修士論文

KAGRA サイトにおけるクライオスタットの振動解析 (Vibration Analysis of Cryostat on KAGRA Site)

東京大学理学系研究科物理学専攻 越智聡郎

> 2018年1月4日 提出 2018年1月30日改訂

概要

2015年に一般相対論で予言されていた重力波がアメリカの LIGO で直接観測された。これに より国際的な重力波観測網を構築することがより重要となり、現在建設中の日本の大型低温重 力波望遠鏡 KAGRA もそれに参加することが急務となっている。 KAGRA は、3 km のアー ムの長さをもつ Michelson 型干渉計に Fabry-Perot 共振器を導入した Fabry-Perot-Michelson 型レーザー干渉計である。他の大型重力波検出器と異なる大きな特徴は、地面振動が非常に小 さい岐阜県の神岡鉱山 (地下 200m より深い位置) に建設し、熱雑音低減のため鏡をおよそ 20 K まで冷却する点である。この Fabry-Perot 共振器の鏡および懸架系は、大型のクライオス タットの2重のシールド内に設置される (外側が 80 K, 内側が 8 K)。 鏡とその懸架系、そして シールドは超低振動パルス管冷凍機によって冷却される。その冷却のため、懸架系と冷凍機は 純アルミでできたヒートリンクでつなげられる。しかし、冷凍機の振動がヒートリンクを介し 鏡に伝搬し、雑音となってしまう。そのためサイトにクライオスタットが納入される前の 2013 年に、東芝社の京浜事業所にて冷却した状態でのクライオスタットの 8K 輻射シールド内の振 動測定を、我々が開発した加速度計により行った。しかし、この測定場所自体の地面振動がサ イトよりおよそ 100 倍大きく、また、サイトでのクライオスタットの接続状況や固定状況が異 なっていた。そのため、本研究では、KAGRA サイトにインストールされた状態での 8K 輻射 輻射シールド内の振動測定およびクライオスタットの打撃試験による共振周波数測定を行い、 冷凍機およびクライオスタットの振動の評価を行った。その結果、8K 輻射シールド底面では、 10-100 Hz の帯域にクライオスタットの構造の共振による励起が見られた。特に、10-30 Hz に、KAGRA サイトの地面振動のおよそ 1000 倍の非常に大きな山が観測された。これら 8K 輻射シールドの振動スペクトルに現れたピークについて、打撃試験による共振周波数測定結果 と殆どについて対応付けられた。また、3 種類ある冷凍機 (輻射シールド用 2 台、低温懸架系 用2台、クライオダクト用2台)の稼働による振動測定結果は、輻射シールド用2台および低 温懸架系用2台による振動のラインスペクトルについては、1-100 Hz まで両者はほぼ一致し、 30-50 Hz のラインスペクトルが最大であった。また、クライオダクト用冷凍機 2 台稼働時の振 動のラインスペクトルは、20.8 Hz で最大であった。これらは開発段階であった東芝での試験 では観測されなかった大きな振動である。今後、これらの振動をどのように防振させるか議論 する必要がある。

目次

1	はじめに	5
2	重力波について	8
2.1	Einstein 方程式と重力波の伝搬	8
2.1	.1 重力波の導出	8
2.1	.2 重力波の偏極	9
2.2	重力波を発生させる天体現象	9
3	レーザー干渉計型重力波検出器	11
3.1	レーザー干渉計の原理................................	11
3.2	大型重力波望遠鏡	13
3.2	.1 世界の重力波望遠鏡	13
3.2	.2 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA	14
3.3	KAGRA の雑音	14
3.3	.1 量子雑音	14
3.3	.2 熱雑音	15
3.3	3 地面振動雑音	15
3.3	.4 散乱光雑音	15
3.3	5 KAGRA の観測帯域	15
3.3	.6 KAGRA で低温システムを導入したことによる新たな雑音	16
4	KAGRA のクライオスタットと冷凍機	17
4.1	全体像	17
4.2	KAGRA クライオスタットの概要	20
4.3	輻射シールドの構造	21
4.4	真空チャンバー	24
4.5	冷凍機	24
4.5	1 各冷凍機の配置と接続	25
4.5	.2 冷凍機の内部構造	26
4.6	クライオダクトとクライオダクト用冷凍機の構造	28
4.6	.1 クライオダクトの構造	28
4.6	.2 ダクトシールドのサポート	29
4.6	3 クライオダクト用冷凍機との接続	30
4.7	東芝でのクライオスタットの振動測定結果	31
4.7	.1 測定の概要	32

	4.7.2	振動測定結果	33
	4.8 K.	AGRA サイトでの振動測定の意義について..............	33
5	打	撃試験によるクライオスタットの共振周波数測定	35
	5.1 打	撃試験の概要	35
	5.1.1	周波数応答関数と共振周波数.............................	35
	5.1.2	打撃試験に用いた測定機器と測定方法	36
	5.1.3	加振点と応答点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	37
	5.1.4	打撃試験時のクライオスタットの状態	40
	5.2 打	撃試験の結果	42
	5.2.1	周波数応答関数から共振周波数の読み取り例とその方法.......	42
	5.2.2	共振周波数測定結果	43
	5.3 東	芝での打撃試験の結果との比較	45
6	8	K 輻射シールドの振動測定と成分分析	48
	6.1 振	動測定の概要	48
	6.1.1	測定箇所	48
	6.1.2	測定装置....................................	49
	6.2 低	温加速度計について..................................	51
	6.3 地	面振動の測定	53
	6.4 輻	射シールド用冷凍機本体の振動測定結果	59
	6.5 8 1	K 輻射シールドの振動;クライオスタットの構造による共振の影響	60
	6.5.1	8 K 輻射シールド底面の振動	60
	6.5.2	共振周波数測定の結果との比較....................	61
	6.5.3	真空チャンバーの振動との比較.......................	63
	6.5.4	8 K 輻射シールドの振動のまとめ	64
	6.6 8K	X 輻射シールドの振動; 全ての冷凍機稼働の振動による影響	65
	6.6.1	8 K 輻射シールド底面の振動	65
	6.6.2	すべての冷凍機の種類による8K 輻射シールドの振動の差	65
	6.6.3	8 K 輻射シールドの振動と冷凍機本体の振動の比較	69
	6.6.4	8 K 輻射シールド底面での冷凍機振動のまとめ	70
	6.7 冷	凍機の稼働による真空チャンバーの振動への影響	71
	6.8 低	温加速度計は低温懸架系に流入する振動の良いモニターとなるか	72
7	結	論と今後の展望	76
	7.1 結	論	76
	7.2 今	後の展望	76

付録 A 打撃試験での周波数応答関数で現れたピーク一覧表

付録 B	低温加速度計のキャリブレーション	86
B.1	低温加速度計のブロックダイヤグラムと振動変位の計算式.......	86
B.2	コイルの伝達関数	87
B.2	.1 V_2/V_1 の測定	88
B.2	.2 干渉計の伝達関数 <i>H</i>	90
B.2	.3 振子の伝達関数	90
B.2	.4 コイルの伝達関数の計算	92
B.3	補正因子 $ \frac{1+G}{G} $ の計算	94
B.4	低温加速度計に用いた回路	97

1 はじめに

重力波は、一般相対性理論を用いて記述される、時空の歪みが波動として光速で伝搬する現象 である。重力波は、1916年に Einstein によって予言され [1]、1979年に R. Hulse と J. Taylor によって連星パルサーの公転周期の変化の観測 [2] により間接的に存在が証明された。 その 後、2015年にアメリカのレーザー干渉計型重力波望遠鏡 LIGO でブラックホール連星合体に よるものと考えられる重力波が直接観測された [3]。また、2017年には連星中性子合体による ものと考えられる重力波も LIGO およびイタリアのレーザー干渉計型重力波検出器 Virgo で観 測され、その観測に伴って電波、光赤外、X 線、ガンマ線によるフォローアップ観測もされた。 このように、重力波はこれまで行われてきた電磁波による観測とは異なる新たな天体現象の観 測方法となった。今後も、多くの重力波を観測し、電磁波では得られない天体に関する物理を 解き明かすことが期待されている。

重力波は非軸対称な質量の運動によって発生するが、地球上で人類が発生させうる重力波の 振幅は非常に小さいために大きな質量運動を伴う天体現象から放射される重力波でないと観測 することができない。それでも、重力波の振幅はおよそ 10⁻²¹ と非常に小さく、超高精度に距 離の変化を測定できる重力波検出器を用いなければ重力波を観測することができない。先述し たブラックホール連星合体などの天体現象を観測できると考えられるおよそ 10 から 1000 Hz の重力波を現在最も高感度に観測できる検出器のタイプがレーザー干渉計型重力波検出器 (以 後、重力波検出器と呼ぶ)である。重力波検出器は、垂直な 2 つの腕の長さの変化を検出する装 置で、その腕の長さがより長いほど重力波の信号をより増幅できる。そのために、重力波検出 器は、実効的な光路長を伸ばすため 2 つの腕それぞれの手前と奥に鏡を置いてレーザー光を多 重反射させている (腕共振器と呼ぶ)。

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA は、岐阜県飛騨市神岡町に建設中の重力波検出器である。 KAGRA の大きな特徴は、地面振動を低減するため地下 200 m より深い所に建設する点と、 重力波検出器の最も感度の良い周波数帯域を制限する熱雑音を低減するため腕共振器の鏡をお よそ 20 K まで冷却する点である。鏡を冷却するという手法は今後建設される次世代型重力波 検出器でも行われる予定であり、KAGRA で培った技術が応用される先進的かつ独自の技術で ある。

腕共振器の鏡は地面振動を低減するため8段振り子の防振装置で懸架され、下3段を冷凍機 で冷却される。この防振装置で冷却される部分を低温懸架系と呼ぶ。低温懸架系は常温からの 熱輻射を抑えるために2重の輻射シールド内にインストールされ、この輻射シールドは冷凍機 によって冷却される。さらにこの輻射シールドは真空チャンバー内にインストールされる。こ れら低温懸架系を取り囲む低温システムである輻射シールド、真空チャンバー、冷凍機をひと まとめにしてクライオスタットと呼ぶ。更に、真空チャンバーに接続するビームの通るダクト は常温からの熱輻射を抑えるために冷凍機によって冷却されており、これをクライオダクトと 呼ぶ。クライオスタットおよびクライオダクト、クライオダクト用冷凍機全てを合わせたもの

をクライオシステムと呼ぶ。なお、クライオシステムに使われる冷凍機は全て高エネルギー加 速器研究機構と住友重機械工業の共同研究によって開発された超低振動パルス管冷凍機である [5] [6]。

クライオスタットに用いるパルス管冷凍機は、真空チャンバー内の2重構造の輻射シールド のうち内側の輻射シールドを約8Kまで冷却する2台と(以下、この内側の輻射シールドを8K 輻射シールドと呼ぶ)、低温懸架系を冷却する台、クライオダクトを冷却する2台に分かれる。 更に、8K輻射シールド用冷凍機2台および低温懸架系用冷凍機2台は、真空チャンバー内の2 重構造の輻射シールドのうち外側の輻射シールドと接続し、この輻射シールドは約80Kまで冷 却される(この輻射シールドを80K輻射シールドと呼ぶ)。

クライオスタットの輻射シールドは、冷却のためにより薄く柔らかくするという要請と、強 度と防振のためにより堅牢にするという相反する2つの要請を程よく同時に満たせるように設 計されている。従って、輻射シールドは防振のためにあまり強固な構造にするわけにはいかず、 輻射シールドの共振の影響により地面振動などクライオスタットの外部から流入する振動が励 起してしまう。また、冷凍機の稼働による振動も輻射シールドに伝搬する。8K 輻射シールド は、低温懸架系を熱伝導で冷却するための冷却棒と接続し、またその冷却棒の先端はヒートリ ンクと呼ばれる熱伝導性が非常に良く柔かい 6N のアルミのより線で低温懸架系と接続されて いるため、8K 輻射シールドの振動が冷却棒およびヒートリンクを伝搬して低温懸架系を加振 し、鏡を揺らしてしまう。また、レーザー光学素子の表面や内部からの散乱光が 8K 輻射シー ルドに当たり、8K 輻射シールドの振動で変調受け、レーザーに再結合されることも雑音とな る。クライオスタットが KAGRA サイトにインストールされる前の 2013 年に、D. Chen らに よって東芝の京浜事務所で 8K 輻射シールドの振動測定が行われた [7]。しかし、当時のクライ オスタットは KAGRA 本稼働時と比較して設置状況が大きく異なり、サイトに設置するクライ オスタットと比較して共振周波数が大きく異なる可能性があった。また、バックグラウンドの 地面振動レベルが KAGRA サイトと比較して 100 倍以上大きく、冷凍機の稼働による振動が 地面振動に埋もれている可能性があった。

そこで、本研究では、KAGRA サイトに設置されたクライオスタットの 8K 輻射シールドに、 我々が開発した真空対応の加速度計を設置し、振動を測定して、クライオスタットの共振の影 響および冷凍機の稼働による振動の影響を再評価した。また、クライオスタットの打撃試験に よりクライオスタットの各部分の共振周波数を測定し、振動測定結果との対応関係をつけた。

最後に、本論文の構成を示す。

第2章では、まず、重力波が一般相対性理論から導かれることと、重力波を発生させる天体 について述べる。

第3章では、世界の主流の重力波検出器であるレーザー干渉計型検出器の原理についてのべる。また、本研究の対象である KAGRA と、その雑音源について紹介し、最後に低温システムを用いたことによる雑音の評価が重要であることを述べる。

第4章では、クライオスタットと冷凍機の構造について説明し、振動がどのように伝わり励

起すると考えられているかを述べる。また、東芝での振動測定結果について紹介し、最後に本 研究を行う意義について説明する。

第5章ではクライオスタットの打撃試験の方法と結果を説明し、クライオスタットの共振周 波数を求める。

第6章では、地面振動、冷凍機本体の振動、真空チャンバーの振動測定結果を述べ、その後 輻射シールドの振動測定結果と比較を行う。

第7章では本研究の総括を行い、今後の課題について述べる。

2 重力波について

本章では、一般相対性理論における人類が観測可能な重力波について簡単に述べ、重力波を発 生させる天体現象について紹介する。

2.1 Einstein 方程式と重力波の伝搬

2.1.1 重力波の導出

一般相対性理論において、重力場の方程式 (アインシュタイン方程式) は、

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} , \qquad (2.1)$$

である。ここで、 $R_{\mu\nu}$ はリッチテンソル、Rはリッチスカラー、 $T_{\mu\nu}$ は物質分布を特徴付ける エネルギー運動量テンソル、Gは万有引力定数、cは光速、 $g_{\mu\nu}$ は計量、 $\mu,\nu = 0, 1, 2, 3$ である。 この計量 $g_{\mu\nu}$ を、弱い重力場:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \qquad |h_{\mu\nu}| \ll 1 ,$$
 (2.2)

について考える。ただし、 $\eta_{\mu\nu}$ はミンコフスキー時空での計量である。式 2.2 を 2.1 に代入し、計量のトレース反転テンソル:

$$\overline{h}_{\mu\nu} \equiv h_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} h , \qquad (2.3)$$

$$h \equiv h^{\mu}_{\ \mu} , \qquad (2.4)$$

および Lorentz 条件、

$$\partial^{\nu} \overline{h}_{\mu\nu} = 0 , \qquad (2.5)$$

を課すと、

$$\Box \overline{h}_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} , \qquad (2.6)$$

となる。これが、弱い重力場でのアインシュタイン方程式である。真空中を考えると、 $T_{\mu\nu} = 0$ であるから、式 2.6 は、波動方程式、

$$\Box \overline{h}_{\mu\nu} = 0 , \qquad (2.7)$$

となる。従って、ミンコフスキー時空の微小なずれ h_{µν} が光速で伝搬する重力波が導出された。

2.1.2 重力波の偏極

重力波の振幅 $h_{\mu\nu}$ に対して、TT ゲージ (Transverse Traceless gauge) 条件

$$h_{\mu 0} = 0$$
, (2.8)

$$h_{ij}^{\ ,j} = 0$$
, $(i, j = 1, 2, 3)$ (2.9)

$$h_j^{\ j} = 0$$
, (2.10)

を課すと、重力波の自由度は2となる。z軸方向の重力波に対し、TTゲージ条件を課すと、時空は、

$$h_{\mu\nu}^{TT} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_{+} & h_{\times} & 0 \\ g & h_{\times} & -h_{\times} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} , \qquad (2.11)$$

と書ける。*h*₊ と *h*_× はそれぞれプラスモード、クロスモードと呼ばれ、重力波の偏極モード を表している。この2つのモードの重力波が z 軸方向から入射した時、xy 平面上にある質点の 相対距離は、図 2.1 のように変化する。



図 2.1: 一般相対性理論による重力波の偏極モード (それぞれ、プラスモード、クロスモード)

2.2 重力波を発生させる天体現象

本節では、地球に到達する大きな振幅を持つ人類が観測可能な重力波の発生源となる天体現象について紹介する。

ブラックホール連星合体

2つのブラックホールが互いに公転しつつ接近し、衝突する最後の約1秒間に振幅の大

きな重力波を放出する。合体後も振動しながら重力波を放出し、1つのブラックホール となる。2015年9月14日に、アメリカのLIGOがブラックホール連星合体起源と考え られる重力波信号を初検出した[3]。この合体では、太陽質量の29倍と36倍の質量を持 つ2つのブラックホールが合体し、62倍の1つのブラックホールが形成された。即ち、 合体前後の質量差に相当する、太陽質量の3倍のエネルギーが重力波として放出された。 現在までに合計4つの連星合体による重力波が検出され、今後も多くの重力波が検出さ れると考えられる。

連星中性子星合体

2 つの中性子星が互いに公転しつつ接近し、衝突する際におおきな振幅の重力波を発す る。2017 年 8 月 17 日に、アメリカの LIGO とイタリアの VIrgo が連星中性子星合体起 源と考えられる重力波信号を初検出した [4][8]。この観測では、重力波のみの解析で天球 上で 28 平方度 (信頼度 90%) まで絞り込まれた。この重力波の観測後に電磁波望遠鏡に よるフォローアップ観測がなされ、地球から 40 Mpc の距離にある銀河である NGC4993 から発せられたことが分かった。もし、KAGRA が稼働していたら、偏極、軌道面傾斜 角、距離の縮退が解け、更にそれらを精度良く観測できた。重力波の偏極は現在精度よ く観測できておらず、一般相対性理論や、それを超える修正重力理論や余剰次元理論の 検証には必須の課題となっている [9]。

超新星爆発

超巨星の高密度コアが内向きに崩壊し、解放されたエネルギーが恒星を吹き飛ばす現象 である。非対称な爆発ならば重力波を発生させる。超新星爆発の際の恒星内部の物理は 不明な点が多く、ニュートリノと重力波のみがコアを直接観測することができると考え られている。

背景重力波

位置が同定できていない多くの重力波源からの重力波の重ね合わせによるものである。 NS-NS 合体など天体起源のものと、インフレーションなど初期宇宙起源のものが考えら れている。

