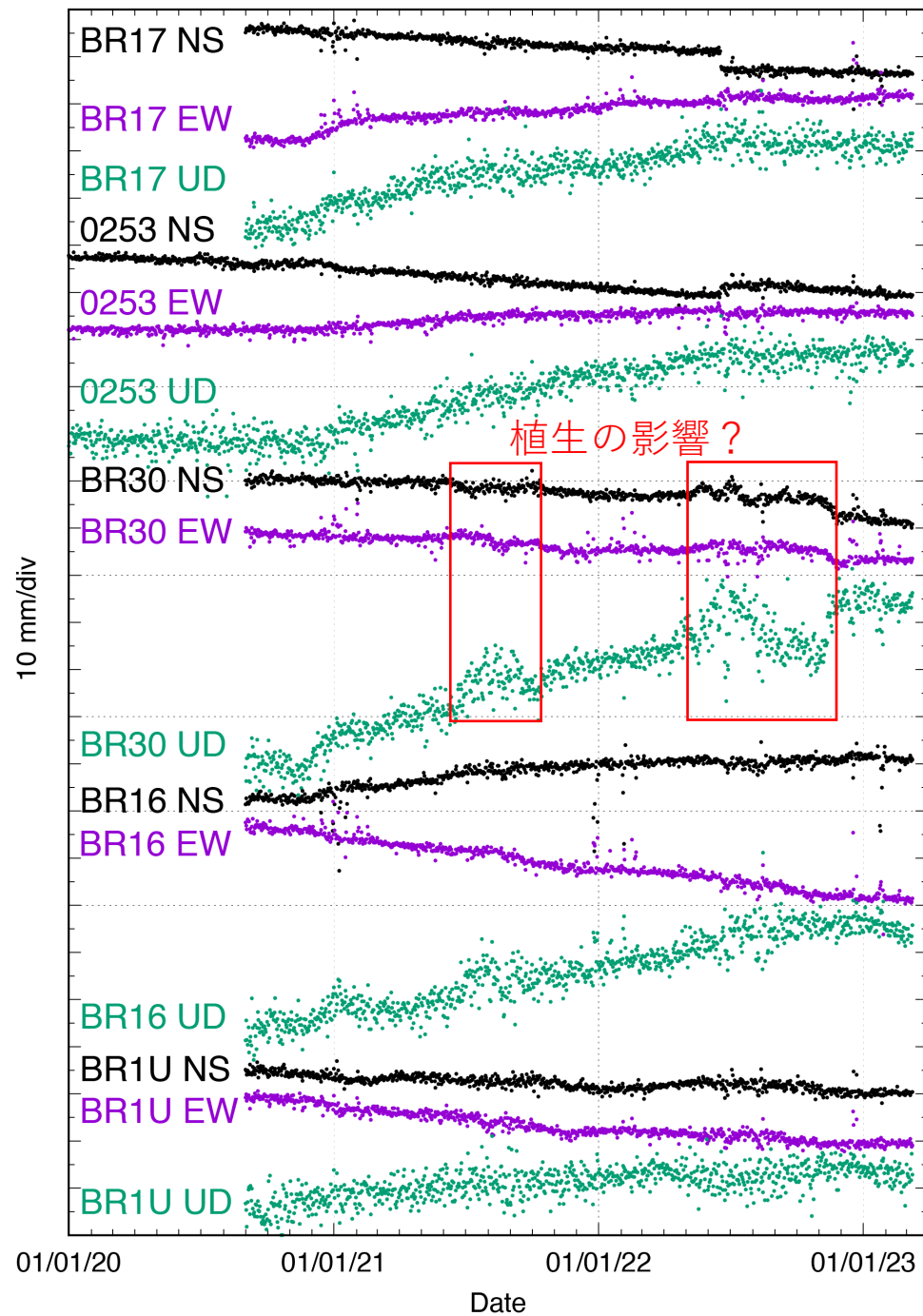
$$f(t) = a + 0.05 \log\left(\frac{t}{100}\right) H(t - t_0) + 0.005 H(t - t_1)$$

# GNSSデータ解析手順

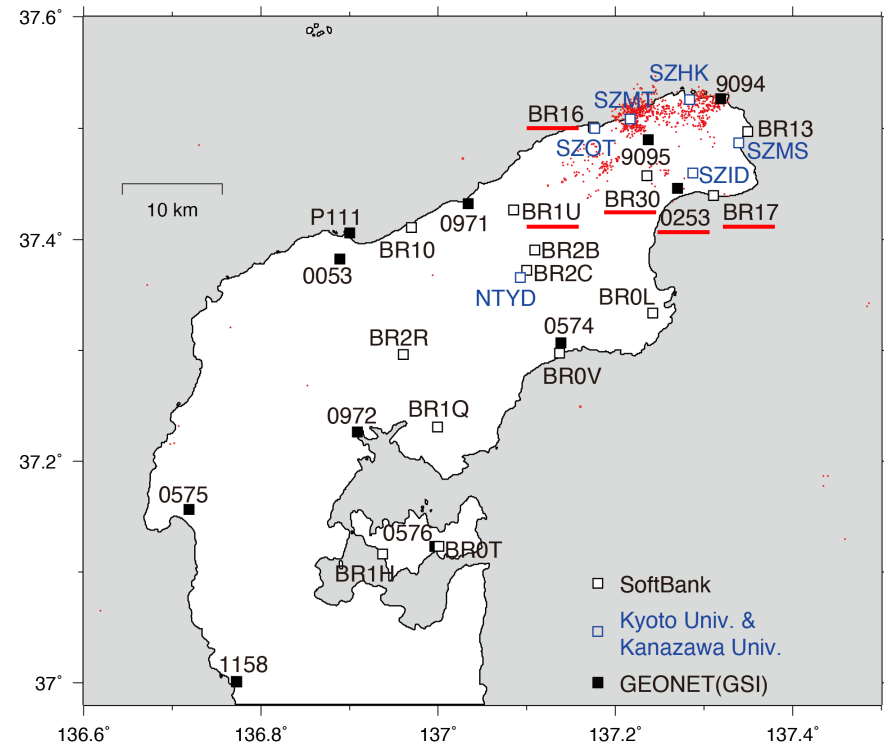
- 日座標値データを用いて解析
  - 日座標値の計算には、GipsyX ver. 1.4 (Bertiger et al., 2020) の整数不確定性を決定した精密単独測位法 (PPP-AR) を使用
    - GPSのみ, 仰角カットオフ  $7^\circ$ , マッピング関数 VMF1 (Boehm et al., 2006), 電離層高次補正あり, 海洋潮汐モデル FES2014b (Carrere et al., 2015, 2016), JPL最終暦
    - ITRF2014準拠(IGb14)座標系
- 日座標値の前処理
  - 2011年以降のデータがある観測点については、2011-2019年の時系列を下記の式(cf. Tobita, 2016)で近似・外挿して、残差の時系列を使用.

$$x(t) = a + bt + c \ln\left(1 + \frac{t}{1.47}\right) + d \ln\left(1 + \frac{t}{123.3}\right) + e \exp\left(-\frac{t}{450021}\right) + f \sin\frac{2\pi t}{365.24} + g \cos\frac{2\pi t}{365.24} + h \sin\frac{2\pi t}{187.62} + i \cos\frac{2\pi t}{187.62}$$

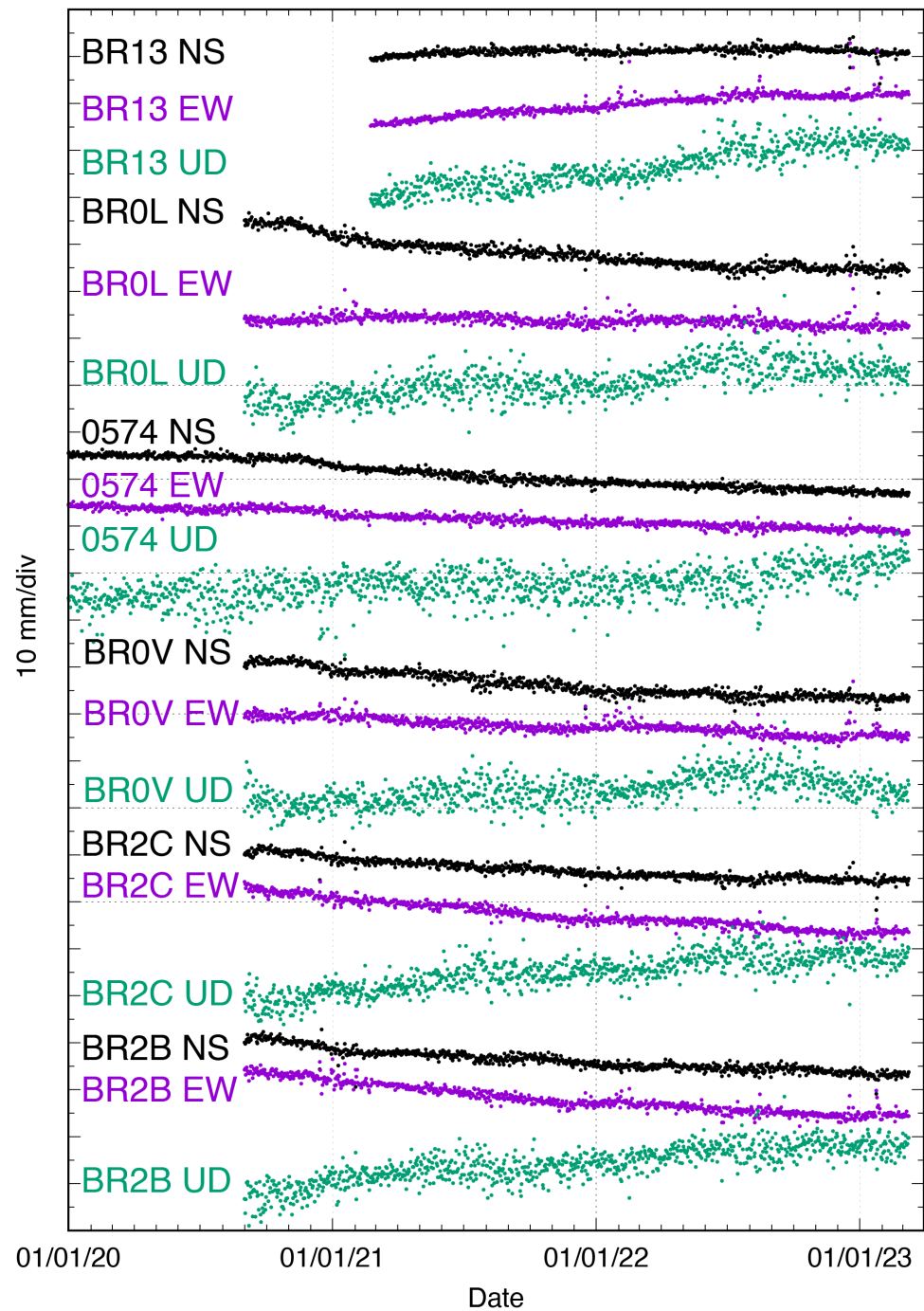
- 臨時&ソフトバンク観測点については、2017-2019年の周辺GEONET観測点での速度に基づいて3次Bスプラインの基底関数展開による空間補間 (Okazaki et al., 2021) により、臨時観測点の位置での速度を観測時系列から除去.
- 地震前速度・年周・半年周補正後の日座標値において、ばらつきの小さな5観測点の共通誤差を全観測点のデータから除去(cf. Wdowinski et al., 1997).



