

# Mid-Range 方式無線電力伝送の中距離伝送に関する研究

M2014SC023 山本将大

指導教員：奥村康行

## 1 はじめに

電磁界または電磁波を用いた無線電力伝送 (Wireless Power Transfer: WPT) はニコラ・テスラの研究 [1] から歴史が始まった。近年では、無線電力伝送は多くの研究機関や企業で研究されている [2][3]。特に、近傍界結合を用いた伝送方式は、高い伝送効率が実現できることから、実用化またはそれに向けた研究が盛んになって行われている。2010年に World Power Consortium が制定した Qi 規格 [4] は、伝送方式に誘導方式を用いて、周波数 100kHz ~ 200kHz で最大 5W の電力が伝送可能で、携帯電話やスマートフォンの二次電池の充電器に実用化されている。Qi 規格が用いた誘導方式は、送電系と受電系間の距離に制限があり、近い距離でしか電力伝送が行えない。伝送距離の可能性を広げたのが、2007年に MIT の研究グループが提唱した Mid-Range 方式である [5][6]。Mid-Range 方式は一般的には共鳴方式と呼ばれているが、共振をとることは誘導方式も共通しているため、本研究では文献 [7] より Mid-Range 方式と呼ぶ。MIT の研究グループは Mid-Range 方式は実験において伝送距離 1m で 90%、2m で 40% の電力伝送を行っている。本研究では、Mid-Range 方式 WPT の中距離伝送の特性について明らかにする。

本研究で用いる送受電系は以下の特徴をもつ。

- 電氣的超小型アンテナにより、リアクティブ近傍界を用いて電力伝送を行う。
- 設計や計算を容易にするため、方形コイルを用いる。
- 送受電コイルは共振せず、共振コイルは集中定数キャパシタで共振する。
- コイルには導体損を軽減させるため断面積が大きく、かつ加工が容易な銅条を用いる。

以上の特徴を持つ WPT の送受電系の特性を明らかにする。

特性を明らかにするために、ISM バンドの 1 つで RFID にも用いられる 13.56MHz 帯で、MATLAB による数値計算、電磁界解析シミュレータ FEKO [8] による全波動解析、ネットワークアナライザ (Network Analyzer: NA) による測定の結果を比較する。

また、LC 素子からなる等価回路を導出して、電力伝送の動作メカニズムと特徴を明確にする。

## 2 誘導方式と Mid-Range 方式のモデル

誘導方式は 2 つの共振コイルにより構成される。図 1 に本研究で用いる誘導方式のモデルを示す。

Mid-Range 方式は、送受電用の 2 つの励振コイルとインピーダンス整合用の 2 つの共振コイルにより実現されている。共振コイルは、文献 [5][6] ではヘリカルコイルを動作周波数で自己共振させているが、本研究では方形コイルに集中定数キャパシタを装荷させて共振をとる。図 2、

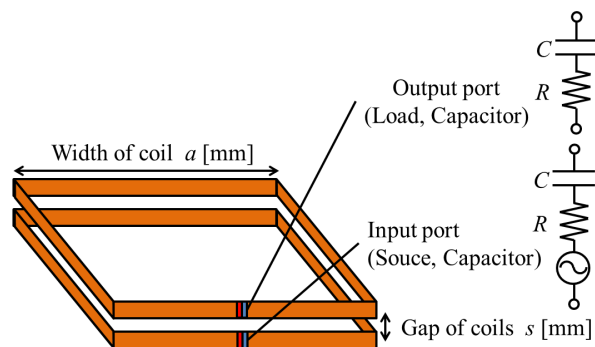


図 1 本研究で用いる誘導方式方式のモデル

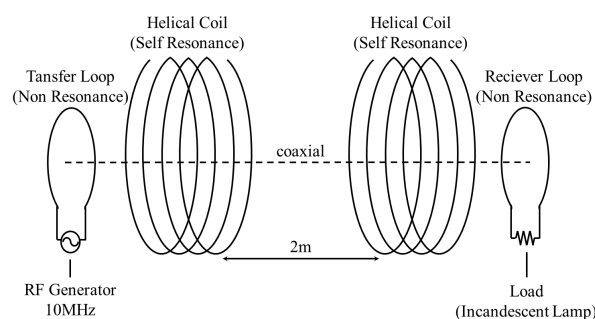


図 2 MIT が提唱した Mid-Range 方式のモデル [5]

