

# 「2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部 陸海域で継続する地震と災害の総合調査」の 中間報告及び令和6年能登半島地震について

金沢大学 平松良浩

謝辞: 珠洲市、能登町、輪島市、石川県の行政・住民・漁協の皆様並びに観測調査やデータ提供にご協力いただいた民間会社の方々の本調査に対するご理解とご協力に感謝します

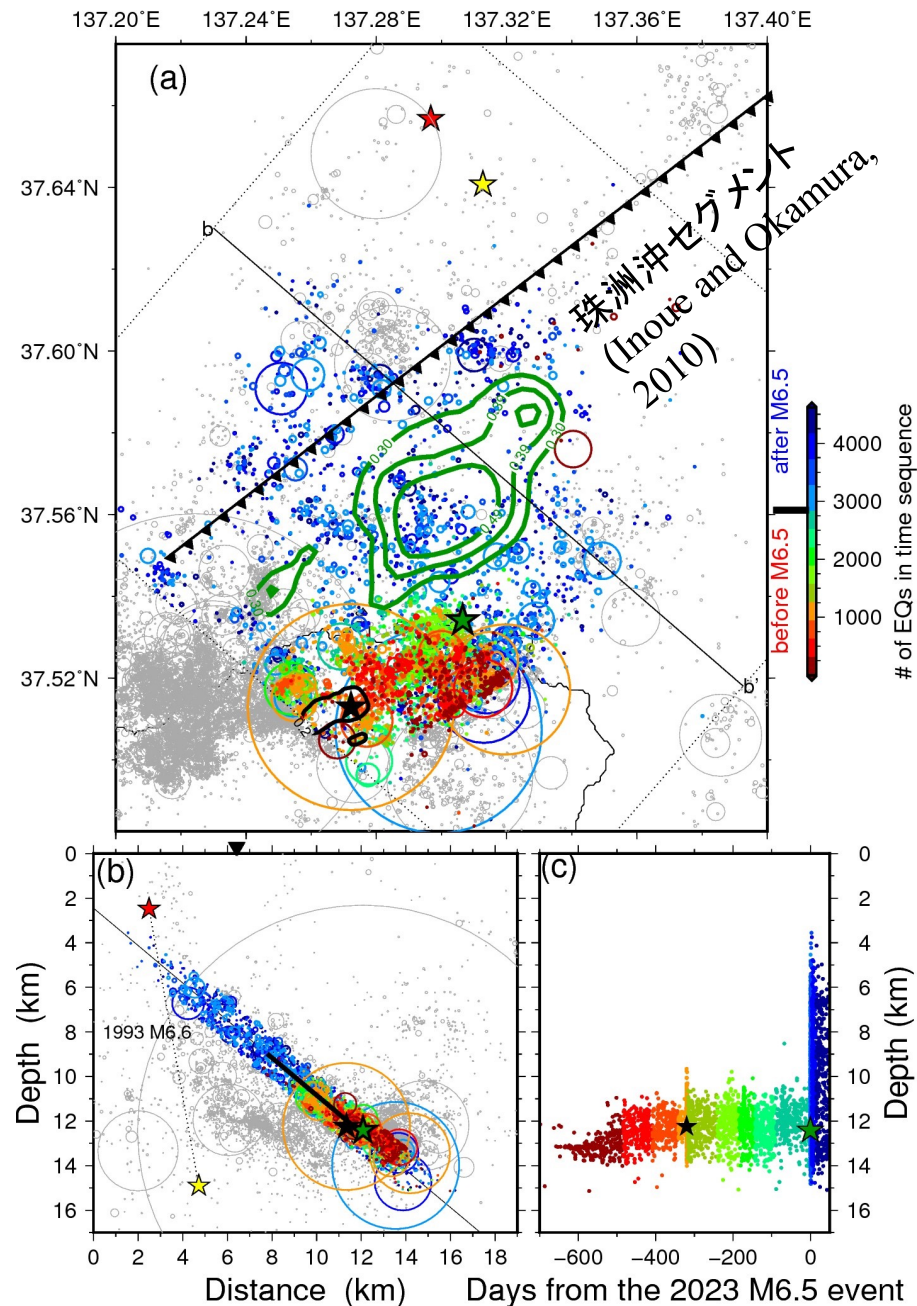
# 2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する地震と災害の総合調査

研究概要	2023年5月5日にM6.5(最大震度6強)の地震が発生し、地震活動が海域に広がった能登半島北東部陸海域で継続する地震活動の原因解明に向けた観測や、災害の被害状況の調査など、更なる総合調査を実施。研究成果を国の機関や地元自治体・住民に提供することにより、今後の地震調査研究の推進や地震防災対策に貢献。
------	--

研究組織	研究代表者:平松良浩(金沢大学) 金沢大学、東北大学、東北大学災害科学国際研究所、筑波大学、東京大学、東京大学地震研究所、富山大学、金沢工業大学、北陸学院大学、福井大学、信州大学、滋賀県立大学、京都大学、京都大学防災研究所、神戸大学、兵庫県立大学、岡山大学、海洋研究開発機構、産業技術総合研究所(全19機関、計41名)
------	--

研究テーマ	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 陸域地震観測による震源域の断層帯および流体供給系の分布・挙動の解明</li><li>2. 海陸統合臨時地震観測による群発地震活動の把握</li><li>3. 測地観測による地殻変動メカニズムの解明</li><li>4. 群発地震域～M6.5地震破壊域における流体分布把握のための海陸電磁気観測</li><li>5. 超高感度地殻活動観測による地殻流体挙動の解明</li><li>6. 温泉水の化学分析による能登半島の物質循環像の調査</li><li>7. 活構造調査による震源域の古地震活動像の解明</li><li>8. 震源過程と強震観測に基づく高震度生成過程調査</li><li>9. 震災による被害状況の調査と再建に関する検討</li><li>10. 社会的脆弱性による災害時の地域への影響調査</li></ol>
-------	---

# 珠洲沖活断層セグメント・1993年 M6.6地震と今回の活動の関係



陸域観測点が遠いため、詳細な比較は難しい

- 珠洲沖セグメント (Inoue and Okamura, 2010)
  - 地表トレースが今回の余震分布よりも浅部に位置
  - おそらく今回の活動で滑った断層とは異なる
- 1993年 M6.6地震
  - 気象庁震源 (赤★)によると、今回の断層の延長付近に位置
  - Tsukuda et al. (1994)の震源 (黄色★)によると、今回の断層よりも有意に深い

コンター: すべり分布. ○: 震源 (2003-2023/7)

★: 2023年M6.5地震震源、★: 2022年M5.4地震震源

断面図太線: すべりの大きかった segment (> 18 cm)



# テーマ1. 陸域地震観測による震源域の断層帯および流体供給系の分布・挙動の解明



詳細な断層帯の構造と流体供給系の分布を明らかにすることを目的として、新たに高密度な地震観測を実施した。

- 観測点数: 珠洲市内11点・輪島市1点
- 設置期間: 2023/10/14-2023/11/30



# 2 : 海陸統合臨時地震観測による群発地震活動の把握

東京大学地震研究所

## ・目的

マグニチュード6.5の地震後に海域に広がった地震活動の震源位置決定精度を向上させるために、群発地震活動域の直上にあたる海域と陸域で同時期に臨時地震観測を実施する。既存陸域地震観測網と連携し、新規に得る海陸統合地震観測データによってマグニチュード6.5の地震の震源断層の広がりや傾きを高精度で把握し、珠洲市の北岸沖に存在する活断層との関係性を明らかにする。

### 観測概要

#### 〈海域〉

設置期間: 2023年6月26日～7月5日

設置場所: 珠洲市北方沖に約5km間隔で4か所, 珠洲市東方沖に1か所

観測装置: 浅海用係留ブイ方式海底地震観測システム

(Shinohara et al., 2022; 篠原・酒井, 2023)

レコーダー: Geospace社製OBX-750

センサー: 固有周波数15Hzの3成分地震計とハイドロフォン

#### 〈陸域〉

設置期間: 2023年6月22日～7月25日

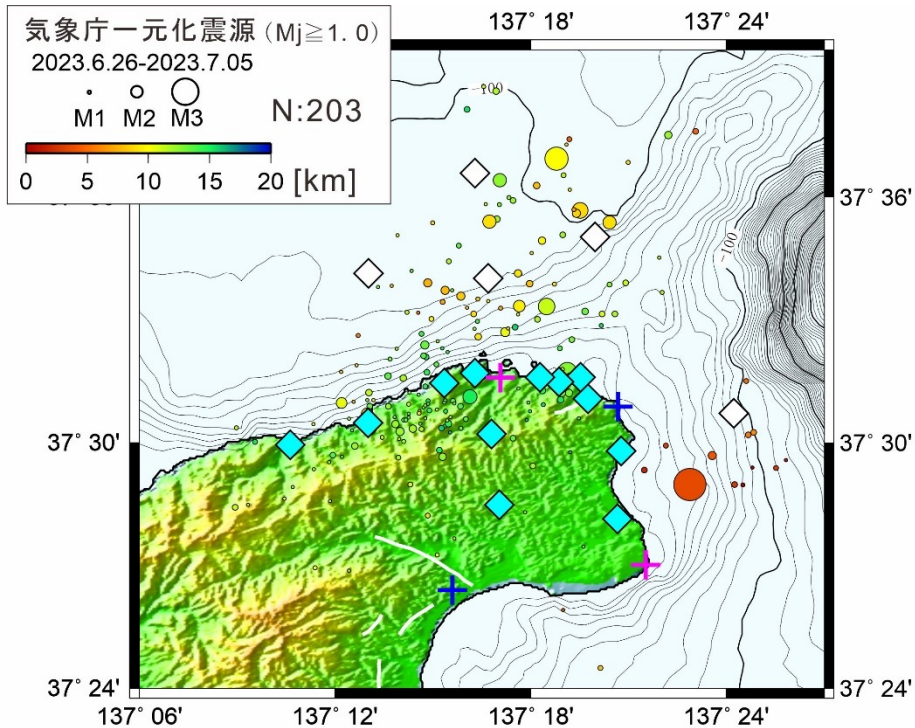
設置場所: 珠洲市北岸から東岸の海岸線沿いと

県道52号線に1km～5km間隔で12カ所

観測装置: 独立型地震観測システム

レコーダー: Geospace社製GSX-3

センサー: 固有周波数1Hzの3成分地震計

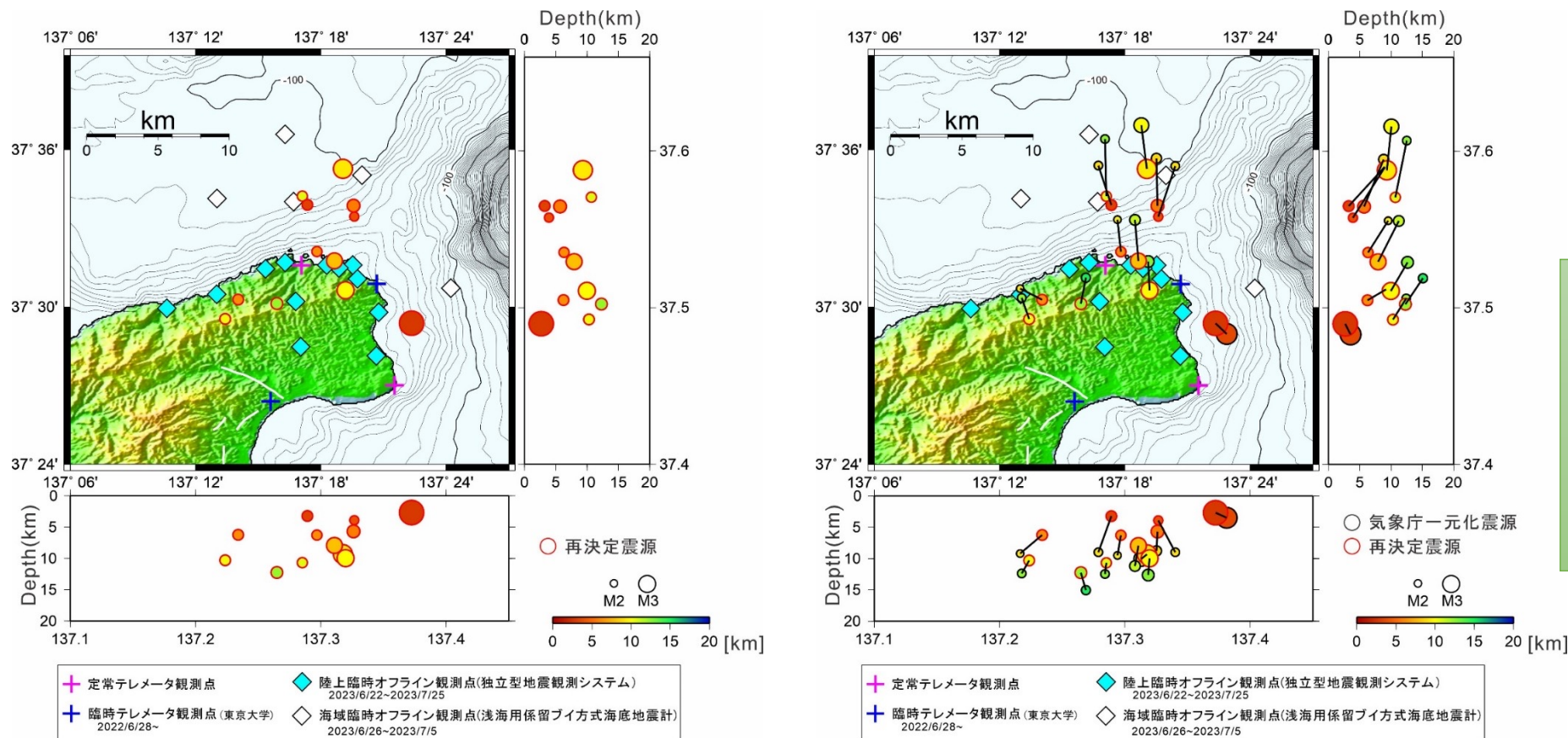


- ✦ 定常テレメータ観測点
- ✦ 陸上臨時オフライン観測点(独立型地震観測システム) 2023/6/22~2023/7/25
- ✦ 臨時テレメータ観測点(東京大学) 2022/6/28~
- ✦ 海域臨時オフライン観測点(浅海用係留ブイ方式海底地震計) 2023/6/26~2023/7/5

# 2 : 海陸統合臨時地震観測による群発地震活動の把握

## ・海陸統合観測データを用いた海域での観測期間中に発生したM<sub>j</sub>2.0以上の震源分布（暫定結果）

Hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987)を使用. 速度構造はJMA2001(上野・他, 2002), 観測点補正値は使用していない.



珠洲市北岸沖において、震源再決定後の震源は、気象庁一元化震源の位置に比べて、南に移動し、深さも浅くなる傾向が見られる。

再決定後の震源分布(M<sub>j</sub> 2.0 以上)

再決定後の震源分布と気象庁一元震源との比較

### 今後の予定

M<sub>j</sub>2.0以下の地震に対しても手動検出作業を実施することでP波・S波の走時データ数を増やし、適切な各観測点における観測点補正値, 速度構造の検討を進めることで, 海陸境界域を含む群発地震活動域の高精度な震源分布を得る.



# テーマ3 測地観測による地殻変動メカニズムの解明

京都大学・筑波大学、金沢大学

- GNSS観測に基づく地殻変動の準リアルタイムモニタリング(京大・金沢大)
  - 珠洲市・能登町の6ヶ所における臨時GNSS観測の継続
  - ソフトバンク株式会社の独自基準点のデータを含む統合解析
- 合成開口(SAR)レーダの干渉解析に基づく非定常地殻変動(筑波大)
- 地殻変動データに基づく変動源の時空間発展の推定(京大)

GNSS観測点の写真



国土地理院「珠洲」



金沢大「日置ハウス」



京大「大谷小中学校」



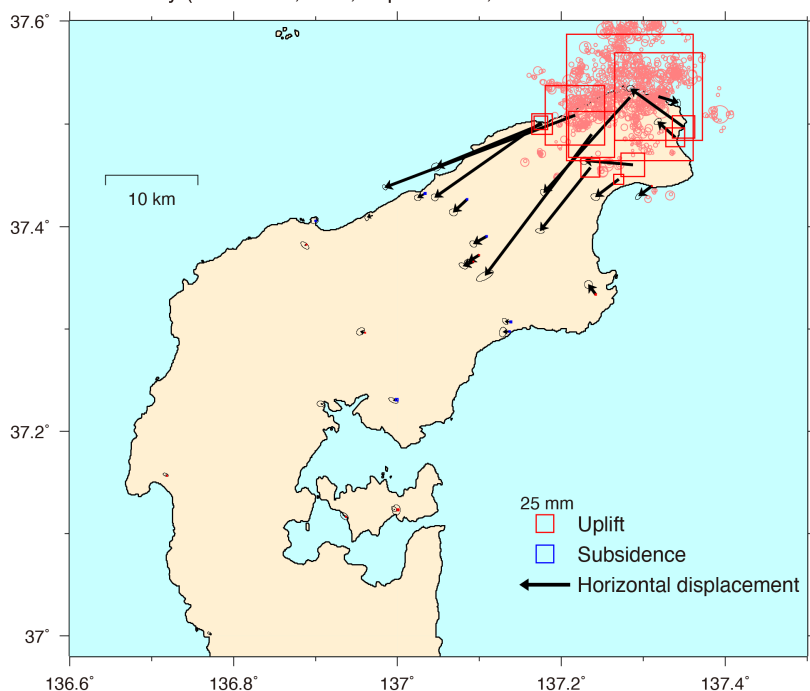
2023年夏頃までの地殻変動の概要は、地震学会広報誌「なみふる」に掲載



# 5月5日の地震(M6.5)後の非定常地殻変動分布

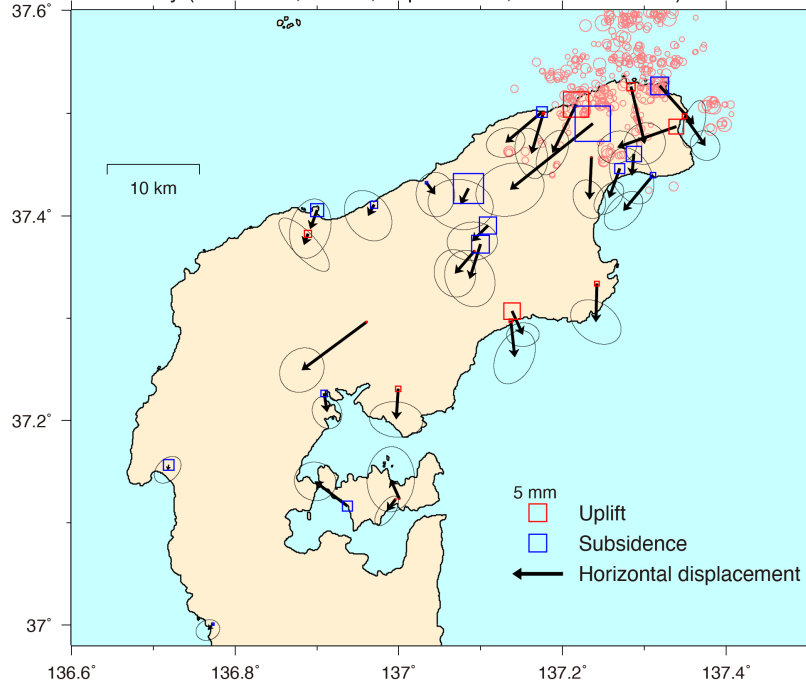
## M6.5地震時

Observed displacement (2023/4/25-5/4 ~ 2023/5/6-10)  
Seismicity (Relocated,  $M \geq 2$ , depth  $\leq 20$  km, 2023/5/5)



