

無線電力伝送用短絡型, 開放型ヘリカルアンテナに関する検討

天野 智博[†] 平山 裕[†] 菊間 信良[†] 榊原久二男[†]

[†] 名古屋工業大学大学院 工学研究科 情報工学専攻 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

E-mail: †hirayama@m.ieice.org

あらまし 次世代の給電方法として, MIT が提案した電磁界結合共振型無線電力伝送に注目が集まっている. この技術はアンテナを共振状態にさせることで電力伝送を可能としている. 原理としては, キャパシタを装荷して Q を高めた電磁誘導であると考えられる. この技術を実用化するためには, 高効率で電力伝送ができ, 周囲物体に影響を与えないようなシステムを構築する必要がある. そのための重要な要素として, 最適なアンテナ形状の提案が挙げられる. MIT の論文で用いられたアンテナ形状は, 両端が開放されたヘリカルアンテナである. しかし, 電磁界結合共振を電磁誘導を発展させたものとするならば, 両端を短絡したコイルとする方が自然である. 本稿では, 最適な無線電力伝送システムを構築するための第 1 段階とし, 開放型ヘリカルモデルと短絡型ヘリカルモデルの比較検討を行った. 伝送効率, 放射電力, 周囲物体による影響, 導体抵抗による影響の 4 つの観点で 2 つのモデルの比較を行った. その結果, 開放型ヘリカルモデルは電界結合も存在するために伝送インピーダンスが高く, 導体抵抗による損失が小さいことがわかった. 短絡型ヘリカルモデルは, 結合係数が高いため伝送距離が長く, 電界がキャパシタの極板間に局在しているため, 放射電力が少なく, 周囲物体による影響が少ないことがわかった.

キーワード 無線電力伝送, WPT, 結合共振, ヘリカルアンテナ, 伝送効率, 放射電力

A Consideration of Shorted and Opened Helical Antennas for Wireless Power Transmission

Tomohiro AMANO[†], Hiroshi HIRAYAMA[†], Nobuyoshi KIKUMA[†], and Kunio SAKAKIBARA[†]

[†] Nagoya Institute of Technology Gokiso-cho, showa-ku, Nagoya, 466-8555 Japan

E-mail: †hirayama@m.ieice.org

Abstract Wireless power transmission using coupled resonance of electromagnetic field proposed by Massachusetts Institute of Technology(MIT) is expected for the next generation power feeding system. This system utilizes resonance of antenna to transmit electric power. This system is a kind of an electromagnetic induction in which capacitors are used to achieve high Q . For practical realization, high efficiency, low emission and low influence by surrounding objects are required. Therefore, it is necessary to propose a suitable shape of the antenna. A shape of antenna used in the paper by MIT is helical antenna whose both ends are opened. However, it is natural to use a coil by assuming that the system is magnetic induction with capacitors. In this report, opened model of helical antenna and closed model of helical antenna are examined from the viewpoints of the transmitting efficiency, radiation power, influence by surrounding objects, and influence by conductivity of wire. As a result, we found that the opened model of helical antenna has an advantage of conductivity loss because of its high transmission impedance due to an electric coupling. On the other hands, we found that the closed model of helical antenna has a benefit of long working distance, low emission, and low influence of surrounding objects.

Key words Wireless Power Transmission, WPT, Coupling Resonance, Helical Antenna, Transmitting Efficiency, Radiation Power

1. まえがき

次世代の給電方法として、無線電力伝送技術に関する研究が盛んに行われている。無線電力伝送には電磁誘導型、電波型、電磁界結合共振型の3つの方式がある。中でも、マサチューセッツ工科大学 (MIT) が提案した電磁界結合共振型 [1] [2] に注目が集まっている。

電磁界結合共振型はアンテナを共振状態にさせることで電力伝送を可能としている。原理としては、キャパシタを装荷して Q を高めた電磁誘導であると考えられる。他の無線電力伝送方式に比べ、数 m 程度の伝送に長けており、電磁界の共振を用いて電力伝送を行っているため、周囲物体にエネルギーを伝えにくいという特徴がある。また、電磁界結合共振型の中でも、磁界を用いた電力伝送は人体などの誘電体の静電容量に影響を受けにくいという特徴が挙げられる [3]。

無線電力伝送システムを実用化するためには、より高効率で電力伝送ができ、より周囲物体に与える影響が少ないシステムを構築する必要がある。そのため近年、無線電力伝送システムにおける最適なアンテナ形状に関する研究 [4] が進められている。MIT の論文で用いられたアンテナ形状は、両端が開放されたヘリカルアンテナである。しかし、電磁界結合共振を電磁誘導を発展させたものと考えれば、両端を短絡したコイルとして考える方が自然である。

