

小型ヘリカルコイルを用いたワイヤレス給電

佐藤 憲史*1, 金原 大*2

Wireless power transfer using compact helical coils

Kenji Sato*1, Hiroshi Kinpara*2

Abstract: We have evaluated experimentally the power transmission efficiencies of compact helical coils with reflection plates for wireless power transfer. The helical coils with diameters of 13 cm and 26 cm were fabricated. Compared with the helical coils with a diameter of 26 cm, the compact one with a diameter of 13 cm resulted in expansion of the gap distance at a fixed frequency of 16 MHz. Transmission efficiencies of more than 60 % were obtained for the gap-distance range of 35–65 cm. The transmission efficiencies against the lateral displacement and rotation were measured, and a practical margin was demonstrated.

Key Words: wireless power transfer, helical coil, reflection plate

1. はじめに

スマートフォンや携帯型コンピュータの普及によって、高性能な電子機器をいつでもどこでも使用する、ユビキタス社会が到来している。しかし、移動可能な電子機器を快適に利用するためには、バッテリーとその充電技術が不可欠である。また、電気自動車を普及させるためには、バッテリーや充電技術が鍵となっている。非接触で給電するワイヤレス電力伝送技術は、電源ケーブルやプラグが不要になるばかりでなく、充電の自由度を高め、給電部の端子等を絶縁できるという大きな利点をもつ。

電磁誘導方式によるワイヤレス電力伝送技術はコイルを対置し磁束を結合させる単純な構造であり、家電等で実用化が進んでいる。しかし、コイル間ギャップ長の増大に伴い出力が急激に低下するため、無線タグなどの応用を除いて、ギャップをミリメートルレベルにする必要がある。2007年に発表された磁界共鳴方式^[1]は、メートルレベルのギャップにおいて高い効率で電力伝送できることから注目された。送電器は発振器に直結された直径 50 cm のループ型励起コイルと直径 60 cm のヘリカル型共振コイルから構成され、2 m のギャップにおいて 40 % 以上の効率で電力伝送できることが報告されている。共振周波数において電力伝送することで、比較的大きなギャップにおいても高い伝送効率が得られるが、この現象はモード結合理論によって解析されている^[2]。また、集中定数回路モデルでも解析されており、同様な結果が得られ

ている^[3,4]。2 個の共振器間の結合と損失から伝送距離や伝送効率が決まることが導出されている。

接地型スパイラルダイポールアンテナ^[5]や接地型ヘリカルアンテナ^[6]によるワイヤレス電力伝送について、シミュレーション解析と実験結果が報告されている。接地板を兼ねた反射板の導入により、不平衡給電が可能である、共振周波数を低減できる、遠方界放射電力を低減できる等の効果が指摘されている^[6]。反射板は、送受電用装置を実装する際、周辺にある導体の影響を遮断し、電磁波漏れによる周辺への影響を低減するためにも重要である。我々は、ヘリカルアンテナを用いたワイヤレス給電において、反射板の有無による電力伝送特性を評価し、伝送効率の改善効果を検証した^[7]。

ワイヤレス給電におけるギャップ長はコイルの直径を大きくすることで拡大できるが、電気自動車等への応用では装置の小型化が求められる。これまでの実験的な報告では、コイルの直径は 30 cm 程度であったが、本研究では、さらなる小型化を検討する。コイルの直径が 13 cm, 26 cm と異なる 2 種類の反射板付ヘリカルコイルを評価し、小型化が可能であることを示す。周波数を固定した場合の電力伝送効率について、コイル間ギャップ長依存性を評価する。入出力線路の特性インピーダンスと共振器のインピーダンスとの比を最適化することで伝送効率が改善されることが理論的に指摘されている^[4,8]が、変成器を挿入することでその効果を実験的に検証する。性能指標に対する最大効率についての理論的な結果^[4]と実験結果を比較する。直径の異なるコイル間での電力伝送が可能であることを検証する。また、横ずれ及び回転に対する伝送効率の変化を評価し、実用的な許容度を有することを示す。