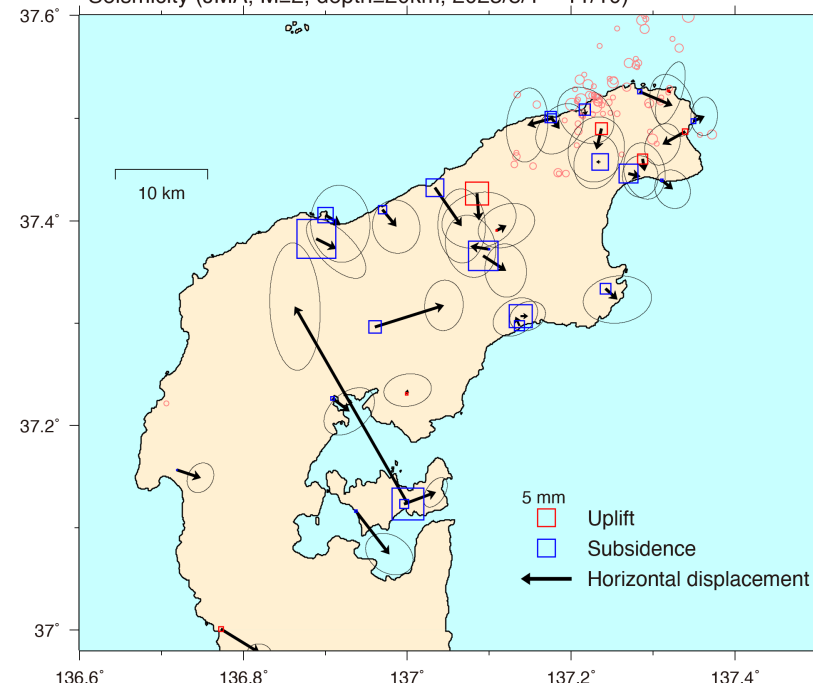
## 5月上旬～8月上旬

Observed displacement (2023/5/6-10 ~ 8/1-10)  
Seismicity (Relocated,  $M \geq 2.0$ , depth  $\leq 20$  km, 2023/5/6 ~ 8/10)



## 8月上旬～11月上旬

Corrected displacement (2023/8/1-10 ~ 11/1-10, 3 mm eastward shift)  
Seismicity (JMA,  $M \geq 2$ , depth  $\leq 20$  km, 2023/8/1 ~ 11/10)

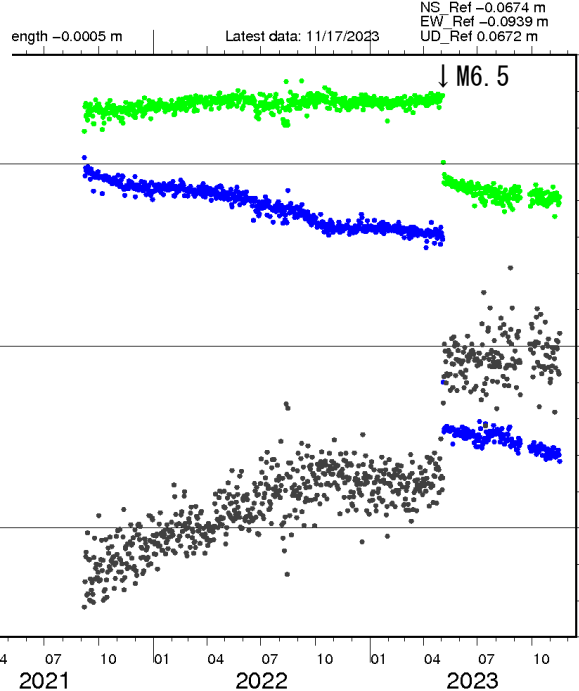


余効変動

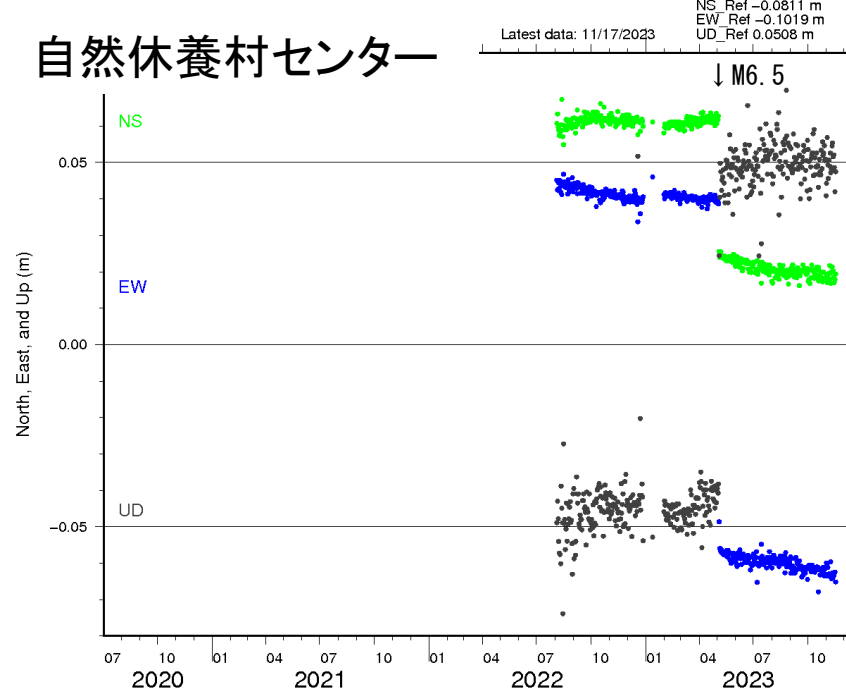
(本震後の断層のゆっくりとしたすべり)

最近の3ヶ月間(右図)では、群発地震震源域の非定常地殻変動は小さくなっている。

# 大谷小中学校

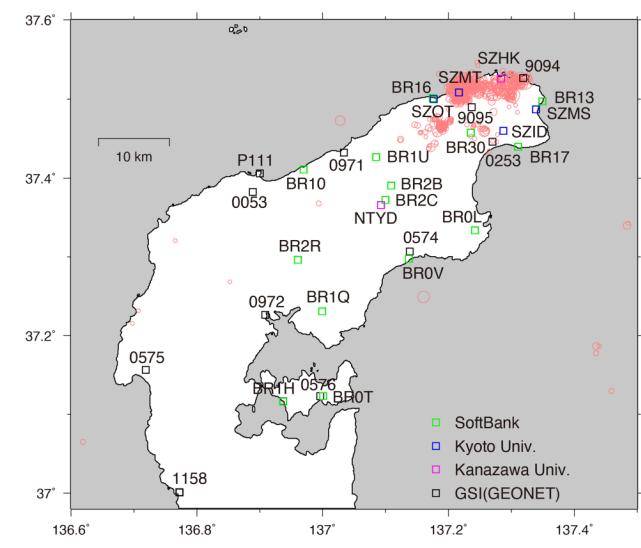


# 自然休養村センター

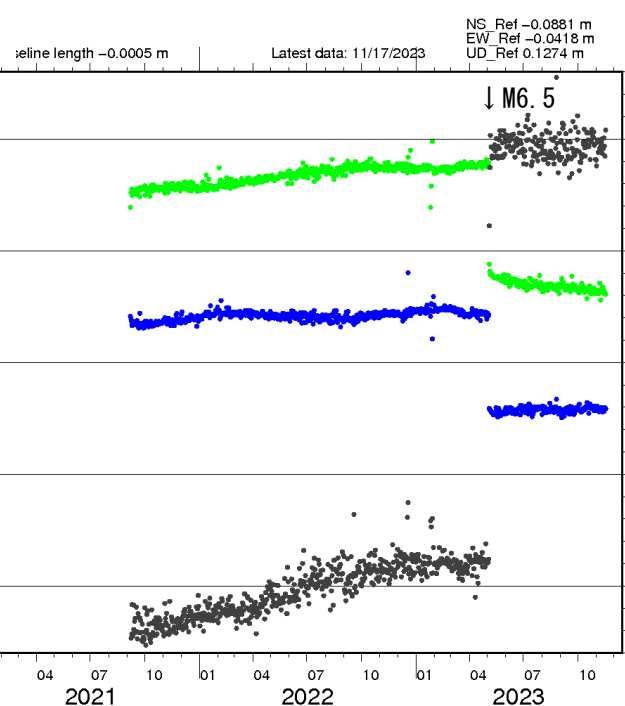


# 外浦沿いの観測点

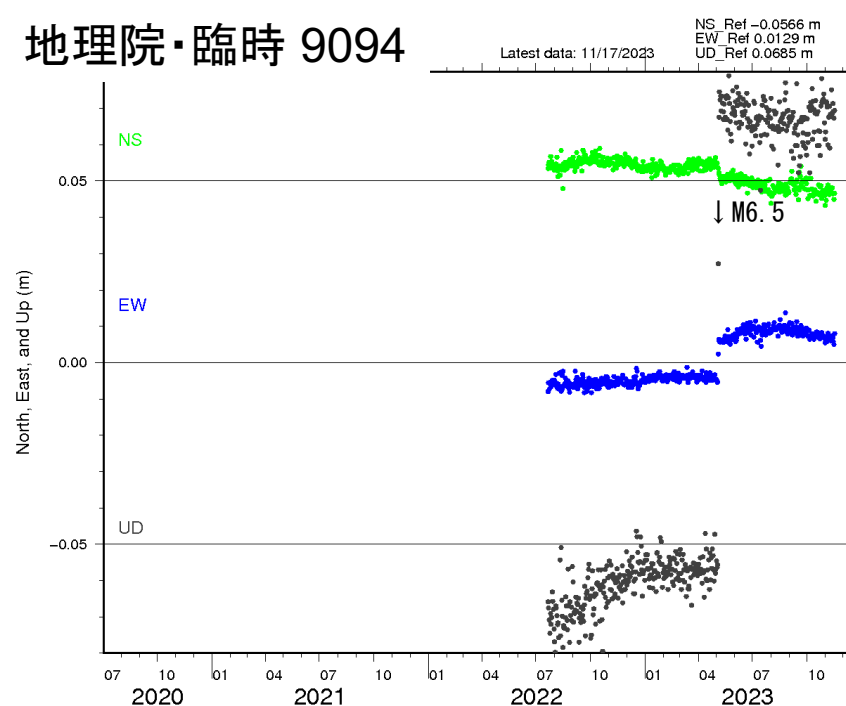
## 観測点配置図



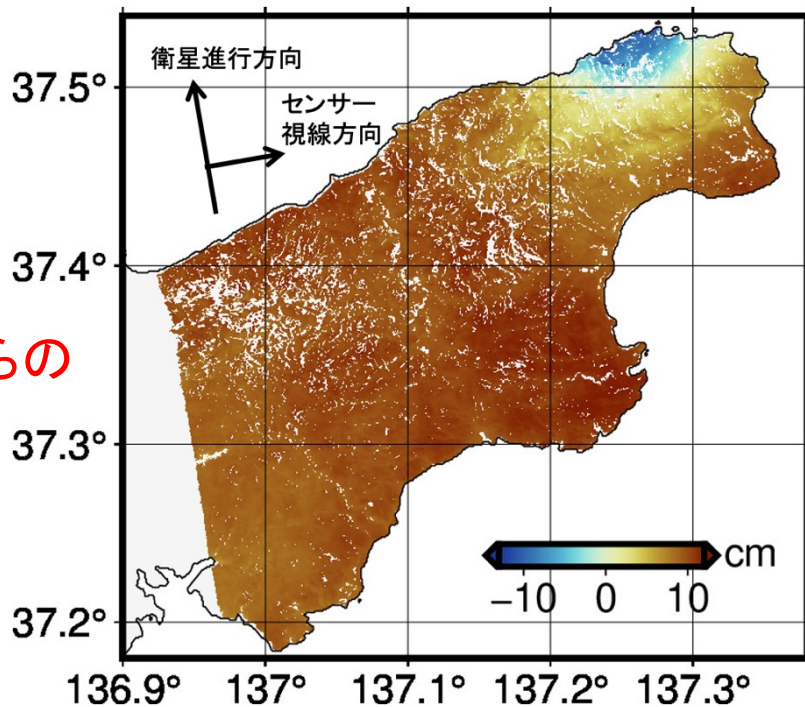
# 日置ハウス



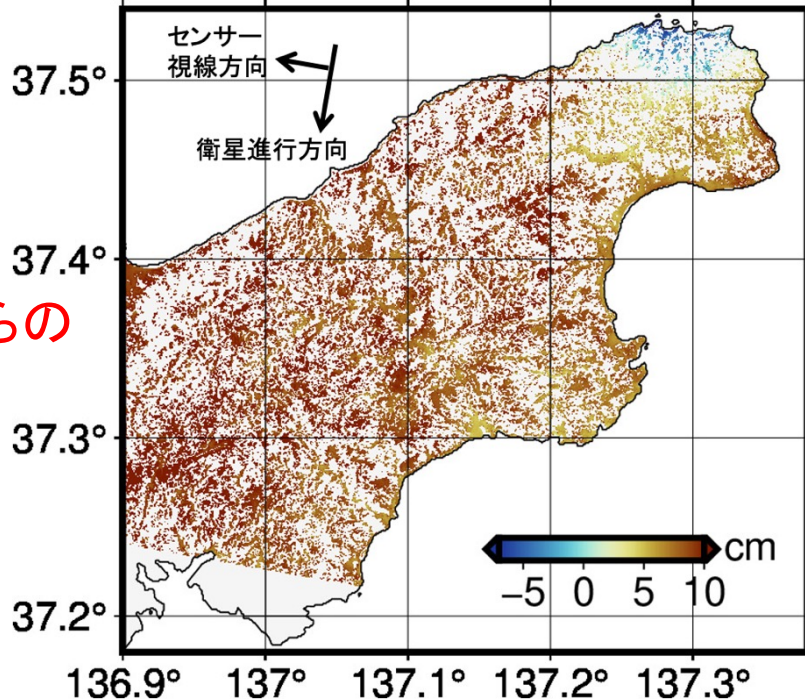
# 地理院・臨時 9094



北行軌道からの  
データ



南行軌道からの  
データ



## ALOS-2 SM1

Primary:  
2023/03/10 (UTC)

Secondary:  
2023/05/05 (UTC)

電離層補正済み  
(SSM)

対流圏遅延補正済み  
(気象庁MSM)

## ALOS-2 SM1

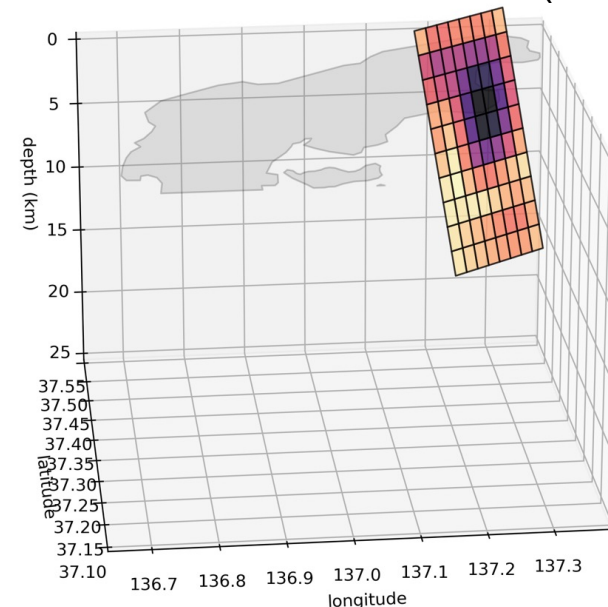
Primary:  
2023/04/09 (UTC)

Secondary:  
2023/05/07 (UTC)

# 合成開口レーダ(SAR)から 得られた2023年5月5日 の地震の地殻変動

人工衛星だいち2号(ALOS-2)  
のデータ解析により、地震に伴  
う地殻変動分布と断層モデルを  
推定

推定された断層すべり分布(暫定)





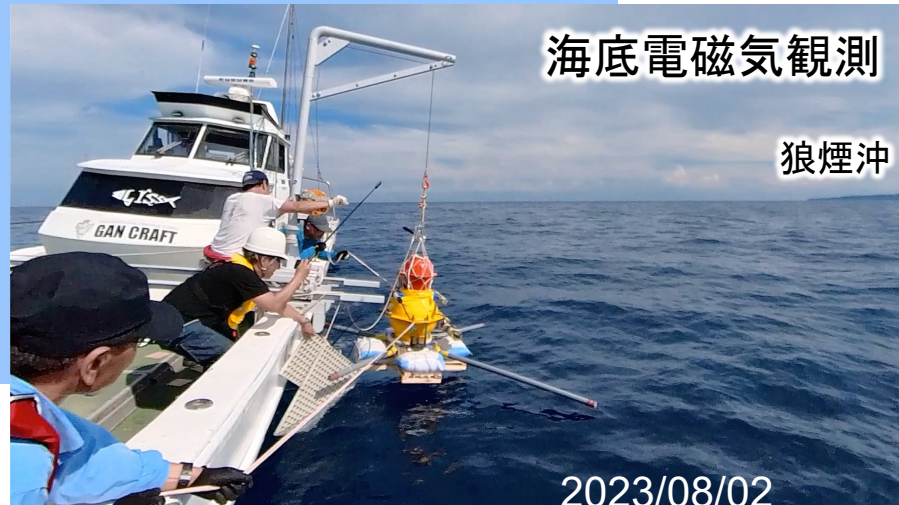
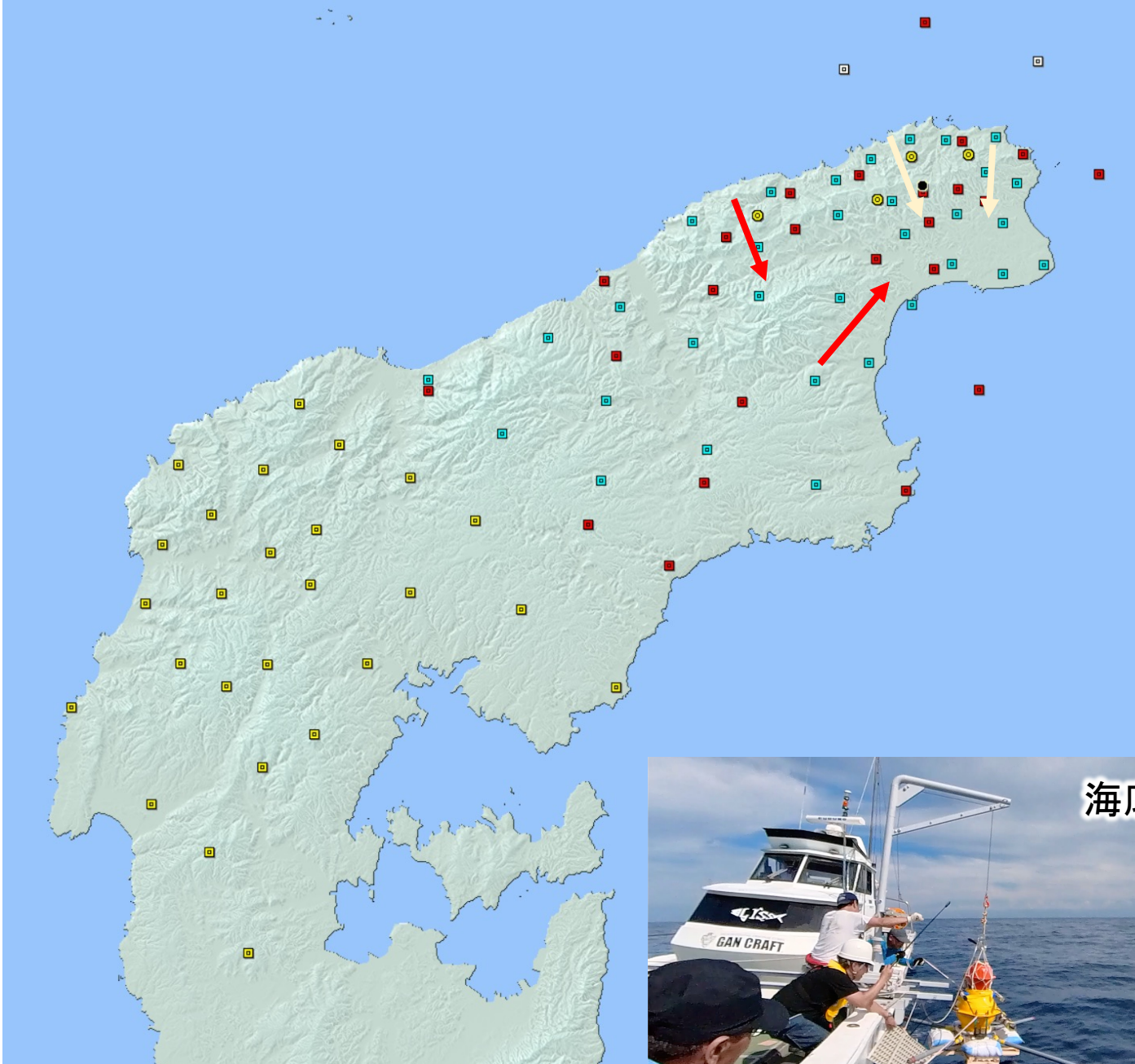
# テーマ4 群発地震域～M6.5地震破壊域における流体分布把握のための海陸電磁気観測

