様式Ｃ－１９

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成２４年　５月１５日現在

機関番号：12501
研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2009～2011
課題番号：21540315
研究課題名（和文）　光磁気カー効果による分数量子ホール電子系のスピン偏極イメージング

研究課題名（英文）　Imaging of electron spin polarization in quantum Hall states investigated by Kerr rotation microscopy

研究代表者
音　賢一（OTO KENICHI）
千葉大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：30263198

研究成果の概要（和文）：極低温・強磁場中の量子ホール状態にある２次元電子系の電子スピンは、核スピンの偏極や多数電子スピンが関わる励起等の「空間分布を示す」現象を引き起こす。本研究では Kerr 効果を用いた高感度な電子スピン偏極の計測と顕微イメージングを組み合わせ、分解能を４ μｍ程度で微弱励起光による整数および分数量子ホール状態でのスピン偏極度の画像化を行い、エッジ状態のスピン偏極の分布や、占有数１近傍での電子スピン偏極度の電流の有無による影響などを詳しく調べた。また、希釈冷凍機と組み合わせた計測系の試作も行った。

研究成果の概要（英文）：The spin-related phenomena observed in the quantum Hall (QH) effect, such as the QH ferromagnet at the filling factor of Landau level $\nu=1$, dynamic nuclear polarization by the QH breakdown current, *etc.*, affect to the spin dynamics and also to the current distribution in the QH devices, showing the ‘spin texture’. We developed an optical fiber-based Kerr microscope operating in the low temperatures below 2 K and high magnetic fields up to 9 T. The spatial resolution of 4 μm can be obtained in the QH regime. We obtained the spatial distribution image of the local filling factor through the degree of the spin polarization, and also observed the spin polarized quantum Hall current both in the bulk and near the edge areas. We are trying to set our Kerr microscope in a dilution refrigerator to investigate the spin polarization in the fractional quantum Hall regime.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００９年度	1,000,000	300,000	1,300,000
２０１０年度	1,700,000	510,000	2,210,000
２０１１年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総　計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学
科研費の分科・細目：物理学・物性Ｉ
キーワード：スピン偏極、イメージング、カー効果、メゾスコピック系、量子ホール効果

１．研究開始当初の背景

GaAs/AlGaAs ヘテロ接合などの２次元電子系の極低温・強磁場における量子ホール効果では、ランダウ量子化により非圧縮性電子状態となりポテンシャル遮蔽の消失と強い電子相関による様々な多体効果が顕著に現れ

る。量子ホール電子系のスピン状態は主にランダウ準位占有数により偏極・非偏極が決まるものと考えられるが、現実の半導体２次元電子系試料中ではイオン化不純物からの空間的にランダムなポテンシャルの揺らぎや核スピン偏極の分布などにより、偏極度の異なるドメインが分布しているものと考えられ、これはクーロン相互作用とゼーマン・エネルギーが拮抗する分数量子ホール状態では特に顕著となる。量子ホール効果は元来「巨視的に現れる量子効果」であるため、例えば試料内の電流分布によらず、正確な量子化ホール抵抗が観測される。しかし、実際には電流分布や局所的な電子スピン状態の分布が量子ホール効果における電気伝導の性質を大きく左右しているものと考えられ、それらの空間分解された計測がそのメカニズムの解明に重要な役割を果たすことが強く認識されるようになった。例えば、東京大学の小宮山グループ、河野・岡本グループによる電気伝導と遠赤外サイクロトロン発光イメージングによる伝導機構の研究や、国外でも von Klitzing のグループで行われた AFM を利用した電位分布計測に関する研究などにより、整数量子ホール効果での電流分布や励起電子の空間分布に関する詳しい知見が得られ、ブレークダウン現象の機構の解明が進んだ。

一方で、量子ホール２次元電子系のスピン偏極度に関しては後述のように直接観測が実験的に困難であり、その空間分布についての研究はほとんど報告が無い。特に、分数量子ホール状態では電子スピンが関与する核スピンの偏極とそれに伴う大きな抵抗増大現象や、多数の電子スピンが関わるスカーミオン励起などに代表される「空間分布を示す物理現象」が電気伝導に大きな影響を与えているため、それらの空間分布の詳細を調べることで量子ホール電子スピンの制御や初期化のメカニズムの解明にも重要な知見をもたらすものである。

