無振動冷却への道

—Cryogenic Laser Interferometer Observatory (CLIO) 用低振動冷凍装置の開発—

幾島 悠喜^{*1,†}, 李 瑞^{*1}, 都丸 隆行^{*2}The Road to Vibration-free Refrigeration
— Development of a Low-vibration Refrigeration System for CLIO —Yuki IKUSHIMA^{*1,†}, Rui LI^{*1} and Takayuki TOMARU^{*2}

Synopsis: The vibration-free cryocooler remains one of the key components in the Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (LCGT). Accordingly, reviewing the design and results of the vibration-free cryocooler for the Cryogenic Laser Interferometer Observatory (CLIO) (prototype of the LCGT) would be useful for development of the LCGT. At the same time, the development of the pulse-tube cryocooler is now progressing to a stage where it is more powerful with less vibration. In this paper, the past development of the vibration-free cryocooler system for CLIO, and new technologies of the vibration-free cryocooler are presented.

Key words: cryocooler, low-vibration, gravitational wave

1. はじめに

極低温冷凍機（クライオクーラー）の低振動化は、大型低温重力波望遠鏡（Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope: LCGT）や LCGT のプロトタイプ Cryogenic Laser Interferometer Observatory (CLIO) のミラーの低温化にとって重要な技術である¹⁾。LCGT や CLIO 用冷凍機には、検出器の設置サイトである岐阜県神岡鉱山内の地盤振動と同程度の振動レベルが要求され、これまでのクライオクーラーで達成されたレベルよりもさらに低振動が求められる²⁾。

クライオクーラーが使用される理由は利便性とコスト優位性にある。クライオクーラーは液体寒剤を使用せず安全性が高い上、操作が容易で繰り返し冷却できるというメリットがある。冷凍能力は液体ヘリウム温度において数 W 程度に限定されるものの、大型の液化装置に比べて安価に導入可能である。クライオクーラーの一つである Gifford-McMahon (GM) 冷凍機は Magnetic Resonance Imaging

(MRI) 用の冷却手段として普及が進んでおり、液体ヘリウム使用量の削減に貢献している。しかし、運転時に発生する振動は以前より問題となっており、機械的な振動が被冷却体となるセンサに伝わり信号ノイズを発生させることがある。実際、このような信号ノイズは高感度・高精度化が進んでいる測定機器の高性能化を阻害する要因となっており、クライオクーラーの低振動化は LCGT に限らず重要な開発課題となっている。CLIO や LCGT では長期間にわたる観測が想定され、クライオクーラーの低振動化の開発が特に重要であった。CLIO 用冷凍装置が開発された 2000 年代前半は 4 K Pulse Tube (PT) 冷凍機が商品化され、クライオクーラーの低振動化に注目された時期でもあった。本解説では CLIO 用低振動 PT 冷凍装置の開発の背景と、最近のクライオクーラーの低振動化の事例を紹介し、LCGT に向けた展望などについて述べる。

2. これまでの低振動化の取り組み

PT 冷凍機は低振動という点で最も有力なクライオクーラーである。その理由は GM 冷凍機や Stirling 冷凍機で振動源となるディスプレイサやピストンを有さないためである³⁾。PT 冷凍機は 1960 年初頭に Gifford らによって発明されているが GM 冷凍機の発展に比べて 4 K 冷凍機としての開発が進んでいなかった⁴⁾。しかし、位相制御機構の改良が進み、2000 年代に入り 4 K PT 冷凍機が開発されるに至った^{5, 6)}。住友重機械工業でも 4.2 K で 0.5 W の冷凍能力を有

Received April 5, 2011

^{*1} 住友重機械工業株式会社精密機器事業部
〒188-8585 東京都西東京市谷戸町 2-1-1
Sumitomo Heavy Industries, Ltd., 2-1-1 Yato-cho, Nishitokyo,
Tokyo 188-8585, Japan

^{*2} 高エネルギー加速器研究機構
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
High Energy Accelerator Research Organization,
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

