補助コイルと整合コイルを用いた磁場共鳴型電力伝送の研究

医用電子工学　2281279 外薗陸矢
（主査：桐生 昭吾 教授　　副査：和多田雅哉 教授　　小林千尋 講師）

1. はじめに

近年、磁場共鳴型非接触電力伝送を用いた研究が様々な分野で注目されている。磁場共鳴型の無線電力伝送はコイルの磁気的結合と共振現象を利用する方式で、コイルを送受電アンテナとして使用し、一次側で発生した磁束を二次側に伝えることで電気を供給することが可能である[1]。 磁場共鳴方式における伝送効率はコイルの磁器的結合度合いを表す結合係数 k と共振の鋭さを表すコイルの Q 値の大きさに依存する。そのため、他の方式と比べて長距離の伝送が可能で、位置の変化にも強いという特徴がある。この性質から磁場共鳴方式は送電デバイスまたは受電デバイスを固定しづらい植込み型除細動器や心臓ペースメーカーなどへの給電にも応用研究されている[3]。
また、電磁誘導方式において、布にリッツ線を縫い込んだコイルを無線電力伝送に使用した報告がある[4]。これを磁場共鳴方式に発展させ衣服にコイルを直接縫込み、バッテリーと接続することで、衣服を着た状態で体外から体内のデバイスへ短距離の送電が可能だと考えられる。送電時の状況として、患者に与える負担を小さくするため、長時間動作しない睡眠時などが考えられる。そこで、本研究では植え込み型医療機器を装着した患者に対し、ベッドなどから無線電力伝送を可能とするシステムの構築を目的とする。先行研究[5]と同様に、磁場共鳴方式における補助コイルを送電コイルと受電コイルの間に配置することで伝送効率を向上させた報告と、補助コイルを衣服に縫い込むことで各コイル間の結合係数を向上させる方式を採用した。また、本研究では”ISM バンド”である 13.56MHz の使用を想定しており、高い周波数を扱うためインピーダンス整合について考慮する必要がある。
インピーダンス整合を行う方法として、従来の回路にインピーダンス整合用のコイルを加えることを考えた。病床の下に配置する送電コイル、植込み型医療デバイスに搭載する受電コイル、衣服の上に直接縫い込む補助コイルにインピーダンス整合用コイルを加えた４コイルの伝送システムを提案する。補助コイルと受電コイルは取り付ける場所が決まっているため、大きさに制限があり、パラメータを調節しにくい。そこに大きさや巻き数など調節できるコイルを１つ追加することで、全体のインピーダンスを調整するという意図から、４コイルの伝送システムの構築という考えに至った。図１に提案する電力伝送システム図を示す。

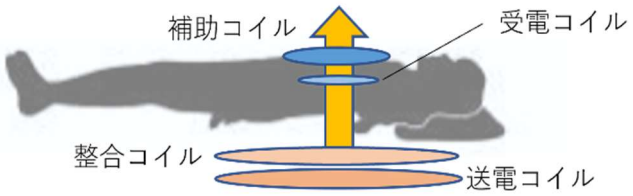

図 1　無線電力伝送のシステム概要

2. 送電システム概要

この研究では、無線電力伝送に 4 つのコイルを用いる。送電コイルと整合コイルはベッド下部に配置、受電コイルは植込み医療機器内、補助コイルは衣服へ縫込むことを想定している。受電コイルは植込み医療機器に搭載できるサイズを設定しなければならない。この研究においては受電コイルの外径は一般的な ICD の 50×50 mm に搭載可能な 40 mm とした。補助コイルのサイズは衣服に縫い込むことを想定し、外径を 200mm とした。送電コイルと整合コイルは、外径の大きさによって補助コイルとの結合係数が変化するため、シミュレーションソフトを用いて結合係数が最も大きくなる外径の大きさを調べる。図 2 に結合係数を算出するシミュレーション条件の配置図を示す。すべてのコイルは中心軸上に配置され、受電コイルと補助コイルの距離は 10 mm と見積もり、送電コイルと補助コイルの距離は 200 mm、送電コイルと整合コイルの距離は 20mm とした。

