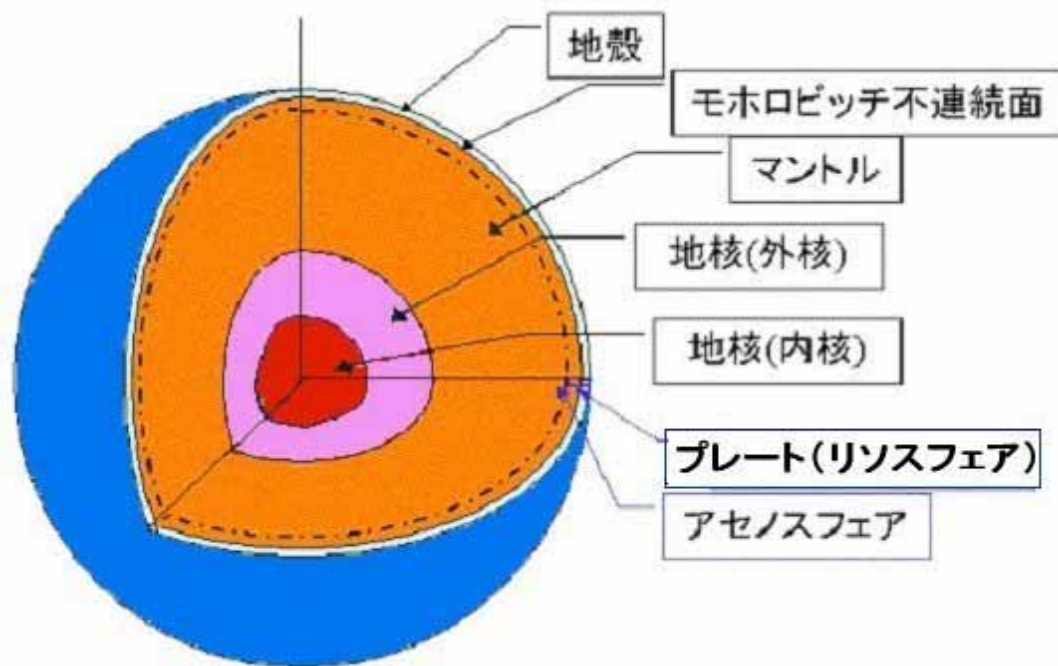
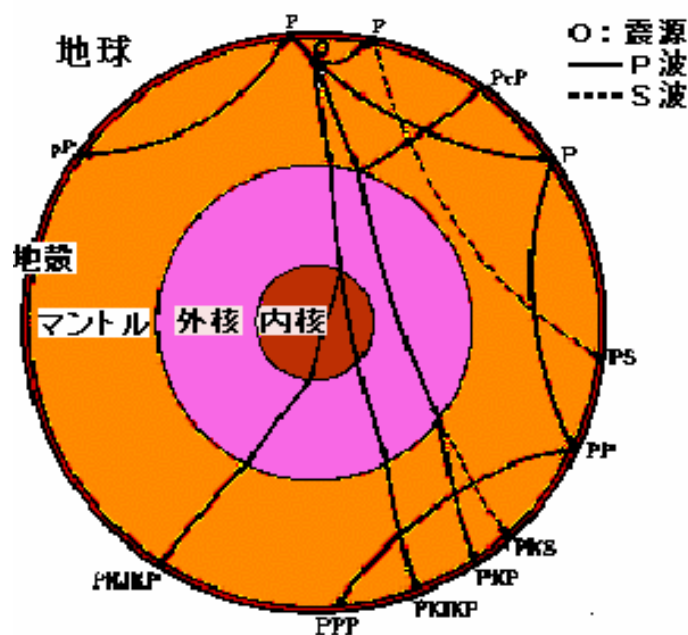
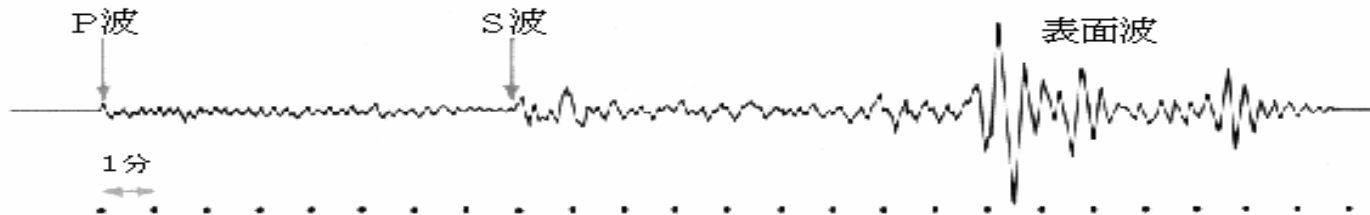


地球物理の将来計画？

研究の意義

地球表面および深部の構造を地震波の伝わり方などから求める



観測の目的

- ・地球中心核の動き

- 大地震の際のコア(内核)の揺れ -> コアの形状などの推定

- 潮汐で励起される流体核(外核)の揺れ

- > マントル最下部の構造、磁場の起源の研究

- ・地球自由振動

- 微弱モードの観測 -> マントルの物性

- 常時自由振動 -> 励起源の解明、大気・海洋を含めた新しい地球モデル

- ・地殻変動

- 跡津川断層クリープにともなう地殻変動 -> 断層運動の解明、地震予知

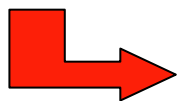
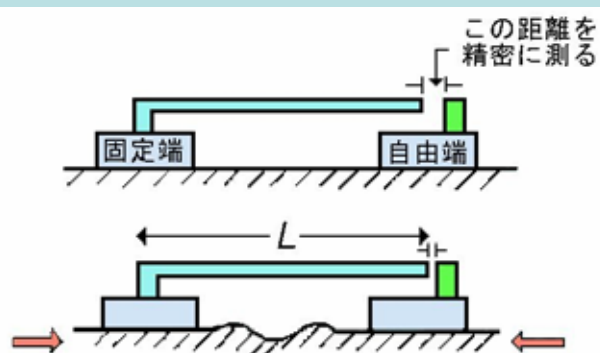
- 永年ひずみの観測 -> 日本列島のひずみ場のモニター