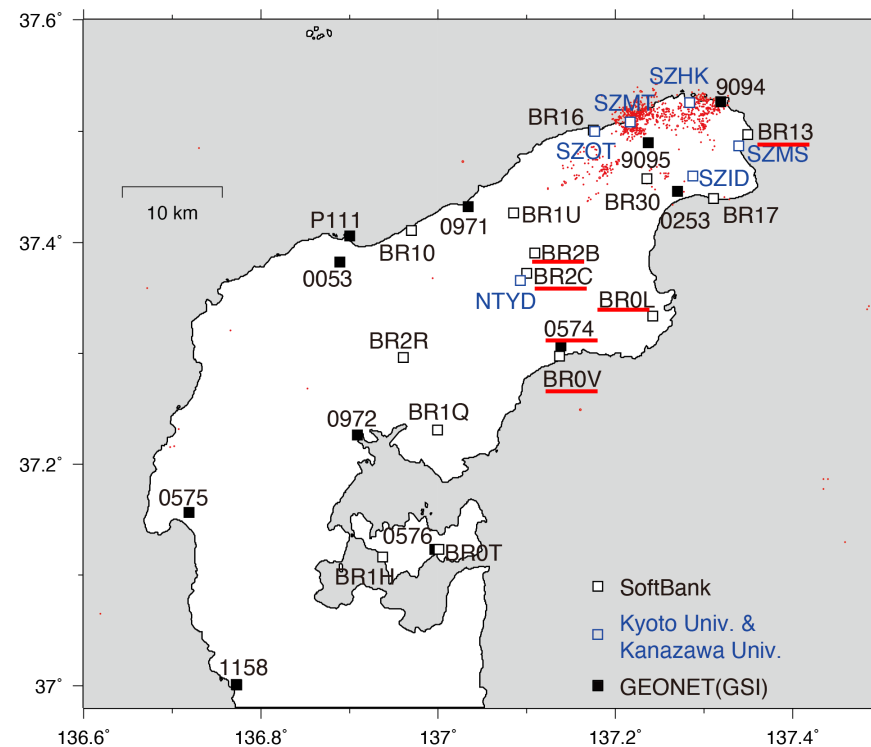
# 処理後の時系列(1)

