

2つのヘリカル素子を用いた送受信ユニットを有する 無線電力伝送システムの伝送効率

星 貴博[†] 袁 巧微[‡]

[†] 仙台高等専門学校情報電子システム工学専攻 〒989-3128 仙台市青葉区愛子中央 4-16-1

[‡] 仙台高等専門学校情報ネットワーク工学科 〒989-3128 仙台市青葉区愛子中央 4-16-1

E-mail: [†] a1102031@sendai-nct.jp, [‡] qwyuan@sendai-nct.ac.jp

あらまし 電磁結合方式を用いた無線電力伝送システム(WPT)の研究開発が盛んに行われている。本稿では電磁界解析ソフトを用いて電磁結合方式の WPT システムの伝送効率を更に向上させることを目的とする。その手法として、まず S パラメータを数値的に解析、または実験により測定する。それからその S パラメータの整合条件を導出し、負荷側および送電側のインピーダンスの最適化設計を行う。本報告では、2つのヘリカルアンテナの組で WPT システムの送受信ユニットとする WPT システムを試作し、そのシステムの S パラメータを解析及び実測し、結果を比較する。最後にその S パラメータを用い、伝送距離および軸ずれによる伝送効率の変化を報告する。

キーワード FEKO, モーメント法, 電磁結合方式, 無線電力伝送, S パラメータ, 整合, 最適化

Wireless Power Transfer System of Electromagnetic coupling

Takahiro HOSHI[†] Qiaowei YUAN[‡]

[†] Sendai National College of Technology 4-16-1 Aoba, Sendai-city, Miyagi, 989-3128 Japan

E-mail: [†] a1102031@sendai-nct.jp, [‡] qwyuan@sendai-nct.ac.jp

Abstract Wireless power transfer system using electromagnetic coupling has been researched very actively. In this report, we intended to improve the transfer efficiency of a WPT System using electromagnetic coupling by a electromagnetic field analysis simulator. The S-parameters is firstly calculated by eletctromagnetic simulator or measured by a network analyzer. Then, the transfer efficiency will be confirmed by using the obtained the S-parameters. Finally, the optimum load impedance and source impedance at the conjugated matching condition will be deduced and further used to obtain the maximum efficiency. In this report , 2-helicals is proposed used as the transmitting and receiving elements for WPT system. The S-parameters of this system is compared with the numerical results and measurements .The effects of the transfer distance and the axial deviation on the transfer efficiency by using the proposed method will be presented.

Keyword FEKO, Moment-method, Electromagnetic coupling , WPT, S-parameter, Matching

1. はじめに

近年電気自動車やスマートフォンなどのモバイル端末の研究開発が進んでいる。量産型の電気自動車が市場に出始めており今後広く普及していくことが予想される。しかし、これらの電化製品は充電を必要とするために、コンセントのある場所、コードの届くところというように利用できる移動範囲が制限され、その利便性が大幅に削がれてしまう。これらの解決策としても無線電力伝送技術は有用である。

現在実用化されている無線での電力供給源として電動歯ブラシの充電スタンドに代表されるような電磁誘導方式を用いたものが挙げられる。しかし、伝送距離

が極端に短いために充電するためには機器を給電器に置かなくてはならず、完全な非接触充電とは言い難い。この状況を打開したのが 2007 年にマサチューセッツ工学大学(MIT)から発表された Witricity の基本原理とされている電磁共鳴方式である。これは、磁界共鳴方式や、磁界共振結合方式など様々な呼称があるため本稿では電磁結合方式という名称で統一する。この電磁結合方式が新たに加わったことにより、飛躍的に伝送距離が長くなることが期待される。しかし、技術として確立するには今後さらなる伝送効率の向上が必要とされている。

以上より、本稿では無線電力伝送システムの実用化

を促進するため、電磁結合方式の更なる高効率化を目的とする。実用化に向けた研究として電磁結合方式の設計理論に関する研究^[1]、素子の形状に関する研究^[2]など様々な先行研究があるが、本研究のアプローチとしては、電磁界解析シミュレータ FEKO を用いた電磁界解析によってアンテナを最適設計することで効率向上を実現する。今回は MIT より発表された Witricity のループアンテナをヘリカルアンテナに変更し、2つのヘリカルアンテナで構成した WPT システムの製作、測定及び電磁界数値解析シミュレータ FEKO を用いて伝送効率解析、評価を行ったので報告する。

