# Dy 拡散磁石を使用したモーターの設計手法と適用効果

Motor Design Method Using Dy Diffused Magnets and Effect of its Application

秦田 充俊\* Mitsutoshi Natsumeda

Dy 拡散磁石 (DD Magic<sup>®</sup>) は、従来材より Dy を削減しつつ高特性化を実現した Nd-Fe-B 焼結 磁石である。これをモーターに使用する場合、磁石内部に保磁力分布を持つため従来の減磁解析手 法ではモーターの減磁耐熱性の設計を行うことができない。そこで、Dy 拡散磁石を使用したモーター の減磁解析手法を開発し、実測結果と比較することで本解析手法の有用性を示した。さらに、Dy 拡散磁石を使用した SPM モーターの設計を行い、Dy 拡散は磁石全面より行うことが最も減磁耐熱 性向上効果が高いこと、また、通常材を使用したモーターと同等のトルクおよび減磁耐熱性を有す るモーターを設計した場合、磁石重量の削減または効率向上効果が得られることを示した。

Dy diffused magnets (DD Magic<sup>®</sup>) are high performance Nd-Fe-B sintered magnets with low Dy, and are expected to reduce motor size and cost such as for hybrid vehicles and air conditioner compressors. However, it is difficult to estimate the demagnetization property for a motor with Dy diffused magnets precisely because of the graded coercive force distribution from the surface to the inside of the magnet. Therefore, we have developed a demagnetization analysis method for Dy diffused magnets and confirmed the accuracy of this method by comparing it with the measurement results. We designed a SPM motor with Dy diffused magnets and demonstrated that the demagnetization heat resistance effect is the highest when Dy diffusion for all surfaces is conducted. Furthermore, it was also verified that the magnet weight can be reduced or the motor efficiency improved using Dy diffused magnets for motors design with the same torque and demagnetization heat resistance as motors using conventional materials.

●Key Word:Nd-Fe-B 烧結磁石,Dy 拡散,減磁解析	
Production Code : Nd-Fe-B sintered magnet	R&D Stage : Mass-production

# 1. 緒 言

高いエネルギー積を有するNd-Fe-B焼結磁石は、モーター の出力密度を向上させることができるため電装用途を中 心に多く使われており、今後もさらなる需要の増加が予測 される。Nd-Fe-B焼結磁石の減磁耐熱性を向上させるた めに添加されている重希土類元素Dyは希少元素であり、 Nd-Fe-B焼結磁石は、高特性化と同時にDy使用量の削減が 強く求められている。そこで、これらの課題を解決すべく Dy拡散磁石が開発された<sup>1)、2)</sup>。Dy拡散磁石は、残留磁束 密度を低下させることなく保磁力を向上させるとともに、 Dyの使用量も削減した永久磁石材料である。Dy拡散磁石 は焼結体表面から内部へDyを拡散させて保磁力を増加させ るため、磁石内部に保磁力分布を持つ。このため、従来の 保磁力が均一な永久磁石の減磁解析手法<sup>3)、4)</sup>では減磁特 性を正確に求めることはできない。

そこで本稿では、Dy拡散磁石を使用したモーターの減磁 解析を行うことを目的として、保磁力分布を有する永久 磁石の減磁解析手法を開発し実測値と解析値を比較するこ とで本手法の有用性を確認し、さらに、モーターに適した Dy拡散方法および適用効果について検討を行ったので報告 する。

# 2. Dy 拡散磁石

Nd-Fe-B焼結磁石における保磁力の発現は主相外郭部で 決定することが知られている。Dy拡散磁石は、Ndより異 方性磁界H<sub>A</sub>の大きいDyを焼結体表面から拡散により粒界 に導入することにより、残留磁東密度を低下させることな く保磁力を向上させた永久磁石材料である<sup>1),2)</sup>。

図1にDy拡散磁石のEPMA(Electron Probe Micro Analyzer:電子線マイクロアナライザー)像を示す。図 中の明るく見える部分がDy濃縮部であり,主相外郭部に Dyが選択的に導入されていることが確認できる。現行の量 産材料の磁石特性とDy拡散磁石の特性マップを図2に示 す。Dy拡散磁石は残留磁束密度を低下させることなく保磁

