

科学研究費助成事業(特別研究促進費)
能登半島北東部において継続する地震活動に関する総合調査
研究成果概要

平松良浩

金沢大学理工研究域地球社会基盤学系

研究概要

2020年12月頃から活発な地震活動が継続し、2022年6月19日にM5.4(最大震度6弱)の地震が発生した能登半島北東部において、その原因を調べるために総合的な調査を実施。研究成果は、国の機関に提供するほか、報告会等を実施することにより、今後の地震調査研究の推進や地震防災対策に貢献。

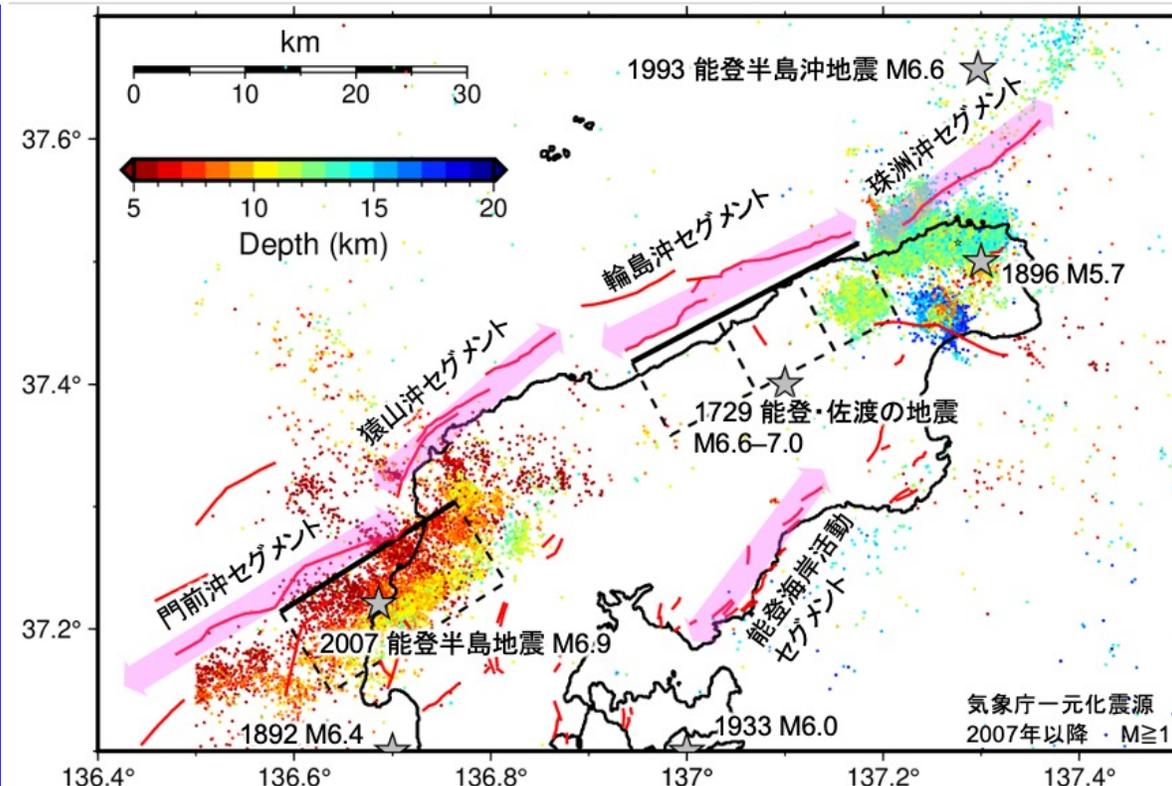
研究組織

研究代表者:平松良浩 (金沢大学)

金沢大学、東北大学、筑波大学、東京大学、東京大学地震研究所、富山大学、福井大学、信州大学、京都大学防災研究所、兵庫県立大学、岡山大学、海洋研究開発機構 (全12機関、計24名)

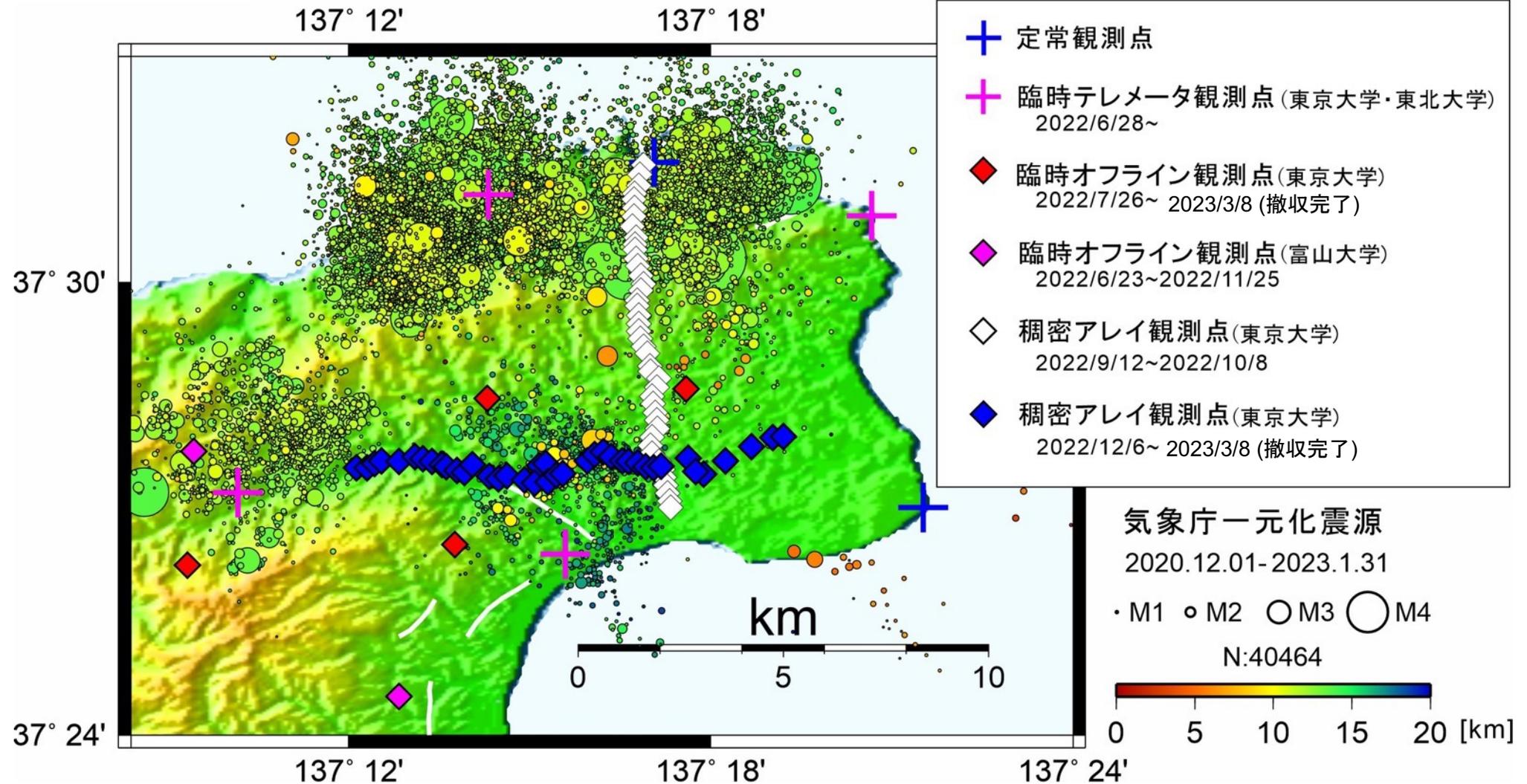
研究テーマ

1. 陸域地震観測による群発地震発生メカニズムの解明
2. 測地観測による地殻変動の調査
3. 電磁気観測による地下電気比抵抗構造の解明
4. 重力観測による地殻流体挙動の解明
5. 温泉成分測定による流体起源の調査
6. 活構造調査による長期間地殻変動の解明
7. 強震観測による被害状況の調査



1: 陸域地震観測による群発地震発生メカニズムの解明

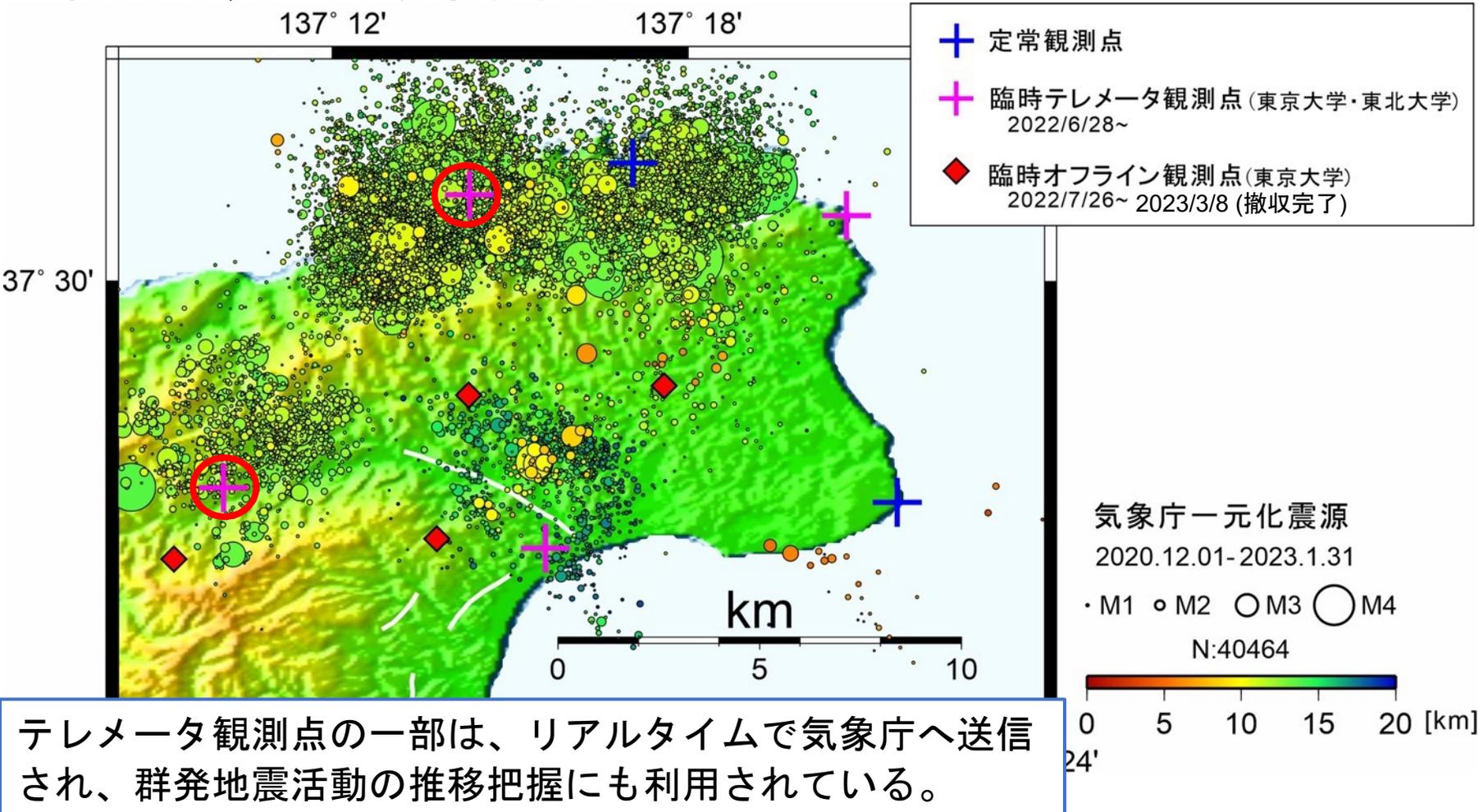
地震観測点配置



1: 陸域地震観測による群発地震発生メカニズムの解明

(東京大学, 東北大学)

群発地震の活動推移把握



臨時テレメータ観測点設置状況

今後の予定:

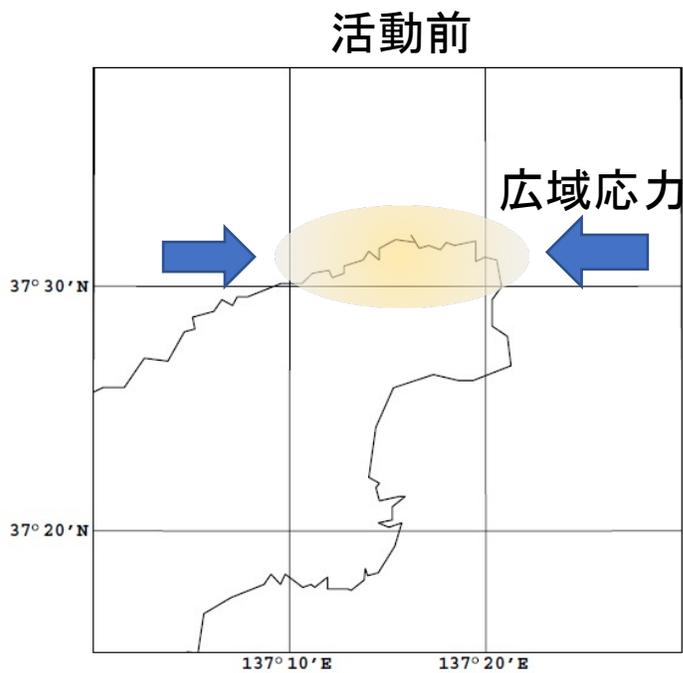
臨時テレメータ観測点のうち、北西側の2か所 \oplus は、オフライン観測点として再設置し、観測の継続を予定。
残り2か所は、引き続きテレメータ点として観測を実施予定。

1: 陸域地震観測による群発地震発生メカニズムの解明

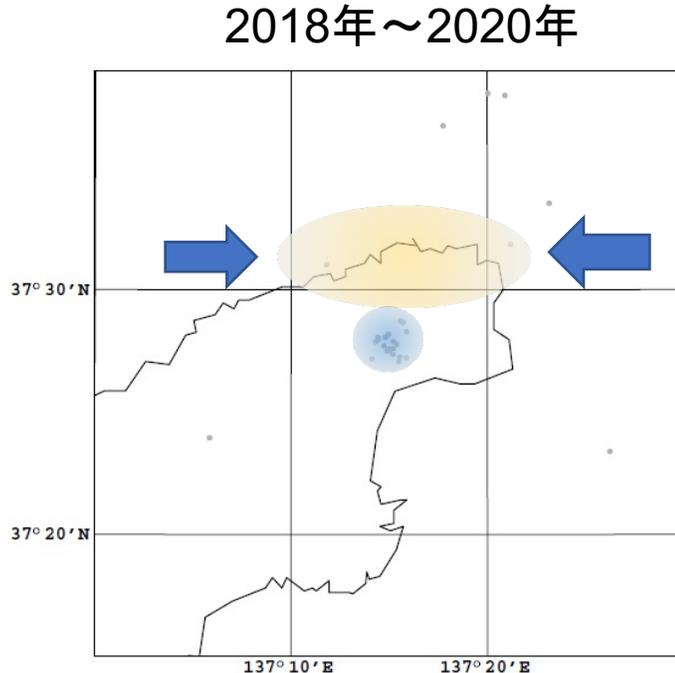
(富山大学)

・モーメントテンソルの推定

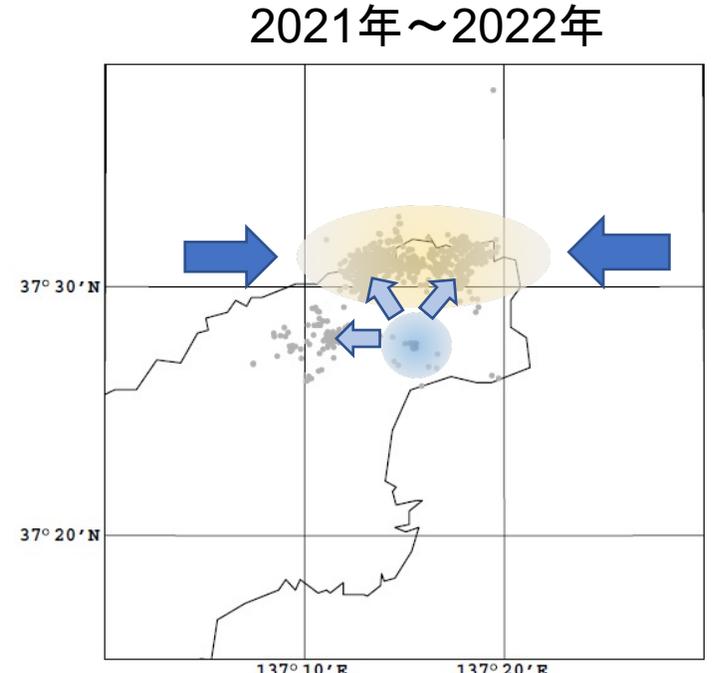
モーメントテンソル解析から推定される地震活動推移の背景
(地震は広域応力に整合的な断層面解を持つ)
(群発地震は能登半島北部域で活動が活発)
(南クラスターから能登半島北部域での活動に時間遅れ)



北部地域において広域応力を支持



(比較的応力の低い)南クラスター域に地下深部より流体侵入(南クラスター域において地震活動活発化)



