

THESIS

**A Study of Baseline Compensation  
System for Stable Operation of  
Gravitational-wave Telescope**

**Koseki Miyo**

*Department of Physics  
University of Tokyo*

MMM 2020



# Abstract

a



# 要旨

2015 年、ブラックホール連星合体からの重力波 GW150914 を LIGO の 2 台の検出器が直接検出することに成功した。また 2017 年には Virgo を加えた 3 台の重力波検出器で連星中性子合体からの重力波 GW170817 を検出し、さらにフォローアップ観測によって電磁波対応天体も同定され、マルチメッセンジャー観測が確立された。そして 2020 年には KAGRA も LIGO と Virgo の重力波観測ネットワークに加わることで、より多くの重力波イベントの観測が期待される。

しかしながら、重力波は地球のどこでも検出できて視界に左右されないはずだが、現在稼働している干渉計型重力波検出器の DutyCycle は 60 % 程度である。これは悪天候時の高波や遠地でおきた地震などによる地面振動によって、干渉計の腕が変動し、干渉しなくなるためである。これら地面振動はおよそ 1 Hz 以下で数 10 km 以上のスケールで地面を揺らすが、現状の防振装置ではこのような低周波地面振動は防振できない。これは、グローバルな低周波の地面揺れを測定できるセンサーがないためである。

本論文では、基線長補償システムについて書かれている。このシステムは、レーザーひずみ計と呼ばれる地殻変動計測用の 1.5 km のレーザー干渉計をもちいて KAGRA の基線長伸縮をモニターし、その信号で、メインの KAGRA の干渉計が揺れないように防振をする。

この論文では、地面振動が干渉計に与える影響について調べられており、そしてその影響を低減するための基線長補償システムの原理と、その理論的性能、既存のシステムと比較した利点が調べられている。そして、このシステムを実際に KAGRA に組み込んだ性能評価実験が述べられている。この実験では、もっとも地面振動の影響を受けやすい 3 km の Fabry-Perot 光共振器に基線長補償システムを組み込み、この腕共振器の長さ変動を測定した。その結果、



# Contents

<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>要旨</b>	<b>5</b>
<b>1 Demonstration of Baseline Compensation</b>	<b>9</b>
1.1 Overview of KAGRA . . . . .	9
1.1.1 Status of KAGRA . . . . .	9
1.1.2 Main Interferometer . . . . .	10
1.1.3 Mirror Suspension System . . . . .	12
1.2 KAGRA Type-A Suspension . . . . .	12
1.2.1 Overview . . . . .	12
1.2.2 Pre-Isolator stage (PI) . . . . .	15
1.3 Experimental Arrangement . . . . .	16
1.3.1 Length measurement of X-arm cavity . . . . .	16
1.3.2 Control Design . . . . .	17
1.3.3 ... . . . .	17
1.4 Results . . . . .	17
1.4.1 Measurement Results . . . . .	17
1.4.2 Comparison of the models . . . . .	20
1.5 Discussion and Summary of the Chapter . . . . .	20
1.5.1 Discussion . . . . .	20
1.5.2 Summary . . . . .	20

<b>2</b>	<b>Conculusion and Future Directions</b>	<b>21</b>
2.1	Conclusion . . . . .	21
2.2	Future Directions . . . . .	21



# Chapter 1

## Demonstration of Baseline Compensation

基線長補償システムの性能評価をするために、KAAGRA の X アームキャビティを防振した。

### 1.1 Overview of KAGRA

#### 1.1.1 Status of KAGRA

KAGRA is a 3km laser interferometer, constructed in Kamioka, Gifu, Japan, and is now in its final commissioning phase. The KAGRA project はこれまでに 2 つの試験運転を経て、今は LIGO と Virgo との第三次共同観測 (O3) にむけた phase にいる。Table??に KAGRA の phase をまとめる。1 つめの試験運転は initial KAGRA (iKAGRA) と呼ばれる、2016 年の 3 月から 4 月に行われた、3km の Michelson interferometer の試験運転である。このとき、テストマスは低温ではなく常温ではなかったが、3km の長期線干渉計を地下で可動させることを実証した。そして次に 2 つ目の試験運転である、baseline KAGRA (bKAGRA) とよばれる、低温鏡をつかった Michelson 干渉計の試験運転である。この運転では低温干渉計を稼働させることを実証した。そして 2019 年 12 月現在、LIGO と Virgo との第三次共同観測 (O3) にむけて、低温鏡を使用した Fabry-Perot Michelson interferometer (FPMI) のコミッショニングをおこなっており、中性子連星合体を