京都大学、金沢大学、兵庫県立大学、海洋研究開発機構

- 海底電磁気観測の実施
- 連続電磁気観測の継続
- 三次元比抵抗構造解析

# 電磁気連続観測点

- 2007年能登半島地震時の観測点(黄■)
- 2021年度観測(青■)
- 2022年度観測(赤■)
- 2023年度観測(白■)
- 2022年度末からの連続観測点(黄◎)
- 赤矢印の点は、地震直後のデータは伝送済み
- 白矢印の点は、地震後の回線断により未確認

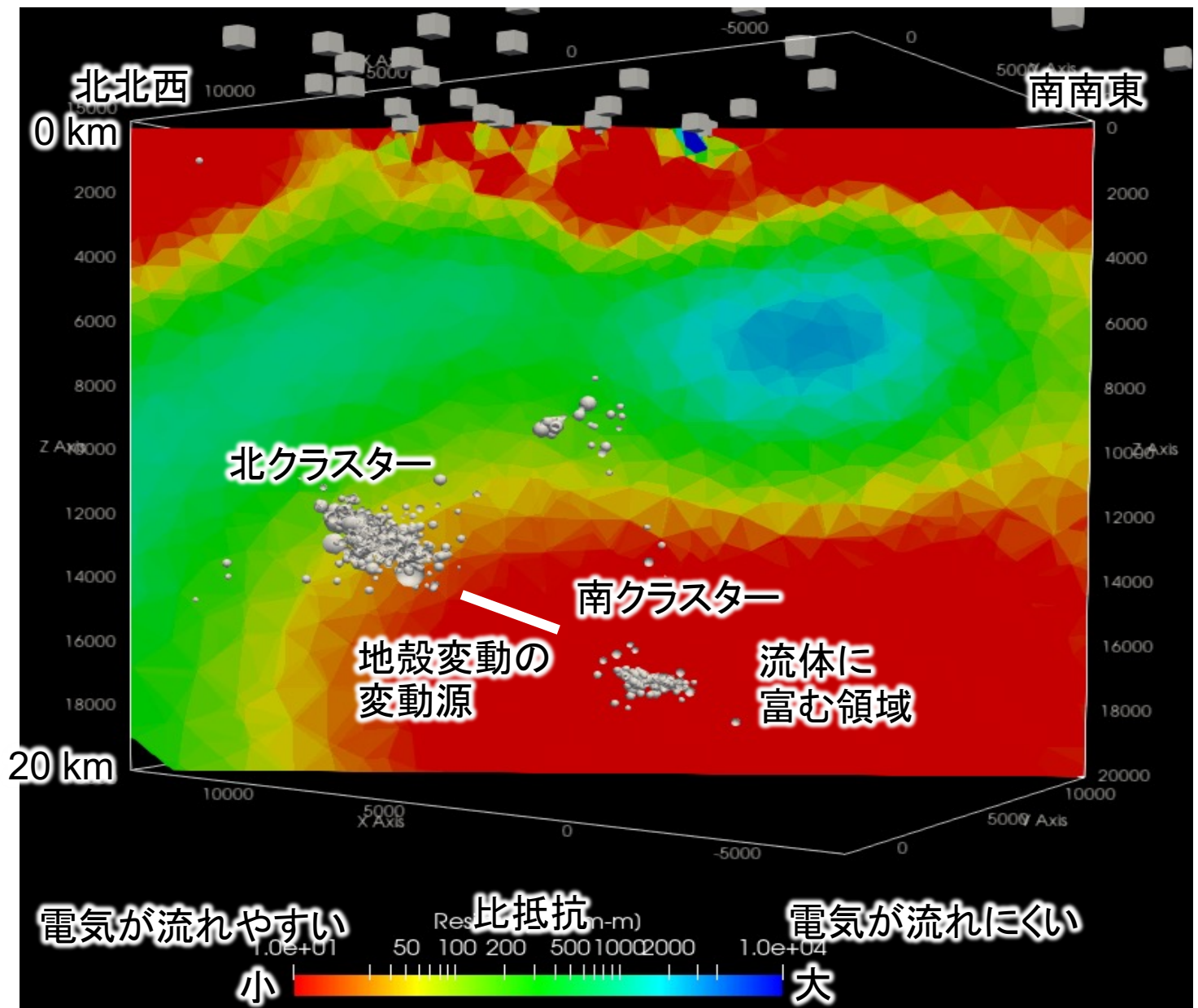
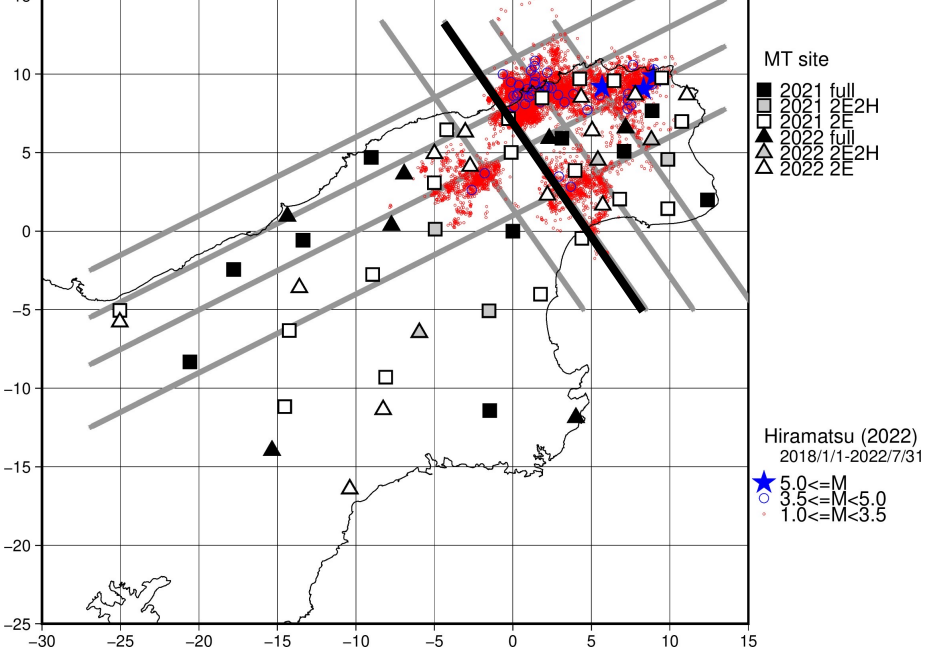


# 三次元比抵抗構造

## 2021・2022年度陸上臨時観測



### 鉛直断面：北北西—南南東





# テーマ5 超高感度地殻活動観測による地殻流体挙動の解明

東大理・東大地震研・京大防災研・海洋研究開発機構・金沢大

## 重力観測

- 1回目2022年3月, 2-4回目2023年3月, **5月, 9月**

## 結果(解析中)

- M6.5地震に伴う変動を観測(2, 3回目の比較)**

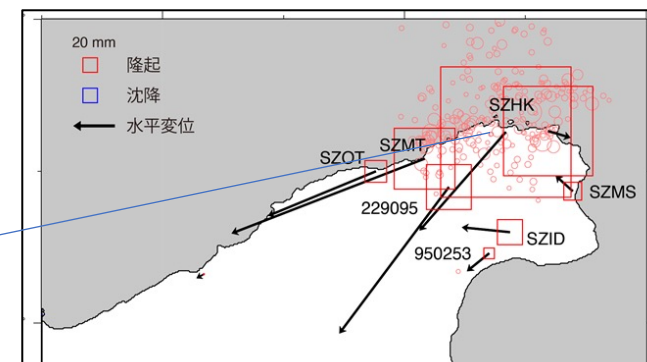
観測点	変化	誤差
<b>日置ハウス</b>	<b>-47</b>	<b>1</b>
みさき小	-16	13
大谷小中	-7	21
輪島2	-13	16
輪島験潮場	-8	4

単位:  $\mu$ ガル (= 10億分の1G)

- 地震後は顕著な変化なし(3, 4回目の比較)**

## 結果が意味すること

- ①GNSSの隆起と同じく重力変化は北東部に集中



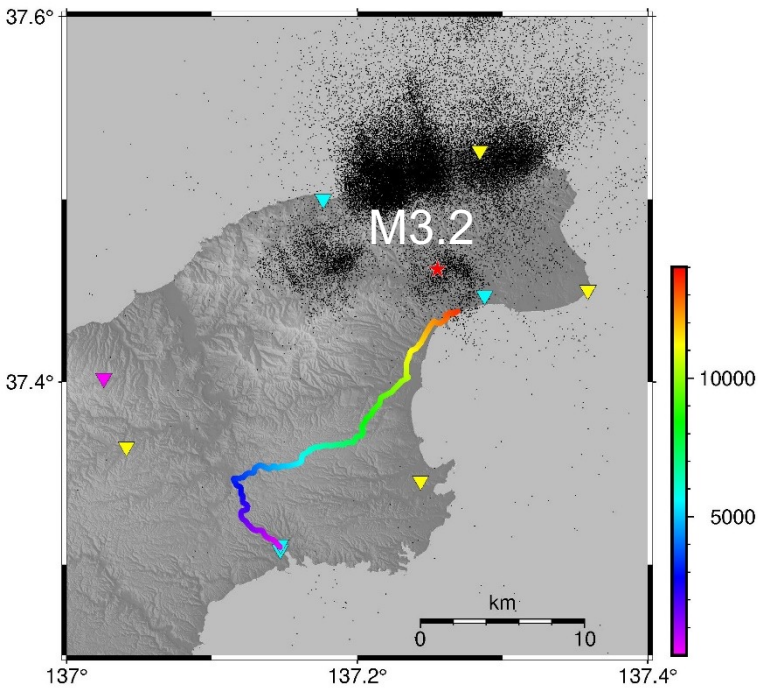
- ②GNSSの隆起18 cmと単純な重力勾配の式を使うと水が入ったことを示す

$$\text{観測された } \frac{dg}{dz} = (-3.0 + 0.4) \mu\text{ガル/cm}$$

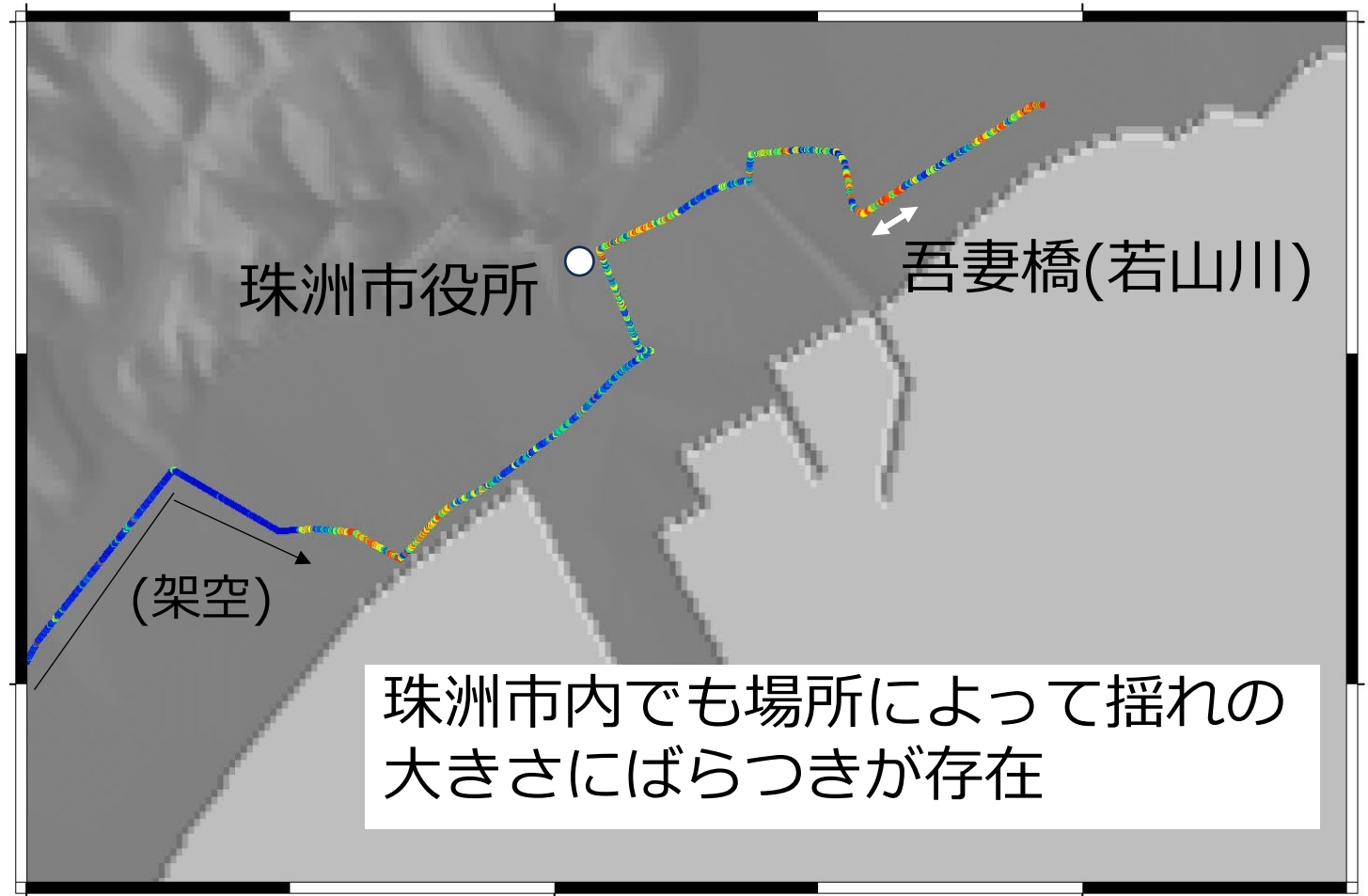
全体としては断層すべりだが  
局所的には水が動いた?  
詳細をOkuboの理論で検証予定

# 光ケーブルを利用した地震動観測 (京大防災研、海洋研究開発機構、東大理)

例：M3.2(2023/7/30 3:10am, Depth=9.5km) (正院で震度3)



