

誘導磁界を用いた新しい無線接続方式

M2007MM029 田中雅人

指導教員：稲垣直樹

1 まえがき

電磁誘導を利用するワイヤレスの伝送技術は RFID などの情報伝達に用いられているが, MIT の Karalis らによりエネルギー伝送にも応用できることが発表され [1], 注目を集めている [2]. MIT のグループは遠方に伝搬しない近接場のエバネセント・テールを利用して, 2m 離れた電球を点灯できることを実験的に示した.

袁, 陳, 澤谷はエバネセント電磁界共振による無線電力伝送システムを扱っているが [3], 送信素子として周囲長が一波長ある大型のループを用いており, 電源から供給される電力の大部分は放射界に向かい, 小型の受信素子との間の電力伝送の効率は高くないと思われる. 常川は, 周波数 41MHz において, 半径 40mm のスパイラルアンテナ (12.5 回巻き) 間の相互結合による電力伝送の可能性を検討しているが [4], 放射抵抗が 0.004 と低く, 伝送距離は 0.1m にとどまっている.

本論文では, 送信アンテナとして電気的小形のコイルを用い, コンデンサ装荷により共振させ, 周囲に誘導磁界を分布させておき, その中に電気的小形の受信コイルを置く. 受信コイルを共振させない状態では誘導磁界のエネルギーはリアクティブのままに存在するが, 直列にコンデンサを接続して共振させると, たちまち送受信コイルの間に伝送路が形成され無線接続が実現できる. このとき送信コイルには損失性の受信コイルが無線で接続されるために, 送信コイルの放射抵抗が比較的大きくなる.

2 誘導磁界を用いる無線接続の電力伝送効率向上の条件

本研究が目的とする誘導磁界を用いる無線接続では高い電力伝送効率を有するために次の条件を課す.

1. 送信アンテナから無限遠に放射される電力は小さい, そのために, 放射抵抗は大きすぎない.
2. 送信アンテナは, 受信アンテナが置かれると想定される領域にエバネセント電磁界を分布させる.
3. 受信アンテナの受信スイッチを ON とすると, エバネセント電磁界が受信アンテナに向かって伝送され, 有効に受信される.

このとき, 次の条件を置く.

1. 送信アンテナは天井裏などに置くことを想定し, 電気的小形であるとするだけで, その大きさには制限を設けない.
2. 受信アンテナは携帯電話機などを想定し, 移動が容易で, 小形であるとする.

無線接続は電力伝送に限らず, 信号伝送をも含む. 信号伝送については, 高い伝送効率を目指すのではなく広域周波数で目標値が達成できることが必要であり, 電力伝送では狭帯域でも構わないので高い伝送効率を得るこ

とが必要である. アンテナ形状として誘導磁界を容易につくるループアンテナ (コイル) を採用する.

3 送信アンテナの設計

この節では, 送信アンテナに具備する条件についてまとめ, これを満足する設計を行う.

3.1 送信ループアンテナの Q

アンテナの Q は放射電力に対する蓄積電磁エネルギーの比により定義される. 図 1 のように, ループアンテナに静電容量 C のコンデンサを直列接続し, 入力ポートに電圧 V , 電流 I を印加する. ループアンテナを取り巻く空間に電界 \vec{E} , 磁界 \vec{H} をつくるとする. このループアンテナの放射インピーダンスを $Z = R + jX$ とすると,

$$V = \left(Z - j\frac{1}{\omega C} \right) I \quad (1)$$

角周波数 ω で共振するように静電容量 C を決めると,

$$X = \frac{1}{\omega C} \quad (2)$$

空間に存在する蓄積電気エネルギーと蓄積磁気エネルギーをそれぞれ W_e, W_m とすると,

$$\frac{1}{2\omega} X |I|^2 = W_m - W_e = \frac{|I|^2}{2\omega^2 C} \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} \frac{dX}{d\omega} |I|^2 = W_e + W_m \quad (4)$$

式 (3), (4) から, ループアンテナの Q は共振周波数 ω において次式のように与えられる. ここで空間の電気的エネルギーを 0 とすると Q は Q' に簡略化される.

$$Q = \frac{\omega W_m}{\frac{1}{2} R |I|^2} = \frac{\omega \frac{dX}{d\omega} + \frac{1}{\omega C}}{2R}, Q' = \frac{1}{W C R} \quad (5)$$