3 に MIT が提唱した Mid-Range 方式と本研究で用いる Mid-Range 方式のモデルを示す。

電力伝送効率はインピーダンス整合により最大となり、近傍界を用いた WPT では共役映像インピーダンスを用いて整合をとる [9]。通常は負荷インピーダンスが実数であるため、映像インピーダンスを用いる。高周波回路では特性の評価に S パラメータを用いる。本研究では S パラメータのうち、送電電力と反射電力の比を示す反射係数  $S_{11}$ 、送電電力と受電電力の比を示す透過係数  $S_{21}$  により特性を評価する。無線電力伝送において最も重要な特性は電力伝送効率に相当する透過係数  $S_{21}$  である。

## 3 設計

WPT の送受電系の設計は回路素子の特性から映像インピーダンスを求め、動作周波数でインピーダンス整合がとれていることを確認することで行う。

設計は以下の手順で行う。

- 励振コイルと共振コイルの大きさ、コイル間の間隔を定めて、ノイマンの公式より低周波インダクタンスを計算する。
- 共振コイルのインダクタンスから、動作周波数で共振をとるために必要なキャパシタンスを計算する。
- 計算して得られた素子の値を回路網に与えて、その

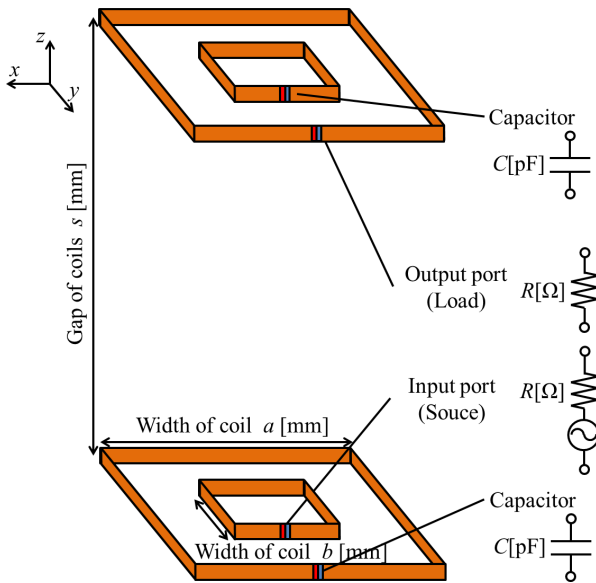


図3 本研究で用いる Mid-Range 方式のモデル

表1 誘導方式の設計例

銅条幅 [mm]	25
コイル幅 [mm]	400
コイル間距離 [mm]	3.19

回路網の映像インピーダンスを計算する。

- 動作周波数で回路網の映像インピーダンスが特性インピーダンスと一致していることを確認する。

本研究では動作周波数は 13.56MHz, 特性インピーダンスは  $50\Omega$  として, 計算には MATLAB を用いた. インダクタンスを計算するとき, パラメータの 1 つに導線半径がある. しかし, 本研究ではコイルの導線は銅条を用いており, 円筒状の導線でないため導線半径が定まらない. そこで導線半径  $r$  [mm] は銅条幅  $a$  [mm] を用いて等価直径  $r = a/4$  と置いて計算した.

表2に伝送距離 3cm でインピーダンス整合のとれる誘導方式, 表2に伝送距離 70cm でインピーダンス整合のとれる共鳴方式の設計例を示す.

## 4 数値計算とシミュレーション

設計した送受電系の映像インピーダンス, 反射係数, 透過係数を MATLAB 及び FEKO で求める.

