

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04615

研究課題名(和文)無線電力伝送用超指向性アンテナに関する研究

研究課題名(英文)Research on super-directional antennas for wireless power transmission

研究代表者

齊藤 敦 (Saito, Atsushi)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70313567

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)：超伝導バルクを共振器とした送信デバイスに関する研究を実施した。周波数 2～6 GHz、入力電力 100 W 以上、伝送距離 1 m 以上、受信電力 5 W 以上(伝送効率 5% 以上)を数値目標とした。研究期間において電波暗室の整備を行い、最大入力電力100 W、最大伝送距離 1 m の無線電力伝送実験が可能なシステムを構築した。送信用 1 素子超伝導バルクアンテナと市販のホーンアンテナを用いて、電力伝送効率の距離依存性を評価した結果、共振周波数 5.0 GHz、伝送距離 0.4 m、入力電力 6.1 W、受信電力 90 mW を得ることができ、伝送効率 1.485% を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の研究期間内では、当初の目標をすべて達成することができなかった。この原因は電波暗室内での伝送効率実験のため小型冷凍機を採用したため、冷却能力が不十分であったこと、また、デバイスのアレイ化が実現できず指向性の向上を十分に達成できなかったことが要因であると考えている。一方で、バルク共振器を用いたアンテナで初めての電力伝送を実現させ、今後デバイス改良を行えば、実用レベルの送受信も可能であるという知見も得ることができた。

研究成果の概要(英文)：We researched a transmission device using a superconducting bulk as a resonator. Numerical targets were set for a frequency of 2 to 6 GHz, an input power of 100 W or more, a transmission distance of 1 m or more, and a received power of 5 W or more (transmission efficiency of 5% or more). During the research period, an anechoic chamber was maintained, and a system capable of wireless power transmission experiments with a maximum input power of 100 W and a maximum transmission distance of 1 m was constructed. Using a single-element superconducting bulk antenna for transmission and a commercially available horn antenna, the distance dependence of the power transmission efficiency was evaluated and achieved a transmission efficiency of 1.485%.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：超伝導バルク アンテナ 無線電力伝送

1. 研究開始当初の背景

無線電力伝送技術に関する研究の歴史は古く、その方式は図1のように分類されている。非放射型伝送方式は送受信コイル間における近接磁場結合や送受信の電極を介した近接電界結合により電力伝送を行う。伝送される電力は距離の2乗に反比例するため比較的近距离での伝送方式であるが、効率は60%以上と比較的高効率が実現されている。一方、放射型伝送方式では送受信のアンテナ間における遠方場により結合を

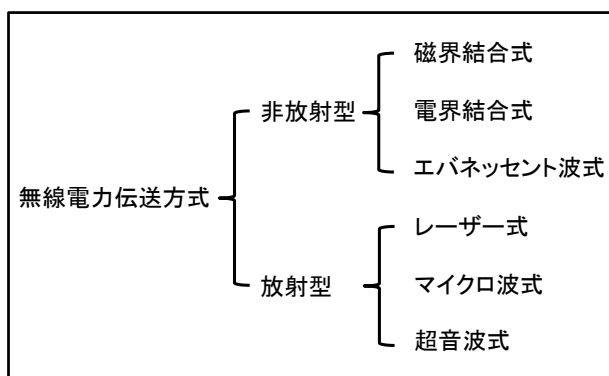


図1 無線電力伝送方式の分類

行うことで、数 m ~ 数 km の長距離電力伝送が期待できるが、伝送効率は数 % 以下と極端に低く、高効率な長距離伝送を実現可能な技術とその物理はまだ明らかになっていない。放射型伝送方式で高効率な長距離電力伝送を行うために、これまで様々な波長の電磁波を用いた研究がなされているが、長波長を用いた効率向上と、短波長を用いた指向性向上に主眼が置かれている。従って、効率と指向性の両方を向上可能で、かつ電波利用法の範疇での周波数選定が必要となる。

さらに、システムで最も重要となる送信系における共振アンテナの低損失化も高効率化への重要な課題である。具体的には、アンテナ部のマイクロ波損失、誘電体損失をいかに低減させ、効率的な共振モードで電力を放射可能なアンテナが必要となる。有望な材料としては超伝導体が考えられ、これまでに厚さ 1 μm 以下の超伝導薄膜を用いたアンテナが報告されている。一方我々は、厚さ約 500 μm の超伝導バルク共振器を用いた 5 GHz 帯 5 段フィルタの設計・作製評価を行ってきた。図2は5段バルク共振器フィルタの外観写真であり、実用化レベルとされる耐電力特性 100 W 以上を世界で初めて達成している。(図3) これらの結果は、超伝導バルクを共振器とするアンテナが高い電力を送信する際、有効な材料であることを示唆している。



