

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「元素戦略を基軸とする物質・材料の革
新的機能の創出」
研究課題「ネオジム磁石の高保磁力化」

研究終了報告書

研究期間 平成23年10月～平成29年3月

研究代表者：宝野 和博
(物質・材料研究機構、フェロー)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

希少元素のDyを使わずに、室温保磁力30 kOe、最大エネルギー積40 MGOe以上、200°Cでの保磁力10 kOe以上のバルク磁石を実現することを最終目的とし、その基盤研究としてNd-Fe-B系磁石の保磁力のメカニズムを解明することを目指した。そのために、既存のNd-Fe-B焼結磁石ならびに試作磁石の微細構造をSEM/FIB, STEM, 3次元アトムプローブ(3DAP)を用いてマルチスケールで解析し、第一原理、マイクロマグネティックシミュレーションの援用を得て、保磁力を最大化するための微細構造の導出と、その微細構造を実現するためのプロセスの検討を行った。

Nd-Fe-B磁石の保磁力は主相であるNd₂Fe₁₄B粒間に形成される3 nm程度の粒界相の連続性と磁性が大きく影響するが、その磁性を直接測定した例はなかった。本研究では、電子線ホログラフィーによるネオジム磁石の粒界相の磁化測定を世界で始めて試みた。電子線ホログラフィーにより粒界相の磁化を決定するためには、結晶粒界がNd₂Fe₁₄B結晶の結晶容易軸に平行に位置するようにTEM試料を作製する必要があったが、それを宝野グループで収束イオンビーム(FIB)による微細加工により行い、それを用いて村上グループが電子線ホログラフィーによる粒界相の磁化測定に世界で初めて成功した。その結果、従来非磁性と信じられていた粒界相が約1 Tの磁化を有することが確立された。この結果は、焼結磁石のNd₂Fe₁₄B粒が強磁性相の粒界相を通して交換結合していることを示唆しており、反転核の核生成によりNd-Fe-B磁石の保磁力が決まるという従来の説に反し、結晶粒における磁壁のピンニングが保磁力に大きな役割を果たすことを示唆している。

このような粒界相の磁性の起源を理解するために、佐久間グループではFe_{1-x}Nd_xアモルファス相の磁性を第一原理により計算した。それによると、fccで近似されるアモルファス構造ではFeは磁性を持たないが、それにNdが合金化されると強磁性となり、その磁化を消失させるためにはx>0.7ものNd濃度が必要であることが分かった。嶋グループではスパッタ薄膜でFe_{1-x}Nd_xの全領域における磁化測定を実験的に行い、第一原理計算とほぼ一致する結果を得た。このことから、Nd₂Fe₁₄B粒の粒間交換結合を室温で分断するためには、粒界相におけるNd濃度を60%以上にしなければならないことが分かった。

Nd-Fe-B焼結磁石の保磁力は結晶粒径が小さくなると増大することが経験的に知られていたが、それについては明確な説明が無かった。Schreflグループが開発した有限要素マイクロマグネティックシミュレーションコードを用いて、宝野グループは表面で磁化反転したNd₂Fe₁₄B粒子からの漏洩磁界が粒径の微細化により小さくなることを見いだした。その結果、微結晶化に伴い保磁力が増大することが分かった。また、従来のマイクロマグネティックシミュレーションでは結晶配向が強くなると保磁力が増大するという結果がだされていたが、これは磁化反転が反転磁区の核生成により起こるとする仮定のもとでシミュレーションが行われていたためである。磁石表面に反転核を導入したモデルにより異方性磁石と等方性磁石の磁化反転挙動のシミュレーション結果が実験結果に良く一致するようになった。

以上の結果からNd-Fe-B磁石の保磁力を飛躍的に高めるためには結晶粒を微細化するとともに、粒間交換結合を分断する非磁性粒界相を粒界に均一に形成することが必要であると結論され、それを実現するためにNd-TMの共晶合金を熱間加工磁石の粒界に浸透させ、粒間の交換結合を分断する実験を行った。熱間加工磁石を選択したのは、焼結磁石にくらべ一桁以上微細な結晶粒が、酸化の影響を受けずに工業化可能なスケールで得られるためである。共晶合金の浸透処理により保磁力が飛躍的に増大するが、同時にバルク試料がc軸方向に膨張することを発見し、それが大きく磁化を低下させる原因であることも分かった。そこで共晶合金浸透処理時に膨張拘束を加えることにより非磁性相の浸透量を最適化する手法を提案した。これにより磁化の低下を最小に止めて、保磁力を増大させる膨張拘束共晶合金拡散法を開発した。Nd-Alを拡散源としてこの処理を施したNd-Fe-B磁石の最高の保磁力は2.8 Tであり、保磁力としてはほぼ当初の目的を達成することができた。しかし、AlがNd₂Fe₁₄B主

相の Fe と置換するために、保磁力の耐熱性を低下させることとなり、結果として Nd-Cu が高温保磁力を維持するためには最適であること、またより高保磁力が必要な場合は微量の Dy を合金化し、膨張拘束拡散処理を行うことにより室温 2.8 T、磁化 1.35 T を実現できることが分かった。

上記の共晶合金浸透処理した試料の微細構造解析過程で、c 面に沿った粒界相は Nd 濃度が高く非磁性であるのに対して、c 面に垂直な粒界相はアモルファス構造で Fe 濃度が高く強磁性であることが判明した。このことから Nd-Fe-B の粒界相には結晶方位依存性があるのではないかと考え、市販の Nd-Fe-B 磁石の結晶粒界相を STEM により原子レベルで解析した。その結果、c 面に沿った粒界相と c 面に垂直な粒界相で組成、構造に異方性があることが初めて確認された。これは過去 34 年間の Nd-Fe-B 焼結磁石研究で全く見逃されていた新たな知見である。この結果に基づき、粒界相の結晶方位依存性を考慮したマイクロマグネティックシミュレーションを実施し、さらに高保磁力化を目指すには c 面に垂直方向の粒界相を非磁性化する必要があることを確認した。このような微細構造を実現するためのプロセス、合金組成の知見を得るために、昭和電工が 2015 年に発表した Nd リッチ Ga 添加焼結磁石の熱処理による微細構造の変化を詳細に解析した。その結果、この組成の磁石で従来の市販焼結磁石よりも高保磁力が得られるのは、Nd₂Fe₁₄B 粒が全方位にわたり非強磁性 Nd リッチ相により交換分断されていることを見いだした。佐久間グループは第一原理計算によりこの合金組成で粒間に形成される Nd₆Fe₁₃Ga 化合物の磁性を検討し、反強磁性相であることを予測した。これらの知見から、熱間加工磁石の粒間交換結合を全方位で分断できる共晶合金源を探索し、Nd-Fe-Ga-Cu 合金などで、有望な特性が得られつつある。現状ではまだ全方位に渡る完全な主相の交換分断には成功していないが、これまでに得られた知見を用いてさらに共晶合金拡散法の拡散源を探索していけば、近い将来に目標を達成することができると期待される。

本研究を実施することにより、Nd-Fe-B 磁石の微細構造と保磁力メカニズムに関する新知見が得られ、これらの論文はいずれも永久磁石分野における重要な文献となっている。また、これらの成果は今後 JST の産学共創基盤研究に引き継がれて行くと同時に、産業界における Dy フリーネオジム磁石研究でも活用されていくと期待される。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. ネオジム磁石の微細構造解析に関する新知見と保磁力メカニズム (宝野グループ)
概要: FIB/SEM, Cs-STEM, 3DAP を相補的に用いた Nd-Fe-B 系磁石の微細構造のミクロスケールから原子レベルまでのマルチスケール解析法を確立した。粒界相が強磁性であること、結晶粒界相に結晶方位依存性があることなど、新規知見を見出した。Nd-Fe-B 磁石のマルチスケール解析手法は国内の磁石メーカーにも導入され、企業で標準的な磁石解析法として使われ初めている。また、マイクロマグネティックシミュレーションの援用を得て、ネオジム磁石の保磁力メカニズムを従来の核生成型ではなく磁壁のピンニングによるものであることを提唱、ネオジム磁石研究における学術的にインパクトの高い成果を挙げた。本研究成果として公開した論文の多くが、ネオジム磁石の最近の文献で最も引用頻度の高い論文となっている。
2. 第一原理計算による粒界相の磁性の解明 (佐久間グループ)
概要: Nd-Fe アモルファスや Nd₆Fe₁₃Ga などの粒界相の磁性を第一原理計算から明らかにし、保磁力に与える影響についての重要な知見を得た。特に、Nd-Fe アモルファスに関しては、嶋グループや村上グループとの連携により、実験・理論両面から室温での強磁性を示すことが出来た。
3. モデル実験としての粒界相構成合金の磁気特性の評価 (嶋グループ)
粒界相を構成する Nd-Fe 系合金の作製を行った。その結果、飽和磁化は Nd 組成が 10 at.% までは急激に減少し、その後 20 at.% において一旦回復した後、さらなる増加により

ゆるやかに減少することを明らかにした。これらの実験結果は理論グループのシミュレーションとよく整合し、本プロジェクト内の連携が成功した。

4. 電子線ホログラフィによる磁性と格子歪の解析 (村上グループ)

概要: 電子位相情報の収集・解析手法を最適化し、焼結磁石に含まれる薄い粒界相 (3 nm ~ 20 nm 程度) の磁束密度を高い精度で決定した。さらに磁場情報と歪情報を分離する技術を考案し、従来困難であった電子線ホログラフィによる磁性材料の歪解析を実現した。電子線ホログラフィを用いた実試料の解析技術が、本プロジェクトを契機に大きく進展した。

5. エネルギー最小法によるマイクロマグネティクスシミュレーションの高速化 (T. Schrefl グループ)

概要: Nd-Fe-B 磁石の信頼性のあるシミュレーションには、有限要素法においてメッシュサイズを磁壁幅程度に微細化しなければならいために、膨大な計算量が必要となり、長時間を要する。本研究では GUI を用いてマイクロマグネティクスシミュレーションを高速化するために、エネルギー最小法による有限要素マイクロマグネティクスシミュレーション法を開発し、それを活用した。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 高保磁力、高残留磁化を有する磁石の開発 (宝野グループ)

概要: 従来の重希土類元素を使う粒界拡散法と異なり、重希土類元素を用いない共晶合金拡散法は熱間加工磁石の保磁力向上に有効であることが明らかになったが、同時に、非磁性相の増大による磁化の減少が問題であった。一方、共晶合金拡散処理の際に体積膨張が結晶磁化容易軸方向に異方的に起こることを見出し、この膨張を拘束するという方法で、Dy を使わずに、4%Dy 含有焼結磁石と同等以上の磁石特性を得ることに成功した。

2. 共晶合金拡散による Nd-Fe-B 系磁石薄膜の保磁力の最大値の達成 (嶋グループ)

概要: Nd-Cu 層を Nd-Fe-B 薄膜上に成膜することにより、Nd-Fe-B 薄膜の膜厚を変化させた膜厚領域 (5nm~100nm) において約 10kOe 以上保磁力が増加することを明らかにした。また、共晶組成である Nd-Cu 合金薄膜及び Al 層を含む多層膜を熱処理により拡散させた結果、Nd-Fe-B (16 nm)/ Nd-Cu (0.25 nm)/ Al (t_{Al} nm) 薄膜において、Nd-Fe-B 系磁石においてチャンピオンレコードである保磁力が 31.5kOe を得ることに成功した。

3. マイクロマグネティクス法の高速化 (Schrefl グループ)

概要: GPU をもちたデスクトップワークステーションで高速動作するマイクロマグネティックシミュレータの開発。2千万有限要素を 8 時間で計算できる高速化を最小エネルギー法で実現することにより、高水準の永久磁石もでるについての高速計算を可能とした。結晶粒の方位分散をモデルに導入することも可能で、磁化反転の起点の可視化が可能。熱揺らぎによる格の可視化も可能。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「宝野」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
宝野 和博	物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材 料研究拠点	フェロー	H23.10～H29.3
大久保忠勝	同上	グループリーダー	H23.10～H29.3
佐々木泰祐	同上	主任研究員	H23.10～H29.3
Sepehri-Amin, Hossein	同上	主任研究員	H23.10～H29.3
Gruber Maria Theresa	物質・材料研究機構 磁性材料ユニット	博士研究員	H24.6～H25.11
村上恭和	東北大学 多元物質科学 研究所	准教授	H25.4～H25.6 (主たる共同研 究者に移行)
秋屋 貴博	物質・材料研究機構元素 戦略磁性材料研究拠点	博士研究員	H25.9～H27.6
高橋 有紀子	物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材 料研究拠点	主幹研究員	H26.4～H29.3
Cui Weibin	物質・材料研究機構 磁性材料ユニット	博士研究員	H26.4～H26.9

研究項目

- ・微細構造解析及びモデル実験による保磁力発現機構の解明

②「佐久間」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
佐久間 昭正	東北大学工学研究科	教授	H23.10～H29.3
土浦 宏紀	同上	准教授	H23.10～H29.3
三俣 千春	同上	博士研究員	H23.10～H24.6
榎 裕太	同上	助教	H24.4～H25.3
三浦 大介	同上	助教	H25.4～H29.3
榎 裕太	物質・材料研究機構	博士研究員	H28.4～H29.3
鈴木 恒明	東北大学工学研究科	博士研究員	H24.12～H27.3
梅津 信之	東北大学工学研究科	博士研究員	H27.4～H28.3
兵頭 一茂	東北大学工学研究科	博士研究員	H28.4～H29.3
片岡 千明	東北大学工学研究科	時間雇用職員	H28.4～H29.3

研究項目

- ・電子状態の第一原理計算による界面磁性の研究

③「嶋」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
嶋 敏之	東北学院大学	教授	H23.10～H29.3
土井正晶	東北学院大学	教授	H23.10～H29.3
岩間弘樹	東北学院大学工総研	M2～博士研究員	H24.4～H29.3
黒須李沙	東北学院大学工学研究科	D2	H28.4～H29.3
菅原彩	東北学院大学工学研究科	M2	H28.4～H29.3
熊谷直也	東北学院大学工学研究科	M2	H28.4～H29.3
中川綾介	東北学院大学工学研究科	M1～2	H26.4～H28.3
古内貴大	東北学院大学工学研究科	M1～2	H26.4～H28.3
二階堂友東	東北学院大学工学研究科	M1～2	H25.4～H27.3
出崎 晶	東北学院大学工学研究科	M1～2	H25.4～H27.3
石岡 創	東北学院大学工総研	客員研究員	H23.10～H24.3
佐藤浩太郎	東北学院大学工総研	客員研究員	H23.10～H24.3
鈴木 翔太	東北学院大学工学研究科	M1～2	H23.11～H25.3
畑山 優貴	東北学院大学工学研究科	M1～2	H23.11～H25.3
阿部 博生	東北学院大学工総研	客員研究員	H24.4～H25.3

研究項目

- ・薄膜による保磁力メカニズム解明とナノコンポジットのモデル実験

④「村上」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
村上 恭和	九州大学大学院工学研究院	教授	H25.7～H29.3
進藤 大輔	東北大学多元物質科学研究所	教授	H25.7～H29.3
赤瀬 善太郎	東北大学多元物質科学研究所	講師	H25.7～H29.3
原田 研	理化学研究所	上級研究員	H28.4～H29.3
新津 甲大	理化学研究所	特別研究員	H26.4～H29.3
佐藤 敦子	WDB 株式会社	派遣社員	H28.1～H29.3
Cho Youngji	九州大学大学院工学研究院	学術研究員	H28.9～H29.3
澤田 龍之介	九州大学大学院工学府	M1	H28.4～H29.3
明石 哲也	日立製作所	主任研究員	H27.4～H29.3
谷垣 俊明	日立製作所	主任研究員	H27.4～H29.3
金子 修平	東北大学大学院工学研究科	M2	H27.4～H28.3
木下 晃一	東北大学大学院工学研究科	M2	H26.4～H27.3
朴 賢洵	理化学研究所	上級研究員	H25.7～H26.3
谷垣 俊明	理化学研究所	研究員	H25.7～H26.3
竹野 雄夢	東北大学大学院工学研究科	M2	H27.7～H26.3

研究項目

- ・電子線ホログラフィによるナノ領域の磁束解析

⑤「Schrefl」グループ
研究参加者

Name	Affiliation	Title	Participation period
Thomas Schrefl	Danube University Krems	Professor	2014.8-2017.3
Markus Gusenbuaer	Danube University Krems	Post-Doc	2014.8-2015.3
Alexander Kovacs	Danube University Krems	Student	2016.4-2017.3
Johann Fischbacher	Danube University Krems	Student	2015.4-2016.1 2016.4-2017.3
Harald Oezelt	Danube University Krems	Student	2015.6-2016.3

研究項目

- Nd-Fe-B 磁石のマイクロマグネティックシミュレーションの大規模化

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

本研究チームのメンバーは、文部科学省の元素戦略プロジェクト<拠点形成型>元素戦略磁性材料研究拠点 (ESICMM) にも参画し、CREST 研究による基礎研究ならびにイノベーションの成果を ESICMM におけるより多面的な解析・熱力学計算・理論計算の対象として問題を移転した。また ESICMM で取り組まれた新規磁石のマルチスケール解析を、本 CREST プロジェクトで分担した。産業会ともトヨタ、大同特殊鋼、TDK と直接の共同研究をおこなった他、信越化学とも学術成果の共用を行った。また学振産学協力委員会アモルファス・ナノ材料第 147 委員会第2分科会の委員会活動を通じて、国内の磁石関連メーカーとの連携を深めた。ESICMM と連携しつつ、国際ワークショップを NIMS で開催、金属学会春期大会でのシンポジウム開催など、国内外の学術ネットワークの構築を行った。Danube University of Krems との CREST プロジェクトでの国際共同研究はとりわけ、世界の磁石研究ネットワーク構築に有用であった。

§ 3 研究実施内容及び成果

3.1 微細構造解析及びモデル実験による保磁力発現機構の解明 (宝野グループ)

3.1.1 微細構造と保磁力

焼結磁石、熱間加工磁石、HDDR 磁石の微細構造を FIB/SEM、収差補正 STEM、及び 3DAP により詳細に解析し、元素分布、結晶構造・方位を、ミクロスケールから原子レベルのマルチスケールで解析した。その結果、結晶粒径、粒界組成、結晶配向と保磁力の因果関係について重要な知見が得られた。特に従来非磁性と信じられていた粒界相が強磁性であることを示した結果は学術上のみならず、今後の高保磁力磁石開発の指針を与える重要な成果となった。また焼結磁石でも熱間加工磁石でも、粒界相中の Nd 組成と保磁力に強い相関があることを明らかにした。本研究を通して、共晶拡散処理を施した熱間加工磁石の粒界相の結晶構造ならびに組成に母相の結晶方位による異方性があることが分かったが、この現象が Nd-Fe-B 磁石の一般的な現象であるかどうかを検証するため、

標準的な Nd-Fe-B 焼結磁石の粒界相の構造および組成について、収差補正電子顕微鏡を用いた詳細な解析を再度実施した結果、これまで非晶質相で、~30at.%の Nd を含むと考えられていた Nd リッチ粒界相は、Nd₂Fe₁₄B 結晶面の角度により、様々な構造・組成を持つことを見出した。Fig.3-1 に示すように、Nd₂Fe₁₄B 相の(001)面が露出した表面には、従来報告されてきた粒界相の Nd 濃度よりもはるかに高い約 60at.%程度の Nd を含み、結晶質の粒界相が形成され、Nd₂Fe₁₄B 相の(001)面が露出していない表面には、従来報告されているような非晶質で Nd 濃度が 30at.%程度の粒界相が形成されていた。このような結晶面による粒界相の異方性は焼結磁石研究 34 年の歴史で全く見逃されたい現象であり、今後の高保磁力磁石開発に重要な指針を与えると期待される。

これらの解析結果ならびに後述するマイクロマグネティクスシミュレーションから、Nd-Fe-B 磁石で高保磁力をえるためには、Nd₂Fe₁₄B 結晶粒界に非磁性相を形成させ、粒子間の交換結合を分断することが重要であるという知見を得た。これを実証するために、超微結晶を持つ熱間加工磁石に

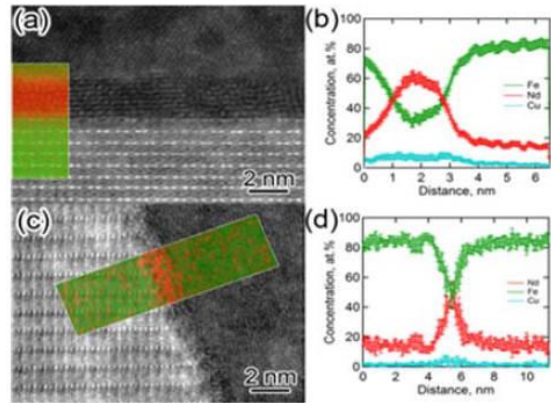


Fig. 3-1-1 Nd-Fe-B 焼結中に観察される Nd リッチ粒界相の HAADF-STEM 像、EDS 元素マップ、および粒界相近傍の濃度プロファイル。(a), (b)は Nd₂Fe₁₄B 相の(001)面上に形成される粒界相のもので、(c), (d)は(a) Nd₂Fe₁₄B 相の a-b 面上に形成される粒界相より得られたもの。

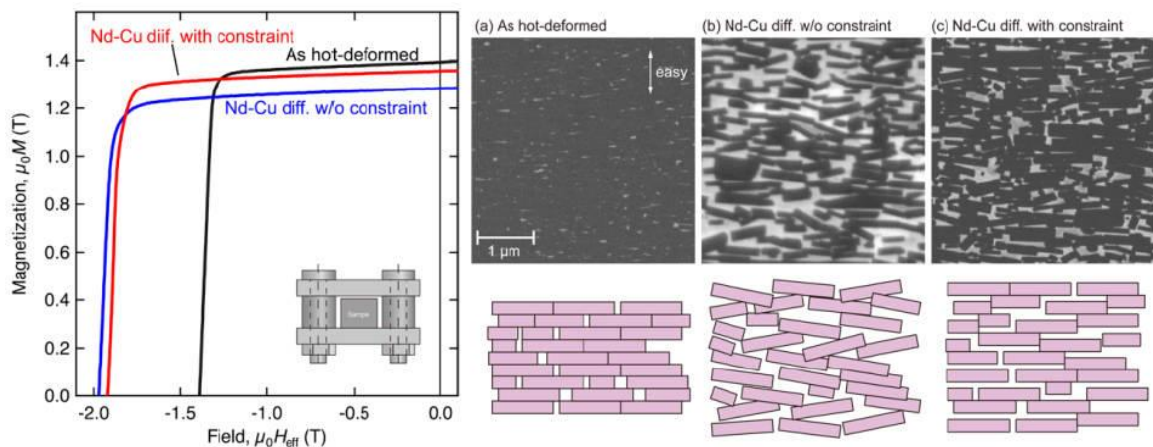


Fig. 3-1-2 Nd-Cu 共晶合金拡散処理前後の減磁曲線と拡散処理前後の熱間加工磁石の微細組織の比較。暗く観察されているのが Nd₂Fe₁₄B 化合物の結晶で、白く観察されるのが Nd。

