

Nd-Fe-B 磁石への希土類添加による保磁力変化の定量的解釈

加藤宏朗, 佐川真人* (山形大, *インターメタリックス)

Quantitative explanation of coercivity change in rare-earth added Nd-Fe-B magnets

H. Kato and M. Sagawa* (Yamagata Univ., *Intermetallics)

Nd-Fe-B 磁石に Dy を添加することで保磁力が上昇することはよく知られている。この現象の解釈として、主相 Nd₂Fe₁₄B の Nd サイトの一部を、より大きな結晶磁気異方性を有する Dy が置換することで系の磁気異方性が向上するため、という説明がよくなされる。しかし (Nd_{1-x}Dy_x)₂Fe₁₄B 系における異方性磁場の Dy 置換による増加の割合 [1] に比べて、Nd-Fe-B 焼結磁石に Dy を添加したときの保磁力上昇率の方が遙かに大きいという問題がある。また、Nd よりも大きな結晶磁気異方性をもつ希土類としては、Dy や Tb の他に Pr 等もあるが、何故に Dy と Tb 添加の場合のみで保磁力が上昇するのか、という疑問についてもこれまできちんとした説明がなされていないのが現状である。そこで本研究では、文献 [2] の結晶場計算モデルと Kronmüller の式 [3] を組み合わせることで、Nd-Fe-B 磁石への希土類添加による保磁力変化についての定量的解釈を行った結果について報告し、Dy 添加以外の方法で保磁力を上昇させる可能性について議論する。

一般に三価の希土類イオン R³⁺ のもつ結晶磁気異方性定数 K₁(ion) は、スティーブンス因子 α と全角運動量 J の二乗、および 4f 軌道の平均二乗サイズ <r²> の積に比例する。下表第 2 列には、Nd³⁺ の値を基準とした K₁(ion) の相対値を示す。Dy³⁺, Tb³⁺ の K₁(ion) は Nd³⁺ の 2 倍の大きさをもつが、Pr³⁺ では更に大きな値をとることがわかる。結晶磁気異方性の一般的定義は、試料を容易軸および困難軸方向に各々完全に磁化させた時のエネルギー差であるので、両方向の磁化曲線で囲まれる領域の面積に対応する。この領域は単純な一軸異方性をもつ強磁性体の場合には、三角形になり、その面積 K₁ は、飽和磁化 M_s と異方性磁場 H_A を用いて K₁=M_sH_A/2 と書ける。しかし Dy₂Fe₁₄B のようなフェリ磁性体では、特に低温においては Fe と Dy のモーメントが non-collinear な配列をとりながら磁化するので、異方性磁場の定義が困難になる。一方、室温以上では Fe と Dy のモーメントが反平行結合を維持したまま collinear な状態で磁場方向に回転するという描像が成り立つことがわかった。そこで我々は有効異方性 K_{eff} を

$$K_{\text{eff}} = \int_0^{H_A} (M_{001} - M_{100}) dH$$

と定義し、R₂Fe₁₄B 単結晶の室温での磁化曲線とその計算値を比較しながら K_{eff} の値を見積もった。その結果、下表第 4 列に示すように、K_{eff} の値は R³⁺ の種類に依らずほぼ同じ値になることがわかった。一方、フェリ磁性体である R=Tb, Dy では M_s が半分以下に減少しているため、有効異方性磁場 H_A* は、下表第 6 列のように R=Nd に比べて 2 倍以上大きくなる。ここで、Kronmüller の式が、H_c=αH_A*-N_{eff}M_s と書けることを考慮すると、R=Tb, Dy においてフェリ磁性結合によって M_s が減少していることは、第一項だけでなく、局所反磁場を表す第二項においても H_c 上昇に大きく寄与していることがわかる。

[1] D.W. Lim, H. Kato, M. Yamada, G. Kido, and Y. Nakagawa, Phys. Rev. B44 (1991) 10014.

[2] M. Yamada, H. Kato, H. Yamamoto, and Y. Nakagaw Phys. Rev. B38 (1988) 620.

[3] H. Kronmüller, K.-D. Durst, and M. Sagawa, J. Magn. Magn. Mater. 74 (1988) 291.

	single R ³⁺ ion	R ₂ Fe ₁₄ B at room temp.				
R ³⁺	K ₁ (ion)	K _i (MJ/m ³)	K _{eff} (MJ/m ³)	M _s (T)	H _A * ≡ 2K _{eff} /M _s (T)	H _A (exp) (T)
Pr ³⁺	2.8	37.6	6.60	1.56	8.46	7.5
Nd ³⁺	1.0	11.1	5.35	1.60	6.69	7.3
Tb ³⁺	2.1	27.7	6.51	0.7	18.6	~22
Dy ³⁺	2.0	26.1	5.08	0.71	14.3	~15