

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成29年1月26日

評価委員：

- 下山淳一 青山学院大学 理工学部 物理・数理学科 教授
- 田中雅明 東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授
- 田中陽一郎 山形大学大学院 理工学研究科 教授
- 山部紀久夫 筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授

確定年月日：平成29年4月7日

プロジェクト名	省エネ磁性材料の研究開発
研究責任者の所属・役職・氏名	フェロー/磁性材料ユニット・ユニット長・宝野和博
実施期間	平成23年度～平成27年度
研究目的と意義	<p>省エネルギーやデータストレージに貢献できる新規の磁性材料とそのデバイス応用に必要な基礎・基盤研究を行う。磁化反転やスピン散乱を制御するために、磁性体とその複合体のナノ構造を高度に制御し、省エネルギーに貢献する永久磁石材料開発、データストレージの高密度化に必要な超高密度磁気記録媒体と磁気センサーの開発、低消費電力型磁気ランダムアクセスメモリ開発のためのトンネル磁気抵抗素子の開発、次世代演算素子を可能とする磁性に基づく新規現象の探索、磁性に基づく熱電現象などに関する基礎研究を実施する。また、3DAP（3次元アトムプローブ）やTEM（透過電子顕微鏡）などのナノ解析手法の磁性材料・デバイス解析への応用と磁壁移動を観察・シミュレートする技術を発展させる。</p> <p>永久磁石材料は日本産業の牽引役となっているハイブリッド・電気自動車に必須の材料である。爆発的に増大しているデータストレージを担うハードディスクドライブの高密度化には磁性材料のナノ構造を極限にまで制御した磁気記録媒体と磁気センサーの大きな変革を必要としている。またDRAMに代わる不揮発性の磁気ランダムアクセスメモリはIT機器の消費電力を大きく下げることになる。さらに磁性を応用した新たな熱電素子の可能性も出始めてきており、これらの実用化には新規な磁性材料のナノ構造を原子レベルで制御してデバイス化する技術が必要とされている。本研究はこれら次世代の磁性材料の最先端の応用技術を支えるための基礎研究として工学的意義が大きい。</p>
研究内容	<p>磁性体および磁性体と非磁性体から構成される材料ならびに人工積層構造とそれらの界面構造・組成をナノスケールで制御することにより、優れた特性を持つ永久磁石材料、超高密度磁気記録媒体、再生ヘッド材料、低消費電力型メモリ、磁性に基づく熱電現象に関する基礎研究を行う。また磁気抵抗や磁壁移動に適した強磁性材料の探索も同時に行う。これらの探索材料を用いて、磁石特性、磁気記録特性、再生・記録特性、不揮発メモリ特性、熱電特性を発現する磁性体の3次元構造体を様々なプロセスにより構築する。また、デバイス構築のナノ構造制御に必須の技術となる3DAP、TEMなどのナノ解析技術ならびに磁区観察技術とそれをシミュレートする手法を発展させる。</p>
ミッションステートメント (具体的な達成目標)	<p>省エネルギーに大きく貢献する磁性材料と磁気デバイスの開発。(1)重希土類元素(Dy)を用いない高保磁力磁石の開発、(2)4T(テラ=兆)bit/in²対応のFePt系熱アシスト磁気記録媒体の開発、(3)ギャップ長20nm以下で□V>10mVの面直電流型巨大磁気抵抗素子開発とそのマイクロ波発振、局所スピンバルブなどの4Tbit/in²対応記録再生ヘッドの基盤技術、(4)室温での電流スピン分極率(P)>0.75の強磁性ハーフメタルの探索、(5)STT-MRAM(電流による磁化反転タイプの磁気抵抗ランダムアクセスメモリ)の基盤技術となる10⁵A/cm²台の低電流密度書込可能なTMR(トンネル磁気抵抗)素子、(6)Si基板上に作製された磁気抵抗素子で室温磁気抵抗比>200%の達成、(7)スピンホール効果、スピン軌道トルクなどの新規スピントロニクス現象の基礎研究、(8)ナノ</p>

