

低温レーザー干渉計CLIOによる重力波研究(VII)

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

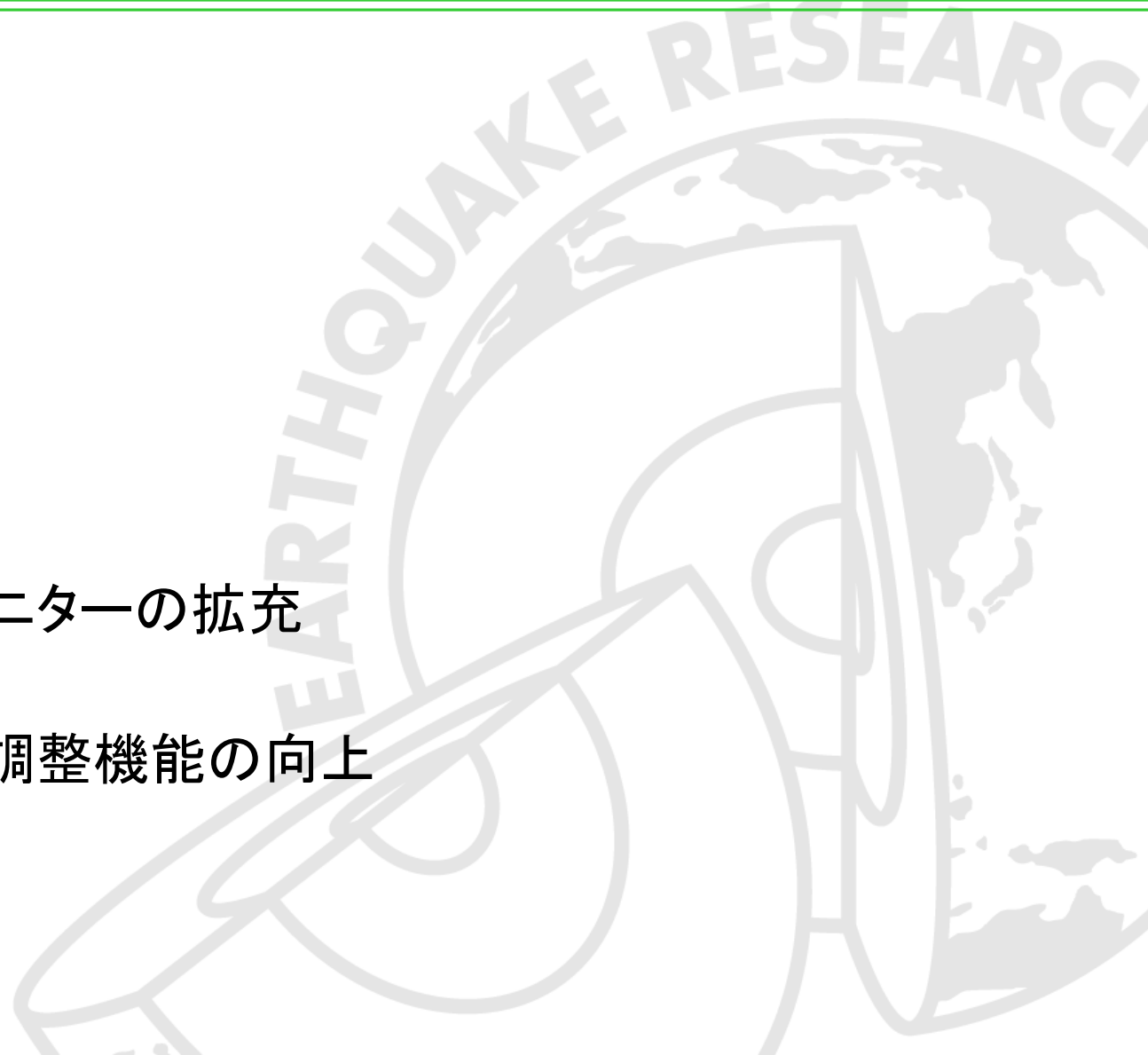
□ 神岡坑内での観測

- 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

- (1)2022年トンガ噴火・坑内環境モニターの拡充
- (2)能登群発地震の観測(2023)
- (3)2024年能登半島地震・リモート調整機能の向上
- (4)絶対重力測定

□ 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

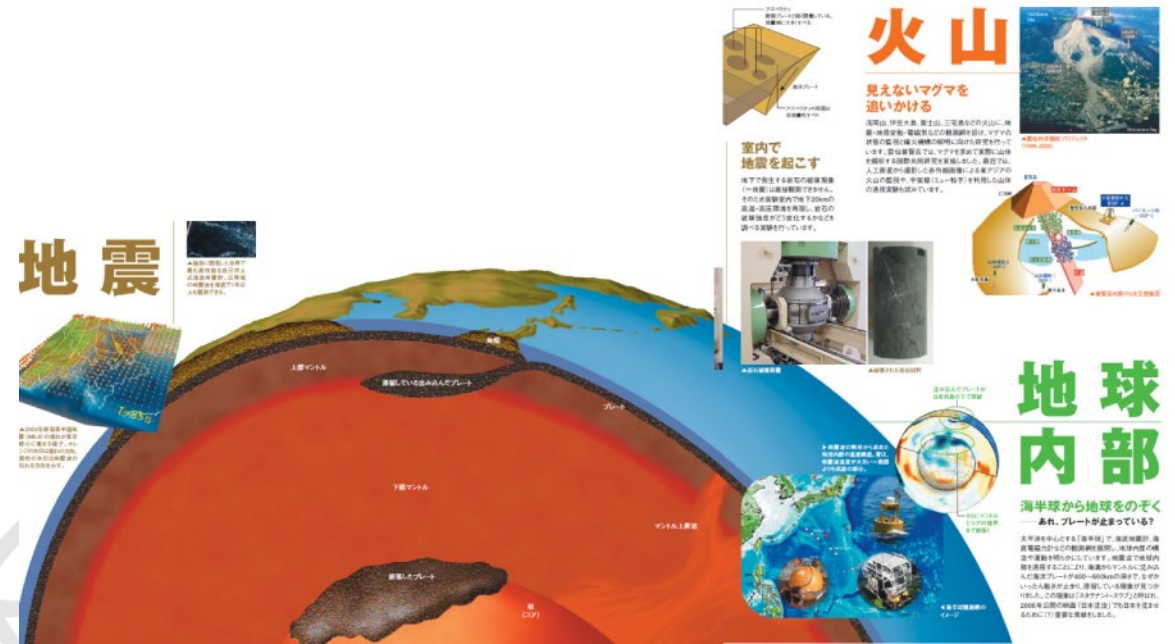
- 現象: 地震・地殻変動・自由振動・潮汐・火山活動など
- 観測手法: 地震波・地殻ひずみ・重力など

□ 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)

2023年度査定額:20万円(旅費として使用)

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

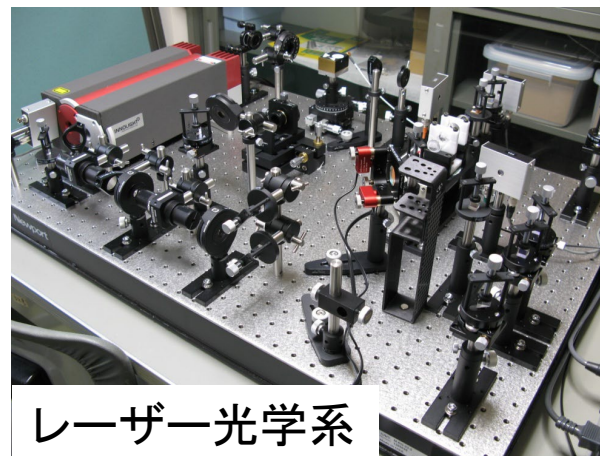
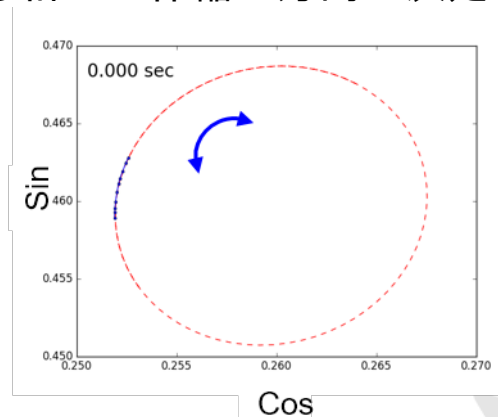
- ◆ レーザー波長 = 長さ基準: ひずみ分解能を決定
 - ヨウ素ガスの吸収線にレーザー波長を安定化
 - 10^{-13} 位の安定度 = ひずみ分解能

