

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420857

研究課題名(和文) 極低温高感度検出器用開口面からの熱輻射抑制に関する研究とその応用

研究課題名(英文) A study of the thermal radiation suppression from the aperture plane of high sensitivity detector cooled the cryogenic temperature

研究代表者

木村 誠宏 (KIMURA, Nobuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・准教授

研究者番号：10249899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：X線天文衛星や赤外天文衛星では極低温に冷却された高感度検出器を使用して観測が行われる。この開口面から入射する熱輻射が衛星に搭載された冷凍機の熱負荷になる。冷凍機の冷却能力が限定される衛星ではこの熱負荷の抑制が重要な課題である。

入射される熱輻射を抑制する事を目的として、光線追跡法を使ったバッフル付きパイプ型輻射シールドの設計法を研究した。この設計法の実証実験を行い、開口面からの熱輻射を抑制できることを示した。この研究成果を低温重力波望遠鏡のパイプ型シールドの設計に応用し、開口面から極低温に冷却された干渉計鏡への入熱を2桁以上低下させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：The observation such as the x-ray or infrared astronomy satellite is observed with the high sensitivity detector that was cooled to cryogenic temperature from an aperture plane. The thermal radiation becomes heat load to cryo-cooler on the satellite. Because of limitation of cooling capacity of cryocooler on the satellite, it is important subject suppression of this heat load for the cryo-cooler.

In this study, design technique of a pipe type radiation shield equipped with baffles, which used ray-tracing method, carried out in order to suppress the thermal radiation from the aperture plane. It was shown the radiation from the opening surface could be suppressed by actual proof experiment based on this design technique. This research result was applied to the design of the pipe type shield of the low temperature gravity wave telescope, and it succeeded heat input to the interferometer mirror cooled to the cryogenic temperature from the plane by more than two orders of magnitude.

研究分野：低温工学

キーワード：熱輻射 熱輻射抑制 パイプ型輻射シールド バッフル 黒化処理 ヒートパイプ ドライアウト

1. 研究開始当初の背景

X線天文衛星や赤外天文衛星では極低温に冷却した高感度検出器を開口面から観測対象に向けて観測している。この時、開口面から侵入する熱輻射が検出器への入熱となり、冷却能力に限られる衛星では大きな問題となる。

熱の移動形態には、主に伝導、対流、輻射の3種類がある。これらをどのように利用し、また低減するかが低温システム設計上の重要な要素である。

例えば、赤外やX線天文衛星では、冷凍機だけでなく積極的に輻射冷却を利用している。特に次期大型赤外線天文望遠鏡衛星SPICAでは、室温付近で冷凍機やバス機器の排熱だけではなく、低温段においても輻射シールド(Radiation Shield)からの輻射冷却を利用した設計となっている。

このように宇宙における輻射冷却を積極的に進める観点から、図1のV-Groove^[1]と呼ばれる放射板構成方法が、James Webb TelescopeやPlanckなどの衛星で使用されている。一方、冷凍能力に限られる天文衛星では検出器用開口面から検出器面を結ぶ主筒内表面の **Funneling** と呼ばれる熱輻射の反射・伝搬の影響^[2]を最少にするため、この入熱量を事前に把握することが衛星での観測を成功に導くための鍵となっている。

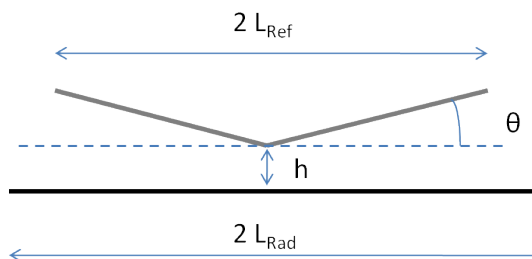


図1 V grooveの例：Radiation Shieldsをまっすぐ設置するのではなく、角度を付けて設置する事で、3Kの宇宙を見る事が容易になり輻射面から多くの排熱が可能となる。

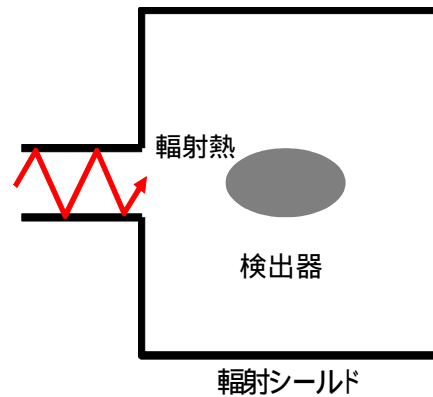


図2 入熱機構：輻射は輻射シールド開口部から検出器表面に直達するのではなく、主筒内表面を反射繰り返して入熱される。

輻射シールドの開口部からの熱輻射を低減するためには、図2に示すようにパイプ状のシールドを延長し、常温部分を見込む立体角を小さくするという方法が一般的に用いられる。しかし、それでもパイプの内壁面で熱輻射が反射し、低温側の検出器に入射される。これを防ぐため、バツフルと呼ばれる穴の開いた円板を挿入することで、入熱を低減できることが確認されていた^[3]。

