

金属壁を介したワイヤレス電力伝送の 高効率化に向けた回路構成に関する基礎検討

大塚 麻以[†] 居村 岳広^{††} 藤本 博志^{†,††,†††} 堀 洋一^{†,††,†††}

[†] 東京大学工学部 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

^{††} 東京大学大学院工学系研究科 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

^{†††} 東京大学大学院新領域創成科学研究科 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

E-mail: †otsuka16@hflab.k.u-tokyo.ac.jp, ††imura@hori.k.u-tokyo.ac.jp, †††{fujimoto,hori}@k.u-tokyo.ac.jp

あらまし 金属壁に囲まれた環境下にあるセンサへの給電を目的とし、ワイヤレス電力伝送の回路構成に関する検討を行った。磁界共振結合方式のワイヤレス電力伝送では様々な回路構成が提案されている。本稿では、SS方式とSP方式の回路構成で電力伝送実験を行い、最適負荷と最大効率に着目して特性を比較した。SS方式の回路構成で金属壁を介した電力伝送を行った場合では、伝送効率を最大化する最適負荷の値が小さくなった。SP方式の回路構成を用いることで、最適負荷の値を大きくすることが可能であることが実証された。

キーワード ワイヤレス電力伝送, 磁界共振結合, 金属, SS方式, SP方式

Basic Study on Circuit Topology for High Efficiency Wireless Power Transfer through Metal Wall

Mai OTSUKA[†], Takehiro IMURA^{††}, Hiroshi FUJIMOTO^{†,††,†††}, and Yoichi HORI^{†,††,†††}

[†] Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 277-8561, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, Japan

^{††} Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 277-8561, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, Japan

^{†††} Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 277-8561, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, Japan

E-mail: †otsuka16@hflab.k.u-tokyo.ac.jp, ††imura@hori.k.u-tokyo.ac.jp, †††{fujimoto,hori}@k.u-tokyo.ac.jp

Abstract The aim of this research is feeding power wirelessly to the sensor surrounded by the metal wall. Various circuit configurations have been proposed for the magnetic resonant coupling wireless power transfer. In this research, we conducted experiment and compared characteristics of series - series (SS) and series - parallel (SP) circuit topology focusing on the optimum load and the maximum efficiency. When the power transfer through the metal wall was carried out with SS circuit topology, the value of the optimum load that maximizes the transmitting efficiency decreased. The value of the optimum load can be increased by using the SP circuit topology.

Key words Wireless Power Transfer, Magnetic Resonance Coupling, Metal, SS Circuit Topology, SP Circuit Topology

1. はじめに

磁界共振結合方式によるワイヤレス電力伝送が2007年にMITから発表されて[1]以来、ワイヤレス電力伝送は電源供給や充電の手段として注目を集めており、産業機器や家電機器への幅広い応用が期待されている[2]~[5].

ワイヤレス電力伝送はセンシング技術への応用も検討されている。センシング技術における課題の一つとして、金属製の水

素タンク内のレベルセンサ[6]や、船舶や航空機で用いられるセンサなど、金属壁で囲まれた環境下にあるセンサへの電力供給が困難であることが挙げられる[7]. センサに電力を供給する方法としては、バッテリーによる電力供給が考えられるが、金属製タンク内のセンサへの電力供給では、バッテリーの劣化やバッテリー交換の困難さが問題となる。従来、金属壁内のセンサへの電力供給は有線により行われてきたが、金属壁にワイヤを通すことにより、タンクの内容物の漏洩、応力疲労による金