パルサー

パルサーは、超新星爆発後に発生すると考えられる高速で回転する中性子星である。パ ルサーが非対称な構造を持つと、重力波が発生すると考えられる。パルサーによる重力 波は連続波と考えられている。

3 レーザー干渉計型重力波検出器

本章では、まず現在の最も感度が高い重力波望遠鏡の基本的な検出原理である Michelson 型 レーザー干渉計と、その発展形である Fabry-Perot-Michelson 型レーザー干渉計について述べ る。次に、世界で建設されている重力波望遠鏡と、本研究の対象である大型低温重力波望遠鏡 KAGRA について紹介する。その後、KAGRA の重力波に対する感度を制限する主な雑音と、 本研究のテーマである鏡を冷凍機で極低温に冷却することによる雑音について述べる。

3.1 **レーザー干渉計の原理**

レーザー干渉計型重力波検出器は、振幅の重力波の入射によって引き起こされる2点間の距離の微小変化を精密測定する装置である。本節では、レーザー干渉計型重力波検出器の最も基本的な形である Michelson 型レーザー干渉計 (MI)、および干渉計の腕の部分で多重反射させることにより実効的な光路長を長くした Fabry-Pelot-Michelson 型レーザー干渉計 (FPMI) について説明する。

Michelson 干渉計の概念図を図 3.1 に示す。Michelson 型レーザー干渉計は、レーザー源から出射されたレーザー光はビームスプリッタで2つに分岐し、鏡で反射され、BS で1つに合わさり、フォトディテクタで検出される。

重力波に対する周波数応答関数 H(ω) は、

$$H(\omega) = \frac{2\Omega}{\omega} e^{i\omega(t - \frac{L}{c})} \sin\left(\frac{L\omega}{c}\right),\tag{3.1}$$

と書ける。ただし、 Ω はレーザーの角周波数、 ω は重力波の角周波数、L は図 3.1 で示される Michelson 型レーザー干渉計の腕の長さ、c は光速である。

Michelson 干渉計の重力波に対する周波数応答関数の応答が最大となる条件、即ち Michelson 干渉計の重力波に対する周波数応答関数の絶対値が最大になる条件は、

$$\frac{L\omega}{c} = \frac{\pi}{2},\tag{3.2}$$

と書ける。即ち、ある各周波数の重力波に対して、重力波に対する応答が式 3.2 で最大となる 腕の長さが一意に決まる。例えば、1 kHz の重力波を観測する場合、重力波に対する応答が最 大となる腕の長さは 75 km 必要となる。しかし、このような非常に長い腕の長さを持つ干渉 計を建設することは困難である。この問題を解決するために、2つの腕の部分の各々で鏡を向 かい合わせにし、その 2 枚の鏡の間で光を多重反射させることにより、実効的な腕の部分の光 路長を長くする方法をとる。この方法はいくつかあるが、そのうち現在の大型のレーザー干渉 計型重力波検出器で用いられているのが、図 3.2 に示す Fabry-Perot-Michelson 型レーザー干 渉計である。Fabry-Perot-Michelson 型レーザー干渉計は、図 3.1 で示した Michelson 型レー ザー干渉計の 2 つの腕を両方とも 2 枚の鏡を向き合わせた Fabry-Perot 共振器にし、腕の部分 の実効的な光路長をより長くしたレーザー干渉計である。ここで、Fabry-Perot 共振器は、2 枚 の鏡の間の距離がレーザーの波長の半整数倍の時、定在波が共振器内に立つことにより実効的 に腕部分でパワーが大きくなる。その折り返し部分で共振器への入射光ともう片方からの反射 光が強め合う光共振器である。



図 3.1: Michelson 型レーザー干渉計の概念図。レーザー源から発射されたレーザー光はビームスプリッ タ (Beam splitter, BS) で 2 つに分岐し、鏡で反射され、BS で 1 つに合わさり、フォトディテ クタ (photo detector, PD) で検出される。また、L は Michelson 干渉計の腕の長さ (基線長) である。



図 3.2: Fabry-Perot-Michelson 型レーザー干渉計の概念図。Fabry-Perot-Michelson 型レーザー干渉 計は、図 3.1 で示した Michelson 型レーザー干渉計の 2 つの腕を両方とも Fabry-Perot 共振器 にし、腕の部分の実効的な光路長をより長くしたレーザー干渉計である。

3.2 大型重力波望遠鏡

3.2.1 世界の重力波望遠鏡

本節では、世界の大型重力波望遠鏡について紹介する。ここで紹介する重力波望遠鏡は全て レーザー干渉計型重力波検出器である。世界の大型重力波望遠鏡とその位置を図 3.3 に示す。

LIGO は、アメリカのハンフォードとリヴィングストンの二箇所に建設され、両者とも 4 km の腕の長さを持つ重力波望遠鏡である。また、LIGO はデザインを改良し感度を上げる Advanced LIGO(aLIGO) というプロジェクトで3倍程度感度が向上し、2015年の試験観測中 に第2章で説明したように重力波を初めて直接検出をした。

Virgo は、イタリアのピサに建設され、3 km の腕の長さを持つ重力波望遠鏡である。Virgo もデザインを改良し感度を上げる Advanced Virgo というプロジェクトで、2017 年に aLIGO と共にブラックホール連星合体および連星中性子星合体による重力波を検出することに成功 した。

他にも、ドイツにある GEO600-HF や、インドに建設計画中の LIGO India などがある。ま た、ESA と NASA によって開発中の宇宙重力波望遠鏡 LISA は、宇宙空間に人工衛星を打ち 上げる重力波望遠鏡である。LISA が本稼働すれば、地上の重力波望遠鏡よりも更に低周波の 帯域の重力波が検出が可能となる。LISA の実験機として LISA pathfinder が 2015 年に打ち 上げられた。



図 3.3: 世界の大型重力波望遠鏡とその位置 [10]

3.2.2 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA は、岐阜県飛騨市神岡町に建設中のレーザー干渉計型重力波 検出器である。3 km の腕の長さを持つ。第1章で説明したように、KAGRA の大きな特徴は、 地面振動を低減するため地下 200 m より深い所に建設する点と、熱雑音を低減するため腕共振 器の鏡をおよそ 20 K まで冷却する点である。2018 年 3 月に bKAGRA-phase1 と呼ばれる試 験運転を行う予定であり、今後も鏡のインストール等を行って重力波の検出を目指している。

3.3 KAGRA の雑音

本節では、KAGRA を含む一般的なレーザー干渉計型重力波検出器において感度を制限する 雑音源である量子雑音、熱雑音、地面振動雑音などの雑音について紹介する。また、本研究の 対象である、KAGRA が低温システムを運用することに起因する雑音である冷凍機の振動によ る雑音についても説明する。

3.3.1 量子雑音

量子雑音は、量子光学的には、干渉計のダークポートから入射する電場の真空場揺らぎによっ て説明される。量子雑音は、散射雑音と輻射圧雑音に分類される。明される。散射雑音は、光 を検出する時のレーザーの光子数のゆらぎによる雑音である。レーザーのパワー P に対して、 散射雑音の雑音レベル $N_{\rm s}$ は $N_{\rm s} \propto 1/\sqrt{P}$ と書くことができるので、散射雑音はレーザーのパ ワーを上げることによって低減できる。また、輻射圧雑音は、光が鏡で反射する時のレーザーの 光子数のゆらぎにより、鏡が揺れることによる雑音で、その雑音レベル $N_{\rm r}$ は、 $N_{\rm r} \propto P$ と書け る。したがって、輻射圧雑音は、散射雑音とは反対にレーザーのパワーを上げることにより雑 音レベルが増大する雑音である。量子雑音は、レーザーのパワーを変化させてもある雑音レベ ルより低減できることができない限界があり、標準量子限界 (Standard Quantum Limit:SQL) と呼ばれている。

3.3.2 熱雑音

鏡を懸架する防振装置と鏡自身が、熱振動によって揺らされることによって生じる振動であ る。熱雑音の大きさは、揺動散逸定理によれば、系の散逸の大きさと温度の積の平方根に比例 する。従って、単純には鏡とその懸架系を冷却することにより熱雑音を低減することができる が、更に低温化による散逸の低減による相乗効果も期待される。KAGRA では腕共振器の鏡と 懸架系を 20 K 近くまで冷却することにより、熱雑音を低減する設計となっている。

3.3.3 地面振動雑音

地面振動が鏡を揺らすことによる雑音を地面振動雑音と呼ぶ。KAGRA では、地面振動雑音 を低減するために、以下の2つの仕方で地面振動雑音を低減させている。1つ目は、地面から 鏡への地面振動の伝搬経路で振動を低減させる防振懸架装置を用いる手法である。2つ目は、 地面振動自体が地表と比較しておよそ100分の1小さい環境である地下200mより深い場所 に干渉計を建設する手法である。

3.3.4 散乱光雑音

レーザー光学素子および内部からの散乱光が真空槽に当たり、真空槽の振動で変調を受け、 レーザー光軸に再結合することによる雑音を、散乱光雑音と呼ぶ。散乱光雑音の大きさは、散 乱光の大きさの平方根と、散乱光に変調をかける真空槽の振動の大きさに比例する。散乱光雑 音を低減するために、KAGRA の3 km の腕の部分や、近傍には、散乱光を吸収する黒色処理 されたバッフルが用いられている。

3.3.5 KAGRA の観測帯域

KAGRA の感度曲線を図 3.4 に示す。この図は、KAGRA がどの周波数でどれだけの雑音レベルになるように設計されているかを示すグラフであり、主要な雑音のレベル(量子雑音、サスペンション熱雑音、鏡とコーティングの熱雑音、地面振動 +Newtonian 雑音)と、KAGRA の 最終的な目標感度を表している。この目標感度曲線で最も感度がいい周波数は、約 100 Hz である。これは、KAGRA が、200Mpc 離れた $1.4M_{\odot}$ の連星中性子星合体から発生した重力波を S/N > 8で捕らえることを目標としているためである [13]。ただし、2015 年に中質量の連星 ブラックホール合体 (以後、BH-BH 合体とする) からの重力波が観測されたのを皮切りに、複数の BH-BH 合体による重力波が観測され、より重い質量の連星ブラックホール合体からの重 力波を観測する可能性が高まっている。それら中-大質量の BH-BH 合体からの重力波は、元々 KAGRA が目標としていた 100 Hz より更に低周波側の、10-100 Hz の帯域で観測することが できる。従って、10-100 Hz の帯域において雑音源を特定し、低減させることが重要となる。



図 3.4: KAGRA の公式感度曲線 [12]。縦軸が歪み (1/√Hz)、横軸が周波数 (Hz) である。また、黒い 点線が最終的な KAGRA の目標感度、赤い実線が量子雑音、黒の実線が標準量子限界 (SQL)、 青い実線が鏡とコーティングの熱雑音、緑の実線がサスペンション熱雑音、茶色の実線が地面振 動雑音と Newtonian 雑音である。

3.3.6 KAGRA で低温システムを導入したことによる新たな雑音

第3.3.2節で述べたように、KAGRAの腕共振器の鏡とその懸架系は熱雑音低減のため冷凍 機を用いて冷却される。しかし、そのために冷凍機の構造的末端と腕共振器の鏡の懸架系の間 にはヒートリンクという熱伝導の高い金属ワイヤーでつながれている。そのヒートリンクを通 して、冷凍機の稼働による振動が鏡を揺らしてしまい、雑音となる。また、そのヒートリンク と接続する冷却棒が、懸架系を格納する8K輻射シールドにサポートされており、そのサポー ト部分からも振動が流入する。これらの振動レベルはKAGRAサイトの地面振動と同じレベ ルを目指して設計されている[13]。

また、前節で述べた 10-100 Hz の帯域において、これらの振動による雑音が懸念されている [7]。本研究では、懸架系を格納する輻射シールドの振動を計測することにより、目標感度への 影響を調べる基礎データを取得し、設計値である KAGRA サイトの地面振動レベルとの比較を 行った。また、その振動の原因究明も行った。

4 KAGRA のクライオスタットと冷凍機

本章では、KAGRA の低温懸架系用真空容器であるクライオスタットおよび冷凍機について説 明する。

4.1 全体像

第3章で述べたように、KAGRA では地面振動を低減するために、3 km の腕 Fabry-Perot 共振器のメインミラーを、Type-A サスペンション (図 4.1) と呼ばれる 8 段振り子構造の防振 懸架装置で懸架している。また、メインミラーの熱雑音低減のために、Type-A サスペンショ ンの下部 3 段を極低温まで冷凍機を用いて冷却する。この部分を低温懸架系と呼ぶ。

図 4.4 は、腕 Fabry-Perot 共振器のメインミラーとそれを懸架する Type-A サスペンション を格納する真空容器全体を表した図である。Type-A サスペンションは、KAGRA トンネル二 層部の岩盤の上に固定された真空タンクに、その上部防振装置が固定され、その二層部から、 一層部天井に貫通する縦穴を通過する縦コルゲート管の中に、下部多段振り子防振装置が懸架 されている。さらに、この縦コルゲート管は、一層に固定されたクライオスタット真空タンク とその上部で接続されており、低温懸架系は、Type-A サスペンションの末端部分に懸架され、 クライオスタット真空槽内に格納されている。

KAGRA における 3 km の腕 Fabry-Perot 共振器のメインミラーは、中央実験室と呼ばれ る広い地下空間に 2 箇所、そこから 3 km 離れた 2 箇所の計 4 箇所にインストールされる (図 4.3)。各々のクライオスタットの設置箇所は、IXC、EXC、IYC、EYC と名付けられ、IXC と IYC が中央実験室に、EXC が X エンド、EYC が Y エンドと呼ばれる中央実験室から 3 km 離れた実験室にある。中央実験室は IXC クライオスタットや IYC クライオスタット以外にも、 多くの KAGRA の光学系を構成する鏡を格納する真空タンクや空調設備がある。各々の真空 タンクはダクトで接続されており、中央実験室と X エンド、Y エンドの間も 3 km のダクトが 設置されている。



図 4.1: 図 4.3 の真空容器にインストールされる Type-A サスペンション全体図. Type-A サスペン ションは防振比を稼ぐために多段振り子となっている. 一番上に倒立振り子と Geometric Anti-Spring(GAS) フィルター、その下に常温の GAS フィルター が 4 段懸架され、さらに下に低 温懸架系が懸架される。



図 4.2: 図 4.3 の位置にインストールされた高さ 14 m の Type-A サスペンション用真空容器の全体図。 Type-A サスペンションは、KAGRA トンネル二層部の岩盤の上に固定された真空タンクに、その上部防振装置が固定され、その二層部から、一層部天井にに貫通する縦穴を通過する縦コルゲート管の中に、下部多段振り子防振装置が懸架されている。さらに、この縦コルゲート管は、一層に固定されたクライオスタット真空タンクとその上部で接続されており、低温懸架系は、Type-A サスペンションの末端から懸架され、クライオスタット真空槽内に格納されている。



図 4.3: KAGRA における Type-A サスペンションとクライオスタットのインストール位置 (黄色い丸の場所)を示した図。2つの腕に2箇所ずつ、合計4箇所にインストールされた。各々のクライオスタットの設置箇所は、IXC、EXC、IYC、EYC と名付けられ、IXC と IYC が中央実験室(水色で囲まれた部分)に、EXC と EYC が中央実験室から3 km 離れた2箇所にある。中央実験室は IXC クライオスタットや IYC クライオスタット以外にも、多くの KAGRA の光学系を構成する鏡を格納する真空タンクや空調設備がある。

4.2 KAGRA クライオスタットの概要

KAGRA のクライオスタットの全体像について説明する。クライオスタットの外観図を図 4.4、サイトでのクライオスタットの写真を図 4.5 に示す。真空チャンバーの中に2重の輻射 シールド、その中に低温懸架系が設置される。 真空チャンバーの両側に2つのクライオダク トが接続されており、このクライオダクトは、KAGRA の腕の部分のダクトのうち、クライオ スタットに接続される前後5mの部分を指す。また、真空チャンバーに4つの冷凍機が、両側 のクライオダクトに1つずつ冷凍機が接続されている。この冷凍機は、液体寒剤による冷却シ ステムではなく、機械式の超低振動パルス管冷凍機である。これら真空チャンバー、輻射シー ルド、真空チャンバーに接続する4つの冷凍機を合わせてクライオスタットと呼ぶ。真空チャ ンバーの上部は、縦コルゲート管の最下部にあるクロス管と接続している。このクロス管は、 縦コルゲート管のうち常温防振装置の最下段部にアクセスするための部分である。また、真空 チャンバーとクライオダクト、冷凍機、クロス管の間は、ロッドでサポートされたベローズで 接続されている。



図 4.4: KAGRA のクライオスタットの外観図。真空チャンバーの中に冷却用の2重の輻射シールド、その中に低温懸架系が設置される.真空チャンバーの上部には常温防振装置用の小さな真空容器であるクロス管、両側には2つのクライオダクトと4つの冷凍機が設置される。更に、常温からの鏡への熱輻射を抑えるために、光軸方向にクライオダクトが接続される。これらの真空容器系全体をクライオシステムと呼ぶ.



