

ERATO 平山核スピントロニクスプロジェクト事後評価（最終評価）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】（敬称略、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トニクス研究拠点／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 石橋極微デバイス工学研究室／主任研究員）

棚本 哲史 （株式会社東芝 研究開発センター／主任研究員）

根本 香絵 （国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系／教授）

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も取り組んでいる。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たものである。

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た。東日本大震災による影響で研究活動には遅れを生じた時期もあったが、特別重点期間の 2 年間も含めて、核電気共鳴（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。また、高感度化された抵抗検出 NMR 法により高品質 GaAs 二次元系の充填率 2 付近において電子がウィグナー結晶となることを確認し、さらにナノスケール MRI の実現に繋がる量子ホール系における核スピン信号の二次元マッピングが実現できたことは、プロジェクト後期の特筆すべき成果としてあげられよう。

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、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される。

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、電子スピンよりスピンの向きが変わりにくいためデコヒーレンス時間が長く、量子状態を保持しやすいという特徴があり、近年、量子コンピューターなどへの応用が強く期待されている。

これまで核スピンはその精密な制御が困難であり、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、電流印加の結果ドメイン境界領域で核スピンの偏極する電流誘起動的核スピン偏極を実現しており、この核スピン制御と抵抗検出核磁気共鳴（RDNMR）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。

本プロジェクトは、平山総括自身がこれまでに開拓してきた基盤技術を背景に、RDNMR、スピン状態転移スペクトロスコーピ、ナノプローブ観察などの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に関する基礎研究を進め、固体中における核スピンの正確で精密な測定・制御を目指した。更にプロジェクトの遂行により、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知見が得られその理解が一層進むことも計画されていた。また、長期的な波及効果としては、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革新的情報技術への展開等、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ていた。この様な構想のもと、研究対象とされた分数量子ホール効果の物理に関して核スピンの果たす役割が明らかにされ、占有率 5/2 分数量子ホール状態が完全スピン偏極状態であり、非アーベリアン統計に従う擬粒子の存在を示唆する結果が得られている。核スピンの量子情報デバイスへの展開には更なる研究の継続が待たれるが、上記の結果は量子情報処理実現に向けた技術基盤の構築に資する大変重要な成果であり、理論的に提案されているトポロジカル量子コンピューターの実現への道を拓くものである。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ったと高く評価できる。

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た。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が切り拓かれた。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 RDNMR 研究を InSb や InAs へ拡張し、大きな核スピンを含む In を研究対象に加えること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有効に機能した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に関する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た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およびナノスケールの核スピン制御技術開発などの研究が活発に実施された。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。また、ナノ構造、局所プローブおよび光学的手法を用いたスピン制御に関する研究も積極的に実施され成果をあげている。

これらの研究活動で得られた知見が活発に報告されていることは、原著論文 62 編、学会発表 262 件、招待講演 42 件、書籍 16 編、受賞 4 件からも判断できるが、この活動が核スピンエレクトロニクスの認知度の向上と半導体における核スピン研究の世界的な広がりにも寄与していることは論をまたない。

〔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. 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た。具体的には、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関し、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という方針に基づき研究を実施した。

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、二つの相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り、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、上記の機構を核スピン偏極手法及び RDNMR 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、プロジェクト開始以前には 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 ピーク近傍の形状全体に注目し、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 スペクトロスコーピに関する研究を実施してきた。この結果、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、本グループは、様々な核スピンの操作法の開発にも取り組んでいる。代表的なもの一つに光による核スピン偏極があるが、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 (高周波) 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、これを実証している。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により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、半導体ナノ構造における核スピンのコヒーレント制御実現に必要な要素技術であるアンテナストライプと半導体構造を集積化するアンテナゲート積層構造が試作され、効率的に様々な半導体ナノ構造に対して RF 振動磁場を印加することが可能になった。同時に、核スピン量子ビットの結合ポイントコンタクト系での操作の基礎となる二層系の上下層のそれぞれにおいて独立制御可能な二層量子ポイントコンタクト (QPC) の作製にも成功を収めた。この構造で核スピンを制御する場合の基礎となる核スピン偏極・検出が実現され、基礎データとして最も重要な核スピンの拡散が測定・解析された。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成果であると評価される。プロジェクトの成果を更に発展させるため、量子構造、特に二次元系の基礎的な物性研究も継続されている。これらは、核スピンを量子ビットとした量子情報処理の実現をも視野に入れた独創的なデバイス構造を提案するために必要になる重要な知見の源泉であり、核スピ

ン制御の舞台となる半導体量子構造への更なる理解を得るために重要である。この研究が、グラフェンや MoS_2 を用いた二次元系、低次元系の量子伝導特性の研究に応用され大きな波及効果をもたらすことも期待される。また、一番単純なメソスコピック構造であるにも関わらずその物理が明確になっていない一層の量子ポイントコンタクトの基礎の解明も引き続き取り組まれている。このような研究は世界でも先例がなく、将来の成果にも期待が持たれる。

