

## ERATO「大野半導体スピントロニクスプロジェクト」追跡評価報告書

### 総合所見

本プロジェクトは「半導体スピントロニクス分野の開拓」を研究目的として企画され、「強磁性半導体」、「非磁性半導体」および「材料開発」を研究対象とする3つのグループから構成されている。従来のスピントロニクスが金属強磁性を軸的材料として発展してきたのに対し、本プロジェクトは半導体を新たな材料ステージに組み込む試みである。「情報処理、通信における集積・機能制御限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製」を戦略目標とし、電荷自由度を活用する半導体にスピン自由度を付加することで半導体の限界論を覆し、革新的機能を持つ半導体スピントロニクスを創出することを目指して研究が推進された。希薄磁性半導体を中心に研究が推進され、半導体スピントロニクス分野の興隆に大きく貢献する成果を得るに至っている。

とりわけ注目すべき成果としては、「強磁性半導体」の研究から、①垂直磁化を有する磁性体の磁壁移動を利用するスピンドバイスの提案・開発と、②電界による磁化反転制御の提案と実証、がある。プロジェクト終了後は、垂直磁化金属磁性体と電流駆動磁壁移動を組み合わせたデバイスを用いる新しい回路設計へと発展している。更に、①および②の成果はそれぞれスピントロニクス分野における垂直磁化膜の応用へ展開、および磁界・電流ではなく電界による新奇磁化制御方法に関する研究分野の世界的展開へとつながった。「非磁性半導体」の研究においては、半導体中の電子スピンのコヒーレンスとスピン緩和に関する研究が中心となっているが、そのなかで、高精度時間分解カー測定方法の確立は特筆すべき成果と判断される。「材料開発」に関する研究に関していえば、室温以上のキュリー温度を有する強磁性半導体の開発は現在にいたっても成功していないが、本研究の波及効果の広がり大きく、磁性半導体という研究分野が国際的に重要視されるための礎を築いた。

研究対象「強磁性半導体」からの研究展開として「半導体+磁性体」という狭義の半導体スピントロニクスへの展開はみられないが、新奇デバイスの提案と半導体回路との組み合わせによる新回路概念の構築という継続研究へとつながっている点では、研究目的である「半導体スピントロニクス分野の開拓」を十分満足させるものとなっている。垂直磁化膜のスピントロニクス応用および電界効果磁性制御は新しい研究分野を開拓したもので、国際的にも高く評価されている。産業面では、磁性半導体を利用するデバイス応用展開にはいたっていないが、総括責任者は現在金属系のトンネル磁気抵抗効果を用いた低消費電力スピントロニクスの実用化に大きな成果を挙げている。そこには本プロジェクトで得られた成果が活用されており、ERATOプロジェクトの発展としてとらえることができる。

研究対象「非磁性半導体」、「材料開発」に関する研究分野には未解決の問題も残っており、今後適切な時期に新たな研究組織が組まれることを期待したい。

本プロジェクトでは国際研究協力を積極的に推進してきた。中堅、若手研究者の養成という観点でも高く評価できる結果を残している。

本 ERATO プロジェクトの成果によって大野チームは日本を代表する研究グループの地位を確固たるものとした。よってその遂行の意義は極めて大きいと評価できる。

## 1. 研究成果の発展状況や活用状況

本プロジェクトの研究目的「半導体スピントロニクス分野の開拓」に沿って、その研究対象「強磁性半導体」、「非磁性半導体」および「材料開発」に関する研究成果の発展状況等を述べる。

研究対象「強磁性半導体」における大きな研究成果は、(GaMn)As 膜構造を用いた電流駆動磁壁移動とそれによる磁化反転に関するものである。この研究は、(GaMn)As の特徴的物性を利用したものであり、スピンデバイス基礎物性の解明に大きく貢献している。これに引き続く研究として重要なものは、①垂直磁化を有する磁性体の磁壁移動を利用するスピンデバイスの提案・開発と②電界による磁化反転制御の提案と実証、である。