図 4.5: KAGRA サイトでのクライオスタットの写真。正面に真空チャンバー、真空チャンバーの両サイ ドにクライオダクトが接続されている。

4.3 輻射シールドの構造

図 4.6(a) に、真空チャンバー内の輻射シールドと周辺の構造物との接続を表した立体断面図、 図 4.6(b) にその模式図を示す。輻射シールドは、低温懸架系が常温からの輻射を直接当てられ ないようにするために低温懸架系全体を覆うように設置される熱シールドである。また、また、 輻射シールドは、冷却のためにより薄く柔らかくするという要請と、強度と防振のためにより 堅牢にするという相反する 2 つの要請を程よく同時に満たせるように設計されている。 輻射 シールドは 2 重構造となっており,大気側から見て外側を 80K 輻射シールド,内側を 8K 輻射 シールドと呼ぶ。また、2 重構造となっている輻射シールドの下部からシールド架台が支えて いる。(以後、単に輻射シールドと呼ぶ時は、真空チャンバー内の 8K 輻射シールド、80K 輻射 シールドおよびシールド架台を全て合わせたものを指すことにする)。

80K 輻射シールドの高さは約 1.8m、縦幅は約 1.2 m、横幅は約 1.8 m、厚みは約 10 mm、材 質は A1070 である。また、8K 輻射シールドの高さは約 1.7 m、縦幅はシールド架台の高さは 約 70 cm、材質は SUS304 である。また、輻射シールド全体での重さは、約 1400 kg である。

80K 輻射シールド底面ととシールド架台の間は、2 箇所で Vespel[®] SP-1 製のサポートポストにより鉛直方向に支持されている。同様に、80K 輻射シールド底面と 8K 輻射シールド底面 52 箇所で Vespel[®] SP-1 製のサポートポストにより鉛直方向に支持されている。80K 輻射 シールドおよび 8K 輻射シールドは、上部に 4 本、下部に 4 本接続されるシールドサポートで 真空チャンバーと支持されている。このシールドサポートは、Vespel[®] SP-1 という熱伝導の

悪い材質で作られている。また、8K 輻射シールドと真空チャンバー間のシールドサポートは、 80K 輻射シールドを貫通している。シールドサポートの真空チャンバーとの軸受部分にはバネ が入っており、冷却による輻射シールドの収縮の変化に対応できるようになっている。垂直方 向のサポートポストと水平方向のシールドサポートだけで輻射シールドが支持されている理由 は、熱伝導を極力低減したいからであり、そのせいで、弱い支持機構になっており、多くの低 い周波数の共振が発生しうる。

また、80K 輻射シールドおよび 8K 輻射シールドの外側は、スーパーインシュレーションと 呼ばれる、薄いアルミニウム箔と断熱材を何重にも交互に重ねた、外部からの輻射熱を断熱す る素材で覆われている。

輻射シールドと冷凍機との接続については、第4.5節で詳しく述べるが、ここでも簡単に紹 介する。輻射シールドに接続する冷凍機は4台ある。まず、80K輻射シールドに4つの冷凍機 (輻射シールド用冷凍機2台および低温懸架系用冷凍機2台)が接続される。そのうち輻射シー ルド用冷凍機2台が8K輻射シールドに、低温懸架系用冷凍機2台が低温懸架系にも接続され る。低温懸架系用冷凍機と低温懸架系の間の冷却パスは、冷却棒およびヒートリンクと呼ばれ る熱伝導の良い素材でできたより線となっている。また、冷却棒は8K輻射シールドとも接続 されている。これら冷却棒およびヒートリンクといった冷却パスから混入する振動が、本研究 で問題となっている点である。



2.5 m

(a) 輻射シールドの立体断面図



(b) 輻射シールドの模式図

図 4.6: (a) が、真空チャンバー内の輻射シールドと周辺の構造物との接続を表した立体断面図、(b) がそ の模式図である。輻射シールドは2重構造となっており、大気側から見て外側を80K輻射シール ド、内側を 8K 輻射シールドと呼ぶ。また、2 重構造となっている輻射シールドの下部からシー ルド架台が支えている。80K 輻射シールドの高さは約 1.8m、縦幅は約 1.2 m、横幅は約 1.8 m、 厚みは約 10 mm、材質は A1070 である。また、8K 輻射シールドの高さは約 1.7 m、シールド 架台の高さは約 70 cm、材質は SUS304 である。輻射シールド全体での重さは、約 1400 kg で ある。80K 輻射シールド底面ととシールド架台の間、および 80K 輻射シールド底面と 8K 輻射 シールド底面の間は、それぞれ2箇所でVespel[®] SP-1 製のサポートポストにより鉛直方向に支 持されている。80K 輻射シールドおよび 8K 輻射シールドは、上部に4本、下部に4本接続され るシールドサポート (Vespel[®] SP-1 製) で真空チャンバーと支持されている。 23

4.4 真空チャンバー

真空チャンバーの外観を図 4.7 に示す。真空チャンバーは、輻射シールドと低温懸架系を格納するための真空容器である。真空チャンバーの質量は約 10700 kg 、材質はステンレスの SUS304、厚みは約 20 mm、高さは約 3.8 m、外径は約 2.5 m である。また、真空チャンバー は、水平方向で 2 箇所に 2.2 m ϕ の鏡板が、上部に 2.4 m ϕ の鏡板が取り付けられた構造となっ ている。



図 4.7: 真空チャンバー単体での CAD 図。真空チャンバーは、水平方向で 2 箇所に 2.2 mφ の鏡板が、 上部に 2.4 mφ の鏡板が取り付けられた構造となっている。

4.5 冷凍機

クライオスタットに接続される冷凍機は6つあり、2つは真空チャンバーの前後に設置され るダクト用冷凍機、2つは輻射シールド用冷凍機、2つは低温懸架系用冷凍機である。ダクト用 冷凍機はパルス管の1段ステージ型パルス管冷凍機であり、単体では45Kまで冷却できる。 一方、輻射シールド用および低温懸架系用冷凍機は2段ステージのパルス管冷凍機であり、単 体では、1段目は45K、2段目は4Kまで冷却できる。本節では、輻射シールド用および低温 懸架系用冷凍機であるパルス管冷凍機の構造と輻射シールドとの接続の仕方、および冷凍機振 動の伝搬経路について説明する。4.5.2節で説明する冷凍機は2段ステージ型パルス管冷凍機で あり、輻射シールド用および低温懸架系用に使用するタイプである。

4.5.1 各冷凍機の配置と接続

冷凍機の接続の仕方は、輻射シールド用冷凍機と低温懸架系用冷凍機、ダクト用冷凍機で異 なる。図 4.8 に3種類の冷凍機から伸びる伝熱バー、伝熱管と輻射シールドの接続のモデル を示す。低温懸架系用冷凍機および輻射シールド用冷凍機から伸びる 80K 伝熱管は全て 80K シールドと接続している。また、低温懸架系用冷凍機から伸びる 8K 伝熱バーは次節で説明す る冷却棒とヒートリンクを介し低温懸架系に、輻射シールド用冷凍機から伸びる伝熱バーは 8K 輻射シールドに接続される。低温懸架系用冷凍機と輻射シールド用冷凍機冷凍機で接続の仕方 が異なる理由は、全て 8K 輻射シールドと接続すると、散乱光による熱負荷によって、8K 輻 射シールドの温度が上昇し、それにより低温懸架系が散乱光の熱により温度が上昇するためで ある。



図 4.8: クライオスタットと接続する冷凍機の配置と接続を表した図。薄い青色の部分が 8K 冷却パス、 濃い青色の部分が 80K 冷却パス、緑色の部分が 50 K 冷却パスである。輻射シールド用冷凍機 2 台と低温懸架系用冷凍機 2 台は全て 80 K 輻射シールドと接続し、低温懸架系用冷凍機から伸び る伝熱バーは次節で説明する冷却棒とヒートリンクを介し低温懸架系に、輻射シールド用冷凍機 から伸びる伝熱バーは 8K 輻射シールドに接続される。ダクト用冷凍機は伝熱バーを介しクライ オダクトと接続する。

4.5.2 **冷凍機の内部構造**

KAGRA で使用するパルスチューブ型冷凍機ユニットの構造を図 4.9 に示す [14] [15]。冷凍 機の稼働による振動発生源はコールドヘッドおよびパルス管部である。コールドヘッドの振動 は、機械的部品の運動に伴う慣性力を起源として引き起こされる振動である。また、パルス管 の振動は、作動ガスの圧力脈動に応じた管状部分の弾性伸縮に起因し、構造物の幾何学形状が 変化することで生じる振動である [5]。

コールドヘッドは、振動を減衰させるために堅牢なコールドヘッドマウントで地面と接続さ れている。また、コールドヘッドの振動を直接冷凍機チャンバーに伝搬させないために、コー ルドヘッドと冷凍機チャンバーの間にベローズが設置されている。パルス管冷凍機はステー ジが2段あり、1段目が単体であれば45K、2段目が4Kまで冷却できる。それぞれの段 で、99.99999% (7N)の高純度の銅のヨリ線でできた柔らかいヒートリンクで VR ステージ (Vibration Reduction stage)と接続される。1stVR ステージは断熱材 (CFRP か GFRP)で できた支持ロッドで冷凍機チャンバーに支持され、2ndVR ステージと1stVR ステージも同じ 素材のもので支持ロッドで支持される。

2ndVR ステージは 8 K 輻射シールドや低温懸架系に接続される伝熱バーと接続し、1stVR ステージは伝熱バーを覆う 80 K 伝熱管に接続される。80 K 伝熱管および伝熱バーは 80K 輻射 シールド、8K 輻射シールドもしくは低温懸架系との接続の途中で 5N8 の積層板でできたフレ キシブル熱リンクを介す。また、伝熱バーと 80K 伝熱管は 2 箇所で 4 方向から断熱材 (CFRP) でサポートされている。サポート部分の断面図を図 4.10 に示す。また、2nd コールドステー ジ、伝熱バー、2ndVR ステージ、2nd コールドステージと 2ndVR ステージ間のヒートリンク を合わせて 8K 冷却パスと名付ける。同様に、1st コールドステージ、80K 伝熱管、1stVR ス テージ、1st コールドステージと 1stVR ステージ間のヒートリンクを合わせて 80K 冷却パスと 名付ける。

次に、冷凍機の振動伝播経路について説明する。コールドヘッドで発生した振動は、ベロー ズを介して冷凍機チャンバーと VR ステージに伝搬する。パルス管の振動を減衰する為の柔ら かいヒートリンクを介して 1st VR ステージおよび 2ndVR ステージへ伝搬する。VR ステー ジの振動は支持ロッドを介して冷凍機チャンバーへほぼそのまま伝搬する。1stVR ステージの 振動の低温懸架系への振動伝搬経路は、80K 伝熱管 (フレキシブル熱リンクを含む) →サポート → 8K 伝熱管→冷却棒→ヒートリンク→低温懸架系、である。また 2ndVR ステージの振動の 低音懸架系への振動伝播経路は、伝熱バー、フレキシブル熱リンクを介して 8 K 輻射シールド または低温懸架系へ伝搬する。



(a) 立体断面図



(b) モデル図



図 4.10: 80 K 伝熱管と伝熱バーのサポート部分の断面図。伝熱バー(薄い水色)は CFRP 製のサポート (茶色) により 4 方向で 80 K 伝熱管 (濃い青色) とサポートされている。

4.6 クライオダクトとクライオダクト用冷凍機の構造

4.6.1 クライオダクトの構造

クライオダクトの全体像を図 4.11 に示す。クライオダクトは円筒形の二層構造となってお り、外側が真空外槽 (SUS304 製)、内側がダクトシールド (SUS304 製) である。ダクトシール ドは厚みが 15 mm、重さが 300 Kg、長さが 5 m、外径が 0.5 m である。真空外槽は厚みが 15 mm、重さが 2 t、長さが 5 m、外径が 1 m である。

真空外槽はクライオスタットの真空チャンバーと接続しており、その接続部分はロッドでサ ポートされたベローズとなっている。また、真空外槽の中央部も、同様にロッドでサポートさ れたベローズが接続された構造となっている。

ダクトシールドはクライオスタットとは直接には接続されておらず、3箇所で真空外槽とサ ポートされているのみである。この真空外槽とダクトシールドのサポート部分については、第 4.6.2節で説明する。

また、真空外槽およびダクトシールドは、真空チャンバーから 4.3 m の部分でクライオダク ト用冷凍機と接続しており、この冷凍機によって、常温からの腕共振器の鏡への輻射熱を抑え るために、ダクトシールドが 50 K 程度まで冷却される。真空外槽およびダクトシールドとク ライオダクト用冷凍機の接続の仕方、およびクライオダクト用冷凍機本体の構造については、 第4.6.3 節で説明する。



図 4.11: クライオダクトの全体図。クライオダクトは外側の真空外槽 (SUS304 製) と内側のダクトシー ルド (SUS304 製) に分かれる。真空外槽はクライオスタットの真空チャンバーと接続してお り、その接続部分はロッドでサポートされたベローズとなっている。また、真空外槽の中央部 も、同様にロッドでサポートされたベローズが接続された構造となっている。ダクトシールド はクライオスタットとは直接には接続されておらず、3 箇所で真空外槽とサポートされているの みである。真空外槽およびダクトシールドは、真空チャンバーから 4.3 m の部分でクライオダ クト用冷凍機と接続している。

4.6.2 ダクトシールドのサポート

ダクトシールドのサポート部分の断面の構造を図 4.12 に示す。ダクトシールドは、水平 方向は熱伝導性の悪い素材である PEEK(ポリエーテルエーテルケトン樹脂) 製のサポート用 PEEK バーで 2 方向にサポートされている。サポート用 PEEKK バーの真空外槽側は、真空 外槽のポートに接続されている。また、垂直方向は、ダクトシールドの下部で、両端に PEEK 製のフランジが付いた SUS304 製のサポートポストでサポートされている。サポートポストの 下部は、クライオダクトを支えるための架台が設置されている。



図 4.12: ダクトシールドのサポート部分の断面図。ダクトシールド (緑色) は、水平方向は PEEK 製の サポート用 PEEK バー (茶色) で 2 方向にサポートされている。また、垂直方向は、ダクトシー ルドの下部で、両端に PEEK 製のフランジが付いた SUS304 製のサポートポストでサポート されている。サポートポストの下部は、クライオダクトを支えるための架台が設置されている。

4.6.3 クライオダクト用冷凍機との接続

クライオダクト用冷凍機およびクライオダクト冷凍機とクライオダクトとの接続部分の構造 を図 4.13 に示す。クライオダクト用冷凍機は、図 4.9 で示した、輻射シールド用冷凍機および 低温懸架系用冷凍機である2段ステージ型パルス管冷凍機と違い、1 段ステージ型パルス管冷 凍機である。パルス管の末端に接続される 1st コールドステージから伝熱バーにヒートリンク が接続され、伝熱バーは 1stVR ステージに固定されている。それ以外の構造は基本的に図 4.9 で示した冷凍機と同じ構造である。

クライオダクト用冷凍機の伝熱バーは、末端部でフレキシブル熱リンクに接続され、フレキ シブル熱リンクが直接ダクトシールドに接続される。また、冷凍機チャンバーとクライオダク トの真空外槽の間はロッドでサポートされたベローズとなっている。

また、1st コールドステージ、ヒートリンク、伝熱バー、1stVR ステージ、フレキシブル熱 リンク、ダクトシールドの部分を、ダクトシールドが 50 K 程度まで冷却されることから、50K 冷却パスと名付ける。

最後に、クライオダクト用冷凍機の稼働による振動が、クライオスタットの 8K 輻射シール

ドや 80K 輻射シールドに伝搬する経路を考える。まず、クライオダクト用冷凍機から真空外槽 への振動伝搬経路は、

- コールドヘッド→ベローズ→冷凍機チャンバー→ベローズ→真空外槽
- ・パルス管→1st コールドステージ→ヒートリンク→伝熱バー→フレキシブル熱リンク→
 ダクトシールド→サポート用 PEEK バーかサポートポスト→真空外槽

という2つの経路が考えられる。また、真空外槽から8K輻射シールドへの振動伝搬経路は、 真空外槽→クライオスタットの真空チャンバー→シールドサポート→8K/80K輻射シールド となる。



図 4.13: クライオダクト用冷凍機とクライオダクトとの接続部分、およびクライオダクト用冷凍機の内 部構造を示した図。緑色の部分は、ダクトシールドが 50 K 程度まで冷却されることから、50K 冷却パスと名付ける。クライオダクト用冷凍機は1 段ステージ型パルス管冷凍機であり、1st コールドステージから伝熱バーにヒートリンクが接続され、伝熱バーは1stVR ステージに固定 されている。

4.7 東芝でのクライオスタットの振動測定結果

本節では、本研究での輻射シールドの振動測定結果と比較するため、KAGRA のサイトへの 納入前に、Chen らによって 2013 年に横浜にある東芝京浜事業所で行われたクライオスタット の振動測定結果について述べる [7]。また、東芝では打撃試験も行われたが、その詳細について は第5章で述べる。

4.7.1 測定の概要

これまで、クライオスタットの輻射シールドの振動は Chen ら [7] によって KAGRA にイ ンストール前の状態で測定されたことはあるが、当時はバックグラウンドとなる地面振動が KAGRA のサイトのおよそ 100 倍大きかったため、冷凍機振動を高いバックグラウンド雑音の 環境下でしか測定することができなかった。

クライオスタットの振動を測定した場所を図 4.14 に示す. 加速度計を真空チャンバー底面お よび 8K シールド底面に設置し、後者に関しては極低温環境下での振動測定を行った. 振動測 定に用いた低温加速度計は、D. Chen らが開発し我々も使用した差動マイケルソン干渉計型加 速度計(測定方向:水平光軸方向)である。マイケルソン干渉計型加速度計については第8章 にて詳しく述べる. 輻射シールド内の2軸の測定方向に合わせて、真空チェンバー外の RION LA-50 加速度計も同じ方向で同時測定を行った。なお、この振動試験では、現在は設置されて いるクライオダクトおよびクロス管は設置されておらず、真空チャンバーは地面に固定されて いない。(図 6.14)



真空チャンバー外底面:RION LA-50 加速度計

図 4.14: 横浜にある東芝の京浜事業所 [11] で行われた KAGRA クライオスタットの振動測定における 測定点と測定に用いた加速度計. 真空チャンバー (写真左)の外側底面に市販の加速度計:RION LA-50(写真右下)、真空チャンバー内にある 8K 輻射シールド底面に低温加速度計 (写真右上) を設置し、振動測定を行った.

