

ERATO 大野半導体スピントロニクスプロジェクト事後評価報告書

【研究総括】

大野 英男 (東北大学電気通信研究所／教授)

【評価委員】(委員はあいうえお順)

新庄 輝也 (委員長；国際高等研究所／上級研究員、京都大学名誉教授)

秋永 広幸 (産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門／研究グループ長)

井上 順一郎 (名古屋大学大学院工学研究科／教授)

山口 浩司 (NTT 物性科学基礎研究所量子電子物性研究部／部長)

評価の概要

現在の情報通信技術は、半導体材料(電子の電荷)と磁性体材料(電子のスピン)を目的に応じて使い分け、機能を発現させることで成り立っている。この「電荷」および「スピン」を組み合わせることが可能となれば、従来の機能を飛躍的に向上させるだけでなく、新たな動作原理に基づく革新的機能素子の実現等が可能になると期待されている。

ERATO 大野半導体スピントロニクスプロジェクトは、このような背景のもと、電子の電荷に加えスピンを利用することが、新たな半導体エレクトロニクスを実現するものとして捉え、半導体におけるスピン物性を顕著に発現させる手法を探求するとともに、半導体中の電子スピンや核スピンの制御技術を探求することなどを大きな目標とし、「半導体スピントロニクス」という新たな研究領域の創出に努めてきた。

プロジェクト期間の終了を迎え、「半導体スピントロニクス」というキーワードが、関連研究者や研究コミュニティに確実に浸透し、また、強磁性半導体の成膜技術や微細加工技術、電界による磁化反転技術や磁区制御技術をはじめとした、プロジェクトから産み出された成果等が、次世代デバイスの創製に明らかに欠かせない要素であると国際的に認められていることは、本プロジェクトの研究アクティビティおよび研究の質の高さを指し示しているといえる。また、室温より高いキュリー温度を示す半導体材料の探索など、物質科学の面での研究も推進し、将来の展開に期待のできる成果を上げた。

大野総括は、「半導体スピントロニクス」という研究領域を開拓・牽引し、世界での中心的役割を担うとともに、将来同分野で活躍する若手研究者の育成にも力を注いだ。また、半導体デバイスの優れた特性とスピン特有の機能の融合による新しい多機能素子の創出の可能性など、将来の情報通信技術に新たな局面を示した。以上の点から、本 ERATO プロジェクトが卓越した研究水準にあることが認められ、戦略目標「情報処理・通信における集積・機能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」に資する十分な成果が得られたと判断する。

1. 研究プロジェクトの設定および運営

1-1. プロジェクトの全体構想

本 ERATO プロジェクトの研究構想は、研究総括である大野英男教授が、1996 年に世界に先駆けて開発した強磁性半導体(Ga,Mn)As の結晶成長技術、そしてそれに続く基盤的物性研究の成果などに立脚して発案されたものであるが、単にそれまでの延長に止まらず、「半導体スピントロニクス」という新分野の創成を目的とし、戦略目標「情報処理・通信における集積・機能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」のもと、2002 年 11 月に発足した。具体的には、既存の半導体テクノロジーの中で単に磁性を扱うのではなく、半導体におけるスピンの振舞いなどへの深い考察をもとにして、スピン物性であるが故の特徴、強磁性半導体であるが故の特性を最大限に活かすことをねらいとした、新しいテクノロジーとエレクトロニクスの融合および開拓を指向したものであった。本研究プロジェクト開始のそもそもの発端は、大野研究総括らの高いキュリー温度を有する III-V 族強磁性半導体の発見にあったが、プロジェクトの研究期間では、キュリー温度の上昇を目的とした材料開発のみならず、(Ga,Mn)As という物質の特色を活かした物性物理学に関する基礎的研究をも大きく推進させた。特に「スピンや電荷の制御」という観点から、半導体スピントロニクスを確立させた点は大きく評価される。本プロジェクトの全体構想は、大野研究総括独自の強力なイニシアチブによる分野創造をその目標としたものであるといえよう。

1-2. プロジェクトの枠組みや研究体制、および研究活動の状況

さて、室温以上のキュリー温度を持つ強磁性半導体材料の開発が当該研究分野において最も待ち望まれていることであるとはいえ、この課題に従事する研究者の誰もが直面している困難なテーマであり、短期間での達成はなかなか容易ではない。そのような状況下で、ただ闇雲にこの難関に立ち向かうのではなく、当該分野でもっとも優れた理論的研究を実施する能力がある、ポーランド科学アカデミーの Tomasz Dietl 教授のグループとの連携を緊密にし、材料開発の指針を定めようとしたことは、プロジェクト運営を有益な方向に導き、ここに特筆して評価したい。イノベーティブな研究を進めるにあたっては、このように理論と実験の連携が必要不可欠であり、Dietl 教授との研究協力により半導体中のスピン制御に関する理論的アプローチを強化した点は、実験的に得られた結果の有用性をより高いものに押し上げる点で効果的であった。単に現象の物理的側面の理解にとどまらず、それらをどのように素子として応用していくか、またその素子が世の中でどのような波及効果を与えていくか、という点を常に強く意識して研究推進が図られている点は、本研究プロジェクトの重要な特色として挙げることができる。

