

# 小型機器向け 磁界共振方式ワイヤレス電力伝送技術

Magnetic Resonance Type Wireless Power Transfer/Transmission Technology for Small Devices

宇佐美 豊      加藤 雅一      大館 紀章

■USAMI Yutaka      ■KATO Masakazu      ■ODACHI Noriaki

電源プラグを挿さなくても置くだけで充電ができるワイヤレス電力伝送技術が注目されている。その技術の一つである磁界共振方式は、比較的離れた場所へ電力を送ることができる利点がある。しかし、小型機器に用いる場合は比較的近距离であるが、機器を置く位置の自由度を確保したいという要望がある。

東芝テック(株)は、磁界共振方式を小型機器に適応できるように数cmの近距离に対応したワイヤレス電力伝送技術を開発している。このような距離の場合コイル間の結合係数は0.1～0.3程度と小さく、この結合係数を前提とした回路共振系を構成することによって、ワイヤレス電力伝送が可能になる。今回、コイル間距離と負荷、及び回路共振条件から動作可能な範囲を導出し、位置自由度を見積もる手法を開発した。

Wireless power transfer is attracting attention as a technology that offers a convenient style of charging electric devices by simply placing them on a charger, eliminating the need to plug them in to a power supply. Wireless power transfer using the magnetic resonance method has the advantage that power can be transferred to relatively distant locations. In the case of small devices, however, although relatively short transfer distances are usually sufficient, there is demand for larger tolerance of charger setting positions.

Toshiba TEC Corporation has developed a wireless power transfer/transmission technology for small devices by customizing the magnetic resonance method to provide a short-distance power transfer range of within a few centimeters. As the inductive coupling coefficient remains at around 0.1 to 0.3 due to the distances involved, it is possible to design a multi-resonant circuit satisfying the power transfer requirement by taking the tendency of this inductive coupling coefficient into consideration. By applying simulation, we have developed a solution to derive the applicable range from the coil distance, load, and circuit resonance conditions.

## 1 まえがき

従来のワイヤレス電力伝送は、電磁誘導方式を用いた近距离での利用が主流であったが、近年、磁界共振を利用して伝送距離を伸ばした電力伝送が実用化されるようになってきた<sup>(1)</sup>。伝送距離を非常に長くする場合には磁気結合トランスとしての結合係数 $k$ は0に近い小さな値になり、電力伝送特性はコイルのインダクタンス成分と抵抗成分及び周波数で決まる $Q$ 値に依存する特性になる。一方、空間距離が数cmの比較的近距离で使う場合には $k$ が0.1～0.3程度となり、この条件で共振回路を設計する必要がある。小型機器では伝送距離が数cm程度変動する可能性があるため、この範囲内で安定に伝送できることが求められる。東芝テック(株)は、回路構成とコイルの位置関係などから、磁界共振方式によるワイヤレス電力伝送をシミュレーションする技術を開発した。ここでは、開発した技術の概要と、検討した事例について述べる。

## 2 磁界共振方式の基本原則

磁界共振を利用した電力伝送の基本モデルを図1に示す。高周波入力電圧の周波数と、インダクタンス $L_1$ 及びコンデン

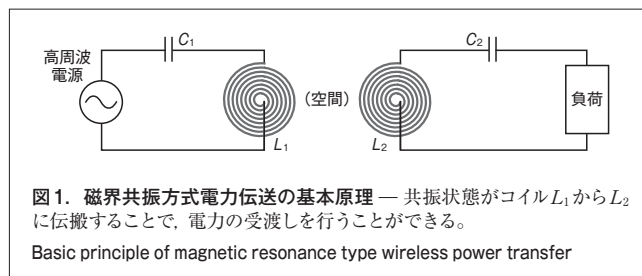


図1. 磁界共振方式電力伝送の基本原則 — 共振状態がコイル $L_1$ から $L_2$ に伝搬することで、電力の受渡しを行うことができる。

Basic principle of magnetic resonance type wireless power transfer

サ $C_1$ から成る回路の共振周波数を近い値にすることで、強い共振電流又は共振電圧が発生する。これに対向させて $L_2$ と $C_2$ から成る共振回路を構成し、その周波数を $L_1$ 、 $C_1$ 回路に近い値にすることで、共振状態が受電側に伝搬し電力を受け渡すことができる。このとき、二つのコイル間は数cm離れており $k$ が0.1～0.3の範囲にあると仮定する。これは、一般的なトランスの $k$ が0.8～0.99であるのに比べて小さい値である。