属壁の破損といったリスクが生じるため、ワイヤレスでの電力供給が求められる。

金属壁を介したワイヤレス電力伝送に関しては、金属配管やタンクの内部に配置されたセンサへの給電を目的とした研究が行われており、50 Hz の低周波においては金属壁を介しての電力伝送が可能であるということが示されている [6], [8]。しかし、低周波では、磁界共振結合方式によるワイヤレス電力伝送の伝送効率が低いことや電力伝送に用いるコイルが大きいことが欠点となる。そのため、磁界共振結合方式によるワイヤレス電力伝送の伝送効率が大きくなる高周波への応用についても研究が行われており、金属管内の給電では、金属管に非誘電体のスリットを導入することで電力伝送を実現している [9]。また、携帯電話のワイヤレス充電でも、カメラ部分の穴をスリットとして利用することで、携帯電話の筐体が金属であってもワイヤレス充電を可能にする技術が開発されている [10]。しかし、スリットを利用した電力伝送では、金属に手を加えるため、金属壁内のセンサへの給電に関しては有線による電力供給と同様の問題が生じる。

本稿では高周波においてもスリットを用いずに金属壁を介しての電力伝送を実現することを目的とし、金属壁を介した電力伝送に適した回路構成を検討する。磁界共振結合方式のワイヤレス電力伝送では様々な回路構成が提案されている。SS 方式の回路構成で金属壁を介した電力伝送を行った場合では、伝送効率を最大化する最適負荷の値が小さくなるため、一般的な値の負荷で効率を得られない。SP 方式の回路構成を用いることで、最適負荷の値を大きくすることが可能である。本稿では、SS 方式と SP 方式の回路構成で電力伝送を行い、最適負荷と最大効率に着目して特性を比較する。

2. ワイヤレス電力伝送の基本的な回路構成

磁界共振結合を用いたワイヤレス電力伝送では、1 次側と 2 次側の共振周波数を合わせるため、1 次側と 2 次側に各々共振コンデンサを接続する。SS 方式と SP 方式の回路構成では、2 次側の共振コンデンサが負荷に対して直列か並列かの違いがあり、特性が異なっている。本章では、金属がないときにおける SS 方式と SP 方式の回路構成における電力伝送の効率と、効率が最大となる負荷の条件について述べる。

2.1 SS 方式の回路解析

SS 方式の回路の T 型等価回路を図 1 に示す [11]。1 次側と 2 次側で共振周波数を一致させるとき、共振条件は式 (1) となり、共振角周波数は式 (2) で表される。

$$\omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1} = \omega_0 L_2 - \frac{1}{\omega_0 C_{2s}} = 0 \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_{2s}}} \quad (2)$$

このとき、1 次側と 2 次側の回路方程式は式 (3), (4) で表される。

$$V_1 = R_1 I_1 + j\omega_0 L_m I_2 \quad (3)$$

$$0 = j\omega_0 L_m I_1 + (R_2 + R_L) I_2 \quad (4)$$

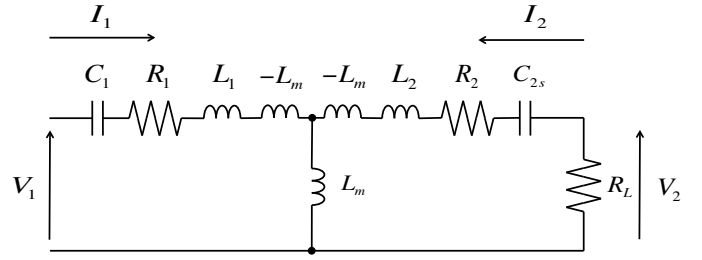


図 1 SS 方式の等価回路。

表 1 Circuit Parameters.

Resonant Frequency	85 kHz
Primary Coil Inductance L_1	100 μ H
Secondary Coil Inductance L_2	100 μ H
Primary Resistance R_1	0.2 Ω
Secondary Resistance R_2	0.2 Ω

