

Ti-6Al-4V合金の極低温高サイクル疲労特性に及ぼす組織の影響

Effect of microstructure on high-cycle fatigue properties for Ti-6Al-4V alloy at cryogenic temperature

由利 哲美、小野 嘉則、緒形 俊夫(物質・材料研究機構); 砂川 英生(宇宙航空研究開発機構)
 Tetsumi Yuri, Yoshinori Ono, Toshio Ogata (NIMS); Hideo Sunakawa (JAXA)
 E-mail: YURI. Tetumi@nims.go.jp

1. はじめに

極低温における高速回転下における使用環境となる国産宇宙ロケットエンジンのターボポンプ用材料は、実使用環境である極低温にける高サイクル疲労特性評価は不可欠である¹⁾。我々はこれまでに、Ti-6Al-4V (Ti64)および鉄・酸素等の不純物元素を低減したTi-6Al-4V ELI 合金鍛造材($\alpha + \beta$)-anneal材に β 域から炉冷(FC)を施した材料を用い、極低温(20 K ガスヘリウム(GHe)雰囲気)における高サイクル疲労特性について報告した^{2,3)}。それらによると、それぞれ 10^6 回付近以上の長寿命側における疲労強度は、針状組織を有するFC材の方が($\alpha + \beta$)-anneal材より高い値を示すこと、また両者のFC材の 10^7 回疲労強度には、有意差が見られないこと等を報告した。本研究では、コスト的に有利となるTi64合金を用いて、 β 域まで加熱後、空冷および水冷を施し針状組織を変えた材料で、20 KGHe中における高サイクル疲労試験を行い、高サイクル疲労特性に及ぼす組織の影響について調べた。

2. 実験方法

供試材は、Ti64 合金鍛造材⁴⁾(鍛造比 2.4、 $\phi 350 \times 200$ 、AMS4928相当、 $940^\circ\text{C}-120\text{min}$ 保持後水冷、 $705^\circ\text{C}-170\text{min}$ 保持後空冷)の($\alpha + \beta$)-anneal材を用いた。試験片サイズの短冊状に切断後、 β 域温度の $1050^\circ\text{C}-60\text{min}$ 保持後、空冷(AC)および水冷(WQ)を施し、その後 $720^\circ\text{C}-120\text{min}$ 保持後炉冷を行った。引張試験と高サイクル疲労試験は、20 KGHe 雰囲気および293 K(室温)にて行った。20 KGHe 中における各試験は、冷凍機を用いて試験片を常時冷却しながら、ヒーターによる温度制御方法により実施した。高サイクル疲労試験は、正弦波での荷重制御にて行い、応力比 $R=0.01$ とし、試験周波数は20 KGHe 中では5~15Hz および293 Kでは10~15Hz で行った。破断しない場合の試験打ち切り回数は、20 KGHe 中では 10^7 回、293 Kでは 2×10^7 回とした。また、一部未破断材については、さらに荷重を増し破断するまで行うステップワイズ試験⁵⁾を実施した。光学顕微鏡による組織観察および各試験後 SEM による破面観察も行った。

3. 実験結果

Fig.1 にそれぞれの光学顕微鏡組織写真を示す。($\alpha + \beta$)-anneal材は、等軸 α 相と針状組織の混合組織を呈している。一方、各 β -anneal材はいずれも針状組織から成り、その針状組織は冷却速度の速い順に細かくなっている。20 KGHe 中における($\alpha + \beta$)-anneal材および各 β -anneal材の引張試験の結果をTable 1 に示す(3本の平均値)。FC材およびAC材の0.2%耐力($\sigma_{0.2}$)および引張強度(σ_B)は、ほぼ同等の値であり、($\alpha + \beta$)-anneal材よりは少し低下している。WQ材は、($\alpha + \beta$)-anneal材より高い値を示す。Fig.2 に、20 KGHe 中における($\alpha + \beta$)-anneal材および各 β -anneal材のS-N曲線を示す。図中の数字は、ステップワイズ試験を行った試験片である。各 β -anneal材の 10^7 回疲労強度(10^7 回未満で破断した最低試験応力と、 10^7 回未破断の試験応力の平均値)は、すべて($\alpha + \beta$)-anneal材に比べ高い値を示し、その順は、WQ材>AC材>FC材と針状組織の細かい順に高い値を示す。また、各 β -anneal材の 10^7 回疲労強度は、我々がこれまでに取得しているチタン合金よりも、優れていることがわかった。破面観察結果の詳細については、発表当日に行う予定である。

参考文献

- (1) NIMS SPACE USE MATERIALS STRENGTH DATA SHEET No.1: National Institute for Materials Science, Japan (2003)
- (2) T.YURI, et al.: Abstracts of CSJ conference, Vol.84(2011) p.13
- (3) T.YURI, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.85(2011) p.53
- (4) T.YURI, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.81(2009) p.227

(5) Y.Murakami, et al.: Trans. JSME (A) 55-510 (1989) p.213

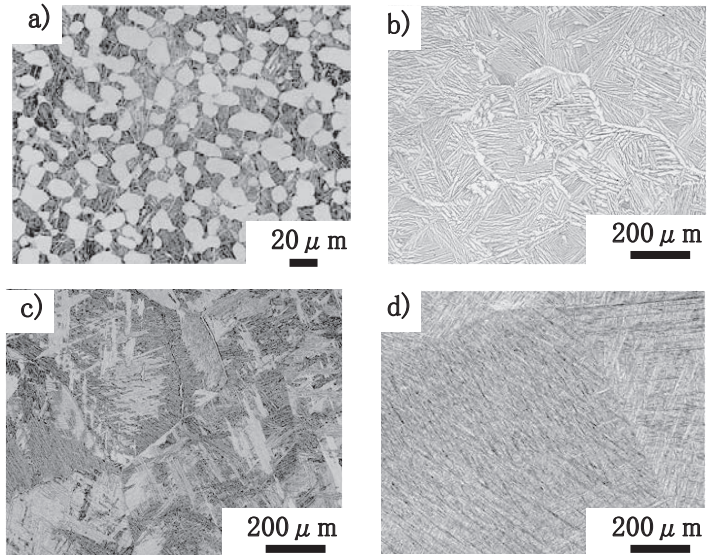


Fig.1 Optical micrographs of Ti-6Al-4V alloy. a) ($\alpha + \beta$)-annealed, b) FC (β -furnace cooled), c) AC (β -air cooled), d) WQ (β -water quenched).

Table 1 Tensile properties of ($\alpha + \beta$) and β -annealed Ti-6Al-4V alloy in gaseous helium at 20 K.

Materials	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)
($\alpha + \beta$)-annealed	1604	1710
FC : β -furnace cooled	1488	1653
AC : β -air cooled	1522	1656
WQ : β -water quenched	1805	1886

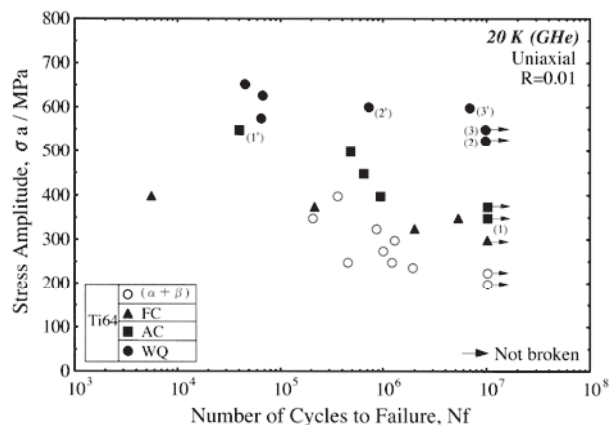


Fig.2 S-N curves of ($\alpha + \beta$) and β -annealed Ti-6Al-4V alloy in gaseous helium at 20 K.

小型ピックアップコイル結合型 HTS-SQUID を用いた 太陽電池特性評価システムの開発

Non-destructive evaluation using HTS-SQUID with a small pickup coil

紀和 利彦, 福留 陽平, 宮崎 真伍, 高木 竜輝, 堺 健司, 塚田 啓二(岡山大)

KIWA Toshihiko, FUKUDOME Yohei, MIYAZAKI Shingo, TAKAGI Ryuki, SAKAI Kenji, TSUKADA Keiji (Okayama Univ.)