高周波の周波数は任意に決められるが、ここでは次の観点に基づいて選択した。小型機器を対象とするため、図1中の平面コイル $L_1$ 及び $L_2$ を小面積化することが望ましい。この観点では周波数が高いほうがよいが、一方で周波数が高いとこれを生成する回路構成が難しくなるとともに、回路内部で使われるスイッチング素子の損失も増大する。そこで、他の無線

機器などへの影響を考慮し、与干渉が少ないと考えられる6.78 MHzを候補とした。

### 3 高効率スイッチング電源技術の応用

図1の回路入力が高周波電圧であるが、小型機器の場合には商用電源又はAC(交流)アダプタ出力からこの高周波電圧を生成する必要がある。電力伝送が目的であることから、この電力変換は高効率であることが求められるが、近年ではスイッチング電源の高効率化が進み、共振型インバータを応用したZVS(Zero Voltage Switching)<sup>(注1)</sup>が主流になっている<sup>(2)</sup>。

スイッチング電源で使われているインバータの三つの基本回路構成を図2に示す。同図には、 $L_1$ 、 $C_1$ 、及び負荷から成る直列接続部分に印加される電圧 $U$ の波形を併せて示す。

フルブリッジ(a)の場合は、半導体スイッチS1とS4をオンすると電圧 $E$ が印加され、一方S2とS3をオンすると $-E$ が印加される。このスイッチング周波数を $L_1$ と $C_1$ の共振周波数近くに設定すれば、共振が誘導され負荷に大電力を供給できる。

ハーフブリッジ(b)は、フルブリッジの半導体スイッチの数を半分にしてコストダウンした構成である。S3とS4に代えて $C_2$ と $C_3$ を接続し、それらの中間点の電位が $E/2$ になるように平滑化している。S1をオンすると差引き $E/2$ が印加され、S2をオンすると差引き $-E/2$ が印加される。したがって、フルブリッジに対して半分の電圧しか印加されないことになり、入力電圧が低い場合は電力を取り出しにくいケースがある。逆に言うと、入力電圧が高い場合には有利になる。

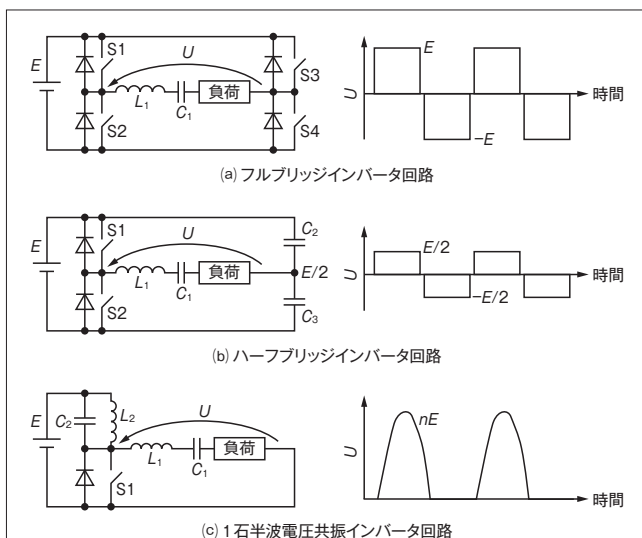


図2. 高効率インバータの基本回路構成 — 小型機器には1石半波電圧共振インバータ回路が適しているが、動作が不安定になりやすい。

Basic configuration of high-efficiency inverter circuits

(注1) 共振を利用してパワー半導体の端子電圧がゼロになる瞬間を作り、そのときに素子をオンさせることで電力ロスを大幅に減らす技術。

1石半波電圧共振(c)は、半導体スイッチの数を更に減らして $L_2$ と $C_2$ に置き換えた構成である。 $L_2$ と $C_2$ から成る電圧共振により、入力電圧 $E$ の数倍高い電圧が発生する。

