11. KAGRA の低温技術

東京大学 宇宙線研究所

木 村 誠 宏

KAGRA の低温技術

1	はじ	めに	11-1		
2	KAG	RA低温設備	11 – 1		
-	2 1	概 要	11-1		
	$\frac{2}{2}$	低温鏡懸架装置	11 - 4		
	23	招低振動冷凍機ユニット	11 - 4		
	2.4	クライオスタット	11-12		
3	低温	設備の組立と総合試験	11 -15		
	3.1	工場内試験	11 -15		
	3.2	伝導冷却路の評価	11 -16		
	3.3	低温設備の再組立と試験	11 -17		
4	鏡冷	句	11 -18		
	4.1	鏡の冷却特性	11 -18		
	4.2	鏡の着霜問題	11 -19		
	4.3	新たな鏡冷却法の提案	11 -19		
	4.4	新冷却法の実証	11 - 20		
5	まと	¢	11 - 21		
6	謝辞		11 -21		
7	補遺		11 -21		
	7.1	Fineness	11 -21		
	7.1	真空ダクト内の圧力	11 -22		
参	考文献		11-22		

KAGRA の低温技術

1. はじめに

KAGRA は岐阜県飛騨市神岡町池ノ山の地 下に建設された基線長 3 [km]のレーザー干渉 計型重力波望遠鏡である. (Fig.1)

2010年に KAGRA が文部科学省により「最 先端研究基盤事業」の大型低温重力波望遠鏡

(Large-scale <u>Cryogenic Gravitational wave</u> <u>Telescope) として選定され,建設が開始された.現在,東京大学宇宙線研究所(ICRR),高エネルギー加速器研究機構(KEK),自然科学研究機構 国立天文台(NAOJ) が共同ホスト機関となり,富山大学など国内外の研究機関と協力してその運用が進められている..</u>

KAGRA に代表されるレーザー干渉計型重 力波望遠鏡の性能限界を決定する原理的な雑 音源の一つとして干渉計の腕共振器を構成す る鏡の熱雑音がある. KAGRA では腕共振器の 鏡を約20[K]まで冷却することで鏡の熱雑音を 低減する手法を選択している. キロメートルス ケールの干渉計型重力波検出器で鏡の低温化 と地面振動が都市近郊の1/100程度の地下設置 を取り入れた検出器は KAGRA だけである.^[1,2] レーザー干渉計型重力波望遠鏡の鏡の低温 化技術は、アメリカやヨーロッパで検討されて いる次世代重力波検出器(第三世代重力波検出 器)にとって非常に重要な技術となっており、 KAGRA 独自の技術へ注目度が高くなっている.

2. KAGRA 低温設備

2.1.概要

干渉計の腕共振器の鏡を冷却する目的は, 鏡 内部の熱雑音を抑制し, 量子雑音レベルの計測 を行うことにある.大パワーレーザ光の照射を 常に受け続ける腕共振器の鏡は, 鏡の基材と反 射膜のわずかな光吸収が発熱源となって温度 が上昇し, 熱雑音が増加する.これら鏡は重力 波の潮汐力に反応するために懸架されており, さらに~2 x10⁻⁷ [Pa]程度の超高真空中に置かれ る.

鏡の冷却に用いる冷熱源の振動は鏡の位置 変化となって現れるため,鏡の位置変化が無い 無振動冷却が KAGRA で要請された.

このため、低温鏡とその懸架装置を内包する クライオスタットと超低振動冷凍機ユニット



Fig.1 岐阜県飛騨市神岡町池ノ山地下に建設された大型低温重力波望遠鏡 © 東京大学宇宙線研究所



で構成される低温設備を製作し,干渉計の腕共 振器の鏡を無振動で20Kまで冷却することが 計画された.

この計画に従って立案された KAGRA 低温 設備の配置図を Fig. 2 に,構成模式図と低温説 断面図を Fig. 3~4 に示す. KAGRA の低温設備 はクライオスタット,冷熱源となる 4 台の超低 振動冷凍機ユニットと 2 台の冷凍機付き多重バ ッフル付ダクト型輻射シールドから構成され ている. (Fig. 3)

クライオスタットは,干渉計に必要なレー ザー光を通すための常温域への開口面を持っ ている. (Fig. 4)

レーザ光を鏡に入射する真空ビームダクト の接続部はクライオスタットの主要な開口面 である. この開口面からクライオスタット内 部の低温部への輻射を抑制するため,100 K 付 近まで冷却された多重バッフル付ダクト型輻 射シールドが3 km 長の真空ダクトとクライオ スタットのビームダクト接続部の間に設置さ れている. ビームダクトとの接続部以外にも低温鏡懸 架装置を懸架する常温側の高性能防振装置と の機械的結合部や鏡の位置モニターに使用す るレーザー光入射窓などの常温開口面が設け られている.

KAGRA 低温設備では鏡やその付帯設備で ある鏡懸架系の冷却として高純度銅や高純度 アルミなどの温度 10 K 付近で高熱伝導率を持 つ冷却導体と小型のヘリウム冷凍機を利用し た伝導冷却を採用している. 伝導冷却は寒冷循 環型の冷却法の流体が流れる際に発生する圧 力振動などに比べて振動抑制が容易になる. 加えて, 小型のヘリウム冷凍機を採用した結果, 閉鎖空間であるトンネル内の冷媒ガスの保有 量が軽減でき, トンネル内の酸欠防止として安 全面からも貢献している.

本テキストでは, KAGRA 低温設備の主要な 構成要素である低温鏡懸架装置, 超低振動冷凍 機ユニット, クライオスタットの設計手法とそ の性能について解説する.

11 - 2



Fig. 3KAGRA 低温設備の構成図^[3]



Fig. 4 KAGRA 低温設備断面図



Fig. 5 クライオスタット内の低温鏡懸架装置(イメージ図 © KAGRA Collaboration / Rey. Hori) と低温鏡懸架装置の構成

2.2. 低温鏡懸架装置

本項では、低温鏡鏡懸架装置の構造を簡単に 紹介する.^[4]

Fig. 5 はクライオスタット内の低温鏡懸架 装置(イメージ図)とその懸架装置の構成で ある. KAGRA では 4 段振り子構造の鏡懸架 装置が採用されている. 上から順番にプラット フォーム (Platform), マリオネット (Marionette), 中間マス(Intermediate Mass)が 懸架され, その下が低温鏡(Mirror)である.

マリオネット,中間マスおよび鏡にはその外側 を覆うように反跳マス(Recoil mass)と呼ばれ る質量が同様に懸架されている.この反跳マス は,鏡の位置制御に用いるコイル-マグネットア クチュエータのコイルの取り付けベースとし て用いられる.鏡を冷却する熱リンク(Heat Link Wires)は鏡懸架チェーンを利用し,クライ オスタット内の高純度アルミ製冷却導体の先 端(Cooling Bar)から縦防振装置(HLVIS),マリ オネット反跳マス,そこから各ステージ熱リン クを接続して伝導冷却のパスが形成されてい る.また,上部のプラットフォームにはベリリ ウム鋼製の板バネを導入し,縦方向の防振も実 現している. (Fig. 3)

2.3. 超低振動冷凍機ユニット

本項では, KAGRA 低温設備の超低振動冷凍 機ユニット(以下,冷凍機ユニット)の特徴で ある防振ステージと伝導冷却路に焦点を当て て解説する.

