

Face-to-Face Double Stack 構造による REBCO 線材の電流輸送特性の ロバスト性向上

Improvement of Robustness of Current Transport Properties in REBCO Coated Conductor by Face-to-Face Double Stack Structure

鬼塚 雄大, 辻野 大樹, 鈴木 匠, 東川 甲平(九州大学); 鈴木 賢次, 富田 優(鉄道総研);
衣斐 頭, 町 敬人, 和泉輝郎(産総研); 木須 隆暢(九州大学)

ONITSUKA Yudai, TSUJINO Daiki, SUZUKI Takumi, HIGASHIKAWA Kohei (Kyushu-University);
SUZUKI Kenji, TOMITA Masaru (RTRI); IBI Akira, MACHI Takao, IZUMI Teruo (AIST); KISS Takanobu (Kyushu University)
Email: y.onitsuka@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

REBCO テープ線材の応用において、クエンチ伝搬速度の遅さから、その空間不均一性による電界集中などの影響を低減する仕組みが必要である。そこで、我々は、同線材の超伝導層を向かい合わせて貼り合わせる Face-to-Face Double Stack 構造 (FFDS 構造) を提案している (Fig. 1)。これは、2 枚の線材を低抵抗接合することで電流が欠陥部を迂回するように流れ、その空間不均一性の影響の低減が見込める。しかし、定量的な効果は明らかになっておらず、本研究では、局所臨界電流分布とそれを用いた分布定数回路の数値解析による FFDS 構造の電流容量とロバスト性の向上について述べる。

2. 実験・解析方法

本研究では、1mm 幅の REBCO 線材を対象とした。リール式走査型ホール素子顕微鏡を用いて二次元の残留磁界分布を取得し、局所 I_c 分布を求め、Fig. 2 の分布定数回路に反映した。分布定数回路における各領域の非線形抵抗 (R_{sc1}, R_{sc2}) は、局所的な電流輸送特性が記述可能なパーコレーション転移モデルを線材の電流輸送特性に拡張した大域的電流輸送特性のモデルを用いて求めた。また、界面抵抗 (R_i) については、ハンダ接合や銀拡散接合相当のものを仮定した。以上のモデルに対し、トータル電流印加時の電流分布と電界分布を数値解析によって評価した。最後に、回路両端の電圧を End-to-End の電圧として導出し、FFDS 構造の電流輸送特性として評価した。

3. FFDS 構造の評価

Fig. 3 に電流密度-電界特性の解析結果を示す。線材 1, 2 は各線材単体での特性を表しており、並列は界面抵抗が無限の場合に相当しており、2 枚の線材間で電流の移り変わりはなため各素線の和を表している。この結果より、銀拡散接合相当や現実的なハンダ接合相当の I_c は、並列接合時の 2 倍ほど高い値を示しており、 I_c の向上が確認できた。これは、FFDS 構造の界面抵抗により欠陥部を迂回するような電流のやり取りが行われたことで欠陥部の電流容量が改善されたためと考えられる。また、Fig. 4 に I_c 通電時の長手方向局所電界分布の解析結果を示す。並列時では局所的に高い電界のみが発生しているが、FFDS 構造時は、並列よりも大きな電流を通電しているにもかかわらず最大電界が 1/3 以下となり最大電界の低減がわかった。また、全長に亘って均一的に電界が発生していることから電界集中の抑制が確認できた。これにより応用時における局所発熱の抑制ができると考えられる。以上のことより、FFDS 構造は、REBCO 線材の電流輸送特性のロバスト性の向上に有効であると考えられる。

謝辞 本研究は、JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A2 の支援を受けて実施したものである

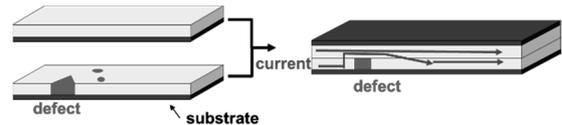


Fig. 1. Schematic diagram of Face-to-Face Double Stack (FFDS) structure

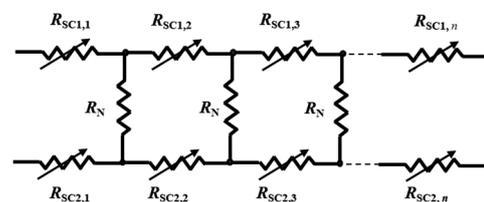


Fig. 2. Distributed parameter circuit of Face-to-Face Double Stack (FFDS) structure

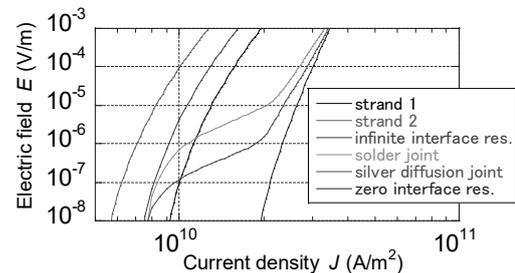


Fig. 3. E - J properties estimated for strands and FFDS.

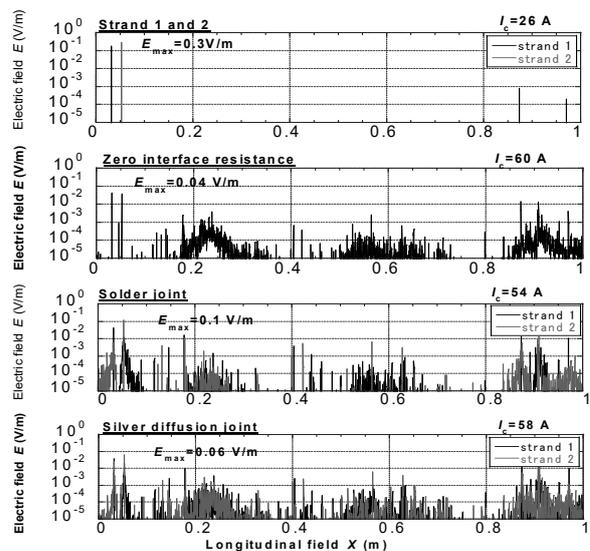


Fig. 4. Local electric field distributions estimated for different interfacial resistances between two strands.

リール式走査型ホール素子顕微鏡システムの マルチチャンネル化による長尺 REBCO テープ線材の高速評価

High-speed Characterization of REBCO Coated Conductor Based on Reel-to-reel Scanning Hall-probe Microscopy with Multi-channel Measurement

井手 暁仁, 熊谷 征久, 呂 琳, 鈴木 匠, 東川 甲平 (九大);
平田 渉, 飯島 康裕 (フジクラ); 木須 隆暢 (九大)

IDE Akihito, KUMAGAI Yukihisa, LYU Lin, SUZUKI Takumi, HIGASHIKAWA Kohei (Kyushu Univ.);
HIRATA Wataru, IIJIMA Yasuhiro (Fujikura); KISS Takanobu (Kyushu Univ.)
E-mail: a.ide@pse.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、長尺 REBCO テープ線材の局所臨界電流分布の評価手法としてリール式走査型ホール素子顕微鏡システム (RTR-SHPM) を開発してきた。本システムによれば、同線材の面内欠陥位置がわかるばかりか、応用上重要となる細線化線材ならびにマルチフィラメント加工線材までの評価が可能となる。一方で、センサの走査機構を有するために空間分解能を保った上での評価速度の向上に課題を抱えていた。本研究では、センサのマルチチャンネル化により、評価速度の高速化に挑戦した。

2. 装置の高速化

RTR-SHPM の原理は、線材を長さ方向に一定速度で搬送させつつ、ホール素子を幅方向に走査することで、磁化した線材の磁界分布を二次元で測定するというものである。従来の測定ではシングルチャンネルのホールセンサを使用していたが、今回はマルチチャンネルのホールセンサを適用する装置のアップデートを行った。

3. 結果、考察

30 m 長の 12 mm 幅線材を測定対象とした。まず、従来のシングルチャンネルのホールセンサを用いて高精度での測定可能な 12.0 m/h で測定した結果を Fig. 1 に示す。次に、マルチチャンネルのホールセンサを用いて 64.8 m/h で評価した結果を Fig. 2 に示している。この際に得られている磁界分布の長さ方向の空間分解能は 1 mm であり、幅方向の空間分解能は 70 ミクロンである。磁界強度の相違はセンサと線材の距離の違い、 I_c 値の相違は電界基準の違いを反映したものであるが、従来の測定と同等の情報を得られる状態で、評価速度を格段に向上することに成功した。また、本成果でマルチチャンネル測定に成功したことは、更なる多チャンネル化により評価速度をさらに向上させられること可能性を示すものである。

謝辞 本研究は、科研費 (JP16H02334) ならびに NEDO 高温超電導実用化促進技術開発「高磁場コイル用超電導線材の生産性向上における連続非破壊高精度特性測定技術開発」の一環として行ったものである。

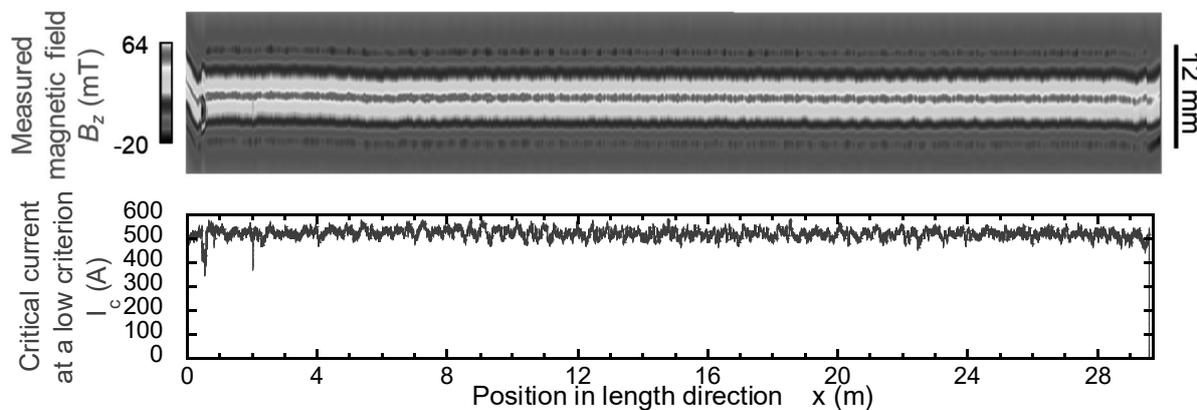


Fig. 1. Magnetic field distribution and the corresponding I_c distribution obtained by a single-channel sensor at 12.0 m/h.

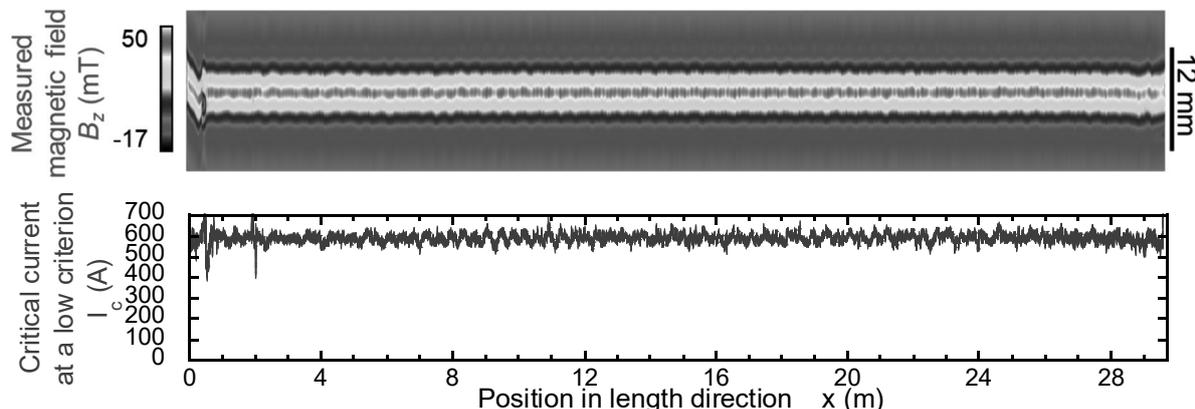


Fig. 2. Magnetic field distribution and the corresponding I_c distribution obtained by a multi-channel sensor at 64.8 m/h.

