

電界共振結合方式における鉄筋が効率に与える影響に関する基礎検討

蘇 宇博[†] 居村 岳広[‡] 堀 洋一[‡]

[†] 東京理科大学理工学部 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

あらまし ワイヤレス電力伝送は送電側と受電側が離れている性質上、送受電間に金属異物が介入すると伝送効率が低下するという問題があるため、異物検出の研究が進められている。本研究の対象である鉄筋も金属異物の一つであるが、壁中に存在するため検出することが困難である。従って、壁越しに電力を供給する必要がある場所においては、鉄筋が含まれていることを前提に電力伝送を考える必要がある。本稿では、各共振周波数において鉄筋が含まれている場合と含まれていない場合について効率の比較を行うことで鉄筋が効率に与える影響を評価した。実験結果から送受電間に鉄筋が介入した場合、効率の低下は確認されるが、電界共振結合方式で電力伝送が可能であることを明らかにした。

キーワード ワイヤレス電力伝送, 電界共振結合, 鉄筋

A Basic Study on Efficiency Affected by the Rebar on Wireless Power Transfer by Electric Resonant Coupling

Uhiro SO[†] Takehiro IMURA[‡] and Yoichi HORI[‡]

[†] Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science 2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba, 278-8510 Japan

Abstract Due to the feature of wireless power transmission, the transmission efficiency will be decreased if metal foreign objects intervene between power transmission and reception. To solve this problem, research on foreign objects detection is gradually progressing. Some power needs to be supplied through the wall where the rebar exists, and they are difficult to be detected. It is necessary to consider the affection of the rebar to power transmission in advance. In this thesis, by comparing the wireless power transmission efficiency with and without rebar at each resonance frequency, the affection of rebar on efficiency was evaluated. With the experimental results, even if the transmission efficiency decreasing was confirmed when the rebar was intervened between power transmission and reception, it is clarified that power transmission is possible by electric field resonance coupling under this condition.

Keywords Wireless Power Transfer, Electric Resonant Coupling, Rebar

1. まえがき

ケーブルなどを介さない非接触型の伝送方法であるワイヤレス電力伝送(WPT: Wireless Power Transfer)は、従来の問題点である摩耗や断線を解決する手法として注目されており、電気自動車や家電機器への幅広い応用が期待されている[1]。WPTにおける非放射型の伝送方式に磁界結合方式と電界結合方式があり[2]、電界結合方式は金属板のみで構成可能なため安価で軽量であるといった利点がある。一方で、送受電間に金属異物が介入すると伝送効率の低下や異物発熱の危険性が伴うという問題がある[3]。そのため、サーチコイルなど

を用いた異物検出の研究が進められている[4],[5]。しかし、金属異物の中には鉄筋などの検出できないものも存在する。鉄筋は主にコンクリートを補強する目的で使用され、壁中や床などに存在するため、検出することが困難である。従って、壁越しに電力を伝送する必要がある場所においては、鉄筋が入っていることを前提に考える必要がある。鉄筋越しのWPTは磁界共振結合方式を用いた研究[6]が行われているが、電界共振結合方式では十分な研究がされているとは言えない。本稿では、空気中と鉄筋での効率について実験による比較を行うことで、鉄筋が効率に与える影響を評価する。

2. 電界結合方式の原理

電界結合方式は4枚の金属板から構成されており、交流電界の伝搬によって電力伝送を行う手法である。基本構造である送受電カプラを図1に示す。送電側の自己容量 C_1 、受電側の自己容量 C_2 、送受電間の相互容量 C_m は容量 $C_{12}-C_{34}$ を用いてそれぞれ(1)~(3)式で表せる。また、送受電間の結合度を示す結合係数 k は C_1, C_2, C_m を用いて(4)式で表せる[7]。

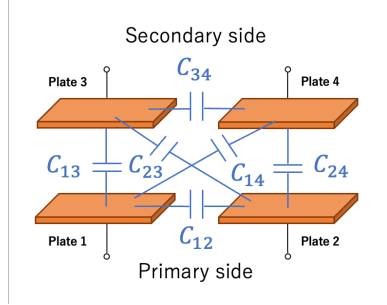


図1: 電界結合方式の送受電カプラ

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

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

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

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

電界結合方式に共振コイルを直列(Series)または並列(Parallel)に接続したものを電界共振結合方式と呼ぶ。本研究では、電界共振結合方式の各トポロジの中で、伝送効率および出力電力に優れた送受電側を共に直列に接続したS-Sトポロジ(図2)を使用した[8]。 C_1, C_2 は送受電キャパシタの自己容量、 C_m は相互容量、 L_1, L_2 は送受電コイルのインダクタンス、 r_1, r_2 は送受電コイルの内部抵抗、 R_L は負荷をそれぞれ表している。S-Sトポロジにおける伝送効率 η は(5)式で表せる。また、最大効率となるように設計された負荷である最適負荷 R_{Lopt} は(6)式で表せる[8]。

