

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「ナノ界面技術の基盤構築」  
研究課題「ナノギャップ電極／ナノ量子系接合  
による新機能の創出」

## 研究終了報告書

研究期間 平成19年10月～平成25年 3月

研究代表者：平川一彦  
(東京大学生産技術研究所、教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

精密に構造制御したナノギャップ電極により、単一分子や InAs 量子ドットへの接合を作製し、金属／ナノ量子系接合が発現する新規な物理現象の解明とその高機能デバイスへの展開を目指し研究を行った。特に本研究では、極微細な **bottom-up** 的ナノ構造にソース・ドレイン・ゲートの3電極を形成し、トランジスタとするための超微細加工技術の高度化が重要な要素であった。さらに、作製されたナノギャップ電極／ナノ量子系接合が発現する物理を理解し、その伝導をいかに制御し、機能を発揮させるかが大きな目標であった。以下に、サブテーマごとに説明する。

#### ■ 単一分子トランジスタ作製基盤技術の高度化と分子を介した量子伝導

我々は、金属ナノ接合に通電して断線させ、金属ナノギャップ電極を作製し(通電断線法)、単一分子トランジスタ(**single molecule transistor; SMT**)を作製する技術の高度化を行った。我々は通電断線過程において、金属ナノ接合が数十 nm 以上の太さの場合にはジュール発熱により金属粒界が融解して断線するが、断面が 100 原子以下の極微細領域に入ると、通電しても発熱はせず、1電子がそのすべての運動エネルギーを1個の原子に受け渡して原子が外れていく過程に移行することを世界で初めて発見した(新しい物理の発見)。この知見は、通電断線を1原子レベルで制御可能にしたのみならず、**VLSI** における配線の信頼性の将来にも展望を拓くものとして注目された。この精密な通電断線法を用いることにより、金を電極材料として用いた場合には従来の約5～10倍の歩留まりで **SMT** が作製できるようになった。さらに、通電断線時の発熱を制御することにより、融点の高い金属を電極とする **SMT** も作製できるようになり、世界で初めて強磁性 Ni 電極を有する **C60 SMT** の作製に成功し、分子スピントロニクスに新しい局面を拓いた。

**SMT** における量子伝導においては、平川グループで実験を行い、塚田・田村グループで第一原理計算を行うという役割で、研究を遂行した。特に、金属電極間で分子が振動することによる **Franck-Condon** 効果が伝導に大きな影響を与えることを見いだしたほか、強磁性 Ni 電極-**C60 SMT** においては Ni 電極と **C60** 分子の混成が **spin-filtering** 効果や大きな負のトンネル磁気抵抗をもたらすことを見いだした。この成果は原子スケールの電子状態が分子伝導に大きな影響を与えることを示しており、分子スピントロニクスの理解に大きく貢献しつつある。また、ポルフィリン分子を金電極で挟んだ **SMT** においては、電圧印加により分子配置の状態を制御し、分子トランジスタに記憶機能を持たせることができることを示した。

#### ■ 単一量子ドットトランジスタ作製に関する基盤技術の確立と新規物性の開拓

我々は、金属を接触させても空乏化しないという特異な半導体である **InAs** に着目し、自己組織化 **InAs** 量子ドットにナノギャップ電極を形成した単一量子ドットトランジスタの作製とその新規物性の開拓の研究を行ってきた。

平川グループでは、量子ドットの位置のランダムさにより再現性よくトランジスタを作製できないという問題に対し、位置制御量子ドットの成長に取り組んだ。特に、**AFM** や電子ビーム露光法を用いて作製したナノパターンを保ったまま、分子線エピタキシーにおいて低温で表面の酸化物を除去する方法を考案し、良質な位置制御量子ドットを成長することに成功した。また成長した位置制御ドットを用いて、高い歩留まりで単一量子ドットトランジスタを作製することに成功した。

単一 **InAs** 量子ドットの量子伝導においてもめざましい成果が得られた。超伝導と近藤効果はスピン相関伝導の観点から相補的な関係にあるが、81K という人工構造では最も高い近藤温度の観測が平川グループによりなされた。また、超伝導における電子伝導の位相が大岩・高柳グループで明らかにされるとともに、近藤効果により超伝導電流が促進されることなどが大岩グループで見いだされている。さらに大岩グループでは、**InAs** 量子ドット内のスピン軌道相互作用や  $g$  因子の大きさをゲート電極により制御できることを見いだした。この成果は、電子スピンを用いた量子情報処理技術に大きな可能性をもたらすものである。また、町田グループでは、強磁性電極を用いた量子ドットトランジスタが数十～数百%のトンネル磁気抵抗を示すことを見い

だし、単一電子トランジスタでは初めてスピントランジスタを実現することに成功した。

自己組織化InAs量子ドットは、数～数十 meVの大きな軌道量子化エネルギーと帯電エネルギーを有している。このエネルギーの大きさは、フォトンエネルギーに換算するとテラヘルツ (THz) 電磁波の領域になり、量子ドット中の電子と THz 電磁波の相互作用が新しい伝導物性の制御法をもたらすと期待される。我々は電子系と THz 電磁波を強く結合させることで、THz 光支援トンネル効果の観測に成功し、THz 電磁波で電子伝導を制御することに成功した。

## (2) 顕著な成果

### 1. 通電断線による原子スケール金属ナノギャップ電極の形成過程の解明と単一分子トランジスタ作製への応用

概要: 金属ナノ電極の通電断線過程において、太さ 100 原子以下の極微細領域に入ると、1 電子が1原子をはじき飛ばす物理過程に移行することを世界で初めて発見し、この知見を用いて、従来に比べ5～10倍の高い歩留まりで単一分子トランジスタ (SMT) が作製できるようになった。さらに、高融点金属電極を用いた強磁性 SMT の作製に世界で初めて成功した。

- K. Yoshida, I. Hamada, S. Sakata, A. Umeno, M. Tsukada, and K. Hirakawa: "Gate-Tunable Large Negative Tunnel Magnetoresistance in Ni-C60-Ni Single Molecule Transistors", Nano Letters, vol. 13, pp. 481-485 (2013), DOI: 10.1021/nl303871x.
- S. Sakata, A. Umeno, K. Yoshida, and K. Hirakawa: "Critical voltage for atom migration in ballistic copper nanojunctions and its implications to interconnect technology for very large scale integrated circuits", Applied Physics Express, vol. 3, pp. 115201-1~3 (2010).
- K. Yoshida, A. Umeno, S. Sakata, and K. Hirakawa: "Structural stability of Ni quantum point contacts under electrical stresses", Applied Physics Express, vol. 3, pp. 045001-1~3 (2010).
- A. Umeno and K. Hirakawa: "Non-thermal origin of electromigration at gold nanojunctions in the ballistic regime", Applied Physics Letters, vol. 94, pp. 162103-1~3 (2009).

### 2. 単一自己組織化 InAs 量子ドット中のトンネル伝導と電子スピンの制御

概要: InAs 量子ドット内の強いスピン軌道相互作用や g 因子の大きさをゲート電極により制御できることを見だし、電子スピンを用いた量子情報処理技術に大きな可能性をもたらした。さらに、THz 電磁波によりトンネル伝導を制御する THz 光支援トンネル効果の観測に成功した。

- K. Shibata, A. Umeno, K. M. Cha, and K. Hirakawa: "Photon-Assisted Tunneling through Self-Assembled InAs Quantum Dots in the Terahertz Frequency Range", Physical Review Letters, vol.109, no. 7, pp. 077401-1~4 (2012), DOI:10.1103/PhysRevLett.109.077401.
- Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura and S. Tarucha: "Electrically tuned spin-orbit interaction in an InAs self-assembled quantum dot", Nature Nanotechnology, vol. 6, pp. 511-516 (2011).
- R. S. Deacon, Y. Kanai, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha: "Electrically tuned g tensor in an InAs self-assembled quantum dot", Physical Review B, vol 84, pp. 041302-1~5 (2011).
- Y. Kanai, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Electrical control of Kondo effect and superconducting transport in a side-gated InAs quantum dot Josephson junction", Physical Review B, vol. 82, pp. 054512-1~8 (2010).
- S. Takahashi, R. S. Deacon, K. Yoshida, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha: "Large anisotropy of the spin-orbit interaction in a single InAs self-assembled quantum dot ", Physical Review Letters, vol.104, pp. 246801-1~4 (2010).

### 3. 自己組織化 InAs 量子ドットの位置と形状の制御と単一電子トランジスタへの応用

概要: AFM や電子ビーム露光法を用いて作製したナノパターンを保ったまま、超高真空中において低温で表面酸化物を除去する方法を考案し、良質な位置制御量子ドットを成長すること

に成功した。さらに、それらを用いて、高い歩留まりで単一量子ドットトランジスタを作製することに成功した。

- K. M. Cha, K. Shibata, and K. Hirakawa: “Single electron transport through site-controlled InAs quantum dots”, Applied Physics Letters, vol. 101, pp. 223115-1~5, (2012), DOI: 10.1063/1.4769039
- K. M. Cha, I. Horiuchi, K. Shibata, and K. Hirakawa: “Size-limiting effect of site-controlled InAs quantum dots grown at high temperatures by molecular beam epitaxy”, Applied Physics Express, vol. 5, pp. 085501-1~3 (2012), DOI: 10.1143/APEX.5.085501.

## § 2. 研究構想

### (1) 当初の研究構想

VLSI はスケールリング則に従い微細化の一途をたどり、現在ではチャンネル長が数十 nm のシリコントランジスタが実現されている。このままの割合でスケールリングが続けば、2030 年頃にはチャンネル長は 1 nm を切り、分子レベルの寸法に達してしまう。従って、ソースやドレイン電極と活性層の界面を原子レベルで制御し、活性層への電子の出し入れを制御性よく行う技術を確立することが必要不可欠である。

一方、活性層がナノメートル領域に入ると、その電子状態は量子力学的によく記述された離散的なものになり、従来のバルクにない様々な性質が顕著になる。

従って、ナノ電極とナノ活性層という2つの要素を組み合わせ、ナノ量子系の状態を金属電極により電氣的に制御・読み出すことができれば、演算や記憶を司る情報処理デバイスに、全く新しい展開をもたらすことができるであろう。さらに、金属電極は、それ自体、超伝導性や磁性を持ったユニークな系であり、ナノ量子系に金属の持つ新しい機能を付加することにより、今までにない機能を発現させることができると期待される。

本研究では、ナノ量子系として、金属と整合性のよい単一分子、InAs 量子ドット、グラフェンに着目し、金属電極との界面の制御を行うとともに、電極からの1電子(または1電子対)の注入とナノ量子系が発現する新規物理現象の解明とその応用について研究を行うことを目的とした。

しかし、単一分子や量子ドットなど、bottom-up 的なナノ量子系のサイズは非常に小さく(典型的には 1 nm~数十 nm)、かつ分子や量子ドットの位置がランダムであるため、金属電極によりナノ量子系にアクセスすることは非常に困難である。さらに、金属/ナノ量子系接合界面のミクロスコピックな構造は、系の量子力学的な結合の強さを支配する重要な要因であるにもかかわらず、ほとんど未解明な状態にあり、伝導特性は素子毎に大きく変動する。また、グラフェンにおいては、その特異な性質が解明され始めているが、金属接合の影響やその制御についてはほとんど調べられていない。

このような状況をふまえ、本研究では、具体的には以下の3点を目標に研究を遂行した;

#### (1) 再現性・安定性に優れたナノギャップ金属電極/単一量子系接合作製技術の確立

原子レベルでの金属原子の振る舞いを理解し、その知見を活かして高度に制御されたナノギャップを有する金属電極の形成技術や安定化技術を確立する。さらに、ナノ量子系の位置や形状の

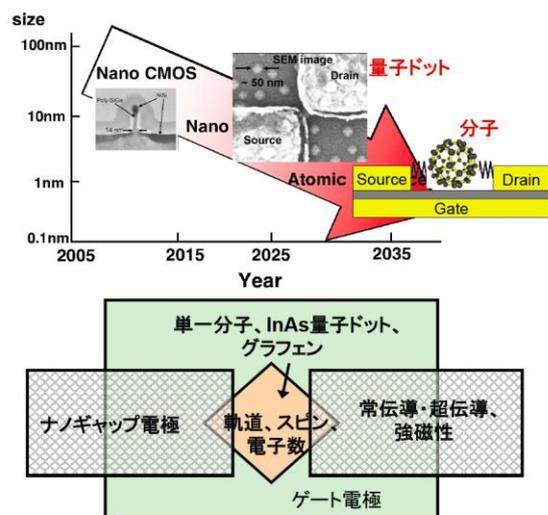


図1 (上)VLSIのトレンド。2030年には分子レベルの活性層になる。(下)本プロジェクトで目指すナノギャップ電極・ナノ量子系極微接合トランジスタの基本構造。

制御により、接合が形成される歩留まりや特性の制御性を画期的に高める。

(2) 金属電極／単一ナノ量子系が発現する新規物理の解明

ナノ量子系に金属電極が持つ特徴(常伝導、超伝導、強磁性など)を付加することにより、金属電極／ナノ量子系接合において新たな機能を創出する。

(3) 金属電極／単一量子系を用いた機能デバイスの実現

金属電極／ナノ量子系特有の新規な物理を機能デバイスへの応用に展開する。特に単一クーパー対の出し入れをゲートで制御する超伝導トランジスタや電子・正孔注入超伝導磁束量子干渉計、スピン偏極した単一電子を注入・制御する単一スピントランジスタなどの実現を目標とする。さらに、単一分子や量子ドット中の電子や核スピンの電気的な制御・読み出しの可能性、さらに超伝導電極から注入されるクーパー対を用いた量子もつれ光子対の発生などへの展開についても挑戦する。

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

本研究では、通電断線における物理の解明が非常に大きな転機をもたらした。特に、通電断線において発熱制御が可能なることを見いだしたことにより、高融点金属を電極とする単一分子トランジスタも作製可能となった。この成果により、強磁性金属を電極とする単一分子トランジスタも再現性よく作製できるようになり、分子スピントロニクスに関する展開が見えてきた。

また、量子ドットの位置と形状制御においても、結合量子ドットを成長できることが明らかになってきたことにより、量子もつれ電子対の生成など、新しい展開が開けつつある。

一方、中間評価では研究の中心テーマが見えにくいと言う指摘を頂いた。これを受けて、後半の期間は分子トランジスタの作製と伝導評価、量子ドットの成長と伝導制御、テラヘルツ電磁波の効果というチームの得意なところに力点を置き、ややカラーの異なるグラフェンは中心課題から外した。さらに、研究のリーダーシップを発揮して欲しいというコメントも頂いた。これを受けて、理論や量子ドットに関するグループと頻繁に会合を持ち、研究を進めた。

### § 3 研究実施体制

(1) 「平川」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
平川 一彦	東京大学生産技術研究所	教授	H19.10～
野村 政宏	東京大学生産技術研究所	准教授	H22.10～
柴田 憲治	東京大学生産技術研究所	助教	H19.10～
梅野 顕憲	東京大学生産技術研究所	特任助教	H19.10～
車 圭晚	東京大学生産技術研究所	PD	H19.10～
吉田 健治	東京大学生産技術研究所	学振 PD	H19.10～
長井 奈緒美	東京大学生産技術研究所	特任研究員	H22.8～
坂田 修一	東京大学生産技術研究所	大学院生(D3)	H20.4～
岡村 直柔	東京大学生産技術研究所	大学院生(M1)	H24.4～
陳 昭祐	東京大学生産技術研究所	大学院生(M1)	H24.4～
朴 敬花	東京大学生産技術研究所	特任研究員	H21.4～H22.11
千葉 茂生	東京大学生産技術研究所	大学院生(D3)	H19.10～H22.11
関 亨太	東京大学生産技術研究所	大学院生(M2)	H20.4～H22.3
堀内 功	東京大学生産技術研究所	大学院生(M2)	H21.4～H23.3
平 将人	東京大学生産技術研究所	大学院生(M2)	H22.4～H24.3

②研究項目

- ・分子接合作製技術の高度化
- ・量子ドットの位置・形状制御と金属との接合界面の電子状態の解明
- ・分子接合／量子ドット接合の伝導ダイナミクスの解明と制御
- ・単一ナノ量子接合による新機能の応用

(2)「大岩」グループ

①研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
大岩 顕	東京大学大学院工学系研究科	講師	H19.10～
樽茶 清悟	東京大学大学院工学系研究科	教授	H19.10～
山本 倫久	東京大学大学院工学系研究科	助教	H19.10～
Giles Daniel Allison	東京大学大学院工学系研究科	特任研究員	H20.11～
Juergen Sailer	日本学術振興会	外国人特別研究員	H24.4～
木山 治樹	東京大学大学院工学系研究科	技術専門職員	H20.4～
金井 康	東京大学大学院工学系研究科	PD	H20.4～
馬場翔二	東京大学大学院工学系研究科	M1	H24.4～
Alessandro Pioda	日本学術振興会	外国人特別研究員	H19.10～H20.3
Monica Ferica Craciun	日本学術振興会	外国人特別研究員	H19.12～H21.10
Saverio Russo	東京大学大学院工学系研究科	外国人客員研究員	H19.12～H21.10
五十嵐悠一	東京大学大学院理学系研究科	D3	H19.10～H20.3
日達研一	東京大学大学院理学系研究科	D3	H20.4～H21.3
木村啓太	東京大学大学院工学系研究科	M2	H20.4～H21.3
井上敦文	東京大学大学院工学系研究科	M2	H21.4～H22.3
高橋 駿	東京大学大学院工学系研究科	D3	H20.4～H24.3
高倉樹	東京大学大学院工学系研究科	D2	H21.4～H24.3
Russell Stuart Deacon	日本学術振興会	外国人特別研究員	H19.10～H24.4

②研究項目

- ・量子ドット／超伝導・強磁性界面の電子相関の解明

- ・超伝導電流制御素子の開発
- ・単一電子スピン制御素子の開発
- ・量子もつれ光源の開発

(3)「町田」グループ

①研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
町田 友樹	東京大学生産技術研究所	准教授	H19.10～H25.3
浜屋宏平	同上	特任助教	H19.10～H20.2
川村稔	同上	特任助教	H19.10～H20.9
増渕覚	同上	大学院生	H19.10～H22.3
守谷 頼	同上	特任助教/助教	H21.4～H25.3
小林 弘侑	同上	大学院生	H20.4～H22.3
池永 恵梨子	同上	大学院生	H22.4～H24.3

②研究項目：「量子ドット/強磁性電極接合の物理と応用」

- ・量子ドット/強磁性界面の制御
- ・単一量子ドットへのスピン注入とスピン伝導
- ・原子間力顕微鏡を用いたナノギャップ電極作製

(4)「高柳」グループ(東京理科大学)

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
高柳 英明	東京理科大学	教授	H19.10～
井上 亮太郎	同上	助教	H19.10～H24.3
石黒 亮輔	同上	助教	H20.4～
津村 公平	同上	助教	H24.4～
松野 美砂	同上	学部4年	H21.8～H21.10
板橋 宣幸	同上	修士課程学生	H19.10～H22.3
菅谷 健太	同上	修士課程学生	H19.10～H22.3
深川 尚義	同上	修士課程学生	H19.10～H22.3
南雲 淑元	同上	修士課程学生	H21.10～H22.3
神尾 充弥	同上	修士課程学生	H22.4～H24.3
村永 健太	同上	修士課程学生	H22.4～H24.3