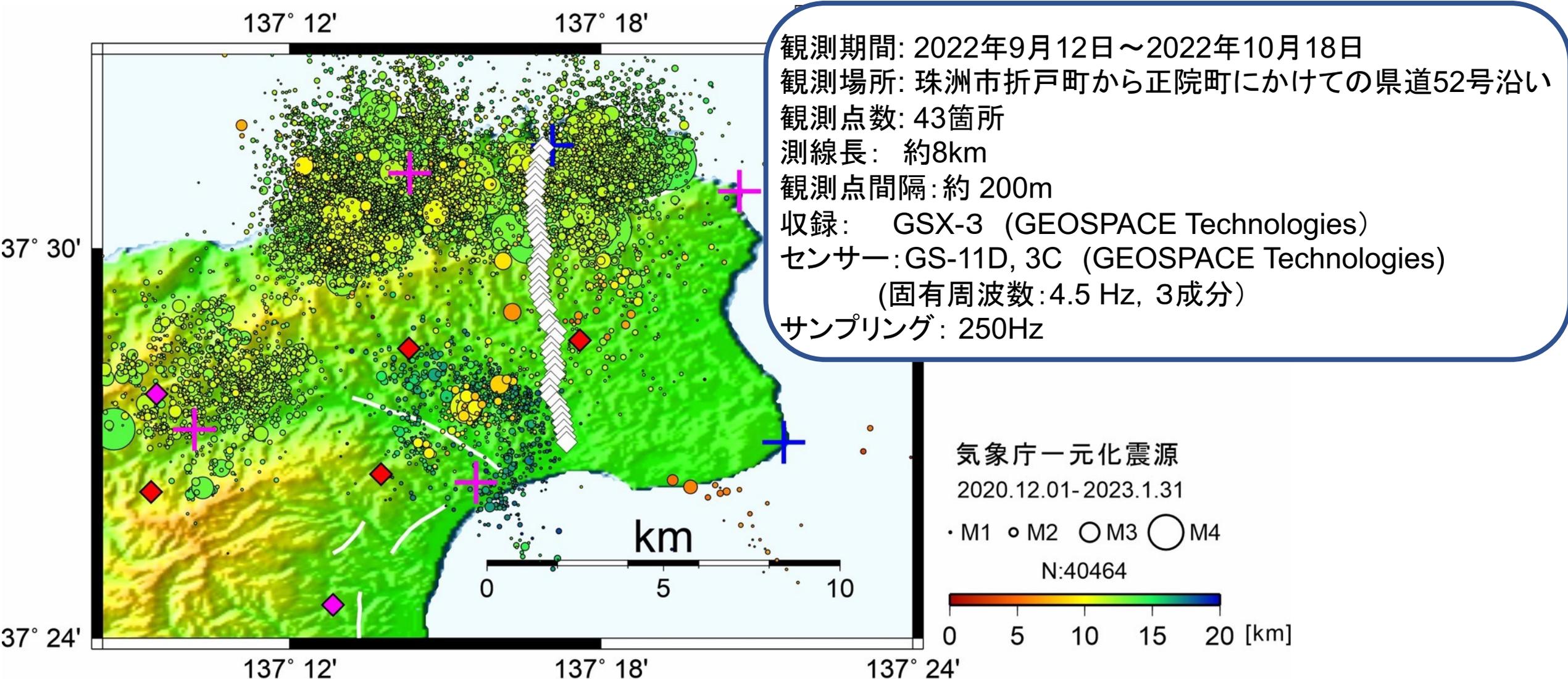
周辺域に流体浸透により、既存断層における地震が活発化(広域応力を支えていた北部において地震発生)

1: 陸域地震観測による群発地震発生メカニズムの解明

(東京大学)

・ 流体を起源とする地殻内反射面の推定

群発地震活動域やその近傍で、オフライン小型地震観測装置による稠密アレイ観測を実施。観測される自然地震の波形中に含まれる反射波を用いて、地下深部に推定されている流体を起源とする地殻内反射面の把握を行う。

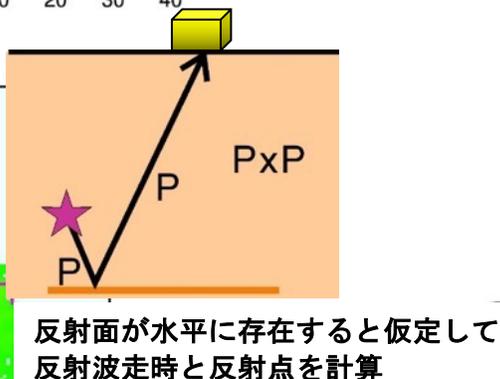
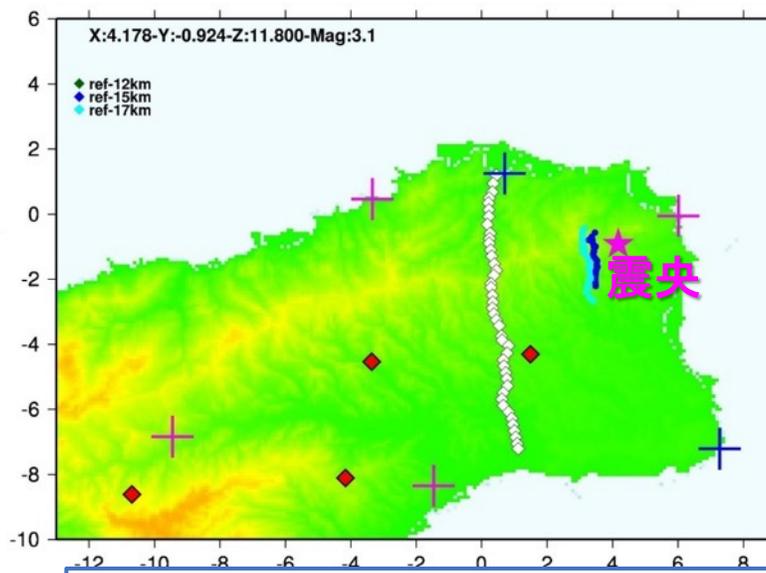
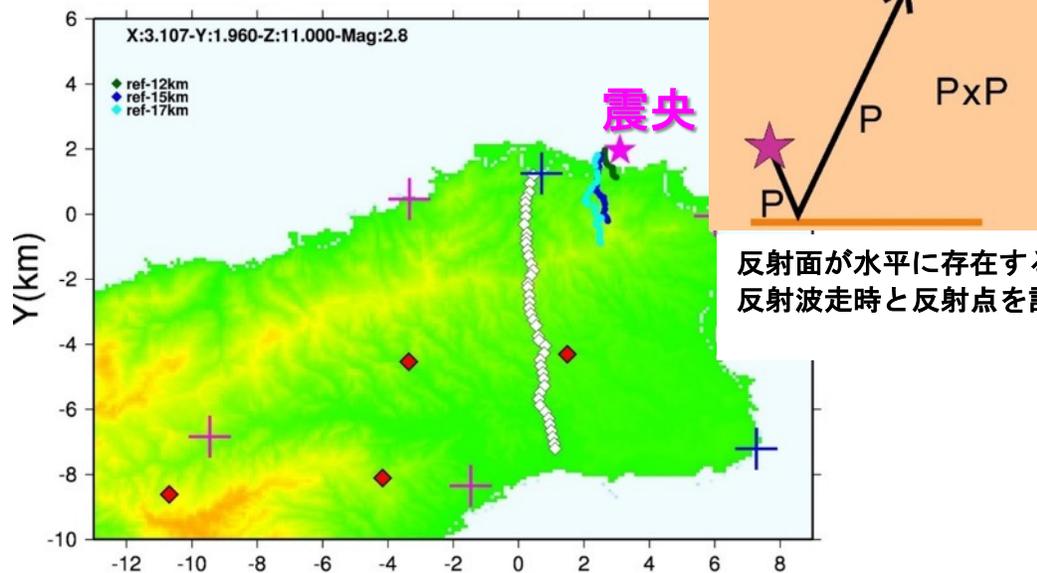
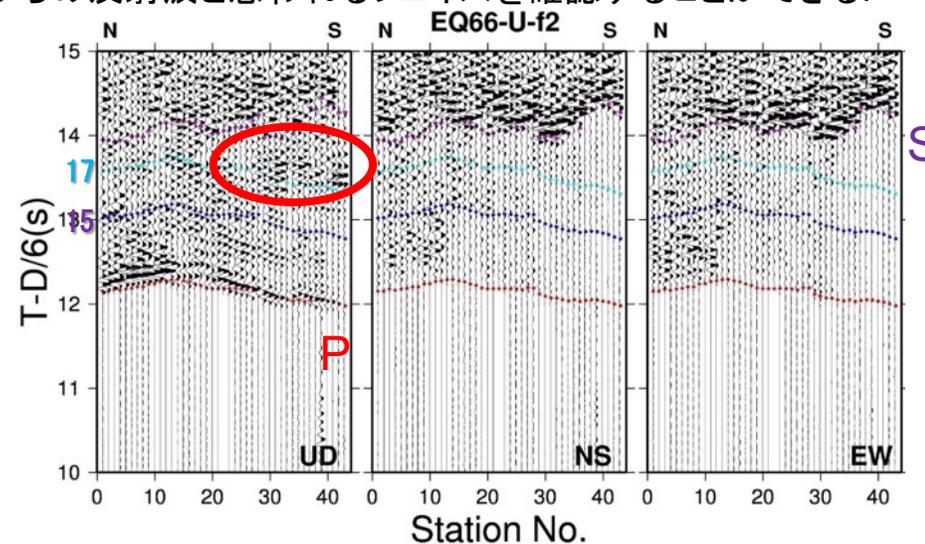
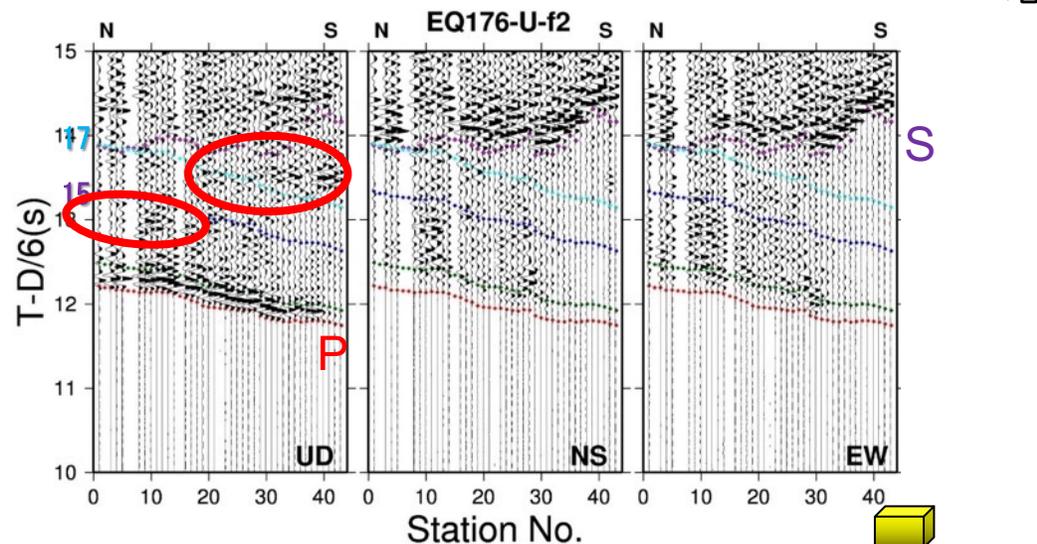


1: 陸域地震観測による群発地震発生メカニズムの解明

(東京大学)

流体を起源とする地殻内反射面の推定

稠密アレイ観測点で収録した自然地震波形では、P波初動のあとに、地下深部からの反射波と思われるフェーズを確認することができる。

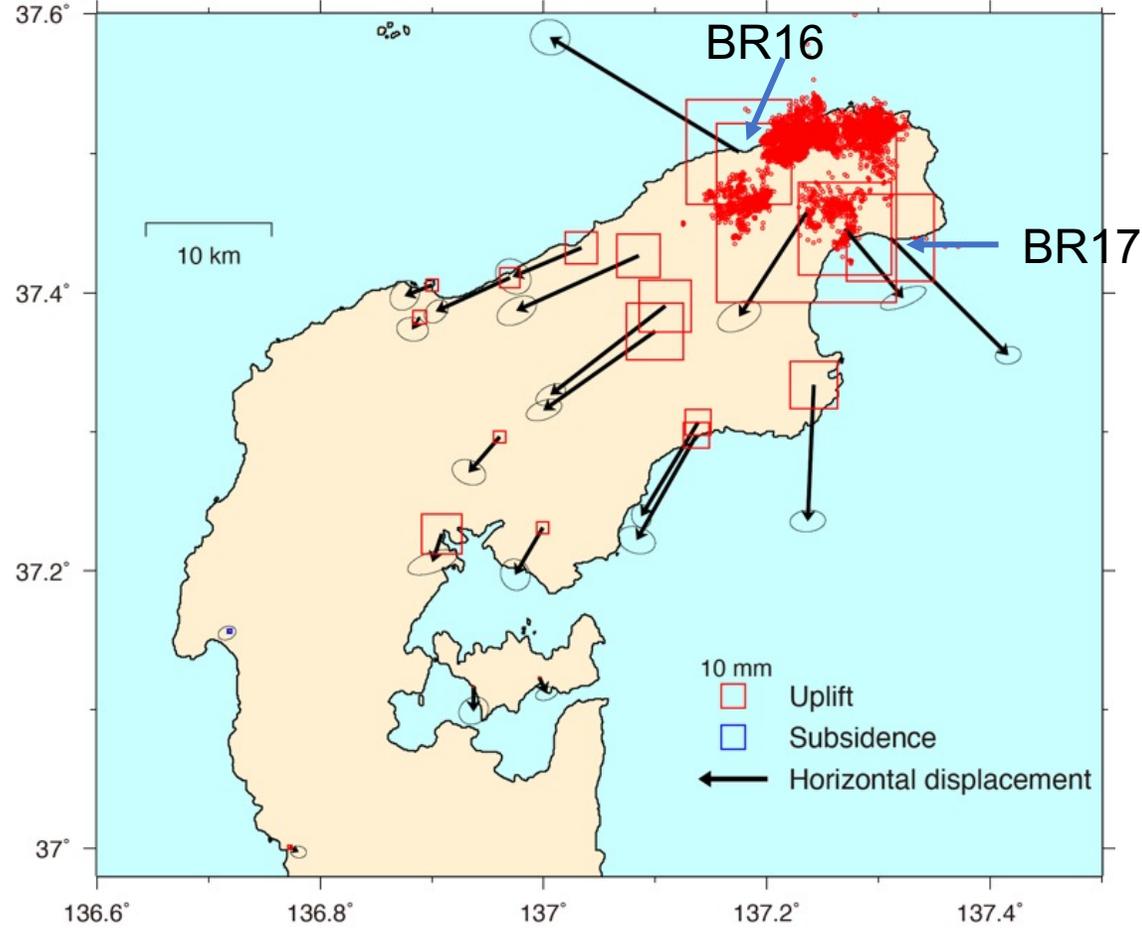


PxP波を仮定した時の反射点位置 青: 深さ15km. 水色: 深さ17km

反射面が深さ15kmから17kmに存在する可能性を示唆

GNSSにより観測された地殻変動

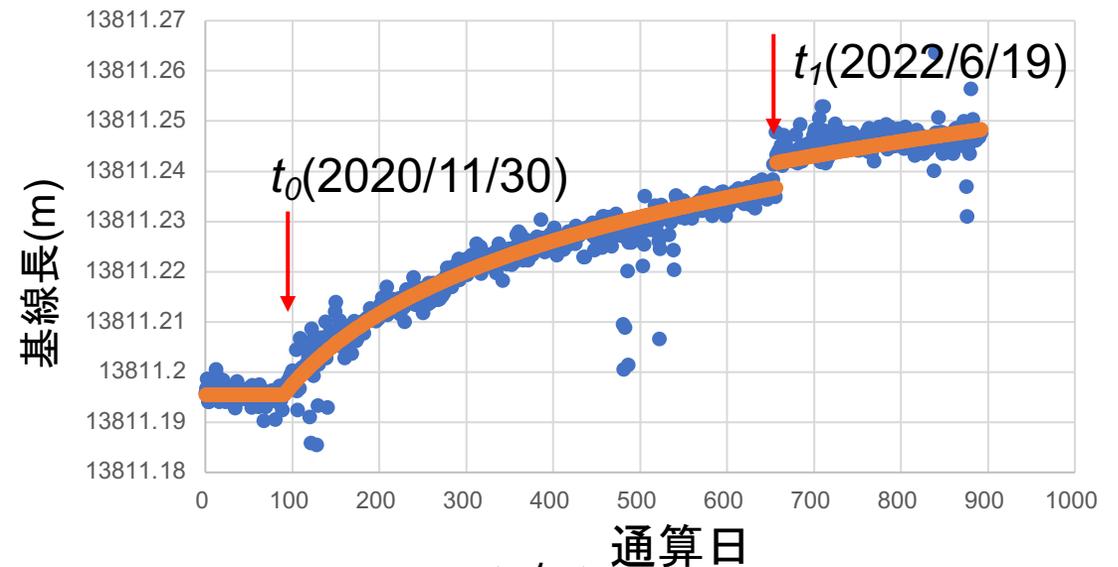
2020年11月から2022年12月までの累積地殻変動



謝辞: ソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは、ソフトバンク株式会社とALES株式会社より「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。

