

電界共振結合方式のワイヤレス電力伝送における 隣接する銅板間の距離を変化させたときの影響の検証

桑田 諒人* 居村 岳広 堀 洋一 (東京理科大学)

Verification of the Effect of Varying the Distance between Adjacent Copper Plates
on Wireless Power Transfer by Electric Resonant Coupling
Ryoto Kuwata*, Takehiro Imura, Yoichi Hori
(Tokyo University of Science)

One of the characteristics of field resonant coupling is that there is a high degree of freedom in the distance between adjacent copper plates. In this study, the effects of varying the distance between adjacent copper plates were investigated using theoretical equations and electromagnetic field analysis, and it was found that the efficiency increased, and the output power decreased when they were farther apart.

キーワード：ワイヤレス電力伝送，電界共振結合，隣接銅板
(Wireless Power Transfer, Capacitive Resonance Coupling, Adjacent Copper Plates)

1. 序論

ワイヤレス電力伝送(WPT)は電源からケーブルを繋ぐことなく、対象の機器に電力を送る技術である⁽¹⁾⁽²⁾。この技術によって簡単に充電が可能になり、より便利な社会になることが期待されている。WPTには様々な方式が存在するが、本研究では電界共振結合方式について扱う。電界共振結合方式は金属プレートによって構成される伝送方式であり、送電側の電極プレートと受電側の電極プレートでコンデンサを構成することで電力を伝送している。そのコンデンサと共振するようにコイルを接続することで、送電距離を長くしても伝送効率が高くなるようにしている⁽³⁾⁽⁴⁾。また、電界共振結合方式の利点としては、金属異物によって発熱などが起こらないことや他の伝送方式と比べて安価で軽量であること、水平4プレートの銅板構成では水平方向の銅板間距離の自由度が高いことなどが挙げられる。欠点としては水等の誘電体の異物が存在すると送電効率が低下する問題や、コンデンサによる伝送なので絶縁破壊による耐圧を考える必要があるため、出力電力が小さくなってしまうことなどがある⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

本研究では、横方向の銅板間距離を変化させたときの出力電力と効率の変化についての検証を行う。電界共振結合方式にはさまざまな特徴が存在するが、その中の一つの水平方向の距離の自由度が高いというものについては研究がされていない。そのため、多くの研究ではどんな銅板の大きさであっても、横方向の銅板間距離を5cmや10cmで固定して電力

伝送を行っている。そこで、本研究では横方向の銅板間距離による出力電力や効率への影響を検証している。

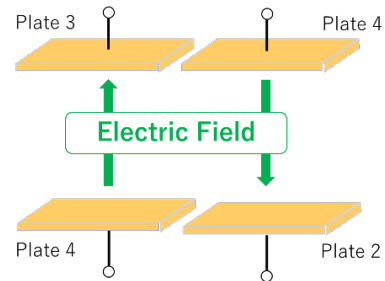


Fig.1 電界共振結合方式の構成

2. 電界結合方式の構成

本研究で用いた水平4プレート方式の銅板構成をFig.2に示す。この銅板構成は送受電の銅板同士を水平方向に並べており、Fig.2ではPlate1,2とPlate3,4がそれぞれ送電または受電プレートの組である。

Fig.2の銅板構成における回路をFig.3に示す。Plateと回路の容量の対応関係としてPlate1,2間の容量が C_{12} 、Plate1,3間の容量が C_{13} としている。またFig.3の回路の π 形等価回路をFig.4に示す。

Fig.4の等価回路における C_1, C_2, C_m はそれぞれ送電側自己容量、受電側自己容量、相互容量と定義され、Fig.3の容量を用いると以下の式で示される。

$$C_1 = C_{12} + \frac{(C_{13} + C_{14})(C_{23} + C_{24})}{C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}} \quad (1)$$

$$C_2 = C_{34} + \frac{(C_{13} + C_{23})(C_{14} + C_{24})}{C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}} \quad (2)$$

$$C_m = \frac{C_{24}C_{13} - C_{14}C_{23}}{C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}} \quad (3)$$

また、結合係数 k は式(4)である。

$$k = \frac{C_m}{\sqrt{C_1 C_2}} \quad (4)$$

本研究で用いた回路を Fig.5 に示す。この回路では等価回路を共振させるために銅板に対して直列にコイルを配置する Series-Series(S-S)共振の回路トポロジを採用し、電源には電圧源、負荷には最適負荷(効率が最大となるような抵抗)を用いる。

