

駆動モータ用重希土類フリー熱間加工磁石

Heavy Rare Earth-free Hot-deformed Magnet for Traction Motor

清水 治彦*
Haruhiko SHIMIZU
服部 篤**
Atsushi HATTORI

加藤 龍太郎*
Ryutaro KATO
日置 敬子**
Keiko HIOKI

中澤 義行*
Yoshiyuki NAKAZAWA
及川 貴司**
Takashi OIKAWA

要 旨

電動車両の駆動モータ用磁石において、耐熱性向上を目的に添加されている重希土類のジスプロシウムとテルビウムの使用量をゼロにする技術を構築した。磁石の製造法において主流である焼結法に対して耐熱性のポテンシャルが高い熱間加工法に着目した。この熱間加工法において加工温度の低減および加工速度と成分設定の最適化をおこなうことで磁気特性を向上させた。これらにより量産車への適用が可能な重希土類完全フリー磁石を実現した。

ABSTRACT

A technology has been developed making it possible to do away with the use of the heavy rare earths dysprosium and terbium, which are added to the magnets employed in traction motors for application in electric vehicles and hybrid electric vehicles in order to increase heat resistance. The research focused on the hot-deformation method of magnet manufacture, which offers greater potential for the realization of heat resistance than the sintering method, the main method of manufacturing the magnets currently in use. The magnetic properties of the developed magnet were boosted by reduction of the temperature for hot-deformation and the optimization of the rate of hot-deformation and the composition design of the magnet material. These approaches made it possible to develop a completely heavy rare earth-free magnet able to be employed in mass-production vehicles.

1. まえがき

1982年に日本人が発明した希土類-鉄-ボロン系磁石（ネオジム磁石）は、最大エネルギー積 $[(BH)_{\max}]$ が現存する永久磁石で最も大きく、焼結法で大量に生産が可能のため広く普及している⁽¹⁾。EVやHEVの駆動用モータに用いられているネオジム磁石も焼結法によるものであるが、家電製品と異なり高温、高磁場の環境となるため、磁石には高い耐熱性の指標となる保磁力 (H_{cj}) が求められる。そのため、磁石主相の異方性磁界を高める効果を有する重希土類を添加することで H_{cj} を向上させている。たとえば重希土類のジスプロシウム(Dy)であれば5 wt%-10 wt%、同じく重希土類のテルビウム(Tb)であれば1 wt%-5 wt%を添加する⁽²⁾。しかし、重希土類は軽希土類に対し鉱石中に含まれる割合が十分の一以下であり、産地も限定される。今後の電動車両の増加を考慮した場合、環境負荷、希少資源

リスクおよびコストの観点から使用量を低減することが必須となってくる。よって、重希土類の添加以外の手法で H_{cj} を向上させることが求められる。

Fig. 1に磁石組織の模式図を示す。主相とそれを取り巻く粒界相からなっており、矢印は主相結晶の磁化容易軸を

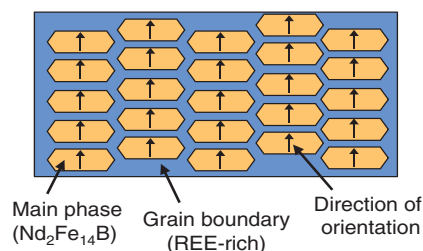


Fig. 1 Schematic image of crystalline microstructure of magnet

* 四輪 R&D センター

** 大同特殊鋼株式会社

表している。この主相結晶を微細にすることや、粒界相を厚くし主相結晶を磁氣的に孤立させることにより H_{cj} を向上できることがわかっている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

しかし、焼結法での原料磁粉の微細化は、酸化が生じたり、1000℃以上の高温加熱時に結晶が5 μm程度に成長してしまうため実現が容易でない。そこで本開発では熱間加工法に着目した。熱間加工法は磁石原料の溶湯を超急冷することでナノメートル (nm) オーダの結晶からなる薄帯を作製し⁽⁶⁾、これを700℃程度の低温で熱間加工する⁽⁷⁾ため、焼結法より十分の一以上微細な数百 nm という組織が実現可能である。しかし、熱間加工磁石は製法の特長から高磁気特性の磁石を大量に製造することが容易でなく、これまでのところ比較的限られた分野で採用されるに留まっていた。