神岡地下での地球物理との連携

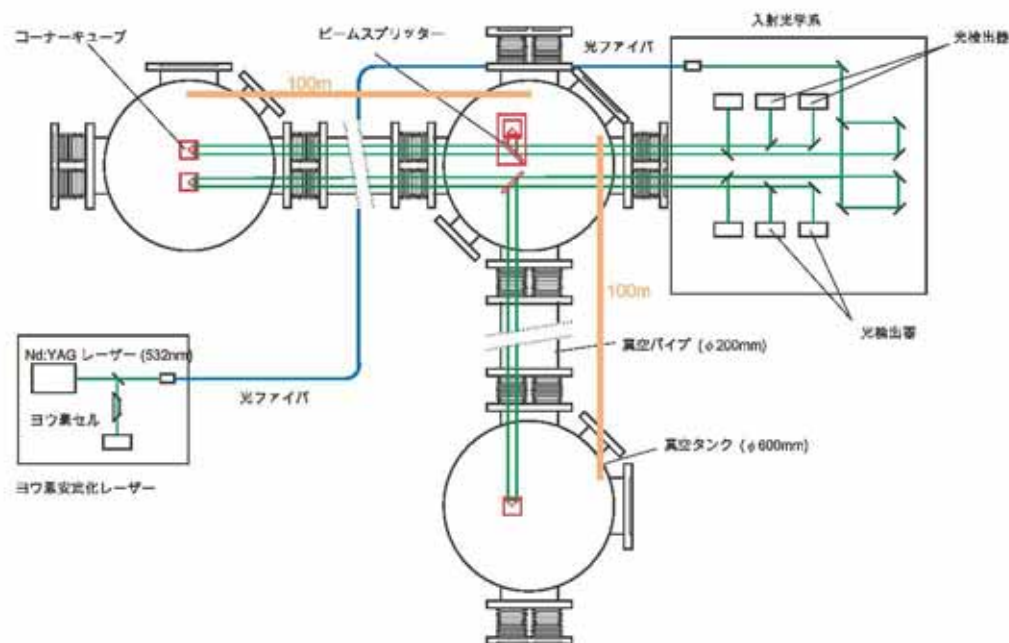


測定の実理：地殻歪の精密測定

地殻歪計の原理



石英伸縮計からレーザー地殻歪計へ
利点：長基線化が可能



100mレーザー地殻歪計による
地下観測の有効性の実証

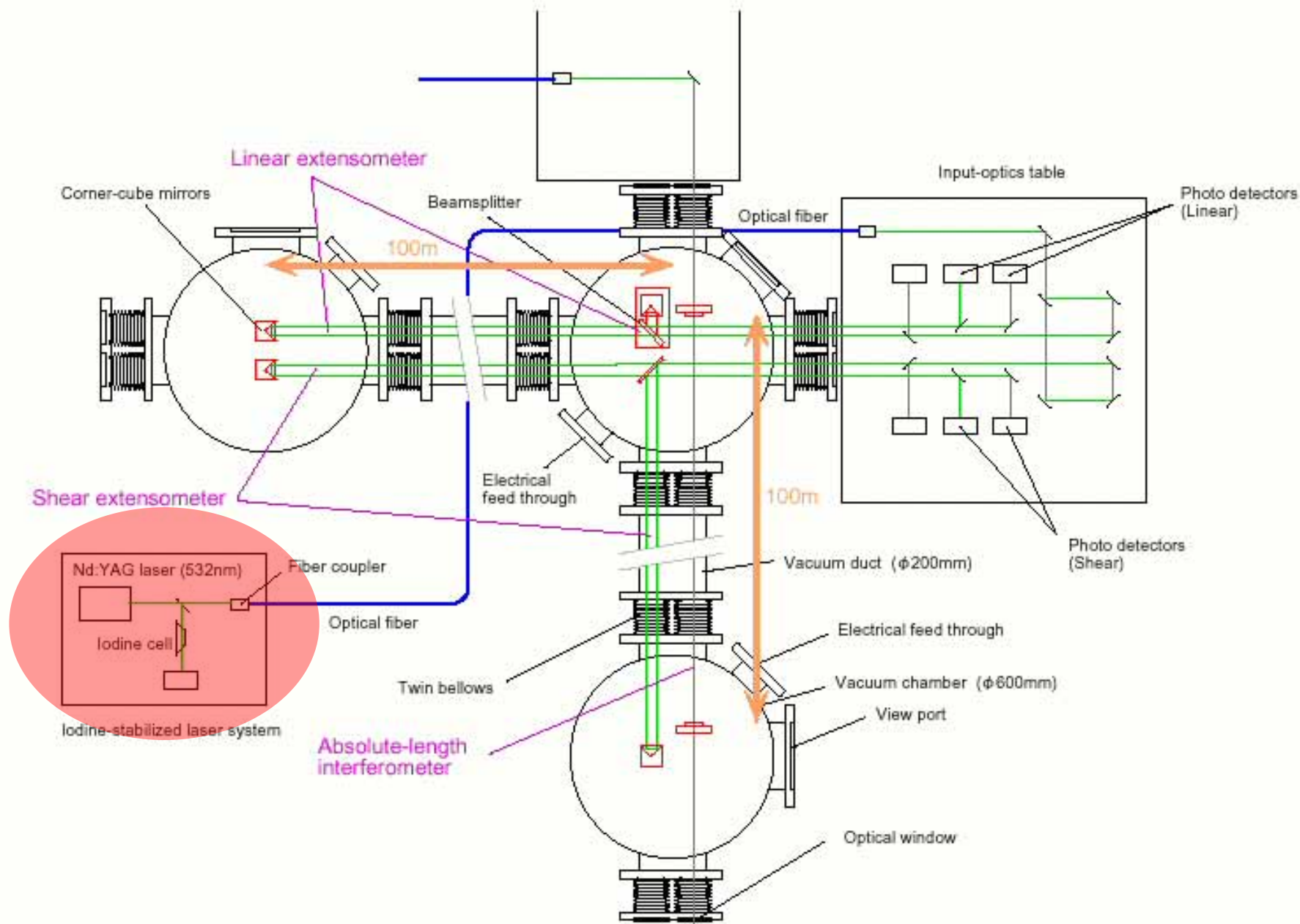


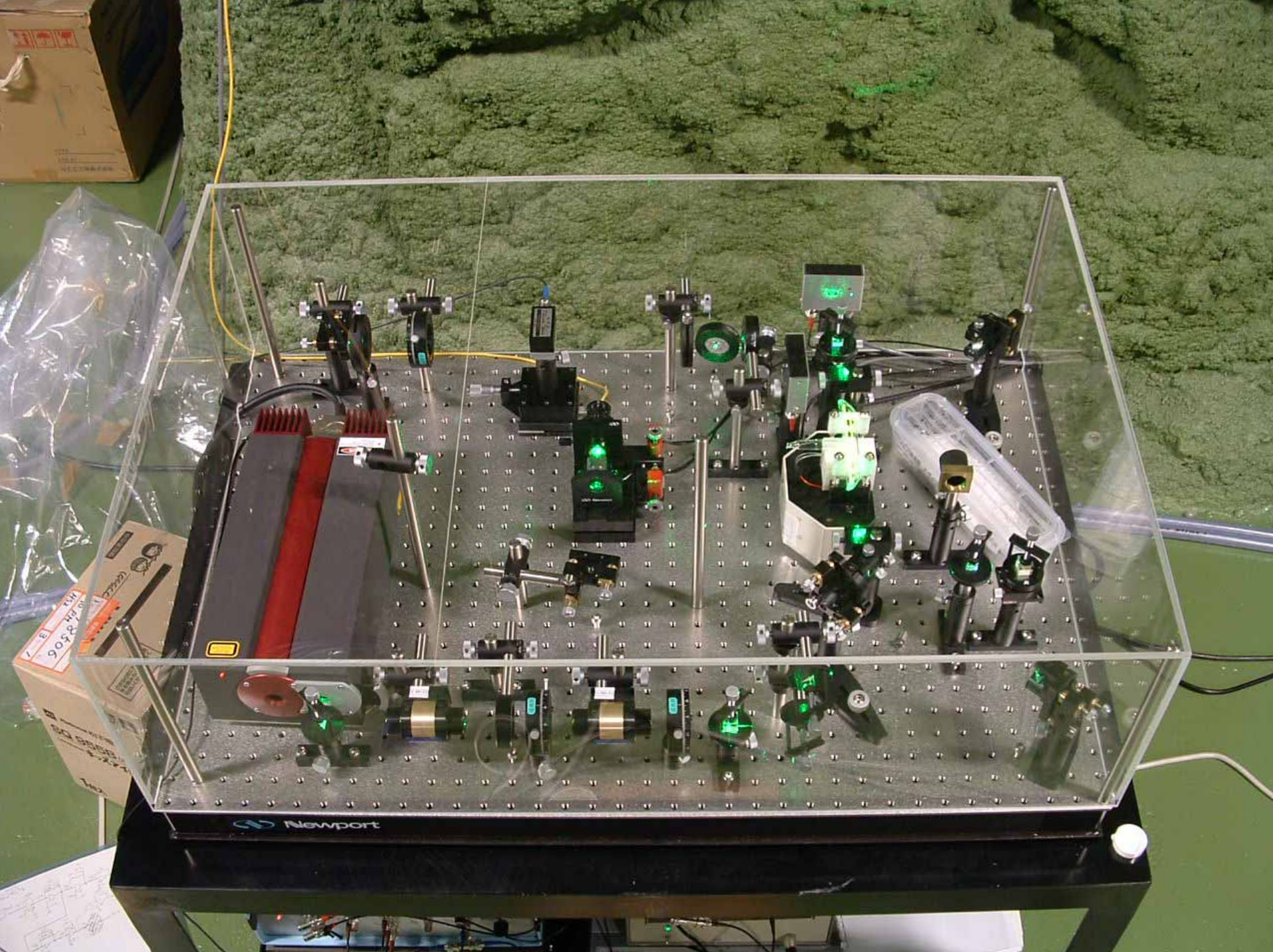
3 km長基線へ

100mレーザー伸縮計

- ・神岡鉱山内地下1000mに設置
- ・ヨウ素安定化Nd:YAGレーザー光源
- ・ひずみ検出精度 10^{-13}

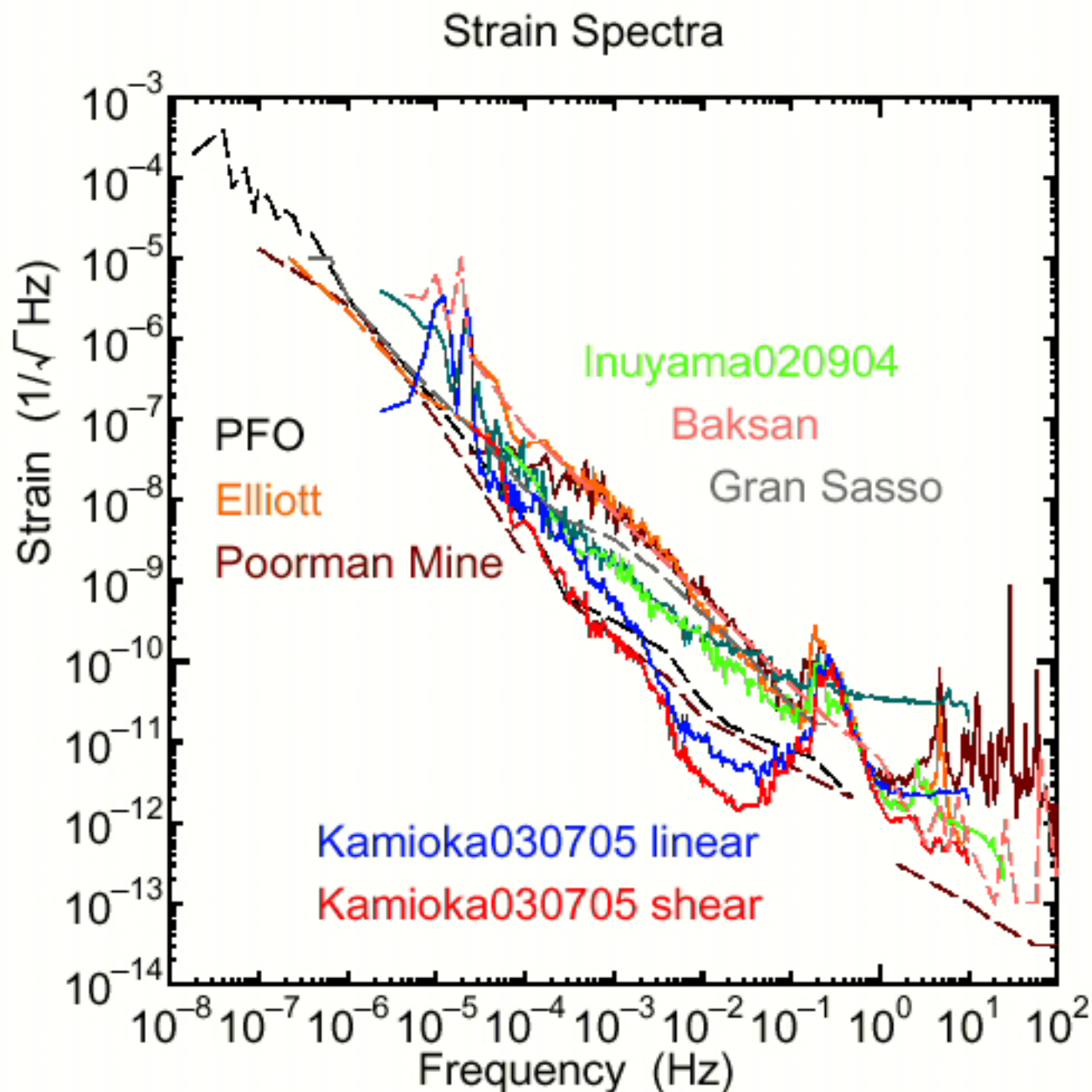


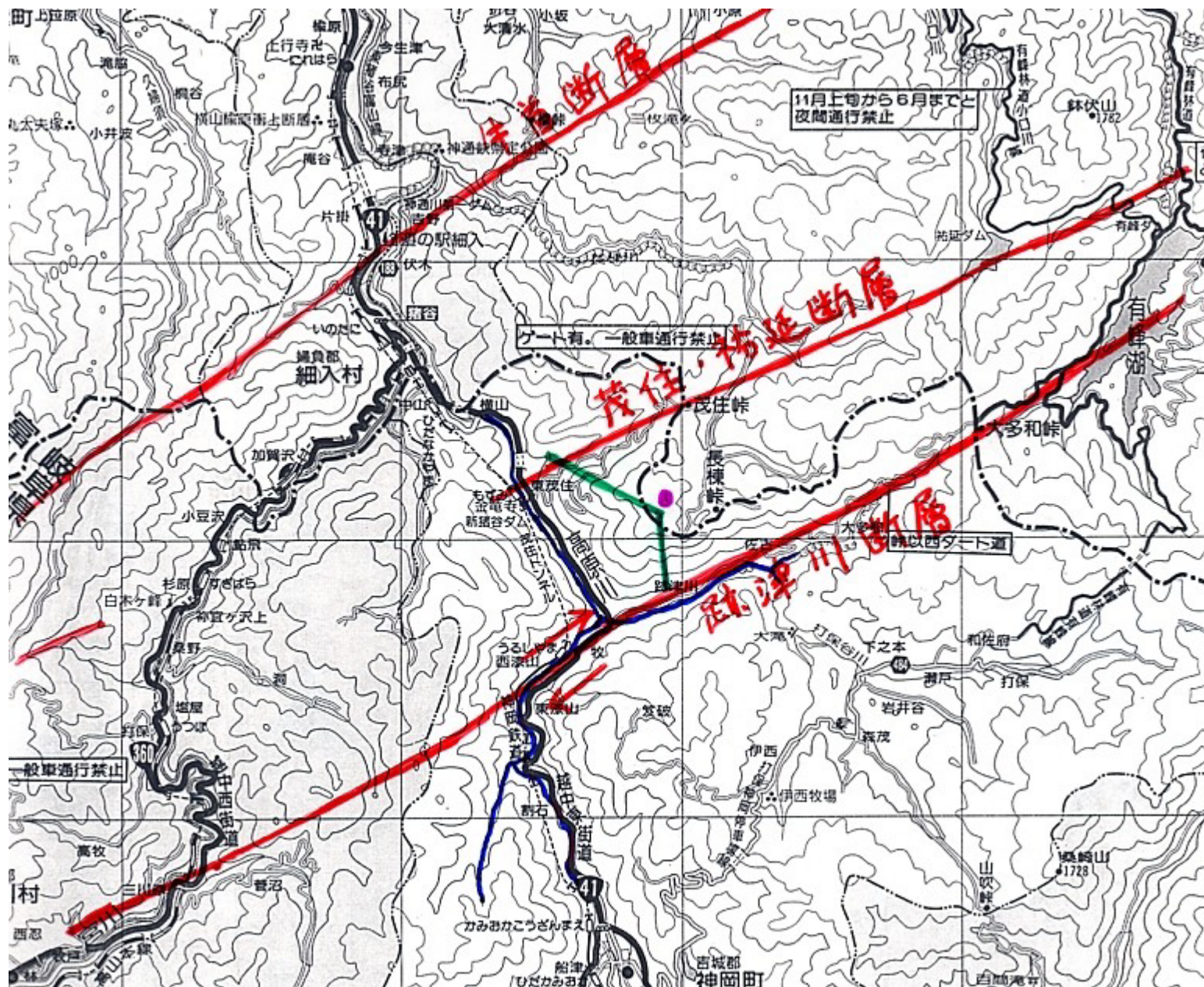






世界のレーザー- 伸縮計の ノイズレベル



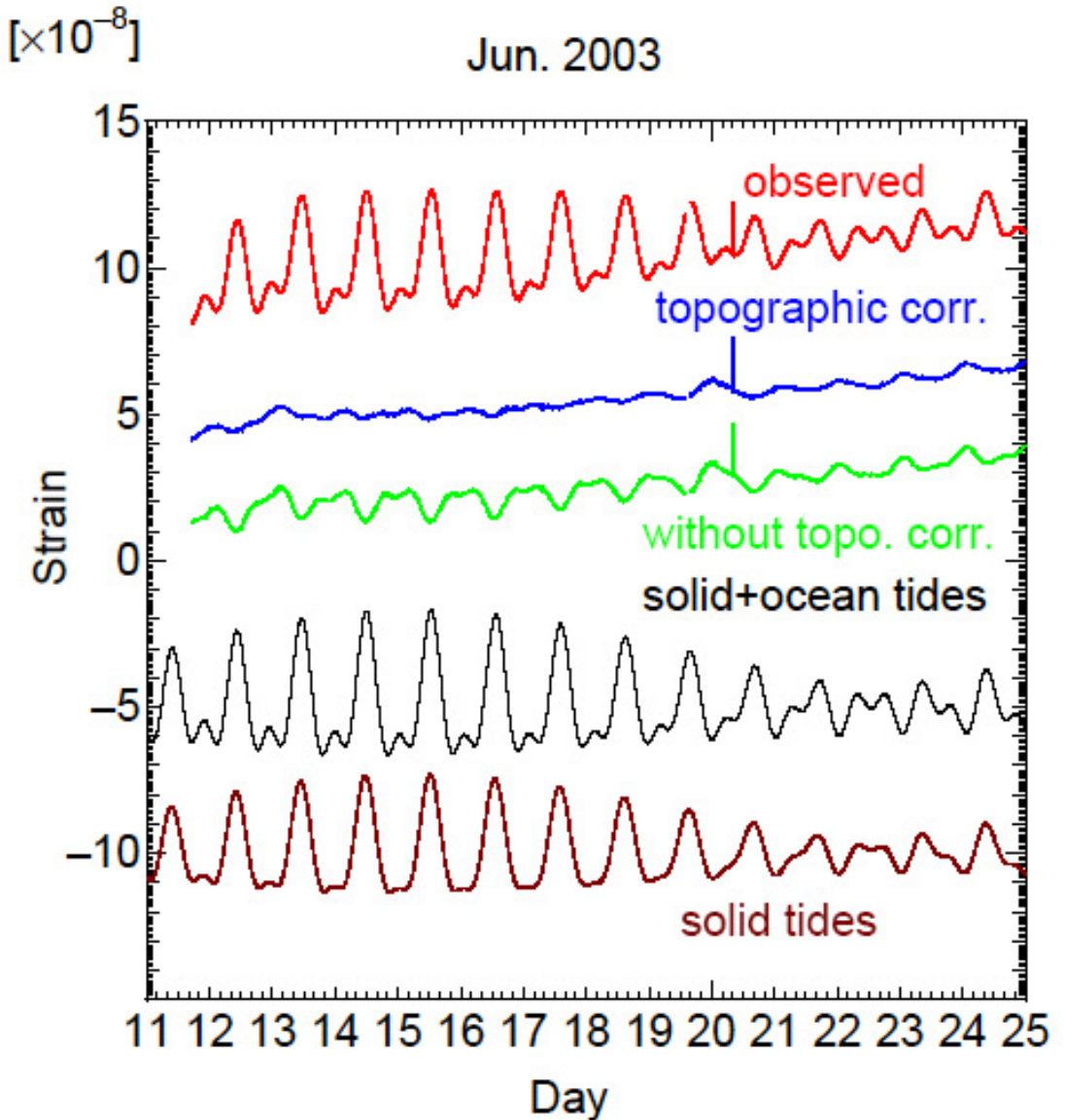


理論波形(GoticiI) による地球潮汐 成分の除去

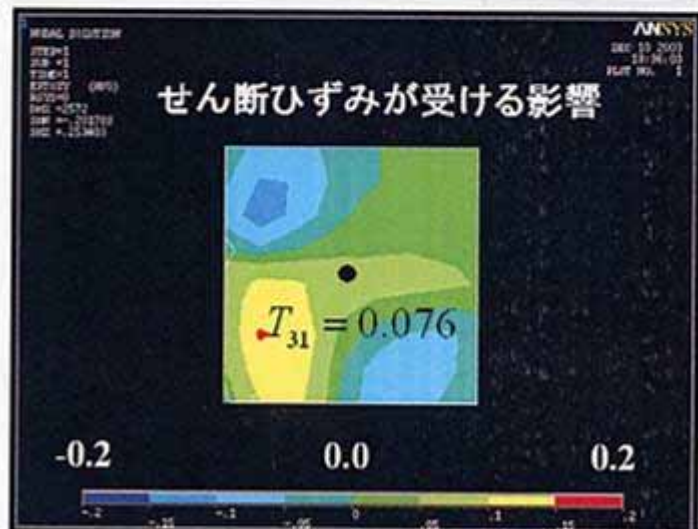
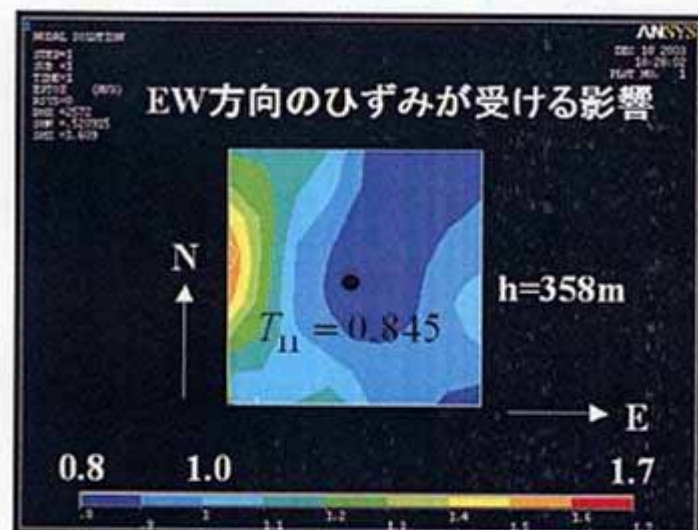
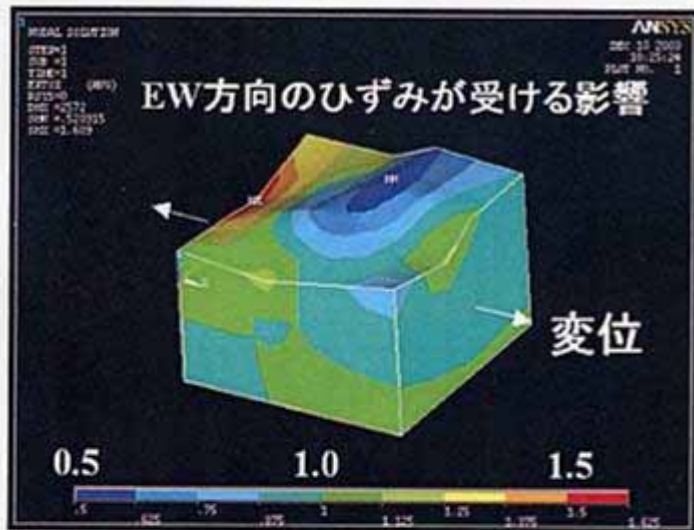
- ・固体地球＋海洋潮汐
荷重を考慮したモデル