2. WPT システムの構成及び等価 2 端子回路

近傍での無線電力伝送には電磁誘導方式と電磁結合方式の 2 つが挙げられる。本稿では近傍界電磁結合方式を用いて、磁界型アンテナとして知られるヘリカルアンテナを組み合わせ、WPT システムを構成する。無線電力伝送システム(WPT システム)の構成には送受信の 2 点のみで電力伝送を行うものと、送受電アンテナの間にリピータデバイスと呼ばれる中継器を用いるマルチホップ形式などが挙げられる。本稿で提案する WPT システムは送受信側アンテナの間にリピータデバイスを配置したような構成となっている。しかし、リピータデバイスと送電及び受電アンテナの素子間隔は 4cm と短いため、2つのアンテナを組み合わせたものをそれぞれ一つのユニットみなしている。そのため、この WPT システムは図 1 のような 2 ポート等価回路図で表すことができる。左側が送信部、右側が受信部である。ポート 1-1' から電源側を見た時の送電側インピーダンスを Z_s 、ポート 2-2' から負荷回路側を見たときの受電側インピーダンスを Z_l とする。ブラックボックス化されている部分がアンテナでの無線電力伝送を行っている部分となっている。FEKO ではこの構成図の送電側から受電側までを解析することができる。このような 2 ポート等価回路図に表わすことで S パラメータの測定結果からアンテナの性能をブラックボックス化することができ、上図に示すような簡単な等価回路で表すことができる。

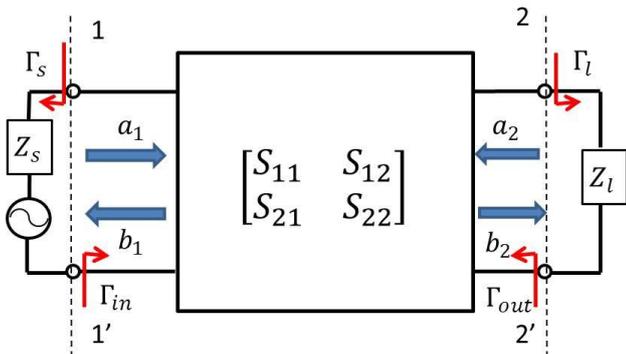


図 1 WPT システムの 2 ポート等価回路図

3. 伝送効率

3.1. 共役整合条件を満たす最適負荷の算出

電磁結合方式に限らず、伝送効率を向上させる手法としてインピーダンス整合による研究がされている。特に電磁結合方式では共振器間の結合を用いた整合条件^[3]などが知られているが、本稿では S パラメータを用いて共役整合条件^[4]を満たすことで伝送効率の向上を検討する。一般に整合とは受信側及び送信側での位相差を解消することによって最大の電力が得られるというものである。送電側及び受電側の整合条件は(1),(2)のようになる。

$$\Gamma_s = \Gamma_{in}^* \quad (1)$$

$$\Gamma_l = \Gamma_{out}^* \quad (2)$$

送電側の反射係数 Γ_{in} 及び受電側の反射係数 Γ_{out} は次のように表すことができる。

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_l}{1-S_{22}\Gamma_l} = \frac{S_{11}-\Delta\Gamma_l}{1-S_{22}\Gamma_l} \quad (3)$$

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_s}{1-S_{11}\Gamma_s} = \frac{S_{22}-\Delta\Gamma_s}{1-S_{11}\Gamma_s} \quad (4)$$

以上の(1)~(4)式を用いて最適な反射係数を求める 2 次方程式として下式(5),(6)を得る。

$$C_1\Gamma_{sop}^2 + B_1\Gamma_{sop} + C_1^* = 0 \quad (5)$$

$$C_2\Gamma_{lop}^2 + B_2\Gamma_{lop} + C_2^* = 0 \quad (6)$$

ここで、(5),(6)中の係数は以下の式で簡略したものである。

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12} \quad (7)$$

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 \quad (8)$$

$$B_2 = 1 - |S_{11}|^2 + |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 \quad (9)$$

$$C_1 = S_{11} - \Delta S_{22}^* \quad (10)$$

$$C_2 = S_{22} - \Delta S_{11}^* \quad (11)$$

式(5)-(11)より最適な反射係数 Γ_{lop} , Γ_{sop} は

$$\Gamma_{sop} = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1} \quad (12)$$

$$\Gamma_{lop} = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2} \quad (13)$$

