# 平成30年度

### 卒業論文

## KAGRA坑内での環境磁場測定

2019年2月8日

富山大学理学部物理学科 レーザー物理学研究室 学籍番号1540138

### 森 有紀乃

# 目次

第1章	重力波について	1
1.1	重力波とは....................................	1
1.2	重力波観測の意義	2
1.3	重力波の直接観測方法	3
第2章	KAGRA について	5
2.1	KAGRA とは	5
2.2	KAGRA の特徴	6
第3章	環境雑音について	7
3.1	環境雑音とは....................................	7
3.2	PEM の目的と意義	7
第4章	KAGRA 坑内における磁場測定	8
4.1	実験動機と目標	8
4.2	実験概要	9
4.3	実験手順と使用した環境モニターについて..................	10
4.4	磁束計の測定原理	12
4.5	スペクトルについて	14
第5章	結果と解析	15
5.1	測定結果と各測定場所の特徴づけ.................................	15
5.2	特徴的なラインやピークについて	63
	5.2.1 共通したピークのまとめ.................................	63
	5.2.2 ラックの個体差, 指向性比較	65
	5.2.3 SR2 チェンバー横と OMC チェンバー横にあるエアファンの個体差比較	69
	5.2.4 クリーンルーム外とクリーンルーム内の比較	71
	5.2.5 チェンバーの個体差比較と音場による環境磁場の発生について	74
	5.2.6 ハムノイズについて	77
第6章	まとめと今後の展望	79
6.1	まとめ	79
6.2	今後の展望	79

第7章	謝辞	81
付録 A A.1 A.2	PSLroom への環境モニターの設置         設置した環境モニターの紹介         A.1.1         マイク         設置場所	82 82 84 86
付録 B	フーリエ変換	87
付録 C	磁束計と ADC のキャリブレーションについて	89
参考文献		93

### 第1章

## 重力波について

### 1.1 重力波とは

重力波は、質量を持った物体が時間とともに四重極的な運動することにより発生する時空の歪みのさざ 波である。

重力波の主な性質を以下に箇条書きでまとめる。

- 光速で時空のゆがみが波打つように伝播する横波である。
- + モードと × モードの2つの偏極モードをもつ。
- 振幅が非常に小さい。重力波の振幅 h は 2 点間の空間の歪みの変化量であり、

$$h \sim \frac{\delta L}{L}$$

である。

• 振幅が小さいため物質との相互作用が小さく、非常に高い透過性がある。

重力波は 1916 年、A.Einstein が一般相対性理論で重力波の存在を予言し、理論提唱から約 100 年後の 2015 年 9 月,10 月,12 月に 3 度アメリカの重力波望遠鏡 LIGO により直接観測され重力波の存在が確認 された [6]。重力波の直接観測に 100 年かかった理由は、重力波はとても微弱だからである。2 つの物体 がお互いの周りを周っている四重極的な加速度運動を考えると、生成される重力波の振幅 h は物体の質量 に比例し、その運動の速度の 2 乗に比例する。また、観測点と重力波発生源の距離に反比例する。そのた め、より大質量で高密度な物体で、地球に近く、高速で運動している重力波源ほど検出しやすい。する と、宇宙での天体現象からの重力波でないと観測できない。主な重力波源を簡単にまとめる。

#### 突発的な重力波源

突発的な重力波源にはまず「コンパクト連星の合体 | がある。

2 つの星がお互いの重力で引っ張り合いながら公転運動す るときに重力波を放射する。それにより、エネルギーを失 いながら軌道距離が近き、公転周期も徐々に短く、速く回 転する。重力波の周波数は高くなり振幅も大きくなる (イ ンスパイラル期)。そして連星は衝突する (合体)。この衝 突の直前で最も強い重力波が放射される。衝突後の星は ほとんどの場合ブラックホールと成り、準固有振動特有の 重力波を放射し、減衰振動をしながら定常状態に落ち着く (リングダウン期)。



図 1.1: コンパクト連星の合体の様子と 発生する重力波信号の波形

コンパクト連星はコンパクト天体から成る連星であり、コンパクト天体には中性子星やブラックホール などがある。コンパクト天体は恒星の進化の最後に生成される。まず恒星の中心部で核融合が起こり鉄原 子核が生成される。鉄原子核は、最も安定な核であるため、これ以上核融合が進まなくなる。そうなると 内部からのエネルギー供給がなくなり、自己重力により、中心部が非常に高密度になる。密度が原子核レ ベルに達するとこれ以上収縮できなくなり、コアバウンスが起こり、衝撃波が生じる。その衝撃波が表面 まで達した際に大量の物質が宇宙上に拡散される。その現象を超新星爆発というが、その中心で生成され た高密度な天体がコンパクト天体である。そのコンパクト天体の生成時に起こる"超新星爆発"も重力波源 である。そして、"高速回転パルサー"である。高速で自転する中性子星の質量や速度分布が回転軸の対称 からずれるとき重力波を放射する。超新星 SN1054 のかにパルサーや帆座パルサーなど多数存在するた め、振幅は小さいが、長時間で観測すると半永続的に観測可能である。

#### 連続的重力波源

連続的重力波源としては、「周期的なコンパクト連星の公転運動」や非軸対称の中性子星の高速に回転 する「回転中性子星」がある。また、超大質量ブラックホール (SuperMassive Black Hole:SMBH) もそ の1つである。

#### 背景重力波

背景重力波とは、初期宇宙からの情報を含んだ様々な天体からの重力波が混ざり合って個別にできない 重力波である。宇宙が誕生後の 10<sup>-34</sup> 秒後に宇宙は急激に膨張し (インフレーション)、その時の時空の 量子的な揺らぎによって重力波が発生すると考えられている。

#### 1.2 重力波観測の意義

重力波を観測する意義は、まず第一に一般相対性理論の検証である。そして次に、従来の電磁波等に変わって、電磁波等では観測することができなかった宇宙現象を観測可能にする「重力波天文学」を切り開くことである。重力波天文学により最も期待されていることは初期宇宙をみることである。電磁波では宇宙誕生後の38万年間は物質にあたり散乱し、地球に届くことのなかった情報も、重力波は相互作用が小

さいため非常に高い透過性があるという特徴を生かして直接観測を可能にする。

### 1.3 重力波の直接観測方法

重力波を直接観測するために、マイケルソンレーザー干渉計型重力波望遠鏡が用いられている。概略図 を以下に示す。



図 1.2: + モードの空間のひずみ (黒点は重力波に 図 1.3: マイケルソンレーザー干渉計型重力波望遠鏡 よって空間が歪んだ後の自由質点を表している)の概略図

マイケルソンレーザー干渉計型重力波望遠鏡は重力波が潮汐的に自由質点間の距離を伸縮させる性質を 生かして重力波を観測する。まずレーザーから出た光はビームスプリッター (BS) で透過、反射し直行す る2方向に分かれる。吊るされた鏡で反射し BS で再結合し、干渉した光はフォトダイオード (PD) で検 出され、干渉縞が見える。重力波は自由質量に対して2点間の固有距離を変化させるという性質を活か し、干渉計に重力波が到達すると、空間が歪み、直行する2方向の光路長がそれぞれ伸び縮みし、干渉光 の明暗が変化する。これを測定することで重力波を観測する。

地上の重力波望遠鏡が観測対象にしている周波数帯は 10Hz-1kHz であり、100Hz の重力波を検出する際 に最も有効な基線長は 750km である。これを地球上に建設するのは不可能なため、効率よく基線長を長 くするため、BS と鏡の間にアーム共振器を加えたファブリペロー・マイケルソン干渉計型が導入された。 これが現在の大型重力波望遠鏡の主流である。



図 1.4: ファブリペロー・マイケルソン干渉計型重力波望遠鏡の概略図

BS と鏡の間にインプットミラーを設置し、レーザー光を往復させることで、レーザー光は2つの鏡の 間で共振し、アーム内での滞在時間が増える。重力波との相互作用の時間が長くなり、実効的な基線長が 長くなることで干渉計の感度を向上させる。[2][3]

### 第2章

## KAGRA について

### 2.1 KAGRA とは

新たな重力波天文学を切り開くため、アメリカの LIGO(Hanford,Livingston),フランス,イタリアのVirgo など干渉計型大型重力波望遠鏡が建設されており、重力波 の国際ネットワークが増築されている。重力波望遠鏡は とても巨大で精密な観測が求められるため天候や地震の 影響を受けやすく、長時間の稼働は難しい。また重力波望 遠鏡は指向性が弱いため多くの重力波望遠鏡を建設する ことで、多方面をカバーし、重力波の方向を絞る必要があ る。高性能で高分解な観測を目指すため、日本にも岐阜県 飛騨市神岡町鉱山地下に重力波望遠鏡、KAGRA が建設 されている。



図 2.1: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

KAGRA は基線長 (BS から終端に吊るされた鏡までの距離) が 3km×3km のファブリペロー・マイケルソン干渉計型重力波望遠鏡である。

KAGRA の光学系の概略図を図に示す。



図 2.2: KAGRA 概略図。黒枠で囲まれて いる箇所の概略図を右図に示す。

図 2.3: KAGRA の光学系の概略図

まずレーザーをでた光は  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow G$ の順に進む。A はインプットモー ドクリーナー (IMC) と呼ばれる 3 枚の鏡から成る三角リング共振器であり、レーザーの周波数を安定化 しビームの断面を円形に整えている。B はレーザーの直径を基線長 3km の干渉計に合う径に拡大してい る。C はパワーリサイクリングを行っている。レーザーと BS の間に置くことで、干渉計から返ってきた 光を入射光と位相を合わせ再び干渉計に戻すことで、干渉計の入射パワーをあげ、感度を向上させてい る。D は BS であり、レーザーを直行する 2 方向に分け、3km 先にある鏡で反射して戻ってきた光を再 結合、干渉させ、F に送る。E は 3km 先の鏡とファブリペロー共振器となっている。3km 先の鏡と同様 にサファイア鏡が用いられている。F はシグナルリサイクリングを行っている。BS と光検出器の間に置 くことで、干渉計に重力波サイドバンドを打ち返し、重力波信号を含んだ光を抑制している。G はアウト プットモードクリーナー (OMC) と呼ばれている。OMC では、余計な光を取り除きその光を PD で検出 している。

#### 2.2 KAGRA の特徴

重力波望遠鏡にとって、もっとも敵となるのが雑音である。重力波信号以外の雑音が入ってしまうと、 重力波信号が埋もれてしまうため、雑音をいかに取り除くかがポイントとなる。雑音には地面振動、熱雑 音、量子雑音などがある。KAGARA がとっている特徴的な対策は地面振動を抑えるために、静寂な環境 である地下に建設していることと、熱雑音を抑えるため鏡を冷却していることである。地下に建設するこ とでの地面振動のオーダーを約2桁 (@10Hz) 下げている。また、鏡の熱雑音 (熱による分子のブラウン 運動)を防ぐため、鏡を冷却している。そのために鏡の材質は低温域で熱伝導がよい単結晶サファイアを 鏡の材質としてを使用し、サファイアの熱が伝わりやすい 20K まで冷やしている。この2点は他の干渉 計型大型重力波望遠鏡にはない KAGRA の最大の特徴であり、武器である。KAGRA の感度をさらに向 上させるためには、これらの雑音以外の環境由来の雑音が KAGRA に与える影響を調べる必要がある。 次章で詳しく説明する。[2][3][4]

### 第3章

## 環境雑音について

### 3.1 環境雑音とは

微小な鏡の変位を読み取る大型重力波望遠鏡にとって最大の敵と成るのは雑音であり、その雑音は干渉 計の内部で発生する雑音と、外部で発生する雑音に分けられる。前者には熱雑音や量子雑音などがある。 しかし、本論文では後者の雑音に焦点を当てる。この雑音は環境雑音と呼ばれており、干渉計や鏡などを 設置する場所や環境、また電源などによって変化し、干渉計に影響を与えてしまう。モニターするべき 環境雑音には音、振動、磁場、気圧、温湿度などがある。この環境雑音を取り除くために 2018 年 8 月に KAGRA 内で発足したチームが、PEM(Physical Environment Monitors) チームである。

