

研究成果報告書

研究 題 目		電磁鋼板の磁気特性測定装置の高性能化に関する研究	実 施 年 度 2019~2020 年度
代 表 研 究 者	所 属	岡山大学学術研究院自然科学学域 (旧：岡山大学大学院自然科学研究科)	
	氏 名	金 錫範 印	

1. 研究の目的・背景

電磁鋼板は、強磁性体に結晶方位の揃え方や磁区の幅をコントロールするなど手を加えることで、磁気的な性質を改良して磁気と電気エネルギー間の変換を行うのに必要な材料であり、主に変圧器やモータ等の鉄心材料として使用されている。電気機器の小形化・高効率化に伴い磁気回路の磁束密度は高くなるので磁気回路の主要材料である電磁鋼板の高磁束密度領域における磁気特性を高精度で測定することが要求されている。そこで、本研究では、変圧器やモータ等で使われる無方向性電磁鋼板と方向性電磁鋼板の磁気特性が正確に計測できる高磁束密度・高性能の1次元および2次元の磁気特性測定装置の開発を目的として行う。

一方、Ni やハステロイなどの金属基板を用いて作製される次世代高温超伝導 (REBCO) 線材 (図1) を巻線とする超伝導応用機器 (超伝導発電機やモータ、NMR/MRI 装置用マグネットなど) においては、

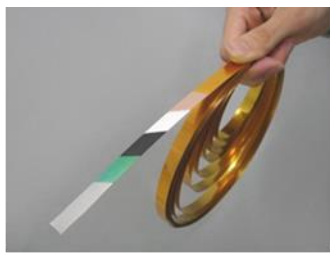
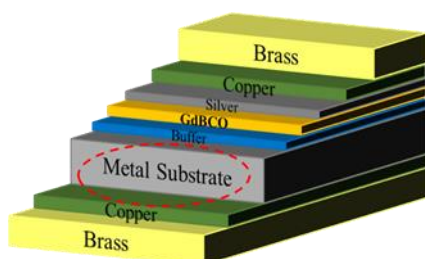



図1 次世代高温超伝導線材の写真 (左) と断面構造 (右)

運転される極低温での金属基板の磁気特性について正確に把握する必要があり、特に高温超伝導線材の金属基板の磁化損失などは、超伝導交流機器応用において非常に重要な要因となる。そして、今後は電磁鋼板も極低温で使用される可能性が高いので、極低温下 (最大 10 K) で金属基板や電磁鋼板の磁気特性が測定できる装置の開発も同時に行う。電磁鋼板と次世代高温超伝導線材用の金属基板などの磁気特性を極低温で測定できる装置の開発を行い、新しく開発する磁気測定装置の高精度化のための測定方法や算定方法の確立を行う。

2. 研究成果及び考察 (申請時の計画に対する達成度合を織込む)

①「1次元単板磁気試験器」と「2次元閉磁路型単板磁気試験器」の性能向上

: 既存の測定装置の測定精度向上と共に高磁束密度化について検討した。本研究で使用している1次元単板磁気試験器 (1D-SST) の励磁巻線は、JIS 規格 1D-SST に対し 60%小型化し (試料幅: 60 mm, 試料長さ: 250 mm)、装置に拡張性を持たせるために巻枠を二重構造としている。試料部の磁路長 (ヨークの内側の長さ) L は 190 mm とし、磁界強度が 40,000 A/m 以上の測定が行えるよう設計してある。まず、低磁束密度で生じる測定誤差を低減するため

の測定システムと磁場計測用コイルの改造を行い、さらに測定精度を向上させるために 2H コイル法を提案し、その性能について検討を行った。2H コイル法は、H コイルを試料片方面の異なる位置に二つ設置し、それぞれの H コイルで測定される磁界強度を線形近似することによって試料中心部の磁界強度を算出する方法である。励磁巻線構造を改造した 1D-SST 装置と 2H コイル法の測定性能を確認するために電磁鋼板の製造メーカから厚みの異なる 2 種類の無方向性電磁鋼板試料を提供してもらい磁気特性評価を行った結果、改造 1D-SST 装置と 2H コイル法による測定精度の向上を確認した。一方、磁化法による非破壊検査で使用される FeCo 系磁歪材料の場合は、大きいサイズのサンプルが入手困難である。そこで、改造した小型 1D-SST 装置を用いて小さい測定試料に複数のひずみゲージを配置することで測定試料 (K-MP70) の B-H 特性と磁歪特性を同時に計測し、製造元のデータと比較することで測定精度の信頼性を確認した。