<p>平成23年度～平成27年度までの主な研究成果(アウトプット)及び研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)</p>	<p>解析による上記材料・デバイスの機能発現メカニズムの解明、を目指す。</p> <p>1) 主な研究成果(アウトプット) :</p> <p>(1) Dy フリー高保磁力 Nd-Fe-B 磁石 : 共晶合金拡散法を熱間加工磁石に適応し、Dy フリーで HVE 応用に必要な高保磁力と、同保磁力レベルの従来磁石よりも高エネルギー積を達成。(2)熱アシスト磁気記録媒体の開発 : FePt-C グラニューラー系薄膜で熱アシスト磁気記録方式に最適なナノ構造を制御する方法を開発、次世代 HDD 産業 R&D におけるプロトタイプ媒体を確立。(3)ホイスラー合金 CPP-GMR 素子 : 新規ホイスラー合金 $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}, \text{Ge})$ 強磁性層と新規スペーサ層を用いた CPP-GMR 素子で世界最高 MR 比 82% を達成。並行して実用的な観点から、Si 基板上に多結晶磁気抵抗素子を成長、CPP-GMR を HDD 再生ヘッド応用の観点から検討。また $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}, \text{Ge})$ を用いた面内スピナルブでヘッド応用に必要なスピン出力が得られることを実証。(4)スピネルバリア MTJ: MgO に変わる MgAlO をバリアとした MTJ で MgO バリアに対する優位性を検証。(5) 巨大界面垂直磁気異方性 : Fe/MgO 系、$\text{Co}_2\text{FeAl}/\text{MgO}$ 系の垂直磁気異方性を界面形成プロセスとともに研究、Fe/MgO 系で 1.4 MJ/m^3 という巨大な垂直磁気異方性を実現すると同時にその、メカニズム解明。(6) 高効率磁化電流反転技術の開発 : 極薄の磁性層を非磁性重金属層と酸化物層で挟んだ磁性ナノヘテロ接合において、Ta 金属層の膜厚をわずかに数原子層程度変化させるだけで、磁性層における磁化方向の電氣的制御効率を大幅に向上。5d 遷移金属のスピンホール角や 5d/3d 遷移金属界面におけるジャロシンスキー守谷相互作用を決定。(6)磁性材料・スピントロニクス素子のナノ解析 : ネオジム磁石やスピントロニクスデバイスのナノ解析により微細構造と特性の因果関係を調査し、機能発現メカニズムを解明。</p> <p>2) 研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト) :</p> <p>Dy を使わずに現行の $(\text{Nd}_{0.7}\text{Dy}_{0.3})\text{-Fe-B}$ 高保磁力磁石と同等の特性を目指した研究成果とそれに至る基礎研究はネオジム磁石に関する世界最高水準の研究として世界的に注目され、産業界へのインパクトも大きい。この実績に基づき、元素戦略磁性材料研究拠点が NIMS に発足された。熱アシスト磁気記録媒体として開発した MgO/FePt-C 系媒体は現在のところ唯一応用に適した媒体として、全ての HDD メーカーの R&D におけるプロトタイプとなっている。またホイスラー合金 CPP-GMR 素子ならびに面内スピナルブの研究は HDD 再生ヘッドの開発動向を定めるものとして産業界の研究に大きな影響を与えている。Fe/MgO の極薄膜で 1 MJ/m^3 という異常に高い界面異方性による垂直異方性が得た結果は、STT-MRAM 用 p-MTJ に使われている CoFeB 合金の垂直膜に替わる新材料として発展している。重金属層のスピンホール効果を用いた低電流磁化反転技術は超高速 3 端子 MRAM 技術へ展開されており、スピン軌道相互作用に起因した物理現象に関する学術研究としても広がっている。また、本プロジェクトで発展させたネオジム磁石のマルチスケール解析手法は現在民間企業の研究室に移転された。</p>
<p>プロジェクトの目標の達成度合い及び自己点検・評価</p>	<p>プロジェクトの目標の達成度合い : 当初の目標を目指して研究を推進、必要な場合は途中一部の目標を修正しつつ、目標は十分に達成した。</p> <p>自己点検・評価 : 各研究項目は国際的な産業界のニーズを反映しながら目標設定を行い、磁性材料・スピントロニクス素子を実用化する上で乗り越えなければならない基礎的な問題に取り組み、それらを解決するよう努力した。特に Dy フリーネオジム磁石、熱アシスト磁気記録媒体の構造制御、新規磁性材料を用いた次世代再生ヘッド、新材料を用いた STT-MRAM 用 TMR 素子開発、スピン軌道効果の評価手法の確立など、産業界では取り組めない萌芽的技術の検証に取り組み、学術的にも技術的にも世界的に注目される成果を挙げた。得られた成果は高い水準の学術論文として公表、特許性のあるものについては出願・取得を行った。これらを通して本プロジェクトの成果を学会・産業界に広く普及させたことから、公的機関で推進するに相応しいプロジェクトであった</p>