低融点の Nd-Cu 合金を浸透させるときの体積膨張を拘束するという方法で、Dy を使わずに、4%Dy 含有焼結磁石と同等以上の磁石特性を得ることに成功した。具体的には、熱間塑性加工法で作製した異方性ネオジム系微結晶バルク磁石に低融点の Nd-Cu 共晶合金の粒界拡散熱処理を施して高保磁力化する際に、体積膨張が主として磁化容易軸配向方向に生ずるという特異な現象に着目し、拡散処理時に膨張を拘束するという比較的単純な方法で、残留磁化の減少を最小限に抑えてジスプロシウムを用いずにネオジム磁石の高保磁力化に成功した。Fig. 3-2 に観察されたように、拡散処理前(a)では非磁性の Nd の比率が少なく、各磁石粒子が直接接触し、磁氣的に結合している。通常の拡散処理後(b)では、粒界層が扁平な磁石粒子に沿って形成され、面に垂直方向にだけ厚さが増加し、大量の非磁性合金が浸透することと磁石粒子の配向に乱れが生じることにより、8.6%も残留磁化が低下する。一方、膨張拘束を行った拡散処理では、浸透する Nd-Cu 相の量が適度に抑制され、磁石粒子の配向も保たれており、残留磁化の低下も 2.6%に抑えることができた(c)。

Fig. 3-3 に、Nd-Cu の拡散処理前後の熱間加工磁石と商用市販の焼結磁石における保磁力および最大エネルギー積の値の温度変化が示されている。Nd-Cu の拡散処理を行った熱間加工磁石の室温での保磁力は、Dy を 4%含むネオジム焼結磁石の 2.2 T よりは少し低い。しかし保磁力の温度依存性は Nd-Cu 拡散処理した磁石の方が 4%Dy を含む焼結磁石よりも小さくなる。保磁力の温度依存性が焼結磁石よりも低くなるのは、熱間加工磁石の結晶粒微結晶化による顕著な効果であり、熱間加工磁石の最大のメリットとなる。最大エネルギー積については、室温の値は通常の拡散処理の磁石では 4%Dy を含む焼結磁石とほぼ同等であるが、膨張拘束を行った拡散処理磁石はさらに高い $(BH)_{max}$ を示す。電気自動車用途で要求される 200°C では、膨張拘束拡散処理磁石の最大エネルギー積は 190 kJ/m³ に達しており、これは 4%、8%Dy 含有焼結磁石よりも高い値である。よって、最大エネルギー積という観点では、膨張拘束共晶拡散処理した熱間加工磁石は Dy 含有焼結磁石よりも優れていると言える。

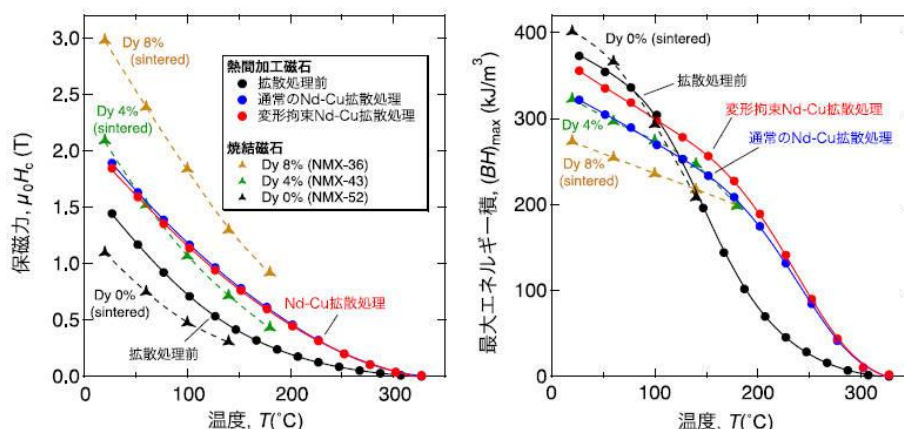


Fig. 3-1-3 熱間加工磁石(熱間加工ままと共晶拡散処理した試料)と市販焼結磁石の、保磁力および最大エネルギー積の温度変化

以上のように、保磁力、最大エネルギー積が向上したものの、Nd-Cu 拡散法では保磁力が上限 2.2 T 程度であり、目標としている 2.5 T には届かない。そこで、熱間加工磁石に対して低温共晶合金 (Nd₉₀Al₁₀、Nd₆₂Dy₂₀Al₁₈、Nd₆₀Dy₁₀Cu₃₀) を用いた拡散処理を行い、保磁力の変化と微細構造について解析を行った。Fig. 3-4 は拡散処理前後の磁化曲線で、拡散処理前の保磁力 1.1 T から、2.7 T (Nd₉₀Al₁₀)、2.8 T (Nd₆₂Dy₂₀Al₁₈)、2.5 T (Nd₆₀Dy₁₀Cu₃₀) と大きく向上した。組織解析の結果、Nd₉₀Al₁₀ 及び Nd₆₂Dy₂₀Al₁₈ 拡散試料では、Al

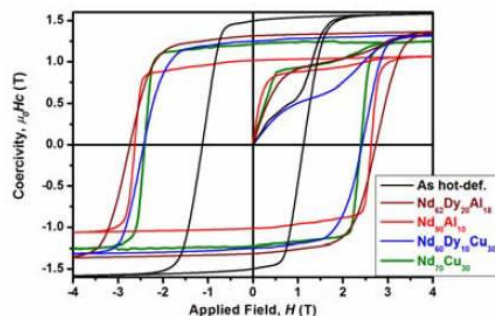


Fig. 3-1-4 低温共晶合金拡散処理前後の磁化曲線

(及び Dy)の主相 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相)への拡散によって、Al(及び Dy)が濃化したシェル組織の形成が確認された (Fig.3-5)。

このような、低温共晶合金により拡散処理された熱間加工磁石のシェル組織では、Dy が比較的高濃度 (通常の焼結磁石の Dy 蒸気拡散法の場合には 3%程度であるのに対して、低温共晶合金拡散処理された熱間加工磁石の場合には 8%程度)で分布していることがアトムプローブ解析によっても確認された。また、拡散処理で使用した Dy 量を見積もったところ、従来の焼結磁石に対する Dy 蒸気拡散法に比べて、低 Dy 量で 2.5T 以上の保磁力が達成できていることが明らかになった。従って、Dy フリー磁石では達成できない保磁力が必要になるような用途では、本手法をさらに最適化することで、Dy 削減が期待できる。

Fig. 3-6 に熱間加工磁石への共晶合金拡散法でえられた磁石の保磁力と残留磁化を示す。比較のために焼結磁石と大量生産されている熱間加工磁石のデータも示している。Nd-Cu 共晶合金で膨張高速拡散処理した熱間加工磁石は 4%Dy を合金化された焼結磁石とほぼ同等の保磁力を持ちながら、残留磁化はそれよりも高い。Nd-Dy-Al 合金で拡散処理した磁石の保磁力は 2.8 T の保磁力を持ちながら、残留磁化は同等の保磁力を有する Dy 含有焼結磁石よりも高い。この図から、共晶合金拡散処理した熱間加工磁石の優位性が読み取れる。

上記の共晶合金浸透処理した試料の微細構造解析過程で、c 面に沿った粒界相は Nd 濃度が高く非磁性であるのに対して、c 面に垂直な粒界相はアモルファス構造で Fe 濃度が強磁性を発現する程度に高いことが判明した。このことから Nd-Fe-B の粒界相には結晶方位依存性があるのではないかと考え、市販の Nd-Fe-B 磁石の結晶粒界相を STEM により原子レベル解析した。その結果、Fig. 3-1 に示されるように c 面に沿った粒界相と c 面に垂直な粒界相で組成、構造に異方性があることが初めて確認された。これは過去 34 年間の Nd-Fe-B 焼結磁石研究で全く見逃されていた新たな知見である。この結果に基づき、粒界相の結晶方位依存性を考慮したマイクロマグネティックシミュレーションを実施し、さらに高保磁力化を目指すには c 面に垂直方向の粒界相を非磁性化する必要があることを確認した。このような微細構造を実現するためのプロセス、合金組成の知見を得るために、昭和電工が 2015 年に発表した Nd リッチ Ga 添加焼結磁石の熱処理による微細構造の変化を詳細に解析した。この磁石の特徴は結晶粒径が従来の高保磁力焼結磁石よりも大きな $6\ \mu\text{m}$ であるにもかかわらず 1.8 T 程度の大きな保磁力が達成されることであり、この磁石の詳細な微細構造解析から、今後の高保磁力磁石開発の指針が得られる可能性があるとの動機で解析を進めた。通常の焼結磁石では焼結後の最適化熱処理による保磁力向上は 25%程度にすぎないのに、この組成を持つ焼結磁石は、焼結後の熱処理によって保磁力が 1.0 T から 1.9 T まで大きく変化することである。マルチスケール組織解析の結果、Fig. 3-7 に示すように、市販のネオジム焼結磁石の粒界相 (厚さ 1~2nm 程度)に比べて非常に厚い 20 nm 程度の Nd リッチ粒界相の形成が確認された。この粒界相は Nd 濃度が 80at.%と極めて高い非磁性相と、Fe が 60%と比較的高濃度であるものの非磁性化合物である $\text{Nd}_6\text{Fe}_{12}\text{Ga}_1$ 相から構成されていることが明らかになり、粒子間の交換結合の分断によって、高

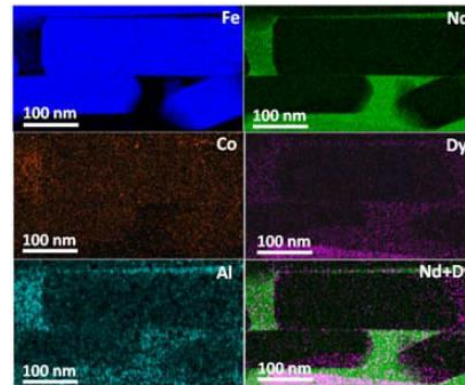


Fig. 3-1-5 Nd-Dy-Al 拡散処理磁石の STEM-EDS 元素マップ

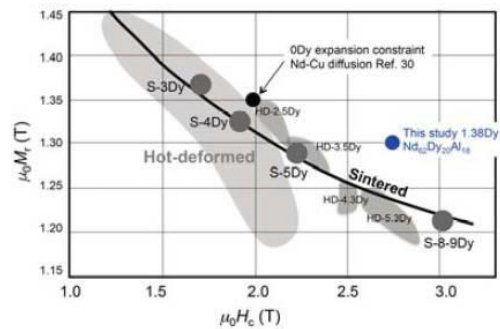


Fig. 3-1-6 Nd-Cu 共晶合金を用いて膨張拘束拡散処理を施した熱間加工磁石と $\text{Nd}_{62}\text{Dy}_{20}\text{Al}_{18}$ 共晶合金を用いて拡散処理した熱間加工磁石と Dy 含有焼結磁石、熱間加工磁石との特性比較。

保磁力が得られることが実証された。一方で、 $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Ga}$ 相が保磁力におよぼす影響について理解するために、熱処理温度、保磁力と粒界 3 重点に存在する各種 Nd リッチ相の面積率の関係を解析したところ、0.5at.% の Ga を添加した試料では、保磁力と $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Ga}$ 相の面積率の増減の傾向は一致しているが、1.0at.% の Ga を添加した試料では保磁力の熱処理温度依存性と $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Ga}$ 相の面積率の熱処理温度依存性は一致しないことがわかった。このことは、 $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Ga}$ 相が保磁力の向上に影響を及ぼす特別な相ではないことを示唆している。

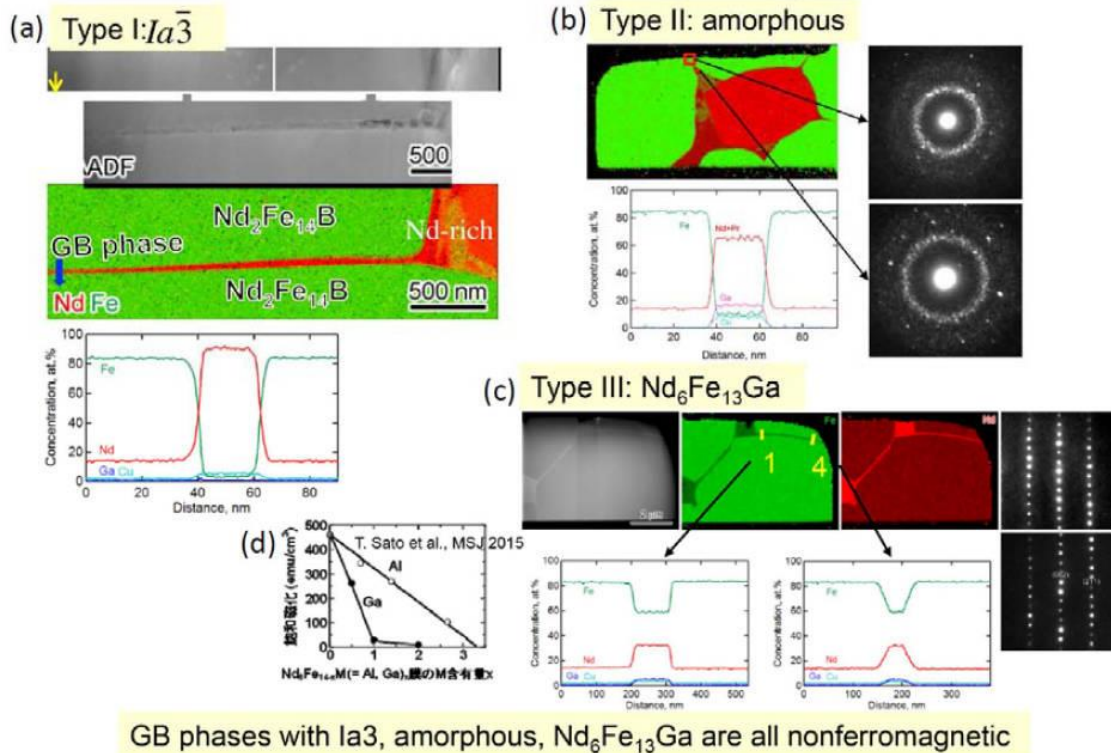


Fig. 3-1-7 Nd リッチ Ga 添加焼結磁石の最適化熱処理状態で観察される 3 種(a,b,c)の粒界相と、 $\text{Nd}_6\text{Fe}_{14-x}\text{Ga}_x$ 相の Ga 組成による磁化の変化(d)。

3.1.2 モデル磁石

粒界相が保磁力に及ぼす影響を調査するために、FIB 法により切り出したマイクロバイクリスタルの磁化測定を行い、2結晶の磁気結合を評価するモデル実験を試みてきたが、試料表面のダメージ相の形成により試料が軟磁性化してしまうことが明らかになったので、焼結磁石から一つの完全な結晶粒を含む試料を微細加工により切り出し、完全に Nd リッチ粒界相に囲まれた粒子と表面を持つ粒子の磁化曲線の測定を行ったが、保磁力は、僅か 0.15T に留まることが明らかになった (Fig. 3-8)。この試料の場合には、表面に接している結晶粒は軟磁性化していると考えられ、これらの反転によって、中心部分に存在するダメージを受けていない結晶粒の磁化が容易に反転しているものと考えられる。

そこで、孤立した Nd-Fe-B 磁粉に対して Nd₇₀Cu₃₀ による表面処理 (600°C×30 分) 前後の磁気測定と組織解析を行った。表面処理前は保磁力がほぼ 0T であったのに対して、処理後は約 1 T と大きな増加が得られた (Fig. 3-9 (a))。Fig. 3-9 (b) に示す組織解析の結果から、磁粉の表面は Nd-Cu の共晶組織で覆われていることが確認された。従って、このモデル実験においても、粒界相にあるような Nd-Cu 相が保磁力向上に重要な役割を果たしていることが明らかになった。

3.1.3 マイクロマグネティクス計算による磁化反転シミュレーション

保磁力の結晶粒径の依存性や、結晶粒界相の磁気特性の影響について理解するために、有要素法をベースとしたマイクロマグネティクス計算を行い、実験結果との比較から、保磁力向上には、粒界相による磁壁ピンング効果が大きく影響していることが明らかになってきた。また長年にわ

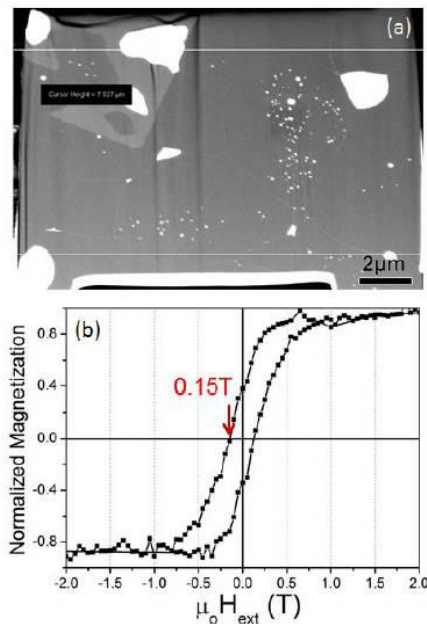
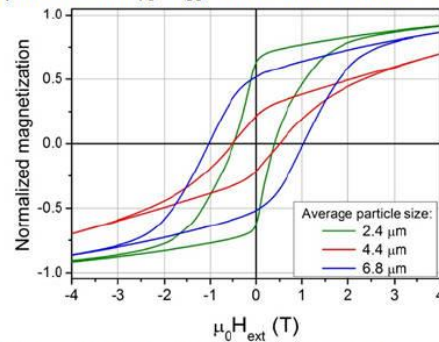


Fig. 3-1-8 FIB 加工で作製したダメージフリー結晶粒を含む試料(a)とその磁化曲線(b)

(a) powders+Nd₇₀Cu₃₀, annealed at 600°C-30min



(b) Microstructure of 6μm sized coated particles

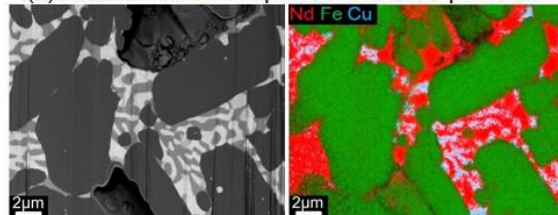


Fig. 3-1-9 Nd₇₀Cu₃₀ による表面処理後の磁化曲線(a)と微細組織(b)

たり焼結磁石の保磁力が結晶粒径微細化により増大することは現象としては知られていたが、その物理的説明が欠如していた。我々は結晶粒径を微細化することにより磁化反転した粒子が隣接する粒子に及ぼす漏洩磁界をマイクロマグネティクスシミュレーションで計算し、この漏洩磁界に反転

粒のサイズ依存性があることを明確にした(Fig. 3-10)。これに基づき、保磁力の結晶粒径依存性を反転粒からの漏洩磁界で説明した。

また、低温共晶合金により拡散処理された熱間加工磁石の微細構造解析の結果から明らかになったシェル組織が、保磁力に与える影響を理解するために、主相、シェル相、粒界相を考慮した板状粒の多結晶モデルを作成(Fig. 3-11)し、マイクロマグネティック計算を実施した。シェル部には、Dy 拡散を考慮して主相よりも大きな異方性磁場を仮定した。計算で得られた減磁曲線を Fig. 3-12 に示す。この結果より、シェル組織の形成は保磁力向上に寄与することがわかった。更に、粒界相を非磁性化すると、保磁力に大きく向上することが示唆された。

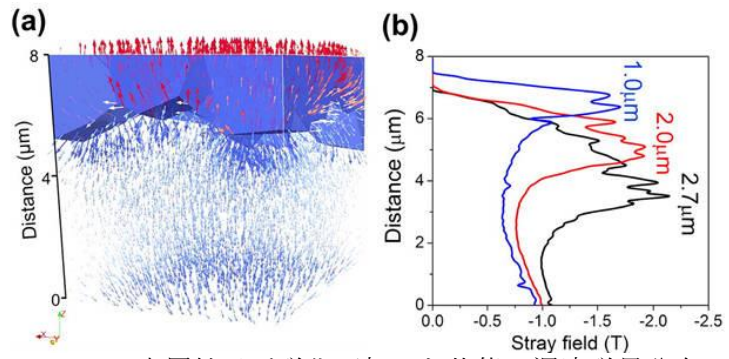


Fig. 3-1-10 表層粒子が磁化反転した状態の漏洩磁界分布(a)と、粒径による最大漏洩磁界の変化(b)

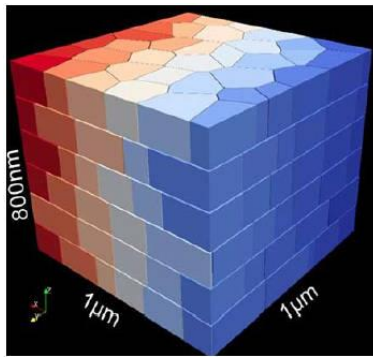


Fig. 3-1-11 熱間加工拡散磁石を想定したマイクロマグネティクス計算用モデル

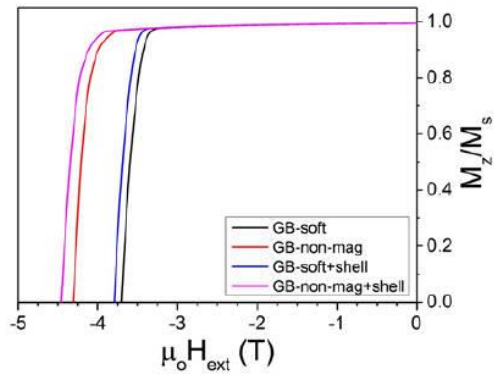


Fig. 3-1-12 マイクロマグネティクス計算用で得られた減磁曲線

一方、Nd-Fe-B 焼結磁石の Dy による粒界拡散法で到達できる上限の保磁力は 2 T 程度で、3 T 以上の保磁力を得るためには、拡散前の磁石にあらかじめ Dy を合金化させる必要があることが知られている。Dy を粒界拡散した磁石の組織は Dy 濃度が 0%あるいは希薄なコアの部分と、Dy 濃度が高いシェル領域で構成されており、この組織と磁気特性の直接的な関係を理解するために、コア-シェル組織を有する多結晶モデルを作成し(Fig. 3-13(a))、シェル中の Dy 濃度、シェルの

