

# 三次元並列有限要素法による大規模磁界解析技術

## Large-Scale Electromagnetic Field Analysis Techniques by 3-D Parallel Finite Element Method

河瀬順洋<sup>†1</sup> (YOSHIHIRO KAWASE)

### 1. はじめに

電気機器の高効率化は省エネルギーの観点から非常に重要な課題のひとつとなっている。

高効率な電気機器の開発設計に磁界解析を用いて行うには、細部まで詳細にモデル化する必要があり、膨大な主記憶容量を要する。また、インバータを駆動源とする場合、入力波形を正確に考慮するためには、膨大な計算時間を要する。そのため、電気機器の磁界解析の高速化・大規模化技術の開発が強く望まれている。本研究では、地球シミュレータ上で動作する、三次元並列有限要素法による大規模磁界解析プログラムを開発し、高速・高精度な大規模磁界シミュレーションを実現することを目的としている。本手法を用いて地球シミュレータ上で行った実際の解析例<sup>1,2)</sup>を静止器・回転機ともに示し、その有用性について述べる。

### 2. 解析手法

#### 2.1 電磁界の基礎方程式

永久磁石および渦電流を考慮した磁界の基礎方程式はマクスウェルの電磁界方程式より磁気ベクトルポテンシャル  $\mathbf{A}$  と電気スカラーポテンシャル  $\phi$  を用いて次式で表される。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J} + \nu_0 \text{rot} \mathbf{M}$$

$$\mathbf{J} = -\sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad} \phi \right)$$

$$\text{div} \mathbf{J}_e = 0$$

ここで、 $\nu$  は磁気抵抗率、 $\mathbf{J}_0$  は強制電流密度、 $\mathbf{J}_e$  は渦電流密度、 $\nu_0$  は真空の磁気抵抗率、 $\mathbf{M}$  は永久磁石中の磁化、 $\sigma$  は導電率である。なお、辺要素有限要素法では、磁気ベクトルポテンシャル  $\mathbf{A}$  は要素の辺上で、電気スカラーポテンシャル  $\phi$  は要素の節点上で、それぞれ定義される。

#### 2.2 地球シミュレータ向けの最適化

四面体辺要素で構成された分割図に対する領域分割には METIS (マルチレベルグラフ理論に基づく領域分割ツール) を用いることで、通信量が少なく、未知数のバランスの取れた領域分割を行うことができる。解析プログラムを高速に動作させるために、線形ソルバを ICCG 法からベクトル化率が高く、並列化しても収束性が悪化しない対角スケールリング前処理付き CG 法に変更した。また、行列の格納方式をベクトル計算機向けの DJDS 方式とスカラー計算機向けの CRS 方式の併用で格納している。なお、通信には MPI を用いている。

<sup>†1</sup> 岐阜大学 Gifu University

### 3. 解析モデルの例

図 1 に解析モデルの例を示す。回転機の場合は回転子と固定子の相対位置が時間的に変化するため、全領域にわたるマトリクスを時間的に変更して解析を行う必要がある。一方、静止器の場合は相対位置が時間的に変化しないため、右辺の電圧等を時間的に変更するだけで、全体のマトリクスの変更を行う必要がない。

表 1 に解析諸元を示す。

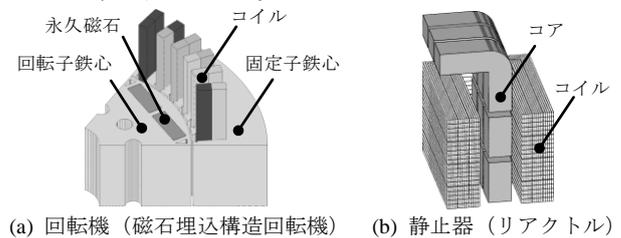


図 1 解析モデル

表 1 解析諸元

解析モデル	回転機	静止器
要素数 (万)	1,371	1,960
解析方法	A 法	A- $\phi$ 法
ステップ数	120	1
計算時間 (hours)	14.6	0.3
ベクトル演算率 (%)	96.639	99.669
MFLOPS	1,211.6*	7,324.2**

\*8 ノード(64CPU)使用 \*\*16 ノード(128CPU)使用

### 4. まとめ

本研究では、地球シミュレータ用の並列計算手法を開発するとともに、実際の電気機器を地球シミュレータ上で解析を行った。その結果、大規模な計算を現実的な時間で完了することが可能となった。また、実験では見えない磁束、渦電流の詳細な可視化を実現した。

今後、これらの解析がより高効率な電気機器の開発に貢献することが期待される。

### 参考文献

- 1) 澤田正志, 進藤裕司, 田宮智彰, 河瀬順洋, 山口忠, 片桐弘雄, 石樽宏紀, 中野智仁: “並列計算システムを用いたリアクトルの銅損にコイル分割が及ぼす影響の解析”, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-12-007/RM-12-007(2012)
- 2) 3-D Finite Element Analysis of Eddy Current in Laminated Cores of Interior Permanent- Magnet Motor (Tomohito Nakano, Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Masanori Nakamura, Noriaki Nishikawa) IEEE Transactions on Magnetics, Vol.49, No.5, pp.1945-1948 (2013)