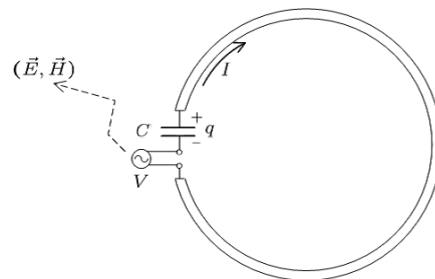


図 1 静電容量 C のコンデンサを直列接続したループアンテナ

3.2 送信ループアンテナの最適寸法

単体のループアンテナの半径 a と放射抵抗 $R[\Omega]$, 共振のために装荷させるコンデンサの静電容量 $C[F]$, ループアンテナの Q , の間の関係を表 1 に示した. ここに, 周波数を 13.56MHz 帯とし, 3 次元電磁界解析シミュレータ FEKO[5] により計算した. 以後, 周波数は ISM(Industrial

Scientific & Medical) Bands の一つである 13.56MHz とする．半径が小さいほど Q の値は大きくなり，放射抵抗の値が低くなる．電源からの電力が放射界に余り向かわず，エバネセント電磁界にとどまるためには Q が大きいことが望ましいが，放射抵抗が小さすぎると，アンテナ導線自体の損失が大きくなり，また，受信アンテナと結合した時の放射抵抗を大きくすることが難しく，電力伝送効率が低くなることが予想される．そこで，今回は Q の値がある程度得られていて，なおかつ放射抵抗の値も小さすぎない $l = \frac{4}{16}\lambda = \frac{1}{4}\lambda$ の送信機コイルを採用することにした．

表 1 周囲長 ℓ に対する放射抵抗 R ，静電容量 C ， Q の値

周囲長 ℓ	$R[\Omega]$	$C[\text{pF}]$	$Q(Q')$
$\frac{2}{16}\lambda$	0.057	52.04	4198 (3911)
$\frac{3}{16}\lambda$	0.373	31.75	1171 (990.3)
$\frac{4}{16}\lambda$	1.729	20.65	443.5 (328.7)
$\frac{5}{16}\lambda$	7.559	13.14	204.0 (118.1)

3.3 周囲長 $1/4\lambda$ のループアンテナのインピーダンス特性

周波数を 13.56MHz，周囲長 $\ell = \frac{4}{16}\lambda$ (半径 88.03cm) のループアンテナを FEKO を用いて解析した (セグメント長 8.8cm，セグメント半径 1.1cm)．装荷したコンデンサと放射抵抗の値をパラメータとし，リアクタンスの値が 0 に近くなるように最適化した結果， $1.960 \times 10^{-11} [F]$ と $R = 1.702[\Omega]$ という値が得られた．

4 受信ループアンテナへの電力伝送特性

3.3 にその特性を示した，周囲長 $1/4\lambda$ ，導線の半径 2mm でのループアンテナを送信アンテナとして用い，エバネセント電磁界の中に 3 巻きの受信ループアンテナを置いて，電力伝送特性を解析する．

電力伝送効率の受信ループアンテナの大きさへの依存性を知るために，半径が 10cm，15cm，20cm，30cm のものを解析して，結果を比較する．ここでは，図 2 のように送信アンテナと受信アンテナの間の距離を 2m とした．

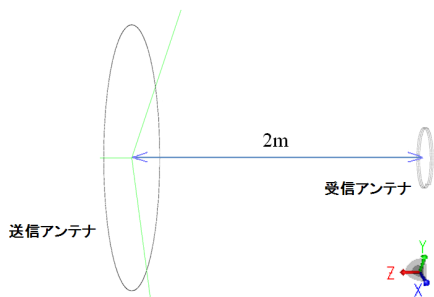


図 2 送信アンテナと受信アンテナの基本構成図

送信機のポートインピーダンスを放射抵抗 $R = 1.702[\Omega]$ に等しくし，静電容量 $C = 14.64[\text{pF}]$ を直列接続した状態を保ち，受信機のポートインピーダンス R' と直列接続コンデンサの静電容量 C' をパラメータとして，送受信機間の S パラメータ， $|S_{21}|$ を最大とするように最適化を

行った．最適化後の送信ループアンテナの放射抵抗と最適化 $|S_{21}|$ の結果を表 2 に示す．

半径 20cm の時， $|S_{21}|$ を伝送効率に換算すると 38% となる．今後はこの結果を基に，距離による影響や受信機の角度による影響等を検証することにする．