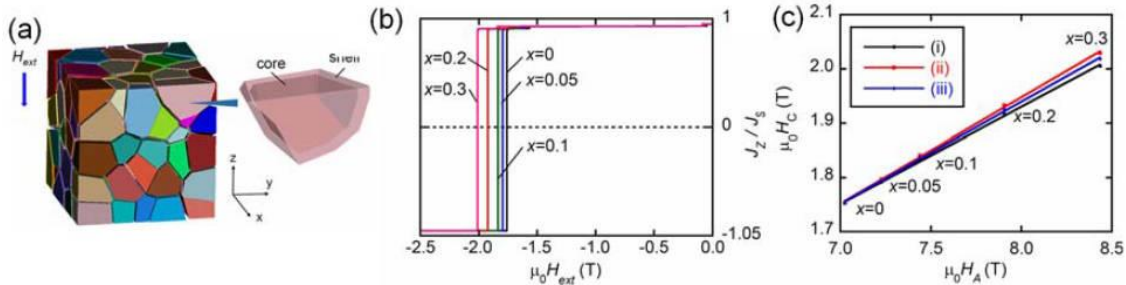


Fig. 3-1-13 コア-シェル組織を有する多結晶モデル(a)、 $(\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x)_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相の組成による減磁曲線の変化(b)、 $(\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x)_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相の組成から計算された異方性磁界と保磁力の関係(b)

厚さと保磁力の関係を評価した(Fig. 3-13(b))。Dy 濃度の増加に伴い期待通りに保磁力の増加が確認され、 $(\text{Nd}_{1-x}\text{Dy}_x)_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相の組成から計算された異方性磁界と保磁力の関係をプロットすると、明瞭な線形関係を有していることが確認できた。ここで興味深いことは、コア部の Dy 濃度に対する保磁力の依存性は非常に僅かで、Dy 拡散磁石の保磁力は、シェル部分の Dy 濃度でほぼ決まっていることである(Fig. 3-13(c))。すなわち、Dy 使用量を削減しつつ高保磁力を達成するには、数 10nm 幅のシェル組織を形成し、その領域の Dy 濃度を可能な限り増やすことが重要であり、それには拡散源として低温の融点を有する重希土類共晶合金を使用することや、低温拡散プロセス等の検討が必要であると考えられる。

3. 2 電子状態の第一原理計算による界面磁性の研究(佐久間グループ)

3.2.1 Nd-Fe-B 結晶粒の歪が磁気異方性エネルギーに与える影響 (T. Suzuki, Y. Toga, and A. Sakuma, J. Appl. Phys., **115**, 17A703, 2014)

これまで我々は、Nd-Fe-B の結晶場パラメータ A_2^0 の第一原理計算から、Nd-Fe-B の(001)表面に露出した Nd 原子の異方性定数 K_u は負になることを見出し、さらにマイクロマグネティクスシミュレーションからこの表面一原子層の負の K_u が結晶粒の保磁力を半減させるだけの効果を持つことを示してきた。そこでここでは、真空表面以外に Nd-Fe-B 結晶粒の $K_u \propto A_2^0$ を負にする因子がどのようなものかを第一原理による電子状態計算から調べた。具体的には、(1)a 軸の圧縮、(2)Nd イオン位置の変位、そして(3)(001)表面での酸素など異種原子との結合、が結晶場パラメータ A_2^0 にどのような影響を与えるかを評価した。結晶場パラメータ A_2^0 は磁気異方性定数 K_1 に近似的に比例するため、 A_2^0 の変化は K_1 の挙動を反映するものとみなすことができる。

一例として Fig. 3-2-1 に、a 軸の圧縮率に対する A_2^0 の変化を示す。 a_0 は平衡状態での a 軸長であり、図中の(f),(g)はそれぞれ f サイト、g サイト位置の Nd イオンを意味する。 $a/a_0=1$ において両サイトの Nd イオンの A_2^0 は正の値を示し、 $A_2^0 \sim 200 \sim 400$ (K/a_0^2) は先行研究や実験結果から見積もられた値と定量的にほぼ一致している。a 軸が縮むとともに A_2^0 は単調に減少し、 $a/a_0 \sim 0.9$ 即ち 10% 程度の a 軸長の圧縮で A_2^0 は負に転じることがわかる。 $a/a_0 \sim 0.85$ では(001)表面第一層の Nd イオンの A_2^0 と同程度の負の値となる。a 軸長の圧縮で A_2^0 が減少する理由は、圧縮により Nd イオンの 5d 軌道が同じ c 面内にある B の価電子軌道との混成が強くなり、4f 電子を取り囲む電子雲が c 面内に広がったためと解釈される。ここで、 A_2^0 の符号が変化する $a/a_0 \sim 0.9$ 近傍での ($a/a_0=1$ からの) 電子系のエネルギー変化は、単位胞あたり +10 eV 程度と著しく大きい値である。このエネルギー増分から考えて、10% という歪はバルクで起こり得るものではない。実際、本プロジェクトの村上らによる電子線ホログラフィーの測定では、粒界近傍の歪量は 1% 程度であることが確認されている。従って、粒界近傍での歪が K_u に顕著な影響を与える可能性は低いと考えられる。

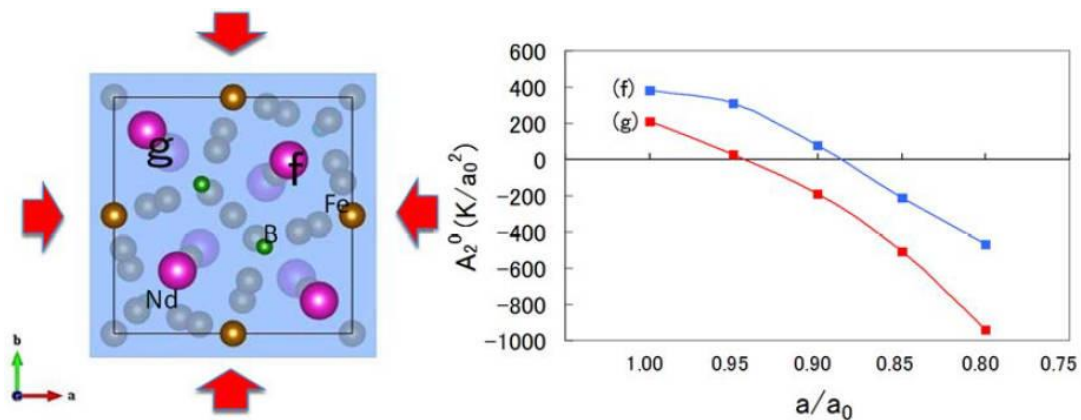


Fig. 3-2-1 a 軸長の圧縮による結晶場パラメータ A_2^0 の変化。 a_0 は平衡状態での a 軸長であり、図中の(f),(g)はそれぞれ f サイト、g サイト位置の Nd イオンを意味する。

3.2.2 粒界相内の各原子が結晶粒表面の Nd イオンに及ぼす影響 (Y. Toga, T. Suzuki, and A. Sakuma, J. Appl. Phys., **117**, 223905, 2015)

3.2.1 に続き、結晶粒表面にいる Nd イオンの結晶場パラメータ A_2^0 が粒界層の原子との相対位置によってどのような影響を受けるかについて調べた。ここでは粒界層内の原子として酸素 O と銅 Cu を取り上げて、それぞれ Nd の結晶場に与える影響を電子状態の第一原理計算から評価した。

Fig. 3-2-2 は、Nd-Fe-B 結晶粒の(001)表面に O 原子を近づけた場合の Nd イオンの結晶場

パラメータ A_2^0 の変化を (001) 表面と O 原子の距離 r に対してプロット (黒点) したものである。図には、各距離における表面近傍の電荷分布も示してある。O 原子が表面から十分に離れている場合 ($r > 3.5 \text{ \AA}$)、Nd イオンの価電子雲は c 面内に広がることを反映して $A_2^0 < 0$ という結果になっている。これは、以前我々が示したように、Nd-Fe-B の(001)表面に露出した Nd 原子の異方性定数 K_u が負になることと矛盾のない結果である。 $2.0 \text{ \AA} < r < 3.5 \text{ \AA}$ では、Nd の価電子雲は O の価電子雲との混成で c 軸方向に伸びるので A_2^0 が正となる。しかし、 r が 2 \AA 以下になると、O の価電子雲 (負電荷) より原子核 (正電荷) の影響が優ってきて Nd の 4f 電子雲を引き付けるため、再び A_2^0 が負に転じることになる。図には全エネルギー (赤点) の r 依存性も示してある。 $r \sim 2.0 \text{ \AA}$ が最安定距離であることから、実際の系において O 原子は A_2^0 の正負を左右する臨界領域に位置する可能性がある。

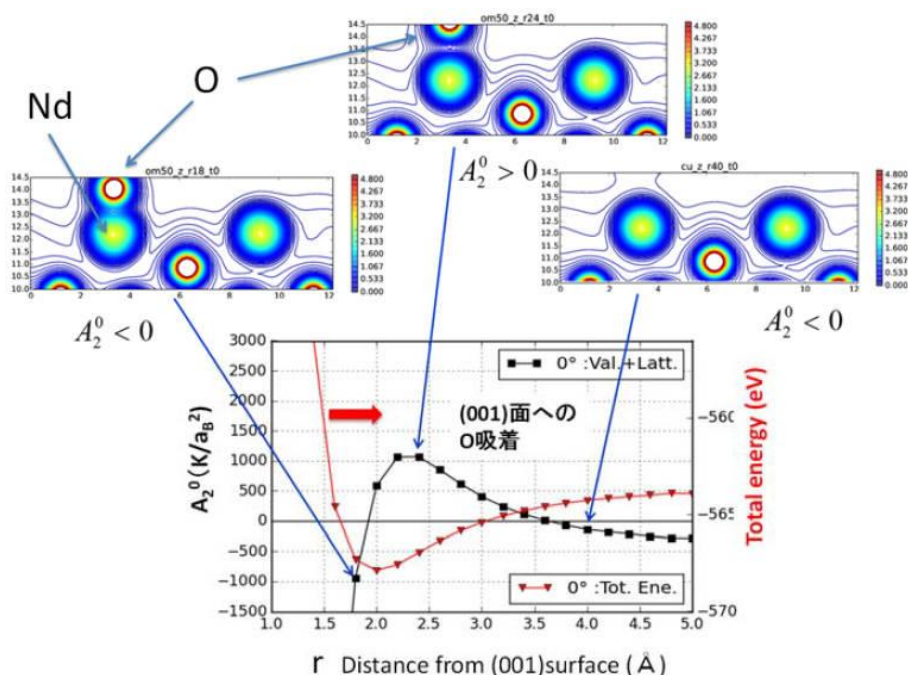


Fig. 3-2-2 Nd-Fe-B 結晶粒の(001)表面に O 原子を近づけた場合の Nd イオンの結晶場パラメータ A_2^0

3.2.3 Nd-Feアモルファス粒界相の磁性 (A. Sakuma, T. Suzuki, T. Furuuchi, T. Shima, and K. Hono, Applied Physics Express, 9, 13002, 2015)

本プロジェクト推進の過程で、NIMSのグループにより二粒子粒界にNd-Feアモルファス相の存在が確認され、その磁性の解明が急務となった。そこで我々は第一原理計算からNd-Feアモルファス相の電子状態と磁性の評価を行った。現時点で、実際のアモルファス構造に関する情報はないので、ここでは短距離的にはアモルファス構造に近いfcc構造を仮定して計算を行った。

Fig. 3-2-3は、一つのFeモーメントに働く交換相互作用の総和 J_0 をNd濃度に対してプロットしたものである。Feのみの構造では反強磁性 ($J_0 < 0$) であるが、わずか10%程度のNd置換で強磁性側 ($J_0 > 0$) に転じ、Nd濃度70%までの領域でFe-Nd系は強磁性を示すことがわかる。特に、NIMSグループによって報告されているNdが約30%の組成領域においては高い J_0 を示し、この値から分子場近似を用いて評価されるキュリー温度は室温を超える (約450K) ことが期待される。従って、この組成領域のFe-Ndアモルファス相が粒界にある場合、これを挟む主相は磁氣的に結合することで保磁力低下の要因になる可能性があることが分かった。また、本結果から得られるFe₇₀Nd₃₀付近での磁化は、嶋グループや村上

グループの測定結果と同程度であることが確認できた。

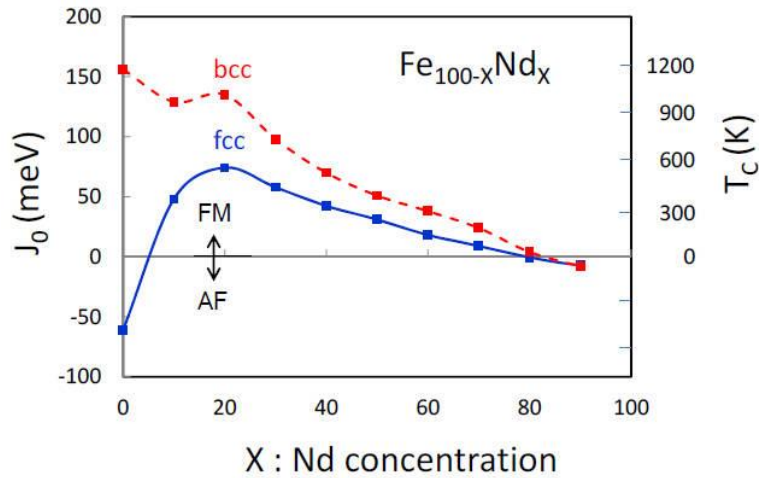


Fig. 3-2-3 $\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}$ (fcc構造)不規則合金においてFeモーメントに働く交換相互作用の総和 J_0 のNd濃度依存性。比較のためbcc構造における結果も示した。

3.2.4 $\text{Nd}_6(\text{Fe,Ga})_{13}$ の磁性に関する第一原理計算

3.2.3で述べたように、Nd-Fe アモルファス粒界相は強磁性であることが、実験・理論の両面から明らかになった。これは、保磁力にとってネガティブな効果をもたらすと考えられるが、Ga 原子をNd-Fe-B に添加して焼結すると保磁力が増大することが報告されている。これは、粒界に $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Ga}$ なる正方晶の規則構造が形成されるためと考えられているが、その磁性についての詳細な検討はなされていない。そこで我々は、Nd-Fe アモルファス相に次いで $\text{Nd}_6(\text{Fe,Ga})_{13}$ の磁性に関する第一原理計算を行った。

Fig. 3-2-4 に $\text{Nd}_6(\text{Fe,Ga})_{14}$ の結晶構造 (左) と計算で仮定した磁気構造 (右) を示す。右上の二つは $\text{Nd}_6\text{Fe}_{14}$ の磁気構造であり、それぞれ強磁性 (FM) 状態と反強磁性 (AF1) を仮定した。最下段は $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Ga}$ の磁気構造であり、Ga 原子 (緑) 層を挟んで両サイドの Nd-Fe クラスターの磁気モーメントが反平行配列した反強磁性構造 (AF2) を仮定している。Fig. 3-2-5 は、 $\text{Nd}_6\text{Fe}_{14}$ (左) と $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Ga}$ (右) の各磁気構造における電子系の全エネルギーである。横軸は c 軸長であり、いずれの場合もエネルギーが最少となる c 軸長は実験結果と同程度である。 $\text{Nd}_6\text{Fe}_{14}$ (左) の場合、磁気構造は FM と AF1 で拮抗しており、磁気的には不安定であると考えられる。一方、Fe を僅かに Ga で置換した $\text{Nd}_6\text{Fe}_{13}\text{Ga}$ (右) では、AF2 構

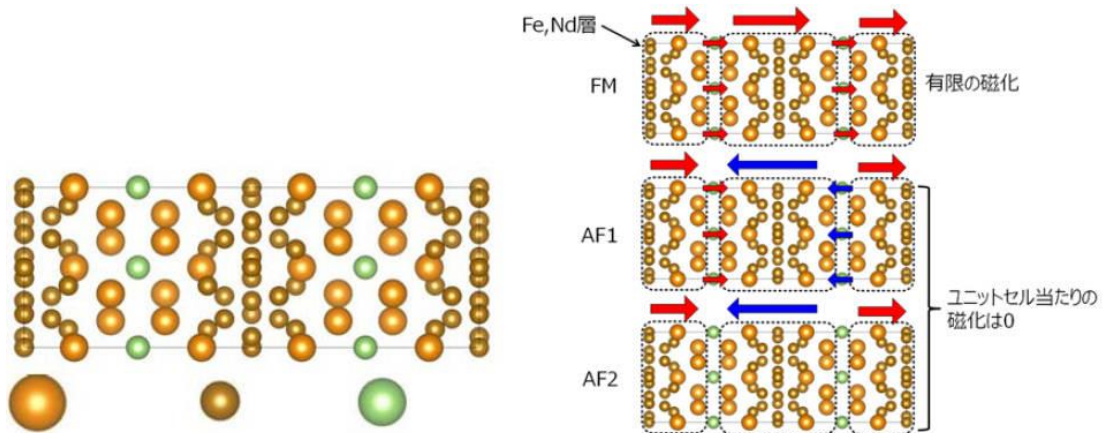


Fig. 3-2-4 $\text{Nd}_6(\text{Fe,Ga})_{14}$ の結晶構造 (左) と計算で仮定した磁気構造 (右)。大きい球は Nd, 小さい球は Fe, そして緑は Ga 原子を表す。

造が一気に安定化することがわかる。ちなみに、3.2.3で述べたNd-Feアモルファス構造の一部をGaで置換しNd₆Fe₁₃Gaと同じ組成にした系では強磁性状態が安定である結果を得ている。

これらの結果から、Gaを添加したFe-Nd粒界相Nd₆Fe₁₃Gaは正方晶に規則化することにより安定した反強磁性状態となり、このことが保磁力の増大に参与している可能性があると考えられる。また、詳細な検討の結果、Nd₆Fe₁₃GaのAF構造は、Nd₆Fe₁₄において磁気的に不安定なFe層が、非磁性であるGa層で置換されることにより安定化することが示された。

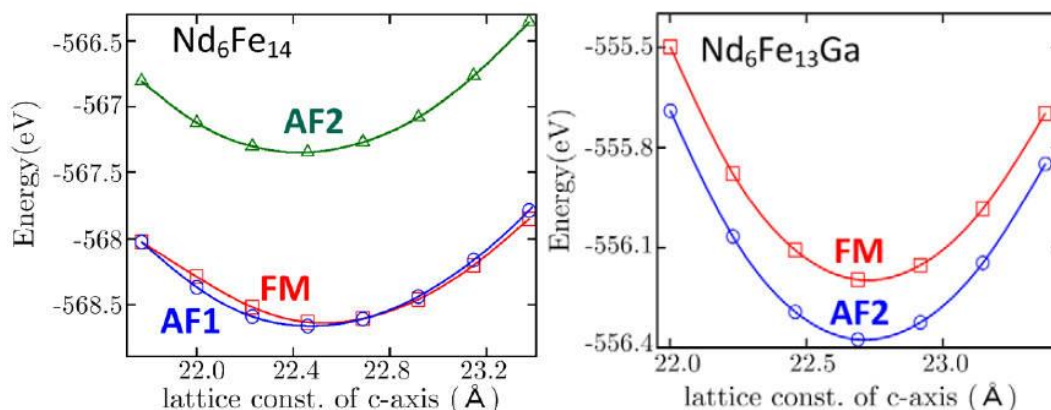


Fig. 3-2-5 Nd₆Fe₁₄ (左) と Nd₆Fe₁₃Ga (右) の各磁気構造における全エネルギー。横軸はc軸長。

3.3 薄膜による保磁力メカニズム解明とナノコンポジットのモデル実験(嶋グループ)

3.3.1 Nd-Fe-B/(Nd-Cu) 薄膜における拡散熱処理後の磁気特性の変化

これまでに Nd₂Fe₁₄B 相の c 軸が膜面垂直方向に配向した柱状構造を示す Nd-Fe-B 薄膜の作製条件の探索を行い、結晶化温度以下の基板温度において成膜後に追加熱を行うことにより配向性に優れた薄膜試料の作製に成功した。磁石性能を向上させるためには最適な熱処理が必要不可欠となっているが、その鍵を担っているのが共晶反応による粒界相の液相化である。そこで本研究では、キャップ層として付与した非磁性層の拡散効果の詳細に調べるために、Cu 層、Nd/Cu 層および Nd-Cu 層を付与した Nd-Fe-B/(Cu, Nd/Cu, Nd-Cu) 薄膜について拡散熱処理後の磁気特性の変化を詳細に調べた。Fig. 3-3-1 に各キャップ層の膜厚による Nd-Fe-B 薄膜の保磁力 H_c の変化を示す。Nd-Cu 層の組成は Nd₇₀Cu₃₀ (at.%) と Nd-Cu2 元合金の共晶点近傍の組成を選択した。Nd-Fe-B 層厚は 100 nm、キャップ層の膜厚は ~25nm と変化させた。Cu 層の場合には層厚の増加により保磁力は減少するが、Nd/Cu2 層膜の場合には Nd 層厚の増加により 5nm の膜厚において 20kOe 以上の保磁力が得られた。

また、Nd-Cu 合金層の場合には膜厚が 1nm から 3nm へ増加した場合に 17~18kOe と保

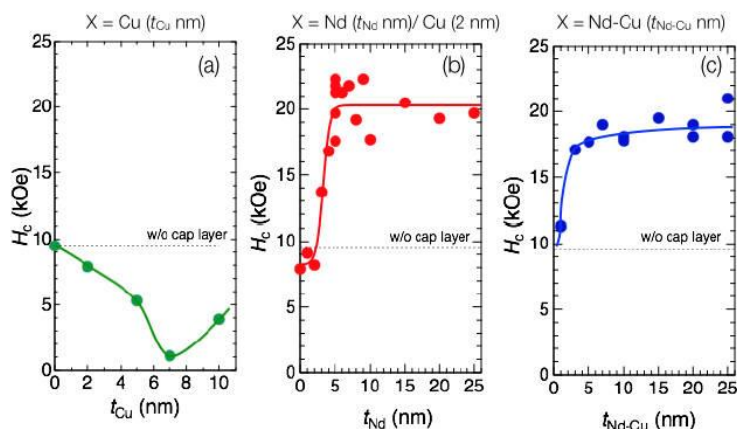


Fig. 3-3-1 Cu, Nd/Cu, Nd-Cu キャップ層を成膜後に熱処理を行った Nd-Fe-B 薄膜の保磁力の変化。Nd-Fe-B 薄膜の膜厚は 100nm とした。

磁力の増加が確認されるが、その後保磁力の大きな変化は見られなかった。Nd-Cu 合金層と Nd/Cu 多層を Nd-Fe-B 薄膜上に成膜し拡散熱処理した場合に、共晶組成付近において保磁力は増加するが、その挙動は異なることが明らかになった。このように Nd₂Fe₁₄B 粒子の界面に接する層の状態により保磁力増加のメカニズムが異なることから、引き続き今後も単磁区粒子径焼結磁石を模した多結晶配向膜を超高真空スパッタ装置により作製し、それらの粒間結合を希土類元素および非磁性元素等の添加元素を拡散させることにより、粒間結合による保磁力変化の実験を行う予定である。

