

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

プロジェクト責任者

中村 雅憲 東洋電機製造株式会社

著者

中村 雅憲^{*1}、河瀬 順洋^{*2}、山口 忠^{*2}、中野 智仁^{*2}、西川 憲明^{*3}

* 1 東洋電機製造株式会社

* 2 国立大学法人岐阜大学

* 3 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 (ES2)

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

本プロジェクトでは、地球シミュレータ上で動作する、三次元有限要素法による並列磁界解析プログラムを開発し、高速高精度な回転機の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。今年度は、前年度に引き続き鉄心の積層構造を考慮した埋込磁石構造回転機の渦電流解析を行い、積層構造の考慮の有無が鉄損の計算精度に及ぼす影響を明らかにしたので報告する。

キーワード：回転機、磁界解析、辺要素有限要素法、積層鋼板

1. はじめに

国内の消費電力のうち、50% 以上が回転機によって消費されていると言われている。よって、回転機の効率向上は環境問題において避けることのできない課題のひとつであると言える。

高効率な回転機の開発設計のためには、回転機本体だけでなく、ケースやその他の構造物等、細部まで精密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、インバータ等による電圧波形や電流波形を正確に考慮するためには、時間軸方向の分解能を高くする必要があり、膨大な計算時間を要する。そのため、回転機の磁界解析の大規模化・高速化技術の開発が強く望まれている。

回転機の鉄心は、鉄心内に流れる渦電流を低減させるために、表面に絶縁処理を施した薄い鋼板を積み重ねて構成されている。このため、鉄心内に流れる渦電流およびそれによって生じる損失を精度よく計算するためには、鉄心の積層構造を考慮して解析する必要がある。しかしながら、そのような解析は計算規模および計算時間が膨大になるため、実現が困難であった。そこで昨年度に、これまでに開発した並列計算手法を用いて、地球シミュレータ上で積層構造を考慮した埋込磁石構造回転機の詳細な渦電流解析を行ったが、鉄損を算出するには至らなかった¹⁾。そこで今年度は引き続き解析を行い、鉄損を算出して積層構造の考慮の有無が鉄損の計算精度に及ぼす影響を明らかにしたので報告する。

2. 解析手法

2.1 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方程式より磁気ベクトルポテンシャル A を用いて次式で表される。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} A) = J_0 - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nu_0 \text{rot} M \quad (1)$$

ここで、 ν は磁気抵抗率、 J_0 は強制電流密度、 ν_0 は真空の磁気抵抗率、 M は永久磁石中の磁化、 σ は導電率である。なお、本プロジェクトでは辺要素有限要素法を用いているため、磁気ベクトルポテンシャルは要素の辺上で定義される。

電圧が印加された場合の解析ではコイルに流れる電流は未知であるため、次式で表される電圧に関する方程式も同時に解かなければならない。

$$E = V_0 - RI_0 - L \frac{dI_0}{dt} - \frac{d\psi}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$\psi = \frac{n_c}{S_c} \int A \cdot n_s dv \quad (3)$$

$$J_0 = \frac{n_c}{S_c} I_0 n_s \quad (4)$$

ここで、 V_0 はコイルの端子電圧、 R はコイルの実効抵抗、 L は解析領域外のインダクタンス、 I_0 はコイルの励磁電流、 ψ は総鎖交磁束数、 n_c はコイルの巻数、 S_c はコイルの断面積、 n_s はコイル断面の単位法線ベクトル、 dv はコイル領域の微小体積である。

2.2 積層鋼板を考慮した磁界解析手法²⁾

本解析では、積層鋼板に流れる渦電流のうち、鋼板に垂直な成分は損失にほとんど影響しないため無視し(垂直方向の導電率を0とした)、図1に示すように面方向に流れる渦電流のみを計算する。また、積層鋼板の絶縁層による磁気抵抗を考慮するため、図2に示すようなギャップ要素³⁾と呼ばれる二次元面要素を用いた。

