

地殻変動データを用いた 地震時断層すべり推定

東北大学 災害科学国際研究所

岡田 悠太郎^{1,2} & 福島 洋^{3,2,1}

1: 上廣防災学寄附研究部門

2: 災害評価・低減研究部門

3: 防災実践推進部門

九州地方

- 陸のプレートの下にフィリピン海プレートが沈み込む
- 内陸には多くの活断層が複雑に分布

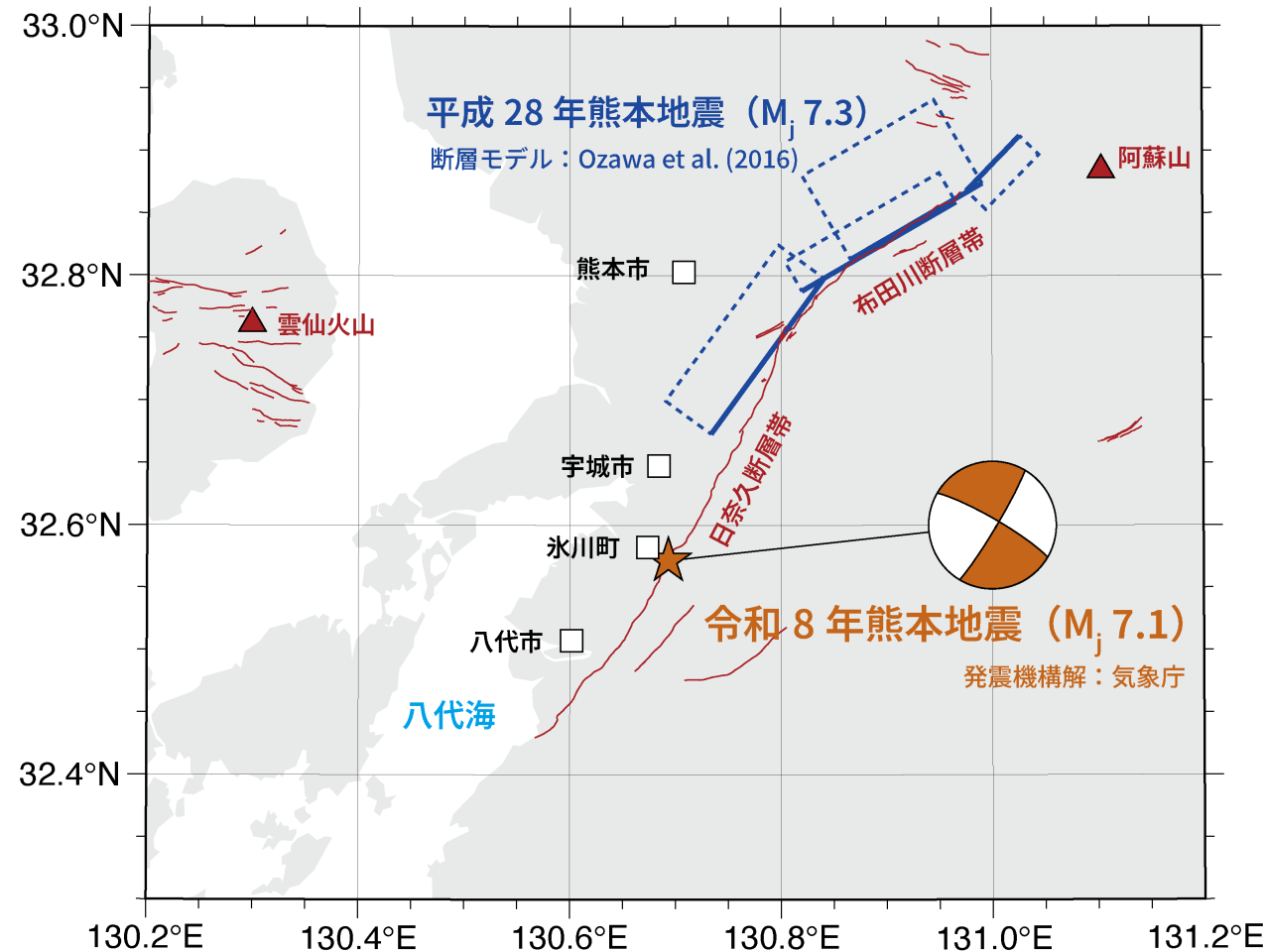
平成28年熊本地震

- M_j 6.5 の地震の28時間後に M_j 7.3 の地震が発生（最大震度 7）
- 布田川・日奈久断層帯で発生した右横ずれ型地震



令和8年熊本地震

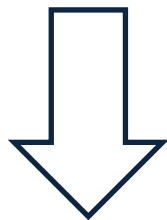
- M_j 7.1 の右横ずれ型地震（最大震度 7）
- 日奈久断層帯で発生



断層線: 中田・今泉 (2002)

目的：地震による断層のずれ（すべり）の特徴の解明

1. 人工衛星のデータを用いた地殻変動解析
([福島, 岡田, & Okur, 令和8年熊本地震速報会](#))
2. 地殻変動データを用いたすべり分布推定



暫定的な推定結果の要点

- 地震による断層すべり（最大約2.5 m）は30 km以上にわたって地表に到達
- 大きなすべりは日奈久区間南部の大部分までは及んでいない
⇒ すべり域の南西側においても大きな地震が発生する可能性

