

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540333

研究課題名(和文)多端子量子ドット系の理論研究：制御可能なスピホール効果の提案

研究課題名(英文)Theoretical study of multi-terminal quantum dot: proposal of tunable spin Hall effect

研究代表者

江藤 幹雄(ETO, Mikio)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：00221812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：半導体量子ドットに3本以上のリードを接続した多端子系の示す物理現象を理論的に研究した。(1) スピン軌道相互作用がはたらく量子ドット多端子系では、スピホール効果によってスピン分極電流が得られること、その分極率はゲート電圧によって電氣的に制御可能であることを示した。(2) 微小なリングに埋め込まれた量子ドットの近藤効果を解析し、近藤効果のリングサイズ依存性、輸送特性における非弾性過程、多端子系で検出される電子の位相情報を明らかにした。(3) InAs量子ドットのg因子の異方性、およびInSbナノワイヤで観測される異常ジョセフソン効果をスピン軌道相互作用を取り入れることで解明した。

研究成果の概要(英文)：Physical phenomena have been theoretically investigated in multi-terminal quantum dots fabricated on semiconductors. (1) We have found the generation of spin-polarized current due to the spin Hall effect, using a multi-terminal quantum dot with spin-orbit interaction. The spin-polarization ratio is electrically tunable via gate voltages. (2) The Kondo effect has been studied in a quantum dot embedded in a small ring. We have elucidated the ring-size dependence of the Kondo effect, inelastic processes in transport properties, and information on the electron phase detected in the multi-terminal geometry. (3) The anisotropic g-factors in InAs quantum dot and anomalous Josephson effect observed in InSb nanowires have been explained, taking into account the spin-orbit interaction.

研究分野：物性理論

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：メソスコピック系 量子ドット スピンエレクトロニクス スピン軌道相互作用 近藤効果 スピホール効果 ナノワイヤ ジョセフソン接合

1. 研究開始当初の背景

半導体の微細加工で作製される量子ドットはクーロンブロック現象を示し、ゲート電圧によって電子数を1個ずつ制御できるという著しい特徴を持つ。外部磁場による電子の離散エネルギー準位の変化、縮退軌道での高スピン状態(フント則)の観測も報告されている。量子ドット中にスピンの局在するときに現れる近藤効果は、実験、理論の両面から研究が進展している。

量子ドット中の電子状態が精度良く調べられるのは、2つのリード(ソース、ドレイン)をトンネル結合で接続し、電気伝導測定ができるためである。このような2端子の電流測定は大きな成果を収めてきたが、伝導に伴う位相差の観測実験では、オンサガーの相反定理のために得られる情報が制限される。最近スピンエレクトロニクスへの応用から注目されているスピンホール効果も、2端子測定では観測されない(ただし、各リード中の伝導チャンネル数が1の場合)。3端子以上を付けると自由度が増え、例えばトンネル結合を電気的に変えることで位相緩和を制御する、等の新しい可能性が生まれる。

多端子量子ドットの実験研究は、国内外ともに数が少ない。国外では非平衡近藤効果の観測が報告され [De Franceschi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 156801]、国内では岡崎らが2重量子ドットの3端子系を作製したことが目につく程度である [Y. Okazaki *et al.*, Phys. Rev. B **84** (2011) 161305(R)]。理論研究では、メソスコピック系の研究の初期に Buttiker が Landauer 公式を多端子系に拡張したが、その後の発展は乏しい。特に電子間相互作用やスピン軌道相互作用も含めた系統的な研究はほとんどない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、多端子量子ドット系の示す新しい物理現象を研究し、メソスコピック系物理学の新分野を開拓することである。具体的には、スピンエレクトロニクスの分野で注目されるスピン軌道相互作用の効果、重要な多体問題である近藤効果、量子情報処理への応用にとって必要不可欠な位相緩和過程の解明に焦点を当てる。

(1) 多端子量子ドットを用いた制御可能なスピンホール効果の提案：スピンホール効果は、スピン軌道相互作用によって電場に垂直方向にスピン分極流が生成される現象である。InAs, InSb 等の狭ギャップ半導体では大きなスピン軌道相互作用がはたらくが知られているが、その量子ドットに3本以上のリードを付けた系のスピン輸送特性を理論的に調べる。スピン分極電流の生成と制御、その検出方法を提案する。

(2) 多端子量子ドットにおける近藤効果：クーロンブロックによって量子ドット中

に奇数個の電子が閉じ込められたとき、そのスピン $S=1/2$ とリード間のトンネル結合によって多体のスピン-重項状態が作られ、その結果、電気伝導に近藤効果が現れる。量子ドットに多端子を接続したときの近藤効果によるスピン輸送特性を明らかにする。

(3) 量子ドットを通る電子の位相緩和の多端子測定による解明：量子ドット中の電子スピン、2重量子ドットの電荷状態等の量子状態を量子ビットに用いる量子計算機が提案されている。量子状態の重ね合わせが壊れる位相緩和の解明は、量子ドットの量子情報処理への応用において重要なテーマである。量子ドットを通る電子の位相差は、アハラノフ・ボームリングに量子ドットを埋め込んだ系で測定できそうであるが、2端子系ではオンサガーの相反定理による制約のために困難である。その多端子系による位相緩和の測定を定式化する。特に近藤領域における位相緩和の解明と観測方法の提案をおこなう。

3. 研究の方法

まず有限バイアス下における多端子量子ドットの電気伝導特性を非平衡グリーン関数法(Keldysh形式)を用いて定式化する。従来の2端子系での計算手法を多端子系に拡張し、電子間相互作用やスピン軌道相互作用を取り入れる。

グリーン関数による解析計算に数値計算を併用し、実際に作製されている半導体ナノ構造の特性を明らかにする。空間を離散化したタイト・バインディング・モデルを用いて量子閉じ込め構造、ゲート電極によるトンネル障壁、スピン軌道相互作用等を表す。リカーゾン法を用いて輸送特性を評価する。

量子ドット複合系における近藤効果の計算では、我々が以前開発した「量子ドット+1本のリード」系に帰着させる方法(R. Yoshii and M. Eto, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 123714)を適用する。帰着したモデルにはスケーリング法、slave-boson 平均場近似、フェルミ流体論等、近藤効果に対する従来の理論手法を用いることが可能である。

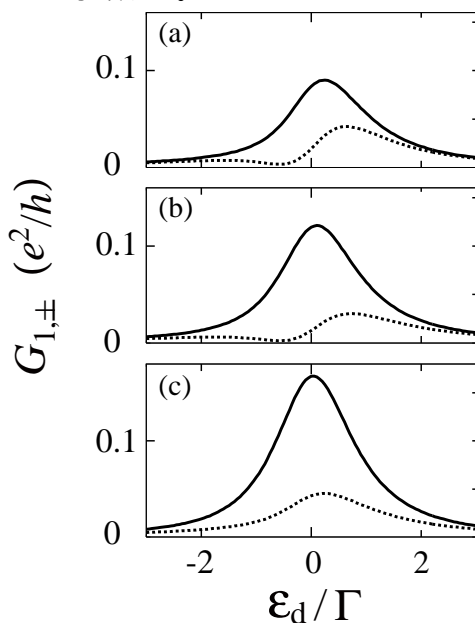
4. 研究成果

(1) 多端子量子ドット系におけるスピンホール効果

非平衡グリーン関数法を用いて、多端子量子ドットにおけるスピンホール効果の定式化をおこなった。最小モデルとして量子ドット中の2つの準位を考慮し、InAs等の狭ギャップ半導体ではたらく強いスピン軌道相互作用を取り入れた。1つの端子から非分極の電流が入射したとき、残りの端子へ出力電流とスピン分極の計算式を導出した。

3端子系におけるクーロン振動(量子ドット中のエネルギー準位をゲート電圧で変えるときに現れる電流のピーク構造)の計算結果を図示する。横軸は量子ドット中の離散エ

エネルギー準位（2準位の平均値）を線幅で規格化したもの、縦軸は端子1から端子2に流れる電流のスピ成分ごとの電気伝導度（実線と破線）である。(a)から(c)まで、端子3のトンネル結合の強さを徐々に大きくしている。端子2に流れ出た電流に大きなスピ分極が生じること、端子3のトンネル結合を変えることでスピ分極率を制御できることがわかる。この結果は、多端子量子ドット系がスピ注入デバイスに応用できることを示唆する。



定量的には次のことが示された。(i) 2端子系ではスピホール効果は生じず、スピ分極電流を作ることができない。(ii) 3端子系で次の条件が満たされるとき、共鳴トンネルによってスピホール効果が増大する：端子1、2のトンネル結合による線幅に比べて量子ドット中の準位間隔が小さいこと（図では準位間隔=15）、端子3のトンネル結合による線幅がスピ軌道相互作用の大きさと同程度であること、である。

生成されたスピ分極電流の検出方法として、「逆スピホール効果」を利用した電流測定を提案した。端子1を強磁性体にして量子ドットにスピ分極流を注入するとき、端子2に流れ出る電流を測定することでスピホール効果が調べられることを示した。

以上の結果は、クーロン振動の電流ピークにおけるスピホール効果である。クーロンブロッケード領域（クーロン振動のピークとピークの間）では近藤効果によって多体の共鳴状態がフェルミ準位に形成される。近藤温度が準位間隔より大きいとき、2準位が絡んだSU(4)近藤効果が生じる。このとき多体の共鳴準位を介してスピホール効果が著しく増大することを見出した。

(2) InAs量子ドットのg因子の異方性の解明
物質中の電子スピに伴う磁気モーメントの大きさはg因子で特徴付けられる。自己

成長型のInAs量子ドットに磁場をかけた実験によってg因子の大きな方向依存性が報告された[樽茶グループ(東大); S. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 246801]。このg因子の異方性の原因として、量子ドット中の大きいスピ軌道相互作用に着目した。量子ドットの異形状をモデル化し、Rashba型のスピ軌道相互作用を取り入れて数値計算をおこなった。計算結果は実験結果と定性的な一致を見た。

(3) アハラノフ・ボーム(AB)リングに埋め込んだ量子ドットにおける近藤効果と弾性・非弾性輸送過程の観測

ABリングは微小なリング構造をしたデバイスで、リングを貫く磁束を変えたときにAB効果による干渉効果が観測される。ABリングに量子ドットを埋め込んだ系では、近藤効果による輸送特性、位相差、位相緩和への影響が電気伝導を通じて観測される。

この系の近藤効果をスケールリング法を用いて調べた。この系には電荷揺らぎの遮蔽長 L_c とスピ揺らぎの遮蔽長 L_k の2つの特徴的な長さがあることを示した。後者は近藤遮蔽雲(多体のスピ一重項の波動関数)の大きさとして知られている。リングサイズ L と L_c, L_k の大小関係によって、近藤温度 T_k の異なる解析解を得た。 L が近藤遮蔽雲よりも小さいとき($L \ll L_c \ll L_k$, または $L_c \ll L \ll L_k$) T_k はリングを貫く磁束に大きく依存するが、逆の場合($L_c \ll L_k \ll L$)は T_k に磁束依存性は見られない。我々の理論は、電気伝導測定によって多体の波動関数である近藤遮蔽雲が観測可能であることを意味する。

量子ドットの近藤領域における弾性過程と非弾性過程の分離方法を開発した。絶対零度での電気伝導には弾性過程のみが寄与するが、有限温度では電子間相互作用に起因する非弾性過程も生じる。非弾性過程は位相緩和の一因となるため、その解明は量子情報処理への応用上重要である。我々は弾性過程の電気伝導への寄与を散乱問題に基づいて定式化し、全電気伝導度とそれとの差として非弾性過程の寄与を評価した。非弾性過程の寄与は温度の上昇と共に顕著となり、近藤温度の近傍で最大になる。さらに温度を上げるとその寄与は小さくなることがわかった。

量子ドットを埋め込んだ微小なリングを多端子に接続した系において近藤効果を調べた。この系は樽茶グループによって実験的に調べられ、2端子系での相反定理による制約を受けることなく、量子ドットを透過する電子の位相を測定できることが示されている(S. Takada *et al.*, arXiv:1311.6884)。我々が以前開発した量子ドット複合系を扱う手法が、多端子系にも適用できることがわかった。その手法によって、近藤温度 T_k の磁

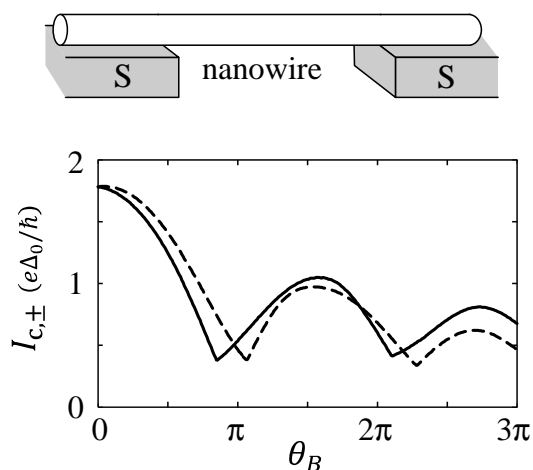
束依存性、および $T \ll T_K$, $T \gg T_K$ での電気伝導度の解析式を導出した。多端子系で検出される電子の位相情報を明らかにした。

(4) 半導体ナノワイヤにおける異常ジョセフソン効果の解明

Kouwenhoven グループ (オランダ、デルフト工科大学) の実験によって、InSb ナノワイヤを2つの超伝導体で挟んだ系が調べられ、特異なジョセフソン効果が観測された。我々は、ナノワイヤではたらく強いスピン軌道相互作用を取り入れ、このジョセフソン接合の性質を理論的に調べた。

まず、ナノワイヤ中のスピン軌道相互作用、不純物散乱、および磁場中のゼーマン効果を1つの散乱体で表すモデルを採用した。超伝導体間の位相差がないときに超伝導電流が流れる異常ジョセフソン効果と臨界電流の方向依存性を導出した。またチャンネル数が1のときに超伝導電流の解析的な表式を得た。

次に、擬1次元のナノワイヤを離散化したタイト・バインディング・モデルを数値的に調べ、上述の散乱体モデルの正当性を確認した。磁場と共に超伝導の臨界電流がキックを伴って変化すること、臨界電流が電流の方向によって異なること (図: 点線と破線がそれぞれ正負の方向に対応、横軸は磁場に比例するパラメーター) を示した。この振舞いは実験結果と定性的に一致する。



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 26 件)

- (1) T. Yokoyama, M. Eto, and Yu. V. Nazarov, "Anomalous Josephson effect induced by spin-orbit interaction and Zeeman effect in semiconductor nanowires," *Phys. Rev. B*, Vol. 89 (2014) 195407/1–14; 査読有, doi: 10.1103/PhysRevB.89.195407
- (2) T. Yokoyama, M. Eto, and Yu. V. Nazarov, "Effect of spin-orbit interaction on supercurrent in

semiconductor nanowire," *JPS Conf. Proc.*, Vol. 1 (2014) 012023/1–4; 査読有, doi: 10.7566/JPSCP.1.012023

- (3) T. Yokoyama, M. Eto, and Yu. V. Nazarov, "Asymmetric current-phase relation due to spin-orbit interaction in semiconductor nanowire Josephson junction," *AIP conf. proc.*, Vol. 1566 (2013) 423–424; 査読有, doi: 10.1063/1.4848466
- (4) R. Yoshii, R. Sakano, M. Eto, and I. Affleck, "Inelastic transport through Aharonov-Bohm interferometer in Kondo regime," *AIP conf. proc.*, Vol. 1566 (2013) 295–296; 査読有, doi: 10.1063/1.4848402
- (5) R. Okuyama, M. Eto, and T. Brandes, "Lasing and antibunching of optical phonons in semiconductor double quantum dots," *New J. Phys.*, Vol. 15 (2013) 083032/1–27; 査読有, doi: 10.1088/1367-2630/15/8/083032
- (6) T. Yokoyama, M. Eto, and Yu. V. Nazarov, "Josephson current through semiconductor nanowire with spin-orbit interaction in magnetic field," *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 82 (2013) 054703/1–9; 査読有, doi: 10.7566/JPSJ.82.054703
- (7) R. Okuyama, M. Eto, and T. Brandes, "Optical phonon lasing in semiconductor double quantum dots," *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 82 (2013) 013704 /1–4; 査読有, doi: 10.7566/JPSJ.82.013704
- (8) T. Yokoyama and M. Eto, "Generation of spin-polarized current using multiterminal quantum dot with spin-orbit interaction," *Phys. Rev. B*, Vol. 86 (2012) 205305/1–10; 査読有, doi: 10.1103/PhysRevB.86.205305
- (9) R. Yoshii, M. Eto, and I. Affleck, "Decoherence induced by inelastic scattering in Aharonov-Bohm ring with embedded quantum dot," *J. Phys.: Conf. Series*, Vol. 400 (2012) 042076/1–4; 査読有, doi: 10.1088/1742-6596/400/4/042076
- (10) T. Yokoyama and M. Eto, "Two-terminal spin filter using quantum dot with spin-orbit interaction in magnetic field," *J. Phys.: Conf. Series*, Vol. 400 (2012) 042075/1–4; 査読有, doi: 10.1088/1742-6596/400/4/042075
- (11) R. Okuyama and M. Eto, "Superradiance in transport through ensemble of double quantum dots," *J. Phys.: Conf. Series*, Vol. 400 (2012) 042049/1–4; 査読有, doi: 10.1088/1742-6596/400/4/042049

- (12) J. Kushihara, R. Okuyama, and M. Eto, “Coherent and incoherent current drag in coupled quantum dots,” J. Phys.: Conf. Series, Vol. 400 (2012) 042037/1–4; 査読有, doi: 10.1088/1742-6596/400/4/042037
- (13) S. Naya and M. Eto, “Negative magnetoresistance in quantum-dot spin valve in cotunneling regime,” AIP conf. proc., Vol. 1399 (2011) 687–688; 査読有, doi: 10.1063/1.3666563
- (14) T. Yokoyama and M. Eto, “Spin Hall effect enhanced by Kondo resonance in semiconductor quantum dot,” AIP conf. proc., Vol. 1399 (2011) 647–648; 査読有, doi: 10.1063/1.3666543
- (15) R. Okuyama, M. Eto, and H. Hyuga, “Aharonov-Bohm effect on trion and biexciton in type-II semiconductor quantum dot,” AIP conf. proc., Vol. 1399 (2011) 415–416; 査読有, doi: 10.1063/1.3666430
- (16) T. Yokoyama and M. Eto, “Efficient spin filter using multi-terminal quantum dot with spin-orbit interaction,” Nanoscale Research Lett., Vol. 6 (2011) 436/1–7; 査読有, doi: 10.1186/1556-276X-6-436
- (17) R. Yoshii and M. Eto, “Analytical expression of Kondo temperature in quantum dot embedded in Aharonov-Bohm ring,” Nanoscale Research Lett., Vol. 6 (2011) 604/1–5; 査読有, doi: 10.1186/1556-276X-6-604
- (18) R. Okuyama, M. Eto, and H. Hyuga, “Magnetoluminescence from trion and biexciton in type-II quantum dot,” Nanoscale Research Lett., Vol. 6 (2011) 351/1–6; 査読有, doi: 10.1186/1556-276X-6-351
- (19) R. Okuyama, M. Eto, and H. Hyuga, “Optical Aharonov-Bohm effect on Wigner molecules in type-II semiconductor quantum dots,” Phys. Rev. B Vol. 83 (2011) 195311/1–9; 査読有, doi: 10.1103/PhysRevB.83.195311
- (20) R. Yoshii and M. Eto, “Scaling analysis of Kondo screening cloud in a mesoscopic ring with an embedded quantum dot,” Phys. Rev. B, Vol. 83 (2011) 165310/1–14; 査読有, doi: 10.1103/PhysRevB.83.165310
- (21) A. Ueda, O. Entin-Wohlman, M. Eto, and A. Aharony, “Phonon spectroscopy by electric measurements of coupled quantum dots,” Phys. Rev. B, Vol. 82 (2010) 245317/1–9; 査読有, doi: 10.1103/PhysRevB.82.245317
- (22) M. Eto and T. Yokoyama, “Quantum dot spin filter in resonant tunneling and Kondo regimes,” J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 79 (2010) 123711/1–4; 査読有, doi: 10.1143/JPSJ.79.123711
- (23) T. Yokoyama and M. Eto, “Spin filter due to spin Hall effect with axially asymmetric potential,” Physica E, Vol. 42 (2010) 956–959; 査読有, doi: 10.1016/j.physe.2009.10.061
- (24) R. Yoshii and M. Eto, “Magnetic flux and gate-voltage dependence of Kondo effect in quantum dot embedded in Aharonov-Bohm ring,” Physica E, Vol. 42 (2010) 856–859; 査読有, doi: 10.1016/j.physe.2009.11.121
- [学会発表](計 64 件)
- (1) 江藤幹雄「半導体ナノ構造におけるスピン分極電流の生成と制御」応用物理学会北海道支部講演会、2014年3月13日、札幌(招待講演)
- (2) T. Yokoyama, M. Eto, and Yu. V. Nazarov, “Anomalous Josephson effect in semiconductor nanowire with strong spin-orbit interaction and Zeeman effect,” Annual APS (American Physical Society) March Meeting, 2014年3月6日, Denver, CO (米国)
- (3) T. Yokoyama, M. Eto, and Yu. V. Nazarov, “Numerical study of anomalous Josephson effect in semiconductor nanowire with strong spin-orbit interaction,” International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2013, 2013年11月27日、厚木
- (4) 横山知大、多々良源、江藤幹雄「半導体ナノワイヤにおける異常ジョセフソン効果の数値計算」日本物理学会2013年秋季大会、2013年9月25日、徳島
- (5) M. Eto, “Optical phonon lasing and antibunching in semiconductor double quantum dot,” 3rd Summer School on Semiconductor/Superconducting Quantum Coherence Effects and Quantum Information, 2013年9月4日、那須(招待講演)
- (6) T. Yokoyama, M. Eto, and Yu. V. Nazarov, “Anomalous supercurrent due to spin-orbit interaction in one dimensional semiconductor nanowire,” VietNam 2013, 2013年8月7日、Quy-Nhon, Vietnam (招待講演)
- (7) T. Yokoyama, M. Eto, and Yu. V. Nazarov, “Effect of spin-orbit interaction on supercurrent in semiconductor nanowire,” 12th Asia Pacific Physics Conference, 2013年7月15日、千葉
- (8) 横山知大、空保亜莉沙、江藤幹雄「半導

体ナノワイヤにおける QPC 構造とジョセフソン電流への影響」日本物理学会第 68 回年次大会、2012 年 3 月 26 日、広島

- (9) M. Eto, “Kondo screening cloud in an Aharonov-Bohm ring with an embedded quantum dot,” 3rd Japan-Israel binational workshop on quantum phenomena, 2013 年 3 月 11 日、沖縄 (招待講演)
- (10) 横山知大、江藤幹雄、Yuli V. Nazarov 「半導体ナノワイヤのジョセフソン接合におけるスピン軌道相互作用の効果」日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 21 日、横浜
- (11) T. Yokoyama, M. Eto, and Yu. V. Nazarov, “Asymmetric current-phase relation due to spin-orbit interaction in semiconductor nanowire Josephson junction,” 2012 年 8 月 2 日, Zürich, Switzerland
- (12) R. Yoshii, R. Sakano, M. Eto, and I. Affleck, “Inelastic transport through Aharonov-Bohm interferometer in Kondo regime,” 2012 年 8 月 2 日, Zürich, Switzerland
- (13) T. Yokoyama, M. Eto, and Yu. V. Nazarov, “Andreev levels in semiconductor nanowire Josephson junction with strong spin-orbit interaction,” 17th International Conference Superlattice, Nanostructures and Nano-devices, 2012 年 7 月 26 日, Dresden, Germany
- (14) M. Eto, “Optical phonon lasing in semiconductor double quantum dots,” International Workshop on Molecular Electronics, 2012 年 7 月 2 日、Jerusalem, Israel (招待講演)
- (15) 横山知大、江藤幹雄、Yuli V. Nazarov 「半導体ナノワイヤのジョセフソン接合におけるスピン軌道相互作用の効果」日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 24 日、神戸
- (16) 吉井涼輔、江藤幹雄、阪野壘、Ian affleck 「近藤領域における量子ドットの非弾性輸送過程」日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 24 日、神戸
- (17) 奥山倫、江藤幹雄、T. Brandes 「二重量子ドットの非平衡輸送現象における光学フォノンのダイナミクス」日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 24 日、神戸
- (18) 山田亮弘、奥山倫、江藤幹雄 「二重量子ドットの非平衡輸送現象における光学フォノンの影響」日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 24 日、神戸
- (19) R. Yoshii, M. Eto, and I. Affleck, “Decoherence induced by inelastic scattering in Aharonov-Bohm ring

with embedded quantum dot,” 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011 年 8 月 12 日、北京

- (20) T. Yokoyama and M. Eto, “Two-terminal spin filter using quantum dot with spin-orbit interaction in magnetic field,” 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011 年 8 月 13 日、北京
- (21) J. Kushihara, R. Okuyama, and M. Eto, “Coherent and incoherent current drag in coupled quantum dots,” 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011 年 8 月 13 日、北京
- (22) R. Okuyama and M. Eto, “Superradiance in transport through ensemble of double quantum dots,” 26th International Conference on Low Temperature Physics, 2011 年 8 月 16 日、北京
- (23) M. Eto, “Semiconductor quantum dots with spin-orbit interaction,” 6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology, 2011 年 8 月 2 日、松江 (招待講演)
- (24) M. Eto and T. Yokoyama, “Spin-polarized current generation in multiterminal quantum dot in Kondo regime,” Annual APS (American Physical Society) March Meeting, 2011 年 3 月 23 日, Dallas, TX (米国)
- (25) 江藤幹雄 「半導体ナノ構造におけるスピンホール効果」日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 25 日、大阪 (シンポジウムでの招待講演)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
該当なし

〔その他〕
ホームページ：
<http://www.phys.keio.ac.jp/faculty/eto/eto.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
江藤 幹雄 (ETO, Mikio)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：00221812

(2) 研究分担者
該当なし

(3) 連携研究者
該当なし