### 3.2 PEM の目的と意義

KAGRA には様々な環境由来の環境雑音があり、PEM チームの最大の目的は「環境雑音がどのように 重力波望遠鏡に影響を及ぼしているかを調べること」である。そしてその雑音を低減し、KAGRA の感 度を設計感度に到達させることである。具体的には環境雑音を環境モニターを用いて測定、評価、低減す るため以下のステップで実験を行っている。

- 1. マイク(音)、加速度計(振動)、磁束計(磁場)などの環境モニターを様々な場所に設置する。
- 2. 振幅スペクトル密度 [物理量/√Hz] を測定し、干渉計の感度への影響を把握する。
- 環境雑音をインジェクション(注入)し、干渉計の信号にどのくらい影響を及ぼすか、伝達関数を 求める。
- 4. 雑音の原因となる発生源への対策をとり、雑音を低減する。

以上の4ステップが基本的な PEM チームの実験内容である。私は環境モニターの中でも、磁束計を担当 しており、本論文では KAGRA 坑内の様々な場所を磁束計を用いて行った磁場測定についてまとめた。 我々は雑音を見つけ、取り除くことをノイズハンティングと呼び、小さな雑音から、いくつもの雑音が重 なった複雑なものまで、1 つでも多くの雑音をノイズハンティングし、KAGRA に貢献することを常に目 標に掲げている。[1][7]

### 第4章

## KAGRA 坑内における磁場測定

### 4.1 実験動機と目標

KAGRA 坑内の環境雑音を把握し、今後のノイズハンティングの参考資料となる環境雑音 MAP の作成のため、まず KAGRA 坑内のセンターエリアで磁場測定を行った。

この実験の最終目標は、アメリカの重力波望遠鏡 aLIGO の PEM チームが作成している MAP サイト [8] である。



図 4.1: aLIGO(LHO) の PEM チームが作成した環境雑音 MAP サイトのスクリーンショット。干渉計 に様々な環境モニターが設置してあり、見たいモニターをクリックすると、その環境モニターの情報や、 参考スペクトル図、設置写真などを見ることができる。

磁場測定の意義は、KAGRA 内の磁場発生源が発する磁場を把握し、重力波信号に与える影響を調べ、 低減することである。磁場測定が役立つ具体的な例としては、OSEM があげられる。OSEM とは磁石と コイルを組み合わせたアクチュエーターに LED と PD を加えることで、磁石の位置を知ることができる ものである。LED と PD の間に光を遮る物体 (磁石) をいれることで、光の強度変化が置き、それを位置 に換算するものである。鏡の揺れを防ぐためには鏡の振動をモニターし、フィードバック制御する必要が あるため、鏡には OSEM が取り付けられている。外部の装置から発生する磁場が OSEM に影響を与え てしまうことは、干渉計の感度を下げることになるため、磁場を把握することは非常に重要である。[9]





図 4.2: 鏡を制御するアクチュエーターである OSEM



#### 4.2 実験概要

KAGRA 坑内の黒枠で囲ったセンターエリアで磁場測定を行った。主に磁場が大きいと予想される以下の箇所で測定を行った。

- クリーンルーム:空気中のゴミやホコリ、浮遊微生物などの混入を防ぐために一定の清浄度レベル になるように管理されたエリアである。
- ラック:回路が収納されている棚である。
- KoachFilter:クリーンルーム内の空調を整えるもの。外気をろ過し空気を循環させている。
- チェンバー:クリーンルーム内にある鏡が収納されている真空槽 (チェンバー)。金属製である。
- 送風機, 冷風機:KAGRA 坑内の空気を循環させている。今回は2つ合わせてエアファンと呼ぶ。

観測した場所を以下の図に示す。測定場所は1から24まで番号付けをした。





図 4.4: KAGRA 概略図。黒枠で囲まれているとこ ろが今回測定を行ったセンターエリアである。

図 4.5: 磁場測定の測定場所

### 4.3 実験手順と使用した環境モニターについて

簡単に磁場測定の実験手順を説明する。

- 手順 1, 測りたい対象の前にマイクスタンドに固定した磁束計を置く。
- 手順 2, 磁束計を Distributer と Whitening Filter が揃った Whitening Filter 回路に接続する。
- 手順 3, スイッチボードを用いて Whitening Filter をかける。
- 手順 4, Whitening Filter 回路はアナログ・デジタルコンバーター (ADC) につながれており、解析 ソフト diaggui を用いて振幅スペクトル密度 (ASD) を得る。



図 4.6: 磁束計の接続方法 (ADC は磁束計で受け取ったアナログ信号をデジタル信号に変換するもの)

では手順1から詳しく説明する。

手順 1:使用した磁束計は Bartington 社の Mag-13MCL100(円形、低ノイズ、±100[µT] レンジ) である。 フラックスゲートセンサーが用いられており、x,y,z 方向の 3 軸同時に、静磁場と交流磁場の測定が可能 である。フラックスゲートセンサーは磁束計の軸方向を表すシールの箇所に入っているため、そこを見た い磁場源に近づけて使用する。磁束計の電源は直流電圧の電源を使用している。

マイクスタンドの先端に磁束計を取り付け、磁束計の軸方向は x 軸を BS を透過したレーザーと平行方向 (x エンド方向)、y 軸を BS を反射したレーザーと平行方向 (y エンド方向)、z 軸を鉛直上向きにした。



図 4.7: Bartington 社の磁束計 (MAG-13MCL)



図 4.8: 測定方法。磁束計をマイクスタンドの先端に 固定し、測定を行った。

手順 2:Whitening Filter 回路とは Whitening Filter と Distributer が揃った回路である。Distributer とは磁束計から得た 3 軸分の信号を x,y,z 軸それぞれの信号に分ける分配装置である。磁束計のアナロ グ信号をデジタル信号に変換する際、ADC(アナログ・デジタル変換器)を使用する。線形でなめらかな アナログ信号をデジタル信号に変換する際に、信号は量子化されたとびとびな信号になり、この時 ADC ノイズが発生する。この ADC ノイズに磁束計の信号が埋もれてしまうため、Whitening Filter を使い、 磁束計の高周波成分の信号を増幅する。Whitening Filter 回路からは Dsub15pin が出力されており、 Whitening Filter 回路から変換コネクタを使い磁束計に接続する。

手順 3:Whitening Filter 回路にはスイッチボードをつけ、信号の増幅の設定を行う。スイッチボードには S1-S4 まであり、S1 は磁束計の x 軸、S2 は y 軸、S3 は z 軸である。S1-4 にはそれぞれ ch1-7 の スイッチがあり、そのスイッチで増幅の設定を行う。今回は 3 軸共に Whitening Filter をかけたいため、S1-3 で ch4,5 スイッチを ON に設定した。これは、約 1Hz に zero 点を 2 個、約 10Hz に pole 点を 2 個 置いたことになる。こうすることにより、地磁気などの DC 成分は増幅せずに、本論文で議論したい高周 波成分のみを増幅することができる。この zero-pole filter の影響はデジタル変換後のデータ内で逆フィ ルタをかけることによりキャンセルしている。



図 4.9: Whitening Filter 回路とそのスイッチボード、及び Dub15pin と磁束計をつなげる変換コネクタ

手順 4:解析ソフトは diaggui を用いて測定を行った。diaggui は時系列データを高速フーリエ変換により、周波数領域のスペクトルに変換するソフトである。測定時のパラメータは機械特有のラインが見たいため BW=0.05[Hz],AV=20[回],Overlap=50[%] に設定し、長い時間フーリエ変換を行った。

磁束計の電源は Whitening Filter 回路から供給されており、Whitening Filter 回路は ±15V の直流電 源が供給されている。そのため、交流電源特有の 60Hz のハムノイズの影響はない。

#### 4.4 磁束計の測定原理

使用した MAG13-MCL についての測定原理をまとめる。MAG-13 にはフラックスゲート磁気センサ が使われており、磁気によってコイルに生じた電圧の変化を検出するセンサである。基本構造を図 2 に示 す。高透磁率をもつコアの周りに巻線が巻かれたコイルが用いられている。コイルには 2 種類あり、磁場 を発生させ磁化飽和させるための励磁コイル (青色)、及び磁気の変化を検出するための検出コイル (赤色) で構成されている。励磁コイルは左側を A、右側を B と別々のコイルと考えると、励磁コイルに励磁交 流電流 *I<sub>exc</sub>* を流すことで励磁磁界がコイルに発生し、コイル A とコイル B は周期的にそれぞれ逆向きに 磁化飽和する。この状態で外部から磁場が加わると、検出コイルから印加された磁界に比例した電圧 *Vout* が誘導され、これがセンサ出力となる。



図 4.10: フラックスゲートセンサの構成

フラックスゲートセンサの動作原理についての図を図3にまとめる。



図 4.11: フラックスゲートセンサの動作原理

励磁交流電流 *I<sub>exc</sub>*(グラフ左上、点線青色) を励磁コイルに流すと励磁磁界 *H<sub>exc</sub>* が発生しコアを飽和さ せるのに十分な振幅を持っていると、発生する磁束  $\phi_{exc}$  はコアの持つ磁気特性により周期的に飽和し、 サイン波の形が頭打ちした形 (グラフ左上、実線灰色) になる。

外部から外部磁場  $H_{out}$  がないとき  $(H_{out} = 0)$  を考えると、励磁コイル A,B で生じる磁束  $\phi_A$ 、 $\phi_B$  はそ れぞれ  $\phi_{exc}$  と同じ大きさであり、それぞれ逆方向に発生するため、図 (グラフ左、上から 2 つ目) のよう に表すことができ、この磁束により発生する誘導起電力  $V_A, V_B$  はファラデーの法則より、

$$V = -N\frac{d\phi}{dt}$$

となる。ここで N はコイルの巻き数であり、磁束の変化を打ち消す方向に誘導起電力 V が発生する。 *V<sub>A</sub>*, *V<sub>B</sub>* は図 (グラフ左、上から 3,4 つ目) に示すように発生し、出力電圧 *V<sub>out</sub>* は *V<sub>A</sub>*, *V<sub>B</sub>* が互いに打ち消 し合うため、

$$V_{out} = V_A + V_B = 0$$

となる。外部から外部磁場があるとき  $(H_{out} = H)$  を考えると、コイル A に発生する励磁磁場は外部磁場と同方向であり、コイル B に発生する励磁磁場は外部磁場と逆方向であるため、

$$H_A = H + H_{exc}$$
$$H_B = H - H_{exc}$$

となる。この時、励磁磁場はコイル A では早く、コイル B では遅く飽和するため、図 (グラフ右上) のように磁束がずれる。それにより、*V<sub>A</sub>*,*V<sub>B</sub>* でもずれが生じ、検出コイルには励磁電流の 2 倍の周波数を持つ電圧が発生する。この出力電圧を励磁周波数の 2 倍の周波数で同期整流することで、図 (グラフ右下、実線赤色) のようなセンサ出力を得る。

外部から検出したい磁場と交流出力 eoの関係はファラデーの法則より、

$$e_0 = \frac{d\phi}{dt} = NA\mu_0\mu\frac{dH(t)}{dt} + NA\mu_0\frac{dH(t)}{dt}$$

ここで φ はコイルの磁束、A はコアの断面積、μ は相対透磁率である。第一項は基本的な誘導磁場の作用 により得られる項であり、第二項がフラックスゲートの効果によって得られる項である。コアの透磁率は 周期的に励磁磁界により変化する。[10][11][12]