GNSS：GPSなどの人工衛星を使って地球上の位置を測定するシステムの総称

⇒ GNSS受信装置を地面に固定することで地面の位置の変化（**地殻変動**）を観測

解析方法

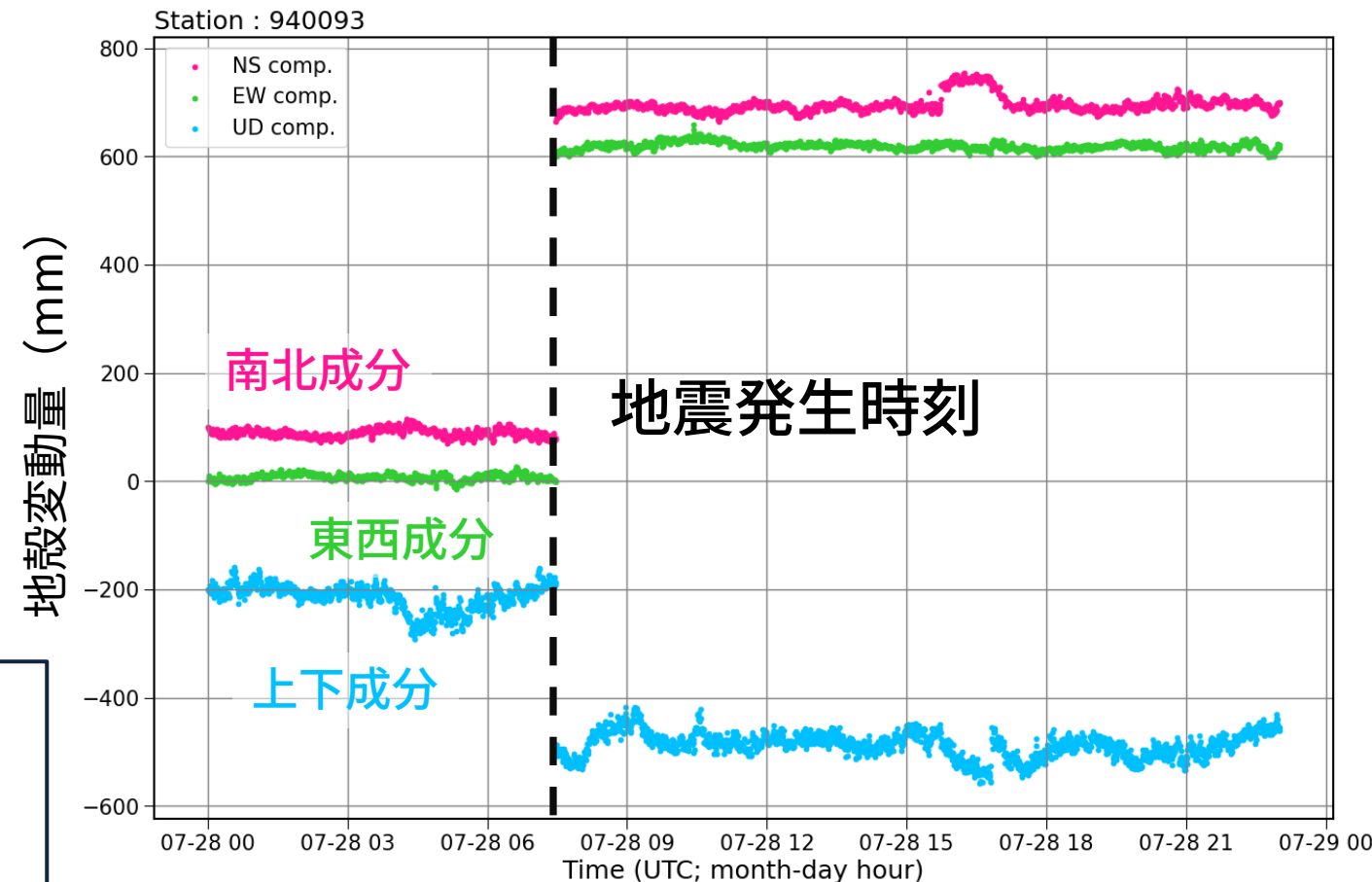
九州地方のGEONET観測局
141点の観測値（2026/7/28）

↓ PRIDE PPP-AR (Geng et al., 2019)

30秒ごとの座標データ

座標時系列の例
(千丁@熊本県八代市)

データには周辺環境や衛星軌道に
起因するノイズが含まれていることに注意



2. GNSSデータ解析により得られた地殻変動場

4

変位の傾向

断層の北西側：およそ北東方向
(最大約86 cm)

断層の南東側：およそ南西方向
(最大約17 cm)

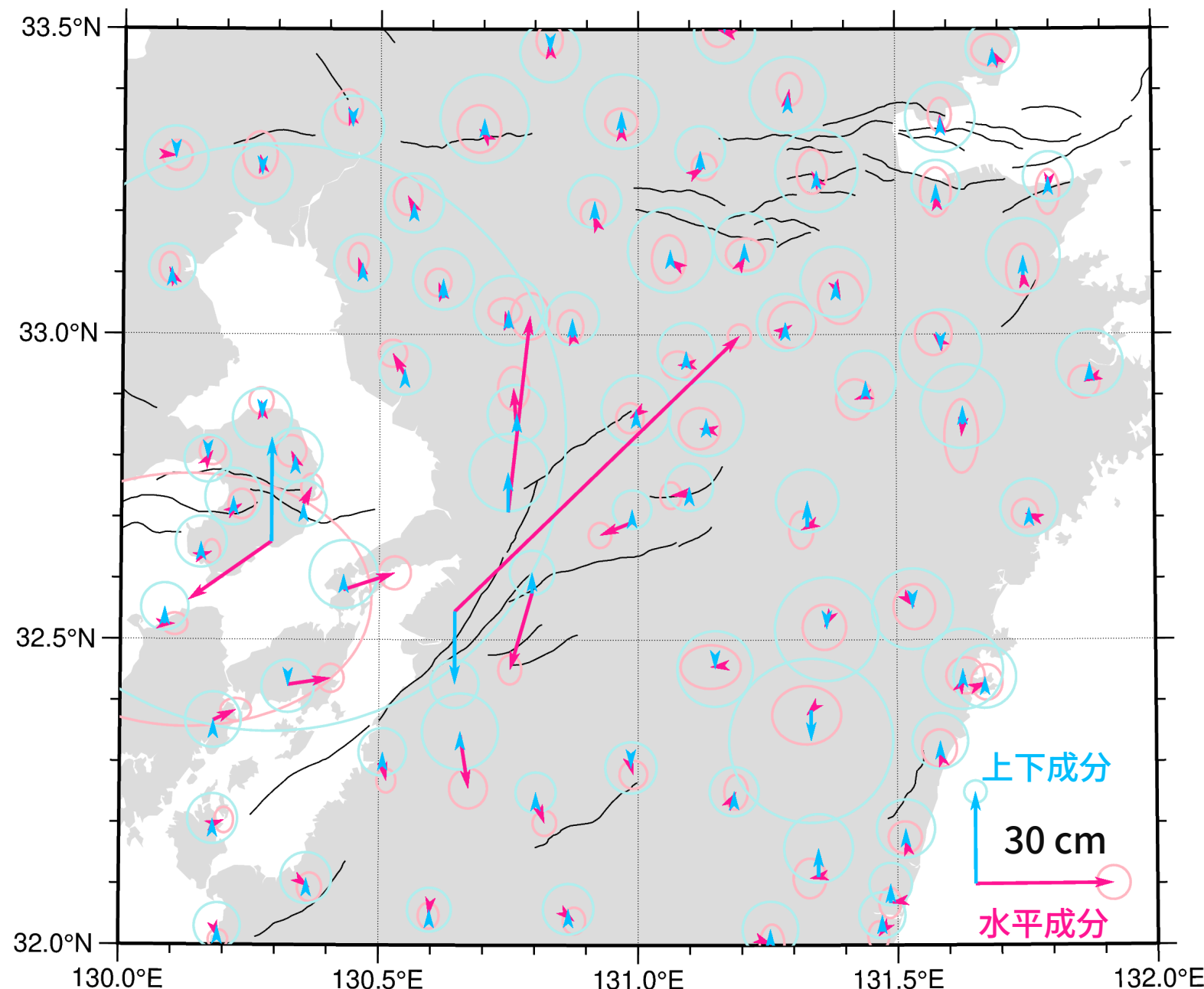
断層の近傍：上下変位
(最大約24 cmの沈降)

図の見方

矢印：変位の大きさと方向

薄い丸：各点の変位の不確実性の大きさ

黒い線：活断層 (Styron et al., 2020)



解析方法

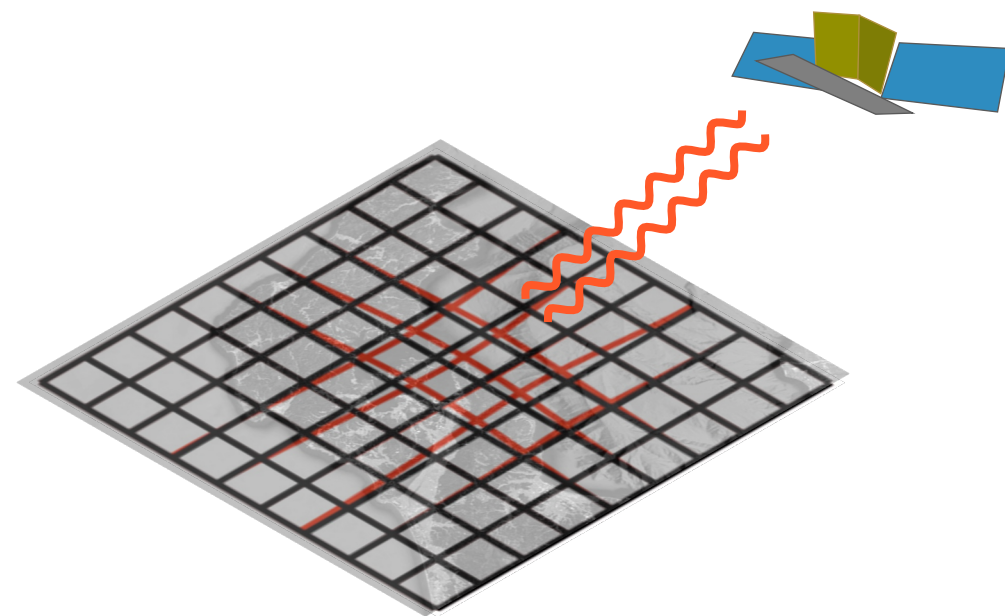
だいち2号に搭載されたPALSAR2のデータ

↓ RINC (Ozawa et al., 2016)

