ねじれ型重力波望遠鏡TOBAのための 防振系の開発

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

高野 哲



- ・ねじれ型重力波望遠鏡TOBAの開発を行い、0.1 Hz帯の重力波の 検出を目指している
- プロトタイプ開発に向けて、能動防振系の開発を行った
- ・制御帯域を先行研究(~1 Hz)よりも低周波側へ広げることに成功



Contents

- 研究背景
 - ► TOBA
 - ▶ 能動防振
- 防振系の構成
 - ▶ 防振系の設計
 - ▶ 防振系の構築
- 防振試験の結果と考察

▶ 結果



まとめ、今後の展望

Contents

- 研究背景
 - ► TOBA
 - ▶ 能動防振
- 防振系の構成
 - ▶ 防振系の設計
 - ▶ 防振系の構築
- 防振試験の結果と考察

▶ 結果



• まとめ、今後の展望

重力波天文学

- ・ 重力波:一般相対性理論から予言される時空の歪みが伝搬する波動
- ・従来の電磁波望遠鏡では観測が困難な対象を観測可能
 - ▶ブラックホールなどのコンパクト天体連星の合体
 - ▶ 超新星爆発
 - ► etc.



*http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/aboutu-gw

- ・ 2015年, advanced LIGOが初の直接観測に成功
 - 重力波天文学の幕開け

22.01.2019

ねじれ型重力波望遠鏡TOBA

ねじれ型重力波望遠鏡TOBA (TOrsion Bar Antenna)

- ・水平に懸架した棒状マスのねじれ回転を検出
- ・ 共振周波数~数mHz→0.1-10Hzの低周波重力波の地上観測が可能
- ・地上で観測可能(宇宙に打ち上げる必要がない)→低コスト
- ・目標: 10mスケールで h~10⁻¹⁹ /√Hz @ 0.1 Hz



TOBAの観測対象



天文学的観測

- ・中間質量BH連星の合体
 - ▶ 10³ 10⁵ Moの質量を持つBH
 - ▶ 銀河中心にある超巨大質量BHの形成過程の候補
 - ▶ 直接観測した例はない
- 背景重力波
 - ▶ 宇宙全天から放出される重力波
 - ▶ 初期宇宙の直接探査



地球物理学

- Newtonian Noise
 - ▶ 大気の揺らぎや地面の振動による重力場の変動



- ▶ 将来の地上望遠鏡における主要な雑音の一つ
- ▶ モデルのみ,実験的な検証が必要
- ・地震速報
 - 地震の際の地面振動や密度変動











Phase-III TOBAによるサイエンス



Phase-III TOBAの構成



Master Thesis Defense





目標感度のための課題

- 低温懸架系
 - ▶ 冷却: 試験マスを4Kまで冷却
 - ▶ Q値: 4 KでQ = 10⁸
- 防振系
 - ▶ 回転地面振動
 - ▶ 並進とのカップリング
 - ▶ 並進地面振動
 - ▶ 冷凍機から導入される振動の低減
- 光学系
 - ▶ wave front sensorを応用した読み取り系

目標感度までの課題

- 低温懸架系
 - ▶ 冷却: 試験マスを4Kまで冷却 →数値シミュレーションで確認済み

→能動防振

- ▶ Q値: 4 KでQ = 10⁸
- 防振系
 - ▶回転地面振動 →2段振り子+同相雑音除去
 - ▶ 並進とのカップリング →低減手法の開発
 - ▶ 並進地面振動: 10⁻⁷ m/√Hz @ 0.1 Hz
 - ▶ 冷凍機から導入される振動の低減
- 光学系
 - ▶ wave front sensorを応用した読み取り系 →原理実証済み