■ Quadrature phase detection

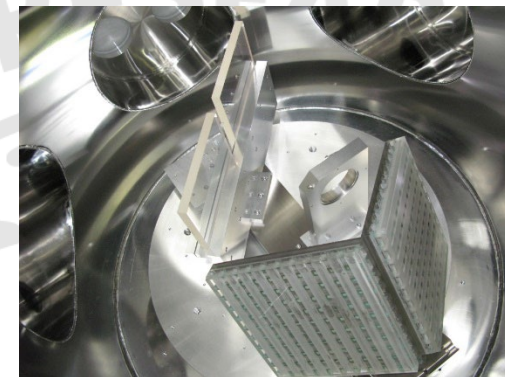
- ◆ 90° の位相差を持った2偏光を使用
 - リサージュ図形からレーザー光の位相変化を検出
cf. 無偏光型の干渉計では伸縮の方向は決定できない



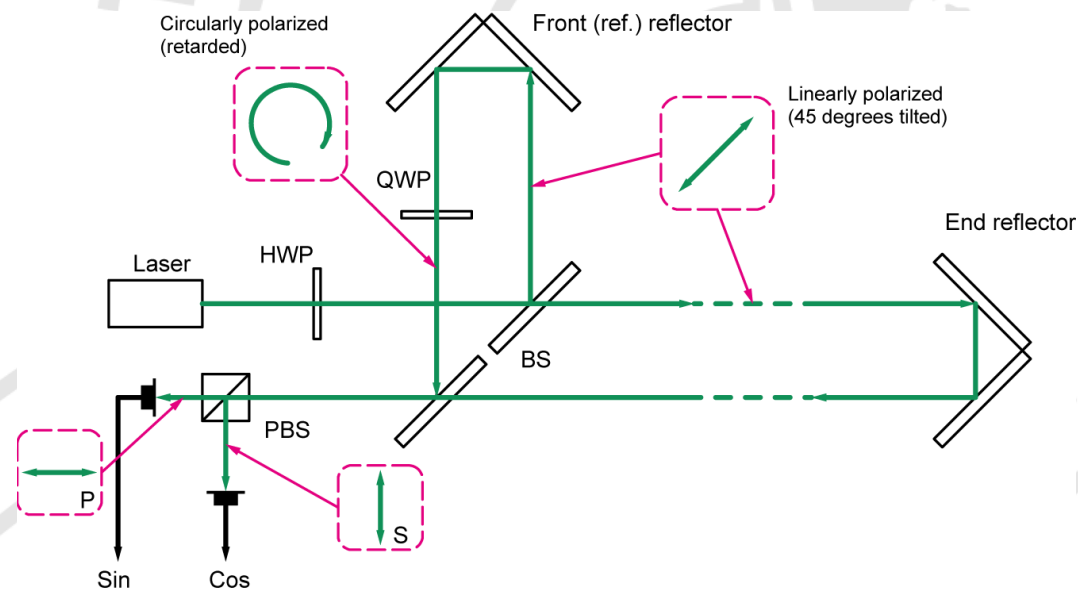
干渉縞



レーザー光学系



ビームスプリッタとリフレクタ



レーザーひずみ計による地殻変動観測

□ 観測・データ処理の流れ

■ 周波数安定化レーザーの波長を基準に地面の伸縮を観測

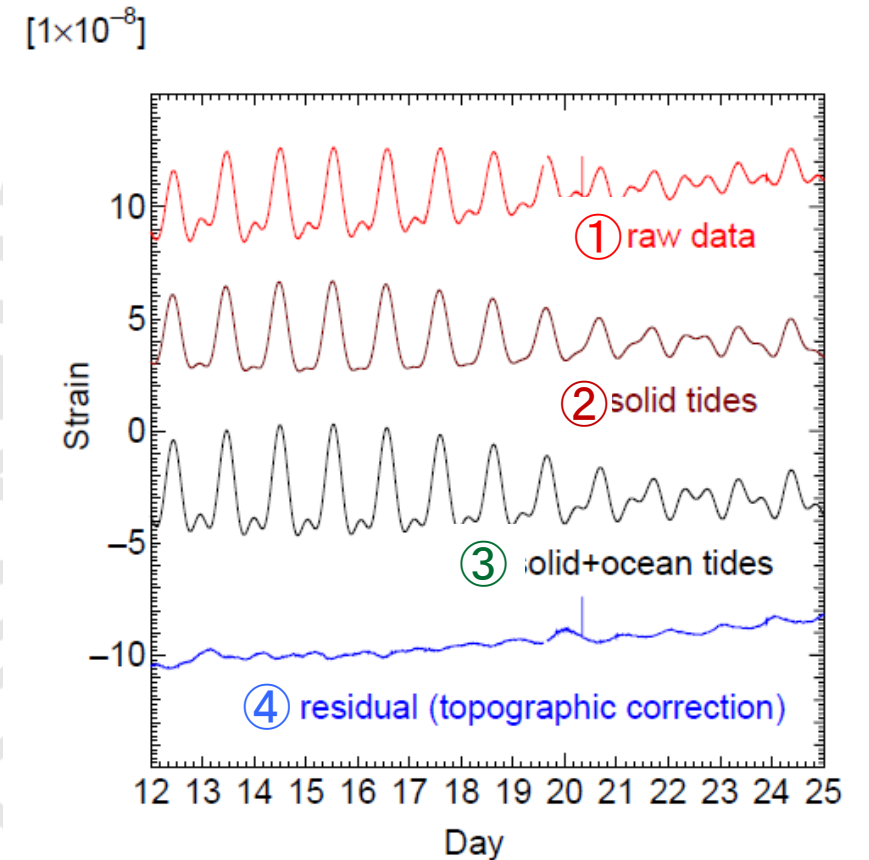
観測データ: 潮汐成分が卓越①

グローバルなモデルによる補正 (GOTIC2)
(個体地球潮汐② + 海の荷重効果③)

ローカルな地形効果による補正④

⇒ 潮汐成分はほぼ除去 (精度5%以内)

