

# 干渉計型重力波検出器の懸架装置における 能動制御のための高感度加速度計の開発

荒瀬勇太

東京大学大学院 理学系研究科  
天文学専攻 修士2年

---

# 目次

1. 加速度計開発の目的
2. サーボ型加速度計
3. 加速度計の製作
4. 感度評価実験
5. まとめ

---

# 目次

1. 加速度計開発の目的
2. サーボ型加速度計
3. 加速度計の製作
4. 感度評価実験
5. まとめ

# 加速度計開発の目的

---

## 将来の懸架装置のための 高感度加速度計の開発

### ■ 動機

- LCGTではSeismic Attenuation System(SAS) による鏡の懸架を予定
  - ⇒SASの性能を十分に引き出すためには、**共振の能動制御**が必要
  - ⇒そのための**加速度計センサー**が求められている
- 現状の加速度計の感度では、**神岡の地面振動**に対して不十分

### ■ 目標

$1 \times 10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1\text{Hz}$  (神岡の地面振動レベル以上の感度)

### ■ 方式

- 現在の**サーボ型加速度計**を改良する
- **光干渉計**による読み取りセンサーを導入



---

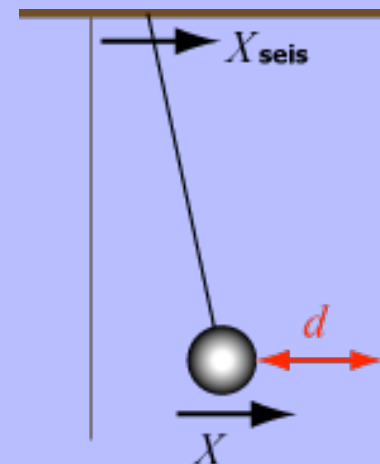
# 目次

1. 加速度計開発の目的
2. **サーボ型加速度計**
3. 加速度計の製作
4. 感度評価実験
5. まとめ

# サーボ型振り子加速度計（1）

## ■ 概要

- 地面振動と振り子との間の**相対距離を測定**
- 振り子をアクチュエートし、制御
- その**フィードバックシグナル**に地面振動の加速度の情報が含まれている
- 慣性系に対しての加速度を測定可能
- 制御信号を使うことで、振り子の共振周波数より低い帯域の加速度も測定できる



振り子の伝達関数

$$\frac{X}{X_{seis}} = H_{pend} = \frac{1 + i \frac{f}{f_0 Q}}{1 + i \frac{f}{f_0 Q} - \frac{f^2}{f_0^2}}$$

# サーボ型振り子加速度計 (2)

## ■ 原理

加速度計内部の変位計で読み取るのは  
地面と振り子の**相対変位d**

$$d = X_{seis} - H_{pend} X_{seis} = (1 - H_{pend}) X_{seis}$$

加速度計の内部サーボでdsに低減される

$$d_s = \left( \frac{1}{1+G} \right) d = \left( \frac{1}{1+G} \right) (1 - H_{pend}) X_{seis} \quad (G=HFAオープンループゲイン)$$

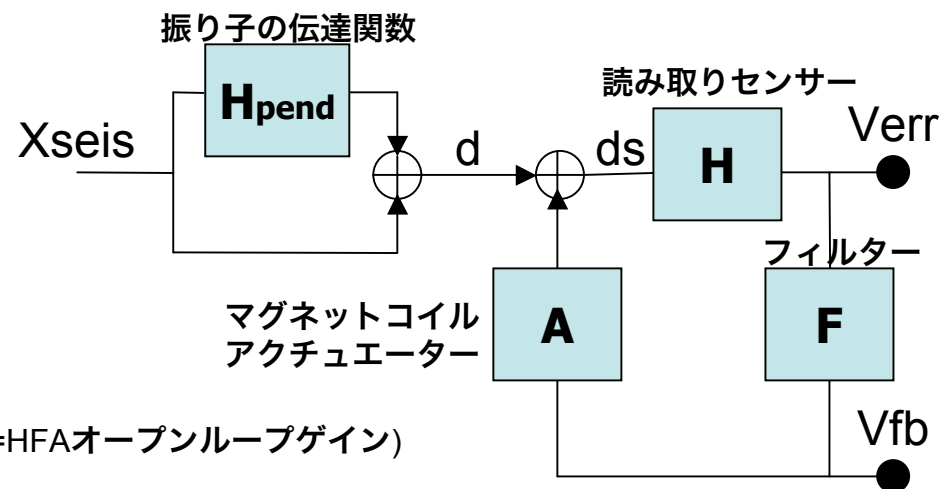
そのときのフィードバックシグナルVfbは

$$\begin{aligned} V_{fb} &= d_s \frac{G}{A} = \left( \frac{G}{1+G} \right) \frac{1}{A} (1 - H_{pend}) X_{seis} \\ &= \left( \frac{G}{1+G} \right) \frac{f^2}{\alpha f_0^2} X_{seis} \end{aligned}$$

$$\propto (2\pi f)^2 X_{seis} \quad (Gが十分大きい帯域で)$$

となり、**地面振動の加速度に比例した信号**が現れる

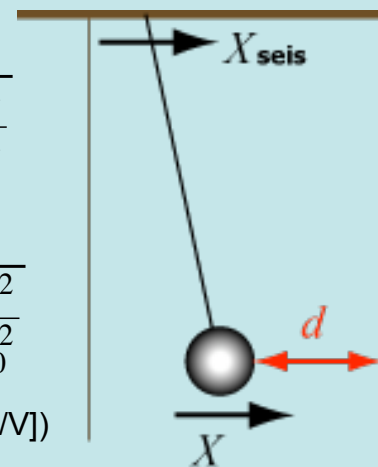
⇒ 「**共振周波数の低い振り子**」と「**ノイズの少ない変位計**」が必要



$$H_{pend} = \frac{1 + i \frac{f}{f_0 Q}}{1 + i \frac{f}{f_0 Q} - \frac{f^2}{f_0^2}}$$

$$A = \frac{\alpha}{1 + i \frac{f}{f_0 Q} - \frac{f^2}{f_0^2}}$$

( $\alpha$ : DCでの電圧変位変換係数[m/V])



