

# PMモータの磁石渦電流損失高速解析手法の開発

🔊 PMモータ, 磁石, 渦電流損失, 磁界解析

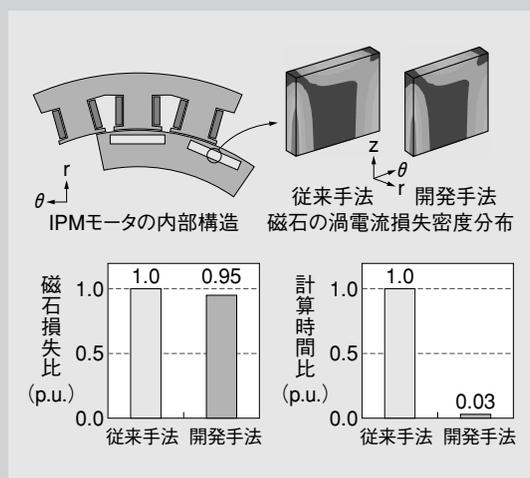
\* 沖津隆志 Takashi Okitsu

\* 松橋大器 Daiki Matsushashi

## 概要

PMモータの磁石の発熱による熱減磁を評価するためには、モータの三次元磁界解析による磁石の渦電流損失の算定が不可欠である。しかし、インバータのPWMキャリア高調波を含む電流波形を用いて磁石の渦電流損失を求める場合は、解析の時間刻み幅を短くする必要があり、計算時間が膨大となる。

そこで、PMモータの二次元解析と磁石単体の三次元解析を併用することにより、磁石の渦電流損失を高速に求める手法を開発した。本手法をIPMモータに適用し、従来の三次元磁界解析のみを用いる手法と比較したところ、渦電流損失算定精度を損なうことなく、計算時間を大幅に削減できることを確認した。



従来手法と開発手法の比較

## 1. ま え が き

近年、小形軽量・高効率である永久磁石を使用した回転機（PMモータ：Permanent Magnet Type Synchronous Motor）は、電気自動車や産業用など様々な分野に応用されている<sup>(1)</sup>。これらのPMモータに多く使用されるNd-Fe-B系の希土類磁石は、高磁束密度という優れた磁気特性を有するが、高温では減磁し易いことも知られている。

PMモータ内に分布している磁束には、インバータのPWMキャリア高調波やスロット高調波など多くの高調波成分が含まれるため、希土類磁石で発生する高調波渦電流によって発熱し、減磁する恐れがある。従って、PMモータの試作前に磁石の熱減磁を評価するため、有限要素法に代表される三次元磁界解析を用いた磁石の渦電流損失の算定が不可欠となっている<sup>(2)</sup>。しかしながら、イン

バータのPWMキャリア高調波を含んだ電流波形を用いて磁石の渦電流損失を求める場合には、磁界解析の時間刻み幅を短くする必要があり、計算時間が膨大になってしまう課題がある<sup>(3)</sup>。

そこで、PMモータの二次元静磁界解析と磁石単体の三次元渦電流解析を併用することにより、磁石の渦電流損失を高速に求める手法を開発した<sup>(4)</sup>。本稿では、開発した手法を理想正弦波駆動のIPM（Interior Permanent Magnet）モータに適用し、従来の三次元磁界解析のみを用いる手法（従来手法）と比較を行ったので紹介する。

## 2. 解 析 方 法

ここでは、開発した二次元・三次元併用解析手法について紹介する。

### 2.1 PMモータの二次元解析

モータ全体の解析は、磁気ベクトルポテンシャル

\*基礎技術開発部

ル $\mathbf{A}$ を用いる $\mathbf{A}$ 法により二次元静磁界解析を行う。その基礎方程式を次式に示す。

$$\text{rot}\{v(\text{rot}\mathbf{A}-\mathbf{M})\}=\mathbf{J}_0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $\mathbf{M}$ は磁石の磁化、 $\mathbf{J}_0$ はコイルに与える電流密度、 $v$ は磁気抵抗率である。