２．研究の目的

我々は、これまでにポッケルス効果による電位分布のイメージングにより量子ホール状態の電流の空間分布についての実験研究を行い、量子ホール・ブレークダウンと電流分布についての知見を得るとともに、低温・強磁場でのイメージング法に関する多くのノウハウを得た。また、連携研究者の室清文千葉大学教授と協力して量子ホール電子系のスピン偏極とダイナミクスについて時間分解 Kerr 回転計測の手法により研究を進め、2 次元電子 1 層の量子ホール電子系のスピン偏極を高感度に検出できることを示した既に示した。これらを組み合わせて、Kerr 効果のイメージング法を量子ホール効果の研究に適用できるよう高感度、高分解能化を行い、中でも分数量子ホール状態の電子スピン偏極の研究に適用できる計測系を開発し、分数量子ホール状態にある電子のスピン偏極状態の空間分布や、電流や核スピン偏極による電子スピンの変化についての捉えることを目指す。

３．研究の方法

(1) <u>量子ホール効果でのスピン偏極度イメージング測定系の構築</u>

極低温・強磁場下での GaAs/AlGaAs２次元電子系（通常のヘテロ接合や単層量子井戸）における量子ホール状態の電子スピン偏極による極めて僅かな Kerr 回転角を共鳴励起直近のスポット励起光と偏光アームを用いたホモダイン検波によって、高感度に検出し、この励起光スポットを走査することで、量子ホール電子系のスピン偏極度のイメージングを行う。この測定系は既存の伝導計測用の超伝導電磁石（光学窓なし）にそのままトップロードで挿入できるもので、図１に示すように自家製の外部共振器型波長可変半導体レーザー（連携研究者の室が開発）を光源に光ファイバーを用いて試料へと励起光を導入し、試料直上でバランス型ホモダイン検波と試料のゲート変調電圧によるロックイン検出を併用して２次元電子のスピン偏極による 10^{-5} rad 程度の微小 Kerr 回転角を高感度に検出可能である。本研究開発で、既存の希釈冷凍機内にセットし温度範囲を１K 以下に広げ、分数量子ホール領域へと拡張する。さらに、励起光スポットサイズを数ミクロン程度に絞るため光学系ヘッド部分を共焦点系に改良し空間分解能を向上させる。

本研究では、これらのシステムの構築を重点的に行うと共に、これを用いて以下の項目を調べる。

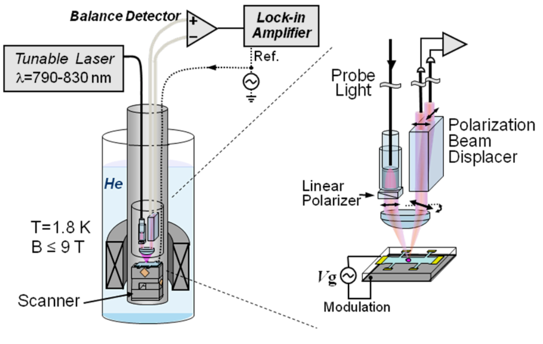

図１：光ファイバーによる導光とバランスホモダイン検波、電子濃度変調によるロックイン検出による低温・強磁場下の高感度 Kerr 回転スピンイメージング装置（He 温度で動作する）

(2) 整数・分数量子ホール電子系のスピン偏極の空間分布

ランダウ準位占有数が奇数の量子ホール状態ではスピン偏極度が大きいが、現実には2 次元電子系の僅かなポテンシャルゆらぎ（電子濃度のゆらぎ）を反映してスピン偏極度も空間分布をもつものと考えられる。本研究で製作するスピンイメージング測定系を用いて極低温・強磁場でのスピン偏極度の示す分布の構造やその温度依存性、電流による変化について調べる。

また、量子ホール効果の電流は「どこをどのように」流れているかは様々な条件ごとに異なっており電流量により動的にすら変化するものと考えられる。電流密度の高い部分は局所的に励起電子が多くなっており、これをスピン偏極度の変化として捉えることを試みる。試料の質や電流量により、電流の空間分布がどのように変化するのかをスピン偏極イメージングで系統的に調べる。

