

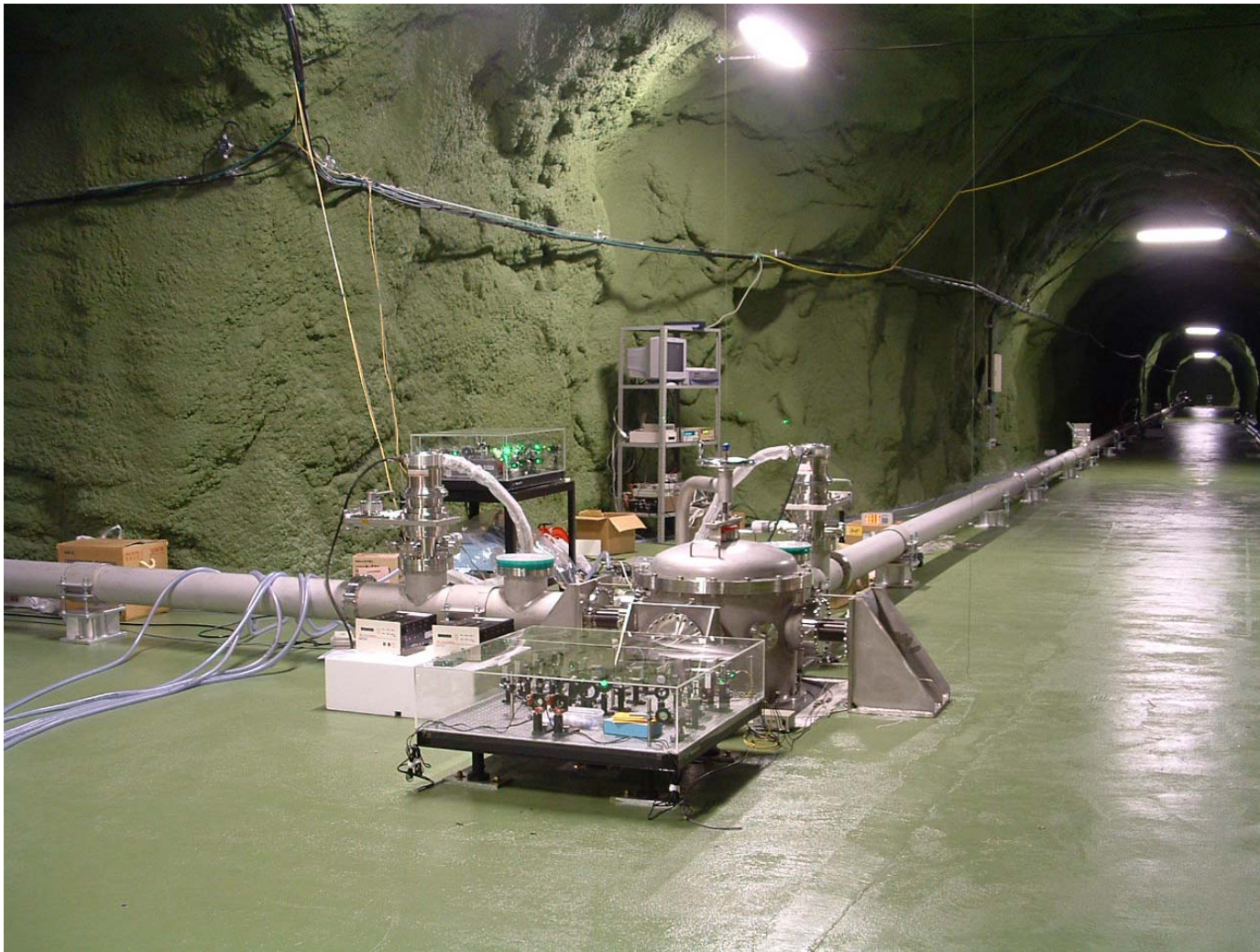
レーザー伸縮計による地震・地殻変動観測

新谷昌人（東京大学地震研究所）

- ・ レーザー伸縮計の概要
- ・ 地震に伴う地殻変動の観測
- ・ まとめ



神岡100mレーザー伸縮計



神岡のメリット

- ・深地下空間(1000m)

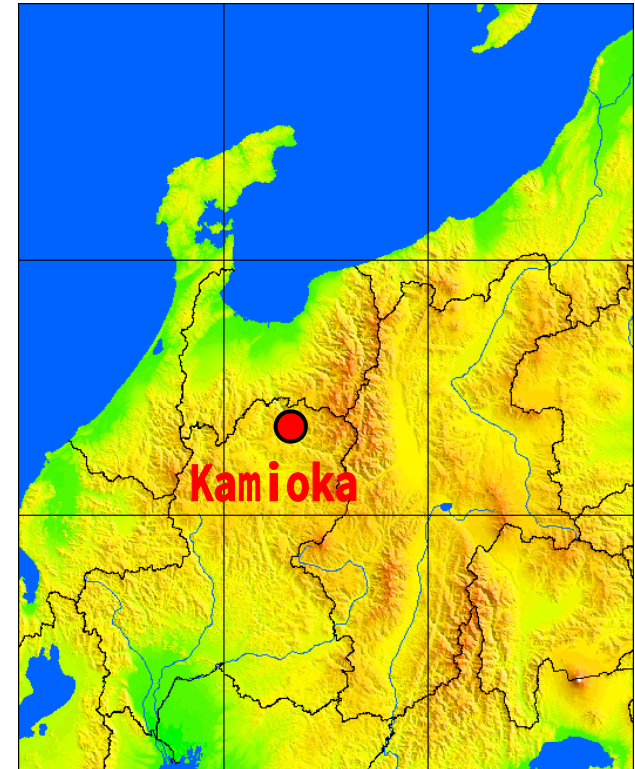
- 遮蔽性**

- 地表ノイズ(気温、地面振動、降雨、
地下水、**宇宙線**、、、)

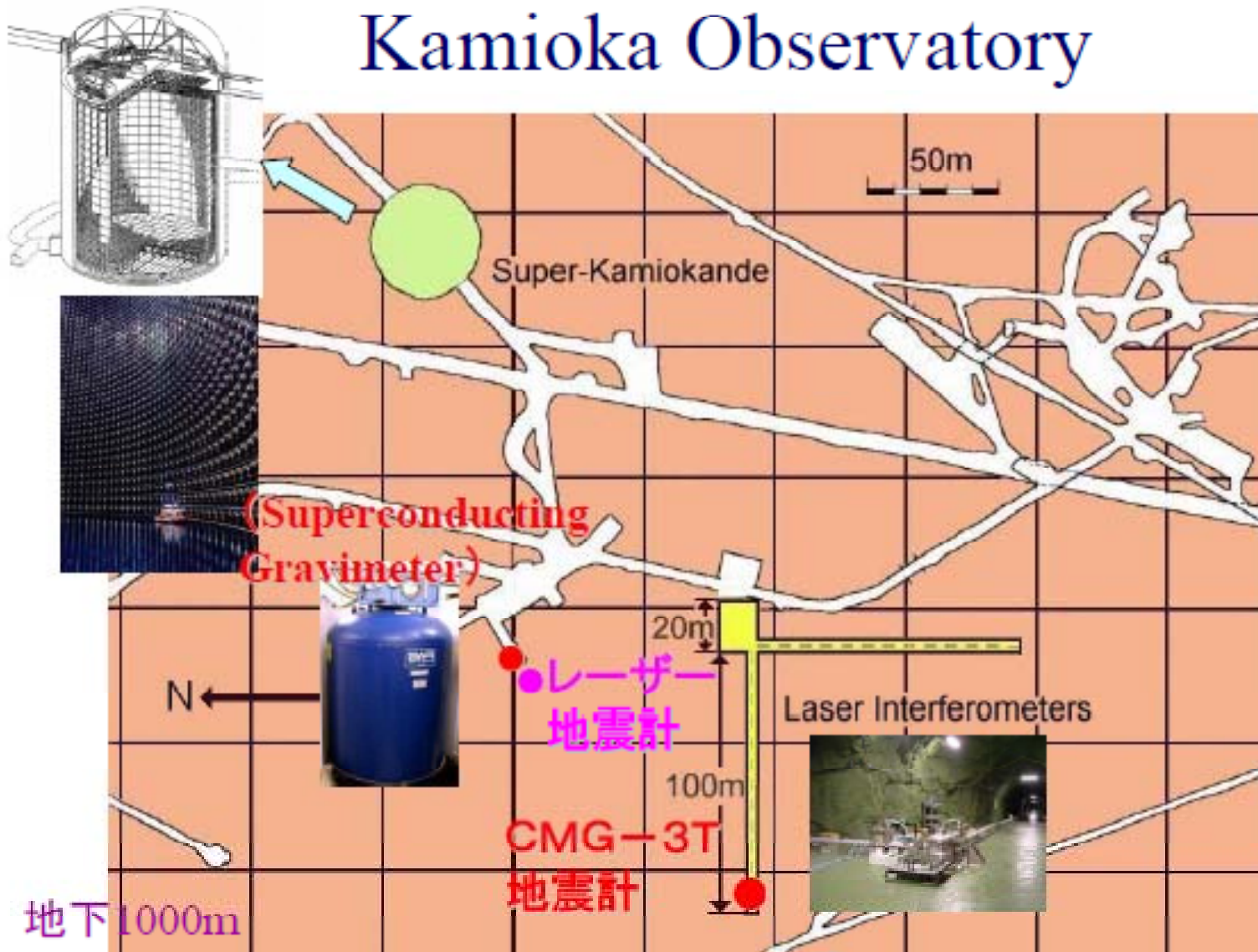
- 強固な岩盤(飛騨片麻岩)**

- 精密計測、テストサイト

- ・跡津川断層近傍 クリープ断層の観測



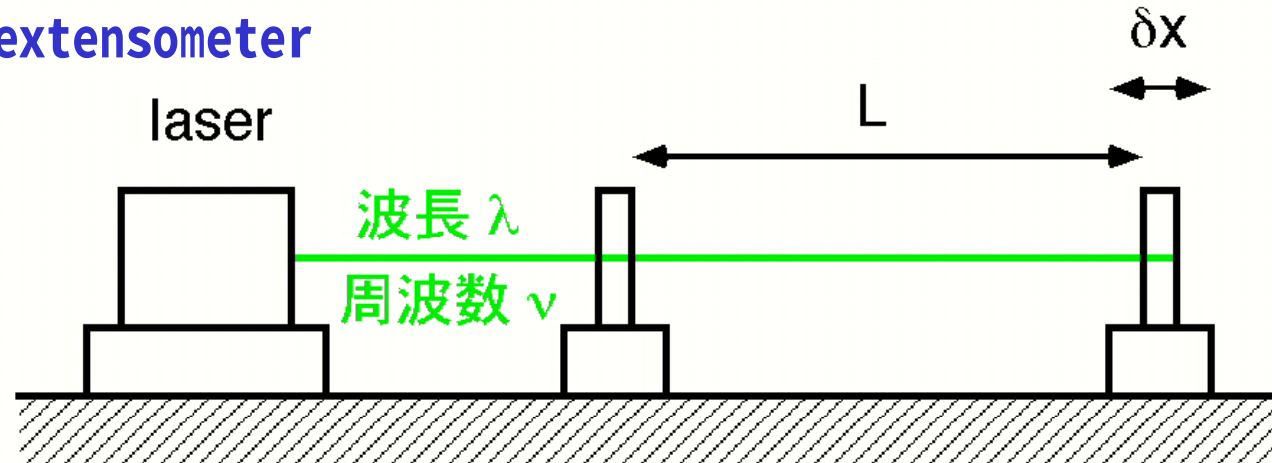
Kamioka Observatory



レーザーひずみ計、超伝導重力計、地震計、およびスーパーカミオカンデ（地下1000m）

レーザー伸縮計 (Vali et al., 1965)

Laser extensometer



検出位相量 : $\phi = 2k(L + \delta x)$
($k = 2\pi/\lambda$)

ひずみ量 : $\varepsilon = \delta x / L = \frac{\delta \nu}{\nu}$
波長安定化

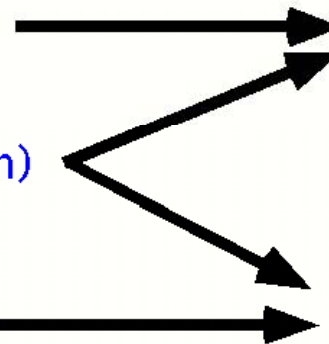
→ $\sim 10^{-13}$

レーザー干渉計のメリット

・ 速い応答特性
Rapid response

・ 長基線化可能 ($\sim 1000\text{m}$)
Long baseline

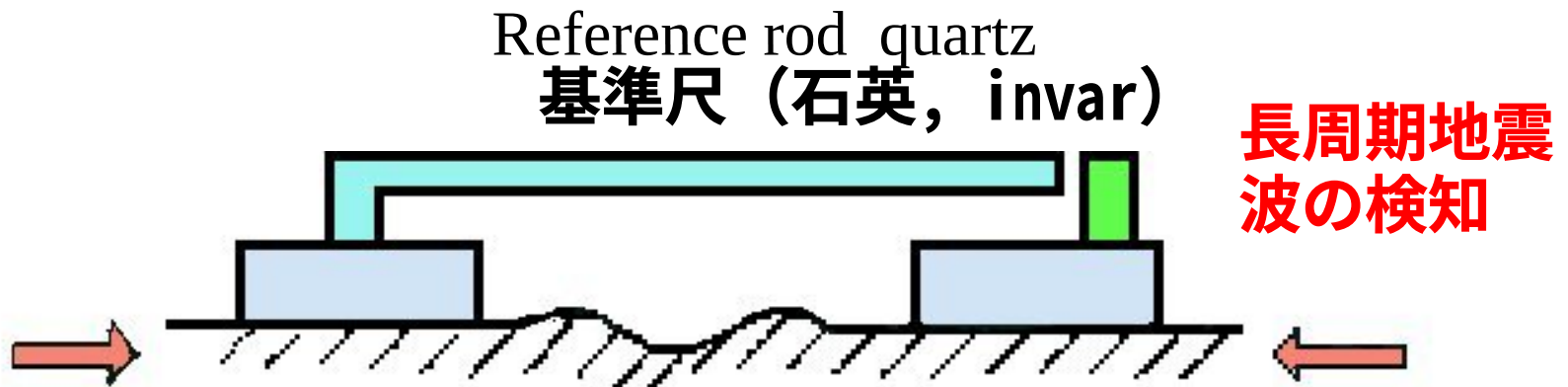
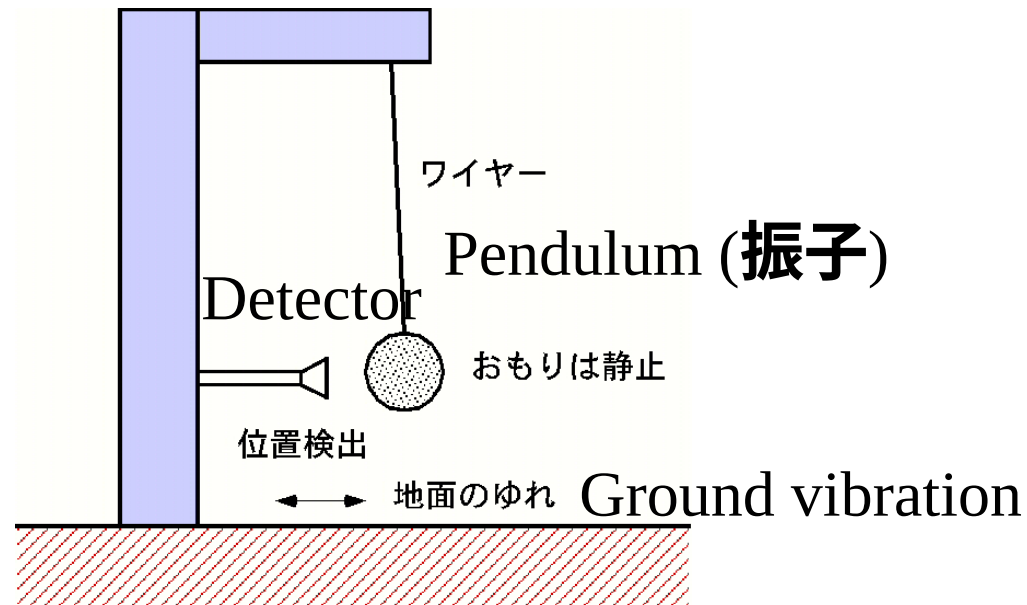
・ 長期安定性
(波長安定化レーザー)
Low drift



