

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19540345

研究課題名（和文） 量子ドット複合系における近藤効果とスピン制御の基礎

研究課題名（英文） Kondo effect and spin manipulation in quantum dot complex systems

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

研究成果の概要（和文）：半導体の微細加工で作製されるナノサイズの箱、量子ドット、はしばしば人工原子と呼ばれる。人工原子のスピンが $1/2$ のとき、金属中の磁性不純物と同様の近藤効果が観測される。人工原子を微小なリングに埋め込んだ系、量子ドットを 2 つ並べた人工分子、強いスピン軌道相互作用がはたらく人工原子、等での近藤効果を理論的に研究し、この多体問題の新しい物理学を開拓した。人工原子などの半導体ナノ構造におけるスピンの制御は量子コンピューターやスピントロニクスへの応用につながる。スピン注入、およびトンネル磁気抵抗の基礎研究を進展させた。

研究成果の概要（英文）：Quantum dots, boxes of nanometer scale fabricated on semiconductors, are often called artificial atoms. Artificial atoms with spin $1/2$ show the Kondo effect as magnetic impurities in metals. In this project, the Kondo effect has been theoretically examined in a small ring with an embedded quantum dot, coupled quantum dots or artificial molecules, quantum dot in the presence of strong spin-orbit interaction, etc. In consequence, new physics has been revealed in this many-body problem. Spin manipulation in semiconductor nano-structures such as artificial atoms is an important issue for the application to quantum computers and spintronics. We have developed the fundamental researches for the spin injection and tunnel magnetoresistance.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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： メゾスコピック系・局在、量子ドット、近藤効果、スピン軌道相互作用

1. 研究開始当初の背景

半導体の微細加工で作製されるナノサイズの箱、量子ドット、はクーロンブロッカー

ドによって電子数を一つずつ制御できる優れた特性を示す。量子ドットに奇数個の電子が閉じ込められているとき、量子ドット中の局在スピン $1/2$ とリード中の伝導電子の間の

トンネル結合によって近藤効果が生じる：近藤温度 T_K 以下の低温で、局在スピンとフェルミの海の伝導電子がスピン一重項の多体状態を形成する。伝導電子が近藤一重項状態を介した共鳴トンネルをする結果、電気伝導度が著しく増大する。これは磁希薄性不純物を含んだ金属で観測される近藤効果と等価な現象である。近藤効果は物性物理学における最も重要な問題の一つであり、その詳細な研究は一般の多体問題の解明の糸口となる。量子ドットでは、(i) 単一の「磁性不純物」の性質を、(ii) トンネル電流の測定によって高精度で調べられ、また (iii) 様々なパラメータが人為的に制御できることから、その詳細な研究が可能である。

1998年に量子ドットでの近藤効果が初めて観測されて以来、理論、実験の両面からその研究が進んできた。通常のスピン $1/2$ の近藤効果に加え、偶数電子系のスピン 3 重項・ 1 重項縮退近傍での近藤効果、スピン $1/2$ 、軌道準位の縮退点近傍での $SU(4)$ 近藤効果等、量子ドット系特有の近藤効果が観測された。さらに直列 2 重量子ドット系での近藤効果、量子ドットに超伝導や強磁性体リードを結合した系での近藤効果も研究されている。私はこれまでその理論研究に携わってきた。

本研究開始当初、近藤物理学の新たな展開として、量子ドット複合系の実験が 3 件報告されていた。(i) 東大物性研の勝本教授らは、アハラノフ・ボーム (AB) リングに埋め込まれた量子ドットにおいて「ファノ近藤共鳴」を観測した。これは多体問題である近藤効果と一体問題の干渉効果に起因するファノ共鳴の共存による現象である。(ii) Max Planck 研究所 (独) の Weis 博士らは、並列 2 重量子ドットを作製し、スピン自由度と軌道自由度の絡んだ $SU(4)$ 近藤効果を詳細に調べた。(iii) 東大工の樽茶教授のグループは、自己形成型 InAs 量子ドットにおける近藤効果の観測に成功した。この系は強いスピン軌道相互作用と大きな g 因子という特徴を持つ。

