

高効率非接触エネルギー伝送のための高精度解析技術開発

プロジェクト責任者

太田 智浩 パナソニック電工解析センター株式会社（現パナソニック株式会社）

著者

太田 智浩^{*1}、阿部 賢吾^{*1}、加田 恭平^{*1}、河瀬 順洋^{*2}、山口 忠^{*2}、中野 智仁^{*2}、
片桐 弘雄^{*2}、平田 勝弘^{*3}、西川 憲明^{*4}、廣川 雄一^{*4}

* 1 パナソニック電工解析センター株式会社

* 2 国立大学法人岐阜大学

* 3 国立大学法人大阪大学

* 4 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 23 年 4 月 1 日～平成 24 年 3 月 31 日

アブストラクト

ワイヤレス電力伝送技術が注目されている。小出力で近接型の充電システムが市場に普及しはじめ、中・長ギャップ間を給電する共振を積極活用したワイヤレス給電技術については、研究開発が加速している。これらは今後高出力化に向けた研究開発が進められると考えられる。一方ギャップを介して給電されるイメージにより効率の低さや待機電力の増大が心配されている。しかし、電磁誘導を利用するワイヤレス給電では効率重視の視点でシステム構成や設計を最適化すれば、スイッチング電源等の高周波インバータを利用するシステムと同等レベルの効率に近づけられる。本プロジェクトは、三次元有限要素法を用いた電磁界解析により、非接触エネルギー伝送システムの動作特性を地球シミュレータ上で解析し、損失を高精度に求め、渦電流が少ない低損失な巻線を得るための指針とすることを目的としている。その基礎検討として非接触充電コイルの二次コイルを精密にモデル化し、地球シミュレータを用いた電磁界解析により、二次コイル中の渦電流が一次コイルの交流抵抗に与える影響を定量的に明らかにする。

キーワード： 大規模シミュレーション、電磁界解析、非接触エネルギー伝送、交流抵抗

1. はじめに

ワイヤレスで電力を供給できる非接触エネルギー伝送は、利便性向上や金属端子レスによる信頼性、安全性向上などが期待でき、快適で安全な社会を実現するための技術として注目されている。一方で地球温暖化防止のため CO₂ の削減が義務化されており、省エネルギーの観点から高効率化が重要となっている。巻線や磁性体などの形状や配置を変更して損失が最小となるように設計する必要があり、高精度な損失シミュレーションは非常に有効となる。ただし、巻線やコアの精密なモデル化が必要なため未知数が数千万規模となり、計算メモリと計算時間の点から従来は計算困難であった。そのため試作した

サンプルを評価して実験的に仕様を決定しており、損失の詳細を把握することは難しく設計に時間を要する。文献(1)で地球シミュレータによる三次元電磁界解析手法が開発され、未知数が数千万規模の計算でも現実的な時間で計算できると考えられ、損失の詳細を明らかにできれば高効率化を期待できる。

本プロジェクトでは、非接触エネルギー伝送システムの動作特性を地球シミュレータ上で解析し、巻線損失を高精度に求め、コイル中の渦電流が少ない低損失な巻線を得るための指針とすることを目的とする。今年度は、その基礎検討として非接触充電コイルの二次コイルを1ターンまたは2ターンで精密にモデル化し、地球シミュレータを用いた電磁界解析により二次コイル中の渦電流が一次コイルの交流抵抗に影響を与えることを明らかにする。

2. 交流抵抗の計算法

コイルに交流電流が流れる場合、表皮効果や近接効果により巻線には銅損、コアには鉄損が発生する。その時の損失は、次式のように複素インピーダンス Z の実部として表れ、これを交流抵抗とする。複素インピーダンス Z は入力電圧 \dot{V} と解析で得られた複素電流 \dot{I} から計算できる。

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = R + jX \quad (1)$$

3. 解析モデルと解析条件

図1に二次コイル1ターンをモデル化した解析モデルを、図2に二次コイル2ターンをモデル化した解析モデルを示す。コイル中の渦電流を考慮するため、図1(a)(ii)および図2(a)(ii)に示すように、二次コイルの素線1本ずつをモデル化してある。また、素線の有限要素メッシュは素線1本を縦横4層ずつ分割してあるため、1ターンモデルでは要素数約5,768万要素、2ターンモデルでは要素数約7,797万要素である。表1に解析条件を示す。一次コイルには振幅1Vの正弦波電圧を印加し、二次コイルは開放とした。上述した条件下で、複素数近似法による電磁界解析により一次コイルの交流抵抗を計算し、二次コイル中の渦電流が一次コイルの交流抵抗に与える影響を定量的に明らかにする。

