

# 磁界共振結合を用いたワイヤレス電力伝送における 複数給電の等価回路化

正員 居村 岳広

上級会員 堀 洋一 (東京大学)

## Equivalent Circuit Theory of Multiple Antennas for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling

Takehiro Imura, Member, Yoichi Hori, Senior Member (The University of Tokyo)

Wireless power transfer technology has received much attention recently. Although the technology has been existed for a long time, never before has it received the current level of attention. The emergence of electromagnetic resonant coupling, which works over a large air gap and displacement with high efficiency has until recently not been possible with typical technologies. Until now, the fundamental characteristics of a paired transmitting antenna and receiving antenna have been determined. However, in practical use, some applications require multiple receiving antennas. In particular, this electromagnetic resonance coupling technology is desirable for powering multiple receiving antennas simultaneously because it is robust to displacement. The characteristics of multiple receiving antennas are known; however, their formulation has not been proposed. In this paper, the formulation and equivalent circuits of multiple antennas are proposed. The formulations tested by magnetic field analysis, and experiments. The results of these investigations agree with each other, confirming the validity of the formulation.

キーワード：複数給電，ワイヤレス電力伝送，磁界共振結合，アンテナ

Keywords : multiple fed, wireless power transfer, magnetic resonance coupling, antenna

### 1 はじめに

磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送は、大きなエアギャップや位置ずれが起きた際にも高効率の電力伝送が可能であるという理由で大きな注目を集めている。これまでに、等価回路化の提案や最大効率化の発表がなされているが、送信アンテナと受信アンテナは一對のみで検証されている<sup>(1)(2)</sup>。しかしながら、実用的な用途を考えると受信アンテナは1個に限った使用法だけではない。特に位置ずれに強いこの磁界共振結合方式においては、複数の受信アンテナに同時に給電する事への期待が大きい。現在までに、複数給電に関しては電磁界解析やデモンストレーションを通しての特性は知られているが、定式化されてこなかった。

本稿では、複数負荷への同時給電を検証し、等価回路化をおこなう。電磁界解析と実験を通して等価回路の妥当性を検証する。まず、最小構成として3素子の場合における等価回路化を第2章で行ない、N個における複数給電の等価回路化を第3章で行ない、第4章でまとめを述べる。

### 2 複数給電の等価回路 (3素子)

本稿での複数給電と述べた場合、複数負荷への給電の事

を指している。複数給電はエアギャップが小さい電力伝送方式の場合などは大きな需要がなかったが、エアギャップが大きく結合が弱い場合、もしくは、結合が弱くなってしまいう位置に受信アンテナがある場合においても磁界共振結合においては高効率で電力伝送ができる事がわかり、このような需要が生まれている。受信アンテナを平面に配置する場合、受信アンテナを送信アンテナの真上に配置するより結合が弱くなる。しかしながら磁界共振結合においては、Fig. 1の様に電力伝送を行なう事ができ、かつ高効率である。

