

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：51101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06249

研究課題名（和文）マルチデバイスワイヤレス給電を実現する新しい対数螺旋構造コイルの開発

研究課題名（英文）Development of new logarithmic spiral coil for multi-device wireless power transmission

研究代表者

野中 崇（Nonaka, Takashi）

八戸工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：00390386

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,000,000円

研究成果の概要（和文）：広範囲で安定して給電するため、外径部、内径部の円形コイルと、中間部の対数螺旋コイル、中間部と内径部をつなぐ対数螺旋の接続部で構成される対数螺旋型の送電コイルを提案し、関数で表現できるコイルは、数値計算により、インダクタンス、結合係数を得ることができた。さらに、コイルの抵抗値である直流抵抗と表皮効果および近接効果による交流抵抗も算出し、コイルのQ値の導出を行った。  
また、実用化を考慮した励磁回路の製作、生体への電磁界影響に配慮した電磁界シミュレータによるSARの評価方法について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の対数螺旋のような形状を関数で記述できるコイルであれば、自己インダクタンス、相互インダクタンス、抵抗の計算が可能であり、電力伝送の送電電力や効率を予測することが可能となる。複雑なコイルでも形状を関数で記述できれば、計算でき、設計が可能となる。また、電磁界を発生する機器は、設計の段階で電磁界暴露の評価を行うことで、より安全、安心につながる製品を提供できることにつながる。

研究成果の概要（英文）：We proposed a logarithmic spiral power transmission coil for stable power supply over a wide range. In the coil that can be expressed by a function, the inductance and the coupling coefficient could be obtained by numerical calculation. Furthermore, as the resistance value of the coil, the DC resistance and the AC resistance due to the skin effect and the proximity effect were also calculated, and the Q value of the coil was calculated.  
We examined the manufacturing method of the excitation circuit for practical use and the evaluation method of SAR by the electromagnetic field simulator considering the effect of electromagnetic field on the living body.

研究分野：磁気工学

キーワード：ワイヤレス給電 対数螺旋

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多くのモバイル機器を所有し、使いこなす現代社会において、頻繁なモバイル機器への充電は日常生活動作のひとつと捉えることができる。充電環境を変革する、モバイル機器への同時給電、異なる規格の機器に対応したマルチデバイスワイヤレス給電を給電範囲においてひとつのコイルで実現する給電ステーション型ワイヤレス電力伝送の構築を目的とする。現在のモバイル機器ごとに異なる充電器をひとつの給電ステーション型充電器に集約することができる。広範囲で安定して給電するため、送電コイルは新しい変則型の対数螺旋コイルを提案する。

2. 研究の目的

広範囲で安定して給電するため、送電コイルは新しい変則型の対数螺旋コイルを提案し、高効率ワイヤレス給電を可能とする送電コイル設計を結合係数  $k$  とコイルの  $Q$  値の最適化により実現する手法を確立する。

3. 研究の方法

- (1) 対数螺旋型の送電コイルは、外径部、内径部の円形コイルと、中間部の対数螺旋コイル、中間部と内径部をつなぐ対数螺旋の接続部で構成される。すべて数式で表現できることから、ノイマンの公式により相互インダクタンスを数値計算により求め、結合係数を得る。
- (2) ワイヤレス電力伝送の伝送効率はコイルの  $Q$  値にも関連することから、コイルの抵抗値の算出を行う。抵抗値は直流抵抗と表皮効果および近接効果による交流抵抗によって表現できる。
- (3) 送電側の高周波インバータ励磁回路を設計し、システム全体の総合効率について検討を行い、実証実験を行う。
- (4) 生体への電磁界影響に配慮し、電磁界シミュレータによる SAR の評価を行う。

4. 研究成果

(1) 円形で分布させた送電コイルを実際に作製する際、円形巻線間を結ぶ部分が存在するため、厳密な形状を再現することはできない。円形巻線のみでの設計では巻線間を結ぶ部分の影響を考慮していない。そこでコイルの巻線が分布している部分を対数螺旋で表現し、対数螺旋部を含んだ送電コイルの結合係数の計算を行うことで、巻線間を結ぶ部分の影響による特性の違いも検討できる。実際に作製できる形状の送電コイルの結合係数分布の特性を予測可能となる。対数螺旋は(1)式の極方程式  $r(\theta)$  に従う。

$$r(\theta) = Ae^{B\theta} \tag{1}$$

$A$  と  $B$  は対数螺旋関数の特徴を示す定数である。  $\theta$  は角度を示している。Neumann の式を用いた対数螺旋関数に従う巻線と円形巻線間の相互インダクタンス  $M_{12}$  の計算結果を(2)、(3)に示す。