---

# 目次

1. 加速度計開発の目的
2. サーボ型加速度計
- 3. 加速度計の製作**
4. 感度評価実験
5. まとめ

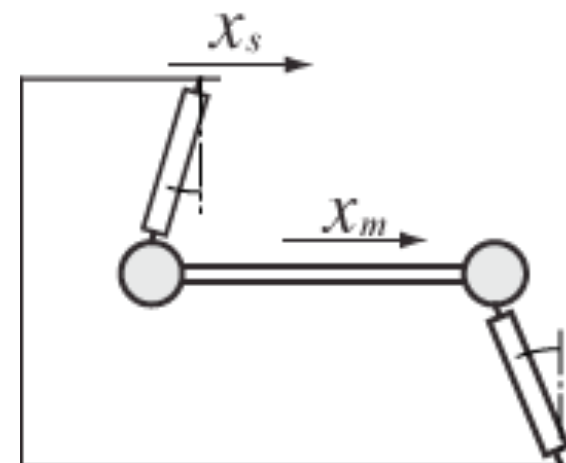
# 加速度計の製作（1）

## 光干渉計を用いたサーボ型加速度計

### ■ 概要

#### > 振り子 ⇒ 折り畳み振り子

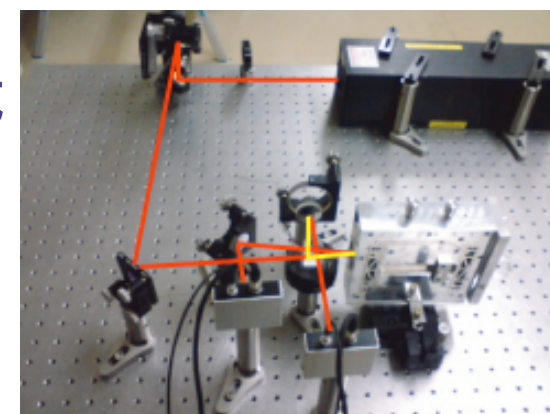
- 単振り子と倒立振り子の組み合わせ
- 小型(10cm程度)でも低い共振周波数
- 並進一次元に振動
- 質点モデルでは単振り子と同等の振る舞い



折り畳み振り子の質点モデル

#### > 変位計 ⇒ マイケルソン干渉計

- 振り子に取り付けられた鏡と固定鏡とで構成
- 雑音レベル： $10^{-11}$  m/rtHz @ 1Hz
- レーザー：HeNe Laser (波長633nm)
- 基線長：9cm

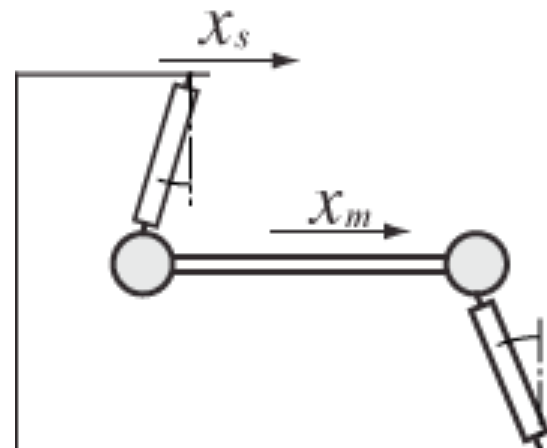


光学台の上に組まれたマイケルソン干渉計

# 加速度計の製作（２）：折り畳み振り子

## ■製作

- アルミニウムをワイヤー加工(モノリシックに製作)
- 可動範囲は1mm程度
- ヒンジの部分は $40\mu\text{m}$ 程度  
⇒接合点での摩擦を抑えている
- 同様のものを2つ製作



折り畳み振り子の質点モデル

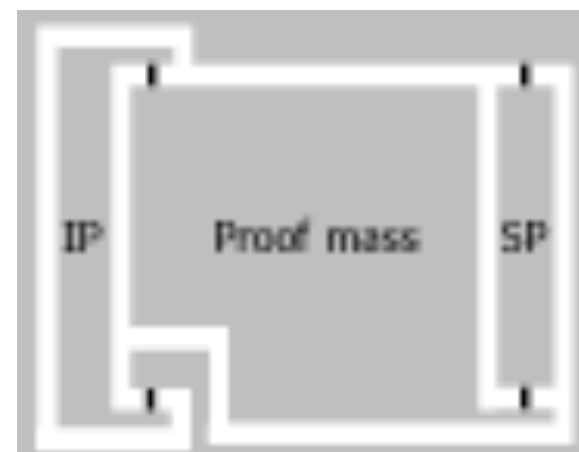
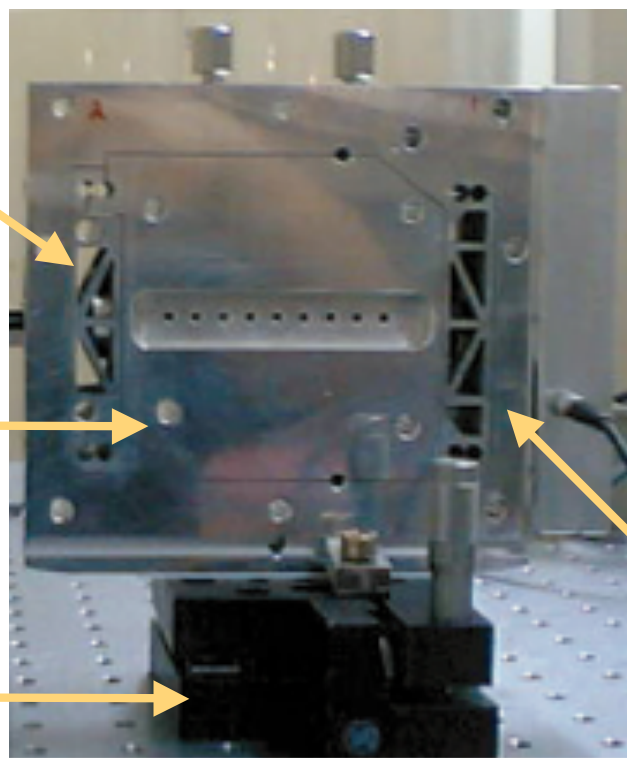
## 倒立振り子