3.3.2 Nd-Fe-B/ Nd-Cu/ Al 薄膜の拡散熱処理による高保磁力化

試料は超高真空多元スパッタ装置を用いて、基板温度 500°C において Nd-Fe-B ($t_{\text{Nd-Fe-B}}$ nm)/ Nd-Cu (0.75 nm) を成膜し、ポストアニールとして $T_a = 550^\circ\text{C}$ において 60 分間熱処理を行った。結晶構造は XRD、磁気特性は SQUID を用いて評価を行った。これらの試料の磁化曲線を Fig.3-3-2 に示す。膜厚増加に従い $t_{\text{Nd-Fe-B}} = 32$ nm までは高い保磁力得られた。これはキャップ層として成膜した Nd-Cu 層が熱処理により拡散し、結晶粒界の状態が最適化され、高い保磁力が発現したものと考えられる。一方で 50 nm 以降の膜厚では保磁力が大幅に減少することが確認され、これは膜厚が増加するに従い磁区構造が単磁区から多磁区構造に近づくためではないかと考えられる。 $t_{\text{Nd-Fe-B}} = 16$ nm において最大の保磁力 29.2 kOe、および良好な角形性が得られた。次に Nd-Fe-B 層厚に対する保磁力、飽和磁化の変化を示したグラフを Fig.3-3-3 に示す。これより $t_{\text{Nd-Fe-B}}$ が減少するに従い、保磁力は増加し、 $t_{\text{Nd-Fe-B}} = 16$ nm において極大値を示すが、さらに膜厚が減少すると保磁力は減少した。これは 16 nm 以下では単磁区粒子が室温においても熱ゆらぎによる影響をうけてしまうため保磁力が減少したためではないかと考えられる。

次に Al 層を含む多層 Nd-Fe-B (16 nm)/ Nd-Cu (0.25 nm)/ Al (t_{Al} nm) 薄膜を作製し評価した。ポストアニールの際の熱処理温度はこれまでの結果より $T_a = 550^\circ\text{C}$ とした。 t_{Al} の値を 0 ~ 0.6 nm まで変化させた場合の X 線回折パターンの結果より、全ての試料において Nd₂Fe₁₄B(004) からのピークが確認された。しかしながら、膜厚に対する顕著なピークの変化は確認されなかった。次にこれらの試料における磁化曲線を Fig. 3-3-4 に示す。これより、Al 層厚を変化させた場合、 $t_{\text{Al}} = 0.3 \sim 1$ nm では比較的良好な角形性および 30 kOe 程度の高い保磁力が得られるが、1.5 nm か

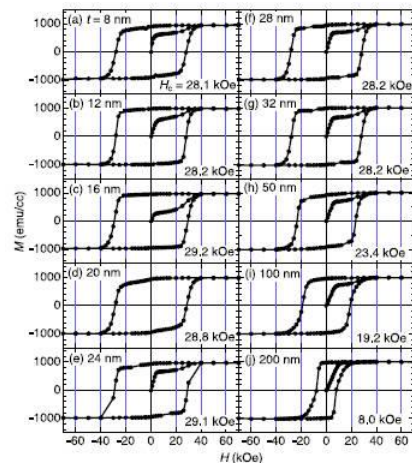


Fig. 3-3-2 Nd-Fe-B ($t_{\text{Nd-Fe-B}}$ nm)/ Nd-Cu (0.75 nm) 薄膜の磁化曲線。

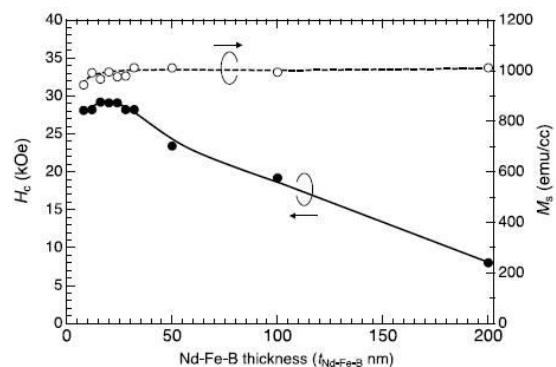


Fig.3-3-3 Nd-Fe-B 層厚に対する保磁力および飽和磁化の変化。

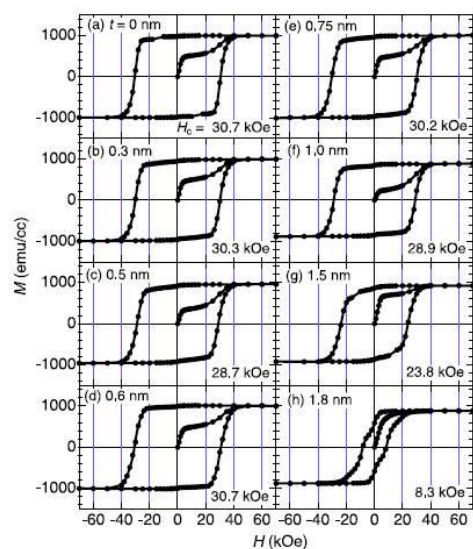


Fig. 3-3-4 Nd-Fe-B (16 nm)/ Nd-Cu (0.75 nm)/ Al (t_{Al} nm) 薄膜の磁化曲線

ら角形性および保磁力値は減少し、1.8 nm では保磁力値は著しく減少した。この結果から Al 層厚が 1.5 nm 以上では Nd-Fe-B 層に拡散する量が多くなり磁気特性が悪化するものと考えられる。今回作製した試料では Al 層を成膜しない場合の試料における保磁力値を超える値は得られなかった。Al 層を成膜した試料では減磁曲線における立ち下りの部分の傾斜が Al 層を成膜しない場合と比較して、よりゆるやかになっていることが確認できる。これは Al 層が Nd-Fe-B 層内部に拡散することで Nd₂Fe₁₄B 相内部に影響を与え、Nd₂Fe₁₄B 相とは異なる磁化反転機構を有する相の形成によるものではないかと考えられる。

3.3.3 Nd-Fe 合金薄膜の作製と磁気特性

次に共同研究者である東北大学の佐久間教授が計算により求めた fcc 構造を有する Fe-Nd 合金の組成による交換相互作用 J_0 および磁気モーメント M_{Fe} の変化について、その理論検証のために組成を変化させた Nd-Fe 薄膜をスパッタ法により作製した。純 Fe (X=0) の試料においては稠密面である bcc (110)からの反射ピークが X 線回折パターンから観察されたが、それ以外の試料においてはピークは見られず、また基板および下地層以外の他のピークも観察されず非晶質状態であることが確認された。Fig. 3-3-5 にこれらの組成を変化させて作製した Nd-Fe 薄膜の磁化曲線を示す。図中赤および黒のデータは各々面内方向および膜面垂直方向に測定したものを示す。Nd 量の増加により磁化の値は減少し、79.2at.%において磁化がほぼ消失することが確認された。この実験により求めた組成による磁化の値の変化を理論計算により得られた変化と比較した結果を Fig. 3-3-6 に示す。通常純 Fe は bcc 構造を示すため、理論計算で算出した fcc とは異なり強磁性を示す。しかしながら磁化の絶対値を規格化して比較すると理論計算から求めた交換相互作用の総和と実験により求めた磁化の値は傾向がほぼ一致していることが明らかになった。今後も保磁力機構を解明するために理論計算と実験結果の比較検討を実施する予定である。また、高保磁力化した Nd₂Fe₁₄B 薄膜に高い磁化を持つ FeCo 相を交換結合させた Nd₂Fe₁₄B/FeCo ナノコンポジット磁石の原理検証

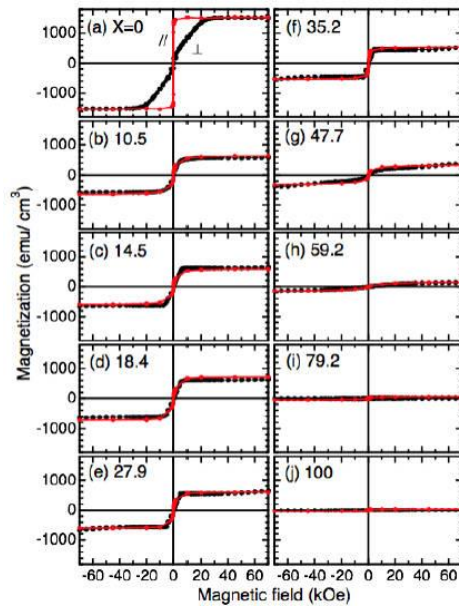


Fig. 3-3-5 Nd_xFe_{100-x} 合金薄膜の組成による磁化曲線の変化。

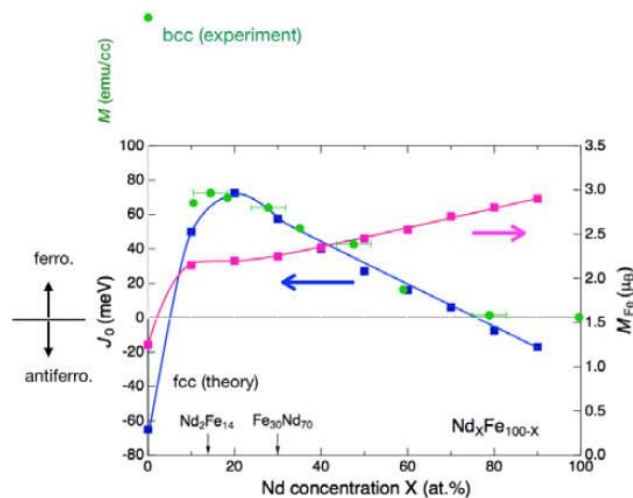


Fig. 3-3-6 計算により求めた fcc 構造を示す Nd-Fe 合金の組成による交換相互作用 J_0 および磁気モーメント M_{Fe} と実験により作製した Nd-Fe 薄膜の磁化の変化。

3. 4 電子線ホログラフィによるナノ領域の磁束解析(村上グループ)

3.4.1 Nd-Fe-B 磁石における粒界相磁束密度の実測

従来は「非磁性」と考えられていた Nd-Fe-B 磁石の粒界相が「強磁性」であるという結果が、モデル薄膜試料を使った宝野グループの系統的实验によって示された。粒界相の磁性は、隣接する Nd₂Fe₁₄B 結晶粒(主相)の磁氣的結合が関与する磁化反転のプロセスに影響を及ぼす、重要な因子である。このような研究動向から、複雑な結晶学的微細構造を示す焼結磁石の粒界相の磁性を実測することが強く求められていた。本研究では電子線ホログラフィを用いてこの課題に取り組んだ。

電子線ホログラフィは、薄片化した試料を透過した電子が被る位相変化を干渉実験(ホログラムの取得と解析)によって決定し、その位相変化の根源である磁束密度を微視的・定量的に決定できる手法である。これまでに超伝導体の磁束量子の観測や磁気記録媒体のパターン解析に応用されてきたが、多くの成果は均一な組成・構造を示す理想的な試料を使った巧妙な実験で導かれてきた。これに対して本研究で扱う焼結磁石は微細構造が複雑なうえに(Fig. 3-4-1)、観測対象の粒界相の厚さが 3 nm 程度と薄いこと、主相からしみ出す漏洩磁場が粒界相本来の磁束密度の解析を阻むことなど、様々な技術的問題を伴う。

これらの問題を解決するために、まず本研究では宝野グループ・佐々木との連携により主相の c 軸方向(磁化容易軸方向が)ほぼ平行な結晶粒を抽出・薄片化し、粒界相への漏洩磁場が 0.01 T オーダーと十分に小さくなる試料片を調製した: Fig. 3-4-1 の結晶粒 A と結晶粒 B がこれに該当する。また研究参考者の理研・谷垣が考案した分離照射という実験技術を永久磁石の解析に導入し、注目する粒界部分(Fig. 3-4-1 の X-Y 線付近)に十分な輝度の電子を入射してホログラムの S/N を高めた。この工夫により十分な電子位相検出精度(<0.1 rad)と、十分な磁束密度の解析精度(~0.1 T)を達成できた。さらに本研究では、試料外の漏洩磁場による参照電子波の位相変調を、試料モデルを使った三次元磁場計算(Fig. 3-4-2)によって再現し、ホログラムを用いた粒界相磁束密度解析の高精度化を多面的に推進した。これらは本 CREST 研究で整備されたオリジナルの解析技術である。

上記の技術を駆使して、3 nm 幅の粒界相に起因する電子の位相変化を求めた。Fig. 3-4-3 は X-Y 線(Fig. 3-4-1)に沿って観測される位相変化で、青い点の実験値、それ以外の点は計算値を表す。後者(計算値)は、粒界相の磁束密度を 0 T から 1.2 T の範囲で仮定した複数の結果を示している。実験データを最もよく再現するのは、粒界相の磁束密度として 1.0 T の値を想定した計算である。この粒界相磁束密度は、主相の磁束密度の 60%に相当する値であ

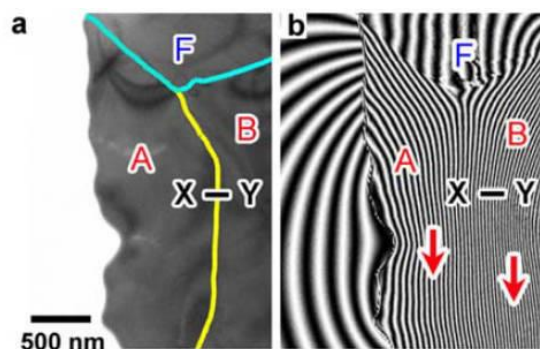


Fig. 3-4-1 (a)薄片化した Nd-Fe-B 磁石と、(b)電子線ホログラフィで決定した磁束線の分布。

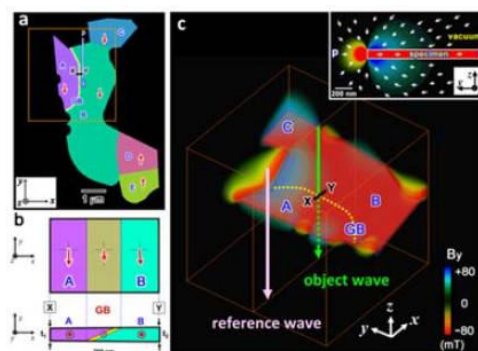


Fig. 3-4-2 三次元磁場計算に用いた試料モデル。

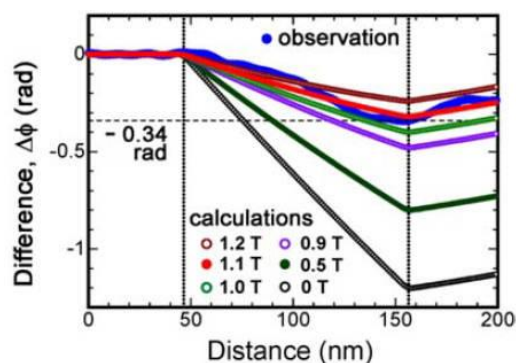


Fig. 3-4-3 X-Y 線(Fig. 4-4-1)に対する位相変化。

り、粒界相が明らかに「強磁性」であることを示している。本実験結果は、粒界相に関する宝野・嶋らの新見解を実証すると同時に、最適化熱処理を施した焼結磁石においても、粒界相が隣接する主相の交換結合を分断できていないことを示している。本研究結果は *Acta Mater.* 誌に論文発表した。

3.4.2 STEM 像のモワレ縞を利用した格子歪解析

Nd-Fe-B 磁石の保磁力と格子歪の関係は従来から関心が持たれており、佐久間グループの第一原理計算や、英国・ドイツの研究グループによる分子動力学計算など理論的研究が進められていた。例えば仮想的に大きな格子歪 (e.g., 10% 程度の歪) を受けた場合、主相 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相) は、磁化容易軸が変わるほどの顕著な異方性変化を示すことが予想されている。しかし複雑な組織を持つ焼結磁石の歪を実測することは容易でなく、実験的な研究は十分に進んでいない。本研究では、当該 CREST プロジェクトで導入された走査透過電子顕微鏡 (STEM) を用いた顕微解析的手法により、Nd-Fe-B 磁石の歪解析を行った。

具体的には、STEM 像に現れるモワレ縞に注目して、粒界三重点に生じた金属 Nd 相 (m-Nd) に接する主相の格子歪を解析した。主相の c 面と平行に電子プローブを走査すると、格子面間隔と、プローブスキャンの間隔の違いを反映したモワレ縞が生じる: Fig. 3-4-4(a)。格子面間隔の僅かな変化は、間隔の広いモワレ縞の周期変調という形で増幅されるため、詳細な歪解析を行うことができる。本研究では、電子線ホログラムの解析に利用するプロトコルをモワレ縞の周期変調解析に応用し、注目する結晶粒の広範な部分に対して歪マップを求める技術を整備した。Fig. 3-4-4(b) は、主相結晶粒における c 面の面間隔変化 (格子歪) の分布を示す。赤から黄色に至る部分は圧縮歪、緑から青に至る部分は引っ張り歪を受けた領域を表す。Fig. 3-4-5(c),(d) は、それぞれ X_1 - Y_1 線、 X_2 - Y_2 線に対して計測した格子歪を示す。圧縮/引っ張りのモードに関わらず、いずれの場合も相境界の近傍で歪量は最大となる。m-Nd 相と接する主相では、最大で 1.2% 程度の歪が観測された。

上述した手法を用いて、最適化熱処理を施した Nd-Fe-B 磁石における様々な相境界の歪解析を行った。解析した相境界 (結晶相の組合せ) と主相で観測された最大の歪量 (c 面の面間隔変化) の関係は以下の通りである: (1) 主相/m-Nd 相 $\sim 1.2\%$ 、(2) 主相/ Nd_2O_3 相 $\sim 0.5\%$ 、(3) 主相/ NdO_x 相 $\sim 0.4\%$ 、(4) 主相/主相 $< 0.2\%$ 。最も歪量が大きい組合せは、主相が m-Nd 相と接する場合であるが、これは宝野グループ・佐々木等が TEM 像の回折コントラストの状態から予想した結果とも一致する。一方、これまでに行われた理論研究を参照すると、この程度の格子歪が誘発する主相の結晶磁気異方性の変化は僅かである。従って本研究からは、主相の格子歪は、焼結磁石の保磁力を制約している主たる要因ではないことが指摘される。これらの研究成果については *Acta Mater.* 誌で論文発表を行った。

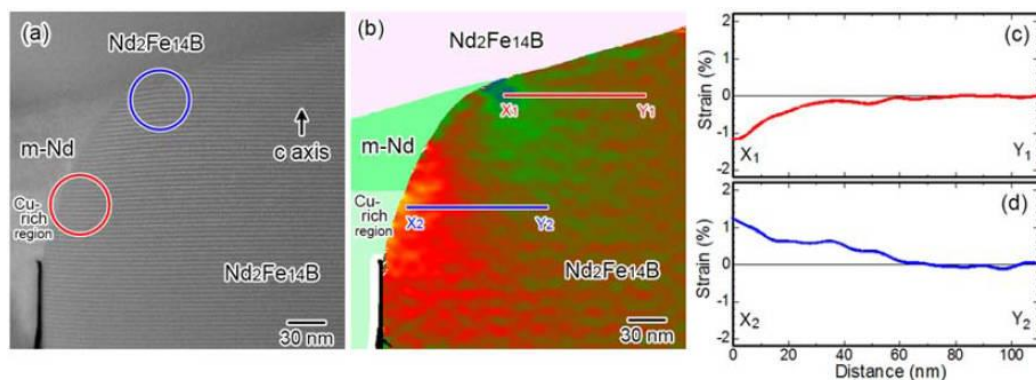


Fig. 3-4-4 (a)STEM に生じたモワレ縞。(b) $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 結晶粒の歪マップ。(c) X_1 - Y_1 線における歪分布。(d) X_2 - Y_2 線における歪分布。

3.4.3 暗視野電子線ホログラフィによる格子歪解析

上述した STEM-モアレ縞による歪解析は実験・解析が比較的簡単のため、同一試料における様々な箇所から歪マップを取得するのに有効である。その一方で、試料片の厚さを数 10 nm オーダーに設定するなど実験上の制約もある。そこで本研究では、比較的厚い試料の解析 (>150 nm) に適用できる暗視野電子線ホログラフィを用いて、モアレ縞から求めた実験結果の検証を行った。なお後述するように、暗視野電子線ホログラフィを用いた磁性材料の歪解析は原理的に難しく、これまで全く実施例がない。本 CREST 研究が契機となり、暗視野電子線ホログラフィによる磁性材料の歪解析が初めて可能になった。

3.4.1 項で述べた通常の電子線ホログラフィでは、ブラッグ反射に関与しない「透過波」を用いてホログラムを作成する。透過波には歪の情報が含まれないため、通常の電子ホログラフィは歪解析に応用できない。これに対して、暗視野電子線ホログラフィは歪情報を含む「回折波」(試料内でブラッグ反射を起こした電子)を用いてホログラムを作成する。暗視野電子線ホログラフィによる歪解析は欧州を中心に精力的に行われているが、全ての事例は半導体を中心とする非磁性材料の研究である。しかし磁性材料では、歪による電子位相変化に加えて、磁場による位相変化がデータに重畳される。後者(磁場による位相変化)は歪由来の位相変化に比べて桁違いに強いうえ、多くの試料では磁場分布自体が複雑なため(空間的に一様でないため)、磁性材料の解析は実質的に不可能とみなされていた。この問題を解決するため、本研究では主相($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相)の 002 反射で結像した暗視野ホログラムに加えて、ブラッグ反射の負号を変えた 00-2 反射によるホログラムを同一領域から収集した。このブラッグ反射の変化に伴い、暗視野ホログラムに記録される歪由来の位相変化は負号を変えるが、磁場由来の位相変化は負号を変えない。この性質を利用して、一対の画像データから必要とする歪情報だけを抽出した。

結果を Fig. 3-4-5(a)に示す。球状の金属 Nd 相($\alpha\text{-Nd}$)を含む主相の c 面間隔の変化を測定した。なお $\alpha\text{-Nd}$ は、Fig. 3-4-4における m-Nd と同一の相(金属 Nd 相)を表す。画像データの差し引きと歪を算出するための微分処理を行っているため、算出した歪量には $\pm 0.2\%$ 程度の不確かさが含まれる。しかしながら、 $\alpha\text{-Nd}$ 粒子の近傍で伸張(粒子の左右の領域)と圧縮(粒子の上限の領域)の格子変形が相補的に起こっている様子など、主相における歪分布の詳細を確認することができる。Fig. 3-4-5(b)には X-Y 線で観測された歪の分布を示す。 $\alpha\text{-Nd}$ 粒子の近傍で 1.5%程度の歪を確認できるが、実験データの不確かさ($\pm 0.2\%$)を考慮する限りは、モアレ縞の解析で求めた結果と同程度の歪が、暗視野電子線ホログラフィでも観測されたことになる。これらの研究成果は Appl. Phys. Lett.誌で論文発表している。なお位相データの解析精度(いまの場合は歪の解析精度に相当)については、今後、大規模画像データの処理を通して改善できると考えている。

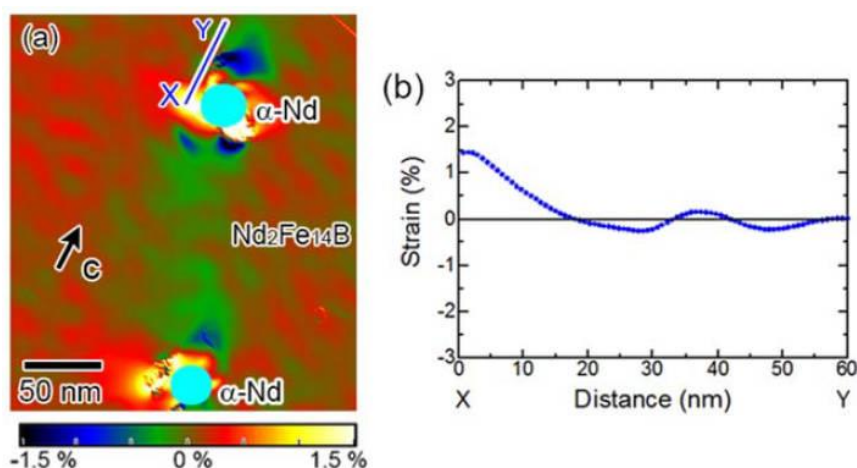


Fig. 3-4-5 (a)暗視野電子線ホログラフィで決定した $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 結晶粒の歪マップ。(b)X-Y 線における歪分布。

3. 5 Nd-Fe-B 磁石のマイクロマグネティックシミュレーションの大規模化 (Schrefl グループ)

3.5.1 Micromagnetic solver

A fast micromagnetic solver for desktop computers with graphic cards was developed. The method uses the finite element model to minimize the total Gibbs free energy. The complex microstructure of the magnet is represented by different intrinsic magnetic properties assigned to the finite elements locally. By selecting numerical methods dynamically during energy minimization the computation time for computing a demagnetization curve could be reduced drastically. Fig. 3-5-1 shows the time to solution as a function of problem size. Each point is an average of at least 5 simulation runs with different microstructures. The time to solution for a typical problem size of 20 million to 25 million finite elements is around 10 hours.

