

部分拡散法によるレアアース低減マグネットの開発

Development of Rare Earth-saving Magnet Using Localized Diffusion Method

三 好 健 宏*

Takehiro MIYOSHI

井 上 雅 志*

Masashi INOUE

東 孝 之*

Takayuki HIGASHI

大 崎 廣二郎*

Kojiro OHSAKI

要 旨

ハイブリッド自動車および電気自動車等の駆動用モータ用 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 焼結マグネットに使用されるジスプロシウム の削減を目的として、部分拡散法によるレアアース低減マグネットの開発をおこなった。

モータ中のマグネットの反磁界分布は均一ではなく角部に集中するため、必要な保磁力分布を CAE により定量化し、その保磁力分布を満足する部分拡散マグネットの材料開発をおこなった。さらにモータ特性評価において部分拡散マグネットも従来同等の減磁特性を示すことを実証した。

レアアースの中でも資源問題が顕在化しているジスプロシウムについて、本技術によりモータ性能を維持したままジスプロシウム使用量を 3 割以上削減できた。

ABSTRACT

A magnet in which rare earth content is reduced by means of a localized diffusion method has been developed in order to reduce the volume of dysprosium used in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ sintered magnets employed in the drive motors of hybrid, electric and other vehicles.

Based on the fact that the distribution of the demagnetization fields to which the magnets in a motor are subject is not uniform, but rather concentrated at the corners of the magnets, the necessary coercivity distribution for the magnets was quantified using CAE, and a magnet with localized Dy diffusion was developed in order to realize this coercivity distribution. Evaluation of motor characteristics showed the developed magnet to possess identical demagnetization characteristics to a conventional magnet.

Dysprosium resources represent a particular issue among the rare earths more generally, and the technology developed in this project is able to reduce dysprosium use in magnets by 30% or more while maintaining motor performance.

1. まえがき

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 焼結マグネットは高い磁束密度を有し、モータの高トルク化、小型化に貢献しているが、高温で使用すると磁束密度が低下しモータトルクが低下する特性を有する。この特性を補うのが、ネオジム (Nd) の一部をジスプロシウム (Dy) で置換した Dy 含有 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 焼結マグネットであり、Dy の高い異方性磁界によりマグネットの高温下での使用を可能にしている。ハイブリッド自動車、電気自動車用の駆動用モータマグネットには、この Dy 含有 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 焼結マグネットが使用されており、マグネットのアプリケーションの中では Dy 使用量が多く 5 wt% から 15 wt% 含まれている。

CO_2 排出量削減のため、近年車両の電動化は加速しており、Fig. 1 に示すように電気自動車などモータを搭載した

車両の増加に伴いマグネットの需要も増加すると予想されている⁽¹⁾。一方 Dy を含むレアアースは産地が限られており、現状中国産が 9 割以上のシェアを占める。需要の増

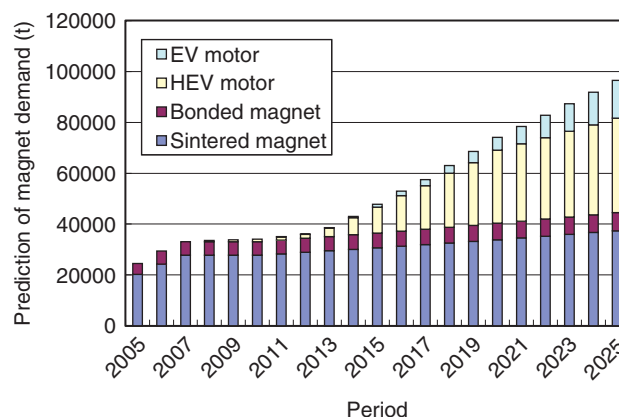


Fig. 1 Prediction of magnet demand

*四輪 R&D センター

加に対して産地が限定されているため 2011 年度より Dy の価格は大幅に高騰した。Fig. 2 にレアアースの価格動向を示す⁽²⁾。直近では下落の傾向にあるが、5 年前の水準と比べると未だに 20 倍強の価格である。今後も Dy は需給ギャップが改善されず資源枯渇するとの予測もあるため⁽³⁾、モータ用マグネットとして減磁性能を維持したまま Dy 使用量を低減することが急務である。

