

コース 基盤科学コース
 学籍番号 100262
 氏名 黄俊明
 指導教員 ルジェロ・ミケレット

Seismic motion is an inevitable noise source for ground-based interferometric gravitational wave detectors. The continuous and random motion of the ground is induced by natural phenomena like oceanic and atmospheric activities, as well as by human activities. This research goal is to design a Shadow Sensor to be placed in a high positioned on the suspension cable, to observe the micro oscillations to realize a better vibration insulation and control.

1、はじめに

アインシュタインの一般相対性理論によれば、質量をもった物体が存在すると、それだけで時空にゆがみができる。さらにその物体が（軸対称ではない）運動をすると、この時空のゆがみが光速で伝わっていく。これが重力波である。重力波はすべてを貫通し、減衰しないと考えられている。LCGT計画の目的は重力波天文学という新しい天文学の分野の創生である。つまりLCGT計画

では特に1.4M \odot の連星中性子星合体から放出される重力波の検出をめざす。そこでLCGT計画の具体的な目標として掲げることとし、観測範囲が改良型LIGO、VIRGOを超えることを目指している。しかし、地上に干渉計を建設する場合、地面振動から逃れることはできない。本研究では、マイケルソン干渉計で吊り下げたサファイヤ鏡の防振システムの高い位置に、地面振動を検出するセンサーを開発し、マイケルソン干渉計で検出した全ての振動を地面振動による振動を除いたら、より高い精度の重力波データを取り出すことが目的である。

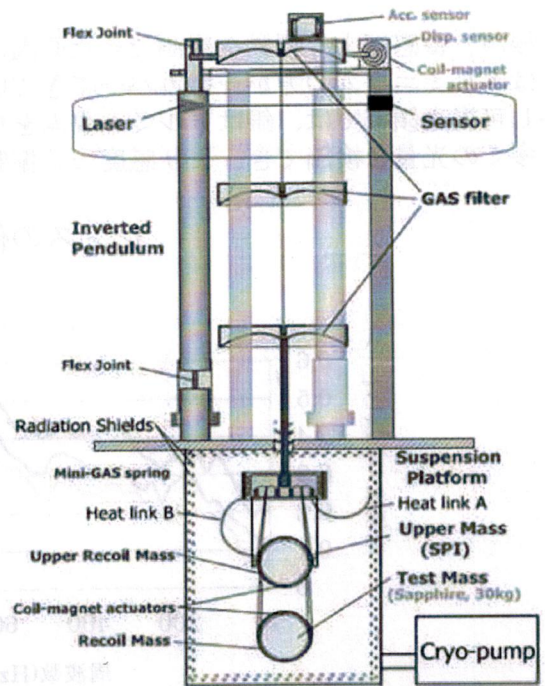


図1.1 干渉計の構造

2、実験内容

LCGTにおける地面振動を感度良く検出するかつシステムに負担をかけないことを注目し、なるべく

シンプルなモデルにした。反射型では、レーザーを対象物(ワイヤー)に当て、反射してきた光と光源(レーザー)との距離で、対象物の微小振動(Δx)を検出するシンプルなモデルである。

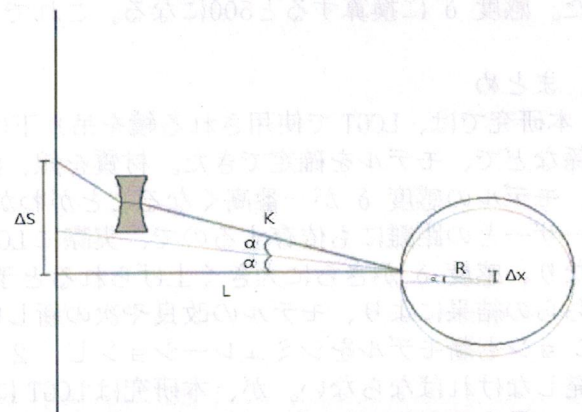
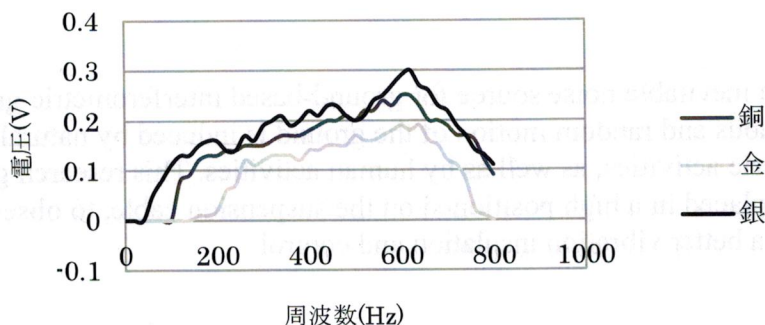


図2.1 モデルの原理

3、実験結果

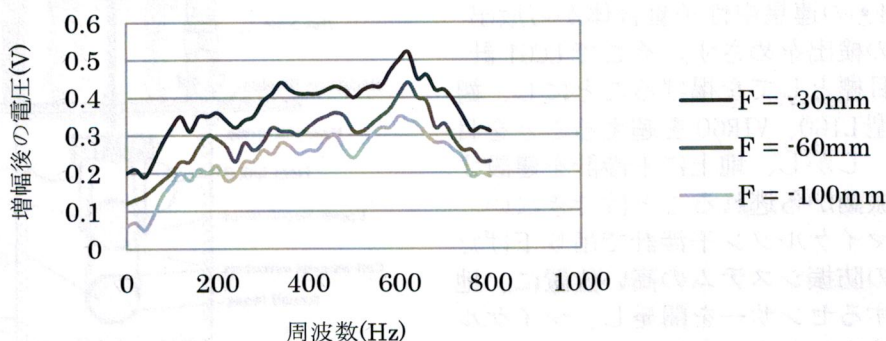
結果は赤レーザーを用いても紫レーザーを用いても、金と銅より銀の方が一番変位を観測しやすかった。

材質別のモデルへの影響



銀が一番感度よく振動を観測できた原因は反射率が一番高いことである。確かにカバー率だけではアルミニウムの方が一番カバーできているが、しかし可視光領域では、銀はアルミニウムを超え、95%の反射率を持つことによって、検出する際より多くの光量を検出でき、より感度よく振動を観測できるはずである。

レンズの位置と焦点の影響



元々使用している圧電素子は測定範囲内の平均変位は $1\mu\text{m}$ (1000nm)が、先行研究による半径2.5mmに対しLが300mmの場合、感度が240になり、理論値は0.24Vになる。本研究では材質の銀、焦点の近いレンズと波長の短い紫レーザーを用いることによって、実際値を0.5Vを超えた時もあった。感度 δ に換算すると500になる。これでこのモデルは有効であることを示している。

4、まとめ

本研究では、LCGTで使用される鏡を吊り下げるワイヤーの材質の反射率、レンズとレーザーの関係などで、モデルを確定できた。材質を銀、波長の短い紫色の光と焦点の近い両凹レンズの場合、モデルの感度 δ が一番高くなることがわかった。なお、理論の関係式より、対象物の太さとレーザーとの距離にも依存するので、実際にLCGTという大型装置に投入すると、さらにLが大きくなり、感度 δ がさらに大きく上げられると予想される。こちらの結果により、モデルの改良や次の新しいモデルの考案も提案した。これからのシミュレーションも新モデルをシミュレーションし、2017年までにLCGTシステムに最適なセンサーを開発しなければならない。が、本研究はLCGTにおける地面振動センサー開発の先行研究というもので、最先端技術のレベルにおいて、不安点としては取るに足らないものであるといえる。

大型低温重力波望遠鏡LCGTにおける高感度地面振動センサーの開発

国際総合科学部 基盤科学コース ルジェロ・ミケレット研究室
学生番号:100262 氏名:黄 俊明(こう としあき)

目次

第一章 はじめに

- 1.1 重力波とは.....1
- 1.2 LCGT 大型低温重力波望遠鏡の仕組み.....1
- 1.3 LCGT がめざすもの..... 3
- 1.4 本研究の目的..... 4

第二章 理論モデルの仕組みとその実験方法

- 2.1 基本理論とモデルの種類.....6
- 2.2 モデルのパラメータ.....8
- 2.3 実験における装置の使用法.....9

第三章 実験結果

- 3.1 実験結果.....11
- 3.2 モデルの評価..... 15

第四章 まとめ

- 4.1 今後の課題.....16
- 4.2 まとめ..... 17

謝辞

参考文献

1.1 重力波とは

アインシュタインの一般相対性理論によれば、質量をもった物体が存在すると、それだけで時空にゆがみができると言われている。さらにその物体が(軸対称ではない)運動をすると、この時空のゆがみが光速で伝わっていく。これが重力波である。重力波はすべてを貫通し、減衰しないと考えられている¹。

