

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：53203

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13934

研究課題名(和文) 商用周波数で磁気共鳴させた鉄筋コンクリート越しのワイヤレス給電

研究課題名(英文) Wireless power transmission through a reinforced concrete plate using circuits resonating at common utility frequency

研究代表者

古川 裕人 (Furukawa, Hiroto)

富山高等専門学校・電気制御システム工学科・准教授

研究者番号：30238670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：金属格子や板越しのワイヤレス給電(WPT)を実現するために磁気共鳴方式のWPTに低周波の磁場を用いた。超低周波を用いると電磁コイルの重量が重くなる欠点があるため、WPTの専用シミュレータを開発して軽量の電磁コイルの設計を行った。その結果、以前に作成した電磁コイルの重量が11.9kgであったのに対して1.69kgまで軽量化することに成功した。また、装置の性能は、伝送距離30mmにおいて伝送効率91%、伝送電力426Wを実現した。さらに、伝送空間を1mm厚のステンレス板で隔てた場合においても伝送効率80%、伝送電力317Wの高い性能を実現した。これらの伝送性能は過去の報告例に比べ格段に高い。

研究成果の概要(英文)：To achieve wireless power transfer (WPT) through a metal steel plate, a super-low frequency (SLF) was used as a resonance frequency. In this study, we designed lightweight coils using a WPT simulator that we developed previously. As a result, the weight was reduced to 1.69 kg from 11.9 kg, the previous coil weight. At a resonance frequency of 400 Hz, the transmission efficiency and output power of advanced SLF-WPT reached 91% and 426 W, respectively, over a transmission distance of 30 mm. Furthermore, 80% efficiency and 317 W output were achieved when transmitting power through a 1 mm-thick stainless-steel plate. This performance is much better than that in previous reports.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：ワイヤレス給電 超低周波

### 1. 研究開始当初の背景

磁気共鳴方式のワイヤレス給電(WPT)は、2007年にマサチューセッツ工科大学の研究グループが Witricity と呼ばれる技術を発表して以降、電気自動車(EV)への充電を適応例として国内外で盛んな研究が行われている。

現在、EVへの応用では、85 kHz程度の交流電源を用いることで規格化が進んでいる。高周波数を用いるとコイルを小さく軽くすることができるため応用上の利点が生まれる。一方で高周波を使うことの欠点もある。例えば、伝送空間を金属壁で遮断してしまえば、壁の向こう側へは、電力を送ることはできない。つまり、現在の磁気共鳴方式のWPTでは、伝送空間が、電磁波の損失要因が無い空間(自由空間)であることが前提となっている。しかし、用途によっては、伝送空間に何らかの物体が存在する場合も想定される。例えば、金属配管内などの閉じた空間への電力伝送、海中でのWPT、さらには、建物の内壁や外壁越しのWPTなどが想定されるが、これらの用途で現在の磁気共鳴方式を用いることは難しいため、新たな方式が求められていた。

### 2. 研究の目的

上記の研究背景から、本研究では、金属壁もしくは、鉄筋コンクリート壁のような金属物体を含む壁越しのWPTを目指す。金属壁で密閉された空間に電力供給ができれば、鉄筋コンクリート壁越しや海中での給電は、より簡単な課題である。よって、本研究では、金属壁で密閉された空間へのWPTを最終的な目的とする。また、具体的な性能としては、伝送距離30mmにおいて、1mm厚の金属壁越しに出力電力300W、電力効率80%を目標に設定した。

良く知られているように金属物体の内部に侵入できる交流磁場の深さは、表皮効果により説明できる。表皮効果の式によれば、磁場の侵入深さは、周波数の平方根に反比例するため、周波数を非常に低くすれば、数ミリ厚程度の金属板ならば、磁場がほとんど減衰することなく通過する。一見、高効率のWPTが可能であるように思えるが、現行のWPT装置は、そもそも高周波を用いることで高効率を実現しているため、そのまま周波数を下げても上手くいかない。よって、本研究目的を達成するのは、非常に低い周波数(超低周波)でありながら高い効率を有するWPT装置を開発することが前提となる。