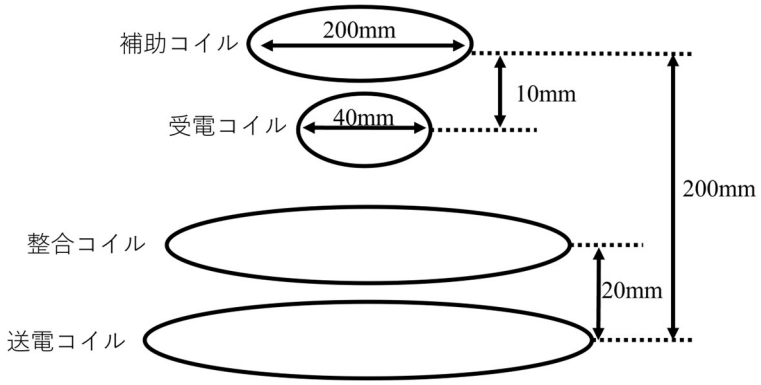

図 2　各コイルの配置条件

3. 結合係数のシミュレーション

磁場共鳴型無線電力伝送において、電力の伝送効率はコイル同士の結合係数と Q 値に依存する。そこで、本章では各コイル同士の結合係数について、シミュレーションを行った。

3.1 補助コイルと受電コイルの結合係数

本研究において、受電コイルは体内への配置を想定しているため、サイズが小さくなる。そのため、送電側コイルとの結合係数は極めて低くなるため、衣服に縫い込んだ補助コイルとの結合係数の最大化が、伝送効率の向上にとって重要である。本章では補助コイルの外径を 200mm、受電コイルの外径を 40mm として結合係数のシミュレーションを行った。シミュレーションはスパイラル形状のコイルに設定し、ピッチを変化させて行ったが、受電コイルについてはサイズが小さく、ピッチの変更が難しかったため 5㎜ に統一した。表 1 にピッチごとのコイルの結合係数を示す。結果として、補助コイルのピッチが 40mm の時、結合係数が 0.095 と最も大きくなることが分かった。このシミュレーション結果から、補助コイルの大きさは外径 200mm のピッチ 40mm とした。

表 1　補助コイルのピッチを変化させたときの補助－受電間の結合係数

ピッチ(mm)		巻き数	結合係数
受電コイル	補助コイル		
5	5	3	0.044
	10		0.050
	15		0.055
	20		0.061
	25		0.068
	30		0.075
	35		0.085
	40		0.095

3.2 補助コイルと受電コイルの結合係数

3.1 で決定した補助コイルを用いて、整合コイルとの結合係数について、シミュレーションを行った。本研究のコイル配置において、整合コイルから補助コイルへの伝送距離が最も長くなるため、整合－補助コイル間の結合を強めることは高効率の電力伝送を行うために不可欠である。本章では、整合コイルの外径とピッチを変更し、結合係数のシミュレーションを行った。このとき補助コイルと整合コイルの巻き数は 3 回とし、コイル間の距離は図 2 に示すように 180mm とした。表 2 に整合コイルの外径を変化させた場合の、補助コイルとの結合係数について示した。結合係数は整合コイルの外径が 500mm の場合に最も大きくなり、外径 300mm～600mm と設定したとき、比較的結合係数が大きくなった。

表 2　整合コイルの外径を変化させたときの整合－補助間の結合係数

整合コイルの外径	結合係数 k
100mm	0.0181
200mm	0.0470
300mm	0.0645
400mm	0.0705
500mm	0.0697
600mm	0.0662
700mm	0.0618
800mm	0.0573
900mm	0.0531
1000mm	0.0493