珠洲市～能登町(28km)  
約2m間隔、13,400点で振動観測



強い揺れ

1000

800

600

400

200

0

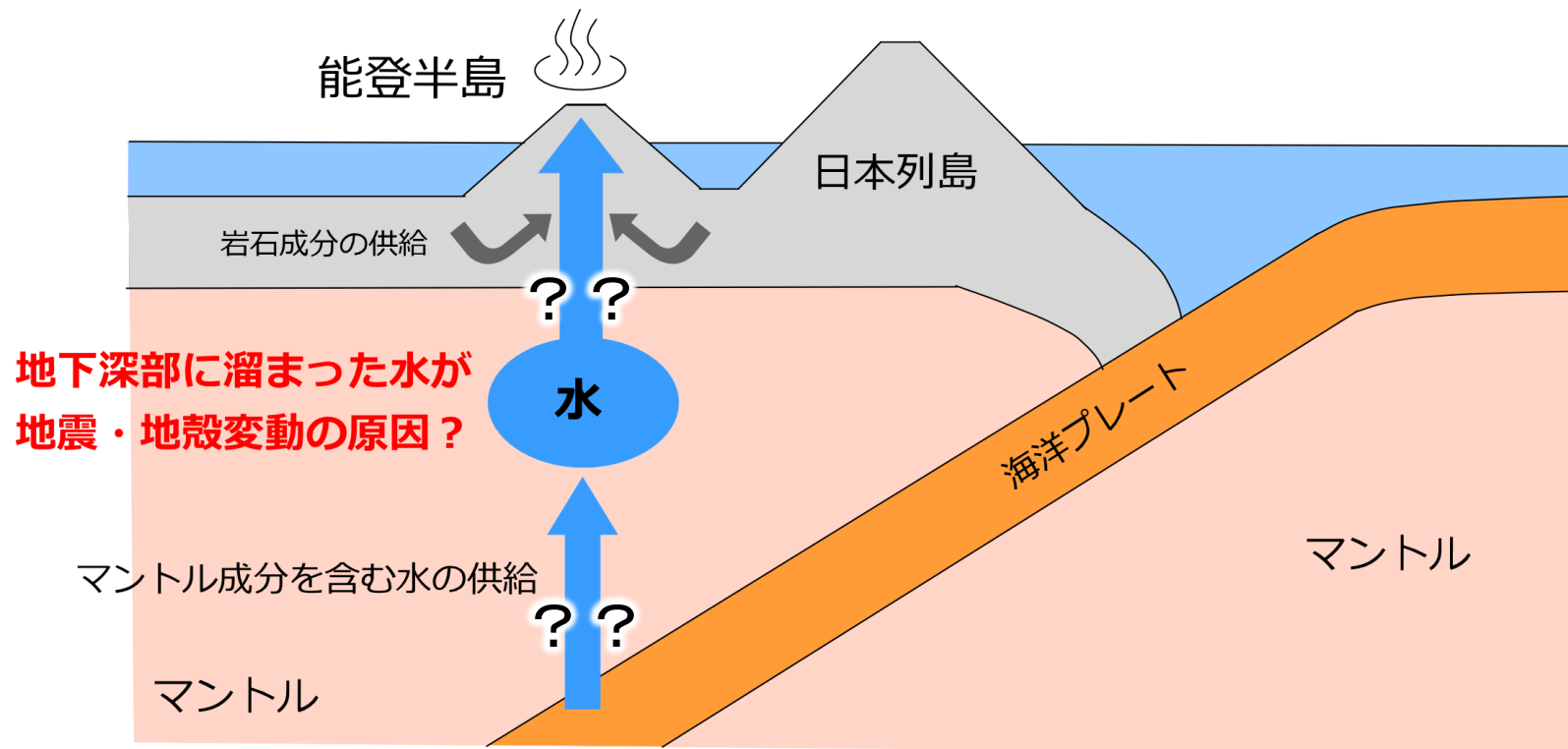
弱い揺れ

# テーマ6. 温泉水の化学分析による能登半島の物質循環像の調査

金沢大学・富山大学

## 本研究の目的

温泉の成分は地下深部の水の情報  
→ 地殻変動・地震メカニズム解明の手掛かりになる

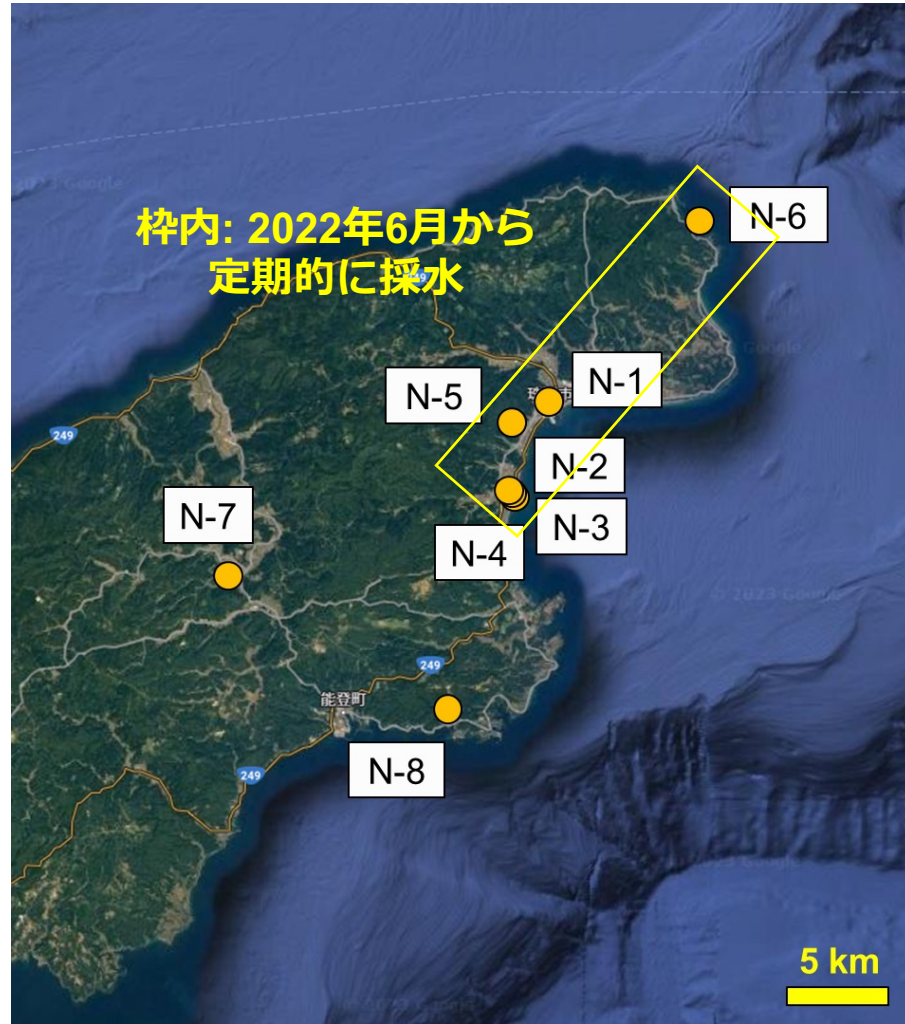


能登半島北東部における温泉の成分の時間変動を観測

→ 地下における水の起源・状態を推定し、地殻変動・地震活動との関係を調査



# サンプリング・分析



サンプリングサイト (丸印)



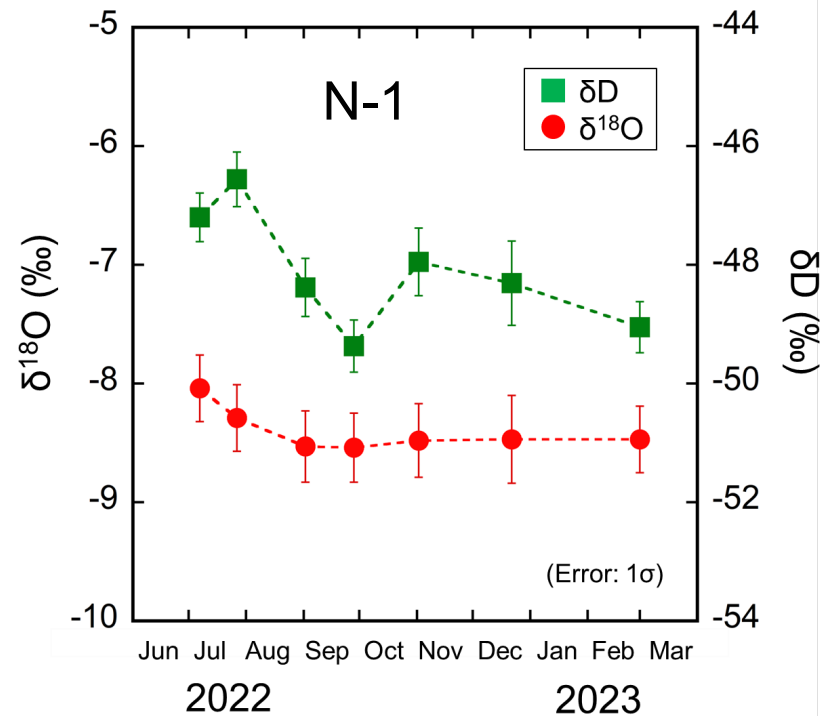
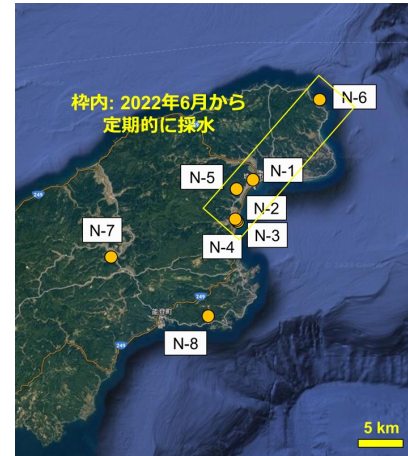
採水風景

ポリビンやガラス容器内に温泉水試料採取  
→ イオン濃度や同位体比を測定  
→ 水の起源を紐解く手がかりに



# 温泉水の酸素・水素同位体比の時間変動

- N-1では、水素同位体比が顕著に変動
- 岩石由来成分の溶解ではなく、異なる起源を持つ流体同士の混合？
- 原因を他のデータとあわせて検証していきたい



$\delta D$ : 水素同位体比  
 $\delta^{18}O$ : 酸素同位体比

温泉水の成分の起源の解明を目指して、他にもヘリウム同位体比を測定

震源域周辺には、日本海形成に関連した火成活動による火山岩類が広く分布。これらの火山岩類中には当時の火山活動によるヘリウムが残っている可能性も要検討

温泉水成分の継続的な観測が必要であり、実施中



# 【テーマ7】 活構造調査による震源域の古地震活動像の解明

石山達也（地震研） 立石 良・安江健一（富山大） 廣内大助（信州大） 松多信尚（岡山大） 宍倉正展（産総研）

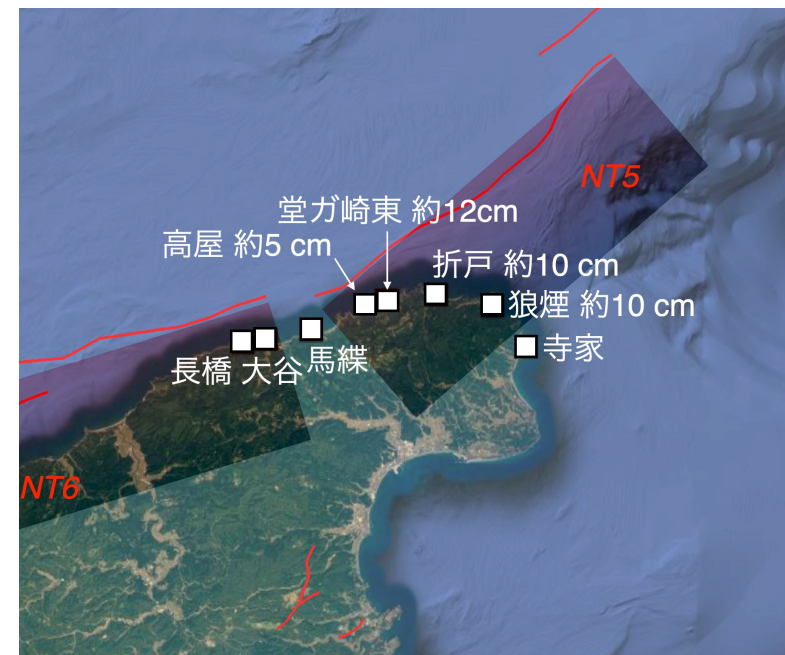


地震3日後,堂ガ崎における  
離水ベンチ・ノッチ  
石山ほか（2023）

地震翌日、狼煙漁港  
において海面上位に  
分布する貝類



2023年地震直後の珠州市高屋町の海岸  
宍倉・越後（2023）



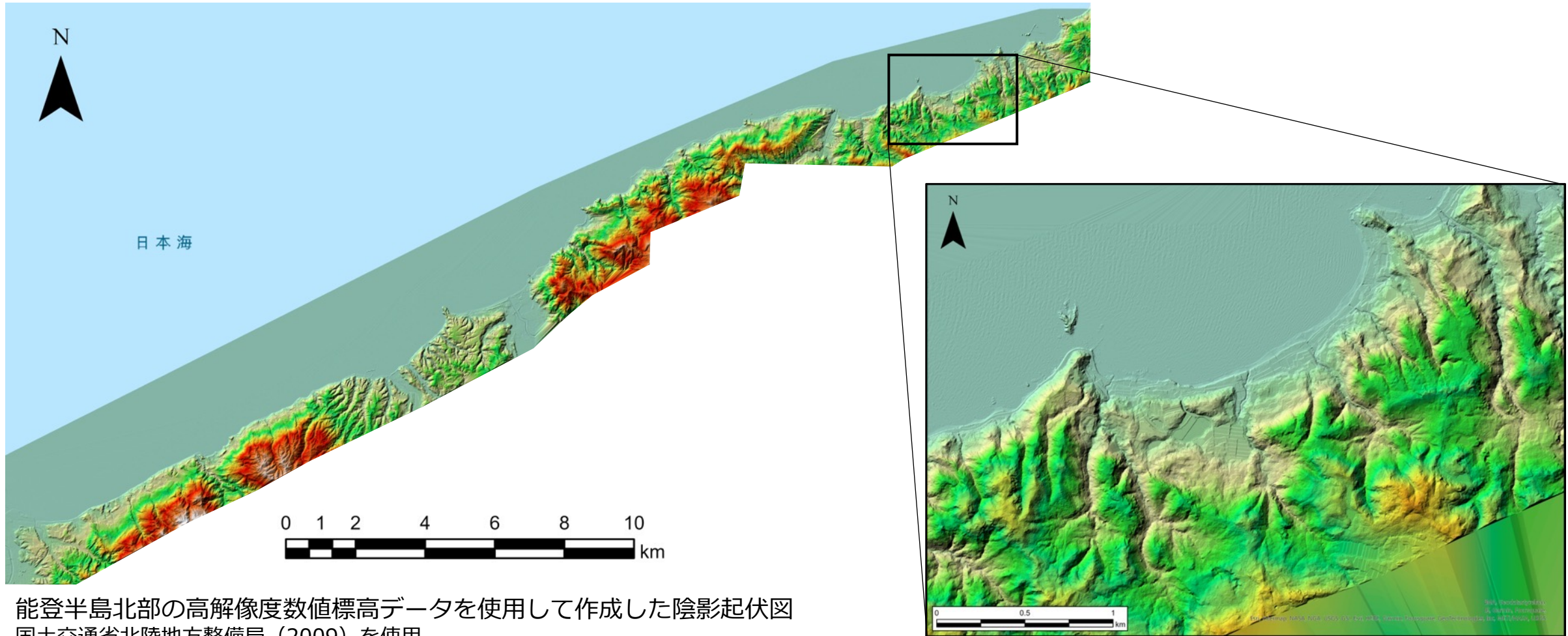
海岸調査による2023年地震に伴う隆起量分布  
石山ほか（2023）

- ・ 2023年地震震源域周辺にて海岸地形調査を行い、岩石海岸地形・生物遺骸の分布高度等から地震時隆起量分布を推定
- ・ 航空レーザー測量データから高解像度数値標高データを生成し、震源域周辺の完新世離水岩石海岸地形を対象とした変動地形の解析と地質調査による離水年代の推定
- ・ 震源域および周辺の古地震活動の時期やこれによる地殻変動と震源断層像を推定



# 変動地形解析

- 能登半島北部の航空レーザー測量データから高解像度数値標高データを生成した。
- これを用いた震源域周辺の完新世の離水岩石海岸地形や中～後期更新世の海成段丘面を対象とした変動地形の解析を行う。

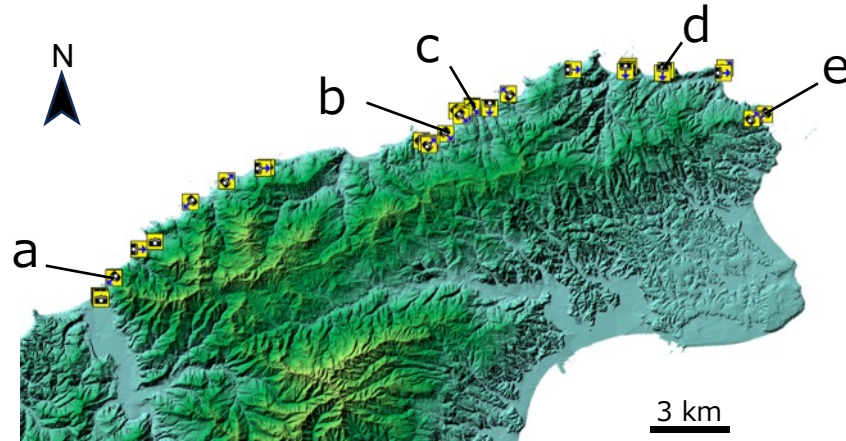


能登半島北部の高解像度数値標高データを使用して作成した陰影起伏図  
国土交通省北陸地方整備局（2009）を使用



# 地形・地質調査

- 能登半島北部沿岸付近の低位段丘面は基本的に3面に区分される（穴倉ほか, 2020）。
- 海岸に沿って段丘面を確認し、周囲の地質を考慮しながら構成層を観察する地点を選定した。
- 構成層の観察・分析から段丘面の離水年代を推定する。



海岸沿いの地形・地質踏査地点と低位段丘面

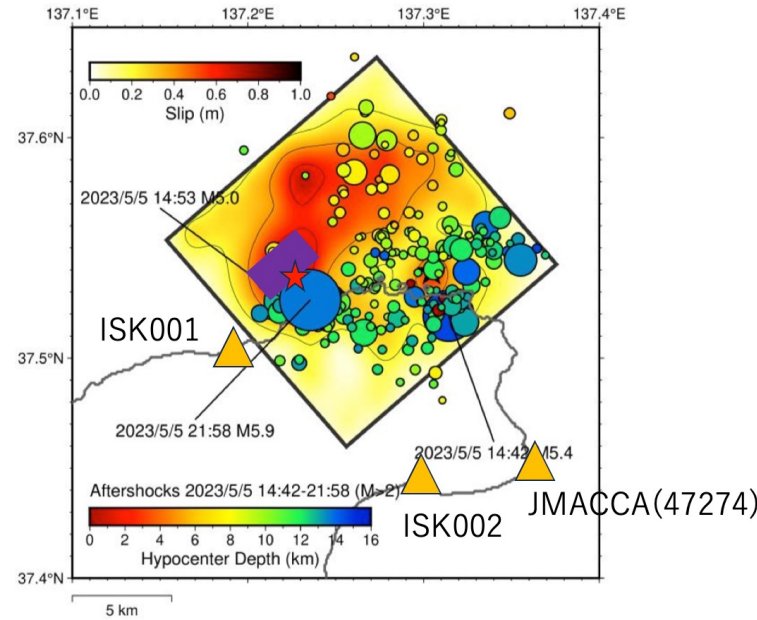
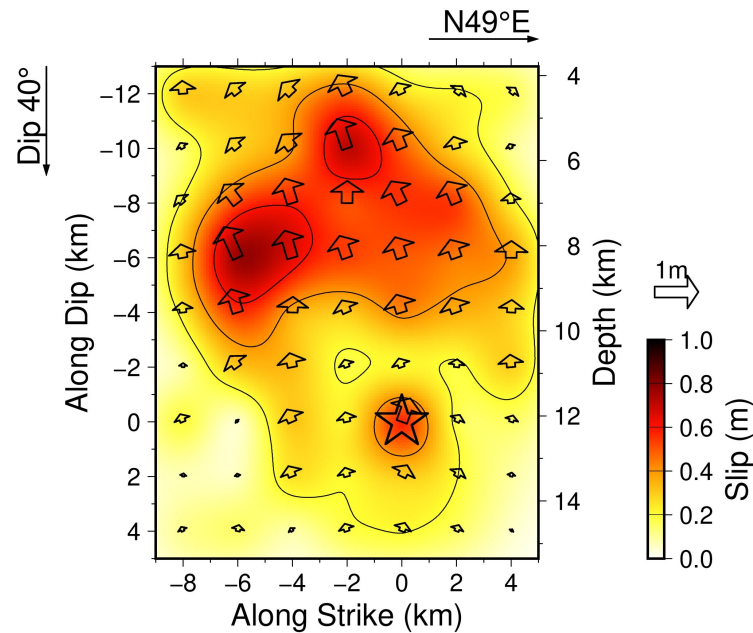