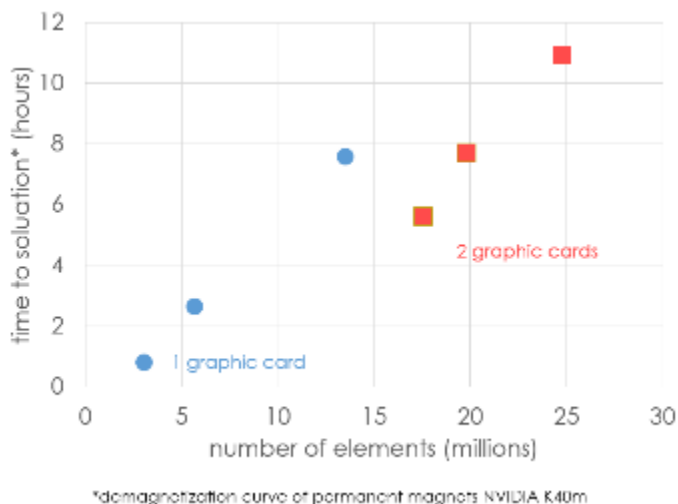


Fig. 3-5-1 Time for computing the demagnetization curve of a magnet using the newly developed micromagnetic finite element software.

3.5.2 Microstructure generation

We developed software for the semi-automatic generation of synthetic microstructures which may be based on hierarchical microstructural analysis. A key new feature in our micromagnetic models is the anisotropy of the properties of the grain boundary phase. The grain boundary properties can be assigned based on the orientation of the grain boundary with respect to the anisotropy direction of the neighboring grains. In order to illustrate the automatic assignment of grain boundary properties, Fig. 3-5-2 shows the three grains and the corresponding grain boundary phases which are embedded in a complex multigrain structure. The grains are represented by a triangular surface mesh. The indices of the neighboring grains are assigned to each grain boundary. Based on microstructural analysis the grain boundary 1-3 (green) is non-magnetic whereas grain boundary 1-2 will be ferromagnetic and grain boundary 2-3 will be weakly ferromagnetic.

The grains and the grain boundary phases are further subdivided into tetrahedral finite elements. We developed a method that leads to high quality meshes by computing various mesh quality factors such as the radius edge ratio or the dihedral angle. For a system similar to Fig.3-5-2 consisting of 6 Nd₂Fe₁₄B grains and 8 nm thick grain

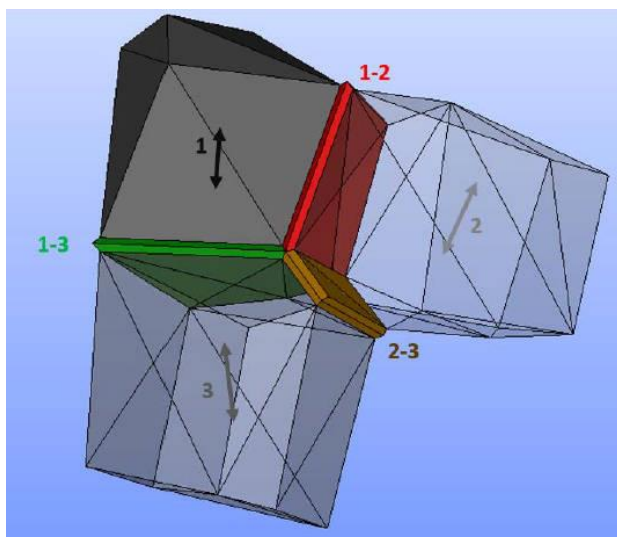


Fig. 3-5-2 Generation of synthetic microstructures to be used for detailed micromagnetic simulations. The image shows how the anisotropic nature of the grain boundaries can be taken into account.

boundaries, we analyzed the nucleation and pinning fields. The lowest pinning field ($\mu_0 H_p = 0.82$ T) was found at grain boundaries of type (2-3), the lowest nucleation field was $\mu_0 H_{nuc} = 1.48$ T.

3.5.3 Effect of demagnetizing fields on magnetization reversal

Using the newly developed micromagnetic solver we computed the influence of the thickness of the Dy-shell in grain boundary engineered NdFeB permanent magnets. We used a finite element model consisting of 64 equiaxed grains. We modified the thickness of the Dy containing $(DyNd)_2Fe_{14}B$ shell surrounding the $Nd_2Fe_{14}B$ core from 0 to 15 nm. The thickness of the weakly ferromagnetic grain boundary phase was 3 nm. The anisotropy constant, the magnetization, and the exchange constant of the different phases were $(DyNd)_2Fe_{14}B$ ($K = 5.17$ MJ/m³, $\mu_0 M_s = 1.15$ T, $A = 8.7$ pJ/m), $Nd_2Fe_{14}B$ ($K = 4.3$ MJ/m³, $\mu_0 M_s = 1.61$ T, $A = 8.7$ pJ/m), grain boundary ($K = 0$, $\mu_0 M_s = 0.5$ T, $A = 7.7$ pJ/m). Figure 3 shows the computed demagnetization curves. A diffusion layer containing Dy with a thickness of 5 nm is sufficient to improve the coercivity by about 1 T. The Dy containing shells for the results in Fig. 3-5-3 were perfect and were covering all grains. When only the surface grains are covered with $(DyNd)_2Fe_{14}B$ the improved of coercivity was found to be 0.5 T. Our analysis shows that demagnetizing field at grain boundaries junctions play a major role in magnetization reversal. Fig. 3-5-4 shows that magnets with Dy containing shell reduce the demagnetizing field in the magnet by around 0.5 T. Thermal fluctuations drive the magnetization over an energy barrier of finite size. We computed the minimum energy path and the saddle point. The magnetization configuration at the saddle point shows the onset of thermally induced magnetization reversal.

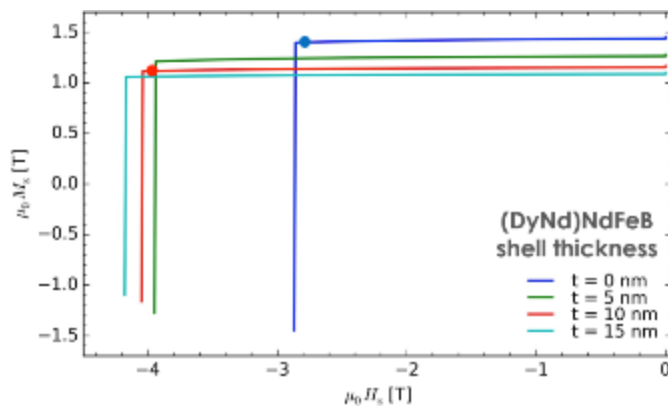


Fig. 3-5-3 Dy diffused NdFeB permanent magnet: Computed demagnetization curve for different thicknesses of the Dy containing shell around the grains.

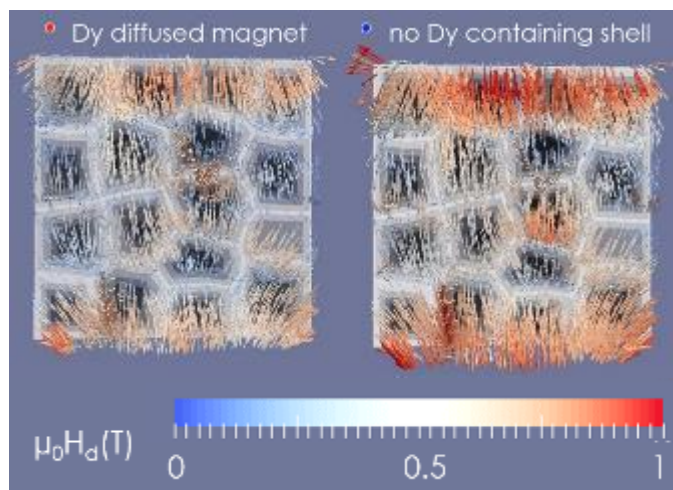


Fig. 3-5-4 Computed demagnetizing field for the Dy diffused magnet ($t = 10$ nm) and the Dy free magnet in the magnetic state just before magnetization reversal.

In Dy diffused magnets the nucleus of reversed magnetization shifts from the grain boundary to the core. This indicates that the grain boundary phase is no more the source for a reduced coercivity if all grains are covered by a Dy containing shell. We quantify the effect that reduce the anisotropy field, H_A , in the two magnets: Misalignment and Fe containing grain boundaries: $-0.52 H_A$, demagnetizing fields: $-0.051 H_A$, thermal effects: $-0.051 H_A$. In the Dy diffused magnet these reduction factors are

lower: $-0.38 H_A$, $-0.3 H_A$, and $-0.014 H_A$, respectively.

3.5.4 Grain shape

The coercive field of a magnet can be expressed as $H_c = \alpha H_A - N_{\text{eff}} M_s$, where H_A is the anisotropy field and M_s is the magnetization. The parameter α indicates a local reduction of the anisotropy field and the effective demagnetization factor N_{eff} is associated with local demagnetizing fields. For the different structures (see Fig.3-5-5) we computed the coercive field as a function of temperature. We fitted H_c/M_s to a straight line in order to derive the microstructural parameters α and N_{eff} . The material properties of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ were used for the analysis with three different sets of grain boundary properties as follows. (a) *non-magnetic*: $\mu_0 M_s = 0$, $A = 0$; (b) *intermediate*: $\mu_0 M_s = (1/3) \mu_0 M_s(\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B})$, $A = (1/3) A(\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B})$; (c) *strong coupling*: $\mu_0 M_s = \mu_0 M_s(\text{Fe})$, $A = A(\text{Fe})$.

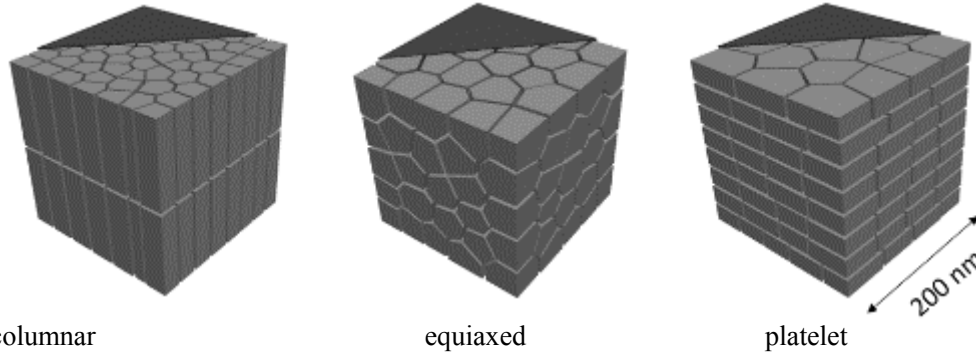


Fig. 3-5-5 Grain structures for the investigation of grain shape on the microstructural parameters. Each structure consists of 128 grains. The thickness of the grain boundary phase is approximately 3.8 nm.

Table 1. Computed microstructural parameters as function of particle shape and coupling strength between the grains. The coercive field is computed from α and N_{eff} .

grain boundary	Shape	α	N_{eff}	$\mu_0 H_c$ (T), 300 K
(a) Non magnetic	columnar	0.88	0.79	5.41
	Equiaxed	0.88	0.87	5.30
	Platelet	0.89	0.91	5.25
(b) Intermediate	columnar	0.45	0.10	3.22
	Equiaxed	0.47	0.27	3.13
	Platelet	0.51	0.43	3.13
(c) Strong coupling	columnar	0.21	0.08	1.48
	Equiaxed	0.19	0.12	1.25
	platelet	0.21	0.15	1.31

Although the grains for case (a) are perfectly isolated and have no soft defect the parameter α is smaller than 1. This is due to the finite angle between the total field (demagnetizing field and external field) with respect to the anisotropy axes at the nucleation site which reduces the switching field according to the Stoner-Wohlfarth model. For all three grain boundary types the effective demagnetizing factor is smallest for the columnar grain and has its largest value for the platelet shaped grains. However, α also change with the shape of the grains. This can be explained by the change of the angle of the total field with respect to the anisotropy axes at the nucleation site with the shape of the grains. The parameter α decreases with higher magnetization in the grain boundary phase. A higher M_s in the grain boundary phase also reduces the magnetic surface charges at the grain surface and in turn leads to a reduction of the effective demagnetizing factor.

§ 4 成果発表等

(1) 原著論文発表 (国内(和文)誌 7件、国際(欧文)誌 52件)

(国内(和文)誌)

1. 宝野和博, “ジスプロシウムを使わない高保磁力ネオジム磁石に向けて”, 工業材料 2014年5月号, p.27-32, 2014.
2. 宝野和博, “Dy を使わない Nd-Fe-B 磁石の開発動向”, までりあ, Vol. 54 (2015) No. 7 p. 351-355, 2015
3. Daisuke Miura, Ryo Sasaki, and Akimasa Sakuma, “Direct expressions for magnetic anisotropy constants”, Applied Physics Express, vol. 8, pp.113003-1- 113003-4, 2015
4. Akimasa Sakuma, Tsuneaki Suzuki, Takahiro Furuuchi, Toshiyuki Shima, and Kazuhiro Hono, “Magnetism of Nd-Fe films as a model of grain boundary phase in Nd-Fe-B permanent magnets”, Applied Physics Express, vol. 9, pp. 13002-1- 13002-4, 2015
5. 平山 悠介, 三宅 隆, 宝野 和博, “ThMn12 構造を有する Nd(FeM)12N 化合物の永久磁石材料としての可能性と課題”, までりあ, Vol. 55 (2016) No. 3 p. 97-103, 2016
6. 佐々木泰祐, 大久保忠勝, 宝野和博 : “ネオジム焼結磁石の微細組織 - 粒界相および界面組織” J. Jpn. Inst. Met. 81[1] (2017) 2-10.
7. 大久保忠勝, SepehriAminHossein, 宝野和博 : “マイクロマグネティクス計算による Nd-Fe-B 磁石磁化反転過程の解析” J. Jpn. Inst. Met. 81[1] (2017) 11-18.

(国際(欧文)誌)

1. A. Sakuma, H. Tsuchiura and C. Mitsumata, “Magnetic Properties of Nd-Oxides in the Grain-Boundaries of Nd-Fe-B Magnets”, Proceedings of the 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and Applications, (2012), 135-138.
2. C. Mitsumata, H. Tsuchiura and A. Sakuma, “Influence of Surface Anisotropy on Orientation of crystal Grain in Rare-Earth Permanent Magnet”, Proceedings of the 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and Applications, (2012), 130-133.
3. H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, M. Yano, T. Shoji, T. Schrefl, and K. Hono, “Microstructure and coercivity of hot deformed Nd-Fe-B anisotropic magnets with non-magnetic grain boundary phase”, Proceedings of the 22nd International Workshop on rare earth magnets and their applications, Nagasaki, 2012, p.71.
4. H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, T. Shima, and K. Hono, “Grain boundary and interface chemistry of a Nd-Fe-B based sintered magnet”, Acta Mater. 60, 819-830 (2012).
5. K. Hono and H. Sepehri-Amin, “Strategy for high-coercivity Nd-Fe-B magnets”, Scripta Mater., 67 (2012) 503 - 535.
6. W. B. Cui, Y. K. Takahashi, and K. Hono, “Nd₂Fe₁₄B/FeCo anisotropic nanocomposite films with a large maximum energy product”, Adv. Mater. 24 (2012) 6530–6535.
7. H. Sepehri-Amin, D. Prabhu, M. Hayashi, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori and K. Hono, “Coercivity enhancement of rapidly solidified Nd-Fe-B magnet powders”, Scripta Mater. 68 (2013) 167-170.
8. T. Akiya, J. Liu, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori and K. Hono, “Low temperature diffusion process using rare earth-Cu eutectic alloys for hot-deformed Nd-Fe-B bulk magnets”, Journal of Applied Physics Vol.115, 17A766, 2014.
9. T. Akiya, J. Liu, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori, K. Hono, “High-coercivity hot-deformed Nd-Fe-B permanent magnets processed by Nd-Cu eutectic diffusion under expansion constraint”, Scripta Mater. 81, pp.48-51, 2014
10. H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, S. Nagashima, M. Yano, T. Shoji, A. Kato, T. Schrefl, K. Hono, “High-coercivity ultrafine-grained anisotropic Nd-Fe-B magnets processed by hot deformation and the Nd-Cu grain boundary diffusion process”, Acta Mater. 61, pp.6622 – 6634, 2013
11. H. Sepehri-Amin, J. Liu, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori and K. Hono, “Enhancement of coercivity of hot-deformed Nd-Fe-B anisotropy magnet by low temperature grain boundary

- diffusion of Nd₆₀Dy₂₀Cu₂₀ eutectic alloy”, *Scripta Mater.* 69, pp.647 – 650, 2013
12. H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hono, “The mechanism of coercivity enhancement by the grain boundary diffusion process of Nd-Fe-B sintered magnets”, *Acta Mater.* 61, pp.1982-1990, 2013
 13. J. Liu, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori, T. Schrefl, and K. Hono, “Effect of Nd content on the microstructure and coercivity of hot-deformed Nd-Fe-B permanent magnets”, *Acta Mater.* 61, pp.5387 – 5399, 2013
 14. Y. Murakami, T. Tanigaki, T.T. Sasaki, Y. Takeno, H.S. Park, T. Matsuda, T. Ohkubo, K. Hono, D. Shindo, “Magnetism of ultrathin intergranular boundary regions in Nd-Fe-B permanent magnets”, *Acta Materialia* Vol.71, 2014
 15. J. Liu, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori, and K. Hono, “Microstructure evolution of hot-deformed Nd-Fe-B anisotropic magnets”, *Journal of Applied Physics* Vol.115, 2014,
 16. H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, M. Gruber, T. Schrefl, K. Hono, “Micromagnetic simulations on the grain size dependence of coercivity in anisotropic Nd-Fe-B sintered magnets”, *Scripta Mater.*, in press (2014)
 17. T. Hozumi, P. LeClair, G. Mankey, C. Mewes, H. Sepehri-Amin, K. Hono and T. Suzuki, “Magnetic and structural properties of MnBi multilayered thin films”, *Journal of Applied Physics*, Vol.115, Issue17, 2014
 18. J. Fujisaki, A. Furuya, Y. Uehara, K. Shimizu, H. Oshima, T. Ohkubo, S. Hirosawa, K. Hono, “Micromagnetic Simulations of Magnetization Reversal in Misaligned Multigrain Magnets With Various Grain Boundary Properties Using Large-Scale Parallel Computing”, *Magnetics, IEEE Transactions on*, Vol.50 (11), p.1-4, 2014
 19. T. Ohkubo, Y. Gohda, K. Hono, S. Hirosawa, “Direct observation of ferromagnetism in grain boundary phase of Nd-Fe-B sintered magnet using soft x-ray magnetic circular dichroism”, *Applied Physics Letters*, Vol.105 (20), pp.202404, 2014
 20. U.M.R. Seelam, T. Ohkubo, T. Abe, S. Hirosawa, K. Hono, “Faceted shell structure in grain boundary diffusion-processed sintered Nd-Fe-B magnets”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 617, pp. 884–892, 2014
 21. J. Liu, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori, T. Schrefl, K. Hono, “Grain size dependence of coercivity of hot-deformed Nd–Fe–B anisotropic magnets”, *Acta Materialia*, Vol. 82, pp.336-343, 2015
 22. Y. Hirayama, Y.K. Takahashi, S. Hirosawa, K. Hono, “NdFe₁₂Nx hard-magnetic compound with high magnetization and anisotropy field”, *Scripta Materialia*, Vol.95, pp.70-72, 2015
 23. W.B. Cui, H. Sepehri-Amin, Y.K. Takahashi, K. Hono, “Hard magnetic properties of spacer-layer-tuned NdFeB/Ta/Fe nanocomposite films”, *Acta Materialia*, Vol.84, pp.405-412, 2015
 24. T.T. Sasaki, T. Ohkubo, Y. Une, H. Kubo, M. Sagawa, K. Hono, “Effect of carbon on the coercivity and microstructure in fine-grained Nd–Fe–B sintered magnet”, *Acta Materialia*, Vol.84, pp.506-514, 2015
 25. H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hono, K. Güth, O. Gutfleisch, “Mechanism of the texture development in hydrogen-disproportionation–desorption–recombination (HDDR) processed Nd–Fe–B powders”, *Acta Materialia*, Vol.85, pp.42-52, 2015
 26. R. Nakagawa, M. Doi, and T. Shima, “Effect of nonmagnetic cap layers for Nd–Fe–B thin films with small addition of rare-earth element”, *IEEE Trans. Magn.*, 51 (11), 2104904 (2015)
 27. Yasukazu Murakami, “Interface Magnetism Studied by Electron Holography with Multiple-biprisms”, *Microscopy & Microanalysis*, vo. 21 (suupl. 3), pp. 2313-2314, 2015
 28. Yasukazu Murakami, Taisuke Sasaki, Tadakatsu Ohkubo and Kazuhiro Hono, “Strain Measurements from Nd₂Fe₁₄B Grains in Sintered Magnets using Artificial Moiré Fringes”, *Acta Materialia*, Volume 99, 15 October 2015, Pages 297–306, 2015
 29. Nobuyuki Umetsu, Akimasa Sakuma, and Yuta Toga, “First-principles study of interface magnetic structure in Nd₂Fe₁₄B/(Fe,Co) exchange spring magnets”, *Physical Review B*, vol. 93, pp. 014408-1 - 014408-6, 2016

