

# 大規模数値解析による静止器高効率化技術の開発

## プロジェクト責任者

松尾 和也 川崎重工業株式会社

## 著者

進藤 裕司<sup>\*1</sup>、松尾 和也<sup>\*1</sup>、田宮 智彰<sup>\*1</sup>、澤田 正志<sup>\*2</sup>、河瀬 順洋<sup>\*3</sup>、山口 忠<sup>\*3</sup>、  
桜木 拓也<sup>\*3</sup>、三好 康介<sup>\*3</sup>、西川 憲明<sup>\*4</sup>

\* 1 川重テクノロジー株式会社

\* 2 川崎重工業株式会社

\* 3 国立大学法人岐阜大学

\* 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 26 年 4 月 1 日～平成 27 年 2 月 28 日

## アブストラクト

近年、船舶・航空などの分野で電動化が加速しており、これらに搭載される電力変換装置の開発が進んでいる。この動きに対し、当社では SiC、GaN 等のワイドバンドギャップ半導体の適用により、電力変換装置の高周波対応によって小型化を目指している。フィルタとして使用されるリアクトルについても小型化が期待できるが、同時に駆動周波数・PWM 周波数の増加によって、フィルタとして使用されるリアクトルの損失、特に鉄損は増加すると考えられる。一方で、現在リアクトルの開発に使用している鉄損の計算方法は、表皮効果<sup>1)</sup>の影響で鋼板内の磁束密度が表面付近に集中する高周波帯では正確な鉄損が計算できない。今後、電力変換装置を高周波化していく中で大きな障害になると懸念され、鉄損手法を確立する必要がある。当社では計算手法確立のためのアプローチとして①理論的知見による計算 ②実機を用いた試験 ③有限要素法による電磁界解析の比較を実施する。電磁界解析について、積層鋼板内の渦電流のモデル化には膨大な計算資源を必要とする。

本年度はフィルタ用リアクトルを対象とし、リアクトルコアの積層鋼板をモデル化し、電磁界解析を実施し、内部の詳細な磁束密度分布・渦電流密度分布を明らかにした。

キーワード：大規模シミュレーション、三次元有限要素解析、リアクトル、表皮効果

## 1. 本プロジェクトの目的

本プロジェクトでは、地球シミュレータ上で静止器の大規模三次元有限要素解析を実行し、静止器における磁気現象を詳細まで可視化することで、設計技術の向上を図ることを目的としている。具体的には、地球シミュレータを用いて静止器の損失分布を特定し、その損失を低減する対策を講じ、地球シミュレータを用いてその有効性を確認する。本年度は昨年度に引き続き、電源高調波低減のため

に PWM (Pulse Width Modulation : パルス幅変調) インバータと系統との間に設置する LCL フィルタに用いるリアクトル (図 1) を特に対象とした。

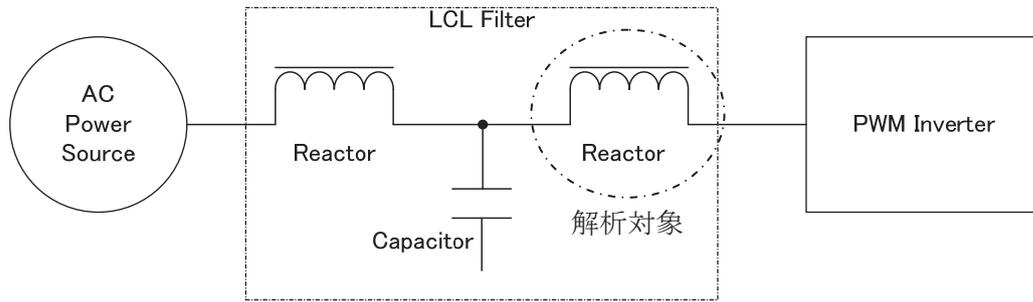


図 1 PWM インバータと LCL フィルタ (1 相分)

今後、高周波化による小型化を検討する上では、鉄損による発熱が大きな問題となる。リアクトルの積層鋼板の鉄損について詳細に解析し、小型化のための指針を得ることを目的とした。

## 2. 解析手法

解析手法について、電磁界の基礎方程式は昨年度までと同一であるため、本稿では省略する (平成 25 年度の報告書参照<sup>2)</sup>)。ここでは鉄損の計算について説明する。

### 2.1. 渦電流損の算出法<sup>3)</sup>

電磁界解析では、磁束密度の時間高調波とベクトルの向きの時間変化を考慮するため、渦電流損  $W_{ed}$  を有限要素法で得られる磁束密度分布の時系列データを用いて近似的に計算することが多い。

$$W_{ed} = \frac{K_e D}{2 \pi^2} \int_{iron} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left\{ \left( \frac{B_r^{k+1} - B_r^k}{\Delta t} \right)^2 + \left( \frac{B_\theta^{k+1} - B_\theta^k}{\Delta t} \right)^2 + \left( \frac{B_z^{k+1} - B_z^k}{\Delta t} \right)^2 \right\} dv \quad (1)$$

