

令和元年6月28日現在

機関番号：32682

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14219

研究課題名（和文）超音波を用いた高温超電導線材の機械的欠損診断法の可能性研究

研究課題名（英文）Feasibility Study on Diagnostic Method for Mechanical Damages in High Temperature Superconducting Wires Using Ultra Sonic Waves

研究代表者

野村 新一（Nomura, Shinichi）

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：90401520

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）：本研究では、イットリウム系高温超電導線材内部で発生する機械的欠損を超音波信号伝達特性から評価する可能性を検証してきた。具体的には、一対のAE（アコースティックエミッション）センサーをテープ形状のY系線材に挟むように設置し、超音波信号伝達特性を室温環境下で評価した。Y系線材を加熱はく離させた場合と機械的はく離させた場合の試料を作成し評価した結果、健全な状態と比較して信号伝達特性が減衰することが確認された。極めて再現性の良い信号伝達特性を得るための診断装置の技術的な手法は解明できたが、臨界電流の劣化特性との相関性に関しては、研究を継続し詳細な検討が必要であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、積層構造を有するY系高温超電導線材の非破壊試験法を提示するものである。AEセンサーの取り付け方法など極めて再現性の良い超音波信号伝達特性を得るための診断装置の技術的な手法は解明できた。超音波信号伝達特性と臨界電流特性（電気抵抗がゼロの状態となる最大電流特性）との相関性について、今後も継続して研究を進め、検証していく必要があるが、本研究成果は、将来的に医療応用や電力応用など高温超電導コイルシステムの更なる信頼性向上に向けた技術的可能性を示唆する第一歩を踏みだすものと考えている。

研究成果の概要（英文）：The objective of this work is to establish the diagnostic method for the mechanical damages in YBCO high temperature superconducting tapes using ultrasonic waves. Two acoustic emission (AE) sensors are set on both sides of the YBCO tape surface. The one sensor is used as a transmitter and the other sensor is used as a receiver which receives the AE signals through the YBCO tapes. To delaminate the layer structure of the YBCO tapes, the one sample is partly applied by heat stresses and the other sample is partly applied by mechanical stresses. The transfer characteristics of the AE signals are measured in room temperature. From the results, the transfer characteristics of the delaminated samples are reduced, which fact shows the feasibility of the proposed diagnostic method. Although high accuracy diagnostic techniques can be established, the further investigations of the relationship between the transfer characteristics and the critical current properties are required.

研究分野：超電導工学

キーワード：高温超電導線材 超電導コイル 超音波 機械的欠損 層間はく離 伝達特性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

イットリウム系(Y系)高温超電導線材は、高磁場中でも良好な臨界電流(超電導状態を維持できる最大電流)を有することから、超電導の電力応用や高磁場超電導コイルの開発を可能にする超電導線材として期待されている。しかし、Y系線材は、安定化層、保護層、超電導層、中間層、金属基板からなるテープ状の積層構造となっており、コイル巻線時、冷却時、通電時など種々の機械的応力がかかる場合、層間剥離などのY系線材内部で発生する機械的欠損が臨界電流特性の劣化、さらには超電導状態そのものの破壊を引き起こすことが懸念される。本研究で着目する学術的背景は下記2点である。

- イ) 機械的応力を計測する方法はひずみゲージが一般に用いられるが、Y系線材表面(安定化層または金属基板)のひずみを計測するものであり超電導層の機械的応力は解析で求めることしかできず、積層構造内部で発生する層間剥離などの機械的欠損を直接計測する手段がない。
- ロ) 層間剥離などY系線材内部で発生する機械的欠損がどの範囲まで生じた場合に臨界電流特性をどの程度まで劣化させるのか、この結果、コイル巻線時、冷却時、通電時の機械的応力を総合的に考慮し機械的欠損はどの程度まで許容されるのかという定量的評価がなされていない。

本研究は、超音波を用いてY系線材の積層構造内部で発生する機械的欠損を診断する技術的手法の可能性を検証する研究である。なお、Y系線材は、希土類系のYを他の元素に組成を変えて線材化されることから、これらを総称してREBCO線材とも称される。

