

面積制限下における電界共振結合型 ワイヤレス電力伝送用銅電極寸法の最適化

学生員 桑田 諒人 正員 居村 岳広 フェロー 堀 洋一（東京理科大学）

Optimization of Copper Electrode Dimensions
for Electric Resonant Coupled Wireless Power Transmission under Area Limitation
Ryoto Kuwata, Student Member, Takehiro Imura, Member,
Yoichi Hori, Fellow (Tokyo University of Science)

In recent years, wireless power transmission is being used to charge various devices. However, Capacitive power transfer (CPT) has not been sufficiently studied with regard to copper plate size when the available area is limited. In this paper, we confirm from theory that there is an optimum copper plate size for a limited area considering the influence of the copper plate size and the distance between adjacent copper plates, and we analyze the case where the usable area is 600 mm x 600 mm using simulation. The results showed that the highest efficiency of 96.97% was obtained for a transmission distance of 50 mm with a copper plate size of 600 mm x 210 mm (copper plate ratio of 70%). It was also confirmed that the optimum copper plate size decreases as the transmission distance increases.

キーワード：ワイヤレス電力伝送，電界結合方式，面積制限，銅板サイズ，最適化

Keywords : wireless power transfer, capacitive power transfer, area limitation, plate size, optimization

1. 序論

ワイヤレス電力伝送（Wireless Power Transfer: WPT）は、電源からケーブルを用いることなく機器に電力を供給する技術であり、近年、電気自動車や医療機器など多様な分野で応用されている⁽¹⁾。短距離での WPT には、主に電界共振結合方式（Capacitive Power Transfer: CPT）と磁界共振結合方式（Inductive Power Transfer: IPT）の 2 方式があり、CPT は構成が金属プレートのみであるため、IPT と比較して安価かつ軽量である。また、CPT は磁性体を使用しないため、発熱による温度上昇が小さいという利点を有する。これらの特長から、幅広いアプリケーションへの展開が期待されており、先行研究⁽²⁾においても CPT の実用化を目指したさまざまな検討が行われている。しかし、充電対象となるデバイスの大きさにより、実際の設置面積には制限が生じるため、限られたスペース内での CPT システムの効率最適化が重要な課題である。特に、銅板の横幅が CPT の伝送効率に与える影響については、これまでの研究において十分な検証がなされていないため、現行の CPT デバイスでは最適化が不十分であり、不要な損失が発生している可能性がある。

そこで本研究では、使用可能面積が制限された状況において、銅板の横幅が伝送効率に与える影響を明らかにし、

さまざまな伝送距離における効率についての最適な銅板の横幅をシミュレーションから導出することを目的とする。

2. 研究概要

〈2・1〉 CPT について CPT は銅板に電圧を加えることで静電誘導を起こし、対向する銅板に電流が流れることを利用した送電方式である。本研究では送電側に 2 枚、受電側に 2 枚並べて銅板を配置する水平 4 プレート方式を採用している。その場合の充電されるデバイスのイメージ図を Fig.1 に示す。このように銅板を配置することを想定している。

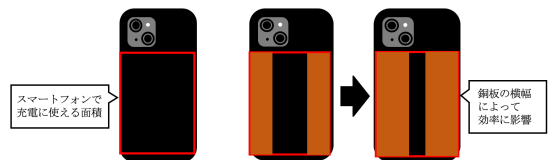


Fig. 1. 充電デバイスのイメージ図

〈2・2〉 本研究での構成 水平 4 プレート方式の銅板構成を Fig.2 に示す。ここで銅板の横幅を x 、隣接する銅板間距離を d 、伝送距離を g 、銅板の縦幅を l とする。また、600 mm x 600 mm の面積での電力伝送を検証しており、銅板の縦幅 l 、隣接する銅板間距離 d と銅板の横幅 x は式(1)で表