[†] E-mail: yuki_ikushima@shi.co.jp

する PT 冷凍機として SRP-052A を 2003 年に発売し好評を得ている。

CLIO 用クライオクーラーの選定として都丸らによって GM と PT 冷凍機の振動特性の比較評価が行われている。この研究では、クライオクーラーの振動をコールドヘッドとコールドステージの振動に分けて比較している^{7, 8)}。まず、コールドヘッドの振動加速度は、PT 冷凍機では 0.1 m/s^2 となり、GM 冷凍機の 10 m/s^2 に比べて十分に小さいことが示され、PT 冷凍機の低振動性を裏付ける結果が示された。一方、コールドステージの変位振動は、動作時のガス圧力変動によるパルス管の弾性変形が支配的であり、振動変位が数 $10 \text{ }\mu\text{m}$ となる GM 冷凍機と同レベルであることが明らかになった。このことは、低振動と言われた PT 冷凍機でも、実はコールドステージの振動変位については GM 冷凍機とあまり変わらないということを意味していた。

開発当時の 2003 年時点で、PT 冷凍機のコールドステージ変位振動に着目しその低振動化を図った事例として、Liennerth らによる単段 PT 冷凍機⁹⁾がある。Liennerth らが製作した低振動冷凍装置の写真と模式図を Fig. 1 に示す。これは SQUID の Field resolution の振動ノイズの低減を行ったもので、新たに Glass FRP (G-FRP) ロッドでサポートされた冷却ステージ (Vibration Reduction (VR)ステージ) を設け、可撓性のヒートリンクで冷却ステージに熱を伝える構造となっている。FRP 支持ロッドはシリンダを覆うような円筒形のものと、円柱をシリンダ周りに 4 つ配置したものが提案されている。また、ヒートリンクとして銅製の板バネが用いられている。この方式により圧力差 0.7 MPa (7 bar) 時の PT シリンダの軸方向の振動振幅を $6.0 \text{ }\mu\text{m}$ から $0.6 \text{ }\mu\text{m}$ へ 1 桁低減している。その後、この方式と同様な振動低減策を用いた事例として、藤本らの $\pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ 以下へ振動低減を達成した例¹⁰⁾、Wang らによる 2 段 PT 冷凍機において $3 \text{ }\mu\text{m}$ へ振動低減を行った例¹¹⁾などがある。いずれも外部機構による PT 冷凍機の変位振動低減が可能であることを示している。しかし、まだ「無振動」というテーマ

に対し以下のような 2 つの課題が残されていた。

[1] PT 冷凍機はロータリバルブで圧力振動を発生させコールドヘッドに供給するが、この圧力振動のためにコールドヘッドで生じる加振力に対しての対策がされていない。さらに、VR ステージがコールドヘッドに直接設けられているため、コールドヘッドの加振力が VR ステージに直接伝播すると考えられる。

[2] VR ステージは G-FRP 製の支持ロッドで支持され、銅製板バネ型のヒートリンクでコールドステージと接続されている。しかし、板バネ型のヒートリンクには振動低減の効果が大きい軸とまったく効果が得られない軸があるという問題がある。

この分析から CLIO 用冷凍装置では問題点を克服するために一つ一つ対策を施した。次節では CLIO で採用した振動低減策について紹介する。

3. CLIO 向け低振動冷凍装置

3.1 基本設計

CLIO 用冷凍装置の開発目標は、 4.5 K において冷凍能力 0.5 W 、振動変位 $\pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ 以下であった。

Fig. 2 に CLIO 用冷凍装置の概要を示す。CLIO 用冷凍装置の低振動化の主な設計方針は、PT 冷凍機の採用、バルブユニットの分離、独立懸架型防振機構の導入である。独立懸架型防振機構とは、新たに導入する VR ステージとコールドヘッドをそれぞれ独立に懸架する構造を指す。以下では、装置の詳細について述べる。

3.2 バルブユニットの分離

PT 冷凍機のコールドヘッド部での振動源となるバルブユニットへの振動対策がバルブユニットの分離である。SRP-052A のバルブユニットはセルフシールカップリングにより切離しが可能となっている。CLIO 用冷凍装置ではステンレス製の剛配管を介してバルブユニットをコールドヘッドへ接続し、バルブユニットは十分剛性があり質量のある台上に分離・固定した。

(a) Photograph⁹⁾

(c) 2001IEEE

(b) Schematic illustration

Fig. 1 Photograph and schematic illustration of the vibration reduction method for the PT cryocooler by Liennerth et al.⁹⁾

Fig. 2 Schematic illustration of the VR method for the PT cryocooler of CLIO.

