

レーザー干渉計型地震計による  
低周波地面振動の高精度観測

新谷 昌人 (東大地震研)

特定領域研究「重力波研究の新しい展開」

地球物理関係 . . . .

・ 計画研究サ：地球物理への応用

「高精度レーザーひずみ計による地球内部  
ダイナミクスの研究」

代表 竹本修三 (京大理)

・ 公募研究

「レーザー干渉計型地震計による低周波  
地面振動の高精度観測」

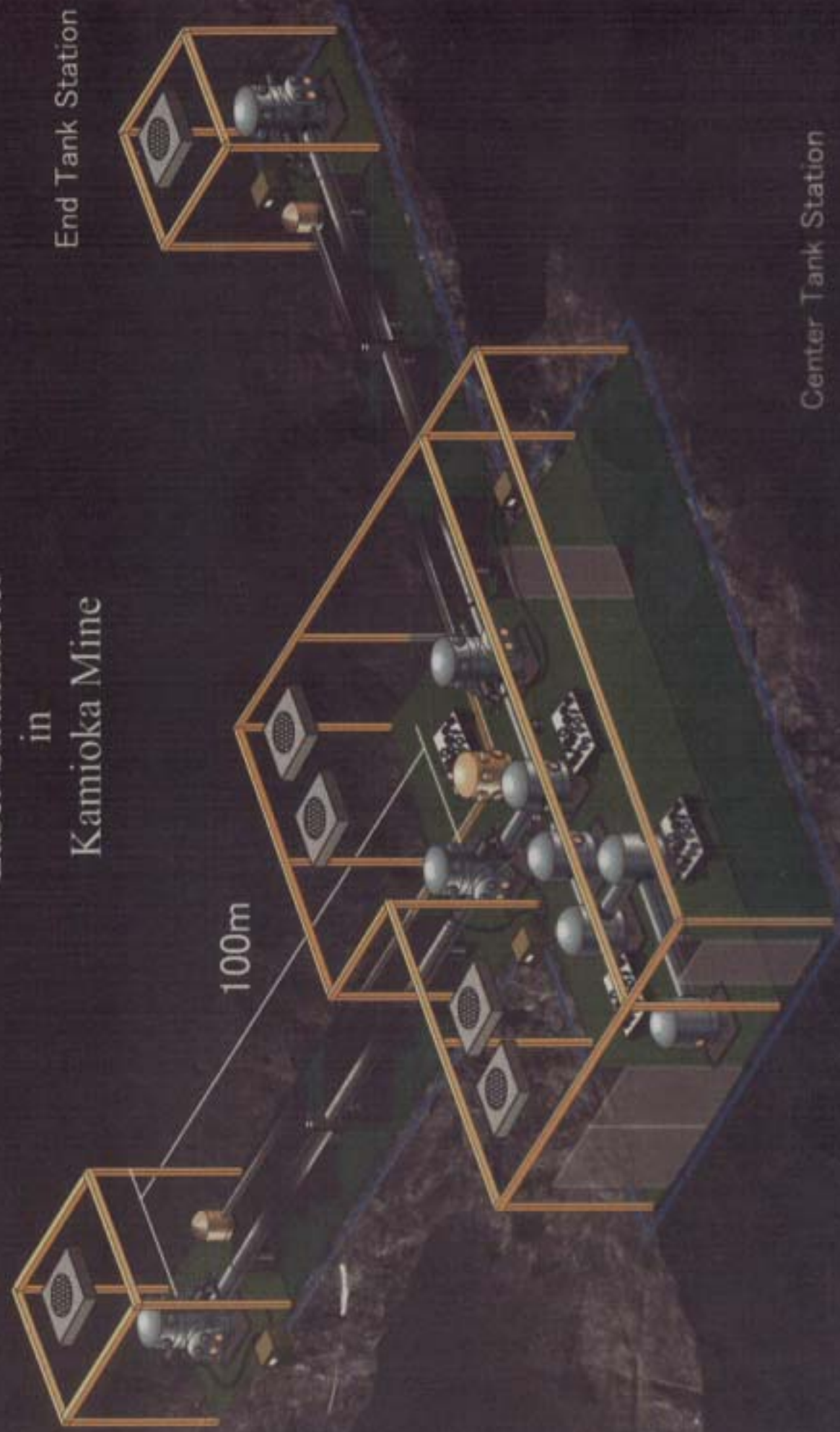
代表 新谷昌人 (地震研)

レーザー干渉計

低周波 (周期～1秒以上) 観測

Cryogenic Laser Interferometer Observatory (CLIO-100)  
and  
Laser Strainmeter  
in  
Kamioka Mine

End Tank Station



End Tank Station

Center Tank Station



## ◎ 従来のひずみ観測

2点間の距離変動を計測 → 地面の伸縮の検出

・ 石英管伸縮計  $10^{-9} \sim 10^{-10}$

・ レーザー伸縮計  $10^{-9} \sim 10^{-13}$

・ ひずみ計 vs 地震計  
dc ~ 1 ~ 10mHz以上

長周期地震波

地震波

地殻変動 ↓

地球内部構造  
マッシュ

・ ひずみ計 vs 重力計

水平成分  
Spheroidal Mode  
Toroidal Mode

垂直成分  
Spheroidal Mode

超伝導重力計

~1ngal (=  $10^{-11} \text{m/s}^2$ )

~ $10^{-13}$

## ◎ 神岡のメリット

・ 地下1000m { 地面振動  
気温  
岩盤

・ 跡津川断層近傍

## ◎ 装置の概要

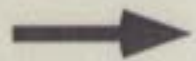
- ・ 100m重力波プロトタイプに併設
- ・ 高精度レーザーひずみ計

1. ヨウ素安定化YAGレーザー + 直線干渉計  
(波長安定度 = ひずみ精度  $\sim 10^{-13}$ )

2. 直交干渉計 (せん断ひずみ。 気圧ノイズ  
の低減)

気圧応答

$$(0.2 \sim 0.9) \times 10^{-8} / \text{hPa}$$



- ・ 常時自由振動 *Toroidal Mode?*
- ・ コアモード *splitting?*
- ・ コアアンダートーン
- ・ 流体核共鳴

(いずれも ngal レベル)

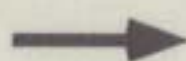
$\mu\text{計}$   
 $\sim 10^{-13}$  (数 MHz)

$10^{-11} \text{ m} / \sqrt{2}$

$\rightarrow$   $10^{-8} \text{ m}$  (変位) (数 MHz)

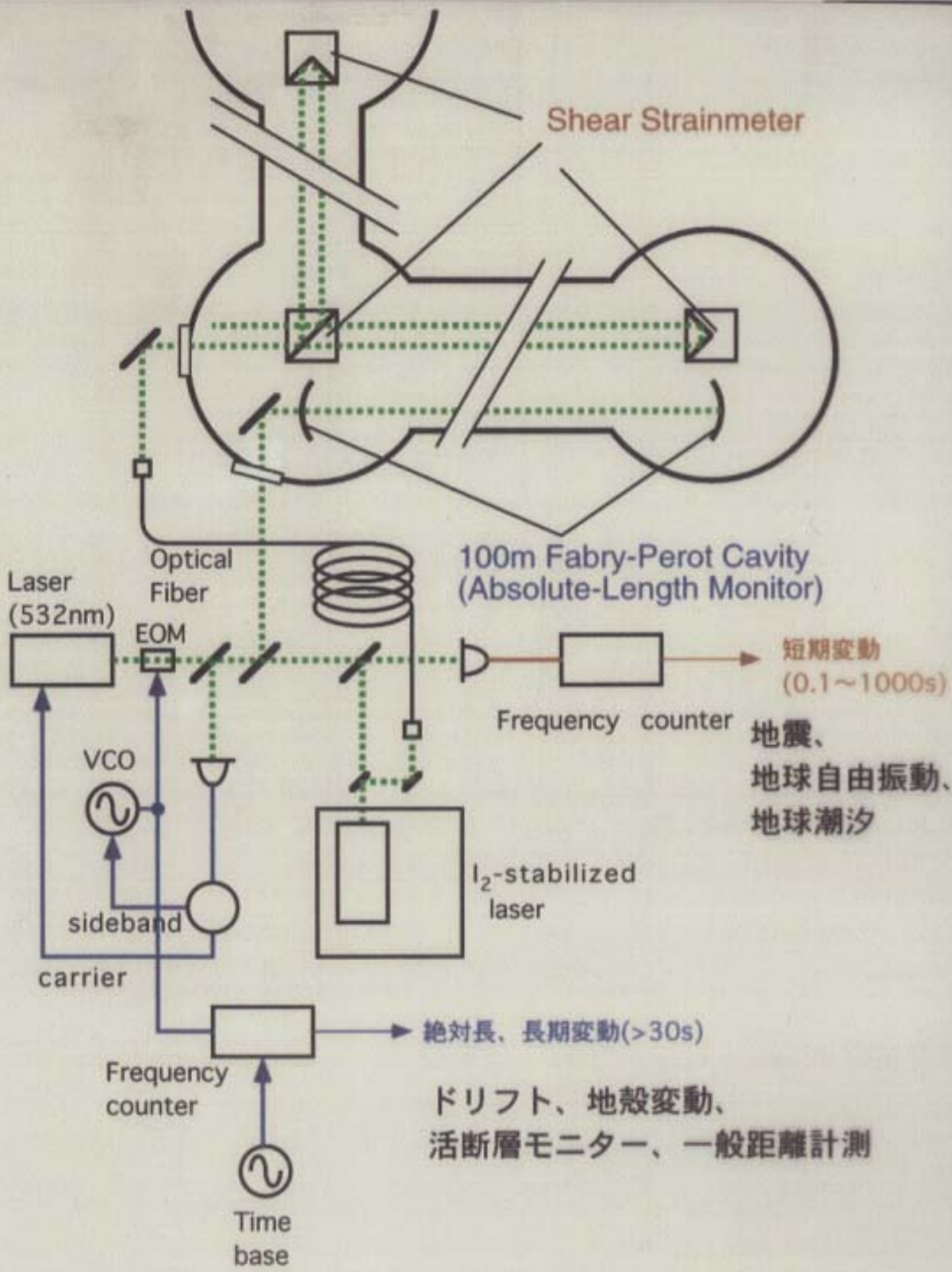
3. 絶対長干渉計 (sideband透過法。  
精度  $0.1 \mu\text{m}$ )