### 4.1 MATLAB による数値計算

3章で示した特性を元に MATLAB で映像インピーダンス, S パラメータを求めた. 映像インピーダンスは

表2 Mid-Range 方式の設計例

銅条幅 [mm]	25
励振コイル幅 [mm]	168
共振コイル幅 [mm]	400
コイル間距離 [mm]	700

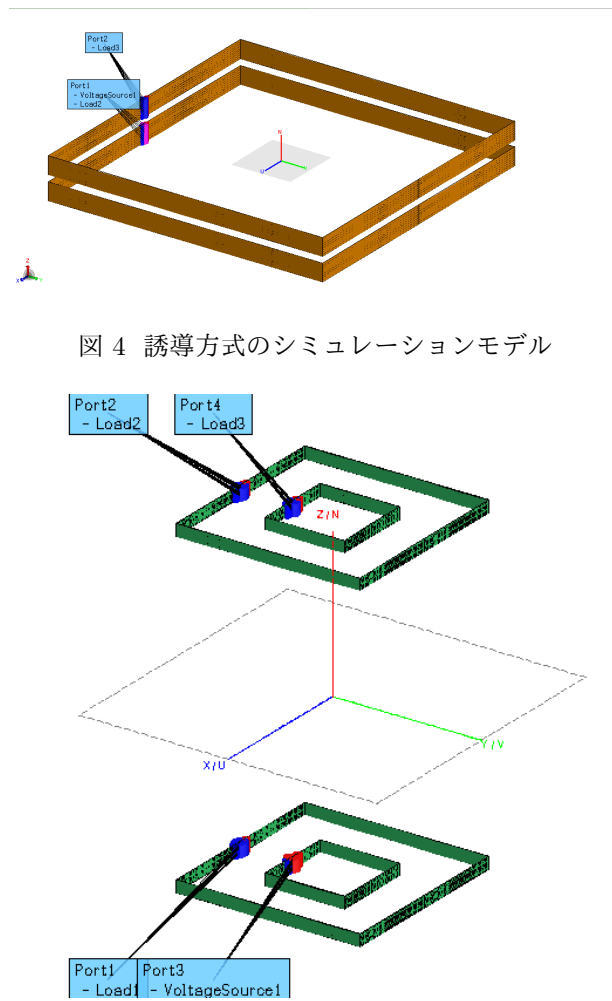


図4 誘導方式のシミュレーションモデル

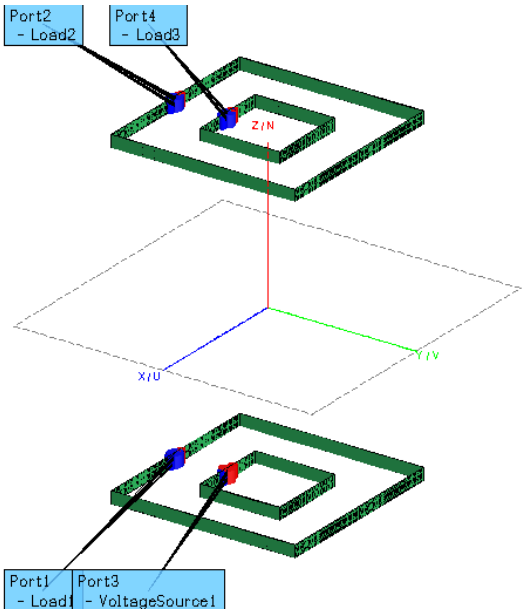


図5 Mid-Range 方式のシミュレーションモデル

$$Z_1 = \sqrt{Z_e Z_o} \quad (1)$$

となる.

偶モードインピーダンス  $Z_e$  は送受電系に同相同大の電源で供給したときの入力インピーダンスで, 奇モードインピーダンス  $Z_o$  は送受電系に逆相同大の電源で供給したときの入力インピーダンスである.

S パラメータは回路網の Z パラメータを変換して求めた.

### 4.2 FEKO によるシミュレーション

FEKO によるシミュレーションについて示す. シミュレーションモデルはコイルだけは CAD で製作して, 負荷インピーダンス, キャパシタはコイルに設けてあるポートに, 値を入力してある. 図4に誘導方式のシミュレーションモデル, 図5に Mid-Range 方式のシミュレーションモデルを示す.