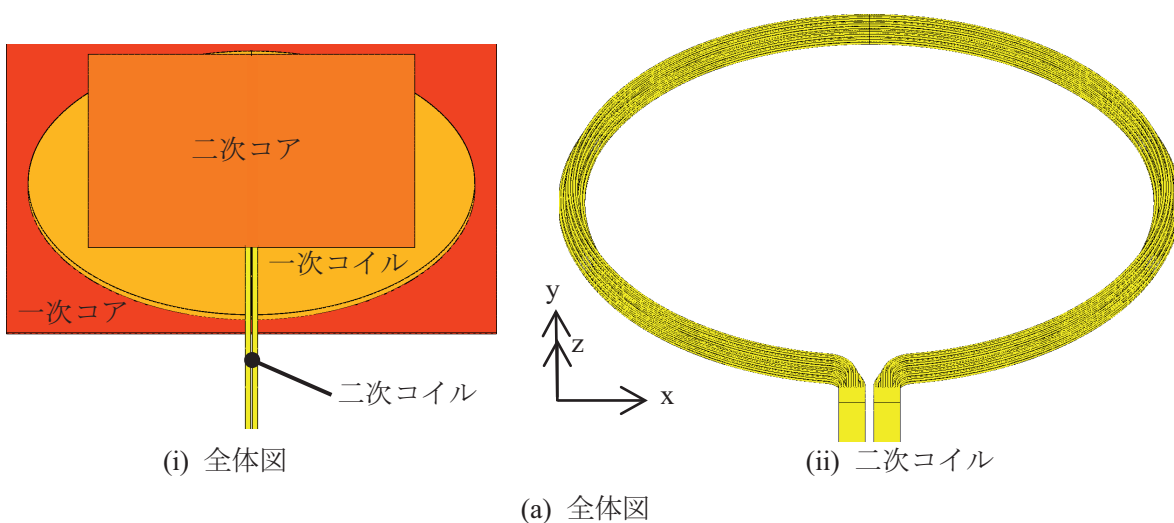


図1 1ターンモデル

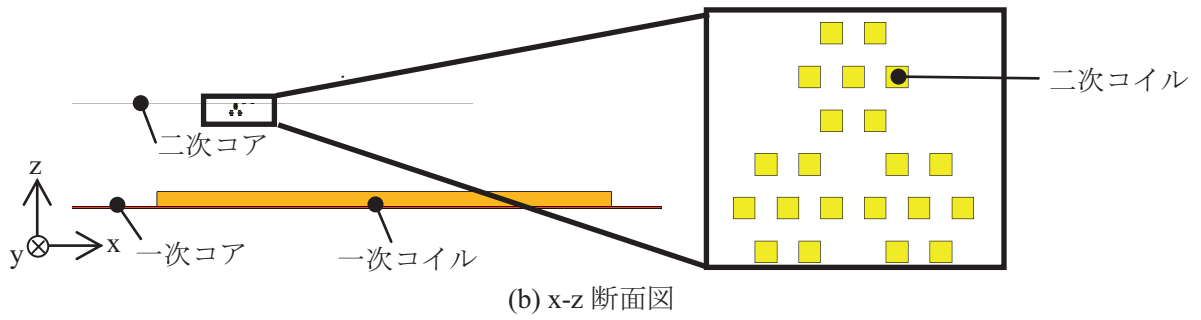


図1 1ターンモデル

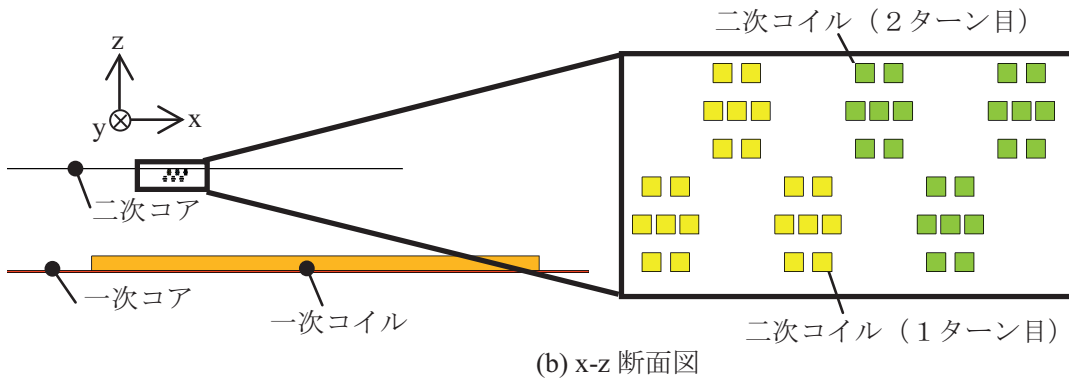
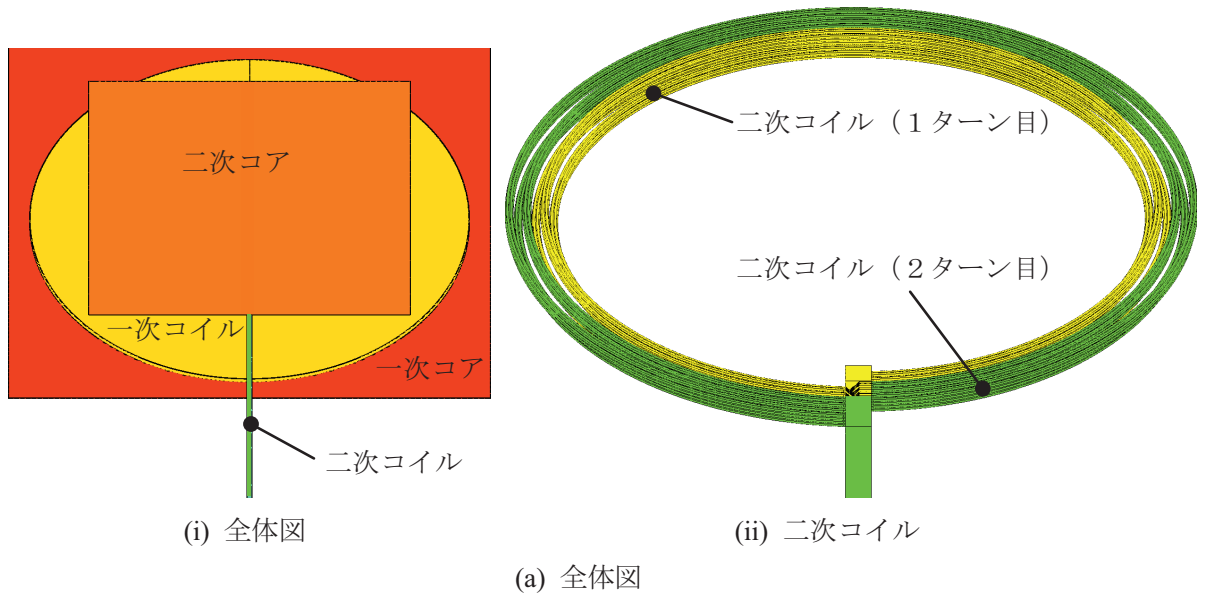


図2 2ターンモデル

表1 解析条件

一次側コア (フェライト)	比透磁率	450
二次側コア (アモルファス)	比透磁率	15,000
一次コイル	印加電圧 (V_{peak})	1.0
	巻数 (turn)	24
	抵抗値 (Ω)	0.33
二次コイル	導電率 (S/m)	5.96×10^7
	抵抗値 (Ω)	10^8

4. 解析結果と検討

図3に渦電流の影響が大きいと考えられる電気角 0° における磁束密度ベクトル分布を示す。1ターンモデル、2ターンモデル共に、二次コイル中を流れる渦電流により磁束が打ち消され、二次コイルを避けるように磁束が流れている。