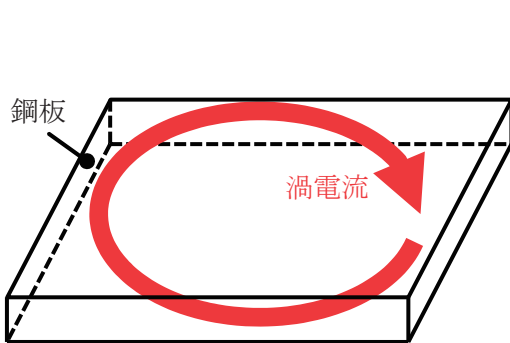


図1 面内渦電流

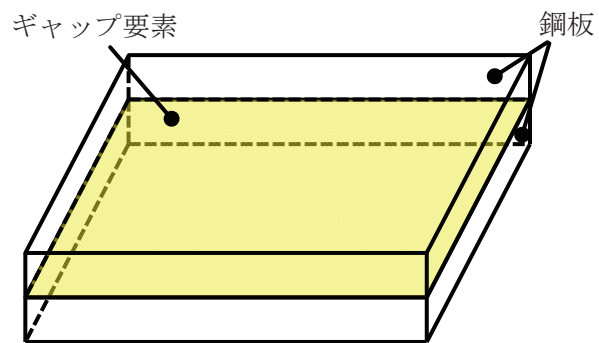


図2 ギャップ要素

3. 積層鋼板を考慮した回転機の渦電流解析

3.1 解析モデルと解析条件

図3に解析モデルを示す。解析領域は対称性により、周方向に1/6、軸方向に1/2とした。図4に解析に用いたメッシュを示す。鉄心の積層構造を考慮して渦電流解析を行うために、軸方向のメッシュは鋼板1枚の厚さである0.5mmごとに分割されている(図4(b))。要素数は13,713,984である。鋼板中の渦電流が回転機の特性に与える影響を検討するため、同じ分割図で渦電流を考慮しない計算も行い、比較する。

