

修士論文

ねじれ振り子型重力波検出器 TOBAのための懸架システムの開発

Development of the Suspension System
for Torsion-Bar Antenna(TOBA)

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
宇宙線研究所 重力波推進室 大橋研究室
修士課程2年 手嶋 航大

1. 研究概要と背景

【目的】

Phase-II TOBA (ねじれ振り子型重力波検出器)における
回転系懸架システムの開発！

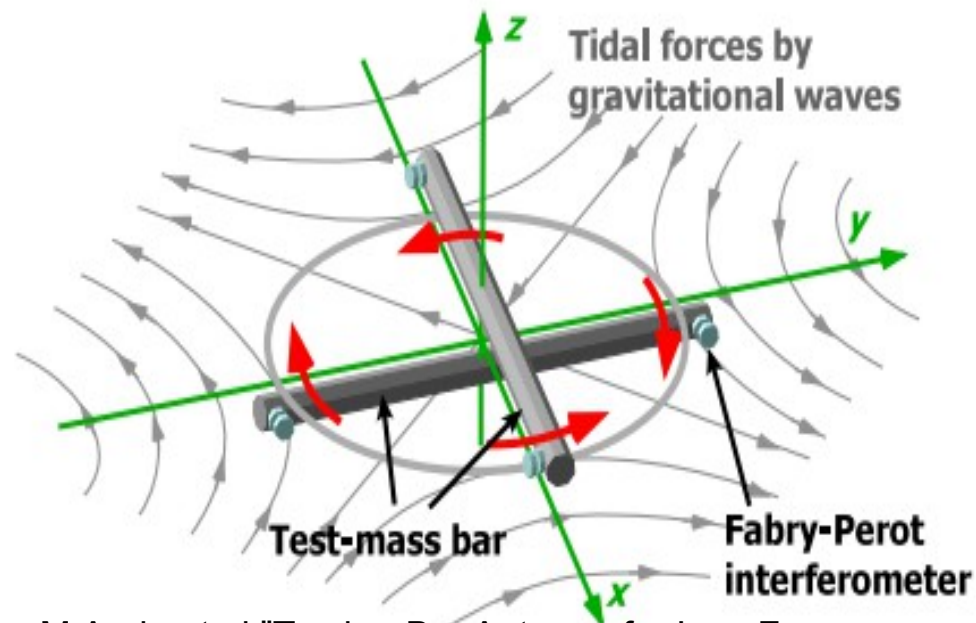
【① 防振性能の検証と共振周波数の見積もり】

多体系防振シミュレーションの構築と解析

【② 実験機における伝達関数の測定】

実際に伝達関数を測定。シミュレーションとの比較・検証

TOBAの原理



M.Ando et al."Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observations" PRL 105, 161101 (2010)

- 重力波によって物体に働く潮汐力を受けて、テストマスが回転する。



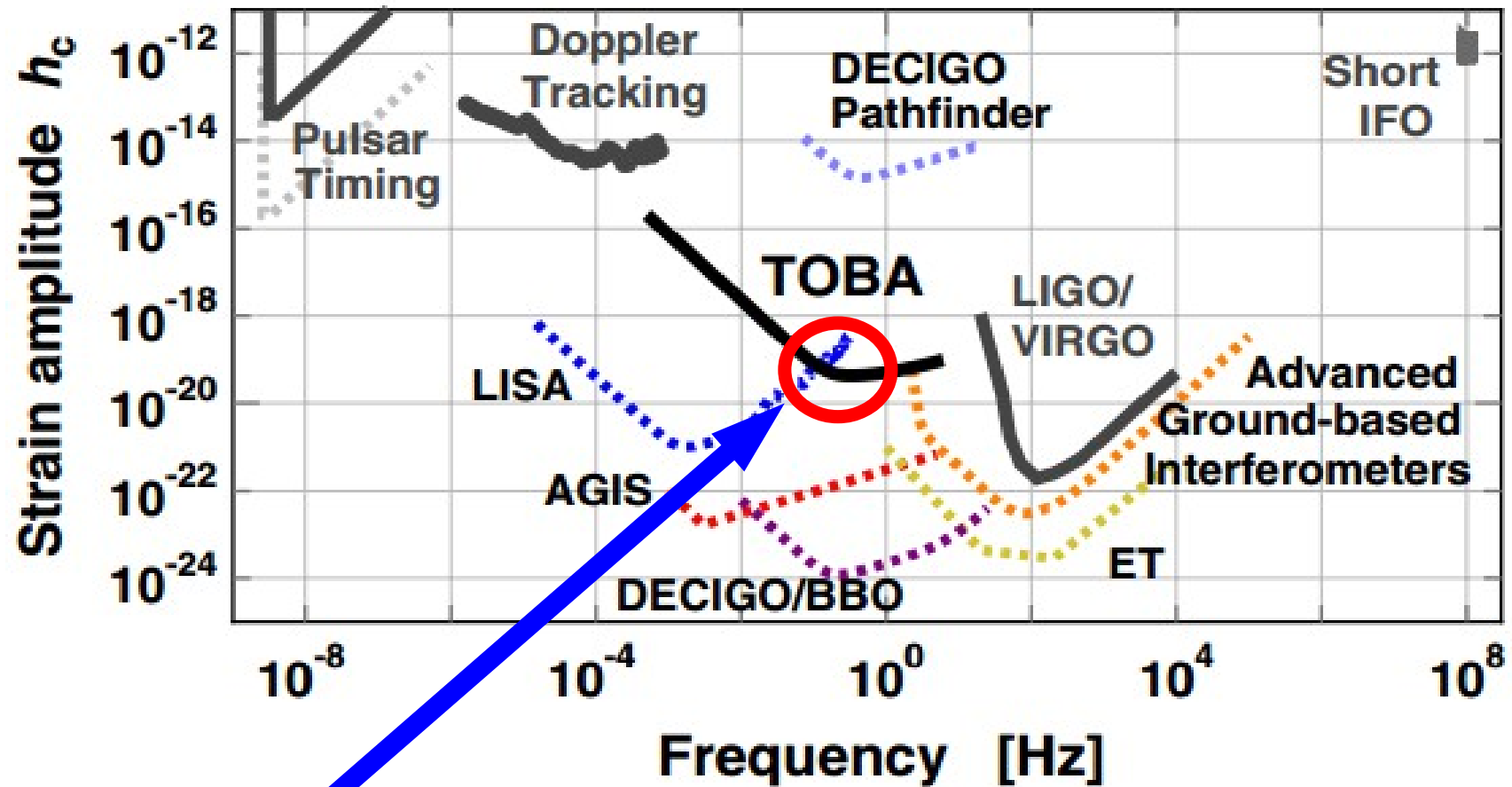
- (究極的には) Fabry-Perot 干渉計を用いた高感度センサーによって変位を読み取る。

$$\theta_{\text{diff}} \propto h_{\times}$$

◎特徴

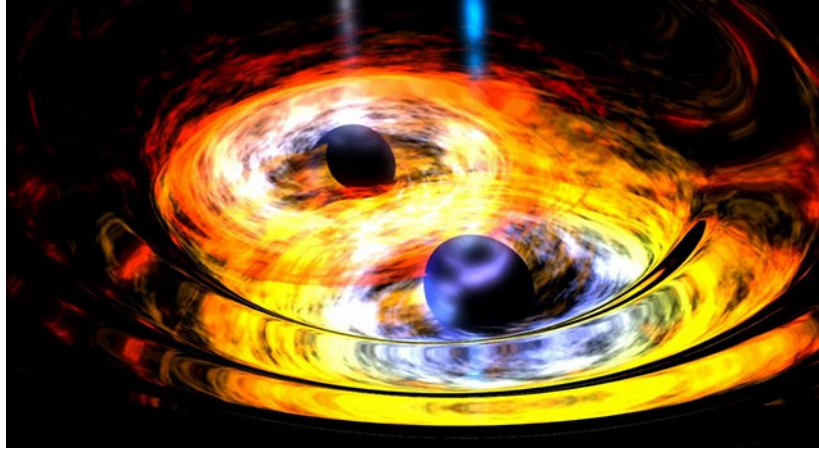
- ① 装置が単純でコンパクトである。
- ② 回転方向の共振周波数が数mHz （並進方向は数Hz）
← 低周波重力波に対し、感度を持つ