4.7.2 振動測定結果

8K 輻射シールドの振動の全冷凍機 (輻射シールド用 2 台 + 低温懸架系 2 台)ON 時 (赤の点 線) と全冷凍機 OFF 時 (青の実線)、およびクライオスタット外の地面振動 (黒) の測定結果を 図 4.15 に示す。 このとき、輻射シールドは、真空引きされており、なおかつ極低温 (10 K) ま で冷却されている状態で、光軸方向の振動を測定した。

まず、冷凍機 OFF 時の 8K 輻射シールドの振動と地面振動を比較すると、8K 輻射シールド 底面では、10 Hz から 80 Hz の周波数ではクライオスタットの構造の影響による励起が観測さ れた。特に、20 Hz 付近と、30-50 Hz では大きな山が観測された。1-10 Hz と 80-100 Hz では 両者は殆ど同じレベルであった。

また、8K 輻射シールド底面の振動の、冷凍機 ON 時と冷凍機 OFF 時の結果を比較すると、 20-50 Hz の周波数で何本かの冷凍機稼働によるラインスペクトルが見られた。それ以外は両者 は殆ど変化が見られず、本来あるはずのの冷凍機稼働の基本振動とその倍波が殆ど見られない ため、そのバックグラウンドの振動に隠れていると考えられる。



図 4.15: 東芝京浜事業所における 8K 輻射シールドの振動の全冷凍機 (輻射シールド用2台+低温懸架系2台)ON時 (赤の点線) と全冷凍機 OFF時 (青の実線)、およびクライオスタット外の地面振動(黒)の測定結果。このとき、輻射シールドは、真空引きされており、なおかつ極低温(10 K)まで冷却されている状態で、光軸方向の振動を測定した。10 Hz 以上の周波数ではクライオスタットの構造の影響による励起が観測された。

4.8 KAGRA サイトでの振動測定の意義について

4.7 節で述べたように、これまでにクライオスタットの8K輻射シールドに加速度計を設置 し、真空引きし10Kまで冷却した状態での振動測定は行われている。ただし、この測定が行 われた時は、KAGRA サイトで実稼働するクライオスタットと比較して、

- 地面振動レベルが 100 倍程度大きく、冷凍機の振動が埋もれている可能性がある
- 真空チャンバーや冷凍機ユニットが地面に固定されておらず、またダクトや縦コルゲー ト管も設置されていないため、サイトと共振周波数が大きく変化する可能性がある
- クライオダクト用冷凍機による振動の評価が全くされていない

という問題がある。そのため、KAGRA サイトで東芝での試験と同じように 8K 輻射シールド 底面に加速度計を設置し、振動を再測定した。また、8K 輻射シールド底面の振動スペクトルに 現れた構造の原因を究明するため、クライオスタットへの打撃試験を行い、クライオスタット の各部分の共振周波数を求めた。

5 打撃試験によるクライオスタットの共振周波数測定

本試験の目的は、クライオスタットの周波数応答関数を求め、共振周波数を求めることにより、 振動特性を求めることである。 更に、クライオスタットの振動測定で求められた振動スペクト ルで現れたピークと紐付けることを第6章で述べる。

5.1 **打撃試験の概要**

打撃試験は、対象物に対しインパルスハンマと呼ばれるハンマで加振し、対象物に取り付け られた加速度計で応答を測定して、その入力と出力から周波数応答関数を求め、構造物の振動 特性を求める加振試験である [16]。本節では、まず周波数応答関数の求め方を説明し、次に打 撃試験の方法と用いた測定機器、打撃試験における加振点と応答点の場所、最後に打撃試験時 のクライオスタットの状況について述べる。

5.1.1 周波数応答関数と共振周波数

周波数応答関数は、構造物の振動伝達系の入力と出力の関係を表すものである。角周波数を ω として、入力のフーリエスペクトルを $A(\omega)$ 、出力のフーリエスペクトルを $B(\omega)$ とする。本 打撃試験においては、入力はハンマーで構造物を加振した時の力、出力は加速度計で応答を見 た時の変位をさす。周波数応答関数 $H(\omega)$ は、

$$H(\omega) = \frac{B(\omega)}{A(\omega)},\tag{5.1}$$

と書ける。また、式の左辺の分母と分子にに入力 $A(\omega)$ の複素共役の $A(\omega)^*$ をかけると、

$$H(\omega) = \frac{B(\omega)A(\omega)^*}{A(\omega)A(\omega)^*} = \frac{C(\omega)}{P(\omega)},$$
(5.2)

と書ける。ただし、 $C(\omega)$ は入力と出力のクロススペクトル、 $P(\omega)$ は入力のパワースペクトル である。

本打撃試験において、周波数応答関数は、ハンマーで構造物を加振した力のパワースペクトルと、加振した力と加速度計で応答を見た変位のクロススペクトルから、式 5.2 を用いて求めた。

ここで、打撃試験で得られた周波数応答関数に現れたピークの周波数が、対象の構造物の共 振周波数である可能性が示される。

一方、共振周波数付近では、構造物が地面振動などの外部からの振動に対して振動の振幅が 大きくなりうる。従って、打撃試験でクライオスタットの共振周波数を求めることにより、振 動測定で得られた振動スペクトルのピークについて、構造物の共振との対応関係を調べること ができる。更に、クライオスタットの各部分の共振周波数を求めておけば、振動スペクトルの
ピークが、クライオスタットのどの部分の共振が原因なのかも分かり、将来的に振動を抑える 対策をする際の指針にもなる。

5.1.2 打撃試験に用いた測定機器と測定方法

図 5.1 に、打撃試験に用いた測定機器一覧を示す。 また、打撃試験のセットアップ図を図 5.2 に示す。本打撃試験では、対象物に加速度計を取り付け、インパルスハンマで対象物を加振し、 FFT アナライザと PC でインパルスハンマからの加振した力の信号と加速度計で応答を測定 した変位信号から周波数応答関数を求めた。また、加速度計は、本来は、接着剤やネジなどで しっかりと固定すべきだが、そのようなことができない場所が多いため、加速度計の接着によ る構造物の影響を受けないようにするために、加速度計上に重りをのせ、ケーブルが加速度計 を引っ張らないように構造物に設置した。

インパルスハンマー	Dytran 5802A
加速度計	特許機器 MG-102S
測定用FFTアナライザ	小野測器 DS-2000

図 5.1: 打撃試験に用いた測定機器一覧



図 5.2: 打撃試験におけるセットアップ図。 対象物に加速度計を取り付け, インパルスハンマで対象物を 加振し, FFT アナライザで入力スペクトルと応答スペクトルを測定する。 FFT アナライザで測 定されたスペクトルは, 計測用の PC で周波数応答関数に変換される。

5.1.3 加振点と応答点

加振した場所と応答を測定した場所の組み合わせを図 5.3 に示す。各々の測定について、真 空チャンバーは6点、クロス管は2点、クライオダクトは1点、輻射シールドは3点加振した。 また、応答点は、真空チャンバーは1点、輻射シールドは1点である。応答点については、1 点の加速度計設置場所について、3軸方向(光軸垂直方向,光軸方向,鉛直方向)を測定した。以 下、簡単のため光軸垂直方向をx軸、光軸方向をy軸、鉛直方向をz軸とする。それぞれの 加振場所と加振方向を、図 5.4 に示す。また、応答点についても、図 5.5 に示す。図 5.4 および 図 5.5 には、3 軸方向の名前の定義も同時に示した。

加振点については、それぞれ、真空チャンバーの加振点の名前を cham-1、cham-2、cham-3、cham-4、 cham-5、cham-6、クロス管の加振点の名前を cross-1、cross-2、クライオダクトの加振点の名前を輻射シールドの加振点の名前を rad-1、rad-2、rad-3 と付けた。それぞれ、cham-1 および cham-2 が真空チャンバー最上部、cham-3 および cham-4 が真空チャンバーの上部、cham-5 および cham-6 が真空チャンバーの中央付近の場所である。クライオダクトの加振点である duct-1 は、真空チャンバーから 1.5 m 程度離れたクライオダクトの真空外槽に

ある。輻射シールドの加振点 rad-1、rad-2、rad-3 については、シールド架台部分の上部のフ レーム部分にある。

ただし、真空チャンバーの加振点である cham-5 については、真空チャンバーで応答を測定 した時に存在した真空チャンバーの 800 ミリフランジが、輻射シールドで応答を測定した時は 無かったため、真空チャンバーで応答を測定した時と輻射シールドで応答を測定した時で少し ずれた場所を加振した。それぞれ、真空チャンバーで応答を測定した時の加振点を cham-5-A、 輻射シールドで応答を測定した時の加振点を cham-5-B と名付け、cham-5-A および cham-5-B をひとまとめにして cham-5 とした。

加振方向は、真空チャンバーの cham-1、cham-3、cham-5、クロス管の cross-1、クライオダ クトの duct-1、輻射シールドの rad-1、rad-3 が x 軸方向、真空チャンバーの cham-2、cham-4、 cham-6、クロス管の cross-2、輻射シールドの rad-2 が y 軸方向である。ここで輻射シールド とは真空チャンバー内の 8 K 輻射シールドと 80 K 輻射シールド、およびシールド架台全てを 指す。

また、真空チャンバーの応答点の名前を cham-res(真空チャンバー上部)、輻射シールドの応 答点の名前を rad-res(8K 輻射シールド底面中央) と付けた。加速度計を設置した場所のうち、 8 K 輻射シールド底面は、第6章で説明するが、8 K 輻射シールドの振動測定を行った場所 (低温加速度計の設置場所) と同じ場所である。この場所で応答を測定した理由は、本章で測定 した共振周波数を、8 K 輻射シールド底面での振動測定結果と比較するためである。また、輻 射シールドでシールド架台以外に加振しなかった理由は、8 K 輻射シールドおよび 80 K 輻射 シールドは外側がスーパーインシュレーションで覆われおり、ハンマーで叩くと破損する可能 性があるためである。

		応答点(加速度計の場所)		
		真空チャンバー(cham-res)	輻射シールド(rad-res)	
	真空チャンバー(cham-1, cham-2, cham-3, cham-4, cham-5, cham-6)	O(cham-5(⊄A)	O(cham-5(⊄B)	
	クロス管(cross-1, cross-2)	0	0	
	クライオダクト(duct-1)	0	0	
加振点(叩いた場所)	輻射シールド(rad-1, rad-2, rad-3)	0	Х	

図 5.3: クライオスタットの打撃試験の、加振点 (ハンマーで叩いた場所) と応答点 (加速度計を設置した 場所) の組み合わせ表。それぞれ、真空チャンバーの加振点の名前を cham-1、cham-2、cham-3 、cham-4、 cham-5、cham-6、クロス管の加振点の名前を cross-1、cross-2、クライオダクトの 加振点の名前を輻射シールドの加振点の名前を rad-1、rad-2、rad-3 と付けた。また、真空チャ ンバーの応答点の名前を cham-res、輻射シールドの応答点の名前を rad-res と付けた。丸が付 いている組み合わせが打撃試験を行った組み合わせ、バツが付いている組み合わせが打撃試験を 行っていない組み合わせである。



(a) 真空チャンバーの加振点



(b) 輻射シールドの加振点

図 5.4: クライオスタットの打撃試験における、ハンマーで加振した場所の図。(a) が真空チャンバー・ クロス管・クライオダクトの加振点、(b) が輻射シールドの加振点の場所を表し、赤い矢印の根 元が加振点、矢印の方向が加振方向、赤矢印の近くに書かれた赤文字が加振点の名前である。ま た、加振点の名前は、(a) における cross-1・cross-2 はクロス管、cham-1・cham-2・cham-3・ cham-4・cham-5-Acham-5-B・cham-6 は真空チャンバー、duct-1 はクロス管、(b) における rad-1・rad-2・rad-3 は輻射シールドである。それぞれ、cham-1 および cham-2 が真空チャン バー最上部、cham-3 および cham-4 が真空チャンバーの上部、cham-5-A、cham-5-B および cham-6 が真空チャンバーの中央付近の場所である。クライオダクトの加振点である duct-1 は、 真空チャンバーから 1.5 m 程度離れたクライオダクトの真空外槽にある。輻射シールドの加振点 rad-1、rad-2、rad-3 については、シールド架台部分の上部のフレーム部分にある。また、(a) お よび (b) には、3 軸方向の名前 (x 軸:光軸垂直方向、y 軸:光軸方向、z 軸:鉛直方向) も示した。



図 5.5: クライオスタットの打撃試験における、真空チャンバーと8 K 輻射シールドでの応答点 (加速度 計の設置場所)を示した4分の1 断面図。cham-res が真空チャンバーの応答点 (真空チャンバー 上部の四角の場所)、rad-res が8 K 輻射シールドの応答点 (8K 輻射シールドの底面中央の四角 の場所)である。それぞれの応答点について、図の左下に示す方向である x,y,z 軸の3 軸方向につ いて応答を測定した。

5.1.4 打撃試験時のクライオスタットの状態

打撃試験において真空チャンバーで応答を見た時と輻射シールドで応答を見た時は、クライ オスタットの状態が異なることを説明する。真空チャンバーで応答を見た時は、クライオス タットは真空引きされている状態であったが、輻射シールドで応答を見た時は、クライオス タットは大気解放されている状態であり、図 5.6 に示す真空チャンバーの 800 ミリフランジが 開けられ、なおかつ図 5.7 に示す 80 K 輻射シールドおよび 8 K 輻射シールドの扉が外側に観 音開きにされている状態であった。真空チャンバーの 800 ミリフランジは図 5.6 に示した場所 の反対側にも存在する (計 2 箇所ある)が、片方のみ開放している状態であった。同様に、80 K 輻射シールドの扉および 8 K 輻射シールドの扉は図 5.7 に示した場所の裏側にも存在する (計 2 箇所ある)が、片方のみ開放されている状態であった。



図 5.6: 真空チャンバーの 800 ミリフランジの場所 (赤丸)。輻射シールドで応答を見た時、800 ミリフラ ンジを開放している状態であった。



図 5.7: 80 K 輻射シールドの扉の場所 (赤四角)。輻射シールドで応答を見た時、80 K 輻射シールドの扉 と、その内側にある 8 K 輻射シールドの扉は外側に観音開きにされている状態であった。

5.2 **打撃試験の結果**

5.2.1 周波数応答関数から共振周波数の読み取り例とその方法

周波数応答関数から共振周波数を読み取る方法を、図 5.8 を用いて説明する。図 5.8 では、 加振点が図 5.4 における 8 K 輻射シールドの rad-1 で、応答点も 8 K 輻射シールド底面中央 (図 5.4) の rad-res 時の、測定方向 3 軸 (x,y,z 軸)の周波数応答関数のゲインと、図 5.9 におけ るクライオスタットの輻射シールドの共振周波数とその番号を示した。rad-1-x が x 軸方向、 rad-1-y が y 軸方向、rad-1-z が z 軸方向を表す。周波数応答関数の周波数分解能は 0.5 Hz で ある。例えば、1 番目の共振点は、3 軸とも 12.5 Hz 付近にあるピークを読み取り、共振周波数 とした。ただし rad-1-x はピークが僅かに分裂しており、共振点の可能性もあるが、rad-1 にお ける他の方向 (rad-1-y、rad-1-z) および 8 K 輻射シールドの加振点 (rad-2、rad-3) における点 では全く見られなかったため、独立した共振点として採用しなかった。また、90 Hz 以上の領 域にあるように、僅かにピークはあるが、殆どフロアレベルと変わらないものは共振として採 用しなかった。他にも、1 方向のみピークが存在し、他のピークが現れなかった場合は、同じ応 答点で異なる加振点についての周波数応答関数でも現れていた場合は、共振として採用し、他 の加振点で全く現れなかった場合は、ピークが大きい場合採用し、小さい場合はノイズと見な し採用しなかった。

このような手法で、他の輻射シールドの加振点 (rad-2、rad-3) についても共振周波数を洗い 出し、採用された共振周波数全てをまずは輻射シールドの共振周波数とした。同様のことをク ロス管・真空チャンバー・クライオダクトを加振し、真空チャンバーで応答を測定した場合に ついても行った。ただし、クロス管、真空チャンバー、クライオダクト部分への加振により得 られた共振周波数は、殆どの共振点において区別が難しかったため、一括してクライオスタッ ト真空容器の共振周波数と解釈した。

また、クロス管、真空チャンバー、ダクト部分を加振し、輻射シールドで応答を測定した場 合については、上記の方法で判別し、その結果輻射シールドとクライオスタット真空容器の共 振周波数が合わさったものが共振周波数として現れた。この組み合わせの測定結果については、 他の組み合わせ(輻射シールドを加振し輻射シールドで応答を測定した場合とクロス管、真空 チャンバー、クライオダクトを加振し真空チャンバーで応答を測定した場合)で得られた周波数 応答関数に現れた同じ共振周波数におけるピークの大きさと比較し、輻射シールドとクライオ スタット真空容器のどちらの共振周波数なのか判別するために使用した。例えば輻射シールド を加振し輻射シールドで応答を見た時はピークが小さかったが、真空チャンバーを加振し輻射 シールドで応答を見た時はピークが大きい場合は、その共振周波数はクライオスタットの真空 容器(クロス管・真空チャンバー・クライオダクトを合わせたもの)の共振周波数として採用し た。ただし、実際には以上で説明したような同じ共振周波数におけるピークの大きさはが明ら かに異なる場合は存在しなかった。



図 5.8: KAGRA クライオスタットの打撃試験によって得られた周波数応答関数の例。縦軸は応答関数 (m/N)、横軸は周波数 (Hz) である。加振点は図 (未) における 8 K 輻射シールドの rad-1 で、応 答点も 8 K 輻射シールド (図未における 8 K8 K 輻射シールド底面の応答点) である。測定時は 大気開放中であり、8 K 輻射シールドの扉は開けていた。グラフにおける 3 つの周波数応答関数 は、それぞれ図 (未) における 3 軸を表し、rad-1-1 は 1 軸 (赤)、rad-1-2 は 2 軸 (灰)、rad-1-3 は 3 軸 (黄) を表す。グラフに表した数字は、8 K 輻射シールドにおける共振周波数の番号 (図 5.9) である。

5.2.2 共振周波数測定結果

KAGRA クライオスタットの打撃試験により得られた、100 Hz までの共振周波数を図 5.9 に示す。クライオスタット真空容器と8 K 輻射シールドの共振周波数が周波数分解能である 0.5 Hz 以内で一致した共振点は、第 5.2.1 節で述べたように全て区別が難しかったため、両方 の共振周波数として示した。したがって、一致した共振周波数は8 K 輻射シールドと真空容 器のどちらかの区別がついていない。ただし、質量比を考えると、第 4 章で示したように真空 チャンバーが約 10700 kg、輻射シールが約1400 kgとかなり真空チャンバーの方が重く、輻 射シールドが真空チャンバーによって揺らされていると考えられるので、輻射シールドの共振 周波数でクライオスタット真空容器の共振周波数と 0.5 Hz 以内で一致したものは、クライオス タット真空容器の共振周波数である可能性が高いと考えられる。

クライ	オスタット真空容器	クラィ 輻射シ	イオスタットの ノールド
番号	共振周波数(Hz)	番号	共振周波数(Hz)
1	9		
2	10		
		1	12.5
3	15		
4	16		
		2	17
5	19.5	3	19
		4	20
6	21.5		
Ø	22.5	5	22.5
8	24	6	24.5
9	25		
		7	27.5
0	30	8	29.5
		9	32
		10	33
11	35.5		
		11	37.5
12	39		
		12	40
13	43.5	13	41
		14	45
14	47.5	(5	47.5
		16	49

(a) 0-50 Hz

クライオスタット真空容器		クライオスタットの 輻射シールド		
番号	共振周波数(Hz)	番号	共振周波数(Hz)	
(5	53	1	53.5	
16	55.5			
17	57.5			
18	58.5	18	59	
19	60.5			
		19	63.5	
		20	64.5	
		21	66.5	
20	69.5	2	69.5	
21	71.5			
		23	73.5	
22	77			
23	79.5	29	79	
24	81.5			
		25	83	
25	84			
26	89	- 26	89	
27	92			
28	93.5			
29	94.5			
30	96.5			

(b) 50-100 Hz

図 5.9: KAGRA クライオスタットの打撃試験によるクライオスタット真空容器と輻射シールドの 100Hz までの共振周波数判定結果とその関係。(a) が0から 50 Hz、(b) が 50 から 100 Hz の共 振周波数を表す。オレンジ色の背景の部分がクライオスタット真空容器 (クロス管・真空チャン バー・クライオダクト)の共振周波数測定結果、灰色の背景の部分が8 K 輻射シールドの共振周 波数測定結果である。クライオスタット真空容器と8 K 輻射シールドの共振周波数を周波数順に 並べ、0.5 Hz 以内で一致している共振点については両者の番号に丸をつけた。

5.3 東芝での打撃試験の結果との比較

KAGRA サイトにクライオスタットをインストールする前の 2013 年に、東芝の京浜事業所 [11] にてクライオスタットの打撃試験が行われている。東芝での打撃試験時はクライオスタッ トにクロス管及びダクトが接続されておらず、真空チャンバーおよび冷凍機ユニットは床面に 固定されておらず、実際の KAGRA サイトに設置されたクライオスタットの状況とは大きく異 なる (図 6.14)。