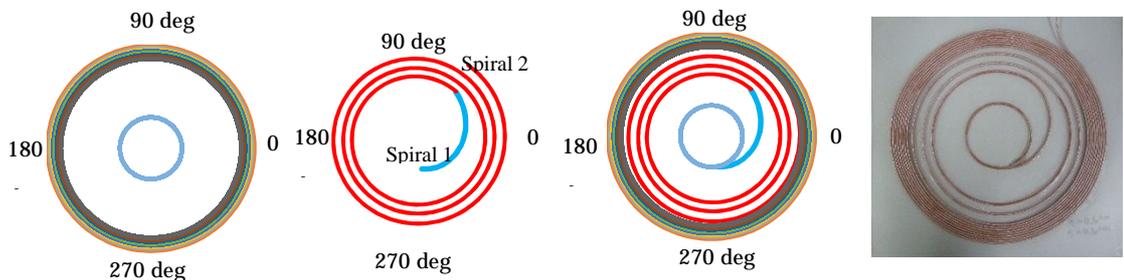
$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \frac{RAe^{B\theta_2} \sqrt{1+B^2} \{\cos(\theta_1 - \theta_2) - B \sin(\theta_1 - \theta_2)\} d\theta_1 d\theta_2}{r \sqrt{(B \cos \theta_2 - \sin \theta_2)^2 + (B \sin \theta_2 + \cos \theta_2)^2}} \tag{2}$$

$$r = \sqrt{d^2 + (x + R \cos \theta_1 - Ae^{B\theta_2} \cos \theta_2)^2 + (y + R \sin \theta_1 - Ae^{B\theta_2} \sin \theta_2)^2} \tag{3}$$

$R$  は円形巻線の半径である。  $\alpha$ 、 $\beta$  は対数螺旋の積分範囲である。対数螺旋関数に従う巻線の自己インダクタンス  $L$  は(4)に示す。

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} \int_{\alpha}^{\beta} Ae^{B\theta} \sqrt{1+B^2} d\theta + M_{LS} \tag{4}$$

$M_{LS}$  は対数螺旋コイルの外部インダクタンスである。外側の集中巻線と2つの対数螺旋コイルで構成した円形巻線部と対数螺旋巻線部それぞれ図1(a)、(b)に、全体図と実際のコイルの写真を図1(c)、(d)に示す。対数螺旋コイルの螺旋定数と角度範囲を表1に示す。送電コイルの自己インダクタンスの計算値と周波数300 kHzでの実測値は37.0  $\mu\text{H}$ 、36.4  $\mu\text{H}$ であり、実測での巻線抵抗は62 m  $\Omega$ であった。図2(a)、(b)に対数螺旋を含む分布巻コイルの結合係数分布の位置ずれ特性の計算値、実測値を示す。横ずれ方向の角度によって結合係数分布に違いがあることがわかる。それぞれの角度について計算結果と実測結果の特徴が類似していることが確認でき、対数螺旋コイルを設計することが可能となった。

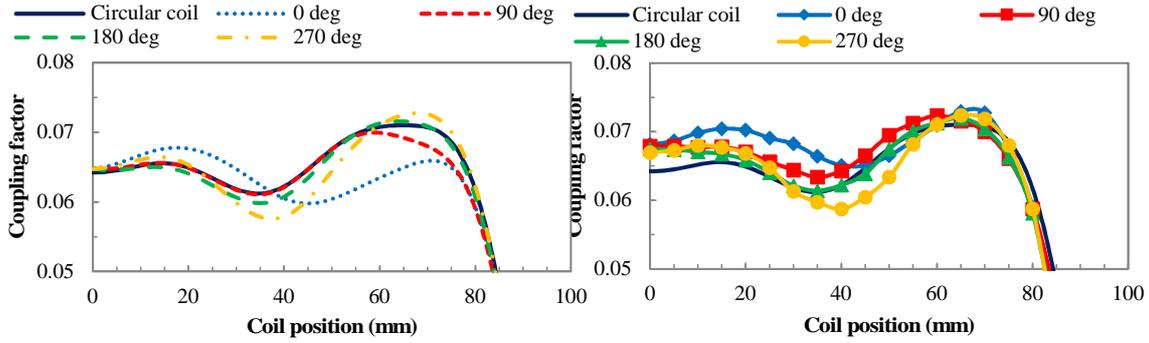


(a) 円形巻線部 (b) 対数螺旋巻線部 (c) 対数螺旋コイル (d) 作製したコイル

図1 対数螺旋コイルの概形図と作製したコイルの写真

表 1 対数螺旋コイルの螺旋定数と角度

Name	A	B	$\alpha$ (deg)	$\beta$ (deg)
Spiral 1	0.30	0.30	-440	-310
Spiral 2	0.30	0.02	-4630	-3640