2. 研究の目的

本研究は、「超音波を用いたY系高磁場超電導線材の機械的欠損診断法を確立する」ことを研究目的とし、一対のAE(アコースティックエミッション)センサーを用いて、線材の一方に設置したAEセンサーから超音波を送信し、他方に設置したAEセンサーでその信号を受信して入出力間の信号伝達特性の変化や共振点近傍の周波数特性などの変化により、層間剥離などの積層構造のY系線材内部で発生する機械的欠損の可能性のある部位を検出する方法の可能性を検証する。

Y系線材短尺試料試験やコイル試験を通じ上記診断方法の有効性が確認された場合、コイル巻線時、冷却時、通電時の機械的応力を総合的に考慮し臨界電流特性を劣化させないためにY系線材内部で発生する機械的欠損はどの範囲まで許容されるのかを定量的に提示することを最終目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、ガドリニウム(Gd)系の市販の高温超電導線材(5mm幅、安定化層有り)を用いて検証実験を実施した。これ以降、REBCO線材と称する。

図1は、AEセンサーを用いた機械的欠損診断法の原理図である。REBCO線材短尺試料(本研究では200mm長)を2つのAEセンサーで挟み、送信用AEセンサーにパルス幅1μs、振幅20mVの電気信号を1ms間隔で送信して短尺試料に超音波を印加し、他方の受信用AEセンサーで受信した超音波を電気信号に変換する。受信信号を40dB増幅し、送受信信号の時間応答波形よりFFT解析を行った。周波数領域の波形は10回の加算平均処理を行った。送受信信号の入出力比から透過信号の伝達関数の減衰状態を比較し、機械的欠損の有無を診断する。

本診断法の再現性を確認するため、同じ短尺試料について、AEセンサーの診断装置からの取り外し・取り付け作業を計5回実施し、上記の信号処理を繰り返した。未使用の線材短尺試料を健全状態とし、健全時の1回目の伝達関数を基準伝達特性とし、各々の実験条件で得られる伝達特性との比をdBで算出した規格化伝達関数を用いることで、本診断法の再現性ならびに機械的欠損の検出評価を行った。

図2に開発した走査型超音波診断装置の全体写真、図3に概要を示す。再現性を向上させるため、適宜改良を加え、すべて自作による診断装置である。AEセンサーは

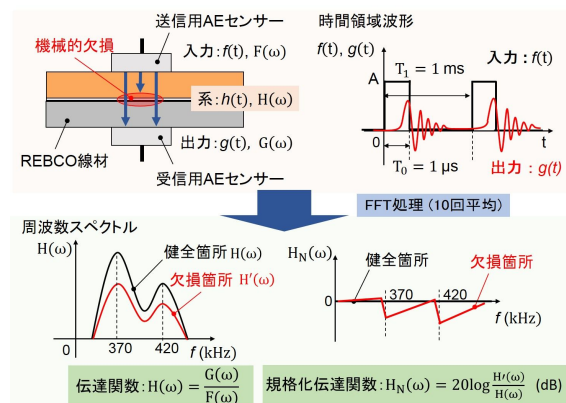


図1 超音波を用いた診断方法の原理

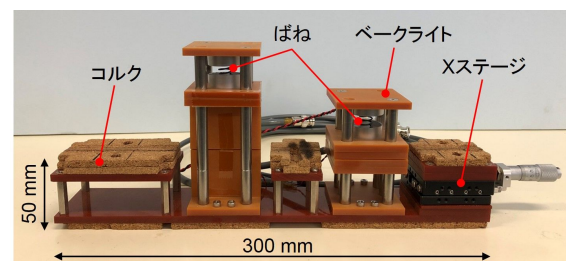


図2 走査型超音波診断装置全体写真

厚み 2 mm、直径 5 mm のチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) の圧電素子である。AE センサーはばね押し当てにより REBCO 線材表面に圧接している。X ステージで線材短尺試料を 2.5 mm 間隔で走査し、1 箇所測定につき AE センサーの取り外し・取り付けを 5 回繰り返して伝達関数を評価した。