#### 4.5 スペクトルについて

重力波検出の際に扱う信号は、干渉計の鏡の変位である時間依存したアナログ信号であり、環境モニ ターからもアナログ信号を得る。アナログ信号を扱う際、時間のみでなく信号の振動する各周波数モード に分解 (スペクトル分解) することでより多くの情報を得るができる。スペクトル分解されたアナログ信 号の各周波数での振幅強度をグラフ化したものが振幅スペクトル密度 (ASD)[m/√Hz] である。この振 幅スペクトル密度は以下のように定義されている。

$$x_T(t) = \begin{cases} x(t), \left(-\frac{2}{T} < t < \frac{2}{T}\right) \\ 0 \end{cases}$$
(4.1)

 $x_T(t)$ をフーリエ変換すると、 $\tilde{x}_T(\omega)$ を得る。

$$\tilde{x}_T(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x_T(t) e^{-i\omega t} dt$$
(4.2)

我々は  $x_T(t)$  そのものより、その振幅の平均に興味がある。 $x_T(t)$  は振幅と位相の情報を含んでいるため、< $|\tilde{x}_T(\omega)|^2$ > を考える。

$$S(\omega) = \lim_{T \to \infty} \frac{2\pi < |\tilde{x}_T(\omega)|^2| >}{T}$$

$$\tag{4.3}$$

であり、この  $S(\omega)$  はパワースペクトル密度 (PSD) と呼ばれ、次元は  $[m^2/Hz]$  である。PSD の平方根を とると、 $[m/\sqrt{Hz}]$ より ASD の次元と一致する。例えば、ある信号の ASD を周波数帯 100-200[Hz] で積 分した値 (積分した PSD の平方根) は、

$$\sqrt{\int_{100}^{200} \tilde{S}_{PSD}(f) df} \simeq \overline{S_{ASD}(f)} \times \sqrt{200 - 100} = 10 \overline{S_{ASD}(f)}$$
(4.4)

となる。ここで

overlineS<sub>ASD</sub> は 100-200Hz 間の振幅スペクトル密度の平均値とする。つまり、測定したい周波数帯の 平方根をかけることで、信号の全スペクトル強度において特定の周波数帯のスペクトルが占めるおおよそ の強度を見つめることができる。

しかし現実では  $x_T(t)$  はランダムな信号であり、 $t \to \pm \infty, x(t) \to 0$  ではないためフーリエ変換できない。そこである信号とそれ自体が一定値ずれた、同一の信号がどれだけ相似しているかを定量化した自己相関関数  $R(\tau)$  を取り入れる。(自己相関関数は  $\tau \to \pm \infty$  で 0 に収束するため、フーリエ変換可能である。また、偶関数である。)

$$R(\tau) = \lim_{T \to \infty} \left\langle \int_{-\frac{2}{T}}^{\frac{2}{T}} x(t)x(t+\tau)dt \right\rangle$$
(4.5)

Wiener-Khintchineの定理より、自己相関関数をフーリエ変換するとパワースペクトル密度が得られる。

### 第5章

## 結果と解析

### 5.1 測定結果と各測定場所の特徴づけ

測定場所の写真と、測定結果のグラフ (x,y,z 軸のスペクトル図)を載せ、ノイズフロアのオーダーやノ イズフロアの揺らぎ、特有のラインやピークがある周波数をピックアップし、各測定場所の特徴づけを 行った。また、ハムノイズとその倍波についても表にまとめた。詳しい解析は (5.2) にまとめる。この結 果は今後、磁場雑音の特定を行う際の資料となることを目標とする。グラフは赤色が磁束計 x 軸成分、青 色が磁束計 y 軸成分、緑色が磁束計 z 軸成分で統一した。

今回の測定結果は、校正係数が間違っていることが論文作成後に判明した。測定結果が実際の数値の 1/2 しかないため、全ての測定結果に ×2 する必要があることをここに明記する。



図 5.1: 磁場測定の測定場所

①:センターエリアの入口付近、クリーンルームから 2m 程離れた場所で測定を行った。





図 5.3: 測定の様子

図 5.2: 測定場所

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$3.9{ imes}10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-10}$	$2.9 \times 10^{-9}$
180	$7 \times 10^{-10}$	$2.1 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-9}$
600	$4.9 \times 10^{-12}$	$3.5 \times 10^{-12}$	$7.7 \times 10^{-12}$
1800	×	×	×

表 5.1: ハムノイズについて



図 5.4:3軸比較したスペクトル図

ノイズフロアは 10Hz 以降から z,x=y 軸の順に高く、安定している。ピークの数も少なく、3 軸共通の ピークは 17.2Hz,30.5Hz があり、x 軸のみで 4Hz、z 軸のみで 1.1Hz のピークを得た。①は他の測定場所 の結果と比べて、ピークの数が少なく、ノイズフロアの揺らぎも小さいため、今後①を基準点とする。



②:PR2 チェンバーの近くにある送風機の近くで測定を行った。

図 5.5: 測定場所

図 5.6: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$2 \times 10^{-8}$	$1.7 \times 10^{-8}$	$7 \times 10^{-9}$
180	$1.4 \times 10^{-9}$	$8.1 \times 10^{-8}$	$2.2 \times 10^{-9}$
600	$1 \times 10^{-11}$	$1.3 \times 10^{-11}$	$7.7 \times 10^{-12}$
1800	×	×	×

表 5.2: ハムノイズについて

ノイズフロアは高周波につれて揺らぎが大きく、2 – 20Hz 間では z 軸が高く、x, y 軸はほぼ等しい。 20-300Hz 間は 3 軸ほぼ等しい。100Hz からは z,x,y 軸の順に高い。低周波では y 軸の揺らぎが大きい。 1-2Hz 間で 3 軸共に特有の盛り上がりがあり、x,z 軸は y 軸と比べて 10 倍スペクトル値が大きい。2.8Hz では 3 軸共通のピークがあった。z 軸での低周波の特有のラインは送風機の影響ではないかと考えた。ま た、高周波でのピークのスペクトル値は y 軸が最も高かった。

基準点と比較すると、ノイズフロアは高周波ではほぼ等しいが、ピークのスペクトル値は②のほうが高 く、y 軸では 10-20 倍高くなった。x,y 軸で 11.7Hz の共通のピークが見られた。



図 5.7:3軸比較したスペクトル図



図 5.8: 基準点との x 軸比較





図 5.10: 基準点との z 軸比較



③:IMC ラックに対して x 軸が平行方向、y 軸が垂直方向の状態で測定を行った。

図 5.11: 測定場所

図 5.12: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$2.7 \times 10^{-7}$	$2.9{\times}10^{-8}$	$5.7 \times 10^{-8}$
180	$4.4 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-8}$	$4.8 \times 10^{-9}$
600	$1.5 \times 10^{-10}$	$6.2 \times 10^{-10}$	$7.1 \times 10^{-11}$
1800	$3 \times 10^{-11}$	$4.3 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{-11}$

表 5.3: ハムノイズについて

ノイズフロアは 10Hz 以下は x 軸は y,z 軸に比べて 2 倍ほど高く、10Hz 以上は 3 軸ほぼ等しく揺らぎ も小さかった。1.5Hz,3.5Hz で 3 軸ともに盛り上がりがあり、15-20Hz では特有のピークが見られた。低 周波でピークが多く、特徴的なのは 11Hz と 13Hz、21Hz と 24Hz、42Hz と 44Hz など 2Hz 間隔で並ん でピークである。高周波でもハムノイズ以外のピークが多い。600Hz ではピークに広がりがなく、60Hz と同じようなピークの形だったが、1800Hz では  $\pm 2Hz$  ほどピークに広がりがあった。また、全体的にハ ムノイズの倍波は y 軸が最も高く、これはラックに対して y 軸が垂直方向であったことが影響だと考え られる。

基準点と比較すると、ピークのスペクトル値は③の方が高くピークの数も多いことから、ラックは磁場発 生源だということが分かる。



図 5.13:3 軸比較したスペクトル図



図 5.14: 基準点との x 軸比較

図 5.15: 基準点との y 軸比較



図 5.16: 基準点との z 軸比較



④:MCEN チェンバーの右側、クリーンルームから 1m 程離れた場所で測定を行った。

図 5.17: 測定場所

図 5.18: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$2.6{\times}10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-9}$	$3.9 \times 10^{-9}$
180	$1.4 \times 10^{-10}$	$2.8 \times 10^{-8}$	$5.6 \times 10^{-10}$
600	×	×	×
1800	×	×	×

表 5.4: ハムノイズについて

ノイズフロアは 100Hz 以下は 3 軸ほぼ等しいが、安定せず揺らぎが大きい。100Hz 以上は z,x,y 軸の 順にノイズフロアが高く、3 軸ともに安定しており揺らぎも小さい。周りに機械やラックがない場所で測 定したため、ピークが少ない。2-5Hz 間で特有のラインが見られた。

基準点と比較すると、ノイズフロア、ピークのスペクトル値共に基準点の方が高い。2-4Hz 間のラインが 3 軸共に基準点と似ており、11.7Hz で共通のピークがあった。









図 5.21: 基準点との y 軸比較



図 5.22: 基準点との z 軸比較



(5):IYC チェンバーの右側にある KOACH FILTER の Fan の前で測定を行った。

図 5.23: 測定場所

図 5.24: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$2.2 \times 10^{-8}$	$3.2 \times 10^{-9}$	$7 \times 10^{-9}$
180	$2 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-9}$	$3 \times 10^{-9}$
600	$1.6 \times 10^{-10}$	$3.7 \times 10^{-11}$	$7.7 \times 10^{-11}$
1800	×	×	×

表 5.5: ハムノイズについて

他の測定場所と比べて特有の盛り上がりが多く、70-120Hz,2000-5000Hz の間で、波を打つよう なラインがあった。500Hz 以降は KOACH FILTER に対して平行方向の y 軸がノイズフロア、 ピークの高さ共に x,y に比べて約 3 倍程高くなった。ノイズフロアは常に振動しており KOACH FILTER 近くの特有の雑音であると予想される。ハムノイズ以外でピークの高い周波数は低周波で は 8.5Hz,17Hz,26Hz,35Hz,43Hz,52Hz,69Hz,77Hz,86Hz,94Hz,103Hz,112Hz,120Hz,129Hz,138Hz と約 9Hz 間隔でのピークが見られた。ハムノイズの倍波である 1800Hz 付近ではピークと言うより盛り上がり があり、他にも 2000-2500Hz,3000-3200Hz,4000-5000Hz でも同様の盛り上がりが見られた。 基準点と比較すると、ノイズフロア、ピークのスペクトル値共に⑤の方が高く、KOACH FILTER の磁 場の強さが分かる。3 軸共通のピークは 17.2Hz であり、x 軸のみで 8.5Hz の共通のピークが見られた。



図 5.25: 3 軸比較したスペクトル図





図 5.27: 基準点との y 軸比較



図 5.28: 基準点との z 軸比較



(⑥:IY0 ラックに対して x 軸が垂直方向、y 軸が平行方向の状態で測定を行った。

図 5.29: 測定場所

図 5.30: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$8.2 \times 10^{-9}$	$8.3 \times 10^{-9}$	$2.5{\times}10^{-8}$
180	$3 \times 10^{-10}$	$6.4 \times 10^{-10}$	$4.7 \times 10^{-10}$
600	$5 \times 10^{-12}$	$1.5 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-11}$
1800	$1 \times 10^{-12}$	×	×

表 5.6: ハムノイズについて

IY0 ラックは他のラックに比べ収納されている回路が少ないため、ノイズフロアは比較的大人しく、 ピークの数も少ない。ノイズフロアは 100Hz から安定しており揺らぎも小さく、x = z,y 軸の順に高い。 低周波で特にピークの高い周波数は 3Hz,18.5Hz,37Hz であった。100Hz 付近で y 軸のみの盛り上がりが あった。ラックに対して x 軸が垂直方向、y 軸が並行方向に設置し測定を行ったが、ノイズフロア、ピー クの高さ共には x 軸のほうが高かった。

基準点と比較すると、高周波でのノイズフロアは基準点の方が高いが、ピークのスペクトル値は⑥の方が 高く、ピークの数も多い。基準点 (入り口付近) と IY0 ラック付近は同じ磁場発生源になりそうなものが 近くにないため、共通したピークはなく、ラインの形も似ていなかった。