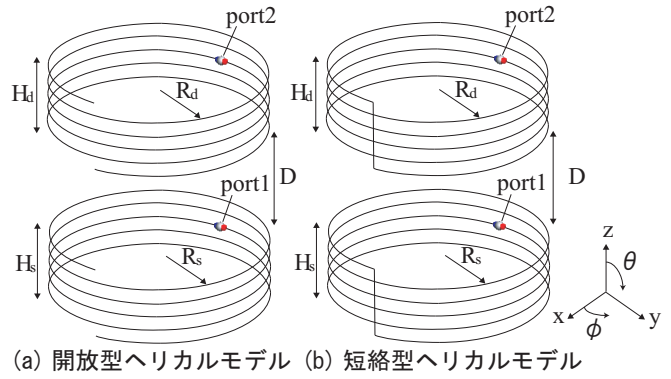
本稿では、最適なアンテナ形状を検討していく上での第1段階とし、開放型ヘリカルアンテナと短絡型ヘリカルアンテナの比較を行う。伝送効率、放射電力、周囲物体による影響、導体抵抗による影響の4つの観点で比較を行い、2つのモデルの性質の違いを明らかにする。

本稿の構成を示す。第2章で解析モデルを示し、第3章で2つのモデルの S パラメータ、電流分布、電磁界分布、送信アンテナとしての利得などの解析結果を示す。第4章では伝送効率、放射電力、周囲物体による影響、導体抵抗による影響の4つの観点から2つのモデルの比較検討を行い、第5章でまとめを述べる。

2. 解析モデル

本報告の解析モデルを図1に示す。図1(a)は送受信アンテナ共に両端が開放された5巻きのヘリカルアンテナで構成されている。ヘリカルアンテナは半径300mm、高さ200mmであり、送受信コイル間の距離は300mmである。送信側アンテナのport1には出力インピーダンス 50Ω を持つ波高値1Vの電圧源、受信側アンテナのport2には負荷 50Ω が繋がれている。このモデルはMITの論文 [2] で用いられた構造から給電ループを取り除き、ヘリカルアンテナに直接給電した構造である。図1(a)で用いられる両端が開放されたヘリカルアンテナ単体の入力インピーダンスは図2に示される。導線が持つ自己インダクタンスと、ヘリカルアンテナの両端にたまる電荷によるキャパシタンスによって、11.6MHz付近で自己共振していることがわかる。

