

## 結合共振型無線電力伝送における 開放型, 短絡型スパイラルアンテナに関する検討

小松佳奈子<sup>†</sup> 天野 智博<sup>†</sup> 平山 裕<sup>†</sup> 菊間 信良<sup>†</sup> 榊原久二男<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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](mailto:†hirayama@m.ieice.org)

あらまし 様々な電子機器の発展と共に, 無線で電力を供給する方法に注目が集まっている. 近年 MIT によって提案された結合共振型無線電力伝送は伝送効率がよく, 数 m の伝送距離を持つため, 次世代の給電方法として研究が進められている. 結合共振型無線電力伝送の実用化においては, 高効率な共振器の開発が必要とされる. 本稿では効率のよい共振器を考える前の基礎研究として, 磁界主結合である短絡型スパイラルモデル, 電磁界共結合である開放型スパイラルモデルにおいて巻き方向を変えた時の諸特性の変化について比較し, 伝送効率, 結合係数の観点で検討を行った. その結果, 開放型, 短絡型共に巻き方向を逆にすることで結合係数, 伝送効率が大きくなることがわかった. また, 電界磁界共結合である開放型の方が巻き方向を変えることによる影響が大きいことが分かった.

キーワード 無線電力伝送, WPT, 結合共振, スパイラルアンテナ, 伝送効率, 結合係数

## A Consideration of Open- and Short-end Spiral Antennas for Coupled Resonant Wireless Power Transfer

Kanako KOMATSU<sup>†</sup>, Tomohiro AMANO<sup>†</sup>, Hiroshi HIRAYAMA<sup>†</sup>, Nobuyoshi KIKUMA<sup>†</sup>, and  
Kunio SAKAKIBARA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Nagoya Institute of Technology Gokiso-cho, showa-ku, Nagoya, 466-8555 Japan

E-mail: [†hirayama@m.ieice.org](mailto:†hirayama@m.ieice.org)

**Abstract** Wireless power transfer technologies are now getting large interests. Coupled resonant wireless power transfer proposed by MIT has an advantages of high efficiency and middle range transfer distance. For a practical use, design criteria of high efficiency resonators should be established. In this report, open-end and short-end type spiral resonators are investigated from the viewpoints of transmission efficiency and coupling efficiency. We have found that transmission efficiency is improved by arranging resonator in reverse direction. Effect of reverse arrangement of the open-end type is larger than the short-end type because both electric and magnetic fields are dominant in the open-end type.

**Key words** Wireless power transmission, WPT, Coupled resonance, Spiral antenna, Transmission efficiency, Coupling coefficient

### 1. ま え が き

電子機器の小型化や充電の利便性が図れることから, 無線電力伝送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, 電磁波型, 共振型の 3 種類がある. 近年 MIT によって開発された結合共振型無線電力伝送は伝送効率が高い上に数 m の距離を伝送できるため, 現在注目されている [1] [2].

結合共振型無線電力伝送はアンテナを共振状態とさせることで電力伝送を可能としている. アンテナにキャパシタンスとイ

ンダクタンスの両方の要素がある場合, アンテナはある特定の周波数で自己共振する. スパイラルアンテナの先端を開放したものはキャパシタンスとインダクタンスがつり合い, 自己共振する. また, キャパシタンス若しくはインダクタンス要素が大きいアンテナの場合はリアクタンス素子を装荷することで共振させる. アンテナの先端を短絡にしたものはインダクタンス要素が大きいいため, キャパシタンスを装荷することで共振させる. 開放型と短絡型の比較はヘリカルアンテナにおいてすでに報告されている [3]. 本研究では開放型と短絡型のスパイラルアンテ