すことができる。

$$l = 600, 2x + d = 600 \quad (1)$$

続いて銅板間の容量を Fig.3 に示す。対称性を考慮することで、Plate 1と2間の容量と Plate3,4間の容量を C_{hol} 、Plate1,3間と Plate2,4間の容量を C_{vert} 、Plate1,4間と Plate2,3間の容量を C_{diag} としている。また、回路の簡単化のために用いる π 形等価回路を Fig.4 に示す。Fig.4の等価回路における C, C_m はそれぞれ自己容量と相互容量と定義され、Fig.3 および Fig.4 の容量を用いて式(2)(3)のように表せる。また、結合係数 k は式(4)で定義する。

$$C = C_{hol} + \frac{C_{vert} + C_{diag}}{2} \quad (2)$$

$$C_m = \frac{C_{vert} - C_{diag}}{2} \quad (3)$$

$$k = \frac{C_m}{C} \quad (4)$$

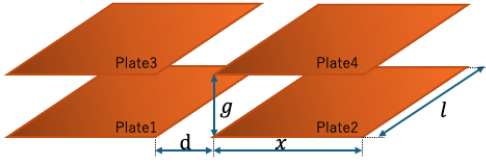


Fig.2. 銅板の寸法

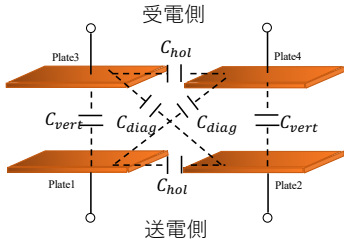


Fig.3. CPT の水平 4 プレート間の容量構成

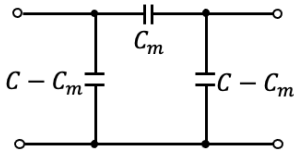


Fig.4. π 型等価回路

〈2・3〉 回路トポロジー

本研究での共振回路を Fig.5 に示す。この回路は自己容量 C に対して共振するコイルを送受電で直列に配置した S-S(Series-Series)の共振回路である。S-S 共振回路は回路の素子数が少なく、多くの先行研究で用いられていることから選択した。また、先行研究⁽³⁾から、S-S 共振回路における共振条件、共振コイルの内部抵抗 r 、効率 η 、出力電力 P_{out} 、最適負荷 R_L の理論式を式(5)~(9)に示す。

$$L = \frac{1}{\omega^2(1-k^2)C} \quad (5)$$

$$r = \frac{\omega L}{Q} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{k^2 Q^2 r R_L}{\{(1+k^2 Q^2)r + R_L\}(r + R_L)} \quad (7)$$

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

$$R_L = r\sqrt{1+k^2 Q^2} \quad (9)$$

ここで、 Q は共振コイルの品質係数を表している。この回路構成および式に基づいて、CPT の効率および最適構成を検討する。

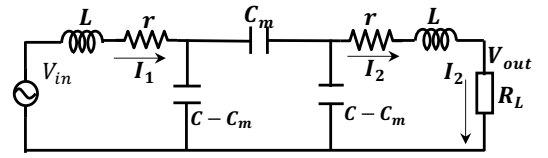


Fig.5. S-S 共振回路図

〈2・4〉 理論式について

最適負荷時の S-S 共振回路での効率 η_{max} を、式(9)を用いて式(7)を変形して式(10)に示す。また、最適負荷時の出力電力 $P_{out\eta_{max}}$ を式(9)から式(8)を変形し、 $\sqrt{1+k^2 Q^2} \approx kQ$ に近似して式(11)に示す。

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k^2 Q^2 \sqrt{1+k^2 Q^2}} + \frac{2}{\sqrt{1+k^2 Q^2}} + \frac{2}{k^2 Q^2}} \quad (10)$$

$$P_{out\eta_{max}} = \frac{|V_{in}|^2}{r \left(\frac{(1+kQ)^2}{k^3 Q^3} + \frac{2(1+kQ)}{kQ(1-k^2)} + \frac{kQ}{(1-k^2)} \right)} \quad (11)$$

