戦略的創造研究推進事業 ERATO 追跡評価用資料

「平山核スピンエレクトロニクス」 プロジェクト (2007.12~2015.3)

研究総括:平山 祥郎

2021年3月

要旨1
プロジェクトの発足に至る経緯及び展開状況(まとめ図)3
第1章 プロジェクトの概要 4
1.1 研究期間
1.2 プロジェクト発足時に至る科学技術や社会の背景4
1.2.1 科学技術の背景 4
1.2.2 社会の背景 5
1.3 プロジェクトのねらい 5
1.4 研究体制
1.5 プロジェクト終了時点での研究成果やその意義6
1.5.1 スピン状態転移と核スピン偏極の高感度測定6
1.5.2 ナノプローブ(走査トンネル顕微鏡)による測定
1.5.3 InSb 二次元系のおける高感度 RDNMR 22
1.5.4 GaAs/AlGaAs の 2 次元電子ガスの研究 26
第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況 33
2.1 プロジェクトの終了後の状況に関する基礎データ
2.1.1 調査方法
2.1.2 競争的研究資金の獲得状況 35
2.1.3 論文の発表状況 37
2.1.4 特許の出願・公開・登録状況 40
2.1.5 招待講演 41
2.1.6 受賞状況 41
2.1.7 ベンチャー企業の設立状況 42
2.1.8 報道関係 42
2.2 プロジェクトの進捗状況 43
2.2.1 抵抗検出 NMR を含む GaAs 量子ホール系研究の発展
2.2.2 走査トンネル顕微鏡と抵抗検出 NMR による電子スピン偏極の空間分布測定.49
2.2.3 InSb 系量子ホール研究の発展 53
2.2.4 2 次元のスピン物性、電荷秩序の研究 59
2.3 プロジェクト参加研究員の活動状況62
2.4 第2章まとめ63
第3章 プロジェクト成果の波及と展望64
3.1 科学技術への波及と展望 64
3.1.1 半導体ナノ構造体における核スピンを使った計測・制御への波及65
3.1.2 グラフェン、カーボンナノチューブ材料やトポロジカル材料への波及可能性66
3.2 社会経済への波及と展望67

3.2.1	量子計算機への応用	67
3.2.2	NMR・MRI 計測への応用	67
【引用文献]	69

要旨

本資料は、戦略的創造研究推進事業の ERATO「平山核スピンエレクトロニクスプロジェ クト」(2007 年 12 月~2015 年 3 月)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的 効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、国立研究開発法人科学技術振 興機構(JST)事業および事業運営等に資するために、追跡調査を実施した結果をまとめたも のである。

第1章では、プロジェクト発足に至る科学技術や社会の背景、プロジェクトのねらい、 研究体制、プロジェクト終了時点での研究成果やその意義をまとめた。

科学技術の背景として、化合物半導体の作製・加工技術の発展により、半導体中に人工 的な量子井戸(0次元)や1次元、2次元の電子系を実現できるようになり、その電子系の詳 細な解明のために、研究手段として整数・分数量子ホール効果(1998年ノーベル物理学賞 の対象)が研究対象となった。これらの研究の中で核スピンと電子スピンの相互作用は伝導 電子の物性解析の重要な手段として行われるようになり、さらなる技術の発展が求められ ていた。社会的な背景としては、核スピンが量子情報処理への応用可能性があり、核スピ ンを精密に制御する技術が求められていた。これらの背景の下、本プロジェクトは、半導 体量子構造やナノマテリアルにおいて核スピンを精密に制御する技術を確立し、量子情報 処理のための固体デバイスや超高感度核磁気共鳴(NMR)への展開を目指した。

東北大学と日本電信電話株式会社(NTT)物性科学基礎研究所(NTT 物性研究所)の共同研 究体制により、4 グループ(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)で本プロジェクトが実施された。特 別重点期間は 2 グループ体制(核スピン操作・評価グループ、物理研究・結晶成長グループ) で研究が行われた。

プロジェクト終了時点での研究成果とその意義について、研究実施報告書、事後評価報 告書等を参考に、(1)スピン状態転移と核スピン偏極の高感度測定、(2)ナノプローブ(走査 トンネル顕微鏡)による測定、(3)アンチモン化インジウム(InSb)二次元系における高感度 抵抗検出 NMR (RDNMR)、(4)ガリウムヒ素(GaAs)/ヒ化アルミニウムガリウム(AlGaAs)の 2 次元電子ガスの研究、の4項目にまとめた。

第2章では、プロジェクト終了から現在に至る状況に関して、文献調査(プロジェクト報告書、解説、原著論文など)、インターネットによる調査、各種データベースによる業績(論文・特許・競争的研究資金の獲得状況・特許出願状況・招待講演・受賞他)の調査からなる 基礎データ調査と、プロジェクト関係者や外部有識者へのインタビュー調査を行った。これに基づき、本プロジェクト期間中の成果と調査時点での発展状況等についてまとめた。

本プロジェクト期間中の論文は93報、発展波及論文は30報が発表されている。期間中の1報あたりの年平均被引用数は1.09件/年・報、終了後は2.04件/年・報であった。特許は期間中に2件出願・登録(国際)され、1件は現在も権利が継続している。なお、終了後の出願はなかった。国際会議への招待講演は期間中48件、終了後は56件であった。受

賞は期間中1件、終了後1件あった。ベンチャー企業の設立はなかった。報道された研究 は期間中に2件、終了後は3件であった。

プロジェクト終了後、平山は科学研究費補助金(科研費)の新学術領域研究(研究領域提案型)「ハイブリッド量子科学」(2015年度~)の研究代表者として研究を展開している。本 プロジェクトの研究成果の発展は、抵抗検出 NMR を含む GaAs量子ホール系の研究として、 ①高いランダウ準位とゼロ磁場に近い状態での RDNMR の実現、②スピン偏極エッジ状態と ホスト核の相互作用、③電界駆動 NMR のスペクトルによるドメイン壁の振動と超微細場と の関係等の研究が行われ、また電子スピン偏極の空間分布測定の研究として、走査トンネ ル顕微鏡と抵抗検出 NMR による電子スピン偏極の空間分布測定が行われた。InSb系量子ホ ールの研究の発展としては、①カイラルエッジ状態の RDNMR による研究、②InSb のトレン チゲートを持つ量子ポイントコンタクト(QPC)における並行チャネル状態等の研究が行わ れた。NTT 物性研究所では、量子情報処理を究極の目的としてトポロジー物性等の研究が 行われており、その中で量子ホール効果におけるエッジチャネルの研究やWigner 結晶の微 視的構造の解析の研究として、2次元のスピン物性、電荷秩序の研究等が行われた。

第3章では、科学技術への波及と展望、社会経済への波及と展望の観点から調べた。ト ポロジーやグラフェン等の近年注目されている研究に対し、当該分野での研究者は少なく、 また発表論文数も少ない。しかしながら、「抵抗検出 NMR」の研究について、海外と日本(平 山・村木以外)との比較では、本プロジェクトからの成果及び発展波及論文の発表件数が最 も多かった。また、抵抗検出 NMR によるイメージングや電界励起の核スピン共鳴(NER)が独 自の新しい発想であった。本研究の成果のトポロジカル材料への適用は、現時点では見当 たらなかったが、今後この分野への展開の可能性がある。

社会的には量子計算機への応用の可能性が見いだされており、核スピンそのものを量子 計算素子として使う研究が現在行われている。さらに、量子メモリーへの応用の研究も行 われている。また核スピンを使った医療用 NMR・MRI や化学分析用等の NMR がすでに広く使 われており、本研究の成果の一部が一般の NMR・MRI へ応用できる可能性もある。

2

プロジェクトの発足に至る経緯及び展開状況(まとめ図)



第1章 プロジェクトの概要

本調査の対象である ERATO「平山核スピンエレクトロニクス」プロジェクト(以後、本プ ロジェクトと記載)の概要を下記に示す。

1.1 研究期間

研究期間は 2007 年 12 月~2015 年 3 月。但し、最後の 2 年(2013 年 4 月~2015 年 3 月) は特別重点期間である。

1.2 プロジェクト発足に至る科学技術や社会の背景

1.2.1 科学技術の背景

本プロジェクトにおいて重要な背景となっているのが 1980 年に発見された整数量子ホー ル効果¹である。この効果は、2 次元電子系で起きる現象として注目され、その後の研究か ら分数量子ホール効果²も発見された。これらの現象は理論的な研究から、トポロジカル量 子系として認知されるようになった。これらの発見はいずれもノーベル物理学賞の対象と なった。

もう一つの重要なキーワードは核スピンである。原子核が磁気モーメントを持つことは 1924年に示され、最初の核磁気共鳴(NMR)は1939年に発見された。その後、NMR は化学分 析の重要な測定装置として発展し、さらに、核磁気共鳴イメージング(MRI)装置として、医 療診断の重要な計測装置となっている。化学・医療分野のみならず固体物理の計測手段³、 また、物性物理の分析手段としても広く使われている。しかし、感度が低く、多くの試料 が必要であるため、ナノ物質には適用できなかった。

一方、半導体、特にIIIV属系の結晶成長技術や微細加工技術の発展に伴い、半導体中に 人工的な量子井戸(0次元)や1次元、2次元の電子系を実現できるようになり、その試料を 使った電子物性の研究が多く行われるようになった。そのような実験において、電子スピ ンと核スピンの相互作用は、電子系と核スピンの相互作用が小さいため、通常の状態では 核スピンが電子スピンに影響を与えることはなく、電子スピンを量子情報処理に使う場合、 むしろ核スピンとの相互作用は量子情報を乱す要因であった。一方、核スピンから見ると、 そのスピン量子状態は周囲との相互作用が弱いため、量子状態が比較的長く保たれる。そ のため、量子コンピュータ⁴の有力な候補として多くの研究が行われている。なお、量子情 報を失わないように様々な量子演算を行うことが重要である(コヒーレントな量子操作と 呼ぶ)。平山も 2005 年に量子コンピュータの量子ビットとして核スピンを使う研究を行っ

¹ 平山祥郎ほか「半導体量子構造の物理」朝倉書店、P24

² 同上、P29

³ https://masashi.issp.u-tokyo.ac.jp/nmrtext.pdf

⁴ https://ja.wikipedia.org/wiki/量子コンピュータ

ている⁵。さらに、GaAs 結晶の 2 次元電子伝導で生じる 2/3 分数量子ホール効果において、 核スピンとの相互作用により抵抗変化が生じることを 2002 年に報告した。この現象をもと に、核スピンを使った電子スピンの偏極の計測や抵抗検出 NMR の研究を中心に本プロジェ クトの研究を行った。

1.2.2 社会の背景

量子コンピュータは既存のコンピュータの壁を破る、革命的なコンピュータとして期待 されている。また、量子コンピュータでは、アルゴリズムは単純だが場合の数が多い計算 が存在し既存のコンピュータでは数万年掛かる(巡回セールスマン問題等)計算が、数秒で 計算できるとされている。実現すれば社会に大きな変化をもたらすと予想されている。現 在、様々なアイディアが提案され、多くの研究が活発に行われている。核スピンは量子情 報処理における候補の一つであり、核スピンとその他の量子との相互作用の詳細や、核ス ピンを精密に制御する技術が求められていた。

核スピンの実用的な成果で最も重要と考えられるのは生物化学分野や物性物理の分析装置としての NMR や医療検査装置の MRI であり、実際、現在も広く使われている。今までに も性能改善が図られてきたが、今もなお、装置が大型で高価であり、また多量の試料を必 要とするという課題がある。

1.3 プロジェクトのねらい

本プロジェクトでは、半導体量子構造やナノマテリアルにおいて核スピンを精密に制御 する技術を確立し、量子情報処理のための固体デバイスや超高感度 NMR への展開を目指し た。具体的には、ガリウムヒ素(GaAs)結晶を用いたナノスケール領域での電子スピンと核 スピンの相互作用の研究、またその知見を生かして電子を介した核スピン同士の相互作用 を明らかにし、またその制御技術の研究を行った。また、これらの成果を超高感度固体 NMR の開発や様々な半導体構造における核スピンの制御へと展開し、最終的には少数核スピン の制御も目指した。ここで得られる超高感度 NMR 測定技術により、半導体などの固体構造 や電子物性について、新たな評価技術の確立を目指した。さらに、これらの研究を通して 核スピンが重要な役割を果たす新たなエレクトロニクス分野を創出する。

1.4 研究体制

東北大学とNTT物性科学基礎研究所との協同体制で研究を行った。研究開始時は4グルー プ体制で研究が行われたが、特別重点期間(2013年4月~2015年3月)は2グループ体制で 研究を行った。なお、2011年の東日本大震災により被害を受け、1年程度研究が遅れた。

⁵ https://www.jst.go.jp/pr/announce/20050421/index.html

表 1-1 研究グループと人員および実施場所(2013 年 3 月現在)

グループ名	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	事務所
実施場所	東北大学大学院理学研究科			NTT 物性科学基 礎研究所	東北大学電気 通信研究所
リーダー	平山 祥郎	橋本 克之	劉 洪武	村木 康二	甘冻会重
研究員	3名	1名	1名	1名(2月まで)	1211例 一 争 東 致 会 東
技術員	0名	0名	1名	0名	争伤 参争 車 致昌
研究補助員	0名	0名	0名	0名	ず伤貝
計	4名	2名	3名	2名	3名
総計			14 名		

(*) 研究推進委員:なし

[2015年1月現在]

ガループタ	核スピン操作・評価	物理研究・結晶成長		
ッル· ノ 石	グループ	グループ		
実施場所	東北大学大学院理学研究科	NTT 物性科学基礎研究所		
リーダー	平山 祥郎	村木 康二		
研究員	5名	0名		
技術員	0名	0名		
研究補助員	0名	0名		
計	6名	1名		
総計	7名			

1.5 プロジェクト終了時点での研究成果やその意義

プロジェクト終了時点での研究成果とその意義について、研究実施報告書、事後評価報 告書等を参考に、①スピン状態転移と核スピン偏極の高感度測定、②ナノプローブ(走査ト ンネル顕微鏡)による測定、③InSb 二次元系のおける高感度 RDNMR、④GaAs/AlGaAs の 2 次 元電子ガスの研究、の4項目にまとめた。

1.5.1 スピン状態転移と核スピン偏極の高感度測定

新しい核スピン操作法の確立と新しい核スピン制御用のデバイスの実現を目標とした。 新しい核スピンの操作法の確立においては、(1)スピン状態転移(Spin Phase Transition: SPT)ピークのスペクトロスコピの研究、(2)光による核スピン偏極の解明、(3)多重パルス によるスピン系の雑音評価と実証、(4)RF(高周波)電界による核スピン共鳴の実証等の研究 を行った。

(1) SPT ピークのスペクトロスコピの研究

2002年に平山らが GaAs 量子井戸構造中の二次元系の分数量子ホール効果のランダウ準位 充填率⁶(充填率)2/3において、図1-1(c)に示すようにR_{xx}のスパイク的な増大を観測した^[1]。

⁶2次元電子系に垂直な磁場をかけるとエネルギースペクトルは離散的なランダウ準位にわかれる。各ラ ンダウ準位には単位面積あたり eB/h だけの電子状態がある(B は磁場の強さ)。2次元電子の密度 n を eB/h

分数量子ホール効果は複合フェルミオン(電子に磁束が 2 つ付いたフェルミ粒子)をキャリ アとする整数量子ホール効果であると考えられており、v=2/3 分数量子ホール効果は複合 フェルミオン描像では、複合フェルミオンのv=2 整数量子ホール効果として理解すること ができる。複合フェルミオンにおいては、有効質量が磁場 B により変化するため、ランダ ウエネルギー分離はほぼ磁場 B^{1/2} に比例して変化する。一方、スピンのゼーマンエネルギー 分離は B に比例して変化する。図 1-1(a)はこれらの変化の様子を示している。高磁場領域 においてスピン↑の複合フェルミオンのランダウ準位が二つ占有されるのに対して、低磁 場領域では↑と↓が占有され、同じ 2/3 でもスピン偏極度が変化する。また、量子井戸の バックゲートの電圧により電子密度を変化させることにより、充填率を変化させることが でき、様々な磁場に対してv=2/3をバックゲート電圧 V によって実現できる。バックゲー トの電圧 V と磁場 Bext をパラメータとして Rxx 値を色で表した結果を図 1-1(b)に示した。磁 場を 7.8 テスラ(T)に固定し、バックゲート電圧を変化させたときの Rxx のピーク(SPT のピ ーク)を観測したところ(図 1-1(c))、スピン状態が↑↑と↑↓の境界で Rxx にピークを生じ ていた。本プロジェクトの研究成果の多くがこの現象を基礎としている。



図 1-1 充填率 2/3 分数量子ホール状態におけるスピン状態転移 (SPT)⁷ (a) 複合フェルミオンのエネルギー状態の外部磁場 B_{ext} による変化 (b) バックゲート電圧 V と外部磁場 B_{ext} をパラメータとしたときの R_{xx} とスピン状態、(c) バックゲート電圧に対する、 R_{xx} の関係

この現象を核スピンと電子スピンとの相互作用の検出に応用した。すなわち、核スピン が偏極すると核スピン偏極に対応したゼーマン磁場 B_Nが生じ、その分全体のゼーマンエネ ルギーは図 1-1(a)の点線のようにシフトする(図 1-2)。 $\nu = 2/3$ 近傍で電子密度を走査する 条件では、70mK では 160mK に比べ全 GaAs の 5%程度核スピン偏極が増すことが期待され、

で割った数vはランダウ準位に電子がどのくらい詰まっているかを表し、これを充填率とよぶ。v=1は基 底ランダウ準位にちょうど電子が詰まった状態を表す。

実際 SPT ピークの低充填側へのシフトが明確に見られた。この図から少なくとも 1%未満の 核スピン偏極であっても高感度に検出することができる^[2]。



図 1-2 充填率 2/3 の SPT ピークで測定された核スピン偏極によるシフト⁷

得られた充填率 v =2/3 の SPT を用いた抵抗検出 NMR (RDNMR) は、これまで SPT 点での抵抗 変化だけを測定するものがほとんどであったが、SPT ピークの振幅にあたる抵抗値の変化に 加えて、SPT ピークの位置、半値幅などを幅広く利用することで核スピン偏極状態や緩和状 態をより詳細に理解することを目指した。その結果を以下にまとめた。