衛星視線方向 & 衛星進行方向の変位

衛星進行方向	基準データ	比較データ
北行軌道	2025/8/12	2026/7/28
南行軌道	2022/12/7	2026/7/29

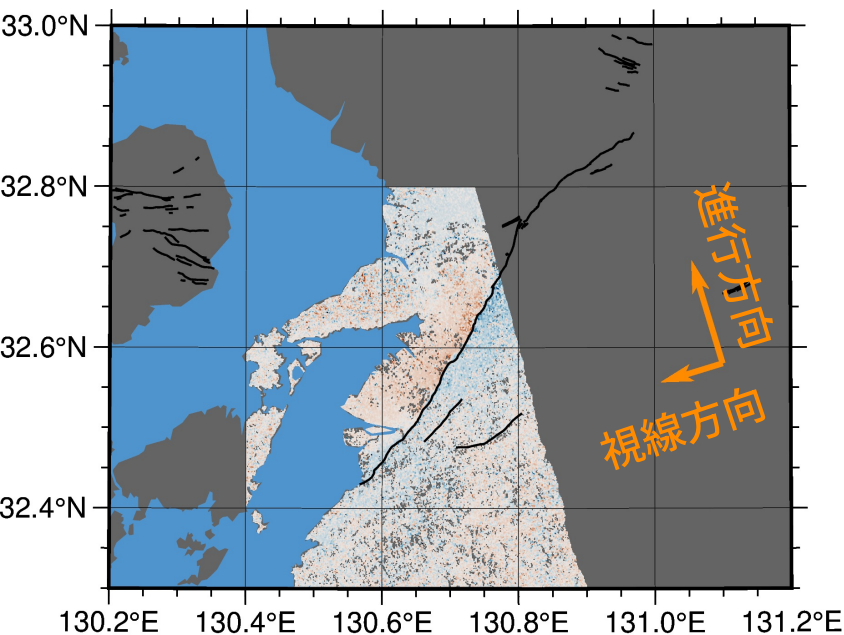
ピクセルオフセット解析



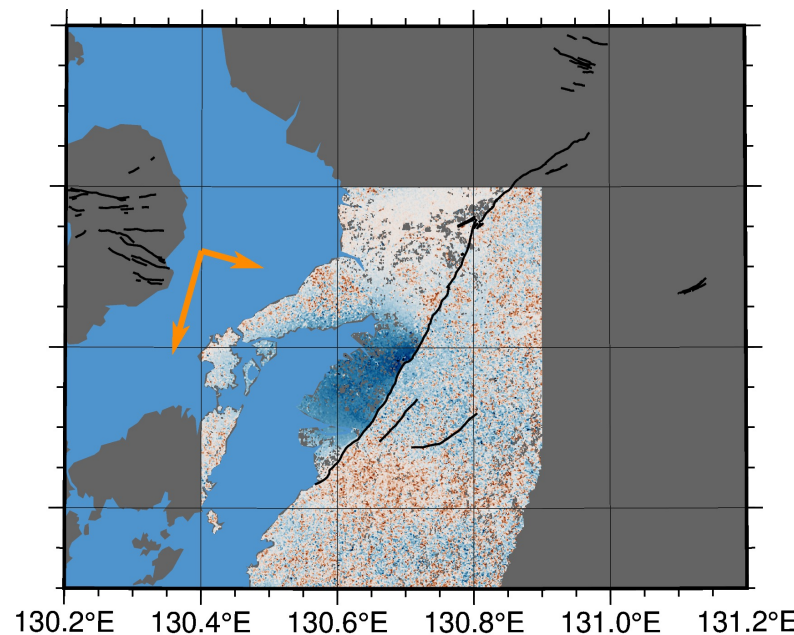
精度は落ちる（数10cm）が、
大きな変動（1m以上）を捉えることができる

2. SARデータ解析により得られた地殻変動場

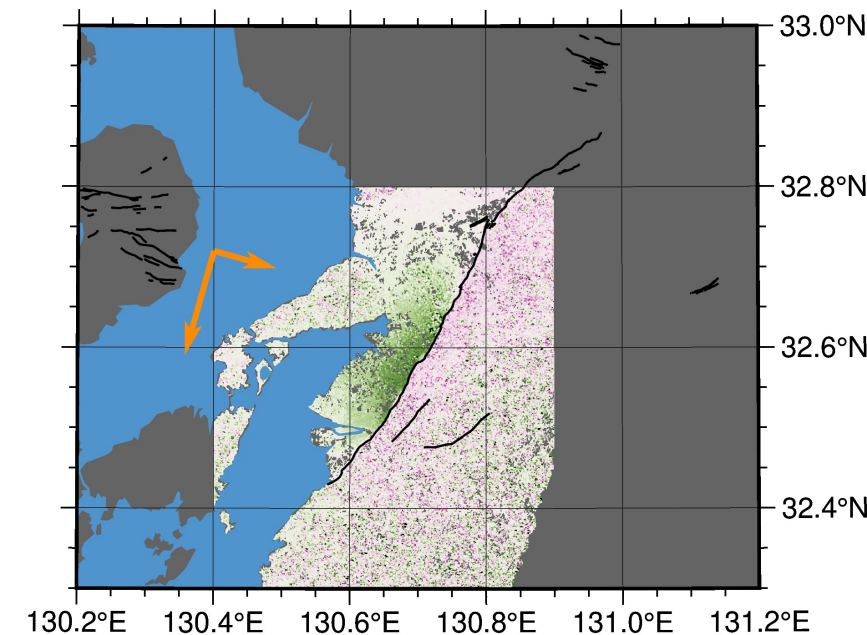
北行軌道（視線方向）



南行軌道（視線方向）



南行軌道（進行方向）



衛星から遠ざかる
視線方向の変位 (m)

衛星に近づく

進行方向と反対
(衛星から遠ざかる)

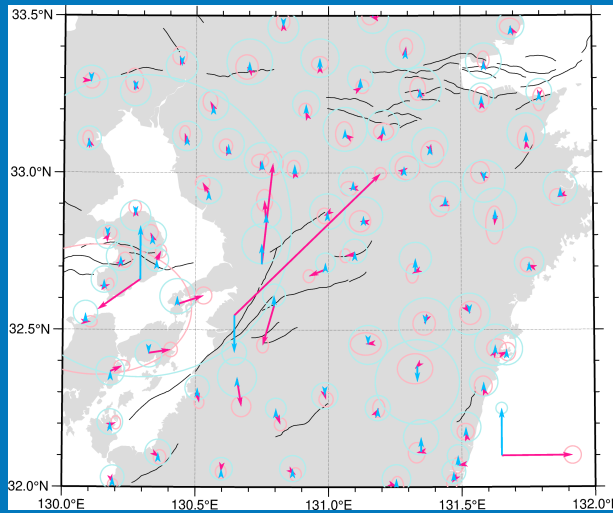
進行方向の変位 (m)

進行方向と同じ
(衛星に近づく)