表 2 の結果に基づき、外径 300mm～600mm それぞれの大きさでピッチを変更した際の結合係数についてもシミュレーションを行い、結果を図 3 のグラフに示した。各大きさのコイルで結合係数が最大となったのは、外径が 300mm の場合、ピッチ 70mm、外径 400mm 時ではピッチ 60mm、外径 500mm 時ではピッチ 70mm。外径 600mm 時ではピッチが 90mm であった。これらのコイルは送電コイルとの結合係数を求める際にも使用した。

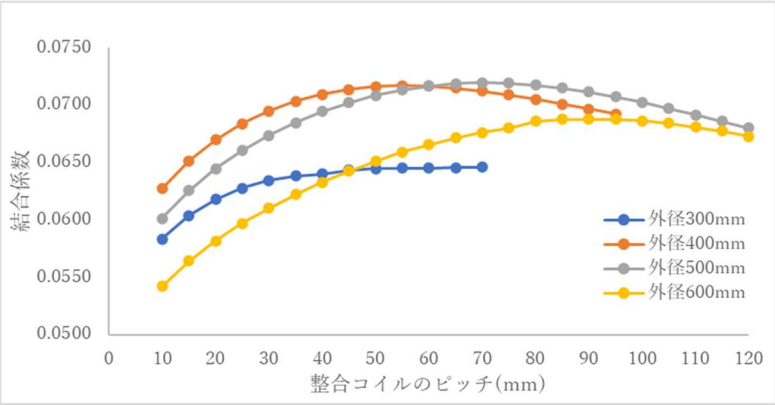

図 3　整合－補助コイル間の結合係数

3.3 補助コイルと受電コイルの結合係数

本章では伝送回路に用いる送電コイルの大きさを決めるため、4.3 で求めた各外径の整合コイルと、送電コイルの結合係数についてシミュレーションを行った。図 4 に送電コイルの外径を 100～1000mm まで変化させ整合コイルとの結合係数を求めた結果を示した。結合係数が最も大きくなるコイルの組み合わせは、整合コイルの外径が 300mm の場合、送電コイルの外径の大きさも 300mm、整合コイルが 400mm の場合は送電コイルも 400mm、整合コイルが 500mm、600mm の場合も送電コイルは 500mm、600mm といずれも外径が等しくなることが分かった。

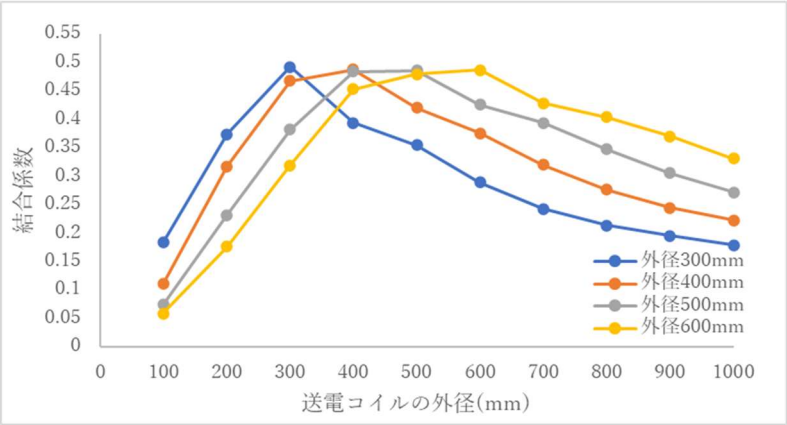

図 4　送電－整合コイル間の結合係数

4. 電力伝送効率のシミュレーション

3 章で伝送システムに用いる 4 つの各コイルの結合係数についてのシミュレーションを行った。各コイルの結合係数が高くなる大きさに設定し、電力伝送効率のシミュレーションを行った。このシミュレーションで使用した補助コイルと受電コイルの条件は表 3 示した。送電側コイルの外径は表 3 の結合係数シミュレーションを踏まえて 300～600mm とし、外径ごとにピッチを変化させたとき、結合係数が高くなる条件下の電力伝送効率を表 4 に示した。結果として、送電側のコイルの外径を 600mm、ピッチを 90mm とした場合に、電力伝送効率が最も大きい 82.8%となった。以上のシミュレーション結果から、今回提案する電力伝送システム用にそれぞれの外径を送電コイルと整合コイルは 600mm、補助コイルは 200mm、受電コイルは 40mm で作製することにした。