一方、近藤温度より高い温度において、量子ドット中に局在した電子スピンの量子状態を制御する研究が目覚しく進展している。量子情報処理やスピントロニクスへの応用が念頭にある。量子ドット複合系での近藤効果の研究の延長線上に、磁場やスピン軌道相互作用を利用した量子ドットへのスピン注入、スピン制御等の提案が考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題の研究目的は、従来とは異なる状況での近藤効果を理論的に研究し、近藤物理学の新たな側面を開拓することである。さらに電子スピン制御の基礎研究を進め、スピン注入デバイスの提案等をおこなう。

(1) AB リングに埋め込まれた量子ドットの示すファノ近藤共鳴については、数値繰り込み群 (NRG) による先行研究がある。が、勝本グループの実験結果を説明するにはモデルが不十分であった。また、近藤温度の磁束依存性、リングサイズと多体の近藤一重項状態の広がり (近藤雲の大きさ) の大小関係による特性の違い、など近藤効果の本質は未解明である。本研究ではスケールリング法によって解析解を求め、その本質を究明する。また、並列 2 重量子ドットにおける $SU(4)$ 近藤効果、スピン軌道相互作用のはたらくときの近藤効果の特性を明らかにする。

(2) 量子ドットの内部構造を取り入れた新しい計算手法を開発する。これまでの近藤効果の理論研究は、量子ドットの内部構造を無視した不純物アンダーソンモデルを基におこなわれている。しかし実験結果の解明には、量子ドットやリードの内部構造を取り入れた、より現実的なモデルの考察が必要となる。量子ドット中の電子間相互作用を取り入れて、電気伝導特性を数値的に求める手法を開発する。スピン軌道相互作用がはたらく系にも応用する。

(3) 半導体ナノ構造におけるスピン制御の基礎研究として、強いスピン軌道相互作用がはたらく狭ギャップ半導体のヘテロ構造や量子ドットに着目する。低次元系でのスピンホール効果を定式化し、スピン注入デバイスを提案する。また量子ドットを強磁性体で挟んだスピンバルブ構造の特性を解明する。

3. 研究の方法

(1) 近藤効果の計算手法：スケールリング解析は、適用可能なパラメータ領域が限られるものの、近藤温度の解析的な表式を与える。また電気伝導度の低温極限での振舞い、高温極限での対数補正項の計算も可能である。数値解法で最も有力なのは数値繰り込み群 (NRG) の方法である。ただし複雑なモデルに用いるのは難しい。Slave boson 法の平均場近似は適用範囲が広く、近藤効果の定性的な理解に有効である。この 3 つの計算手法を問題に応じて適宜使い分ける。

(2) 量子ドットの内部構造を取り入れたモデルの数値計算：空間を離散化した tight-binding model を用いて量子ドットの内部構造、トンネル障壁、リードを表現する。グリーン関数法によって電子間相互作用を自己無撞着に取り入れ、輸送特性を数値的に求める手法を開発する。

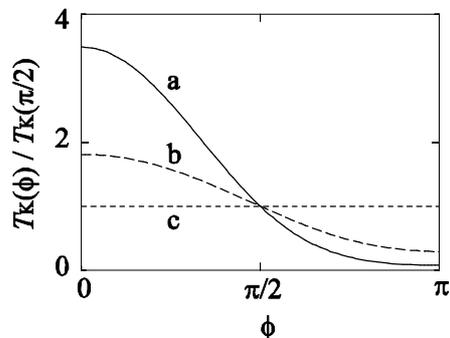
(3) 半導体ナノ構造におけるスピン制御： 2 次元電子系におけるスピンホール効果を、散乱理論の部分波展開の方法によって定式化する。半導体ナノ構造を用いたスピン注入デバイスの数値シミュレーションには (2) の方

法を適用する。量子ドットスピンバルブ構造においては、マスター方程式の方法によって磁気抵抗を評価する。

4. 研究成果

(1) ABリングに埋め込まれた量子ドットにおける近藤効果のスケーリング解析：最初に、量子ドットの外部 (ABリング+2本のリード) の固有モードにユニタリー変換をおこない、量子ドットに結合するモードとそうでないモードに分ける計算手法を確立した。前者のみを取り入れることで、量子ドット複合系は通常の「量子ドット+リード」のモデルに帰着し、近藤効果の計算が容易となる。この方法は一般の量子ドット複合系にも適用可能である。本研究では帰着したモデルにスケーリング解析をおこなった。ABリングのサイズが小さい極限において、近藤温度 T_k の解析的な表式を導出した。 T_k はリングを貫く磁束に対して指数関数の形で強く依存することがわかった。電気伝導度の高温極限 ($T \gg T_k$) および低温極限 ($T \ll T_k$) の表式を求めた。