(3) サニャック干渉計による超高感度・高安定 Kerr イメージング測定系の構築

希釈冷凍機温度での分数量子ホール効果の Kerr イメージングでは、測定用の励起光による温度上昇を極限にまで低減することが重要である。また位置分解能の向上のため光スポット径を小さくすると励起光密度が高くなるため入射光の強度を下げる必要がある。このため Kerr 効果の高感度化が必須である。また、イメージングでは光スポットを走査するため測定時間が長くなるので条件をそろえた S/N の良好なイメージを得るためにはノイズの低減と高安定化も欠かせない。スタンフォード大学のグループでは、図2 にあるような光ファイバージャイロで用いられている技術を物性研究に応用し、ファイバー、様々な光学系からの擾乱を原理的に排除できるサニャック干渉計を用いて 10^{-8} rad もの極微小 Kerr 回転角の計測に成功している。さらに MHz オーダーの変調周波数によるロックイン検出を用いて 1/f ノイズを抑制するとともに、極微弱光の検出と時間安定性を実現している。

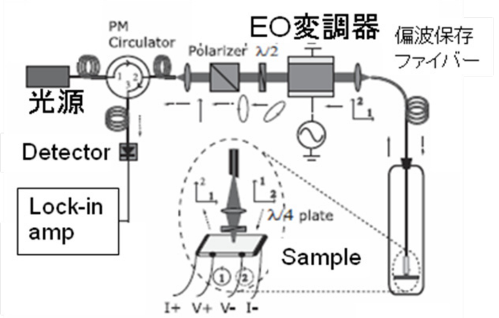

図２：サニャック干渉計による超高感度・高安定度 Kerr 効果測定系, J. Xia, et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 167002 (2006).

本研究ではこの手法を導入して、希釈冷凍機温度での超高感度・高安定 Kerr イメージング計測装置を構築し、①弱励起光による分数量子ホール状態の低侵襲計測、②光スポット径の微小化によるスピン偏極度の位置分解能の向上等を実現する。

４．研究成果

(1) 極低温・強磁場下における量子ホール２次元電子のスピン偏極イメージング

高易動度 GaAs/AlGaAs 量子井戸２次元電子系を対象に、光磁気 Kerr 効果を用いて２次元電子系１層の電子スピン偏極について高感度・高分解能で検出し、その空間分布を測定できるシステムを開発した。このスピン偏極イメージングを通して、試料内の僅か 0.1%以下のごく僅かな電子濃度のゆらぎが明瞭に可視化され、半導体２次元電子系の均一度を数ミクロンの分解能で鋭敏に評価が可能であることを示した。さらに、試料に電流を流すことでホール効果によるポテンシャル分布が生じ、これにより生じた僅かな電子分布（局所占有数）の変化がスピン偏極度に反映することでイメージングが可能であることを示した。図３のイメージは占有数 $\nu=1$ の量子ホール強磁性状態におけるスピン偏極度のマッピングで、無電流の左図では電子濃度の揺らぎの分布が可視化され、右図は外部から電流を電極間に流すことで、２次元電子系のスピン偏極度の空間分布が無電流時から比べて顕著に変化し、電流分布の情報が電子スピン偏極度を通して計測できることを示した。

(2) 量子ホール電子スピンのダイナミクス

量子ホール状態での固有のスピン緩和時間 (T_2*) を調べるため、２色ポンププローブ法による擾乱を与えない選択励起と、高周波磁場印加による核スピンの消磁を行って、時間分解 Kerr 回転測定によるスピン・ダイナミクスを調べた。スピン緩和時間はランダウ占有数が $\nu=1$ や 3 の奇数占有数のとき鋭いピークを示し、その極近傍ではスカーミオン

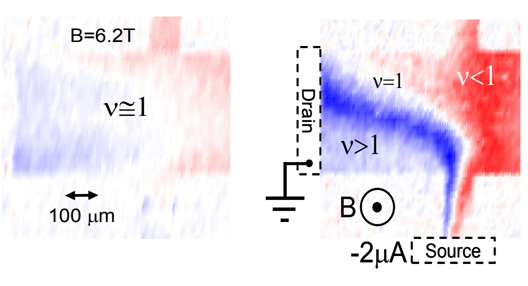

図３　温度 4.2 K、占有数ν=1 における試料中のスピン偏極イメージング。左：無電流、右：外部電流 2μA。白い帯部が $\nu=1$。

やアンチスカーミオン励起によるスピン緩和時間の著しい減少を観測した。これは、NMRや伝導計測で報告されているスカーミオン励起による核スピン緩和とは異なるメカニズムで生じている可能性がある。さらに、占有数ν＝３や５においてもスカーミオン励起が存在することを示す実験結果を得た。