2.3.1. 構造

冷凍機ユニットは、動作時に発生する振動が 実用上無振動と見なせる池ノ山地下の地面振 動レベル以下に低減することが求められてい る.この要求を満たすため、冷凍機ユニットの 構造はの冷凍機(冷凍能力約1W@4K)と防振 ステージを組み合わせた構造である.

この構造は、高エネルギー加速器研究機構・超 伝導低温工学センターが KAGRA のプロトタ イプとして建設された基線長 100 [m]の CLIO 向け超低振動冷凍機開発で得た知見を基にし て設計されている.^[5,6]

冷凍機ユニットの振動特性と冷凍能力は2.4 のクライオスタットの設計での知見から次の ように決定した.



(1) 振動特性

・8K伝導冷却路 最大振幅±100[nm]以下

・80 K 伝導冷却路 最大振幅±100 [nm]以下

(2) 冷凍能力

- ・8K伝導冷却路接続端温度9Kで2.5[W]
- ・80 K 伝導冷却路接続端温度 70 [K] で 35 [W]

冷凍機ユニットの構造設計の要点は、地面に 強く固定された防振ステージを用意し、それ と冷凍機の間を柔らかくて熱伝導率が高い素 材で結ぶと云う点である.この要点に従って設 計・製作した冷凍機ユニットの構造図を Fig.6 に示す.^[7]

冷凍機ユニットの冷熱源は CLIO 向け超低振 動冷凍機と同様にバルブユニット分離式の 2 段 式パルス管冷凍機(住友重機械工業社製 RP-082B2S, 1st stage 35 [W] @45 [K], 2nd stage 0.9 [W] @4.2 [K])を選定し, 冷凍機ユニットに 使用するパルス管冷凍機 16 台全数について冷 凍機冷凍能力を測定している. その測定結果の 一部を Fig.7 に示す.^[7]



Fig. 7 冷凍機単体の冷凍能力^[7]

冷凍機の防振ステージ(Vibration Reduction Stage)から延伸する伝導冷却路の金属材料について述べる.

冷凍機の 2nd 防振ステージに接続され, 鏡またはクライオスタットの内層輻射シールドを
冷却する 8 K 伝導冷却路(8 K Thermal Conduction Bar)は幅 50 mm, 高さ 75
mm の 5N8 超高純度アルミ角材(純度 99.9998%)^[8]を使用している.この理由は, 超



Fig.8 無酸素銅及び純アルミの熱伝導率¹⁹ 図中の RRR は金属の残留抵抗比

高純度金属材が持つ高い熱伝導率(6N アルミ 材で 40,000 [W/m/K] @ 6 [K],5N アルミ材で 20,000 W/m/K @ 10 K) により冷却対象と冷 凍機間の熱輸送から生じる温度差を最小にす るためである.(Fig.8)加えて,その副次的効果 として超高純度金属材料が持つヤング率(6N アルミ材で 40 [GPa])の振動抑制効果を狙っ ている.

1st 防振ステージ に接続されてクライオス タットの外層輻射シールドを冷却する 80 K 伝 導冷却路(80 K Thermal Conduction Rod)は A1070 純アルミ材を採用している.

これは, Fig. 8 に示されるようにアルミの熱伝 導率が温度 300 K から 60 K 付近まで純度に寄 らないことためである.^[9]

この他,冷凍機ユニットの設計過程で3つの 設計上の課題が判明した.

(1) CLIO 向け超低振動冷凍機の開発から時間 が経過し,防振ステージの熱リンクに使用 していた高純度 5N アルミ製撚り線の技術 継承が行われなかった.このため,代替え となる撚り線の検討と調達が必要.

- (2) 防振ステージの支持ロッドに使用していたアルミナ繊維強化プラスチック (ALFRP)製造の事業継承が行われなかった.このため、代替えとなる素材の検討と調達が必要.
- (3) CLIO 向け超低振動冷凍機では冷凍機ユニ ットとクライオスタットを連結する伝導 冷却路の防振支持構造が検討されていな かったため,新規設計が必要.
- 2.3.2. 防振ステージと伝導冷却路の設計検討

冷凍機ユニットの防振ステージの設計検討 は、CLIO 向け超低振動冷凍機で確立された設 計概念を踏襲している.^[5,6]

防振ステージ設計要点は,熱リンクのバネ定 数を小さくする,支持ロッドのバネ定数を大き くする,冷凍機取付フランジの振動を小さくす る(=地面振動)の3項目である.

この要点の内,新たな設計課題である熱リン クと支持ロッドの2項目について述べる.

2.3.2.1. 熱リンク用撚り線の検討

防振ステージに組み込む熱リンク用撚り線 の構造と使用する素線の検討を行った.

式(2·1)は,片持ち梁のたわみの式から導出 したバネ定数の計算式である.^[8]

$$k = K \frac{E}{L^3} I = K \frac{E}{L^3} \frac{\pi D^4}{64}$$
(2-1)

ここで, *k*はバネ定数(N/m), *K*は形状係数, *E*は ヤング率[GPa], *L*はバネの長さ[m], *D*は撚り 線の素線径[m]である.

冷凍機ユニットの設計開始時点で熱リンク に使用可能な高純度金属製素線は,7N 超高純度 銅(純度 99.99999 %)のみであった.^[10]

一方, 7N 銅と 5N アルミのヤング率が 117 [GPa]と 69 [GPa]であり, CLIO の 5N アルミ製 撚り線 (素線径 0.15 [mm]) のバネ定数以下と するため, 7N 超高純度銅の素線径を約半分の 0.08 [mm]とした.

Table 1 熱リンクの断面席と導体構成

断面積 [mm ²]	構成 [本/本/本/mm]
15	19/7/22/0.08

Table 1 に冷凍機ユニットの熱リンクの導体構成と撚り線の断面積を示す. 冷凍機の冷却 段と防振ステージを接続する熱リンクの構造 は, Fig.9 の複合ロープ撚り線構造である.

複合ロープ撚り線は,1次撚り(0.08 [mm]を 22本),2次撚り(1次撚り線を7[本]),本撚り(2 次撚り線を19[本])を撚り合わせた構造である. また,撚り合わせもS撚りとZ撚りが組み合わ されている.この撚り線構造も,CLIO向け超 低振動冷凍機開発から得た知見に基づいている.[11]

熱リンクはその両端にボルト固定用の端末 (7N 材のブロック)を取り付けた後,加工歪み 除去と脱ガスを兼ねて真空中で温度 500 [℃] 3 時間の焼鈍処理を実施している. Fig.10 に熱処 理前と熱処理後の熱リンク端末の断面組織写 真を示す.熱処理前後の写真から,熱処理温度 が高くなるほど,熱リンク素線の結晶粒が大き くなっていることが理解できる.