図1(b)のモデルは同図(a)のヘリカルアンテナの両端を短絡させた構造である。図1(b)で用いられる両端が短絡されたヘリ



	D	H _d	H _s	R _d	R _s
mm	300	200	200	300	300

図1 解析モデル

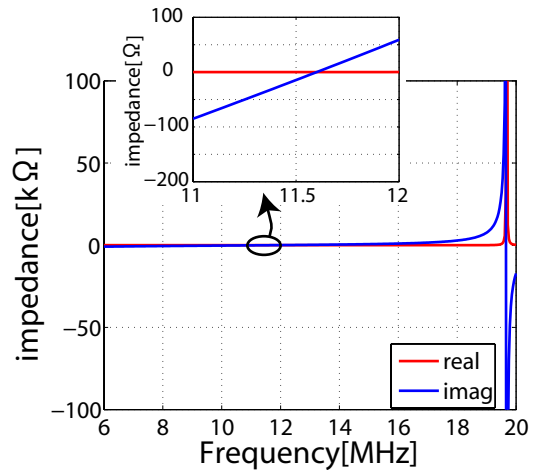


図2 開放型ヘリカルアンテナの入力インピーダンス

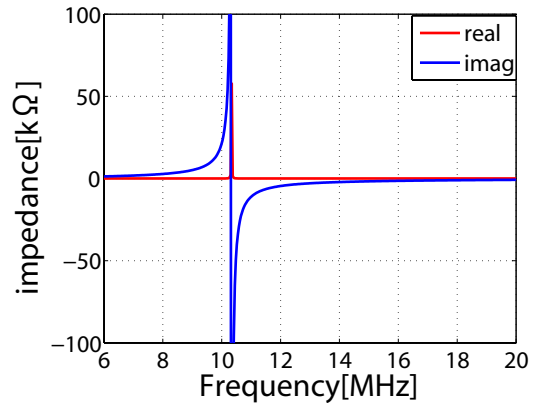


図3 短絡型ヘリカルアンテナの入力インピーダンス

カルアンテナ単体の入力インピーダンスは図3に示される。図3より、開放型ヘリカルアンテナの共振周波数である11.6MHzにおける短絡型ヘリカルアンテナのリアクタンスは負であることがわかる。このため、短絡型ヘリカルアンテナを11.6MHzで共振させるためには短絡型ヘリカルアンテナの外部にインダクタを装荷する必要がある。つまり、短絡型ヘリカルアンテナ自体はキャパシタとして動作する。しかし、短絡型ヘリカルアンテナは線間に存在するキャパシタンスしか持たず、結合が弱い。そこで、短絡型ヘリカルアンテナのリアクタンスが正である8MHzで共振させる。このとき短絡型ヘリカルアンテナ自体はインダ

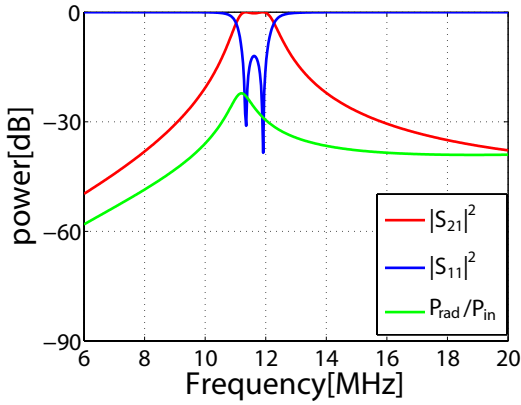


図4 開放型ヘリカルモデルのSパラメータと放射電力の周波数特性

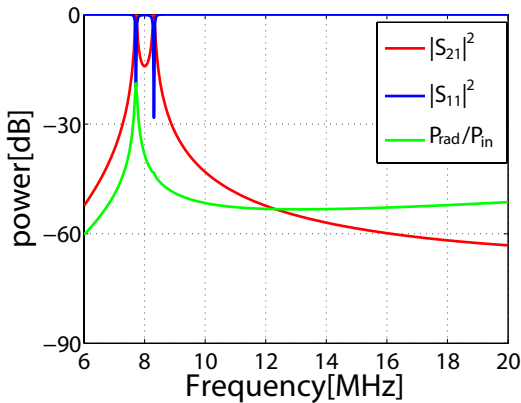


図5 短絡型ヘリカルモデルのSパラメータと放射電力の周波数特性

クタとして動作する。8MHzで共振させるために、7.174pFのキャパシタを短絡型ヘリカルアンテナの給電点と直列に接続した。図1(b)は同図(a)と同様に、送信側アンテナのport1には出力インピーダンス50Ωを持つ波高値1Vの電圧源、受信側アンテナのport2には負荷50Ωが繋がれている。図1(a),(b)共に導線は完全導体である。

以下の章から11.6MHzで自己共振する開放型ヘリカルモデルと、8MHzで外部共振する短絡型ヘリカルモデルの比較を行う。また、解析にはモーメント法(MoM)を用いる。

3. 開放型ヘリカルモデルと短絡型ヘリカルモデルの解析結果

3.1 Sパラメータと放射電力の周波数特性

図1の解析モデルにおけるSパラメータと進行波電力 P_{in} に対する放射電力 P_{rad} の周波数特性を図4,5に示す。図4,5から、どちらのモデルも結合が強く共振周波数が2つに割れていることがわかる。2つの共振のうち、低い周波数の共振を奇モード、高い周波数の共振を偶モードという。奇モードは送受信アンテナに流れる電流の位相が同相に近く、偶モードは逆相に近いことが知られている[5]。電流の位相はアンテナ間の結合が強いほど同相、逆相の関係が顕著となる。図4,5において、どちらのモデルも同相に近い電流が流れる奇モードの方が放射が多いことが確認できる。また図4,5において、短絡型ヘリカルモデルの共振モード間の伝送効率は大きく下がっているのに対し、