「高柳」グループ(独立行政法人物質・材料研究機構)

氏名	所属	役職	参加時期
高柳 英明	独立行政法人物質・材料研究機構	主任研究員	H20.4～
堂田 泰史	同上	ポスドク研究員	H20.4～H22.3
金 鮮美	同上	ポスドク研究員	H21.10～
津村 公平	同上	ポスドク研究員	H22.4～H24.3
井上 亮太郎	同上	外来研究者	H20.4～H24.3
石黒 亮輔	同上	外来研究者	H20.4～
津村 公平	同上	外来研究者	H24.4～
塩見 佳子	同上	研究業務員	H21.4～H24.3
南雲 淑元	同上	研究業務員	H21.4～H22.3
松野 美砂	同上	研究業務員	H21.5～H21.7

林 朋美	同上	研究業務員	H21.5～H24.3
矢ヶ部 恵弥	同上	研究業務員	H22.4～H24.3
横島 加奈子	同上	研究業務員	H22.4～H24.3
神尾 充弥	同上	研究業務員	H22.4～H24.3
大杉 正樹	同上	研究業務員	H22.9～
矢吹 紘久	同上	研究業務員	H22.9～
佐久間 大輔	同上	研究業務員	H22.11～

② 研究項目:「グラフェン/超伝導接合の物理とデバイス応用」

- ・超伝導/グラフェン接触界面の作成とその特性解明
- ・SQUID の開発
- ・高感度光子素子の開発

(5)「塚田・田村」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
塚田捷	東北大学原子分子材料 科学高等研究機構	教授	H19.10～H24.3
田村宏之	同上	助教	H21.4～
濱田幾太郎	同上	助教	H23.7～
洗平昌晃	同上	ビジットイング サイエンティスト	H20.4～H24.7
田上勝規	早稲田大学先進理工学 研究科	客員講師	H19.10～H20.3
原田昌紀	早稲田大学先進理工学 研究科	大学院博士課程 学生	H20.4～H21.3

②研究項目:「分子およびグラフェン架橋系の機能探索」

- ・分子およびグラフェン架橋系の機能探索

## § 4 研究実施内容及び成果

### 4.1 「ナノギャップ電極／量子ナノ系接合の作製とその物理と応用の研究」

(東京大学 平川グループ)

#### (1)研究実施内容及び成果

単一分子や量子ドットなどナノ量子系の状態を金属電極により電氣的に制御・読み出すことができれば、演算や記憶を司る情報処理デバイスに革新をもたらすことができる。本研究では、精密に構造制御したナノギャップ電極により単一分子、InAs 量子ドットへの接合を作製すること、さらに金属接合を介した1電子の注入と金属／ナノ量子系接合が発現する新規な物理現象の解明、さらにその高機能デバイスへの展開を目指して研究を行った。

#### 1)再現性・安定性に優れた単一分子トランジスタ作製のための基盤技術の確立

##### ■原子レベルで制御されたナノギャップ電極の形成技術の確立－エレクトロマイグレーションの素過程の解明

単一分子を介した伝導を測定する方法としては、ギャップ長を精密に制御できるSTMや機械的破壊接合法が広く用いられている。しかし、その形状的な制約により、2端子のダイオード特性は測定できるが、ゲートを付加したトランジスタにするのは極めて困難である。ゲート電極はチャンネルとなる分子内の静電ポテンシャルを制御することができるため、ダイオード構造に比べ、トランジスタ構造では圧倒的に得られる情報が多い。我々は単一分子伝導の理解と機能性の探索には、トランジスタ構造を作製することができる通電断線法の高度化を中心に研究を進めた。

金属ナノギャップ電極の形成技術として用いられる通電断線法は、エレクトロマイグレーション(EM)効果を利用して金属を断線させる方法である。我々は、通電断線プロセスにおける電圧印加にフィードバック制御を導入し、電氣的なストレスと原子移動の関係を詳細に解析した。図1(a)に示すような金属ナノ接合試料に、そのコンダクタンスをモニターしながら電圧を印加し、精密にEMを起こさせる。このとき急激にコンダクタンスが低下する電圧を臨界電圧  $V_c$  と定義し、金属ナノ接合の抵抗と  $V_c$  の関係をプロットしたのが図1(c)である。図からわかるように、接合太さが 100 原子以上の時は(接合抵抗  $R_J$  が  $0.01(h/2e^2)$  以下の時)、ちょうど接合で消費される電力がある値に達すると、EMが誘起されていることがわかる。このことは、金属ナノ接合が 100 原子以上の半古典的領域にあるときには発生したジュール熱により金属粒界が溶解し、EMが進行していることを物語っている。しかし、さらにEMを進行させると、接合抵抗と  $V_c$  の関係が単純な電力消費の関係からずれてくる。

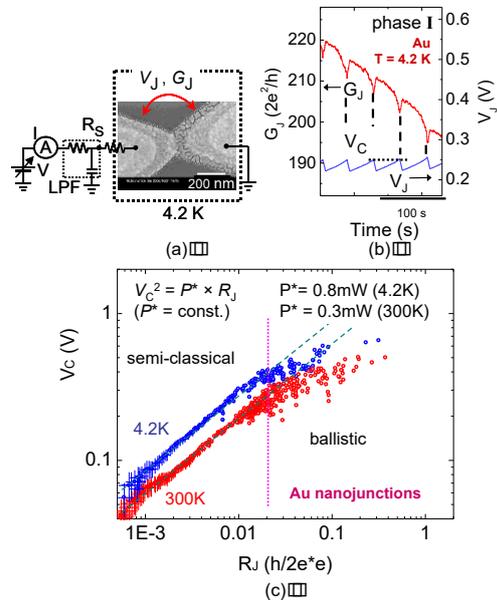


図 1 (a)フィードバック通電断線の実験系、(b)フィードバック通電断線中の印加電圧(青)と接合コンダクタンス(赤)。縦軸のコンダクタンスは量子化コンダクタンス( $e^2/h$ )で規格化してある。(c)金属ナノ接合の抵抗(コンダクタンスの逆数)とエレクトロマイグレーションが進行する臨界電圧  $V_c$  の関係。  $R_J < 100R_0$  の領域からジュール加熱の特性から外れてくる。

図からわかるように、接合太さが 100 原子以上の時は(接合抵抗  $R_J$  が  $0.01(h/2e^2)$  以下の時)、ちょうど接合で消費される電力がある値に達すると、EMが誘起されていることがわかる。このことは、金属ナノ接合が 100 原子以上の半古典的領域にあるときには発生したジュール熱により金属粒界が溶解し、EMが進行していることを物語っている。しかし、さらにEMを進行させると、接合抵抗と  $V_c$  の関係が単純な電力消費の関係からずれてくる。

図2(a)は、金ナノ接合の太さが40原子程度まで狭窄されたときの接合コンダクタンスの変化をプロットしたものである。縦軸は、量子化コンダクタンスの単位に規格化してあり、接合部の原子数にほぼ対応する。伝導度は量子化コンダクタンスの整数倍の値にほぼ量子化されており、金属ナノ接合がバリスティック伝導を示す量子ポイントコンタクト状態にあること、また電圧印加とともに1原子ずつ原子がはずれていくことが見て取れる。このとき、原子がはずれる臨界電圧  $V_c$  に対して、同様な実験を金、銅、ニッケルについて行い、 $V_c$  をヒストグラム化したものが図2(b)である。また図中の矢印は各金属について報告されている表面拡散ポテンシャルの値である。図からわかるように、接合電圧が金属の表面拡散ポテンシャルに等しくなったとき、原子移動が起きることがわかる。このことは、バリスティック領域では、従来の高電流密度状態下における多数の電子の原子への衝突(電子風)やジュール発熱により原子移動が誘起されるのではなく、1つの電子がそのすべての運動エネルギーを原子に与えて原子移動が起きるという全く新しい機構(図2(c))が支配的であることを示している。

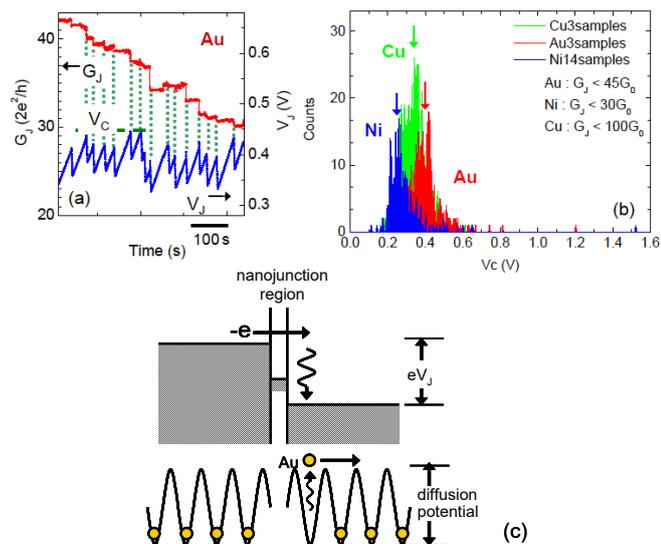


図2 金属ナノ接合の通電断線とエレクトロマイグレーション  
 (a)フィードバック制御した電圧印加と金ナノ接合のコンダクタンス;  
 (b)原子移動の臨界電圧のヒストグラムを金、銅、ニッケルについてプロットしたもの。図中の矢印は各金属の表面拡散ポテンシャル;  
 (c)本研究で提案しているエレクトロマイグレーションの素過程。

また、このとき接合を通過する電流の密度は約  $10^{10}$  A/cm<sup>2</sup> と、従来報告されているエレクトロマイグレーションが起きる臨界電流密度  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> の約  $10^4$  倍も大きな値であり、バリスティックな金属接合はカーボンナノチューブやグラフェンと同等の電流を流せることを示している。この知見は、ますます微細化が進んでいく VLSI の配線において、電流密度の上昇にともなう EM が喫緊の大きな課題と考えられているが、さらに微細化を進めて 100 原子以下の太さの原子スケールの配線にすれば電流耐性が格段に上がることを意味しており、VLSI 配線技術への新しい展望を拓くものである。

■単一分子トランジスタ作製の基盤技術の高度化

我々は通電断線法を用いて金属ナノギャップ電極を作製し、単一分子トランジスタ(SMT)を作製している。

新しい通電断線プロトコルを用いて、強磁性金属であるNiを電極に用いた C60 SMT の作製に世界で初めて成功した。強磁性電極/単一分子/強磁性電極構造のトランジスタは、分子スピントロニクスの基本構成要素であり、それが実現できるようになったことは大きな進展である。

Ni は金に比べて非常に反応性が高い金属であり、C60 分子との界面は van der Waals 吸着ではなく、ある程度軌道混成したものになっていることが予想される。我々は Ni/C60 SMT のクーロン安定化ダイアグラムを詳細に測定した結果、通常金の電極の SMT で観測されるような単純なダイヤモンドパターンだけではなく、図3に示すような分子軌道の反交差がある複雑な振る舞いをする状態があることを見いだした。また、クーロンブロード領域の中にもコトンネリングによる伝導が見られ、分子を介したインコヒーレントなホッピング伝導から分子軌道を経由したコヒーレント伝導へのクロスオーバーが観測された。

さらに実験技術的にも大きな進歩があった。通電断線過程では、試料のコンダクタンスをモニターしつつ、電圧をフィードバックさせながら印加する。このとき、PC とのインターフェースのために、1 ステップのプロセスに 10 msec 程度の時間が必要であった。このため通電断線を行うときに、早くても 30 分程度の時間が必要であった。このことは、試料作製の歩留まりが低い単一分子デバイス作製においては大きな問題であった。そこで我々は、試料と制御用 PC のインターフェースを改良し、FPGA を用い

ることにより 1 ステップあたりの時間を 1-10  $\mu$ sec とし、通電断線プロセスが約 1 分程度 (従来の数十分の 1 の時間) で終了するように超高速化することに成功した。また、同様に DAC を用いることにより、半日程度かかっていたクーロン安定化ダイアグラムの測定も約 10 分程度でできるようになった。これにより試料作製と測定のスループットが格段に向上した。

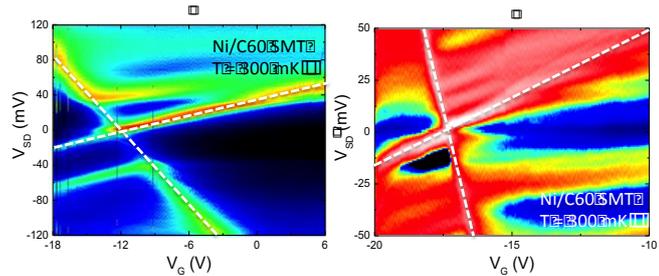


図 3 作製した 2 つの強磁性 Ni/C60/Ni 単一分子トランジスタ試料のクーロン安定化ダイアグラム。多くの試料で、電荷縮退点が  $-12\text{ V} \sim -16\text{ V}$  の間に入っており、C60 分子と Ni 界面が清浄であることを意味している。また、40 meV あたりに見える励起状態は、そのエネルギーが C60 分子の内部振動エネルギーにほぼ等しく、捕獲されている分子が C60 であることを強く示唆している。

## 2) 単一分子トランジスタの特異な量子伝導

これまで単一分子トランジスタの伝導に関して多くの報告がなされている。例えば、単一電子トンネル効果や近藤効果、singlet-triplet 遷移など、興味深い現状が多く報告されてきた。しかしその多くは半導体などで作製される単一電子トランジスタが示す物理とほぼ同じであり、分子特有の効果に関して、それほど議論がなされてこなかった。

我々は、単一分子トランジスタ特有の効果を探求し、分子が軽く機械的振動しやすいこと (分子振動の効果) や分子軌道の混成や分子の配置変化が、伝導に与える効果について研究を行った。

### ■ Au/C60/Au 界面における分子振動とフランク・コンドンブロード現象

単一分子を介した伝導では、電荷移動と分子振動が強く結合していることが予想されている。C60 分子は、金電極表面に van der Waals 吸着しており、その吸着ポテンシャルの中で重心運動することができる。従って、C60 分子の振動が、その伝導に大きな影響をもたらすことが期待される。

金ナノギャップ電極上に C60 分子を分散して作製した単一 C60 分子トランジスタの伝導特性を測定すると、多くの場合、素子の微分コンダクタンスには分子振動に起因する 5 meV 程度の微細構造が現れる。この 5 meV という値は、金表面の C60 分子の van der Waals ポテンシ

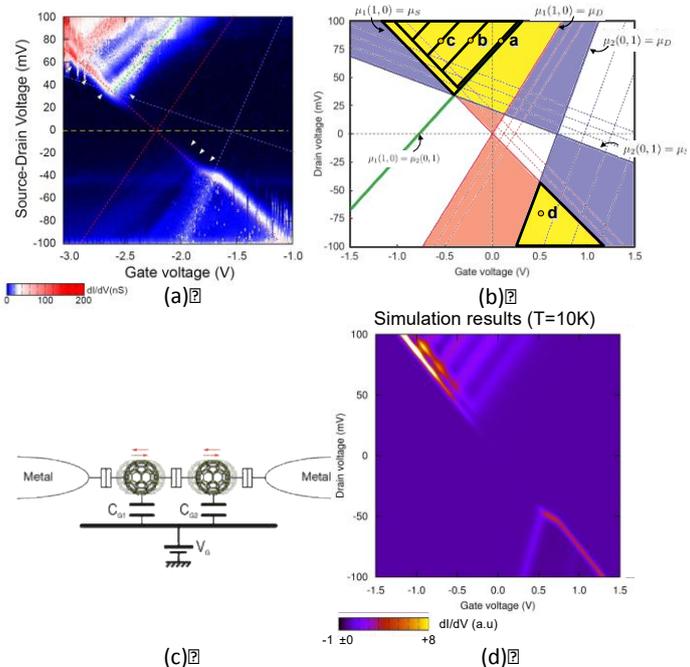


図 4 (a) Au/C60 分子/Au 試料のクーロン安定化ダイアグラム。(b) C60 分子が直列接続された二重分子トランジスタと考えたときのクーロン安定化ダイアグラムの予想。(c) 直列二重 C60 分子トランジスタの概念図と分子振動の様子。(d) 実験から読み取れる構造パラメータを用いてマスター方程式を解いて求めたクーロン安定化ダイアグラム。実験 (a) の特徴をよく再現している。

ヤルの曲率とよい一致をしており、C60 分子が金表面で振動していることを意味している。この効果は、1電子が C60 分子内に入ると分子の平衡位置がシフトし、分子振動を誘起してトンネルする現象 (Franck-Condon 効果) でよく説明できる。

さらに、接合によっては、図 4(a)のように、ゼロバイアス付近で大きくコンダクタンスが抑制されるような場合も発見された。この特性は単一 C60 分子が 2 個直列に配置されている直列 2 分子トランジスタ構造を考えることによりよく理解できた。この構造においては、電子が C60 分子中にトンネル入ると分子振動 (vibron) が励起される。このとき電子がさらに 2 個目の分子に移動すると、1 個目の分子の vibron は消滅し、2 個目の分子の vibron が励起されると言う、vibron の生成・消滅を伴いながら電子がトンネルすると言う特異な機構で、伝導特性がよく理解できることが明らかになった (図 4(c))。

### ■ Ni/C60/Ni 単一分子トランジスタにおける

軌道混成と大きな負のトンネル磁気抵抗  
強磁性 Ni/C60/Ni 単一分子トランジスタは、分子スピントロニクスにおける基本構造であり、その作製とスピン依存伝導機構の解明は極めて重要である。Ni/C60/Ni SMT に磁場を印加し、電極の磁化の向きによるトンネル磁気抵抗 (TMR) を測定したところ、強磁性電極のスピン分極した状態密度から予想される +20% 程度の正の TMR ではなく、図 5 に示すように -100% 程度の大きな負の TMR が観測された。塚田・田村グループによる Ni/C60 分子界面付近の第一原理計算から、Ni 表面と C60 分子が混成することにより、フェルミ面近傍の分子軌道に Ni 電極の多数スピンと反強磁性的な配置となる状態が C60 分子内に形成され (図 5(b))、そのためにスピンフィルター効果が発生し、大きな負の TMR が得られることがわかった。このことは、電極と分子のミクロな界面の電子状態 ("spinterface") がスピン依存伝導の起源になっていることを示しており、今後の分子スピントロニクスに大きな可能性をもたらすものである。

また、ゲート電圧を大きく正に振り、C60 分子にさらにもう 1 個の電子を注入したところ、-10,000% という巨大な負の磁気抵抗が観測された。これらの知見は、分子スピントロニクスに向けた大きな一歩である。

### ■ ポルフィリン分子の電氣的配置制御と抵抗変化メモリー効果

単一分子デバイスの特性は、分子そのものの特性に加えて、単一分子の電極間での配置にも大きく影響される。特に異方性のある分子軌道を持つ分子を用いた単一分子デバイスにおいては、その効果は顕著である。したがって、分子の配置がデバイス特性に与える影響を解明することは今後の分子デバイスの設計に関して極めて重要である。しかし、これまで電極間のあ