E-mail: kiwa@okayama-u.ac.jp

1. はじめに

太陽電池は自然エネルギーとして注目されている。高効率・低コストの太陽電池を開発するためには、発光効率・電流密度などの分布を計測し、評価する必要がある。しかしながら、太陽電池の特性に密接に関連する電気特性の評価については、一般的に、端子間の電流・電圧を計測していた。それに対して、我々の研究グループでは、太陽電池を流れる電流によって発生する接線方向磁場の2次元分布をピックアップコイル結合型 HTS-SQUID で得ることで、電気特性の2次元分布を可視化するシステムの開発を行ってきた。

本研究では、小型ピックアップコイルを結合した HTS-SQUID システムを構築し、多結晶太陽電池の評価を行ったので報告する。

2. 実験システム

Fig.1 は構築したシステムの概要図である。試料である太陽電池パネルは、パーマロイ磁気シールド内の x-y 自動ステージ上に設定されている。パネルの上には、パネル平面に対して接線方向2成分(x軸およびy軸)の磁場を計測するための小型ピックアップコイルが固定されている。ピックアップコイルは矩形でありその一辺は内側で約5 mm とした。巻き数は200回であった。太陽電池にオフセットを加えた交流電圧を印加することで発生した磁場をピックアップコイルによって検出する。この磁場信号は、シールド線を通り、HTS-SQUID 上にフリップチップマウントされた入力コイルに伝達される。伝達された磁気信号は、HTS-SQUID によって検出されたのち、ロックイン増幅器によって信号の基本は成分の振幅および印加電圧に対する位相差成分が分離され、検出される。我々は、これまでに、得られた信号が太陽電池パネルの微分コンダクタンスに比例することを示している[1]。

HTS-SQUID には、ランプエッジ接合型ジョセフソン接合を用いた。ベース及びカウンタ電極は、それぞれ $\text{La}_{0.1}\text{Er}_{0.95}\text{Ba}_{1.95}\text{Cu}_3\text{O}_y$ および $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ であった。HTS-SQUID の構造および作成プロセスについては参考文献[2-3]に報告されている。ロックイン増幅器接続前における雑音は、1.7 kHz で約 1.97 pT であった。

3. 実験結果

Fig.2 は構築したシステムによって計測した電気特性分布

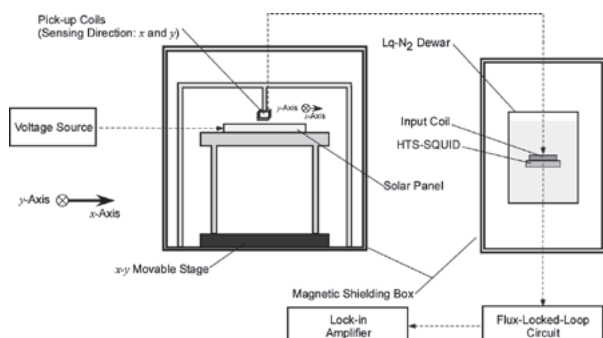


Fig.1 Schematic of the developed system

である。試料には市販されている多結晶太陽電池パネルを用いた。パネルの電極には直流電圧 4 V に振幅 0.5 V の交流電圧を重畳させたものを印可した。周波数は 1.7 kHz とした。これにより、電圧 4 V 付近での磁場の電圧微分に比例する信号を検出することができる。本研究では2成分方向より得られた磁場信号をベクトル合成したのち、その振幅の位置分布を太陽電池パネルの光学写真上に重ねて表示した。配線部分で強度が強くなっていることがわかる。また、微分コンダクタンスが均一であると仮定したとき、検出信号は、流れる電流強度に比例する。そこで、x,y 各成分の合成ベクトルより得られた磁気信号を90度回転させることで、流れる電流のベクトルを再構成し表示した。以上の結果は、太陽電池パネルのセル内部を流れる電流およびその電気特性を開発した HTS-SQUID システムを用いて可視化することが可能であることが示している。

4. まとめ

本研究では、小型ピックアップコイルを用いた HTS-SQUID システムの構築を行い、多結晶太陽電池の特性分布評価を行った。太陽電池パネルの平面に対して接線方向2成分の地場信号を計測することにより電気特性および太陽電池を流れる電流ベクトルの可視化に成功した。

本研究は、産学イノベーション加速事業により実施したものである。

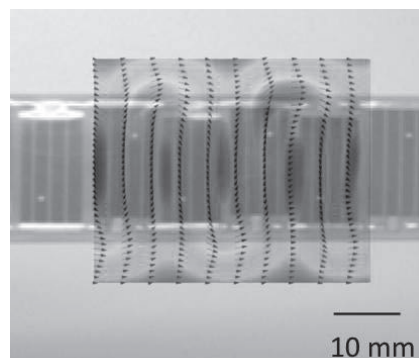


Fig.2 Mapping of the electric properties and the currents in the solar panel. The image was superimposed on the photograph of the sample.

参考文献

1. T. Kiwa, et al.: Physica C, Vol. 471 (2011) p.1238
2. S. Adachi, et al.: Physica C, Vol. 468 (2008) p.1936
3. H. Wakana, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, (2009) p.782

常温磁束トランスと高温超伝導 SQUID を用いた地磁気 NMR 計測装置の試作

Earth's field NMR system utilizing room-temperature flux transformer coupled with HTS-SQUID

廿日出 好, 村田 隼基, 綱木 辰悟, 田中 三郎 (豊橋技科大)
 HATSUKADE Y., MURATA H., TSUNAKI S., TANAKA S. (TUT)
 E-mail: hatukade@ens.tut.ac.jp

1. 緒言

現在, SQUID を用いた超低磁場 NMR/MRI に注目が集まっている[1]. 我々は, この技術を活用してオンサイトでの石油探査等への適用が期待される, 地磁気 NMR に着目した. 地磁気 (~50 μ T) を静磁場としてプロトン NMR を計測する場合, プロトンのラーモア周波数は数 kHz となる. 石油探査応用など, このような計測を研究室外で行うには, 低周波数帯域でも高感度で, モービリティの高い HTS-SQUID がセンサとして適している. このように, 磁気シールドルーム外で HTS-SQUID を用いて直接 NMR 信号を計測するには, ノイズキャンセル技術が必須となり, 従来用いられてきた HTS-SQUID マグネトメータを直接センサとして NMR 計測に用いることは困難と考えた. そこで, 本研究では, 銅線を用いた軸方向微分型ピックアップコイルを有する常温磁束トランスを作製し, これと結合させた HTS-SQUID マグネトメータを簡易・小型磁気シールドケース内に設置することで, 地磁気 NMR を計測できる装置を試作した. 本装置を用いて, 水サンプルの地磁気 NMR 信号を計測できたので, 装置開発と性能について報告する.

2. 地磁気 NMR 装置

本研究で試作した地磁気 NMR 装置は, 基板共振型 HTS-rf-SQUID マグネトメータとクライオスタット, SQUID エレクトロニクス, 3 層磁気シールドケース, 軸方向微分型ピックアップコイルとインプットコイルから構成される常温磁束トランス, AC パルス用コイル, 磁場勾配補償コイル, 永久磁石, サンプル移動機構, 遅延パルス発生器, 電流源, スペクトラムアナライザなどから構成される (Fig.1(a)). 地磁気中でのプロトンの磁化は大変微弱なため, 約 0.8T の前分極用永久磁石を用いた. この永久磁石を NMR 信号計測部のピックアップコイルから 3 m ほど離れた場所に設置し, 磁石内で磁化したガラス瓶入り水サンプルを, 窒素ガス圧で塩化ビニールパイプを通してピックアップコイルの片側に移動させる機構を構築した. ピックアップコイルに移動したサンプルが, コイル端に設置したマイクロスイッチを押すことでトリガを発生させ, このトリガにより遅延パルス発生器から AC パルス印加用トリガ, SQUID リセットトリガ, 計測用トリガを発生させる. ここでは Fig.1(b) に示すようなパルスシーケンスを採用した. 装置設置場所の地磁気は約 30 μ T であり, この静磁場を B_m とする. サンプルは永久磁石の前分極磁場 B_p により約 5 秒間磁化され, サンプル移動機構により約 0.9 s でピックアップコイルに移動する. その直後, Fig.1(a) に示す y 方向に 90° パルス B_{AC} を印加し, プロトンの磁気モーメントを xz 平面に倒す. その後, 発生する FID 信号をピックアップコイルで検出, 誘導された電圧はインプットコイルを介して磁束変換され SQUID に伝達される. SQUID 出力はスペアナにより記録, またフーリエ変換されて NMR スペクトラムが得られる. 磁場勾配補償コイルは静磁場中の不均一性補償に用いる. ここでは, 互いに逆向きに巻いた各 1000 回巻のピックアップコイルと, これらと直列に接続した 800 回巻のインプットコイルを磁束トランスとして使用した.