30. Y. Toga, T. Suzuki, and A. Sakuma, "Effects of trace elements on the crystal field parameters of Nd ions at the surface of Nd₂Fe₁₄B", *Journal of Applied Physics*, vol. 117, pp. 223905-1-223905-6, 2015
31. R Goto, S Okamoto, T Akiya, N Kikuchi, O Kitakami, H Sepehri-Amin, T Ohkubo, K Hono, K Hioki, A Hattori, "Energy barrier analysis on hot-deformed Nd-Fe-B magnets", *Magnetics Conference (INTERMAG)*, 2015
32. H Sepehri-Amin, L Liu, T Ohkubo, M Yano, T Shoji, A Kato, K Hono, "Thermal stability of coercivity in grain boundary modified anisotropic hot-deformed Nd-Fe-B magnets", *Magnetics Conference (INTERMAG)*, 2015 IEEE, Pages 1, 2015
33. Yasukazu Murakami, Taisuke Sasaki, Tadakatsu Ohkubo, Kazuhiro Hono, "B23-P-02 Strain analysis from Nd-Fe-B sintered magnet using artificial moiré fringes", *Microscopy*, Volume 64, Issue suppl 1, Pages i112, 2015
34. Kazuhiro Hono, Dierk Raabe, Simon P Ringer, David N Seidman, "Atom probe tomography of metallic nanostructures", *MRS Bulletin / Volume 41 / Issue 01 / January 2016*, pp 23-29, 2016
35. Y. Hirayama, T. Miyake, K. Hono, "Rare-Earth Lean Hard Magnet Compound NdFe₁₂N", *JOM*, June 2015, Volume 67, Issue 6, pp 1344-1349, 2015
36. H. Sepehri-Amin, Lihua Liu, T. Ohkubo, M. Yano, T. Shoji, A. Kato, T. Schrefl, K. Hono, "Microstructure and temperature dependent of coercivity of hot-deformed Nd-Fe-B magnets diffusion processed with Pr-Cu alloy", *Acta Mater.* 99, 297-306 (2015)
37. Satoshi Okamoto, Ryota Goto, Nobuaki Kikuchi, Osamu Kitakami, Takahiro Akiya, Hossein Sepehri-Amin, Tadakatsu Ohkubo, Kazuhiro Hono, Keiko Hioki and Atsushi Hattori, "Temperature-dependent magnetization reversal process and coercivity mechanism in Nd-Fe-B hot-deformed magnets", *Journal of Applied Physics* 118, 223903 (2015), 2015
38. T.T. Sasaki, T. Ohkubo, Y. Takada, T. Sato, A. Kato, Y. Kaneko, K. Hono, "Formation of non-ferromagnetic grain boundary phase in a Ga-doped Nd-rich Nd-Fe-B sintered magnet", *Scripta Materialia*, Volume 113, 1 March 2016, Pages 218-221, 2016
39. Lihua Liu, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, M. Yano, A. Kato, T. Shoji, K. Hono, "Coercivity Enhancement of Hot-deformed Nd-Fe-B Magnets by the Eutectic Grain Boundary Diffusion Process", *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 666, 5 May 2016, Pages 432-439, 2016
40. W.B. Cui, L. Ma, H. Sepehri-Amin, Y.K. Takahashi, K. Hono, "The influence of grain morphology and easy axis orientation on the coercivity of Sm(Co_{0.9}Cu_{0.1})₅ thin films", *Acta Materialia*, Volume 107, 1 April 2016, Pages 49-58, 2016
41. T. Oikawa, H. Yokota, T. Ohkubo and K. Hono, "Large-scale micromagnetic simulation of Nd-Fe-B sintered magnets with Dy-rich shell structures", *AIP Advances* 6, 056006 (2016)
42. T.T. Sasaki, T. Ohkubo, K. Hono, "Structure and chemical compositions of the grain boundary phase in Nd-Fe-B sintered magnets", *Acta Materialia* 115, 269-277 (2016).
43. U.M.R. Seelam, Lihua Liu, T. Akiya, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, N. Sakuma, M. Yano, A. Kato, K. Hono, "Coercivity of the Nd-Fe-B hot-deformed magnets diffusion-processed with low melting temperature glass forming alloys", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 412, 234-242 (2016).
44. H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hono, "Micromagnetic Simulations of Magnetization Reversals in Nd-Fe-B Based Permanent Magnets", *Materials Transactions* 57 (8), 1221-1229 (2016).
45. Lihua Liu, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, M. Yano, A. Kato, T. Shoji, K. Hono, "Coercivity enhancement of hot-deformed Nd-Fe-B magnets by the eutectic grain boundary diffusion process", *Journal of Alloys and Compounds* 666, 432-439 (2016).
46. J. Fujisaki, A. Furuya, Y. Uehara, K. Shimizu, T. Ataka, T. Tanaka, H. Oshima, T. Ohkubo, S. Hirosawa, K. Hono, "Micromagnetic simulation of the orientation dependence of grain boundary properties on the coercivity of Nd-Fe-B sintered magnets", *AIP Advances* 6 (5), 056028 (2016).
47. T. Akiya, K. Hioki, A. Hattori, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hono, "Low-temperature Diffusion Process for Hot-deformed Bulk Permanent Magnet using RE-Cu Eutectic Alloy",

- IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials 136, 478-483 (2016).
48. Y. Murakami, K. Niitsu, S. Kaneko, T. Tanigaki, T.T. Sasaki, Z. Akase, D. Shindo, T. Ohkubo, and K. Hono "Strain Measurement in Ferromagnetic Crystals using Dark-field Electron Holography" Applied Physics Letters 109, 193102 (2016).
 49. Y. Toga, M. Matsumoto, S. Miyashita, H. Akai, S. Doi, T. Miyake, A. Sakuma, "Monte Carlo analysis for finite-temperature magnetism of Nd₂Fe₁₄B permanent magnets", Phys. Rev. B **94**, 174433-1 - 174433-9, (2016).
 50. H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, M. Zaktonik, D. Prospero, P. Afiuny, C.O. Tudor, K. Hono, "Microstructure and magnetic properties of grain boundary modified recycled Nd-Fe-B sintered magnets", Journal of Alloys and Compounds 694, 175-184 (2017).
 51. X. Tang, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori, K. Hono, "Coercivities of hot-deformed magnets processed from amorphous and nanocrystalline precursors", Acta Materialia 123, 1-10 (2017).
 52. L. Liu, H. Sepehri Amin, T. Ohkubo, M. Yano, A. Kato, N. Sakuma, T. Shoji, K. Hono : "Coercivity enhancement of hot-deformed Nd-Fe-B magnets by the eutectic grain boundary diffusion process using Nd62Dy20Al18 alloy" Scr. Mater. 129 (2017) 44-47.
- (2) その他の著作物(総説、書籍など)
1. 宝野和博、金属学会セミナーテキスト「次世代永久磁石材料をめざしてー磁石材料の微細構造と保磁力」日本金属学会、2013、ISBN978-4-889023-151-5 C3057
 2. 宝野和博、広沢哲、"元素戦略における永久磁石材料"、まぐね、7 (2012) 1-10.
 3. 嶋敏之、佐藤浩太郎、三品由利子、大槻知裕、岩間弘樹、"Si 基板上に作製した Nd-Fe-B/Nd-Cu 薄膜の磁場中磁区構造観察"、日本金属学会誌第 76 巻第 1 号(2012)52-58. 特集「永久磁石材料の現状と将来展望」
 4. 宝野和博、大久保忠勝、Sepehri-Amin Hossein: "Nd-Fe-B 磁石の高保磁力化をめざした微細組織制御"、日本金属学会誌、76 (2012) 2-11.
 5. 佐久間 昭正、"機能性磁性材料に関する電子論的研究"、まぐね、9、pp.59 - 68、2014.
 6. 村上恭和、"電子線ホログラフィーを用いた界面領域の磁性の研究"、日本金属学会誌(オーバービュー論文)、vol. 79, pp. 233-242, 2015
 7. 村上恭和、"電子線ホログラフィーによる粒界相磁束密度の解析"、「省/脱 Dy ネオジム磁石と新規永久磁石の開発(宝野和博、広沢哲監修)」、シーエムシー出版、第 5 章、pp. 125-133、2015
 8. 佐久間 昭正、佐々木 良、小林 尚史、兵頭 一茂、三浦 大介、小田 洋平、"強磁性体の結晶磁気異方性に関する理論研究"、マグネティクス研究会、vol. 15, pp. 15-18, 2015
 9. 佐久間 昭正、土浦 宏紀、"省/脱 Dy ネオジム磁石と新永久磁石の開発(第6章 第一原理計算による Nd-Fe-B 磁石の粒界近傍における磁気特性)"、シーエムシー出版、pp. 73-83, 2015
 10. 大久保忠勝、"Nd-Fe-B 磁石の有限要素マイクロマグネティクス解析"、「省/脱 Dy 化ネオジム磁石と新規永久磁石の開発」,(広沢、宝野監修)、pp. 154-164, 2015
 11. 佐々木泰祐、"Nd-Fe-B 系磁石のマルチスケール組織解析"、「省/脱 Dy 化ネオジム磁石と新規永久磁石の開発」,(広沢、宝野監修)、pp. 29-36, 2015
 12. Akimasa Sakuma, Tsuneaki Suzuki, Takahiro Furuuchi, Toshiyuki Shima, and Kazuhiro Hono, "Magnetism of Nd-Fe films as a model of grain boundary phase in Nd-Fe-B permanent magnets", Appl. Phys. Exp., 9, 013002 (2016).
 13. T. Tanigaki, K. Harada, Y. Murakami, K. Niitsu, T. Akashi, Y. Takahashi, A. Sugawara and D. Shindo "New Trend in Electron Holography" J. Phys. D: Appl. Phys., 49 (2016) 244001(1)-244001(13).
 14. 村上恭和、新津甲大、谷垣俊明、朴賢洵、貝沼亮介、進藤大輔 "天然の界面が示す磁性ー電子線ホログラフィーによる解析ー"顕微鏡、51 (2016) 29-36.

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 42 件、国際会議 54 件)

(国内会議)

1. 宝野和博(物質・材料研究機構、H. Sepehri-Amin、大久保忠勝、Nd-Fe-B 磁石の高保磁力化をめざした微細組織制御、粉体粉末冶金協会平成 24 年度春季大会、京都工芸繊維大学、2012 年 5 月 23 日
2. 大久保忠勝(物質・材料研究機構)、H. Sepehri-Amin、宝野和博、マルチスケール組織解析による Dy フリー希土類磁石の保磁力機構解明と向上、磁気応用技術シンポジウム、東京ビッグサイト、2012 年 7 月 11 日
3. 佐々木泰祐(物質・材料研究機構)、先端磁性材料のマルチスケール組織解析、顕微鏡学会関東支部講演会、東京大学、2013 年 3 月 6 日
4. H. Sepehri-Amin(物質・材料研究機構)、“Microstructure-coercivity relationship of hot-deformed Nd-Fe-B anisotropic magnets”, 日本金属学会 2013 年春期(第 152 回)講演大会、東京理科大学、2013 年 3 月 28 日
5. Yasukazu Murakami, Toshiaki Tanigaki, Taisuke Sasaki, Yumu Takeno, Hyun Soon Park, Tsuyoshi Matsuda, Tadakatsu Ohkubo, Kazuhiro Hono and Daisuke Shindo, “Determination of magnetic flux density for boundary phase in Nd-Fe-B sintered magnet by electron holography”, 日本磁気学会シンポジウム、札幌、2013 年 9 月 3 日
6. 宝野和博(物質・材料研究機構)、Microstructure and coercivity relationships in Nd-Fe-B permanent magnets、第 37 回日本磁気学会学術講演会、北海道大学(札幌市)、2013 年 9 月 3-6 日
7. K. Hono, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, J. Liu, T. Sasaki, and T. Akiya, Microstructure and coercivity relationships in Nd-Fe-B permanent magnets, 39th MSJ Meeting Symposium, 札幌市、2013 年 9 月 5 日
8. 宝野和博(物質・材料研究機構)、永久磁石材料の微細構造と保磁力、SPRING-8 シンポジウム 2013、京都大学おおぼくプラザ(京都府)、2013 年 9 月 8 日
9. 宝野和博(物質・材料研究機構)、Nd-Fe-B 磁石の微細構造制御による保磁力向上、磁性材料研究会 21-希土類磁石とその応用探究分科会、東京都千代田区、2013 年 10 月 9 日
10. 宝野和博(物質・材料研究機構)、レアアース問題から考える磁石研究のありかた、学振第 147 委員会、弘済会館(東京都千代田区)、2013 年 10 月 10 日
11. 宝野和博(物質・材料研究機構)、Nd-Fe-B 磁石の高保磁力化、CREST・さがりけ元素戦略領域合同第一回公開シンポジウム、東京国際フォーラム、2013 年 11 月 29 日
12. 宝野和博(物質・材料研究機構)、ネオジウム磁石の微細構造と保磁力、平成 25 年度磁性材料研究会(テーマ:バルク磁性材料の内部構造に迫る)、研究社英語センター(東京都新宿区)大会議室 2013 年 12 月 20 日
13. 大久保忠勝(物質・材料研究機構)、マイクロマグネティクス計算によるネオジウム磁石磁化過程の解析、平成 25 年度磁性材料研究会(テーマ:バルク磁性材料の内部構造に迫る)、研究社英語センター(東京都新宿区)大会議室 2013 年 12 月 20 日
14. 宝野和博(物質・材料研究機構)、Nd-Fe-B 磁石の微細構造と保磁力、金属学会セミナー「次世代永久磁石材料をめざしてー磁石材料の微細構造と保磁力」、ソラシティカンファレンスセンター(東京都千代田区)、2013 年 12 月 26 日
15. 大久保忠勝(物質・材料研究機構)、マイクロマグマティクス計算による 異方性 Nd-Fe-B 磁石の磁化過程、アモルファス・ナノ材料第 147 委員会第 122 回研究会、桑山ビル(愛知県名古屋市)、2014 年 3 月 12 日
16. 大久保忠勝(物質・材料研究機構)、マイクロマグネティクス計算による Nd-Fe-B 磁石磁化過程の検討 / マイクロマグネティクス計算による Nd-Fe-B 磁石磁化過程の検討、日本金属学会 2014 年春期講演大会、東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区)、2014 年 3 月 21-23 日

17. 宝野和博(物質・材料研究機構)、ネオジウム磁石の微細構造と保磁力、機能無機物質シンポジウム「金属系エネルギー材料の可能性」、東北大学多元物質科学研究所(仙台市青葉区)、2014年3月28日
18. 村上恭和(東北大学多元研)、谷垣俊明、佐々木泰祐、竹野雄夢、朴賢洵、松田強、大久保忠勝、宝野和博、進藤大輔、電子線ホログラフィを用いたNd-Fe-B磁石の粒界相の磁束密度解析、日本顕微鏡学会学術講演会、幕張(東京都)、2014年5月13日
19. 宝野和博(物質・材料研究機構)、希土類磁石の微細構造及び分析技術、日本磁気学会第2回岩崎コンファレンス、東京都品川区、2013年5月13日
20. 宝野和博(物質・材料研究機構)、Toward the development of Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, Inter. Workshop of Computational Nano-Materials Design on Green, 大阪大学豊中キャンパス、2014年6月1-3日
21. 佐々木泰祐(物質・材料研究機構)、SEM・TEM・3DAPによるネオジウム磁石のマルチスケール組織解析 / Multi-scale characterization of Nd-Fe-B sintered magnet by SEM, TEM and 3DAP、日本学術振興会アモルファス・ナノ材料第147委員会第122回研究会、弘済会館(東京都)、2014年6月25日
22. 村上恭和(東北大学多元研)、電子線ホログラフィによるNd-Fe-B焼結磁石の粒界相磁束密度の解析、日本学術振興会アモルファス・ナノ材料第147委員会第122回研究会、弘済会館(東京都)、2014年6月25日
23. 秋屋貴博、「Low eutectic temperature alloy diffusion process for hot-deformed Nd-Fe-B magnet」、第38回日本磁気学会学術講演会、慶応義塾大学日吉キャンパス、2014年9月2日
24. 村上恭和、「電子線ホログラフィーによるナノ領域の磁性解析」、学振第151委員会「ナノ計測・材料」研究会、東京、2014年11月14日
25. SepehriAmin Hossein, 「Grain boundary structure/chemistry modifications of Nd-Fe-B permanent magnets」、産学協力研究アモルファス・ナノ材料第147委員会第127回研究会、弘済会館(東京都)、2015年1月8日
26. 宝野和博, ”希少金属をつかわない自動車用永久磁石材料の開発”, 第13回ナノテクノロジー総合シンポジウム JAPAN NANO 2015, 東京ビッグサイト, 2015年1月30日
27. 宝野和博、Dy-free high coercivity Nd-Fe-B based permanent magnets for automotive applications, 11th Inter. Nanotechnology Conf. Communication and Cooperation, Hilton Fukuoka Sea Hawk Fukuoka, Fukuoka, 2015年5月13日
28. 佐久間 昭正、磁性体の結晶磁気異方性についてあれこれ、みちのく磁性談話会、宮城蔵王、2015年6月6日
29. 佐久間 昭正、結晶磁気異方性の理論、日本磁気学会第64回ナノマグ専門研究会、御茶ノ水、2015年6月26日
30. 大久保忠勝、Multi-scale Characterization of Nd-Fe-B Permanent Magnets by FIB-SEM/TEM/3DAP、NIMS Conference 2015、つくば国際会議場エポカル、つくば市、2015年7月15日
31. 大久保忠勝、ネオジウム磁石のマルチスケール組織解析、材料の微細組織と機能性第133委員会第228回研究会、JR博多シティ会議室、福岡県福岡市、2015年9月19日
32. 村上恭和、電子線ホログラフィーによる磁性材料観察、学振第133委員会研究会「材料の微細組織と機能性」、JR博多シティ、福岡、2015年9月19日
33. 村上恭和、電子線ホログラフィーを用いたNd-Fe-B磁石の粒界相の磁性の解析、未踏科学技術協会「希土類磁石とその応用探求分科会第3回フォーラム」、航空会館、東京、2015年10月15日
34. 佐々木泰祐、ネオジウム磁石のマルチスケール組織解析 / Multi-scale characterization of Nd-Fe-B sintered magnet、日本学術振興会アモルファス・ナノ第147委員会、主婦会館プラザエフ、東京、2015年11月20日
35. 佐久間 昭正、強磁性体の結晶磁気異方性に関する理論研究、マグネティクス研究会、

秋田大学、2015年12月7日

36. 村上恭和、TEMによる材料機能発現メカニズムの探求、日本電子ユーザーズミーティング、東京大学、東京、2015年12月11日
37. 村上恭和、電子線ホログラフィーによる材料の電磁場解析、九州大学超高压電子顕微鏡室開設40周年記念講演会、九州大学、福岡、2015年12月18日
38. H. Sepehri-Amin, Influence of defects to the coercivity of permanent magnets and energy density of nanocomposite magnets; a micromagnetic simulation study、ESICMM-G8 symposium on Next Generation Permanent Magnets、物質・材料研究機構(つくば市、茨城県)、2015年6月18日-2015年6月19日
39. 佐々木泰祐、Ndリッチ相および2粒子粒界相の制御によるネオジム焼結磁石の高保磁力化、日本金属学会2016年春期大会、東京理科大学葛飾キャンパス(東京都葛飾区新宿6-3-1)、2016年3月23日-2016年3月25日
40. H28年度NIMS外 佐久間 昭正(東北大)、Theoretical study on the finite temperature magnetism of rare earth permanent magnets、第40回日本磁気学会学術講演会、金沢大学、2016年9月7日
41. 村上恭和、Magnetization and Strain Measurements by Electron Holography、日本顕微鏡学会第59回シンポジウム、帝京大学、2016年11月19日
42. 佐久間 昭正、“希土類磁石の有限温度における磁気異方性に関する理論的考察”、日本金属学会2017年春期講演大会、首都大学東京、2017年3月16日

(国際会議)

1. *H. Sepehri-Amin(物質・材料研究機構)、“Microstructure and coercivity of hot deformed Nd-Fe-B anisotropic magnets with non-magnetic grain boundary phase”, REPM 2012, Nagasaki, 2012年9月3日
2. S. Hirose and K. Hono(物質・材料研究機構)、“Critical issues for the realization of permanent magnets free of critical elements”, 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, 2013年1月15日
3. 宝野和博(物質・材料研究機構)、“Toward the development of Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets”, Materials Science and Engineering Spring 2013 Seminar, Iowa State University(Ames,USA), 2013年4月11日
4. 宝野和博(物質・材料研究機構)、“CPP-GMR using new FM and NM materials for narrow readers”, Seagate University Conclave 2013, Hilton Minneapolis(Minneapolis,USA), 2013年6月10日
5. K. Hono(物質・材料研究機構)、“Towards the Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets”, PRICM 2013(Hawaii), 2013年8月8日
6. T. Shima (Tohoku Gakuin University)、“Grain boundary engineering of Nd-Fe-B thin films”, 6th International Workshop on Amorphous and Nanostructured Magnetic Materials (ANMM2013), Sendai, 2013年10月1日
7. 宝野和博(物質・材料研究機構)、“Toward the development of Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets”, Fall Conference of KIM (The Korean Institute of Metals and Materials), 韓国光州, 2013年10月24日
8. K. Hono(物質・材料研究機構)、“Towards the Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets”, Indian Institute of Metals, IIM-NMD-ATM, IIT BHU(Varanasi, India), 2013年11月15日
9. K. Hono(物質・材料研究機構)、“Towards Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets”, Annual meeting of Korean Magnetic Society, Phenix Park Hotel(Pyeongchang), 2013年12月6日
10. *H. Sepehri-Amin(物質・材料研究機構)、“Microstructure and Coercivity Relationships of Anisotropic Hot-deformed Nd-Fe-B Magnets”, 2014TMS Annual Meeting&Exhibition(SanDiego, USA), 2014年2月17日