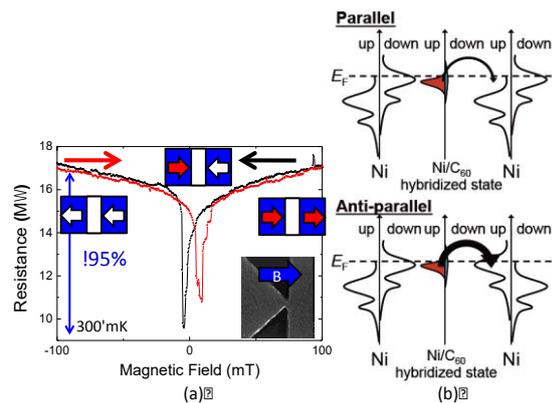


図 5 (a) 強磁性 Ni/C60/Ni 単一分子トランジスタのトンネル磁気抵抗 (TMR)、(b) Ni 電極と C60 分子の混成によるスピン依存状態密度と負の TMR の起源

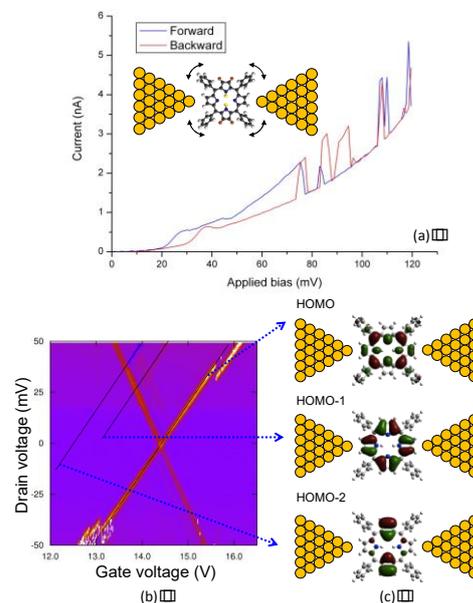


図 6 (a) 単一 H2TPP 分子トランジスタの電流-電圧特性。電圧を増加させると双安定な抵抗変化を示す。(b) 単一 H2TPP 分子トランジスタのクーロン安定化ダイアグラム。クーロン階段での抵抗の減少も観測された。(c) 基底状態と励起状態の分子軌道。

る特定の安定的配置に分子を置くことは可能であったが、その配置を外部から制御することは不可能であったため、そのような分子配置がデバイス特性に与える影響は明らかにされてこなかった。

本研究では、テトラフェニルポリフィリン分子(H2TPP 分子)を用いて単一分子トランジスタを作製し、その構造に対して電極から波形状の電氣的刺激を加えることにより、分子の配置を複数の安定的配置に変化させることに世界で初めて成功した。実験結果より、H2TPP 分子の持つ異方性分子軌道に起因した微分不正抵抗が観測されること、またその軌道エネルギーが配置変換により大きく変化することがわかった。後者の変化は電極からの鏡像効果や電界効果が分子軌道に与える影響が配置変換により大きく変化したために生じたものと考えられる。以上から、異方性分子軌道を持つ単一分子のデバイス特性は、電極間での分子配置に非常に敏感であり、電氣的刺激により配置を制御することが可能であることがわかった。

本結果は、単一分子デバイス設計に不可欠な基礎的な知見を与えるだけでなく、電氣的な単一分子配置制御の実現から単一分子メモリーや極小機械スイッチング素子という新たなデバイスの可能性も示唆される重要な結果である。

### 3) 単一量子ドットトランジスタ作製に関する基盤技術の確立

#### ■ 自己組織化 InAs 量子ドットのトンネル抵抗を支配している要因の解明とその制御

これまでの我々の研究により、量子ドットサイズと金属/ドット接合界面のトンネル抵抗に強い相関があることがわかってきたが、成長温度が異なる量子ドットを作製し、その単一電子トンネル抵抗を系統的に調べたところ、抵抗がドット/基板界面における In と Ga 原子の相互拡散による量子ドット内の組成傾斜に非常に大きく依存することが明らかになった。図7左図は、従来より低い 470 °C で成長した直径 60 nm の量子ドットを用いて作製した単一量子ドットトランジスタの特性を示したものである。d 軌道まで明瞭な殻構造が観測される。470 °C と 500 °C で成長したドットを s-p 軌道間のエネルギーで比較すると、500 °C で成長したドットの実効的な直径が 470 °C で成長したものに比べて約 15 nm 程度小さいことがわかった。これは In と Ga 原子の相互拡散効果でよく説明できる。さらに図7右図は、470 °C と 500 °C で成長したドットの s 軌道のトンネルコンダクタンスを比較したものであるが、In と Ga の相互拡散が抑制される 470 °C で成長したドットでは、高いコンダクタンスが実現できており、成長温度がトンネル抵抗の制御に非常に有効であることが明らかになった。

この高いコンダクタンスは、近藤効果の観測、超伝導クーパー対の注入によって大変有効であり、InAs 量子ドット系で 81 K という人工ナノ構造では最も高い近藤温度の観測にもつながった。

#### ■ 自己組織化 InAs 量子ドットの位置と形状の制御とその応用

量子ドット/金属接合作製の歩留まりが低い理由が、自己組織化結晶成長プロセスにおけるドット位置のランダムさである。本研究で

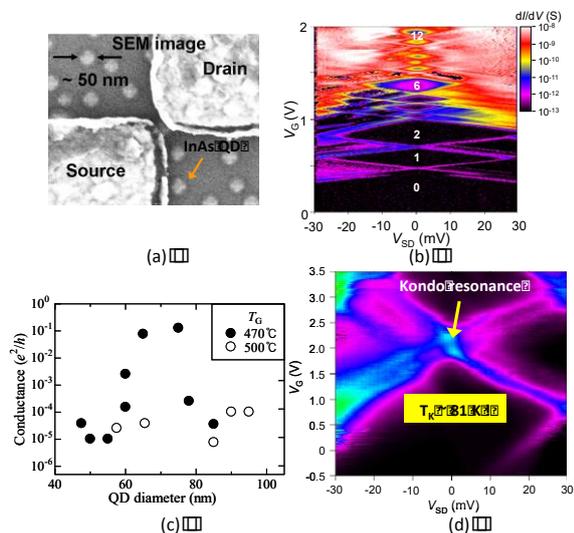


図7 (b)470°C で成長した直径 60 nm の量子ドットを用いて作製した量子ドットトランジスタのクーロンダイヤモンド。(c) 470 °C (●)と 500 °C (○)で成長した量子ドットの s 殻コンダクタンス、(d)トンネル抵抗を低減し、ドットと電極の結合を強くした試料のクーロンダイヤモンド。人工ナノ構造では最も高い 81 K という近藤効果が得られた。

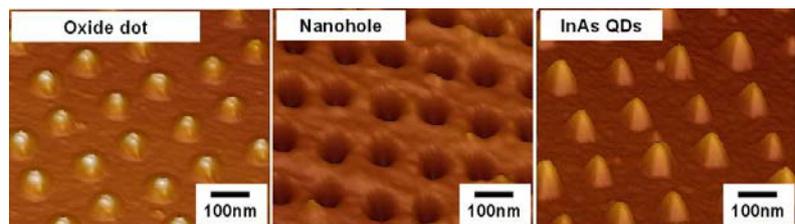


図8 (左)AFM陽極酸化を用いてGaAs基板表面上に形成した酸化物ドット、(中央)酸化物ドットをウェットエッチングした状態、(右)位置制御された量子ドット列

は、AFMを用いてGaAs表面に局所陽極酸化を行うことにより、ドットの位置制御に取り組んできた。その中で、特に基板表面に不可避免的に形成されるGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が良好な量子ドットの形成を阻害していることが明らかになった。

そこでプロセスフローを最適化し、AFM酸化により形成したピットの形状を損なわないように、低温でGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を除去する方法として、MBE中でのGa照射による低温クリーニングを行ったところ、ファセットを有する極めて結晶性のよい位置制御量子ドットを再現性よく成長できるようになった。

また、AFMで形成するピットの間隔を系統的に変えることで、図9に示すように、結合を制御した二重量子ドットの成長も可能になった。従来の自己組織化プロセスでは、平面的にトンネル結合している二重量子ドットを成長することは不可能であったが、本プロセスで初めて可能になった。

自己組織化InAs量子ドットにナノギャップ電極でアクセスする単一量子ドットトランジスタの作製

歩留まりは、典型的には1%以下である。この課題を解決するために、AFM陽極酸化法により位置制御した量子ドットを用いて単一量子ドットトランジスタを作製したところ、歩留まりを約80%にまで高めることに成功した。さらに作製した単一量子ドットトランジスタは、図10に示すように良好なクーロンダイヤモンドを示し、位置制御ドットが優れた結晶性を持っていることが確認できた。

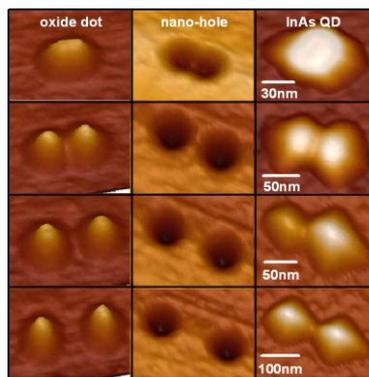


図9 AFM陽極酸化の間隔を系統的に変化させながら成長した結合二重量子ドット

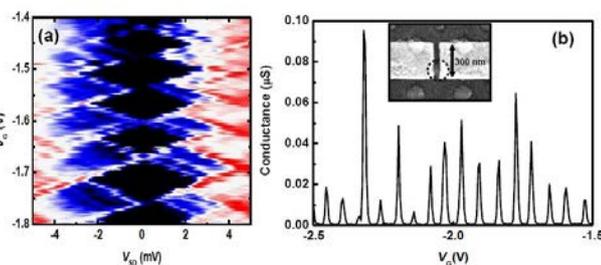


図10 位置制御されたInAs量子ドットを用いた単一量子ドットトランジスタのクーロン安定化ダイアグラム(a)とクーロン振動(b)。測定温度は300 mK。挿入図は試料のSEM像。

#### 4) 量子ドットの電子状態と量子伝導の制御

##### ■イオン液体電気二重層ゲートを用いた量子ドットの電子状態制御

単一InAs量子ドットトランジスタにおいては、高周波電界や光子等を用いた単一電荷・スピン状態の動的制御の実現が期待されている。しかし、これまで、ボトムアップ的に形成された極微細InAs量子ドットに対して、量子ドットへの光学的なアクセスを保ちつつ、その電子状態を大きく変調することは極めて困難であり、素子の制御性は非常に限られていた。

この状態を打破するため、岩佐グループ(川崎チーム)と共同で、図11(a)に示すように、光学的に透明な電解液に電圧を印加することで固体/電界液界面に形成される電気二重層で実現する極めて高い電界をゲートに用いる量子ドット電気二

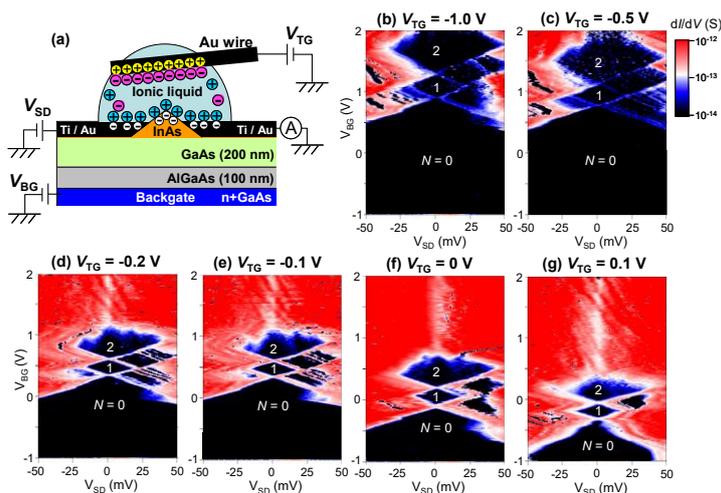


図11 (a)イオン液体を用いた電気二重層ゲートトランジスタ構造、(b)-(g)電気二重層トップゲートに様々な電圧を印加したときのバックゲートによるクーロン安定化ダイアグラム。

重層で実現する極めて高い電界をゲートに用いる量子ドット電気二

重層トランジスタを作製した。その結果、図11(b)-(g)に示すように、電解液に印加する電圧を変化させることで、素子のクーロン安定化ダイアグラムが大きく変化した。伝導特性の解析から、素子の軌道量子化エネルギー、帯電エネルギー、コンダクタンス、電子のg因子などのパラメータを、この手法を用いることで大きく変調できることがわかった。

以上の成果は、世界で初めての量子ドットに対する電気二重層トランジスタの適用であるだけでなく、広くボトムアップ量子ナノ構造の電子状態を光学的なアクセスを保ちつつ大きく変調する手法を示した点でも大きな意義がある。

### ■テラヘルツ電磁波による単一量子ドットトランジスタの伝導制御

自己組織化 InAs 量子ドットは、数～数十 meV の大きな軌道量子化エネルギーと帯電エネルギーを有している。このエネルギーの大きさは、光子エネルギーに換算するとテラヘルツ (THz) 電磁波の領域になり、量子ドット中の電子と THz 電磁波の相互作用が新しい電子物性の制御法をもたらすと期待される。我々は、ナノギャップ電極の形状をアンテナ構造とし、電子系と THz 電磁波を強く結合させることで、THz 光支援トンネル効果の観測に成功した。図12に示すように、THz 光支援プロセスにより新しい電子の伝導チャネルが開き、基底準位や励起準位を介した共鳴的な電流が観測された。また、THz 光子エネルギーと量子ドット内の帯電エネルギー、量子化エネルギーの大小関係により、光支援トンネル効果によりドットから電子が脱出した時に励起準位を経由して電子が流れるという過程も発見された。さらに、THz 強度を上げるとともに第4次までの多光子トンネルプロセスも観測された。

本研究は、量子ドットの THz ダイナミクスの解明と制御に大きな一歩となった。また THz 電磁波による伝導制御は、強磁性電極や二重量子ドットを用いることにより、スピン偏極した電子の生成に応用でき、スピントロニクス分野への新しい可能性を提供するものである。

### (2)研究成果の今後期待される展開

CMOS に代表されるシリコンテクノロジーは、その微細化が限界に近づきつつあり、構造的にも原子レベルの界面制御が必要であることが認識されるとともに、さらに CMOS を越える新しい素子原理(いわゆる beyond CMOS 素子)を探索することが急務となっている。

我々が研究を推進してきたナノギャップを有する電極構造とナノ量子構造の接合は、基本的にはトランジスタ構造を持っており、エレクトロニクスとの整合性が極めてよい。それに加えて、電極とナノ量子系の持つユニークな物性を合体して、さらに新しい機能を創造しようというものであり、デバイスに新規な概念を導入できる基礎研究である。

また、今回我々が明らかにしたエレクトロマイグレーションも、半世紀近くわたくして VLSI 分野で議論されてきた課題であり、本研究は VLSI 配線技術の問題を解決する将来の糸口を提供するものである。また、抵抗変化型メモリーには金属フィラメントの生成・断線を用いたものが多いが、その動作機構の解明は経験的な推測の域を出ていない。我々が得た原子レベルの原子移動の知見は、量子力学に根ざしたものであり、次世代高集積記憶素子の開発にも大きなインパクトをもたら

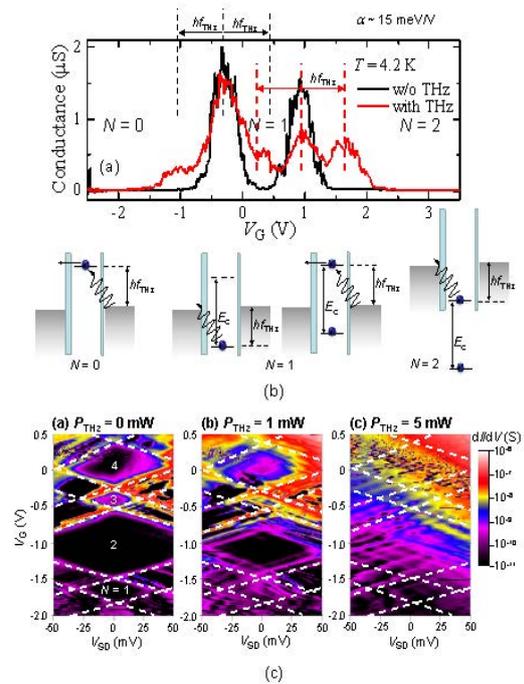


図12 (a)単一量子ドットトランジスタに2.5THzの電磁波を照射したときの線形コンダクタンススペクトル、(b)THz 光支援トンネル過程、(c)THz 強度を増していったときのクーロン安定化ダイアグラムの変化。

すであろう。

さらに、量子ドットに関しては、結晶の品質を“デバイスグレード”に保ちつつ、位置と形状の制御が可能になったことは、トランジスタへの応用のみならず、量子ドットレーザや単一光子発生源などの先端光デバイスにも大きな進展をもたらすものである。さらに、二重量子ドットの成長を行うことにより、量子もつれ電子対の生成など、量子情報処理技術へも展開する予定である。

#### 4.2 量子ドット/超伝導接合の物理と応用、およびスピンを利用した情報処理技術の研究

(東京大学 大岩グループ)

##### (1) 研究実施内容及び成果

###### 実施方法

本グループでは、InAs 自己形成量子ドットの低温単一電子量子輸送現象を測定してきた。その結果、作製プロセスによる界面制御や、InAs 量子ドット近傍に配置したサイドゲートによる電氣的な界面制御により、超伝導近接効果や近藤効果などの多体効果や、スピン軌道相互作用やg因子といった様々な物性の解明と制御など特色のある成果を挙げてきた。本プロジェクトで開発したサイドゲート電極による自己形成量子ドットパラメータ制御法は、世界的に研究が盛んな半導体ナノワイヤやカーボンナノチューブなど類似の系では実現されていない、独自の制御法である。

###### 実施内容・成果

###### ■量子ドット/超伝導・強磁性界面の電子相関の解明

量子ドットと特に超伝導体での界面で起こる相関効果の解明と制御に集中して研究を遂行した。近藤効果との相関の制御という当初目的を達成するだけでなく、量子ドット中の二準位が関係した近藤効果との相関や、界面での混成によって量子ドット中に生ずるアンドレーエフ束縛状態の分光測定など、予定を超える成果を挙げる事ができた。

・近藤効果と超伝導電流の相関 [Y. Kanai et al., Phys. Rev. B 82, 054512 (2010); Y. Kanai et al., J. Phys. Conf. ser. (accepted).]

後述のように超伝導電極 (Al) とドットの強結合状態を実現し、電子数が奇数領域で超伝導電流が抑制される  $\pi$  接合を観測した。こうした奇数電子領域では近藤効果が起こる。この近藤効果が、超伝導近接効果に及ぼす影響を実験的に解明するために、図13(a)のように量子ドット近傍にサイドゲート電極を設置した。サイドゲート電極で横方向から閉じ込めポテンシャルを変化させることで、トンネル結合が変わり、近藤効果を電氣的に制御することに成功した。そこで同一の電荷状態において、近藤温度  $T_K$  を系統的に変化させたところ、近藤温度が高い領域では超伝導電流が増大し、近藤温度が低い領域では超伝導電流が強く抑制されるという結果を得た。この相転移は  $k_B T_K / \Delta \sim 1.1$  で起こり ( $\Delta$  は超伝導ギャップ)、理論とも一致している。これはこれまでの理論を実証し、近藤相関がクーパー対のトンネルを促進することを実験的に示す結果である。

・超伝導/量子ドット/常伝導接合におけるアンドレーエフ束縛状態の検出 [R. S. Deacon et al., Phys. Rev. Lett. 104, 076805 (2010); R. S. Deacon et al., Phys. Rev. B 81, 121308(R) (2010).]