量子ドット中の電子間相互作用 U が大きい極限、および電子正孔対称性が近似的に成り立つ領域において、近藤温度の異なる磁束依存性を導出した。両者の状況は、ゲート電圧の操作によって実現可能である。ABリングのサイズが有限の場合に計算を拡張した。スケーリング法によって2つの特徴的な長さが自然に導出される。1つは電荷揺らぎに由来する $L_c = \hbar v_F / |\epsilon_0|$ (ϵ_0 はドット中のエネルギー準位、 v_F はフェルミ速度) もう1つはスピン揺らぎに起因する $L_k = \hbar v_F / T_k$ で近藤雲の広がりに対応する。リングサイズ L と L_c , L_k の大小関係によって、近藤温度の異なる解析解が得られた。 L が近藤雲よりも小さいとき (a: $L \ll L_c \ll L_k$, および b: $L_c \ll L \ll L_k$)、 T_k はリングを貫く磁束に大きく依存する。図の ϕ は磁束による AB 位相である。一方、c: $L_k \ll L$ のとき T_k の ϕ 依存性はない。



近藤温度のリングサイズ依存性の解析的な表式を導いたのは我々が初めてである。多体の波動関数の形状が半導体ナノ構造の物性に影響を与えることを明確に示した成果

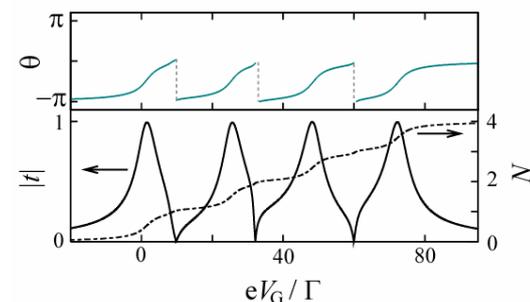
は、近藤物理学にとって大きな意義がある。現在、この近藤効果の厳密解の導出を試みている。さらに下記(3)の数値計算手法を適用し、量子ドットや AB リングの内部構造を取り入れた計算をおこない、実験結果の定量的な説明を目指す。

(2) 並列結合量子ドットにおける SU(4)近藤効果：2つの量子ドットを並列に結合し、各ドットに2本のリードを結合した系が実験で研究されている。この結合量子ドットに1個の電子が局在したときの SU(4)近藤効果を、スケーリング法と数値繰り込み群を用いて詳細に調べた。(i) 電気伝導度 G の温度依存性を求め、そのユニバーサルな振舞い $G(T/T_k)$ を示した。一方、各ドットを流れる電気伝導度は T/T_k のユニバーサルな関数とはならない。(ii) 近藤温度 T_k は量子ドット間の準位間隔 Δ にべき乗則で依存する。これは強結合固定点がマージナルであることを反映した SU(4)近藤効果固有の特性である。

SU(4)近藤効果はカーボンナノチューブの実験でも観測されている。その特徴の詳細な研究は現在幅広く興味を持たれている。

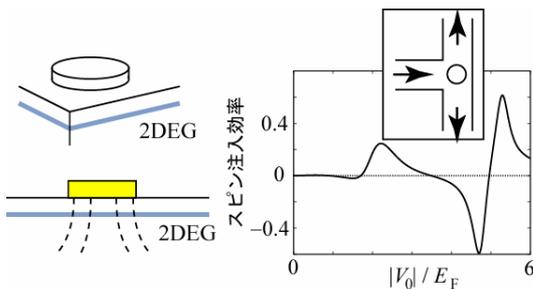
(3) 量子ドットの内部構造を取り入れたモデルの数値計算：tight binding model によって「量子ドット+トンネル障壁+リード」の現実的なモデルを作り、量子ドットの内部構造と電子間相互作用を取り入れる数値計算手法を確立した。その応用として、ゲート電圧 V_g で量子ドットの静電エネルギーを変えたときの電流のピーク構造 (クーロン振動) および電子の位相の振舞い (位相の急峻な飛び、phase lapse) の問題を考察した。図は V_g の関数として、量子ドット中の電子数 N 、透過率 t 、位相 θ を示す (電気伝導度は $G = (2e^2/h) |t|^2$ で与えられる)。 t のゼロ点で θ の飛びが見られるが、これは実験結果と一致する。さらにドットやリード内部の磁場の効果を取り入れたところ、phase lapse が消えることがわかった。