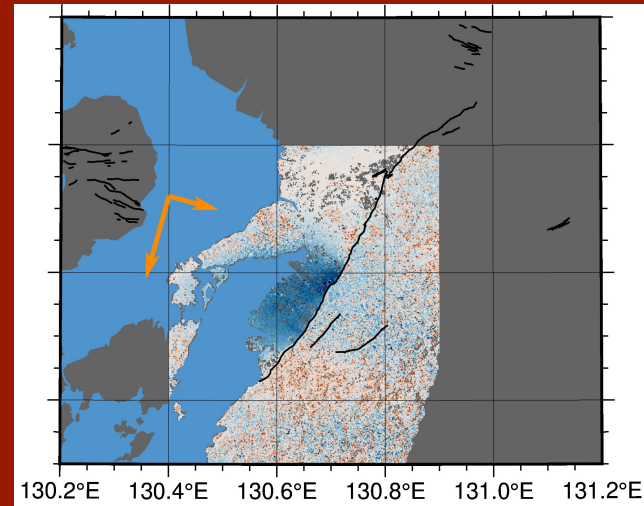
- ノイズの影響はあるものの、最大約1 mの変位を観測
- 日奈久断層を境に変位の符号が反転
⇒ 右横ずれすべりから期待される空間パターンと調和的

入力データ

GNSSデータ



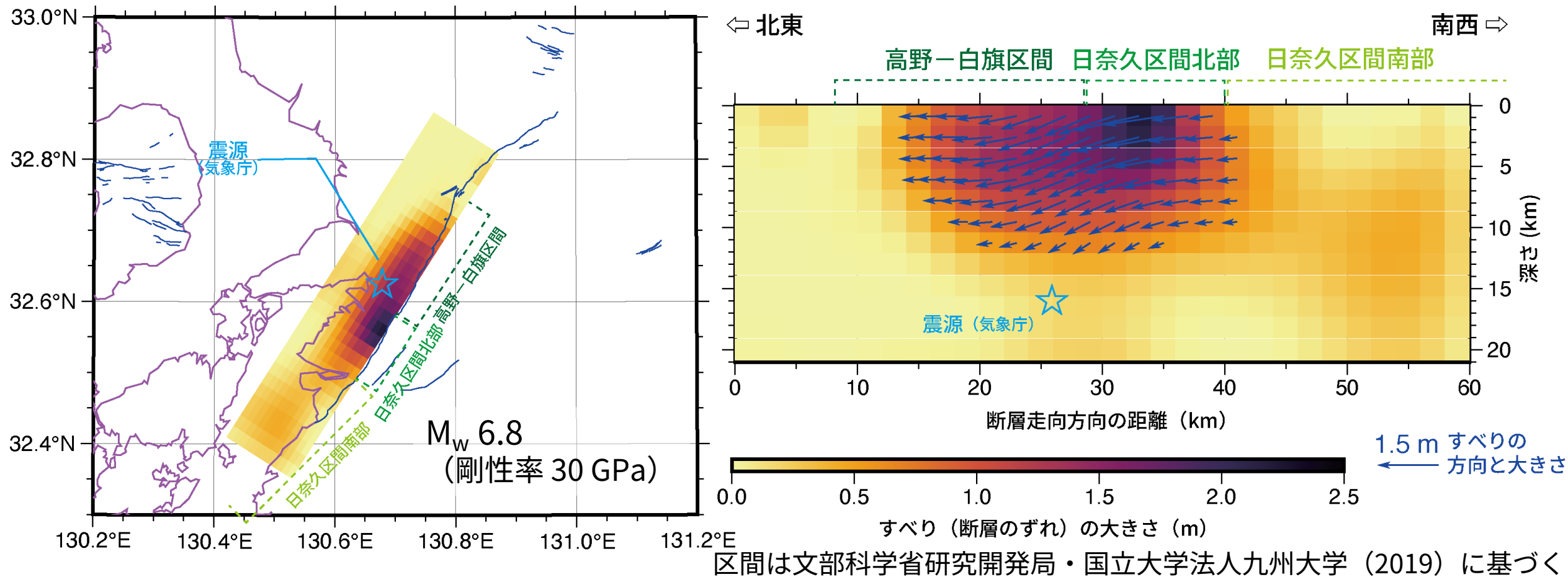
SARデータ



断層すべりモデル推定

- 地殻変動を断層のずれに変換する物理モデルを仮定 (Okada 1992)
- 最適な断層のずれのパターンを統計的手法により探索 (cf. Yabuki & Matsu'ura 1992)

3. 推定された断層すべりモデル（暫定版）

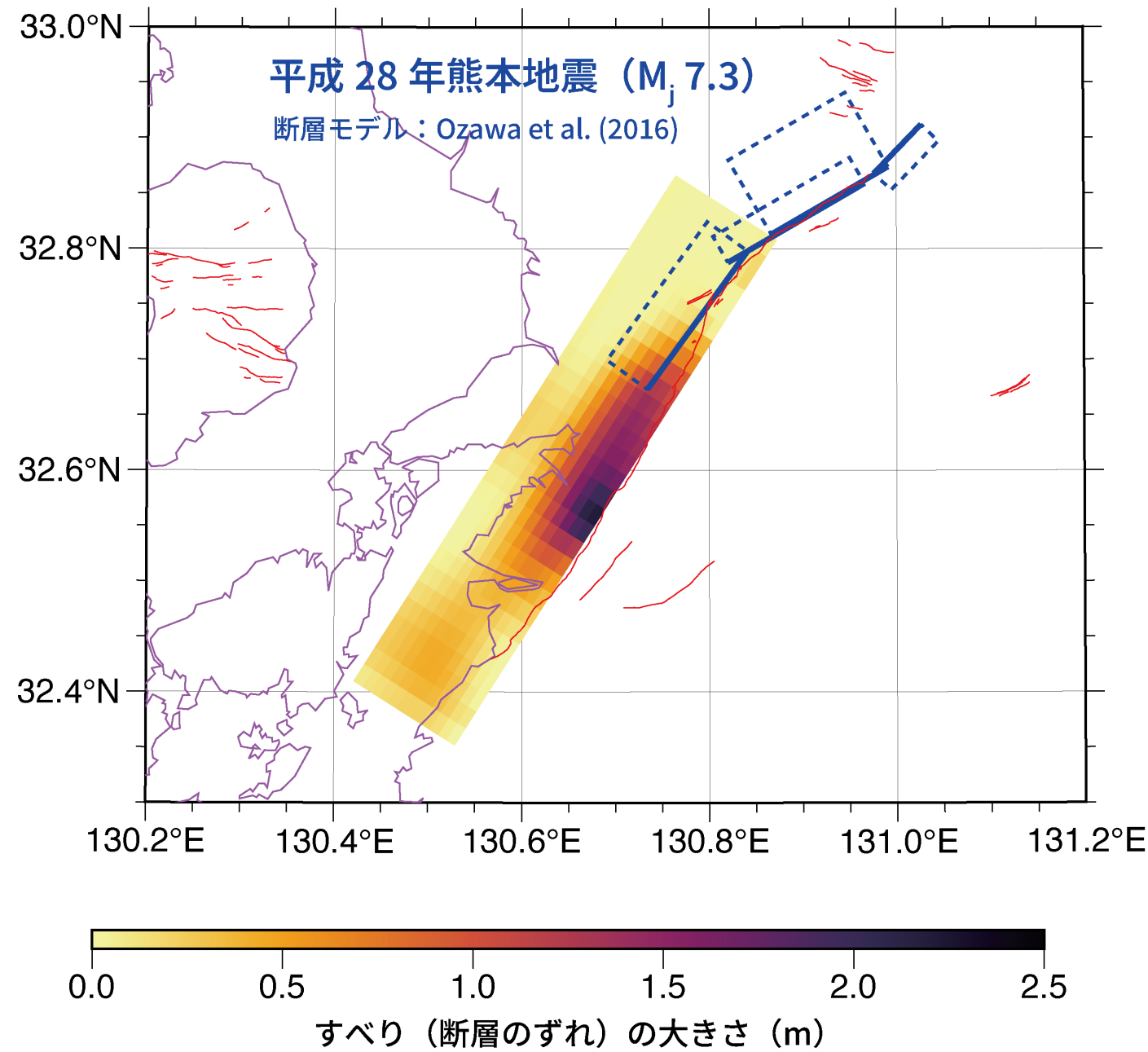


- 断層すべりは30 km以上にわたって地表まで到達（最大約2.5 m）
⇒ すべり域の広がりとは現地調査で得られた地表地震断層の分布と調和的
- 大きなすべりは日奈久区間南部の大部分までは及んでいない
（日奈久区間南部の小すべり域はM_j 5+ の余震を捉えている可能性がある）