式(10)、(11)について $Q = 300$ 、内部抵抗 $r = 2 \Omega$ 、入力電圧 $V_{in} = 100 \text{ V}$ の条件で、結合係数 k について変化させたグラフを Fig.6 に示す。グラフからも結合係数の増加に伴い効率が単調に上昇する傾向が確認される。また、S-S 共振回路での出力電力は結合係数が小さい範囲で最大となることが示された。

次章では、シミュレーションを用いて $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ の範囲内で銅板の横幅 x を変化させたときの結合係数 k の変化を解析し、最高効率となる銅板の横幅 x を示す。

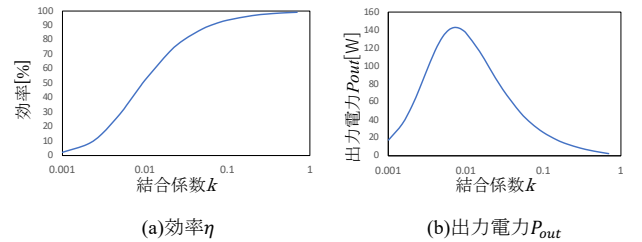


Fig.6. S-S 共振回路での結合係数と関係

3. シミュレーションからの検討

〈3・1〉 解析方法について 本研究では電磁界解析にモーメント法に基づく CEM ソフトウェアである FEKO を用

いた。解析の手順としては、オープンショート法を用いて、自己容量 C 、結合係数 k 、相互容量 C_m のパラメータを算出した。そこから式(5)、(6)を用いて共振インダクタンス L 、コイルの内部抵抗 r を求め、S-S共振回路を構築した上で、解析を行った。Fig.9に電磁界解析モデルの様子を示す。解析においては使用可能面積を600 mm×600 mmに固定し、銅板の横幅 x を変化させながら解析を行った。本研究での具体的な解析条件をTable1に示す。

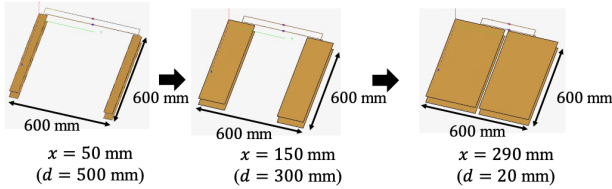


Fig. 9. 銅板の横幅 x を変えた時の解析の様子

Table 1. 解析条件

周波数	f	13.56 MHz
使用可能面積	-	600 mm×600 mm
入力電圧	V	100 V
Q 値	Q	300
伝送距離	g	50 mm
銅板の横幅	x	50~299 mm
隣接する銅板間距離	d	400~2 mm

〈3・2〉 パラメータ解析 S-S共振回路の構成に必要なパラメータを求めるため、オープンショート法に基づく等価回路解析を行った。本手法は、回路の負荷端を開放（オープン）および短絡（ショート）状態にして入力側から見た容量の違いから回路定数を逆算するものである。オープンショート法をCPTの π 型等価回路に適用した回路をFig.10に示す。オープンでの入力側からみた容量を C_{op} 、ショートでの入力側からみた容量を C_{sh} とする。これらに基づく C 、 k 、 C_m の各パラメータの関係を式(12)に示す。

$$C_{op} = C(1 - k^2), \quad C_{sh} = C, \quad k = \sqrt{1 - \frac{C_{op}}{C}} \quad \dots\dots (12)$$

この解析により、銅板の横幅 x を変化させた際の各パラメータ C 、 k 、 C_m の変化を求めた。これらの結果をFig.11に示す。結果として、 x の増加に伴い、 C および C_m は単調に増加し、結合係数 k は銅板の横幅が210 mmで最大値を示した。得られた C 、 C_m 、 k の値をもとに、式(5)、(6)、(9)と $Q = 300$ を用いて、共振インダクタンス L およびコイルの内部抵抗 r と最適負荷 R_L を算出した。