プロジェクトの研究実施の主体は、大野研究総括の本務先である東北大学電気通信研究所であり、プロジェクトの進行中での改編等を経て、(1) 強磁性半導体、(2) 非磁性半導体、(3) 材料開発という 3 つの大きなテーマのもとで推進された。上述のポーランド科学アカデミーに加え、中国科学院やドイツ・マックスプランク研究所などの海外著名研究拠点と協力関係を持ち、また国内に目を転じると、理化学研究所や東京大学、北陸先端科学技術大学院大学などから研究者を採用するなど、国内外の異なる研究領域の知識を融合させた研究チームの構成が行われた。研究設備面では、東北大学電気通信研究所との連携が極めて効果的であり、本プロジェクトの研究費は、

主に評価装置の購入を新しい展開に必要な新規プロセス装置に限定して用いることにより、効率的な資金運用を行った。

また本プロジェクトを成功と評価できる要素のひとつに、優れた若手研究員を集め、かつ育成したことも挙げられるであろう。質の高い論文が多数発表され、また多数の大学院生が最先端の科学技術に間近で接する機会を数多く有したことは、若手研究者の成長を促す、何よりの材料であったといえよう。事後評価ヒアリング（2007年12月13日実施）において、大野研究総括により「(ヘテロな集団を)いきなりトップスピードに持っていく努力をした」と説明された内容は、今後のERATOプロジェクトの運営に対しても示唆を与えるものではなかろうか。

以上ここまで、本ERATOプロジェクトの設定および運営等に関して述べてきた。本プロジェクトの最大の目標は「半導体スピントロニクス」の開拓と新規研究分野の創出にあることは上記したが、こうしたコンセプトが関連研究者や関連学会に確実に浸透し始めている事実がある。例えば応用物理学会では、2008年春の学術講演会から、「スピントロニクス・マグネティクス」という大分類分科が発足し、また磁性金属材料を主たる対象としていた日本磁気学会においては、スピントロニクス専門研究会が2004年7月発足し、2005年からは強磁性半導体がトピックスとして取り上げられるようになり、さらに2006年1月の研究会では、本ERATOプロジェクトから(Ga,Mn)Asからなる磁気トンネル接合におけるスピン注入磁化反転の成果が報告されている。まさに「新しい研究領域の開拓」が実を結んでいることを如実に示しており、またその中で、世界を先導している本ERATOプロジェクトの卓越した研究活動を物語るものである。したがってこれは、同プロジェクトの設定および運営が特に優れて的確かつ効果的であり、また特筆して望ましい研究活動・展開を示したと、我々評価委員が申し述べるのに必要十分な証拠であるといえる。次節以降の研究成果で述べるように、強磁性体と半導体の機能を融合させた全く新しい技術の開発、およびこれらの異なる物性の境界領域に属する新しい物理の発展を導き出す、非常に多くの成果を生み出したと評価できる。

〔研究プロジェクトの設定および運営〕 a+（特に優れて的確かつ効果的であった）
 〔研究活動の状況〕 a+（特筆して望ましい研究活動・展開を示した）

2. 研究成果

2-1. 強磁性半導体

本研究テーマは、電流による磁化制御と、電界による磁化回転制御という、スピントロニクスの重要な研究課題の達成を目標としており、本ERATOプロジェクトの中心的役割を担う部分である。

試料には、伝導キャリアのスピン偏極が輸送現象として確実に観測される、強磁性半導体(Ga,Mn)Asを用い、電流による磁区移動や電界による保磁力制御を行った。その結果、極めて低電流密度での磁壁移動の観測に成功し、また磁壁移動のメカニズムの解明や、保磁力の電界制御と電界アシスト磁化反転などの、新しい視点に基づく成果を創出した。これらはERATOプロジェクト実施期間内での、半導体スピントロ

ニクス分野開拓にむけた材料技術、デバイス要素技術の飛躍的な発展を明示しており、「半導体中のスピンの挙動を理解する」という、本プロジェクトの研究目標に照らし合わせて、十分な達成度であると評価できる。