11. 宝野和博, "Toward the development of Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets", Deutsche Physikalische Gesellschaft Frühjahrstagung, Technischen Universität Dresden(Dresden, Germany), 2014年4月3日
12. 宝野和博, "Towards the development of Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets", IEEE International Magnetics Conference, International Congress Center Dresden(Dresden, Germany), 2014年5月8日
13. SepehriAmin Hossein, "Microstructure and magnetic properties of Mn-X (X=Rh, Bi, Al) thin films", G8 Project Workshop, Technical University of Darmstadt(Darmstadt,Germany), 2014年5月9日
14. Y. Murakami, "Characterization of Magnetic Microstructures by using TEM", GIFT Seminar, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea, 2014年5月22日
15. 宝野和博, "Toward the development of Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets", Inter. Workshop of Computational Nano-Materials Design on Green, 大阪大学豊中キャンパス, 2014年6月1-3日
16. H. Sepehri-Amin (物質・材料研究機構), A multi-scale approach to develop high coercivity Dy-free permanent magnets, CIMTEC 2014, 6th Forum on New Materials, Montecatini Terme(Tuscany,Italy), 2014年6月15-19日
17. SepehriAmin Hossein, "A multi-scale approach to develop high coercivity Dy-free permanent magnets", CIMTEC 2014, 6th Forum on New Materials, Montecatini Terme(Tuscany,Italy), 2014年6月16日
18. *宝野和博, "Dy-free high coercivity Nd-Fe-B hot-deformed magnets", REPM2014, The Westin Annapolis(Annapolis, Maryland, USA), 2014年8月20日
19. 宝野和博, "Dy-free high coercivity Nd-Fe-B hot-deformed magnets", 15th Inter Conf on Rapidly Quenched & Metastable Materials (RQ15), Shanghai International Convention Center(Shanghai,China), 2014年8月25日
20. 秋屋貴博(物質・材料研究機構), Low eutectic temperature alloy diffusion process for hot-deformed Nd-Fe-B magnet, 第38回日本磁気学会学術講演会, 慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県横浜市), 2014年9月2-5日
21. *佐々木泰祐, "Nd-Fe-B 焼結磁石のマルチスケール組織解析", TMS2015 Annual Meeting and Exhibition, Walt Disney World(Orlando, FL,USA), 2015年3月
22. *Thomas Schrefl, "Non-Zero Temperature Micromagnetics for Rare-Earth Permanent Magnets (Invited)", TMS2015, Orlando, FL, USA, 2015年3月17日
23. H. Sepehri-Amin, Influence of defects to the coercivity of permanent magnets and energy density of nanocomposite magnets; a micromagnetic simulation study, International Symposium on Advanced Permanent Magnetic Materials, Beijing University of Technology, Beijing, China, 2015年5月9日-2015年5月11日
24. *H. Sepehri-Amin, Thermal stability of coercivity in grain boundary modified anisotropic hot-deformed Nd-Fe-B magnets, INTERMAG 2015, China National Convention Center, 2016年5月11日-2015年5月15日
25. Thomas Schrefl, Finite element micromagnetics at non-zero temperature, 10th International Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics, Iasi, Romania, 2015年5月18日
26. Yasukazu Murakami, Taisuke Sasaki, Toshiaki Tanigaki, Shuhei Kaneko, Kodai Niitsu, Zentaro Akase, Daisuke Shindo, Tadakatsu Ohkub and Kazuhiro Hono, Electron Holography Studies on Magnetization and Lattice Strain in Nd-Fe-B Permanent Magnets, ESICMM-G8 Symposium on Next Generation Permanent Magnets, NIMS, Tsukuba, Japan, 2015年6月18日
27. Thomas Schrefl, Micromagnetics of rare earth efficient permanent magnets, 20th International conference on Magnetism, Barcelona, Spain, 2015年7月10日
28. Yasukazu Murakami, Interface Magnetism Studied by Electron Holography with Multiple-

- biprisms, Microscopy & Microanalysis 2015, Oregon Convention Center, Portland, USA, 2015年8月6日
29. 佐々木泰祐, Correlative Multi-scale Analysis of Nd-Fe-B Permanent Magnet, AVS 62nd International Symposium & Exhibition, San Jose Convention Center (San Jose, CA, USA), 2015年10月18日-2015年10月23日
 30. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, IEEE Magnetic Society Distinguished Lecture, Yonsei University, Korea, 2015年12月1日
 31. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, IEEE Magnetic Society Distinguished Lecture, Seoul National University, Korea, 2015年12月2日
 32. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, IEEE Magnetic Society Distinguished Lecture, POSTECH, Korea, 2015年12月3日
 33. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, IEEE Magnetic Society Distinguished Lecture, KIMS, Korea, 2015年12月4日
 34. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, TMS2016 145th Annual Meeting & Exhibition, Nashville Music City Center, Nashville, 2016年2月17日
 35. Thomas Schrefl, Computational challenges for micromagnetics of permanent magnets, MANA 2016 -Micromagnetics: Analysis, Numerics, Applications, Vienna, Austria, 2016年2月18日
 36. Thomas Schrefl, Micromagnetics for rare earth reduced permanent magnets, Advances in Magnetism 2016, Bormio, Italy, 2016年3月15日
 37. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets / Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, Kolokvij na IJS (IEEE Magnetic Society Distinguished Lecture), Institut Jozef Stefan, Ljubljana, 2016年5月9日
 38. 宝野和博, H. Sepehri-Amin, T.T. Sasaki, T. Ohkubo, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, Summit of Materials Science 2016, Tohoku Univ., Sendai, 2016年5月18日-2016年5月19日
 39. Yasukazu Murakami, Analysis of Interface Magnetism by Transmission Electron Microscopy, EMN Prague Meeting Energy Materials Nanotechnology, Prague, Czech, 2016年6月21日
 40. Yasukazu Murakami, Electron Microscopy Studies on Magnetic Nanostructures, 2016 Japan-Germany Joint Symposium on Advanced Characterization of Nanostructured Materials for Energy and the Environment, Düsseldorf, Germany, 2016年6月28日
 41. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets / Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, IEEE Magnetic Society Distinguished Lecture, The Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, 2016年6月30日
 42. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets / Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, IEEE Magnetic Society Distinguished Lecture, ARCI, Chennai, 2016年7月7日
 43. 宝野和博, T.T. Sasaki, H. Sepehri-Amin, J. Liu, T. Ohkubo, Impact of atom probe tomography on the development of high coercivity Nd-Fe-B based magnets, SISS-18, Seikei Univ., Tokyo, 2016年7月21日-2016年7月22日
 44. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, 9th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM9), International Conference Center, Plenary Talk. 2016年8月1日-2016年8月5日
 45. *宝野和博, High-coercivity Dy-free Nd-Fe-B permanent magnets, The 24th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and Their Applications (REPM 16), Technical University of Darmstadt. 2016年8月28日-2016年9月1日
 46. *Thomas Schrefl, Coercivity in RE and MnAl(C) magnets, The 24th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and Their Applications (REPM 16) Darmstadt, Germany, 2016年8月30日

47. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets / Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, IEEE Magnetic Society Distinguished Lecture, CHINA IRON & STEEL RESEARCH INSTITUTE, 北京, 2016年9月22日
48. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets / Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, IEEE Magnetic Society Distinguished Lecture, Metal Industries Research & Development Centre, Kaohsiung, 2016年10月12日
49. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets / Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, IEEE Magnetic Society Distinguished Lecture, Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, Pennsylvania, 2016年10月25日
50. Yasukazu Murakami, Analysis of electromagnetic field in nanostructures by electron holography, The 36th Annual Nanotesting Symposium, Osaka, 2016年11月9日
51. 宝野和博, Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets / Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnets, IEEE Magnetic Society Distinguished Lecture, Institute Neel, Grenoble, 2016年11月15日
52. Thomas Schrefl, Demagnetizing fields and magnetization reversal in permanent magnets, TMS2017, San Diego, CA, 2017年2月26日-3月2日
53. Akimasa Sakuma, Theoretical study on the temperature dependence of magnetic anisotropy constants of rare earth permanent magnets, TMS2017, San Diego, CA, 2017年2月26日-3月2日
54. Y. Murakami, Electron holography studies of magnetic nanostructures in alloys, 5th Annual Congress of Analytix-2017, 2017年3月24日

② 口頭発表 (国内会議 39件、国際会議 30件)
(国内会議)

1. 秋屋貴博(物質・材料研究機構)、微結晶 Nd-Fe-B 焼結磁石の熱処理による微細構組織変化と保磁力、日本金属学会 2012 年秋期(第 151 回)講演大会、愛媛大学、2012 年 9 月 17-19 日
2. 唐木田春哉(物質・材料研究機構)、H-HAL 法による(Nd,Dy)-Fe-B 焼結磁石の Nd 組成による保磁力と組織の変化、日本金属学会 2012 年秋期(第 151 回)講演大会、愛媛大学、2012 年 9 月 17-19 日
3. J. Liu (物質・材料研究機構), Microstructure and Coercivity Relationships of Hot-deformed Nd-Fe-B Magnets, 日本金属学会 2012 年秋期(第 151 回)講演大会、愛媛大学、2012 年 9 月 17 日
4. H. Sepehri-Amin(物質・材料研究機構), Microstructural Features of High Coercivity Dy Diffusion Processed Nd-Fe-B Sintered Magnets, 日本金属学会 2012 年秋期(第 151 回)講演大会、愛媛大学、2012 年 9 月 17 日
5. 大久保忠勝(物質・材料研究機構)、マイクロマグネティクス計算による Nd-Fe-B 磁石磁化過程の解析、日本金属学会 2013 年春期(第 152 回)講演大会、東京理科大学、2013 年 3 月 29 日
6. W.B.Cui(物質・材料研究機構), Structure and chemical composition of Nd-rich phase in diffusion-processed Nd-Fe-B thin films with high coercivity, 日本金属学会 2013 年春期(第 152 回)講演大会、東京理科大学、2013 年 3 月 28 日
7. 佐々木泰祐(物質・材料研究機構)、微結晶 Nd-Fe-B 焼結磁石の微細組織と磁壁移動、日本金属学会 2013 年春期(第 152 回)講演大会、東京理科大学、2013 年 3 月 28 日
8. 秋屋貴博(物質・材料研究機構)、種々の永久磁石化合物における高温特性の評価、日本金属学会 2013 年春期(第 152 回)講演大会、東京理科大学、2013 年 3 月 28 日
9. 秋屋貴博(物質・材料研究機構)、RE-Cu 共晶合金低温拡散法の Nd-Fe-B バルク磁石への応用、第 37 回日本磁気学会学術講演会、北海道大学工学部(札幌市)、2013 年 9 月 3-6 日
10. GRUBER Maria Theresa (物質・材料研究機構), Microstructure and coercivity

- relationships in Nd-Fe-B model thin films, 第 37 回日本磁気学会学術講演会, 北海道大学工学部(札幌市), 2013 年 9 月 3-6 日
11. SepehriAminHossein (物質・材料研究機構), Finite element micromagnetic simulations of hot-deformed Nd-Fe-B magnets with directional intergranular phases, 第 37 回日本磁気学会学術講演会, 北海道大学工学部(札幌市), 2013 年 9 月 3-6 日
 12. 大久保忠勝(物質・材料研究機構)、複相組織を有する永久磁石の有限要素マイクロマグネティクス計算」、第 37 回日本磁気学会学術講演会、北海道大学工学部(札幌市)、2013 年 9 月 3-6 日
 13. 秋屋貴博(物質・材料研究機構)、熱間加工バルクネオジウム磁石への RE-Cu 共晶合金の低温拡散プロセス、マグネティクス研究会、日本電気計器検定所(港区芝浦)、2013 年 9 月 30 日
 14. SEELAMUma Maheswara Rao (物質・材料研究機構), Mechanism of Shell Structure Formation by HRE Grain Boundary Diffusion Process of Sintered Nd-Fe-B Magnets, 58th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference 2013, Sheraton Denver Downtown Hotel(Denver,USA), 2013 年 11 月 4 日-2013 年 11 月 8 日
 15. 二階堂友東(東北学院大学)、非磁性中間層を有する Nd-Fe-B 多層膜の構造と磁気特性、日本金属学会 2014 年春季(第 154 回)大会、東京工業大学、2014 年 3 月 21 日、2014 年 3 月 23 日
 16. 秋屋貴博(物質・材料研究機構)、熱間加工ネオジウム磁石に対する変形拘束拡散法の開発、日本金属学会 2014 年春季(第 154 回)大会、東京工業大学、2014 年 3 月 21 日-2014 年 3 月 23 日
 17. 佐々木泰祐(物質・材料研究機構)、微細粒焼結磁石の組織と保磁力に及ぼす炭素濃度の影響、日本金属学会 2014 年春季(第 154 回)大会、東京工業大学、2014 年 3 月 21 日-2014 年 3 月 23 日
 18. 秋屋貴博(物質・材料研究機構)、熱間加工ネオジウム磁石に対する低共晶温度合金拡散法、粉体粉末冶金協会平成 26 年度春季大会、早稲田大学国際会議場(東京都新宿区)、2014 年 6 月 3 日-2014 年 6 月 5 日
 19. 金子修平, 村上恭和, 赤瀬善太郎, 進藤大輔, 佐々木泰祐, 大久保忠勝, 宝野和博, 谷垣俊明, 新津甲大、暗視野電子線ホログラフィーを用いた Nd-Fe-B 焼結磁石の歪解析、日本金属学会春季講演(第 156 回)大会、東京大学駒場キャンパス、2015 年 3 月 18 日
 20. SepehriAminHossein, Influence of defects to the energy density of nanocomposite Nd-Fe-B/Fe magnets; a micromagnetic simulation study、日本金属学会 2015 年春季(第 156 回)大会(シンポジウム)、東京大学駒場キャンパス 2015 年 3 月 18 日-2015 年 3 月 20 日
 21. 佐々木泰祐、商用ネオジウム焼結磁石のマルチスケール組織解析、日本金属学会 2015 年春季(第 156 回)大会(シンポジウム)、東京大学駒場キャンパス 2015 年 3 月 18 日-2015 年 3 月 20 日
 22. 中川 綾介、嶋 敏之、土井正晶、宝野和博、Jun Liu、コラムナー構造を示す Nd-Fe-B 薄膜の作製と粒界拡散効果、日本金属学会 2015 年春季(第 156 回)大会、東京大学駒場、2015 年 3 月 18 日-2015 年 3 月 20 日
 23. J. Liu, K. Nakagawa, M. Doi, T. Ohkubo, T. Shima, K. Hono, Microstructure analysis of high coercivity Nd-Fe-B thin films, 日本金属学会 2015 年春季(第 156 回)大会、東京大学駒場キャンパス、2015 年 3 月 18 日-2015 年 3 月 20 日
 24. 金子修平、村上恭和、谷垣俊明、佐々木泰祐、赤瀬善太郎、新津甲大、進藤大輔、大久保忠勝、宝野和博、「暗視野電子線ホログラフィーによるNd-Fe-B焼結磁石の歪解析」、日本金属学会第 156 回大会、東京、2015 年 3 月 19 日
 25. 三浦 大介、佐々木 良、佐久間 昭正、「有限温度における Nd-Fe-B 磁石の結晶磁気異方性に関する理論研究」、日本物理学会第 70 年次大会、早稲田大学、2015 年 3 月 21 日

26. 佐々木泰祐、Nd リッチ Ga 添加 Nd-Fe-B 磁石の微細組織解析、日本磁気学会 第 39 回学術講演会、名古屋大学 東山キャンパス、2015 年 9 月 8 日-2015 年 9 月 11 日
27. SepehriAminHossein、Grain boundary/Interface modification of Nd-Fe-B sintered magnets by low melting temperature Nd-TM (TM : Cu, Al, Zn) alloys、日本磁気学会 第 39 回学術講演会、名古屋大学 東山キャンパス、2015 年 9 月 8 日-2015 年 9 月 11 日
28. 佐々木泰祐、Nd リッチ Ga 添加 Nd-Fe-B 磁石の微細組織解析、日本金属学会 2015 年秋期大会、九州大学伊都キャンパス、2015 年 9 月 16 日-2015 年 9 月 18 日
29. 三浦 大介、佐々木良、佐久間昭正、局在磁性体における結晶磁気異方性定数の一般論、日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大、2015 年 9 月 18 日
30. 村上恭和、佐々木泰祐、大久保忠勝、宝野和博、STEM 像のモワレ縞を利用した Nd-Fe-B 焼結磁石の歪解析、日本金属学会春期講演大会(第 158 回)、東京、2016 年 3 月 24 日
31. 村上恭和、佐々木泰祐、大久保忠勝、宝野和博、HAADF-STEM 像のモワレ縞を用いた Nd-Fe-B 磁石の歪分布解析、日本顕微鏡学会第 72 回学術講演会、仙台、2016 年 6 月 15 日
32. Lihua Liu, H. Sepehri-Amin, T.T. Sasaki, M. Yano, N. Sakuma, T. Shoji, A. Kato, T. Ohkubo K. Hono, Coercivity enhancement of hot-deformed Nd-Fe-B magnets by the eutectic grain boundary diffusion process, 日本磁気学会第 40 回学術講演会、金沢大学、2016 年 9 月 5 日-2016 年 9 月 8 日
33. X. Tang, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori, K. Hono, Coercivity enhancement in hot-deformed magnets processed from amorphous precursors, 日本磁気学会第 40 回学術講演会、金沢大学、2016 年 9 月 5 日-2016 年 9 月 8 日
34. 佐々木泰祐、大久保忠勝、高田幸生、佐藤岳、加藤晃、金子裕治、宝野和博、Microstructure-coercivity relationship in Nd-rich Ga-doped Nd-Fe-B sintered magnets, 日本磁気学会第 40 回学術講演会、金沢大学、2016 年 9 月 5 日-2016 年 9 月 8 日
35. 榎 裕太(物質・材料研究機構)、スピンモデルによる磁気異方性の有限温度特性に対する表面効果の解析、日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 14 日
36. 宝野和博 : “Dy-フリーネオジム磁石の開発動向” 2016 BM シンポジウム、東京、2016 年 12 月 9 日
37. 宝野和博 : “Dy-free high coercivity Nd-Fe-B permanent magnet” 物性研談話会、東京大学、2016 年 12 月 22 日
38. 榎 裕太(物質・材料研究機構)、スピンモデルによる局所磁化反転時におけるエネルギー障壁の外場依存性、日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学、2017 年 3 月 18 日
39. 兵頭 一茂(東北大)、Ga 添加した NdFeB 磁石の粒界相に析出する Fe-richNd(Fe,Ga) 合金の磁気構造に関する第一原理計算、日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学、2017 年 3 月 18 日

(国際会議)

1. H. Sepehri-Amin, “Microstructure and coercivity of Nd-Fe-B anisotropic magnets with nonmagnetic grain boundary phase”, INTERMAG 2012, Vancouver, 2012 年 5 月 8 日
2. H. Sepehri-Amin, “Atom Probe Tomography of Nd-Fe-B Permanent Magnets”, IFES2012, The University of Alabama, 2012 年 5 月 21 日
3. A. Sakuma, “Magnetic Properties of Nd-Oxides in the Grain-Boundaries of Nd-Fe-B Magnets”, The 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and Applications, Nagasaki, 2012
4. C. Mitsumata, “Influence of Surface Anisotropy on Orientation of Crystal Grain in Rare-Earth Permanent Magnet”, The 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and Applications, Nagasaki, 2012 年 9 月 4 日
5. T.T. Sasaki, “Multi-scale microstructure characterization of fine grained Nd-Fe-B sintered magnet”, REPM 2012, Nagasaki, 2012 年 9 月 4 日

6. T. Ohkubo, "The role of grain boundary phase on the magnetization process of Nd-Fe-B magnet", REPM 2012, Nagasaki, 2012 年 9 月 4 日
7. T. Akiya, "Microstructural study for degraded Nd-Fe-B magnet annealed at 400°C", ICAUMS 2012, Nara, 2012 年 10 月 4 日
8. H. Sepehri-Amin, "Enhancement of coercivity in rapidly quenched Nd-Fe-B powders by the Nd-Cu diffusion process", ICAUMS 2012, Nara, 2012 年 10 月 4 日
9. H. Sepehri-Amin, "Microstructure-coercivity relationship of hot-deformed Nd-Fe-B anisotropic magnets", 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, 2013 年 1 月 15 日
10. J. Liu, "Microstructure and coercivity relationships of hot-deformed Nd-Fe-B magnets", 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, 2013 年 1 月 15 日
11. H. Sepehri-Amin, Anisotropy inducement mechanism in hydrogen disproportionation desorption recombination processed Nd-Fe-B powders, IEEE International Magnetism Conference (Intermag), International Congress Center(Dresden,Germany), 2014 年 5 月 4-8 日
12. R. Nakagawa, M. Doi and T. Shima, Effect of Dy/ Cu cap layers for Nd-Fe-B thin films after heat treatment, The 23rd International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and their Applications (REPM2014), Annapolis (USA), 2014 年 8 月 17-21 日
13. LIU Jun, Atom probe tomography and electron microscopy study on hot-deformed Nd-Fe-B magnets, Atom Probe Tomography & Microscopy 2014, University of Stuttgart(Stuttgart,Germany), 2014 年 8 月 31 日-9 月 5 日
14. SepehriAmin Hossein, "Anisotropy inducement mechanism in hydrogen disproportionation desorption recombination processed Nd-Fe-B powders", IEEE International Magnetism Conference (Intermag), International Congress Center(Dresden,Germany), 2014 年 5 月 5 日
15. R. Nakagawa, M. Doi and T. Shima, "Effect of Dy/ Cu cap layers for Nd-Fe-B thin films after heat treatment", The 23rd International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and their Applications (REPM2014), Annapolis (USA), 2014 年 8 月 17 日-2014 年 8 月 21 日
16. SEELAMUma Maheswara Rao, "Coercivity and microstructure of Tb4O7 grain boundary diffusion processed sintered (Nd,Dy)-Fe-B magnets", Rare earth and future permanent magnets (REPM2014), REPM2014, The Westin Annapolis(Annapolis, Maryland, USA), 2014 年 8 月 18 日
17. Akimasa Sakuma, Theoretical Study on the Magnetic Properties of Nd-Rich Grain-Boundary Phase of Nd-Fe-B Magnets, The 23rd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and their Applications, Annapolis, USA, 2014 年 8 月 20 日
18. SepehriAmin Hossein, "Anisotropy inducement mechanism in hydrogen disproportionation desorption recombination (HDDR) processed Nd-Fe-B powders", REPM2014, The Westin Annapolis (Annapolis, Maryland, USA), 2014 年 8 月 21 日
19. LIU Jun, "Atom probe tomography and electron microscopy study on hot-deformed Nd-Fe-B magnets", Atom Probe Tomography & Microscopy 2014, University of Stuttgart (Stuttgart,Germany), 2014 年 8 月 31 日-9 月 5 日
20. 佐々木泰祐, Structure and chemistry of grain boundary phase in a Nd-rich Ga-doped Nd-Fe-B sintered magnet, 2016 Joint MMM-Intermag Conference, Hilton San Diego Bayfront in San Diego,San Diego ,United States, 2016 年 1 月 11 日-2016 年 1 月 15 日
21. 佐々木泰祐, Anisotropic nature of the grain boundary phase in Nd-Fe-B sintered magnets, 2016 Joint MMM-Intermag Conference, Hilton San Diego Bayfront in San Diego,San Diego ,United States, 2016 年 1 月 11 日-2016 年 1 月 15 日
22. Thomas Schrefl, Energy minimization methods for micromagnetics, 13th Joint MMM-Intermag Conference, San Diego, USA, 2016 年 1 月 14 日
23. Nobuyuki Umetsu, Yuta. Toga, Akimasa Sakuma, First principles study on interfacial magnetic structure in Nd₂Fe₁₄B/(Fe,Co) exchange spring magnets, 13th Joint MMM-

