

# 神岡坑内における精密地球物理観測 と地殻活動のモデリング

高森 昭光 (東大地震研)

# 概要

## □神岡坑内での観測

- 地下観測の目的
- これまでの共同利用研究課題
- 神岡地下観測装置
- レーザーひずみ計

## □研究報告

- 能登半島付近の地震活動、イベントに関連するひずみ変動の解析
- スペクトログラムを用いた解析（2022年6月19日のイベント）
- 地震断層モデルの評価（2023年5月5日のイベント）
- 2024年1月1日のイベント後の余効変動とひずみ計光軸の長期変動の解析

## □今後の計画

# 神岡坑内での観測

□目的：地殻活動・地球内部構造の研究

■現象：地震・地殻変動・自由振動・潮汐・火山活動など

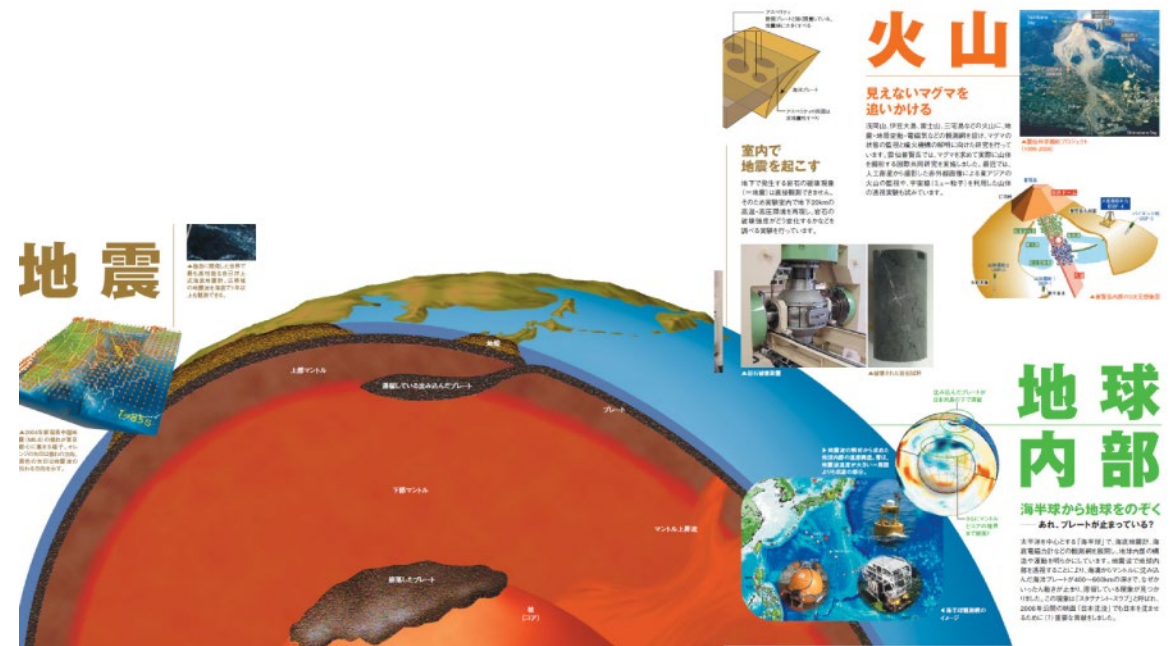
■観測手法：地震波・地殻ひずみ・重力など

□神岡坑内観測のメリット

■安定、擾乱の少ない環境 ⇒ **高精度**観測が可能（より微細な現象、遠方の現象を観測）

□KAGRAの安定稼働に寄与

■基線長変動の補償データ提供



# これまでの採択課題

## □2003～2005年度

- 神岡地下施設におけるレーザー伸縮計を用いた地球ダイナミクスの研究（竹本修三 他）

## □2007～2012年度

- レーザー伸縮計と超伝導重力計の同時観測による地球の固有振動の研究（森井互、田村良明 他）

## □2013～2016年度

- 坑内地球物理観測でとらえる水と雪のダイナミクス（今西祐一、新谷昌人 他）

## □2017年度～継続中（本課題）

- 神岡坑内における精密地球物理観測と地殻活動のモデリング（新谷昌人 他）

2024年度査定額：20万円（旅費として使用）

# 神岡地下観測装置



# レーザーひずみ計

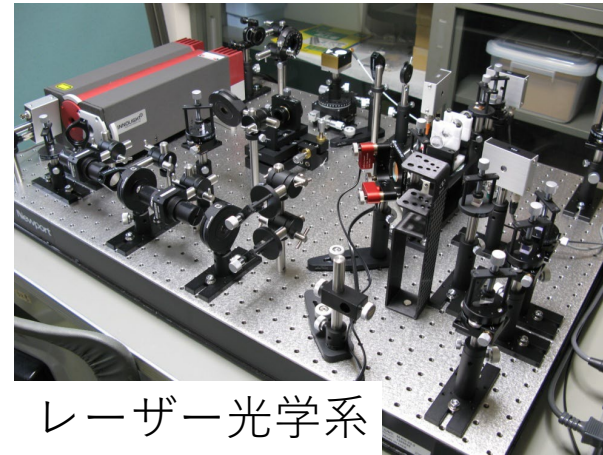
## □ マイケルソン干渉計

### ■ ヨウ素安定化レーザー

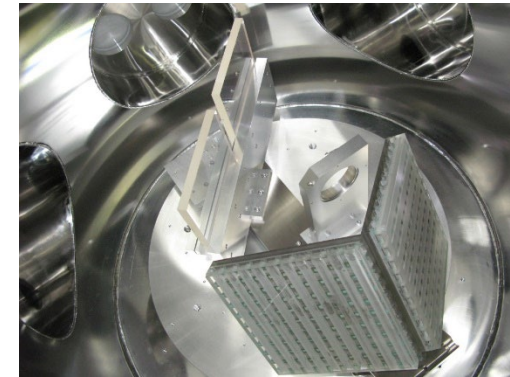
- レーザー波長 = 長さ基準：ひずみ分解能を決定
  - ヨウ素ガスの吸収線にレーザー波長を安定化
  - $10^{-13}$  位の安定度 = ひずみ分解能

### ■ Quadrature phase detection

- $90^\circ$  の位相差を持った2偏光を使用
  - リサージュ図形からレーザー光の位相変化を検出  
cf. 無偏光型の干渉計では伸縮の方向は決定できない



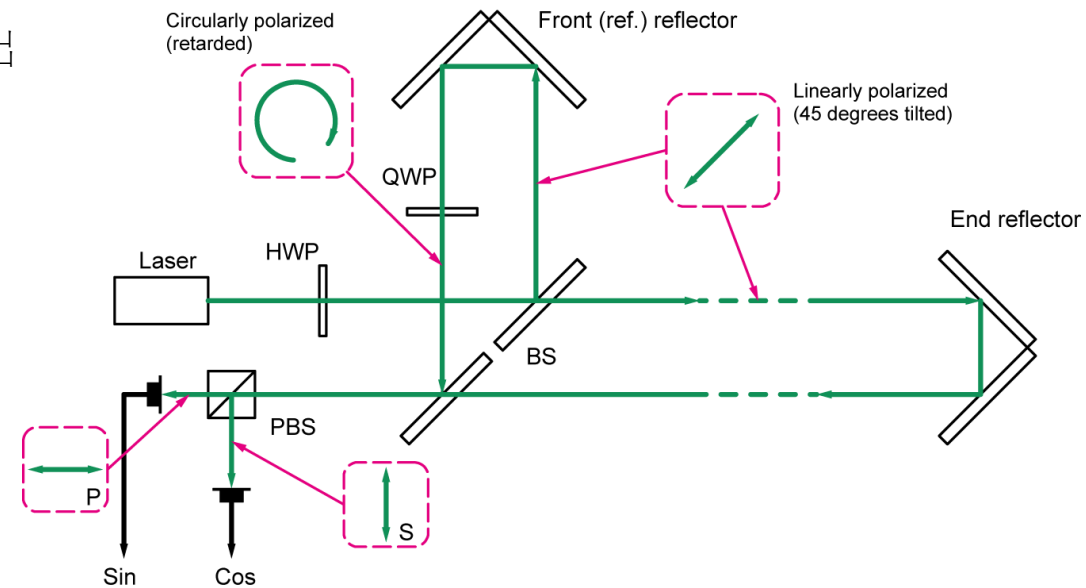
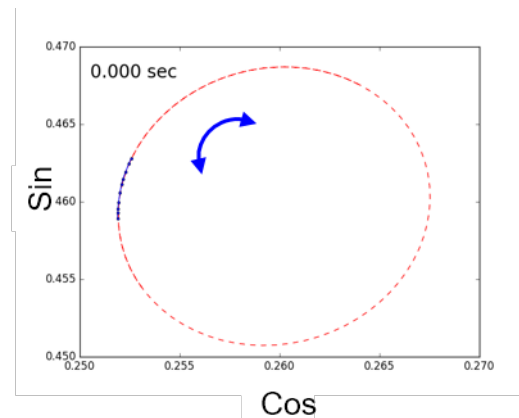
レーザー光学系



ビームスプリッタとリフレクタ

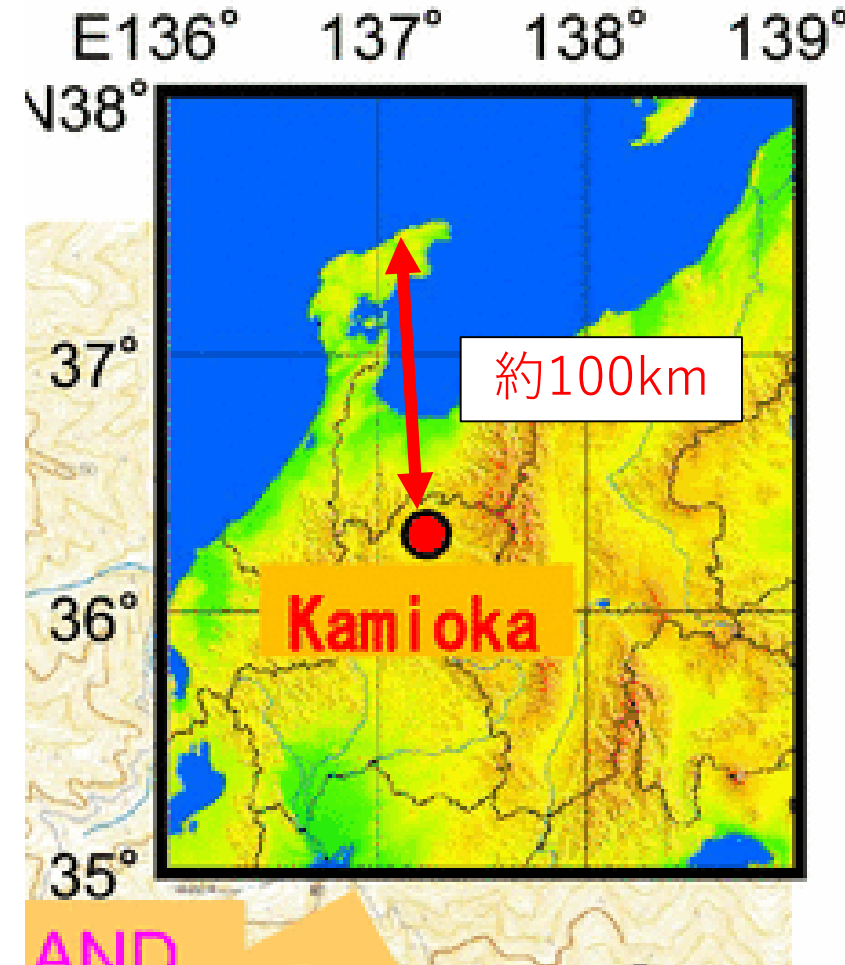


干渉縞



# 能登半島付近の地震活動について

- 2007年3月25日に西部でM6.9の地震
- 2020年12月頃から能登地方での地震活動が活発化
- 2022年6月19日にはM5.4の地震
- 2023年5月5日にはM6.5の地震
- 2024年1月1日にはM7.6の地震
- 2022年～の地震活動に流体が関与していることが示唆されている