1 Mpc で観測できる感度まで向上させるノイズハンティングを行っている。

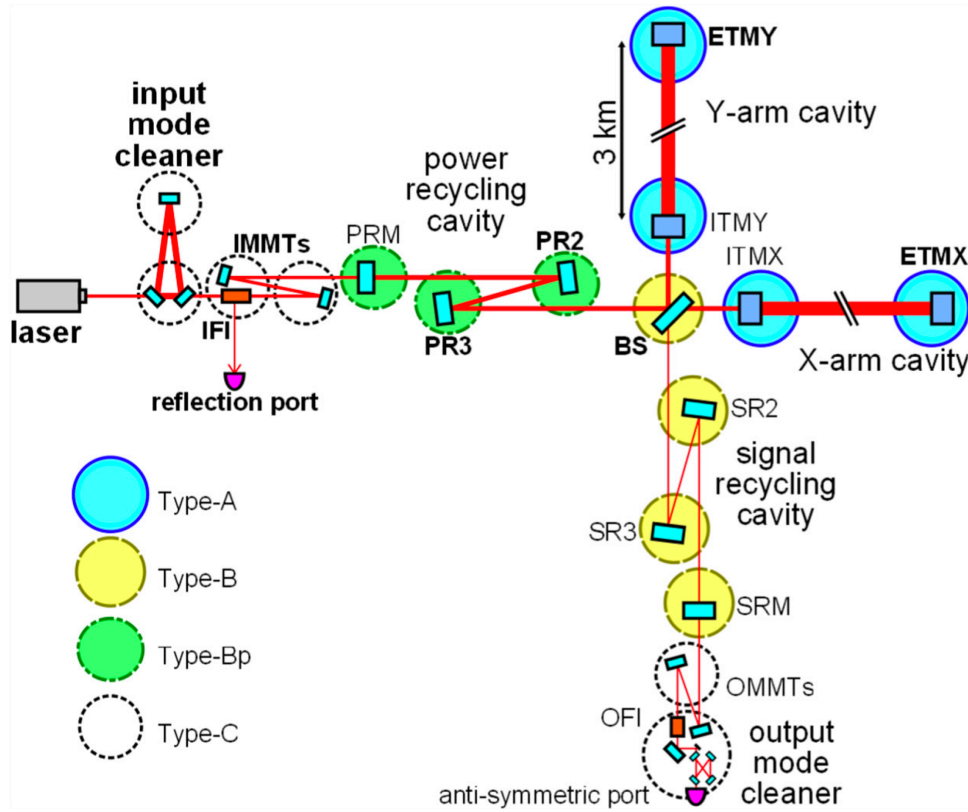
**Table 1.1:** Summary of the phases of KAGRA. MI: Michelson Interferometer, FPMI: Fabry-Perot Michelson Interferometer, DRFPMI: Dual-Recycled Fabry-Perot Michelson Interferometer, RSE: resonant sideband extraction

	iKAGRA	bKAGRA Phase1	bKAGRA for O3	bKAGRA (final)
Year	2016 Mar - Apr	2018 Apr - May	2019 Dec -	2020 - (planned)
Configuration	MI	MI	FPMI	DRFPMI (RSE)
Test mass temperature	room temp.	18K room temp.	18K room temp.	22K

