

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成24年2月8日

評価委員：（敬称略、五十音順）

神谷利夫 東京工業大学 応用セラミックス研究所 教授
 財満鎮明 名古屋大学大学院 工学研究科 教授
 田中雅明 東京大学大学院 工学系研究科 教授

確定年月日：平成24年3月14日

プロジェクト名	ナノ構造制御による高機能ナノ磁性材料の創製
研究責任者の所属・役職・氏名	環境・エネルギー材料部門 磁性材料ユニット長 （元磁性材料センター長） 宝野和博
実施期間	平成18年度～平成22年度
研究目的と意義	高度情報化社会に必要なHDD（ハードディスクドライブ）やMRAM（磁気抵抗メモリ）などのデータストレージ技術のさらなる発展のためのキーマテリアルである磁性材料・スピントロニクス材料を開発し、それらのデバイス展開を検討する。また自動車への応用で需要の増しているNd-Fe-B系磁石の高保磁力化に資する基礎研究を行う。またこれらの材料のナノ解析を行い、磁気・伝導特性を発現するために必要なナノ構造の制御を行う。
研究内容	高度情報化社会と脱温暖化社会に必要な磁性材料・スピントロニクス材料を試作し、そのナノ構造の解析、構造と磁気特性の因果関係の解明を行うことにより、社会的ニーズの高い磁性材料の開発とそのために必要な基礎研究を推進する。具体的には磁気記録技術への用途を想定して、(1)次世代高密度磁気記録媒体用磁性薄膜、(2)次世代再生ヘッド用CPP-GMR（膜面垂直通電型巨大磁気抵抗）スピバルブ、(3)MRAMやスピロジックを目指したハーフメタルを用いたTMR（トンネル磁気抵抗）デバイス、(4)高保磁力を持つ磁石薄膜とバルク磁石材料の開発を目指す。それを実現するために、レーザー補助広角3次元アトムプローブ(La3DAP)、高分解能電子顕微鏡法(HREM)、分析電子顕微鏡法などを駆使して試作された磁性材料やスピントロニクス素子のナノ構造を原子レベルまで遡って徹底的に解析し、ナノ構造と磁気・伝導特性の因果関係を解明することにより、材料・素子開発の設計指針を得る。
ミッションステートメント（具体的な達成目標）	<p>具体的な研究目標は以下の通りである。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. High-K_u（高誘電率）材料を用いた超高密度垂直磁気記録媒体の開発 2. $H_c > 30$ kOe の焼結磁石設計指針の提案と異方性ナノコンポジット磁石の創製 3. 室温ハーフメタルの探索とハーフメタル薄膜の作製法の確立 4. ハーフメタルを用いて室温で1000%を超えるMR（磁気抵抗）比を発現するTMR素子の開発 5. ハーフメタルを用いた室温で30%のMR比を発現するCPP-GMR素子の開発 6. ハーフメタルを用いた低電流スピン注入磁化反転技術の開発 7. 室温で動作可能なスピンフィルター素子の開発 8. 磁性薄膜・スピントロニクス素子の3次元ナノ解析を実現するレーザー補助広角3DAPとデバイス解析のための周辺技術の開発 9. マルチスケール解析による先端ナノ材料の微細組織と特性の因果関係の確立
平成18年度～平成22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>1) 主な研究成果（アウトプット）：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 高スピン分極率ホイスラー合金の探索：PCAR（点接触アンドレーエフ反射）を用いた高スピン分極率ホイスラー合金探索研究を系統的に行った結果、$\text{Co}_2(\text{Cr}, \text{Fe})\text{Si}$, $\text{Co}_2\text{Mn}(\text{Ge}, \text{Ga})$, $\text{Co}_2\text{Mn}(\text{Ga}, \text{Sn})$, $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ge}, \text{Ga})$などの新材料が高いスピン分極を示すことが分かった。 2. ホイスラー合金電極を用いたCPP-スピバルブ：上記探索材料を用いてCPP-擬スピバルブを作製し、室温42%、低温130%の世界最高値のMR比を達成。