表3に FEKO によるシミュレーション条件を示す.

## 5 実験

3章で示した設計を元に, 送受電系を製作した. 誘導方式の実験では, 製作した送電系と受電系を 3cm だけ離し

表 3 FEKO によるシミュレーションの条件

銅条の厚さ [mm]	1
導体の比透磁率	0.99
導体の導電率 [S/m]	$57.6 \times 10^6$
空間の比透磁率	1
空間の比誘電率	1
装荷キャパシタ [pF]	122
特性インピーダンス [ $\Omega$ ]	50

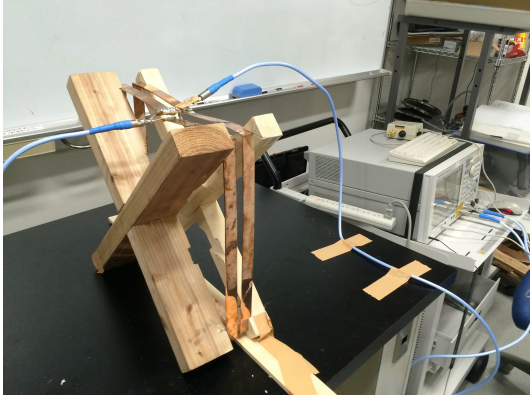


図 6 誘導方式の実験風景

て設置した。Mid-Range 方式の実験では、製作した送電系と受電系を 70cm 離して設置した。

図 6 に誘導方式の実験風景, 図 7 に Mid-Range 方式の実験風景を示す。

コイルは木製の土台に溝を掘り銅条を固定して製作した。コンデンサは村田製作所製のチップ積層セラミックコンデンサの紙基板上に並列に実装している。

## 6 Mid-Range 方式無線電力伝送の等価回路

Mid-Range 方式無線電力伝送は偶奇モード共振周波数から、等価回路を同定することができる [10]。図 8 に Mid-Range 方式無線電力伝送の等価回路を示す。

図 8 に示した等価回路の素子は、偶モードの共振周波数  $f_{se}$  と反共振周波数  $f_{pe}$ , 奇モードの共振周波数  $f_{so}$  と反共振周波数  $f_{po}$  より、

$$L_{e0} = L_1 \frac{f_{pe}^2 (f_{po}^2 f_{se}^2 - f_{pe}^2 f_{so}^2)}{f_{po}^2 (f_{pe}^2 - f_{se}^2)} \quad (2)$$

$$L_{e1} = L_1 \frac{-f_{po}^2 f_{se}^2 + f_{pe}^2 f_{so}^2}{f_{po}^2 (f_{pe}^2 - f_{se}^2)} \quad (3)$$

$$L_{e2} = L_1 \frac{f_{pe}^2 (f_{po}^2 - f_{so}^2)}{f_{po}^2 (f_{pe}^2 - f_{se}^2)} \quad (4)$$

$$C_{e1} = \frac{1}{4\pi^2 L_{e0} (f_{se}^2 - f_{pe}^2)} \quad (5)$$

$$C_{e2} = \frac{1}{4\pi^2 L_{e0}} \left( \frac{1}{f_{so}^2 - f_{po}^2} - \frac{1}{f_{se}^2 - f_{pe}^2} \right) \quad (6)$$

