

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H02728

研究課題名(和文)一次元電子系のハイパーファイン相互作用実空間観察

研究課題名(英文)Observation of hyperfine interaction in1D electron system

研究代表者

橋本 克之(Katsushi, Hashimoto)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：30451511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,970,000円

研究成果の概要(和文)：独自の走査プローブ手法を用いることで、非平衡な量子ホール状態において1次元スピンの偏極エッジチャンネルからの電子散乱領域と核スピン偏極領域に相関があることを明らかにした。さらに、核スピン・電子スピンマッピングから1次元電子系を形成する量子ポイントコンタクトでも、類似の相関を見出した。これらの結果は、非平衡な量子ホール効果の特異な電気伝導特性が、1次元電子チャンネル・核スピンの間に働くハイパーファイン相互作用に起因していることを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

独自に開発した「走査核スピン共鳴顕微鏡」を用い、量子ホールスピンの偏極エッジチャンネルと核スピン偏極の空間分布をナノスケールで特定することに成功した。この結果は、非平衡状態におけるスピンの偏極エッジチャンネルからの電子の非平衡散乱と核スピン間に働くハイパーファイン相互作用の微視的な描像を理解するうえで重要であると考えられる。この成果は、量子構造のスピンの状態のミクロスコピック MRI の実現への第一歩となると共に、「核スピントロニクス」といった新しい分野の開拓に貢献すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Using the unique scanning-probe techniques, in the non-equilibrium quantum Hall regime, we found the spatial correlation between the electron scattering region from the one-dimensional spin-polarized edge channel and the nuclear spin polarization region. Furthermore, a similar correlation was found in quantum point contacts that form a one-dimensional electron system. These results provide microscopic pictures of one-dimensional hyperfine interaction between the electron and nuclear spins that induces the intriguing phenomenon in the non-equilibrium quantum Hall regime.

研究分野：ミクロスコピック量子物性

キーワード：量子ホール効果 核スピン共鳴 量子ポイントコンタクト 走査プローブ観察

1. 研究開始当初の背景

電子・核スピンのハイパーファイン相互作用は、スピントロニクスの研究において重要な研究対象の一つである。このハイパーファイン相互作用を利用した抵抗検出核スピン共鳴技術により、国内外で、二次元電子系の量子ホール状態における特異な電子スピン状態の研究が盛んに行われている。近年、量子ホール系に形成される一次元電子系でも核スピン偏極が可能であることが電気抵抗検出で明らかになっているが、電子系と核スピン偏極が実空間でどのように関連しているかという問題はまだ未解明のままである。

2. 研究の目的

本研究では走査核スピン共鳴マッピング技術を用いて、量子ホール一次元電子系のハイパーファイン相互作用の微視的描像を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

一次元電子系と核スピンの相互作用の微視的描像を明らかにするため、主に GaAs/AlGaAs 量子井戸上に作成した擬一次元電子系量子ポイントコンタクトを用いて、量子ホール状態に現れる 1 次元エッジチャンネルや量子ポイントコンタクト近傍のエッジチャンネルと電流励起核スピン偏極の位置相関を、走査核スピン共鳴マッピングによって明らかにする。

4. 研究成果

走査核スピン共鳴顕微鏡を用いた量子ホール効果ブレイクダウン状態における核スピン及び電子スピン偏極度マッピングの解析により、ランダウレベル充填率が $\nu = 1$ よりわずかに上の領域では、量子ホール 1 次元エッジチャンネルに沿った 1 次元領域で核スピン偏極が生じることが明らかになった (図 1 (a))。この結果は、量子ホール効果ブレイクダウン現象が、電子・核スピンのミクロスコピックな分布と強く関連していることを示している。独自に開発した走査核スピン共鳴マッピング技術が核スピン・電子スピンの空間分布を捉える強力な手法であることが認められ、この成果は Nature Communications 誌に掲載される [1] と共に「核スピン共鳴プローブ顕微鏡の開発に成功 - 量子構造のスピン状態のミクロスコピック MRI を実現 - 」と題して日経ウェブサイト等で報道された。

上記の 1 次元核スピン偏極領域と量子ホール 1 次元エッジチャンネルとの空間的相関を調べるために、非平衡トランスポートを利用した走査ゲートイメージングを行った。その結果、 $\nu = 1.05$ では、スピン偏極エッジチャンネルからバルク領域への電子散乱に伴い、試料端に沿った 1 次元パターンが観測された (図 1 (b)) [2]。観測された領域が 1 次元核ス

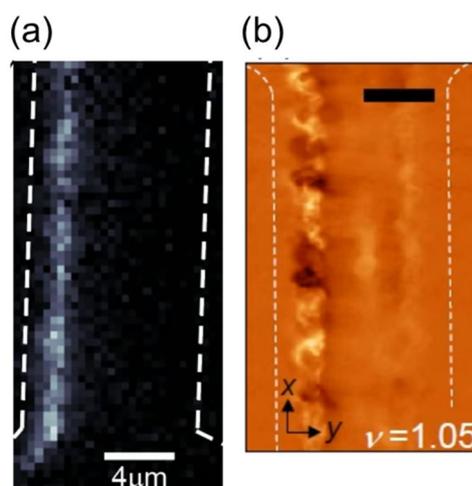


図 1 $\nu \approx 1$ で得られた核スピン共鳴像(a)と非平衡トランスポートを利用した走査ゲート像。それぞれ試料端に沿った 1 次元的な核スピン偏極領域 (a) と量子ホールエッジチャンネルからの電子散乱領域 (b) を示している。破線はホールバー端を示している。

