

プロジェクト中間評価報告書

評価委員会開催日：平成25年12月25日

評価委員：（敬称略、五十音順）

天野 浩 名古屋大学大学院工学研究科 教授
 大塚洋一 筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授
 田中雅明 東京大学大学院工学系研究科 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26年2月17日

| | |
|----------------------------|---|
| プロジェクト名 | 省エネ磁性材料の研究開発 |
| 研究責任者の氏名・所属・役職 | 宝野和博 フェロー/磁性材料ユニット長 |
| 実施予定期間 | 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磁性材料の探索とそのデバイス応用に関する基礎研究を行う。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(MRAM)開発のためのトンネル磁気抵抗(TMR)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などを実施する。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・電気自動車で必須の材料である。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(HDD)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（ダイナミックランダムアクセスメモリ）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。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$\Delta V > 10$ mVの面直電流型巨大磁気抵抗(CPP-GMR)素子開発とそのマイクロ波発振、局所スピントルバなどの4Tbit/in²対応記録再生ヘッドの基盤技術、(4)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)Spin-MRAMの基盤技術となる10⁵ A/cm²台の低電流密度書込可能なTMR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(MR)比>200%の達成、(7)磁壁移動型メモリ基盤技術、(8)ナノ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>平成23年度～平成25年度中間評価時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>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：第一期中期計画で開発した Nd-Cu 共晶拡散法を熱間加工磁石に適用し、Dy フリーで 2.2 T の高保磁力を達成し、同じ保磁力レベルの Dy 含有磁石よりも高いエネルギー積を達成した。</p> <p>(2) FePt 系熱アシスト磁気記録媒体の開発：平均粒径 6 nm、粒子サイズ分散 15% の垂直磁化高保磁力 (FePt)_{0.9}Ag_{0.1}-30vol%C グラニューラー薄膜を Si またはガラス基板上に MgO 下地を RF スパッタすることにより作製することに成功、熱アシスト磁気記録方式としては発表当時世界最高の 550 Gbit/in² を超える記録密度を実証することに成功した。</p> <p>(3) 新規ホイスラー合金を用いた CPP-GMR 素子：新規ホイスラー合金電極 Co₂Fe(Ga, Ge) を用いた CPP-擬スピナルブ素子で世界最高レベルの MR 比 57.2% を得ると同時に、実用的な観点から、Si 基板上に多結晶の多層膜磁気抵抗素子を検討し、低温アニールによりエピタキシャル膜相当の磁気抵抗比が得られることを実証した。また Si 基板を用いて (001) 配向多層膜磁気抵抗素子を創製することに成功し、自然配向により得られる (011) 面界面よりも高い磁気抵抗出力が得られることを世界で初めて実証した。</p> <p>(4) 巨大界面垂直磁気異方性：Fe/MgO 系の垂直磁気異方性の大きさを界面形成プロセスとともに研究した結果、1.4MJ/m³ という従来の報告値を大幅に上回る巨大な垂直磁気異方性を実現した。</p> <p>(5) 高効率磁化制御技術の開発：極薄の磁性層を非磁性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、非磁性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気的制御効率を大きく変えられることを見出した。</p> <p>(6) ネオジウム磁石の保磁力発現機構の解明：ネオジウム磁石の微細構造解析により微細構造と保磁力の因果関係を調査し、新しい保磁力メカニズムを提唱、磁石コミュニティに大きなインパクトを与えた。</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 (Nd_{0.7}Dy_{0.3})-Fe-B 高保磁力磁石と同等の特性を目指した研究成果はネオジウム磁石に関する高水準の基礎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。熱アシスト磁気記録媒体として開発した FePtAg-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 メーカーで追試されている。またホイスラー合金 CPP-GMR 素子研究の成果は 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。またヘッド応用を目指した非局所スピナルブの研究例は少なく、本プロジェクト成果はヘッドの将来技術動向を定めるものとして、HDD メーカーから多大な関心を集めている。Fe/MgO の極薄膜で 1 MJ/m³ という異常に高い界面異方性による垂直異方性を得た結果は、現在 STT (Spin-Transfer-Torque)-MRAM 用 p-MTJ (磁気トンネル接合) に使われている CoFeB 合金の垂直膜に替わる新材料の一つとして今後大きな注目を集めると予想される。また、本プロジェクトで発展させたネオジウム磁石解析手法は現在いくつかの民間企業にそのまま移植されている。独自に開発した UV レーザーアトムプローブは、従来不可能と考えられていた絶縁性物質の解析や絶縁体基板上の素子解析を可能とし、アトムプローブの応用範囲を著しく拡大し、材料解析分野に与えたインパクトも大きい。</p> |
| <p>中間評価時の進捗状況及び自己点検・評価</p> | <p>中間評価時の進捗状況：</p> <p>予定通りの進捗で目標を達成できる。個々の成果の産業界に与えるインパクトは極めて高い。</p> <p>自己点検・評価：</p> <p>各研究項目は産業界の意見を反映しながら進めており、磁性材料を実用化す</p> |