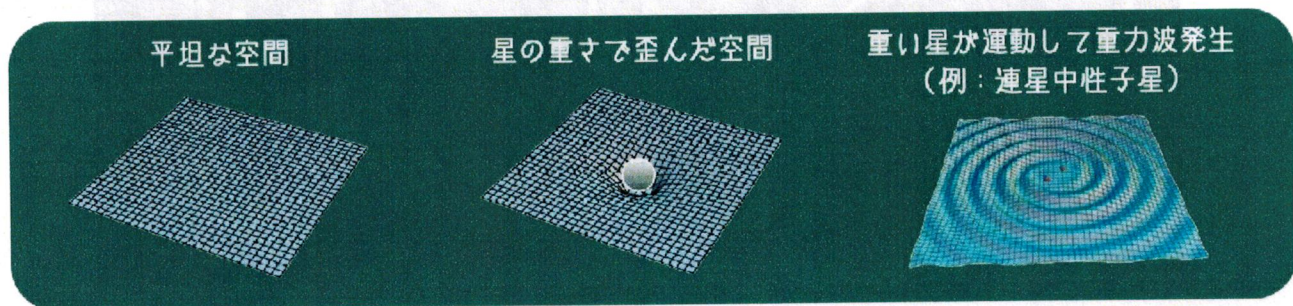


図 1.1: 重力と重力波

人類は、昔からつい最近まで可視光でしか自然を観察できなかった。しかし 19 世紀に入って電波やX線が発見されると、遠くに一瞬で情報を伝えたり、人体や物質の中の様子が観察できるようになった。そのため今まで全く未知だった世界への扉が開かれ、人類の知識の増大・世界観の変化に大きく役立った。その後も赤外線・紫外線やガンマ線など、次々と新しい「観測手段」が発見されるごとに、未知なる世界が人類に解き放たれている。これらはすべて「波動現象」を利用した情報伝達による自然観察と行うことができる。従って電磁波と同じ「波動現象」である「重力波」も、この歴史にならって新しい観測手段となり人類に未知なる世界を垣間見ることを可能にするであろうと期待される。

1.2 LCGT 大型低温重力波望遠鏡の仕組み

LCGT 大型低温重力波望遠鏡は 2017 年完成される重力波検出装置である。設置場所は岐阜県神岡町の「池の山」山中にある。神岡はニュートリノの検出器として知られるスーパーカミオカンデがあることで有名な場所でもある。スーパーカミオカンデも LCGT も地上における雑音を避けるために遮蔽効果を期待して地下に設置場所を求めた実験ばかりである。そのため、これら実験施設群は山頂下 1000m の深い地下に設置されている。

この地を選んだ最大の理由は、都市部に比較して圧倒的に地面振動が静かであるという利点のためである。加速度で比較すると、神岡の坑内実験室の地面振動レベルは定常的に三鷹の地面振動レベルよりも平均振幅で 2 桁程度小さい。実験室の地面振動レベルが小さいということは、数 Hz 以下の低周波領域については神岡という地が日本の中でも地域的に外乱の少ない静かな領域にあることと、それ以上の高周波領域では実験室が地表からおよそ 1000m 離れた大深度地下にあるために、地表層からの振動が減衰することによっていると考えられる。

1 KAGRA homepage: <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

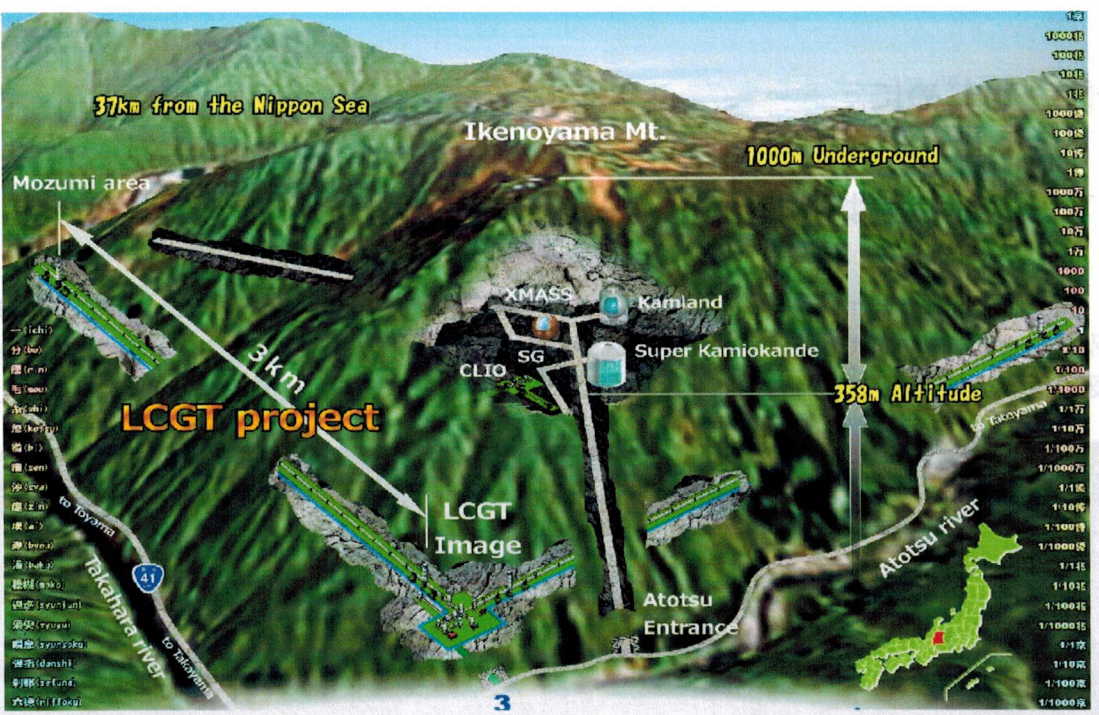


図 1.2: 完成後の LCGT 重力波望遠鏡のイメージ

重力波は、全てのものを貫通してしまうため、物にぶつけてその反応をみるという方法はとれない。しかし光は重力波によってゆがんだ空間に沿って走る性質があり、それと直行方向で伸縮するという性質を利用し、基本的には「マイケルソン干渉計」を用いる。長さを測るには、同じ光を直行する二方向に向けて発射し、遠くに置いた鏡で反射させ、また戻ってきた光の到達時間を両方で比較する。伸びた距離を走った光のほうが短い距離を走った方の光より帰ってくるのに時間が長くかかるため、伸縮の有無が分かる。ただし、地球上では地球が丸いという理由から、光が走る腕の長さはせいぜい 4 Km 程度にしか取れない。そのため一回折り返しでは 8 Km しか走れない。それでは無駄が多いので、片腕に鏡を二枚用意して、その間を何度も反射して折り返す。そうすることで実質的に光が 70 Km 程度走ようになる。²

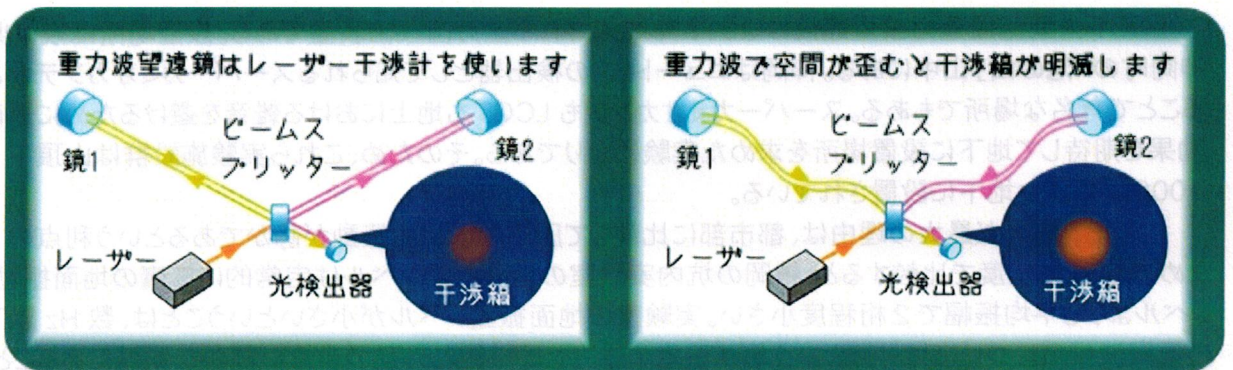


図 1.3: マイケルソン干渉計の原理図

² KAGRA homepage: <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

1.3 LCGTがめざすもの

LCGT 計画の目的は重力波天文学という新しい天文学の分野の創生である。つまり LCGT 計画で建設される検出器は少なくとも年に数回の割合で重力波を捕らえなければならない。多くの重力波を捕らえるためには、感度を向上させてより遠くからくる重力波を検出できるようにする必要がある。LCGT 計画では特に 1.4 M \odot の連星中性子星合体から放出される重力波の検出をめざす。地球から 200Mpc 以内の領域でこのような連星合体は年に 1 回以上生じると考えられる。そこで LCGT 計画の具体的な目標として掲げることにし、観測範囲が改良型 LIGO、VIRGO を超えることを目指している。

- ・ 200Mpc 離れた 1.4M \odot 連星中性子星合体から発生した重力波を S/N > 8 で捕らえる

このためには 100Hz 付近で $h = 3 \times 10^{-24} m / \sqrt{Hz}$ 程度の感度を持つ干渉計を建設しなければならない。これは TAMA 300 の目標感度より 2 桁良い。

