

ERATO「平山核スピンエレクトロニクス」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、化合物半導体界面の 2 次元電子系において強磁場下で見られる量子ホール効果（整数量子ホール効果および分数量子ホール効果：それぞれ 1985 年と 1998 年のノーベル物理学賞を受賞）という極めて興味深く重要な物理現象と関連して、電子のスピンと原子核のスピンとが結合して生じる現象に着目し、核スピンが重要な役割を演じるエレクトロニクスの新分野の開拓、それを量子情報処理の実現に向けての基盤技術の構築に繋げるという独創的で挑戦的な目標を掲げた。東北大学と NTT 物性科学基礎研究所を中心とした 4 つの研究グループにおいて研究を進め、核スピンの挙動を電気抵抗の変化として検出する方法を開発し、抵抗検出型核磁気共鳴法（RDNMR）を生み出し、その利用によって 2 次元電子系の強磁場下における物理現象の探索と理解を進めるなど、さまざまな特筆すべき成果を上げた。

本プロジェクトの終了後も、平山研究総括およびプロジェクト参加研究者はさまざまな研究組織において活動を続け、プロジェクトの研究成果を発展させて顕著な成果を上げてきている。なかでも、2015 年～2019 年に平山研究総括が研究代表者として ERATO プロジェクトを引継ぐ形で採択された科学研究費補助金（科研費）による新学術領域研究「ハイブリッド量子科学」は、多くの顕著な成果を上げた。この新学術領域研究では、核スピンを電子の電荷やスピンだけでなく、光子、フォノンなどの他の量子とも結びつけてハイブリッド化するという構想のもとに、強磁場だけでなく、より低磁場での核スピンの挙動の探求を含めて、さまざまな新しい「量子技術」を開拓した。また、走査プローブを用いた核スピン状態の局所的イメージングおよび局所核磁気共鳴などの興味深い発展もあった。これらの研究成果は多数の優れた学術論文として発表され、多くの関連研究者の関心を惹き、一つの研究コミュニティを形成するまでに至っている。また、若い研究者の育成についても見るべきものがある。

以上より、本プロジェクトは、研究計画の斬新性と独創性、研究期間中に得られた研究成果の高い水準と量、その後に展開された研究の広がり、若手研究者の育成などにおいて、特筆すべき成果を上げたと評価される。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

本プロジェクトが 2007 年に発足された背景として、1980 年頃に発見された化合物半導体の界面に形成される 2 次元電子系が強磁場下において示す極めて興味深い現象である整数量子ホール効果および引き続いて発見された分数量子ホール効果があった（それぞれ 1985 年と 1998 年のノーベル物理学賞を受賞）。平山研究総括は、この現象において原子核のスピンがどのような影響を及ぼすかに着目し、それをを用いて核スピンを精密に制御する研究を開始した。その一つの重要な原動力として、量子情報処理（量子コンピューティング）の

実現への期待の高まりがあり、いくつかの先駆的な研究も進行しつつあった。さらに、核磁気共鳴法（NMR）を始めとする計測手法の革新も視野の中にあった。2007年にスタートした本プロジェクトは、東北大学とNTT物性科学基礎研究所の研究者を中心に、4つの研究グループ、1)核スピン操作グループ、2)ナノNMR・ナノプローブグループ、3)半導体特性評価グループ、および4)物理研究・結晶成長グループが活発な研究を進め、核スピンと電子スピンの相互作用に関連した基礎研究を中心に、それに基づいた核スピンの制御技術の開拓など、目覚ましい研究成果を上げた。これらの研究成果は、プロジェクト期間中、国際的に著名な論文誌を含む93報の論文、国内外の学会での発表（招待講演48件）などによって発表され、関連の科学と技術の分野に著しい影響を与えた。

本プロジェクト終了後、平山研究総括を始めとするプロジェクトの参加研究者は、さまざまな研究組織の形成あるいは他の研究組織へ参画し、プロジェクト期間中の研究を継続発展させてきた。最も顕著なものは平山研究総括が研究代表者となって採択された科研費による新学術領域研究「ハイブリッド量子科学」である。核スピンを電子スピンだけでなく、光子、フォノンなどの他の量子とも結びつけてハイブリッド化するという構想のもとに、さまざまな新しい「量子技術」の開拓がなされた。例えば、抵抗検出型核磁気共鳴法（RDNMR）の開拓による量子ホール効果現象の基礎物理の精密な解析、走査プローブを用いた核スピン状態の局所的イメージングなど、重要で興味深い成果を上げた。それらの研究成果は約30報の論文として著名な論文誌で発表された。このように、本プロジェクトの発展状況や活用状況については、極めて顕著な足跡を残したと言える。