先行研究⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾から S-S 共振回路における共振条件、効率、最適負荷、出力電力の理論式は以下の式である。

$$L_1 = \frac{1}{\omega^2(1-k^2)C_1}, \quad L_2 = \frac{1}{\omega^2(1-k^2)C_2} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_2 r_2 R_L}{\{(1+k^2 Q_1 Q_2)r_2 + R_L\}(r_2 + R_L)} \quad (6)$$

$$R_L = r_2 \sqrt{1+k^2 Q_1 Q_2} \quad (7)$$

$$P_{out} = \frac{k^2(1-k^2)^2 Q_1 Q_2 r_1 r_2 R_L |V_{in}|^2}{r_1 \{(1-k^2)(r_2 + R_L) + k^2 Q_1 Q_2 r_2\}^2} \quad (8)$$

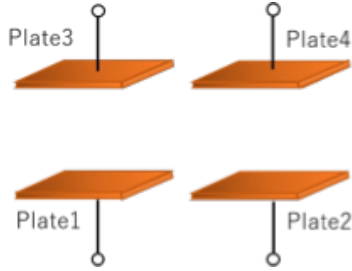


Fig.2 本論文での銅板構成

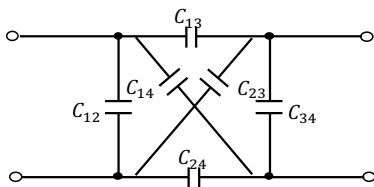


Fig.3 電界結合方式での回路

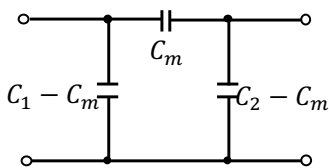


Fig.4 π 形等価回路

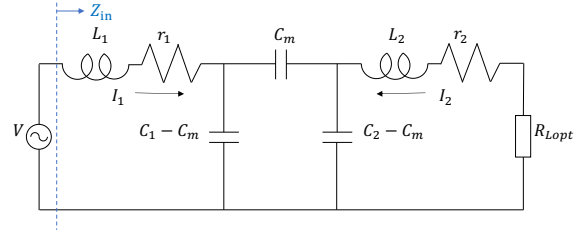


Fig.5 S-S 共振時の π 形等価回路⁽¹¹⁾

3. 理論式での検証

銅板構成と S-S 共振回路の理論式から隣接する銅板間距離を変化させたときの影響を検証する。

〈3・1〉銅板構成からの考察

Fig.2 の銅板構成について横方向を x 、縦方向(伝送方向)を z 、斜め方向を y 方向と置く。本研究では x 方向の銅板間の距離のみを変化させる。ここで

$$C_x = C_{12} = C_{34} \quad C_y = C_{14} = C_{23} \quad C_z = C_{13} = C_{24} \quad (9)$$

とおくと銅板を x 方向に離していった場合には縦方向の C_z は変化せず、横と斜めの C_x, C_y は減少する。

次に自己容量 C_1, C_2 と相互容量 C_m の変化を考察する。式(9)を用いて式(1)~(3)をまとめると次式(10)になる。

$$C_1 = C_2 = C_x + \frac{C_y + C_z}{2}, \quad C_m = \frac{C_z - C_y}{2} \quad (10)$$

(20)式において C_x, C_y が減少していくと、自己容量 C_1, C_2 は減少し相互容量 C_m は増加する。また、結合係数 k は(4)式において $C_1 = C_2$ とすると

$$k = \frac{C_m}{C_1} \quad (11)$$

となる。自己容量 C_1 は減少し相互容量 C_m は増加するため銅板を x 方向に離していった場合には結合係数 k は増加する。

〈3・2〉効率の理論式からの検証

式(6)から銅板を x 方向に離したときの効率の特性を検証する。回路の条件式が下式である。

$$Q = Q_1 = Q_2, \quad r = r_1 = r_2 \quad (12)$$

式(12)の条件のもと式(6)をまとめると、

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{2}{k^2 Q^2 \sqrt{1+k^2 Q^2}} + \frac{2}{\sqrt{1+k^2 Q^2}} + \frac{2}{k^2 Q^2}} \quad (13)$$

