

複数の磁気作業物質を用いた場合の磁気ヒートポンプの特性

Characteristics of magnetic heat pump using several magnetic materials

宮崎佳樹, 池田和也, 脇耕一郎 (鉄道総研)
 MIYAZAKI Yoshiaki, IKEDA Kazuya, WAKI Koichiro (RTRI)
 E-mail: miyazaki.yoshiki.23@rtri.or.jp

1. はじめに

ノンフロンで高効率期待される磁気ヒートポンプ技術の、鉄道車両空調への適用を目指した研究開発を行っている。今回冷却温度差の拡大を目的として、動作温度帯の異なる複数の磁気作業物質を組み合わせ(カスケード)、AMR(Active magnetic regenerator)評価装置に搭載して基礎試験を行った。また、数値解析を用いた充てん方法の検討を行ったので報告する。

2. 基礎試験装置

室温磁気ヒートポンプサイクルに用いられるAMRの評価を行うための基礎試験装置の概略図をFig. 1, 写真をFig. 2に示す。Fig. 3に示すように、永久磁石が回転することにより固定されたAMRを励消磁する。往復ポンプをAMRの励消磁に合わせて動かすことで、AMR内の磁気作業物質と熱交換流体(水)を熱交換させることができる。磁気作業物質にはガドリニウム(Gd; 粒径0.6 - 0.85 mm)を用いた。永久磁石は内径104 mm 外径154 mm, ハルバツハ配列を用いた2極磁石で、表面磁束密度は1.0 Tである。AMR容器はアクリル製で内径15 mm, 外径20 mm, 磁気作業物質充填長さは60 mmである。Gdの充填量は52.9 g, 充填率は63%程度とした。AMR両端部に熱電対を挿入して、AMR内部の温度を測定し、両端の温度差を評価した。

3. 数値解析

数値解析は、熱損失を考慮したモデルを用いている[1, 2]。磁気作業物質はGd系を想定し、断熱温度変化が励磁と消磁で異なること、磁場中では比熱がブロードになることなどを考慮した[3, 4]。磁気作業物質と熱交換流体の熱交換時間は0.1 sec一定とし、熱交換流体の移動速度と移動距離で決まる熱交換流体流量をパラメータとして、AMR両端の温度差を評価した。

Fig. 4に複数の磁気作業物質を用いた場合のAMR冷却温度差を示す。其々のキュリー点を T_c (°C)と略記し、図中にカスケードの組み合わせを模式的に描いた。Case 1は $T_c20^\circ\text{C}$ を100%, Case 2は $T_c20^\circ\text{C}$ と $T_c15^\circ\text{C}$ を1:1に配列してAMRに充填した。環境温度はいずれも 22°C とした。Case 1の $T_c20^\circ\text{C}$ のみを充填した場合と比較して、 T_c15 を組み合わせると冷却温度差が拡大することがわかる。また、最大温度差を迎える熱交換流量は、 $T_c20^\circ\text{C}$ と組み合わせる材料のキュリー点が低下するに従い、減少することがわかる。

4. 試験結果

Case 1を実験的に検証した結果をFig. 4に示す。最大冷却温度差は、Case 1で 21°C を得た。Case 2については当日報告予定である。

5. まとめ

熱損失を考慮し、断熱温度変化や比熱の磁場特性を考慮した数値解析により、Gd単体については磁気ヒートポンプの温度差に関する試験結果をよく表わすことができた。カスケードの結果は当日報告する。

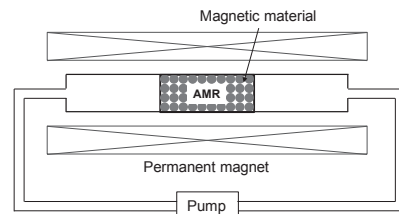


Fig. 1 Schematic of experimental set up for magnetic refrigerator

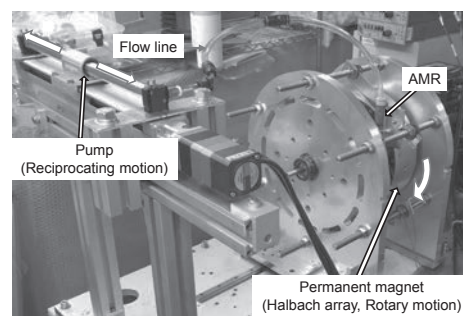


Fig. 2 Photograph of experimental set up

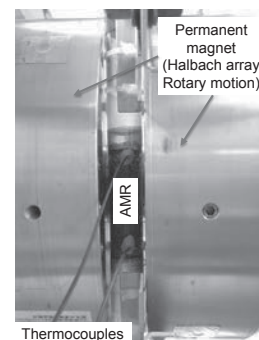


Fig. 3 Photograph of AMR and magnet

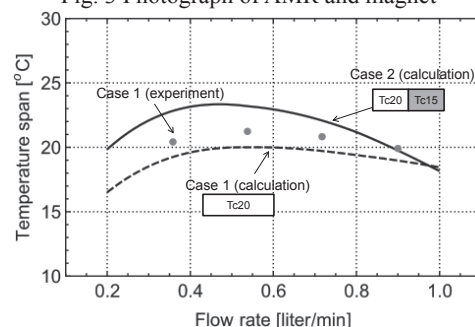


Fig. 4 Comparison of Calculated temperature span of AMR with experimental result

参考文献

- [1] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 91 (2015) p. 193.
- [2] Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p. 238.
- [3] Andrej Kitanovski, Peter W. Egolf, International Journal of Refrigeration 29 (2006) pp. 3–21.
- [4] S. Y. Dan'kov, et al.: Physical Review B, Vol.57, No.6, (1998), pp. 3478-3490.

第2段階蓄冷器形状の等価的变化による冷凍能力への効果 Effect on the cooling power by the equivalent change of the second stage regenerator configuration

増山 新二 (大島商船高専)

MASUYAMA Shinji (National Institute of Technology, Oshima College)

E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

蓄冷式冷凍機の蓄冷器は、一般的に断面が一般的な円筒形状を持っている。4Kレベルの冷却が可能な冷凍機において、その蓄冷器形状について検討した先行研究は、見当たらない。この理由の一つとして、例えば蓄冷器の一部を細くすることは、円筒形状と比較して、蓄冷器の熱容量の減少を招き、結果として冷凍効率の低下につながると考えられるためであろう。しかしながら、近年の増山らの報告[1]によると、蓄冷器形状を等価的に変化させることで、むしろ冷凍能力が改善される条件が見出されている。

そこで今回は、現在までに得られている最適条件を使用して、第2段階蓄冷器の高温端温度を変化させた時の4.2 Kでの冷凍能力への影響を実験的に調査した。また、蓄冷材として、新たに Gd_2O_3 (GOS) を充填した時の性能も評価した。以下に、蓄冷器構造、実験結果を述べる。

2. 第2段階蓄冷器構造の概略とGM冷凍機

本研究では、Fig. 1に示すGM冷凍機の2段階蓄冷器がテストされた。その構造は、つぎの四つであり、それらを Fig. 2に示す。(a) は二層構造 (Two-layer) で、高温側にPb球、低温側に $HoCu_2$ 球が充填されている。(b) はTwo-layer構造に、蓄冷効果を持たない材料であるベークライト棒がPb部の中心軸上に挿入された構造 (Two-layer-rod) で、等価的にPb部の蓄冷器が細くなっている。(c) は低温端側にGOSが充填された構造 (Three-layer) である。(d) はThree-layer構造に、(b)と同様にベークライト棒が挿入された構造 (Three-layer-rod) である。異種の蓄冷材の境界部には、ステンメッシュの仕切り材が施工されているが、Fig. 2では省略してある。

性能試験に使用された2段階GM冷凍機は、コールドヘッド: RDK-408D2 (SHI)、圧縮機: C300G (SUZUKISHOKAN) で、電気入力は7.3 kWである。冷凍機の動作周波数は1.2 Hz、ヘリウムガスの初期封入圧力は1.6 MPa一定とした。

3. 冷凍性能試験方法・結果

室温から運転されたGM冷凍機は、各ステージに取り付けてある電気ヒータにより、2段階ステージを4.2 Kに固定し、1段階ステージの熱負荷を変化させた。各蓄冷器タイプにおける4.2 Kでの冷凍能力と1段階ステージ温度の関係を Fig. 3に示す。Two-layerとThree-layerを比較すると、両者の差は、ほぼ全温度領域で同様であり、Three-layerが約12%の能力改善となっている。これは、低温端側に充填されたGOSの比熱特性によりものである。つぎに、高温側にベークライト棒が挿入されたTwo-layer-rodでは、1段階ステージ温度の上昇にともない、冷凍能力も改善し、48 Kで1.35 Wが得られている。これはTwo-layerと比較すると、約10%の能力改善である。その後は、能力の大幅な低下が見られる。一方、Three-layer-rodにおいては、40 Kまでは能力が向上し、1.47 Wを發揮しているが、その後Two-layer-rodのような明確なピークは見られず、53 Kまで冷凍能力は、ほぼ同じである。また、能力の低下もTwo-layer-rodほど大きくないことがわかる。

以上の結果から、レイヤー構造では、蓄冷材の差異による冷凍能力の違いが見られた。一方、ベークライト棒が挿入された構造では、冷凍能力が改善される温度領域が存在するが、その効果には、両者で差が生じているようである。

4. まとめ

GM冷凍機の2段階蓄冷器内に冷凍に寄与しないベークライト棒を挿入し、冷凍能力への効果を実験的に調査した。通常のレイヤー構造では、蓄冷材による効果が確認された。一方、蓄冷器形状を等価的に変化させた場合では、1段階ステージ温度に依存した冷凍能力の改善が見られたものの、GOSを充填した時と、しない時とを比較すると、それらの効果に差が生じているようである。

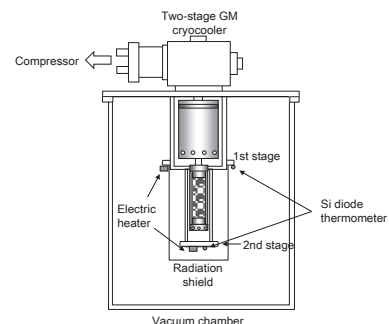


Fig. 1. Schematic diagram of the two-stage GM cryocooler

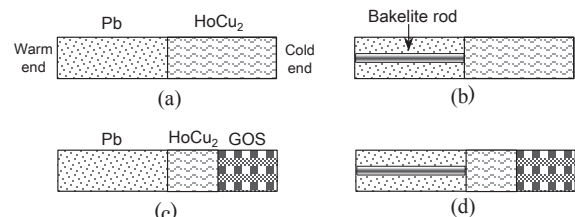


Fig. 2. Schematics of four types of second stage regenerator configurations: (a) two-layer, (b) two-layer with bakelite rod, (c) three-layer, and (d) three-layer with bakelite rod

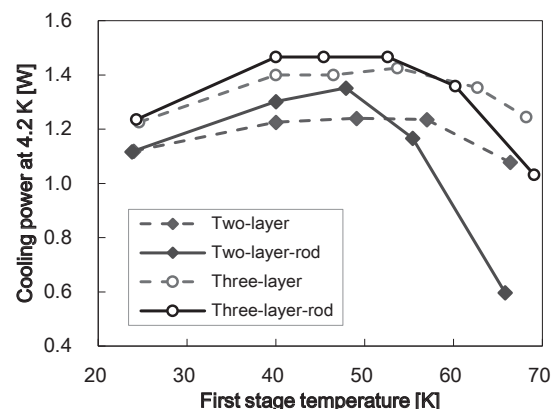


Fig. 3. Experimental results of the cooling power at 4.2 K of four types of regenerator configurations as a function of the first stage temperatures

謝辞 本研究は、科学研究費助成事業(基盤研究 (C) 15K06693), ならびに核融合科学研究所一般共同研究(NIFS15KECA034)の一部により実施された。

参考文献

1. S. Masuyama et al., *Cryocoolers* **18** (2014), pp. 271-276

4K-GM 冷凍機用希土類窒化物蓄冷材の粒子径の最適化

Optimum particle size of rare earth nitride regenerator for 4K-GM cryocooler

白石 拓也, 宮内 隆至, 中川 貴, 清野 智史, 山本 孝夫, 藤本 靖(大阪大学); 増山 新二(大島商船高専)

SHIRAISHI Takuya, MIYAUCHI Takayuki, NAKAGAWA Takashi, SEINO Satoshi, YAMAMOTO A. Takao,
FUJIMOTO Yasushi (Osaka Univ.); MASUYAMA Shinji (Oshima College)

1. はじめに

ヘリウムの液化には、現在 GM(Gifford-McMahon)冷凍機が実用化され多用されているがその冷凍性能を左右する要素の1つが蓄冷材の特性であり、蓄冷材には極低温での高い比熱と熱伝導度が要求されている。現在の市販冷凍機には HoCu_2 が主に使用されており、冷凍効率の向上や省エネの為にはその特性を超える新たな蓄冷材の開発が望まれている。

