

ワイヤレス電力伝送における効率と電力の互換性可視化手法

櫻井 良哲* 居村 岳広 堀 洋一 (東京理科大学)

Efficiency and Power Compatibility Visualization Methodology for Wireless Power Transfer
Ryotetsu Sakurai*, Takehiro Imura, Yoichi Hori, (Tokyo University of Science)

Power transfer characteristics, which are important for constructing wireless power transfer (WPT) systems, vary greatly depending on coupling and resonant circuits. To solve this problem conventional impedance map method which can visualize the power characteristics is extended and the method to visualize the efficiency simultaneously is proposed. This method enables us to verify the compatibility even in systems where efficiency needs to be considered. The effectiveness of the proposed method was demonstrated through experiments.

キーワード：無線電力伝送, 磁界共振結合, 特性, 効率, 可視化, 互換性,
(Wireless Power Transfer, Magnetic Resonance Coupling, Transfer Characteristic, Efficiency, Visualization, Compatibility)

1. はじめに

近年、ワイヤレス電力伝送(WPT)の研究開発が盛んになっているが、WPTの適用先はスマートフォンなどに限定されている。普及が進まない原因の1つとして互換性の有無があげられる。そのため、任意の送電と受電のペアについて給電が可能かどうかの互換性を検証する技術が必要となる。互換性を確認する上で電力伝送特性を把握することが非常に重要となるが、送受電コイルの結合状態や共振回路の設計によって電力伝送特性は大きく変化することが知られている。

こういった課題を解決するため、WPTシステムの特性を視覚的に表現可能なインピーダンスマップ手法が既に提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。インピーダンスマップ手法を用いることでWPTシステムの電力伝送特性を視覚的に把握できると共に、送電側と受電側のシステムの間で電力面での互換性があるかを確認することができる。電力面での互換性とは、インバータやコイルの定格を超えずに要求する電力を伝送できるかどうかを指す。一方でこの手法では効率について考慮できていないという問題がある。

本研究ではインピーダンスマップ手法を拡張し、電力と同時に効率も可視化する手法を提案する。これにより対象のWPTシステムを更に正確に把握し、効率面からの互換性を確認できる。提案手法は様々な状況に適用可能であり、そのうちの1つにスマートフォン向けWPT規格であるQi規格⁽³⁾が挙げられる。そこで本研究では近年普及が進むQi規格と同じサイズのコイルと、近年同様に普及が進むタブレット⁽⁴⁾に搭載可能なQi規格の4倍のサイズのコイルを用いて行

ことで送受電システム間の互換性を可視化する。

2. 電力を可視化するインピーダンスマップ

既に提案されている、電力の伝送特性を可視化するインピーダンスマップ手法について説明する。Fig.1に一般的なWPT回路を示す。

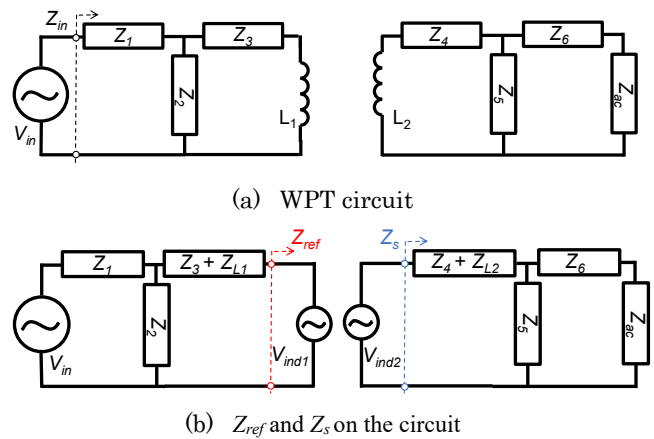


図1 一般的な WPT 回路

Fig.1 General WPT circuit

Fig.1(b)における Z_{ref} は2次側の回路構成、結合、負荷条件を反映した等価インピーダンスであり、2次側の合成インピーダンスを Z_s 、相互インダクタンスを L_m とおくと式(1)のように導出できる。