ホール素子を用いた高温超伝導ケーブル導体および接続線材の 通電電流分布評価

Investigation of current density profiles of spliced high- T_c superconducting tapes and cable core using scanning Hall probe method

筑本 知子, 山口 作太郎 (中部大学); シスキン・オレグ (ハリコフ大)

CHIKUMOTO Noriko, YAMAGUCHI Satarou Chubu Univ.); SHYSHKIN Oleg (V.N. Karazin National University)

E-mail: nchiku@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導 (HTS) ケーブルシステムやマグネット等の応用開発が盛んに行われているが、いずれも HTS 線材を複数用いて積層したり並列させたりしているため、通電時には相互の自己磁界の影響を受けることになる。特に HTS 線材はテープ状の構造となっており、またテープ面に垂直方向と平行方向の電磁氣的異方性が非常に大きいことから、電流の流れ方は非常に複雑な状況になっていると考えられる。さらに現在製造されている HTS 線材の単長が最長でも 1km 程度と短いことから、実際の応用機器においては必ず接続部がある。HTS 線材の接続技術としては、現在ははんだを用いた手法が主流であるが、接続抵抗のばらつきが大きいなどの課題があり、それにより電流分布はさらに複雑さを増していると考えられる。そこで、我々のグループでは集合導体や接合部での電流特性を非破壊で測定する方法として走査型ホールプローブを用いた評価手法と、そのデータを用いた電流分布の解析法の開発を行ってきた。今回は RE123 の接合試料の評価結果と現在開発を進めているケーブル用評価装置の概要について報告する。

2. 実験方法

接続部の測定に用いた試料は Super0x 製 GdBCO の接合線材 (4mm 幅、Cu plated、ラップ長 3cm、使用はんだは Pb39Sn61) であり、 I_c 値 (仕様) は約 135A、接合抵抗 (LN2 温度、実測値) は $78n\Omega$ であった。磁場分布測定は試料を液体窒素に浸漬し、 I_c 値以下の電流を流した状態で、3次元ホールプローブ (AREPOC 社製) を試料の長手方向を X、幅方向を Y、面に垂直方向を Z とし、ホールプローブを XY 方向にスキャンして、 B_x 、 B_y 、 B_z の 3 方向の磁場の測定を行った。

一方、ケーブルの磁場分布測定は Arepoc 社 (型番: HHP-VP) の横軸型ホール素子を用い、Fig. 1 に示すようケーブルに電流を流した状態で回転方向に対してホール素子が垂直になるように配置して磁場分布の測定をした。

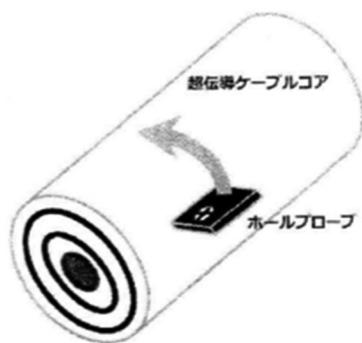


Fig. 1 ケーブル用磁場分布測定装置におけるホール素子の配置とスキャン方向

測定試料として、定格 2kA の直流送電用ケーブル (DI-BSCCO[®]、内導体: 11 本/12 本; 外導体: 16 本、外径 35mm) を用いた。

3. 磁場分布評価結果と電流分布の解析

Fig. 2 に 100A 通電時の接合試料の B_x 分布 (1mT 毎に色分け) を示す。ここで X、y、z 方向のうち、x 方向の磁場は接合方向での電流の乗り移りにのみ発生する磁場となる。この磁場分布測定データを用いた電流解析から、測定試料においては主に電流の下流側の接合端部において電流の乗り移りが起きていることがわかった。

次に Fig. 3 にケーブルの外導体 1 本に 150A の電流を通電した時の磁場分布測定結果例およびこれより計算で求めた電流分布計算結果を示す。今の所ホール素子-ケーブル導体間距離が 1cm の大きいため今後より近付けて分解能の向上を図る予定である。

謝辞

磁場分布測定について、染川晃輝、鶴岡誠、領木勇太、横山智一、芳村幸治、岩田暢祐の各氏のご協力に感謝いたします。

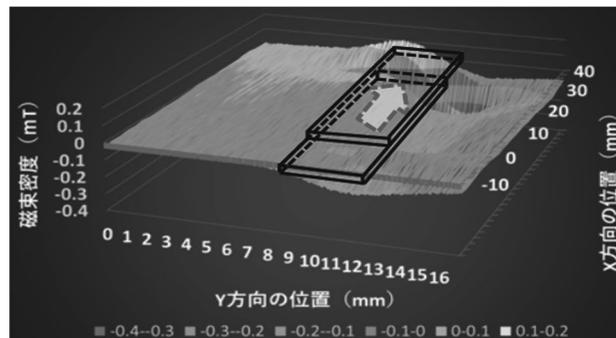


Fig. 2 100A 通電時の B_x 分布。黒線は線材配置、矢印は電流方向である。

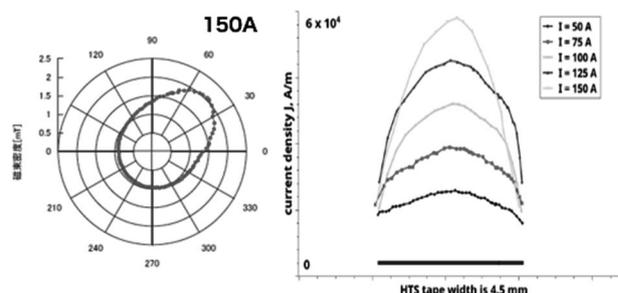


Fig. 3 ケーブルの外導体 1 本に 150A の電流を通電した時の磁場分布測定結果 (左) および 50-150A 通電時の電流分布計算結果 (右)。

航空機用積層導体の臨界電流のヒステリシス特性-1

Hysteresis Characteristics of Critical Current of Stacked Conductor for Aircraft-1

神田 昌枝, 山口 作太郎, 岩田 暢祐 (中部大学); シスキン・オレグ(ハリコフ大)

KANDA Masae, YAMAGUCHI Satarou, IWATA Yousuke (Chubu University);

SHYSHKIN Oleg (V.N. Karazin National University)

E-mail: kanda@isc.chubu.ac.jp

1. 緒言

近年、航空機の電気・電動化 (MEA: More Electric Aircraft) が進み、銅ケーブルに代わる軽量で大電流に耐える新しいケーブルが求められている。超伝導技術は、超伝導送電システムや超伝導モータなど新しい技術として宇宙・航空機応用に期待されている。一方、超伝導バスバーに大電流を流すと自己磁場が大きくなり、臨界電流が下がる。更に、交流を流す場合には均流化のために現在 Roebel 導体を利用しているが、線材を細く切り出すため臨界電流は半分以下になることが報告されている[1]。

本研究グループでは、航空機用の超伝導ケーブルとして、臨界電流 180A 級の Bi2223 テープ線材で 6 層 2m 長のケーブル導体をスタック状に積層したケーブル導体を開発し、臨界電流測定を行った。この Bi2223 テープ線材は、ヒステリシス特性が大きいと言われている。そこで、各層に流す電流によって臨界電流のヒステリシスを確認することを試みた。

2. 実験試料・方法

本研究で使用した試料は、ビスマス系 (Bi2223) の超伝導テープ線材を準備し、試料形状は横幅 4.6mm、厚み 0.35mm で 77K の時の臨界電流は 189A のものを使用した。線材は 6 層を重ねており、電流方向を反転させて積層させた。

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。外側のタップは、内側タップから端子までの発熱量を測定するために用いており、内側のタップは臨界電流測定のために使用した。本実験では、積層させた試料に Hall 素子 (HG-372A, Asahi Kasei Microdevices 製) を 6 個使用し、超伝導テープ線材の両面に Hall 素子をカプトンテープで取り付けました。

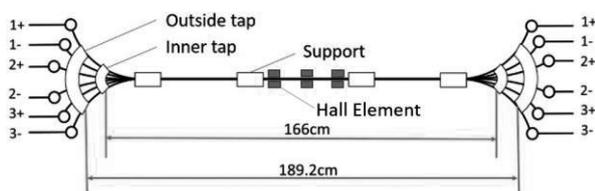


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

3. 実験結果・考察

Bi-2223 テープ線材を6層、重ねた超伝導テープ線材に各 1 本ずつ電流を流して得られたホール素子 (中上) の電圧を Fig.2 に示す。1A/s で 100A まで電流を上げた後、一度、電流をカットし、その後、150A、臨界電流まで再び電流を上げて、その時のホール素子の電圧を測定した。積層導体の 1+, 1-, 2+, 2- の順番に電流を流すと、電圧が下がることが分かる。この結果から、積層導体の 1+ に電流を流すことによって臨界電流のヒステリシスを確認した。

今回の測定では 6 個のホール素子でホール電圧を測定したが、全ての部分で臨界電流のヒステリシスを確認した。しかし、ホール電圧符号が必ずしも揃わないことから、部分的に循環電流が流れていることも想定している。

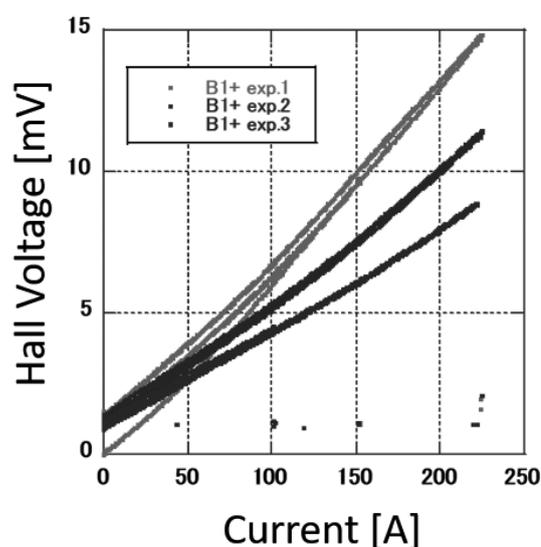


Fig.2 Different current of hall voltage at each layer.