穴があいていて、横から試験質量部分が覗ける

## 試験質量部分

左右に約1mm可動  
アクチュエートのためのコイル  
が取り付けられている

傾きを調整する台  
(これは仮のもの)



## 単振り子

穴があいていて、横から試験質量  
をアクチュエートするための磁石  
を通して

# 加速度計の製作（3）：折り畳み振り子

## ■ 特性

フォトセンサーを使って、振り子の特性を調べた

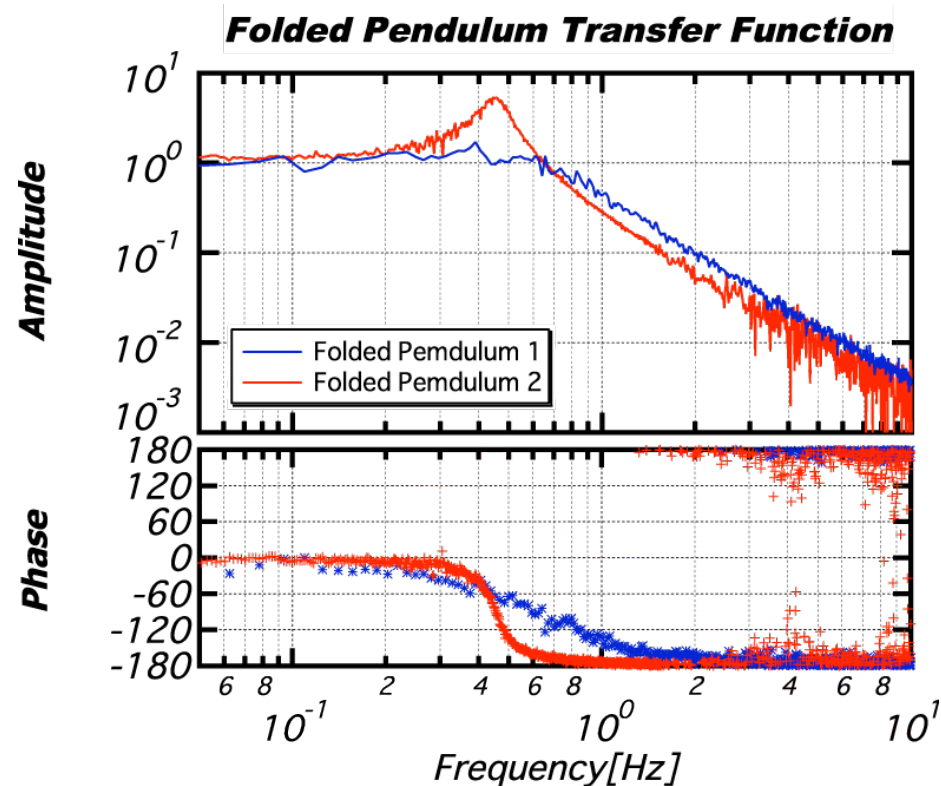
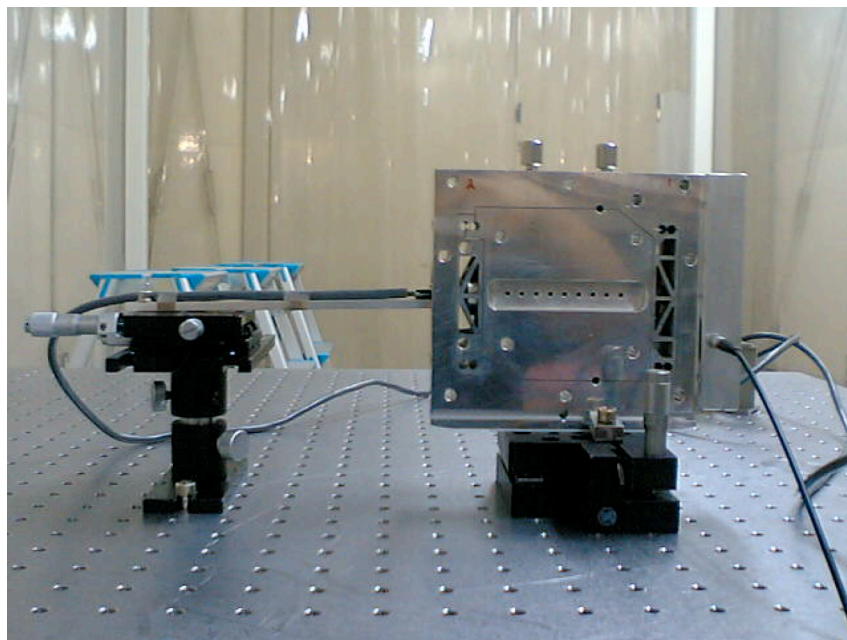
－ 共振周波数