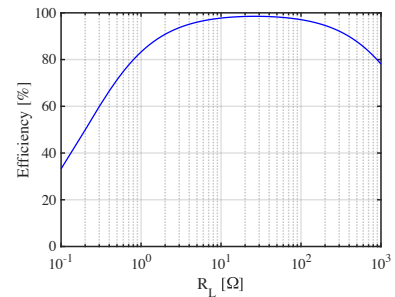


図 2 SS 方式における負荷と効率の関係。

式 (3), (4) より 1 次側電流 I_1 , 2 次側電流 I_2 が式 (5), (6) のように求まる。

$$I_1 = \frac{R_2 + R_L}{R_1(R_2 + R_L) + \omega_0^2 L_m^2} V_1 \quad (5)$$

$$I_2 = -\frac{j\omega_0 L_m}{R_1(R_2 + R_L) + \omega_0^2 L_m^2} V_1 \quad (6)$$

式 (5), (6) より、共振時の効率は式 (7) のように求まる。

$$\eta = \frac{I_2^2 R_L}{V_1 I_1} = \frac{R_L}{(R_L + R_2) \left(1 + \frac{R_1 R_L + R_1 R_2}{(\omega_0 L_m)^2}\right)} \quad (7)$$

従って表 1 に示す条件下で $L_m = 50 \mu\text{H}$ としたときの負荷と効率の関係は図 2 のようになり、効率が最大値をとるような R_L の値が存在する。効率が最大値を取るとき、式 (8), (9) が成り立つ。

$$\frac{\partial \eta}{\partial R_L} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial R_L^2} < 0 \quad (9)$$

式 (7)–(9) より、効率が最大となる最適負荷の値は式 (10) で表される。

$$R_{Lopt-ss} = \sqrt{\frac{R_2(\omega_0 L_m)^2}{R_1} + R_2^2} \quad (10)$$

従って式 (7), (10) より、SS 方式での最大効率は式 (11) で表される。

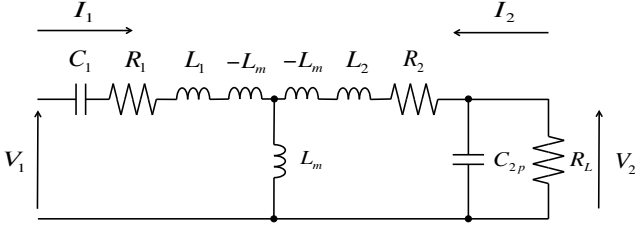


図3 SP方式の等価回路.

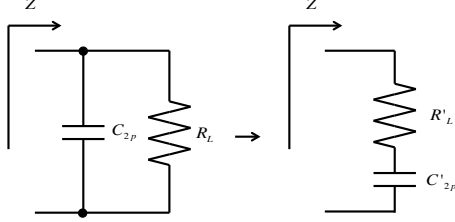


図4 2次側共振コンデンサと負荷抵抗の直列変換.

$$\eta_{max_ss} = \frac{(\omega_0 L_m)^2}{\left(\sqrt{R_1 R_2} + \sqrt{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2}\right)^2} \quad (11)$$

2.2 SP方式の回路解析

SP方式の回路のT型等価回路を図3に示す[11]. 図4のように2次側の共振コンデンサ C_{2p} と負荷抵抗 R_L を直列変換することでSS方式と同様の解析が可能になる. 2次側の共振コンデンサと負荷抵抗によるインピーダンス Z は式(12)で表される.

$$Z = \frac{R_L - j\omega C_{2p} R_L^2}{1 + \omega^2 C_{2p}^2 R_L^2} \quad (12)$$

Z を直列変換した共振コンデンサと負荷抵抗の値で表すと式(13)のようになる.

$$Z = R'_L - j\frac{1}{\omega C'_{2p}} \quad (13)$$

式(12), (13)より R'_L , C'_{2p} はそれぞれ式(14), (15)のように表される.

$$R'_L = \frac{R_L}{1 + \omega^2 C_{2p}^2 R_L^2} \quad (14)$$

$$C'_{2p} = \frac{1 + \omega^2 C_{2p}^2 R_L^2}{\omega^2 C_{2p} R_L^2} \quad (15)$$

直列変換後の共振コンデンサの値を用いてSS方式と同様に共振条件を表すと式(16)のようになる.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C'_{2p}}} \quad (16)$$

SS方式において R'_L と等価な負荷 R_L は式(17)で表される.

$$R_L = \frac{1 + \omega^2 C'_{2p}{}^2 R_L'^2}{\omega^2 C'_{2p}{}^2 R_L'} \quad (17)$$

