

磁界共鳴方式ワイヤレス給電のMHz帯におけるモデリングと実験

Modeling and Experiment on Magnetic Resonance Wireless Power Transfer in MHz Band

堂本航一¹⁾ 王晶²⁾ 古川達也³⁾

Koichi Domoto, Jing Wang and Tatsuya Furukawa

¹⁾計測エンジニアリングシステム株式会社 シニアエンジニア (〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-9-5 SF 内神田ビル,
E-mail: domoto@kesco.co.jp)

²⁾博士(工) 計測エンジニアリングシステム株式会社 主任 (〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-9-5 SF 内神田ビル,
E-mail: jing_wang@kesco.co.jp)

³⁾工博 MachLabo, 佐賀大学 名誉教授, 〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地, E-mail: tach@cc.saga-u.ac.jp

In a smart society, it is desirable to be able to use electronic devices at any locations. To realize this convenience, the contactless power supply to the devices over medium distances is required. In the development of these technologies, the collection coil analysis is very important, and at the same time, there are many issues to be solved. In this paper, the authors report on the modeling, coil analysis, and experiments on the wireless power transfer using the magnetic resonance over medium distances, and the possibility of using finite element analysis in the system design.

Key Words : Wireless Power Transmission, Magnetic Resonance, MHz Band, CAE

1. はじめに

スマート社会では、電子機器を自由な位置で使用できることが望まれており、その利便性の実現には、中距離の機器への非接触給電が求められている。

これらの技術開発においてコイルの解析は、非常に重要であると同時に解決すべき課題も多い。

筆者らは、中距離での磁界共鳴式ワイヤレス給電のモデリングとコイル解析と実測を行い、システム設計を行う上での有限要素解析の活用の可能性を検討してきた [1]。

本稿では、磁界共鳴方式にとって重要なコイル共振周波数について、寄生キャパシタンスと自己共振周波数の関係をシミュレーションと実測で比較し、考察を行ったので報告する。

2. 磁界共振方式のワイヤレス給電

ワイヤレス給電方式は、大きく電界結合方式、電磁誘導方式があるが、その中でも近年、期待されているのは、後者に属するコイルを利用した磁界共鳴方式である。磁界共鳴方式は、送電側と受電側のコイルを共振状態として使うことで長距離でも高効率伝送を実現できるため、急速に技術開発が進んでいる。

コイルを共振状態で使用するには、外付けのキャパシタを接続するか、コイルの自己共振を使用するなどいくつか方法がある。コイル共振時は、コイルに発生する電圧が高いため、外付けのキャパシタを使用する際は、耐電圧に注意する必要がある。

一方、自己共振を利用したシステムでは、そのような注意は、不要ではあるが、キャパシタンス値を調整

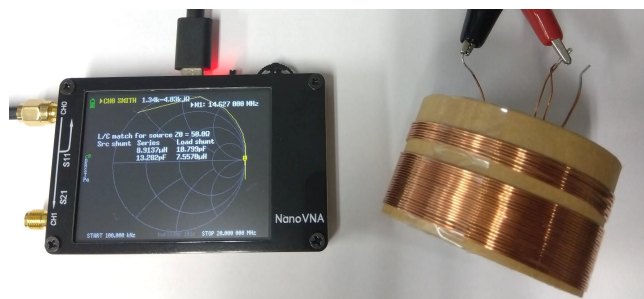


写真-1 測定装置

して、送受信コイルで一致させることが困難な場合がある。また、コイルの設計において、共振周波数を合わせこむためにキャパシタンスを変化させることは、設計上必須事項であり、形状に依存する相互インダクタンスや寄生キャパシタンスを含めたシミュレーション手法は、極めて有益であると考えられる。