	と高く評価できる。
【評価項目】	コメント
<p>①研究計画、実施体制、マネージメント、連携 (事前・中間評価の結果を受けて、ロードマップに問題はなかったか、実施体制は十分だったか、マネージメントの是非、連携の範囲や連携課題、連携の成果はどうだったか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・プロジェクトの体制及び外部との協力関係は複雑であるがうまくマネージメントされている。 ・定年制職員 12 名の少数人員でありながら、産業及び学術連携により高い研究効率を生みだしている点は、研究責任者のマネージメント能力を評価したい。 ・成果が多いことも良好な研究開発体制であった裏付けになっている。 ・この研究戦略については、多分野への横展開を図る上で参考にすべき点が多い。 ・リーディング企業との積極的な連携共同研究により、実業における最先端デバイスに対するニーズを汲み取る仕組みをうまく活用している。 ・積極的な外部資金導入と連携研究先からのニーズ情報の活用が有益に機能している。 ・共同研究成果は公表（特許化の余裕日もみせる）している。 ・各テーマとも高いレベルの成果を挙げている。 ・高い論文、特許という出力がある。 ・原理的な研究成果も出ており、使命を果たしている。 ・高度なナノ組織解析技術と理論追求の両輪に強力にサポートされた磁性材料及び機能デバイス開発体制・研究戦略を遂行しており、材料物性に基礎を置く研究開発の規範たりうる。 ・共同研究の際のサブテーマのすみ分けがよい。 ・実験（解析）結果と理論の融合がうまくいっている。 ・ナノ解析も高い機能を果たしている。 ・希少金属 Dy を使わない永久磁石の開発・磁気記録材料の開発は学術的にも応用面でもすばらしい研究成果である。
<p>②プロジェクトの具体的な達成度 (目標は達成されたか、学術的価値、社会的価値、経済的価値の創造につながったか、技術レベルの向上につながったか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・各テーマとも達成度は高い。 ・原理解明から応用まで広く使命を果たしている。 ・目標とする TMR（トンネル磁気抵抗効果）1000%は達成されていないが、重要な研究指針を得たと考えて良い。 ・企業との共同研究が多く、社会に発信しやすい取り組み方である。 ・ナノ解析の有効性などを示し、解析法を提示したことは物質開発の手法提供の観点から大きい成果である。 ・磁性材料のナノ解析については、サブテーマ 1～3 の研究活動に効果的に活用されている。 ・サブナノスケールの原子組織構造と磁性及びスピントロニクス機能との関係を解明することに貢献し、本プロジェクトの推進力になっている。 ・重希土類元素 Dy を使わずに NdFeB 結晶間交換結合分断により優れた性能の異方性磁石を開発し、目標となる研究開発指針を達成した。 ・これは自動車駆動系に関する省エネルギー施策への貢献が大きい。 ・新規媒体が磁気記録を主導するという本質を良く理解した実用化アプローチと評価できる。 ・高保磁力磁石、磁気記録など新しく注目される成果が得られている。 ・CPP-GMR（膜垂直通電型巨大磁気抵抗）で室温 82%（低温 280%）の MR（磁気抵抗）はすばらしい。 ・次世代磁気記録方式の本命と期待される熱アシスト記録を牽引する媒体として、C 濃度傾斜 FePt 成膜と MgTiO 下地層を開発した。 ・加えて、ホイスラー合金を用いた高 ΔRA（抵抗・面積変化）の高速動作 CPP-GMR の研究と、再生分解能を高めるシールド間狭小化技術を合わせ、今後 4Tb/in² 以上の記録密度を達成するキー技術として、IoT 及びビッグデータ解析を支えるインフラへの貢献が期待できる。