残差より、地殻変動や地震の余効変動を観測・定量化



国内のレーザーひずみ計

□ 中部地方の2箇所で観測中

■ 愛知県犬山市

◆ 基線長30 m

◆ 名大観測所, 2002年～

■ 岐阜県飛騨市神岡町

◆ CLIO: SK坑内, 基線長100 m (2台), 2003年～

◆ GIF: KAGRA坑内 (1成分), 基線長1.5 km, 2016年～

□ 2023年まで稼働

■ 静岡県浜松市天竜船明→2023年11月に停止

◆ 旧国鉄船明トンネル内, 基線400 m

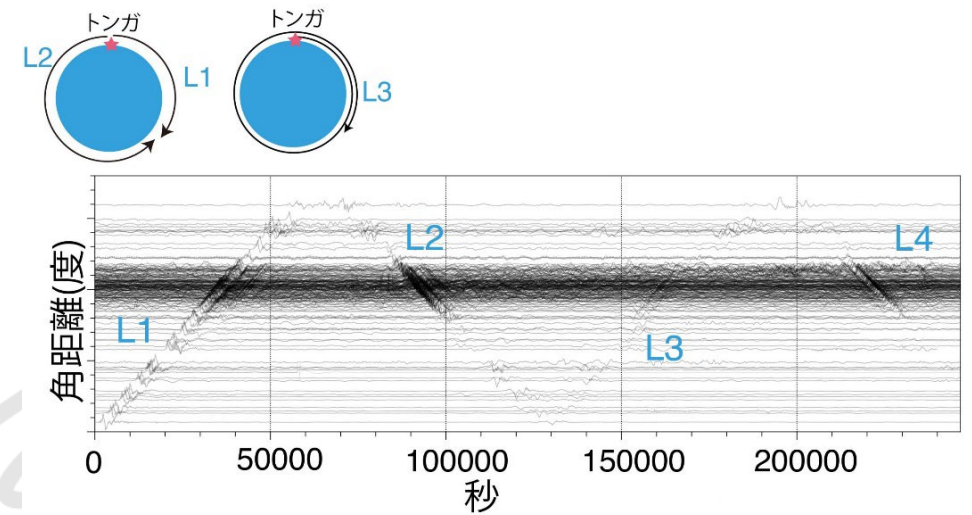
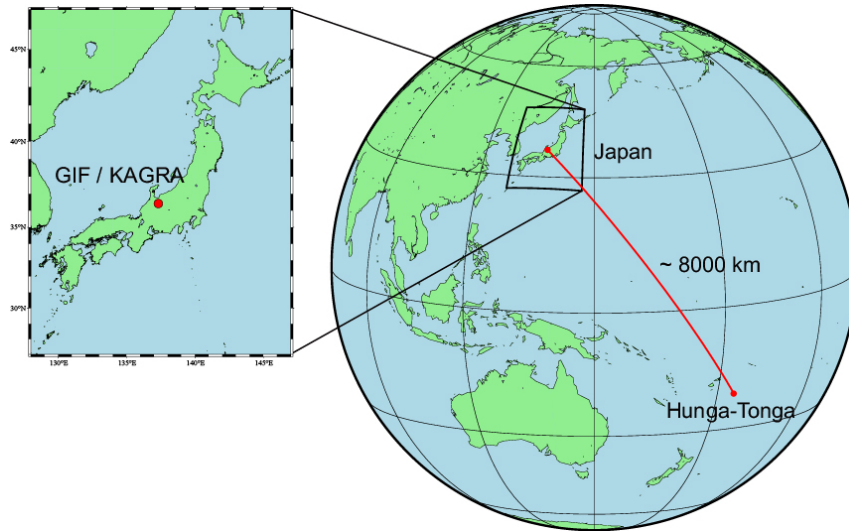
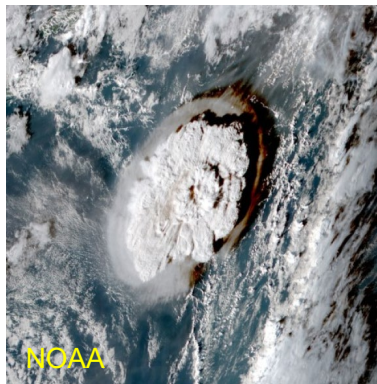
◆ 移転・代替施設を検討



研究報告(1)

□ 2022年トンガ海底火山噴火に伴うひずみ変化の観測

- 2022年1月15日 4:14 (UTC)頃、フンガ・トンガ海底火山が噴火
 - ◆ 地震、津波、気圧、磁場変動、インフラサウンドなどが地球規模で発生
 - KAGRA (GIF) の環境センサーによる観測 (Washimi 2022)
 - ◆ 大気Lamb波が地球を周回
 - GIF: 気圧変動によるひずみ変化を観測

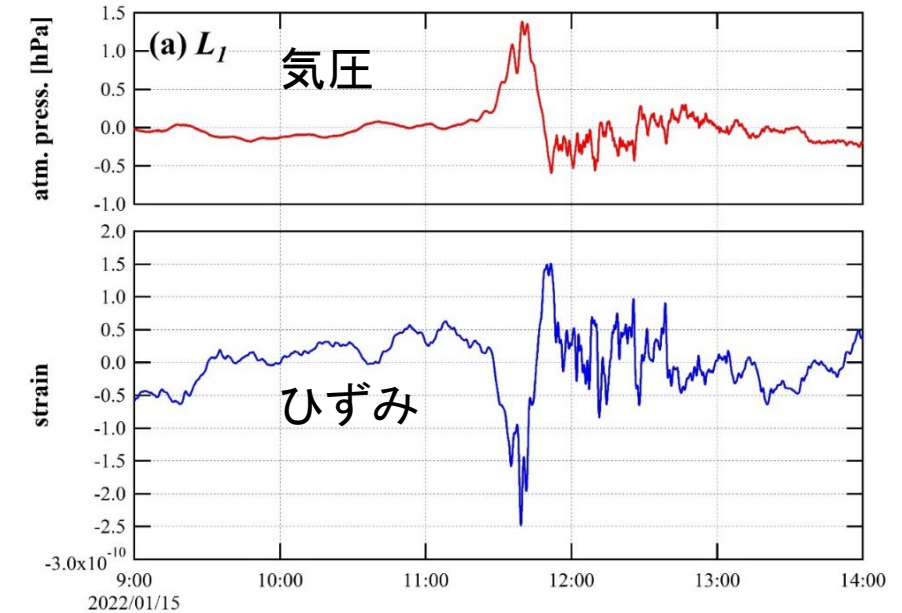


西田 (2022)

研究報告(1)

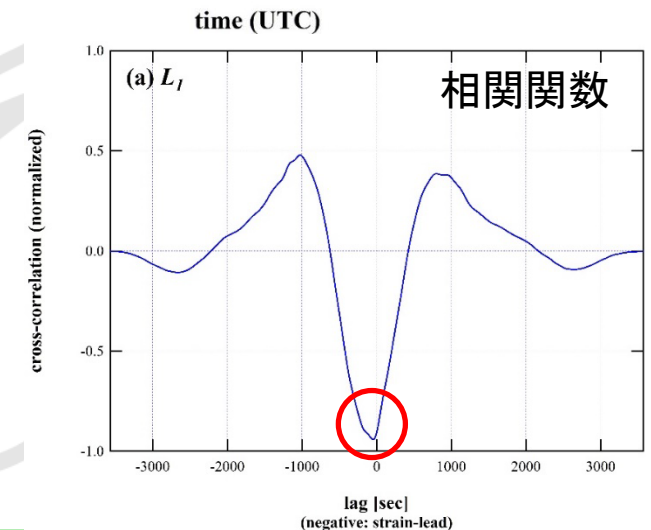
□ Lamb波の大気荷重によるひずみ変化

- 気圧変化: ~ 2 hPa
- 応答係数: $-(2.3 - 3.7) \times 10^{-10}$ str/hPa
 - ◆ 通常の気圧変化($\sim -5 \times 10^{-10}$ str/hPa)の約半分
- 気圧とひずみ変化の時間ずれ
 - ◆ 相関関数のピーク(155–25秒): ひずみが先行
 - ◆ 通常の気圧変化でも同様の傾向



□ 気圧の影響を再評価

- 数mHz以下での主要雑音源
- Lamb波観測により得られた新たな知見
 - ⇒ 気圧観測態勢の強化
今年度はKAGRA Yアーム坑内に観測点追加
 - 理論モデルの構築



研究報告(2)