このとき, 共振条件を満たす2次側コンデンサの値は式(18)となる.

$$C_{2p} = \frac{C'_{2p}}{1 + \omega_0^2 C'_{2p}{}^2 R_L'^2} \quad (18)$$

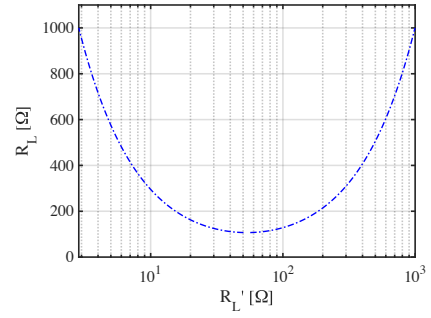


図5 R'_L と R_L の関係.

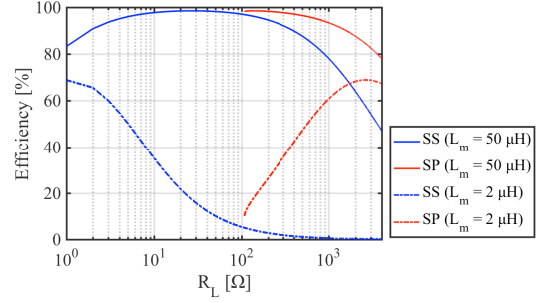


図6 L_m による最適負荷の比較.

共振が成立しているときの表1の条件における R'_L と R_L の関係を図5に示す.

効率が最大となるときの R'_L を R'_{Lopt_sp} とすると式(19)が成り立つ.

$$\begin{aligned} R'_{Lopt_sp} &= R_{Lopt_ss} \\ &= \sqrt{\frac{R_2(\omega_0 L_m)^2}{R_1} + R_2^2} \end{aligned} \quad (19)$$

式(16), (17), (19)より, SP方式での最適負荷の値は式(20)で表される.

$$R_{Lopt_sp} = \sqrt{\frac{R_2(\omega_0 L_m)^2}{R_1} + R_2^2} + \frac{L_2}{\sqrt{\frac{R_2(\omega_0 L_m)^2}{R_1} + R_2^2}} \quad (20)$$

従って式(21)が成立し, SS方式とSP方式での最適負荷の値を比較するとSP方式の最適負荷が大きくなる.

$$R_{Lopt_sp} - R_{Lopt_ss} = \frac{L_2}{\sqrt{\frac{R_2(\omega_0 L_m)^2}{R_1} + R_2^2}} > 0 \quad (21)$$

また, SP方式での最大効率は負荷の値が R_{Lopt_sp} のときの効率となり式(22)で表される.

$$\begin{aligned} \eta_{max_sp} &= \eta_{max_ss} \\ &= \frac{(\omega_0 L_m)^2}{\left(\sqrt{R_1 R_2} + \sqrt{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2}\right)^2} \end{aligned} \quad (22)$$

表1の条件におけるSS方式とSP方式での負荷と効率の関

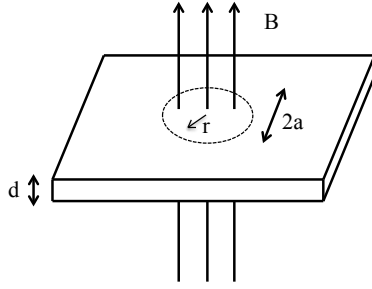


図 7 金属壁に磁束が鎖交する様子.

表 2 Metal Resistivity.

Material	Resistivity ρ [$\mu\Omega\text{m}$]
Steel (SS400)	0.10
Stainless Steel (SUS304)	0.72
Titanium	0.56
Copper	0.02
Aluminum (52S)	0.03

係を図 6 に示す. ω_0 , L_m , L_1 , C_1 , R_1 , L_2 , R_2 が一定の条件下で SS 方式と SP 方式を比較すると, 最適負荷の値は SP 方式の方が大きくなり, 最大効率等は等しくなる. L_m が大きく低下しているときでは SS 方式での最適負荷が小さくなり, SP 方式の方がより一般的な負荷に対して高効率を得やすい.

