

電磁振動プロセスを用いた異方性鋳造ネオジム磁石の創製

田村 卓也¹⁾ 李 明軍²⁾

「異方性鋳造ネオジム磁石を作りたい。」と磁石の専門家に相談したならば、きっと呆れられるに違いない。多分、磁石として成り立つための発現機構に関して詳細に説明して頂けるだろう。実際、ネオジム磁石の組成を溶解・凝固させても磁石の「じ」にもならない。Nd₂Fe₁₄B相はデンドライト成長するため、一つの結晶核から発生・粗大化したデンドライト結晶は全て繋がっていることが磁石の「じ」にもならない最大の要因であろう。磁石となるNd₂Fe₁₄B相が試料の中で微細結晶粒として存在し、更に磁化容易軸のc軸が配向していることが異方性ネオジム磁石として成立させるための条件である。詳細な磁石の基礎知識に関しては他文献⁽¹⁾⁽²⁾を参照して頂くとして、我々の専門である「凝固プロセス」に関して少しご説明したい。「鋳造」を辞書で引くと、「金属を溶かし、型に流し込んで固め、目的の形状物を作ること。」というような文言が出てくるであろう。我々はその中の「溶かし・固める」という凝固プロセスを研究している。特に力を入れているプロセスが「電磁振動プロセス」である。電磁振動プロセスとは、直流磁場内で金属液体中に直流磁場と直交する交流電流を印加することにより、金属液体内部に発生する交流電流の周波数と同じ周波数で振動する力(ローレンツ力)を利用したプロセスである⁽³⁾。これまで、我々は電磁振動プロセスによる結晶粒微細化⁽⁴⁾や金属ガラスにおけるガラス形成能向上⁽⁵⁾に関して電磁振動プロセスの効果を見出してきた。これらの効果は液相と固相の電気抵抗が異なるため、電気抵抗の低い固相に電流が集中し、液相の中で固相が大きく振動する現象が基本原理となっている。

さて、話を「異方性鋳造ネオジム磁石」に戻そう。つまり、我々は電磁振動プロセスにより異方性ネオジム磁石を作製しようと試みているわけである。そのためには液相と固相が混じった状態にできる合金系でなければならない。そこで、Pierre Courtoisらが強磁場中でNd₂Fe₁₄B相の配向実験に用いていた「Nd-30 mol%Cu 共晶+30 mass% Nd₂Fe₁₄B」合金⁽⁶⁾を実験に用いた。Nd-30 mol%Cu 共晶合金の共晶温度

は793 Kと比較的低温であるので、ある温度域において、Nd-30 mol%Cu 液相とNd₂Fe₁₄B固相が共存できる状態となる。図1に10 Tの強磁場下で1273 Kまで昇温させ、Nd-30 mol%Cu 液相とNd₂Fe₁₄B固相の状態にした後、完全凝固させた試料の光学顕微鏡写真を示す。試料の大きさは直径φ5.5 mm、長さ20 mmである。白い相がNd₂Fe₁₄B相であるが、非常に大きな板状結晶であることがわかる。このような状態では磁石として機能するはずもなく、強磁場下で冷却したのにもかかわらず、全く鉄にはくっつかない試料であった。Nd₂Fe₁₄Bの結晶構造はc軸が長い正方晶であり、c軸方向に稠密な鉄層を持つため⁽²⁾、凝固プロセスを研究している我々としてはc軸方向の結晶成長速度がa, b軸方向よりも遅く、板状結晶となっている、つまりは板状結晶の板厚方向がc軸方向と考えるのが当然である。そうすると「電磁

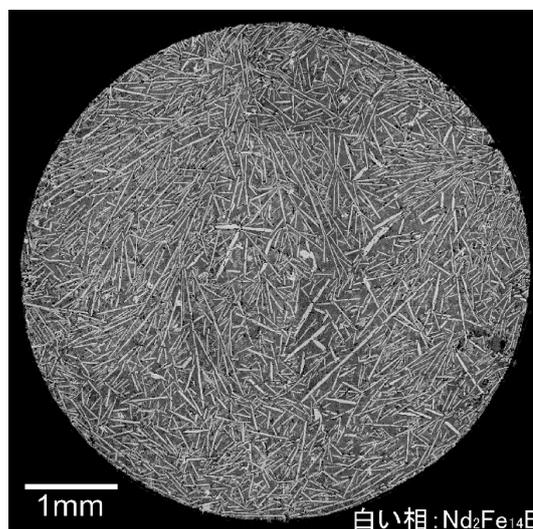


図1 10 Tの強磁場下で1273 Kまで昇温させ、Nd-30 mol%Cu 液相とNd₂Fe₁₄B固相の状態にした後、完全凝固させた試料の光学顕微鏡写真。

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所 磁性粉末冶金研究センター 磁性材料プロセスチーム(〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞2266-98) 1)研究チーム長 2)主任研究員
 Creation of the NdFeB Anisotropic Cast Magnet Using the Electromagnetic Vibration Process; Takuya Tamura, Mingjun Li (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Magnetic Powder Metallurgy Research Center, Nagoya)
 Keywords: neodymium magnet, electromagnetic vibration, magnetic anisotropy, crystalline orientation, cast magnet
 2019年5月28日受理[doi:10.2320/materia.58.520]