	<ul style="list-style-type: none"> ・非局所スピバルブ素子においては、世界最高のΔR_s 値を達成している。 ・不揮発性 MRAM（磁気ランダムアクセスメモリ）はコンピューティングのアーキテクチャを根本から変革し得る重要技術である。 ・また MgO 多結晶膜上でも単結晶同等の TMR を得ており、規則合金系 TMR 素子の Si 基板上でのスピン注入磁化反転メカニズムの学理探求も期待したい。 ・スピネルバリア格子定数制御とホイスラー合金の格子整合 MTJ（磁気トンネル接合）により TMR=342%@RT という優れた特性を得たこと、極薄ホイスラー合金により大きな界面垂直異方性を確認できた。 ・超省電力演算を担う低電流磁化制御の重要なステップとして、スピン軌道相互作用が大きい非磁性重金属と強磁性金属の薄膜ヘテロ構造において、スピンホール効果によるスピン流が磁化に作用するトルクを測定する手法を確立した。 ・駆動電流密度 $1 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ の目標実現は明確ではないが、DMI（ジャロシンスキー・守谷相互作用）効果と遷移金属電気陰性度の依存を示すなど、多面的なアプローチが見られる。 ・これらを産業化にもつなげてもらいたい。
<p>③研究開発の進捗状況 （研究により得られた成果は、世界レベルで比較して高いか、予算に見合った成果が得られたか、将来の新しい研究の芽が得られたか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・各テーマにおいて世界レベルの成果を得ている。 ・5年という期間の成果としては達成されている。 ・独自性が高くインパクトが大きな成果が得られており、いくつかは永く実用される技術が含まれている。 ・もちろん完全理解には継続が必要である。 ・Dy を含まない高性能 NdFeB 磁石として世界最高レベルの特性を達成し、今後のモーター高性能化の展開が期待できる。 ・またホイスラー合金 CPP-GMR 素子として世界最高の MR 比を達成した。 ・スピネル系 TMR 素子では、スピネル系バリア材料の開発成功によって単結晶以外の選択肢を増やし TMR 比 300%超を達成した。 ・STT-MRAM（電流による磁化反転タイプの磁気抵抗ランダムアクセスメモリ）の低電力化に向けた低電流磁化反転技術では、スピンホール効果によるスピン流が磁化に作用する状況を制御する基盤研究で成果をあげた。 ・高速3端子 MRAM の展開に期待できる。
<p>④見込まれる直接の成果（アウトプット）、効果・効用（アウトカム）や波及効果（インパクト） （質の高い論文・特許が多く出たか、新技術や実用材料につながるか、思いがけない成果があったか、他分野への波及効果はあるか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・定年制職員 12 名の少数精鋭体制で、産学連携を駆使して 196 件の多数の研究論文と 164 件の招待講演、更に 42 件の特許出願を実施したことは多いに評価できる。 ・論文・特許ともすくなくとも数量的には達成の域にある。 ・永久磁石や磁気記録材料の開発をはじめ、社会へのインパクトは大きい。 ・特に、普及力のある方法での成果であることは評価できる。 ・磁性材料は競合物質技術が多いなか、優位に差別化できる複数の技術開発が可能な成果が挙げられている。 ・今後技術の産業界展開を積極的に図るとともに、その活動の中から新しい研究ニーズとシーズを抽出されることを期待する。
<p>総合評価点平均 （10点満点）</p>	<p>9.5点 （小数第二位四捨五入）</p>
<p>その他 研究全体に対する総合的な所見、①～④に入らない所見、問題点、あるいはプロジェクトに対する印象など自由にご記入ください</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・磁性材料・スピントロニクスはきわめて重要な分野であり、本グループは材料を中心にこの分野の発展に大きく貢献している。 ・顕著な成果が多く、また今後の発展が期待できるものが多かった。 ・先が見えない基礎的な材料、物性研究も長期的視野で続けてほしい。 ・NIMS として、今後のますますのこの分野への注力に期待する。 ・他のプロジェクトに比べて研究者人数が少ないようにみえるが、若手の採用も含め、もっと人材をこの分野に向けてもよいのではないかと。

第3期中長期計画プロジェクトの事後評価基準

評価点	評価	評価基準
10	S	全ての点において模範的に優れていた。 多くの点において模範的に優れていた。
9		
8	A	総合的に優れていた。 顕著な成果が出た優れたプロジェクトであった。
7		
6		
5	B	平均的なプロジェクトであった。 一部の計画の見直しが必要であった。
4		
3		
2	C	期待されたほどではなかった。 計画を大幅に見直して実施すべきであった。
1		