3. 金属による電力伝送への影響

3.1 渦電流による損失

金属壁を介したワイヤレス電力伝送では, コイルからの磁束が金属に鎖交することで渦電流が生じ, 損失となる. 本節では図 7 のように厚さ d の金属壁の直径 $2a$ の円形部分に対し, 磁束が一様に鎖交しているとして渦電流損を計算する. 金属に鎖交する磁束を ϕ , 磁束密度を B とすると, 電磁誘導により円の中心軸から距離 r の位置では式 (23) のように起電力 e が生じる.

$$e = -\frac{\partial\phi}{\partial t} = -\pi r^2 \frac{\partial B}{\partial t} \quad (23)$$

導体の抵抗率を ρ とすると, 位置 r における抵抗 ΔR は式 (24), 電流 Δi は式 (25), 電力損失 ΔP は式 (26) で表される.

$$\Delta R = \rho \frac{2\pi r}{d\Delta r} \quad (24)$$

$$\Delta i = \frac{e}{\Delta R} = -\frac{d}{2\rho} \frac{\partial B}{\partial t} r \Delta r \quad (25)$$

$$\Delta P = e\Delta i = \frac{\pi d}{2\rho} \left(\frac{\partial B}{\partial t}\right)^2 r^3 \quad (26)$$

従って, 渦電流による電力損失 P_e は式 (27) で表される.

$$P_e = \int_0^a \frac{\pi d}{2\rho} \left(\frac{\partial B}{\partial t}\right)^2 r^3 dr = \frac{\pi d}{8\rho} \left(\frac{\partial B}{\partial t}\right)^2 a^4 \quad (27)$$

式 (27) より, 渦電流損は磁束密度の変化速度の 2 乗に比例する. そのため, 周波数の増加に伴い渦電流損は大きくなる. また, 渦電流損は抵抗率に反比例するため, 抵抗率の大きい材質

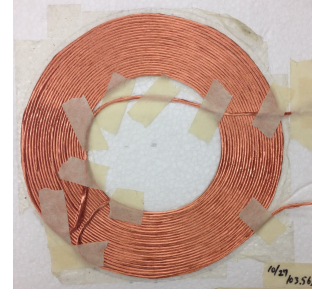


図 8 実験に用いたコイル.

表 3 Coil Specifications.

	Primary Coil	Secondary Coil
Outer Diameter	193 mm	185 mm
Inner Diameter	100 mm	100 mm
Turns	24 turns	24 turns
Metal Plate Dimension	600 mm \times 600 mm \times 1 mm	
Air Gap	20 mm	
Resonant Frequency	85 kHz	

ほど電力損失が小さくなる.

金属による物性の比較として, 鉄 (SS400), ステンレス (SUS304), チタン, 銅, アルミニウム (52S) の抵抗率を表 2 に示す. 式 (27) より, 抵抗率 ρ の大きい材質ほど電力損失が小さくなる. 従って, チタンやステンレスは鉄, 銅, アルミニウムに比べ電力伝送に適している. 本稿では金属壁としてステンレス板 (SUS304) を用いる.

3.2 渦電流によるインダクタンスの低下

コイルからの磁束が金属に鎖交するとき, 金属中で生じた渦電流が, コイルからの磁束を打ち消す方向に磁束を発生させる. そのため, コイル近傍に金属が存在する条件でコイルのインダクタンスと内部抵抗を測定したとき, インダクタンスは減少し, 内部抵抗は増加する. また, 2 次側コイルに鎖交する磁束が減少するため相互インダクタンスは減少する.

金属壁を介して電力伝送を行うとき, コイルのインダクタンスが減少することで共振条件が変化するため, 金属壁が存在しないときと比較して伝送効率が最大となる周波数が高くなる. 伝送効率は, 内部抵抗の増加と相互インダクタンスの減少により低くなる. 式 (10) より, SS 方式では相互インダクタンスが小さくなる時最適負荷が 2 次側コイルの内部抵抗 R_2 に近づく.