**2.2 磁石単体の三次元渦電流解析**

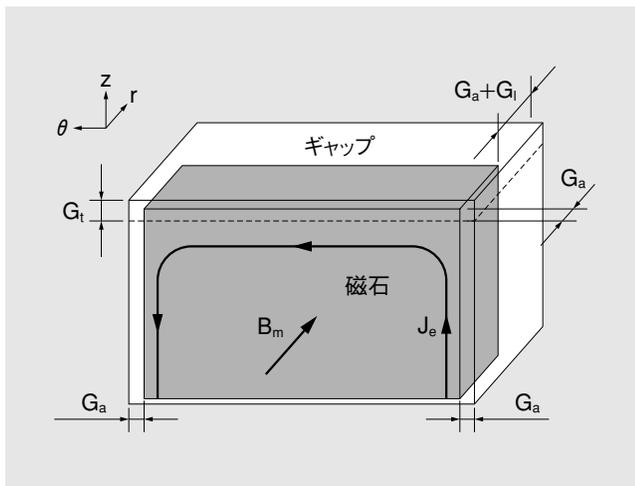
PMモータの二次元静磁界解析により得られた磁石中の磁束密度 $\mathbf{B}_m$ の分布を用いて磁石単体の三次元渦電流解析を行う。磁石の渦電流による反作用磁界を考慮するため、磁気ベクトルポテンシャル $\mathbf{A}$ と電気スカラーポテンシャル $\phi$ を用いる $\mathbf{A}-\phi$ 法により三次元渦電流解析を行う。その基礎方程式を次式に示す。

$$\text{rot}\{v(\text{rot}\mathbf{A}-\mathbf{B}_m)\}=-\sigma\left(\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}+\text{grad}\phi\right) \quad \dots\dots(2)$$

$$\text{div}\left\{-\sigma\left(\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}+\text{grad}\phi\right)\right\}=0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $\sigma$ は磁石の導電率である。

なお、渦電流の反作用磁界を考慮する場合には、渦電流が作る磁束に対する磁気抵抗を考慮する必要がある。そのため、開発手法では、第1図の磁石単体の解析モデルに示すように分割された磁石間のギャップ $G_t$ と磁石とロータ鉄芯間のギャップ $G_a$ を考慮し、また、 $G_t$ と $G_a$ を除くモータ全体の磁気抵抗を等価的に置き換えたギャップ $G_l$ を考慮したモデルの解析を行う。 $G_l$ の算出については後述する。境界条件は、磁石対称面には磁束が平行で渦電流が垂直となる $\mathbf{A}=\mathbf{0}$ 、 $\phi=0$ 、 $G_t$ 上面には磁束



第1図 磁石単体の解析モデル (z方向1/2)  
開発手法の磁石単体の三次元渦電流解析に用いる解析モデルを示す。

が平行となる $\mathbf{A}=\mathbf{0}$ の固定境界条件を与え、そのほかの面は、透磁率が無限大の鉄芯に接していると仮定し、自然境界条件とした。

等価的に加えたギャップ $G_l$ の長さは、磁石表面に流れる電流に対する磁石を除いたモータ全体の非線形性を考慮した磁気抵抗 $R_l$ から決定する。以下、第2図を用いてその方法を紹介する。

まず、磁石表面に流れる電流 $I_m$ のみが作る磁束量 $\phi$ を把握するため、磁石の磁化 $\mathbf{M}$ を微小量 $\Delta\mathbf{M}$ だけ増やした解析を行い、磁石に鎖交する磁束の変化量 $\Delta\phi$ を求める。この時、 $\Delta\mathbf{M}$ が磁石内で一定の場合、 $I_m$ の変化量 $\Delta I_m$ と $\Delta\mathbf{M}$ には、次式の関係が成り立つ。

$$\Delta I_m = \frac{\Delta\mathbf{M}L_l}{\mu_r} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで $L_l$ は磁石の長さ、 $\mu_r$ は磁石のリコイル透磁率である。これよりモータ全体の磁気抵抗 $R_l$ が次式により算出できる。

$$R_l = \frac{\Delta I_m}{\Delta\phi} = \frac{\Delta\mathbf{M}L_l}{\mu_r\Delta\phi} \quad \dots\dots\dots(5)$$