○ 1台目：624mHz : Q値 1.1

○ 2台目：455mHz : Q値 4.8

(重りを振り子に取り付けることにより、調整→最適化)

低い共振周波数を実現

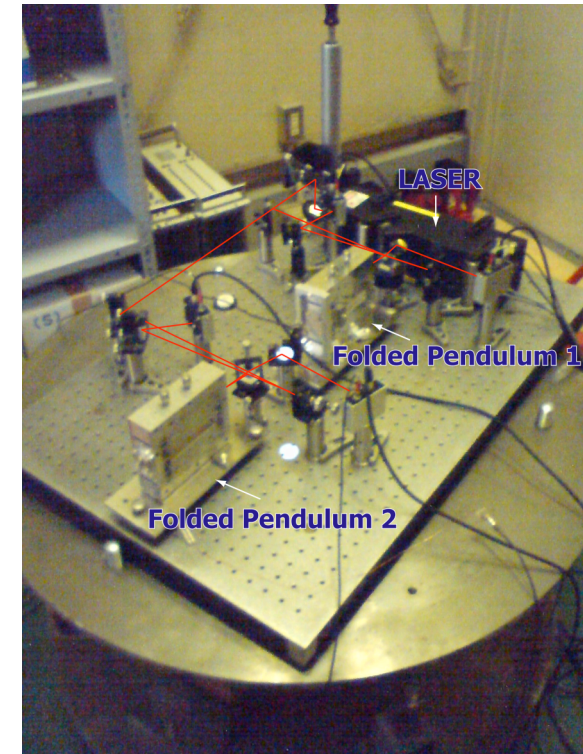
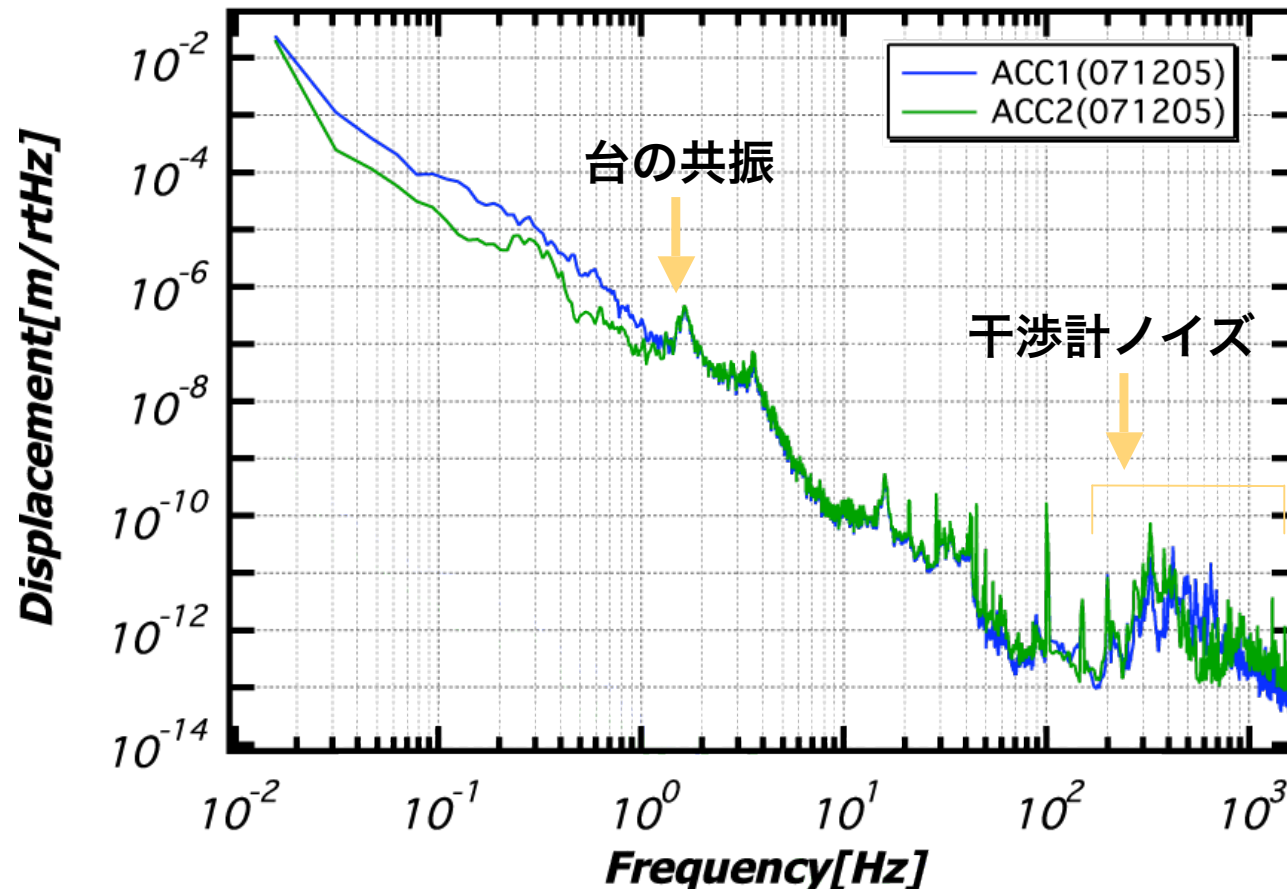