4. 結言

本研究では、超伝導技術を超伝導送電システムや超伝導モータなど新しい技術として宇宙・航空機応用するため、本研究グループでは、航空機用の超伝導ケーブルとして、臨界電流 180A 級の Bi2223 テープ線材で 6 層 2m 長のケーブル導体をスタック状に積層したケーブル導体を開発し、臨界電流測定を行った。この Bi2223 テープ線材は、ヒステリシス特性が大きいと言われているので、各層に流す電流によって臨界電流のヒステリシスを確認することを試みた。その結果、積層導体の各層に電流を流し、臨界電流のヒステリシスを確認した。今後、この特性によって交流損の見積もりを行うことも予定している。そして、ホール電圧符号が揃っていないことから、層毎の電流密度分布が複雑なパターンになっていることも想定している。また、ヒステリシス特性が比較的低いと言われている Coated Conductor で同様な実験を予定している。

参考文献

1. S. S. Fetisov et al, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 26, NO. 3, APRIL 201, 4803204.

異なる厚みの基板上に作製した SmBa₂Cu₃O_y 線材の臨界電流の曲げ特性

Bending Characteristics of Critical Currents in SmBa₂Cu₃O_y Coated Conductors Fabricated on Substrates with Various Thicknesses

森口 凱安, 土屋 雄司, 一野 祐亮, 吉田 隆 (名大)

MORIGUCHI Yoshiyasu, TSUCHIYA Yuji, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)

E-mail: moriguchi.yoshiyasu@c.mbox.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(REBCO)の高磁場マグネットへの応用のための導体として、CORC®導体が研究されている。コイルサイズを増大させずにさらなる高磁場化が求められているため、より外径が小さい丸線の開発が盛んに行われている[1,2]。CORC®導体は円柱状の芯にREBCOテープ線材を巻きつける形状のため導体外径が太く、導体を小さい径で曲げると J_c が劣化する問題がある。導体の外径を小さくするためには、より細い径にREBCO線材を巻く必要があるが、より大きい曲げひずみが線材に加わるため J_c が低下する。そのため、小さい径の曲げを加えても J_c が低下しないREBCO線材の開発が重要である。線材表面の超伝導層にかかる曲げひずみ ε は、線材中立軸の曲げ半径 R と線材の厚み t から(1)式により求められるため、線材の厚みを薄くすることで超伝導層にかかる曲げひずみを低減できる。IBAD法を用いたREBCO線材では、線材の強度を担うため基板に高強度なHastelloy層が大部分を占めている。このHastelloy層を薄くすることで、超伝導層に影響を与えずに線材全体の厚みを変化させることが考えられる。本研究では、Reel to Reel Systemを用いたPLD法により作製したSmBa₂Cu₃O_y(SmBCO)線材のHastelloy層が薄くなるよう加工し、曲げひずみを加えたときの臨界電流に与える影響を検討した。

$$\varepsilon = \frac{d}{2R} \times 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

2. 実験方法

Reel to Reel System, KrF エキシマレーザーを用いたPLD法により、超伝導層膜厚800nmのSmBCO線材を厚さ75μmのIBAD-MgO基板上に作製した。線材の厚みをベルトディスクサンダにP400の研磨紙を用い、Hastelloy層が露出する線材裏面を研削することで変化させた。作製した線材の厚みをマイクロメータを用いて計測し、75μmから50μm及び30μmになるまで研削した。

超伝導特性は線材にレーザーエッチングにより100μm幅のブリッジを作製し、液体窒素中自己磁場下において直流四端子法を用いて電流電圧特性を測定し1μV/cmの電界基準から J_c を算出した。機械特性の評価には、Goldacker型曲げ試験機を用いた。液体窒素で冷却し、圧縮側に最大角度まで曲げ変形を加え、その後引張側に変形を加えて超伝導特性の測定を行った。

3. 実験結果及び考察

Fig.1に異なる線材厚みのSmBCO線材における J_c と、引張側の規格化 J_c の曲げ半径依存性を示す。 J_c はそれぞれの厚みにおけるゼロひずみ J_{c0} で規格化している。無加工の厚み75μm線材が7.5mmの曲げ半径で J_c が大幅に低下したのに対し、厚み50μm、30μmの線材は曲げ半径が6mmでも J_c が劣化しなかった。また、6mmの曲げを加えたとき厚み50μmの線材においては J_c が25%低下したのに対し、厚み30μmの線材においては15%低下した。この結果から、線材の厚みが薄いほど、同じ曲げ半径での J_c 減少率は低くなるということがわかった。

Fig.2に異なる線材厚みのSmBCO線材における、規格化 J_c の曲げひずみ依存性を示す。すべての厚みの線材において J_c のひずみ依存性は同様の挙動を示した。この結果から、線

材の曲げひずみの低減による、同じ曲げ径での J_c の向上が示唆された。(1)式から、30μmの線材では3mmの半径まで曲げても J_c が劣化しないことが予想できる。

今後は丸線運用時を想定し、より小さい曲げ半径における特性や印加する曲げ方向による特性の変化等について検討していく。

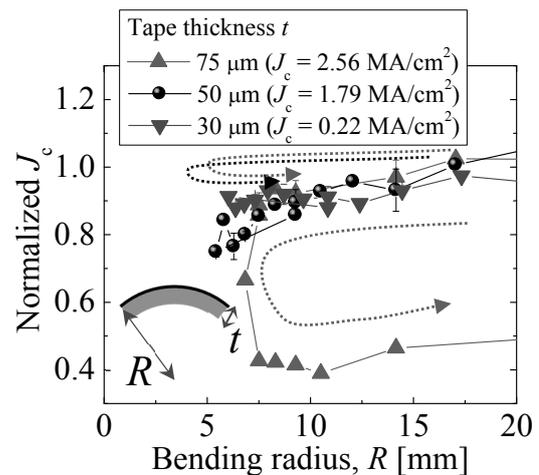


Fig. 1 Relationship between bending radius and normalized J_c for SmBCO coated conductors with various thicknesses at 77 K in a self-field.

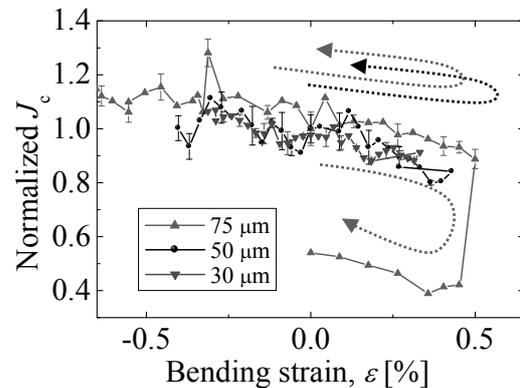


Fig. 2 Bending strain dependence of normalized J_c for SmBCO coated conductors with various thickness at 77 K in a self-field.

謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費(16H04512)と先端的低炭素技術開発(JST-ALCA)の助成を受けて実施した。本研究では、株式会社フジクラ飯島康裕様より金属テープに関して御協力を得た。また高エネルギー加速器研究機構研究機関菅野未知央様より曲げ試験機について御協力を得た。

参考文献

- [1] D. C. van der Laan, *et al.*: Supercond. Sci. Technol. **29** (2016) 055009.
- [2] S. Kar, *et al.*: Supercond. Sci. Technol. **31** (2018) 04LT01.

超伝導材料へのインフォマティクス活用に向けた輸送特性予測手法の検討

Percolation modeling of transport properties in superconducting materials

山本 明保(農工大, JST-CREST), 小原 拓也(農工大), 山中 晃徳(農工大, JST-CREST),

嶋田 雄介(東北大, JST-CREST), 波多 聰(九大, JST-CREST), 飯田 和昌(名大, JST-CREST)

YAMAMOTO Akiyasu (TUAT, JST-CREST), OBARA Takuya (TUAT), YAMANAKA Akinori (TUAT, JST-CREST), SHIMADA Yusuke (Tohoku Univ., JST-CREST), HATA Satoshi (Kyushu Univ., JST-CREST), IIDA Kazumasa (Nagoya Univ., JST-CREST)

E-mail: akiyasu@cc.tuat.ac.jp

1. 背景・目的

インフォマティクス技術や計算機シミュレーションなどの急速な進歩を受け、計算機の巨大情報処理能力を材料研究に活用するマテリアルズインフォマティクスが国内外で注目を集めている。我が国は、新物質の発見と材料化の両輪において、これまで世界の超伝導研究をリードし、先端産業競争力の基盤を支えてきた。一方で、国内においては少子高齢化が進み、各国では研究人材や研究開発投資額が増大する中、伝統的な実験科学的研究の強み(ノウハウ、データ等を含む)を生かした我が国らしい材料研究開発モデルが、今求められている。

超伝導材料において、輸送特性は応用上有用な特性の一つであるが、物質本来の有する物性と材料として得られる特性との間に大きな乖離があることから、その予測モデルを確立することはインフォマティクス活用に向けた重要な課題となる。

本研究では、超伝導材料へのインフォマティクス活用に向けて輸送特性予測手法の検討を行うことを目的とした。コネクティビティは電流輸送経路の有効断面積を表す指標であり、松下らにより組織欠陥との定量的関連が提案されている[1]。一方、平均場近似理論はマクロなトップダウン的手法であり、ローカルな情報と結びつけることが困難という課題があった。ローカルな情報に基づくボトムアップ的手法により、計算・データ科学や人工知能をも活用して特性予測を行うことができるようになれば、実材料中の電流制限箇所の予測やプロセスへの高速フィードバックに大きく貢献し得ることが期待される。

2. 方法

計算機内で発生させた、多結晶材料を模した仮想的な系について、まず常伝導状態の電流輸送に対して組織欠陥と異方性が及ぼす影響を計算した。電気的異方性を持つ結晶から構成され、組織欠陥として空隙を含む多結晶材料の輸送機構を、3次元キュービックサイト系パーコレーションモデルによるランダム抵抗ネットワークにより検討した。所定の占有確率で閉サイトを与え、各閉サイトにはランダムに結晶方位(θ, ϕ, ω)を付与し、その方位に依存する電気抵抗率を与えることで異方性を考慮した超伝導多結晶材料のモデルを構築した(Fig. 1)。有限要素法を用いた数値シミュレーションにより電流分布と系のコネクティビティ K を求めた。また予測した結果と、作製した試料の電気抵抗率測定結果との比較を行った。

3. 結果・考察

シミュレーション結果の例として、Fig. 2に閉サイトの占有確率 $P = 70\%$ とした空隙分布(a)と、 x 方向に電圧を印加した際の電流分布(b)とを、Fig. 3に異方性パラメータ $\Gamma = 4$ とした結晶方位分布(a)と、電流分布(b)とを示す。いずれのケースにおいて

も、絶縁・高抵抗部の影響により、電流が迂回、局所的に不均一分布する傾向が現れており、特定部への集中もみられた。系全体のコネクティビティ(有効伝導度)は、電流の「蛇行」と「滞留」により低下し、空隙を導入した場合は約38%、異方性がある場合は約74%と見積もられた。講演では電流制限箇所の考察と電気抵抗率の実測値との比較についても報告する。

謝辞

本研究は、JST-CREST(JPMJCR18J4)の支援、並びにJSPS科研費JP15H05519, JP18H01699の助成を受けたものある。

参考文献

- [1] A. Yamamoto *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **20**, 658-666 (2007);
T. Matsushita *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **21**, 015008 1-7 (2008).

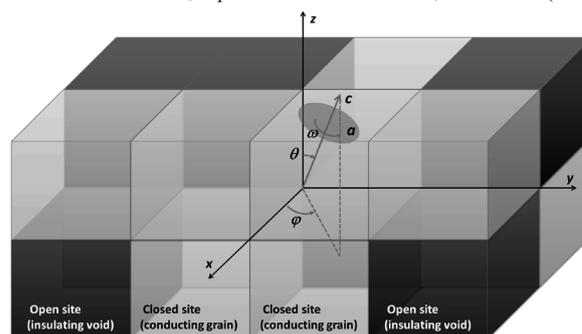


Fig. 1. 3D cubic site percolation model (white: closed, black: open).