これらの電圧波形を前述の磁界共振方式ワイヤレス電力伝送の高周波電圧源として利用することを考える。小型機器に搭載するためには、半導体素子が少なく安価なことが及び低電圧で駆動しやすいことが求められるため、1石半波電圧共振を選択した。ただし、この方式の場合、半波電圧共振を生成する $L_2$ と $C_2$ の共振と負荷側の $L_1$ と $C_1$ の共振から成る複合共振系となるため、動作が不安定になりやすい。したがって、位置自由度の範囲内でこの共振バランスを維持できるように、共振条件を定める必要がある。

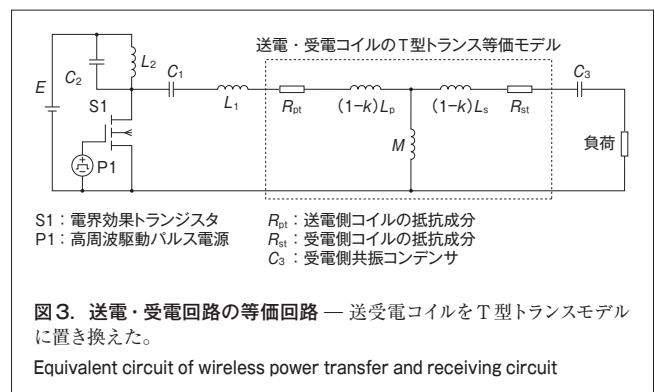
### 4 送電・受電回路のシミュレーションによる検討

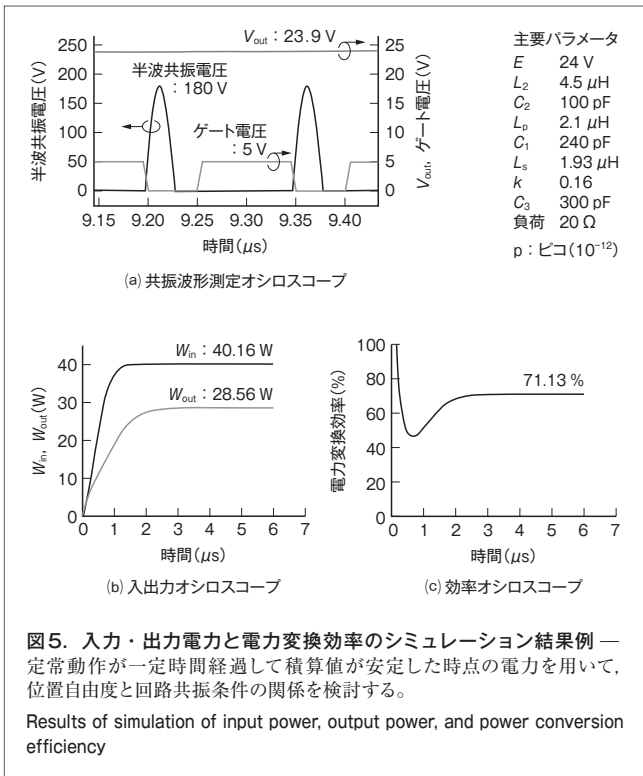
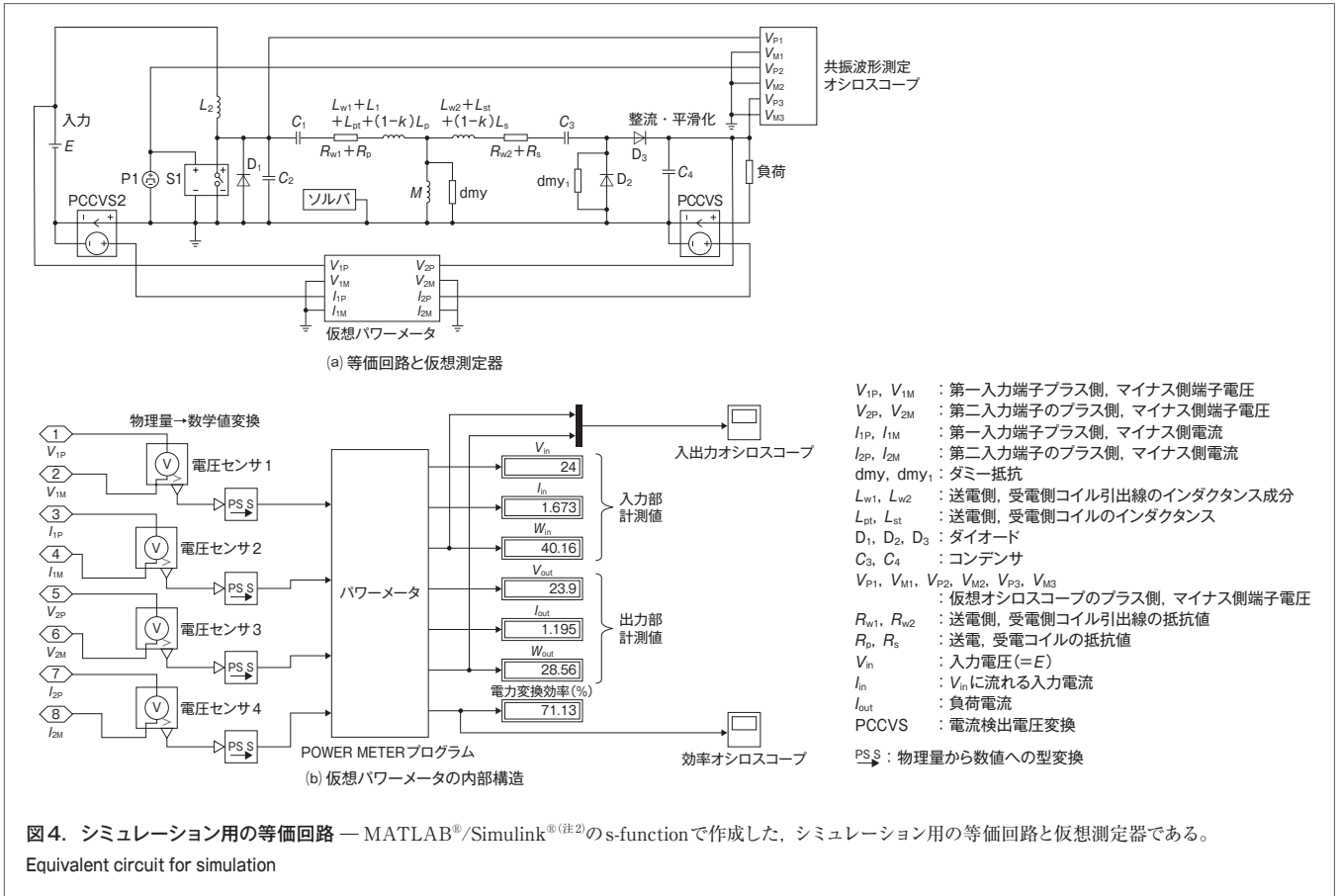
1石半波電圧共振を応用した送電・受電回路の等価回路を図3に示す。送電コイルと受電コイルをT型トランスモデルに置き換え、送電側及び受電側コイルの等価インダクタンスを $L_p$ 、 $L_s$ で表しこれらに働く関係を $k$ と相互インダクタンス $M=k\sqrt{L_p \cdot L_s}$ で表現する。

図3の等価回路をベースに、シミュレーション用に作成した回路を図4に示す。シミュレーションでは直流(DC)電圧出力が得られるように、高周波出力を整流・平滑化する回路を付加した。また、電力や変換効率を仮想測定するためのパワーメータ機能も作成した。電力は一定の時間間隔で電圧値と電流値をサンプリングし、瞬時電力を積分していくことで平均値を算出する。

シミュレーションによる出力例を図5に示す。(a)は、図中に記載した主要パラメータの値をもとに定常動作させたゲート印加電圧波形と、これをもとにスイッチングして発生させた半波共振電圧波形及び出力電圧波形 $V_{out}$ である。また(b)と(c)は、動作時の入力電力 $W_{in}$ と出力電力 $W_{out}$ 、及びこれらの比で定義される電力変換効率である。このシミュレーション結果を用いて、位置自由度と回路共振条件の関係を検討する。

