

ERATO 平山核スピントロニクスプロジェクト事後評価（予備評価）報告書

【研究総括】 平山 祥郎 （東北大学大学院理学研究科／教授）

【評価委員】（五十音順）

青野 正和 （委員長；物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクニクス研究拠点／拠点長）

安藤 恒也 （東京工業大学 大学院理工学研究科／特命教授）

石橋 幸治 （理化学研究所 基幹研究所／主任研究員）

蔡 兆申 （日本電気株式会社 中央研究所／主席研究員、
理化学研究所 基幹研究所 物質創成研究領域単量子操作研究グループ
巨視的量子コヒーレンス研究チーム／チームリーダー）

評価の概要

ERATO 平山核スピントロニクスプロジェクトは、半導体量子構造やナノマテリアルを舞台に、原子核のスピン（核スピン）と電子のスピンの結合が生み出す種々の現象や機能を探究し、エレクトロニクスの新分野の開拓を目指すものである。特に、核スピン系と電子スピン系のコヒーレントな結合を活かして、空間的に分離した核スピンを精密に制御し、そこに内在する物性現象の解明と展開可能性の探索を進めるとともに、高感度核磁気共鳴（NMR）測定技術の創出や確立に取り組んでいる。平山祥郎総括は独自の着想に基づき、電流誘起動的核スピン偏極現象による核スピン制御と抵抗検出核磁気共鳴による偏極読み出しを組み合わせた量子情報システムを提案し、基礎研究を推進してきた。本プロジェクトは、こうした先駆的・独創的な発想と基礎技術を基盤に展開されている。

研究グループは、平山総括を中心とした核スピン操作グループ、ナノ NMR・ナノプローブグループ、半導体特性評価グループ、物理研究・結晶成長グループの 4 グループで構成され、比較的若手のグループリーダーにより特色ある先端的な研究が展開されている。東日本大震災による影響で研究活動には約 1 年の遅れが見られるにも関わらず、核磁気共鳴（NER）や光による核スピン偏極など種々の核スピン操作技術を実現し、ナノスケールの NMR を目指した極低温・強磁場で動作するナノプローブの開発を進めるとともに、多核スピン特性を持つ In 系半導体の超高感度 NMR 測定や占有率 5/2 分数量子ホール状態における電子スピン偏極度の測定に成功するなど世界的な成果を数多く上げてきた。さらに今後はナノ構造やナノプローブによるナノスケールの核スピン計測における展開が期待される。

以上より、ERATO 平山核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てきたことは疑うまでもなく、戦略目標「情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築」に資する十分な成果が得られることが期待される。ただし、上述の大震災による影響がなければ、さらに多くの成果が創出されるといった可能性も考慮して、評価委員会としては、災害被害による遅れについて何らかの措置が取られることが望ましいと考える。

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

本研究プロジェクトは、半導体結晶を構成する原子の核スピンに関わる新たな物性を調べ、量子情報処理等への応用可能性を探索するものである。半導体物性との関連における核スピンの研究は、1980年代後半にまでその源流を遡ることができるが、近年、量子情報処理における核スピン利用の可能性が指摘されるに至り、急速に活発化した研究分野である。研究総括の平山祥郎氏は、この分野の研究をいち早く開始しており、現在ではこの分野を牽引する世界でも有数の研究者である。

原子は原子核と電子から構成されており、これらはともに、物質の磁気特性と関連付けられる「スピン」を有している。電子の持つ電子スピンは、ハードディスクの読み取りヘッドをはじめとして、エレクトロニクス分野で広く利用されている。一方、原子核の持つ核スピンは、電子スピンよりもデコヒーレンス時間が長くスピンの向きが変わりにくく、量子状態を保持しやすいという特徴があり、近年、量子コンピュータなどへの応用が強く期待されている。しかしながら、これまで核スピンはその精密な制御が困難であり、特に固体中での応用は制限されていた。この問題に対して平山総括は、分数量子ホール効果を発現するメカニズムの一つであるとされる半導体の分域構造（ドメイン構造）に着目し、これに起因する電流駆動による動的核スピン偏極による核スピン制御と、抵抗検出核磁気共鳴（NMR）による偏極読み出しを組み合わせた量子情報システムを提案し、研究を推進してきた。本プロジェクトは、こうした平山総括の先駆的・独創的な発想を基盤としたものである。

