

反射板付ヘリカルアンテナによるワイヤレス電力伝送

佐藤 憲史*, 金原 大*

Wireless power transmission using helical antennas with reflection plates

Kenji Sato*, Hiroshi Kinpara*

Abstract: We have fabricated helical antennas with reflection plates for wireless power transmission systems. The reflection plates act as a shield plane to reduce electromagnetic influences from the rear equipment. The transmission and return loss for a pair of helical antennas were measured by using a network analyzer. Compared with conventional helical antennas without reflection plates, the gap-length dependence of the transmission efficiency was evaluated for operation at a fixed frequency or the resonance frequencies. A transformer between an antenna and a co-axial cable was introduced to realize impedance matching. The improvement of the transmission efficiency was observed in the helical antennas with reflection plates. The problem due to the separation of resonance frequencies was described.

Key Words: wireless power transmission, helical antenna, reflection plate

1. はじめに

携帯電話やコンピュータの進化によって、高性能な電子機器をいつでもどこでも使用できる、いわゆるユビキタス社会が到来している。このような電子機器の利用にはバッテリーとその充電技術が不可欠である。また、電気自動車の普及においてもバッテリーと充電技術が鍵となっている。充電する際に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利点がある。ワイヤレス給電は、電気カミソリなどの家電や無線タグなどにおいて実用化されており、今後ますます普及すると予想される。

ワイヤレス電力伝送技術には主に3つの方式；電磁誘導方式、電磁界共鳴方式と、電磁波方式がある。トランスと同じ構造による電磁誘導方式が最も一般的である。コイルを対置し磁束を結合させる単純な構造であり、実用化が進んでいる。しかし、コイル間ギャップ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程度にする必要がある。電磁界共鳴方式は、2007年にMITが発表したもので、1-2メートルのギャップでも高効率な電力伝送が可能であることから注目された^[1]。電磁波方式は、アンテナによる無線通信を応用したもので、原理的には宇宙規模の長距離においても電力伝送が可能である。これらの3つの方式において、電磁界共鳴方式はメートルレンジのギャップで給電が可能であることから、電気自動車など大型のシステムへの応用が期待されている。

本研究では、ヘリカルアンテナを用いた電磁界共鳴方式について、反射板を取り付けることで特性向上を図る。反射板は送受電装置を自動車などに実装する場合、装置や周辺の影響を遮断するために必須であると同時に、給電面と反対側の電磁波を反射することで伝送効率の向上が期待できる。また、共振周波数がコイル間のギャップに依存して分離・変化する問題について抑制効果が期待される。本報告では、反射板の効果について実験的に検討した結果を述べる。

2. ワイヤレス給電装置の構成

ワイヤレス給電システムの概要を図1に示す。AC電源、あるいは直流電源による電気をワイヤレスで伝送するために適当な高周波(RF)へと変換する。ワイヤレス給電された高周波を変換回路で変換し、バッテリーの充電等に利用する。本研究では、図中点線で囲ったワイヤレス給電の核心部分について、ヘリカルアンテナを用いて構成している。入出力の接続には、50Ωの特性インピーダンスを持つ同軸ケーブルを用いて評価している。

図2に、ヘリカルアンテナを用いた構成の外観を示す。図2(a)は、通常のヘリカルアンテナであり、線状のダイポールアンテナをコイル状に巻いた構造となっている。給電点をヘリカルアンテナの中央に設け、両端は開放としている。同軸ケーブルと給電点を接続する際、自作した変成器型のバランを挿入して、不平衡系から平衡系の接続を達成している。図2(b)は、図2(a)の構造において中央から半分を反射板で置き換えた構造になっている。反射板は給電用同軸ケーブルの外導体と接続し接地している。インピーダンス整合のために変成器を挿入することを検討する。反射板の導入は、送受電用