我々は 2003 年以後、新たな蓄冷材として希土類元素の窒化物を適用する研究を進め、Ho と Er の二元系窒化物 $\text{Er}_x\text{Ho}_{1-x}\text{N}$ が HoCu_2 を超える特性を持つことを報告した[1]。また、ErN の球状試料は粒径が小さい程、冷凍能力が向上することを報告している。[2]本研究では、 $\text{Er}_x\text{Ho}_{1-x}\text{N}$ での最適な粒子径を探るため、これまでより小さな粒径の試料を合成し、GM 冷凍機に充填して 4.2K での冷凍能力を測定し比較した。

2. 実験手法

出発原料として $\text{Er}_{0.5}\text{Ho}_{0.5}$ の組成の合金球(酸素不純物; 0.30 wt%)を分級し、粒径範囲が 75-180 μm 、180-212 μm 、250-300 μm の3種の粒度を準備した。これらの窒化には、先行研究と同じく熱間等方圧加圧装置(榑神戸製鋼所, O_2 -Dr-HIP)を用いて高温高压窒素(196 MPa, 1550 $^\circ\text{C}$)雰囲気下で窒化した。窒化後の試料の表面を処理するために、窒化物球状試料 5 g をヘプタンで満たしたスクリー管に入れて、超音波処理を施し球同士の衝突で表面突起を除去した。試料の評価には、X 線回折装置を用いた結晶構造、走査型電子顕微鏡を用いた試料の表面と断面の観察を行った。さらに、物理物性測定装置(日本カンタム・デザイン(株), PPMS)を用いて低温域での比熱を測定した。冷凍能力は、商用実機である 4K-GM 冷凍機(住友重機械工業(株)製, SRDK-101D)、に充填されている HoCu_2 をこれらの試料に置換して測定した。

3. 実験結果・考察

結晶構造解析、表面と断面の観察、比熱測定の一連の測定を行った。そのうちの SEM での観察結果を Fig. 1 に示す。どの粒径でも単相の $\text{Er}_{0.5}\text{Ho}_{0.5}\text{N}$ が得られており、粒径以外の条件がそろった窒化物球の試料が得られたことを確認した。さらに、冷凍試験の結果を Fig.2 に示した。縦軸は冷凍能力、横軸が平均粒径である。ErN による先行研究では粒径が小さくなるにつれ冷凍能力は単調に向上していたが、 $\text{Er}_{0.5}\text{Ho}_{0.5}\text{N}$ による本実験の結果では、180-212 μm 、250-300 μm 間では冷凍能力が増加したが、75-180 μm 、180-212 μm 間では冷凍能力が減少した。これは、冷凍能力には最適粒径があることを示唆

し、GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器の低温端に用いる $\text{Er}_{0.5}\text{Ho}_{0.5}\text{N}$ の蓄冷材としては 180-212 μm が最適であることを示す。

この粒径依存性の背景には、次のようなクロスオーバーがあると考察される。蓄冷材はヘリウムと熱交換を効率よく行うことが重要であるので、蓄冷材の粒径が大きすぎると冷熱が球状試料の中心部まで十分に出入りできず、有効に働く蓄冷材が減少する。しかし、ある一定の粒径でこの効率性は飽和し、より小さくすると圧力損失が増大し冷凍能力が減少する。

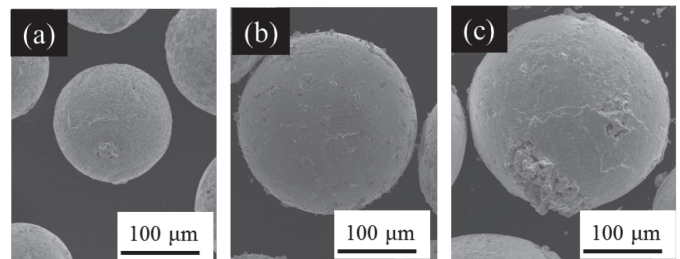


Figure 1 SEM images of typical $\text{Er}_{0.5}\text{Ho}_{0.5}\text{N}$ sphere. Particle sizes are (a)75 – 180 μm , (b)180 – 212 μm and (c) 250 -300 μm .

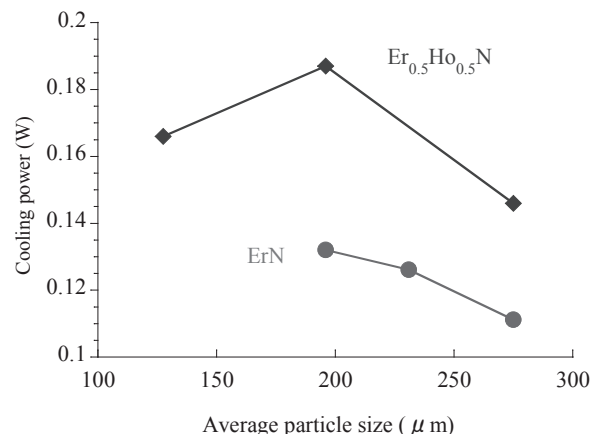


Figure 2 Cooling power at 4.2K of GM cryocooler using different particle sizes of rare earth nitrides as regenerator.

参考文献

- [1] Y. Hirayama, *et al.*: Journal of Alloys and Compounds. Vol. 462(2008)L12.
- [2] T. Nakagawa, *et al.*: Abstracts of cssj conf. Vol. 91(2015)96.

磁気冷凍用磁性体の磁場中熱伝導率測定

Thermal conductivity measurement of magnetic materials for magnetic refrigeration

宇治山 崇, 裏 雄太郎, 村山 大樹, 阿部 聡, 松本 宏一(金沢大)

UJIYAMA Takashi, URA Yutaro, MURAYAMA Daiki, ABE Satoshi, MATSUMOTO Koichi (Kanazawa Univ)

E-mail: urd-22.25.gk1@stu.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

我々は磁性体の磁気熱量効果を利用した磁気冷凍に用いる磁性材料の物性評価を行っている。磁場中比熱、磁化測定、断熱消磁などで磁気熱量効果を評価してきた。水素液化磁気冷凍機に用いられる磁性材料に関してはこれまでに金属間化合物、ガーネット系酸化物、希土類硫化物などの磁気熱量効果を報告した。

熱伝導率は冷凍サイクルを検討する上で重要な物性値である。本研究では低温域や磁場中で測定するため、Quantum Design 社の PPMS を利用した熱伝導率測定装置を開発し、試験測定を行った。また希土類硫化物 EuS の磁場中熱伝導率測定を行ったので報告する。

2. 熱伝導率測定装置

本研究では、試料に定常熱流を与え、試料の温度勾配を測定することで熱伝導率を求める定常法を用いた。定常法では比熱や密度などの他の物理量を必要とせず、熱伝導率を求めることができる。与える定常熱流 \dot{q} 、温度計間の温度差 ΔT を測定し、以下の式より熱伝導率 κ を算出した。

$$\dot{q} = -\kappa S \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

κ [W/m·K] : Thermal conductivity

\dot{q} [W] : Heat flow through the sample

ΔT [K] : Temperature difference between thermometers

S [m²] : Sectional area of the sample

Δx [m] : Distance between thermometers

熱伝導率測定セルの概略図を Fig.1 に示す。断熱ヒーターで発生した熱は試料中を流れ試料ホルダー、爪付きバッフルを介して PPMS サンプルチャンバーへと流れる。試料間の温度差を測定する温度計には、磁場中や低温域での温度測定誤差の小さいセルノックス温度計を 2 つ用いた。また試料の温度勾配を正確に測定するため、温度計ホルダーの先端をくさび型に作製し試料との接触面を小さくした。バッフルの外側にはばね型の爪を取り付け、試料ホルダーと PPMS 内部との熱接触を図った。ヒーターからの熱リークとなる輻射伝熱を小さくするため輻射シールドを作製し、測定精度の向上を図った。各部品は無酸素銅(OFC)で作製し、輻射シールドは酸化を防ぐため金メッキを施した

測定の典型例は、サンプル長さ 15~20mm、温度計距離 10mm 程度である。

3. 測定装置の試験測定

熱伝導率が知られている測定試料を用いて試験測定を行った。温度・磁場など測定条件の検討を行い、装置の性能評価を行った。SUS304 の試験測定では、文献値[1]からの差は 4~150K で 2%程度、室温近傍では 10%程度大きくなった。この差の温度依存性や大きさからヒーターからサンプルチャンバーへの輻射伝熱が主な熱リークになっていると考えられ、ヒーター温度とチャンバー温度から熱リークを見積もった。解析によると、100K 以下の温度領域では熱リークの影響は十分小さ

く、室温近傍では 8%程度の熱リークが見積もられた。この補正を行うことで、室温近傍でも 2%程度の誤差で熱伝導率を求められることがわかった。さらに Cu の試験測定では、磁場中の熱伝導率測定を行い測定装置の磁場依存性が十分小さいことを確認した。

4. 磁性材料の測定結果

測定試料である EuS は 16.5K で強磁性から常磁性状態へ二次相転移する[2]。相対密度 95%の多結晶焼結体を用いて磁場中熱伝導率測定を行った結果を Fig.2 に示す。5T の磁場中での熱伝導率は 0T の値とほぼ同じであった。転移温度付近でも熱伝導率の磁場依存性が十分に小さいことがわかった。

講演では、測定装置や測定結果の詳細について報告する。

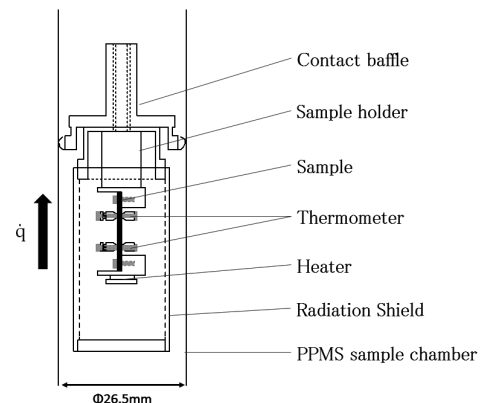


Fig.1 Schematics of thermal conductivity cell

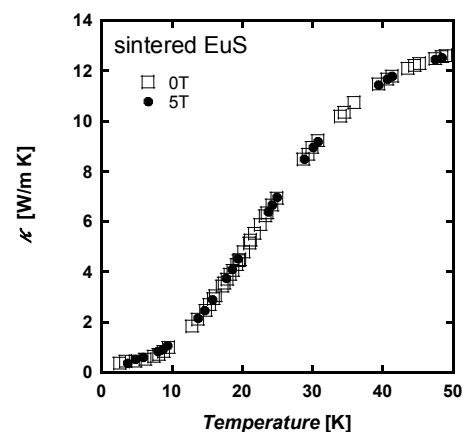


Fig.2 Thermal conductivity of sintered EuS

参考文献

1. http://www.cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/304Stainless/304Stainless_rev.htm 2016/4/11
2. K.Matsumoto, et al.:Abstracts of CSSJ Conference, Vol.92 (2015) p.233

コールドイナータンス接続管型パルス管冷凍機 Pulse tube refrigerator with cold inertance connecting tube

朱 紹偉(同濟大学)
ZHU Shaowei (Tongji University)
E-mail: swzhu2008@yahoo.com

1. INTRODUCTION

In order to recover the expansion work of the inertance tube pulse tube refrigerator for efficiency up, a pulse tube refrigerator with cold inertance connecting tube is introduced. Its theoretical efficiency is same as Stirling refrigerator. As a reversible refrigerator, it also can be operated as a cold engine. Its basic working mechanism as a refrigerator and a cold engine is discussed with numerical simulation.

2. STRUCTURE

Figure1 shows the schematic of the pulse tube refrigerator with cold inertance connecting tube. An after cooler, a regenerator, a cold head, an inertance connecting tube and a pulse tube connected sequentially. The step piston forms expansion space which is connected to the after cooler and compression space which is connected to the pulse tube.

Its working mechanism is that the pressure waves in the compression space and expansion space are shifted out phase due to the cold inertance connecting tube, then the integration of the PV area is negative in the compression space and is positive in the expansion space. Its advantage is that the length of the inertance connecting tube is shorter than an inertance tube at ambient temperature. The disadvantage is that the irreversible loss due to the heat transfer and friction in the inertance connecting tube is a simple loss. When it is operated as a cold engine, the integration of the PV area is negative in the expansion space, and positive in the compression space. Basic parameters of the machine are regenerator 120×40, cold inertance connecting tube 30×1200, pulse tube 50×200, frequency 100Hz, charge pressure 3MPa, ambient temperature 300K, low temperature 112K, pressure ratio at the right end of the cold head is 1.2.

