

# 誘導磁界を用いた無線接続に関する研究

2006MI049 伊藤 敏貴      2006MI093 増田 清也  
指導教員 稲垣 直樹

## 1 はじめに

電磁誘導を用いて情報を伝達するワイヤレス技術は RFID などに利用されているが、MIT の研究グループはエネルギー伝送にも応用できることを発表した。遠方に伝搬しない近接場のエバネッセント・テールを利用したと主張し、2m 離れた電球を点灯できることを実験的に示した [1]。このワイヤレスで電力を伝送できる技術は、モバイル端末や電気自動車などにも応用が期待できるため、注目を集めている。

ループアンテナを送受信機に用い誘導磁界を用いた無線接続について検討した。電気的小型のループアンテナは放射抵抗が小さく、誘導磁界を容易に作るからである。送信機にキャパシタを直列接続し共振させ、周囲に誘導磁界を分布させておく。その中に受信機を置き、アンテナの正のリアクタンスを打ち消して共振させるため、キャパシタの装荷をオン・オフする。これにより、スイッチングすることができ無線伝送路を形成させる [2]。このことを示したのが図 1 と図 2 である。先行研究では、 $Q$  が十分に大きいと電力伝送効率を高めることがわかっている。例として、周波数 13.56MHz 帯、送信機に半径 88.03cm の 1 巻きループアンテナ、受信機に半径 20cm の 3 巻きループアンテナを用い、送受信機間の距離が 2m のときに結果として、電力伝送効率 40%、ポートインピーダンス 10Ω 以下を得ている。

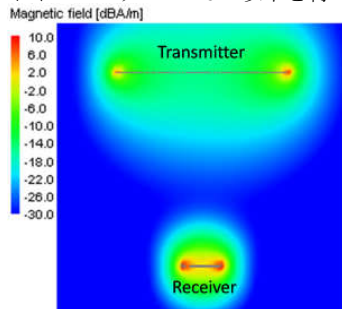


図 1 受信機にキャパシタの装荷をオンした状態の磁界分布図

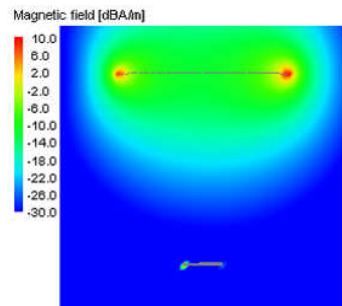


図 2 受信機にキャパシタの装荷をオフした状態の磁界分布図

## 2 研究目的・方法

誘導磁界を用いた無線接続は、実用上で高い電力伝送効率を有することが大きな課題となってくる。それは、電力伝送効率が低いと、ほとんどのエネルギーを電磁波のまま利用せず無駄にしてしまうためである。そこで、本研究では高い電力伝送効率を得ることを目的とする。また、最適なアンテナを理論的に設計・解析し、実験による理論値との比較検証からこの技術の可能性を示すことを目的とする。

研究方法について説明する。設計・解析には 3 次元電磁界解析シミュレータ FEKO を用い、周波数は IMS(Industrial, Medical, Science) 周波数帯の一つである 13.56MHz を用いる。送受信機は同一形状の 1 巻きループアンテナ (実寸モデル) を使用し、送受信機間の距離 1m を検証する。送受信機のポートインピーダンスと装荷キャパシタンスは共役影像アドミタンスの概念 [3] を用い求める。実寸モデルのポートインピーダンスは 100Ω に近い値を目指す。これは、鏡像の原理を用いることによってポートインピーダンスが 2 分の 1 となり、実験で 50Ω のネットワークアナライザと整合をとるためである。次に導体平面上に半円状のループアンテナを作製する。これを鏡像モデルと呼ぶ。鏡像の原理を用いる理由は、バランが不要であり、測定装置のケーブルを導体平面の下に隠せて測定精度を高くできるからである。次に、周波数を 10 倍の 135.6MHz にし、鏡像を含めた実寸モデルの 10 分の 1 となるスケールモデルを考える。この鏡像の原理とスケールモデルを用いることにより、実験での困難を軽減することができる。FEKO で得られたスケールモデルの結果と実験で得られた結果を比較し、有用性を調べる。有用性は散乱行列パラメータである  $|S_{11}|$  と  $|S_{21}|$  より調べる。 $|S_{11}|$  は Port1 への入射波に対する反射波の比率、 $|S_{21}|$  は Port1 への入射波が Port2 に到達する比率を表す。これらの値より、それぞれ反射損失と電力伝送効率を求めることができる。目的としている高い電力伝送効率を得るためには、 $|S_{21}|$  の値が 0dB に近く、 $|S_{11}|$  の値が低いことが必要である。また、熱や放射による損失についても検証する。これは 100% から電力伝送効率と反射損失を引くことによって得られる。また、アンテナをシールドボックスで遮へいすることによっての影響と送受信機間距離の変化による影響について検証した。