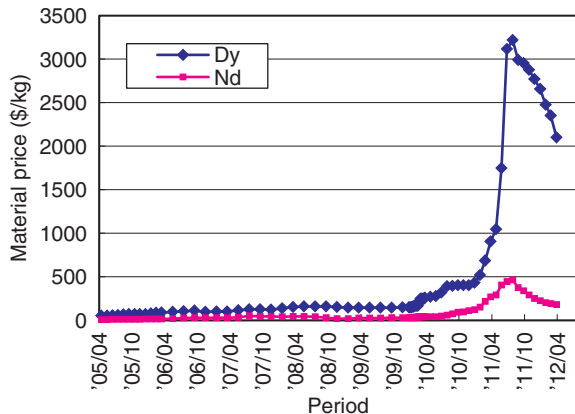


Fig. 2 Material prices for Nd and Dy

2. Dy 削減の課題

モータ内でマグネットが受ける反磁界が保磁力を上回ると、マグネットからの発生磁束が減少し、たとえ反磁界が弱くなってもマグネットの発生磁束が回復せずモータ発生トルクが低下する。この現象を減磁と呼ぶ。Nd₂Fe₁₄B 焼結マグネットは高温下で保磁力が低下するため (Fig. 3)、ある限界温度を超えると減磁が起こる。Dy は Nd に対して異方性磁界が約 2 倍高いために、Dy を添加されたマグネットは保磁力が高く、減磁が起きる温度も向上する。車載環境では登坂や連続高速走行時にマグネット温度は 160℃ から 200℃ まで上昇する。Dy を低減すると高温での保磁力も低下し車載には不適当となる。従って、Dy を削減しても減磁特性を維持する技術が必要である。

Nd₂Fe₁₄B 焼結マグネットの Dy 使用量を削減する技術

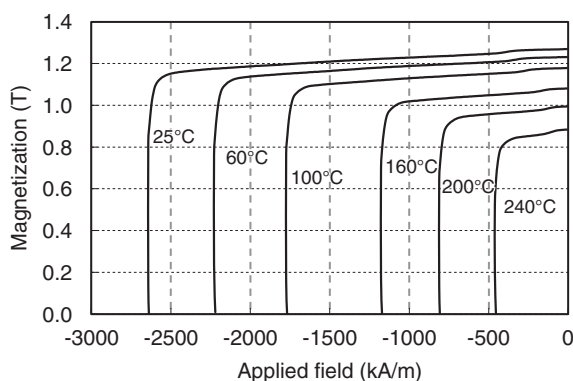


Fig. 3 Temperature-dependence of magnet property

として、Dy を粒界に拡散させる技術が提案されている⁽⁴⁾。⁽⁵⁾。粒界拡散技術とは表面に塗布した Dy を内部に拡散させる技術だが、表面近傍しか特性を向上できず Dy 削減量は約 10% から 15% にとどまる。また従来は全域で均一な保磁力のマグネットを用いており、領域ごとに特性の傾斜したマグネットを使用した例はなかった。

今回、Dy の使用量を少しでも多く削減するために、必要な部位に最小限の Dy を用いることを開発のコンセプトとした。この粒界拡散技術を用いて減磁が起こりやすい角部だけ保磁力を高めれば、従来同等の減磁特性が得られると考えた。本コンセプトイメージを Fig. 4 に示す。Dy を削減しても減磁特性を維持するために、部分的な Dy 拡散技術の確立が課題である。

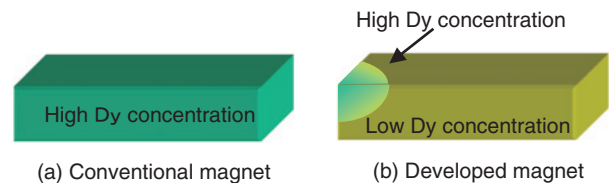


Fig. 4 Concept of reduction of Dy through localized diffusion

3. Dy 削減の検討

電磁界解析ソフトの JMAG (JSOL 製) を用い IPM (Interior Permanent Magnet) モータの減磁挙動を計算し、領域ごとに必要な Dy 量を定量化をした。

減磁する条件でモータの電磁界解析をおこない、減磁領域を特定した。この結果を Fig. 5 に示す。減磁は全域で均一に起こるのではなくロータ外周側の磁極端部から発生する。これはモータ中でマグネットが受ける反磁界が角部で大きいことに起因すると考えられる。