ここに得られた成果は、今後の基礎的研究を行う上で大きな波及効果を与える可能性を持っている。スピン偏極キャリア注入による磁化反転や磁壁移動現象の理解は、スピントロニクス全般の喫緊の課題であったが、ここに磁壁のクリープ運動がその駆動パラメータに依存する様子を詳細に明らかにしたことは、この課題を解決するために重要な成果であった。一方 (Ga,Mn)As の異方性磁気抵抗効果に関する研究においては、ヘテロエピタキシャルに導入したひずみにより、磁性半導体の磁気特性を制御できる可能性を明らかにし、強磁性体としての材料の自由度を大幅に広げる手法の提案として、大きな波及効果が期待できる成果である。強磁性半導体における磁性発現機構に関しては、Dietl 教授のグループが、不均一性が本質的役割を担っているという理論的見解を出しており、この問題の解決に向けての重要な示唆を与えている。

上記の成果は、磁性半導体の基礎的研究領域のみならず、社会的にも大きな影響を与えうる可能性を持つ。例えば、電氣的磁壁スイッチングのテーマで得られた成果は、磁気メモリの操作を外部磁界ではなく電氣的に行う可能性を示唆したものであり、超高密度磁気メモリデバイスの開発への進展が期待される。電界アシスト磁化反転の成果は、電界印加によって保磁力を小さくする可能性を明らかにしており、磁化反転を用いるメモリ素子の消費電力を低減させ、さらに外部磁界によらず電氣的にメモリ情報を消去するなどの可能性が考えられ、今後産業応用の研究フェーズへと繋がっていくことで、研究の価値がさらに上昇するであろう。

現時点では本プロジェクトの成果がただちに産業応用に結びついているわけではなく、またただちに結びつけることが、ERATO で求められるミッションではない。評価所見としてここに特筆しておきたいのは、プロジェクトにおける成果から、磁性元素を含む半導体の成膜技術と微細加工技術、および磁界ではなく電界による磁化反転、磁区制御技術が、2020 年までにその開発が期待されている、いわゆる「Beyond CMOS」世代のデバイスの動作実証に明らかに欠かせない要素となったことである。この事実は国際半導体技術ロードマップ (International Technology Roadmap for Semiconductors ; ITRS) 2007 年度版にも記されているところであり、わが国における半導体産業の基礎基盤技術に対して、国際競争力を与えることを通じて新たな産業的および社会的価値の創造に結実したといえよう。

2-2. 非磁性半導体

非磁性半導体におけるスピン物性に関する研究は、強磁性半導体に対して比較的最近になって開始されたテーマである。GaAs をベースとして半導体ヘテロ構造において、電子スピンを光で制御し、かつ超微細相互作用を電界で変調することにより、核スピンを制御することなどが重点課題となっている。光によるスピン回転を観測したカリフォルニア大学サンタバーバラ校 (UCSB ; アメリカ) など先行グループもごく少数は存在するが、動的核スピン分極の双安定性とその制御法の提案、核スピンのコヒーレント振動の検出とエネルギー緩和ならびに位相緩和時間の同定などは、UCSB グループの報告に優るとも劣らないものである。

特に核スピンに関する自由度を取り入れた研究は、オリジナリティが高く評価できる。最近注目されている半導体中のキャリアと核スピンの相互作用の研究に、光学的評価による新しい研究手法を与えただけでなく、超微細相互作用の電界制御の可

能性など、当初予想もされなかった新しい現象の発見につながった。核スピン 2 量子ビットのゲート操作に相当する実験にも成功している。ひずみ InGaAs 量子井戸や、GaN での電子・正孔スピンのコヒーレンス、MOS ゲート構造を有する縦型量子ドットや、スピンエサキダイオードなど、新しい材料系やデバイス構造を用いたスピン物性の探索も幅広く行っており、数多くの特筆すべき成果を得ている。

非磁性半導体における電子スピン制御に関しては、このように学術的に高いレベルの成果を産み出しているが、さらに核スピンを高感度に検出する技術を開発し、独自性の高い研究成果を達成している点にも注目したい。特に量子演算や量子暗号など量子情報処理技術においては、スピンが長いコヒーレンスを持つ量子系として、量子ビットの基本構成要素を担える期待性が高く、また量子構造中の電子スピンや外界との相互作用が著しく弱い核スピンの自由度に対し、どのような量子状態を検出・制御できるのかに注目が集まっているが、プロジェクトにおいて、動的核スピンの双安定性の解明と制御を実現した点、電子スピンと核スピン間の超微細相互作用を電界により制御できることを見出した点、さらには核スピンのエネルギー緩和ならびに位相緩和時間を見積もり、最終的に 2 量子ビットに対するゲート操作に成功した点などは、こうした状況に極めて重要な示唆を与え、関心を与えうるものである。またナローギャップ半導体からなる絶縁ゲートを用いた縦型量子ドット作製技術や、ウエハボンディングに関する要素技術などについては、多ビット制御や Si におけるスピン依存現象の制御などに向けた、今後の発展に期待したい。