# テーマ8

## ◆強震波形を用いた震源過程の推定と強震動シミュレーション

強震波形の長周期成分(周期1~10秒)を使って、M6.5の地震の震源断層の破壊過程を推定

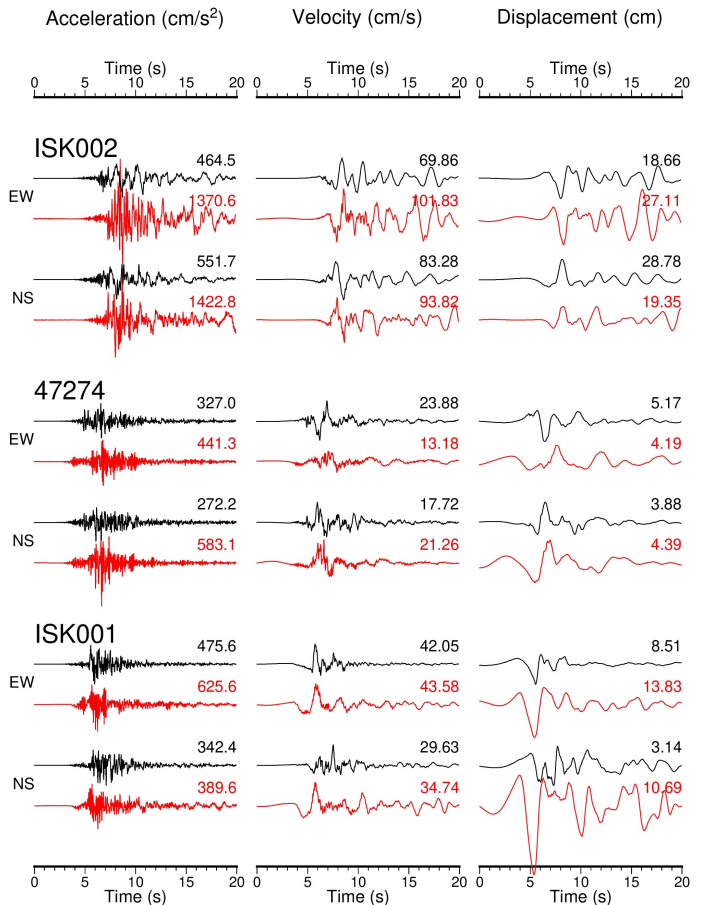


震源深さは約12kmで、主にすべったのは深さ5~10km, 逆断層運動で少し右横ずれ成分を含む

- すべり分布の地図射影とM6.5地震発生後7時間の地震活動との比較. すべりの大きいところは地震活動が少ない
- 既知の活断層の深部延長とは対応しない

地震モーメント  $M_0 = 2.43 \times 10^{18}$  Nm ( $M_w$  6.2)  
 平均すべり量  $D_{ave} = 0.30$  m  
 最大すべり量  $D_{max} = 0.77$  m

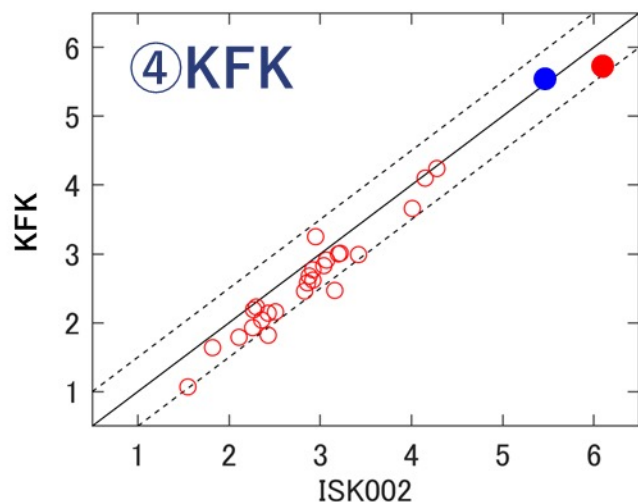
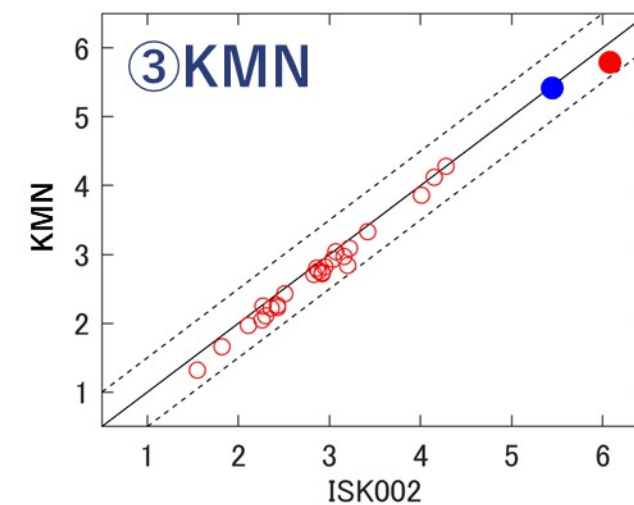
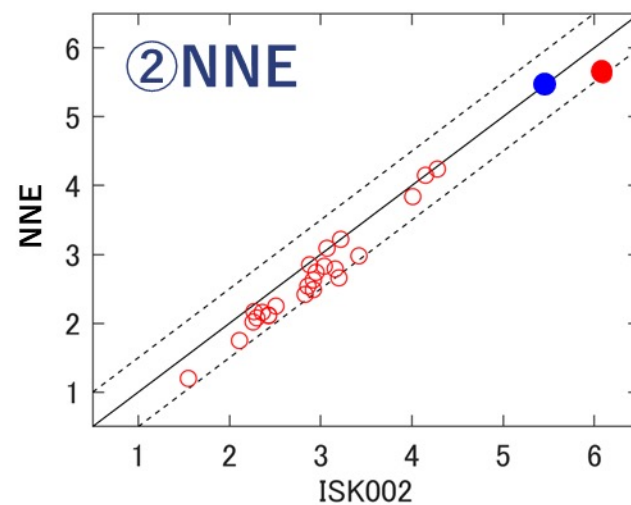
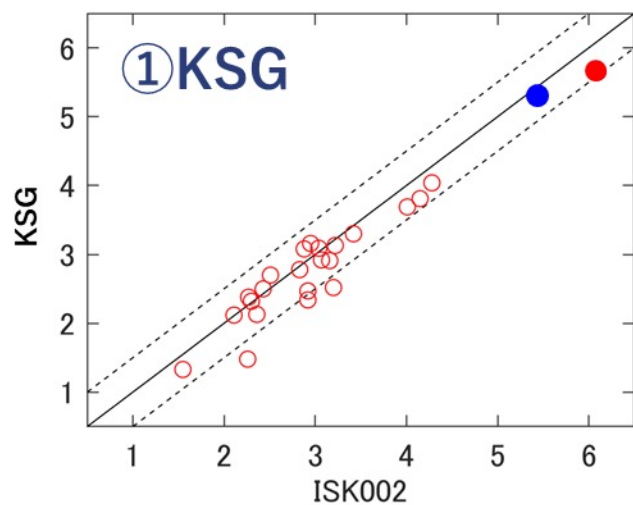
20230505 (M<sub>J</sub>6.5) Observation  
 Synthetics



すべり分布を参考に、断層面北西のすべりの大きいところから強い地震波が放射されたと仮定した(中図の紫の四角)場合の広帯域地震動シミュレーション結果(周期5~0.1秒). 震源近傍観測点の速度波形, 加速度波形の主たる特徴を再現できている

# ◆強震観測，地盤震動観測（1）地震被害地域における強震観測

● 本震  
● 最大余震



- ISK002の計測震度（本震 6.1、最大余震5.4）と比較すると、臨時観測点①～④の計測震度は、本震では0.33～0.49ほど小さく、最大余震ではほぼ同等の結果を示した。
- ⑤、⑥では、本震、最大余震は欠測となった。

地震被害地域において強震観測を継続している。臨時観測点における本震時の地震記録には、設置した地震計の大振幅時の特性による影響が含まれており、これを補正するために、現在、振動実験等より検討中である。



# ◆強震観測，地盤震動観測（1）正院地区における常時微動観測



・1993年能登半島沖地震や今回の地震によって被害を生じた石川県珠洲市正院町の正院，川尻，小路地区の住宅地を中心として，約100 mメッシュでの微動観測を実施し，表層地盤による増幅特性の評価を試みる．測定点は全部で120点

・HVスペクトル比のピーク周期に着目して，その分布等を調査中（岩田・他(2022)のISK002(K-NET正院)でのアレイ調査から，工学的基盤面以浅の地盤の震動卓越周期（約1秒）の空間分布を調べる）

・対象地域内で卓越周期が0.1s～2s程度の間ではばらつきが見られ，卓越周期が空間的に不均質である可能性

・卓越周期と被害分布等の比較を進める

※)国土地理院地図



# テーマ9 震災による被害状況の調査と再建に関する検討

金沢大学・福井大学・金沢工業大学・京都大学防災研究所

## 建築物被害悉皆調査の概要



日時：2023年5月15日～18日(4日間)

人数：2～3人 × 4～5チーム

調査棟数：

正院 552棟

川尻 295棟

小路 150棟

合計 997棟

# 調査建物概況（調査範囲全体）

## 正院

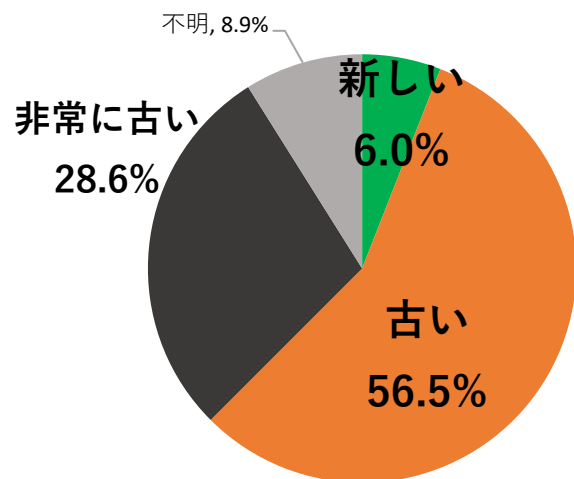


図3.1 正院の住宅の築年数

## 小路

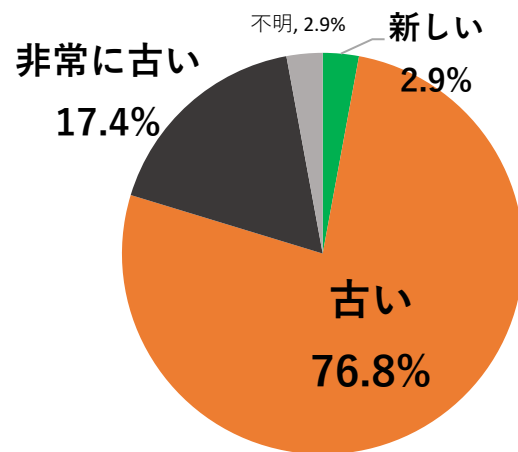


図3.2 小路の住宅の築年数

## 川尻

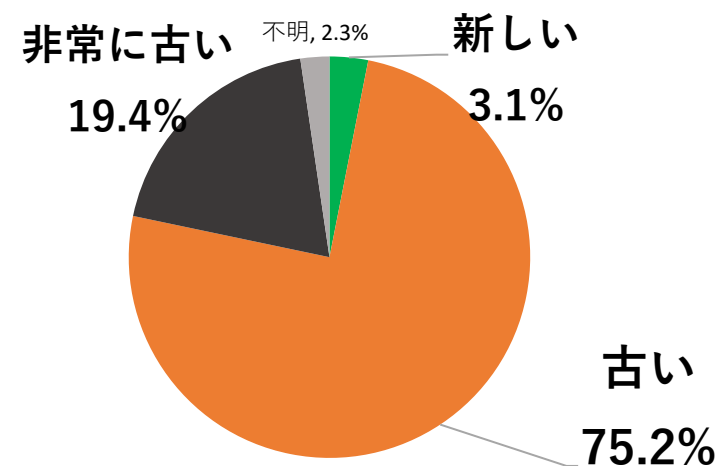


図3.3 川尻の住宅の築年数

正院地区 ⇒ 『新しい』、『非常に古い』住宅の割合が最も高い  
築年数が様々な住宅が混在

築年数：新しい（築20年以内）、古い（築20～40年）、非常に古い（築40年以上）

# 調査結果 ー 建物被害(調査範囲全体)

- 調査項目② 建物被害**
- D0 : 無被害
  - D1 : 壁面亀裂, 外装材の若干の剥落
  - D2 : 屋根瓦・壁面のモルタルの剥落
  - D3 : 柱・梁・壁の一部が破壊, 内部空間の欠損は無い
  - D4 : 柱・梁の破壊による内部空間の欠損
  - D5 : 居住空間の著しい破壊, 1階屋根の接地など

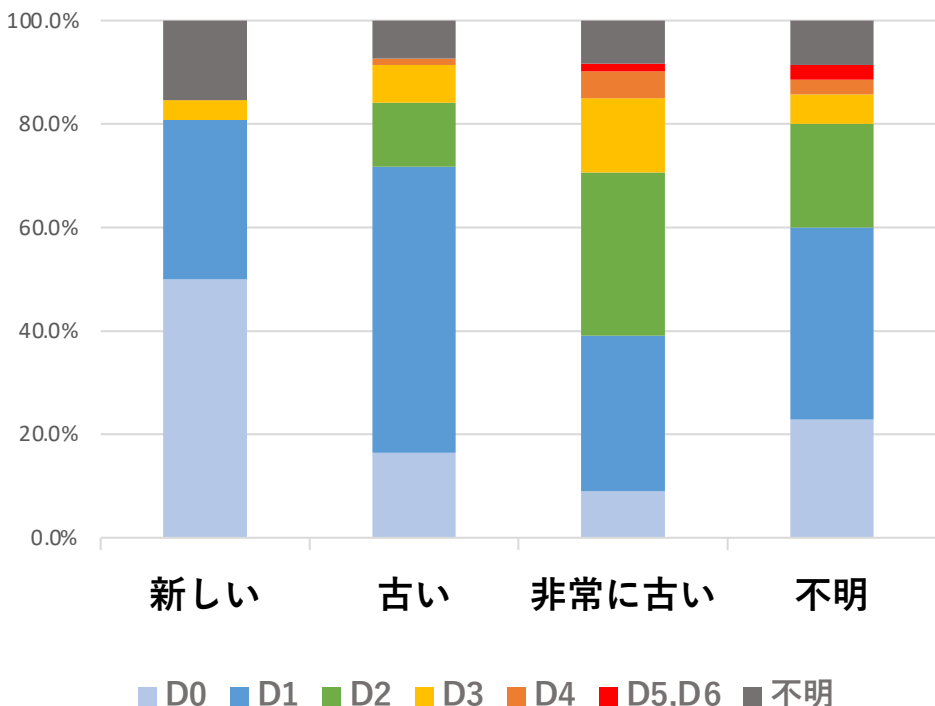


図7 築年数別の住宅の被害状況

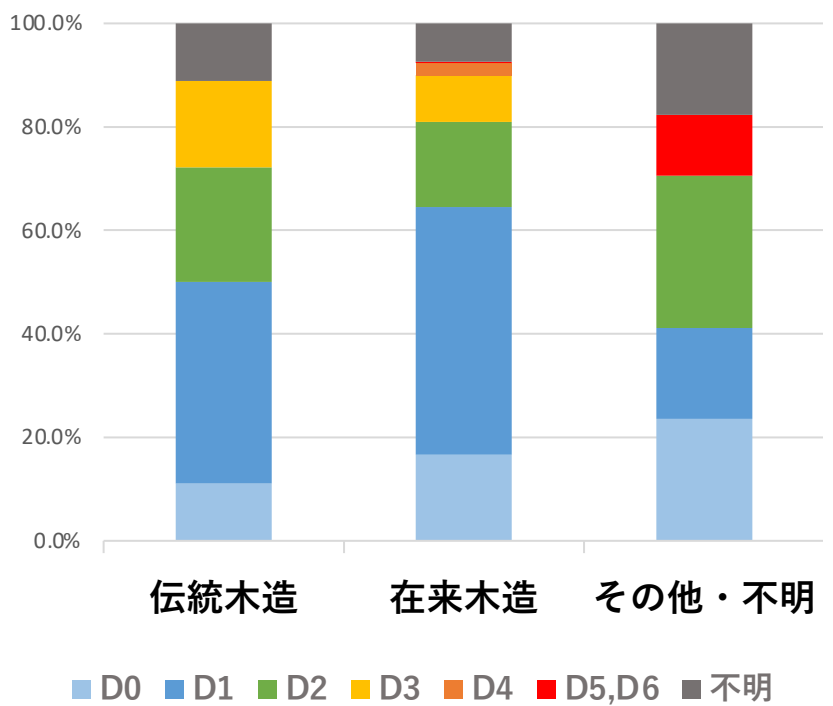


図8 構造様式別の住宅の被害状況

**伝統木造 ⇒ D4以上の被害がゼロ**



# テーマ10 社会的脆弱性による 災害時の地域への影響調査

金沢大学・北陸学院大学、神戸大学、東北大学災害科学国際研究所、東北大学

サブテーマ1: 津波に対する住民意識

サブテーマ2: 学校の防災対策に対する影響

サブテーマ3: 災害時の自治体財政運営

サブテーマ4: 住宅・生活再建支援の課題

サブテーマ5: 住民側から見た被災直後の状況の把握

サブテーマ6: 過疎地域におけるインクルーシブ防災等の現状

# サブテーマ 1 : 津波に対する住民意識

- 担当: 青木賢人・林 紀代美(金沢大)
- 今回の地震を含め、群発地震の震源域が北側の海域に移動してきたことから、海底活断層(珠洲沖セグメント)での地震と津波の発生が懸念される状況。群発地震により地震に対する防災意識は向上しているが、津波に対する認識は十分ではない可能性。津波発生時の被害を大きくしないための働きかけの必要と、その内容・方向性を明らかにすることが必要。
- 珠洲市の沿岸地域の全集落(36集落)に対し、郵送で悉皆調査を実施(4,916世帯)。1,627世帯(33.1%)から回答があり、現在、入力・集計作業を進めているところ。年度内の分析結果公表へ向けて鋭意作業中。
  - 津波避難を「ギブアップ」「不安を感じている」住民が多い←ギブアップさせない支援
  - 津波の想定を十分に理解できてない人も多い←良くわからないがギブアップの可能性
  - 珠洲沖セグメント起源の津波を過大評価している住民が多い  
←HM想定に対してギブアップしていると、小規模な津波であっても避難しない恐れ