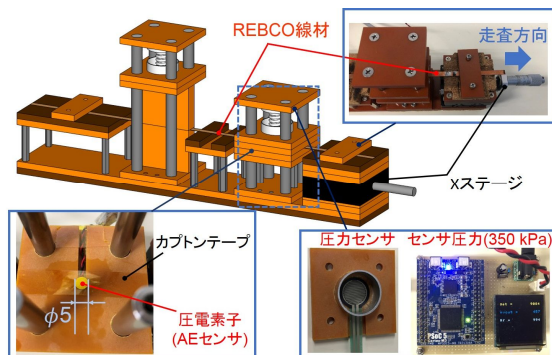


図3 走査型超音波診断装置概要

4. 研究成果

(1) 診断の再現性の向上対策

本研究は、室温環境下で超電導線材内部の機械的欠損を診断し、極低温環境下での臨界電流特性の推定を試みるものであり、非破壊検査環境と動作環境とが全く異なる状態で機械的欠損を診断しようとする挑戦的な研究である。このことを実現するためには、まずは診断手法の再現性を十分に担保することが最も難しく、かつ最も重要な研究課題となる。当初の計画では、コイル状態での診断も試みる予定であったが、線材短尺試料での診断精度を高めることに焦点を絞り研究を遂行した。

再現性向上のため 図3 に示すように AE センサーの押し付け圧力を圧力センサーにより管理した。また、AE センサーと線材との接触面の位置決め精度を向上させるよう装置に改良を加え、最終的に、音響インピーダンス改善のため AE センサーに塗布するグリース量を 2 マイクロリットルで管理した。図4 は、健全な状態の線材短尺を用いてグリース塗布量を管理する前後での伝達特性のばらつき具合を比較した結果である。図4 に示すように、グリース塗布量を管理する前は、健全な試料でも伝達特性にばらつきがみられ、機械的欠損による減衰状態を判断することが困難となる。一方、AE センサーの押し付け面積に合わせてグリース塗布量を 2 マイクロリットルで管理することで、極めて再現性の良い超音波伝達特性を得ることができた。この結果は、本診断法により機械的欠損の有無の違いが検出可能になることを示唆している。

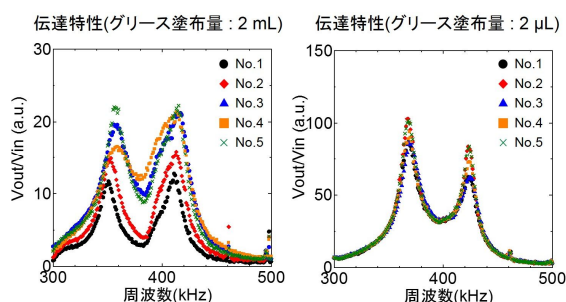


図4 グリース塗布量の調節による超音波診断の繰り返し測定再現性の評価

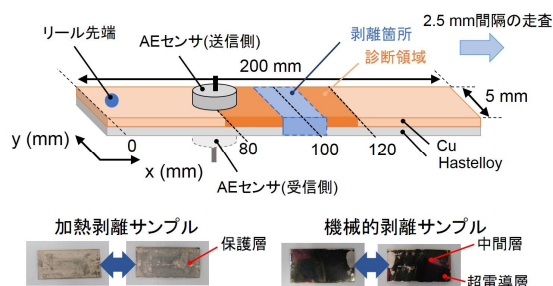


図5 線材短尺試料の超音波診断領域と剥離サンプルの状態

(2) 層間剥離診断の検証

本診断法による REBCO 線材内部で生じる層間剥離診断の検証を行った。図5 に線材短尺試料の超音波診断領域と剥離サンプルの状態を示す。200 mm 長の短尺試料のリール先端を 0 mm とし、短尺試料を x 方向に 2.5 mm 間隔で走査し伝達特性を測定した。

はじめに健全状態の短尺試料を室温環境下で AE センサーによる超音波伝達特性とマイクロメータを用いて線材厚み測定を実施し、液体窒素温度下で臨界電流値を測定した。その後、短尺試料の中央を層間剥離させ、超音波伝達特性、線材厚み、臨界電流値を測定した。層間剥離加工は、はんだごてによる加熱剥離と機械的剥離の 2 通りのサンプルをそれぞれ用意した。健全状態の臨界電流値は 293 A であり、加熱剥離サンプルは 247 A、機械的剥離サンプルは 33 A に低下した。図5 に示すように加工の違