図2 5段バルク共振器フィルタの外観

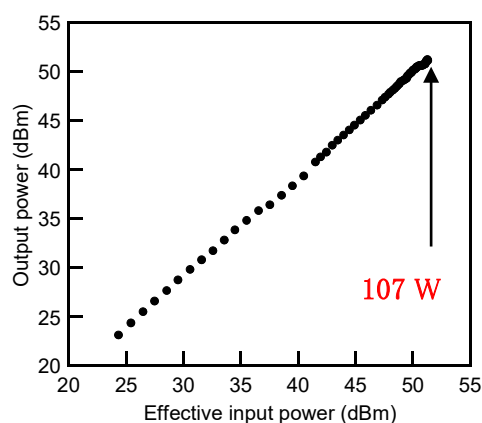


図3 5段バルク共振器フィルタの耐電力特性

最後に、アンテナから放射される伝送波を如何に高効率で空間伝送させるかについては、放射パターンの指向性向上が有効であると考えられるが、マイクロ波帯での研究は殆ど成されていない。このような学術的背景をふまえ、本研究の核心をなす学術的な問いをまとめると、

「無線電力伝送に最適な周波数は？」

「送信アンテナを構成する共振器材料と構造は？」

「電力の空間伝送に有効な高指向性を実現可能な方式とその物理は？」

となり、これらの学術的な問いを解決することで、未だ実用化されていない大電力送信用超伝導アンテナの実現への知見を得ることができると考えている。

2. 研究の目的

本研究の目的を以下3つに設定し、研究を実施した。

- ① 無線電力伝送に利用可能なマイクロ波帯周波数とその有効性を明らかにする。
- ② 超伝導バルク共振器アンテナの低損失性と耐電力性に関する有効性を明らかにする。
- ③ マイクロ波放射パターンの指向性を向上するために有効なレンズ構造を明らかにする。

上記目的を達成するための、具体的な数値目標を以下に示す。

周波数: 2~6 GHz (ISM 周波数 2.45 GHz, 5.8 GHz を想定)、入力電力: 100 W 以上、伝送距離: 1 m 以上、受信電力: 5 W 以上 (伝送効率: 5 % 以上)

3. 研究の方法

3.1 バルク共振器アンテナの電磁界解析

3次元空間でモデル化したアンテナモデルの周波数特性、近傍解解析、遠方解解析には電磁界解析ソフト CST studio suite を用いた。図 4(a) は典型的なバルク共振器アンテナの3次元モデルを示している。バルク共振器がサファイア基板に包まれ、上部解放の銅キャビティにセットされている。アンテナの共振周波数については、本来 ISM バンド周波数である 5.8 GHz を利用することが理想であるが、本研究で利用可能なパワーアンプの周波数レンジが 4.9 GHz~5.1 GHz であるため、今回は 5 ± 0.1 GHz となるようにバルクの直径を最適化した。また、アンテナの給電方法は同軸ケーブルの中心導体によるギャップ給電方式を採用し、共振器と中心導体先端の距離を変化させることで、結合強度を調整可能な構造とした。シミュレーションで用いた共振器材料のパラメータを表 1 に示す。サファイア基板の実効誘電率を $\epsilon_r = 8.6$ 、誘電損失 $\tan\delta = 10^{-7}$ を用いた。図 4(b) に周波数特性のシミュレーション結果を示す。GdBCO 共振器の共振周波数 $f_0 = 5.051$ GHz、Cu 共振器の共振周波数 $f_0 = 5.062$ GHz が得られている。また、この時の中心導体は直径 0.5 mm、長さ 4.44 mm であり、バルクとのギャップ長は 3.81 mm である。解析結果から得られた共振周波数、最大減衰量、結合係数を表 2 にまとめた。このシミュレーション結果をもとに実際にバルク共振器アンテナを作製し測定を行った。