表 2 最適化の結果

受信ループ半径 [cm]	受信機コンデンサ $C'[\text{pF}]$	受信機インピーダンス $R'[\Omega]$	送信機放射抵抗 $R[\Omega]$	$S_{21}[\text{dB}]$
10	36.86	6.508	1.755	-15
15	19.24	6.599	2.070	-7.7
20	10.81	7.303	3.237	-4.1
30	1.683	11.17	1.679	-12.3

図 3 と図 4 は受信ループアンテナに共振用コンデンサを装荷する前後の，磁界，電界，ポインティングベクトルの分布を示す．受信ループアンテナが共振する前はエバネセント電磁界は送信ループの付近に局在するが，受信ループアンテナは共振すると，受信ループアンテナに向かって電力伝送が行われ，受信ループアンテナの付近の電磁界の強度が強くなっていることがわかる．

5 受信ループアンテナの配置と電力伝送効率

受信ループアンテナの送信機からの距離，角度，受信機の数，などを変化させて伝送効率に及ぼす影響を調べる．

5.1 距離を 1m から 4m の間で変化

伝送距離を 1m から 4m まで変化させて解析する．図 5 のように送信機は固定して，受信機を Z 軸方向にスライドさせて解析した．その結果を図 6 に示す．

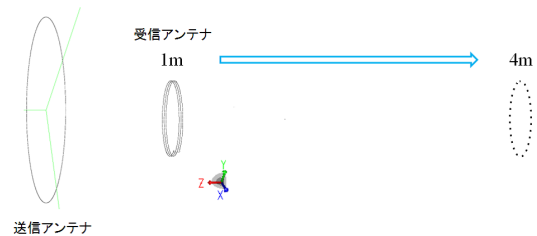


図 5 送受信機間の距離を変化

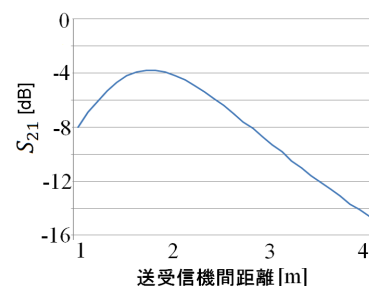
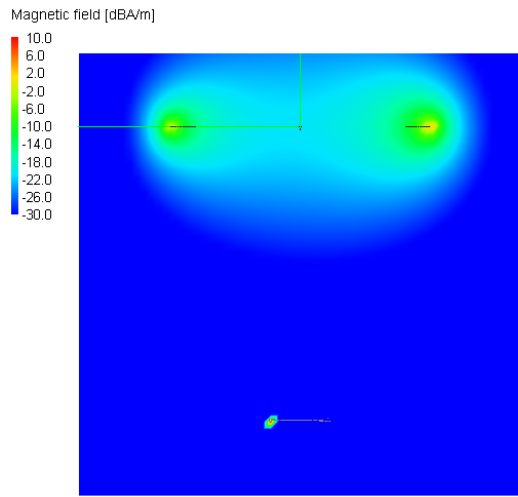
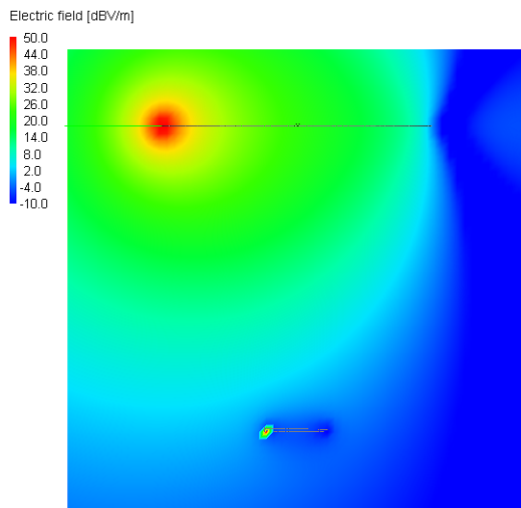