本プロジェクトで、平山総括は、自身がこれまでに開拓してきた基盤技術を背景に、多様な手法を取り入れて、電子系と核スピン系の相互作用の基礎研究を進め、固体中の核スピンの正確で精密な測定・制御を目指している。これにより、固体中の核スピンの偏極技術と観測技術が進歩するだけでなく、さまざまな分数量子ホール状態の電子スピン偏極に関する新しい情報が得られ、その理解がさらに進むことも期待される。さらに長期的な波及効果として、半導体ナノシステムの核スピンを量子ビットとして用いた量子情報技術への実用展開等、新たな社会経済的価値の創出につながることを期待される。

このように本プロジェクトは、高い目標を掲げた挑戦的・創造的な取組であり、ERATO にふさわしい構想であると高く評価できる。

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

プロジェクトの構成は、東北大学・平山グループ（核スピン操作グループ）と NTT 物性科学研究所・村木グループ（物理研究・結晶成長グループ）が、核スピン制御に関する研究の中核を担っており、特に村木グループの持つ結晶成長技術によって、本研究に不可欠な高品質半導体（主に GaAs 系）を安定的に供給することが可能となっている。ここにナノプローブの操作・開発を得意とする橋本グループ（ナノ NMR・ナノプローブグループ）が加わり、マクロな電気伝導特性測定のみならず、そのナノスケールでの実空間可視化という新しい研究側面を切り拓こうとしている。さらに劉グループ（半導体特性評価グループ）は、これまで GaAs に限られていた抵抗検出 NMR 研究を InSb や InAs へ拡張し、大きな核スピンを含む In により多彩な核スピン物性の探索が可能となった。グループリーダーには次世代を担う比較的若い研究者が選ばれており、後述するように、それぞれ特色のある先端的な成果を上げている。このことは、プロジェクトの方向性を堅持しながらも若手研究者が自律的に研究を進めることができる研究体制が、研究総括の配慮により構築さ

れ機能しているものと高く評価できる。

研究活動においては、電子系と核スピン系の相互作用の基礎研究を基盤として、核スピンの正確で精密な制御を目指し、様々な核スピン偏極技術の開発、電気的手法と光学的手法の融合技術開発、スピン制御パルス技術開発、及びナノスケールの核スピン制御技術開発などの研究を活発に行っている。特に、2次元電子系での核スピン制御技術の進展は高く評価できる。今後の研究推進に当たっては、東日本大震災の影響によりやや立ち遅れている、ナノ構造、局所プローブ、及び光学的手法を用いたスピン制御に関する研究を、重点的に推進することが望まれる。

2. 研究成果

2-1. 核スピン操作グループ

本研究グループは、本プロジェクトの中核的研究を担っており、新しい核スピン操作法の確立と核スピン制御デバイスの実現を目標としている。本グループでは、これまで溶液 NMR においてのみ実現可能であった核スピンコヒーレント制御について、固体における高感度 NMR を実現させることにより、固体 NMR を用いた核スピン制御技術を確立することを目指している。

本研究グループの研究手法の特徴は、核スピン偏極および検出の手法として、分数量子ホール効果の占有数 $2/3$ におけるスピン状態転移 (SPT) ピークを利用することである。占有数 $2/3$ の量子ホール状態は、ある磁場の強度の範囲内で、完全にスピン偏極した相とスピンの偏極していない相のエネルギーがほぼ縮退しており、それが異なる空間領域を占めるドメイン構造をとる。その境界である分域壁では、電子スピンと核スピンの間で、超微細相互作用によりスピンのやりとりが起これ、結果として核スピン偏極が生じる。また、分域構造が核スピンの有効磁場で変化するため、電気抵抗は核スピン偏極に強く影響され、抵抗変化となって現れる。本プロジェクトでは、これを核スピン偏極手法及び抵抗検出 NMR として活用する研究を展開した。

これまでの成果として、スピン状態転移と核スピン偏極の高感度測定により、SPT ピーク位置が核スピン偏極に対して高感度に変化することを確認している。また、本グループのリーダーである平山研究総括は、プロジェクト開始前まで SPT ピークの抵抗値のみに着目していたが、本プロジェクトにおいては SPT ピーク全体に注目し、核スピンの偏極状態や緩和状態を明らかにする目的で、電流駆動による動的核スピン偏極や SPT スペクトロスコピーに関する研究を実施してきた。その結果、分数量子ホール効果におけるスピン偏極ドメイン構造の理解が大きく進展したと認められる。