超伝導電極 (Al) と常伝導電極 (Au) を有する InAs ドット試料で、アンドレーエフ束縛状態の検出に成功した。量子ドット/超伝導接合では、量子ドットの離散状態と超伝導体との混成により、ドット中にアンドレーエフ

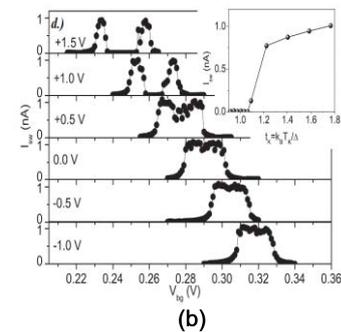
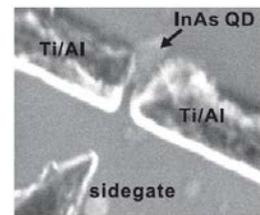


図 13 (a)試料の電子顕微鏡写真。(b)奇数電子領域で電流駆動 4 端子法により測定した臨界電流( $I_{sw}$ )のサイドゲート電圧依存性。挿入図は相関パラメータ  $k_B T_K / \Delta$  に対して  $I_{sw}$  をプロットしたもの。

束縛状態が形成される。このアンドレーエフ束縛状態は、超伝導近接効果に重要な役割を果たすことが知られており、接合の基底状態について重要な情報を与える。我々はクーパー対伝導のそのゲート電圧依存性から、基底状態が BCS 一重項状態から二重項状態への相転移、近藤状態とのクロスオーバーなど重要な新しい知見を発表した。

### ■超伝導電流制御素子の開発

この課題では、まず InAs 量子ドットジョセフソン接合を実現し、超伝導電流を観測することに成功した。これは前述の近藤効果との相関を研究する上で、本プロジェクトの重要な成果である。さらにゲート電圧による超伝導電流の制御や、接合界面の改善による大きな超伝導電流の実現など、超伝導電流を電氣的に制御する素子の基盤となる技術を開発した。

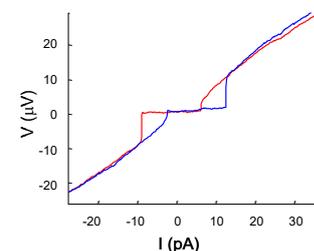
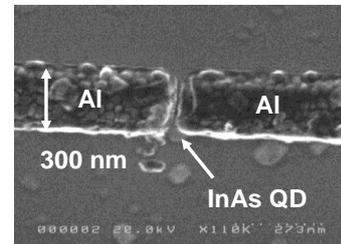


図 14(上)Al 電極を有するナノギャップ試料の走査型電子顕微鏡写真。(下)InAs 量子ドットで観測された典型的な超伝導電流特性。

・量子ドットと超伝導接合系で発現するクーパー対トンネル [Y. Kanai et al., J. of Phys.: Conf. ser., 150, 022032 (2009); Y. Kanai et al., Appl. Phys. Lett. 100, 202109 (2012).]

狭い Al ナノギャップ電極の作製とドット/超伝導体界面の改善から、強結合ドットを実現し、超伝導電流を観測することに成功した(図 14(下))。さらに臨界電流の大きさがゲート電圧に対して変化する基底状態の偶奇性を反映して、増大または抑制されるという興味深い現象を観測した。臨界電流の大きさは超伝導ギャップから期待される値よりもはるかに小さかったが、その後、数 nA 程度の比較的大きな臨界電流も実現できた。超伝導電流の観測は研究開始 1 年ほどで達成し、多くの成果を挙げる足がかりになった。さらに強結合領域での準位の重なりを制御することにより、超伝導電流の制御も実現している。これらの成果は超伝導電流制御素子の基本動作を示すものである。

### ■単一電子スピン制御素子の開発

InAs は強いスピン軌道相互作用と大きな g 因子を持つことが知られ、スピン量子ビットとして量子情報処理への応用が期待される。そこで我々は、量子ドットにおけるスピン軌道相互作用の解明と電氣的制御、さらに高周波印加による単一電子スピンコヒーレント制御を目指してきた。その結果、スピン軌道相互作用や g 因子については予想以上の成果を挙げる事ができたが、単一電子スピン制御素子は、いまだ実現には至っていない。

・スピン軌道相互作用の定量的評価と、電氣的制御 [S. Takahashi et al., Phys. Rev. Lett., 104, 246801 (2010); Y. Kanai et al., Nature Nanotechnology 6, 511 (2011)]

始めに InAs 量子ドットにおけるスピン軌道相互作用の定量的評価とその起源の解明に取り組んだ。励起状態分光法を使い、スピンと軌道量子数が異なる 2 つの状態の状態遷移点において、スピン軌道相互作用による状態反交差を観測することにより、スピン軌道相互作用エネルギーが最大で 100 μeV 程度であることを明らかにした(図 15(a))。これは当時すでに報告があった InAs ナノワイヤの値と同等であった。またこのスピン軌道相互作用の外部磁場角度依存性は、ラ

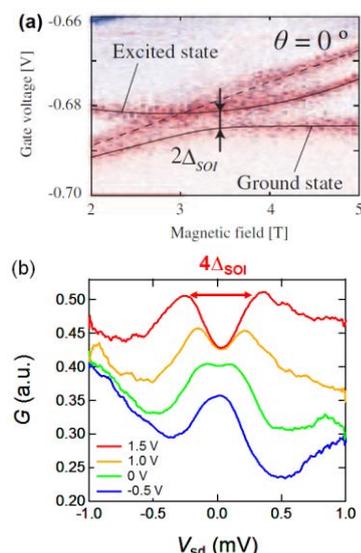


図 15 (a)InAs 量子ドットにおける励起状態スペクトルの磁場依存性。基底状態遷移磁場で反交差が観測される。その大きさが  $2\Delta_{SOI}$  である。(b)異なるサイドゲートで測定した近藤ゼロバイアス異常の分裂。分裂幅がスピン軌道相互作用エネルギーに相当し、サイドゲート電圧に依存してスピン軌道相互作用エネルギーが変化してい

シュバ型スピン軌道相互作用としてよく説明できることを明らかにした。この手法は、量子ドットにおけるラシュバ型スピン軌道相互作用の実験的証明として、他の研究グループで採用されている。その後、サイドゲート電圧によりスピン軌道相互作用の大きさを制御することに成功した。これはサイドゲートが横方向の閉じ込めポテンシャルを変化させると、関与する状態の波動関数が、それぞれ異なる影響を受け、その結果、有効スピン軌道相互作用磁場が変化するためだと考えられる。この実験では、近藤効果によるスピン軌道相互作用エネルギーの定量的評価も初めて実現した(図3(b))。

・InAs 量子ドットにおける g 因子の電氣的制御と g テンソル変調  
 スピン共鳴[R. S. Deacon et al., PRB 84, 041302 (2011); S. Takahashi et al., in preparation]  
 g 因子の解明と制御も新たな電子スピン操作をもたらす。我々は、本プロジェクトで導入したベクターマグネットを用い、世界で初めて3次元的に量子ドットの g 因子の異方性を明らかにした(図16)。さらに InAs 量子ドットに近接したサイドゲートを用いて、その g 因子(テンソル)の異方性の電氣的制御に成功した。g テンソルの変化はスピン歳差回転軸の変化を意味しており、g テンソル変調による電子スピン共鳴が可能で、数 MHz 程度のラビ振動が実現できることを示した。

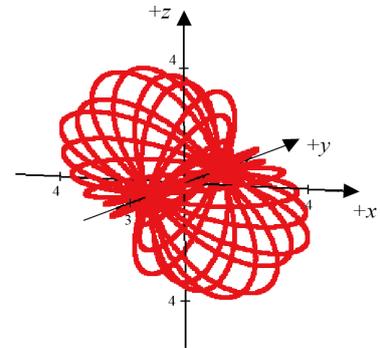


図16 InAs 量子ドットにおける異方的 g 因子の3次元極プロット

## (2)研究成果の今後期待される展開

超伝導体との接合界面の研究では、これまで理論研究が先行していた領域で、実験的に新しい知見を得ると共に、理論の実証など、基礎物理の点で大きな成果を得たと考える。量子ドットジョセフソン接合の超伝導電流や  $\pi$  接合の観測など、半導体ナノワイヤ量子ドットやカーボンナノチューブで先行研究があったが、アンドレーエフ束縛状態の検出や、近藤効果による  $\pi-0$  接合相転移の系統的測定は、何れもこれまで報告がなく、超伝導/量子ドット系の大きな進展である。特に近年、半導体ナノワイヤでの強いスピン軌道相互作用によるマヨラナフェルミオンの観測が、固体物理での新しいトピックスとして世界的な注目を集めているが、本研究成果である超伝導/量子ドット接合技術や束縛状態分光測定は直接これらの研究に生かすことができ、実際、我々はマヨラナ束縛状態検出の研究も開始している。また本研究で重要な役割を果たしたサイドゲート法は、今後、自己形成ドットだけでなく、半導体ナノワイヤやカーボンナノチューブなど様々な量子ドット・半導体低次元構造の研究で幅広く活用され、進展させると期待する。

量子ドット中のスピン軌道相互のメカニズムと電氣的制御を本プロジェクトでかなり解明することができた。近年、スピン軌道相互作用を使ったスピン量子ビットが有望視されており、そうした量子ビットの実現と更なる性能の向上のために大変重要な知見が得られたと考えている。また g 因子の電氣的制御の成果も、新しいスピン量子ビットの動作原理の可能性を示唆している。

より高速で動作するスピン量子ビットへの応用はこのようにスピン軌道相互作用が電氣的に制御できることを駆使して、強いスピン軌道相互作用により電子スピンの回転操作を行い、スピン情報を保持する時には、スピン軌道相互作用を弱くして、情報の散逸を抑えるという、スピン量子情報にとって理想的な機能を有する従来にない素子の提案と実証へと展開が期待される。

また本研究では、自己形成量子ドットを使って、スピン量子ビットとしての可能性の一端を示したが、自己形成量子ドットの位置制御成長法と組み合わせることで、集積化可能への道が開け、将来、コヒーレンス時間など量子ビットの性能を向上させることで、現在、量子計算機の開発で、様々な固体量子素子開発者が直面している多ビット化を解決し、現実的な量子計算機実現へのブレークスルーへつながると期待する。

#### 4.3 量子ドット/強磁性電極接合の物理と応用(東京大学生産技術研究所 町田グループ)

##### (1)研究実施内容及び成果

###### 1) 量子ドット/強磁性界面の向上

強磁性ナノギャップ電極を有する InAs 単一量子ドット素子を作製し、低温における電気伝導特性を測定した。強磁性金属/InAs 界面の向上による素子特性の改善のため、強磁性電極としてコバルト、鉄、ニッケル、パーマロイの4種類の金属で比較を行った。

強磁性金属/InAs 界面にある酸化物や不純物などをできるだけ除去して、トンネル特性を向上させることにより、量子ドットと電極間の強い結合を実現し、量子ドットスピンバルブ素子において近藤効果を観測した。強磁性電極との相互作用により、近藤共鳴ピークの分裂が観測された。外部磁場の印加により近藤共鳴ピークの分裂は減少し、1.2 T 程度で一旦消失した後、再度分裂幅が増大する。[K. Hamaya, K. Hirakawa, T. Machida *et al.* Appl. Phys. Lett. 91, 232105 (2007).]

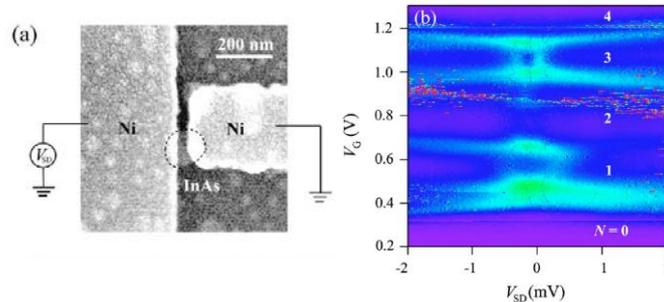


図 17 量子ドットスピンバルブ素子における近藤共鳴ピークの分離

###### 2)トンネル磁気抵抗効果の制御

量子ドットスピンバルブ素子:強磁性金属/InAs 量子ドット/強磁性金属接合を作製し、スピン伝導を観測した。トンネル磁気抵抗効果(TMR)が明瞭に観測され、強磁性電極から量子ドットへのスピン偏極電流の注入およびスピン依存伝導の検出を実現した。さらにTMRのゲート電圧依存性およびソースドレイン電圧依存性を明らかにし、ゲート電圧およびソースドレイン電圧によりTMRの大きさと極性が系統的に変化する様子を観測した。スピン偏極電流の注入・制御・検出を単一の半導体素子において実行しており、単一量子ドットスピン FET 素子の実現に相当する。[K. Hamaya, K. Hirakawa, T. Machida *et al.* Phys. Rev. B 77, 081302 (2008).]

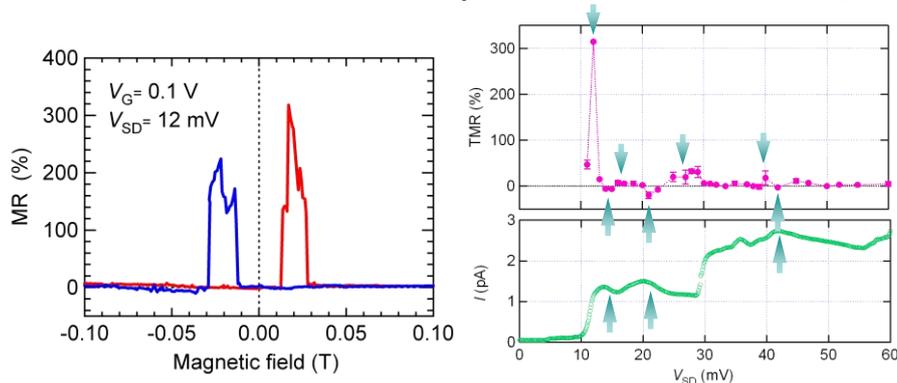


図 18 量子ドットスピンバルブ素子におけるトンネル磁気抵抗効果

###### 3) 単一量子ドットスピンバルブ素子における電子数・軌道状態制御

###### 3.1 小数電子を含む量子ドットスピンバルブ素子におけるトンネル磁気抵抗効果

電子数を  $N=0,1,2,3$  の範囲で制御可能な単一 InAs 量子ドットに対して強磁性ナノギャップ電極を作製し、スピン伝導を観測した。 $N=1 \leftrightarrow 2$  の単一電子トンネル領域においてTMRが明瞭に観測されたが、この領域において観測されるTMRは負の極性のTMRのみであることが明らかになった。

観測した負のTMR効果は通常のスピン注入・スピン蓄積描像では説明できない現象であり、量子ドット中の準位がスピン分離したことによるスピン依存伝導によると考えられる。つまり、量子ドット中の電子数が  $N=2$  である時、基底状態がスピン一重項を形成することにより、強磁性電極の磁化が平行配置の場合は強磁性電極→量子ドットおよび量子ドット→強磁性電極の伝導がマイノリティスピン伝導に起因するのに対し、強磁性電極の磁化が反平行配置の場合は量子ドット→強磁性電極の伝導がマジョリティスピン伝導に起因するため伝導度が大きくなることにより、負の極性のTMRが観測されると理解することが出来る。量子ドットのチャージングエネルギーの相当するソースドレイン電圧を印加することによりTMR効果が消失していく様子が観測されており、上記の描像を支持している。[K. Hamaya, K. Hirakawa, T. Machida *et al.* Appl. Phys. Lett. 93, 222107 (2008).]

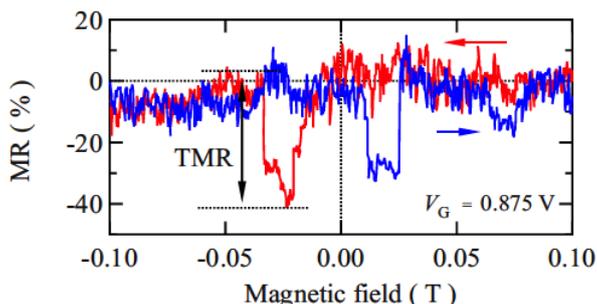


図 19 量子ドットスピンバルブ素子 ( $N=1\leftrightarrow 2$ ) におけるトンネル磁気抵抗効果

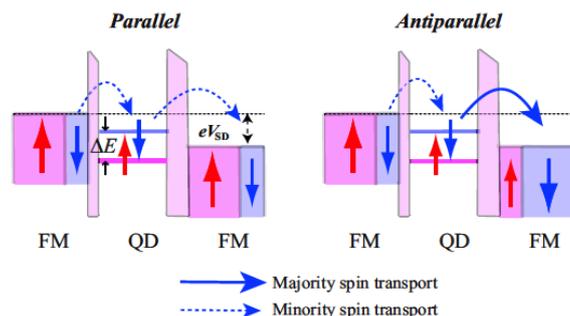


図 20 量子ドットスピンバルブ素子 ( $N=1\leftrightarrow 2$ ) におけるスピン依存伝導

#### 4) スピンフィルター効果の実現

##### 4.1 強磁性電極/InAs 量子ドット/非磁性電極接合におけるスピントラップ効果の観測

単一 InAs 量子ドットに対して強磁性電極および非磁性電極を付与した強磁性電極/InAs 量子ドット/非磁性電極構造を作製した。電気伝導測定で得られるクーロンダイヤモンドにおいて、量子ドット中の電子数が  $N=1\leftrightarrow 2$  と移り変わるべき領域において、強磁性電極から量子ドットへの電子注入が顕著に抑制される現象が観測された。人工原子的な特性を示す量子ドットに対して、強磁性電極から上向きスピン偏極した電子の注入がスピントラップ効果により抑制されたためと理解できる。強磁性電極/InAs 量子ドット接合におけるスピントラップ効果の初めての観測である。[K. Hamaya, K. Hirakawa, T. Machida *et al.* Phys. Rev. Lett. 102, 236806 (2009).]