①電流駆動による動的核スピン偏極と SPT スペクトロスコピ(半値幅の利用)

SPT ピークの位置は核スピン偏極により生じた磁場 B_Nの値を反映することは前項で明らかになったが、その半値幅は B_Nの分布を反映することが予測された。

図 1-3 はv=2/3の SPT 点 (R_{xx} がピークを示す点)で 100nA の電流を τ 秒流し、その後高速 にバックゲート電圧をスキャンしてv=2/3 近傍の SPT ピークの形を測定した実験結果であ る^[2]。これまで知られているように、SPT ピークにおける R_{xx} の値が増大するが、それとと もに SPT ピークの幅が大きく広がることがわかる。ピーク値の増大は数百秒のオーダーで 生じ、最終的にはほとんどすべての充填率で R_{xx} が増大し SPT ピークは見えなくなる。



図 1-3 ν=2/3SPT においてソース・ドレイン間に 100nA の電流を流し、核スピン偏極を行っ た場合の電流印加時間 τ による SPT ピークの変化⁷

これらの測定結果から、v = 2/3 の SPT 点で電流を流すと電子が異なるスピン状態のドメ イン間を移動することで核スピン偏極が起きるが、電子が↑↑から↑↓のドメインに移る か、その逆になるかは場所により異なり、局所的に↑あるいは↓の核スピン偏極が生じるこ とが確認できる。↑↑から↑↓(↑↓から↑↑)に電子が移るとき、核スピンは↑(↓)に偏極 する。この空間的に不均一な動的核スピン偏極はv = 2/3 の SPT 点のドメイン構造から予想 されるが、SPT ピークを連続的に測定することでその様子が明瞭にわかる。半値幅から τ =20s で局所的には構成元素の∓10%が偏極し、数百秒では∓40%が偏極し、また、ピーク位置 があまり移動しないことから、空間的に平均した核スピン偏極はほぼゼロであることもわ かる。これらのことから核スピンの偏極が空間的に不均一に生じ、空間的にゼーマンエネ ルギーが変化するため、電子スピンのドメイン構造が複雑になり、SPT ピークの R_{xx} 値は電 子の後方散乱の増加を反映して増加してゆくことが推定される。

②SPT スペクトロスコピによる核スピン集団の協働現象の測定^[3]

一次元系で、核スピン集団に協働現象が生じる可能性があること、さらにそれが電子系の状態により変化する可能性を明らかにした。実験から、同様な協働現象が二次元系でも 生じている可能性をつかみ、電子系として強いコヒーレント性を有する 2 層系の傾角反強 磁性相(図 1-5(a)参照)における Goldstone モード⁸と核スピン系を相互作用させることで、 どのような変化が核スピン集団に生じるかを、SPT スペクトロスコピを用いて測定した。

試料として2層の GaAs 量子井戸のホールバー⁹(図 1-10(a)参照)を作製し、ホールバーの 表面電極と基板電極を背面電極により、電荷密度すなわち充填率vを制御した。実験のプ ロトコルを図 1-4(a)に示した。図に示したように、バック層の充填率v=2/3、トップ層の 充填率v=0 になるよう電極電圧を設定し、ホールバー試料のソース・ドレイン間に電流 Isd=60nA を 500 秒流すと、電子スピンが 2 つの異なるドメインを通過する際の散乱により核 スピンが分極する動的分極 (Dynamic Nuclear Polarization:DNP)が生じ、核スピンは大き く偏極した。その後、偏極した核スピン集団を 2 層間の充填率差 δ の様々な値について 2 層系を τ_i 時間さらし、次に読み取り電流 Isd=2nA を 25 秒流すことにより Rxx を測定し、こ の操作を繰り返し行った。図 1-4(b)は、核スピン集団が特に相互作用することなく、一定 の緩和時間で緩和する場合に予想される SPT ピークの変化である。電流による DNP が時間 とともに発展するのを丁度逆にしたような一様な緩和が期待できる。

⁸ 自発的な対称性の破れ。(参考)http://www.sci-museum.jp/files/pdf/exhibit/sbs&nambu.pdf

⁹2次元電子系の電気伝導の測定に使われる試料形状。





測定結果を図 1-5 に示した。総充填率 $v_{tot}=2$ に固定し、2 層の充填率差 δ を 0 から増大し ていくと、2 層系は強磁性 (FM) 相から傾角反強磁性 (CAT) 相を経て、Spin-Singlet (SS) 相に 変化し、CAT 相では電子スピン系が Goldstone モードを有するため核スピンの緩和は極めて 早くなった。この現象に加えて、SPT スペクトロスコピでは特異な変化が見られた。すなわ ち、SS 相ではゆっくりと図 1-4(b)に示したような核スピン緩和が全体的に一様に生じるの に対し、反強磁性 (antiferromagnetic, CAF) 相では空間的に不均一に偏極した核スピンが、 わずか 1 秒間、CAF 相の Goldstone モードにさらされるだけで、SPT ピークは大きくシフト し、しかも半値幅が大幅に減少した。これは、核スピン集団に協働現象が生じ核スピン偏 極状態が急激に変化することを意味している。FM 相では振る舞いは SS 相とは異なるが、数 秒 FM 相と相互作用したあとも SPT ピークの幅は広いままであり、CAF 相で見られるような 変化は生じていない。さらに、核スピンの偏極度により、1 秒後の SPT ピークがどのように 変化は生じていなかった。図 1-5(c)で示したような特異な変化を生じるにはある程度の 核スピンの大きさが必要であることが分かった。

これは SPT スペクトロスコピを用いると核スピン集団の協働現象にも研究を広げられる 可能性を示している。核スピン集団と電子スピンの協働現象は核スピンや電子スピンを用 いた将来の量子情報処理にも重要である。



 図 1-5 2 層構造 GaAs のホールバー構造の試料について、DNP 後の緩和測定⁷
(a) 表面電極電圧と背面電極電圧に対する R_{xx}のカラーマッピング。白点は総充填率ν_{tot}=2 に沿った、 δ=0、0.17、0.46 の点で、それぞれ FM 相、CAF 相、SS 相に対応する。右の挿入図はスピン状態 (強磁性相 FM、傾角反強磁性相 CAT、Spin-Singlet 相 SS)の概念。
(b) ~(d) はそれぞれ FM 相、CAF 相、SS 相で観測された核スピン集団の緩和のスペクトロスコピ測

(b)~(d)はそれそれFM相、CAF相、SS相で観測された核スピン集団の緩和のスペクトロスコピ測定。

(2) 光による核スピン偏極の解明

電流による動的核スピンの偏極を中心に研究を進めてきたが、核スピンの偏極法として 光を用いたものがある。これは、円偏光照射が選択的な電子スピン励起、さらには選択的 な核スピン偏極に繋がることを利用したもので、v=2/3SPT 点のような特殊な状態を必要 とせず、様々な半導体材料に広く応用できる。これまでにも光による核スピン偏極を利用 した研究はあるが、これらはすべて核スピン偏極もその読み出しも光学的に行うものであ り、一方で、電流による動的核スピン偏極のような電気的な手法も、核スピン偏極、その 読み出し両方ともに電気的に行うもののみであった。本プロジェクトでは光学的手法と電 気的手法の特長を相互に活かした組み合わせを考え、光学的に偏極した核スピン情報を電 気的に読み出すことができる独自の実験系を構築し、高感度抵抗検出の特徴を生かして光 照射による核スピン偏極の詳細を測定することに成功した。

①照射レーザ光の偏光による SPT の変化

円偏光したレーザ光照射で偏極した電子スピンを半導体量子井戸内に形成しそれを核ス ピン偏極に転写した場合に、核スピン偏極がどのように生じるかをv=2/3SPT スペクトロ スコピを利用して電気的に測定した。図 1-6 に得られた結果を示す。垂直磁場は7.1T とし、 v = 2/3SPT ピーク付近で遷移に対応した波長 809.2nm のレーザ光を照射した。試料温度は 320mK であるがレーザ照射中は 380mK 程度に温度が増加した。レーザ光を照射しない時の SPT ピーク(図中(a)(i))に比べて σ +方向の円偏光レーザ光を照射した場合(図中(a)(ii)) は SPT ピークの位置はその充填率が増える方向に、そして、 σ -方向の円偏光レーザ光を照 射した場合(図中(a)(iii))は SPT ピークの位置はその充填率が減る方向にシフトした。さら に、図 1-6(b)に示したように、 σ +方向の円偏光レーザ光を照射したあとに、GaAs 量子井 戸を構成している原子である As の NMR 共鳴周波数に対応する RF 振動磁場を与えると、SPT ピークが徐々に(b)(III)の状態になり、元の状態(a)(i)に戻ることが確認できた。このこ とは円偏光レーザ光照射による SPT ピークのシフトが核スピン偏極に由来すること、さら に円偏光の向きにより核スピンの偏極方向が反転できることを示している。なお、SPT ピー ク位置の変化から予想される核スピンの偏極度は GaAs 構成元素の 12%程度であり、半値幅 が大きく増大せずに SPT ピークのシフトが得られることは、v = 2/3SPT と電流による電気 的な動的核スピン偏極と異なり、光学的手法では空間的に一様な核スピン偏極が得られて いることを示唆している^[4]。



図 1-6 (a) 照射するレーザ光の偏光による SPT スペクトルの変化:(i)光照射なし、(ii)σ+、 (iii)σ-偏光のレーザ照射。(b) SPT スペクトルの RF 磁場による変化:(I)⁷⁵As に共鳴しない、(II) 共鳴する RF 磁場をσ+レーザ光照射後にあてた場合。(III)は参照データでレーザ照射も RF 磁場 も加えない場合の SPT スペクトル⁷。

②ホールバー試料へのレーザ光照射位置の変化に伴う SPT スペクトル

ホールバー試料にσ+、σ-方向の円偏光レーザ光の波長を変えて照射した場合に SPT ピ ーク位置(バックゲートの電圧で測定)がどのように変化するかをプロットしたものを図 1-7(a)に示す。σ+(σ-)方向偏光が吸収されるのはスピンが+1(-1)に対応する遷移に限定 されることを考えると、例えば図中の①から⑤の吸収が対応する各波長で生じることが予 想される。実際に①から⑤の SPT ピークシフトは予想される核スピン偏極で説明すること ができる。図 1-7(a)で SPT ピークシフトが生じる波長位置は電子、正孔の予想されるエネ ルギー準位と良く対応している。これらの結果は、レーザ光の波長や偏光により精密に量 子井戸内の核スピン偏極が制御できるだけでなく、抵抗検出が高感度であることを反映し て、核スピン偏極から量子井戸中の様々な準位を正確に決定できる可能性を示している^[5]。





図 1-7 (a) レーザ光の波長を変化させながら、σ+、σ-偏光のレーザ光照射を行った場合に測 定された核スピン偏極による SPT ピーク位置(バックゲートの電圧で示す)の変化。(b)磁場中で 量子井戸中に形成される電子、正孔の準位。①から⑤の共鳴励起に対応して、左図の①から⑤の 核スピン偏極が生じると考えられる⁷。

さらに、照射レーザパワーと照射時間に対する核スピン偏極の変化や量子井戸中の二次 元電子系の充填率 v が核スピンに与える影響を明らかにした。

(3) 多重パルスによるスピン系の雑音評価と実証

多重パルスを印加した時のコヒーレント信号の振る舞いが、スピン系(量子ビット系)が 感じる雑音スペクトルとどのように関連するかを明らかにし、スピン系が感じる雑音スペ クトルを測定する汎用的な手法を提案した^[6]。

その原理は、1) パルス間隔 τ_i でスピン系を π パルス¹⁰で励起すると $2\tau_i$ より長い周期の 雑音はコヒーレンス特性に影響しないこと、2) パルス間隔 τ_i で π パルスにより励起すると $2\tau_i$ より短い周期の変動はパルス列の初期の段階で信号の減衰に寄与するが、十分にパルス

¹⁰ スピンを反転(回転角: πラジアン)するパルスのこと。

列を打った後での信号の減衰に寄与するのは丁度周期が $2\tau_i$ の雑音かその高調波成分になること、の二点である。模式図を図 1-8 に示した。パルス間隔 τ_i で π パルスを打ちながら信号強度を測定すると、最初信号は急激に減衰するが、十分にパルス数が増大した後の信号の減衰は exp(-t/T₂^L)の指数関数で表すことができ、T₂^Lはパルス間隔 τ_i により異なる値を示す。この T₂^Lの逆数が 1/2 τ_i の周波数に対応した雑音スペクトルになるというものである。



図 1-8 τ_i(i=1, 2, 3)の間隔による πパルスでスピン系を励起したとき、 得られる雑音スペクトルの模式図⁷

この成果は様々なパルス間隔_{τi}の多重パルス列を印加した時の T₂^Lを求めることにより 量子ビットやスピン系が環境から受ける雑音スペクトルが比較的簡単な実験から求められ ることを示しており、一般の NMR や MRI 測定へも適用できる。

(4) RF 電界による核スピン共鳴の実証

核スピンの操作法に関しては、従来の RF 振動磁場を用いた核スピン共鳴とは異なり、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、核電 界共鳴(NER: Nuclear Electric Resonance)、を提案し、確かにドメイン構造の振動により 核スピン操作が生じていることを確認した^[7]。

NER はv = 2/3の SPT 点で形成されるドメイン構造を用いる。その原理を図 1-9 に示した。 v = 2/3SPT 点においては図 1-1 に示したように電子スピン↑↑と↑↓のドメインが形成される。↑↑ドメインでは核スピンが感じる z 方向(量子井戸に垂直方向)のハイパーファイン磁場 B_z^{IF} はフル Knight シフト¹¹に対応する $B_z^{IF}=1$ である。一方で、↑↓のドメインでは $B_z^{IF}=0$ となる。NER に重要なのはドメイン境界のドメインウォール(DW)ではスピン方向が徐々に変

¹¹ NMR において、核スピンと電子との間の磁気的超微細相互作用によって、共鳴線はシフトを生じる。このシフトを Knight シフトと呼ぶ。片方のスピン偏極が、他方へ及ぼす内部磁場の影響によって起こる。

化するため、ハイパーファイン磁場に平坦方向成分 B_x^{IF} が生じる点である。 B_x^{IF} は DW の幅 W の間にだけ生じる。RF 交流電圧をバックゲートに印加してドメインを振動させる場合、例 えば DW の振動の大きさが振幅で 3.5W の場合、図 1-9(a)のように DW が中央にある場合と一番振れた状態で B_x^{IF} 、 B_x^{IF} は図中の実線ならびに点線で示したように変化する。核スピンが どのような時間変化する磁場を感じるかは核スピンがどの位置に存在するかにより変化する。図 1-9(e)にその一例として x=0(中央)すなわち t=0、x=1.5(単位 W)すなわち t=f_{RF}⁻¹/4(あ るいは $3f_{RF}^{-1}/4$)に位置する核スピンが感じる B_x^{IF} 、 B_x^{IF} の時間変化を示す。

図 1-9(b)は各位置に存在する核スピンが感じる f_{RF}、2f_{RF}の成分のスペクトル密度である。 x=0(中央)ではパルス的な B_x^{HF}を丁度周期の半分ごとに感じるため f_{RF}の成分はゼロになり、 2f_{RF}の成分が最大になる。別の言い方をすれば、もし核スピンが x=0(中央)にデルタ関数的 に偏極していると f_{RF}=f_L/2 の NER 信号は大きくなるが、f_{RF}=f_Lの NER 信号はゼロになる。核 スピンが感じる Knight シフトも NER の場合核スピンの位置により変化する。この様子を図 1-9(c)に示した。核スピンはドメインの振動を平均した B₂^{HF}を感じるため、↑↑のドメイン が核スピン位置に存在する時間が長くなれば長くなるほど平均した B₂^{LF} は大きくなる。通常 の NMR では核スピンが↑↑のドメインに位置するか、↑↓のドメインに位置するかに対応 してフル Knight シフトとゼロ Knight シフトに対応したダブルピークを示すのに対し NER では Knight シフトは中間の値になりどのようなピークが出るかは核スピン偏極とドメイン 構造のミクロスコピックな状況により変化することになる。

さらに、核スピン緩和に寄与する B_x^{IF} は NER では正弦波ではなくパルス的になる。ドメイン振動の周波数 f_{RF} が Ga ならびに As 核スピンのラーマー周波数 (f_L) と共鳴する場合、偏極した核スピンは回転し NER 信号が得られるが、パルス的な B_x^{IF} はフーリエ変換すると高調波成分をたくさん含むため、NER 信号は f_{RF} が Ga、As のラーマー周波数に等しいとき $(f_{RF}=f_L)$ のみならず、 $f_{RF}=f_L/2$ 、 $f_L/3$ 、 $f_L/4$ の時にも観測することができる。このように高調波成分が出ることも NER の大きな特徴である^[8]。



図 1-9 NER のメカニズム⁷

ここでは DW の幅 W で x 軸を正規化しており、DW の振動幅として 3.5W を仮定している。(a) DW が振動の中 央あるいは端にある場合の B_z^{IF} 、 B_x^{IF} の変化、(b) 各 x 位置における RF 周波数ならびに倍周波のスペクトル 密度、(c) ドメインの振動を平均化した B_z^{IF} 、(d) 核スピン偏極の x 位置依存性、(e) x=0(中央) ならびに x=1.5 で期待される時間領域での B_z^{IF} 、 B_x^{IF} の変化。

RF 電圧をバックゲートに加えることで、ドメイン構造が振動し、その結果、周期的にド メインウォールが偏極した核スピン上を通過することを利用するものである^[7]。図 1-10 に NER 実験とその手順を示す。