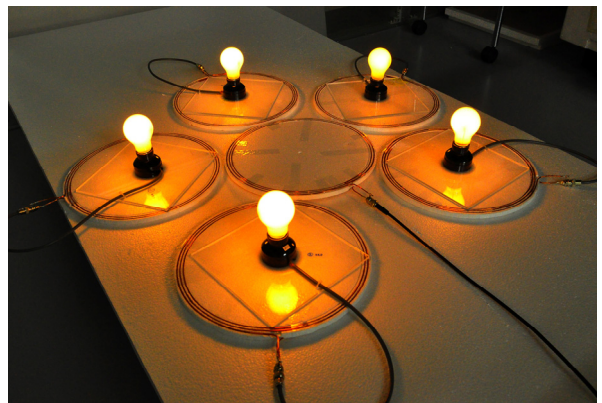


Fig. 1. 複数給電の電球点灯実験

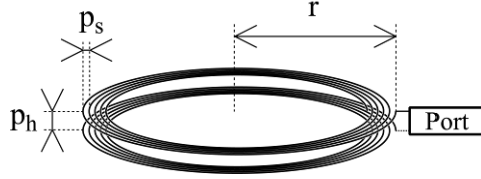


Fig. 2. スパイラルアンテナのパラメータ

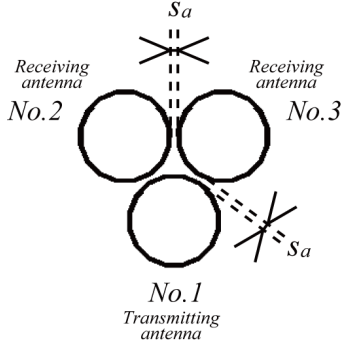


Fig. 3. 複数給電における受信アンテナ2個の構成,  $S_a = 10$  mm

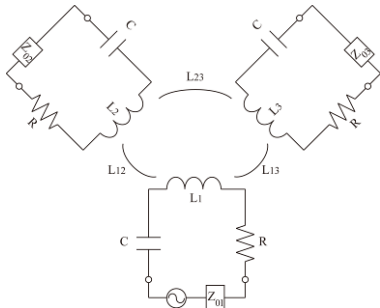


Fig. 4. 複数給電の等価回路 (3素子)

本稿では薄型かつ給電を容易にしたスパイラルアンテナを使用する (Fig. 2)。半径  $r=150\text{mm}$ , 5 巻, ピッチ  $p_s=5\text{mm}$ , 厚み  $10\text{mm}$  のオープンタイプのスパイラルアンテナを使用する<sup>(3)</sup>。このアンテナを 3 素子利用し、1 つを送信アンテナ、2 つを受信アンテナとし、平面配置とする (Fig. 3)。送信アンテナと受信アンテナの一对の電力伝送では、送信アンテナと受信アンテナのみの結合のみを考慮すれば良かったが、複数給電の場合、送信アンテナ間の相互インダクタンスだけでなく、受信アンテナ間での相互インダクタンスを考慮する必要がある。そのため、等価回路は Fig. 4 の様になり、受信アンテナ間の相互インダクタンス  $L_{23}$  を考慮する。 $R$  は内部抵抗と放射抵抗の合算である。以上より、行列式で表すと、インダクタンスは(1)式、インピーダンスは(2), (3)式,  $S$  パラメータは(4)式となり、特性インピーダンスと負荷インピーダンスを(5)式で表すと、(6)式から  $S$  パラメータは求まる。その際、(7)~(9)式を使用する。アンテナ No.3 への電力伝送効率  $\eta_{31}$  は(10)式で表され、アンテナ No.2 への電力伝送効率  $\eta_{21}$  は(11)式で表され、電力反射率  $\eta_{11}$  は(12)式となる。

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) & j\omega L_{12} & j\omega L_{13} \\ j\omega L_{21} & R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) & j\omega L_{23} \\ j\omega L_{31} & j\omega L_{32} & R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[Z_0] = \begin{bmatrix} Z_{01} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{02} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{03} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[S] = \left\{ [Z] + [I] \right\}^{-1} \left\{ [Z] - [I] \right\} \quad (6)$$

$$[Y_0] = [Z_0]^{-1} \quad (7)$$

$$[\hat{Z}] = [\sqrt{Y_0}] [Z] [\sqrt{Y_0}] \quad (8)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\eta_{31} = |S_{31}|^2 \quad (10)$$

$$\eta_{21} = |S_{21}|^2 \quad (11)$$

$$\eta_{11} = |S_{11}|^2 \quad (12)$$

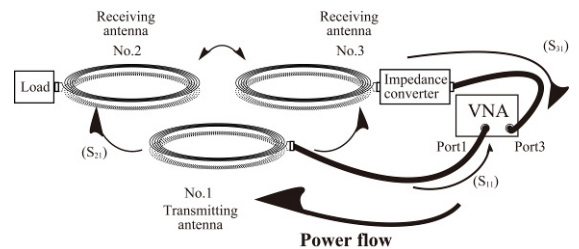
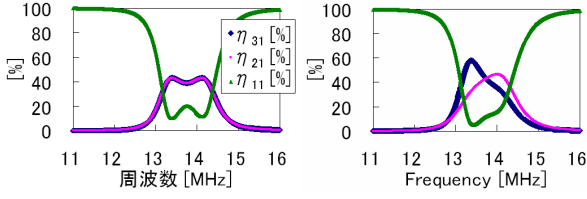
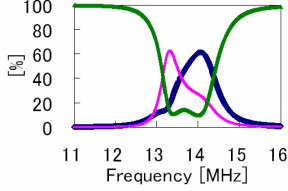