熱処理前後の熱リンク素線の熱伝導率の測 定結果を Fig.11 に示す.熱処理により,熱伝導 が改善されていることが確認できる.

一方, バルクと見なされる形状では 500 [℃]以 上の熱処理で熱伝導率がさらなる上昇が見込 まれているが本熱リンク素線の測定からは顕 著な差が見られなった.^[11]

この理由は,素線の直径が 0.08 [mm]と細く極低温領域での電子の平均自由行程に対して小さいことからその影響と推察している.

2.3.2.2. 防振ステージ支持ロッドの検討

アルミナ繊維強化プラスチック(ALFRP)に 代わる素材としてヤング率 117 [GPa]のカーボ ン繊維強化プラスチック(CFRP)を防振ステー ジの支持ロッドとして選定した.

(ALFRPのヤング率は 100 [GPa])



Fig.9 複合ロープ撚り線の断面構造



Fig. 10 熱リンク圧着部の φ0.08 [mm]-7N 銅素線の断面組織



Fig. 11 φ0.08 [mm]-7N 銅素線の熱伝導測定結果^[11]

項目			寸 法		単 位
		1 st 防振ステージ	φ14x180Lx2.0t [mm]	4.57 x 10 ⁵	N/m
バタ字粉	CI'NF 5 4	2 nd 防振ステージ	φ14x75Lx1.5t [mm]	$4.85 \ge 10^6$	N/m
八个足数	ヒートリンク	1 st 防振ステージ	L=225 [mm]	$6.02 \text{ x } 10^1$	N/m
	96本	2 nd 防振ステージ	L=113 [mm]	$4.82 \ge 10^2$	N/m
	クライオスタットフランジ (=地面振動)			0	m
	1 st コールドステージ		2.0 x 10 ⁻⁵	m	
変位量	量 1 st 防振ステージ		2.64 x 10 ⁻⁹	m	
	2 nd コールドステージ		2.0 x 10- ⁵	m	
	2 nd 防振ステージ		4.82 x 10 ⁻⁹	m	

Table 2 防振ステージのバネ定数と変位量の計算値結果

式(2-2)は、参考文献[5]の式(4-8)から引用した防振ステージの式である.

$$Z_2 = Z_1 + \frac{k_h}{k_r} Z_3 \tag{2-2}$$

ここで, Z₂は防振ステージの変位量[m], k_rは防 振ステージ支持ロッドのバネ定数[N/m], k_bは 熱リンクのバネ定数[N/m], Z₃は防振ステージ の変位量[m], Z₁は防振ステージの取付部の変 位量[m]である.

防振ステージのバネ定数と変位量の計算結 果を Table 2 に示す.計算ではクライオスタッ



Fig. 12 各種 FRP 材料の熱伝導率の温度依存性^[12]

Table 3 支持ロッド5本の熱負荷(計算)

部 位	熱負荷
1 st 防振ステージ	0.6 W
2 nd 防振ステージ	$0.02~\mathrm{W}$

トフランジの振動を地面振動 0 [m]とした. 支 持ロッドの形状と使用本数をパラメータとし た計算の結果から, 2nd 防振ステージの振動が. 防振比 1:4300 で 4.8 x 10⁻⁹ [m]まで減衰するこ とが示唆された.

Fig.12 に示すように CFRP の熱伝導率は ALFRP のそれに比べて 50 [K]付近より上で大 きく, 50 [K]付近以下で小さい.^[12]

1st 防振ステージの CFRP 製支持ロッドの 個体熱伝導分の増加による熱負荷を減らすた め, ALFRP を使用した場合と同程度の熱負荷 となるよう CFRP パイプの肉厚を選定してい る.

冷凍機ユニット防振ステージ支持ロッドの 熱負荷の計算結果を参考として Table 3 に示す.

2.3.2.3. 8K伝導冷却路の設計

Fig. 13 に KAGRA 冷凍機ユニット用とし て新規設計した 8K 伝導冷却路の形状を示す. 8 K 伝導冷却路は,幅 50 mm,高さ 75 mm,長 さ 947 [mm]の直線部と幅 75 [mm],厚さ 0.5 [mm]の板材を積層した可撓導体部(図の右側 の R60 の湾曲部分)から構成されている.



Fig. 138K 伝導冷却路 (8K Thermal Conduction Bar)

可撓導体部組込の目的は、冷却時の熱収縮吸収 並びに伝導冷却路の軸方向に伝播する振動吸 収のためである。

直線部の角材と可撓導体部の素材は 5N8 超 高純度アルミを使用している.

可撓導体部と直線部並びに撓導体部先端に 取り付けられた面接号用の端板は 5N アルミ線 (線径 2.4 [mm], RRR~5000)を溶接フィラーと する溶接で接合している.

圧力容器の溶接組立では、溶接部の強度や質 を担保するために容器母材と同一の素材から 取り出した共材を溶接フィラーとして使用す る場合が有る.8K伝導冷却路の溶接接合で 5Nアルミ線をフィラーとした理由は溶接溶融 部に巻き込まれる不純物を減らすことでこの 部分の熱伝導率の低下を回避するためである.

8 K 伝導冷却路と防振ステージ又はクライ オスタット伝導冷却路の接合はボルト締結に よる面接合である. 伝熱面の面接合では接合面 の実効的な接触面積が伝導冷却路の熱抵抗に 影響する. このため, ボルト接合部のモックア ップ供試体を製作し, 感圧フィルムを使用して 接合面の接触面積やボルトの締め付け手順等 を確認している.また,このモックアップ試験 では,冷凍機ユニット運用中の伝導冷却路接合 部に負荷される熱サイクルの影響も考慮して, モックアップ試筐体に常温~液体窒素温度の 熱サイクルを加えて接合部のボルト締め付け 部に緩み等が発生しないか確認している.

8 K 伝導冷却路は 4 箇所の溶接接合部, 3 箇 所のボルト接合部が存在している. これら接合 面に生ずると予想される熱抵抗を解析的に求 めることは困難であり, また, 溶接法や締め付 けによって熱抵抗のばらつきが生ずると考え られる. このため, 同様の伝導冷却構造を持つ CLIO の伝導冷却路の定常状態での導体長さ方 向の温度分布, 寸法, 使用されている 5N アルミ 材の熱伝導特性から, CLIO 伝導冷却路の実効 的な熱伝導率を求めた.

この実効的な熱伝導率と5Nアルミ母材の熱伝 導率と比較し,溶接接合やボルト接合部を含め た素材の熱伝導率の減少度を予測した.この結 果,8K伝導冷却路の実効的な熱伝導率は素材 が持つ熱伝導率の1/4程度まで減ずると予測さ れた.このため,冷凍機ユニット並びにクライ オスタット内の8K伝導冷却路は,伝導冷却導 体の実効的な熱伝導率を 5000 [W/mK]として 熱設計している.この実効的な熱伝導率の妥当 性については 3.2 の伝導冷却路の評価の項で述 べる.