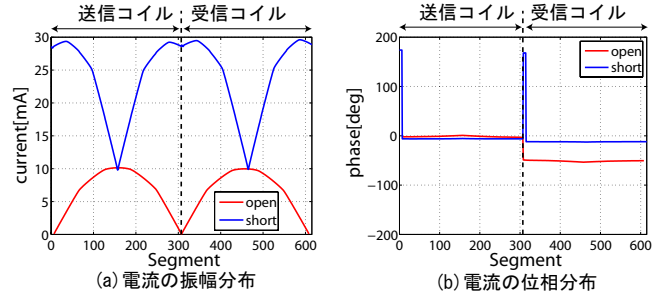


図6 奇モードにおける電流分布

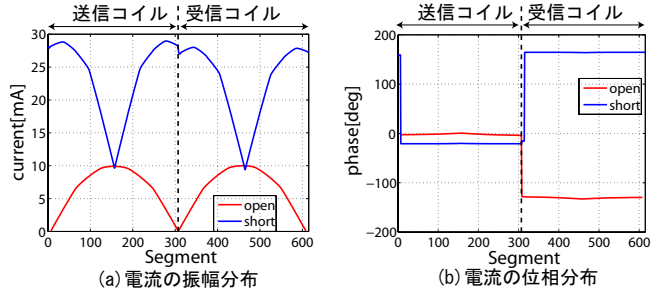


図7 偶モードにおける電流分布

開放型ヘリカルモデルの伝送効率の上がり幅は小さい。これは電界結合によるものであると考えられる。短絡型ヘリカルモデルはアンテナに流れる電流によって生じる磁界によって結合しているが、開放型ヘリカルモデルは磁界の他にヘリカルアンテナの両端にたまる電荷によって生じる電界で結合していると考えられる。電界による結合によって、開放型ヘリカルモデルにおける共振モード間の伝送効率の上がり幅が小さくなったのではないかと考えられる。

奇モード、偶モードにおける、各モデルの電流分布を図6,7に示す。図6(a),図7(a)より、短絡型ヘリカルの方がヘリカルアンテナに流れる電流が大きいことが確認できる。図6(b)において、短絡型ヘリカルモデルの方が送受信アンテナに流れる電流の位相が同相に近く、図7(b)において、短絡型ヘリカルモデルの方が逆相に近いことがわかる。以上のことより、短絡型ヘリカルモデルの方が結合が強いと言える。

3.2 電界、磁界と空間インピーダンス分布

遠方界では自由空間の特性インピーダンス η_0 を用いて、電界 \mathbf{E} と磁界 \mathbf{H} は以下のように関係づけられる。

$$|\mathbf{E}| = \eta_0 |\mathbf{H}| \quad (1)$$

遠方界からのずれの指標として、近傍界において以下の値を計算する。

$$\zeta = \log_{10} \left(\frac{1}{\eta_0} \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|} \right) \quad (2)$$

近傍界において ζ が正の値のときは電界が支配的であり、負の値のときは磁界が支配的である。

奇モード、偶モードにおける電界強度、磁界強度の分布と、式(2)から求めた空間インピーダンス分布を図8-13に示す。図8-13に示す平面はアンテナの中心軸を通るy-z平面であり、白線はモデルの位置を表す。