図 5.31:3 軸比較したスペクトル図



図 5.32: 基準点との x 軸比較

図 5.33: 基準点との y 軸比較



図 5.34: 基準点との z 軸比較

⑦:機械室 (機械を収納しておく倉庫であり、様々なケーブルや使われていない機械が収納されている) の中央で測定を行った。



図 5.35: 測定場所

図 5.36: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$1.2{ imes}10^{-8}$	$1.9{ imes}10^{-8}$	$7.3{\times}10^{-9}$
180	$7.5 \times 10^{-10}$	$3 \times 10^{-10}$	$5.1 \times 10^{-10}$
600	$5 \times 10^{-12}$	$9 \times 10^{-12}$	$7 \times 10^{-12}$
1800	×	×	×

表 5.7: ハムノイズについて

KAGRA 内でも比較的磁場が弱そうだと思い測定したが、低周波で特有のラインが見られ、もう一度 測定し直し本当にこの磁場が正しいのか調べる必要がある。ノイズフロアは 100Hz 以降から安定してお り比較的おとなしく、x=z,y 軸の順に高い。

基準点と比較すると、ノイズフロアは基準点の方が2倍ほど高い。ピークの数は基準点とほぼ同じだが、 共通のピークはなかった。







図 5.38: 基準点との x 軸比較

図 5.39: 基準点との y 軸比較



図 5.40: 基準点との z 軸比較



⑧:IX0 ラックに対して x 軸が垂直方向、y 軸が平行方向の状態で測定を行った。

図 5.41: 測定場所

図 5.42: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$7.8 \times 10^{-8}$	$2.9{\times}10^{-7}$	$5.5 \times 10^{-8}$
180	$1.7 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-8}$
600	$2.7 \times 10^{-10}$	$3.7 \times 10^{-10}$	$1.7 \times 10^{-10}$
1800	$2 \times 10^{-11}$	$8 \times 10^{-11}$	×

表 5.8: ハムノイズについて

ノイズフロアは 10 - 100Hz 間では y=z,x 軸の順に高く、y=z 軸は x 軸に比べて 3 倍ほど高かったが、 ラインの形は 3 軸ほぼ等しかった。他のラックでは高周波で安定していたが、IX0 ラックでは 100Hz 以 降では z,x=y の順に高く、10<sup>-10</sup>[T] から 10<sup>-12</sup>[T] まで周波数に対し緩やかに減少する。ピークの高さは z 軸に比べて x,y 軸が高く、特に高いピークをもつ周波数は 20Hz であり 20Hz の倍波がでていた。 基準点と比較すると、ノイズフロア、ピークのスペクトル値、ピークの数ともに⑧の方が大きく、⑧の磁 場が強いことが分かる。



図 5.43:3 軸比較したスペクトル図



図 5.44: 基準点との x 軸比較

図 5.45: 基準点との y 軸比較



図 5.46: 基準点との z 軸比較

⑨:SR2 チェンバー近くにある送風機と冷風機の前で、冷風機に対して x 軸が垂直方向、y 軸が平行方向になるように測定をした。



図 5.47: 測定場所

図 5.48: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$9.8 \times 10^{-8}$	$7.4 \times 10^{-8}$	$3.7 \times 10^{-8}$
180	$6 \times 10^{-9}$	$4 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-9}$
600	$1 \times 10^{-11}$		$6 \times 10^{-12}$
1800	$6 \times 10^{-12}$		$1 \times 10^{-11}$

表 5.9: ハムノイズについて

送風機の前での測定であったからか、低周波で磁場が強く、特に 1.5Hz で高いピークが見られた。ノ イズフロアは 3 軸ともに等しく、10Hz から 7000Hz まで徐々に減少する。ピークの高さは x 軸で特に高 く、1.1Hz,3.8Hz,5Hz で高いピーク値を得たが、11.7Hz では 3 軸ともにハムノイズより高いピーク値が 見られた。また 5-6Hz 間で盛り上がりも見られた。

基準点と比較すると、ノイズフロアは等しく、3 軸共通のピークは 11.7Hz,30Hz があった。



図 5.49:3 軸比較したスペクトル図





図 5.51: 基準点との y 軸比較



図 5.52: 基準点との z 軸比較


(①:OMC ラックに対して、x 軸が平行方向、y 軸が垂直方向の状態で測定を行った。

図 5.53: 測定場所

図 5.54: 測定の様子

「ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$1.4 \times 10^{-7}$	$1.2{ imes}10^{-8}$	$2.6{\times}10^{-8}$
180	$2.3 \times 10^{-8}$	$6.1 \times 10^{-9}$	$8.1 \times 10^{-9}$
600	$5.2 \times 10^{-10}$	$3 \times 10^{-11}$	$7.3 \times 10^{-11}$
1800	$1.3 \times 10^{-11}$	$4.8 \times 10^{-12}$	$2 \times 10^{-11}$

表 5.10: ハムノイズについて

測定時はまだレーザー光が OMC チェンバーに到達しておらず、OMC ラックに収納されている回路 も、動いていないものが多かった。ノイズフロアは 500Hz までは 3 軸等しく、500Hz 以降は z,x,y 軸の 順に高い。3 軸共通のピークは 1.1Hz,1.7Hz,12Hz,14Hz,27.6Hz,30.5Hz などがあった。3582[Hz] で y 軸 の盛り上がりが見られた。

基準点に比べるとフロア自体のスペクトル値は高くないが、揺らぎが大きくぐらつきがあるように感 じた。



図 5.55: 3 軸比較したスペクトル図



図 5.56: 基準点との x 軸比較

図 5.57: 基準点との y 軸比較



図 5.58: 基準点との z 軸比較

①:OMC チェンバー近くにある送風機と空調の近くで空調機に対して x 軸が垂直方向、y 軸が平行方向 になるように測定をした。



図 5.59: 測定場所

図 5.60: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$8 \times 10^{-8}$	$1.2{\times}10^{-7}$	$4.2 \times 10^{-8}$
180	$6.4 \times 10^{-10}$	$5.3 \times 10^{-10}$	$1.7 \times 10^{-9}$
600	$1.2 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-11}$	$4 \times 10^{-11}$
1800			

表 5.11: ハムノイズについて

ノイズフロアは 3 軸共に等しく、100Hz から安定しており、揺らぎも小さい。3 軸共通のピークは 0.6Hz,1.2Hz,1.8Hz,11.7Hz と、0.6Hz の倍波が多かった。ノイズフロアは 11.7Hz,30Hz,60Hz で大きな 盛り上がりが見られた。

基準点と比較すると、高周波ではノイズフロアのオーダーはあまり変わらないが、低周波では①の方が 10 倍高い。共通のピークは 11.7Hz,30Hz があり、y 軸のみで 4Hz のピークがあった。



図 5.61:3 軸比較したスペクトル図





図 5.63: 基準点との y 軸比較



図 5.64: 基準点との z 軸比較

ここからはクリーンルーム内での測定結果である。 ⑫:OMC チェンバーのダクトが通る大開口部前で測定を行った。



図 5.65: 測定場所

図 5.66: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$2.6{\times}10^{-9}$	$6.8 \times 10^{-10}$	$1.3 \times 10^{-9}$
180	$1.7 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-11}$	
600	$2 \times 10^{-11}$	$5 \times 10^{-12}$	$4 \times 10^{-11}$
1800			

表 5.12: ハムノイズについて

ノイズフロアは 500Hz までは 3 軸等しく、500Hz 以降は z,x,y 軸の順に高い。低周波では 17.2Hz,23.5Hz,30Hz,36Hz,45Hz でノイズフロアの盛り上がりが見られ、高周波で 1150Hz,1700Hz,2450Hz,3450Hz で大きい盛り上がりが見られ、4000-5000Hz 間では特に大きい盛り上がりが見られた。3 軸共に高いピー クのある周波数は 12Hz であり、z 軸のみで 1.1Hz のピークがあった。 基準点と比較すると、ノイズフロアはほぼ同じオーダーであり、3 軸共通のピークは 11.7Hz,17.2Hz,30Hz があり、z 軸のみで 1.1Hz のピークを得た。



図 5.67: 3 軸比較したスペクトル図





図 5.69: 基準点との y 軸比較



図 5.70: 基準点との z 軸比較



(3:OMMT チェンバーの小開口部付近で測定した。

図 5.71: 測定場所

図 5.72: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$2.8 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-9}$
180	$1.2 \times 10^{-9}$	$7 \times 10^{-11}$	$7 \times 10^{-10}$
600	$1.2 \times 10^{-10}$	$7 \times 10^{-12}$	
1800			

表 5.13: ハムノイズについて

ノイズフロアは 110Hz 付近までは安定しておらず、x 軸が最もオーダーが低く、y, z 軸は形がほぼ一 致している。110Hz 以降は 3 軸のオーダーは等しい。22.5Hz,27.5Hz,36Hz,1150Hz でノイズフロアの盛 り上がりが見られた。3 軸共通のピークは 12Hz である。

基準点と比較すると、ノイズフロア3軸共にほぼ変わらないが高周波では<sup>(3)</sup>のほうがオーダーが1桁小 さくなっている。x軸ではピークの数、スペクトル値はほぼ変わらず、4Hz,12Hz で共通のピークがあっ た。y軸では12Hz で基準点と<sup>(3)</sup>共通のピークがあるが、基準点では鋭いピークであるのに比べて、<sup>(3)</sup>は フロア自体が盛り上がりピークが立っている。z軸では1.1Hz で共通のピークがある。



図 5.73: 3 軸比較したスペクトル図



図 5.74: 基準点との x 軸比較

図 5.75: 基準点との y 軸比較



図 5.76: 基準点との z 軸比較





図 5.77: 測定場所

図 5.78: 測定の様子

「ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$4.6 \times 10^{-9}$	$7.4 \times 10^{-10}$	$4.8 \times 10^{-10}$
180	$1.5 \times 10^{-9}$	$3.2 \times 10^{-10}$	$4.8 \times 10^{-10}$
600	$1.1 \times 10^{-11}$		
1800			

表 5.14: ハムノイズについて

ノイズフロアはオーダーは 3 軸等しく、低周波ではゆっくりとした揺らぎが見られ、500Hz 以降は z,x,y 軸の順に高い。17.2Hz,22.5Hz,27.5Hz,36Hz,43.6Hz,1130Hz でノイズフロアの盛り上がりが見られ た。3 軸共通のピークは 12Hz があり、y,z 軸で 1.2Hz,1.4Hz で高いピークが見られたが x 軸では見られ なかった。

基準点と比較すると、ノイズフロアのオーダーは 3 軸等しく、12Hz では 3 軸共通のピークがあった。x 軸では 1Hz-10Hz はオーダーやピークの高さは違うがグラフの形が等しいため、SRM と入り口の間にあ り、SRM 近くの磁場発生源からの雑音だと考えられる。y 軸では 4Hz で共通のピークがあり z 軸では 1.1Hz で共通のピークがあった。また、z 軸では各ピークの高さが基準点のほうが 10 倍ほど高かった。



図 5.79:3軸比較したスペクトル図



図 5.80: 基準点との x 軸比較

図 5.81: 基準点との y 軸比較



図 5.82: 基準点との z 軸比較



(B:SR3 チェンバー小開口部、ダクトロの前で測定を行った。

図 5.83: 測定場所

図 5.84: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$4.2 \times 10^{-9}$	$6.5 \times 10^{-10}$	$1.3{ imes}10^{-9}$
180	$1 \times 10^{-9}$	$4.7 \times 10^{-10}$	$7.4 \times 10^{-10}$
600			$5 \times 10^{-12}$
1800			