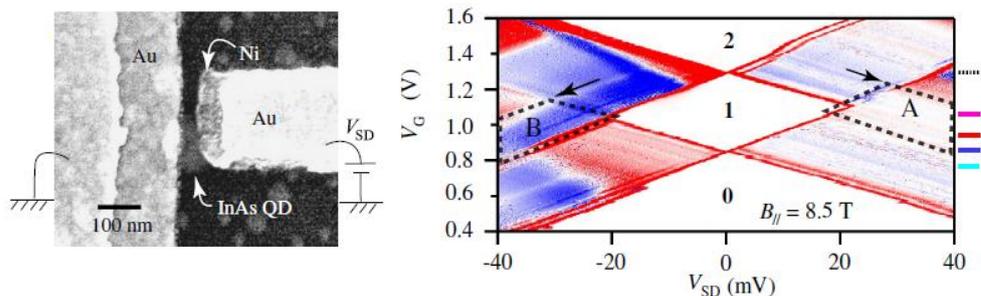


図 21 強磁性電極/InAs 量子ドット/非磁性電極接合におけるスピントロニクス効果の観測

5) 原子間力顕微鏡を用いた単一量子ドットへのナノギャップ電極作製

これまでの InAs 量子ドット/ナノギャップ電極接合の作製手法は、量子ドットがランダムな位置に形成された基板の上に電子線リソグラフィによって大量のナノギャップ電極を作製し、その中から偶然に量子ドットとナノギャップが接合した素子を用いる手法である。従って、ナノギャップ電極と量子ドットの接合は偶然の配置に依存しており、(1)素子作製の収率が極めて低く、(2)接合する量子ドットの形状や大きさを選択できない、(3)量子ドットと金属電極の重なり具合(両者間の相互作用強度)を調整できない、(4)二重量子ドットや三端子以上の電極など、素子構造の複雑化が困難といった課題があった。

ナノギャップ電極を量子ドットの位置に正確に配置して作製するためには、量子ドットの位置観察と電極の微細加工を同じシステムで実行する必要がある。表面観察機能と表面微細加工機能をあわせ持つ原子間力顕微鏡(AFM)に着目し、AFMを用いた局所陽極酸化法による単一量子ドットへのナノギャップ電極作製を行った。InAs 量子ドットがランダムに配置された基板の上に金属の薄膜細線を作製し、選択した単一量子ドットの直上を横切るようにカンチレバーを走査することにより、量子ドット直上に金属酸化物を形成する。絶縁体である酸化物が金属薄膜細線の電気伝導を遮断するため、金属/酸化物/金属の構成によるナノギャップ電極となり、量子ドットが伝導チャネルとなる。作製した SET 素子の電気伝導特性を測定したところクーロン振動が観測され、この新たな手法で作製した単一 InAs 量子ドット/金属ナノギャップ電極接合が単電子トランジスタ素子として動作していることを示している。さらにリソグラフィ技術の向上により人工原子的な特性も観測している。また同手法を強磁性金属へも適用し、量子ドットスピバルブ素子も作製している。[R. Moriya, K. Hirakawa, T. Machida *et al.* Appl. Phys. Express, 3, 035001 (2010)]

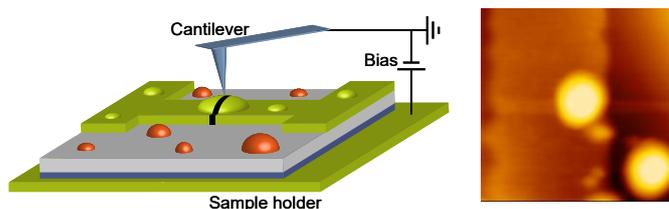


図 22 原子間力顕微鏡による局所陽極酸化を利用したナノギャップ電極作製

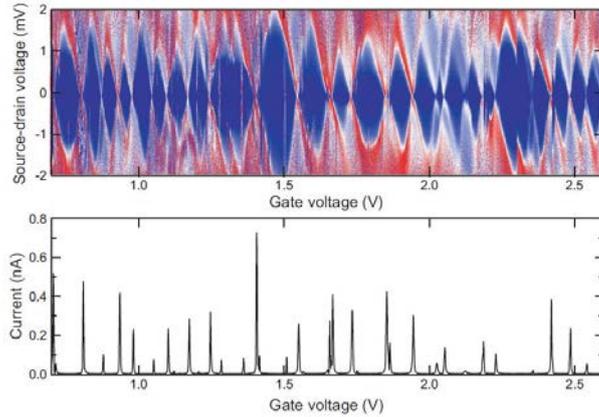


図23 AFM局所酸化法により作製した単一 InAs 量子ドット/ナノギャップ電極接合の電気伝導特性 (30 mK)。

## (2)研究成果の今後期待される展開

スピントロニクス分野において、スピン FET の早期実現が切望されている。スピン偏極電流の注入・制御・検出というそれぞれの技術については研究開発が発展してきているものの、全ての要素技術を単一の素子で実現することが困難であった。本研究では半導体量子ドットを用いることにより、スピン偏極電流の注入・制御・検出を単一の半導体素子において可能にしておき、単一量子ドットスピン FET 素子を実現したことに対応する。今後のスピントロニクス技術の発展に寄与する重要な基礎的成果である。

本 CREST プロジェクトで示したように、半導体量子ドット+ナノギャップ電極の系は新たな物理現象が数多く観測され、素子応用への可能性も拓けている。一方、これまでのナノギャップ電極作製手法では、任意の単一量子ドットに対して選択的にナノギャップ電極を作製することが不可能であった。この技術的課題を解決する1つの可能性は平川グループで行っている、半導体量子ドットの選択成長であり、もう1つの可能性は、我々のグループで行っている原子間力顕微鏡 (AFM) を利用したナノギャップ電極作製である。この新たな手法で作製した単一 InAs 量子ドット/金属ナノギャップ電極接合が単電子トランジスタ素子として動作することを示し、原理的には任意の半導体 InAs 量子ドットを狙ってナノギャップ電極を作製できることを示した。従って、本研究分野の最大の技術的課題を解決したことになり、今後の発展可能性が拓けた。

## 4. 4 グラフェン/超伝導接合の物理とデバイス応用 (東京理科大学 高柳グループ)

### (1)研究実施内容及び成果

#### 1) 超伝導/グラフェン接触界面の作成とその特性解明

超伝導体-グラフェン-超伝導体 (SGS) 接合に於いて、グラフェンチャンネル中に超伝導電流を流すためには、SG 界面ポテンシャルバリアの低い良好なコンタクト形成が不可欠である。これを実現する方法の一つとして、超伝導体とグラフェンの間に薄い Ti 密着層を挿入する手法が知られている。しかしこの際のコンタクト形成過程は自明ではなく、例え Ti 層を挿入しても容易にはコンタクト抵抗は低減できない。この要因を明らかにするため、図 24(c)に示すような Al/Ti(100/10nm)-グラフェン構造を有する SGS 接合を様々な条件下で作製し、その輸送特性を評価した。

作製した接合の極低温に於ける微分抵抗・バイアス電圧 ( $dV/dI$ - $V$ ) 特性を図 24(a)に示す。黒線は Ti を  $5\text{\AA}/\text{sec}$  で成膜した試料の、赤線は  $0.5\text{\AA}/\text{sec}$  で成膜した試料の  $dV/dI$ - $V$  特性をそれぞれ示している。 $0.5\text{\AA}/\text{sec}$  試料ではゼロバイアス近傍で  $dV/dI$  が増大しているが、 $5\text{\AA}/\text{sec}$  試料ではゼロバイアス近傍に於いて  $dV/dI$  が減少する。また  $0.5\text{\AA}/\text{sec}$  試料は  $5\text{\AA}/\text{sec}$  試料よりも抵抗値が一桁大きい。これは前者では界面のポテンシャルバリアが高く、後者ではそれが低くなっていることを示している。さらに  $5\text{\AA}/\text{sec}$  試料では  $n = 1, 2, 3$  とラベルしたバイアス電圧に於いて多重 Andreev 反射に伴う準調和エネルギーギャップ構造が見られる。これは電極の超伝導性がグラフェンチャネ

ル内に誘起され、グラフェン中で超伝導に伴うコヒーレントな輸送現象が生じていること表している。つまり Al/Ti/グラフェン構造作製時の Ti 薄膜蒸着レートが、グラフェン中で超伝導輸送特性に大きな影響をおよぼすことがわかる。

この要因を明らかにするため、 $0.3\text{\AA}/\text{sec}$  と  $5\text{\AA}/\text{sec}$  の蒸着レートでグラフェン上に Ti(10nm)を蒸着し、その表面構造を AFM により観察した。図 24(b)に示すように、 $0.3\text{\AA}/\text{sec}$  ではグラフェン上に Ti の島状構造がはっきりと見られるが、 $5\text{\AA}/\text{sec}$  ではそのような構造が見られず、一様な Ti 薄膜がグラフェン上に形成されることが明らかになった。図 24(c)に示すように、この一様な Ti 薄膜が Al/グラフェンの実効的な接触面積を増大させ、コンタクト抵抗を減少させている。TLM 法によるコンタクト抵抗 ( $R_c$ ) 測定では、 $5\text{\AA}/\text{sec}$  試料では  $R_c \sim 50\Omega$  まで低減できることが明らかになった。これまでも接触面積を大きく取ることによりコンタクト抵抗が低減できるという報告はあったが、それを実現する具体的手法については明らかにされていなかった。我々はこのコンタクト形成過程を明らかにした。またこの手法であれば、Pd 等の Ti 以外の金属も挿入層に使用可能であり、更なるコンタクト抵抗低減も可能とされるはずである。

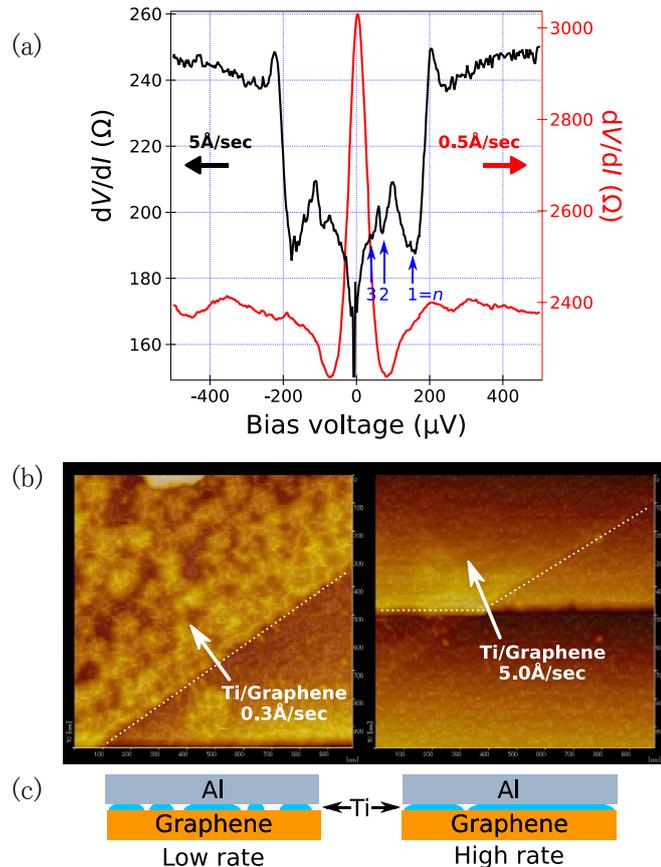


図 24 (a)Ti 蒸着レート  $5\text{\AA}/\text{sec}$ (黒線)と  $0.5\text{\AA}/\text{sec}$ (赤線)試料の  $T=35\text{mK}$  に於ける  $dV/dI$  特性 (b)グラフェン上に蒸着した Ti 薄膜(10nm)の AFM 像:左  $0.3\text{\AA}/\text{sec}$ 、右  $5\text{\AA}/\text{sec}$  (c)Ti 蒸着レート制御によるコンタクト形成過程制御の模式図

## 2) グラフェン SQUID の開発

前記により得た知見を元に、2つの SGS 接合を超伝導ループ上に配置したグラフェン SQUID を作製し、その輸送特性を評価した。

作製したグラフェン SQUID の構造を図 25(a)に示す。各 SGS 接合の幅は  $W=2\mu\text{m}$ 、SQUID ループサイズは  $30\mu\text{m}^2$  と設計した。接合の長さは  $L=70\sim 350\text{nm}$  の間で複数の試料を作製した。 $T=35\text{mK}$  に於けるデバイス( $L=150\text{nm}$ )のゲート電圧  $V_g=+60\text{V}$  に於ける  $I$ - $V$  特性は図 25(b)の通りで、グラフェンチャネル中を流れる超伝導電流(臨界電流:  $I_c \sim 300\text{nA}$ )が観測できた。 $I_c$  のバックゲート電圧( $V_g$ )依存性が図 25(c)で、 $V_g$  印加によって  $I_c$  が約  $50\sim 300\text{nA}$  の範囲にわたって制御できていることがわかる。 $I_c$  の極小点がグラフェンの電荷中性点に対応し、従来の報告通り電荷中性点に於いても有限の  $I_c$  が見られた。電荷中性点を中心とした左右非対称性は Al/Ti 電極によるドーピングのためであり、同図に示したノーマルコンダクタンス( $G_N$ )のゲート電圧特性にも見て取れる。さらにデバイスの磁場応答を評価した結果を図 25(d)に示す。 $I_c$  が印加磁場( $B$ )に対し、 $\sin$  関数的な振動を示していることがわかり、フィッティングにより求められ振動周期は約  $0.7\text{G}$  であった。この周期はデバイス構造から見積もられる周期  $0.69\text{G}$  と非常に良く一致し、作製したデバイスがグラフェン SQUID として動作することが確認された。 $I_c$  の磁場特性は、 $I_c(B) = \sqrt{I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + 2I_{c1}I_{c2}\cos(2\Phi/F_0)}$  で表される。ここで  $I_{c1}$  と  $I_{c2}$  は接合1と2の臨界電流値を、 $\Phi_0$  は磁束量子である。これを用いて、 $I_c$ - $B$  特性をフィッティングすると、 $I_{c1} : I_{c2} \sim 10:9$  程度であることが確認できた。これは SQUID 内の2つ

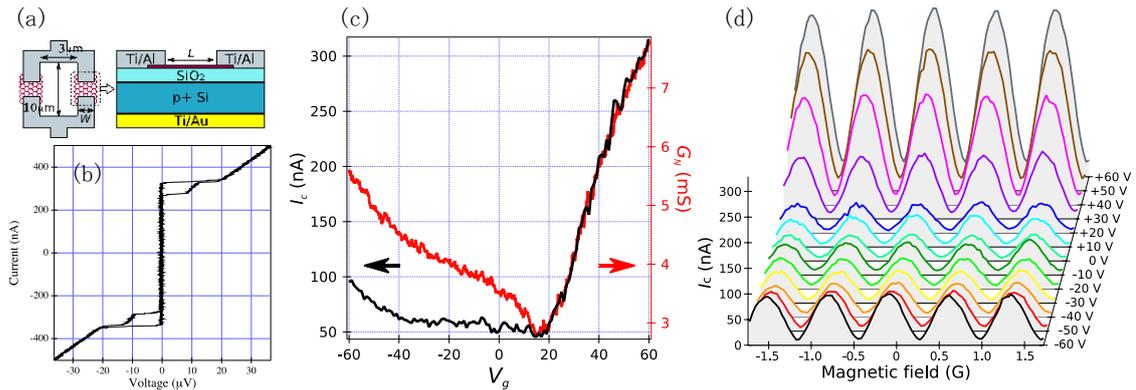


図25 (a) グラフェン SQUID の構造、(b)  $T=35\text{mK}$ 、 $V_g=+60\text{V}$  に於ける SQUID の  $IV$  特性、(c)  $T=35\text{mK}$  に於ける臨界電流値のゲート電圧依存性(黒線)とノーマルコンダクタンスのゲート電圧依存性、(d) 臨界電流値のゲート電圧・磁場依存性

の SGS 接合がほぼ均一に作製できていることを示しており、我々の超伝導体-グラフェンコンタクト形成技術が非常に優れていることがわかる。Girit らは SGS 接合では特有の電流位相関係が見られるのではないかという報告をしているが、我々のデバイスの SQUID 動作特性ではこのような特性は見られなかった。これは我々のグラフェンチャネル中の伝導が拡散的であることに起因すると考えられる。このことは、図 25(c) の  $G_N \cdot V_g$  特性から求めたグラフェンチャネル中での平均自由行程が約  $20\text{nm}$  と接合長  $L$  よりも短いことから確認された。

バリスティックな SGS 接合を用いたデバイス開発が今後の課題であるが、現時点ではゲート電圧・磁場によって制御可能なデバイス開発に成功している。

### 3) 光検出器への応用可能性探索

SGS 接合の光検出器への応用可能性を探るため、極低温下の試料に対して波長  $1.31\mu\text{m}$  の光を照射し、SQUID 動作の変化を測定した。図 26 は  $I_c \cdot B$  特性の光照射パワー依存性を示している(光照射パワーをレーザーダイオードの電流値で示している)。光照射パワーの増大に伴って、 $I_c$  の振動振幅が減少するとともに、あるパワー以上の光照射下では振動周期が短くなることわかる。これは図 25(d) の  $I_c \cdot B$  特性の温度変化に見られるような、単純な振動振幅の減少とは本質的に異なっている。この減少の物理的背景はまだ明らかではないが、これを応用した新たな光検出器を開発できるものと期待される。

これまでは超伝導電極に Al を用いたデバイス開発を進めてきた。しかし、高感度光子検出器等に SGS 接合を応用する上では、より超伝導ギャップエネルギーの大きな超伝導材料を用いた SGS 接合作製技術が必要である。これにより、高温域や強磁場下といったさまざまな条件下で動作可能なデバイスが実現可能となる。これまでに Pb、NbTiN、ReW 等を用いた SGS 接合に於ける超伝導電流観測の報告が成されているが、我々は NbN を用いた SGS 接合の開発を進めた。NbN はスパッタリングにより容易に作製でき、さらに  $20\text{T}$  程度の強磁場中でも超伝導性が保たれることが知られており、今後のデバイス応用に於いて非常に重要な材料である。

ここでも Ti 薄膜挿入によるコンタクト形成法を応用し、NbN/Ti/グラフェン構造により良好なコンタクト形成を試みた。作製した試料は NbN/Ti-グラフェン-Ti/NbN 接合で、NbN/Ti の膜厚は  $100/10\text{nm}$  である。接合幅は  $W=2\mu\text{m}$ 、接合長は  $L=350\text{nm}$  の試料を作製した。この試料では  $T=35\text{mK} \sim 1.2\text{K}$  に於いて超伝導電流が流れることを確認している。 $I_c$  の磁場特性を図 27 に示す。ブラウンホーファー型の  $I_c$  の振動を仮定してフィットした結果が赤線である。振動周期自体は作製した SGS 接合サイズと NbN 電極内への磁束侵入を考慮した振動周期とほぼ一致するが、通常のブラウンホーファー型の振動からは大きくずれていることが見て取れる。この要因に関しては、接合内部での不均一な電流分布等が考えられるが、詳細については検討中である。

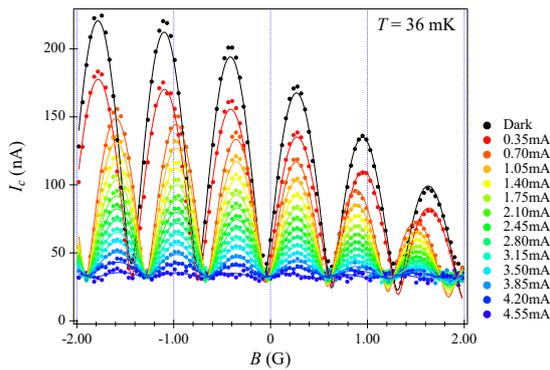


図 26 SQUID 試料の  $I_c$ - $B$  特性の  
光照射パワー依存性

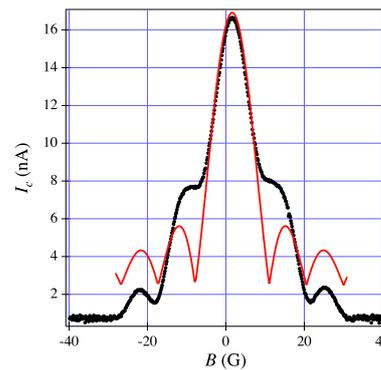


図 27 NbN を用いた SGS 接合の  $I_c$ - $B$  特性

## (2)研究成果の今後期待される展開

本研究で明らかにした様々な超伝導体とグラフェン間のコンタクト形成手法は、実用的なグラフェン超伝導デバイス開発や、強磁場と超伝導の競合といったグラフェンを舞台とした新規な超伝導現象の研究に対する基盤技術を提供する。また本手法は、通常の金属電極作製に対しても共通する知見を与えるものである。