② 高磁束密度印加用2次元磁気特性測定装置の概念設計と試作

：電磁鋼板の磁気特性の評価は、24 枚の電磁鋼板を Epstein tester など測定するのが一般的であり、測定された鉄損などの値は平均値となる。また、電磁鋼板に印加される磁束密度の向きは 1 次元であり、その磁束密度の強度も 1.7 T である。しかし、実際の電気機器で鉄心として使われる電磁鋼板は、材料の異方性や形状、励磁方法などの要因から磁束が 2 次元的に変化する部分も存在するので実際の電気機器が使用される環境に近い 2 次元磁気特性を測定する必要がある。そこで、電磁鋼板の 2 次元の磁気特性が同時に測定でき、最大磁束密度が 1.8 T 付近までの交番磁界と回転磁界の条件下で電磁鋼板の磁気特性が評価できる測定装置の開発を行ってきた。本研究では、3 次元電磁場数値解析を行い、正確な交番磁界と回転時間が発生できる構造について検討を行い、実機で適用することで測定精度の向上を確認している。また、最大磁束密度を 2.2 T まで向上できる巻線構造についても検討したので、今後さらに装置の改造を行う。

③ 極低温用単板磁気試験器の形状設計と試作

：Ni やハステロイなどの金属基板を用いて作製される次世代高温超伝導線材 (図 1) を巻線とする超伝導応用機器 (超伝導発電機やモータ、NMR/MRI 装置用マグネットなど) においては、運転される極低温での金属基板の磁気特性について正確に把握する必要があり、特に高温超伝導線材の金属基板の磁化損失などは、超伝導交流機器応用において非常に重要な要因となる。そこで、現有している 4 K 級伝導冷却装置に装着できる超小型 1D-SST 装置の形状設計を行った。まず、装着する小型 1D-SST 装置と外気との十分な断熱構造を確保するために既存の伝導冷却装置の試験機装着部の直径を 2 倍以上に拡大させた (図 2)。冷却装置の直径を拡大させることによって輻射熱シールドを二重にすることも可能となり、測定試料の温度を 4 K (-269°C) まで冷却することが可能であると考えている。高温超伝導線材用の金属基板や希少金属など非常に小さい試料を測定するためには磁気試験器も超小型化にする必要がある。また、伝導冷却装置の冷凍機の冷却能力は極低温では非常に低いので試験器の熱負荷や設置空間を考慮した場合、既存の試験器より遥かに小型な試験器を作製する必要がある。そこで、図 3 で示すような超小型磁気試験器を試作した。

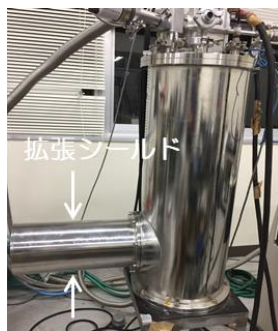


図2 L字型伝導冷却装置

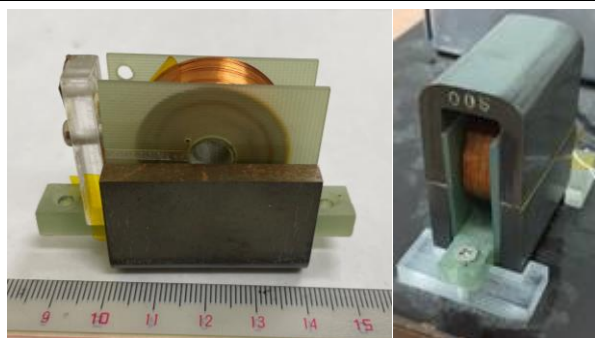


図3 試作した超小型 1D-SST 装置

試験器の励磁巻線は 2557 ターンであり、0.05 A の通電で 13 kA/m の磁界強度が得られる。試料測定部の長さ 5 mm での磁界強度のばらつきは 2% であり、この試験器専用の小型 H コイルと B コイルを製作して、長さ 3 m 以上のソレノイドコイルを用いて室温と液体窒素温度で H コイルと B コイルの校正を行った。