ここで、 $K_e$  はエプスタイン試験によって求められる渦電流損係数、 $D$  は鋼板の密度、 $\Delta t$  は時間刻み幅、 $N$  は 1 周期分のステップ数、 $B_r$ 、 $B_\theta$ 、 $B_z$  はそれぞれ  $r$  方向成分 (径方向)、 $\theta$  方向成分 (周方向)、 $z$  方向成分 (軸方向) の磁束密度である。

一方で、式 (1) は鋼板中の磁束密度が一定であることを前提としているが、kHz 帯以上の高周波帯域では表皮効果の影響で積層鋼板中の磁束密度が一定とならず、式 (1) をそのまま使用できない。そこで本研究では、鋼板中に流れる渦電流密度  $J_e$  を電磁界解析で計算し、以下の式 (2) を用いて渦電流密度  $W_{ed}$  を計算した。

$$W_{ed} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} \left\{ \int_{V_e} \frac{(J_e)^2}{\sigma} dV \right\} dt \quad (2)$$

ここで、 $\tau$  は渦電流の周期、 $\sigma$  は材料の導電率である。

### 2.2. ヒステリシス損の算出法<sup>3)</sup>

ヒステリシス損とは、鉄心が磁化された際にヒステリシスループ間の面積に比例した電力量が鉄の中で熱になることにより失われる電力損失である。時間高調波を含む磁界が鉄板に加わると、ヒステ

リシスループにはマイナーループが発生し、損失が増加する。ここでは、次のような仮定を行い、マイナーループを含むヒステリシス損の近似計算を行った。

- (1) 磁束密度のすべての極大・極小値はヒステリシスループを作る原因となる
- (2) 各ヒステリシスループは全て、基本波による磁界によるものと相似形であるとする
- (3) ヒステリシス損は、各ヒステリシスループの面積の総和であるとする

以上の仮定より、ヒステリシス損を次のように仮定する。

$$W_{hy} = \frac{K_h D}{T} \sum_{i=1}^{NE} \frac{\Delta V_i}{2} \left( \sum_{j=1}^{N_{mr}^i} (B_{mr}^{ij})^2 + \sum_{j=1}^{N_{m\theta}^i} (B_{m\theta}^{ij})^2 + \sum_{j=1}^{N_{mz}^i} (B_{mz}^{ij})^2 \right) \quad (3)$$

ここで、 $K_h$  はエプスタイン試験によって求められるヒステリシス損係数、 $T$  は解析期間、 $NE$  は鋼板に含まれる要素数、 $\Delta V_i$  は  $i$  番目の要素に対応する体積、 $N_{pr}^i$ 、 $N_{p\theta}^i$ 、 $N_{pz}^i$  はそれぞれ  $i$  番目の要素における磁束密度の  $r$ 、 $\theta$ 、 $z$  成分の時間変化に対する極大・極小値の個数、 $B_{mr}^{ij}$ 、 $B_{m\theta}^{ij}$ 、 $B_{mz}^{ij}$  はそれぞれヒステリシスループの振幅の  $r$ 、 $\theta$ 、 $z$  方向成分である。

### 3. 積層鋼板中の渦電流損の計算

#### 3.1. 概要

本章では、積層鋼板を厳密にモデル化したリアクトルの電磁界解析を実施し、鋼板内の渦電流損を計算した内容について記す。

#### 3.2. 解析モデルと解析条件

解析モデルは実際に試験に使用したリアクトルの鉄心 (図 2) を元に作成した。

図 3 に解析モデルを示す。巻鉄心の角部はモデル化が難しかったため簡略化している。解析モデルは四面体要素を使用し、全体の 1/8 モデルとした。鉄心の積層鋼板は全てモデル化し、積層鋼板 1 層の厚みは 0.23mm とし、占積率は 94.5% として各鋼板の間にギャップ要素を挿入し、層間ギャップ ( $1.33 \times 10^{-2}$ mm) の空気抵抗を考慮した。メッシュは積層方向に鋼板 1 枚の厚さで分割した。60Hz における積層間に渦電流が流れないようにするため、継鉄部では  $\sigma_y = 0$ 、脚鉄部では  $\sigma_x = 0$  として鋼板の面方向に流れる渦電流のみ考慮した。