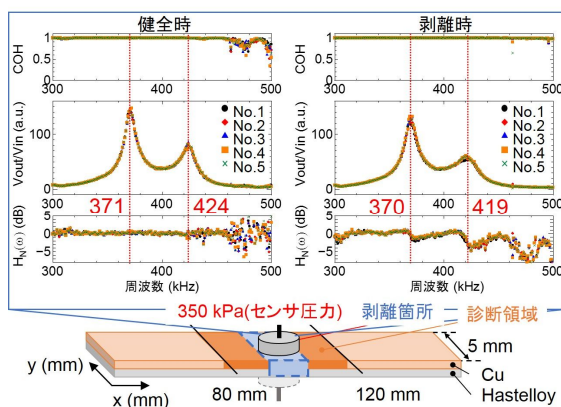


図6 加熱剥離前後の伝達特性比較 (診断箇所: $x = 100$ mm, センサー圧力: 350 kPa)

いにより剥離箇所が異なっている。

図6に加熱剥離加工前後、図7に機械的剥離加工前後の超音波伝達特性を示す。上から送受信信号のコヒーレンス関数 (COH), 伝達関数ならびに規格化伝達関数を示している。図6および図7の結果から、伝達関数のピーク値が現れる周波数においてコヒーレンス関数はほぼ1となり、送受信間の雑音が少なく信頼性の高い信号が検出できていることを示している。剥離前後の規格化伝達関数の結果から、特に加熱剥離サンプルは伝達関数のピーク値が現れる周波数近傍において超音波信号の減衰が生じていることが確認された。

図8は線材長手方向に対する線材厚み測定と超音波伝達特性の関係性を示している。図8の結果からも、特に加熱剥離サンプルは、厚みの変化に応じて超音波伝達特性の減衰が生じることが確認された。この結果は、本診断法により線材内部の機械的欠損を検出できる可能性を示唆している。

しかし一方、機械的剥離サンプルは大幅に臨界電流値が低下しているが、剥離箇所の線材厚みの変化は確認できたものの超音波伝達特性の大幅な減衰は確認できなかった。これは、AEセンサーの押し付け圧力が高すぎたことが原因の一つではないかと考えられる。図9は押し付け圧力を350 kPaから200 kPaに下げた場合の超音波伝達特性を示している。押し付け圧力を下げた場合、機械的剥離サンプルにおいても超音波伝達特性の減衰は確認された。AEセンサーの押し付け圧力に関しては最適化が必要である。

(3) 本研究で得られた知見と今後の課題

本研究は、積層構造を有する高温超電導線材の非破壊試験法を提示するものである。AEセンサーの取り付け方法、特に、AEセンサーに塗布するグリース量を管理することにより、極めて再現性の高い超音波信号伝達特性を得るための診断装置の技術的手法は解明できた。また、加熱剥離および機械的剥離の線材サンプルを作成し、臨界電流特性が劣化する場合、超音波伝達特性の減衰が確認された。しかし、機械的剥離サンプルでは、大幅な臨界電流特性の低下が生じるが、AEセンサーの押し付け圧力の大きさによっては超音波伝達特性の大幅な減衰が確認できない場合があることも判明した。したがって、今後はAEセンサーの押し付け圧力の最適化が必要である。

以上の成果から、上記2.に記載した研究の目的の前半部分、すなわち、層間剥離などの積層構造の高温超電導線材内部で発生する機械的欠損の可能性のある部位を検出する診断法の可能性を示すことができたと考える。このことは、将来的に医療応用や電力応用など高温超電導コイルシステムの更なる信頼性向上に向けた技術的可能性を示唆する第一歩を踏みだせたものと考えている。

しかし一方で、超音波伝達特性と臨界電流特性の関係性について、定量的な評価が可能な状態には至っておらず、研究の目的の後半部分に記載した最終目的を達成するためにも、剥離状態が異なる場合の超音波伝達特性と臨界電流値の低下率の関係性について統計的な調査が必要であり、物理的根拠に基づく超音波透過波の理論的な分析も今後の課題となる。超電導線材レベルだけでなく、超電導コイルでも本診断法の有効性を示すためにも、研究を継続し詳細な検討が必要であることが明らかとなった。