9ヶ所



- ・ 断層運動 (跡津川、茂住) の  
モニター *creep?*





Shear Strainmeter

100m Fabry-Perot Cavity (Absolute-Length Monitor)

Laser (532nm)

Optical Fiber

EOM

短期変動 (0.1~1000s)

Frequency counter

地震、地球自由振動、地球潮汐

I<sub>2</sub>-stabilized laser

carrier

絶対長、長期変動(>30s)

Frequency counter

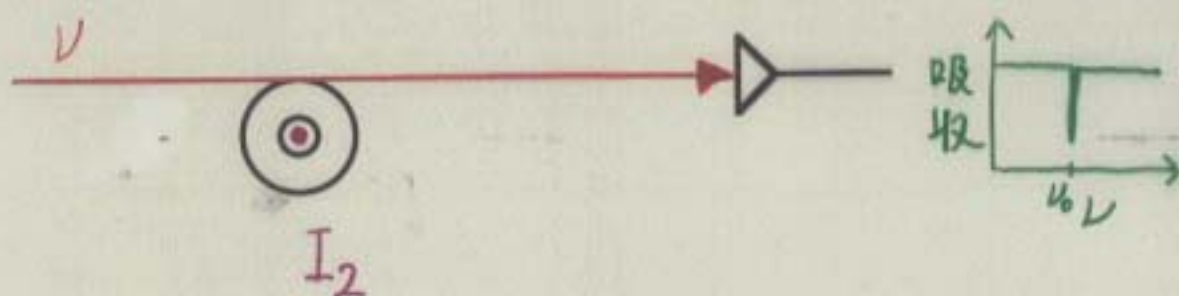
ドリフト、地殻変動、活断層モニター、一般距離計測

Time base



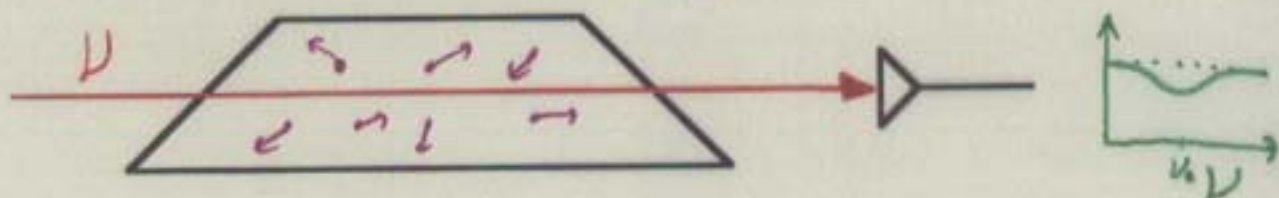
# 飽和吸収分光法

止まっている分子・・・鋭い吸収スペクトル



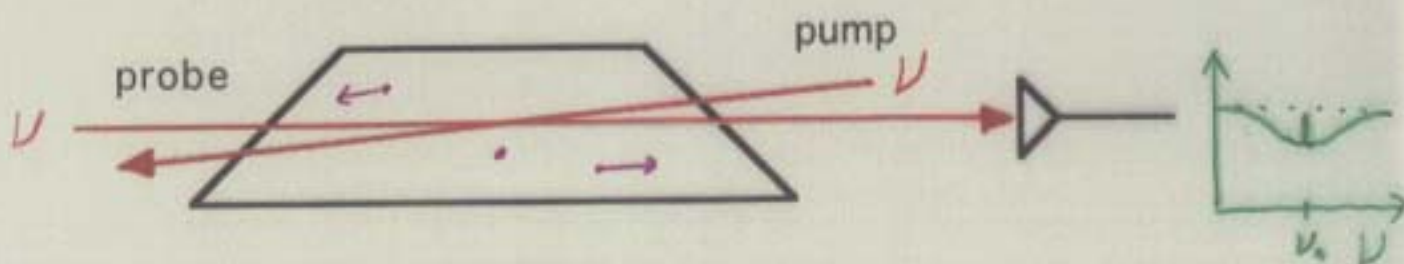
動いている分子・・・Doppler広がり

$$f(v_x) \sim \exp\left(-\frac{m v_x^2}{2k_B T}\right)$$



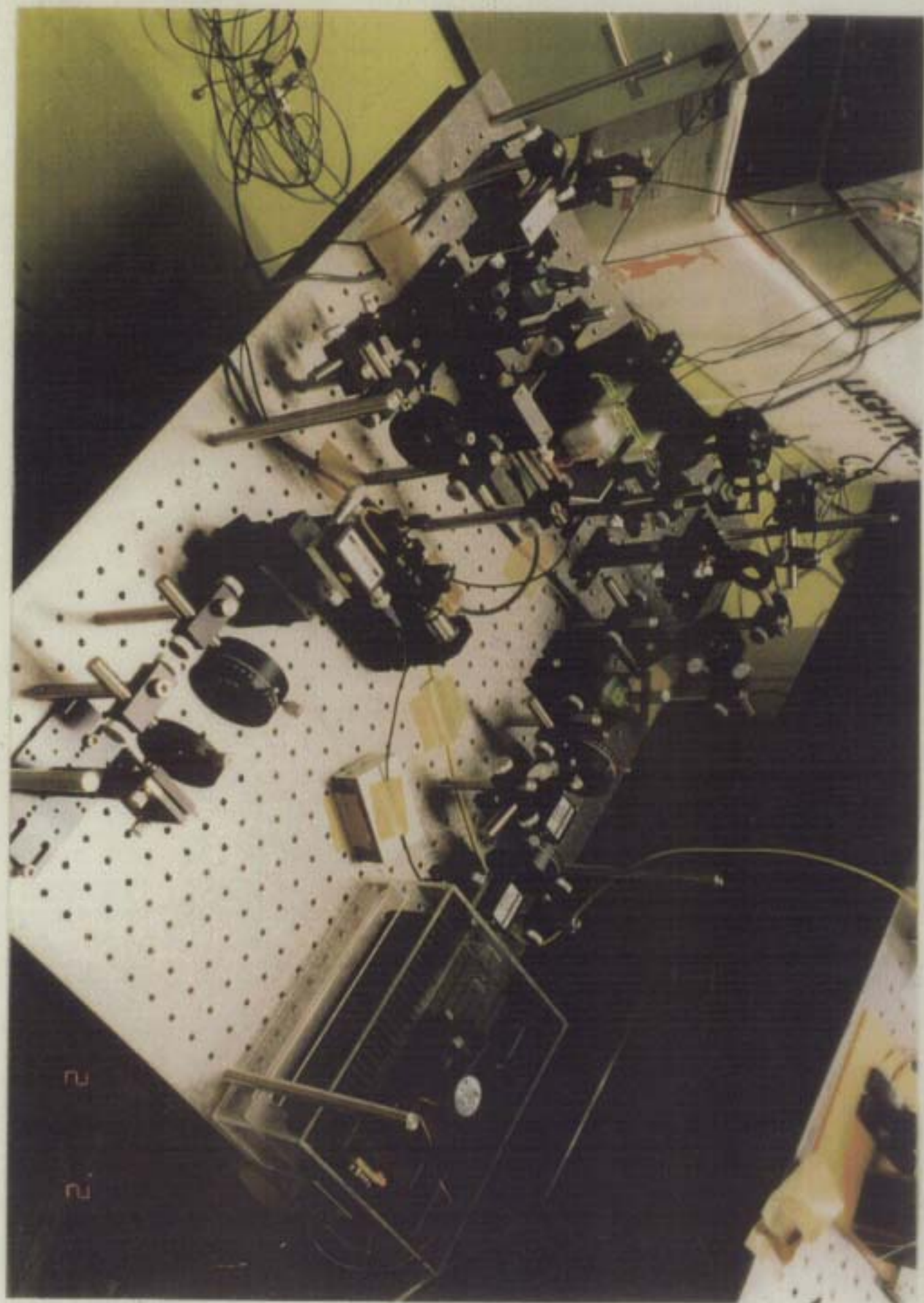
$$f(\nu) \sim \exp\left(-\frac{m c^2 (\nu - \nu_0)^2}{2k_B T \nu_0^2}\right)$$