2. 開発のねらい

焼結磁石および従来の熱間加工磁石と本開発における熱間加工磁石の特性を Fig. 2 に示す。

横軸が駆動モータの運転時最高温度における H_{cj} 、縦軸が残留磁化 (B_r) である。駆動モータに求められる特性領域 (Fig. 2 図中の赤点線内) に対し、焼結磁石は重希土類 (主に Dy) を添加することで異方性磁界を向上させて対応しており、重希土類フリーでの対応はできていない。また、従来の重希土類フリー熱間加工磁石は希土類フリーの焼結磁石と比較すると H_{cj} は高いものの十分ではなく、駆動モータに適用できるものはなかった。そこで加工条件の最適化と成分設定をおこなうことで特性を向上させ、駆動モータとして使用可能な領域を目指した。

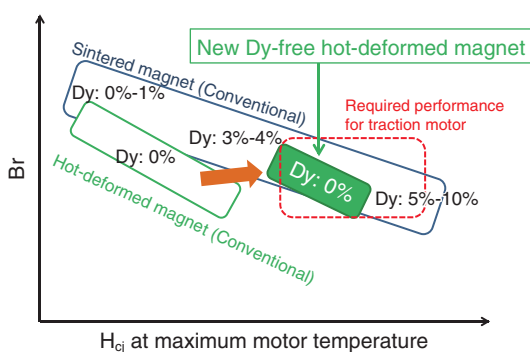


Fig. 2 Relationship between magnetic properties

3. 磁石の製造方法と課題

磁石の製造方法にはさまざまなものがあるが⁽⁸⁾、ネオジム磁石の製法として代表的な焼結法および本開発で取り上げた熱間加工法についてそれぞれの特徴を Fig. 3 に示す。

3.1. 焼結磁石

焼結法の出発原料となる磁粉は、原料合金の溶湯を薄板状に冷却したあと機械的に粉碎したもので、2 μm から 5 μm の粉末状となる。これを冷間プレスで圧粉体に成形するが、このとき金型のキャビティ内に磁場を発生させ磁粉の磁化容易軸をそろえて配向させる。磁粉は個々の粉末が一つの結晶からなっているため配向が容易であり、圧粉体の形状の自由度が高い。このため、大きなブロックを成形することが可能で生産性が高い。続いて加熱炉で焼結、時効をおこない磁石が完成する。

3.2. 熱間加工磁石

熱間加工法は原料合金の溶湯を 10⁵℃/s から 10⁶℃/s の速度で急速に冷却して薄帯を作製する。この急冷効果により、40 nm 程度の微細な結晶を生成させることができる。この薄帯を碎き 150 μm 程度の多結晶状の粉末にして原料磁粉とする。個々の粉末内部の微細結晶の向きは等方的であるので配向させて磁化容易軸をそろえる必要がある。ただし、焼結法のように個々の粉末が一つの結晶からなっているわけではないので、磁場で配向させることはできず、まず圧粉体に成形したあとに熱間で塑性加工をおこなって配向させる。その配向のメカニズム⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾を Fig. 4 に示す。

結晶に熱が加わると磁化容易軸である c 軸に対し垂直方向に優先成長して扁平な形状になっていく。その後、一軸方向の荷重を加えると扁平な結晶にトルクが働いて回転し、加圧した方向に配向する⁽¹⁰⁾。以上のメカニズムに基づ