表 3　補助・受電コイルの外径

	外径	ピッチ	巻き数
補助コイル	200mm	40mm	3
受電コイル	40mm	5mm	3

表 4　外径ごとの伝送効率

整合コイルの外径	ピッチ	伝送効率
300mm	70mm	64.7%
400mm	60mm	72.9%
500mm	70mm	76.1%
600mm	90mm	82.8%

5. 実機の作製

5.1　コイルの電気的特性

本章ではシミュレーションを行った設計条件で実際にコイルの作製を行い、インダクタンスや損失抵抗などの測定を行った。各コイルの作製には 0.04mm×660 本のリッツ線を使用しており、補助コイルについては布に縫い付けて作製した。シミュレーション上のパラメータは表 5 に、実際の値は表 6 に示した。シミュレーション値と実測値を比較すると、送電コイルと整合コイルの実測値は比較的シミュレーションの値に近かったが、送電コイルと整合コイルに関してはインダクタンスが大幅にシミュレーション値を上回った。原因として、コイルが自己共振を起こしていたことが考えられる。コイルの周波数特性を調べたところ、14MHz 付近で自己共振していた。13.56MHz の周波数下でコイルを使用することを想定しているため、自己共振周波数に近い値であったことで、コイルがインダクタとして正常に機能していな

かったと考えられる。また、損失抵抗も 1.37kΩ とかなり高く、コイルとして機能させるにはこれも無視できない。コイルの巻き数を減らす、リッツ線を 2 重に並列で並べてコイルを作成するなどの方法で抵抗を抑える必要があると考えられる。

表 5　シミュレーション上のコイルのパラメータ

	外径	ピッチ	インダクタンス	キャパシタンス
送電コイル	600mm	90mm	7.26μH	19.0pF
整合コイル	600mm	90mm	7.26μH	19.0pF
補助コイル	200mm	40mm	1.72μH	80.1pF
受電コイル	40mm	5mm	0.26μH	529pF

表 6　作製したコイルのパラメータ

	外径	ピッチ	損失抵抗	インダクタンス	キャパシタンス
送電コイル	600mm	90mm	1.37kΩ	24.2μH	5.69pF
整合コイル	600mm	90mm	1.37kΩ	24.2μH	5.69pF
補助コイル	200mm	40mm	2.65Ω	2.22μH	62.0pF
受電コイル	40mm	5mm	2.29Ω	0.38μH	361pF

5.2　二重リッツ線コイルの作製

表 5 の外径 600mm の送電コイルを二重にしたリッツ線で作製し、測定を行った結果を表 7 に示した。表 6 の 1 本のリッツ線で作製したコイルと比較すると損失抵抗が小さくなり、インダクタンスも表 5 のシミュレーション値により近づいた。しかし損失抵抗は 312Ω とまだ大きく、インダクタンスについてもシミュレーション値である 7.2μH を大きく上回っており、改善の必要があるということが分かった。

表 7　2 重リッツ線コイルのパラメータ

	損失抵抗	インダクタンス	キャパシタンス
シミュレーション値	ー	7.26μH	19.0pF
1 重 実測値	1.37kΩ	24.2μH	5.69pF
2 重 実測値	**312Ω**	**19.9μH**	**6.92pF**

5.3　コイルの巻き数の変更

損失抵抗の緩和のため、巻き数を減らした 1 巻、2 巻のコイルについてもシミュレーションと作製を行った。まず 1 巻コイルについて、結合係数のシミュレーションを行った結果、伝送効率が 57.6%と 3 巻きのコイルで行った時よりも大幅に低下したため、実用にはふさわしくないと判断した。2 巻コイルについては整合コイル、送電コイルともに外径が 600mm の時、結合係数が高い値となった。また伝送効率は送電コイルのピッチを 90mm、整合コイルのピッチを 100mm としたとき 74.8%となった。3 巻コイルを使用した際の伝送効率には劣るが、1 巻コイルと比較すると高い伝送効率であると言える。この条件で実機の作製を行った。