## 3 1 巻きループアンテナの実寸モデル

### 3.1 ループアンテナの構造

ループアンテナの構造を図 3 に示す。導線の半径を  $sr = 3\text{mm}$ 、送受信機ループアンテナの半径を  $a$ 、送受信

機間の距離を  $d$  とした。また、Port1 と Port2 の部分に装荷キャパシタンスを装荷し、ポートインピーダンスを終端する。

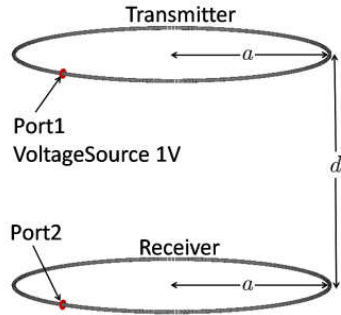


図3 1巻きループアンテナの構造

### 3.2 装荷キャパシタンス, ポートインピーダンス, 電力伝送効率

ここでの目的は、ポートインピーダンスが  $100\Omega$  付近の設計を得ることである。送受信機間の距離  $d = 1\text{m}$ , ループ半径  $a = 1.45\text{m}$  としたときの送受信機の装荷キャパシタンス  $C[\text{F}]$ , ポートインピーダンス  $r[\Omega]$  を最大電力供給の条件より算出した。結果を表1に示す。

表1  $d = 1\text{m}$  のときの送受信機の装荷キャパシタンスとポートインピーダンス

$d[\text{m}]$	$a[\text{m}]$	$C[\text{F}]$	$r[\Omega]$
1	1.45	$4.110 \times 10^{-12}$	98.786

表1より、ポートインピーダンスは  $98.786\Omega$  で  $100\Omega$  に近い値となり、目的の設計を得ることができた。

このときの周波数  $13.56\text{MHz}$  付近の  $|S_{11}|$  と  $|S_{21}|$  の周波数特性を図4に示す。

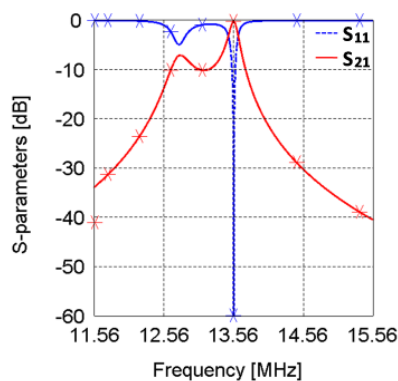


図4 1巻きループアンテナ(実寸モデル)の  $|S_{11}|$  と  $|S_{21}|$  の周波数特性

図4より、 $|S_{11}|$  は  $-86.962\text{dB}$  で反射損失は  $0\%$ ,  $|S_{21}|$  は  $-0.225\text{dB}$  で電力伝送効率は約  $95\%$  となり、高い電力伝送効率を得ることができた。

## 4 実験用モデルの作成

次に実験用モデルのループアンテナを図5に示す。

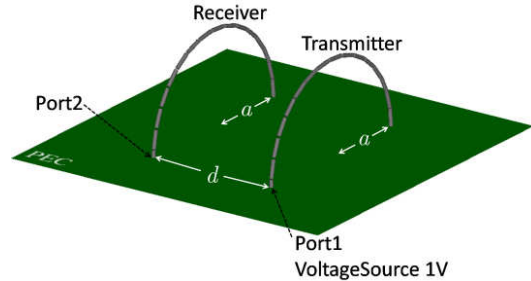


図5 実験用モデルを利用した1巻きループアンテナの構造

### 4.1 鏡像を利用したループアンテナ

鏡像を利用したループアンテナの  $C$  および  $r$  を3.2同様に最大電力供給の条件より算出した。その結果を表2に示す。

表2 鏡像を利用した送受信機の装荷キャパシタンスとポートインピーダンス

$d[\text{m}]$	$a[\text{m}]$	$C[\text{F}]$	$r[\Omega]$
1	1.45	$8.293 \times 10^{-12}$	48.534