| | <p>る上で必要とされている基礎的な知見を産業界に提供しつつある。特に熱アシスト磁気記録媒体、次世代再生ヘッド、STT-MRAM を実現するために必要な基礎的な素子の新材料を用いた実験検証など、産業界ではリスクが高すぎる萌芽的段階の技術の検証など、重要な成果を挙げてきた。</p> |
|---|--|
| 【評価項目】 | コメント |
| <p>① <u>研究計画、実施体制、マネジメント、連携</u> (研究開発の方向性・目的・目標の見直し、計画・ロードマップの問題点、実施体制・マネジメントの改善、連携のあり方、ほか)</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 研究開発の方向性・目的・目標の設定は妥当である。 ・ 各サブテーマの位置付けもはっきり意識されている。 ・ 3年間で選択と集中を行うテーマがはっきりしており、明確な戦略のもとに遂行されている。 ・ サブテーマ4：ナノ組織解析グループによる強力なバックアップがプロジェクト全体の研究推進の鍵であると思われるが、この協力関係がよく実現されている。まさにNIMSの強みといってよい。 ・ 分析力を高めることで全体を支える戦略となっており、製膜、デバイス、解析とサイクルができており、しっかりした開発体制ができている。その中で個々の研究ターゲットが明確にされているため、サイクルのどこかで新しい発明・発見があると全体に展開され、多くの成果に結びつくことになっている。 ・ 研究の方向付けやグループの掌握などにおいて研究責任者は優れた指導力を発揮している。 ・ 半導体メモリとのつながりから、STT-MRAMは最重要研究と位置付けられる。 ・ 磁性材料研究は、precompetitive（基礎研究的な段階）のテーマも多く、一方、STT-MRAMのような正にcompetitive（競争的）なテーマもあり、多くの点で期待値が高い。 ・ 共同研究を行う企業ともうまく連携している。 ・ 企業との共同研究を通して最先端実用研究におけるニーズを知り、研究の方向にフィードバックをかけるという、よいサイクルができています。 ・ 海外メーカーとの共同は、研究のグローバル化という視点で重要である一方、公的研究機関として知的財産戦略の構築は極めて重要である。 |
| <p>② <u>研究開発の進捗状況及び進め方</u> (進捗状況の把握、研究責任者の自己点検・評価の妥当性、進め方の見直し（継続・変更・中止等）、研究資源（資金・人材）の再配分、ほか)</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 総体的に極めて高いレベルの研究が行われ優れた成果を挙げていると認められる。研究責任者の能力は高く、このまま進めることに問題は無い。 ・ 各サブテーマで優れた研究成果が挙げられている。特にHDD用磁気記録媒体では実用化一歩手前まで到達しており高く評価される。 ・ テーマの選択が明確である。 ・ 研究責任者の自己点検・評価も妥当である。 ・ スピンホール効果を利用したスピン反転の実現は興味深い。今後の研究に期待する。 ・ Dy-free ネオジム磁石に関する説明はあまりなかったが、元素戦略プロジェクトとの切り分けとして理解する。 ・ 分析力を武器に研究を進めるとことは、重要な視点である。ナノテクノロジーとしての質の高い研究を進めるためには、特に重要である。 ・ 磁気デバイスへの期待の高さからすると、細い長くではなく、太く長い研究分野に仕上げる必要がある。従来の磁性研究より、オープンイノベーションにより、多くの研究が参加しやすい状況を作り上げていくことも、公的研究機関の重要な役割かと考える。 ・ 高額物品についても必要性はよく理解できる。 |