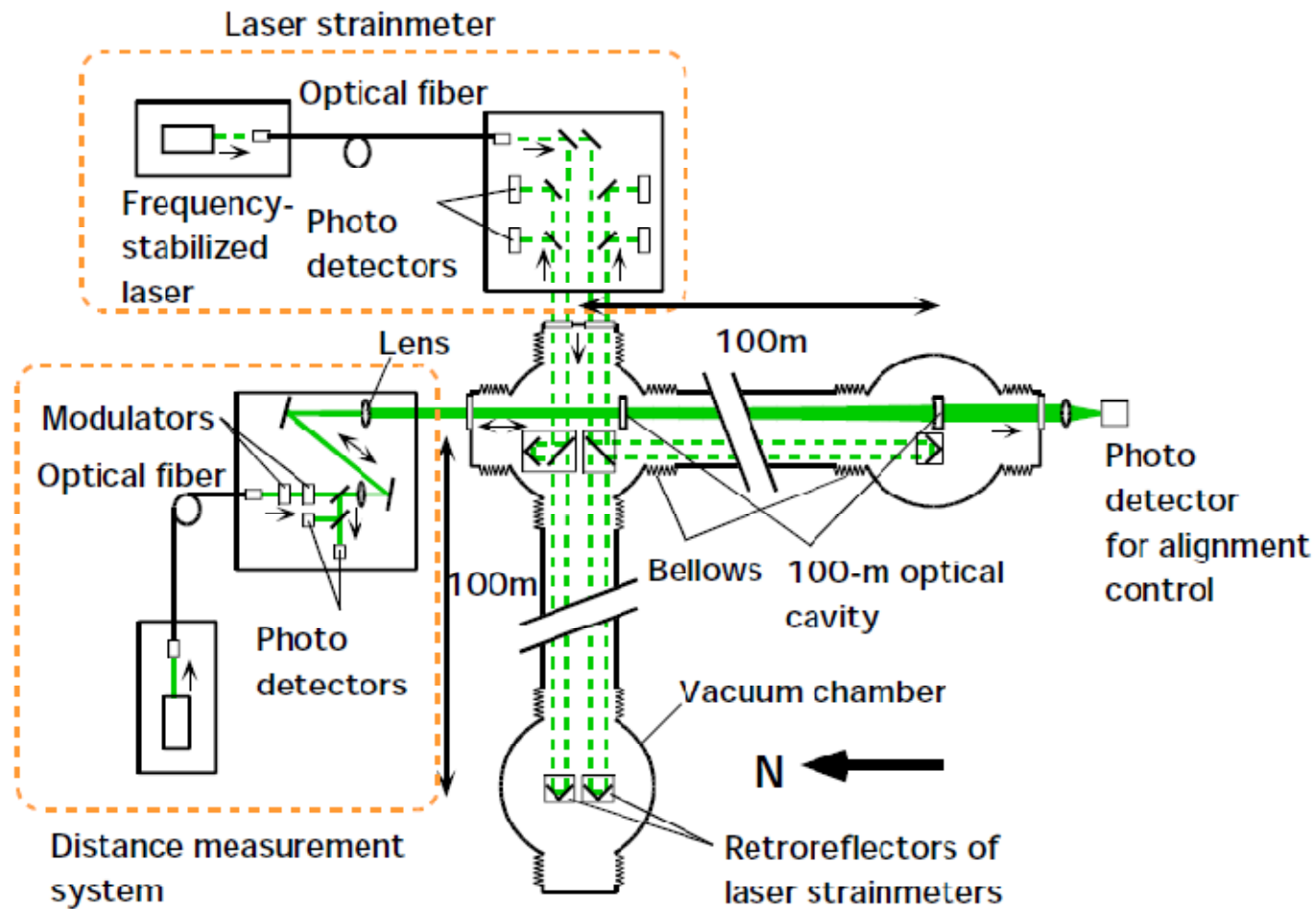
高感度広帯域地震計
Strain seismometer

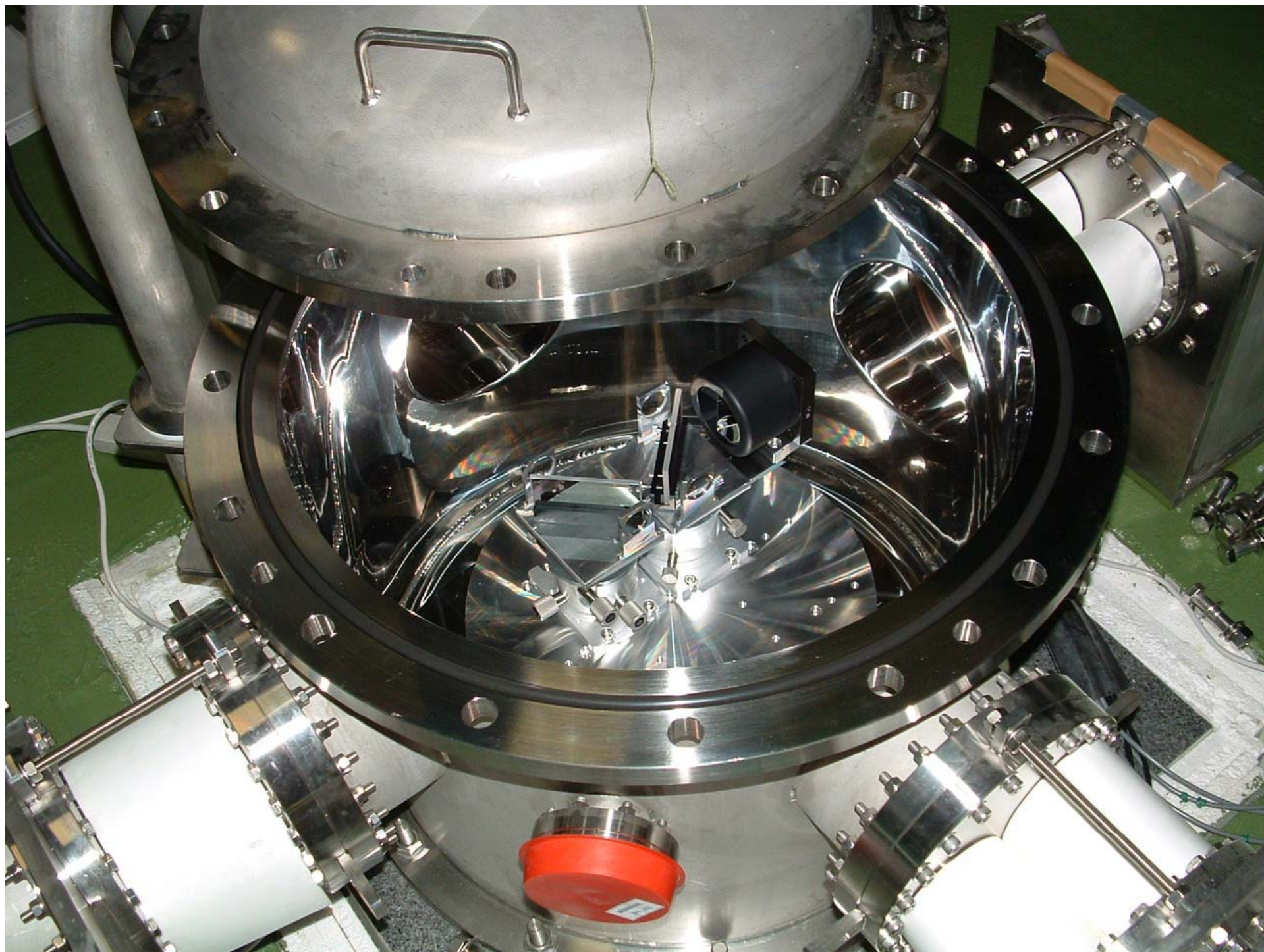
地殻変動観測
Crustal movement

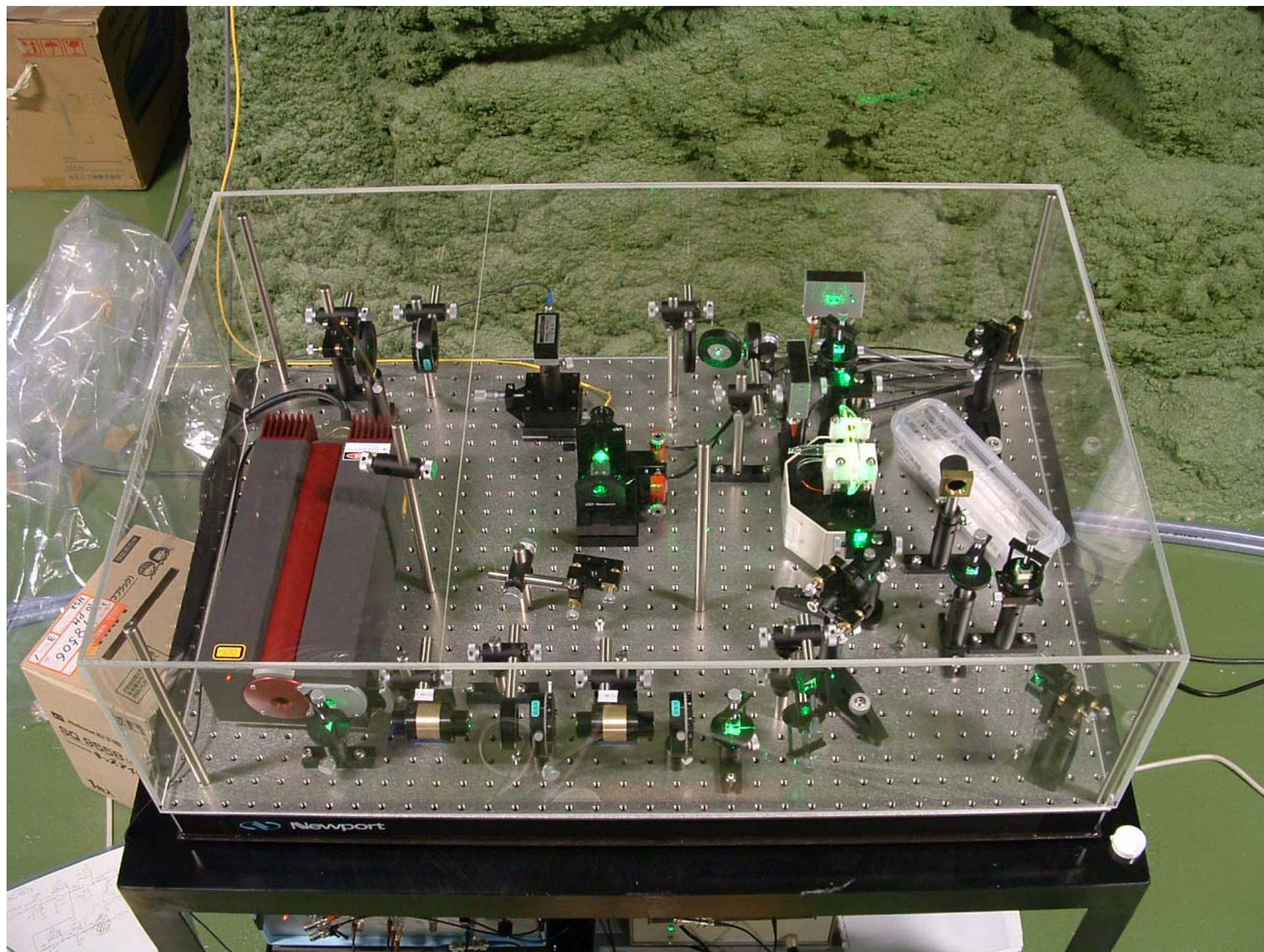
Seismometer and Strainmeter



観測システム . . . レーザー伸縮計+絶対長干涉計







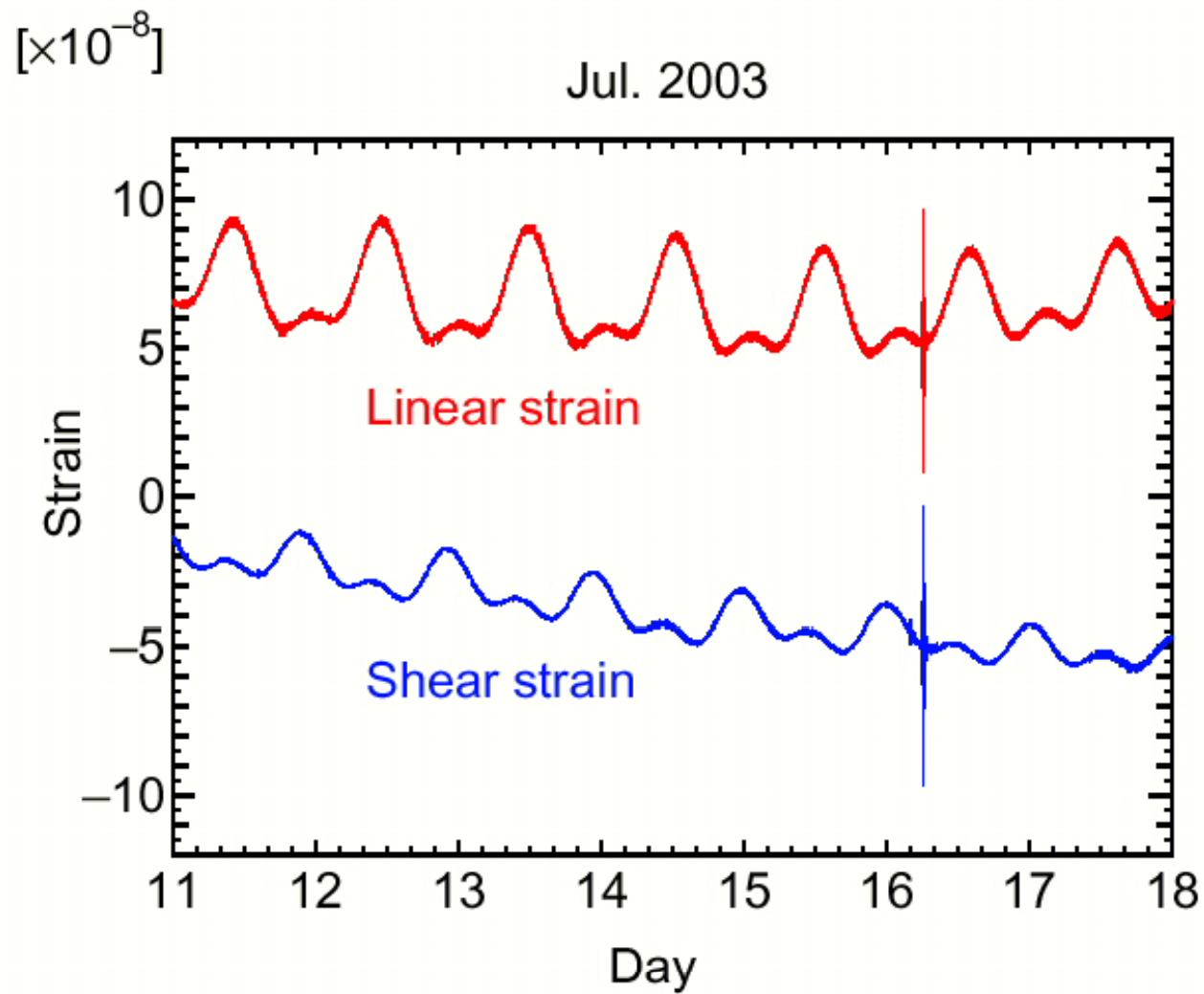
これまでの観測結果（神岡レーザー伸縮計）

超広帯域観測

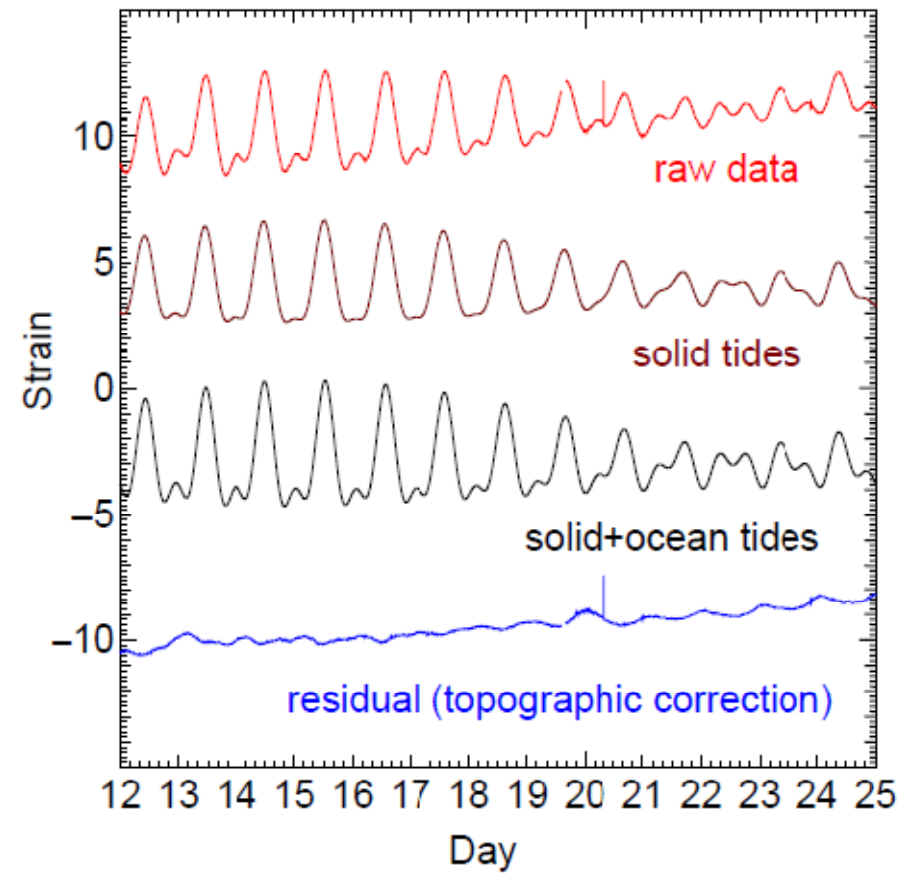
地殻変動～季節・気象変動～潮汐～自由振動～自然地震～人工地震

- 潮汐・・・理論潮汐と地形補正で5%以内で観測と一致 数日
海洋潮汐の影響も検知
- 自由振動・・・十勝沖地震(2003.9)など 数十分
- 歪ステップ・・・紀伊半島沖(2004.9)など 数分