位相の急峻な飛びは、メソスコピック物理学で長年議論されている未解決問題である。現実的なモデルの考察によってその出現する条件を明らかにした意義は大きい。



(4) 半導体ヘテロ構造、および InAs 量子ドットにおけるスピンホール効果：スピン軌道相互作用の強い狭ギャップ半導体ヘテロ構造での2次元電子系において、アンチドットやSTM等で作られる人工ポテンシャル(左図)による外因性スピンホール効果を考察した。外因性スピンホール効果とは、電子が不純物で散乱されるときスピンの向きによって散乱方向が異なる現象である。スピントロニクスにおいて、磁性体を使わないスピン注入デバイスへの応用が期待されている。

まず2次元電子系に軸対称な散乱ポテンシャルがある場合のスピンホール効果を、部分波展開の方法を用いて定式化した。次にアンチドットに正のゲート電圧をかけて作られる引力ポテンシャルに着目した。人工ポテンシャルの深さ V_0 を制御して共鳴散乱の条件を満たすとき、スピンホール効果が著しく増大することがわかった。アンチドットを含む3端子デバイスに対して数値計算をおこない、50%を超える高効率のスピン注入の可能性を示した(右図)。



次に InAs 量子ドットを想定し、それに複数のリードを結合した系でのスピンホール効果を定式化した。クーロン振動の電流ピークの近傍において、共鳴トンネルによってスピンホール効果が増大する条件を明らかにした。さらにクーロンブロッケード領域で近藤効果が生じるとき、多体の共鳴状態によってもスピンホール効果が著しく増大することがわかった。

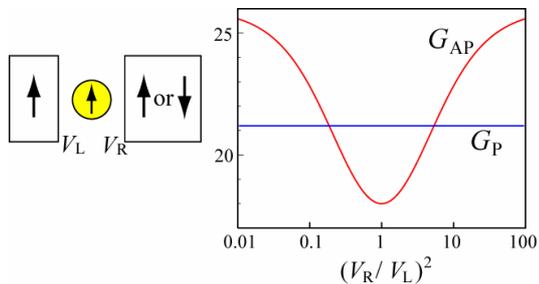
半導体ナノ構造におけるスピンホール効果は応用上の意義に加えて、基礎研究面での意味も大きい。近藤効果の絡んだスピンホール効果は金属中の不純物散乱でも指摘されているが、量子ドットではパラメータの制御によってより詳細な研究が可能である。

(5) 量子ドットスピンバルブの負のトンネル磁気抵抗効果の解明：量子ドットを2つの強磁性体で挟んだ系は量子ドットスピンバルブと呼ばれる。この系に磁場を印加すると、2つの強磁性体の磁化の反平行配置(AP配置)から平行配置(P配置)への変化に伴って大きな電気抵抗の変化が生じる。この大きなトンネル磁気抵抗効果はスピントロニク

スへの応用上重要である。

東大生産研の町田准教授のグループの実験で、通常とは逆符号の負の磁気抵抗(電気伝導度が $G_{AP} > G_P$)が観測された。その機構を調べるため、クーロンブロッケード領域における高次のトンネル過程(コトンネリング伝導)に着目した。量子ドット中にスピンが局在するとき、コトンネリングによるスピン反転過程が存在する。トンネル結合の非対称性が大きいとき、スピン反転過程の寄与が増大し、負の磁気抵抗の原因となることを指摘した。また、有限バイアス下の非平衡伝導特性において、スピン反転過程によって微分伝導度にピーク構造が現れることを見出した。

この研究成果はトンネル磁気抵抗の素過程の解明の意味を持つ。また量子ドット中のスピン制御の観点からも注目されている。



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16件)