また、本グループでは、様々な核スピンの操作法の開発に取り組んでいる。そのうちのひとつとして代表的なものが光による核スピン偏極である。これは、円偏光レーザー照射により、核スピンを偏極させる方法である。半導体物理の分野では、円偏光で電子スピンを選択的に励起できることはよく知られた事実であるが、本研究の独創的な点は、これを核スピン偏極へ適用し、さらに高感度抵抗検出により電氣的に読み出すことが可能なことを実証した点である。この方法は、核スピン偏極の局所的な情報を得るための必須技術として、極めて重要な成果である。また、新たな核スピン操作法として、従来の RF 振動磁場を用いた核スピン共鳴とは異なる、核電気共鳴 (NER:Nuclear Electric Resonance) を提案し、実証した。これは RF 電界で電子系のドメイン構造を振動させることで核スピン共鳴を起こす新しい方法であり、注目に値する成果である。この他、新潟大学との共同研究において、多重パルス印加によるスピン系の雑音測定の可能性の提案や、新しい緩和時間の発見等の重要な成果を上げている。

一方、デバイスの開発研究においては、ナノ構造体における核スピンの振る舞いの理解を進めている。その成果として、二層量子ポイントコンタクトに発生する核スピンの拡散現象の測定が挙げられる。これは、核スピンを利用した量子ビットや、条件付き量子ゲートデバイスの実現につながると評価できる。特に、核スピンを量子ビットとした量子情報処理を実現するにあたっては、独創的なデバイス構造の提案に向けた、重要な成果と言える。今後、ナノ構造作製のための電子ビーム露光装置導入とともに、本格的なデバイス開発研究を進める計画になっている。このような研究は世界でも先例がなく、成果に期待が持たれるところだが、光による核スピン制御の研究とあわせて、東日本大震災被害により1年程度の遅延を余儀なくされている。このことは、本プロジェクトの期間延長の審査に当たって考慮される必要があると考える。

2-2. ナノNMR・ナノプローブグループ

本研究グループは、極低温・強磁場中で動作するナノプローブの開発と、これを用いた核スピン状態の局所的な観察を目標としている。具体的には、電子状態や核スピン偏極のナノスケール測定、固体におけるナノスケールMRIの開発、ナノマテリアルのNMRを目指している。世界でもこのような装置を稼働させているグループは極めて少なく、息の長い開発努力が必要であると言える。このような中、本研究グループは、高移動度半導体中の二次元電子ガスの整数・分数量子ホール状態やその核スピンとの相互作用について、実空間での観察を行うために、極低温・強磁場で動作する希釈冷凍機走査トンネル顕微鏡（STM）や原子間力顕微鏡（AFM）システムの開発に取り組んでいる。

これまでの本研究グループの成果として、ハンブルグ大との共同研究により、InSb表面2次元系における整数量子ホール状態の局所状態密度について、低温・強磁場でのSTMを用いたマッピングの結果が得られている。この研究では、量子ホール状態の局在状態と非局在状態の電子状態の空間分布を、探針電圧を変化させた微分コンダクタンスを測定することにより明確に示すとともに、ランダウ準位占有数に依存した空間分布を見出した。整数量子ホール状態の局在・非局在について、実際に可視化したことは、大変大きな成果であると言える。この成果の論文について引用が大変多いことも、この成果が優れていることを示していると言えよう。今後は、本研究グループが目指す「極低温」における分数量子ホール状態の核スピン偏極のマッピングに、この経験が生かされることを期待する。また、現在、本研究グループは、希釈冷凍機プローブシステムを用いた量子ホール状態における電子・核スピン分布の局所観察へ向け、走査ゲート顕微鏡法（SGM）による実験を準備中である。この予備実験として、量子ホール効果のブレイクダウンに伴う核スピン偏極にする実験を進めており、これまでに核スピン偏極シグナルが最大となる値（ $\nu=1.00$ ）の直上の臨界電流値近傍での測定が有望であることを明らかにしている。本研究グループによるマイクロな核スピン偏極の情報は、他のグループによるマクロな抵抗検出データと組み合わせることにより、核スピン研究の強力なツールとなり得るであろう。また、SGMにより具体的に何が観測されているのかについては、理論計算やシミュレーションと組み合わせた詳細な解析が必要となる可能性が高い。今後の研究展開に期待するところである。

2-3. 半導体特性評価グループ

本研究グループは、従来GaAs半導体に限られていた抵抗検出型NMRを他の半導体、特にスピン軌道相互作用の大きいInSbやInAsなどの材料へ展開することを目標としている。Inは大きな核スピンを有することから、多準位系（多量子ビット）の観点からも興味