- 長期変動・・・ゆっくり(～数ヶ月)とした変動 数ヶ月～数年
→ 絶対長システムの組み込み
- 人工地震の波形・・・跡津川構造探査(2005.8) 数十Hz

Strain waveform



$[1 \times 10^{-8}]$



Earth tides . . . $\sim 5\%$ agreement with GOTIC2

1

ELEMENTS

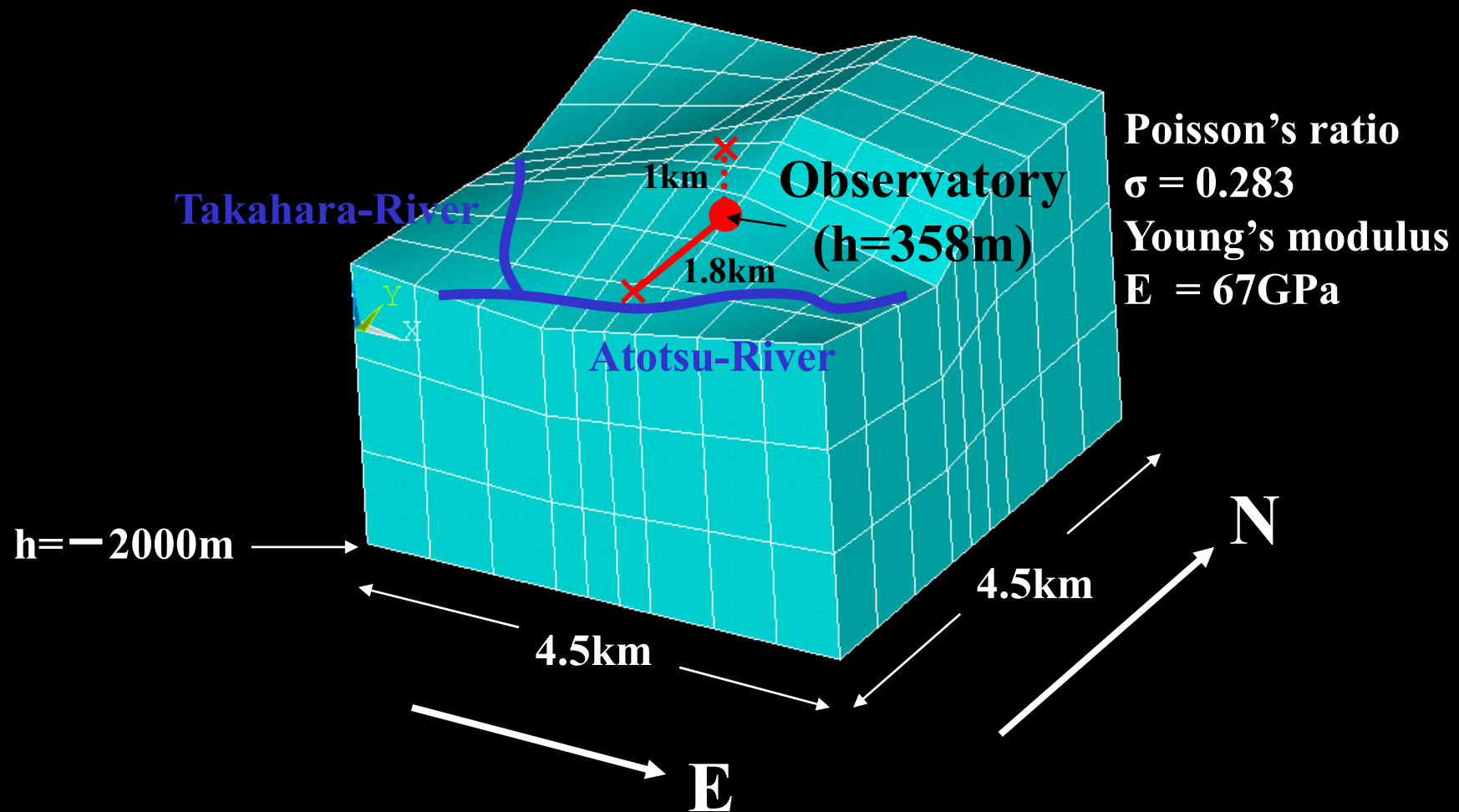
ANSYS

DEC 14 2003

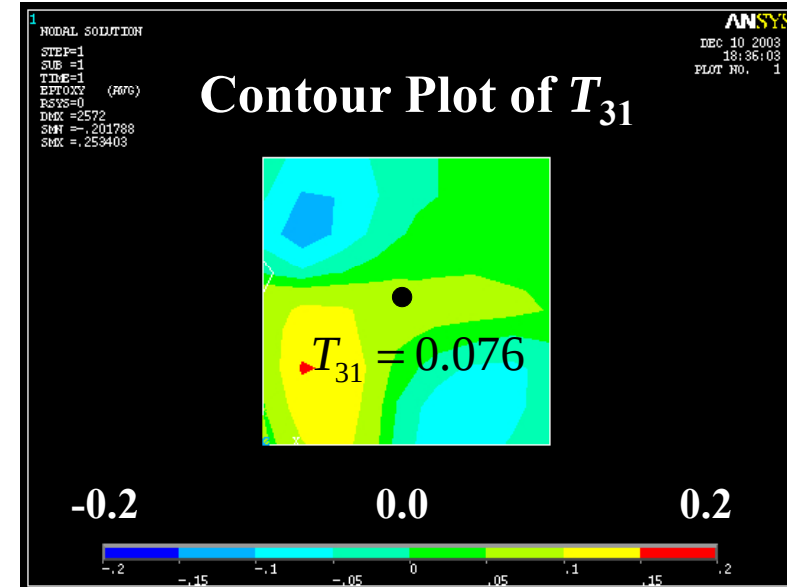
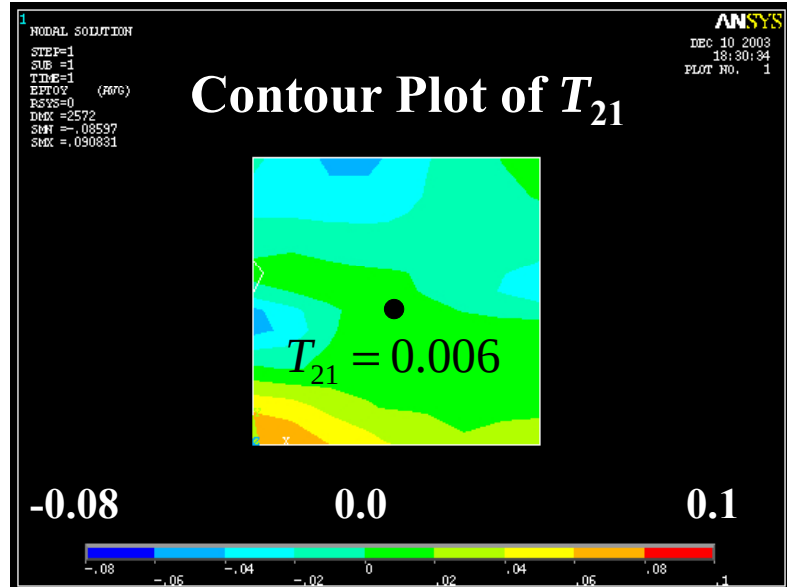
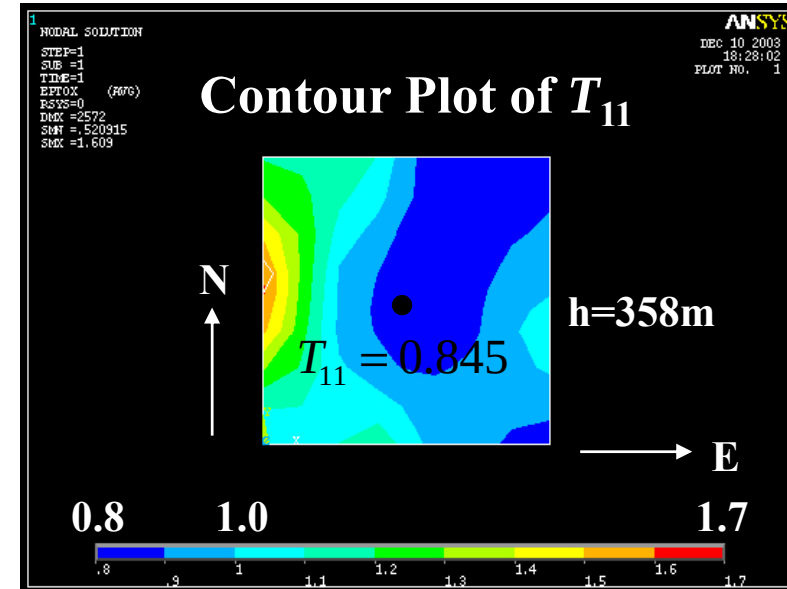
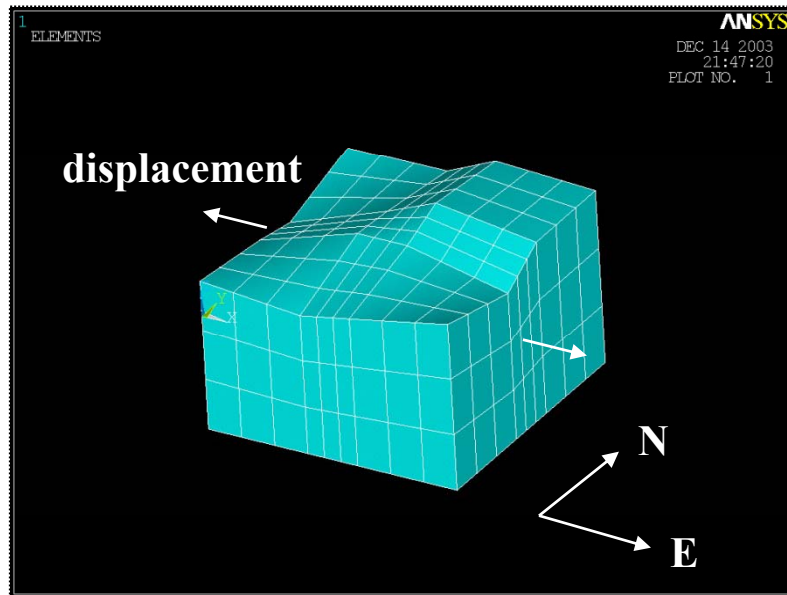
21:47:20

PLOT NO. 1

3D Finite Element Model (243 Elements)