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 による評価を目指し研究が実施されている。このような装置を稼働させているグループは世界でも極めて少なく、様々な実験装置そのものから造るといふ息の長い開発努力が必要であると言える。このような背景にあつて本研究グループは、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の相互作用について、実空間で観察を行なうために、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だ。この結果、極低温・強磁場中において低いノイズレベルでの安定な測定が可能となっている。実際、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分布に関するマッピング結果が低温・強磁場条件下での STM を用いて得られている。

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微分コンダクタンスを測定することにより明確に表示することに成功しており、ランダウ準位占有数に依存した空間分布が見出されている。整数量子ホール状態の局在・非局在について、実際に可視化できたことは、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。

希釈冷凍機プローブシステムを用いた核スピンの分布の観察対象の一つとして、量子ホール効果のブレイクダウン現象における核スピン偏極があげられるが、プローブをゲートとして用い局所的に核スピン偏極・非偏極を行いながら電氣的な検出により核スピンのマッピングを行う走査ゲート顕微鏡 (SGM) 法による局所観察実験は継続中である。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関する実験が進められた結果、充填率 1 の臨界電流値近傍で核スピン偏極シグナルが最大となる領域での測定が有望であることが明らかにされている。

また、希釈冷凍機 AFM の探針を局所ゲートとして探針から印加する交流電界により生ずるスピン電界共鳴 (NER) を用いて、核スピン偏極の抵抗検出実空間イメージングが実施されている。試料は移動度 $100\text{m}^2/\text{Vs}$ のバックゲート付 GaAs/AlGaAs 量子井戸構造をホールバー形状に加工したものである。この一連の実験から、試料は核スピン偏極領域が $10\mu\text{m}$ 程度の長さスケールの局在構造を持つことが示唆されるなど、ナノスケール固体 MRI の実現に向けた成果も得られている。

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に存在する電子

スピンドメイン構造や、電流により動的に核スピン偏極された核スピンの実空間マッピングにこの経験が生かされることを期待する。

本研究グループによるミ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つつあるが、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も必要である。

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 RDNMR 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物質であり、研究の意義は高い。本研究グループはまず、InSb の大きな g 因子に着目し、その 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 観測に成功している。次にこの技術を用いて、 ^{115}In 、 ^{123}Sb 、 ^{121}Sb の抵抗検出 NMR の観測にも成功し、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活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、RDNMR 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、この問題について原子層堆積（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 GaAs/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、ウェハ作製のため

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。

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研究を通じて、高感度抵抗検出 NMR のスペクトル形状は電荷秩序・電子密度揺らぎを検出することに対して比類のない測定手法となることが示され、本グループで作製された高品質二次元系では、充填率 2 の近傍においてウィグナー結晶の存在が確認されている。

電子は他の電子との相互作用よりも不純物ポテンシャルの影響をより強く受けるため、ウィグナー結晶状態の観測には不純物の濃度を最小限に抑える必要がある。今回ウィグナー結晶状態を明瞭に観測することに成功したことはそれ自体大きな成果であるが、抵抗検出 NMR の有用性を示すとともに結晶成長技術の高さをも示すものである。

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が持たれている。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、電子スピンが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。

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。本研究において、占有数 $5/2$ 状態は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結果が得られているが、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い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、雑音に強いスキームの量子計算が可能になる可能性を実験から示唆するもので、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。2次元電子系での研究成果をはじめ様々な成果が出始め、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に東日本大震災が発生し、研究進捗に 1 年程度の遅れが生じたことは非常に残念であったが、研究グループの努力により震災の影響を乗り越え完全に回復できたことは、生み出された様々な研究成果から判断される。

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、充填率 2 の近傍におけるウィグナー結晶の存在確認など、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・観測さらには核スピン制御デバイス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、高いインパクトファクターを持つ *Science*, *Nature Physics*, *Phys. Rev. Lett.* に掲載された論文を含む原著論文 62 編が執筆されており、充実した成果が得られたことを裏付けている。

RDNMR 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。実際、核スピンを用いた RDNMR が半導体薄膜評価装置等に実装されれば、薄膜やナノ構造の制御に役立つ。従来にない高感度な MRI が実現されればその社会的な価値は非常に大きい。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、核スピンを制御する基盤技術開発に貢献するとともにトポロジカル量子コンピューターの可能性を実験的に示唆したことは、いずれも評価に値する。

〔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、研究活動にはやや遅れが見られたが、2 年間の特別重点期間によって十分に取り戻せたと判断される。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たと言えよう。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、核スピンの新しい可能性を拓いたことは、技術革新を予見させる成果であると言える。本プロジェクトで実施された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、両者とも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新しい可能性が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、核スピンの双方ともどのような形で貢献していくかどうかについては、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の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。核スピン偏極や検出、電子スピンの相互作用など、基本的な機構にはまだ完全に理解されていない部分も残されている。それらの基本的な物理をさらに深めることはこれからも必要であろう。

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。この基礎研究の段階において、プロジェクト独自の高感度 NMR 法を基に種々の計測技術や核スピン制御法の研究に成果をあげており、ナノ構造やナノプローブ計測など、未踏の研究分野に果敢に挑戦した結果、依然として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。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たことを評価する。

以上、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、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」に資する基礎的ではあるが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