表2より、ポートインピーダンスは実寸モデルの2分の1となり、これで実験で整合をとることができる。装荷キャパシタンスは2倍となっている。また、周波数  $13.56\text{MHz}$  付近の  $|S_{11}|$  と  $|S_{21}|$  の周波数特性は図4と同じ結果となった。

### 4.2 スケールモデルを利用したループアンテナ

ループ半径が  $1.45\text{m}$  で実験するには非常に大きく、作製するのに困難である。そのため周波数を10倍の  $135.6\text{MHz}$  とし、10分の1のスケールモデル(ループ半径  $a = 0.145\text{m}$ , 送受信機間の距離  $d = 0.1\text{m}$ , 導線半径  $sr = 0.3\text{mm}$ )を利用する。スケールモデルを利用したループアンテナの  $C$  および  $r$  を最大電力供給の条件より算出した。装荷キャパシタンスは鏡像モデルの10分の1で、ポートインピーダンスは  $48.533\Omega$  となった。また、周波数  $135.6\text{MHz}$  付近の  $|S_{11}|$  と  $|S_{21}|$  の周波数特性は図4と同様の結果となり、 $d = 0.1\text{m}$  のとき  $|S_{21}|$  は  $-0.225\text{dB}$  で電力伝送効率は実寸モデル、鏡像モデルと同じ  $95\%$  であった。

## 5 実験

### 5.1 解析と実験の比較・検証

次に解析と実験の結果を比較する。まず、FEKOで設計した実験用のモデルを図6に示す。これまでの解析は、キャパシタを集中定数回路として解析していた。しかし、実験ではキャパシタを作製するため、解析では銅板2枚でキャパシタを設計した。最大電力供給の条件で得たキャパシタンスと同じ値になるようにキャパシタの銅板面積と間隔を決定した。銅板の一辺は約  $1\text{cm}$ , 銅板間隔は  $0.1\text{cm}$  であった。キャパシタを装荷する位置を変化

させるとリアクタンスの値が変化するため、OPTFEKOを用い共振がとれる $\theta$ を決定した。 $\theta$ は約 $8^\circ$ であった。また、導体平面となる銅板は $1\text{m} \times 0.72\text{m}$ を使用した。

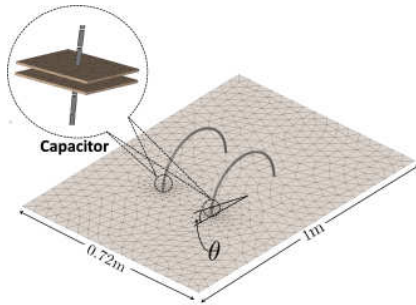


図6 FEKOで設計した実験用のモデル

次に実験のモデルを図7に示す。実験でのキャパシタはプリント基板で作製した。 $\theta$ は解析の結果より $8^\circ$ とした。プリント基板の厚さは $0.16\text{cm}$ で一定であるが、誘電率が特定できないため、プリント基板の面積を変化させた。結果、プリント基板の一边は約 $0.7\text{cm}$ で解析と同様の傾向を得ることができた。このときのプリント基板の一边と間隔から誘電率は約 $1.2$ であることがわかった。