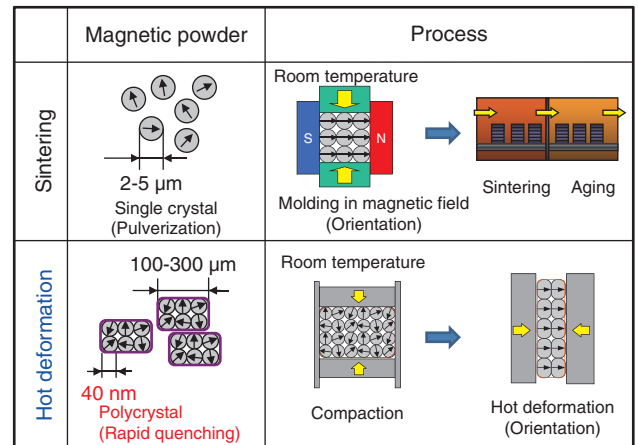


Fig. 3 Magnet manufacturing method comparison

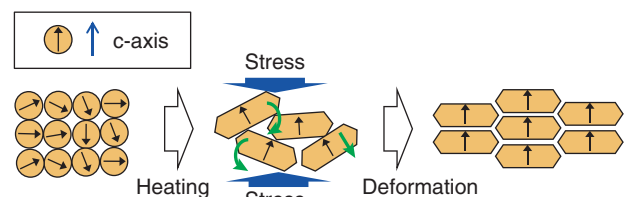


Fig. 4 Model of anisotropic crystal growth

き、圧粉体に対して熱間での押出し加工による一軸加圧をおこない、配向した板状の磁石を成形する。ただし、圧粉体の全ての部位に均等に圧力を伝えなければならないため、均質な磁石を作るためにはある程度圧粉体の形状に制約があり、塑性加工条件の設定でばらつきを抑えることが課題である。本工程において、配向によって B_r は向上するが、被熱による結晶成長を伴うので H_{cj} は逆に低下する。そのため、このトレードオフを考慮し特性を向上させる必要がある。また、本開発磁石のような微細組織を有する高 H_{cj} 磁石は一般に着磁性の低下が懸念されるため、この影響も確認する必要がある。

4. 熱間加工磁石の特性向上

4.1. 熱間加工条件

Fig. 5 に本開発で特性を向上させた Dy フリー磁石の熱間加工温度ごとの走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す。熱間加工温度が上がるほど結晶が成長し、形状が扁平化していくため、配向が進んでいることがわかった。一方で、前述の通り、微細組織を維持するためには、熱間加工温度をより低温化する必要がある。そのため本開発では、熱間加工時の温度を低温化することで、結晶粒の微細化を図ると共に、その低温条件でも、従来工法対比で相対的に高い配向度が得られるよう塑性加工速度の設定をおこなった。

4.2. 成分設定

ネオジム磁石の主相の化学量論比組成は $RE_2T_{14}B$ (RE: 希土類, T: 遷移元素) で表される金属間化合物となっているが、実際には粒界相の成分も存在するため、原料合金中の総希土類量 (Total Rare Earth: TRE) は化学量論比組成よりも多くなっている。Fig. 6 に TRE が少なく H_{cj} が低い従来の磁石と、TRE が多く H_{cj} が高い改善された磁石の SEM 写真を示す。粒界相 (白い部分) を厚くすることで、主相の磁氣的孤立が確保されて H_{cj} が向上する。主相割合を大きく減少させない範囲で TRE を増やして特性向上を図った。

4.3. 磁気特性の改善

Fig. 7 に従来熱間加工磁石と本開発磁石の磁気特性を示す。本開発磁石は、熱間加工温度の低温化、塑性加工条件の最適化および最適粒界相とするための成分設定をおこなった。結晶粒の微細化と主相の磁氣的孤立性の改善によって H_{cj} を向上させると共に、微細組織を維持しつつ配向度を改善することで、 B_r も向上した。