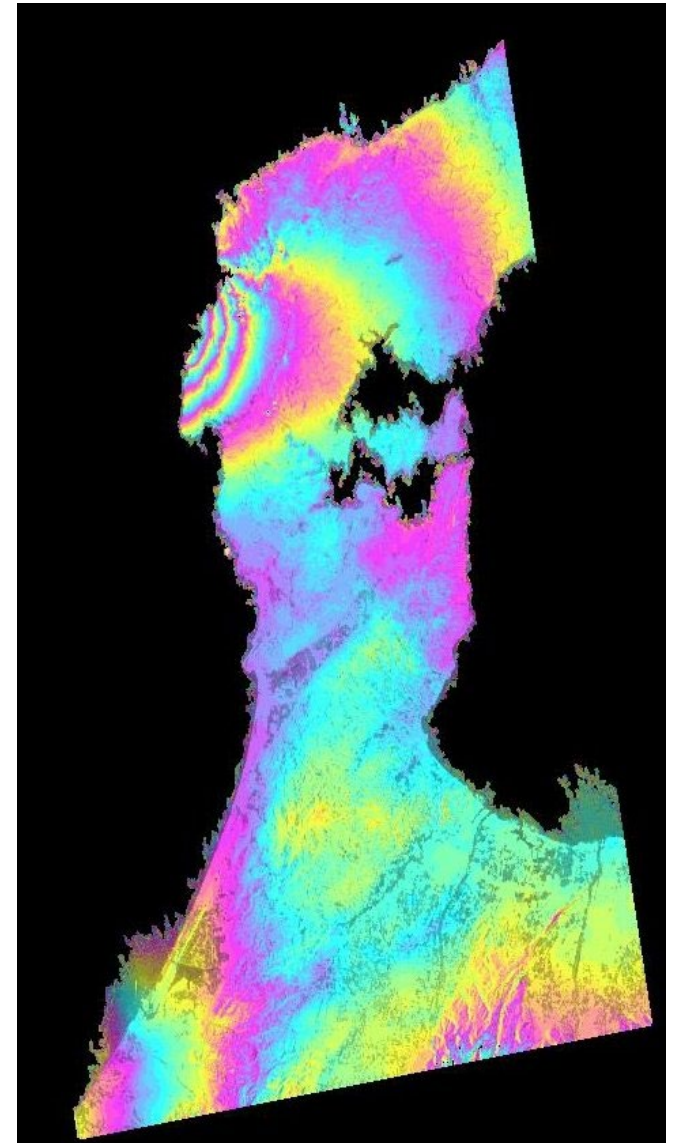


# 能登半島付近の地震活動について

2007年能登半島沖地震M6.9

合成開口レーダー(InSAR)で観測された地震にともなう地殻変動

・・・衛星「だいち」によるInSAR解析結果  
(古屋正人氏による)



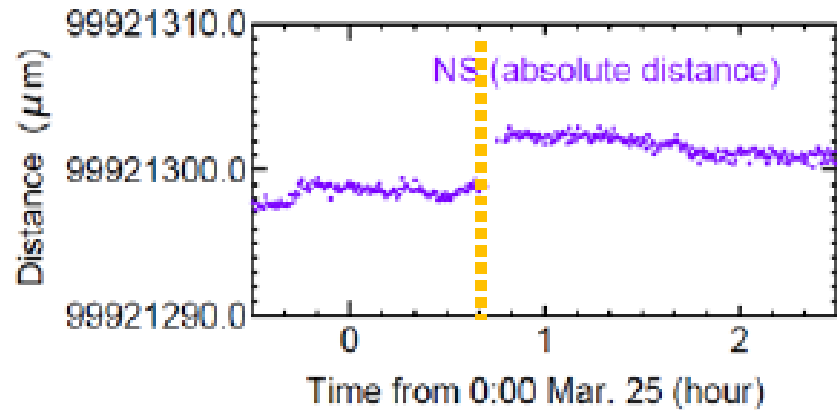


# 能登半島付近の地震活動について

GPSによる観測結果(国土地理院HP)

・・・震源より遠方は変化が小さく検出困難

□2007年3月25日M6.9の際に100m  
ひずみ計で観測された基線長変動

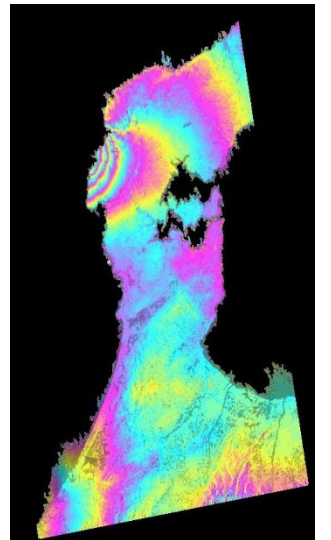
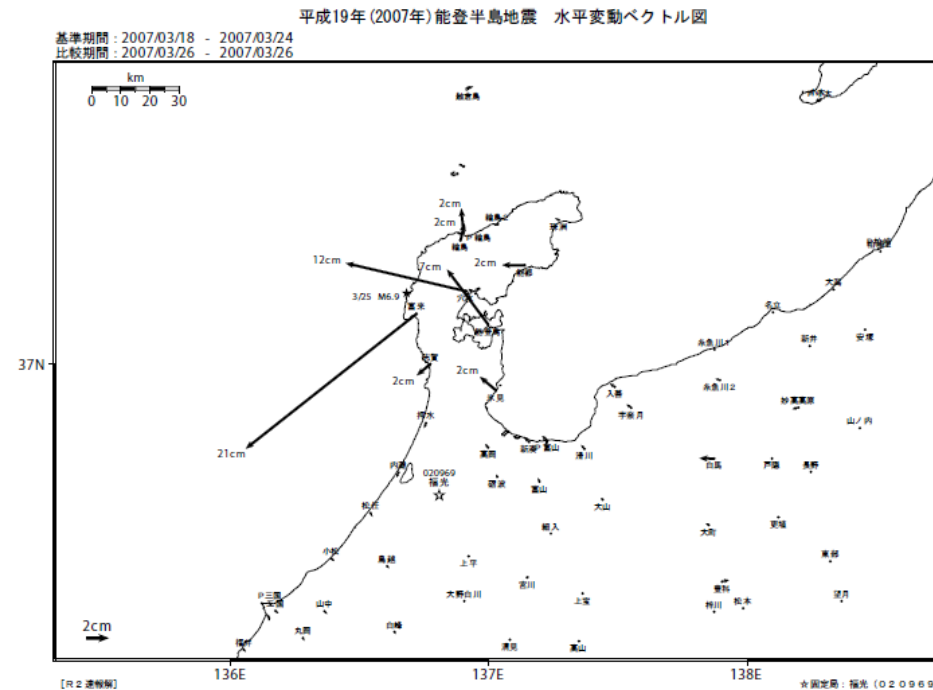


CLIO絶対長干渉計により距離変化を観測(NS: $3.5 \times 10^{-8}$ )

・・・100mの距離の3.5  $\mu\text{m}$ の伸び  
(Araya et al., 2010)