深い。この他、圧力印加による核スピンの g 因子や四重極分離の制御を目指している。

本研究グループは既に、 InSb の大きな g 因子に着目し、その表面の 2 次元電子系において、磁場中で試料を傾けることによりスピン分離とランダウ準位分離を調整し、電子スピン偏極の異なる 2 状態の共存状態を作り出すことにより、抵抗検出 NMR 観測に成功した。この技術を用いて、 ^{115}In 、 ^{123}Sb 、 ^{121}Sb の抵抗検出 NMR の観測に成功しており、中でも ^{115}In の核スピンの準位分裂を観測したことは、 GaAs 以外での高感度抵抗検出 NMR を世界で初めて可能とした例であり、極めて重要な成果であると言えよう。今後は、 In 系特有の多核スピン特性を生かした多スピン量子系の制御実験を計画しているところである。この現象をさらに詳細に追求することにより、例えばラシュバ及びドレッセルハウスのスピン軌道相互作用の役割等について重要な知見が得られる可能性が高い。本グループの手法はシリコンを始めとした他の半導体材料でも可能であり、抵抗検出 NMR 法の多様な材料への展開に大いに寄与することが期待できる。

また、 InSb はリーク電流の問題のために、ゲート電極を作製し電子濃度を変化させることが困難であるが、この問題について ALD 酸化膜を堆積することにより解決したことは、デバイスプロセス開発の観点から大きな進展であると言える。この技術はゲート作成が難しい材料に広く応用が可能であると期待できる。

本研究グループは論文による成果発表も多数行ってきており、研究成果の質の高さを反映していると言え、高く評価できる。

2-4. 物理研究・結晶成長グループ

本研究グループは、高品質の $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ の 2 次元電子ガスウェハを作成し、他のグループに供給するとともに、ランダウ準位占有数 $5/2$ の分数量子ホール状態の物性を調べることにより、分数量子ホール状態の抵抗検出 NMR 法による電子スピン偏極度の決定と電子状態を解明することを目標としている。

後者の研究を行うためには、極めて高品質なウェハを成長する技術を確立することが必須条件である。また、単に高移動度を実現すればいいというのではなく、ランダウ占有数 $5/2$ 状態での縦抵抗が文字通りゼロになるよう最適化されたデバイス構造を持つ高品質のウェハ作製技術が求められる。本研究グループでは、実験を重ねることにより、(1)試料を幅 $100\text{--}200\ \mu\text{m}$ のホールバー型にする、(2)バックゲートによる $x=0.25$ の試料でドーピング密度を $5 \times 10^{11}\text{m}^{-2}$ にする、といったウェハ作成のための最適化条件を見出した。世界でもこのレベルのウェハを作製できる研究機関は極めて少ない。本研究グループは、高品質半導体構造の結晶成長に関しては後発でありながら、多大な努力により短期間に世界のトップクラスに躍り出たことは高く評価されるべきであろう。

分数量子ホール効果の研究においては、占有数 $5/2$ の分数量子ホール状態はその物理的な起源が未解明であり、基礎物性の観点から興味を持たれている。本研究グループは、上記の高品質の試料を作製したことによって、 $\nu=5/2$ 状態における特性の改善をもたらし、広い範囲で電子密度、占有率依存性を調べることが可能となった。その結果、抵抗検出 NMR を最大限に駆使し、初めて核スピン共鳴ピークの明確なシフトを観測することに成功し、電子スピンの完全なスピン偏極を保っているという結論を得た。ランダウ準位占有数 $5/2$ の分数量子ホール状態を記述する波動関数は、理論的にいくつか提案されているが、その妥当性の判断のためには、スピン偏極度の測定が必要であった。本研究成果はこうした議論に重要な実験証拠を与えるものである。

また占有数 $5/2$ 状態は、準粒子の統計性からも特異な状態であることが理論的に予測されているが、本研究において占有数 $5/2$ 状態が非アーベリアン型統計性に従う波動関数で記述されることを決定づける成果が得られている。準粒子の統計性が非アーベリアン型に

従うことは、外部擾乱に強くコヒーレンスが良好な準粒子の存在を予言しており、この性質を用いたトポロジカル量子コンピューティングの可能性をもたらすものとして注目されている。本成果は、雑音に強い全く新しいスキームの量子計算が可能になる可能性を示唆するもので、非常に重要な成果であると言える。本グループの質の高い基礎研究により、量子情報処理の実現へ向けて何らかの糸口が見出せるならば、これは予想外の大きな成果であり、今後の進展を期待したい。

