

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 パナソニック株式会社

著者

太田 智浩^{*1}、二畠 康^{*1}、加田 恭平^{*1}、森田 智彦^{*1}、河瀬 順洋^{*2}、山口 忠^{*2}、
中野 智仁^{*2}、片桐 弘雄^{*2}、太田 信治^{*2}、平田 勝弘^{*3}、西川 憲明^{*4}、廣川 雄一^{*4}

* 1 パナソニック株式会社

* 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 地球シミュレータセンター

利用期間：平成 24 年 4 月 1 日～平成 25 年 3 月 31 日

アブストラクト

近年、ユビキタス社会の到来によりモバイル機器のネットワークはワイヤレス化され、電源線のワイヤレス化が注目されている。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高効率化すれば、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、渦電流が少なく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。本年度は、非接触充電コイルの二次コイルの素線を 1 本ずつ精密にモデル化して渦電流損失を解析することで、転位による交流抵抗の低減効果を明らかにし、実測値と比較することで妥当性を検証する。さらに、求めた交流抵抗を用いて実際の駆動条件での効率についても計算している。

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、転位

1. はじめに

ワイヤレスで電力を機器に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。

高効率化のために低損失な巻線を開発することが望まれており、有限要素法により巻線損失を高精度にシミュレーションすることが望まれている。高精度な巻線損失のシミュレーションには巻線の精密なモデル化が必要なため、未知数が数千万規模の計算が必要となり、計算メモリと計算時間の点から従来は困難であった。しかし、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計算時間で計算できると考えられる。

本プロジェクトでは、三次元有限要素法による電磁界解析により、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、巻線損失を高精度に求め、コイル中の渦電流が少なく低損失な巻線を得るための指針を得ることを目的とする。

昨年度は、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、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。⁽²⁾

今年度は、非接触充電コイルの二次コイルの転位がある場合と転位がない場合で、実機と同じ14ターン分精密にモデル化し、転位による交流抵抗の低減効果を明らかにする。さらに、求めた交流抵抗を用いて、実際の駆動条件での効率を計算し、解析の妥当性を明らかにする。

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直流電流が流れる場合よりも抵抗が高くなる。その時の抵抗を交流抵抗と呼び、次式のように複素インピーダンス Z の実部として現れる。

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

複素インピーダンス \dot{Z} は解析で入力した複素電圧 \dot{V} と解析で得られた複素電流 \dot{I} から、次式を用いて計算できるため、その実部を取り出すことで交流抵抗 R が計算できる。

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} \quad (2)$$

$$R = \text{Real}(\dot{Z}) = \text{Real}\left(\frac{\dot{V}}{\dot{I}}\right) \quad (3)$$

3. 解析モデルと解析条件

図1に解析対象とする非接触充電コイルの解析モデルを示す。二次コイルは素線5本を並列に接続し1ターンを構成している。本モデルでは損失低減のために7ターン目と8ターン目の間で素線を転位している。図2に三次元分割図を示す。コイルの素線1本を縦横4×4で分割しており、メッシュ1層あたりの幅は0.04mmである。この値は120kHzにおける銅の表皮深さ0.19mmより十分に小さい。表1に解析条件を示す。励磁側に周波数120kHz、振幅1Vの電圧を印加し、転位がある場合と転位がない場合の一次側励磁、二次側開放と一次側開放、二次側励磁の条件で、一次側および二次側のインダクタンス、交流抵抗を計算し、二次コイルの転位による交流抵抗の低減効果を明らかにする。また、実際の駆動条件での効率を求め、解析の妥当性を明らかにする。