3. 実験と結果

開発したシステムを用いて, 10 ml の水サンプルを用いて地磁気中でのプロトン NMR 信号を計測した. 結果を Fig.2 に示す. 図に示すように, 1274 Hz にスペクトラムピークが得られ, 対応する地磁気強度は, フラックスゲート磁束計で計測した 30 μ T とほぼ一致した. 計測に用いた地磁気に含まれる一次磁場勾配を磁場勾配補償コイルで補償した結果, 同図に示されるように,

信号強度が約 3 倍, 信号線幅が約 2 Hz の増大された信号が計測された. 後者において, NMR 信号周波数が 1278 Hz 付近と, 前者と比べて少し増加しているが, これは測定時の地磁気強度が変化したためか, 磁場勾配補償の結果, 中心周波数がずれたためと考えられる. また, 本装置で, 90° パルスを印加する時間を, 磁化後 0.9 ~ 9.9 s で変化させたところ, 地磁気中における水の縦緩和時定数 T_1 として約 2.8 s が得られた.

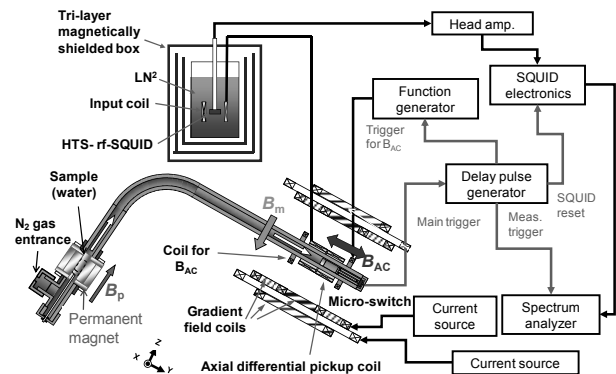
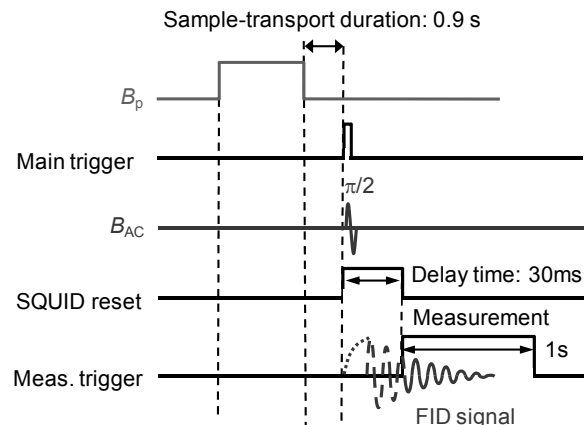


Fig.1 (a) Earth's field NMR system utilizing room-temperature flux transformer coupled with HTS-rf-SQUID.



(b) Pulse sequence for EF-NMR.

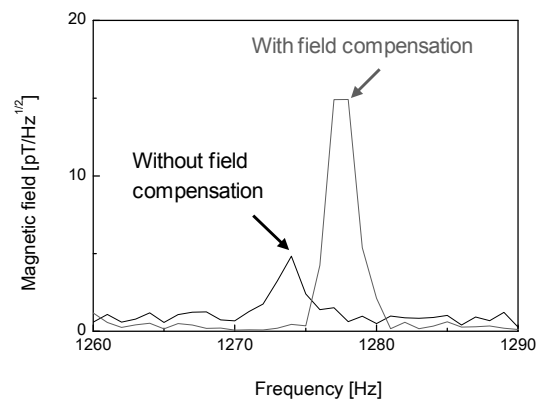


Fig.2 ^1H -NMR signals with and without field compensation.

参考文献

- [1] S. Fukumoto, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 522.

超低磁場 SQUID-NMR/MRI 応用のための磁気ノイズ低減に関する研究

Study of magnetic noise reduction for ultra-low field NMR/MRI using HTS-SQUID

廿日出 好, 今村 啓佑, 村田 隼基, 田中 三郎 (豊橋技科大), 安達 成司, 田辺 圭一 (ISTEC-SRL)
 HATSUKADE Y., IMAMURA K., MURATA H., TANAKA S. (TUT), ADACHI S., TANABE K. (ISTEC-SRL)
 E-mail: hatukade@ens.tut.ac.jp

1. 緒言

我々は、HTS-SQUID を用いた超低磁場 NMR/MRI 計測の研究を行ってきた[1]。これらの研究では、静磁場が約 50 μT と小さく、環境磁気ノイズによる静磁場の乱れを抑制する必要があるため、磁気シールドルーム内に計測部を構築してきた。しかし、本技術の実用化のためには、高価で大型の磁気シールドルームを用いることなく、静磁場および SQUID を時間・空間的に安定した低磁気ノイズ環境に保持できるノイズ低減技術が必要となる。そこで、本研究では、フラックスゲート磁束計を参照センサとした簡易なアクティブ磁気シールドルームを構築し、その中で高温超伝導 Bi 系円筒内に SQUID を設置することにより、超低磁場 NMR/MRI 用静磁場、および SQUID に対する環境磁気ノイズ混入の抑制を図った。本システムでは、NMR/MRI 信号は別のピックアップコイルで計測し、磁束トランスを形成し Bi 円筒内の SQUID に伝達して読み出す構成とする予定である[2]。本稿では、アクティブ磁気シールドルームと Bi 円筒内で計測した SQUID のノイズ特性について報告する。

2. アクティブ磁気シールドの構築と評価

本研究では、3回巻 3 軸コイルを有する 1.6 m × 1.6 m × 2 m のアルミフレームで簡易ルームを作製し、これらの 3 軸コイルを磁場補償コイルとして用いた。環境磁気ノイズを計測する参照センサとして約 20 pT/Hz^{1/2} のノイズレベルを有する 3 軸型フラックスゲート磁束計を用いた。フラックスゲートで x, y, z 成分の環境磁気ノイズを計測し、それらの出力を 1 kHz のローパスフィルタを介して磁場補償コイルにフィードバックする 3 軸磁場補償回路を用いた。この回路は、フラックスゲートを設置した場所の地磁気成分についてはフィードバックしない仕様で用いた。

上記アクティブ磁気シールドルーム内にて、高周波数電磁場ノイズ低減のための電磁シールド布を周囲に配し、有効磁束捕獲面積 0.25 mm²、サイズ 10 mm × 10 mm の HTS-dc-SQUID マグネトメータを液体窒素冷却し、アクティブ磁気シールドを用いた時の SQUID の磁束ノイズ特性を計測した。本測定装置の概念図を Fig.1 に示す。この計測では図に示す Bi 円筒は用いなかった。測定結果を Fig.2 に示す。図に示すように、アクティブ磁気シールドを用いた場合、用いなかった場合と比較して、建物、もしくはセンサの振動由来と考えられる 20, 30 Hz およびそれらの高調波成分のピークノイズと 1 kHz までのホワイトノイズを低減することができた。一方、通常用いる磁気シールドルーム内の 3 層磁気シールドケース内で同 SQUID を計測した場合と比較すると、50 倍ほどホワイトノイズが高かった。