3. 平成28年熊本地震との比較

9

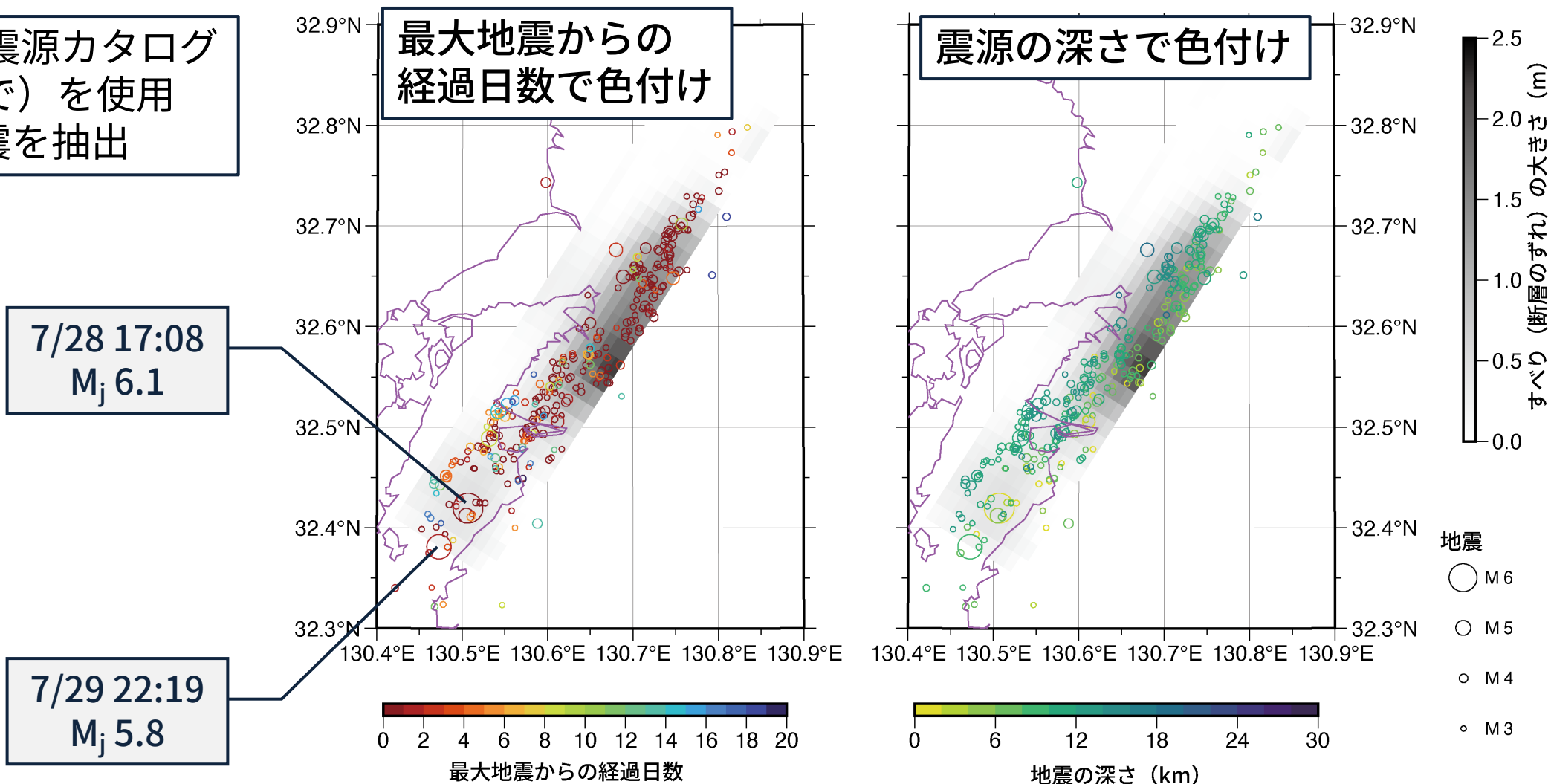
- 令和8年熊本地震のすべり域の重心は平成28年熊本地震のすべり域の南西側に位置
- 令和8年地震のすべり域は平成28年地震と一部重なる
 - ⇒ 短期間で断層の繰り返しずれ動いたことは現地調査からも示唆されている
(熊原・他, [日本地理学会災害調査報告](#))



3. 余震活動との比較

10

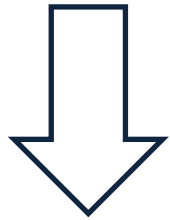
- ・ 気象庁一元化震源カタログ (2026/8/17まで) を使用
- ・ M_j 3以上の地震を抽出



- 余震は主にすべり域からその南西側にかけて分布
- M_j 6.1・ M_j 5.8の余震はすべり域南西側に分布

目的：地震による断層のずれ（すべり）の特徴の解明

1. 人工衛星のデータを用いた地殻変動解析
([福島, 岡田, & Okur, 令和8年熊本地震速報会](#))
2. 地殻変動データを用いたすべり分布推定



暫定的な推定結果の要点

- 地震による断層すべり（最大約2.5 m）は30 km以上にわたって地表に到達
- 大きなすべりは日奈久区間南部の大部分までは及んでいない
⇒ すべり域の南西側においても大きな地震が発生する可能性

- ALOS-2衛星のSARデータは、JAXAが主体となって実施している地球観測衛星を用いた防災利用検証実験の一環として、地震活動SAR解析ワーキンググループ（事務局：国土地理院）の活動を通して提供されました。
- SAR解析には、RINC (Ozawa et al., 2016) を使わせていただきました。
- GEONET RINEXデータ (GSI, 2025) は国土地理院により提供されたものです。
- PyGMT (Tian et al., 2026; Wessel et al., 2019) を作図に用いました。

補遺

3. 断層すべり分布推定手法 (1)

断層すべりをすべり1方向（右横ずれすべり）とすべり2方向（正断層すべり）に分解するとGNSS・SARデータについての観測方程式はそれぞれ以下のように書ける

For GNSS

$$\mathbf{d}^g = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_1^g & \mathbf{G}_2^g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{s}_1 \\ \mathbf{s}_2 \end{pmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}^g$$

For SAR

$$\begin{pmatrix} \mathbf{d}^{ar} \\ \mathbf{d}^{dr} \\ \mathbf{d}^{da} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_1^{ar} & \mathbf{G}_2^{ar} \\ \mathbf{G}_1^{dr} & \mathbf{G}_2^{dr} \\ \mathbf{G}_1^{da} & \mathbf{G}_2^{da} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{s}_1 \\ \mathbf{s}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Gamma}^{ar} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Gamma}^{dr} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \boldsymbol{\Gamma}^{da} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}^{ar} \\ \mathbf{x}^{dr} \\ \mathbf{x}^{da} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^{ar} \\ \boldsymbol{\varepsilon}^{dr} \\ \boldsymbol{\varepsilon}^{da} \end{pmatrix}$$

$\mathbf{d}^{(\cdot)}$: データベクトル

$\mathbf{G}_{(\cdot)}^{(\cdot)}$: 断層すべり成分のカーネル行列 (Okada 1992)