図 5.10: 東芝でのクライオスタットの打撃試験を行った時のクライオスタットの固定状況を表した図。 東芝での打撃試験時は、KAGRA サイトでの打撃試験時と違って冷凍機本体(中央の写真下) および真空チャンバー(中央の写真真ん中)は地面に固定されておらず、クロス管およびダクト が真空チャンバーに接続されていなかった。

KAGRAサイト		東芝		
番号	共振周波数(Hz)	番号	共振周波数(Hz)	
		1	5.5	
1	9			
2	10			
		2	14	
3	15			
4	16	3	16	
5	19.5			
6	21.5	4	21	
0	22.5			
8	24			
9	25			
		5	27	
10	30			
11	35.5			
12	39			
13	43.5			
		6	45	
14	47.5			
ശ	53			
16	55.5			
17	57.5			
08	58.5			
19	60.5			
		7	64	
- 20	69.5			
21	71.5			
22	77			
23	79.5			
24	81.5	8	82	
25	84			
- 26	89			
27	92			
28	93.5			
29	94.5			
30	96.5			

図 5.11: KAGRA クライオスタットの打撃試験によって得られた、真空チャンバーの共振周波数と、東 芝での真空チャンバーの打撃試験によって得られた共振周波数(灰色背景)の比較し、周波数順 に並べた表。それぞれの測定に対し、共振周波数(右)と、低い周波数から付けた番号(左)を 表した。また、KAGRA サイトの共振周波数の番号には、図 5.9 における 8 K 輻射シールドと クライオスタット真空容器で共振周波数が周波数分解能である 0.5 Hz 以内で同じだったものに 丸をつけた。KAGRA サイトと東芝での共振周波数が 0.5 Hz 以内で一致したものには、共振 周波数および番号を太字にした。東芝での測定の 1 番目の共振周波数である 5.5 Hz は、このサ イズの構造物では低すぎる共振周波数であるため、本当は共振点でない可能性が高い。

図 5.11 に、KAGRA での打撃試験によって得られたクライオスタット真空容器の共振周波

数と、東芝での打撃試験で得られた真空チャンバーの共振周波数の比較表を載せた。ほとんど の共振周波数が一致しなかった。得られた共振周波数の個数が大きく異るのは、KAGRAの サイトではクロス管やダクトが接続されてより構造が複雑になったことや、地面振動が小さく なったためより小さい共振でも見えるようになったことがあげられる。また、いくつか共振周 波数が一致したものもあったが、変形モードの形が分からないため、同じ共振なのかは同定で きなかった。

6 8 K 輻射シールドの振動測定と成分分析

本章では、低温懸架系がインストールされる KAGRA クライオスタットの8K 輻射シールド の振動測定と成分分析について述べる。

6.1 振動測定の概要

第3章で述べたように、8K輻射シールドの振動は、冷却棒を揺らし低温懸架系を加振する と同時に、散乱光雑音の増大にもつながる。このため、極低温での振動測定を目的として我々 が開発した、低温加速度計を8K輻射シールド底面に設置し、振動測定を行った。しかし、極 低温での振動測定は、冷却により光軸アライメントが崩れ、低温加速度計が動作しなくなった ため、常温かつ真空の状態で測定した。

8 K 輻射シールドの振動は、振動源である地面振動と冷凍機振動が、クライオスタットの構 造による伝達関数の影響を受けて伝搬してくる。第6.3 節では地面振動測定結果を述べる。ま た、第6.4 節では、冷凍機本体の振動測定結果を述べる。次に、第6.5 節で冷凍機が稼働して いない状態での常温真空での8 K 輻射シールド底面の振動測定結果を述べ、地面振動と比較し て8 K 輻射シールドの振動が大きく励起していることを述べる。更に、第5 節で測定したクラ イオスタットの共振周波数との比較を行う。第6.6 節では冷凍機を稼働させた状態での8 K 輻 射シールド底面での振動測定結果について述べる。また、冷凍機の種類ごとによる振動スペク トルの差異、冷凍機本体の振動スペクトルとの差異についても考察する。第6.7 節では、冷凍 機振動によるクライオスタットの振動伝搬経路を調べるため、クライオスタットの真空チャン バーの振動測定を行った結果について述べる。第6.8 節では低温加速度計を設置した8 K 輻射 シールド底面の振動と、低温懸架系に振動が流入する前の、ヒートリンクを介し低温懸架系へ 振動を伝搬する冷却棒の先端の振動の差異を調べ、8 K 輻射シールドの振動が低温懸架系へ伝 搬する振動のモニターとなり得るかを述べる。

6.1.1 測定箇所

第 6.8 節以外では、図 6.1 に示すように、低温懸架系がインストールされていない状態のク ライオスタットの振動測定を行った。また、図 6.1 には、8 K 輻射シールド底面の低温加速度 計を設置した場所も示した。



図 6.1: 低温懸架系がインストールされていないクライオスタットの8K 輻射シールド底面に低温加速度 計を設置して振動測定を行った場所を示す図。低温加速度計は、8K 輻射シールド底面 (写真中 央下部)に設置した。

6.1.2 測定装置

本研究では、我々が開発した低温加速度計、特許機器社製 MG-102S[17]、 Nanometrics 社製 TC120-SV1(以降 Trillium)[18] の3種類の加速度計を使用した。図 6.2 に振動測定に用いた 加速度計と、測定を行った箇所の対応表を載せた。特に、KAGRAの本稼働状態に一番近い常 温真空状態での8K輻射シールド底面での測定に用いた、低温加速度計については、次節で詳 しく述べる。また、市販の加速度計の仕様をまとめたものを図 6.3 に示す。

加速度計	振動測定をした箇所			
低温加速度計(我々が開発	輻射シールド底面、地面振動			
Trillium compact TC120-SV1	地面振動			
特許機器 MG-102S	冷凍機本体、真空チャンバー、冷却棒の先端、輻射シールド			
図 6.2: 振動測定に用いた加速度計と、振動測定を行った箇所				

	測定原理	感度	周波数範囲	横方向感度
Trillium compact TC120-SV1	静電トランス デューサー	754.3 V/(m/s)	0.0083-108 Hz	0.5 %
特許機器 MG- 102S	サーボ型	0.5102 V/(m/s ²)	0,1-400 Hz	0.1 %

図 6.3: 振動測定に用いた 2 つの市販の加速度計 (Trillium) の仕様。それぞれ、測定原理、感度、測定で きる周波数範囲、横方向感度について示した。

6.2 低温加速度計について

本節では、我々が開発した低温加速度計の測定原理について説明する。低温加速度計の画像 およびモデル図を図 6.4 に示す。片方の腕の鏡が固定鏡、もう片方の腕の鏡が共振周波数が 10 Hz の倒立振子によって防振されている。レーザーは 1550nm 1.5mW のものを使っており、 クライオスタット外から発せられたレーザー光がファイバーを通してクライオスタット内の 8 K 輻射シールドに設置された低温加速度計まで伝搬させている。加速度計に振動が伝搬する と、防振されている鏡とビームスプリッタ (BS) の間の距離と防振されていない鏡と BS の距離 に差が生じ、干渉信号の位相のずれとしてフォトディテクタ (PD) で検出される。2つの PD の信号がクライオスタット外の制御用の回路 (差動アンプ) で差動信号に変換され、サーボと コイルドライバーを経由して倒立振子の鏡の後ろに設置されたコイルマグネットアクチュエー ターにフィードバックされる。

差動アンプの出力における干渉信号の位相のずれ依存性を表すグラフを図 6.5 にプロットした。図 6.5 における差動アンプ出力の最大値 (1 V) と最小値 (-1 V) の中間電圧 (0 V) で制御をかけた。



(a) 低温加速度計の画像



(b) 低温加速度計と制御モデル図

図 6.4: 我々が開発した差動マイケルソン干渉計型の低温加速度計の (a) 画像と、(b) モデル図。15×40 cm の銅製の光学定盤上に、干渉計部品の固定鏡 ((a) 写真上)、鏡を取り付けた振子およびフィー ドバック用のコイル ((a) 写真左)、ビームスプリッタ (BS:(a) 写真中央)、フォトディテクタ (PD:(a) 写真右)、ファイバーレーザー光発射用のコリメータ ((a) 写真下) を取り付けた。コイ ルおよび PD はカプトン被覆電線でクライオスタット外部の制御系 (差動アンプとコイルドライ バー)と電気的に繋がっている。クライオスタット内での測定時は、光学定盤部を8 K 輻射シー ルド底面に設置している ((b) 青線内)。PD の出力をクライオスタット外部にある差動アンプに 送り、バンドパスフィルタ、コイルドライバを通してクライオスタット内光学定盤上のコイルに フィードバックしている。



図 6.5: 差動アンプ出力の、干渉信号の位相のずれ依存性を表したグラフ。縦軸に差動アンプ出力 (V)、 横軸に位相のずれ (rad) としてプロットした。ただし、差動アンプ出力の数値はあくまで例で あり、実際には最大振幅が 10 V 程度である。低温加速度計は、縦軸の差動アンプ出力の最大値 (1 V) と最小値 (-1 V) の中間電圧 (0 V) で制御をかけた。

6.3 **地面振動の測定**

本節では、8 K 輻射シールド底面の振動との比較用の、8 K 輻射シールドの振動の励起源と なる地面振動の測定について述べる。地面振動の測定には、8 K 輻射シールド底面での測定と 条件を揃えるために、低温加速度計で測定した。また、比較用に市販の加速度計 (Trillium) を 用いた地面振動測定も行った。測定場所は、低温加速度計を設置したクライオスタット近傍の 地面 (図 6.7)、およびクライオスタットと同じ実験エリアにある防音室内 (図 6.6) で行った。防 音室内でも地面振動測定を行った理由は、低温加速度計を用いて振動測定を行ったクライオス タットがある実験エリアが、多くのファンの稼働の影響で騒音が大きく、地面だけでなく加速 度計本体にも音の影響が出ると考えられるからである。



図 6.6: KAGRA 坑内のクライオスタットのそばでの地面振動測定のセットアップの写真。真空チャン バー付近の白丸で囲まれている場所に低温加速度計を設置した。また、市販の加速度計 Trillium でも同じ箇所で測定を行った。



図 6.7: KAGRA 坑内の防音室内での低温加速度計および Trillium を用いた地面振動測定のセットアップの写真。低温加速度計と Trillium(白丸)を並べて設置した。

クライオスタット近傍での低温加速度計と市販の加速度計 (Trillium) での地面振動の測定結 果が図 6.8、防音室内での地面振動の測定結果が図 6.9 である。2つの加速度計のスペクトル は、クライオスタット近傍でも防音室内でも、0.2 Hz 付近のマイクロサイズミックノイズと呼 ばれる海の波浪が原因と考えられている山は一致した。1 Hz から 100 Hz では、クライオス タット近傍では全周波数で低温加速度計の方が振幅が大きかったが、防音室内では 30-60 Hz で Trillium の方が大きかった。低温加速度計は、雑音レベルは測定していないので分からないが、 30 Hz 以外に加速度計本体の共振によるピークがある以外は 100 Hz までは共振が無く、ユニ ティゲイン周波数も 300 Hz にあり、加速度計自体は制御されているので、真の地面振動が低温 加速度計で測定した振動スペクトルより大きいことはないと言える。つまり、低温加速度計の スペクトルのうち、トリリウムより大きな振動レベルとなっている周波数領域では、すべて低 温加速度計の感度限界を表していると考えられる。一方、振動レベルが防音室内の Trillium の 30-60 Hz の山は、Trillium 本体の固定の仕方が適切ではなく、ケーブリングにより侵入した雑 音だと考えられる。図 6.10 に低温加速度計および Trillium でのクライオスタット近傍と防音 室での地面振動の比較結果を載せた。Trillium では、10-100 Hz で防音室内の方が振動が大き かった。これは、防音室での測定時は、先程述べたように Trillium の固定状況が悪かったから であると考えられる。また、低温加速度計での測定結果は両者とも殆ど変化しなかった。ただ し、10Hz 以下は本来一致すべきだが、わずかに一致してないのは、キャリブレーションに問題 があったかもしれない。もし、一致していたとすると、10Hz 以上では防音室のほうが、より小 さいレベルであるといえるが、これが真に地面振動を測定できていることは現段階では断定で きない。

従って、低温加速度計は、神岡の地面振動を 1-100 Hz の範囲で測定できているとは言え ず、上限値かピークしか測定できていない。ただし、クライオスタット内での測定は、より

55

KAGRA が本稼働した時の状態に近づけるため、真空状態で振動測定を行う必要がある。真空 での測定が可能な加速度計は低温加速度計のみであり、かつ、原理まですべて把握して、波長 基準でキャリブレーションでき真空引きによるアライメントの変化にも対応できるため、クラ イオスタット内での測定には低温加速度計を用いた。

本節での目的はクライオスタットの振動の比較対象および励起源としての地面振動測定で あったので、クライオスタットの近傍での低温加速度計の地面振動測定結果を、サイトの地面 振動と今後呼ぶ。



図 6.8: KAGRA 坑内のクライオスタットのそばでの地面振動測定結果。灰色の線が低温加速度計 (cryoacc)、青色の線が比較のための市販の加速度計 (Trillium) での測定結果で、1 台ずつ同じ場 所で振動を測定をした。また、Trillium の自己ノイズレベル (黒) も同時にプロットした。低温 加速度計の 30Hz のピークは加速度計自身の共振である。1 Hz 以下は低温加速度計と Trillium は一致しているが、1 Hz 以上では Trillium の方が小さいため、1 Hz 以上では低温加速度計の データは感度限界を表していると言える。



図 6.9: KAGRA 坑内の防音室での地面振動測定結果。灰色の線が低温加速度計 (cryoacc)、青色の線が 比較のための市販の加速度計 (Trillium) での測定結果で、1 台ずつ同じ場所で振動を測定をした。 また、Trillium の自己ノイズレベル (黒) も同時にプロットした。低温加速度計の 30Hz のピーク は加速度計自身の共振である。1 Hz 以下は低温加速度計と Trillium は一致しているが、1 Hz 以 上では Trillium の方が小さかった。30-60 Hz で trillium に山があり、Trillium 本体の固定がま ずかった可能性がある。





図 6.10: クライオスタット近傍での地面振動と防音室での地面振動の比較。(a) が低温加速度計、(b) が 市販の加速度計 Trillium での比較である。(b) の Trillium には自己ノイズレベル (黒)[18] も示 した。低温加速度計での測定では、防音室とクライオスタット近傍での測定結果は殆ど差が無 かった。また、Trillium で測定したスペクトルは、防音室の方が 10 Hz 以上の領域で大きく、 全周波数で自己ノイズレベルより大きかった。これは、防音室での測定時は、Trillium の固定 状況が悪かったためであると考えられる。

6.4 輻射シールド用冷凍機本体の振動測定結果

次に、8 K 輻射シールド底面の振動との比較用の、冷凍機本体の振動測定結果について述 べる。測定のセットアップを図 6.11 に示す。加速度計は、冷凍機チャンバーの上に設置した。 この場所は、コールドヘッドの振動がベローズを経由して伝搬してくる場所である。図 4.9 に あるように、測定箇所である冷凍機チャンバーから 8 K 輻射シールドへの振動伝搬経路には、 VR ステージとそれをサポートする支持ロッド、伝熱バー、およびフレキシブル熱リンクが存 在する。



図 6.11: クライオスタットの8K 輻射シールド用冷凍機本体の冷凍機チャンバー部の振動測定のセット アップ図。加速度計を冷凍機チャンバーの上 (赤四角の場所) に設置した。この場所は、コール ドヘッドの振動がベローズを経由して伝搬 (オレンジの矢印) してくる場所である。

図 6.12 は、冷凍機チャンバーの振動の冷凍機の on/off による比較結果である。冷凍機 OFF の結果を見ると、20-30 Hz、30-40 Hz、40-70 Hz、70-95 Hz に、明らかに地面振動には見ら れない山が見られた。これは冷凍機本体の何らかの構造の共振による励起が見えていると考え られる。また、冷凍機 ON の結果と冷凍機 OFF の結果を比較すると、、2.06 Hz の倍波の冷凍 機稼働によるラインスペクトルの倍波が基本振動である 2.06 Hz から 100 Hz 付近まで見られ た。特に、30-40 Hz 付近のラインスペクトルが、冷凍機 OFF 時で見えていた山に上乗せする 形で大きく見えていた。これは、冷凍機本体の構造の共振の影響で冷凍機稼働による振動のラ インスペクトルも励起したからだと考えられる。また、それ以外に、冷凍機 ON の結果と冷凍 機 OFF の結果を比較して、フロアレベルの上昇や、2.06 Hz の冷凍機振動の倍波以外のピーク の出現は見られなかった。

この図の冷凍機 ON の振動を、冷凍機稼働時の冷凍機本体の振動とする。



図 6.12:8 K 輻射シールド用冷凍機本体のチャンバー部の振動測定結果。黒い破線が冷凍機を稼働させ ていない時、赤い実線が冷凍機を稼働させている時の結果である。測定には市販の加速度計(特 許機器 MG-102S)を用いた。冷凍機 OFF の結果を見ると、20-30 Hz、30-40 Hz、40-70 Hz、 70-95 Hz に山が見られた。また、冷凍機 ON の結果と冷凍機 OFF の結果を比較すると、 2.06 Hz の倍波の冷凍機稼働によるラインスペクトルの倍波が基本振動である 2.06 Hz から 100 Hz 付近まで見られた。また、それ以外に、冷凍機 ON の結果と冷凍機 OFF の結果を比較 して、フロアレベルの上昇や、2.06 Hz の冷凍機振動の倍波以外のピークの出現は見られなかっ た。

6.5 8 K 輻射シールドの振動; クライオスタットの構造による共振の影響

6.5.1 8 K 輻射シールド底面の振動

図 6.13 は、常温真空かつ全冷凍機 OFF の状態での 8 K 輻射シールド底面の振動とクライオ スタット近傍での地面振動の比較結果である。10 Hz 以上では 8 K 輻射シールド底面の振動は 地面振動と比較して非常に大きな構造が観測された。特に、10-30 Hz では地面振動と比較して およそ 1000 倍の振動が観測された。10 Hz 以下のフロアレベルが異なる理由は、測定日が、地 面振動が 2017 年 12 月 26 日、8 K 輻射シールドの振動が 2017 年 8 月 9 日と大きく離れてい るためではないかと考えられる。また、どちらの測定も測定中に周囲の人の作業による振動の 混入の可能性がある。 これは、クライオスタットの様々な構造の共振により地面振動が影響を受けて励起したこと が原因ではないかと考えられるため、次節ではクライオスタットの共振周波数との比較につい て述べる。



図 6.13: KAGRA 坑内クライオスタットの全冷凍機 OFF 時の 8 K 輻射シールド底面の振動(オレン ジ)とクライオスタットのそばの地面振動(青)の比較したグラフ。8 K 輻射シールド底面の振 動は、クライオスタット内が常温かつ真空に引かれている時のもので、地面振動は別の日に測定 されたもの(図 6.8)である。また、両者とも低温加速度計で測定されたものである。測定方向 は、両者とも KAGRA のビーム方向である。10 Hz 以下のフロアレベルが異なる理由は、測定 日が、地面振動が 2017 年 12 月 26 日、8 K 輻射シールドの振動が 2017 年 8 月 9 日と大きく 離れているためではないかと考えられる。また、どちらの測定も測定中に周囲の人の作業によ る振動の混入の可能性がある。