3. Bi 円筒のシールド効果の検証

従来の磁気シールドと同等のノイズ遮蔽性能を得るため、Fig.1 に示すように Bi 円筒を用い、ここでは、アクティブ磁気シールドを動作させた後、Bi 円筒を液体窒素で冷却し、その後、SQUID を円筒内で冷却する方式を用いた。この際、Bi 円筒として内径 60 mm、厚さ 5 mm、長さ 100 mm の底無し円筒と、内径 35 mm、厚さ 3 mm、ドーム状の底がついた長さ 100 mm の底付き円筒を用いた。これらの条件における SQUID のノイズ特性の測定結果を Fig.2 に示す。底無し Bi 円筒を用いた場合、低周波成分ノイズが増加し、7~8 Hz を基調とする高調波成分をもつピークノイズが現れた。ホワイトノイズレベルについては、円筒を用いない場合と比較して、わずかに減少した 700

$\mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ となった。一方、底付き Bi 円筒を用いた場合、10 数 Hz~80 Hz の帯域でノイズが増加しているものの、ホワイトノイズは従来磁気シールドに近い 50 $\mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ となった。底無し円筒シールドを用いた場合、アクティブ磁気シールドでは地磁気磁場をキャンセルしないため、冷却時に地磁気が円筒内に量子化されて残留し、これらの磁束が振動による影響などでピークノイズを発生させたものと考えられる。ホワイトノイズのわずかな低減については、円筒側面のマイスナー効果によるものと考えられる。一方、底付き Bi 円筒の場合、同様に地磁気中冷却された際に、底面で磁束のピン止め効果が働き、残留磁束の振動が抑制されたため、ピークノイズ発生が抑制され、側面および底面でのマイスナー効果によりホワイトノイズレベルが小さくなったものと考えられる。

参考文献

- [1] 廿日出好, 他, 第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会 講演概要集, p. 47.
 [2] 廿日出好, 他, 第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会 講演概要集, p. 48.

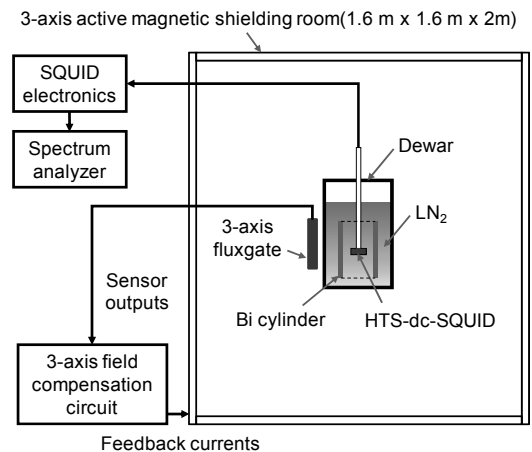


Fig.1 Schematic diagram of measurement system for magnetic flux noise of HTS-dc-SQUID. It utilized 3-axis active magnetic shielding scheme and HTS Bi cylinder.

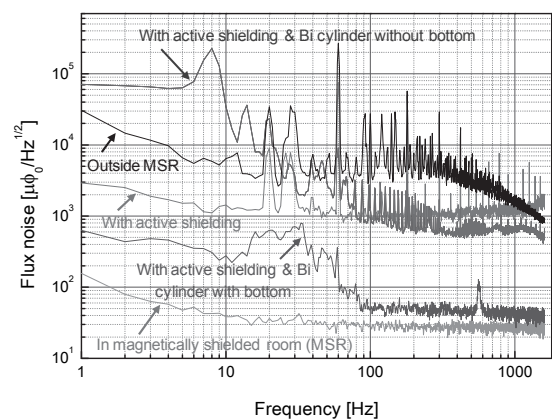


Fig.2 Flux noise spectra of HTS-dc-SQUID magnetometer in and outside magnetically shielded room (MSR), with and without active shielding, and in Bi cylinders with and without bottom.

3次元マトリクス線路を用いた超伝導フィルタの高耐電力化 Improvement in power-handling capability of superconducting filters using 3D matrix microstrip line resonators

高橋 峻平, 秋谷 守紀, 齊藤 敦, 大嶋 重利 (山形大学)

TAKAHASHI Shumpei, AKIYA Moritoshi, SAITO Atsushi, OHSHIMA Shigetoshi (Yamagata University)
E-mail: tme39827@st.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導フィルタは逼迫した周波数資源の有効利用が可能であり、現在は特に送信用超伝導フィルタの高耐電力化が望まれている。マイクロストリップライン共振器 (MSLR) フィルタは共振器線路端部と共振器を構成する超伝導薄膜端部と基板の界面に電流が集中する。従って線路の臨界電流の分布がフィルタ耐電力特性に強く依存する [1]。

これまでに我々は MSLR フィルタの耐電力特性向上の手法として、分割型 MSLR と積層型 MSLR を報告してきた [2]。今回、より高い耐電力特性を有する共振器構造として、分割型・積層型両構造を組み合わせた新たな 3次元マトリクス MSLR (3DM-MSLR) を提案する。それは共振器線路として基板上に超伝導体/絶縁体/超伝導体積層薄膜を作製し、それをさらに幅方向に分割した MSLR フィルタである。本報告では 3DM-MSLR フィルタにおいてどれほどの耐電力向上が見込めるかを実験的に調査した。

2. 3DM-MSLR フィルタ

図 1 に一般的な MSLR 共振器と 3DM-MSLR フィルタの電流密度分布モデルを示す。3DM-MSLR フィルタでは超伝導体と絶縁体を交互に基板上に成膜することで z 方向に、共振器線路を分割することで x 方向に電流を分散させることができ、各方向の最大電流密度 J を低減することができる。このことから、3次元 MSLR フィルタは一般的な MSLR 共振器と比べ、より高い耐電力を有すると考えられる。また 3DM-MSLR は積層型と分割型の共振器構造を組み合わせた構造であるため一般的な MSLR フィルタに対する 2種類の共振器との耐電力特性の結果から、3DM-MSLR フィルタの耐電力特性を予測することが可能と考えられる。

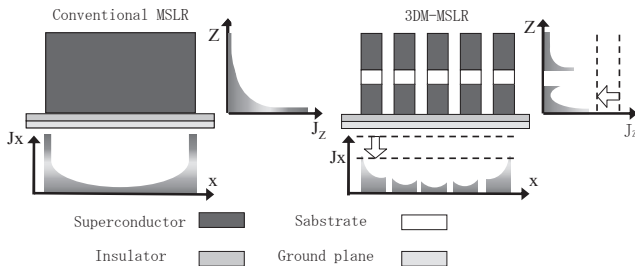


Fig. 1 Current density models of conventional MSLR and 3DM-MSLR

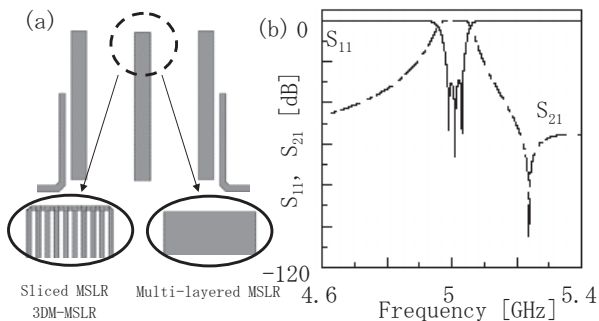


Fig. 2 (a) MSLR filter layout (b) Simulated frequency response

3. 結果

図 2 に 3 段 MSLR フィルタデザインを示す。設計仕様 (中心周波数 5GHz, 帯域幅 100MHz) を満たすように設計し、共振器線路構造を変化させることで耐電力特性の改善を計った。積層型および分割型 MSLR フィルタを同一の膜厚で作製し、一般的な MSLR フィルタと耐電力特性の比較を行った。図 3 に積層型 MSLR フィルタおよび分割型 MSLR フィルタの周波数特性を示す。積層型、分割型どちらのフィルタもともに良好なバンドパス特性を示した。図 4 に積層型 MSLR フィルタおよび分割型 MSLR フィルタの耐電力特性を示す。積層型 MSLR フィルタでは一般的な MSLR フィルタより耐電力が 1.9dB 向上した。分割型 MSLR フィルタでは一般的な MSLR フィルタより、1.8dB 耐電力が倍向上した。

4. 考察

以上のことから 3DM-MSLR フィルタは、一般的な MSLR フィルタに比べ耐電力特性が 3.7dB 向上すると予想できる。

本研究では実験的に知見を得るために一般的な形状の MSLR フィルタと 3DM-MSLR フィルタを作製・評価し、3DM-MSLR 共振器の耐電力特性向上の有効性を調査する予定である。詳細については講演の際述べる。