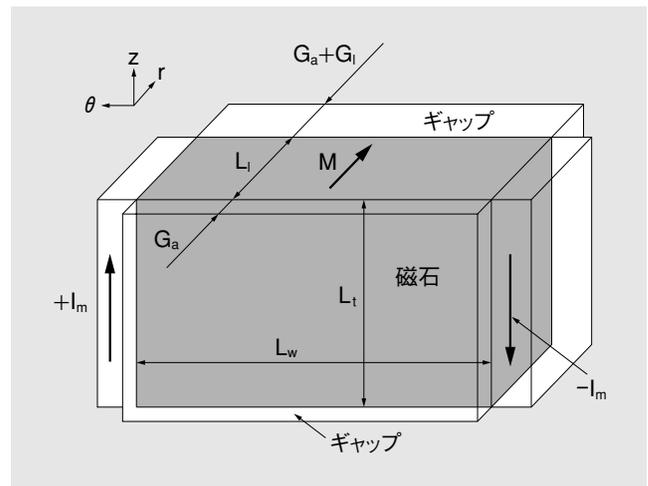
また、磁石以外の磁気抵抗 $R_i$ は、 $R_l$ から磁石の磁気抵抗 $R_m$ を除けばよいので、次式となる。

$$R_i = R_l - R_m = \frac{\Delta\mathbf{M}L_l}{\mu_r\Delta\phi} - \frac{L_l}{\mu_r L_w L_t} \quad \dots\dots\dots(6)$$

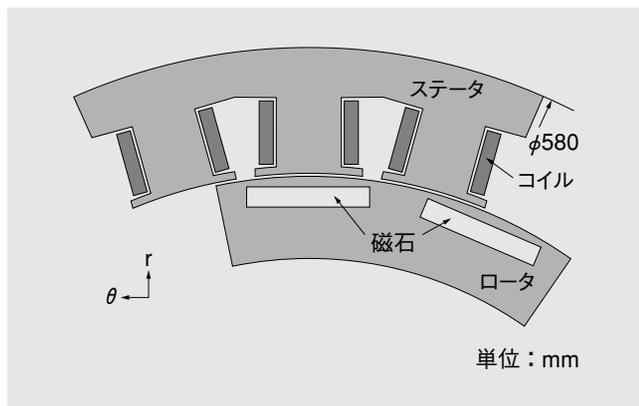
ここで、 $L_w$ は磁石の幅、 $L_t$ は磁石の高さである。

一方、第2図のモデルにおける磁石以外の磁気抵抗 $R_i'$ は次式で表される。 $\mu_0$ は真空の透磁率である。

$$R_i' = \frac{G_l + 2G_a}{\mu_0 L_w L_t} \quad \dots\dots\dots(7)$$



第2図 ギャップ長 $G_l$ を求めるモデル  
モータ全体の磁気抵抗を等価的に置き換えたギャップ長 $G_l$ を求める方法を説明するためのモデルを示す。



第3図 IPMモータ（周方向1/8）  
検討に用いたIPMモータのモデル図を示す。

第1表 IPMモータの諸元

検討に用いたIPMモータの諸元を示す。

極数	16
スロット数	24
軸長	100mm
ギャップ長	1mm
回転速度	2400min <sup>-1</sup>
電流（正弦波）	1890AT
電流位相角β	60deg
コア材質	35A300
磁石種類, 磁化	Nd-Fe-B, 1.22T
磁石の導電率	7.1×10 <sup>5</sup> S/m

(6), (7)式を等値と置くことにより,  $G_l$ の長さは次式で求めることができる。

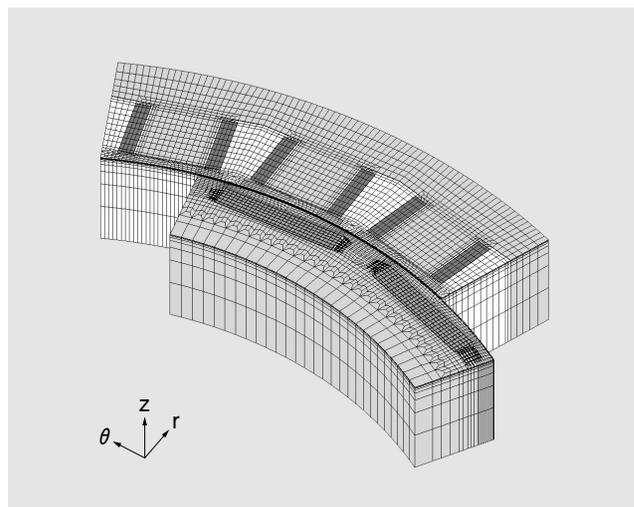
$$G_l = \frac{\mu_0 \Delta M L_w L_t L_l}{\mu_r \Delta \phi} - \frac{\mu_0 L_l}{\mu_r} - 2G_a \quad \dots\dots\dots(8)$$