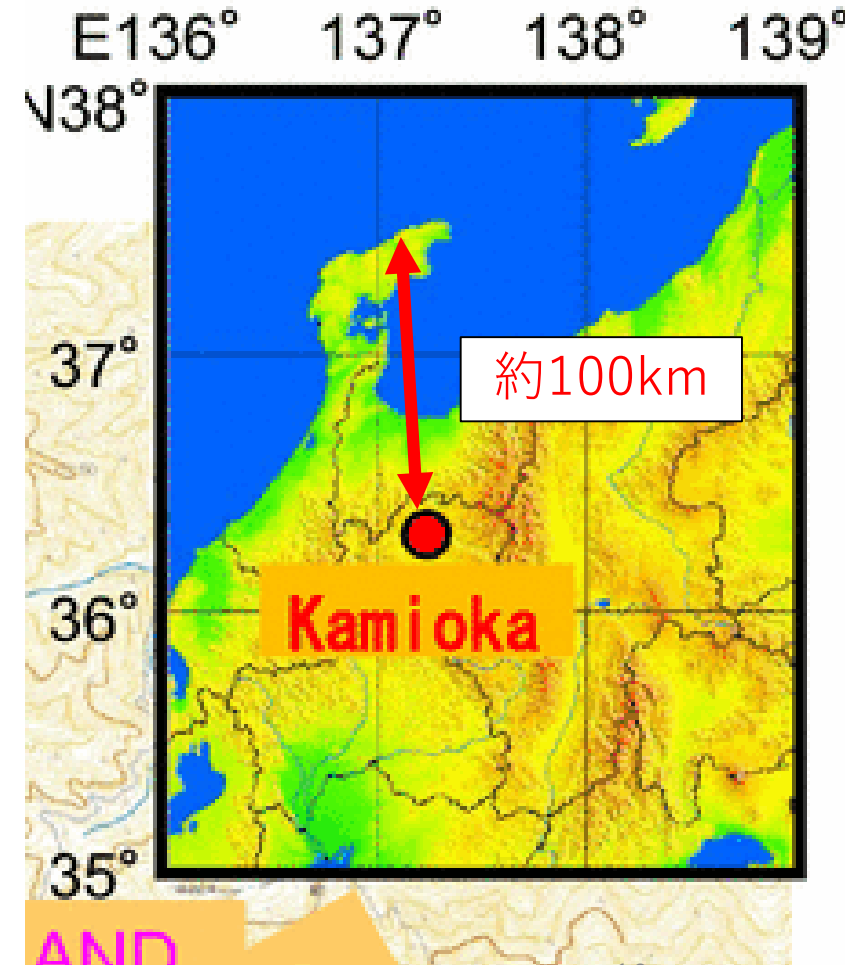
平成19年(2007年)能登半島地震に伴う地殻変動ベクトル図

資料-1

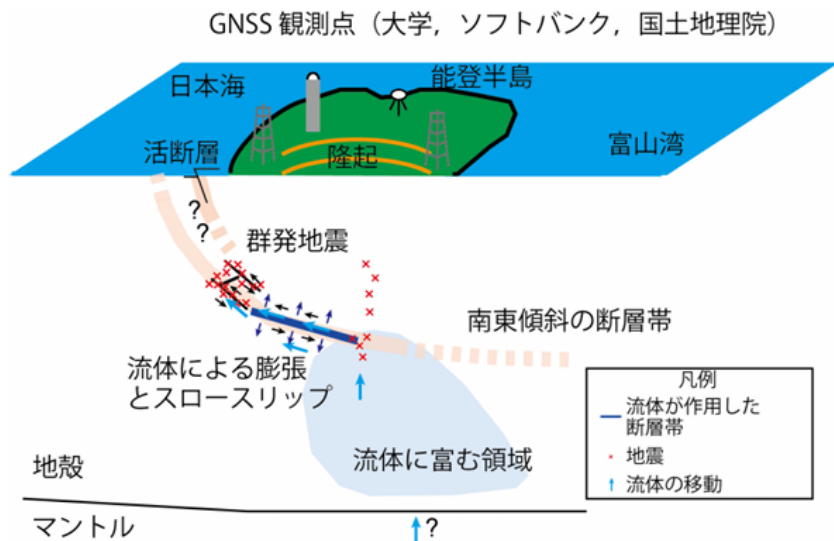


# 能登半島付近の地震活動について

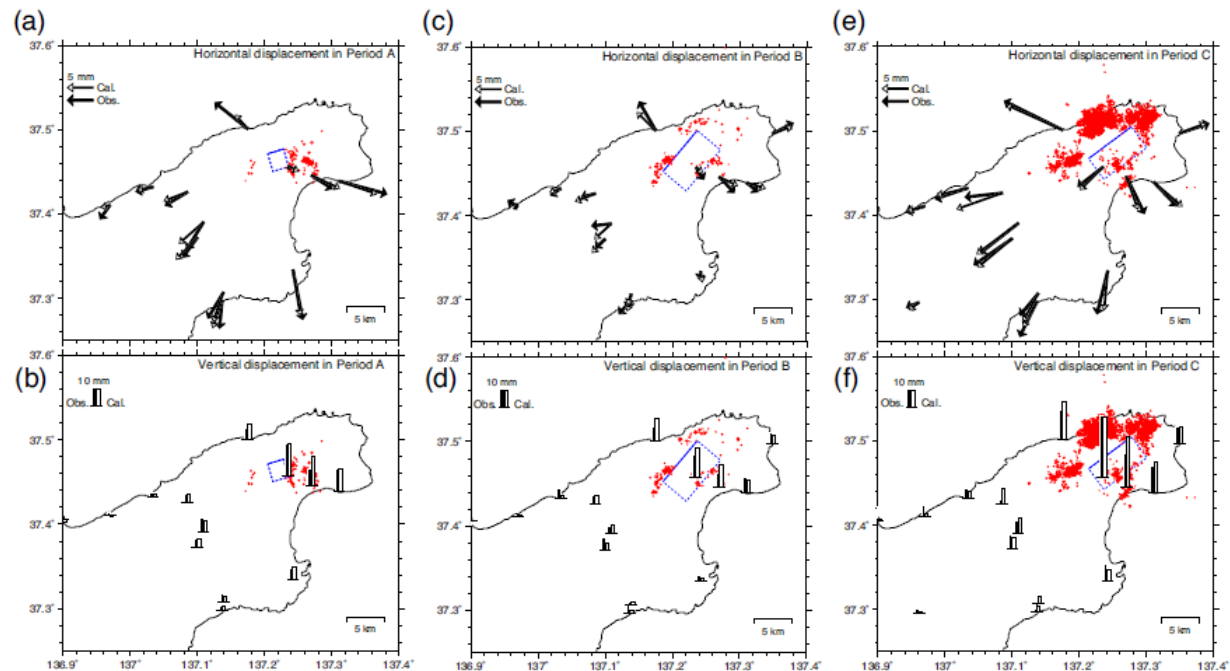
- 2007年3月25日に西部でM6.9の地震
- 2020年12月頃から能登地方での地震活動が活発化
- 2022年6月19日にはM5.4の地震
- 2023年5月5日にはM6.5の地震
- 2024年1月1日にはM7.6の地震
- 2022年～の地震活動に流体が関与していることが示唆されている



# 能登半島付近の地震活動



●能登半島の群発地震のメカニズムの模式図。GNSSデータの解析から、地殻深部の流体が断層帯内を拡散することにより断層帯の膨張とスロースリップを引き起こし、さらにその浅部で活発な地震活動を長期にわたって引き起こしていることが示唆されます。

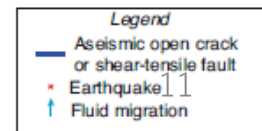
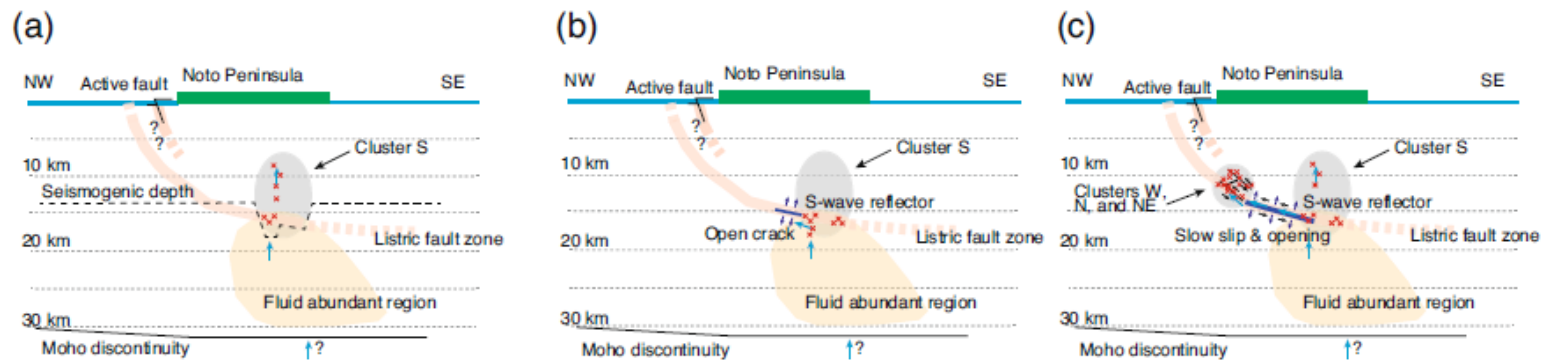


2020.11~2021.3

2021.3~2021.6

2021.6~2022.6

西村、平松、太田(2023)



Nishimura et al. (2023)

GNSS観測結果は地下流体の関与を示唆

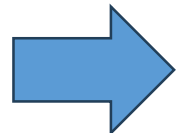
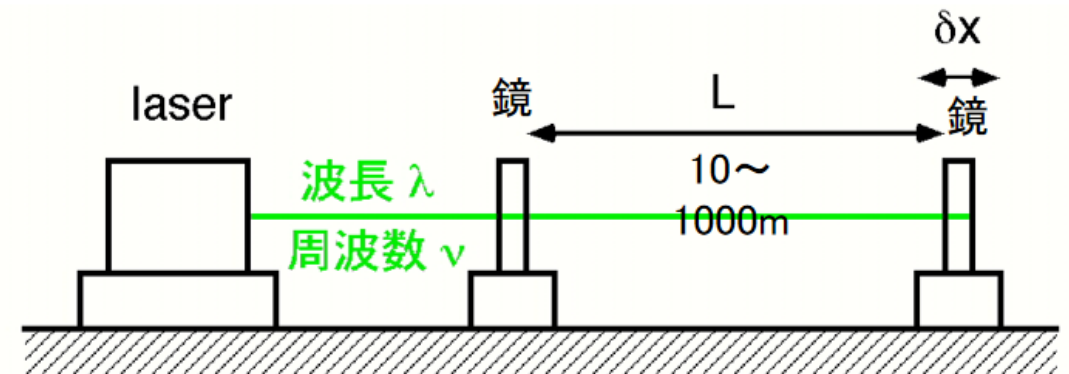
# レーザーひずみ計のメリット

□地震計に比べて、低周波の現象を捉えやすい

- 地震計 速度や加速度
- ひずみ計 距離変化

□高いひずみ分解能

- ボアホールひずみ計  $10^{-9}$ 程度の相対変化
- レーザーひずみ計  $10^{-13}$ 程度の相対変化 (Araya et al. 2002)



流体が関与した長周期変動などを捉えられる可能性がある

# ひずみデータの解析・・・複数の手法を適用

ひずみスペクトルの時間変化（スペクトログラム）を用いた解析

- 地震イベント前後のひずみスペクトルの時間変動
- 同様の気圧スペクトルとの比較
- 地震発生メカニズム（流体の寄与等）の評価

地震断層モデルを用いた神岡での地殻変動量の評価

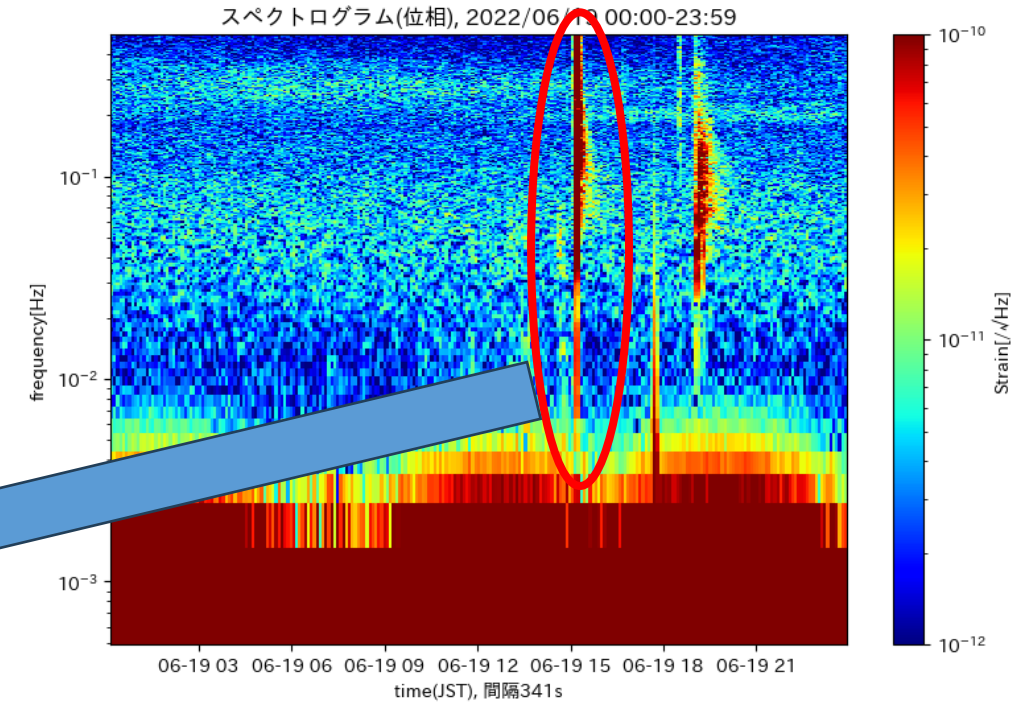
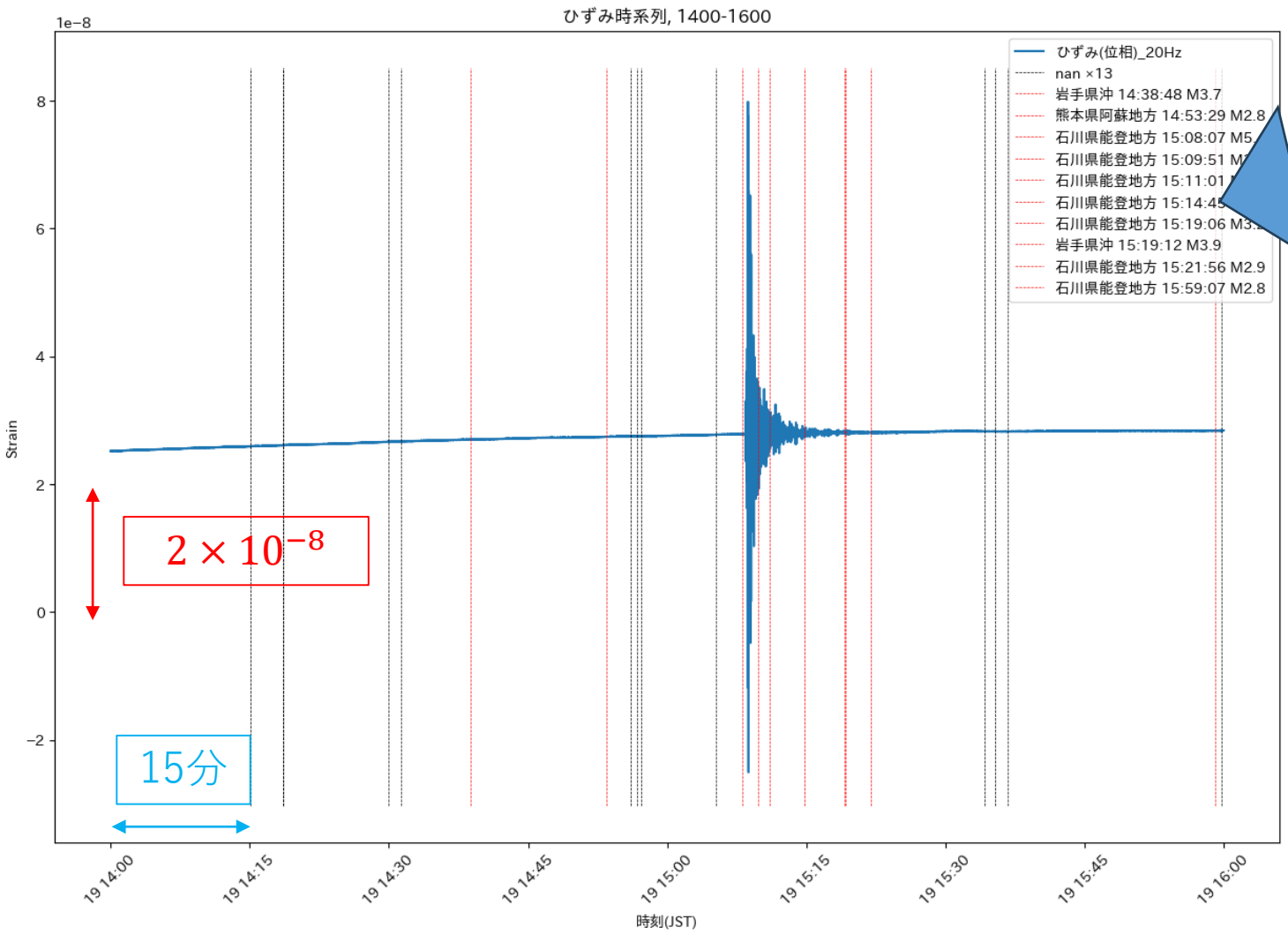
- 地震イベント前後のひずみ変化量を算出し、モデルの妥当性を評価