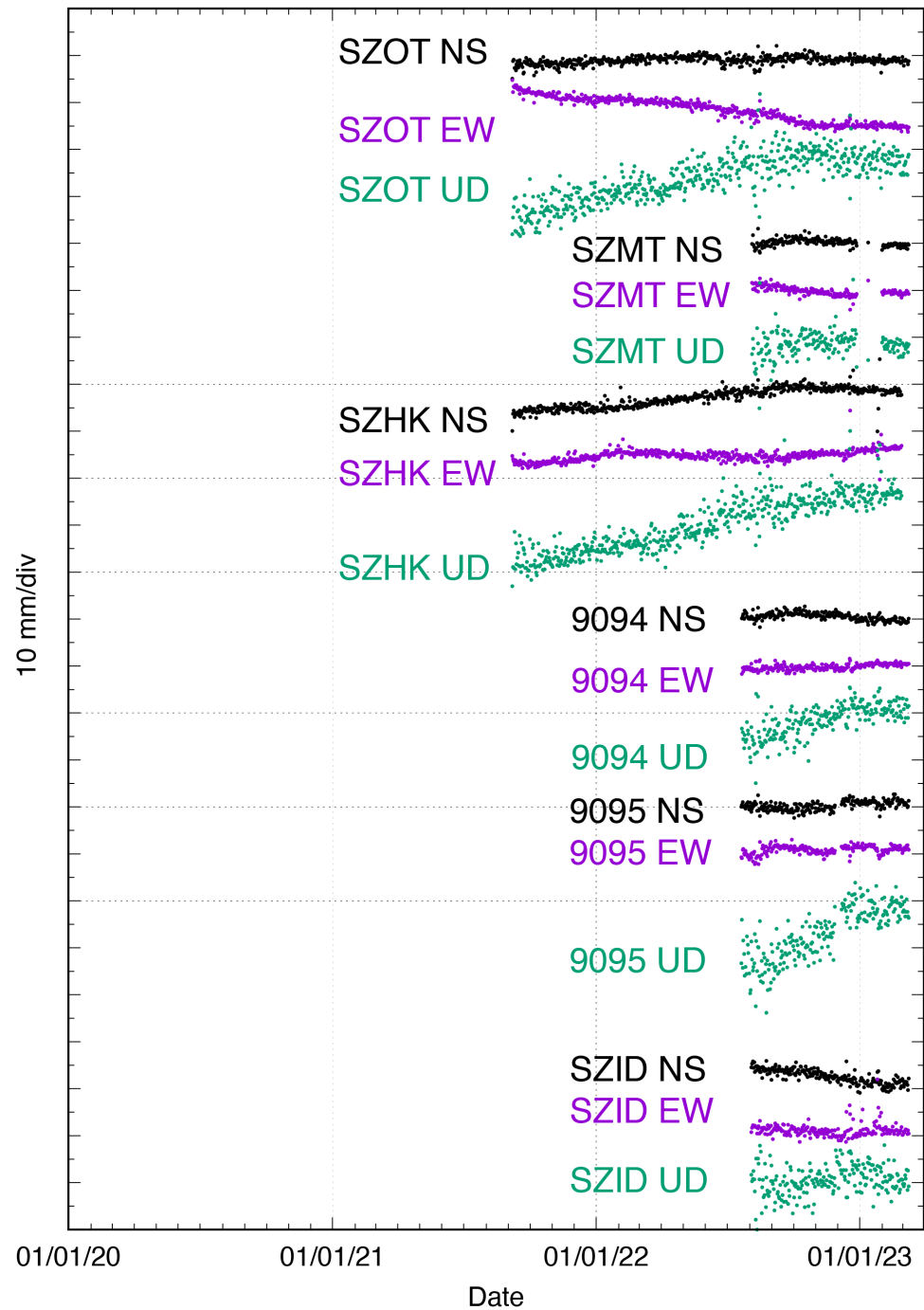




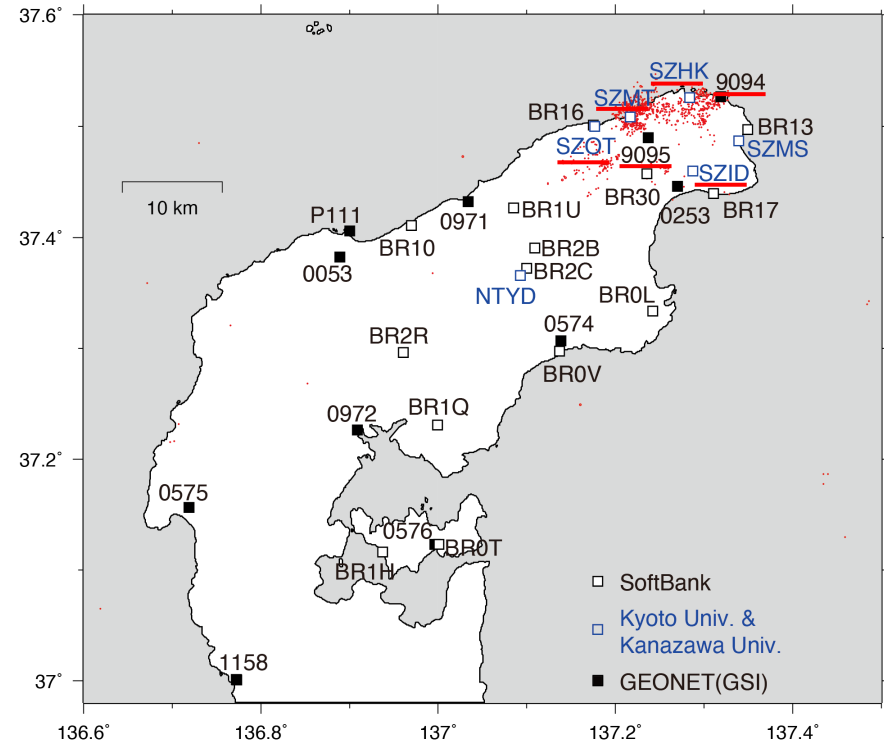


# 処理後の時系列(2)



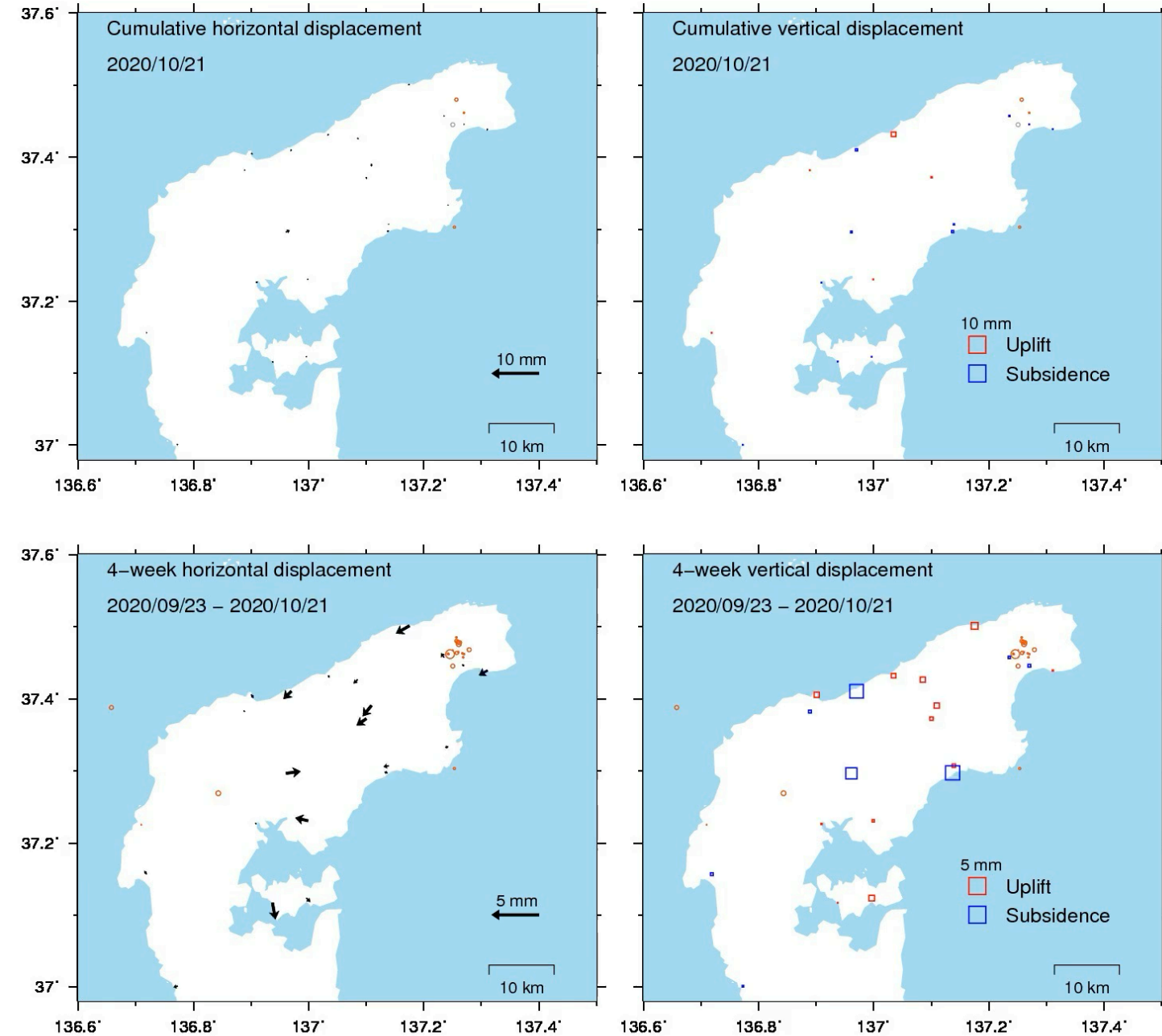


# 処理後の時系列(3)



# 地殻変動の時間 発展（動画）

- 2020年12月-1月の変動速度が大きい。
- 変動パターンの変化はあまり明瞭ではないが、4週間変位では2021年前半のBR30の水平変位に特徴的な変化が見られる。
- 全体を4期間に分けて、変動源モデルを推定

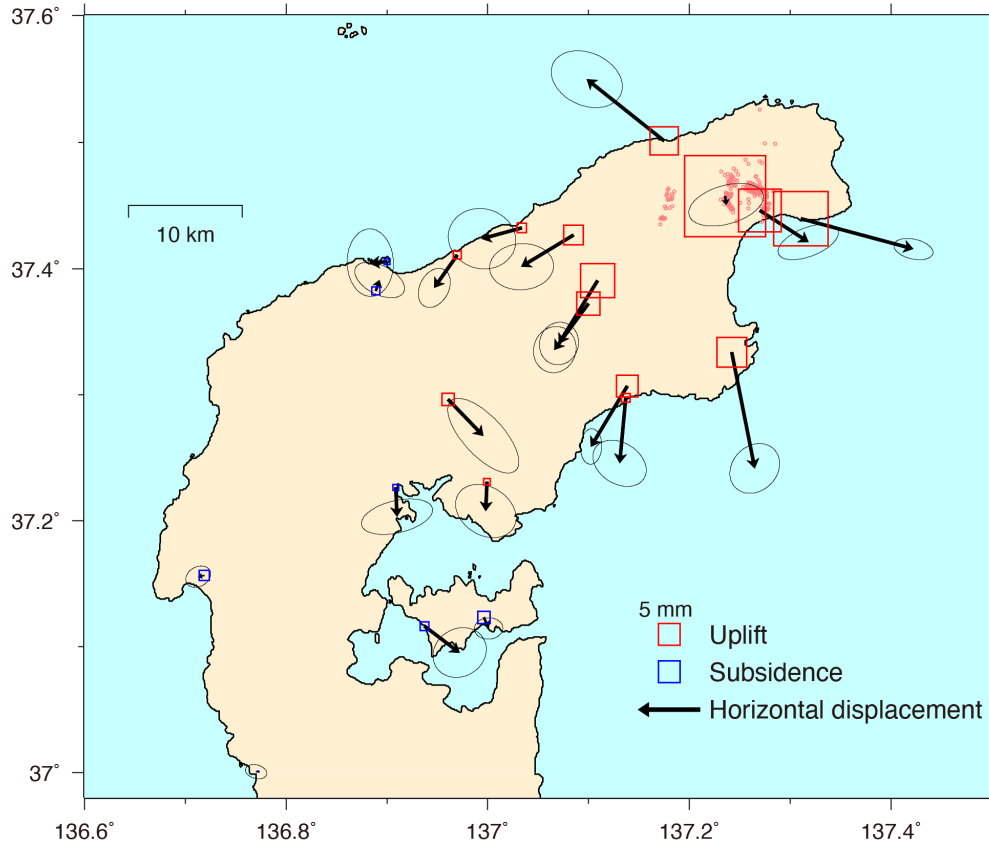


# 地殻変動のスナップショット(1)

期間A(2020年11月上旬-2021年3月上旬) 期間B(2021年3月上旬-6月下旬)

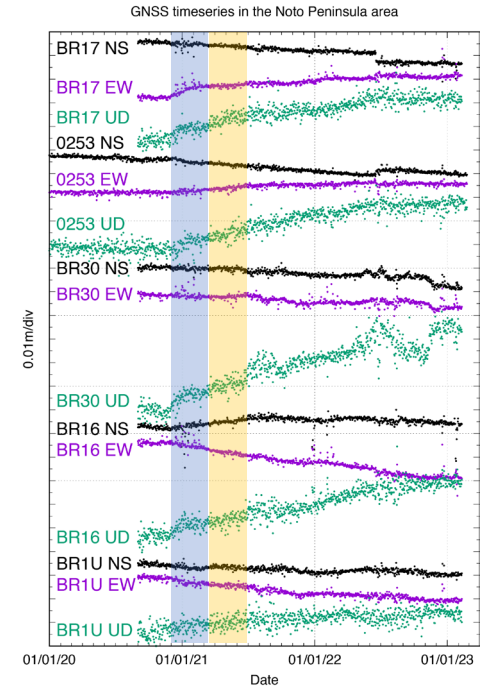
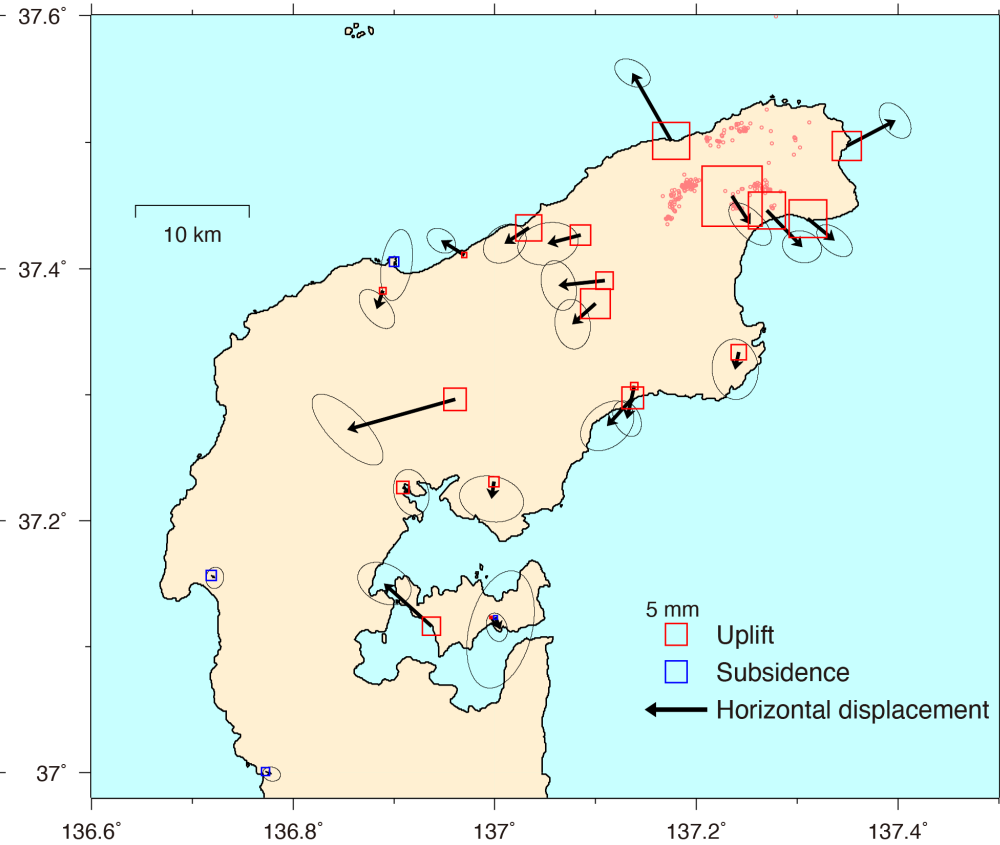
Observed displacement (2020/11/1-10 ~ 2021/3/1-10)

Seismicity (Relocated,  $M \geq 1.2$ , depth  $\leq 20$ km, 2020/11/11 ~ 2021/3/10)



Observed displacement (2021/3/1-10 ~ 6/21-30)

Seismicity (Relocated,  $M \geq 1.2$ , depth  $\leq 20$ km, 2021/3/1 ~ 6/30)