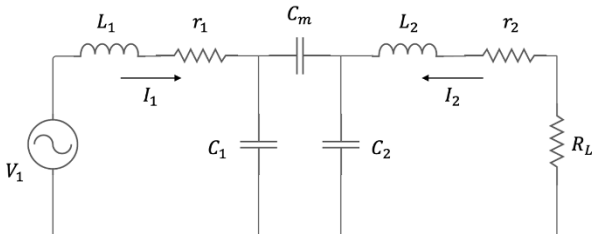


図2: 電界共振結合方式 (S-S)

$$\eta = \frac{R_L L_2 C_2^2 C_m^2}{r_1 \{ C_2 (R_L + r_2)^2 (C_1^2 C_2^2 - C_m^4) + L_2 C_m^4 \} + (r_2 + R_L) C_m^2 C_2^2 L_2} \quad (5)$$

$$R_{Lopt} = \sqrt{r_2^2 + \frac{L_2 C_m^2 (r_1 C_m^2 + r_2 C_2^2)}{r_1 C_2 (C_1^2 C_2^2 - C_m^4)}} \quad (6)$$

3. 提案する手法

本研究では、電界共振結合方式において鉄筋が効率に与える影響を評価するために、空気中と鉄筋での効率について実験による比較を行った。提案する空気中での実験回路設計を図3、鉄筋での実験回路設計を図4、図5に示す。

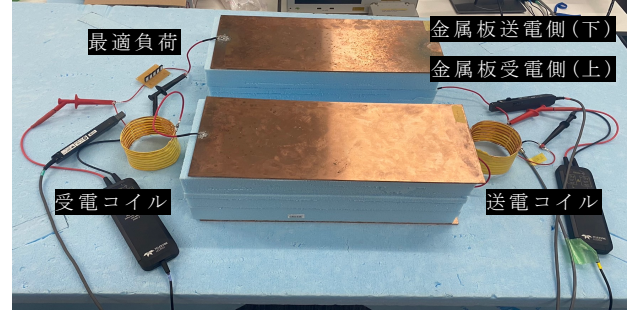


図3: 実験回路設計 (空気中)

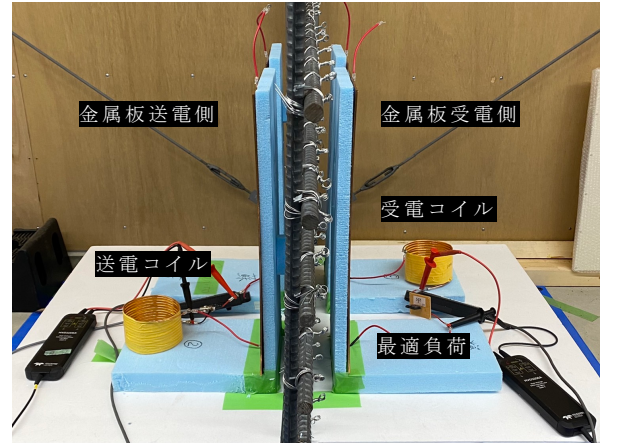


図4: 実験回路設計 (鉄筋)

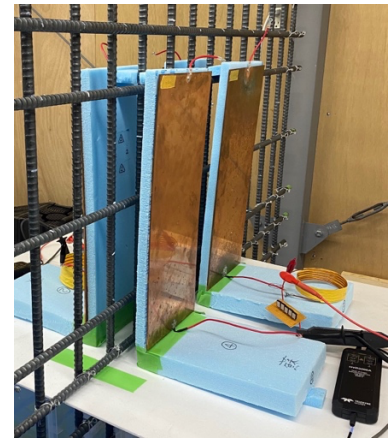


図5: 実験回路設計 (鉄筋)

今回の回路設計を行うために、図6に示す縦幅50cm、横幅20cm、厚さ3mmの銅板を4枚使用した。送電側および受電側の金属板間距離を10cm、伝送距離を15cmで固

定した.共振周波数は科学や医療を目的として国際電気通信連合(ITU)によって確保されている周波数帯であるISMバンド[9]の中で,MHz帯の周波数である6.78MHz,13.56MHzを使用し,10MHz,15MHzでも測定を行った.また,各周波数において共振構造を構築するために2.6mmの単線を使用した直径11cmの共振コイルを作成した.コイルの巻き数は6.78MHzが21巻,10MHzが13巻,13.56MHzが7巻,15MHzが5巻でそれぞれ作成した.代表例を図7に示す.