pump光による飽和・・・鋭い飽和吸収スペクトル



pump光のAM変調によりS/N向上



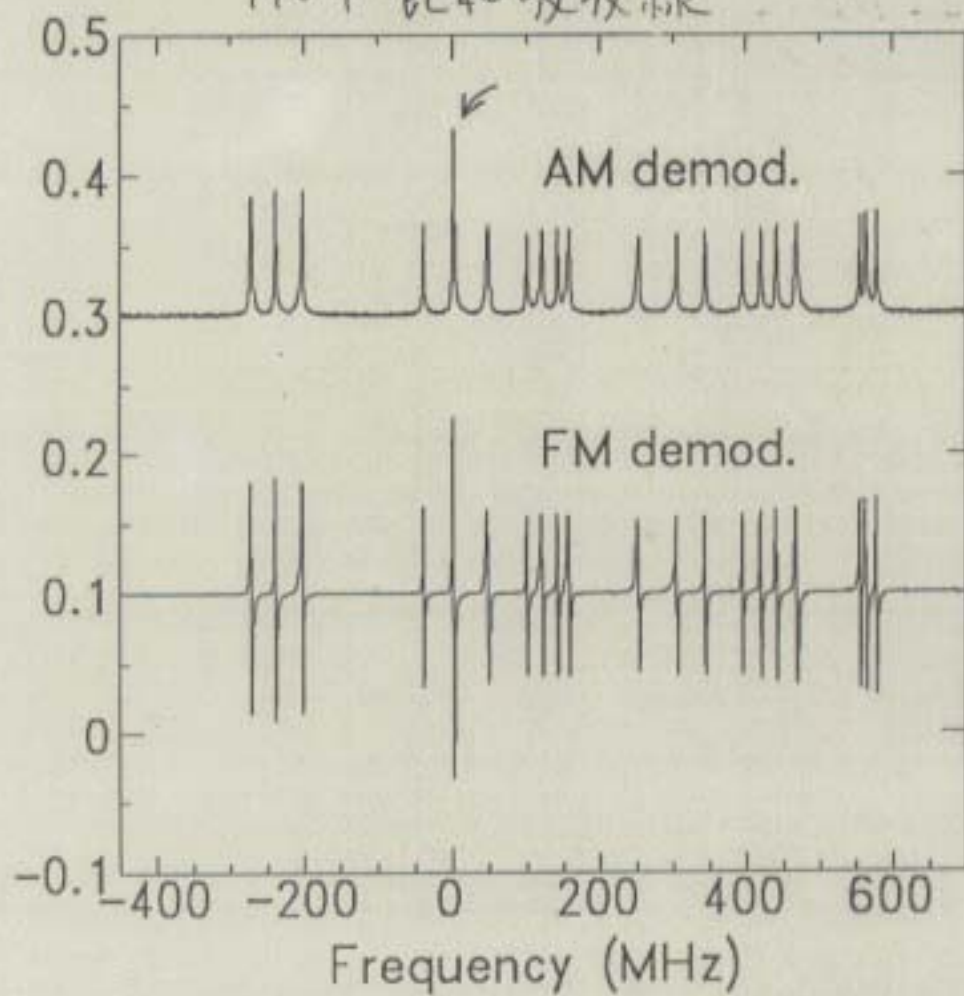


2. 2



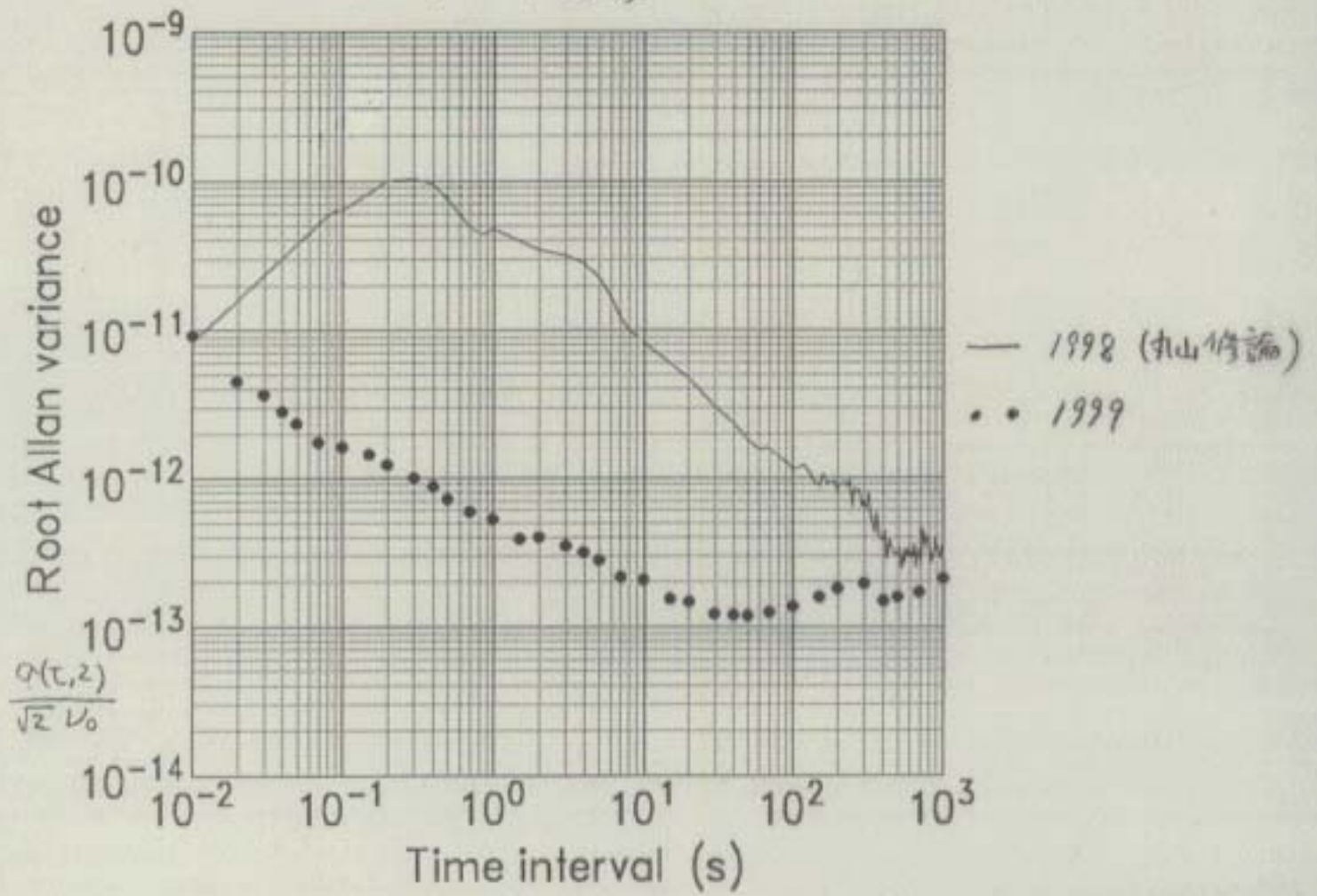
3

1104 飽和吸收線



24

### レーザー安定度





# 神岡100mL—ザー—伸縮計

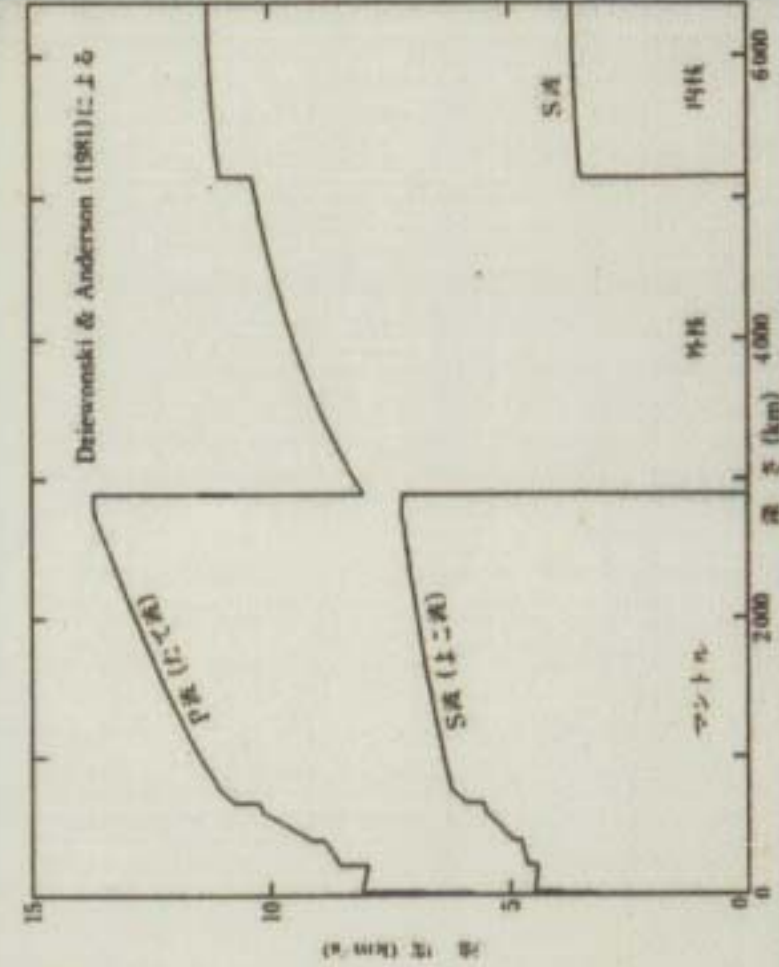
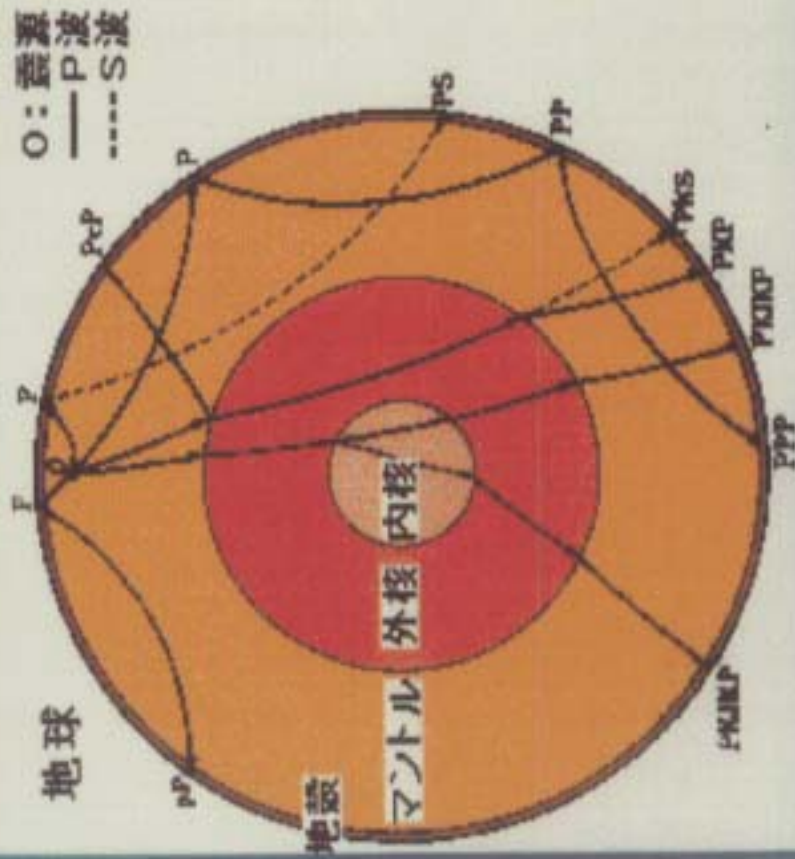
分解能:  $1 \times 10^{-13}$

- ◎流体核共鳴効果 ( $1 \times 10^{-11}$ )
- ◎地球の常時自由振動 ( $1 \times 10^{-12}$ )
- サイレント・アースクエイク ( $1 \times 10^{-12}$ )
- コア・モード(1): ( $1 \times 10^{-12}$ )  
媒質の弾性的な復元力と分子結合力による振動のうち、コアにエネルギーが集中するもの

△コア・モード(2) ( $1 \times 10^{-13}$ )  
重力(アルキメデスの浮力)を復元力とする流体中にある固体の運動  
(内部重力波)

スリヒター・モード  
コアー・アンダー・トーン

# 地球内部構造



- ・地球は、地殻、マントル、外核、内核から成る。
- ・流体である外核は、全地球の16%の体積と31%の質量を占め、大気層や海洋を凌ぐ。
- ・流体核は、地磁気の発生源であるほか、地球ダイナミクスの最大の熱源。

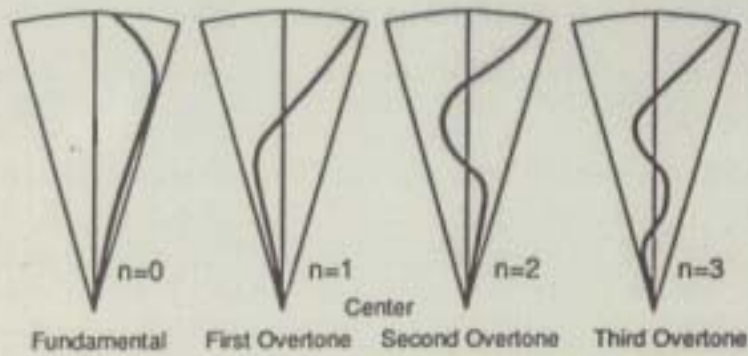