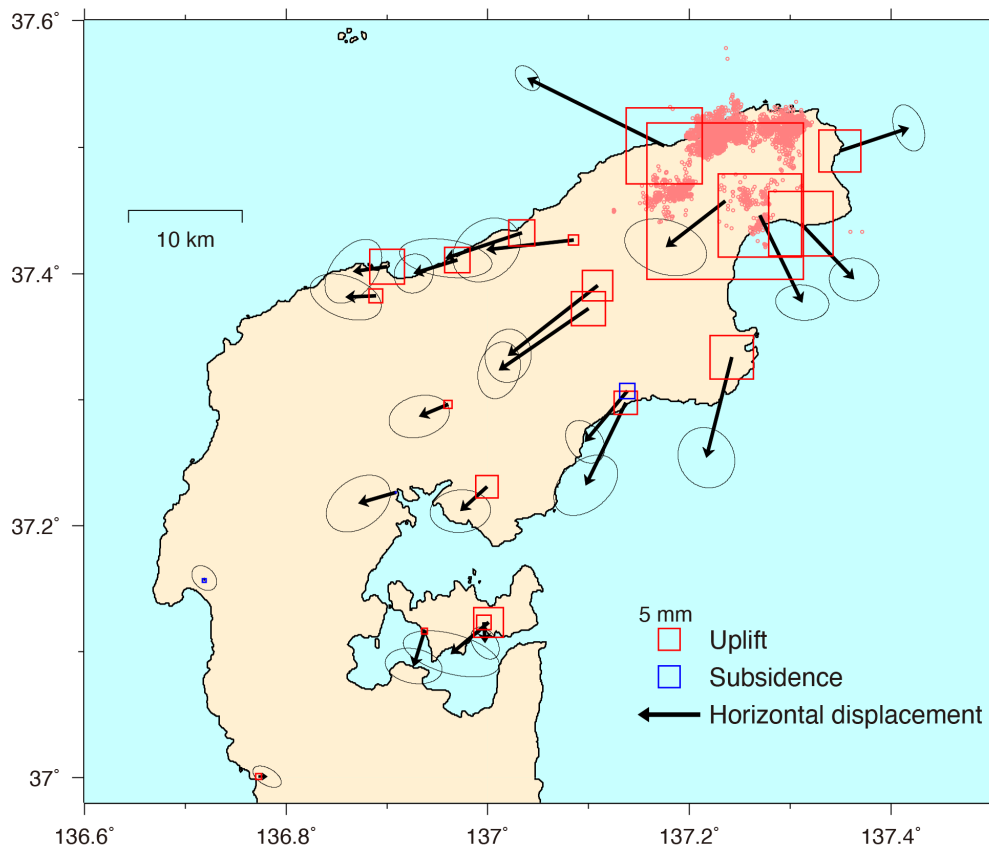


期間A 期間B

# 地殻変動のスナップショット(2)

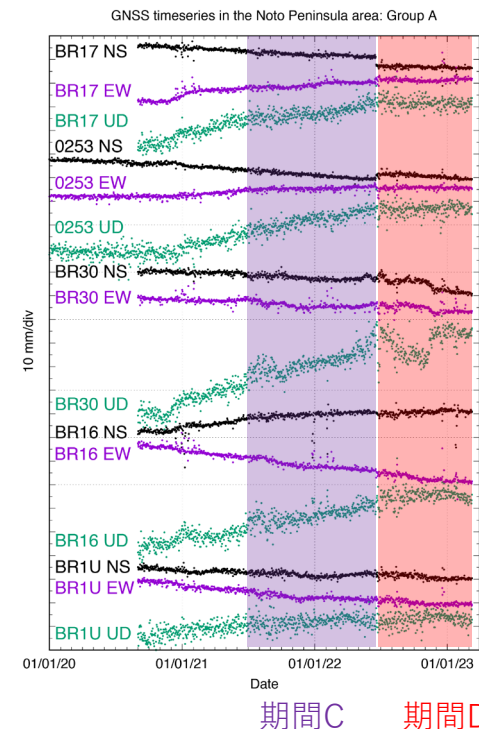
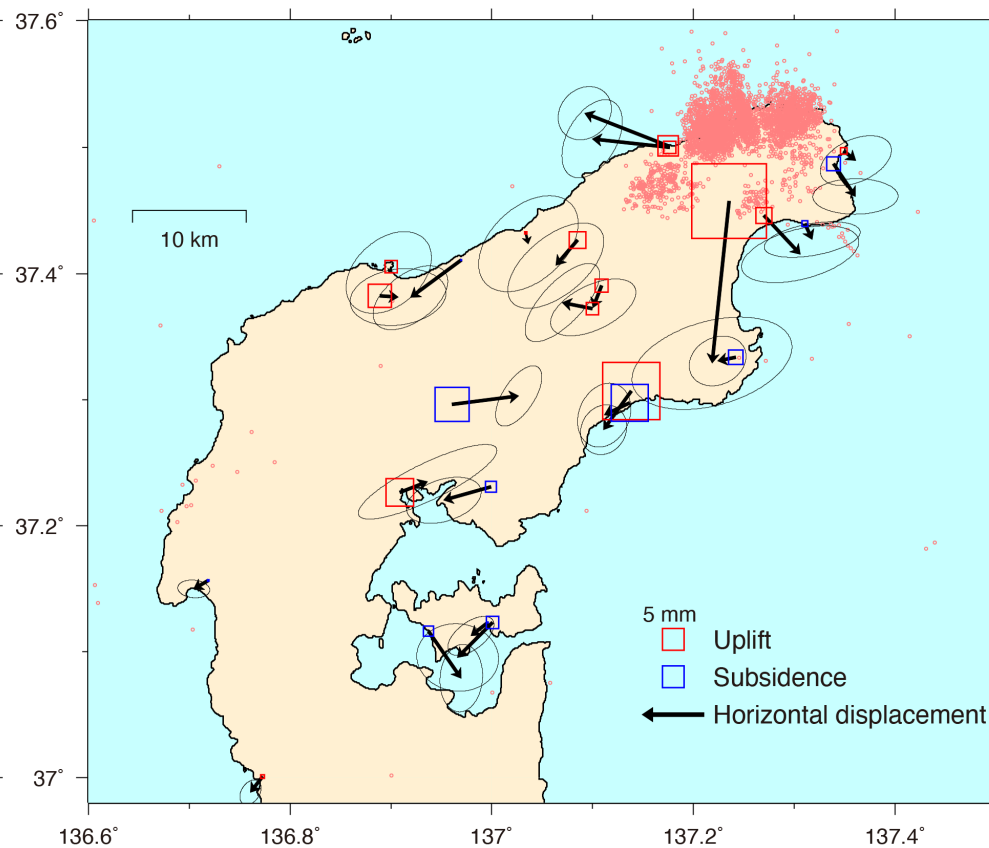
## 期間C (2021年6月下旬-2022年6月中旬)

Observed displacement (2021/6/21-30 ~ 2022/6/9-18)  
Seismicity (Relocated,  $M \geq 1.2$ , depth  $\leq 20$ km, 2021/6/21 ~ 2022/6/18)



## 期間D (2022年6月下旬-2023年3月上旬)

Observed displacement (2022/6/21-30 ~ 2023/3/1-10)  
Seismicity (JMA,  $M \geq 1.2$ , depth  $\leq 20$ km, 2022/6/21 ~ 2023/3/10)





# 地殻変動のスナップショット(3)

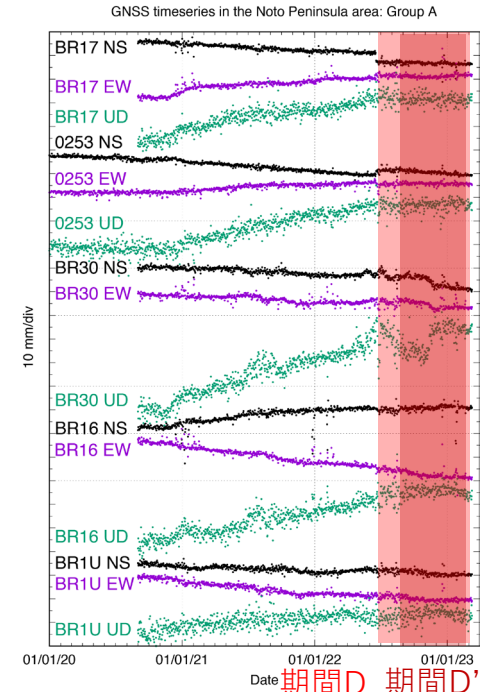
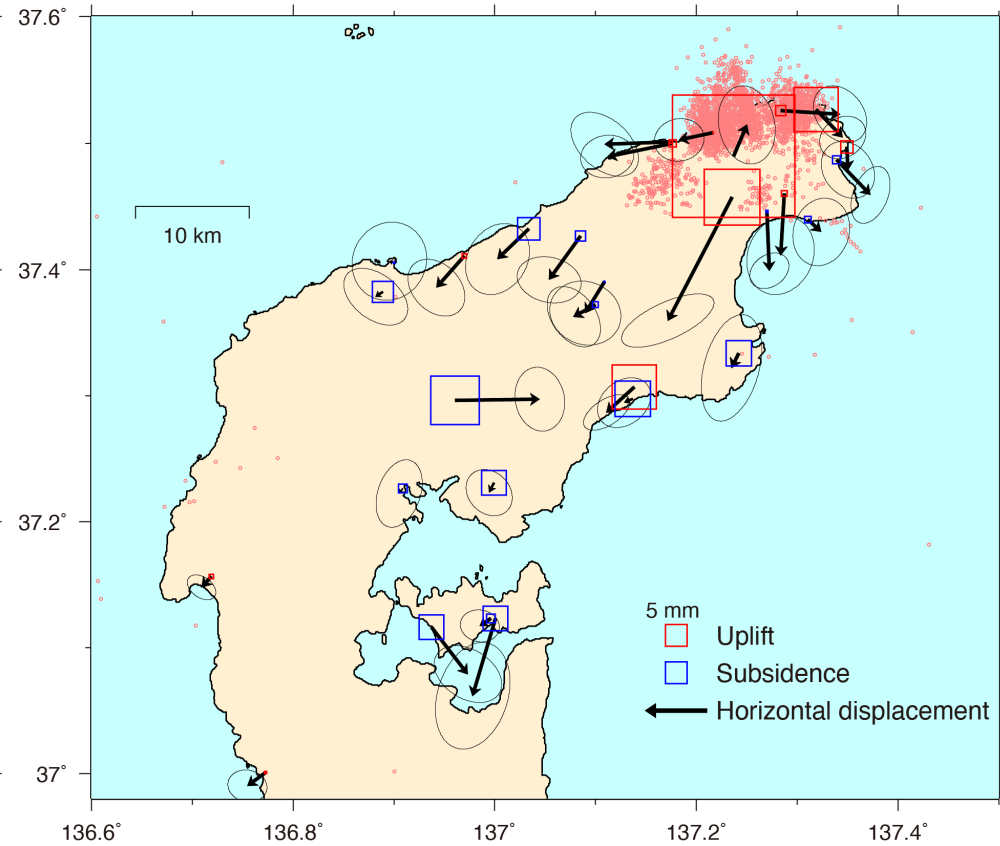
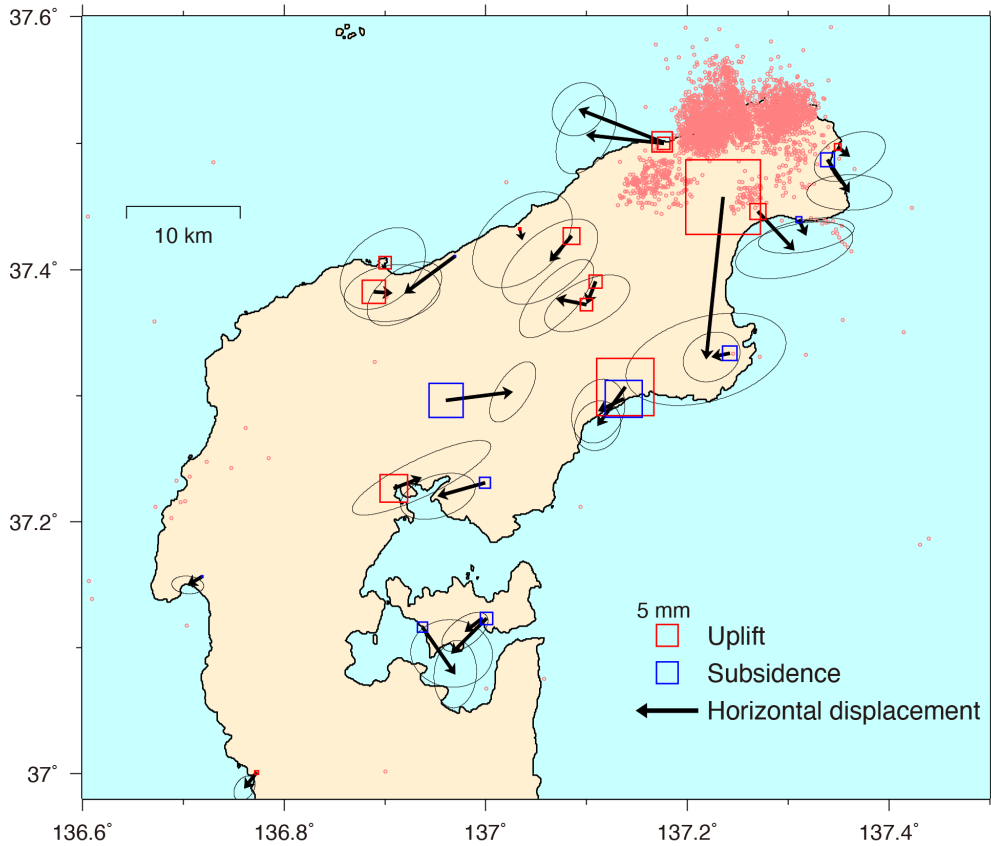
期間D (2022年6月下旬-2023年3月上旬) 期間D' (2022年8月下旬-2023年2月下旬)