4. 実験

4.1 金属板なしのときの SS 方式と SP 方式の比較

図 8 に示すコイルを用いて SS 方式と SP 方式の回路構成で電力伝送を行い, 効率を測定した. 実験環境の詳細を表 3, 回路のパラメータを表 4 に示す. コイル間の距離を 20 mm とし, 85 kHz で共振する条件で金属板を置かず電力伝送を行い, 伝送効率をベクトル・ネットワーク・アナライザ (Vector Network Analyzer : VNA, Keysight 製 E5061B) を用いて測定した. 伝送効率は電源周波数が 80 kHz から 100 kHz までの

表 4 Circuit Parameters (Without Metal Plate).

Primary Coil Inductance L_1	103 μH
Secondary Coil Inductance L_2	103 μH
Mutual Inductance L_m	47.6 μH
Primary Capacitor C_1	34.0 nF
Secondary Capacitor C_{2s}	34.0 nF
Secondary Capacitor C_{2p}	29.0 nF
Primary Resistance R_1	0.22 Ω
Secondary Resistance R_2	0.26 Ω

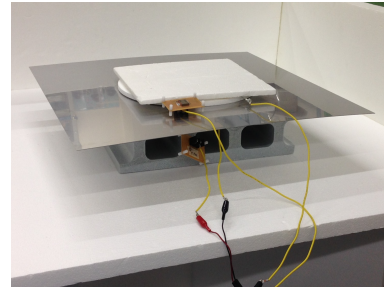


図 10 実験環境.

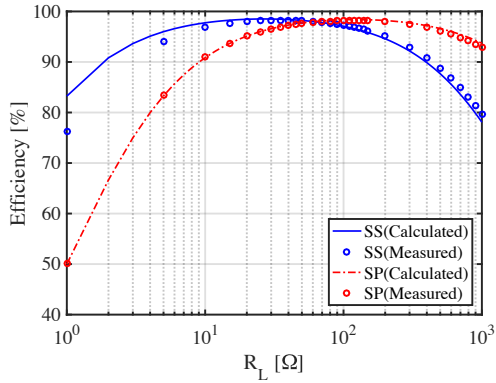


図 9 SS 方式と SP 方式の伝送効率の比較 (金属板なし).

範囲での最大値とした。

測定の結果を図 9 に示す。測定値は計算結果に一致している。SP 方式は SS 方式に比べ負荷抵抗の変化に対し効率の影響を受けにくく、効率が最大となる負荷抵抗の値が大きくなっている。

4.2 金属材料の違いによる伝送効率の比較

1 次側と 2 次側のコイル間に金属板 (SUS304, 52S, SS400) を置いたときの SS 方式の電力伝送の効率を測定した。実験環境を図 10, コイルと金属板の位置関係を図 11 に示す。金属板を置いていないときに 85 kHz で共振する条件で電力伝送を行い、伝送効率を VNA を用いて測定した。

測定の結果を図 12, 図 13 に示す。アルミ板 (52S), 鉄板 (SS400) では伝送効率が 1% に満たないのに対し、ステンレス板 (SUS304) では伝送効率が 17% となっており、抵抗率の大きい金属材料では伝送効率が大きくなっている。また、渦電流による影響でインダクタンスが減少することで共振条件が変化するため、伝送効率が最大となる周波数が 85 kHz よりも高くなっている。

4.3 金属壁を介したワイヤレス電力伝送

図 11 のようにコイル間に金属板を設置したときの伝送効率を測定した。回路のパラメータを表 5 に示す。金属板を置いた状態で 85 kHz で共振する条件で電力伝送を行い、伝送効率を VNA を用いて測定した。伝送効率は電源周波数が 80 kHz から 100 kHz までの範囲での最大値とした。

伝送効率の計算値を図 14, 測定値を図 15 に示す。コイル間に金属板を置いた場合では 1 次側コイルと 2 次側コイルの相互インダクタンスが小さくなるため、SS 方式での効率が最大とな

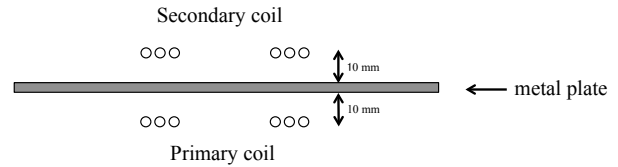


図 11 金属板とコイルの配置.