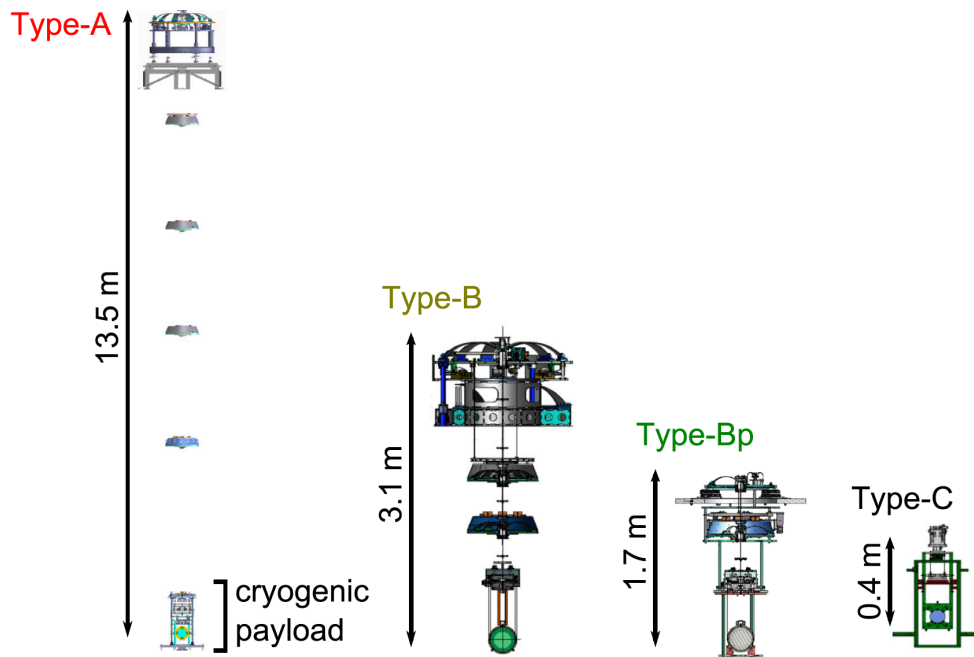
### 1.1.2 Main Interferometer

KAGRA のメイン干渉計の図を Fig.1.1a に示す。KAGRA は他の LIGO や Virgo と同様に、腕に Fabry-Perot 光共振器とリサイクリング光共振器をもつマイケルソン干渉計である。ただし他とことなるのは、腕共振器の鏡は 22 K まで冷却されていることである。この鏡にはサファイヤを使用している。なぜならば極低温下でも高い thermal conductivity と高い Q 値を持ち、それぞれの特徴が熱レンズ効果と熱雑音を低減できるためである。また KAGRA その他の鏡はすべて常温の fused silica 鏡である。

KAGRA の干渉計は、おもに 4 つに分けられる; arm cavities, input and output mode cleaners (IMC and OMC), power recycling cavities (PRC), and signal recycling cavities (SRC). Arm cavities are composed of input test masses (ITMs) and end test masses (ETMs). また低温鏡である ITM 内部でのパワーをへらすために、フィネスは 1530 と他の検出器とくらべて高い。IMC は入射光の空間モードの整形と周波数を安定化させるために使われ、OMC は出射光の unwanted higher-order spatial modes と frequency sideband を落とすためにある。IMC は 3 つの鏡で構成される三角共振器であり、およそ 1Hz 以上の周波数の pre-stabilization ができる



(a) Schematic interferometer configuration of KAGRA [1]



(b) KAGRA mirror suspension system [1]

**Figure 1.1:** Interferometer configuration and mirror suspension system

ように設計されている。また OMC は 4 つの鏡から構成される bow-tie cavity である。PRC は BS と共振器をつくる PRM の他に PR2 と PR3 鏡で構成される。この共振器で入射光のパワーを 10 倍増幅させる。SRC は SRM と SR2、SR3 で構成される。SRC は検出器を広帯域にして重力波信号を抜き出すために使われる。This technique is more important than Advanced LIGO and Advanced Virgo, because the bandwidth is narrower than other detectors due to a high finesse arm cavity of KAGRA.