### 3. 研究の方法

上記の研究課題に取り組むには、コンピュータシミュレーションが不可欠であるが、シミュレータそのものが存在していないため、本研究では、研究期間の前半において専用シミュレータの開発を行う。そして、研究期間後半では、この専用シミュレータを用いて超低周波(400Hz以下)においても高効率、大

電力での電力伝送が可能な電磁コイルの設計を行う。さらに、シミュレータ上で金属壁越しのWPTにとって最適な駆動周波数を見出す。最終的にシミュレータ上で性能が実証された装置を実機として製作し、その性能を検証する。

### 4. 研究成果

本研究では、過渡応答解析が行えるように電磁界解析には、時間領域解析の一種である時間領域差分法(FDTD法)を採用した。FDTD法では、刻み時間 $\Delta t$ 毎に時系列に電磁界計算を進めるが、 $\Delta t$ はクーランの安定条件に従うように設定しなければならない。そのため、FDTD法を低周波問題で使用する場合は、計算時間が非常に長くかかる。本研究では、この問題を Graphics Processing Unit (GPU)を用いた並列計算により解決した。

図1に示したように設計した電磁コイルを3次元空間において一定の距離を隔てて対向させて配置し、奥行方向(z方向)の中央位置での2次元面(x-y面)での磁場分布の計算を行った。解析空間に仮想的に Yee 格子と呼ばれる格子を配置して格子の交点における電界、その格子の周囲における磁場を計算した。Yee 格子の概念図を図2に示す。格子のサイズ( $\Delta x \times \Delta y$ )は $1.0 \times 1.0$  mm、格子数( $N_x \times N_y$ )は $352 \times 288$ に設定した。また、解析空間の縁に設定する吸収境界条件として Perfectly Matched Layer を用いた。その他の計算条件は、表1にまとめた。各項目の詳細については、発表論文②を参照して頂きたい。

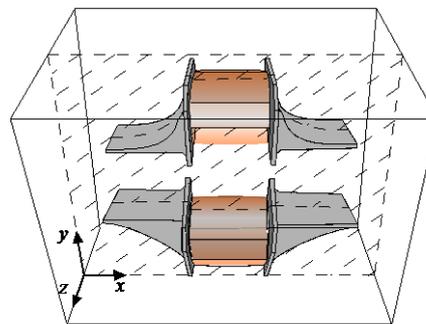


図1. WPTシミュレーションのモデル

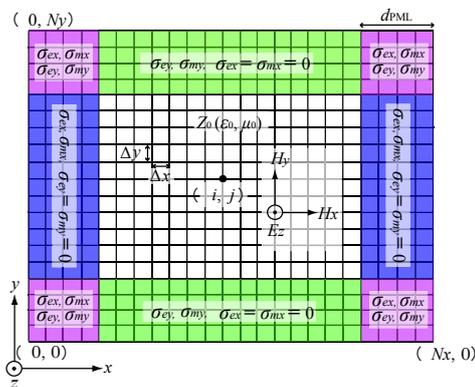


図2. 2次元面(x-y面)に仮想的に設定した Yee 格子

表 1. WPT シミュレーションの主な計算条件

Parameter	Condition	Remarks
Number of cells of Yee lattice $N_x \times N_y$	352×288 cells	
Width of the PML absorption boundary	16 - 32 cells	
Cell sizes $\Delta x, \Delta y$	1.00 mm	
Model to actual size scale ratio	1 time	
Step time $\Delta t$	$2.35 \times 10^{-12}$ s	Scale ratio is one time
Frequency of power supply	100 - 400 Hz	
Input current $I_{IN}$	3.0 to 6.0 A RMS	Sinusoidal wave
Transmission distance	1.0 - 6.0 cm	
Diameter of winding	1.5 mm	
Number of turns $N_1, N_2$	473 turns	
Conductivity of winding	$59.6 \times 10^6$ S/m	Copper winding
Winding resistance $r_1, r_2$	1.12 $\Omega$	It was calculated value by the simulator.
Magnetic permeability of the magnetic core	According to the $\mu$ - $H$ curve	
Core loss resistance $r_c$	0.4 $\Omega$	Measured value
Load resistance $R_L$	$R_{Lmax}$	It was calculated value by the simulator.

