

重力波検出と技術

GRAVITATIONAL WAVE DETECTION AND ITS TECHNOLOGIES

都丸隆行^{#, A)}, KAGRA コラボレーション

Takayuki Tomaru ^{#, A)}, KAGRA Collaboration

A) High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

KAGRA is an interferometric gravitational wave detector under construction in Kamioka area in Gifu prefecture in Japan. While the Advanced LIGO in United State and the Advanced VIRGO in Italy are upgraded detector from their initial project of LIGO and VIRGO, respectively, the KAGRA is new detector and introduces some of new features and technologies. For example, choice of underground site to reduce seismic noise is a unique features and cryogenic mirror system to reduce thermal noises are an advanced technology developed in Japan. Also, ultra-high vacuum condition is realized without backing. These cryogenics and vacuum technologies are originally studied in the field of accelerator science, and are advanced to improve the performance of gravitational wave detector. In this proceedings, these technologies advanced from accelerator science to gravitational wave detector will be presented.

1. はじめに

重力は電磁力に比べて 36 桁も小さな極めて微弱な相互作用であり、物理学の中でもっとも理解が進んでいない分野の1つである。一般相対論の枠組みでは、重力は時空間の歪みとして表現され、この時空間の歪みが波動として伝搬する現象を重力波と呼ぶ。重力波の理論的予言はアインシュタインが一般相対論を発表してからまもなくされたが、あまりにその信号が小さいため、100 年を経た 2015 年にようやく直接検出がなされた。米国の Advanced LIGO により発見され、GW150914 と名付けられたこのイベントは、13 億光年彼方で太陽の約 30 倍の質量のブラックホール同士が合体するというセンセーショナルな事象であった[1]。これにより新たな重力波天文学・宇宙物理学が幕を開けるとともに、国際重力波観測網での重力波観測が重要となる時代へと突入した。

重力波検出を成し遂げた Advanced LIGO や、現在最終調整中のヨーロッパの Advanced VIRGO は、第一世代の検出器からのアップグレードである。一方、日本の KAGRA は、第二世代として新規に建設中の重力波望遠鏡であり、開発スケジュールとしては Adv. LIGO や Adv. VIRGO の後塵を拝しているものの、その分新しい技術や特徴を有している。特に、検出器を地下に建設した点と、極低温まで冷却したサファイア鏡を搭載する点は、他の検出器にはない日本のオリジナルである。

Figure 1 に示すように、KAGRA は岐阜県飛騨市神岡町池ノ山の地下に設置されており、山頂から約 1000m、もっとも地表に近いところからでも約 200m の地点にある。3km もの基線長を持つ L 字のマイケルソン型レーザー干渉計であり、加速器並みの大きな施設である。このため、Super Kamiokande のように既存の鉱山トンネルに建設することが難しく、新規にトンネルを掘削した。池ノ山地下を選択した理由は、地面の常時微動が非常に小さいためであり、典型的な都市部に比べて2~3桁、Adv. LIGO サイトと比べても1桁小さい(Figure 2)。このことは



Figure 1: KAGRA location.

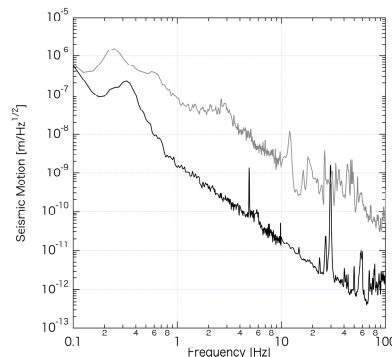


Figure 2: Seismic vibration levels at typical urban area (gray line, Kashiwa campus, university of Tokyo) and at underground in Ikenoyama, Kamioka.