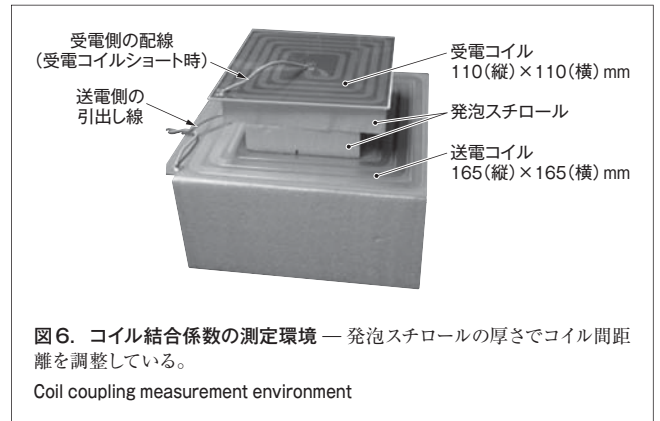
位置自由度が変わると、コイル間の $k$ が変化する。また、コ



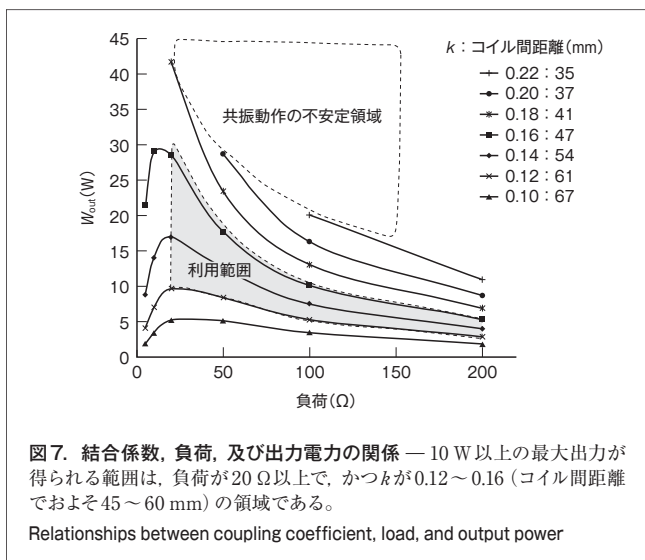


イル間の $k$ と距離の関係はコイルの形状に依存する。そこでここでは、一例として図6に示す平面コイルで検討した。この際、インダクタンス値を測るために引出し線を取り付ける必要があるが、もともとコイルのインダクタンス値は小さいため引出し線のインダクタンスも加味されてしまう。そこで検討に際しては、コイル本来のインダクタンス値と引出し線のインダクタンス値を分離し、 $k$ 及び $M$ を算出するように配慮した。

$k$ と負荷を変化させた場合の $W_{out}$ のシミュレーション結果を図7に示す。 $k$ が大きいと電力を伝送しやすいが、共振系への影響も顕著になるため共振動作が不安定になり、3章で



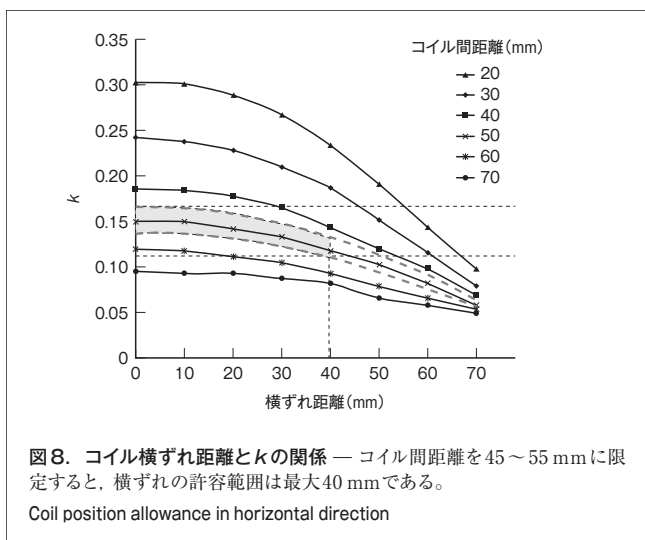
(注2) MATLAB®/Simulink®は、MathWorks Corp.の商標。