6.5.2 共振周波数測定の結果との比較

図 6.14 は、8 K 輻射シールド底面の振動(図 6.13)に現れたピークに対応する、ピークと 0.5 Hz 以内で一致したクライオスタットの共振周波数(図 5.9)を示したものである。(a)は 0-100 Hz、(b) はそのうち 5-30 Hz を拡大表示したものである。

10-30 Hz の大きな山は、8 K 輻射シールドの 2 から 7 番目の共振周波数と、クライオスタッ ト外壁の共振周波数の 2 から 4 番目の共振周波数と一致し、対応付けることができた。また、 34.3、50.8、56.6 Hz の大きなピークは、打撃試験の結果と対応付けられなかったが、それ以外 の主要なピークは全て対応付けることができた。



(b) 5-30 Hz

図 6.14: クライオスタットの共振周波数測定結果と常温真空での8K輻射シールド底面の振動測定結 果の比較。8K輻射シールドの振動スペクトルに現れたピークと打撃試験の周波数分解能であ る 0.5 Hz 以内で周波数が一致する、打撃試験で特定したクライオスタット外壁および8K輻 射シールドの共振周波数を表した。shield が8K輻射シールドの共振、outside がクライオス タットの外壁(クロス管・真空チャンバー・クライオダクト)の共振を表しており、番号は図 5.9 における共振の番号と対応している。丸がついている共振の番号は、図 5.9 における 0.5 Hz 以 内でクライオスタット外壁と8K輻射シールドの共振周波数が一致しているものである。

6.5.3 真空チャンバーの振動との比較

本節では、80 K 輻射シールドおよび8 K 輻射シールドを揺らすと考えられる、真空チャン バーと8K 輻射シールド底面の同時振動測定結果について述べる。図 6.15 に、真空チャンバー の振動測定の為に真空チャンバー上部に市販の加速度計(特許機器 MG-102S)を設置した場所 を示した。測定方向は8 K 輻射シールド底面に設置した低温加速度計と同じ光軸方向である。

図 6.16 は、常温真空かつ全冷凍機 OFF での8 K 輻射シールド底面と真空チャンバー上部の 同時振動測定結果である。結果を見ると、60 Hz 以下では両者のスペクトルはほぼ一致した。 60 Hz 以上では8 K 輻射シールドの方が大きかったが、スペクトルの構造はほぼ一致した。

真空チャンバーと輻射シールドの質量比を考えると、真空チャンバーが約 10700 kg、輻射 シールドが約 1400 kg と、真空チャンバーの方がかなり重いため、輻射シールドが真空チャン バーによって揺らされていると考えられる。



図 6.15: 真空チャンバーの振動測定のため、設置した加速度計の場所 (赤四角) を示した CAD 図。加速 度計の測定方向は、8 K 輻射シールド底面に設置した低温加速度計と同じ光軸方向 (y 軸方向) である。



周波数(Hz)

図 6.16: 冷凍機 OFF の時の真空チャンバー上部の振動 (オレンジの実線) と8 K 輻射シールド底面の振 動 (黒の破線) を比較したグラフ。10Hz 以下は真空チャンバーの振動が加速度計のノイズレベ ルで埋もれており、構造が全く見えなかったので省略した。クライオスタットは常温かつ真空引 きされている状態である。両者は同時に測定したもので、8 K 輻射シールド底面の振動は低温加 速度計、真空チャンバーの振動は市販の加速度計 (特許機器 MG-1028) で測定し、KAGRA ビーム方向を測定したものである。どちらも測定中に周囲の人の作業による振動の混入の可能 性がある。

6.5.4 8 K 輻射シールドの振動のまとめ

常温真空かつ全冷凍機 OFF の状態で8 K 輻射シールドの振動を測定し、クライオスタット のそばで測定した地面振動と比較した。その結果をまとめると、

- 10 Hz 以下は8K 輻射シールド底面の顕著な共振は見られなかった。
- 10-30 Hz に地面振動の 1000 倍近い大きな山があった。
- 30 Hz 以降も多くのピークがあった。
- 打撃試験による共振周波数測定結果と比較した結果、10-30 Hz の山にあるピークと打撃 試験の結果は全て対応付けることができ、30 Hz 以降の主要なピークもほぼ全て対応付 けることができた。
- 真空チャンバーと8K輻射シールドの振動はほぼ同じであり、輻射シールドが真空チャンバーによって揺らされていると言える。

となる。従って、地面振動の伝搬による8K輻射シールドの振動の最大レベルを減衰させる 場合、まず 10-30 Hz の大きな山を防振させなければならない。

6.6 8K 輻射シールドの振動; 全ての冷凍機稼働の振動による影響

6.6.1 8 K 輻射シールド底面の振動

図 6.17 に、常温真空での8 K 輻射シールド底面の振動の全冷凍機 ON/OFF による比較結 果を示す。結果から、冷凍機の稼働によって、1.63 Hz のダクト用冷凍機振動および 2.06 Hz の8 K 輻射シールド用と低温懸架系用冷凍機の振動の倍波のラインスペクトル以外は変化がな かった。



図 6.17: 6 台ある冷凍機 (ダクト用冷凍機 2 台、8 K 輻射シールド用冷凍機 2 台、懸架系用冷凍機 2 台) 全て稼働させた時の KAGRA クライオスタットの 8 K 輻射シールド底面の振動(赤)と全て OFF(黒い破線) およびサイトで測定した地面振動(灰)を比較したグラフ。全て低温加速度計で 測定した。8 K 輻射シールド内の振動は両者ともクライオスタット内が常温かつ真空に引かれ ている時である。測定日は、地面振動が 2017 年 12 月 26 日、8 K 輻射シールドの振動が 2017 年 8 月 9 日で、どちらも測定中に周囲の人の作業による振動の混入の可能性がある。測定方向 は、両者とも KAGRA のビーム方向である。

6.6.2 すべての冷凍機の種類による8K輻射シールドの振動の差

次に、図 6.18 に各冷凍機を独立に稼働させた時の 8 K 輻射シールド底面の振動を載せた。 (a) が輻射シールド用冷凍機 2 台 ON、(b) が低温懸架系用冷凍機 2 台 ON、(c) がクライオダ クト用冷凍機 2 台 ON の時と全冷凍機 OFF との比較である。どの冷凍機でも 8 K 輻射シール ド底面で振動が観測された。8 K 輻射シールド用および低温懸架系用冷凍機では 2.06 Hz の基 本振動から 70 Hz 付近まで倍波が観測された。クライオダクト用冷凍機では 1.63 Hz の基本振 動から 10 Hz までの倍波と、12.8 Hz、20.8 Hz の倍波が観測され、20.8 Hz のラインスペクト ルが最も振幅が大きかった。

図 6.19 は、常温真空での 8 K 輻射シールド用冷凍機と低温懸架系用冷凍機を稼働させたと きの振動の比較結果である。また、図 6.20 に、8 K 輻射シールド用冷凍機および低温懸架系用 冷凍機から伸びる伝熱バーと8K輻射シールドとの接続を表した図を示した。これは本章で低 温加速度計を設置した IXC のクライオスタット内の状態であり、低温懸架系がインストール されていないので、低温懸架系用冷凍機から伸びる伝熱バーから伸びる伝熱バーの上に設置さ れるはずの冷却棒が設置されていない。冷凍機から伸びる伝熱バーは 80 K 伝熱管と 3 箇所で 各々 4 方向からサポート (CFRP 製のサポート) され、80K 伝熱管はそのまま 80K 輻射シール ドと接続している。また、8 K 輻射シールド用冷凍機から伸びる伝熱バーのみについては、8 K 輻射シールドの底面とネジで固定されている。したがって、輻射シールド用冷凍機から伸びる 伝熱バーと低温懸架系用冷凍機から伸びる伝熱バーでは8K輻射シールドとの接続の仕方が異 なり、振動の伝搬経路も異なる。低温懸架系用冷凍機から伸びる伝熱バーからの振動は、伝熱 バー→サポート→ 80K 伝熱管→ 80K 輻射シールド→サポートポスト→ 8K 輻射シールドとい うパス (このパスをパス A とする) で伝搬するが、輻射シールド用冷凍機から伸びる伝熱バー から 8K 輻射シールドへの振動は、それに加え伝熱バー→ 8K 輻射シールドという直接伝搬す るパス (このパスをパス B とする) も存在する。しかし、図 6.19 における 8 K 輻射シールドで の振動は、8 K 輻射シールド用冷凍機と低温懸架系用冷凍機を稼働させたときでほぼ同じ結果 であった。したがって、両者の冷凍機から伸びる伝熱バーからの振動伝搬経路で共通するパス であるパス A が、8K 輻射シールド用冷凍機および低温懸架系用冷凍機から伸びる伝熱バーと 8K 輻射シールドとの振動伝搬経路のメインパスであると言える。



(a) 8 K 輻射シールド用冷凍機 2 台 ON



(c) クライオダクト用冷凍機 2 台 ON

図 6.18: 6 台ある冷凍機を、各種類ごとに 2 台ずつ稼働させた時と全冷凍機 OFF の時振動スペクトルの 比較をしたグラフ。それぞれ、(a)が8K輻射シールド用冷凍機2台ON、(b)が低温懸架系用 冷凍機2台、(c)がクライオダクト用冷凍機2台である。また、各々稼働させた時の KAGRA クライオスタットの8K輻射シールド底面の振動(赤)と全てOFF(黒い実線)、サイトで測 定した地面振動(灰)である。全てクライオスタット内が常温かつ真空に引かれている時のもの で、全て低温加速度計で測定されたものである。測定方向は、全て KAGRA のビーム方向であ る。測定日は、地面振動が 2017 年 12 月 26 日、8 K 輻射シールドの振動が 2017 年 8 月 9 日 で、どちらも測定中に周囲の人の作業による振動の混入の可能性がある。 67



図 6.19: 図 6.18 における 8 K 輻射シールド用冷凍機 2 台 ON(黒の破線) と低温懸架系用冷凍機 2 台 ON(赤の実線)の時の、常温真空中の 8 K 輻射シールド底面の振動を比較したグラフ。両者は 殆ど変わらなかった。



図 6.20: 8 K 輻射シールド用冷凍機および低温懸架系用冷凍機から伸びる伝熱バーと8 K 輻射シールド との接続を表した図。これは本章で低温加速度計を設置した IXC のクライオスタット内の状態 であり、低温懸架系がインストールされていないので、低温懸架系用冷凍機から伸びる伝熱バー から伸びる伝熱バーの上に設置されるはずの冷却棒が設置されていない。冷凍機から伸びる伝 熱バーは 80 K 伝熱管と 3 箇所で各々 4 方向からサポート (CFRP 製のサポート) され、80K 伝熱管はそのまま 80K 輻射シールドと接続している。また、8 K 輻射シールド用冷凍機から伸 びる伝熱バーのみについては、8 K 輻射シールドの底面とネジで固定されている。

6.6.3 8 K 輻射シールドの振動と冷凍機本体の振動の比較

図 6.21 は、8 K 輻射シールド用冷凍機1台を稼働させた時の常温真空での8 K 輻射シールド 底面の振動と、冷凍機稼働時の8 K 輻射シールド用冷凍機本体の冷凍機チャンバーの振動(図 6.12)の比較結果である。冷凍機稼働によるラインスペクトル (2.06 Hz の倍波)以外の部分を 比較すると、30 Hz 以上ではスペクトルの形が似ていることから、輻射シールドの振動が冷凍 機本体に影響を及ぼしていると考えられる。また、冷凍機稼働によるラインスペクトルの部分 (2.06 Hz の倍波)を比較すると、30-50 Hz 付近でのピークのレベルが似ていた。これは、輻射 シールドと冷凍機本体間の冷凍機稼働によるラインスペクトルの振動を伝搬させる伝熱バーと、 それを覆う 80K 伝熱管の間にあるサポートで伝熱バーが動かないように強くサポートされ、振 動が伝熱バー部分でほとんど励起しなかったからであると考えられる。



図 6.21:8 K 輻射シールド用冷凍機1台 ON にしたときの常温真空中の8 K 輻射シールド底面の振動(赤の実線)と、図 6.12の、同じ8 K 輻射シールド用冷凍機を ON にしたときの冷凍機本体のチャンバー部の振動(黒の破線)を比較したグラフ。両者は別の日に測定したもので、8 K 輻射シールド底面の振動は低温加速度計、冷凍機本体の振動は市販の加速度計(特許機器 MG-102S)で測定し、KAGRA ビーム方向を測定したものである。どちらも測定中に周囲の人の作業による振動の混入の可能性がある。

6.6.4 8 K 輻射シールド底面での冷凍機振動のまとめ

常温真空の状態で8K輻射シールド底面での冷凍機稼働時の振動測定を行った。その結果を まとめると、

- 低温懸架系用および8K輻射シールド用冷凍機の稼働による 2.06 Hz の振動の倍波の ラインスペクトルは、両者とも 30 から 50 Hz で最大レベルになり、その変位はおよそ 10⁻⁸ m/rtHz であった。
- 8 K 輻射シールド底面での低温懸架系用冷凍機稼働時の振動と8 K 輻射シールド用冷凍
 機稼働時の振動はほぼ同じレベルであった。
- 8 K 輻射シールド底面においてダクト用冷凍機稼働による 1.63 Hz の倍波のラインスペクトル振動が観測され、特に 20.8 Hz で、その変位が 10⁻⁸ m/rtHz 程度の大きなピークがあった。

である。従って、8 K 輻射シールド底面の冷凍機による振動の最大レベルを減衰させる場合、 まずダクト用冷凍機の振動の 20.8 Hz のピーク、次に低温懸架系用および 8 K 輻射シールド用 冷凍機の 30-50 Hz のラインスペクトルを、本体もしくはその振動の伝播経路で防振する必要が ある。

6.7 冷凍機の稼働による真空チャンバーの振動への影響

本節では、真空チャンバーの冷凍機の稼働による振動測定結果について説明し、冷凍機稼働 の振動がどう伝搬するかについて考察を行う。測定のセットアップは第 6.5.3 節と同じである。 図 6.15 に、真空チャンバーの振動測定の為に真空チャンバー上部に市販の加速度計 (特許機器 MG-102S)を設置した場所を示した。測定方向は 8 K 輻射シールド底面に設置した低温加速度 計と同じ光軸方向である。

図 6.22 に、全冷凍機 OFF の時と全冷凍機 (クライオダクト用冷凍機 2 台・輻射シールド用 冷凍機 2 台・低温懸架系用冷凍機 2 台) が ON の時の、真空チャンバーの振動測定結果を示し た。測定時、クライオスタットは常温真空の状態で、10Hz 以下は真空チャンバーの振動が加速 度計のノイズレベルで埋もれており、構造が全く見えなかったので省略した。

全冷凍機 OFF の結果を見ると、10-20 Hz と 20-30 Hz に大きな山が見られた。30 Hz 以降 を見ると、40-60 Hz に複数の大きいライン状のピークが見られた。このうち、60 Hz のピーク は 60 Hz の AC100 V 電源によるノイズである。

また、全冷凍機 ON と全冷凍機 OFF の結果を比較すると、12.8 Hz と 20.8 Hz で全冷凍機 ON 時にライン状のピークが現れた。これは、次節で述べるクライオダクト用冷凍機の動作周 波数である 1.63 Hz の倍波であるので、真空チャンバーは、クライオダクト用冷凍機の稼働に よる 1.63 Hz の倍波の振動により揺らされると言える。他の冷凍機である輻射シールド用冷凍 機および低温懸架系用冷凍機の動作周波数は 2.06 Hz であるが、これらの冷凍機の稼働による 振動は見られなかった。また、全冷凍機 ON は、全冷凍機 OFF と比較しても、全てライン状 のピークしか現れず、フロアレベルの上昇は全く見られなかった。

したがって、ダクト用冷凍機と8K輻射シールドの間の物理的接続はダクトと真空チャン バーしかないため、8K輻射シールド底面で観測されたダクト用冷凍機の振動は真空チャン バーを介して伝搬していると言える。

71


frequency(Hz)

図 6.22: 全冷凍機 ON の時 (赤の実線) と全冷凍機 OFF(黒の破線) にした時の、クライオスタットの真 空チャンバー上部の振動測定結果を比較したグラフ。10Hz 以下は真空チャンバーの振動が加速 度計のノイズレベルで埋もれており、構造が全く見えなかったので省略した。クライオスタッ トは常温かつ真空引きされている状態である。両者とも同じ日に、市販の加速度計 (特許機器 MG-102S) で、光軸方向を測定したものである。どちらも測定中に周囲の人の作業による振動 の混入の可能性がある。全冷凍機 OFF の結果を見ると、10-20 Hz と 20-30 Hz に大きな山が 見られた。30 Hz 以降を見ると、40-60 Hz に複数の大きいライン状のピークが見られた。この うち、60 Hz のピークは 60 Hz の AC100 V 電源によるノイズである。

6.8 低温加速度計は低温懸架系に流入する振動の良いモニターとなるか

本節では、低温懸架系がインストールされている状態の EYC でのクライオスタットで、ヒー トリンクを介して低温懸架系と接続される冷却棒との先端と 8 K 輻射シールド底面の振動の相 関を調べ、その差異について考察する。図 6.23 に測定時の加速度計設置場所を示した。(a) が その写真、(b) が模式図である。加速度計は、冷却棒の先端と、冷却棒の近くの 8K 輻射シール ド底面に設置した。IXC のクライオスタットで低温加速度計が設置された場所は、EYC のク ライオスタットでは低温懸架系用の光学定盤を設置しており、加速度計を設置できないため、 8 K 輻射シールド底面の振動測定場所はより冷却棒に近い場所とした。また、この冷却棒は、 低温懸架系用冷凍機から伸びる伝熱バーの上に固定され、低温懸架系へと接続されるヒートリ ンクとの間の熱アンカーの役割を果たしている。また、冷却棒は、棒の中央付近で 8K 輻射シー ルドと押しボルトでサポートされている。



(a) 写真



(b) 模式図

図 6.23: 低温懸架系がインストールされている状態の 8K 輻射シールド底面と冷却棒の先端の振動の同時測定場所を示した、(a)写真と、(b)模式図である。(a)における白丸の場所が加速度計の設置場所で、写真右上の白丸部分の加速度計が冷却棒の先端に設置した加速度計、写真下方の白丸部分の加速度計が 8K 輻射シールドに設置した加速度計である。同様に、(b)における赤四角が加速度計を表す。どちらの加速度計も光軸方向を測定した。この冷却棒は、低温懸架系用冷凍機から伸びる伝熱バーの上に固定され、低温懸架系へと接続されるヒートリンクとの間の熱アンカーの役割を果たしている。また、冷却棒は、棒の中央付近で 8K 輻射シールドと押しボルトでサポートされている。