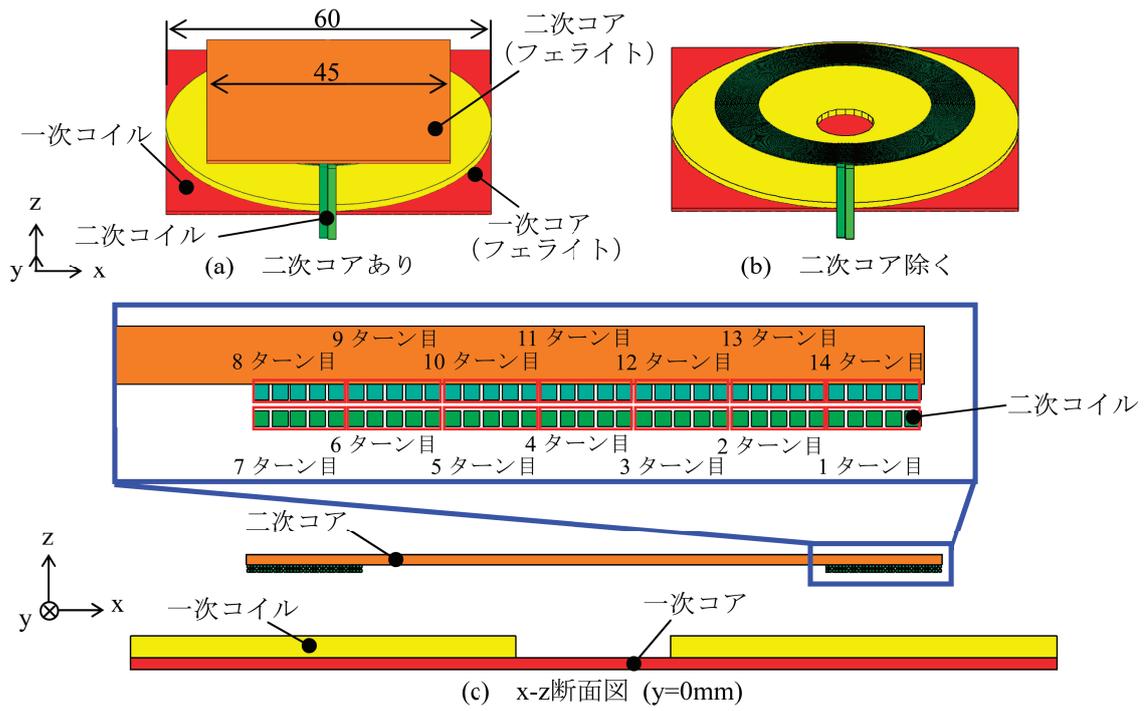


図1 解析モデル

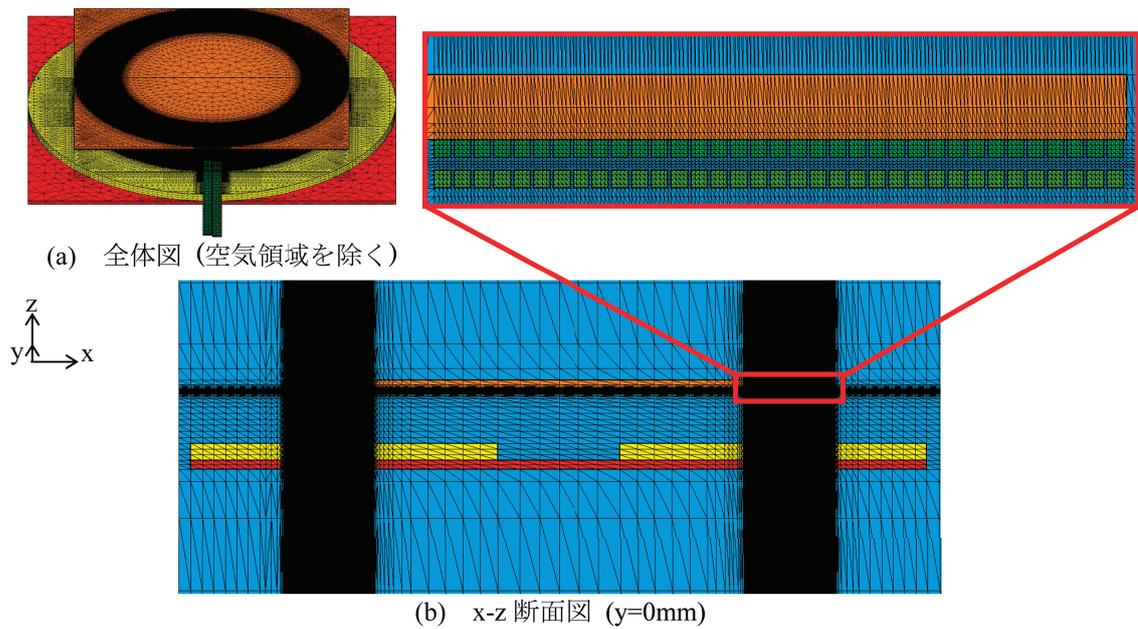


図2 三次元分割図

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 (フェライト)	比透磁率	450
一次コイル	巻数 (turn)	20
二次コイル	巻数 (turn)	14
	導電率 (S/m)	59,600,000
周波数 (kHz)		120

4. 解析結果

4.1. 一次側励磁、二次側開放の交流抵抗解析

図3に解析で考慮した回路図を示す。図に示すように、一次側励磁、二次側開放の条件で交流抵抗を計算する。図4に $x=0\text{mm}$ 断面での空気中の磁束密度ベクトル分布を示す。