長期的な坑内変形と地殻変動の関連性の解析

- 1500mひずみ計の光軸の長期的時間変動の抽出
- 2024年1月1日のイベント後の余効変動との関連性の評価

# スペクトログラムを用いた解析

- 2022年6月19日の地震イベント前後のひずみスペクトルの時間変動
- 同様の気圧スペクトルとの比較

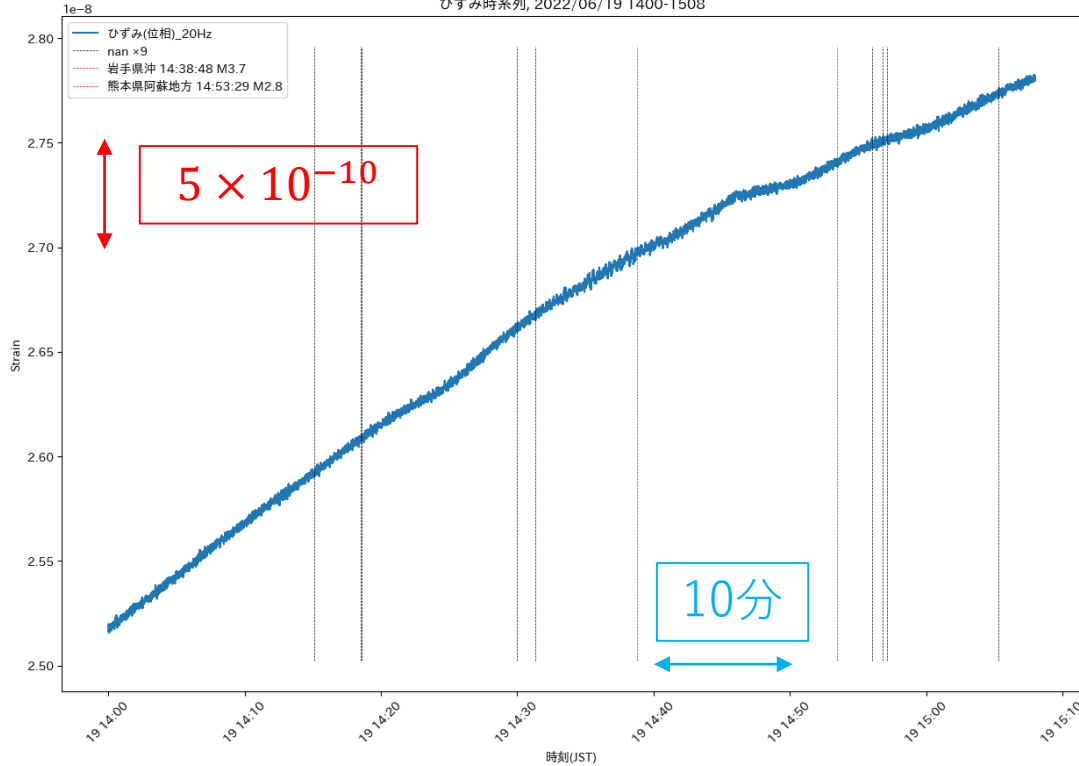


- 15:08 能登M5.4
- 地震時のひずみ変化が大きい  
→地震前後で分割

# 地震前後 2022/6/19 15時ごろ

## 地震前

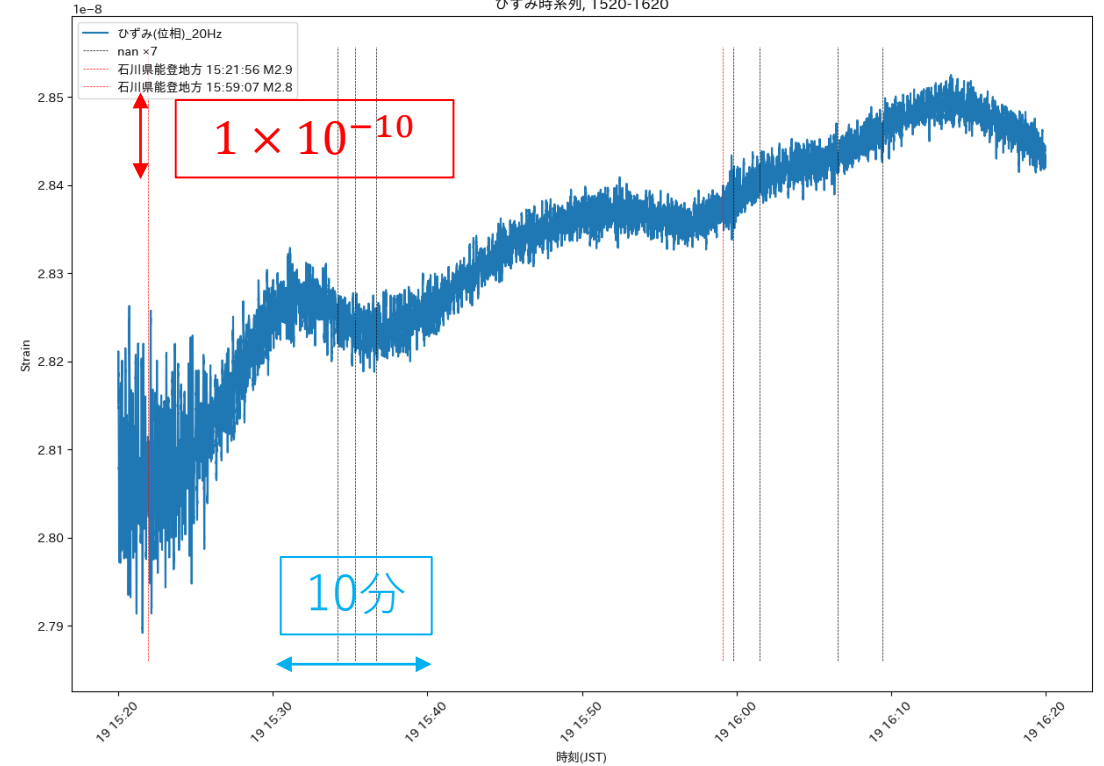
ひずみ時系列, 2022/06/19 1400-1508



## 地震

## 地震後

ひずみ時系列, 1520-1620



- 地震後に10~20分程度の比較的周期が長い変動
- 地震波動により励起された媒体（流体等）の振動の可能性を調査中

# 地震断層モデルを用いた神岡での地殻変動量の評価

## □能登群発地震の観測（2023）

- 2023年5月5日 14:42, Mw6.2
- 震源：能登半島沖、神岡の北134 km、神岡で震度2

## □神岡レーザーひずみ計による観測

- GIF：干渉状態を維持。連続観測成功
- CLIO:観測中断中（レーザー制御off）にイベント発生

### セントロイド時刻とセントロイド位置およびモーメントマグニチュード

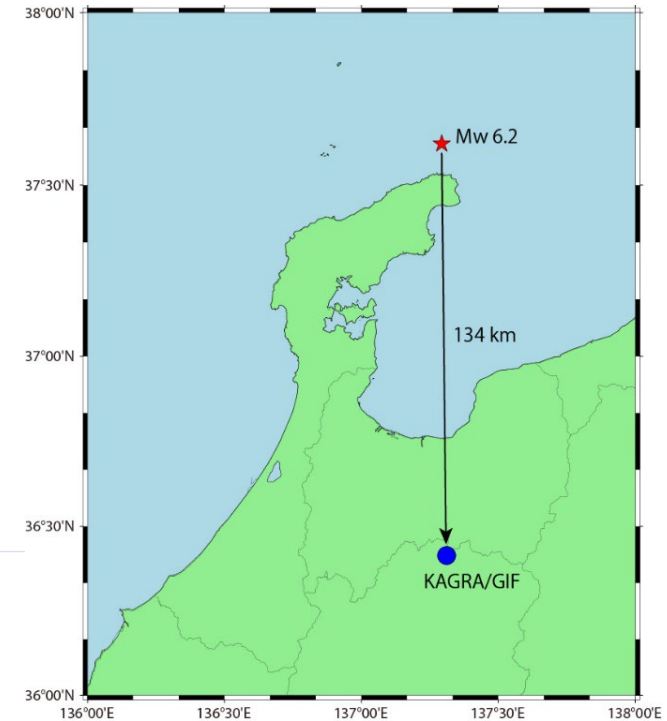
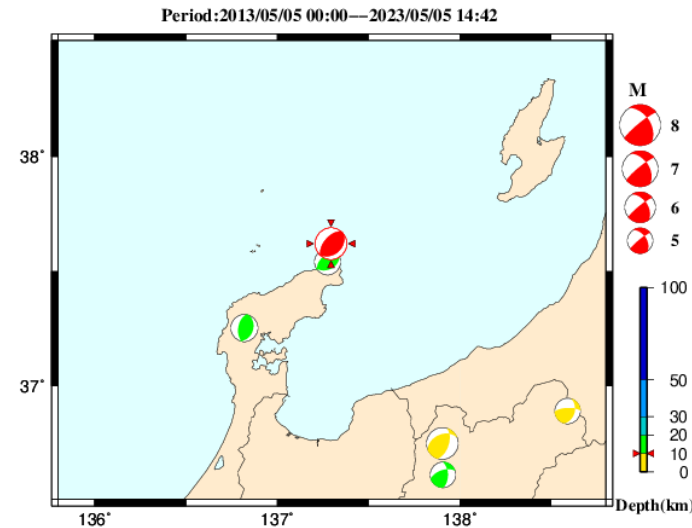
セントロイド時刻	緯度	経度	深さ	Mw
2023-05-05 14:42:10.1	北緯37度37.2分	東経137度17.6分	10km	6.2