図 1-10 (a) NER 測定の概略図。(b) NER スペクトルを得るための実験手順。

NER 実験の手順を図 1-10(b)に示す。最初に I のステージで v =2/3SPT 点で電流 I_{pol} を時間 τ_{pol} 流すことにより核スピンを動的に偏極する。次に II のステージで v =2/3SPT 点での R_{xx} を測定する。さらに、III のステージで充填率を v_{temp} にセットし、セット時間 τ の間に、 τ_{NF} 時間 RF 電圧をバックゲートに加える。最後にIVのステージで再び v =2/3SPT 点での R_{xx} を測定し、II とIVのステージで測定した R_{xx} 値の差を III のステージで加えた RF 周波数の関数としてプロットすることで NER スペクトルを得ることができる。NER の原理から v_{temp} は 2/3 近傍の電子スピン状態のドメインが存在する充填率に限定されるが、他の様々なパラメータを広く変化させて実験を行った。また、実験では比較のため通常のコイルを用いた NMR スペクトル測定も行った。



図 1-11 [A] は通常の抵抗検出 NMR で測定される NMR スペクトル⁷

(a)空乏状態、(b) ν =2/3SPT 点で fL 近傍を走査、(c)、(d) は ν =2/3SPT 点で f_L/2、f_L/3 の近傍を走査。[B] は ν =2/3SPT 点で測定された NER スペクトル。(e)-(h) では f_L、f_L/2、f_L/3、f_L/4 の近傍を走査している。

はじめに比較的大きな RF 振動電圧をバックゲートに加えて測定した NER 信号を通常の NMR 信号と比較して図 1-11 に示す。NMR 測定[A]図の (a) ではバックゲート電圧を-3.1V とし て、二次元電子系を空乏化し抵抗検出 NMR を測定している。この場合、核スピンは電子か らのハイパーファイン磁場を感じることがない (Bz^{IF}=0) ため、スペクトルを見ると、 f_{RF}=56.038MHz 付近に顕著なピークが見られる。これは、外部磁場が B=7.666T の場合の As の共鳴周波数と良く一致している。(b) はコイルによる RF 磁場印加時も二次元電子系をν =2/3 の SPT 点に保ち f_{RF}を 56.00MHz から 56.06MHz の周波数範囲で走査した時の測定結果で ある。(a) と同様に f_{RF}=56.038MHz 付近にピークが見られるが、ピークが二つに分裂してい ることがわかる。v=2/3SPT 点では、 $\uparrow \uparrow と \uparrow \downarrow$ の電子スピン状態がドメイン構造を形成す るため、 $\uparrow \downarrow$ 電子ドメイン中に存在する核スピンは Bz^{IF}=0 に対応して f_{RF}=56.038MHz 付近を 頂点とするピークを形成する。一方、 $\uparrow \uparrow$ の電子ドメイン中に存在する核スピンはフル Knight シフトに対応した Bz^{IF}を感じる為に、スペクトルは Knight シフトを反映した周波数 を頂点とするピークとなる。二つのピークが表れることはドメイン構造の形成と Knight シ フトにより説明することができる。コイルに交流電流を流す NMR の場合、試料に加えられ る磁場は場所によらず一様にきれいな正弦波形状であるから、(c)(d)に示したように共鳴 周波数以外の周波数領域には信号は出現しない。

次に、RF 振動電圧をバックゲートに加えた NER で測定した(図 1-11[B])。図 1-9 の NER のメカニズムで期待した通り、RF 磁場を直接印加していないにもかかわらず、As の共鳴周 波数付近に明瞭な信号(NER 信号)が観察され(図 1-11[B](e))、ドメインの振動により核ス ピンが緩和していることが確認できた。バックゲートに加える RF 強度が比較的大きいこの 実験では、信号のピーク位置は NMR 測定において観測された二つのピークの中間に位置し、 確かに異なる v=2/3 電子スピン状態の平均的な Knight シフトを示していることがわかる。 さらに NER の特徴として、期待した通り、図 1-11(f)-(h)に示すように、As の共鳴周波数 の 1/2、1/3、さらには 1/4 の周波数においても共鳴による信号が見られた。この結果は、 DW が通過する際に核スピンが感じる B^{xff} は確かにパルス的であり、パルス的な磁場が含む 高調波成分により信号が出ていることが分かる。これらのデータは NER の起源が DW の周期 的運動にあることを明確に示唆するとともに、NER の場合、核スピンの共鳴周波数の 1/2、 1/3 あるいは 1/4 の周波数で核スピンを操作できることを示している。その他、詳細にパラ メータを変えた実験から核スピン偏極のミクロな情報を引き出すことができ、電子スピン のドメイン構造の評価にも有効であった^[8]。

さらに、2/3 以外の充填率でも交流電界による核スピン制御が生じることを実験的に確認 し、スペクトル形状から、四重極分離と交流電界の相互作用により核スピンを制御できる こと^[7]、量子ホールの局在領域で試料の絶縁性を反映して交流電界制御が効率的に生じるこ とを示した。

1.5.2 ナノプローブ(走査トンネル顕微鏡)による測定

低温・強磁場走査トンネル顕微鏡を用いた、整数量子ホール状態の電子状態密度マッピ ングに成功した。さらに、希釈冷凍機原子間力顕微鏡および希釈冷凍機走査トンネル顕微 鏡を構築し、ミリケルビンレンジの極低温および強磁場下でそれぞれのナノプローブを動 作させることに成功した。さらに、そのプローブを使い量子ホール効果による核スピンの マッピングを行った。

(1) 整数量子ホール状態の電子状態密度のマッピング

二次元に閉じ込められた電子(2DES)は、極低温・強磁場中でサイクロトロン運動により 運動エネルギーが量子化されランダウレベル(LL)を生じる。このLLは試料中の無秩序ポテ ンシャルによりエネルギー的に広がり、巨視的な量子効果である整数量子ホール効果の原 因となる。本研究では、この量子ホール状態において「強磁場中の電子の波動関数がどの ように振る舞うか」という微視的描像を極低温・強磁場中での走査トンネル分光¹²により明 らかにした。

微視的描像をナノスケールでとらえるため、走査型トンネル顕微鏡(STM)で直接観察できる「表面二次元電子系(2DES)」を作成し、強磁場(最大 B=12T)、極低温 T=300mK、超高真空で動作する STM を用いて、量子ホール状態における波動関数の振る舞いを観察した^{[9],[10]}。 表面 2DES は、n型-InSb(110)上にドーパントとして Cs 原子を 1%ML 吸着することで作成した。作成した試料表面上で、試料バイアス電圧(V_s)を変化させ微分電気伝導度[dI/dV(V_s)] カーブを測定し、走査トンネル分光を行った。これは、エネルギーを変化させ電子の局所 状態密度(LDOS)を測定することに相当する。

得られた dI/dV カーブ(図 1-12)において、特定の位置で磁場を変え dI/dV カーブを測定 すると、B=6T 以上で明確な LL 及びスピンレベルが現れ、それらの間隔が磁場と共に増大し た。



図 1-12 試料の位置を固定して、磁場を変えて測定した dI/dV(V_s)⁷

図 1-13(a)-(g)に、T=0.3K、B=12T、最低 LL で行った dI/dV(V_s)の二次元実空間 LDOS マッ ピングの結果を示す。それぞれの LDOS 像は dI/dV カーブ(図 1-13(h))に示すように最低 LL の低エネルギーの裾野からもう一方の高エネルギーの裾野間のエネルギーE の LDOS(E)像を 示している。エネルギーが LL ピークに近づくに伴い、リングは大きくなりそれらが結合し て行く様子が見られた(図 1-13(b)(c)(d)(e)(f))。これは、量子ホール状態の局在状態(裾 野の領域)から非局在状態(中央領域)への遷移に伴うものと考えられる。さらに LL 中央 Vs=-98mV(図 1-13(d))では、高密度のネットワーク構造が現れた。このネットワーク構造は、

¹² 物性研究・電子版 Vol. 6, No. 4, 064231 (2017 年 11 月号)

試料全体に浸透する非局在状態と考えられる。これらの実験結果は、理論的に予想された 量子ホール転移における電子状態の微視的振る舞い¹³に合致する。



図 1-13 最低 LL における dI/dV マップ (B=12T、170x170nm²)⁷

上述の LDOS パターンの変化は、ランダウ量子化された電子状態が、試料中の等高ポテン シャル線をなぞることに起因する。この状態は半古典的には、電子が、速いサイクロトロ ン運動をしながらゆっくりとドリフト運動(案内中心運動とも呼ばれる)をすることで記述 される。これらの結果およびその後の実験と理論から n 番目の LL に特徴的な波動関数の構 造を示すことが示唆された。

(2)核スピンマッピングに向けた量子ホール効果ブレークダウンの抵抗検出NMR (RDNMR)

希釈冷凍機プローブシステムを用いた核スピン分布の観察対象の一つとして、量子ホー ル効果のブレークダウン現象¹⁴における核スピン偏極があげられる。このような系では、電 気的に核スピンの偏極・検出が可能である。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気的な検出(抵抗検出)を行うことにより、局所的な核スピン のマッピングを目指している。この手法は、走査ゲート顕微鏡法(SGM)と呼ばれ、通常、半 導体へテロ構造中の表面から離れた 2DES の電流のチャンネルをマッピングする手法として 広く用いられている。SGM により核スピン分布をとらえる予備実験として、どのような条件 下で抵抗検出によるブレークダウン・核スピン偏極のシグナルが最大になるかを調べた。

電流(Ix)および充填率(v)の条件を変化させ、ブレークダウンでの核スピン偏極の検出 を抵抗検出核磁気共鳴(RDNMR)により行った。実験は、GaAs/AlGaAs 量子井戸構造を用いて、 T=0.3K、B=6.95T で行った(図 1-14)。図 1-14(a)はv=1.0 における整数量子ホール効果と RDNMR を行った結果である。

 ¹³ T. Ando, J. Phys. Soc. Jpn., 53, 3101 (1984); B. Kramer et al., Phys. Rep., 417, 211 (2005).
¹⁴ 整数量子ホール状態において試料に流す電流を増加させていくと、ある臨界電流で量子ホール効果が崩壊する現象。



 $I_x \Rightarrow 3.1 \mu A で見られるブレークダウンによる V_x の増加と共に、V_x がピークを示している。$ $ところが、このピークの電流位置より約 10%大きい電流値 I_x=3.4 \mu A では、V_x が急激に減少$ し半減している。同様の実験を v=0.98、1.03 で行った結果を図 1-14(b)(c)にそれぞれ示 $す。いずれの場合も、v=1.00 に比べ臨界電流値が小さくなりブレークダウンによる V_x の$ $増大が緩やかになっている。それと共に、V_x のピークの形状が広くなだらかになり、そのピ$ $ーク値も減少している。この V_x の I_x および依存性は、核スピンの偏極速度だけではなく核$ スピンの検出感度の両方に依存していると考えられる^[11]。これを完全に理解するためにはより詳しい測定が必要になるが、核スピン偏極のより大きな抵抗検出感度が要求される SGM測定では、核スピン偏極シグナルが最大となる v=1.00 直上の臨界電流値近傍での測定が有望であることが分かった。

1.5.3 InSb 二次元系における高感度 RDNMR

(1)新規の動的核偏極 (DNP) 法¹⁵の開発による単一 InSb2 次元電子ガス (2DEG) 中の RDNMR の実 証

高感度 RDNMR 技術は、これまで GaAs ベースの量子構造にのみ適用されている。本研究の 主な目的は、狭ギャップ半導体 InSb、InGaAs、InAs など、GaAs 以外のホスト材料で作られ た量子井戸で RDNMR 測定を行うことである。

単一の InSb 2DEG における RDNMR の実証に成功した^[12]。InSb 2DEG における磁場 B とエネ ルギー準位の関係を図 1-15 に示した。InSb 2DEG では大きな g 因子¹⁶(g*)(39 以上)を持っ ており、傾斜磁場によって充填率=2 付近で n=0 と n=1 のランダウ準位(LL)を交差させるこ とができる。



図 1-15 InSb 2DEG における電子スピン状態が異なるランダウ準位(LL)の交差⁷

回転機構を用いて、磁場 B_{tot}の周りに InSb 2DEG を傾ける(左上)。2DEG の電子のエネル ギーは垂直磁場 B₁によって、ランダウ分裂し ω_o によって分離された 2 つのレベル LL に分 裂する。一方、B_{tot} は電子スピンの方向に応じて、各 LL をゼーマンエネルギー ω_z によって 分離された 2 つのサブレベルに分割する。LL のエネルギーギャップは、整数量子ホール効 果が生じる原因であり、R_{xx}=0 が成立する。ランダウ分裂(ω_o)は B₁によって、ゼーマン分 裂(ω_z)は B_{tot} によって決定されるので、LL のエネルギーギャップは傾斜角 θ によって調整 することができ、B_{tot} を一定に保ちながら θ を大きくすると、スピン反転が可能となる LL

¹⁵ スピン偏極を電子から原子核へと移動させることにより、電子スピンと同じ程度まで核スピンを揃える 手法。

交差が生じる。交差点でのエネルギーギャップは、電子-電子相互作用がない場合に0になり、R_{xx}=0が崩れ抵抗ピークを示す(中央パネル)。これが量子ホール効果においてR_{xx}にピークが生じる原理である。

図 1-15 に示すように、 ν =2 の InSb 2DEG では、大きな g*に起因して異なるスピン状態 の LL の交差が生じる。

この状態ではドメイン構造を持つ最も単純な擬スピン量子ホール強磁性体 (Quntum Hall Ferromagnet: QHF)¹⁷が形成され、電子スピン偏極ドメインと非偏極ドメインがエネルギー的に縮退している。この場合、電子スピンフリップのエネルギーは核スピンフロップのエネルギーと同程度になる。縦方向抵抗 R_{xx} のピークは QHF が生じている証拠である。DNP は、 $\nu = 2$ の QHF の状態で大きな電流を流すと DNP が発生し、その結果、抵抗が変化し、RDNMR 信号が生じる。これは比較的小さな g*の GaAs 2DEG で開発された DNP 法とは対照的であり、HgTe、AlAs、および CdMnTe などの他のホスト材料からなる 2DEG にも適用することができると期待される。

実際に測定した結果を図 1-16 に示した。



(a) 測定結果 (b) ¹¹⁵In(I=9/2) のエネルギー図

核スピン同位体、¹¹⁵In の 9 つの四重極分裂を分解することができた (図 1-16)。図 1-16(a) に示したのは 3KHz/分の低速 RF 掃引速度および T=100mK での四重極分裂を伴う¹¹⁵In の RDNMR 信号である。実線は 9 本のガウス曲線(破線)にフィットした。図 1-16(b) は電気四重極結合 の存在下での¹¹⁵In (I=9/2) の 10 個の核スピン状態|m>のエネルギー図である。ω₀とω₀は、 それぞれゼーマン周波数と四重極周波数である。

¹⁷ T. Jungwirth and A. H. MacDonAld, *Phys. Rev. Lett.*, 87, 216801 (2001).

In ベースのヘテロ構造およびナノ構造における分解された四重極分裂は、Si CMOS(シー モス、Complementary MOS;相補型 MOS)を超える代替デバイスとして期待される InSb 半導体 における局所歪みのプローブとして期待できる。

さらに、LL が交差する点で形成されるドメイン構造が DNP に支配的な役割を果たすこと を確認した。実験では、抵抗ピークを精査し、 θ =53.2と θ =64.3の間のv=2のQHFの全領 域で高感度 RDNMR との関係を調べた。結果を図 1-17 に示した。この図において、v=2付近 の領域で、検出できた RDNMR を点で表している。明らかに、RDNMR 信号は、抵抗ピークの周 囲でのみ発生し、ドメイン構造が DNP にとって極めて重要であることを示している。



図 1-17 ν =2 付近で試料の角度を変えた時の B₁に対する R_{xx}⁷ 曲線を上下にずらして表示している。矢印は、抵抗ピークを示している。点で示されたデータ は、RDNMR 測定から得られた結果であり、 ν =2 周辺での DNP 領域を指し示している。ドット の直径は ¹¹⁵In の RDNMR の際の抵抗変化 Δ R_{xx}の絶対値(| Δ R_{xx})と R_{xx}の比を表している。

(2) InSb 高密度 2DEG におけるスピン偏極の非線形磁場依存性

スピン偏極の非線形磁場依存性は、電子相関が支配的である低密度二次元電子ガス (2DES)において理論的に予測されている。この予測が正しければ、実験でしばしば行われ るように、スピン偏極の線形磁場依存性を仮定する方法では、電子相関が存在する 2D スピ ンの磁化率を正しく求めることはできない。スピン分極の非線形磁場依存性は、これまで GaAs の低密度 2DES について調べられてきたが、本研究では InSb の 2DES におけるスピン分 極の非線形磁場依存性を実験的に調べた。

その結果、高密度の InSb の 2DES は、低密度の GaAs の 2DES と同様に、スピン偏極の非 線形磁場依存性を見出した(図 1-18)^[13]。この系では電子相関は無視できる。この発見によ り、低密度 GaAs 2DES において観察された非線形性の解釈とは異なり、電子交換結合によ る直線的に偏極度に依存する g 因子が非線形性を説明することを明らかにした。 低密度 2DES は古典的な多体現象(Wigner 結晶化、金属-絶縁体転移、強磁性フェルミ液体 など)を研究するための舞台として使われているが、理論的にも実験的にもまだ多くの議論 の余地がある。これらの議論を解決するためには、スピン感受率の正確な理解が必要であ る。高密度 InSb 2DES におけるスピン偏極の磁場依存性の系統的研究によって、2DES にお けるスピン感受率という基本的な研究が進展することが期待できるとした。



図 1-18 スピン偏極度と全スピン偏極の臨界磁場で規格化した全磁場との対比⁷ 挿入図はスピン偏極度とメインプロットのデータから導かれたスピン感受率との関係を示している。

(3) InSb 2DEG による高温(4K)での RDNMR に成功

InSb 2DEG は g*が大きいためゼーマン分裂が大きく、有効質量 m*が小さい。そのことにより、4K までの高温で RDNMR 測定を実行することができた^[14]。これは、これまでの RDNMR 測定で報告された最高動作温度である。