Observed displacement (2022/6/21-30 ~ 2023/3/1-10)

Seismicity (JMA,  $M \geq 1.2$ , depth  $\leq 20$ km, 2022/6/21 ~ 2023/3/10)

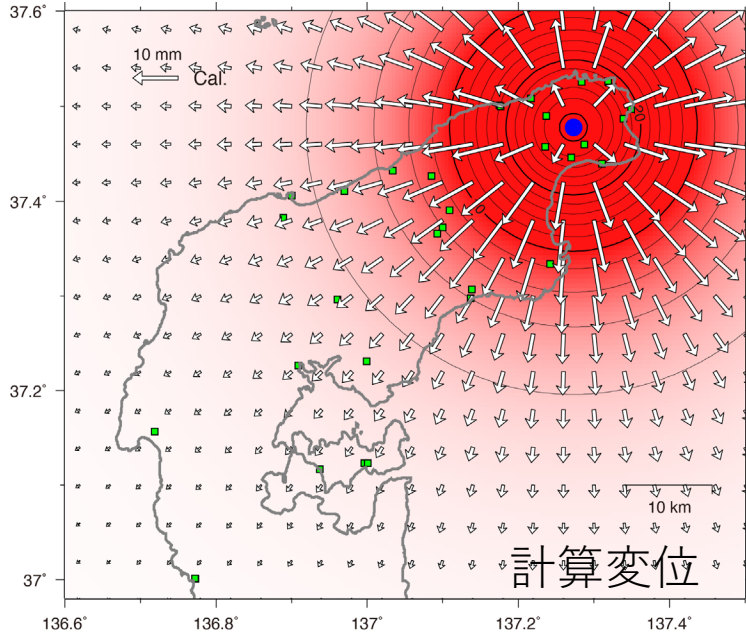
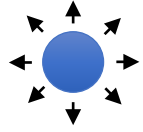
Observed displacement (2022/8/21-30 ~ 2023/2/19-28)

Seismicity (JMA,  $M \geq 1.2$ , depth  $\leq 20$ km, 2022/8/21 ~ 2023/2/28)

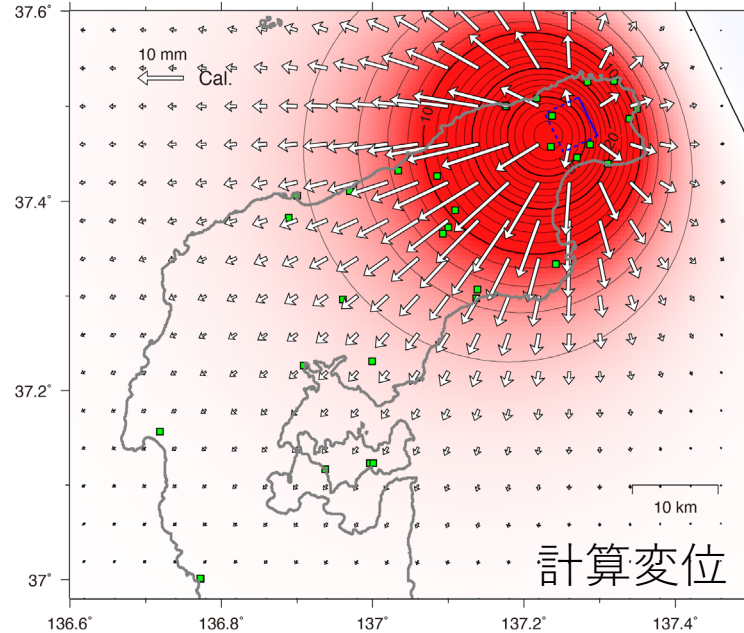
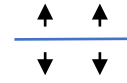


# 地殻変動源を一意に推定することは困難

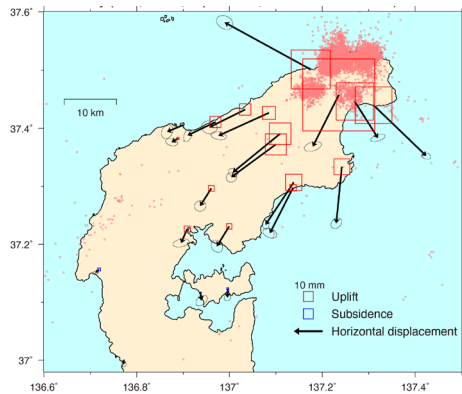
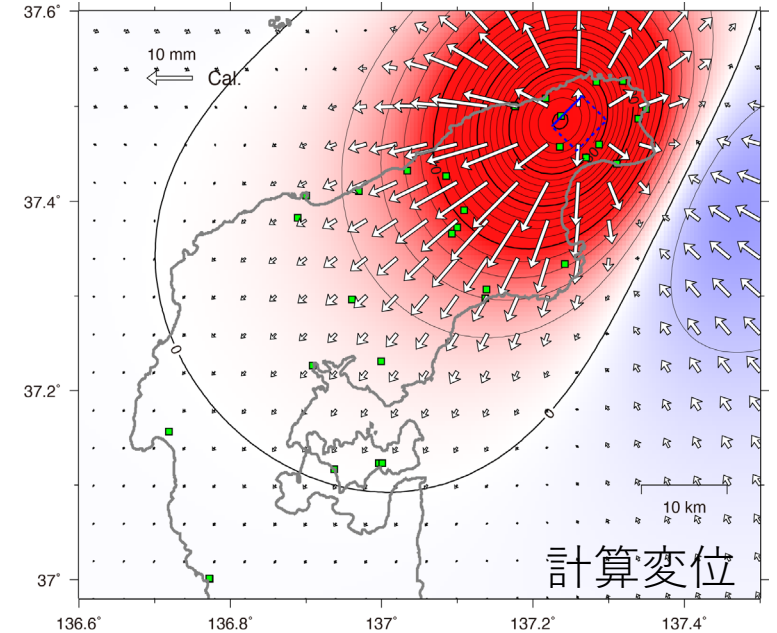
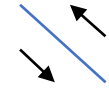
球状圧力源



水平に近い開口割れ目  
(e.g., シル)



逆断層  
(南東傾斜)



観測変位

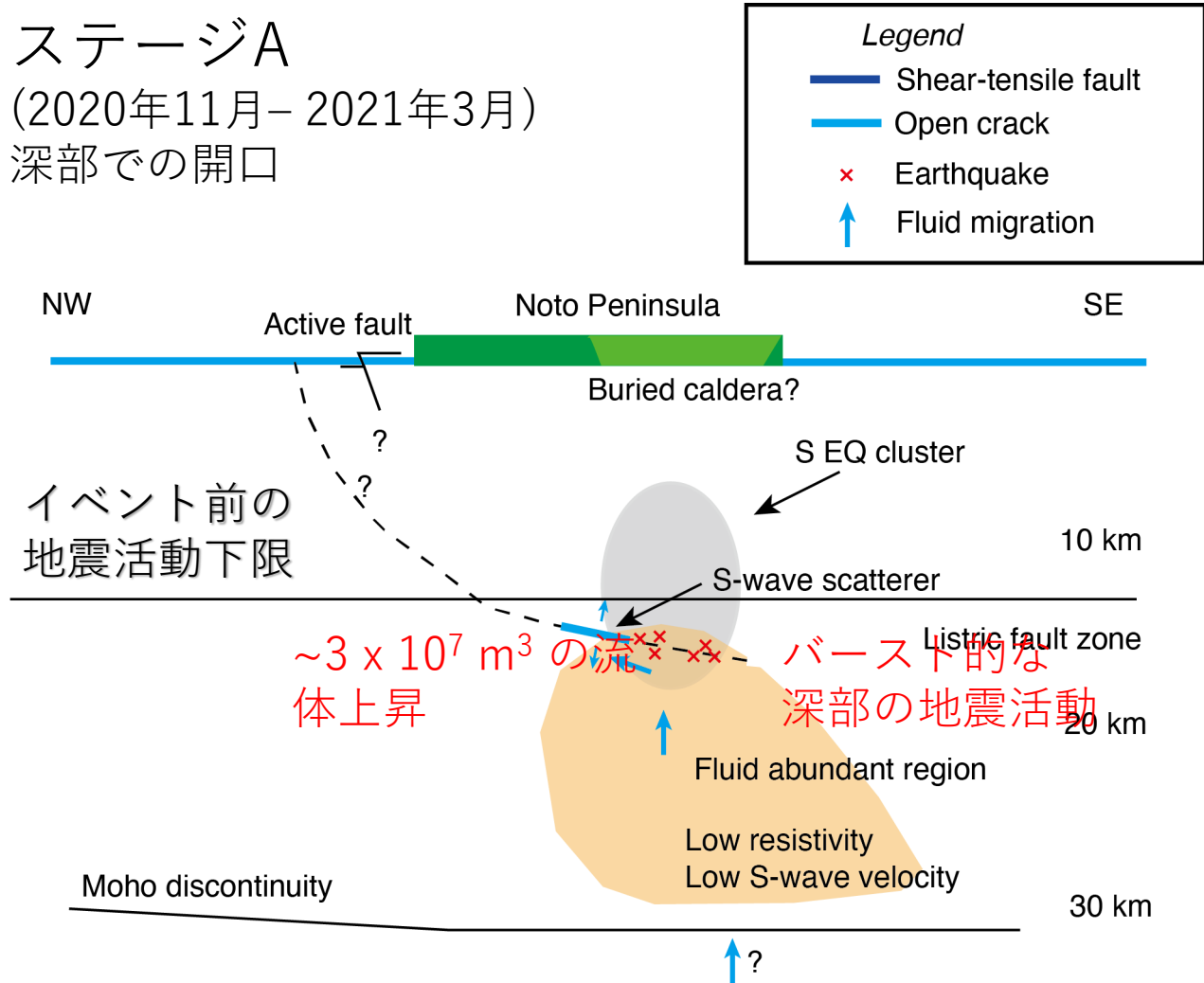
- 観測点が陸域に限られるため、観測データを概ね再現できる複数の形状・方向の力源モデルが存在する。
- 地殻変動だけでなく、地震活動の変化やテクトニックな状況を考慮したシナリオを提案する。