図 1 の次世代高温超伝導線材は、金属基板上に中間層を形成し、その中間層の上に約 $1\ \mu\text{m}$ の超伝導層を成膜する。成膜した超伝導層を結晶化させるためには、様々な温度と分意義で線材を熱処理する必要がある、その熱処理過程で金属基板の磁気特性が変化する可能性がある。そこで、本研究では、次世代高温超伝導線材の金属基板となるニッケル基板（タングステン 3%）の熱処理による磁気特性の変化について試作した超小型試験器を用いて検討した。その結果の一例を図 4 に示す。図 4 の(a)は、熱処理を施していないニッケル基板と酸素とアルゴン分意義中において 500°C で熱処理したニッケル基板の B-H 曲線であり、熱処理によってニッケル基板の磁気特性が大きく向上していることが明らかになった。また、図 4 の(b)と(c)は、室温と液体窒素温度での各試料の鉄損を計測した結果であり、液体窒素中での試料の鉄損が大きくなっていることが明らかになった。これは、低温領域でのニッケル基板の磁化率が大きくなったのが原因であり、この現象は超伝導機器の臨界電流密度を低下させるために、極低温領域においても磁化率が増加しない金属基板の開発が必要であることが示された。

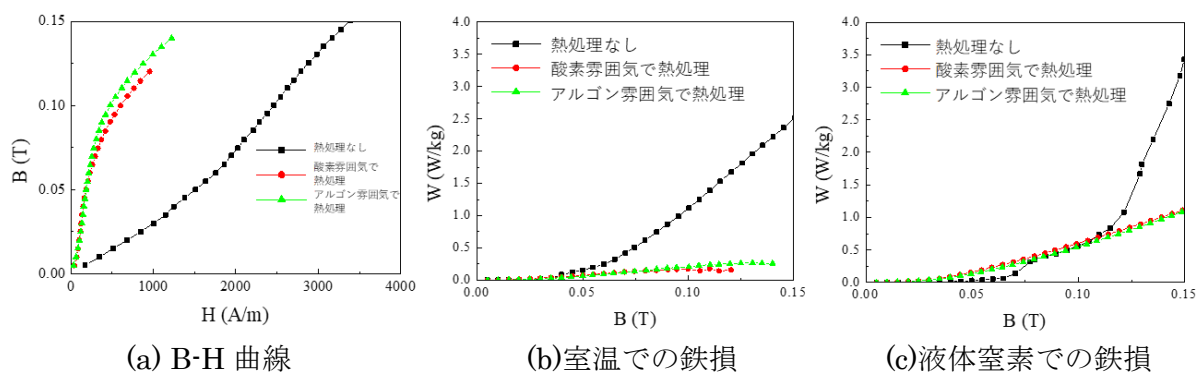


図4 次世代高温超伝導線材用金属基板の磁気特性の熱処理条件と測定温度依存性

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

<消耗品費>

- ・ 1次元磁気試験器の改造（20万円）：20万円
- ・ 高磁束密度2次元磁気試験器の試作（40万円）：30万円（改造費用）
- ・ 極低温1次元磁気試験器の試作（40万円）：40万円
- ・ 液体窒素（0円）：10万円
- ・ 電気電子部品（0円）：106,760円（シャント抵抗、銅線、ひずみゲージ）

<旅費>

- ・ 岡山ー東京、4回（20万円）：93,240円

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究では、磁性体の磁気特性をより正確に計測できる磁気試験器の開発を行っており、測定精度を大幅に向上させることに成功した。従って、変圧器をはじめ電気自動車や電動航空機などで使われる高性能モータに用いられる電磁鋼板の2次元磁気特性を正確に評価することが可能になると期待している。また、磁気試験器を超小型化することによって高温超伝導線材や希少金属など試料サイズが小さい金属に対して磁気特性が評価できるようになった。さらに、本研究では予算の制限によって伝導冷却装置の改造ができず試作した超小型磁気試験器を伝導冷却装置に装着して極低温での性能評価までは出来なかったが、今年の10月までは完成させ、その実験結果を11月に開かれる国際学会へ発表する予定にしており、世界初の極低温磁気試験器の開発を目指している。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

<学会発表>

・ Song ChanEun, 久米一輝、井上良太、植田浩史、金錫範、廿日手好（近畿大学）、小型単板磁気試験器による炭素鋼鋼管材の磁気特性測定、2020年度（第71回）電気・情報関連学会中国支部連合大会、2020年10月24日

・ K. Kume, R. Inoue, H. Ueda, S.B. Kim, Evaluation of magnetic properties of REBCO wire by modified SST for cryogenics, 27th International Conference on Magnet Technology, 2021年11月15日～19日（福岡、発表予定）

<論文投稿予定>

・ K. Kume, R. Inoue, H. Ueda, S.B. Kim, Evaluation of magnetic properties of REBCO wire by modified SST for cryogenics, IEEE Transactions on Applied Superconductivity