図 6.24 に低温懸架系用冷凍機 2 台および 8 K 輻射シールド用冷凍機 2 台を稼働した時の (a) 同時測定結果と (b) 両者の振動比を示す。(a) の振動スペクトルを見ると、10 Hz 以下は殆ど加 速度計のノイズに埋もれていた。20-60 Hz の冷凍機振動のラインスペクトルはほぼ一致した。 60 Hz 以上は冷却棒の先端の振動の方が大きく、一致しなかった。また、(b) の振動比を見る と、冷凍機の振動によるピークの比は分からないが、およそ 10-60 Hz の周波数では振動は 10 倍以内に収まっていた。しかし、60 Hz 以上では両者に大きな差があり、最大で 100 倍程度の 差があった。





図 6.24: 低温懸架系がインストールされている状態の 8 K 輻射シールド底面(黒)と冷却棒の先端(赤) の振動の同時測定結果(a)、および10-100 Hz の領域での両者の振動の比((冷却棒の先端の振 動)/(8 K 輻射シールドの振動))(b)。低温懸架系用冷凍機 2 台および 8 K 輻射シールド用冷凍 機 2 台を稼働させ、大気開放中に、ビーム方向を測定した。測定には、両箇所とも市販の加速 度計(特許機器 MG-102S)を用いた。(a)の振動スペクトルを見ると、10 Hz 以下は殆ど加 速度計のノイズに埋もれていた。

7 結論と今後の展望

7.1 結論

本研究では、KAGRA サイトにインストールされたクライオスタットの8K 輻射シールド底 面に低温加速度計を設置し、地面振動などの振動が伝搬しクライオスタットの共振の影響を受 けて励起した振動、および冷凍機の稼働による振動を測定した。また、クライオスタットの打 撃試験を行い、クライオスタットの共振周波数を判別し、クライオスタットの8K 輻射シール ド底面の振動スペクトルとの対応関係を求めた。その結果、

- クライオスタットの8K輻射シールド底面の振動スペクトルは、10-100 Hzの周 波数でクライオスタットの構造による共振の影響による大きな励起が見られた。特に、 10-30 Hz では地面振動のおよそ1000 倍大きい山が観測された。
- クライオスタットの8K輻射シールド底面の振動スペクトルは、冷凍機稼働時において は冷凍機の動作周波数の倍波のラインスペクトルが観測された。特に、10 Hz 以上の周 波数においては、クライオダクト用冷凍機 (動作周波数:1.63 Hz)の稼働によるライン スペクトルでは、12.8 Hz と 20.8 Hz のピークが観測された。
- 輻射シールド用冷凍機および低温懸架系用冷凍機 (動作周波数 2.06 Hz)の稼働によるラインスペクトルでは、30 Hz から 60 H z の周波数で冷凍機稼働による大きなラインスペクトルが観測され、その大きさは最大でおよそ 10⁻⁸ m/rtHz であった。
- 全冷凍機 OFF 時の 8K 輻射シールド底面の振動スペクトルに現れた構造は、打撃試験に よって得られたクライオスタットの共振周波数とほぼ全て対応付けることができた。特に、10-30 Hz の大きな山の部分の構造については、全て対応付けることができた。
- 真空チャンバーと輻射シールドの質量比を考えると、真空チャンバーが約 10700 kg、輻射シールドが約 1400 kg であるので、輻射シールドは真空チャンバーにより揺らされていると考えられる。実際、常温真空状態で真空チャンバーと 8K 輻射シールド底面の振動の同時測定を行うと、その振動スペクトルは 10-100 Hz でかなり一致し、真空チャンバーでの振動の励起が輻射シールドにも伝搬していると考えられる。

となった。

7.2 今後の展望

今後の展望としては、

- クライオスタットの構造的な共振による影響を減衰させるために、クライオスタットの 詳細な振動モードを求め、どこを防振させるべきか議論する。
- 冷凍機の稼働による影響を減衰させるために、コールドヘッドやパルス管から輻射シー

ルドまでの振動の伝搬経路での防振を行う。例えば、コールドヘッド下のベローズにゴ ムを入れたり、冷凍機本体の適切な場所に制振合金を取り入れること、などである。

である。

付録 A 打撃試験での周波数応答関数で現れたピーク一覧表

本章では、5章の打撃試験で得られた周波数応答関数に現れたピークを、各加振点と応答点の組 み合わせ毎に述べる。加振した場所と応答を測定した場所の組み合わせは表 5.3、加振点と応答 点を表した図は図(未)である。それぞれ、クロス管を加振し、真空チャンバーで応答を見た時 の周波数応答関数に現れたピークの一覧表を付録 A.1 に、真空チャンバーを加振し真空チャン バーで応答を見た時の周波数応答関数に現れたピークの一覧表を付録 A.2 に、クライオダクト を加振し真空チャンバーで応答を見た時の周波数応答関数に現れたピークの一覧表を付録 A.3 に、輻射シールドを加振し輻射シールドで応答を見た時の周波数応答関数に現れたピークの一 覧表を 付録 A.4 に、クロス管を加振し輻射シールドで応答を見た時の周波数応答関数に現れた ピークの一覧表を付録 A.5 に、真空チャンバーを加振し輻射シールドで応答を見た時の周波数 応答関数に現れたピークの一覧表を付録 A.6 に、クライオダクトを加振し輻射シールドで応答 を見た時の周波数応答関数に現れたピークの一覧表を付録 A.7 に示した。

各表に対し、一番左の列に共振周波数、一番上の行に加振点(加振点の名前と場所の対応は図 5.4 にあり、各加振点の名前に対し、末尾の x から z の軸が図における x 軸から z 軸に対応して いる)の名前があり、各加振点に対し現れたピークに丸をつけた。また、各々の加振点で得られ た周波数応答関数で最も応答 (m/N)が大きいピークは、二重丸を記入した。1 Hz だけ離れて いる 2 つの共振周波数から 0.5 Hz ずつ離れたちょうど中間の周波数にピークが出た場合は、2 つの共振周波数両方に三角の印を記入した。1 つの表で1 つもピークが現れていない共振周波 数もあるが、それは他の表では現れているものであり、全ての表で揃えるためあえて記入した。

共振周波数	cross-	cross-	cross-	cross-	cross-	cross-
(112)	1-X	т-у	1-2	2-x	2-y 0	2-2
10	0	0	0			
15					0	
16		0			0	
19.5		0				
21		0			0	
22.5		~			~	
25		0	0		0	0
30	0		8	0	0	- X
35.5	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ
43.5	ŏ	ŏ	Ŭ		ŏ	Ŭ
47.5	Ō	Ō	0	0	Ō	0
53	0		0	0	0	0
55.5	0		0	0	0	0
57.5	0	~	0	0	0	~
58.5	0	0	0	~	0	0
60.5	0		8	0	8	8
09.5	0	ŏ	ŏ	0	ŏ	ŏ
71.5	Ŭ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ
79.5		Ŭ	Ŭ	ŏ	Ŭ	Ŭ
81.5	0	0	0	Õ	0	0
84		0			0	Õ
89	0	0	0	0	0	0
92				0	0	0
93.5	0		0			
94.5	0	0	0		0	0

図付録 A.1: クロス管を加振し、真空チャンバーで応答を見た時の周波数応答関数に現れたピークの一覧 表。一番左の列に共振周波数、一番上の行に加振点(加振点の名前と場所の対応は図 5.4 に あり、各加振点の名前に対し、末尾の x から z の軸が図における x 軸から z 軸に対応して いる)の名前があり、各加振点に対し現れたピークに丸をつけた。また、各々の加振点で得 られた周波数応答関数で最も応答(m/N)が大きいピークは、二重丸を記入した。

共振周波数 (Hz)	cham-	cham-	cham-	cham- 2-x	cham-	cham	cham	cham	cham	cham	cham	cham	cham	cham	cham	cham	cham-	cham
(1)27 G	1-2	1 y	1.1	2-2	\triangle	2.2	-3-2	- J -y	5.2	4.	ō'	42		- J - y	5.2	-0-X	0-y	-0-2
10					Δ			0			-						0	
15		0			Δ	0				0	0							
16		0		0	Δ	0		0	0					0			0	0
19.5		0		~	~	~				~			~		~			
21		0		0	0	0		~		0	0		0	~	0			
22.5	~	0		0	8			0		0				0	8		0	
24	0	8		0	8	0		0	0	0	0	0	0	0	8		0	0
25		0		ŏ	ŏ	ŏ		0	0	0	0	0	0	0	0		0	ŏ
25.5	0	0	0	0	ŏ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ŏ
30.3	õ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	õ	õ	õ	õ	õ	ŏ		õ	õ	ŏ		ŏ	~
43.5	ŏ	õ	õ		ŏ	-	õ	õ		-	ŏ		õ	õ	-		õ	
47.5	0	0		0	0				0		0						0	0
53	0		0	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0		0
55.5	0		0	0	0						~		0			~		
57.5				~	~			~			0		~	~	~	0	~	
58.5	~		~	0	0	~	~	8	~	~	~	~	8	8	8	~	8	~
60.5	0		8	8		0	8	0	8	8	0	0	8	8	8	8	0	ő
59.5	0	0	ŏ	ŏ	0	0	ŏ	0	0	ŏ	0	0	ŏ	ŏ	0	0	0	0
71.5	~	ŏ	~	ŏ	õ	ŏ	ŏ	ŏ		~	ŏ	ŏ	~	ŏ			ŏ	
79.5	0	Ŭ	0	ŏ	-	ŏ	ŏ	Ŭ	0		Ŭ	Ŭ	0	ŏ	0		Ŭ	
81.5	-		-	-		Õ	-		-				Õ	Õ	-			
84					0		0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
89	0		0	0		0	0		0	0		0	0	0	0	0	0	0
92	~		0	0		0	0	0	0	0		0	0	0	0	0		0
93.5	0																	
94.5											0							
96.5											0							

図付録 A.2: 真空チャンバーを加振し、真空チャンバーで応答を見た時の周波数応答関数に現れたピークの一覧表。一番左の列に共振周波数、一番上の行に加振点(加振点の名前と場所の対応は図5.4にあり、各加振点の名前に対し、末尾のxからzの軸が図におけるx軸からz軸に対応している)の名前があり、各加振点に対し現れたピークに丸をつけた。また、各々の加振点で得られた周波数応答関数で最も応答(m/N)が大きいピークは、二重丸を記入した。

共振周波数(Hz)	duct- 1-x	duct- 1-y	duct- 1-z
9			
10			
15	0	0	0
16		0	
19.5	0	0	0
21	0	0	
22.5	0	0	0
25	0	0	0
30		0	0
35.5	0		0
39		0	
43.5		0	0
47.5	0	0	0
53	0	0	0
55.5			
57.5		~	
58.5	~	0	~
60.5	0	0	0
69.5	0		0
71.5	0	~	0
77	0	0	_
79.5	-	-	0
82	0	0	-
84	0	0	0
89	0		0
92	0		0
93.5	~	~	~
94.5	0	0	0
96.5	0	0	0

図付録 A.3: クライオダクトを加振し、真空チャンバーで応答を見た時の周波数応答関数に現れたピーク の一覧表。一番左の列に共振周波数、一番上の行に加振点(加振点の名前と場所の対応は図 5.4 にあり、各加振点の名前に対し、末尾の x から z の軸が図における x 軸から z 軸に対応 している)の名前があり、各加振点に対し現れたピークに丸をつけた。また、各々の加振点 で得られた周波数応答関数で最も応答(m/N)が大きいピークは、二重丸を記入した。

共振周波数									
(Hz)	rad-1-x	rad-1-y	rad-1-z	rad-2-x	rad-2-y	rad-2-z	rad-3-x	rad-3-y	rad-3-z
12.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	17	0	0	0	0	0
19	0	0					0	0	0
20	0	0		0	0				
22.5		0		0	0	0			
24.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27.5	0	0	0	0		0	0	0	0
29.5			~			~		0	0
32	0	~	0			0	~	-	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37.5	0	0	Ö	0	0	0	0	0	0
40	~		0	~	0	~	~	~	~
41	8	~	0	0	2	0	0	0	
45	8	0	8	0	0	0	~	- 2	0
47.5	8	8	8	0	0	~	8	8	8
49	8	8	8	8	8	8	8	8	8
53.5	8	8	8	- X	8	8	- X	8	8
59	ĕ	ĕ	ĕ	ĕ	ĕ	- X	ĕ	- X	- X
63.5	ŏ	ŏ	ĕ	ĕ	ŏ	0	ĕ	ŏ	ŏ
64.5	ŏ	ĕ	ĕ	ĕ	ŏ	0	ŏ	ŏ	ŏ
00.5	ŏ	ĕ	ŏ	ĕ	ŏ	ŏ	0	ŏ	ŏ
69.5	ĕ	ĕ	ĕ	ĕ	0	ĕ	0	ŏ	ĕ
/3.5	0	0	0	ő	0	0	ŏ	0	0
/9	õ	0	0	ŏ	0	ő	ŏ	0	ő
83	8	8	0	0	8	8	8	0	0
89	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図付録 A.4: 輻射シールドを加振し、輻射シールドで応答を見た時の周波数応答関数に現れたピークの一 覧表。一番左の列に共振周波数、一番上の行に加振点(加振点の名前と場所の対応は図 5.4 にあり、各加振点の名前に対し、末尾の x から z の軸が図における x 軸から z 軸に対応し ている)の名前があり、各加振点に対し現れたピークに丸をつけた。また、各々の加振点で 得られた周波数応答関数で最も応答(m/N)が大きいピークは、二重丸を記入した。

共振周波数(Hz)。	cross- 1-x	cross- 1-y	cross- 1-z	cross- 2-x	cross- 2-y	cross- 2-z
5	0	8			~	0
12.5	õ	ŏ	0	0	0	0
15	Ŭ	~	Ŭ	-	ŏ	Ŭ
17	0	0	0	0	Õ	0
19	0	0		0	0	0
20						
21.5	õ	<u>o</u>	0	~	~	~
22.5	0	0	0	8	8	0
24.5	8			8	0	
27.3	ŏ			~		
31.5	ŏ		0	0	0	0
33.5	ŏ	0	ŏ	ŏ	õ	õ
35.5	0	0	0	0	0	0
37.5				0	0	0
40.5	~	~	~			
41.5	8	0	0			
44	8	8	0	0	0	0
45.5	ŏ	ŏ	8	ŏ	ŏ	ŏ
49.5	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	~
51	Ŭ	ŏ	ŏ	č	ŏ	0
53		0	0		0	0
58	0		0	0		
59.5	~	<u>o</u>		~	<u>o</u>	
63.5	8	0	0	8	0	0
65	ŏ	0	0	8	0	0
70	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ
72.5	õ	õ	õ	õ	õ	õ
76.5		Ō	Ō	Ō	Ō	0
77.5				0	0	
81	<u>o</u>	0	0	0	0	0
83	8	8	8	0	0	0
88	8	8	8	0	0	0
89.5	ŏ	ŏ	ŏ	<u> </u>	0	0
96	~	~	~			
97.5	0	0	0		0	0

図付録 A.5: クロス管を加振し、輻射シールドで応答を見た時の周波数応答関数に現れたピークの一覧 表。一番左の列に共振周波数、一番上の行に加振点(加振点の名前と場所の対応は図 5.4 に あり、各加振点の名前に対し、末尾の x から z の軸が図における x 軸から z 軸に対応して いる)の名前があり、各加振点に対し現れたピークに丸をつけた。また、各々の加振点で得 られた周波数応答関数で最も応答(m/N)が大きいピークは、二重丸を記入した。

天振同 波数	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-	cham-
(Hz)	1-x	1-y	1-z	2-x	2-y	2-z	3-x	3-у	3-z	4-x	4-y	4-z	5-x	5-y	5-z	6-x	6-y	6-z
9	0	Δ		0	Δ					0	0	0	0			8	8	8
12.5	ŏ	0	0	0	0					0	0	~	0		0	ŏ	ŏ	ŏ
15		-	~	-	- -								-		Ŭ	õ	ŏ	Ŭ
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0				0	0					~	~	~	0	~	
20	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	8	0	0	8	0
22.5	ŏ	0	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	0	ŏ	ŏ	ŏ	0	ŏ		ŏ	ŏ	ŏ
24.5	0	0		0	0		0	0	0	0	0		0	0		0	0	0
27.5	õ	0	0	<u>o</u>			0	0	0	0			0	0	0	8	0	~
29	0	0		8		0	0	0	0	0				0	0	8		8
33.5	0	0	0	ŏ	0	~	ŏ	ŏ	ŏ	~			0	ŏ	ŏ	ŏ	0	ŏ
35.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
37.5	0	0	0	0			0	0	0	0			0	õ	<u>o</u>	0	<u>o</u>	0
40.5	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	8	8		0	0
44	ŏ	~	~	ŏ	ŏ		ŏ	~	~	ŏ	ŏ	~	ŏ	ŏ	ŏ	0	0	0
45.5	0	0	0				0	0	0	0	0	0				0	0	0
47.5	õ	0	0	~			~	0	<u>o</u>	~	0	~	0		0	0	0	0
49.5	0	8	0	0	0		0	8	0	0	0	0		0		0	0	0
53	0	ŏ	ŏ	0	ŏ	0	0	ŏ	0	0	ŏ	0	0	ŏ	0	~	ŏ	ŏ
58	ō		õ	ō			ō		ō	õ			õ	ō	ō	0	Ō	Õ
59.5		0	~	~	~	~	<u>o</u>	0	õ	~	<u>o</u>	~	õ	0	~	0	<u>o</u>	~
63.5	0	0	8	8	8	8	0	0	0	8	8	8	0	0	0	0	0	0
66.5	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	0		0	°	́	~	0	0	0	0	0	0
70	Ō	Ō	Õ	Ō	Ō	Õ	Ō	0	Õ	0	0	0	Ō	Ō	Ō	Ō	Ō	Ō
72.5	õ	~	<u>o</u>	0		0	0		0	0	<u>o</u>	0	0	0	0	0	0	0
76.5	0	8	8	0	0	~	0	0		8	8	0	0	0		0	0	0
81	0	ŏ	ŏ	<u> </u>	ŏ	ŏ	ŏ	ŏ	0	ŏ	ŏ	0	ŏ	ŏ	0	0	0	0
83		õ	õ			õ	õ	õ	õ	õ	õ	õ		_		Õ		
88	0	0	0	0	0	0	Q	0	0	~	~		0	0	0	~	~	
89.5	0	0	0	0	0		8	8	0	0	0	0	0	8	8	0	0	0
92	0	0	0				0	ŏ	ŏ		0	0	0	ŏ	ŏ		0	0
98								õ	õ		õ	õ		-	-	0	õ	õ

