

氏 名 幾島 悠喜

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大乙第 188 号

学位授与の日付 平成 20 年 9 月 30 日

学位授与の要件 学位規則第 6 条第 2 項該当

学位論文題目 超低振動クライオクーラの開発研究

論文審査委員 主 査 教授 細山 謙二
教授 山本 明
教授 春山 富義
教授 西山 樟生(高エネルギー加速器
研究機構)
教授 光延 信二(高エネルギー加速器
研究機構)
佐藤 明男(物質・材料研究機構)

論文内容の要旨

クライオクーラーは、120 K以下の極低温まで冷却可能な冷凍機である。MRI や NMR など超伝導現象を用いた機器や熱雑音を嫌う高感度センサなどの冷却に利用されている。

CLIO (Cryogenic Laser Interferometer Observatory) は、レーザー光を反射するミラー部を極低温まで冷却することで検出感度の向上が図られた重力波検出器である。クライオクーラーは長期観測に対する利便性からその冷却手段として利用が検討されたが、クライオクーラーの動作振動が懸念されていた。CLIO がクライオクーラーに要求する性能は、冷却インターフェースにおける振動変位として 1 μm 以下、冷凍能力は 4.5 K において熱負荷 0.5 W であった。

現在、クライオクーラーとしてギフォードマクマホン (GM) 冷凍機が普及している。GM 冷凍機は、取扱いが容易であり、4 K において 1 W 程度の冷凍能力が得られることが特徴である。しかし、GM 冷凍機は、低温生成部にある蓄冷器 (ディスプレイサ) が往復運動するため加振力を発生し、冷却物へ伝播する振動が大きいという欠点があった。一方、近年実用化されたパルス管冷凍機は、低温生成部に機械的な可動部品を持たないため、GM 冷凍機より振動が小さいことが特徴である。都丸らは、パルス管冷凍機の振動を調査し、常温部 (コールドヘッド) の加振力は GM 冷凍機に比べ 1/10 も小さくなるものの、低温端部 (コールドステージ) の振動は 10~20 μm 程度と GM 冷凍機とほとんど変わらないことを明らかとした。このコールドステージ振動は、作用ガスの圧力振動によってパルス管が弾性変形するために引き起こされることが指摘されていた。

過去のコールドステージの振動低減策として、冷凍機外部に減振機構を設ける方法が Wang らにより試みられている。FRP ロッドで支持された新しい冷却インターフェースである VR (Vibration Reduction) ステージを設け、パルス管低温端とコールドステージを可撓性のヒートリンクで接続することで振動低減を図る方法が取られている。しかし、この方法ではコールドステージ振動は 3 μm 程度に留まり、CLIO へのクライオクーラーの導入には更なる振動低減が必要であった。

本研究では、低振動クライオクーラーの開発として、過去の成果の分析から振動低減策を徹底し、それに基づいた冷凍機システムを設計・製作と性能評価をおこなった。本研究で導入した振動低減コンセプトの特徴は、

- (1) コールドステージへの振動伝播を防ぐ VR ステージの導入
- (2) 振動源となる圧力切り換えバルブユニットの分離
- (3) ベローズよるクライオクーラーとクライオスタットの分離

である。また、振動低減効果を高めるため、材料面での検討も加え、FRP ロッドにアルミナ FRP、ヒートリンクに高純度アルミニウム撚り線を候補とした。設計検討では、材料特性の測定を行い、振動変位および冷凍能力の性能予測を行った。材料特性を評価した結果、アルミナ FRP は G-FRP に比べヤング率が 3 倍高いこと、高純度アルミニウム撚り線を用いたヒートリンクはバネ定数が小さいうえ、熱抵抗が小さくなることが分かった。また、バネ系および熱抵抗系を用いた性能予測の結果から、VR ステージへの振動変位の伝播は数十ピコメートルオーダーの振動変位に抑えられること、冷凍能力についても目標とする冷凍性能 (第 2 段ステージ: 4.5 K において 0.5 W、第 1 段ステージ: 50 K において 20 W) となることの見込みが得られた。

これらの設計をもって製作された低振動クライオクーラーの性能を確認するため、振動変位測定および冷凍能力測定を実施した。実施の結果、振動測定においては目標である 1 μm 以下、特に z 軸方向 (クライオクーラーのシリンダ軸方向) では、60 nm となる結果が得られた。この値はパルス