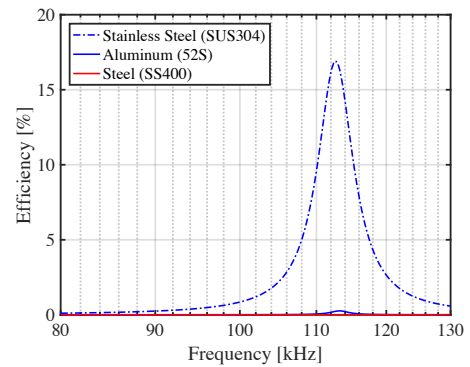


図 12 金属材料ごとの SS 方式での伝送効率.

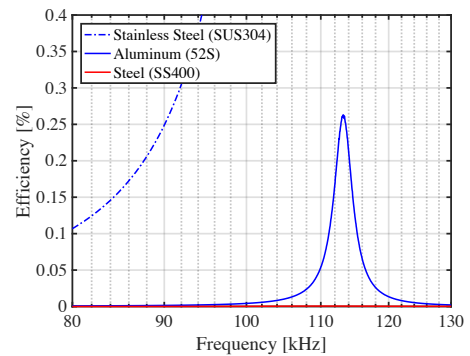


図 13 金属材料ごとの SS 方式での伝送効率 (拡大図).

る負荷抵抗の値が小さくなっているが、回路構成を SP 方式にすることでより大きな負荷抵抗でも効率を得られることが示された。効率の計算結果と測定値が一致しない理由は、コイル付近に金属板が存在するときの相互インダクタンスが JIS 規格の測定法で正しく測定できないためだと考えられる。図 16 に相互インダクタンス L_m を 2 μH としたときの負荷抵抗と効率の関係を示す。このとき効率が測定値と一致することから、実際の相互インダクタンスの値は 2 μH 程度であると推測される。

表 5 Circuit Parameters (With Metal Plate).

Primary Coil Inductance L_1	51.6 μH
Secondary Coil Inductance L_2	54.4 μH
Mutual Inductance L_m	0.21 μH
Primary Capacitor C_1	68.3 nF
Secondary Capacitor C_{2s}	64.3 nF
Secondary Capacitor C_{2p}	64.3 nF
Primary Resistance R_1	1.68 Ω
Secondary Resistance R_2	1.60 Ω

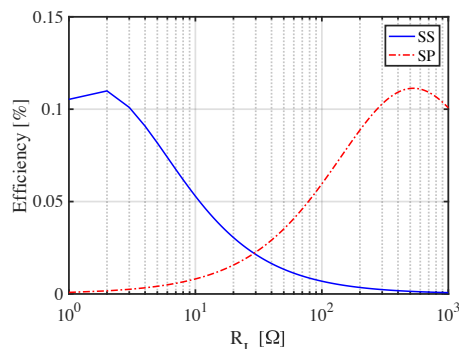


図 14 金属板を設置したときの伝送効率 (計算結果).

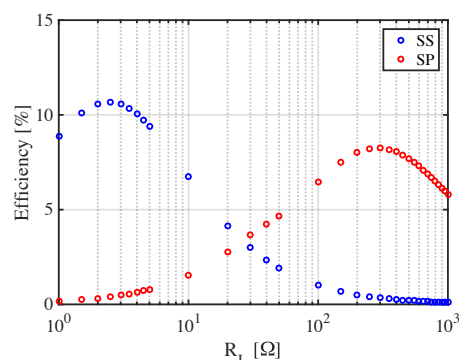


図 15 金属板を設置したときの伝送効率 (測定値).