図付録 A.6: 真空チャンバーを加振し、輻射シールドで応答を見た時の周波数応答関数に現れたピークの 一覧表。一番左の列に共振周波数、一番上の行に加振点(加振点の名前と場所の対応は図 5.4 にあり、各加振点の名前に対し、末尾の x から z の軸が図における x 軸から z 軸に対応 している)の名前があり、各加振点に対し現れたピークに丸をつけた。また、各々の加振点 で得られた周波数応答関数で最も応答(m/N)が大きいピークは、二重丸を記入した。

	duct-1-	duct-1-	duct-1-
共振周波数(Hz)	x	у	z
9		0	
10			
12.5	0	0	0
15			
17	~		
19	8	~	0
20	0	•	0
21.5			
22.3	0	0	
24.3	ŏ	ŏ	
27.3	~	~	
31.5	0	0	
33.5	-	-	
35.5	0	0	0
37.5			
40.5	0		
41.5		0	0
44	-		
45.5	0	0	<u>o</u>
47.5	0	<u>o</u>	0
49.5		0	
51	~	~	~
53	8	8	8
58	0	0	0
59.5	0	0	0
65.5	ŏ	ŏ	ŏ
66.5	ŏ	ŏ	ŏ
70	ŏ	ŏ	ŏ
72.5	õ	õ	õ
76.5	Ō	Ō	0
77.5			
81	0	0	0
83	0	0	0
88	0	0	0
89.5	0	0	0
92	0	0	0
96	~	~	~
98	0	0	0

図付録 A.7: クライオダクトを加振し、輻射シールドで応答を見た時の周波数応答関数に現れたピークの 一覧表。一番左の列に共振周波数、一番上の行に加振点(加振点の名前と場所の対応は図 5.4 にあり、各加振点の名前に対し、末尾の x から z の軸が図における x 軸から z 軸に対応 している)の名前があり、各加振点に対し現れたピークに丸をつけた。また、各々の加振点 で得られた周波数応答関数で最も応答(m/N)が大きいピークは、二重丸を記入した。

付録 B 低温加速度計のキャリブレーション

本節では、第6章で使用した低温加速度計のキャリブレーション方法と回路について述べる。

B.1 低温加速度計のブロックダイヤグラムと振動変位の計算式

低温加速度計のブロックダイヤグラムを図付録 B.1 に表す。地面振動の加振による慣性力 $-m\omega^2 \tilde{X}(\omega)$ が振子に入力されると、振子の伝達関数 H_p および干渉計の伝達関数 Hを伝達し、 干渉計出力電圧 V_2 として出力される。また、 V_2 は、制御用のフィルターの伝達関数 F、およ び振子へのフィードバック機構であるコイルマグネットアクチュエータを電流駆動させるため のコイルドライバーの伝達関数 A を経由し、コイルドライバーの信号 V_1 として出力される。 V_1 はコイルと振子の磁石間の伝達関数 H_c を経由し、フィードバック力 fとして振子にフィー ドバックされる。

このとき、振子への入力 y_e は、

$$y_{\rm e} = -m\omega^2 \tilde{X}(\omega) - f , \qquad (\text{fig B.1})$$
$$= -m\omega^2 \tilde{X}(\omega) - H_{\rm p} HFAH_{\rm c} y_{\rm e} ,$$

である。 $G = H_{p}HFAH_{c}y_{e}$:開ループ伝達関数とすれば、 y_{e} は、

$$y_{\rm e} = \frac{G}{1+G} (-m\omega^2 \tilde{X}(\omega)) , \qquad (\text{fig B.2})$$

となる。また、測定電圧 V_1 、 V_2 は、

$$V_{1} = H_{p}HFAy_{e} , \qquad (\text{fd} \oplus B.3)$$
$$= \frac{G}{1+G}H_{c}(-m\omega^{2}\tilde{X}(\omega)) ,$$
$$V_{2} = HH_{p}y_{e} = \frac{HH_{p}}{1+G}(-m\omega^{2}\tilde{X}(\omega)) \qquad (\text{fd} \oplus B.4)$$

となる。従って、地面振動変位 $|\tilde{X}(\omega)|$ は、

$$|\tilde{X}(\omega)| = \frac{1}{m\omega^2} \left| \frac{1+G}{G} \right| H_c , \qquad (\text{fig B.5})$$

$$|\tilde{X}(\omega)| = \frac{1}{m\omega^2} |\frac{1+G}{HH_p}|V_2 , \qquad (\text{figs B.6})$$

となる。本研究においては、式付録 B.6 を用いて振動変位を求めた。



図付録 B.1: 低温加速度計のブロックダイヤグラム。地面振動による慣性力 $-m\omega^2 \tilde{X}(\omega)$ 振子に入力されると、振子の伝達関数 H_p および干渉計の伝達関数 H を伝達し、干渉計出力電圧 V_2 として出力される。また、 V_2 は、制御用のフィルターの伝達関数 F、および振子へのフィードバック機構であるコイルマグネットアクチュエータを電流駆動させるためのコイルドライバーの伝達関数 A を経由し、コイルドライバーの信号 V_1 として出力される。 V_1 はコイルと振子の磁石間の伝達関数 H_c を経由し、フィードバック力 f として振子にフィードバックされる。

B.2 コイルの伝達関数

図付録 B.1 におけるコイルドライバーの出力 V1 から干渉計の出力 V2 までの伝達関数は、

$$HH_{\rm p}H_{\rm c} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_2}{x} \frac{x}{f} \frac{f}{V_1} , \qquad (\text{fi} \oplus \text{B.7})$$

とかける。ここで、x は振子の変位である。これから、コイルの伝達関数 H_c は、

$$H_{\rm c} = \frac{V_2/V_1}{HH_{\rm p}} \tag{fd$B.8}$$

により求まる。

B.2.1 V₂/V₁の測定

式付録 B.8 において、まず、 V_2/V_1 を測定する。その測定のブロックダイヤグラムを、図付録 B.2 に示す。図付録 B.2 における Source で正弦波を入力し、その正弦波の周波数を変化させ、 V_1 から V_2 への伝達関数を求めた。ここで、 V_2/V_1 は、 V_{OUT}/V_{IN} である。その結果のボード線図を図付録 B.3 に示す。



図付録 B.2: V_2/V_1 の測定のブロックダイヤグラム。コイルドライバー出力を V_{IN} 、干渉計出力を V_{OUT} とし、干渉系出力に正弦波信号を入れて伝達関数を測定した。ここで、 V_2/V_1 は、 V_{OUT}/V_{IN} である。



図付録 B.3: V₂/V₁ の測定結果のボード線図。(a) がゲイン曲線、(b) が位相曲線である。

B.2.2 干渉計の伝達関数 H

干渉計の伝達関数 H を求める。まず、干渉計出力 (差動アンプの出力)V2 は、

$$V_2 = B\sin\left(4\pi x/\lambda\right)\,,\tag{discussion}$$

と書ける。ここで、 λ はレーザーの波長であり、 $\lambda = 1550$ nm である。また、*B* は V_2 の振幅 である。ここで、干渉計が制御されているとき、*x* は微小であると仮定すると、式付録 B.9 は、

$$V_2 \sim \frac{4\pi x B}{\lambda} \tag{fd$B.10}$$

と近似できる。したがって、干渉計の伝達関数は、

$$H = \frac{V_2}{x}$$
(fd B.11)
= $\frac{4\pi B}{\lambda}$

となる。

B.2.3 振子の伝達関数

振子の伝達関数 H_p は、

$$H_{\rm p} = \frac{x}{f} , \qquad (\text{ff} \oplus B.12)$$
$$= \frac{1}{m\sqrt{(\omega_{\rm c}^2 - \omega^2)^2 + \frac{Q^2}{\omega_{\rm c}^2}\omega^2}} ,$$

と書ける。ここで、Qは振子の共振の鋭さを表すQ値、 ω_c は振子の水平光軸方向の共振周波数である。また、実際に使用した振子の質量は、

$$m = 72.68 \text{ g}$$
, ($\texttt{fd} \oplus \texttt{B.13}$)

である。また、共振周波数 ω_c は、コイルの伝達関数 H_c および干渉計の伝達関数 H が、振動 測定帯域である 100Hz までの周波数に対して定数であることを用いて、振子の伝達関数の関数 形である、

$$f(x) = \frac{a}{\sqrt{(b-x^2)^2 + cx^2}} , \qquad (\text{fd} \oplus B.14)$$

で、*V*₂/*V*₁ の測定結果である図付録 B.3(a) のゲイン曲線を最小二乗法を用いてフィッティング することにより求めた。ただし、*a*、*b*,*c* はフィッティングパラメータである。フィッティング 結果を図付録 B.4 に示す。



図付録 B.4: 式付録 B.14 を V₂/V₁ のゲイン曲線である図付録 B.3(a) に最小二乗法を用いてフィッティ ングした結果。緑色の点が V₂/V₁ のゲイン曲線、赤色の線が式付録 B.14 をフィッティング したものである。

フィッティングした結果、各パラメータは、

$$a = (100 \pm 4) \times 10^{4}$$

 $b = 134.4 \pm 0.1$ (付録 B.15)
 $c = -132 \pm 0.1$ (付録 B.16)

となった。これから、bの平方根より、振子の共振周波数は、

$$\omega_{\rm c} = 11.52 \; {\rm Hz} \; , \qquad ({\rm fi} \oplus {\rm B.17})$$

となった。これら b、c のパラメータを式付録 B.13 に対応する係数に代入し、振子の伝達関数 のゲイン曲線を求めた結果を、図付録 B.5 に表す。



図付録 B.5: 式付録 B.14 を V₂/V₁ のゲイン曲線である図付録 B.3(a) に最小二乗法を用いてフィッティ ングし、それにより求まったパラメータ (b,c) を、式付録 B.13 に対応する係数に代入し、求 まった振子の伝達関数のゲイン曲線

B.2.4 コイルの伝達関数の計算

これまで求めた、図付録 B.3(a) のゲイン曲線、図付録 B.5 のコイルの伝達関数、および式付録 B.14 から、コイルの伝達関数を計算したものを、図付録 B.6 に示す。

ここで、図付録 B.14 のコイルドライバーの出力側にある 51 Ω の抵抗、コイルドライバーの 出力電流を *i*、コイルの結合定数を α とすれば、コイルから振子へのフィードバック力 *f* は、

$$f = \alpha i = \alpha \frac{V_1}{51\Omega} , \qquad (\text{fig B.18})$$

と書くことができる。したがって、コイルの伝達関数は、

$$H_{\rm c} = \frac{f}{V_1} = \frac{\alpha}{51} ,$$
 (付録 B.19)

となる。この式の最右辺は明らかに定数なので、図付録 B.6 に対し、定数関数のフィッティン グによりコイルの伝達関数を求める。ここで、10Hz 付近の共振点による利得の低下、 および 110Hz の共振の影響を取り除くため、 フィッティング領域を 0.5 73 Hz までとした。その結 果を、図付録 B.7 に表す。これより、コイルの伝達関数 H_c は、

$$H_{\rm c} = 0.0035 \pm 0.0002,$$
 (付録 B.20)

となった。また、上式と式付録 B.19 から、コイルの結合定数 α は、

$$\alpha = 0.18 \pm 0.01$$
 (付録 B.21)

となる。



図付録 B.6: 図付録 B.3(a) のゲイン曲線、図付録 B.5 のコイルの伝達関数、および式付録 B.14 から、コ イルの伝達関数を計算した結果。縦軸が利得、横軸が周波数 (Hz) である。



図付録 B.7: 図付録 B.6 に対し、定数関数のフィッティングによりコイルの伝達関数を求めた結果。緑の 点が図付録 B.6 のコイルの伝達関数を実測値から計算したもの、赤の線がフィッティングし た定数関数である。

B.3 補正因子 $|\frac{1+G}{G}|$ の計算

式付録 B.6 における補正因子 $|\frac{1+G}{G}|$ を求めるために、まず、開ループ伝達関数 G を求める。 開ループ伝達関数の測定のブロックダイヤグラムを、図付録 B.8 に示す。測定では、フィル ターの後ろに信号源を入れ、その前後の電圧を入出力の電圧とし、信号源の正弦波の周波数を 変化させ、それに対する $V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$ を求め、それを開ループ伝達関数とした。その結果を図付録 B.9 に示す。(a) がゲイン曲線、(b) が位相曲線を表す。ここで、10 Hz 以下が無いのは、 V_{in} が 小さすぎてノイズに埋もれ、測定できなかったためである。



図付録 B.8:開ループ伝達関数 G の測定のブロックダイヤグラム。



図付録 B.9: 開ループ伝達関数 G の測定結果。(a) がゲイン曲線、(b) が位相曲線を表す。10 Hz 以下が 無いのは、V_{in} が小さすぎてノイズに埋もれ、測定できなかったためである。

図付録 B.9 のゲインおよび位相から、補正因子 $|\frac{1+G}{G}|$ を計算した結果を、図付録 B.10 に示 す。10 Hz 以下については、 H_p の形状、 H_c 、および H が定数であることを考えると、開ルー プ伝達関数 G のゲインは十分大きいと言えるので、補正因子 $|\frac{1+G}{G}|$ は 1 とした。



図付録 B.10: 図付録 B.9 のゲインおよび位相から、補正因子 | 1+G / 6 計算した結果

以上で求められた補正因子 $|\frac{1+G}{G}|$ 、コイルの伝達関数 H_c 、振子の質量、干渉計出力 V_1 を式付録 B.6 に代入することにより、振動変位スペクトルが求まる。

B.4 低温加速度計に用いた回路

本節では、低温加速度計で用いた回路を載せる。図付録 B.11 がファイバーレーザーを駆動す るための回路、図付録 B.11 が PD の電流信号を電圧に変換し、2 つの PD の信号を差動で出力 する回路、図付録 B.13 が制御用のフィルター回路、図付録 B.14 がコイルに電流を流すコイル ドライバー回路である。全て、LTspice[19] により書いた。それぞれの回路の「IN」が回路の入 力端子、「OUT」が出力端子である。



図付録 B.11: ファイバーレーザーを駆動するための、レーザーダイオード駆動回路



図付録 B.12: 干渉計の PD の電流を電圧に変換し、差動で出力する差動アンプ回路



図付録 B.13: 制御用フィルター回路



図付録 B.14: コイルドライバー回路

参考文献

- A. Einstein, "Naherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation" Sitzungsberichte der Koniglich Preuβischen Akademie der Wissenschaften, 1:688-696, 1916.
- [2] R. Hulse and J. Taylor, "Discovery of a pulser in a binary system", ApJ, 195:L51-53, 1982.
- [3] B. P. Abbott *et al.*, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", *PhysRevLett.* **116**, 061102, 2016.
- [4] B. P. Abbott et al., "Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral", *PhysRevLett.* 119, 161101, 2017.
- [5] 都丸隆行 他,「小型冷凍機の振動解析」,低温工学,**38**,693-702,2003.
- [6] 幾島悠喜, 李瑞, 都丸隆行, 「無振動冷却への道 Cryogenic Laser Interferometer Observatory(CLIO) 用低振動冷凍装置の開発-」, 低温工学, vol. 46 No.7, 2011.
- [7] D. Chen et al., "Vibration measurement in the KAGRA cryostat" Class. Quantum Grav. 31, 224001, 2014.
- [8] 神田展行「重力波観測が明らかにする中性子星連星の姿」, 天文月報, 2018年1月.
- [9] 西澤篤志「重力波検出器によるスカラー・ベクトル背景重力波の探査」, 重力波研究交流 会, 2009 年 11 月 5 日.
- [10] 苔山圭以子、「重力波検出器の開発と重力波天文学」、大阪大学電気工学特別講義、2016 年 6月 28日.
- [11] 東芝京浜事業所, www.toshiba.co.jp/worldwide/index.html
- [12] KAGRA 公式感度曲線, http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/researcher/ parameter
- [13] LCGT Collaboration, 「大型低温重力波望遠鏡 (LCGT 計画) -設計文書 (第 3 版)-」, (JGW-T0400030-v4), 2009.
- [14] C. Tokoku *et al.*, "Cryogenic system for the interferometric cryogenic gravitationalwave telescope, KAGRA design, fabrication, and performance test -" *AIP Conf. Proc.* **1573**, 1254 (2014); doi: 10.1063/1.4860850
- [15] T. Kume et al., "Development of the very low vibration cryocooler unit for large-scale cryogenic gravitational wave telescope, KAGRA" ICEC24/ICMC2012, 399-402(2012)
- [16] 長松昭男 著「モード解析入門」, コロナ社, 1993.
- [17] 特許機器 MG-102S, http://www.tokkyokiki.co.jp/product/product_mra06x. html
- [18] Nanometrics 社 Trillium compact, https://www.nanometrics.ca/products/ instrumentation/trillium-compact-seismometers

[19] リニアテクノロジー社 LTspice, http://www.linear-tech.co.jp/designtools/ software/#LTspice

謝辞

本研究は、多くの方々の協力のおかげで成し遂げることができました。深く感謝致します。

指導教官である三代木伸二准教授には、研究において非常に助けて頂きました。毎週の研究 室ミーティングでの議論をはじめ、自分が実験で困った時には何度も助けて頂きました。特に、 坑内での作業の時には、何度も一緒に坑内に入って頂き、実験に付き添って頂きました。また、 自分の拙い修士論文の修正について、長時間に渡って指導して頂きました。

富山大学理学部の山元一広准教授には、振動解析の日々の研究を遂行する上で、多くの議論 や助言をして頂きました。また、柏の実験室にいた頃は、全く実験が分からなかった自分に、 一から電気回路の作り方や、測定装置の使い方などについて教えて頂きました。神岡での実験 でも、何度も一緒に坑内に入って頂き、作業しづらいクライオスタット内の作業も何度も自分 と一緒にして頂きました。また、自分の実験に関する些細な質問でも、丁寧に説明して頂きま した。

高エネルギー加速器研究機構の木村誠宏准教授には、クライオスタットに関する情報につい て詳しく教えて頂きました。また、坑内での作業も、多くの場面で助けて頂きました。

同機構の都丸隆行准教授、宇宙線研究所の鈴木敏一氏、牛場崇文氏には、研究の様々な場面 で多くの助言を頂きました。特に、実験が行き詰った時には、有効な打開策を与えて頂き、非 常に助かりました。同機構の萩原綾子氏には、研究に必要な多くの CAD 図を用意して頂きま した。同機構の久米達哉氏には、打撃試験の方法をゼロから丁寧に教えて頂き、打撃試験に用 いる道具一式を貸して頂きました。東京大学地震研究所の新谷昌人教授、宇宙線研究所の端山 和大助教には、研究に必要な地震計を貸して頂きました。

また、同じ三代木研究室に属する長谷川邦彦先輩、両角達彦氏、荒井滉矢氏には、ミーティン グなどで様々な助言や議論をして頂きました。自分以外の研究についても詳しく知ることがで き、非常に有益でした。長谷川邦彦先輩には、クライオスタット内の作業も手伝って頂き、大 変助かりました。宇宙線研究所の宮本昂拓先輩、田中宏樹先輩には、低温実験や研究生活に関 する様々なことを教えて頂き、また相談に乗って頂きました。

最後に、自分の進路について理解を示し、応援して頂いた両親に最高の感謝の意を表します。

103