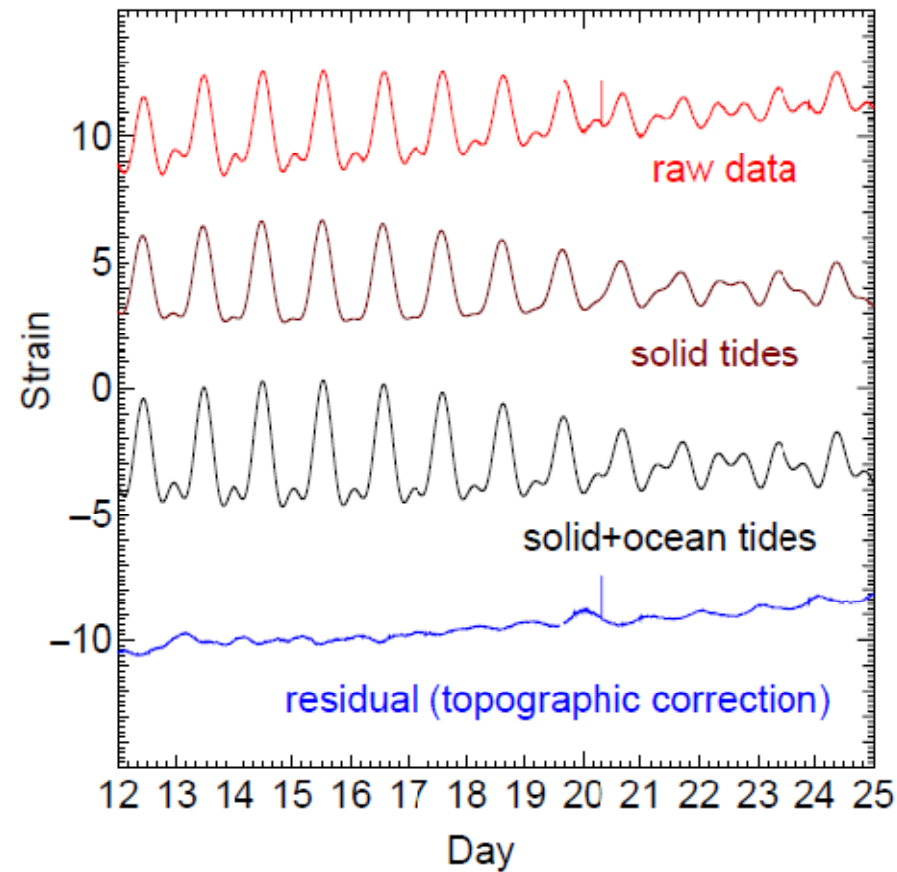


Contour Plots of T_{11} , T_{21} and T_{31}



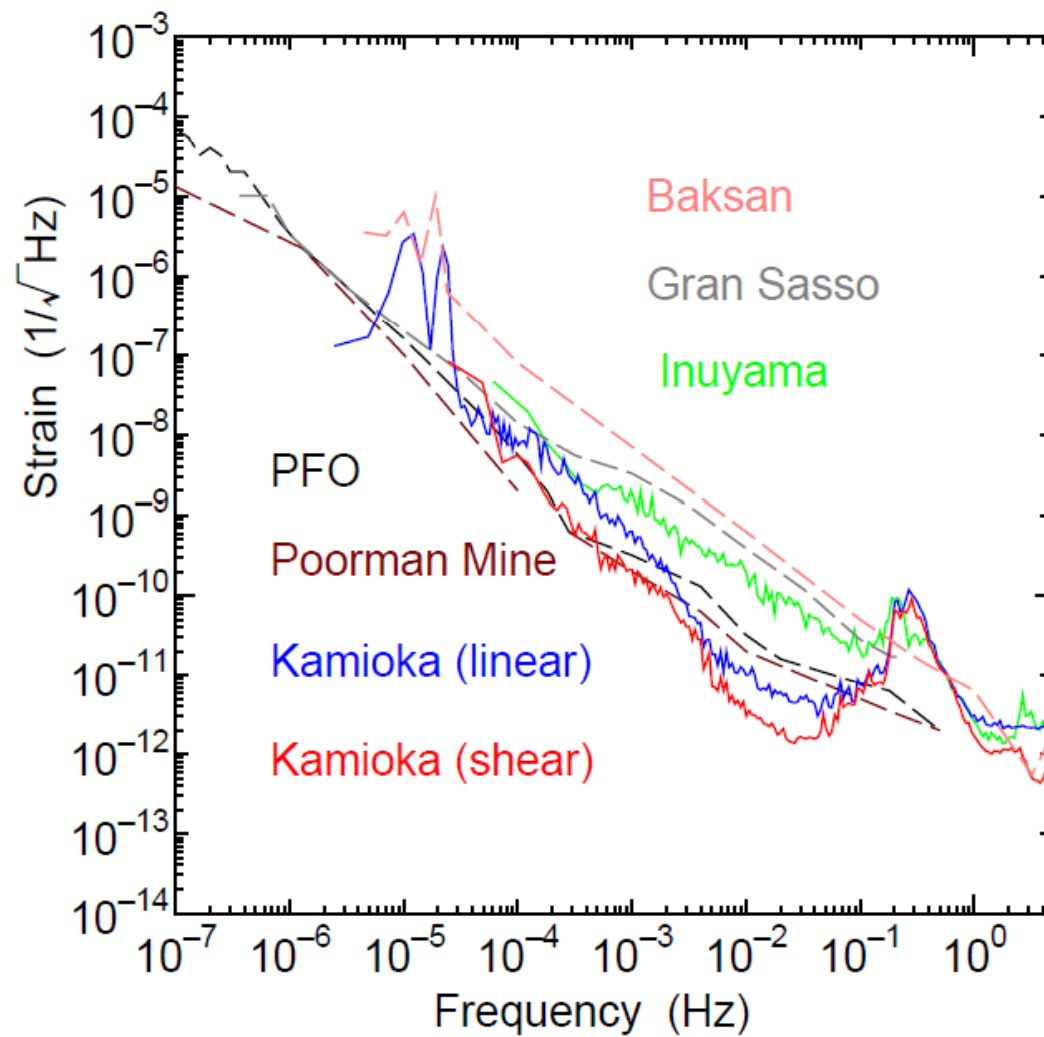
地球潮汐（月・太陽の引力による地球の変形）の観測

[1×10^{-8}]



海洋潮汐の影響を検証

World's lowest background

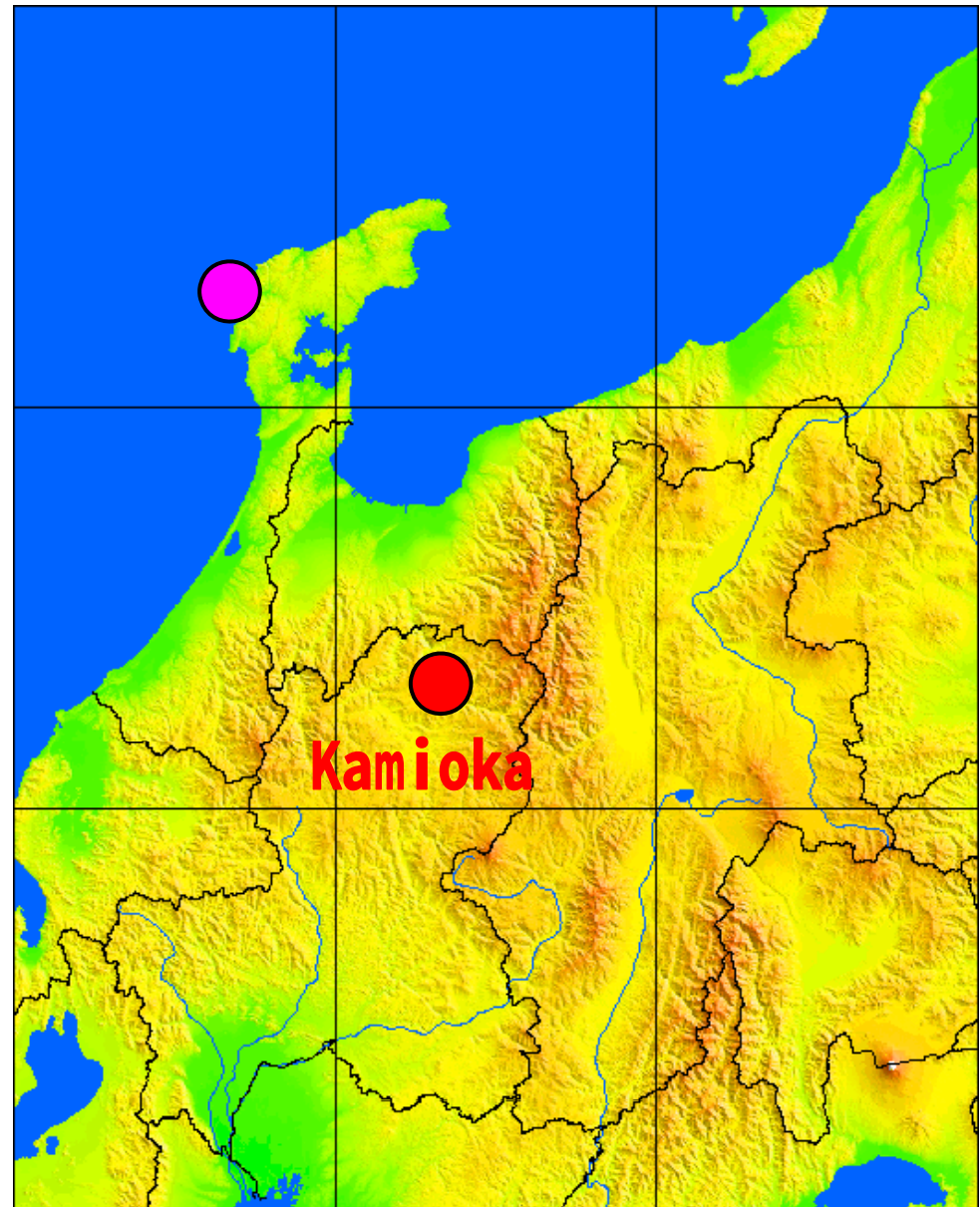


2007能登半島地震

神岡レーザー干渉計

- 震源域より約100km
- 地下1000m
- 100mの距離を
レーザーで高精度計測

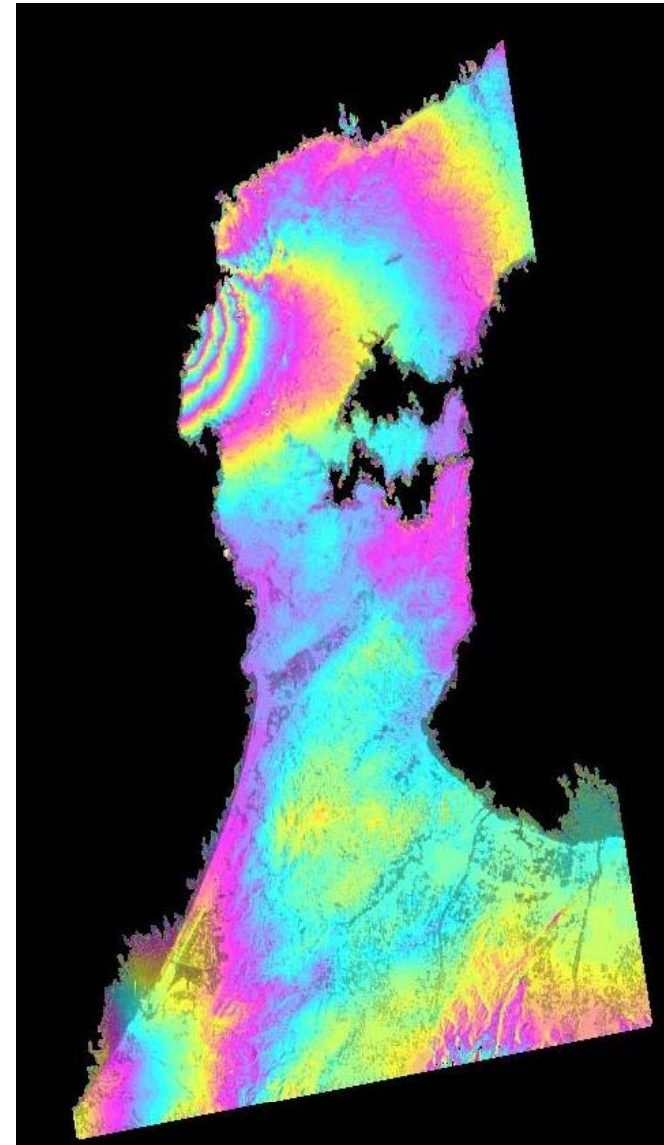
->ひずみを検知



地震にともなう地殻変動

震源近傍(数mm以上の変化)
はGPSやSAR(合成開口レーダ)
により検知可能

- ・・・衛星「だいち」によるInSAR
解析結果
(古屋正人氏による)



地震にともなう地殻変動

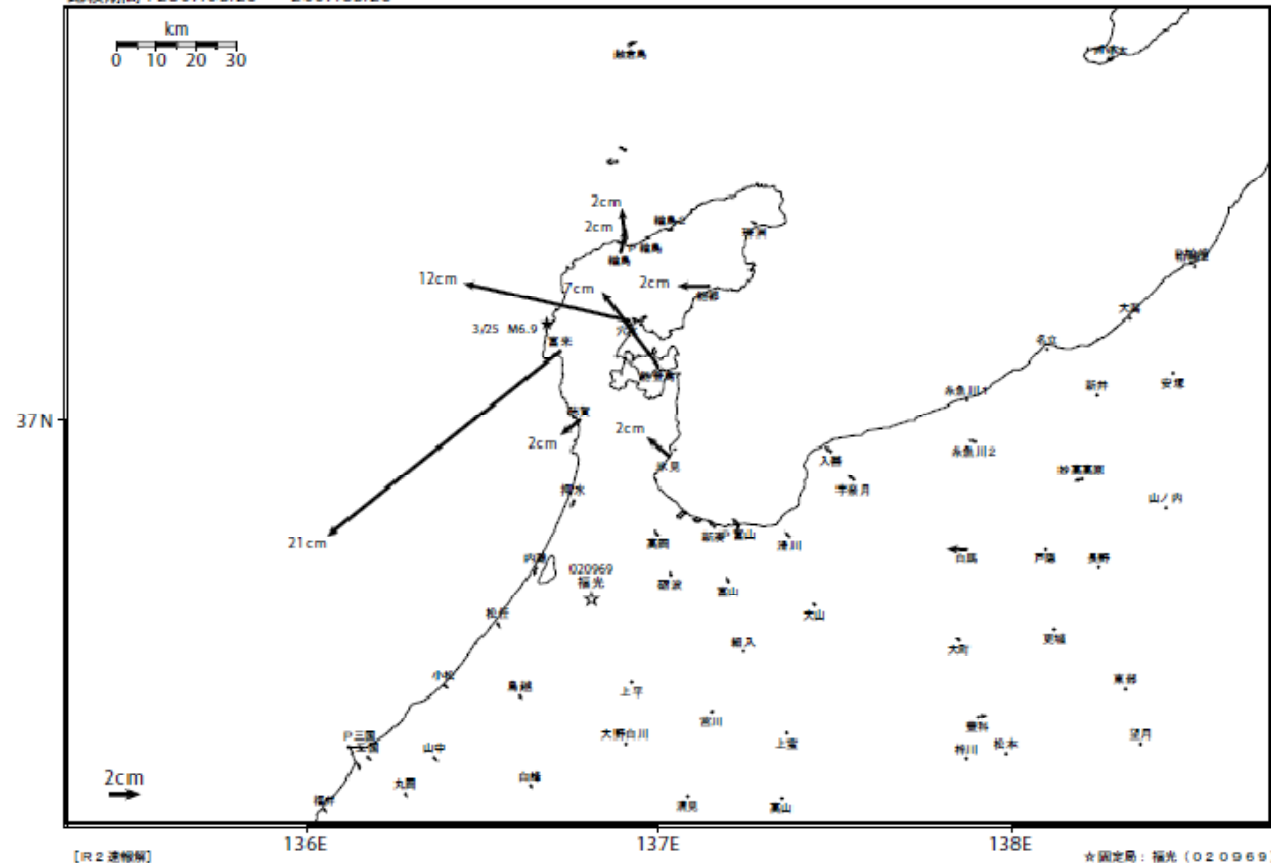
GPSによる地殻変動観測結果(国土地理院HPより)