電磁界解析にて、領域ごとに必要な保磁力を定量化した結果を Fig. 6 に示す。マグネット仕様の考え方を Fig. 7 に示す。拡散処理前のベースマグネットに低保磁力マグネット (低 Dy マグネット) を用いた場合、同等の減磁特性を保つために角部は保磁力を高める必要があり、局部的に Dy を必要とする。ベースマグネットの保磁力をより下げれば角部に必要とする Dy は増加するため、全体での Dy 使用

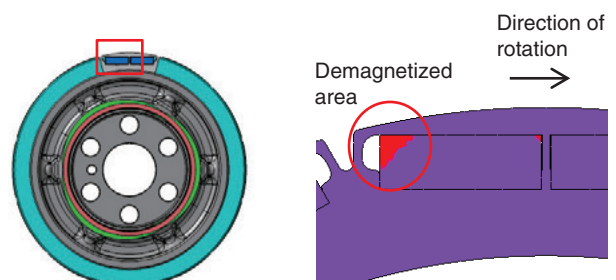


Fig. 5 Motor demagnetization area

量は極値を持つ。今回のモータの場合、保磁力が従来より 550 kA/m 低いマグネットを用い、角から約 3 mm の領域だけ保磁力を強化し角部で従来同等にすれば Dy を削減できる。この場合の Dy 削減量は 30% と試算された。

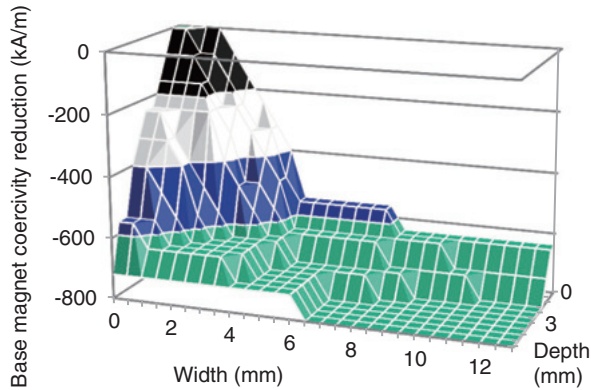


Fig. 6 Minimum Dy distribution

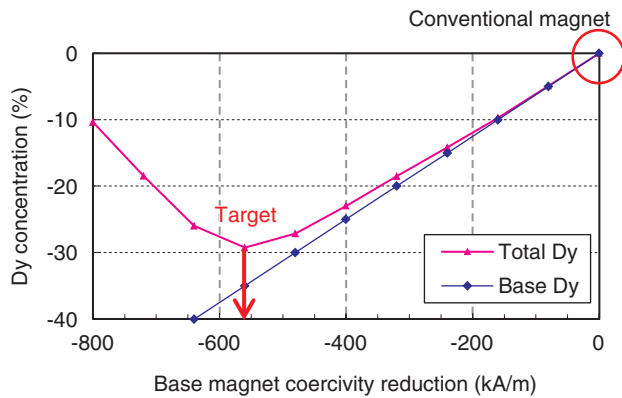


Fig. 7 Concept of base magnet

4. マグネット作成と評価手法

4.1. Dy 部分拡散マグネットの作成

保磁力の強化が必要な領域にのみ Dy を部分的に拡散させる拡散条件を設定した。従来のマグネット製造プロセスと本プロセスの違いを Fig. 8 に示す。Dy を拡散させるプロセスとして、表面に Dy ペーストを付与し熱拡散させる工程が追加となる。Fig. 9 に一般的な拡散の模式図を示す⁽⁶⁾。本式を元に Dy 拡散の支配因子を検討し、Dy 表面濃度、拡散時の熱処理温度、時間、マグネット寸法と塗布面積などの因子について最適条件を設定した。