成果①の研究は、大野グループで実施されていた日立グループとの共同研究にその芽がある。同共同研究では IBM で実証された FeCoB/MgO 膜を用いた強磁性トンネル接合の高性能化を目指し、国内他グループ(東北大、産総研、北大、等)と開発研究を競っていた。その結果、大野グループは、ハーフメタルを用いたトンネル接合よりも FeCoB を用いたトンネル接合のほうが室温において高い性能を有することを示した。電流駆動型磁化反転においては、垂直磁化膜が格段に有利であり、FeCoB/MgO 膜を利用するトンネル接合が垂直磁化を示すことを実証したことの意義は大きい。この成果は垂直磁化金属強磁性体を用いた電流駆動型磁壁移動デバイスへの開発へと引き継がれている。また、研究を担当した千葉氏は、磁壁移動型デバイスの基礎・開発研究を並行して行っていた京大グループプロジェクト(NEDO プロジェクト、NEC との共同研究)に参画している。さらに現在、NEC の中心的メンバーであった深見氏が、大野英男氏がセンター長である東北大学省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター(CSIS)の助教として参画し、磁壁移動型メモリデバイスの開発に携わっている。

成果②の研究は、強磁性半導体デバイスにゲート電圧を印加することによりその磁化反転磁界の低減ないしは電流駆動型磁化反転に要するソース・ドレイン電流の低減が可能であることを示したものである。本研究は、電気的な磁化操作に関する研究であり、電界による磁化スイッチングの実現とナノスケールの磁気メモリの書き込み手法への応用が期待される。その後、京大グループに参画した千葉氏を中心に、例えば電界によるコバルト薄膜の磁化制御の研究へと発展している。現在では磁性体分野全般で磁性を電界によって制御しようとする試みが注目されているが、この研究展開の源流は本研究グループにあり、プロジェクトが大きな波及効果を生み出している。

研究対象「非磁性半導体」においては、半導体中の電子スピンのコヒーレンスとスピン緩和に関する研究が中心である。大野研大野裕三氏らが行った高精度時間分解カー測定方法の確立は特筆すべき成果であり、プロジェクト終了後にこの手法を活かした研究が展開されている。これらに関係する最近の成果として、スピンホール効果の詳細な実験と解析がある。その結果は、他グループで行われている金属系スピンホール効果の実験解釈に大きな影響を与えるものとなっている。なお、半導体電子スピンのコヒーレンス制御と量子エンタングルメントとの関わりに関する

る研究は、名目的には本プロジェクトに含まれていないが間接的には大野プロジェクトから大きな影響を受けていたものと判断される。

「材料開発」に関する研究は、室温以上のキュリー温度を有する強磁性半導体の開発にいたらなかったという点においては不満足な結果であろうが、磁性と半導体というまったく異なる性質を有する物質の基礎的研究は、特にヨーロッパ(ポーランド)の研究者との共同研究を通して着実に進められている。プロジェクト終了後においても、グループリーダーであった松倉氏はヨーロッパグループとの共同研究を引き続いて行なっている。

プロジェクト総括およびメンバーはプロジェクト終了後いくつもの競争的資金を獲得し、研究を継続させている。なかでも通称 IT21 と FIRST は大きなプロジェクトであるが、ここで総括は研究の重点を金属系磁性体に移し、室温での動作可能な不揮発メモリの実現を目指す研究を推進し、すでに目覚ましい成果を得ている。例えば室温での TMR 比として世界最高値を得るなど、磁性半導体分野のみならず、磁性体全体の基礎研究に関してのトップリーダーとして国際的に認められるにいたっている。一方、応用面でも総括は民間企業を巻き込んで、スピントロニクス技術を実用化につなげようとする開発研究の陣頭指揮に当たっており、近い将来に大きな成果を得るものと期待できる。