# 提案するシナリオ(1)

## ステージA

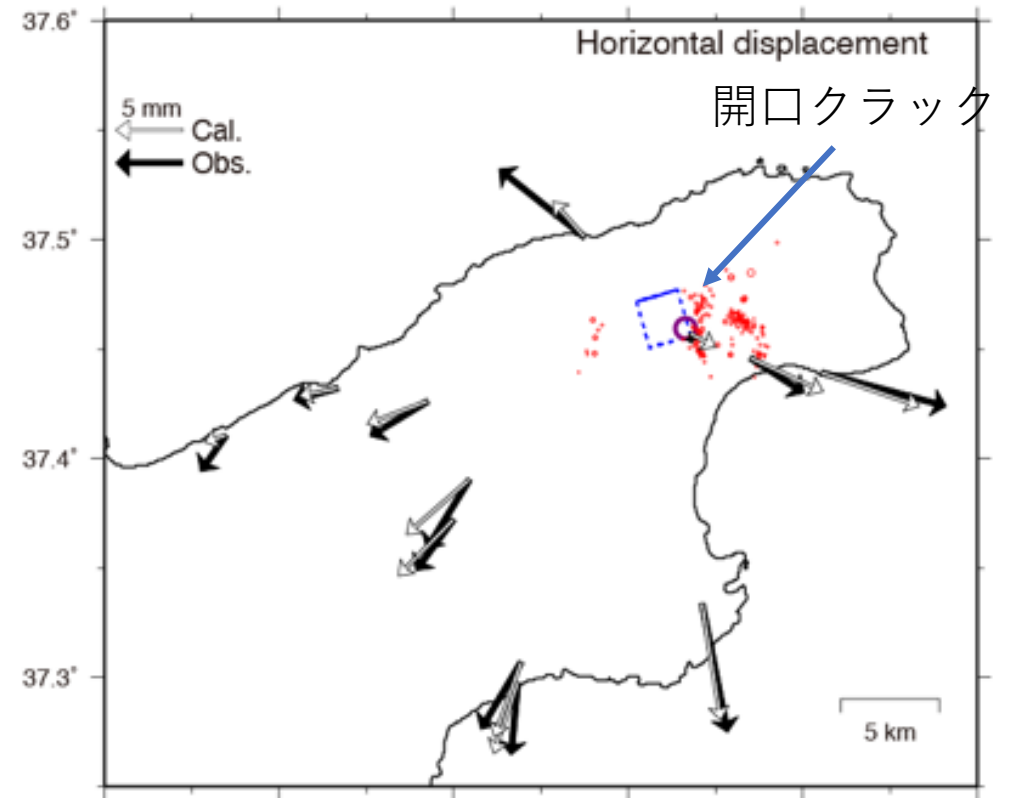
(2020年11月-2021年3月)

深部での開口



期間A(2020年11月上旬-2021年3月上旬)

観測値と計算値の比較



Inflation  $\Delta V +3.1 \times 10^7 \text{ m}^3$  Depth 15 km



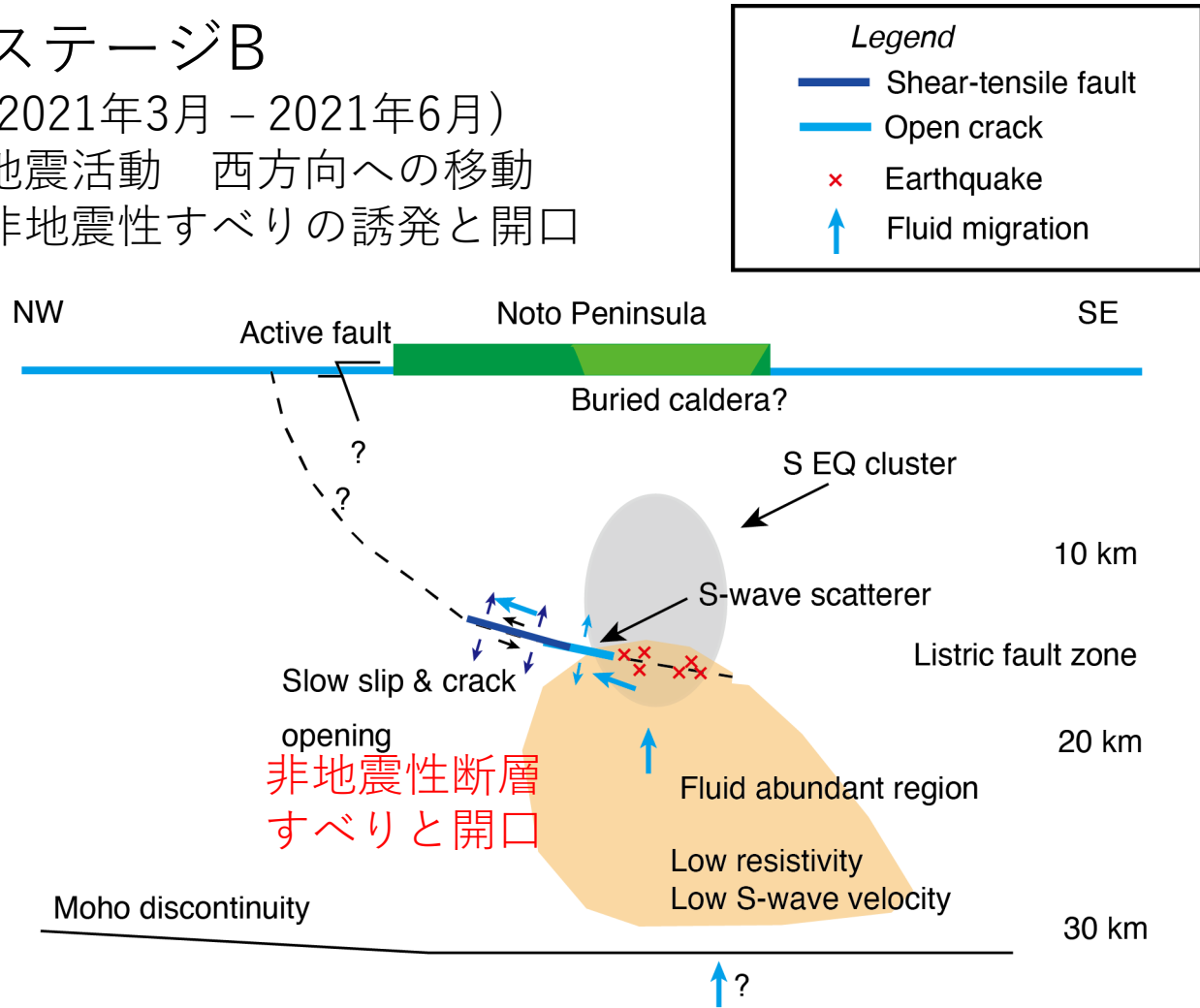
# 提案するシナリオ(2)

## ステージB

(2021年3月 - 2021年6月)

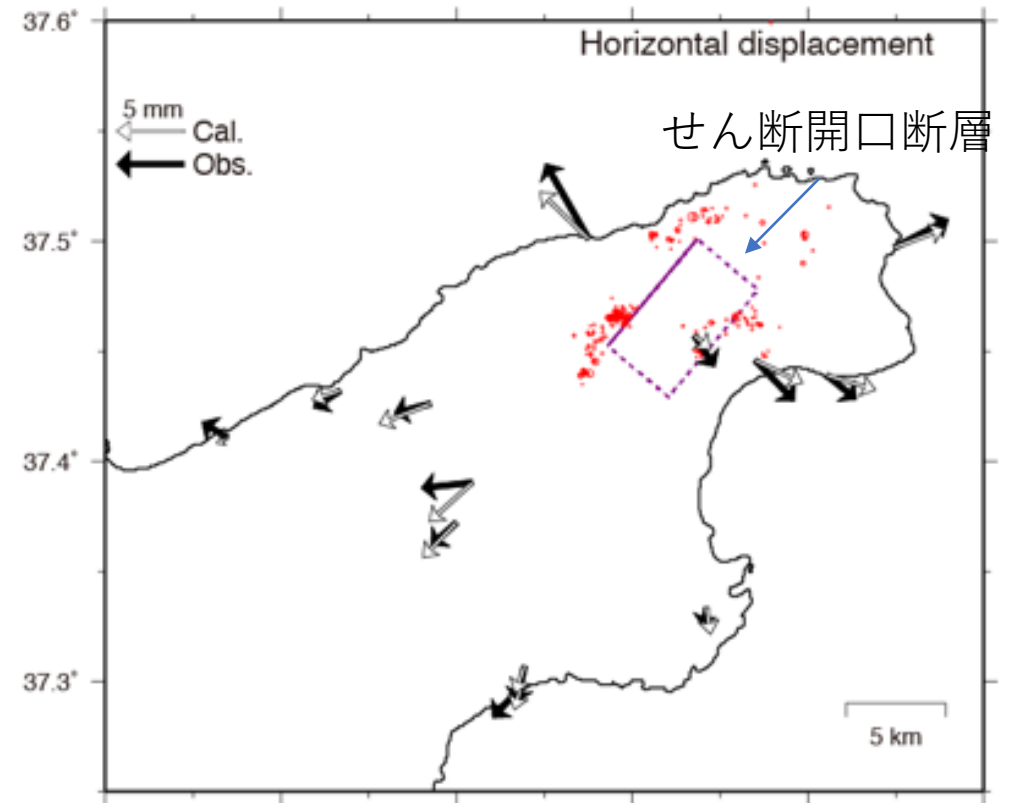
地震活動 西方向への移動

非地震性すべりの誘発と開口



期間B(2021年3月上旬-6月下旬)