図より、転位がない場合ではコイルの両端の素線に循環電流が流れているため、1ターン中の端に磁束が寄っていることがわかる。図5に $x=0\text{mm}$ 断面での二次コイルの素線中の渦電流密度ベクトル分布を示す。図5(a)の9ターン目では、コイルの両端の素線に循環電流が流れているが、図5(b)では転位により循環電流が流れず、1ターン中の素線1本ごとに渦電流が流れていることがわかる。他のターンでも同様の傾向である。

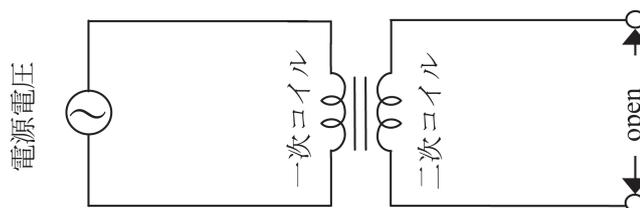


図3 回路図

表2にインダクタンスと交流抵抗を示す。一次コイルのインダクタンスは実測値（転位あり）で、交流抵抗は直流抵抗の実測値（転位あり）で正規化している。表より、インダクタンスは転位の有無によってほとんど変わらず、実測値とよく一致している。また、交流抵抗は転位がない場合と比較すると、転位によって交流抵抗が約39%減少することがわかる。