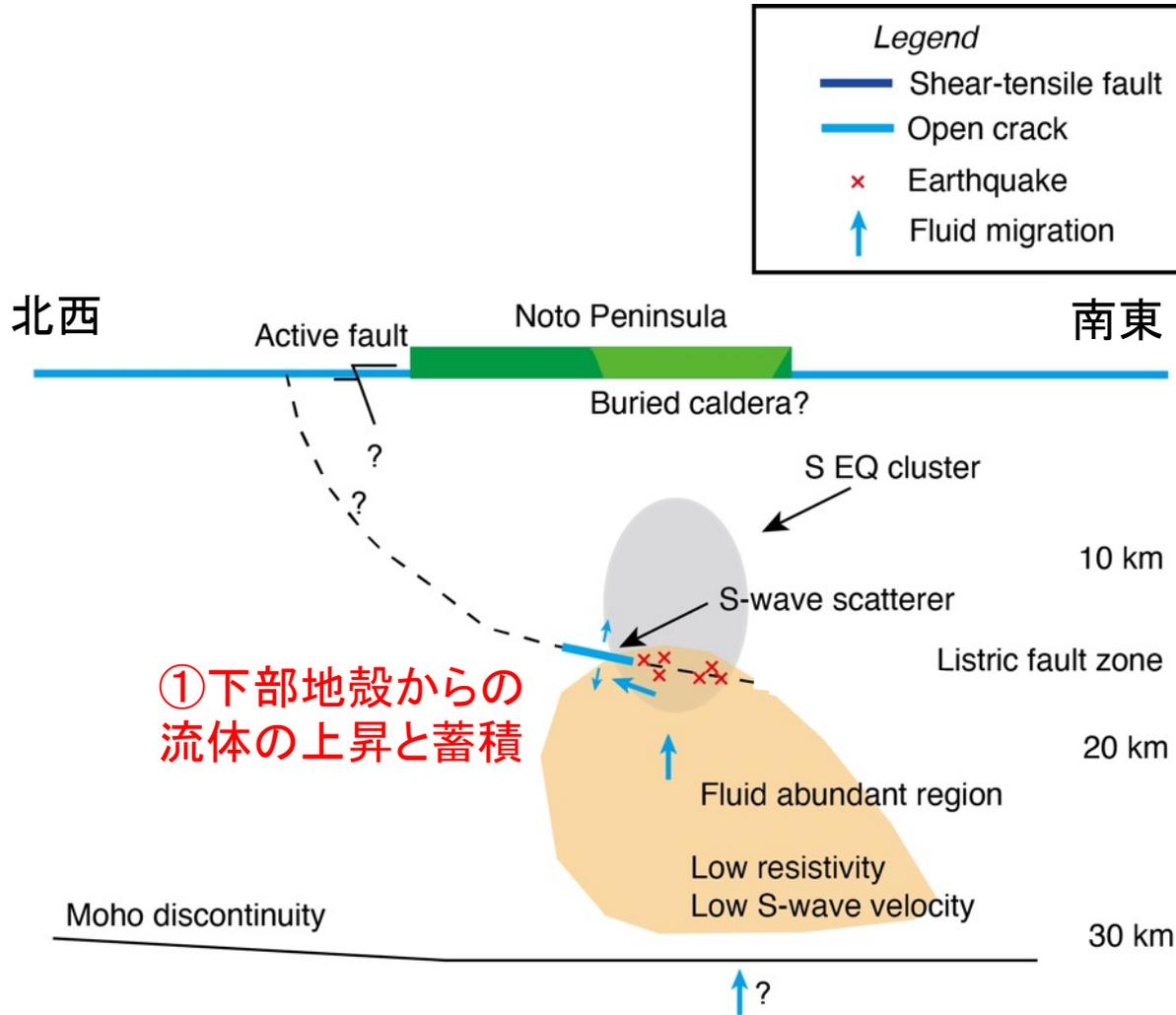
- 水平変位: 放射状に群発地震震源域から遠ざかる. 最大約3cmの変動
- 上下変位: 約2年間で最大7cmの隆起. 震源域から約20kmの範囲内で有意な隆起
- 時間変化: 変動速度は, 大局的には活動開始期(2020年12月頃)がピークで, その後は単調に減少. 2023年に入ってから, 北側の一部の観測点を除いて, 変動は停滞.

BR16-BR17 基線長



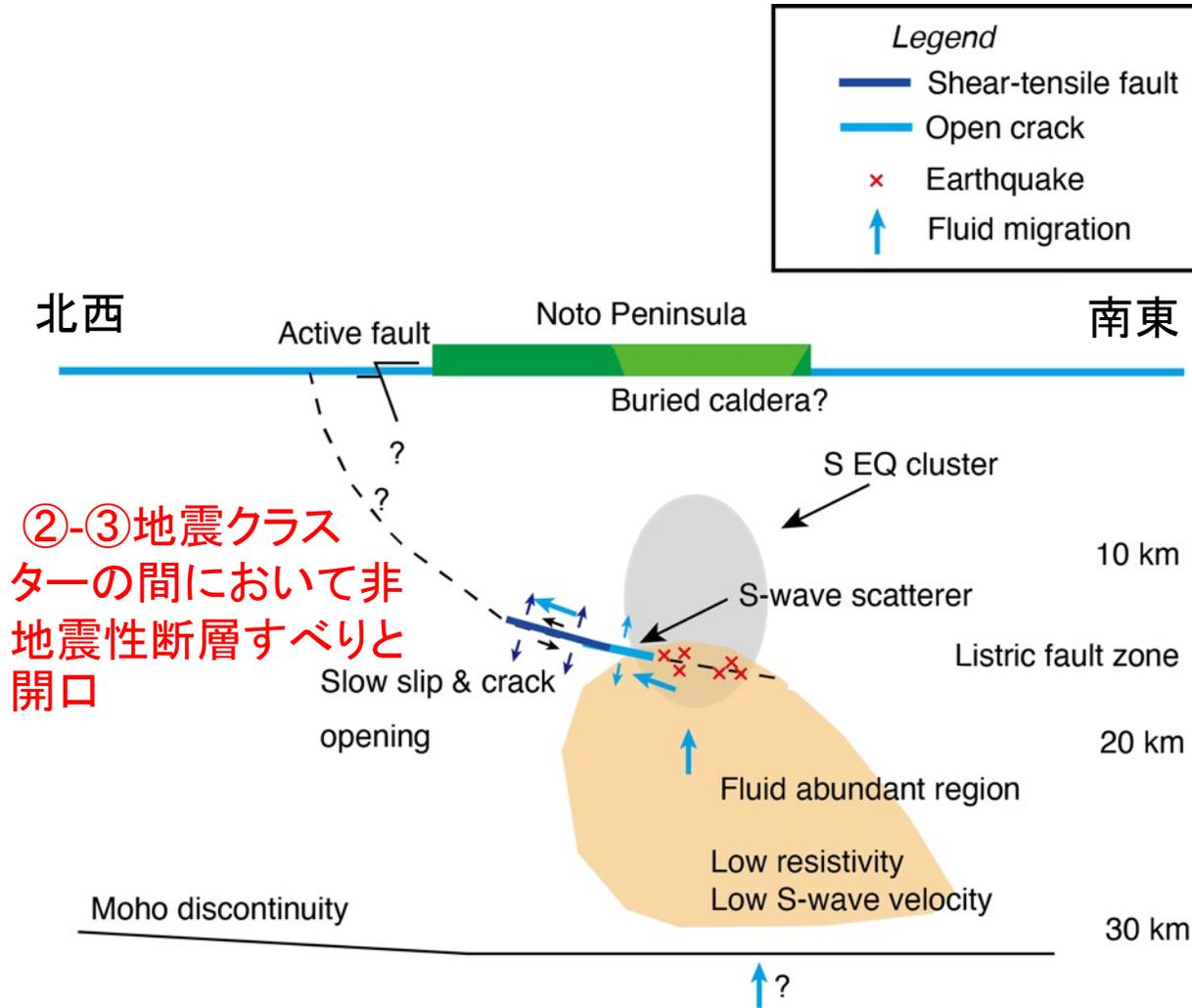
$$f(t) = a + 0.05 \log\left(\frac{t}{100}\right) H(t - t_0) + 0.005 H(t - t_1)$$

地殻変動から推定された変動プロセス



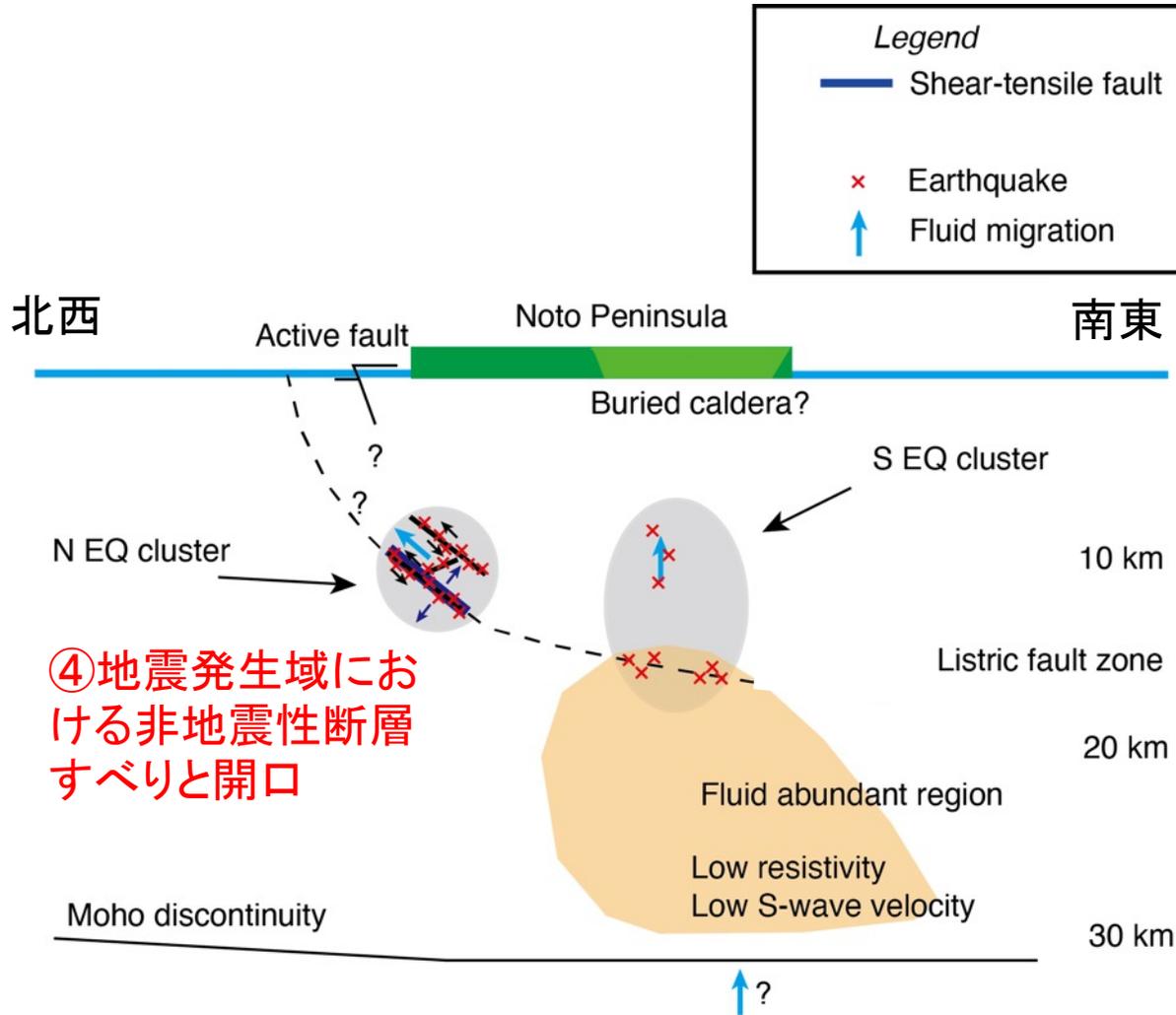
- ステージ1(2020/11/30-2021/3)
 - 下部地殻から流体が上昇, 南東傾斜の逆断層帯に沿って, 深さ16-18km付近に蓄積
- ステージ2及び3(2021/3-2022/6)
 - 深部からの流体の供給が継続し, 断層帯を押し広げる(開口)とともに, 流体による強度低下のため深さ14km以深で非地震性すべりが発生.
 - 非地震性すべりと断層の開口により, 14kmよりも浅部では活発な地震活動が誘発
- ステージ4(2022/6以降)
 - 深さ14kmよりも浅部の地震発生領域での非地震性すべりと断層の開口

地殻変動から推定された変動プロセス



- ステージ1(2020/11/30-2021/3)
 - 下部地殻から流体が上昇, 南東傾斜の逆断層帯に沿って, 深さ16-18km付近に蓄積
- ステージ2及び3(2021/3-2022/6)
 - 深部からの流体の供給が継続し, 断層帯を押し広げる(開口)とともに, 流体による強度低下のため深さ14km以深で非地震性すべりが発生.
 - 非地震性すべりと断層の開口により, 14kmよりも浅部では活発な地震活動が誘発
- ステージ4(2022/6以降)
 - 深さ14kmよりも浅部の地震発生領域での非地震性すべりと断層の開口

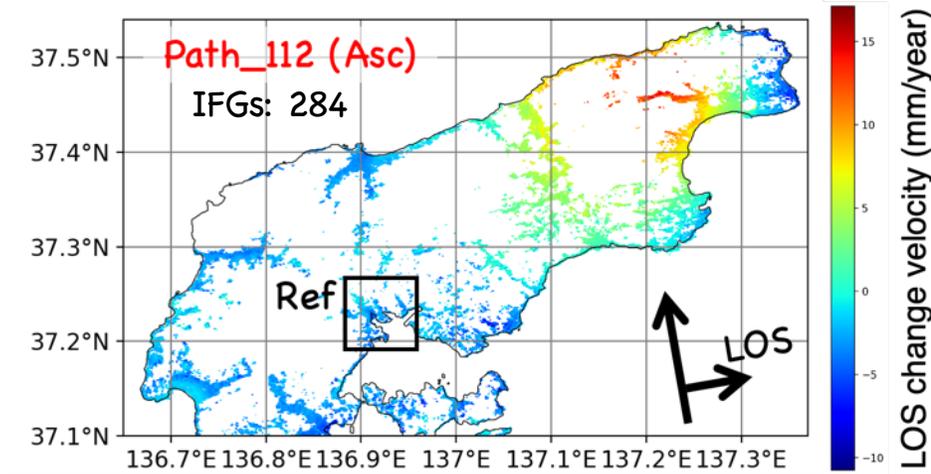
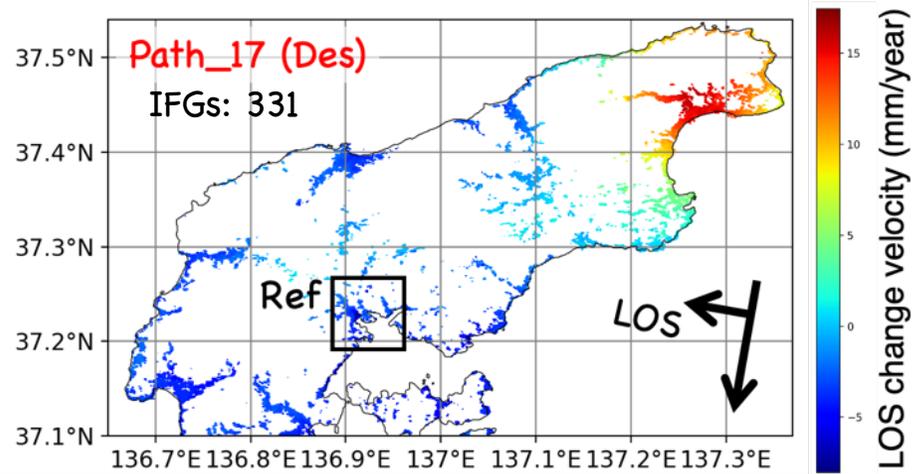
地殻変動から推定された変動プロセス



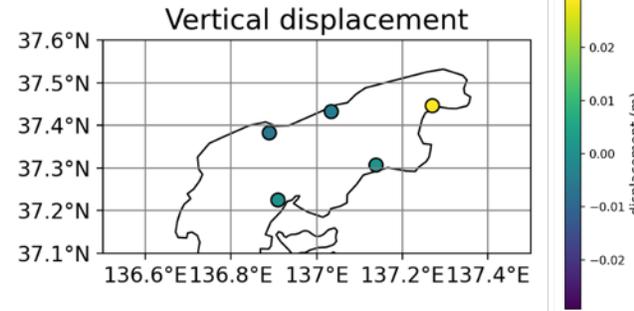
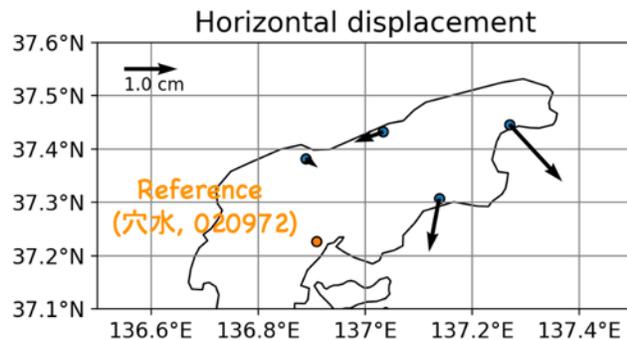
- ステージ1(2020/11/30-2021/3)
 - 下部地殻から流体が上昇, 南東傾斜の逆断層帯に沿って, 深さ16-18km付近に蓄積
- ステージ2及び3(2021/3-2022/6)
 - 深部からの流体の供給が継続し, 断層帯を押し広げる(開口)とともに, 流体による強度低下のため深さ14km以深で非地震性すべりが発生.
 - 非地震性すべりと断層の開口により, 14kmよりも浅部では活発な地震活動が誘発
- ステージ4(2022/6以降)
 - 深さ14kmよりも浅部の地震発生領域での非地震性すべりと断層の開口

InSAR時系列解析による地表面変位

- Sentinel-1A & 1B with ISCE & LiCSBAS (2020/11 – 2021/12)
- All figs were delay-corrected by GNSS-based model (Kinoshita 2022, IEEE)

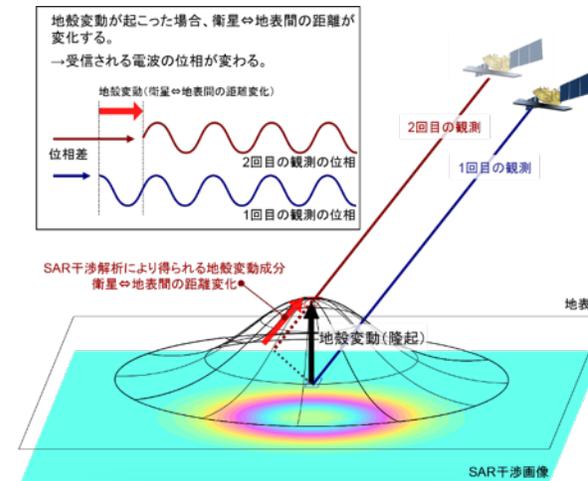


【参考】
GNSS 変位



参考: InSARとは?

