# 大規模数値解析によるコイル損失低減技術の開発

## プロジェクト責任者

伊藤 一洋 東光株式会社

#### 著者

伊藤 一洋  $^{*1}$ 、井田 浩一  $^{*1}$ 、池 寛子  $^{*1}$ 、高橋 政幸  $^{*1}$ 、河瀬 順洋  $^{*2}$ 、山口 忠  $^{*2}$ 、加藤 大地  $^{*2}$ 、塚田 彰太  $^{*2}$ 、福井 義成  $^{*3}$ 、西川 憲明  $^{*3}$ 

- \* 1 東光株式会社
- \* 2 国立大学法人岐阜大学
- \* 3 国立研究開発法人海洋研究開発機構

利用施設:国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間: 平成 26 年 8 月 7 日~平成 27 年 8 月 6 日

## アブストラクト

磁性体を含んだコイルの大規模磁界解析の結果を報告する。近年、電源回路の省電力化および高周 波化が進んでおり、それに伴いコイル製品の損失低減が求められている。コイルの高周波損失低減を 目的として、撚り線の使用や磁性体材料の改良などの工夫が行われるが、コイルの損失現象は非常に 複雑であり、最適化設計を行うには損失現象を熟知する必要がある。損失現象の解明には有限要素法 シミュレーションが有用だが、コイルの3次元構造を詳細に解析するためには大規模計算が必要であ る。そこで本プロジェクトでは、磁性体を含んだコイルの詳細モデルに対し、地球シミュレータを用 いた大規模磁界解析を試みた。その結果、磁性体基板が撚り線コイルの特性に与える影響を定量的に 明らかにすることができた。さらに、金属磁性材料トロイダルコイルの解析を行うことにより、金属 磁性材料内部を流れる渦電流の様子を可視化できた。

キーワード:大規模シミュレーション、有限要素法、コイル、撚り線、渦電流、磁性体

#### 1. 本プロジェクトの目的

近年、携帯電話などの電気機器において省電力化・高周波化が進んでおり、それに伴ってコイル製品の損失低減が求められている。コイルに高周波電流を流すと、巻線には直流抵抗と渦電流による損失 (銅損)が生じ、磁性体コアには磁気ヒステリシスや渦電流などによる損失 (鉄損)が生じる。そのため、撚り線の使用や磁性体材料の改良などの工夫を行い、高周波損失の低減を図る。しかし、コイルの損失は巻線構造や磁性体の特性などの多くの要因に依存する複雑な現象であるため、最適化設計を行うには損失現象を熟知する必要がある。

コイルの損失現象の解明には有限要素法シミュレーションが有用である。ところが、PC (パーソナル・コンピュータ)で可能な簡略化モデルのシミュレーションでは、コイル全体の損失現象を十分

に再現できない。そこで、コイルの3次元構造を詳細に考慮した大規模シミュレーションが必要である。本プロジェクトは、地球シミュレータを用いた大規模シミュレーションを行うことで、コイル全体の損失現象の知見を得ることを目的としている。そして、その知見を基に損失低減設計の理論体系構築を目指す。昨年度は空芯の撚り線コイルを解析対象とし、素線の撚りが損失特性に及ぼす影響について知見を得た<sup>1)</sup>。しかし、実際には磁性体を使用したコイル製品が使われることが多いため、空芯コイルに関する知見だけでは不十分である。そこで、本年度は磁性体を含んだコイルの損失現象を調査するため、磁性体基板付き撚り線コイルと金属磁性材料トロイダルコイルを解析対象とした。

## 2. 解析手法

### 2.1 有限要素法による磁界解析 2)

渦電流を考慮した磁界解析のための基礎方程式は、マクスウェルの電磁方程式より磁気ベクトルポテンシャル $\dot{A}$ と電気スカラポテンシャル $\dot{\phi}$ を用いて次式で表される(ただし、ドット(・)は複素数を表す)。

$$rot(v \text{ rot } \dot{A}) = \dot{J}_0 + \dot{J}_e \tag{1}$$

$$\dot{\boldsymbol{J}}_{e} = -\sigma(j\omega\dot{\boldsymbol{A}} + \operatorname{grad}\dot{\boldsymbol{\phi}}) \tag{2}$$

$$\operatorname{div}\dot{\boldsymbol{J}}_{a} = 0 \tag{3}$$

ここで、 $_{V}$ は磁気抵抗率、 $\dot{J}_{o}$ は強制電流密度、 $\dot{J}_{e}$ は渦電流密度、 $\sigma$ は導電率、jは虚数単位、 $\omega$ は角周波数である。