- ・地形補正を加える

-> ～5%以内の精度で
観測波形を説明できる

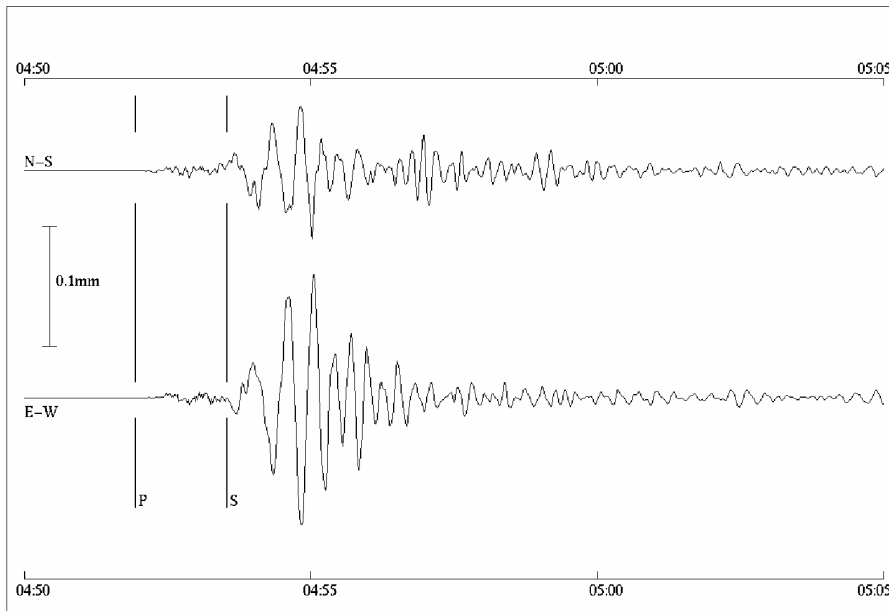


**地形補正 … 有限要素法で地形効果のmatrixを計算
(4.5km×4.5km×(2.3~3.3km)、9×9×3分割)**

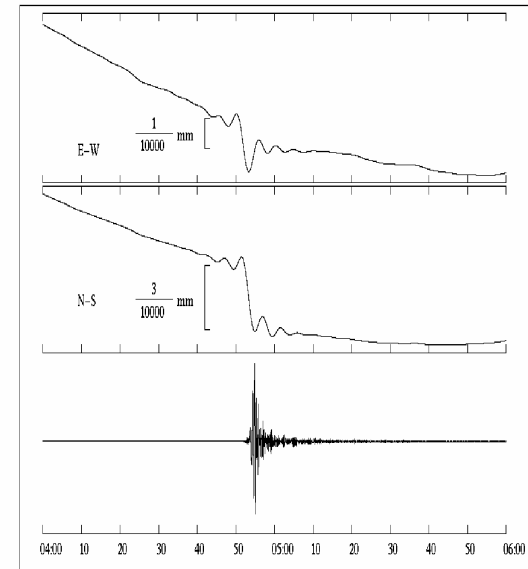


十勝沖地震の主要動と永久歪

レーザー地殻歪計で捉えた十勝沖地震の主要動



永久歪の測定
地球のモデルの精度を
確かめることができる

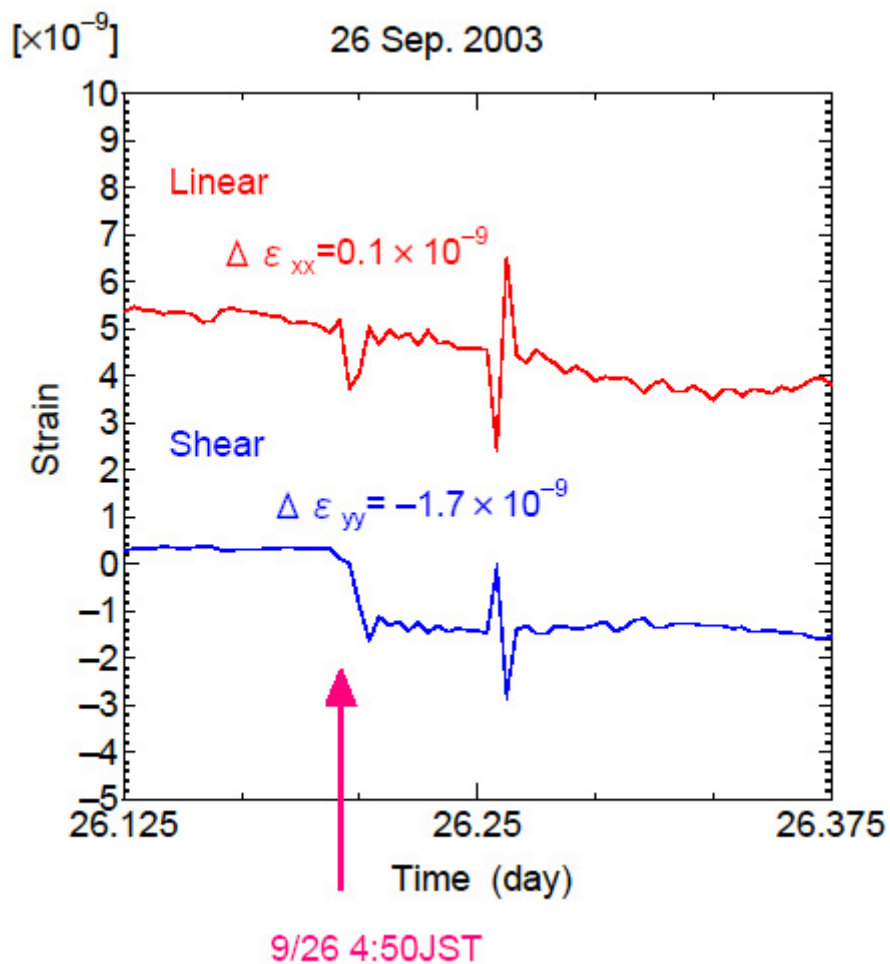


地震の際に生じた永久歪
100km先の10mの断層

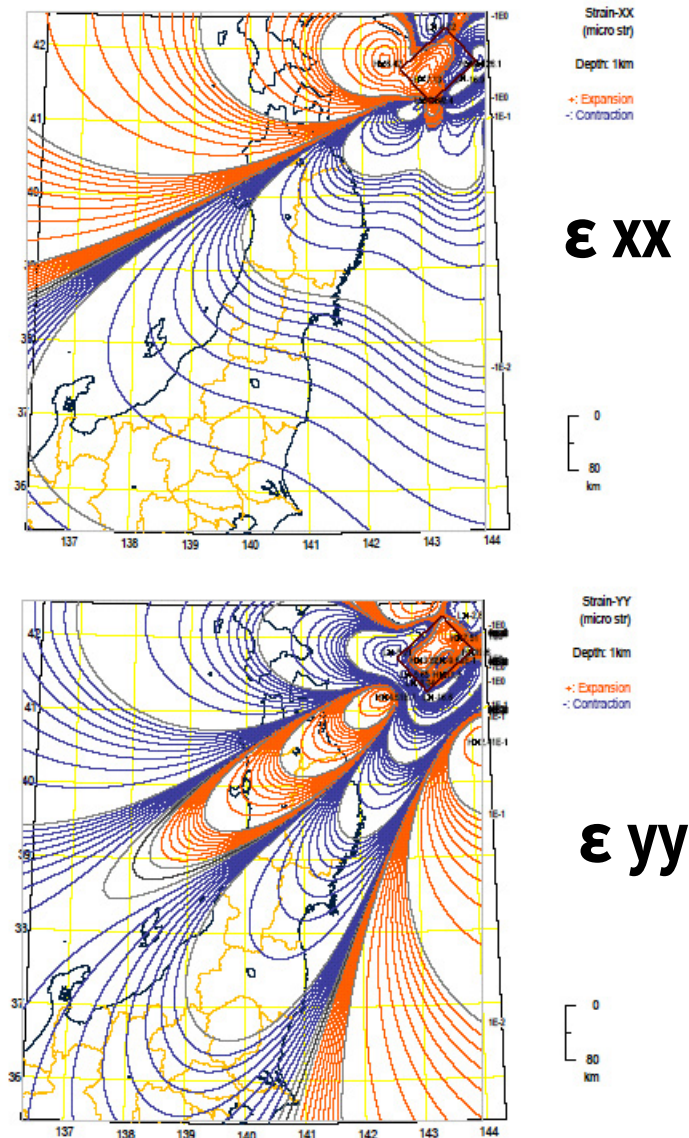
➡ 0.3 μ

十勝沖地震

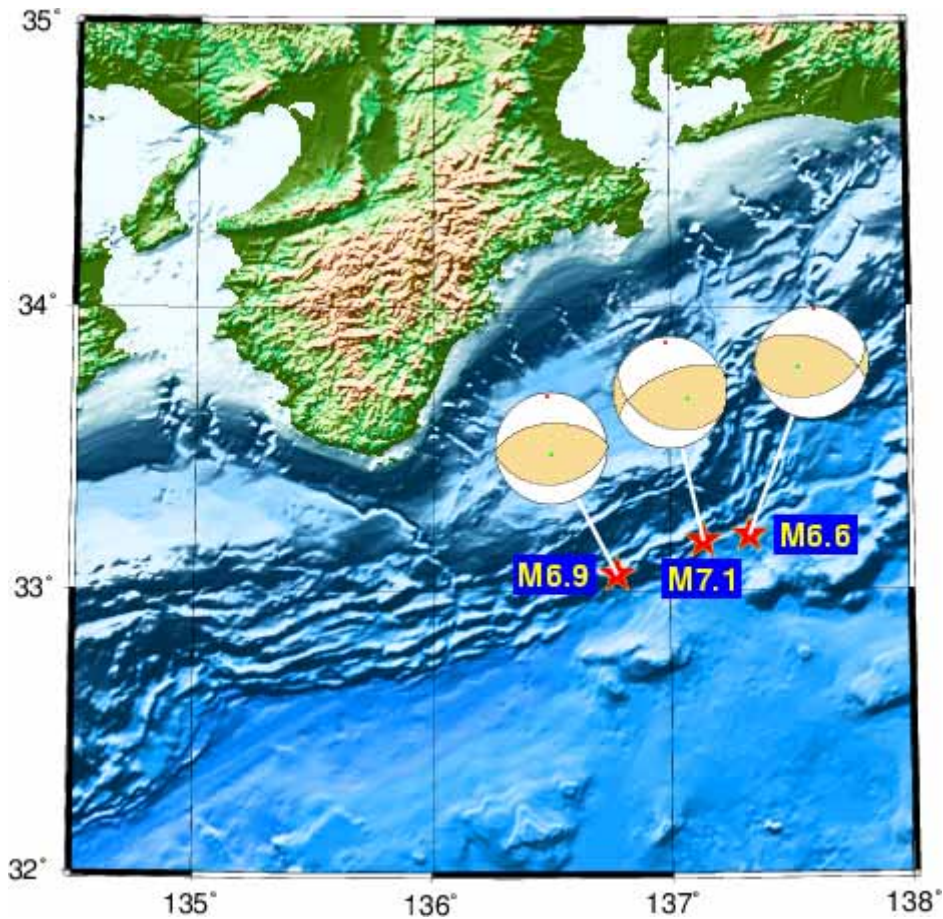
観測値



断層パラメーターから 計算した予想値

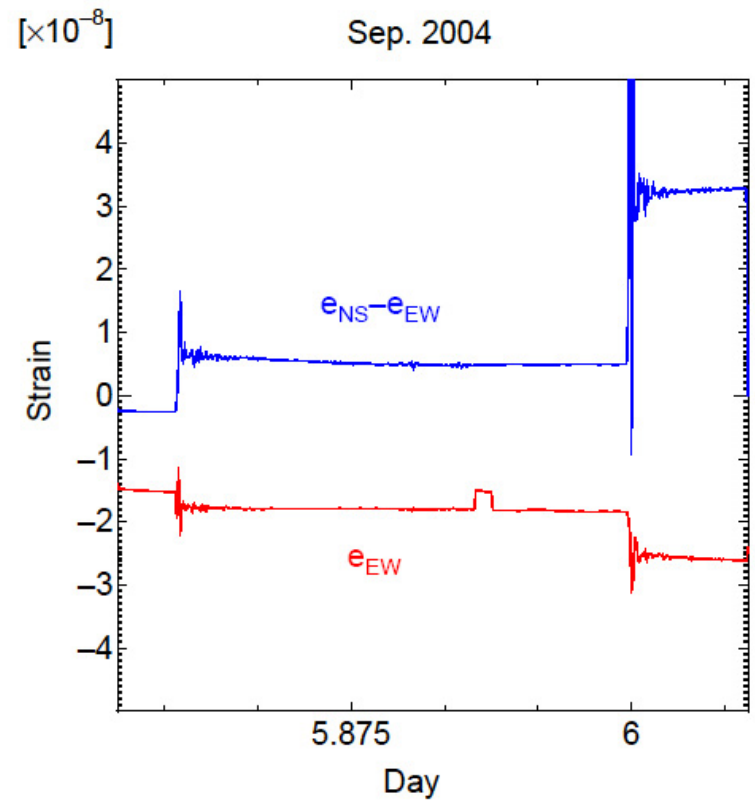


紀伊半島南東沖地震

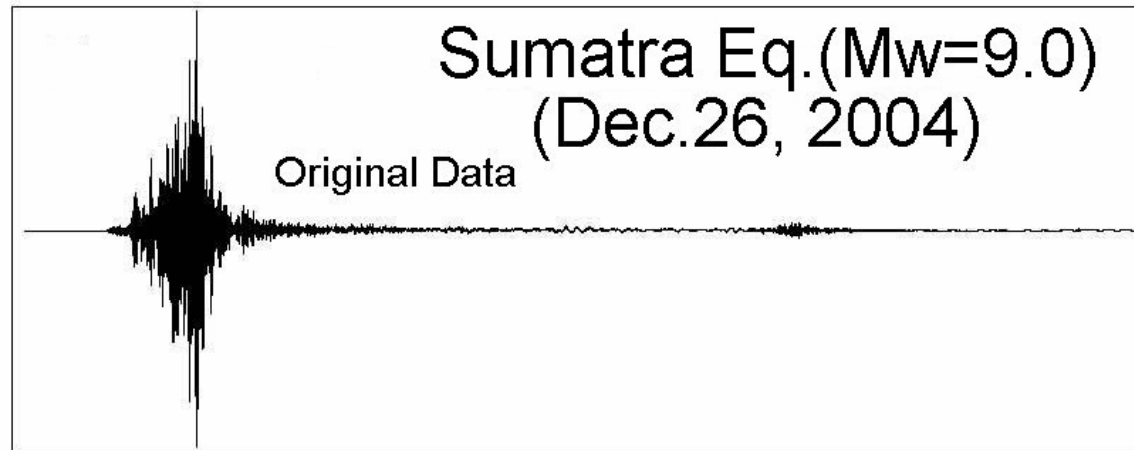


観測された波形

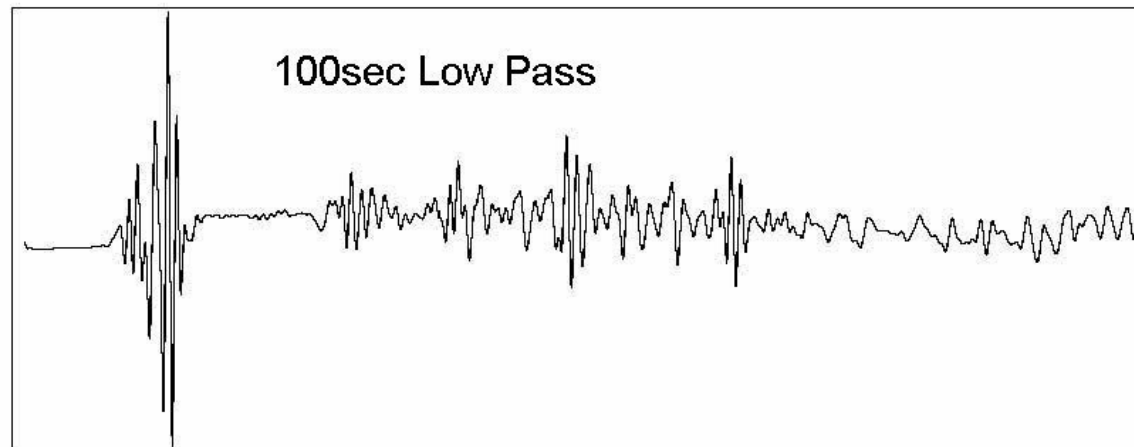
— 歪ステップが明瞭である



神岡レーザー伸縮計で観測された スマトラ沖地震の波形 (EW方向)