注: $1M\odot = \text{太陽の質量} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$
 $1\text{pc} = 3.261561\text{ly} = 3.08568 \times 10^{16} \text{ m}$

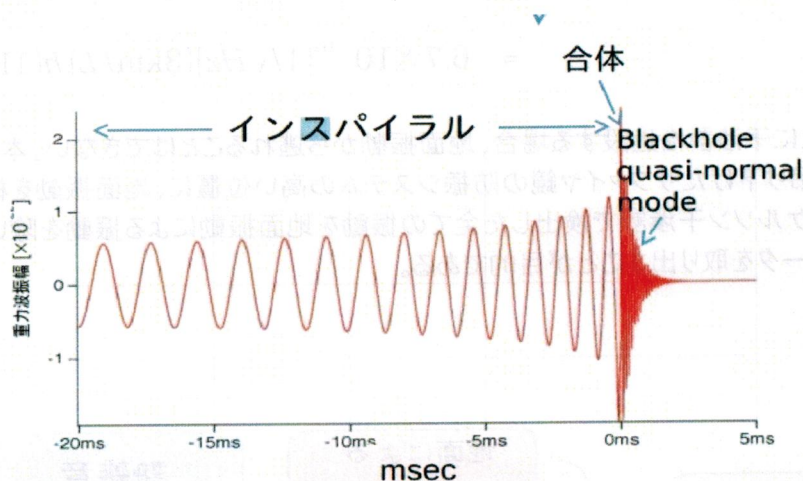


図 1.4: 連星中性子星合体時の重力波の信号

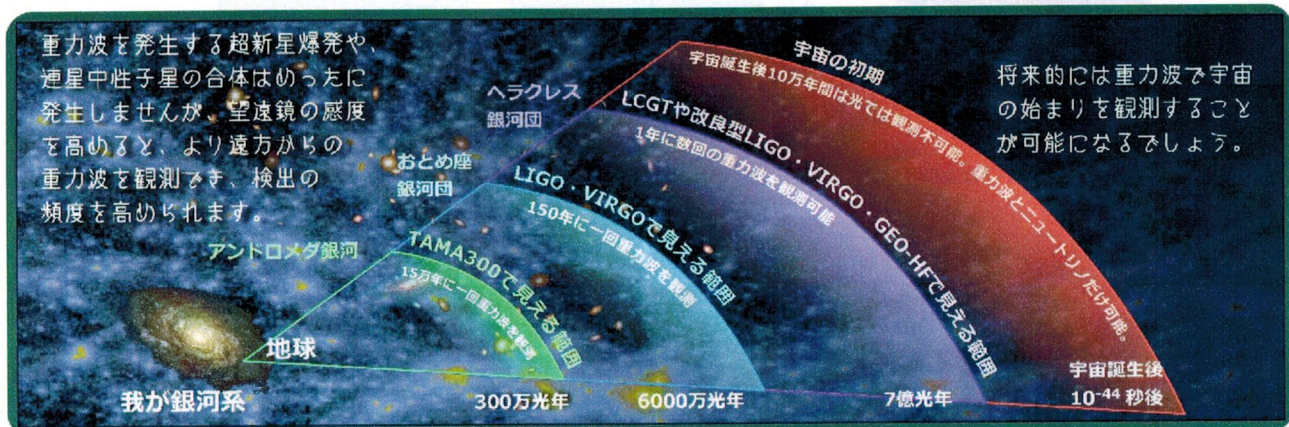


図 1.5: 各重力波望遠鏡の比較(KAGRA ホームページより)

1.4 本研究の目的

LCGT 大型低温重力波望遠鏡における地面振動、熱雑音、光輻射圧雑音など、様々なノイズによる観測感度が下がる。地面振動による干渉計の構成要素の振動が seismic noise である。Seismic noise 対策としては、静かな場所に建設、防振計の導入、という2つの方法がある。LCGT では地面振動が東京より2桁小さい神岡山内に建設する。神岡の地面振動のパワースペクトルは

$$G_{\text{seismic}} = 10^{-9} / f^2 [m/\sqrt{Hz}]$$

である。そして防振系 SAS (Seismic Attenuation System) と SPI (Suspension Point Interferometer) の導入により seismic noise を低減する。SAS の防振比 Hisolation は

$$H_{\text{isolation}} = 10^{-3} / f^{10}$$

である。以上のことから seismic noise は以下のようになる。

$$\begin{aligned} h_{\text{seismic}} &= (2/L) H_{\text{isolation}} G_{\text{seismic}} \\ &= 6.7 \times 10^{-16} [1/\sqrt{Hz}] (3\text{km}/L) h(1\text{Hz}/f)^{12} \end{aligned}$$

しかし、地上に干渉計を建設する場合、地面振動から逃れることはできない。本研究では、マイケルソン干渉計で吊り下げたサファイヤ鏡の防振システムの高い位置に、地面振動を検出するセンサーを開発し、マイケルソン干渉計で検出した全ての振動を地面振動による振動を除いたら、より高精度の重力波データを取り出すことが目的である。

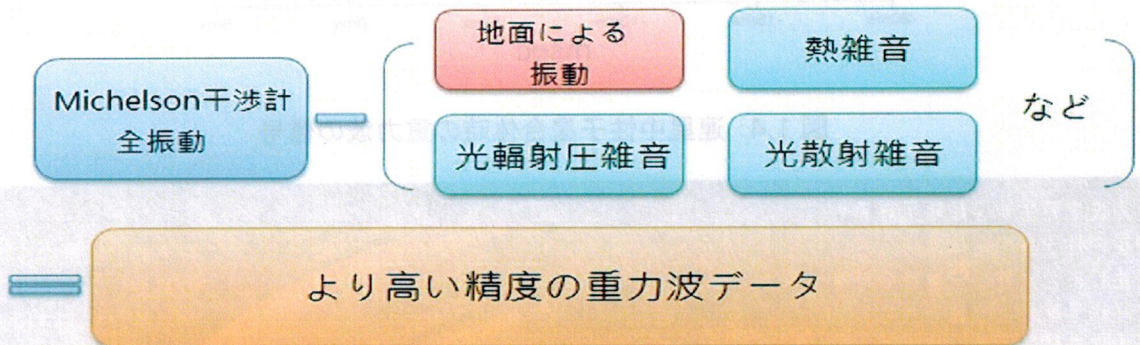


図 1.6: 本研究は赤い部分について研究している

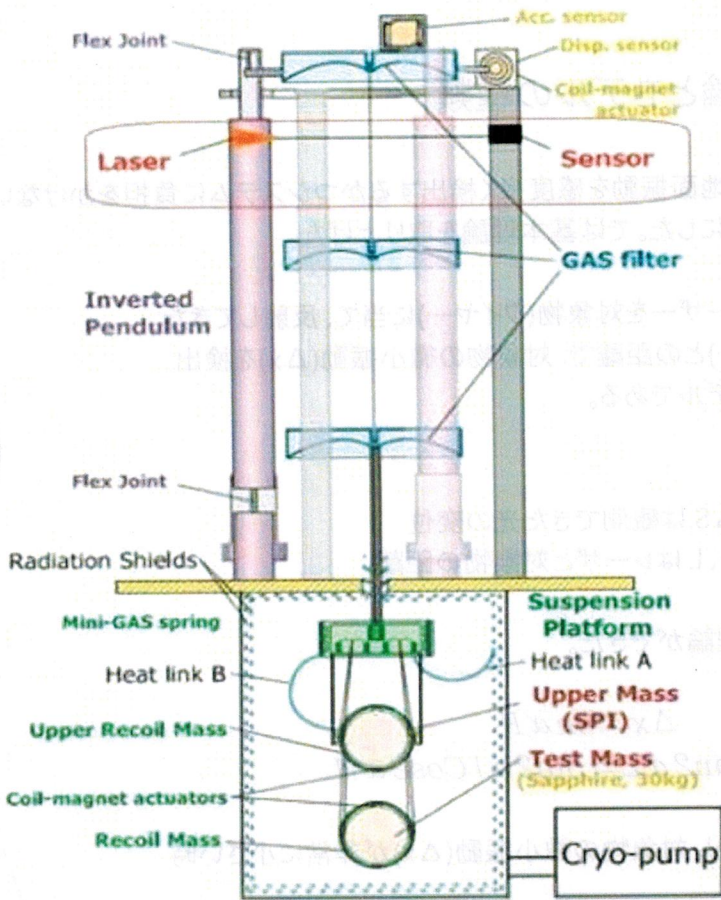


図 1.7: サファイヤ鏡の防振装置の構造(東京大学重力波推進室より)