#### 2.2 電気的損失の算出法

強制電流を与えたコイル中の銅損 $W_{cu}$ は、磁界の変化により生じる渦電流を考慮して次式により算出する。

$$W_{cu} = \frac{1}{2\sigma} \int_{V_c} \left| \dot{\boldsymbol{J}}_0 + \dot{\boldsymbol{J}}_e \right|^2 dv \tag{4}$$

ここで、 $V_c$ は渦電流の流れる導体の領域である。この時、コイル中の渦電流損 $W_{ed}$ は次式により算出する。

$$W_{ed} = W_{cu} - RI^2 \tag{5}$$

ここで、Rはコイルの直流抵抗、Iは電流実効値である。また、コイルの交流抵抗 $R_{ac}$ は次式により 算出する。

$$R_{ac} = \frac{W_{cu}}{I^2} \tag{6}$$

#### 3. 磁性体基板付き撚り線コイルの解析

磁性体が撚り線コイルの特性に与える影響を調査するため、コイル近傍に磁性体基板を配置した場合について解析を行った。図1に解析モデルを示す。図1の磁性体はフェライトを想定しており、磁性体の損失は十分小さいとみなして無視した。また、撚り方と特性との関係を調査するため、平行線、集合撚り、複合撚りの3種類について検討した。図2に集合撚りと複合撚りの概念図を示す。図2(a)の集合撚りは、平行線をそのまま捻る撚り方である。図2(b)の複合撚りは、複数の集合撚りを束ねた

ものを捻る撚り方である。

図3に周波数100kHzにおける16本撚りコイルの磁束密度ベクトル分布の解析結果を示す。図3より、磁性体基板を付加すると磁性体内部に磁束が集中し、撚り方が異なっても磁束分布はほとんど変化しないことがわかる。また、図4に渦電流密度分布の解析

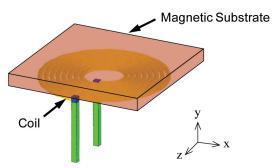


図1 磁性体基板付き撚り線コイルの解析モデル

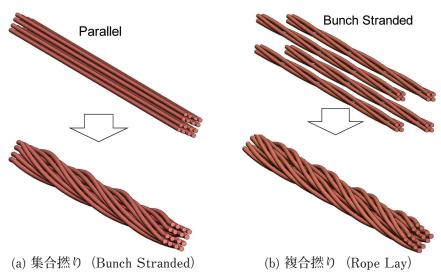


図 2 集合撚りと複合撚り

## Frequency: 100kHz

	Parallel	Bunch Stranded	Rope Lay
Air Core	CRESCONO.	TREE PRINCE AND CASES	1700 Table 200 T
With Magnetic Substrate		Resulting	B (T) 0 0 y z ← x

図3 16本撚りコイルの磁束密度ベクトル分布

結果を、図5に銅損分布の解析結果を示す。図4と図5より、平行線コイルは磁性体基板の反対側に 渦電流と銅損が集中するのに対し、撚り線コイルは渦電流と銅損の集中が大幅に緩和されることがわ かる。さらに、集合撚り線コイルと比べて複合撚り線コイルの方が、渦電流と銅損の集中緩和効果が 高いこともわかる。