他の検出器との感度比較



M.Ando et al."Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observations" PRL 105, 161101 (2010)

なぜ、いま低周波を目指すのか？



http://www.astroarts.co.jp/news/2013/12/04binary_bh/index-j.shtml

興味深い物理現象がある

⇒超巨大ブラックホールの進化論

⇒インフレーション宇宙論・

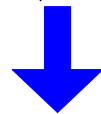
時空の相転移



従来の電磁波観測では
到底知ることできなかった。

重力波による高い透過性で
観測的アプローチを狙う。

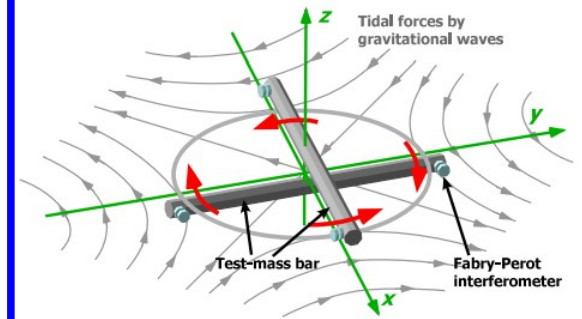
地上での干渉計型重力波検出器では感度を持たない。
宇宙で行うにも、コスト、メンテナンスなど課題も多い。



新原理で地上でも低周波帯域における検出の可能性が見出された！

プロトタイプTOBA 開発への過程

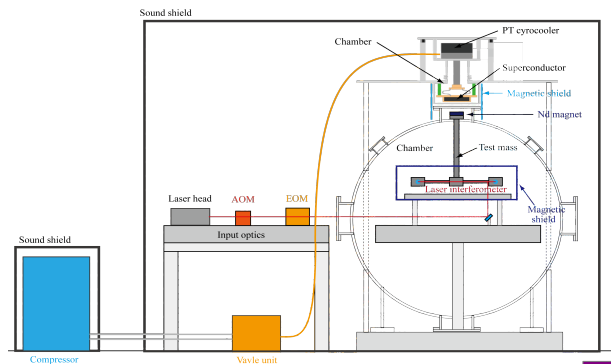
Final



- 10m級テストマス
(2本)

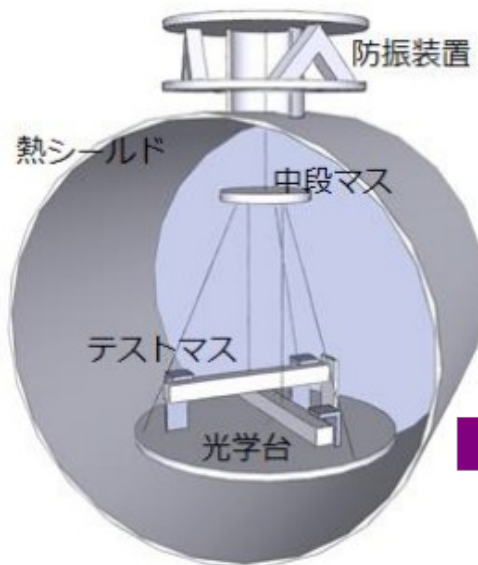
プロトタイプTOBA 開発への過程

Phase-I



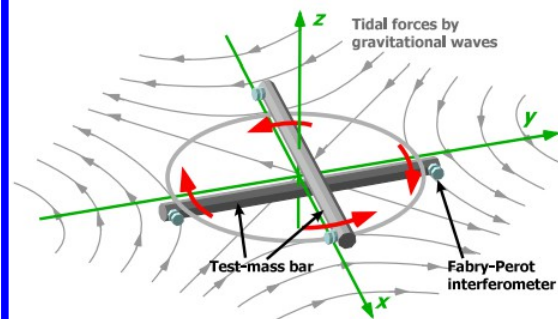
- 20cmテストマス
(1本)
- 原理の検証

Phase-II



- 24cmテストマス
(2本)
- ワイヤ懸架式
- 防振系を導入
- 低温化

Final

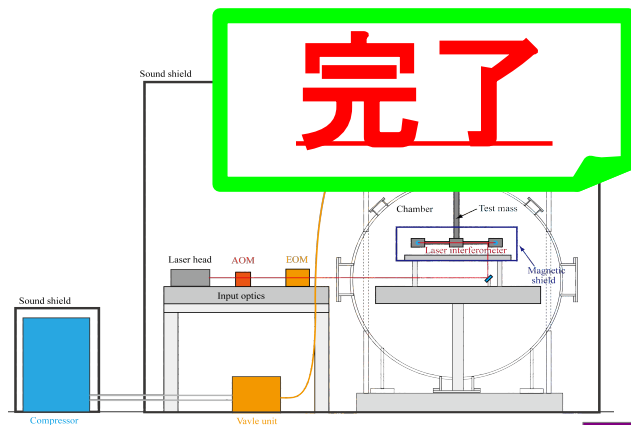


- 10m級テストマス
(2本)

プロトタイプTOBA 開発への過程

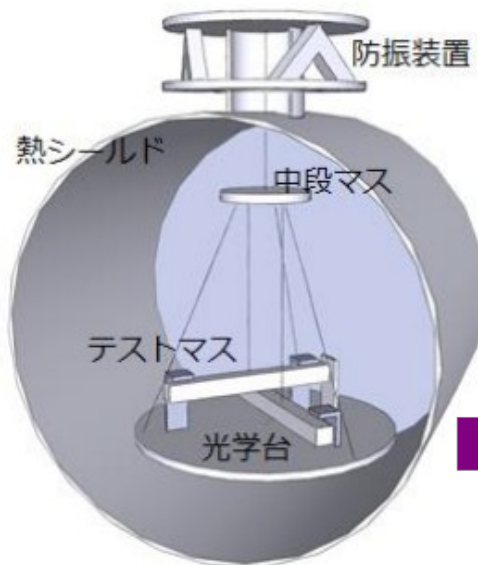
Phase-I

完了



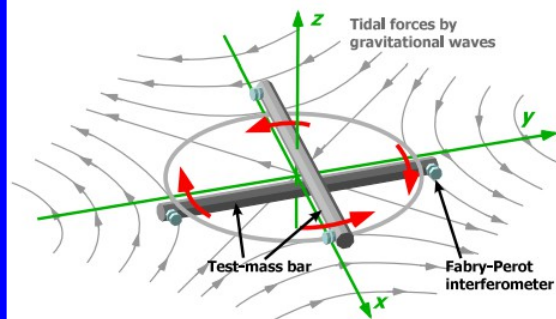
- 20cmテストマス
(1本)
- 原理の検証

Phase-II



- 24cmテストマス
(2本)
- ワイヤ懸架式
- 防振系を導入
- 低温化

Final

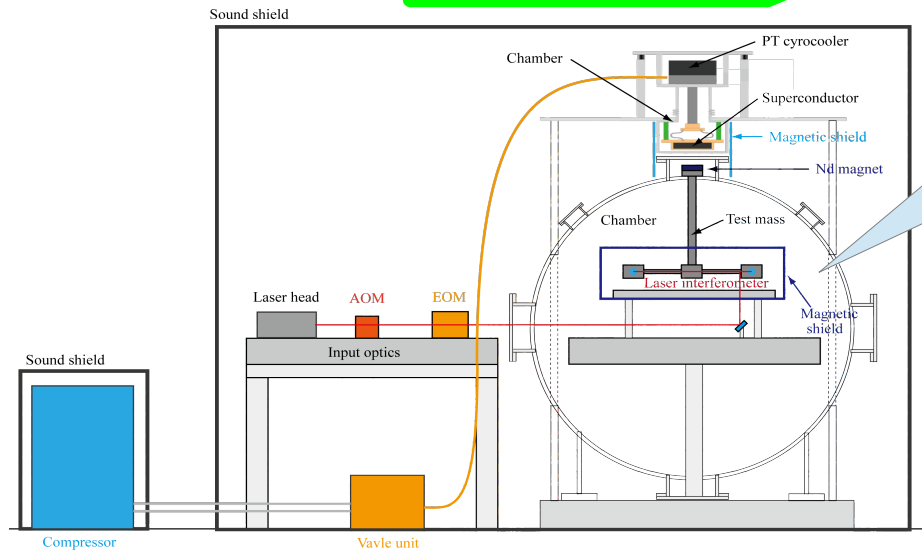


- 10m級テストマス
(2本)