なお, この $G_l$ は電機子電流やロータ位置によって変化する。

### 3. 解析モデル及び解析条件

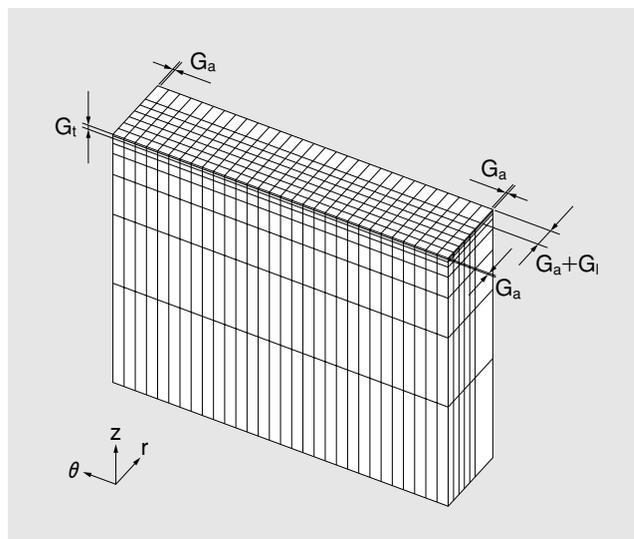
IPMモータに開発手法を適用し, 妥当性の検討を行った。第3図にIPMモータのモデル図を, 第1表に諸元を示す。今回は開発手法の妥当性を検討することを目的としているため電機子電流は理想正弦波とした。また, 磁石分割の影響も検討するため, 磁石を分割しない場合と, 軸方向に5分割した場合の解析を行った。

第4図に従来手法の三次元渦電流解析に用いた三次元分割図を示す。本分割図は, 開発手法の二次元静磁界解析に用いた二次元分割図を軸方向に積み上げて作成し, 解析領域は周期性を考慮して周方向1/8, 対称性を考慮して軸方向は磁石1個の



第4図 IPMモータの三次元分割図

従来手法による三次元渦電流解析に用いたIPMモータの三次元分割図を示す。



第5図 磁石の三次元要素分割図

開発手法による磁石単体の三次元渦電流解析に用いた三次元分割図を示す。

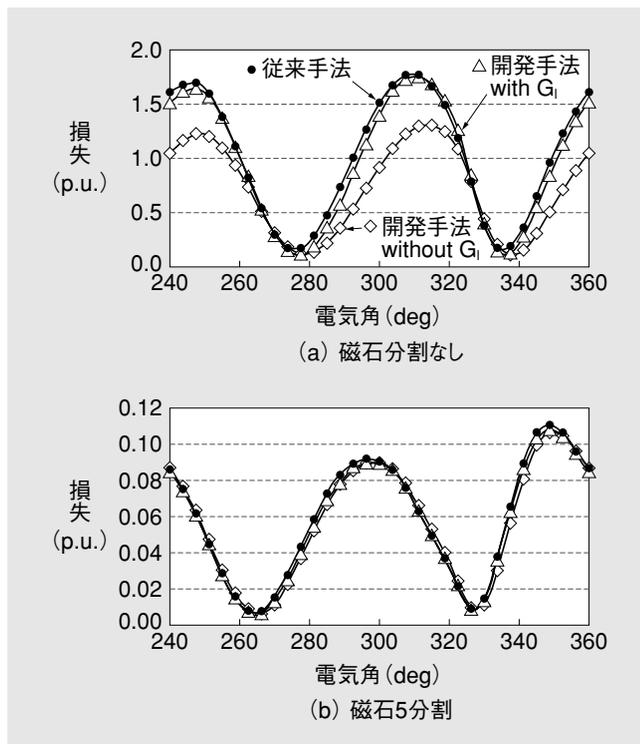
1/2とした。また, 第5図に開発手法の磁石単体の三次元渦電流解析に用いた要素分割図を示す。磁石及びギャップ $G_l$ ,  $G_a$ 部分は第4図の三次元分割図と同様としており,  $G_l$ は0.2mm,  $G_a$ は0.1mmの一定とし,  $G_l$ は解析ステップごとに(8)式より算出して分割図を修正している。

