九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

Automatic Detection of Local Obstacles in Long Length High Temperature Superconducting REBCO Coated Conductors by Deep Learning Based Image Analysis in Reel-to-Reel Magnetic Microscopy

ソムジャイジャルン, ナタウィロー

https://hdl.handle.net/2324/5068237

出版情報：九州大学, 2022, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

（様式 2）

氏　　名　：ソムジャイジャルン　ナタウィロー

論 文 名　：Automatic Detection of Local Obstacles in Long Length High Temperature Superconducting REBCO Coated Conductors by Deep Learning Based Image Analysis in Reel-to-Reel Magnetic Microscopy
（深層学習画像解析を導入したリール式磁気顕微鏡観察による長尺 REBCO 高温超伝導コート線材の局所電流阻害因子の自動検出）

区　　分　：甲

論 文 内 容 の 要 旨

高温超伝導(HTS)線材は、カーボンニュートラルや先進医療に大きく貢献できる技術として、モーターや NMR 分析装置用の高磁界マグネットなど、さまざまな応用が期待されている。しかしながら、HTS 線材を用いた導体／コイルの歩留まり、信頼性を担保した本格的な量産や事業化のためにはまだ不十分であり、近年、空間均一性に優れた線材化技術の確立が急務となっている。HTS 線材の素線における臨界電流（I_c）の確率論的なバラツキは、これまで線材特性のモデリングには十分に反映されておらず、応用機器の運転時の影響についても不明確である。電界—電流密度の転移が比較的急峻な希土類系高温超伝導（REBCO）線材においては、I_c の空間変化に伴い生じる局所電界の集中は不安定性の芽に成り得る。また、最近の磁界下の I_c 連続測定の結果より、長尺線材における I_c の空間変化の主因は、電流分布の不均一性を誘起するマクロサイズの欠陥に起因することが明らかとなりつつある。これらの、電流阻害因子は、低温域での動作や、過負荷耐性において重要となり、ロバスト性の高い導体・コイル化技術確立のために局所不均一性に関する知見の集積が急務であるといえる。

長尺線材の均一性評価手法として、線材中の局所磁化計測によって非破壊・非接触に線材の局所 I_c 分布を可視化するリール式磁気計測は、有効な評価手法として期待されている。しかしながら、現状では、複雑な空間分布を有する欠陥ドメイン領域の特定や欠陥形状の判別には、人の判断によるところが大きく、長尺の実用線材への適用には限界がある。本研究では、長尺線材のリール式磁気計測において問題となる膨大な観察画像の解析に深層学習による画像解析を導入し、欠陥の自動検出を可能とすると共に、電流阻害因子となるドメインのサイズやその空間分布、統計分布のデータ取得など、新たな解析手法の確立に成功した。

本論文は次の 7 章からなる。

第 1 章では、本研究の背景、研究目的について記述した。

第 2 章では、本研究で用いた長尺 HTS 線材のリール式磁気顕微鏡システムならびに、一般的に用いられるホール素子配列による磁気測定システムについて記述した。

第 3 章では、深層学習による画像分類を用いた磁気顕微画像の解析について、基本的な電流阻害因子の検出のための解析モデルの作成と教師データによる学習、作成したモデルのパフォーマンスの検証、さらに実際の 200 m 級 REBCO 長尺線材の 4,000 枚を超える磁気顕微画像の計測結果を用いた欠陥検出の有効性を示した。

第 4 章では、欠陥検出精度の更なる向上のため、第 3 章において得られた欠陥と正常の境界領域

におけるデータを精査して教師データを追加し、新たな学習を行うと共に、欠陥領域のサイズによって 4 つのカテゴリーに分類した教師データを用いることで、欠陥検出の信頼性向上と共に欠陥サイズに応じた分類が可能である事を示した。さらに、本手法を製法の異なる線材に適用した結果、磁気像によって得られる欠陥の形態がプロセス依存性を有する物を見出し、これらのデータを加えた学習を追加する事で、異なる作製プロセスによる REBCO 線材に対しても、本研究で開発した画像分類モデルによる欠陥検出を可能とした。

第 5 章では、物体検出モデルを作成し、線材内の局所的な I_c 低下領域のドメインを直接検出し、その空間位置、サイズ、統計分布など、欠陥領域に関する詳細な情報を取得する事に成功した。さらに、第 4 章で述べた画像分類によるマルチカテゴリーの結果と物体検出による欠陥サイズとの対応を調べ、検出された欠陥の数やそのサイズの分布など両者の結果が定量的に良く一致する事を示した。

第 6 章では、現在 HTS 線材の均一性評価に広く用いられているホール素子配列を用いた測定結果に対して、本研究で開発した物体検出モデルの適用について検討した。通常のホール素子配列法では、センサの数が限られるため、線材の幅方向の解像度が不足しており、画像解析による微小欠陥の検出が困難である。本研究では、補間を用いた磁気像の高解像度化手法を提案し、同一線材に対する高解像度の走査型磁気顕微鏡観察との比較によって、第 5 章で述べた物体検出モデルによる解析において、ホール素子配列法による測定結果をもとに同程度のサイズの欠陥を検出できることを示した。

第 7 章は結論であり、本研究をまとめた。