表3に解析諸元を示す。

表3に解析諸元を示す。

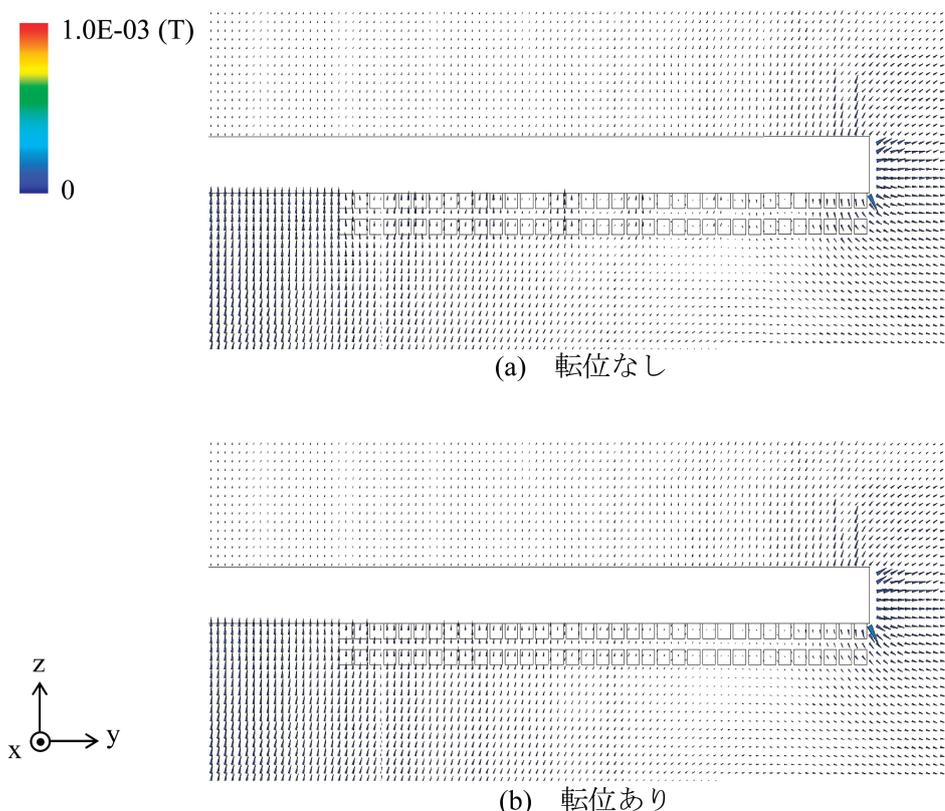


図4 磁束密度ベクトル分布（空気領域のみ表示、 $x=0\text{mm}$ 、 y - z 断面図）

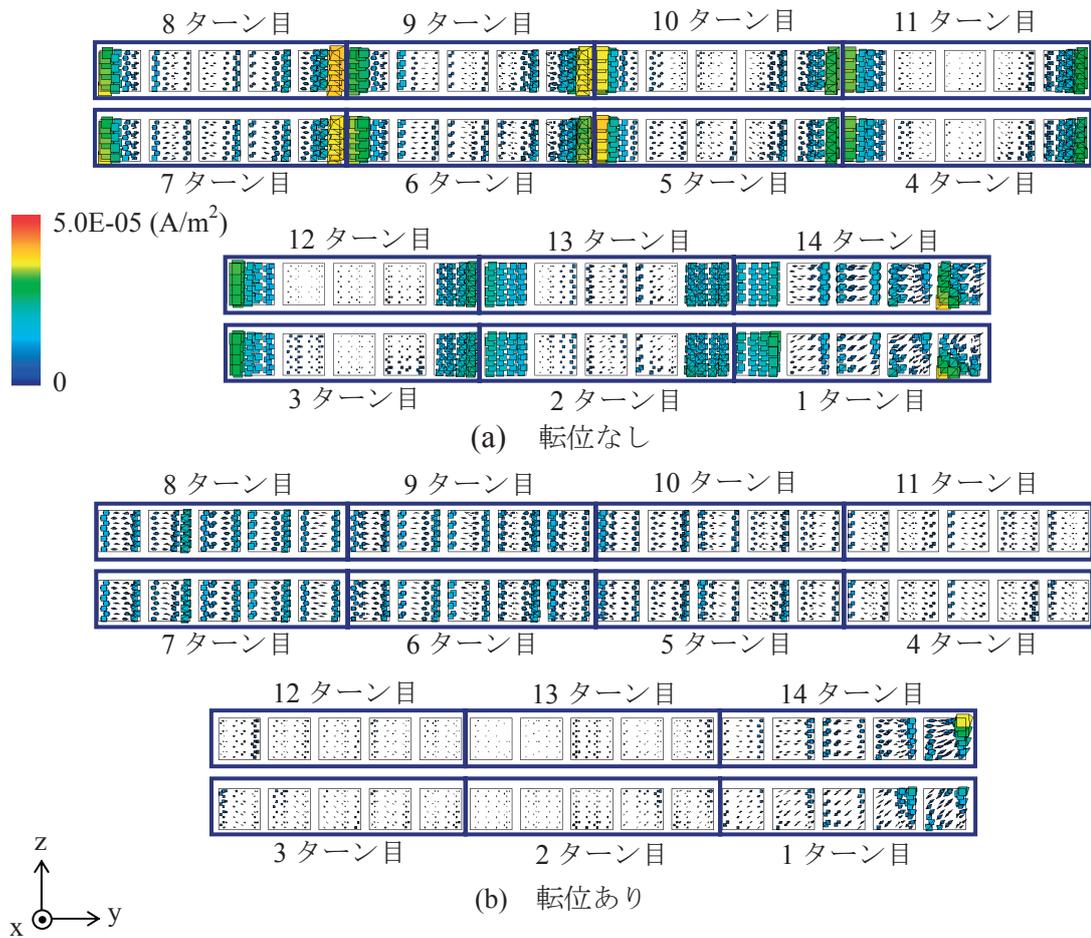


図5 渦電流密度ベクトル分布 (x=0mm、y-z 断面図)

表2 インダクタンスと交流抵抗

	転位なし	転位あり
一次コイルのインダクタンス (p.u.)	0.99	0.99 (1.00)
一次コイルの交流抵抗 (p.u.)	1.87	1.13 (1.48)

※括弧内の値は実測値

表3 解析諸元

	転位なし	転位あり
要素数	70,771,650	70,697,850
節点数	12,035,388	12,022,842
未知数	81,847,116	81,761,755
ステップ数	1	
使用ノード数	13 (104CPU)	
計算時間 (hours)	5.94	5.65
ベクトル演算率 (%)	99.738	99.671
処理速度 (MELOPS)	8,004	7,362
CG 反復回数	762,967	719,820