となる。 Q 一定で銅板を x 方向に離したときの結合係数 k は増加し、そのときの式(13)の分母は減少するため効率は増加する。

〈3・3〉出力電力の理論式からの検証

式(8)から銅板を x 方向に離したときの出力電力の特性を検証する。式(12)の条件のもとでまとめると、

$$P_{out} = \frac{|V_{in}|^2}{r \left(\frac{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q^2})^2}{k^2 Q^2 \sqrt{1 + k^2 Q^2}} + \frac{2(1 + \sqrt{1 + k^2 Q^2})}{\sqrt{1 + k^2 Q^2}(1 - k^2)} + \frac{k^2 Q^2}{\sqrt{1 + k^2 Q^2}(1 - k^2)} \right)} \quad (14)$$

となる。ここで $k^2 Q^2 \gg 1$ であるとし、 $\sqrt{1 + k^2 Q^2} = kQ$ と近似を行うと次式(15)となる。

$$P_{out} = \frac{|V_{in}|^2}{r \left(\frac{(1 + kQ)^2}{k^3 Q^3} + \frac{2(1 + kQ)}{kQ(1 - k^2)} + \frac{kQ}{(1 - k^2)} \right)} \quad (15)$$

ここで $k^2 Q^2 \gg 1$ のときには、 $\frac{kQ}{(1 - k^2)} \gg \frac{2(1 + kQ)}{kQ(1 - k^2)} + \frac{(1 + kQ)^2}{k^3 Q^3}$ であるので P_{out} の分母の変化では $\frac{kQ}{(1 - k^2)}$ の変化が支配的である。銅板を x 方向に離れたときには結合係数 k は増加し、 $\frac{kQ}{(1 - k^2)}$ が増加、(15)式の分母は増加するため $k^2 Q^2 \gg 1$ では全体の P_{out} は減少する。

次に $k^2 Q^2 \ll 1$ であるとし、 $\sqrt{1 + k^2 Q^2} = 1$ に近似を行うと式(14)は次式(16)となる。

$$P_{out} = \frac{|V_{in}|^2}{r \left(\frac{4}{k^2 Q^2} + \frac{4}{(1 - k^2)} + \frac{k^2 Q^2}{(1 - k^2)} \right)} \quad (16)$$

$k^2 Q^2 \ll 1$ のときには、 $\frac{4}{k^2 Q^2} \gg \frac{4}{(1 - k^2)} + \frac{k^2 Q^2}{(1 - k^2)}$ であるので、 P_{out} の分母の変化では $\frac{4}{k^2 Q^2}$ の変化が支配的である。銅板を x 方向に離れたときに結合係数 k は増加し、 $\frac{4}{k^2 Q^2}$ が減少するため(16)式の $k^2 Q^2 \ll 1$ では P_{out} は増加する。

よって P_{out} は結合係数 k が増加すると $k^2 Q^2 \ll 1$ では増加し、 $k^2 Q^2 \gg 1$ では減少するため、その間で最大値を取ることが考察できる。

また、詳細については後述するが実際の動作領域では結合係数の範囲は $k^2 Q^2 \gg 1$ であるので、結合係数 k が増加すると出力電力 P_{out} は減少すると考察できる。

〈3・4〉理論式からのグラフ

Fig.6 に式 (14)を結合係数 k について変化させたグラフを示す。また、Fig.7 に (13)を結合係数 k について変化させたグラフを示す。このときの回路条件は $Q = 300$ 、内部抵抗 $r = 2\Omega$ であるとする。Fig.6 のグラフから結合係数 $k = 0.007$ のときに最大出力電力 38.6W を取り、Fig.7 から最大出力電力をとる結合係数 $k = 0.007$ のときの効率率は 39.9% である。このように $Q = 300$ 、 $r = 2\Omega$ では $k \ll 1$ の時に最大電力をとるが効率は非常に悪いことが確認できる。銅板が存在した場合には、銅板を x 方向に変化させていっても取ることでできない結合係数が存在する。そのため、どの結合係数の範囲を本研究の銅板構成で取ることができるのかについても確かめる必要がある。