□ 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

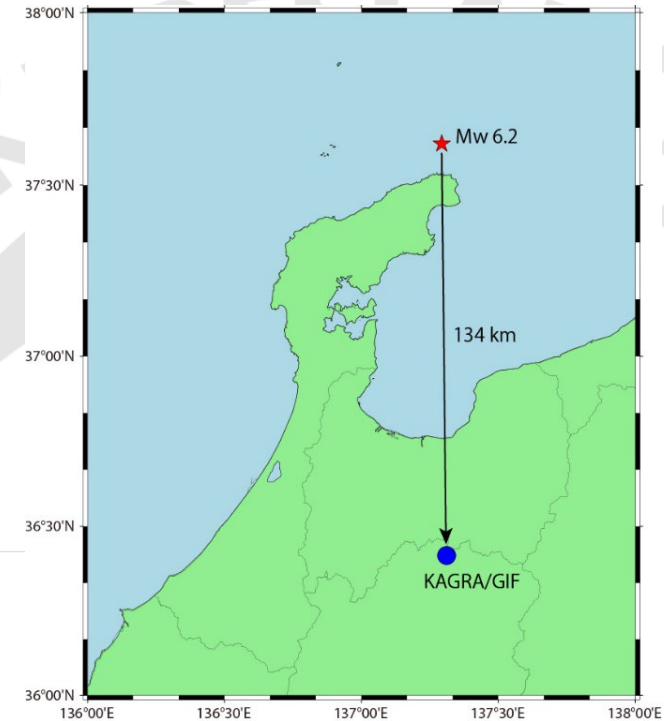
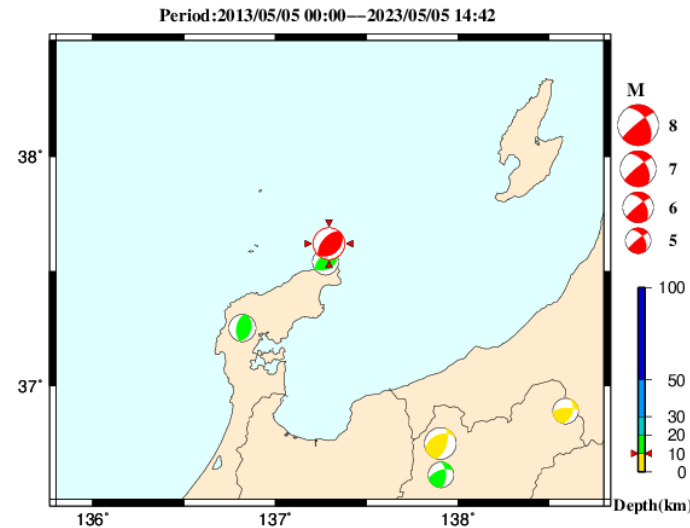
周辺のCMT解

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

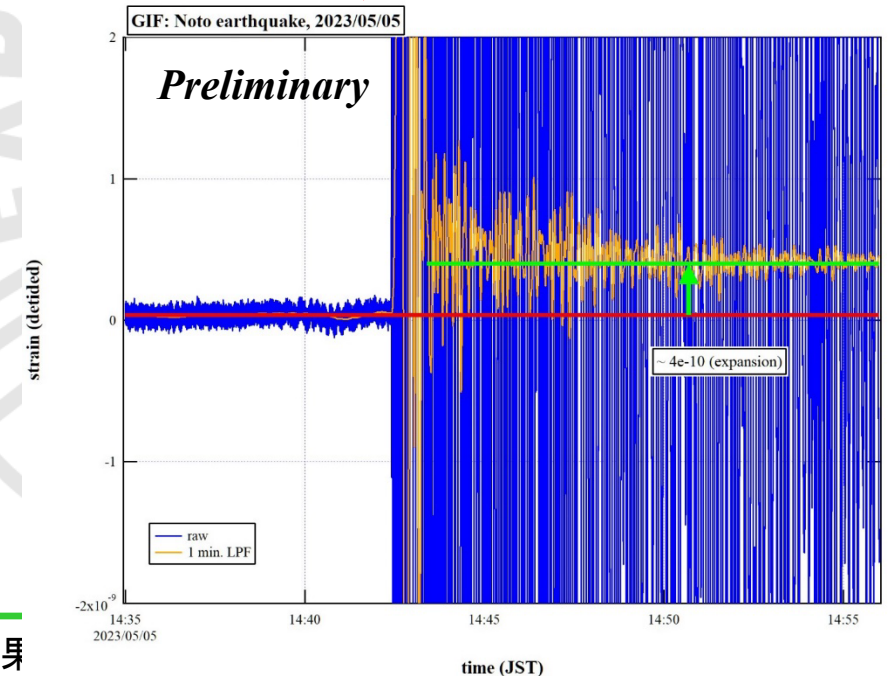
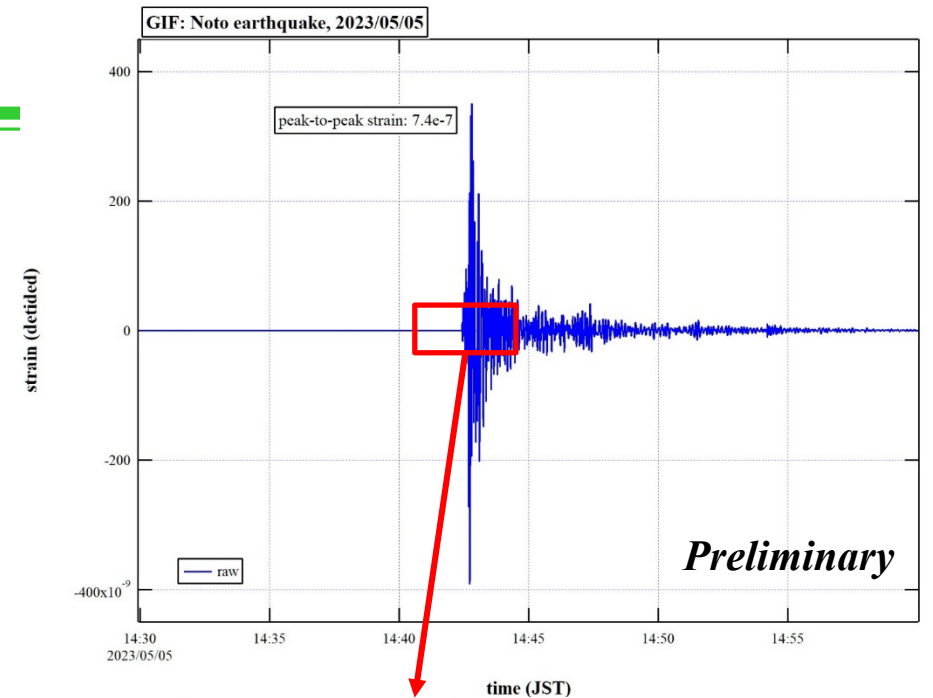


研究報告(2)

□ GIFによる観測(暫定値)

- 大振幅のひずみ波形を観測
 - ◆ 7.4×10^{-7} pp(飽和や不連続点なく観測)
- ひずみステップ
 - ◆ 観測値: $\sim 4 \times 10^{-10}$ (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



研究報告(3)

□ 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

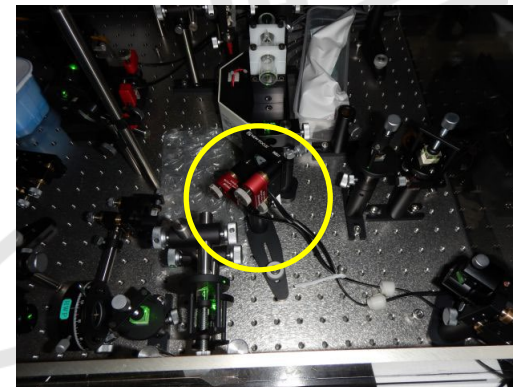
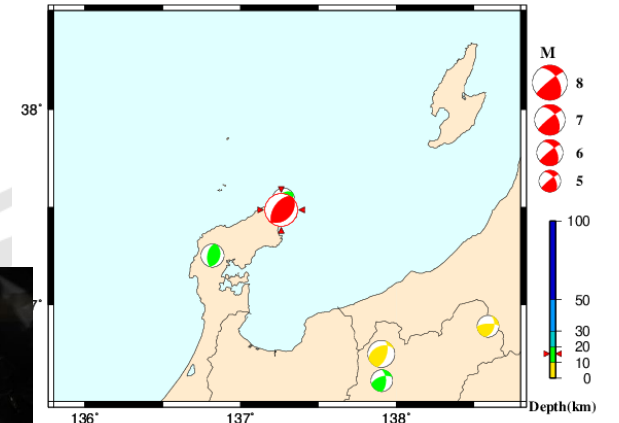
セントロイド時刻とセントロイド位置およびモーメントマグニチュード