図 3 に GPU による並列計算の概念図を示す。1 枚目の GPU では、磁気共鳴を起こさない（つまり、電磁誘導のみ）状態での計算を行い、伝送効率の計算などに必要なパラメータ（磁気結合係数  $k$ 、コイルの品質ファクター  $Q$ ）を計算する。この計算と並行して 2 枚目の GPU では、コイルに仮想的に共鳴用のコンデンサを接続することで、実際の駆動時の磁場分布を計算する。GPU 間で必要な情報をやり取りし、伝送性能に関わる伝送効率や伝送電力を瞬時値として計算できるようにした。GPU を用いたことで計算時間は格段に短縮された。

本シミュレータによる出力例として磁束密度の時間平均値をコンターグラフとして表したものを図 4 に示す。全てのコンターグラフにおいて下側が給電コイル、上側が受電コイルである。図 4(a)は、受電コイルを開放した状態であり、ある程度、給電コイルに磁束が鎖交している様子がわかる。図 4(b)は、受電コイルに負荷抵抗を接続した状態である。負荷抵抗が接続されると受電コイルには、誘導電流が流れるが、この誘導電流は、レンツの法則に従い磁束の鎖交を妨げる向きに流れる。シミュレーション結果からも受電コイルの磁場が遮断されている様子がわかる。この状態は、電磁誘導のみを利用した WPT と等価であり、電磁誘導のみでは、大きな電力を送送できないことが理解できる。図 4(c)は、集中定数素子として共鳴用のコンデンサをコイルに対して直列に接続した場合のシミュレーション結果である。磁気共鳴によりコイル間の磁気結合が、図 4(b)に示した電磁誘導のみの場合よりも強くなっている様子がわかる。これらの結果は、磁気共鳴方式の WPT の一般的な理解と一致するものである。