- (1) 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
- (2) T. Yokoyama and M. Eto, "Spin injection using tunable antidot potential in semiconductor heterostructure with spin-orbit interaction," *Physica E*, Vol.42 (2010) 956-959; 査読有
- (3) H. Morishita, L. S. Vlasenko, H. Tanaka, K. Semba, K. Sawano, Y. Shiraki, M. Eto, and K. M. Itoh, "Electrical detection and magnetic field control of spin states in phosphorus-doped silicon," *Physical Review B*, Vol.80 (2009) 205206/1-6; 査読有
- (4) T. Yokoyama and M. Eto, "Enhanced spin Hall effect by tuning antidot potential: Application to spin filter," *Physical Review B*, Vol.80 (2009) 125311/1-11; 査読有
- (5) M. Eto and T. Yokoyama, "Enhanced spin Hall effect in semiconductor hetero-

- structures with artificial potential,” Journal of the Physical Society of Japan, Vol.78 (2009) 073710/1-4; 査読有
- (6) R. Yoshii and M. Eto, “Magnetic flux-dependent Kondo effect in a quantum dot embedded in an Aharonov-Bohm ring,” Journal of Physics: Conf. Ser. Vol.150 (2009) 022104; 査読有
- (7) T. Homma and M. Eto, “Numerical study of Coulomb oscillation and phase shift through quantum dots in a magnetic field,” Journal of Physics: Conf. Ser. Vol.150 (2009) 022028; 査読有
- (8) A. Ueda and M. Eto, “Electrically detected phonon spectroscopy in double quantum dots,” Journal of Physics: Conf. Ser. Vol.150 (2009) 022093; 査読有
- (9) 江藤幹雄「半導体中のスピン軌道相互作用入門 (その1~その3)」固体物理 Vol.43 (2008) 145-152; 197-205; 397-406; 査読なし
- (10) 江藤幹雄「国際ワークショップ: ナノスコピック輸送現象における相互作用と干渉効果 (会議だより)」固体物理 Vol.43 (2008) 371-379; 査読なし
- (11) R. Yoshii and M. Eto, “Scaling Analysis for Kondo Effect in Quantum Dot Embedded in Aharonov-Bohm Ring,” Journal of the Physical Society of Japan, Vol.77 (2008) 123714/1-4; 査読有
- (12) K. Saito, S. Okubo and M. Eto, “Analytical expression of leakage current through double quantum dots in Pauli spin blockade,” Physica E, Vol.40 (2008) 1149-1151; 査読有
- (13) A. Ueda and M. Eto, “Nonequilibrium Transport in T-shaped Double Quantum Dots: Phonon Emission without Dephasing,” Physica E, Vol.40 (2008) 1602-1604; 査読有
- (14) T. Ishikawa and M. Eto, “Theoretical study of optical excitation in quantum dots by circularly polarized light,” Physica Status Solidi (c) Vol.5 (2008) 374-377; 査読有
- (15) A. Ueda and M. Eto, “Nonequilibrium transport through coupled quantum dots with electron-phonon interaction,” New Journal of Physics, Vol.9 (2007) 119/1-14; 査読有
- (16) D. Matsubayashi and M. Eto, “Spin splitting and Kondo effect in quantum dots coupled to noncollinear ferromagnetic leads,” Physical Review B, Vol.75 (2007) 165319/1-12; 査読有
- [学会発表](計46件)
- (1) 江藤幹雄「多端子量子ドット系におけるスピンホール効果の理論」日本物理学会第65回年次大会、2010年3月20日、岡山
- (2) 横山知大、江藤幹雄「多端子量子ドット系における近藤共鳴とスピンホール効果の増大」日本物理学会第65回年次大会、2010年3月20日、岡山
- (3) 吉井涼輔、江藤幹雄「ABリングに埋め込まれた量子ドットの近藤効果におけるリングサイズ依存性 III」日本物理学会第65回年次大会、2010年3月20日、岡山
- (4) 納谷尚吾、江藤幹雄、「強磁性および常磁性リードで量子ドットを挟んだ系の非平衡伝導特性」日本物理学会第65回年次大会、2010年3月20日、岡山
- (5) R. Yoshii and M. Eto, “Scaling study of Kondo effect in a quantum dot embedded in an Aharonov-Bohm interferometer,” Annual APS (American Physical Society) March Meeting, 2010年3月17日, Portland, OR (米国)
- (6) T. Yokoyama and M. Eto, “Efficient spin filter utilizing antidot potential in semiconductor heterostructures,” Annual APS (American Physical Society) March Meeting, 2010年3月17日, Portland, OR (米国)
- (7) 吉井涼輔、江藤幹雄、「アハロノフ・ボーム効果と近藤効果の競合: 近藤効果の磁束依存性」14th Symposium on the Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, 2009年12月21日、横浜
- (8) 横山知大、江藤幹雄、「半導体アンチドット構造によるスピンホール効果の増大とスピンフィルターへの応用」14th Symposium on the Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, 2009年12月21日、横浜
- (9) 納谷尚吾、江藤幹雄、「強磁性リードに接続した量子ドットにおけるコトンネリング伝導」14th Symposium on the Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors, 2009年12月21日、横浜
- (10) M. Eto, “Flux-dependent Kondo effect in an Aharonov-Bohm ring with an embedded quantum dot,” International workshop on “50 years of the Aharonov-Bohm Effect: Concept and Applications,” 2009年10月12日, Tel Aviv (Israel)
- (11) T. Yokoyama and M. Eto, “Spin injection using tunable antidot potential in semiconductor heterostructure with spin-orbit interaction,”

- 18th International Conference on Electronic Properties of Two - Dimensional Systems, 2009年7月23日, Kobe
- (12) R. Yoshii and M. Eto, "Ring-size dependence of Kondo effect in quantum dot embedded in Aharonov-Bohm ring," 18th International Conference on Electronic Properties of Two - Dimensional Systems, 2009年7月21日, Kobe
- (13) M. Eto and T. Yokoyama, "Enhanced Spin Hall Effect by Single Antidot Potential," Annual APS (American Physical Society) March Meeting, 2009年3月18日, Pittsburgh (米国)
- (14) H. Morishita, H. Tanaka, K. Semba, L. S. Vlasenko, K. Sawano, Y. Shiraki, M. Eto and K. M. Itoh, "Magnetic Field Control of the Bell States Formed by Nuclear Spins and Electron Spins of Phosphorus in Silicon," International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (招待講演), 2009年1月21日, Atsugi
- (15) M. Eto and T. Yokoyama, "Enhanced Spin Hall Effect in Semiconductor Anti-Dot Structures," International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, 2009年1月20日, Atsugi
- (16) M. Eto, "Spin injection using semiconductor nanostructures with spin-orbit interaction," International Workshop on Spin Transport in Condensed Matter (招待講演), 2008年11月17日, Kyoto
- (17) R. Yoshii and M. Eto, "Magnetic-flux-dependent Kondo effect in a quantum dot embedded in an Aharonov-Bohm ring," 25th International Conference on Low Temperature Physics, 2008年8月8日, Amsterdam (オランダ)
- (18) T. Homma and M. Eto, "Numerical study of Coulomb oscillation and phase shift through quantum dots in a magnetic field," 25th International Conference on Low Temperature Physics, 2008年8月7日, Amsterdam (オランダ)
- (19) A. Ueda and M. Eto, "Electrically detected phonon spectroscopy in double quantum dots," 25th International Conference on Low Temperature Physics, 2008年8月7日, Amsterdam (オランダ)
- (20) M. Eto, "SU(4) Kondo effect in coupled quantum dots in parallel: Evidence of marginal fixed point," Annual APS (American Physical Society) March Meeting, 2008年3月10日, New Orleans (米国)
- (21) M. Eto, "SU(4) Kondo effect in double quantum dots connected in parallel," International workshop on Interaction and Interference in Nanoscopic Transport, 2008年2月19, 21日, Dresden (独国)
- (22) M. Eto, "Kondo effect in multi-level and multi-valley quantum dots," Yukawa International Seminar on "Interaction and Nanostructural Effects in Low-Dimensional Systems (招待講演), 2007年11月19日, Kyoto
- (23) 江藤幹雄「量子ポイントコンタクトでのスピンフィルター効果」第68回応用物理学会学術講演会(招待講演), 2007年9月6日, 札幌
- (24) T. Ishikawa and M. Eto, "Theoretical Study of Optical Excitation in Quantum Dots by Circularly Polarized Light," 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors, 2007年7月23日, Tokyo
- (25) A. Ueda and M. Eto, "Nonequilibrium Transport in T-shaped Double Quantum Dots: Phonon Emission without Dephasing," 17th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 2007年7月18日, Genova (伊国)
- (26) K. Saito and M. Eto, "Analytical Expression of Leakage Current through Double Quantum Dots in Pauli Spin Blockade," 17th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 2007年7月16日, Genova (伊国)
- 〔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