* 電気電子工学科

Department of Electrical and Electronics Engineering

の装置を実装する際、周辺の影響を遮断するために必須である。また、給電面と反対側の電磁波を反射することで効率の改善が期待される。

図2 (a), (b)に示す2種類のアンテナ対を、銅線を用いて作製した。図2 (a)の通常タイプでは、ヘリカルコイルの直径22 cm, ピッチ8 mmとし、合計12巻とした。図2 (b)の反射板付のタイプでは、ヘリカルコイルの直径26 cm, ピッチ6 mmとし、6巻とした。反射板は1辺が60 cmの正方形をしたアルミ板である。これらのアンテナ対のギャップ長は、図2に示すように、(a)ではヘリカルアンテナの中央の給電点間距離、(b)では反射板間距離として評価した。

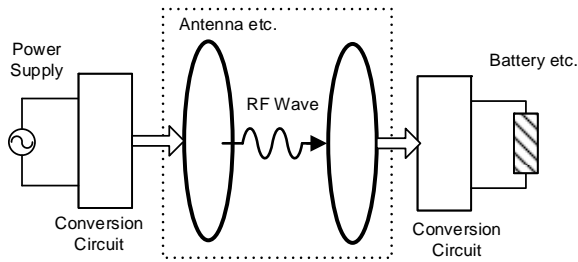


図1. ワイヤレス給電システムの概要.

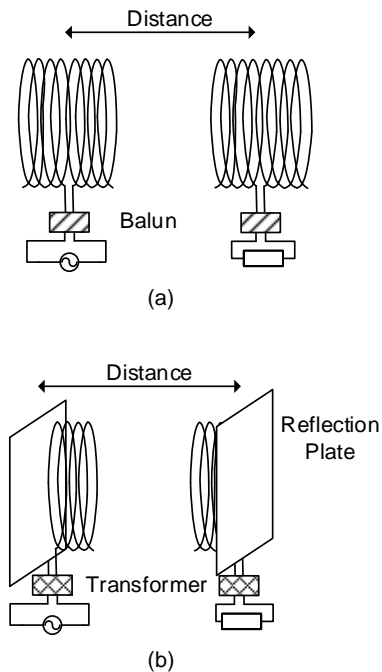


図2. ヘリカルアンテナを用いたワイヤレス給電装置。
(a) 通常のヘリカルアンテナ対. (b) 反射板を設けたヘリカルアンテナ対.

3. 電力伝送特性

ヘリカルアンテナ対の電力伝送特性を測定する系を、図3に示す。ネットワークアナライザ(Agilent, 8714ES)を用いて

Sパラメータを測定した。測定された S_{21} の値を電力伝送効率として評価している。また、 S_{11} の測定からリターンロスと入力インピーダンスを評価している。

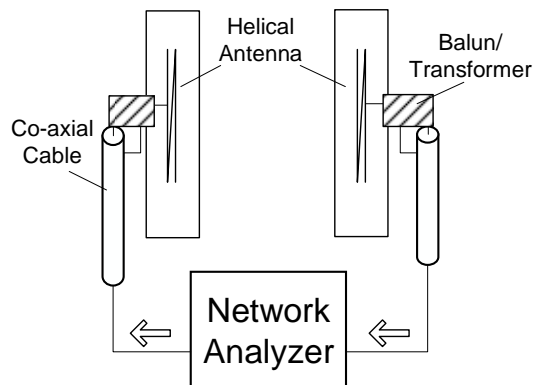


図3. 測定系の構成.

通常のヘリカルアンテナ (図2 (a)) において測定された透過特性 (S_{21}) を、図4に示す。アンテナのギャップ長を10, 20, 50 cmとした3つの場合について図示している。透過率が極大となるピーク周波数が共振周波数であるが、ギャップ長が10と20 cmでは2つに分離している。測定された共振周波数のギャップ長依存性を、図5に示す。ギャップ長が30 cm以下で2つの共振周波数に分離し、ギャップ長の低下に伴い周波数差が拡大することがわかる。

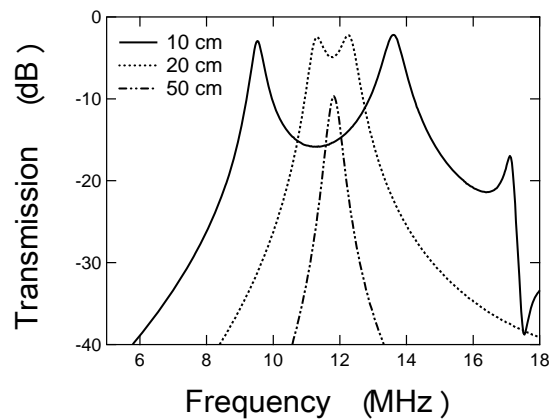


図4. 通常のヘリカルアンテナ (図2 (a)) の透過特性 (S_{21}).