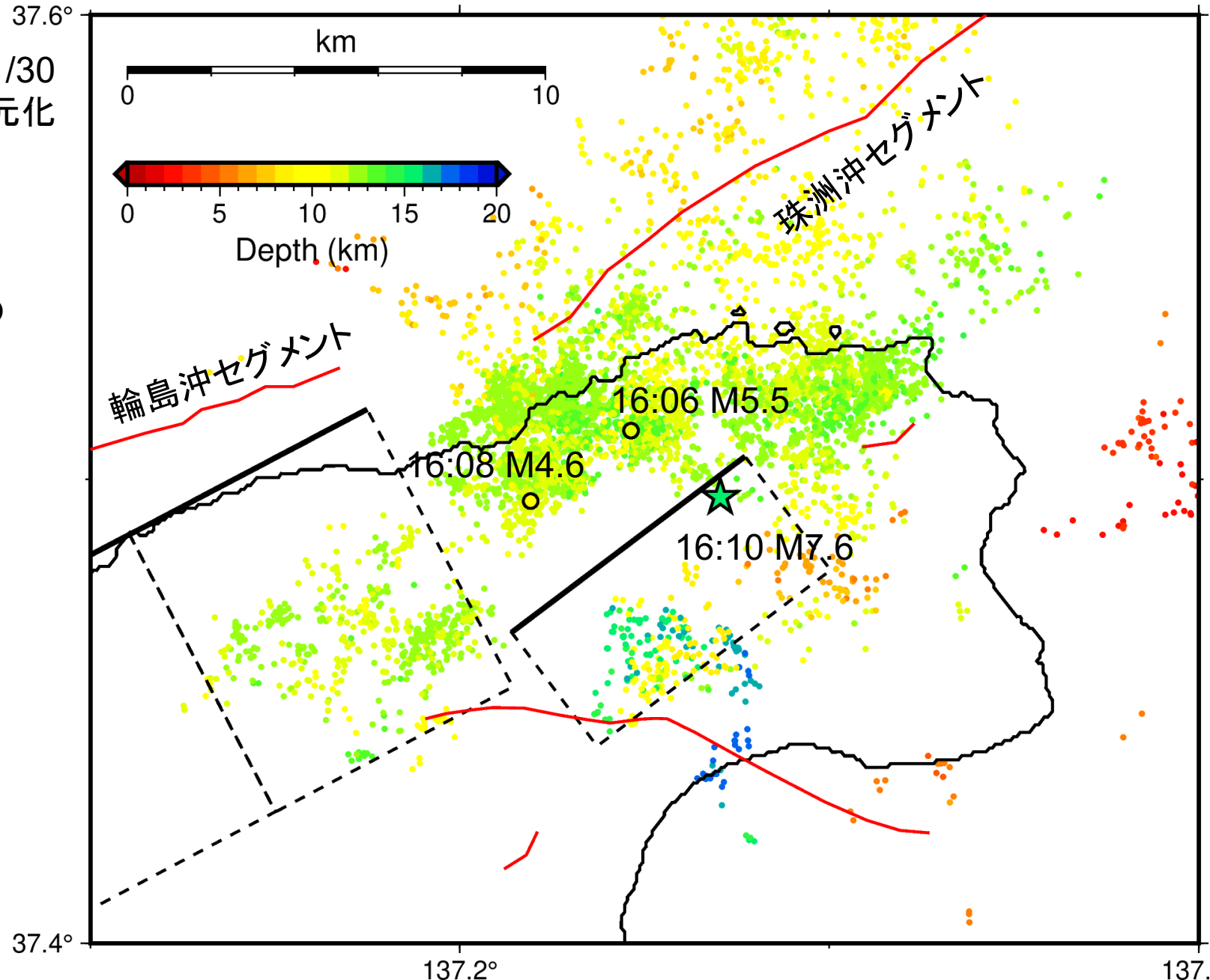
# 令和6年能登半島地震について

hypoDDによる震源再決定(2018–2023/11/30  $M \geq 1.5$ )とM7.6の地震の震源と(気象庁一元化震源)(星印)

図中央の矩形はNishimura et al. (2023)の period C のshear-tensile fault の位置

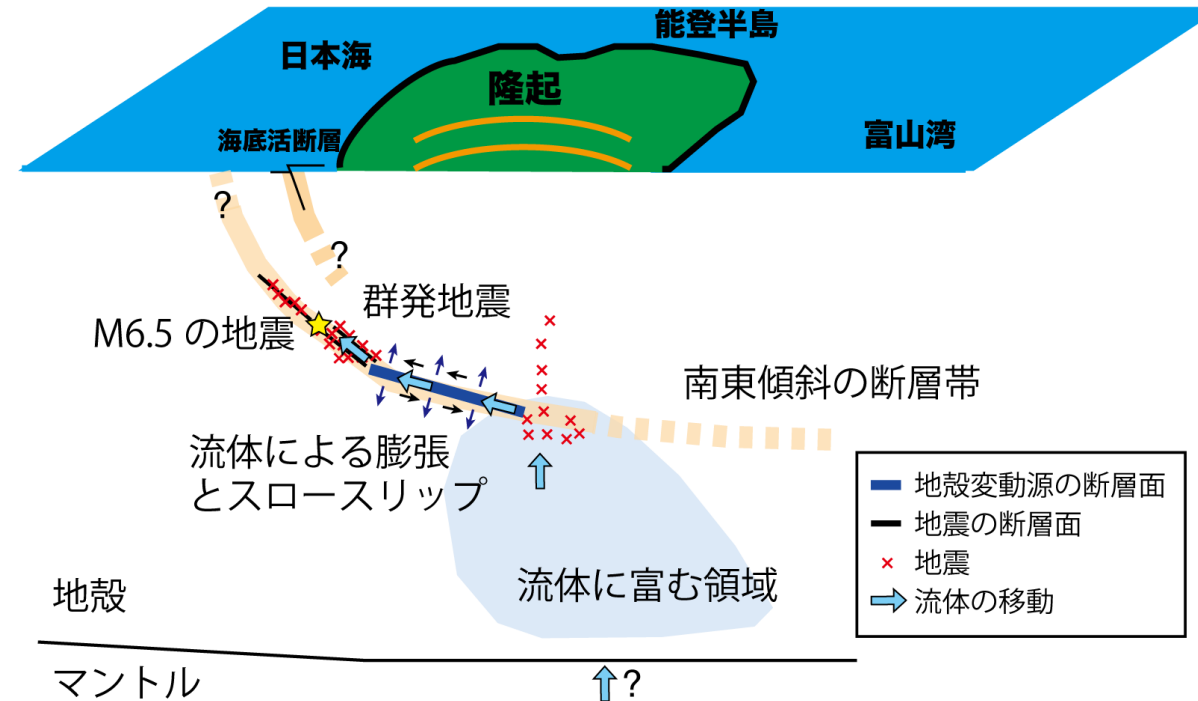
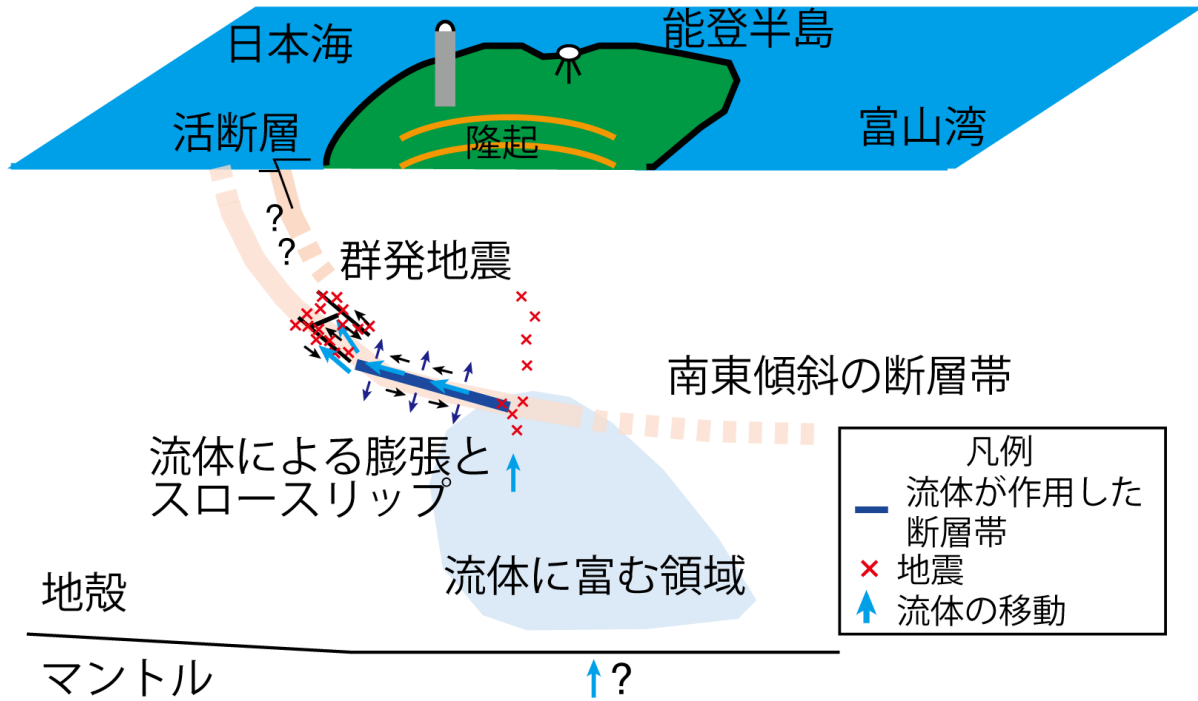
2021/06/21–30 から 2022/06/9–18

左の大きな矩形は Hamada et al. (2016) による断層モデル





2023/05/05 M6.5



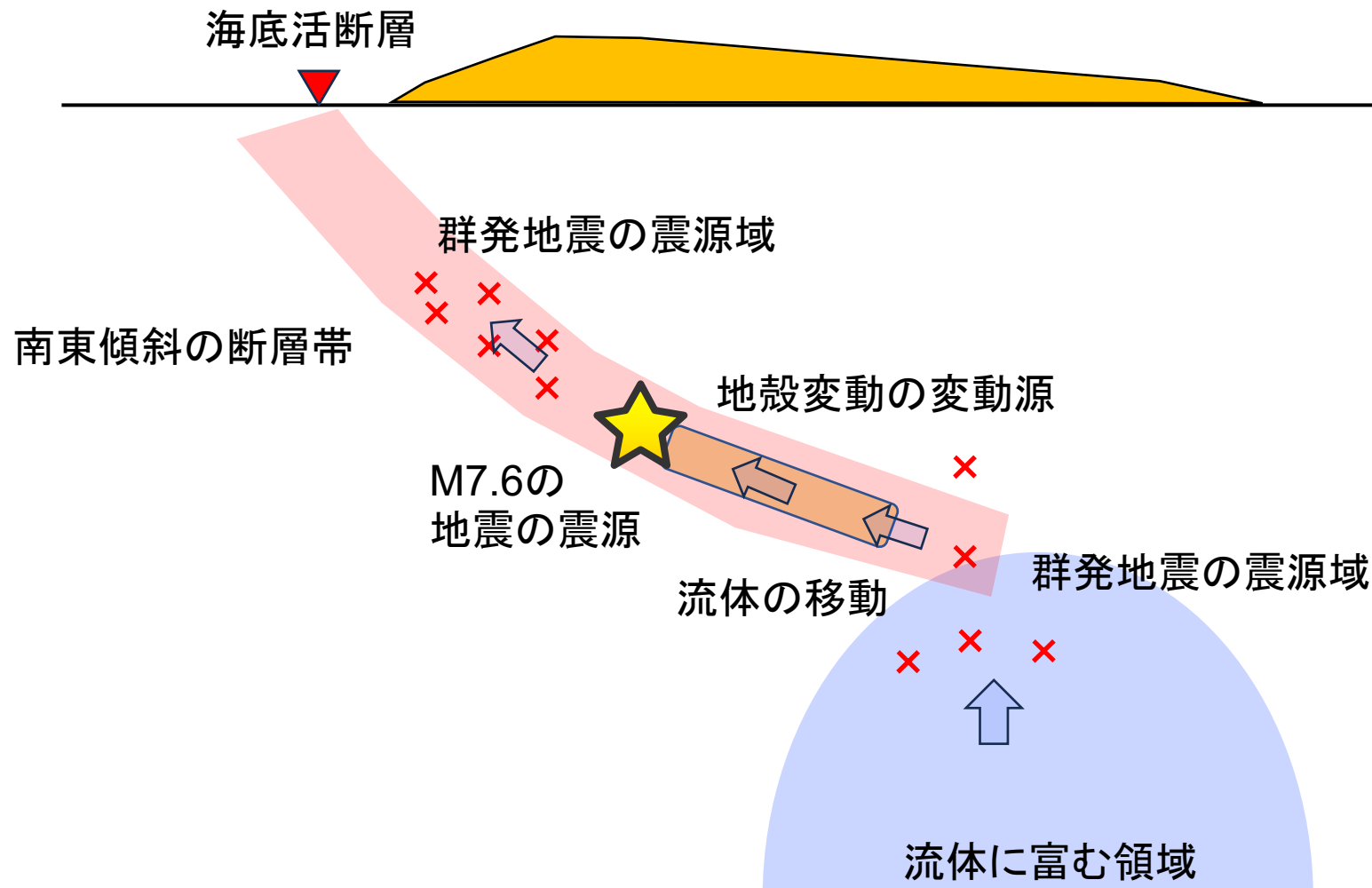
Nishimura et al. (2023) プレスリリースより

Nishimura et al. (2023) プレスリリース図を改変

日本海

能登半島(珠洲市付近)

富山湾

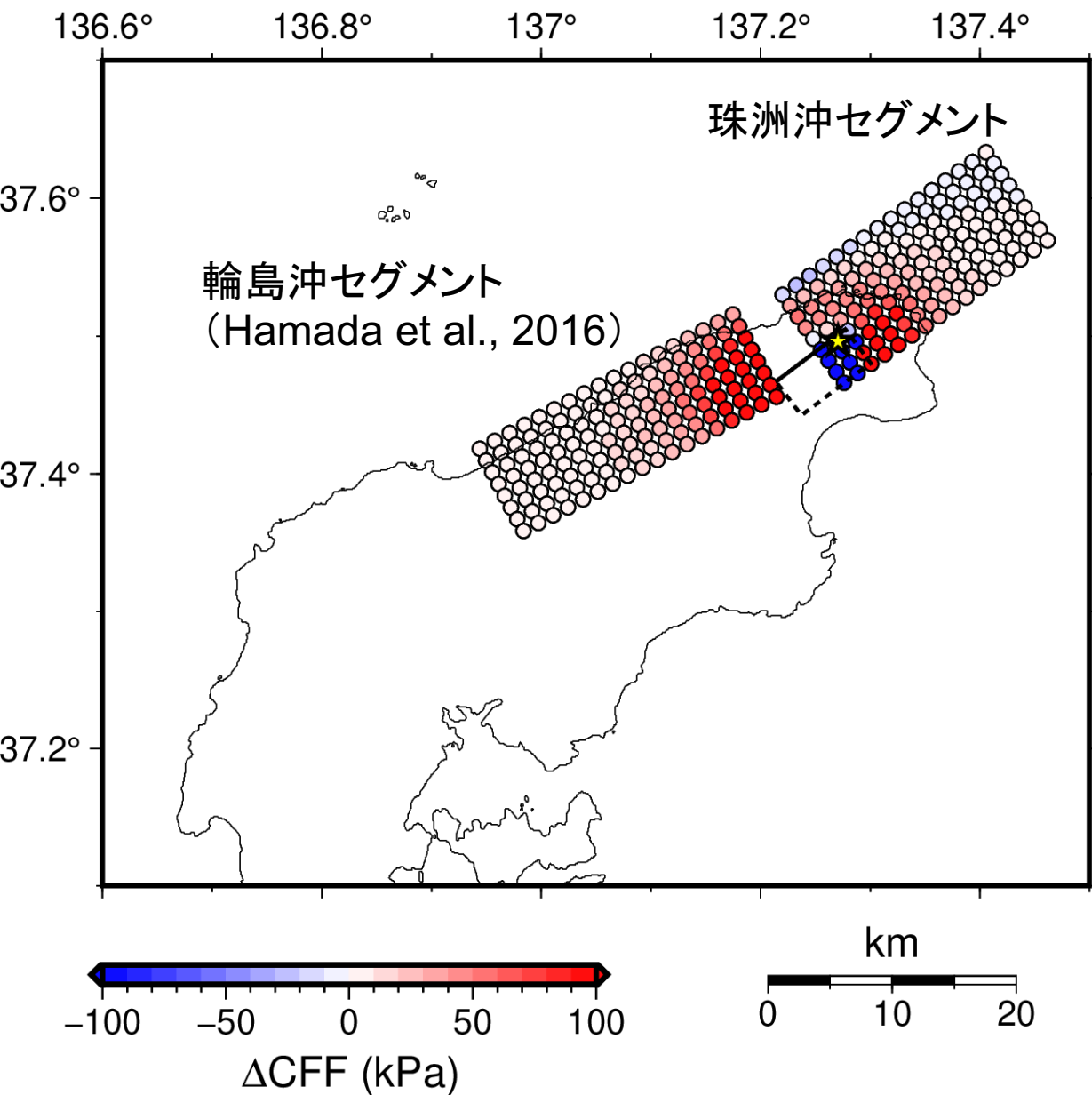


M7.6の地震発生を受けて、各テーマにおいて解析が進行中  
(本調査委員会にも資料提出)