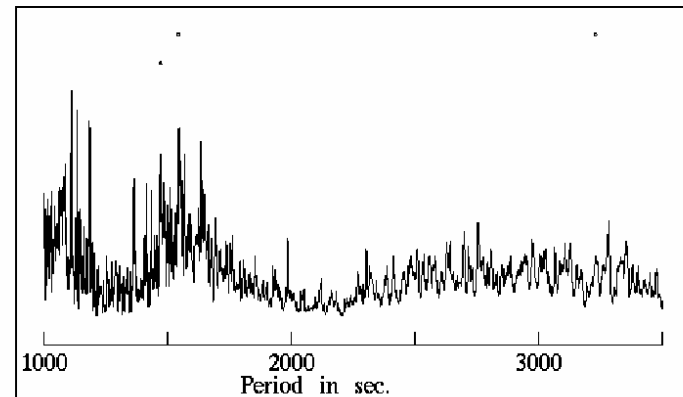
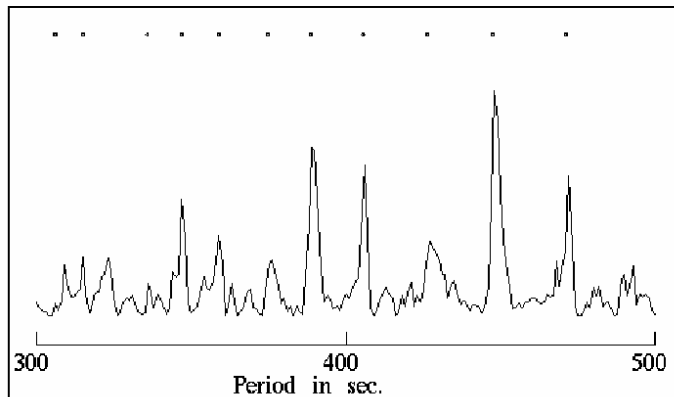
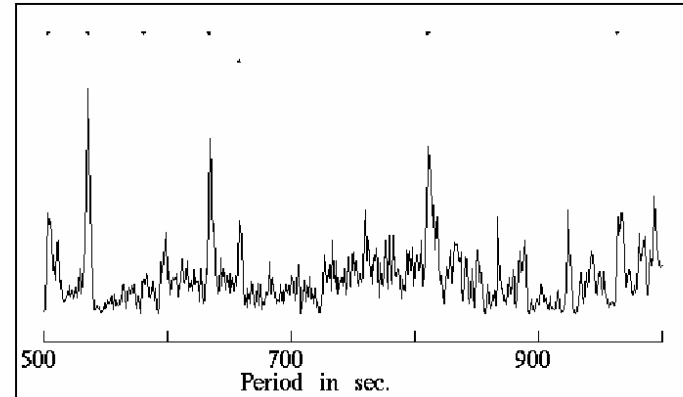
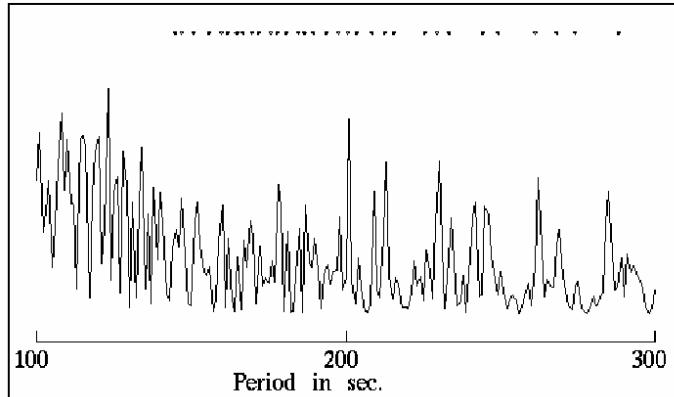
—1 hour—



神岡での再立上げメンバー (10. 22)



十勝沖地震に際して観測された地球自由振動 (伸び縮みモード)



昭和基地の重力計室

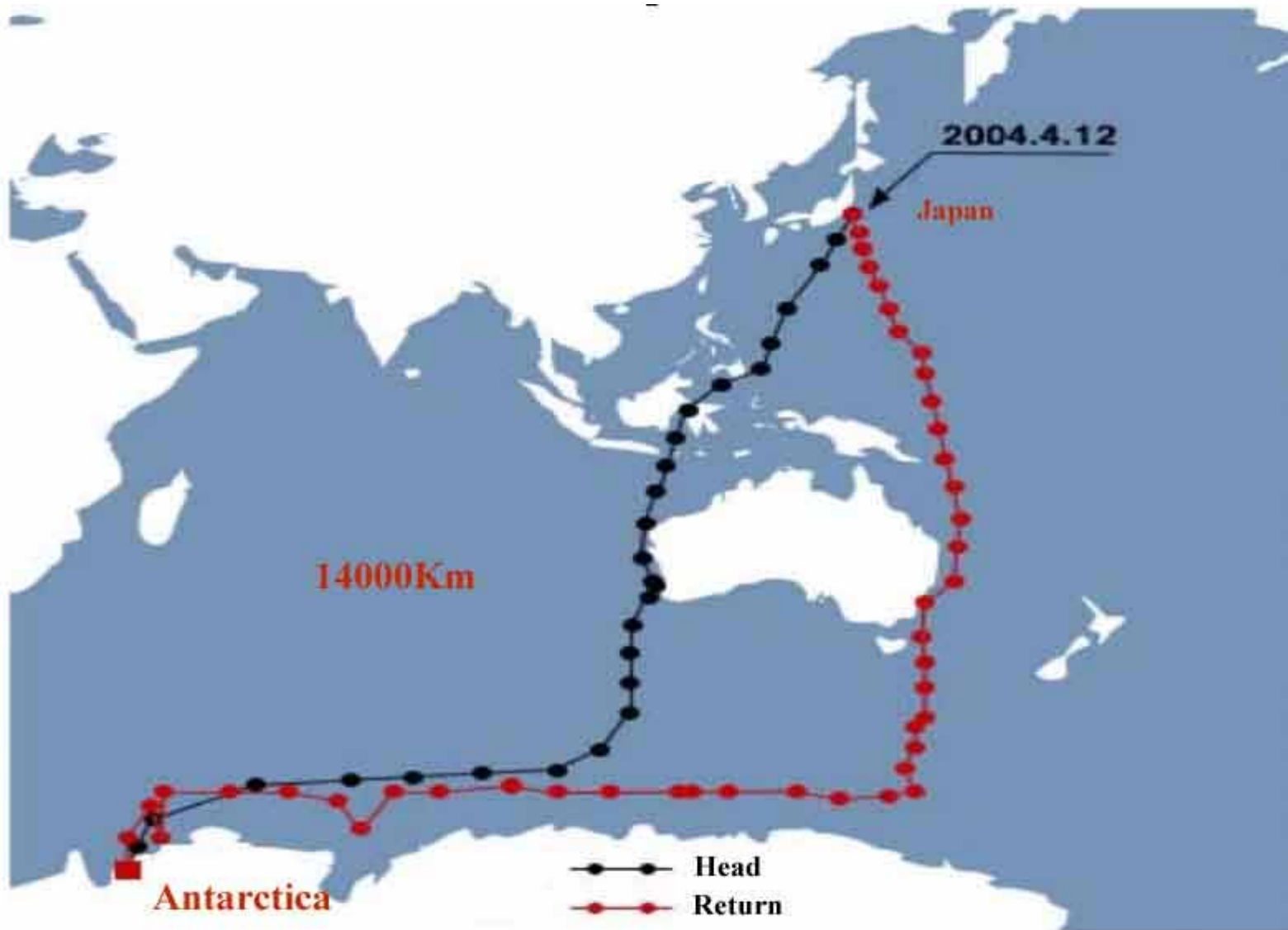


砕氷艦“しらせ”による輸送

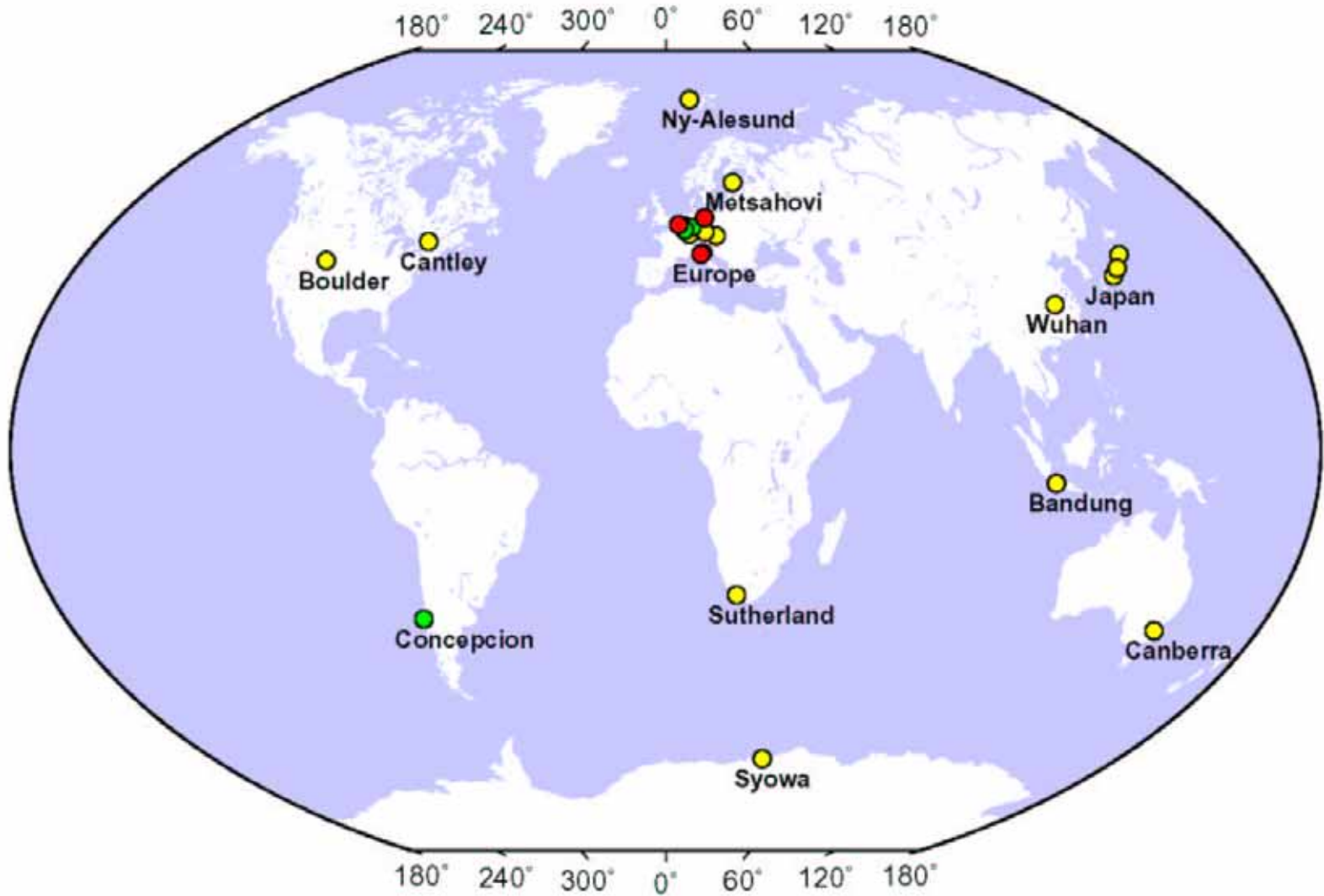


photo by TAKEDA Tsuyoshi, The Asahi Shimbun

日本から南極への輸送経路

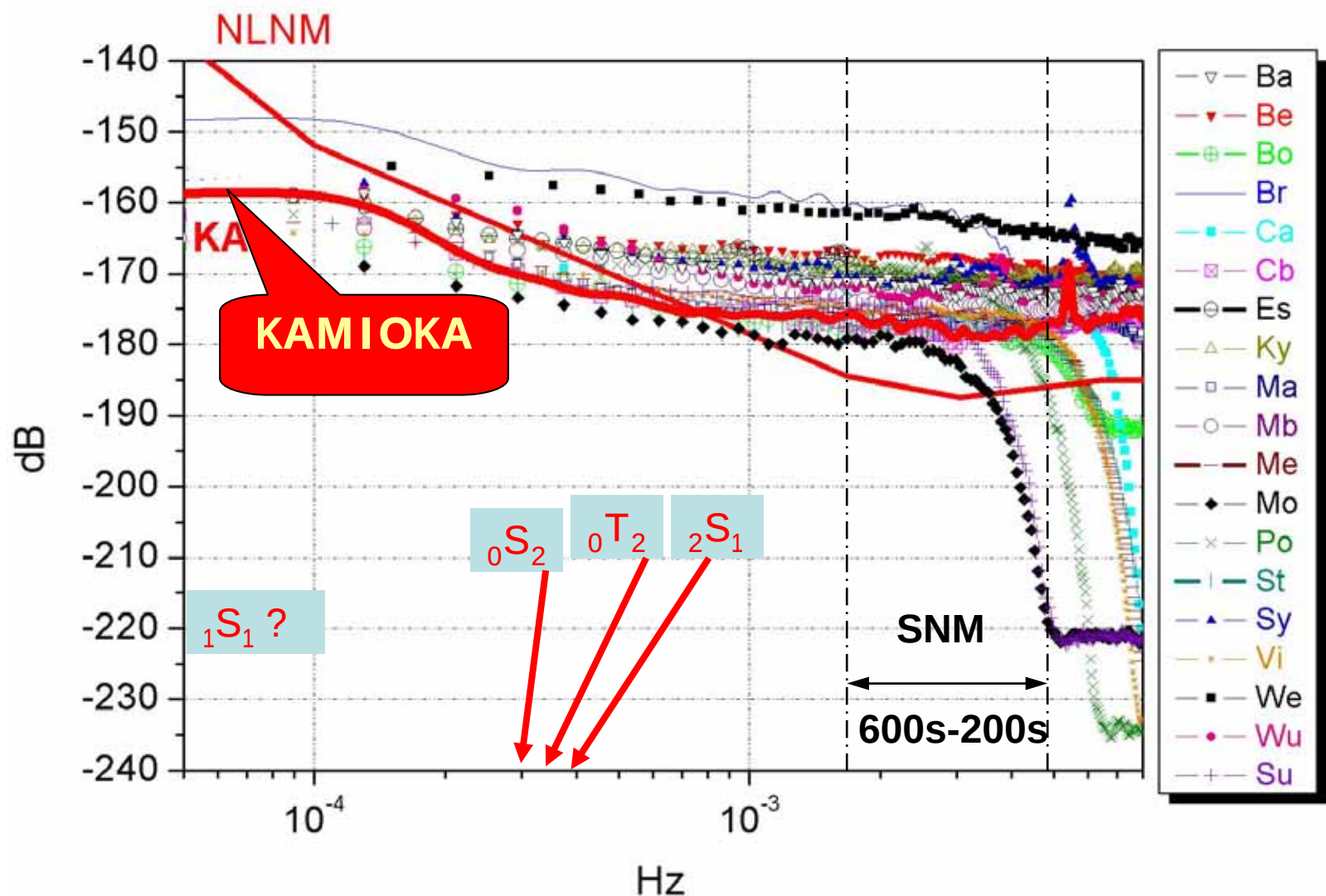


GGP Stations 1997 - 2003



Power Spectral Densities on 5 quiet days at GGP stations

= seismic noise levels



Seismological reference noise model : Peterson's noise model NLNM (1993)