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

平成19年(2007年)能登半島地震 水平変動ベクトル図

基準期間：2007/03/18 - 2007/03/24
比較期間：2007/03/26 - 2007/03/26



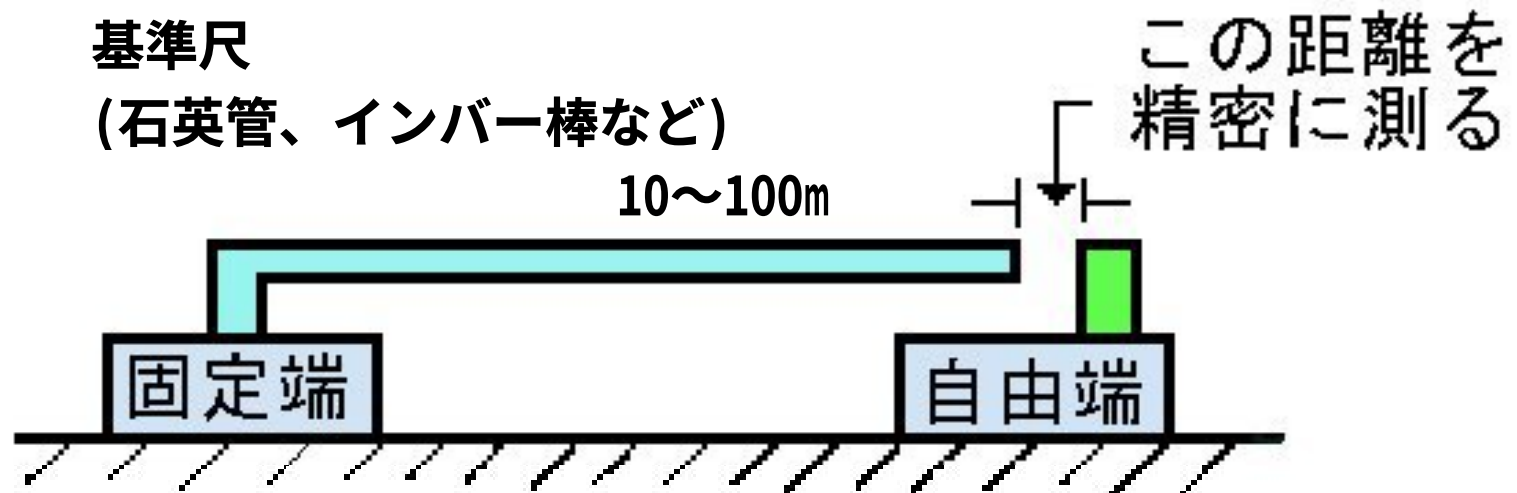
…遠方は
変化が小さく
検出困難

従来の歪み
観測では？

石英管／インバー伸縮計

ひずみ精度 $\sim 10^{-9}$

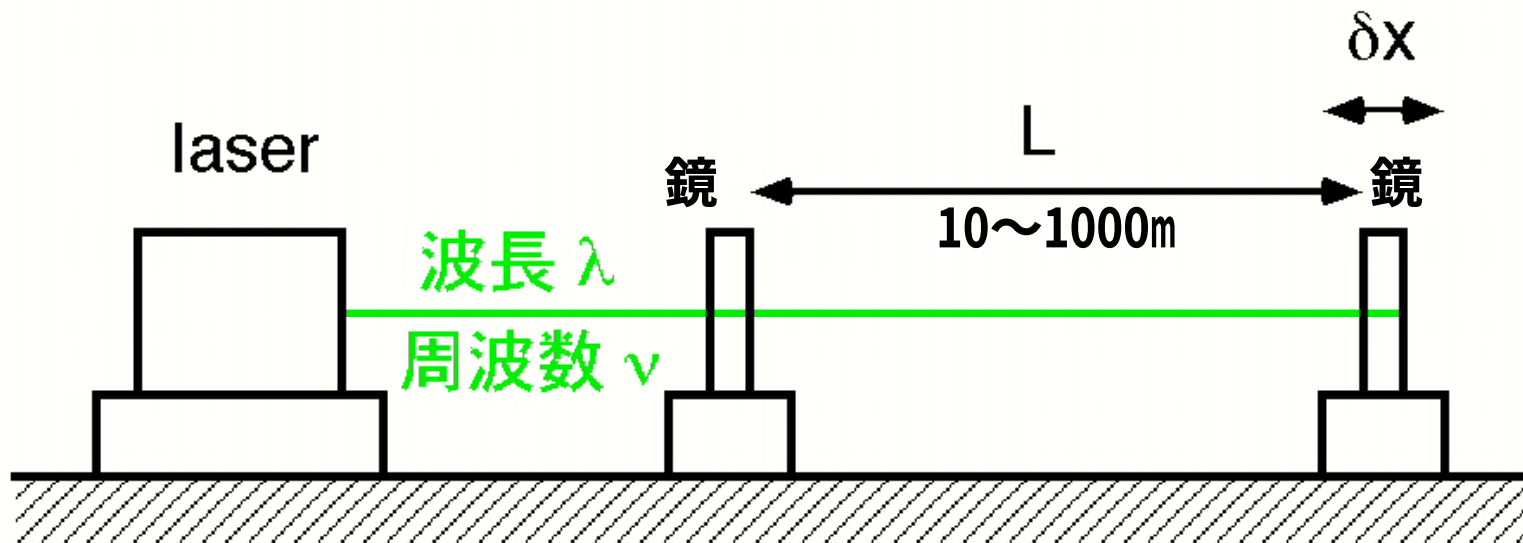
しかし、co-seismicなひずみ
ステップの検知は困難
(強震動による基準尺のスリップ)



レーザー伸縮計

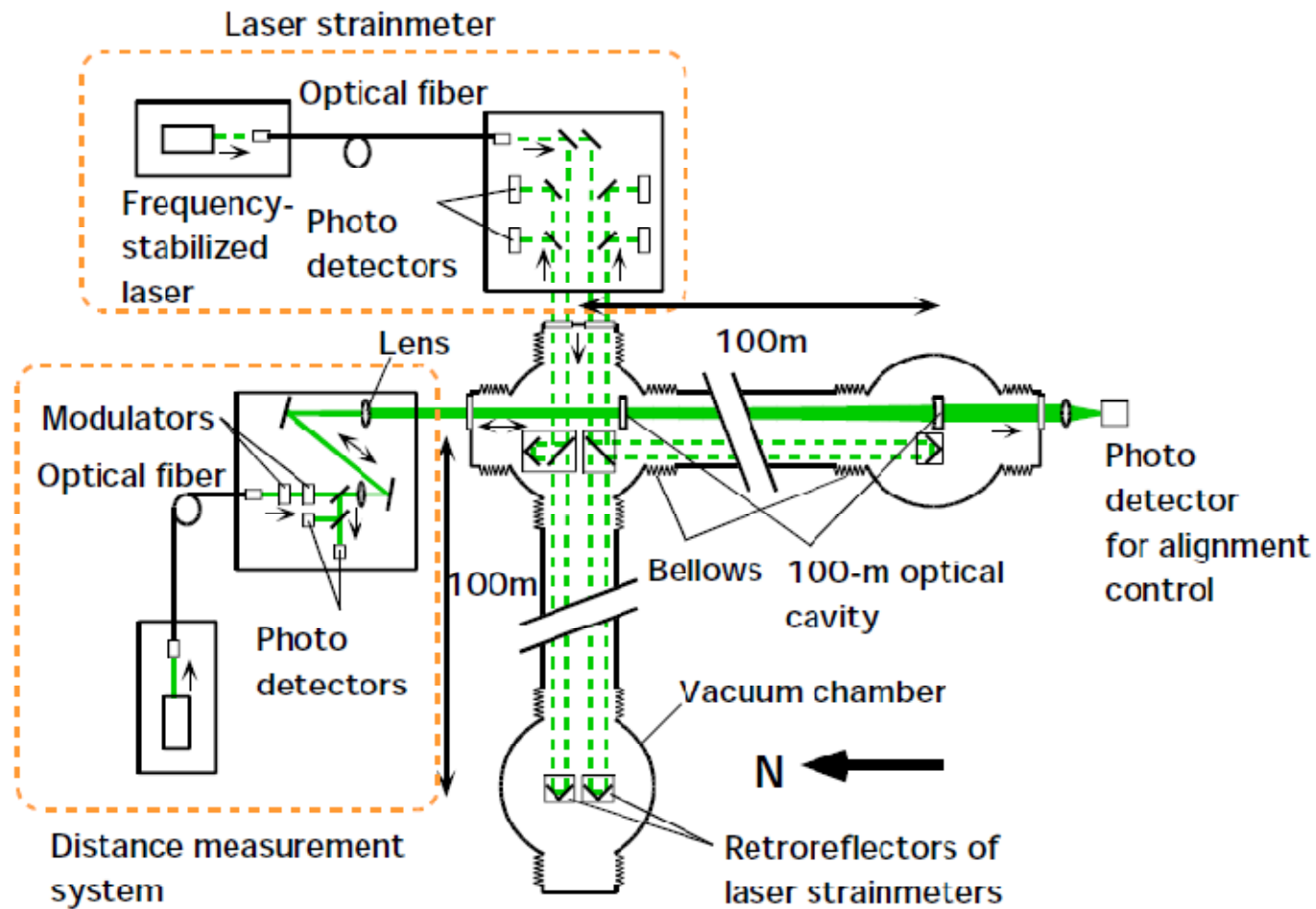
ひずみ精度 $\sim 10^{-13}$

co-seismicなひずみステップを
検知可能



神岡の観測システム

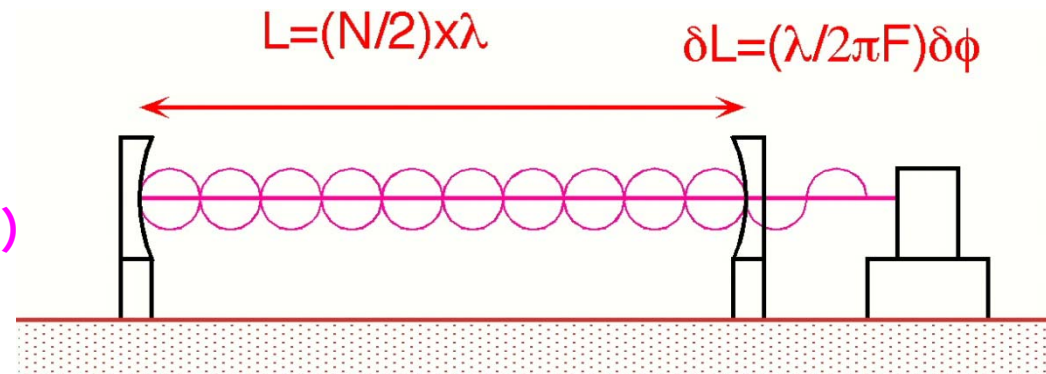
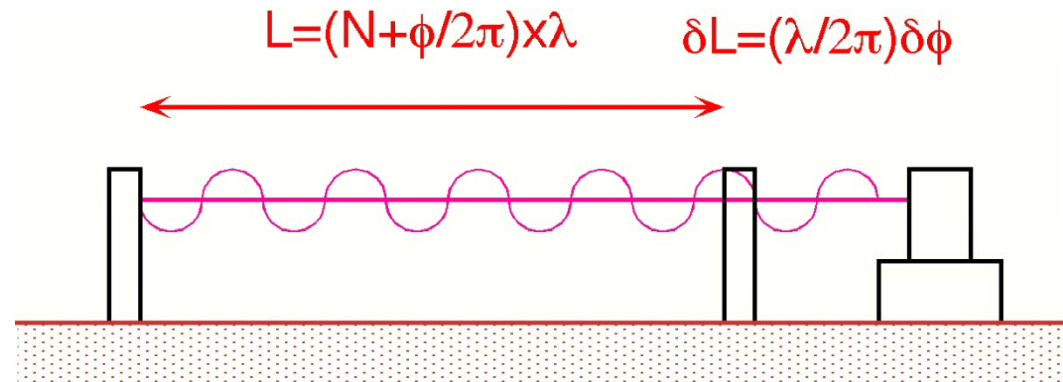
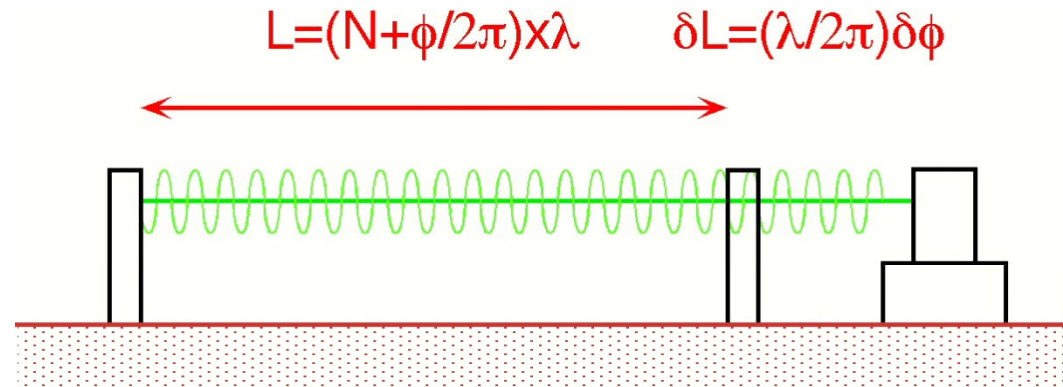
・・・ レーザー伸縮計＋絶対長干渉計



従来の方法の問題点

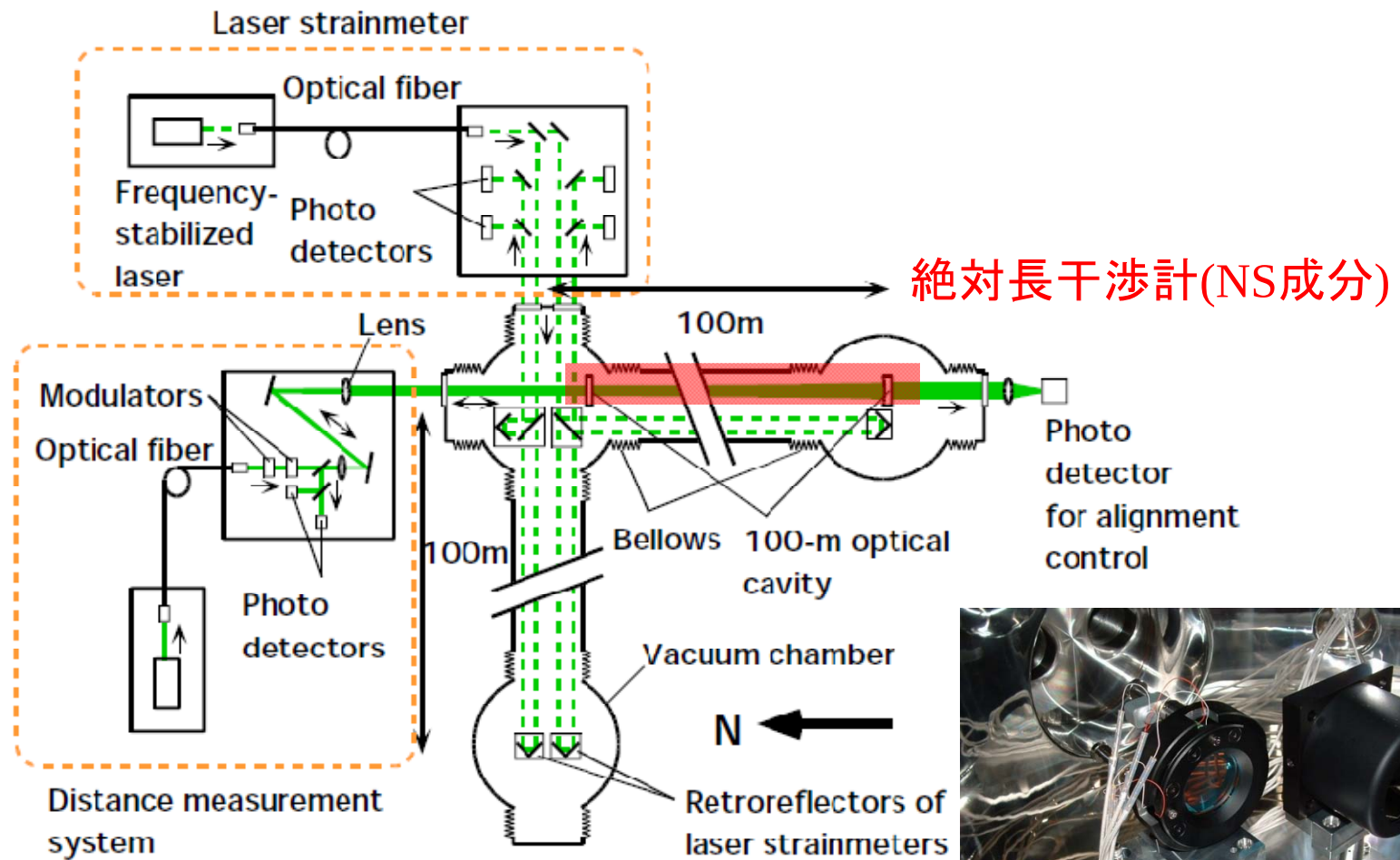
- 通常のレーザー伸縮計
 - • • 欠測時にひずみが不定
(N が不確定)
- 光波測距、マイクロ波測距
 - • • 分解能不足 (λ が大)
- 絶対長干渉計 (光共振器)
 - • • 高精度に距離を決定
(光共振器により ϕ の分解能向上)