3.3 独立懸架型防振機構の導入

上述したように PT 冷凍機では冷却ステージでの内部圧力変動に伴って変位振幅が生じる。これを抑えるために Fig. 2 に示すような既存の冷凍機に対し新たに冷却インターフェースとなる VR ステージを設けた。VR ステージは FRP 支持ロッドによってクライオスタットに荷重支持され、冷却ステージとの接続には柔軟かつ熱伝導性のよいヒートリンクを用いることで、無振動で冷凍能力低下の小さい冷却面を作り出す。

Fig. 3 に、VR ステージのバネ系モデルを示す¹²⁾。対象は 2 段冷凍機に対する振動低減であるが、簡単のため単段冷凍機で考える。単段型モデルによる検討であっても、2 段型パルス管クライオクーラーにそのまま拡張することが可能である。複数本で構成される支持ロッドのバネ定数を k_r 、ヒートリンクのバネ定数を k_h 、パルス管冷凍機のシリンダ部のバネ定数を k_p とする。また、コールドヘッドの変位を z_0 、支持ロッドを取り付けるフランジ（クライオスタット）の変位を z_1 、VR ステージの変位を z_2 、コールドステージの変位を z_3 とした場合、VR ステージのバネ系における運動方程式は以下になる。

$$\begin{cases} m_2 \ddot{z}_2 + k_h(z_2 - z_3) + k_r(z_2 - z_1) = 0 \\ m_3 \ddot{z}_3 + k_h(z_3 - z_2) + k_p(z_3 - z_0) = f_g \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 m_2 は VR ステージの質量、 m_3 はコールドステージの質量、そして、 f_g はガス圧力による加振力である。

(1)式をフーリエ変換し、行列で表し連立 1 次方程式を解く。 k_h は k_r および k_p より十分小さいことと駆動周波数が固有値より十分小さいことを仮定すれば以下になる。

$$\begin{bmatrix} z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{k_r k_p} \begin{bmatrix} k_r k_p z_1 + k_h(k_p z_0 + f_g) \\ k_h k_r z_1 + k_r(k_p z_0 + f_g) \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式の $(k_p z_0 + f_g)$ の項を消去し、 z_2 で整理すると以下のような簡単な関係式で示すことができる。

$$z_2 = z_1 + \frac{k_h}{k_r} z_3 \quad (3)$$

以上から、VR ステージはコールドステージ変位にヒートリンクのバネ定数と支持ロッドのバネ定数の比をかけた変位（コールドステージ変位の振動伝達）と、支持ロッドが支持されるクライオスタットフランジの変位（Fig. 3 で示す z_1 ）によって決定され、 k_h / k_r をできるだけ小さくし $z_1 \sim 0$ にすることが理想であることが分かる。

CLIO 用冷凍装置の場合、クライオスタットは神岡坑道内の非常に静粛な地盤にアンカーされるため、地盤振動による影響は非常に小さいと考えられる。しかし、コールドヘッドで発生する圧力切替えに伴う振動がクライオスタット

Fig. 3 Schematic illustration of the spring constant model of the VR method.¹²⁾

トを振動させる懸念がある。従来の PT 冷凍機の低振動化ではコールドヘッド支持フランジ (Fig. 3 で示す z_0) とクライオスタットフランジ z_1 は同一であり、そこに直接 VR ステージを固定する対策であったため、VR ステージにコールドヘッド振動が直接伝播したと考えられる。CLIO 用冷凍装置ではコールドヘッド支持フランジ z_0 とクライオスタットフランジ z_1 の間にベローズを導入して振動絶縁を行っており、このベローズには柔軟性の高い溶接ベローズを用いている。実際に神岡坑道内に CLIO 用冷凍装置を設置し、PT 冷凍機動作時のクライオスタットフランジ z_1 の振動測定を行った結果では、PT 冷凍機動作時でも都市部での変位密度レベルである 10^{-7} m/√Hz @1 Hz を下回り、神岡坑道内の地盤振動レベルとなる 10^{-9} m/√Hz @1 Hz である結果が得られた¹³⁾。

Fig. 4 に独立懸架型防振機構の熱計算モデルを示す¹²⁾。熱の流れは矢印で示す方向となり、各 VR ステージでの熱の出入りを示すと以下のように示される。

$$\begin{cases} 0 = Q_1 + Q_{r1} - Q_{h1} - Q_{r2} \\ 0 = Q_2 + Q_{r2} - Q_{h2} \end{cases} \quad (4)$$

ここで Q_1 および Q_2 はそれぞれ 1 段および 2 段 VR ステージに被冷却物から流入する熱量 (熱負荷)、 Q_{h1} および Q_{h2} はそれぞれ 1 段および 2 段ヒートリンクを流れる熱流、 Q_{r1} および Q_{r2} はそれぞれ 1 段および 2 段の支持ロッドを流れる熱流である。