# 加速度計の製作 (4)

## ■ 地面振動測定

Seismic motion spectrum 071205



1Hzから100Hzまでで2台の加速度計で一致  
→  $2 \times 10^{(-7)} \text{m/rtHz}$  @ 1Hz以上の感度



---

# 目次

1. 加速度計開発の目的
2. サーボ型加速度計
3. 加速度計の製作
- 4. 感度評価実験**
5. まとめ

# 感度評価実験（1）

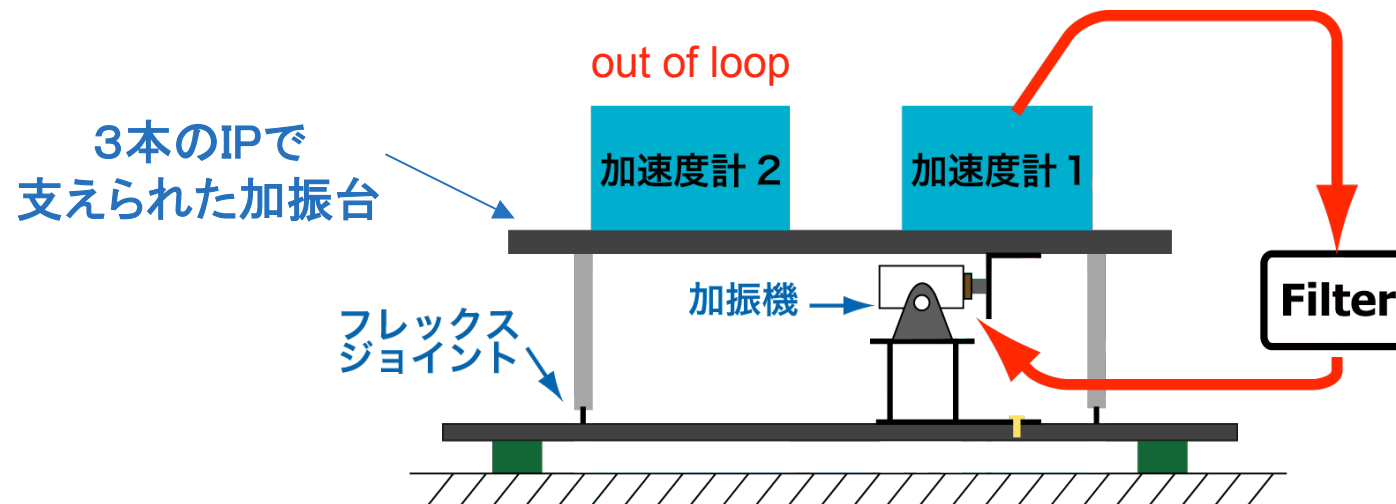
## ■概要

### (目的)

地面振動で隠されている加速度計の感度を測定する

### (方法)

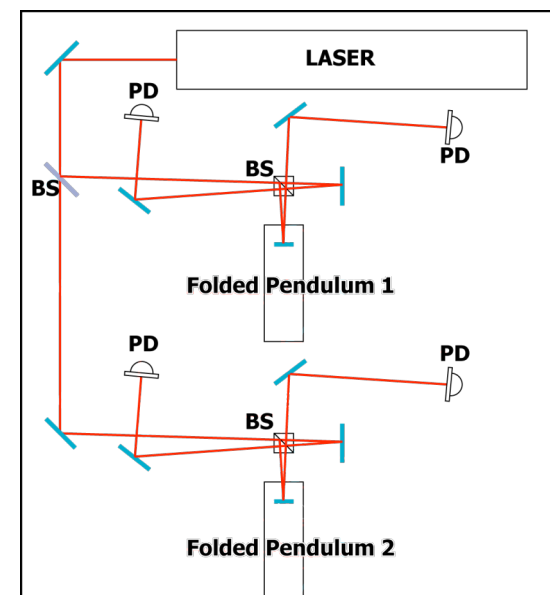
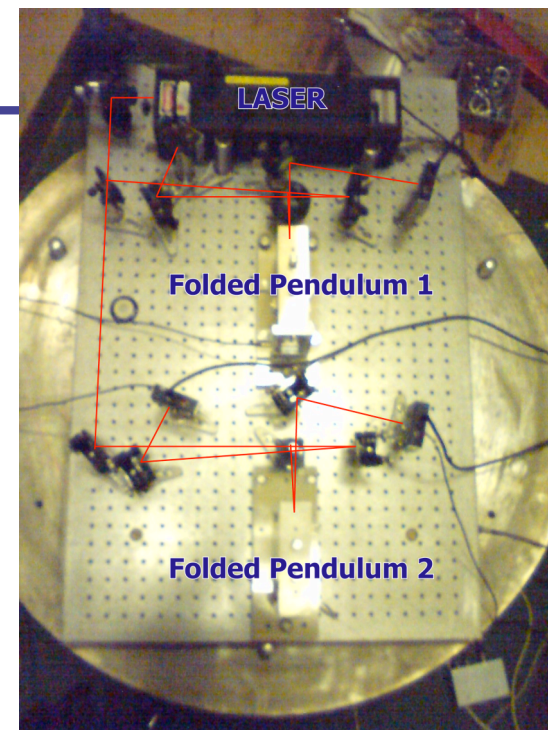
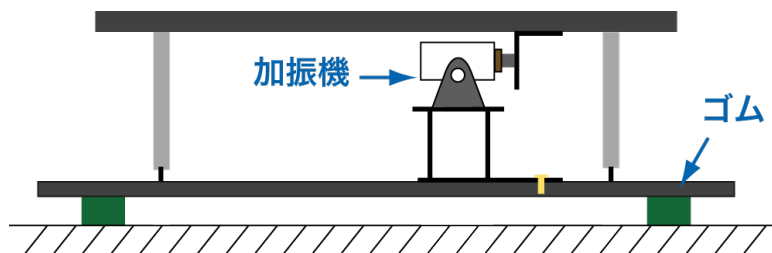
- 2台の加速度計を加振台の上に設置
- 一方で加振台を制御、もう一方で感度の評価を行う
  - 神岡の地面振動よりも静かな環境を作り出す
  - 1Hzでオープンループゲイン100以上の制御が必要
  - 制御帯域は数十mHから数十Hzまで