本冷却路についても加工歪み除去と脱ガス を兼ねて真空中で温度 500 [°C] 3 時間の焼鈍処 理を実施している.

2.3.3. 冷凍機ユニットの振動特性と冷凍能力

冷凍機ユニットの振動測定は、冷凍機ユニットの伝導冷却路接続部先端に装着された真空 断熱容器の可視化窓からレーザ距離計のレー ザ光を入射し、8 [K]伝導冷却路先端部に取付た 反射用ミラーの反射により軸方向・垂直・水平 の3軸方向を直接且つ同時に測定している. (Fig. 15 及び Fig. 16)

実機1号機の性能試験の結果,8[K]伝導冷却 路先端部に生じている振動が仕様値(<100 [nm])より大きいことが確認された.

この対策として加速度センサーを使用したハ ンマリング試験を実施し、冷凍機内の伝導冷却 路の支持構造材が振動伝搬の主要な経路とな っていることが判明した.支持構造材の種類・ 形状や支持方法の改良を続けた結果、伝導冷却 路の冷凍機側端部に仮付けされている輸送用 固定治具が軸方向の制振に効果的であること が示された.^[13]

この輸送用固定治具の素材を CFRP に変更し, 伝導冷却路の軸方向の支持機構とすることで 接続部先端部の振動の要求仕様値を達成して いる.8K 伝導冷却接続端で測定した冷凍機ユ ニットの振動波形を Fig.17 に示す.^[7]

冷凍能力の測定は,振動測定後に冷凍機ユニ ットを常温まで加温し,振動測定用可視化窓の 閉止並びに輻射シールド及び SI を装着した後, 反射用ミラー近傍に取り付けられた加熱ヒー タを使用して熱負荷を加えている.

Fig.18 に冷凍機ユニットの冷凍能力測定結 果を示す.図の縦軸は8 K 伝導冷却路の先端温 度,横軸は80 K 伝導冷却路の先端温度である. また,図中の()書きの数値は,それぞれの伝導



Fig. 158K伝導冷却路先端部の振動測定





Fig. 18 冷凍機ユニットの冷凍能力^[7]

冷却路先端に加えられた熱負荷である.

製作された 16 台冷凍機ユニットについて振 動特性と冷凍能力の全数測定を実施し,全ての 冷凍機ユニットについて要求仕様が満たした ことを確認している.

冷凍能力測定結果は, 次項のクライオスタッ トの熱負荷測定の校正データとして利用して いる. 2.3.4. その他

この他、クライオスタットの超高真空対応と して、冷凍機ユニット真空容器の真空接面であ る内表面を複合電解研磨している.また、冷凍 機ユニットの多層断熱に使用する Super Insulation (SI:超断熱膜)は2.4.3 で紹介する 高真空対応向けに改良した製品を使用してい る.この SI を 80 K 伝導冷却路の外表面に 50 層、8 K 伝導冷却路の外表面に 20 層施工してい る.

冷凍機ユニットの組立は全てクリーンルー ム内で行った. これら真空に関連する部材への 要求は, KAGRA 真空設備の仕様を踏襲してい る.^[20]



Fig. 19 クライオスタット外形図^[7]

2.4. クライオスタット

2.4.1. 構 造

低温鏡懸架装置を内包するクライオスタットは 3km 長のトンネル内輸送とトンネル内設 置場所での組立と云う条件を基に設計・製作 されている.

クライオスタットの立案段階で策定された 要求仕様を次に示す.

- (1) 小型冷凍機を使用した伝導冷却
- (2) 鏡冷却の熱リンク接続部温度が8K以下
- (3) 低温鏡懸架装置組込作業を行うための作 業空間をクライオスタット内に確保する
- (4) 観測時のクライオスタット内圧力を
 10⁻⁷ [Pa]程度の圧力を保持可能な超高真空
 対応であること
- (5) クライオスタットの製造場所からトンネ ル内設置箇所への輸送を考慮した設計で あること

設計・製作したクライオスタットの外形図を Fig.19に示す.^[7]

クライオスタットは高さ 4.3 [m], 直径 2.6[m] の大きさを持ち, 組立時の総重量は約 11,000 [kg]である. クライオスタット内には室温の真 空容器内表面から内層側シールドへの熱侵入 を防ぐ断熱構造として2層構造のそれぞれの温 度の輻射シールドが設置されている.

低温鏡懸架装置は,2層構造の内層輻射シール ドで囲われた空間中に設置される.

懸架装置が組み込まれる内層輻射シールドの 大きさは幅 1.6 [m], 奥行き 1.02 [m], 高さ 1.7 [m]である.また, 低温鏡懸架装置の組み込み作 業用として幅 1.6 [m], 奥行き 0.89 [m], 高さ 1.48 [m]の観音扉構造の開放面が設けられてい る.

外層輻射シールドの大きさは幅 1.81 [m], 奥行 き 1.22 [m], 高さ 1.92 [m]で,幅 1.09 [m], 高さ 1.55 [m]の観音扉構造の開放面が設けられてい る.

2 層構造の輻射シールドはそれ自身の剛性と 冷却時の熱伝導性を確保するため, A6063 アル ミ製のフレームと厚さ 10 [mm]の A1070 純ア



Fig. 20 真空容器の固有値解析の結果^[14]



Fig. 21 内層輻射シールドの 固有値解析の結果^[14]

ルミ板を組み合わせた構造で,その質量は内層 側が約 460 [kg], 外層側が約 590 [kg]である.

2 層構造の輻射シールドは 2.3 の超低振動冷 凍機ユニットを接続して伝導冷却で冷却され る. それぞれの冷却温度はクライオスタット設 計時に内層側が約 10 [K], 外層側が温度 80 [K] と見積もられた.

クライオスタットの設計では固有値解析(モ ーダル解析)を実施し、その構造保持法も含め た設計を実施している.

真空容器と2層輻射シールドの固有値解析の結 果例を Fig.20 及び Fig.21 に示す.^[14]

前述の固有値解析の他にも神岡鉱山地下トン

ネルで実測された地面振動データを使用して 真空容器の地面振動に対する応答解析も実施 している.

2.4.2. 伝導冷却路と鏡の冷却法

クライオスタット内には低温鏡懸架装置(以下,鏡)と輻射シールドを冷却する2系統の伝 導冷却路が組み込まれている.

それぞれの伝導冷却路には冷凍機ユニットが2 台ずつ,計4台の冷凍機ユニットが接続されて いる.伝導冷却路を2層化した理由は,冷凍機の 並列化による冷凍能力の増加と冷凍機故障の 際の冗長性向上を図ったためである.