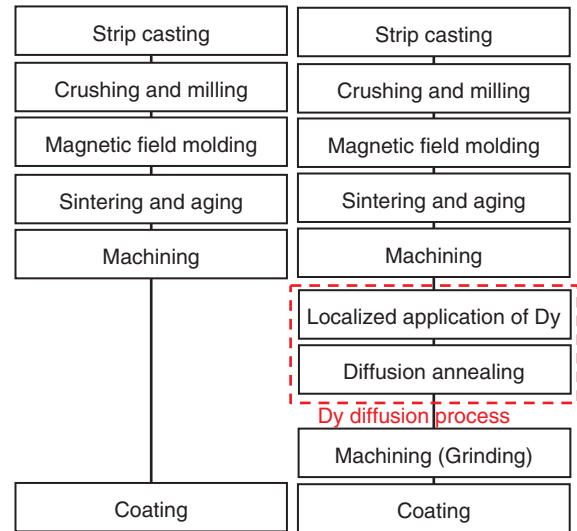
4.2. マグネット特性評価手法

Dy 部分拡散マグネットの局所的な Dy 分布を測定するために、Vibrating Sample Magnetometer (VSM 法) で部位ごとの保磁力を測定した。マグネットを Fig. 10 に示すように 0.9 mm ピッチで切出し、各領域ごとの保磁力を振動試料型磁力計にて測定した。

全体のオープンフラックスはフラックスメータにて測定した。Dy 分布は Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) で測定した。

4.3. モータ特性評価手法

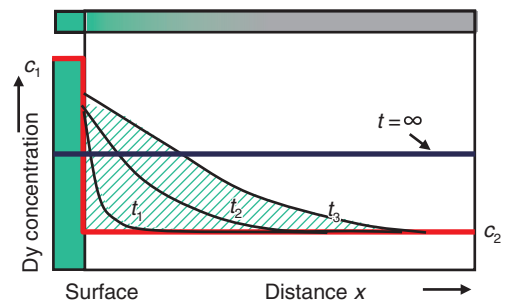
前述のプロセスにて作成されたマグネットを用いてモータを作成し、特性評価をおこなった。モータ評価システム



(a) Conventional process

(b) Developed process

Fig. 8 Dy diffusion process



$$C = c_1 + \frac{(c_2 - c_1)}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_0 \cdot t \cdot \exp(-E/k_B T)}} \right) \right]$$

C: Dy concentration

c_1 : Surface concentration

c_2 : Base concentration

x: Distance

D_0 : Vibration factor

t: Time

E: Activation energy

k_B : Boltzmann's constant

T: Temperature

Fig. 9 Basic diffusion model

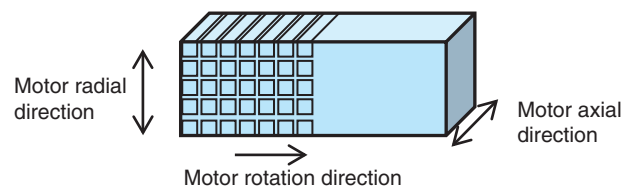


Fig. 10 Method of evaluation of coercive force distribution

の外観写真を Fig. 11 に示す。Dy 部分拡散による効果を定量化するために、拡散処理を実施しないモータについても同様の評価をおこない比較した。

トルク特性については、所定の電流を印加した際のモータ発生トルクを計測した。減磁特性については、所定温度にて最大電流を印加することでマグネットに最大反磁界を与え、その後マグネット発生磁束を評価し、電流印加前後での変化を計測した。初期値からの磁束低下率によって、減磁特性の評価をおこなった。

4.4. 減磁試験後の特性評価手法

マグネットの減磁部位を調査するために、減磁試験前後にてマグネット表面の磁束密度分布の測定をおこなった。試験前後での磁束密度の差異をとることで減磁発生部位を特定することが可能となる。測定にはマグネットアナライザを用いた。

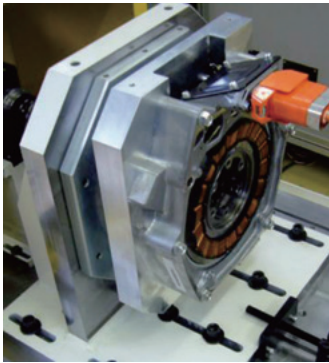


Fig. 11 Appearance of motor evaluation system

5. 結果と考察

5.1. 材料評価

5.1.1. 保磁力特性

Dy 部分拡散マグネットの保磁力分布測定結果を Fig. 12 に示す。保磁力は、中央部は Dy 部分拡散処理前の保磁力と同等であるが角部に向けて保磁力が向上し、ピークである角部は目標の 550 kA/m 以上保磁力が向上していた。この結果は Dy 拡散モデルでの検討結果と一致しており、Dy の拡散濃度違いによる保磁力の傾斜を確認できた。

