

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04230

研究課題名（和文）両面超伝導構造を用いた高周波用超伝導線材の開発とそれを用いた高Q値コイルの応用

研究課題名（英文）Development of double-sided superconducting wire for high frequency and its application to high quality factor coil

研究代表者

關谷 尚人（SEKIYA, Naoto）

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：80432160

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：高周波で低損失を実現できる高周波用超伝導線材を開発し、それを用いて非常に高いQ値（銅コイルの20倍）を持つコイルを開発した。また、開発したコイルをワイヤレス電力伝送の送受電コイルに用いることで、伝送効率を大幅に改善した。高周波用超伝導線材は2本の超伝導線材から構成されるため、それらを張り合わせる技術を開発した。また、超伝導線材の導体損失に影響を与えない銀保護膜の厚さを明らかにした。さらに、コイルを作製する際の支持材がコイルのQ値影響を与えない最適な構造を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：開発した高Q値コイルは従来技術では実現できない飛躍的に高いQ値を実現し、それを使ったワイヤレス電力伝送の効率が大幅に改善することを実証した。これら成果は未開拓であった超伝導線材の高周波応用分野の先駆けとして重要な意義を持つ。

社会的意義：高周波用超伝導線材を用いた高Q値コイルはワイヤレス電力伝送の送受電コイルやMRIの信号検出コイルに使用することで、効率や感度を大幅に改善することができるため、未来の非接触電力供給技術や医療の向上などに貢献できる。

研究成果の概要（英文）：We have developed extremely high quality (Q) factor superconducting coil comprising two conventional high-temperature superconducting (HTS) tapes for radio frequency applications. A method of joining two HTS tapes by using dielectric film tape was developed. A styrene foam coil-support configuration that has lower effective dielectric loss was developed. The skin effect of the Ag protection layer was suppressed by making it thinner than the conventional one. A coil using the proposed tape had a measured Q factor of about 20,000, which is about 20 times that of one using Cu tape. The large improvement of the power transfer efficiency of wireless power transfer system was obtained using the proposed coil compared to copper coil.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：ワイヤレス電力伝送 高Q値コイル 高温超伝導線材

## 1. 研究開始当初の背景

【研究背景】高周波帯（数 KHz～数 100MHz）で用いられるコイルには MRI や NMR 装置の共鳴信号を受信するための検出コイル、近年注目されているワイヤレス電力伝送（WPT）に用いられる送受電コイルなどがある。これら装置の性能（感度や伝送効率）を改善する最も基本的な方法は高い Q 値（導体損失が低い）のコイルを用いることである。しかし、これらコイルは銅線で作製されており、これ以上導体損失を低減できないため、高い Q 値を実現できず MRI、NMR、WPT の性能改善は限界を迎えている。

この問題を解決できる唯一の方法が『超伝導体』の利用である。超伝導体は直流の場合、無損失であり、高周波帯では銅と比較して 3 桁以上低い導体損失となる。したがって、超伝導体をコイルに用いることにより飛躍的に高い Q 値を実現でき、上記装置の性能改善が期待できる。しかしながら、現在商業化されている直流用途に開発された超伝導線材（図 1(a)）は直流では無損失であるが、高周波帯では表皮効果によってほとんどの高周波電流は銅に流れるため導体損失を低減することができず、それを用いて上記コイルを作製しても高い Q 値を実現できない。また、銅を取り除いてもハステロイ（銅の 70 倍の低効率）があるため、超伝導層に効率的に電流を流すことができず、導体損失を低減することができない。