4.2 一次側開放、二次側励磁の交流抵抗解析

図6に解析で考慮した回路図を示す。図に示すように、一次側開放、二次側励磁の条件で交流抵抗を計算する。図7に $x=0\text{mm}$ 断面での空气中的磁束密度ベクトル分布を示す。図より、転位の有無による違いはほとんど見られないことがわかる。図8

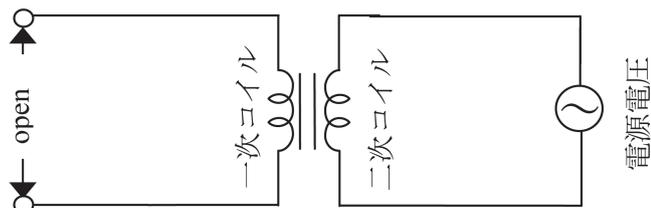


図6 回路図

に $x=0\text{mm}$ 断面での二次コイルの素線中の渦電流密度ベクトル分布を示す。図8(a)の9ターン目では、コイルの両端の素線に循環電流が流れているが、図8(b)では転位により循環電流が流れず、1ターン中の素線1本ごとに渦電流が流れていることがわかる。他のターンでも同様の傾向である。

表4にインダクタンスと交流抵抗を示す。二次コイルのインダクタンスは実測値（転位あり）で、交流抵抗は直流抵抗の実測値（転位あり）で正規化している。表より、インダクタンスは転位の有無によってほとんど変わらず、実測値とよく一致している。交流抵抗は転位がある場合では実測値と計算値がほぼ一致している。また、転位がない場合と比較すると、転位によって交流抵抗が約14%減少することがわかる。