で与えられる。また、特性インピーダンスが Z_0 である時、反射係数を最適にするための負荷インピーダンス Z_{sop} , Z_{lop} は次式で与えられる。

$$Z_{sop} = \frac{1+\Gamma_{sop}}{1-\Gamma_{sop}} Z_0 \quad (14)$$

$$Z_{lop} = \frac{1+\Gamma_{lop}}{1-\Gamma_{lop}} Z_0 \quad (15)$$

(14),(15)式から、 $|\Gamma_{lop}| < 1$, $|\Gamma_{sop}| < 1$ の範囲でのみこの整合条件は成立することが分かる。

3.2. 伝送効率

一般に電磁結合方式の効率の評価には結合係数 k と Q 値の積を用いて評価されることが多い。しかし、本稿では FEKO で得られた S パラメータ、またはベクトルネットワークアナライザ (VNA) の測定結果を用いて式 (12)、(13) より与えられる最適な反射係数をもとに効率の評価を行うことを提案する。式 (16) に効率評価の式を示す。 P_2 は受電側負荷より取り出すことのできる電力、 P_1 は送電側より送られる電力となっている。負荷側に送られる電力の効率は S パラメータを用いて表すと次式のようになる。

$$G_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{|b_2|^2 - |a_2|^2}{|a_1|^2 - |b_1|^2} = \frac{(1 - |\Gamma_l|^2)(1 - |\Gamma_s|^2)|S_{21}|^2}{|(1 - S_{11}\Gamma_s)(1 - S_{22}\Gamma_l) - S_{11}S_{22}\Gamma_s\Gamma_l|^2} \quad (16)$$

本稿の効率の評価では FEKO によって計算された WPT システムの S パラメータをもとに反射係数を最適化するための整合回路を装荷したと仮定したときの伝送効率を WPT システムのもつ伝送効率としている。

なお、本稿における伝送効率の範囲は WPT システム全体の効率としている。また、アンテナに用いている銅線による損失は考慮しているが、電源回路及び受電回路などでの効率低下は考慮していない。

4. 電磁界解析による伝送効率の評価

4.1. 電磁界解析シミュレータ FEKO

本研究では 3 次元電磁界シミュレータ FEKO (FARAD 社) を用いて電磁界数値解析を行なっている。FEKO はモーメント法 (MoM) を基にした解析手法を用いており解析対象をメッシュ化し、導体上の電流密度を計算することで高速に電磁界解析が行える。しかし、FEKO の解析結果をより正確にメッシュ化の際にメッシュ長さ l_m が $l_m > 0.3\lambda$ 、導線半径 r が $r > 0.3l_m$ となるときに計算精度は低くなると考えられる。電磁界解析を用いた研究での分割数を参考にし、メッシュ長さを $l_m < 0.1\lambda$ となるようにし、解析周波数域を 10-25 [MHz] とし、周波数分解能を 200 [kHz] に設定して解析を行った。

4.2. 提案する送信・受信素子

ヘリカルアンテナを用いて効率の向上を目指す研究は様々あり、アレー化によって高効率に伝送できるものや、発表されている^{[5][6]}。本稿で提案する WPT システムも複数のヘリカルアンテナを用いることによって伝送効率の向上を目指すことに主眼を置いている。図 2 に FEKO で解析を行ったモデルを示す。提案する