式(4)下段の 2 段ステージに注目すると、熱負荷 Q_2 を大きく得るにはヒートリンクの熱流量 Q_{h2} を増やし、支持ロッドからの熱流量 Q_{r2} をできるだけ小さくすることがポイントとなる。熱流量 Q と温度 T との関係は熱抵抗 R を用いて

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \quad (5)$$

と表されるため、これらを実現するためには、ヒートリンクの熱抵抗 R_h をできるだけ小さくし、支持ロッドの熱抵抗 R_r を増さなければならない。

これらの関係式から、VR ステージに対し低振動を維持し、かつ高冷凍能力を得るためには、

- ① FRP 支持ロッドはできるだけ熱伝導性が低く、ヤング率が大きい材料を使用し、かつ高い剛性の構造とする。
 - ② ヒートリンクは剛性が低く高熱伝導性材料を用いる。
- の条件を満たすことが必要であることが分かる。

3.4 アルミナ FRP の採用

FRP 支持ロッドにはアルミナ FRP という強化プラスチック複合材料を用いた。アルミナ FRP は一般的な G-FRP の約 3 倍のヤング率を有しており、低温領域では G-FRP と同等かそれ以下の熱伝導率となる。実際の測定でも、30 K 以下でアルミナ FRP は G-FRP に比べ熱伝導率が小さく、10 K あたりでは G-FRP の 55% 程度であった。この結果か

Fig. 4 Schematic illustration of the thermal resistance model of the VR method.¹²⁾

らアルミナ FRP は FRP 支持ロッドとして適した材料であるといえる。さらに、断面積を小さくかつ剛性を高めるため中空パイプ形状に加工して用いることとし、FRP 支持ロッドを円周上に 8 つ配置した。この FRP 支持ロッドを用いた場合の 2 段 VR ステージへの侵入熱は 0.02 W と見込まれる。

3.5 ヒートリンクの改良

Fig. 5 に CLIO 用冷凍装置で用いたヒートリンク構造を示す。ヒートリンクの主要な伝熱材は純金属製の撚り線である。CLIO 用冷凍装置の特徴のひとつである撚り線構造は、剛性に対しては一本一本の線が細いためバネ定数が小さくなり、熱伝導に対しては断面積で決まるため大きな値を確保できる²⁸⁾。したがって、柔軟性が高く熱伝導性が高いヒートリンクを作ることができる。また、Lienerth らの板バネ方式のような方向性を持たないことも特徴である。

Fig. 6 へヒートリンクを 4 K 冷凍機に取り付けた際の写真を示す。このヒートリンクを 4 K 冷凍装置の 2 段ステージには 30 本、1 段ステージには 48 本、シールドクーラー用として同時に開発した 80 K 冷凍機には 48 本取り付けした。当初、電線用撚り線ケーブルを用いた Oxygen-Free High thermal conductivity Copper (OFHC) ヒートリンクを用いたが、振動低減効果が十分に得られなかったため、後にさらに柔軟な純アルミニウム (Pure-Al) ヒートリンクへ変更した。Pure-Al 撚り線は軽量で非常に柔らかい素材であり、純金属であることから低温領域において熱伝導率が高くなる特徴を有する。ヒートリンクに用いた撚り線は、純度 99.999% で $\phi 0.15 \times 15 \times 7 \times 7$ で構成されている。このヒートリンクとしてのばね定数は 1 本あたり 13.4 N/m であった。熱抵抗測定では、30 K 以下ではヒートリンクの接続金具 (圧着端子) による接触熱抵抗が支配的となり¹²⁾、熱抵抗としては OFHC ヒートリンクとほとんど差がなく、

Fig. 5 Schematic illustration of the heat link of the CLIO cryocooler.

Fig. 6 Photograph of the cold part of a 4 K CLIO cryocooler equipped with a VR stage. A pure-Al heat link is used in this setup.