<sup>\*</sup> 日立金属株式会社 NEOMAX カンパニー



図 1 Dy 拡散磁石の EPMA 像 Fig. 1 EPMA Image of Dy diffused magnet



図 2 Dy 拡散磁石の磁石特性マップ Fig. 2 Magnetic properties of Dy diffused magnet

力を向上できるので、従来材の特性マップが高保磁力側へ シフトする形になる。同じ保磁力の材料を比べた場合、Dy 拡散磁石は従来材より残留磁束密度が高くなることより、 Dy拡散母材のDy量を削減することができる。つまり、Dy 拡散技術は高性能化技術であると同時に省Dy技術である。

Dyは焼結磁石の表面より導入されるため、磁石表面から の距離に対してDyが濃度分布を持つことになる。したがっ て、Dy拡散磁石には磁石表面からの距離に対して保磁力分 布が存在するため、均一保磁力材料を対象として開発され た従来の減磁解析手法<sup>3).4)</sup>では減磁解析を行うことがで きない。そこで、Dy拡散磁石の減磁解析を行うには、保磁 力分布をモデル化する手法と保磁力分布を考慮した減磁解 析手法が必要となる。

## 3. Dy 拡散磁石の減磁解析手法

#### 3.1 保磁力分布のモデル化

Dy拡散を行ったときの磁石表面からの距離 $\delta$ に対する  $\Delta H_{CJ}$ (以下, $\delta - \Delta H_{CJ}$ 特性)を図3に,Dy導入量に対す る保磁力増加量 $\Delta H_{CJ}$ (以下,Dy導入量- $\Delta H_{CJ}$ 特性)を図4 に示す。 $\delta - \Delta H_{CJ}$ 特性より,焼結体表面よりDyが拡散によ り導入されるため,表面部の $\Delta H_{CJ}$ が大きく深層部の $\Delta H_{CJ}$ が低くなることがわかる。また,Dy導入量- $\Delta H_{CJ}$ 特性か らは、 $\Delta H_{CJ}$ はDy導入量に対して非線形性を持つため磁石 内部の $\Delta H_{CJ}$ 分布を求めるにはDy導入量分布を求めなけれ ばならないことがわかる。そこで,図5に示す磁石表面か



図3 磁石表面からの距離 $\delta$ に対する保磁力増加量 $\Delta$   $H_{CJ}$ 特性 Fig. 3  $\delta$  -  $\Delta$   $H_{CJ}$  characteristic



図 4 Dy 導入量に対する保磁力増加量 △ H<sub>CJ</sub> 特性 Fig. 4 Amount of Dy diffusion – △ H<sub>CJ</sub> characteristic



図 5 磁石表面からの距離δに対する Dy 導入量特性 Fig. 5δ-Amount of Dy diffusion characteristic

らの距離 $\delta$ に対するDy導入量特性(以下, $\delta$ -Dy導入量 特性)を $\delta$ - $\Delta H_{CJ}$ 特性とDy導入量- $\Delta H_{CJ}$ 特性から求め, ノイマン境界条件を用いて磁石内部のDy導入量分布を求め ることとした。

ノイマン境界条件を用いた拡散モデルの模式図を図6に 示す。 $\delta$ -Dv導入量特性をDv拡散面とDv拡散面と対抗す



図 6 ノイマン境界条件を用いた拡散モデル Fig. 6 Diffusion model using Neumann boundary condition

る面の距離(ノイマン境界面)で折り返し積算することで 磁石厚み間のDy導入量分布を求めることができる。これを すべてのDy拡散面に対して行い積算することで磁石内部の Dy導入量分布が求められ,Dy導入量- $\Delta H_{\rm CJ}$ 特性を用いて Dy導入量を $\Delta H_{\rm CJ}$ に変換すると $\Delta H_{\rm CJ}$ 分布がモデル化でき, 保磁力の絶対値分布は拡散母材の保磁力に $\Delta H_{\rm CJ}$ を足すこ とで求めることができる。

磁石厚みが薄くノイマン境界条件が必要なサンプルにDy 拡散を行い、 $\Delta H_{CJ}$ 分布の計算と実測を比較し拡散モデル の検証を行った結果を示す。対象サンプルを図7に、磁石 中央部および端部位置における厚み方向の $\Delta H_{CJ}$ 分布を比 較した結果を図8に示す。ここで、Dy拡散は図7に示す 5面より行った。比較結果より、 $\Delta H_{CJ}$ の計算値と実測値は よく一致し、開発した保磁力分布モデル化手法で精度良く  $\Delta H_{CJ}$ 分布を求められることが確認できた。