表 5.15: ハムノイズについて

ノイズフロアは 500Hz までは 3 軸等しく、500Hz 以降は z,x,y 軸の順に高い。10-50Hz 間 (17.2Hz,23.5Hz,25.5Hz,30Hz,36Hz,45Hz) で大きい、100-600Hz 間 (140Hz,320Hz,420Hz,500Hz) で小 さい盛り上がりが見られた。盛り上がりはあるが、高周波でのノイズフロア自体の揺らぎは小さい。3 軸 共通のピークは 1.4Hz,2.25Hz,5.5Hz,12Hz,17.2Hz,23.5Hz,44Hz などがあり、z 軸のみ 1.2Hz のピークが 見られた。

基準点と比較すると3軸共通のピークは12Hz,17.2Hz である。y 軸では4.3Hz で共通のピークがあり、 ピークのスペクトル値も全体的に⑮のほうが高く、z 軸では1.1Hz で共通のピークが見られた。ハムノイ ズ (60Hz) は3 軸共に基準点と比べてノイズフロアから盛り上がってピークをたてる形をしている。



図 5.85:3軸比較したスペクトル図



図 5.86: 基準点との x 軸比較

図 5.87: 基準点との y 軸比較



図 5.88: 基準点との z 軸比較



(⑥:SR2 チェンバーの小開口部付近、OMC,x 側で測定を行った。

図 5.89: 測定場所

表 5.16: ハムノイズについて

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$9.5 \times 10^{-9}$	$3.3 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$
180	$2 \times 10^{-9}$	$1.8 \times 10^{-9}$	$1.8 \times 10^{-9}$
600	$6.5 \times 10^{-12}$	$4.3 \times 10^{-12}$	$3.2 \times 10^{-12}$
1800			

表 5.17: ハムノイズについて

ノイズフロアは 1 - 10Hz で z,y,x 軸の順に高く、揺らぎが大きく安定していない。10-500Hz では 3 軸等しいが、ノイズフロアで 17.2Hz,23.5Hz,30Hz では大きい、34Hz,36Hz,38.5Hz では小さい盛り 上がりが見られた。500Hz 以降も低周波と同様に z,y,x 軸の順に高くなっている。3 軸共通のピークは 1.4,12Hz,54Hz などがあった。

基準点と比較すると、ノイズフロアは<sup>(1)</sup>に比べて基準点のほうが、高周波でオーダーが2倍ほど高いが、 ピーク値は<sup>(1)</sup>のほうが高かった。3軸共通のピークは12Hz,17Hz であったが、x,z軸ではその2点以外の ピークの位置が異なり、スペクトルの形が異なるため磁場発生源は別物だと考えられる。y軸では4Hz で 共通のピークが見られた。



図 5.91:3軸比較したスペクトル図



図 5.92: 基準点との x 軸比較

図 5.93: 基準点との y 軸比較



図 5.94: 基準点との z 軸比較



(⑦:BS チェンバーの x アーム側、SR2 チェンバー側で測定を行った。

図 5.95: 測定場所

図 5.96: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$5.4 \times 10^{-9}$	$5.4 \times 10^{-9}$	$2.3{\times}10^{-8}$
180	$9.4 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-9}$	$4 \times 10^{-9}$
600			
1800			

表 5.18: ハムノイズについて

ノイズフロアは常に z 軸が高く低周波では x,y 軸より 3 倍程大きかった。500Hz 以降は z,x,y 軸の順 に高い。チェンバーで共通していた低周波でのノイズフロアの盛り上がりは BS チェンバー SR2 チェン バー側では x,y 軸のみにあり、17.2Hz,21Hz,24Hz,28Hz,30Hz,34Hz で小さい盛り上がりが見られ、高周 波では 2300Hz,3300Hz,4250Hz,4600Hz で 3 軸共に小さい盛り上がりが見られた。3 軸共通のピークは 44Hz があり、全周波数帯で z 軸のピーク値が高い。

基準点と比較すると、ノイズフロアは基準点に比べて低周波では高周波での揺らぎが大きい。x,y 軸では 11Hz,17.2Hz に共通のピークがあるが、3 軸共にラインは余り似ていないため、共通の磁場発生源からの 雑音はないと考えられる。



図 5.97:3 軸比較したスペクトル図









図 5.100: 基準点との z 軸比較



(⑧:BS チェンバーの Y アーム側、PR2 チェンバー側で測定を行った。

図 5.101: 測定場所

図 5.102: 測定の様子

「ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$2.3 \times 10^{-9}$	$5.9{ imes}10^{-9}$	$5.5 \times 10^{-8}$
180	$1.8 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-8}$
600	$5.8 \times 10^{-12}$	$8.6 \times 10^{-12}$	$5 \times 10^{-11}$
1800			

表 5.19: ハムノイズについて

①とは BS を挟んで対象になるような場所で測定を行った。ノイズフロアは①と同様の結果となり、x ノイズフロアのオーダーの高さや盛り上がりが見られた周波数帯も一致した。ピークの高さは③のほうが 高く、これは⑧の近くに回路の収納された小ラックがあったからと考えられる。①と隣り合ったチェン バーであるため、スペクトルの形が似ていた。

基準点と比較した結果も①と同様の結果を得た。







図 5.104: 基準点との x 軸比較

図 5.105: 基準点との y 軸比較



図 5.106: 基準点との z 軸比較



(9:PR2 チェンバー、少ラック (回路がいくつか収納されていた)の近くで測定を行った。

図 5.107: 測定場所

図 5.108: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$6.5 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-8}$	$3.3{ imes}10^{-8}$
180	$5.7 \times 10^{-9}$	$4.5 \times 10^{-9}$	$5.3 \times 10^{-9}$
600	$1.2 \times 10^{-11}$	$1.8 \times 10^{-11}$	$2.9 \times 10^{-11}$
1800			

表 5.20: ハムノイズについて

ノイズフロアは低周波では z,x,y 軸の順に高く、100 - 1000Hz 間は等しいが 1000Hz 以降は低周波同様 z,x,y 軸の順に高かった。BS チェンバー近くの結果と同様に x,y 軸で 17.2Hz,21Hz,24Hz,28Hz,30Hz,34Hz で小さい盛り上がりがあり、3 軸共に 50Hz 周辺でも盛り上 がりが見られた。ラックの近くで測定を行ったためピークの数は多く、得に高いピークとして x,y 軸で 2.5Hz がある。

基準点と比較すると、高周波でノイズフロアの揺らぎが大きく、各ピーク値も高い。3 軸共通のピークと して 11Hz があった。



図 5.109:3 軸比較したスペクトル図



図 5.110: 基準点との x 軸比較

図 5.111: 基準点との y 軸比較



図 5.112: 基準点との z 軸比較

20:PR3 チェンバー近くで測定を行った。



図 5.113: 測定場所

図 5.114: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$1.8 \times 10^{-9}$	$2.2 \times 10^{-9}$	$9.8 \times 10^{-9}$
180	$2.1 \times 10^{-9}$	$1.6 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$
600			
1800			

表 5.21: ハムノイズについて

ノイズフロアは 500Hz までは 3 軸等しく、500Hz 以降は x=z,y 軸の順に高い。低周波では 12Hz,20Hz,24Hz,35Hz,43Hz,50Hz で小さい盛り上がりがあり、高周波では 300Hz で大きい盛り上がり が見られた。1-10Hz 間のラインは y,z 軸でほぼ等しく同じ磁場発生源からのノイズであると考えられる。 3 軸共通のピークは 3.6Hz,11.7Hz があり、y,z 軸共通のピークは 2.5Hz,8Hz、また z 軸のみのピークは 1.4Hz である。

基準点と比較すると、ノイズフロアは低く、揺らぎも大きいがピークの数はあまり変わらなかった。3 軸 共通のピークは 11.7Hz があり、各ピーク値は@のほうが高かった。







図 5.116: 基準点との x 軸比較

図 5.117: 基準点との y 軸比較





(1):PRM チェンバーの小開口部付近で測定を行った。

図 5.119: 測定場所

図 5.120: 測定の様子

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$1.2 \times 10^{-9}$	$6.2 \times 10^{-10}$	$1.4 \times 10^{-8}$
180	$7.2 \times 10^{-10}$	$2.2 \times 10^{-10}$	$3.2 \times 10^{-9}$
600			
1800			

表 5.22: ハムノイズについて

ノイズフロアは 500Hz までは 3 軸等しいが、500Hz 以降は x=z,y 軸の順に高い。低周波では@と同じ ような周波数帯で小さい盛り上がりが見られた。3 軸共通のピークは 3.6Hz,8.7Hz,11.7Hz があり、z 軸の みでは 1.5Hz でピークがあった。各ピークは z 軸でのピーク値が高かった。

基準点との比較はノイズフロアはஹの方が低いが、ピーク値はஹの方が高くなった。これはஹでピーク が立っている周波数でスペクトル値が大きく、より強い磁場があることが分かる。3 軸共通のピークは 11.7Hz であり、x 軸では 4Hz で共通のピークがあった。



図 5.121: 3 軸比較したスペクトル図



図 5.122: 基準点との x 軸比較

図 5.123: 基準点との y 軸比較



図 5.124: 基準点との z 軸比較

(2):IMM チェンバーの近くで測定を行った。



図 5.125: 測定場所

図 5.126: 測定の様子

「ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$5 \times 10^{-9}$	$1.8 \times 10^{-9}$	$1.2{ imes}10^{-8}$
180	$1.5 \times 10^{-9}$	$6 \times 10^{-10}$	$2.3 \times 10^{-9}$
600	$1.4 \times 10^{-11}$	$9.3 \times 10^{-12}$	$7.4 \times 10^{-12}$
1800			

表 5.23: ハムノイズについて

ノイズフロアは 500Hz までは 3 軸等しく、500Hz 以降は x=z,y 軸の順に高い。x 軸のみで⑳,㉒と同様の低周波での盛り上がりが見られたが、y,z 軸では 24Hz のみでの盛り上がりしか見られなかった。y,z 軸は低周波でのラインが似ているが、3.3Hz,8Hz では 3 軸共通のピークを得たため 3 軸共に同じ磁場発生 源からの雑音を見ていると考えられる。

基準点と比較すると、20と同様、ノイズフロアは20の方が低く、各ピーク値は20の方が高かった。3 軸共 に 11.7Hz で共通のピークを得たが、それ以外に共通のピークがなかったため、磁場発生源に共通点はな いと考えられる。



図 5.127:3 軸比較したスペクトル図



図 5.128: 基準点との x 軸比較





図 5.130: 基準点との z 軸比較

23:IFI チェンバー、ダクト近くで測定を行った。



図 5.131: 測定場所

ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$5.7 \times 10^{-9}$	$5.9{ imes}10^{-9}$	$9.4 \times 10^{-9}$
180	$8.8 \times 10^{-10}$	$2.6 \times 10^{-9}$	$3.2 \times 10^{-12}$
600	$3.4 \times 10^{-11}$	$4.5 \times 10^{-12}$	$1.6 \times 10^{-10}$
1800			

表 5.24: ハムノイズについて

ノイズフロアは 5Hz から 3 軸共に減衰し、100Hz 以降は z,x,y 軸の順に高くなった。 ⑳,㉒,㉒で見られ た低周波でのノイズフロアの盛り上がりはなく、x,y 軸で 100 - 500Hz 間で大きな盛り上がりが見られ た。8.7Hz,11.7Hz,17Hz,41.5Hz で 3 軸共通のピークがあり、4Hz では x 軸のみ、0.8Hz では y 軸のみ、 1.5Hz,4.3Hz, では z 軸のみでピークがあった。高周波では comb 波が見られた。

基準点と比較すると、ノイズフロアは低周波では23の方が約5倍高く、高周波ではほぼ等しいオーダー となり、各ピーク値は23の方が高い。低周波では3軸共通で4Hz,11.7Hz,17Hz などピークがあり、オー ダーが違うがラインの形も似ているため、共通の磁場発生源からの雑音であると考えられる。