本解析では, 電気角一周を96分割し, ステップ・バイ・ステップ法を用いて渦電流がほぼ定常になる一周解析を行った。

### 4. 結果及び検討

#### 4.1 磁石の渦電流損失

第6図に従来手法と開発手法によって得られた



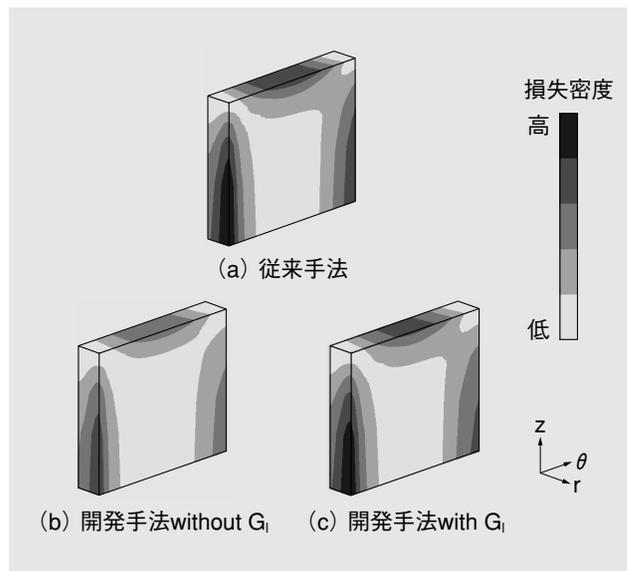
第 6 図 磁石の渦電流損失時間変化

従来手法と開発手法により得られた磁石損失の時間変化を示す。従来手法と開発手法with  $G_1$ はよく一致している。

磁石1個当りの渦電流損失の時間変化を示す。但し、図中では磁石を分割しない従来手法で得られた平均渦電流損失の値で正規化している。なお、参考のため、開発手法ではギャップ $G_1$ を無視した場合も示す。磁石を分割しない(a)より、開発手法においてギャップ $G_1$ を無視した場合には、渦電流損失は過小評価されている。これは、磁石の渦電流による反作用磁界の影響が大きいためである。すなわち、ギャップ $G_1$ を無視した場合は、 $G_1$ を考慮した場合と比べてモデル全体の磁気抵抗が小さいため、磁石渦電流の反作用磁界による磁束変化の低減効果が過大評価され、渦電流損失が小さく算定される。

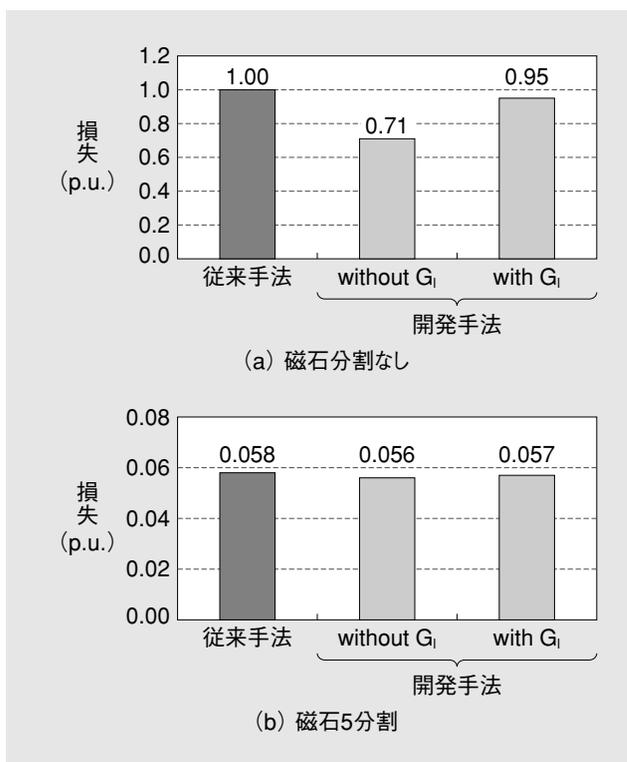
一方、ギャップ $G_1$ を考慮した開発手法は、従来手法とほぼ一致しており、妥当な結果が得られていることがわかる。なお、磁石を分割することにより、渦電流が作る反作用磁界の影響は小さくなるため、5分割の場合には、 $G_1$ を無視した場合でもほぼ妥当な結果が得られることが分かる。