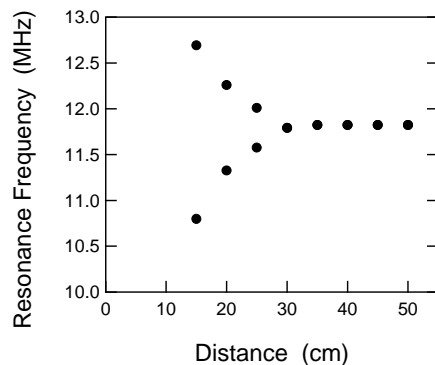


図5. 共振周波数のギャップ長依存性.

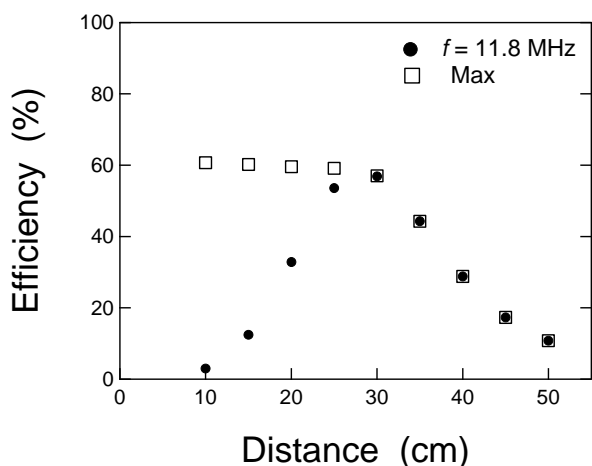


図 6. 通常のヘリカルアンテナの効率のギャップ長依存性.

図 6 は, S_{21} の値を%で表した電力伝送効率について, ギャップ長依存性を示している. ここで, 送電された高周波の周波数を 11.8 MHz に固定したときと, それぞれのギャップで効率が最大となる周波数をとったとき(Max)の 2 種類の結果を図示している. Max では共振周波数を選択していることになるが, 図 5 で共振周波数が分離している場合, 効率が大きい値を図示している. ギャップ長が 30 cm 以下で効率は 60% とほぼ一定であり, 30 cm 以上で効率が低下する. 周波数を固定して使うことが現実的であるが, その場合, ギャップ長に対して最適値が出現する. 図 6 では, ギャップ長が 50 cm における共振周波数 11.8 MHz に固定しており, 30 cm 近傍で効率が最大 57% となっている. 30 cm 以下では, 効率が急激に低下する. これは, 図 5 から明らかのように, 共振周波数が 2 つ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.

反射板付ヘリカルアンテナ (図 2 (b)) について, 透過特性と効率の測定結果を, 図 7, 8 に示す. ギャップ長が 20 cm と近傍では 2 つのピークへの分離が見られるが, 最大 90% の効率が得られた. 通常のヘリカルアンテナに比べ, 効率が改善されている. また, 周波数を 16.0 MHz に固定した場合と最適周波数とした場合(Max)で効率の差が小さい.

しかし, ギャップ長が 40 cm では効率が 29% (16.0 MHz) となり, ギャップ長の増大に伴い急激に低下している. ギャップ長に依存して伝送効率が低下する要因として, ヘリカルアンテナ間の結合が弱まることやインピーダンス不整合が考えられる. ヘリカルアンテナ間の結合は, コイル間の結合と同様に磁界の結合が支配的であり, 変成器の結合定数として見積もることができる. アンテナの形状や配置の設計によって結合係数を高められる可能性がある.