$$Z_{ref} = \frac{(\omega L_m)^2}{Z_s} \quad (1)$$

インピーダンスマップ手法では Z_{ref} の実部と虚部である R_{ref} 、 X_{ref} を軸としたマップを作成する。コイルの結合状態や負荷の変動によって Z_{ref} が変化することに着目しており、伝送可能電力を評価可能である。ここで Fig.1(a)では補償回路が LCC/LCC 回路⁽⁵⁾のような構成となっているが、各素子の値を 0(短絡)や ∞ (開放)にすることで S/S 回路⁽⁶⁾などの他回路構成においても対応可能である。Fig.2 にインピーダンスマップを示す。インピーダンスマップは Fig.3 に示す電力マップと Fig.4 に示す結合係数を 0.15 から 0.32 まで変動させたときの Z_{ref} 軌跡を組み合わせることによって作成できる。

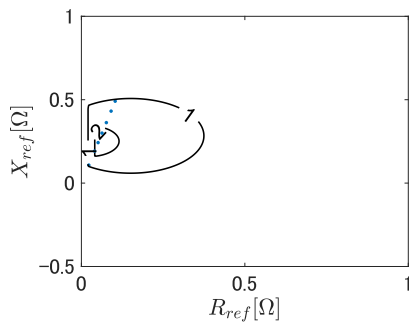


図2 インピーダンスマップ

Fig.2 Impedance Map

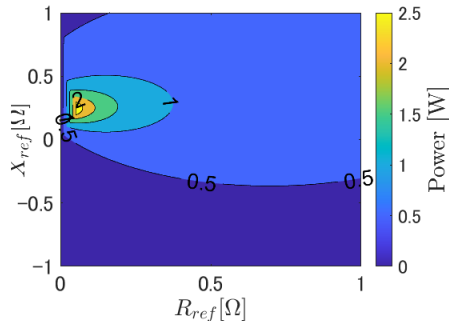


図3 電力マップ

Fig.3 Power Map

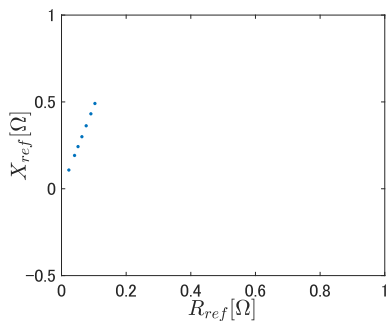


図4 Z_{ref} 軌跡

Fig.4 Z_{ref} traces

Fig.2 のマップでは、送電側にスマートフォン用の WPT 規格である Qi 規格と同じサイズのコイルを使用したパラメー

タ、受電側にタブレットに搭載可能な Qi 規格の 4 倍サイズのコイルを使用したときのパラメータ (Table1) を用いている。入力 は 100kHz の正弦波とする。

表1 インピーダンスマップのパラメータ (LCC/LCC 回路)

Table1 Parameters of impedance map drawing

	R	L	C
L_1	0.0075 Ω	1.8 μH	-
L_2	0.083 Ω	24 μH	-
Z_1	24.6 m Ω	3.7 μH	-
Z_2	0.023 Ω	-	6.8 μF
Z_3	0.03 Ω	-	1.4 μF
Z_4	0.21 Ω	-	103 nF
Z_5	0.02 Ω	-	563 nF
Z_6	0.02 Ω	4.5 μH	-
Z_{ac}	5 Ω	-	-