図7 Dy 拡散モデルの検証モデル

Fig. 7 Evaluation model for proposed diffusion model



図8 ⊿ H<sub>CJ</sub>分布の比較

Fig. 8 Comparison of  $ightarrow H_{CJ}$  distributions (a) center position (b) edge position

#### 3.2 Dy 拡散磁石の減磁解析手法

モーターの減磁解析は、無負荷時のパーミアンス係数と 印加される反磁界をパラメータとして減磁評価温度で減磁 した後の磁石特性を作図により求める手法とした。減磁後 の磁石特性算出方法を図9に示す。図9は100 ℃で減磁し た後の常温(20℃)での磁石特性を求めた模式図である。 J-Hカーブ上で無負荷時のパーミアンス係数がラインiで あるとすると、20 ℃での動作点は点Aとなり、反磁界Hex が印加されるとラインiは反磁界の大きさだけ平行移動し ラインiiになる。このときの20 ℃での動作点は点Bとなり, 温度が100 ℃になると動作点は点Cとなる。このとき,動 作点Cは100 ℃のJ-Hカーブのクニック点(偏曲点)より下 にあるため減磁が発生する。100 ℃で減磁が発生したとき の等価的なJ-Hカーブはカーブ①(太点線)となり、減磁 後に20 ℃に戻したときのJ-Hカーブは、カーブ①を残留磁 東密度および保磁力の温度係数で戻したカーブ②(太実線) となる。



図9 減磁後の磁石特性算出方法

保磁力の温度係数は、図10に示すように保磁力の絶対値 に依存する。Dy拡散磁石は保磁力分布を持つため、磁石各 部位における保磁力の温度係数も分布を持つことになる。 そこで、本解析手法では図10に示す特性を二次近似し、近 似式より保磁力に対する保磁力の温度係数を求め減磁解析 を行った。



図 10 保磁力と保磁力の温度係数 Fig. 10 Relationship between H<sub>CJ</sub> and Temp. coefficient

Fig. 9 Calculation method of magnetic characteristic after demagnetization

# 4. モーターモデルでの解析精度の検証

## 4.1 モーター減磁評価装置

モーター減磁評価装置を図11に示す。モーターの減磁評価を行うためには、磁石温度の管理を正確に行う必要がある。そこで、供試モーターのみを恒温槽に入れてモーターを駆動させ減磁評価を行う装置を製作した。

(a) Appearance

(b) Interior of thermostatic





図 11 モーター減磁評価装置

Fig. 11 Equipment for evaluation of motor demagnetization (a) appearance (b) Interior of thermostatic chamber

## 4.2 実機モーターでの解析精度の検証

6極9スロットの解析精度検証用SPM (Surface Permanent Magnet:表面磁石型) モーターモデルを図12に,モー ター諸元を表1に示す。ここで、Dy拡散母材には残留磁 束密度Brが1.46 (T),保磁力 $H_{CJ}$ が901 (kA/m)のNd-Fe-B 焼結磁石を用い、Dy拡散は内径R面を除く5面から行った。 Dy拡散の $\delta$ - $\Delta H_{CJ}$ 特性を図13に、図14に計算で求めた $\Delta$  $H_{CJ}$ 分布図を示す。 $\Delta H_{CJ}$ 分布より、Dyを導入した面の表 面の保磁力増加量が大きく、また複数面よりDyが導入され る磁石コーナー部の保磁力増加量が大きいことが確認でき る。解析精度検証用SPMモーターの減磁特性を解析し、実 測と比較した結果を図15に示す。ここで、減磁率は減磁評 価温度での駆動前後における常温のトルク減少率とした。 図15より、モーター減磁特性の解析と実測はよく一致し、