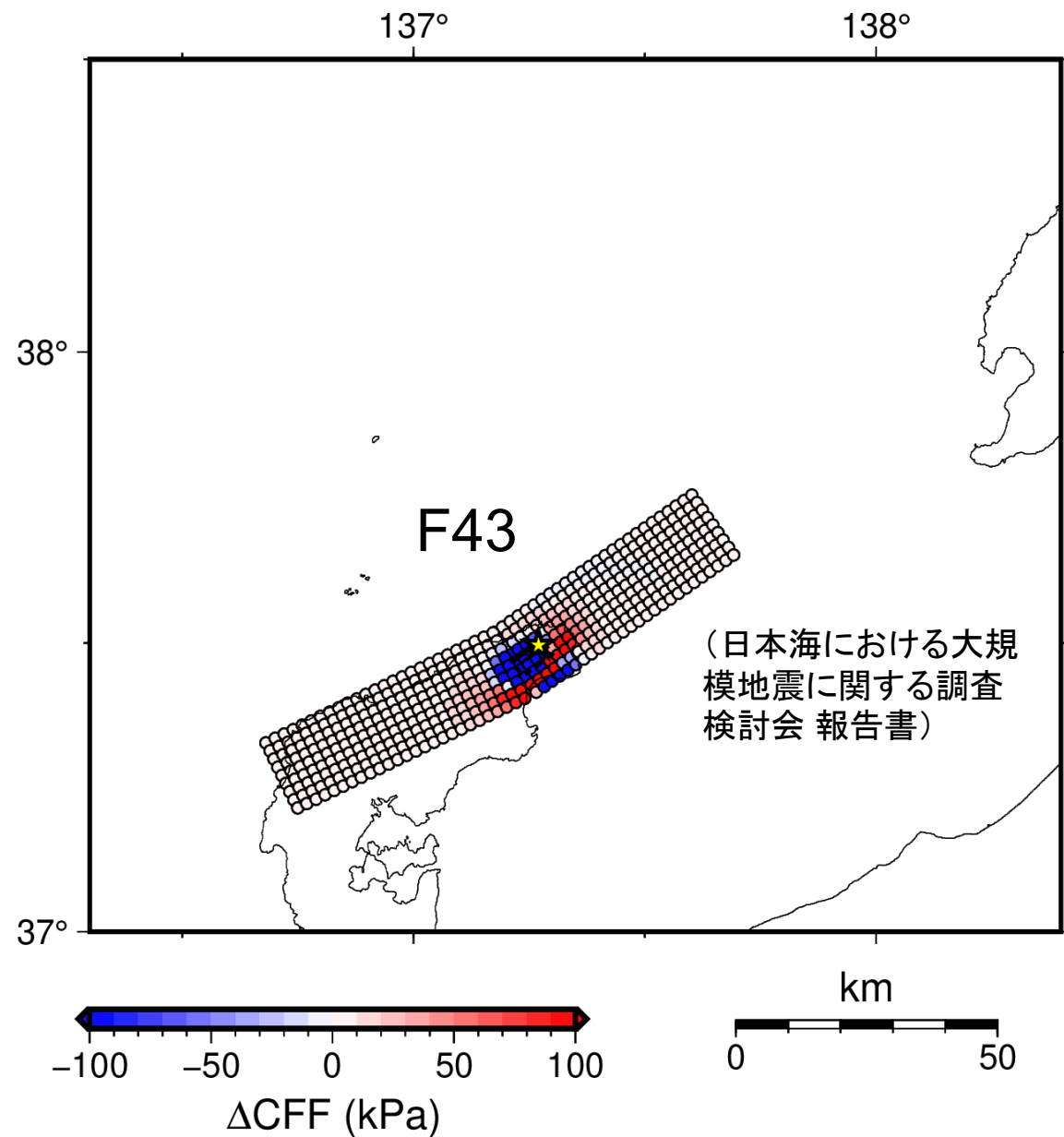
M7.6の地震の震源付近の概念図

# 輪島沖セグメントと珠洲沖セグメントのクーロン破壊応力変化

Nishimura et al. (2023) Period C 2021/06/21-30 から 2022/06/9-18



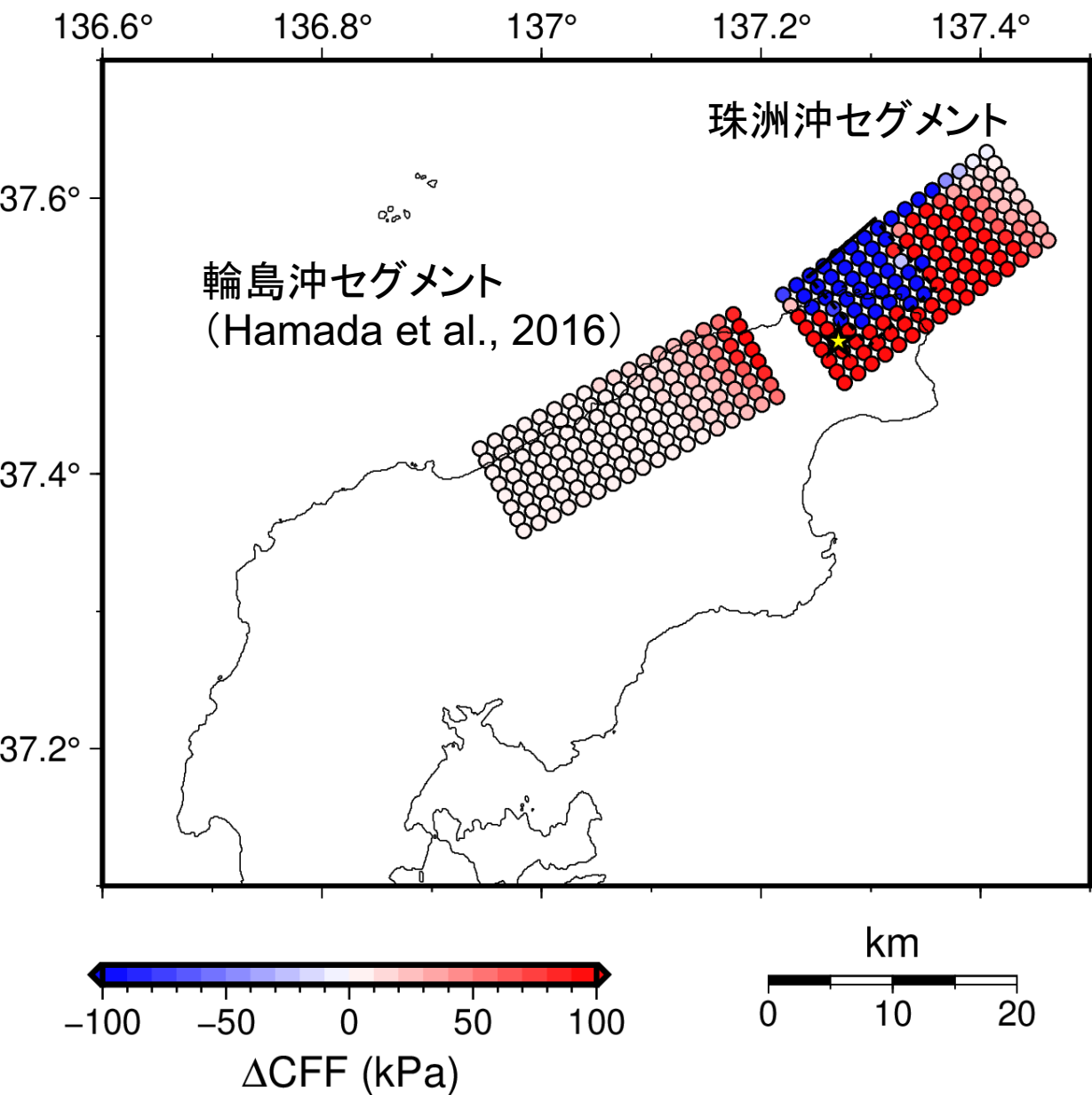
# 非地震性の断層運動により、両側の断層に破壊が拡がりやすい環境の形成



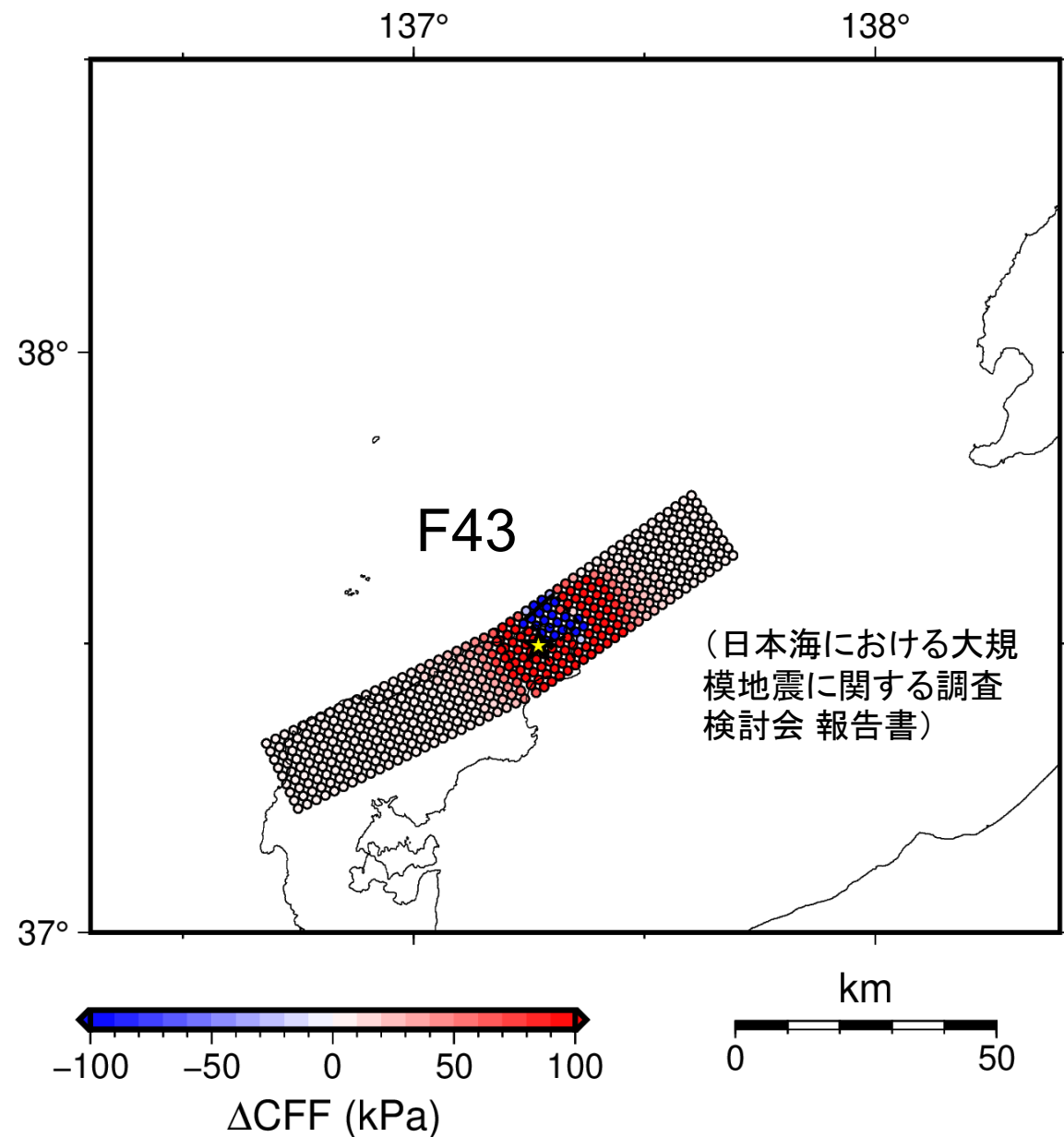


# 2023/05/05 M6.5の地震によるクーロン破壊応力変化

断層モデルは地震調査委員会資料(京都大学・金沢大学)気象庁CMT解固定



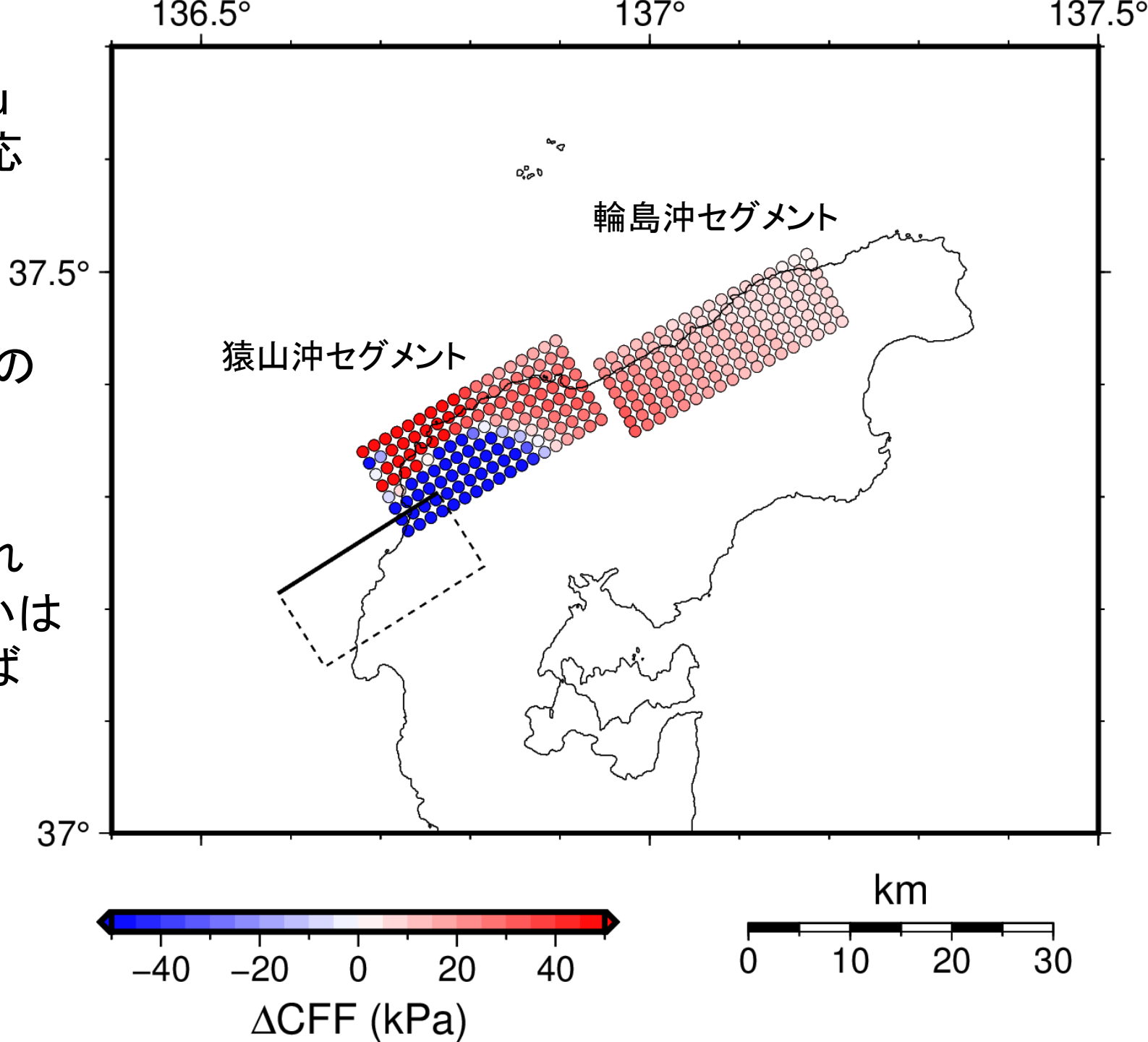
# M6.5の地震の断層運動により、両側の断層に破壊が拡がりやすい環境の形成



# 2007年能登半島地震(Hiramatsu et al., 2008)によるクーロン破壊応力変化

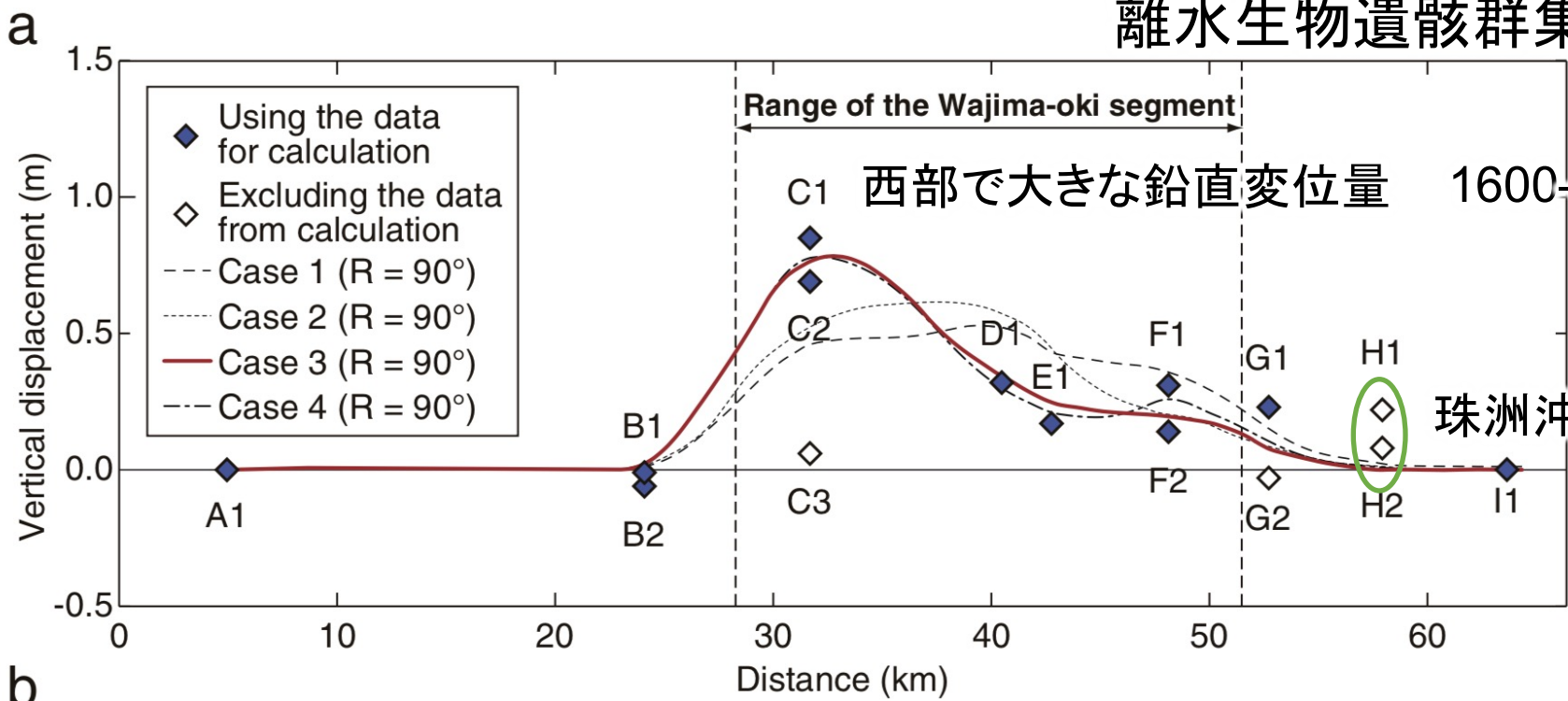
西側に破壊が拡がりやすい環境の形成

Hamada et al. (2016) で推定された断層と同じ断層の活動であるかは不明だが、並行する断層であれば同じ結果になる



# 輪島沖セグメントでの地震性隆起イベント (Hamada et al., 2016)

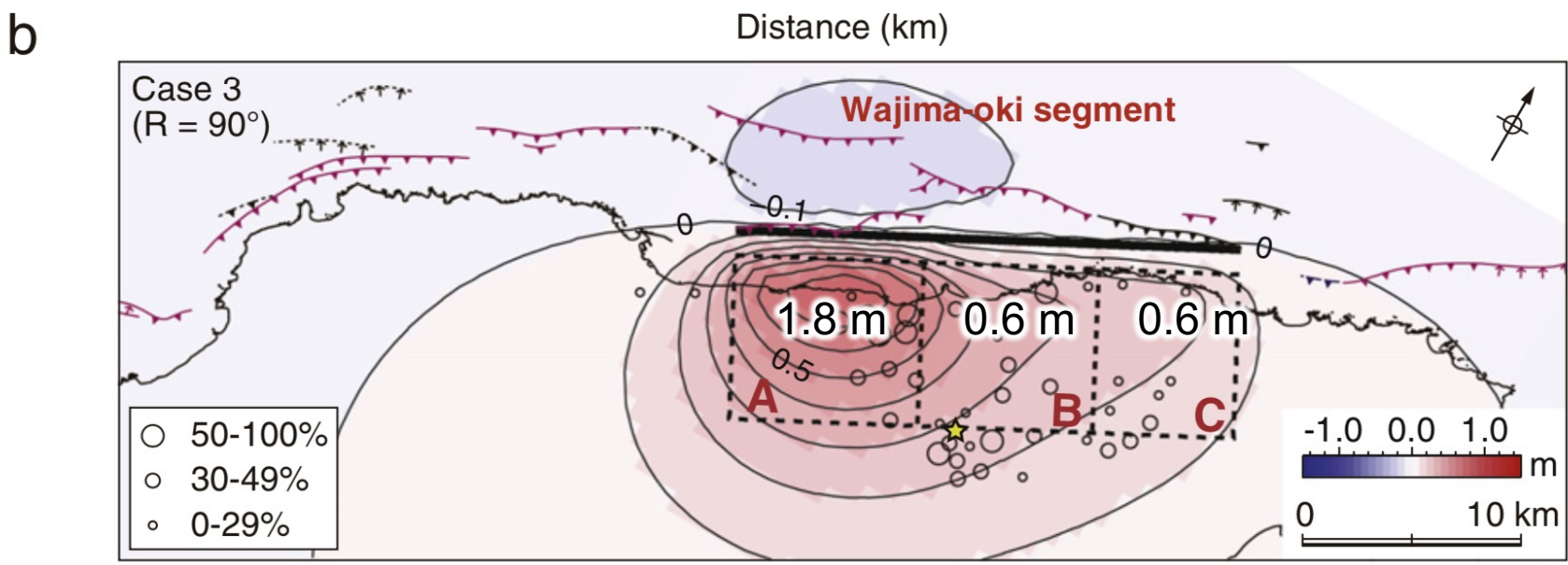
離水生物遺骸群集から海岸の鉛直変位量を推定



1600–1800ADの間に隆起イベントが発生

M<sub>w</sub> 6.6  
M<sub>JMA</sub> 6.9

珠洲沖セグメントのイベントの影響?  
1280–1420 AD



西部で大きなすべり量

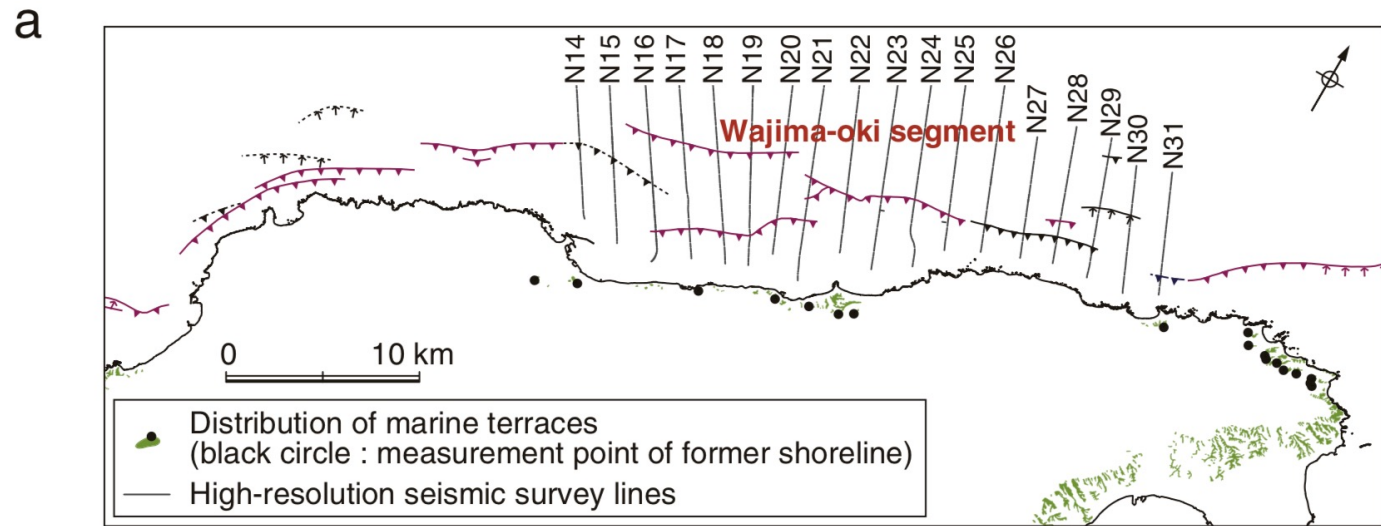
1729年の地震 (M6.6–7.0) の倒壊率 (宇佐美, 2003) の分布と良い対応

輪島沖セグメントの活動により  
1729年の地震が発生

珠洲沖セグメントと2023 M6.5の地震  
の関係を考えると輪島沖セグメントに  
並行な断層の可能性?

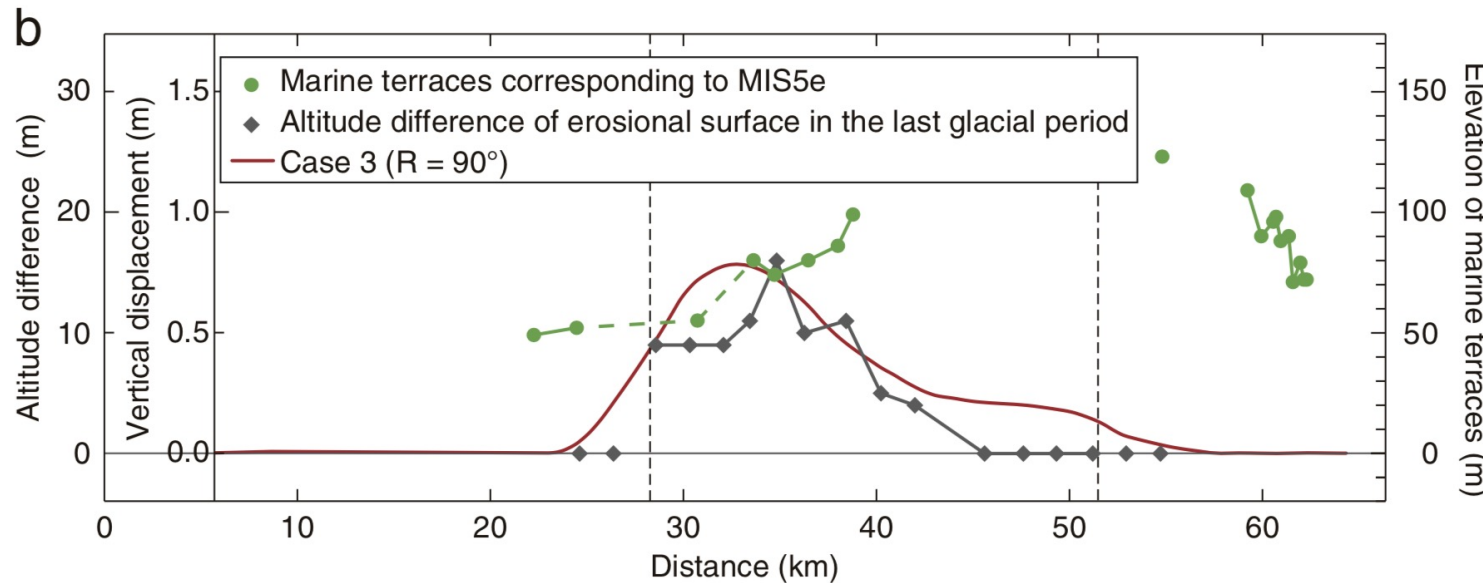