# 感度評価実験 (2)

## ■ セットアップ

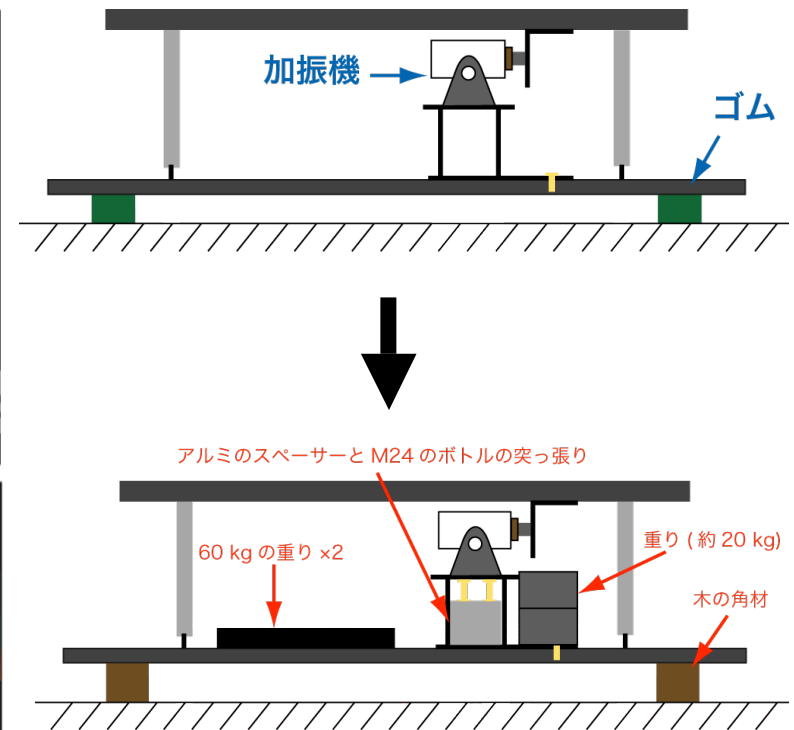
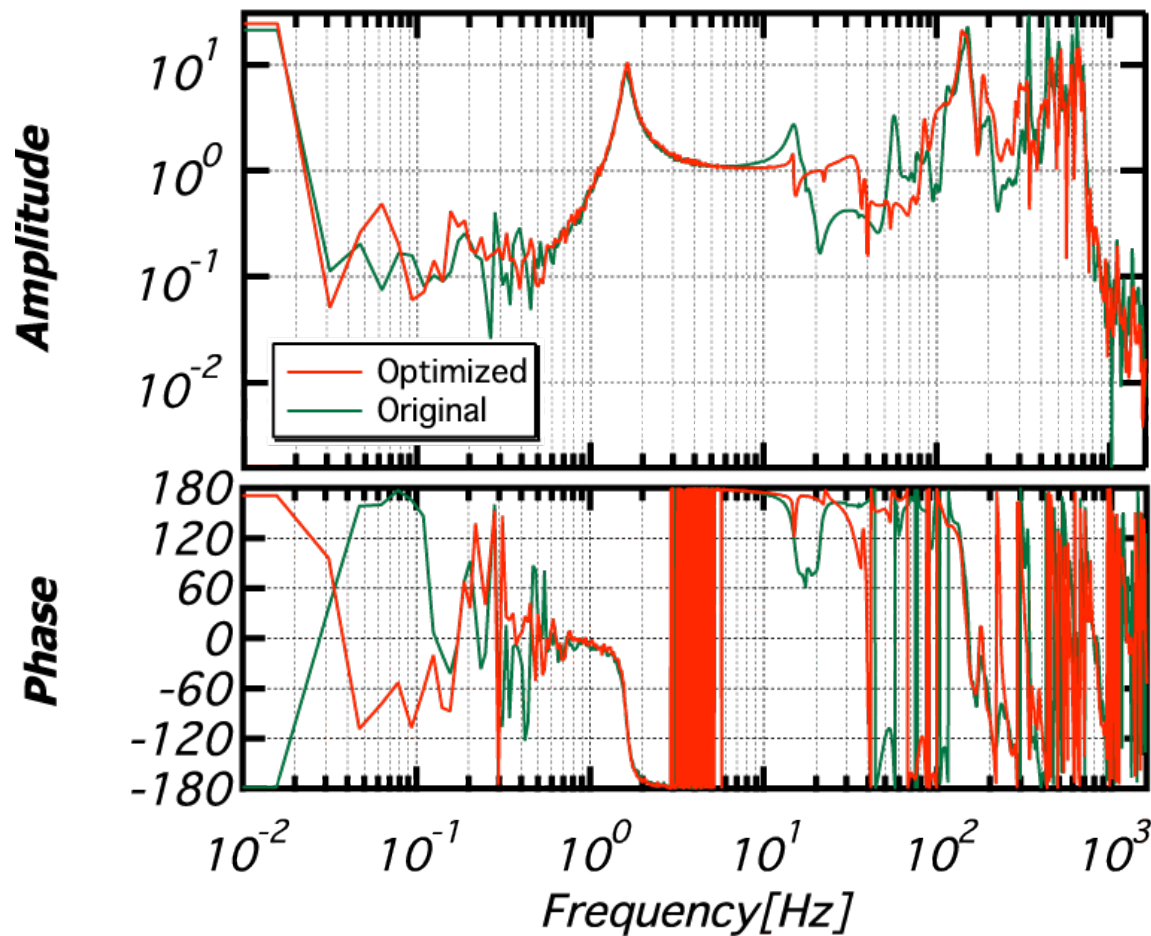
- センサーセットアップ
  - 1軸上にセンサーと加振機が並ぶように設置
  - 1つのレーザーの光を、ビームスプリッターで分けて共有
- アクチュエーターセットアップ
  - 台の下の部分に加振機を取り付け
  - 台と接着剤で連結