目標感度までの課題

- 低温懸架系
 - ▶ 冷却: 試験マスを4Kまで冷却 →数値シミュレーションで確認済み

→能動防振

- ▶ Q値: 4 KでQ = 10⁸
- 防振系
 - ▶回転地面振動 →2段振り子+同相雑音除去
 - ▶ 並進とのカップリング →低減手法の開発
 - ▶ 並進地面振動: 10⁻⁷ m/√Hz @ 0.1 Hz
 - ▶ 冷凍機から導入される振動の低減

• 光学系

▶ wave front sensorを応用した読み取り系 →原理実証済み

並進地面振動カップリング

系の非対称性により並進地面振動がねじれ回転方向の信号に現れる

カップリング カップリング メ 雑音 「係数 × ^{要求値} 10⁻¹⁶ rad/√Hz 10⁻⁹ rad/m

カップリング係数を下げる

- 10⁻⁶ rad/m まで低減 [Shimoda+ (2018)]
- カップリング係数の低減だけでは難しい
 - ▶ 並進地面振動を防振する



懸架点の防振

- ・ 懸架点の振動への要求値: 10⁻⁷ m/√Hz @ 0.1Hz
 - ▶ 0.1 Hzで1/10, 1 Hzで1/100 程度の防振が必要



目標感度までの課題

- 低温懸架系
 - ▶ 冷却: 試験マスを4Kまで冷却 →数値シミュレーションで確認済み

→能動防振

- ▶ Q値: 4 KでQ = 10⁸
- 防振系
 - ▶回転地面振動 →2段振り子+同相雑音除去
 - ▶ 並進とのカップリング →低減手法の開発
 - ▶ 並進地面振動: 10-7 m/√Hz @ 0.1 Hz
 - ▶ 冷凍機から導入される振動の低減
- 光学系
 - ▶ wave front sensorを応用した読み取り系 →原理実証済み

冷凍機からの振動の流入



目標感度までの課題

- 低温懸架系
 - ▶ 冷却: 試験マスを4Kまで冷却 →数値シミュレーションで確認済み

→能動

- ▶ Q値: 4 KでQ = 10⁸
- 防振系
 - ▶回転地面振動 →2段振り子+同相雑音除去
 - ▶ 並進とのカップリング →低減手法の開発
 - ▶ 並進地面振動: 10⁻⁷ m/√Hz @ 0.1 Hz
 - ▶ 冷凍機から導入される振動の低減

• 光学系

▶ wave front sensorを応用した読み取り系 →原理実証済み

振り子による防振

振り子による防振

・共振周波数以下では防振できない



▶並進の共振周波数を0.1 Hz以下に下げるのは難しい

- ▶(例): f₀ = 0.1 Hz → l ~ 25 m
- ヒートリンクを防振するにはよりリジッドな系が好ましい

xg

能動防振の原理







22.01.2019

Master Thesis Defense

Phase-II TOBAでの能動防振

- x, y, z軸の並進振動を同時に制御
- 1 Hzで1/10の低減に成功



先行研究における問題点



(1) アクチュエータのレンジ

- ・地面振動: peak to peakで~18 µm
 - ▶ 3軸同時制御→ 18 µm × √3 ~ 30 µm必要
- 一方アクチュエータのレンジは~30 µm



►レンジが足りない

(2) フレームの共振

$$\tilde{x} = \frac{1}{1+G}\tilde{x}_0$$
 G = -1 となると発散

▶ フレームの共振のせいで位相が大きく回り,不安定



安定な制御:

(3) 並進と傾き変動のカップリング

- センサーが傾いていると、傾きに比例して重力がマスに働く
 - ▶ 傾きが変動するとマスにかかる重力も変動し、マスが余計に揺 らされる
 - ▶ ∝ f⁻²→低周波数ほど問題