### 1.1.3 Mirror Suspension System

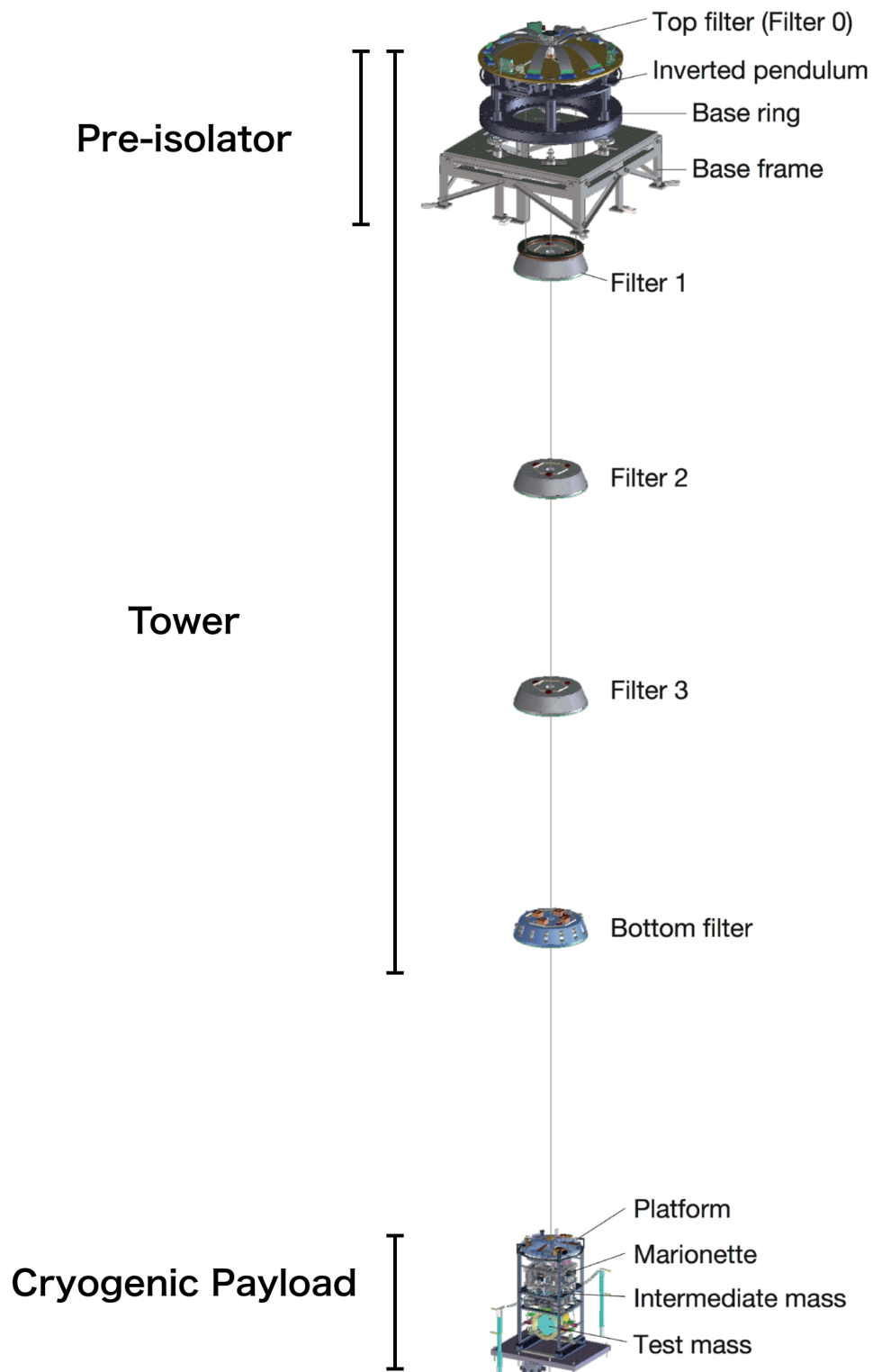
KAGRA の干渉計を構成する鏡はすべて Suspension で懸架されており、それらは 4 つの種類がある; Type-A, Type-B, Type-Bp, Type-C. Type-A はテストマス懸架するため、最も高い防振比が求められ、13.5m の 9 段振り子である。次に変位雑音への要求が高いシグナルリサイクリング鏡は、Type-A の段数を減らした、Type-B Suspension で懸架される。そして Type-Bp はさらに pre-isolator を取り除いた Suspension であり、Power recycle を懸架している。最後に、Type-C は最も簡易的な振り子で TAMA で使用されていたものを修正した Suspension である。