## 2. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な効果・効用及び波及効果

### 2.1 科学技術の進歩への貢献

垂直磁化を有する FeCoB/MgO 薄膜を用いた強磁性トンネル接合において、電流駆動型磁化反転が有効かつ安定的に行えることを示した研究は高く評価できる。そのため、従来主として HDD への応用に関して注目されていた垂直磁化が、スピントロニクス分野で広く興味をひきつける研究対象となった。垂直磁化膜の研究は我が国が世界をリードする研究分野であり、現在も活発な研究が続いている。電界効果による磁化制御についても様々な展開が各国においてなされている。電界がどのように磁化に影響するかに関しては多様な可能性があり、基礎物性面で数多くの研究が活発に行われているが、大野グループの研究が世界の研究動向に大きな影響を与えたことは、最近の 3M 国際会議などにおける発表件数や論文引用数の多さが証明している。

電流ないしは電界による微小強磁性体の磁化制御に関する研究は、デバイス応用に向けた基礎研究として行われているが、電流による磁壁移動現象において極めて低電力での磁壁移動を実現しており、その電力閾値は金属系の値と比較してもトップデータに位置し、低電流化への指針を与えたものとなっている。このように大野プロジェクトの成果は、金属系スピントロニクス分野の新展開に大きく貢献していると判断される。他方、半導体スピントロニクスに直接関わる応用研究の成果は乏しい。スピン注入やスピントランジスターに関する研究がプロジェクトの中心課題ではなかったためである。これらの研究は世界各国で活発に研究されてきたにも係らず、半導体+スピndeバイスのプロトタイプはまだ実証されていない。大野プロジェクトの後継はむしろ、回路中においてスピndeバイスをいかに有効に利用するかという点にある。

大野氏の強磁性半導体の発見以後、強磁性半導体の材料開発に関する研究が世界的に広まった。

高キュリー温度強磁性半導体の探索研究では大きな成果は得られていないが、強磁性半導体の基礎物性が重要な研究課題であることには間違いはない。半導体と磁性に関わる問題に対する取り組みは、わが国においては特定領域研究等でも行なわれたが、結果的に十分な成果が得られたとは言いがたい。世界的にみても同様であるが、大野プロジェクトに参加していた海外グループ(ポーランド)はこの基礎的問題に積極的に取り組んでいた。今後も基礎的問題として継続的に研究を進める必要がある。また、(GaMn)As をベースにした電界制御強磁性ドットは、現時点では低温作動に限られているが、電荷分布制御が可能な高キュリー温度強磁性体という材料が開発されれば、応用につながる可能性が高い。強磁性半導体の基礎物性については国内の研究者(東大グループなど)からもインパクトのある成果が報告されている。今後機会をみて基礎概念確立に向けた研究協力を進めることが望まれる。

## 2.2 応用に向けての発展

「磁性半導体」に対して研究を行ってきたスピン注入磁化反転および電流による磁壁移動技術は、当プロジェクトの終了後、室温動作が可能な金属磁性体システムに応用され、不揮発メモリへの展開が図られている。研究総括が主導する形で民間企業の協力を得た開発が進行しており、まさに本研究の成果が望ましい形で引き継がれたとの印象を受ける。大野グループでは、垂直磁化を有する金属強磁性体の電流駆動による磁壁移動を利用したメモリの開発に取り組んでいるが、この研究には京大-NEC 共同研究(NEDO プロジェクト)で中心的役割を果たした深見氏が東北大CSISの助教として参画している。電流駆動型磁壁移動メモリは、強磁性トンネル接合における電流駆動磁化反転とならんで、MRAM 応用への期待が高く、大野プロジェクトとほぼ並行して NEDO プロジェクト(東芝、NEC、京大、阪大、産総研等)が推進されていた。GMR 多層膜や強磁性トンネル接合における磁界による磁化反転を利用する MRAM のプロトタイプはすでに報告されている。現在では電流駆動型磁化反転を利用する MRAM の商品化開発が幾つかの企業において継続され、一部は商品化が予定されている。高密度 MRAM が実現された場合の波及効果は世界的なものであり、この技術開発は地球レベルでのエネルギー・情報問題の課題解決につながるものである。