Fig. 5. 実験構成

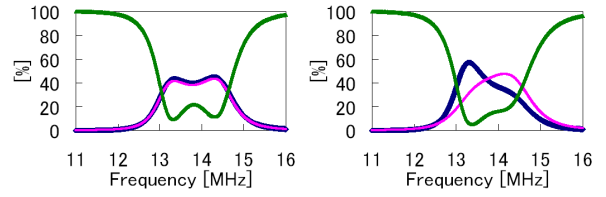


(a) (b)

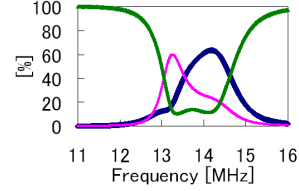


(c)

Fig. 6. 複数給電の等価回路結果 (3 素子),  $s_a=10$  mm。 (a)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=50\ \Omega$ ,  $Z_{03}=50\ \Omega$  (b)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=100\ \Omega$ ,  $Z_{03}=50\ \Omega$  (c)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=25\ \Omega$ ,  $Z_{03}=100\ \Omega$

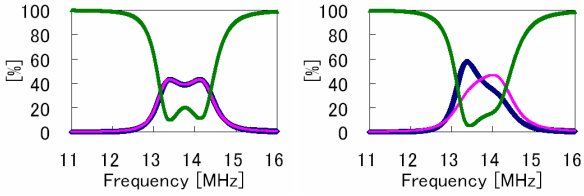


(a) (b)

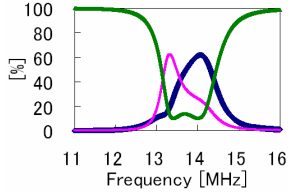


(c)

Fig. 8. 複数給電の実験結果 (3 素子),  $s_a=10$  mm。 (a)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=50\ \Omega$ ,  $Z_{03}=50\ \Omega$  (b)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=100\ \Omega$ ,  $Z_{03}=50\ \Omega$  (c)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=25\ \Omega$ ,  $Z_{03}=100\ \Omega$



(a) (b)



(c)

Fig. 7. 複数給電の電磁界解析結果 (3 素子),  $s_a=10$  mm。 (a)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=50\ \Omega$ ,  $Z_{03}=50\ \Omega$  (b)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=100\ \Omega$ ,  $Z_{03}=50\ \Omega$  (c)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=25\ \Omega$ ,  $Z_{03}=100\ \Omega$

この式の妥当性を評価するために、電磁界解析と実験を行なう。電磁界解析はモーメント法を利用する。実験はベクトルネットワークアナライザを用いて行なう。実験の構成をFig. 5に示す。ベクトルネットワークアナライザは、透過  $S_{31}$ ,  $S_{21}$  と反射  $S_{11}$  が測定できるので、式(10)と式(12)から電力伝送効率と電力反射率を計算する。

アンテナ 3 素子を利用し、受信アンテナ 2 素子として、Fig. 3の構成の時にに関して検証する。 $S_a=10$  mm とし、負荷の値を変更する。(a)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=50\ \Omega$ ,  $Z_{03}=50\ \Omega$  の場合、(b)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=100\ \Omega$ ,  $Z_{03}=50\ \Omega$  の場合、(c)  $Z_{01}=50\ \Omega$ ,  $Z_{02}=25\ \Omega$ ,  $Z_{03}=100\ \Omega$  の場合の 3 通りを検証する。自己インダクタンス  $L=11.0\ \mu\text{H}$ , キャパシタンス  $C=12.5\text{pF}$ , 内部抵抗  $R=0.77\ \Omega$ , 相互インダクタンス  $L_{12}=L_{13}=-L_{23}=0.542\ \mu\text{H}$ , 結合係数  $k=L_{12}/L=0.049$  である。等価回路による計算結果をFig. 6