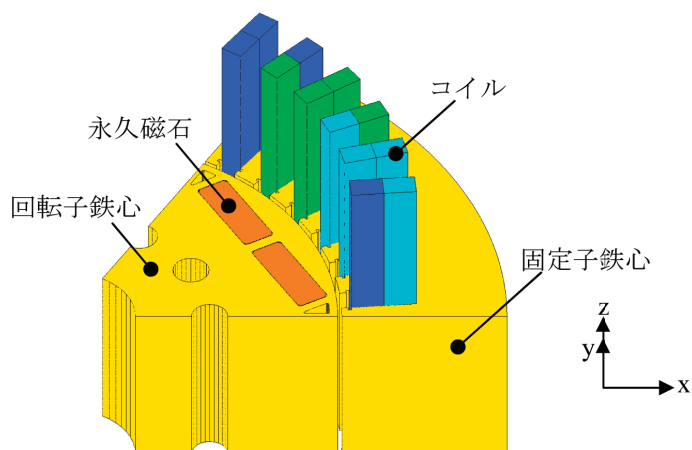


図3 解析モデル

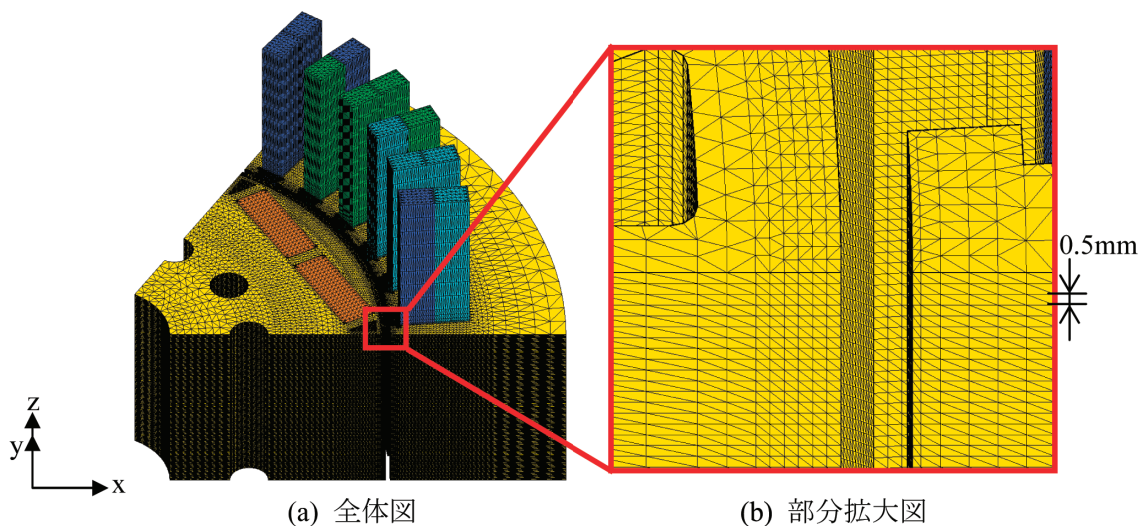


図4 メッシュ

3.2 解析結果

図5に磁束密度分布を示す。鉄心の上面、特にティース先端部や回転子の表面で、渦電流を考慮した場合の磁束密度が高くなっている。また、渦電流を考慮していない場合と比べて、考慮した場合は磁束密度のz方向成分が高くなっていることがわかる。

図6に磁束密度ベクトル分布を示す。鉄心中央では、渦電流を考慮した場合としていない場合とで、分布はほぼ同じであるが、鉄心上面では、渦電流を考慮した場合は磁束が空気中に漏れていることがわかる。

図7に鉄心中の渦電流密度分布を示す。鉄心の上部、特にティース先端部と回転子表面付近で渦電流密度が高くなっている。

図8に渦電流密度ベクトル分布を示す。鉄心上面では、ティースの周囲や回転子表面付近で渦電流が発生している。これは鉄心上面から磁束が漏れているためである。一方、鉄心中央では、渦電流はほとんど発生していない。