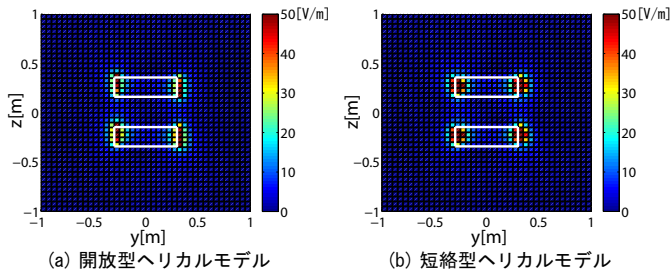


図 8 奇モードの電界強度分布

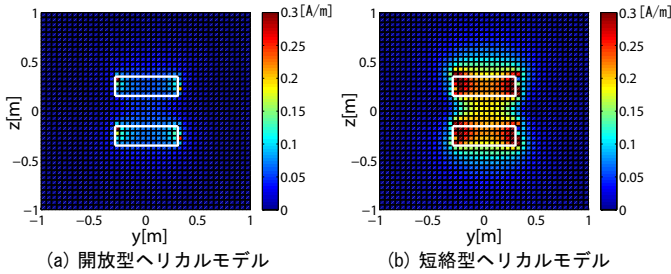


図 9 奇モードの磁界強度分布

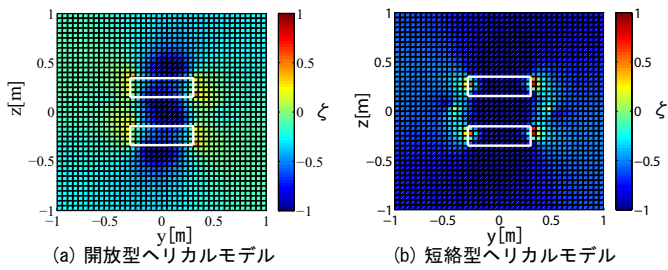


図 10 奇モードの空間インピーダンス分布

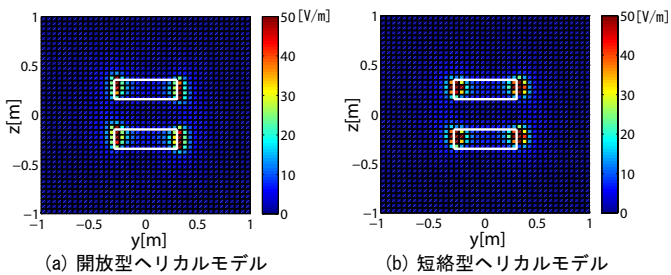


図 11 偶モードの電界強度分布

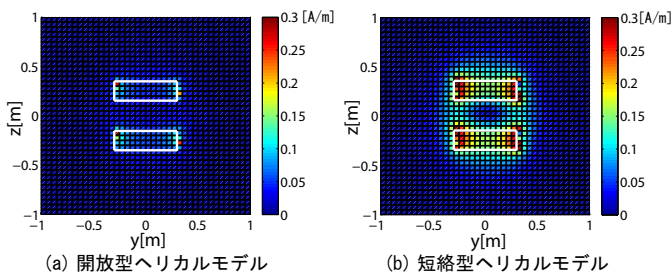


図 12 偶モードの磁界強度分布

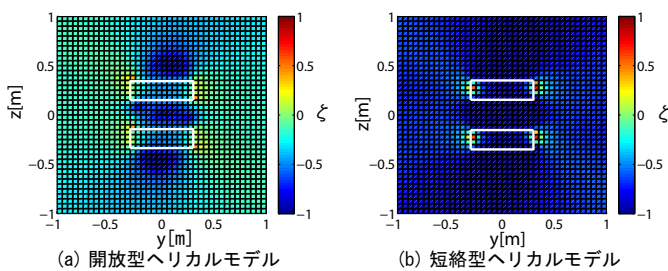


図 13 偶モードの空間インピーダンス分布

図 6, 7 より, 短絡型ヘリカルモデルの方が流れる電流が大きいため, 図 9, 12 において磁界強度が大きくなっていることが確認できる. 図 10, 13 の空間インピーダンス分布において, どちらのモデルも共振アンテナ間には磁界が支配的であることがわかる. また開放型ヘリカルモデルのアンテナ外側近傍において, 電界が支配的な領域がある. 開放型ヘリカルアンテナはアンテナの両端が開放されているため, 両端に電荷がたまり, その電荷によって電界が生じる. このため, 近傍界に電界が支配的である領域が存在していると考えられる. 短絡型ヘリカルモデルの空間インピーダンス分布は磁界が支配的であるので, 磁界結合によって電力伝送されている. 開放型ヘリカルモデルの空間インピーダンス分布において, 共振アンテナ間には磁界が支配的であるが, 共振アンテナのすぐ外側に電界が支配的である領域があるため, 磁界結合と電界結合の両方によって電力伝送されていると考えられる.

3.3 利得の角度特性

放射のメカニズムを解明するために, 2つのヘリカルアンテナを1つの送信アンテナとした利得の角度特性を求める.

図 14 に各のモデルの奇モード, 偶モードにおける利得の角度特性を示す. 図 14 において, 2つのモデルとも送受信アンテナに流れる電流の位相が同相に近い奇モードの方が逆相に近い偶モードより利得が大きくなっている. また奇モードの電流の振幅分布である図 6(a) において, 短絡型ヘリカルモデルの方がヘリカルアンテナに流れる電流が大きい. このため図 14 の奇モードの利得は短絡型ヘリカルモデルの方が大きくなっている. 偶モードの電流分布である図 7 において, 短絡型ヘリカルモデルの方がヘリカルアンテナに流れる電流は大きい, 送受信アンテナに流れる電流の位相が逆相に近い. このため図 14 の偶モードの利得は短絡型ヘリカルモデルの方が小さい.

図 15, 16 に奇モード, 偶モードにおける各のモデルの偏波成分の利得を示す. 開放型ヘリカルモデルはヘリカルアンテナの両端にたまる電荷による放射と, ヘリカルアンテナに流れる電流による放射が存在する. このため開放型ヘリカルモデルはダイポールアンテナとループアンテナで等価的に表わすことができる. また短絡型ヘリカルモデルは流れる電流による放射のみ存在するため, ループアンテナのみで等価的に表わすことができる [6]. このため図 15, 16 において, 短絡型ヘリカルモデルの垂直偏波は小さい.