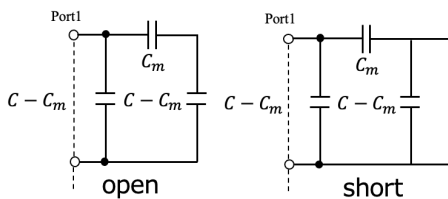
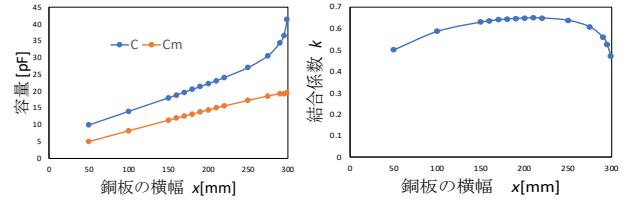


Fig.10. オープンショート法での回路



(a) C 、 C_m の変化

(b) k の変化

Fig. 11. 銅板の横幅 x による C 、 C_m 、 k の変化

〈3・3〉 効率の解析 前節で求めたパラメータをもとにS-S共振回路を構成し、伝送効率の解析を行った。解析条件はTable.1の条件であり、使用可能面積を600 mm×600 mmと固定し、銅板の横幅 x を変化させて効率を評価した。解析結果の効率のグラフをFig.13に示す。Fig.13より、銅板の横幅が210 mm(銅板占有率70%)のとき、最高効率98.98%が得られることが確認された。さらにこの効率を得るための電磁界解析モデルをFig.14に示す。このときのコイル構成は共振インダクタンス $L = 10.29 \mu\text{H}$ 、コイルの内部抵抗 $r = 2.92 \Omega$ 、最適負荷 $R_L = 569.66 \Omega$ であった。以上の結果から面積制限下において伝送効率を最大化するための最適な銅板の横幅 x が存在することが明らかとなった。Fig.13に示される効率特性は、銅板の横幅 x を基準に、効率が上昇する前半領域と低下する後半領域に分けて考察できる。前半では、銅板の横幅 x の増加に伴い電極面積が拡大し、自己容量 C および相互容量 C_m が増加する。特に、Fig.11(a)から銅板の横幅 x が100 mmから200 mmへ変化させた際、 C_m の相対増加率は75.59%、 C の相対増加率は58.85%である。相対増加率の関係式を式(13)に示す。

$$\frac{\Delta C_m}{C_m} > \frac{\Delta C}{C} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式(13)が成り立つときに銅板の横幅 x が増加すると、結合係数 k は式(4)において分母の C より分子の C_m の増加割合が大きいため、増加する。式(10)から、 Q 一定では結合係数 k の増加に伴い、効率が向上する。一方、後半では、銅板の横幅 x の増加により隣接する銅板間距離 d が短くなる。このとき先行研究⁽⁴⁾から隣接する銅板間距離 d が短くなると C_m は減少し C が増加することから、結合係数 k は減少し、効率が低下することになる。すなわち、容量増加による効率向上効果と、隣接距離 d が短くなることによる効率低下が拮抗する点において、効率が最大値を取る。