### 発震機構解

	走向	傾斜	すべり角		P軸	T軸	N軸
断層面解1	49	34	97	方位	313	113	223
断層面解2	220	56	85	傾斜	11	78	4

気象庁CMT解

### 周辺のCMT解





# 地震断層モデルを用いた地殻変動量の評価

## □ GIFによる観測（暫定値）

### ■ 改良位相変換プログラムによる再解析

- 自動化を目標に改良作業継続中

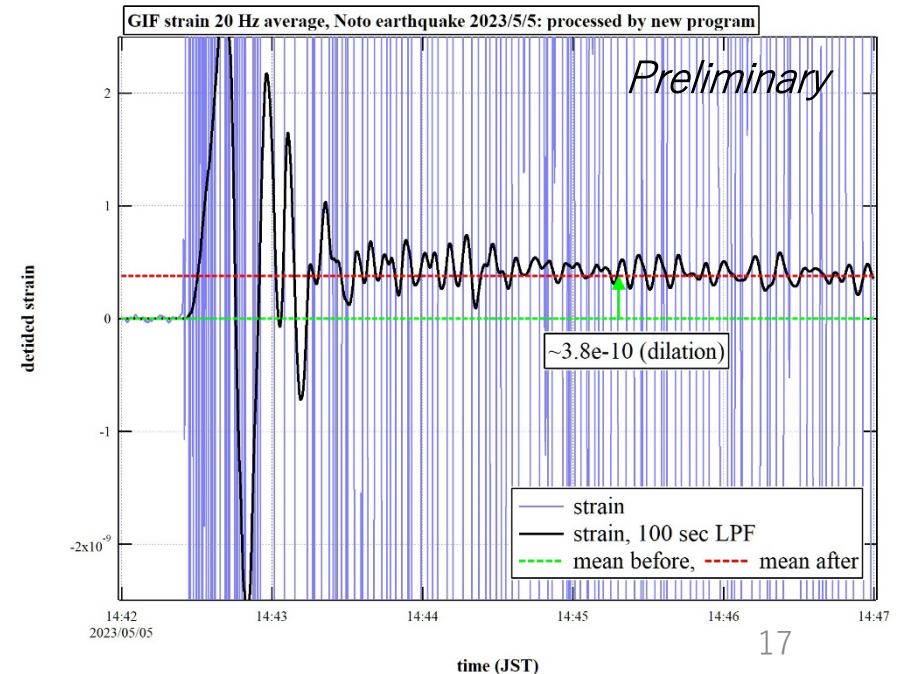
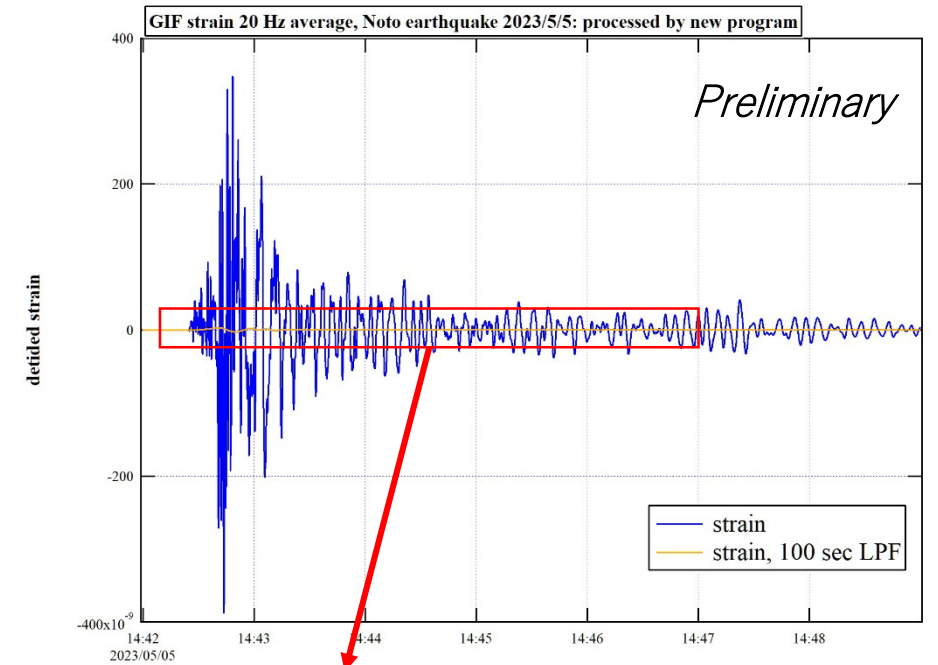
### ■ 大振幅のひずみ波形を観測

- $7.4 \times 10^{-7}$  pp（飽和や不連続点なく観測）

### ■ ひずみステップ

- 観測値： $\sim 3.8 \times 10^{-10}$ （伸び）
- 理論値： $\sim 7.6 \times 10^{-10}$ （伸び）
  - 気象庁CMT解とMICAP-G（弾性体モデル）
  - 断層長さ5 km, 幅 10 kmを仮定した推定値

⇒ 整合的な方向、オーダー



# 長期的な坑内変形と地殻変動の関連性の解析

## □2024年能登半島地震

- 2024年1月1日 16時すぎ (最大Mw 7.5@16:10)
- 神岡で震度4：安全のため入坑制限

## □レーザーひずみ計

- GIF:振動により光軸がずれ、干渉が途切れた
  - 翌日にリモート復旧して、余震などの観測を継続
- CLIO:観測中断中にイベント発生
  - 約1ヶ月後に現地で復旧作業、観測を継続
  - リモートでの復旧（調整）機能を強化した
    - モーター付きミラーマウントへの交換
    - レーザー周波数制御の稼働率向上
    - 干渉計入射光軸モニター用カメラ追加

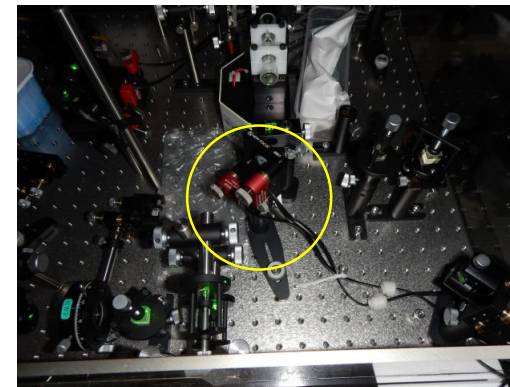
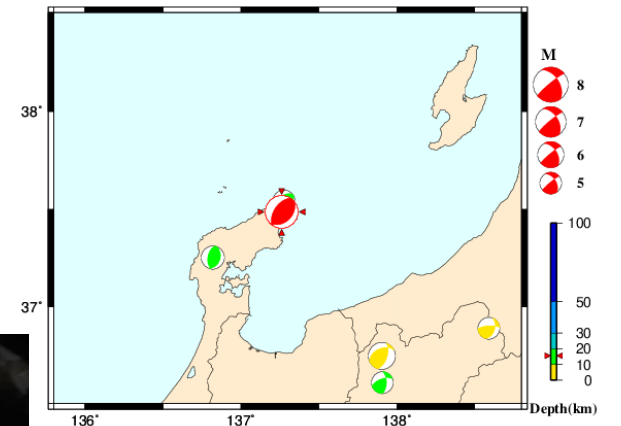
セントロイド時刻とセントロイド位置およびモーメントマグニチュード

セントロイド時刻	緯度	経度	深さ	Mw
2024-01-01 16:10:42.3	北緯37度29.2分	東経137度15.6分	15km	7.5

発震機構解

	走向	傾斜	すべり角		P軸	T軸	N軸
断層面解1	47	37	100	方位	310	93	219
断層面解2	215	54	82	傾斜	8	80	6

Period:2014/01/01 00:00—2024/01/01 16:10



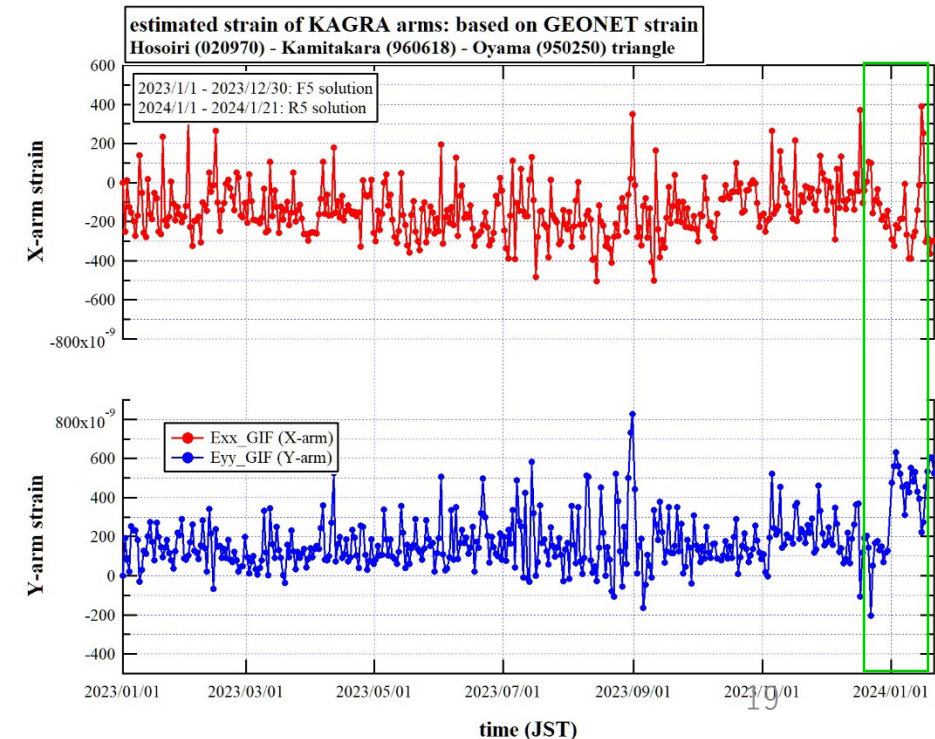
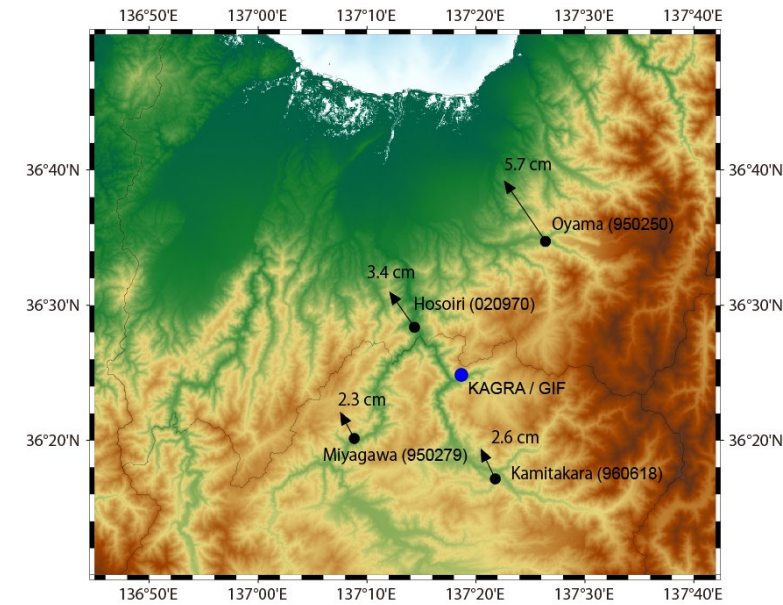
# 長期的な坑内変形と地殻変動の関連性の解析

## □2024年能登半島地震

### ■GNSSデータによるひずみ推定

- 国土地理院GEONETのGPSデータ利用
  - 神岡周辺の電子基準点4カ所の変位から推定
  - 各点2-6 cm程度北西に変位
  - 一様な変形を仮定

- KAGRAトンネルのひずみ推定値
  - Xアーム： $\sim -95 \times 10^{-9}$  (約0.3 mm縮み)  
2023.5.5の約240倍
  - Yアーム： $\sim 524 \times 10^{-9}$  (約1.6 mm伸び)
- 両アーム間の角度変化
  - $\sim 4.9 \times 10^{-7}$  rad (90° より閉じる方向)