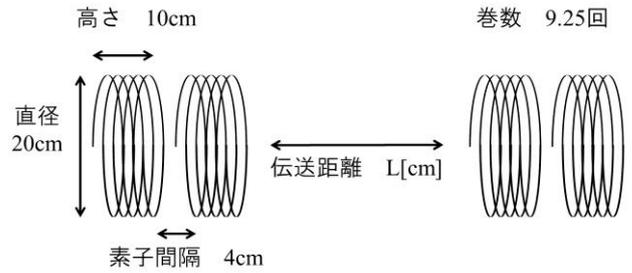


図 2 提案する WPT システム概要図

WPT システムは 2 つのヘリカル素子を用いて構成されている。この 2 つのヘリカル素子の間隔は 4 cm としている。つまり、一つのユニットとして見たときのサイズは縦 20 cm、横 24 cm と少々大きめである。また、このヘリカルアンテナ単体での共振周波数は 20.91 MHz である。

4.3. 解析パラメータの振る舞い

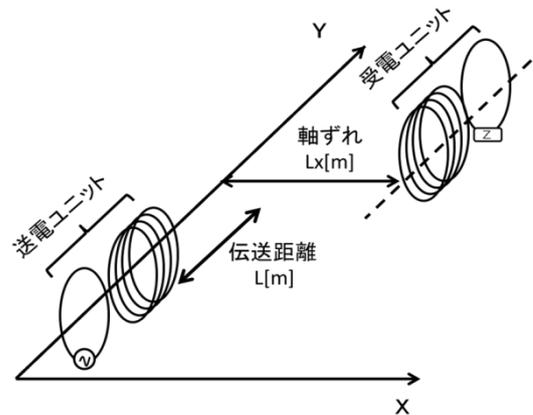


図 3 解析概要図

WPT システムの性能を (1) 距離、(2) 軸ずれの 2 つで WPT システムの伝送効率の評価を行った。(1) については送電側を固定し、受電側との距離をパラメータとし、10, 20, 30, 40 cm の 4 点での解析を行った。また、(2) については図 4 に示すように送電側と受電側の中心を結ぶ線を軸とし、この軸から受電側ユニットの x 方向のずれを l_x とし、効率がどのように変化するかを調べた。この実験では伝送距離 10 cm から 40 cm の各距離で軸ずれ 10, 20, 30 cm の 3 点を解析した。

4.4. 伝送効率の距離依存性

図 4 に最適整合回路の装荷を仮定したときの伝送効率の距離依存性を示す。伝送距離 10 cm では双峰特性となり、それぞれのピーク値は 90% 近くとなった。それ以降はピークが一つになり、距離が延びるにしたがって徐々に低下していく。また、10 cm の場合を除いて、いずれも共振周波数付近で最大値を示している。

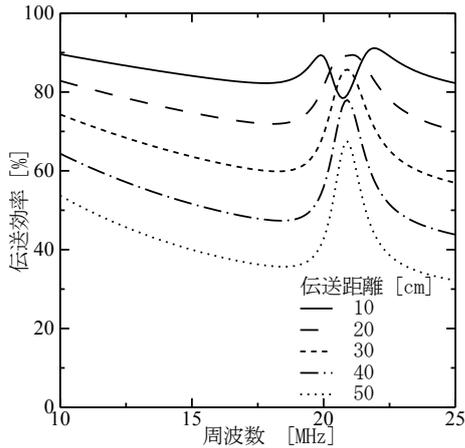
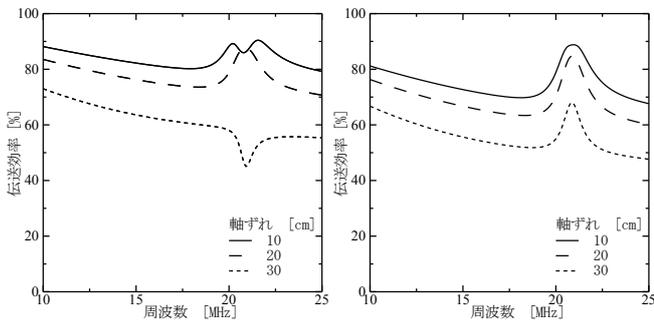
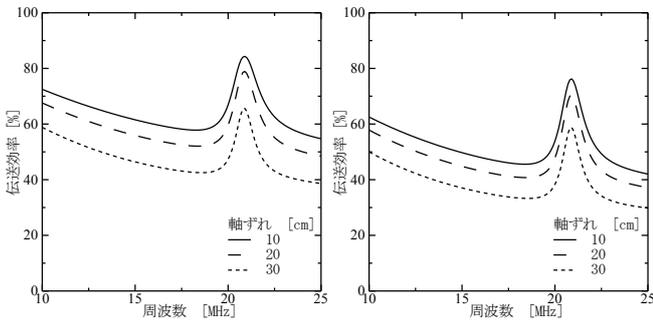