に、電磁界解析による結果をFig. 7に、実験結果をFig. 8に示す。3 通り全ての条件において一致がみられ、等価回路の妥当性が確認できる。

### 3 複数給電の等価回路の一般化

これまでの議論は 3 素子の場合で行なった。しかしながら、負荷が複数個あっても、これまで述べてきた議論は同様に行なえる事を検証する。そこで、等価回路をアンテナ素子が  $N$  個の場合とし、行列式を一般化すると、式(1)から式(12)は、式(13)から式(19)に集約される。

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1,N-1} & L_{1,N} \\ L_{21} & L_{2,2} & \ddots & L_{2,N-1} & L_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ L_{N-1,1} & L_{N-1,2} & \ddots & L_{N-1,N-1} & L_{N-1,N} \\ L_{N,1} & L_{N,2} & \dots & L_{N,N-1} & L_{N,N} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1,N-1} & Z_{1,N} \\ Z_{21} & Z_{2,2} & \ddots & Z_{2,N-1} & Z_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Z_{N-1,1} & Z_{N-1,2} & \ddots & Z_{N-1,N-1} & Z_{N-1,N} \\ Z_{N,1} & Z_{N,2} & \dots & Z_{N,N-1} & Z_{N,N} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) & j\omega L_{12} & \dots & j\omega L_{1,N-1} & j\omega L_{1,N} \\ Z_{21} & R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) & \ddots & Z_{2,N-1} & j\omega L_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ j\omega L_{N-1,1} & j\omega L_{N-1,2} & \ddots & R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) & j\omega L_{N-1,N} \\ j\omega L_{N,1} & j\omega L_{N,2} & \dots & j\omega L_{N,N-1} & R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1,N-1} & S_{1,N} \\ S_{21} & S_{2,2} & \ddots & S_{2,N-1} & S_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ S_{N-1,1} & S_{N-1,2} & \ddots & S_{N-1,N-1} & S_{N-1,N} \\ S_{N,1} & S_{N,2} & \cdots & S_{N,N-1} & S_{N,N} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[Z_0] = \begin{bmatrix} Z_{01} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & Z_{02} & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & Z_{0,N-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & Z_{0,N} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\eta_{N1} = |S_{N1}|^2 \quad (19)$$

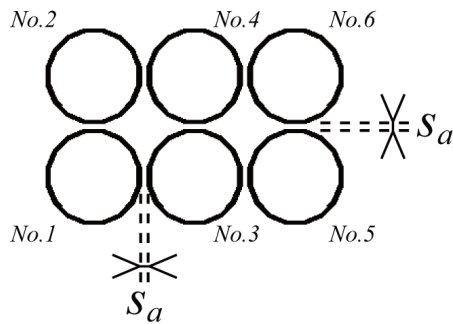


Fig. 9. 複数給電における受信アンテナ 5 個の構成,  $S_a = 10$  mm

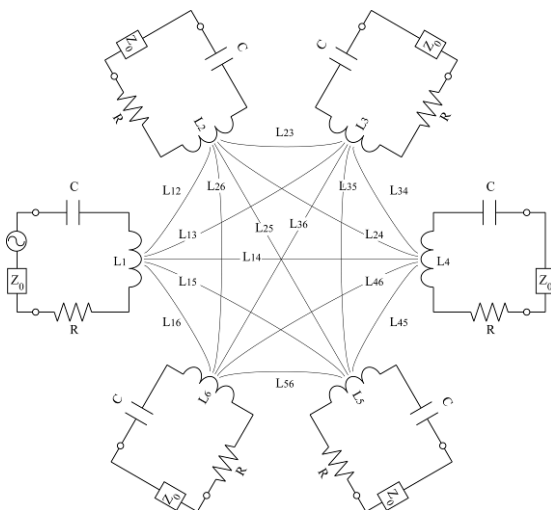


Fig. 10. 複数給電の等価回路 (6 素子)