地表に観測機器を置くことなく、人工衛星-地表間の距離を計測するリモートセンシング技術

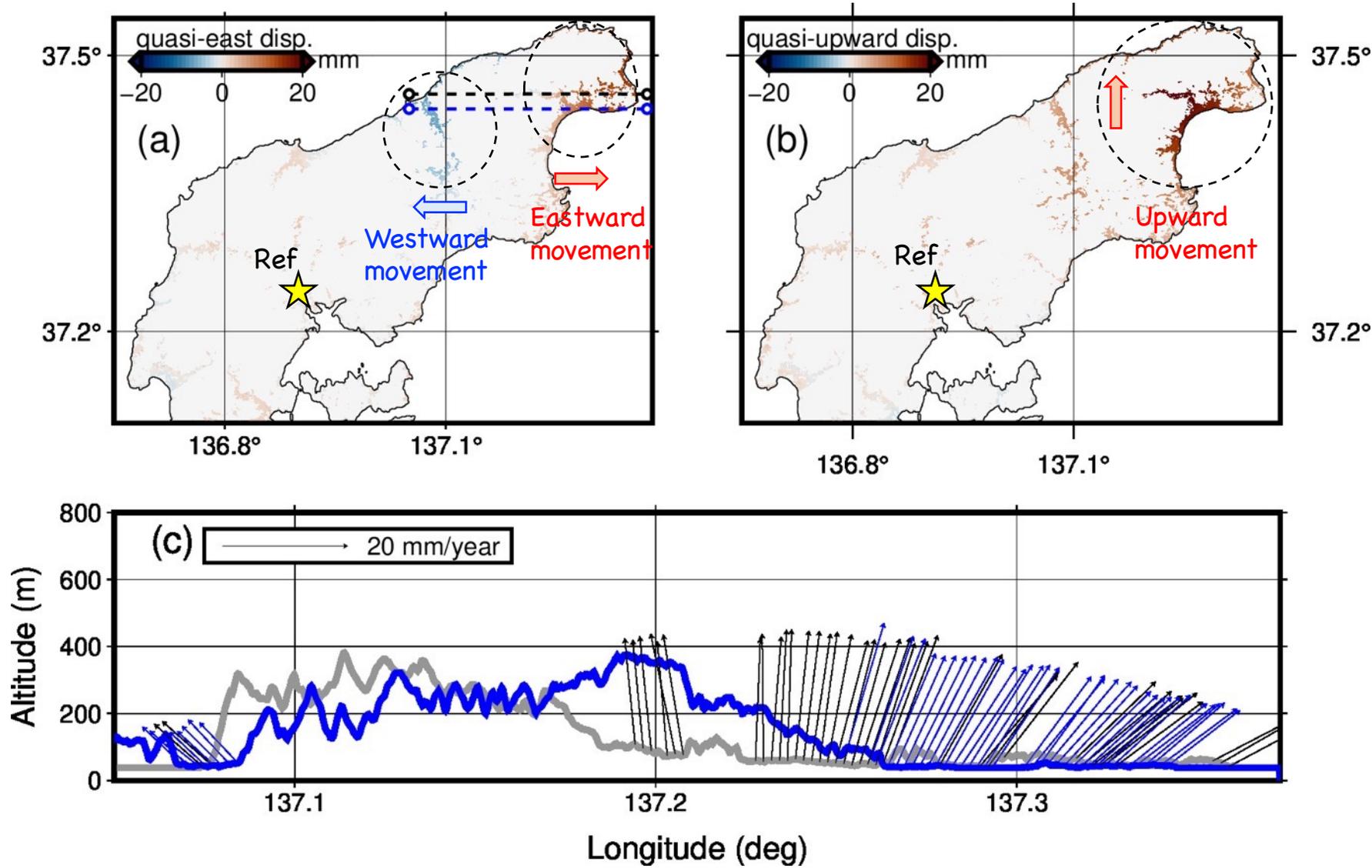


Sentinel-1

2014~

InSAR 2.5次元解析 (Fujiwara et al. 2000)

変位をほぼ東西&上下に投影する(南北には感度が無い)



2023年度の予定

- GNSS臨時観測の継続
 - 大学設置点(計6点)については, 地震活動が落ち着くまで観測を継続予定.
- 民間事業者の協力によるGNSS地殻変動モニタリングの継続
 - ソフトバンク株式会社による独自GNSS観測点のデータ提供を受けて, 大学・地理院の観測網も合わせた地殻変動のモニタリングを行う. 今後もソフトバンクの協力が得られる見込み.
- InSAR解析
 - 日本のSAR衛星(ALOS2)のデータを用いた解析を進める予定.

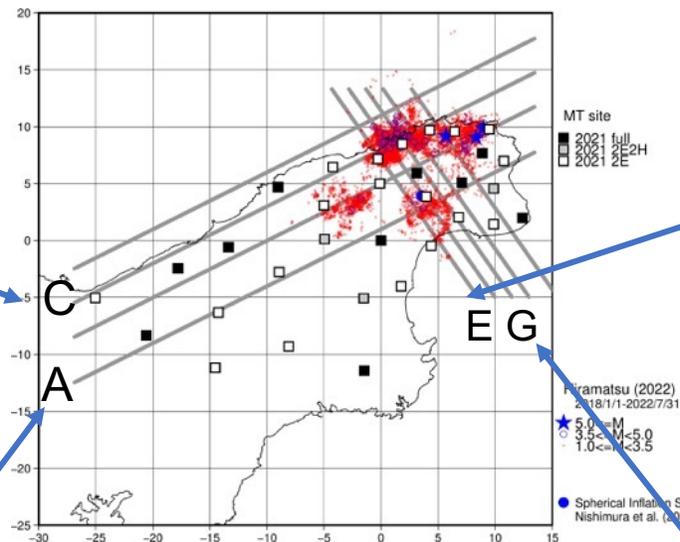
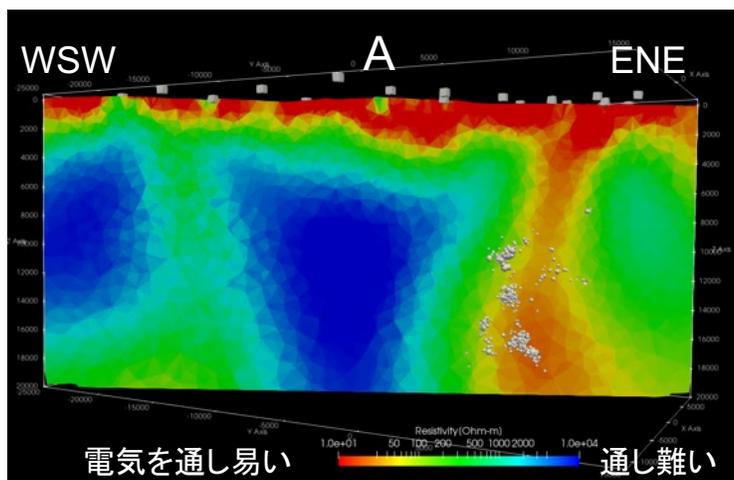
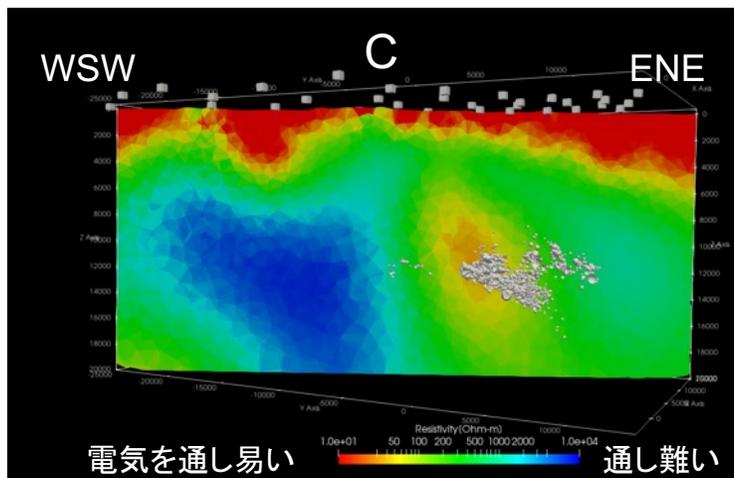
電磁気観測による 地下電気比抵抗構造の解明

京都大学防災研究所・兵庫県立大学・金沢大学・海洋研究開発機構

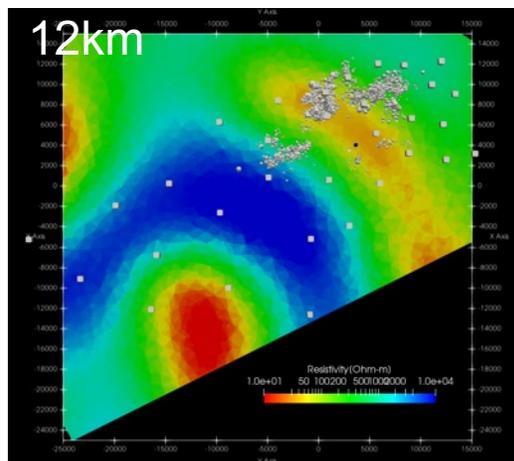
観測の実施に当たっては、地権者様ならびに珠洲市危機管理室・教育委員会・農林水産振興係、珠洲漁協、石川県珠洲土木事務所をはじめ関係機関にご協力いただきました。一部の器材は、東京工業大学理学院火山流体研究センターより借用しました。本研究は、文部科学省「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」・「特別研究促進費22K19949」、JSPS科研費「18H03894」ならびに京都大学防災研究所「国際共同研究2020W-02」の助成を受けました。

2021年度の観測から得られた地下構造

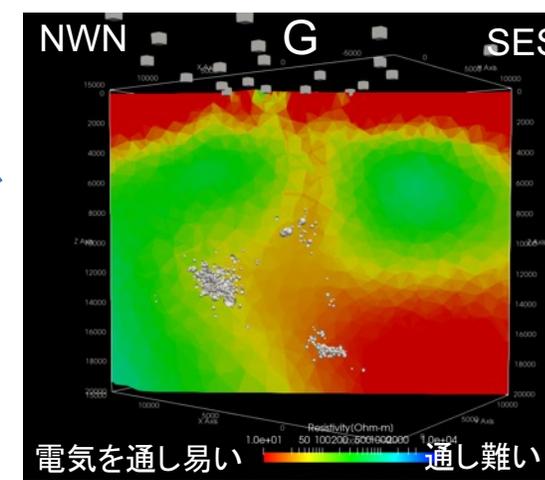
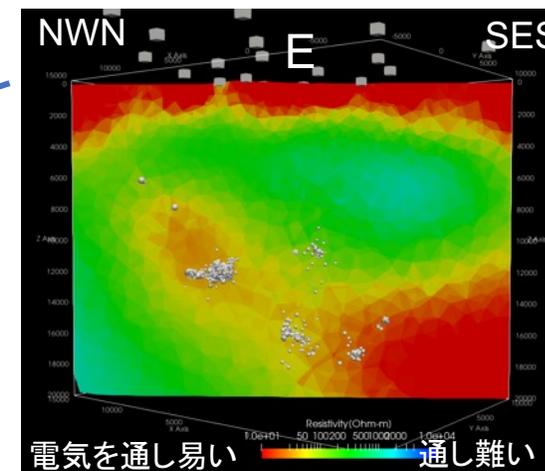
鉛直断面：西南西－東北東



水平断面：12km深



鉛直断面：北北西－南南東



吉村他(2022, SGEPSS)

2021年度データを用いた解析結果まとめ

- 南のクラスタは、低比抵抗体内縁辺で発生し、その低比抵抗体の伸長部に北のクラスタが位置している
 - 流体に非常に富む（or 連結性が非常に高い）領域である可能性が高い
- 東西のクラスタは、低比抵抗体と周囲の高比抵抗体の境界で発生
- 東の高比抵抗領域（数kmサイズ）は、西に比べてぼんやりしている
 - 小サイズの高比抵抗体をはっきりと描像できるほど、測点間隔が十分でない？
- 輪島沖セグメントの構造は、2007年能登半島地震域の構造に類似している
 - 2021年観測域の西側は、測点密度が低く、データの質も悪いので、追加調査が必要