電力マップの線上の数字は 2 次側へ伝送可能な電力の大きさを表す。この最大値はインバータやコイルの定格によって決定される。最大伝送可能有効電力は送電コイルの定格電流 I_{L1max} 、定格電源電圧 V_{max} 、定格電源電流 I_{max} を使って (2)~(4) 式のように計算する。

$$P_{trans}^{L1} = R_{ref} I_{L1max}^2 \quad (2)$$

$$P_{trans}^V = \frac{R_{in}}{R_{in}^2 + X_{in}^2} V_{max}^2 \quad (3)$$

$$P_{trans}^I = R_{in} I_{max}^2 \quad (4)$$

実際に考慮する最大伝送可能電力は、(2)~(4) 式で得られる電力値を比較しその最小値で決定される。

電力マップは Fig.3 に示すように沢山の線の集まりである。Fig.3 の場合は各線に書かれている数字が伝送可能な電力の大きさを表しており、線の内側に行くほど伝送可能な電力が大きくなっていくことがわかる。

Z_{ref} 軌跡は結合や負荷の変化によって変動する Z_{ref} を全てプロットしたものである。電力マップと Z_{ref} 軌跡はどちらも縦軸と横軸を Z_{ref} の実部と虚部で表す平面上に描画されているため、2 つを重ねることが可能である。すると Z_{ref} 軌跡が描かれている地点の電力マップの値を読み取ることによって、その状態の回路で伝送可能な電力の大きさが分かる。

Fig.2 の例だと実線は電力マップの中で所望の電力 (1 W) の線を切り抜いた図で点線が Z_{ref} 軌跡である。電力面での互換性があるとは、電力マップにおける所望の電力を表した線内に Z_{ref} 軌跡が全て収まることを指す。

従来のインピーダンスマップの課題を解消するため、本研究ではインピーダンスマップを効率面からも評価可能にすることで、システムをより正確に把握することを目指す。

$$R_{in} = R_1 + \frac{(R_2 + R_3 + R_{ref})(R_2 R_3 + R_2 R_{ref} - X_2 X_3 - X_2 X_{ref}) + (X_2 + X_3 + X_{ref})(X_2 X_3 + X_2 X_{ref} + R_2 X_3 + R_2 X_{ref})}{R_2^2 + R_3^2 + R_{ref}^2 + 2(R_2 R_3 + R_3 R_{ref} + R_{ref} R_2) + X_2^2 + X_3^2 + X_{ref}^2 + 2(X_2 X_3 + X_3 X_{ref} + X_{ref} X_2)} \quad (5)$$

$$X_{in} = X_1 + \frac{(R_2 + R_3 + R_{ref})(X_2 R_3 + X_2 R_{ref} + R_2 X_3 + R_2 X_{ref}) + (X_2 + X_3 + X_{ref})(X_2 X_3 + X_2 X_{ref} - R_2 R_3 - R_2 R_{ref})}{R_2^2 + R_3^2 + R_{ref}^2 + 2(R_2 R_3 + R_3 R_{ref} + R_{ref} R_2) + X_2^2 + X_3^2 + X_{ref}^2 + 2(X_2 X_3 + X_3 X_{ref} + X_{ref} X_2)} \quad (6)$$

3. 効率を可視化するインピーダンスマップ

〈3・1〉 効率の導出方法 提案手法である効率を可視化する手法について述べる。インピーダンスマップにおいて新たに効率マップを作成して導入するにあたり、インピーダンスマップに対応した効率の式を導出しマップの合成方法を確立する必要がある。最初に効率の式の導出方法について述べていく。通常、電気回路において効率を導出する際は入力電力と出力電力を用いて $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ で導出することができる。そのため入力電力と出力電力を Z_{ref} で表すことで効率をインピーダンスマップに導入することができる。実際に Fig.1 の回路において入力インピーダンス Z_{in} の実部と虚部 R_{in} 、 X_{in} を Z_{ref} の実部と虚部 R_{ref} 、 X_{ref} で表すと(5)、(6)式のように導出できる。また入力電圧 V_{in} 、 Z_{in} を用いて、入力電力 P_{in} は(7)式で表せる。

$$P_{in} = \frac{R_{in}}{R_{in}^2 + X_{in}^2} V_{in}^2 \quad (7)$$

よって Z_{in} を Z_{ref} で表すことができれば入力電力を適切にかたちに変形できる。そこで(5)、(6)式を(7)式に代入し入力電力を Z_{ref} で表した。