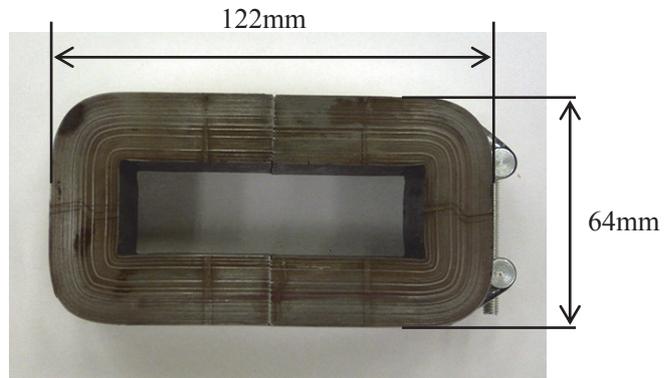


図 2 試験用リアクトルの鉄心

表 1 に解析条件を示す。本解析は電流入力 ( $\Delta t$  法) で行った。周波数は解析が容易な低周波帯域 (60Hz) で実施した。

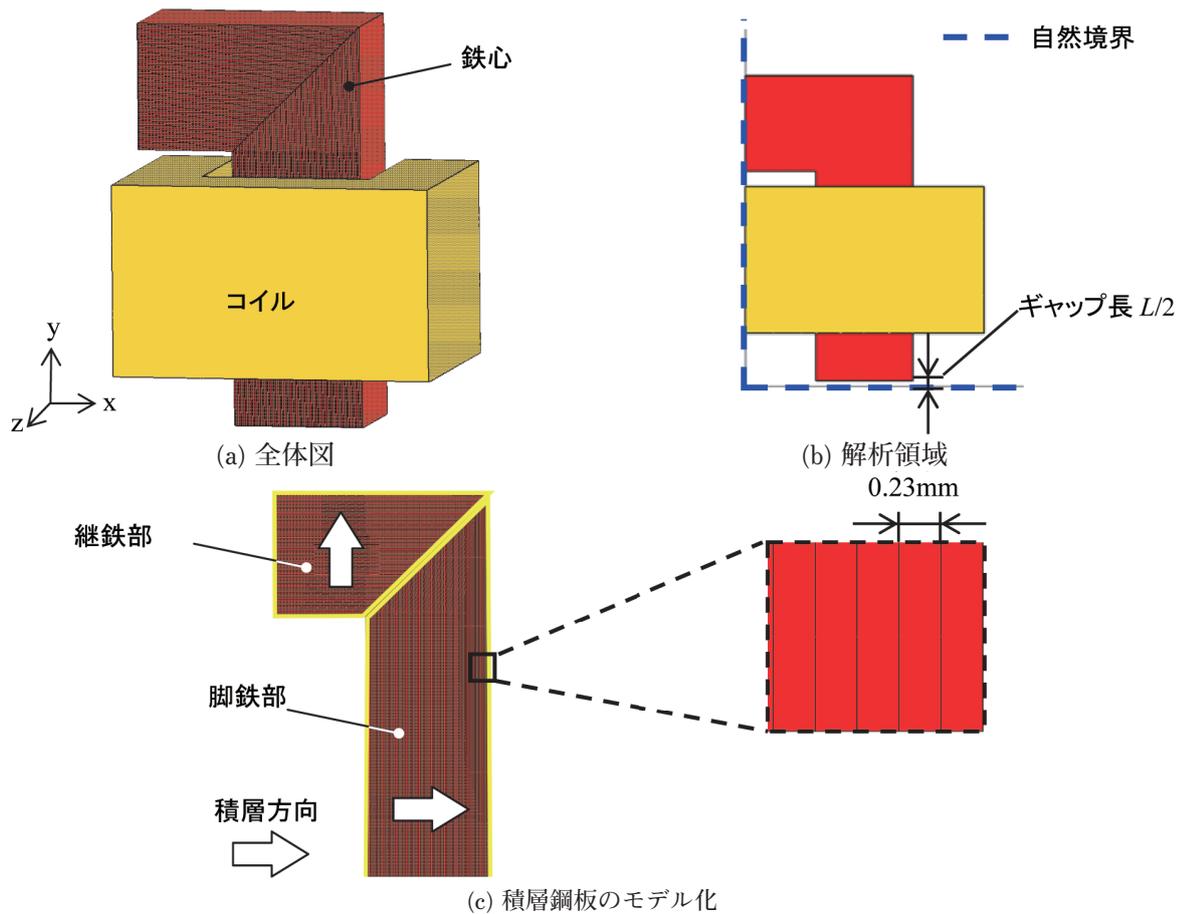


図 3 解析モデル

表 1 解析条件

No.	項目	値	
1	ギャップ長 (L/2) [mm]	1.0	
2	入力電流	電源周波数 [Hz]	60
3		電流 [Arms]	70.3
4		巻数 [turn]	8
5	鉄心 (23R85)	導電率 [S/m]	2,000,000
6		渦電流損係数	$5.33 \times 10^{-5}$
7		ヒステリシス損係数	$3.11 \times 10^{-3}$