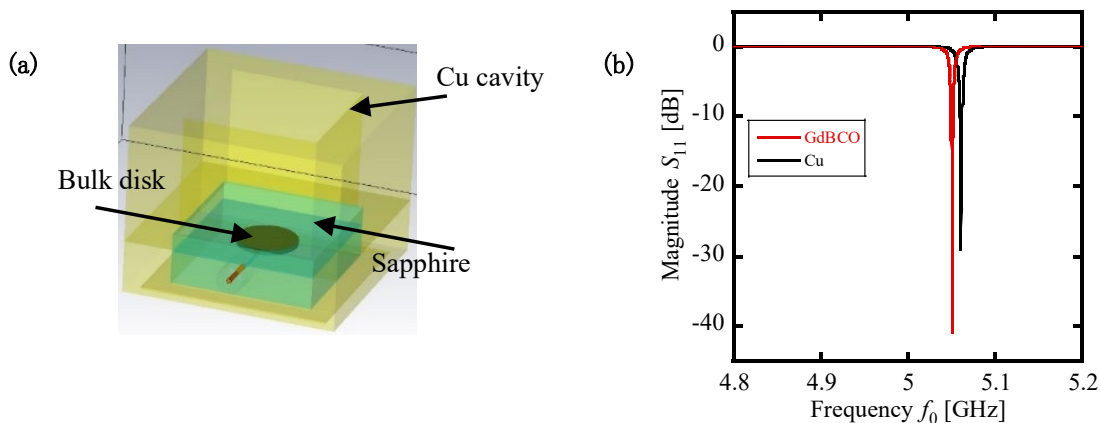


図 4 シミュレーションモデル(a)と解析結果(b)

表 1 シミュレーションパラメータ

Parameter	Cu	GdBCO
Conductivity [S/m]	5.8×10^7	5.8×10^9
Diameter [mm]	7.5	7.5
Thickness [mm]	0.5	0.5

表 2 シミュレーション結果

Parameter	Cu	GdBCO
Resonant frequency [GHz]	5.062	5.051
Maximum attenuation [dB]	-29.12	-41.05
Coupling	Critical	Critical
Coupling coefficient	1.00	1.00
Resonant mode	TM11	TM11

3.2 バルク共振器アンテナの作製方法

バルク共振器を作製する際、バルク共振器にはバルク径 7.5 mm、厚さ 0.5 mm の GdBCO(日本製鉄(株)製)とバルク径 7.3 mm、厚さ 0.5 mm の Cu の二種類を用いた。サファイア基板は上下に分かれており、下基板にバルク共振器をセットするための溝と給電用同軸ケーブルの中心導体を設置可能な溝を作製した。共振器を下部基板に設置後、上部基板で押さえつける構造とした。その後、上面から電波が放出されるようにアルミシールを底面と給電部を除く側面に貼り付けた。それを銅キャビティにセットし、銅板により固定した。その後適切な長さの中心導体をもつ SMA コネクタをセットした。図5 は完成した典型的なアンテナの写真である。キャビティは冷凍機のコールドヘッドに取り付け可能な構造とした。

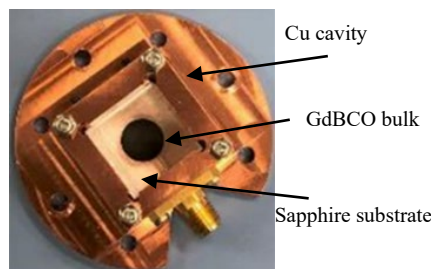


図5 超伝導バルク共振器を用いたアンテナ

3.3 アンテナの周波数特性および伝送効率の測定方法

GdBCO と Cu それぞれのバルク共振器アンテナを用いて、ベクトルネットワークアナライザにて反射特性を測定し、共振周波数を確認した後、図6(a) に示す測定系にて伝送効率の測定を行った。実際には共振周波数付近で最も受信電力が大きくなる周波数を用いた。シグナルジェネレータにて共振周波数での電力を $-30 \sim 0$ dBm まで入力し、パワーアンプで $+45$ dB 電力を増幅後、送信アンテナへ電力を入力した。送信アンテナからマイクロ波を発信し、受信アンテナに入力された電力をパワーメーターにて読み取った。パワーメーターに入力できる範囲に電力を減衰させるために -30 dB のアッテネーターを用いた。測定の際の送受信アンテナの様子を 図6(b) に示す。パルスチューブ冷凍機(富士電機(株)製)にて約 50 K 付近まで冷却した送信用バルクアンテナと、受信用の市販のホーンアンテナ(TR17206)にて測定を行った。伝送効率 η [%] は送信アンテナへの入力電力 P_{in} と受信アンテナへの入力電力 P_{out} を求め、式(1)にて算出した。

$$\eta = (P_{out} / P_{in}) \times 100\% \quad (1)$$

P_{in} は、送信アンテナへの入力電力を示しており、送受信アンテナ部分をほぼ無損失のスルーコネクタに置き換えた時にパワーメーターで測定された電力に、受信側のアッテネーターとケーブルの損失分を差し引いた値である。 P_{out} は受信電力を示しており、送受信アンテナを用いた場合の受信電力の損失補正された測定結果である。伝送効率の測定はバルク共振器アンテナのバルク表面からホーンアンテナの開口面までを伝送距離とした。アンテナが冷凍機内にある都合上、バルク表面からホーンアンテナの開口面までの最短伝送距離は約 7.6 cm となっており、5 cm 間隔で 47.6 cm までの伝送実験を行った。