出力電力についても入力電力と同様に考えることができる。Fig.1 において、負荷抵抗で消費される出力電力 P_{out} は(8)式のように表せる。

$$P_{out} = Z_{ac} \left(\frac{Z_5 V_{ind}}{Z_5 (Z_5 + Z_6 + Z_{ac})} \right)^2 \quad (8)$$

Z_s は(1)式に代入することで Z_{ref} で表すことができる。また V_{ind} は(9)式のように表せる。

$$V_{ind} = j\omega L_m \frac{V_{in}}{Z_{in}} \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_3 + Z_{ref}} \right) \quad (9)$$

(1)、(9)式を(8)式に代入することで出力電力を Z_{ref} で表すことができる。 Z_s が開放の場合であれば、(10)式のように求まる。

$$P_{out} = \frac{R_{ac}}{R_s^2 + X_s^2} V_{ind}^2 \quad (10)$$

これにより求めた入力電力と出力電力を用いることで、効率を Z_{ref} で表せるようになった。

〈3・2〉 マップの描画 視覚的に特性を把握できるようにするため、導出した効率を Z_{ref} を基準としたマップに描画する。従来のインピーダンスマップに合成して電力と効

率を統一的に検証可能にするため、作成する効率マップはインピーダンスマップに適合したものにする必要がある。

また合成先であるインピーダンスマップは既に Fig.3、Fig.4 のように2種類のデータが内包されている。そのため視認性を保ちつつ新しい要素を加えるに当たって、従来のインピーダンスマップも効率マップを合成可能な形に変える必要がある。

従来のインピーダンスマップでは結合係数、あるいは負荷抵抗のどちらか一方のみの変動を見ている。そのため、Fig.4 にあるように Z_{ref} 軌跡は線状となっている。これを結合係数と負荷抵抗(5 Ω ~ 9.5 Ω)の両方の変動を同時に考慮するように計算することで、Fig.5 に示すように面状の Z_{ref} 軌跡を描画することができる。

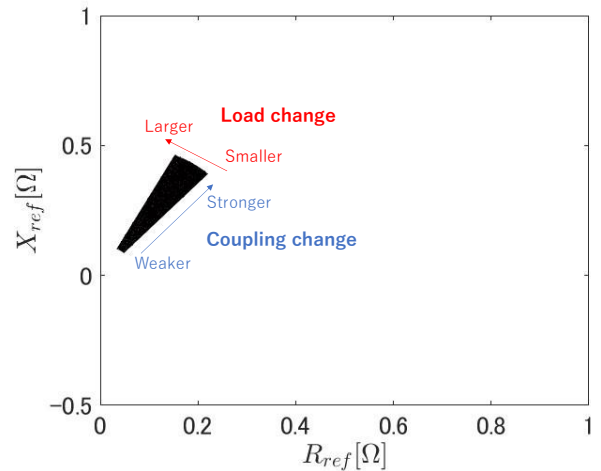


図5 拡張 Z_{ref} 軌跡

Fig.5 Extended Z_{ref} traces

Z_{ref} 軌跡は電力マップとの位置関係が互換性の有無を確認する上で重要なため、軌跡の上であれば追加の要素を加えることができる。本研究では効率の要素を入れ込むことが目的であったため、軌跡の上に効率マップを重畳させることで、インピーダンスマップに効率の要素を追加した。

〈3・3〉 提案するインピーダンスマップ Fig.6 に効率を追加した提案するインピーダンスマップを示す。提案するインピーダンスマップでは Z_{ref} 軌跡上に効率マップを描画している(以後、効率マップに統一する)。