2022年度の調査内容

- 構造推定の高度化

- ✓各クラスタの境界領域の分解能を上げる

- 陸上 23 点（珠洲市14点、輪島市4点、能登町5点）での観測

- 11月～2月実施

- ✓南クラスタの深部（20km深）の分解能を上げる

- 海域 3 点での観測

- 9, 10月実施

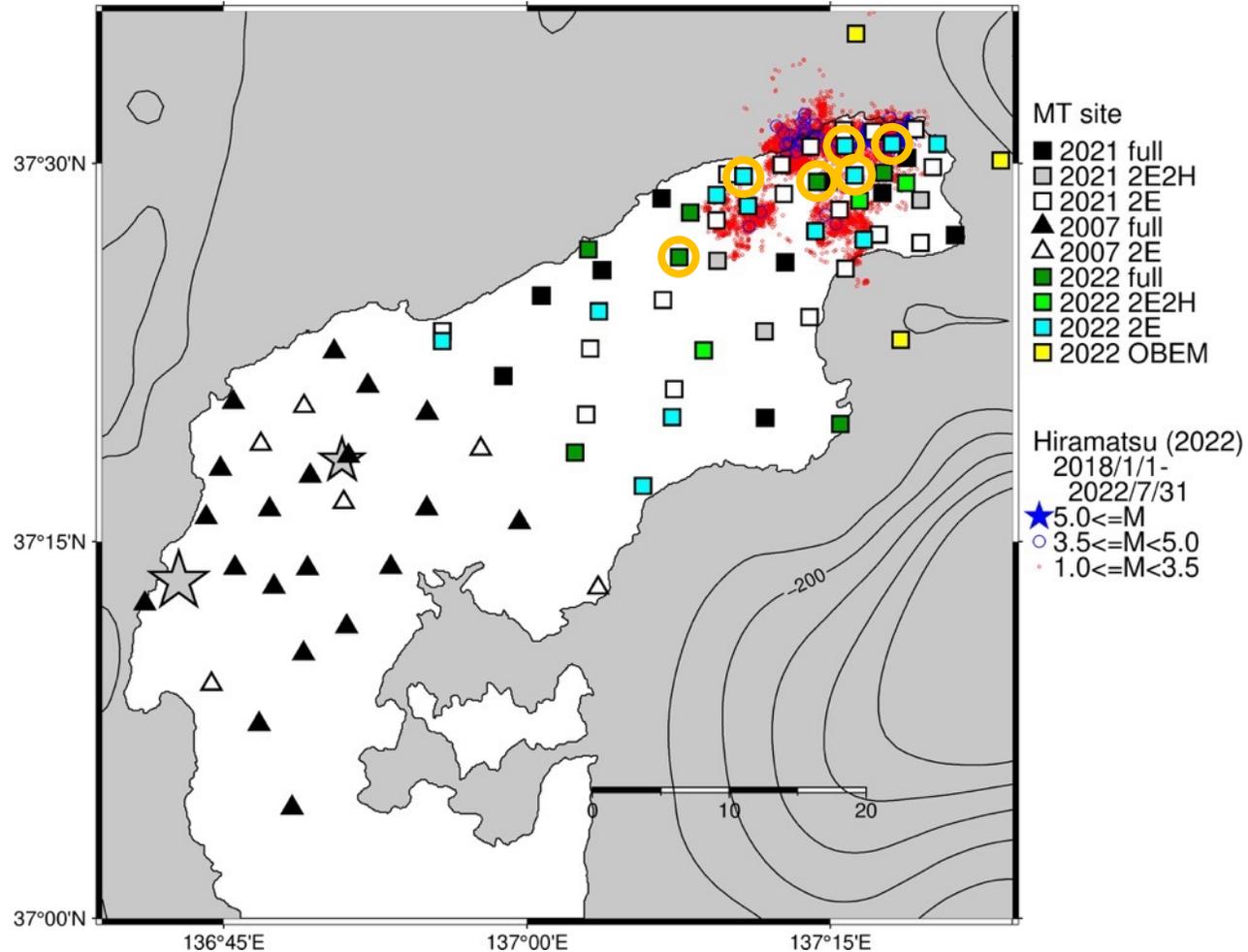
- 構造の時間変化検出の試み

- 陸上補充観測点中6点（珠洲市5点、輪島市1点）での連続観測

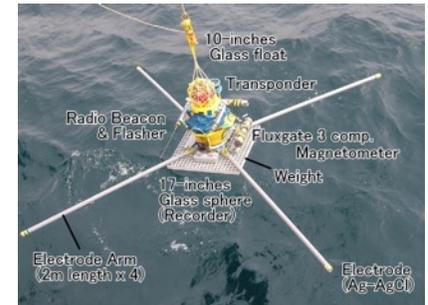
- 11月～現在

- 輪島市1点は3月撤収

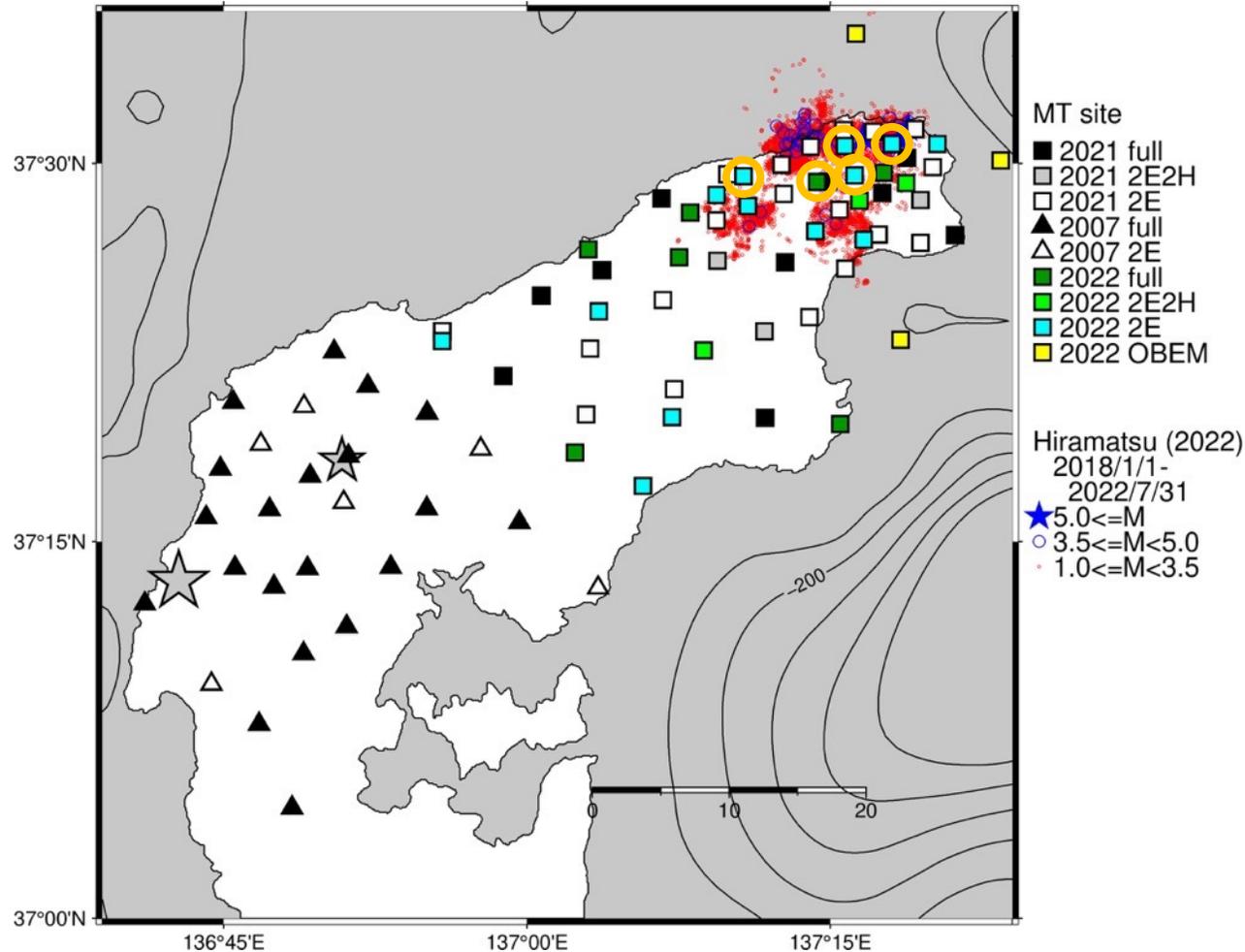
2022年度の観測点分布



- 海域: 3点 (黄)
 - 10月24日回収済み
- 陸上: 23点 (緑・黄緑・水)
 - 11月12日より
- 連続観測: 6点 (橙○)



2023年度の調査観測の継続予定



• 連続観測: 5点 (橙○)

- 夏まで(可能であれば年度末まで)継続
- 人工ノイズが大きいため、2点について4, 5月に移設を検討
- 少なくとも毎月1回のバッテリー交換・記録回収

流体挙動の把握に向けた重力観測の実施

東大理 田中愛幸・坂上啓 京大防災研 西村卓也 金沢大学 平松良浩

- 地震の原因となる流体の種類や移動を調べる
- 先行事例: 伊東沖群発地震 (Yoshida et al., 1999)
 - **重力が減少** → **軽いもの** (泡状マグマか熱水) が板状の隙間を上がってきたことが判明
- 同じ観測手法を使う
 - 1か所に据え置く重力計 (写真上) と野外で使う重力計 (写真下) の2つを組み合わせる
 - GNSS観測を行っているところで測定
- 能登は
 - 火山活動が現在活発な地域ではない
 - 断層が垂直ではなく水平に近い
 - **変動がゆっくり** 伊東は1カ月
 - **深い** (>10 km) 伊東は地表まで断層到達

⇒観測される重力変化が小さいことが予想される



FG5重力計

2023/3/7 日置ハウス

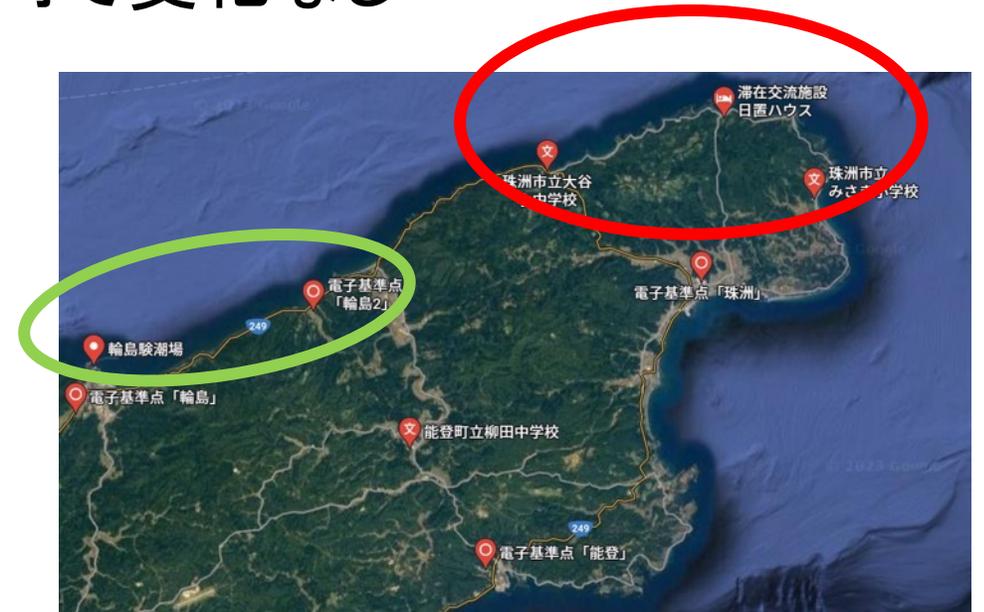


ラコスト
重力計

観測結果

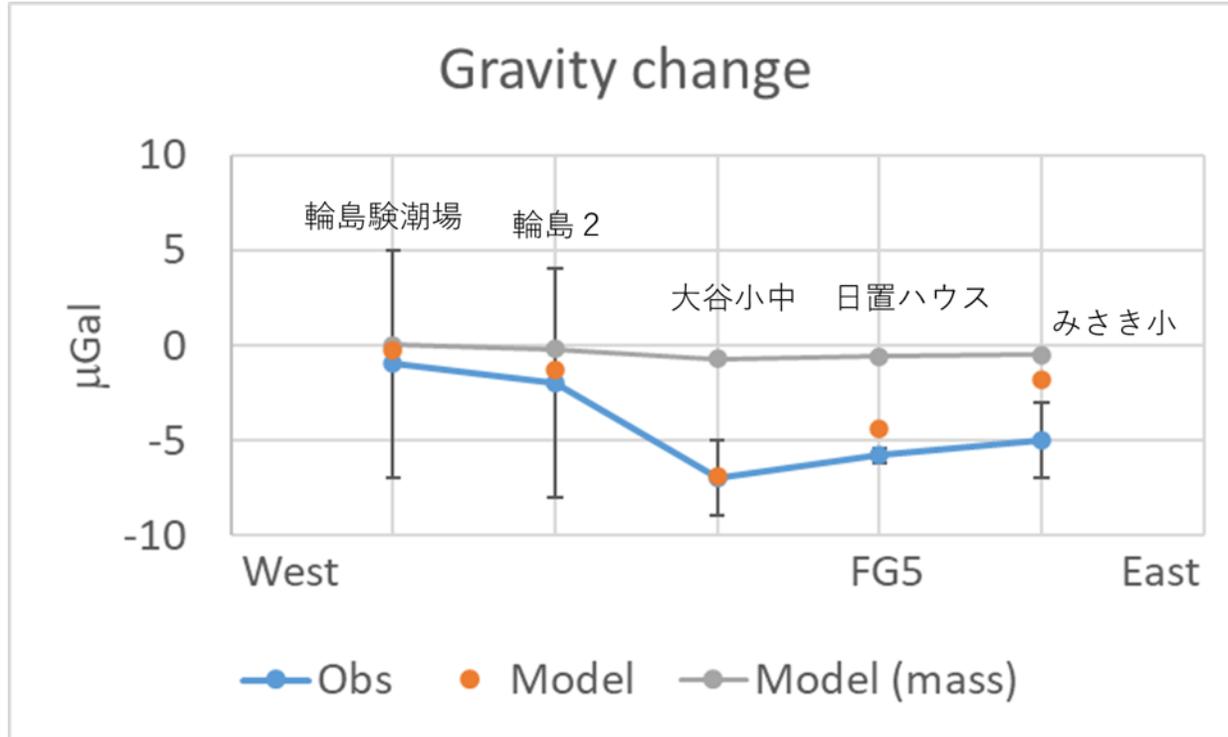
- 1回目(2022年3月中旬)と2回目(2023年3月上旬)の差
- 暫定結果、詳細な誤差評価は現在実施中
- 地震活動が活発でGNSSで大きな隆起速度が観測されている
珠洲市北部で有意な減少、輪島は誤差内で変化なし

観測点	変化	誤差
日置ハウス	-5.1	0.4
みさき小	-4	2
大谷小中	-6	2
輪島2	-1	6
輪島験潮場	-1	6



単位: μ ガル (=10億分の1G)

観測結果の一つの解釈とまとめ

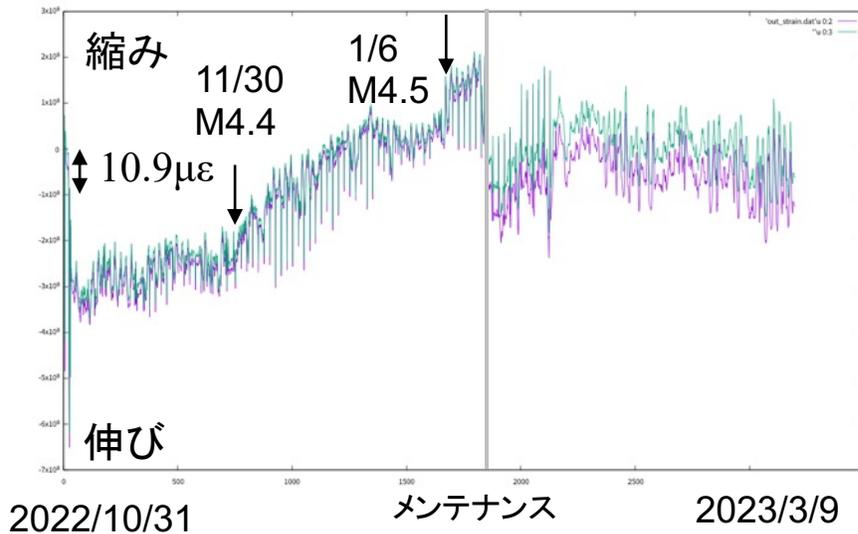


- GNSSによる断層モデルで説明できるか調べる
- 青が観測結果、橙が断層モデル(Nishimura et al., 2021/6-2022/6)で、開口割れ目に水が貫入したと仮定
- 灰色はモデルにおける水の寄与でFG5の観測誤差程度の大きさ。観測された重力変化の大部分は隆起による。

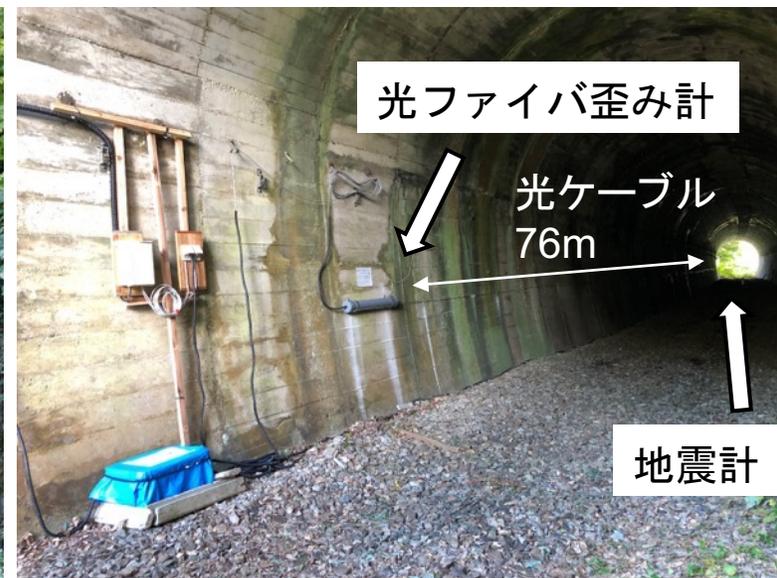
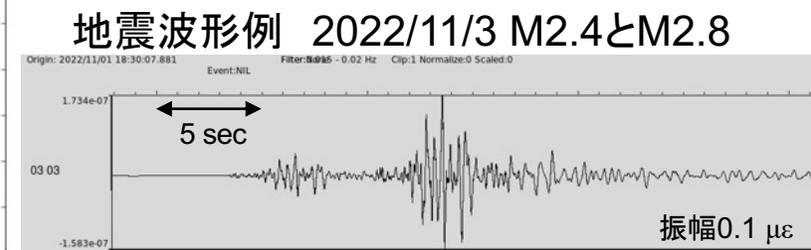
- 2022年3月から2023年3月の珠洲市北部の**重力減少は断層モデルで説明可**
- 貫入した物質の密度が小さいほど重力変化が説明しやすい。ただし、**水とマグマとの差は現時点では観測誤差程度。**
- 震源が今の半分程度の深さになるか変動が蓄積すると水だと特定できる
- 重力観測が今後の状況把握に有効であることが確認できたため、GNSSデータの推移を見つつ年1-2回の頻度で**観測を継続したい。**

光ファイバーセンシングの活用(春日トンネルにおける歪み観測)

