静かに冷やす*

—重力波望遠鏡の冷凍機システム—

Low Vibration Cooling—Cryocooler System for Gravitational Wave Detector—

鈴木敏一**

Toshikazu SUZUKI

Key words cryocooler, low vibration, gravitational wave detector

1. はじめに

重力波検出実験にとって振動ノイズは大敵である。重力波は、空間的に離れて置かれた二つの試験質量の間の距離をわずかに変化させる。試験質量間の微小な距離変化を計測するため光干渉計を用いるのが現在の検出器の主流で、干渉計の鏡を重力波に対する試験質量としてマイケルソン干渉計を構成する。検出器のもつノイズの大きさを等価な試験質量間の距離変化 δL で表し、干渉計の腕の長さを L とすると、その検出器で検出可能な重力波の振幅は $\delta L/L$ で与えられるので、高感度の検出を行うには δL を小さく、 L を大きく採らなければならない。問題は信号として予測される重力波の振幅がとてつもなく小さいことで、このことが実験を行う上での困難の元凶となっている。検出器に最終的に求められるのは δL を量子限界とする計測で、そのため量子限界をマスクする雑音を検出器から取り除くが必要になる。まず検出器の置かれる環境からの外来振動が干渉計の鏡に伝わらないように高性能の防振装置を設ける。外来振動が除かれると、次に熱起源の雑音が問題となる。鏡とその支持構造が有限の温度にあれば、各々の運動の自由度は温度と熱浴との結合に応じた揺らぎをもち、熱起源の雑音として δL に表れる。揺らぎを引き起こす熱雑音力の大きさは温度と振動の損失の積に比例するので、揺らぎを低減するには鏡を冷却するのが原理的に明確な方法である。このことが LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) 計画で鏡を冷却する理由である。冷却には冷凍機を用い、冷凍機の機械振動が鏡を揺らすことがないように静かに冷却しなければならない。

本解説では静かに冷却するための方法を、CLIO (Cryogenic Laser Interferometer Observatory) に用いられた低振動化パルス管冷凍機を例として述べる。

2. 重力波検出器における鏡の冷却系

現在稼働中の検出器の干渉計の腕は、米国の LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) では 4 km, ヨーロッパの VIRGO は 3 km, の長さをもっており、建設が始まった日本の LCGT では 3 km の長さである。これらの中で鏡冷却を行うのは LCGT のみである。LCGT の光路と光学素子は高真空中に置かれるため、鏡の冷却は伝導か、放射冷却を使って行うことになる。このうち放射冷却は、鏡素材であるサファイアが温度 300 K での黒体放射のピーク波長 (~ 10 数 μm) 付近で比較的大きな放射率をもつので、100 K 程度までは使えるが、全放射エネルギーが温度の 4 乗で落ちてしまうため、それより低温域では伝導冷却しか使えない。熱伝達路には、熱を通して振動を通さない目的で、何重かのヒートリンクを設ける。基本的には、大きな質量の間を弱いバネで結んで機械的ローパスフィルターを構成し、質量-バネで決まる共振周波数より高い周波数をもつ振動の伝達を妨げる。バネに相当する部分は、高純度のアルミや銅の細線あるいは薄板を束ね、熱輸送に必要な断面積を確保しつつ等価的なバネ定数を小さくするように工夫する。鏡からの熱流は冷凍機で吸収する。冷凍機は寒剤の搬送や貯蔵の煩わしさをなしに極低温を得る手段として、今日では広く使われている。冷却を連続して、装置の定常的な運転を期待できる一方で、ガスの膨張・圧縮サイクルを使用するため、冷凍機の発生する振動が被冷却物に悪影響を与える可能性がある。重力波検出器は最も振動を嫌う装置の一つである。低温を得るための冷凍機が新たな振動雑音の源とならないように、冷凍機の使用に当たっては十分な振動防除が必要とされる。