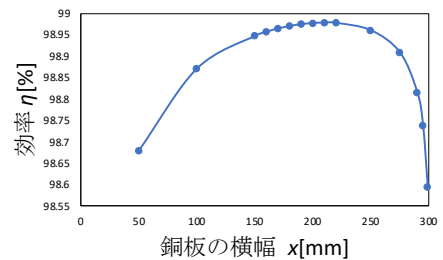


Fig. 13. 銅板横幅と効率の関係

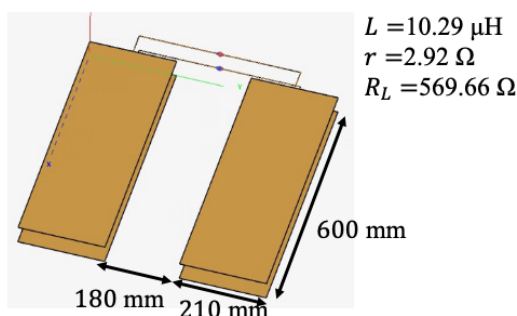


Fig. 14. 最高効率となる銅板構成

〈3・4〉出力電力の解析 前節で構成した S-S 共振回路について出力電力の解析を行った。解析結果を Fig.15 に示す。この結果より、銅板の横幅 x を増加させるにつれて出力電力が増加する傾向が確認された。これは以下の要因によるものである。銅板の横幅 x の増加により自己容量 C および相互容量 C_m が増加し、 Q 一定では式(5)、(6)に基づき内部抵抗が減少する。これによって出力電力の式(11)では分母が小さくなるため、出力が大きくなる。さらに Fig.6(b)のグラフから結合係数 k が 0.007 以上の範囲では 結合係数 k の低下によって出力は増加傾向を持つ。したがって、効率が最大となる銅板横幅 x を超えても、出力電力はさらに増加し続ける傾向が見られる。これは、S-S 共振回路において効率と出力電力が必ずしも同時に最大化されないことを示しており、トレードオフ関係であることを表している。

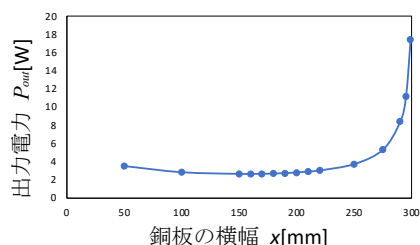


Fig. 15. 銅板横幅と出力電力の関係

〈3.5〉伝送距離の影響の解析 使用可能な面積が同じ状態で伝送距離が変化する場合、最適な銅板の横幅にも影響がある。そこで、シミュレーションを通して伝送距離の最適な銅板の横幅への影響を検証した。解析条件は Table 1 において伝送距離 g を 100 mm、200 mm、400 mm に変化させた。解析を行い、それぞれの効率と最適な銅板サイズの比較を行った。効率についての解析結果を Fig.16 に示し、その結果から得られた最適な銅板サイズについてのグラフを Fig.17 に示す。Fig.16、Fig.17 の結果より、伝送距離の増加に伴い伝送効率が低下し、最適な銅板の横幅は次第に小さくなる傾向が示された。特に、伝送距離が 50 mm から 400 mm の範囲においては、最適な銅板の横幅が距離に対して概ね線形に変化しており、設計上の指標となりうると判断できる。

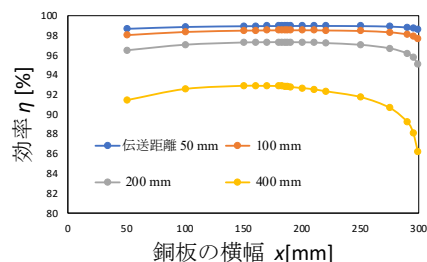


Fig.16. 伝送距離による効率と最適な銅板の横幅への影響

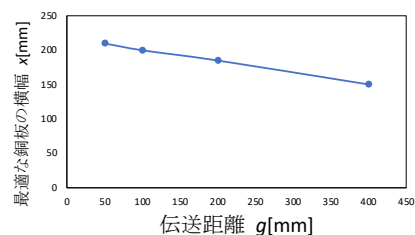


Fig.17. 伝送距離と最適な銅板の横幅の関係

4. まとめ

本研究では、S-S 共振回路における使用可能な面積が 600 mm×600 mm の場合での最高効率となる最適な銅板サイズをシミュレーションから決定した。シミュレーション結果から伝送距離が 50 mm の場合には銅板サイズが 600 mm×210 mm で最高効率 98.98 %を得ることが確認された。また、伝送距離の増加によって最適な銅板サイズが小さくなっていくことが明らかになった。今後は、S-S 共振回路以外の回路構成における効率と出力電力の評価や、伝送距離に応じた最適サイズの変化を理論的に明らかにすることが課題である。

文 献

- (1) 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,
- (2) 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.
- (3) H. Namiki, T. Imura and Y. Hori, " Unified Theory of Non-Resonant and Resonant Circuits in Inductive Power Transfer and Capacitive Power Transfer" *IEEJ Journal of Industry Applications*, 2024 volume13, Issue 6, Page 633-644.
- (4) 桑田諒人, 居村岳広, 堀洋一: 「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距離を変化させたときの影響の検証」, 電気学会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, 2024