*1 電気電子工学科

Department of Electrical and Electronics Engineering

*2 電気電子工学科卒業生

Graduate of Department of Electrical and Electronics Engineering

2. 送受電装置の作製と実験

図 1 に、ヘリカルコイルを用いたワイヤレス給電装置の外観を示す。ワイヤレスで電力伝送するために、送電側では高周波の発振器を送電器に接続する。受電側では、ワイヤレス給電された高周波電力を、変換回路を用いてバッテリーの充電等に利用する。本研究では、高周波をワイヤレスで送受電する部分を、反射板付ヘリカルコイルを用いて構成している。50 Ω の特性インピーダンスを持つ同軸ケーブルを用いて入出力部を接続し、50 Ω の負荷を仮定して送受電部を評価している。高周波の周波数については、非接触 IC カード等で用いられている 13.56 MHz などいくつかの候補が考えられる。製作や計測等の制約から、本研究では、16 MHz に設定して実験している。図 1 に示すように、反射板上にヘリカルコイルを固定し、BNC レセプタクルを介して給電用同軸ケーブルの内導体と接続している。ヘリカルコイルの片方の端は開放状態である。同軸ケーブルの外導体は反射板に接続されており、反射板は接地板としても機能している。

本実験では、ヘリカルコイルの大きさを変えた 2 種類、S 型と L 型の装置を作製した。それらの構造パラメータを表 1 に示す。現状では設計方法は未確立であるが、コイルの直径が 26 cm の L 型と 13 cm の S 型で同一の共振周波数を持つようにパラメータを設定した。ピッチはらせん状コイルにおける間隔である。高さ、 h は、図 1 に示すように、反射板からコイルの先端までの距離である。コイルと反射板間に 1 cm 程度のギャップを設けたため、表 1 の高さはコイルのピッチと巻き数から見積もられる値より大きくなっている。直径 2 mm のポリエステル絶縁銅線を用いてコイルを作製している。アクリル板の支柱を反射板に取り付けコイルを固定している。正方形の形状を持つ反射板には厚さ 3 mm のアルミニウム板を用いている。

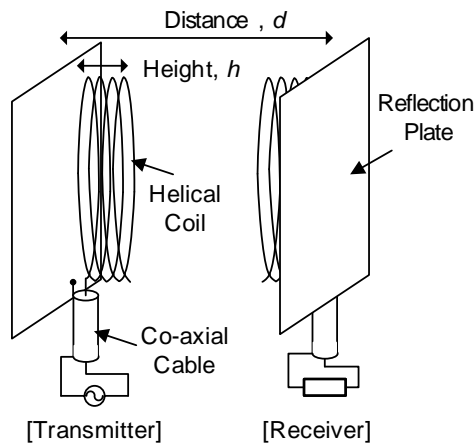


図 1 ヘリカルコイルを用いたワイヤレス給電装置の構成
作製された装置の高周波入出力特性評価には、ネットワー

クアナライザ (Agilent, A8714ES) 及びトラッキングジェネレータ付スペクトラムアナライザ (Agilent, N1996A) を用いている。

表 1 ヘリカルコイルと反射板の構造パラメータ

パラメータ	S 型	L 型
コイル直径 [cm]	13	26
ピッチ [mm]	4	6
巻き数	11.5	5.5
高さ, h [cm]	6	4
反射板の大きさ [cm ²]	26 x 26	60 x 60

3. 電力伝送特性

3.1 反射特性と共振周波数

ネットワークアナライザを用いて、作製された反射板付ヘリカルコイル単体の反射特性 (S_{11} の強度) を評価した。図 2 に、S 型と L 型の反射特性を示す。