3. 冷凍機の振動防除

冷却した鏡をもつ重力波検出器プロトタイプ CLIO で使用している低振動冷凍機システムを例として、冷凍機の振

*原稿受付 平成 22 年 8 月 23 日

**高エネルギー加速器研究機構 (茨城県つくば市大穂 1-1)

鈴木敏一

1981 年東京大学大学院理学系研究科物理学専門課程修了。理学博士。研究内容は重力波検出実験、低温科学。

動防除について述べよう。CLIO は腕の長さ 100 m の干渉計で、鏡の冷却によって検出器の δL が小さくなることを実証する目的で建設された。冷却に用いる小型冷凍機の振動の起源と特徴を解明することから着手し、市販の GM (Gifford-McMahon) 冷凍機とパルス管冷凍機の系統的な振動測定を通じて、冷凍機が振動源として被冷却体に与える影響は、振動防除の立場から 2 種類に分けて考えると都合がよいことを明らかにした¹⁾。

その一は、寒冷端の運動として被冷却物体を直接揺さぶる振動がある。冷凍機を駆動するガス圧力の変動によって起こる管部の弾性変形が原因と考えられ、簡単なモデル計算と有限要素法による数値解析結果と実測値の 3 者が良く一致したことから結論づけられた。ガス圧力は、典型的には約 1 Hz で変動するので、寒冷端の振動は 1 Hz 付近に最大のピークがある。GM 冷凍機とパルス管冷凍機を比較した場合、振動の振幅は同レベルで約 20 μm の大きさであった。

第二には、冷凍機本体の振動で、これは冷凍機フランジを介して、取り付けられた装置全体を揺さぶるので、ちょうど装置を設置した床あるいは地盤が揺れるのと同様の悪影響を及ぼす。原因は寒冷端の運動の反作用、バルブユニットの運動、圧力供給のためのフレキシブルチューブの変形、冷凍機内で運動する質量からの反作用、が考えられる。GM 冷凍機とパルス管冷凍機を比較すると、GM 冷凍機の場合冷凍機内で往復運動する固体製ディスプレイサーからの反作用が大きく、パルス管冷凍機ではそれに相当するのは作動ガスの流れなので、予想通りこの第二のタイプの振動に対してパルス管冷凍機の振動加速度は 0.1 m/sec^2 の大きさで、パルス管冷凍機は GM 冷凍機の約 1/100 低振動であった。

この結果に基づき、CLIO 用低振動冷凍機システムの開発において、冷凍機本体の振動の小さいパルス冷凍機をベースとして、冷凍機本体の振動と寒冷端振動の各々に対して、重力波検出器から要求される振動レベルまで振動防除対策を施すことにした。

4. 開発の方針

以下では低振動冷凍機システムの各部の名称を次のような意味で使用する。

コールドヘッド：パルス管、蓄冷器、コールドステージなどを含む冷凍機本体。

コールドステージ：冷凍機本体の寒冷端。

減振ステージ：低振動冷凍機システムの寒冷端、被冷却物への接続部。

先に述べたように小型冷凍機の振動の原因と、実装における現れ方は明らかになっている。そこで、CLIO が設置される神岡鉱山トンネルの地盤常時微動が小さく、かつ床下の岩盤が強固なことを利用し、冷凍機起源の振動を神岡の床振動レベルまで落とすことを低振動冷凍機システムの開発方針とした。具体的には以下の対策を採る。

- ・ コールドヘッドの振動とコールドステージの振動の各々を分離して対策を施す。
- ・ コールドヘッドの振動の小さいパルス冷凍機をベースに、コールドヘッドとバルブユニットを分離し、各々を剛性の高い構造物で床に固定する。コンプレッサーからのフレキシブルホースはバルブユニット台のところで剛性の高い配管に変換し、配管はバルブユニット台に固定する。
- ・ 剛性の高い真空容器を床に固定し、真空容器に減振ステージを設ける。真空容器とコールドヘッドの接続には柔らかいベローズを用いて、振動の伝達を防止する。減振ステージとコールドステージの間は柔軟なヒートリンクで接続して熱伝導を確保すると同時に振動伝達を防止する。

この方法による低振動化では、冷凍機システムの振動は設置場所の床あるいは地盤の常時微動レベルに依存するが、低温を必要とする実験装置自体が常時微動を背景振動ノイズとして受けている。もし、常時微動以下の振動しか与えない冷凍機ならば、冷凍機を装置に組み込んでも装置の環境振動ノイズレベルは悪化しないという意味で、そのような冷凍機は実用上“無振動”である。このことから、冷凍機を低振動化するに当たって、目標を地盤の常時微動レベルに置くことが考えられる。神岡鉱山トンネルの常時微動は通常の市街地に比べて約 2 桁小さいので、神岡鉱山トンネル内の常時微動レベルまでの低振動化が達成されれば、この方法による低振動化の有効性が実証されるとともに、通常の市街地における使用でも実用上十分な低振動冷凍機システムが実現できたと考えられる。