$\lambda = c/f$ より発振器の周波数 f から
距離を高精度に計測できる



往復回数 $F \sim 1000$

観測システム . . . レーザー伸縮計+絶対長干渉計

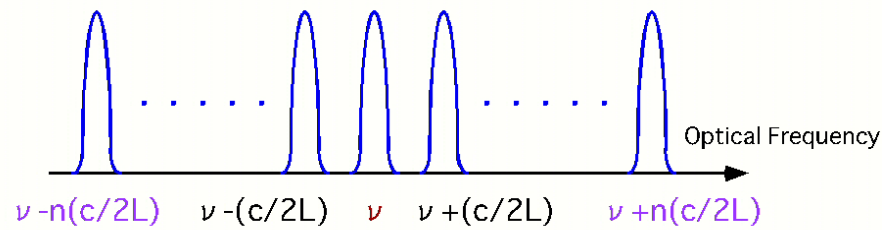


絶対長干涉計

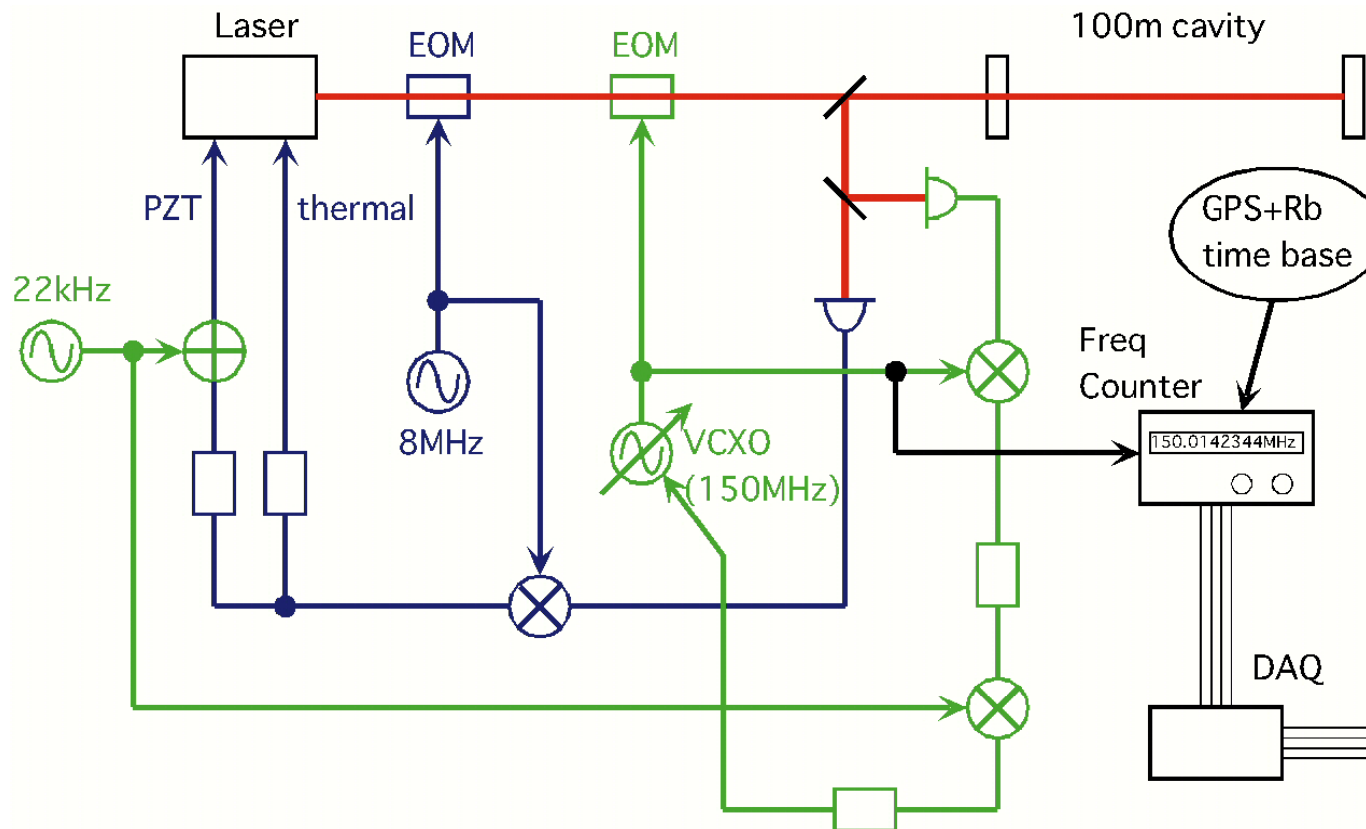
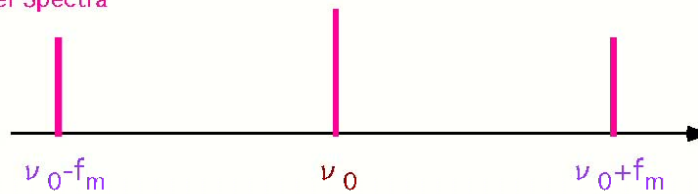
- 光共振器に
共鳴(carrier)

- RF信号も共
鳴(sideband)

Cavity Resonance



Laser Spectra



長さの定義の変遷

国際度量衡委員会

1889 メートル原器 ($\sim 10^{-7} \times$ 温度変化) <- 子午線の長さに基づく

1960 ^{86}Kr のスペクトル ($\sim 4 \times 10^{-9}$)

1983 真空中の光が進む距離 (時間標準の精度 $< \sim 10^{-14}$)

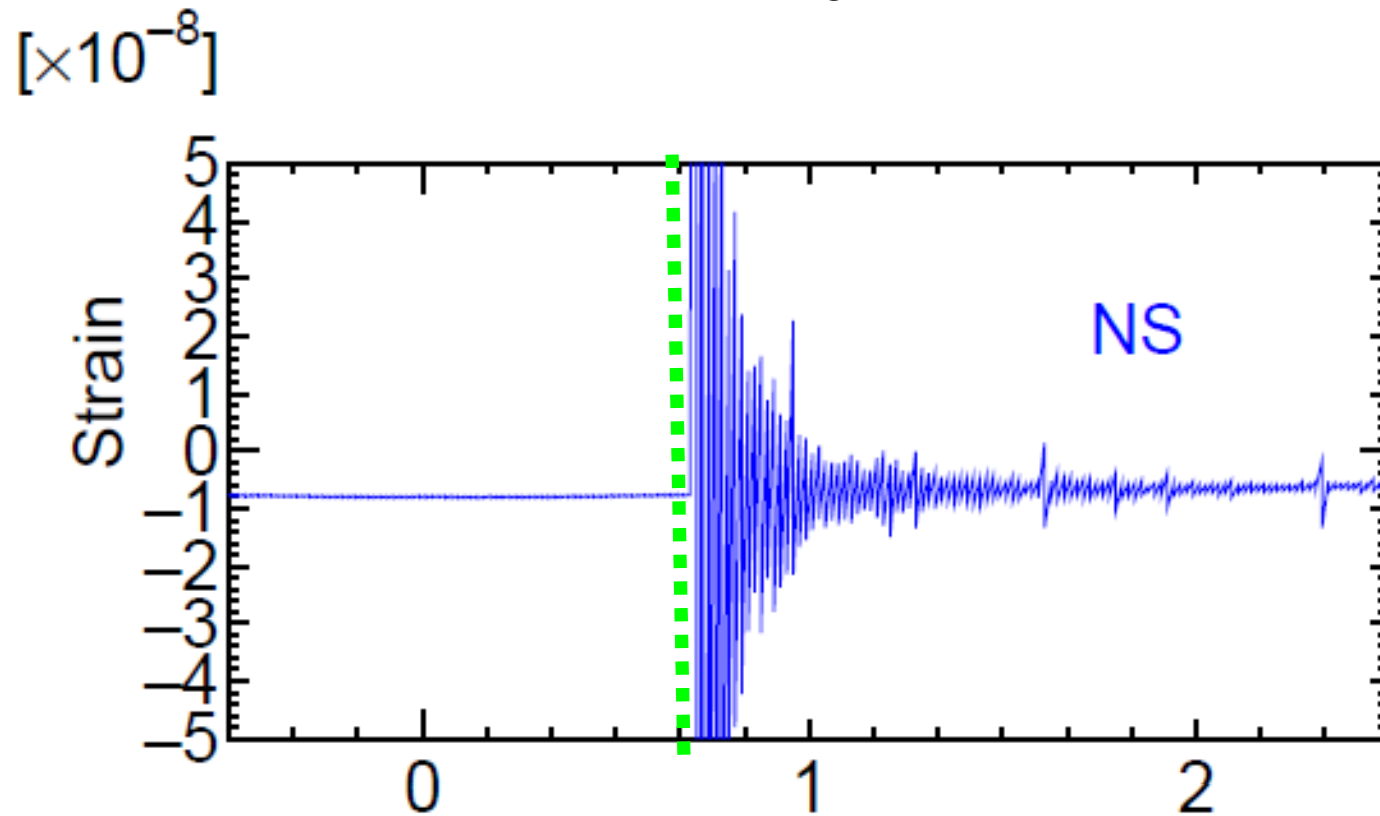
真空中の光速度 $c=299792458\text{m/s}$ と定義

・・・発振器の周波数から長さが精度良くわかる

●絶対長干渉計・・・長さの定義に基づいた高精度距離計測

能登半島地震 深さ11km

(2007/3/25 9:41 Mj6.9)



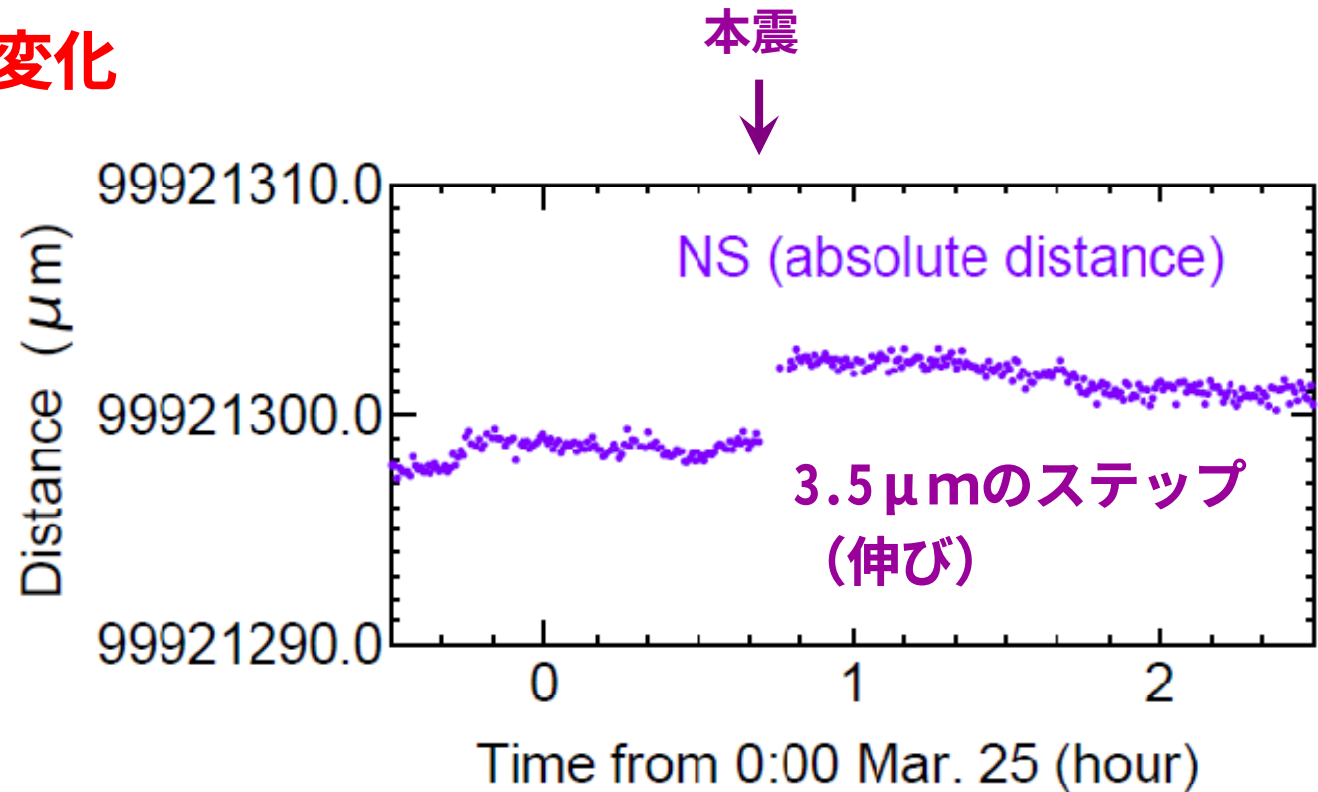
レーザー伸縮計 干涉縞欠落

→ 永久変位が不定 ($n \times \lambda / 2$)