以上に基づき研究成果を俯瞰すると、まず全体的には、大変オリジナリティーが高く、質の高い研究が行われており、基礎研究の観点から十分に評価されるべき研究が行われている。非常に残念ながら、様々な研究成果が上がりつつある段階で東日本大震災が発生し、研究進捗に約1年の遅れが生じている。これまでは2次元電子系での研究で成果が上がっており、これからナノ構造へと研究を展開しようとしていた矢先であった。しかし、研究グループの努力により、核スピン操作グループの光による核スピン制御の研究以外は復帰しており、これから大きな成果が期待できる。

次に成果の科学技術的側面については、種々の核スピン操作技術の実現、ナノスケールMRIの可能性の示唆、抵抗検出NMR法の確立へ向けた進展、InSb等GaAs以外の半導体への抵抗検出NMR法の適用、量子ホール状態の波動関数のナノスケール実空間観察、多重パルス列による雑音スペクトル測定、世界トップクラスの良質2次元系の作製と占有率5/2分数量子ホール状態の電子スピン偏極度の測定など、数々の重要な成果が得られている。今後、ナノ領域の核スピン制御・観測へと発展させることを期待する。なお成果の論文発表については、東日本大震災による被害のために遅れ気味なこともあり、発表論文の被引用数はそれほど伸びていないように思われ、今後の進展を期待したい。

一方、成果の産業社会的側面については、抵抗検出NMR法の適用範囲の拡大により、このプロジェクトで開発された技術が将来他の応用分野へと波及する可能性が期待できる。また核スピンの量子情報処理への応用可能性については、量子情報処理技術自身がまだ基礎的な研究のフェーズである中で、量子情報処理にとって核スピンという新しい情報の担い手が現れたことは注目すべきことであり、その長期的な産業社会的波及効果が期待でき、いずれも評価に値する。

3. 総合評価

以上の通り、本研究プロジェクトは、平山研究総括のもと、半導体核スピン物性研究に関して世界的な成果を上げている。これまでの研究成果は、2次元系を主としたマクロな系での核スピン物性の研究が中心であり、今後はナノ構造やナノプローブによるナノスケールの核スピン計測における展開が期待される。東日本大震災の影響により、研究活動には約1年の遅れが見られているが、震災による影響がなければ、さらに多くの成果が生まれた可能性もあり、評価委員会としては、災害被害による遅れについて何らかの措置が取られることが望ましいと考える。

ERATO事業の趣旨であるところの、新たな科学技術の潮流の創出の可能性については、核スピンの制御という新たな研究テーマを大きく発展させ研究の斬新な方向性を打ち出すことに成功している。さらにその先に想定される将来の社会・経済の変革に繋がるイノベーション創出の可能性について、未だ基礎的な研究段階にある量子情報処理技術分野において、核スピンという新たな情報の担い手を登場させたことが、技術革新を予見させる成果と言えよう。本プロジェクトで行われているマクロな数の核スピンアンサンブルを情報媒体とする研究は、その対極にある単一核スピン研究と対比して検討して行く必要がある。後者は技術的には圧倒的に困難であり、数年で目処が立つような技術ではなく、長期的な

視点からフォローしていく必要があることは、本プロジェクトの評価において留意されるべきである。

半導体における核スピン研究は近年注目されている研究分野である。電子の電荷に加えて電子スピンを利用するスピントロニクスが活発化したのは約 10 年前であり、ここに近年核スピンの加わって現在の研究トレンドが形成されている。新しいエレクトロニクスに、電子スピン、核スピンともどのような形で貢献していくかどうかなについては、まだ予見が可能となるには至っていない。量子情報処理への展開は一つ有望な可能性ではあるが、まだまだ基礎研究フェーズにある。

その意味からも、本プロジェクトの本質は基礎研究であると捉えるべきである。現在、基礎研究で順調に成果が上がっており、ナノ構造やナノプローブ計測など、未踏の研究分野に今後挑戦してゆく予定であり、この分野の研究で世界を牽引する研究グループであることは疑いの余地がない。本研究グループはこれからも大きな成果を上げるポテンシャルを秘めているので、評価委員会としては、イノベーション創出への道筋を的確に見極めつつも、早急な成果を求めず、じっくりと研究支援がなされることを希望する。

以上、ERATO 平山核スピンエレク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、戦略目標「情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築」に資する十分な成果が得られたと判断する。

以上