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

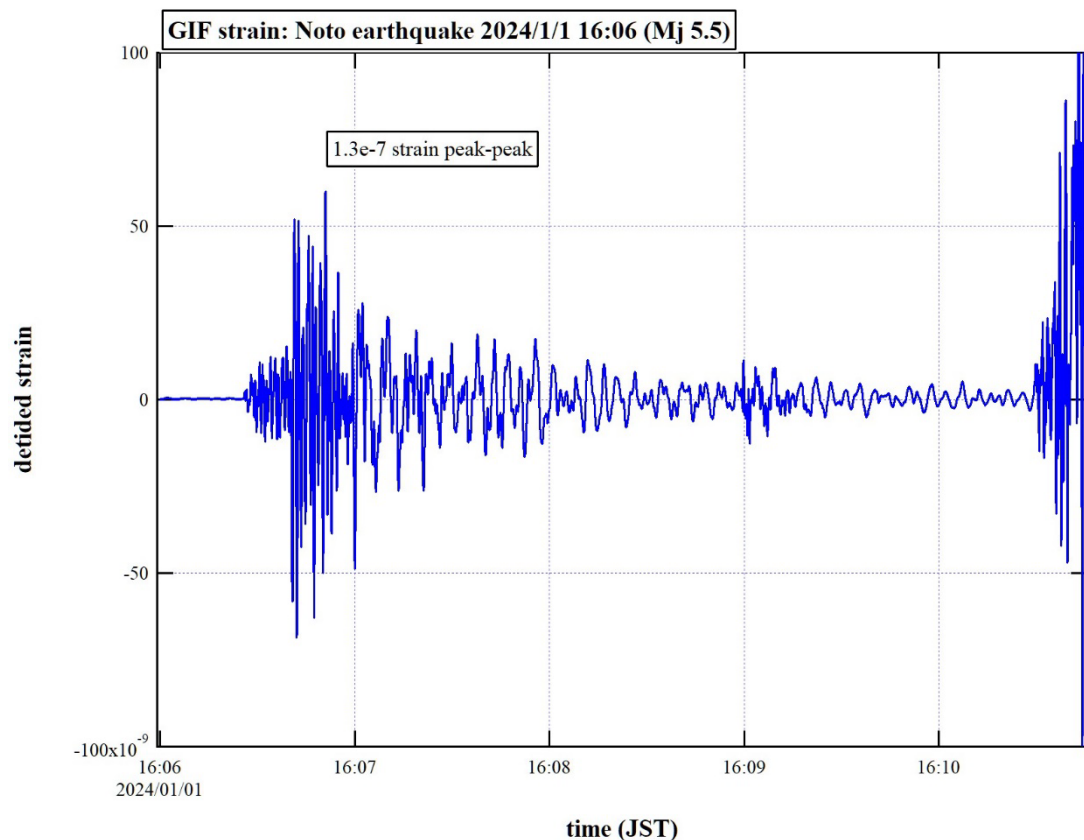
Period:2014/01/01 00:00—2024/01/01 16:10



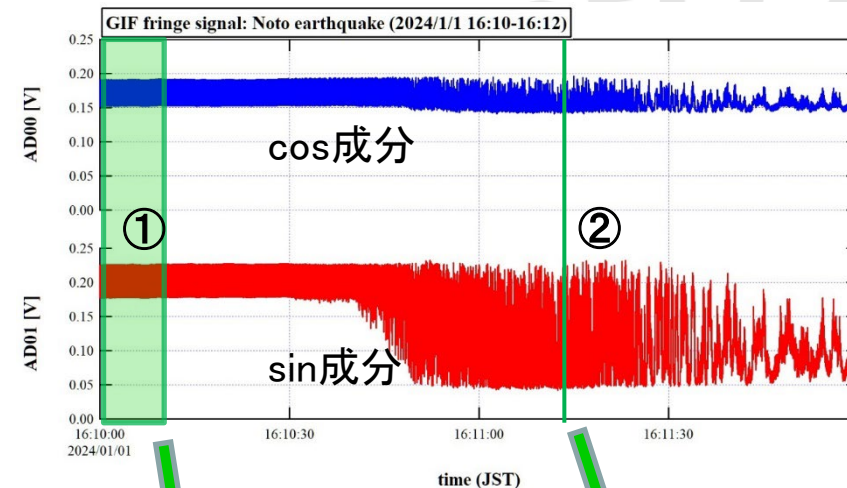
研究報告(3)

□ 2024年能登半島地震

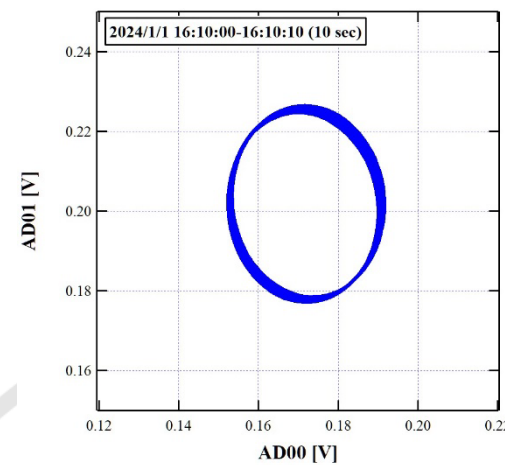
- GIF: 前震の観測と干渉の消失
- ◆ $\sim 1.3 \times 10^{-7}$ pp (連続的に観測)



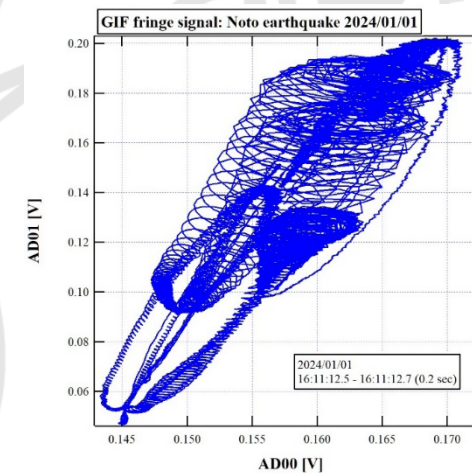
これ以降フリンジ消失



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)

研究報告(3)