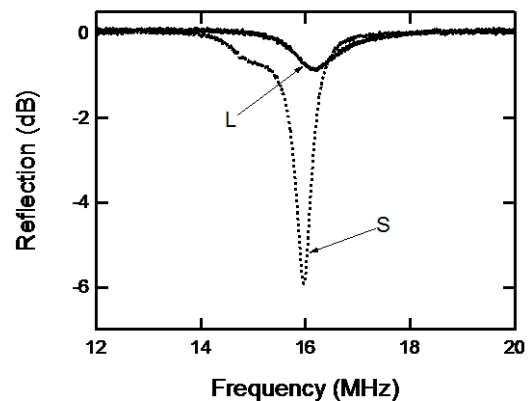


図 2 ヘリカルコイルの反射特性：S 型と L 型

表 2 共振周波数、インピーダンスと Q 値

項目	S 型	L 型
コイル長 [m]	4.7	4.5
共振周波数：実験 [MHz]	16.0	16.1
共振周波数：計算 [MHz]	16	17
インピーダンス：実験 [Ω]	15.8	2.2
Q 値：実験	172	357

周波数 16 MHz 近傍で鋭いディップが観測されており、コイルの共振周波数が求められる。ネットワークアナライザにより、共振周波数と共振周波数におけるインピーダンスの絶対値、および、インピーダンスの周波数特性から見積もられた共振器としての Q 値を表 2 に示す。ここで、コイル長は表 1 の構造パラメータから見積もられた。また、共振周波数の計算は、コイル長が波長の 1/4 になる、モノポールアンテナの仮定に基づいている。実験的に得られた共振周波数は計算

とほぼ一致している。この結果より、作製したヘリカルコイルをノーマルモードヘリカルアンテナとみなすことができる。ワイヤレス給電ではアンテナを対向して配置するが、ギャップ長は 1 m 程度であり、16 MHz における波長 19 m に比べ非常に小さい。波長に比べ十分離れていることを前提としたアンテナでは放射波を対象としており、磁気共鳴方式によるワイヤレス給電ではアンテナと異なる解析が必要である。

3.2 電力伝送特性:S型

2 個の S 型ヘリカルコイルを対向させたとき、測定された透過特性 (S_{21} の強度) を、図 3 に示す。2 個のコイルは、図 1 に示したように、コイルの中心を同一直線上に配置しており、反射板間の距離をギャップ長、 d と定義する。図 3 では、ギャップ長を 20, 40, 60, 80, 100 cm とした 5 つの場合について図示している。ギャップ長が 40 cm 以下では、透過率が極大となる 2 個のピークが観測されている。ギャップ長を増大させるとピークは 1 個に収束し、共振周波数は反射特性より測定した共振周波数と比べ 0.1 MHz 程度低いが、ほぼ一致する値となった。

ヘリカルコイルを近接させると共振周波数が 2 個に分離する現象は、例えば、近接した 2 本のストリップ線路において奇モードと偶モードの 2 個のモードが現れる現象と類似している。ネットワークアナライザの位相測定により、入出力の位相差が、低い共振周波数においてほぼ 0、高い共振周波数においてほぼ π となることを確認した。これは、低い共振周波数では 2 個のコイル間で磁場が同位相で平行な偶モード、高い共振周波数では磁場が反平行な奇モードとなっていることを意味している。この結果は、結合モード理論による解析結果^[3]と一致している。偶モードでは 2 個のコイルの同位相結合により共振器長が等価的に増大し共振周波数が低下するのに対して、奇モードでは共振器長が等価的に減少し共振周波数が増大すると考えられる。近接したコイルにおいて共振周波数が 2 個に分離する現象は、集中定数回路モデルでも導出されている^[3, 4]。