# 地球自由振動モード $nS_e$ , $nT_e$

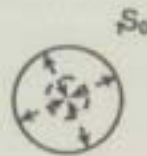
Surface Patterns



Radial Patterns



Radial Modes



Toroidal Motions

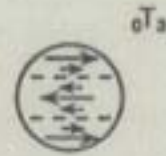
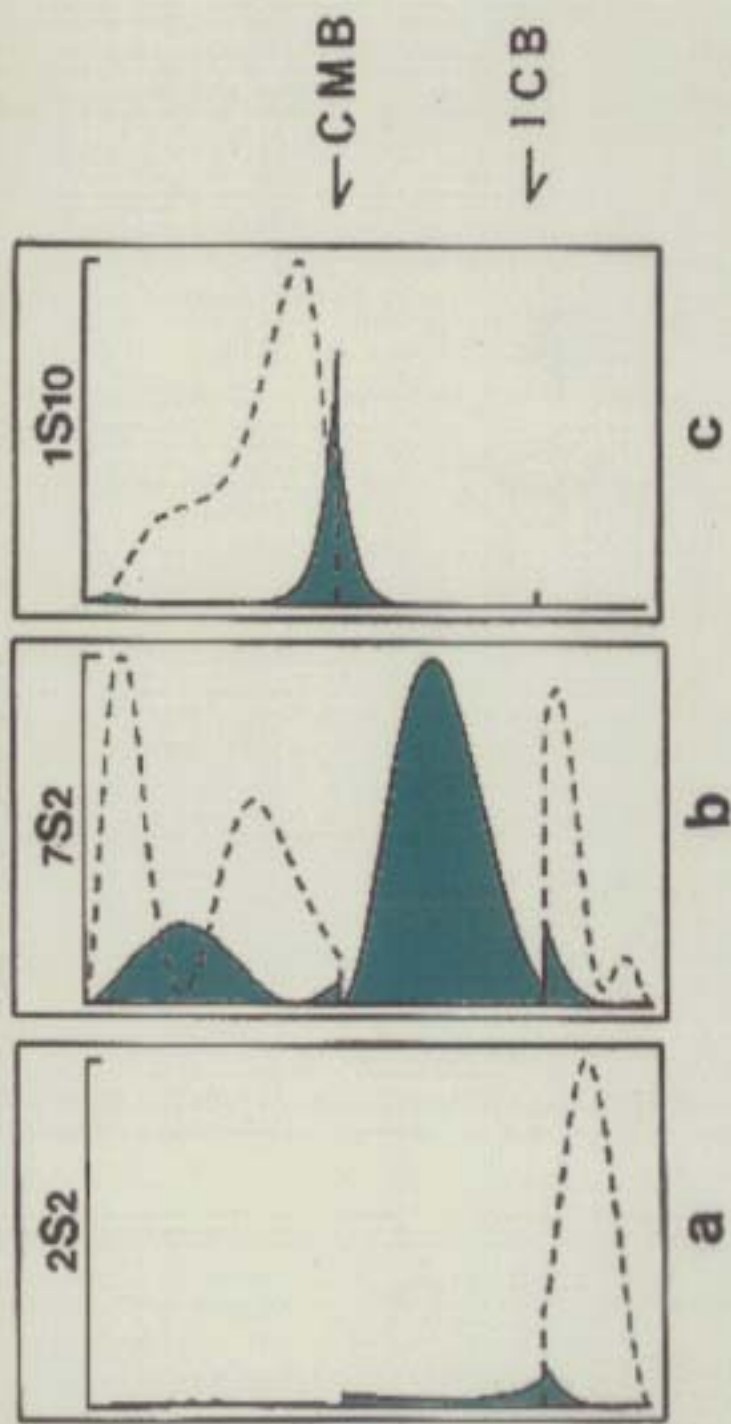


TABLE 4.2 Some Observed Normal-Mode Periods

Spheroidal modes	$T(s)$	Toroidal modes	$T(s)$
${}_0S_0$	1227.52	${}_0T_2$	2636.38
<u><math>{}_0S_2</math></u>	<u>3233.25</u>	${}_0T_{10}$	618.97
${}_0S_{15}$	426.15	${}_0T_{20}$	360.03
${}_0S_{30}$	262.09	${}_0T_{30}$	257.76
${}_0S_{45}$	193.91	${}_0T_{40}$	200.95
${}_0S_{60}$	153.24	${}_0T_{50}$	164.70
${}_0S_{150}$	66.90	${}_0T_{60}$	139.46
${}_1S_2$	1470.85	${}_1T_2$	756.57
${}_1S_{10}$	465.46	${}_1T_{10}$	381.65
${}_2S_{10}$	415.92	${}_2T_{40}$	123.56