4. 開放型ヘリカルモデルと短絡型ヘリカルモデルの比較検討

4.1 伝送効率の比較

図 17 に各のモデルにおいて, アンテナ間距離 D を変化させたときの伝送効率を示す. この図で示す伝送効率は各アンテナ間距離 D における伝送効率の最大値である. 図 17 より, 短絡型ヘリカルモデルの方が遠くまで電力伝送できることがわかる. これは図 10, 13 より, 短絡型ヘリカルモデルの方が磁界による結合が強いためであると考えられる. 短絡型ヘリカルモデルの方が強く結合していることは, 図 6(b), 7(b) における電流の位相差からもわかる.

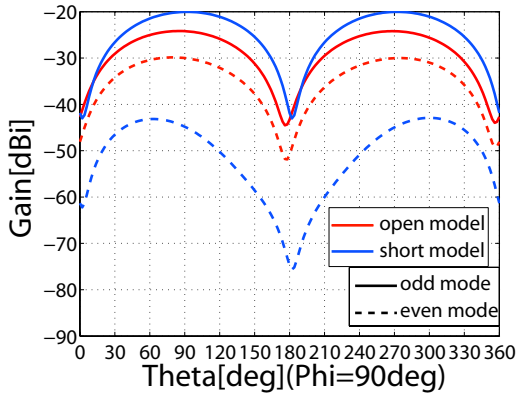


図 14 利得の角度特性

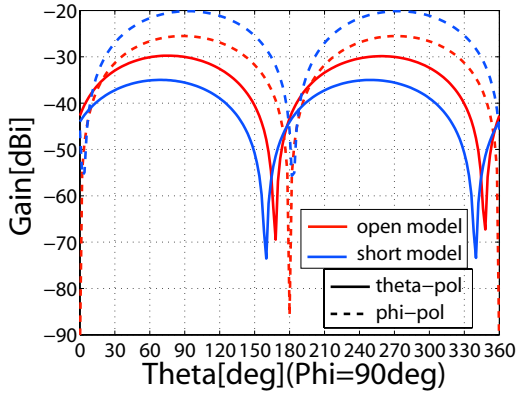


図 15 各モードの各偏波成分の利得の角度特性

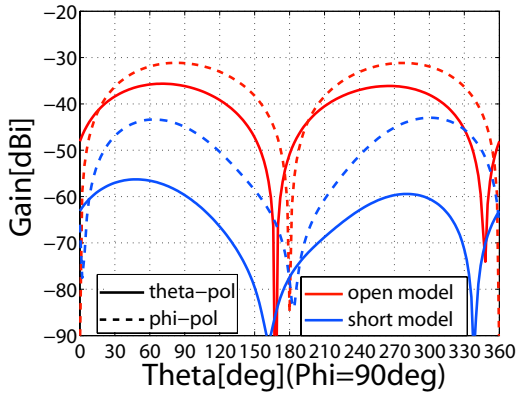


図 16 偶モードの各偏波成分の利得の角度特性

4.2 放射電力の比較

図 4, 5 より, 偶モードにおける放射電力は短絡型ヘリカルモデルの方が開放型ヘリカルモデルに比べ 14.42dB 小さくなる. 短絡型ヘリカルモデルはたまた電荷による放射が少ないため, 垂直偏波の利得が小さい. また送受信アンテナに流れる電流の位相が逆相に近い場合, 水平偏波の利得も小さい. このため放射電力を抑えることができる. 偶モードでは, 結合が強いほど, 送受信アンテナに流れる電流の位相は逆相に近く. このため偶モードでは, より結合が強いモデルが放射電力を抑えることができる.

一方, 送受信アンテナに流れる電流の位相が同相に近い奇モードにおいては, 短絡型ヘリカルモデルの方が開放型ヘリカルモデルに比べ, 3.97dB 放射が大きくなる. しかし, 無線電力伝送システムは放射電力が少ない偶モードの周波数において使用さ