絶対長干渉計による 歪みステップの検出

距離変化に対応する
発振器の周波数変化

$3.5 \mu\text{m}/100\text{m}$
 $= 3.5 \times 10^{-8}$
のstrain step



地震断層の動きによる地殻のひずみ

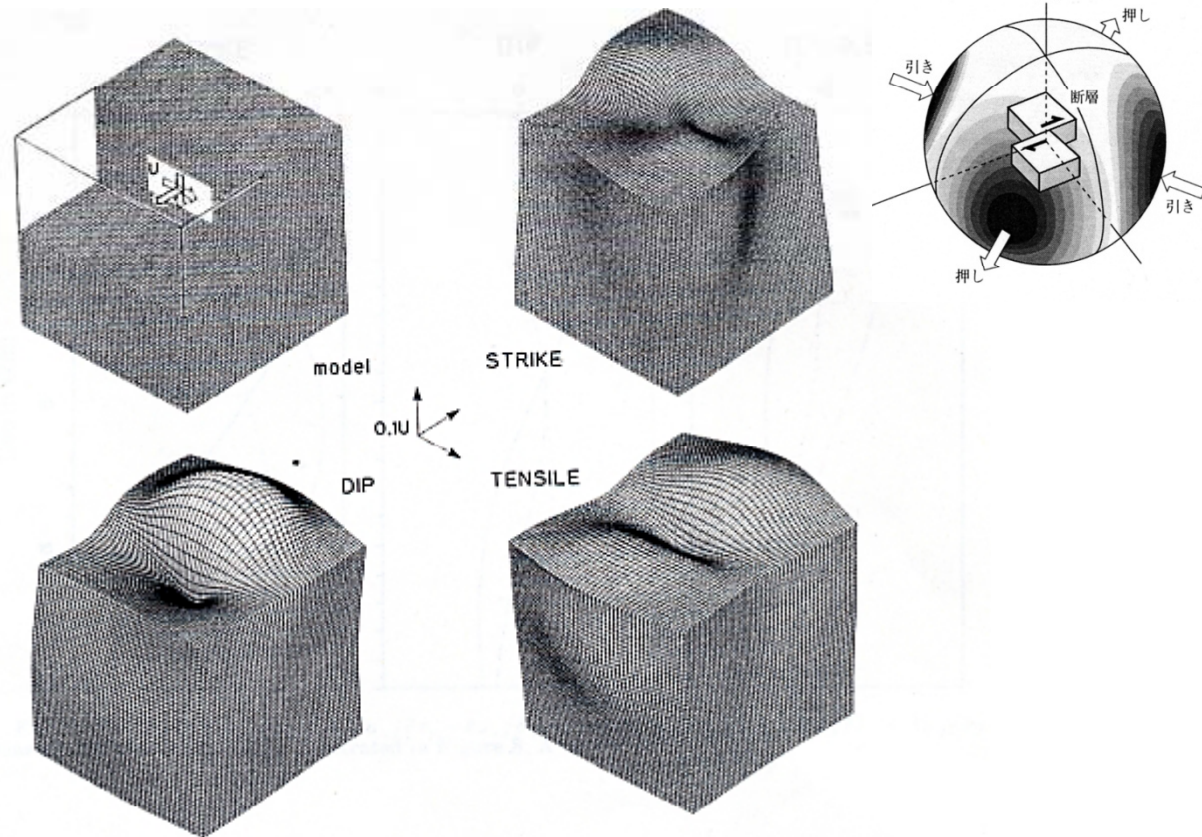


FIG. 7. Schematic 3-D deformation of an elastic half-space due to slip on a vertical strike-slip, dip-slip, or tensile fault. The block has a size of 50 km, the top of which corresponds to the free surface. The vertical fault is 20 km long and 10 km wide extending from 10 to 20 km depth. U stands for the dislocation amount.

ひずみの理論計算

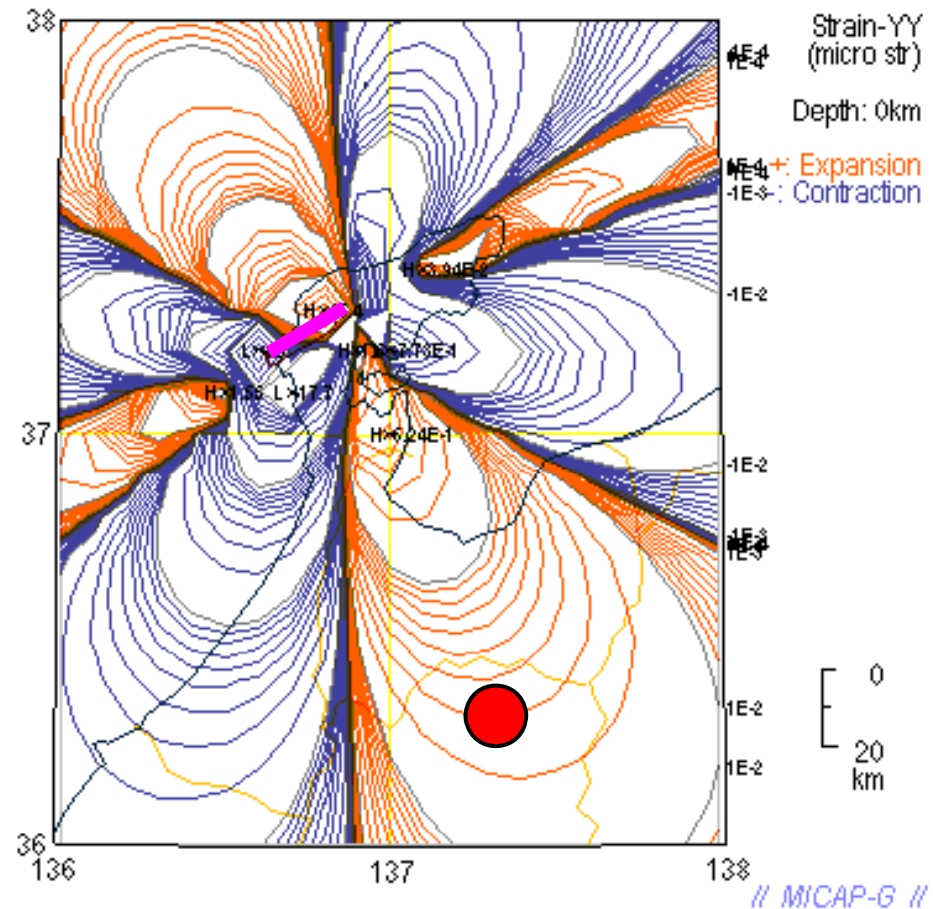
1. 半無限 (Okada, 1992)

(MICAP-Gによる計算)

2. 球対称地球モデル

(Sun, 2004) (構造:
PREM)

+ 地下サイトの効果
(地形補正、0.8~0.9
倍)



断層パラメータ (60,72,120)

36.43N 137.32E depth=0.0

S=20km×10km slip=1.4m

観測値と理論予想値との比較

4種の断層モデル

2種の理論

Case 1

半無限均質媒質
(Okada 1992)

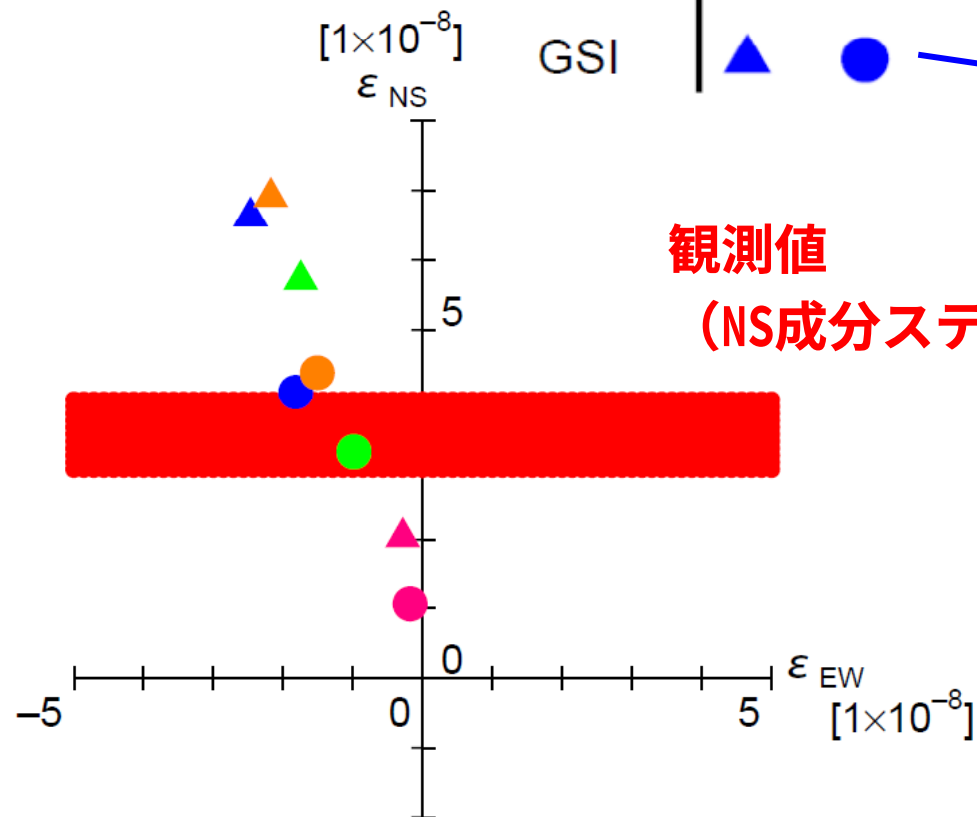
Case 2

球対称、PREM
(Sun 2004)

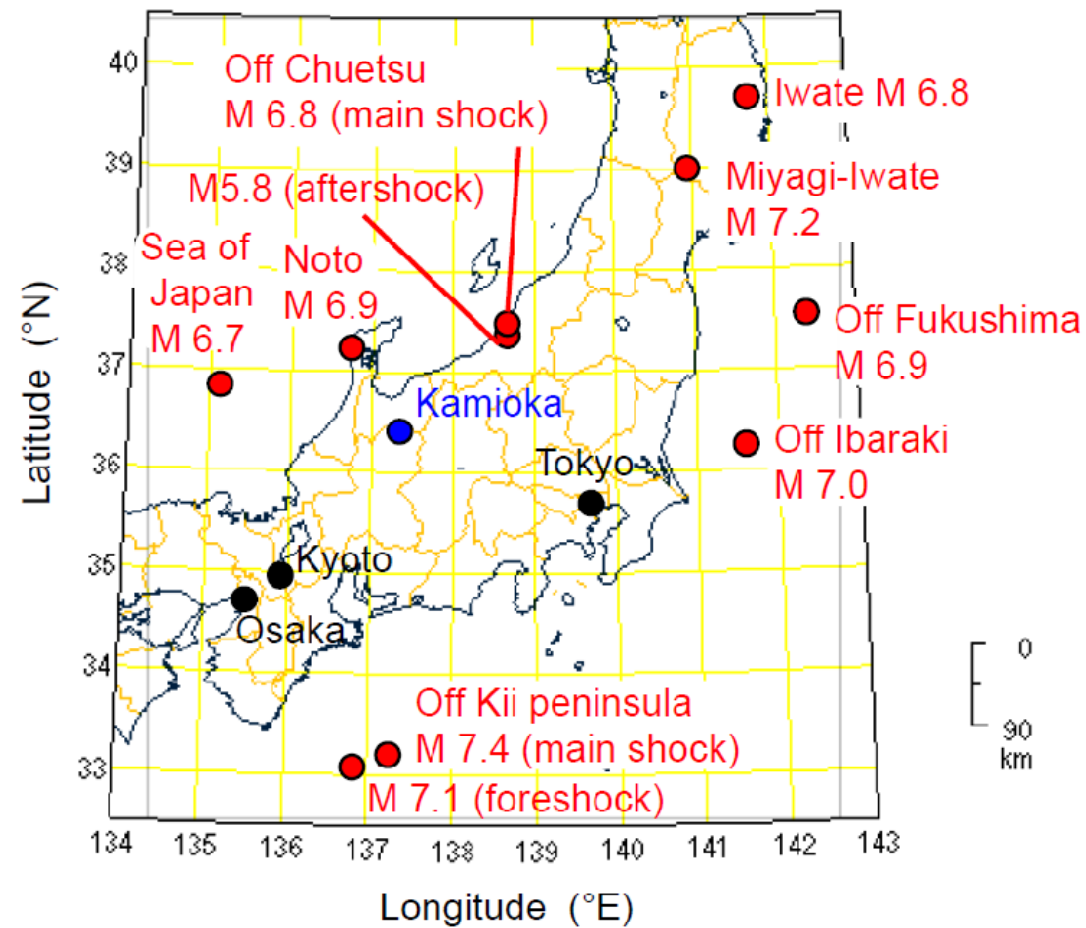
	Case	
	1	2
JMA	▲	●
USGS	▲	●
GCMT	▲	●
GSI	▲	●

地震学的

測地学的



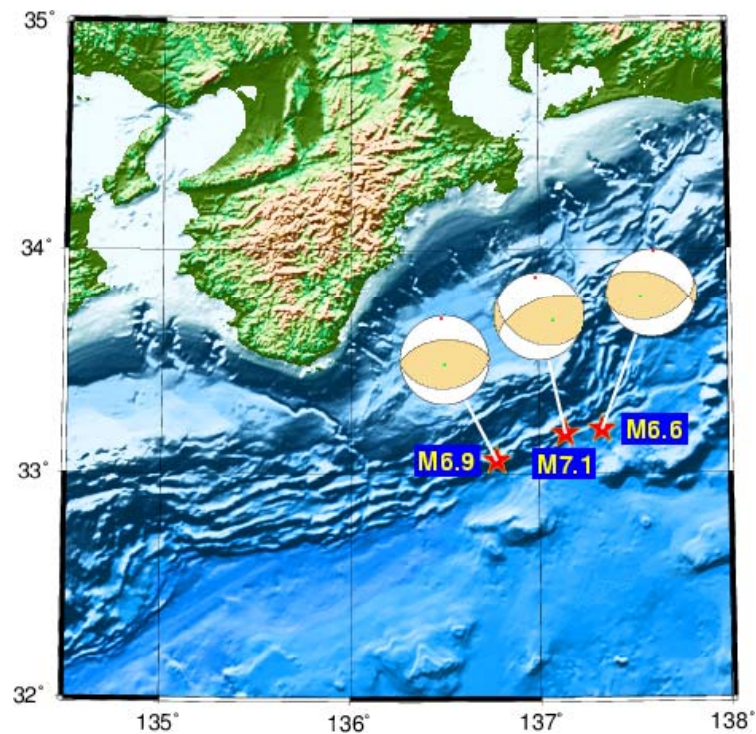
→ Case 2 が妥当



観測されたおもなイベント(2004-2008)

co-seismicなひずみステップの観測 例

紀伊半島南東沖地震 (2004/9/5-6)