4.4. 温度依存性

一般的に H_{cj} は高温で低下するが、その低下率は粒径に

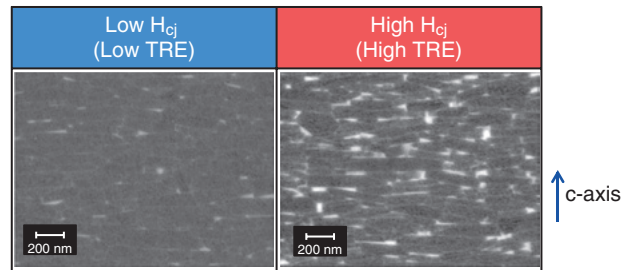


Fig. 6 Crystalline microstructure of hot-deformed magnet

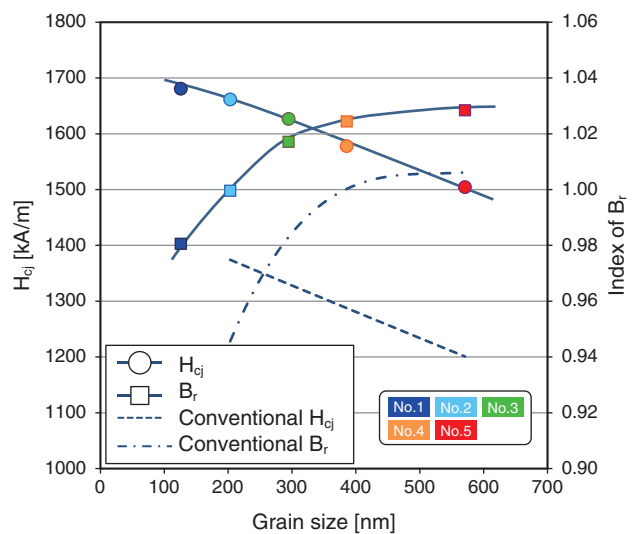


Fig. 7 Relationship between grain size and H_{cj} /grain size and B_r

No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
SEM image					
Grain size	126 nm	203 nm	295 nm	386 nm	571 nm
Deformation temp.	700°C	725°C	750°C	775°C	800°C

Fig. 5 Grain size of hot-deformed magnet for differing deformation temperatures

依存する⁽⁴⁾。微細化の副次効果として H_{cj} の温度係数 (β %/°C) と粒径との相関が認められた (Fig. 8)。

温度係数の改善による具体的な効果の例を Fig. 9 に示す。常温付近での熱間加工磁石の H_{cj} は、実線で示す焼結磁石の H_{cj} より低い。高温側になっていくと焼結磁石と同等以上の H_{cj} になる。これは熱間加工磁石の温度依存性が小さく、 H_{cj} の低下割合が少ないためである。駆動モータにおいて減磁が課題となる高温側では、熱間加工磁石の温度依存性が利点となる。

4.5. 着磁性

Fig. 10 に焼結磁石および熱間加工磁石の初磁化曲線 (ヒステリシス曲線の第 1 象限) を示す。原点から印加磁界を

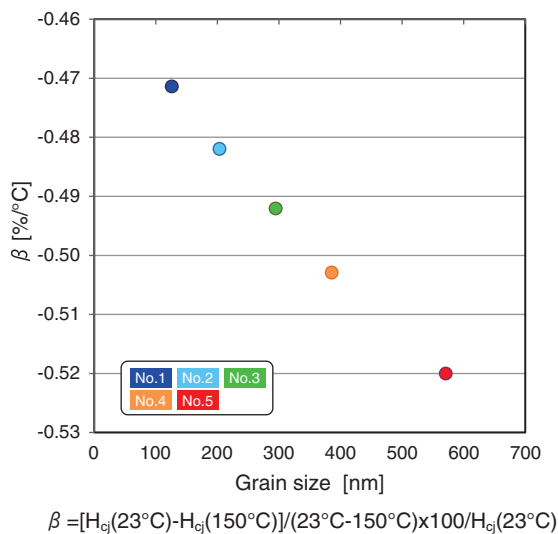


Fig. 8 Relationship between grain size and temperature coefficient of H_{cj} (β)