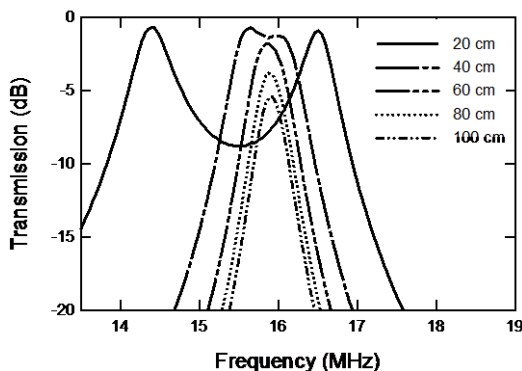


図 3 透過特性 : S-S

測定された S_{21} の強度を%で表した値を電力伝送効率と定

義する。図 4 は、電力伝送効率のギャップ長依存性を示している。ここで、動作周波数 f を、ギャップ長 100 cm におけるピーク周波数 15.9 MHz に固定したときの効率の値と、それぞれのギャップ長において効率が最大となる値(Peak)を示している。Peak では、ギャップ長が 40 cm 以下において効率は 86%程度とほぼ一定である。周波数を 15.9 MHz に固定した場合、ギャップ長に対して最適値が出現し、45 cm 近傍で効率が最大 78%となっている。40 cm 以下では、効率が急激に低下する。これは、図 3 から明らかなように、共振周波数が 2 個に分離し変化するため、動作周波数が共振周波数から離反することによる。45 cm 以上ではギャップ長の増大により効率が低下している。ギャップ長の増大に伴いコイル間の磁気的な結合は弱まる。それに伴い共振周波数が 1 個に収束し、Peak と周波数固定で効率の差異はほとんどなくなる。給電システムでは動作周波数は狭帯域に限定されるため、周波数を固定することが現実的である。図 4 において $f = 15.9$ MHz と固定した場合、伝送効率を 60%以上確保できるギャップ長の範囲は、35-65 cm である。

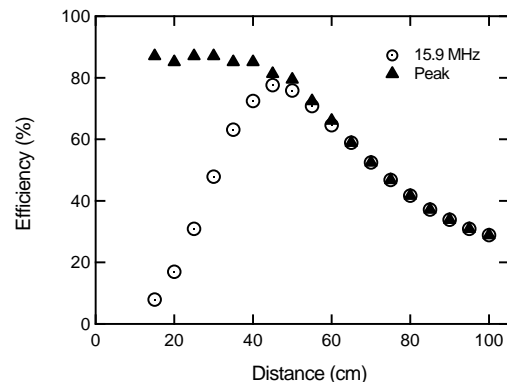


図 4 電力伝送効率の距離依存性 : S-S, $f = 15.9$ MHz とピーク

3.3 電力伝送特性:L型

次に、コイルの直径が S 型の 2 倍ある L 型の電力伝送特性について述べる。L 型の実験では、変成器の導入によりインピーダンス変換し、伝送効率を改善することを実験的に試みる。入出力線路の特性インピーダンスと共振器のインピーダンスとの比を最適化することで、伝送効率を最大化できることが理論的に示されている^[4, 8]。単体アンテナではインピーダンス整合により反射率を低減することが重要になるが、コイルを対向させたワイヤレス給電では、コイル間の結合状態によってインピーダンス比の最適条件が決まる。

2:1 の巻き数比をもつ変成器を、磁気トロイダルコアを用いて作製し、送受電用コイルと同軸ケーブル間に挿入した。単体としてのコイルのインピーダンスは、表 2 より 50 Ω に比べ小さく、実験で用いた変成器の挿入はインピーダンス比を低下させる。図 5 は、2 個の L 型ヘリカルコイルを対向させ

測定された電力伝送効率のギャップ長依存性である。周波数を 16.0 MHz に固定している。変成器を接続していない場合 (w/o Trans.) と変成器が接続された場合 (Trans.) について図示している。変成器の挿入によりインピーダンス比が低下するため、ギャップ長が大きくコイル間の結合係数が低下する領域において伝送効率の改善が見込まれる^[4]。図 5 より、40 cm 以上のギャップ長において効率が増大し、40 cm で 29% から 59% に改善されている。

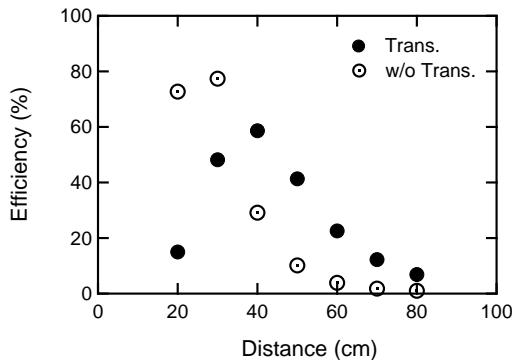


図 5 電力伝送効率の距離依存性 : L-L, $f = 16.0$ MHz

インピーダンス変換率を調整することで、伝送効率を改善することが可能である。ここでは、最大効率の理論結果と実験結果を比較してみる。コイル間の結合係数 k と共振器の Q 値との積 kQ を性能指標として、最大伝送効率 η_{max} は、次式で与えられる^[4]。