観測値と計算値の比較

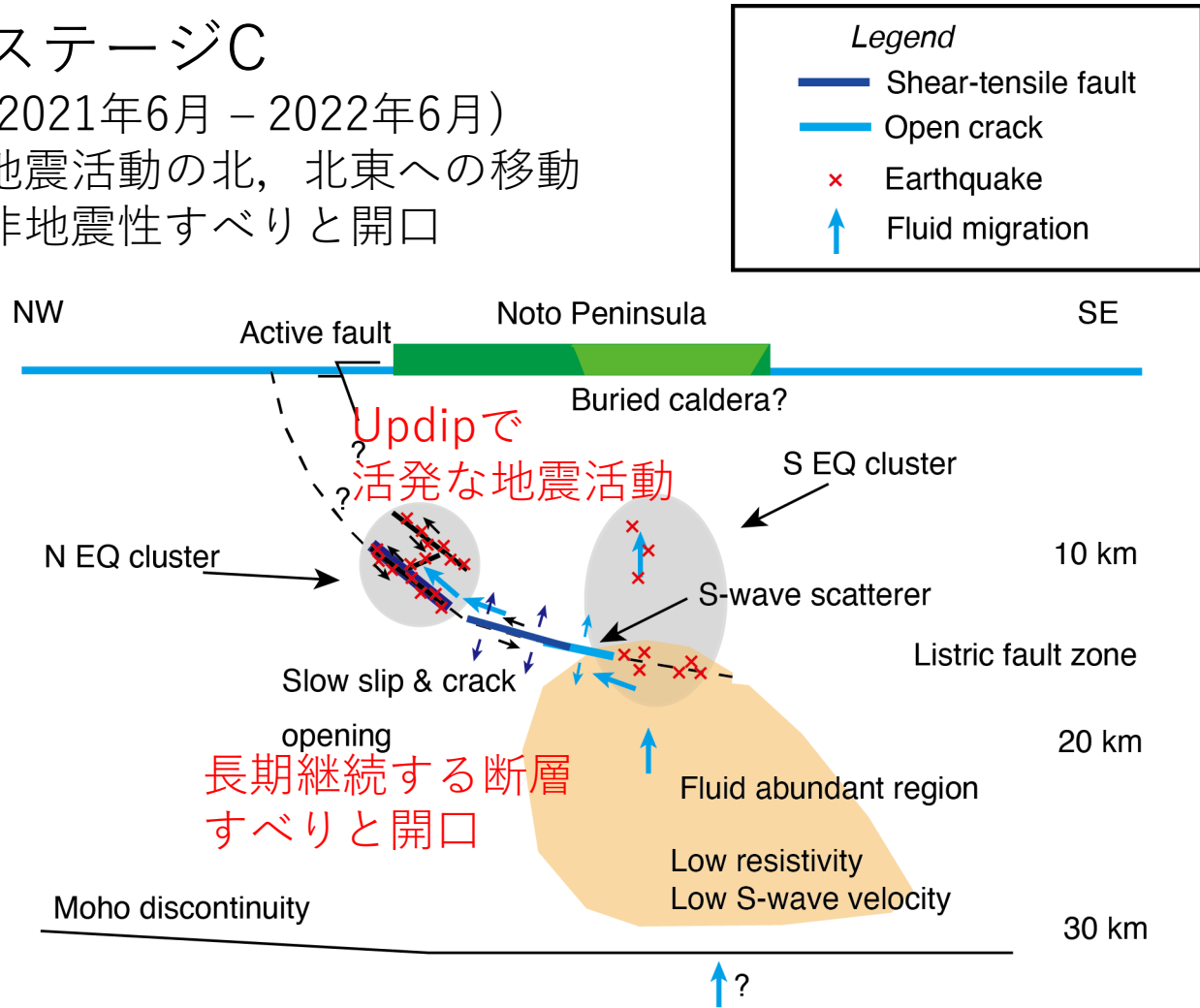


せん断開口断層:  $M_w$  5.4,  $\Delta V +4.1 \times 10^6 \text{ m}^3$

# 提案するシナリオ(3)

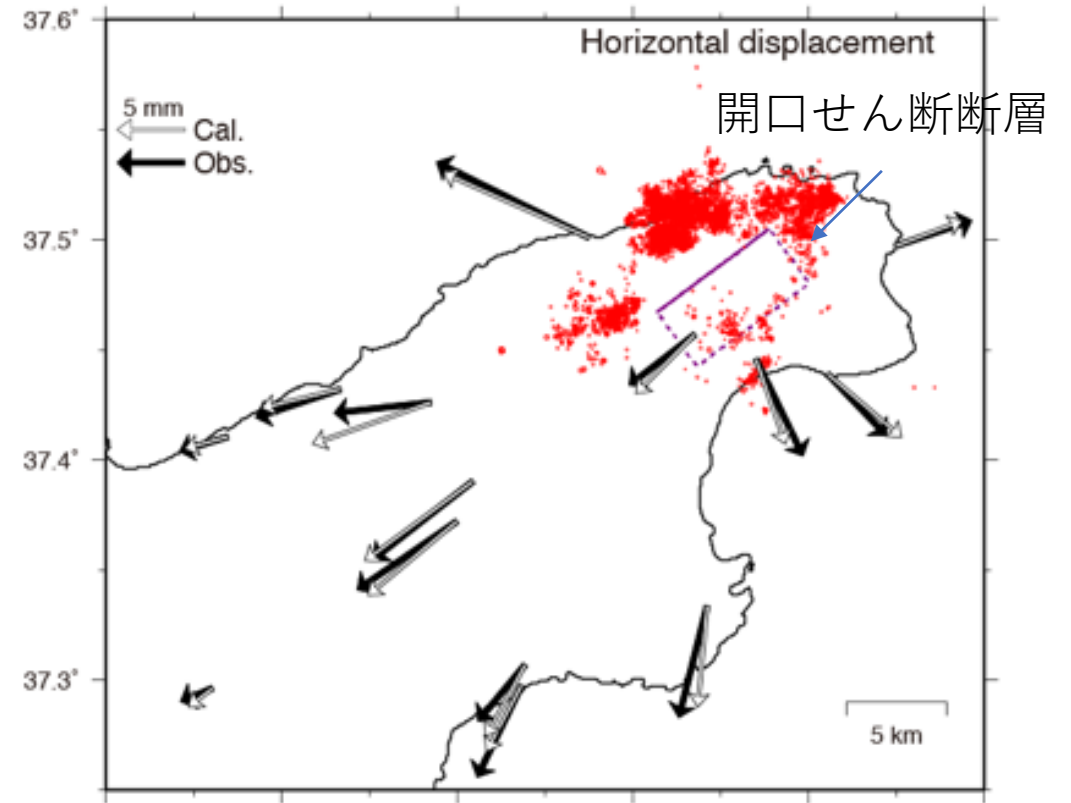
## ステージC

(2021年6月 - 2022年6月)  
地震活動の北、北東への移動  
非地震性すべりと開口



期間C (2021年6月下旬-2022年6月中旬)