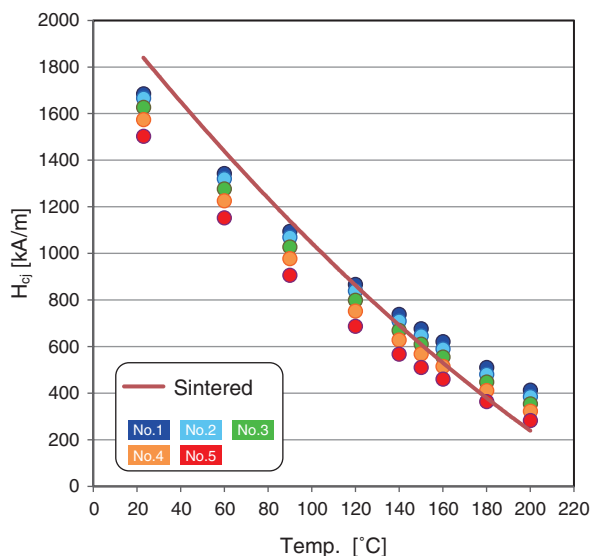


Fig. 9 Temperature-dependence of H_{cj} in hot-deformed magnet and sintered magnet

増やしていくと焼結磁石は 500 kA/m 程度で一気に飽和してほぼ完全に着磁されるが、熱間加工磁石は初磁化曲線が 2 段階になり完全着磁に保磁力相当以上の有効磁界が必要となる。

焼結磁石は結晶粒が大きいいため一つの粒が多磁区構造になっており、磁界が印加されると磁壁移動により容易に磁化される。これに対し、熱間加工磁石は結晶粒が小さいため単磁区構造と多磁区構造の結晶粒が複合している状態になっている。この場合、まず多磁区結晶粒が磁化されてから単磁区結晶粒が磁化されるため、2 段階の初磁化曲線を描く。

両磁石の磁区構造を磁気力顕微鏡で観察した結果を Fig. 11 に示す。焼結磁石は一つの結晶中に磁壁で区切られた磁区が複数存在する多磁区構造になっているが、熱間加工磁石は磁壁が存在しない単磁区構造の結晶が多くみられる。これより、初磁化曲線の相違が裏付けられる。

以上から、熱間加工磁石の着磁にはより大きな印加磁界が必要となるため、生産技術上考慮が必要であり、着磁電源の電圧設定で対応した。

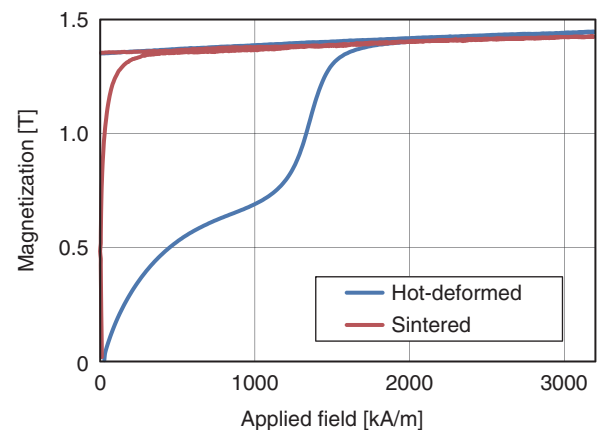


Fig. 10 Magnetization profile

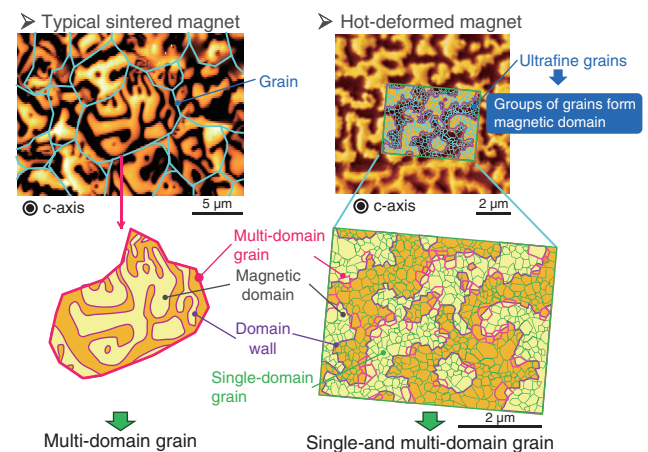


Fig. 11 Magnetic domain structures (Magnetic force microscope image)