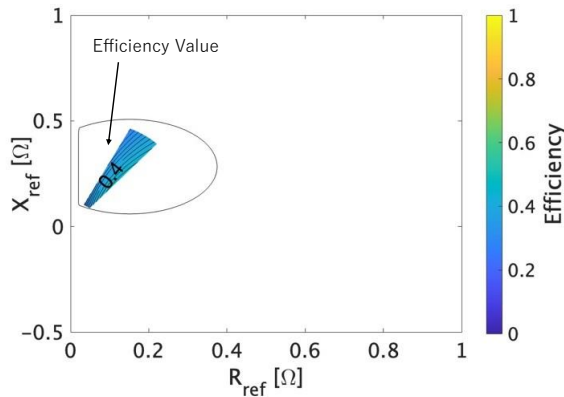


図6 提案するインピーダンスマップ
Fig.6 Proposed Impedance map

提案するインピーダンスマップでは電力面での伝送特性と効率面での伝送特性を同時に把握することができる。まず電力面での特性を見る方法は2章で述べた従来のマップと同様で、電力マップに描画されている線のうちシステムに要求する電力の線を切り出し、効率マップの描画範囲と照らし合わせることで行う。効率マップの描画範囲が電力マップの線内に収まっていれば電力面での互換性があると言える。例えばシステムに 1W の電力伝送を要求している場合、Fig.6 では電力マップから切り出した 1W の線内に効率マップが全て収まっているため、電力面での互換性はあると言える。

効率面での特性を見る方法についても説明する。効率マップ上には各 Z_{ref} における伝送効率が描画されている。Fig.6 の効率マップ内の線に書かれている 0.4 は、 Z_{ref} がその線上の値を取るときの効率が 0.4 であることを指す。効率マップが描画されている範囲はそのシステムがとりうる Z_{ref} の範囲を示している。そのため、効率マップの描画範囲内全てにおいてシステムに要求する効率を超えていれば、効率面での互換性があると言える。例えばシステムに 80%以上の効率を要求している場合、Fig.6 を見ると下回っているため、このシステムでは効率面の互換性がないと言える。

4. 実験を通した S/S 回路の伝送特性可視化検証

〈4・1〉 実験手法 次に 2、3 章でも用いた Qi 規格と同じサイズの送電コイルおよびタブレットへの搭載を想定した Qi 規格の 4 倍のサイズを受電コイルを用いて電力伝送実験を行い、提案した電力と同時に効率も可視化する手法の妥当性を確認する。4 章は Qi 規格を基準とした互換性がないシステム(S/S 回路 1)、5 章は問題点を改善した互換性のあるシステム(S/S 回路 2)について述べる。

実験ではまずインピーダンスアナライザで素子の値を測定し、提案手法に当てはめて計算を行った。その後、信号発生器および増幅器を用いて電力伝送を行い、オシロスコー

プを用いて伝送特性を測定した。伝送特性は入力電力および負荷抵抗で消費する電力を測定することによって確認した。伝送特性は送受電コイルの位置を Fig.7(a)、(b)および Table2 のように動かしながら行った。Fig.7(a)、(b)では送電コイルが上、受電コイルが下の位置関係となっている。また、Fig.7(c)、(d)に実験で使用したコイルを示す。

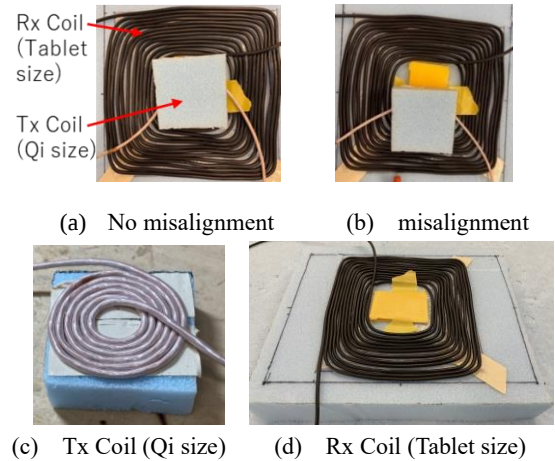


図7 実験で使ったコイル

Fig.7 Coil used in the experiment

表2 実験でのコイルの位置ずれ範囲

Table2 Coil misalignment range in the experiment

	X	Y	Z
Distance from Center	0 mm	0~60 mm	0 mm

コイルを各位置に置いたときの結合係数は式(11)に示すオープンショート法により測定している。ここで、 L_s L_o はそれぞれ 2 次側をショート、オープンさせた際に 1 次側から測定したインダクタンスを表す。