Dy 部分拡散マグネットの保磁力分布を、目標値と比較した結果を Fig. 13 に示す。角部から辺と平行な断面と最も拡散距離が長くなる 45° の断面の 2 平面で評価した。いずれの面に対しても必要な保磁力を満足していることが確認できた。Dy の塗布量や熱処理条件を制御することで保磁力の傾斜を制御できた。

5.1.2. 磁束密度

一般に Dy 添加によりマグネットを高保磁力化すると残留磁束密度は低下する⁽⁷⁾。今回試作したマグネットの磁束密度を従来の高 Dy マグネットと比較した。Dy 部分拡散処理

の有無による残留磁束密度の差は認められなかった。高 Dy マグネットにおいて Dy は $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相に分散して存在し、Dy と Nd の磁束が打ち消しあい全体の磁束密度が低下する。一方 Dy 部分拡散マグネットでは、融点の低い粒界領域に Dy が偏在するため、保磁力の増加に対し磁束密度の低下が抑制されたと考えられる。

Fig. 14 に Dy 部分拡散処理前後の EPMA 像を示す。拡

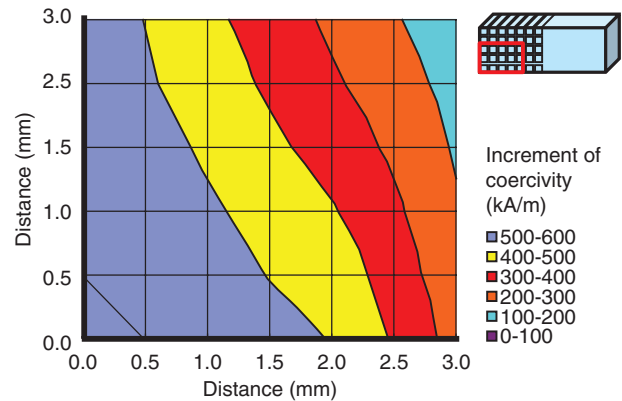


Fig. 12 Coercivity map for localized Dy diffusion process

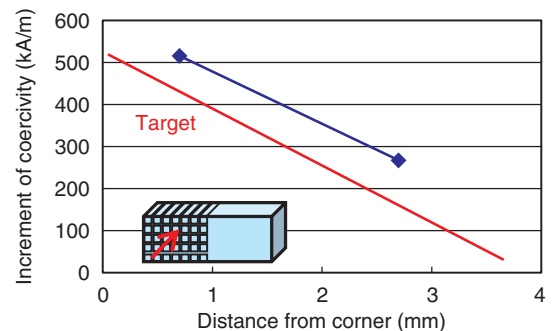
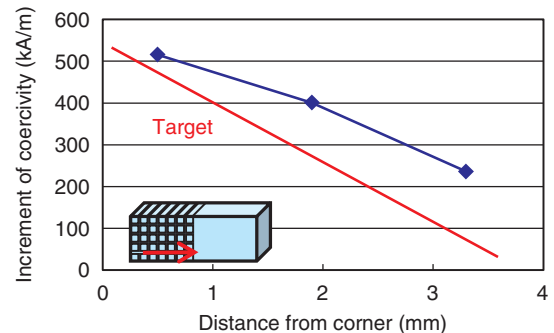
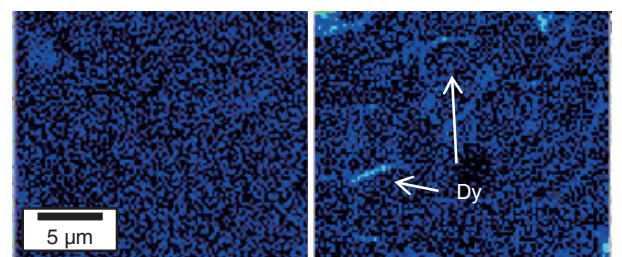


Fig. 13 Comparison of CAE analysis and magnet with localized Dy diffusion



(a) Base magnet

(b) Magnet with localized Dy diffusion

Fig. 14 Cross-sectional EPMA photographs

散処理前の Fig. 14 (a) では全域で著しい濃度変化はなく Dy が均一に分散していることがわかる。拡散処理後の Fig. 14 (b) では Dy (図中白部) 線状に濃化しており、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相の磁束を打ち消すことなく残留磁束密度が低下しなかったと考えられる。