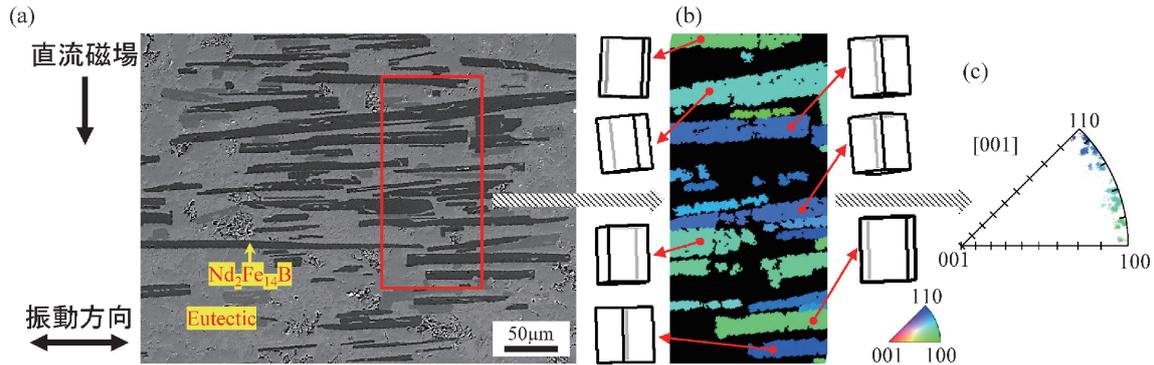


図2 電磁振動印加により、微細化かつ配向化された $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 凝固組織. (a) 走査型電子顕微鏡(SEM)の二次電子線像(secondary electron image, SEI) (b) 赤線で示した領域にある $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相の電子線後方散乱回折(electron back scattering diffraction, EBSD)画像. 代表的な $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相の結晶方位も単位格子にて表示している. (c) EBSD 画像からの[001]逆極点図(inverte pole figure, IPF). 結晶方位は(100)から(110)間に集中し、(001)へのズレは 10° 以内である.

振動プロセスにより板状結晶を微細化し、更に板状結晶を並べることにより配向化させ…最終的に「異方性铸造ネオジム磁石」ができるに違いない。」という発想に至るまでには時間はかからなかった。しかし、電磁振動プロセスにより板状結晶を微細化することは、これまでの結晶粒微細化等の研究成果より容易に想像できるが、果たして板状結晶を並べることができるのであろうか？ Pierre Courtoisらは、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ B相が常磁性状態の高温において、結晶構造に起因する磁化率の異方性エネルギーのみでは強磁場下でc軸方向に配向させるのに十分なエネルギーを与えられないと結論づけている⁽⁶⁾。この問題に対する解は電磁振動プロセスの基本原理にあった。それは、「液相の中で固相が大きく振動する現象」である。お風呂の中で浮かぶ板状のおもちゃを平らな状態で沈めたことがあるだろうか？ 左右に振動しながら水平のまま上昇するのである。つまり、板状物体を液相の中で振動させると、流体抵抗を最小にするため振動方向に対して必ず板厚方向が垂直になるのである。当然といえば当然のことである。そこで、10 Tの強磁場下で973 Kまで昇温させ、Nd-30 mol%Cu液相と $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 固相の状態を試料の長さ方向に60 A, 1 kHzの交流電流を2 min流すことで電磁振動を印加した後、冷却し試料を完全凝固させた。その試料断面の走査型電子顕微鏡(SEM)像、及び電子線後方散乱(EBSD)結果を図2に示す。電磁振動により、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 固相が微細化し、望み通り板厚方向が振動方向に対し垂直となっている。さらに、結晶構造に起因する磁化率の異方性エネルギーによりc軸方向が磁場印加方向と同じになっていることもわか

る。この結果より、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 板状結晶の板厚方向がc軸方向であり、電磁振動プロセスにより $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 板状結晶を微細化・c軸配向化させることができることが判明した。この試料は、鉄に僅かに引き寄せられる程度であったが、微細化・c軸配向化それぞれに最適な電磁振動を印加する「2ステップ電磁振動プロセス」を用いることにより、「Nd-30 mol%Cu共晶+30 mass% $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 」合金において、残留磁束密度0.38 T、保磁力621 kA/mの異方性铸造ネオジム磁石を創製することができた。詳細は、Scientific Reportsに掲載された論文⁽⁷⁾を参照して頂ければ幸いである。

今後は、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相増加による高性能化や、他の複合材料系にこの電磁振動プロセスによる微細分散・配向化を適用できればと考えている。本研究の一部はJSPS科研費JP19K05071の助成を受けたものです。

文 献

- (1) 金子秀夫, 本間基文: 磁性材料, 日本金属学会, (1977).
- (2) 佐川真人, 浜野正昭, 平林 真: 永久磁石—材料科学と応用—, アグネ技術センター, (2007).
- (3) C. Vives: Metall. Mater. Trans. B, **27**(1996), 445-455.
- (4) M. Li, T. Tamura and K. Miwa: Acta Mater., **55**(2007), 4635-4643.
- (5) T. Tamura, K. Amiya, R. S. Rachmat, Y. Mizutani and K. Miwa: Nature Mater., **4**(2005), 289-292.
- (6) P. Courtois, R. P. de la Bathie and R. Tournier: J. Magn. Magn. Mater., **153**(1996), 224-230.
- (7) M. Li and T. Tamura: Scientific Reports, **9**(2019), 5733.