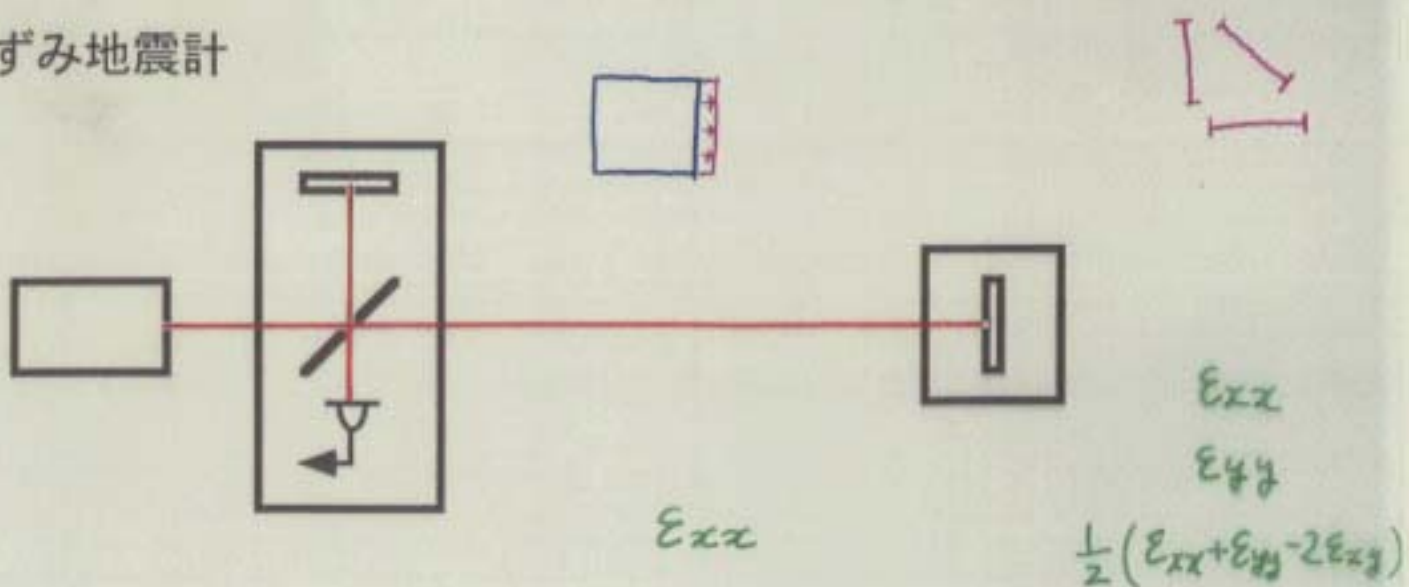
# コア・モード



図一1 検出されたモードの弾性エネルギーの深さ分布図（地表から地球中心まで）の一例。実線が圧縮の、破線がせん断のエネルギーを表す。CMBはコア・マントル境界、ICBは内核境界を表す。a: コアモード, b: 準コアモード, c: 準ストンリナーモード