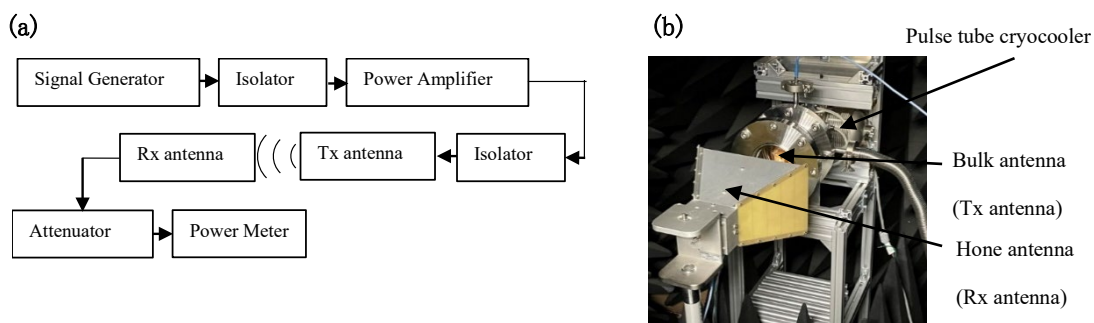


図6 伝送効率の測定系の概略図(a) 測定装置の外観図(b)

4. 研究成果

4.1 反射特性の評価

GdBCO バルク及び Cu バルク共振器アンテナを約 50 K まで冷却した時の反射特性を **図7**に示す。GdBCO は共振周波数が 5.0425 GHz、共振ディップ深さが -25.725dB、結合係数が 1.11 であった。また Cu は共振周波数が 5.04875 GHz、共振ディップ深さが -20.891dB、結合係数が 1.19 となった。両結果ともほぼクリティカルカップリングであること、共振周波数もほぼ一致していることが確認できた。これらの素子を用いて電素効率の測定を行った。

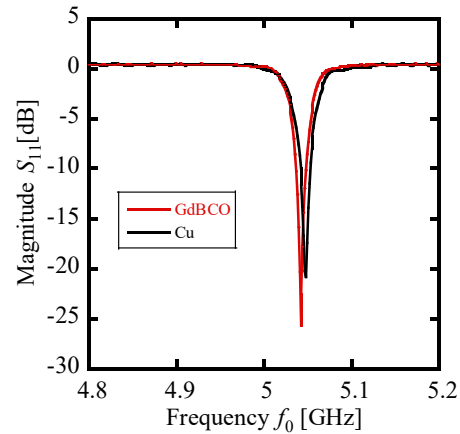


図7 GdBCO バルク及び Cu バルク共振器アンテナを約 50 K まで冷却した時の反射特性

4.2 伝送効率の測定結果

図8(a), (b) は GdBCO、Cu 共振器アンテナにおける各伝送距離ごとの、入力電力 P_{in} と受信電力 P_{out} の結果である。GdBCO の時は P_{in} が 6.95 W の時に P_{out} が 1.11 W (7.6 cm)、Cu の時は P_{in} が 6.3973 W の時に P_{out} が 0.94 W (7.6 cm) 受信できている。以上の結果から伝送効率を算出し、各伝送距離ごとの最大伝送効率と伝送距離の関係を **図9**に示す。伝送距離 7.6 cm で GdBCO バルク共振器アンテナが P_{in} が 6.95 W で 16.3%、Cu バルク共振器アンテナは P_{in} が 6.3973 W で 14.7% の伝送効率となった。また、伝送距離 47.6 cm の時は GdBCO と Cu とともに 1.3% の伝送効率となった。これらの結果から GdBCO は Cu と比べて同等以上の伝送効率を実現できる材料であることを明らかにした。