図9に渦電流密度から直接算出した渦電流損分布を示す。鉄心上部のティース先端部や回転子表面付近に損失が集中していることがわかる。

図10に磁束密度から近似計算した渦電流損分布を示す。鉄心上面付近で、渦電流を考慮した場合の方が考慮していない場合よりも、若干損失が大きくなっている。

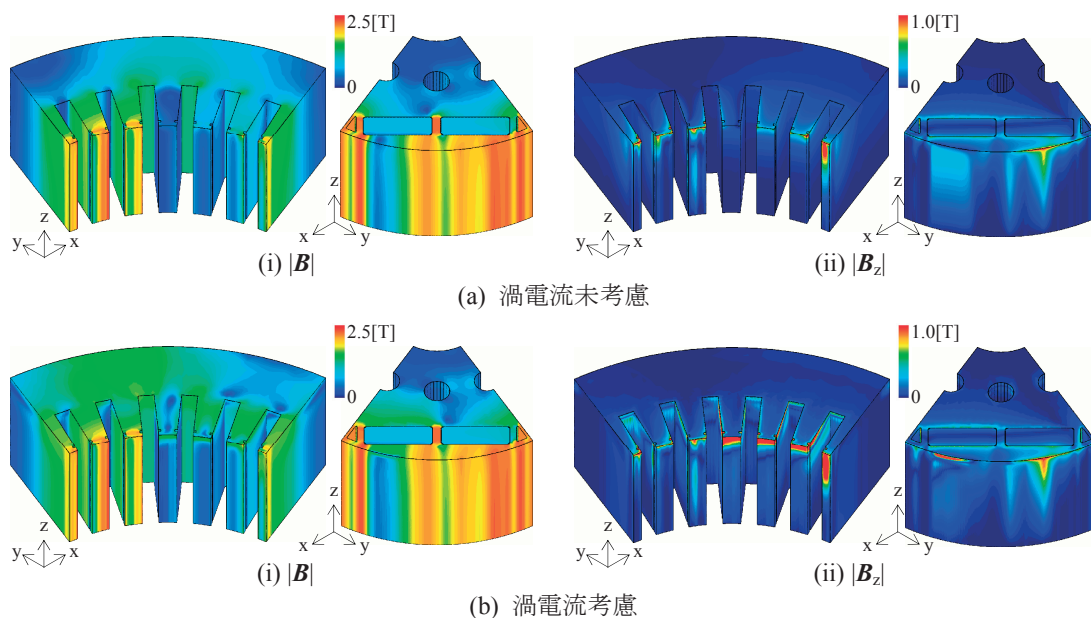


図5 磁束密度分布（電気角 180°時）

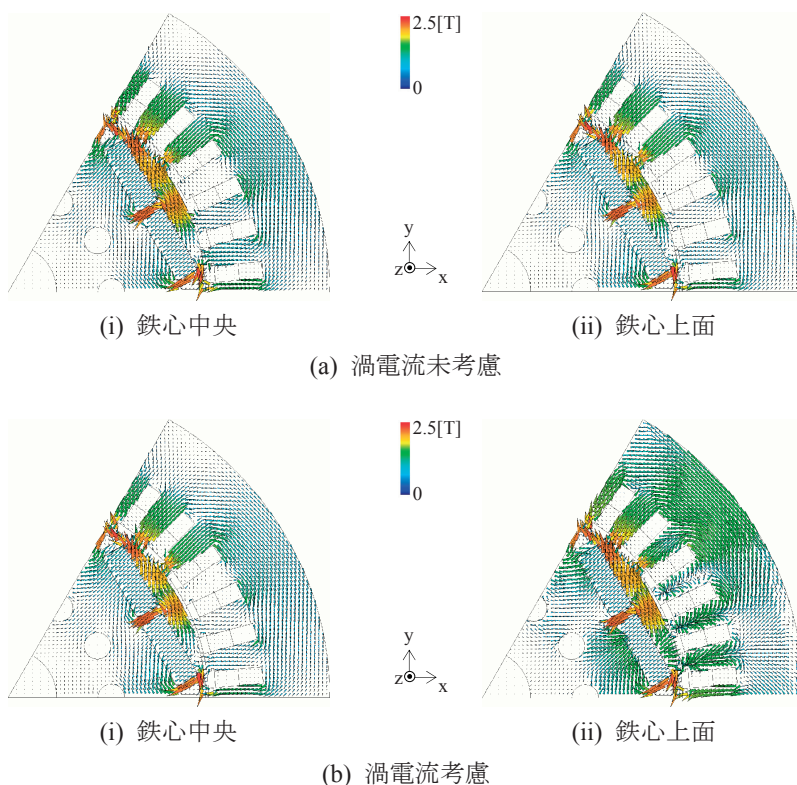