(3) 量子ホール系 Kerr 回転スペクトル

上記(1),(2)の Kerr 回転計測では実際に何を測っているのかを解明するため、GaAs/AlGaAs 量子ホール系の光磁気 Kerr 回転スペクトル（Kerr 回転の励起光の波長依存性）を調べた。磁場下で GaAs の共鳴励起波長では、スピン選択光吸収による磁気円２色性による信号が支配的で、このときの磁気スペクトルは単純なランダウ・ファンではなく、量子ホール系特有の多体効果による整数占有数でのスペクトル先鋭化や分裂が顕著に現れた。また、(1)の Kerr イメージングで用いている波長では、Kerr 効果による信号が主に観測されており、まさしくスピン偏極度のイメージであることを実験的に確認した。

(4) サニャック干渉計による量子ホール電系のスピン偏極イメージング

測定に用いる光による２次元電子系への擾乱をできるだけ抑え、また、より低温での計測を可能にするためには、できるだけ低励起光での実験が望ましい。本研究では量子ホール電子系による Kerr 効果のさらなる高感度計測を目指し、サニャック干渉計を用いた Kerr 回転イメージング装置を製作した。この方法では、光ファイバー1 本で励起光を送るとともに信号光を受け、試料近傍の光学系も共焦点構造となるため位置分解能も高くなる利点がある。さらにゲートによる電子濃度変調の必要も無いため、バックゲートの無い試料でも計測が可能である。ただし、高 S/N での計測にはノイズ源となる光学系の振動の除去などを当初想定していた以上に厳密に行う必要があることが分かった。今後さらに改良を加えて分数量子ホール状態での実験に活用する予定である。

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計８件）

(1) H. Ito, T. Yamazaki, D. Fukuoka, K. Oto, K. Muro, Y. Hirayama, and N. Kumada, High-sensitive optical measurement of spin polarization in a quantum Hall system J. Phys., Conf. Ser., 査読有, Vol.**334**, 2011, 012021 (6 pages).
DOI:10.1088/1742-6596/334/1/012021

(2) T. Yoshida and K. Oto, High-field magneto-transport at charge neutrality point in monolayer graphene
J. Phys., Conf. Ser., 査読有, Vol.**334**, 2011, 012036 (5 pages).
DOI: 10.1088/1742-6596/334/1/012036

(3) H. Ito, M. Seo, D. Fukuoka, K. Oto, K. Muro, Y. Hirayama, and N. Kumada,
Spin polarization in quantum Hall state obtained by Kerr rotation spectra,
AIP Conf. Proc. 査読有, Vol.**1399**, 2011, 637-638.
http://dx.doi.org/10.1063/1.3666539

(4) D. Fukuoka, K. Oto, K. Muro, Y. Hirayama, and N. Kumada, Skyrmion effect on the relaxation of spin waves in a quantum Hall ferromagnet, Phys. Rev. Lett., 査読有, Vol.**105**, 2010, 126802 (4 pages).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.126802

(5) T. Yoshida, and K. Oto, Graphene-like magneto-oscillations in graphite capacitor, Physica E, 査読有, Vol.**42**, 2010, 684-686.

(6) K. Oto, 他 5 名, Optical imaging of quantum Hall current in GaAs/AlGaAs two-dimensional electron system
AIP Conf. Proc. 査読有, Vol.**1199**, 2009, 245-246.

(7) D. Fukuoka, N. Tanaka, K. Oto, K. Muro, 他 4 名, Time-resolved Kerr rotation spectroscopy of spin dynamics in a quantum Hall system, AIP Conf. Proc. 査読有, Vol.**1199**, 2009, 243-244.

(8) T. Yoshida, T. Ishihara, K. Oto, 他3名, Quantum Hall effect and spin resolved anti-crossing of Landau levels in AlGaSbAs /InAs and AlInSb/InAsSb quantum wells
AIP Conf. Proc. 査読有, Vol.**1199**, 2009, 243-244.

〔学会発表〕（計 32 件）

(1) 軍司雄太，長尾圭介，音賢一，室清文，熊田倫雄，平山祥郎，サニャック干渉計による量子ホール電子系のスピン偏極計測，日本物理学会第67回年次大会，2012年3月26日，関西学院大学（西宮市）

(2) 岡田圭介，泉咲希，平井宏昌，音賢一，室清文，高スペクトル純度の波長可変レーザーを用いた単層カーボンナノチューブのPLE測定，日本物理学会第67回年次大会，2012年3月24日，関西学院大学（西宮市）

(3) 島根佑太，音賢一，室清文
分子吸着したカーボンナノチューブの電気伝導特性の温度変化，日本物理学会第 67 回年次大会，2012 年 3 月 25 日，関西学院大学（西宮市）

(4) 音賢一, 軍司雄太, 長尾佳介, 室清文, 熊田倫雄, 平山祥郎, 量子ホール系のスピン偏極電流イメージング, 対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象 第２回領域研究会（招待講演）, 2011 年 12 月 19 日,岡山大学（岡山市）
(5) K.Oto, T.Matsuda, Y.Gunji, D.Fukuoka, K.Muro, N.Kumada, and Y.Hirayama, Imaging of spin polarized quantum Hall current in GaAs quantum well by scanning Kerr microscope, Int. Conf. Solid State Devices and Materials (SSDM2011), (invited) 2011 年 9 月 30 日, 名古屋市
(6) 島根佑太, 音賢一, 室清文, 架橋単層カーボンナノチューブの分子吸着による伝導特性の変化, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21 日, 富山大学（富山市）
(7) 音賢一, 量子ホール２次元電子系のスピン偏極電流, 理研シンポジウム「量子凝縮系の非線形・非平衡現象」, 2011 年 1 月 4 日, 理化学研究所（和光市）
(8) 三野弘文,米内山章吾,大戸一樹,音賢一, 室清文, 秋本良一,顕微円二色測定による光生成二次元電子ガスの時間分解スピンイメージング, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 26 日, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス（大阪府堺市）
(9) 伊藤裕紀,瀬尾宗隆,福岡大輔,音賢一, 室清文,他 2 名, 光ファイバーを用いた量子ホール系の強磁場、極低温における Kerr 回転スペクトルの測定, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 24 日, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス（大阪府堺市）
(10) H. Ito, D. Fukuoka, K. Oto, K. Muro, Y. Hirayama, and N. Kumada, High sensitive measurement of spin polarization by Kerr rotation in a quantum Hall system, 19th Int. Conf. on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology, 2010年8月4日, Fukuoka, Japan
(11) T. Yoshida and K. Oto, High-field magneto-transport at charge neutrality point in monolayer graphene, 19th Int. Conf. on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology, 2010年8月4日, Fukuoka, Japan
(12) H. Ito, M. Seo, D. Fukuoka, K. Oto, K. Muro, Y. Hirayama, and N. Kumada, Spin polarization in quantum Hall state obtained by Kerr rotation spectra, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors, 2010 年 7 月 27 日, Seoul, Korea
(13) 瀬尾宗隆、伊藤博紀, 室清文, 音賢一, 光ファイバを用いた偏光干渉分光測定系の開発, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 23 日, 岡山大学津島キャンパス（岡山市）
(14)吉田高英, 音賢一, 単層グラフェンにおける電荷中性点付近の磁気抵抗, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学津島キャンパス（岡山市）
(15)長能卓哉,岡田圭介,毛利真一郎,音賢一, 室清文, ナノファイバー上に ACCVD 成長させた単層カーボンナノチューブの単分子計測, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学津島キャンパス（岡山市）
(16) 山田哲也,音賢一,室清文, ポッケルス効果による GaAs 量子ホール系の電位分布測定, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学津島キャンパス（岡山市）
(17)松田貴治,山田哲也,文堤會,音賢一,室清文,熊田倫雄,平山祥郎, Kerr 顕微鏡による $\nu=1$ 量子ホール状態の局所占有数と電流分布, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学津島キャンパス（岡山市）
(18) K. Oto, 他 5 名, Imaging of local filling factor in current flowing $\nu=1$ quantum Hall state by scanning Kerr microscope, The 10th Quantum Transport Nano-Hana Int. Workshop on Recent highlight in QHE studies, 2010年1月28日, Chiba University, Chiba, Japan
(19)T. Yoshida and K. Oto, High Field magneto-transport around Dirac point in monolayer graphene, 5th Int. Workshop on "Electronic Structure and Processes at Molecular-Based Interfaces, 2010 年 1 月 27 日, Chiba University, Chiba, Japan
(20) 音賢一, 走査型Kerr顕微鏡によるGaAs量子井戸中のスピン偏極量子ホール電流の可視化 （招待講演）, 第14回半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS14),2009年12月21日,慶應義塾大学日吉キャンパス,(東京都)
(21) K. Oto, 他 7 名, Imaging of Local Filling Factor near $\nu=1$ Quantum Hall State by Scanning Kerr Microscope in High Magnetic Fields, Joint IMR Int. Symp. High Magnetic Field Spin Science in 100T VI, 2009年12月21日,東北大学（仙台市）
(22) H. Ito, K. Muro, K. Oto, 他4名, Kerr Rotation Spectra of 2D Electrons in GaAs/AlGaAs Quantum Well, Joint IMR Int. Symp. High Magnetic Field Spin Science in 100T-VI,2009年12月21日,東北大学(仙台市)
(23) T. Yoshida and K. Oto, Magneto-transport near Dirac point in monolayer graphene, Joint IMR Int. Symp. High Magnetic Field Spin Science in 100T-

VI ,2009年12月21日,東北大学(仙台市)
(24) 吉田高英，音賢一，単層グラフェンのディラック点付近における強磁場量子輸送，第３回物性科学領域横断研究会「凝縮系科学の最前線」, 2009年11月30日，東京大学武田ホール,(東京都)
(25) 吉田高英，音賢一，グラファイト磁気キャパシタンス振動の起源，日本物理学会2009年秋季大会，2009年9月25日，熊本大学黒髪キャンパス（熊本市）
(26) 福岡大輔，永山達也，音賢一，室清文，他３名，量子ホール強磁性状態における乱雑ポテンシャルによるスピン波の崩壊，日本物理学会2009年秋季大会，2009年9月25日，熊本大学黒髪キャンパス（熊本市）
(27) 伊藤裕紀，福岡大輔，永山達也，音賢一，室清文,他３名，量子ホール２次元電子系における光学遷移の占有数依存性，日本物理学会2009年秋季大会，2009年9月25日，熊本大学黒髪キャンパス（熊本市）
(28) 三野弘文，大谷創右，音賢一，室清文，秋本良一，ZnSe/BeTe 量子井戸における光誘起 Kerr スペクトル測定,日本物理学会 2009年秋季大会，2009年9月25日，熊本大学黒髪キャンパス（熊本市）
(29) K. Oto,他 7 名, Imaging of local filling factor in current flowing $\nu=1$ quantum Hall state by scanning Kerr microscope, 18th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional Systems, 2009年7月23日, Kobe, Japan
(30)T. Yoshida and K. Oto, Graphene-like magneto-oscillations in graphite capacitor, 18th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional Systems, 2009年7月23日, Kobe, Japan
(31) D. Fukuoka, K. Oto, K. Muro,他５名, Spin relaxation mechanism in a quantum Hall ferromagnet, 18th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional Systems, 2009年7月21日, Kobe, Japan
(32) H. Ito, D. Fukuoka, K. Oto, K. Muro, 他3名, Sensitive detection of the spin polarization in a quantum Hall regime by a Kerr rotation measurement, 18th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-dimensional Systems, 2009年7月20日, Kobe, Japan

〔その他〕
音賢一、電子のスピンを見る、千葉大学大学院理学研究科・理学部NEWS、No.22, 2010年11月号, p2. http://www.s.chiba-u.ac.jp/Publicity/koho/rigakubunews/News_22.pdf

６．研究組織

(1)研究代表者
音　賢一（OTO　KENICHI）
千葉大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：30263198

(2)研究分担者
該当無し
研究者番号：

(3)連携研究者
室　清文（MURO　KIYOFUMI）
千葉大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：90112028