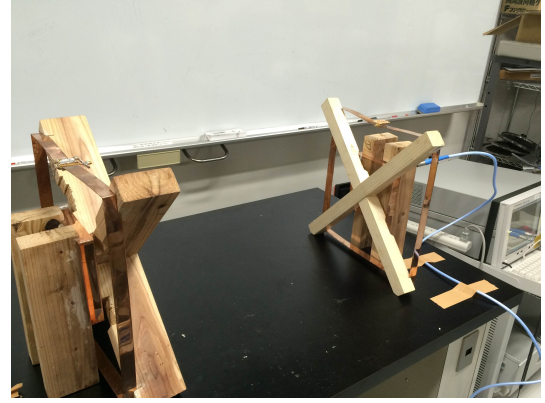


図 7 Mid-Range 方式の実験風景

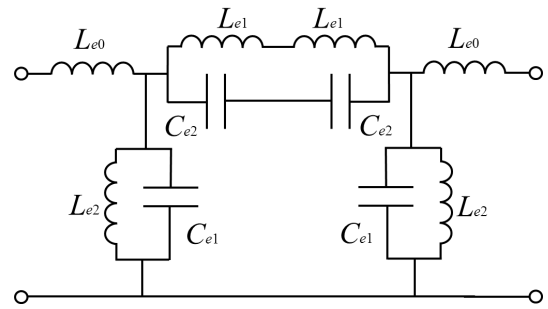


図 8 Mid-Range 方式無線電力伝送の等価回路

と求めることができる。Mid-Range 方式無線電力伝送の偶奇モードにおける入力インピーダンスと入力アドミタンスを測定して、式 (2)~(6) より等価回路の各素子を同定する。同定した回路の  $S$  パラメータを MATLAB を用いて計算をする。

## 7 結果

結果を示す。図 9, 図 10 に MATLAB で計算した影像インピーダンスの周波数特性を示す。

図 9 に示したように、誘導方式の影像インピーダンスは 11~20MHz で実数となる。50 $\Omega$  付近では周波数による変化が少なく、13~15MHz で 50 $\Omega$  に近くなる。図 10 に示したように、誘導方式の影像インピーダンスは 13.49~13.75MHz で実数となり、50 付近で周波数に対して変化が大きく、13.56MHz でのみ 50 $\Omega$  となる。

図 11, 12 に  $S$  パラメータの周波数特性とを示す。誘導方式の実験では、 $S_{21}$ [dB] は 14.02MHz の時に最大値-0.128dB をとった。Mid-Range 方式の実験では、 $S_{21}$ [dB] は 13.56MHz の時に最大値-1.54dB をとった。誘導方式と Mid-Range 方式とともに、実験で測定した  $S_{21}$ [dB] は回路計算やシミュレーションよりも低くなっているが、特徴は一致しているといえる。

## 8 まとめ

誘導方式と Mid-Range 方式では、伝送距離が大きく異なる。本研究では、同一の共振コイルを用いたが、誘導方式では 3cm でインピーダンス整合がとれたが、Mid-Range 方式では 70cm でインピーダンスの整合をとることができ