図 12 解析精度検証用 SPM モーター Fig. 12 SPM motor for verification of analysis accuracy

本解析手法でDy拡散磁石を使用したモーターの減磁特性を 精度良く解析できることが確認できた。

#### 表1 解析精度検証用 SPM モーター諸元

Table 1 Specifications of SPM motor for verification of analysis accuracy

Magnet (Base)	Remanence Br	(T)	1.46
	Coercivity H <sub>CJ</sub>	(kA/m)	901
	50A1300		
Material of stator core			50A1300
Material of shaft			S45C
Coil winding	Number of turns	(turn/coil)	119
	Connection		3 phase-Y 3 series
Operating condition	Speed	(min <sup>-1</sup> )	1,000
	Current (RMS) (A)		3 (Sinusoidal waveform)
	Current phase angle $\beta$ (deg.)		0



図 13 磁石表面からの距離 $\delta$ に対する保磁力増加量 $\Delta$   $H_{CJ}$ 特性 Fig. 13  $\delta$  -  $\Delta$   $H_{CJ}$  characteristic



図 14 保磁力増加量⊿ H<sub>CJ</sub> 分布 Fig. 14 Distribution of ⊿ H<sub>CJ</sub>



図 15 解析精度検証用 SPM モーターの減磁特性比較

Fig. 15 Comparison of demagnetization characteristics of SPM motor for verification of analysis accuracy

## 5. 最適な Dy 拡散方法と Dy 拡散磁石の適用効果

モーターを設計対象として、最適なDy拡散磁石の使用方 法と適用効果について検討を行った。設計対象とした8極 12スロットのSPMモーターを図16に、設計諸元を表2に 示す。通常材と同等な減磁耐熱性を有するモーターをDy拡 散磁石で設計し、通常材を使用したモーターと比較するこ とでDy拡散磁石を適用した場合の効果について検討を行っ た。なお、Dy拡散を行わない通常材の磁石特性はBrが1.305 (T)、H<sub>CJ</sub>が1,671 (kA/m)である。なお、今回は2次元 磁界解析で設計を行ったため、軸方向端面からのDy拡散に よる保磁力増加効果は考慮していない。



図 16 設計検討 SPM モーター Fig. 16 SPM motor for design evaluation

表 2	設計検討	SPM モータ	ーの設計調	者元
Table	2 Specific	ation of SPM	motor for	design evaluatior

Outer <i>φ</i>		(mm)	80
Rated SPEC	Current density	(A/mm²)	10
	Torque	(Nm)	2
	Speed	(min <sup>-1</sup> )	1,000
Demag. SPEC	Current density	(A/mm²)	30
	Temperature	(°C)	140
	Reduction rate of rated torque at 20 ℃	(%)	≦1

表 3 設計検討 SPM モーターの⊿H<sub>CJ</sub> 分布と Br 減少率分布 Table 3 Distributions of ⊿H<sub>CJ</sub> and Br reduction rate of SPM motor for design evaluation

# 5.1 Dy 拡散面および Dy 拡散母材の選定

Dy拡散面の選択を変えた時のモーター減磁特性を比較した。Dy拡散面の比較は,弦方向端部,弦方向端面+外径R面, 全面の3種類で行った。Dy拡散面を変えた時のモーター減 磁特性を図17に,保磁力増加量分布および2%減磁時の Br減少率分布を表3に示す。モーター減磁耐熱性を比較し た結果より,Dy拡散を行わない通常材において減磁が発生 する弦方向端部にのみDy拡散を行った場合では,モーター の減磁耐熱性の向上効果が少なく,全面からDy拡散を行っ た場合に最もモーター減磁耐熱性向上効果が高いことがわ かった。

また,2%減磁時のBr減少率分布より,Brが減少する部 位はDy拡散面の選択により異なり,反磁界が印加され保磁 力増加量が少ない部位のBrが減少していることが確認で き,Dy拡散が最も減磁耐熱性向上効果が高いことがわかる。

減磁耐熱性向上効果が最も高い全面拡散で設計した場合, Dy拡散母材の磁石特性をBrが1.360(T), H<sub>CJ</sub>が1,273(kA/m)とすることで通常材と同等以上のモーター 減磁特性が得られ,通常材と比べBrを4.2%向上させること ができ,これによりモータートルクも4.2%増加させること ができた。



図 17 設計検討 SPM モーターの Dy 拡散面の違いによる減磁特性比較 Fig. 17 Comparison of demagnetization characteristics of SPM motor for design evaluation