参考文献

1. A. Saito, et al.: Physic C, 463(2007) pp.1064-1067.
2. S. Ohshima, et al.: Physics Procedia, 36(2012) pp. 429-434.

謝辞

本研究の一部は科研費基盤研究「c」[22560317]「2456039」のサポートにより実施された。

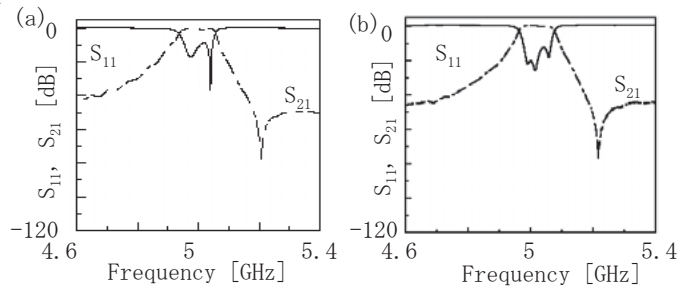


Fig. 3 Frequency responses: (a) Multi-layered MSLR filter (b) Sliced MSLR filter

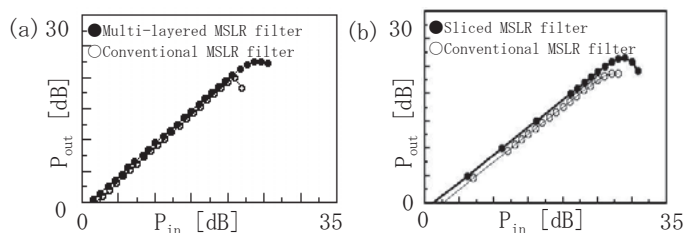


Fig. 4 Power handling capabilities: (a) Multi-layered MSLR filter (b) Sliced MSLR filter

MPMS用ヘリウム循環装置 (HCS) の開発

Development of helium circulation system (HCS) for MPMSs

武田 常広(東大)、岡本 雅美(FTI)、宮崎 隆(東大)、森田直樹(FTI)、片桐 啓志(FTI)

TAKEDA Tsunehiro (The Univ. of Tokyo),

OKAMOTO Masayoshi (FTI), MIYAZAKI Takashi (The Univ. of Tokyo), MORITA Naoki (FTI) and KATAGIRI Keishi (FTI)

E-mail: takeda@brain.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

我々は MEG (脳磁計) 用ヘリウム循環装置 (HCS) を開発し、その HCS を東京大学の 440 チャンネル MEG に搭載して、HCS を運転中に MEG 計測が可能であること、ランニングコストを 1/10 以下に出来ることなどを実証してきた。しかしながら、当該 HCS はトランスファーチューブ (TT) の挿入管が 3/2 インチであったため、一般の MEG 装置に利用するには利用 MEG の改造を必要としていた。挿入管の受入れポートの径を 3 倍にするだけであるが、結果的には MEG デュワ全体を改造しなくてはならないため利用が困難であった。そこで、挿入管径を標準の 1/2 インチにし、利用機器の TT 挿入口に挿入するだけで、一般の超伝導利用測定機器に利用可能な HCS を開発し、H23 年 5 月 N 大医学部に実機搭載した。今回は、開発した HCS を MPMS などに利用可能なように改造したので、その結果を報告する。

2. HCS のコンセプト

精密計測機に用いられている SQUID は、超伝導状態にあるため、それが発生する熱は極めて小さい。また、ヘリウムガスから液体ヘリウムを生成する過程では、常温ヘリウムから数十 K のヘリウムガスを作ることは比較的容易だが、その低温ガスを更に冷やして、液体ヘリウムを作るために大量のエネルギーが必要になる。そこで、生成が容易な低温ヘリウムガスをデュワのネックチューブ部に大量に流しデュワへの侵入熱を奪うことにより、デュワの液体ヘリウム部に侵入する熱を少なくし、液体ヘリウムは出来るだけ蒸発直後に回収してすぐに液化して戻す方式のヘリウム循環システムを開発してきた。冷凍機は信頼性の高い 4K1.5WGM 冷凍機を用い、循環装置内に混入する不純物を精製し、精製器が不純物で閉塞した場合自動運転で閉塞を解除できるシステムを開発してきた。

今回は、TT の長さを約 500mm として、MPMS に改造無く利用可能とすると共に、冷凍機を 1 台として、装置全体を小型にすることを試みた。

3. 開発装置

Fig.1 は、名古屋大学の MEG 装置に搭載されて、1.5 年以上実用運転を続けている HCS の外観を示す。1.5W4KGM 冷凍機を 2 台用いて、14 L/D 以上の液体ヘリウム循環を達成し、HCS を運転中でも通常の MEG 計測に支障が無いことが確認されている [1,2,3]。

Fig.2 は、今回開発した HCS を試験用 MPMS のデュワで試験運転している様子を示す。本 HCS は、1.5W4KGM 冷凍機を 1 台用いているので、冷凍チャンバが大幅に小さくなっている。一般の MPMS の隣に置き、液体ヘリウムを 8 L/D 以上の循環させることができた。

本 HCS は、相互に SI で熱分離した 3 つのパイプを、まとめてシールド管で熱シールドすることによって、挿入管の太さを抑えることと、熱侵入量を抑えることの両立を図った。実証実験の結果、上記目標はほぼ満足出来る程度に達成された。

また、吸振性に優れたシリコン材料を利用することにより、冷凍機から伝わる振動を大幅に減少させることに成功し、HCS

を運転中に MPMS で計測しても、計測データに悪影響が生じないことを確認した。

参考文献

1. T Takeda, et al.:Cryogenics, Vol. 48, (2008) p.6-11
2. T Takeda, et al.:Cryogenics, Vol. 49, (2009) p.144-150
3. 武田ら:第 27 回日本生体磁気学会, vol.25, (2012), p.96-97

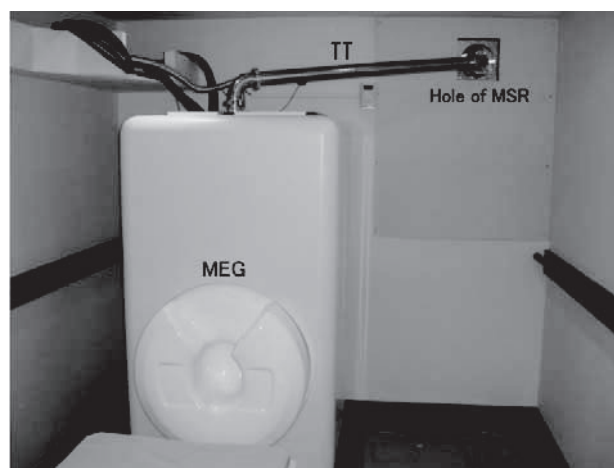


Fig.1 HCS installed on a commercialized MEG made by Yokokawa Electric Corporation Inc. (PQ1160C). The ventilation hole located at the upper right of the MSR, which has a diameter of 170 mm, was used. TT with a reduced diameter of 60.5 mm was vented twice to use the hole and tilted approximately 5 degrees to allow the LHe flow by gravity. TT: transfer tube, MSR: magnetically shielded room..

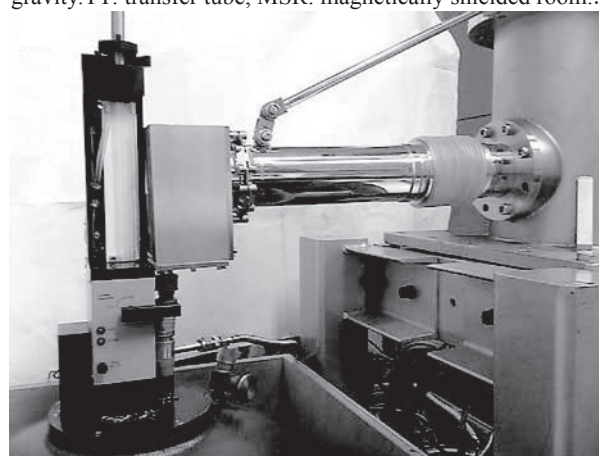


Fig.2 Developed HCS for LTP devices mounted on a MPMS. It was confirmed that the HCS can liquefy Helium more than 8 L/D.