先行研究における問題点



Contents

- 研究背景
 - ► TOBA
 - ▶ 能動防振
- 防振系の構成
 - ▶ 防振系の設計
 - ▶ 防振系の構築
- 防振試験の結果と考察

▶ 結果



• まとめ、今後の展望



能動防振系

- ・懸架テーブル(制御対象)
- ・変位センサー
- ・アクチュエータ

アクチュエータをより
 レンジの大きなもので構成
 制御帯域を底周波数側へ拡
 大



傾斜系

- ・懸架テーブルの傾き変動を測定
- 傾き変動を制御
 - ▶カップリングを回避

```
フレームの補強
・共振モードの共振周波数を上昇
▶制御帯域を高周波数側へ拡大
```







能動防振系

- ・懸架テーブル(制御対象)
- ・変位センサー
- ・アクチュエータ

アクチュエータをより
 レンジの大きなもので構成
 制御帯域を底周波数側へ拡
 大







能動防振系

- ・懸架テーブル(制御対象)
- 変位センサー
- アクチュエータ

アクチュエータをより
 レンジの大きなもので構成
 制御帯域を底周波数側へ拡
 大


傾斜計の必要性



22.01.2019

Master Thesis Defense

傾斜計のセットアップ



22.01.2019

傾斜計の原理



Master Thesis Defense

傾斜計の原理



傾斜計の設計感度

0.1 - 1 Hzで要求値を満たす



防振系の現状

能動防振系

- ・懸架テーブル(制御対象)
- ・変位センサー
- アクチュエータ

アクチュエータをより
 レンジの大きなもので構成
 制御帯域を底周波数側へ拡
 大



防振系のセットアップ





能動防振系の構成

懸架テーブル: 制御対象



~フレーム:

能動防振系が載っているやぐら

能動防振系の構成

地震計:

テーブルの慣性系での変位を測定



フォトセンサー:

テーブルとフレームの相対変位を測定

能動防振系の構成

ピエゾアクチュエータ: 地震計,フォトセンサーからの信号をテーブルへフィードバック



変位センサー

地震計とフォトセンサーの2種類



- ▶ コイルと磁石からなる速度計
- ▶ 慣性系での変位を測定
- ▶ 低周波になるほど感度が悪化し,

低周波ではそのまま制御に使うと余計に揺らす

- ・フォトセンサー
 - ▶ LEDと光検出器のペア
 - ▶フレームとテーブルの相対変位を測定
 - ▶ 地震計の雑音による過剰なフィードバックを抑制





アクチュエーター

ピエゾアクチュエーター

- ・印加した電圧に応じて長さが変化
- ・0-100 Vの範囲で軸方向に最大90 µm伸縮
 - ▶ 斜め45°に取り付けている → 並進方向のレンジは ~ 60 µm
 - ▶ 地面振動レベル(3軸合わせて ~30 µm)よりも十分長い









22.01.2019

Master Thesis Defense

Contents

- 研究背景
 - ► TOBA
 - ▶ 能動防振
- 防振系の構成
 - ▶ 防振系の設計
 - ▶ 防振系の構築
- 防振試験の結果と考察

▶ 結果



まとめ、今後の展望



- z軸制御
 - ▶ 0.1 3 Hzの帯域で制御
 - ▶ 最大で防振比 ~ 1/100
- x 軸制御
 - ▶ 0.2 2 Hzの帯域で制御
 - ▶ 最大で防振比 ~ 1/10
- •y軸制御
 - ▶ 0.2 1 Hzの帯域で制御
 - ▶ 最大で防振比 ~ 1/2



z軸の制御試験結果

z軸(鉛直方向)の制御

- 0.1 Hz-3 Hzの帯域で制御に成功
 - ▶先行研究(Phase-II)よりも、より低周波数側に制御帯域を拡大



x軸の制御

x軸(水平方向)の制御

- 0.2 Hz-2 Hzの帯域で制御に成功
 - ▶z軸同様, 低周波数帯に制御帯域を拡大
- ・防振比は概ね設計通り
 ▶0.5 1 Hzで1/10
- ・防振比が十分でない
 - ▶フレームの共振(5 Hz) のため



y軸の制御

y軸(水平方向)の制御

- ・制御が不安定(短時間でしか保てない)
- 0.2 Hz-1 Hzの帯域で制御
 - ▶0.3 1 Hzで約1/2
- ・ 制御の不安定性
- →0.15 Hz付近のピーク ピークのために制御信号が アクチュエータのレンジを 超えてしまう