図 1-19(a)は温度 0.1K での InSb 2DEG の RDNMR の結果である。この図に現れている微細 構造は、四重極分裂がこの広がったスペクトルの原因になっている可能性を示している。 図 1-19(b)は温度 1K の、(c)は 4K における¹¹⁵In の RDNMR 信号であり、4K でも RDNMR を識別 することができた。



図 1-19 (a) 100Hz/s の遅い RF 掃引速度と P=-6dbm の小さい RF 電力での T=100mK における¹¹⁵In の RDNMR 信号スペクトルの微細構造は、¹¹⁵In の分解された四重極分裂に対応している。 (b) T=1K (IDC=870nA、P=-6dBm) および (c) T=4K (IDC=1.5µA、P=2dBm) での 4kHz/s の高速掃引速度 による¹¹⁵In の RDNMR 信号を示す⁷。

1.5.4 GaAs/AlGaAsの2次元電子ガスの研究

物理研究・結晶成長グループでは、ランダウ準位充填率v=5/2 における分数量子ホール 状態のスピン偏極度を抵抗検出 NMR によって明らかにすることを目標とした。v=5/2 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、理論的に提案されている波動関数の うちどれが正しく状態を記述しているか分かっていない。スピン偏極度を測定することに より、理論的に提案されている波動関数のうちスピン偏極度の異なる状態を明確に区別す ることができ、それによって波動関数を特定できる可能性がある。特に提案されている波 動関数のうちいくつかは非可換統計に従う準粒子の存在が予想されており^[2]、この特殊な準 粒子を用いることで外界からの擾乱に強いまったく新しいスキームの量子計算が可能にな ると理論的に提案されている^[3]。スピン偏極度の測定によって波動関数を特定し、それが非 可換統計に従うものであることを示すことができれば、量子計算が可能であるという意味 で科学的な意義は非常に大きい。

(1) v=5/2 分数量子ホール状態のスピン偏極度の解明

本研究はv=5/2 分数量子ホール状態のスピン偏極度を決定することで、その波動関数を 特定することを目的とした。2次元電子の電子スピン偏極度を測定する方法にはいくつかあ るが、母体結晶を構成する原子のNMRを用いる方法が最も信頼性が高い。NMRの弱点は検出 感度が低く、通常は大きな試料を必要とするため、2 次元電子系に用いることは難しい。 RDNMRでは、核磁気共鳴による2次元電子の抵抗変化を検出することで、検出感度の問題を 解決することができる。具体的には、母体結晶である GaAs を構成する 75As 原子の磁気共 鳴スペクトルが、2次元電子のスピンと相互作用することによって低エネルギー側にシフト する(Knight シフト)ため、この Knight シフトの大きさから2次元電子のスピン偏極度を求 めることができる。

RDNMR の測定結果を図 1-20 に示す^[15]。(a)は測定の配置を示している。測定試料は GaAs/AlGa1-xAs(x=0.25)量子井戸構造をホールバー型に加工したもので、バックゲートに より電子密度を制御できる。試料のまわりに RF 磁場照射用コイルを設置した。図 1-20(b) は実際に NMR 測定に用いた試料の電気伝導特性を示す。図に示したデータではバックゲー トにバイアスを加え、電子密度を 4.2x10¹¹ cm⁻²にしてある。この電子密度に対する電子易動 度は 1.14x10⁷ cm²/Vs である。このようにホールバー型試料においても充填率 v =5/2、7/3、 8/3 の分数量子ホール状態が明瞭に観測されている。



(c) RDNMR 測定手順の概略⁷

通常、RDNMR では照射した RF 磁場の周波数が核スピンの共鳴周波数に一致したときに生じる抵抗の微小な変化を検出する。しかしこの実験では、磁場とゲート電圧を充填率v=5/2となるように固定して照射する RF 磁場の周波数依存性を調べたところ、NMR に対応する共鳴構造は観測されなかった。そのため、v=5/2における RF 照射の前後でゲート電圧を変え、抵抗変化の読み出しには別の充填率(v_{read})を用いた。図 1-20(c)に示した測定手順は以下の通りである。磁場を一定に保ち、(i)ゲート電圧を $v_{read}=0.61-0.66$ にした状態で電流を45nA流し、抵抗が増大して飽和したのち、(ii)ゲート電圧をv=5/2とし、100ms後に RF 出力(-17dBm)を10~12秒間照射し、(iii)ゲート電圧を読み出し用の値に戻す。ステップ(ii)の直前直後の充填率 v_{read} における抵抗の変化 $\Delta R_{xx}=R_{xx}(i)-R_{xx}(iii)$ を信号とする。この方法により、v=5/2だけでなく、さまざまな充填率における NMR スペクトルを得ることができる^[16]。

v =5/3 などの N=0 ランダウ準位における通常の分数量子ホール状態に比べ、v=5/2 分数 量子ホール状態ははるかにエネルギーギャップが小さい。実際、v=5/2 における極小が明 瞭に観測されるのは 50mK 以下の極低温においてのみであった。まさにこのことがv=5/2 分 数量子ホール状態のスピン偏極度測定を極めて困難なものにしている要因である。

図 1-21 の左上挿入図は、希釈冷凍機のベース温度(12mK)における RF 照射時(赤線)と非 照射時(黒線)の B=6.4T における試料の伝導特性を比較したものである。RF 周波数はv=5/2における ⁷⁵As 核の共鳴周波数としているが、他の周波数についても同様であることを確認 している。RF 照射によって電子温度が若干上昇し、抵抗の特性が変化しているものの、RF 連続照射下においてもv=5/2の極小は明瞭に観測されており、v=5/2分数量子ホール状態 が形成されていることがわかる。

図 1-21 は B=6. 4T において測定された v=2、5/2、5/3 における ⁷⁵As 核の RDNMR スペクト ルである^[15]。同一の磁場で測定しているにも関わらず、電子の充填率によって共鳴周波数 が変化しているのがわかる。右挿入図に示すように、 v=2 において電子は N=0 ランダウ準 位の上向きスピンと下向きスピン状態を等しく満たしているため、電子系のスピン偏極は ゼロである。そのため ⁷⁵As 核の共鳴周波数は電子との超微細相互作用の影響を受けない ⁷⁵As 核固有の共鳴周波数を示す。一方、v=5/2、5/3 でスペクトルが低周波数側にシフトしてい るのは、電子スピンと ⁷⁵As 核の超微細相互作用の結果であり、これらの充填率において電 子系のスピン偏極度が有限であることを示している。図中の実線は電子の波動関数の形状 を考慮した数値的なフィッティングである。

図 1-21 の結果から、 $v = 5/2 \ge 5/3$ ではスピン偏極度がほぼ等しいことが以下の簡単な考察からわかる。右挿入図は $v = 5/2 \ge 5/3$ において電子系が完全スピン偏極している場合の電子配置を模式的に示している。厳密ではないが、次のように説明できる。模式図では、電子系のスピン偏極を担っているのはv = 5/2 では N=1 ランダウ準位にある 3 個の上向きスピンであるのに対し、v = 5/3 では N=0 ランダウ準位にある 2 個の上向きスピンの電子である。



図 1-21 充填率 v =2、5/2、5/3 における⁷⁵As の RDNMR スペクトル(磁場 6.4T)⁷ 左上挿入図:RF 照射時(赤)と非照射時(黒)における充填率 v =5/2 まわりの抵抗のゲート電圧依存性。右挿 入図:各充填率における電子スピン配置の模式図。

これより v =5/2 と 5/3 がいずれも完全スピン偏極の場合、核スピンが受ける Knight シフトの大きさの比は 3:2 となることが予想され、実際、実験結果はそのようになっている。

なお、スピン偏極度を定量的に求めるために、測定した NMR スペクトルをモデルにもと づいてフィッティングし、ν=5/2 と 5/3 がどちらも完全スピン偏極であることを確認して いる。

v=5/2 分数量子ホール状態では、粒子の交換に対して状態が変化する非可換統計¹⁸に従う 準粒子が存在すると考えられており、トポロジカル量子計算が可能になると期待されてい る。しかしv=5/2 分数量子ホール状態を説明する理論はいくつかあり、その中には可換統 計に従うものも含まれている。これまで提案されている理論の中で、スピン完全偏極を支 持するものは全て非可換準粒子を予言しており、以上の実験結果は非可換準粒子の存在を 強く示唆するものである。

(2) 高感度抵抗検出 NMR による電荷秩序・電子密度揺らぎの検出

これまで半導体中の電子系に対する NMR 測定は、もっぱら電子のスピン状態を調べるこ とをその目的としてきた。分数量子ホール状態は密度一定の非圧縮性量子液体状態である が、充填率によって Wigner 結晶や電荷密度波状態など並進対称性を破った電荷秩序状態が 現れることが電気伝導測定やマイクロ波吸収などから示唆されている。一方、有機伝導体

¹⁸ 非アーベル統計のこと。

や強相関物質では電子は原子により強く束縛されており、そこでは NMR は着目する原子近 傍の局所的な電子状態を知るためのツールとしてその有用性が確立されている。本研究で は、このような NMR の局所プローブとしての側面を半導体の電子系に適用すること、具体 的には分数領域や整数充填率近傍の Wigner 結晶状態、高ランダウ準位における電荷密度波 状態を調べ、従来の電気伝導測定やマイクロ波吸収では得られない、そのミクロな構造を 明らかにすることを目的とした。

前項では面内で密度が一定という仮定を用いて NMR スペクトルをフィッティングしてス ピン偏極度を求めた。しかしより詳細な測定により、充填率によってはそのようなモデル ではフィッティングできない特異なスペクトル形状が観測された。ここでは整数充填率 2 近傍および分数領域 v <1/3 に現れる Wigner 結晶状態に関する結果について述べる。

図 1-22 は磁場 6.4T、ベース温度における充填率 2 近傍の抵抗検出 NMR スペクトルを示す ^[17]。 v=5/3 とv ≧2.2 では、実験とシミュレーションはよく一致しており、この充填率範 囲では系がスピン偏極した空間的に一様な液体状態にあることがわかる。一方、5/3< v < 2 および 2< v <2.2 では、観測されたスペクトルはシミュレーションの結果と大きく異な った。実験で観測されるピークは常にシミュレーションで予想されるよりも高周波数側に あり (つまり Knight シフトが小さい)、かつスペクトルは低周波数側に裾を引いている。特 に v=2.1 ではこの低周波数側の裾がコブのような形を示しており、シミュレーションで予 想されるよりも低周波数側で大きなスペクトル強度をもっていることがわかる。シミュレ ーションでは電子が完全スピン偏極していることを仮定していることから、この低周波数 側の裾は、局所的に電子密度が高い領域が存在することを示している。逆に、スペクトル のピークが高周波数側にずれていることは、電子密度の低い領域が多く存在することを示 唆している。そのような局所電子密度の変調の原因として、v=2 に付け加えた電子や空孔 が Wigner 結晶状態を作って空間的に局在していることが考えられる。



30

そこでWigner 結晶の試行波動関数¹⁹を用い、NMRスペクトルのシミュレーションを行った。 その結果を図 1-23 に示す。図 1-23 (a) は試行波動関数を用いて計算した充填率 ν =2.1、1.9、 1.8 における Wigner 結晶の電子密度分布である。試行関数では、各格子点のまわりで電子 がお互いに相関なしにサイクロトロン運動をしており、電子相関や有限温度の効果は入っ ていない。そこでこれらを実効的に取り入れるため、パラメータσを導入した。



図 1-23 (a) 試行波動関数を用いて計算した充填率v=2.1、1.9、1.8 における Wigner 結晶の電 子密度分布。 σ は電子相関や有限温度の効果を表すために導入した長さの次元をもつパラメータ であり、電子分布のぼけを表す。(b) v=1.8 およびv=2.1 近傍の NMR スペクトル、赤実線は σ を パラメータとした Wigner 結晶モデルによるフィッティング。黒破線は電子密度が一様な場合に 予想されるスペクトル⁷。

図 1-23(b)は Wigner 結晶モデルによる実験結果のフィッティングを示す^[17]。σをパラメ ータとすることで、観測されたスペクトルを非常に良く再現できた。特にν=2.1 近傍で観 測されたスペクトルの低周波数側にあるこぶのような構造が、N=1 ランダウ準位波動関数の 特徴である節をもったリング状の電子密度分布の極大に対応していることがわかる。また、

¹⁹ K. Maki and X. Zotos, *Phys. Rev.*, B 28, 4349 (1983).

実験で得られたスペクトルと試行波動関数を用いたシミュレーションを直接比較することで、試行波動関数と実際の状態のずれをパラメータσによって定量化することができる。 σを温度に依存したパラメータとすることで、スペクトルの温度依存性をフィッティング することもでき、その結果から結晶を作る電子の熱揺らぎを定量的に評価することもでき る。また、充填率依存性を調べると、Wigner 結晶状態(固体)と液体状態の境界が N=0 と N=1 のランダウ準位では異なることもわかった。
第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況

2.1 プロジェクトの終了後の状況に関する基礎データ

2.1.1 調査方法

調査は、文献調査(プロジェクト報告書、解説、原著論文など)、インターネットによる 調査、各種データベースによる業績(論文・特許・受賞他)の調査からなる基礎データ調査 と、プロジェクト関係者や外部有識者へのインタビュー調査を行った。これに基づき、本 プロジェクト期間中の成果の調査時点での発展状況及び波及効果等についてまとめた。

(1) 基礎データ調査の方法

基礎データ調査については、基本的にプロジェクトメンバーを対象として、プロジェクトの研究に関連した成果の発展状況について、文献による成果の把握と、論文や研究助成金の獲得状況等のデータ調査を行った。各項目について利用したデータベースと調査範囲等を下記に記す。

①論文20

本プロジェクトの成果論文は、期間中の論文として 2007 年~2015 年に発表されたもの及 びプロジェクトの終了報告書にリストアップされている論文とした。また *in press*、 *submitted*等と表記があり、その後発表されたものについても基本的には成果論文とした。

本プロジェクトの発展論文は、プロジェクト終了後の2015年4月以降に発表され、かつ 本プロジェクトメンバーが著者になっている論文を収集した(ただし、上記の本プロジェク ト期間中の論文に含むものは除く)。収集した論文の中で、本プロジェクトとの関連を Abstract、引用関係等で確認し、関連のあるものをリストアップした。

データベースは、エルゼビア社の Scopus および、クラリベイト・アナリティクス社の Web of Science を利用した。

各論文については評価指標 FWCI²¹および FWCI TopX%²²、および Jornal の指標となる CiteScore についても収集した。

②競争的研究資金の獲得状況

²⁰ ここで示す論文の定義は、文献データベースの文献タイプで、article、review、および conference paper (あるいは proceedings)を対象とした。

²¹ FWCI (Field-Weighted Citation Impact):1 文献あたりの被引用数を世界平均(年別・分野別・文献タイ プ別に算出)で割った数値。

²² FWCI が全論文の中で上位 X%以内に含まれる論文。

プロジェクトメンバー全員を対象として、本プロジェクトの研究内容に関連している研 究課題について調べた。表 2-1 はその中で、競争的研究資金の総額 1 千万円以上のものを 抽出して示した。

データベースとしては、調査対象者の所属する研究室や本人の WEB サイト及び KAKEN 科 学研究費助成事業データベース等の競争的研究資金に関する検索サイトと、補助的に Google 等の検索サイトを利用した。

③特許の出願・登録状況

本プロジェクト期間中の特許は、プロジェクト終了報告書の成果リスト記載の特許とした。本プロジェクト終了後の特許は2015年4月以降に出願されかつ、プロジェクト関係者が発明者に入っているものから、プロジェクトの成果と関連のある特許を収集した。

データベースは、主に PatentSquare を利用し、補助的に特許情報プラットフォームと Espacenet を利用した。

④招待講演

プロジェクト関係者の本プロジェクト終了後の招待講演を調査対象者の所属する研究室 や本人の WEB サイトの調査、Google 等の検索サイト、①で記述した文献データベースの会 議録等を併せて収集し、かつインタビューの際に主な招待講演について確認した。

(2)インタビュー調査の方法

インタビュー調査は本プロジェクトの主なメンバーと数名の当プロジェクトの研究内容 について詳しい外部有識者について、実施した。なお、プロジェクト関係者には、基礎調 査で知り得た情報の本プロジェクトとの関連や、その後の展開等についての情報を収集し た。

2.1.2 競争的研究資金の獲得状況

本プロジェクト期間中から現在までのプロジェクトメンバーも含めた競争的資金の獲得 状況を表 2-1 に示す。

平山は科研費新学術領域研究(研究領域提案型)「ハイブリッド量子科学」(研究代表)を 獲得した。村木(NTT)も複数の科研費を獲得している。橋本も2件の科研費基盤研究(B)(S) を獲得している。

1													L.	IST			科	研費	Ē	
研究 期間 (年 度)	研究種目	研究課題	研究代表 者	2 0 0 7	2 0 0 8	2 0 0 9	2 0 1 0	2 0 1 1	2 0 1 2	2 0 1 3	2 0 1 4	2 0 1 5	2 0 1 6	2 0 1 7	2 0 1 8	2 0 1 9	2 0 2 0	2 0 2 1	2 0 2 2	金額 (億円)
$\begin{array}{c} 2007 \\ \sim \\ 2014 \end{array}$	ERATO	平山スピンエレクト ロニクス	平山 祥郎																	14.60
$\begin{array}{c} 2014 \\ \sim \\ 2017 \end{array}$	科研費 基盤研究(B)	InSb 量子構造のゲー ト制御伝導特性の研 究	平山 祥郎 (研究分担 者:橋本 克之)																	0. 16
2015 \sim 2019	科研費 新学術領域研 究(研究領域 提案型)	ハイブリッド量子科 学の研究総括	平山 祥郎																	0.85
2015 \sim 2019	科研費 新学術領域研 究(研究領域 提案型)	電荷・スピンハイブ リッド量子科学の研 究	石橋 幸治 (研究分担 者:平山 祥郎)																	2.86
2015 \sim 2019	科研費 新学術領域研 究(研究領域 提案型)	ハイブリッド量子科 学の進展に向けた国 際活動強化支援	平山 祥郎																	0. 75
2018 ~ 2020	科研費 基盤研究(B)	量子ポイントコンタ クトにおける電子相 関の研究	平山 祥郎																	0. 15
$\begin{array}{c} 2017 \\ \sim \\ 2021 \end{array}$	科研費 基盤研究(B)	ー次元電子系のハイ パーファイン相互作 用実空間観察	橋本 克之																	0. 18
$2015 \\ \sim \\ 2019$	科研費 新学術領域研 究(研究領域 提案型)	トポロジカル物質ナ ノ構造の輸送現象	藤澤 利正 (研究分担 者:村木 康二)																	2. 61