金属磁性体での電流駆動磁壁移動現象は京大グループが最初に報告したが、大野グループでは(GaMn)As における電流駆動磁壁移動の成果を踏まえ、これを金属強磁性体垂直磁化膜で実現させ、デバイスへの応用を目指している。この研究推進において、京大、NEC および大野グループ間での人材交流が適切になされている点は評価に値する。

大野グループは、このデバイス(要素技術)を単に MRAM ではなく、集積回路のなかで素子として利用するという観点から現在の「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」プロジェクトを推進している。この研究は、すでに述べたように、当該プロジェクトにおける電流駆動磁壁移動の研究成果と、大野グループにおける他研究課題の成果である金属強磁性体膜の垂直磁化とが融合して展開されているものである。このプロジェクトは、将来の新エレクトロニクスの展開の芽となる技術開発と人材育成を目指し、国内のいくつかの企業が参画して行われており、本プロジェクトの成果が応用に向けた技術開発への展開につながったとみることができる。

さらに、大野プロジェクトの研究成果の一つに、ゲート電界による磁性制御の提案・実証がある。このような磁性制御は、磁界を用いる磁性制御に比べ、デバイスの微細化が可能であるため、応用への期待が大きい。このような背景のもと、電界を用いる磁性制御は世界各国で活発に研究されるようになってきている。このような研究は現時点では基礎研究であるが、我が国におけるスピントロニクス研究(例えば高梨特定研究)などと並んでスピントロニクス研究の最先端の一つであり、今後応用への展開が期待される。

### 2.3 参加研究者の活動状況

「材料開発」を担当した松倉氏は、当時大野研助手の立場であったが、その後准教授を経て、現在東北大教授となっている。材料開発の研究は一本道ではなく、様々な視点に基づいた試行錯誤が必要である。強磁性半導体は、磁性と半導体という全く異なる性質からなる材料であるため、異なる分野の研究者の協同研究が必要となる。ポーランドは元来磁性研究が活発な国であり、ポーランドとの協同研究は有効であった。この研究には国内研究者は参画していないが、松倉氏はその後、ポーランドのグループとも協同研究を活発に推進している。また、同氏は、強磁性半導体中の電流誘起磁壁移動、非磁性半導体におけるスピントロニクス等に関する研究成果を挙げられ、研究の幅を広げていると推察される。本 ERATO の中で共同研究者と位置づけられていた大野(裕三)氏は「非磁性半導体」の研究に協力し、大きな成果を挙げるために貢献したことは明らかである。プロジェクトスタート時点で大野研助教授として半導体における光・電子スピントロニクスに関する重要な成果を上げた。プロジェクトにおいては時間分解測定手法を確立された点は特筆すべきことであろう。同氏はプロジェクト終了後、大野研准教授を経て平成 24 年より筑波大学教授として研究を推進している。千葉氏は大野研で学位を取得した後、JST 研究員として京大小野研において研究を継続した。従来小野グループは電流駆動による磁壁移動の研究、およびその MRAM への応用をめざした NEDO プロジェクトを推進していたが、同氏は大野研で培われた研究能力を小野研において十分発揮したといえる。人材交流の面から高く評価できる。プロジェクト終了後の有意義な人材交流として次のような例をあげることができる。すなわち、NEC 研究員であった深見氏は、京大小野研で NEC との共同研究として進められていた NEDO プロジェクトに参画し、同プロジェクトに大きな貢献を行ったが、同氏は現在東北大 CSIS の助教として、大野プロジェクトの重要課題であったスピントロニクスの開発に取り組んでいる。