□ 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

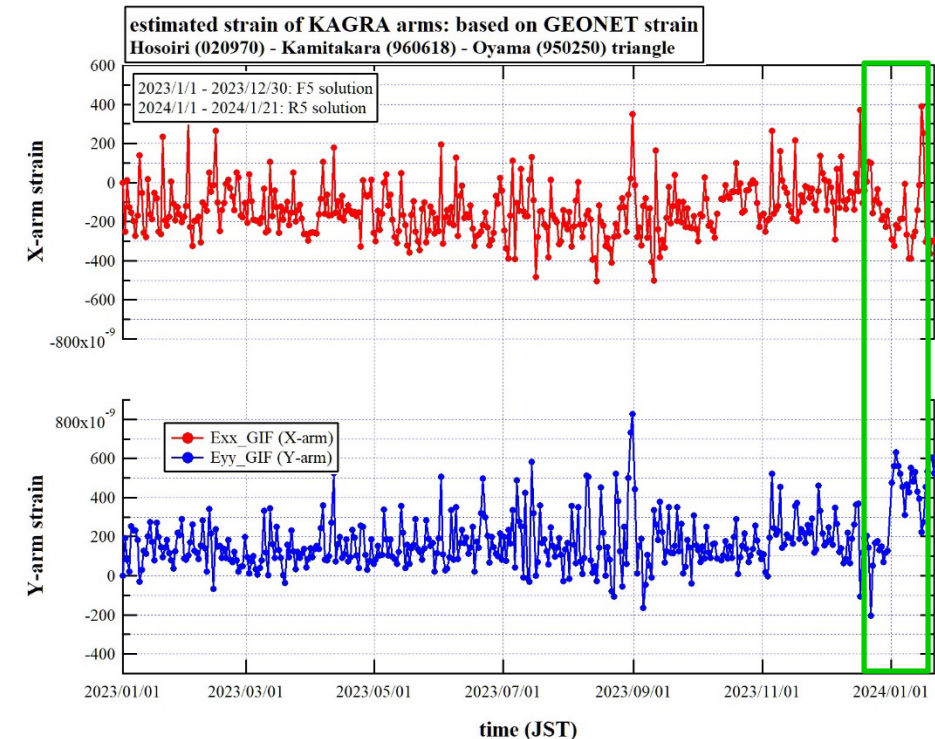
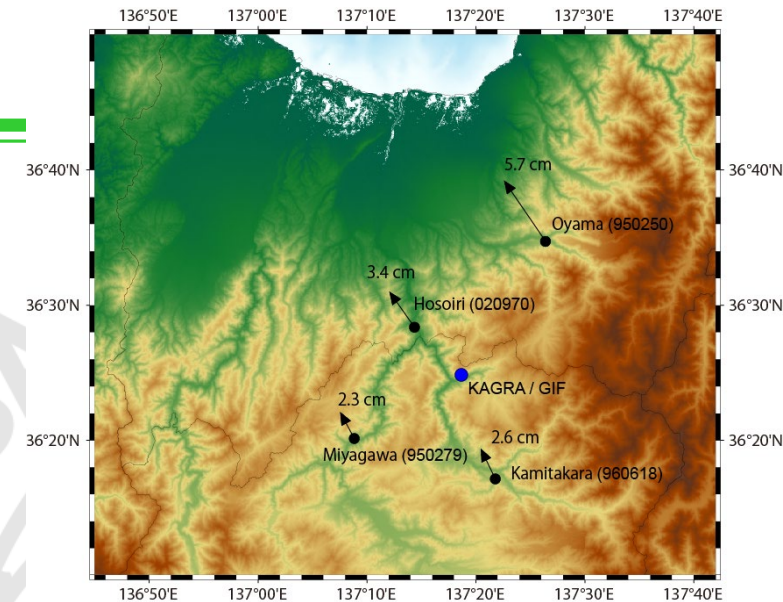
- 神岡周辺の電子基準点4カ所の変位から推定
- 各点2-6 cm程度北西に変位
- 一様な変形を仮定

◆ 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)



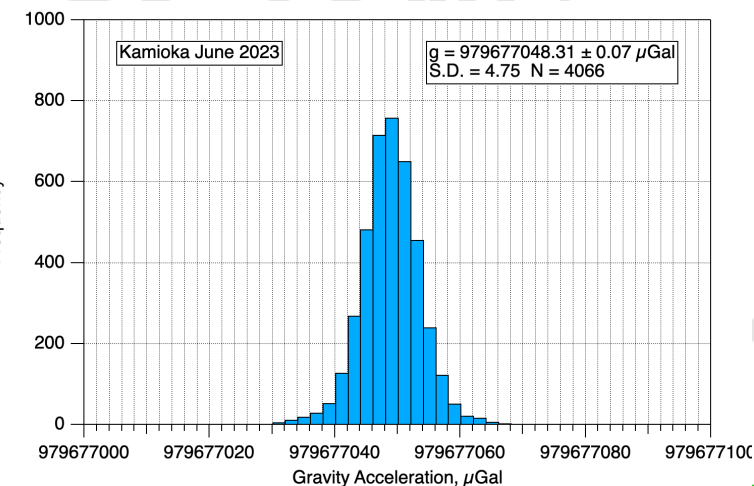
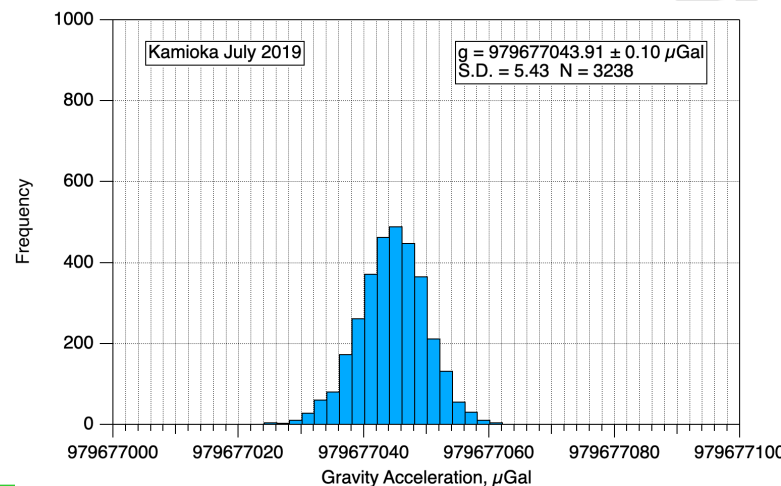
研究報告(4)

□ 絶対重力測定

- 2023年6月27-29日、旧重力観測点(Lab-B内)で実施(4年ぶり)
- FG5絶対重力計
 - ◆ 他、シントレックスCG-3M重力計により重力鉛直勾配も測定

□ 測定結果

- 2019年と比較して約 $4\mu\text{Gal}$ の重力増加
 - ◆ 2011年東北地震発生後の急激な重力減少は収まり、一定レベル(あるいは増加傾向)に達したか?
 - ◆ 今後も同様の測定を行なって、巨大地震後の粘弾性緩和の過程を追跡していきたい



今後の計画

- CLIO, GIFのレーザーひずみ計同時長期観測
 - 能登半島地震の余震、ひずみ変化の観測
 - 長期的な地殻変動観測を継続
 - ◆ 課題: CLIOの観測効率向上