### 3.3. 解析結果と検討

図 4 (a) に x-y 断面、図 4 (b) y-z 断面の電流最大時の空気の磁束密度ベクトル分布を示す。(a) の赤色の丸で示す鉄心角部で、磁束が鋼板の積層方向に漏れている様子が見られる。また、赤色の四角で示す鉄心表面では、測定面 A (鉄心中央断面) よりも測定面 B (鉄心表面) の方が漏れ磁束が大きいことがわかる。これは、測定面 A よりも測定面 B の方がコイルに近いと考えられる。また、ギャップ中の磁束密度は 1.0T である。

図 5 に x-y 断面の電流最小時 (渦電流最大時) と電流最大時 (磁束密度最大時) における鉄心の磁束密度分布を示す。電流最大時、鉄心中の磁束密度は 1.6T であった。

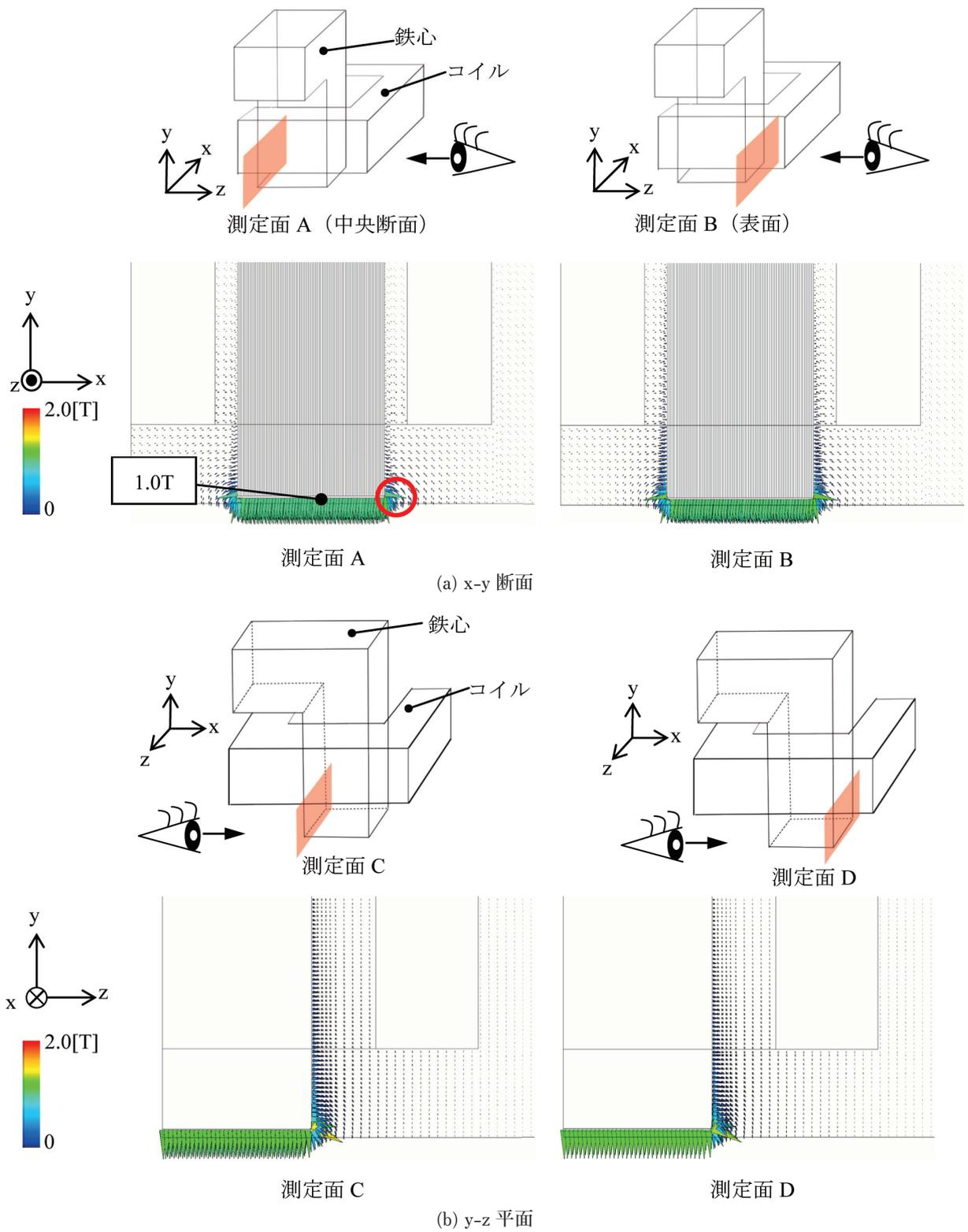


図4 空気の磁束密度ベクトル分布

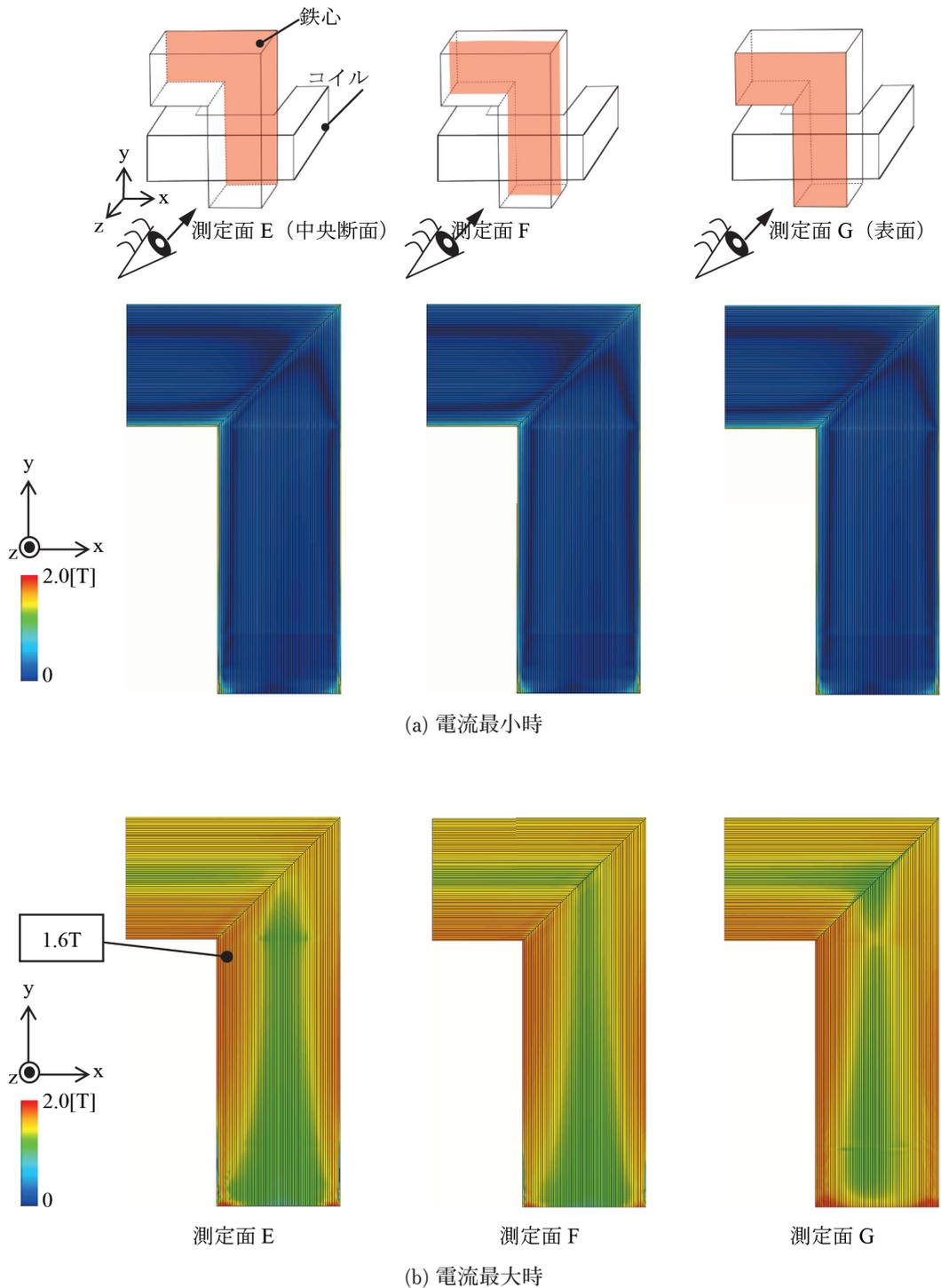


図 5 鉄心中の磁束密度分布

図 6 に電流最大時における鉄心表面の磁束密度分布を示す。図より、黒枠で囲んだ部分のように磁束密度が低い箇所が見られる。これは後述する鋼板中の渦電流による反作用磁界による影響と考えられる。

図 7 に電流最大時における鉄心表面の渦電流分布を示す。図より、渦電流はギャップ近傍の鉄心端部に集中していることがわかる。これは図 1 の空気中への漏れ磁束によって渦電流が発生している（フリッジング効果）である。