上述した外径 600mm の送電コイル・整合コイルのシミュレーション上のパラメータと実際のパラメータを表 8、表 9 に示した。送電・整合コイルの損失抵抗は 310Ω、228Ω と、それぞれ 3 巻で作製したコイルよりも小さくなった。コイルの巻き数を減らすことで抵抗の緩和に効果的であることはわかったが、補助コイルや受電コイルが約 2Ω だったことから、抵抗はかなり大きいといえる。5.2 で、コイルの作製に 2 本のリッツ線を用いることで抵抗が低減されたことから、2 巻コイルも表 9 に示した条件で 2 本のリッツ線を使用したコイルも作製することにし、その実際のパラメータは表 10 に示した。いずれのコイルもリッツ線を並列に増やすことで損失抵抗が抑えられ、インダクタンスをシミュレーションの値に近づけることができた。また、3 巻きで作製したコイルよりもシミュレーション値に近い仕上がりとなった。

表 8　2 巻の送電コイルのパラメータ

	損失抵抗	インダクタンス	キャパシタンス
シミュレーション値	―	4.24μH	32.5pF
実測値	310Ω	7.26μH	19.0pF

表 9　2 巻の整合コイルのパラメータ

	損失抵抗	インダクタンス	キャパシタンス
シミュレーション値	―	4.08μH	33.8pF
実測値	228Ω	6.43μH	19.0pF

表 10　2 重リッツ線で作製した 2 巻コイルのパラメータ

	損失抵抗	インダクタンス	キャパシタンス
送電コイル	26.8Ω	6.77μH	20.3pF
整合コイル	19.1Ω	5.80μH	21.4pF

6. まとめと今後の課題

本研究では、縫込み補助コイルとインピーダンス整合コイルを用いた磁場共鳴方式における各コイルの設計を行った。コイルの結合係数の最適化を図った結果、送電コイルと整合コイルの外径を 600mm、補助コイルは 200mm、受電コイル 40mm という条件下で伝送効率が 82.8%となった。しかし、実際にコイルを作成した結果、送電側のコイルの損失抵抗が非常に大きくなり、インダクタンスがシミュレーション上の理想値よりも高くなった。ただ、コイルの巻き数を減らすことやコイルの作製に複数のリッツ線を使用することである程度抵抗の緩和ができることが分かった。本研究では送電側のコイルの設計がシミュレーショ通りにいかなかったが、補助コイルと受電コイルに関しては、インダクタンスが比較的シミュレーションの値と近かった。そのため、今回作成した送電コイルの実測値を踏まえて、補助・受電コイルの設計条件について改めて見直し検討する必要があると考えられる

7. 参考文献

[1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffattl, J. D. Jannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” Science, vol. 317, no5834, pp.84-86, July 2007

[2] Y. Tak, et al., “Mode-based analysis of resonant charac-teristics for near-field coupled small antennas,” IEEE An-tennas and Wireless Propagation Letters, vol. 8, pp. 1238-1241, 2009

[3] T. Ishizaki, et. al, “Comparative study of coil resonators of transfer loss,” IEICE Electronic Express, vol. 7, no. 11, pp. 785-790, 2010

[4] Ryohei Suwahara, Rei Omata, Ryota Kato, Kei Seta and Shogo Kiryu, “Production of the Coils by Use of Sewing Technologies for an Electromagnetic Induction Power Transmission,” Jarnal of JSAEM, vol. 25, No. 2, pp100-105, 2017

[5]小泉皓平，“補助コイルを用いた縫込み型非接触電力伝送に関する研究”，(2021)