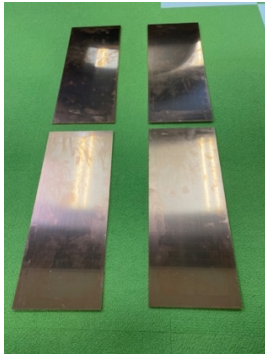


図 6: 使用した金属板



図 7: 作成した共振コイル

送受電間に挿入する鉄筋を図 8 に示す.全体の大きさは 1.5m×1.5m,鉄筋同士の間隔は 100mm であり,交差部を鉄線で縛ったものを使用した.



図 8: 使用した鉄筋

4. インピーダンスアナライザによる測定

各周波数において,図 1 で示した容量 $C_{12} - C_{34}$ を測定し,(1)~(3)式から求めた空気中での金属板の自己容量 C_1, C_2 および相互容量 C_m を表 1,鉄筋でのパラメータを表 2 に示す.また,算出した結果を(4)式に代入して空気中と鉄筋での結合係数を比較した結果を図 9 に示す.

表 1:金属板の各パラメータ (空気中)

f [MHz]	6.78	10	13.56	15
C_1 [pf]	35.7	36.0	37.5	38.2
C_2 [pf]	34.3	34.4	36.4	36.8
C_m [pf]	1.13	1.06	1.14	1.09

表 2:金属板の各パラメータ (鉄筋)

f [MHz]	6.78	10	13.56	15
C_1 [pf]	47.6	49.6	52.9	55.4
C_2 [pf]	47.1	48.6	51.7	54.0
C_m [pf]	0.42	0.39	0.35	0.31

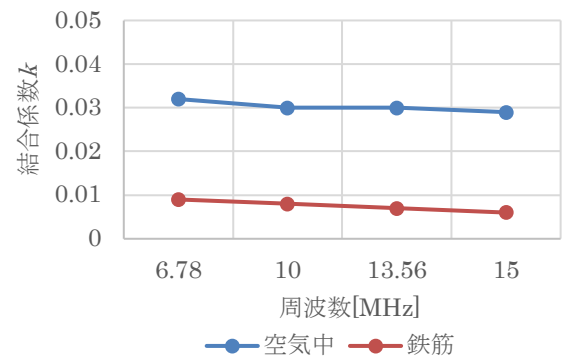


図 9:結合係数の比較

測定結果から鉄筋が介入すると,自己容量の増加と相互容量の減少から結合係数が低下することが分かった.

また,同様に作成した共振コイルのインダクタンス L_1, L_2 ,内部抵抗 r_1, r_2, Q 値を測定し,空気中と鉄筋での各パラメータを表 3,表 4 に示す. Q 値は共振のピーク時の鋭さを表すパラメータであり,共振角周波数 ω, C, r を用いて(7)式で定義される.

$$Q = \frac{1}{\omega Cr} \quad (7)$$

表 3:コイルの各パラメータ (空気中)

f [MHz]	6.78	10	13.56	15
L_1 [μH]	34.1	18.3	7.86	5.10
r_1 [Ω]	4.96	3.03	1.87	1.22
Q_1	133	146	167	228
L_2 [μH]	32.5	17.1	7.34	4.48
r_2 [Ω]	4.34	2.74	1.53	1.04
Q_2	158	169	211	253

表 4: コイルの各パラメータ (鉄筋)

f [MHz]	6.78	10	13.56	15
L_1 [μH]	33.9	18.5	7.85	5.14
r_1 [Ω]	5.78	3.87	2.79	2.51
Q_1	85	82	79	76
L_2 [μH]	32.7	17.6	7.31	4.47
r_2 [Ω]	5.07	3.68	2.66	2.34
Q_2	98	88	85	84

表 3,表 4 から鉄筋が介入すると,コイルの内部抵抗が増加し,それにより Q 値が低下することが分かった.

測定した金属板とコイルのパラメータを(6)式に代入して,最大効率となるように設計された負荷である最適負荷 R_{Lopt} を作成した.結果を表 5 に示す.

表 5:最適負荷

f [MHz]	6.78	10	13.56	15
R_{Lopt} [Ω]	291	199	125	97

5. 伝送効率の比較

各周波数において,空気中と鉄筋を含む場合での効率の理論値と実測値を比較したものを図 10,図 11 に示す.(5)式から理論値計算を行う際に,負荷 R_L は表 5 で示した最適負荷 R_{Lopt} を用いて行っている.また,オシロスコープで測定した出力波形を図 12,図 13 に示す.黄色線が送電側電圧,赤色線が送電側電流,青色線が受電側電圧,緑色線が受電側電流をそれぞれ表している.