## 4.5 分子およびグラフェン系の機能探索 (東北大学 塚田・田村グループ)

### (1)研究実施内容及び成果

#### 1) ナノギャップの形成機構の解明

主に、エレクトロマイグレーションの理論解析について研究を行った。平川グループでは、接触した島状金電極間にバイアス電場をかけると、ある条件化で急激にコンダクタンスが減少しナノギャップ形成にいたることを見出し、これを用いたナノギャップの形成・制御法を開発した。本研究ではこの現象の素過程を解明するため、括れ部の原子が抜け出しエレクトロマイグレーションする機構を、第一原理非平衡グリーン関数法と運動学的モンテカルロ法により解明した。具体的には、金の鎖上に吸着した原子のポテンシャル面が印加電圧と電流によりどのような影響を受けるかを、理論計算で明らかにした。印加電圧による金原子の移動経路に沿うポテンシャルの変化から、金原子の移動方向は電子流と同じ向きになることがわかり、活性障壁の電圧依存性から見積もった金原子の移動度の温度依存性の傾向は、実験と矛盾がないことなどを見出した。(M.Araidai et al, Phys. Rev.B80 (2009) 045417)

一方、本研究では上記の断熱過程によるエレクトロマイグレーションの他に、ナノ架橋内を弾道的に運動する電子が、有限なエネルギー量子を表面原子に与えて量子ジャンプさせ、振動励起または並進励起させる非断熱的な励起過程が可能であることを見出した。我々は、この非断熱エレクトロマイグレーションプロセスは弾道的電流強度が支配的であるナノ電極系では特に著しくなることを見出し、マイグレーションの確率が温度やバイアス電圧によりどう変化するかを理論的に調べた。(M.Araidai and M.Tsukada, Phys. Rev. B84, (2011) 195461) その結果、温度が室温程度より低い場合には、バイアス電圧がある数居値を超えると非断熱的なエレクトロマイグレーションが熱活性的(断熱的)エレクトロマイグレーションよりも支配的になることが見出された。弾道的な電子が非断熱的に量子ジャンプして、表面原子を格子位置からキックアウトする過程も同様に可能であり、ナノ系でのエレクトロマイグレーションにおける支配的な素過程であることが明らかになった。

#### 2) 電極結合とコンダクタンス

特に、分子架橋系の電圧電流特性について研究した。分子接合系を電子デバイスとして利用するとき、その基本的な性質は  $I$ - $V$  特性を通して現れる。しかし  $I$ - $V$  曲線は、分子と電極の組み合わせで決まり、通常、著しい非線形性を示し、そのメカニズムの理論的な解明は理論研究で解決すべき主要な課題である。多くの有機分子では、 $I$ - $V$  曲線をファウラー・ノルトハイム(FN)プロットす

ると、遷移電圧(transition voltage)と呼ばれる電圧値で鋭い屈折点が出現する。この transition voltage spectroscopy という計測法のもとになる現象についての従来の解釈は、直接トンネルメカニズムから電界放出メカニズムへの移り変わりによるとするものであるが、架橋分子内でのマイクロなポテンシャル分布を反映しないためにその妥当性が疑われていた。

本研究では第一原理計算と非平衡グリーン関数法を併用して、ベンゼンチオールなど種々の分子系の電流電圧特性を直接計算し、FNプロットにおける鋭い屈折点の出現を再現した。(M.Araidai and M.Tsukada, Phys. Rev. B81 (2010) 235114) このように現象論的な仮説を用いない非平衡系の電子状態計算から、FN プロットにおける屈折点出現のメカニズムが明らかにされた。そのメカニズムは、分子の共鳴準位がバイアス窓に接近するときの急激な電流増加を反映するものである。この屈折点に対応する電圧、すなわち遷移電圧(transition voltage)は、分子と電極材料の組合せに固有なものであり、電極のフェルミ準位に相対的な分子共鳴のエネルギー準位によって決定されることを明らかにした。

### 3) 外部環境と電子系の相互作用

以下に述べる3つの課題 i, ii, iii について研究を行った。

#### [i] 分子接合系の電子移動におけるコヒーレンスと散逸

分子接合系の電気伝導においては、環境系との相互作用や電極分子間のボトルネックの強さによりコヒーレント過程と散逸的な過程とが競合・共存する。我々はその状況を、簡単な理論模型によりエネルギー損失スペクトル関数(ELSF)を用いて解析し、コンダクタンスのゼロバイアス異常やポーラロンブロッケードなどの新しい現象を予言した。また、接合系の電気伝導におけるコヒーレント過程から散逸的過程への移り変りを解明し、デコヒーレンスが温度や環境との相互作用によりどのように影響を受けるかを明らかにした。(M.Tsukada, et al, J. Phys. Soc. Jpn., 78 (2009) 084701)

#### [ii] 分子を用いた光電変換系の理論

ナノギャップに挿入される有機分子の光電変換過程に注目し、その基礎となる励起子移動および電荷分離を解析するため第一原理計算と量子動力学法による解析を行った。(H.Tamura, et al, J. Phys. Chem. C113, (2009) 7548) 有機導体では、特に有機分子の特徴である強い電子格子相互作用が励起子やキャリアの動力学に重要な影響を与える。有機導体のキャリアは格子変位を伴うポーラロンとして伝導する。また、励起子・キャリアの欠陥へのトラッピング過程を理解するためには、量子コヒーレンスと散逸過程を同時に考慮する必要がある。本研究では、電子格子相互作用を考慮した量子動力学法を用いて分子集合体中の励起子動力学を検討した。ポルフィリン分子の会合体について励起子移動過程、トラッピング過程、及び非局在励起子のダークエキシトンへの緩和過程について検討した。また、フレーレン会合体およびルブレン単結晶をモデル系として、量子コヒーレンスと、格子歪み、熱振動、エネルギー散逸が競合する系のポーラロン伝導を検討した。[Phys. Rev. B 86, 035208 (2012); Phys. Rev. B 85, 054301-1-8 (2012)]

#### [iii] フランク・コンドン・ブロッケードの理論

分子接合系において、電極と分子間の電子混成相互作用に比べて、分子振動・電磁場環境などと入りする電子との相互作用が強くなると、クーロンブロッケード現象のような単電子過程がコヒーレント過程に比べて支配的になる。この状況でさらに、離散的な分子振動準位の影響が顕著であれば、いわゆるフランク・コンドン・ブロッケード(FCB)現象が観察される。本CREST研究の代表者である平川教授のグループでは、金のナノ電極ギャップ内に挿入されたC<sub>60</sub>を経由する電流においてFCB現象を観察した。我々のグループでは、この現象を解析するための理論モデルを導入し、実験結果の特徴を理論的に再現することに成功した。

用いたモデルは、C<sub>60</sub>の中性状態と負イオン状態では中心座標に対する断熱ポテンシャル面が異なり、各ポテンシャル面ごとに異なる振動準位の系列があるとする。またこの二つの断熱ポテンシャル面は、ゲート電圧によって変化すると仮定する。この描像は分子内の電子滞在時間が、振動準位形成時間より長い場合には有効であり、電子が分子と電極間を行き来するとき、これに伴い二

つの振動準位系列間での遷移が引き起こされる。それらの確率をエネルギー損失スペクトル関数(ELSF)を用いて評価し、全ての状態の存在確率の時間発展をマスター方程式で追跡することにより、電流電圧特性を求めソースドレイン電圧とゲート電圧の2次元座標面でコンダクタンスマップを理論的にシミュレーションした。モデルのパラメータを適当に設定すると、実験の特徴を良好に再現できた。

## (2)研究成果の今後期待される展開

ナノギャップ系形成を支配するエレクトロマイグレーション過程の基礎がほぼ解明されたことは、今後、より広範にエレクトロマイグレーション現象を解析する理論の重要な基礎が形成されたと言える。微細デバイスで問題となる電流による劣化現象の解析法や対策、さらに積極的にエレクトロマイグレーションを利用するナノ電極系形成法の指導原理へと展開することができる。

第一原理計算から、分子の電極フェルミ準位と相対的なレベル位置を決定し、多くの実験との整合性を検証することにより、**transition voltage spectroscopy**の基礎を確立させることができる。またこれにより、分子接合系の特性を系統的に研究し、機能デバイスに適した分子を探索する手掛かりとなる。

C<sub>60</sub>と有機分子を用いた有機太陽電池において、励起子解離、キャリア伝達の素過程と速度論を理論的に解明し、ナノからメゾレベルでの界面構造とその制御法についての指導原理を構築する研究へと発展させる。

## § 5 成果発表等

(1) 原著論文発表 (国内(和文)誌 0 件、国際(欧文)誌 82 件)

- (1) S. Takahashi, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Electrically tunable three-dimensional g-factor anisotropy in single InAs self-assembled quantum dots, *Physical Review B*, in press.
- (2) K. Yoshida, I. Hamada, S. Sakata, A. Umeno, M. Tsukada, and K. Hirakawa: "Gate-Tunable Large Negative Tunnel Magnetoresistance in Ni-C60-Ni Single Molecule Transistors", *Nano Letters*, vol. 13, issue 2, pp. 481-485, (2013), Feb., DOI: 10.1021/nl303871x.
- (3) R. Moriya, E. Ikenaga, S. Masubuchi, T. Machida: "Cross-sectional transmission electron microscope analysis of nanogap electrode fabricated by atomic force microscope local oxidation", *Japanese Journal of Applied Physics* (2013).
- (4) K. M. Cha, K. Shibata, and K. Hirakawa: "Single electron transport through site-controlled InAs quantum dots", *Applied Physics Letters*, vol. 101, pp. 223115-1~5, Nov. (2012) DOI: 10.1063/1.4769039
- (5) K. Shibata, A. Umeno, K. M. Cha, and K. Hirakawa: "Photon-Assisted Tunneling through Self-Assembled InAs Quantum Dots in the Terahertz Frequency Range", *Physical Review Letters*, vol.109, no. 7, pp. 077401-1~4, (2012). DOI : 10.1103/PhysRevLett.109.077401.
- (6) K. M. Cha, I. Horiuchi, K. Shibata, and K. Hirakawa: "Size-limiting effect of site-controlled InAs Quantum dots grown at high temperatures by molecular beam epitaxy", *Applied Physics Express* 5, pp. 085501-1~3, (2012). DOI:10.1143/APEX.5.085501.
- (7) Y. Kanai, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Control of supercurrent in a self-assembled InAs quantum dot Josephson junction by electrical tuning of level overlaps", *Applied Physics Letters* 100, pp.202109-1~3 (2012). DOI:10.1063/1.4719072.
- (8) K. Tsumura, M. Ohsugi, T. Hayashi, E. Watanabe, D. Tsuya, S. Nomura, and H. Takayanagi, Development of superconducting quantum interference device based on graphene, *Journal of Physics: Conference Series* vol. 400, 042064 (2012) .
- (9) H. Tamura, M. Tsukada, H. Ishii, N. Kobayashi, and K. Hirose: "Roles of intramolecular and intermolecular electron-phonon coupling on the formation and transport of large polarons in organic semiconductors" *Phys. Rev. B* **86**, p.035208 (2012).
- (10) M. Tsukada, A. Masago and M. Shimizu: "Theoretical Simulation of Kelvin Probe Force Microscopy for Si Surfaces by Taking account of Chemical Forces", *J. of Phys., Condensed Matter* 24, 084002-084011, 2012.
- (11) I. Hamada, M. Araidai and M. Tsukada, "Origin of nano-mechanical motion in a single-C60 transistor", *Phys. Rev. B* 85, 121401(R)- 1-3, 2012.
- (12) H. Tamura and M. Tsukada, "Role of intermolecular delocalization on electron transport in fullerene aggregates", *Phys. Rev. B* 85, 054301-1-8, 2012.
- (13) H. Tamura, R. Martinazzo, M. Ruckebauer, and I. Burghardt, "Quantum dynamics of ultrafast charge transfer at an oligothiophene-fullerene heterojunction" *J. Chem. Phys.* 137, 22A540-1-8 (2012).
- (14) H. Tamura, M. Tsukada, H. Ishii, N. Kobayashi, and K. Hirose, "Roles of intramolecular and intermolecular electron-phonon coupling on the formation and transport of large polarons in organic semiconductors" *Phys. Rev. B* 86, 035208 (2012).
- (15) H. Tamura, M. Tsukada, K. P. McKenna, A. L. Shluger, T. Ohkubo, and K. Hono, "Laser-assisted field evaporation from insulators triggered by photoinduced hole

- accumulation" *Phys. Rev. B* 86, 195430-1-6 (2012).
- (16) K. M. Cha, K. Shibata, M. Kamiko, R. Yamamoto, and K. Hirakawa: "Chemical Composition and Thermal Stability of Atomic Force Microscope-Assisted Anodic Oxides as Nanomasks for Molecular Beam Epitaxy", *Japanese Journal of Applied Physics* 50, pp.120205-1~3, (2011).
  - (17) K. Shibata, K. Seki, P. J. J. Luukko, E. Räsänen, K. M. Cha, I. Horiuchi, and K. Hirakawa: "Electronic structures in single self-assembled InAs quantum dashes detected by nanogap metal electrodes", *Applied Physics Letters*, vol. 99, issue 18, pp. 182104-1-3, (2011). DOI: 10.1063/1.3659479.
  - (18) Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura and S. Tarucha: "Electrically tuned spin-orbit interaction in an InAs self-assembled quantum dot", *Nature Nanotechnology*, vol. 6, pp.511-516, (2011) Aug.
  - (19) R. S. Deacon, Y. Kanai, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha: "Electrically tuned g tensor in an InAs self-assembled quantum dot", *Physical Review B*, vol 84, pp. 041302-1~5, (2011).
  - (20) K. Shibata, K. Seki, K. M. Cha, I. Horiuchi, and K. Hirakawa: "Growth of self-assembled InAs quantum dashes and their applications to single electron transistors", *AIP conference proceeding series*, vol. 1399 , pp. 273-274 (2011).
  - (21) K. M. Cha, K. Shibata, I. Horiuchi, M. Kamiko, R. Yamamoto, and K. Hirakawa: " Chemical composition and thermal stability of AFM anodic oxides as nanomasks for site-controlled InAs QDs ", *AIP conference proceeding series*, vol. 1399, pp. 239-240 (2011).
  - (22) S. Kim, R. Ishiguro, M. Kamio, Y. Doda, E. Watanabe, D. Tsuya, K. Shibata, K. Hirakawa and H. Takayanagi: "Side-gate controlled electrical properties of superconducting quantum interference device coupled with self-assembled InAs quantum dot", *AIP conference proceeding series* AIP conference proceeding series, vol. 1399 , pp. 383-384 (2011).
  - (23) Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, Y. Tokura, K. Hirakawa and S. Tarucha: "Spin-orbit interaction detection using Kondo effect in single self-assembled InAs quantum dots", *AIP conference proceeding series*, vol. 1399 , pp. 355-356 (2011).
  - (24) S. Kim, R. Ishiguro, M. Kamio, Y. Doda, E. Watanabe, D. Tsuya, K. Shibata, K. Hirakawa, and H. Takayanagi: " $\pi$  junction transition in InAs self-assembled quantum dot coupled with SQUID", *Applied Physics Letters*, vol. 98, pp. 063106-1~3, (2011). Feb.
  - (25) Y. Kanai, K. Nakayama, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa and S. Tarucha, Phase measurement in the Kondo regime of a self-assembled InAs quantum dot SQUID, *Journal of Physics*, conference series, (in press).
  - (26) T. Kubota, M. Araidai, S. Mizutani, X. Zang, Q. Ma, H. Nagashima, M. Oogane, Y. Ando, M. Tsukada and T. Miyazaki: "Composition dependence of magnetoresistance effect and its annealing endurance in tunnel junctions having Mn-Ga electrode with high perpendicular magnetic anisotropy", *Appl. Phys. Lett.*, 99, p. 192509, 2011.
  - (27) M. Araidai and M. Tsukada: "Non-adiabatic Electromigration along One-Dimensional Gold Chain", *Phys. Rev. B* 84, 195461, 2011.
  - (28) M. Tsukada, H. Tamura, K.P. McKenna, A.L. Shluger, Y.M. Chen, T. Ohkubo and K. Hono: "Mechanism of Laser Assisted Field Evaporation from Insulating Oxides", *Ultramicroscopy*, 111, pp. 567-570, 2011.
  - (29) M. Tsukada: "Theoretical Simulation of Scanning Probe Microscopy", *Analytical Sci.*, 27, pp. 121-127, 2011
  - (30) A. Masago, M. Tsukada and M. Shimizu, "A Simulation Method of Kelvin Probe Force Microscopy at Nano-Meter Range and Its Application", *Phys. Rev. B* 82, pp. 195433-1-8, (2011).

- (31) H. Tamura, I. Burghart and M. Tsukada: "Exciton Dissociation at Thiophene/Fullerene Interfaces: The Electronic Structures and Quantum Dynamics", *J. Phys. Chem.*, **115**, pp. 10205-10210, 2011
- (32) I. Hamada, and M. Tsukada: "Adsorption of C60 on a Metal Surface Revisited: A van der Waals density Functional Study", *Phys. Rev. B* **83**, 245437-1-5, 2011.
- (33) S. Sakata, A. Umeno, K. Yoshida, and K. Hirakawa: "Critical voltage for atom migration in ballistic copper nanojunctions and its implications to interconnect technology for very large scale integrated circuits", *Applied Physics Express*, vol. 3, No. 11, pp.115201-1~3, (2010).
- (34) A. Umeno and K. Hirakawa: "Spectroscopic analysis of electromigration at gold nanojunctions", *Physica E: Low-dimensional systems and nanostructures*, vol. 42, pp. 2826-2829 (2010).
- (35) K. Shibata, M. Jung, K. M. Cha, and K. Hirakawa: "Control of tunnel coupling strength between InAs quantum dots and nanogap metallic electrodes through In-Ga intermixing", *Physica E*, vol. 42, pp.2595-2597 (2010).
- (36) Y. Kanai, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Electrical control of Kondo effect and superconducting transport in a side-gated InAs quantum dot Josephson junction", *Physical Review B*, vol. 82, pp.054512-1~8, (2010).
- (37) S. Takahashi, R. S. Deacon, K. Yoshida, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha: "Large anisotropy of the spin-orbit interaction in a single InAs self-assembled quantum dot ", *Physical Review Letters*, vol.104, pp.246801-1~4 (2010). June
- (38) R. S. Deacon, Y. Tanaka, A. Oiwa, R. Sakano, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: " Kondo-enhanced Andreev transport in single self-assembled InAs quantum dots contacted with normal and superconducting leads", *Physical Review B*, vol.81, pp. 121308(R) (2010). Mar
- (39) K. Yoshida, A. Umeno, S. Sakata, and K. Hirakawa: "Structural stability of Ni quantum point contacts under electrical stresses", *Applied Physics Express*, vol. 3, pp.045001-1~3 (2010).
- (40) R. Moriya, H. Kobayashi, K. Shibata, S. Masubuchi, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, and T. Machida: "Fabrication of single-electron transistor composed of a self-assembled quantum dot and nanogap electrode by atomic force microscope local oxidation", *Applied Physics Express*, vol. 3, pp. 035001-1~3 (2010). Mar
- (41) R. S. Deacon, Y. Tanaka, A. Oiwa, R. Sakano, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Tunneling Spectroscopy of Andreev Energy Levels in a Quantum Dot Coupled to a Superconductor", *Physical Review Letters*, vol. 104, pp.076805-1~4, (2010). Feb.
- (42) R. S. Deacon, Y. Kanai, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Proximity supercurrent in self assembled InAs quantum dots", *AIP Conference Proceedings Series*, vol. 1199 , pp. 275-276 (2010). Jan. 4
- (43) G. Allison, A. Oiwa, S. Kumar, D. DiVincenzo, M. Ketchen, K. Hirakawa, H. Takayanagi, S. Tarucha: "A superconducting resonator designed for coupling to spin based qubits in quantum dots" submitted to *Journal of Physics: Conference Series* **245**, 012024 (2010).
- (44) M. Araidai and M. Tsukada, "Theoretical calculations of electron transport in molecular junctions: Inflection behavior in Fowler-Nordheim plot and its origin", *Phys. Rev. B* **81**, 235114, 2010
- (45) M. Harada and M. Tsukada, "Tip-Sample Interaction Force Mediated by Water Molecules for AFM in Water", *Phys. Rev.* **B80**, 035414, 2010.
- (46) M. Tsukada, N. Watanabe, M. Harada and K. Tagami, "Theoretical Simulation of Noncontact Atomic Force Microscopy in Liquids", *J. Vac. Sci. and Techn.* **B28**(3) c4c1-c4c4, 2010.