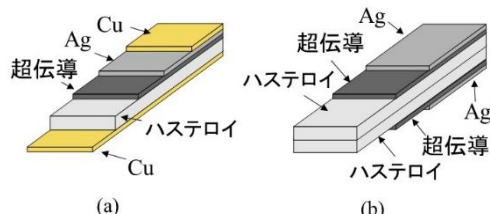


図1 (a)直流用超伝導線材. (b)高周波用超伝導線材

この問題に対して、本研究実施者は図 1(b)に示す高周波用超伝導線材構造を提案した。従来の直流用超伝導線材（銅を取り除いたもの）を超伝導層が上下面に来るように貼り合わせることで、高周波電流が超伝導層に効率的に流れるようにし、線材の導体損失を低減する構造となっている。ここで、直流用超伝導線材を 2 枚貼り合わせているのは、現在の技術ではハステロイ両面に超伝導薄膜を成膜する技術がないためである。高周波用超伝導線材（銀を除いたもの）を用いてコイルを設計し、そのコイルの Q 値を電磁界シミュレータで計算したところ、銅コイルの約 45 倍の Q 値（約 45,000）を得た。一方、直流用超伝導線材（図 1(a)）を用いたコイルの Q 値は約 2,900 程度であることから、提案する高周波用超伝導線材は導体損失を大幅に低減できることを明らかにした。

以上の結果を踏まえて、本研究では提案する高周波用超伝導線材を用いたコイルが高 Q 値であることを実証し、それをワイヤレス電力伝送（WPT）のコイルに用いることで伝送効率を大幅に改善できるか明らかにする。

## 2. 研究の目的

本研究は次の流れで研究を実施する。初めに、高周波用超伝導線材を開発し、次にそれを用いた高 Q 値コイルを開発し、最後に開発した高 Q 値コイルを WPT に応用する。各段階における具体的な研究目的を以下に示す。

- 1 高周波用超伝導線材を実現するために最適な銀保護膜の厚さの解明
- 2 高 Q 値コイルを実現するために最適なコイル構造の開発
- 3 高 Q 値コイルを用いた高伝送効率 WPT システムの実現と基礎特性の評価

## 3. 研究の方法

研究目的 1～ 3 に対する具体的な研究の内容と方法を以下に示す。

### 【 1 高周波用超伝導線材を実現するために最適な銀保護膜の厚さの解明】

超伝導体は湿気や水分によって劣化するため、銀保護層は不可欠である。しかしながら、銀保護層は表皮効果によって高周波用超伝導線材の導体損失増加の原因となる。そこで、電磁界シミュレータを用いて導体損失に影響を与えない銀保護膜の膜厚を検討する。

### 【 2 高 Q 値コイルを実現するために最適なコイル構造の開発】

図 1(b)に示すように高周波用超伝導線材は 2 本の線材から構成されるため、2 本の線材を一体化する方法を検討する。また、高周波用超伝導線材を用いてコイルを作製するためには、コイル形状を維持するための支持材が必要である。支持材には扱いが容易な発泡スチロールを用いることを検討しているが、発泡スチロールの誘電体損失がコイルの Q 値の低下の原因となること

が事前の検討で分かっているため、発泡スチロールによる Q 値の低下を最小限に抑える支持構造について検討する。

### 【 3 高 Q 値コイルを用いた高伝送効率 WPT システムの実現と基礎特性の評価】

1, 2 によって開発した高周波用超伝導線材を用いたコイル(超伝導コイル)を WPT の送受電コイルの一方に用いて伝送効率を測定し、送受電に銅コイルを用いた WPT の伝送効率と比較してどれだけ伝送効率が向上するか明らかにする。

## 4. 研究成果

### 【 1 高周波用超伝導線材を実現するために最適な銀保護膜の厚さの解明】

銀保護膜の厚さに対するコイルの Q 値の変化を電磁界シミュレータで計算した結果、表皮深さの 3% 以下にすることで、銀保護膜の影響を最小限に抑えられることが分かった。