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q^2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q^2})^2} \quad (1)$$

インピーダンス比が $\sqrt{1 + k^2 Q^2}$ に等しいとき、最大効率が得られる。ただし、対向する 2 個の共振器の Q 値を等しいとしている。図 3 に示したように透過特性において共振周波数が分離する場合、測定される 2 個の共振周波数 f_m , f_s ($f_m < f_s$) から、結合係数 k は、次式^[3]により求められる。

$$k = \frac{f_s^2 - f_m^2}{f_s^2 + f_m^2} \quad (2)$$

上式より実験的に求めた結合係数 k と表 2 に示した Q 値より kQ を算出し、対応する伝送効率のピーク値を図 6 に示す。S 型 (図 4) と L 型 (図 5, w/o Trans. 及び Trans.) の実験結果についてプロットしているが、結合係数 k が求まる、ギャップ長が比較的小さい (k が相対的に大きい) 領域に限定されている。図中の曲線は、(1)式より計算された最大効率である。図 6 より、変成器なしの実験結果について理論的な最大効率に近い値が得られている。 $kQ < 10$ において、実験値が理論値よりも大きくなっている。この原因として、(2)式は共振器の損失を無視しており、実験的に求めた結合係数 k が過小評価されている^[3]ことが考えられる。最大効率を得るためにはギャップ長に応じてインピーダンス比を調整する必要

があり、ギャップ長を拡大するためには性能指標 kQ を高める検討が重要となる。

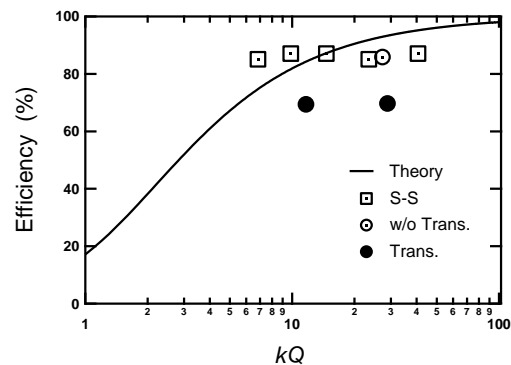


図 6 性能指標 kQ に対する最大伝送効率

L 型間の伝送効率に比べ、前節で述べた S 型間の伝送効率が相対的に高くなっている。例えば、 $d = 60$ cm において、L 型間の伝送効率が 23% であるのに対し、S 型間では 65% である。L 型に比べ S 型ではコイルの直径が 1/2 に小型化されているにもかかわらず、ギャップ長の拡大が図られている。反射板付ヘリカルコイルでは、コイルの高さとコイルの直径や反射板の大きさとの比に依存して磁場の広がりや共振器間の結合が変化する。これらを考慮した解析が必要である。

3.4 電力伝送特性:L 型-S 型

形状の異なるコイル間でワイヤレス電力伝送が可能であることを検証するため、L 型ヘリカルコイルと S 型ヘリカルコイルを対向させ、透過特性 (S_{21} の強度) を評価した。その結果を、図 7 に示す。L 型ヘリカルコイルには前節で述べた変成器が挿入されている。また、L 型単体の共振周波数が S 型と一致するようにコイル長を微調している。ギャップ長が 40 cm 以下で共振周波数の分離が起こることは S-S と L-L の対称な構成と同様である。しかし、対称な場合と異なり、非対称な L-S 間では高周波側の共振周波数とその周辺の変化が小さいという結果が得られた。

伝送効率のギャップ長依存性を、図 8 に示す。周波数は 15.9 MHz に固定されている。図中には、比較のため、図 4 に示した S-S 間の効率も図示している。ギャップ長が 40 cm 以下では、L-S 間の伝送効率の方が大きい。これは図 7 に示したように、共振周波数分離の影響が弱まっていることによる。ギャップ長が 40 cm 以上では、L-S 間の伝送効率は S-S 間に比べやや小さいが、形状が異なるコイル間でも共振周波数を一致させることで電力伝送できることを実証した。