2. 研究成果から生み出された科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果

(1) 研究成果の科学的・技術的観点からの貢献

本プロジェクトの研究成果を発展させ活用するために引き続いて採択された科研費による新学術領域研究「量子ハイブリッド科学」の5年余において得られた研究成果の科学的・技術的観点からの貢献は、端的に言えば、電子（電荷およびスピン）、光子、フォノンのような“古典的な”量子を用いて発展してきた従来の物性計測や物質分析による基礎科学の研究ならびに情報の処理や通信に関わる実用技術（半導体エレクトロニクスおよびスピントロニクス）において、原子核のスピンもまた重要な役割を果たしうることを明瞭に示したことである。核スピン自体は、核磁気共鳴法（NMR）において古くから物質の分析のために用いられてきたが、本研究によって電子と核スピンの相互作用が詳細に明らかにされ、それを有効に利用した抵抗検出型核磁気共鳴法（RDNMR）が開発された。また、走査プローブを用いて局所に高周波電界を印加し、局所において核磁気共鳴を起こさせ、核スピン状態のイメージングを行うことが可能であることも示された。さらに、ますます期待が大きくなりつつある量子情報処理（量子コンピューティング）に関して、最大の問題点である量子干渉状態が環境によって乱されるデコヒーレンスの問題が核スピンの場合には起こりにくいことを利用した、核スピンによる量子コンピューティングの可能性が明示された。本プロジェクトの発足以来12年余の研究の流れを俯瞰するとき、プロジェクトにおいて先鞭がつけら

れた創造的な研究の成果が新学術領域研究において花開いたと言える。新学術領域研究において、核スピンを電子スピンだけでなく、光子、フォノンなどの他の量子とも結びつけてハイブリッド化するという構想のもと、さまざまな新しい「量子技術」の開拓がなされた。ERATO 事業の目的である『既存の研究分野を超えた分野融合や新しいアプローチによって挑戦的な基礎研究を推進することで、今後の科学技術イノベーションの創出を先導する新しい科学技術の潮流の形成を促進する』にまさに沿った研究が推進されたと言える。

これらの研究成果の科学的・技術的観点からの貢献が顕著であったことは、多数の論文が影響力の大きい著名な論文誌での発表（プロジェクト期間中 93 件および終了後 30 件）、また多くの招待講演（国際会議 56 件、国内会議 13 件）の実績として現れており、特筆すべき貢献がなされたと言って過言でない。なお、平山研究総括は関連する成果で 2020 年に第 17 回江崎玲於奈賞を受賞している。

(2) 研究成果の社会的・経済的観点からの貢献

本プロジェクト（7 年余）およびその後の科研費による新学術領域研究「量子ハイブリッド科学」（5 年余）においてなされた研究は、いずれも基礎研究である。それゆえ研究成果の社会的・経済的観点からの貢献は、いまだ必ずしも顕著には表れていないが、今後の周辺技術の発展などによって、大きい貢献につながるであろうと期待される。

どのような分野での貢献が期待できるであろうか？ 21 世紀の人間社会を支えるすべての技術が複雑で多量の情報の処理や通信によって支えられるであろうことは疑う余地がなく、なかでも、量子情報処理（量子コンピューティング）の実現は、我が国はもとより世界の各国において、科学と技術の最重要課題の一つとみなされている。云うまでもなく、量子コンピュータを実現する上での最大のネックは、従来型の量子ビットすなわち超電導型量子ビットや半導体中の電子スピン量子ビットにおいて、量子干渉状態が環境からの外乱によって短時間で乱されるという点である。環境からの外乱を受けにくい核スピンを量子ビットとして用いることができれば、量子コンピュータを実現する一つの有望な道が開けるとの期待が本プロジェクトの当初からもあったが、その期待はプロジェクト期間中およびその後の研究において、核スピンを制御するための重要な基礎的知識が得られたことによって、さらに膨らんだと言えよう。もちろん、核スピン量子コンピュータを実現するためには、まだまだ多くの周辺技術の開拓がなされなければならない。また、核スピン集団としてハイブリッド量子系やメモリ機能としての活用も考えられる。別の社会的な貢献として、これらの基礎研究から得られたさまざまな知見は、物質材料の分析に用いられてきた核磁気共鳴法（NMR）や医療診断に用いられている磁気共鳴画像診断法（MRI）に革新をもたらす可能性が大いにあると思われる。今後の展開が楽しみである。

(3) その他の特記すべき波及効果

本プロジェクトならびにその後の新学術領域研究に参加した若手研究者の多くが、国内外の大学などの准教授クラスのポジションにキャリアアップしており、人材育成という観

点からの波及効果も大きかったといえる。これは次の2つの要素から生まれたと思われる。一つは、エレクトロニクス分野ではいわば“新しい”量子である核スピンの研究に携わり新分野を開拓する経験をしたこと、言い換えれば、安易に時流に流されず、独自の研究を遂行する経験をしたことである。もう一つは、独創的でありかつ優れた指導者によって指導されたことである。若手研究人材の育成は、どのような研究組織にとってもある意味で最も重要なことであり、その点で多くの若手研究者がキャリアアップし育ったことは高く評価する。これらの人材が我が国の学术界や産業界において次代を担うことを願うものである。