# 感度評価実験 (3)

## ■ 加振効率

TF (Excitor input => MI feedback) Optimized

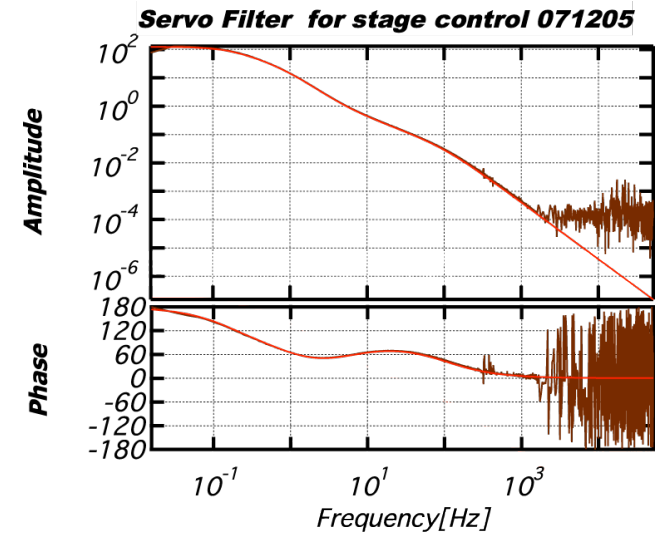
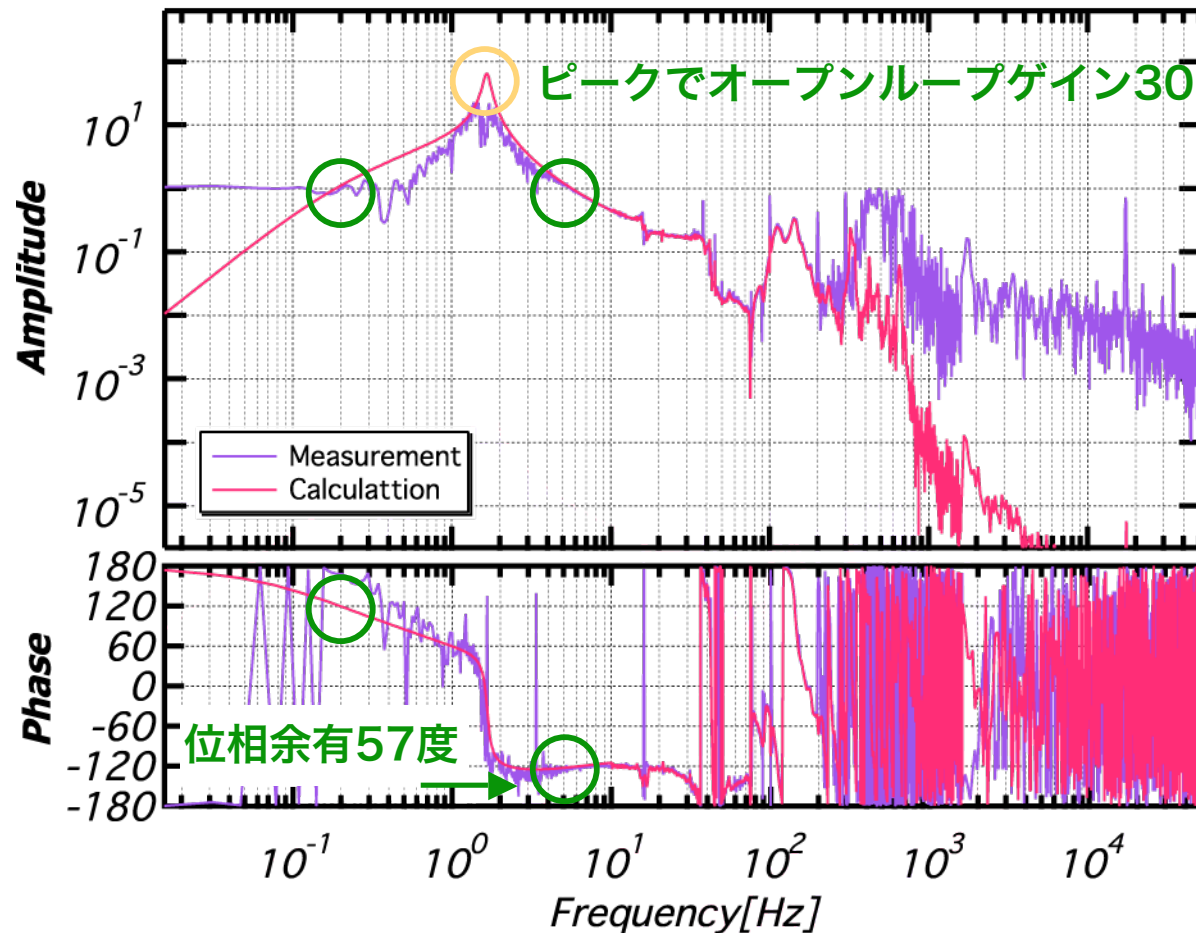