表 2-1 競争的資金の獲得状況

研究 期間 (年 度)	研究種目	研究課題	研究代表 者	2 0 0 7	2 0 0 8	2 0 0 9	2 0 1 0	2 0 1 1	2 0 1 2	2 0 1 3	2 0 1 4	2 0 1 5	2 0 1 6	2 0 1 7	2 0 1 8	2 0 1 9	2 0 2 0	2 0 2 1	2 0 2 2	金額 (億円)
$2015 \\ \sim \\ 2019$	科研費 新学術領域研 究(研究領域 提案型)	トポロジーが紡ぐ物 質科学のフロンティ アの総括	川上 則雄 (研究分担 者:村木 康二)																	0.90
2014 ~ 2016	科研費 基盤研究(B)	電子-正孔複合量子 井戸による量子スピ ンホール効果の実現	鈴木 恭一 (研究分担 者:村木 康二)																	0.18
2019 ~ 2023	科研費 基盤研究(S)	量子情報処理に向け た時間と原子空間分 解能を持つスピンコ ヒーレンス顕微鏡の 開発	 米田 忠弘 (研究分担 者:橋本 克之) 																	1.91

2019年11月21日検索

2.1.3 論文の発表状況

成果論文および発展論文の論文数および全論文の FWCI TopX% (Field-Weighted Outputs in Top Citation Percentiles)²³の論文数を表 2-2 に示す。成果論文 3 報 (全成果論文数 93 報中)、発展論文で 2 報 (全発展論文数 30 報中)が FWCI Top10%以内であった。

成果	発展	FWCI Ta 以	op0.01% .内	FWCI To	p0.1%以 勺	FWCI To	p1%以内	FWCI To	op10%以 勺	FWCI To 夕	op10%圏 忭
- 冊文 粉	冊 <u>入</u> 粉	成果	発展	成果	発展	成果	発展	成果	発展	成果	発展
妖人	妖人	論文	論文	論文	論文	論文	論文	論文	論文	論文	論文
93	30	0	0	0	0	0	0	3	2	90	28
								検索	対日 20	19年10	月 30 日

表 2-2 プロジェクトの論文発表状況一覧

(1)本プロジェクトの成果論文

成果論文数をその累計被引用数の推移と共に図 2-1 に示す。1 報、1 年あたりの平均被引 用件数は 1.09 件/年・報となっており、累積被引用件数は確実に増加している。



図 2-1 プロジェクトの成果論文の累計発表論文数と累計被引用数の推移 (検索 DB: Scopus 検索日 2019 年 11 月 21 日)

累計被引用数上位5報の論文の概要を表2-3にまとめた。上位3報は100件以上の被引

²³ 出版年別の FWCI が世界全体の上位 X%に含まれる文献数/率。0.01%は、0.01%以内に含まれる論文の数を 示し、0.1%は、0.01%より大きく、0.1%以内のものを示す。

用数であり、残りの2報はそれぞれ、52件、34件である。

N o	著者名	タイトル	出版 年	出版物名	巻	马	ページ	被引用数	DOI	文献タ イプ	FWCI	Cite Score 2018
1	Liu H.W., Fujisawa T., Ono Y., Inokawa H., Fujiwara A., Takashina K., Hirayama Y.	Pauli-spin-block ade transport through a silicon double quantum dot	2008	Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics	77	7	73310	109	10. 1103 /PhysRe vB. 77. 0 73310	Article	6. 97	3. 70
2	Tiemann L., Gamez G., Kumada N., Muraki K.	Unraveling the spin polarization of the $v = 5/2$ fractional quantum hall state	2012	Science	335	6070	828 -831	105	10.1126 /scienc e.12166 97	Article	5.11	15. 21
3	Hashimoto K., Sohrmann C., Wiebe J., Inaoka T., Meier F., Hirayama Y., Römer R.A., Wiesendanger R., Morgenstern M.	Quantum hall transition in real space: From localized to extended states	2008	Physical Review Letters	101	25	256802	100	10.1103 /PhysRe vLett.1 01.2568 02	Article	4. 26	8.64
4	Yuge T., Sasaki S., Hirayama Y.	Measurement of the noise spectrum using a multiple-pulse sequence	2011	Physical Review Letters	107	17	170504	52	10.1103 /PhysRe vLett.1 07.1705 04	Article	1.56	8.64
5	Giudici P., Muraki K., Kumada N., Hirayama Y., Fujisawa T.	Spin-dependent phase diagram of the vt=1 bilayer electron system	2008	Physical Review Letters	100	10	106803	34	10.1103 /PhysRe vLett.1 00.1068 03	Article	1.77	8.64

表 2-3 プロジェクトの成果論文の内、被引用上位 5 報の論文概要

検索日 2019年11月21日

(2) 本プロジェクトの発展論文

本プロジェクトの研究成果の発展論文は計 30 報であった。その中で 16 報が本プロジェ クトのメンバーであった NTT グループからの発表であった。



図 2-2 プロジェクト発展論文の累計発表論文数と累計被引用数の推移 (検索 DB: Scopus 検索日 2019 年 11 月 21 日)

発展論文の中、累計被引用上位5報の論文概要を表2-4にまとめた。これら5報の論文 はすべて本プロジェクトのメンバーであったNTTグループの論文であった。累計被引用件 数は28件が最大値であった。

N o	著者名	タイトル	出版 年	出版物名	巻	号	ページ	被引 用数	DOI	文献タ イプ	FWCI	CiteSc ore201 8
1	Hashisaka M., Hiyama N., Akiho T., Muraki K., Fujisawa T.	Waveform measurement of charge- and spin-density wavepackets in a chiral Tomonaga-Lutting er liquid	2017	Nature Physics	13	6	559- 562	28	10. 1038 /nphys4 062	Article	3.62	13. 01

表 2-4 プロジェクトの発展波及論文の内、累計被引用上位 5 報の論文概要

N o	著者名	タイトル	出版 年	出版物名	巻	号	ページ	被引 用数	DOI	文献タ イプ	FWCI	CiteSc ore201 8
2	Suzuki K., Harada Y., Onomitsu K., Muraki K.	Gate-controlled semimetal-topolo gical insulator transition in an InAs/GaSb heterostructure	2015	Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics	91	24	245309	26	10. 1103 /PhysRe vB. 91. 2 45309	Article	2.35	3. 70
3	Couëdo F., Irie H., Suzuki K., Onomitsu K., Muraki K.	Single-edge transport in an InAs/GaSb quantum spin Hall insulator	2016	Physical Review B	94	3	35301	17	10. 1103 /PhysRe vB. 94. 0 35301	Article	1.93	3. 70
4	Akiho T., Couëdo F., Irie H., Suzuki K., Onomitsu K., Muraki K.	Engineering quantum spin Hall insulators by strained-layer heterostructures	2016	Applied Physics Letters	109	19	192105	14	10. 1063 /1. 4967 471	Article	1.29	3. 58
5	Washio K., Nakazawa R., Hashisaka M., Muraki K., Tokura Y., Fujisawa T.	Long-lived binary tunneling spectrum in the quantum Hall Tomonaga-Lutting er liquid	2016	Physical Review B	93	7	75304	8	10. 1103 /PhysRe vB. 93. 0 75304	Article	0.91	3. 70

検索日 2019年11月21日

2.1.4 特許の出願・公開・登録状況

本プロジェクトの期間中と終了後の調査時点に至るまでの特許出願状況を表 2-5 および 表 2-6 に示す。期間中の出願が 2 件、すべてが登録されている。プロジェクト終了後は出 願されていない。なお、期間中の 2 件は国際出願されており、2 件とも登録された。その後、 表中 No. 1 の 1 件は権利を放棄した。

	表 2-5	プロジェク	トの特許出願状況-	一覧
--	-------	-------	-----------	----

	出願	件数	登録	件数
	国内	海外	国内	海外
プロジェクト期間中	2	2	2	2
プロジェクト終了後	0	0	0	0
合計	2	2	2	2

2019年12月20日時点

表 2-6 プロジェクトの特許出願状況[期間中]

NO	出願番 号	公開・ 公表番 号	審査状 況	登録番号	発明者名	出願人・権 利者名	発明の名 称	国際 出願 番号	国際 公開 番号	海外 の登 録特 許	備考
1	特願 2011-5 46122	W02011 /07455 8	登録 (権利 保有)	特許第 5569945 号	劉 洪武, 楊 凱鋒, 平山 祥郎	国立研究 開発法人 科学技術 振興機構	核スピン 〜 を よ よ に 、 振 低 置 ス 代 出 核 核 よ ズ に 、 振 、 、 に 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	PCT/ JP20 10/0 7243 8	W020 11/0 7455 8	_	終了報 告書に 記載

NO	出願番 号	公開・ 公表番 号	審査状 況	登録番号	発明者名	出願人・権 利者名	発明の名 称	国 出 番 号	国際 公開 番号	海外 の登 録特 許	備考
2	特願 2013-5 50279	W02013 /09458 2	登録 (権利 保有)	特許第 6023084 号	佐々木 進, 弓削達 郎, 平山 祥郎	国立研究 開発法人 科学技術 振興機構	核磁気共鳴 イメージ および な 気 共鳴 表 で び な 、 、 の で 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の で 、 の 、 の	PCT/ JP20 12/0 8273 9	W020 13/0 9458 2	_	終了報 告書に 記載

2019年12月20日時点

2.1.5 招待講演

本プロジェクトの総括およびメンバーの、期間中(2007年12月~2015年3月:約7年間) と終了後(2015年5月~2019年12月:約5年間)の国際会議の招待講演数を表 2-7にまと めた。期間中に比べ終了後の全体件数が多いのが特徴である。

		111111/1		
	全体	期間中	終了後	備考
平山	53	19	34	研究総括
村木	26	11	15	グループリーダー
Liu	1	1	0	グループリーダー
橋本	2	0	2	グループリーダー
(連名)	22	17	5	複数の研究者名を含む
合計	104	48	56	

表 2-7 国際会議の招待講演数(研究者別状況)

2.1.6 受賞状況

プロジェクト期間中の受賞状況を表 2-8 および表 2-9 に示した。期間中1件、終了後1 件であった。

表 2-8 プロジェクト期間中の受賞

No.	受賞者	賞名	授賞機関(国)	受賞年度	受賞理由
1	平山 祥郎	ISCS The Quantum	International	2013年5月	Pioneering contributions to
		Device Award	Symposium on		the fundamental research of
			Compound		semiconductor quantum systems,
			Semiconductors		particularly those based on
					nuclear-spin related phenomena

2019年11月21日時点

表 2-9 プロジェクト終了後の受賞

No.	受賞者	賞名	授賞機関(国)	受賞年度	受賞理由
1	橋坂 昌幸、	文部科学省ナノテク	文部科学省(日	2018年2月	量子ホールエッジチャネルに
	村木 康二、	ノロジープラットフ	本)		おける電荷ダイナミクス研究
	藤澤 利正、	オーム平成 29 年度 秀			
	河田 慎太郎	でた利用成果 優秀賞			

2019年11月21日時点

²⁰¹⁹年11月21日時点

2.1.7 ベンチャー企業の設立状況

ベンチャー企業の設立はなかった。

2.1.8 報道関係

プロジェクト期間中に報道された内容を表 2-10 に、また終了後を表 2-11 に示した。同 一の研究が複数の報道機関で発表されているケースをまとめると、報道された研究は2件、 終了後は3件であった。

報道日	報道機関	報道タイトル
2014/07/22	日経速報ニュースアーカイブ	NTT と JST、高純度半導体における電子の結晶化の観測に 成功
2012/01/26	日経速報ニュースアーカイブ	NTT と JST、自然界の基本粒子とは異なる「準粒子」の存 在が期待される電子状態を解明
2007/12/10	化学工業日報	JST、07 年度 ERATO 型研究で新規領域・総括を決定
2007/12/05	日経産業新聞	科技機構、今年度分、戦略的創造研究、東大の中内氏ら 5総括者を選出。

表 2-10 プロジェクト期間中に報道された内容

2019年9月5日調査

表 2-11 プロジェクト終了後に報道された内容

報道日	報道機関	報道タイトル
2018/06/07	日本経済新聞電子版	東北大、核スピン共鳴プローブ顕微鏡の開発に成功
2018/06/07	日経速報ニュースアーカイ ブ	東北大、核スピン共鳴プローブ顕微鏡の開発に成功
2017/04/21	日刊工業新聞	量子ホール系の核スピン偏極特性、東北大などが解明- 新 NMR 開発に道
2017/04/21	マイナビニュース	東北大、量子ホール系における核スピン偏極の相反性を 発見
2017/04/20	日本経済新聞電子版ニュー ス	東北大、量子ホール系における核スピン偏極の相反性を 発見
2017/04/20	日経速報ニュースアーカイ ブ	東北大、量子ホール系における核スピン偏極の相反性を 発見
2016/04/12	日経速報ニュースアーカイ ブ	NTT、量子ドットとメカニカル振動子のハイブリッド素子の作製に成功

2019年9月5日調査

2.2 プロジェクトの進捗状況

プロジェクト期間中から、半導体中でのキャリア相関の研究を、特に核スピンとの相互 作用に着目して進めてきたが、プロジェクト終了後、これらを発展させた研究を進めてい る。平山は科研費の新学術領域研究(研究領域提案型)「ハイブリッド量子科学」の研究代 表者として研究の範囲を広げている。「ハイブリッド量子科学」では、量子構造における物 理量の量子コヒーレント操作を、大規模な量子計算の方向ではなく、Quantum Enabled Technology (QET、量子コヒーレンスの制御によって可能となる科学技術)の実現に結び付け ていこうとしている。

例えば、(1)抵抗検出 NMR を含む GaAs 量子ホール系の研究として、①高いランダウ準位 とゼロ磁場に近い状態での RDNMR の実現、②スピン偏極エッジ状態とホスト核の相互作用、 ③電界駆動 NMR のスペクトルによるドメイン壁の振動と超微細場との関係、(2) 走査トンネ ル顕微鏡と抵抗検出 NMR による電子スピン偏極の空間分布測定、また(3) InSb 系量子ホー ル研究の発展として、①カイラルエッジ状態の RDNMR による研究、②InSb のトレンチゲー トを持つ QPC における並行チャネル状態の研究が進められている。

NTT 物性研究所の村木は、量子情報処理を究極の目的としてトポロジー物性等の研究を 進めており、その中で量子ホール効果におけるエッジチャネルの研究や Wigner 結晶の微視 的構造の解析の研究等を行っている。具体的には 2.2.4 項に 2 次元のスピン物性、電荷秩 序の研究の成果を示した。

2.2.1 抵抗検出 NMR を含む GaAs 量子ホール系研究の発展

本プロジェクト期間中に進めた抵抗検出 NMR (RDNMR)の研究は終了後、様々な研究に展開 した。以下にその展開状況を簡単にまとめた。

(1)高いランダウ準位とゼロ磁場に近い状態での RDNMR 実現^[18]

従来の量子ホール効果の実験では核スピンと NMR 検出は最も低いランダウ準位(すなわち、高磁場印加、充填率 v =1 前後)で行われて来た。この研究では高いランダウ準位(ゼロあるいは低磁場印加、 v >>1)での核スピン偏極と NMR 検出を行った。

図 2-3(a)に GaAs 量子井戸上に作製した試料の構成を示した。3 つのショットキーゲート を形成し、その中央ゲートには V_{GG}、2 つの分離ゲートには同一の電圧 V_{SG}を印加し、また 試料を内部に含むようにコイルを設け、そこに NMR 用の励起 RF 信号を印加した。図 2-3(b) は磁場を変えながら分離ゲートに対する対角コンダクタンス G_{diag}の値を測定した結果であ る。図の白丸の部分が NMR の測定部分である。この部分では充填率 v が奇数になっており、 十分な電流を長時間流すことにより核スピン偏極を実現することができた。具体的には電 流 10nA を 1.5 秒流すことによって生じる動的核スピン偏極 (Dynamic Nuclear polarization:DNP)により、核スピンを偏極させたのち、RF 信号を印加して NMR を行った。



図 2-4 (a) ~ (d) に ⁷⁵As の RDNMR の結果を示した。なお、抵抗から求めた対角コンダクタ ンス G_{diag}は 2e²/h で規格化した。測定された 3 つのピークは 4 重極相互作用を示している。 磁場 T=0.98T の NMR スペクトル(図 2-4(d))から T=1.24T (図 2-4(c))、T=1.65T (図 2-4(b))、 T=2.5T のスペクトル(図 2-4(a))まですべての磁場において NMR スペクトルとして 3 つのピ ークが確実に測定された。この時、磁場 T=0.98T の NMR は、バルクの充填率 v qpc <9 と大き く、高いランダウ準位 (LL)=5 の状態で実現している。この測定が確かな NMR 共鳴かどうか を確認するために、⁷⁵As の中央のピークに対して共鳴のジャイロ係数(磁場 T に対する共鳴 周波数の比)を測定した。得られたジャイロ係数7.27MHz/T は一般の NMR 測定による共鳴ジ ャイロ係数7.29MHz/T とほぼ一致した。誤差は本研究がポイントコンタクト部分に限定さ れた核スピン偏極による Knight シフト測定であること、超電導磁石のオフセット等の誤差 によるとした。本研究により、従来行われていなかった高いランダウ準位とゼロ磁場に近 くでの RDNMR を実現した。