2. 研究の目的

研究代表者のグループは、これまでモンテカルロシミュレーションを使った光線追跡法による定性的な評価と輻射シールドを構成する材料並びに表面処理法について常温から低温 (~20 K) までの定量的な評価を行ってきた^[4,5]。

研究から得られた知見は、大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)の設計等に活かされているが、体系的な実験例や汎用性の有るデータが不十分であった。

このため、本研究では体系的な実験例や汎用性のあるデータを取得し、天文観測衛星の観測用開口部から流入する検出器への熱負荷のさらなる抑制のためのデータ取得を目的とした。

[参考文献]

- [1] Development of a high performance cryogenic radiator with V-groove radiation shields, S. Bard, *J. Spacecraft and Rockets*, **24**, (1987) pp. 193-197
- [2] Y. Kuraoka, et al.: "Heat analysis and reduction of evaporation rate of liquid helium dewar," *Cryogenics* **19**(4) (1979) 182-186
- [3] T. Tomaru, et al.: "Conduction effect of thermal radiation in a metal shield pipe in a cryostat for a cryogenic interferometric gravitational wave detector," *Jpn. J. Appl. Phys.* **47** (2008) 1771-1774
- [4] 榎原 裕介, et al. : "大型型低温重力波望遠鏡(LCGT)熱シールド用金属の低温における波長10 μm での反射率測定," *低温工学* **46**, (2011) pp.434-440
- [5] Y. Sakakibara, N. Kimura, et al.: "Calculation of thermal radiation input via funneling through a duct shield with baffles for KAGRA," *Class. Quantum Grav.* **29** (2012) 205019

3 . 研究の方法

小型の実験装置並びに光線追跡を用いたシミュレーション計算等により設計手法を確立し、その結果を飛騨市神岡町の大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)をダクトシールドの設計・製作に応用した。

KAGRAでは、干渉計の鏡を冷却するため4台のクライオスタットが設置される。

(詳細 : 図 3)

冷却すべき鏡(TM: Test Mass, 20 K)およびその懸架系(Platform, IM, IRM, RM)は2重の輻射シールドで囲まれるが、主レーザー光線のための開口部が必要である。一方、鏡が吸収可能な熱量は限られており、穴か

らの熱放射の低減が必要である。この熱放射を低減する方法として、ダクトシールドと呼ばれるパイプ型のシールドが用いられる。

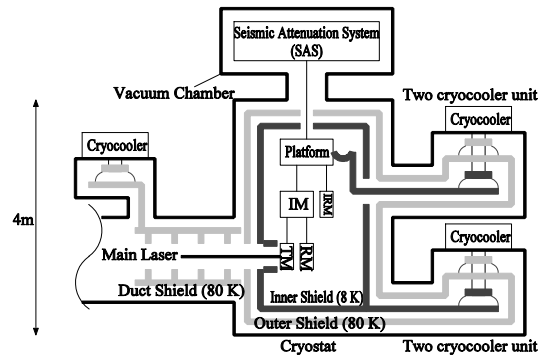


図 3 KAGRA のクライオスタットの概念図。鏡(TM)は、防振装置(SAS)から吊られている。ダクトシールドによって、開口部から入射される300 Kの輻射を低減する。

このダクトシールドの設計に本研究で得られた知見を応用し、その妥当性を検証した。

実証研究を行ったダクトシールドは、最初に光線追跡法を用いて熱放射の計算を行い、常温部分を見込む立体角を減らすためのバッフル位置の最適化を行った。

この計算から、バッフルが挿入されたダクトシールドが開口面からの入熱を3桁低減できることを示した。

この計算を基にダクトシールドを模擬した予備実験を行った。予備実験では、ダクトシールドの両端に輻射板と吸熱板をそれぞれ吊るし、ダクトシールドを通過する熱放射量を測定することで計算の妥当性を検証した。その結果、通過する熱放射量は、誤差の範囲内で計算と一致することが確認された。

これら知見を基にダクトシールド実機の設計と製作を行った。実機の設計段階において、鏡からの散乱光を光線追跡し、散乱光量の計算を行っている。その結果、実証機に比べて、計算上散乱光量(強度)を約2桁、散乱光雑音を1桁程度改善できることを