重り、固定を変更 → 共振のピークを抑えた

# 感度評価実験 (4)

## ■ 制御フィルター／オープンループ設計

Open loop Transfer function (stage control servo)



### 制御フィルター

- Pole 160mHz
- Pole 1Hz
- Zero 5Hz
- Pole 100Hz

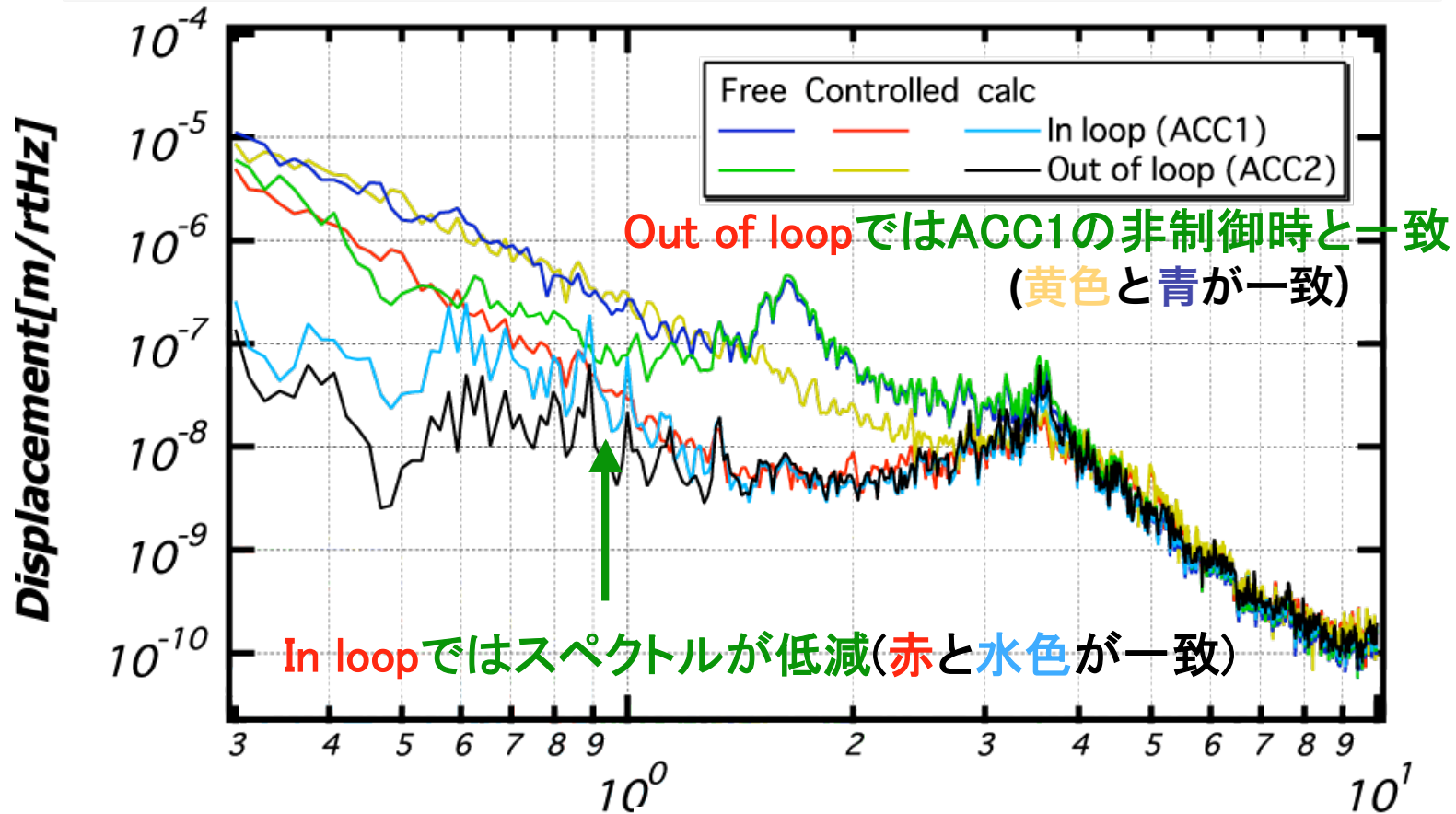
まずは低いゲインでの制御を試みた ⇒ 今後制御ゲインを上げていく (G>100)



# 感度評価実験 (5)

## ■ 制御結果

**Seismic motion spectrum (Free run & Controlled) 071205**



Out of loopの制御スペクトルが、ACC1の非制御時スペクトルと一致  
⇒ACC1の感度は $2 \times 10^{-7} \text{ m/rtHz} @ 1 \text{ Hz}$ と推定

# まとめ

---

○将来の重力波干渉計に向けた加速度計を開発

○目標感度  $1 \times 10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1\text{Hz}$  (神岡の地面振動レベル以上の感度)

○光干渉計を用いたサーボ型加速度計を開発

折り畳み振り子 : 共振周波数624mHz:455mHz

マイケルソン干渉計 :  $10^{-11} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ の雑音レベル

○2台の加速度計により感度評価実験を行った

○現状感度 :  $2 \times 10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1\text{Hz}$

⇒今後、感度を制限している要因を特定していく