2.1 基本理論とモデルの種類

LCGTにおける地面振動を感度良く検出するかつシステムに負担をかけないことを注目し、なるべくシンプルなモデルにした。では基本理論を取り上げた。

反射型では、レーザーを対象物(ワイヤー)に当て、反射してきた光と光源(レーザー)との距離で、対象物の微小振動(Δx)を検出するシンプルなモデルである。

右の図では、
 Δx は微小振動、 ΔS は観測できた光の変位
 R は対象物の半径、 L はレーザーと対象物の距離
 α は振動により角
 で、以下のような理論ができた。

$$\Delta x = \sin \alpha R$$

$$\Delta S = \tan 2\alpha L = (\sin 2\alpha / \cos 2\alpha) L$$

という関係式があり、対象物の微小振動(Δx)が非常に小さい時

$$\alpha \rightarrow 0$$

$$\sin \alpha \approx \alpha$$

$$\sin 2\alpha \approx 2\alpha$$

$$\cos 2\alpha \approx 1$$

になり、感度 δ は

$$\delta = \Delta S / \Delta x = 2\alpha L / \alpha R = 2L / R$$

である。微小振動 Δx は

$$\Delta x = \Delta S / \delta = \Delta S \cdot R / 2L$$

となり、モデルの固定パラメータと観測した ΔS で求められる。

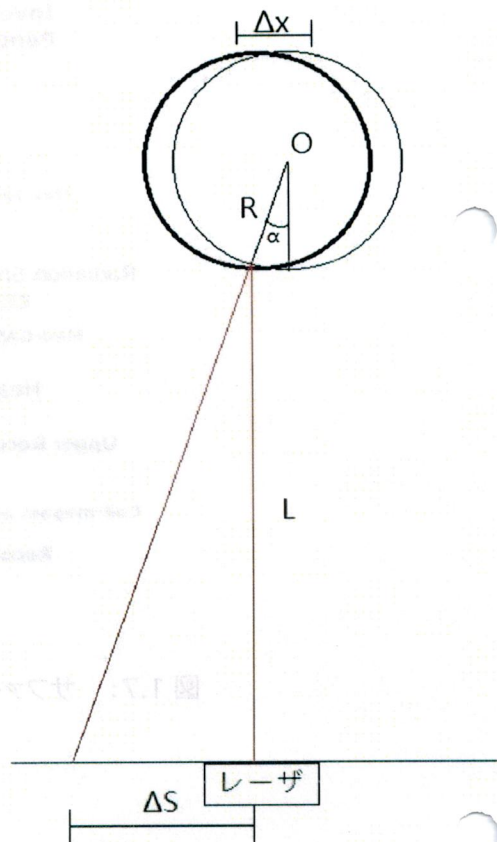


図 2.1 反射型の原理

理論により、以下のモデルを考案した。電気を使わずにレンズを用いて Original Passive Amplification Model は高出力レーザーを用いなく、シンプルな構造で雑音などを極力に防いでいる。

【レンズ型】

反射型の原理を用いて反射してきた光と光源の距離 ΔS を凹レンズで増幅するモデルである。

本研究では、
 対象物: 金(Au)、銀(Ag)、銅(Cu)
 レーザ : 赤(670nm)、紫(405nm)
 凹レンズの焦点: -30mm
 -60mm
 -100mm

半径 R: 2.5mm
 距離 L: 300mm

ΔM : 対象物が振動する時検知器の変化

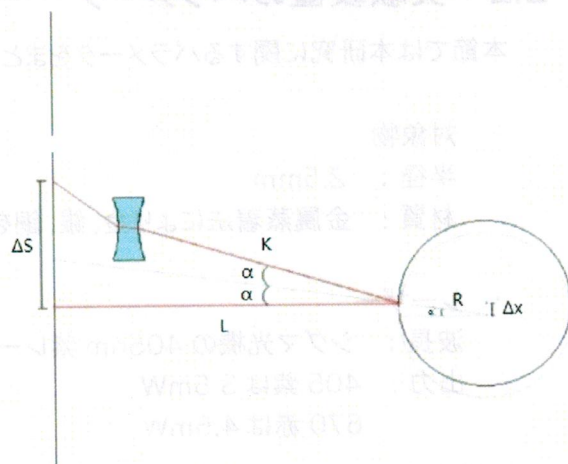


図 2.4: レンズ型のイメージ

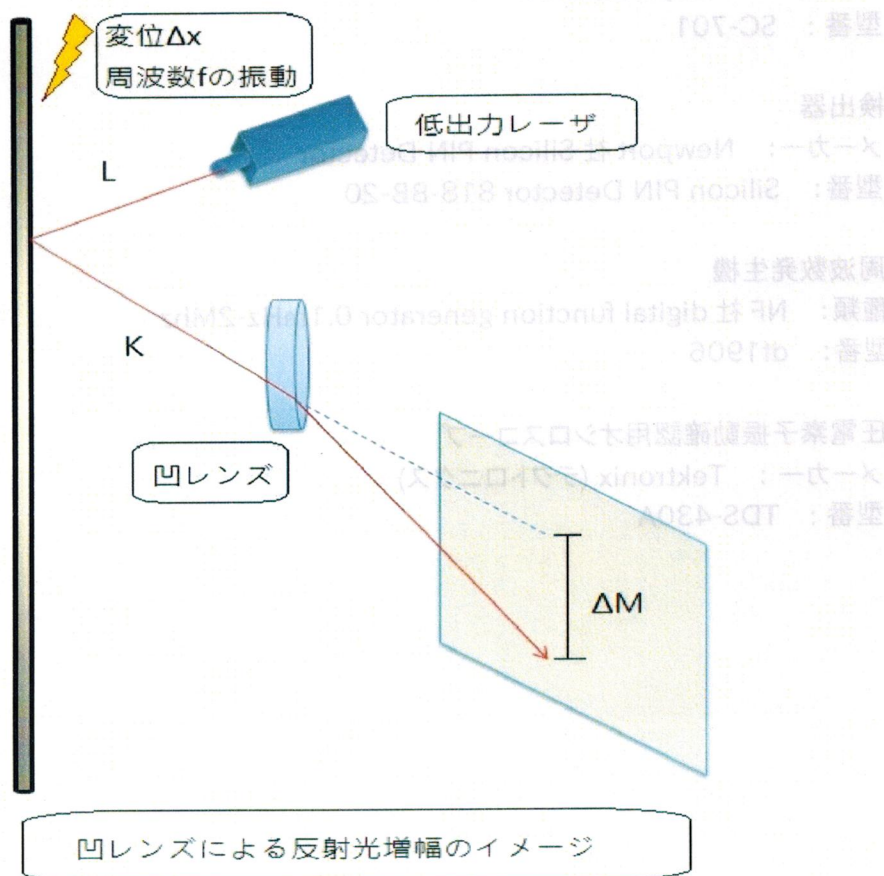


図 2.5: レンズ型の 3D 構造図

2.2 実験装置のパラメータ

本節では本研究に関するパラメータをまとめておく。

- 対象物
半径： 2.5mm
材質： 金属蒸着法により金、銀、銅を三分間蒸着
- レーザー
波長： シグマ光機の 405nm 紫レーザー、635nm 赤レーザー
出力： 405 紫は 3.5mW
670 赤は 4.5mW
- レンズ
メーカー： シグマ光機製作反射防止膜コート付
焦点： -30mm, -60mm, -100mm
- 金属蒸着機
メーカー： Sanyu Electron
型番： SC-701
- 検出器
メーカー： Newport 社 Silicon PIN Detector
型番： Silicon PIN Detector 818-BB-20
- 周波数発生機
種類： NF 社 digital function generator 0.1mHz-2Mhz
型番： df1906
- 圧電素子振動確認用オシロスコープ
メーカー： Tektronix (テクトロニクス)
型番： TDS-430A

2.3 実験における装置の使用法

本節では、本実験を再現するには必要な実験装置の使い方をまとめた。

実験用テスト対象物ケーブルを製作：

【金属蒸着機の使い方】

- 1、手袋をはめる。
- 2、ピンセットで対象物を掴み、蒸着台に乗せる。
- 3、専用テープで試料の両端を止める。
- 4、試料台を装置に入れる。
- 5、金属蒸着機のドアを閉める。
- 6、左下の power on を押し、その上の main valve を押す。
- 7、5分ほど待ち、右下のレバーを下にし、真ん中のメーターが 5mA 以下になると真空の準備が完了。
(真空になっていないと図 2.8 のように放電現象が見られる。)
- 8、時間を 3 分に設定し、右下のレバーを上 Start にし、蒸着し始める。
(5mA を超えないように確認し続ける。超えたら危険なので中止すること。)
- 9、蒸着完了したら、main valve を押し、power を消す。