3. 解析と実験の対象

本稿では、MHz帯での電磁誘導方式の実験を行った際に使用した写真-1に示す先のシステム [1] を流用した。伝送用コイル [2] は、電線を紙製のボビンに巻き付けたものであり、写真-1右に示すように直径 50mm の芯に 0.8 Φ のポリウレタン銅線を巻き付けており、巻数は、21 ターンである。写真では 2 つのコイルが巻かれているが巻数の多いコイルが本稿での対象である。

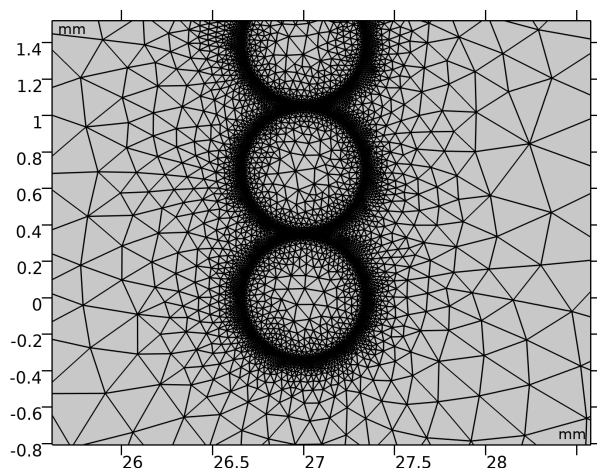


図-1 メッシュ

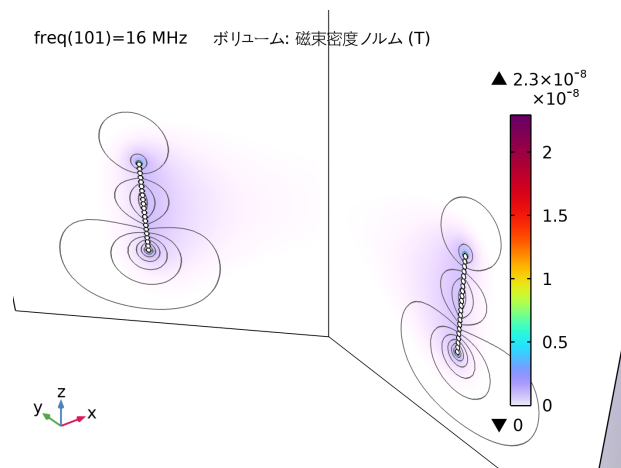


図-2 解析結果

4. シミュレーション

本解析には、COMSOL Multiphysics 6.2（以降、CAE ツールと略す）を利用し、低周波電磁波解析専用の AC/DC モジュールを用いた。シミュレーションモデルは、軸対象三次元モデルとし、周波数領域での解析を行った。コイルのモデルは軸対象のジオメトリのため、リング状のコイルを巻き数である 21 ターン分積層したモデルとなっている。コイルの電磁場解析を行う場合、計算量を少なくするためにコイルの領域を設定し、内部の電流とターン数を指定する手法がある。しかし、本稿の趣旨である、寄生キャパシタンスの要素を含んだ解析にはコイルの形状の再現が必要である。実際のコイルはスパイラル状であるが、今回のモデルはリング上のため同じ形状ではない。そのため比較結果に差がある場合の要因の一つであることは認識として必要な部分である。

解析では、磁場および電場インタフェースを使用した。これは、全ての計算領域が一様な比透磁率 1 を持つという仮定をするので、マクスウェル方程式を単純化でき、計算時間を短縮することができる。解析モデルのメッシュを図-1 に示す。コイルの磁場解析においては表皮効果による電流分布を考慮する必要がある。解析する周波数によって、電流の深さが決まるため、その深さに対して十分精度が出る解析ができるようメッシュを作成する必要がある。本モデルでは線径は 0.8 Φ であり、線間の隙間は 0.1 μm とした。表皮深さは 10 MHz で 10 μm 程度のため、導線表皮付近は 10 μm のサイズでメッシュを作成している。コイルのモデルを図-2 に周波数解析のシミュレーションの結果を図-3 に示す。