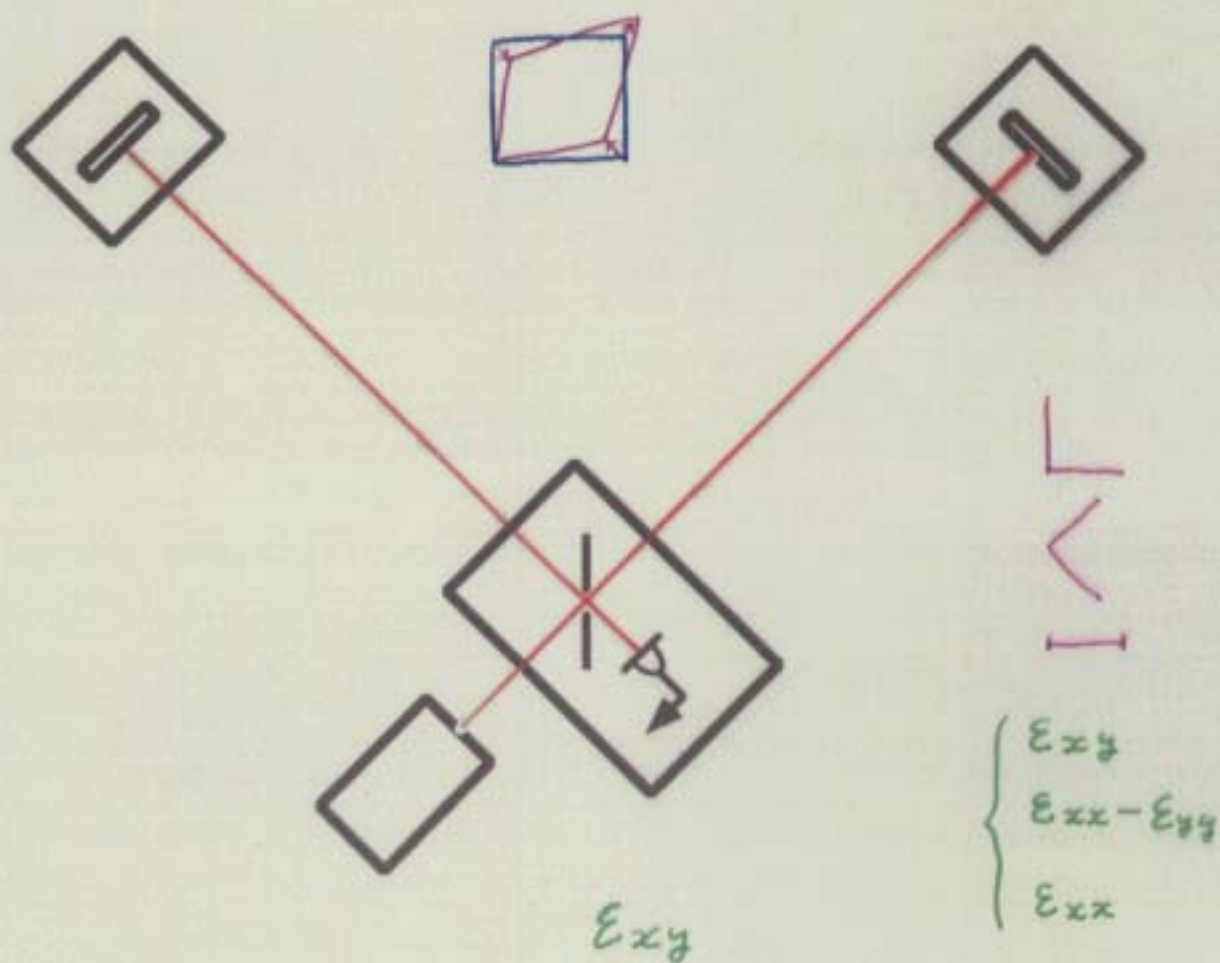


ひずみ地震計

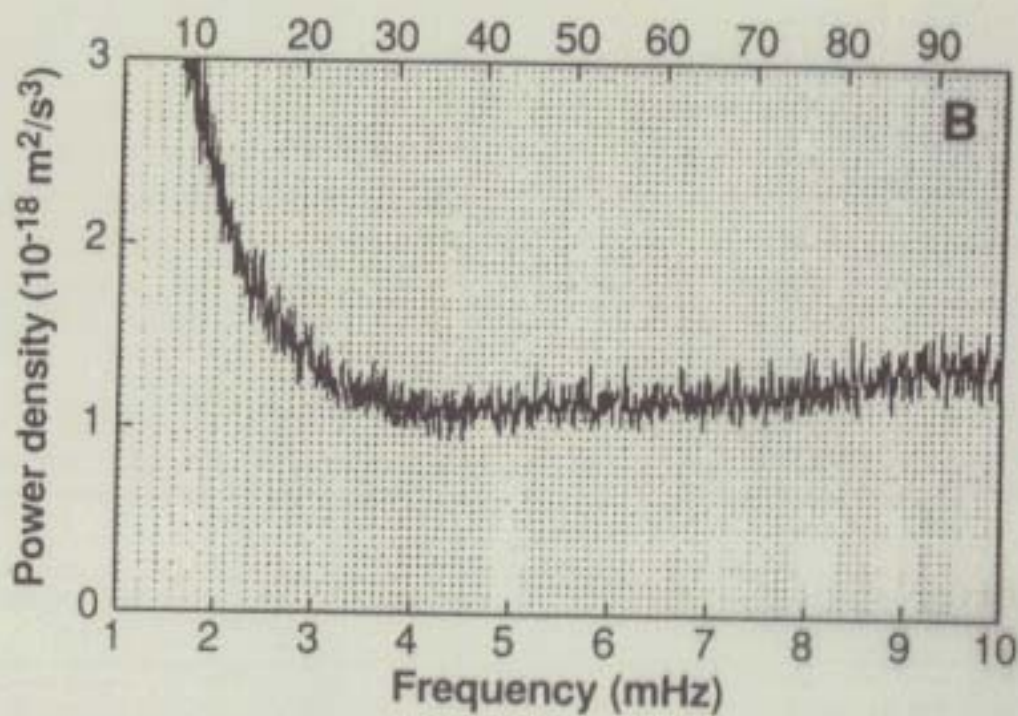
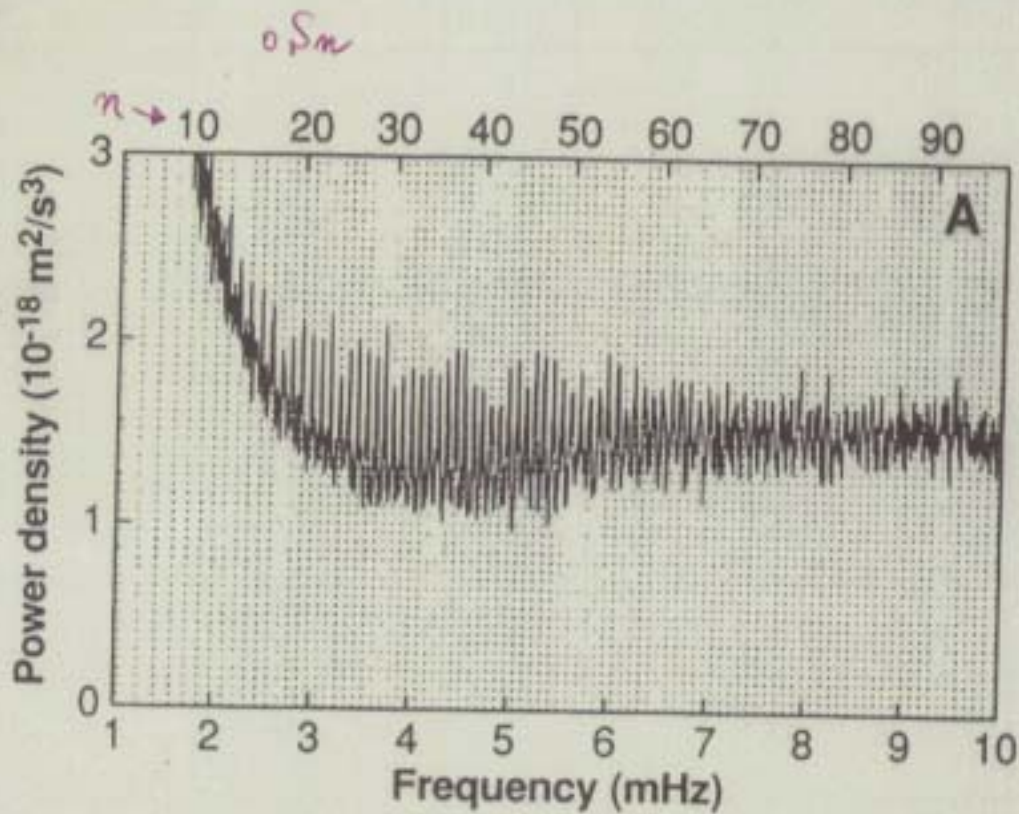


wideband観測 (地殻変動～自由振動～地震波)

shearひずみ地震計



Vertical motion



Suda et al. , Science 279 , 2089 (1998)







牛首断層

茂佳·祐延断層

蹴津川断層



LOCATION OF EARTHQUAKES ALONG THE PROTOSOGWA FAULT 27.5-31.5 TOTAL=1077

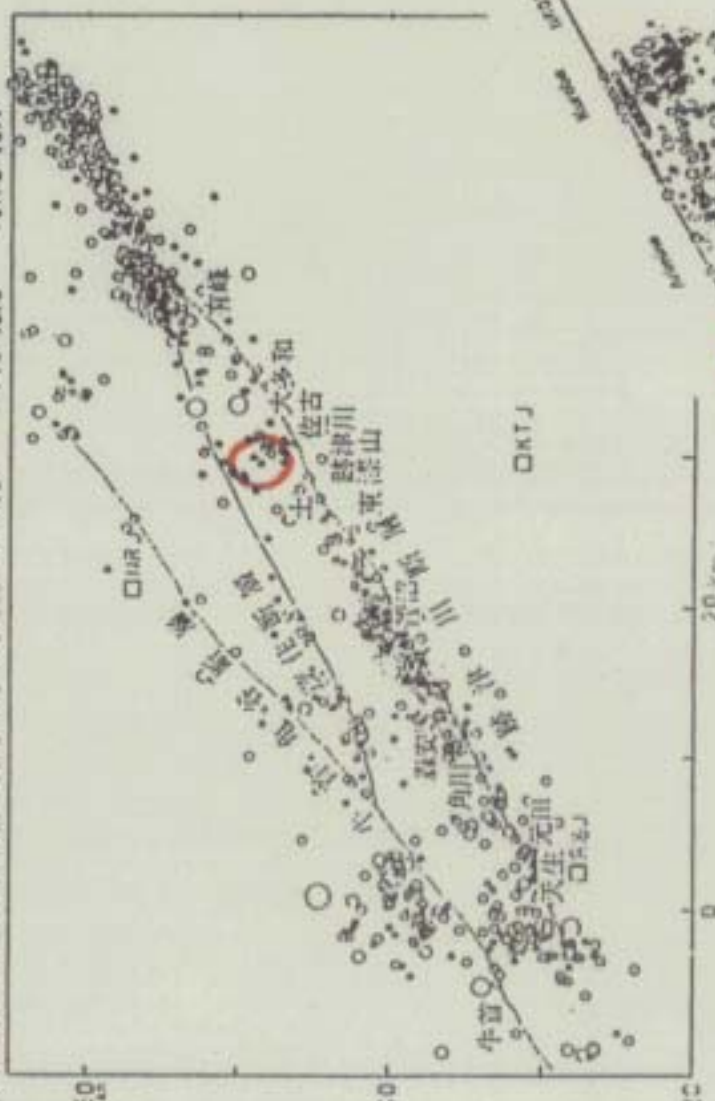
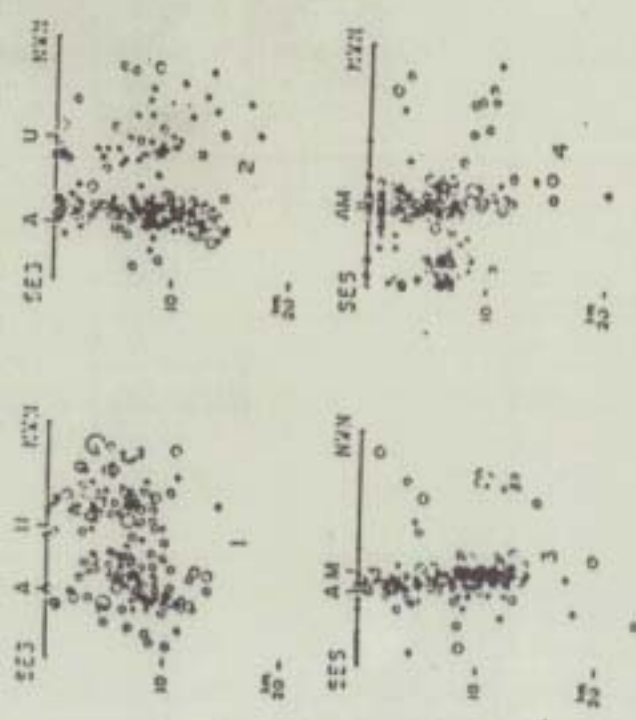


図3 野津川断層周辺の震央分布



a)

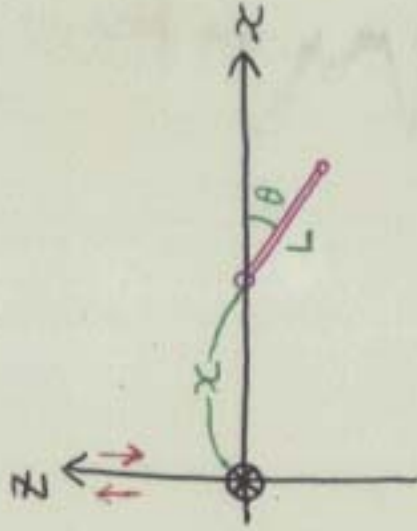
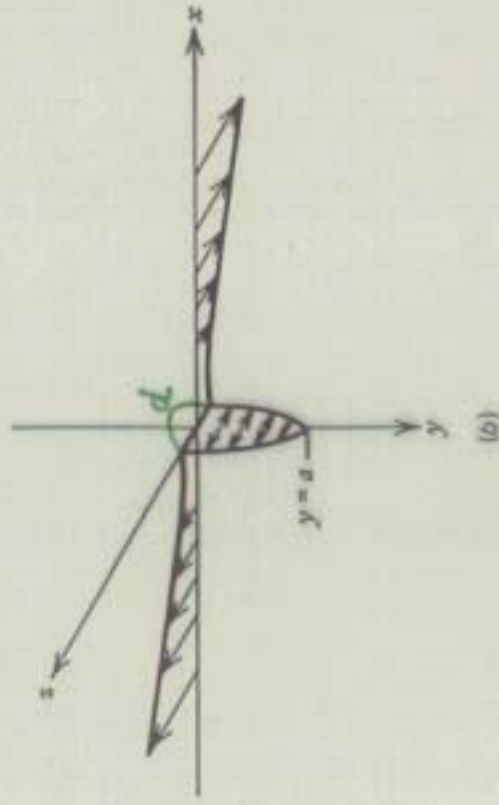
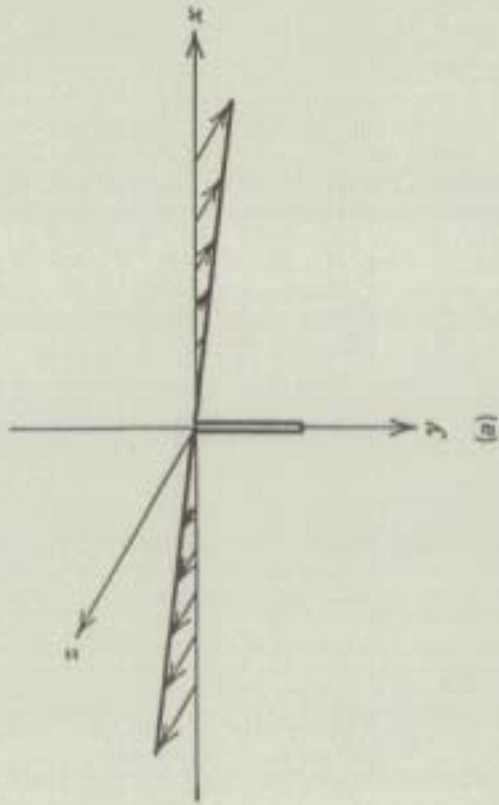


b)