述べたZVSを実現できない場合がある。逆に $k$ が小さいと, 十分な電力を伝送できない。この回路構成の場合に, 負荷20 Ω時に $W_{out}$ が10 W以上必要だとすると,  $k$ が0.12~0.16 (コイル間距離でおよそ45~60 mm)の範囲が安全に使える領域であることがわかる。

次に, この $k$ の範囲と位置自由度の関係を更に詳細に検討した。コイル間距離をパラメータとして, コイルを横にずらした距離と $k$ との関係をシミュレーションした結果を図8に示す。図7に示した結果は横ずれなしの場合であり, 図8の横ずれ距離0 mmに相当する。コイル間だけでなく横ずれ方向の距離も検討する場合は, 例えばコイル間距離を45~55 mmに制限すると,  $k$ が0.12以上を保てる領域が横ずれの許容範囲であり, このコイルの場合は最大40 mmになる。

以上の解析結果から, このコイルと半波電圧共振回路の条件の組合せで, 負荷20 Ω時に10 W以上の $W_{out}$ を得るためには, コイルの横ずれがない場合に限定すると, コイル間距離の



自由度は45~60 mmと広く取れる。逆に, 例えばコイル間距離の自由度を45~55 mmに限定すると, コイルの横ずれ許容がなかったものが, 最大40 mmまで許容できるようになることがわかる。このように位置自由度とコイル間の $k$ の関係を見積もることができれば, 位置自由度をシミュレーション中の $k$ に帰着させ, 送電・受電回路の複合共振条件について様々な検討をすることができる。

## 5 あとがき

磁界共振方式を用いたワイヤレス電力伝送の位置自由度と回路共振条件の関係を, シミュレーション技術を交えて述べた。小型機器の場合は, 磁界共振の中でも数cmの距離で使用する場合のため, コイルの $k$ が0.1~0.3程度となる状況での検討になる。位置自由度に対応する $k$ をシミュレーションに含めることで, 回路共振条件を考慮した特性が算出できる。

以上の結果より,  $k$ はコイル間距離によって変化し, 共振を構成するインダクタンス値が変化することを示した。これはコイル間距離によって回路の共振条件が変わってしまうことを意味する。したがって, 想定する距離範囲と負荷範囲に対して送電・受電コイルとインバータ共振から成る動作可能範囲をできるだけ広く設計するために, 今回開発した手法は有用である。

一方, コイル間の伝送距離を長くできるということは, 送電コイルと受電コイル間に異物が入り込みやすいというデメリットにもなる。これをいかに検出して安全性を高めるかについても, 回路の共振系設計は重要な役割を持つと考えられる。

## 文献

- 庄木裕樹. “ワイヤレス電力伝送の技術動向・課題と実用化に向けた取り組み”. 電子情報通信学会ホームページ. <<http://www.ieice.org/~wpt/paper/WPT2010-07.pdf>>. (参照2013-06-17).
- 原田耕介. スイッチング電源ハンドブック. 東京, 日刊工業新聞社, 2000, 549p.



宇佐美 豊 USAMI Yutaka, D.Eng.

東芝テック(株)商品技術企画部 研究開発センター参事, 博士(工学)。インバータ, スイッチング電源, ワイヤレス給電などの研究・開発に従事。  
Toshiba TEC Corp.



加藤 雅一 KATO Masakazu

東芝テック(株)商品技術企画部 研究開発センター参事。無線通信や, RFID, ワイヤレス給電などのアナログ及びデジタル技術に従事。  
Toshiba TEC Corp.



大館 紀章 ODACHI Noriaki, D.Eng.

研究開発センター ワイヤレスシステムラボラトリー主任研究員, 博士(工学)。ワイヤレス電力伝送及びアンテナの研究・開発に従事。IEEE, 電子情報通信学会会員。  
Wireless System Lab.