$\mathbf{s}_{(\cdot)}$: 小断層における断層すべり

$\boldsymbol{\Gamma}^{(\cdot)}$: SARデータの長波長ノイズについてのカーネル行列

$\mathbf{x}^{(\cdot)}$: 長波長ノイズの振幅

$\boldsymbol{\varepsilon}^{(\cdot)}$: 観測誤差

それぞれの観測手法における観測誤差は平均 $\mathbf{0}$ 、共分散行列 $\mathbf{E}^{(\cdot)}$ の多変量正規分布に従うと仮定

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(\cdot)} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{E}^{(\cdot)})$$

共分散行列の与え方

GNSS : 観測に基づき対角項の値を決定

SAR : 指数減衰モデル (e.g., Fukushima et al. 2005)

(2.5 kmの減衰距離、標準偏差 5 cmを試行錯誤的に使用)

3. 断層すべり分布推定手法 (2)

以上より、GNSS・SARの2つのデータを用いたすべり推定における観測方程式は

$$\begin{pmatrix} \mathbf{d}^g \\ \mathbf{d}^{ar} \\ \mathbf{d}^{dr} \\ \mathbf{d}^{da} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_1^g & \mathbf{G}_2^g & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{G}_1^{ar} & \mathbf{G}_2^{ar} & \mathbf{\Gamma}^{ar} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{G}_1^{dr} & \mathbf{G}_2^{dr} & \mathbf{0} & \mathbf{\Gamma}^{dr} & \mathbf{0} \\ \mathbf{G}_1^{da} & \mathbf{G}_2^{da} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{\Gamma}^{da} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{s}_1 \\ \mathbf{s}_2 \\ \mathbf{x}^{ar} \\ \mathbf{x}^{dr} \\ \mathbf{x}^{da} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^g \\ \boldsymbol{\varepsilon}^{ar} \\ \boldsymbol{\varepsilon}^{dr} \\ \boldsymbol{\varepsilon}^{da} \end{pmatrix}$$

となり、一般に知られた線形システムの観測方程式

$$\mathbf{d} = \mathbf{H}\mathbf{a} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

の形となる。ただしここで

$$\boldsymbol{\varepsilon} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{E}(\gamma^2))$$

であり、共分散行列 $\mathbf{E}(\gamma^2)$ はそれぞれのデータの共分散行列 $\mathbf{E}^{(\cdot)}$ を用いて

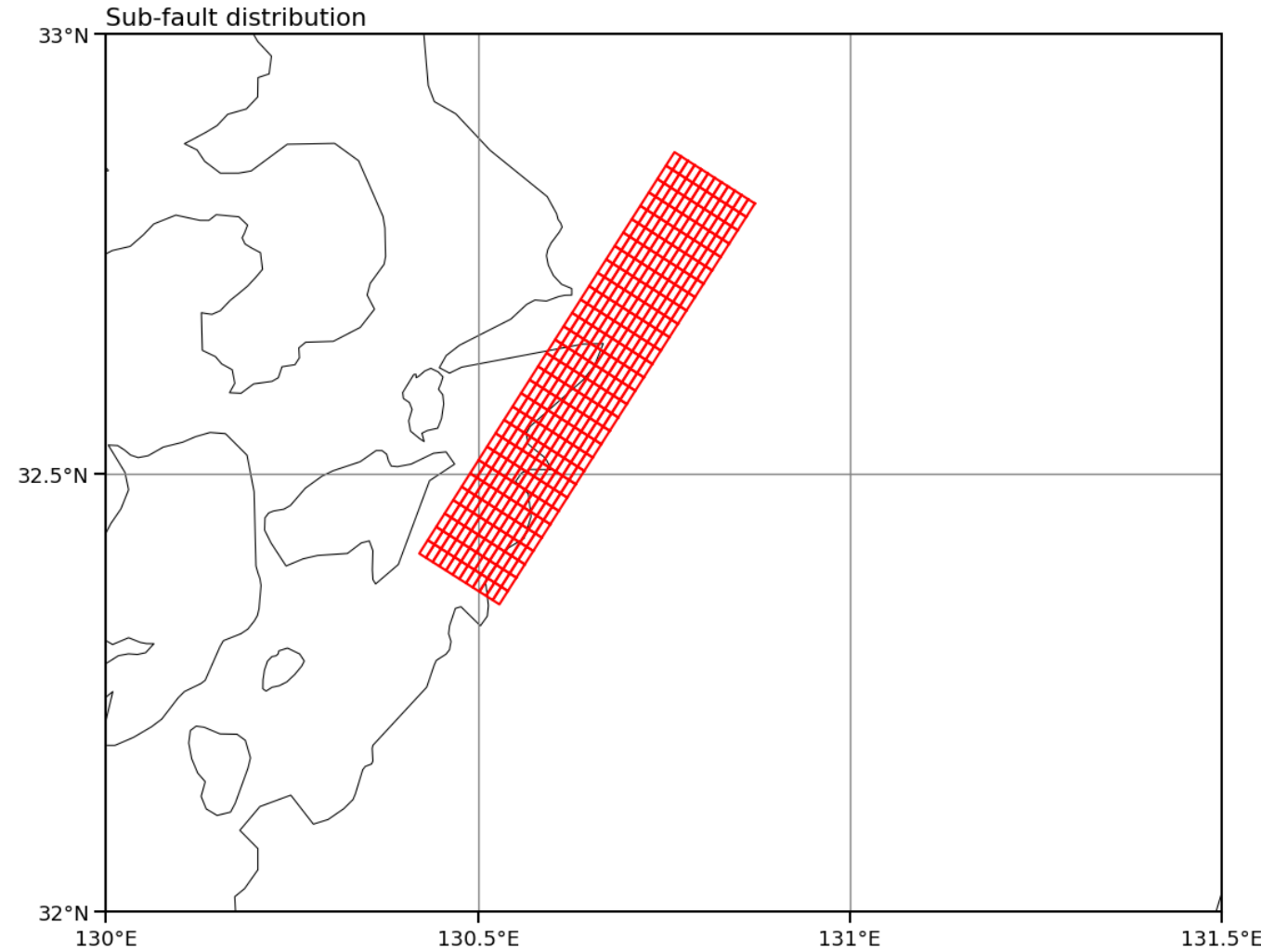
$$\mathbf{E}(\gamma^2) = \begin{pmatrix} \mathbf{E}^g & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \gamma^2 \mathbf{E}^{ar} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \gamma^2 \mathbf{E}^{dr} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \gamma^2 \mathbf{E}^{da} \end{pmatrix}$$

γ : データ間の重みを決める超パラメータ
(Funning et al. 2014)

3. 断層すべり分布推定手法 (3)

小断層の設定方法

- 2 km × 2 kmの矩形断層を仮定
- 深さの上端を0 km、下端を約20 kmに設定（傾斜角により異なる）
- 走向は日奈久断層の走向に基づき決定
- 傾斜を超パラメータとして扱いABICを用いて最適化
(Fukahata & Wright 2008)



3. 断層すべり分布推定手法（4）

先験情報

- ・滑らかなすべり分布
- ・小断層を設定した範囲の外側におけるすべりは0（地表地震断層が観測されているため上端についてはこの拘束を与えない）

目的関数

$$s(\mathbf{a}; \alpha, \beta, \gamma) = (\mathbf{d} - \mathbf{H}\mathbf{a})^T \mathbf{E}^{-1}(\gamma^2)(\mathbf{d} - \mathbf{H}\mathbf{a}) + \mathbf{a}^T (\alpha^2 \mathbf{L}_1^T \mathbf{L}_1 + \beta^2 \mathbf{L}_2^T \mathbf{L}_2) \mathbf{a}$$