目的:地震や地殻変動を高感度に捉える



2022/10末設置
当面測定を継続



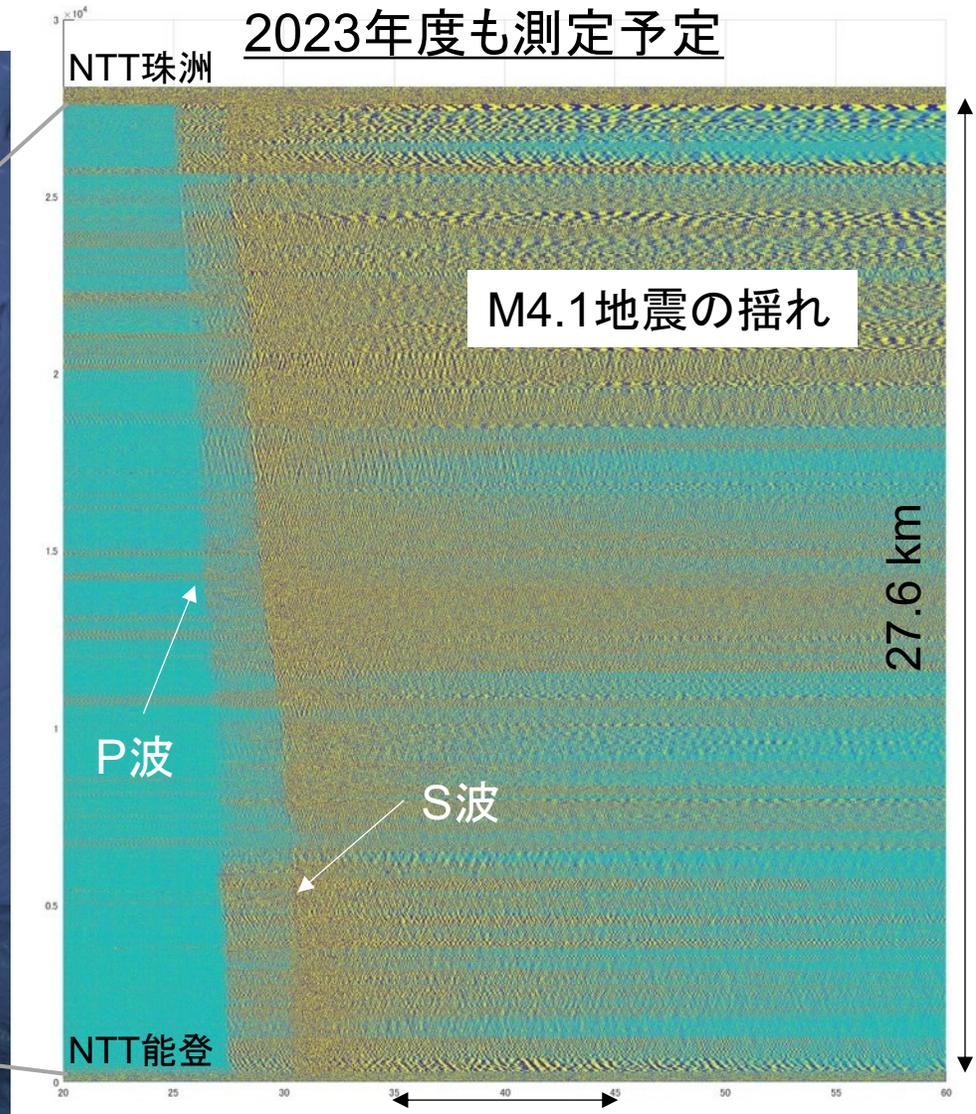
(京大防災研・JAMSTEC・東大理)

光ファイバーセンシングの活用(NTT西 光ケーブルによる歪み測定) サブテーマ 4

目的: 地震動を超高密度かつ高精度に捉える

2023年1月11日~3月11日測定
2023年度も測定予定

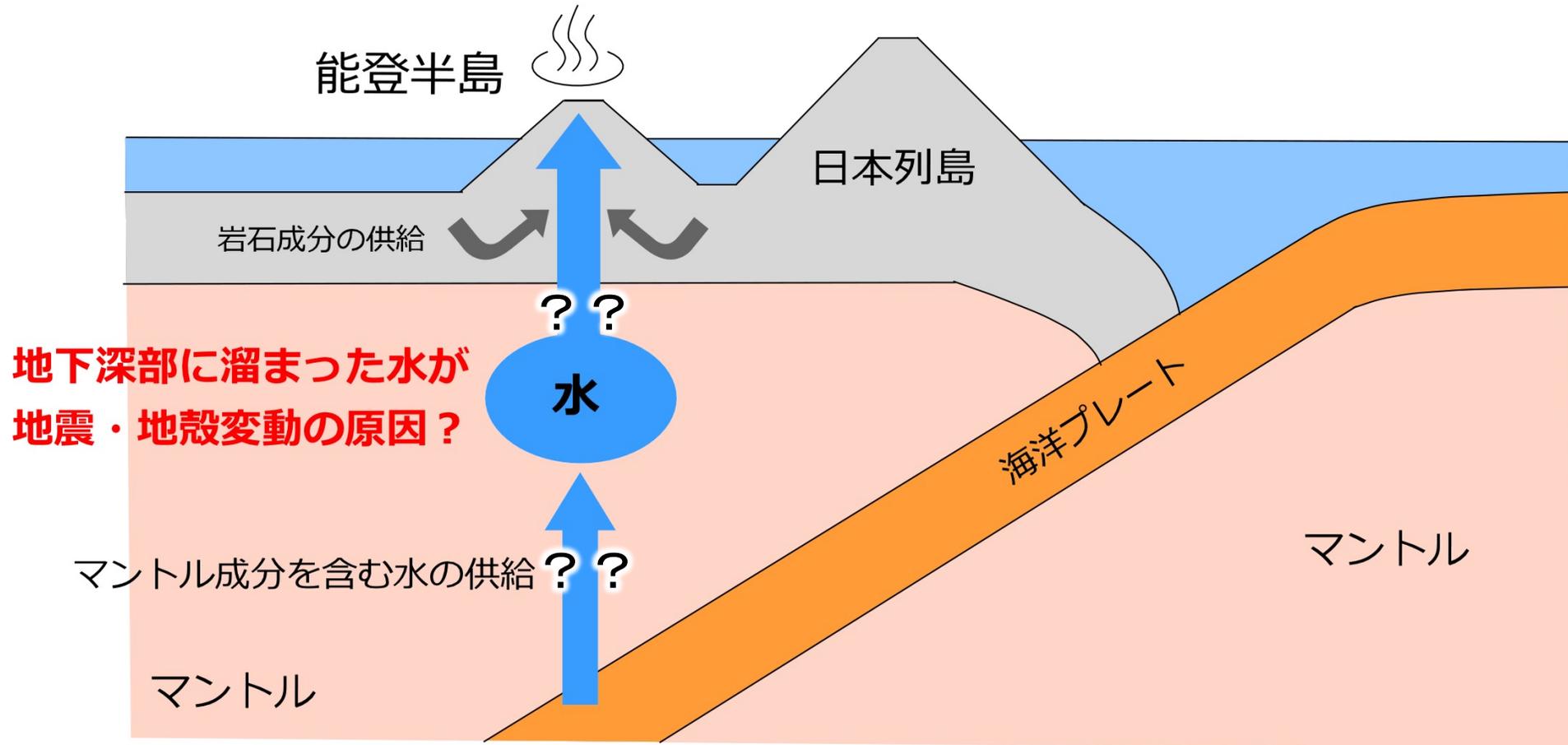
約28kmの光ケーブルを使い、
約5,400か所(約5m毎)の揺れを測定



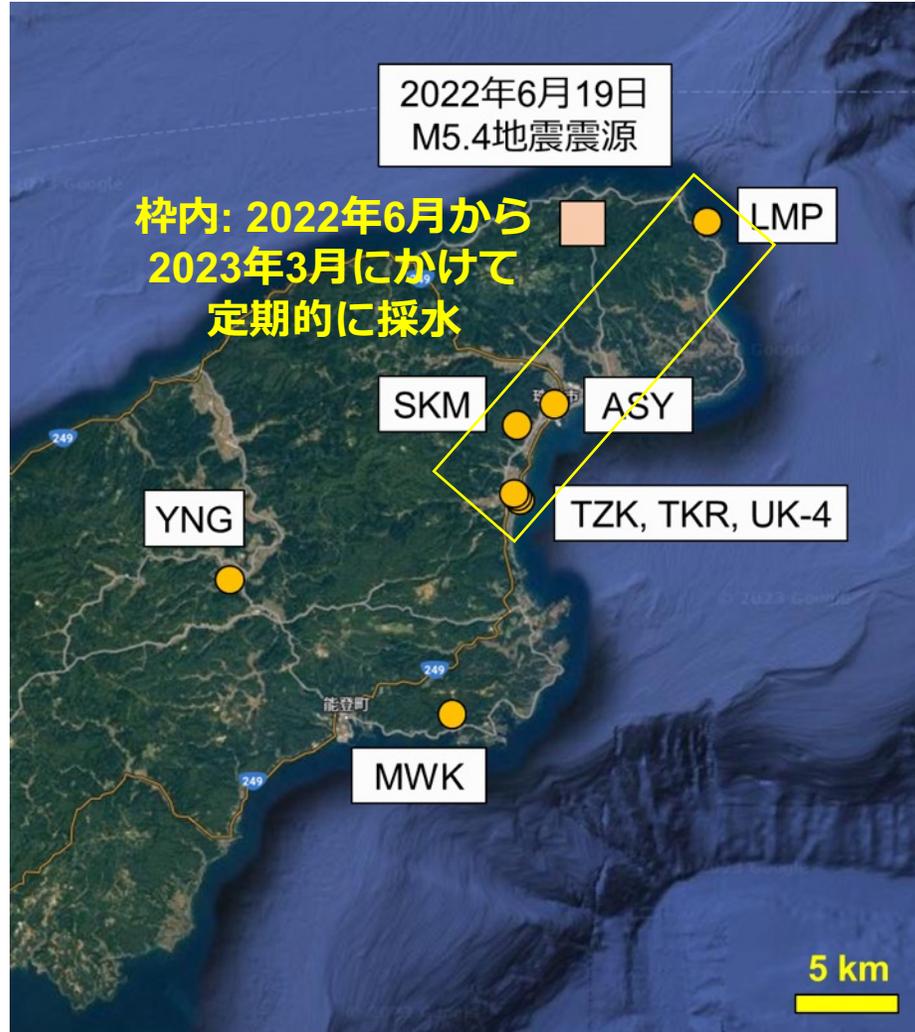
10秒
(京大防災研・東大理・JAMSTEC)

本研究の目的

温泉の成分は地下深部の水の情報 reflects
→ 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

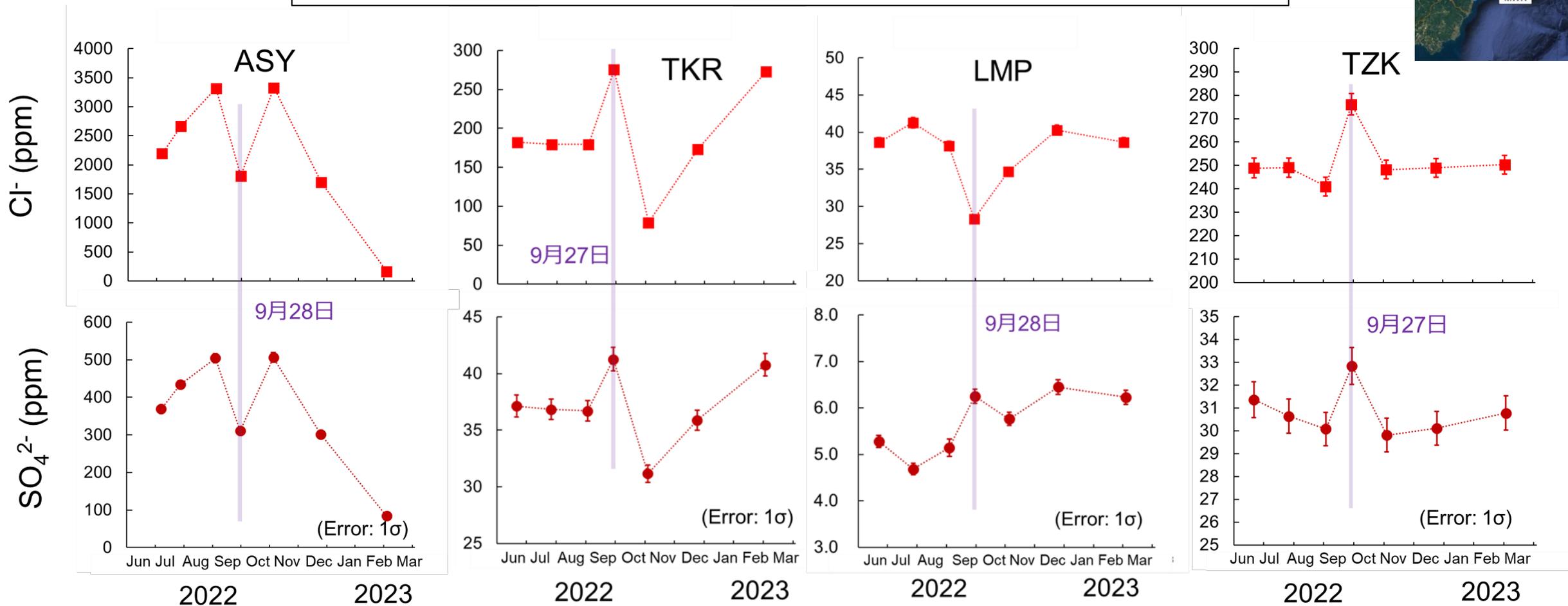
ポリビンやガラス容器内に温泉水試料採取
→ 富山大学に持ち帰り、陰イオン濃度や
酸素・水素同位体比を測定
→ 水の起源を紐解く手がかりに

(分析機器)・Cl⁻, SO₄²⁻ 濃度: イオンクロ 883 basic IC plus
・酸素・水素同位体比: 安定同位体比分析装置 L2130-i

謝辞: サンプリングにあたっては現地温泉施設、珠州市役所企画財政課、能登町役場ふるさと振興課、株式会社エオネクスの皆様にご協力いただきました。

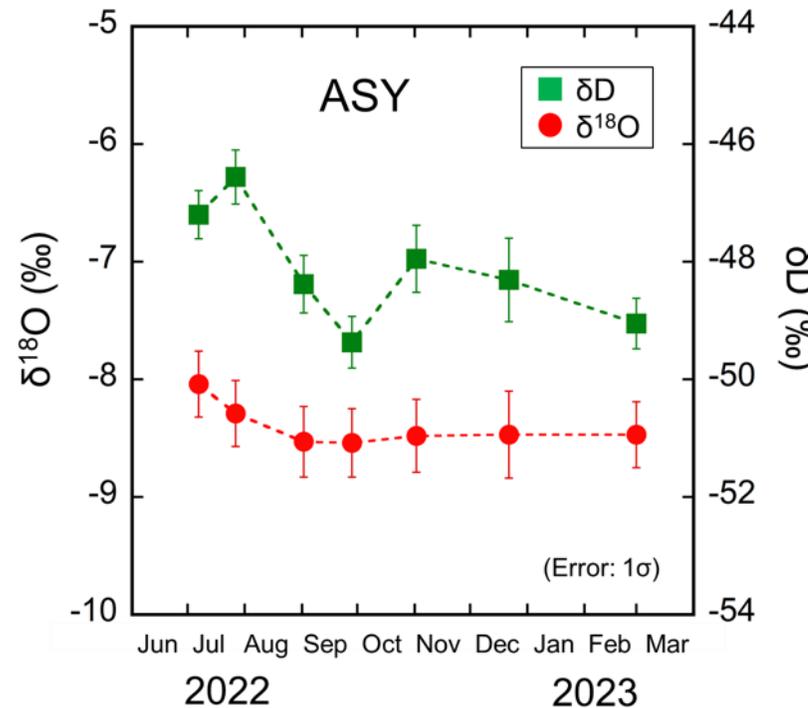
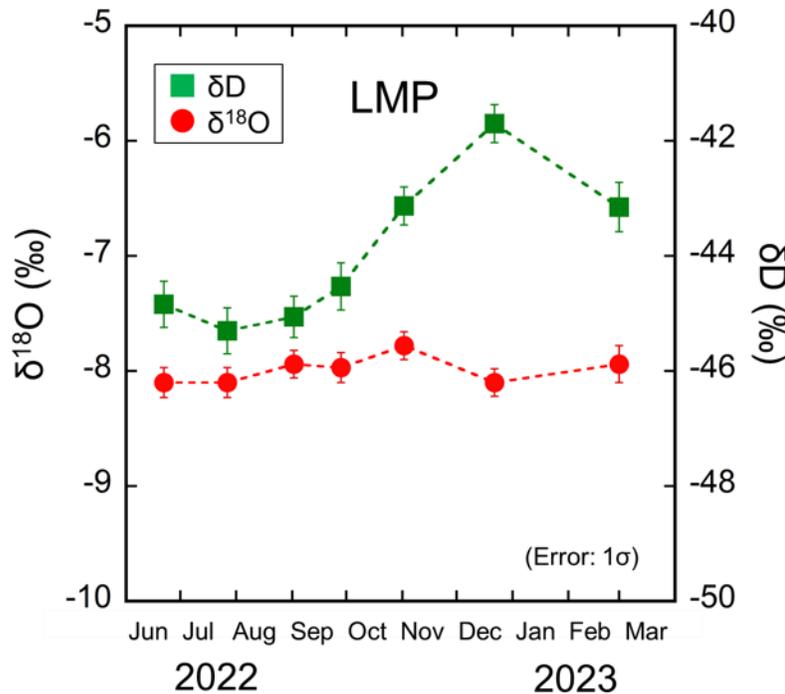
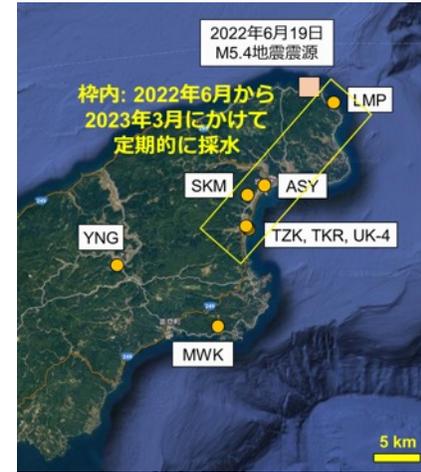
温泉水中の陰イオン濃度の時間変動