4.6. 特性の均一性

製法変更に伴う成形品の安定性を確認した。成形品から切り出した個々の磁石の B_r に起因する磁束を測定した(Fig. 12)。熱間塑性加工時の金型最適設計と成形条件の最適化により、磁束のばらつきはHEVに求められる範囲に対して工程能力指数 $C_p=5.90$ を確保できた。

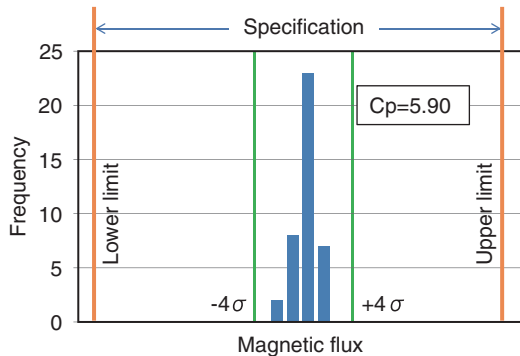


Fig. 12 Dispersion on magnetic flux

5. まとめ

本開発では重希土類フリー熱間加工磁石の駆動モータへの適合をおこなった。低温での熱間加工による微細組織化、塑性加工速度の最適化による高配向化、粒界相の設定による主相の磁氣的孤立の確保により H_{cj} および B_r を向上させた。また、量産における品質の安定性も確認した。これらにより産出偏在性の大きい高コストな重希土類を用いることなく従来同等以上の性能を有する電動車両用駆動モータの量産が可能となった。

参考文献

- (1) Sagawa, M., Fujimura, S., Togawa, N., Yamamoto, H., Matsuura, Y.: New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe, J. Appl. Phys., Vol.55, No.6, p.2083-2087, (1984)
- (2) 佐川真人, 広沢哲, 山本日登志, 松浦裕, 藤村節夫: Nd-Fe-B系永久磁石材料, 固体物理, Vol.21, No.1, p.37-45, (1986)
- (3) 宇根康裕, 佐川真人: 結晶粒微細化によるNd-Fe-B焼結磁石の高保磁力化, 日本金属学会誌, 第76巻, 第1号, p.12-16, (2012)
- (4) Hioki, K., Hattori, A., Iriyama, T.: Development of Dy-Free Hot-Deformed Nd-Fe-B Magnets by Optimizing Chemical Composition and Microstructure, J. Magn. Soc. Jpn, 38, p.79-82, (2014)

- (5) Liu, J., Sepehri-Amin, H., Ohkubo, T., Hioki, K., Hattori, A., Schrefl, T., Hono, K.: Effect of Nd content on the microstructure and coercivity of hot-deformed Nd-Fe-B permanent magnets, Acta Mater., 61, p.5387-5399, (2013)
- (6) Croat, J. J., Herbst, J. F., Lee, R. W., Pinkerton, F. E.: Pr-Fe and Nd-Fe-based materials: A new class of high-performance permanent magnets, J. Appl. Phys., 55, p.2078-2082, (1984)
- (7) Lee, R. W.: Hot-pressed neodymium-iron-boron magnets, Appl. Phys. Lett., Vol.46, p.790-791, (1985)
- (8) 佐川真人, 浜野正昭, 平林真: 永久磁石, アグネ技術センター, p.240, (2007)
- (9) Mishra, R. K.: Microstructure of hot-pressed and die-upset NdFeB magnets, J. Appl. Phys., 62, p.967-971, (1987)
- (10) Kato, R., Nakazawa, Y., Shimizu, H., Kumano, M., Nagase, T., Yasuda, H. Y.: Orientation and Deformation Mechanisms of Hot-Deformed Nd-Fe-B Magnets, Proceeding of the 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and Their Applications, p.85-88, (2012)
- (11) 塩井亮介, 宮脇寛, 森田敏之: RE-Fe-B系熱間加工異方性磁石の配向メカニズム, 電気製鋼, 第82巻, 1号, p.31-37, (2011)

著者



清水 治彦



加藤 龍太郎



中澤 義行



服部 篤



日置 敬子



及川 貴司