観測機器の進歩により新たな知見が得られた例

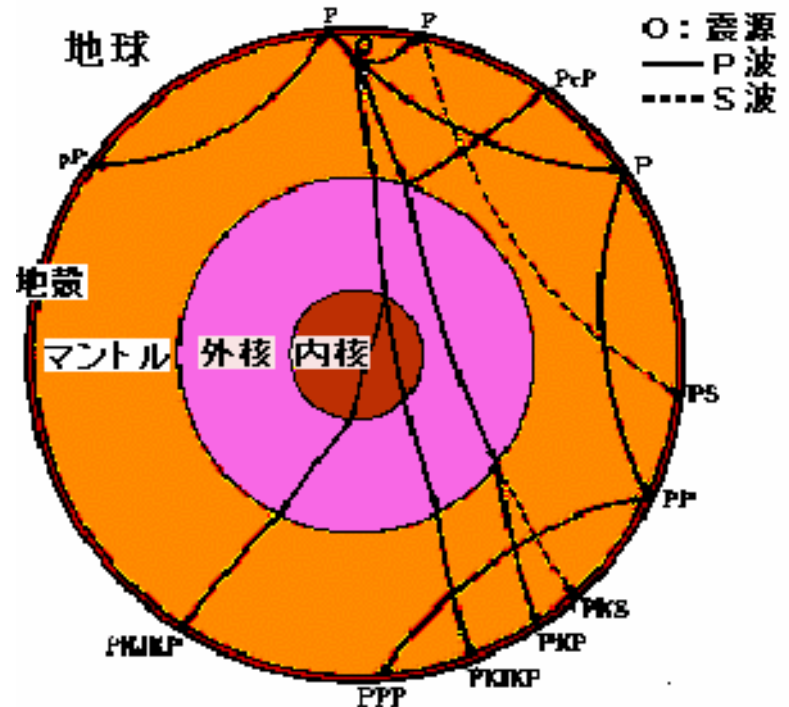
- 地震観測 . . . 広帯域地震計ネットワーク
 - > 地球のウラからの**長周期地震波**もきれいに検知

地震波の減衰(下表)のために
地球中心部からの信号を捉えるには
~0.1Hz以下の地震波の観測が必要

そのためには、
長周期の振り子
(数十秒以上)が
必要だが、
作るのが困難

$x=12700\text{km}, v=10\text{km/s}, Q=500$

$f(\text{Hz})$	λ	λ_c	$\exp(-x/\lambda_c)$
10	1km	160km	3×10^{-35}
1	10km	1600km	3×10^{-4}
0.1	100km	16000km	0.45
0.01	1000km	160000km	0.92



広帯域地震計の開発

STS地震計・・・ 板ばねを用いた長周期振子
+ 電氣的制御回路

-> 360秒周期の地震波まで観測可能

板ばね・・・ 温度変化による誤差を避ける
ために正と負の温度係数のものを併用して打ち
消している

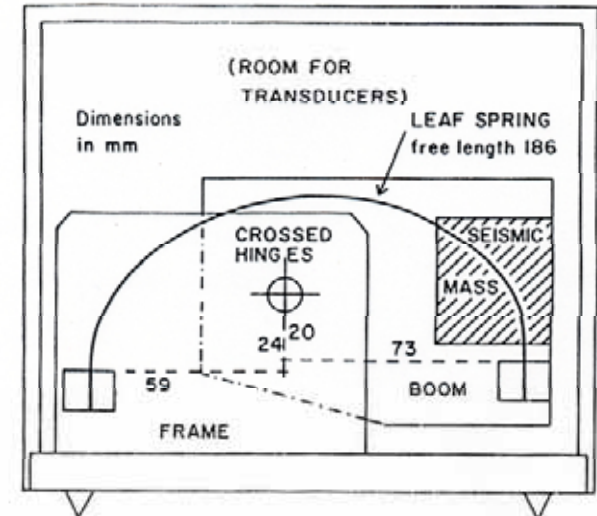
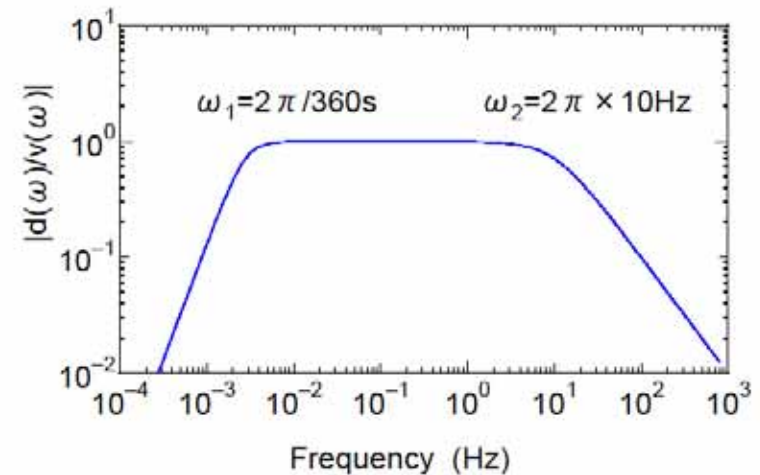
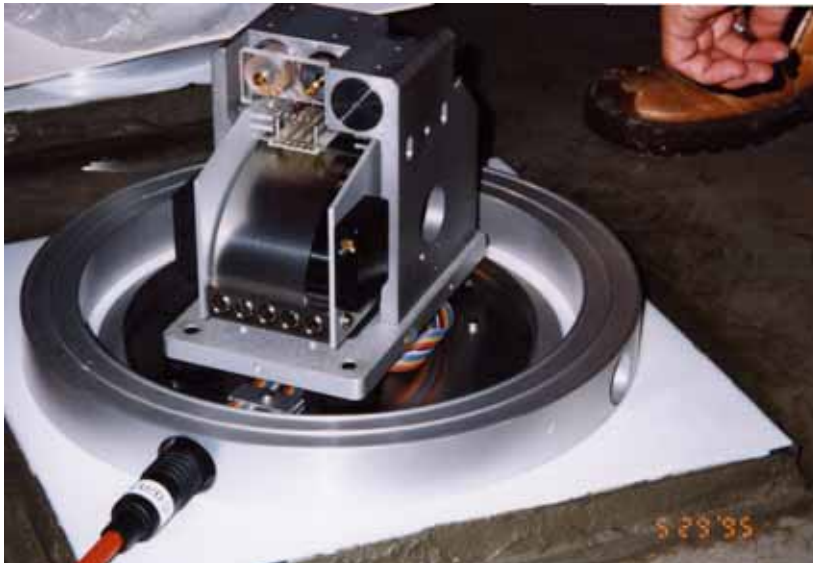
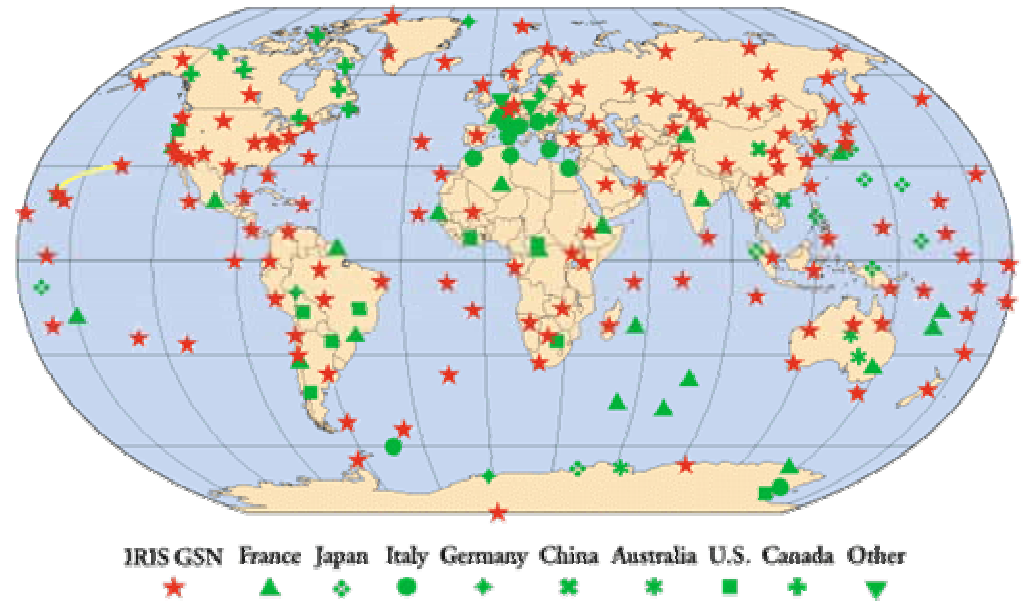


FIG. 5. Spring geometry of the leaf-spring seismometer.



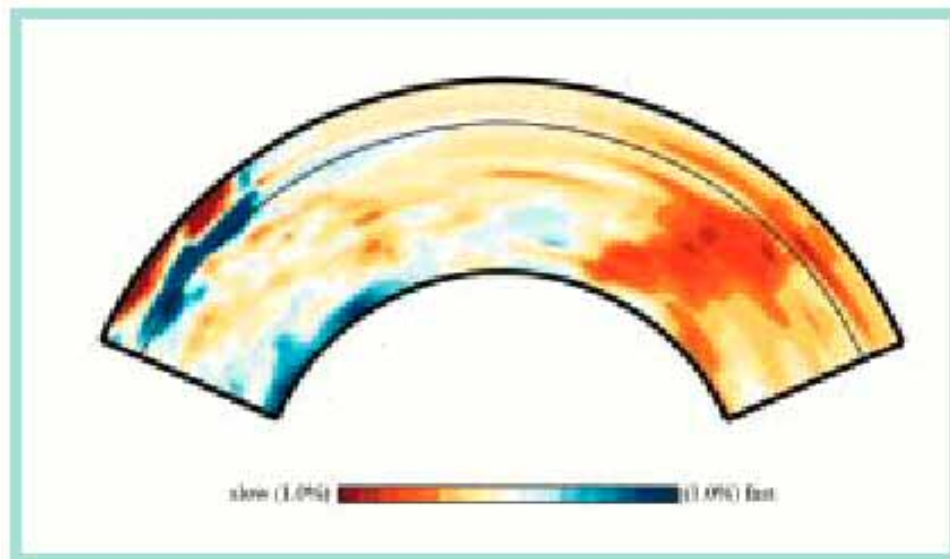
STS地震計は横坑
に設置される



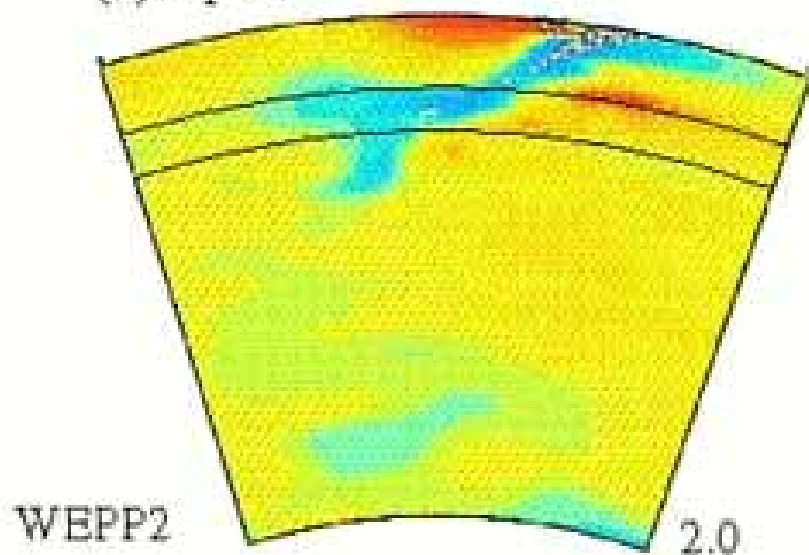
広帯域地震計による
世界規模のネットワーク



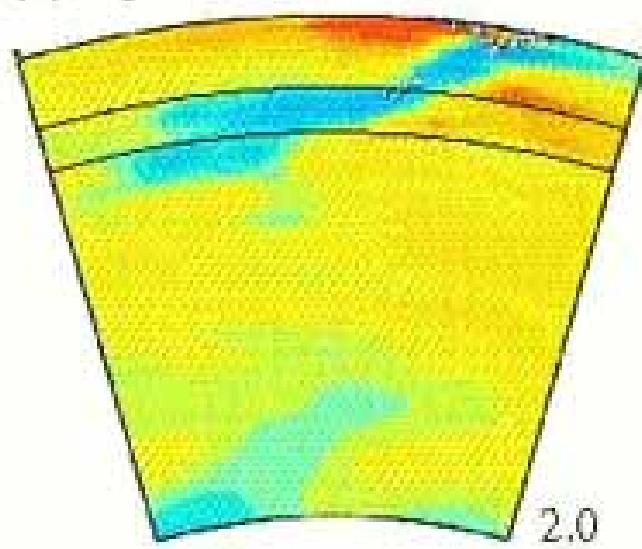
その結果、
地震波を用いた
地球内部トモグラフィー
が可能となった



(a) Japan A

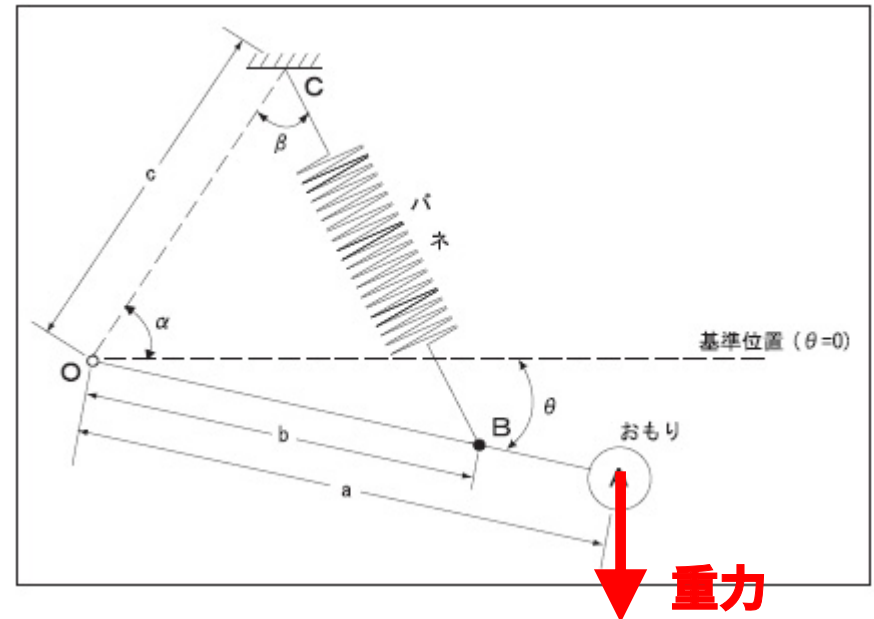


(b) Japan B



観測機器の進歩により新たな知見が得られた例

- ・絶対重力計 ・ ・ ・ 従来の重力計では基準重力点との
重力差しか得られなかった



従来の重力計(LaCoste重力計など)は、ばねばかりの原理で重力の**変化**を測る

絶対重力計

自由落下させた鏡の位置をレーザーの波長と原子時計を基準に測定
 $y = (1/2)gt^2$ により重力そのもの
(絶対値)を観測できる

9桁(10億分の1)の精度
($1 \mu\text{gal} = 10^{-8}\text{m/s}^2$)