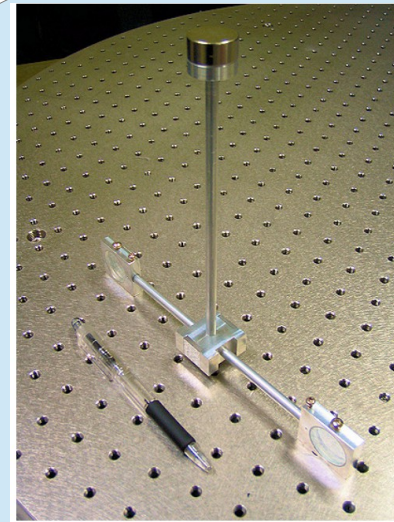
プロトタイプTOBA 開発への過程

Phase-I

完了



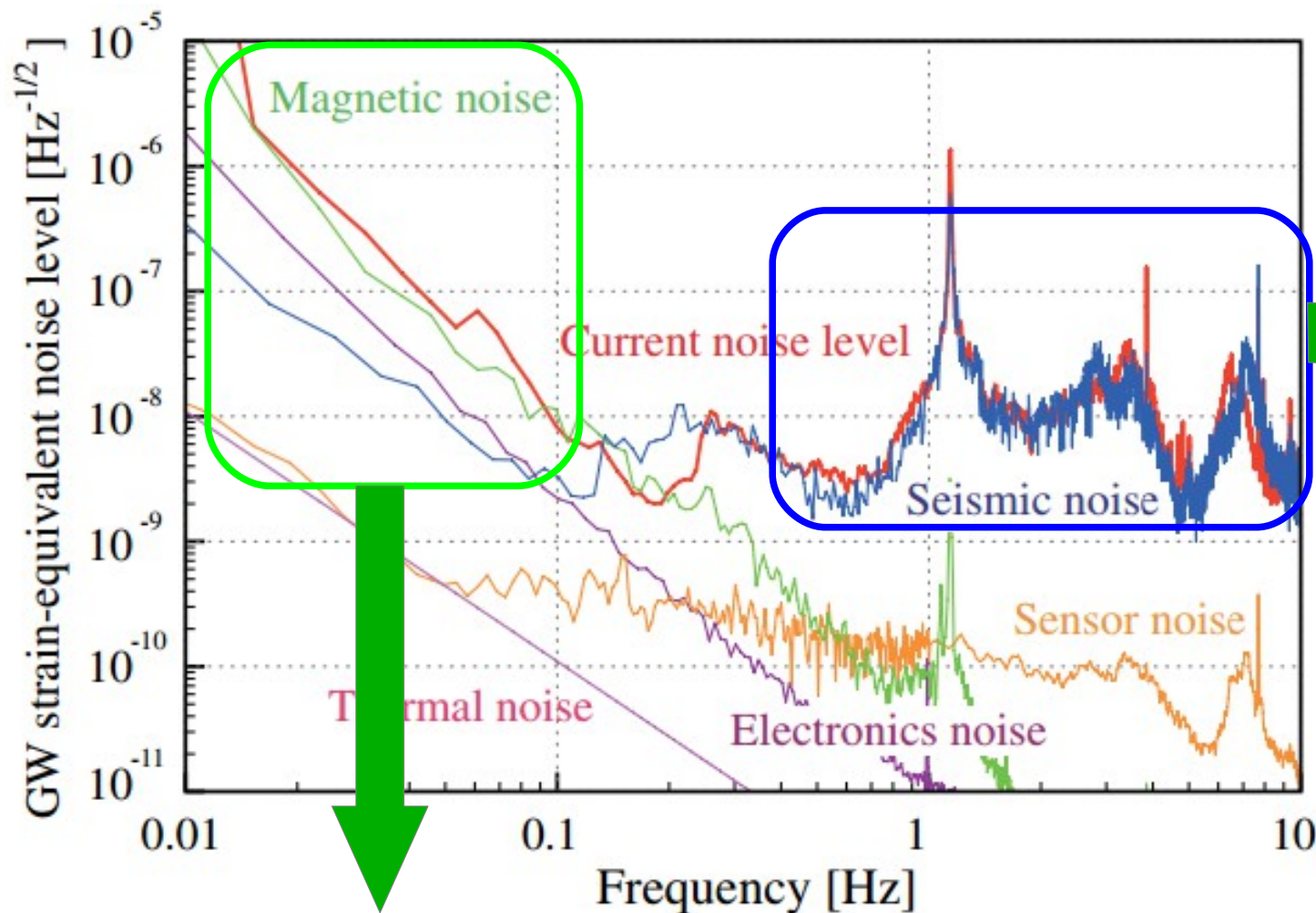
K. Ishidoshiro, M. Ando, A. Takamori, H. Takahashi, K. Okada, N. Matsumoto, W. Kokuyama, N. Kanda, Y. Aso, and K. Tsubono, "Upper Limit on Gravitational Wave Backgrounds at 0.2Hz with a Torsion-Bar Antenna," Physical Review Letters 106, 161101 (2011)



岡田健志:「低周波重力波探査のための超伝導磁気浮上型ねじれ振り子の研究」 修士論文(2010)

超伝導磁石によるピン止め効果
⇒ 浮上型ねじれ振り子

Phase-I TOBAにおける研究概要と結論



0.1Hz未満

磁場カップリング雑音
によって**感度を制限!**

0.5Hz以上

地面振動雑音
の並進成分
によって
感度を制限!

...Phase-II TOBA開発に至る経緯

Phase-II TOBAのまとめと、研究目的の再確認

これまで...

Phase-I TOBAによる技術検証・背景重力波探査 **完了**



発見された感度制限

| | |
|------------------------------|------------------------------------|
| 0.1Hz未満 <u>磁場カップリング雑音</u> | 0.5Hz以上 <u>地面振動雑音</u> (並進成分) |
|------------------------------|------------------------------------|

Phase-II TOBAの開発(ワイヤー懸架式・防振系導入)

- …回転系の防振懸架系について新たな知見を得る。
- …重力波以外の要因によるマスの振動・Couplingの除去を目指す

⇒ 内在する非対称性の見積もり

実際の装置

天盤

柱

中段マス

ダンピングマス

テストマス

光学台

底盤

★ 全体の大きさ
 $\phi 450\text{mm} \times 500\text{mm}$

防振系の力学的検証（モデルと計算方法）

◎ 仮定するモデル

⇒ **剛体モデル**

…自由度が多く煩雑だが現実的な議論が可能

◎ 防振特性の計算 → 伝達関数測定に向けて共振周波数を予測

① SimMechanicsによるモデリングの妥当性検証のため、
簡単な基礎構造を構築

⇒ 解析力学 or 古典力学的静的仮想変位法
による計算と比較

② SimMechanicsによる実際の懸架システムのモデリング
& シミュレーション解析


複雑な多体系解析に有効

シミュレーション解析

- ① Scopeブロックで、パルス的な外力を与えた後の実際の振る舞いをシミュレーション（ここでは割愛）
- ② 伝達関数測定用入力・出力ブロック間で、伝達関数のシミュレーション