低周波側で主たるノイズ源となる地面振動による鏡の揺れを抑えるのに極めて有効であり、後発の KAGRA の持つアドバンテージの1つである。

技術的な面では、極低温鏡システムの採用やベキングを用いない超高真空システムなどに最先端技術が取り入れられている。これらはいずれも加速器科学で基礎研究がなされ、重力波検出器に応用・発展したもので

[#] tomaru@post.kek.jp

ある。次世代の重力波望遠鏡計画ではいずれもこれらの技術の導入が検討されており、日本発・加速器発の技術が世界標準になろうとしている。

本稿では、KAGRA で用いられている特にこの2つの技術について、より詳しく紹介したい。

2. 極低温鏡懸架システム

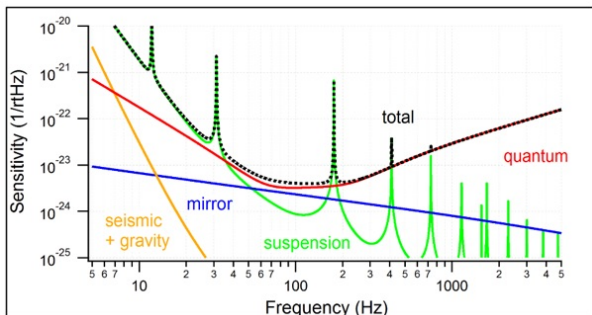


Figure 3: KAGRA の設計感度曲線。

Figure 3 は KAGRA の設計感度曲線を表す。もっとも感度のよい周波数帯域は 100Hz 前後であり、第1世代の重力波検出器では鏡や鏡のサスペンションワイヤーの熱雑音が原理的な感度限界であった。熱雑音にはいわゆるブラウン運動や、熱揺らぎと熱膨張がカップルする熱弾性振動などが含まれるが、いずれも熱的な揺らぎがマクロな物体の弾性振動として現れるもので、特に干渉計の光軸方向の振動を持つモードは干渉計の変位雑音として検出される[2-5]。Figure 3 には、3本のシャープなノイズピークが現れているが、これは鏡サスペンションワイヤーの弦モードの熱雑音である。もちろんこのような大きなピーク状ノイズの存在は望ましくないが、もっとも大事なのは、フロアーのノイズレベルを低減することである。このため、熱雑音を低減するためには、温度と機械的 Q 値の2つのパラメータが重要となる。機械的 Q 値は、マイクロ波における Cavity Q と同様共振の鋭さを表すパラ

メータであり、Q 値が大きいほど振動のエネルギーはピークに押し込められ、ラインが細くかつ裾野が小さくなる。よって、大きな機械的 Q 値を持つ材料を、鏡や鏡のサスペンションワイヤーに用いる事が重要である。

KEK および東大宇宙線研の重力波グループでは、極低温のサファイア単結晶が光学的により特性を持ちつつ機械的 Q 値も極めて大きくなる点に着目し、長年にわたり基礎研究を続けてきた。Table 1 は重力波検出器で用いられている典型的な鏡材料の機械的 Q 値を表したもので、20K のサファイア単結晶では約 10^8 にも達する[6]。よって、極低温のサファイア鏡では、温度の低下と機械的 Q 値の増大で、劇的に熱雑音を低減することが可能である。

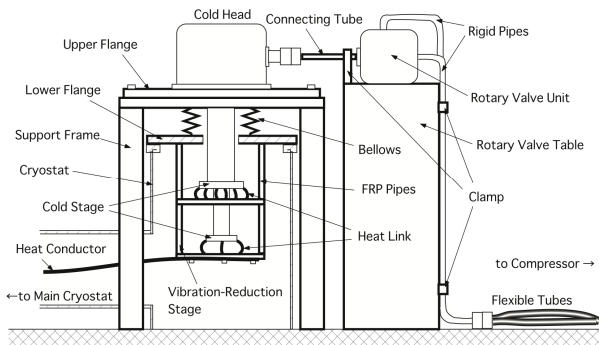
Table 1: Typical Mechanical Q Values for Mirror Materials

	Fused Silica (300K)	Sapphire (300K)	Sapphire (20K)
Mechanical Q	$\sim 10^7$	$\sim 10^5$	$\sim 10^8$