ピン偏極領域(図1(a))と一致することから、エッジチャンネルからのスピン反転を伴う電子散乱により核スピンの偏極することが明らかになった。また、このホールバー端に現れる1次元領域はランダウレベル充填率を下げることでホールバー中央に広がり、 $\nu = 1$ では閉じたループ構造を形成した。これらの構造は、量子ホール効果の非散逸的な輸送現象の微視的メカニズムである電子の局在状態を示していると考えられる。

さらに、この1次元量子ホールエッジチャンネルからの電子散乱が不純物などによる静電的な無秩序ポテンシャルによりどのように変化するかを調べるため、比較的低い移動度の試料を用いて非平衡トランスポートを利用した走査ゲートイメージングを行った。その結果、不純物ポテンシャル閉じ込めにより形成された量子ドット状態を介した電子トンネル散乱により、試料端に沿ったライン状パターン中により小さく細かいパターンが現れることが分かった[3]。

一次元電子系を閉じ込める量子ポイントコンタクト(QPC)の核スピン共鳴マッピングでは、図2に示すようにQPC近傍(数マイクロメートル領域)で局所的な核スピン共鳴が得られることから、QPC近傍で隣り合う反対のスピン方向に偏極したエッジチャンネル間の電子散乱により核スピンの偏極していることが分かった。さらに、その共鳴スペクトルのピークシフトに数百ナノメートルオーダーの空間分布があることを見出した。これは、電子スピン偏極の空間変化によるナイトシフトを示していると考えられ、量子ポイントコンタクト周辺の異なるスピン偏極度を持ったエッジ

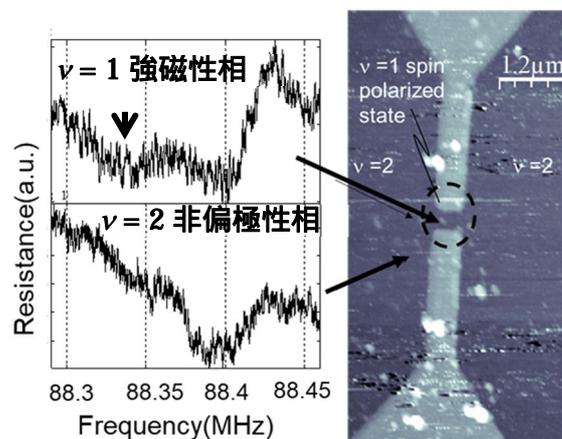


図2: 核スピン共鳴マッピングによる局所共鳴スペクトル。QPCから離れた量子ホール $\nu = 2$ 非偏極領域に比べQPC近傍の $\nu = 1$ 偏極領域ではナイトシフトにより低周波数側にずれたスペクトル構造(矢印)も現れている。磁場: 8 T, 温度: 150 mK。

チャンネルに関連するものと考えられる。これ等の結果は、核スピンや電子スピン偏極の不均一性がQPCからサブマイクロからマイクロメートル離れた領域まで広がっていることを示唆している。さらに、この実験で使用した走査プローブ顕微鏡の金属探針を使い、QPCから1マイクロメートルの範囲内に探針を近づけることで、QPC内の量子ホール状態制御に成功した。これは、走査プローブを用いたナノ電界ゲートによるスピン偏極量子ホール状態及び核スピン偏極をナノスケールで操作が可能であることを意味している。

一方で、抵抗検出核磁気共鳴測定では、高次のランダウレベル(LL5)における電流励起ダイナミック核スピン偏極を用いることで、 $B = 1$ T以下の低磁場まで核スピン偏極とその抵抗検出をすることに成功した[4]。また、抵抗検出核磁気共鳴でこれまで用いてきたGaAs量子井戸とは異なるInSb量子井戸に、トレンチ型面内ゲート量子ポイントコンタクトを作製し、InSb一次元系における核磁気共鳴の抵抗検出を試みた。本実験において核磁気共鳴信号を検出することは出来なかったが、これはゼロ磁場での量子化コンダクタンスが明瞭に確認できないといった不十分な電気伝導特性に起因する可能性があり、今後の量子ポイントコンタクト構造の改良による電気特性の改善が望まれる。

[1] K. Hashimoto et al. Nat. Commun. 9, 2215 (2018).

[2] T. Tomimatsu, et al. Phys. Rev. Research 2, 013128 (2020).

[3]. Y. H. Wang, et al. Phys. Rev. B 103, 085308 (2021).