### 3. その他

ここでは、事後評価そのものの捉え方・考え方をまず述べ、続いてそれを踏まえて今後の研究推進課題について触れたい。

プロジェクトの事後評価は、狭義にはそのプロジェクトで取り扱われた課題に対する研究成果の拡大・発展であろう。それらの研究成果から生まれた新しい研究課題・研究成果は当然ここに含まれる。枠をさらに広げるならば、プロジェクト課題とは異なる研究内容であっても、プロジェクト参画メンバーから生まれた研究成果は事後評価に加えても良いであろう。プロジェクトメ

ンバーが各自他のプロジェクトに参画している場合には、事後評価対象が広がることになる。特に海外研究者をプロジェクトメンバーに含む場合には、グローバルな視点から事後評価を行なわねばならないことになる。更には、誰もが興味を持つ重要な研究課題であれば、当該プロジェクトの成果が不発であっても、国際的に研究開発が進展するはずである。これも評価対象であろう。

大野プロジェクトにおける研究成果の直接的波及効果は、垂直磁化膜のスピン트로ニクスへの応用と、電界効果による磁化制御の二つであろう。垂直磁化そのものはわが国において古くから提案・実証され、特に HDD への応用研究が活発である。それに関する基礎研究やスピン트로ニクスへの応用研究もすでに国内外で多数実施されている。磁性研究の主要国であるわが国にとって、今後それらの成果を磁性に関する学理として纏め上げる必要がある。開発研究に関しては企業との連携が欠かせない。大野プロジェクトそのものは開発研究を主体とするものではないので、この点を直接評価対象とする必要はない。しかしながら、ERATO プロジェクトの研究目的の延長線上に応用開発があるのであれば、事後評価においても企業連携等に関わる内容を評価すべきである。

強磁性半導体の磁性基礎および材料開発は世界的にみても重要な研究課題であり、大野プロジェクトに含まれている海外メンバーの研究成果の国際的波及効果は大きい。ただ、国内における磁性基礎分野との連携研究は、いくつかの特定領域研究が組織されたにも関わらず十分とは思えない。例えば東大グループなどから重要な研究成果が報告されており、新しい組織的研究の推進が望まれる。大野プロジェクトでは非磁性半導体におけるスピン緩和が研究課題として取り上げられていたが、スピン트로ニクス分野においても、スピン緩和は重要な研究課題であり、新しい研究組織の編成を検討すべきである。

ERATO 研究制度に対して、以下のように提言したい。

最近、実用化の観点からの直接的な成果を問う研究制度および研究評価が多くなる傾向があるとはいえ、世の中にパラダイムシフトを引き起こすような革新的技術の土台となる先駆的な基礎研究開発が不可欠である。実用化までに、かなり時間を要するようなチャレンジングな研究領域に対するサポートも積極的に行うべきである。

大野プロジェクト以後の進展や展開を見ると、まさに JST による先駆的な研究のサポートであったと評価できる。このような事例を考えると、最近の JST が主宰する研究支援制度の採用方針において、応用展開がすでに見えているものや、既存の研究の延長上にあるものだけでなく、一見、海のものとも山のものともわからないような提案の中から、価値あるチャレンジングな提案を英断的に採択することも行って欲しい。

大野プロジェクトの主な研究内容は、プロジェクトの期間終了後、磁性半導体から金属磁性体へとかなり大きく転換している。この転換は研究の流れとして理解できるもので、磁性半導体に関して得られた基礎的知見が金属磁性体における実用化を意識した研究において有効に活かされており、結果的にはこの転換が大成功であった。ここで再点検すべきは「プロジェクト制度に研究者の自由な発想による研究展開を妨げる作用がなかったか？」という点であるが、大野プロジェクトの場合には研究者の意向をプロジェクトが束縛するようことはなく、自由な転換が図られ

ており、JST の研究支援の運営が適切に行われたといえる。今後もプロジェクトを運営していく際に、研究者の自由な発想による研究方向の転換などに対して柔軟性を持って当たってもらうことを望んでおきたい。

以 上