## 1.2 KAGRA Type-A Suspension

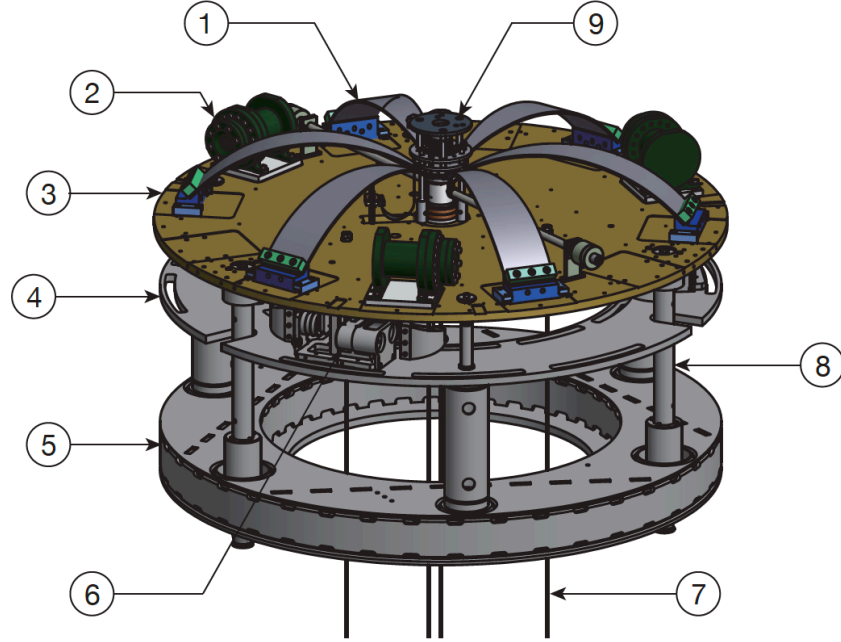
### 1.2.1 Overview

In order to suspend the cryogenic test mass, as shown in Fig.1.2, KAGRA Type-A suspension has two parts; cryogenic payload and 13.5m room temperature tower pendulum [2]. The cryogenic payload is consisted of Platform, Marionette, Intermediate mass, Test mass. The tower is consited of 5 mechanical filter; Top filter, F1, F2, F3, and Bottom filter. Moreover, the suspension point of tower is suspended by pre-isolator stage which has a inverted pendulum.

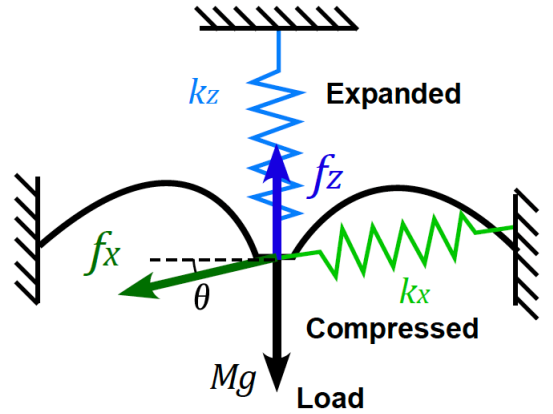
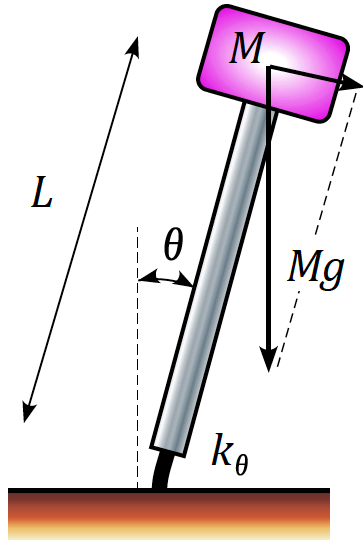
In terms of the low-frequency seismic attenuation, the pre-isolator is the important mechanical part.



**Figure 1.2:** An overview of the Type-A suspension [2]. Test mass is suspended by a 13.5 m pendulum consisting of several mechanical filters. The suspension point of the long pendulum is supported by the pre-isolator, which consists of an inverted pendulum, on the ground through the base frame and base ring.



(a) Pre-isolator stage (PI). (1) Cantilever blade for GAS. (2) Geophone (3) Table of the top stage (4) Reference frame rigidly connected to the base ring (5) The base ring mounted on the ground (6) LVDT and the coil magnet actuator (7) suspension wire to suspend the lower stages (8) leg of the inverted pendulum (IP). Figure is cited from figure 3.9 in [2]



(b) Leg of the inverted pendulum (IP) [3].

(c) Geometrical Anti-Spring [3].

**Figure 1.3:** CAD drawing of the pre-isolator (top) and main mechanical components of PI; IP leg and GAS (bottom).

### 1.2.2 Pre-Isolator stage (PI)

Pre-isolator(PI) は振り子の懸架点を防振するための能動防振システムであり、??でのべた地震計と変位計をもちいた能動防振である。Fig.1.3a に示すように、機械的には、懸架点の並進方向は IvertedPendulum で、垂直方向は GAS で防振されている。

#### Inverted pendulum for horizontal vibration isolation

Inverted pendulum は Preisolator の荷重を調整することで、実質的なばね定数を小さくし、共振周波数を小さくすることができる。The angluar eigenfrequency of the singla IP leg is

$$\omega_{IP} = \sqrt{\frac{g}{L} \left( \frac{k_{\theta}/gL - M}{M} \right)}, \quad (1.1)$$

$$(1.2)$$

where is the bending spring constant of the flexure,  $M$  is the mass of the stage and  $L$  is the length of the leg. このように、原理上はステージの質量を調整すれば、共振周波数を 0 にすることができることがわかる。しかし、平方根の中がマイナスの場合振り子は不安定になるので、実際の共振周波数は 100 mHz 程度に設定されている。