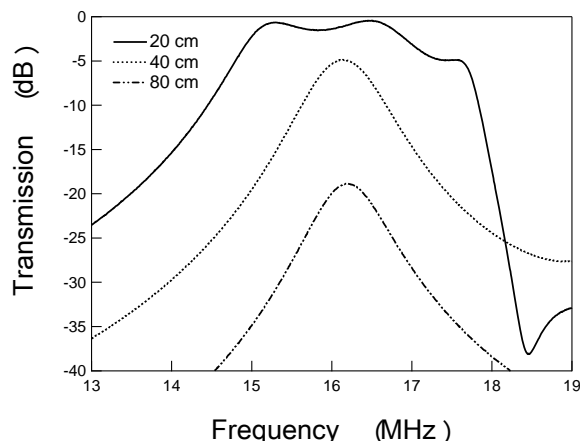


図 7. 反射板つきの場合 (図 2 (b)) の透過特性 (S_{21}).

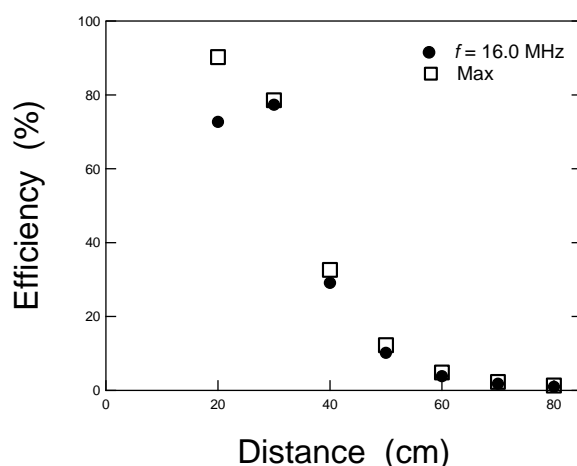


図 8. 反射板つきの場合の効率のギャップ長依存性.

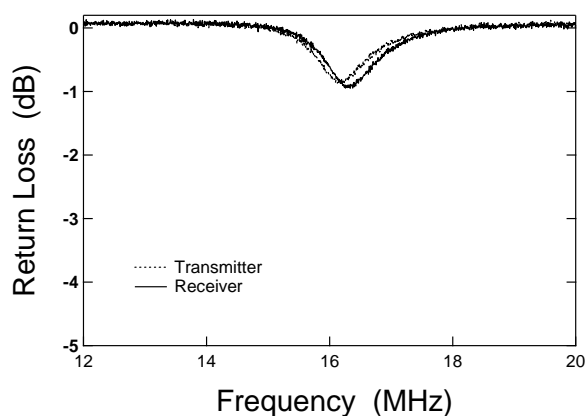


図 9. 反射板付ヘリカルアンテナのリターンロス特性 (S_{11}).

インピーダンス不整合については, 整合回路を用いて改善することが可能である. 反射板付ヘリカルアンテナ単体での反射損失 (S_{11}) の測定結果を図 9 に示す. 送電用と受電用のヘリカルアンテナを孤立した状態で測定した. 共振周波数 16 MHz における反射損失は -1 dB であり, インピーダンス整合条件から大きくずれていることがわかる. ネットワークアナライザにより入力インピーダンスを測定し, 共振周波数にお

いて $2-3\Omega$ と非常に小さい値であることがわかった。変成器によりインピーダンス変換し、インピーダンス整合することが可能である。2:1の巻き数比をもつ変成器を作製し、アンテナと同軸ケーブル間に挿入した。その結果、共振周波数におけるインピーダンスが 10Ω に増大し、反射損失が -5 dB に改善された。この値は、反射板がないヘリカルアンテナ (図 2(a)) の測定結果と同等であった。この変成器を用いた時の電力伝送特性を、図 10, 11 に示す。周波数を 16.0 MHz に固定した場合、 40 cm のギャップ長で効率が 58% と改善されている。 40 cm 以上のギャップ長においても効率が增大している。 20 cm のギャップ長においては、共振周波数における効率が 70% であり、図 8 と比較して低下している。変成器がない場合 20 cm のギャップ長において 90% の高い効率が得られており (図 8)、インピーダンス整合が取れている。この領域では変成器の導入はインピーダンス不整合に働き逆効果となる。