図 1 に地盤の常時微動スペクトルの例を示した。つくばの高エネルギー加速器研究機構で測定した常時微動振幅のパワースペクトル密度が灰色線で表示され、ほぼ $0.1 \mu\text{m}/\text{Hz}^{1/2} \times (1 \text{ Hz}/f)^2$ で周波数 f とともに減少する。普通

図 1 神岡とつくばの地盤常時微動比較

の市街地の地盤常時微動は大体この程度の大きさであるが、図1の濃い黒線で表される岐阜県神岡鉱山のトンネル内の地盤では常時微動のスペクトルは約2桁小さい。これは神岡鉱山のトンネルが強固な岩盤中を貫いていることと、地表を伝搬する弾性波の影響が除かれていることによる。CLIOの設置場所は神岡鉱山の跡津坑口から約3 km奥にあり、頭上は約1 kmの厚さの岩盤が覆っている。CLIOはこのような場所で冷凍機を使用するので、冷凍機低振動化の目標として図1の黒線のレベルを設定した。重力波検出器の鏡の位置での振動ノイズの制限は遙かに厳しく、例えば3 Hz付近で図1の黒線のレベルからさらに8桁以上の防振が必要とされるが、そのための防振装置は冷凍機の有無にかかわらず必要であるから、冷凍機システムの低振動化目標を神岡鉱山トンネル内の地盤常時微動レベルに置けば防振装置への負荷を最小にとどめることができる。

5. 低振動冷凍機システムの構造

図2に低振動冷凍機システムの構造概念図を示す。市販の2段パルス管冷凍機をベースとして、パルス管冷凍機コールドヘッドと減振ステージは共に厚さ20 mmのステンレス製フランジに固定され、両フランジは振動絶縁と真空保持のために溶接ペローズで連結されている。コールドステージを固定した上フランジ(Upper Flange)は、堅牢な槽で床にアンカー固定する。コールドヘッドから分離されたバルブユニットは、ステンレス製の重量約100 kgのバルブ台に固定して、バルブ台は床にアンカー固定した。圧縮機も振動源となるので、冷凍機システムからはできるだけ距離をおいてバルブ台の基底部近くまでフレキシブルチューブで接続する。バルブ台からコールドヘッドまでは肉厚管($\phi 16$ t1.2)の配管として、ガス供給管の圧力脈動による弾性変形をできるだけ抑える。管はバルブ台にしっかり固定してある。ガス配管の接続部はすべてセル

フシールカップリングが用いられている。

減振ステージを固定した下フランジ(Lower Flange)は真空容器の蓋も兼ねている。真空容器の円筒部の寸法は $\phi 355 \times 640$ t6.4、底板の厚さは20 mmで、重量は約65 kgである。真空容器も床にアンカー固定されている。

減振ステージはアルミナFRP製のロッドと2箇所の銅製低温端(80 Kと4.2 K)で構成されている。アルミナFRPは熱伝導率が小さく剛性が高いので、常温の下フランジと減振ステージの低温端の間の熱絶縁と機械的緊結を両立するために使用した。減振ステージの低温端とベース冷凍機のコールドステージは純Al熱線($\phi 0.15$ 素線)のヒートリンクで接続し、低温運転での大きな熱伝導と曲げに対する小さな実効バネ定数による振動遮蔽を実現した。

このような方針に沿って開発した試作器は、CLIOの設置場所で振動測定を行い、図3に示す結果を得た。減振ステージの振動は垂直方向の振幅にして約50 nmのレベルを達成し、減振ステージの冷凍能力もベースとしたパルス管冷凍機と比べて遜色ない値が達成された²⁾。図4にCLIOで使用している低振動冷凍機を示す。