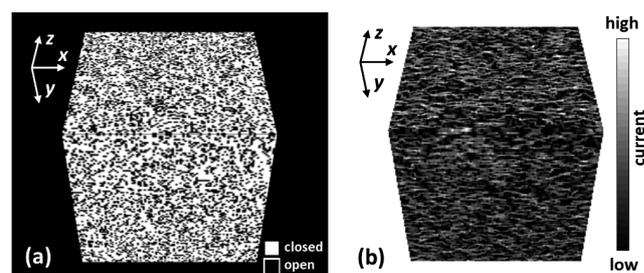


Fig. 2. Site distribution (white: closed, black: open) (a) and current density distribution (b) for a 3D cubic site system with $P = 70\%$.

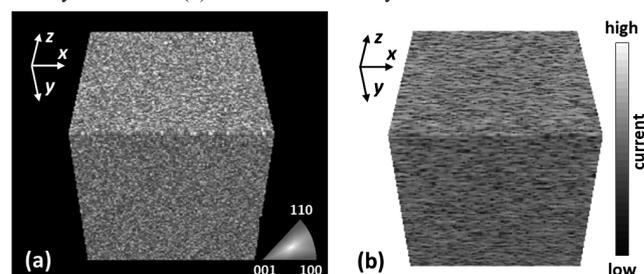


Fig. 3. Site orientation distribution (a) and current density distribution (b) for a 3D cubic site system with anisotropy $\Gamma = 4$.

量子磁束パラメトロンを用いたニューラルネットワークによる 数入力規模の論理ゲート構成の検討

Investigation of several-input-scale logic gate using quantum flux parametron neural network

山梨 裕希 (横浜国大); 山口 大貴 (横浜国大); 吉川 信行 (横浜国大)
YAMANASHI Yuki (YNU); YAMAGUCHI Daiki (YNU); YOSHIKAWA Nobuyuki (YNU)
E-mail: yamanashi-yuki-kr@ynu.ac.jp

1. はじめに

人工ニューラルネットワークは生物の脳の働きを模倣した回路網であり、従来のブール代数に基づく論理演算とは異なる情報処理を効率よく行える可能性がある。近年ではボルツマン機械学習を実現する回路としても注目を集めている。超伝導回路はその非線形な入出力特性から、以前より人工ニューラルネットワークを実現する系として研究が進められてきた[1]。本研究では、超伝導回路の中でも極めて小さな消費電力を特徴とする磁束量子パラメトロン(QFP)を用いて、人工ニューラルネットワークを構築することを検討した。

しかしながら、大規模なニューラルネットワークを構築するには、素子からの出力の多分岐が必要となる。多数の信号分岐は出力が微弱な超伝導回路の苦手とするところであり、大規模ニューラルネットワークへの応用は難しいと言える。そこで、おおよそ3分岐までの信号分岐で実現できる、数入力程度の超伝導ニューラルネットワークを検討し、2通りの方法で小規模な論理回路を実現する方法を検討した。

2. パーセプトロン型論理ゲート

QFPは前段からの入力電流(または磁束)の総和の正負によって出力の'0' '1'が変わる。この特性を持つQFPは、活性化関数として符号関数を持つニューロンとして応用することができる。これらのQFPニューロンをつなぐシナプスとして、我々は重みの正負を切り替えることができるSQUIDを用いた回路を提案した[2]。これらの要素回路を用いてパーセプトロン型の回路を構成することにより、外部または内部制御によって任意の入出力特性を持つ論理回路を実現できる。

図1に3入力論理ゲートのブロック図を示す。入力層、出力層を含めて計3層のニューロンと、層間をつなぐシナプスを制御することによって回路の入出力特性を任意の組み合わせに変えられる。この方法を用いて、従来の量子磁束パラメトロンセルを用いた場合に比べ、3入力排他的論理和が少ない素子数で実現できる。

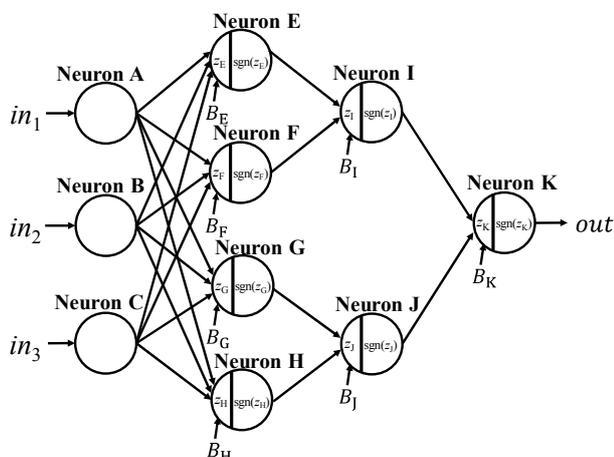


Fig.1 パーセプトロン型による3入力論理ゲート構成の例。2層目以降のニューロンにQFPを使う。

3. ボルツマンマシン型論理ゲート

もう一つのニューラルネットワークの実現方法として、すべてのQFPニューロンを重みづけ可能なシナプスでつなぎ、すべてのQFPニューロンを同時に励起させて回路全体のエネルギーが最小となるように回路状態を収束させることにより、所望の出力を得る、ボルツマンマシン型の構成を検討した。

図2にボルツマンマシン型のQFPニューラルネットワークによる2入力論理ゲートの構成を示す。特定のQFPニューロンに入力した状態で全てのQFPニューロンを励起することにより、出力を担うQFPニューロンの状態が確定し、出力信号が得られる。この回路を用いると、ニューロンとニューロン間の相互作用エネルギーを設計することにより、所望の論理回路が実現できる[3]。この際論理回路として確定した動作を得るには、所望の論理特性を持つ基底状態のエネルギーと第一励起状態のエネルギー間隔が熱エネルギー、具体的にはQFPを動作させる4Kの熱エネルギーよりも十分大きくなるように回路パラメータを設計する必要がある。この条件を守っていれば、ニューロン自体とニューロン間相互作用のエネルギーを調整することにより、あらゆる論理回路が実現できる。

本手法は全てのQFPニューロンを一斉励起することができることから、パーセプトロン型の構成に比べて出力を早く得ることができる。また、大規模なQFPで問題になる位相を揃える回路設計、ならびにそのために必要となるオーバーヘッドの問題を解決できる可能性がある。

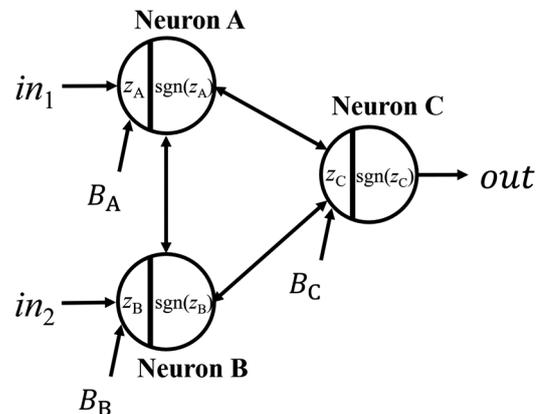


Fig.2 ボルツマンマシン型の構成による2入力論理ゲートの構成。ニューロン間の矢印は相互作用を表し、その大きさはQFPニューロンの磁気結合強度を変えることによって調整できる。

参考文献

- 例えば F. Chiarello et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 26, (2013) p.125009
- 山口他, 応用物理学学会春季講学術演会, (2019)
- K. Imafuku et al., Adiabatic Quantum Computing Conference 2016 (AQC2016)

光ファイバ入力光学 LEKID アレイの作製

Fabrication of Optical LEKID Array with Optical Fiber Inputs

寺井 誠, 栄元 雄山, 成瀬 雅人, 田井野 徹, 明連 広昭(埼玉大院理工)
 TERAJI Makoto, EIMOTO Yusan, NARUSE Masato, TAINO Tohru, and MYOREN Hiroaki (Saitama Univ.)
 E-mail: m_terai@super.ees.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

生体試料からの蛍光を時間相関分光することにより様々な情報を得ることができる。中赤外領域での測定が可能で光子数検出可能なイメージング検出器として、光学 LEKID アレイを検討している[1,2]。入力に光ファイバアレイを用いることを前提に検出器の間隔を 250 μm として LEKID を設計し、コプレーナ線路を用いたマイクロ波読み出しによる基礎的な応答を測定した。講演ではさらに詳細な設計およびマイクロ波領域での共振特性などを詳しく報告する。

2. 光学 LEKID アレイの設計

光学 LEKID アレイの 1 素子分の設計レイアウトを図 1 に示す。入力をシングルモードの光ファイバアレイと仮定して、16 μm 角のミアンダ型のインダクタ L を光検出部とし、幅 154 μm 、高さ 30 μm のインターデジタル型のコンデンサ C と接続した LC 共振器を構成し、図の下部に配置されたコプレーナ線路と結合する。

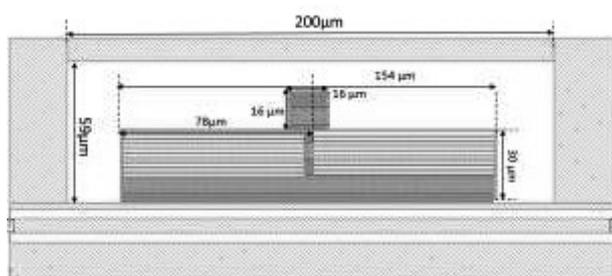


図 1 LEKID1 素子分の設計レイアウト

ミアンダ型のインダクタは、厚さ 4 nm、幅 500 nm の NbN ナノワイヤで形成され、主に力学的インダクタンスによる 1 μm 当たり 0.05 nH 程度のインダクタンスを仮定して設計した。それぞれの LEKID の共振周波数を変えるために、インターデジタル型のコンデンサのクシの本数を変えて容量を設計した。図 2 は、インターデジタル型のクシの本数と静電容量の関係を示している。クシの本数に比例してキャパシタンスも増加するため、設計が容易である。

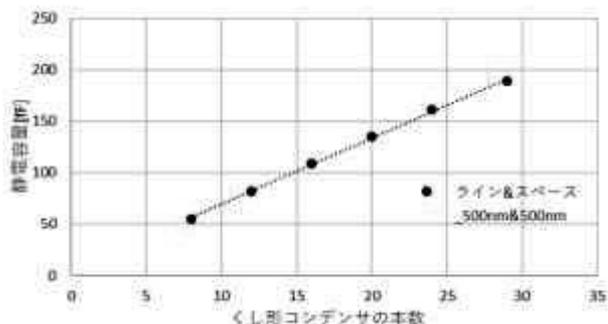


図 2 インターデジタル型コンデンサのクシの本数と静電容量の関係

これらから、2-8 GHz の間で等間隔に共振ピークを持つように 6 個の LEKID を設計し、コプレーナ線路の中心部に配置した。

3. 素子の作製

NbN 薄膜は、MgO(100) 単結晶基板の上に室温で Ar と N₂ の混合ガス中で直流スパッタリング法にて堆積した。膜厚は、超伝導ナノワイヤ 単一光子検出器と同様に 4 nm とした。微細加工は、電子ビーム描画法とフォトリソグラフィ法を用いて行った。