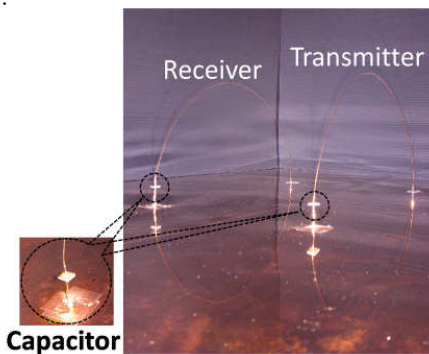


図7 実験のモデル

次に、解析の $|S_{11}|$ と $|S_{21}|$ の周波数特性を図8に示す。

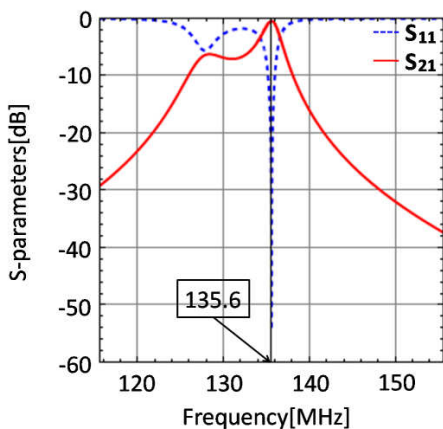


図8 解析の $|S_{11}|$ と $|S_{21}|$ の周波数特性

図8より、周波数 $135.6\text{MHz}$ 帯の $|S_{11}|$ は $-54.183\text{dB}$ で反射損失は $0\%$ であり、 $|S_{21}|$ は $-0.476\text{dB}$ で電力伝送効率率は約 $89\%$ である。これより、損失は約 $11\%$ で解析では完全導体であるため熱損失は考慮せず、この損失は放射によるものと考えられる。

次に、実験の $|S_{11}|$ と $|S_{21}|$ の周波数特性を図9に示す。

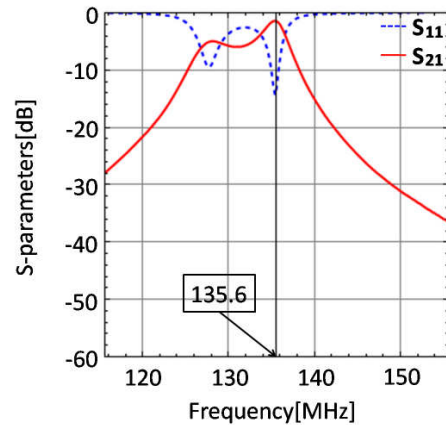


図9 実験の $|S_{11}|$ と $|S_{21}|$ の周波数特性

図9より、周波数 $135.6\text{MHz}$ 帯の $|S_{11}|$ は $-12.915\text{dB}$ で反射損失は約 $5\%$ であり、 $|S_{21}|$ は $-1.460\text{dB}$ で電力伝送効率率は約 $71\%$ である。これより、損失は約 $24\%$ で実験では完全導体でないため熱損失が発生する。よって損失は放射と熱によるものと考えられる。電力伝送効率が解析値より約 $18\%$ 低くなった理由は、熱が発生したからであると考えられる。

## 5.2 シールドボックスで遮へいしたとき

次に図10にシールドボックス( $38\text{cm} \times 25\text{cm} \times 26\text{cm}$ )で遮へいしたときのモデルを示す。アンテナをシールドボックスで遮へいし、放射をなくし、どのくらいの熱の損失かを調べる。また、電力伝送効率率への影響を調べる。シールドボックスは段ボールにアルミ箔を貼り付け作製した。



図10 シールドボックスで遮へいしたときの実験のモデル

まず、解析の $|S_{11}|$ と $|S_{21}|$ の周波数特性を図11に示す。

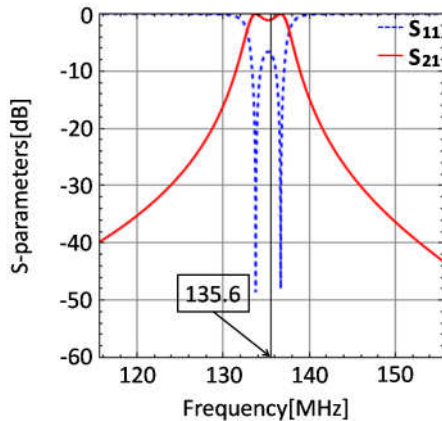


図 11 シールドボックスで遮へいしたときの解析の  $|S_{11}|$  と  $|S_{21}|$  の周波数特性

図 11 より、周波数 135.6MHz 帯の  $|S_{11}|$  は  $-7.073\text{dB}$  で反射損失は約 20% であり、 $|S_{21}|$  は  $-0.963\text{dB}$  で電力伝送効率率は約 80% である。この結果と図 8 の結果より、シールドボックスで遮へいすることによって電力伝送効率率は約 9% 低くなったことがわかる。これは、シールドボックスによって電力が反射され周波数がずれたからであると考えられる。