図 4 伝送効率の距離依存性



(a) L=10cm

(b) L=20cm



(c) L=30cm

(d) L=40cm

図 5 軸ずれ特性

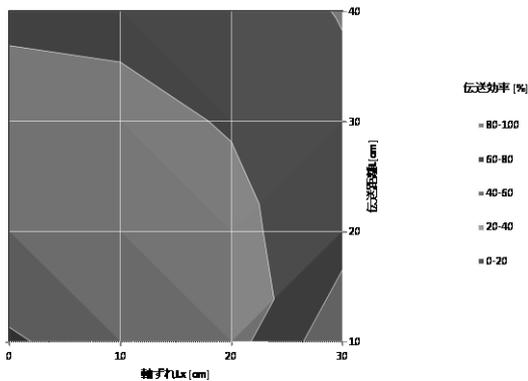


図 6 電力伝送可能範囲の可視化

4.5. 軸ずれに対する効率の変化

図 5 に伝送距離別の軸ずれ特性を示す. $L=10\text{cm}$ の時は軸ずれが 10cm でも双峰特性が見られる. 4つの解析結果に共通して言えることは軸ずれが拡大するにつれ, 減衰量が大きくなっているということである. この傾向から軸ずれ 40cm のときはさらに減衰が拡大することが予想できる.

また, 解析結果を基に提案する WPT システムの伝送可能な範囲を可視化したものを図 8 に示す. 観測点が少ないために伝送効率が段階的に減衰する様子を表現することはできなかったが, WPT システムの仕様の説明としては十分であると考えている. この図からも分かるように軸ずれとして許容出来る範囲は 20cm であると言える.



図 7 製作したアンテナ

5. 製作した WPT システムの実験について

5.1. アンテナの製作

FEKOによる電磁界数値解析後, 実際にアンテナを製作し, WPT システムを構築した. 送信及び受信ユニットとして図 2 に示すようなアンテナを製作した. 一つのユニットは 2つのヘリカルアンテナから構成されており, 上側がリピータデバイス, 下側のアンテナが電力の受け渡しユニットとし, 巻数の半分となる場所を給電点としている. また, 図 7 にあるように同軸ケーブルを用いて給電を行う.

5.2. 実験結果

製作したアンテナの用いた WPT システムの VNA で測定した結果と FEKO による解析結果を比較する. 周波数に差が見られるものの, 最大値やピークの数など類似点が見られる. 図 5 に示したのは伝送距離 10cm の S パラメータの解析結果である.

FEKO での解析結果の方が高い帯域にピークが出ている. しかし, ピークの高さや数は VNA により実測したものとはほぼ同じとなった. また, 周波数に関しても使用する銅線や外部の環境を正確に再現することが出来れば実測値に近づくことを確認することが出来た. このことから, FEKO による解析結果が実測値と代替することが出来ると言える.