野津川断層周辺の震央分布 (a) 断層に垂直方向の断面  
 野津川断層周辺の震央分布 (b) 断層に平行方向の断面

図4

断層モデル

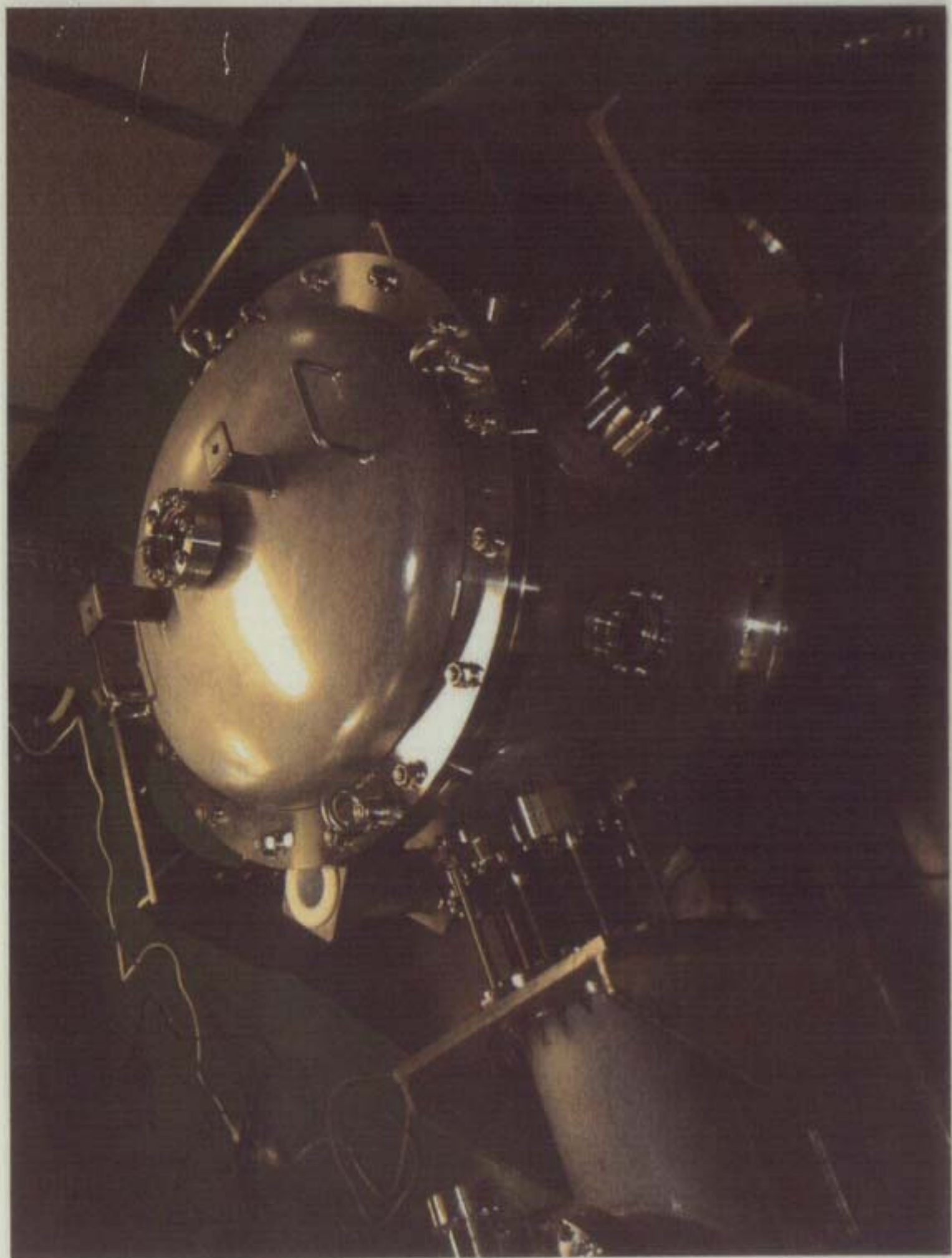


$$\Delta L \approx \frac{L}{4} \left[ 1 - \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} \right] \frac{\dot{d}}{a} \sin 2\theta$$

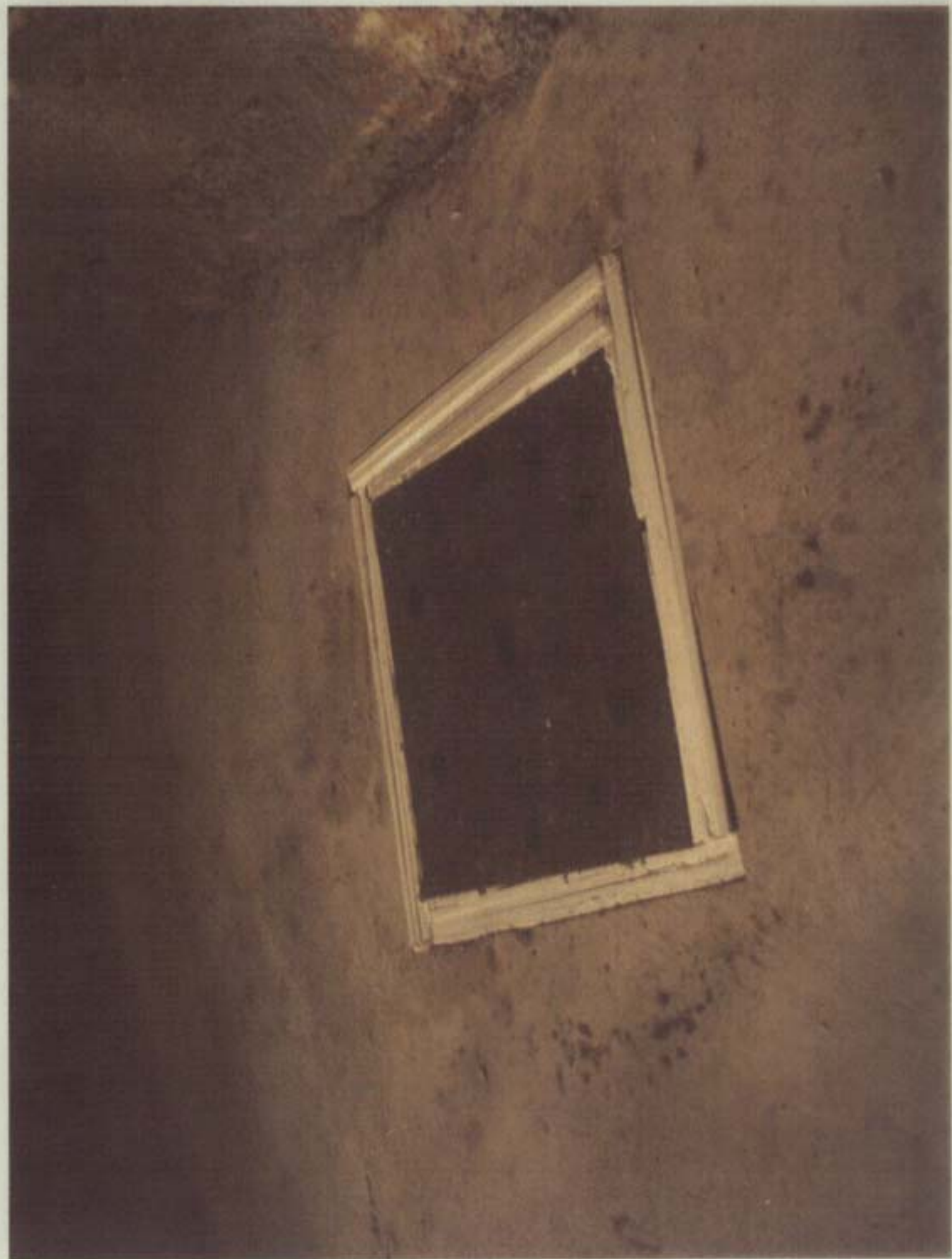
$$= 1.9 \mu\text{m}/\text{yr}$$

(  $L = 100\text{m}$ ,  $x = 2\text{km}$ ,  $a = 15\text{km}$ ,  
 $\dot{d} = 1.5\text{mm}/\text{yr}$ ,  $\theta \approx 30^\circ$  )











## レーザー干渉計型地震計 . . . .

### プロトタイプを改良

気圧ノイズ、発熱ドリフト、

### 改良点・特徴

- ・ 孔内設置型 (φ140mm耐圧容器) . . . .