アクチュエート

- (1) y軸並進加振
- (2) z軸並進加振
- (3) y軸まわり回転加振
- (4) z軸まわり回転加振

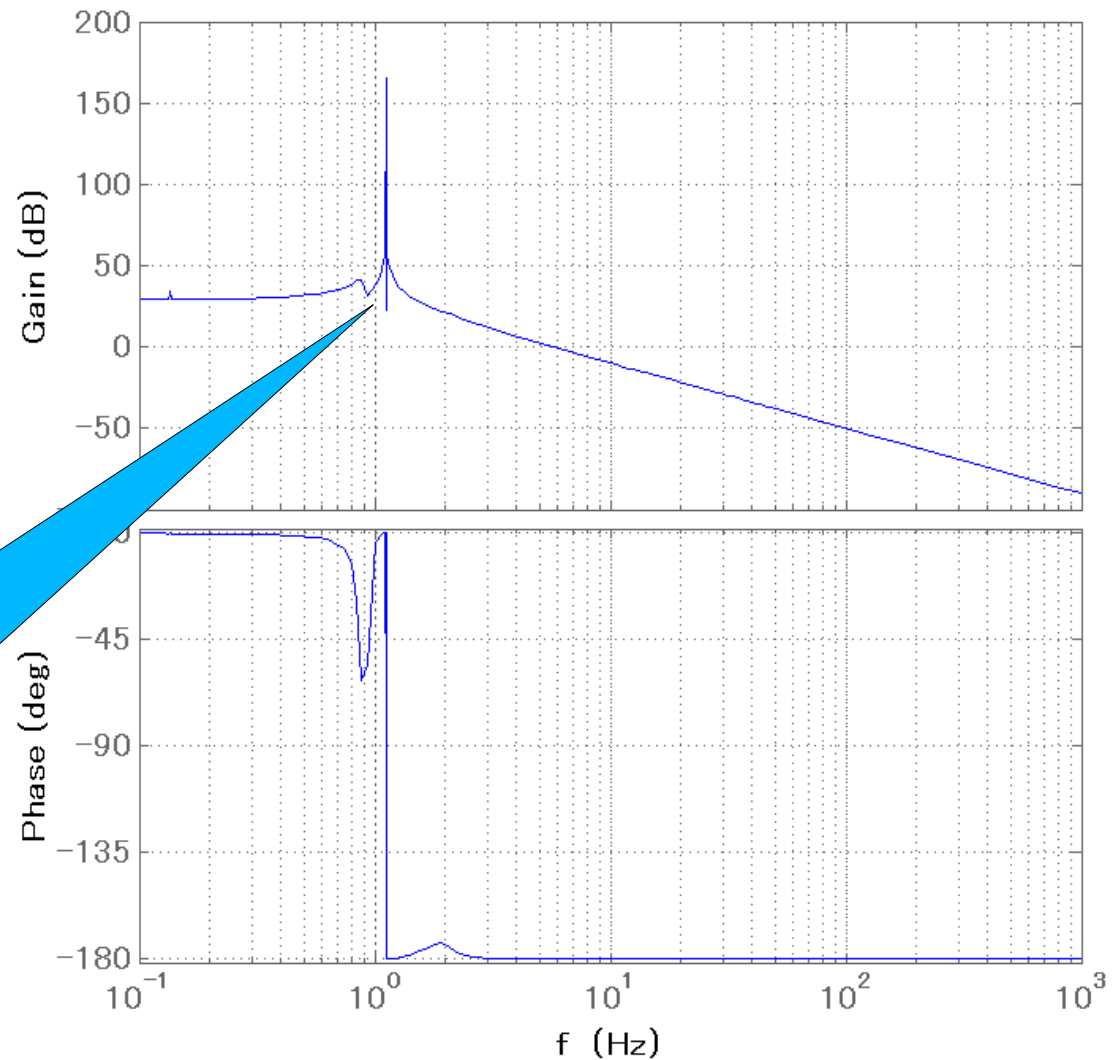
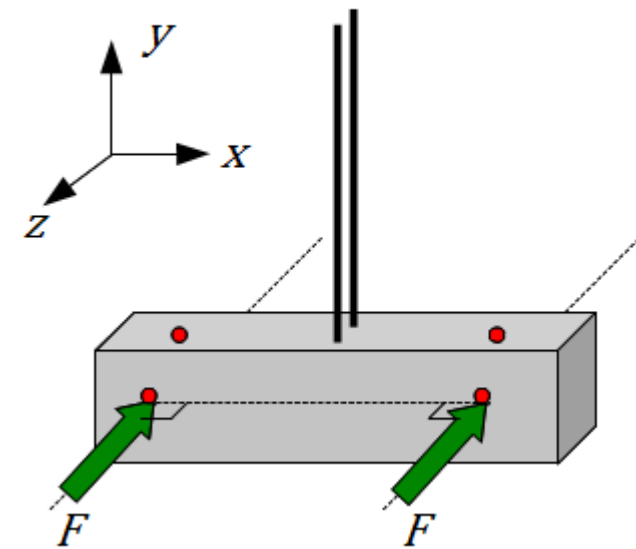

$$4 \times 6 = 24$$

通り

センサー

- (1) x軸並進モニター[x]
- (2) y軸並進モニター[y]
- (3) z軸並進モニター[z]
- (4) x軸回転モニター[θ]
- (5) y軸回転モニター[ϕ]
- (6) z軸回転モニター[ψ]