次に、実験の  $|S_{11}|$  と  $|S_{21}|$  の周波数特性を図 12 に示す。

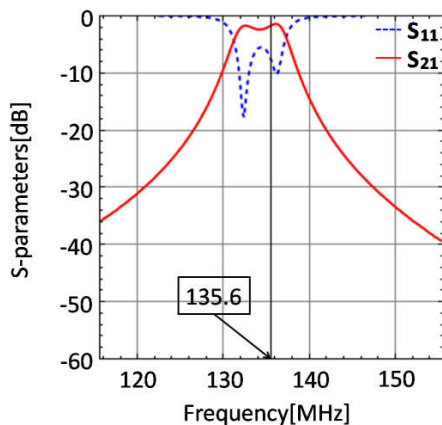


図 12 シールドボックスで遮へいしたときの実験の  $|S_{11}|$  と  $|S_{21}|$  の周波数特性

図 12 より、周波数 135.6MHz 帯の  $|S_{11}|$  は  $-7.989\text{dB}$  で反射損失は約 16% であり、 $|S_{21}|$  は  $-1.616\text{dB}$  で電力伝送効率率は約 69% である。アンテナをシールドボックスで遮へいし放射をなくしたため、約 15% が熱による損失であることが考えられる。これと図 9 の結果から、約 9% が放射による損失であることがわかった。また解析と同様、シールドボックスで遮へいすることによって電力伝送効率率は約 2% 低くなった。

### 5.3 距離変化による影響

次に送受信機間の距離 0.1m を 0.2m に変化させ、電力伝送効率への影響を調べた。

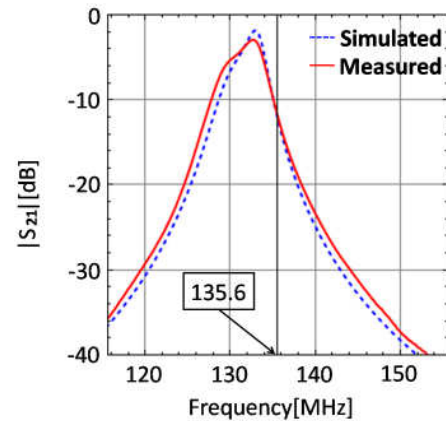


図 13  $d = 0.1\text{m}$  を  $d = 0.2\text{m}$  に変化させたときの実験と解析の  $|S_{21}|$  の周波数特性

図 13 より、解析と実験の  $|S_{21}|$  はそれぞれ  $-12.310\text{dB}$ 、 $-12.003\text{dB}$  で共に電力伝送効率率は約 6% で下がる結果となった。これより、距離変化による影響は大きく、距離ごとに最適化する必要があることがわかった。

## 6 おわりに

本研究では、最大電力供給の条件を用いて最適なアンテナを設計・解析し、実験を行い理論値との比較検証から有用性を調べた。同一形状の 1 巻きループアンテナを使用し、鏡像・スケールモデルの原理を用い、送受信機間の距離が 0.1m のときの解析と実験の比較を行った。実験の 135.6MHz 帯での電力伝送効率では、解析値と比べ約 18% 低い結果となってしまった。これは、実験では熱による損失のため解析との誤差が生じたからであると考えられる。しかし、 $|S_{11}|$  と  $|S_{21}|$  の周波数特性は解析値と同様な傾向を得ることができた。アンテナをシールドボックスで遮へいしたときの電力伝送効率では、実測値は解析値より 11% 低い値となってしまった。しかし、 $|S_{11}|$  と  $|S_{21}|$  の周波数特性は同様な傾向を得ることができた。実験では、15% が熱による損失で、約 9% が放射による損失であることがわかった。送受信機間の距離を遠ざけると、解析でも実験でも電力伝送効率が大幅に下がることがわかり、距離ごとに最適化する必要があることがわかった。今回の実験で、理論と実測により有用性を示すことができた。

## 参考文献

- [1] Solijacic M. et al, “電力を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.
- [2] 田中, 稲垣, 藤井, “誘導磁界を用いた新しい無線接続方式,” 信学技報, A-P2008-184, pp.197-202, Jan. 2008.
- [3] 丸地, 稲垣, 藤井, “誘導電界を用いた新しい無線接続方式,” 信学技報, A-P2009-84, pp.29-34, Sep. 2009.