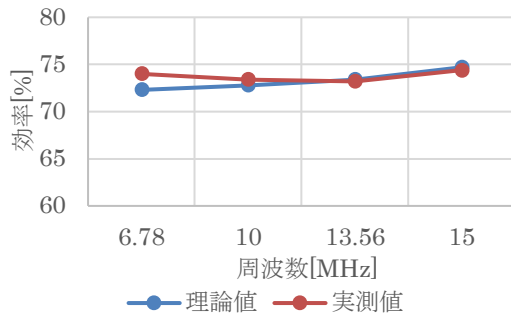


図 10:効率の理論値比較 (空気中)

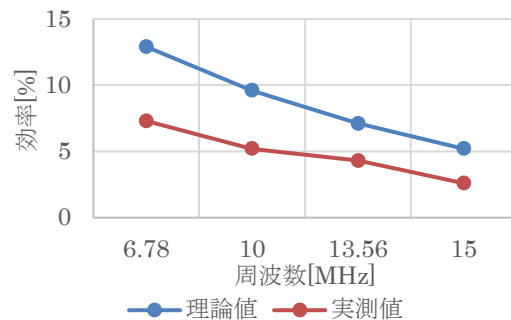


図 11: 効率の理論値比較 (鉄筋)

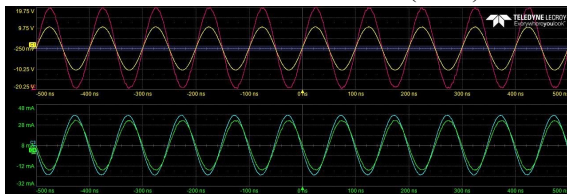


図 12:出力波形 (空気中)

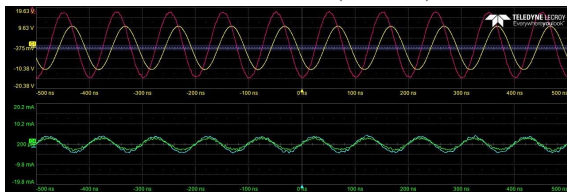


図 13:出力波形 (鉄筋)

図 10,図 11 の比較から送受電間に鉄筋が介入すると,伝送効率が低下することが分かった.また,図 12,図 13 の比較から,空気中では所望の周波数において共振しているのに対して,鉄筋を含む場合では送電側に共振のずれが発生することが分かった.

6. おわりに

本稿では,電界共振結合方式における鉄筋が伝送効率に与える影響について評価を行った.共振コイルと最適負荷を作成した上で実験を行い,空気中と鉄筋を含む場合について効率を比較することで評価した.実験結果から,送受電間に鉄筋が介入した場合,効率の低下は確認されるが,電力伝送は可能であることが明らかとなった.効率が低下した原因として,鉄筋の影響による結合係数の低下と共振のずれが発生したことが挙げられる.また,コイルの内部抵抗が増加し,それにより Q 値が低下したことが伝送効率に影響していると考えられる.

本研究では,効率の比較を行うために空気中と鉄筋で同じ共振コイルおよび最適負荷を使用したため,鉄筋を含む場合での効率の最大化を実現できていないので,今後検討したいと考えている.

文 献

- [1] T. Imura, Y. Hori, "Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula," IEEE Trans. IE, Vol. 58, No. 10, pp. 4746–4752, 2013
- [2] 居村岳広, 磁界共鳴によるワイヤレス電力伝送, 森北出版株式会社2017
- [3] P.Zhang, Q.Yang, X.Zhang, Y.Li, "Comparative Study of Metal Obstacle Variations in Disturbing Wireless Power Transmission System," IEEE Trans. Magnetics, Vol. 53, No.6, 2017
- [4] Lijuan Xiang, Ze Zhu, Jindong Tian, and Yong Tian, "Foreign Object Detection in Wireless Power Transfer System Using Symmetrical Coil Sets," IEEE Access, vol.7, pp.44622–44631, Apr. 2019
- [5] Y. Sun, G. Wei, K. Qian, P. He, C. Zhu and K. Song, "A Foreign Object Detection Method Based on Variation of Quality Factor of Detection Coil at Multi-frequency," IEEE, pp.1578–1582, 2021.
- [6] Seiya Yamamoto, Chiaki Nagai, Takehiro Imura, "A Basic Study on Frequency Characteristics of the Influence of Rebar on Wireless Power Transfer by Magnetic Resonant Coupling "
- [7] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, C. Mi, "A Double-Sided LCLC-Compensated Capacitive Power Transfer System for Electric Vehicle Charging," IEEE Trans. PE, Vol.30, No.11, pp.6011–6014 (2015)
- [8] Shunya, Kuroda, Takehiro, Imura; "Derivation Comparison of Efficiency and Power in Resonant Circuit of Capacitive Power Transfer,"
- [9] K. Dautov, R. Gupta, and M. Hashmi, "A Performance Enhanced Dual-band Wireless Power Transfer System for Practical ISM Bands" IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, 2019