(a) 計算値 (b) 実測値

図 2 対数螺旋コイルの結合係数分布

(2) 本研究ではコイルの作製にリッツ線を使用しており、交流抵抗を予測できれば、コイルのインダクタンスと合わせて受電電力や、伝送効率の予測が可能となる。リッツ線の交流抵抗の理論計算を行った。本研究で使用しているリッツ線は複巻形のものであるが、単純に素線を撚り合わせただけのものと近似して計算を行った。単純に撚りだけの構造では素線のデカルト座標上への配置は非常に単純にでき、素線数より極方程式に従い、素線を配置した(図3)。

渦電流損を計算するため、ある素線によって他の素線に生じる磁界を計算する必要がある。素線番号  $m$ 、 $n$  において、番号  $m$  の素線が  $n$  に生じさせる磁界は、水平方向の磁界  $H_{nm_x}$ 、垂直方向の磁界  $H_{nm_y}$ 、合成磁界  $H_{nm}$  は式(5)、(6)、(7)とできる。

$$H_{nm_x} = \frac{I}{2\pi N} \frac{r_{ny} - r_{my}}{(r_{nx} - r_{mx})^2 + (r_{ny} - r_{my})^2} \quad (5)$$

$$H_{nm_y} = \frac{I}{2\pi N} \frac{r_{nx} - r_{mx}}{(r_{nx} - r_{mx})^2 + (r_{ny} - r_{my})^2} \quad (6)$$

$$H_{nm} = \sqrt{H_{nm_x}^2 + H_{nm_y}^2} \quad (7)$$

リッツ線の表皮効果に起因する交流抵抗  $R_s$  は以下の式(8)で計算できる。なお、この式には直流抵抗を含んでいる。

$$R_s = -\frac{\omega\mu_0 d}{4\pi a} \frac{\text{ber}_0(x) \{\text{ber}_1(x) - \text{bei}_1(x)\} + \text{bei}_0(x) \{\text{ber}_1(x) + \text{bei}_1(x)\}}{\text{ber}_1^2(x) + \text{bei}_1^2(x)} \quad (8)$$

図 1(d)のコイル形状における交流抵抗の数値計算を行った。同時に自己インダクタンスの計算を行い、Q 値の算出を行った。図 4 に巻線抵抗と Q 値の周波数特性を示す。計算結果と実測結果との比較を行った。結果から、理論計算結果の方が実測結果よりも値が小さくなったが、Q 値と抵抗の曲線的な特性は類似しており、一定の成果が得られた。誤差の原因として、実際のコイルの接触抵抗、折れ曲がった部分により抵抗が考えられる。

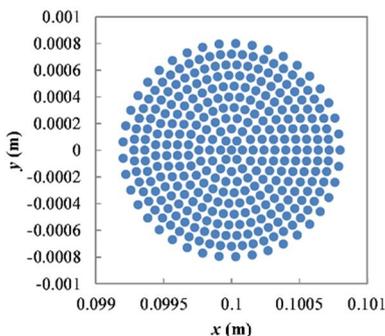


図 3 リッツ線の素線配置

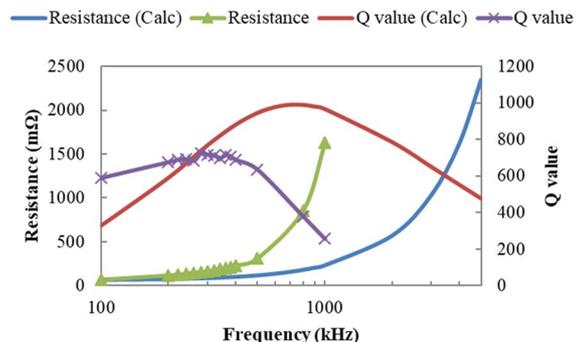


図 4 巻線抵抗と Q 値の周波数特性

(3) 図 5 に本研究で製作した E 級アンプの基本回路を示す。図 6 にワイヤレス電力伝送における負荷と 1 次・2 次コイル、共振用コンデンサを含めた回路を示す。図 5 の E 級アンプにおける負荷  $R_L$  を、ワイヤレス電力伝送回路のインピーダンスから、コイルと抵抗の直列負荷とみなし、E 級アンプの回路パラメータの設定を行った。

コイル間距離 5 mm、負荷 39  $\Omega$ 、周波数 300 kHz とした。効率はインバータ回路自体で 94%、コイル間効率を含めた総合効率は 82% となった。図 7 に負荷特性を示す。設計通り 39  $\Omega$  で最大となり、20 から 60  $\Omega$  の範囲において高効率で安定した特性が得られた。