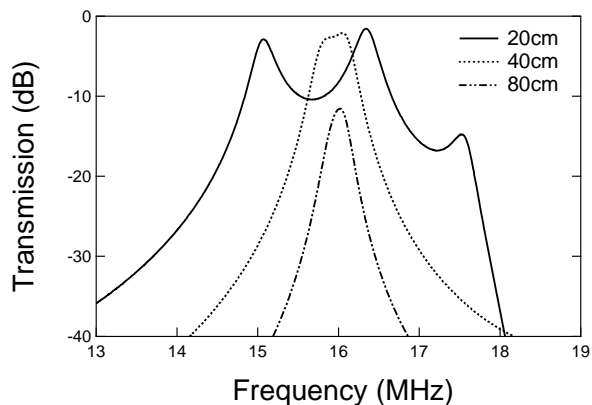


図 10. 変成器を挿入した場合 (図 2 (b)) の透過特性 (S_{21}).

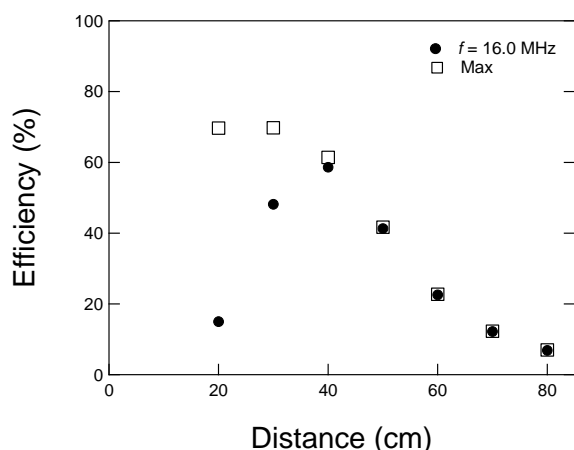


図 11. 変成器を挿入した場合の効率のギャップ長依存性.

4. 共振周波数の分離について

作製したヘリカルアンテナでは、 60% 以上の高い伝送効率が得られるのはギャップ長が 40 cm 以下であり、ヘリカルコイルの直径程度に近付ける必要がある。この領域では共振周

波数が 2 つに分離した。共振周波数の分離は周波数を固定して使用する場合大きな問題となる。この分離は、図 12 に示す 2 つのモード、偶モード (共振周波数 f_e) と奇モード (共振周波数 f_o) に対応している^[2]。偶モードでは磁場 (H) が 2 つのアンテナで同位相となり、奇モードでは反転位相となる。ネットワークアナライザの位相測定により、2 つの共振周波数において、入出力の位相差が $0, \pi$ となること、実験的に $f_e < f_o$ であることを確認した。偶モードでは 2 つのアンテナの結合により共振器長が等価的に増大するのに対して、奇モードでは共振器長が等価的に減少すると考えられる。

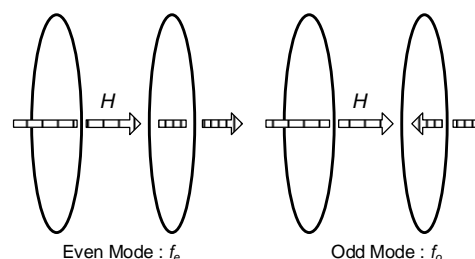


図 12. 接近したアンテナ対における偶モードと奇モード.

5. おわりに

電磁界共鳴方式による電力伝送において、反射板を持つヘリカルアンテナを作製し特性を評価した。アンテナ間のギャップ長依存性において、通常のヘリカルアンテナに比較して伝送効率の改善が見られた。インピーダンス整合のためアンテナの入出力部に変成器を挿入し、ギャップ長がアンテナの直径程度以上で、効率の改善効果を検証した。ギャップ長がアンテナの直径程度以下になると共振周波数の分離が起こり、周波数を固定する作動では問題となることを指摘した。

謝辞

本研究は 2011 年より卒業研究として継続しており、それらの成果をもとに本報告をまとめている。これまで研究に関わった本校電気電子工学科の卒業生、澤口冬威君、山本恭平君、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. Soljagic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, Vol. 317, No. 5834, pp. 83-86, 2007.
- [2] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljagic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, Vol. 323, pp. 34-48, 2008.