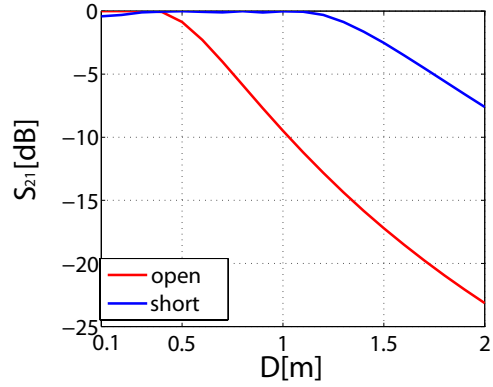


図 17 伝送効率が最大になる周波数における伝送効率の距離特性

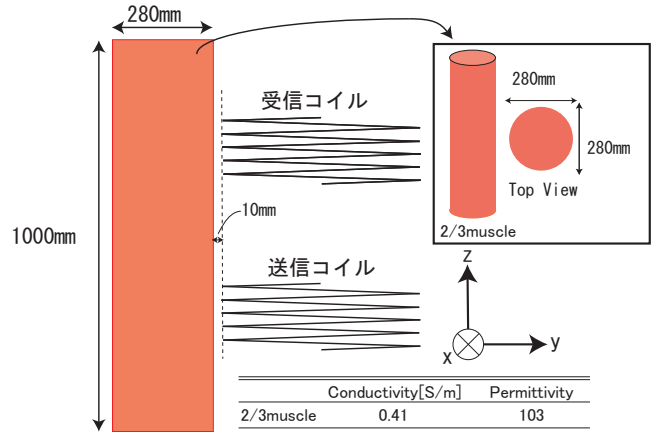


図 18 誘電体の配置図

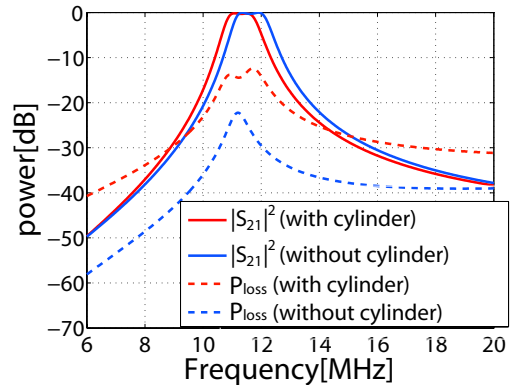


図 19 誘電体の有無における伝送効率 (開放型ヘリカルアンテナ)

れると考えられる. このため, 短絡型ヘリカルモデルの方が開放型ヘリカルモデルに比べて放射が少ないと言える.

4.3 周囲物体による影響

図 18 のように人体を模擬した円柱の誘電体をアンテナの近傍 1cm に置いたときと置かないときの周波数特性の比較を行う. 誘電体は 2/3 筋肉組織 [7] で構成されており, 誘電体の比誘電率は 103, 導電率は 0.41S/m である. 図 19, 20 に各モデルにおける誘電体の有無による伝送効率と損失電力 P_{loss} を示す. ここで $P_{loss} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ として求めている. このため赤の破線は誘電体内で消費された電力と放射された電力の和を表わし, 青の破線は放射された電力を表す.

図 19, 20 から, 開放型ヘリカルモデルは誘電体を置いたこと

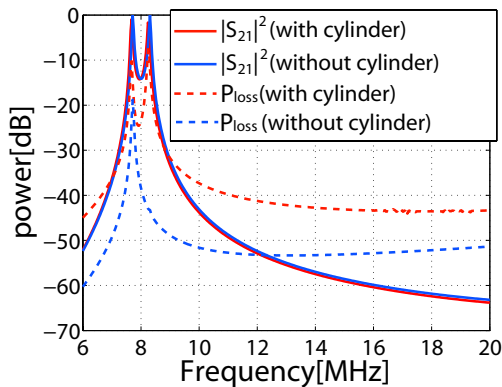


図 20 誘電体有無における伝送効率 (短絡型ヘリカルアンテナ)

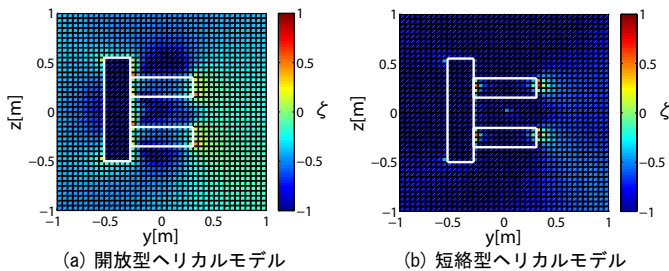


図 21 誘電体が存在するときの空間インピーダンス分布 (偶モード)