- 大気荷重によるひずみ変化のメカニズムの研究
 - 観測と理論モデルの両面からアプローチする

- 絶対重力計測を継続
 - 能登半島地震の影響評価
 - 長期地殻変動の計測を随時実施

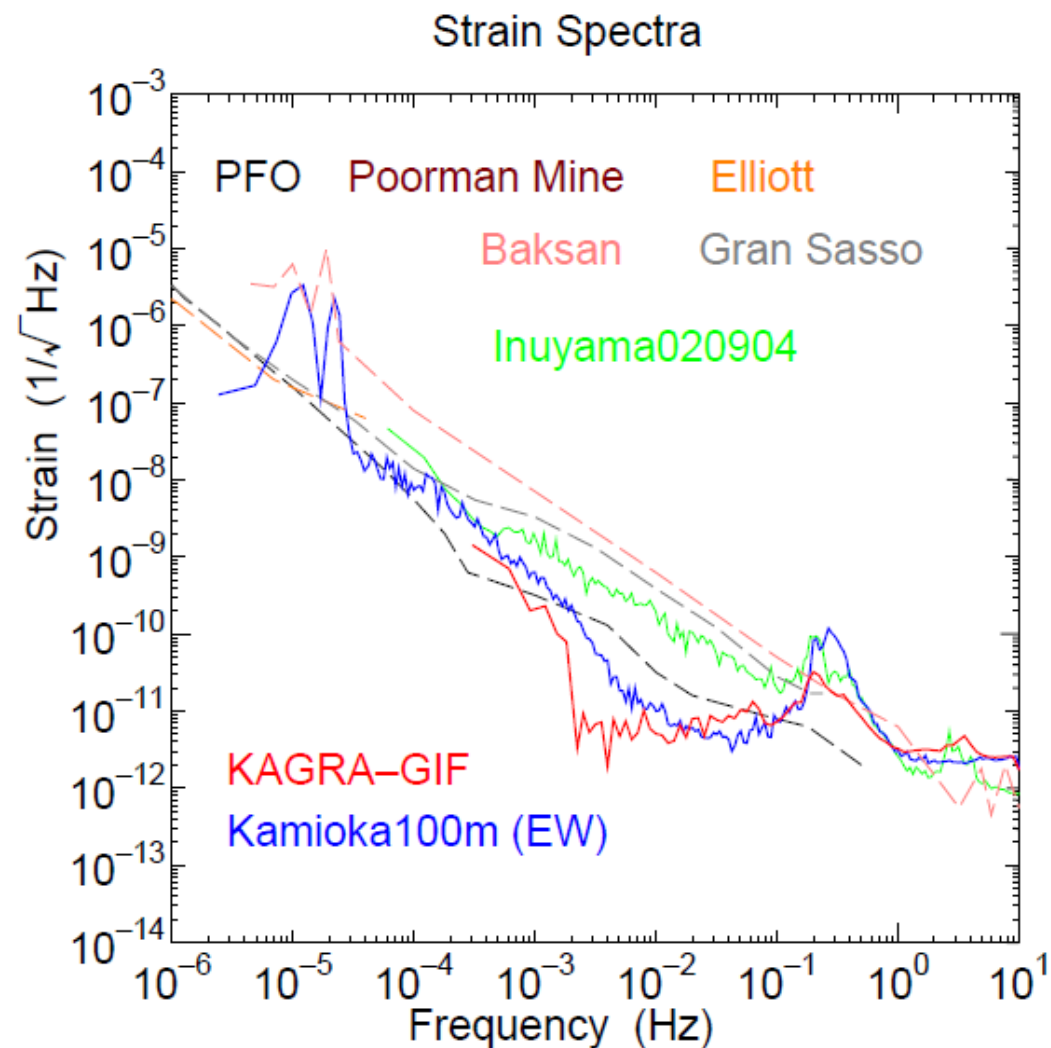
補足資料



レーザーひずみ計の分解能

□ バックグラウンドのスペクトル

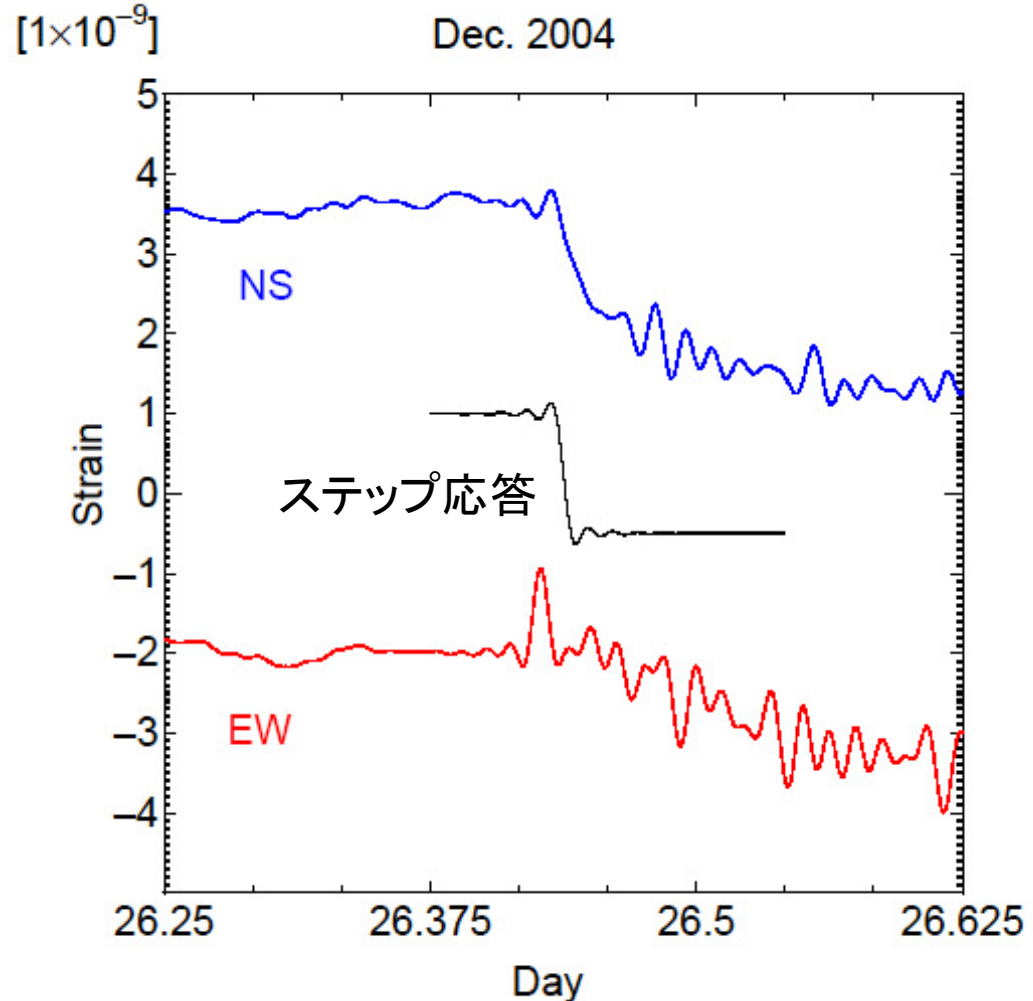
- 他のレーザーひずみ計と比較
- GIF: 1-10 mHz帯で最高感度を達成



遠地地震に伴うひずみステップ

□ スマトラ地震(2004)で観測されたひずみ

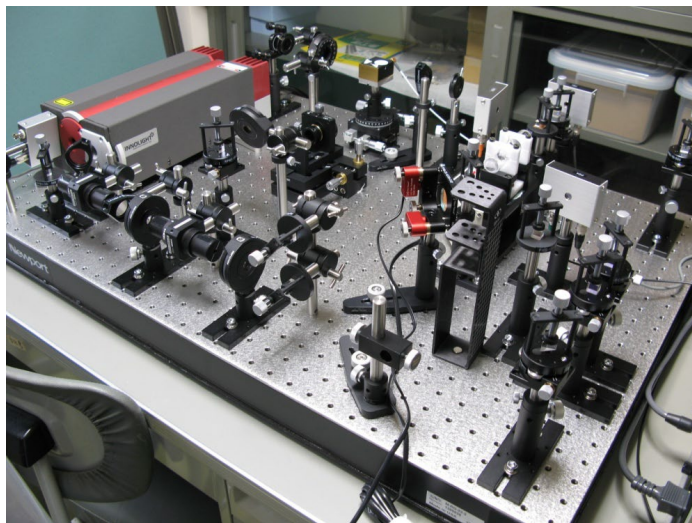
- 地震波除去
 - ◆ 1000秒LPF
- NS成分
 - ◆ -1.5×10^{-9} のステップ
 - ◆ ゆっくり変動(~1 hour)
- EW成分
 - ◆ 明瞭なステップなし
 - ◆ ひずみ上限値 0.2×10^{-9}