管冷凍機本体のクールドステージ振動変位から 2 桁小さく、本研究の方式による振動低減効果が大
きいことが示された。また、VR ステージにおける冷凍能力測定については、第 2 段ステージに熱負
荷 0.5 W を加えた場合の到達温度は 4.34 K となり、また第 1 段ステージに熱負荷 20 W を加えた
場合の到達温度は 50.5 K となる結果が得られた。これにより、目標の冷凍能力以上の性能が得ら
れたことを確認した。

考察では、測定値との比較からモデルによる予測が実用上の範囲で定量性を有すること、VR ステ
ージの x, y 軸方向の変位が相対的に大きいことが構造上の理由によるものであることを示した。さ
らに、低振動クライオクーラーの更なる向上として、VR ステージ構造の改良とヒートリンクの熱接
触対策について議論した。

以上、本研究により世界最高レベルの低振動性を有する 4K クライオクーラーが実現した。本研究
で開発された低振動クライオクーラーは、重力波検出器に限らず、今後低振動が要求される低温機器
に広く応用されることが期待できる。

論文の審査結果の要旨

研究の対象である超低振動クライオクーラーは重力波検出器（Cryogenic Laser Interferometer Observatory, CLIO）を安定に長期間にわたって冷却することを目標に開発され、4.5Kでの冷凍能力 0.5W を持つとともに、低温ステージでの振動振幅をミクロン以下に抑えることが出来ることが最大の特徴である。

クライオクーラーはこれまでに多くの研究者により精力的に開発研究され、現在では、4Kまでの冷却が可能な小型装置が実用化され、超伝導マグネットや検出器等の極低温機器を安定に長期冷却・保持する冷凍装置として利用されている。極低温領域である 4K の実用の冷凍機として、もっとも普及しているギフォードマクマホン（GM）冷凍機は膨張ピストンが使われており、その往復運動に起因する機械的な振動が大きな問題となることが知られている。

そこで、幾島氏は超低振動化を実現するために、まず、近年、性能が向上し、実用化が進んだパルス管冷凍機に着目して、冷凍機として二段のパルス管冷凍方式を採用することにした。パルス管冷凍機では、管内のガスを膨張ピストンとして利用するため、機械的な膨張ピストンが不要で、低振動化が期待されたからである。ところが、運転中のシリンダー内のガスの圧力変動に起因するシリンダーの変形による低温生成部の振動が大きく目標の超低振動の実現が不可能であると判断した。そこで、幾島氏は、過去に実施された振動の低減化の事例をバネ系モデルにより詳細に解析・検討して、振動振幅の大幅な低減には以下の3項の改善が重要であることを見出した。

1) 低温生成部と独立した防振構造の低温ステージを導入して、主要な振動源である低温生成部から伝播される振動を阻止すること。これを実現するために熱接続要素として従来使用されていた銅製の板バネを、剛性の低い純アルミニウムの撚線に変える。

2) 低温ステージの支持構造は室温部からの熱侵入を阻止するための優れた断熱性能と同時に低温ステージの振動を抑えるための剛性が要求される。構造解析コードを駆使することにより、剛性の高い支持構造の形状を決定する。同時に、その支持ロッドをガラス繊維の FRP にかえて極低温で剛性が高いアルミナ繊維の FRP 製を採用して剛性を強化する。

3) 冷凍機運転時のバルブの切り替え操作に起因する振動を低減するために、バルブユニットを冷凍機から分離する。

幾島氏は試作機の製作に先立って、超低振動クライオクーラーの主要な構成要素である純アルミニウムの撚線の熱接続要素やアルミナ製の FRP 支持ロッドを試作して、そのバネ定数、ヤング率、熱伝導率など熱設計や機械設計に必要な多くのデータを根気よく丹念に測定し、それをもとにして、超低振動のクライオクーラーを設計・製作を行っている。この真摯で、堅実で緻密な開発手法は高く評価される。

完成した超低振動のクライオクーラーは性能試験で所定の性能が得られることが確認され、本研究の成果は研究論文として、低温工学や Cryogenics に発表されて高い評価を得ている。本研究により開発された超低振動クライオクーラー数台が重力波検出器 CLIO に取り付けられ、すでに1年以上安定して運転され、実用機としてその性能を実証しており、今後、低振動が要求される極低温機器への広汎な応用が期待される。

本研究の重要性はクライオクーラーの振動の原因を詳細に究明して、適切な防振対策を見出し、必要な構成要素を開発することによりを完成度の高い超低振動クライオクーラーの実用機を完

成させたことにある。

以上の理由により、幾島悠喜氏の提出した博士論文を審査員全員が一致して合格と判断した。