- (47) K. Yoshida, A. Umeno, S. Sakata, and K. Hirakawa: "Importance of Moisture Control in Formation of Nanogap Electrodes by Electrical Break Junction Method", *Japanese Journal of Applied Physics*, Rapid communication, vol. 48, pp.120216-120218 (2009). Dec.
- (48) K. Hamaya, M. Kitabatake, K. Shibata, M. Jung, S. Ishida, T. Taniyama, K. Hirakawa, Y. Arakawa, and T. Machida: "Spin-related current suppression in a semiconductor quantum dot spin-diode structure", *Physical Review Letters*, vol.102, Issue 23, pp.236806~236809 (2009). Jun
- (49) A. Umeno and K. Hirakawa: "Non-thermal origin of electromigration at gold nanojunctions in the ballistic regime", *Applied Physics Letters*, vol. 94, pp.162103-1~3 (2009).
- (50) K. Shibata, M. Jung, K. M. Cha, M. Sotome, and K. Hirakawa: "Effect of In-Ga intermixing on the electronic states in self-assembled InAs quantum dots probed by nanogap electrodes ", *Applied Physics Letters*. Vol. 94, pp.162107-1~3 (2009). Apl
- (51) K. Shibata, K. Hirakawa: "The Kondo effect observed up to TK~80 K in self-assembled InAs quantum dots laterally coupled to nanogap electrodes", *Journal of Crystal Growth*, vol. 311, Issue. 7, pp.1795-1798 (2009). Mar
- (52) S. Masubuchi, M. Ono, K. Yoshida, K. Hirakawa, and T. Machida: "Fabrication of graphene nanoribbon by local anodic oxidation lithography using atomic force microscope", *Applied Physics Letter*, vol.94, Issue 8, pp. 082107~082109 (2009). Feb
- (53) S. Takahashi, Y. Igarashi, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Quantitative evaluation of spin-orbit interaction in InAs quantum dots", *Journal of Physics: Conference series*, 150, pp. 22084 1-3 (2009).
- (54) K. Hitachi, A. Inoue, A. Oiwa, M. Yamamoto, M. Piror-Ladriere, Y. Tokura, and S. Tarucha: "Negative differential conductance in a quantum dot and possible application to ESR detection", *Journal of Physics: Conference series*, **150**, 022026 1-3 (2009).
- (55) Y. Kanai, R. S. Deacon, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, A. Oiwa, and S. Tarucha: "Observation of supercurrent in single InAs self-assembled quntum dots coupled to superconducting leads", *Journal of Physics: Conference series*, **150**, 022032 1-3 (2009)
- (56) M. Araidai and M. Tsukada, "Diffusion Processes in Single-Atom Electromigration along a Good Chain: First-Principles Calculations", *Phys. Rev. B* **80**, 045417, 2009.
- (57) H. Tamura, J.M. Mallet, M. Oheim, and I. Burghardt, "Ab initio study of excitation energy transfer between quantum dots and dye molecules", *J. Phys. Chem. C*, **113**, 7548-7552, 2009
- (58) M. Tsukada and K. Mitsutake, Theory of Dissipative Electron Transport of a Molecule at the Interface, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **78** (2009) 084701~11
- (59) Y. Otsuka and M. Tsukada, "Theoretical Study of Crystal Structures and Energy Bands of Polyacene and Pentacene Derivatives", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **78** 024713-1-11, 2009
- (60) K. Hamaya, M. Kitabatake, K. Shibata, M. Jung, M. Kawamura, S. Ishida, T. Taniyama, K. Hirakawa,, Y. Arakawa, and T. Machida: "Tunneling magnetoresistance effect in a few-electron quantum-dot spin valve", *Applied Physics Letters*, vol. 93, Issue 22, pp.222107-1~3, (2008). Dec. 3
- (61) M. Jung, W. Song, J-S. Lee, N. Kim, J. Kim, J. Park, H. Lee and K. Hirakawa: "Electrical breakdown and nanogap formation of indium oxide core/shell heterostructure nanowires", *Nanotechnology*, vol. 19, p.495702 (2008).
- (62) K. Shibata, and K. Hirakawa: "High Kondo temperature (TK~80 K) in self-assembled InAs quantum dots laterally coupled to nanogap electrodes", *Applied Physics Letters*, vol. 93, pp. 062101-1~3 (2008). Aug.
- (63) K. Shibata, C. Buizert, A. Oiwa, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Electron transport through single self-assembled InAs quantum dots coupled to superconducting

- nanogap electrodes", *Physica Status Solidi (c)*, 5, No.1, pp.178-181 (2008).
- (64) K. Hamaya, M. Kitabatake, K. Shibata, M. Jung, M. Kawamura, S. Ishida, T. Taniyama, K. Hirakawa, Y. Arakawa, and T. Machida: "Oscillatory changes in the tunneling magnetoresistance effect in semiconductor quantum-dot spin valves", *Physical Review B*, vol. 77, pp. 081302-1~4(2008). Feb.
- (65) M. Harada, M. Tsukada: "Theoretical Simulation of noncontact atomic force microscopy of 5-(4-methylthiophenyl)-10,15,20-tris(3,5-di-*t*-butylphenyl) porphyrin", *Phys. Rev. B* **77**, 205435, 2008.
- (66) A.Masago, S.Watanabe, K.Tagami, and M.Tsulada: "Adsorption of benzene on Si(001) from noncontact atomic force simulation", *Jpn. J. Appl. Phys.* 47 6092-6095, 2008.
- (67) K. Hamaya, M. Kitabatake, K. Shibata, M. Jung, M. Kawamura, K. Hirakawa, T. Machida, T. Taniyama, S. Ishida, and Y. Arakawa: "Kondo effect in a semiconductor quantum dot coupled to ferromagnetic electrodes", *Applied Physics Letters*, vol. 91, pp. 232105-1~3 (2007). Dec.
- (68) C. Buizert, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Kondo universal scaling for a quantum dot coupled to superconducting leads", *Physical Review Letters*, vol.99, pp.136806 (2007). Sep.
- (69) T. Akasaka, A. Umeno, S.-H. Hong, K. Hirakawa, and K. Araki: "Novel gold nanoparticles/conjugated molecules network structures fabricated by self-assembling process", *AIP Conf. Proc.*, vol.893, p.361 (2007).
- (70) A. Umeno, T. Akasaka, S.-H. Hong, and K. Hirakawa: "Atomistic picture of electromigration process and its application to high-yield fabrication of nanogap electrodes", *AIP Conf. Proc.*, vol.893, p.373 (2007).
- (71) Y. Igarashi, M. Jung, M. Yamamoto, A. Oiwa, T. Machida, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Spin-half Kondo effect in a single self-assembled InAs quantum dot with and without an applied magnetic field", *Physical Review B*, vol. 76, pp.081303-1~4 (2007).
- (72) K. Shibata, C. Buizert, A. Oiwa, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Lateral electron tunneling through single self-assembled InAs quantum dots coupled to superconducting nanogap electrodes", *Applied Physics Letters*, vol. 91, No. 11, pp. 112102-1~3 (2007). Sep.
- (73) K. Hamaya, M. Kitabatake, K. Shibata, M. Jung, M. Kawamura, K. Hirakawa, and T. Machida: "Electric-field control of tunneling magnetoresistance effect in a Ni/InAs/Ni quantum-dot spin valve", *Applied Physics Letters*, vol. 91, No. 2, 022107-1~3 (2007).
- (74) M. Gel, T. Ishida, T. Akasaka, A. Umeno, K. Araki, K. Hirakawa, and H. Fujita: "Mechanically controlled quantum contact with on-chip MEMS Actuator", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 16, No. 1, pp.1~6 (2007).
- (75) K. Shibata, M. Jung, K. Hirakawa, T. Machida, and H. Sakaki, S. Ishida and Y. Arakawa: "Electronic properties of self-assembled InAs quantum dots on GaAs surfaces probed by lateral electron tunneling structures", *Journal of Crystal Growth*, vol. 301-302, pp. 731-734. (2007).
- (76) S.W. Lee, T.G. Kim, K. Hirakawa, J.S. Kim, S.H. Choi, and H.Y. Cho: "Lateral photoconductivity and bound states of self-assembled Ge/Si quantum dots", *Nanotechnology*, vol.18, No. 10, P. 105403 (2007).
- (77) K. Hamaya, S. Masubuchi, M. Kawamura, T. Machida, M. Jung, K. Shibata, K. Hirakawa, T. Taniyama, S. Ishida, and Y. Arakawa: "Spin transport through a single self-assembled InAs quantum dot with ferromagnetic leads", *Applied Physics Letters*, vol. 90, No. 5, pp. 053108-1~3 (2007).
- (78) M. Tsukada, K. Tagami, Q. Gao and N. Watanabe, "Theoretical Simulations of Scanning Probe Microscopy for Organic and Inorganic Materials", *Current Nanoscience* **3**, 57-62, 2007.

- (79) K. Tagami and M. Tsukada, "Simulated non-contact AFM images of an alcohol molecule in an alkanethiol self-assembled monolayer", *Nanotechnology* **18**, 084005, 2007.
- (80) M. Harada, M. Tsukada and N. Sasaki, "Theoretical Simulations of Atomic Force Microscopy of Graphite Flake on Graphite Surface", *e-J. Surf. Sci. and Nanotechnol.*, **5**, 126-131, 2007.
- (81) M. Harada, M. Tsukada and N. Sasaki, "Energy Dissipation Mechanism of Non-Contact Atomic Force Microscopy for Movable Objects", *e-J. Surf. Sci. and Nanotechnol.*, **6**, 1-6, 2007
- (82) A. Masago, S. Watanabe, K. Tagami and M. Tsukada, "Simulation of the energy dissipation image in noncontact atomic force microscopy of adsorbed methyl on Si(100) surface", *J.Phys. Conf. Ser.* 785-789, 2007.

(2) その他の著作物(総説、書籍など)

- (1) 平川一彦、柴田憲治、梅野顕憲: "ナノギャップ電極を用いた量子トランジスタの作製と電子伝導", *Journal of the Vacuum Society of Japan* vol. 55、 no. 7、 pp. 321-327、 (2012). (招待解説論文)
- (2) 平川一彦、梅野顕憲、吉田健治、坂田修一: "金属ナノ接合におけるエレクトロマイグレーションの素過程と単一分子トランジスタ作製への応用", *表面科学*、 vol. 32, no.10, pp. 635-640、 (2011). (招待論文).
- (3) 大岩顕、ラッセル・スチュワート・ディーコン、金井康、田中洋一、柴田憲治、平川一彦、樽茶清悟: "InAs 量子ドット/超伝導複合構造素子における Andreev 束縛状態分光と近接効果と近藤効果の相関", *固体物理*、 47 巻, 7 号, 321, (2012)
- (4) 高柳英明、"ナノ超伝導デバイス", *NIMS NOW*, vol. 12, No. 1 (2012)
- (5) M. Araidai and M. Tsukada: "Single Atom Electromigration in Atomic Scale Conductors", in "Fundamentals of Picoscience", ed. By K.Sattler, Taylor and Francis, in press, 2012.
- (6) 梅野顕憲、吉田健治、坂田修一、平川一彦: "原子スケールの金属ナノ接合におけるエレクトロマイグレーションの素過程", *固体物理*, vol. 46, No. 4, pp. 21-31 (2011).
- (7) 平川一彦、柴田憲治: "単一量子ドットトランジスタの量子伝導とその応用"(第2編第4章第1節)、「量子ドットエレクトロニクスの最前線」(分担執筆) NTS、 pp.389-402 (2011).
- (8) 町田友樹、小林弘侑、守谷頼: "原子間力顕微鏡を用いた自己形成 InAs 量子ドット単電子トランジスタの作製", 「量子ドットエレクトロニクスの最前線」(NTS 出版), pp. 403-413 (2011).
- (9) 塚田捷 「シュレーディンガー方程式から物性へ」*数理科学* 49、 8, 46-51, (2011)
- (10) 高橋駿、Russell S. Deacon, 吉田勝治、大岩顕、柴田憲治、平川一彦、都倉康弘、樽茶清悟, 単一 InAs 自己形成量子ドットにおけるスピン軌道相互作用の異方性, *固体物理*, 45 巻, 9 号, 497, (2010).
- (11) 塚田捷、田上勝規、原田昌紀: 「走査プローブ顕微鏡による表面・界面の理論研究」 *表面科学*, 31, 66-72 (2010)
- (12) 星野忠治、塚田捷、田上勝規「表面バイオインタフェースの理論研究」 *表面科学* 31, 2, 62-72, (2010)
- (13) 塚田捷、田上勝規、光武邦寛 「分子ナノデバイス新機能の理論的予言」、「分子エレクトロニクスの基盤技術」松重、田中、和田監修、シーエムシー出版、 pp.240-251 (2009)
- (14) 塚田捷、佐々木成朗「SPMの理論シミュレーション法とその応用」*実験物理学シリーズ*第6巻、共立出版、pp.265-274, (2009).
- (15) 塚田捷、「分子架橋の電子輸送と新機能探索」、*応用物理学会誌* 77, no.6, pp.643-649 (2008).

- (16) 塚田捷、田上勝規、光武邦寛、「分子ナノデバイス新機能の理論的予言」、機能材料、 **28** , pp.71-83, (2008)
- (17) 塚田捷「分子架橋の電子輸送と新機能探索 –分子デバイス光応答への期待–」応用物理学会誌、 **77**, 643-649 (2008)
- (18) 塚田捷「走査プローブ顕微鏡における理論シミュレーションの方法」、固体物理特集号 **42**, 835-846, (2007)
- (3) 国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 39 件、国際会議 45 件)

- (1) 平川一彦、吉田健治、坂田修一、梅野顕憲:”精密制御した金属ナノコンタクトのエレクトロマイグレーションと単一分子トランジスタへの展開 (招待講演)“、第60回応用物理学会春期学術講演会、神奈川工科大学、3月27日 (2013).
- (2) 平川一彦:“原子スケールナノ構造と極限トランジスタへの展開”、(招待講演)大阪工業大学戦略的研究プロジェクト第2回シンポジウム、大阪工業大学、大阪、10月29日 (2012).
- (3) 濱田幾太郎:“Adsorption of C60 on metal surfaces: A density-functional theory study”, 阪大産研研究会~電子状態計算の発展に向けて~, 有馬温泉, 2012.2.23-24
- (4) 塚田捷、「走査プローブ顕微鏡と分子架橋の理論」、JSTさきがけ「界面の構造と制御」研究領域公開シンポジウム、東北大学1月5日 (2012).
- (5) 平川一彦:“エレクトロマイグレーションを用いた原子スケール電極加工と単一分子トランジスタ” (招待講演)、CMSI 元素戦略 WG「電子材料の部」実験計算連携検討会、東京大学本郷キャンパス、東京、12月5日 (2011).
- (6) 平川一彦:“原子レベルの金属ナノ配線とエレクトロマイグレーション”、第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、神奈川、3月24日~27日 (2011).
- (7) 平川一彦:“テラヘルツ・光物性分野の現状と今後の展望” (招待講演)、第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、神奈川、3月24日~27日 (2011)
- (8) 平川一彦:“精密原子スケールナノギャップ電極作製と単一分子トランジスタへの応用” (招待公演)、第 69 回表面科学研究会 単一分子の表面科学、東京工業大学大岡山キャンパス、東京、3月9日 (2011).
- (9) 浜屋宏平 (九州大学):“強磁性電極を接合した半導体量子ドットのスピン伝導に関する研究”, 日本物理学会 2011 秋季大会 (若手奨励賞記念講演), 富山大学, 2011. 9. 21
- (10) 塚田捷「単一分子におけるコヒーレント伝導と散逸的伝導」第 69 回表面科学研究会、東工大、2011.3.9
- (11) 塚田捷「SPM シミュレータの理論とアルゴリズム」SPMシミュレータセミナー、オリンピック記念青少年総合センター、2011.3.8
- (12) 塚田捷「表面・界面・ナノ構造の理論と計算科学のアプローチ」分子科学研究所計算機科学研究センターワークショップ、2011.1.24-25
- (13) 平川一彦、梅野顕憲、吉田健治、坂田修一:”金属ナノ接合におけるエレクトロマイグレーション分光と原子移動の素過程” (招待講演)、第57回応用物理学会関係連合講演会、東海大学、神奈川、3月20日~23日 (2010).
- (14) 平川一彦、梅野顕憲、吉田健治、坂田修一:”バリスティック伝導金属ナノ接合におけるエレクトロマイグレーションと臨界電流密度”、第57回応用物理学会関係連合講演会、東海大学、神奈川、3月20日~23日 (2010).
- (15) 梅野顕憲、吉田健治、坂田修一、平川一彦:“金微小接合におけるエレクトロマイグレーションの素過程”、第57回応用物理学会関係連合講演会、東海大学、神奈川、3月20日~23日 (2010).
- (16) 浜屋宏平 (九州大学)、町田友樹 (東京大学生産技術研究所):“単一量子ドット/強磁性