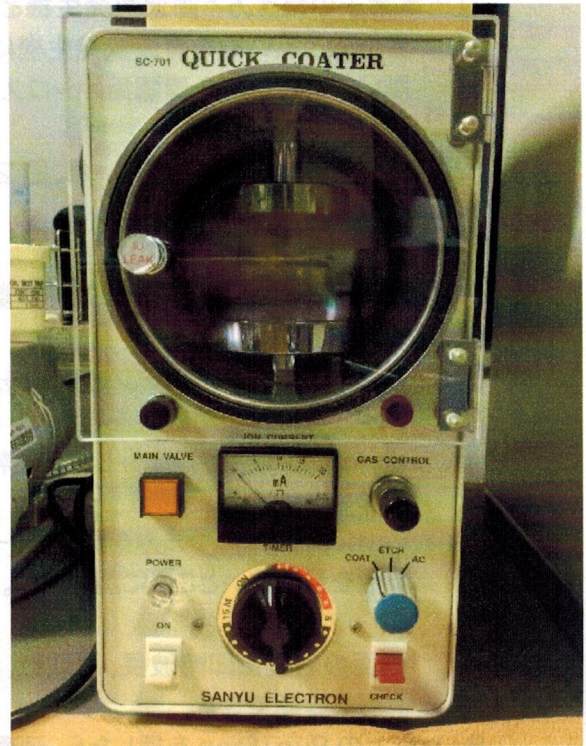


図 2.6: 金属蒸着機

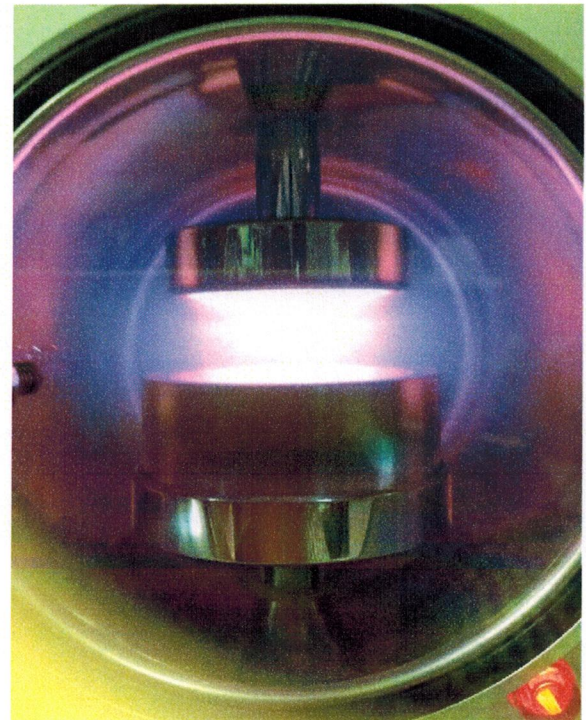


図 2.7: 真空でない状態での放電現象

微小振動を発するには、圧電素子ピエゾを用いた。圧電素子ピエゾは定量的な振動が得られ、容易にコントロールすることができることはメリットである。

【圧電素子の繋ぎ方と周波数発生機とオシロスコープの使い方】

- 1、 赤い線と黒い線を周波数発生機に繋ぎ、黒い線と青い線を確認用オシロスコープに繋ぐ。
- 2、 周波数発生機の電源をいれ、図 2.9 のように設定する
- 3、 周波数発生機の右下のつまみ周波数を調節し、output で周波数を発する。
- 4、 確認用のオシロスコープの電源を入れる。
- 5、 Reset を押し初期設定を行う。
- 6、 channel1 のボタンを押し、圧電素子の波形を確認する。
- 7、 Vertical 区域のつまみを調節し、一番波形を見やすいところに調節する。
- 8、 画面の右側に即時波長、周波数、振幅などの情報を確認できる。
- 9、 右上の Run/Stop を押したら、画面が止め、瞬時の情報が得られる。

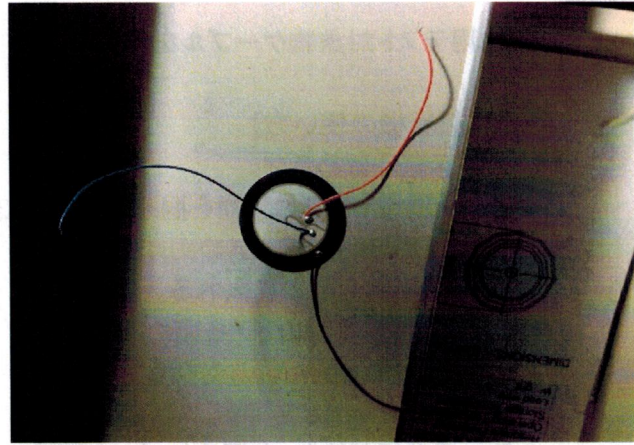


図 2.8: 圧電素子

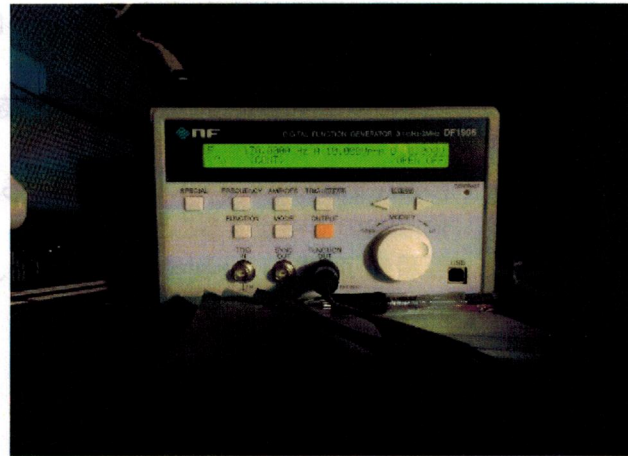


図 2.9: 周波数発生器

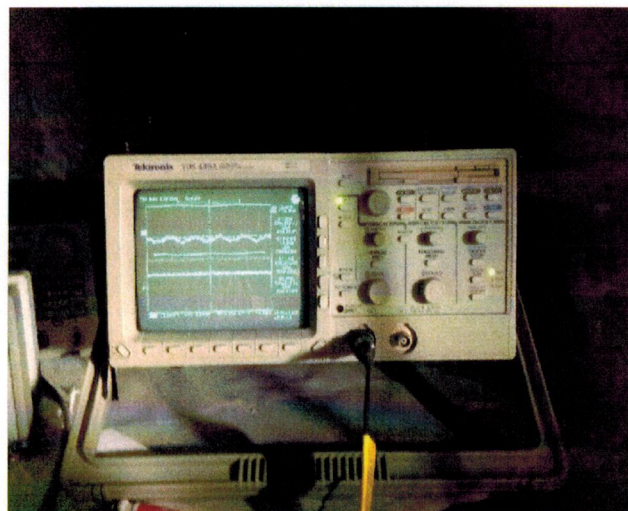


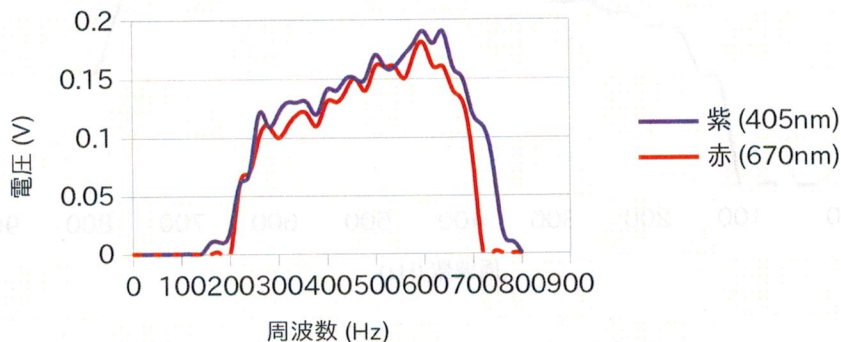
図 2.10: 確認用オシロスコープ

3.1 実験結果

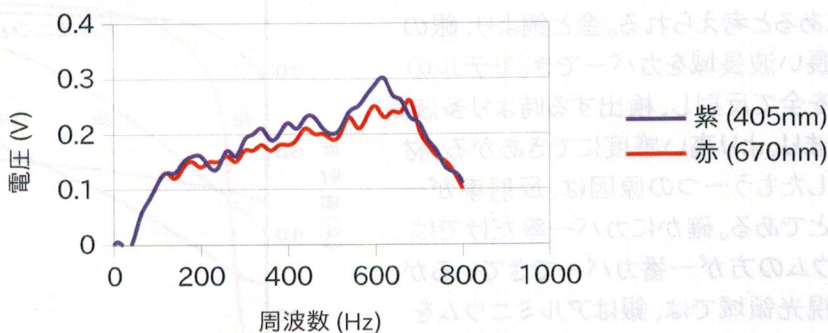
下図では、レンズ抜きのモデルにおける材質の影響を確認したものである。

結果は、赤レーザーを用いても紫レーザーを用いても、金と銅より銀の方が一番変位を観測しやすかった。

モデルにおける材質の影響 (金)



モデルにおける材質の影響 (銀)



モデルにおける材質の影響 (銅)

