

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 25 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800157

研究課題名(和文)超伝導多層膜構造中の磁場分布測定

研究課題名(英文) Measurement of the magnetic field distribution in multilayer superconductors

研究代表者

久保 毅幸 (Kubo, Takayuki)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：30712666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は超伝導層と絶縁層からなる多層膜構造を加速空洞内面に導入する事で、バルクのニオブを上回る加速電場とQ値が実現するための基礎研究である。実験面では、多層膜試料の分析により現実の試料形状を確認した。更に転移温度測定装置を立ち上げ、試料の質の評価と成膜条件へのフィードバックを可能とした。理論面では、各層が理想的に平坦な場合を仮定して準古典理論に基づいて最大加速電場を評価し、適切な材料の組み合わせと最適膜厚を示した。実験データとの精密な比較のため、表面のナノからサブミリメートルの凹凸の影響を評価した。更に空間的温度勾配下での冷却による磁束排除現象を理論的に解析し、実験と合うモデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：The present work is a fundamental study towards the realization of multilayer coating technology, which is the new technology expected to exceed the bulk Nb performance. In the experimental aspect, we have analyzed cross sections and surface topographies of multilayer samples and made the device for the critical temperature measurement to check sample qualities, by which feedback to coating conditions has become possible. In the theoretical aspect, we have evaluated the maximum field for ideal multilayer structure based on the quasiclassical theory and found the appropriate material combinations and optimum thicknesses of the layers. To compare the theory with experimental data, we have incorporated effects of nano scale surface topography and sub-millimeter pits into the theory. The flux expulsion phenomenon observed in cooling down process with spatial thermal gradient has also been theoretically studied.

研究分野：超伝導加速空洞

キーワード：超伝導 加速器

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導加速空洞は現在殆どがバルクのニオブ製である。ニオブは比較的加工性が高く空洞の製作に適していることに加え、下部臨界磁場  $H_{c1}$  が大きいため、磁束侵入によるエネルギー散逸を伴うことなく高い加速電場を実現できるためである。しかしながら、数十年に亘る研究・開発を経て、ニオブ製超伝導空洞の加速電場は限界に達しつつある。近年製造・運転されている多くのニオブ製超伝導空洞では、表面磁場の大きさが  $H_{c1}$  を超えており、今後、加速電場の大幅な向上は見込めない。ニオブ製超伝導空洞に代わる次世代超伝導空洞開発は、研究者コミュニティが共有する最重要課題の一つである。

2006年、A. Gurevich は、一様高周波磁場中の超伝導薄膜(数 nm ~ 100 nm)の  $H_{c1}$  がバルクの超伝導体よりも大きくなることに注目し、超伝導薄膜と絶縁層を交互に積層することで空洞壁のニオブを空洞内の大きな高周波磁場から遮蔽し、保護することを提案した。これにより、空洞はさらに高い表面磁場まで耐えられるようになり、大幅な加速電場の向上が期待される。さらに、臨界温度の高い超伝導体を薄膜に用いれば、表面抵抗を小さくすることも可能である。この提案以降、各国は実証実験に乗り出したが、少数の例を除いて成功していない。

我々は、実証実験に成功していない理由が理論的理解の不足にあると考えた。そこで最も簡単な場合として、ニオブ上に絶縁層と超伝導層が1枚ずつ積層されている系を取り上げ、London モデルに基づいて電磁場の分布と磁束の侵入開始磁場の解析を行い、各層の最適な厚みの評価方法を明らかにした (the 16th international conference on RF superconductivity, SRF2013 の Young Scientists Best Poster Award を受賞)。この研究はこれまで手探りで行われていた実験に対し、理論的な指針を示したと言える。日本は、これまで超伝導多層膜構造の研究に関して、世界の流れから大きく遅れを取ってきたが、この理論的研究により得た優位性は、日本における超伝導多層膜技術による次世代超伝導加速空洞の実証実験推進の足掛かりとなる。

## 2. 研究の目的

先行研究における計算は超伝導層中の磁場が指数関数的に減衰すると仮定しており、磁束侵入開始磁場が超伝導層と絶縁層の厚みに依存しない。しかし、我々の理論に基づく、膜内磁場の減衰が各層の厚みに依存するため、磁束侵入開始磁場の向上のためには、各層に対して最適な膜厚の選択が重要である。この理論を直接検証するため各層の厚みを変えた試料を作成し膜内の磁場分布を測定する。また、現時点の理論研究では無限に広がった理想的に平坦な超伝導体と絶縁体を仮定しているが、現実には表面にマイクロな