4. 測定結果

作製した LEKID のマイクロ波領域でのマイクロ波透過特性は、0.5K に到達可能な無冷媒冷凍機を用いて測定した。図 3 は、0.9K におけるマイクロ波透過特性 S₂₁ を示している。

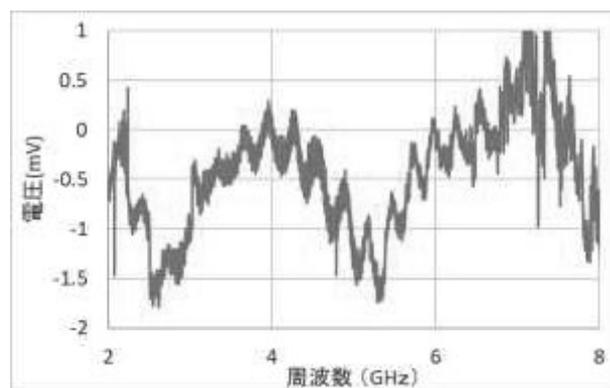


図 3 作製した素子のマイクロ波透過特性

明らかに、2.0785 GHz と 4.788 GHz に吸収ピークが観測された。これらの吸収ピークの周波数より、ミアンダ型のナノワイヤインダクタの 1 μm 当たりのインダクタンスは 0.12 nH と見積もられた。今後、さらに LEKID とコプレーナ線路の結合を大きくするために NbN 薄膜の膜厚を 20 nm として LEKID のレイアウト設計を行い、試作・測定を行う予定である。

5. まとめ

膜厚 4 nm の NbN ナノワイヤを用いた LEKID を作製し、共振ピークの観測に成功した。コプレーナ線路との結合を大きくするため、NbN の膜厚を 20 nm とした LEKID を作製し、光学 LEKID アレイ検出器を作製するための基礎資料を収集していく予定である。

参考文献

1. S. Doerner, A. Kuzmin, K. Graf, I. Charaev, S. Wuensch, and M. Siegel, *Journal of Physics Communications*, vol. 2, no. 2, p. 025016, Feb. 2018.
2. B. A. Mazin et al., *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 125, no. 933, pp. 1348–1361, Nov. 2013.

高温超伝導 SQUID を用いた板材のガイド波試験技術 -その 1-

HTS-SQUID-based Ultrasonic Guided Wave Testing on Boards -No. 1-

廿日出 好, 東 雄貴, 渡邊 敬祐 (近畿大学)

HATSUKADE Y., AZUMA Y., WATANABE K. (Kindai Univ.)

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

1. 緒言

我々は、長大な配管やパイプのリモート検査技術として、超音波ガイド波と高温超伝導 (HTS) SQUID を組み合わせたガイド波試験技術の開発を行ってきた[1, 2]. 本技術は板材にも応用可能であり、高精度かつ高効率な検査技術が求められている炭素繊維強化プラスチック (CFRP) への適用可能性を検討している. 今回, CFRP を含む板材に適用可能な HTS-SQUID ベースのガイド波試験装置を開発して, 金属及び CFRP 板材に適用し, 材料特性が異なるサンプルにおけるガイド波伝達速度や減衰係数に関する基礎的実験を行ったので報告する.

2. サンプルと板材用 SQUID 式非破壊検査装置

本研究では, 研究室内で取り回しのきく幅 300~350 mm, 長さ 1000 mm, 厚さ 3 mm 程度のアルミ板, 鉄板, 繊維構成が異なる 4 種類の CFRP 板材を用意した. CFRP の繊維構成は単方向 0° 配向 (ガイド波の進展する長手方向) 積層, 単方向 90° 配向積層, 0° 90° 交互積層, 3K 平織クロス積層を用意した. 配管等シリンダ形状において, 波の伝達方向と垂直に変位するせん断 (ねじり) 横波は T(0, 1) モードガイド波と呼ばれるが, これに対応する板形状のせん断横波は SH 波である. 今回, SH 波を発生させるため, Fig.1 に示すように, 事前に電磁石で磁化した幅 24 mm のニッケル薄板を, 上記サンプルの左右両端から 250 mm の場所に 2 枚貼り付けた. 片側には楕円形のダブル D 型励振コイルを設置して送信器とし, 残りは受信器に用いることとした.

上記サンプルにおいてガイド波の送受信を行うため, Fig.1 に示す HTS-SQUID ベースのガイド波検査装置を構築した. HTS-SQUID グラジオメータは液体窒素を冷媒とする小型のクライオスタット内で伝導冷却により約 78 K に冷却した. 上記サンプルの構成で受信部に SH 波を生じさせた際, 長手方向を x 軸とすると, 発生する SH 波由来の磁気信号は x 方向に振動する波となるため, 本クライオスタットでは, SQUID グラジオメータを垂直方向に設置し, x 方向磁場成分の z 方向微分 (勾配 dB_x/dz を測定できる構成とした. この SQUID はサンプルの受信部ニッケル板の中心直上にリフトオフ約 8 mm で設置した. 板の上でグラジオメータを y 方向に移動させて計測を行うことで, ガイド波の y 方向分布を計測することができる. 送信部では, 楕円形の 8 の字コイルの中心部がニッケル薄板と重なるように設置し, これに数 10 kHz の正弦波バースト電流を印加して励振磁場を発生, これにより SH 波を発生させる. SQUID 出力電圧はオシロスコープでモニタしながら, PC 上で開発した LabVIEW プログラムで記録し, 即座に波形表示や周波数解析, コンターマップ作成を行うことができる. S/N 向上のためデータは 256 回の加算平均を行った.

3. ガイド波計測実験

上記装置を用いて, 各サンプルに対して, 設置した送信器コイルに 20~80 kHz, 1 周期の正弦波バースト電流を印加し, 超音波ガイド波を発生させた. このガイド波由来の磁気信号を, 受信部中央に設置した SQUID グラジオメータで計測した. 全サンプルで SH 波を発生させ, 群速度を結果から計算した結果, Table 1 に示すように, 速度は鉄>>アルミ>>CFRP0° 90° 交互積層>>単方向 0° 積層>>単方向 90° 積層>>平織クロス積層の順となった. また, 伝達に伴うガイド波の減衰を

調べた結果, 上記速度から換算したガイド波伝達距離と信号強度の関係は Fig. 2 に示すようになり, 減衰の緩やかさ=伝達距離の長さは鉄>>アルミ>>CFRP 単方向 90° 積層>>平織クロス積層>>単方向 0° 積層>>CFRP0° 90° 交互積層の順となった. CFRP はいずれも減衰が激しく, 現状では約 1.5 m も伝達すればノイズレベルまでガイド波が減衰することがわかった. 現在, ニッケルより磁歪効果が大きな新磁歪材料を導入したガイド波強化の方法等について検討を行っている.

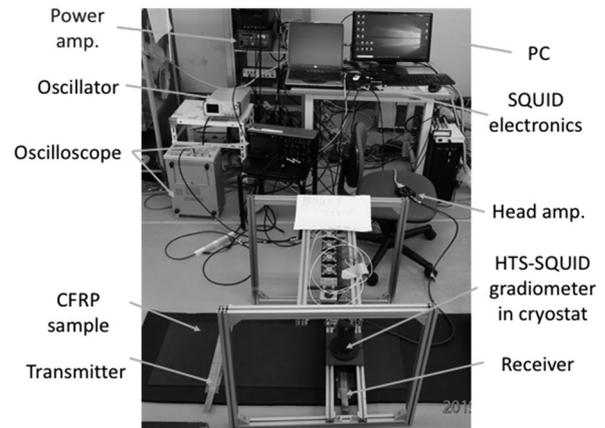


Fig.1 Schematic diagram of HTS-SQUID-based guided wave testing system for board sample.

Table 1 Summary of group velocity characteristics

Sample	Iron	Aluminum	CFRP (0 deg. laminate)	CFRP (90 deg. laminate)	CFRP (0, 90 deg. alternating laminate)	CFRP (cross plain woven laminate)
Group velocity [mm/ms]	3240	3040	1800	1785	1740	1640

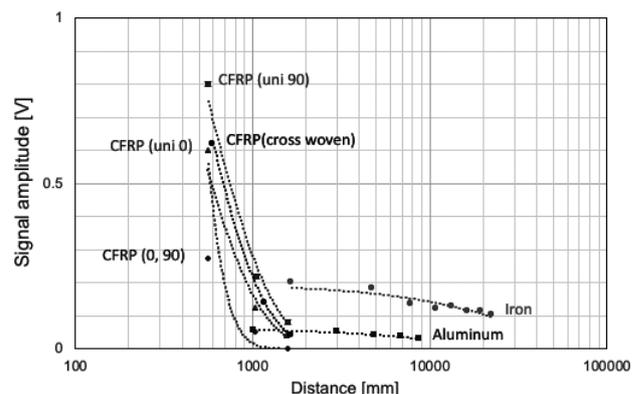


Fig.2 Vibration damping characteristics of SH waves on board samples, such as iron, aluminum, CFRP unidirectional 0 degree CF laminate, unidirectional 90 degree CF laminate, 0 and 90 degrees CF alternating laminate, and 3K 0 and 90 degrees cross plain woven CF laminate.

参考文献

- [1] 廿日出好, 他, 2016 年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集, 1D-p03, p.55, 2016.
- [2] 廿日出好, 他, 2016 年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集, 1D-p04, p.56, 2016.

大規模超伝導量子アニーリングマシンの実現に向けたフリップチップボンディングによる超伝導接続の技術開発

Development of superconducting connection by flip chip bonding for realization of large scale superconducting quantum annealing machines

牧瀬 圭正, 日高 睦夫, 仲川 博, 藤井 剛, 菊地 克弥, 川畑 史郎 (産総研)

MAKISE Kazumasa, HIDAKA Mutsuo, NAKAGAWA Hiroshi, FUJII Go, KIKUCHI Katsuya, KAWABATA Shiro (AIST)

E-mail: kf-makise@aist.go.jp

1. はじめに

2011年にD-Wave Systemsが量子アニーリングマシンを商用化し、量子アニーリングマシンや量子コンピューターに大きな注目が集まっている。量子アニーリングは、組合せ最適化問題を量子効果を利用して解くもので、従来のコンピューターと比較して、実用可能な計算時間で解を得ることができるため人工知能・製造・物流・小売・金融・交通・社会インフラ・医療・ヘルスケア・農業・製薬等、への応用が期待されている。そのため世界的に研究開発が激化しており、実用化に向けた大規模化や高性能化へハードウェア開発が進んでいる。このハードウェアの開発でも進んでいるのは超伝導エレクトロニクスと超伝導量子回路である。この技術を利用した超伝導量子アニーリングマシンはジョセフソン接合からなるSQUIDが基本素子として構成される。SQUIDは量子化磁束を利用するため半導体のCMOSと比較しても専有面積が大きく、想定とする実用可能なレベルでの集積化は大きな課題となっている。その課題を解決する解として、フリップチップやシリコン貫通ビアを用いた3次元実装とパッケージング技術が検討されている。今発表では、大規模量子アニーリングマシンに向けたフリップチップボンディングによる超伝導接続の開発の現状について報告する。