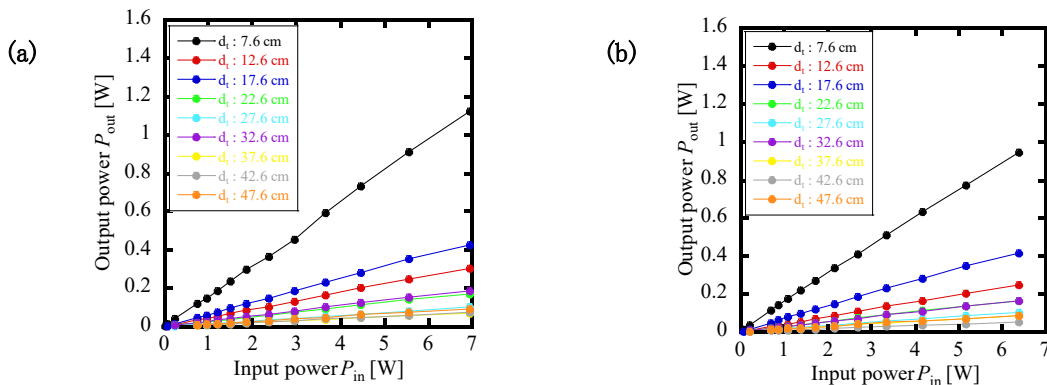


図8 GdBCO バルク(a)及び Cu バルク共振器アンテナ(b)の入力電力-受信電力の関係

今回の研究期間内では、当初の目標をすべて達成することができなかった。この原因は電波暗室内での伝送効率実験のため小型冷凍機を採用したため、冷却能力が不十分であったこと、また、デバイスのアレイ化が実現できず指向性の向上を十分に達成できなかったことが要因であると考えている。一方で、バルク共振器を用いたアンテナで初めての電力伝送を実現させ、今後デバイス改良を行えば、実用レベルの送受信も可能であるという知見も得ることができた。

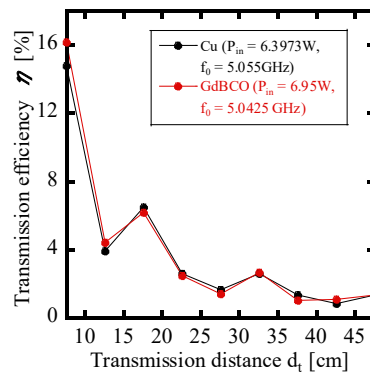


図9 各伝送距離ごとの最大伝送効率と伝送距離の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Atsushi SAITO, Takehiro SATO	4. 巻 2022
2. 論文標題 Research on super directional antennas for wireless power transmission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IMPACT	6. 最初と最後の頁 18-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21820/23987073.2022.2.18	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 A. Saito, F. Shimada, T. Sato, K. Kiyooka, M. Shibata, S. Ono, M. Takeda, Y. Narita, K. Nakajima	4. 巻 2323
2. 論文標題 Design and fabrication of microwave transmitting antenna using HTS thick disk for wireless power transfer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: COnference Sories	6. 最初と最後の頁 12031
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2323/1/012031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Fumiya Shimada, Takehiro Sato, Atsushi Saito
2. 発表標題 Design and evaluation of transmit antenna using HTS bulk as a resonator for wireless power transfer
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2021), 74, Online (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Saito, Fumiya Shimada, Takehiro Sato, Kazushi Kiyooka, Masafumi Shibata, Satoshi Ono, Masanori Takeda, Yuzuru Narita, Kensuke Nakajima
2. 発表標題 Design and Fabrication of Microwave Transmit Antenna Using HTS Thick Disk for Wireless Power Transfer
3. 学会等名 34th International Symposium on Superconductivity (ISS 2021), DE4-3, Online (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤豪大、島田文哉、清岡和史、柴田將史、齊藤 敦
2. 発表標題 無線電力伝送用バルク共振器アンテナにおける超伝導体の優位性
3. 学会等名 第76回応用物理学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 島田文哉、佐藤豪大、清岡和史、柴田將史、齊藤 敦
2. 発表標題 高温超伝導バルクを共振器として用いたマイクロ波アンテナの設計と評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会, 22p-P03-8
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤豪大、島田文哉、清岡和史、柴田將史、齊藤 敦
2. 発表標題 超伝導バルク共振器を用いた 5 GHz 帯アンテナの伝送効率評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会, 24a-D214-2
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 島田 文哉、佐藤 豪大、齊藤 敦
2. 発表標題 無線電力伝送用超伝導バルク共振器アンテナの設計と評価
3. 学会等名 応用物理学会 東北支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清岡和史、佐藤豪大、秋元大輝、柴田將史、成田克、大音隆男、齊藤敦
2. 発表標題 超伝導バルク共振器アンテナにおける誘電体基板の厚さによる共振周波数の調整
3. 学会等名 第77回応用物理学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 X. Wang, K. Koibuchi, H. Koyama, T. Sato, K. Kiyooka, H. Akimoto, A. Saito
2. 発表標題 Research on wireless power transmission using 24 GHz patch antennas
3. 学会等名 The 11th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE 2023) in Okayama, Japan
4. 発表年 2023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
---------	---------