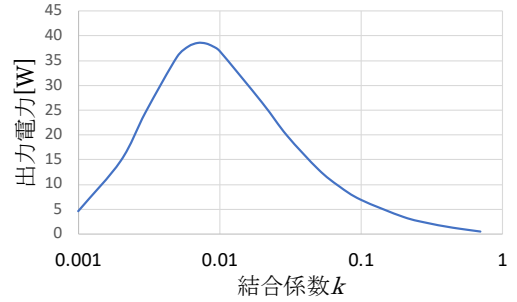


Fig.6 結合係数に対する出力電力の変化

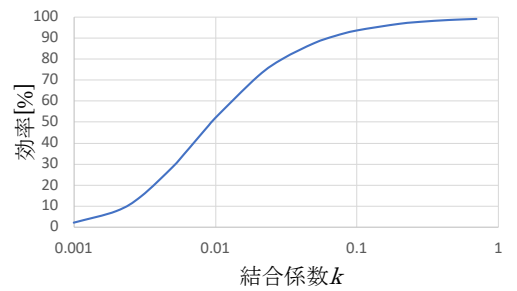


Fig.7 結合係数に対する効率の変化

4. 電磁界解析による検証

本論文ではモーメント法の電磁界解析ソフト FEKO を用いて解析を行った。解析の流れとしては、オープンショート法を用いて C_1 、 k 、 C_m のパラメータを求め、そこから L_1 、 r_1 を計算し、S-S 共振回路を作成して解析を行う。

〈4・1〉オープンショート法によるパラメータ解析

本研究では C_1 、 k 、 C_m のパラメータを求めるためにオープンショート法を用いて解析を行った。オープンショート法は回路に接続されている負荷について開放と短絡を行い、その違いから必要なパラメータを得る方法である。オープンショート法を Fig.4 の回路に適応した回路を Fig.8 に示す。このときの回路について $C_{1,op}$ をオープンでの入力側からみた容量、 $C_{1,sh}$ をショートでの入力側からみた容量とする。このとき C_1 、 k 、 C_m について回路の式を考えると、

$$C_{1,op} = C_1(1 - k^2), \quad C_{1,sh} = C_1, \quad k = \sqrt{1 - \frac{C_{1,op}}{C_1}} \quad (17)$$

となる。これによって、Fig.8 の回路を解析することで $C_{1,op}$ 、 $C_{1,sh}$ を調べ、 C_1 、 k 、 C_m を具体的な値として得られる。

Fig.9 に電磁界解析の様子を示す。このように x 方向の銅板間距離を離していくことで解析を行う。そのときの本研究での解析条件を Table1 に示す。Fig.10,11 に x 方向の銅板間距離を離していったときの C_1 、 C_m 、 k の変化のグラフを示す。解析結果から x 方向の銅板間距離を離していくと C_1 は減少し、

C_m と結合係数 k は増加している。この結果は銅板構成からの考察と同じである。Fig.10, 11 の結果から L_1 , r_1 の値を求める。共振インダクタンス L_1 は(5)式、共振コイルの内部抵抗 r_1 は Q 値と L_1 から

$$r_1 = \frac{\omega L_1}{Q_1} \tag{18}$$

で求められる。このとき計算できる L_1 , r_1 の結果を Fig.12,13 に示す。この結果から得られたパラメータを用いて Fig.5 の S-S 共振回路を作成して解析を行う。