ここで

$$\mathbf{L}_1 = \begin{pmatrix} l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{L}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & l & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

l ：ラプラシアン行列

α ：すべり1の平滑化強度を決める超パラメータ

β ：すべり2の平滑化強度を決める超パラメータ

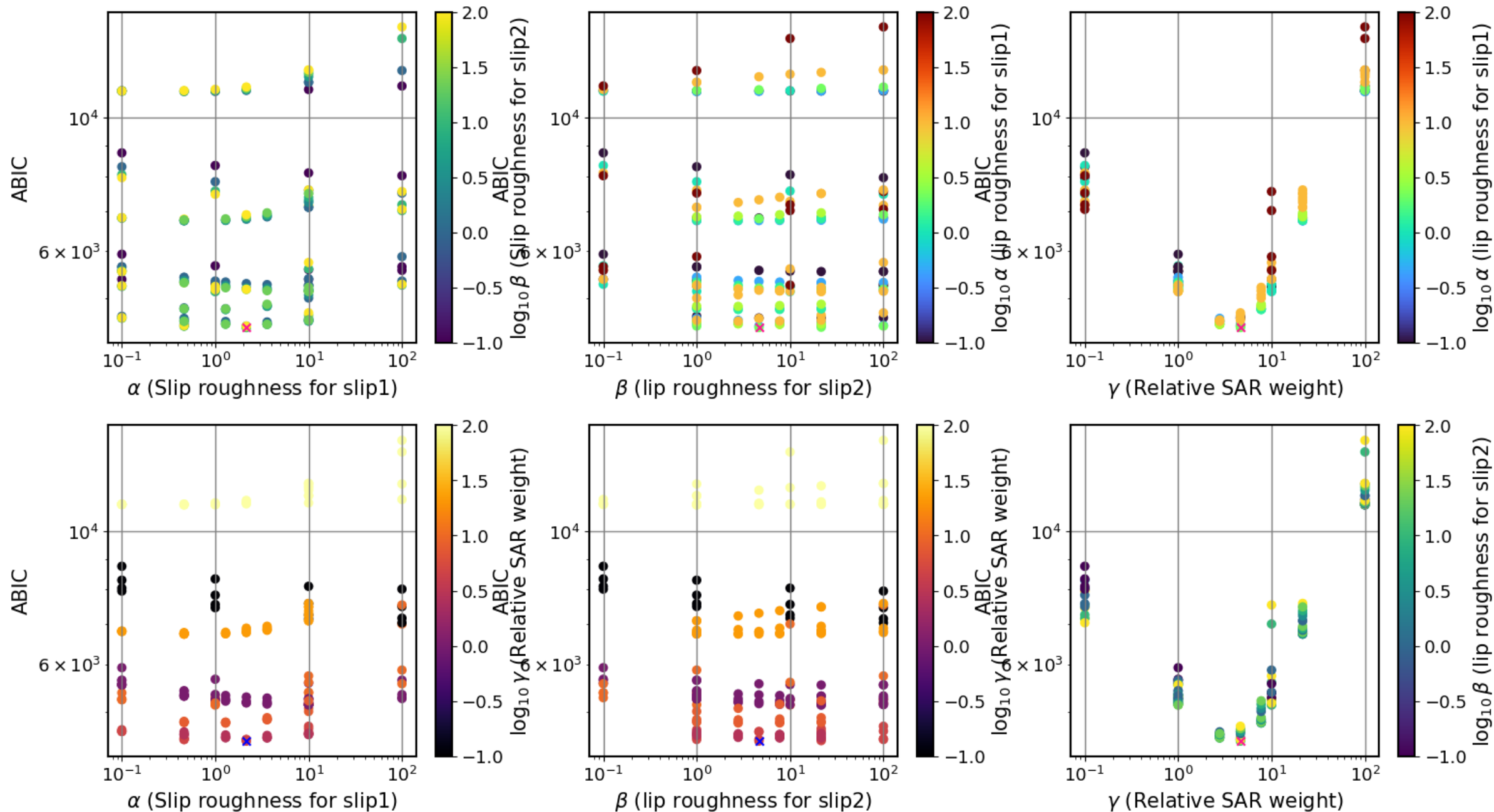
最適化手法（cf. Cheng et al. 2026）

STEP 1：ABICに基づき超パラメータを最適化（Fukahata et al. 2004）

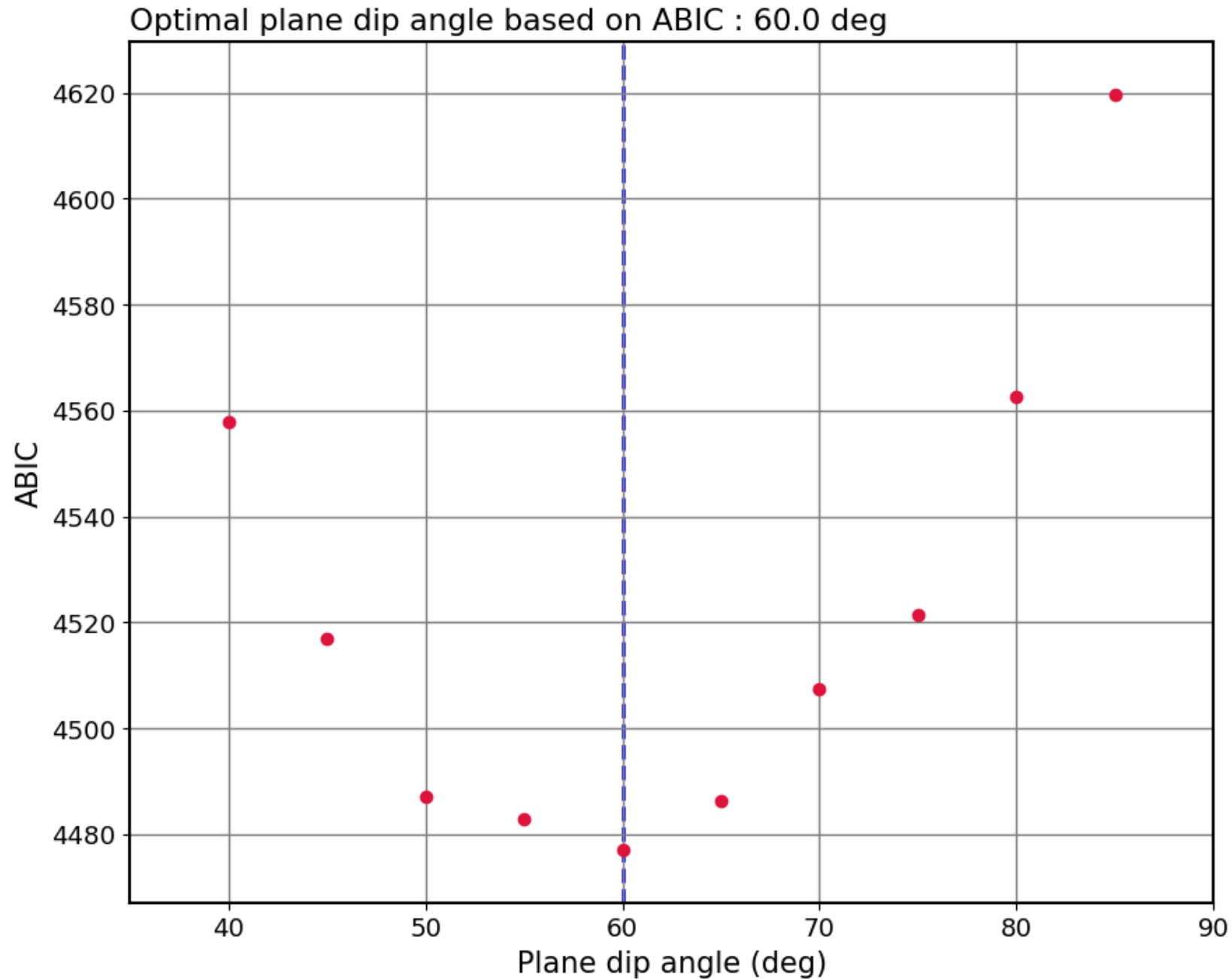


STEP 2：最適な超パラメータの下での目的関数 $s(\mathbf{a}; \hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma})$ を
Adam（Kingma & Ba 2017）を用いて非負拘束条件付最適化