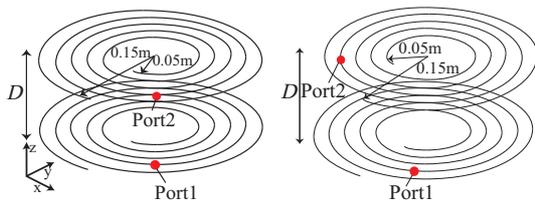


図 1 解析モデル:開放型

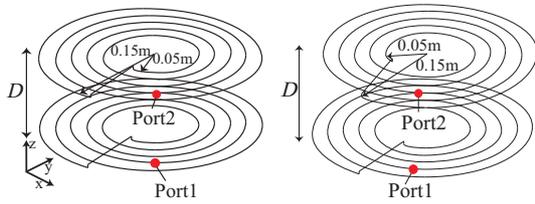


図 2 解析モデル:短絡型

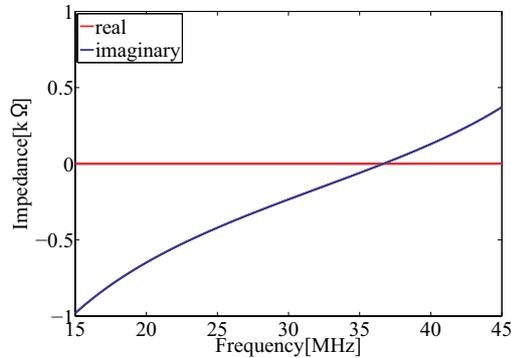


図 3 開放型スパイラルアンテナの入力インピーダンス

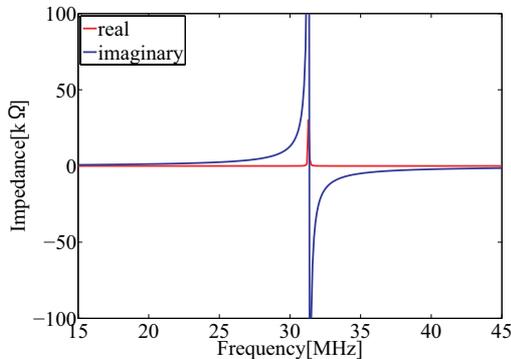


図 4 短絡型スパイラルアンテナの入力インピーダンス

ナの諸特性を比較する。

また、結合係数は電界の重なり積分と磁界の重なり積分の差で表されるため、電界の向きを変えることによって結合係数が増加すると報告されている。結合係数増加を目的として、スパイラルアンテナの受信部のみ逆方向に巻いたモデルが提案されている [4]。本稿では開放型と短絡型スパイラルアンテナを逆方向に巻くことによる諸特性の変化について検討を行う。

本稿の構成を示す。第 2 章で解析モデルの説明を示し、第 3 章で 2 つのモデルの伝送効率、電磁界分布などの解析結果を示す。第 4 章では伝送効率、結合係数、電界・磁界結合係数、導体