# GIF入射光軸の長期変動解析

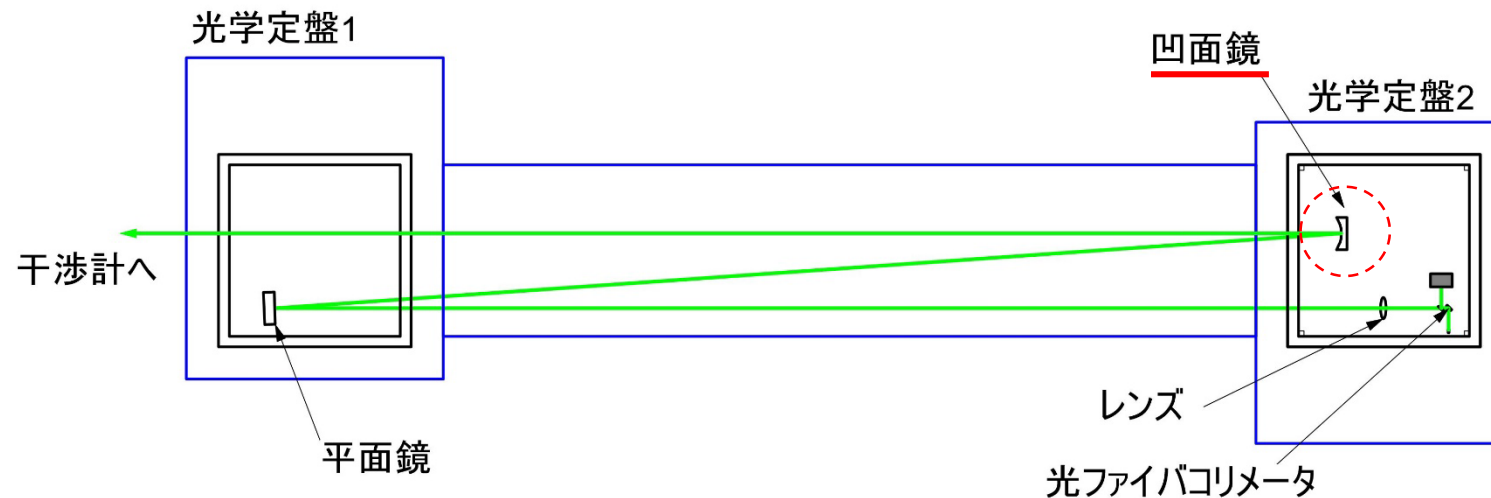
## □入射光学系

### ■平面・凹面鏡による反射望遠鏡

- ・ ビームウェスト位置をエンドリフレクタに合わせる

### ■光軸調整

- ・ 凹面鏡の角度をアクチュエータで調整
- ・ およそ月1回リモートで調整
- ・ 主に入射光を下げる方向（pitch）の調整



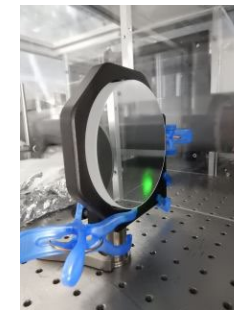
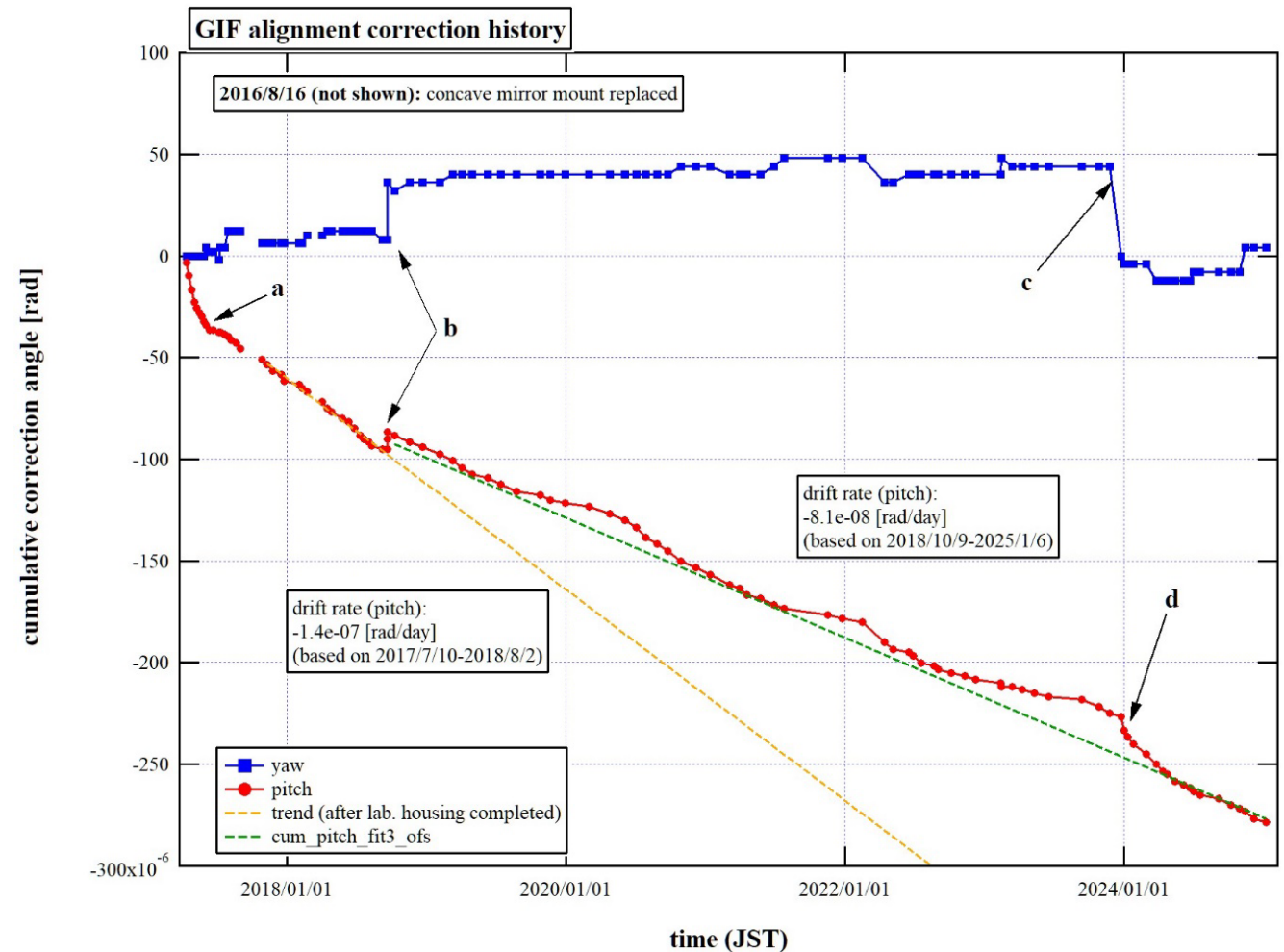
# 入射光軸調整の履歴

## □主なできごと

- a. 実験室の小屋が完成 (2017/6/23)  
簡易的なビニールカーテンのみだった  
環境変化によるドリフト速度変化
- b. 平面鏡のマウント補強 (2018/8/17)  
平面鏡の荷重を受けるばねを補強  
→ドリフト速度が半分近くに低下
- c. 誤操作による飛び (2023/12/26)  
KAGRAのアクチュエータと誤認して操作
- d. 能登半島地震 (2024/1/1)

## □pitchの長期変動

- 上記のb以降ほぼ一定のドリフト速度
- トレンドから外れる時期あり：原因調査中
  - 冬場に発生する傾向：季節変動?降雪量と関連?
  - 地震、地殻変動と関連?

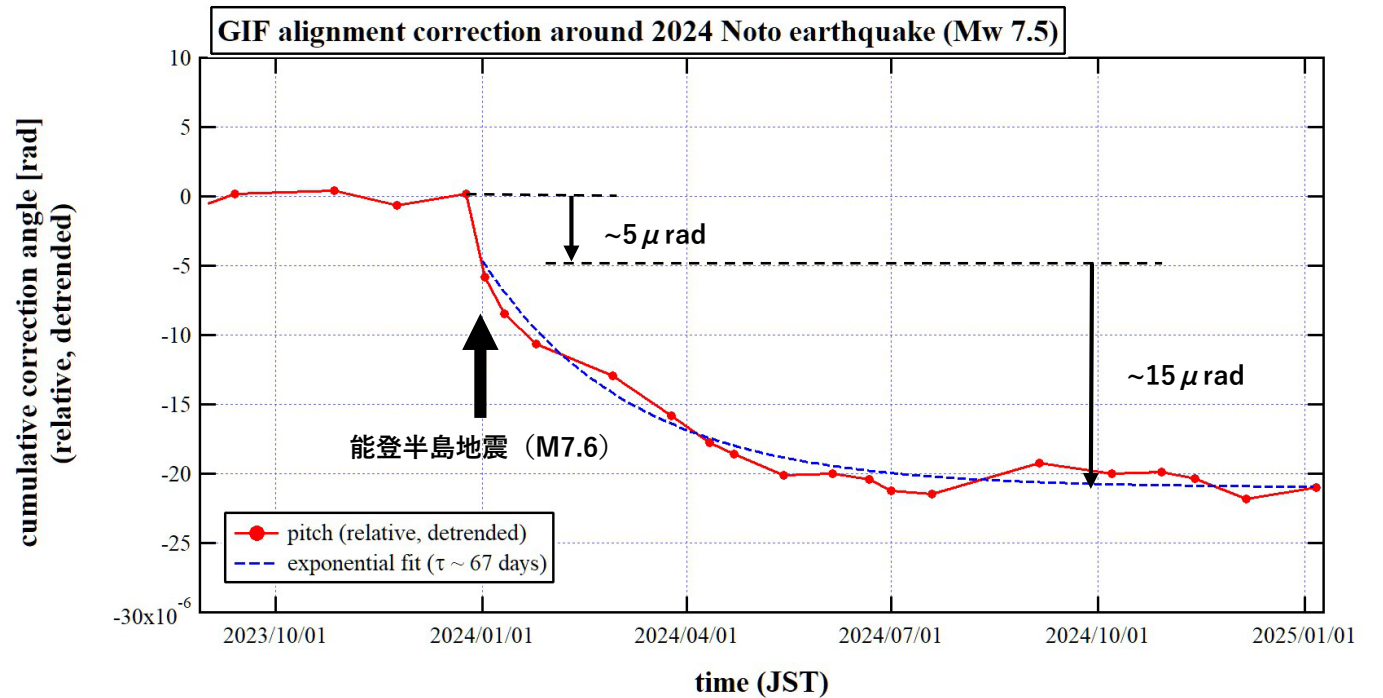


b. ミラーマウントの補強

# 2024能登半島地震

## □GIF光軸への影響

- 地震前から継続するドリフト成分を除去
- 地震直後に約 $5\ \mu\text{rad}$ の飛び (coseismicな変動)
- 地震前よりはやくい過渡的変動が約半年継続
  - 地震直後に比べてトータルで約 $15\ \mu\text{rad}$ 変動
  - 変動の時定数 $\sim 67$ 日