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_s}{L_o}} \quad (11)$$

伝送特性を測定後、提案手法による計算結果と比較することで電力と効率を可視化する提案手法を評価した。

実験では簡単のため 2、3 章と異なり Fig.8、Table3 に示すように S/S 回路を採用した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。負荷抵抗としては 20Ω の抵抗を使用している。

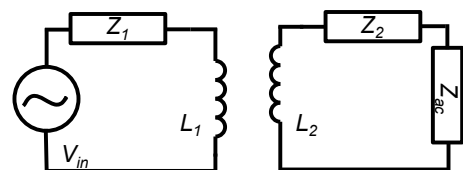


図8 実験で使った回路の模式図

Fig.8 Schematic diagram of the circuit

表 3 実験で使った素子の値(S/S 回路 1)

Table3 Values used in the experiment (S/S circuit 1)

	R	L	C
L_1	6.3 m Ω	1.8 μ H	0 F
L_2	83 m Ω	24 μ H	0 F
Z_1	0.34 Ω	0 H	1.4 μ F
Z_2	0.28 Ω	0 H	0.10 μ F
Z_{ac}	20 Ω	83 nH	0 F

V_{in} としては Qi 規格の規格書に書かれているテストモジュール⁽³⁾を参考に、実効値 1V、100kHz の正弦波を印加した。

Fig.9 に Table3 で得られたパラメータおよびコイルの定格 7A を用いて、Table4 のようにパラメータを変動させた際の提案するインピーダンスマップを示す。また、Fig.9 に示す赤線は実験と同様に Z_{ac} を 20 [Ω] に固定して結合係数のみを 0.02 から 0.25 まで動かした際の Z_{ref} 軌跡を示している。

今回の実験では S/S 回路を用いているため、電力マップは Fig.3 のような楕円形ではなく帯状となっており、Fig.9 の $R_{ref} = 0.1$ [Ω] における線は電力マップから 5W の線を切り出したものである。5W の線は Qi 規格のベースラインの上限である 5W を基準とした。効率マップがこの 5W の線からはみ出しているかどうか見ることで、5W の伝送が可能かどうかを確認出来る。

表 4 変化パラメータ(S/S 回路 1)

Table4 Changed parameters (S/S circuit 1)

k	Z_{ac}
0.02~0.25	1~20 Ω

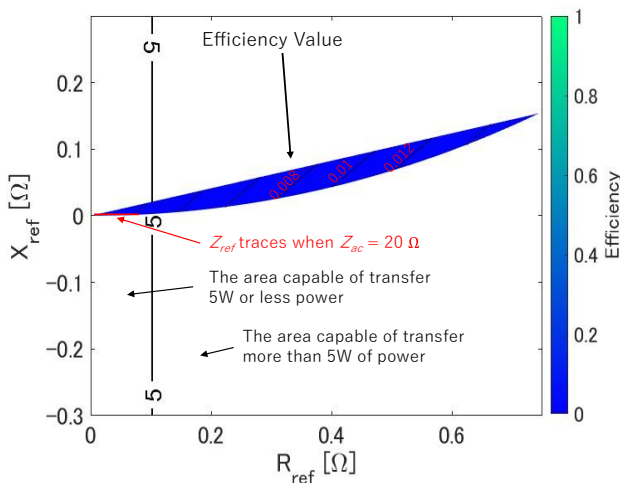


図 9 実験に使用した回路のインピーダンスマップ

Fig.9 Proposal impedance map of Experiment

Fig.9 では効率マップが電力マップの 5W の線から左には

みだしているため電力面での互換性がない。効率面での互換性についても確認する。効率における所望の値として Qi 規格の規格書に書かれているテストモジュールの最低効率 50%を目安とすると、Fig.9 の効率マップの描画範囲内に 50%を下回る部分が存在しているため、効率面においても互換性がないことがわかる。この傾向が電力伝送実験と一致しているか確認する。