(2) z軸並進加振 vs. (3) z軸並進モニター



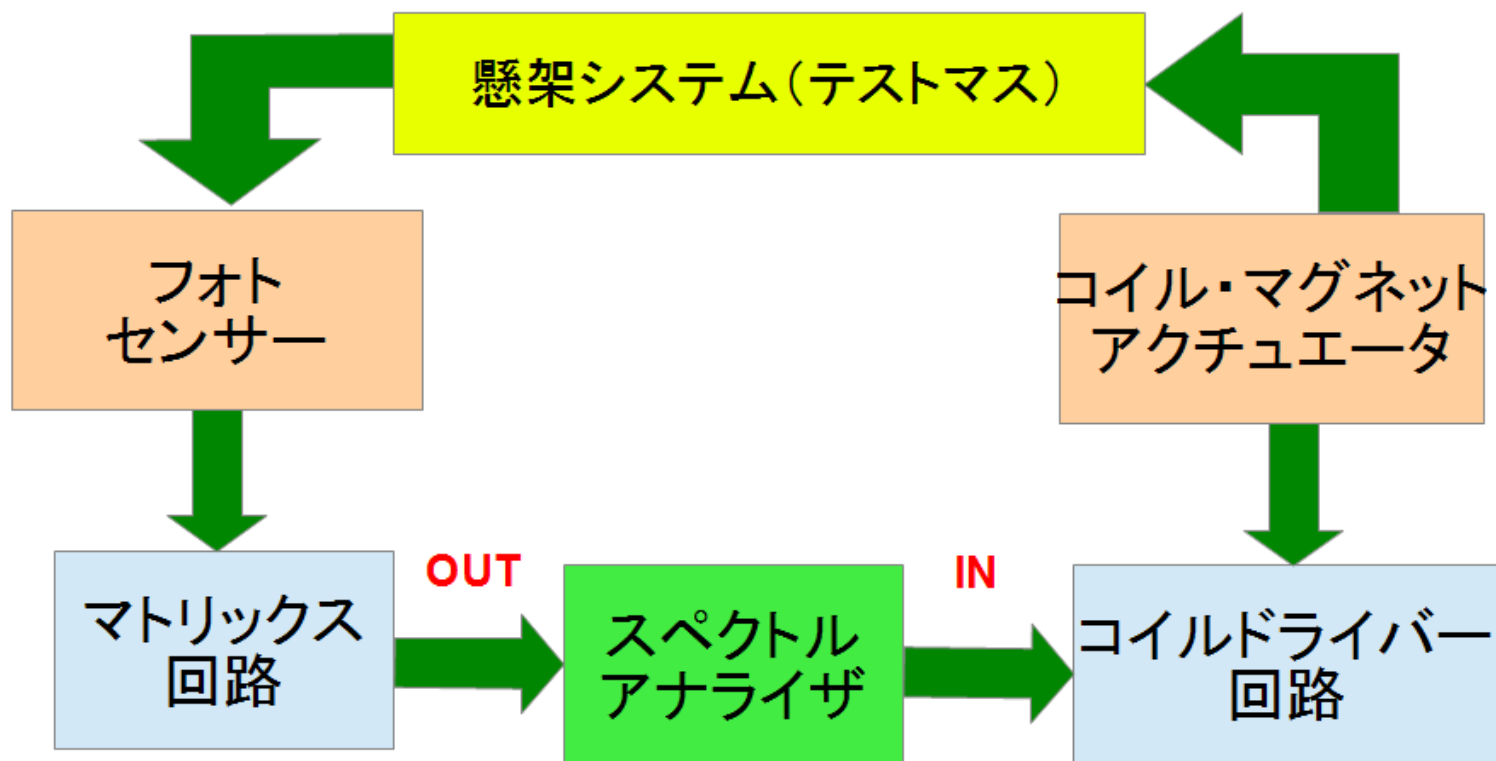
最大ピーク: 1.1Hz
z軸方向の振り子振動
の共振周波数

実験概要

y軸まわりの回転の自由度について、懸架システムの伝達関数を計測する。

ブロックダイアグラム

→ 今回は制御を行わずに計測する。

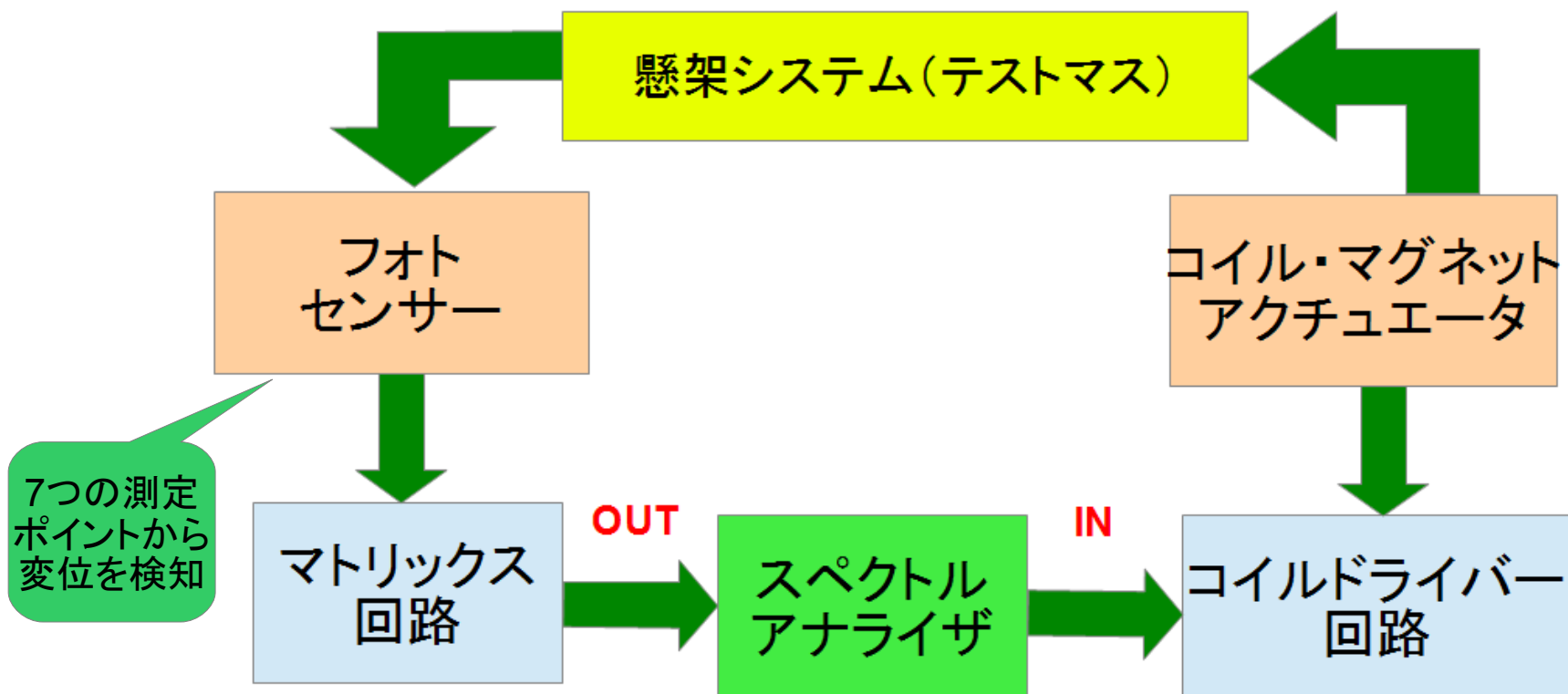


実験概要

y軸まわりの回転の自由度について、懸架システムの伝達関数を計測する。

ブロックダイアグラム

→ 今回は制御を行わずに計測する。