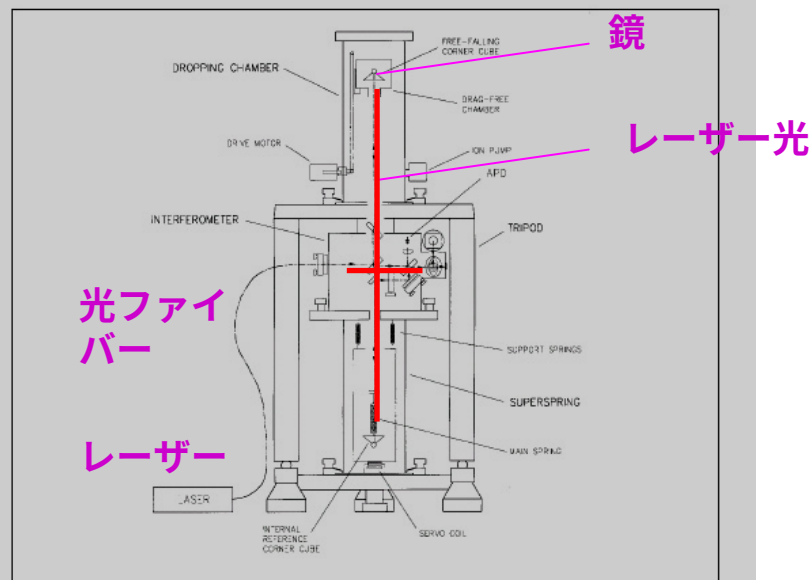


Figure 2-1 The FG5 System

重力基準点が不要なので、火山島など地域全体の重力変化が大きい場合の観測に威力を発揮。 -> **三宅島火山活動時の空洞形成を検知**

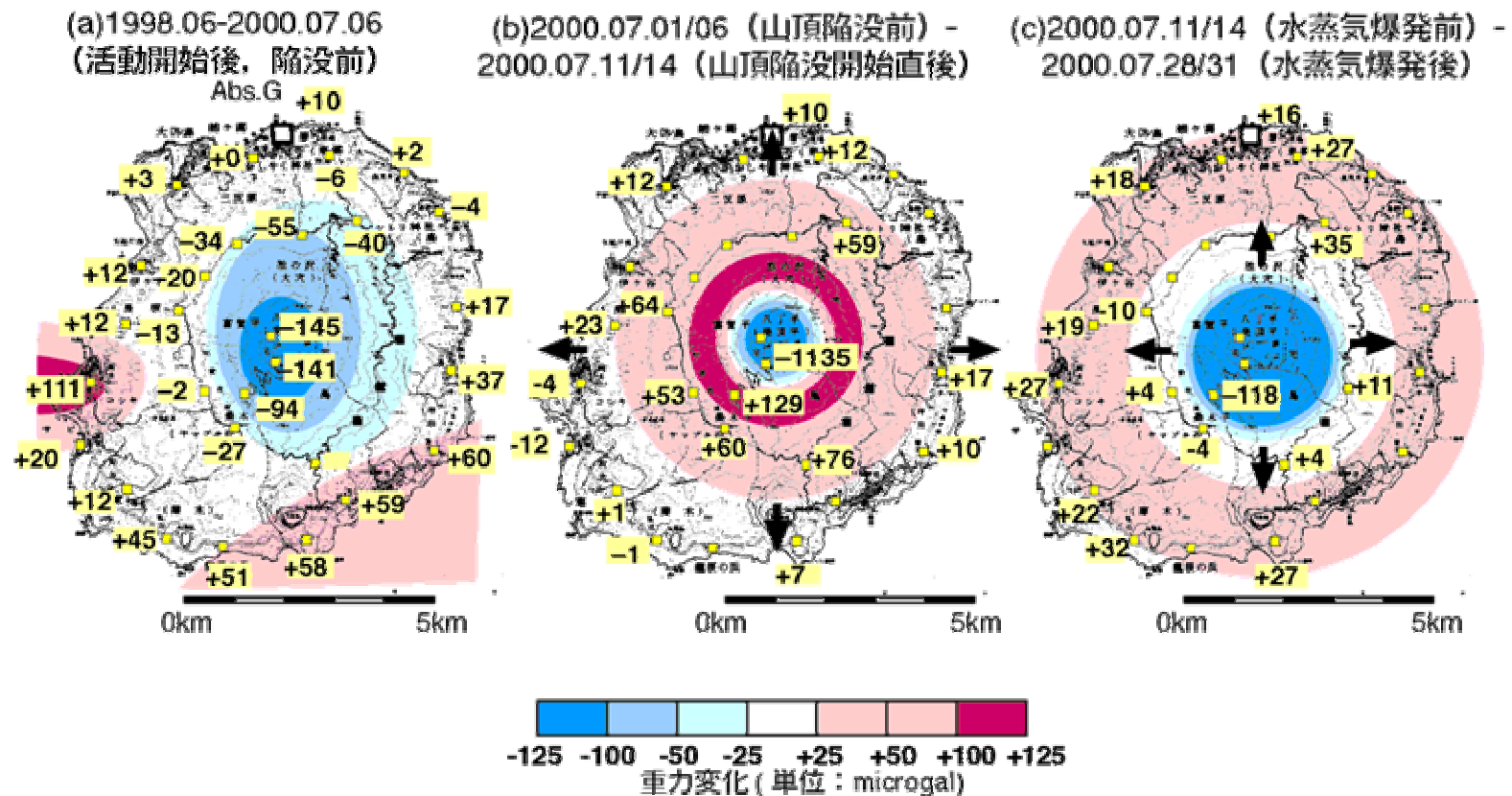
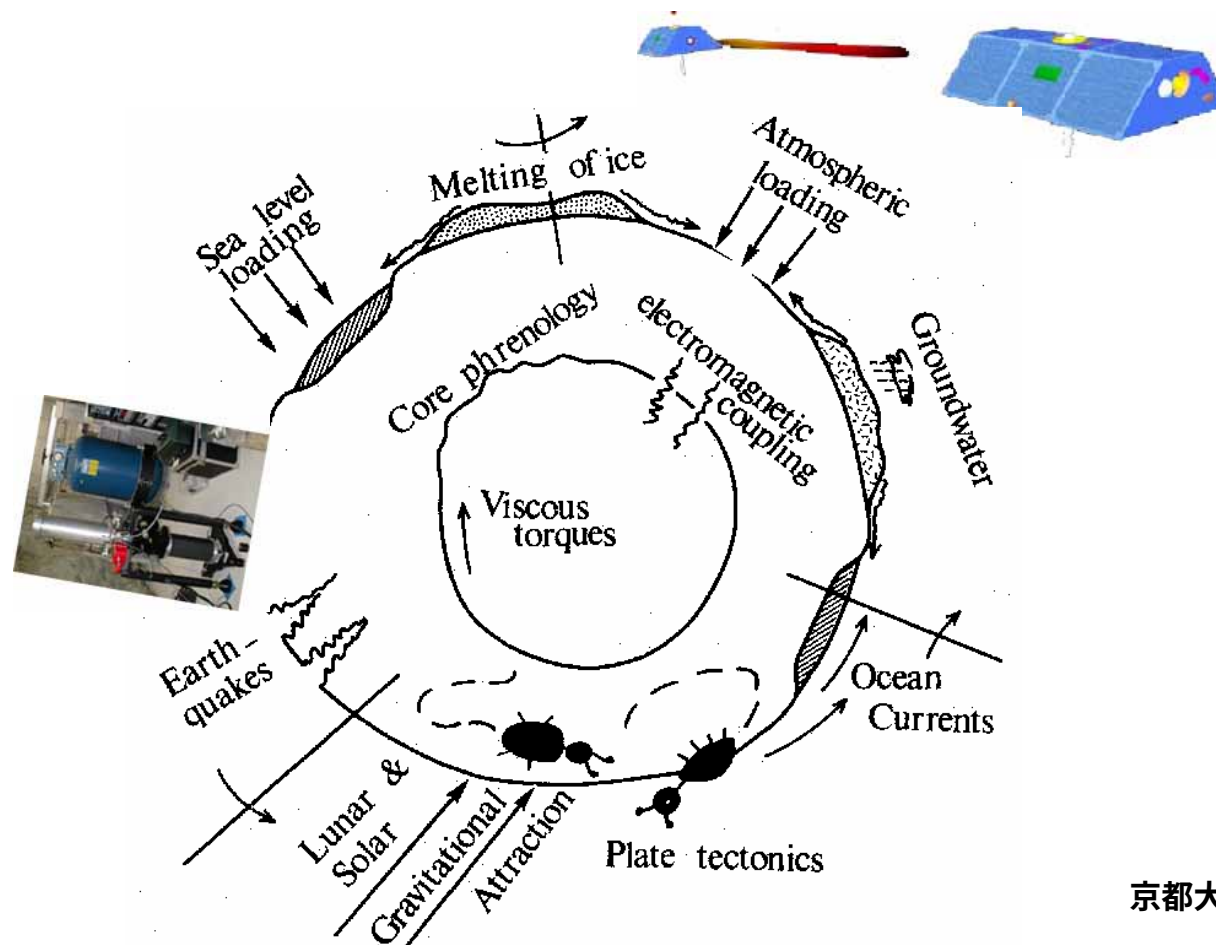


図1. 三宅島島内の重力の時間変化

LaCoste重力計と絶対重力計を併用して、島内の重力変化を観測
-> 山頂付近の急激な重力低下(=空洞形成)を検知 -> その後陥没

地上重力観測と地上観測



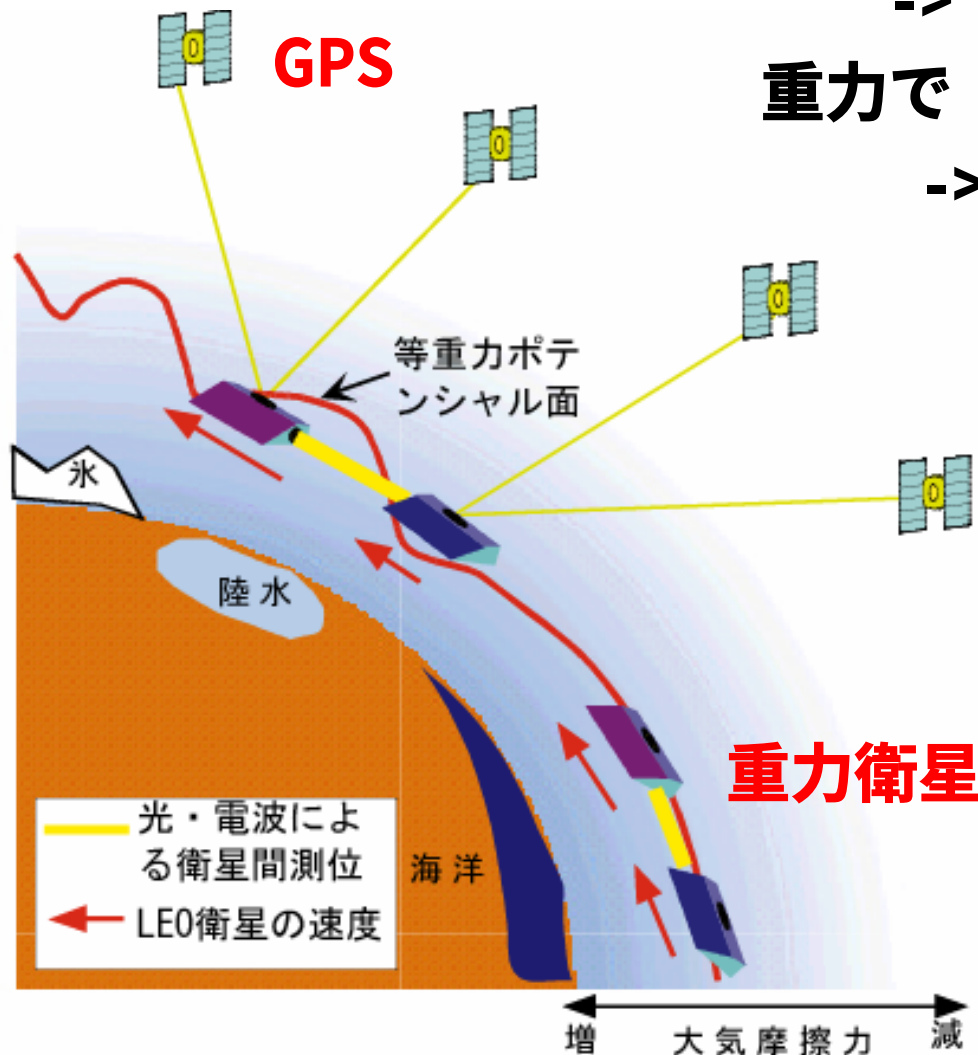
観測機器の進歩により新たな知見が得られた例

・ 衛星重力観測 . . . 人工衛星の軌道から重力変化を検知

-> 地球規模の重力観測が可能。

重力で「水」が測れる

-> 地球環境のモニター



・ 地球重力場の研究

・ 水の監視

(地下水、氷床)

・ 地殻変動の監視

(地震、火山噴火)

-> 地球環境監視

アマゾン地域の重力変化は「水」によるものと考えられる。

GRACE衛星で検知された重力場の季節変動

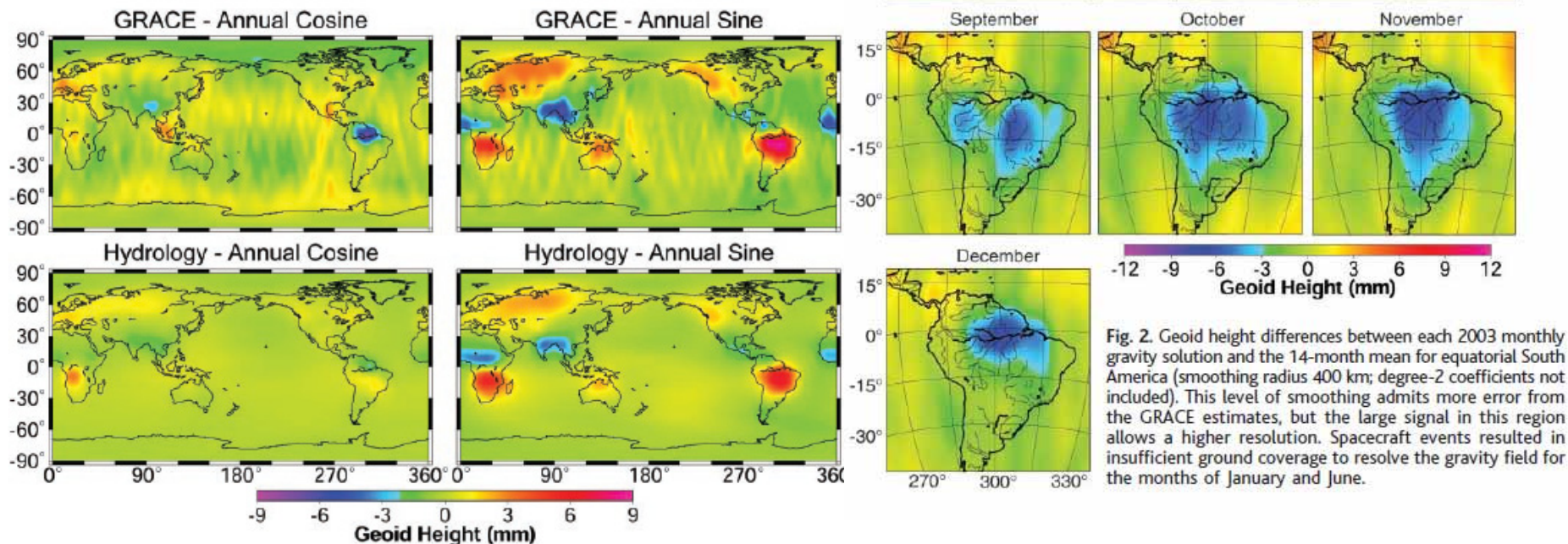
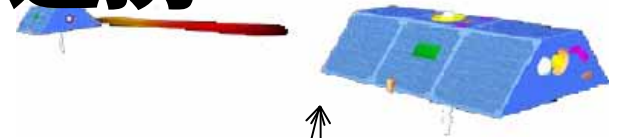


Fig. 2. Geoid height differences between each 2003 monthly gravity solution and the 14-month mean for equatorial South America (smoothing radius 400 km; degree-2 coefficients not included). This level of smoothing admits more error from the GRACE estimates, but the large signal in this region allows a higher resolution. Spacecraft events resulted in insufficient ground coverage to resolve the gravity field for the months of January and June.