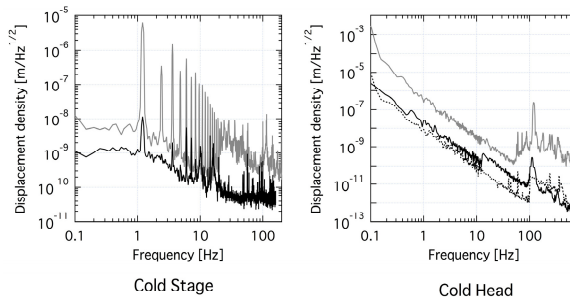
しかしながら、これを実際のシステムで成立させるためには多くの課題がある。

まず、鏡の防振と冷却を両立させねばならない。後述するとおり、重力波望遠鏡では残留ガスによる屈折率揺らぎがノイズ源になりうるため、鏡は超高真空中に設置される必要があり、伝導冷却が必須となる。しかし、折角振動を避けるように鏡を防振しているにもかかわらず、振動の流入パスを鏡に取り付けるのは、矛盾する要求であり、この振動流入をいかに小さく出来るかが技術的課題となる。

KEK の重力波グループでは、まず、超低振動の機械式冷凍システムの開発に着手し、市販の冷凍機の振動を約3桁低減することに成功した[7-8]。これは市販のパルス管冷凍機を徹底的に振動解析し[9]、振動源となりうる部分の分離を行った成果である。特に重要な開発アイ



(a) Ultra-small vibration cryocooler system used in KAGRA. Each part names used here are also defined.



(b) Vibration level of developed ultra-small cryocooler system. And gray lines show vibration level for commercial pulse-tube cryocooler and black line shows that of this system. The dashed line shown in right figure shows seismic vibration level in Kamoka underground.

Figure 4: Ultra-small vibration cryocooler systems and its vibration level.

テムは、高純度のアルミニウム撚り線型ヒートリンクを用いた点である。一般に高純度金属は極低温で極めて大きな熱伝導率を持ち、常温に比べ2桁も大きくなる。この冷凍機開発当時においては、5N 純度のアルミニウムをφ0.15mm の細線にし、これを束ねる事で高い熱伝導率を持ちつつバネ定数の小さなヒートリンクを開発・搭載した。Figure 4 の冷凍システムはこの 5N 純度のヒートリンクを搭載したものである。最近になって、6N 高純度のアルミニウム細線ヒートリンクの製作にも成功し、KAGRA のクライオスタット内では、さらに高性能の 6N ヒートリンクを用いている[10]。



Figure 5: KAGRA cryostat.

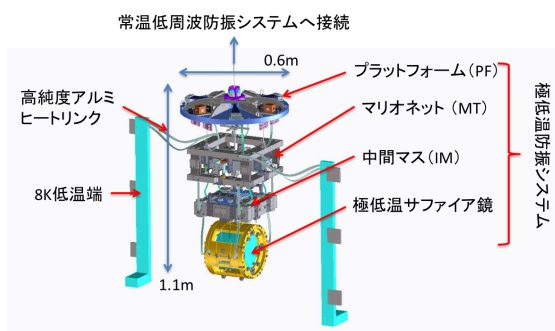


Figure 6: KAGRA の極低温鏡懸架システム。

Figure 5 は KAGRA のクライオスタットの写真である。このクライオスタットの内部には、Figure 6 に示すような極低温鏡懸架システムが収納され、4台の 4K, 1W 超低振動パルス管冷凍機システムと 2 台のシールド冷却用 80K 超低振動パルス管冷凍機システムで冷却される。極低温鏡懸架システムは、4段の振り子型防振装置であり、この上部の常温部に設置される低周波防振装置から全体が懸架される。低温部で4段の複雑な振り子型防振装置が必要となる理由は、ヒートリンクからの振動流入を低減するためおよび鏡の姿勢制御のためである。

2017 年 7 月に、KAGRA サイトにおいて、最初の極低温鏡懸架システムのインストールテストを実施した (Figure 7)。このシステムは鏡にサファイア製のダミーを用いたことと輻射冷却用の黒色コーティングがなされていないことを除き、ほぼ最終形態となっており、今秋に予定されている実機インストールの良い予行演習となった。