| | | |
|--|--|--|
| <p>③論文・特許等の直接の成果（アウトプット）、効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト） （研究成果の質は世界レベルか、どのような効果・効用あるいは波及効果が出たか/期待されるか、研究タイプを考慮した費用対効果はどうか、セレンディピティー、ほか）</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・当該分野において世界レベルの研究成果を挙げている。 ・論文、特許等も多く、成果の発信も活発である。低消費電力の不揮発性記録素子やストレージ分野におけるアウトカム、インパクトも大きいことが期待される。 ・論文数も継続的に増加の傾向にあり、望ましい。実用的な貢献もあると判断される。 ・論文向きのテーマと実用化に近いテーマのすみわけがはっきりしており、それぞれ成果が出ている。 ・費用対効果も充分と思われる。 ・国内での実施企業が急減している状況で研究成果をどのように社会に還元するかは、研究者と共に機関が考えるべき問題であろう。 | |
| <p>④総合評価 （研究全体に対する総合的所見、及び上記評価項目①～③に含まれない、その他の評価ポイント、問題点等があれば追加してコメント）</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・応用に関する最先端研究での問題点を把握しつつ、優れたナノ組織解析グループとの協力の下、一流の研究成果を挙げている。 ・比較的少ない人数で顕著な成果を挙げていることは高く評価される。 ・サブテーマ間の相互作用について、サブテーマ1、2、3それぞれとサブテーマ4間は緊密であることは分かったが、サブテーマ1、2とサブテーマ3間、あるいはサブテーマ1とサブテーマ2間については明確でないような印象である。 ・物質としてのアプリケーションに対する潜在的なポテンシャルの高さがあり、今後も、重点的な研究が望まれる。 ・公的研究機関として、多くの物質研究者あるいは種々の分析研究者を巻き込むだけの広がり期待したい。 ・平成24年度の高額物品（FIB/SEM）はプロジェクト内ではなくて、共通使用が可能なのか。 | |
| <p>各委員の総合評価点 （10点満点）</p> | <p>9、9、10、9（順不同）</p> | |
| <p>総合評価点平均 （10点満点）</p> | <p>9.3（小数第二位四捨五入）</p> | |
| <p>評価点</p> | <p>評価</p> | <p>評価基準</p> |
| <p>10</p> | <p>S</p> | <p>全ての点において模範的に優れている。 計画を変更することなく継続すべきである。</p> |
| <p>9</p> | | |
| <p>8</p> | <p>A</p> | <p>総合的に優れている。 一部計画を見直し継続すればS評価になる可能性がある</p> |
| <p>7</p> | | |
| <p>6</p> | | <p>平均的なプロジェクトである。</p> |
| <p>5</p> | | <p>継続は認めるが、継続する時に、一部計画を見直した方が良い点がある。</p> |
| <p>4</p> | <p>B</p> | <p>期待されたほどではない。 計画を見直して継続すべきである。</p> |
| <p>3</p> | | |
| <p>2</p> | <p>C</p> | <p>プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更が必要である。 大きな問題があり、継続を中止すべきである。</p> |
| <p>1</p> | | |