2. デバイス構造とテストチップ設計

我々はNbを使ったジョセフソン接合によって百万量子ビット級の量子アニーリングマシンの実現を目指している。1量子ビットの大きさは、約 $6,400 \text{ nm}^2$ と見積もられ、この量子ビットを 20 mm 角チップに敷き詰めると、1チップに62,500量子ビットを搭載可能である。我々が提案する構造では16チップ搭載することで百万量子ビットの超伝導量子アニーリングデバイスを構成することが可能となる。これを実現するためには高密度の半田バンプ接続が必要となる。これは 1 mm^2 当たり約1000個の半田バンプとなる。さらにそれらのバンプがチップ間を超伝導で接続されなければならない。これらを実証するために我々は30000を超える直列族されたバンプアレイと半田バンプを介してSQUID回路を試作し、実験を行った。チップはニオブ配線にTi/Auのパッドと鉛-インジウムの半田バンプを用いている。(図1参照)バンプ径は $10 \mu\text{m}$ と $30 \mu\text{m}$ で高さは $5 \mu\text{m}$ である。チップ上に作成したアライメントマークによって上下チップはアライメントし、その誤差は $1 \mu\text{m}$ 以下の精度でフリップチップ接続が可能である。フリップチップ接続時のチップ温度は 110°C を最大とし、ジョセフソン接合の熱負荷を抑えている。

3. 実験結果

図2にフリップチップ接続したバンプアレイの抵抗温度依存性を示す。温度の低下とともに抵抗が減少する典型的な金属の抵抗温度依存性を示している。さらにバンプアレイの数に比例して抵抗が増加している。これは超伝導バンプがショートや短絡なく接続されていることを反映していると思われる。さらにバンプの数に依存せず9Kと5K付近で2段の超伝導転移が観測された。9Kはニオブ配線の超伝導転移であるか

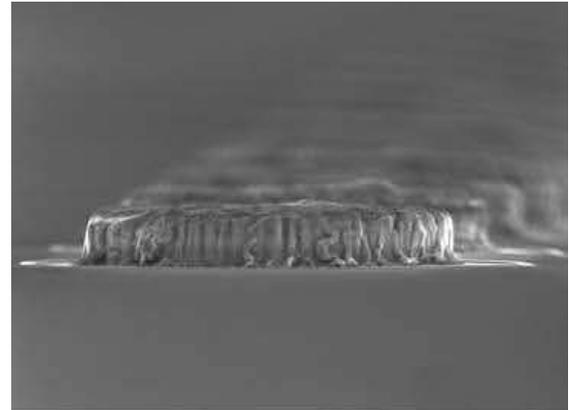


Fig.1 Scanning electron microscope image of lead-alloy bumps. The nominal diameter and height of the bumps are 30 and $5 \mu\text{m}$, respectively.

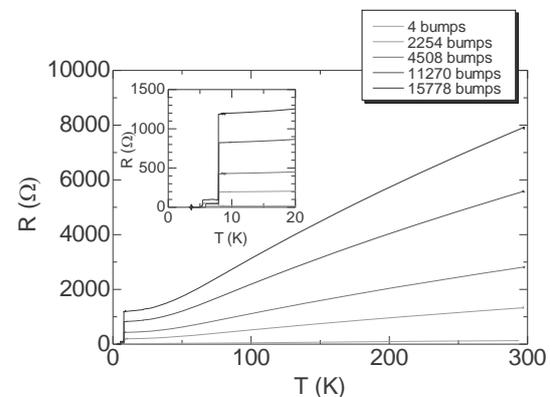


Fig.2 Temperature dependence of Resistance for several daisy chain.

ら半田バンプの転移温度が 5K であると考えられ、バンプ接続が極めて均質で良好あることも意味している。この結果から我々が目標とする半田バンプ密度の超伝導接続に実証した。さらに今発表ではバンプの接触抵抗とバンプの臨界電流の依存性についても触れる。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。

超伝導デジタル回路用冷凍機システムにおける 広帯域配線からの熱流入の評価

Evaluation of Heat Inflow through Broad-Band Inputs and Outputs in Cryogenic Systems for Superconductor Digital Circuits

田中 雅光¹, 佐野 京佑¹, 山下 太郎^{1,2}, 藤巻 朗¹ (¹名大, ²JST さきがけ)
 TANAKA Masamitsu¹, SANO Kyosuke¹, YAMASHITA Taro^{1,2}, FUJIMAKI Akira¹ (¹Nagoya Univ., ²JST-PRESTO)
 E-mail: masami_t@ieec.org

1. はじめに

我々は、0.1Wの冷却能力を持つ4K-GM冷凍機を用い、単一磁束量子(SFQ)回路などの超伝導デジタル回路によるシステム構築を目指している。近年、超伝導集積回路の低消費電力化・高エネルギー効率化に関する研究が進展し、低電圧駆動や交流駆動で1,2桁の低エネルギー化が可能となったり、あるいは、断熱動作や可逆演算のアイデアを取り入れることで、究極的な低エネルギー動作が可能であることが示されたりしている。

集積回路チップにおける消費電力が非常に小さく抑えられるようになると、回路の動作温度である4Kステージへの熱流入や、集積回路以外での発熱をいかに抑えるかが重要となる。室温エレクトロニクスとの広帯域な信号アクセスの確保と、熱流入の抑止を両立するため、我々はこれまでに高温超伝導体を用いた断熱配線技術の開発に取り組んできた[1]。本稿では、配線からの熱流入の影響を定量的に評価することを目的として行った冷却試験の結果を報告する。

2. 冷凍機システムの構成

本研究では、数千接合規模の低エネルギー SFQ 回路を想定し、高周波信号線 10 本、100mA 級の大電流直流バイアス供給ツイスト線 5 対、小電流バイアス供給ツイスト線 5 対、ヒーターツイスト線 2 対、温度センサ用ケーブル 2 対を有する小型冷凍機システムを開発している。これらの配線は、室温から 60K ステージを経由して 4K ステージへ接続される。高周波信号はセミリジッド同軸ケーブルを用い、それ以外の配線は熱伝導をできるだけ抑えるため、60K ステージへはリン青銅線、4K ステージ上では NbTi 線を用いている。

60K ステージから 4K ステージへの熱流入を抑制しながら、広帯域信号アクセスを確保するため、熱伝導度の低いイットリア安定化ジルコニア (YSZ) 基板上に成膜した YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO) 薄膜を加工した、特性インピーダンス 50Ω のコプレナー型導波路による YSZ-HTS 断熱配線基板を製作した。YBCO 薄膜は厚み 500nm である。熱流入は主に基板を介して起こる。今回使用した基板は、大きさ 40mm × 40mm、厚さ 0.25mm で、YSZ の熱伝導率を 1.8 W/m/K とすると、熱流入は基板 1 枚当たり 29mW と見積もることができる。1 枚の YSZ-HTS 配線基板には、11 本の導波路が構成され、バイアス線も含むすべての配線に適用する。

冷凍機システムでは、計 3 枚の配線基板を用いる。熱流入の合計は、YSZ-HTS 基板を用いれば 0.1W GM 冷凍機の冷却能力以内にちょうど収まる計算となる。

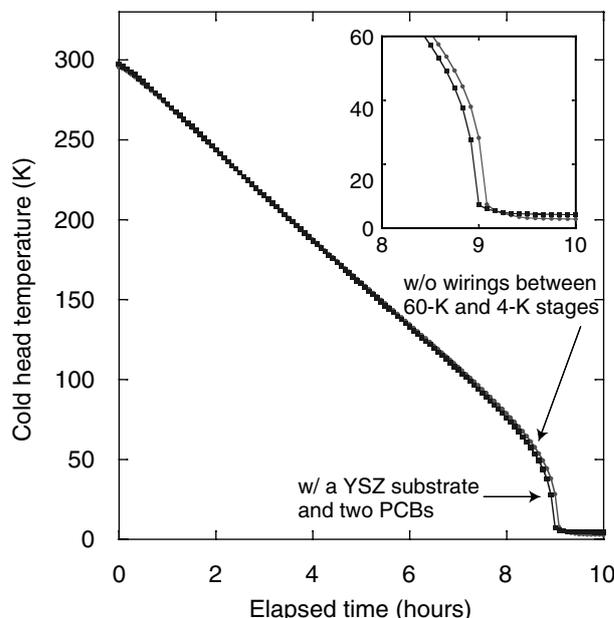


Fig. 1 Cooling test results without and with a YSZ-HTS substrate and two PCBs (sampling interval: 5 minutes).

3. 冷却試験結果

まず、YSZ-HTS 基板による熱流入抑止効果を確認するため、配線基板を 3 箇所のうち 1 箇所に取り付けて冷却した。およそ 10 時間で温度は 2.33K へ到達し安定した。到達温度は、YSZ-HTS 基板を取り付ける前後でほぼ変わらず、断熱配線が期待通り機能していると考えられる。

次に、残り 2 箇所に熱伝導度がより高いと考えられる、銅箔プリント基板 (PCB) を取り付けて冷却した。Fig. 2 に室温から冷却した際の経過時間とコールドヘッドの温度変化を計測した結果を示す。およそ 9 時間後までの冷却経過に違いはほとんどないが、到達温度は 3.76K に上昇した。今回は冷凍機の能力に余裕があったため、目標の 4K 以下まで冷却ができたものと考えられるが、まだ含まれていない集積回路チップの発熱や、電流供給によって発生するジュール熱が更に加わることを考慮すると、YSZ-HTS 断熱配線技術は本冷凍機システムには必須であると推定される。

参考文献

1. 藤巻朗, 2014 年春季低温工学・超伝導学会.

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (JP18H05211, JP18H01498) 及び JST 未来社会創造事業 (JPMJMI18E1) の支援を受けて実施したものである。

高磁場中の超伝導テープ線材の履歴損失

Hysteretic losses in superconducting tape wires in large magnetic fields

馬渡 康徳, 東 陽一 (産総研)
 MAWATARI Yasunori and HIGASHI Yoich (AIST)
 E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

1. はじめに

超伝導線材・導体の損失の低減は、電力機器等へ応用するための重要な課題の一つである。特に高速で変動する磁場中の超伝導線材では大きな履歴損失を生じるため、この場合の損失を精密に評価する必要がある。

本研究では、様々な形状をもつ超伝導線材について、高磁場中の履歴損失を導く一般的な理論解析手法について考察した。平坦な超伝導テープ線材に垂直磁場と輸送電流とを同時に印加する場合や、CORC 導体のように螺旋形状をもつ線材について履歴損失の解析的表式を導いた。

2. 高磁場中の超伝導体の電磁応答

超伝導線材に磁場 $B_a(t)$ を印加する場合の電磁応答について考察する。超伝導線材における磁場 B は、印加磁場 $B_a(t)$ と線材中に流れる遮蔽電流による磁場 B_s との和と与えられる。印加磁場(交流の場合は交流磁場振幅)が線材の中心到達磁場 B_p より十分大きい場合、 $|B_a| \gg |B_s| \sim B_p$ なので遮蔽電流による磁場の効果は無視することができ、Maxwell-Faraday の誘導則は次のように近似することができる[1]。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \approx -d\mathbf{B}_a / dt \quad (1)$$

(1)式を積分して電場 \mathbf{E} が得られ、臨界電流密度 J_c が一定とする臨界状態モデルにより、電流密度 $\mathbf{J} = J_c \mathbf{E} / |\mathbf{E}|$ が得られる。損失パワー密度は $p = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} = J_c |\mathbf{E}|$ なので、これを超伝導体内で空間積分すれば損失パワー $P(t)$ の表式が導かれる。