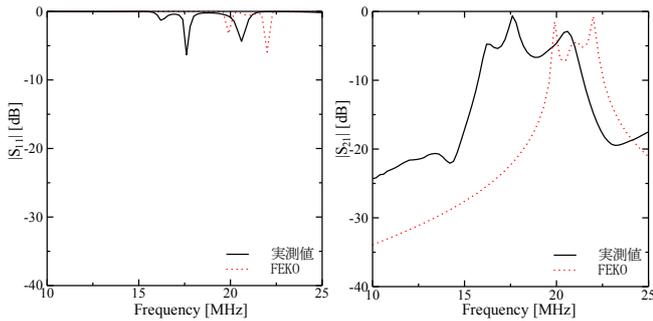


図 8 実測値と解析値の比較

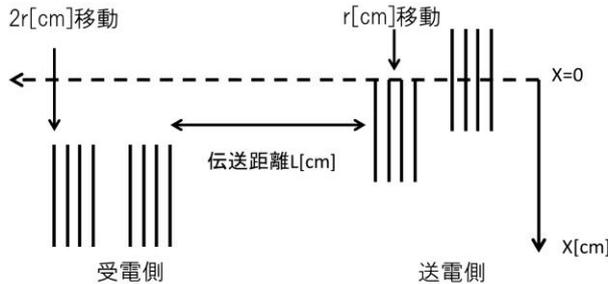


図 9 リピータデバイスによる補正

6. リピータデバイスによる軸ずれ補正

解析結果でも示したように WPT システムは軸ずれによって伝送効率に大きな影響が出てしまう。効率低下の原因として、磁束が受電デバイスに誘導されづらくなるため結合が弱まってしまふことが挙げられる。そこで軸ずれによる伝送効率の低下を防ぐためにリピータデバイスを的確に動かすことで対処することを提案する。図 9 に伝送距離が 30cm のとき軸ずれの影響を各条件毎に比較したものである。受信側が一個分ずれたとき、送電側リピータデバイスを半個分動かしたものと一個分動かしたもので伝送効率を比較する。半個分補正したものの方が一個分補正したものに比べ効率が改善できていることが分かる。

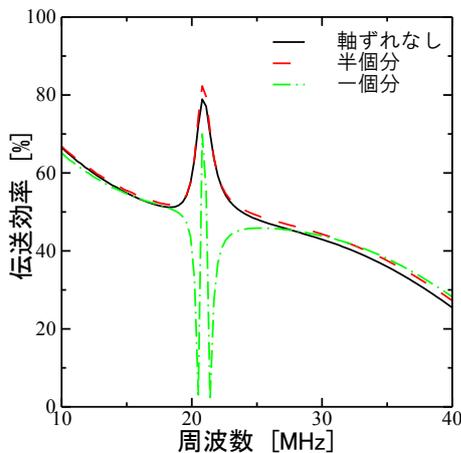


図 10 補正による影響の緩和

7. まとめ

今回の報告に関する要点を以下にまとめる。

- (1) S パラメータより求めることができる反射係数を最適にする整合回路を装荷することで効率が向上する。
- (2) FEKO による解析結果と実測結果から周囲の環境を考慮せずともある程度の精度を持つ。
- (3) 解析結果から位置関係による伝送効率を図示することで軸ずれが許容できる伝送可能範囲を示した。
- (4) 送電側リピータデバイスを動かすことで効率を改善できることを確認した。しかし、同様に受電側リピータデバイスを動かしても変化はなかった。

実際に製作した WPT 用アンテナの測定を行った結果と FEKO で解析した結果を比較すると、損失やモデルを忠実に再現することで多少の誤差はあるが、解析結果を実測結果に近づけることができ、FEKO の有効性と信頼性を再確認することが出来た。また、得られた S パラメータより求めた最適化整合回路の結果から集中定数回路での設計が可能であることが分かった。また、リピータデバイスを補正することで軸ずれによる伝送効率の低下を抑えることができた。

文 献

- [1] 細谷達也, “ソフトスイッチング技術を用いた新しい共鳴型ワイヤレス給電システム的设计理論,” 信学技報, WPT2011-22, pp17-24, Dec. 2011.
- [2] 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,” 信学技報, 総大, WPT2011-05, pp1-6, Oct. 2011.
- [3] 工藤浩喜, 大館紀章, 小川健一郎, 庄木裕樹, “磁気共鳴無線電力伝送の伝送距離変化時の効率改善技術の提案,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-1-9, Mar. 2011.
- [4] 袁巧微, 陳強, 澤谷邦男, “S パラメータによる無線電力伝送システム伝送効率の解析,” 信学技報, WPT2011-18, pp53-58, Oct. 2011.
- [5] 小川健一郎, 工藤浩喜, 大館紀章, 尾林秀一, 庄木祐樹, 諸岡翼, “磁気共鳴方式における第 3 のコイルおよびアレー化による電力伝送効率の向上,” 信学技報, WPT2010-13, pp1-6, Jan. 2011.
- [6] 西村太, 安倍秀明, “磁気共鳴型ワイヤレス電力伝送コイルの面方向へのアレー化に関する一検討”, 信学技報, WPT2010-17, pp21-25, Jan. 2011.