第 7 図に磁石を分割しない場合の各手法で得られた平均渦電流損失密度分布を示す。ギャップ $G_1$ を考慮した開発手法の結果は、従来手法で得られた分布とほぼ一致する。



第 7 図 磁石の平均渦電流損失密度分布 (磁石分割なし)

従来手法と開発手法により得られた磁石の平均渦電流損失密度分布を示す。従来手法と開発手法with  $G_1$ はよく一致している。



第 8 図 磁石の平均渦電流損失

従来手法と開発手法により得られた磁石の平均渦電流損失を示す。従来手法と開発手法with  $G_1$ の差は最大で5%程度である。

第 8 図に各手法で得られた磁石1個当りの平均渦電流損失を示す。但し、図中では磁石を分割しない場合の三次元解析で得られた値で正規化している。反作用磁界の影響が大きい磁石を分割しない場合でも、ギャップ $G_1$ を考慮した開発手法の誤差は5%程度であり、開発手法の妥当性がわかる。



**第2表 従来手法と開発手法の解析諸元及び計算時間**  
 従来手法と開発手法の解析諸元及び計算時間を示す。開発手法の計算時間は従来手法の約1/30である。

解析手法	従来手法 (フル3D)	開発手法	
		モータ(2D)	磁石(3D)
総要素数	32,688	4086	2016
総ステップ数	96	96×2	96
計算時間(分)	164	4	2

CPU : Pentium4 3.8GHz  
 $\epsilon_{ICCG} : 10^{-7}$ ,  $\epsilon_{NR} : 0.001T$

#### 4.2 計算時間の比較

第2表に従来手法と開発手法の解析諸元及び計算時間を示す。本開発手法の場合は、 $G_r$ を算出するために磁石の磁化を修正して、再度電気角一周期分計算する必要があり、その再計算を含めた合計を示している。開発手法を用いることにより計算時間は約1/30に短縮でき、開発手法が有用であることが分かる。

### 5. む す び

PMモータの磁石の渦電流損失を高速に求めるため、モータ全体の二次元非線形静磁界解析と磁石単体の三次元渦電流解析を併用した方法を開発すると共に、理想正弦波駆動のIPMモータに適用し、開発手法の妥当性と有用性の確認を行った。その結果、磁石の渦電流による反作用磁界の影響が大きいモデルに開発手法を適用した場合には、反作用磁界に対するモータ全体の磁気抵抗を考慮すれば妥当な結果が得られ、更に計算時間を大幅に短縮できることを示した。これにより、PMモータの開発スピードだけでなく、最適化による

性能及び信頼性の向上が期待できる。

今後は、インバータ駆動時の電流高調波を考慮した解析に開発手法を適用し、妥当性と有用性の検討を行うと共に、解析技術の更なる充実と製品開発への活用を推進していく所存である。

#### 《参考文献》

- (1) 清水, 水野, 永田, 廣江, 野坂: 「8輪インホイール駆動システムの開発」, 明電時報278号, 2001/No.3, pp.11~14
- (2) 久保, 松橋: 「PMモータの磁界解析技術」, 明電時報296号, 2004/No.3, pp.74~76
- (3) 松橋, 沖津, 渡辺: 「PMモータの磁界/連成解析技術」, 明電時報310号, 2006/No.5, pp.6~9
- (4) 沖津, 松橋, 村松: 「二次元・三次元併用解析による永久磁石式モータの磁石内渦電流損失算定法に関する検討」, 電気学会静止器・回転機合同研資, 2008, SA-08-77, RM-08-84, pp.63~68

#### 《執筆者紹介》



沖津隆志 Takashi Okitsu  
 電気機器解析技術の研究開発に従事



松橋大器 Daiki Matsuhashi  
 電気機器解析技術の研究開発に従事