#### Geometric Anti-Spring for vertical vibration isolation

GAS は向かい合わせた cantilever blades を圧縮することで、実質的な上下方向のばね定数を小さくする機械的なフィルターである。GAS の固有周波数は、

$$\omega_{GAS} = \sqrt{\frac{1}{M} \left[ k_z - \left( \frac{l_0}{x_0} - 1 \right) k_x \right]}, \quad (1.3)$$

where  $M$  is the load mass,  $k_x$  and  $k_z$  are the elastic constant of the compressed catilevers,  $l_0$  is a natural length of the blades,  $x_0$  is the horizontal distance between the central keystone and the support poit of the blades. One can find that the angular eigenfrequency of the GAS is reduced when  $x_0 < l_0$ .

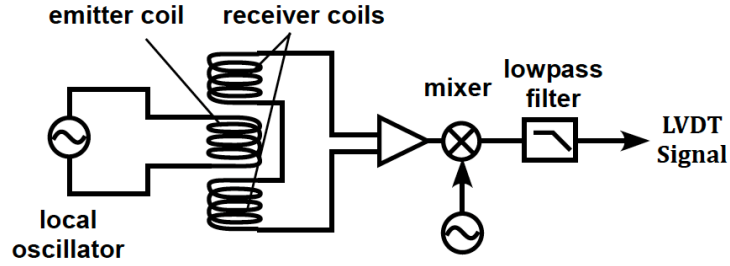


Figure 1.4: [3]

### Liner Variable Differential Transducer (LVDT)

LVDT is a wide range relative position sensor composed of three coils [4]. shown in Fig.1.4. The emitter coil is mounted on the pre-isolator stage and driven with a sinusoidal signal to emit a modulated magnetic field. The two receiver coils is mounted on the reference structure, and these coils are counter-wound to each other. When the emitter coil is on the center of two reciever coils, induced voltage is not emitted from the reciever coils. On the other hand, when the pre-isolator is moved, a sinusoidal signal appears on the reciever coils. Therefore, after demodulating this signal, amplitude of output signal is propotional to the displacement from the LVDT geometrical center.

### Coil-magnet actuator

We use a voice-coil type wide range actuator to move the pre-isolator stage [5].

## 1.3 Experimental Arrangement

### 1.3.1 Length measurement of X-arm cavity

腕共振器の長さ変化は、腕共振器が共振を維持できるように周波数アクチュエータである AOM をつかって共振を維持した状態で、その制御信号からもとめた。

このとき、角度制御以外にマスアクチュエータを使っていない。



### 1.3.2 Control Design

### 1.3.3 ...

## 1.4 Results

### 1.4.1 Measurement Results

#### Reduction of the slow motion

基線長補償システムをいれたときの X アーム共振器の腕の長さ変化をしらべた。Fig.1.5a に、X アームの制御信号とそのときの基線長伸縮を示す。12 分に、補償システムをいれた。入れる前は、X アームの長さは基線長伸縮によってゆっくりとドリフトしていたが、入れたあとは、そのドリフトはなくなっている。基線長はおおよそ 34 分の間 8  $\mu\text{m}$  ほど変化していたのに対して、補償システムをいれたあとは X アームの長さは 1  $\mu\text{m}$  以下に低減されているので、おおよそ 10 分の 1 の低減が確認できる。

#### Reduction in the microseismic region

また、システムを入れる前後で RMS 振幅場が小さくなっていることがわかる。システムを入れた前後の時系列データからもとめた ASD を Fig.1.5b に示す。補償システムをいれたことで、0.01Hz 以上の累積 RMS の値が半分に減っていることがわかる。

### 1.4.2 Comparison of the models

測定した X-arm 長変動と、モデルから期待される変動を比較する。このモデルは、Type-A の振り子を剛体としてモデル化して得られる [3]。

#### When the compensation system is OFF

補償システムが OFF のときの X アーム長変動の測定値と、そのときにモデルから期待されるものを比較する。Fig.1.5b にその比較を示す。??で述べたように、補償システムを入れる前は、それぞれの Pre-isolator はそれぞれのローカルの LVDT