南極昭和基地での超伝導重力計の長期運転について

For long-term operation of a superconducting gravimeter in Syowa Station at Antarctica

池田 博(筑波大), 青山雄一, 土井浩一郎, 渋谷和雄(極地研)

IKEDA Hiroshi(Tsukuba Univ.), AOYAMA Yuichi, DOI Kouichiro, SHIBUYA Kazuo(NIPR)

E-mail: ikeda@bk.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

南極昭和基地では1993年から10KタイプGM冷凍機を装備した超伝導重力計(TT-70 # 16)による重力の連続観測が初めて行われた。2003年からは4KタイプGM冷凍機を装備した液体ヘリウム再凝縮型の小型超伝導重力計(CT # 043)に更新され、2009年12月末まで連続観測を行った。これまでの超伝導重力計によって地球上の重力を測定して地球内部の動きや地球自由振動の測定により地球の動的特性を解明しようとしている[1]。第51次南極地域観測隊夏隊により第3世代の超伝導重力計(OSG#058)が導入され2010年1月より連続観測を開始しており、2012年9月まで長期連続観測を継続しており、2012年2月まで設置後22132時間、メンテナンス無しで連続観測に成功した。これは超伝導重力計観測の連続観測の世界新記録である。ここでは長期連続運転の結果についてとデータについて報告する。

2. 長期連続運転

第51次南極地域観測隊夏隊により第3世代の4KタイプGM冷凍機を装備した液体ヘリウム再凝縮型の超伝導重力計(OSG#058)が導入され2010年1月より連続観測を開始しており、今までの超伝導重力計では1年ごとに冷凍機の交換と圧縮機の交換を行って来た。今回は運転状況から2年間連続運転を行い2012年2月に初めて冷凍機の交換と圧縮機の交換を行った。これは超伝導重力計の連続観測としては新記録である。交換した冷凍機と圧縮機は53次隊夏隊によって日本に持ち帰り、住友重機械工業によってメンテナンスを行った。その結果、持ち帰った時点での負荷性能試験を行ったところ1st 56.2K(60K以下) 2st 3.49K(4.2K以下)の性能が得られ、設置当初の値1st 52.4K、2st 3.40Kからの性能劣化はほとんど無く、さらなる長期運転が可能であったことが示唆される。運転時間は2012年2月8日で22132時間であった。冷凍機の分解調整の結果、内部摺動部の異常磨耗やパーツ破損等も無かった。修理作業としては蓄冷材のベーキング、再組立て、リーク検査等を行った。交換部品としてはバルブ本体、バルブプレート、軸受ベアリング等を交換した。圧縮機についてはアドソーバの交換を行った。現在、使用されている冷凍機と圧縮機については今回の状況を踏まえて3年連続運転を計画している。図1に2年間連続運転したディスペンサーの写真を示す。ほとんど劣化の様子は見受けられない。

3. 長期連続観測データ

2010年1月より連続観測を開始してからの観測データを図2に示す。上から生データ、潮汐、残差、気圧変動、長周期トレンドの順である。2年間、欠測も無く、ステップも生じていない。南極昭和基地のブリザードによる気圧変動の激しさが見られ最大で60hpaもの変動があり、1日で40hpaもの変動が生じる時もある。トレンドは年周期などが観測されているが今後の解析が期待される。このように2年間の連続観測でデータにステップが無く、ノイズレベルも0.1 μ ガル以下であることは超伝導重力計の性能を十分に発揮していると考えられる。2012年2月8日に冷凍機と圧縮機の交換を行ったが、観測データはUPSがあるので継続されており、冷凍機交換によるステップも生じることは無かった。そのため今後も継続したデータが取得出来る。このように長期運転による高精度のデー

タがこれほど長期に渡って得られたことは無く、今後もさらに継続されることを期待している。

4. まとめ

第51次南極地域観測隊夏隊により第3世代の超伝導重力計(OSG#058)が導入され2010年1月より連続観測を開始しており、2012年9月まで長期連続観測を継続しており、2012年2月まで設置後22132時間、メンテナンス無しで連続観測に成功した。

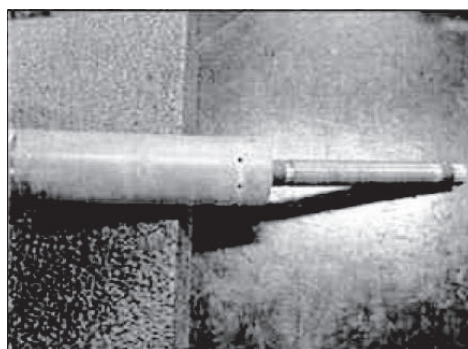


Fig.1 Displacer continuous operation for two years

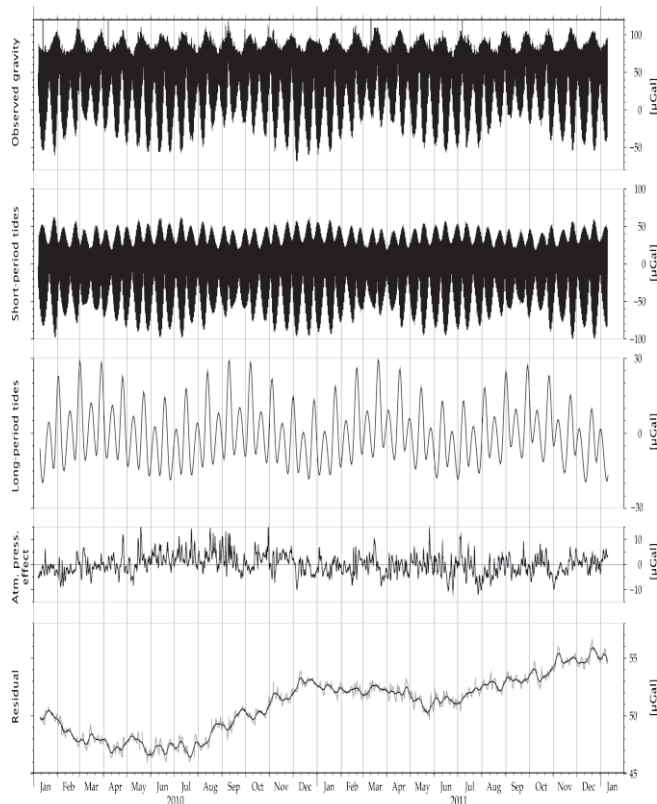


Fig.2 Observed data of superconducting gravimeter.

参考文献

1. K. Nawa, N. Suda, Y. Fukao, T. Sato, Y. Aoyama and K. Shibuya, Earth Planet and Space **50** (1998) 3.

大型低温重力波望遠鏡用低温設備の開発 (5)

- KAGRA 用低振動冷凍機ユニット性能試験 -

Development of cryogenic system for Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (5) - Results of performance test of the very low vibration cryocooler unit for KAGRA -

東谷 千比呂(東大); 木村 誠宏(KEK); 榊原 裕介(東大); 鈴木 敏一, 久米達哉, 小池重明(KEK);
山元一広, 大橋正健, 黒田和明(東大); 田中雅樹, 後藤修一(ジェック東理社)

TOKOKU Chihiro (ICRR); KIMURA Nobuhiro (KEK); SAKAKIBARA Yusuke (ICRR); SUZUKI Toshikazu,
KUME Tatsuya, KOIKE Shigeaki (KEK); YAMAMOTO Kazuhiro, OHASHI Masatake, KURODA Kazuaki (ICRR);
TANAKA Masaki, GOTO Shuichi (Jecc Torisha)

E-mail: tokoku@icrr.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)は、熱雑音を低減するためマイケルソン型干渉計のサファイア単結晶製鏡を 20K まで冷却する。この鏡の冷却に用いる冷凍機として 0.9W/4K パルス管冷凍機と独立懸架型防振機構を組み合わせた低振動冷凍機ユニット(以下、冷凍機ユニット)を製作し、その性能評価を行っている。本講演では KAGRA で使用する冷凍機ユニットの振動特性や冷凍性能の試験結果について報告する。なお、実験は東京大学柏キャンパスの宇宙線研究所実験室に行っている。