- 9月末に陰イオン濃度が変動
- 地点間で傾向が異なるため、天水の混入ではなく地殻流体の影響を反映した可能性がある



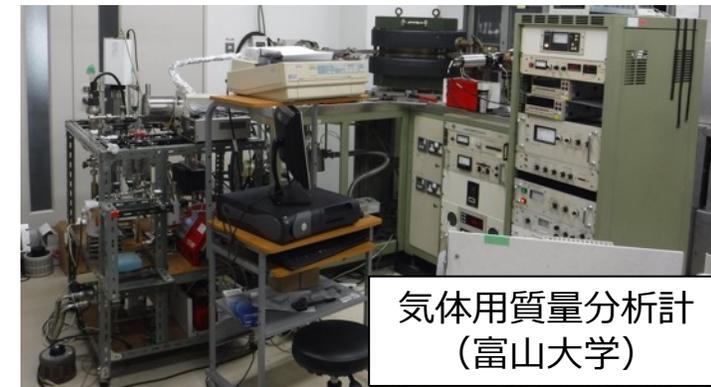
温泉水の酸素・水素同位体比の時間変動

- ASY, LMP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



δD: 水素同位体比
δ¹⁸O: 酸素同位体比

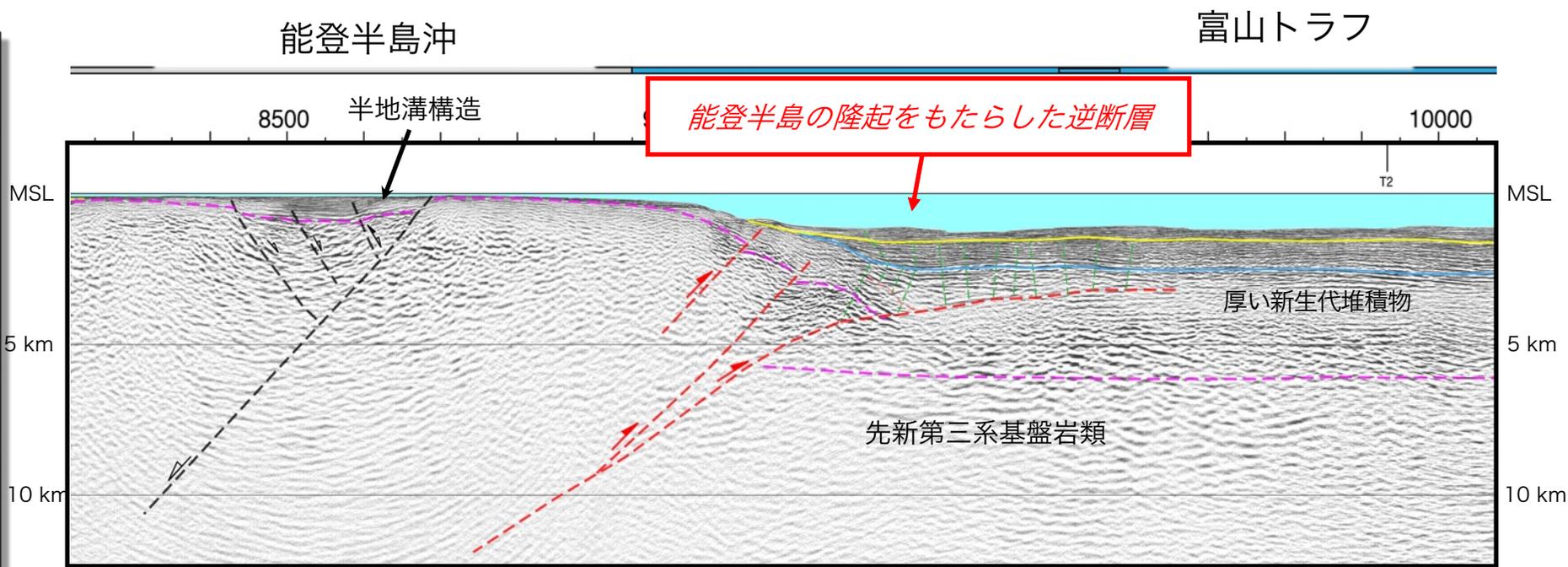
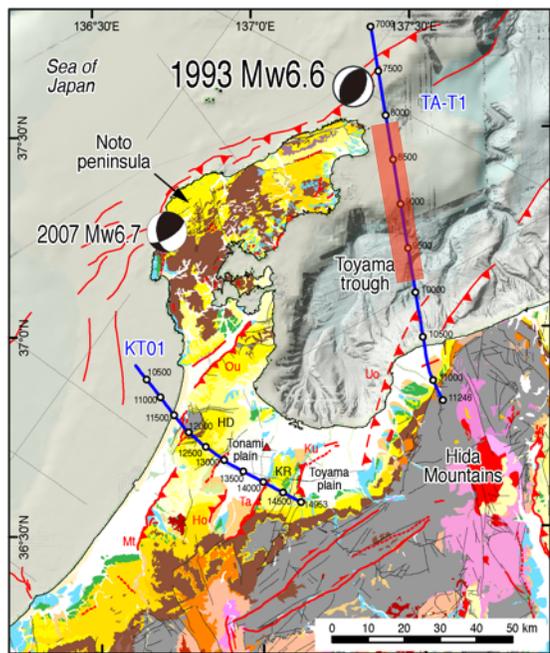
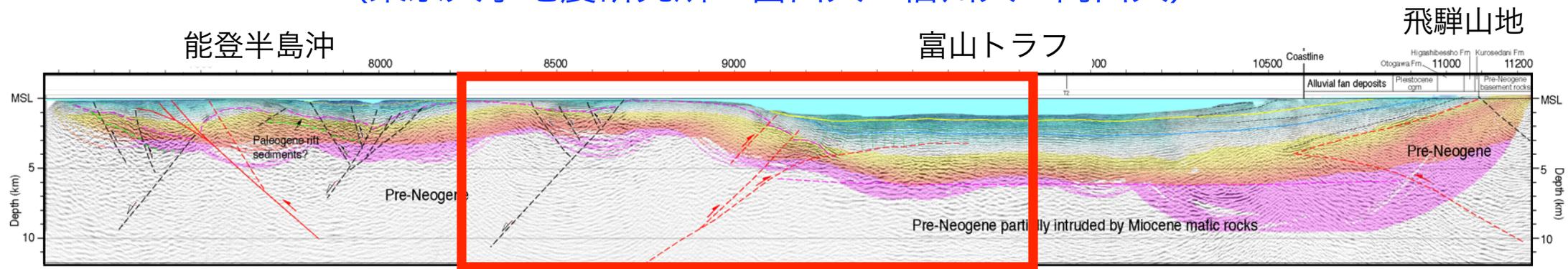
今後、ヘリウム同位体比等を測定



気体用質量分析計 (富山大学)

温泉水成分の継続的な観測が必要 (令和5年度の観測を計画)

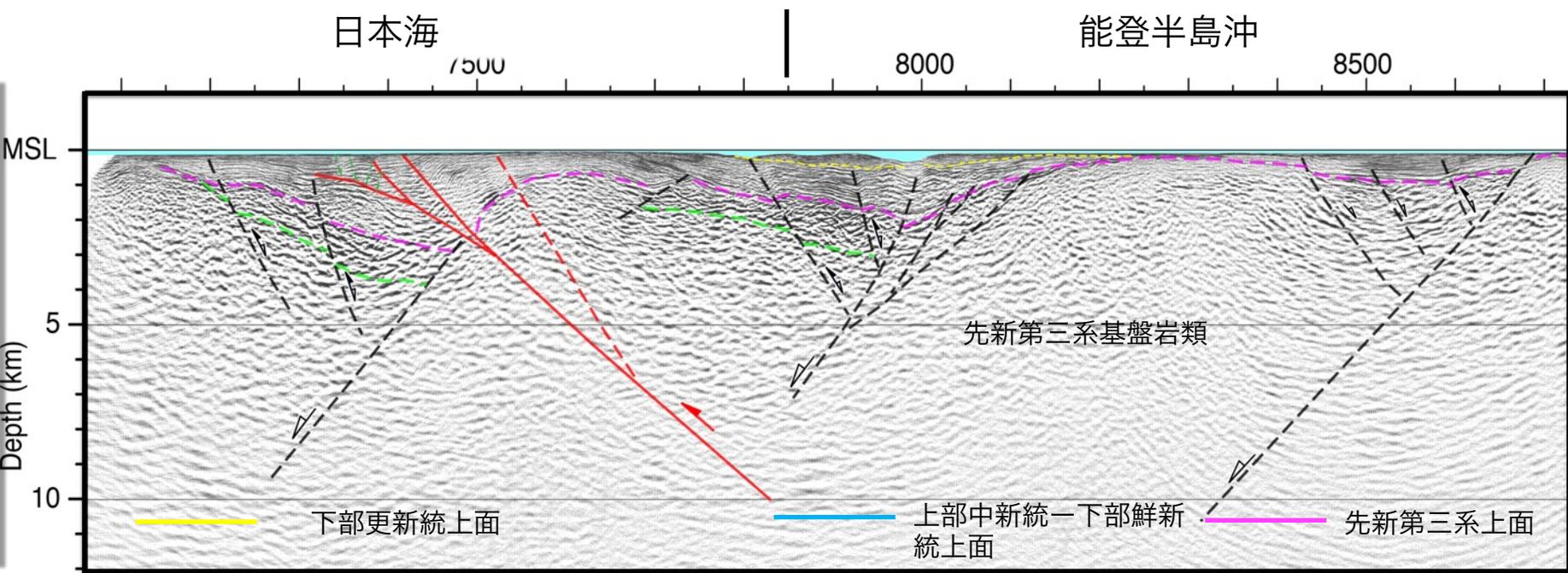
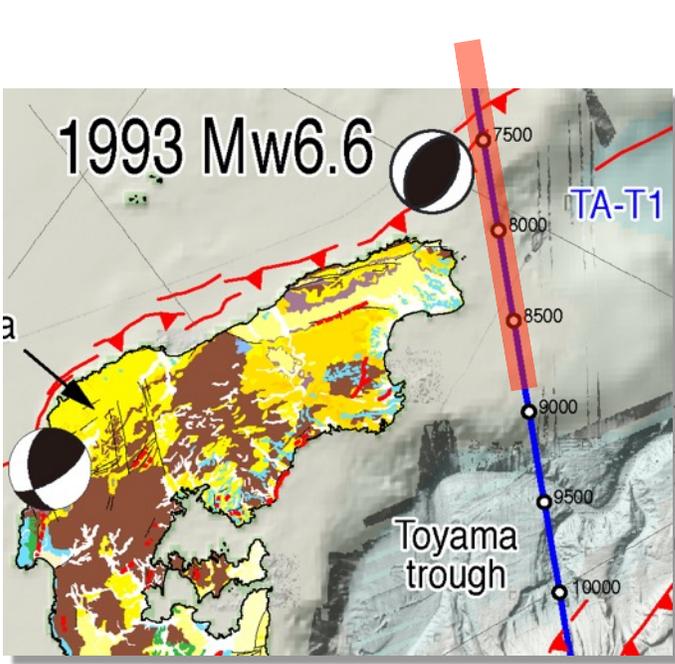
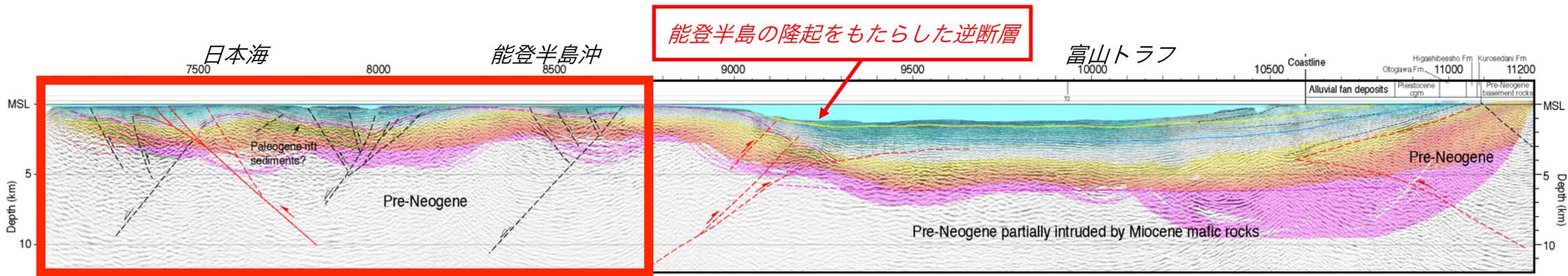
活構造調査による能登半島北東部の長期間地殻変動の推定 (東京大学地震研究所・富山大・信州大・岡山大)



Ishiyama et al., 2017

—— 下部更新統上面
 —— 上部中新統一下部鮮新統上面
 —— 先新第三系上面

能登半島北東沖-富山トラフ-飛騨山地北西縁の地殻構造断面 (TA-T1)



- ・ 海底活断層は半地溝構造の再活動、基本的には半島北東部の構造と連続
- ・ 周辺では1993年能登半島沖地震が発生 (M6.6)

能登半島北東部の海成段丘の離水年代推定

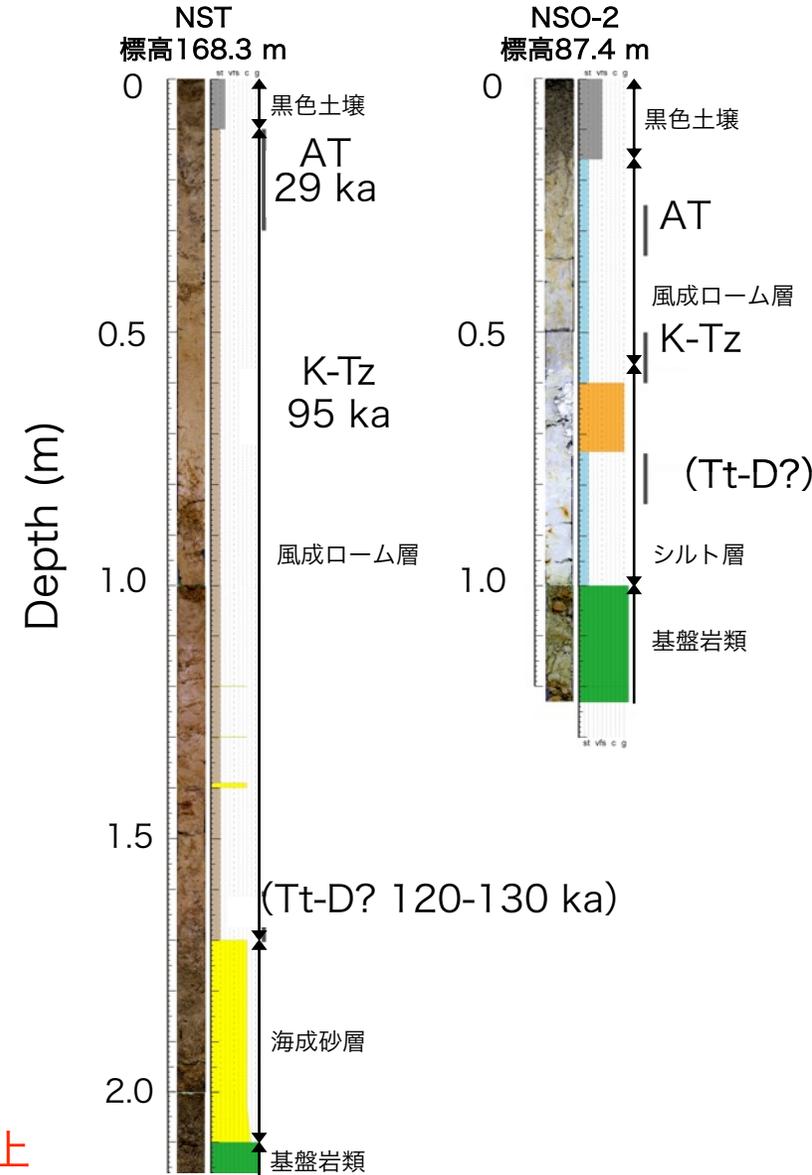
ボーリング掘削調査地点



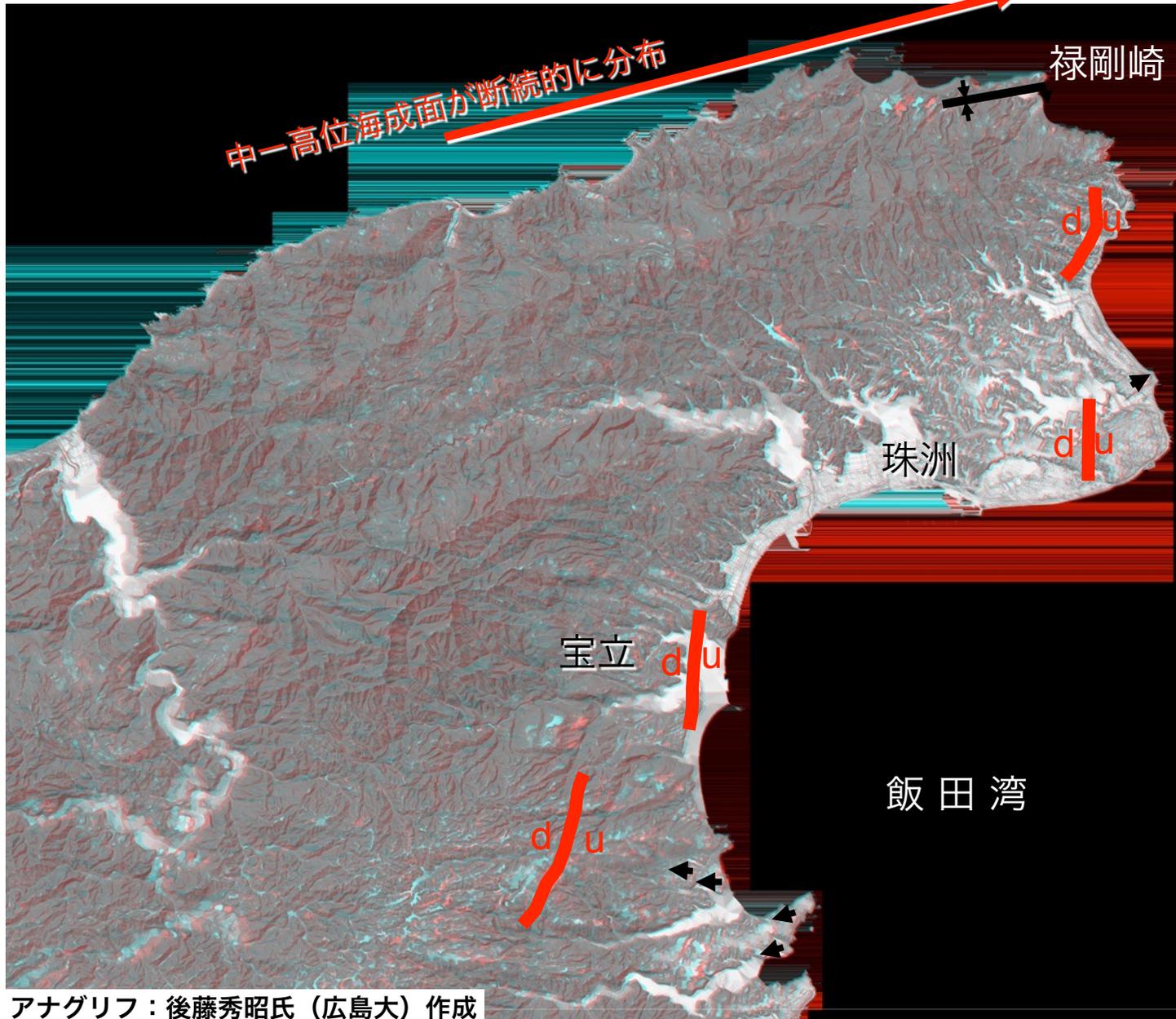
打ち込み式ボーリングの調査風景 (NSO-2)