図 5.134: 基準点との x 軸比較

図 5.135: 基準点との y 軸比較



図 5.136: 基準点との z 軸比較

Q4:MCF チェンバー、ダクト近くで測定を行った。



図 5.137: 測定場所

図 5.138: 測定の様子

「ハムノイズ [Hz]	x 軸 [T]	y 軸 [T]	z 軸 [T]
60	$1.6 \times 10^{-9}$	$4.4 \times 10^{-9}$	$4.8 \times 10^{-9}$
180	$6.5 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-9}$
600	$6 \times 10^{-12}$	$5.9 \times 10^{-12}$	$2.7 \times 10^{-12}$
1800	$3.6 \times 10^{-12}$	$7.6 \times 10^{-12}$	$3.6 \times 10^{-12}$

表 5.25: ハムノイズについて

ノイズフロアはほぼ 3 軸等しく、低周波では 10Hz,17.2Hz,23.5Hz で大きな盛り上がりが見ら れ、ハムノイズ (60Hz) ではノイズフロアから盛り上がりピークがあった。3 軸共通のピークは 1.5Hz,3.6Hz,5Hz,11.7Hz,17.2Hz,44Hz,54Hz などがあり、y 軸のみで 30.5Hz のピークを得た。

基準点と比較すると、ノイズフロアは約2倍高く、3軸共通のピークとしては11.7Hz,17.2Hz があった が、その他に共通のピークはなく、ラインの形も似ていないため、@は基準点とは違う磁場発生源からの 雑音によるピークであると考えられる。







図 5.140: 基準点との x 軸比較

図 5.141: 基準点との y 軸比較



図 5.142: 基準点との z 軸比較

## 5.2 特徴的なラインやピークについて

前章で特徴づけをした各データの中で、似ているスペクトル値をもった箇所や、特徴的なラインやピー ク値を持った箇所をまとめる。

## 5.2.1 共通したピークのまとめ

磁場測定の結果から各測定場所ごとに共通したピークが見られたため、DC-60Hz 間の共通したピーク を表にまとめる。

周波数 [Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.1	0	0								0	0
1.5			0								
4	0		0	0							
11.7		0	0	0					0	0	0
17.2	0		0	0	0	0		0	0	0	0
20				0				0			0
30.5	0		0	0		0	0		0	0	0
37						0			0		
40								0	0		
44		0	0			0		0		0	
54		0		0				0		0	

表 5.26: 測定場所で共通したピーク (クリーンルーム外)

周波数 [Hz]	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1.1	0	0	0	0									
1.4		0	0	0	0	0	0	0					
1.5									0	0	0	0	0
3.6									0	0			0
4			0		0					0	0	0	
11.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0				0	0		0	0				0
23.5	0	0	0	0	0	0					0	0	0
24								0	0	0	0		
30.5	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	
34					0	0		0					
36		0	0	0	0	0		0	0	0			0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 5.27: 測定場所で共通したピーク (クリーンルーム内)

同じ周波数でピークを持つ測定場所の中でも、特に場所に規則性がある周波数を以下の図にまとめる。 その周波数でピークをもつ測定場所をオレンジ色と青色の丸で囲む。偏りがある位置にその周波数の磁場 を発生する磁場雑音源があるため、今後のノイズ削減の資料とする。





図 5.143: 1.1Hz でピークをもつ測定場所

図 5.144: 1.4Hz,1.5Hz でピークをもつ測定場所 (1.4Hz:オレンジ色、1.5Hz:青色)





図 5.145: 11.7Hz でピークをもつ測定場所

図 5.146: 23.5Hz,24Hz でピークをもつ測定場所 (23.5Hz:オレンジ色、24Hz:青色)



図 5.147: 44Hz でピークをもつ測定場所

## 5.2.2 ラックの個体差,指向性比較

今回測定したラックは、IMC ラック、IY0 ラック、IX0 ラック、OMC ラックである。各ラックの中に 入っている回路は図に示す。また、各ラックに対して磁束計の x,y 軸がそれぞれ垂直方向を測定している か、平行方向を測定しているかを表にまとめる。z 軸は常時ラックに対して鉛直上向き方向である。



図 5.148: IMC ラック

図 5.149: IY0 ラック

図 5.150: IX0 ラック



ラック名	垂直方向	平行方向
IMC ラック	y 軸	x 軸
IY0 ラック	x 軸	y 軸
IX0 ラック	x 軸	y 軸
OMC ラック	y 軸	x 軸

表 5.28: ラックに対する磁束計の軸の向き

図 5.151: OMC ラック



まずラックに対して垂直方向,平行方向のそれぞれのスペクトルを比較する。



図 5.153: ラックに対して平行方向の磁場比較

垂直方向, 平行方向共に IX0 ラックで磁場が大きくノイズフロアは他の 3 箇所と比べて 100 倍大きい。 IX0 ラックには IMC,OMC ラックと比べて回路の数が少ないが、測定時にどのラックにも入っている IOchaccis(各回路からインプットしたデータを KAGRA 本体の計算機へアウトプットするための計算機) の近くで測定を行ったためと考えられる。IY0 ラックが IMC,OMC ラックよりノイズフロアが低い理由 としては、ラックに収納されている回路の数が少ないためである。



各ラックごとに、垂直方向と平行方向を磁場比較を行った。

図 5.154: IMC ラックの垂直方向と平行方向の磁場 図 5.155: IYO ラックの垂直方向と平行方向の磁場比 比較 較



図 5.156: IX0 ラックの垂直方向と平行方向の磁場比 図 5.157: OMC ラックの垂直方向と平行方向の磁場 較 比較

IMC,IY0,OMC ラックは垂直方向, 平行方向共にノイズフロアのオーダーも等しく、指向性はない。特に IX0 ラックでは低周波でのノイズフロアのラインが一致しているため、同じ磁場発生源からのノイズ を見ていると考えられる。低周波では平行方向の磁場のほうが約2倍高く、高周波ではノイズフロアは等しい。



最後にラックに対して鉛直上向きである z 軸を比較する。

図 5.158: ラックに対して鉛直上向きの磁場比較

各ラックは、収納されている回路の数やケーブル、回路の中にあるファンや動作確認のために使われ る LED などで磁場の大きさが変化するが、今回は回路それぞれの磁場を測定したのではなく、ラックか ら 50cm 程離れた中央付近で測定を行ったため、ラックの個体差に差は余り見られなかった。ラックから 50cm 程離れた場所では磁場の指向性もない。
### 5.2.3 SR2 チェンバー横と OMC チェンバー横にあるエアファンの個体差比較

SR2 チェンバー近くにあるエアファンで行った測定結果と、OMC チェンバー近くにあるエアファン付近で行った測定結果を3軸それぞれ比較する。



図 5.159: x 軸比較

図 5.160: y 軸比較



図 5.161: z 軸比較

ノイズフロアは 3 軸共に等しい。高周波でのピーク値の高さは 3 軸共に OMC 付近のエアファンのほ うが高いスペクトル値を得た。x 軸では 0.6Hz で OMC 付近のエアファンのみで高いピークがあり、y 軸 では 1.5Hz で SR2 付近のエアファンのみでピークを得た。z 軸ではほぼ等しい形のグラフが得られた。3 軸共に OMC 付近のエアファンのみで 1.7Hz のピークがあり、これはエアファン以外から発生する磁場 だと考えられる。

エアファン前では基準点と比較して、両者ともに磁場が大きくなった。これはファンのモーターによる回 転磁界の影響が考えられる。この送風機は株式会社タニヤマの誘引ファン SF200-4F-0.03(4)RR である。 モーターは4極電動機である。4極電動機は固定子コイル2組の3相と、回転コイルから成るモーターで ある。3相のコイルにそれぞれ交流電流を流すと、回転コイルに4極の回転磁界が発生する。交流電流1 周期で固定子コイルが1組分回転するため、コイルが1回転するためには2周期必要である。よって回 転数 N[rps] は交流電流の電源周波数 f, 極数 P とすると、

$$N = \frac{2f}{P} \tag{5.1}$$

KAGRA は岐阜県にあるため、電源周波数 f=60[Hz] より

$$N = \frac{2 \times 60}{4} = 30[rps] \tag{5.2}$$

このファンは1秒間に30回転するため、送風機付近での測定結果では30[Hz] でピークが現れると考えられる。測定結果を以下に示す。



図 5.162: 送風機前での測定結果-x 軸

図 5.163: 送風機前での測定結果-y 軸



図 5.164: 送風機前での測定結果-z 軸

3 軸共に 30.5[Hz] でピークが見られた。これが実際に回転磁界の影響でのピークかは、送風機の稼働時 と稼働していない時を比較する必要があり、今後の課題となる。

### 5.2.4 クリーンルーム外とクリーンルーム内の比較

クリーンルーム外は①-①、クリーンルーム内は⑫-@である。クリーンルーム内の磁場発生源として考 えられるのは KoachFilter、光学定盤上にある光学センサー (PD など) があり、クリーンルーム外の磁場 発生源として考えられるのはラックやエアファン、電源、ケーブルやコード類、その他諸々の機械類であ る。今回はクリーンルーム内外で、測定場所の近い3箇所をピックアップし、x 軸で比較を行った。

IMC ラックと MCF チェンバーを比較する。





図 5.166: 紺色グラフ:IMC ラック前での測定結果, オレンジ色グラフ:MCF チェンバーでの測定結果

ノイズフロアのオーダーは低周波ではクリーンルーム外のほうが約3倍高く、60Hz以降はほぼ同じで あった。ピークの高さもクリーンルーム外の方が高く、ラック前での測定なため、回路による影響だと考 えられる。



PR2 チェンバー付近のエアファンと PR2 チェンバーを比較する。

図 5.167: 測定場所



図 5.168: 紺色グラフ:エアファン近くでの測定結果, オレンジ色グラフ:PR2 チェンバーでの測定結果

ノイズフロアのオーダーは、低周波ではクリーンルーム外のほうが約4倍高く、60Hz 以降はほぼ同じ であった。ラインの形やピークのたつ位置が似ているため、PR2 チェンバーもエアファンの影響を受け ていると考えられる。

OMC ラックと OMC チェンバーを比較する。





図 5.170: 紺色グラフ:OMC ラック前での測定結果, オレンジ色グラフ:OMC チェンバーでの測定結果

ノイズフロアのオーダーはほぼ等しいが、ピークの高さはクリーンルーム外の方が高く、ラック内の回 路の影響だと考えられる。

比較結果としては、ノイズフロアのオーダーは低周波ではクリーンルーム外の方が約3,4倍高く、60Hz 以降はほぼ同じであった。クリーンルーム外ではピークの数が多く、ピーク値も高かった。それは機械 類,回路からの磁場の影響を見ていると考えられる。クリーンルーム内では、ピークというよりかはノイ ズフロア自体の盛り上がりが見られた。次節で詳しく考察する。

### 5.2.5 チェンバーの個体差比較と音場による環境磁場の発生について

各チェンバーでの測定結果を特徴づけした際に、低周波 (17.2,23.5,25.5,30,36,45Hz) において共通した ノイズフロアの盛り上がりがあることが分かった。ノイズフロアの盛り上がりは長期間での磁場雑音の変 化を見ており、時間変化が大きいラインノイズと考えられる。ノイズフロアから約3倍の盛り上がりが見 えた時を盛り上がりが大きい、約1.5倍の盛り上がりが見えた時を盛り上がりが小さいとする。



図 5.171: ノイズフロアの盛り上がりが大きい例

図 5.172: ノイズフロアの盛り上がりが小さい例

その低周波でのノイズフロアの盛り上がりの大きさを表と図に示す。盛り上がりが大きいチェンバーを 赤色、盛り上がりが小さいチェンバーを黄色で色分けしている。

低周波でのノイズフロアの盛り上がり	チェンバー名
大きい	OMMT,SRM,SR3,SR2,PR3
小さい	OMC,BS,PR2,PRM,MCF
なし	IMM,IFI