### Frequency: 100kHz

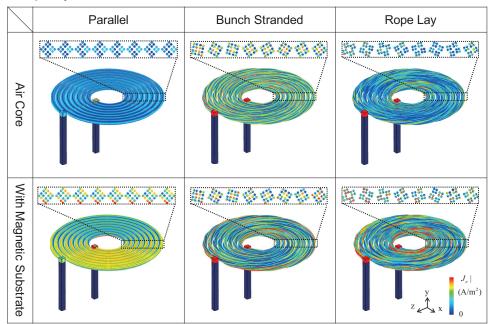


図 4 16 本撚りコイルの渦電流密度分布

#### Frequency: 100kHz

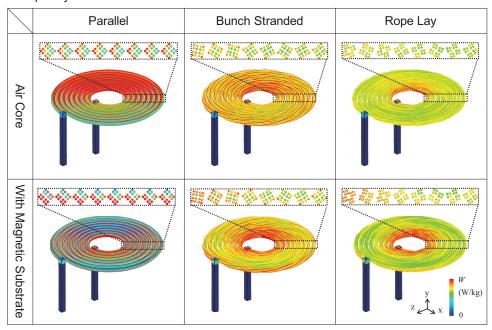
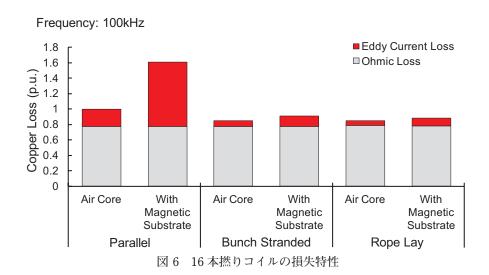
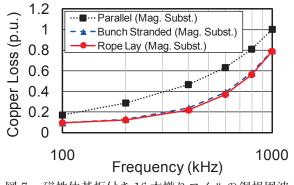


図 5 16 本撚りコイルの銅損分布

図 6 に周波数 100kHz における 16 本撚りコイルの損失特性を示す。図 6 より、特に平行線コイルは、磁性体基板の付加によって渦電流損失が大幅に増加することがわかる。図 7 に磁性体基板付き撚り線コイルの銅損周波数特性の比較を示す。図 7 より、平行線コイルの銅損が一番大きく、集合撚り線コイルと複合撚り線コイルの差は小さいことがわかる。また、解析結果の検証のため、コイルの試作を行った。図 8 に磁性体基板付き複合撚り線コイルの交流抵抗の計算値と実測値を示す。図 8 より、計算値と実測値は良く一致することがわかる。

表 1 に磁性体基板付き 16 本撚りコイルの解析諸元を示す。計算時間は 96CPU 使用時で 40 分程度 であり、地球シミュレータを用いることによって 1 億要素規模のモデルが現実的な時間で解析できた。





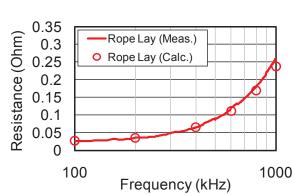


図7 磁性体基板付き16本撚りコイルの銅損周波 数特性

図8 磁性体基板付き複合撚り線コイルの交流抵抗 の計算値と実測値

表 1 磁性体基板付き 16 本撚りコイルの解析諸元

Analyzed model	Parallel	Bunch Stranded	Rope Lay		
Frequency (kHz)	100				
Number of elements	104,913,504	107,997,211	107,862,507		
Number of unknown variables	130,144,656	133,880,711	133,768,779		
MFLOPS	13213.33	13569.48	13276.63		
Vector operation ratio (%)	99.54	99.57	99.54		
Elapsed time (min.)	44.68	34.66	28.77		

Computer used: Earth Simulator (ES2) 96CPU

## 4. 金属磁性材料トロイダルコイルの解析

鉄などの金属磁性材料は飽和磁束密度が高いという特徴があるため、大電流用コイルのコア材料として良く使用されている。しかし、フェライトのように絶縁性が高い材料と異なり、金属磁性材料は電流が流れやすいため、渦電流損失が大きくなるという問題がある。そのため、金属磁性材料の渦電流解析は重要である。今回は金属磁性材料トロイダルコアを題材として、コア内部を流れる渦電流を解析した。図9に解析モデルを示す。図9に示すように、トロイダルコア内部には鉄球が充填されており、鉄球の渦電流損失を鉄損として評価した。なお、構造の対称性を利用し、全体の1/2をモデル化した。

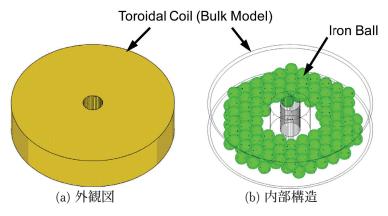


図 9 金属磁性材料トロイダルコイルの解析モデル (1/2 モデル)

図 10 に、金属磁性材料トロイダルコイルの磁東密度分布の解析結果を示す。図 10 より、鉄球表面の磁東密度が高くなっており、周波数が高くなるとその傾向が強まることがわかる。

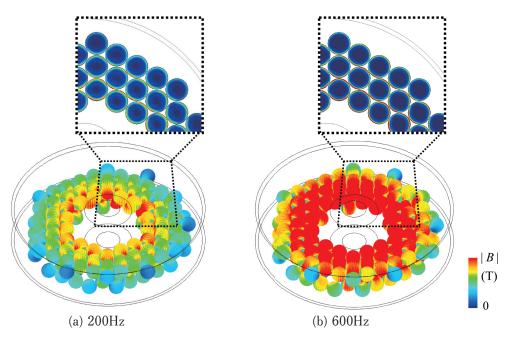


図 10 金属磁性材料トロイダルコイルの磁束密度分布

図 11 に金属磁性材料トロイダルコイルの渦電流密度分布の解析結果を示す。図 11 より、鉄球表面に渦電流が集中し、周波数が高くなると渦電流が大きくなることがわかる。