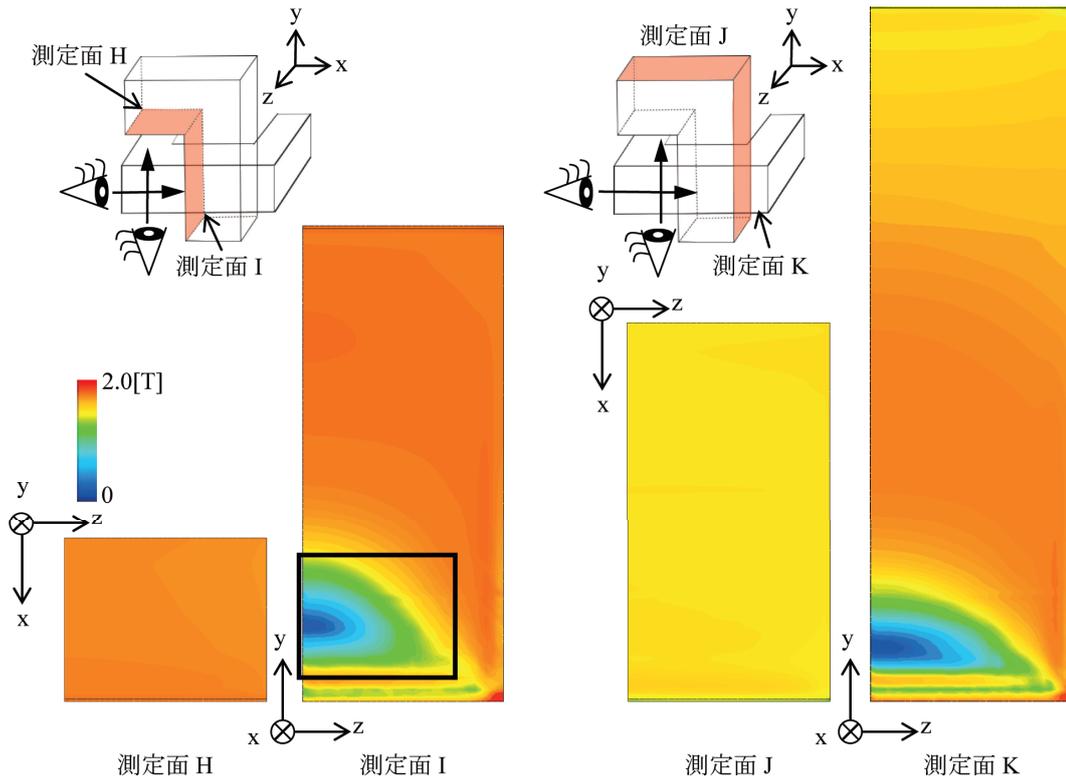


図 6 鉄心中の磁束密度分布

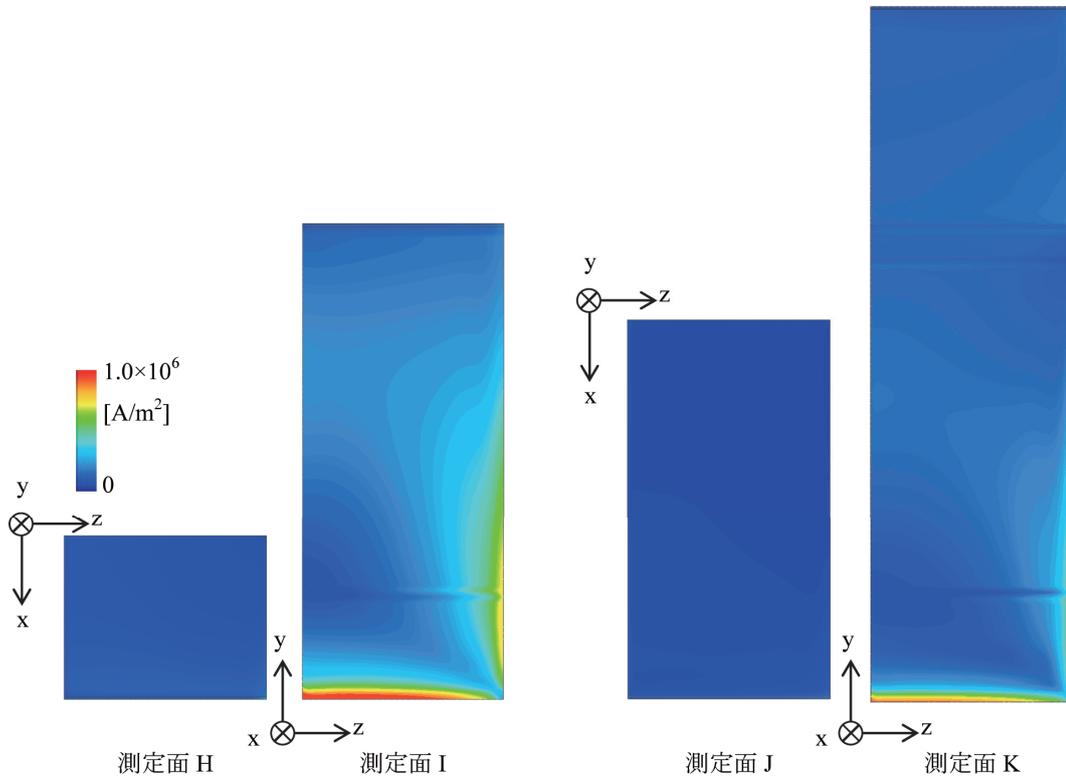


図 7 鉄心中の渦電流密度分布

図 8 に渦電流密度から計算した鉄心の渦電流損（以下、面内渦電流損）、図 9 に磁束密度から近似計算した渦電流損、図 10 にヒステリシス損分布を示す。なお、図 9 と図 10 の分布が似ているのは同じ磁束密度分布から計算しているためである。