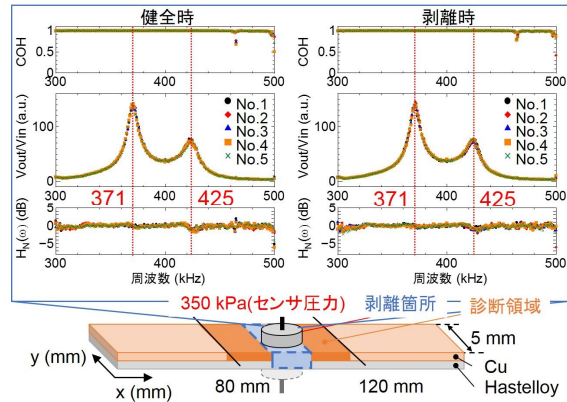


図7 機械的剥離前後の伝達特性比較 (診断箇所: $x = 100$ mm, センサー圧力: 350 kPa)

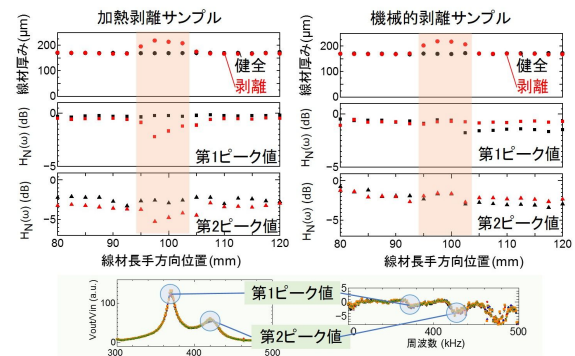


図8 剥離サンプルの線材厚みと超音波伝達特性の関係性 (センサー圧力: 350 kPa)

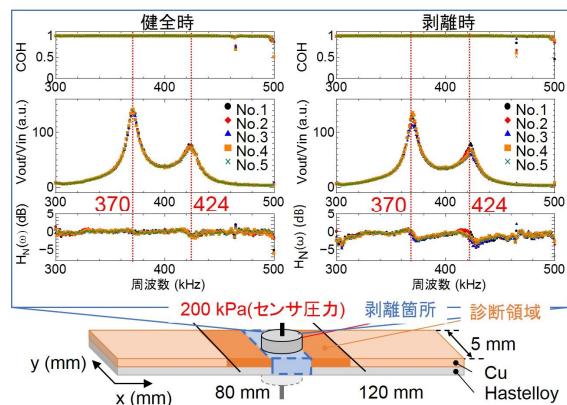


図9 機械的剥離前後の伝達特性比較 (診断箇所: $x = 100$ mm, センサー圧力: 200 kPa)

5. 主な発表論文等

[学会発表](計4件)

富塚 貴大, 鎌田 太陽, 二ノ宮 晃, 野村 新一, 超音波信号を用いた REBCO 線材の層間剥離診断法の再現性評価, 平成 31 年電気学会全国大会, 2019

富塚 貴大, 鎌田 太陽, 二ノ宮 晃, 野村 新一, 超音波透過信号を用いた室温環境下における REBCO 線材の剥離診断 - 超音波透過特性と臨界電流特性の評価 -, 2018 年度秋季低温工学・超電導学会, 2018

富塚 貴大, 二ノ宮 晃, 野村 新一, 超音波透過信号を用いた室温環境下における REBCO 線材の剥離診断 - 空隙による厚み変化の検出 -, 2018 年度春季低温工学・超電導学会, 2018
T. Tomitsuka, Y. Sakamaki, A. Ninomiya, S. Nomura, Delamination diagnostic method of REBCO tapes using ultrasonic waves, 25th International Conference on Magnet Technology, 2017

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 二ノ宮 晃

ローマ字氏名: NINOMIYA Akira

所属研究機関名: 明治大学

部局名: 研究・知財戦略機構

職名: 研究推進員(客員研究員)

研究者番号(8桁): 50119351

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。