鏡と内層側輻射シールドの伝導冷却路の部材 は、2.3 の超低振動冷凍機ユニットと同じくそ の冷却温度に応じて 5N8 超高純度アルミ材 (純度 99.9998 [%])とA1070 純アルミ材を選 定・使用している.

クライオスタットの鏡用伝導冷却路先端から 鏡まで5N8超高純度アルミ製撚り線(Fig. 3の Heat Link Wires)が縦防振装置(Fig. 3の HLVIS)を経由して接続されている.この撚り 線は直径 0.15 [mm]の細線 49 本を撚り合わせ ており, 撚り線のバネ構造による振動抑制効果 を利用するためである.^[15]

一方, 常温から 100 [K]付近の温度域ではア ルミの熱伝導率は純度に寄らず 200 [W/(m・K] 程度とほぼ一定のため, 常温から 100 [K]付近 の温度域では伝熱面積の小さい撚り線部分の 熱抵抗が相対的に大きくなり, 結果として重力 波観測に要求される鏡の温度 20 [K]までの冷却 時間が長くなる.

この鏡の冷却時間を短縮するため, KAGRA クライオスタットは, 鏡の常温から 100 [K]付 近まで鏡から内層側輻射シールド内面への放 射伝熱を利用した冷却法を採用している. これは式(2-3)の Stefan-Boltzmann 方程式で 記述される伝熱量である.

$$\dot{q_{rad}} = \sigma \varepsilon A T^4 \tag{2-3}$$

ここで、 σ は Stefan-Boltzmann 定数 5.67×10⁻⁸



Fig. 22 初期冷却時間の シミュレーション結果^[17]

[W/m²K⁴], *e*は放射率, *A*は表面積, *T*は温度である.

式(2-3)から放射伝熱量は放射率 *e*の値に依存 する.この放射率 *e*を1に近づけるため,内層側 輻射シールドと鏡の懸架装置の表面に黒化処 理^[16]が施工されている.

KAGRA 低温設備で採用した黒化処理は内層 輻射シールド内表面がダイヤモンド・ライク・ カーボン(DLC), 鏡の懸架装置の表面は濃黒色 無電解鍍金(商品名:ソルブラック)である.

Fig.22 に初期冷却時間のシミュレーション結 果を示す.^[17] (a)は黒化処理施工無しの冷却時 間の計算結果, (b)は黒化処理を施工した場合の 冷却時間の計算結果である.

このシミュレーションから約 150 [K] 以上 では, 鏡は放射伝熱により冷却, 150 [K] 以下で は, 熱伝導による冷却が支配的であることが示 された.この放射伝熱と伝導冷却の複合冷却法 により,鏡の初期冷却時間が伝導冷却路だけの 場合に比べて約 1/2 に短縮されると見積もられ た.^[8]

2.4.3. 多層断熱

低温設備ではクライオスタットの真空断熱 容器内の輻射抑制のために Super Insulation (超断熱膜)を使用した多層断熱構造を持つ.

Super Insulation (以下, SI) は, 基材であるポ リエステル系薄膜フィルムの両表面にアルミ を蒸着した素材が一般的である.KAGRA 低温 設備では,この SI を外層側輻射シールドの外表 面に 50 層, 内層側輻射シールドの外表面に 20 層施工している. その真空脱ガス面積はクライ オスタット真空容器内表面や輻射シールドの 表面のそれよりも桁違いの大きくなっている. クライオスタット内の圧力を~10⁻⁷ Pa 程度に保 持すると云う超高真空対応の要求から,この SI 表面の脱ガス特性が検討された.

実験から SI の脱ガス特性を支配する水分吸 着量は SI 表面に蒸着されたアルミよりも SI の 基材であるポリエステル系薄膜フィルムの厚 さに依存していることが判明した.^[18,19]

この結果を基に、SI に用いる薄膜フィルムのフ ィルム厚さを 25 [µm]から 5 [µm]に変更するこ とで SI 表面からの脱ガス特性を改善し,100 時 間程度の初期排気を行えば電界研磨したステ ンレス板と同程度の桁まで気体放出速度を減 少させられることできた.

さらに SI を積層する際に用いられる層間セ パレーターについてもポリエステル製ネット からアルミ蒸着された薄膜フィルムの片面に 不織布を融着する事でフィルムの薄膜化によ る強度補償と使用する有機材料の総量を減少 させている.

SIの熱伝達特性は式(2-4)で表される.

$$q_t = q_r + q_c \tag{2-4}$$

ここで q_r は SI の輻射熱伝達成分, q_e は SI の 接触熱伝達成分である. 接触熱伝達成分 *qe*は SI の質量並びに施工時の SI への圧迫によって変化する.

有機材料の総量の減少は同式から *qc* の改善効 果があることが示唆される.

この他, クライオスタットの超高真空対応と して, 真空容器の真空接面である内表面を複合 電解研磨している.また, 輻射シールドや伝導 冷却路に使用している金属材料についても脱 ガスを兼ねた焼鈍処理(真空中 500°C 3 時間)と 表面研磨を行っている.これら真空に関連する 部材への要求は, KAGRA 真空設備の仕様を踏 襲している.^[20]

2.4.4. クライオスタットの熱負荷

クライオスタットの設計から推定された熱負荷 (Estimated Heat Load) を Table 4 に示す.^[7] 表には 3.1 で述べる実熱負荷 (Measured Heat Load) と合わせて示す. 実熱負荷測定では個々 の熱負荷要素を分離測定できないため, 熱負荷 を纏めた数値で示されていることに注意された い.^[7] また, 表では冷凍機ユニット 1 台当たり の熱負荷 [W/Unit]も参考として記載している.

表から, クライオスタットの設計熱負荷は, 内 層側輻射シールドが温度 10 K で 5.0 [W]と予測 された. その内訳は, 光学窓 0.4 [W], 外層側輻 射シールドからの輻射 2.2 [W], 支持構造材 2.4 [W]と推定された.

外層側輻射シールドの熱負荷は温度 80 [K]で 116 [W], その内訳は光学窓 22 [W], 真空容器内 表面からの輻射 70 [W], 支持構造材 24 [W]と推 定された.