2. 低振動冷凍機ユニットの仕様

低温鏡を設置するクライオスタットの要求仕様から、冷凍機ユニットの振動特性および冷凍能力は以下の通りである。

1) 振動特性

- 8K 伝導冷却路において最大±100nm 以下
- 80K 伝導冷却路において最大±100nm 以下

2) 冷凍能力

- 8K 伝導冷却路接続端温度 9K において 2.5W
- 80K 伝導冷却路接続端温度 70K において 35W

3. 振動性能

振動測定は、レーザ距離計のレーザ光を冷凍機ユニットの先端にある可視化窓から入射させ、伝導冷却路先端部の軸(Ch1)・水平(Ch2)・垂直(Ch3)の 3 軸方向を直接かつ同時に観測した。また、加速度センサーを使用したハンマリング試験を行い、共振周波数分布を調べながら減振ステージ部の剛性向上の改良を重ねた。Fig.1 に現在最も低振動を達成している冷凍機ユニットの 8K 伝導冷却路端での典型的な振動波形を示す。

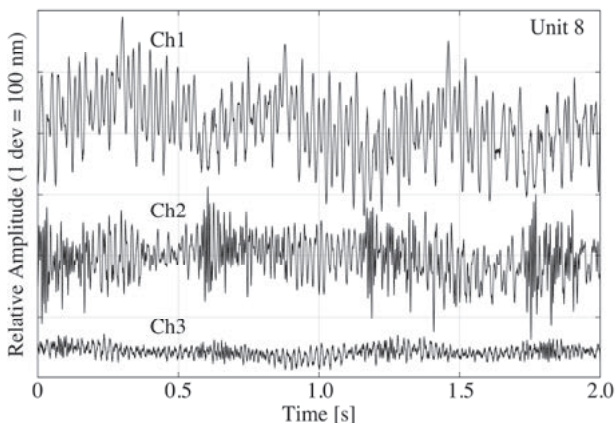


Fig.1 Vibrations of the three directions at the end of 8 K heat conduction bar. Ch1, 2, and 3 represent the vibrations along the 8K conduction bar axis, perpendicular to the bar axis (horizontal), and vertical, respectively.

4. 冷凍性能

冷凍能力は振動測定とは独立して行った。測定は可視化窓を閉止し、輻射シールドおよび SI を装着した状態で測定している。伝導冷却路が最低到達点に達した後、冷却路先端に組み込まれたヒータを使用して熱負荷を与え冷凍能力を測定した。さらに数台のユニットについては、仕様より多めの負荷を与えて冷凍能力を測定した。Fig.2 に 2 台の冷凍機ユニットの冷凍能力曲線を示す。冷凍機によって冷凍能力にばらつきがあることがわかった。

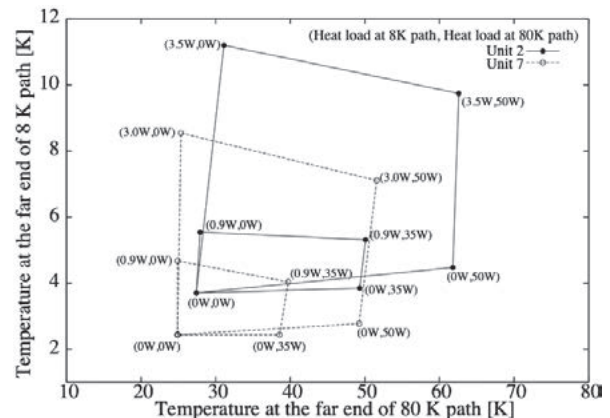


Fig.2 Load map measured at the far end of 8 K/80 K paths of the two different cryocooler units.

5. まとめ

KAGRA に搭載する 16 台の低振動冷凍機ユニットを製作中である。完成した冷凍機ユニットについて振動特性ならびに冷凍機能力を測定した。振動特性については実験と改良を重ねて仕様を満たすレベルに到達した。また冷凍能力については仕様を満たすものの冷凍機単体やユニットの構造による機体差があることがわかった。これらの低振動冷凍機ユニットは平成 25 年 3 月までに 16 台全てを完成する予定である。

参考文献

1. T. Suzuki et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.216
2. N. Kimura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.217
3. N. Kimura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.218
4. Y. Sakakibara et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.219
5. T. Kume et al.: "Development of the very low vibration cryocooler unit for large-scale cryogenic gravitational wave telescope, KAGRA" Proceedings of ICEC24-ICMC2012, 17P-P03-01 (in press) (2012)

高圧ガス保安法に関する市町村への権限移譲に伴う 大学での対応について

Correspondence of our university to
authority delegation of High Pressure Gas Safety Act to mayors

百瀬 英毅 (大阪大)

MOMOSE Hideki (Osaka Univ.)

E-mail: momose@mat.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

現在、我が国では地方分権が積極的に進められおり、国から都道府県へ、都道府県から市町村へ、法的な権限を移す流れが加速している。そのような時代背景の中、大阪大学のある大阪府では『大阪発“地域分権改革”ビジョン』が2009(平成21)年3月に取りまとめられ、大阪府知事がもつ法的権限を積極的に府内の各市町村長に移譲する方針が決まった。これにより福祉、教育など広範な分野で権限移譲について具体的施策が検討され、産業保安分野においては高圧ガス保安法、液化石油ガス法、火薬類取締法の3法を一括して各市町村へ権限移譲することとなった。この報告では、この中で高圧ガス保安法の権限移譲に伴う本学の対応について紹介する。特に本学では2市にまたがるキャンパスがあるため、その法的な取り扱いを巡って、紆余曲折を経ているので参考事例として紹介する。

2. 権限移譲に至る経緯

大阪府における市町村への権限移譲は以前から検討が行われていて、今回の移譲につながる報告書を作成した「大阪府・市町村分権協議会」は1996(平成8)年5月に発足している。大阪府のウェブサイトで公開されている情報[1]によると発足当時は“まちづくり分野”を中心に知事の権限を市町村長へ移譲していたようである。2008(平成20)年10月に開催した協議会から対象とする取扱事務の範囲を広げて議論が行われ、4回の会議と市町村からの意見聴取を行う説明会を経て、特例市並みの権限移譲に向けた報告書「大阪発“地方分権改革”の推進に向けて」が取りまとめられた。移譲対象となった事務は、現行の特例市が権限を有する事務、国の地方分権改革推進委員会からの第一次勧告として示された事務、大阪版地方分権推進要綱として示された事務に大別され(一部に重複がある)、まちづくり分野以外に、医療・保健・衛生分野、公害規制分野、教育分野、生活・安全・産業振興分野と非常に広範にわたることとなった。

2009(平成21)年度に入ると、府庁内にて上で示した『大阪発“地域分権改革”ビジョン』の具体的な実施計画の策定が始まり、課題整理、財政支援の制度設計、計画のたたき台の作成、市町村との協議・調整などが進められたようである[2]。2010(平成22)年度に入ると個々の事案の計画が策定され、条例の制定など権限移譲に向けた具体的な作業も始まった。

このような中で、産業保安分野においては、高圧ガス保安法、液化石油ガス法、火薬類取締法の3法(大阪府では、この3法を合わせて“保安3法”と呼称する)を一括して取り扱うこととし、2011(平成23)年度～2013(平成25)年度の3ヶ年をかけて府下の各市町村長へ、具体的な事務の取り扱いとしては各市の消防本部に権限移譲されることとされた。なお、各法で定める免状や試験に関する事務には移譲対象とはならず引き続き大阪府が実施することとなった。

3. 本学における対応

大阪大学は吹田、豊中、箕面の3つの大きいキャンパスを有しているが、実験研究系の設備があるのは吹田と豊中のキ

ャンパスである。豊中キャンパスのほぼ全域が豊中市であるが、吹田キャンパスは吹田市と茨木市にまたがっている。ちなみに、保安3法を各市へ移譲する時期は、茨木市へは2011(平成23)年4月、箕面市へは同年10月、吹田市と豊中市へは2012(平成24)年4月とされた。