地上と衛星観測の連携



一衛星観測

(ほぼ) 純粋に質量変化だけを観測する
距離による感度の低下

$$\propto 1/h^2 \rightarrow \propto 1/h^2 \cdot (d/h)^2$$



一地上観測

質量変化と地殻変動(上下動)の両方を観測する
ローカルな影響が大きい



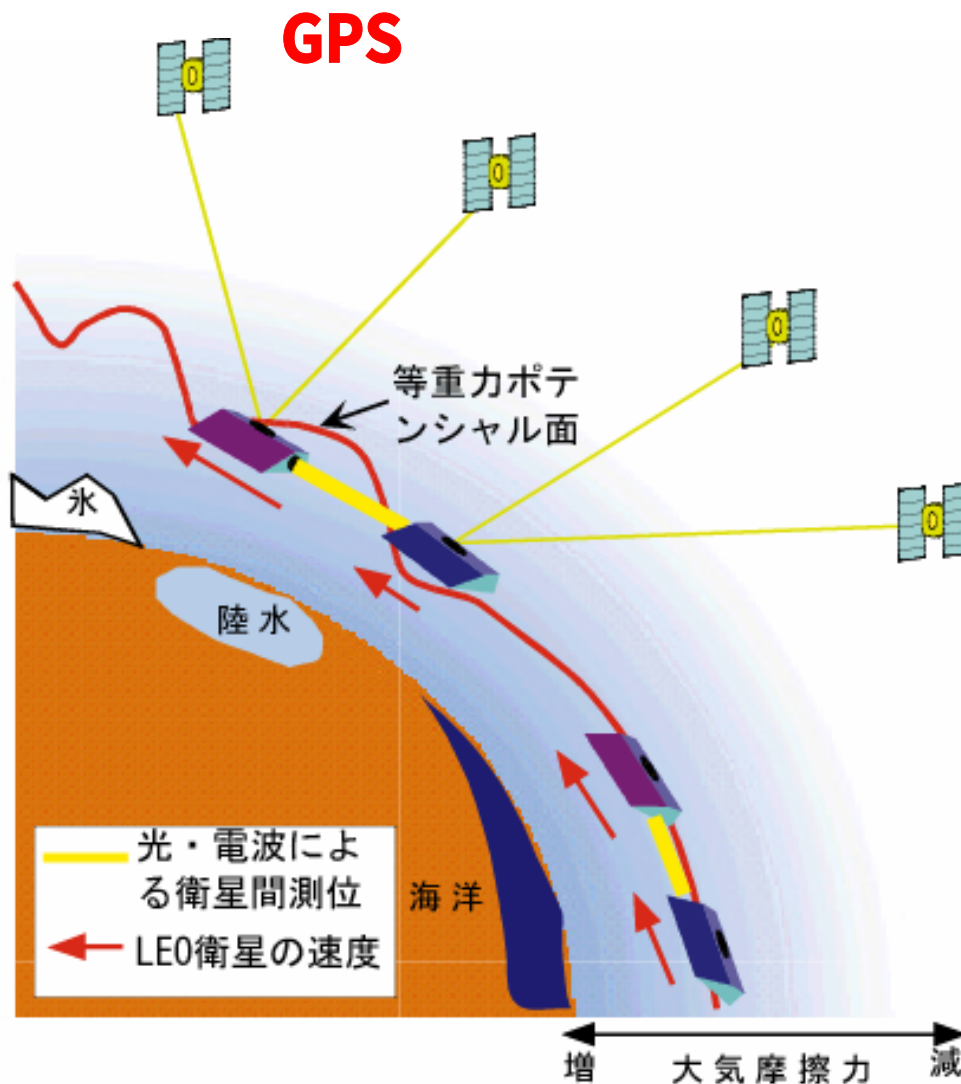
これらのtoolを如何に使いこなすか

小型衛星による 「重力ミッション」の概要 (GPS・加速度計搭載衛星)

新谷 昌人(東大地震研)
津田 敏隆(京大生存圏)
福田 洋一(京大院理)
齊藤 昭則(京大院理)
大坪 俊通(NICT)
久保岡俊宏(NICT)
青山 雄一(NICT)

衛星重力ミッションとは？

人工衛星の軌道から地球重力場を検知

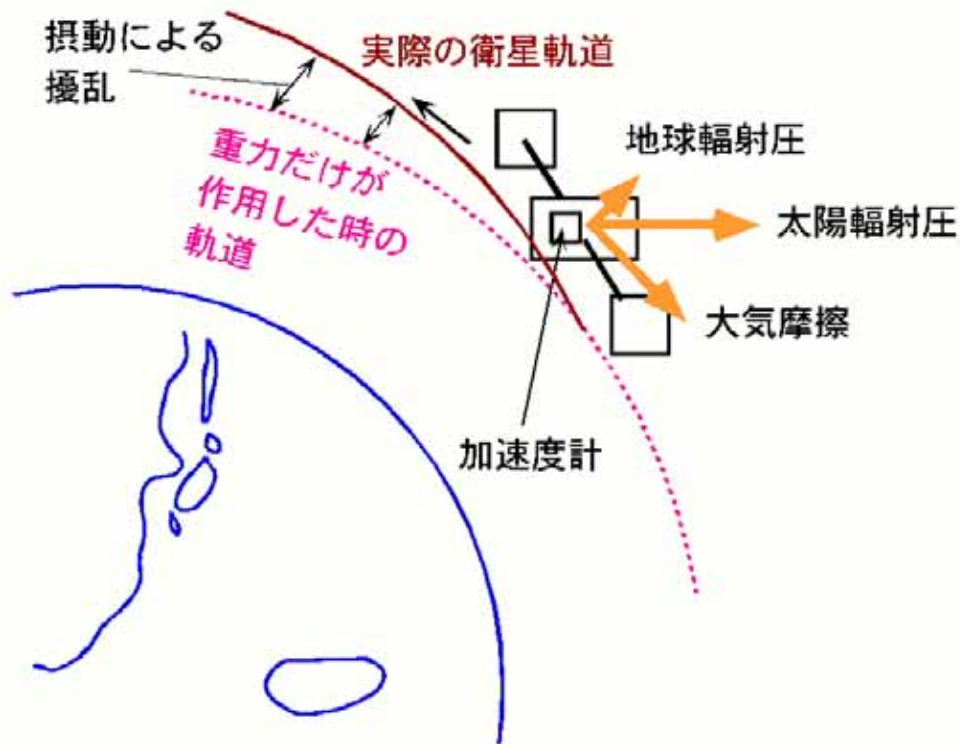


- ・地球重力場の研究
- ・水の監視
(地下水、氷床)
- ・地殻変動の監視
(地震、火山噴火)

-> 地球環境監視

加速度計による非重力擾乱の補正

非重力擾乱 …… 大気抵抗、太陽・地球輻射圧($10^{-6} \sim 10^{-8} \text{m/s}^2$)



加速度計による衛星軌道補正

衛星軌道のdrag

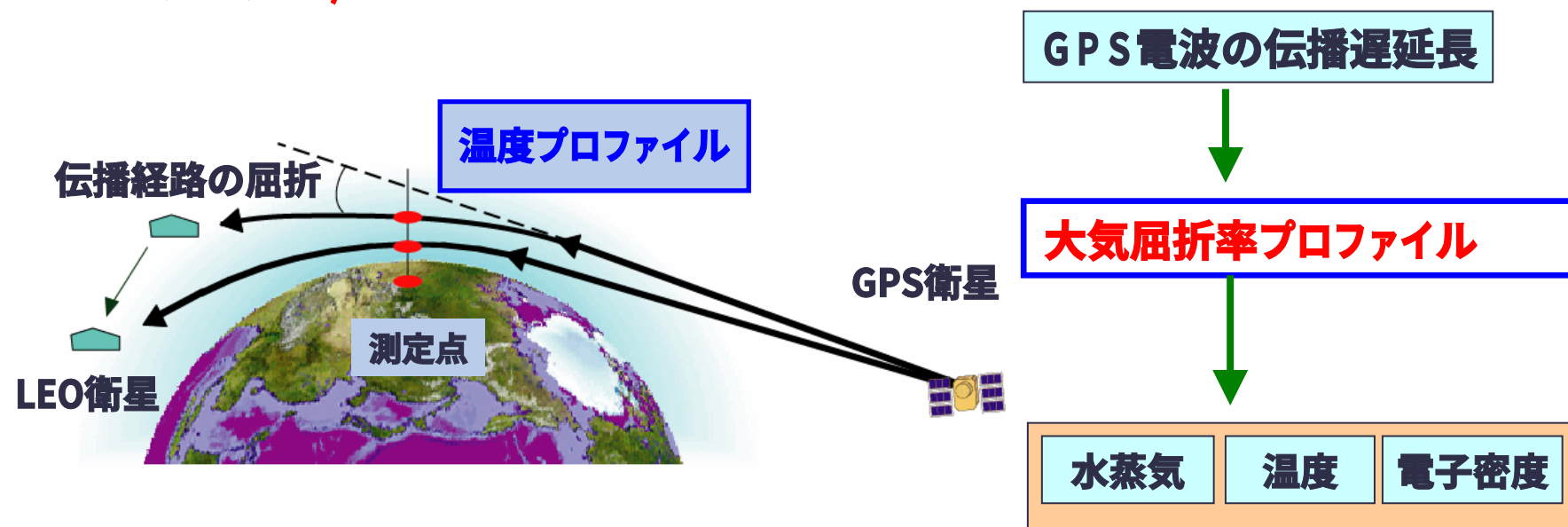
-> 衛星搭載加速度計で
非重力擾乱を検知、
dragを補正

精度 $\sim 10^{-11} \text{m/s}^2$
(0.1mm/周回に相当)

GPS掩蔽とは？

低軌道 (LEO) 衛星や航空機から見て、GPS衛星が地平線に没する (掩蔽) 際に、大気をかすめて伝播してくる電波を受信し、伝搬遅延から気温・水蒸気量・電子密度の高度プロファイルを測定する。

低軌道 (LEO) 衛星によるGPS掩蔽観測



科学目的

GPS/TEC観測

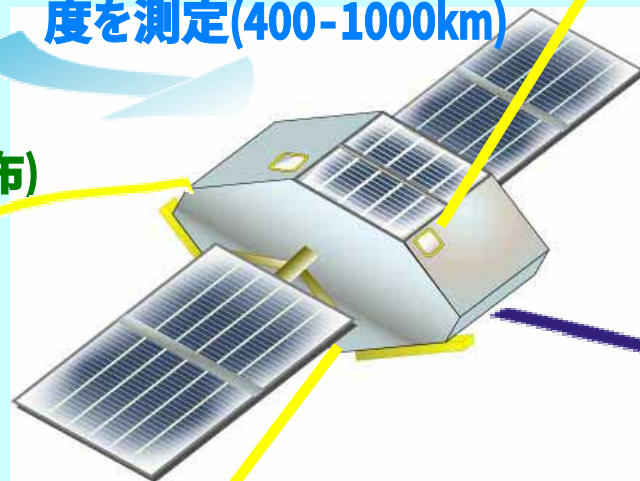
プラズマ圏 (電子密度)
電離層トモグラフィ



GPS衛星

軌道擾乱観測

大気ドラッグより大気密度を測定(400-1000km)



GPS掩蔽観測

対流圏・成層圏
(温度・湿度など)
電離層 (電子密度分布)



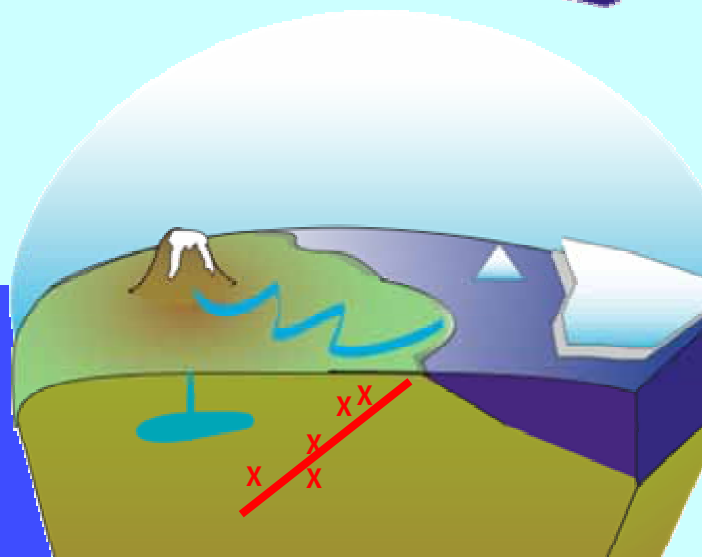
GPS衛星

軌道変動から 地球重力場測定

雪氷圏 (氷床・氷河)
海洋 (深層流、大気荷重応答)
陸水 (水循環、土壌水分)
マントル (ポストグレーシャル
リバウンド)