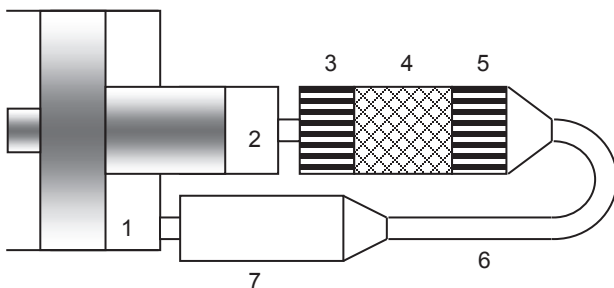


Figure 1 Schematic of pulse tube refrigerator with step piston
1. expansion space 2. compression space 3. after cooler
4. regenerator 5. cold head 6. cold inertance connecting tube 7. pulse tube

3. NUMERICAL RESULTS

Figure 2 shows the powers of compression space and expansion space, total power, heat, and efficiency vs. swept volume ratio of the step piston. Positive power means output, negative power means input, positive heat means cooling power, negative heat means adding heat to cooling source. When the swept volume ratio is in the range 0-0.465, the machine is a refrigerator. When the swept volume ratio is in the range 0.465-1, the machine is a cold engine. At 0.465, the heat is zero, we definite it as a critical point to separate the machine as a refrigerator and a cold engine. When the swept volume ratio is zero, the swept volume of the expansion space is zero, the machine is similar to a basic pulse tube refrigerator.

With the increasing of the swept volume ratio, the swept volume of the expansion space increases, the absolute value of the cooling power, expansion power and compression power increase, then get peak point, and decrease to zero. When the swept volume ratio is one, the swept volume of the compression space is zero, it is a simple heater due to the input power from the expansion space. With the decrease of the swept volume ratio, the compression swept volume increases, the expansion power from the compression space increase, the absolute value of the heat, expansion power and compression power increase, then get peak point, and decrease to zero. The efficiency also has a peak point. The peak point of expansion power, compression power, heat, efficiency is near the critical point.

Theoretically, this machine also can be a heat engine and heat pump. As a heat pump, the irreversible loss in the inertance connecting tube contributes part of heat power. As a heat engine, the inertance connecting tube may be too long for practical use because it is at high temperature.

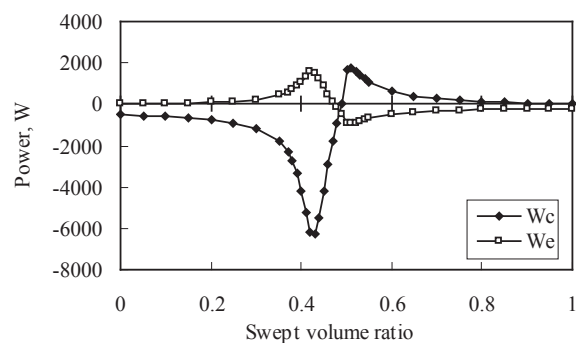


Figure 2a Power of compression and expansion space

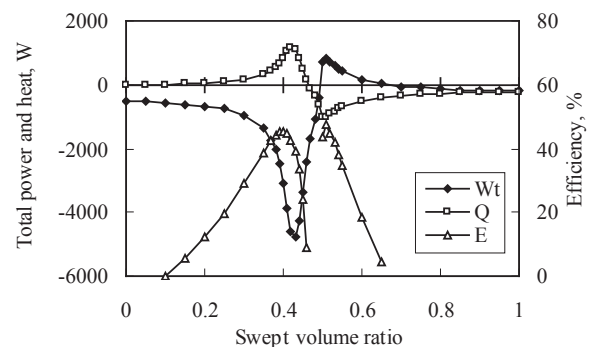


Figure 2b Total power, heat and efficiency

4. CONCLUSION

Pulse tube refrigerator with inertance connecting tube is a potential new type pulse tube refrigerator. It can work as a refrigerator or cold engine, depending on the swept volume ratio of step piston.

REFERENCES

1. SW. Zhu. Cryogenics, Vol.64(2014). p.63-69
2. SW. Zhu. Energy, Vol.100(2016), p190-198

小型超低温連続冷凍システムの開発 I

Development of a Compact and Continuous Ultra-low Temperature Refrigerator (I)

戸田 亮, 村川 智, 福山 寛 (東京大学)

TODA Ryo, MURAKAWA Satoshi, FUKUYAMA Hiroshi (The Univ. of Tokyo)

E-mail: toda.ryo@mail.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

従来、一部の研究に限られてきたサブ mK の超低温実験環境をより広い分野に応用できるよう、操作の簡便な小型超低温連続冷凍システムの開発を進めている。本装置は、磁気作業物質に増強核磁性体 PrNi_5 を採用し、これを磁気遮蔽した小型超電導磁石で断熱消磁するユニットを2つ組み合わせて、コンパクトでありながら 1 mK 以下の超低温を連続発生できる。今回は、その概要と設計について報告する。

2. 開発の背景と目的

今日、自動制御機能をもつ市販の希釈冷凍機を使えば、20 mK 程度までの極低温環境を得るのはそれ程困難ではない。これより 1 桁以上低い温度は、磁気作業物質に銅核スピンを用いる断熱消磁冷凍機[1]で得られるが、大型の希釈冷凍機と超電導磁石を使うため、コスト、スペース、専門知識など設置のハードルは高い。例えば、実用的な冷却力をもつ銅核ステージは、直径 50 mm、長さ 300 mm 程度の大きさとなり、これ全体に 8 T の強磁場を印加する大型の超電導磁石が必要である。そして、その磁化熱を効率よく奪って 20 mK 以下まで予冷できる大冷却力 (200 μW @100 mK 以上) の希釈冷凍機も必要である。被冷却物に高磁場を印加するときは、その超電導磁石と消磁冷却用磁石との磁場干渉を避けるために両者の距離を離す必要があり、装置はさらに長大となる。このため、従来の核スピン断熱消磁冷凍機は十分な天井高のある特殊な実験室でなければ設置困難であった。断熱消磁法は単発式の冷却手段なので、これを連続冷却運転するには、2 つの核ステージを直列(あるいは並列)接続して独立運用しなければならない。しかし、これも装置があまりに大型化してしまうため、実用化されていない。

こうした理由から、サブ mK の超低温実験環境は、これまで超流動および固体ヘリウム 3、金属核磁性、一部のアモルファス物質などごく一部の研究分野での活用に限られてきた。ところが近年、試料の高品質化が進んだ半導体低次元電子系[2]や重い電子系[3]などより広い物質科学分野で超低温環境が必要とされるようになってきた。衛星搭載する X 線・赤外線・ミリ波検出器でも、感度向上のための動作温度の低温化が急速に進んでいる。現在 50 mK の動作温度[4]をサブ mK まで下げることができれば、さらなる高分解能化が期待できる。

3. 小型超低温連続冷凍システム

以上のような背景のもと、本研究では、作業物質として増強核磁性体 PrNi_5 を用いて小型化した連続冷却システムの開発を進めている。Van Vleck 常磁性物質である PrNi_5 中の Pr 原子核スピンの感じる磁場は、超微細相互作用の効果により外部磁場の約 12 倍に増強される[1]。磁気秩序化温度は 0.4 mK と核スピン系としては高いが、目標の最低動作温度より低いので問題ない。実効磁場が増強されるため、1.2 T の印加で、8 T 印加した同体積の銅と同じ冷却容量(スピンエントロピーの減少量)が得られる。印加磁場(1.2 T を予定)が低いので超電導磁石を小型化でき、遺漏磁場を抑えるよう電磁石全体を高透磁率材で囲めば、2 つの断熱消磁ユニットを近接配置できる。

図1は、小型超低温連続冷凍システムの概略図である。希釈冷凍機の混合器より上のスペースに、消磁ユニット2つと Zn

の超伝導熱スイッチ(Zn-HSW)を搭載し、単体の希釈冷凍機に大きな改造を施すことなく、超低温環境を連続発生することができる。このシステムで、最低連続運転温度 0.7-1 mK、冷却力 1-10 nW 程度の実現できると考えている。

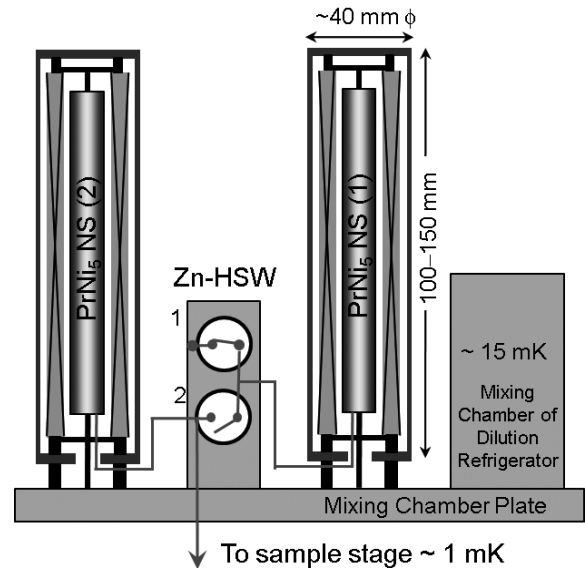


Fig.1 Schematic illustration of compact and continuous ultra-low temperature refrigerator

連続運転中は超伝導熱スイッチを使って 2 つの消磁ユニットの熱的な切替を頻繁に行う。このため、スイッチには臨界磁場の小さい Zn を使い、超伝導転移に伴う磁気発熱や磁場掃引時の渦電流発熱を抑える。断熱消磁冷却自体の冷却力は理想的には温度に比例するが、システム全体としての冷却力は、被冷却部と核スピン系とを結ぶ熱伝導度によって大きく制限される。このため、各ユニット間を結ぶ銀の熱リンク、熱スイッチの Zn 板、作業物質 PrNi_5 の間の接触熱抵抗を小さくすることが重要となる。現在は、良好な熱接触を得られる接合の開発を行っている。

参考文献

1. F. Pobell: Matter and Method at Low Temperatures (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, 3rd ed.)
2. W. Pan, et al.: Phys. Rev. Lett., Vol. 83 (1999) p.3530; A. C. Clark, et al.: Rev. Sci. Instrum., Vol. 81 (2010) p.103904
3. D. H. Nguyen, et al.: J. Phys. Conf. Ser., Vol. 400 (2012) p.052024
4. P. J. Shirron, et al.: Cryogenics, Vol. 74 (2016) p.2

HTS-SQUID を用いた磁気ナノ粒子の基礎特性評価

Characterization of magnetic nanoparticle using a HTS-SQUID magnetometer

一色 良太, 中村 勇太, 松永 恭暁, 堺 健司, 紀和 利彦, 塚田 啓二(岡山大学)

ISSHIKI Ryota, NAKAMURA Yuta, MATSUNAGA Yasuaki, SAKAI Kenji, KIWA Toshihiko, TSUKADA Keiji (OKAYAMA UNIV.)