これらの成果は、単に半導体スピン物性に関連する研究領域のみならず、応用にも関係した広い分野に波及効果を与える可能性を持つ。量子演算は従来に比較して早い計算を実現する技術であり、量子構造中の電子スピン状態の制御は、量子暗号通信におけるフォトンソースへの応用が期待される重要な技術である。特に本プロジェクトでは、偏光による量子状態の制御に重点をおいているが、これは量子通信と量子メモリーのインターフェースの構築という意味で重要である。さらに、量子情報処理以外においても、核スピンを表舞台に登場させ、半導体トランジスタ技術によってその相互作用を制御できることを実証した点は、核スピン共鳴技術との融合により、全く新しい技術分野が展開されることを示唆している。量子情報処理技術が実際に利用されるに至ったとき、本プロジェクトの成果の延長線上にある研究開発が、その基盤技術として貢献していることが予想される。

2-3. 材料開発

本研究テーマに関して、プロジェクト実施期間内になされた重要な成果のひとつは、ワイドギャップ磁性半導体の強磁性発現に重要な役割を果たしている指摘されつつあるスピノダル分解が、ドーピングされる磁性元素の荷電状態によって影響を受けることを明らかにしたことと、そのメカニズムを物質によらず統一的に議論できるように理論的整備を施したことである。2-1. の「強磁性半導体」の研究テーマにおいて、その成果創出には、ERATO 制度の特色が十分に活かされたと評価したが、本研究テーマ「材料開発」に対しては、研究総括主体のマネジメントを可能とする ERATO 制度の特色が、「継続」というキーワードで十分に活かされたと考えられる。新しい材料を実験的に発見するという、目に見えた成果に結びつけることが決して容易でないことは、この分野に携わる人なら誰もが認めることであり、また「成果、成果」と紋切り型に評価を行ってはいけず、ハイ・インパクトな研究に取り組む人のモチベーションを阻害してしまう恐れがあり、ひいては物質科学研究の停滞を招きかねな

い。さらにいえば、大野研究総括のグループが現在の高い研究レベルを維持している理由は、(In,Mn)As (1989年)ならびに(Ga,Mn)As (1996年)の高純度結晶成長技術を、手間暇をかけて確立してきたことが原点にあり、多少の失敗はあれども、「継続」をもってこのような材料探索研究を推し進めることが重要であるのは、明白である。今後、理論グループとのさらなる緊密な連携のもとに、強磁性発現機構を解明するための実験が行われることを期待する。

さて、ワイドギャップ半導体への磁性原子ドーピングについては、Dietl・Ohnoらの理論的予測(2000年)以降、今をもって未解明な部分が多いのが現状であるが、本プロジェクトの実験結果は、今後、集約的解釈を導き出すものになると期待したい。また当研究テーマに関する物質探索研究の推進は、今後の半導体スピントロニクス分野へ与えるであろうインパクトを鑑み、材料探索および開発の重要性に関する持続的な情報発信であったとして評価したい。

本 ERATO プロジェクトで開拓を目指した半導体スピントロニクスが、ある学術領域の創出だけではなく、産業の創出にまで貢献するためには、室温より十分に高いキュリー温度を持つ強磁性半導体の開発が必要不可欠である。一方で、高いキュリー温度を持つ強磁性半導体の実現を目指した研究開発は、少なくともその学術論文数からみると、若干停滞しているのが現状であり、したがって産業面に結びつく成果に至るまでにかかる時間は予測不能である。そのような状況下で、半導体スピントロニクス分野を先導する大野研究総括の研究グループが材料開発の重要性を発信し続けたことそのものに、高い評価を与えたい。本プロジェクトの期間に、スピノーダル分解による構造制御や、GaN や ZnO 系の物質に強磁性発現の手がかりが得られ、新規な展開を目指す指針がえられている。これらの研究活動に真の価値をもたらし、次なるブレークスルーへと至らしめるために、さらに強力にかつ継続的に材料探索研究に臨んでもらいたい。