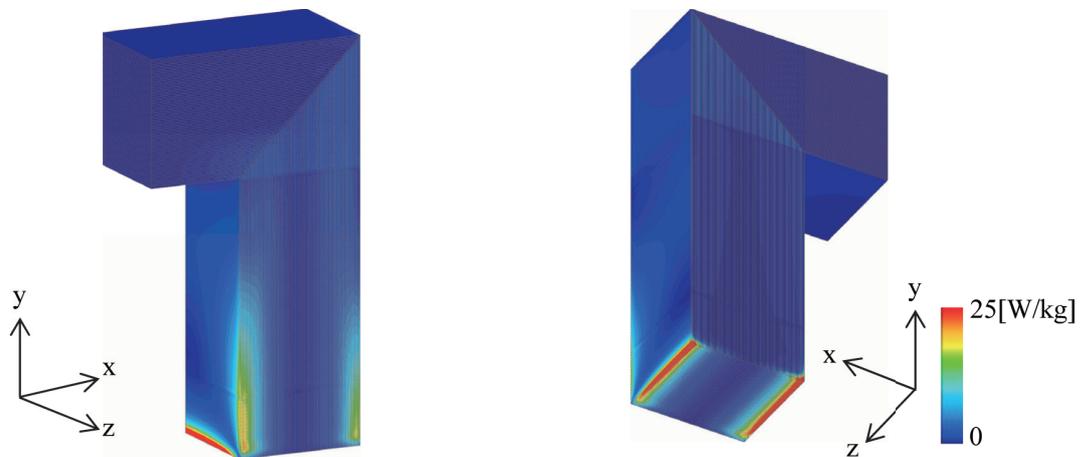


図 8 渦電流損分布（渦電流密度から計算）

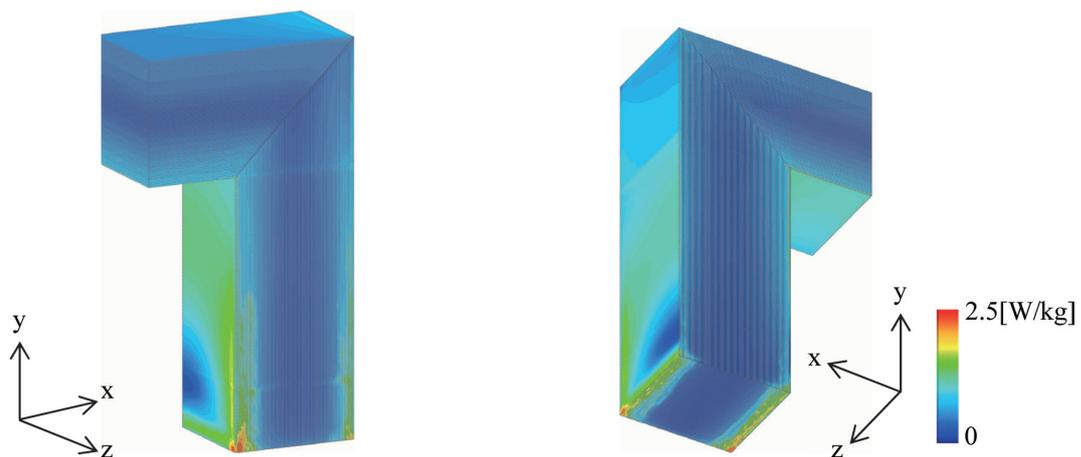


図 9 渦電流損分布（磁束密度から近似計算）

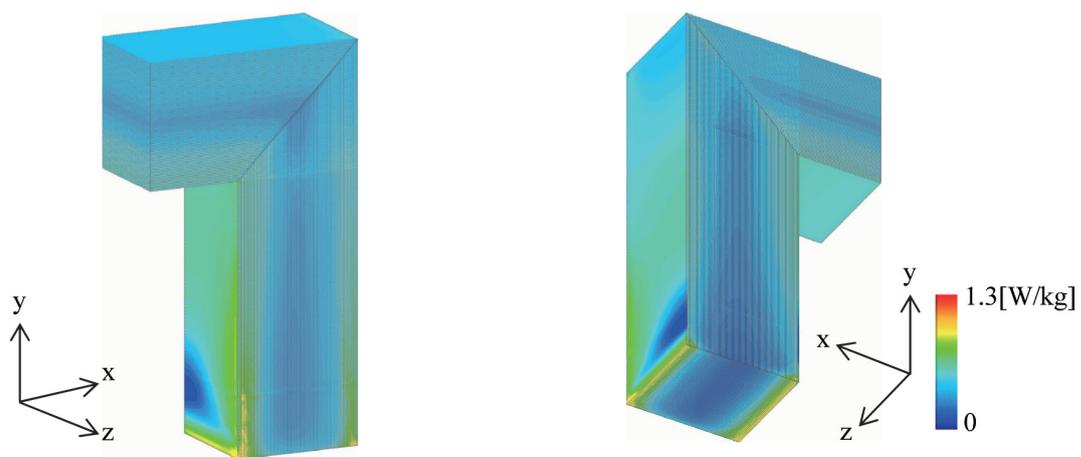


図 10 ヒステリシス損分布

表 2 にギャップ中の磁束密度と損失を示す。次章にて詳細に検証する。

表 2 ギャップ磁束密度と損失特性

No.	項目	単位	解析結果	
1	ギャップ磁束密度	T	1.0	
2	鉄損	W	1.967	
3			面内渦電流損	0.605
4			ヒステリシス損	0.724
5			渦電流損	0.638

表 3 にパフォーマンスを示す。

表 3 パフォーマンス

解析マシン	地球シミュレータ	PC クラスタ
周波数 (Hz)	60	
要素数	2,701,440	
節点数	15,957,042	
辺数	18,741,765	
未知数	18,273,877	
ステップ数	54	72
CPU 数	96 (12 ノード)	16
収束判定値	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-6}$
平均 MFLOPS	1,460.20	-
解析時間 (hours)	28.7	432.0

#### 4. 考察

試験機との比較ができなかったため、簡易計算との比較を行い、解析結果を考察する。表 4 に比較結果を示す。ここでいう簡易計算とは、コア部材メーカーのカatalog記載の鉄損曲線のデータを参考に、古典的設計手法を用いた計算のことである。計算には、解析結果を参考に鉄心中の磁束密度を 1.6T として計算した。