E-mail: pysv5rpl@s.okayama-u.ac.jp

1. 背景

現在、磁気ナノ粒子というナノレベルの磁性体粒子の免疫検査応用が期待されている。この免疫検査手法は従来の手法に比べ、検査時間が短く、光を透過しない検体についても測定できるなどの利点がある。応用するうえで、磁気ナノ粒子の基礎特性を知ることは磁氣的免疫検査において重要な役割を持つ。これまでに低コストで小型化可能な HTS-SQUID (高温超伝導量子干渉素子) 高感度磁化率計を開発し、磁化率測定を行ってきた。[1]本研究では HTS-SQUID を用い、磁化率測定と高調波測定、緩和測定、緩和測定の各測定が可能な装置を開発し、磁気ナノ粒子の水溶液中での基礎特性評価を行った。

2. 計測システム

Fig. 1 にシステムの概略図を示す。本システムでは、サーボモータにより試料の振動・回転を行うことで磁化率測定と緩和測定の動作を実現した。さらに、電磁石で交流磁場を印加することにより、高調波測定も可能にした。磁化率測定ではサンプルを直流磁場中で微小角度の往復運動をすることで振動させ、発生する二次的な磁場をピックアップコイルで検出する。高調波測定では、サンプルを動かさずに交流磁場を印加して、発生する二次的な磁場の時間変化をピックアップコイルで検出することで高調波成分を検出する。このとき、直流バイアスをかけると高調波成分が変化するので、これを観察することでサンプルの交流特性を測定することができる。緩和測定では、電磁石の位置を 0° とし、電磁石からの角度が 88° の位置にもう一つピックアップコイルを設置し 0° と 88° で検出する。サンプルを回転させることで、磁場を印加してから 88° 位置のピックアップコイルまで到達する時間を緩和時間として考えることができる。このため、回転周波数を変化させることで緩和時間を変更することを可能にした。各測定において、ピックアップコイルで検出された信号を、デュワ内では冷却されている SQUID に伝達することで試料からの信号を測定した。

3. 測定結果

本研究では、nanomag®-D という酸化鉄のナノ粒子をデキストランでコーティングした粒子径が 130nm の磁気ナノ粒子を用いた。磁化率測定では磁気ナノ粒子を純水に 2 vol. %, 4 vol. % 希釈したものをサンプルとして使用した。Fig. 2 に本システムで磁化率測定を行った結果を示す。Fig. 2 より低磁場で線形となり、高磁場で飽和するという超常磁性の特性を確認することができる。また、磁気ナノ粒子の濃度の違いにより信号が変わっていることも確認することができる。以上のことより、水溶液中の低濃度の磁気ナノ粒子の磁化率測定が可能であり、低濃度領域の濃度差も判別することができた。高調波測定では磁化率測定と同じサンプルを用いた。測定の結果、水溶液中の低濃度磁気ナノ粒子の交流特性を測定することができた。緩和測定では、磁気ナノ粒子のブラウン緩和時間の違いを測定した。ブラウン緩和時間 τ_B は式(1)で表される。

$$\tau_B = \frac{3\mu V_H}{k_B T} \quad (1)$$

ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は温度、 V_H は粒子体積、 μ は溶媒粘度である。式(1)より、緩和時間は溶媒粘度に比例していることがわかる。そこで、本研究ではブラウン緩和時間の違いを作るために、サンプルごとに溶媒粘度を変化させた。本シ

ステムでは、サンプル信号の Peak-to-Peak を信号強度として、磁気緩和現象を評価した。この結果、時間とともに信号強度が減少しており、粘度が高くなると信号強度が高くなっている緩和現象が確認できた。このことから、水溶液中の磁気ナノ粒子の磁気緩和現象を解析することが可能である。以上のことより本システムを用いることで低濃度磁気ナノ粒子の磁化率特性、交流特性、磁気緩和現象を観測することが可能であり、水溶液中の磁気ナノ粒子の基礎特性を高精度に評価できることを示すことができた。

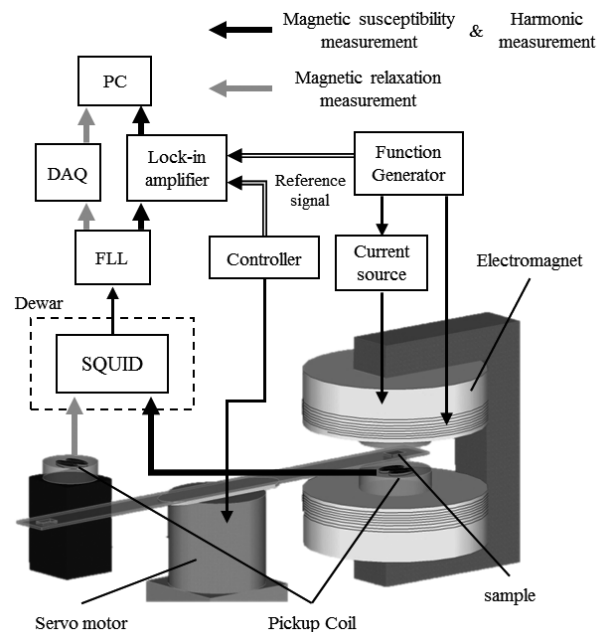


Fig. 1 Schematic of measurement system

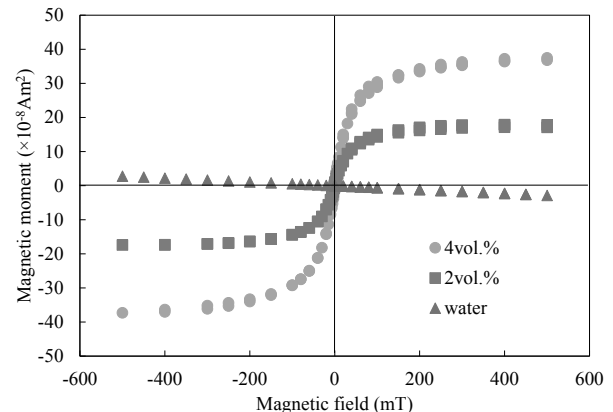


Fig. 2 Magnetic susceptibility measurement result

参考文献

- 1) M.M. Saari, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.25, no.3, pp.1,4, June 2015

HTS-SQUID を用いた高調波による砂の水分量計測

Moisture Content Measurement of Sand by Higher Harmonic Signals Using HTS-SQUID

中村 勇太, 松永 恭暁, 一色 良太, 堺 健司, 紀和 利彦, 塚田 啓二(岡山大)

NAKAMURA Yuta, MATSUNAGA Yasuaki, ISSIKI Ryota, SAKAI Kenji, KIWA Toshihiko, TSUKADA Keiji (OKAYAMA Univ.)

E-mail: p1w51i0v@s.okayama-u.ac.jp

1. 研究背景

水分量計測の必要性は高まってきており、短時間に高感度な計測が求められている。様々な手法により水分量計測が行われているが、従来の手法では、計測に時間がかかる、あるいは計測の際に試料を破壊する必要がある等の問題点があった。これらの問題を解決する手法として、磁気を用いた水分量計測法を我々の研究室が初めて報告した[1]。本研究では磁化率の小さい物質の計測が可能な HTS-SQUID (高温超伝導量子干渉素子) を用いた磁化率計により、非破壊・非接触でのさらに精度の高い砂の水分量計測を行った。ここで、農業や土木の応用として砂を計測対象とし、水分量の計測を行った。砂は土壌を構成する要素の一つであり、土壌水分の灌漑管理が温度管理とともに作物の生育を維持するための重要な因子となっている。また砂はコンクリートの原料でもあり、砂中に含まれる水分量によりコンクリートの強度に影響を及ぼすため、正確な水分量計測が求められている。砂は強磁性、常磁性、反磁性の複合材料から構成されており、水の反磁性を抽出する方法として直流磁場と交流磁場を組み合わせ高調波を利用する方法を考案し、本計測手法の有用性の検討を行った。

2. 計測方法

計測は水分量の異なるサンプルに磁場を印加し、サンプルに二次的な磁場を発生させ、その磁場を HTS-SQUID により計測する方法を用いた。本研究で用いたシステムでは、計測に合わせて直流磁場と交流磁場を印加することができる。Fig.1 に計測システムの概略図を示す。システムは主に磁場印加用の電磁石、サーボモータ、信号検出用のピックアップコイル、冷却機構を備えたデュウによって構成されている。SQUID の安定動作のためにデュウは二層パーマロイの磁気シールド内に配置し、その磁気シールドをさらに電波シールドで覆うことにより環境磁場ノイズを低減させた。ピックアップコイルには周囲の磁場による影響を減らし、システムの出力を改善するためにグラジオメータを用いており、グラジオメータでのキャンセルしきれない出力差を低減するために補償コイルを取り付けた。ピックアップコイルにより検出された信号は磁気シールド内の SQUID に伝達され、ロックインアンプにより検波される。

本研究で計測した砂は砂鉄等の強磁性体を含んでおり、磁気飽和特性を持つ。その飽和点付近において、直流磁場と交流磁場を重畳して印加することにより、基本波および高調波が検出できる。水分量の違いにより飽和点付近の曲線に違いが生じるため、検出される信号に差が生じる。本計測は、直流磁場を 400 mT、交流磁場を 10 Hz、20 mT_{pp} 印加して行い、サンプルから生じる二次的な磁場出力信号の第二高調波を計測した。計測した砂の水分量は、純水に対する質量比が 0 wt%、2 wt%、4 wt%、6 wt%、8 wt%、10 wt% の 6 種類である。計測はサンプルをアクリル製のケースに入れて行い、サンプル一つ当たり 20 回のデータを取得し加算平均することにより計測誤差を低減させた。

3. 計測結果

実際に作製したサンプルは加熱乾燥式水分量計により計測することで、目標の水分量となっているか確認を行った。加

熱乾燥式水分量計による計測の結果、おおよそ目標の水分量となっていることが確認できた。

次に、Fig.2 に砂の水分量計測を行った結果を示す。Fig.2 より、砂の水分量の増加に伴い第二高調波の信号強度も増加する結果が得られた。水分量と第二高調波の信号強度の線形近似による相関係数は 0.978 であり、強い相関性を示した。このことから、本計測手法により水分量計測が可能であることを示した。

4. 結論

本研究では、水の反磁性を抽出する方法として高調波を利用する方法を考案し、HTS-SQUID を用いた磁化率計により、砂の水分量を定量化することができた。また、本計測手法は従来の手法と比べて迅速であり、非破壊・非接触での計測が可能である。このことから、本計測手法の有用性を示すことができた。

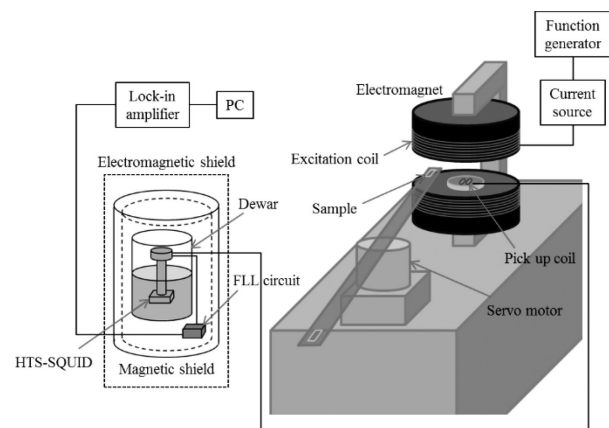


Fig.1 Schematic of measurement system

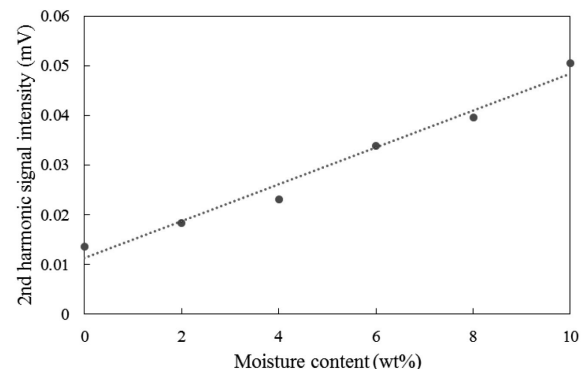


Fig.2 Moisture content measurement results

参考文献

1. K. Tsukada, et al.: Magnetic Measurement of the Moisture Content in Soil: Diamagnetic Measurement with the Presence of Ferromagnetic Material, Applied Physics Express, Vol. 1 (2008)

高温超伝導 SQUID を用いた金属管のリモート非破壊検査手法の開発 -その2-

Development of remote NDE method for metallic pipes using HTS-SQUID -No. 2-

廿日出 好, 小林 奉樹, 中家 早紀, 増谷 夏輝 (近畿大学)

HATSUKADE Y., KOBAYASHI T., NAKAIE S., MASUTANI N. (Kindai Univ.)