GPS海面反射

海面高度分布
波浪・海上風測定



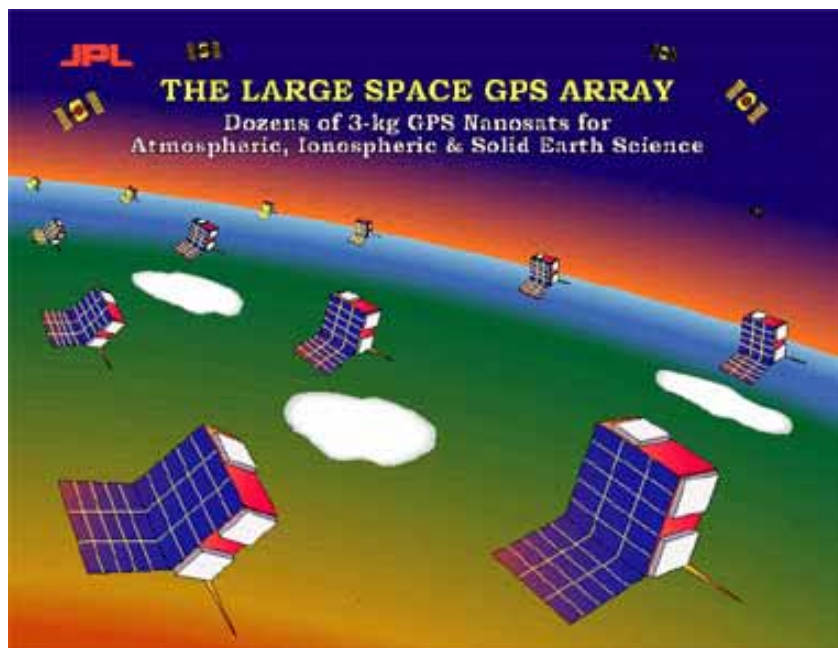
「日本版衛星重力ミッション」の提案

海外のミッション … 少数精鋭、高コスト

日本版 … 小型低軌道(LEO)衛星、低コスト・多数

-> 時間・空間分解能の向上、開発・打ち上げ期間短縮

イメージとしては…「衛星重力アレイ」



- ・GPS受信機と加速度計のユニット
(小型軽量、高性能、低価格)

- ・(50kg程度)LEO衛星を複数台
今後の地球周回衛星にも標準搭載

- ・小型LEO衛星網を用いた高時空間分解
能での地球観測

水資源探査、天気予報・気候変動予測、
海面変動、宇宙天気予報などに貢献

提案計画概要

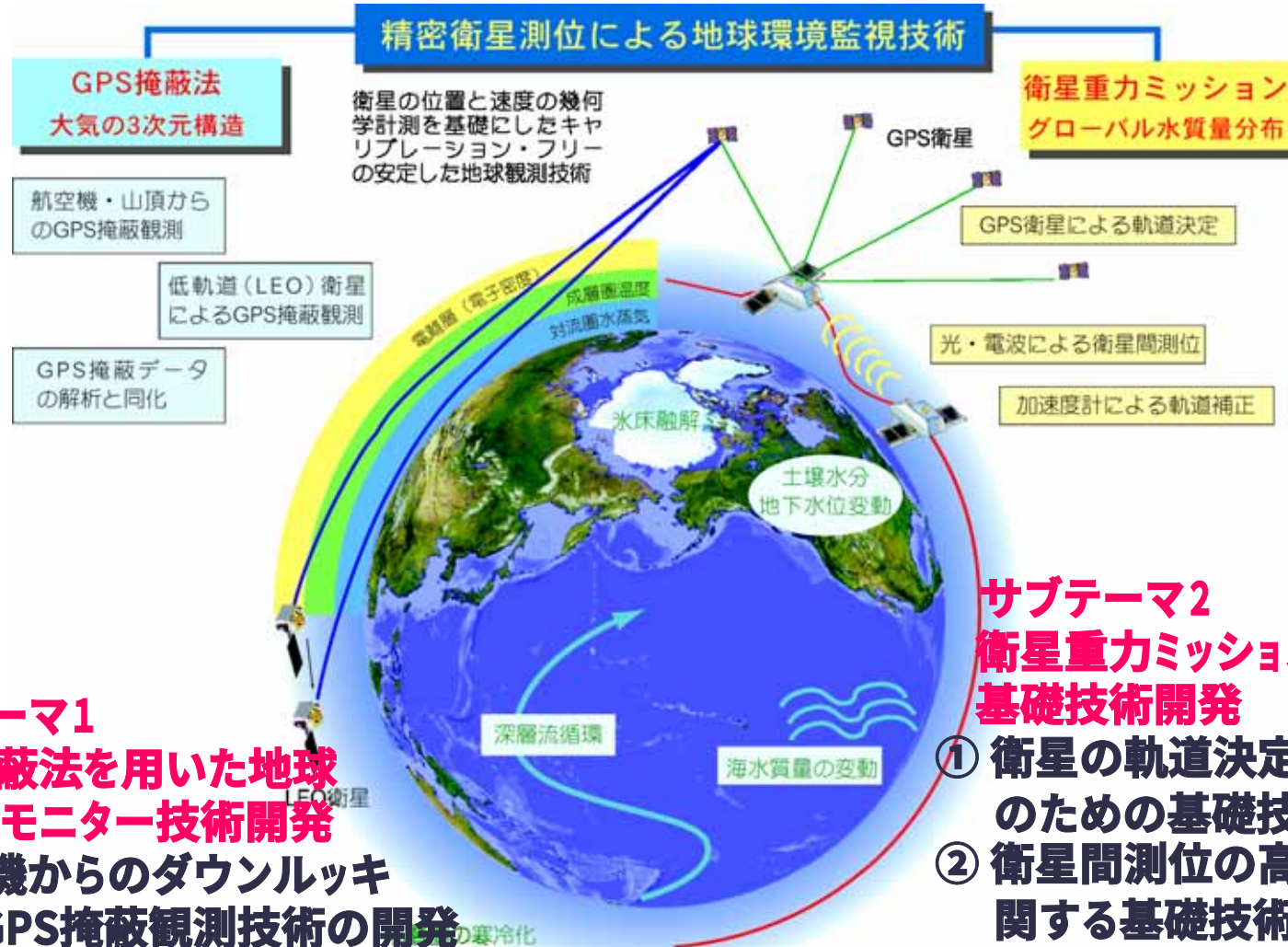
◆ 要素技術

- ❖ 衛星搭載型超精密**加速度計**
- ❖ 高性能**GPS受信システム** (2周波、**掩蔽観測**)
- ❖ 精密**軌道決定ソフト**

◆ 科学目的

- ❖ 精密測位、加速度測定による**地球重力場観測**
- ❖ 中性大気ドラッグからの**超高層大気擾乱の観測**
- ❖ GPS掩蔽法による**大気・電離層・プラズマ圏の観測**
- ❖ GPS電波の海面反射による**海面高度、波浪測定**

準備状況・・・科学技術振興調整費(H14～H16年度)



サブテーマ1

GPS掩蔽法を用いた地球大気圏モニター技術開発

- ① 航空機からのダウンルッキングGPS掩蔽観測技術の開発
- ② LEO衛星によるGPS掩蔽観測の国際共同研究の推進
- ③ GPS掩蔽観測データの解析とデータ同化システムの開発

サブテーマ2

衛星重力ミッションの基礎技術開発

- ① 衛星の軌道決定精度向上のための基礎技術開発
- ② 衛星間測位の高精度化に関する基礎技術開発
- ③ 衛星搭載型高感度加速度計の開発
- ④ 将来の衛星観測ミッションに関する技術評価と物理設計

科振費の主な研究成果

<http://stglinux.kugi.kyoto-u.ac.jp/~sktext/kashinhi/>

(1) GPS掩蔽

- 1) 世界初の航空機によるGPS掩蔽実験に成功
航法精度向上 (4mm/s)のための電離層モデル開発
- 2) ブラジル・米等と国際協力で**LEO衛星によるGPS掩蔽実験**を推進
GPS掩蔽データ収集・解析・解析システムを開発
- 3) 気象数値予報モデル (全球・メソ) へのデータ同化手法の研究

(2) 衛星重力ミッション

- 1) **精密軌道決定ソフトウェア(Concerto)を開発**
重力場、海洋潮汐モデルの改良、軌道精度5cmを達成
- 2) 衛星間精密測位の地上実証
レーザ干渉計による新手法で従来法 (電波) より2桁精度向上
- 3) **高精度加速度計の独自開発**
レーザ干渉計法による独自の方式を採用

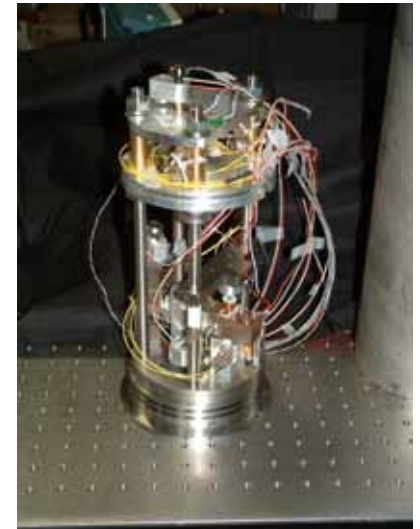


小型LEO衛星提案

開発状況

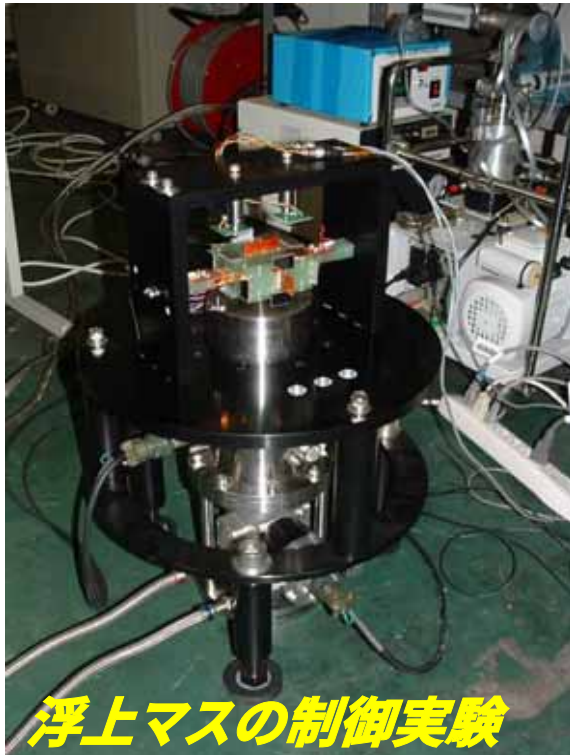
(1)レーザー干渉計測を利用した加速度計 …… 地上型加速度計の
埋設性能試験

基本動作の検証、雑音レベルの評価

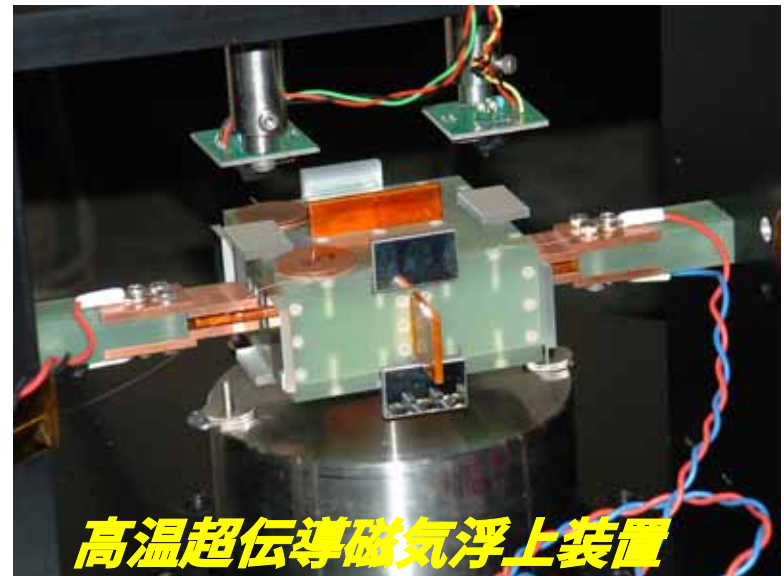


レーザー干渉計式加速度計

(2)磁気浮上マスの姿勢制御テスト …… 2自由度での浮上マスの制御
高温超伝導磁場中で浮上した永久磁石を静電アクチュエーターで
姿勢制御



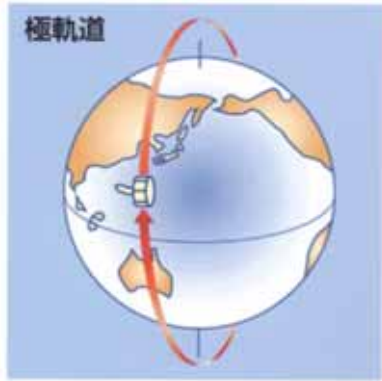
浮上マスの制御実験



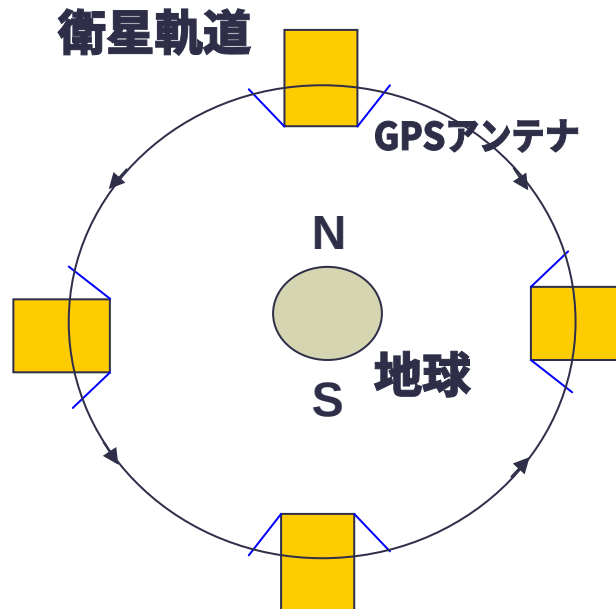
高温超伝導磁気浮上装置

衛星の軌道

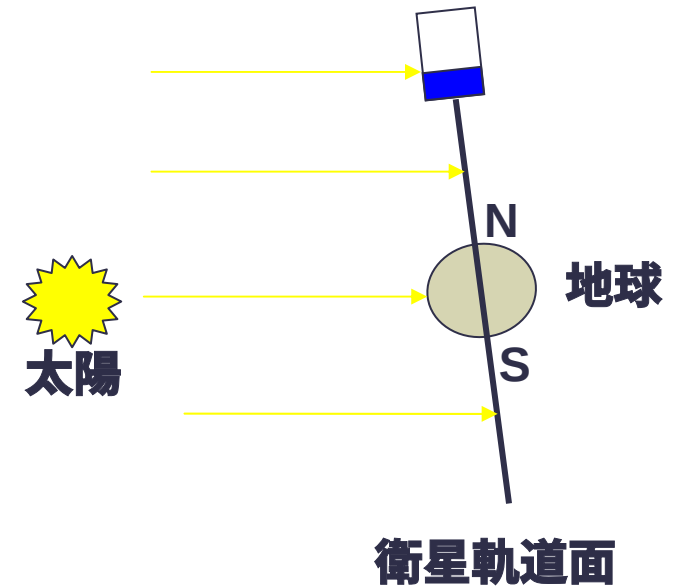
・極軌道



・地球指向



・太陽同期(6時、18時)



たとえば、

極軌道でない・・・低緯度地域に限定

太陽指向・・・GPS side looking(掩蔽イベント減少)

太陽同期(0時、12時)・・・太陽電池パドルを回転

太陽電池パドル・・・固定

まとめ 日本版衛星重力ミッション

- ・ **GPS受信機と高精度加速度計**を搭載した小型低軌道衛星
- ・ **多数展開**することにより、**低コスト化、時間空間分解能が向上**
- ・ **重力とGPS掩蔽**などにより**質量分布変動をグローバルに監視**
気象予報、気候変動、水資源の監視、超高層大気物理
地球重力場、地震・地殻変動
- ・ **極軌道、地球指向、太陽同期(6時、18時)**
- ・ **予算 特定領域「衛星重力地球学」 代表 福田洋一(京大理)**
を申請中