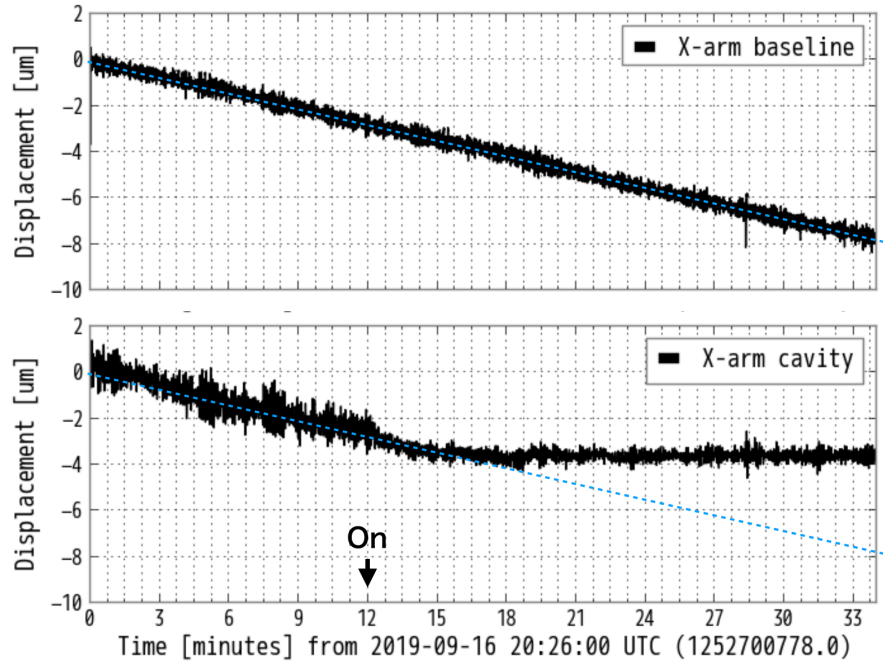
をつかって Feedback 制御されている。このときの LVDT のセンサーノイズを水色で、地面振動ノイズをオレンジ色で示す。これらノイズの二乗和のルートを Total とし、赤色で示す。1Hz 以上の、X アーム測定の測定ノイズで埋もれている帯域を除けば、1Hz 以下ではこの Total は実際の測定値と一致していることがわかる。

When the compensation system is ON

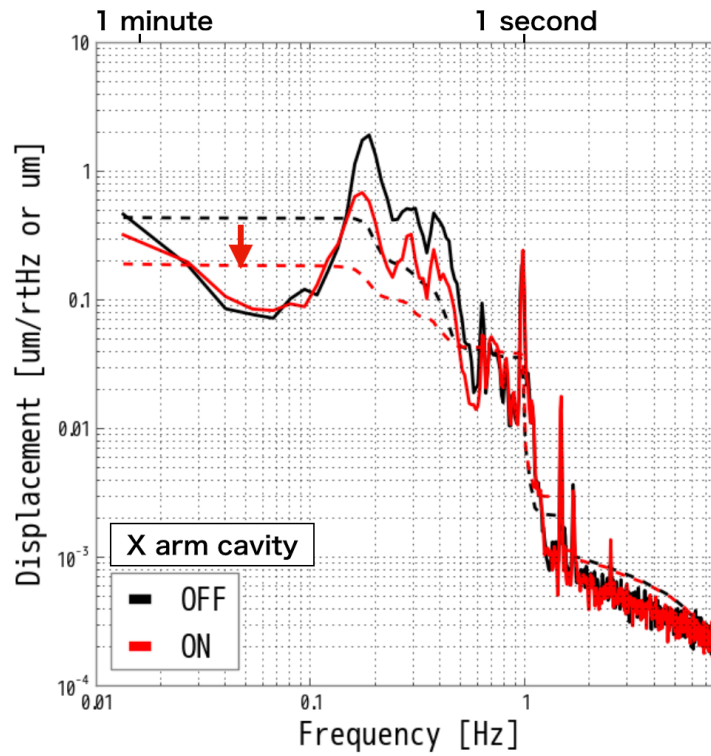
## **1.5 Discussion and Summary of the Chapter**