E-mail: hatsukade@hiro.kindai.ac.jp

1. 緒言

原子力発電所の配管や格納庫など、人が容易にアクセスできない構造物に発生した欠陥は早期検出が大変困難であり、大事故を引き起こす可能性がある。そこで、我々は、DC～MHz までの広い測定帯域と半導体センサより2-3桁以上の超高感度特性を有する高温超伝導(HTS)SQUID 磁気センサを用いて、これら構造物のための非破壊検査技術の研究を行っている[1]。この研究では、超音波ガイド波と超伝導磁気センサ SQUID を組み合わせた新しい非接触・リモート検査技術を開発している。本研究では、超音波ガイド波の発生機構として磁歪効果を応用する磁歪式コイルを適用し、ガイド波由来の磁気信号発生機構としてビラリ効果を応用した受信部に HTS-SQUID グラジオメータを設置し、超音波ガイド波由来の磁気信号を計測できるかを実験的に調べた。

2. 超音波ガイド波計測のための SQUID 非破壊検査装置

Fig.1 に示すような、HTS-SQUID グラジオメータ、クライオスタット一体型パルス管冷凍機、SQUID 駆動回路、オシロスコープ、発信器、電力増幅器、信号増幅器、PC などから構成される SQUID 非破壊検査装置を構築した。用いた配管は、直径 110 mm、厚さ約 3 mm、長さ 1505 mm のアルミパイプ (A5052) で、管の二カ所を管一周するように磁化したニッケルが貼り付けられている。管の左端から 200 mm に貼り付けたニッケルには励磁用コイルが巻きつけられており、コイルに電流を流すと磁歪効果によりニッケル薄板が振動しガイド波が発生する。このニッケルから 1105 mm 離れたもう片側のニッケルは、SQUID 磁気センサをその上部に設置することで、ビラリ効果によりガイド波の歪でニッケル薄板の磁化が変化し、磁気信号が発生、SQUID で計測する受信部となっている。このような送信器の場合、発生するガイド波は主に T(0,1)モードのねじれ波となる[2]。計測に使用した SQUID は ISTEK/SRL 製の HTS-SQUID グラジオメータで[1]、平面 1 次微分型検出コイルの一つのコイルの大きさは 1 mm × 1 mm である。HTS-SQUID は冷凍機により約 63 K に冷却して、SQUID 駆動回路で駆動した。SQUID のホワイトノイズレベルは約 $20 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ であった。SQUID 出力電圧は、アンプで増幅されたのち、オシロスコープで加算平均され表示される。なお、ガイド波の参照センサとして、高分子圧電フィルムである PVDF (PolyVinylidene DiFluoride) を SQUID 近傍の管表面に接着して用いた[2]。なお、SQUID グラジオメータは、ニッケル薄板から 3 mm のリフトオフを離して設置した。

3. ガイド波計測実験

上記装置を用いて、送信器コイルに 38kHz、2 周期の正弦波のバースト波電流 $1 A_{pp}$ を印加し、約 263 ms の周期で超音波ガイド波を発生させた。その際のガイド波を、SQUID 近傍の PVDF で直接、または受信部ニッケル薄板上の SQUID で間接的に計測した。この結果を、Fig.2 に示す。ここでは、オシロスコープで 128 回加算平均を行った。送信器にバースト波を印加したタイミングから約 350～360 μs 後に SQUID 及び PVDF でそれぞれ磁気信号、および電圧信号が計測された。アルミを伝わる T(0,1)モードガイド波の伝達速度は 3100 mm/ms であり、これは 1105 mm の距離を約 355 μs で伝達する。以上の結果から、SQUID で計測された信号はガイド波由来の磁気信号であることがわかった。また SQUID では最初の波の

後に、位相が逆転し、かつ 2 倍ほど大きな信号が計測された。これは、送信器から左右に発生したガイド波が、それぞれ管の左端および右端で反射して位相が逆転し[2]、1505 mm と同じ伝送距離となる SQUID 配置部で重畳したために生じた波である。なお、PVDF は SQUID 真下のニッケルより 40 mm 端に近い位置に設置したため、SQUID 出力とはわずかに信号発生タイミングがずれていた。Fig.2 が示すように、管と接触していないにも関わらず、HTS-SQUID グラジオメータは高い信号雑音比(S/N)でガイド波を間接的に計測できており、本手法がリモート・非接触検査として大きな優位性を持っていることが示唆された。

4. まとめ

今回、HTS-SQUID により、非接触・リモートで超音波ガイド波に由来する磁気信号を検出することができた。現在、この技術の有効性を明らかにするため、リフトオフや電流値、周波数などの測定パラメータを変化させて計測を行っている。

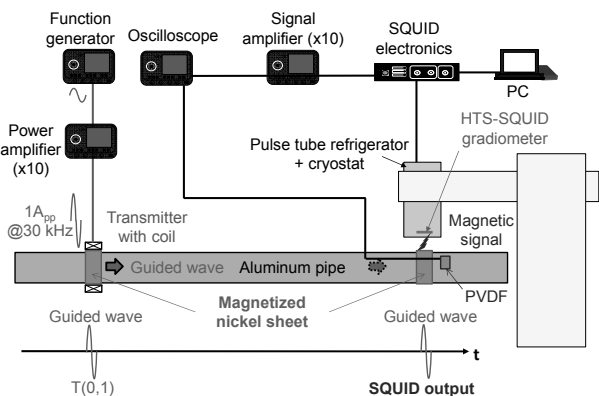


Fig.1 Schematic diagram of HTS-SQUID NDE system for pipe.

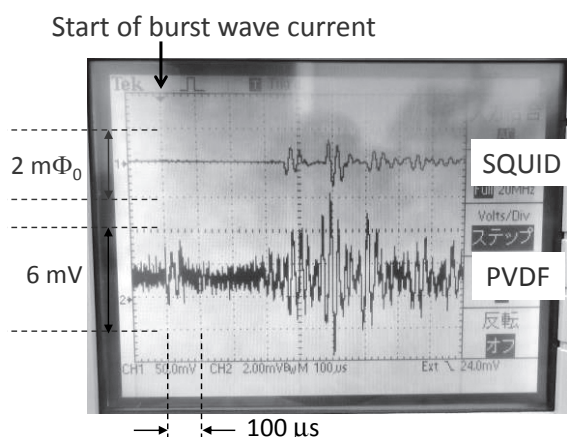


Fig.2 Output of HTS-SQUID gradiometer and PVDF piezoelectric sensor after occurrence of ultrasonic guided wave at 38 kHz.

参考文献

- [1] 廿日出好, 他, 2015 年度秋季低温工学・超電導学会 講演概要集, 1D-p03, p.58, 2015.
- [2] 田中義和, 他, 日本機械学会論文集(A 編), 72 巻, 718 号, pp.951-956, 2006.

高温超伝導 SQUID を用いた金属管のリモート非破壊検査手法の開発 -その3-

Development of remote NDE method for metallic pipes using HTS-SQUID -No. 3-

増谷 夏輝, 小林 奉樹, 中家 早紀, 廿日出 好 (近畿大学)

MASUTANI N., KOBAYASHI T., NAKAIE S., HATSUKADE Y (Kindai Univ.)

E-mail: 1633850010h@hiro.kindai.ac.jp

1. 緒言

原子力発電所や火力発電所において配管などの減肉や亀裂による重大な事故が報告されており、リモートで配管の欠陥を早期検出できる技術が必要とされている。現在は超音波ガイド波と圧電素子 (例えば PolyVinylidene DiFluoride: PVDF) や Acoustic Emission (AE) を用いた検出手法が提案されている。しかし、これらの技術は送受信部を配管に接触させる必要があり、配管に断熱材を巻いている場合、検査が困難である。そこで、我々は、DC~1 MHz までの広い測定帯域と半導体センサより 2-3 桁以上の超高感度特性を有する高温超伝導 (HTS) SQUID 磁気センサを用いて、これら構造物のための非破壊検査技術の研究を行っている[1]。本学会に投稿している「高温超伝導 SQUID を用いた金属管のリモート非破壊検査手法の開発 -その2-」(1D-p03)において、超音波ガイド波と SQUID を組み合わせた非接触・リモート検査技術の原理実証実験を報告した。本研究では、受信部の SQUID で計測されるガイド波由来の磁気信号の、入力電流強度、入力電流周波数、リフトオフ(センサ・サンプル間距離)などの測定パラメータに関する依存性を調査した。

2. 超音波ガイド波計測のための SQUID 非破壊検査装置

本実験で使用する非破壊検査装置は、前述の 1D-p03 と同様で、HTS-SQUID グラジオメータ、クライオスタット一体型パルス管冷凍機、SQUID 駆動回路、オシロスコープ、発信器、電力増幅器、信号増幅器、PC などから構築した。用いた配管も同じく直径 110 mm、厚さ約 3 mm、長さ 1505 mm のアルミパイプ (A5052) で、管のニカ所を管を一周するように磁化したニッケル薄板が貼り付けられている。管の左端から 200 mm に貼り付けたニッケルには励磁用コイルを巻きつけており、コイルに電流を流すと磁歪効果によりニッケル薄板が振動し、ガイド波が発生する。このニッケルから 1105 mm 離れたもう片側のニッケルの上に、SQUID 磁気センサ設置した。ニッケルのピラリ効果によりガイド波の歪でニッケルの磁化が変化し、磁気信号が発生、SQUID で計測する。また、ガイド波の参照センサとして PVDF を、SQUID から管軸方向に 40 mm 離れた管表面に接着した。

3. ガイド波計測実験

3.1 入力電流の振幅を変化させた場合

上記装置を用いて、送信器コイルに 38 kHz、2 周期の正弦波のバースト波電流を約 263 ms の周期で繰り返し印加した。その際、電流振幅を 0~1 A_{pp} まで変化させ、ガイド波を SQUID 近傍の PVDF で、ガイド波由来の磁気信号をリフトオフ 2 mm の SQUID で計測した。両センサの出力において、送信信号から 160 μs 後に最初に計測されたガイド波の、信号強度の両振幅と電流振幅の関係を Fig.1 に示す。PVDF と SQUID の両方において、入力電流振幅の範囲で信号両振幅は電流振幅におよそ比例することが分かった。

3.2 入力電流の周波数を変化させた場合

送信器への入力電流は 1 A_{pp} で固定して周波数を 10~100kHz まで変化させて 3.1 同様に計測を行い、ガイド波由来の信号の両振幅と周波数の関係を調べた。この結果を Fig.2 に示す。PVDF の場合、周波数の増加に従い、信号振幅は最初緩やかに増加し、60 kHz 付近で飽和した。一方、SQUID の場合は 20~40 kHz でピーク値になり、その後、信号強度は減

衰した。しかし駆動回路の特性を考慮すると、50 kHz 以上で出力が減衰するため、PVDF と同じような周波数依存性になると推定される。

3.3 リフトオフを変化させた場合

電流振幅は 1 A_{pp}、周波数は 20 kHz として、SQUID と配管のリフトオフを 2~22 mm まで変化させ、SQUID でガイド波由来の磁気信号を計測した。信号両振幅とリフトオフの関係を Fig. 3 に示す。この結果、リフトオフの約 2 乗分の 1 に比例して出力電圧の振幅が減衰することがわかった。

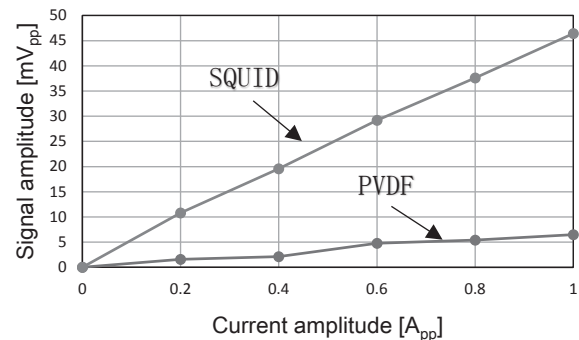


Fig. 1 Signal amplitudes of SQUID and PVDF vs. input current amplitude

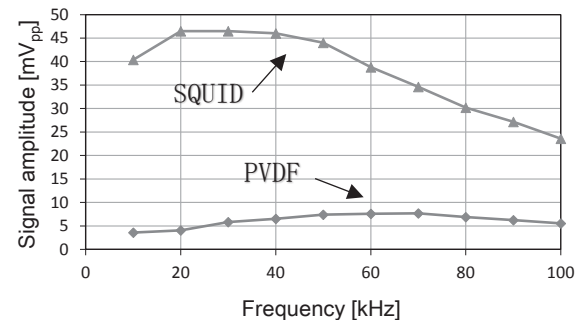


Fig. 2 Signal amplitudes of SQUID and PVDF vs. input current frequency

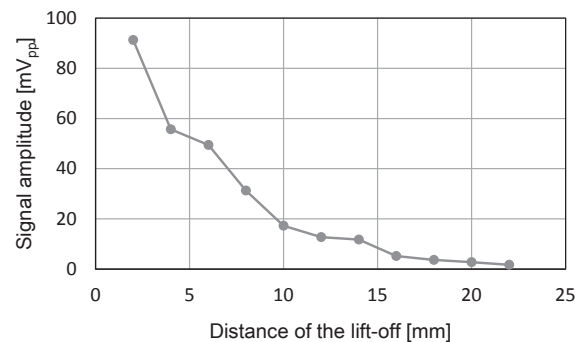


Fig. 3 Signal amplitude of SQUID vs. lift-off distance

参考文献

[1] 廿日出好, 他, 2015 年度秋季低温工学・超電導学会 講演概要集, 1D-p03, p.58, 2015.

Coherent Terahertz Sources Using Intrinsic Josephson Junctions in High- T_c Cuprate Superconductor

辻本 学, 柏木 隆成, 南 英俊, 門脇 和男 (筑波大); 掛谷 一弘 (京大)
 TSUJIMOTO Manabu, KASHIWAGI Takamari, MINAMI Hidetoshi, KADOWAKI Kazuo (Univ. Tsukuba);
 KAKEYA Itsuhiro (Kyoto Univ.)
 E-mail: tsujimoto@ims.tsukuba.ac.jp

1. Introduction

Electromagnetic waves in the 0.3–10 THz frequency range have great potential in research and industry; thus, compact, solid-state, and continuous-wave terahertz sources are being developed in various fields [1]. We discovered a remarkable phenomenon that high-transition-temperature (high- T_c) cuprate superconductors $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) generates intense and coherent terahertz waves [2]. This compound is known as the intrinsic Josephson junction (IJJ) system, where an insulating Bi_2O_2 layers is sandwiched by CuO_2 double layers responsible for superconductivity. Previous studies revealed that the emission frequencies are shown to obey two necessary conditions: One is the Josephson relation, which converts application of 1-mV voltage into the 0.4836-THz oscillation. Another is the geometrical cavity resonance condition [3,4].