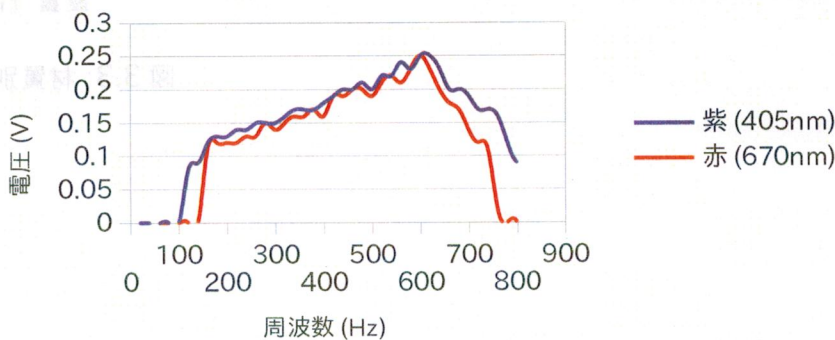


図 3.1: モデルにおける材質の影響

ここで各材質の紫レーザーでの反射データをまとめ、以下のグラフにした。

材質別のモデルへの影響

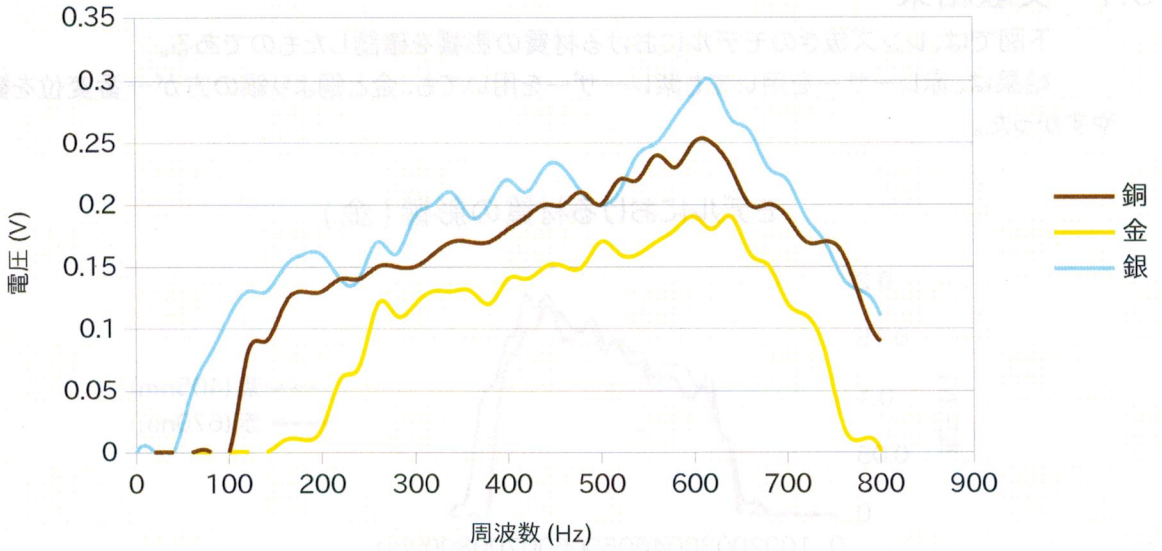


図 3.2: 紫レーザーの用いる時材質別の変位

銀が一番感度よく振動を観測できた原因は、反射率にあると考えられる。金と銅より、銀の方がより長い波長域をカバーでき、モデルのレーザーを全て反射し、検出する時より多波長の光を捕まり、より高い感度にできあがる。材料を銀にしたもう一つの原因は、反射率が一番高いことである。確かにカバー率だけではアルミニウムの方が一番カバーできているが、しかし可視光領域では、銀はアルミニウムを超え、95%の反射率を持つことによって、検出する際より多くの光量を検出でき、より感度よく振動を観測できるはずである。

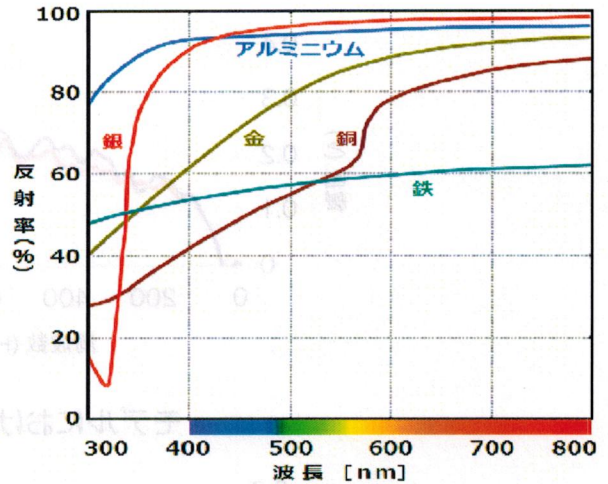
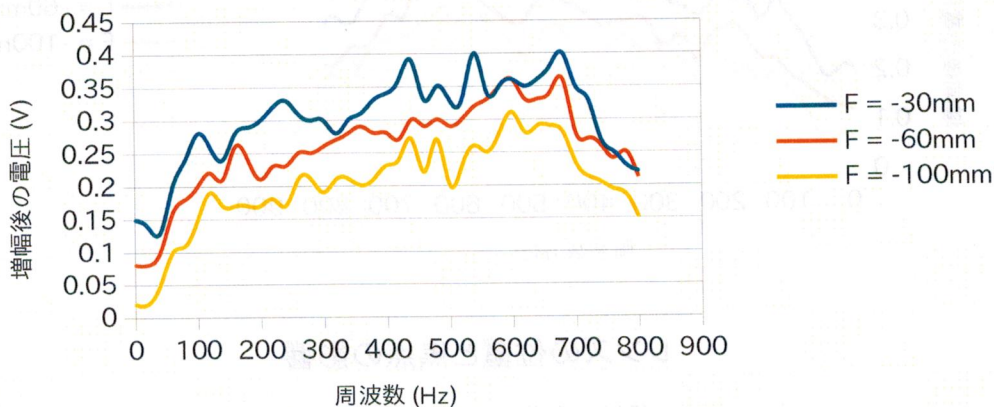


図 3.3: 材質別の反射率

下記では、レンズ抜きの結果より材質を銀にし、各焦点のレンズを投入したモデルの実験結果である。
 K=対象物とレンズの距離(図 2.5 参照)

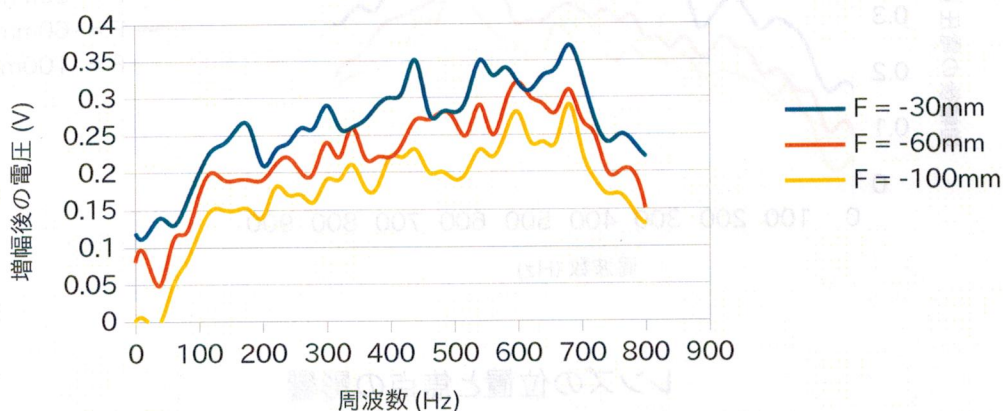
レンズの位置と焦点の影響

(SLV, 670nm, K=100mm)



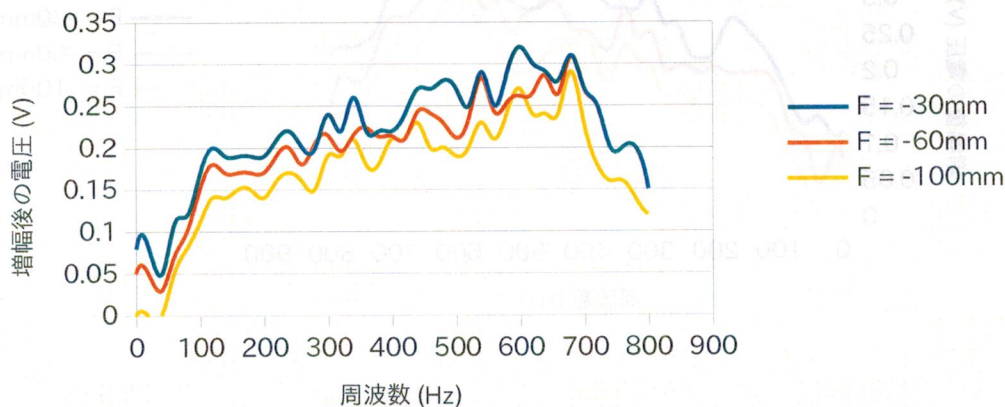
レンズの位置と焦点の影響

(SLV, 670nm, K=200mm)