低振動冷凍機システムと重力波検出器との接続は図には示していないが、以下のような構造になる。コールドヘッドを支える槽はクライオスタットとは直接触れないように配置される。冷凍機システムの真空容器は、重力波検出器の低温鏡を収めるクライオスタットと真空部分を共有する。したがって冷凍機システムの真空容器部分の振動はそのままクライオスタットに伝達される。クライオスタット内部の被冷却物は共通真空内を通る伝熱体で減振ステージの低温端と結び、冷却される。CLIOでは冷凍機からの振動の影響が鏡懸架の300 Kベースプレート部に表れていないことは実測から示されている³⁾。

6. 低振動化対策の根拠

図2 低振動冷凍機システム概要

図3 神岡での低振動冷凍機システム振動スペクトル（垂直方向）

図4 CLIO で使用している低振動冷凍機システムの外観

分離した振動源を床に固定して振動レベルを抑える対策は、固定する構造物が剛体として振る舞えば期待通りの効果を生むはずである。しかし、現実の構造物はすべて弾性体で作られているから、ここで採用した低振動化対策が有効な範囲を見積もっておかなければならない。等方弾性体でできた構造物を考えて、これに境界条件を与えて運動方程式を解くと固有モードの集まりが得られる。あるモードに注目して、外力の周波数がモード周波数より十分に低ければこのモードは近似的に外力と同じ位相で応答する。さらに、モードの等価的バネ定数はモード周波数の2乗に比例するから、外力による変形はモード周波数が高いほど小さい。このことから、モード周波数に比べて十分に低い周

波数の外力に対して、モードは近似的に剛体として応答すると考えることができる。パルス管冷凍機にとって最も基本的な周波数は冷凍機を駆動するガス圧力の切り替え周波数である。実用的なパルス管冷凍機で、それは約1 Hzであるから冷凍機システムの構造体のモード周波数が1 Hzに比べて高い範囲に分布するような設計になっていれば、分離した振動源を床に固定して振動レベルを抑えるという低振動化対策が有効と考えられる。

減振ステージについても同様の考えを適用して、減振ステージが床と剛体的に結ばれる状態に近づけるため、減振ステージの固有振動数が1 Hzに比べてできるだけ高い周波数に分布する設計をとる。

ガス圧力の切り替え時の変化は、単純な正弦関数的な波形ではないが、コールドヘッド入り口で測定した結果からは極端な高調波成分は見られない。したがって、近似的には数次の高調波成分、周波数領域で10 Hz程度までが主たる寄与と考えられ、このことは後述の測定結果の振動スペクトルからも裏付けられる。

ガス流路のインピーダンス変化によって流体力学的な振動流が発生する可能性があり、実際に冷凍機からガス圧力の切り替えに同期した運転音が聞き取れる。重力波検出器の主要部分はすべて高真空容器中に収められているため、音響として伝搬する振動に対しては十分に遮蔽される。容器壁を伝わる音響周波数領域の振動は、最終的には地盤振動と同じ伝達経路を取るから、防振機構によって取り除くことができる。

7. 低振動冷凍機システム他分野への応用など

LCGTにおいてもCLIOの低振動冷凍機システムと同じ考え方での冷凍機振動防除が採用される予定である。他分野への応用例としては比熱の精密測定装置で使用され、効果を示している。

CLIOの低振動冷凍機システムでは、十分に小さな振動レベルの参照物体を基準にとることと、高性能のヒートリンクがポイントとなる。これらについてさまざまな変形が可能である。例えば、冷凍機でヘリウム再凝縮を行い、ヘリウムのガスと液をヒートリンクに用いる方式が実用化されている⁴⁾。

参考文献

- 1) 都丸隆行, 鈴木敏一, 春山富義, 新富孝和, 山本明, 小山知大, 李瑞, 松原洋一: 小型冷凍機の振動解析, 低温工学, **38**, 12 (2003) 693-702.
- 2) 幾島悠喜, 李瑞, 都丸隆行, 佐藤伸明, 鈴木敏一, 春山富義, 新富孝和, 山本明: 超低振動PT冷凍装置, 低温工学, **43**, 1 (2008) 7-14.
- 3) K. Yamamoto, et al.: Measurement of Vibration of the Top of the Suspension in a Cryogenic Interferometer with Operating Cryocoolers, J. Phys. Conf. Ser., **32** (2006) 418-423.
- 4) C. Wang and J. Hartnett: A Vibration Free Cryostat Using Pulse Tube Cryocooler, Cryogenics, **50** (2010) 336-341.