(2)スピン偏極エッジ状態とホスト核の相互作用^[19]

GaAs 半導体の量子ポイントコンタクト(QPC)における、核スピンとの超微細相互作用を 媒介とした量子ホール効果のエッジチャンネル伝導現象の理論的側面を明らかにするため に、電圧-伝導度特性と RDNMR の信号の2つの実験に焦点を当てて解析を行った。

QPC 測定の概略とその結果を図 2-5 に示す。QPC 実験系では、z 方向に磁場 B、x 方向に 電流を流す。QPC ゲートの制御によって QPC 部分を通過する電子のスピン方向に不均衡を 生じる。図 2-5(b)は①電圧 V=0 付近での微分伝導度 dI/dV の変化、図 2-5(c)は②RDNMR で の励起 RF 信号のスイープに対する微分伝導度の変化を示している。共に、測定の行きと帰 りに波形が異なるヒステリシスを示している。この現象を含めて超微細相互作用による電 子スピン-核スピンの分極反転過程を介したスピン散乱の現象論的な解析をランダウア ー・ビュティカーの方法²⁴により行った。



図 2-5 QPC 実験系の概略と測定結果^[19]

(a) QPC 測定の概略
 (b) 電圧 V=0 付近における V に対する微分伝導度 dI/dV の測定結果²⁵。上図は dI/dV>e²/h、下図は dI/dV<e²/h での測定値(T=50mK、B=5.4T)。
 (c) RF 信号のスイープ (RDNMR) に対する GaAs のホール伝導度変化²⁶。

²⁴ 平山祥郎、山口浩司、佐々木智、*半導体量子構造の物理*、P26、2016(朝倉書店)

²⁵ K. R. Wald, L. F. Kouwenhoven, P. L. McEuen, N. C. van der Vaart, and C. T. Foxon, *Phys. Rev. Lett.*, 73, 1011 (1994)

²⁶ Z. K. Keane, M. C. Godfrey, J.C. H. Chen, S. Fricke, O. Klochan, A. M. Burke, A. P. Micolich, H. E. Beere, D. A. Ritchie, K. V. Trunov, D. Reuter, A. D. Wieck, and A. R. Hamilton, *Nano Lett.*, 11, 3147 (2011)

電圧 V≒0 付近の伝導度のヒステリシス①について、量子ホール素子試料に流れるエッジ 電流の電子スピンと核スピンが QPC ゲート付近で相互作用すると仮定して、核スピン分極 の格子緩和効果を考慮した理論解析を行った。解析結果を図 2-6 に示した。スキャン時間 200s に比べて、緩和時間 τ_Iが短い時間(a)(d)や長い時間(c)(f)ではヒステリシスの現象 は起きないが、同程度の時間(b)(e)ではヒステリシスが生じることを示すことができた。



図 2-6 電圧 V=0 付近の伝導度 G の理論計算結果^[19] 全測定時間は 200s とした。核スピン分極の緩和時間 τ_{I} とする。 (a) \sim (c) は G<e²/h、(d) \sim (f) は G>e²/h での測定結果。

②の RDNMR においては、外部から加えられる RF 信号によって QPC 近傍での核スピン分極 に摂動が生じ、結果としてゼーマン分裂を通じて相互作用する。この考え方で理論計算を 行った結果を図 2-7 に示した。スイープ速度が早い(a)(d)では大きなヒステリシスを示し ており、スイープ速度が遅い(c)(f)ではほとんどヒステリシスが生じていない。この解析 から、ヒステリシスは核スピン分極の立ち上がり時間が遅いために起こることを示すこと ができた。



図 2-7 RDNMR における励起周波数に対する抵抗変化^[19] (a) (d) はスイープ時間 50s、(b) (e) はスイープ時間 100s、(c) (f) はスイープ時間 500s

この研究の成果により、量子ホール実験系の QPC 近傍でおきる核スピンとエッジ状態の 電子伝導の相互作用について、理論的なシミュレーション手法を明らかにすることができた。

またこの考え方により、以前には観察されていない RDNMR の信号形状の幅の広がり(分散)について、QPC 内での2つの超微細構造によるスピン反転が同時に起こることによって 生じることが説明できた^[20]。

(3) 電界駆動 NMR のスペクトルにおけるドメイン壁の振動と超微細場との関係^[21]

電界駆動 NMR(NER)により分数量子ホール状態のドメイン壁と超微細場の関係を調べた。 GaAs 量子井戸に作成したホールバー上に、中央に分離ゲートを設け、その電極にバイアス 電圧 V_{SG} と励起用の RF 信号を印加する。バックゲート電圧 V_{BG} とスプリットゲート電圧 V_{SG} の組み合わせにより、2/3 充填率の分数量子ホール状態を維持しつつ($\nu = 2/3$)、対角抵抗 ${}^{27}R_{D}$ はバルク領域からワイア領域へと連続的に変化した(図 2-8(c))。充填率 $\nu = 2/3$ のとき $R_{D}=38$. 7k Ω となり、図 2-8(c)での黄色の線が $\nu = 2/3$ の状態を表している。



図 2-8 (a) 測定に用いた 3 対のスプリットゲート電極を有するデバイス (b) 測定素子のレ イアウトと接続状況 (c) 磁場 B=7.5T 一定にしたときの、バックゲート電圧 V_{BG}、スプリッ トゲート電圧 V_{SG}を変えたときの R_Dの分布^[21]

バックゲート電圧 V_{BG}=0.50V、スプリットゲート電圧 V_{SG}=-0.25V(v = 2/3)に固定し、動 的核スピン偏極(DNP)²⁸により核スピンを励起した後、⁷⁵As 核スピンを対象に NER を実行し た。図 2-9 に実験結果と解析の結果を示した。図 2-9(a)は測定の手順を示している。電流 I_{SD}を流すと電流方向の抵抗 R_{sx}が時間とともに大きくなり飽和する。その後 RF 信号をスプ リット電極に印加し核スピン共鳴を起こさせた時の、R_{sx}の減少量(Δ R_{sx})が測定結果となる。 測定結果を図 2-9(b)に示した。この図で共鳴周波数付近の Δ R_{sx}の測定値は点で示してお り、実線は⁷⁵As のエネルギー準位(図 2-9(c))から得られた理論値を示している。図 2-9(c) の核スピンのエネルギー準位の図で、核スピンのゼーマン分離((c)の左)、四重極場((c) の中央)、ドメイン壁の振動によるエネルギー((c)の右)を考慮したものである。励起 RF 信号のパワーP_{rf}は充填率vを変化させることが知られており(変化分= v_{rf})、P_{rf}=-60dBm の 測定においては、 $v_{rf} = 10^{-4}$ と小さい。その結果、励起 RF 信号のパワーP_{rf}が-60dBm のとき は計算と実測がよく一致した。図 2-9(d)は v_{rf} に対するドメイン壁 DW の振動振幅 A_{DW}をプ ロットしたものである(実験データから導出)。P_{rf}が増大する結果 v_{rf} が大きくなっても A_{DW} は数百 nm 以下になっている。

また、DNP と NER を使ったワイア領域の基本的な共鳴吸収結果から、NER の共鳴スペクト ルは四重極場と振動するドメイン壁を考慮することで解析できた。

²⁷ 論文に合わせて対角抵抗としたが、いわゆるホール抵抗のこと。ν=2/3 では 38.7KHz となる。

²⁸ 量子ホール効果において電流を長時間流すと、スピン偏極した電子により核スピンも偏極してくる現象のこと。



図 2-9 測定結果とその解析

(a) 測定の手順
 (b) 得られた NER の測定結果。実線、点線は Knight シフト K の有無による違い。
 (c)⁷⁵As のエネルギー準位
 (d) 充填率の変化分 ν_{rf}に対するドメイン壁の振動振幅 A_{DW}のプロット。上部の横軸は励起 RF 信号のパワーP_{rf}^[21]。

2.2.2 走査トンネル顕微鏡と抵抗検出 NMR による電子スピン偏極の空間分布測定

走査トンネル顕微鏡(STM)プローブに RF 信号を重畳し、局所的な核スピン共鳴測定を行うことにより電子スピン偏極の空間分布の測定に成功した^[22]。

図 2-10(a)に測定の概略図を示した。ここでは GaAs/Gao.7Alo.3As の量子井戸試料に作成 されたホールバー構造を示している。試料面に垂直に磁場 B を加え、二次元系に電流 Ix を流し、電極に出てくる Vx を測定する。試料面に近接して保持した STM プローブには DC バイアス電圧と同時に核スピン共鳴を誘起するように RF 信号を加え、電子密度をバックゲ ート電圧で制御している。図 2-10(b)は ⁷⁵As の核スピン(I=3/2)のゼーマン分裂のエネルギ ーレベルを模式的に示している。この図の左側は電子スピンとの相互作用がない場合を示 し、右側は相互作用がある場合、すなわち Knight シフトが生じている場合を示している。 磁場 B=8T、充填率 v=1.01 において、量子ホール効果のブレークダウン状態²⁹での ⁷⁵As の 核スピン共鳴をプローブの場所を変えて測定した結果を図 2-10(c)に示した。この図の挿 入図は電流の流れる方向と直角方向の測定の位置 i、ii、iiiを示している。図 2-10(c)の Vx の測定結果から、i の位置で核スピン共鳴が生じているが、ii、iiiの位置では共鳴が生 じていないことが分かる。

²⁹ 量子ホール効果におけるブレークダウンは核スピンの偏極を誘起することが知られている。Vx の低下 は核スピンによる共鳴で生じる。M. Kawamura et al., *Appl. Phys. Lett.*, 90, 022102 (2007)、 http://qhe.iis.u-tokyo.ac.jp/DNP.html



図 2-10 局所的な核スピン共鳴測定結果^[22] (a) 測定の概略図 (b) 核スピンのゼーマン分裂準位(Knight シフトなし(左)とあり(右)) (c) 電流に垂直方向 3 箇所の核スピン共鳴結果

上記の STM プローブによる局所的な 1 点測定方法を使い、プローブの走査により領域の 核スピン共鳴強度のマッピングを行った(図 2-11)。図 2-11(a)は測定における RF 励起信号 の印加方法を示す。プローブの移動中は共鳴しない周波数(forf)を印加し、移動を停止した 後、共鳴周波数(forn)を一定時間印加し、Vx の変化 ΔVx を測定した。なお ΔVx の振幅が共 鳴の強さを示している。図 2-11(b)にはホールバーにおけるプローブの走査領域を、また 図 2-11(c)(d)(e)は充填率 v=1.10、1.05、1.00の測定結果を示している。図 2-11(c)で示 すように、y 方向の試料の端で、エッジチャネルの電子の流れる方向に線状のパターンが 観測された。これはケミカルポテンシャル³⁰が高い側であり、電子の流れを逆にすると線 状パターンが試料の反対側へ移動した。充填率 v を小さくする(v=1.05)と線状パターンは 少し移動するとともに少し広がる(図 2-11(d))。v=1.00ではパターンはホールバー全体に 広がる(図 2-11(e))。このような v によるパターンの変化は他の研究における電子分布描 像と一致した³¹。

³⁰ 統計物理学によればケミカルポテンシャル増大は自由電子の電子数の増大を意味する。

³¹ Panos, K., Gerhardts, R., Weis, J. & von Klitzing, K., New J. Phys., 16, 113071 (2014).



図 2-11 核スピン共鳴の信号強度のマッピング^[22] (a) プローブ走査における RF 励起信号の印加手順 (b) 測定試料とその概略図 (c) (d) (e) 充填率 ν を変化させたときの ΔVx の空間マッピング結果

さらに、核スピンの偏極状況を観測するために共鳴周波数のKnight シフトによるマッピ ングを行った(図 2-12)。充填率v=1.02、量子ホール効果のブレークダウン状態において バックゲート電極から RF 励起信号を与えた場合の試料全体のNMR 測定結果を図 2-12(a)に 示した。電流 Ix=1.7 μ Aのとき、Knight シフトが最も大きい値 Ks=43.7KHz を示している。 別の実験から得た最大偏極のときのKnight シフトと一致した。電流 Ix を増やすと共鳴ピ ークはブロードになり、低い周波数の成分が増えていく。この原因を突き止めるため、プ ローブによる核スピン共鳴のマッピングを行った。電流 Ix=2.6 μ A に固定して、図 2-12(b) に示した領域での核スピン共鳴周波数(図 2-12(c))と共鳴の強度(図 2-12(d))のマッピン グを行った。図2-12(c)において、Knight シフトKsの大きさに応じた色付けを行っている。 この図から電子が流入してくる付近(上部の左)のKs が大きく、流れに沿って徐々にKs が 小さくなっていることが分かる。その状況を図 2-12(e)に定量的に示した。図 2-12(a) (Ix=2.6µA) はこのように分布した Ks の強度を合算した結果を表しており、全体の 共鳴強度が低周波数側へ広がっている状況が詳細に明らかになった。



図 2-12 核スピン共鳴のスペクトル分布[22]

 (a) 試料全体の共鳴信号スペクトル
 (b) マッピング領域と電子の流入の関係
 (c) マッピング 領域における Ks 周波数の分布
 (d) プローブ各点における共鳴信号強度の分布。i ~ vは(e) の測定点を表している。
 (e) i ~ vの各点における NMR 測定結果

さらに、 ν =1.02 においてホールバーに流す電流による共鳴スペクトルのマッピングを 行った(図 2-13)。この図(b)は量子ホール効果のブレークダウン電流付近の電流電圧特性 を示している。ブレークダウンは付近の電流 1.4 μ A、1.6 μ A、ブレークダウンを越えた電 流 2.0 μ A、2.6 μ A の電流で共鳴スペクトルをマッピングしたのが図 2-13 (a) である。Ix=1.4 μ A では領域全体でほぼ最大値 Ks (Ks=43.7 KHz) と一定であった。この状況は Ix=1.6 μ A で も同じであった。Ix=2.0 μ A、2.6 μ A では Ks が全体的に小さくなると同時に、空間分布も 均一ではなくなった。



図 2-13 核スピン共鳴の電流によるスペクトル分布の変化^[22] (a)電流毎のKsのマッピング(v=1.02) (b)電流 Ix と電圧 Vx の関係。

これらの結果は、核スピン偏極の状況を直接的に証明するものである。すなわち、量子 ホール効果のブレークダウン付近の電流では比較的一様に偏極すること、それより大きな 電流では電流の出口に向かって Ks が小さくなることが明らかになった。これは電流が大き くなると加熱が生じ、下流側ではスピン偏極が乱されたためと考えられる。

2.2.3 InSb 系量子ホール研究の発展

(1) カイラルエッジ状態の RDNMR による研究^[23]

量子ホール強磁性体(QHF)における動的核偏極(DNP)に基づく抵抗検出 NMR(RDNMR)は、量 子ホール相を発見するための非常に高感度な方法である。しかしながら、この DNP のメカ ニズム、そして特に、その中の量子ホールエッジ状態の役割は不明であった。本研究では QHF の散乱を伴う輸送特性におけるエッジ状態に注目し、従来、殆ど注目されていなかっ たカイラルモードが DNP の形成に果たす役割を明らかにした。

図 2-14(a) (b) に用いた Corbino ディスク試料とホールバー試料の形状を示す。両者の違いは Corbino ディスクではバルク電流だけであるがホールバー試料ではそれに加えてエッジ電流の影響が生じることである。図 2-14(c) に InSb の量子ホール効果を示す。充填率 ν =2 で生じる QHF において核スピンとの相互作用によるスピン状態転移(SPT) が検出される。



図 2-14 本研究の試料の形状と InSb の量子ホール強磁性体 (QHF) 状態^[23] (a) Corbino ディスク試料 (b) ホールバー試料 (c) InSb における量子ホール 効果と QHF 状態のおこる条件

充填率v=2のQHF状態におけるCorbino試料とホールバー試料によるRDNMRの研究を行った(図 2-15)。両者の差はCorbino試料では温度が2Kになると信号が無くなってしまうのに比べて、ホールバー試料では温度上昇によりはじめは信号が急速に小さくなるが温度3Kから6Kでは徐々に信号が小さくなる。さらに、電流の流れ方向に対してCorbinoでは信号の対称性が保たれるのに対して、ホールバー試料では対称性が悪化していく。このことはDNPが低温ではバルクの電流が支配的で、ホールバー試料におけるエッジ状態がこの差を生じさせていることを示唆している。



図 2-15 Corbino 試料とホールバー試料による RDNMR 信号の比較^[23] 黒線は正方向の電流、赤線は負方向の電流。(a) Corbino ディスク試料での RDNMR (b) ホールバ ー試料での RDNMR

試料内部での電子スピンと核スピンの間のスピン交換の模式図を図 2-16 に示した。図 2-16 図(a)(b)はそれぞれ Corbino 試料とホールバー試料のQHF のドメイン構造の模式図で ある。図 2-16(a)の左の P=0 のドメインのダウンスピン電子が流れる時 P=1 のドメインと の境界のドメイン壁でアップ核スピンをダウンに反転させ、右ではアップ電子スピンが流 れる時ダウンスピンの核スピンをアップに反転させる。図 2-16(b)はバルク電流に加えて エッジ電流(黒線と赤線)が加わる。赤線はダウンスピン、黒線はアップスピンに対応する 状態を示している。ドメインの周囲の細い赤線、黒線もダウンスピン、アップスピンのエ ッジ状態を示している。線の太さはエッジ電流の相対強度を表している。エッジ輸送は、ホールバーのバルクモードに次のように影響する。エッジ状態のカイラル特性により、片 側(たとえば、ポイント A)から試料に供給される電子は、スピン反転なしで DW に沿って同 じ側(ポイント C)に移動するか、スピン反転して DW を通過して反対側(ポイント B)に到達