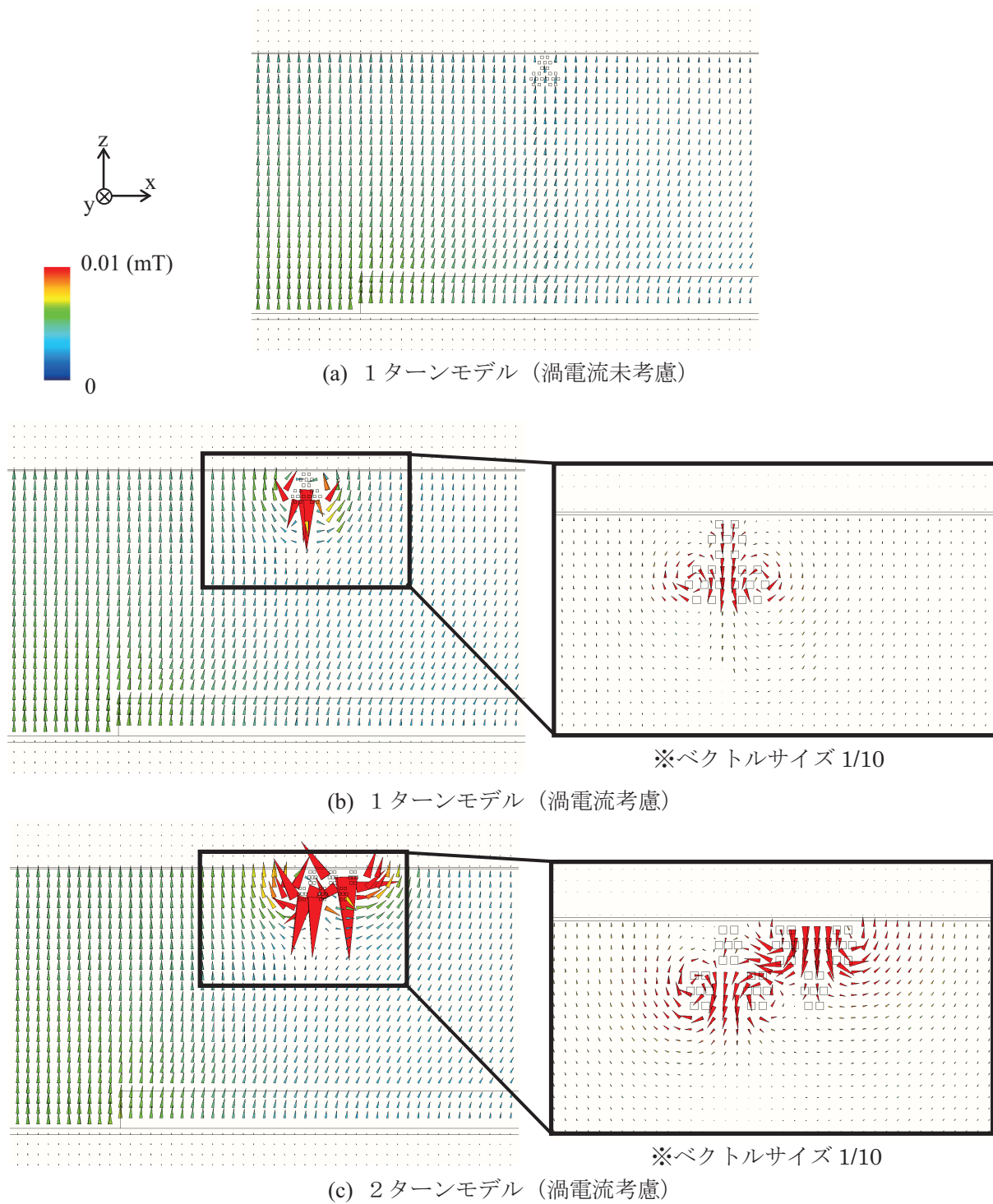


図3 磁束密度ベクトル分布

図4に電気角 0° における二次コイルの渦電流密度ベクトル分布を示す。1ターンモデル、2ターンモデル共に二次コイル中の渦電流はコイル1ターン分を循環するように流れている。表2に一次コイルの電流値と交流抵抗を示す。1ターンモデルで渦電流を考慮した場合と考慮していない場合を比べると、二次コイルに流れる渦電流の影響で一次コイルの交流抵抗が上昇していることがわかる。また、渦電流を考慮した2ターンモデルでは渦電流を考慮した1ターンモデルよりさらに交流抵抗が上昇していることがわかる。