最小で 2.5 K/W となることが分かった。金具部における接触熱抵抗の低減は今後の課題である。OFHC と Pure-Al それぞれのヒートリンクを適用した場合の変位測定による比較は次節で述べる。

4. VR ステージの評価

Fig. 7 にレーザー変位計を用いた VR ステージの振動変位測定系を示す。CLIO 用の振動低減策では、(2) 式で示したように地面振動からの振動伝播がバックグラウンドノイズとなりうる。よって、クライオスタットフランジの支持フレームは、エアダンパーの上に設置し、地面振動の影響を小さくした。非接触にコールドステージ振動を計測するため反射型レーザー変位計の Keyence LC-2420 を用いた。このレーザー変位計は真空中で使用できないため、コールドステージならびに VR ステージの変位測定は大気中で行った。大気中ではコールドステージ温度の低下とともに結露してしまうため、クライオクーラーの起動直後の常温状態で計測を行った。動作開始時の振動は冷却が進んだ状態の振動より大きいことから、振動の上限値を得ることが可能である。また、測定は 3 方向から実施した。鉛直方向を z 軸とし、それに直角面内に x, y 軸をとり、連結配管の軸方向から 15° 時計回りに回転した軸を x 軸方向とし、その直角方向が y 軸である。

Fig. 8 に VR ステージの変位測定の結果得られた z 軸に対する振動変位波形ならびにスペクトラム結果を示す。また、**Table 1** には CLIO 用冷凍装置として製作した 4K-PT 冷凍装置 4 台のうちヒートリンク条件を変更させた 3 台の試験結果を示す。4K-1 号機には 1 段および 2 段 VR ステージともに OFHC ヒートリンクを使用し、4K-2 号機には

Fig. 7 Setup for measurement of displacement for the VR stage and the measurement coordinate system.

1 段、2 段にそれぞれ OFHC、Pure-Al ヒートリンクを用い、4K-3 号機は 1 段および 2 段 VR ステージともに Pure-Al ヒートリンクを使用した。

4K-1 号機に採用した OFHC ヒートリンクの場合でも、VR ステージの性能は、2 段 VR ステージにおいて冷凍能力が 0.5 W 負荷時で 4.43 K、振動変位は z 軸方向で $\pm 0.2 \mu\text{m}$ となり良好な結果が得られた。しかし、x, y 軸では最大 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ となり目標である $\pm 1.0 \mu\text{m}$ に届かない結果となった。そこで 4K-2 号機では 2 段 VR ステージに Pure-Al ヒートリンクを用いたところ、冷凍能力は 0.5 W 負荷時で 4.38 K、振動変位としては x, y 軸で最大 $\pm 0.54 \mu\text{m}$, z 軸で $\pm 0.16 \mu\text{m}$ という結果となった。4K-3 号機では両方の VR ステージに Pure-Al ヒートリンクを用い、冷凍能力は 0.5 W 負荷時で 4.34 K、振動変位としては x, y 軸で最大 $\pm 0.73 \mu\text{m}$, z 軸で $\pm 0.05 \mu\text{m}$ という結果となった。

Fig. 8 で示す振動変位波形の結果でも振動低減効果は明らかであるが、スペクトラムにおいて冷凍機の動作周波数となる 1.2 Hz に注目すると、ベースとなるコールドステージの振動変位が $6 \times 10^{-5} \text{ m}$ であるのに対し、Pure-Al 使用時には $1 \times 10^{-8} \text{ m}$ となるなど 2 桁以上の振動低減効果があることが分かった。式(3)を用いた変位予測では $3.3 \times 10^{-10} \text{ m}$ となり、測定値はこれに及ばなかった。予測値と測定値の差異は測定系を構成する模擬クライオスタットの剛性が足りず、また地面へのアンカーが不十分であったことで、クライオスタットフランジ(x_i)で変位が生じたことに起因すると考えられる。また、VR ステージは横方向への剛性が

小さいことからヒートリンク材料の比較では、Pure-Al ヒートリンクを用いた測定結果は、OFHC ヒートリンクを用いた場合に比べ、x, y 方向では約 1/2、z 軸方向ではそれ以上の効果が見られる。Pure-Al のヤング率と OFHC のそれとの比では 54%であることから、OFHC から Pure-Al ヒートリンクへ材料見直しの効果が示されていると言える。

冷凍能力に関して、式(4)および(5)を用いた予測によると 2 段 VR ステージにおいて Pure-Al ヒートリンクで発生する温度差は 0.5 W 負荷において $\Delta T = 0.17 \text{ K}$ となったが、4K-3 で得られた測定結果は $\Delta T = 0.38 \text{ K}$ となった。ヒートリンク単独で熱抵抗測定した状態と実際の取付け状態が異なることが推測され、ヒートリンク取付け部の接触熱抵抗が原因と考えられる。とはいえ、温度差は小さく、式(4)と(5)により冷凍能力のオーダ見積りを与えることが可能である。また、Pure-Al ヒートリンク条件においても高い冷凍能力を維持しており、独立懸架方式防振機構により冷凍能力を損なわず効果の高い低振動化が達成できたと言える。