以上ここまで、ERATO 大野プロジェクトの根幹である 3 つの大きなテーマの研究成果について述べてきた。半導体スピントロニクスの材料学的基盤の構築を目指した本プロジェクトにおいて、発足当初の研究目標として掲げた「室温以上のキュリー温度を持つ半導体の開発」だけが実現されなかったものの、ほぼ全般的に秀逸な科学技術的成果が得られているといえる。ERATO プロジェクトの評価が、目標に対する達成度(ミッション・ステートメント)を拘子定期的に評価することが目的ではなく、研究成果の本質や意義を適切に評価すること、また ERATO の事業趣旨でもある「極めて高いチャレンジングな目標設定」に対しては、その目標を達成するための戦略がいかに企画され、また実現に向けてなされた過程からどのような課題が抽出されたかを見ることが、その目的である。本プロジェクトでは、例えば強磁性半導体薄膜を非熱平衡状態(この場合は分子線エピタキシー成長における表面の状態)にて作製する際にドーピングされる磁性元素の荷電状態を制御することが重要であるという、プロジェクト開始当初では想像し得なかった指針が得られている。こうしたことも加味して、プロジェクト全体の科学技術的研究成果は、総合的にみて極めて秀逸であると判断した。

本プロジェクトの 5 年間にわたる研究活動の「目標」は、十分に達成されたと評価した。一方で、プロジェクトから得られた成果の中長期的展望としては、我々の社

会を持続的に発展させるための産業的アウトカムに結実して欲しいという広い期待が寄せられるのは当然であり、それは、ERATO の制度趣旨にもうたわれている部分でもある。産業・社会面から、10年、15年後に真の意味で高い評価を受けるためには、「これからの」研究のあり方が重要であり、結果的に「これまでの」5年間の取組みに対する評価にも返ってくるものである。現状では道半ばではあるが、将来への展望を開くための多大な成果が得られているという認識から、産業・社会的側面から極めて良好な成果が上がっていると判断した。

〔研究成果（科学的側面）〕 a+（成果として秀逸である）

〔研究成果（産業・社会的側面）〕 a（成果として良好である）

3. 総合所見

本 ERATO プロジェクトの全体目標は、半導体中のスピンを制御するための技術の開発と、スピン依存現象の深い理解を元にして半導体スピントロニクスを材料学的基盤を構築し、新しい科学技術領域の創出を目指すものであった。そしてその中から、将来の情報通信の分野に革新性をもたらすことが期待されたものであった。

研究プロジェクト全般の運営についていえば、その目標を達成するために研究総括のイニシアチブが遺憾無く発揮されていた。また現時点での研究成果は、産業に直接結びつくものではないが、半導体と電子スピンを組み合わせて発現するデバイス機能に関して、新しい概念および機構を提案している。得られた研究成果は質および量の両面から分野創出を先導するものであった。わが国の半導体スピントロニクス分野が極めて優れたレベルにあることが国際的にも認知されているのは、本プロジェクトがあったがゆえのことであり、高く評価できる点である。

「強磁性半導体」に関しては、磁気的な性質を電界や電流によって制御する、強磁性体と半導体の両方の機能を融合によって可能となるプロトタイプ型新規素子の開発に成功し、またそれらの現象の根底にある物理的機構の探求に多くの心血を注ぎ、また成果を上げている。

「非磁性半導体」については、電子スピンや核スピンの挙動を詳細に調べ、将来の革新技術として期待されている量子情報処理技術への応用につながる重要な成果を得ている。動的核スピン分極の双安定性とその制御法を見出し、核スピンのコヒーレント振動を検出してエネルギー緩和と位相緩和時間を見積もったこと、さらに核スピン量子ビット操作に相当する実験に成功したことは重要な成果である。

「材料開発」に関しては、研究開始から5年という期間であることもあり、未だ発展途上の面もあるが、種々の材料系に対して磁性半導体の可能性を追求しており、将来の展開に期待できる。

国際的な評価に関しては、Nature, Science, Physical Review Letters 誌への論文掲載、数多くの新聞報道、さらに176件に達する招待講演の多さが本研究グループのアクティビティの高さを客観的に示しているといえよう。また本プロジェクトは、国内外の若手研究者の育成面でも評価できるものであり、将来の世界的なスピントロニクス分野の振興に貢献していることを付け加えておきたい。

以上、ERATO 大野半導体スピントロニクスプロジェクトは、卓越した研究水準を示したことは疑うまでもなく、また半導体デバイスの優れた特性とスピン特有の機

能の融合による新しい多機能素子の創出の可能性など将来の情報通信技術に新たな局面を示したと認められ、評価委員の総意として、戦略目標「情報処理・通信における集積・機能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」に資する十分な成果が得られたと判断する。

〔総合評価〕 **A+**（戦略目標に資する十分な成果が得られた）

以上