

超高性能永久磁石の研究と応用動向の現状

超高性能永久磁石の研究および応用動向調査専門委員会編

目 次

1. まえがき	3	8. Nd-Fe-B 磁石の微細構造と保磁力	34
2. レアアースの資源問題	3	8.1 はしがき	34
2.1 Nd および Dy の資源問題	3	8.2 Nd-Fe-B 焼結磁石の微細組織	36
2.2 レアアース資源の動向	9	8.3 Nd-Fe-B 焼結磁石の最適化熱処理による 微細組織変化	37
3. 低希土類元素組成高性能異方性ナノコンポ ジット磁石の開発	10	8.4 焼結磁石の結晶粒微細化による保磁力向上	38
3.1 はしがき	10	8.5 超微細結晶異方性 Nd-Fe-B 磁石	39
3.2 磁気硬さの小さな物質を用いて行う新規 永久磁石材料開発の基本的な考え方	11	8.6 熱間加工異方性磁石	39
3.3 異方性ナノコンポジット磁石の作製例と 明確化された課題	14	8.7 まとめ	40
3.4 まとめ	16	9. 磁気力顕微鏡による永久磁石の磁区観察	41
4. 薄膜・厚膜磁石の研究開発動向	17	9.1 はしがき	41
4.1 はしがき	17	9.2 磁気力顕微鏡 (MFM) について	41
4.2 スパッタリング法による異方性 Nd-Fe-B 系 厚膜磁石の開発	17	9.3 高保磁力探針による永久磁石の磁区観察	43
4.3 ボトムアップ手法による厚膜磁石の開発	18	9.4 焼結 Nd-Fe-B 磁石の熱消磁過程その場 MFM 観察	45
5. 寒冷積雪地用 EV 実現への基盤技術開発	19	9.5 熱間加工 Nd-Fe-B 磁石の MFM 観察	46
5.1 はしがき	19	9.6 焼結 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 磁石の MFM 観察	48
5.2 車のエネルギー消費について	20	9.7 SEM-MFM による粒界・組成・磁気構造 解析	48
5.3 寒冷地向け電動車	21	9.8 まとめ	48
5.4 まとめ	22	10. 希土類-鉄-ボロン系急冷薄帯の磁気特性	49
6. 電気自動車に求められる磁性材料	22	10.1 はしがき	49
6.1 はしがき	22	10.2 低保磁力 Pr-Fe-Co-Ti-B 系急冷薄帯の磁気特性 — トルクリミッタ用ロータ材料の開発 —	49
6.2 コスト低減, 資源供給リスク緩和の取組	23	10.3 耐熱性 Didymium-Y-Fe-Co-Nb-V-B 系急冷薄帯 並びにそれらのボンド磁石の諸特性	54
6.3 航続距離延長に対する取組	24	11. Fe-Co 系データテープの経時変化	58
6.4 まとめ	25	11.1 はしがき	58
7. $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 系磁石の現状と将来展望	26	11.2 磁気記録媒体の熱ゆらぎ磁気余効	59
7.1 はしがき	26	11.3 実験方法	59
7.2 R-Co 系金属間化合物の磁気的性質と結晶 構造	26	11.4 実験結果	60
7.3 2-17SmCo 希土類磁石の磁気特性と推移	27	11.5 まとめ	62
7.4 2-17SmCo 希土類磁石の保磁力機構	31	12. あとがき	62
7.5 まとめ	34		

超高性能永久磁石の研究および応用動向調査専門委員会委員

委員長	小林 久理眞（静岡理科大学）	委員	西尾 博明（明治大学）
	幹事 徳永 雅亮（三徳）		長谷部 章雄（アドバンス・キャパシタ・テクノロジーズ）
幹事補佐	山本 和彦（三徳）	委員	浜野 正昭（未踏科学技術協会）
	野中 賢一（日本電気計器検定所）		日高 徹也（TDK）
委員	有泉 豊徳（東英工業）		広沢 哲（物質・材料研究機構）
	石橋 利之（安川電機）	委員	福田 方勝（三菱製鋼）
委員	井上 宣幸（三徳）		福永 博俊（長崎大学）
	入山 恭彦（大同特殊鋼）	委員	宝野 和博（物質・材料研究機構）
	大橋 健（信越化学工業）		堀田 勝喜（日本工業大学）
委員	奥村 邦夫（東京マグネٹエンジニアリング）		堀 充孝（日本電磁測器）
	小原 学（明治大学）	委員	町田 憲一（大阪大学）
委員	加藤 義雄（三徳）		松岡 篤（三菱電機）
	川本 淳（住友金属鉱山）	委員	村上 亮（日産自動車）
委員	木戸 義勇（物質・材料研究機構）		森本 耕一郎（戸田工業）
	齋藤 哲治（千葉工業大学）	委員	山岡 武博（日立ハイテクサイエンス）
委員	桜田 新哉（東芝）		山田 修（ミネベア）
	佐々木 信生（玉川製作所）	委員	山本 日登志（KRI）
委員	佐藤 正一（NECトーキン）		山元 洋（明治大学）
	島田 宗勝（弘前大学）	途中退任	石川 尚（住友金属鉱山）
委員	島村 正彦（岩通計測）	委員	高橋 勝美（並木精密宝石）
	白井 照光（日本電気計器検定所）		山崎 二郎（九州工業大学）
委員	杉本 諭（東北大学）	主な参加者	入江 年雄（三徳）
	竹澤 昌晃（九州工業大学）		小澤 純夫（石油天然ガス・金属鉱物資源機構）
委員	谷川 茂穂（日立製作所）	主な参加者	栗岩 貴寛（三徳）
	中村 元一（並木精密宝石）		堺 和人（東洋大学）
委員	西内 武司（日立金属）		渡辺 寧（産業技術総合研究所）