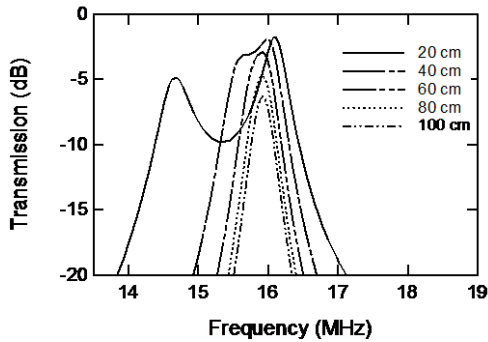


図 7 透過特性 : L-S

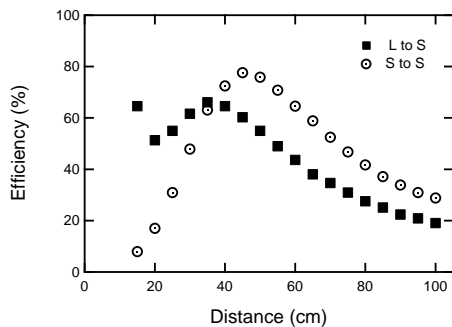


図 8 電力伝送効率の距離依存性 : L-S と S-S, $f = 15.9$ MHz

4. 位置ずれと回転特性

前章において、2 個のヘリカルコイルの中心を同一直線状に配置し、伝送効率のギャップ長依存性を評価した。次に、図 9 に示すように、反射板の中心間ギャップ長を固定し、横ずれを起こした場合と受電側のコイルを回転した場合について伝送効率の変化を評価する。これまで、反射板がない場合の横ずれ依存性について報告⁹⁾はあるが、回転依存性についてはほとんど報告例がない。図中に横ずれ長と回転角の定義を示している。中心間のギャップ長は、共振周波数の分離が収束し伝送効率が高い 40-45 cm としている。

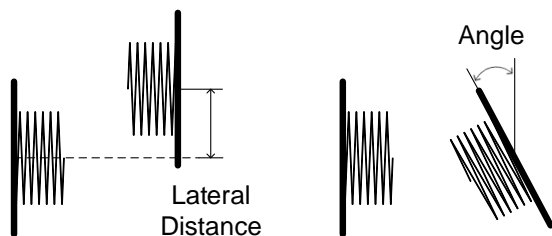


図 9 横ずれ長と回転角の定義

図 10 は、S 型の 2 個のコイルでギャップ長を $d = 45$ cm と固定した時、横ずれ長に対する電力伝送効率を示す。周波数は 15.9 MHz に固定されている。横ずれ長が 20 cm まで伝送効率はほとんど変化せず、反射板の 1 辺の長さ 26 cm に対して 0.8 倍程度の許容度が得られた。この結果は、反射板がな

いヘリカルコイルの結果⁹⁾と同程度である。

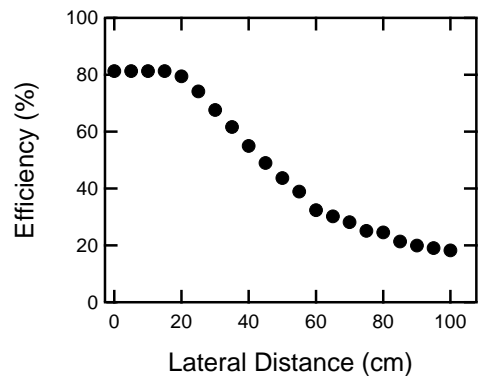


図 10 電力伝送効率の横ずれ長依存性 : S-S, $d = 45$ cm, $f = 15.9$ MHz

図 11 は、反射板の中心間距離を $d = 40$ cm と固定した時、受電側のコイルの回転角に対する電力伝送効率を示す。90°の回転角においても伝送効率の低下は小さく、実用性のある許容度が得られた。