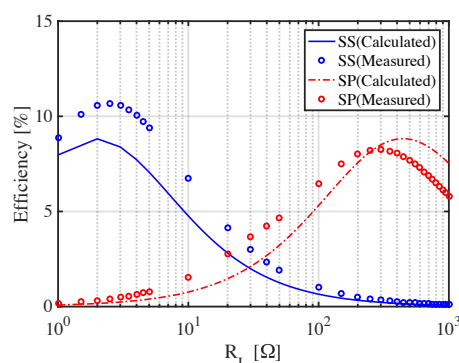


図 16 $L_m = 2 \mu\text{H}$ と仮定したときの伝送効率 (計算結果).

5. おわりに

金属壁に囲まれた環境下にあるセンサへのワイヤレス電力伝

送の実現を目的とし、回路構成に関する検討を行った。SS方式とSP方式の回路構成について、金属壁を介した電力伝送を行ったときの最適負荷と最大効率への影響に着目し、実験を通して特性を比較した。金属壁を介したワイヤレス電力伝送では渦電流の影響によりコイルのインダクタンスが減少し、伝送効率が最大となる周波数が高くなる。また、相互インダクタンスが減少するためSS方式での最適負荷の値が小さくなる。SP方式による電力伝送ではSS方式と比較して最適負荷の値が大きくなるため、金属壁内のセンサへの給電のための回路構成としては、SP方式が適している。また、金属壁を介した電力伝送では従来の方法による相互インダクタンスの測定ができないため測定方法の検討が必要となる。

文 献

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic: "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, Vol.317, No.5834, pp.83–86, (2007).
- [2] H. Shoki: "Trends of Wireless Power Transmission Technologies and Approaches for Commercialization," *Technical report of IEICE(WPT2010-07)*, pp.19–24, (2010).
- [3] Siqi Li, and Chunting Chris Mi: "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol.3, No.1, pp.4–17, (2015).
- [4] John M. Miller, Omer C. Onar, and Madhu Chinthavali: "Primary-Side Power Flow Control of Wireless power Transfer for Electric Vehicle Charging," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol.3, No.1, pp.147–162, (2015).
- [5] S. Y. Hui: "Planar Wireless Charging Technology for Portable Electronic Products and Qi," *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, Vol.101, No.6, pp.1290–1301, (2013).
- [6] Hubert Zangl, Anton Fuchs, Thomas Bretterklier, Michael J. Moser, and Gert Holler: "Wireless Communication and Power Supply Strategy for Sensor Applications Within Closed Metal Walls," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol.59, No.6, pp.1686–1692, (2010).
- [7] Ding-Xin Yang, Zheng Hu, Hong Zhao, Hai-Feng Hu, Yun-Zhe Sun, and Bao-Jian Hou: "Through-Metal-Wall Power Delivery and Data Transmission for Enclosed Sensors: A Review," *Sensors 2015*, 15, 31581–31605, (2015).
- [8] Masato Yamakawa, Yoshihiro Mizuno, Jun Ishida, Kimiya Komurasaki, Hiroyuki Koizumi: "Wireless Power Transmission into a Space Enclosed by Metal Walls Using Magnetic Resonance Coupling," *Wireless Engineering and Technology*, Vol. 5 No. 1, pp.19–24, (2014).
- [9] Kohei Shimamura, Masayoshi Koizumi, Yoshihiro Mizuno, Kimiya Komurasaki: "Effect of Axial Slit on Metallic Tube for Wireless Power Transfer Via Magnetic Resonance Coupling," *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol.135, issue 7, pp.787–793, (2015).
- [10] Nathan S. Jeong and Francesco Carobolante: "Enabling Wireless Power Transfer Through a Metal Encased Hand-held Device," *WPTC*, (2016).
- [11] Takehiro Imura, Yoichi Hori: "Unified Theory of Electromagnetic Induction and Magnetic Resonant Coupling," *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol.135, No. 6, pp.697–710, (2015).