コイルの自己共振周波数は、コイルのインダクタンス成分と寄生キャパシタンス成分によって決定し、その周波数では、コイルのリアクタンスが急激に変化する。本シミュレーションの結果からインピーダンスにピークが発する共振周波数は、13.3 MHz と推定できる。

5. 実測の測定手法および結果

次にコイルの実測を行った。自己共振周波数の測定には、簡易ネットワークアナライザ NanoVNA（写真-1

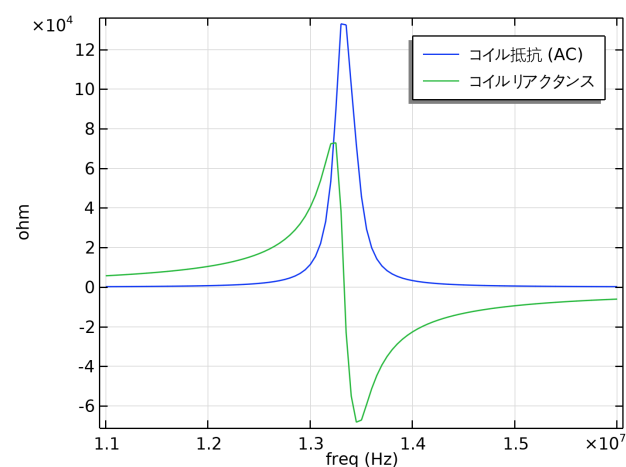


図-3 周波数解析結果

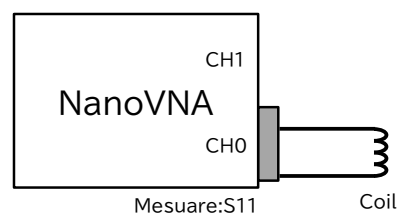


図-4 測定系の模式図

左) を用い、電力の収支を意味する S パラメーターを測定した。ネットワークアナライザは被測定物に高周波信号を入力し、伝送損失や反射損失を測定する測定器である。被測定物への入力信号の大きさ、反射して戻ってきた信号の大きさや、被測定物を通過して出力された伝送信号の大きさを検出する。これら測定した値を S パラメータと呼ぶ。今回測定する反射係数は、その入力信号と反射信号から表される S11(反射波)と呼ばれる値である。