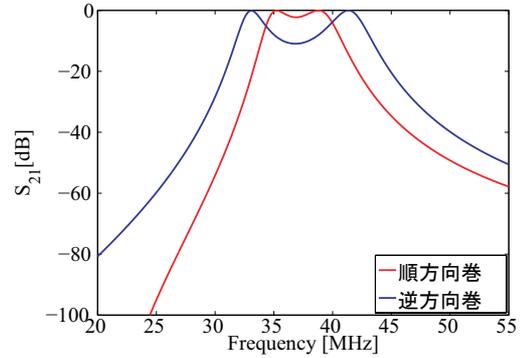


図 5 開放型スパイラルモデルの伝送効率の周波数特性

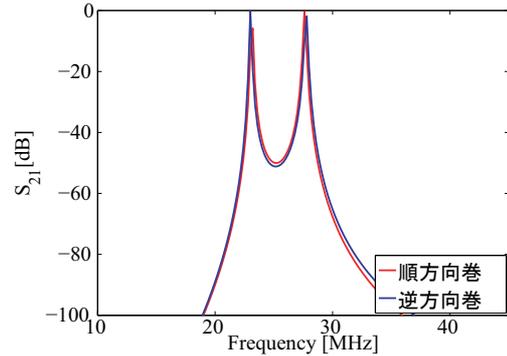


図 6 短絡型スパイラルモデルの伝送効率の周波数特性

表 1 開放型アンテナの結合係数

	順方向巻	逆方向巻
$k$	0.0971	0.2230

表 2 短絡型アンテナの結合係数

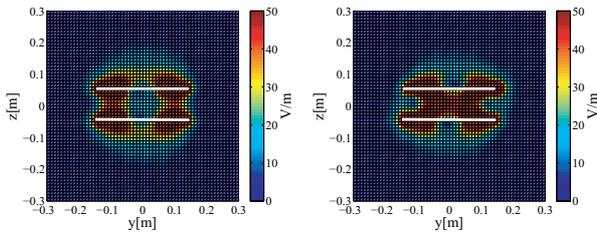
	順方向巻	逆方向巻
$k$	0.17193	0.1873

抵抗による影響の観点から各モデルの比較検討を行い、第 5 章でまとめる。

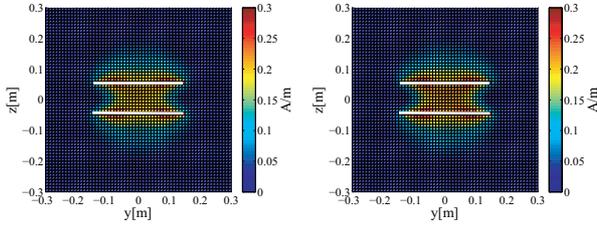
## 2. 解析モデル

本報告の解析モデルを図 1, 2 に示す。図 1 は送受信アンテナ共に両端が開放された 5 巻きのスパイラルアンテナで構成されている。スパイラルアンテナは内径 0.05m, 外径 0.15m である。送受信アンテナ間の距離  $D$  は 0.1m である。送信側アンテナの Port1 には出力インピーダンス  $50\Omega$  を持つ波高値 1V の電圧源、受信側アンテナの Port2 には負荷  $50\Omega$  が接続されている。図 1 で用いられる両端が開放されたスパイラルアンテナ単体の入力インピーダンスを図 3 に示す。導線が持つ自己インダクタンスと、スパイラ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、36.7MHz 付近で自己共振していることがわかる。

図 2 のモデルはスパイラルアンテナの両端を短絡させた構造である。このアンテナの単体の入力インピーダンスを図 4 に示す。後に用いる等価回路を使用する都合で、本モデルでは各ポートにキャパシタを装荷する。図 4 より、キャパシタを装荷するた

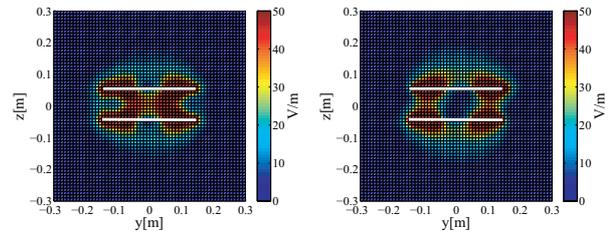


(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 7 開放型における低周波モードの電界強度分布

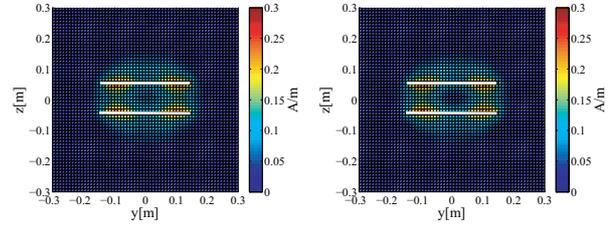


(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 8 開放型における低周波モードの正規化空間インピーダンス分布

(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 9 開放型における低周波モードの正規化空間インピーダンス分布



(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 10 開放型における高周波モードの電界強度分布



(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 11 開放型における高周波モードの磁界強度分布

(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 12 開放型における高周波モードの正規化空間インピーダンス分布

めには 31.5MHz 以下で動作させる必要がある。本モデルでは各ポートに 2.54pF のキャパシタを装荷することで 25MHz で共振させる。

以下の章から 36.7MHz で自己共振する開放型スパイラルモデルと、25MHz で外部共振する短絡型スパイラ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。図 1, 2 共に導線は完全導体を使用する。