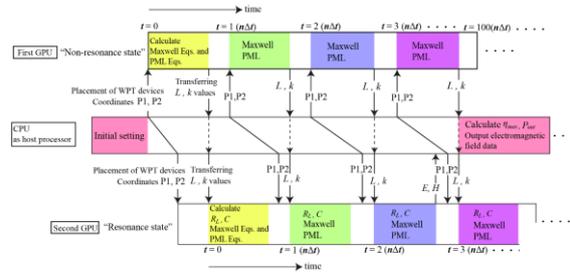


図 3. GPU を用いた電磁界計算の概念図

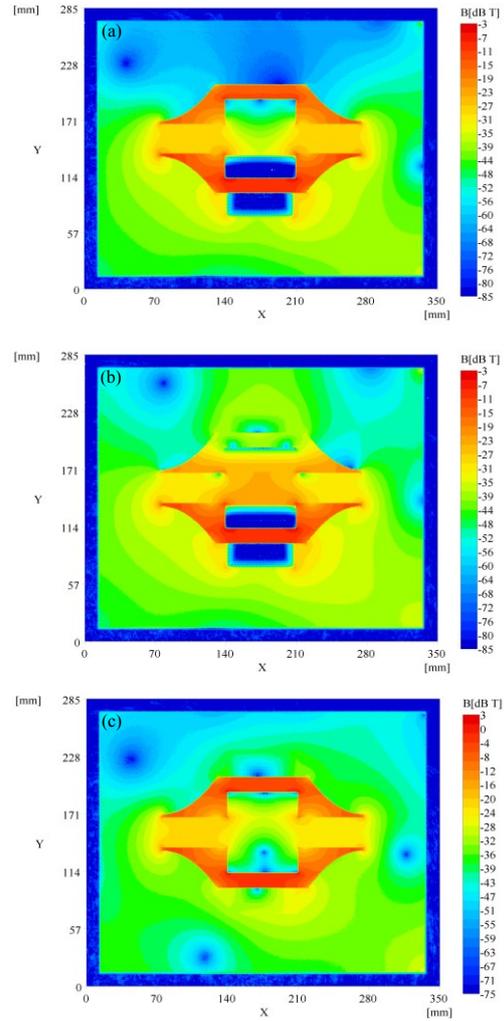


図 4. シミュレーション結果の一例（磁束密度分布）(a) 受電コイル解放時、(b) 電磁誘導のみを利用した場合、(c) 磁気共鳴させた場合

次にシミュレーションを行ったモデルと同じ仕様の装置を実際に作製し実験結果との比較を行った。シミュレータによる計算結果と実験結果を比較した結果を図 5 に示す。図中の破線が計算結果であり、プロットが実験結果である。伝送効率、伝送電力ともに両者は良く一致しており、この結果よりシミュレータ上で伝送性能をある程度予測できるようになったと言える。

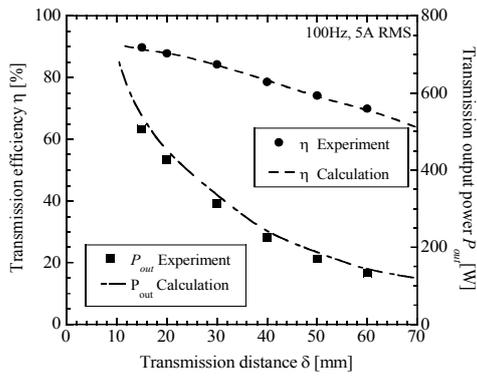


図 5. 伝送性能の計算および実験結果の比較

続いて金属壁越しの WPT について取り組んだ。図 6 に示すシミュレーションモデルのように受電コイルを 1mm 厚さのステンレス(SUS304)ボックスで密閉した状況を仮想的に作り、コイルの最適形状や最適な駆動周波数についてシミュレータ上で詳細に調べた。シミュレーション結果の詳細は、発表論文①に記載した。

図 7 にシミュレーション結果に基づいて製作した実機の写真を示す。P5 は 150 Hz 付近で最大効率・最大電力に達するように設計した装置である。また、P6 は 400Hz 付近で最大効率・最大電力が得られるように設計した装置である。図 8 に P6 のシミュレーション結果を示す。図 8(a)がステンレスボックス無しの場合の結果であり、図 8(b)がステンレスボックス有りの場合の結果である。期待通り 400Hz の超低周波であれば、ステンレス板で磁場は、ほとんど減衰することなく、コイル間で強い磁気結合を保てることになった。

次に図 9 の写真に示すように図 8 に示したシミュレーション結果と同じ状況を再現して検証実験を行った。尚、この写真では、ステンレスボックスの蓋が開いているが、実際の実験では、完全に閉じた状態で行った。また、装置の駆動には、写真に示した正弦波 PWM インバータを用いた。インバータ単体での電力変換効率は、駆動範囲において 93-94%であった。

