

令和 7 年度 (2025) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名 和文：大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) の低温懸架系の研究)

英文：Research on cryogenic payload for KAGRA

研究代表者 山元 一広

参加研究者 森脇 喜紀、千葉 天祐人、小山 智、渡辺 陸斗、道村 唯太、
小森 健太郎、大塚 宗丈、木村 誠宏、牛場 崇文、都丸 隆行、鈴木 敏一、
苔山 圭以子、辻 健志

研究成果概要

重力波は一般相対論から予言される光速度で伝搬する時空のさざ波である。重力波の直接検出は物理学、天文学において大きな意味を持つ。2016年2月のアメリカのLIGOの初の直接検出の発表で検出器の開発は新たなphaseに入った；次の目標は国際的な重力波観測ネットワークの構築である。このネットワークは重力波自体の研究（重力波の偏極は一般相対論通りなのか、それとも他の重力理論に従うのか）、到来方向の精度の高い決定（天文学にとって必須）に貢献する。日本に建設されたKAGRA干渉計は国際ネットワークの一員としての寄与が期待されている。

KAGRAが従来のkmスケールの干渉計と大きく異なる特徴の一つとして熱雑音を低減するためにサファイア鏡とその懸架系を20K程度まで冷却することがあげられる。歴史的な経緯から現在の稼働もしくは建設中の干渉計は第2世代と呼ばれているがさらに感度を10倍向上させた第3世代検出器計画の議論がヨーロッパで進められており（Einstein Telescope）、ここでも低温技術が採用される。つまり低温鏡はさらなる感度向上でも重要な位置を占める。本研究の目的はKAGRAの低温懸架系の技術を進展させることである。

今年度はサファイア鏡のパラメトリック不安定性の研究を行った。これはレーザー光の輻射圧が鏡の弾性振動モードを励起し、この弾性振動が光を励起し、そしてこの光が鏡をさらに励起するという現象である。これにより干渉計の鏡が大きく振動し、干渉計の安定な運転そして観測が困難となる。現在 LIGO ではこの不安定性が深刻な問題となり、その対処に多大な労力を割いている。

KAGRA の場合のパラメトリック不安定性は申請者がすでに 18 年程前に検討している (Journal of Physics: Conference Series 122(2008)012015)。その結果によると KAGRA

は低温技術を導入したことにより、不安定な鏡の弾性振動モードの数はLIGOの1/10程度である。

しかしながら数が少ないとはいえ不安定モードは存在するのでその対策が必要である。また最近15年の間にサファイア鏡や干渉計の設計仕様に変更がなされた。これを受けて富山大学でKAGRAに設置されたサファイア鏡の形状を考慮して有限要素法によるシミュレーションを行い（図1）、さらに実験的に検証 KAGRAの鏡と同形状のサファイアバルクの共鳴振動の周波数と形状を測定している。

今年度はシミュレーション（学会発表などの1）と実験（学会発表などの2）双方の課題に取り組んだ。シミュレーションでは文献によってサファイアの弾性係数の符号が異なる問題を検討した。符号の違いは座標系の定義によることが判明した。つまりサファイアが円柱形の場合は弾性係数の符号を入れ替えても、共鳴モードの周波数や形状は変わらない。これを逆手にとって弾性係数の符号を変えてシミュレーションを行い、よく一致していることを確認した。これでシミュレーション自体に大きな問題がないことを示すことができた。実験では励起した共鳴振動の振幅とシミュレーションの結果を比較するために、励起用アクチュエータの較正を行った。較正結果は理論と桁はあっているが、食い違っており、精査が続けている。

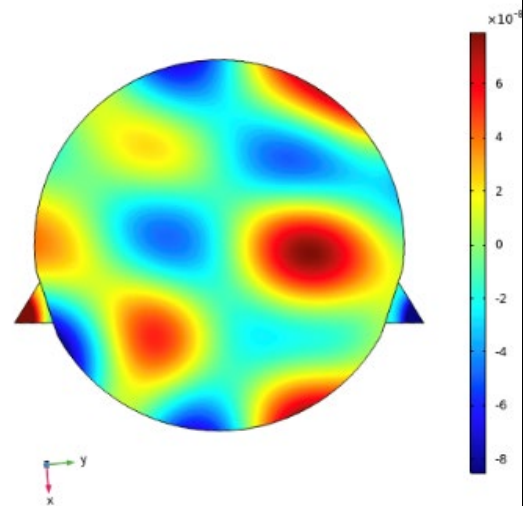


図1：不安定性シミュレーションの結果の一例。周波数は65.119kHzである。

学会発表など

1. 國富 耀仁、”KAGRAにおけるサファイアの弾性定数の符号の評価”, 富山大学卒業論文(2026).
2. 清水 暢弘、”PI 研究のための励起用サファイアバルクのコイルマグネットアクチュエータの較正と評価”, 富山大学卒業論文(2026).
3. K. Yamamoto, R. Watanabe, ”LMA and NAOJ coating mechanical loss at cryogenic temperatures”, KAGRA Future Working Group 5th open meeting & Quantum probes for gravity workshop 2025, Hongo campus, The University of Tokyo, 6 Nov 2025
4. R. Watanabe, R. Fujii, K. Yamamoto, ”Improvement and verification of the instrument to measure the mechanical loss of the mirror reflection coating for KAGRA”, The 35th KAGRA face to face meeting, Gofuku Campus, University of Toyama, 19–21 Aug 2025