小型化、低雑音環境での観測

- ・ 光ファイバーリンク方式 . . . . .

内部発熱・電氣的ノイズの低減

- ・ 目標分解能

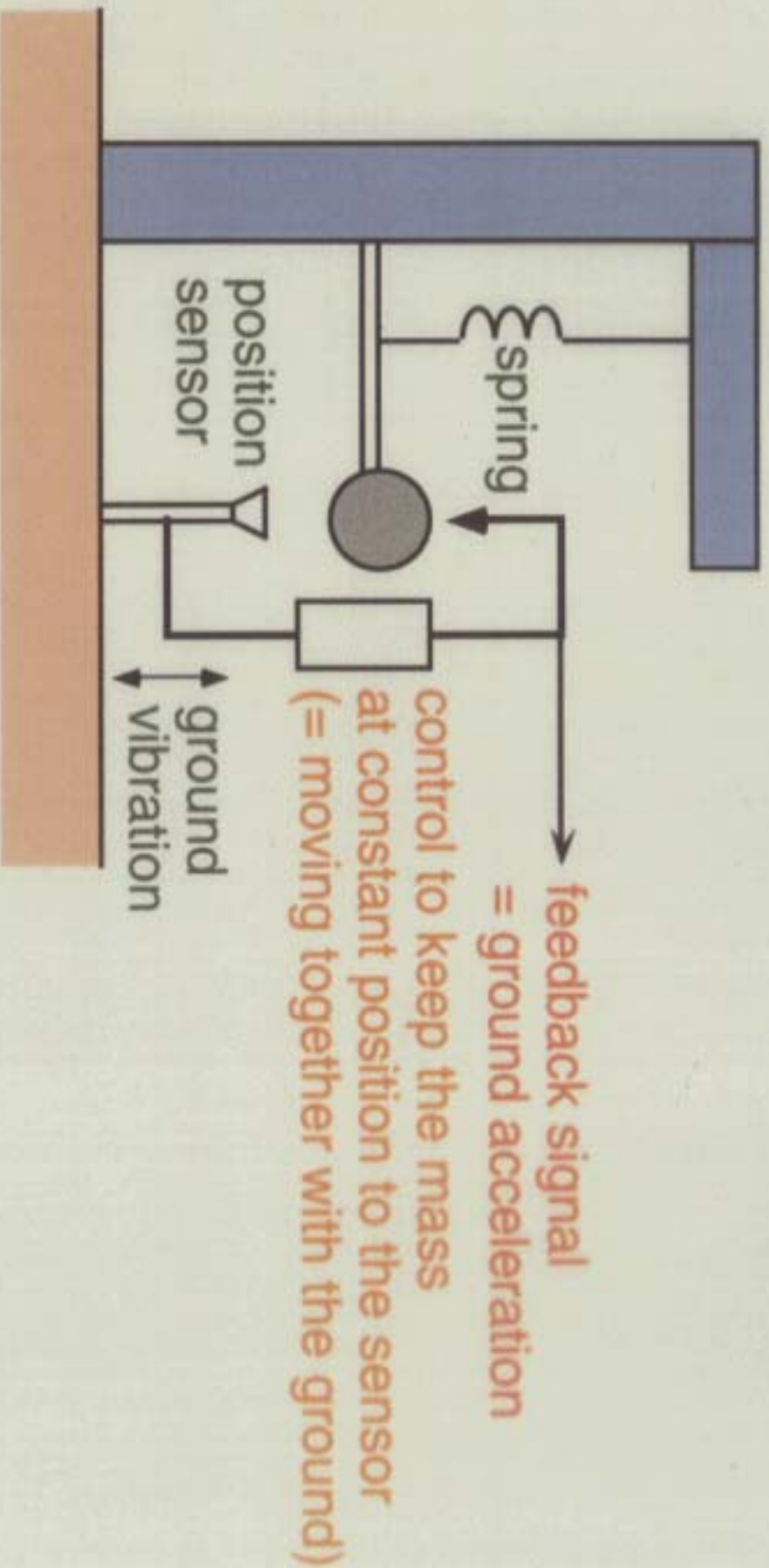
$10^{-10} \text{m/s}^2 \sqrt{\text{Hz}}$  > 10mHz

全帯域でLow Noise Model観測可

### スケジュール

2002年度 水平・垂直 各1成分製作

2003年度 孔内計測によるノイズ評価、観測

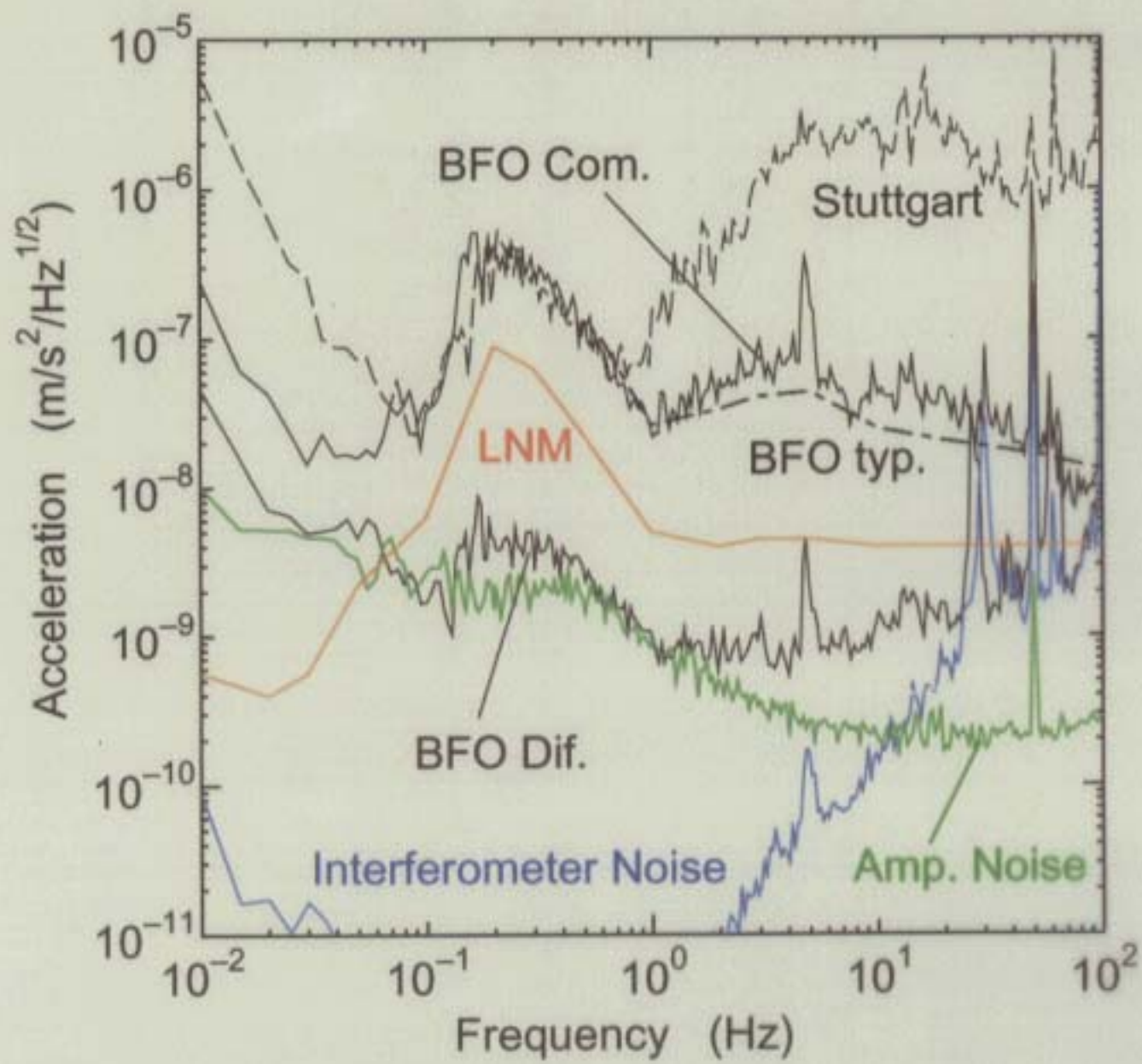


feedback signal  
 = ground acceleration  
 control to keep the mass  
 at constant position to the sensor  
 (= moving together with the ground)

# Servo-type seismometer









## まとめ

- 3種類のレーザーひずみ計を重力波干渉計 (CLIO) に併設
  - 高安定度ヨウ素安定化レーザー ( $\sim 10^{-13}$ )
    - 高分解能ひずみ観測
  - 直交ひずみ計
    - shear成分の検出
    - { Toroidal mode の分離
    - { 気圧ノイズの低減
  - 絶対長干渉計
    - 断層運動モニター
- 

## スケジュール