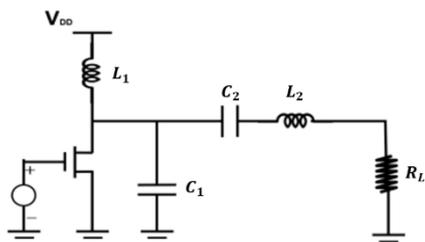


図 5 E 級アンプの基本回路

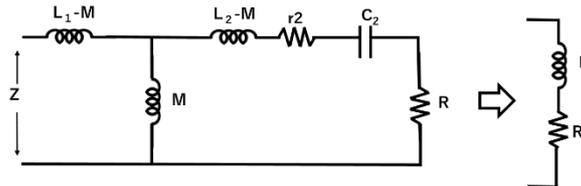


図 6 ワイヤレス電力伝送における等価回路

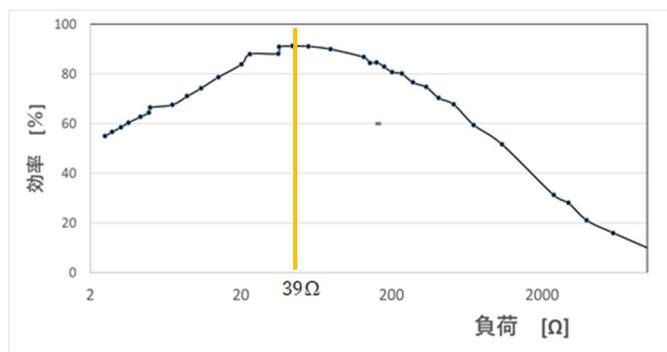


図 7 製作した E 級アンプの負荷特性

(4) 図 8 に検討した空心コイルを示す。1 次コイル (20 回巻) には二段階分布巻コイルを採用し、外径 90 mm、内径 40 mm、厚さ 1 mm、2 次コイル (20 回巻) は外径 60 mm、内径 20 mm、厚さ 1 mm とした。周波数  $f$  は 300 kHz とし、直列共振用コンデンサ  $C_1$ ,  $C_2$  を設定し、 $V_1$  は負荷で消費される電力が 20 W となるように設定した。また、このときの一次側電流  $I_1$  および二次側電流  $I_2$  はそれぞれ 331 mA, 707 mA とした。電磁界シミュレータより電流密度分布を取得し、(20)式を用い SAR を算出した。

$$SAR = \frac{j^2}{\sigma\rho} \quad (20)$$

図 9 に 1 次コイルから 3 mm 下の SAR 算出結果を示す。電流密度からの算出結果が 0.01552 であった。ICNIR が定める局所平均 SAR の基準値と比較すると、十分下回った。計算値の妥当性について検証が必要であり、今後の課題であるが、ひとつの検討手法として活用できることがわかった。

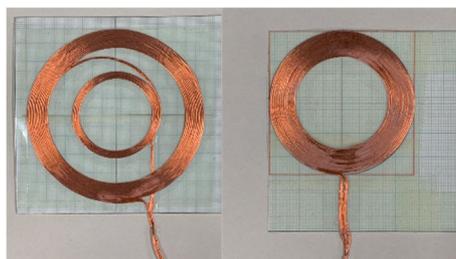


図 8 検討用の空心コイル

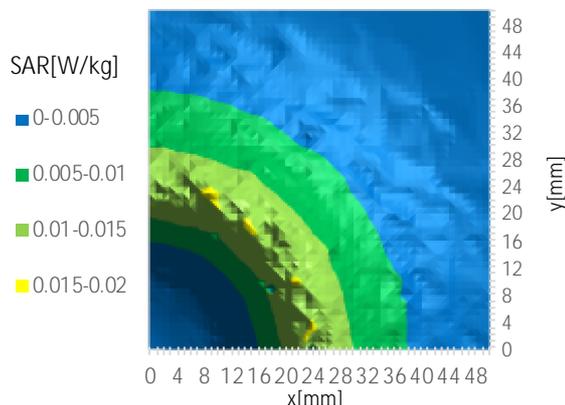


図 9 シミュレーションによる SAR 分布

<引用文献>

水野勉 他, 「磁性めっき線を用いた空心コイルの交流抵抗」, Journal of the Magnetics

Society of Japan, Vol. 34, No. 3, pp. 401-406 (2010)

三澤 崇弘 「EV用非接触給電システムにおける実規模給電回路に関する研究」,平成24年度  
東北大学大学院工学研究科 電気・通信工学専攻 修士学位論文

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 甲田 智也, 野中 崇
2. 発表標題 ミアングコイルによる共振型ワイヤレス電力伝送システムの位置特性の改善
3. 学会等名 平成30年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤 大晟, 野中 崇, 佐藤 健
2. 発表標題 モバイル機器の充電装置からの漏洩磁界の低減と高効率化
3. 学会等名 平成29年度東北地区高等専門学校専攻科産学連携シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野中 崇
2. 発表標題 ワイヤレス電力伝送における対数螺旋コイルの設計
3. 学会等名 マグネティックス研究会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----