図6 磁束密度ベクトル分布

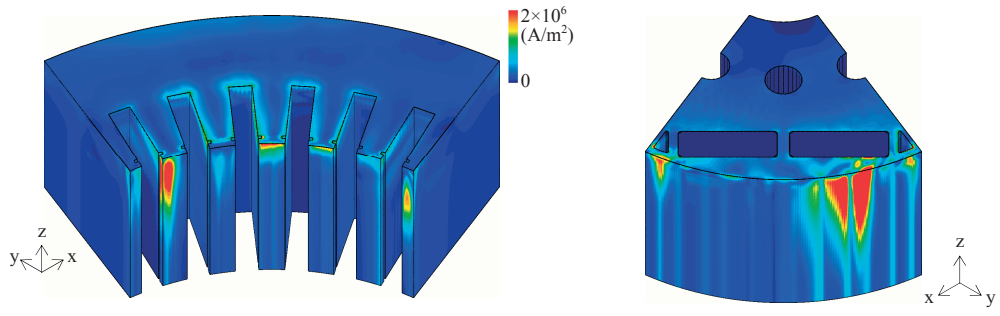


図7 渦電流密度分布

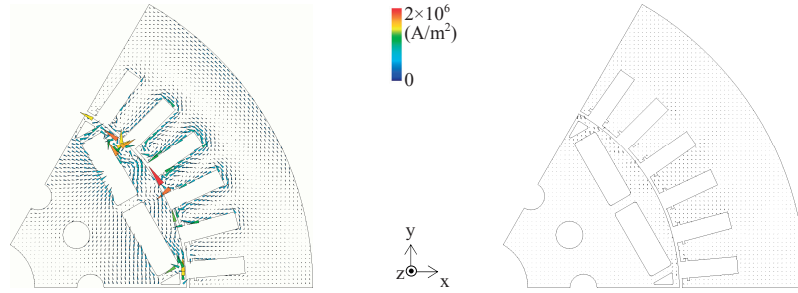


図8 渦電流密度ベクトル分布

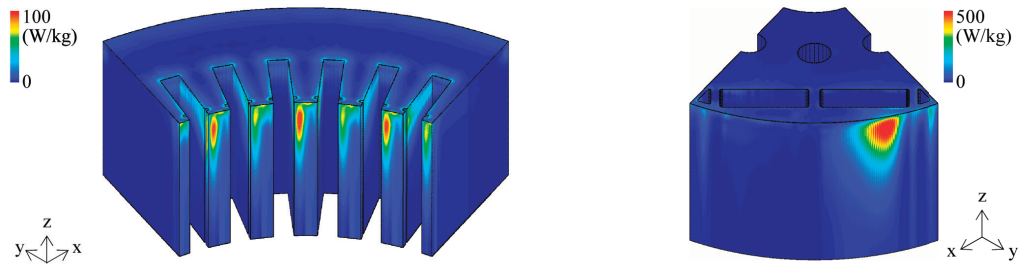
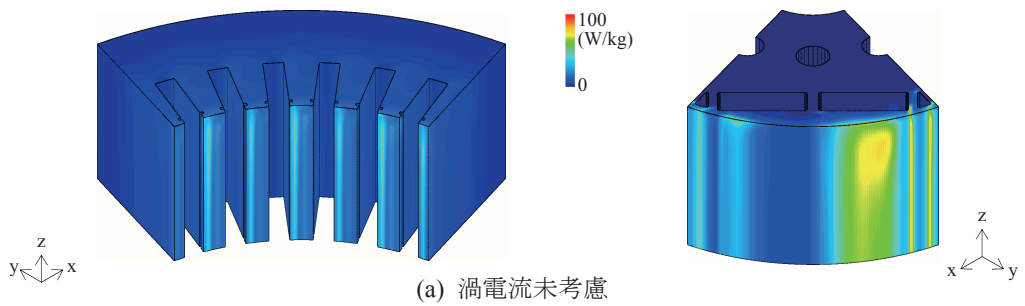
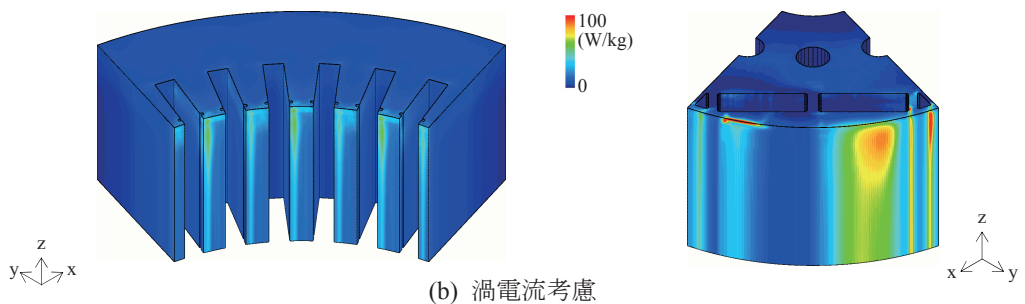