The most intriguing physics of the terahertz emissions is the synchronization among thousands of stacked IJJs with distributed widths due to the trapezoidal cross-section of the mesa structure. Mutual synchronization based on hot-spot formation has been identified in a recent mixing experiment [5]. A complete study of increases in local temperature in the emitting stack will lead to a further understanding of the non-linear phase dynamics of the IJJ system. Meanwhile, the effective prevention of overheating is required to increase the emission intensity, which is essential for designing powerful terahertz sources. In this study, we dynamically control the temperature distributions in the emitting stack by altering the dc current distributions and simultaneously monitor the change in the emission intensity. We find that we can increase emission intensity considerably by preventing the excessive heating that increases hot-spot size [6].

2. Experimental

Single crystals of Bi-2212 were grown by a traveling-solvent floating-zone technique. A small piece of an annealed crystal was glued onto a sapphire substrate using epoxy resin Stycast® 1266. The temperature dependence of the c -axis resistivity shows the behavior typical of underdoped crystals with $T_c = 78$ [K]. Then, the mesa structure with the width of $w = 73$ [μm] and length $L = 400$ [μm] was milled from the crystal surface by photolithography and argon ion milling techniques. The thickness of $t = 1.1$ [μm] corresponds to 720 junctions in the stack. The terahertz-emitting sample is installed into the He-flow type cryostat. The emission is detected using a Si-composite bolometer.

3. Results and discussion

Figure 1(a) shows the four-terminal current-voltage characteristics (IVCs) at bath temperatures of $T_b = 10$ K (left scale) and the emission intensity (right scale). Dashed lines at 0.884 V represent calculated emission voltages. In Fig. 1(b), the emission intensity was plotted as a function of I . Intense emissions were observed in two characteristic bias regimes: high-bias regime (11–23 mA) and low-bias regime (4–5 mA). As discussed earlier, the extreme temperature inhomogeneity in the stack is a key feature to understand the synchronization mechanism in the high-bias regime.

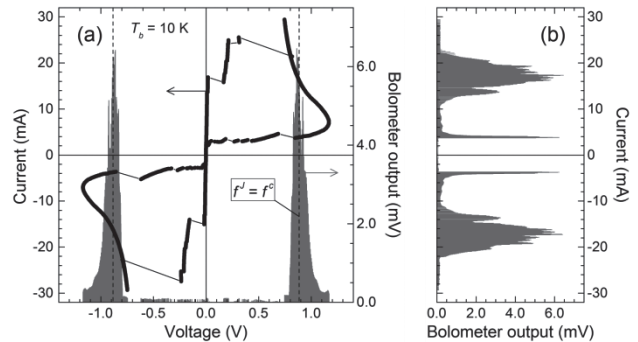


Fig. 1: (a) Current-voltage characteristics (left scale) and emission intensity detected by a Si-composite bolometer (right scale) at $T_b = 10$ K. (b) Emission intensity as a function of the bias current.

To image the local temperature distribution in the stack, we use a fluorescent technique based on the strong temperature dependence of fluorescence intensity on the coordination complex. From the temperature imaging results (not shown here), we can presume that emission intensity has a strong correlation with the volume of the superconducting parts in the emitting stack.

4. Summary

We investigated the universal relationship between coherent terahertz-wave emission and temperature inhomogeneity in the emitting stack of Bi-2212 IJJs. The emission intensity increases by up to 20% with a decrease in the hot-spot size. Because no regard has been given to the elimination of the excess heat from high- T_c superconducting terahertz sources, further improvements in terms of the sample structure and the bias condition may allow for the construction of powerful and tunable terahertz sources that fill a technical gap in the terahertz regime.

Acknowledgments

The authors thank Dr. T. Kitamura, C. Watanabe, H. Kambara, and Prof. T. Tamegai for valuable discussions. Bi-2212 single crystals were provided by Y. Nakawaga. Comments from Dr. H. Asai, Prof. R. Yoshizaki, and Prof. R. A. Klemm are greatly appreciated. This work was supported by KAKENHI (Grants No. 23681030, No. 13J04811, and No. 26790032).

References

1. M. Tonouchi: Nature Photon. Vol. 1 (2007) p.97–105.
2. U. Welp et al.: Nature Photon. Vol. 7 (2013) p.702–710.
3. L. Ozyuzer et al.: Science Vol. 318 (2007) p.1291–1293.
4. M. Tsujimoto et al.: Phys. Rev. Lett. Vol. 105 (2010) p.037005-(1–5).
5. M. Li et al.: Phys. Rev. B Vol. 86 (2012) p.060505-(1–5).
6. M. Tsujimoto et al.: Phys. Rev. Appl. Vol. 2 (2014) p.044016-(1–6).

微小電流検出に向けたジョセフソンコンパレータの最適化と評価

Optimization and evaluation of Josephson comparators for very small current detection

阿部 裕, 佐野 京佑, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大)

ABE Yutaka, SANNO Kyosuke, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.)

E-mail: abe-yutaka-vm@ynu.jp

1. はじめに

これまで半導体集積回路が計算機の性能向上を担ってきたが、その微細化は物理的限界を迎えており、消費電力の増大という問題も深刻化している。そこで我々は、高速動作性と低消費電力性に優れた単一磁束量子 Single-Flux-Quantum (SFQ) 回路に着目し研究を行っている。

SFQ 回路の研究において、Josephson-CMOS ハイブリッドシステムの CMOS 信号や単一光子検出信号の高感度検出に微小電流の検出が必要とされている。そこで、我々は微小電流検出が可能な SFQ 回路を研究している。

2. ジョセフソンコンパレータ

微小電流の検出を目的としたコンパレータの回路図を Fig.1 に示す。コンパレータは入力電流 I_{in} に対するしきい値 I_{th} を持つ。微小電流 I_{in} を入力するとき、 I_{in} が I_{th} より小さい場合には Clk に入力された SFQ パルスは出力へは伝搬せず、 I_{in} が I_{th} より大きい場合には Clk に入力された SFQ パルスが出力へ伝搬する。出力への SFQ パルスの伝搬を観測することで微小電流入力を検出できる。

測定環境下においては、ジョセフソン接合に接続された抵抗に熱雑音電流が生じることで、電流入力に対して出力が一意に定まらない領域(グレーゾーン)が発生する。微小電流検出のためにはグレーゾーンの幅(グレーゾーン幅)を縮小させる必要がある。

本研究では、グレーゾーン幅を縮小するために、コンパレータに独立したバイアス電流 I_b を印加する配線を追加した。また、微小電流入力に対する感度を上げるために、コンパレータを構成するジョセフソン接合のうち Fig.1 の J_3 の臨界電流値を下げた。

最適化を行った回路を設計、試作し、シミュレーションおよび測定による評価を行った。Fig.2 に試作した回路の顕微鏡写真を示す。また、Fig.3 にコンパレータのバイアス電流を変化させた場合のグレーゾーン幅の依存性をシミュレーションおよび測定によって評価した結果を示す。Fig.3 に示した結果よりシミュレーション、測定ともにコンパレータに印加するバイアス電流を変化させることでグレーゾーン幅が最小となる点を取ることがわかる。シミュレーションにおいては Clk 入力に印加する SFQ パルスの周波数を 1, 5, 10 GHz と変化させており、周波数を低くするほど最小グレーゾーン幅は小さくなることがわかる。最小グレーゾーン幅はそれぞれ、シミュレーションにおいては $1.5 \mu A$ 、測定においては $0.9 \mu A$ となった。この結果は同一の回路構造を持つ先行研究[1]の測定結果である $1.7 \mu A$ に比べ十分小さい値が得られた。

謝辞

本研究に使用された回路は、(独)産業技術総合研究所(AIST)の超伝導クリーンルーム(CRAVITY)において、AIST-STP2 プロセスを用いて作製された。

参考文献

1. T. Haddad, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 25, No. 3 (2015) pp. 1-4

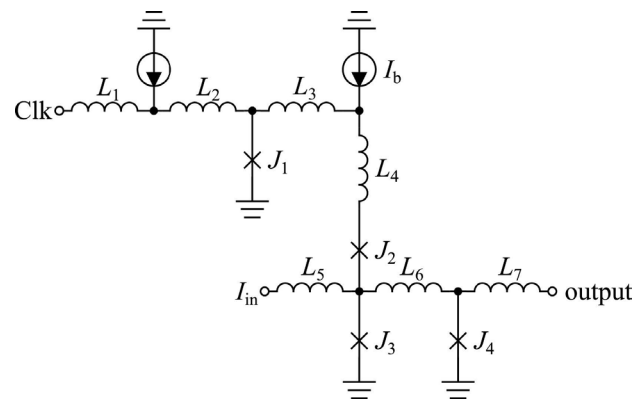


Fig.1 Schematic diagram of the Josephson comparator circuit under investigation.

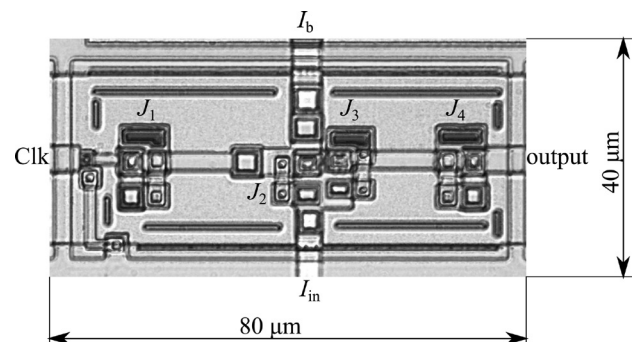


Fig.2 Microphotograph of the Josephson comparator under investigation.

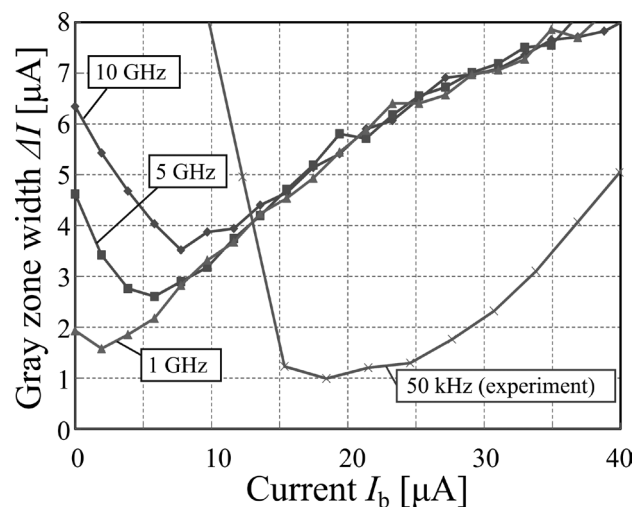


Fig.3 Experimental results in comparison with simulation results.

Investigation on multi-excitation mode for high-speed and low-latency AQFP circuits

Kun Fang, Takumi Ando, Yuki Yamanashi, Nobuyuki Yoshikawa (Yokohama Nat. Univ.);

Naoki Takeuchi (Yokohama Nat. Unit., JST-PRESTO)

E-mail: fang-kun-vx@ynu.jp

1. Introduction

Adiabatic quantum-flux-parametron (AQFP) circuits [1] are very low-power because of zero static power consumption and extremely small dynamic power consumption thanks to adiabatic switching operations. In order to increase operation frequencies and to reduce latency in AQFP circuits, we herein demonstrate multi-excitation AQFP (ME-AQFP) circuits, in which AQFP gates switch multiple times during a cycle of excitation currents. In the numerical simulation, we showed AQFP gates operating in the double-excitation mode, in which the circuits operate at 10 GHz with 5-GHz excitation currents. Moreover, we experimentally demonstrated several logic circuits, including an XOR gate in the double-excitation mode at a low frequency and confirmed wide excitation margins of more than $\pm 20\%$. The above results indicate the possibility of high-speed AQFP circuits operating at frequencies higher than 10 GHz.

2. Periodic Evolution of Potential Energy

In ME-AQFP, we utilize the periodic change of potential energy. The potential energy of an AQFP gate, U , is given by [2]:







$$U = E_j \left[\frac{(\phi_x - \phi_-)^2}{\beta_L} + \frac{(\phi_{in} - \phi_+)^2}{\beta_L + 2\beta_q} - 2 \cos \phi_- \cos \phi_+ \right], \quad (1)$$

where E_j is the Josephson energy, ϕ_x is the normalized excitation flux, ϕ_{in} is the normalized input current, β_L and β_q are the normalized inductances, $\phi_+ = (\phi_1 + \phi_2)/2$, $\phi_- = (\phi_1 - \phi_2)/2$, ϕ_1 and ϕ_2 are the phase differences of the two Josephson junction in the AQFP gate. The potential energy evolves periodically between a single-well shape and a double-well shape as ϕ_x increases, as shown in Table I.