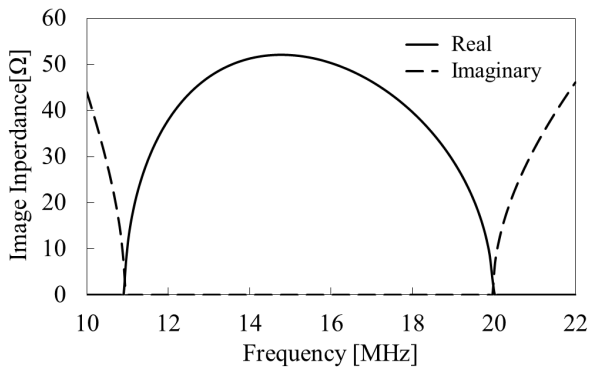


図9 誘導方式の映像インピーダンスの周波数特性

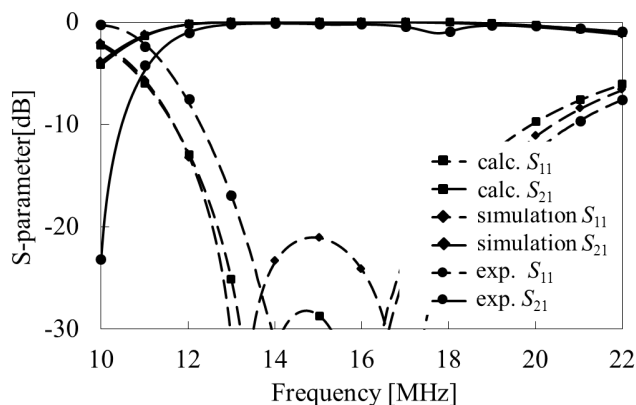


図11 誘導方式のSパラメータの周波数特性

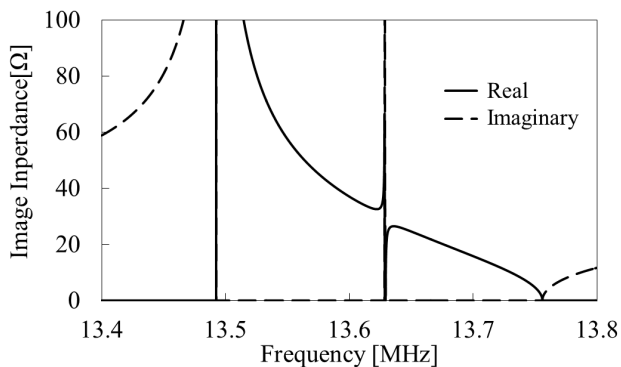


図10 Mid-Range方式の映像インピーダンスの周波数特性

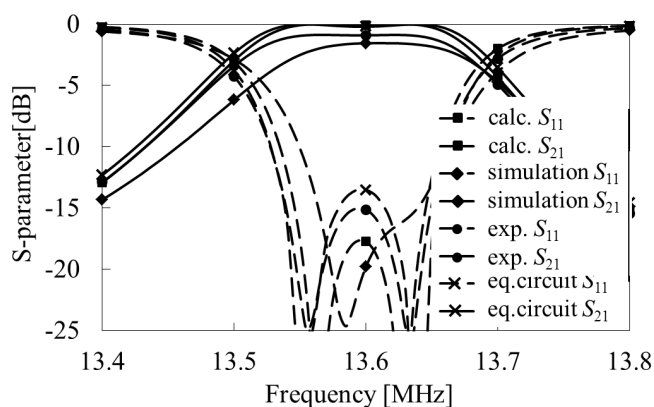


図12 Mid-Range方式のSパラメータの周波数特性

た。しかし、Mid-Range方式に比べて、導方式のほうが伝送効率の最大値が大きくなった。これは送受電系の伝送効率の最大値は $kQ$ 積の大きさによって決まるためである。 $kQ$ 積は、送受電系の結合の強さと $Q$ 値の積であり、この値が大きいほど伝送効率は高くなる。本研究において同一の共振コイルを用いているため、Mid-Range方式は励振コイルの損失の分だけ $Q$ 値が小さくなっている。また、誘導方式とMid-Range方式のインピーダンス整合をとることができる距離は、Mid-Range方式のほうが長いので、誘導方式よりも結合が小さくなっている。Mid-Range方式による中距離伝送で高効率を達成するためには、高い $Q$ 値を持つ送受電系が必要となるといえる。

### 謝辞

本研究に際して、ご指導頂いた奥村康行教授と藤井勝准教授、稲垣直樹先生に深謝致します。

### 参考文献

[1] N. Tesla, "Apparatus for transmitting electrical energy," US patent, 1902.  
 [2] 庄木裕樹, "ワイヤレス電力伝送の技術動向・課題と実用化に向けた取り組み," 信学技報, WPT2010-07, pp.19-24, 2010.  
 [3] 居村岳広, 堀洋一 "電磁界共振結合による伝送技術," 電学誌, Vol.129, No.7, pp.414-417, 2009.

[4] World Power Consortium, "System Description Wireless Power Transfer," 2010.  
 [5] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Jannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science Express, Vol.317, pp.83-86, 2007.  
 [6] A. Karalisa, J. D. Joannopoulos, M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," Annals of Physics, 323, pp.34-48, Elsevier, 2007.  
 [7] S.Y.R. Hui et al., "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," IEEE trans, Power Electronics, Vol.29, No.9, pp.4500-4511, 2014.  
 [8] FEKO ホームページ, <http://www.feko.info/>.  
 [9] 稲垣直樹, 堀智, "近傍界結合アンテナを用いる無線接続の基礎," 信学論 (B), vol.94-B, No.3, pp.436-443, 2011.  
 [10] 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映像インピーダンスに基づく特性評価," 信学論 (B), vol.94-B, No.3, pp.1076-1085, 2011.