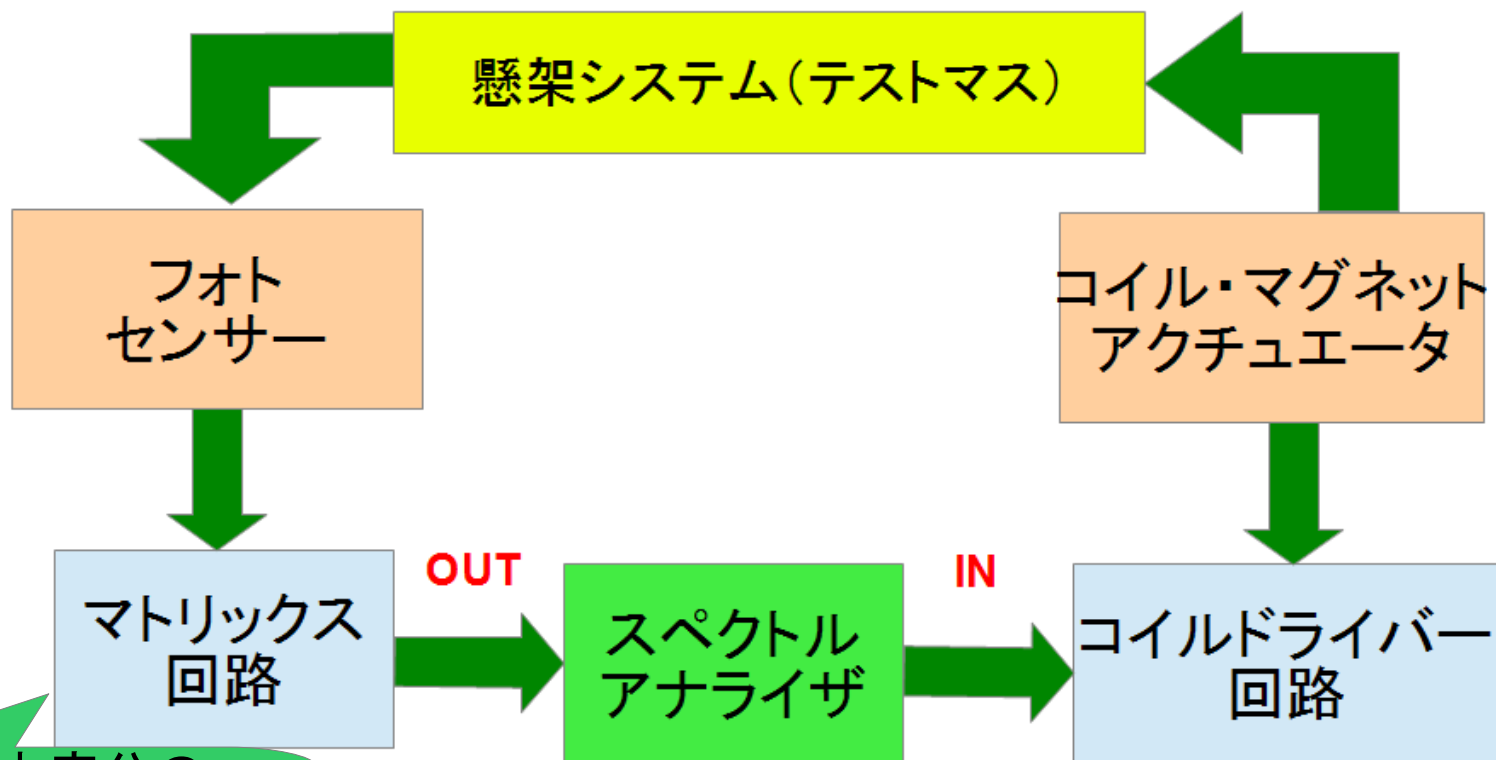


実験概要

y軸まわりの回転の自由度について、懸架システムの伝達関数を計測する。

ブロックダイアグラム

→ 今回は制御を行わずに計測する。



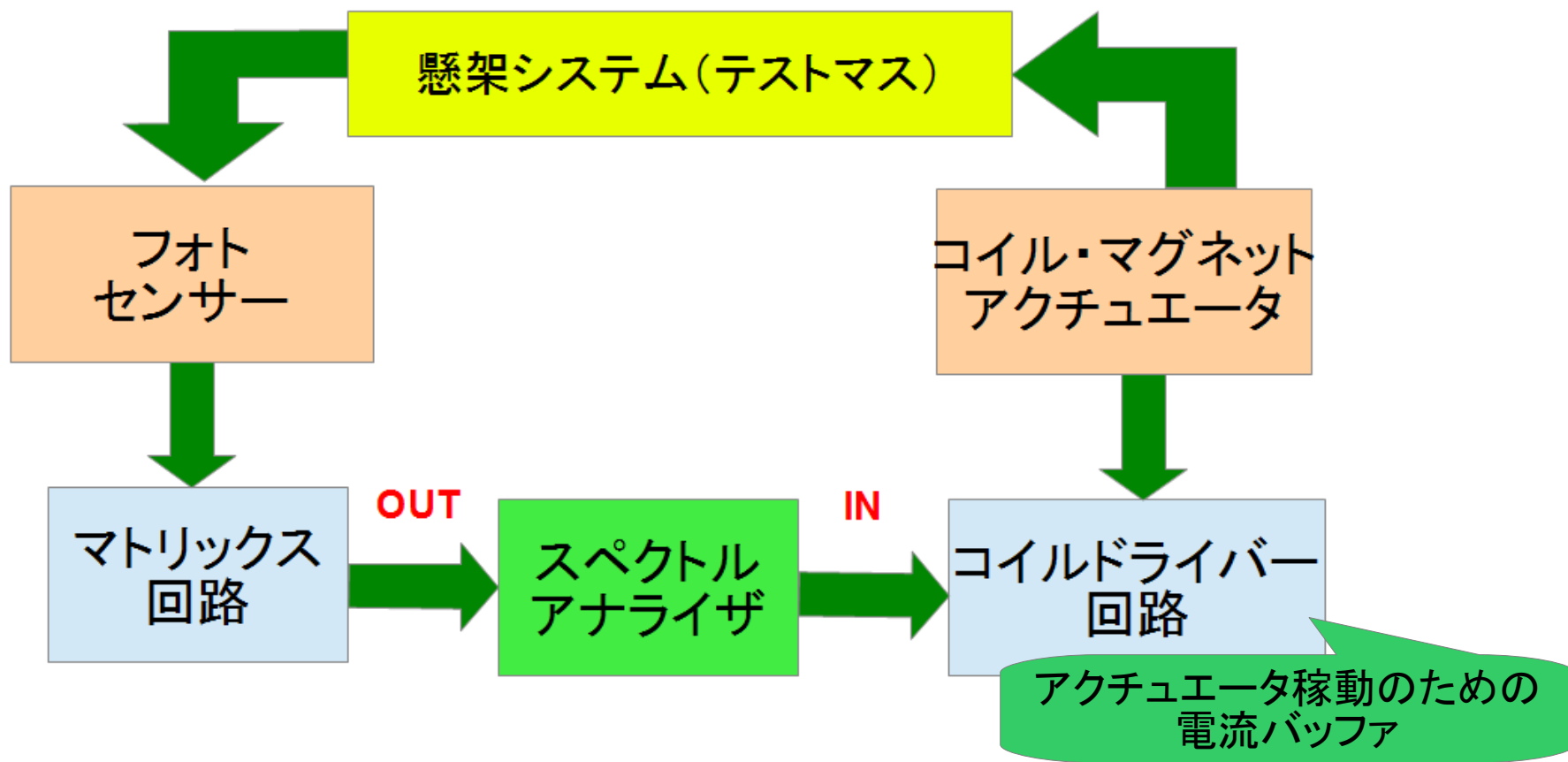
6自由度分の
信号を導出

実験概要

y軸まわりの回転の自由度について、懸架システムの伝達関数を計測する。

ブロックダイアグラム

→ 今回は制御を行わずに計測する。

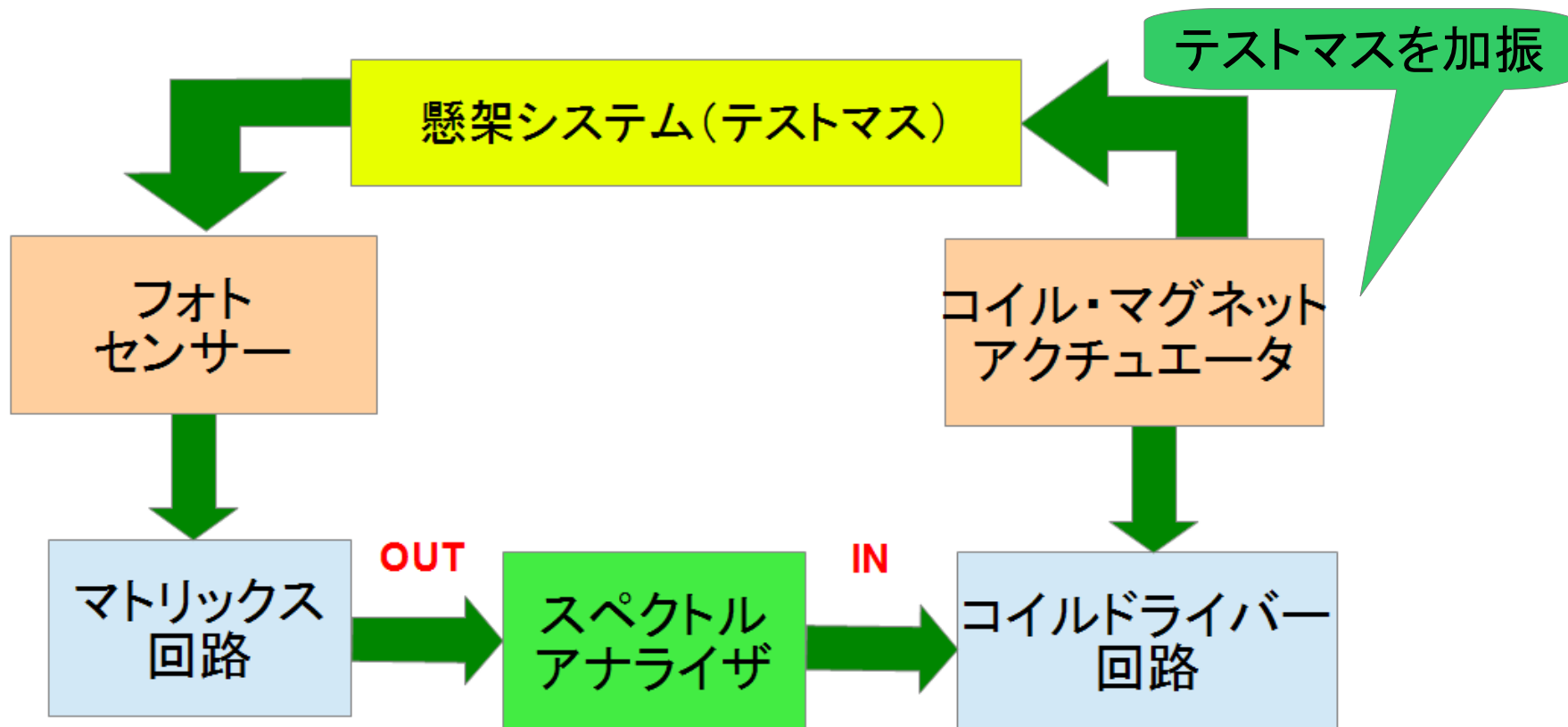