〈4・2〉 実験値と計算値の比較 Fig.10 に S/S 回路 1

による電力伝送実験から得られた伝送特性の測定値と、提案手法による計算値を示す。

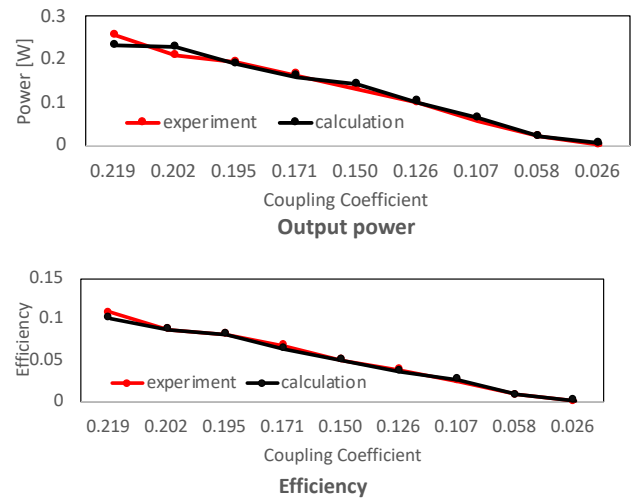


図 10 実験結果

Fig.10 Results of the Experiment

Fig.10 より、コイルの位置ずれが 0mm の $k=0.219$ における電力の値において誤差率が 9.1%であり、計算結果と一致していることが確認出来る。実験値と計算値の誤差については今回の実験で使用した送電コイル用の共振コンデンサの誤差が 13.2%であるため、コンデンサの誤差範囲内であると言える。実験値と計算値が一致していることから、効率を可視化する手法が妥当であることを確認できた。

5. 回路を改善しインピーダンスマップで確認

Fig.9、10 より、4 章の S/S 回路 1 を用いた実験の問題点として結合係数が高い場合においても効率が低いという点が挙げられる。5 章では回路を改善し、提案するインピーダンスマップを用いて改善された伝送特性を確認した。

効率が低くなる原因としては 2 点考えられる。1 つ目は 4.1 節でも示すように今回の実験で使用した負荷が最適負荷から大きく離れている点である。2 つ目としては 4 章の実験で補償回路として作成した共振コンデンサの個数が多く、内部抵抗が大きくなったことが原因として挙げられる。

以上 2 点を改善した回路を作成し測定したところ Table4

に示すようなパラメータが得られた。改善後の回路(S/S 回路 2)を用いてシミュレーションを行ったところ、伝送特性が Table5 の値にまで改善したのを確認できた。なお Table5 は送受電コイルの結合係数が 0.23 の値を示している。

表 5 改善後のシステムの素子値(S/S 回路 2)

Table5 Values of the improved system (S/S circuit 2)

	R	X
Z_1	11 m Ω	1.4 μ F
Z_2	0.22 Ω	0.10 μ F
Z_{ac}	3.9 Ω	0.33 μ H

表 6 改善後のシミュレーション値(S/S 回路 2)

Table6 Simulated values (S/S circuit 2)

P_{out}	Efficiency
0.97 W	0.85

これらの傾向は提案するインピーダンスマップを用いることでも確認することができる。Fig.11 に S/S 回路 2 における、提案するインピーダンスマップを示す。Fig.11 では Table7 のようにパラメータを変動させている。結合係数および負荷抵抗の変動を Table4 よりも制限することで、効率と電力の両方で互換性を確保した。ここで、効率における所望の値は 4 章と同様に Qi 規格のテストモジュールの最低効率 50%を基準としている。電力においても 4 章と同様に Qi 規格のベースラインの上限である 5W を基準とした。