Figure 7: KAGRA サイトにおける極低温鏡懸架システムのインストールテスト。クライオスタット内に極低温鏡懸架システムのインストールが完了したところ。

3. 超高真空システム

重力波検出器では数 km の基線長で Fabry-Perot 光共振器を構成させるため、途中で窓やレンズなど光の損失減となるものを導入することができず、結果としてレーザーのビーム径はかなり大きなものになる。KAGRA の場合、鏡上でのビーム直径 (1σ) は 8cm 程度である[11]。さらに、レーザー光の回折ロスを十分に抑え、また、鏡やビームダクトでの散乱光の影響を十分に小さくするため、KAGRA のビームダクトの直径は 80cm にもなっている (Figure 8)。この直径で総長 6km のビームダクトを構成しているため、その容積と表面積はそれぞれ約 3000 m^3 、15000 m^2 であり、日本最大の真空容器となっている。世界最大の加速器 LHC ですら、容積と表面積はそれぞれ約 110 m^3 、8500 m^2 程度である。ちなみに、世界最大の真空容器は、米国の LIGO であり、こちらは直径 1m のビームダクトが総長 8km 続いている。



Figure 8: KAGRA のビームチューブ。

Figure 9 は、KAGRA の真空系レイアウトの概要図である。鏡類を収納する 10 コの主要な真空タンクと主鏡を収納する4個の極低温クライオスタット、6km の真空ダクトからなっている。この真空系を、最終的にはドライポンプ、ターボ分子ポンプ、イオンポンプのユニット総計 50 台で排気する予定であり、設計真空圧力は 2×10^{-7} Pa である。この値は、残留ガス(主成分は水)による屈折率揺らぎが

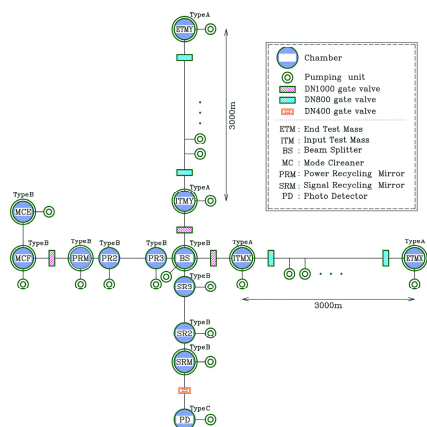


Figure 9: Vacuum tank layout in KAGRA.

検出器感度に影響を与える値の1桁下になるよう設計されている[12]。

KAGRA のような巨大な真空装置でこのような超高真空を達成することは容易ではなく、徹底的なアウトガス低減がなされている。

まず、これまでの加速器科学分野での研究から、金属表面の変質層を除去することで容器からのアウトガスを大幅に低減出来る事が分かっており、KAGRA でも真空ダクト、真空容器の内面はすべて機械研磨と電解研磨を実施し、容器表面の変質層を除去した。この上で、200°C、20 時間の脱ガス処理を行い、乾燥空気を充填密封した上で KAGRA サイトへ搬入した。これにより、地下トンネル内でベーキング処理することなく、超低アウトガスの容器を実現した。

また、ガス放出速度の実測にもとづき、使用材料の選定も徹底している。高分子材料の使用は極力行わないようにしているが、電気絶縁や極低温用の断熱材などではどうしても高分子材料を用いざる得ない場合もあり、このような時は PEEK、ポリイミド(PI)、CFRP など相対的にアウトガスの小さな材料を脱ガス処理して用いている。Figure 10 は、これらの材料を様々な条件で脱ガス処理した場合のガス放出速度測定結果である[13]。この結果に基づき、信号ケーブルや極低温用構造支持材などは脱ガス処理を施し用いている。

最後に、興味深い材料として、超高真空中で使用可能な黒色コーティングを紹介しておきたい。黒色コーティングは、レーザー散乱光の吸収および熱放射による極低温鏡懸架システムの効率的冷却などに有用であり、KAGRA ではクライオスタット内および真空ダクト内に一定間隔で設置されたバッフルに採用されている。KAGRA のビームダクト直径が LIGO よりも小さな理由の一つとして、このような散乱光吸収のための黒色コーティングが有効に使われている事が挙げられる。KAGRA で