実験概要

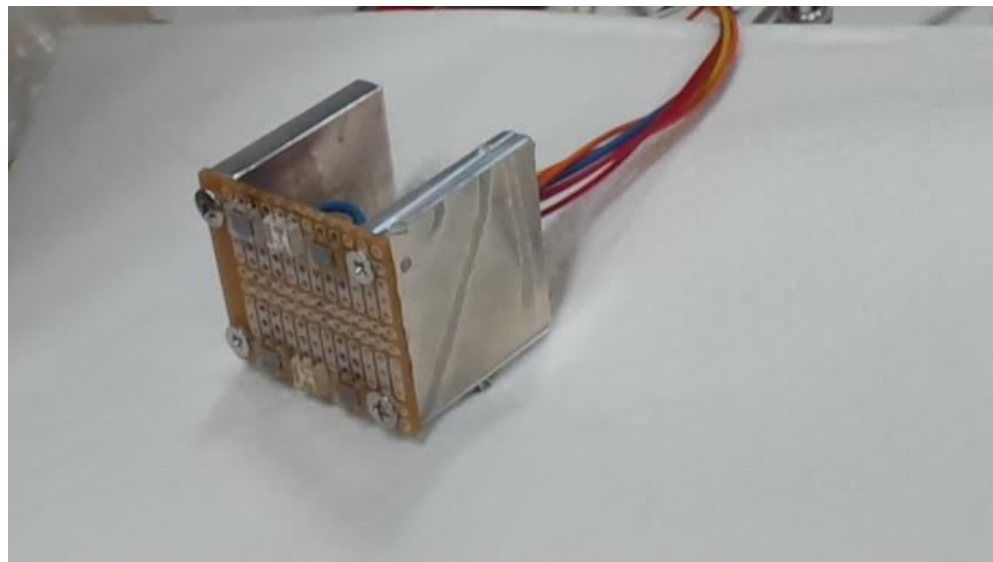
y軸まわりの回転の自由度について、懸架システムの伝達関数を計測する。

ブロックダイアグラム

→ 今回は制御を行わずに計測する。

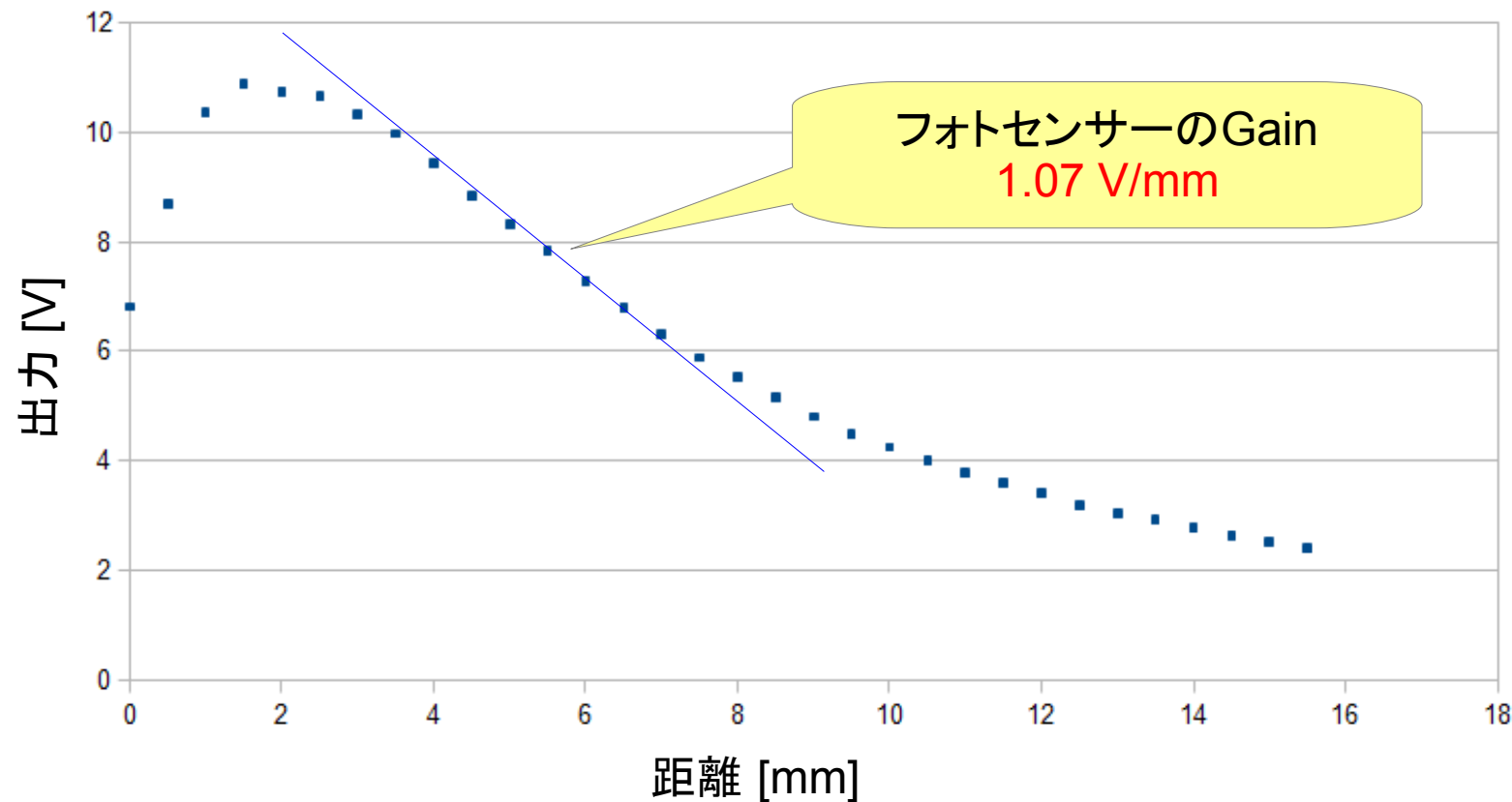


フォトセンサー



- ・7チャンネル分のフォトセンサー
⇒7つのセンサーの出力を
加減算することで6自由度分の
信号を得る。
- ・中央にLED、両端にフォトダイオード
を備える。
- ・鏡の設置箇所がないので、簡易的
にマスに直接光を当てて計測