防振性能が不十分

- ・制御のゲインを上げられない
 - ▶ フレームの共振

- ・y軸の制御が不安定
 - アクチュエータの傾斜カップリング





フレームの共振

アクチュエータの伝達関数の位相がフレームの共振周波数で



↑ ×軸制御のオープンループ伝達関数の振幅と位相

フレームの補強

- ・斜めに補強を追加
 - ▶ 不十分
- さらなる補強が必要



アクチュエータの傾斜カップリング

- アクチュエータから地震計への応答が低周波でモデルからズレ
 - ▶ 傾斜カップリングによる影響
 - ▶ x軸(y軸)にアクチュエートしているつもりが, 同時に傾斜方向に も揺らしてしまっている
 - ▶ 余計な制御ループの導入,制御がかからない



傾斜カップリングの低減

- 水平方向と同時に傾斜方向にも揺らすことで打ち消す
 - ▶ 1/10 以下にまで低減
 - ▶ x軸は安定した制御に成功, y軸は未だ不安定
 - ▶ さらなる低減、もしくは傾斜計による傾き制御

↓ アクチュエータから地震計への応答の振幅と位相(低減前後)



解決策

防振性能が不十分

- ・制御のゲインを上げられない
 - ▶ フレームの共振

○当初の計画通り、フレームの補強を施す

- ・y軸の制御が不安定
 - アクチュエータの傾斜カップリング

○デカップリングを進める

○傾斜計を用いて傾斜方向に制御を行う

Contents

- 研究背景
 - ► TOBA
 - ▶ 能動防振
- 防振系の構成
 - ▶ 防振系の設計
 - ▶ 防振系の構築
- 防振試験の結果と考察

▶ 結果



まとめ、今後の展望

まとめ

- ・ Phase-III TOBA実現に向けた能動防振系の設計
- 防振系の構築
 - ▶ x, y, z軸を個別に制御
 - ▶ 制御帯域の下限を0.2 Hzにまで拡大
 - ▶ 最大で防振比~1/100を達成
- 問題点
 - ▶ 防振性能がフレームの共振で制限
 - ▶ アクチュエータの傾斜カップリングの影響



- ・フレームの補強を導入
 - ▶ 共振周波数を ~ 20 Hz程度にまで上昇
- 傾斜カップリングの低減
 - アクチュエータのデカップリングを進める
 - ▶ 傾斜計の構築を進め、傾斜方向の制御を行う

傾斜計の現状

- ・傾斜計の設計は完了
- 懸架系は懸架テーブル上に構築済み
- 光学系の構築を進行中



22.01.2019

Master Thesis Defense



- ・ねじれ型重力波望遠鏡TOBAの開発に向けて,能動防振系の開発 を行った
- ・制御帯域を先行研究よりも低周波数帯へ広げることに成功
- 1 Hzにおいて防振比 1/100を達成
- 問題点
 - ▶フレームの共振点により制御ゲインが制限
 - ▶ アクチュエータの傾斜方向のカップリング
- ・今後は防振比の向上,傾斜計の構築及び性能評価を行い, Phase-Ⅲ TOBAへのインストールを目指す

補助スライド

これまでの感度1



これまでの感度2



Phase-IIIのプロトタイプ



22.01.2019

能動防振の有無



地震計から計測可能な傾斜カップリング




ワシントン大で測定された傾斜変動*



冷凍機の振動

冷凍機が動作している時の振動スペクトル

▶1.75 Hzの倍波にピーク

▶~ 1 Hzからの防振が必要



傾斜カップリングの低減

・カップリングを減らしてピークの大きさが減少