Table 2 には、シールドクーラー用 80 K 冷凍装置^{14, 15)}の結果を示す。80 K 冷凍機の開発にあたっては SRP-052A の 2 段部分を除いて単段化を行った。冷凍能力は 50 W 負荷時で 67.5 K (コールドステージ自体では 41.7 K) と当初目標としていた 80 K を十分に超える結果が得られた。また、単段冷凍機ではより小さい振動変位となりほぼ無振動に近い (バックグラウンドレベルの) 振動レベルとなった。単段の振動低減効果が高い理由としては、パルス管での振動変位が小さいことに加え、VR ステージの支持構造

Fig. 8 Vibration displacement on the 2nd cold stage and the 2nd VR stage with aluminum or OFHC heat links (z-axis).

Table 1 Performance of 4 K PT cryocooler units for CLIO.^{14, 15)}

			4K-1	4K-2	4K-3
Heat link			OFHC	(2nd)Pure-Al (1st) OFHC	Pure-Al
Cooling performance	2 nd cold stage	(0.5 W)	4.10 K	4.12 K	3.97 K
	1 st cold stage	(20 W)	41.5 K	40.3 K	42.8 K
	2 nd VR stage	(0.5 W)	4.43 K	4.38 K	4.34 K
	1 st VR stage	(20 W)	48.6 K	47.7 K	50.5 K
Vibration amplitude	2 nd	X	±1.20 μm	±0.54 μm	±0.61 μm
	VR stage	Y	±1.50 μm	±0.50 μm	±0.73 μm
		Z	±0.20 μm	±0.16 μm	±0.05 μm

Table 2 Performance of 80 K PT cryocooler units for CLIO.^{14, 15)}

			80K-1	80K-5
Heat link			OFHC	Al
Cooling performance	80 K cold stage	(50 W)	41.9 K	41.7 K
	80 K VR stage	(50 W)	56.3 K	67.5 K
Vibration amplitude	80 K	x	±0.30 μm	±0.02 μm
	VR stage	y	±0.25 μm	±0.03 μm
		z	±0.07 μm	±0.05 μm

がより堅固であるためと考えられる。

CLIO 用低振動 PT 冷凍装置は 2005 年に神岡坑道の干渉計システムに組み込まれている。システムに組み込まれた状態でのミラーやクライオスタットなどの主要な部位の温度や加速度測定、干渉計の感度の測定が行われ、設計通りの結果が得られたことが報告されている¹⁶⁻¹⁸⁾。さらに、本低振動化策がカロリメータなどの物性測定装置へ応用された事例も報告されている¹⁹⁾。

5. 近年の低振動冷凍機開発

最後に、近年の 4K PT 冷凍機の進展と PT 冷凍機の低振動化の研究について紹介する。近年の PT 冷凍機は、低振動に加えて GM 冷凍機並みの高冷凍能力を実現することや一層の小型化を目指して開発が進んでいる。

中野らは MRI 搭載を目的とした 2 段 PT 冷凍機を開発し、2nd ステージに 1 W 負荷を与えた状態で 4.02 K を達成した²⁰⁾。住友重機械工業ではこれをベースにした 1.0 W 負荷時 4.2 K の冷凍能力を持つ SRP-082B を発売している²¹⁾。さらにロータリバルブを分離したタイプも開発し、1 W 負荷時 3.99 K と冷凍能力は維持しつつ低振動化を行っている²²⁾。また、Cryomech 社では 1.5 W 負荷時 4.2 K の冷凍能力を有する PT415 をラインナップに加えている²³⁾。

一方、クライオクーラーの低振動化に対する取組みについても、いくつかの方法が提案されている。

許ら²⁴⁾は、2 段 PT 冷凍機に対しパルス管と蓄冷管のシリンダの肉厚を温度勾配にあわせて変えることで、侵入熱を抑制させつつも圧力変化によって生じるシリンダ軸方向の変位を低減させた。また、シリンダ水平方向の振動対策としてパルス管と蓄冷管の間を可撓性形状のパイプで連絡することで、パルス管と蓄冷管の剛性が異なることで発生

していた横方向振動を低減したことを報告している。さらに、ロータリバルブの低振動化に目を向け、従来は 3 相シンクロナスマータを用いていた駆動モータに 5 相ステッピングモータを用いることで駆動の際に発生する加速度振動の低減を行っている。