	Conventional	Base magnet of	Dy diffused magnet Br=1.360 (T)		
	magnet Br=1.305 (T)	Dy diffusion Br=1.360 (T)	Dy diffusion from side edge	Dy diffusion from side edge and outer R	Dy diffusion from all surfaces
⊿ <i>H</i> <sub>cJ</sub> 0 1.0 (p.u.)	_	_			
Br reduction rate at 2 % demagnetization 0 25 (%)	(159 °C)	(123 °C)	(130 °C)	(144 °C)	(162 °C)

() : temp. at 2 % demagnetization

#### 5.2 Dy 拡散磁石の適用効果

通常材を使用したモーターと同一寸法および駆動条件で は、Dy拡散磁石を使用すると4.2%トルクが増加したため、 軸長の削減,または軸長の変更を行わず電流密度の削減を 行い,通常材を使用したモーターとトルクを合わせた条件 でDy拡散磁石を使用した場合の効果について検討を行っ た。

軸長を削減する場合,軸長はトルク増加率相当を削減で き,今回の場合の4.2%軸長を短くでき,使用磁石重量も 4.2%削減できた。

軸長の変更を行わず電流密度を下げる場合,電流密度は 5%削減することができた。定格条件でのモーター損失を 図18に示す。定格条件でのモーター損失計算結果より,銅損 が大幅に削減できていることが確認でき,その結果,定格 点でのモーター効率は通常材 81.6%だったものがDy拡散磁 石では 82.8%となり,モーター効率を1.2%向上することが できた。



図 18 電流密度低減時の定格点におけるモーターの損失

Fig. 18 Loss of SPM motor at rated operation when current density is decreased

#### 6. 結 言

保磁力分布を持つDy拡散磁石を使用したモーターの減磁 解析を行う手法として、保磁力分布をDy導入量分布に注目 してモデル化する手法と、保磁力の温度係数分布を考慮し た減磁解析手法を開発した。本解析手法を解析精度検証用 SPMモーターに適用し解析値と実測値を比較した結果、解 析値と実測値はよく一致し、本解析手法が有用であること を確認した。

また、通常材と同等な減磁耐熱性を有するモーターをDy 拡散磁石で設計検討した結果より、Dy拡散を行う面の選択 で減磁耐熱性が大きく異なることがわかった。Dy拡散によ り保磁力を増加させる領域は、通常材で減磁によりBrが 減少する箇所だけでは減磁耐熱性向上効果は少なく、磁石 全体の保磁力を上げるように全周よりDy拡散を行うことが 最も減磁耐熱性を向上させる効果が高いことがわかった。 つまり、最終形状に磁石を加工した後に全面よりDy拡散を 行うことが最もモーターに適したDy拡散方法であるといえ る。

さらに,通常材と同等のモーター減磁耐熱性を有する SPMモーターをDy拡散磁石を使用して設計した結果,残 留磁東密度が通常材より高い磁石材料を使用することがで き,これによりモーターの小型化(磁石使用重量の削減)や, モーター効率の向上の効果があることを示した。モーター 効率の向上効果は,全損失に対して銅損の割合が高い低速・ 高トルク領域で効果が高くなるため,Dy拡散磁石を使用す ることで一般的にモーター効率の低い低速・高トルク領域 の効率を効果的に向上させることができると考えられる。

今回設計したモーターモデルではモーターの断面形状の 変更は行わなかったが、断面形状の最適化を図るとさらな る効果が期待できる。

#### 引用文献

- 森本英幸:「高性能 Nd-Fe-B 焼結磁石の最新動向」,日本応用磁気学会第147回研究会資料,(2006).
- 吉村公志,森本英幸,小高智織: [R-Fe-B系希土類焼結磁 石およびその製造方法」,特許第4241900号.
- 3) A.Yamagiwa, K.Aota, Y.Sanaga, H.Takabayashi and M.Natsumeda : "Demagnetization analysis of IPMSM using FEM", IEE of Japan, RM-03-41, (2003).
- 4) M.Natsumeda : "Analysis Method of Magnetization and Demagnetization of Permanent Magnets", IEE of Japan, RM-08-121, (2008).



**楽田 充俊** Mitsutoshi Natsumeda 日立金属株式会社 NEOMAX カンパニー 熊谷製作所 設計グループ