図 6 伝送距離を 1m から 4m まで変化させた時の $|S_{21}|$

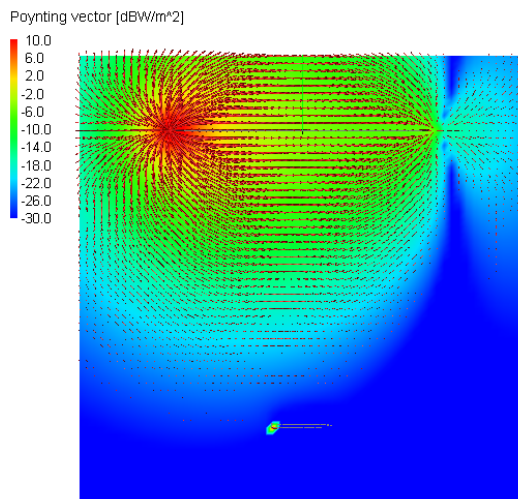
距離が遠くなるに連れて値は低くなると思われたが，実際には 1.7m 程度のところで最大値が得られた．このような結果が得られたのは，コイルを設計する際に 2m の距離で内部抵抗値を最適化したために 1m の時よりも 2m の方がよい値が得れたと考えられる．



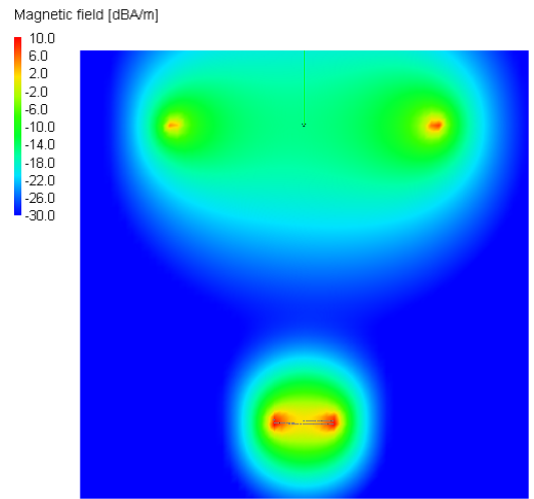
(a) 磁界分布



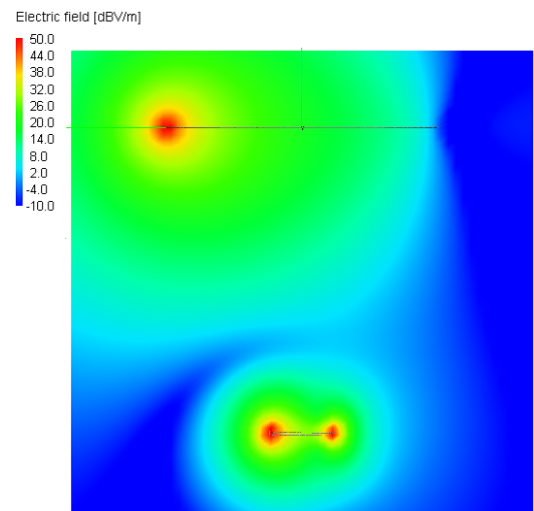
(b) 電界分布



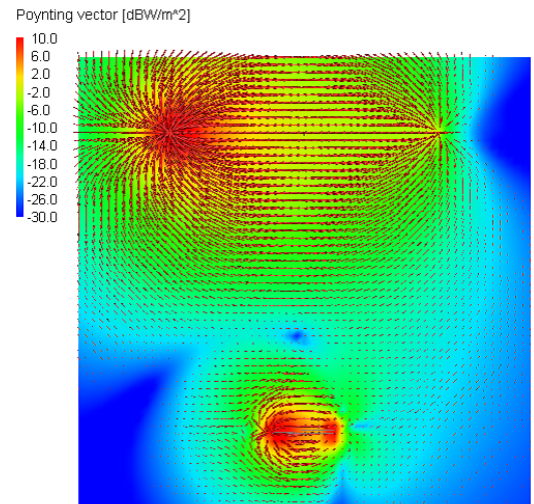
(c) ポインティングベクトル



(a) 磁界分布



(b) 電界分布



(c) ポインティングベクトル

図 3 受信ループにコンデンサを装荷していない場合の電磁界分布

図 4 受信ループにコンデンサを装荷している場合の電磁界分布

5.2 角度を 0° から 90° の範囲で変化

受信機の角度を送信機に対して、図 7 のように水平状態から垂直状態まで変化させる。その結果を図 8 に示す。

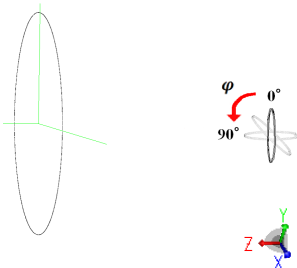


図 7 受信機を回転

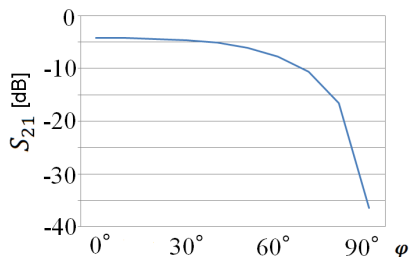


図 8 0° から 90° まで変化させた時の |S₂₁|

回転角度が 60° 以下では変化が小さく、60° を超えると急に小さくなる。これは送受信ループが共軸であり、送信ループのつくる磁界の受信ループと鎖交する割合が $\cos \varphi$ に比例して小さくなるからである。