5.2. モータ特性評価

5.2.1. トルク特性

Dy 部分拡散マグネットと従来の高 Dy マグネットを用いたモータテストでトルク特性を比較した。結果を Fig. 15 に示す。いずれもトルク特性は同等で Dy 部分拡散処理により発生トルクの低下が無いことが確認できた。これはマグネット単体の検証において磁束密度が低下していない結果と一致する。

5.2.2. 減磁特性

従来の高 Dy マグネットと Dy 部分拡散マグネットを用いたモータテストで減磁特性を比較した。結果を Fig. 16 に示す。開発材の Dy 含有量は 39% 低減したにもかかわらず、従来同等の減磁挙動を示した。これは Dy 部分拡散マグネットの減磁が起り始める角部は高 Dy マグネットと同等の保磁力を有していたためと考えられる。より高温で反磁界が大きい領域での挙動は差が出ると予想されるが、

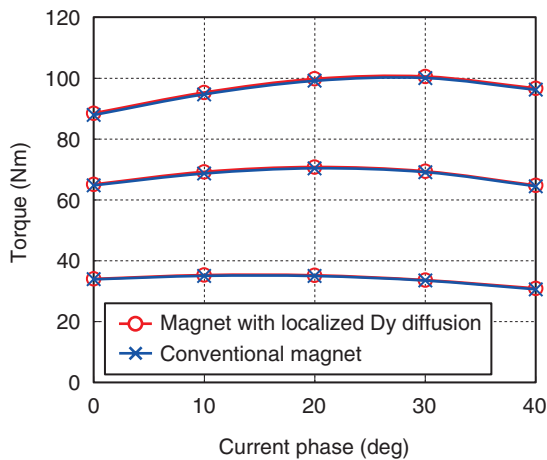


Fig. 15 Comparison of current-torque characteristics

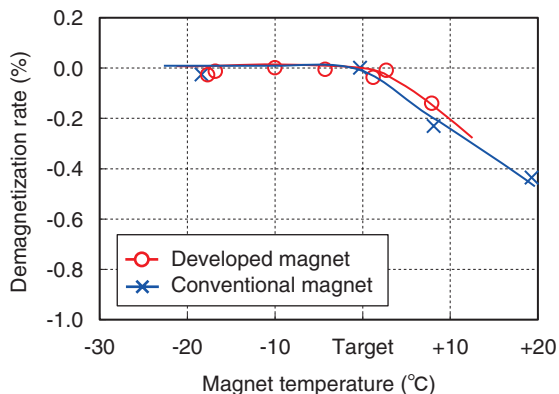


Fig. 16 Demagnetization characteristic

ハイブリッド自動車の駆動用モータの使用環境下では Dy 削減によるモータ特性への影響はないことを示している。

5.2.3. 減磁部位測定

減磁後のマグネットの減磁部位測定結果を Fig. 17 に示す。電磁界解析による減磁部位計算結果もあわせて下図に示す。それぞれ減磁領域を青枠で示す。Fig. 17 (a) の従来マグネットはマグネット角部から減磁が発生しているのに対し、Fig. 17 (b) の Dy 部分拡散マグネットはマグネット中央部より減磁が発生していることがわかる。これは、Dy 拡散によりマグネット角部の保磁力が強化されたため、最弱部が中央部になったものと考えられる。電磁界解析については、計算上は磁石内の温度勾配を表現していないため詳細な減磁領域の形状は一致しなかったが、減磁領域が角部から中央部に移動する傾向は再現されている。前述の減磁特性と合わせ、コンセプトどおりのマグネットが開発できたことを示している。