そこで、まず問題になったのが、吹田キャンパスにおける高圧ガスに関する法的手続きの移行時期について、先行する茨木市の2011(平成23)年4月とするか、後行する吹田市の2012(平成24)年4月にするかである。本学では、大学法人化の際に、高圧ガスに関しては従来の部局単位から事業場単位(おおむねキャンパス単位)での管理に変更[3]していたため、2010(平成22)年度後半ごろから吹田キャンパスの取り扱いについて大阪府と意見交換を始めた。断続的に協議は続いたものの2011(平成23)年3月の時点までに結論が出ず、茨木市への権限移譲は本学敷地部分については延期され、大阪府が引き続き担当することになった。

2011(平成23)年度に入ると吹田市域部分も含めた権限移譲について検討が進められた。最大の論点になったのが、市の境界線でキャンパスを分割して、高圧ガス保安法上は2事業所に変更するか否かであった。本学の吹田キャンパスは、市境界線を意識してキャンパス整備を行っていないため、内部に斜めに市境界が通る建物があるなど、実際の運用を考えると相当な混乱が予想された。また、高圧ガス保安法では“事業所”を保安体制の基盤として保安統括者の配置、危害予防規程の制定が義務付けられているが、学内のほとんどの構成員が市の境界線を正確に認知しておらず、この部分に安全に関わる基盤を設けること自体が安全管理上の問題と考えている。地方行政における属地主義とも関わるため、2012(平成24)年度に入ってから断続的な協議を継続している。

上述した状況は、権限移譲が地方自治法により実施されているが、知事から市町村長へ権限移譲を高圧ガス保安法および関連法規が想定していない点に要因の一つがある。特に複数市町村にまたがる場合は国の地方分権改革推進委員会でも勧告対象となっていない。また、この件に対して経済産業省は地方分権が背景にあるため、自治体には運用で対処するように指導する程度で留めているようである。

4. まとめ

現在、大阪府で行われている市町村への権限移譲と、高圧ガス保安法に関わる部分について大阪大学での対応状況について説明した。権限移譲は地方自治法を根拠にしているが、個別法である高圧ガス保安法においては権限移譲が想定されていない点についても紹介した。

参考文献

1. 大阪府ウェブサイト: 府政運営・市町村/市町村への権限移譲, <http://www.pref.osaka.jp/shichoson/kengenijyou/>
2. 大阪府総務部市町村課振興・分権グループ: 自治大阪, 2010(平成22)年7月号, p.13
3. H. Momose: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.176

2012 年度 低温技術夏合宿 -77 K 小型冷凍機を作ろう-

Summer seminar for cryogenic technology – the challenge to making 77 K cryocooler –

宮崎 佳樹(鉄道総研); 鈴木 邦彦(日立製作所); 久志野 彰寛(旭川高専); 本田 大和(大陽日酸); 樋口 晃一(クライオバック); 岡本 雅美(東大); 伴野 信哉(NIMS); 矢山 英樹(九大); 岡島 直輝(東大); 水野 克俊(鉄道総研); 永浜 恭秀(JASTEC); 澤田 健一郎(JAXA); 宮北 健(JAXA)

MIYAZAKI Yoshiaki (RTRI); SUZUKI Kunihiko (Hitachi, Ltd); KUSHINO Akihiro (Asahikawa National College of Technology); HONDA Yamato (Taiyo Nippon Sanso Corporation); HIGUCHI Koichi (CryoVac); OKAMOTO Masami (Tokyo University); BANNO Nobuya (NIMS); YAYAMA Hideki (Kyushu University); OKAJIMA Naoki (Tokyo University); MIZUNO Katsutoshi (RTRI); NAGAHAMA Yasuhide (JASTEC); SAWADA Kenichiro (JAXA); MIYAKITA Takeshi (JAXA)

E-mail: miyazaki@rtri.or.jp

1. はじめに

若手の研究者や技術者を対象とし、超電導や低温技術の理解を深めることを目的として開催されてきた低温技術夏合宿は、今回初めて小型パルス管冷凍機製作の企画となった。高エネルギー加速器研究機構にて2012年8月6日から10日までの一週間で学んだ内容や、製作したパルス管冷凍機の実験について報告する。

2. 座学

本合宿は、冷凍機、クライオスタット、高圧ガス、計測などの座学および、小型冷凍機の製作実習により構成される。座学では、「パルスチューブ冷凍機」、「小型冷凍機の試作」、「冷凍機と低温機器」、「真空、高圧ガスと安全」、「クライオスタット」、「計測」についての講義があった。

3. 小型パルス管冷凍機の製作

パルス管冷凍機の製作実習は3班に分かれて行った。パルス管冷凍機の材料、寸法、および用いた蓄冷材を表1に示す。パルス管冷凍機は、パルス管、蓄冷管に SUS304 パイプを用い、その間を内径10 mmの銅パイプをろう付けして図1のような折り返しのある構造とした。また、班ごとに SUS 球、SUS メッシュ、銅メッシュと異なる蓄冷材を用いて冷却実験を行った。

4. 冷却試験および試験結果

製作したパルス管冷凍機を圧縮機と接続した。パルス管のバルブの接続を取り換えることで、ベーシック型、オリフィス・ダブルインレット型、4バルブ型に変更することができる。それぞれの班でオリフィスやダブルインレットの開度、バルブタイミングを調整し、ベーシック型、オリフィス型、4バルブ型の動作特性を把握できるよう実験条件を工夫しながら最低到達温度77 Kを目指した。4バルブ型については、バルブ制御指令に電磁弁が追従しきらず、不安定な動作となったが、ダブルインレット型とした場合には銅網200メッシュを蓄冷材に用いた冷

Table 1 Components and size of pulse tube

パルス管/蓄冷管材料	SUS304 パイプ
パルス管内径	20 mm
パルス管外径	21 mm
パルス管長さ	224 mm
蓄冷管内径	30 mm
蓄冷管外径	31 mm
蓄冷管長さ※	144 mm
蓄冷材	SUS 球 #50 125-355 μ m
	SUS 網 300 メッシュ 1000 枚
	銅網 200 メッシュ 1000 枚

※蓄冷管はそれぞれの蓄冷材を充填したのち、デッドスペースはスペーサで埋めている。

凍機が83 K、SUS球を用いた冷凍機が78 K、SUS網300メッシュを用いた冷凍機が69 Kにそれぞれ到達し、最低到達温度77 Kを達成することができた。

5. おわりに

今回の夏合宿では初めて小型パルス管冷凍機の製作に取り組むこととなったが、パルス管冷凍機の冷却原理を座学と実習を通じ、あるいは動作実験中に実験装置の一部の配管がベーシックパルス管を形成するなどの興味深い現象を通して、パルス管冷凍機の原理、そのシンプルな構造を知ることができた。なにより講師の方々や受講者同士のつながりができたことは、受講者にとって貴重であった。今後もこのような実習が継続されることを希望する。

6. 謝辞

高エネルギー加速器研究機構 細山謙二先生、中西功太先生、ColdTech 上岡泰晴先生、Corycooler Expert 松原洋一先生、東京農工大学 上田祐樹先生、クライオウエア 藤岡耕治先生、産業技術総合研究所 我妻洗先生、古瀬充徳先生には、座学やパルス管製作実習を通じて貴重な知識と技術を頂戴いたしました。この場をお借りして講師の皆さまに深く感謝申し上げます。

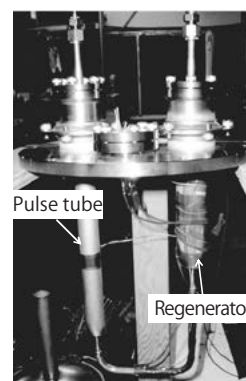


Fig.1 Photograph of pulse tube cryocooler.

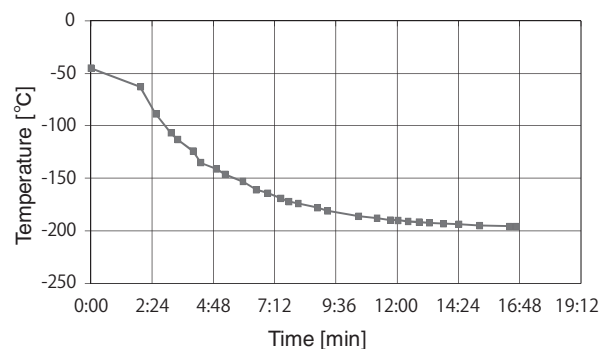


Fig. 2 Cool down process of double-inlet pulse tube