### 3. 開放型スパイラルモデルと短絡型スパイラルモデルの解析結果

#### 3.1 伝送効率の周波数特性

図 1, 2 のモデルの  $S_{21}$  の周波数特性を図 5, 6 に示す。図 5, 6 より、逆方向巻にすることで共振周波数の間隔が大きくなっている事が分かる。共振器の結合の強さを表す結合係数は式 1 で求めることができる。

$$k = \frac{f_h^2 - f_l^2}{f_h^2 + f_l^2} \quad (1)$$

ただし  $f_l$  は低周波共振周波数,  $f_h$  は高周波共振周波数を表す。この式を用いて図 5, 6 から伝送距離 0.1m のときの各モデルの結合係数を求めると、表 1, 2 のようになる。表 1, 2 より、開放で 129%, 短絡型で 8.9%, 逆方向に巻く事で結合係数が増加している事が分かる。

#### 3.2 電界、磁界と空間インピーダンス分布

遠方界では電界  $\mathbf{E}$  と磁界  $\mathbf{H}$  は、自由空間の特性インピーダンス  $\eta_0$  を用いて以下のように関係づけられる。

$$|\mathbf{E}| = \eta_0 |\mathbf{H}| \quad (2)$$

近傍界における遠方界からのずれの指標として、以下に正規化空間インピーダンス  $\zeta$  を定義する。

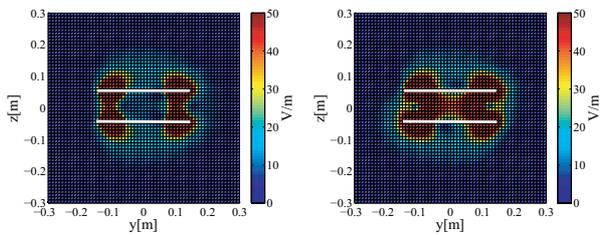
$$\zeta = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{\eta_0} \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|} \right) \quad (3)$$

$$= 10 \log_{10} \frac{W_e}{W_h} \quad (4)$$

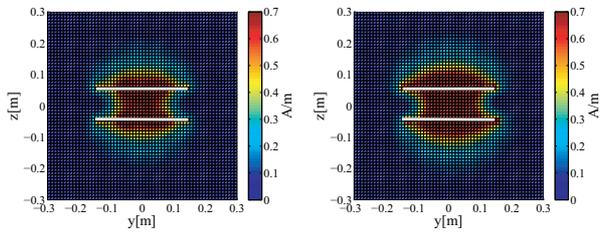
式 4 は空間における電氣的蓄積エネルギー密度  $W_e$  と磁氣的蓄積エネルギー密度  $W_h$  の比を表す。近傍界において  $\zeta$  が正の値のときは電界が支配的であり、負の値のときは磁界が支配的である。

開放型スパイラルアンテナの低周波モード、高周波モードにおける電界強度、磁界強度の分布と、式 (3) から求めた空間インピーダンス分布を図 7-12 に示す。同様に短絡型スパイラルアンテナの低周波モード、高周波モードにおける電界強度、磁界強度、空間インピーダンスの分布を図 13-18 に示す。図 7-18 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。

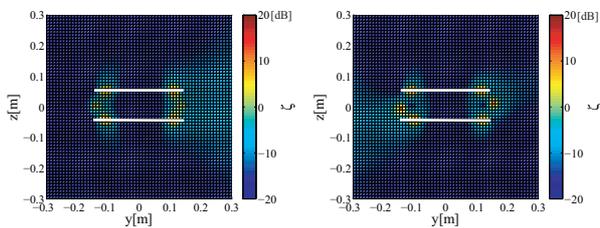
図 7, 10 より、逆方向に巻くことによって電界強度の分布が変化している事が分かる。また、図 8, 11 より磁界強度の分布



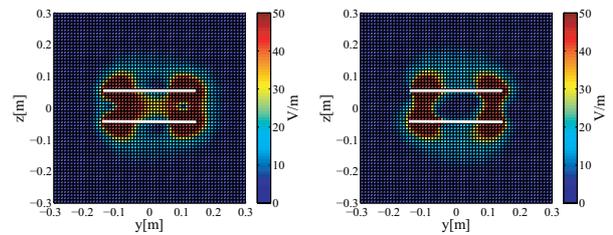
(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 13 短絡型における低周波モードの電界強度分布