横ずれと回転に対して伝送効率がほとんど変化しない領域が得られた。横ずれや回転によりコイル間の距離は等価的に増大している。単純なループ状コイル間では、距離や角度が増大すると相互インダクタンスは低下する。共振器としての 2 個のコイルの電磁氣的結合について、反射板を含めた解析が必要である。

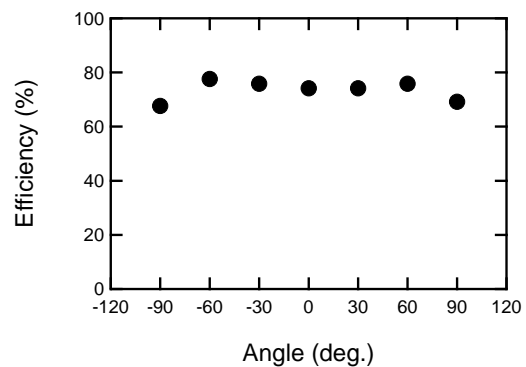


図 11 電力伝送効率の回転角度依存性 : S-S, $d = 40$ cm, $f = 15.9$ MHz

5. おわりに

磁気共鳴方式によるワイヤレス電力伝送において、反射板付ヘリカルコイルを作製し、電力伝送特性を実験的に評価した。共振周波数は 16 MHz と等しいが、コイルの直径が 13 cm, 26 cm と異なる 2 種類のヘリカルコイルを作製した。2 個のコイルを対向させ、ネットワークアナライザを用いて透過特性のギャップ長依存性を評価した。反射板間のギャップ長が 40 cm 以下で共振周波数が 2 個に分離した。ギャップ長が 40 cm 以上では共振周波数の分離が収束すると同時に、伝送効

率が低下した。動作周波数を固定した場合、ギャップ長に対して伝送効率の極大値が存在することを示した。直径 26 cm のコイルに比べ、直径が 13 cm のヘリカルコイルにより、ギャップ長が拡大し相対的に高い伝送効率を得た。具体的には、35-65 cm のギャップ長において伝送効率 60 %以上が得られた。横ずれと回転に対する伝送効率の変化を評価し、ずれや回転に対して実用性のある許容度を得られた。ヘリカルコイルに反射板を取り付けることで小型化が可能であり、構造の最適化によりさらなる特性向上が期待される。

謝辞

装置の作製や評価に関わった本校電気電子工学科の卒業生、芹澤知志君に感謝する。

参考文献

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Mohhatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol.317, no.5834, pp.83-86, July 2007.
- [2] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol.323, pp.34-48, April 2008.
- [3] 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一, "等価回路から見た非接触電力伝送の磁界共振結合と電界結合に関する研究," *電学論 D*, vol.130, no.1, pp. 84-92, Jan. 2010.
- [4] T. Komura, M. Koizumi, K. Komurasaki, T. Shibata, and K. Kano, "Compact and Tunable Transmitter and Receiver for Magnetic Resonance Power Transmission to Mobile Objects," *InTech, Wireless Power Transfer – Principles and Engineering Explorations*, K. Y. Kim (Ed.), pp.133-150, 2012.
- [5] 稲垣直樹, 田端隆伸, 堀智, "接地オフセット給電スパイラルダイポールアンテナによる無線電力伝送," *信学技報, A・P2011-118*, pp.161-166, Nov. 2011.
- [6] 天野智博, 平山裕, 菊間信良, 榎原久二男, "無線電力伝送用接地型ヘリカルアンテナ," *信学技報, WPT2012-18*, pp.161-166, Aug. 2012.
- [7] 佐藤憲史, 金原大, "反射板付ヘリカルアンテナによるワイヤレス電力伝送," *沼津工業高等専門学校研究報告, 第 49 号*, pp. 11-14, Jan. 2015.
- [8] 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一, "等価回路から見た磁界共振結合におけるワイヤレス電力伝送距離と効率の限界値に関する研究," *電学論 D*, vol.130, n.10, pp.1169-1174, Oct. 2010.
- [9] 居村岳広, 岡部浩之, 内田利之, 堀洋一, "共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力伝送," *電学論 D*, vol.130, no.1, pp. 76-83, Jan. 2010.