観測値と計算値の比較



せん断開口断層:  $M_w$  5.7,  $\Delta V +1.4 \times 10^7 \text{ m}^3$

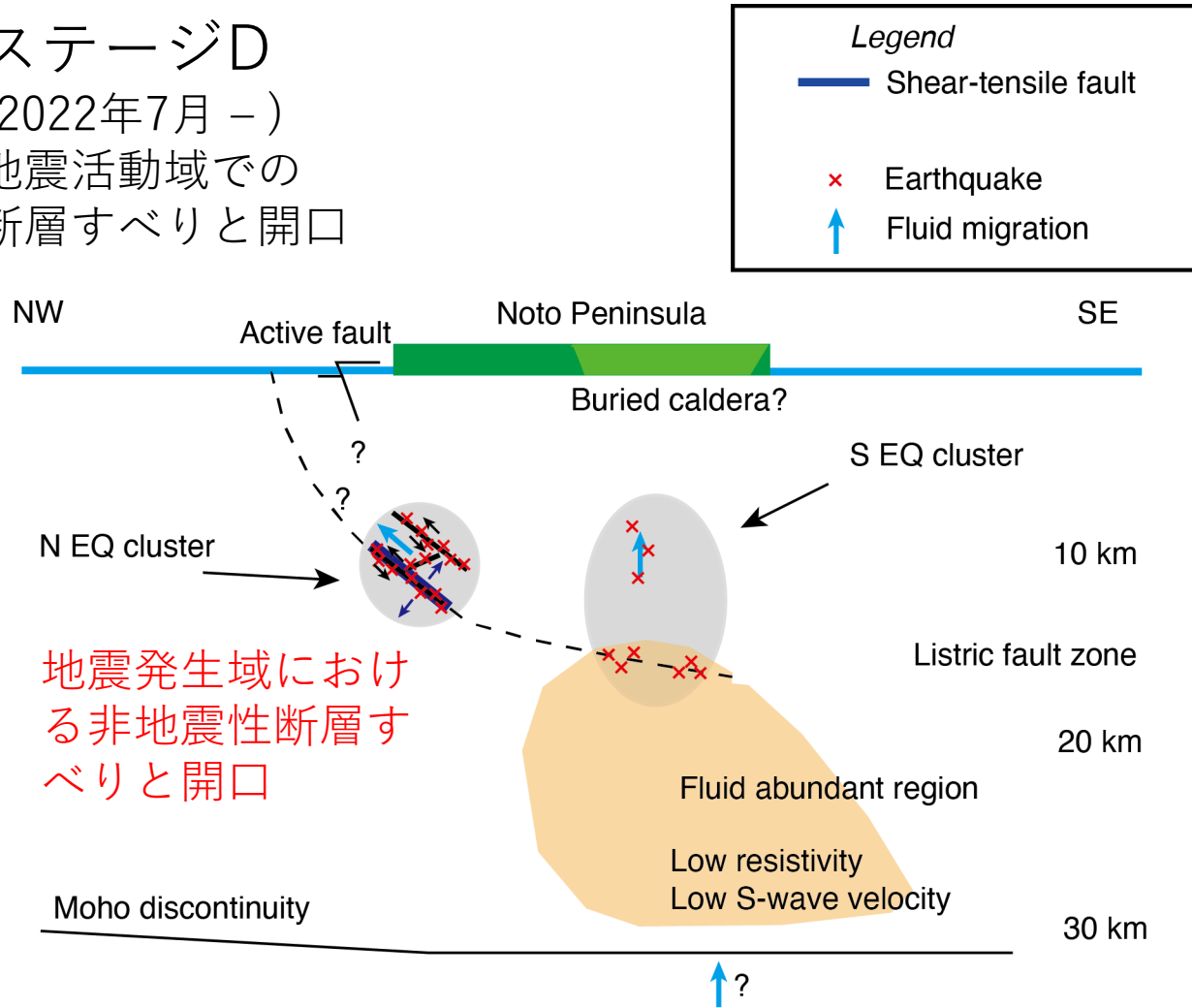
継続期間1年以上

# 提案するシナリオ(4)

## ステージD

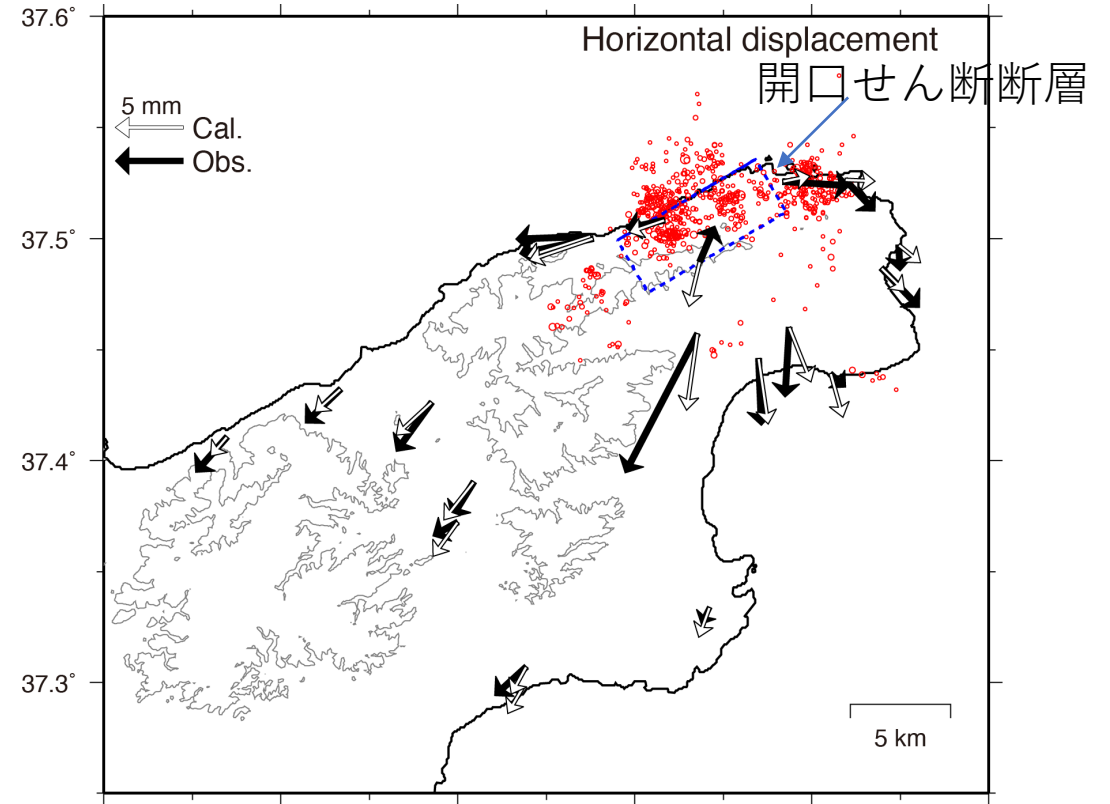
(2022年7月 -)

地震活動域での  
断層すべりと開口



期間D' (2022年8月下旬-2023年2月下旬)

観測値と計算値の比較



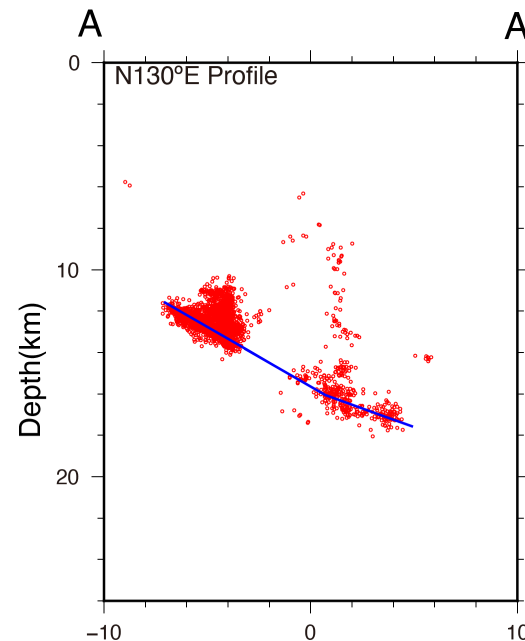
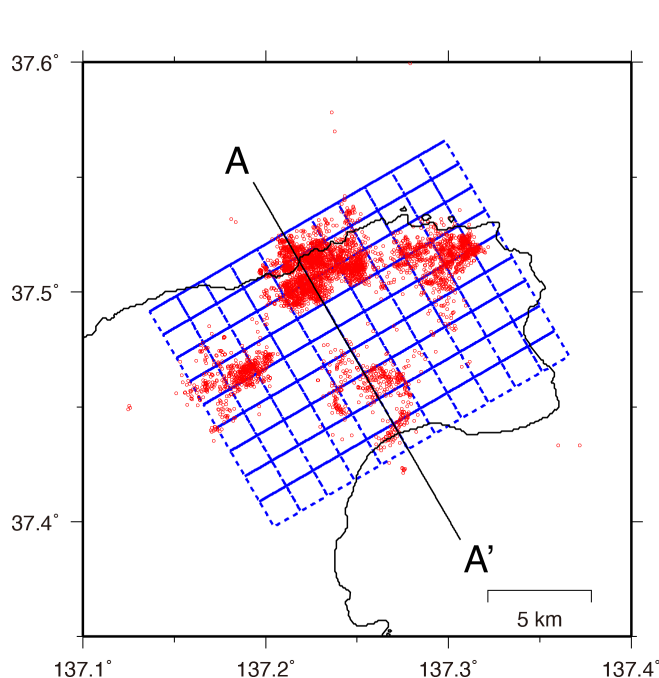
せん断開口断層:  $M_w$  5.4 ( $1.7 \times 10^{17}$  N m)  
 $\Delta V +2.2 \times 10^6$  m<sup>3</sup>

同じ期間の微小地震による地震モーメント積算は  
 $\sim 6 \times 10^{16}$  N mなので、非地震性すべりは2/3程度

# すべり分布推定 (暫定)

南東傾斜の断層面上ですべり (すべり角  $125^\circ$  で固定) と開口を同時推定. 滑らかな分布(ラプラシアンが小さい)を先験情報としている. 非負拘束使用し, 先験情報を軽視した (スムージングが効いていない) 解を採用.

仮定した断層面形状



赤点はDD法による再決定震源(平松・私信)

	期間A	期間B	期間C	期間D'
期間	20年11上-21年3月上	21年3上-6月下	21年6下-22年6月中	22年8下-23年2月下
地震モーメント ( $\times 10^{17}$ Nm) ( $M_w$ )	1.1 (5.29)	2.5 (5.53)	7.2 (5.84)	2.1 (5.48)
体積増加量( $\times 10^6$ m <sup>3</sup> )	14.7	7.0	7.7	3.1

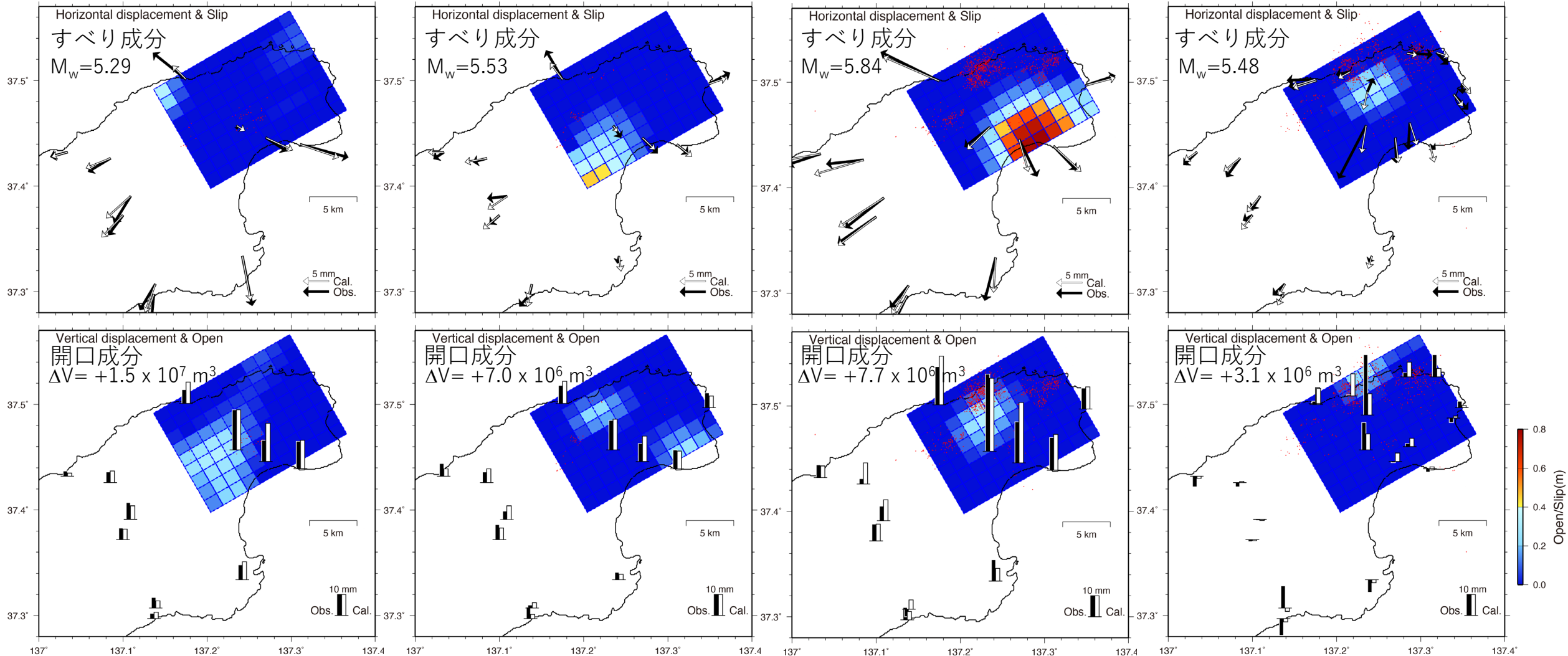
# すべり分布推定 (暫定)

Period A (2020年11月上旬-2021年3月上旬)

Period B (2021年3月上旬-6月下旬)

Period C (2021年6月下旬-2022年6月中旬)

Period D' (2022年8月下旬-2023年2月下旬)



# まとめ

- 2020年12月から始まった能登半島群発地震は、非火山地域の群発地震としては最近30年間には見られなかった非定常地殻変動を伴っている。2022年6月のM5.4地震以降は地殻変動速度は鈍化しているが、現在も北側の観測点ではわずかな変動が継続している
- ソフトバンク独自基準点や臨時観測点により、非定常地殻変動の詳細な時空間発展が明らかになった。
- 観測された地殻変動を説明するシナリオは以下の通り。
  - 最初の3ヶ月間に南側の地震クラスターを通過して、深さ16km程度へ大量の流体( $1-3 \times 10^7 \text{m}^3$ )が上昇し、透水率の低い断層帯に沿って北西方向へ移動し、シル状に蓄積。
  - 断層帯に沿って北から北東側に流体が移動すると同時に、断層帯の強度低下により地震発生域下限より深部で非地震性すべりを誘発。
  - 非地震性すべりと流体拡散による強度低下の両方が浅部での活発な群発地震を誘発。
  - 2022年6月以降は地震発生下限よりも浅部へ流体が移動し、群発地震発生域でも非地震性すべりが発生。