測定手法は、図-4 に示すように、測定対象コイルは、ネットワークアナライザの CH0 ポートに接続する。CH0

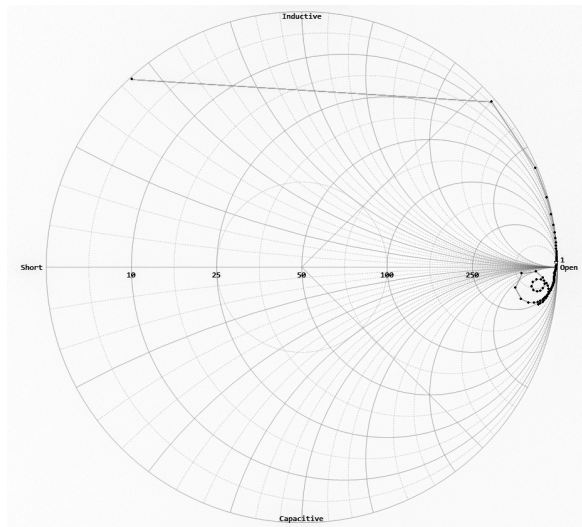


図-5 測定結果（スミスチャート）

から測定する周波数領域の信号が出力され、コイルからの反射を同じ CHO ポートで測定して S11 を測定している。

図-5 に測定結果のスミスチャートを示す。高周波回路の設計評価に用いられるスミスチャートは、ある周波数におけるインピーダンスをプロットする表現方法である。

スミスチャートの横軸は、抵抗成分であり、円がリアクタンス成分である。リアクタンスの縦軸の無限大が横軸の無限大につながるよう配置されている。つまり、チャートの上半部から下半部に移動する点である虚部が正から負に移動する周波数は、インピーダンスのピークが存在する周波数であり、本解析における共振周波数となる。測定の結果、10.6MHz 付近に存在することが確認できた。コイルのパラメーターには、インダクタンス、寄生キャパシタンス、直流抵抗成分が存在するが、この中で小型のコイルの寄生キャパシタンスの測定は、LCR メーターでは、微小容量であるため一般的に難しい。共振周波数から寄生キャパシタンスを算出するために、筆者らは外付けのキャパシタンスを追加し、共振周波数が変動分から寄生キャパシタンスを求めた。LC 回路における共振周波数 f_0 は以下となる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

共振周波数 f_0 から未知である L と C を算出するには、二つの共振周波数の結果が必要である。そこで、コイルに実測値 450pF のキャパシタを並列に接続し、共振周波数の変化を測定し、変化分からコイルのキャパシタンスを計算した。追加のキャパシタを接続した状態でネットワークアナライザで測定を行った結果、コイル共振周波数は 1.1MHz となり、寄生キャパシタンスは計算より 4.9pF となった。このキャパシタンス値を使い、インダクタンス値を算出したところ 46μH となった。

6. シミュレーションと実測の比較

本稿の比較対象であるコイル共振周波数について、実測では 10.6MHz でありシミュレーションでは 13.3MHz であった。さらにシミュレーション結果である共振周波数から実測値である寄生キャパシタンス 4.9pF を利用しインダクタンス値は算出すると 30μH となった。また、逆にインダクタンス値 46μH を用いて寄生キャパシタンス値を算出すると 31pF となった。しかし、筆者らが先に行った本コイルのインダクタンス算定 [1] では、実測値とシミュレーションによる解析値は、LCR メーター（NF 社製 2345）での実測値が 37μH に対し、3D モデルでの解析値は 33μH であった。これらの値の差について考察を行と、実測のインダクタンス値はネットワークアナライザの入力端子でキャリブレーションを行っていても、接続するコイルへのリード線分によりインダクタンス値が大きくなる傾向にあると考えられる。そのため、実測のコイル共振周波数から寄生キャパシタンスを算出した場合、インダクタンス値は大きめである可能性がある。また、寄生キャパシタンスについては簡易測定環境では、pF レベルについては十分な精度で測定することは難しい。シミュレーションの観点では、コイルの形状とモデリングの差で μH オーダーか pF オーダーの誤差の何れかが発生しやすいかを考えると、こちらも pF レベルの寄生キャパシタンスはコイルの線間距離により影響が出やすいと考えられる。以上より、実測のインダクタンス値 37μH に対して、寄生キャパシタンスを共振周波数から算出した値を比較する。シミュレーションでは共振周波数 13.3MHz に対して寄生キャパシタンスが 3.9pF であり、実測は 10.6MHz に対して寄生キャパシタンスが 4.9pF であることは経験則上十分に近い値であると考えられる。

7. まとめ

本稿では MHz 帯での磁界共鳴方式ワイヤレス給電用コイルの自己共振周波数を解析し、実測との結果を比較した。実測と解析結果には絶対値の差が存在するが、実機のシミュレーションモデルの差異ならびに測定系の誤差の原因について検討を行った。その結果、差について定性的な関連と理論的に結びつけられる可能性を確認でき、コイルシミュレーションにおける一つの観点を提示できたと考える。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、計測エンジニアリングシステム（株）技術部長米大海氏ならびに同社橋口真宜氏には、解析についてのご助言を頂いた、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 堂本航一，王晶：ワイヤレス給電用コイルにみる実測と電磁界シミュレーションとの比較，計算工学講演会論文集，Vol.29, pp.12–16, 2024.
- [2] グリーン・エレクトロニクス，No.6，ワイヤレス給電の技術と実際，CQ 出版社，2011.