	Components		Estimate	Measured	
			d		
			Heat	Heat	
			Load [W]	Load [W]	
1st Cold Stage	80 K Shield		116	125	
01460	(Load per Cryoc	ooler	29 W/Unit	31 W/Unit)	
			(breakdown)		
	- Eleven (1	1) View	22 *	-	
	Ports				
	- Radiation f	from 300	70	-	
	K				
	- Support Posts/Rods			-	
	- Electrical V	Vires	3×10^{-4}	-	
3 ~ 10					
2nd	Cold Stage 8 K	Shield 5	5	< 2.0	
(Load pe	er Cryocooler	2.5 W	//Unit < 1	.0 W/Unit)	
		(bre	eakdown)		
- Duct S	Shields	< 0.	05 *	-	
- Eleve	en (11) View	0.4	L *	-	
Ports					
- Radiat	tion from 80 K	2.	2	-	
- Suppo	- Support Posts/Rods		4	-	
- Electrical Wires - Scattering Light		3 X	10^{-4}	-	
		Severa	al watts *	-	
	Payload		1 *		
(Load per Cr	yocooler	0.5 W/Uni	t 0.	4 W/Unit)	
	Mirror Depositio	on	1 *	_	

Table 4 クライオスタット熱負荷^[7]

3. 低温設備の組立と総合試験

3.1. 工場内試験

2011 年 4 月からクライオスタットと冷凍機 ユニット設計が開始され, 2013 年 3 月までに 4 台のクライオスタットと 16 台の冷凍機ユニッ トが完成した. クライオスタットの製造と平行してクライオ スタットと冷凍機ユニットを組み合わせた総 合試験が2013年1月からクライオスタットの 製造者である(株)東芝の京浜事業所内で実 施され,クライオスタットの熱負荷を含む冷却 特性を確認した.

その結果,クライオスタットの低温鏡懸架装 置の冷却系と2層輻射シールドは冷却開始から 約2週間で設計温度に到達することを確認した. 冷却試験から,内層側輻射シールドの熱負荷は 設計5.0 [W]に対して実負荷は1.0 [W]であった. 実負荷が設計に比べて小さい理由は,工場試 験時は光学窓やビーム接続部が閉止さており, この箇所からの輻射入熱が負荷されないため である.外層側輻射シールドの熱負荷は設計 116 [W]に対して実負荷は125 [W]であった.

この結果, クライオスタットの熱負荷がほぼ設 計通りであることが確認された.

工場試験で測定したクライオスタットの実熱負荷を Table 4 に示す.

この他,冷却試験では KAGRA トンネルでの冷 却運転を模擬したクライオスタット内の振動 測定や内層輻射シールド内表面から模擬低温 懸架に懸架された鏡への放射伝熱による冷却 の寄与\の実証試験が行われた.^[17,21]

3.2. 伝導冷却路の評価

伝導冷却路の評価回路を Fig. 23 に示す. 図 中の(a)は鏡の冷却路, (b)は内側輻射シールド の冷却路を模式的に表した図である. また, 図 中の T1 から T11 は冷却路表面に組み込まれた 温度計である. 図の T3 (T11)の右横の実線は



Fig. 23 伝導冷却路の評価回路. (a): 鏡懸架冷却路, (b): 内側輻射シールド冷却路

クライオスタットと冷凍機ユニットの取り合い点を示している.

温度計 T3 から T5 の距離は 1.4 [m]で, クラ イオスタット内のある. 伝導冷却路の断面と 使用素材は冷凍機ユニットと同じ幅 50 [mm,] 高さ 75 [mm]の 5N8 アルミ材を使用している. また, 伝導冷却路の屈折点(T4 並びに T9 位置) は溶接で接合されている.伝導冷却路の評価は T5 直近のヒーター並びに T11 直近のヒーター と冷凍機の冷凍能力測定結果を用いて行った.

ヒーター加熱量 5 [W]で,4 基のクライオス タットの鏡冷却路の冷凍機冷却ステージから クライオスタット内冷却路端部間の平均熱抵 抗は 0.13 [K/W]であった. また,4 基のクライ オスタットの内側輻射シールド冷却路の冷凍 機冷却ステージからクライオスタット内冷却 路端部間の平均熱抵抗は 0.44 [K/W]であった. これを熱伝導として評価するとそれぞれ~5600 [W/mK]と~3200 [W/mK]であった.

これまで述べたように 5 箇所の溶接接合部(冷 凍機ユニット4箇所,クライオスタット1箇所), 3 箇所のボルト接合部が伝導冷却路に存在して いること,測定が4端子ヒートフロー法による 微少区間の温度差測定でないことから,参考値 程度であることに注意されたい.

一方,2.3.2.3 の8 K 伝導冷却路の設計で述 べた熱伝導率の減少率の推定は上記の熱伝導 評価からほぼ妥当な推定と考えられる. 伝導冷 却の設計では導体接合部溶接や機械的接合面 の設計において適当な熱伝導率の減少率(=安 全率)の導入が必要で有る事が示唆されいる.

3.3. 低温設備の再組立と試験

総合冷却試験を完了した 4 基の低温設備 (クライオスタット4台,冷凍機ユニット16台) が KAGRA トンネル内への搬入のために順次 分解・梱包され,2013年夏までに岐阜県飛騨市 内の保管倉庫に輸送された.

2014 年に低温設備のトンネルへの輸送が開 始され,最初の輸送でクライオスタットが Fig. 2の X-end 鏡室と Y-end 鏡室へそれぞれ搬入さ



Fig. 24 総合組立を完了した Y-end 鏡室 (Fig.2) の低温設備

れた. 2014 年 11 月から, 低温設備のトンネル で鏡冷却用クライオスタット, 冷凍機並びに多 重バッフル付ダクト型輻射シールドを組み合 わせる総合組立が開始され, 途中の中断期間を 経て 2016 年 7 月末に組立を完了している.

2014年11月からは、低温設備のトンネルで 鏡冷却用クライオスタット、冷凍機並びに多重 バッフル付ダクト型輻射シールドを組み合わ せる総合組立が開始され、途中の中断期間を経 て2016年7月末に組立を完了した。

この組立に要した期間は,機材の輸送等も含め て1クライオスタット辺り約一ヶ月であった. Fig.21 に KAGRA トンネルで総合組立を完了 した Y-end 鏡室の低温設備を示す.

組立を完了した低温設備は,2016年10月か ら冷却性能の確認試験を開始し,2017年8月ま でに全試験を完了した.この冷却性能確認試験 の結果を Fig.22 に示す.図中の破線は,2013年 の(株)東芝京浜事業所内での試験結果,シン ボルが Y-end 鏡室低温設備試験の結果である. 図から,KAGRA トンネル内の設置場所に於い ても工場試験での冷却特性を再現し,約2週間 の冷却期間で定常状態まで冷却できることを



確認した.また,この結果から工場試験以降の輸送,保管並びにトンネル輸送等による低温設備の損傷が無い事が確認された.

4. 鏡冷却

4.1. 鏡の冷却特性

2019 年, 観測運転に向けて 4 枚の鏡が極低温 に冷却された. Fig.26 は, 2019 年 4 月から 5 月にかけての Y-end 鏡室低温設備の冷却曲線で ある. Fig.26 が示すように 100K 以上の冷却 は放射伝熱が支配的であるため,内層輻射シー ルド,鏡,マリオネット反跳マス,HLVIS が同時 に冷却されている.一方,100K 以下では5N8超 高純度アルミ製撚り線による伝導冷却が支配 的なため,冷凍機に近い冷却要素から,HLVIS, マリオネット反跳マス,鏡の順で冷却が進んで いる. 低温設備の冷却開始から27日目に鏡は 22Kに到達している. 100K 以下で鏡の冷却速 度が急激に変化しているのは,温度の低下に伴 ってヒートリンクの熱伝導率が上昇したこと, 鏡や懸架装置の素材の比熱が低下したためで ある.