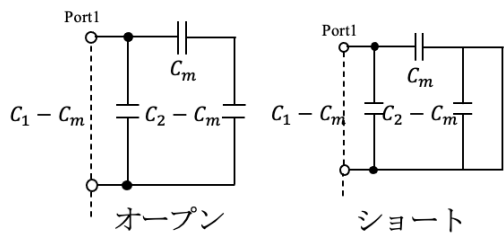


Fig.8 オープンショート法での回路

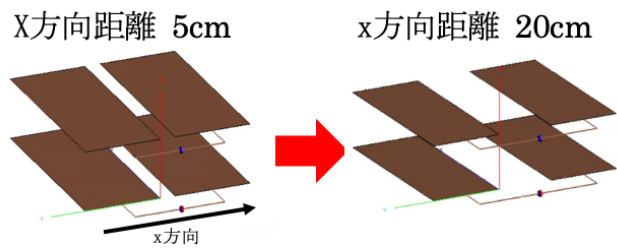


Fig.9 FEKO での解析の様子

Table 1 解析条件

周波数	f	13.56 MHz
銅板サイズ	-	60cm×25cm
伝送距離	z	20 cm
入力電圧	V	30 V
x 方向の距離	x	1～20 cm

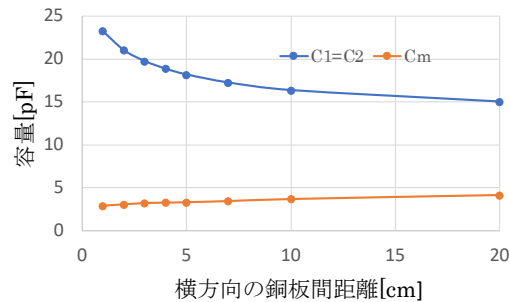


Fig.10 x 方向の距離に対する C_1 , C_m

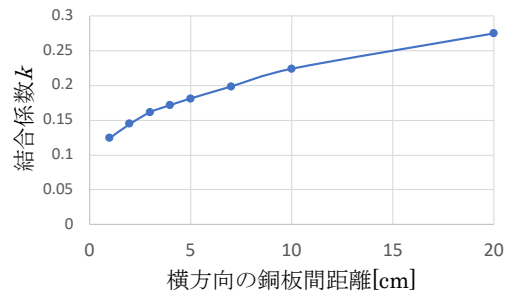


Fig.11 x 方向の距離に対する結合係数 k

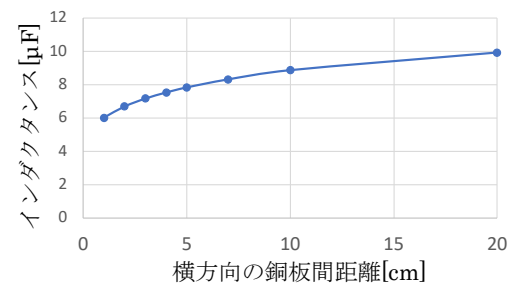


Fig.12 x 方向の距離に対する L_1

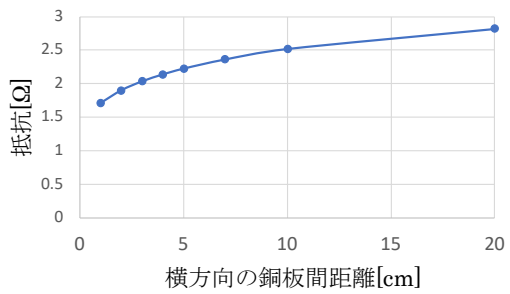


Fig.13 x 方向の距離に対する r_1

〈4・2〉 S-S 共振回路における電力解析

4・1 節で求められたパラメータを用いて S-S 共振回路を作成する。電磁界解析での S-S 共振回路を Fig.14 に示す。解析条件は Table.1 の条件であり、x 方向の銅板間距離を離して解析する。解析結果の入出力電力のグラフを Fig.15、効率のグラフを Fig.16 に示す。Fig.15 の結果から、x 方向の銅板間距離を離していくと出力電力は減少していくことが確かめられる。また、Fig.16 の結果から x 方向の銅板間距離を離していくと効率は上昇していくことも確かめられる。Fig.15,16 の結果から横方向の銅板間距離が 1cm と 20cm について比較を行ったとき、1cm は 20cm に比べて効率は 2.5%低下するが出力電力は 3.4 倍に増加している。