# 2024能登半島地震による coseismic な傾斜変動

## □理論モデル：傾斜変動

- MICAP-G (気象研) を用いて計算
  - 弾性体モデル (Okada, 1992)
- 国土地理院の断層モデルを適用

【推定された震源断層パラメータ】

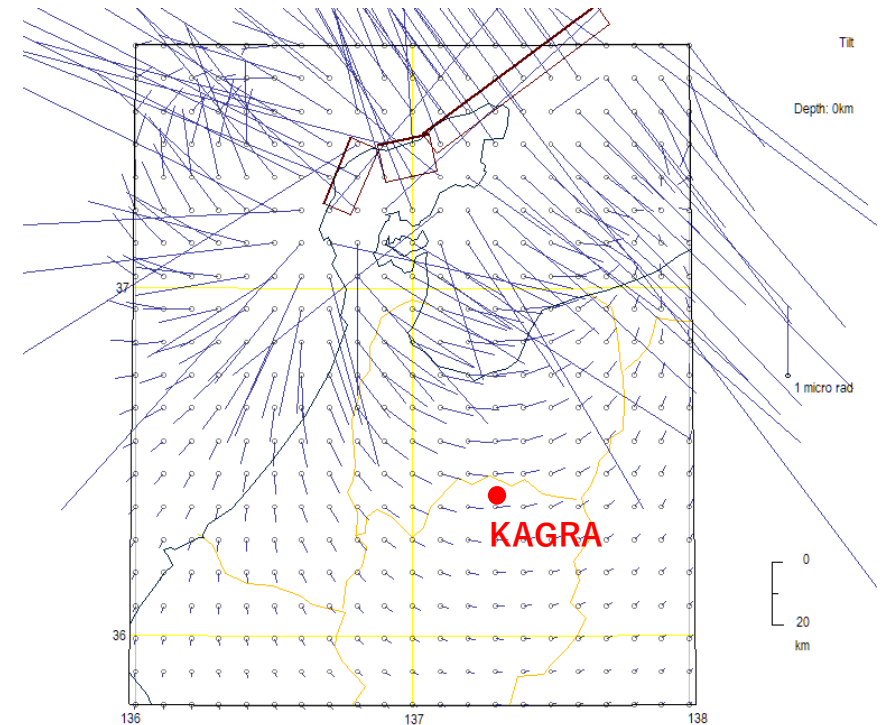
	経度	緯度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜	すべり角	すべり量	$M_w$
	°	°	km	km	km	°	°	°	m	
断層1	136.680	37.246	0.1	22.0	12.2	22.7	40.6	84.4	6.79	7.09
	(0.002)	(0.002)	(0.1)	(0.3)	(0.2)	(1.0)	(0.4)	(1.3)	(0.11)	(0.01)
断層2	136.876	37.414	0.0	16.2	20.4	78.3	54.9	140.2	2.83	6.90
	(0.003)	(0.001)	(0.0)	(0.4)	(0.5)	(0.6)	(0.6)	(0.7)	(0.05)	(0.01)
断層3	137.037	37.445	0.1	66.8	11.5	53.3	49.7	114.6	4.42	7.27
	(0.001)	(0.002)	(0.1)	(1.1)	(0.1)	(0.4)	(0.3)	(0.2)	(0.04)	(0.00)

・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。括弧内は誤差 ( $1\sigma$ ) を示す。

・ $M_w$  と断層面積をスケーリング則 (Strasser et al., 2010) に近づくように拘束。

・ $M_w$  の計算においては、剛性率を 30GPa と仮定。3枚の断層の合計の  $M_w$  は 7.44。

<https://www.gsi.go.jp/common/000264084.pdf>



傾斜変動ベクトルの分布 (モデル)

## □結果

- 東西方向に約  $0.23 \mu\text{rad}$  傾く (東が上昇)
- GIFの基線方向では、約  $0.21 \mu\text{rad}$  傾く
- 入射光軸補正量より1桁小さい
  - 一様な傾きは入射光軸に影響しない

# 2024能登半島地震によるcoseismicな傾斜変動

## □理論モデル：ひずみ

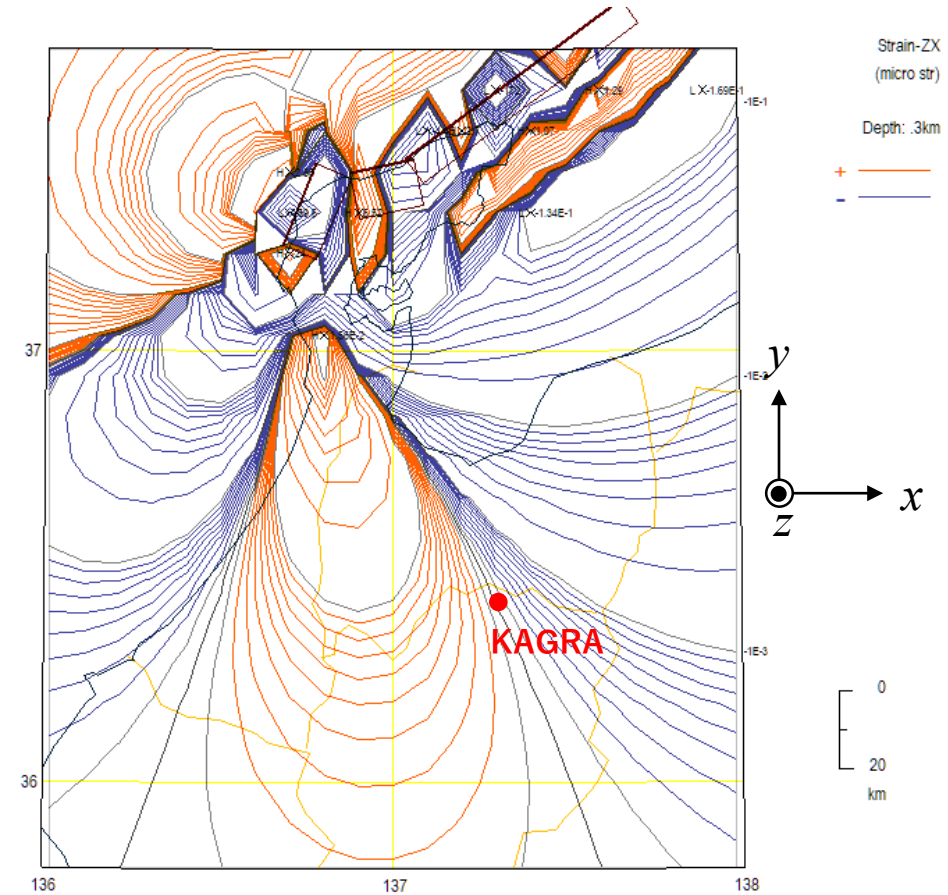
### ■地下（KAGRA坑内）のせん断ひずみ

- 深さ依存性あり
- 地下300-500 mで計算
- $\varepsilon_{zx}$ および $\varepsilon_{yz}$ 成分から光軸のずれを見積もる

### ■GIF光軸方向の変化

- エンドリフレクタの方が高くなる方向に変動
  - 高低差：2.7-4.5  $\mu\text{m}$
- 0.002-0.003  $\mu\text{rad}$ の傾斜に対応
  - 入射光軸の補正量に比べて十分小さい

深さ	GIFミラーの高低差 $\Delta z$ ( $\mu\text{m}$ )	傾斜換算 ( $\mu\text{rad}$ )
300 m	+2.7	0.0018
400 m	+3.6	0.0024
500 m	+4.5	0.0030



せん断ひずみ ( $\varepsilon_{zx}$ 成分) の分布

// MICAP-G //



# 2024能登半島地震後の地殻変動（余効変動）

## □GNSSデータ解析

### ■ 国土地理院GEONET

- 日毎のデータ解析

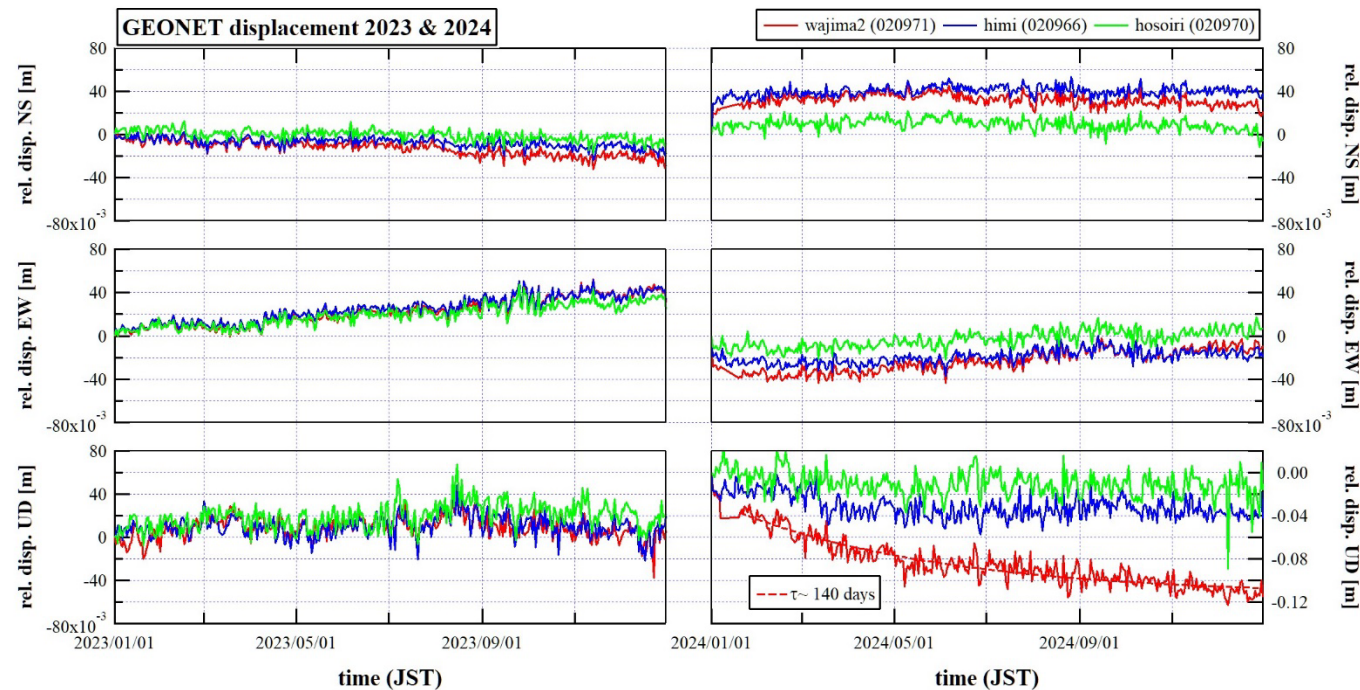
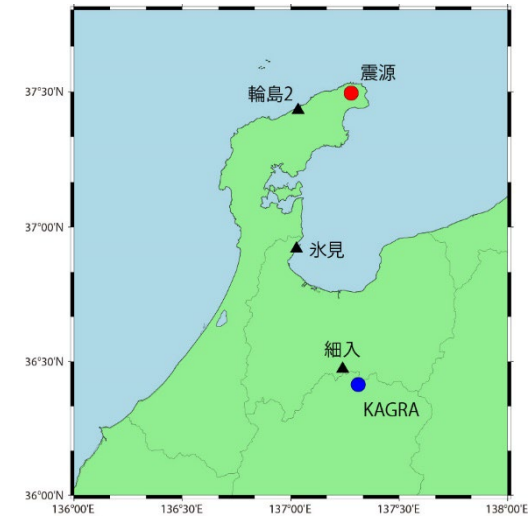
### ■ 3地点のデータを使用

- 震源域：輪島2
- 神岡近傍：細入
- 中間地点：氷見

### ■ 震源域で顕著な上下変動

- 2024年末までに~7 cm沈降
- 変化の時定数 $\geq 140$ 日
  - GIF光軸変化の2倍以上

⇒ 近傍断層活動や強震動の影響も考慮しつつ引き続き分析



2023（左）、2024年（右）の電子基準点（GEONET）変位

# 今後の計画

- CLIO, GIFのレーザーひずみ計同時長期観測
  - 安定・長期的な地殻変動観測を継続
    - ・ 能登半島地震の余震、ひずみ変化に注目
  - データ処理手法の改良（自動化）
  - DAQシステムの更新
  