する。前者のプロセスは DNP に直接寄与しないが、DW を通過する電子の数を減らす傾向が あり、結果として高抵抗(図 2-14(c))のピークが生じるだけでなく、図 2-15(b)に示されて いるように RDNMR 感度も向上し、大きな信号振幅が得られる。さらに、ホールバー試料で は電流の方向(図 2-15(b))、磁場の反転特性(図 2-16(c))、および冷却毎の差(図 2-16(d)(e)) で差異を生じることが分かっており、電流の方向と磁場の反転については、エッジ電流の 経路の違いにより、冷却毎による違いは不純物ポテンシャルのランダムな変化が DW 付近の 電子の透過確率を変化させたためと説明できる。



図 2-16 QHF における Corbino 試料とホールバー試料のドメイン構造と 核スピンによる電子スピン反転の模式図^[23]

灰色は分極 P=0 のドメイン、緑色は P=1 のドメイン。その境界にドメイン壁がある。中空の丸のスピンが核スピンを表している。これらの図では P=0 のアップスピンは省略されている。
(a) Corbino ディスク試料のスピン反転はバルクのみ (b) ホールバー試料でのスピン反転はバルク+ エッジ (c) 磁場を反転させたときの RDNMR 信号の差異 (d) (e) 試料を 100mK に冷却した時、最初の冷却と 2 回目での RDNMR 信号の差異。信号の振幅が異なる。

(2) InSb のトレンチゲートを持つ QPC の伝導特性^[24]

InSb では、これまで GaAs のようなスプリットゲートを持つ QPC 素子ができず、トレン チゲート素子で1次元(1D)素子が作成されているが、その特性は完全には分かっていなか った。本研究ではトレンチタイプのゲートを有する QPC 素子を作成し、ゲートに負電圧を 掛けた時に1次元(1D)チャネルが形成されること、正電圧を掛けた時 InSb 特有の 1D 並行 チャネルが形成されることを示した。

試料のホールバーとトレンチゲートを設けた QPC を図 2-17 に示した。トレンチゲートは 図 2-17(b)の黒線部分である。それを含んで L と R のゲート部が設けられている。トレン チの深さは 150nm で InSb の量子井戸を越える深さである。ゲート L と R には独立に電圧 V_{sgL} と V_{sgR} を印加できる。トレンチ構造の試料のため、磁場 B について x、y、z の 3 方向の 印加も行った。



図 2-17 (a) InSb ホールバーと QPC の試料。赤色はトレンチゲートを示している。 (b) QPC 部分の電子顕微鏡写真。黒色がトレンチ部分である。トレンチを含んで 上下にLとRのゲート電極が設けられている^[24]。

磁場 $B_z をパラメータとして、ゲート電圧 V_{sg}(=V_{sgL}=V_{sgR}) に対して伝導度 G(=I_{sd}/V_{diag}) を測定した(図 2-18(a))。磁場 <math>B_z$ の増加につれて、平坦部分が見えるようになり、ゼーマン分裂による半整数 0.5G₀と 1.5G₀の平坦部分が現れてくる。図 2-18(b)は相互伝導度 dG/dV_{sg}のカラープロットである。1D のエネルギーサブバンドが明瞭に観測される。これらの測定結果は、磁場 B_z による 1D チャネルの個数の減少は電子のサイクロトロン運動によっていることを示している。このことを理論的に解析し、裏付けを得た。



図 2-18 (a)磁場 B₂を変えながらのゲート電圧に対する伝導度 G(2e²/h 単位)を測定。縦 軸は見やすくするために、B₂ごとにずらしている。 (b)磁場 B とゲート電圧 Vsg の変化 に対する相互伝導度 dG/dVsg のカラープロット^[24]。

磁場 B を x 方向、y 方向に掛けた場合も半整数の平坦部分が現れる。図 2-19(a) は y 方向 磁場 B_y=0T~10T と変えながら測定したゲート電圧 V_{sg}に対する伝導度 G を示している。赤 線の B_y=4.5T で G=1 での平坦部分が消えて、緑線の B_y=7T で再び現れることが分かる。図 2-19(b) には 1D のサブバンド N が磁場により N ↑ と N ↓ に分裂する様子が観測された。スピ ン分裂したサブバンド N ↓ と (N+1) ↑ が交差することにより半整数の平坦部分が現れ、N ↓ と (N+2) ↑ との交差で整数の平坦部分が再び現れることを示している。



図 2-19 (a)磁場 B_zを変えながらゲート電圧に対する伝導度の測定。赤線は B_y=4.5T、緑線は B_y=7T。 (b) ゼーマン分裂で生じる 1D のエネルギーサブバンドと磁場 B の関係模式 図。点線で囲んだ部分はサブバンドの交差部分^[24]。

さらに、InSb の QPC におけるトレンチタイプのゲートに独立のゲート電圧 $V_{sgL} \ge V_{sgR} \ge Inscients Theorem 2005 (a) に独立のゲート電圧 <math>V_{sgL} \ge V_{sgR} \ge V_{s$



図 2-20 (a) 左右のゲート電圧 $V_{sgL} \geq V_{sgR} を 独立に変えたときの相互伝導度^[24]。$ $dG/dV_{sgL}+dG/dV_{sgR}のカラーマッピング。 (b) 1D チャネルが単一のときの模式図 (c) 1D チャネ$ ルが 2 本のときの模式図 (d) ゲート電圧によって生じる放物線型のポテンシャルエネルギー。 $左図は <math>V_{sgL} < 0$ 、 $V_{sgR} < 0$ 、中央図は $V_{sgL} > 0$ 、 $V_{sgR} < 0$ 、右図は $V_{sgL} > 0$ の場合。

一方、ゲート電圧が正の時(V_{sgL}>0 and/or V_{sgt}>0)、市松模様のパターンが現れている(模 式図:図2-20(c))。ゲート電圧が両方とも負の時は、図2-20(d)の左図のようにゲート電 圧が放物線状のエネルギーポテンシャルを形成し、単一の伝導チャネルで説明できる。一 方、両方のゲート電圧が正の時、エネルギーポテンシャルは図2-20(d)の右図のように2 つに分裂し、その結果として並行伝導チャネルが形成されることが分かった。

2.2.4 2次元のスピン物性、電荷秩序の研究^[25]

本プロジェクトに参画した NTT グループは、プロジェクト終了後、独自の研究目標に基づいて研究を継続し、2D システムにおける電子のエッジ状態、特に量子スピンホール効果 を理解するために、InAs 量子井戸中に作製したホールバー構造でのエッジ状態の詳細を研 究対象にした。

図 2-21 に作製したホールバー試料とその電極レイアウトと、さらにホールバー試料の両 側に設けた電極間の抵抗測定結果を示す。3 つの測定結果を比較すると、磁場 |B|>4T の領 域では量子ホール効果 (QH) が予想される充填率 v=2 と 3 のところで、抵抗 R_{xx} はゼロにな っていない。このことは QH が十分発達していないことを示している。さらに、 v=2 と 3 での R_{xx} は磁場の方向とプローブの位置に系統的に依存している。上図と下図を比べると、 上図の磁場 B<-4T と下図の B>4T の領域で大きな抵抗 R_{xx} となり、反対に上図の B>4T と下 図の B<-4T で小さな抵抗 R_{xx} になる。このようなカイラルブレークダウンは順行と逆行の エッジチャネル間の散乱を考慮に入れたランダウ・ビュティカーモデルによって説明でき る。



図 2-21 InAs ホールバー試料と複数のプローブ電極のレイアウト、 および磁場 B に対する長手方向電極間の抵抗 R_{xx}の測定結果^[25]

電荷の逆行流れを示すための試料(図 2-22(a))を作製し、3 端子による測定を行った。この測定によって、逆行モードの数(N_c)および透過率(T_c)をそれぞれのエッジについて直接決めることができる。T_cのエッジの長さ(L_{edge})依存性を調べるために L_{edge}がすべて同じ(= 60μ m)試料 A と L_{edge}の異なる($30 \sim 280 \mu$ m)試料 B を作製した。エッジチャネルのキラリティが時計回りとなるように磁場を与えた。この3端子測定法によって、I_{in}端子の上流側の電流 I_{entr}および下流側の通常の順方向の電流 I_{fred}を測定し、さらにバルク中の電流を検出するために試料の反対側の端子で I_{opp}を測定した。

はじめに試料 A(すべて同じ L_{edge}=60 μ m)での結果を図 2-22(b)に示す(I_{in}=10nA)。量子 ホール状態ではバルク電流は流れず、キラリティが生じるので、電流 I_{fwd}=I_{in}、I_{entr}=0 が必 要である。磁場 B=2~4T においてはこれが成立している。B>4T では I_{opp}が消えていき、I_{fwd} が I_{in}より小さくなる。それにつれて I_{entr}が大きくなる。この結果は InAs 量子ホール系で は逆行するエッジチャネルが存在することの直接的な証拠である。

さらに、入力電圧 V_{in}、電流 I_{in}とすると、順行の伝導度は g_F⁽ⁱ⁾=(I_{fwd}/V_{in})/G₀、逆行の伝 導度は g_c⁽ⁱ⁻¹⁾=(I_{entr}/V_{in})/G₀(i:順行電流、i-1:逆行電流を表す、G₀=e2/h)となる。ランダ ウアー・ビュティカーのモデルによると、g_c⁽ⁱ⁻¹⁾=N_cT_c⁽ⁱ⁻¹⁾(T_cは透過確率、i-1は逆行流を示 す)。N_c個の逆行エッジチャネルがあるとすれば、順行エッジチャネルには ν +N_cが存在し、 各エッジの詳細バランスから g_F⁽ⁱ⁾= ν +g_c⁽ⁱ⁾となる³²。次に、試料 B(L_{edge}=30~180 μ m)につい て、プローブ間のレイアウトを同じにして測定を行った。その結果を図 2-22(c)に示した。 正規化伝導度 g_cは L_{edge}が大きくなるとすべての V_{FG}に対して減少する。



図 2-22 (a) 試料の模式図。電圧、電流の測定状況を示す。N_cは逆流モードの数、T_cは各エッジの透過確率。 (b) 電流 I_{in}=10nA における I_{fwd}、I_{opp}、I_{entr}の磁場 B による変化。 (c) 試料の表面に設けられた電極電圧 V_{FG}に対する正規化された伝導度 g_c(\propto I_{entr})の変化。ここで、電極電圧 V_{FG}は充填率 v を変化させている。 (d) 充填率 v=1 \sim 4 に対する N_cT_c(=g_c)のプロット。この 図から L_{edge}を導出した^[25]。

この図から各 L_{edge} に対して $v=1\sim4$ での g_c をプロットしたのが図 2-22(d)である。直線は指数関数 $g_c=N_cT_c=Aexp(-L_{edge}/\lambda_{eq})$ で表すことができる。 $L_{edge}=1$ の時、透過率 $T_c=1$ が期待

³² 詳細なバランスから各エッジについて(ν +N_c)(1-T_f⁽ⁱ⁾)= N_c(1-T_c⁽ⁱ⁾)。ここでT_F⁽ⁱ⁾はi番目のエッジの順行透過確率。これをT_F⁽ⁱ⁾について解き、g_F⁽ⁱ⁾=(ν +N_c)T_F⁽ⁱ⁾に代入するとg_F⁽ⁱ⁾= ν +N_cT_c⁽ⁱ⁾= ν +g_c⁽ⁱ⁾を得る。

できるので、 $A=N_c$ となる。Aの代わりに逆行流に対する実効数 $\langle N_c \rangle$ で表す。例えば磁場B=6T、 充填率 $\nu = 4$ の時、 $\langle N_c \rangle = 1.67$ 、 $\lambda_{eq} = 70 \mu m$ と計算できる。

このような測定を磁場 B=4~8T で行い λ_{eq} と $\langle N_c \rangle$ を計算し、 $\nu = 1 \sim 4$ に対して \mathcal{T} ロットしたのが図 2-23 である。図 2-23(a)は V_{FG} に対して λ_{eq} \mathcal{T} ロットを、挿入図は磁場 B に対して λ_{eq} \mathcal{T} ロットを示した。この図から V_{FG} に対して ν 、 λ_{eq} は単調に増加する。これは磁場 B の増加とともに順行エッジチャネル、逆行エッジチャネルの間の距離が増加し、両者による散乱が減っていることを示唆している。図 2-23(b)においては、 $\nu = 1$ と3 では $\langle N_c \rangle$ が1以下となっており、 $\nu = 2$ と4 では1以上となるが2を越えない値となっている。



図 2-23 (a) V_{FG} に対する λ_{eq} のプロット。 $\nu = 1 \sim 4$ 。挿入図は磁場 B に対する λ_{eq} のプロット。 (b) V_{FG} に対する $\langle N_c \rangle$ のプロット。 $\nu = 1 \sim 4^{[25]}$ 。

これらの結果を説明するために、試料のメサエッジ近くの電子充填率について電子密度 分布についてランダウ量子化のみを考慮したポアソン方程式を自己無撞着に解く純古典的 計算によって求めた。バルク電子密度が3.65x10¹⁵m⁻²でv=3と4の場合についての結果を 図 2-24 に示した。両方ともエッジに近くなると密度が大きくなり、ゼロに向かって急速に 減少する。さらに、電子密度は非圧縮性流路(灰色の領域)と圧縮性流路(黄色の領域)を形 成することが原因で階段状に変化する。隣接するエッジチャネル間の電荷平衡はその間に ある灰色の領域を横切る散乱を介して発生するため、その幅は散乱率を決定する重要なパ ラメータである。灰色の領域の幅は磁場 B=0 における密度勾配とランダウ準位間のエネル ギー差によって決定される。充填率が奇数でv=3の場合、v_{1ocal}=4 で幅が最大である(図 2-24(a))。そのため、それより内側の逆流チャネルは他のすべてのチャネルから孤立して おり、外側の逆流チャネルは順行チャネルと非常に近くなっている。この事により、奇数 のvにおいて唯一の逆流チャネルモードが透過することが分かる。一方、充填率が偶数で ν=4 では最も広い灰色領域は ν local=6 であり、その領域が内側の 2 つのチャネルを分離して複数の逆行チャネルモードが透過することになる。



 図 2-24 エッジからの距離 x に対する電子密度を ローカルな充填率 v local として表したシミュレーション結果^[25]
 上部の挿入図は赤矢印が順行流路、青矢印は逆行流路。灰色の領域は v local が整数で電子密度一定の 領域 (a) v=3 の場合 (b) v=4 の場合

様々なエッジ長さについて逆流伝導度を測定することによって、バルク整数充填率v=1~4 での逆流モードの有効数(N_c)およびそれらの平衡長さ λ_{eq} を決定した。 λ_{eq} は磁場 B とともに指数関数的に増加し、B \geq 7.6T でv=4に対して200 μ mに達した。これらのデータは、有効数(N_c)と λ_{eq} の決定における最も内側の非圧縮ストリップの役割を示している。

2.3 プロジェクト参加研究員の活動状況

グループリーダーでは、劉洪武が東北大学大学院理学研究科准教授を経て中国の吉林大 学教授へキャリアアップした。

また研究員であった Shahin Kaya Ozdemir は Washington University Research Scientist を経て Penn State University Associate Professor へ、楊凯锋は博士研究員から東北大 学大学院理学研究科助教をへて吉林大学副教授へ、Lars Tiemann はマックスプランク研究 所の博士研究員から ETH Zurich, Switzerland-Advanced Semiconductor Quantum Materials Postdoctoral researcher を経て Center for Hybrid Nanostructures of the University of Hamburg Senior Scientist へ、羽田野剛司は科学技術振興機構 ICORP グループリーダーか ら東北大学大学院理学研究科助教を経て日本大学工学部電気電子工学科准教授へ、宮本聡 は慶應義塾大学大学院年から慶應義塾大学理工学部物理情報工学科リサーチアシスタント へ、Trevor David Rhone はコロンビア大学から NTT 物性科学基礎研究所を経て Rensselaer Polytechnic Institute (RPI)、Assistant Professor へとそれぞれキャリアアップした。

研究補助員であった Uddin Md Mohi は東北大学大学院生から Department of Physics, Chittagong University of Engineering and Technology(CUET) Assistant Professor へ とキャリアアップした。本プロジェクトの研究に協力した Mohammad Hamzah Fauzi は東北 大学大学院生から東北大学助教をへて、Indonesian Institute of Sciences, Physics Research Center でグループを持つ立場へとキャリアアップした。

2.4 第2章まとめ

プロジェクト終了から現在に至る状況に関して、文献調査(プロジェクト報告書、解説、 原著論文など)、インターネットによる調査、各種データベースによる業績(論文・特許・ 競争的研究資金の獲得状況・特許出願状況・招待講演・受賞他)の調査からなる基礎データ 調査と、プロジェクト関係者や外部有識者へのインタビュー調査を行った。これに基づき、 本プロジェクト期間中の成果の調査時点での発展状況等についてまとめた。

本プロジェクト期間中の論文は93 報また発展波及論文は30 報発表されている。期間中の1報あたりの年平均被引用件数は1.09件/年・報、終了後は2.04件/年・報であった。 特許は期間中に2件出願・登録(国際)され、1件は現在も権利が継続している。なお、終 了後の出願はなかった。国際会議への招待講演は期間中48件、終了後56件であった。受 賞は期間中1件、終了後1件であった。ベンチャー企業の設立はなかった。報道関係では 報道された研究は期間中に2件、終了後は3件であった。

プロジェクト終了後、平山は科研費の新学術領域研究(研究領域提案型)「ハイブリッド 量子科学」の研究代表者として研究を展開している。抵抗検出 NMR を含む GaAs 量子ホール 系の研究として、①高いランダウ準位とゼロ磁場に近い状態での RDNMR の実現、②スピン 偏極エッジ状態とホスト核の相互作用、③電界駆動 NMR のスペクトルによるドメイン壁の 振動と超微細場との関係等の研究が行われ、また電子スピン偏極の空間分布測定の研究と して、走査トンネル顕微鏡と抵抗検出 NMR による電子スピン偏極の空間分布測定が行われ た。InSb 系量子ホール研究の発展としては、①カイラルエッジ状態の RDNMR による研究、 ②InSb のトレンチゲートを持つ QPC における並行チャネル状態等の研究が行われた。