5.3 送信機との距離を一定にして X 軸方向に -90° から 90° の角度で変化

送信機と受信機の距離を一定にして X 軸方向に図 9 のように -90° から 90° の角度で変化させる。その結果を図 10 に示す。

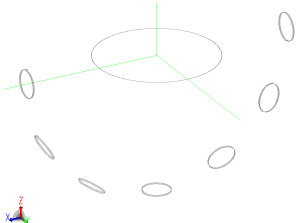


図 9 受信機を送信機との距離を変化させずに移動

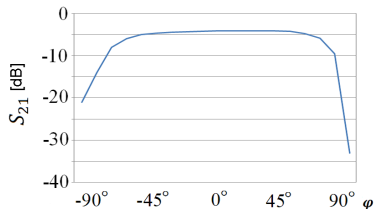


図 10 送信機との距離を一定にして X 軸方向に -90° から 90° の角度で変化させた時の |S₂₁|

受信コイルを送信コイルの真横に設置した時の伝送効率は 1% にも満たない程度であったが、回転角度が -50° から 70° では通常の状態とほぼ同じ伝送効率が得られた。これは、送信ループのつくる磁界の向きが受信ループの軸とほぼ一致し、鎖交する割合の変化が小さいためと考えられる。

5.4 受信機数を 1 から 2 に増加

図 11 のように受信機の数を増やし、それぞれ片方ずつ、また両方同時にスイッチを入れたときにどうなるかを検証した。なお、それぞれの受信機と送信機の距離は 2m である。解析結果を表 3 に示した。

両方の受信機にコンデンサの接続スイッチを ON した時に、伝送効率はそれぞれ 25% と 15% に落ちることがわかった。ここに、ON, OFF はコンデンサ装荷の有無を示す。なお、port2 のみコンデンサを装荷した時は、通常の状態とほぼ変わらない伝送効率が得られた。つまり、コンデンサを装荷したコイル以外のある程度近くにコイルが存在しても、コンデンサを装荷していなければ影響は少ないことがわかった。

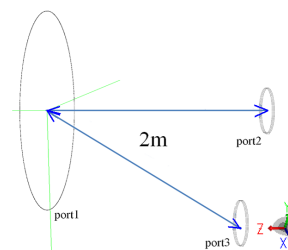


図 11 受信機数を 1 から 2 に増加

表 3 受信機数を 1 から 2 に増加した時の S-parameter

port2	port3	送信機放射抵抗 R [Ω]	S ₂₁ [dB]	S ₃₁ [dB]
ON	ON	4.295	-6.2	-7.7
ON	OFF	3.240	-4.1	-48

6 おわりに

本研究では、送受信ループアンテナの値を最適化し、伝送距離約 2m のときに電力伝送効率 40% を得た。今回は、自由空間に送受信ループアンテナがあるものとして検討したが、送受信アンテナ付近に誘電体等の障害物を設置して解析していく必要がある。また、人体への影響を検証するために誘電体を人間に近いモデルで設計することが望まれる。

参考文献

- [1] Karalis. A. et al, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," Annals of Physics.323, pp.34-48, Elsevier, Available online 27 April 2007(www.elsevier.com/locate/aop).
- [2] Solijacic M. et al, "電力で無線伝送する技術を開発、実験で 60W の電球を点灯," 日経エレクトロニクス, pp.117-128, 12-3, 2007.
- [3] 袁, 陳, 澤谷, "人体影響を考慮したエバネセント電磁界共振により無線電力伝送システムの伝送効率," 信学技報, A・P2008-91, pp.95-99, Sep. 2008.
- [4] 常川, "屋内ユビキタス無線アクセスシステムにおいて、アンテナ相互結合を用いた電力伝送の可能性検討," 信学技報, A・P2008-113, pp.13-18, Nov. 2008.
- [5] EM Software & Systems_S.A.(Pty)Ltd, FEKO ホームページ, (<http://www.feko.info/>).