### 【 2 高 Q 値コイルを実現するために最適なコイル構造の開発】

2 本の超伝導線材から構成される高周波用超伝導線材を一体化する方法として PTFE を用いる方法を開発した。PTFE は誘電体損失が非常に小さいため、PTFE を使って高周波用超伝導線材を構成してもコイルの Q 値の劣化を最小限に抑えられることを電磁界シミュレーションで確認した。次に、高周波用超伝導線材をコイル形状にするための支持材(発泡スチロール)の構造について検討した結果、支持材として使用する割合をできる限り少なくすることで、発泡スチロールによるコイルの Q 値の劣化を最小限に抑えられることを電磁界シミュレーションによって確認した。

最後に、銀保護膜を表深さに対してできる限り薄くした超伝導線材を 2 本準備し、それらを PTFE で一体化し、最適化した発泡スチロールの支持材を用いてコイルを作製した。図 2 挿入図に作製したコイルを示す。また、図 2 に作製したコイルの Q 値と銅線材を用いたコイルの Q 値を示す。図 2 に示すように、開発したコイルの Q 値は銅コイルと比較して約 20 倍の大きさを得た。

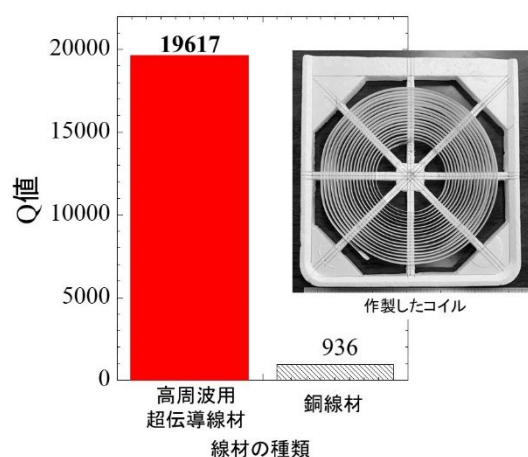


図2 各線材を用いたコイルのQ値

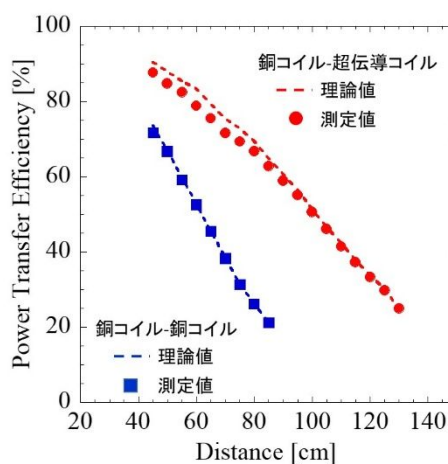


図3 伝送効率の比較

### 【 3 高 Q 値コイルを用いた高伝送効率 WPT システムの実現と基礎特性の評価】

WPT の送受電コイルの一方に開発した高周波用超伝導線材を用いたコイル(超伝導コイル)を使用し、もう一方に銅コイルを使用したときの送受電コイル間距離に対する伝送効率を測定した。また、送受電コイルに銅コイルを用いた場合の伝送効率も測定した。測定結果を図 3 に示す。図 3 に示すように超伝導コイルを用いることで、伝送効率が大幅に改善し、従来技術では高効率で送れない距離に高い効率で電力を非接触で送電できることが分かった。送受電コイルの両方に超伝導コイルを用いればさらに伝送効率の改善が見込める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 桶田将弘, 關谷尚人
2. 発表標題 高周波用超伝導線材の開発とそれを用いたワイヤレス電力伝送用高Q値コイルの開発
3. 学会等名 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桶田将弘, 關谷尚人
2. 発表標題 新規高周波用超伝導線材を用いた高Q値コイルの検討 (III)
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桶田将弘, 關谷尚人
2. 発表標題 新規高周波用超伝導線材を用いた高Q値コイルの検討 (II)
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoto Sekiya
2. 発表標題 Novel high-Tc superconducting wire for high quality factor at high-frequency and its applications
3. 学会等名 31th International Symposium on Superconductivity (ISS2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------