	<ol style="list-style-type: none"> 3. FePt 系熱アシスト磁気記録媒体：結晶粒径約 6 nm の $L1_0$-FePt 垂直磁化膜の創製に成功、(株) HGST と共同で熱アシスト磁気記録としては最高の 550 Gbit/in² を達成。 4. スピン注入磁化反転：ホイスラー合金を用いた CPP-GMR 素子におけるスピン注入書込みを世界で初めて測定し、CPP-GMR 系では最小となる低電流密度 ($9.3 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$) を得た。 5. TMR：磁化ダンピングが非常に小さいと期待される Co_2FeAl ホイスラー合金における顕著なコヒーレントトンネル効果を観測するとともに巨大な TMR 比 (室温 330%) を実現した。 6. MgAl_2O_4 スピネルバリアにおける大きな TMR 比 (室温 256%) と良好なバイアス電圧依存性を得た。これまで MgO 以外には実用可能性のある結晶性バリアはないとする常識を覆した。 7. スピンダイナミクス：世界で初めて強磁性細線におけるスピン起電力の実時間観測に成功。また誘導起電力を利用した磁性ナノ構造における磁化ダイナミクスの検出手法を確立した。 8. スピントルクオシレータ：ホイスラー合金を用いた巨大磁気抵抗素子において、CPP-GMR としては最高の～数 nW の電気発振信号の発生に成功。 9. Dy フリー高保磁力 Nd-Fe-B 磁石： HDDR (水素化脱水素化不均化反応) 法で作製された $D \sim 250$ nm の Nd-Fe-B 系超微結晶粒異方性磁粉に Nd-Cu を拡散処理することにより結晶粒界を改質し、Dy フリーの異方性超微結晶磁石粉で約 20 kOe の保磁力を達成した。 10. ナノ解析：紫外光 La3DAP を開発した。また、試料作製プロセス、レーザー照射条件の最適化を行い、バルク絶縁体試料の解析や焼結磁石の結晶粒界組成の同定に世界で初めて成功した。 <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>$\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ge}, \text{Ga})$ などの新規高スピン分極強磁性材料電極を用いた CPP-スピンバルブで、世界最高値の MR 比を達成。結晶粒径約 6 nm の $L1_0$-FePt 垂直磁化膜の創製に成功、熱アシスト磁気記録としては最高の 550 Gbit/in² を達成。上記記述に関し HDD メーカーとの共同研究開始。またホイスラー合金電極や MgAl_2O_4 スピネルバリアを用いた磁気トンネル接合素子で、高い TMR 比を実現、スピン RAM 素子としての検討を開始。また HDDR 法で作製された Nd-Fe-B 系超微結晶粒異方性磁粉に Nd-Cu を拡散処理することにより結晶粒界を改質し、Dy フリーの異方性超微結晶磁石粉で約 20 kOe の保磁力を達成、磁石メーカーやユーザーとの共同研究を開始。上記材料や素子開発の原子レベルでの組成解析を行うために、紫外光レーザー広角 3 次元アトムプローブ (La3DAP) を開発し、試料作製プロセス、レーザー照射条件の最適化を行い、上記材料や素子における構造と特性の因果関係を解明した。</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 :</p> <p>目標を十分に達成した。</p> <p>自己点検・評価 :</p> <p>磁性材料では、本研究で探索した新合金を CPP-スピンバルブに応用することによりチャンピオンデータを達成した。また、FePt 系熱アシスト磁気記録媒体としては最高の 550 Gbit/in² を達成した。これらの成果は HDD 産業界の注目を集め、2 Tbit/in² 級磁気記録達成への足がかりになると期待されている。また磁石研究においても、ナノ組織解析グループと共同で、保磁力と微細構造の因果関係を調査し、Dy を使わない高保磁力磁石の開発や薄膜を用いたナノコンジット磁石の実証などに成功した。スピントロニクス素子開発でも、新規トンネルバリアーの開発など予期しない顕著かつ次期プロジェクトにつながる成果も得られており、十分な評価に値すると思われる。また、世界に先駆けて、ホイスラー合金を用いた素子におけるスピン注入磁化反転を実証したり、室温でのスピンフィルター効</p>

	<p>果の観測にも成功した。また「La3DAPの開発」を行い、それとSEM（走査型電子顕微鏡）、TEM（透過型電子顕微鏡）を併用して磁性材料のマルチスケール解析を行っており、種々の磁性材料、スピントロニクスデバイス、また企業や他の共同研究先から提供される磁石材料やその他の磁性材料、磁気デバイスのナノ組織を解析し、特性との因果関係の解明につながる多くの成果を発表した。</p> <p>また、従来、NIMSでは組織としての磁性材料研究は基盤がなく、第2期中期計画（平成18年度～22年度）における本研究により、初めて組織的に磁性材料の研究に取り組んだ。ナノ構造評価・新規磁性材料探索などの材料科学に軸足を置いた磁性材料、スピントロニクス素子の研究開発、本研究提案の母体となった旧ナノ組織解析グループからの伝統を引き継いだアトムプローブをコアコンピタンスとしたナノ組織解析においても大きな発展が得られ、学会のみならず産業界からも高い評価を受け、企業との多くの共同研究につながり、第3期中期計画（平成23年度～27年度）プロジェクト「省エネ磁性材料」の研究課題に繋げた。ゼロから世界水準の磁性・スピントロニクス研究ユニットに発展した。</p> <p>以上のことから当初の目標を十分に達成したと評価できる。</p>
【評価項目】	コメント
<p>①研究計画、実施体制、<u>マネージメント、連携</u> （計画はきめ細かかったか、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、どこが問題なのか、ほか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・計画・ロードマップが磁性材料に特化し、具体的かつ現実的である。 ・最終的に、設定した目的や目標は達成されており、研究計画やロードマップには問題はなかったと考える。 ・計画、実施体制とも適切に運営されており、企業も含め連携もなされている。 ・実施体制を徐々に強化しているとはいえ、研究員の人数が少ないことが気になる。しかしながら、特に若手の活力で優れた成果を挙げている。 ・実施体制については、専任研究職の数は必ずしも多くなかったが、得られた研究成果や波及効果などの点では、むしろ優れた研究プランに基づいたプロジェクトと考える。 ・連携については 個々の研究テーマで興味・利害が一致し、能力のあるベストパートナーとの連携を積極的に行っている。 ・研究の進展と共に産業界との共同研究も順調に進展していることが窺える。今後の発展を期待したい。
<p>②研究開発の進捗状況及び<u>具体的目標の達成度</u> （研究責任者の自己点検・評価を踏まえて、進み具合はどうだったか、目標は達成されたか、目標は具体的であったか、世界レベルで見て目標は高かったか・低かったか、問題点は何か、ほか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・全体として、設定した目的は達成できているものとする。 ・3つのサブグループの内、磁性材料、ナノ組織解析については、プロジェクト開始当初より順調に進展し、研究成果的にも、数値目標的にも、目標は達成したと考える。 ・特にDyフリー磁石の開発など、独創的な技術成果を挙げている。 ・極薄記録磁性層材料、Dyフリー磁石など、現在の環境・技術課題に対応した、優れた新しい材料の開発に成功している。これらは研究計画に沿ったものであり、達成度は高い。 ・各項目において、高スピン偏極材料や高GMR（巨大磁気抵抗）などレベルの高い成果が得られており、高く評価できる。磁性材料について世界レベルの成果である。 ・スピントロニクス分野でも、若手からリーダーまで世界的に知名度の高いスタッフをそろえ、実際に高い評価を得ている。 ・スピントロニクスグループでも立ち上げてから日が浅いにもかかわらず優秀な若手人材を集め質の高い成果が得られている。 ・スピントロニクスに関しては、初期の立ち上げに時間が掛かっており、必ずしも目標に到達できなかった部分もあるが、今後の研究開発、技術開発の基盤となるとところまでは達していると判断できる。