- ・ **テフラ層序による海成段丘面の離水年代推定**を目的とした掘削調査を実施 (2023年1月)
- ・ NSO地点 (標高約87 m) にて、ローム層からAT (29 ka) , シルト層からK-Tz (95 ka) の火山灰を検出→ローム層の厚さ・風化度、K-Tzの層位から、MIS5eの可能性が高い
- ・ NST地点 (標高約168 m) にて、ローム層からAT (29 ka) およびK-Tz (95 ka) の火山灰を検出→ローム層の堆積速度一定とすると、MIS7eの可能性 **両地点の隆起速度は0.7 mm/yr以上**



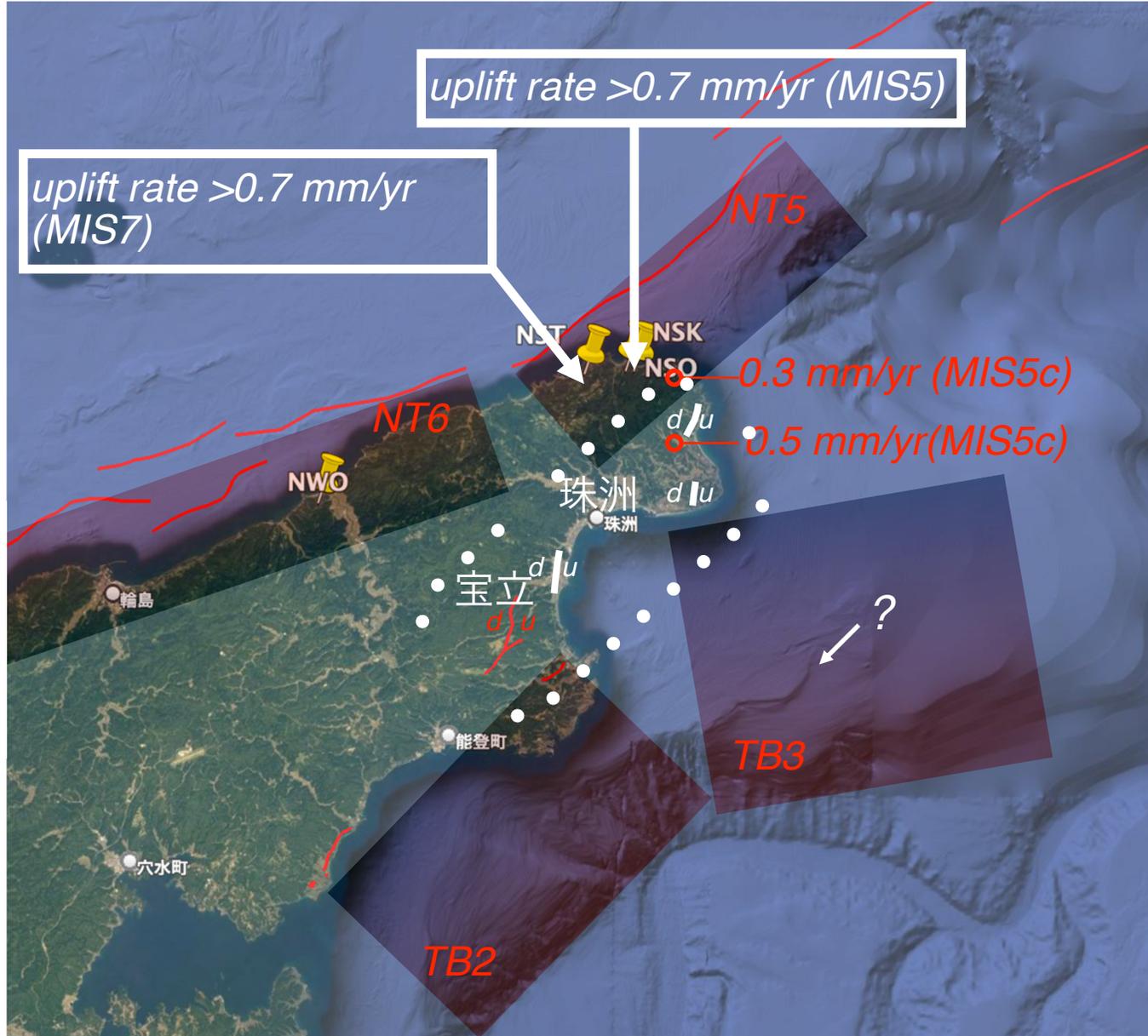
能登半島北東部の変動地形の再検討



アナグリフ：後藤秀昭氏（広島大）作成

- ・能登半島北東部をカバーする高分解能DEMは存在しないため、米軍・地理院1/4万の空中写真を使い変動地形を検討
- ・禄剛崎～飯田湾にかけて、最終間氷期およびそれ以前の海成段丘面に、低断層崖・傾動（逆向きが主体）・向斜状変形が新たに認められた
- ・海成段丘面の隆起+局所的な変形
→富山トラフ西縁から沿岸にかけての海底活断層による地殻変動の可能性
- ・能登半島北岸の海成段丘面に局所的な変形は認められない

能登半島北東部の変動地形と震源断層



- 震源断層モデル（佐藤ほか, 2020, 日本海PJ報告書）NT5の上盤側の隆起速度は過去おおよそ20万年間に約0.7 mm/yrと等速

- 飯田湾岸、珠洲～宝立の海成段丘面の局所的変形・隆起（点線枠内）はTB2, 3, NT5, 6では説明できない

→より陸側に海底活断層が存在？

今後、海底地形・地質構造等の検討が必要

大堀道広（福井大学）・村田晶（金沢大学）・岩田知孝（京都大学）

(1) 高震度生成メカニズムの解明

○微動アレイ調査によるK-NET正院(2022年6月19日の地震で震度6弱を計測)などの浅部地盤構造調査

- ・微動アレイ観測を実施し、深さ数十mまでのS波速度構造を求めた。
- ・地質ボーリング情報や表層地質情報を参考にすると、当該地域の工学的基盤は珪藻質泥岩層であり、その上に砂礫、泥の沖積層で構成される浅部地盤であることがわかる。また平野内で沖積層厚は空間的に不均質であることもわかった。
- ・モデルからはK-NET正院では1Hz程度の地震動の卓越が予想され、観測事実と整合する。
- ・(2)の臨時強震観測で見られる卓越周波数や空間的变化に対応する結果が得られている。

(2) 被害状況との対応調査

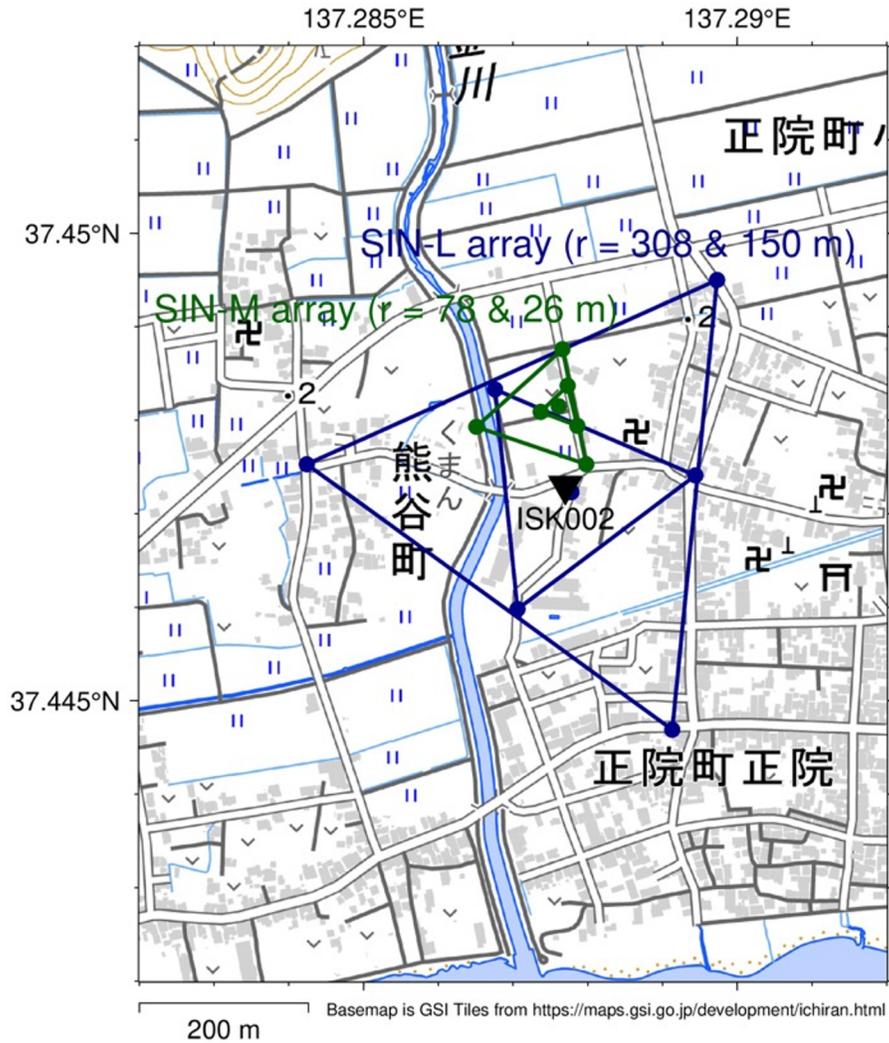
○地震被害調査

- ・全壊となるような建物はなく、ブロック塀が倒れるなどの被害が散見した。全体的に被害は軽微であった。
- ・1993年能登半島沖地震で被害が多くみられた地区と今回の被害が見られた地区はオーバーラップしていた（飯田，直，正院地区）。
- ・春日神社の大鳥居の倒壊には表層地盤による地震動増幅や脚部の根入れ不足・強度不足も関係していたと見られる。（ref. 珠洲市三崎町須須神社の大鳥居）

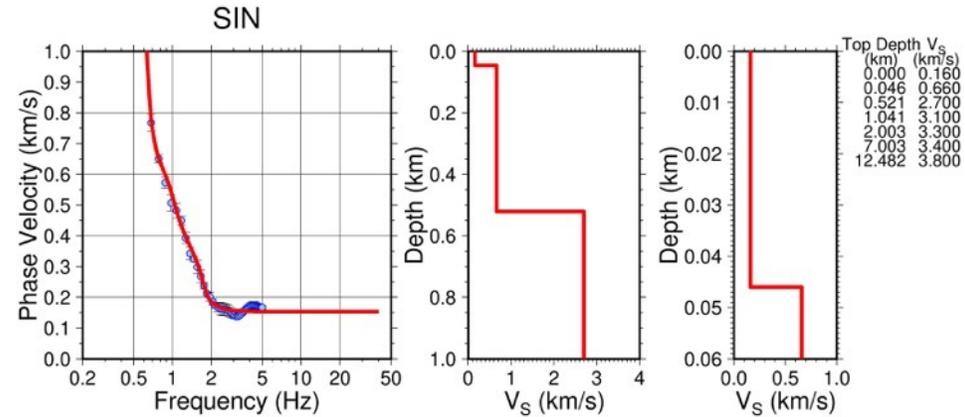
○臨時強震観測（被害が生じた珠洲市平野部6地点で観測を実施）

- ・KSG（春日神社）では1~2Hzおよび2~3Hz付近に振幅のピークが見られ、KMN（K-NET正院近傍）では1.0~1.3Hz付近にピークが見られるなどの卓越周波数特性の違いがあった。
- ・観測地震動のKMN（K-NET正院近傍）の計測震度相当値（1.3~4.2）に対する各地点の平均震度増分は、ISK002が+0.16、SIKが+0.15、SKNが+0.06、KSGが-0.02、KFKが-0.09、NNEが-0.1となり、大きな差は見られなかった。

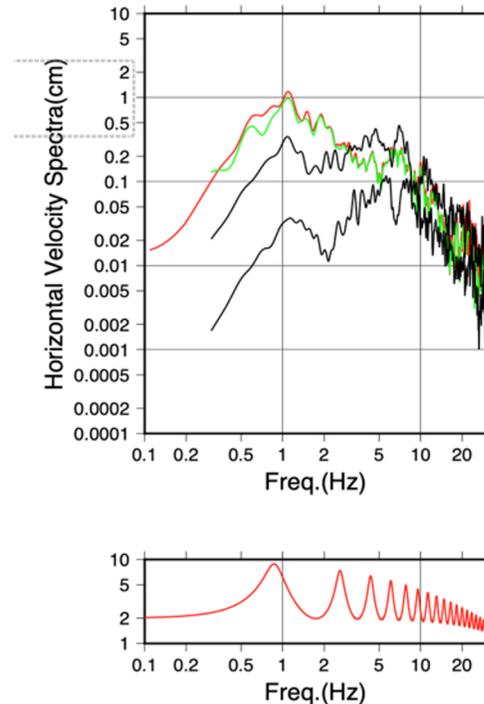
(1) 高震度生成メカニズムの解明



ISK002付近で実施した微動アレイ観測位置図



得られた分散曲線と推定されたS波速度構造モデル. 表層Vs=160m/sで厚さ46mと推定された



(上) ISK002で観測されたいくつかの(規模の違う地震の)記録の水平速度振幅スペクトル. 1Hzよりすこし高いところに卓越周波数が見える. (下) 得られたS波速度構造モデルの浅部構造による理論増幅率. 1Hzよりやや低い周波数で卓越している. この差は, 観測アレイサイズ内でも沖積層厚や平均S波速度が変化していて, ISK002においては得られたモデルより, やや高い卓越周波数を示す傾向も得られている.

(2) 被害状況との対応調査

2022年6月19日能登半島の地震 (M5.4) における 珠洲市街地の主な被害と臨時観測点



須須神社の大鳥居
(三崎町寺家)



鳥居の転倒
(産経新聞より)



② 墓石の転倒



A 外壁・瓦の落下



B 塀の崩壊



C ブロック塀の倒壊



D ブロック塀の倒壊



⑥ 墓石の転倒

地震計：応用地質
McSEIS-AT(3ch)
[約2Hzの速度計]



① KSG

①～④はAC電源を借用



⑥ SIK

⑤⑥はsolarパネルとカー
バッテリーを利用

ISK002では震度6弱 (計測震度5.56) が記録された。
珠洲市内の他の地点での震度はどのくらいか？

▲ 臨時地震観測点

令和5年度も
観測継続予定

地元自治体や一般市民への情報提供・成果報告について

2022年8月30日 地震活動や総合調査に関する意見交換会(珠洲市役所)
金沢大学・珠洲市・金沢地方気象台

2022年11月24日 地震活動の現況等の報告(石川県庁)
石川県防災会議震災対策部会

2022年11月24日 総合調査の現況報告会(オンライン)
金沢大学・珠洲市・石川県危機対策課

2023年2月13日 総合調査の概要及び現時点の成果報告(石川県庁)
石川県防災会議震災対策部会

2023年3月28日 総合調査の研究成果報告(珠洲市役所)
金沢大学・珠洲市・石川県危機対策課・金沢地方気象台

2023年6月4日 一般市民への研究成果報告会(珠洲市)