図9 渦電流損分布 (J_e から直接計算)



(a) 渦電流未考慮



(b) 渦電流考慮

図10 渦電流損分布 (B から近似計算)

表 1 に鉄損特性を示す。渦電流を考慮した場合の方が、考慮していない場合よりも鉄損の合計が約 47% 大きくなっている。これは、渦電流を考慮していない場合では軸方向の磁束に起因する渦電流損が評価できていないためである。よって、鉄損を高精度に計算するためには、鋼板中の渦電流の計算が非常に重要であると言える。

表 2 に計算時間を示す。約 1300 万要素の大規模な非線形渦電流解析を ES2 の CPU を 64 台用いることで、1 ステップあたり 440 秒 (約 7.3 分) で完了させることができた。

表 1 鉄損特性 (W)

| | 渦電流未考慮 | 渦電流考慮 |
|-------------------------|--------|--------|
| J_e から直接計算した渦電流損 (W) | — | 309.5 |
| B から近似計算した渦電流損 (W) | 187.0 | 187.4 |
| B から近似計算したヒステリシス損 (W) | 494.4 | 505.7 |
| 合計 (W) | 681.3 | 1002.6 |

表 2 計算時間 (渦電流考慮時)

| | |
|-----------------|------------|
| 要素数 | 13,713,984 |
| 節点数 | 2,319,515 |
| 未知数 | 15,974,262 |
| CPU 数 | 64 |
| 1 周期あたりの時間ステップ数 | 120 |
| 経過時間 (s/step) | 440.05 |

使用計算機 : ES2 (64 CPUs)

4. 結言

鉄心の積層構造を考慮した大規模な回転機の磁界解析を行った。軸方向の磁束が鉄心端部に渦電流損を発生させる様子を確認することができた。また、鉄損を高精度に計算するためには、鋼板中の渦電流の計算が必要であることが分かった。さらに、地球シミュレータを用いることにより、大規模な計算を現実的な時間で完了させることができた。本報告で示した技術は様々な回転機に幅広く応用できるため、回転機的设计・開発プロセスの効率化に大きく貢献することが期待できる。

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, 桜井裕司, 西川憲明, “三次元有限要素法による回転機の高速度高精度磁界解析技術の開発”, 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.43-48, 2012
- 2) 山崎克巳, 佐藤寛之, 渡邊裕太, “積層鉄心を考慮した永久磁石モータの損失解析に関する検討”, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-06-25/RM-06-25, 2006.
- 3) N. Nakata, N. Takahashi, K. Fujiwara and Y. Shiraki, “3-D magnetic field analysis using special elements,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, no. 5, pp. 2379-2381, 1990.

外部発表等

- 1) 河瀬順洋, 山口忠, 中野智仁, 太田信治, 中村雅憲, 西川憲明, “積層銅板内の渦電流を考慮した埋込磁石構造回転機の損失解析”, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-03-021/RM-03-021, 2012
- 2) T. Nakano, Y. Kawase, T. Yamaguchi, M. Nakamura and N. Nishikawa, “3-D Finite Element Analysis of Eddy Current in Laminated Cores of the Interior Permanent-Magnet Motor,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 5, 2013
- 3) 河瀬順洋, 山口忠, 中野智仁, 太田信治, 中村雅憲, 西川憲明, “積層銅板内の渦電流が埋込磁石構造回転機の鉄損に及ぼす影響の検討”, 平成 25 年電気学会全国大会講演論文集, 5-022, 2013