表 4 簡易計算と解析結果の比較

No.	項目	単位	簡易計算	有限要素法解析結果	
1	ギャップ磁束密度	T	1.0	1.0	
2	鉄心中磁束密度	T	1.6	-	
3	鉄損	W	-	1.967	
4			面内渦電流損	-	0.605
5			ヒステリシス損	1.394	0.724
6			渦電流損		0.638

簡易計算では面内渦電流損が考慮できないため、ヒステリシス損と渦電流損の合計について比較する。解析結果：1.362W (0.724 + 0.638) に対し、簡易計算結果：1.394W と同程度である。解析結果が妥当であると考えられる。

解析結果をベースとすると、簡易計算では全鉄損の約 30% が考慮できていないこととなる。解析は 60Hz で実施しているため、鉄損も小さい。しかし、高周波帯域では鉄損が増加するため、面内渦電流損も含めた計算手法の確立は重要である。

## 5. まとめ

本年度の大規模数値解析により、リアクトルにおいて積層鋼板内の磁束密度分布、渦電流密度分布、損失密度分布といった磁気現象を定量的に明らかにし、また、可視化することができた。同時に、積層鋼板内の渦電流損に踏み込んだ鉄損計算手法の確立の必要性も明らかとなった。

計算手法の確立により、より高効率・小型化の静止器の設計が容易となり、省エネルギー化への貢献、小型化による必要資源の低減に寄与するものと考えている。

## 参考文献

- 1) 卯本重郎：「電磁気学」昭晃堂（1975）
- 2) 平成 25 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
- 3) 山崎克巳：「固定子及び回転子の高調波電磁界を考慮した誘導電動機の損失算定」、電気学会論文誌 D、vol.123、no.4、pp.392-400 (2003)