冷却完了後のクライオスタット内温度分布を Fig.27 に示す.







Fig. 27 冷却完了後のクライオスタット内温度分布

4.2. 鏡の着霜問題

LIGO-Virgo-KAGRAの国際重力波ネットワ ークの第3期観測期間(O3)(2020年3月終 了)に向けて低温設備の冷却を開始したとこ えろ,鏡の表面に霜が形成されると云う深刻な 問題が発生した.これは,鏡の初期冷却時に鏡 表面への残留ガスの分子吸着が予想以上に大 きく,鏡面に目に見える霜が形成された推定さ れた.Fig.28に,鏡面に霜が形成された状態

(右) と形成されていない状態(左) での緑 色レーザーを照射した鏡面の写真を示す.^[22] 極低温(~22 K)の鏡面に非常に厚い霜が形成 された結果,緑色レーザーのビームを大きく散 乱させている。

鏡面に厚い霜が形成された結果,干渉計の性能 指標の一つである Finesse が室温の約 1500 の 精度から数百以下まで低下した.

また, 鏡に着霜したガスの成分は, 鏡を加温し た際の温度と Finesse の変化から N_2 と O2 が 主であることが推測された.

KAGRA ではこの Finesse を 1400 前後と しており, Finesse の低下は KAGRA の観測運 転にとって深刻な問題となる.^[25]



Fig.28 緑色レーザーが照射された鏡面の写真 ^[22] (右)着霜した鏡, (左)霜の無い鏡

このため, 鏡表面に残留ガスが着霜無く, 鏡の 冷却を継続できる方法の検討が課題となった. [24]

4.3. 新たな鏡冷却法の提案

低温鏡の着霜による Finesse 低下という問 題を受けて, 鏡表面への霜の形成を防ぐ新たな 冷却方法が検討され, 低温設備の各冷却要素を 段階的に冷却し, 真空槽内の残留ガス分子を鏡 表面ではなく, 輻射シールドの表面に吸着させ るという冷却法が提案された.

新たに提案された段階的冷却法を以下に示す.

<u>Step 1:</u>

真空容器内の真空排気時間を21日以上とし,容 器内の圧力を1x10⁻⁴ [Pa]以下とする.

<u>Step 2:</u>

真空排気後に実施する He リーク試験の判定値 を 1x10⁻¹¹ [Pam^{^3}s⁻¹]以下とし, 判定値以上のリ ーク箇所は補修を実施する.

(これまでの基準は 1x10⁻¹⁰ [Pam^{^3}s^{^-1}]の検出 感度でリークが検出されないであった.)

<u>Step 3:</u>

クライオスタットに接続されている2台の多重 バッフル付きダクトシールドの冷却を開始し, 約 11 日の冷却時間で残留ガス中の水分(H₂O) をダクトシールド内表面に吸着させる.

ダクトシールド内表面の平均温度が 140 [K]以下で水分(H₂O)の分圧は飽和蒸気圧温度から 1x10⁻⁶ [Pa]台と予測.

<u>Step 4:</u>

輻射シールド冷却用冷凍機ユニット2台(Fig.3 の PTC for Cryostat Radiation Shields)により クライオスタットの内層側と外層側輻射シー ルドの冷却を開始する.約24日の冷却時間で残 留ガス中の水分(H₂O), N₂, O2 を内層輻射シー ルド内表面に吸着させる.内層輻射シールド表 面の平均温度が20K以下でN₂とO2の分圧は 飽和蒸気圧温度から1x10⁻⁸ [Pa]台と予測.

<u>Step 5:</u>

低温鏡懸架装置の冷却を開始する.

(冷却時間は約10日)

その他, Step 1~4の冷却期間中, ガス分析器(Q-mass)を使用して残留ガスの分圧測定を継続して行い, 残留ガスの分圧変化を確認する.

4.4. 新冷却法の実証

2020 年 11 月から 2021 年 2 月にかけて KAGRA 低温設備を使用した冷却法の実証試験 が行われた. この冷却法で冷却された低温設備 の特性を Fig.29 に示す.

この冷却法により, 鏡が 22 [K]に到達するの に要した時間は 49 日であった.

(真空排気時間(21日)を除く)

Fig.26 の冷却時間 27 日と比較して約2倍の鏡 の冷却時間が必要であるが、この冷却法により 目視で確認できるほど厚い霜が付くことなく 鏡の冷却に成功している.

この実証試験では, 懸架装置の中間質量 (Fig.3 中の Intermediate Mass) と内層輻射 シールドに装着されたヒーターによる除霜試 験も実施した.

ヒーターで加温した鏡(図中の TM)並び
 に内層輻射シールド(図中の 8 K top 及び 8 K side)の加温特性を Fig.25 に示す.

この加温ヒーターにより N₂ と O2 の除霜温度 40 [K]以上までの加温時間が 1 日, 再冷却に必 要な時間が1日であることが確認された.

この結果から, 鏡表面又は輻射シールドの光学 窓に霜が付着しても約2日で除霜が可能である ことを実証した.また, KAGRAの観測運転の保 守期間を利用して定期的に除霜することで観 測期間中も Finesse の低下を防ぐことができた.



Fig. 29 実証実験で確認した低温設備の冷却特性



Fig. 30 除霜ヒータによる鏡と内層輻射シール ドの加温特性

この実証実験では、神岡町池ノ山の地下に設置 されたクライオスタット内の低温下での振動 測定が行われている.^[3]

この振動測定では、新たに開発された極低温干 渉型加速度計^[22]を用いて低温環境下で実施さ れている.測定された振動の解析の結果、冷凍 機ユニットに由来するクライオスタットの固 有振動が KAGRA の重力波観検出感度に影響 しないことが示された.^[23]

5. まとめ

本テキストで紹介した KAGRA 低温設備の 設計・製作は高エネルギー加速器研究機構が 持つ加速器関連の技術が応用例である.

特に冷凍装置を冷熱源とする伝導冷却は,高 エネルギー素粒子検出用超伝導磁石等で多用 されており,建設が検討されている国際リニア コライダー計画でも伝導冷却化した補正用超 伝導磁石の設置が検討されている.

今後とも加速器建設で開発された先進技術 が多方面で応用され、さらなる科学の発展に寄 与することを希望している.

本稿では KAGRA に応用された低温技術を解 説した.本稿に記述した他にもクライオスタッ トの超高真空の立場からの設計検討が実施さ れている. 真空の仕様等を含めた KAGRA 全体の解説 が参考文献[1,2]に纏めているので参照された い.また, KAGRA 低温技術の内, 多重バッフル 付きダクトシールドの機能と設計法は原稿作 成の都合で省略した.この多重バッフル付きダ クトシールドについては次の機会で紹介した い.