凹凸が存在するなど複雑である。これらの効果を取り入れ更に精緻な理論を構築し実験データと精密な比較を実現する。

我々の理論計算では最適な膜厚が存在する。これまでの手探りの実験とは異なり、最適パラメータに基づくピンポイントの実験が可能になり、磁束侵入開始磁場の大幅な向上に繋がる。これにより、超伝導多層膜の技術を空洞に応用する基礎が確立する。超伝導多層膜構造による次世代超伝導空洞が実現すれば、最大加速電場は大幅に向上し、かつ表面抵抗は小さくできる。このことは超伝導加速空洞の小型化または高エネルギー化、そして省エネルギー化を促進し、医療用・産業用加速器、X線自由電子レーザー(XFEL)、エネルギー回収型ライナック(ERL)、高レベル廃棄物処分としての加速器駆動核変換技術(ADS)、国際リニアコライダー(ILC)等の加速器計画の建設費及び維持費の大幅な軽減につながる。

## 3. 研究の方法

転移温度を測定する装置を立ち上げ、多層膜試料の質の評価に用いる。この結果を成膜条件にフィードバックし、試料の質を徐々に向上させていく。試料内の磁場分布は NMR を用いて直接測定することが可能である。これと並行して、より精緻な理論を構築する。申請者が2013年に発表した理論は London モデルに基づいており、定量的な予言には向かない。したがって、任意温度に適用可能な準古典理論の枠組みに基づいて理論を再構築する。また、現実の試料の表面にはナノ・スケールからサブミリメートル・スケールに亘る様々な凹凸が存在するため、これらの最大加速勾配への影響を評価する。更には、空洞冷却時に捕獲される磁束は、超伝導体内では振動する常伝導の糸として振舞い、空洞の表面抵抗に寄与し、更には高加速電場下で熱暴走によるクエンチに繋がりが得るため、捕獲磁束の影響も評価する必要がある。これにより実験と理論の精密な比較が可能となる。

## 4. 研究成果

多層膜試料の分析により現実の試料表面には無数の凹凸が存在すること、膜厚も不均一であることを確認した。これにより、どのように理論を精緻化すべきかが明らかになった。更に、転移温度測定装置を立ち上げ、試料の質の評価と成膜条件へのフィードバックを可能とした。これにより、多層膜試料の質を継続的に向上させることが可能となった。NMRによる磁場測定までは進めることができなかった。

2014年に発見された温度勾配下での空洞冷却による捕獲磁束低減法は多層膜の表面抵抗の低減、最大加速電場の最大化に寄与すると期待される。研究代表者は、本現象を理論的に解析し、実験と合うモデルを提案(論文、学会発表)するとともに実験によ

り表面抵抗と温度勾配と環境磁場の間の関係を明らかにした(論文)。捕獲磁束は多層膜の表面抵抗に寄与し、高加速電場下では熱暴走によるクエンチに繋がるため、将来的には最大加速電場の制限要因となることが懸念されるが、本研究はこの問題に直面した際、解決に向けての基礎を提供すると期待される。

2015年、各層が理想的に平坦でかつ絶縁層が薄い場合の理論が準古典理論に基づいて再構築された。研究代表者はこれを有限の絶縁層厚さを持つ場合及び絶縁層が無い場合に拡張し、更に表面にナノ・スケールの凹凸が存在する場合の効果を取り入れて最適膜厚を示した(雑誌論文、学会発表⑥⑧⑨⑩⑪)。更に、これまでは平面波が垂直入射する場合のみを考えてきたが、コイルが多層膜試料内部に作る磁場の分布も評価した(学会発表)。この結果は、将来のコイルを用いた磁束侵入開始磁場測定に利用できる。また、サブミリメートル・サイズのピットの影響を評価し、ピットの形状と最大加速電場を関係付けた(論文、学会発表)。これらの結果により、実験と理論のより精密な比較が可能となった。

なお、上記の成果の多くは、多層膜だけでなく、バルク・ニオブや他のバルク超伝導体にも適用可能であり、今後、超伝導空洞の物理における幅広い問題の解決に貢献するものと期待される。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