# 輪島沖セグメントでの地震性隆起イベント (Hamada et al., 2016)



1729年の地震での地殻変動の鉛直変位量分布はMIS5eの海成段丘の高度分布とは不一致

1729年の地震でのすべり量分布は輪島沖セグメントでの長期的な平均すべり量分布と異なる



珠洲沖セグメントの活動

→ 今回の地震?

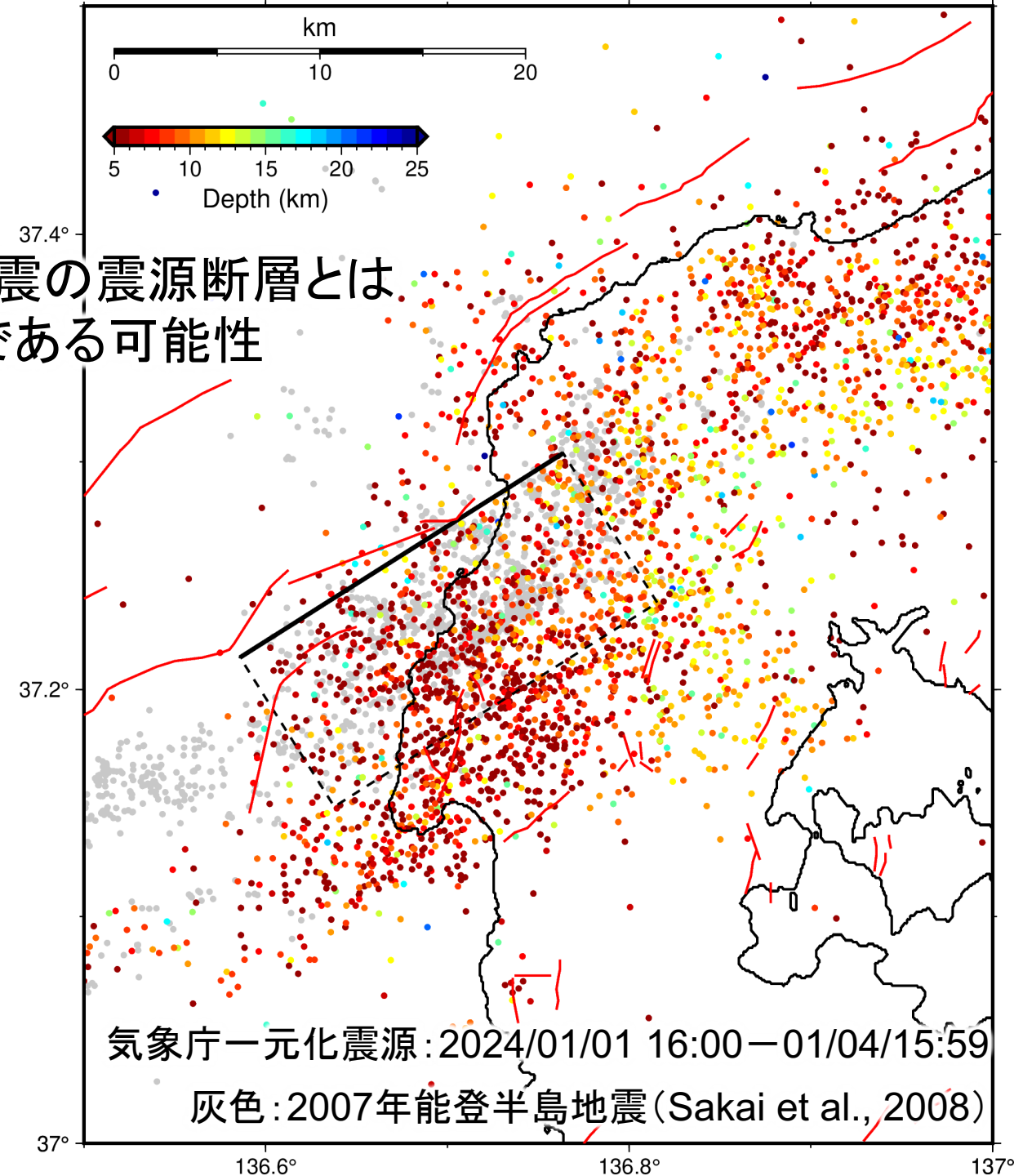
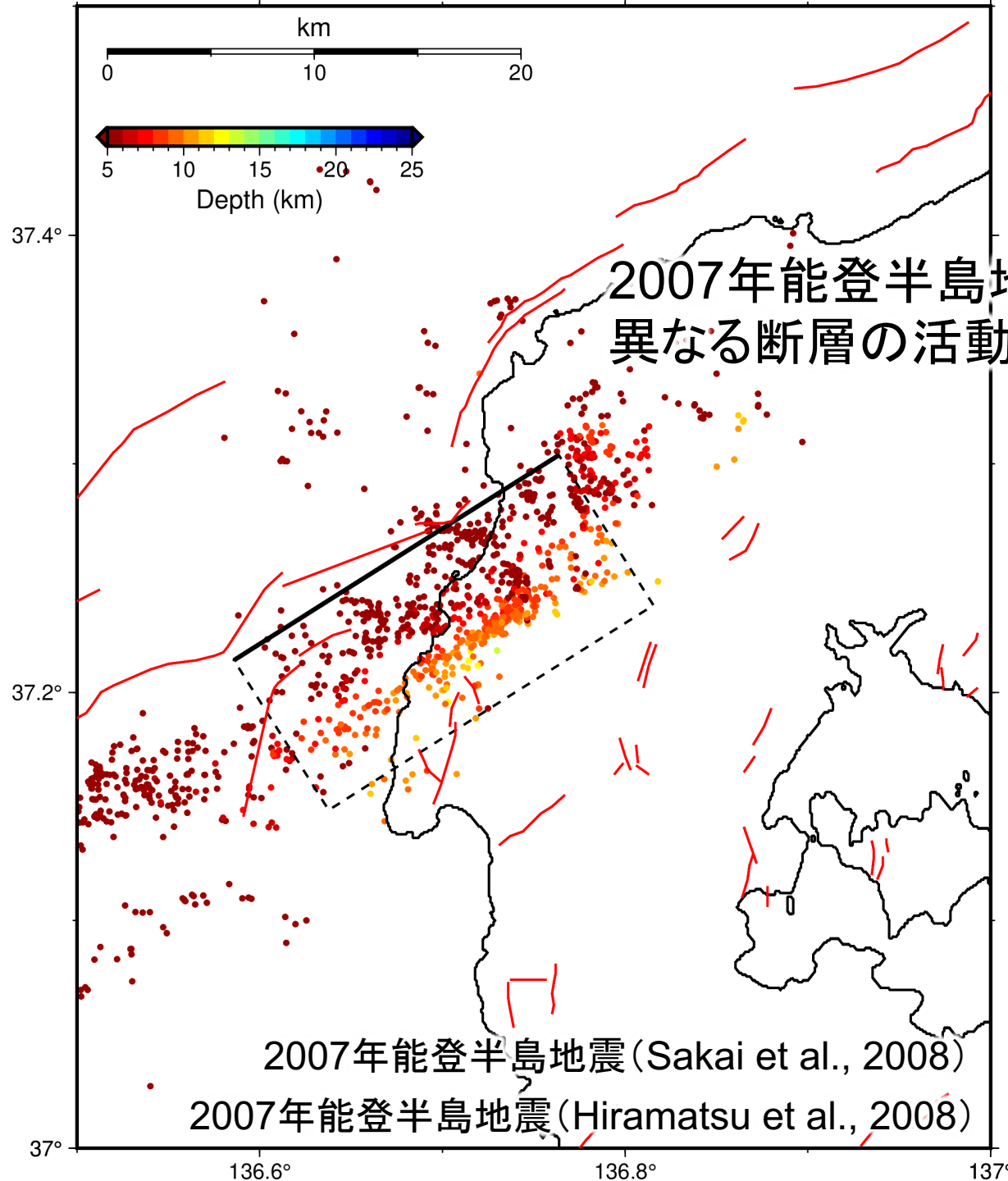
非地震性の隆起

→ 2020/12頃からの非地震性地殻変動

未知の活断層 (宍倉ほか, 2000)

→ 2023 M6.5の震源断層

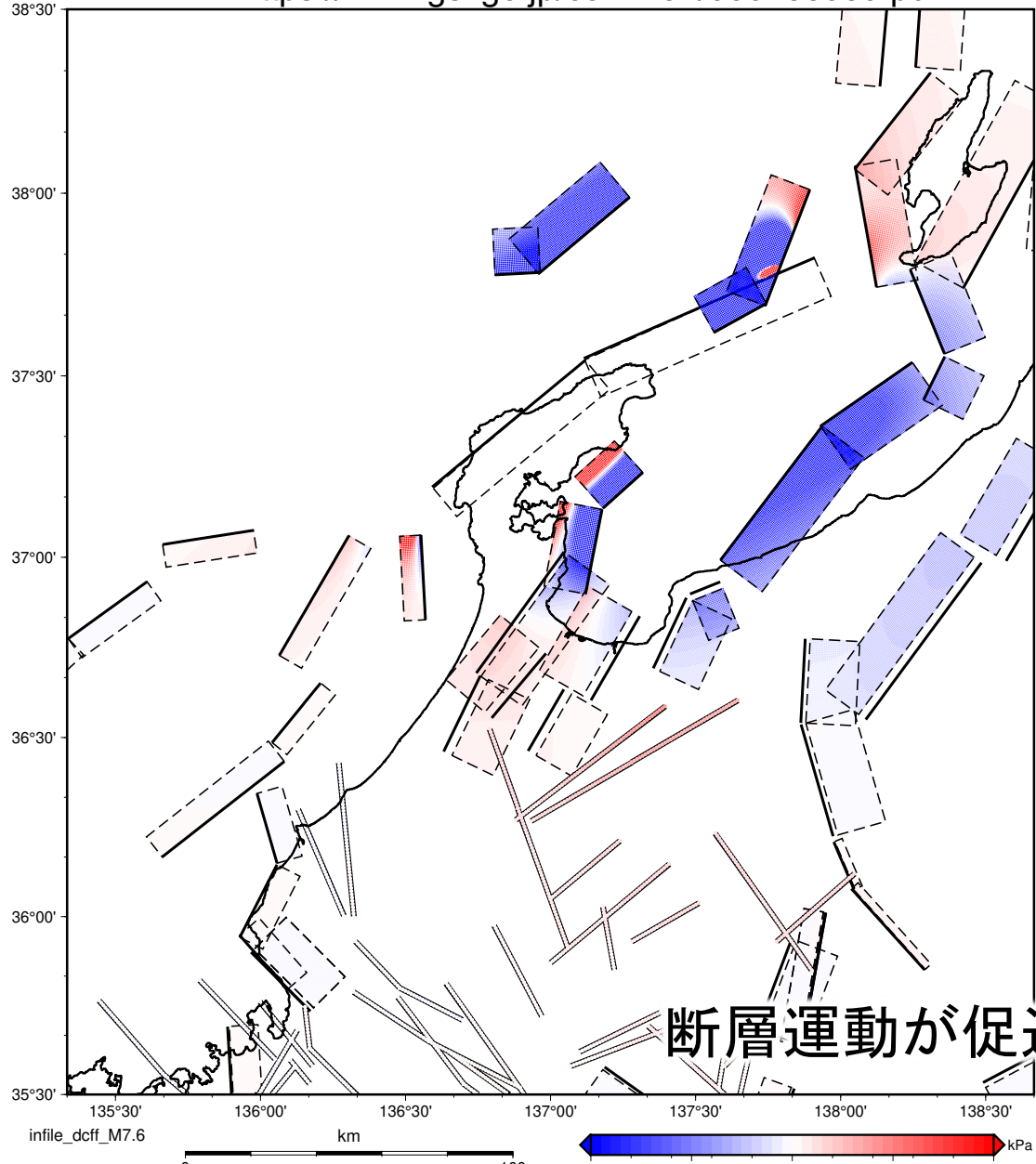
**Fig. 6.** (a) Distribution map of marine terraces corresponding to MIS5e (Koike and Machida, 2001) and the locations of high-resolution seismic survey lines (Inoue and Okamura, 2010). Only the former shoreline of marine terraces facing the northern coast of the Noto Peninsula was selected. (b) Distribution of the altitude differences of the erosional surface in the last glacial period (black diamonds) and the coastal uplift calculated for Case 3 using the fault model (red line).



2007年能登半島地震の震源断層とは異なる断層の活動である可能性

# 国土地理院の断層モデルによる周辺の断層帯でのクーロン破壊応力変化

<https://www.gsi.go.jp/common/000253939.pdf>



# 本調査委員会 京都大学・金沢大学・東北大学資料の断層モデルによる周辺の断層帯でのクーロン破壊応力変化