- 地震イベント前後のひずみ変動解析を継続
  - 解析ターゲットを拡充（イベント選定）
  - 地震発生メカニズム（流体の寄与等）との関係を定量的に評価
  
- 気圧変化とひずみの関係調査
  - 理論、観測両面からのアプローチ
  
- 近傍断層活動の影響評価手法の研究

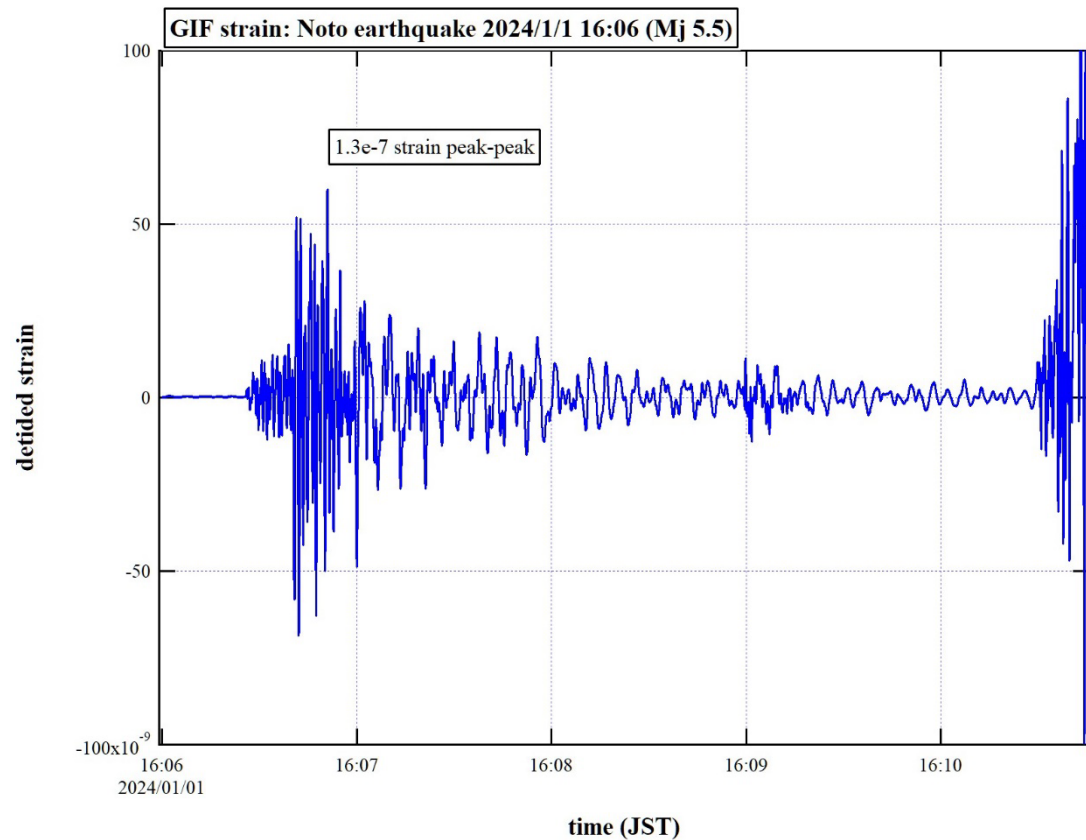


# 地震時の干渉計信号

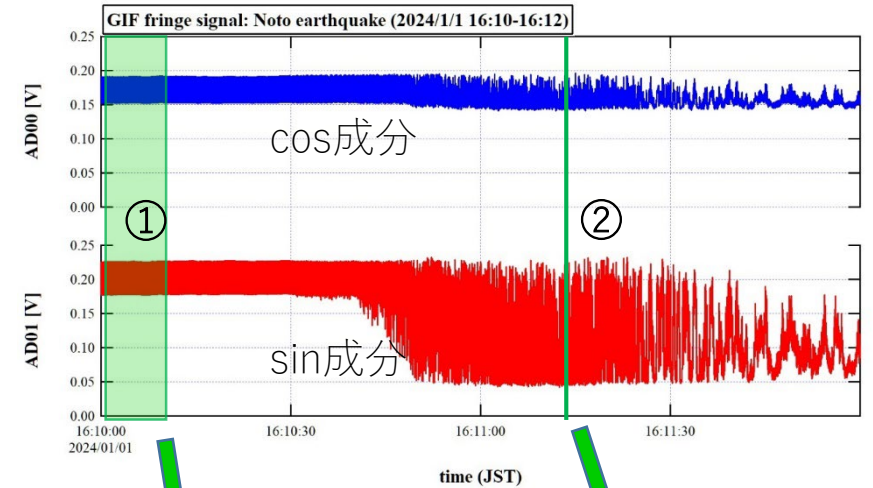
## □ 2024年能登半島地震

### ■ GIF：前震の観測と干渉の消失

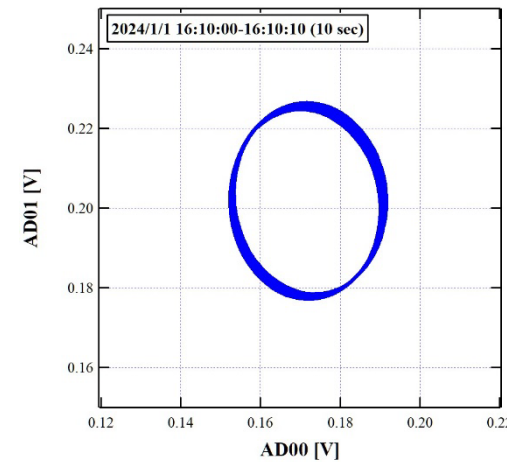
- $\sim 1.3 \times 10^{-7}$  pp (連続的に観測)



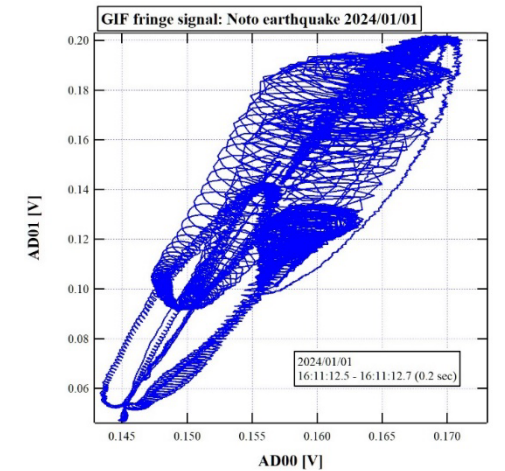
これ以降フリッジ消失



干渉計信号 (sin, cos成分)

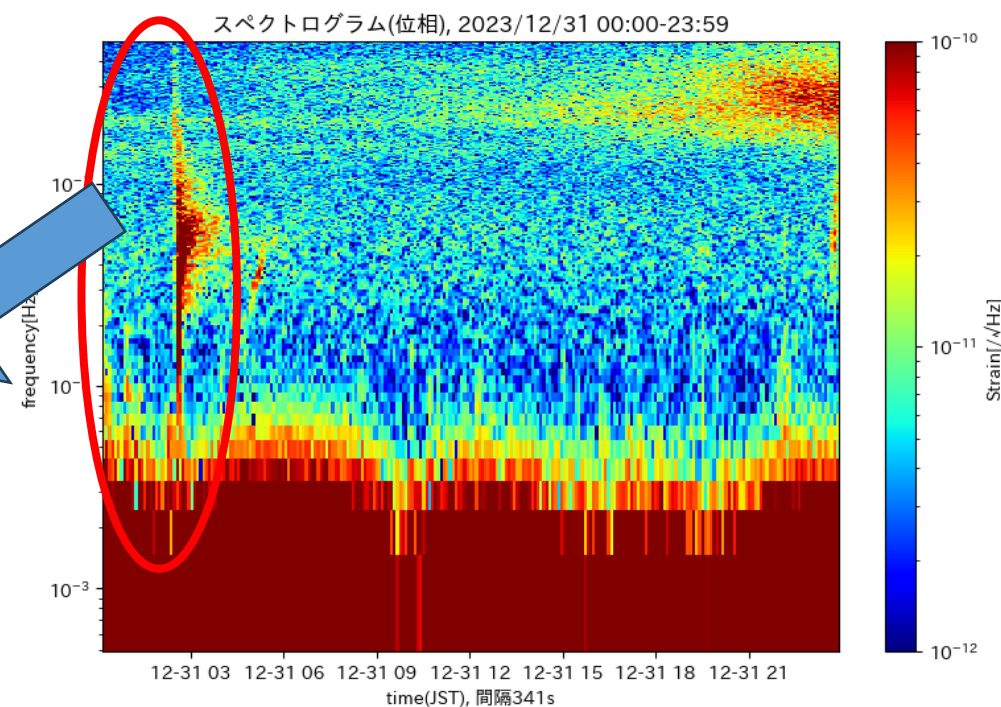
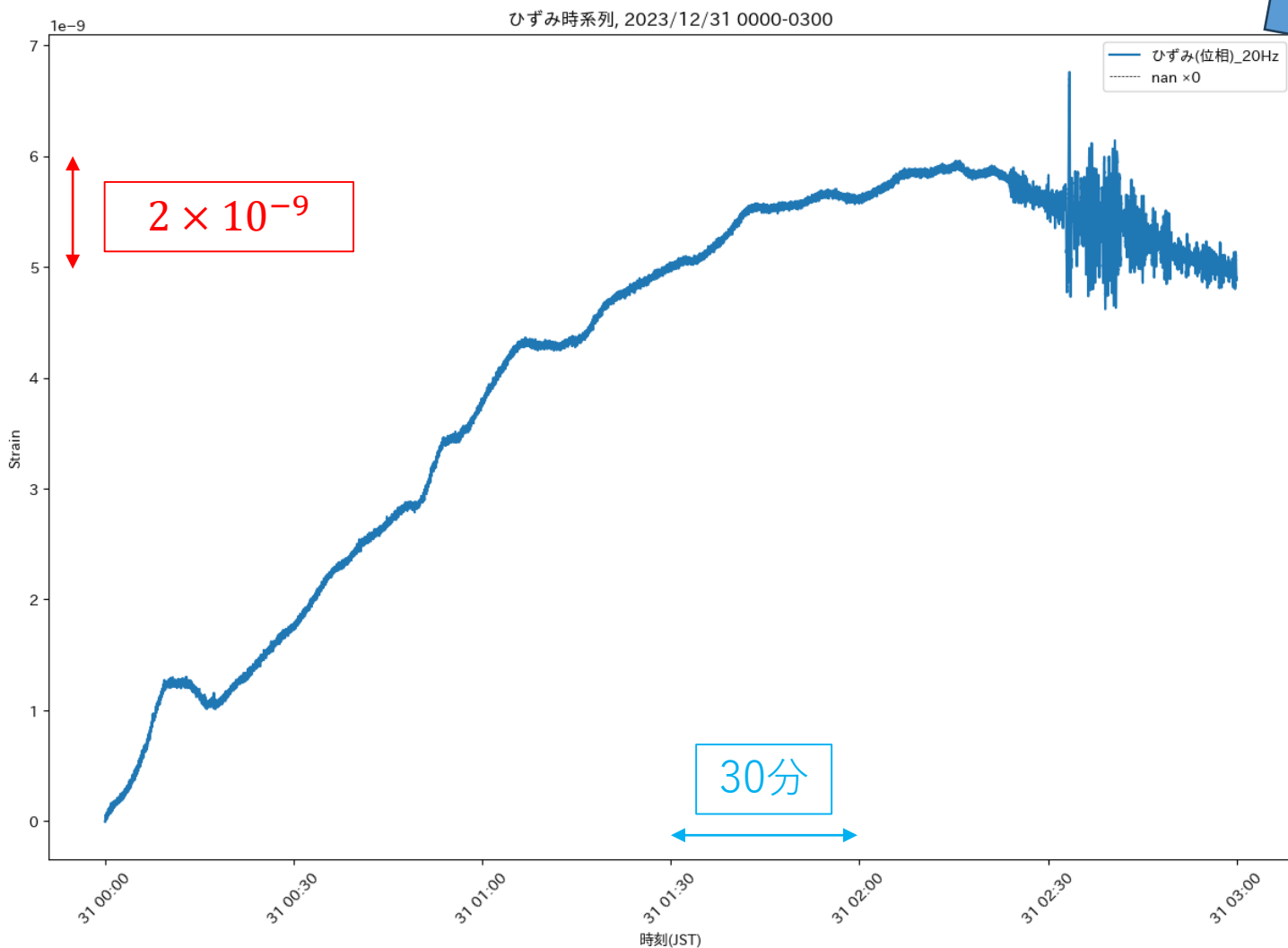


①:地震前 (10秒間)



②:揺れの最中 (0.2秒間)

# 遠地地震と不規則なひずみ変動 2023/12/31 0~3時



- 遠地地震は2:16  
Abepura西南西(インドネシア)M6.3
- 固体地球潮汐とは異なる長周期ひずみ変動を観測
  - ・・・気圧との関連性？