3. Multi-Excitation AQFP

In a conventional operation mode, an AQFP gate is excited

Table I
Quantum flux changing along with excitation

$\phi_x/2\pi$	...	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5	...
$\phi_1/2\pi$	...	-1	0	0	1	1	2	...
$\phi_2/2\pi$	...	1	1	0	0	-1	-1	...
Potential shape	...							...

one time during a cycle of excitation fluxes, because the excitation flux, $\phi_x/2\pi$, oscillates between 0 and 0.5 during a cycle. We refer to this conventional operation as a single-excitation mode. Assuming that $\phi_x/2\pi$ oscillates between 0.5 and 1.5 in a cycle of an excitation current, an AQFP gate is excited two times during a cycle of excitation fluxes. We refer to this operation as a double-excitation mode.

In simulation and experiment, we demonstrated an XOR gate operating in the double-excitation mode. We also evaluated energy efficiency of ME-AQFP circuits and confirmed that, in the double-excitation mode, the operation frequency doubles, gate delay halves, and the energy-delay product (EDP) is kept, compared to the single-excitation mode.

Acknowledgement

This work was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (S) (No. 26220904) from Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), and PRESTO from Japan Science and Technology Agency (JST). The circuits were fabricated in the clean room for analog-digital superconductivity (CRAVITY) of National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST).

Reference

1. N. Takeuchi, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 26 (2013) p.035010
2. H. L. Ko. et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 2 (1992) p.156

複合イベント処理用 SFQ Complex Event Detector の設計と動作実証

Design and demonstration of a complex event detector unit using SFQ circuits for complex event processing systems

佐藤 僚亮, 小野 智裕, 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大)

SATO Ryosuke, ONO Tomohiro, YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.)

E-mail: sato-ryosuke-ck@ynu.jp

1. はじめに

現代の情報化社会においてビックデータと呼ばれる膨大で多種多様な情報の処理についての検討が行われている。その中でも複合イベント処理(Complex Event Processing : CEP)が注目されている。CEP とは、ストリームデータであるビックデータを対象にデータを蓄積せずにリアルタイム処理を行う処理方法である。そのため、情報蓄積能力よりも情報処理能力を求められる。

CEP システムの応用先として、ネットワーク型侵入検知システム (Network Intrusion Detection System : NIDS) がある。NIDS は、ネットワーク上を流れる通信パケットを監視するシステムである。NIDS では、コンピュータウイルスを正規表現で定義したパターン (ウイルスパターン) と通信パケットに対するパターンマッチングを行うことで、ウイルスの検知を行う。

本研究では消費電力が半導体回路に比べ3~4桁低く、高速性においても数十 GHz での高速動作が可能であることが特徴である単一磁束量子 (Single Flux Quantum : SFQ) で NIDS を実現することを目指している[1]。

今回、我々は CEP システムにおけるパターンマッチングを行う回路である CED (Complex Event Detector) 回路と構成要素である 1-symbol matching 回路の回路構成を考案し、4 シンボルのマッチングの動作実証を行った。

2. CED 回路の構成

CED 回路で行われているパターンマッチングとは、入力されたデータ列に対し、あらかじめ決めたシンボル列が一致するかどうかを検知することである。NIDS では、ウイルスパターンを 16 進数二桁のシンボル列で表現している。そのため 8 bit で構成されるシンボル列とのパターンマッチングが必要となる。このパターンマッチングを行う回路を 1-symbol matching 回路と呼ぶ。

Fig.1 に動作実証を行った CED 回路の回路構成図を示す。動作実証を行った回路は、Fig.1 のように 1-symbol matching 回路を 4 つ並べてシステム化し、連続入力されるデータに対し、4 つのシンボルとのパターンマッチングを行う構成となっている。

CED 回路の動作原理についての概要を述べる。まず、1-symbol matching 回路においてデータとシンボルの比較が行われる。データとシンボルが一致した場合、一致信号が出力され、次段の 1-symbol matching 回路において次のデータとシンボルの比較が行われる。これを繰り返し、最終段の 1-symbol matching 回路において一致信号が出力された時、入力されたデータ列中にシンボル列が検出されたときみなす[2]。

3. 測定結果

Fig.2 に動作実証を行った回路のチップ写真を示す。測定した回路では 8 bit で 1 つの Symbol を表現し、4 つの Symbol と入力 Data を比較する構成となっている。

Fig.3 に測定結果を示す。Fig.3 に示す通り、51.2 GHz での動作を確認した。また 51.2 GHz において -26.4% ~ +5.4% の動作余裕度を確認できた。

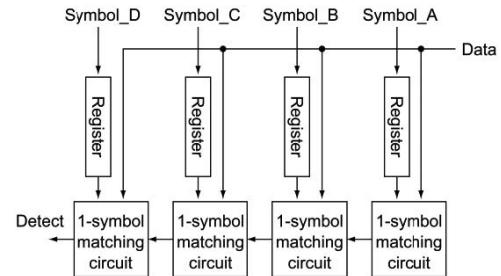


Fig.1 Architecture of CED circuit

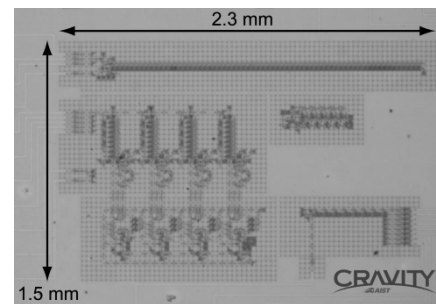


Fig.2 Picture of CED circuit

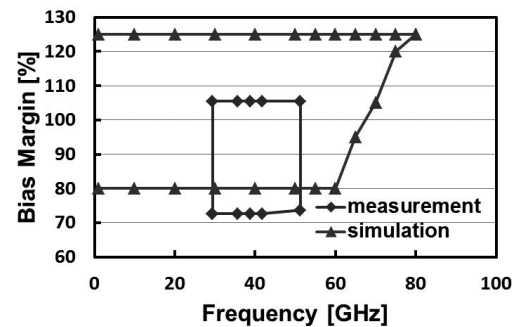


Fig.3 Result of measurement

謝辞

本研究に使用された回路は、(独)産業技術総合研究所 (AIST) の超伝導クリーンルーム (CRAVITY) において、AIST-ADP2 プロセスを用いて作製された。

参考文献

1. K. K. Likharev and V. K. Semenov, "RSFQ logic/memory family: A new Josephson-junction technology for sub-terahertz-clock frequency digital systems", *IEEE Trans. Supercond.*, vol.1(1991), pp.1-28.
2. T. Ono, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, "Design of a Complex Event Detector Circuit for Complex Event Processing System Using SFQ Circuits", SSV 2015, Nagoya, Japan, July 2015.

超伝導位相シフタに用いる磁性体の個別磁化制御による磁束バイアス量の変化

Study on Flux biasing of Ferromagnets Magnetized by Individual Configuration Method for Superconducting Phase Shift Elements

谷口 壮耶, 伊藤 大, 石川 航太, 黒川 綜太, 田中 雅光, 赤池 宏之, 藤巻 朗(名大)

TANIGUCHI Soya, ITO Hiroshi, ISHIKAWA Kouta, KUROKAWA Sota,

TANAKA Masamitsu, AKAIKE Hiroyuki, FUJIMAKI Akira (Nagoya Univ.)

E-mail: taniguchi@super.nuqe.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

磁性体を用いた超伝導位相シフタ(PSE)は超伝導ループの近傍に磁性体パターンを配置する事で実現され、超伝導ループに磁性体からの磁束バイアスが加わることによって位相シフトが引き起こされる。この PSE の制御によって、単一磁束量子(SFQ)回路を用いて再構成可能回路を実現することができる[1]。この SFQ 回路を用いた再構成可能回路は SFQ 回路の持つ高速動作性という特徴を引き継ぎ、既存の半導体 FPGA などと比べて高速に動作すると考えられる。しかし、大規模化した回路で PSE を利用する場合、回路内に複数存在する PSE 内の磁性体の磁化の向きを個別に制御する手法を確立する必要がある。

本報告では、磁性体の磁化の制御を個別に行う手法を提案し、この手法によって得られる磁束バイアス量の変化を調査した結果について述べる。

2. 磁化の書き込み手法

Fig.1 のように、格子状に磁化用電流線を配置し、交点部分に PSE を配置した構造を利用する。磁性体が十分な磁化をもつキュリー点以下の温度で X 方向、Y 方向に電流を流す事により磁場を印加し、磁性体を磁化させる。書き込み動作時は、二つの配線に同じ向きに電流を流し、交点の磁性体は磁場の向きに沿って磁化される。順次、交点をずらし、各磁性体の磁化を設定する。ただし、交点にないが同じ行か列の磁性体は半選択状態となり、片方の配線に流れる電流の影響を受けるが、既に持つ磁化の向きを保持する必要がある。

3. 実験手法・測定結果

まず、異常ホール効果を用いて磁性体の磁化曲線を測定することで磁化の大きさ、方向の変化を調査した。作製したホールバーの顕微鏡写真を Fig.2 に示す。磁性体として $\text{Pd}_{0.89}\text{Ni}_{0.11}$ 合金を利用し、膜厚は 30nm、キュリー点は 120K 程度である。Fig.3 に測定結果を示す。液体窒素を用いた 77K の温度で順番に +0.1T, -0.05T, +0.05T, -0.05T と磁場を印加した。この場合、0.1T 及び 0.05T は、書き込み時及び半選択時の磁場に相当する。その結果、+0.1T の印加で設定した磁性体の磁化は、-0.05T を印加する事による半選択で弱まるものの、磁化の向きを保持し、その後は $\pm 0.05\text{T}$ の印加によってマイナーループを描いた。そのため、磁化の個別書き込みが可能である事がわかり、磁束バイアス量は $\pm 0.05\text{T}$ のマイナーループ分変化する事がわかった。

しかし、ホール効果を用いた測定では、磁化方向や膜厚の点で相違点がある。そこで、磁性体パターンを持つ超伝導磁束量子干渉計(SQUID)を作製し、実際の PSE に近い条件で同様の磁束バイアス量の調査を行なった。利用した磁性体パターンは $\text{Pd}_{0.89}\text{Ni}_{0.11}$ 合金で、膜厚は 200nm である。磁化を書き込み、半選択を行ったところ、磁化の向きを保持するという同様の結果を得た。このとき、磁束バイアス量は極性の違う半選択(Fig.3 のマイナーループに相当)によって $\pm 14\%$ 変化した。そのため、PSE を用いた SFQ 回路では磁束バイアス量の設計値に対して $\pm 14\%$ の動作余裕度が必要である。既存のスイッチ回路[2]に対してこの磁束バイアスの変化を考慮した

場合でも問題なく動作し、大規模回路でも利用が可能であると考えられる。現在、実際の回路を用いた詳細な検討を進めている。

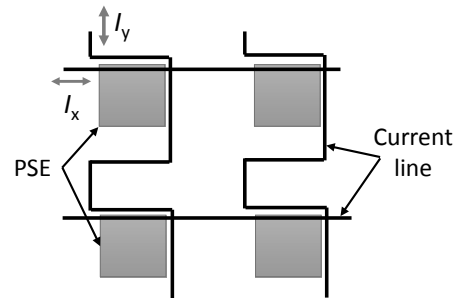


Fig.1 Proposed configuration method of PSE

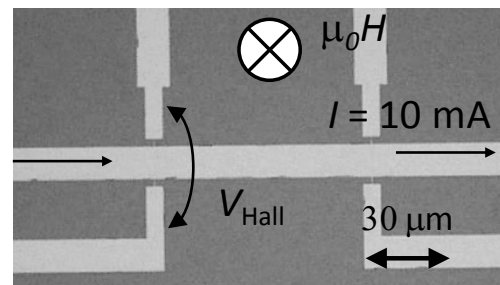


Fig.2 Microphotograph of Hall bar

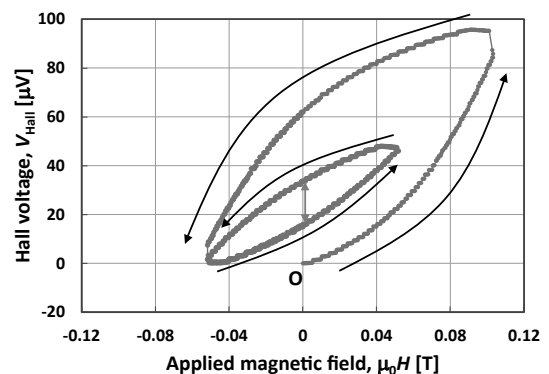


Fig.3 Magnetic hysteresis in anomalous Hall effect measurement

参考文献

1. S. Taniguchi, et al.: Abstracts of the 76th JSAP autumn meeting, 15a-4B-5 (2015)
2. S. Kurokawa, et al.: Abstracts of the 76th JSAP autumn meeting, 15p-4B-3 (2015)