T. Kubo, "Multilayer coating for higher accelerating fields in superconducting radio-frequency cavities: a review of theoretical aspects", *Superconductor Science and Technology* **30**, 023001 (2017), 査読有り, DOI:10.1088/1361-6668/30/2/023001

S. Huang, T. Kubo, and R. L. Geng, "Dependence of trapped-flux-induced surface resistance of a large-grain Nb SRF cavity on spatial temperature gradient during cool-down through  $T_c$ ", *Physical Review Accelerators and Beams* **19**, 082001 (2016), 査読有り, DOI:10.1103/PhysRevAccelBeams.19.082001

T. Kubo, "Flux trapping in superconducting accelerating cavities during cooling down with a spatial temperature gradient", *Progress of Theoretical and Experimental Physics*

**2016**, 053G01 (2016), 査読有り, DOI: 10.1093/ptep/ptw049

T. Kubo, "Magnetic field enhancement at a pit on the surface of a superconducting accelerating cavity", *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2015**, 073G01 (2015), 査読有り, DOI: 10.1093/ptep/ptv088

T. Kubo, "Field limit and nano-scale surface topography of superconducting radio-frequency cavity made of extreme type II superconductor", *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2015**, 063G01 (2015), 査読有り, DOI: 10.1093/ptep/ptv082

[学会発表](計 13 件)

T. Kubo, "The Next Technologies: contribution to Transformational Routes for Gradients and Q Round Table", GARD-SRF Roadmap Workshop, IL, USA (2017). イリノイ州シカゴ(アメリカ)

T. Kubo, "The Next SRF Technologies", in proceedings of the International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2016), Morioka, Japan (2016). アイナ(岩手県盛岡市)

T. Kubo, "Reaching higher gradients in bulk Nb with nano-layer coating", TESLA Technology Collaboration (TTC) meeting, Saclay, France (2016). サクレ(フランス)

T. Kubo, "Magnetic fields in bulk, film, and multilayer superconductors in front of a multi-turn coil", in proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference, IPAC16, Busan, Korea (2016), p. 2164, WEPMB019. 釜山(韓国)

T. Kubo, "Model to explain the role of thermal gradient in flux expulsion efficiency", TESLA Technology Collaboration (TTC) meeting, Menlo Park, CA, USA (2015). カリフォルニア州メンロパーク(アメリカ)

T. Kubo, "Theory of multilayer coating for proof-of-concept experiments", in proceedings of the 17th International Conference on RF Superconductivity, SRF 2015, Whistler, Canada (2015), TUBA07. ウィスラー(カナダ)

T. Kubo, “ Model of Flux Trapping in Cooling Down Process ” , in proceedings of the 17th International Conference on RF Superconductivity, SRF 2015, Whistler, Canada (2015), p. 90, MOPB009. ウィスラー (カナダ)

T. Kubo, “ Theoretical Field Limit and Cavity Surface Conditions: Nano-Scale Topography and Submillimeter Pit ” , in proceedings of the 17th International Conference on RF Superconductivity, SRF 2015, Whistler, Canada (2015), p. 86, MOPB008. ウィスラー (カナダ)

T. Kubo, “ Field limit and nano-defects covering material surface ” , TESLA Technology Collaboration (TTC) meeting, Tsukuba, Japan (2014). KEK (茨城県つくば市)

T. Kubo, “ Superconducting nano-layer coating without insulator ” , in proceedings of the 27th Linear Accelerator Conference, LINAC14, Geneva, Switzerland (2014), p. 1026, THPP074. ジュネーブ (スイス)

T. Kubo, “ Vortex-penetration field at a groove with a depth smaller than the penetration depth ” , in proceedings of the 27th Linear Accelerator Conference, LINAC14, Geneva, Switzerland (2014), p. 590, TUPP071. ジュネーブ (スイス)

T. Kubo, “ Two-dimensional models of the magnetic-field enhancement at pit and bumps ” , in proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, IPAC14, Dresden, Germany (2014), p. 2525, WEPR1024. ドレスデン (ドイツ)

T. Kubo, Y. Iwashita, and T. Saeki, “ Review of the multilayer coating model ” , in proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, IPAC14, Dresden, Germany (2014), p. 2522, WEPR1023. ドレスデン (ドイツ)

〔その他〕

ホームページ等

<http://researchmap.jp/kubotaka/>

6 . 研究組織

研究代表者

久保 毅幸 (KUBO, Takayuki)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施