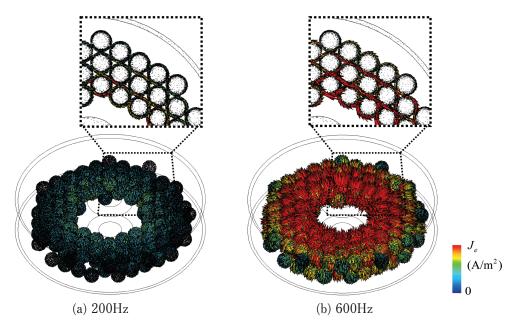


図 11 金属磁性材料トロイダルコイルの渦電流密度ベクトル分布

図 12 に金属磁性材料トロイダルコイルの損失特性と交流抵抗周波数特性を示す。図 12(a) より、周波数が 200Hz から 600Hz に変化すると、鉄損が 5 倍以上増加することがわかる。図 12(b) は、交流抵抗の計算値と実測値を比較したグラフである。

図 12(b) に示すように、計算値と実測値は概ね一致していることから、解析結果は妥当と言える。表 2 に金属磁性材料トロイダルコイルの解析諸元を示す。PC では解析が困難な 5000万要素規模のモデルだが、地球シミュレータを用いることによって 9 時間程度で解析できた。

表 2 金属磁性材料トロイダルコイルの解析諸元

Analyzed model	Toroidal Coil		
Frequency (kHz)	200	600	
Number of elements	50,775,725		
Number of unknown variables 63,622,287		2,287	
Elapsed time (hour)	9.18	9.64	

Computer used: Earth Simulator 96CPU

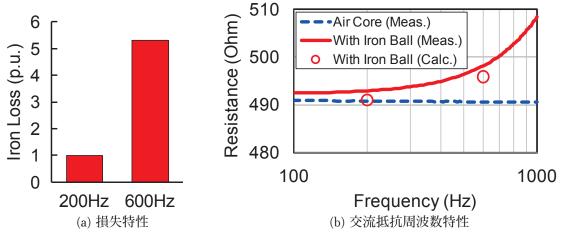


図 12 金属磁性材料トロイダルコイルの損失特性と交流抵抗周波数特性

### 5. まとめ

磁性体基板付き撚り線コイルの大規模磁界解析を行い、磁界や銅損などの分布を可視化することによって、磁性体が撚り線コイルの特性に及ぼす影響について知見を得た。また、素線の撚り方と損失特性との関係を定量的に明らかにするとともに、計算値と実測値は良く一致することを確認した。さらに、金属磁性材料トロイダルコイルの解析を行うことによって、金属磁性材料内部を流れる渦電流の様子を可視化し、鉄損の定量的データを得た。今回のようなシミュレーションで得た知見をコイル製品の損失低減設計に適用することによって、電気・電子機器の省エネルギー化に貢献できると考えられる。

## 参考文献

- 1) 伊藤一洋, 井田浩一, 河瀬順洋, 山口忠, 河合良祐, 加藤大地, 福井義成, 西川憲明, "大規模数値解析によるコイル損失低減技術の開発", 平成 26 年度研究基盤共用・プラットフォーム形成事業「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.41-49, 2015.
- 2) 伊藤昭吉, 河瀬順洋, 最新有限要素法による電気・電子機器の CAE, 森北出版, 2000.
- 3) 河瀬順洋,山口忠,加藤大地,塚田彰太,井田浩一,伊藤一洋,福井義成,西川憲明,"三次元有限要素法による磁性体基板を配置した撚り線コイルの特性解析",電気学会静止器・回転機合同研究会資料,SA-15-041/RM-15-033,2015.
- 4) 河瀬順洋,山口忠,加藤大地,塚田彰太,井田浩一,伊藤一洋,福井義成,西川憲明,"磁性体基板を配置した撚り線コイルの電磁界解析",平成27年電気学会全国大会講演論文集,5-060,2015.
- 5) Y. Kawase, T. Yamaguchi, D. Kato, S. Tsukada, K. Ito, K. Ida, Y. Fukui and N. Nishikawa, "Numerical Analysis of Stranded Wire Coil with Magnetic Substrate Using 3-D Finite Element Method", 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, Oct. 2015.