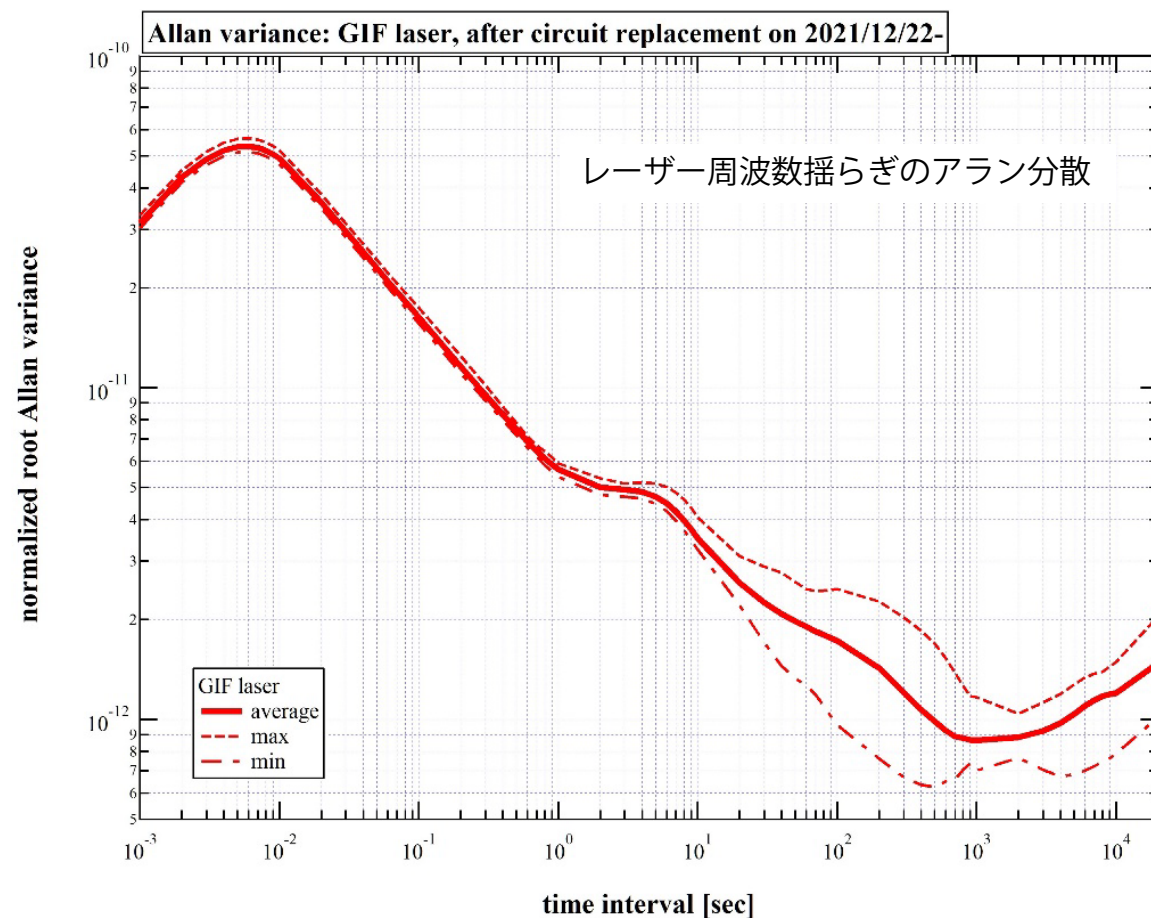
レーザー周波数の安定度評価

□ 周波数安定化レーザー

- 周波数基準:ヨウ素ガスの超微細構造による吸収線
 - ◆ 安定な量子基準
- 周波数安定度 = 歪み分解能
 - ◆ 観測中にレーザー周波数安定度を評価
 - ◆ 1秒以上で定常的に 10^{-12} 台の安定度を維持



周波数安定化レーザーの光学系



GIFの気圧応答

□ 気圧とひずみの逆相関

- 0.1 – 数 mHz の周波数帯域で相関

- ◆ 波形(逆相関)、スペクトル形の類似性 (Akutsu 2021)

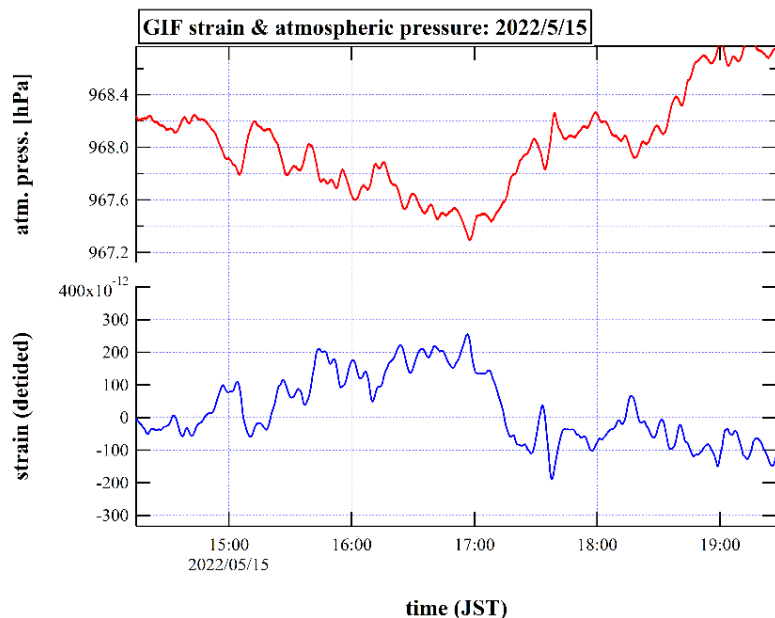
- ◆ 応答係数: $(-4.8 \pm 0.5) \times 10^{-10}$ [/hPa]

(※ 2017/10 – 2022/09から4日選んで解析)

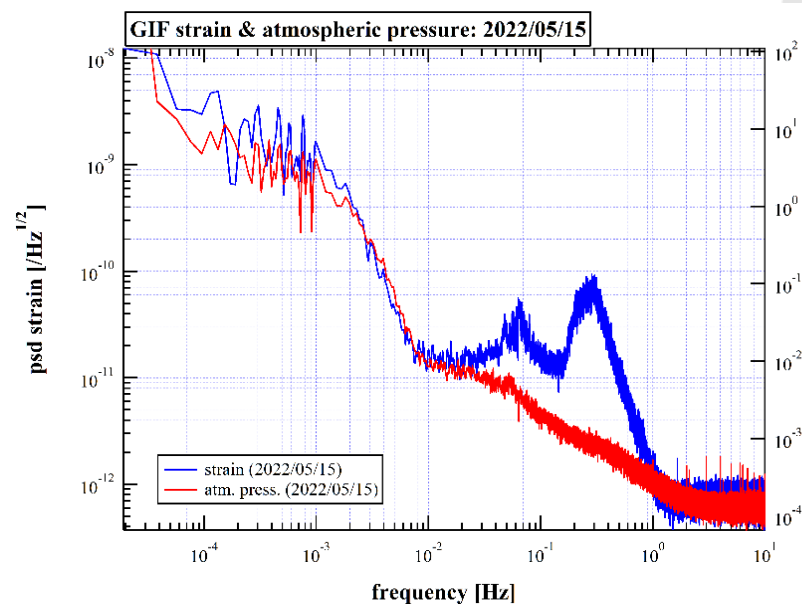
- 一様弾性モデルと整合的(絶対値はやや大きくなる傾向)

- 時期による変動あり

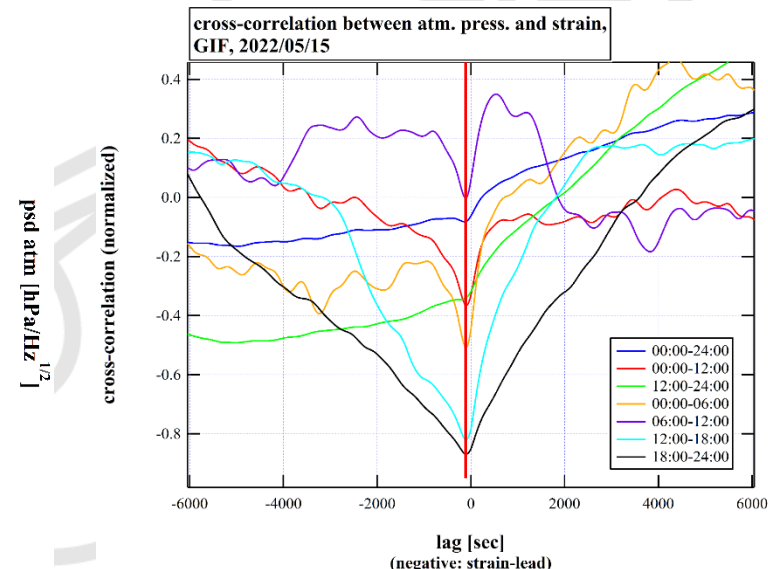
- ◆ 時刻のずれ(ひずみが先行)



気圧 (上) とひずみ (下) の時系列



スペクトル (赤: 気圧, 青: ひずみ)



相関関数