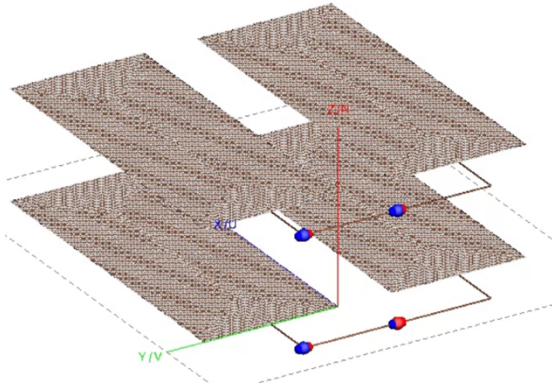


Fig.14 FEKO での S-S 共振回路の解析

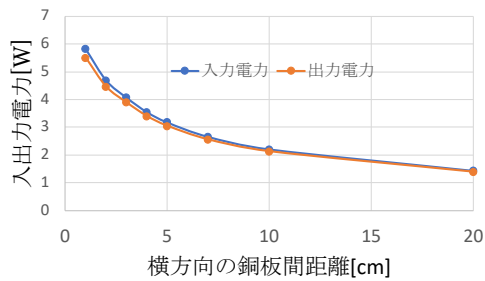


Fig.15 x 方向の距離に対する入出力電力

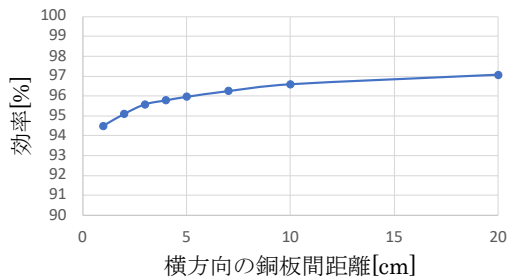


Fig.16 x 方向の距離に対する効率

〈4.3〉 理論値との比較

4.2 節で求められた出力電力と効率について理論値との比較を行う。出力電力の理論式(8)と効率の理論式(6)に 4.1 で解析と計算から求めたパラメータを代入した値を x 方向の銅板間距離が変化したときの理論値とする。Fig.17,18 に理論値と 4.2 での解析結果の比較のグラフを示す。この結果から出力電力と効率の両方で理論値と解析結果は同様の傾向を示している。つまり x 方向の銅板間距離が離れるほど出力電力は下がっていき、効率は上がっている。

次に 3 章で求めた理論式の結合係数の変化によるグラフとの比較を行う。そのために 4.2 節で求めた Fig.15,16 の出力電力と効率の解析結果のグラフについて横軸が距離だったものを結合係数 k になるように変換した。このとき、Fig.11 の結果を用いて変換している。変換したグラフを 3 章の Fig.6,7 の

グラフに重ねたグラフを Fig.19,20 に示す。グラフのオレンジの部分解析結果から得られた部分である。電磁界解析の結果は理論式から得られたグラフと一致している。電磁界解析の結合係数の範囲は 0.1~0.3 であり、この範囲が銅板の x 方向の距離によって変化する範囲である。そのため、結合係数 $k = 0.007$ 付近で最大出力電力をとることが予想されるが、本研究の銅板構成である水平 4 プレート方式では、銅板を水平に置く必要があることから銅板同士を近づけられる範囲が制限され、結合係数の取りうる範囲は狭くなっているため、最大出力電力をとることは困難である。本研究の銅板構成では横方向の銅板間距離を離れたときには結合係数が増加するので、効率が向上し、出力電力が減少すると判断できる。