表 7 変化パラメータ(S/S 回路 2)

Table7 Changed parameters (S/S circuit 2)

k	Z_{ac}
0.15~0.25	1~3.9 Ω

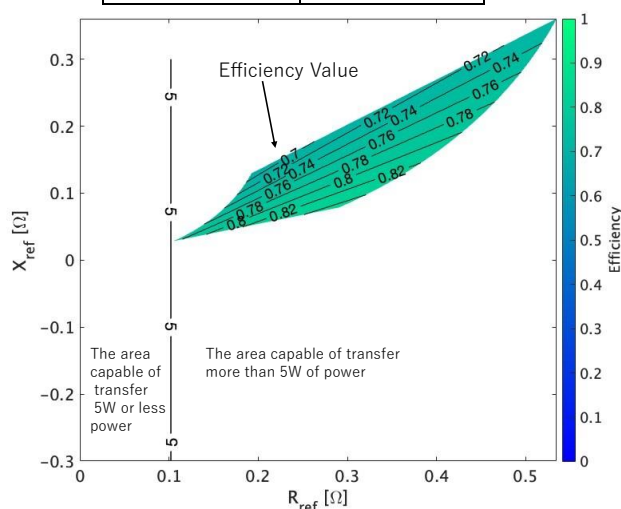


図 11 S/S 回路 2 の提案するインピーダンスマップ

Fig.11 Proposal impedance map of S/S circuit 2

Fig.11 をみると Fig.9 と異なり効率マップが電力マップの 5W 以上のエリアに収まっているため、S/S 回路 2 は電力面での互換性があると分かる。加えて効率マップ上の数字を読み取ると効率マップの全ての領域で所望の値である 50%を超えているため、効率面での互換性もあるということが出来る。

6. おわりに

伝送特性を把握し電力伝送に関する互換性を検証可能な手法であるインピーダンスマップに効率を追加できる解析手法を提案した。提案するインピーダンスマップを用いることで、効率を考える必要があるシステムにおいても互換性検証が可能になった。

実験を通した有効性の実証にも成功した。問題点として実験で作成したシステムでは効率が低かったという点が挙げられるが、最適負荷や共振回路の再設計で改善することができた。また、これらの特徴は再設計した値を適用することで、提案するインピーダンスマップにおいても確認することができた。

文 献

- (1) Kodai Takeda, Takehiro Imura, Toshiyuki Fujita, Takafumi Koseki and Yusuke Minagawa, "Visualized Evaluation of Feasibility of Power Transmission with Electrical Constraints in Wireless Power Transfer," 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (WoW2020), Nov. 2020.
- (2) Kodai Takeda, Toshiyuki Fujita, Takehiro Imura and Takafumi Koseki, "Power Transmission Characteristics of LCC Compensation Network to Coupling and Load Variation," 5th International Electric Vehicle Technology Conference 2021, May 2021.
- (3) WIRELESS POWER CONSORTIUM, "Qi Specification Version1.3," Jan. 2021
- (4) statcounter, "Tablet Vender Market Share Worldwide," URL:https://gs.statcounter.com/vendor-market-share/tablet/worldwide (Reference date : Jun.2022)
- (5) Siqi Li, Weihang Li, Junjun Deng, Trong Duy Nguyen and Chunting Chris Mi, "A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer," IEEE Transactions on Vehicular Technology, VOL.64, NO.6, Jun 2015.
- (6) Wei Zhang, Chunting Chris Mi, "Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, VOL.65, NO.6 Jun 2016.
- (7) Weihang Li, Han Zhao, Junjun Deng, Siqi Li, Chunting Chris Mi, "Comparison Study on SS and Double-Sided LCC Compensation Topologies for EV/PHEV Wireless Chargers," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.65, NO.6, Jun 2016.