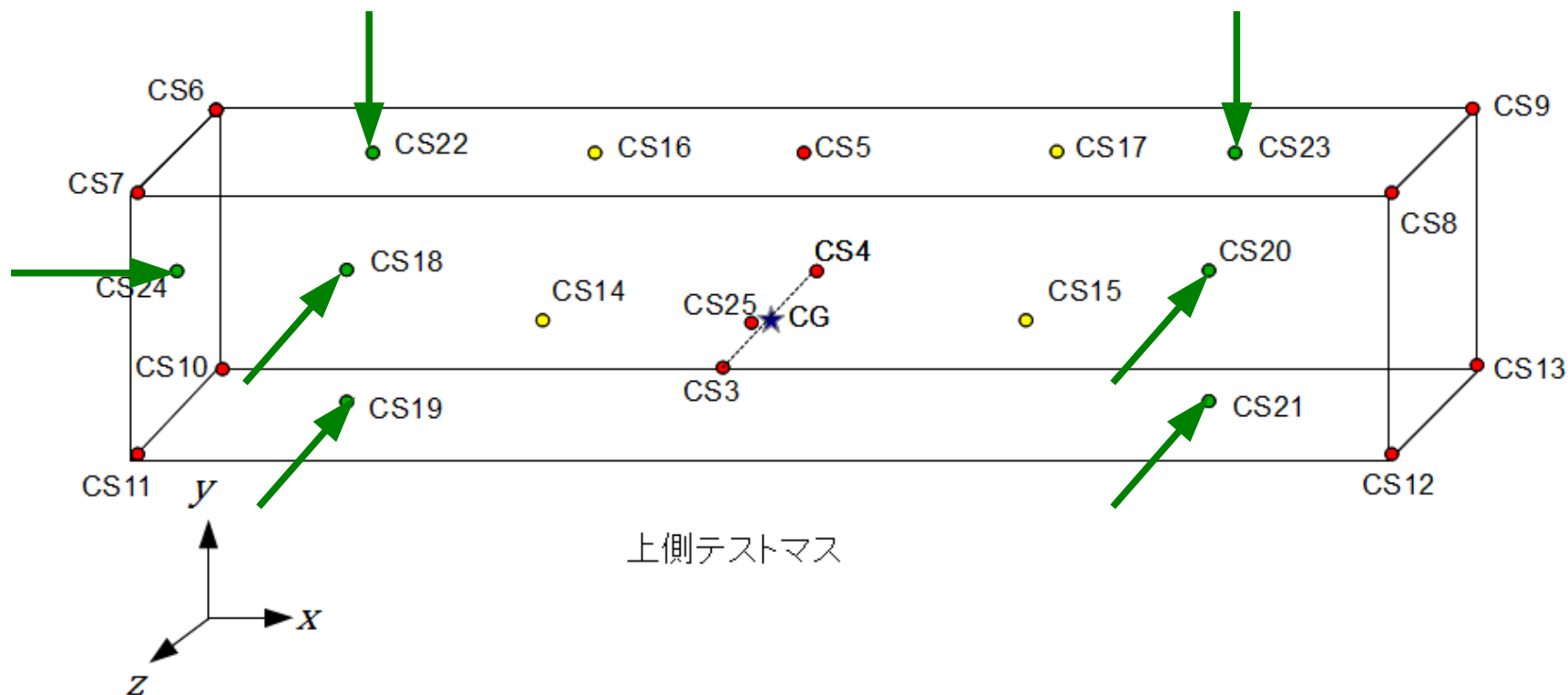
フォトセンサー



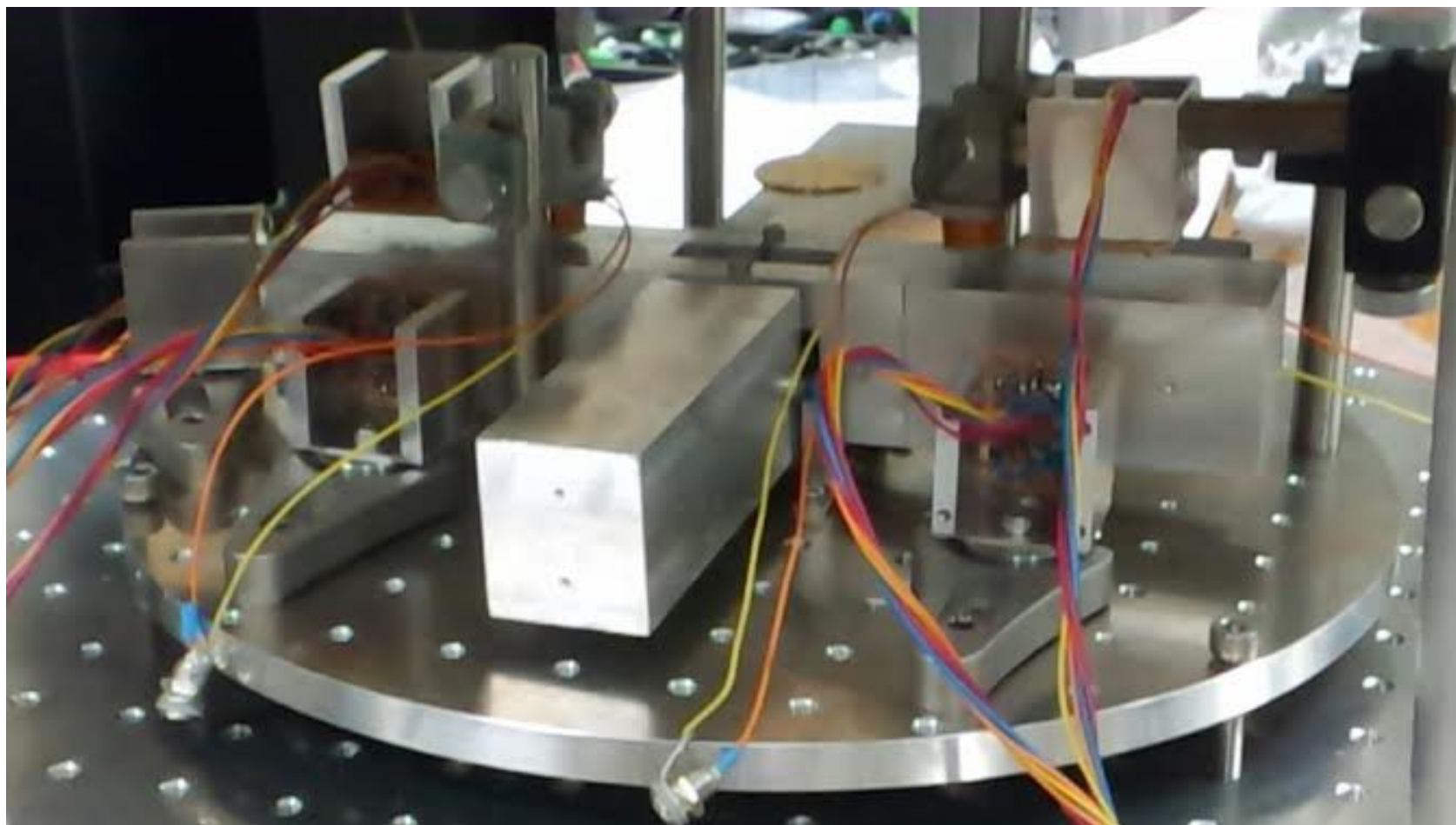
フォトセンサー特性曲線 —————> 線形近似できる5mm付近にセンサーを設置

フォトセンサー

7つのフォトセンサーの設置箇所



実験概要図



実験における考察

◎ 今回の測定においては有意なデータが得られなかった。

原因

- ・ 懸架システムの組み上げにおいて補正の許容度を超える非対称性があった。



テストマス同士・他のマスに接触しており
自由質量化が実現できていない。

⇒懸架システムの正確な組み上げの再度の実施

今後の見通し

- ・ 1自由度に関しての伝達関数の測定。
⇒制御も導入して行う。
- ・ 得られたデータから懸架システムの伝達関数を割り出し、シミュレーション結果との比較・考察

まとめ

① Phase-II TOBA実験機の設計

- ・ワイヤー懸架式の新プロトタイプTOBA
 - ⇒テストマスの子状の構造設計
 - ⇒渦電流ダンピングを担うダンピングマスの形状設計
 - ⇒テストマスと光学台の同時懸架の試み

② SimMechanicsによる多体防振系システムの解析

- ・SimMechanics内での懸架システムのモデリング構築
- ・共振周波数、伝達関数のシミュレーションと見積もり

③ 伝達関数測定実験

- ・制御を取り入れずに伝達関数の計測を試みたが、懸架における非対称性が非常に大きく、有意な結果を得るまでに達しなかった。