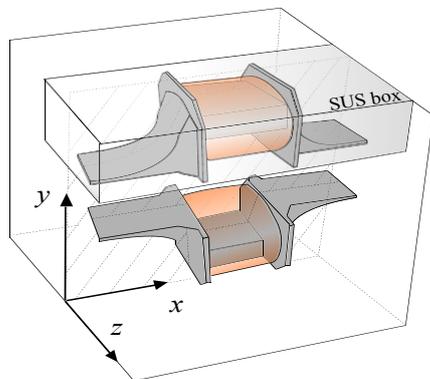


図 6. 受電コイルをステンレスボックスで密閉したシミュレーションモデル

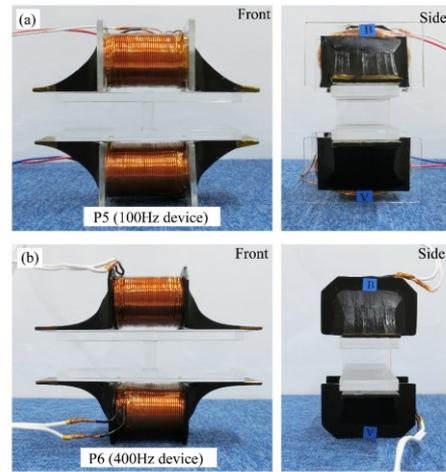


図 7. シミュレーション結果に基づいて作製した実機、(a) 100-200 Hz での駆動を想定した P5、(b) 350-450 Hz での駆動を想定した P6

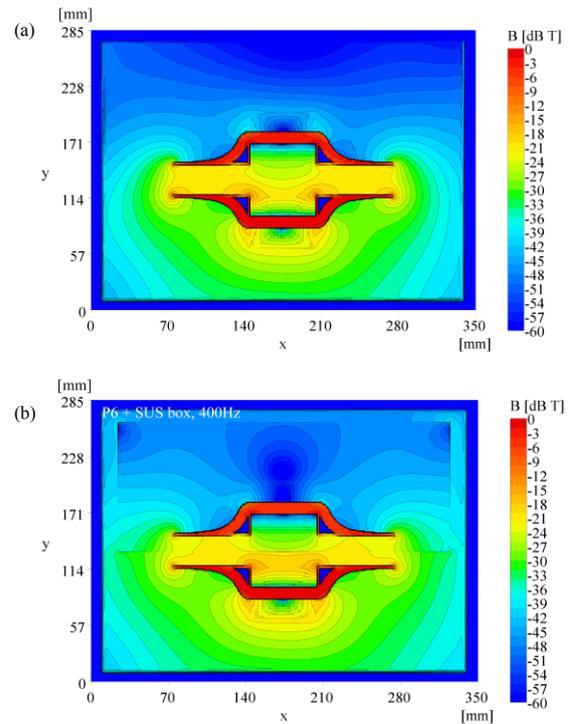


図 8. ステンレスボックス内部への WPT を想定したシミュレーション結果、(a) ステンレスボックス無し、(b) ステンレスボックス有り

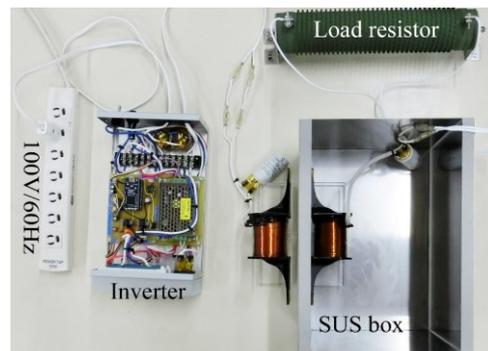


図 9. P6 を用いた検証実験の様子

図 10 に P6 の伝送性能を示す。図 10(a)は、ステンレスボックスが無い場合の結果である。実験結果と計算結果は、良く一致している。例えば、伝送距離 30 mm における伝送効率 91%、伝送電力は 426 W であった。超低周波においても高周波システムと遜色ない伝送性能を実現できることを確認した。

図 10(b)は、ステンレスボックスが有る場合の結果である。ステンレスボックスが無い場合に比べやや性能は落ちるが、伝送距離 30 mm において伝送効率 80%、伝送電力 317 W を達成した。この性能は、これまでの報告例よりも格段に高いことから、研究目標を十分に達成する成果を得ることができた。