- Intermag, San Diego, USA, 2016年1月16日
24. J. Liu, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hono, Multiscale characterizations on hot-deformed Nd-Fe-B magnets, APT&M 2016, Gyeongju, South Korea, 2016年6月12日-2016年6月17日
 25. T. Ohkubo, H. Yokota, T. Oikawa, T. Schrefl, K. Hono, Micromagnetic simulation on the grain alignment dependence of coercivity in Nd-Fe-B sintered magnets, The 24th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and Their Applications (REPM 16) Darmstadt, Germany, 2016年8月28日-2016年9月1日
 26. H. Sepehri-Amin, I. Dirba, A. Schwobel, T. Ohkubo, O. Gutfleisch, K. Hono, Design of nanocomposite Nd-Fe-B/Fe magnets using micromagnetic simulation, The 24th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and Their Applications (REPM 16) Darmstadt, Germany, 2016年8月28日-2016年9月1日
 27. Thomas Schrefl, Energy minimization methods for micromagnetics, 13th Joint MMM-Intermag Conference, San Diego, CA, January 14, 2016. Johann Fischbacher, Magnetization reversal in Dy-diffused permanent magnets, MMM 2016, New Orleans, LA, 2016年11月3日
 28. K. Hono : “High coercivity Dy-free Nd-Fe-B permanent magnets” International Symposium on MMM 2016, 2016年11月23日-2016年11月25日
 29. T. Ohkubo, H. Sepehri Amin, K. Hono : “Microstructure and magnetic property of NdFeB magnet” CDMSI International Workshop, Tokyo, Japan, 2017年2月20日-2017年2月21日
 30. Thomas Schrefl, Micromagnetics of magnetization reversal in permanent magnets - nucleation and pinning in focus, 3N-Lab Workshop on Permanent Magnets, Tsukuba, Japan, 2017年3月24日

③ ポスター発表 (国内会議 20件、国際会議 23件)
(国内会議)

1. 岩間弘樹、二階堂友東、幕田裕和、土井正晶、嶋 敏之、Nd-Fe-B/Nd-Cu 薄膜及び円形配列試料の磁区構造観察、日本金属学会 2013 年秋期(第 153 回)大会、金沢大学、2013 年 9 月 16 日-2013 年 9 月 18 日
2. 出崎晶、土井正晶、嶋敏之、配向制御Nd-Fe-B ナノコンポジット薄膜の作製、日本金属学会 2013 年秋期(第 153 回)大会、金沢大学、2013 年 9 月 16 日-2013 年 9 月 18 日
3. 二階堂友東、土井正晶、嶋敏之、Nd-Fe-B/Nd/Cu 多層膜の構造と磁気特性、日本金属学会 2013 年秋期(第 153 回)大会、金沢大学、2013 年 9 月 16 日-2013 年 9 月 18 日
4. 出崎晶、土井正晶、嶋敏之、Nd-Fe-B ナノコンポジット磁石薄膜の配向制御と磁気特性、日本金属学会 2014 年春期(第 154 回)大会、東京工業大学、2014 年 3 月 21 日-2014 年 3 月 23 日
5. 二階堂友東、土井正晶、嶋敏之、非磁性中間層を有する Nd-Fe-B 多層膜の構造と磁気特性、日本金属学会 2014 年春期(第 154 回)大会、東京工業大学、2014 年 3 月 21 日-2014 年 3 月 23 日
6. 岩間弘樹、幕田裕和、栗田大地郎、土井正晶、嶋 敏之、MgAl₂O₄ 及び MgO 基板上に作製した FePt 薄膜の構造と磁気特性、日本金属学会 2014 年秋期(第 155 回)大会、名古屋大学、2014 年 9 月 24 日-2014 年 9 月 26 日
7. 出崎 晶、土井 正晶、嶋 敏之、Nd-Fe-B 複合磁石薄膜の配向制御と層間結合、日本金属学会 2014 年秋期(第 155 回)大会、名古屋大学、2014 年 9 月 24~26 日
8. 二階堂 友東、土井 正晶、嶋 敏之、Nd 系合金層拡散による Nd-Fe-B 薄膜の構造と磁気特性の変化、日本金属学会 2014 年秋期(第 155 回)大会、名古屋大学、2014 年 9 月 24 日-2014 年 9 月 26 日
9. 古内 貴大、土井 正晶、嶋 敏之、Nd-Fe-B 粒子状薄膜の Nd-Fe 層拡散による磁気特性の変化、日本金属学会 2014 年秋期(第 155 回)大会、名古屋大学、2014 年 9 月 24

日-2014年9月26日

10. 中川 綾介、土井 正晶、嶋 敏之、Nd 量の組成変調により作製した Nd-Fe-B 薄膜の構造と磁気特性、日本金属学会 2014 年秋期(第 155 回)大会、名古屋大学、2014 年 9 月 24 日-2014 年 9 月 26 日
11. 古内 貴大、石澤 裕介、嶋 敏之、土井正晶、Nd-Fe-B/Nd-Fe 薄膜の構造と磁気特性、日本金属学会 2015 年春期(第 156 回)大会、東京大学駒場、2015 年 3 月 18 日-2015 年 3 月 20 日
12. 岩間 弘樹、伊東 優、土井正晶、嶋 敏之、異なる MgO バッファー層上に作製した FePt 薄膜の構造と磁気特性、日本金属学会 2015 年春期(第 156 回)大会、東京大学駒場、2015 年 3 月 18 日-2015 年 3 月 20 日
13. 中川綾介、Al, Ga 添加による Nd-Fe-B 薄膜の構造と磁気特性、日本金属学会 2015 年秋期(第 157 回)大会、九州大学伊都キャンパス、2015 年 9 月 16 日
14. 古内貴大、Ti 添加による Nd-Fe 薄膜の構造と磁気特性、日本金属学会 2015 年秋期(第 157 回)大会、九州大学伊都キャンパス、2015 年 9 月 16 日
15. 菅原 彩、電子線描画による Nd-Fe-B 薄膜の微細加工と磁気特性、日本金属学会 2015 年秋期(第 157 回)大会、九州大学伊都キャンパス、2015 年 9 月 16 日
16. 金子修平、村上恭和、新津甲大、赤瀬 善太郎、進藤大輔、谷垣俊明、佐々木泰祐、大久保忠勝、宝野和博、暗視野電子線ホログラフィーを用いた Nd₂Fe₁₄B 結晶粒の歪分布の評価、日本金属学会 2015 年秋期(第 157 回)大会、九州大学伊都キャンパス、2015 年 9 月 16 日
17. 村上恭和、佐々木泰祐、大久保忠勝、宝野和博、HAADF-STEM 像のモワレ縞を利用した Nd-Fe-B 磁石の歪解析、第 57 回日本顕微鏡学会九州支部学術講演会、九州大学、福岡、2015 年 11 月 21 日
18. →28NIMS 外 菅原 彩(東北学院大学)、微細加工により作製した Nd-Fe-B 薄膜の磁気特性の擬似粒界相による影響、日本金属学会 2016 年春期(第 158 回)大会、東京理科大学葛飾キャンパス、2016 年 3 月 23 日-2016 年 3 月 25 日
19. 三浦 大介、有限温度における局在モーメント系の磁気異方性定数に関する摂動論、日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学、2016 年 9 月 13 日
20. 菅原 彩(東北学院大学)、グリッド形状を有する Nd-Fe-B 薄膜の磁気特性のサイズ効果、日本金属学会 2016 年秋期(第 159 回)大会、大阪大学豊中キャンパス、2016 年 9 月 21 日-2016 年 9 月 23 日

(国際会議)

1. S. Suzuki(東北学院大学), Y. Hatayama and T. Shima, Preparation of Nd-Fe-B thin films with columnar structure and their structure and magnetic properties, International Conference on Magnetism (ICM2012), Busan, Korea, 2012 年 7 月 8 日-2012 年 7 月 13 日.
2. S. Suzuki(東北学院大学), H. Hatayama, and T. Shima, Effect of Cap Layers on the Structure and Magnetic Properties for Nd-Fe-B Films with Columnar Structure, 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and their Applications (REPM2012), Nagasaki, 2012 年 9 月 2~5 日
3. H. Sepehri-Amin(物質・材料研究機構), T. Ohkubo, M. Hayashi, T. Shima, and K. Hono, Coercivity Mechanism in Nd-Fe-B Commercial Sintered Magnets, 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and their Applications (REPM2012), Nagasaki, 2012 年 9 月 2~5 日
4. Y. Hatayama(東北学院大学), S. Suzuki, T. Shima, Structure and Magnetic Properties for (Nd-Dy)-Fe-B / Nd-Cu Thin Films, 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and their Applications (REPM2012), Nagasaki, 2012 年 9 月 2~5 日
5. Y. Hatayama(東北学院大学), H. Abe; S. Suzuki, M. Doi, T. Shima, Effect of partial substitution of Dy for Nd-Fe-B / Nd-Cu thin films on the structure and magnetic properties,

- 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, 2013 年 1 月 14~18 日
6. S. Suzuki(東北学院大学), Y. Hatayama, T. Shima, Effect of non-magnetic layers on the structure and magnetic properties for Nd-Fe-B films and multilayers, 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, 2013 年 1 月 14~18 日
 7. H. Iwama(東北学院大学), S. Suzuki, T. Sato, H. Makuta, M. Doi, T. Shima, Effect of non-magnetic layer on the magnetization process for Nd-Fe-B thin films and circular dots, 12th Joint MMM/Intermag Conference, Chicago, 2013 年 1 月 14~18 日
 8. Y. Nikaido, M. Doi, and T. Shima, Preparation of highly oriented Nd-Fe-B multilayer films and their grain boundary diffusion, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA 2013), Taichung, Taiwan, 2013 年 7 月 22 日
 9. A. Dezaki, H. Abe, K. Takahashi, M. Doi, T. Shima, Fabrication of orientation controlled nano-composite magnetic thin film, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA 2013), Taichung, Taiwan, 2013 年 7 月 22 日
 10. H. Iwama, Y. Nikaido, S. Suzuki, T. Sato, H. Makuta, M. Doi and T. Shima, Effect of non-magnetic layer on the magnetization process for Nd-Fe-B thin films and circular dots, The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA 2013) Taichung, Taiwan, 2013 年 7 月 22 日
 11. R. Nakagawa, Y. Hatayama, S. Suzuki, T. Shima, Effect of Dy and Cu cap layers on the magnetic properties for Nd-Fe-B thin films, 6th International Workshop on Amorphous and Nanostructured Magnetic Materials (ANMM2013), Sendai, 2013 年 10 月 1 日.
 12. Aki Dezaki, Masaaki Doi, Toshiyuki Shima, Fabrication of Nd-Fe-B/ FePt nano-composite thin films and their magnetic properties, IEEE International Magnetism Conference (Intermag 2014), Dresden, Germany, 2014 年 3 月 3-8 日
 13. Y. Nikaido, M. Doi and T. Shima, Structure and magnetic properties of Nd-Fe-B multilayer films with non-magnetic intermediate layers, IEEE International Magnetism Conference (Intermag 2014), Dresden, Germany, 2014 年 3 月 3-8 日
 14. T. Furuuchi, H. Iwama, M. Doi and T. Shima, Effect of non-magnetic layer diffusion for Nd-Fe-B thin films with particulate structure, The 23rd International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and their Applications (REPM2014), Annapolis (USA), 2014 年 8 月 17-21 日
 15. Y. Murakami(東北大学多元研), T. Tanigaki, T. Sasaki, Y. Takeno, H. S. Park, T. Matsuda, T. Ohkubo, K. Hono and D. Shindo, Determination of magnetic flux density of grain boundary phase in Nd-Fe-B permanent magnets, 18th International Microscopy Congress, Prague, Czech, 2014 年 9 月 10 日
 16. R. Nakagawa, Effect of non-magnetic cap layers for Nd-Fe-B thin films with small addition of rare earth element, Intermag 2015 Conference, Beijing (China), 2015 年 5 月 11 日
 17. R. Nakagawa, Enhancement of coercivity through Nd-Cu eutectic reaction for Nd-Fe-B thin films, The 20th International Conference on Magnetism (ICM2015), Barcelona (Spain), 2015 年 7 月 5 日
 18. T. Furuuchi, Effect of Nd-Fe layer on the hard magnetic properties for Nd-Fe-B thin films, The 20th International Conference on Magnetism (ICM2015), Barcelona (Spain), 2015 年 7 月 5 日
 19. A. Sugawara, Fabrication of Nd-Fe-B circular dot arrays and their structure and magnetic properties, Magnetism and optics research international symposium 2015 (MORIS2015), Penang (Malaysia), 2015 年 11 月 29 日
 20. A. Sugawara (Tohoku Gakuin Univ.), Effect of microfabrication method on magnetic properties for Nd-Fe-B thin films, The 4th International Conference of the Asian Union of Magnetic Society (ICAUMS2016), Tainan(Taiwan), 2016 年 8 月 1-5 日
 21. D. Miura (Tohoku Univ.), Perturbative treatment of anisotropy constants based on

- constrained monte carlo method, The 24th International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and their Applications, Darmstadt, Germany, 2016年8月31日
22. X. Tang, H. Sepelri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori, K. Hono, Coercivity enhancement in hot-deformed magnets processed from amorphous precursors, The 24th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and Their Applications (REPM 16) Darmstadt, Germany, 2016年8月28日-2016年9月1日
23. A. Sugawara (Tohoku Gakuin Univ.), Magnetic properties of microfabricated Nd-Fe-B thin films with grid pattern, The 61th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2016), New Orleans (USA), 2016年10月31日-11月4日

(4)知財出願

①国内出願 (3件)

1. 発明の名称:希土類磁石の製造方法、発明者:秋屋貴博・宝野和博・大久保忠勝・セペリアミンホセイン・日置敬子・服部篤、出願人:NIMS および大同特殊鋼株式会社、出願日:2013年10月24日、出願番号:特願2013-2209082.
2. 発明の名称:希土類磁石及びその製造方法、発明者:矢野正雄、佐久間紀次、真鍋明、加藤晃、シーラムウママヘスワラオ、劉麗華、秋屋貴博、セペリアミンホセイン、大久保忠勝、宝野和博、出願人:トヨタ自動車株式会社、国立研究開発法人物質・材料研究機構、出願日:2014年12月12日、出願番号:特願2014-252325.
3. 発明の名称:希土類異方性磁石材料およびその製造方法、希土類磁石前駆体材料およびその製造方法、発明者:平山悠介、高橋有紀子、宝野和博、広沢哲、出願人:国立研究開発法人物質・材料研究機構、出願日:2014年8月18日、出願番号:特願2014-165769

②海外出願 (0件)

③その他の知的財産権(0件)

(5)受賞・報道等

① 受賞

1. *TMS Life Time Membership、宝野和博、2012年7月
2. 平成25年度(2013年)ISAMMA 2013(The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications) Taichung, Taiwan, July 21-25, 2013、国際会議最優秀ポスター賞(Best Poster Award)受賞、出崎晶、Fabrication of orientation controlled nano-composite magnetic thin film.
3. *日本磁気学会業績賞(MSJ Achievement Award)、宝野和博、2013年9月4日
4. 平成25年度(2013年)ANMM2013(6th International Workshop on Amorphous and Nanostructured Magnetic Materials) Sendai, 2013年9月30日-10月3日、国際会議最優秀ポスター賞(Best Poster Award)受賞、中川亮介、Effect of Dy and Cu cap layers on the magnetic properties for Nd-Fe-B thin films.
5. “Honorary Membership “ The Indian Institute of Metals (IIM)、宝野和博、2013年11月18日
6. *日本金属学会第20回増本量賞、宝野和博、2014年3月21日
7. 日本金属学会春期(第156回)大会 優秀ポスター賞、岩間弘樹、2015年3月20日
8. *ゴットフリード・ワグネル賞 2015: 粒界エンジニアリングによるジスプロシウムフリー高特性ネオジム磁石の開発、ドイツ・イノベーション・アワード、Hossein Sepelri-Amin、グランドハイアット東京、2015年6月30日
9. 第25回奨励賞、日本金属学会、Hossein Sepelri-Amin、九州大学伊都キャンパス、2015年9月16日

10. *The 2016 Distinguished Lecturer: 宝野和博、The IEEE Magnetics Society、2015年9月24日
11. ポスター賞、REPM 2016(The 24th International Workshop on Rare-Earth and Future Permanent Magnets and Their Applications)、Xin Tang、Coercivity enhancement in hot deformed magnets processed from amorphous precursors.、2016年8月31日
12. *第27回つくば賞、一般財団法人 茨城県科学技術振興財団、宝野和博、ナノ構造制御による先進磁性材料の開発、2016年11月22日

② マスコミ(新聞・TV等)報道(プレス発表をした場合にはその概要もお書き下さい。)

1. 「ジスプロシウムフリーネオジム磁石の開発 微細組織の制御で熱間加工磁石を高性能化」(2014年3月26日付NIMSプレスリリース)、H26年3月27日付日本経済新聞13面および日本経済産業新聞11面、2014年3月28日付化学工業新聞7面、日刊鉄鋼新聞3面および日刊工業新聞3面
2. NIMS プレスリリース、「レアアース量の少ない新規磁石化合物の合成に成功 最強の磁石化合物 Nd₂Fe₁₄B を超える磁気特性」、2014年10月20日
3. 日経産業新聞、「ネオジム10%減で磁石 物材機構が新材料」、2014年10月21日
4. 日本経済新聞、「希少物質不要の磁石開発挑む」、2014年10月21日
5. 鉄鋼新聞、「ネオジム磁石超す新化合物 物質・材料研が合成に成功」、2014年10月22日
6. 鉄鋼新聞、「物質・材料研 磁石用に新化合物合成 省レアアース10%を実現」、2014年10月22日
7. 日刊工業新聞、「磁石化合物 希土類使用10%低減 物材機構、実現化目指す」、2014年10月22日
8. 日刊工業新聞、「ネオジム磁石 レアアース量2/3 物材機構が化合物開発」、2014年10月22日
9. Materials Today、「Synthesis of a new lean rare earth permanent magnetic compound superior to Nd₂Fe₁₄B」、2014年10月28日
10. 産経新聞、「物質機構、新たな磁石材料を開発 レアアース1割削減可能に」、2014年11月3日
11. 株式会社ニュートンプレス、「Newton(a Japanese graphic science magazine, Volume 34, No. 11)」Topics「現代の錬金術—新材料をつくりだせ!」、2014年11月号

③ その他

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

- JST 産学共創基礎基盤研究プログラム「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」に採択され、現在実施中 課題名「ネオジム磁石の超微結晶化による高温磁石特性の飛躍的改善」(H28~32)

②社会還元的な展開活動

- 本研究成果を元に、「すごい磁石」(著者:宝野和博、本丸諒)という初心者向け書籍を執筆し、最先端の磁石研究をわかりやすく解説した。
- IEEE Magnetics Society の Distinguished Lecturer として、世界14カ国で38講演。CREST 研究成果のアウトリーチ

§ 5 研究期間中の活動

5.1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2015/6/18-19	ESICMM-G8 Symposium on Next Generation Permanent Magnets	物質・材料研究機構 (茨城県つくば市)	150名	Advances on experimental and theoretical investigations toward next generation high performance permanent magnets. Both rare earth magnets and rare earth free magnets will be covered in this workshop. Benchmarking of potential magnetic properties of newly proposed magnets with respect to the existing magnets in view of the amount of natural resources and cost of raw materials and processing.
2017/3/24	3 N-Lab Workshop on Permantet Magnets	物質・材料研究機構 (茨城県つくば市)	120名	Advances on experimental and theoretical investigations toward next generation high performance permanent magnets.

§ 6 最後に

Fig. 3-6 に示したように、Dy フリーで 4%Dy 含有焼結磁石を超える室温特性を達成したのみならず、熱間加工磁石では結晶粒径が焼結磁石の 1/20 程度となるために保磁力の温度依存性が改善される。それに加え、自動車用駆動モーターにおける冷却技術が進歩したことにより、熱間加工磁石では室温保磁力が 2.5 T で用途的に十分であることを示した。残留磁化を犠牲にすれば、2.5 T は共晶合金拡散処理した熱間加工磁石で達成可能であり、今後は 2.5 T の保磁力を 1.4 T に迫る高い残留磁化で達成できるかが技術的課題となる。本研究では最終目標に向かってやり残したことはあるが、それに向かっての技術的な道筋と学術的な根拠を示すことができた。本研究ではこれまで多くの謎につつまれていた Nd-Fe-B 磁石の保磁力のメカニズムに迫る学術的に大きな進展を達成することが出来た。本研究の成果として発表された Nd-Fe-B 磁石の微細構造と保磁力に関する学術論文は、磁石コミュニティーで圧倒的に高い比率で引用されており、本研究に参画した研究者は世界の磁石関連国際会議における招待講演者の常連となっている。また本研究で示した Nd-Fe-B 磁石の微細構造のマルチスケール解析は磁石メーカーや大学における規範となっており、ある焼結磁石メーカーでは NIMS で確立した磁石解析法と大規模マイクロマグネティックシミュレーション法をそのまま自社の解析部門に導入している。このように本研究が国内外の永久磁石研究に与えた影響は大きいと自己評価する。やり残された課題は今後、JST 産学共基礎基盤研究技術テーマ「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」で継続する。

本研究課題の研究費の多くが収差補正 STEM の導入に使われたが、それに見合う成果が十分に得られたと自己評価している。世界的に収差補正電子顕微鏡は普及しているが、どの研究機関においても使用制約が多く、とくに強磁性材料の観察は共用装置では嫌われる。本プロジェクトで導入した収差補正 STEM は Lorentz TEM の機能も有し、永久磁石材料の解析のみならず、多くの磁性材料・スピントロニクスデバイスの観察にも活用された。それら永久磁石課題以外での成果も含めれば、非常に多くの学術成果に繋がった。