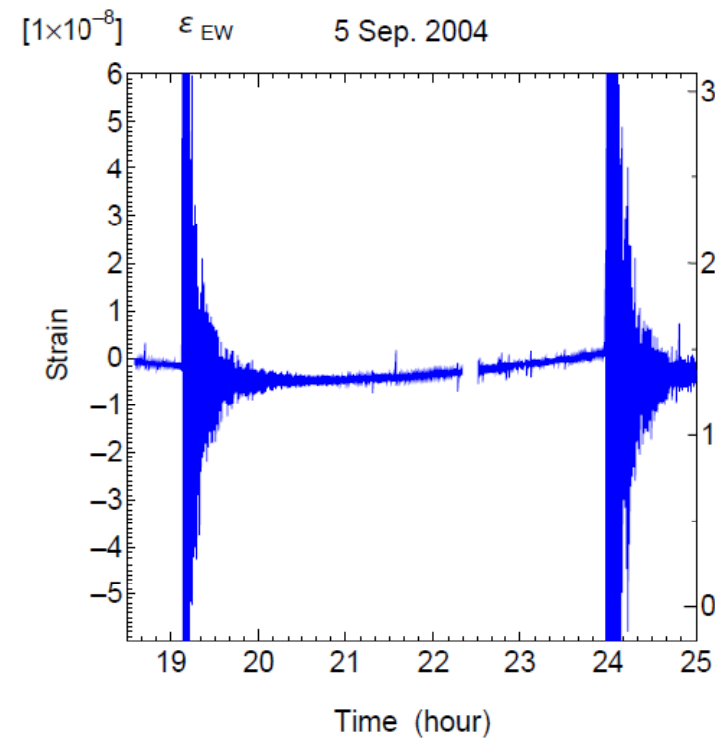


前震 9/5 19:07

$$\Delta e_{EW} = -0.25 \times 10^{-8}$$

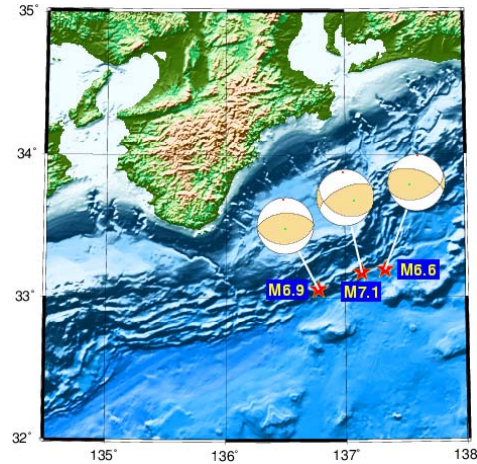
本震 9/5 23:57

$$\Delta e_{EW} = -0.71 \times 10^{-8}$$



10^{-8} (100kmあたり1mm)以下のひずみステップ。約400km離れた神岡で観測。

Strain Step
Event 1
9/5 19:07



$$\Delta e_{EW} = -0.25 \times 10^{-8}$$

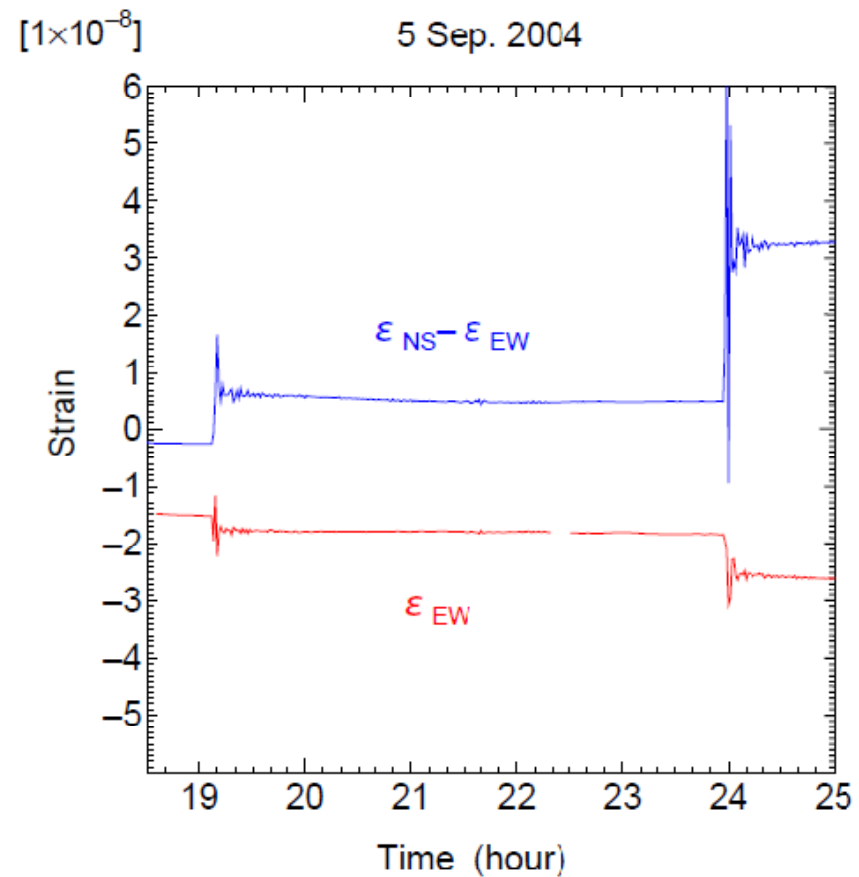
$$\Delta e_{NS} - \Delta e_{EW} = 0.86 \times 10^{-8}$$

Event 2
9/5 23:57

$$\Delta e_{EW} = -0.71 \times 10^{-8}$$

$$\Delta e_{NS} - \Delta e_{EW} = 2.71 \times 10^{-8}$$

Extracting signal from raw data



観測値と理論予想値との 比較

Case 1

半無限均質媒質

Case 2

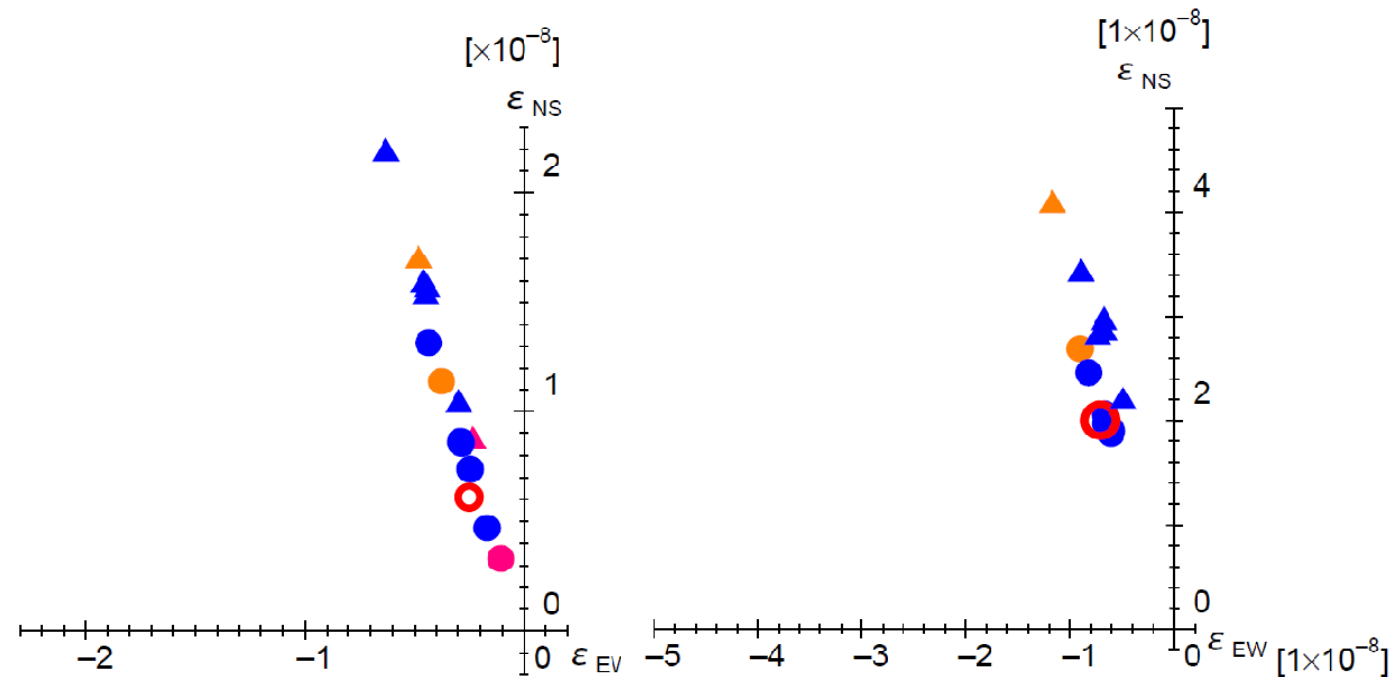
球対称、PREM

前震 2004 9/5 19:07

本震 2004 9/5 23:57

	Case	
	1	2
JMA	▲	●
USGS	▲	●
GSI	▲	●

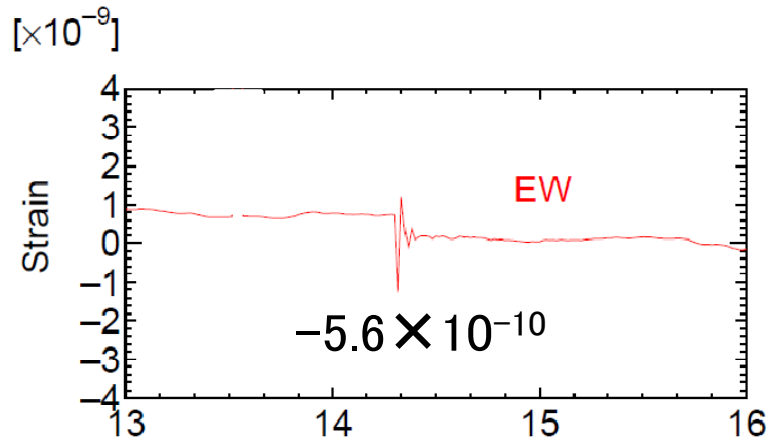
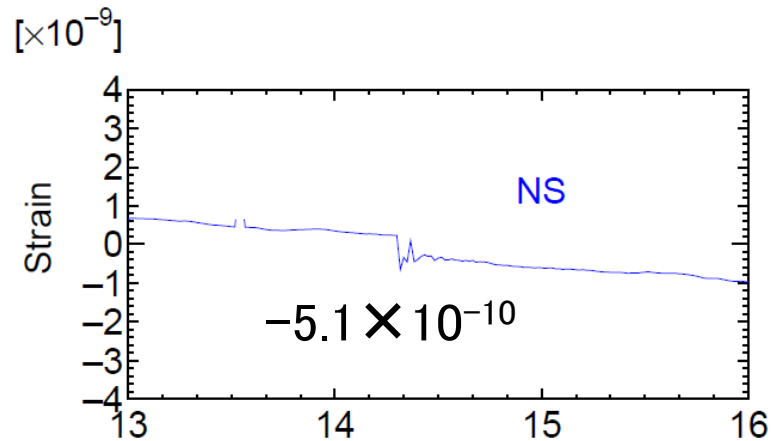
観測値 ○



深発・遠地のイベント（レーザー伸縮計）

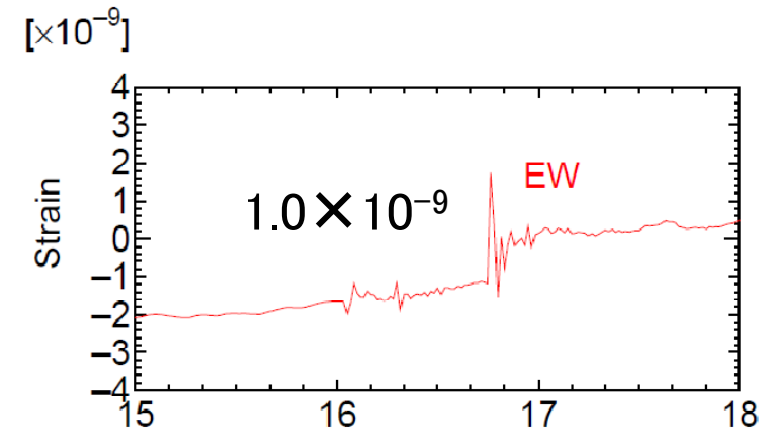
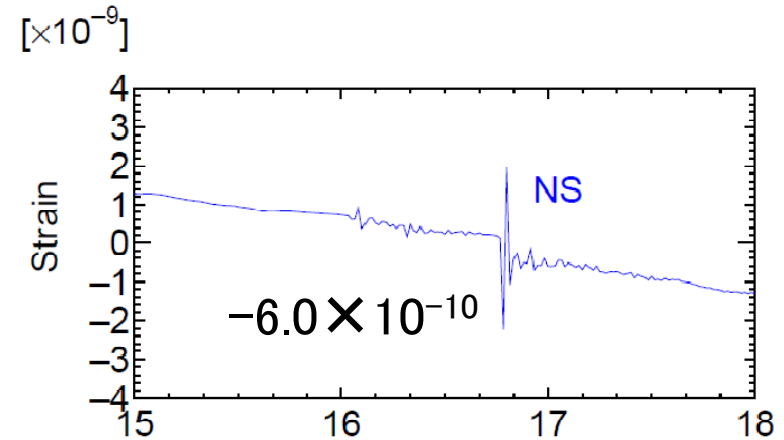
京都沖 深さ374km

(2007/7/16 23:17 Mj6.8)



茨城沖 深さ51km

(2008/5/8 1:45 Mj6.8)



ひずみステップは M_0/μ に依存(M_0 :地震モーメント、 μ Sd)

-> μ (剛性率)を震源域の地下構造から推定して補正

Case 1

Noto: $\mu = 30\text{GPa}$

半無限均質媒質

Case 2

球対称、PREM

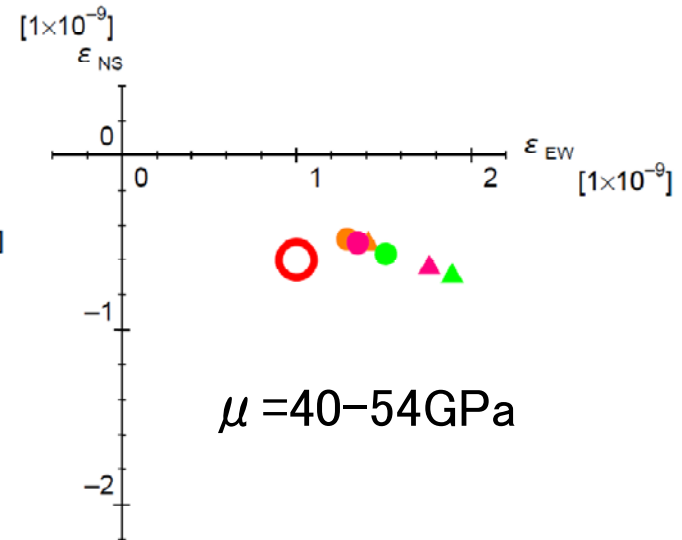
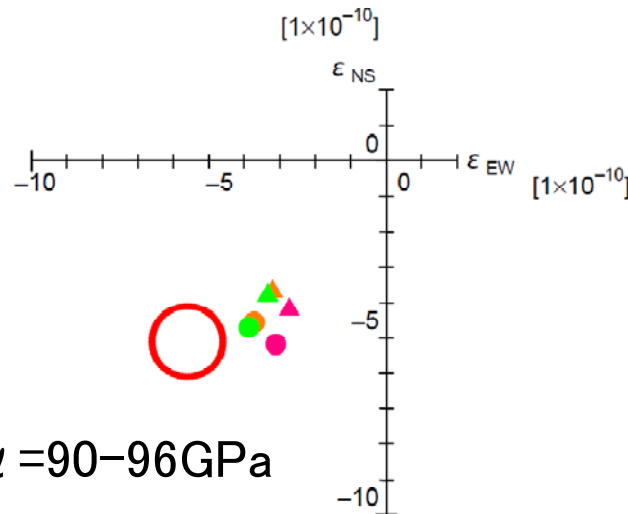
京都沖 深さ374km

(2007/7/16 23:17 Mj6.8)

茨城沖 深さ51km

(2008/5/8 1:45 Mj6.8)

	Case	
	1	2
JMA	▲	●
USGS	▲	●
GCMT	▲	●



観測値 ○

$\mu = 90-96\text{GPa}$

●観測とよく合っている。球対称・PREMに近い

●震源パラメーターや M_0/μ に制約を与えることができる

まとめ

- レーザー伸縮計・絶対長干渉計により 10^{-10} レベルのcoseismicひずみステップの観測が可能となった
- Far fieldの測地学的観測から断層モデル／理論に新たな制約を与えることが可能

	Near field	Far field
地震観測	強震計	広帯域地震計
測地観測	GPS, SAR ($\sim 1\text{mm}$)	レーザー伸縮計・ 絶対長 ($\sim 10^{-10}$)

- 地震学、物理学（計測標準）への波及効果を期待