3. ABICの分布（傾斜角60°を仮定した場合）

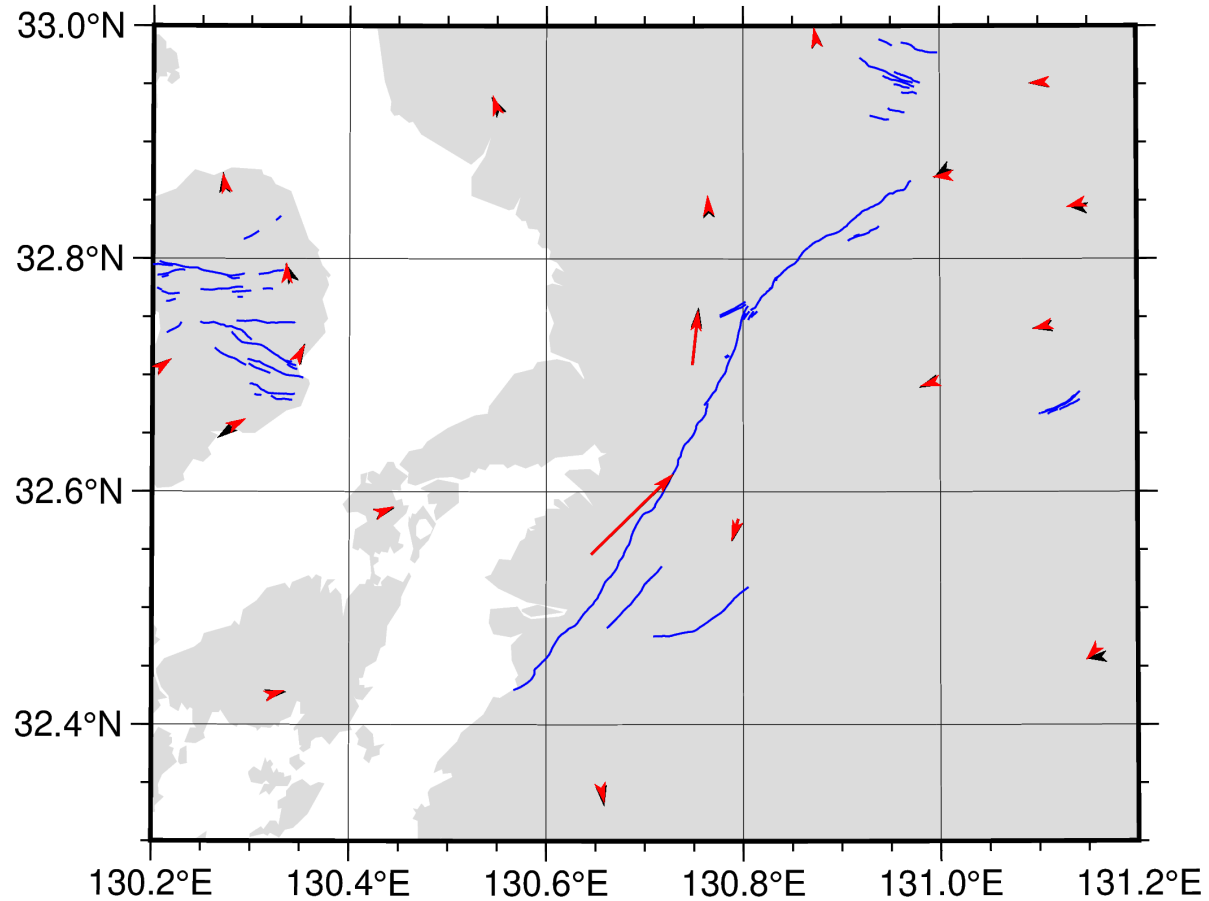


3. 仮定した傾斜角ごとのABICの分布



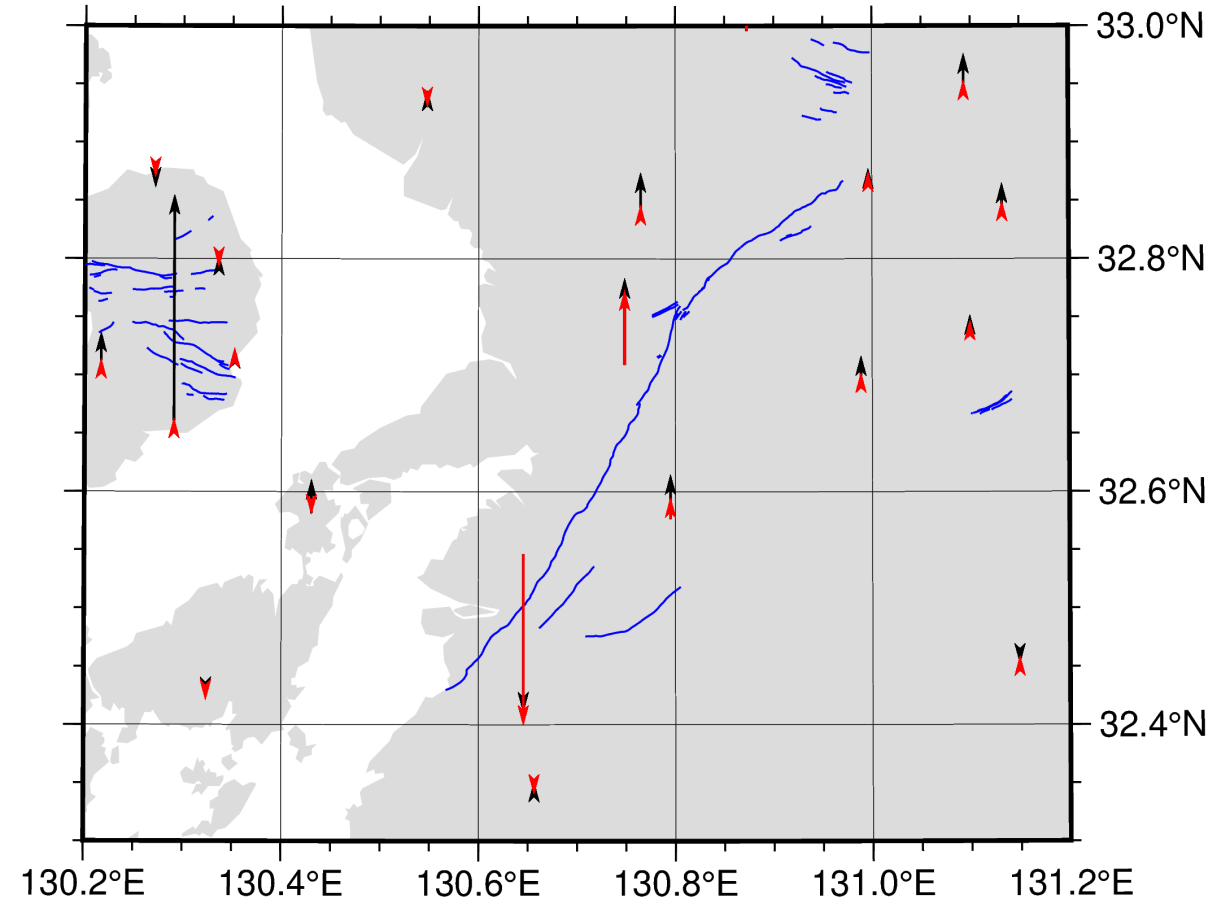
3. 観測値と計算値の比較 (GNSS)

水平変位



50 cm
Obs. →
Cal. →

上下変位



10 cm
Obs. ↑
Cal. ↑

3. 観測値と計算値の比較 (SAR)