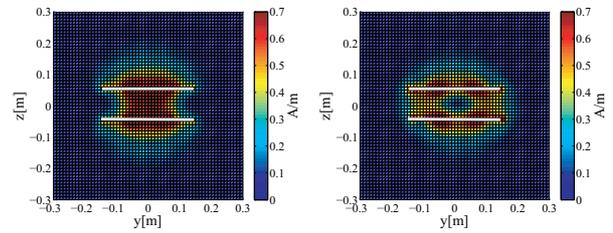
(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 14 短絡型における低周波モードの磁界強度分布



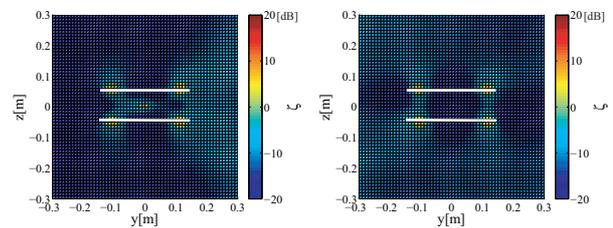
(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 15 短絡型における低周波モードの正規化空間インピーダンス分布



(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 16 短絡型における高周波モードの電界強度分布



(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 17 短絡型における高周波モードの磁界強度分布



(a) 順方向巻 (b) 逆方向巻  
図 18 短絡型における高周波モードの正規化空間インピーダンス分布

は逆方向に巻くことによる変化がないことが分かる。このことから、逆方向に巻くことによって磁界強度の分布はそのまま電界強度のみ変化することが分かる。

図 8 と図 14, 図 11 と図 17 より、開放型に比べて短絡型の方が磁界が強いことが分かる。これは、短絡型の方がアンテナに流れる電流が大きいためであると考えられる。図 9 と図 15, 図 12 と図 18 より、開放型に比べて短絡型はアンテナ近傍において磁界が支配的であることが分かる。

#### 4. 開放型スパイラルモデルと短絡型スパイラルモデルの比較検討

##### 4.1 結合係数の比較

式 1 を用いて低周波モード及び高周波モードの共振周波数から求めた結合係数の距離特性を図 19, 20 に示す。式 1 は共振周波数が 2 つに割れている範囲内にしか適用できないため、それ以上の距離においては結合係数の値は 0 とする。図 19, 20 より、開放型スパイラルモデル、短絡型スパイラルモデルにおいて逆方向巻にすることによって結合係数が大きくなっていることが分かる。また、逆方向巻にすることによる結合係数の変化量は短絡型に比べて開放型の方が大きいことが分かる。

##### 4.2 電界結合係数, 磁界結合係数の比較

アンテナ間の結合は電界結合, 磁界結合から成る。それぞれの結合が伝送特性に及ぼす影響を明らかにするために本解析モ

デルの結合を電界結合, 磁界結合に分けて考える。電界結合係数  $k_c$ , 磁界結合係数  $k_m$  を求めるために, 図 21, 22 に示す等価回路を用いる [5]。開放型および短絡型モデルの電界結合係数, 磁界結合係数の距離特性を図 23, 24 に示す。これを比較すると, 短絡型に比べて開放型モデルの方が電界結合係数が大きいことが分かる。この理由として, 開放型スパイラルモデルは両端にたまる電荷によって電界結合が生じるためであると考えられる。また, 図 23 より, 逆方向巻にすることで電界結合係数の符号が反転していることが分かる。これによって, 逆方向巻にすることで結合係数が増加したと考えられる。

##### 4.3 伝送効率の比較

各モデルにおいて, アンテナ間距離  $D$  を変化させたときの伝送効率を図 25, 26 に示す。この図で示す伝送効率は各アンテナ間距離  $D$  において周波数を変化させた時の伝送効率の最大値である。図 25 より, 開放型モデルでは逆方向巻にすることによって伝送距離が 35mm(25.0%) 延びることが分かる。同様に図 26 より, 短絡型モデルにおいても逆方向巻にすることによって伝送距離が 8.5mm(1.8%) 延びることが分かる。両モデルとも逆方向巻にすることで伝送効率の距離特性が良くなる。この理由は, 4.1 節で明らかにしたように, 逆方向巻にすることで結合が強くなるためであると考えられる。また図 25, 26 より, 逆方向巻にすることによる伝送距離の延びは開放型モデルの方が大きいことが分かる。これは, 開放型の電界結合係数が短絡型