確認した。

製作したKAGRAのダクトシールド実機3台を使用して、入熱量の測定と評価を行った。事前の予測によると、ダクトシールドによって入熱を2桁以上低減することが可能であった。

評価は、製作したダクトシールドの両端に輻射板と吸熱板を吊るし、ダクトシールドを通過する熱放射量を測定した。

(図4参照)

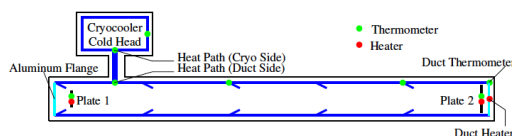


図 4 ダクトシールドを使用した検証実験装置の概略図。図中の Plate1 と Plate2 が輻射板と吸熱板。ダクトシールドは冷凍機により 80K 前後に冷却されている。

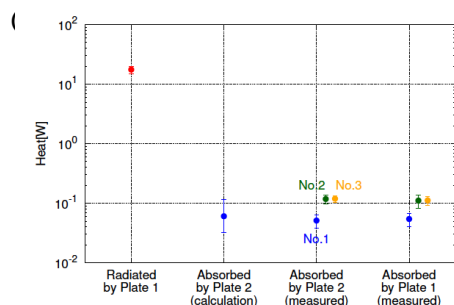


図 5 検証実験装置の結果。Plate1 から放射された熱が Plate2 の受熱面のポロメータでは 2 桁以上低下している。

(研究協力者の学位論文から引用)

その結果、通過する熱放射量が3台すべてについて、誤差の範囲内で計算値と一致することを示した。

さらにダクトシールドで吸熱した熱について液体窒素冷却ヒートパイプを用いたパイプ・バッフルから熱の除熱法の実証実験を海外の研究者の協力を得て行った。この実験データの解析から、ヒートパイプ過加熱後に発生するドライアウトの検証が本実験により可能であることが理解された。さらにヒートパイプの熱輸送能力について断

面形状等の依存性についての実験を行い、ヒートパイプの断面並びに折り曲げ等の幾何形状除熱性能の変化について確認を行った。

4 . 研究成果

本研究により次の成果を得た。

- (1) 小型の実験装置並びに光線追跡を用いたシミュレーション計算等によりバッフルが挿入されたパイプ型シールドの設計手法を確立した。
- (2) 本設計手法を観測機器のパイプ型シールドに応用し、その設計手法が有用であることを示した。
- (3) これらの成果が投稿論文 4 件、学会発表 13 件、学位論文 1 件として纏められた。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

Y. Sakakibara, N. Kimura, K. Yamamoto, T. Suzuki, T. Tomaru, S. Miyoki,

T. Uchiyama, and K. Kuroda: “Calculation of thermal radiation input via funneling through a duct shield with baffles for KAGRA”, *Classical and Quantum Gravity* **29** (2012) 205019.

Y. Sakakibara, N. Kimura, T. Suzuki, K. Yamamoto, D. Chen, S. Koike, C.

Tokoku, T. Uchiyama, and K. Kuroda; “A Study of Cooling Time Reduction of Interferometric Cryogenic Gravitational Wave Detectors Using a High-Emissivity Coating,”

Adv. Cryog. Eng. **59B** (2014), pp.1176-1183.

doi:10.1088/0264-9381/31/10/105004 .

Y. Sakaibara, N. Kimura, A. Akutsu,

T. Suzuki and K. Kuroda ; "Performance test of pipe-shaped radiation shields for cryogenic interferometric gravitational-wave detectors", *Classical and Quantum Gravity* **32** (2015), 155011(10 pp.), doi:10.1088/0264-9381/32/15/155011 .

Y. Sakaibara, N. Kimura, T. Suzuki, K. Yamamoto, C. Tokoku, T. Uchiyama and K. Kuroda ; "An experiment to distinguish between diffusive and specular surfaces for thermal radiation in cryogenic gravitational-wave detectors," *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2015), 073F01(9 pp.), doi:10.1093/ptep/ptv100.