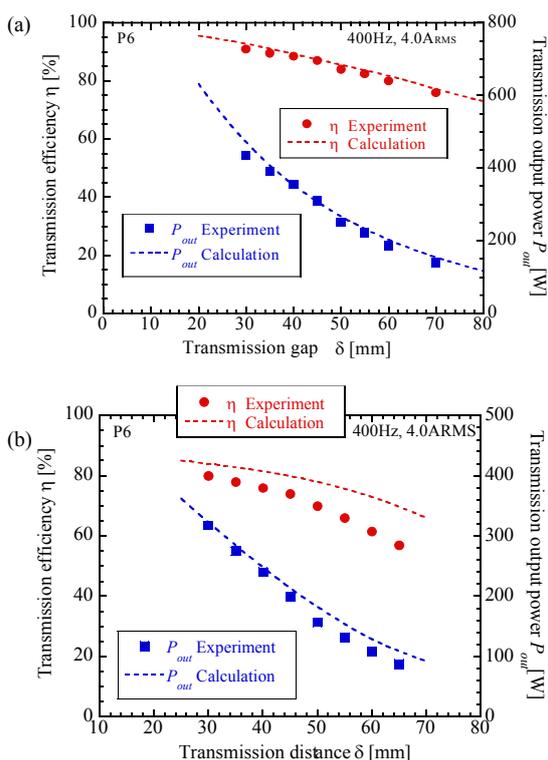


図 10. P6 による検証実験の結果、(a)ステンレスボックス無し、(b)ステンレスボックス有り

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- ① H. Ishida, T. Kyoden, and H. Furukawa, “Super-low-frequency wireless power transfer with lightweight coils for passing through a stainless steel plate”, *Review of Scientific Instruments*, vol. 89, no. 034706 (1)-(11) (2018). 査読有  
DOI: 10.1063/1.5010855
- ② H. Ishida, H. Furukawa, T. Kyoden, and T. Tanaka, “Development of a wireless power transmission simulator based on finite-difference time-domain using graphics accelerators”, *IET Power Electronics*, vol. 10, pp. 1889-1895 (2017). 査読有  
DOI: 0.1049/iet-pel.2017.0263

- ③ H. Ishida, H. Furukawa, and T. Kyoden, “Development of design methodology for 60 Hz wireless power transmission system”, *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 5, pp. 429-438 (2016). 査読有  
DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejjia.5.429>

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 石田弘樹, 古川裕人, 経田僚昭, 「低周波を用いた金属板越しの非接触給電」電気学会全国大会, no. 4-131, p.214, 2018 年 3 月 16 日 (九州大学)
- ② 田中貴大, 石田弘樹, 古川裕人, 経田僚昭, 「超低周波ワイヤレス給電装置のシミュレーション」第 68 回電気・情報関連学会中国支部連合大会, no. R17-04-01, 2017 年 10 月 21 日 (岡山理科大学)
- ③ 石田弘樹, 古川裕人, 経田僚昭, 「時間領域差分法による非接触給電装置の数値計算」電気学会全国大会, no. 4-174, pp.305-306, 2017 年 3 月 17 日 (富山大学)
- ④ 石田弘樹, 田中貴大, 古川裕人, 経田僚昭, 「時間領域差分法による非接触給電のシミュレーション」第 67 回電気・情報関連学会中国支部連合大会, no. R16-04-02, 2016 年 10 月 22 日 (広島大学)
- ⑤ 石田弘樹, 古川裕人, 経田僚昭, 「GPGPU による 60 Hz ワイヤレス給電の数値計算」第 66 回電気・情報関連学会中国支部連合大会, no. 4-8, 2015 年 10 月 17 日 (山口大学)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古川 裕人 (FURUKAWA, Hiroto)

富山高等専門学校・電気制御システム工学科・准教授

研究者番号：30238670

### (2) 研究分担者

石田 弘樹 (ISHIDA, Hiroki)

岡山理科大学・理学部・応用物理学科・准教授

研究者番号：50413761

経田 僚昭 (KYODEN, Tomoaki)

富山高等専門学校・商船学科・准教授

研究者番号：50579729