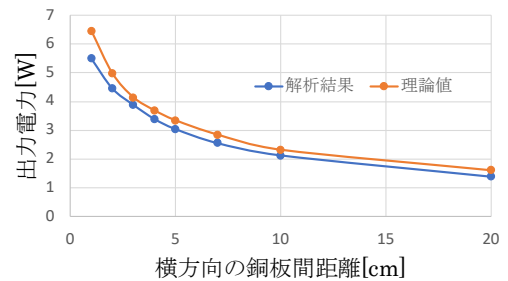


Fig.17 理論値との出力電力の比較

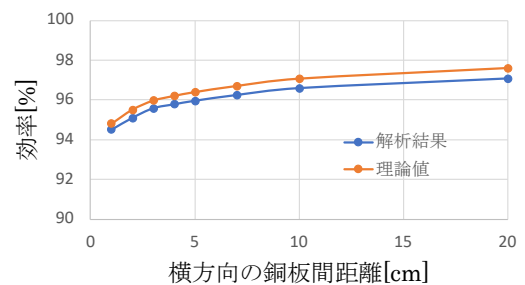


Fig.18 理論値との効率の比較

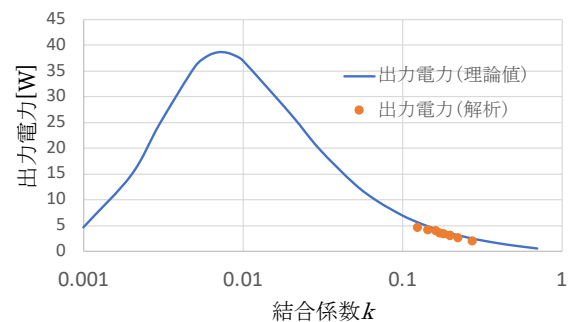


Fig.19 出力電力での理論式と解析の比較

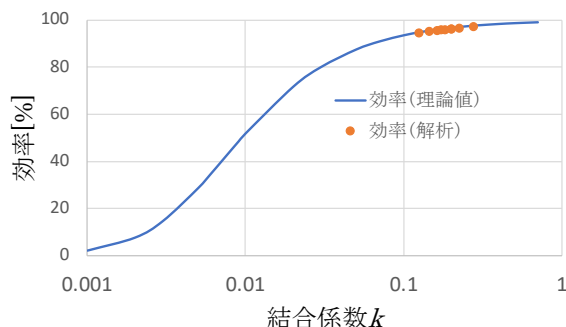


Fig.20 効率での理論式と解析の比較

5. 結論

本研究では、理論式と電磁界解析の結果から電界共振結合方式のS-S共振回路における隣接する銅板間距離を変化させたときの特性を明らかにした。隣接する銅板間距離を離れたときには結合係数が増加するため、S-S共振回路では効率が向上して $k^2Q^2 \gg 1$ では出力電力は減少することを理論式と電磁界解析から明らかにした。つまり電力と効率は $k^2Q^2 \gg 1$ ではトレードオフであるが、効率を高めるならば横方向の銅板間距離を離れた方が良いことを示した。

また、理論式において Q 値が300、コイルの内部抵抗 $r=2\Omega$ とくと、結合係数 $k=0.007$ で最大出力電力38.6Wを取るが、そのときの効率は39.9%と低いことが確かめられた。

電磁界解析で隣接する銅板間距離を1cm~20cmで変化させたときに結合係数の取りうる範囲は0.1~0.3であり、横方向の銅板間距離を近づけると効率の低下が3%で出力電力が3倍となった。電磁界解析と理論式の比較から解析でも結合係数 $k=0.007$ 付近で最大出力電力であることが予想されるが、銅板構成からその結合係数は取ることは難しい。そのため、本研究の銅板構成では横方向の銅板間距離を離れたときには結合係数が増加するので、効率が向上し、出力電力が減少すると判断できた。

今後の検討として本研究ではS-S共振回路を用いたがそれ以外のトポロジーでの影響や伝送距離による結合係数の変化による影響などについてなどの研究が挙げられる。

文 献

- (1) André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher and Marin Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science, Vol. 317, no. 5834, p.83-86, 6.July.2007.
- (2) Franklin Hadley, "MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords", MIT News, 7.June.2007.

- (3) T. Imura and Y. Hori, "Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 10, pp. 4746-4752, Oct. 2011,
- (4) T. Imura, H. Okabe, T. Uchida and Y. Hori, "Study of Magnetic and Electric Coupling for Contactless Power Transfer Using Equivalent Circuits -Wireless Power Transfer via Electromagnetic Coupling at Resonance-, " *The Institute of Electrical Engineers of Japan*, vol.130, No.1, pp.84-92, 2010,
- (5) M.Z.Erel, K.C.Bayindir, M. T. Aydemir, S. K. Chaudhary and J. M. Guerrero, "A Comprehensive Review on Wireless Capacitive Power Transfer Technology: Fundamentals and Applications," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 3116-3143, 2022.
- (6) 増田 満 : "共振電界結合によるワイヤレス電力伝送," *エレクトロニクス実装学会誌*, vol.18 No.5 pp. 327-330, 2015
- (7) H. Namiki, T. Imura and Y. Hori, "Comparison of Multiple Circuits Including LCL in Inductive Power Transfer and Capacitive Power Transfer," *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, Singapore, 2023, pp. 1-7.
- (8) K. Suzuki, K. Hata, T. Imura and Y. Hori, "SS and SP Topology Analysis for Capacitive Power Transfer with Resonance Coupling Based on Power Factor Consideration," *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, USA, 2018, pp. 4846-4851,
- (9) S. Kuroda and T. Imura, "Derivation and Comparison of Efficiency and Power in Non-resonant and Resonant Circuit of Capacitive Power Transfer," *2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, Seoul, Korea (South), 2020, pp. 152-157.
- (10) S. Kuroda and T. Imura, "Resonant circuit topology Comparison and CC / CV Characteristic Evaluation Considering the Difference in Power Supply in Capacitive Wireless Power Transfer circuits," *IECON 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Toronto, ON, Canada, 2021, pp. 1-5.
- (11) T. M. Mostafa, D. Bui, A. Muharam, A. P. Hu and R. Hattori, "Load Effect Analysis and Maximum Power Transfer Tracking of CPT System," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular*