

IX - 4. 光ナノ物性グループ

准教授 野村 晋太郎

大学院生 7 名

【1】 量子ホール系カイラルエッジ状態のスピ分解観測（柴田、野村）[論文 1]

最近、量子ホール効果、量子スピンホール効果、量子異常ホール効果等の端状態に多くの注目が集まっている。これらの端状態では、スピン状態に依存したキャリアの輸送等の興味深い現象が起こるとされている。私達は近接場走査型光学顕微鏡を用いてスピン分裂した量子ホール端状態を空間分解して観測を行っている。近接場走査型光学顕微鏡は従来円偏光の照射にはあまり用いられてこなかった。これは標準的な光ファイバーでは偏光が保存されないことが知られていることやわずかな引っぱり歪みやねじれによって近接場プローブに複屈折を生じさせることのためである。そこで、私達は近接場プローブを作製するにあたって金属の蒸着条件を最適化すると共に集束イオンビーム(FIB)を使い軸対称に近い開口部をプローブ先端に形成した。さらにベレク補償子を用いて外部的に偏光状態を制御することにより、近接場プローブ先端から出射される光が円偏光となるよう複屈折を補償した。測定方法の概略図を図1に示す。

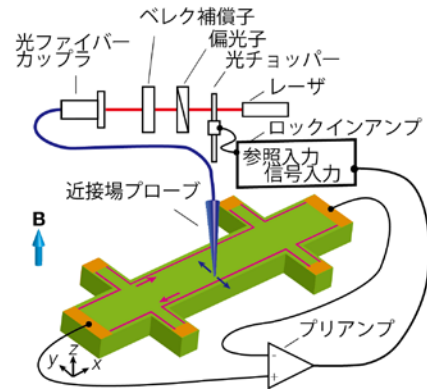


図1：円偏光照射近接場走査型光学顕微鏡を用いたカイラルエッジ状態の空間分解分光測定法の概略図。

円偏光近接場走査型顕微鏡を用いてホールバー試料に円偏光を局所的に照射し、ホールバーの電極間に生じる光電流の空間マップ図を得た。この空間マップ図により、カイラルエッジ状態にあるとされていた圧縮性液体、非圧縮性液体の分布が明らかにされた。この空間マップ図には黒の楕円で示すように上向きスピンの電子を光生成する右回り円偏光励起と下向きスピンの電子を光生成する左回り円偏光励起との間に光電流の明確な円偏光依存性が見られた。そこで、 $\partial_y V_\eta^\downarrow$, $\partial_y V_\eta^\uparrow$ をそれぞれ↓スピン、↑スピンの電子を伝導電子帯につくる円偏光を照射した場合の光電流の空間微分として

$$P_\eta = \frac{\partial_y V_\eta^\downarrow - \partial_y V_\eta^\uparrow}{|\partial_y V_\eta^\downarrow| + |\partial_y V_\eta^\uparrow|}$$

を定義し、その結果を図2に示した。 $\eta = \pm$ は磁場の符号である。図2にはLier等のモデルによるスピン非偏極非圧縮性液体の帯の位置を黒の実線で示し、本研究で導入したスピン分裂した非圧縮性液体の帯の位置を白の破線で示した。黒の実線上ではPは緑色の0に近い値を示しており、円偏光の向きによる光電流の差が小さいことを示している。これは非圧縮性液体の帯が非偏極であることと整合している。一方、白の破線上では P_η は-1若しくは+1の絶対値の大きな値を示しており、これはこの非圧縮性液体の帯がスピン分裂していることと整合している。この結果はスピン偏極した電子が局所光照射により二次元電子

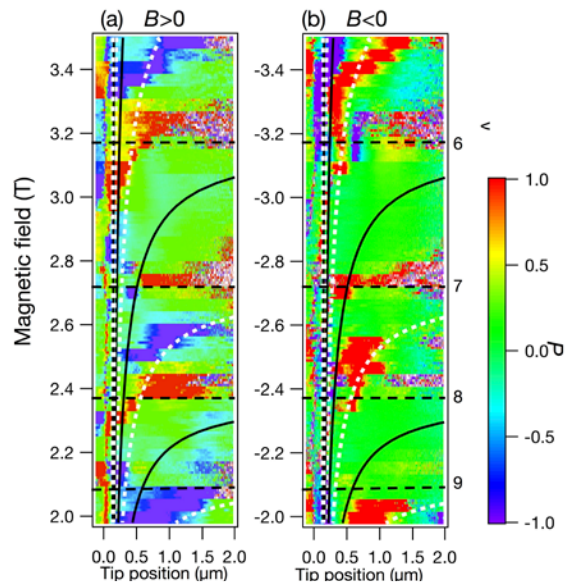


図2：(a) $B > 0$ の場合の光電流の空間微分の偏極度 P_+ 、(b) $B < 0$ の場合の偏極度 P_- [Adopted with permission from (Nano Lett. 15, 2417 (2015)). Copyright (2015) American Chemical Society.]。

系層に注入されたことを明確に示している。

以上の結果をより深く理解するために、局所スピン密度汎関数法に基づいて強磁場中のスピン自由度を含んだカイラルエッジ状態のサブバンド構造および電子密度分布を高次差分法により数値的に求めた。その結果の一例を図3に示す。代表的な例として二次元電子系のバルク状態の電子占有数 $\nu=7.4$ と $\nu=6.2$ の場合について図3に示した。この計算結果は m を整数として $2m-1 < \nu < 2m$ の場合に、スピン分裂した非圧縮性液体の帯 I_s がバルク状態とカイラルエッジ状態を隔てていることを示す。図の左端に \uparrow スピンまたは \downarrow スピンの電子が近接場プローブを用いた光局所照射によって選択的に生成される場合を考える。この場合に \uparrow スピンの電子の方が \downarrow スピンの電子よりも I_s を透過して図の右の方にあるバルク状態へ移動する確率が多いことが示された。このことによって $\partial_y V_\eta^\uparrow$, $\partial_y V_\eta^\downarrow$ の符号と図2の白の破線近傍で $|P_\eta|$ が大きいことが理解された。一方、図3において $2m < \nu < 2m+1$ の場合に、スピン非偏極の非圧縮性液体の帯 I がバルク状態とカイラルエッジ状態を隔てていることを示す。この場合、図の左端に光学的に生成された \uparrow スピンの電子と \downarrow スピンの電子が I を透過する確率に大きな差が生じず、そのため図2の黒の実線近傍で $|P_\eta| \approx 0$ であることが理解された。

以上のように、本研究によって新たに開発された円偏光近接場光学顕微鏡は、光によってスピン偏極した電子をナノメートル領域に注入可能であることを初めて実験的に示したものである。その結果、スピン非偏極の非圧縮性液体の帯とスピン分裂した非圧縮性液体の帯の分布を空間マップして示すことに成功した。この成果は、例えば、消費電力を極限まで低減させるとされるスピントロニクス素子やトポロジカル素子中のスピン偏極した電子の流れの空間分布の解明を促進し、ひいてはそれらの素子の開発に大きく貢献するものと考えられる。

本研究は低温物性グループの大塚洋一教授、産業技術総合研究所柏谷聡氏、NTT 物性科学基礎研究所山口真澄氏、田村浩之氏との共同研究である。

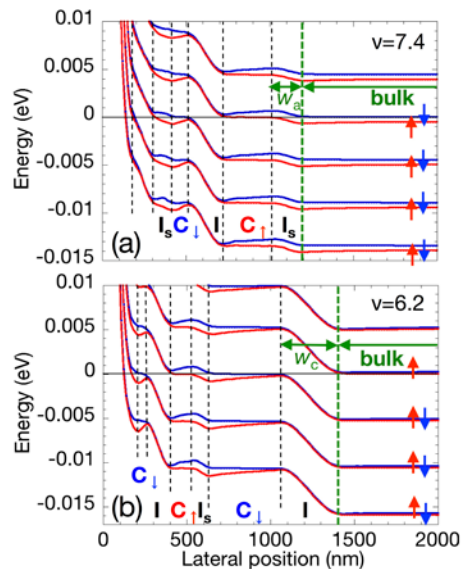


図3：局所スピン密度汎関数法に基づいた計算による強磁場中のスピン自由度を含んだカイラルエッジ状態の (a) $\nu=7.4$ と (b) $\nu=6.2$ の場合のサブバンド構造。フェルミ準位をエネルギーの原点にとった。[Adopted with permission from (Nano Lett. **15**, 2417 (2015)). Copyright (2015) American Chemical Society.]

【2】 ナノ SQUID 走査型顕微鏡を用いたヘテロ接合中電流密度の可視化（柴田、大嶋、野村）

私達のグループでは Nb 弱結合型超伝導量子干渉計 (SQUID) を用いた走査型 SQUID 顕微鏡の開発を進めている。SQUID は超高感度磁束検出器として知られているが、SQUID 顕微鏡の多くは空間分解能が $10\mu\text{m}$ 以上であった。ナノメートル構造試料の物性測定のためにはより高い空間分解能の SQUID 顕微鏡が求められていた。そこで、収束イオンビーム (FIB) 加工によって SQUID のループサイズを微細化し、さらに SQUID プローブの先端部の研磨により SQUID と測定対象との間の距離の最小化を図り、空間分解能の向上を目的に研究を実施した。図4にこの

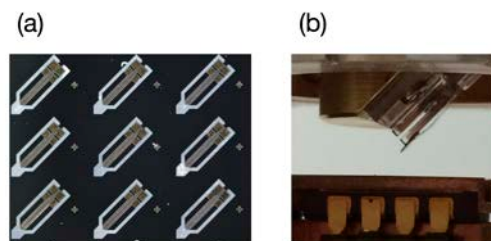


図4：(a) レーザリソグラフィと深堀エッチングにより作製された SQUID プローブ基板。(b) チューニングフォークに取り付けられた SQUID プローブとチップキャリア。

ようにして作製された SQUID プローブの写真を示す。通常の Nb 弱結合型 SQUID ではその電流-電圧特性にヒステリシスが見られ、走査中の各点において電流をスウィープして臨界電流 I_c を測定する必要があった。本研究では、SQUID の構造の工夫によりヒステリシスが小さい SQUID プローブを作製し、SQUID を磁束-電圧変換素子として動作させることに成功し、走査による磁束イメージの取得が容易になった。図 5 に文献で知られている最先端の磁気顕微鏡、および私達の走査型 SQUID 顕微鏡の磁場感度と空間分解能の関係を示す。空間分解能を高くすると磁場感度が低下する傾向を見て取ることができる。磁気顕微鏡としては左下に位置するものが性能が高いとみなすことができるが、磁場感度-空間分解能の関係の中で私達の走査型 SQUID 顕微鏡はほぼベストの性能を示していることがわかる。

GaAs/AlGaAs 変調ドープヘテロ接合ホールバー構造試料中を流れる電流のつくる磁場分布の空間分解測定を実施し、二次元電流密度ベクトル分布を得た。図 6 に直線上に電流が流れる場合と、ホールバー内にて電流経路が折れ曲がる場合とについて、試料中を流れる電流のつくる磁場分布を測定した例を示す。測定により得られた磁場分布からフーリエ解析により試料中の二次元電流密度分布 $J_x(x, y)$, $J_y(x, y)$ を再構成した。この結果の主な特徴は、電流密度分布のモデル計算により再現された。得られた結果は試料中電子の平均自由行程 $8.7 \mu\text{m}$ で説明されるバリステックな伝導を反映していることを示した。この新たに開発された走査型 SQUID 顕微鏡はトポロジカル素子や超伝導体中の電流密度分布の解明に貢献するものであると考えられる。

本研究は産業技術総合研究所柏谷聡氏のグループ、東京理科大学教授高柳英明氏のグループとの共同研究である。

【3】ベクトル波形整形波の二次元電子系試料への照射効果（大嶋、野村）

二次元電子系中の量子ホール状態の実現に磁場は必須ではなく、時間反転対称性を破ることにより生じ得ることが Haldane によって示されていた。最近、トポロジに起因した量子状態への理解が深まり、円偏光照射による半導体のトポロジカル絶縁体への転移や光照射による無磁場下での量子ホール状態等の理論的提案が相次いでなされ、円偏光照射による新たな量子状態の生成が注目を集めている。これまでに私達のグループでは、近接場走査型光学顕微鏡を用いた量子ホール端状態の研究や極低温における分数量子ホール状態の研究を行い、量子ホール状態の解明に光学的手法が有効であることを示して来た。近年の超高速パルスレーザー技術の急速な進歩に伴い、THz 光発生は実験室レベルでの物性研究に適用されるようになってきた。そこで波長可変な円偏光パルス光を二次元電子系試料

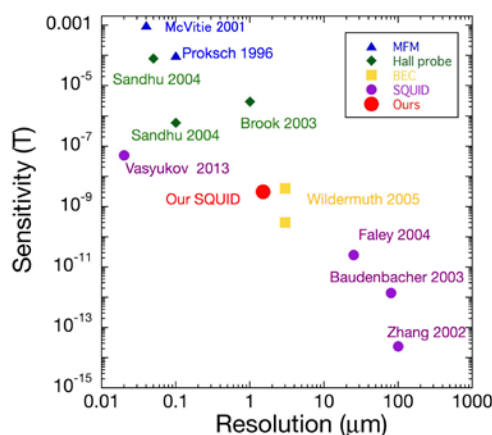


図 5 : 磁気顕微鏡における磁場感度-空間分解能の関係。

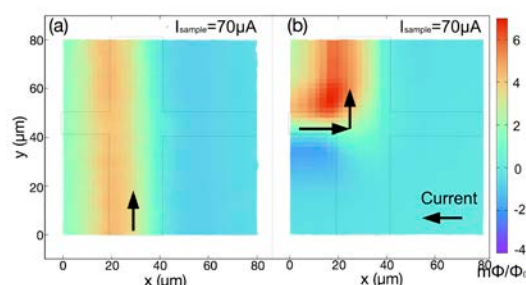


図 6 : GaAs/AlGaAs 変調ドープヘテロ接合ホールバー構造試料中を流れる電流のつくる磁場分布のマップ図。試料温度は 4 K、試料を流れる電流は $70 \mu\text{A}$ 。(a)ホールバー中を直線的に電流が流れる場合、(b)ホールバー中で電流経路が折れ曲がる場合のプロット。

に照射することにより、THz 回転電場を印加して円偏 THz 光照射による無磁場下での量子ホール状態の端緒を得ることを目的に本研究を開始した。

本年度、フェムト秒パルス中の $+45^\circ$, -45° の 2 つの偏方向成分の位相を独立に制御し、出力波の偏方向状態を制御するパルスシェーピングの一種であるベクトル波形整形波を用いた。この手法により中心周波数、偏方向状態、スペクトルバンド幅が制御された THz 帯の変調波を得ることが可能である。図 7 に示すように、このベクトル波形整形波を低温クライオスタット中の二次元電子系ホールバー構造試料に照射し、ホールバー電極間に誘起される光電流のベクトル波形整形波の電場波形のねじれの向きに対する依存性を調べた。その結果 THz 回転電場の振動数と向きに依存した光電流を観測した。

本研究は東京農工大学三沢和彦氏のグループとの共同研究である。

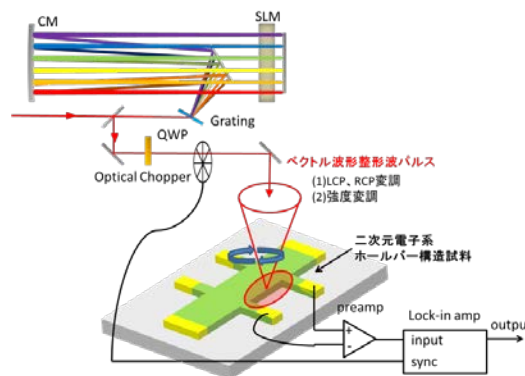


図 7：二次元電子系へのベクトル波形整形波照射・測定系の概略図。

【4】 遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の光物性（塚本、渡邊、野村）

最近、原子層数層の薄膜が得られるようになった遷移金属ダイカルコゲナイド二次元層状物質は、グラフェンと異なり有限のバンドギャップをもち、室温で強い発光が観測されたことを契機に注目を集めている。また、空間反転対称性の破れから有限のバンドギャップをもち、またスピン=軌道相互作用が大きいことが知られている二次元層状物質である。

遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の一種である MoS_2 薄膜をポリジメチルシロキサンフィルムを用いた転写により六方晶窒化ホウ素上に転写して薄膜試料を作製した。作製した薄膜試料の光学顕微鏡像の一例を図 8 に示す。空間反転対称性の破れに起因する第二次高調波発生強度の層数依存性、発光ピークエネルギーの層数依存性を調べ、単層から 3 層の薄膜試料の層数を決定できることを示した。また、円偏光励起発光測定のための顕微分光セットアップを構築し、単層 MoS_2 薄膜の円偏光励起発光スペクトルを得た。二次元層状物質である MoS_2 薄膜の層数を発光ピークエネルギーと第二次高調波発生強度から迅速に非破壊的に決定できることを示した。

また、 MoS_2 薄膜の光伝導特性の研究を行った。光伝導特性の測定のためには、 MoS_2 薄膜に電極を形成する必要があるが、接触抵抗が高いことが問題となっていた。また、 MoS_2 薄膜が意図せずにドーパされた状態になっており光非照射時の暗電流が大きいことが問題となっていた。これらの問題の解決のために、本研究では 1, 2 ジクロロエタンに 17～72 時間浸して化学ドーピングをして接触抵抗の低減を図った。また、裏面ゲート電極により、 MoS_2 薄膜中キャリア密度を制御し、暗電流の低減を図った。実際、1, 2 ジクロロエタンに浸したことによる空乏層長の低減によるソースドレイン電流の増大を観測し、裏面ゲート電極によりキャリア密度

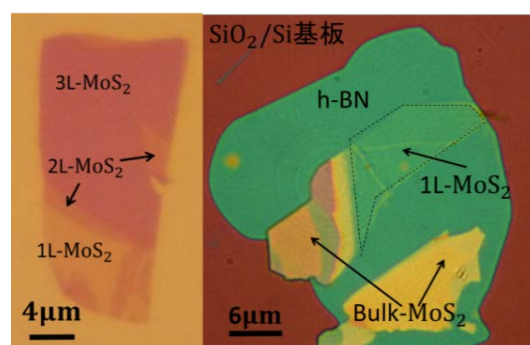


図 8： SiO_2/Si 基板上に作製した MoS_2 薄膜試料（左）および六方晶窒化ホウ素上に作製した MoS_2 薄膜試料（右）の光学顕微鏡写真。

の制御が可能であることを示した。これらの手法により、光励起強度が 62 nW の場合に 3.2 A/W の受光感度を得た。これは従来の報告の 1.04 A/W より大きな受光感度であり、電極のショットキー障壁の高さの低減の効果が現れたものと考えられる。また、裏面電極制御によって暗電流が低減され、on-off 比として 100 倍以上を得ることに成功した。

<論文>

1. Syuhei Mamyouda, Hironori Ito, Yusuke Shibata, Satoshi Kashiwaya, Masumi Yamaguchi, Tatsushi Akazaki, Hiroyuki Tamura, Youiti Ootuka, and Shintaro Nomura: "Circularly polarized near-field optical mapping of spin-resolved quantum Hall chiral edge states", *Nano Lett.* **15**, 2417 (2015).
2. Ryosuke Ishiguro, Eiichiro Watanabe, Daisuke Sakuma, Shogo Tsuchiya, Yusuke Nago, Hirotaka Osato, Daiju Tsuya, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, Hideaki Takayanagi, Yoshiteru Maeno: "Development of nano and micro SQUIDs based on Al tunnel junctions", *Journal of Physics: Conference Series* **568**, 022019 (2014).
3. Shogo Tsuchiya, Misa Matsuno, Ryosuke Ishiguro, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, Hideaki Takayanagi, Yoshiteru Maeno: "Magnetization of a Mesoscopic Superconducting Sr_2RuO_4 Plate on Micro-dc-SQUIDs" *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, 094715, (2014).

数理物質科学研究科物理学専攻修士論文（2015 年 3 月）

1. 大嶋 勇輝：「ベクトル波形整形波の二次元電子系試料への照射効果」
2. 塚本 知九馬：「顕微円偏光励起による遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の発光スペクトルの研究」
3. 渡邊 寛之：「裏面ゲート付き薄膜 MoS_2 の光伝導特性の研究」

<国際会議>

1. Y. Shibata and S. Nomura: "Imaging of magnetic flux induced by current in a Hall-bar structure with scanning Nb-SQUID microscope", *Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS'14)* (Tsukuba, July, 2014).
2. Ryosuke Ishiguro, Eiichiro Watanabe, Daisuke Sakuma, Shogo Tsuchiya, Yusuke Nago, Hirotaka Osato, Daiju Tsuya, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, Hideaki Takayanagi, Yoshiteru Maeno: "Development of nano and micro SQUIDs based on Al tunnel junctions", *27th International Conference on Low Temperature Physics (Buenos Aires, Argentina, Aug. 2014)*.
3. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, T. Ohira, L. Yoshikawa, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Real-space Mapping of Spin-resolved Quantum Hall Chiral Edge States by Near-field Scanning Optical Microscopy", *The 2014 International Conference on Solid State Devices and Materials, H-3-5* (Tsukuba, Sep., 2014).
4. Y. Shibata, Y. Osima, H. Kashiwaya, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, H. Takayanagi and S. Nomura: "Development of Scanning dc-SQUID system for local magnetic imaging", *The 2014 International Conference on Solid State Devices and Materials* (Tsukuba, Sep., 2014).
5. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Imaging of spin-split incompressible strips in the quantum Hall chiral edge state", *the International Conference on Topological Quantum Phenomena (TQP2014)* (Kyoto, Dec., 2014).
6. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, M. Korkusinski, and P. Hawrylak: "Quasiexciton-Quasielectron Trion Emission in the Fractional Quantum Hall Effect Regime", *International Symposium on Quantum System and Nuclear Spin Related Phenomena 2015 (Miyagi-Zao, Feb., 2015)*.

<講演>

1. 野村晋太郎、山口真澄、田村浩之、赤崎達志、平山祥郎、M. Korkusinski, P. Hawrylak, 「分数量子ホール効果領域における準励起子-準電子発光」物性研短期研究会「スーパーマターが拓く新量子現象」（2014 年 4 月）

2. 野村晋太郎、「半導体二次元電子系へのベクトル整形パルス照射について」東京農工大学
科研費セミナー（2014年7月）
3. 野村晋太郎、「 $\nu=1/4$ 近傍における三重項準励起子からの発光の消失」日本物理学会秋季大
会、（2014年9月）
4. 柴田祐輔,大嶋勇輝,柏谷裕美,石黒亮輔,柏谷聡,高柳英明,野村晋太郎 「走査型 Nb-SQUID
顕微鏡を用いた ^4He 無冷媒冷凍機中の局所磁束観察」日本物理学会秋季大会（2014年9月
）
5. 野村晋太郎、「極低温円偏光走査型近接場光学顕微鏡によるスピン分裂非圧縮性液体の観
測」平成26年度東北大プロジェクト研究会「非平衡スピン・ゆらぎの精緻な制御と観測に
よる新規ナノデバイスの開拓研究」（2014年11月）
6. 柴田 祐輔、「走査型 Nb 製弱結合型ナノ SQUID 顕微鏡を用いた局所磁束観察」第10回
つくばナノテク拠点シンポジウム（2015年3月）
7. 篠崎智也,佐藤太一,永合祐輔,石黒亮輔,柏谷聡,柏谷裕美,野村晋太郎,前野悦輝,
高柳英明、「マイクロ SQUID を用いた Sr_2RuO_4 微小片の磁場侵入特性の研究」日本物理学
会第70回年次大会（2015年3月）
8. 柴田祐輔,大嶋勇輝,柏谷裕美,石黒亮輔,柏谷聡,高柳英明,野村晋太郎 「走査型 Nb-SQUID
顕微鏡を用いた ^4He 無冷媒冷凍機中の局所磁束観察 II」日本物理学会第70回年次大会(2015
年3月)。
9. 大嶋勇輝,伊東駿,野村晋太郎,三沢和彦、「GaAs 単一ヘテロ接合ホールバーへのベクト
ル波形整形波照射効果」日本物理学会第70回年次大会（2015年3月）

<外部資金>

1. 科学研究費 新学術領域研究（研究領域提案型）研究分野：対称性の破れた凝縮系における
トポロジカル量子現象（領域代表：前野 悦輝）「量子ホール系カイラルエッジ状態の空間
分解分光研究」研究課題番号：25103704，平成26年度：直接経費 2,300,000 円（研究
代表者：野村 晋太郎）
2. 科学研究費 挑戦的萌芽研究「ベクトル整形パルス励起による端電流制御」研究課題番号：
26610079，平成26年度：直接経費 1,700,000 円（研究代表者：野村 晋太郎）