謝辞

本研究は JST-ALCA、科研費(26420306)の助成を受けたものである。また本研究に使用された一部の回路は、(独)産業技術総合研究所(AIST)の超伝導クリーンルーム(CRAVITY)において作製された。

交流プログラマブルジョセフソン電圧標準による実効値 10 V での サーマルコンバータの評価

Evaluation of a thermal converter using an AC-Programmable Josephson voltage standard at the root-mean squared value of 10 V

天谷 康孝, 丸山 道隆, 山森 弘毅, 島崎 毅, 浦野千春, 藤木 弘之, 金子 晋久 (産総研)

AMAGAI Yasutaka, MARUYAMA Michitaka, YAMAMORI Hirotake, SHIMAZAKI Takeshi, URANO Chiharu, FUJIKI Hiroyuki,
KANEKO Nobu-Hisa (AIST)
E-mail: y-amagai@aist.go.jp

1. 緒言

交流電圧標準は、サーマルコンバータと呼ばれる電気-熱変換素子を用い、直流電圧標準との熱量比較から導く[1]。つまり、サーマルコンバータの熱線に測定する交流電圧と校正した直流電圧を交互に加え、発生ジュール熱に比例する温度上昇を、熱線に取付けた熱電対で測定する。この方式では、直流と交流の熱量を正確に比較するため、サーマルコンバータの直流と交流の電気-熱変換係数に相当する AC-DC 差を評価する必要がある。しかし、100 Hz 以下では、熱的時定数に起因した遮断周波数が交流信号周波数より高いため、熱線の温度は交流信号に追従し、温度振動が現れる。そのため、熱線表面の放熱特性など考慮すべき要因が増え、AC-DC 差を理論的に推定する方法では不確かさが増大する。

産総研では、10 Hz 以下の低周波領域に着目して、プログラマブルジョセフソン電圧標準 (PJVS: Programmable Josephson Voltage Standard) [2]の交流応用 (AC-PJVS) を進めてきた[3]。これまで、実効値 3 V で AC-PJVS によるサーマルコンバータの評価に成功した。[4]。さらに、電圧範囲を拡大するため、20-V チップ[5]を用いて、実効値 10 V の交流波形生成に成功した[6]。サンプリング測定回路を構築し、不確かさを評価した[7]。これらの開発により、実用的な 10 V で、交流計測器の評価など様々な応用が可能になった。そこで、本研究では、量子力学的に厳密に電圧を可計算な AC-PJVS を用い、AC-DC 差の低周波特性を実験的に評価した。

2. 実験方法

Fig. 1 には評価回路のブロック図を示す。AC-PJVS はジョセフソン接合アレーをバイナリに分割して、各セグメントをバイアス電流によりスイッチングし、量子力学的に実効値が可計算な交流波形を生成する。実験では 1 周期 8 ステップの交流波形を生成した。AC-PJVS をサーマルコンバータの正確な評価に应用するため、サンプリング手法によりトランジェントノイズを回避し、量子化された電圧部のみを測定した。サンプリング電圧計など計測機器はすべて基準クロックと同期させた。さらに、AC-PJVS と半導体型電圧発生器の電圧差を測定する差動方式を用いた。その結果、負荷電流を供給しつつ、正確に評価された信号がサーマルコンバータに入力されている。

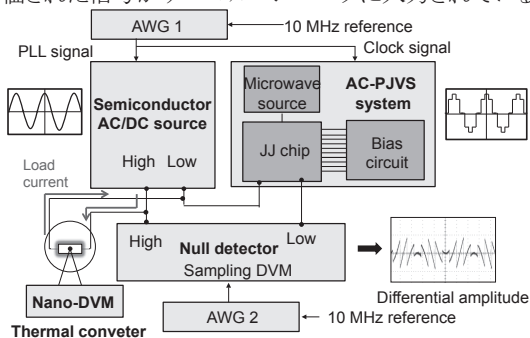


Fig. 1 Block diagram of an electrical circuit for the measurement of AC-DC difference of a thermal converter.

3. 実験結果

Fig. 2 には、サーマルコンバータの AC-DC 差の評価結果を示した。測定電圧実効値は 9.87298 V、周波数は 62.5 Hz である。図中のエラーバーは、拡張不確かさ (2σ) を示す。詳細な解析の結果、不確かさは 1.3 ppm であった。赤点線は、従来の理論的推定による不確かさを示す。つまり、産総研計量標準総合センター (NMIJ) で管理する国家標準器 (サーマルコンバータ) との比較測定によって得られる不確かさである。図に示す通り、国家標準器との比較測定により得られた結果と不確かさの範囲で一致し、測定不確かさを約 1 桁改善することに成功した。これらの結果により、低周波領域での交流電圧標準の不確かさが大幅に改善されることが期待される。

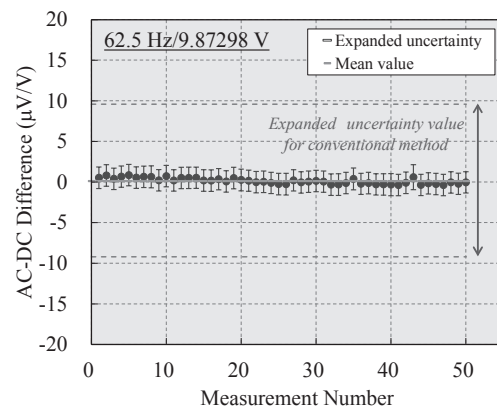


Fig. 2 Measured AC-DC difference at the root-mean squared voltage of 10 V for the frequency of 62.5 Hz.

4. 結論

本研究では、電圧実効値が可計算な AC-PJVS を用い、サーマルコンバータの低周波での AC-DC 差を実験的に評価した。その結果、電圧実効値 10 V でのサーマルコンバータの AC-DC 差の評価にはじめて成功し、不確かさを、約 1 桁改善した。これらの結果により、交流電圧標準の不確かさの大幅な改善が期待される。今後は、10 Hz 以下の低周波特性の評価実験を行う予定である。

参考文献

1. B. D. Inglis: Metrologia, Vol.29 (1992) pp.191-199
2. C. J. Burroughs, et al.: IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol.56 No.2 (2007) pp.289-293
3. Y. Amagai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, May (2014)
4. Y. Amagai, et al.: IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol.62 No. 6 (2013) pp.1621-1626
5. H. Yamamori, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol.22 (2009) p.095010
6. M. Maruyama, et al.: Proc. CPSEM2014 Digest, (2014)
7. S.-F. Chen, et al.: IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol.64 No. 12 (2015) pp.3308-3314

超伝導デジタル回路向け冷凍機システムの構築 Cryocooled system for superconductor digital circuits

藤巻 朗, 田中雅光, 鈴木雅斗, 伊藤雄記 (名古屋大学)

FUJIMAKI Akira, TANAKA Masamitsu, SUZUKI Masato, ITO Yuki (Nagoya University)

E-mail: fujimaki@nu.uee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導デジタル回路はその集積化が進み、数万個のジョセフソン接合からなる回路が、4 Kにおいて数十 GHz で動作している。消費電力はわずか1 mW ならずであり、集積回路自身は、高速性と低消費電力性を兼ね備えたデバイスであることが実証されている。集積度については1 cm²当たり数十万から百万接合の密度を目指し、研究を進めている。一方、室温との信号の出し入れに用いるケーブルでは、その太さや形状に関わらず、熱流入やジュール熱によって最低でも1本当たり数 mW の熱的負荷を4 K の動作ステージに与えている[1]。

超伝導デジタル回路の産業機器応用では、汎用性の観点から冷凍機の使用が求められる。超伝導集積回路の機能が向上する中、いかにして不要な熱負荷を低減化するか、すなわち熱流入とジュール熱の抑制が実用化の鍵を握っている。とりわけ、入出力線については、少なくともケーブル1本で数 GHz 以上のアナログ帯域幅を確保する必要がある。広帯域性と不要な熱負荷の抑制の両立が求められる。

我々は、高温超伝導コプレーナ導波路を、冷凍機の60Kステージと4Kステージの間に配置し、広帯域性の確保と熱流入抑制を目指している。今回は、その設計思想とともに冷却実験の結果について報告する。また、ジュール熱低減に向け、一部のコンポーネントについて接触抵抗の評価を行った。その結果も簡単に報告する。

2. 実装方法

冷凍機には、冷却能力100 mW の4K-GM冷凍機を用いた。被測定対象は、単一磁束量子回路によるマイクロプロセッサを想定しており、その消費電力は1mW 以下である。一方、駆動のため直流バイアス電流線が最低でも5本程度、試験のための入出力交流信号線が6本程度、温度制御のための信号線が3本程度必要となる。これらはすべて電流線で、電流のリターンパスも確保するため、実際には2倍の配線数となる。将来のことも考え、ここでは、高周波交流信号線を11本、直流線(バイアス線、制御線)を22本確保することとした。

Fig. 1が、実際に冷却実験に用いた冷凍機内部の写真である。高周波線は、中心導体、外部導体ともに銅製のセミジ

ッドケーブルをすべての配線に用いた。一方、直流線については、すべてツイスト線とし、磁場の漏えいを抑制した。同時に4Kで大電流の流れる配線については、ジュール熱抑制のためNbTi線を用いた。

60Kステージと4Kステージの間の高周波線は、広帯域性を確保するため、40 x 40 x 0.25 mm のYttria-stabilized Zirconia (YSZ)基板上に堆積したYBa₂Cu₃O_y薄膜によりコプレーナ型導波路を形成した。1つの基板には11個の導波路を作製した。特性インピーダンスは50Ωとなっている。60Kステージからの4Kステージへの熱流入は、YSZ基板を通して生じる。YSZの熱伝導率は、1.8 W/m/Kであることから、1つの基板で25 mWの熱流入となる。今回は、直流線についても、コプレーナ導波路の中心導体と片側の接地線を用いて配線を行った。Fig. 1の右上の写真が、11個のコプレーナ線を形成したYSZ基板である。実機には、これを3枚搭載している。

ジュール熱が問題となる接触抵抗は、異種金属間の接触部となると想定した。もっとも可能性が高いのは、Fig. 1右下に示したスプリングピンでの接触となる。このスプリングピンは、4Kステージ内の配線に対し複数個所で用いられている。繰り返し使用により、このスプリングピンの接触抵抗が許容範囲を超える数十 mΩから100 mΩとなる場合があることが分かった。

3. 冷却実験

シフトレジスタ回路を実装し、上記システムの冷却試験を行った。Fig. 2が、その実験結果である。15時間ほどを要したものの、4Kに達しており、熱流入は抑制されたものと考えている。また、回路に電流を流しても、温度上昇は見られなかったことから、ジュール熱も小さかったと考えている。このことは、本技術が熱流入の抑制に有効であることを意味している。現在、YSZ基板は0.05 mm厚の基板が市販されている。また、コプレーナ導波路は、さらに細くすることも可能であることから、1桁以上のさらなる熱流入の抑制も実現できるものと考えている。

しかしながら、振動もしくは熱収縮の影響でボンディングがはずれやすく、回路の試験に大きな支障を及ぼしている。接触抵抗の問題とともに、この問題の解決が、超伝導デジタル回路向け冷凍機システムの実用化には不可欠である。

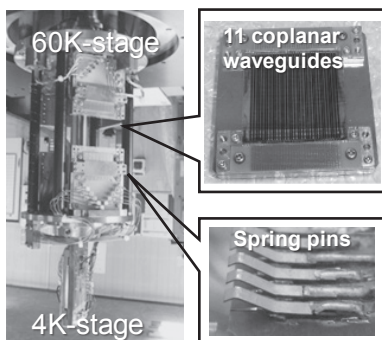


Fig. 1 Inside of the GM cryocooler. The broad band communication and suppressed heat inflow are achieved by the superconducting coplanar waveguides formed on the YSZ substrates. Dominant joule heats are generated at the spring pins.

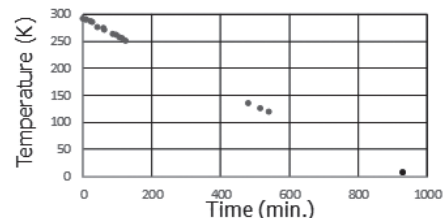


Fig. 2 Cooling test of the cryocooler with technology of suppressed heat inflow.

謝辞

本研究は、JST-ALCAによって支援されている。

参考文献

1. Y. Hashimoto, et al.: Abstracts of Superconducting SFQ VLSI Workshop, 2009, p.59