鈴木ら²⁵⁾は 3 組の PT シリンダを組み合わせた単段 PT 冷凍機を製作し、そのそれぞれのシリンダの組みに対し位相差をつけた圧力振幅を与えることで振動相互相殺を行って振動変位を 98%低減させている。

Wang ら²⁶⁾は、PT 冷凍機を液体ヘリウムの凝縮器として用いた Vibration-Free Cryostat を製作している。被冷却物は液体ヘリウムにより冷却を行い、PT 冷凍機は蒸発したヘリウムを再度液化させるために用いている。サンプル冷却ステーションにおいて 0.7 W at 4.2 K の冷凍能力が報告されている。

Mauritsen ら²⁷⁾は、PT 冷凍機や GM 冷凍機のコールドステージに取り付けて振動低減と温度振幅を低減させる Vibration Isolation Hardware の開発を行っている。SHI 製 GM 冷凍機 RDK-101D に対しこの装置を取り付けた場合で、1.4 Hz における最大変位振幅が 22 nm となったと報告している。

以上のように、PT 冷凍機は冷凍能力、振動低減の両面で著しく発展を続けている。LCGT は CLIO に比べて非常に大型のクライオスタットが用いられるため、冷凍能力の増加等、より一層厳しい要求が与えられている。CLIO で開発された低振動化技術に加え、これら新しい技術の導入が LCGT の冷凍を達成するためには必要となるだろう。LCGT のような大型科学プロジェクトは、基礎科学の発展だけでなく、その厳しい要求から新しい技術発展にも貢献すると期待される。