[学会発表](計 13 件)

【国際会議】

Y. Sakakibara, N. Kimura, T. Suzuki, K. Yamamoto, D. Chen, S. Koike, C. Tokoku, T. Uchiyama, and K. Kuroda
 「Verification of cooling time reduction for KAGRA」, 『Bilateral Italy-Japan Workshop』、Italian Institute of Culture, Tokyo, Japan、(April 2013)

Y. Sakakibara, N. Kimura, T. Suzuki, K. Yamamoto, D. Chen, S. Koike, C. Tokoku, T. Uchiyama, and K. Kuroda
 「Verification of cooling time reduction of interferometric cryogenic gravitational wave detectors using high emissivity coating」, 『Gravitational Wave Advanced Detector Workshop』、La Biodola, Isola d'Elba, Italy、(May 2013)

Y. Sakakibara}, N. Kimura, T. Suzuki, K. Yamamoto, D. Chen, C. Tokoku, T. Uchiyama, and K. Kuroda
 「A study of cooling time reduction of interferometric cryogenic gravitational wave detectors using high emissivity coating」, 『CEC/ICMC 2013』、2013-0073、

Anchorage, Alaska, USA、(June 2013)

Y. Sakakibara, N. Kimura, T. Suzuki, K. Yamamoto, D. Chen, S. Koike, C. Tokoku, T. Uchiyama, M. Ohashi, and K. Kuroda
 「Cooling time reduction of KAGRA」, 『International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves』、Pohang, Korea、(August 2013)

Y. Sakakibara, N. Kimura, T. Suzuki, K. Yamamoto, S. Koike, R. Takahashi, C. Tokoku, Y. Saito, T. Akutsu, K. Kuroda
 「Heat and vibration measurement of KAGRA duct shields」, 『ELITES Second general meeting』、Tokyo, Japan、(December 2013)

Y. Sakakibara, N. Kimura, M. Tanaka, T. Kume, S. Koike, T. Akutsu, T. Tomaru, T. Suzuki, K. Yamamoto, K. Kuroda
 「Cryogenic system for KAGRA - Status and results of performance test of a cryogenic duct shield -」, 『Gravitational Wave Advanced Detector Workshop』、Takayama, Japan、(May 2014)

Y. Sakakibara, N. Kimura, M. Tanaka, T. Kume, S. Koike, T. Akutsu, T. Tomaru, T. Suzuki, K. Yamamoto, K. Kuroda
 「Performance test of KAGRA cryogenic duct shield」, 『The 6th Korea-Japan Workshop on KAGRA』、NAOJ, Japan、(June 2014)

Y. Sakakibara, N. Kimura, T. Suzuki, K. Yamamoto, S. Koike, R. Takahashi, C. Tokoku, Y. Saito, T. Akutsu, K. Kuroda
 「Calculation and measurement of thermal radiation through a pipe-shaped shield」, 『ICEC 25 - ICMC 2

014』、Thu-Af-Orals Session 14、Enschede, Netherlands、(July 2014)

Y. Sakakibar 「Status and results of performance test of cryogenic duct shields」 『KAGRA face to face meeting』、Toyama University、(August 2014)

【国内会議】

榊原裕介, 木村誠宏, 鈴木敏一,
山元一広, 陳たん, 小池重明,
東谷千比呂, 内山隆, 大橋正健,
黒田和明, KAGRA Collaboration 「KAGRAクライオスタット実機を用いた低温懸架系の冷却実証実験」、『日本物理学会2013年秋季大会』、講演番号：22pSR-5、高知大学、2013年9月

榊原裕介, 木村誠宏, 鈴木敏一,
山元一広, 小池重明, 高橋竜太郎
東谷千比呂, 齊藤芳男, 阿久津智忠,
黒田和明 「パイプ型シールドを用いた放射シールド開口からの熱放射低減の研究」、『2013年度秋季低温工学・超電導学会』、講演番号：3D-a03、ウヰンクあいち、2013年12月

榊原裕介, 木村誠宏, 鈴木敏一,
山元一広, 小池重明, 高橋竜太郎,
東谷千比呂, 齊藤芳男, 阿久津智忠,
黒田和明 「KAGRAダクトシールドの入熱・振動測定」、『日本物理学会第69回年次大会』、講演番号：27aTL-13、東海大学、2014年3月

榊原裕介, 田中雅樹, 木村誠宏, 阿久津智忠, 都丸隆行, 鈴木敏一.

山元一広, 黒田和明 「KAGRA用パイプ型熱放射シールドの性能評価」 『日本物理学会2014年秋季大会』、講演番号：20aSB-7、佐賀大学、2014年9月

〔図書〕(計 1件)

【学位論文(博士)】

Y. SAKAKIBARA, “A Study of Cryogenic

Techniques for Gravitational Wave Detection”, 東京大学大学院, 2014年度

6. 研究組織

(1) 研究代表者

(1) 研究代表者

木村 誠宏 (KIMURA Nobuhiro)
高エネルギー加速器研究機構・共通基盤研究施設・准教授
研究者番号：10249899

(2) 研究分担者

山元 一広 (YAMAMOTO Kazuhiro)
富山大学・大学院理工学研究部(理学)
・准教授
研究者番号：00401290