NTT 物性研究所の村木は、量子情報処理を究極の目的としてトポロジー物性等の研究を 進めており、その中で量子ホール効果におけるエッジチャネルの研究やWigner 結晶の微視 的構造の解析の研究として、2次元電子系のスピン物性、電荷秩序の研究等を行った。

第3章 プロジェクト成果の波及と展望

3.1 科学技術への波及と展望

本プロジェクトの研究成果およびその発展・展開の研究は、超低温における半導体量子 井戸で生じる核スピンに関係する現象を扱った基礎研究である。トポロジーやグラフェン 等の近年注目されている研究に比べ、当該分野の研究者は少なく、また発表論文数も少な い。しかしながら、「抵抗検出 NMR」の研究について、海外・日本(平山・村木以外)との比 較を行い、本プロジェクトの成果及び発展波及論文の発表件数が多くなっていること、抵 抗検出 NMR によるイメージングが独自の新しい発想であり、また日本及び海外での核スピ ン計測は着実に根付いていることが明らかになった。本研究成果のトポロジカル材料への 適用は見当たらなかったが、今後その可能性がある。

(1)物性物理で現在もっとも関心を集めているトポロジーやグラフェンの2018年の論文数 はトポロジーで約3万報、グラフェンで約2.2万報に達する。一方、核スピンの2000年~ 2018年の論文数は、トポロジーやグラフェンの論文数の約1/10であり、約2.6千報であ る。核スピンの研究は本プロジェクトで扱ったナノサイズの半導体だけでなく、物性研究 で使われる一般NMRの研究を含んでおり、またナノサイズの半導体を対象にした論文数は 更に少なく被引用数が少ないと考えられる。そのことの具体的な一例として、本プロジェ クトにおける重要な研究である「抵抗検出NMR」に係わる表題・概要を含む論文数を調べ た(図3-1)。この図に示すように、すべての年で10報以下であることがわかった。

(2)「抵抗検出 NMR」は 1988 年にマックスプランク研究所の Klitzing のグループが論文を 発表した。それ以後 1994 年以降までこの技術を使った論文は発表されていない。国内の論 文は 2004 年が初めてである。2005 年以降に平山の論文発表が始まり、2018 年まで比較的 一定の発表が行われている。日本では東京大学、京都大学、国立研究開発法人理化学研究 所(理研)等の発表があった。発表数の合計は 61 報、その内、海外が 28 報、日本(平山・村 木以外)が 12 報、平山・村木が 21 報であり、本プロジェクトが研究グループとして最多で あった(図 3-1)。海外の研究は 2002 年まではマックスプランク研究所他、2002 年~2015 年はフランス国立科学研究センター(フランス)他のグループ、2005 年以降は様々なグルー プがこの研究に参入している。発表論文の研究内容を見ると、本プロジェクトの成果・発 展である抵抗検出 NMR を使ったイメージングは他に例を見ない新しい発想であることが分 かる。また、本プロジェクトで開発した電界励起の NMR (NER) に関して、海外の論文には見 いだせなかった。



図 3-1 「抵抗検出 NMR」を表題・概要に含む論文数の推移。 (論文の収集は 2009 年のレビュー論文³³とそれ以後はタイトルと概要の検索によって行った。 検索日 2019 年 11 月 25 日 DB: Scopus)

以下、核スピンに対して、半導体ナノ構造やトポロジー、グラフェン等の研究動向から、 半導体ナノ構造での波及と展望等について示す。

3.1.1 半導体ナノ構造体における核スピンを使った計測・制御への波及

核スピンを使った代表的な計測法として、NMR や MRI が既に広く使われている。医療用 や化学分析はもちろん物性物理の分野でも NMR が広く使われている³⁴。しかし、半導体、 特にナノサイズの素子における核スピンを使った物性や計測については、本プロジェクト 以外にも、国立研究開発法人理化学研究所³⁵、兵庫医科大学³⁶、北海道大学³⁷等、複数の研 究機関で行われており、本プロジェクトが先鞭をつけた核スピン計測によるイメージング 技術は広がりを見せている。国立研究開発法人物質・材料研究機構と東北大学の共同研究³⁸ は、測定対象となる半導体の試料(半導体ナノ構造)に光を照射した際に試料から放出され る蛍光強度が核スピンの状態によってわずかに変化することを利用し、その発光のわずか な変化の空間的な違いを可視化する技術を使い、完全強磁性相と非磁性相という2つの異 なる分数量子ホール液体が縞状の空間パターン(磁区構造)を形成し、その境界で核スピン と強く相互作用をすることを見いだした(この論文は Physical Review Letters の注目論文

³³ Gervais G., "Resistively detected NMR in GaAs/AlGaAs", Top. Appl. Phys., 115, 35-50 (2009)

³⁴ https://www.jstage.jst.go.jp/article/hamon1991/10/4/10_4_49/_pdf,

³⁵ https://www.riken.jp/press/2015/20150706_2/

³⁶ https://www.hyo-med.ac.jp/faculty/course/physics.html

³⁷ https://www.topo.hokudai.ac.jp/education/SpecialLecture/111104.pdf

³⁸ https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press20170203_01web.pdf

に選ばれている)。一方、海外ではケンブリッジ大学³⁹、グルノーブル大学^{40,25}等で本プロジェクトと類似の研究が行われており、この分野での核スピン計測の利用が進んでいる。

3.1.2 グラフェン、カーボンナノチューブ材料やトポロジカル材料への波及可能性

グラフェンやカーボンナノチューブ等は2次元、1次元伝導材料として代表的な材料で あるばかりでなく、近年研究が活発に行われており、核スピン関連する研究も少数である が報告されている⁴¹。

例えば、単相カーボンナノチューブにおいて、局所的な磁気モーメントと1次元導体の 電子との相互作用により、磁気モーメントと電子が互いに緊密に結合している秩序相が発 生する現象について、電荷とスピンの自由度を組み合わせた電子密度波に不可分に束縛さ れた核強磁性からなる秩序相をもたらすことを示した。また、相互作用する¹³C ナノチュ ーブにおける局在核スピンと伝導電子間の超微細結合から生じる Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida(RKKY)相互作用⁴²を調べている。これらの研究は核スピン による計測法が半導体ナノ構造だけでなく、他の材料等でも適用可能なことを示している。 今後の研究により、本プロジェクトの成果がこのような材料等へ使われる可能性がある。

また、グラフェンの研究において、カナダのシェルブック大学で¹³CのグラフェンのNMR 信号の形状と結晶状態の関係の研究を行っており⁴³、さらに同じ研究室で抵抗検出NMRの スペクトルと2次元電子ガスのスピン構造との関係を研究している⁴⁴。

トポロジカル材料については、Bi₂Se₃についての NMR による研究が行われている⁴⁵。この 研究において、NMR と輸送測定を組み合わせてバルクの Bi₂Se₃の電子状態のスピン自由度 を Bi 原子核との超微細相互作用を介して直接測定できることを示している。さらに、Bi ベースのトポロジカル絶縁体の表面電子状態のスピン物理を明らかにする手段として、将 来の高感度 NMR 実験(抵抗検出 NMR など)への可能性について言及している。また、抵抗検 出型 NMR を適用できればトポロジカル絶縁体の電子状態の空間分布を実証できる可能性を 指摘している⁴⁶。現在のところ、本研究の成果のトポロジカル材料への適用は見いだせな かったが、今後、その可能性がある。

以上のことから、本プロジェクトの成果がナノサイズの半導体量子物理だけでなくトポ ロジー、グラフェン、カーボンナノチューブなどの最先端の材料へ次第に波及している、 あるいは、将来さらに大きく波及する可能性があると言える。

³⁹ https://www.sp.phy.cam.ac.uk/research

⁴⁰ http://lncmi-g.grenoble.cnrs.fr/spip.php?&lang=en

⁴¹ Chen-Hsuan Hsu C-H., et al, *Phys. Rev.*, B92, 235435 (2015)

⁴² 金属中の伝導電子のスピンを介して行われる局在スピン同士の相互作用(ウィキペディアより引用)

⁴³ Côté R., Parent J.-M., "Nuclear magnetic resonance line shapes of Wigner crystals in C 13 -enriched graphene", *Physical Review*, B95, 235411 (2017)

⁴⁴ Côté R., Simoneau A.M.," Resistively detected NMR spectra of the crystal states of the two-dimensional electron gas in a quantizing magnetic field", *Physical Review*, B93, 75305 (2016) ⁴⁵ http://lncmi-g.grenoble.cnrs.fr/spip.php?article763&lang=fr、あるいはS. Mukhopadhyay, S. Krämer, H. Mayaffre, H. F. Legg, M. Orlita, C. Berthier, M. Horvatić, G. Martinez, M. Potemski, B. A. Piot, A. Materna, G. Strzelecka, and A. Hruban, *Phys. Rev.*, B91, 081105 (2015) ⁴⁶ https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PR0JECT-24684021/24684021seika.pdf

3.2 社会経済への波及と展望

本研究は基礎研究であり、現在またはすぐに社会経済へ波及する事実はなかったが、ど のような展望があるか、以下に記述した。

3.2.1 量子計算機への応用

核スピンも電子スピンや光子のように一つの量子であり、量子計算の候補である。これ らの量子はそれぞれ特徴がある。核スピンを使った量子コンピュータについての最近の研 究⁴⁷では、核スピンによる量子計算の可能性が再評価された。実際に、核スピンを量子計 算に使う可能性について研究を行っているグループがある⁴⁸。

一方、核スピンを量子メモリーとして使うアイディアもある^{49,50}。一般に、核スピンを 操作する方法としては、磁場中で歳差運動に共鳴する電磁波を照射する核磁気共鳴法が用 いられる。しかし、一様に広がる磁場と空中を容易に伝搬してしまう電磁波を用いる従来 の手法では、広い領域で同時に核磁気共鳴を引き起こしてしまうため、多数の素子を小さ なチップに配置した集積回路において、所望の素子の核スピンを個別に操作することが困 難であった。平山らが ERATO の研究から継続して実現してきた NER は電界で核スピンを制 御するものであり、この問題を克服して、ナノスケールのゲート下(あるいは近傍)の核ス ピンを操作できる。橋本らの核スピン顕微鏡では、NER とナノプローブの組み合わせでま さにナノプローブ下の微小領域の核スピンを制御している。さらに、微細なメカニカル振 動子が引き起こす振動を共鳴周波数とすることにより、核磁気共鳴の周波数を素子単位で 制御できることも実験的に示している⁵¹。これらの技術により、集積素子における所望の 量子メモリーの核スピンを個別に操作することが可能となり、固体素子による量子メモリ ーを実現していくうえで、重要な要素技術となることが期待される。量子メモリーの用途 としては、光による量子情報通信が有力である。光を使った量子情報通信の距離には限界 があり、適当な距離ごとに中継機が必要とされている。中継機として、量子情報を忠実に コピーして記憶する量子メモリーが候補となりうる。

3.2.2 NMR・MRI 計測への応用

現在、核スピンを使った最も社会的に有用な計測技術は医療用や産業用のNMR・MRIである。本プロジェクトで扱った試料は半導体で、且つナノサイズの微小な試料であるため全く無関係な研究と思われがちである。しかし本研究における、1.5.1(3)「多重パルスによるスピン系の雑音評価」は一般NMR・MRIにも応用できる研究である(国際特許取得済)。現在、この技術が具体的に進展している確認は取れていないが、本研究で行われた雑音を低

⁴⁷ https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/report/sh_heisei11/denshikoushi/kitagawa.pdf

⁴⁸ http://www.qc.ee.es.osaka-u.ac.jp/research_j.html

⁴⁹ https://science.sciencemag.org/content/364/6435/62

 $^{^{50}}$ https://www.ntt.co.jp/journal/1901/JN20190147_h.html

⁵¹ Okazaki Y., et al., *Nature Comm.*, 9, 2993 (2018)

減する技術は共通である。今後核スピンの研究が進む中で、一般のNMR・MRIへ応用できる 技術が開発される可能性がある。
【引用文献】

- Hashimoto K., Muraki K., Saku T., Hirayama Y., "Electrically Controlled Nuclear Spin Polarization and Relaxation by Quantum-Hall States", *Phys. Rev. Lett.*, 88, 176601 (2002)
- [2] Fauzi M.H., Watanabe S., Kumada N., Hirayama Y., "All electrical probe of nuclear spin polarization and relaxation by spin phase transition peaks of the filling fraction v = 2/3 quantum hall effect", *J. Korean Phys. Soc.*, 60, 1676-1679 (2012)
- [3] Fauzi M.H., Watanabe S., Hirayama Y., "Nuclear magnetometry studies of spin dynamics in quantum Hall systems", *Physical Review*, B 90, 23, 235308 (2014)
- [4] Akiba K., Kanasugi S., Nagase K., Hirayama Y., "Resistive detection of optically pumped nuclear polarization with spin phase transition peak at Landau level filling factor 2/3", Appl. Phys. Lett., 99, 112106 (2011)
- [5] Akiba K., Yuge T., Kanasugi S., Nagase K., Hirayama Y., "Optically induced nuclear spin polarization in a single GaAs/AlGaAs quantum well probed by a resistance detection method in the fractional quantum Hall regime", *Phys. Rev. B Condens. Matter Mater. Phys.*, 87, 235309 (2013)
- [6] Yuge T., Sasaki S., Hirayama Y., "Measurement of the noise spectrum using a multiple-pulse sequence", Phys. Rev. Lett., 107, 170504 (2011)
- [7] Kumada N., Kamada T., Miyashita S., Hirayama Y., Fujisawa T., "Electric field induced nuclear spin resonance mediated by oscillating electron spin domains in GaAs-based semiconductors", *Phys. Rev. Lett.*, 101, 137602 (2008)
- [8] Watanabe S., Igarashia G., Hashimoto K., Kumada N., Hirayama Y., "Spectroscopic study of nuclear magnetic resonance induced by oscillating electron spin domain walls", *Phys.*, E 42, 999-1003 (2010)
- Hashimoto K., Sohrmann C., Wiebe J., Inaoka T., Meier F., Hirayama Y., Römer R.A., Wiesendanger R., Morgenstern M., "Quantum hall transition in real space: From localized to extended states", *Phys. Rev. Lett.*, 101, 256802 (2008)
- [10] Hashimoto K., Champel T., Florens S., Sohrmann C., Wiebe J., Hirayama Y., Römer R.A., Wiesendanger R., Morgenstern M., "Robust nodal structure of landau level wave functions revealed by fourier transform scanning tunneling spectroscopy", *Phys. Rev. Lett.*, 109, 116805 (2012)
- [11] Tomimatsu T., Hashimoto K., Sato K., Hirayama Y., "Pump-probe nuclear magnetic resonance measurement in quantum Hall effect breakdown regime", Appl. Phys. Lett., 103, 082108 (2013)
- [12] Liu H. W., Yang K. F., Mishima T. D., Santos M. B., Hirayama Y., "Dynamic nuclear polarization and nuclear magnetic resonance in the simplest pseudospin quantum Hall ferromagnet", *Phys. Rev.*, B 82, 241304(R) (2010)

- [13] Yang K.F., Liu H.W., Mishima T.D., Santos M.B., Nagase K., Hirayama Y., "Nonlinear magnetic field dependence of spin polarization in high-density two-dimensional electron systems", New J. Phys., 13, 083010 (2011)
- [14] Yang K.F., Liu H.W., Nagase K., Mishima T.D., Santos M.B., Hirayama Y., "Resistively detected nuclear magnetic resonance via a single InSb two-dimensional electron gas at high temperature", Appl. Phys. Lett., 98, 42109 (2011)
- [15] Tiemann L., Gamez G., Kumada N., Muraki K., "Unraveling the spin polarization of the $\nu = 5/2$ fractional quantum hall state", *Science*, 335, 828-831 (2012)
- [16] N. Kumada, K. Muraki, and Y. Hirayama, "NMR Evidence for Spin Canting in a Bilayer v = 2 Quantum Hall System", Phys. Rev. Lett., 99, 076805 (2007)
- [17] Tiemann L., Rhone T.D., Shibata N., Muraki K., "NMR profiling of quantum electron solids in high magnetic fields", Nat. Phys., 10, 648-652 (2014)
- [18] Fauzi M.H., Noorhidayati A., Sahdan M.F., Sato K., Nagase K., Hirayama Y., "Dynamic nuclear polarization at high Landau levels in a quantum point contact", *Phys. Rev.*, B 97, 201412 (2018)
- [19] Singha A., Fauzi M.H., Hirayama Y., Muralidharan B., "Landauer-Büttiker approach for hyperfine mediated electronic transport in the integer quantum Hall regime", *Phys. Rev.*, B 95, 115416 (2017)
- [20] Fauzi M.H., Singha A., Sahdan M.F., Takahashi M., Sato K., Nagase K., Muralidharan B., Hirayama Y., "Resistively detected NMR line shapes in a quasi-one-dimensional electron system", *Phys. Rev.*, B 95, 241404 (2017)
- [21] Miyamoto S., Miura T., Watanabe S., Nagase K., Hirayama Y., "Localized NMR Mediated by Electrical-Field-Induced Domain Wall Oscillation in Quantum-Hall-Ferromagnet Nanowire", Nano Lett., 16, 1596-1601 (2016)
- [22] Hashimoto K., Tomimatsu T., Sato K., Hirayama Y., "Scanning nuclear resonance imaging of a hyperfine-coupled quantum Hall system", Nat. Commun., 9, 2215 (2018)
- [23] Yang K., Nagase K., Hirayama Y., Mishima T.D., Santos M.B., Liu H., "Role of chiral quantum Hall edge states in nuclear spin polarization", Nat. Commun., 8, 15084 (2017)
- [24] Masuda T., Sekine K., Nagase K., Wickramasinghe K. S., Mishima T. D., Santos M. B., Hirayama Y., "Transport characteristics of InSb trench-type in-plane gate quantum point contact", Appl. Phys. Lett., 112, 192103 (2018)
- [25] Akiho T., Irie H., Onomitsu K., Muraki K., "Counterflowing edge current and its equilibration in quantum Hall devices with sharp edge potential: Roles of incompressible strips and contact configuration", Phys. Rev., B 99, 121303 (2019)