3 素子の時同様に、6 個のアンテナを使用して複数負荷の値を変化させ、その妥当性を評価する (Fig. 9)。送信アンテナは No.1 でそれ以外は受信アンテナである。等価回路は Fig. 10 となる。 $S_a = 10$  mm とし負荷の値を変更する。(a) 全て  $50 \Omega$  の場合、(b)  $Z_{01} = Z_{02} = Z_{03} = Z_{04} = 50 \Omega$ ,  $Z_{05} = 200 \Omega$ ,  $Z_{06} = 300 \Omega$  の場合の 2 通りを検証する。等価回路での計算結果を Fig. 11 に、電磁界解析の結果を Fig. 12 に示す。等価回路において N 素子まで一般化し、6 素子の場合で検証した結果、電磁界解析結果と等価回路の一致が確認でき、等価回路の妥当性が示された。

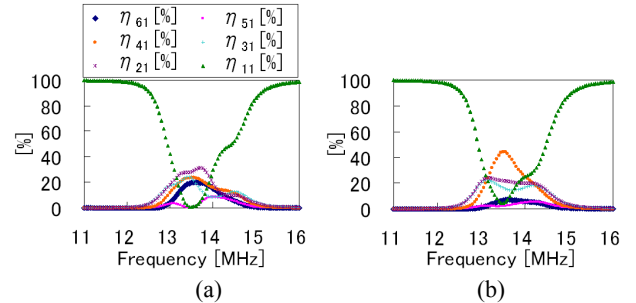


Fig. 11. 複数給電の等価回路結果 (6 素子), (a) 全て  $50 \Omega$  (b)  $Z_{01} = Z_{02} = Z_{03} = Z_{04} = 50 \Omega$ ,  $Z_{05} = 200 \Omega$ ,  $Z_{06} = 300 \Omega$

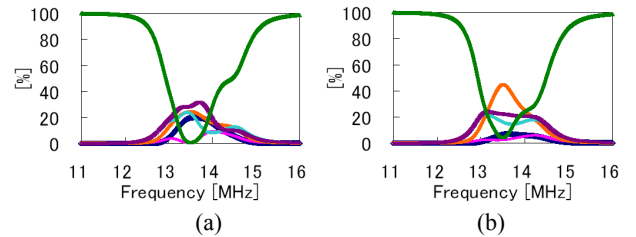


Fig. 12. 複数給電の電磁界解析結果 (6 素子), (a) 全て  $50 \Omega$  (b)  $Z_{01} = Z_{02} = Z_{03} = Z_{04} = 50 \Omega$ ,  $Z_{05} = 200 \Omega$ ,  $Z_{06} = 300 \Omega$

## 4 まとめ

送信アンテナと受信アンテナの一对の等価回路化をこれまでには行なってきたが、本稿では、複数の受信アンテナへの同時給電である複数給電における等価回路化を行なった。最小構成である 3 素子の場合から検証を行ない、等価回路におけるアンテナ素子を N 個まで一般化した。今回の検証においては最大 6 素子まで検証し、N 個への拡張の妥当性を示した。今後は複数給電における効率の最適化などを引き続き検討して行く予定である。

## 文 献

- (1) 居村 岳広, 岡部 浩之, 内田 利之, 堀 洋一, “等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究”, 電学論D, Vol. 130, No. 1, pp.84-92 (2010).
- (2) 居村岳広, 堀洋一, “等価回路から見た磁界共振結合におけるワイヤレス電力伝送距離と効率の限界値に関する研究”, 電学論D, Vol. 130, No. 10, pp.1169-1174 (2010).
- (3) Takehiro Imura, Hiroyuki Okabe, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, “Study on Open and Short End Helical Antennas with Capacitor in Series of Wireless Power Transfer using Magnetic Resonant Couplings”, IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference, 2009.11