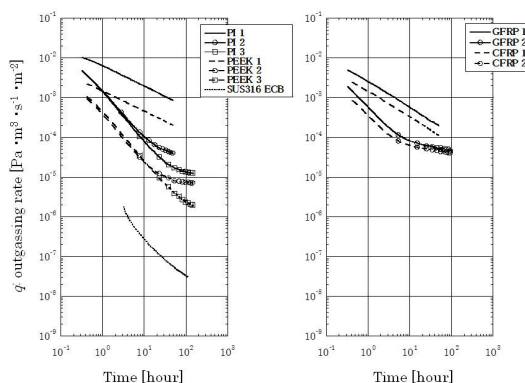


Figure 10: 相対的にアウトガスの小さな材料のガス放出速度測定結果。PI はポリイミド、GFRP、CFRP はそれぞれガラス繊維、カーボン繊維強化プラスチック。PI1, PEEK1, GFRP1, CFRP1 は十分に飽和している材料、PI2, PEEK2 は 200°C、10 時間の脱ガス処理を 2 回、PI3, PEEK3 は 200°C、8 時間の脱ガス処理を 5 回、GFRP2, CFRP2 は 80°C、8 時間の脱ガス処理を行った場合である。

はプロジェクト初期に製造されたクライオスタット内には Diamond like carbon が用いられているが、この放射率およびレーザー吸収率はそれほど大きくない。このため、後に製造されたバッフルなどでは、ニッケル-リン系の黒色メッキが用いられている。このコーティングの表面反射率は 3%程度であり、250°C、4 時間の脱ガス処理後には研磨された金属表面レベルまでアウトガスが低下することを確認している[14]。

ただし、この黒色コーティングは磁性を持っており、磁力により擾乱を受けてしまう極低温鏡懸架システムには用いる事が出来なかった。このため、低磁性のニッケルリン系黒色コーティングをメーカーと開発し、光吸収率・放射率は通常のものに及ばないものの、SUS316 よりも磁性の小さな黒色コーティングを達成した。

4. まとめ

本稿では、日本の重力波検出器 KAGRA で特徴的な極低温鏡懸架システムと超高真空システムに焦点を当てて紹介を行った。現在では、どちらの技術も海外の重力波プロジェクトから注目を集めており、特に極低温システムに関しては第3世代の重力波望遠鏡で必須のアイテムとなっている。これらの技術は加速器科学分野で研究がなされ、重力波検出器へ応用、さらなる発展を遂げたものである。もっとも良い例は、低振動冷凍技術などであり、今度は重力波で発展した技術が将来のナノビーム加速器などにも役立つと考えられる。

参考文献

- [1] B.A Abbott *et al.*, (LIGO Scientific Collaboration and VIRGO Collaboration), Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016).
- [2] Y. Levin, Phys. Rev. D **57** (1998) p. 659.
- [3] K. Yamamoto, Ph. D thesis, University of Tokyo (2000).
- [4] V. B. Braginsky *et al.*, Phys. Lett. A **264** (1999) 1.

- [5] M. Cerdonio *et al.*, Phys. Rev. D **63** (2001) 082003.
- [6] T. Uchiyama *et al.*, Phys. Lett. A **261** (1999) p. 5.
- [7] T. Tomaru *et al.*, Cryocoolers **13** (2005) p.695; T. Tomaru *et al.*, Int. J. Mod. Phys. (Proc. ECRS) **20** (2005) p. 7063.
- [8] Y. Ikushima *et al.*, Cryogenics **48** (2008) p. 406.
- [9] T. Tomaru *et al.*, Cryogenics **44** (2004) p. 309.
- [10] 都丸隆行 他, 低温工学 **46** (2011) p. 415.
- [11] K. Somiya *et al.*, Class. Quantum Grav. **29** 124007 (2012).
- [12] 齊藤芳男, 高橋竜太郎, J. Vac. Soc. Jpn. **54** (2011) p. 35.
- [13] 佐藤吉博 他, J. Vac. Soc. Jpn. **56** (2013) p. 26.
- [14] T. Akutsu *et al.*, OPTICAL MATERIALS EXPRESS **6**, (2016) p. 1613.