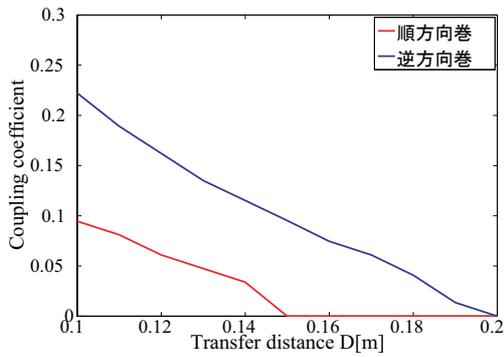


図 19 開放型スパイラルモデルにおける結合係数の距離特性

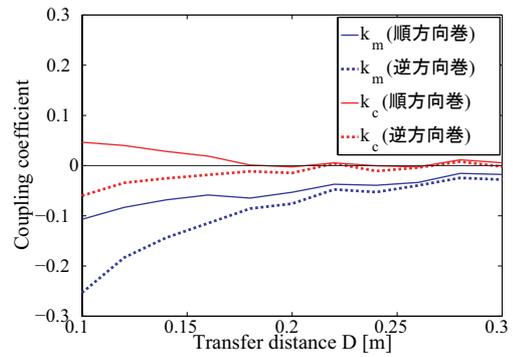


図 23 開放型スパイラルモデルにおける電界, 磁界結合係数の距離特性

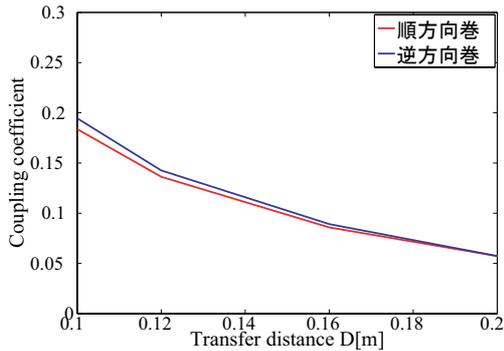


図 20 短絡型スパイラルモデルにおける結合係数の距離特性

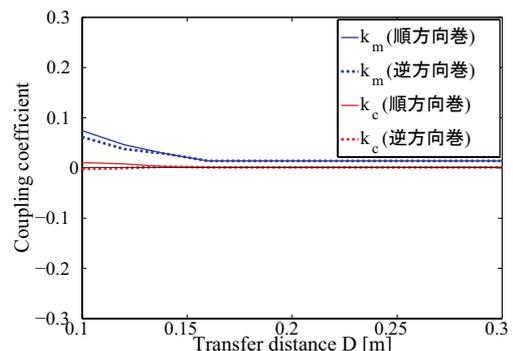


図 24 短絡型スパイラルモデルにおける電界, 磁界結合係数の距離特性

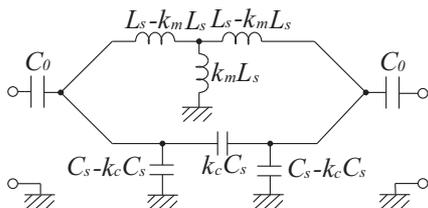


図 21 開放型スパイラルモデルの等価回路

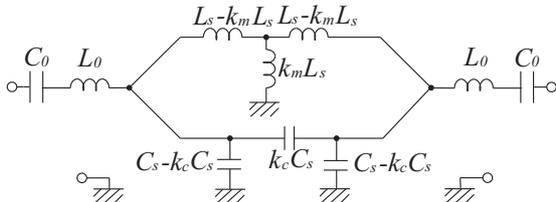


図 22 短絡型スパイラルモデルの等価回路

に比べて大きいと、逆方向巻にすることによる影響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、導体損失が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, 2 において、導電率  $\sigma$  の導線を用いたときの開放型スパイラルモデル、短絡型スパイラルモデルの伝送効率の比較を行う。