6. 謝辞

2011 年 4 月以来, 多くの方の協力により KAGRA 低温設備の設計・製作が進められ, 観 測開始までたどり着くことができました.

内山 隆氏(東大宇宙線研),大橋 正健氏 (東大宇宙線研),大森 隆夫氏(帝京大学), 久米 達哉氏(KEK),小池 重明氏(KEK), 榊原 裕介氏(東大宇宙線研),斎藤 芳男氏 (KEK),鈴木 敏一氏(KEK),陳たん氏(東大 宇宙線研),東谷 千比呂氏(東大宇宙線研), 山岡 宏氏(KEK),山元一広氏(東大宇宙線研) の方々から低温設備の設計と関連する R&D で ご協力頂きました.ここに感謝いたします. (五十音順.括弧内は設計開始時の所属)

2011 年 4 月のプロジェクト開始に当たって 山本 明前 KEK 超伝導低温工学センター長から 多大なサポートを頂きました.

ここに感謝いたします.

今回, OHO'22のテキストとして KAGRA 低 温技術の解説文書作成の機会を提供頂いた事 務局に感謝いたします.

7. 補 遺

以下の項目について補遺として簡単に解説 する.

7.1. Fineness

KAGRA は, Fabry-Perot Michelson 干渉計 (FPMI)を基本とし, 重力波信号である位相 変化を増幅するため直交する腕内を光子が複 数回往復させる. FPMI では Finesse と呼ばれ るパラメータがある. Finesse は重力波検出器 の腕共振器を構成する鏡の透過率に反比例する.^[25]

KAGRA はこの Finesse を 1400 前後とし ている. 冷却された鏡の表面に真空槽内の残 留ガスが着霜した結果, 反射率が下がり Finesse が低下した.

このため, 鏡表面に残留ガスが着霜すること なく, 冷却を継続することは長期観測を行う低 温干渉計の課題であった.^[22]

7.2. 真空ダクト内の圧力

干渉計の光路上に存在する気体分子は、レー ザー光を散乱し光路長変化の原因となる.加え て,鏡への気体分子の入射・脱離による鏡の機 械的・音響的振動も干渉計の雑音となる.

KAGRA の目標感度を得るための圧力は2 x10⁻⁵ [Pa]以下と見積もられる. KAGRA ではさらに1桁の安全係数を持たせ て,干渉計の運転時での圧力条件を~2 x10⁻⁷ [Pa]としている.^[20]

参考文献

- [1] 特集「重力波検出と極低温冷却技術」 J. Cryo. Soc. Jpn., 46 (2011)
- [2] 特集「KAGRA~時空のさざ波をとらえる ~」日本機械学会誌, **120** (2017)
- [3] R. Bajpai, et al., A laser interferometer accelerometer for vibration sensitive cryogenic experiments, Meas *Sci. Technol.* 33 (2022) https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac6d46
- [4] 都丸 隆行、他「KAGRA の防振系」日本 機械学会誌 120 (2017) pp.16-19
- [5] 幾島悠喜、「超低振動クライオクーラーの 開発研究」総合研究大学院大学 学位論文 (博士) (2008)

https://ir.soken.ac.jp/?action=pages_view _main&active_action=repository_view_ main_item_detail&item_id=652&item_n o=1&page_id=29&block_id=155

[6] 幾島悠喜、他「超低振動パルス管冷凍装置-冷凍能力と振動-」 J. Cryo. Soc. Jpn.,
 43 (2008) pp.7-14

- [7] C. Tokoku, et al., Cryogenics System for the Interferometric Cryogenics Gravitational Wave Telescope, KAGRA – Design, Fabrication, and Performance Test -, Adv. Cryog. Eng., 59 (2014), pp.1254-1261.
- [8] 都丸隆行、他「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–」J. Cryo. Soc. Jpn. 46 (2011) pp.415-420
- [9] 低温工学・超電導学会 物性データより, https://www.csj.or.jp/handbook/index.ht ml
- [10] 新冨孝和、他「超高純度金属細線による 伝導冷却 II -高純度銅-」 J. Cryo. Soc. Jpn., 46 (2011) pp.421-425
- [11] 榊原 祐介、「A Study of Cryogenic Techniques for Gravitational Wave Detection」東京大学大学院 学位論文(博 士) (2014)

https://repository.dl.itc.utokyo.ac.jp/records/8069#.YwL1cy_3LSw

- [12] 西嶋 茂宏、他「クライオスタットの支 持材に関する研究」大阪大学研究センタ ーだより 57 (1987) pp. 17-19
- [13] T. Kume, S. Koike, et al., Development of the low vibration cryocooler unit for large-scale cryogenic gravitational wave telescope, KAGRA, Proc. of ICEC 24 (2012), pp.399-402.
- [14] 小池 重明、他「KAGRA クライオスタットの設計-振動解析について-」平成 25 年度 核融合科学研究所技術研究会報告
 (2014) pp.28-31.
- [15] T. Yamada, et. al, High Performance Heat Conductor with Small Spring Constant for Cryogenic Applications, Cryogenics, Vol. 116 (2021), 103280.
- [16] 榊原 祐介、他「大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 10µm での反射率測定」 J. Cryo. Soc. Jpn 46 (2011) pp.434-440
- [17] Y. Sakakibara, et. al, A study of cooling time reduction of interferometric cryogenic gravitational wave detectors using a high-emissivity coating, Adv. *Cryog. Eng.*, **59** (2014), pp.11176-11183.
- [18] 大森 隆夫他、他「大型重力波望遠鏡

(LCGT)における真空技術と断熱技術」J. Cryo. Soc. Jpn. 46 (2011) pp.408-414

- [19] 高田 聡他、他「真空多層断熱材用アルミ 蒸着ポリエステルフィルムの気体放 出速度の測定」、J. Vac. Soc. Jpn, 57 (2014) pp.1-6
- [20] 齊藤 芳男、他「KAGRA の真空装置」 日本機械学会誌 **120** (2017) pp.16-19.
- [21] D. Chen, et al., Vibration measurement in the KAGRA cryostat, Class. *Quantum Grav.* **31** (2014),

doi:10.1088/0264-9381/31/22/224001.

- [22] H. Abe, et al., The Current Status and Future Prospects of KAGRA, the Large-Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope Built in the Kamioka Underground, Galaxies 2022, 10, 63, https://doi.org/10.3390/galaxies10030063
- [23] R. Bajpai, et al., Vibration analysis of KAGRA cryostat at cryogenic temperature, Class. Quantum Grav. 39 (2022) https://doi.org/10.1088/1361-6382/ac7cb5
- [24] K. Hasegawa, et al., Molecular adsorbed layer formation on cooled mirrors and its impacts on cryogenic gravitational wave telescopes, Phys. *Rev. D*, 99 (2019), 022003.
- [25] 麻生 洋一、他「超高感度重力波検出器の ための光学設計と制御」 J. Vac. Soc. Jpn.,
 54 (2011) pp.597-603