表 5.29: 各チェンバーのノイズフロアの盛り上がり



図 5.173: 各チェンバーの低周波でのノイズフロアの盛り上がりの色分け

測定時にマイクスタンドの先端には磁束計を取り付け、マイク (ACO 社 type7147A/4152) をマイク スランドからぶら下げ同時に音場測定を行っていた。マイクの周波数範囲は 20[Hz]-10[kHz] なので、 20-50[Hz] 間のマイクと磁束計のスペクトル図を見ると、低周波で同様のノイズフロアの盛り上がりが見 られた。マイクのノイズフロアのオーダーは約 10<sup>1</sup>、磁束計のノイズフロアのオーダーは約 10<sup>-12</sup> なた め、マイクのデータに ×10<sup>-12</sup> し、オーダーを揃えプロットし、2 つのグラフの相似を見た。例として OMMT チェンバーの測定結果を使用する。



図 5.174: マイクの低周波でのノイズフロアの盛り上 図 5.175: 磁束計の低周波でのノイズフロアの盛り上 がり がり



図 5.176: マイクを磁束計のオーダーに合わせ、プロットしたグラフ

マイクと磁束計のスペクトルが一致したことから、マイクと磁束計は同じ雑音源からの音場、磁場を測 定していることが分かり、両者に影響を与える雑音源として音場による環境磁場の発生が考えられる。そ の中の1つに音場の振動(風)が考えられる。音場の振動により、導体(金属)が振動し、ファラデーの電 磁誘導の法則から誘導電流が発生する。そしてその誘導電流から磁束密度が発生するという可能性が考え られる。今回の測定場所であるクリーンルーム内は空調を整える KoachFilter があり、チェンバーは、金属性であるため、このように低周波でのノイズフロアの揺れが見られたと考えられる。

クリーンルーム内と同様に、クリーンルーム外でもマイクと磁束計のノイズフロアの揺れが一致する かを確認した。スペクトルが一致している箇所と一致していない箇所があったため、図にまとめる。



図 5.177: マイクと磁束計の低周波におけるノイズフロアの揺らぎについてのスペクトルが一致した測定 箇所。

この図からクリーンルーム内での測定では、金属性のチェンバーで測定を行ったため、ほぼ全箇所でス ペクトルが一致した。クリーンルーム外ではスペクトルが一致した測定箇所に共通点はなく、エアファン 近くで測定を行った際は、スペクトルが全く一致しなかった。その原因としては、音場により発生する環 境磁場より、機械自身から発する磁場が大きく、その磁場に埋もれてしまったからだと考えられる。



図 5.178: IMC ラック前で測定した際の低周波のスペクトルの一致



図 5.179: OMC チェンバー横にある送風機と空調近くで測定した際のでの低周波のスペクトルの不一致

#### 5.2.6 ハムノイズについて

ハムノイズとは交流電源などの振幅によって発生する電磁波に由来する、50Hz もしくは 60Hz の 電源周波数による雑音である。(KAGRA は岐阜県にあるため、60Hz。) 交流電流が流れている電源 ケーブルからは磁場の形でハムノイズが発生し、フレミングの右手の法則に従い電流が発生する。磁束 計,Whitening Filter 回路は直流電源を使用しているため、測定時のハムノイズは各測定場所の機械や回 路、ケーブルからのハムノイズだと考えられる。60Hz は倍波として 120,180,240Hz... と現れるため、今 回は 60,180,600,1800Hz のハムノイズのスペクトル値を比べる。 最もハムノイズが大きい測定場所を表にまとめる。

測定場所	ハムノイズのオーダー [T]
SR2,OMC チェンバー近くのエアファン	$10^{-6}$
PR2 チェンバー近くのエアファン,IYC 近くの KoachFilter	$10^{-8}$
IMC,IX0,OMC ラック	$10^{-7}$
IY0 ラック	$10^{-8}$
BS,PR2 チェンバー	$10^{-8}$
OMC,SR2,PR3,PRM,IMM,IFI チェンバー	$10^{-8}$
OMMT,SRM,SR3,MCF チェンバー	$10^{-9}$

表 5.30: 60Hz でのハムノイズのオーダーまとめ

この結果から、エアファンが特にハムノイズが大きいことが分かる。回路が収納されているラックと チェンバー近くのハムノイズのオーダーがほぼ等しいのは、意外な結果となった。チェンバーの中でも特 に BS,PR2 チェンバーのハムノイズが大きいのは、近くに少ラック (クリーンルーム内) があったからだ と考えられる。

### 第6章

### まとめと今後の展望

今実験のまとめと今後の展望について記す。

### 6.1 まとめ

本研究では、環境磁場雑音 MAP 作成のための前段階実験として、KAGRA 坑内のセンターエリアに おける磁場測定を行った。24 箇所で磁場測定を行い、各測定場所の特徴づけを行った。また、測定結果 の中で最も磁場が弱いと考えられるセンターエリア入り口付近の結果を基準点とし、各測定場所での比較 も行った。現在の KAGRA のセンターエリアでの磁場のオーダーはおおよそ 10<sup>-11</sup>~10<sup>-12</sup>[T/√Hz] で あることが分かった。

クリーンルーム外

- KoachFilter や送風機、冷風機などファンを用いた機械類の磁場が大く、モーターの回転磁界による影響であると考えられる。
- ラックは今回の実験では個体差はあまりない。IOchassis などファンを用いた回路の磁場が大きい。
- ハムノイズは機械類の近くで大きく、高周波の倍波になるにつれて、ピークではなくノイズフロア が盛り上がる。

クリーンルーム内

 チェンバー付近では低周波でノイズフロアの揺らぎが現れる。それは音により金属が振動し、磁場 が発生する可能性がある。

### 6.2 今後の展望

#### 磁場測定における今後の展望

 ラックの中にある回路、ケーブルごとに磁場測定を行う。磁場発生源が回路であった例として timing master(干渉計の制御のタイミングを合わせるための回路)という回路がある。これは LIGO の PEM チームの研究 [1] により、1Hz の comb 波磁場雑音を発生していることが分かった。 この 1Hz のノイズは回路の動作確認のために 1s 周期で点滅する LED ライトが原因であることが 分かり、ノイズハンティングをした例がある。我々もこのように、回路1つ1つの磁場を測定し、 ノイズハンティングを行いたい。

- 環境磁場と OSEM の伝達関数の測定。OSEM が環境磁場の影響を受けると、重力波観測に直接的 な影響を与えるため、重要なタスクである。
- 光学素子の信号と環境磁場の相関をとり、影響を受けやすい光学素子を探す。
- ・ 音場による環境磁場の発生を調べる。周りに磁場や音場を発生するものがない開空間の中心に金属を置き、その両端に同じ距離だけ離れた位置にマイクと磁束計を設置する。スピーカーから様々な周波数の音を出力し、マイクと磁束計の相関をとり、音場によって発生する環境磁場の影響を調べる。
- 今 KAGRA には、長期的に設置できる磁束計が2本ある。長期的な磁場測定をするということはより細かく鮮明なデータを取ることができる(周波数分解能を下げることが可能)。今実験より、KoachFilter や送風機、冷風機の磁場は強いが、KAGRA の稼働時には動作しないと考えられるため、長期的な測定対象からははずす。その他で磁場が気になる箇所は OMC ラックと OMC チェンバーである。OMC チェンバーは重力波信号観測に影響を与えやすい光検出器に最も近く、OSEM が取り付けられた鏡が収納されており、その OSEM からの信号を制御する回路が収納されているラックが OMC ラックである。将来的に磁束計が増えれば、BS チェンバーや 3km 先のサファイア鏡が収納されたクライオスタット (真空槽)に設置したい。

#### PEM としての今後の展望

- 環境モニター (加速度計、マイク、磁束計など)を干渉計の様々な場所 (光学定盤上、光学素子の近く、チェンバー、アームなど) に設置し、環境雑音を長期的に測定する。→環境磁場雑音 MAP
- 加振機、コイル、スピーカーを用意し、sin 波や comb 波など様々な環境雑音をインジェクションし、干渉計に及ぼす伝達関数を測定する。
- 干渉計の感度に影響を与える雑音は削減する。
- ひとつでも多くの環境雑音を見つけ、諦めずにノイズハンティングし、KAGRA の重力波検出に貢献する。

### 第7章

## 謝辞

本研究を行うにあたり、また本論文を作成するにあたり、非常に多くの方にお世話になりました。深く お礼を申し上げます。

森脇喜紀教授には授業だけでなく、本実験に対しても鋭い観点から的確なご指摘やアドバイスを頂き、 大変お世話になりました。指導教員の山元一広准教授は干渉計セミナーを通して重力波や KAGRA につ いてご教授頂きました。重力波に対する深い知識でいつも適切な助言を下さり、本論文の執筆、研究につ いてもご指導頂きました。

レーザー物理学研究室の先輩方は、私のイメージする大学院生そのものでした。研究に真摯に向き合い ながら、楽しそうに笑っている先輩方が醸し出す緩急のついた空気が、私はとても好きです。同期の皆さ んは、紅一点であった私に対して同士として接して頂き、とても居心地の良く、楽しい研究生活を過ごす ことができました。特に毎週のように電車で隣に座り KAGRA に行き、隣に座り帰り、また研究室の席 も隣である開発輝一くんには大変お世話になりました。開発くんの物理と Mr.Children に対する深い知 識と愛にいつも感銘を受け、良い刺激を頂いています。私の至らない点にもいつも的確なご指導を頂き、 とても大変だったと思います。これからもお互いを高め合う存在でありたいと思います。

東京大学宇宙線研究所特任研究員の横澤孝章氏には、本研究をするにあたり大変お世話になりました。 多忙であるにも関わらず、何も知識のない私に1つ1つ丁寧にご指導頂きました。意見を押し付けるので はなく、同じ目線になって議論をしてくださり、その中で横澤氏の深い知識を共有してくださるおかげ で、丁寧に考えながら実験をすることができました。いつも暖かく見守ってくださりありがとうございま す。横澤氏の知識の深さに少しでも追いつくことができるようこれからも励みます。

そして、遠い岡山から私の大学生活を支えてくれている家族へ深い感謝を述べたいと思います。金銭 面、健康面、精神面など様々なサポートをしてくださり、家族の支えのおかげで、楽しく意味のある濃い 4年間を過ごすことができました。まだまだ不甲斐ない私ですが、大学院生になり、さらに勉学に励み良 い研究生活にしたいと思います。

### 付録 A

## PSLroom への環境モニターの設置

KAGRA への環境モニターの設置場所として、まずはじめに PSLroom へ環境モニターを設置した。 PSLroom へ環境モニターを設置した理由は、PSLroom は干渉計にレーザーを入射するための光学系が 設置されている部屋であり、干渉計にとって最上流部である。PSLroom には光学定盤があり、その上に は様々な光学素子や共振器があるため、ここでの雑音を把握し、削減することが干渉計全体の感度向上の ために最重要任務であると考えられる。今回 PSLroom へ設置した環境モニターは加速度計、マイク、磁 束計である。

### A.1 設置した環境モニターの紹介

まず初めに設置した環境モニターと環境モニターの使用方法について紹介する。

#### 加速度計

加速度計は KISTLER 社の加速度計と TEAC 社の加速度計を使用。

#### KISTLER 社

PiezoBeam モーダル加速度センサ Type 8640A5。高感度の単軸加速度計でとても繊細なため取り扱い には注意する。手で触った直後は温度や電荷が一時的に揺らぐため、しばらく触らず出力が安定したら測 定を開始する。加速度計についているねじを直接定盤に設置することもできるが、付属の糊を使い、見 たい軸方向に合わせ設置することも可能。今回は糊で固定し、さらにその上から針金でワッシャーと加 速度計を固定した。アンプの電源は ±15VDC を用いる。倍率は ×2,×20 があり、×200 まで回せるがそ の場合は ×2 となる。SENCER に加速度計の信号を入力し、OUTPUT から出力する。出力時の信号は [count] であるため  $[m/s^2]$  にキャリブレーションし、実際の信号値を得る。キャリブレーション値は、感 度 972[mV/g]、倍率 ×20 の加速度計の場合、