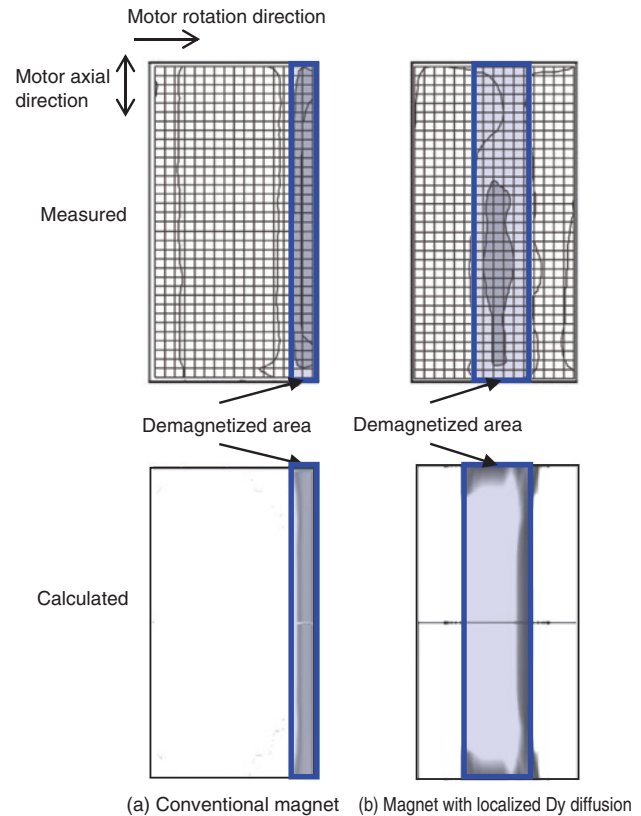


Fig. 17 Magnet flux distribution after demagnetization test

6. 適用効果

角部にのみ Dy を拡散した Dy 部分拡散マグネットは、高 Dy の従来マグネットと同じモータ特性、減磁特性が得られた。Dy 使用量の削減結果を Fig. 18 に示す。保磁力の不要な領域から Dy を計 47% 削減でき、部分拡散処理で 8% Dy を使用するが、最終的に削減量は 39% となった。

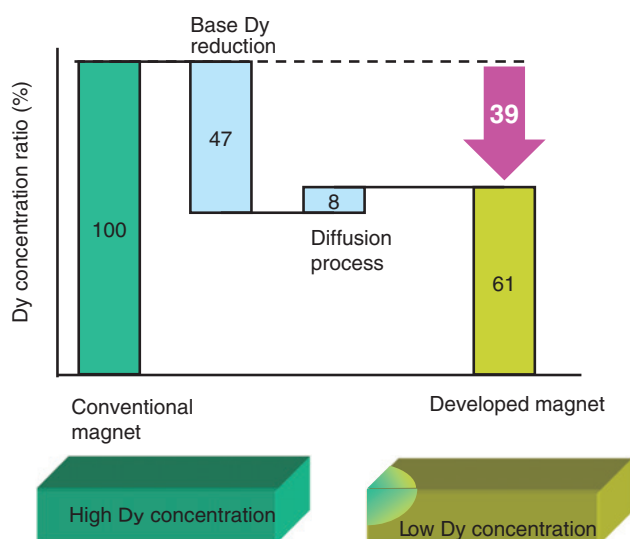


Fig. 18 Effect of application of magnet with localized Dy diffusion

7. まとめ

モータ中マグネットの反磁界分布に着目して、Dy量を局部的に変化させたDy部分拡散マグネットの設計コンセプトとその製法を確立し、従来のマグネットと同様の磁気特性を示すことを実証した。マグネットのレアアース削減はマグネット業界における長年の課題であったが、本技術によりDy使用量を39%低減できた。

本マグネットは今後のハイブリッド車用IMA (Integrated Motor Assist) モータに順次適用していく予定である。

参考文献

- (1) 山本日登志: 希土類磁石の発展と市場動向, 日中レアアース交流会議シンポジウム (2009)
- (2) METAL-PAGES, <http://www.metal-pages.com/>
- (3) Lifton, J.: The Consequences of Uncertainty in the Future Rare Earths Supply Chain, REPM 2010
- (4) 中村元: 粒界拡散法により作製したNd-Fe-B系焼結磁石, 日本応用磁気学会 147 回研究会資料, p.13-18 (2006)
- (5) 町田憲一: 粒界拡散技術による特定レアアースを低減した高性能希土類磁石の開発, セラミックス 44, No.5, p.392-396(2009)
- (6) 杉本孝一, 長村光造: 拡散方程式の解, 材料組織学, 朝倉書店, p.64-69(1991)
- (7) 島田寛, 山田興治: 希土類磁石, 磁性材料, 講談社, p.114-126(1991)

■ 著 者 ■



三好 健 宏



東 孝 之



井上 雅 志



大崎 廣 二 郎