表5に解析諸元を示す。

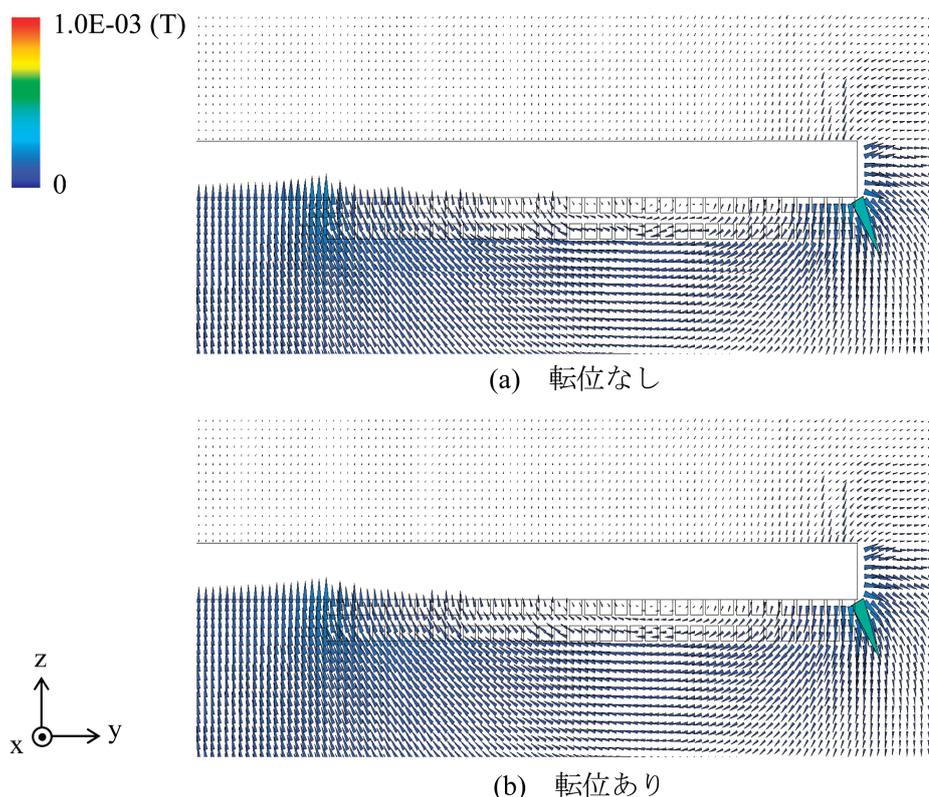


図7 磁束密度ベクトル分布（空気領域のみ表示、 $x=0\text{mm}$ 、 $y-z$ 断面図）

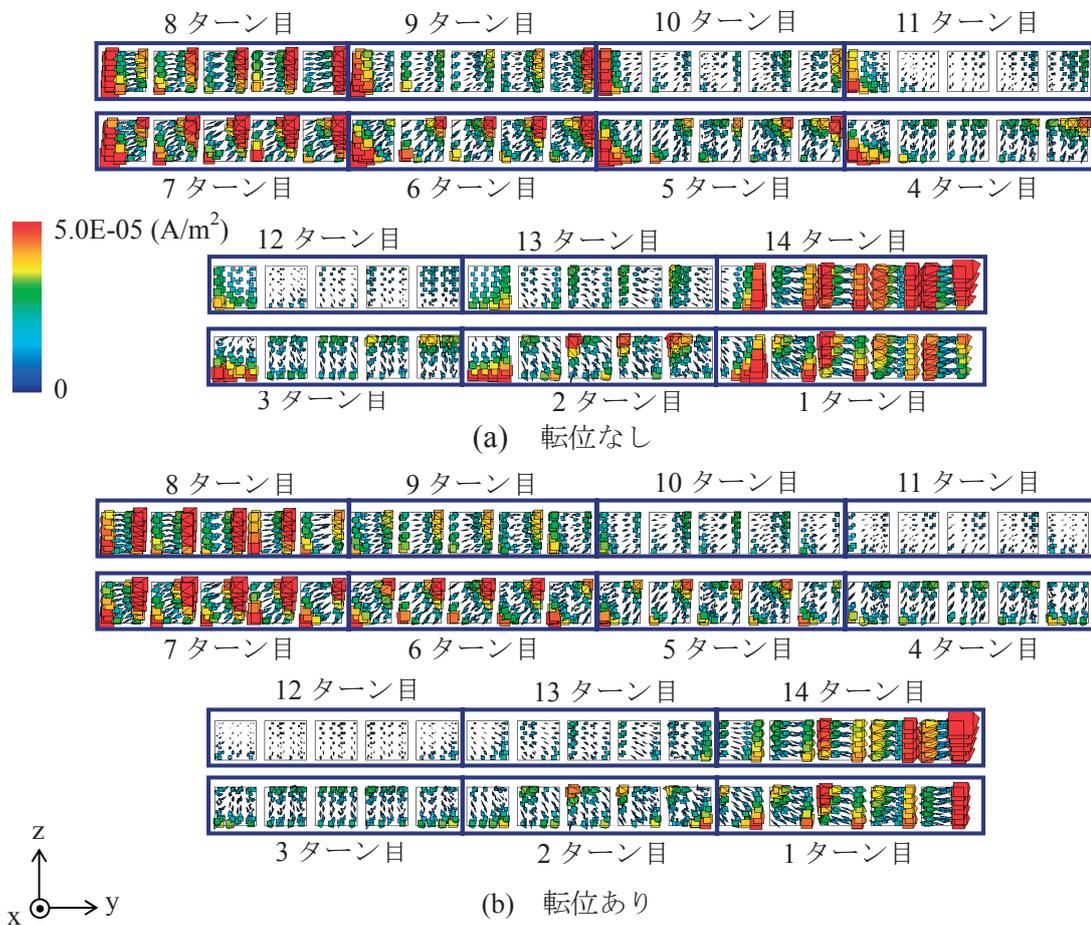


図8 渦電流密度ベクトル分布 (x=0mm、y-z 断面図)

表4 インダクタンスと交流抵抗

	転位なし	転位あり
二次コイルのインダクタンス (p.u.)	1.02	1.02 (1.00)
二次コイルの交流抵抗 (p.u.)	1.67	1.43 (1.36)

※括弧内の値は実測値

表5 解析諸元

	転位なし	転位あり
要素数	70,771,650	70,697,850
節点数	12,035,388	12,022,842
未知数	81,847,116	81,761,755
ステップ数	1	
使用ノード数	13 (104CPU)	
計算時間 (hours)	5.94	5.97
ベクトル演算率 (%)	99.740	99.673
処理速度 (MELOPS)	8,032	7,359
CG 反復回数	762,967	719,820

4.3 駆動状態の損失解析