参 考 文 献

- 1) K. Arai, et al.: "Status of Japanese gravitational wave detectors", *Class. Quantum Grav.* **26** (2009) 204020
- 2) T. Tomaru, et al.: "Development of a Small Vibration Cryocooler for CLIO", *The 28th International Cosmic Ray Conference* (2003) 1-4
- 3) 栗山 透: 低温維持のための技術, 「低温工学概論—超伝導技術を支えるもの— (荻原宏康編)」, 東京電気大学出版局, 東京 (1999) 279-287
- 4) 松原洋一: 「パルス管冷凍機の誕生と変遷(その1)」, *超電導 Web21* 2003 年 1 月号, *ISTEC* (2003) 1-3
- 5) M. Y. Xu, et al.: "Development of a 4 K two-stage pulse tube cryocooler", *Cryocooler* **12** (2003) 301-307
- 6) C. Wang, et al.: "Development of 4K pulse tube cryorefrigerators at Cryomech", *CP613 Adv. Cryo. Eng. : Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference Vol. 47* (2002) 641-648
- 7) T. Tomaru, et al.: "Vibration analysis of cryocoolers", *TEION KOGAKU* **38** (2003) 693-702 (in Japanese)
都丸隆行ら: 「小型冷凍機の振動解析」, *低温工学* **38** (2003) 693-702
- 8) T. Tomaru, et al.: "Vibration analysis of cryocoolers", *Cryogenics* **44** (2004) 11-34
- 9) C. Lienerth, G. Thummes and C. Heiden: "Progress in low noise cooling performance of a pulse-tube cooler for HT-SQUID operation", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** (2001) 812-814
- 10) S. Fujimoto, et al.: "Development of a low-noise, single-stage pulse-tube cryocooler", *TEION KOGAKU* **39** (2004) 322-327 (in Japanese)
藤本修二ら: 「低ノイズ単段パルス管冷凍機の開発」, *低温工学* **39** (2004) 322-327
- 11) C. Wang and P.E. Gifford: "Performance characteristics of a 4K pulse tube in current applications", *Cryocooler* **11** (2001) 205-212
- 12) Y. Ikushima, et al.: "Analysis of a vibration reduction system of pulse-tube cryocooler", *Int. Cryo. Eng. Conf.* **22** (2008)
- 13) T. Tomaru: "Vibration-free pulse tube cryocooler system for gravitational wave detectors I - Vibration-reduction method and measurement -", *Cryocoolers* **13** (2005) 695 -702
- 14) Y. Ikushima, et al.: "Ultra-low vibration pulse tube cooling system -Cooling performance and vibration-", *TEION KOGAKU* **43** (2008) 7-14 (in Japanese)
幾島悠喜ら: 「超低振動パルス管冷凍装置—冷凍能力と振動—」, *低温工学* **43** (2008) 7-14
- 15) Y. Ikushima, et al.: "Ultra-low-vibration pulse-tube cryocooler system -cooling capacity and vibration-", *Cryogenics* **48** (2008) 406-412
- 16) T. Uchiyama, et al.: "Cryogenic systems of the Cryogenic Laser Interferometer Observatory", *J. Phys.: Conf. Ser.* **32** (2006) 259-264
- 17) K. Yamamoto, et al.: "Measurement of vibration of top of the suspension in cryogenic interferometer with operating cryocoolers", *J. Phys.: Conf. Ser.* **32** (2006) 418-423
- 18) K. Yamamoto, et al.: "Current status of the CLIO project", *J. Phys.: Conf. Ser.* **122** (2008) 012002
- 19) H. Kato, et al.: "Development of heat capacity measurement apparatus by use of closed-cycle refrigerator", *Abstracts of CSJ Conference* **73** (2005) 172 (in Japanese)
加藤英幸ら: 「クローズドサイクル式冷凍機を用いた比熱容量測定装置の開発」, 第 73 回 2005 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集(2005) 172
- 20) K. Nakano, H. Takayama and M.Y. Xu: "Performance evaluation of 4K pulse tube cryocooler in helium atmosphere", *Abstracts of CSJ Conference* **81** (2009) 30 (in Japanese)
中野恭介, 高山寛和, 許 名堯: 「4K パルスチューブ冷凍機のヘリウム雰囲気中における能力評価」, 第 81 回 2009 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2009) 30
- 21) Sumitomo Heavy Industries, Ltd. SRP-082B catalog (<http://www.shicryogenics.com/>)
- 22) K. Nakano, et al.: "Experimental investigation of 1W 4K pulse tube cryocooler with separate valve unit", *Abstracts of CSJ Conference* **82** (2010) 44 (in Japanese)
中野恭介ら: 「パルスユニット分離型 1W4K パルスチューブ冷凍機の評価試験」, 第 82 回 2010 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2010) 44
- 23) Cryomech PT415 catalog (<http://www.cryomech.com/>)
- 24) M.Y. Xu, H. Takayama and H. Yamanouchi: "Low vibration 4K two-stage pulse tube cryocooler", *Proceedings of ICCR'2008* (2008)
- 25) T. Suzuki, et al.: "Development of pulse tube cryocooler system with vibration cancellation method", *Abstracts of CSJ Conference* **73** (2005) 80 (in Japanese)
鈴木敏一ら: 「振動自己相殺型パルス管冷凍機システムの開発」, 第 73 回 2005 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2005) 80
- 26) Chao Wang and John G. Hartnett: "A vibration free cryostat using pulse tube cryocooler", *Cryogenics* **50** (2010) 336-341
- 27) L. Mauritsen, et al.: "Low vibration, low thermal fluctuation system for pulse tube and Gifford-McMahon cryocooler", *Cryocoolers* **15** (2009) 581-585
- 28) T. Tomaru, et al.: "Conduction cooling using ultra-pure fine metal wire I—pure aluminum—", *TEION KOGAKU* **46** (2011) 415-420 (in Japanese)
都丸隆行ら: 「超高純度金属細線による伝導冷却 I —高純度アルミニウム—」, *低温工学* **46** (2011) 415-420

幾 島 悠 喜 昭和 52 年 7 月 1 日生。平成 12 年富山県立大学工学部機械システム工学科卒業。平成 14 年九州大学大学院総合理工学府博士前期課程 (環境エネルギー工学専攻) 修了。平成 14 年住友重機械工業(株)精密機械事業本部 (現・精密機器事業部) 勤務。平成 20 年総合研究大学院大学大学院博士後期課程修了。主に極低温冷凍機の開発に従事。低温工学・超電導学会会員。工学博士。

李 瑞 1960 年 7 月 18 日生。1982 年中国 Zhejiang University 熱物理学工学部低温工学科卒業。1990 年東京工業大学大学院理工学研究科応用物理学専攻博士後期課程修了。同年より住友重機械工業(株)平塚研究所勤務。現在、同社精密機器事業部所属。主に極低温小型冷凍機及びその応用の研究開発に従事。低温工学・超電導学会、日本真空協会会員。理学博士。

都 丸 隆 行 1970 年 9 月 14 日生。1996 年東京工業大学理学部物理学科卒業。2001 年東京大学理学系研究科物理学専攻博士課程修了。同年日本学術振興会特別研究員。2004 年高エネルギー加速器研究機構機関研究員。同年同機構助手。現在同機構助教。専門は重力物理学、宇宙物理学、低温工学。低温工学・超電導学会、日本物理学会会員。博士(理学)。