伝送効率の比較を図 27 に示す。図 27 は各導電率  $\sigma$  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率は開放型スパイラルモデルの方が高いことがわかる。このため、開放型スパイラルモデル

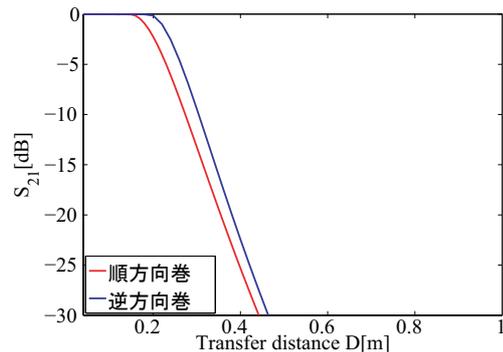


図 25 開放型スパイラルモデルにおける伝送効率の距離特性

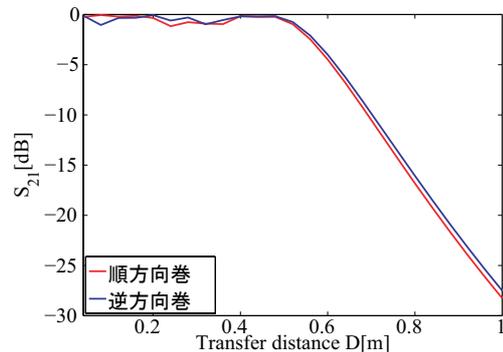


図 26 短絡型スパイラルモデルにおける伝送効率の距離特性

の方が導体損失となる電力が小さいことがわかる。図 8, 14 より、磁界強度は開放型スパイラルモデルの方が弱い。このため開放型スパイラルモデルの方が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。

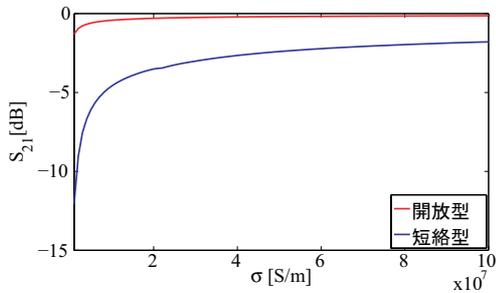


図 27 伝送効率の導電率特性

## 5. 結 び

本稿では、開放型スパイラルモデルと短絡型スパイラルモデルの比較及び各モデルを逆方向に巻いた時の諸特性の変化について検討を行った。伝送効率、結合係数、電界・磁界結合係数、導体損の観点から考察を行った。アンテナ近傍における電磁界強度分布から、逆方向巻にすることによって磁界分布はそのまま電界分布のみ変化させることがわかった。このことは逆方向巻にすることによって電界結合係数の符号が反転したことから数値的に確認できた。この影響によって、共振周波数の割れから求めた結合係数は大きくなり、伝送距離が延びることがわかった。

開放型スパイラルモデルと短絡型スパイラルモデルを比べると、短絡型の方が磁界が支配的であることが空間インピーダンス分布から確認できた。このことが、逆方向巻にすることによる諸特性の変化量が開放型の方が大きいこととして考えられる。

## 文 献

- [1] Arsteidis Karalis, John joannopoulos, Marin Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, 323, pp. 34-48, Apr. 2007.
- [2] Andre Kurs, Arsteidis Karalis, Robert Moffatt, John joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science Express*, Vol. 317, No. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [3] 天野智博, 平山裕, 菊間信良, 榊原久二男, "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," *信学技報*, WPT2011-06, Oct. 2011.
- [4] 粟井郁雄, *日経エレクトロニクス*, pp.100-108, 11-14, Nov. 2011.
- [5] 稲垣直樹, 堀智, "共鳴方式無線接続システムの偶奇モードリアクタンス関数と影像インピーダンスに基づく特性評価," *信学論*, Vol.J94-B, No.9, pp.1076-1085, Sep. 2011.