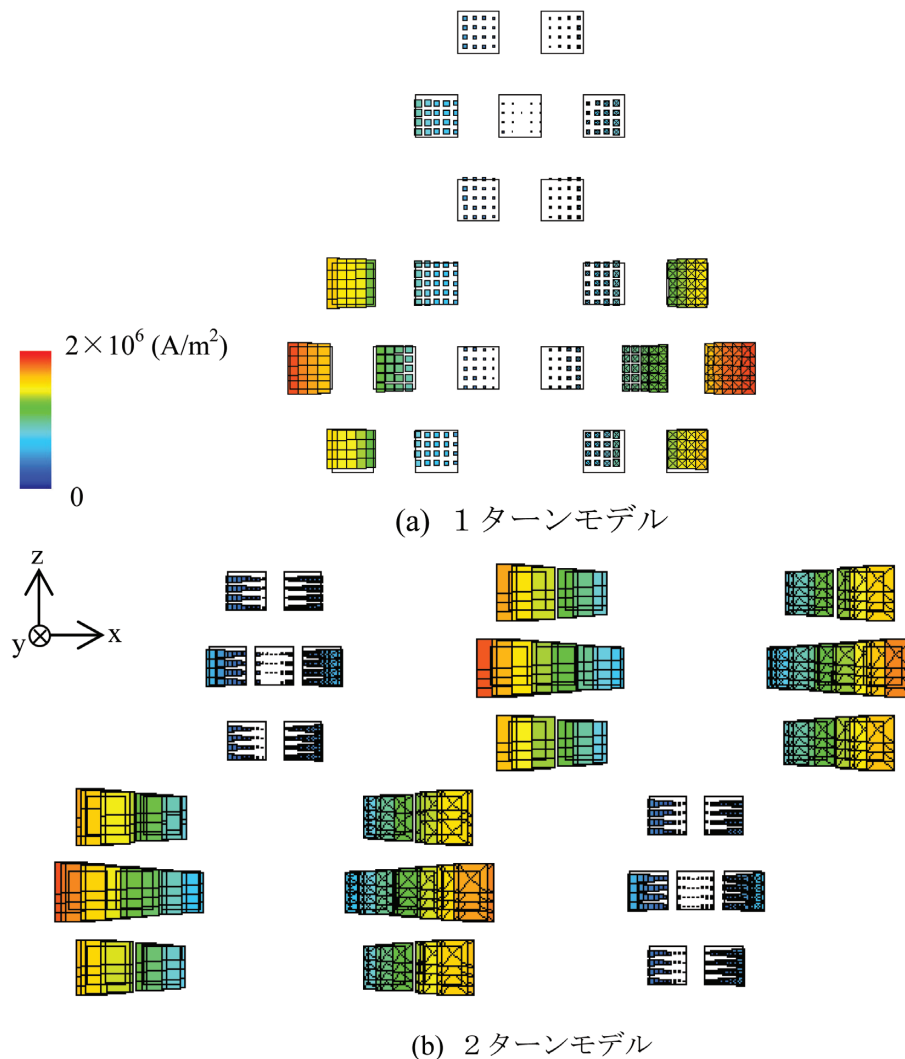


図4 二次コイルの渦電流密度ベクトル分布

表2 電流値と交流抵抗

パターン	1ターンモデル (渦電流考慮なし)	1ターンモデル (渦電流考慮)	2ターンモデル (渦電流考慮)
電流実効値 (Arms)	0.043162	0.043165	0.043184
電流位相差 (deg.)	-88.8	-88.8	-88.8
交流抵抗 (Ω)	0.3300	0.3366	0.3459

表3に解析諸元を示す。渦電流を考慮していない1ターンモデルに比べ、渦電流を考慮した1ターンモデルおよび2ターンモデルは、ベクトル演算率が高くなったことで、処理速度が速くなり、地球シミュレータをより効率良く利用できている。

表3 解析諸元

パターン	1ターンモデル (渦電流考慮なし)	1ターンモデル (渦電流考慮)	2ターンモデル (渦電流考慮)
要素数	57,686,355		77,965,740
使用ノード数	12 (96 CPU)		13 (104 CPU)
計算時間 (hours)	0.327	3.341	0.705
ベクトル演算率 (%)	96.725	99.698	99.615
処理速度 (MFLOPS)	3,667	7,581	4,686
CG法の反復回数	7,517	523,933	47,849

5. 結言

非接触充電コイルの二次コイルを1ターン分精密にモデル化した場合と2ターン分精密にモデル化した場合において、地球シミュレータを用いた電磁界解析により一次コイルの交流抵抗を計算し、二次コイル中の渦電流が一次コイルの交流抵抗に与える影響を定量的に明らかにした。

1ターンモデルの解析では、コイル中の渦電流による交流抵抗の上昇が電磁界解析上でも確認できたが、ターン数が少ないため交流抵抗の上昇幅が小さかった。2ターンモデルでは1ターンモデルより交流抵抗が上昇し、今後ターン数を増やしていくことで、コイル中の渦電流による交流抵抗の上昇が顕著になると考えられる。

今後は、二次コイルのターン数を実機と同数のターン数とし、電磁界解析で求めた交流抵抗を実測値と比較することで、電磁界解析による交流抵抗計算の精度を検証する予定である。

謝辞

地球シミュレータの利用にあたり、独立行政法人海洋研究開発機構地球シミュレータセンターシミュレーション応用研究グループの皆様にご指導、ご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村雅憲, 河瀬順洋, 山口忠, 中野智仁, 柴山義康, 西川憲明, 上原均, “三次元有限要素法による回転機の高速度高精度数値解析技術の開発”, 平成22年度地球シミュレータ産業戦略利用プログラム利用成果報告書, pp.59-65 (2011)