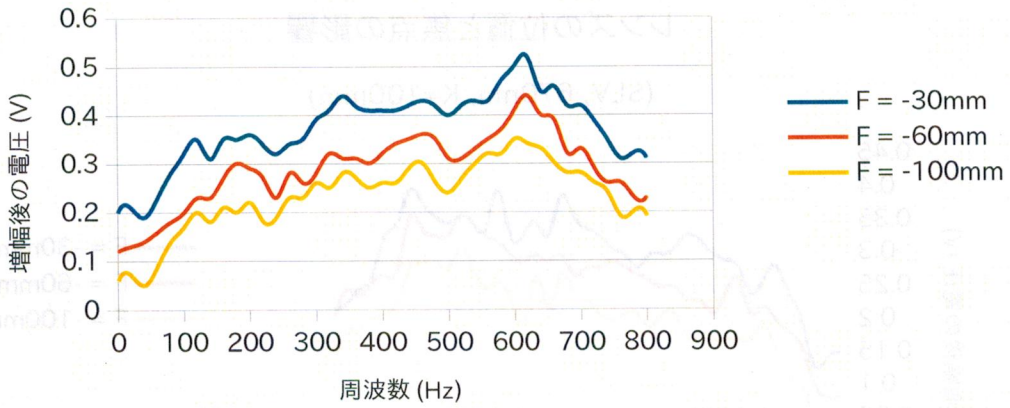
レンズの位置と焦点の影響

(SLV, 670nm, K= 300mm)



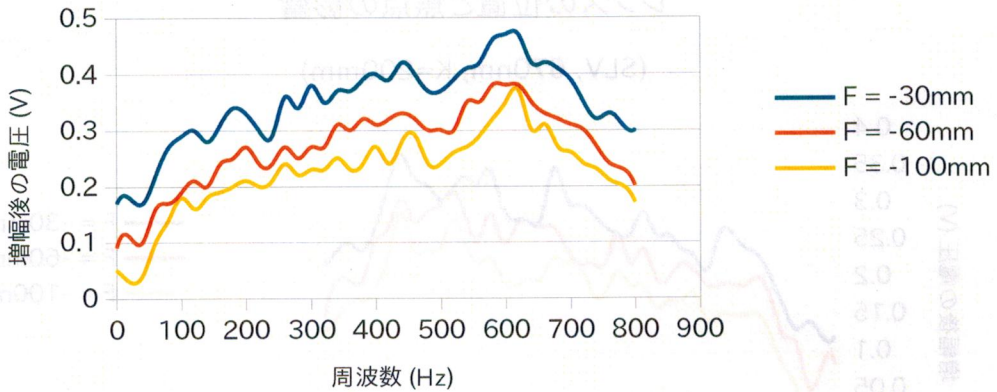
レンズの位置と焦点の影響

(SLV, 405nm, K= 100mm)



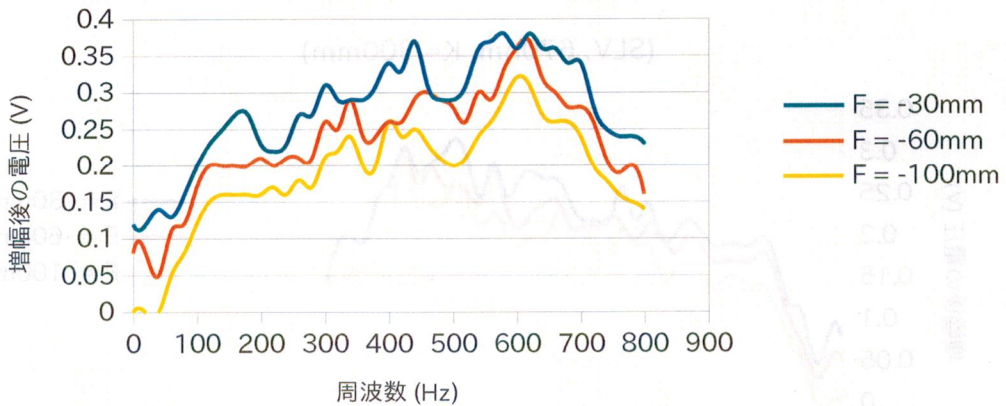
レンズの位置と焦点の影響

(SLV, 405nm, K=200mm)



レンズの位置と焦点の影響

(SLV, 405nm, K= 300mm)



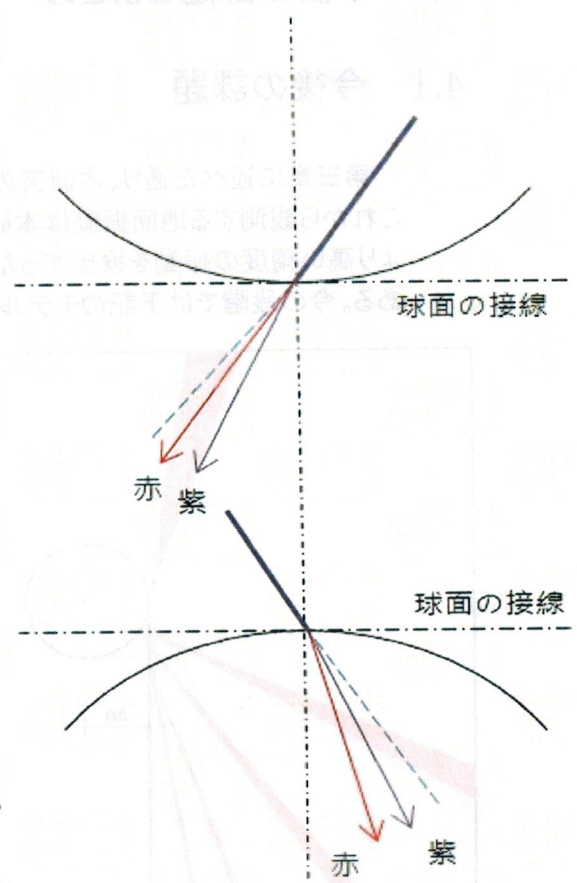
3.2 モデルの評価

レンズ型ではレンズの右記のような両凹レンズ性質を用いたモデルである。両凹レンズでは、第一面では紫の光の方が屈折角は小さくなるが、レンズの形状ゆえに赤い光よりも光軸から遠ざかる方向に発散する。第二面でも赤い光より光軸から離れるように発散する。その結果、紫の方がより大きく屈折する。波長の短い光の場合、凸レンズは光線を光軸に近付けるように屈折させるが、凹レンズは光軸から遠ざかるように屈折させる。波長の長い光の場合、反対に、凸レンズは光軸から遠ざかるように屈折させるが、凹レンズは光軸に近付けるように屈折させる。これで肉眼では判別できない圧電素子の振動が少しぼんやりに見えるようになった。

元々使用している圧電素子は測定範囲内の平均変位は $1\mu\text{m}$ (1000nm)が、基本理論による半径 2.5mm に対し L が 300mm の場合、感度が 240 になり、理論値は 0.24V になる。本研究では材質の銀、焦点の近いレンズと波長の短い紫レーザーを用いることによって、実際値を 0.5V を超えた時もあった。

感度 δ に換算すると 500 になる。これでこのモデルは有効であることを示している。

しかし、これから検出する神岡鉱山の地下にある地面振動は今回の実験で使われた圧電素子の変位より小さいので、モデルの改良と対象物の材質、検出技術の革新の必要がある。



4.1 今後の課題

第三章に述べた通り、本研究の実験モデルは感度 δ を500に上げることをできたが、これから観測する地面振動は本研究で研究した圧電素子の振動より遥に小さいので、より高い精度の振動を検出するため、モデルの改良や新しいモデルを開発する必要がある。今の段階では下記のモデルを考えている。

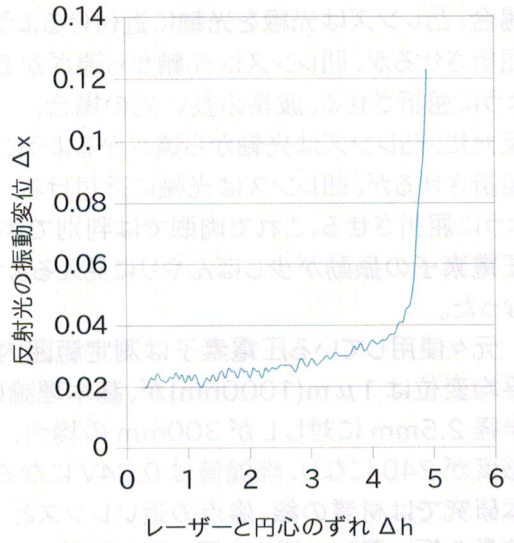
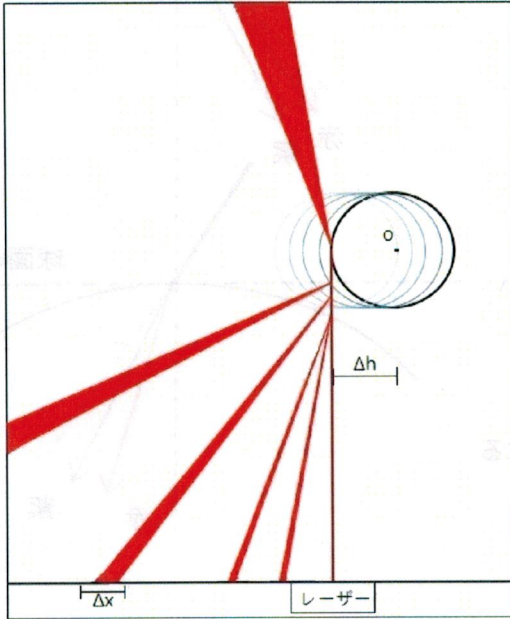