### **1.5.1 Discussion**

### **1.5.2 Summary**

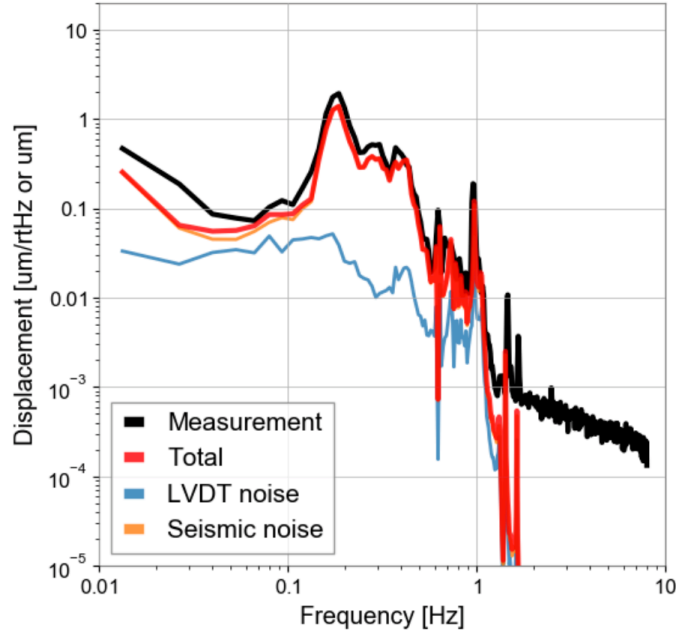


(a) Length change of both X-arm baseline and X-arm cavity when baseline compensation system is turned on or off. At 12 minutes, the control is on.

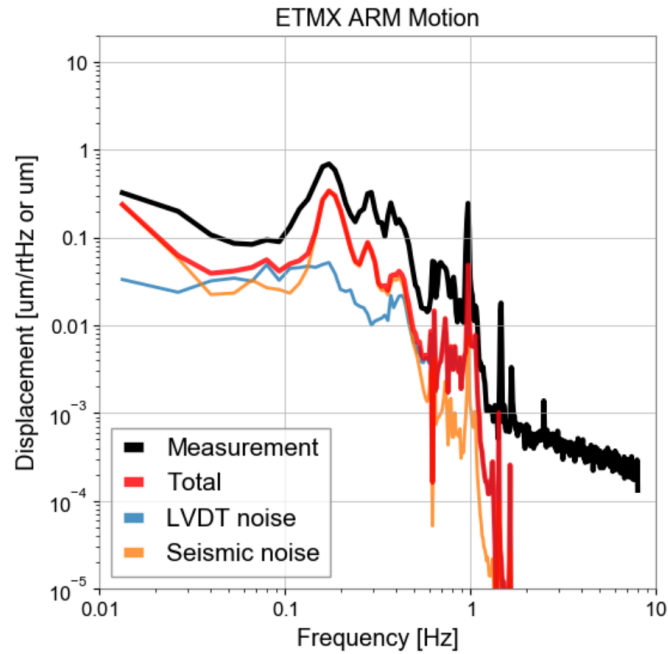


(b) ASDs of X-arm cavity length when baseline compensation system is turned on and off.

**Figure 1.5:** Comparison of the reduction of the X-arm cavity length fluctuation when the baseline compensation system is turned on or off.



(a) Noise budget of the X-arm length fluctuation when the compensation system is OFF. Measurement is same as the black line in Fig.1.5b. Total is the summation of all noise contributions.



(b) Noise budget of the X-arm length fluctuation when the compensation system is ON. Measurement is same as the red line in Fig.1.5b. Total is the summation of all noise contributions assuming the reduction factor of sensor correction of 1/20.

**Figure 1.6:** Noise budget of the X-arm length fluctuation when the compensation system if turned on or off.

## Chapter 2

# Conculusion and Future Directions

### 2.1 Conclusion

### 2.2 Future Directions



# Bibliography

- [1] T Akutsu, M Ando, K Arai, Y Arai, S Araki, A Araya, N Aritomi, H Asada, Y Aso, S Atsuta, et al. First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory kagra. *arXiv preprint arXiv:1901.03569*, 2019.
- [2] Okutomi Koki. *Development of 13.5-meter-tall Vibration Isolation System for the Main Mirrors in KAGRA*. PhD thesis, SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies, 2019. [Link](#).
- [3] Takanori Sekiguchi. *A Study of Low Frequency Vibration Isolation System for Large Scale Gravitational Wave Detectors*. PhD thesis, Department of Physics School of Science, University of Tokyo, 2016.
- [4] Hareem Tariq et al. The linear variable differential transformer (LVDT) position sensor for gravitational wave interferometer low-frequency controls. *Nucl. Instrum. Meth.*, A489:570–576, 2002.
- [5] Chenyang Wang, Hareem Tariq, Riccardo DeSalvo, Yuki Yoshi Iida, Szabolcs Marka, Yuhiko Nishi, Virginio Sannibale, and Akiteru Takamori. Constant force actuator for gravitational wave detector’s seismic attenuation systems (sas). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 489(1-3):563–569, 2002.