 $A_{\pm j 2}[count] \times 305[\mu V/count] \times \frac{1}{20} \times \frac{1}{972[mV/g] \times 9.8[m/s^2]} = A_{\pm j 2} \times 1.537 \times 10^{-4}[m/s^2] \quad (A1.1.1)$ 

と計算し、 $1.537 \times 10^{-4} [m/s^2/count]$ となる。 $305[\mu V/count]$ はカウントから ADC 電圧への変換係数 である。





図 A.2: アンプ

図 A.1: KISTLER 社加速度計 (8640A5)

#### TEAC 社

圧電型加速度トランスデューサー 700 シリーズ (電圧出力タイプ)710。超低周波・高感度型である。共 振周波数は約 700Hz。内部にプリアンプ (インピーダンス変換回路)を内蔵した電圧出力型である。圧電 素子を使用しているため、物理量に比例した電荷を自己発生するため外部からの電源は必要ない。アンプ は圧電型加速度計トランスデューサー用アンプ SA-611 を使用した。倍率は×1,×10,×100 の 3 段階可能 であり、入出力は BNC コネクタを使用した。電源は単 3 乾電池 3 本もしくは外部 DC 電源、または AC アダプタによる AC 電源が可能である。アンプのスイッチについては下にあるスイッチから説明する。

- ・POWER スイッチ:電源
- CAL スイッチ:ON にすると OUTPUT コネクタから 200Hz の校正電圧が出力される。RANGE スイッチが H,M の時は 2Vp-p(peak to peak) の矩形波、L の時は 20Vp-p の矩形波が出力される。(\*Vpp とは直流 (DC) は電圧が一定であるのに対し、交流は時間によって電圧が変化するため 最大値と最小値の差をとる。それが Vp-p である。)
- ・HPF スイッチ:5Hz のハイパスフィルタが設定される。(\*ハイパスフィルタとはある周波数よりも 高い周波数成分のみを通過させるためのフィルタ)
- LPF スイッチ:1kHz,10kHz のローパスフィルタが設定される。(\*ローパスフィルタとはある周波 数よりも低い周波数成分のみを通過させるためのフィルタ)
- · RANGE スイッチ:SENS スイッチに合わせて設定する。
- ・SENS スイッチ:使用するセンサの電圧感度  $[mV/m/s^2]$  に入力すると、 $\pm 1[V]$  が出力された場合は  $\pm 1[m/s^2]$  の加速度がセンサに加わったことになる。



図 A.3: TEAC 社アンプの断面図



図 A.4: TEAC 社加速度計 (710)



図 A.5: TEAC 社アンプ (SA-611)

### A.1.1 マイク

B&K 社 (Bruel&Kjaer) のマイク。マイクとプリアンプを組み合わせたプリアンプ内蔵型を使用。マ イクにはいくつか種類があり、使用用途により選ぶ。

- ・自由音場型:自由音場において平坦な周波数特性になる。1箇所から1方向に伝播する音源に対し て有効に用いられる。無響室や反射のない大きな開放された空間での使用向き。
- ・音圧型:全周波数で音圧感度が一定となるように設計されている。壁の音圧など対象の表面や堅固 な反射面の近くでの測定に使用される。

・拡散型:音源が周りにたくさんあり、様々な方向から音がくるとき、全方位の音を平均して出力する。音楽ホールなど反響のある場所での測定に用いられる。

マイクを使用するときは、センサーを aco 社 4ch センサー用電源 TYPE5006/4 の電源につなぎ、電源から出力する。この電源は倍率 20[dB](10 倍) も可能である。入出力は BNC ケーブルを使用する。



図 A.6: B&K 社マイク



図 A.7: aco 社電源

磁束計については、本章(4.3)を参照する。

センサ	s ナンバー	感度	周波数応答
mic(B&K)	s8142	$31.6[\mathrm{mV/Pa}]$	$20{\sim}~12.5k[{\rm Hz}]$
mic Amp	s8142		
magnetometer(Bartington)	s7355	100[mV/uT]	$DC \sim 3[kHz]$
Whitening filter	s8181		
distributer	s8519		
QND	s8518		
ACC1(TEAC)	s8520	$316[V/m/s^2]$	$0.05{\sim}~200[{\rm Hz}]$
ACC1 amp	s8523		
ACC2(TEAC)	s8521	$279[V/m/s^2]$	$0.05{\sim}~200[{\rm Hz}]$
ACC2 amp	s8524		
ACC3(TEAC)	s8522	$280[\mathrm{V/m}/s^2]$	$0.05 \sim 200 [Hz]$
ACC3 amp	s8525		
ACC1(KISTLER)	s7225	972[mV/g]	$0.5 \sim 3k [\text{Hz}]$
ACC1 amp	s8191		
ACC2(KISTLER)	s7226	$959[\mathrm{mV/g}]$	$0.5 \sim 3k [\text{Hz}]$
ACC2 amp	s8190		

表 A.1: PSLroom へ設置した環境モニターとそのアンプ, 電源のまとめ

### A.2 設置場所



図 A.8: PSLroom 配置図

まず、光学定盤の上に TEAC 社の加速度計 (①②③)を3つ設置した。これは光学定盤の 80Hz の固有 振動 (バタフライモード)を調べるためである。KISTLER 社の加速度計 (黄色四角) は揺れが大きいと予 想されるレーザーの高さを調節する PeriScope 上に設置した。REFCAV(参照共振器) と、レーザーが出 力するダクト手前にある PeriScope 上に設置した。マイクは PSLroom 全体の音場を把握できるように、 光学定盤中心付近に設置した。防振のため天井から吊り下げた。磁束計はラック上部へ設置した。

### 付録 B

## フーリエ変換

まずアナログ信号をフーリエ変換し、周波数モードに分解する。時系列データは複雑な波である。その 複雑な波は周期と振幅が異なる正弦波と余弦波に分解することができ、周波数領域に変換することができ る。これがフーリエ変換である。



図 B.1: フーリエ変換の概略図。

フーリエ変換をするために、まず複雑な周期関数や周期信号を、単純な形の周期性をもつ関数の和に よって表したフーリエ級数を求める。周期 T の周期関数 x(t) のフーリエ級数は、

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos\frac{2n\pi t}{T} + b_n \sin\frac{2n\pi t}{T})$$
(C.1)

ここで、係数 $a_n, b_n$ は、

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos\frac{2n\pi t}{T} dt$$
 (C.2)

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin \frac{2n\pi t}{T} dt$$
 (C.3)

である。フーリア級数を複素数で表すと、オイラーの公式  $e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$  より、

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{2} (a_n - ib_n) e^{\frac{2n\pi t}{T}i} + \frac{1}{2} (a_n + ib_n) e^{-\frac{2n\pi t}{T}i} \right]$$
(C.4)

ここで、 $C_0 = \frac{a_0}{2}, C_n = \frac{1}{2}(a_n - ib_n), C_{-n} = \frac{1}{2}(a_n + ib_n), n = 1, 2, 3...$ とおき (C.1) に代入すると、

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n e^{\frac{2n\pi t}{T}i} + C_{-n} e^{-\frac{2n\pi t}{T}i})$$
$$= \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{\frac{2n\pi t}{T}i}$$
(C.5)

これが複素フーリエ級数である。また、 $C_n$ は、

$$C_{n} = \frac{1}{2}(a_{n} - ib_{n})$$

$$= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)(\cos\frac{2n\pi t}{T} - i\sin\frac{2n\pi t}{T})dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)e^{-\frac{2n\pi t}{T}i}dt$$
(C.6)

となる。ここで、とびとびな値をもつスペクトルを連続的に考えるため、x(t) を  $T \to \infty$  の極限をとる。 n 次の波の周波数と基本周波数は、

$$f_n = \frac{n}{T} \tag{C.7}$$

$$\delta f = \frac{1}{T} \tag{C.8}$$

となるため、x(t)は(C.5)は、

$$\begin{aligned} x(t) &= \lim_{T \to \infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{-\frac{2n\pi t}{T}i} dt \right) e^{\frac{2n\pi t}{T}i} \\ &= \lim_{T \to \infty} \sum_{-\infty}^{\infty} \left( \delta f \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{-2i\pi f_n t} dt \right) e^{2i\pi f_n t} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} C(f) e^{2i\pi f t} df \end{aligned}$$
(C.9)

ここで、C(f) は

$$C(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2i\pi ft}dt \qquad (C.10)$$

この C(f) が x(t) のフーリエ変換である。

### 付録 C

# 磁束計と ADC のキャリブレーションにつ いて

まず、磁束計のアナログ信号をデジタル信号で見るためには、信号がカウント [cnt] のままになってい て、データとして扱いにくいのでキャリブレーションを行う。磁束計は磁束密度 [T] を電圧 [V] に変え、 磁束密度は Whitening Filter 回路に繋がれており、Whitening Filter 回路は電圧をカウントに変える ADC につながっている。この逆の計算をすればキャリブレーションが行える。



図 C.1: キャリブレーションの概要図

キャリブレーションの方法

- 1. site map を起動し、PEM を選択、キャリブレー ションファクターをかけたいチャンネルを選択。
- チャンネルを右クリックし、Foton を開く。file を 開き、Only Read をはずす。
- Foton の section にチェックをいれ、関数名を入力 する。
- 4. Command に移動し、Gain の関数を入力する。
- 5. file の Save を押し、完了。入力した関数名が FM1 から順に入る。
- 入力した関数名が FM1 から順に入る。medm に戻り、FM1 からクリックする、ON のときは緑色に変わる。

 Image in the image in

Design Graphics

図 C.2: Foton で FM1 フィルターを入れ る例

今回の磁場測定で用いたキャリブレーション関数

FM1:gain(0.000305)... カウントを電圧に変換 (1[cnt] は 305[µV])

FM2:gain(1e-5)... 電圧を磁束密度に変換 (磁束計は 10<sup>5</sup>V/T)

FM3:zpk([10;10],[1;1],1,"n")...Whitening Filter を取り除くフィルター



図 C.3: medm で関数を入力した様子。緑のときはフィルター ON,赤のときはフィルター OFF である。

このキャリブレーションをおこなった結果、グラフは以下のように変化する。

まず、FM1,2,3のフィルター、Whitening Filter がかかっていない状態を A とする。





FM1 のみフィルターをいれると、 $A \times 0.000305 \approx A \times 3 \times 10^{-4}$ より A からオーダーが4桁下がる。



⊠ C.5: FM1:ON,FM2,3:OFF,Whitening Filter:OFF

FM1,2 のみフィルターをいれると、 $A \times 0.000305 \times 10^{-5} \approx A \times 3 \times 10^{-9}$ よりAからオーダーが9桁下がる。



⊠ C.6: FM1,2:ON,FM3:OFF,Whitening Filter:OFF

Whitening Filter 回路で Whitening Filter をかけ、FM3 で増幅分を差し引くと、測定時のデータになる。



図 C.7: FM1,2,3:ON,Whitening Filter:ON

## 参考文献

- [1] P.B.CovasIdentification and mitigation of narrow spectral artifacts that degrade searches for persistent gravitational waves in the first two observing runs of Advanced LIGO,2018
- [2] 安東正樹, 重力波とはなにか「時空のさざなみ」が拓く新たな宇宙論,2016
- [3] 川村静児, 重力波物理の最前線, 2018
- [4] 国立天文台重力波プロジェクト推進室 HP
- [5]
- [6] B.P.Abbott, A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs, 2018
- [7] Robert Schoffield, Introduction to LIGO PEM With a focus on diagnostic investigations
- [8] LIGO PEM Central hp
- [9] 北沢秀昌,KAGRA の光学技術の開発-ファイバーによるグリーンレーザーの伝送/偏光法によるモー ドクリーナーの制御-,2016
- [10] Shimoda Yutaka, 磁性材料 · 磁気工学入門
- [11] 牧野雅彦, 物理探索ハンドブック物理探査学会編,1998
- [12] Imperial College London-How a fluxgate works