図 4.1 新モデルの原理

図 4.2 新モデルの Δx の変化

レーザーを対象物に当てる時、検出した振動変位 Δx は、レーザーが円心と一直線にするより、対象物と接する位置にレーザーを当てる方が、 Δx が遥に大きくなる。この特性を用いて、以下のモデルを考案した。

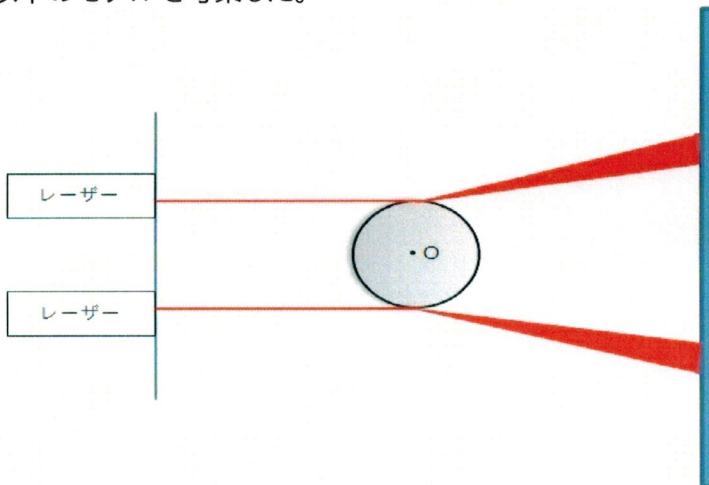


図 4.3 新モデルの概念イメージ

このモデルはレーザーの位置を調節することで、感度を調節できる。そしてより多様な振動を対応できる。しかし問題点は反射した振動変化 Δx の幅が大きいため、検出器のサイズも大きくしなければならない。これでまた装置に負担にかかるので改良が必要である。

また、本研究が考案したモデルは下記の図のようなである。

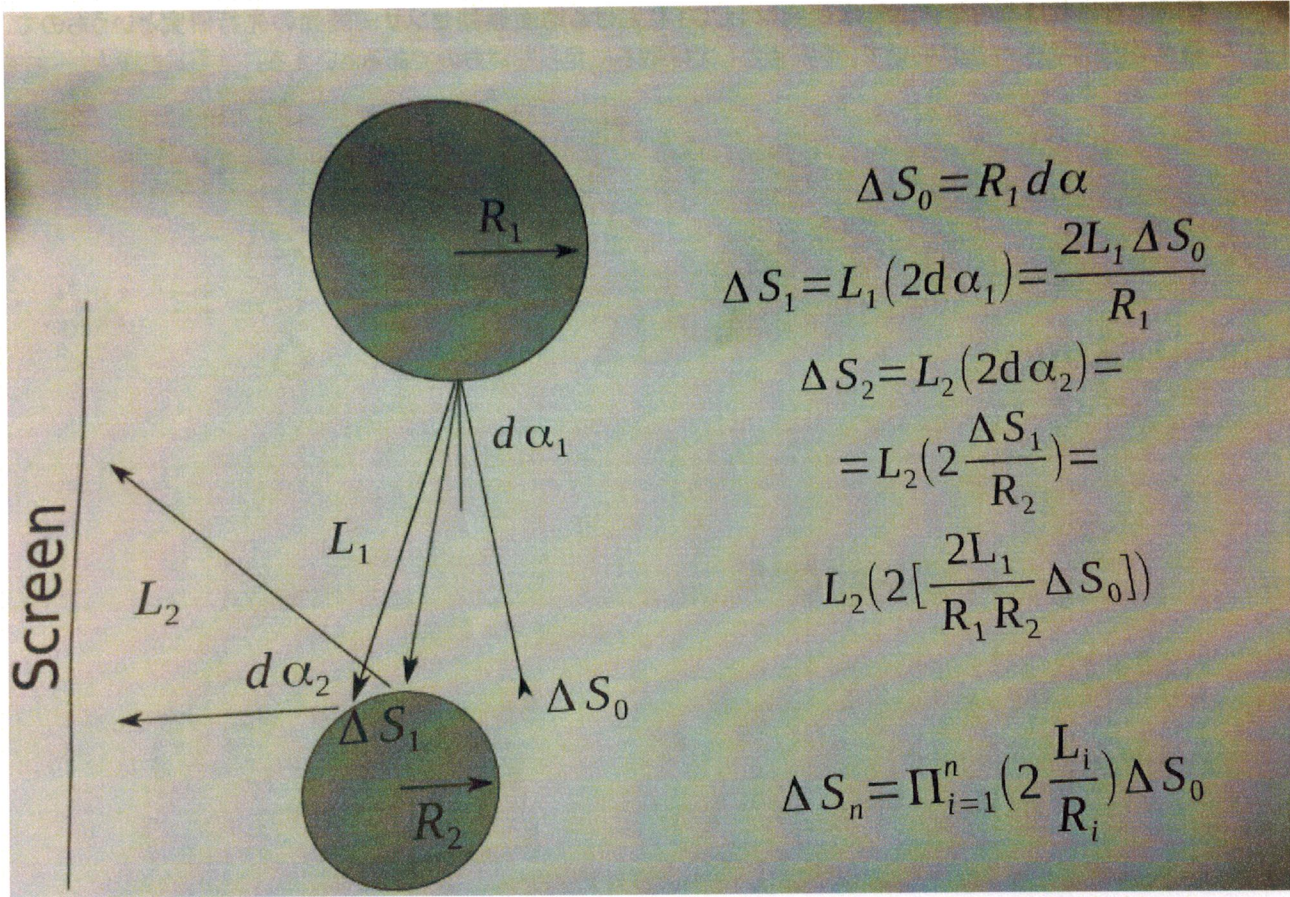


図 4.4: 本研究が考案したモデル

このモデルについてデータをまだ取っていないが、半径が小さい二次増幅システムを投入すれば、より感度 δ が高くなる見込みである。

これからの予定としては、シミュレーションでモデルを LCGT システムに作動するかどうかを確認し、その温度依存性や欠点を見出すことである。

4.2 まとめ

重力波は電磁波と同じ「波動現象」を起こし、人類に未知なる世界を垣間見ることが可能にするであろうと期待されている。アメリカの LIGO をはじめ、イタリアの VIRGO、日本の KAGRA を次々試行し始め、重力波の検出することに努力している。日本 KAGRA プロジェクトの LCGT 装置は、かなり先端な技術でできたシステムだが、残念ながら地面からの振動を完全に防げないので重力波の特定が困難になっている。

ここで本研究では LCGT システムに適する地面振動検知センサーを開発し、より高い精度の重力波

のデータを取り出せるのが目的である。本研究では、LCGTで使用される鏡を吊り下げるワイヤーの材質の反射率、レンズとレーザーの関係などで、モデルを確定できた。材質を銀、波長の短い紫色の光と焦点の近い両凹レンズの場合、モデルの感度 δ が一番高くなることがわかった。なお、理論の関係式より、対象物の太さとレーザーとの距離にも依存するので、実際に LCGT という大型装置に投入すると、さらに L が大きくなり、感度 δ がさらに大きく上げられると予想される。

こちらの結果により、モデルの改良や次の新しいモデルの考案も提案した。これからのシミュレーションも新モデルをシミュレーションし、2017年までに LCGT システムに最適なセンサーを開発しなければならない。が、本研究は LCGT における地面振動センサー開発の先行研究というもので、最先端技術のレベルにおいて、不安点としては取るに足らないものであるといえる。

図 10-1-1 LCGT システムの概観

謝辞

この卒業論文を完成できるのには、私一人の手柄ではなく、この論文を作成する途中、たくさんの方々のご協力をいただき、心から誠に感謝の意を申し上げます。

特に感謝したのは、私の指導先生、ミケレット・ルジェロ先生です。この論文を作成する最初の問題は、論文の実験モデルを決めることでした。たくさんの方が時間がかかり、色々なモデルを検討しましたが、結局卒業論文に徹するものではありませんでした。何も分からない私に、ミケレット先生は優しく、モデルの原型とそのポイントを教えてくださいました。そのおかげで、論文を完成させることが出来ました。心から感謝しています。ありがとうございます。

なお、同じ研究室の先輩たちからも大変貴重なアドバイスを頂いて、この論文がよりよくできました。特に孫哲さんからの技術のサポートと鷹取さんのアドバイスに感謝しています。ここで皆さんにお礼を申し上げます。

最後、この場をお借り頂き、この四年間ずっと熱心にご指導をくださった穏やかで親しみやすい基礎科学コースの先生方に、厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1、 中村卓史 他、「重力波をとらえるー存在の証明から検出へ」、京都大学学術出版会、1998年。
- 2、 日本物理学会、「ニュートリノと重力波」、裳華房、1997年。
- 3、 P.C.W.デイヴィス、「重力波のなぞ」、岩波書店、1981年。
- 4、 潮秀樹、「よくわかる光学とレーザーの基本と仕組み」、秀和システム、2010年
- 5、 前田譲二 他、「光工学が一番わかる」、技術評論社、2011年
- 6、 KAGRA homepage: <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>