[4] M. H. Fauzi, et al. Phys. Rev. B 97, 201412 (2018)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. H. Wang , K. Hashimoto, T. Tomimatsu, and Y. Hirayama	4. 巻 103
2. 論文標題 Imaging disorder-induced scattering centers in quantum Hall incompressible strip	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 085308-1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.103.085308	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Tomimatsu , K. Hashimoto , S. Taninaka, S. Nomura , and Y. Hirayama	4. 巻 2
2. 論文標題 Probing the breakdown of topological protection: Filling-factor-dependent evolution of robust quantum Hall incompressible phases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW RESEARCH	6. 最初と最後の頁 013128-1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.013128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Fauzi M. H., Noorhidayati A., Sahdan M. F., Sato K., Nagase K., Hirayama Y.	4. 巻 97
2. 論文標題 Dynamic nuclear polarization at high Landau levels in a quantum point contact	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 201412
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.97.201412	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hashimoto Katsushi, Tomimatsu Toru, Sato Ken, Hirayama Yoshiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Scanning nuclear resonance imaging of a hyperfine-coupled quantum Hall system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2215
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-018-04612-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 K. Hashimoto
2. 発表標題 Nuclear Electric Resonance Microscopy of Quantum Hall Systems
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本克之
2. 発表標題 半導体量子デバイスの核スピン共鳴イメージング
3. 学会等名 NANOSPEC 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本克之
2. 発表標題 核スピン共鳴プローブ顕微鏡による半導体量子構造の電子。核スピン偏極マッピング
3. 学会等名 第182委員会、第167委員会、合同研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本克之
2. 発表標題 走査プローブ顕微鏡による核スピン共鳴イメージング
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本克之
2. 発表標題 ナノプローブによる量子ホール系の研究と核スピンイメージング
3. 学会等名 量子デバイス材料研究ミニワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hashimoto
2. 発表標題 Nuclear Resonance Spectroscopic Imaging of Quantum Devices
3. 学会等名 Smart NanoMaterials 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hashimoto
2. 発表標題 Nuclear Resonance Spectroscopic Imaging of Hyperfine-Coupled Quantum Hall System
3. 学会等名 International Congress on Microscopy & Spectroscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsushi Hashimoto
2. 発表標題 Scanning gate imaging of quantum-Hall electronic, spin, and nuclear spin states
3. 学会等名 International Workshop Disordered Systems: From Localization to Thermalization and Topology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsushi Hashimoto
2. 発表標題 Scanning gate imaging in quantum Hall system
3. 学会等名 8th Summer School on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsushi Hashimoto
2. 発表標題 Scanning gate imaging of quantum Hall systems and its extension to nuclear resonance microscopy
3. 学会等名 International Workshop on Hybrid Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本克之, 富松透, 谷中俊宥, 野村晋太郎, 平山祥郎
2. 発表標題 量子ホール非圧縮性状態の走査ゲートイメージング
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsushi Hashimoto
2. 発表標題 Scanning nuclear resonance imaging of a hyperfine-coupled quantum Hall system
3. 学会等名 Tohoku-Tsinghua Joint Workshops on Materials and Spintronics Sciences (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsushi Hashimoto
2. 発表標題 Nuclear Resonance Spectroscopic Imaging of Hyperfine-Coupled Quantum Hall System
3. 学会等名 6th International Congress on Microscopy and Spectroscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsushi Hashimoto
2. 発表標題 Microscopic Knight-shift measurements in the quantum-Hall breakdown system
3. 学会等名 SpinTech IX (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Katsushi Hashimoto
2. 発表標題 Scanning-probe imaging of nuclear/electron spin polarization in a quantum Hall system
3. 学会等名 the Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Katsushi Hashimoto
2. 発表標題 Real-space mapping of nuclear resonance spectroscopy in a quantum-Hall system
3. 学会等名 HQS2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Katsushi Hashimoto
2. 発表標題 Nuclear Resonance Spectroscopic Imaging of Hyperfine-Coupled Quantum Hall System
3. 学会等名 Reimei/GPSpin/ICC-IMR Workshop on New Excitations in Spintronics (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本克之
2. 発表標題 走査プローブ顕微鏡による電子/核スピン物性測定
3. 学会等名 新学術領域ハイブリッド量子科学第3回若手研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 K. Hashimoto, T. Tomimatsu, Y. Hirayama (Ed: Y. Hirayama, K. Hirakawa, H. Yamaguchi)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 341
3. 書名 Quantum Hybrid Electronics and Materials	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>トポロジカルに護られた電気伝導特性の可視化に成功 - 外乱に強い量子ホール状態の実証 - https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2020/02/press20200206-01-topo.html 核スピン共鳴プローブ顕微鏡の開発に成功 https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2018/06/press20180607-kakuspin.html 東北大、核スピン共鳴プローブ顕微鏡の開発に成功 https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP481679_V00C18A6000000/ 東北大、核スピン共鳴プローブ顕微鏡を開発 http://www.optronics-media.com/news/20180611/51586/</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	ファウジ モハマドハムザ (Fauzi Mohammad) (90732892)	東北大学・スピントロニクス学術連携研究教育センター・助教 (11301)	削除：2020年6月30日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関