3. 平坦な超伝導テープ線材の損失

上記手法により、平坦な超伝導テープ線材に対して輸送電流 I_t と外部磁場 B_a を同時掃引する場合の損失について考える。超伝導テープの x 方向の幅は w で、 z 方向の厚さは d_s ($\ll w$) であり、 y 方向に十分長いものとする。外部磁場 $B_a(t)$ は z 方向に印加される。(1)式を積分して、電場(y 成分)は $E_y = -(dB_a/dt)(c_0 - x)$ で与えられる。ここで、 c_0 は I_t に比例するパラメータである。損失パワー密度は $p(x,t) = J_c |dB_a/dt| |c_0 - x|$ であり、 $p(x,t)$ を xz 断面 ($-w/2 < x < w/2, -d_s/2 < z < d_s/2$) で空間積分すると、線材単位長あたりの損失パワー P_{flat} は次のように導かれる。

$$P_{\text{flat}}(t) = \frac{1}{4} J_c d_s w^2 \left| \frac{dB_a(t)}{dt} \right| \left[1 + \left(\frac{I_t(t)}{I_c} \right)^2 \right] \quad (2)$$

例えば、超伝導テープ線材を用いたコイルを励磁(消磁)する場合、輸送電流および線材が感じる印加磁場 B_a はほぼ一定速度で掃引されるので、 $|dB_a/dt| = \beta$ は一定で、 $I_t(t)/I_c = \alpha t$ は t に比例すると考えられる。(2)式によれば、この場合の損失パワーは $\beta(1 + \alpha^2 t^2)$ のような2次関数の時間依存性となる。また、印加磁場および輸送電流が交流の場合でも、(2)式を交流一周期 ($0 < t < 2\pi/\omega$) で積分して履歴損失を求めることができる。

4. 螺旋巻き円筒状導体の磁場中損失

CORC 導体[2]のモデルとして、Fig. 1 に示した、一枚の超伝導テープ線材(幅 w , 厚さ d_s) を半径 R の円筒上に螺旋巻きした導体の磁場中損失について考察する。ただし、超伝導テープは自身が重ならないよう単層で巻かれ、螺旋巻きピッチ長 L_p は十分長いものとする。このように、ゆるく螺旋状に変化する形状をもつ線材の損失は、長手方向に一樣な(螺旋状ではない直線状の)線材について、任意の傾き角 φ について損失を求め、 $0 < \varphi < 2\pi$ で平均すればよいことが知られている[3]。

この方針のもとに、円筒上にゆるく螺旋巻きした超伝導テープ線材の磁場中損失 P_{helical} について解析し、次のような結果が得られた。

$$P_{\text{helical}}(t) = \frac{1}{4} J_c d_s w^2 \left| \frac{dB_a(t)}{dt} \right| \frac{2 \sin(w/4R)}{\pi (w/4R)} \quad (3)$$

ここで、 $(1/4)J_c d_s w^2 |dB_a/dt|$ の因子は、(2)式において輸送電流の影響を無視した ($I_t/I_c \rightarrow 0$) 場合の損失であり、円筒上に螺旋巻きした効果は $(2/\pi)(4R/w)\sin(w/4R)$ の因子として現れている。円筒半径が線材幅に比べて十分大きい場合 ($R \gg w$)、この因子は $2/\pi = 0.637$ となり、ゆるくツイストしたテープ線材の損失に一致する[3]。一方、テープ線材が重ならない限界まで円筒半径を小さくした場合 ($R \rightarrow w/2\pi$)、この因子は $(2/\pi)^2 = 0.405$ となり、円筒径を細くすれば損失が小さくなることわかる[4]。

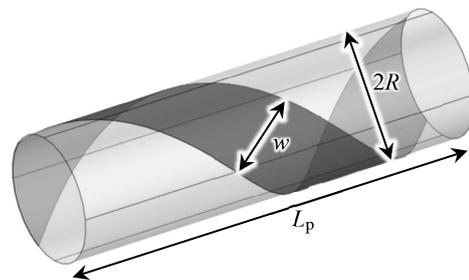


Fig. 1: Helically wound superconducting tape wire of width w and helical pitch L_p , conforming to a cylinder of radius R .

参考文献

- [1] Y. Mawatari, et al., Appl. Phys. Lett. **70**, 2300 (1997).
- [2] D. C. van der Laan, Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 065013.
- [3] Y. Higashi, H. Zhang, and Y. Mawatari, IEEE Trans. Appl. Supercond. **29**, 8200207 (2019).
- [4] Y. Higashi and Y. Mawatari, "Analytical modeling of the magnetization loss on a helically wound superconducting tape in a ramped magnetic field," unpublished.

磁界の波形が RE 線の磁化損失特性に及ぼす影響の検討

Influence of magnetic field waveform on magnetization loss in RE tape

小川 純, 近藤 和人, 福井 聡 (新潟大学)

OGAWA Jun, KONDO Kazuto, FUKUI Satoshi (Niigata University)

E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線に生じる交流損失は 100Hz 以下の条件では渦電流損失の影響を無視することが可能であり、周波数に対し比例しヒステリシス的に生じ損失が増加する。この特性は、一般的に知られたものである。一方、[1]により波形が異なる通電を行ったときに1サイクル当たりの損失が異なる現象が報告されている。この理由として臨界状態モデルではヒステリシス的に生じるが n 値により完全なヒステリシス損失ではないことが考えられる。そこで、本件研究では前述のデータに RE 線に波高値が同じ様々な形状の交流磁界を印加し磁化損失測定を行い、これと同様な条件における数値解析を Comsol の磁場定式化モデルを用い検討を行った。

2. 磁界の印加条件

実験に使用した超電導線は幅 5.0mm、臨界電流値 185.4A、 n 値 40 の超電導線を使用した。磁界の印加方向は線材面に対し垂直に印加し、熱的測定法により磁化損失測定を行った。印加した磁界は図1に示すような正弦波、三角波、CF 制御正弦波、飽和正弦波2種類の5種類の磁界を印加し、それぞれの磁界の波高値は 20mT とした。三角波は正弦波に近い波形、CF 制御正弦波は正弦波ではあるが、インターバルがある波形、飽和正弦波は波高値の持続時間が長い条件としてこれらの波形を設定した。これと同条件の数値解析を Comsol により計算を行った。

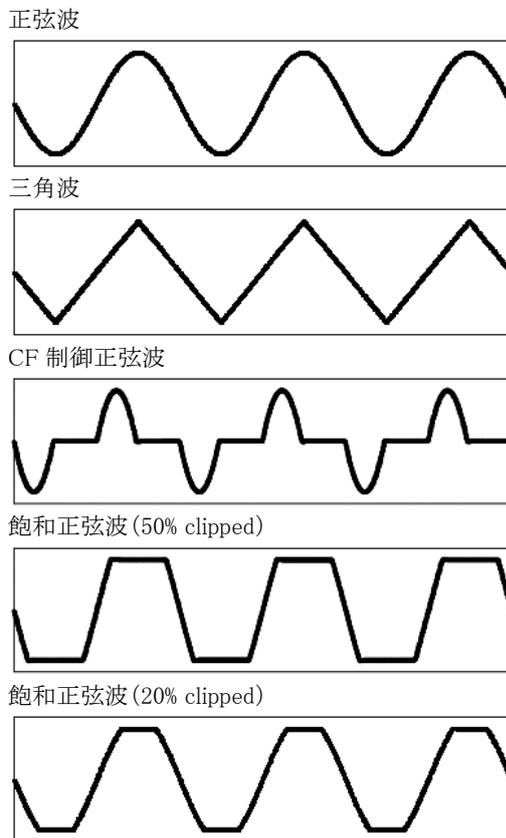


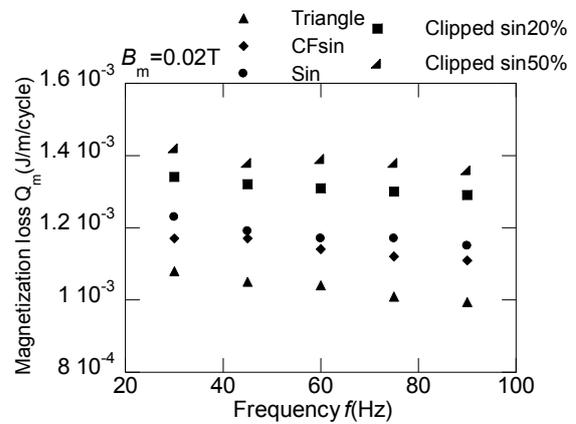
図1 印加磁界の波形

3. 波形の異なる磁化損失の1サイクル当たりの比較

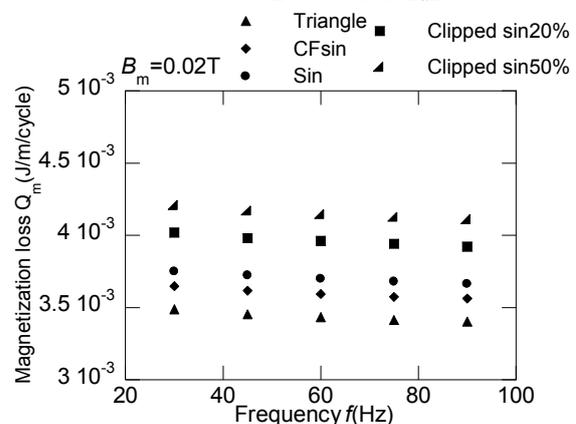
図2に(a)熱的測定法による磁化損失測定結果、(b)数値解析による計算結果を示す。図中の磁化損失は1サイクル当たりの損失を示しており、もし仮に完全にヒステリシス的に損失が生じていると仮定すれば、すべての損失は同じ値を示す。しかし、実際には実験、解析ともに損失は異なる値を示し、損失の大きさは三角波、CF 制御正弦波、正弦波、飽和正弦波 20%、飽和正弦波 50% の順で大きくなっており完全なヒステリシス損失とは言えない。実験値と数値解析値はともに同じ傾向を示していることから数値解析の結果より超電導線内部でどのように損失が生じているか検討が可能である。この結果、 n 値による影響が大きく影響しており、飽和正弦波のように磁界の波高値の状態が長い条件のほうが損失は大きく生じることがわかる。これは、臨界状態モデルでは損失は磁束の変化に対し損失が生じるが n 値モデルでは飽和正弦波などのように磁界が大きい条件で静止している場合でも損失が生じているためであると考えられる。

参考文献

1. J. Ogawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.63



(a)熱的測定法による測定値



(b)数値解析による計算結果

図2 5種類の磁界を印加したときの1サイクル当たりの磁化損失

垂直磁界中における積層した REBa₂Cu₃O_y 超伝導テープの 積層枚数スケーリング則を用いた交流損失予測手法 Estimation Method for AC Loss of Stacked REBa₂Cu₃O_y Superconducting Tapes in Perpendicular Magnetic Field Using Scaling Law of Number of Layer Stack

佐々 滉太, 川崎 剛輝, 三浦 峻, 岩熊 成卓 (九大); 和泉 輝郎, 町 敬人, 衣斐 頌 (産総研)
SASA Hiromasa, KAWASAKI Goki, MIURA Shun, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.);
IZUMI Teruo, MACHI Takato, IBI Akira (AIST)
E-mail: sasa@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE = Rare Earth)超伝導テープを積層した並列導体として応用することが提案されており、我々はあらゆる線材積層枚数における交流損失を容易に予測する手法の確立を目指している。これまでの研究で、磁界中のREBCO超伝導テープの交流損失の線材積層枚数依存性を実験的かつ理論的に明らかにした[1][2]。本研究では、これを利用し、ある積層枚数における交流損失から他の積層枚数における交流損失を容易に見積もることができる予測手法を提案し、その妥当性を明らかにする。