図9に実際の駆動条件での回路図、図10に磁気回路における損失をそれぞれ示す。損失は転位がない場合の損失で正規化している。これより転位によって磁気回路における損失を10%低減できることがわかる。

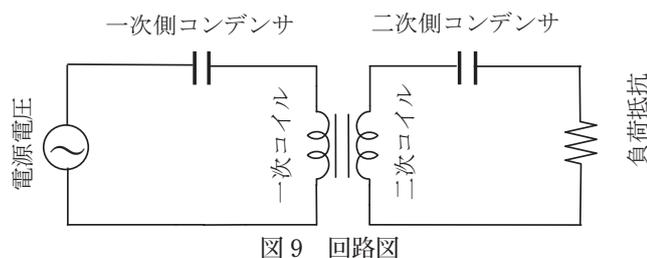


図9 回路図

5. 結言

非接触充電コイルの二次コイルの転位がある場合と転位がない場合の2パターンで、実機と同じ14ターン分精密にモデル化し、地球シミュレータを用いて電磁界分布を解析した。これにより交流抵抗や駆動時の損失などに対する転位の効果を明らかにした。

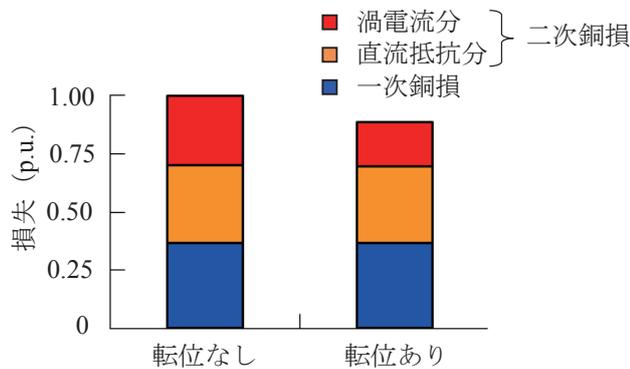


図10 磁気回路における損失

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)
- 2) 太田智浩、阿部賢吾、加田恭平、河瀬順洋、山口忠、中野智仁、片桐弘雄、平田勝弘、西川憲明、“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”、平成23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.111-117 (2012)