<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）</p> <p>（世界レベルの質の成果が出たか、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、問題点は何か、ほか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> 論文数は十分に多く、とくに定年制研究員が少ないことを考えると高く評価できる。 5年間での発表論文数は185件と多く、専任研究職の数からしてもこの研究グループの研究アクティビティは高いと判断できる。招待講演に関しても同様で、質の高い研究成果が出たことが数字の上にも表れている。 論文や国際会議等で多数の成果が発表されており、波及効果はい大きいと思われる。 サイズ分散の小さいFePtグラニューラ構造薄膜の開発、高スピン分極率のホイスラー合金の発見や開発など、実用的な見地から、今後の展開が期待できる成果が得られている。 目的基礎研究という立場から、HDDR（水素化脱水素化不均化反応）磁粉の保磁カメカニズムの解明やスピネルトンネルバリアの開発は有用な成果と位置付けられる。 特に、レーザー補助広角3次元アトムプローブの開発とその応用は、波及効果が極めて大きい重要な成果と考える。 研究内容からすると、より多くの特許化の可能性があると思われるので、今後は実用化展開を主眼としたプロジェクトへの進展を期待したい。 	
<p>④総合評価</p> <p>（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があれば追加してコメント）</p>	<ul style="list-style-type: none"> 人数が少ないことから、新磁性材料に特化したプロジェクト編成をしており、この点で、現状をよく考慮した効率的なプロジェクト運営をしてきたこと、人員規模に比較し、論文数、具体的な成果（新材料開発）など、客観的に高く評価できる成果を挙げている。 学術的および応用につながる優れた成果が数多く得られており、高く評価できる。 プロジェクトタイプが目的基礎研究であり、その点では発表論文数や招待講演数などの数値的な部分に加え、内容的にも世界をリードする十分な研究成果が得られている。 NIMSにおいては、磁性材料に関する組織的な研究基盤が無かったということであるが、その点ではこの5年間の進捗は意義深く、今後、当該分野においてより幅の広い研究開発へと発展し、NIMSにとって重要な研究開発分野となっていくことを期待する。 磁性材料およびスピントロニクスは今後も重要なテーマであるが、本グループはスタッフの人数が少ないように思うので、できれば増員されることが望まれる。 プレゼンテーションでは少し説明が足りないと感じたが、質疑応答によってよく理解できた。一方、NIMS内での連携などについて、見えるような説明をするなどの工夫が必要と考えられる。 	
<p>各委員の総合評価点 （10点満点）</p>	<p>10、9、9（順不同）</p>	
<p>総合評価点平均 （10点満点）</p>	<p>9.3（小数第二位以下四捨五入）</p>	
<p>総合評価点</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た。</p>
<p>9</p>	<p>S</p>	<p>多くの点において非常に優れていた。</p>
<p>8</p>	<p rowspan="3">A</p>	<p>総合的に優れていた。</p>
<p>7</p>	<p>優れたプロジェクトであった。</p>	
<p>6</p>	<p>平均的なプロジェクトであった。</p>	
<p>5</p>	<p rowspan="3">B</p>	<p>一部の計画の見直しが必要であった。</p>
<p>4</p>	<p>期待されたほどではなかった。</p>	
<p>3</p>	<p>計画を見直して継続すべきであった。</p>	

2	C	プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更が必要であった。
1		大きな問題があり、プロジェクトを中止すべきであった。