2. 実験方法

線材試料諸元および実験条件を Table.1 に示す。冷凍機による伝導冷却で冷却された試料に NbTi 超伝導マグネット で外部磁界を印加した。鞍型ピックアップコイル[3]により磁化損失を測定した。

3. 積層枚数スケーリング則

Fig.1 に 50 K における交流損失の積層枚数依存性と、以下に説明する規格化を行ったグラフ(挿入図)を示す。Irie-Yamafuji モデルより、交流損失曲線の近似式は

$$W(B_m, n) = \begin{cases} A(n)B_m^{\gamma} & (B_m > B_p(n)) \\ A'(n)B_m^{\gamma'} & (B_m < B_p(n)) \end{cases} \quad (1)$$

となる。 W 、 B_m 、 n はそれぞれ交流損失、磁界振幅、積層枚数である。また、 γ および γ' は線材のピンパラメータであり、 A および A' は線材幅や γ から決まる定数である。交流損失の積層枚数依存性を考慮し、

$$b_m = B_m/B_p(n), \quad w(b_m) = W(B_m, n)/AB_p^{\gamma}(n) \quad (2)$$

のように規格化した磁界振幅および交流損失を導入することで、Fig. 1 の挿入図のように 1 本のマスターカーブにスケーリングする。 B_p は中心到達磁界であり、Fig. 1 の矢印は各積層枚数における B_p を表す。

4. 中心到達磁界 B_p の積層枚数依存性

式(1)および交流損失の積層枚数依存性から、中心到達磁界は $B_p(n) \propto n^a$ のように積層枚数のべき乗関数で表されることが導かれる。ある積層枚数 n_0 枚における $B_p(n_0)$ を実験から得られれば、任意の積層枚数 n 枚における $B_p(n)$ を導くことができる。

5. 積層枚数スケーリング則を用いた交流損失予測

積層枚数スケーリング則を用いれば、測定で得られた n_0 枚における交流損失曲線から任意の枚数 n 枚における交流損失曲線が容易に予測される。予測に必要な $B_p(n)$ は前項で述べたように導出される。Fig.2 に実験で得られた 16 枚の交流損失から上記手法で予測した 1 枚の交流損失を示す。積層枚数スケーリング則を用いれば、容易に、かつ図のように精度よく交流損失を予測することが可能である。さらに他の線材に関しても本予測手法の妥当性を検討したので、当日発表する。

謝辞

本研究の一部は NEDO、JST-ALCA、科学研究費補助金(18H03783,17H06931)の助成を受けて実施したものである。

Table.1 Specifications of REBCO tapes and conditions of experiments.

Dimensions of the tape	5 mm in width, 106 μm in thickness
Superconducting layer	EuBa ₂ Cu ₃ O _y + BaHfO ₃ (0.7 μm in thickness)
Temperature	25 ~ 77 K
Field amplitude	0.004 ~ 4.3 T
Field angle	Perpendicular to tape face ($B // c$)
Number of layer stack	1 ~ 16
Measurement method	Pickup-coil method

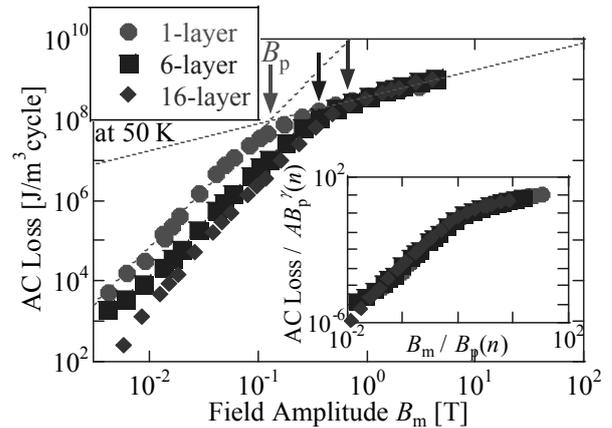


Fig.1 Number of layer stack dependence of AC losses of EuBCO + BHO tape(s) at 50 K.

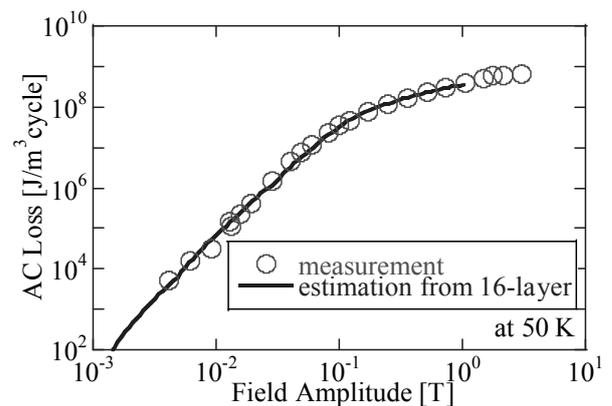


Fig.2 Measured AC loss of 1-layer tape and estimated one from 16-layer case.

参考文献

1. H. Sasa, et al.: J. Phys.: Conf. Ser., 1054 (2018) 012037
2. H. Sasa, et al. (Submitted)
3. M. Iwakuma, et al.: Supercond. Sci. Technol., 16 (2003) p.545

スパイラル状に巻いた多芯薄膜高温超伝導線材の結合時定数測定

Coupling time constants measurements of spirally-wound striated coated conductors

李 陽, 雨宮 尚之(京大); 吉田 良行, 町 敬人(産総研)

LI Yang, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University); YOSHIDA Yoshiyuki, MACHI Takato (AIST)

E-mail: y-li@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. 背景

高温超伝導線材の多芯化は交流損失を低減させる有効な手段である。多芯化された高温超伝導線材のフィラメント間が絶縁されている場合、欠陥などによってあるフィラメントに常伝導部が発生した場合、他のフィラメントへの分流が難しく、線材の安定性が悪くなる。しかし、フィラメント間が絶縁していない場合、フィラメント間の結合によって線材の磁化損失が増加する。フィラメント間の結合をなくす方法として線材のツイストが存在するが、高温超伝導線材のツイストは線材の性質上困難である。疑似的なツイスト方法として、高温超伝導線材をスパイラル状に巻く手法が考えられた。我々はスパイラル状に巻いた多芯化高温超伝導線材の磁化損失の測定を行い、スパイラル巻きによる疑似的なツイストが多芯化高温超伝導線材の磁化損失に与える影響を評価した。

2. 温度可変交流損失測定システム

今回の測定のために、温度可変交流損失測定システムを構築した。図 1 の通り、本装置はピックアップコイルを用いて試料の磁化損失を測定するシステムである。測定時、図 2(a) に示したクライオスタットに液体窒素を充填し、図 2(b) に示したマグネット及び試料を液体窒素に浸した状態で測定を行う。本装置のクライオスタットは気密性が高いため、図 2(a) に示したロータリーポンプを起動させることで容器内の圧力を減少させ、圧力の減少に伴う液体窒素の沸点の低下から容器内の温度を調整できる。そのため本装置は 77 K(大気圧における液体窒素の沸点)から 64 Kでの測定が可能である。今回は本装置を利用して、77 Kと 64 Kにおける試料の交流磁場(振幅 1 mT)における磁化損失の周波数依存性を測定した。

3. 測定試料及び測定結果

まず、産総研が製作したレーザーで超伝導層を 6 分割した多芯化薄膜高温超伝導線材(線材幅 5 mm)から、長さ 150 mm の試料を切り出した。その後、切り出した試料(フィラメント間は絶縁されている)の片側に厚さ 0.05 mm の銅テープを半田付けした。製作した試料は直線状に配置し、77 K と 64 K における磁化損失の周波数依存性を測定した。図 3 (Straight) に示した測定結果では、結合損失が示すデバイカーブが観測され、試料の結合時定数($1/(2\pi f_{\text{peak}})$; f_{peak} は損失のピークがある周波数)はおおよそ 8 ms である。

その後、同じ試料を図 4 のように直径 20 mm の円筒状 GFRP フォーマの上に巻き付け(ピッチ長さ 120 mm)、カプトンテープで試料を固定した。このスパイラル状に巻いた試料に対して、同じく 77 K と 64 K における磁化損失の周波数依存性を測定した。図 3 (Spiral) に示した測定結果では、典型的なデバイカーブが観測されていないが、デバイカーブのピークが測定可能な周波数領域より高い領域にある可能性が高い。

4. 結論

まず、図 3 の (Straight) と (Spiral) の結果の比較から、低周波数領域においてスパイラル巻きによる磁化損失の低減が確認された。これは線材における磁場の垂直成分の減少した影響もあるため、スパイラル巻きによる結合損失の低減とは言い切れない。しかし、図 3 の (Spiral) の結合時定数は (Straight)

より低いと推察でき、スパイラル巻きによるツイスト効果が見え確認された。

謝辞

本研究はNEDOの「高温超伝導実用化促進技術開発」事業及び文部科学省の原子力システム研究開発事業の支援によって行われた。

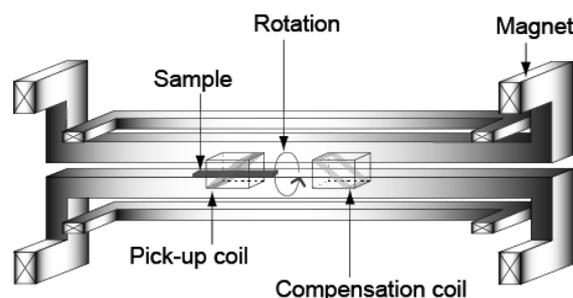


Fig.1 Conceptual diagram of AC loss measurement system

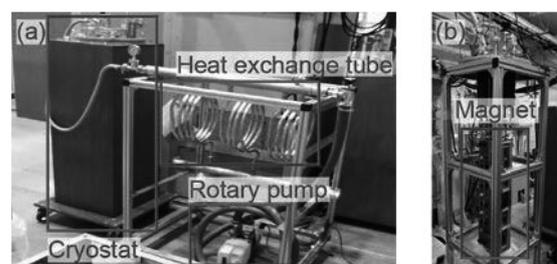


Fig.2 Temperature-adjustable AC loss measurement system

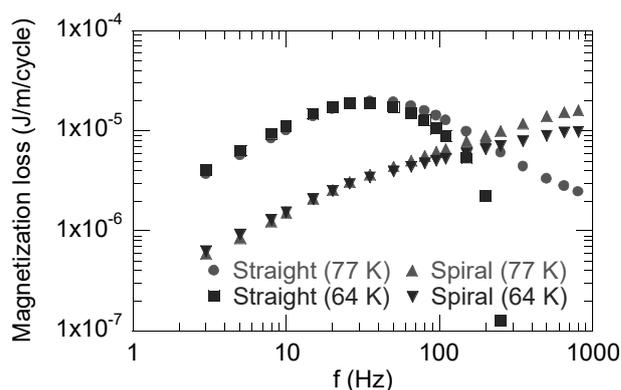


Fig.3 Measurement result of straight sample and spiral sample at 77 K and 65 K



Fig.4 Spirally wound multi-filament coated conductor