1. まえがき

永久磁石は現在、非常に広い分野に利用されている。たとえば、現在の日本の科学研究の代表的な装置、測定機器の一つである Spring-8 では、光の取り出し部分に Nd-Fe-B 磁石が並列に多数並べられた重要な装置が使われている。また、最近なにかと注目される兵器部品でも、磁石応用は決して少なくない。さらに、注目の自動車関連部品、とくに駆動モータ、電力回収用の発電機にもネオジム磁石の応用が進んでいる。また、まったく視点を変えて、「おもちゃ」の各種部品や、自転車などにも多くのネオジム磁石が用いられ、各地の工具、部品を扱う大規模小売店では、小さな袋詰めにされたネオジム磁石や Sm-Co 系磁石、そしてフェライト磁石が販売されている。

以上のように応用分野が広がり、産業上の重要度が増すと、自然と注目が集まり、いろいろな評価を受けることとなる。喜ばしい例としては、2012 年度の日本国際賞をネオジム磁石の発明者であり、本委員会との縁も深い佐川真人博士が受けられたことがある。また、あまりありがたくない例としては、本報告書でも詳しく取り上げられたレアアースの資源問題の深刻化がある。

第二次世界大戦以前から続けられたフェライト磁石研究は、La, Co などの添加で、現在でも新局面が開けうる可能性を示したし、70 年代以降に出現した Sm-Co 系磁石も、Co の Fe 置換量の増加による磁気特性向上と、高温特性の改良で新局面を開こうとする動きが本格化している。また、当然、それらの動きに呼応するようにネオジム磁石は結晶粒径や組成を制御してさらなる高保磁力化が進み、省 Dy 化に拍車がかかっている。

基礎的材料研究の側面もある薄膜及び厚膜磁石関連では、ナノサイズの薄膜から、多層膜による数 10 から数 100 μm 厚の磁石の研究まで広く行われ、それ自体の応用を探る動きと、それらを、焼結磁石の粒界特性を中心とする物性研究のモデル物質として扱う方向の研究も進められている。しかし、MEMS などに用いられる超小型モータについては大量に応用される印象は、現状のところない。1990 年代から研究されてきた交換スプリング現象に基礎をおくナノコンポジット磁石は、一部の粉体磁石が実用化されてきたが、大きな市場を形成するには至っていない。しかし、この種の磁石の製造法として研究、開発が進んできた磁石材料の急冷薄帯調製技術は、現在では、広い意味では、あらゆる磁石で使用されている。薄帯磁石自体の研究と、磁石原料調製技術開発として研究は、基本的には同じ技術的基礎を有するもので、重要である。

磁石材料の評価技術としては、まず、微構造解析技術に目を見張るべき進展がある。透過型電子顕微鏡 (TEM) では、それから発展して STEM, CS-TEM などの磁石材料研究における利用が進み、たとえば、ネオジム磁石の結晶粒界の内部構造、Dy 原子の希土類副格子内における占有サイト

の特定など、これまで観察が不可能であった微細構造が明らかにされつつある。磁区構造観察においても、磁気力顕微鏡 (MFM) の高性能化により、これまでは観察の難しかった微弱な磁束密度変化が映像化でき、それにより、たとえば高配向焼結磁石の a-b 面 (c 軸に垂直方向面) の縞状 (ストライプ) 磁区構造の詳細な観察も可能になっている。また、ホール素子による磁区観察 (SHPM) にも期待が集まっている。また、各種磁区構造、磁壁観察手法は次第に重要性が認識され、さかんに研究されている。

永久磁石 (硬質強磁性体) の理論的研究では、従来のマイクロマグネティックスのシミュレーションをスーパーコンピュータにより行い、基本ユニットを極めて小さく (ナノサイズ) に見立てた大規模計算が可能になりつつある。また、第一原理計算により各種基礎物性を計算物理学的に扱うことも広く行われ、各種新規磁性体、磁石材料の物性計算がさかんに行われている。

一方で、Kronmüller の式や磁気余効測定にも根強い関心が集まり、学会発表や論文では引用され続けている。この分野については、ある意味で 1948 年の Stoner-Wohlfarth の論文発表とその後の発展、1960 年代の Brown のマイクロマグネティックスの提唱とその後発展が、現在の研究状況を作り出しているとも言える。もちろん、その背景に、別途、バンド理論の発展があり、新しい計算手法、計算上のノウハウの蓄積と、プログラミング技術の発展があることを想像することは、門外漢にとっても容易である。

ただし、以上の研究状況について、細分化された神経組織の物理化学的研究と、ゲシュタルト心理学の関係をみるのは、一人筆者のみであろうか。

いずれにしても、永久磁石のような原子レベルから巨視的サイズまで、多様性に富む物性が混在し、複雑で、ある意味では混乱しがちな、一筋縄では扱えない物質でありながら、それでいて基本的な切り口を見出そうという研究が必要な物質は、現在の科学・技術にとって、まさに、挑戦的な存在と言えよう。鷹揚に構えれば、これからが楽しみである。

本報告には、以上に筆者が雑然と述べてきた問題が、それぞれの講演いただいた先生方の明快な解説で、順次現れる。ぜひ、精読をお願いしたい。

2. レアアースの資源問題

2.1 Nd および Dy の資源問題

2.1.1 はしがき

NdFeB 永久磁石の材料として使用される Nd と Dy は希土類を構成する 17 元素に含まれる。希土類は、かつては触媒や冶金、研磨剤が主要な用途であったが、最近、磁石が最も大きな需要分野になっている (表 2.1)。希土類の資源埋蔵量は世界全体で 1 億 1,000 万トンと見積もられている (表