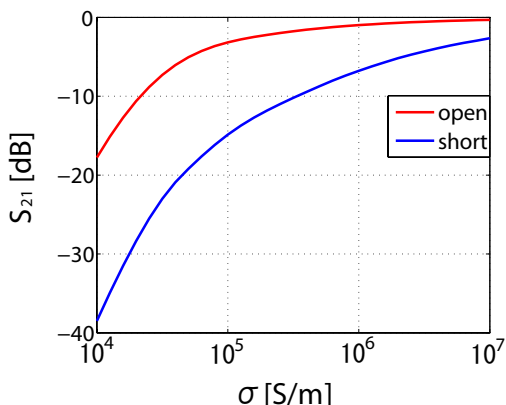


図 22 伝送効率の導電率特性

により、伝送効率の周波数特性が低周波側にずれていることがわかる。図 10, 13 の空間インピーダンス分布において、開放型ヘリカルモデルのアンテナ外側近傍には、電界が支配的である領域がある。この領域に誘電体を置くことで、電磁界分布が変化し、電力伝送に影響を与えていると考えられる。そこで、誘電体を置いたときの偶モードにおける空間インピーダンス分布を図 21 に示す。図 13, 21 を比較すると、明らかに開放型ヘリカルモデルの方が誘電体を置いたことによる空間インピーダンス分布の変化が大きいことがわかる。

図 10, 13 の空間インピーダンス分布において、電界が支配的な領域がない短絡ヘリカルモデルは、誘電体の有無による伝送効率への影響は少ない。しかし、図 19, 20 より、短絡型ヘリカルモデルの方が共振周波数において、損失電力が大きいことが分かる。これは図 6, 7 より、ヘリカルアンテナに流れる電流が短絡型ヘリカルモデルの方が大きいいため、損失となった電力が

大きくなったと考えられる。

4.4 導体抵抗による影響

以上の議論では、導体損失をないものとして解析を行った。しかし、実際に無線電力伝送システムを作る上で、導体損失は無視できない問題である。この節では、図 1 において、導電率 σ の導線を用いたときの各モデルの伝送効率の比較を行う。

伝送効率の比較を図 22 に示す。図 22 は各導電率 σ において、伝送効率が最大となる周波数における伝送効率を表している。導体損失があるときの伝送効率は開放型ヘリカルモデルの方が高いことがわかる。このため、開放型ヘリカルモデルの方が導体損失となる電力が小さいことがわかる。図 10, 13 の空間インピーダンス分布において、空間インピーダンスは開放型ヘリカルモデルの方が大きい。このため図 6, 7 において、開放型ヘリカルモデルの方がヘリカルアンテナに流れる電流が小さく、導体損失が小さくなったと考えられる。

5. 結 び

本稿では、開放型ヘリカルモデルと短絡型ヘリカルモデルの比較検討を行った。伝送効率、放射電力、周囲物体による影響、導体抵抗による影響の 4 つの観点からそれぞれ比較を行った。

電流分布や空間インピーダンス分布から、短絡型ヘリカルモデルの方が磁界による結合が強いことがわかった。結合が強いため、より遠くまで電力を送ることができ、偶モードにおける放射電力を抑えられることがわかった。また電界結合に比べ、磁界結合が支配的であるので、周囲物体による影響が少ないことがわかった。

開放型ヘリカルモデルは空間インピーダンスが大きいいため、ヘリカルアンテナに流れる電流が小さく、導体損失が小さくなることがわかった。電界結合によって、流れる電流が小さくても高効率で電力伝送できていると考えられる。

今後の課題として開放型ヘリカルモデル、短絡型ヘリカルモデルを等価回路で表わし、電気回路的に違いを説明する。また給電方法の違いなど無線電力伝送システムの最適なアンテナ形状を提案する上での検討が挙げられる。

文 献

- [1] A. Karalis, et al, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, 323, pp. 34-48, Apr. 2007.
- [2] A. Kurs, et al, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science Express*, Vol. 317, No. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [3] M. Solijacic, et al, "電力を無線伝送する技術を開発, 実験で 60W の電球点灯," *日経エレクトロニクス*, pp.117-128, Dec. 2007.
- [4] 門井優文, 菊間信良, 平山裕, 榊原久二男, "磁界結合共振型無線電力伝送における伝送効率向上のためのアンテナ形状に関する検討," *電子情報通信学会, 2011 年総合大会*, B-1-7, Mar. 2010.
- [5] 平山裕, 小澤俊之, 平岩洋介, 菊間信良, 榊原久二男, "無線電力伝送の共鳴モードと等価回路表現," *信学技報*, AP2009-85, pp.35-40, Sep. 2009.
- [6] 朝倉俊, 菊間信良, 平山裕, 榊原久二男, "磁界結合共振型無線電力伝送のシールド効果," *電子情報通信学会, 2011 年総合大会*, B-4-69, Mar. 2010.
- [7] 土田昌吾, 梁瀬和哉, 平田晃正, 上村佳嗣, "磁界共鳴型無線電力伝送に伴う電磁界による体内誘導量解析," *電子情報通信学会, 2011 年環境電磁工学研究会, EMCJ 2011-73*, Sep. 2011.