- 電極ナノ接合におけるスピン伝導”, 日本物理学会 2010 秋季大会(シンポジウム講演), 大阪府立大学, 2010. 9. 25
- (17) 塚田捷:「バイオ系における走査プローブ顕微鏡のシミュレーション」「生命をはかる」研究会第32回公開研究会、2010.12.27
- (18) 塚田捷:「SPM の理論と汎用シミュレーション」学振167、157委員会研究会「半導体評価技術における SPM の新展開を探る」産総研臨海副都心センター、2010.11.25
- (19) 塚田捷:「金属-有機分子接合系における電気伝導の理論」日本化学会関東支部講演会「有機金属界面と電気伝導」、東京お茶の水、2010.11.1
- (20) 塚田捷:「非接触原子間力顕微鏡の理論的基礎とシミュレーション」表面科学会シンポジウム、東京船堀、2010.10.28
- (21) 塚田捷:「界面現象における最近の理論研究の話題」埋もれた界面の X 線・中性子解析に関するワークショップ 2010、2010.7.25 於 名古屋大学
- (22) 塚田捷:「走査プローブ顕微鏡の理論的基礎とシミュレーション」日本顕微鏡学会第 66 回学術講演会、2010.5.26
- (23) 塚田捷:「界面マイクロ構造の諸問題」応用物理学会シンポジウム“X線による埋もれた固液界面の精密科学の可能性”、2010.3.18
- (24) 平川一彦、梅野顕憲、吉田健治、坂田修一:”通電断線法を用いた原子レベルギャップ電極の作製とエレクトロマイグレーションの素過程”、第70回応用物理学会学術講演会、富山大学、富山、9月8日～11日(2009)。
- (25) 平川一彦、梅野顕憲、吉田健治、坂田修一:”極微金属接合におけるエレクトロマイグレーションの素過程”(招待講演)、第 14 回 LSI における原子輸送・応力問題研究会、東京工業大学、大岡山、東京、7月27日～28日(2009)。
- (26) 塚田捷、「非接触原子間力顕微鏡の理論的基礎とシミュレーション」表面科学会シンポジウム、2009.10.28
- (27) 塚田捷:「単分子エレクトロニクスさらなる展開に向けて 実験と理論の課題」2009 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会 シンポジウム「単分子エレクトロニクスの課題」富山大学 2009. 9.8
- (28) 塚田捷:「SPM の理論とロードマップ点検」学振 167 委員会 第55回研究会「SPMと関連技術の未来予想 SPM ロードマップ 2010-2011 に向けて」桐生地域地場産業振興センター-2009. 7.23-24
- (29) 塚田捷:「界面科学への理論的アプローチ」埋もれた界面の X 線・中性子解析に関するワークショップ、筑波大学東京キャンパス(秋葉原) 2009.7.14
- (30) 塚田捷:「界面の科学 金属(半導体)有機分子界面、固液界面、ナノ物質界面の性質と界面現象」第 56 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム X 線・中性子線による埋もれた界面研究の最前線 2009. 3. 31
- (31) 塚田捷:「走査プローブ顕微鏡の理論 タンパク質と液中計測」電気通信研究所講演会 2009.3.13
- (32) 塚田捷:「ナノ構造の物理 走査プローブ顕微鏡と分子架橋」、第 2 回ハイテクリサーチセンターシンポジウム 材料・デバイス・システム連携と次世代通信社会、2009.1.17.
- (33) 町田友樹(東京大学生産技術研究所): “強磁性電極を有する単一 InAs 量子ドットおよび単層グラフェンにおけるスピン依存伝導”, アライアンス G2 分科会シンポジウム-新機能ナノエレクトロニクス-, 東京工業大学, 2008. 10. 9
- (34) 平川一彦、柴田憲治、梅野顕憲、町田友樹、大岩 顕、樽茶清悟:”ナノギャップ量子系接合の作製とその物理”(invited)、ナノ量子情報エレクトロニクスシンポジウム、東京大学 駒場キャンパス、東京、10月24日、25日(2007)
- (35) 平川一彦、柴田憲治、梅野顕憲、Minkyung Jung、町田友樹、浜屋宏平、樽茶清悟、大岩 顕、Christo Buizert:”ナノギャップ電極/ナノ量子系接合による新機能の創出”(invited)、ナノサーフェス勉強会、東京大学生産技術研究所、10月10日(2007)
- (36) 平川一彦、柴田憲治、梅野顕憲、Minkyung Jung、町田友樹、浜屋宏平、樽茶清悟、大岩

頭、Christo Buizert:”ナノギャップ電極／ナノ量子系接合による新機能の創出”(invited)、Post Silicon アライアンス 阪大産研、大阪大学産業研究所、9月27日(2007)

- (37) K. Hirakawa: "Physics and Applications of Nanogap Junctions" (invited), IBM-UTワークショップ、東京大学本郷キャンパス、東京、9月12日(2007)
- (38) 浜屋宏平(東京大学生産技術研究所)、北島未来(東京大学生産技術研究所)、町田友樹(東京大学生産技術研究所): “強磁性電極を有する半導体量子ドット単電子トランジスタのスピントラnsport”, 第12回「半導体スピン工学の基礎と応用」研究会, 東京, 2007. 12. 21
- (39) 塚田 捷:「ナノバイオ系走査プローブ顕微鏡の理論解析」, 早稲田大学創立125周年シンポジウム バイオ・ナノ融合領域の新展開, 2007. 12. 14

(国際)

- (1) R. S. Deacon, "Cooper pair splitting in parallel quantum dot Josephson junctions", 3<sup>rd</sup> Japan-Israel Binational Workshop on Quantum Phenomena, March 10-13 (2013).
- (2) H. Hirakawa, K. Yoshida, S. Sakata, and A. Umeno: "Fabrication and novel electron transport of single molecule transistors", The Sweden-Japan Workshop on Quantum Nano-Physics and Electronics (QNANO2013), Tokyo, Japan, Jan. 13-14 (2013).
- (3) A. Oiwa, Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha, "Electrical tuning of spin-orbit interaction in self-assembled InAs quantum dots", The 17th Symposium on the Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-17), Fukuoka Japan, December 19-20, (2012).
- (4) K. Hirakawa: "Bottom-up nanostructures and their applications to extreme-nano transistors", GIEE Seminar, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, Nov.19-21 (2012).
- (5) A. Oiwa, "Interplay between proximity effect and Kondo effect in InAs self-assembled quantum dot Josephson junctions", QD(New Frontiers in the Physics of Quantum Dots)2012, Chernogolovka, Russia September10-14, (2012).
- (6) K. Shibata, N. Pascher, P. J. J. Luukko, E. Räsänen, S. Schnez, T. Ihn, K. Ensslin, and K. Hirakawa: "Electron magneto-tunneling through single self-assembled InAs quantum dashes coupled to ferromagnetic leads", International conference on superlattices, nanostructures, and nanodevices (ICSNN 2012), Dresden, Germany, Jul. 22-27 (2012).
- (7) K. Hirakawa, K. Shibata, Y. Zhang, and K. M. Cha: "THz photon-assisted tunneling in single quantum dot transistors", The 2nd International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2012), Okinawa, Japan, Jul 4-5 (2012).
- (8) R. S. Deacon, "Electrical control of the spin-orbit interaction in a single InAs self-assembled Quantum dot", 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012) September 25-27, (2012).
- (9) A. Oiwa, Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Electrically tunable spin-orbit interaction in self-assembled InAs quantum dots", 31st International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS2012), (Zurich, Switzerland), July29- August 3, (2012).
- (10) A. Oiwa, Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha: "Electrical control of spin-orbit interaction in self-assembled InAs quantum dots", 7th International Conference on Quantum Dots (QD2012), (Santa Fe, USA), May 13-18, (2012).
- (11) I. Hamada, "Van der Waals density functional applied to adsorption systems", Material Simulation in Petaflop Era, MASP2012, Kashiwa, Japan, 7.12-13 (2012).
- (12) M. Tsukada and R. Kakinuma, "Theoretical SPM Simulations towards Standardization", Scanning Probe Microscopy 12, (SPM012), NIMS, Tsukuba,

- 2012.3.1-2”
- (13) K. Hirakawa, A. Umeno, K. Yoshida, S. Sakata: “Elementary process of electromigration and its application to fabrication of single molecule transistors”, The Joint Conference for International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2011) & Workshop of International Terahertz Research Network (GDR-I THz 2011), Osaka, Japan, Nov. 24-29 (2011) .
  - (14) K. Hirakawa: “Elementary process of electromigration and fabrication of atomic-scale nanogap electrodes for single molecule transistors”, International Conference on Nano Science and Nano Technology (ICNST 2011), Sunchon, Korea, Nov. 10-11 (2011) .
  - (15) K. Hirakawa, A. Umeno, K. Yoshida, S. Sakata: “Elementary process of electromigration at metal nanojunctions and its application to fabrication of single molecule transistors”, International workshop on Advanced Materials and Devices, Osaka, Japan, Aug. 22-23 (2011).
  - (16) A. Oiwa, R. S. Deacon, Y. Kanai, S. Takahashi, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Electrical tuning of g-tensor in self-assembled uncapped InAs quantum dots, 17th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON17), Santa Barbara, California, USA, 9 August (2011)
  - (17) A. Oiwa, R. S. Deacon, S. Takahashi, Y. Kanai, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura and S. Tarucha, Electrical Control of Anisotropic Spin-orbit Interaction in InAs Self-assembled Quantum Dots: Part 1 & Part2, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2011), Suzhou, China, 12 September (2011)
  - (18) A. Oiwa, Electrically Tuned Spin Effects in a Self-assembled InAs Quantum Dot: Spin-orbit Effect, g-factor and Kondo Effect, BIT's 1st Annual World Congress of Nano S&T, Dalian China, 25 October (2011).
  - (19) M. Tsukada, “Features of electron transport through molecules and nano-structures”, The 2nd France-Japan Workshop on Nano-photonics, Toba, 2011.11.7-9
  - (20) M. Tsukada, “Recent topics in theory of scanning probe microscopy”, Shanghai Jiaotong University Symposium, Shanghai, China, 2011.11.3
  - (21) M. Tsukada, “Theoretical Bases of Scanning Probe Microscopy and Molecular Bridges”, The 13th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, Shizuoka University, 2011.11.17
  - (22) M. Tsukada, “Theoretical Approaches and Simulators for the Scanning Probe Microscopy”, The 29th International Brand Ritchie Workshop, Matsue, Shimane, 2011.5.12-15
  - (23) K. Hirakawa, A. Umeno, K. Yoshida, and S. Sakata: "Elementary process of electromigration at metal nanojunctions in the ballistic regime", International Interconnect Technology Conference (IITC 2010), Session 13: Reliability and Characterization II, p. 36, San Francisco Airport Burlingame, California, USA, June 7-9 (2010).
  - (24) K. Hirakawa, A. Umeno, K. Yoshida, and S. Sakata: "Elementary process of electromigration at metallic nanojunctions in the ballistic regime", 11th International Workshop on Stress-Induced Phenomena in Metallization, Dresden, Germany, Apr. 12-14 (2010).
  - (25) K. Hirakawa: "Elementary process of electromigration at metallic nanojunctions in the ballistic regime", UK-Japan Workshop: Novel Phenomena and Techniques in Semiconductor Nanostructures, Univ. of Tokyo, Komaba campus, Tokyo, Jan. 22 (2010).
  - (26) M. Tsukada: “Theoretical Methods for KPFM Simulation and Application to Semiconductor Surfaces”, International Vac. Conf., IVC-18 , 2010.8.26, Beijing

- (27) M. Tsukada: "Theory of Coherent vs dissipative electron transport of molecular junctions", French-Japan Workshop on Nanophotonics, Univ. Paris, 2010.11.4,
- (28) M. Tsukada and M. Araidai: "Theoretical Bases for the Electron Transport of Molecular Junctions", QNSP (International Symposium on Quantum Nanostructures and spin related Phenomena) Univ. Tokyo, Komaba-Campus, Tokyo, 2010.3.9-11
- (29) K. Hirakawa: "Physics and Applications of Single Self-Assembled Quantum Dots Coupled to Nanogap Electrodes", 5th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, Osaka Univ. Osaka, Sep.3-4 (2009).
- (30) M. Tsukada: "Theoretical Approaches for the Analyses of Scanning Probe Microscopy", Tutorial talk at 7th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '09 (ALC '09), Maui, Hawaii, USA. 2009. 12. 6-11
- (31) M. Tsukada: "Theory of Coherent and Dissipative Transport of Electrons and Excitons through Molecular Junctions", The 7th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO-7), International Convention Center, Juju Island, Korea. 2009. 11. 25-27
- (32) M. Tsukada, "Theory of Coherent vs Dissipative Electron Transport of Molecular Bridges" JSPS-KOSEF-NSFC. A3 Foresight Program Matsushima Seminar on Nanomaterials-sub-10nm Wires and Nano-structure, Matsushima, Japan, 2009. 11. 15-18
- (33) M. Tsukada, "Theoretical Aspects of Scanning Probe Microscopy and Molecular Bridges," NanotechEurope, TU Berlin, Germany, 2009. 9.30
- (34) K. Hirakawa: "Physics and Applications of InAs Quantum Dots Coupled to Nanogap Leads", 9TH International Workshop on Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies (EXMATEC 2008), Lodz, Poland, June 1~4 (2008)
- (35) K. Hirakawa, K. Shibata, M. Jung, A. Umeno, T. Machida, Y. Arakawa, A. Oiwa, and S. Tarucha: "Physics and Application of Single Quantum Dot Transistors", International Symposium on Secure-Life Electronics, Univ. of Tokyo, Hongo campus, Tokyo, March 6-7 (2008)
- (36) A. Oiwa, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Spin-orbit interaction and Kondo-superconductivity interplay observed in single self-assembled InAs quantum dots (invited)", IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008 (NMDC 2008), Kyoto University, Kyoto, Japan, Oct. 20-22 (2008)
- (37) T. Machida (Institute of Industrial Science, University of Tokyo): "Spin transport through a single quantum dot with ferromagnetic electrodes and coherent control of nuclear spins in quantum Hall systems", JST-DFG Workshop on Nanoelectronics, Aachen, Germany, 2008. 3. 5
- (38) T. Machida (Institute of Industrial Science, University of Tokyo), Spin-dependent electron transport in a semiconductor quantum-dot spin valve, NanoScience + engineering 2008 (SPIE 2008), San Diego, USA, 2008.8.12
- (39) T. Machida (Institute of Industrial Science, University of Tokyo), Spin Transport in a Single InAs Quantum Dot Attached to Ferromagnetic Electrodes, 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2008), Tsukuba, Japan, 2008.9.26
- (40) M. Tsukada, "Role of Theoretical Approaches for Surfaces, Interfaces and Nano-Structures", VASSCAA-4(4th Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia), Matsue City, 2-8, Oct. 28-31, 2008
- (41) M. Tsukada, "Theory of Scanning Probe Microscopy and Transport for Nano-Structures", WPI&IFCAM Joint Workshop Challenge of Interdisciplinary Materials Science to Technological Innovation of the 21st Century, Feb. 2008
- (42) K. Hirakawa, K. Shibata, M. Jung, T. Machida, K. Hamaya, S. Tarucha, A. Oiwa, C.

Buizert, "Probing Single Quantum Dots by Nanogap Electrodes", Sweden-Japan work shop, Lund, Sweden, Dec.13-14 (2007)

- (43) K. Hirakawa: "Probing quantum dots by nanogap electrodes", 1st NNL-IIS Workshop on Nanotechnology, Komaba, Tokyo, May 16 (2007)
- (44) M. Tsukada, K. Mitsutake, K. Tagami, N. Kobayashi, K. Hirose, R. Tamura: "Coherent and non-coherent features of electron transport through nano-structures, FCSNT2007, Morito Memorial Hall, Tokyo University of Science, June 2007.
- (45) M. Tsukada, Theoretical Simulation of Scanning Probe Microscopy and Molecular Bridges, International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), Tokyo Univ., Nov. 11-15, 2007

② 口頭発表 (国内会議 67 件、国際会議 53 件)

(国内会議)

- (1) 柴田憲治(東大)、Hongtao Yuan、岩佐義宏、平川一彦: "電気二重層ゲートによる InAs 量子ドットの電子状態の変調"、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、神奈川、3月27日～30日(2013)。
- (2) 吉田健治(東大)、坂田修一、平川一彦: "強磁性単一分子トランジスタにおける磁化変化に伴う静電容量変調効果"、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、神奈川、3月27日～30日(2013)。
- (3) 坂田修一(東大)、北川裕一、小尾匡司、吉田健治、石井和之、平川一彦: "単一ポリフィリン分子トランジスタにおける分子の回転と異方性分子軌道の効果"、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、神奈川、3月27日～30日(2013)。
- (4) 馬場翔二(東大)、J. Sailer, R.S. Deacon、大岩頭、柴田憲治、平川一彦、樽茶清悟: "並列二重量子ドットジョセフソン接合における非局所トンネル過程の検出"、日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、広島、3月26日～29日、(2013)。
- (5) 平川一彦(東大): "単一量子ドット・分子を用いた極限ナノトランジスタとその展開"、CREST「ナノ界面技術の基盤構築」研究領域 第2回公開ワークショップ、科学技術振興機構東京本部別館、東京、2月27日(2013)。
- (6) 柴田憲治(東大)、張亜、K. M. Cha、長井奈緒美、平川一彦: "InAs 量子ドットトランジスタにおける THz 光アシストトンネル"、第 73 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学、愛媛、9月11日～14日(2012)。
- (7) 坂田修一(東大)、梅野顕憲、吉田健治、平川一彦: "FPGA を用いた超高速フィードバック制御通電断線とエレクトロマイグレーションの緩和過程"、第 73 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学、愛媛、9月11日～14日(2012)。
- (8) 車圭晚(東大)、柴田憲治、平川一彦: "位置制御 InAs 量子ドットの形状に及ぼす核形成過程の影響"、第 73 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学、愛媛、9月11日～14日(2012)。
- (9) 平将人(東大)、Cha Kyu Man、長井奈緒美、柴田憲治、平川一彦: "ステップ酸化クリーニング法による位置制御 InAs 量子ドットの MBE 成長"、2012 年春季第 59 回応用物理学会関係連合講演会、早稲田大学、東京、3月15日～18日(2012)。
- (10) 吉田健治(東大)、梅野顕憲、坂田修一、平川一彦: "Ni-C<sub>60</sub>-Ni 接合を有した単一電子トランジスタの磁気抵抗効果"、2012 年春季第 59 回応用物理学会関係連合講演会、早稲田大学、東京、3月15日～18日(2012)。
- (11) 車圭晚(東大)、柴田憲治、平将人、平川一彦: "自己組織化 InAs 量子ドットの位置制御と単一電子トランジスタへの応用"、2012 年春季第 59 回応用物理学会関係連合講演会、早稲田大学、東京、3月15日～18日(2012)。
- (12) 柴田憲治(東大)、梅野顕憲、Kyu Man Cha、平川一彦: "単一自己組織化 InAs 量子ドットにおける THz 光アシストトンネル"、2012 年春季第 59 回応用物理学会関係連合講演会、早稲田大学、東京、3月15日～18日(2012)。

- (13) 池永恵梨子(東大), 守谷頼, 柴田憲治, 平川一彦, 石田悟己, 荒川泰彦, 町田友樹:“AFM局所酸化法による金属ナノギャップ電極の作製とその断面 TEM 観察”, 2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、東京、3月15日～18日 (2012).
- (14) 金井康(東大), R. S. Deacon, 大岩顕, 吉田勝治, 柴田憲治, 平川一彦, 樽茶清悟、自己形成 InAs 量子ドットジョセフソン接合における準位縮退領域の超伝導電流のサイドゲート制御、日本物理学会第 67 回年会、大阪、3月24日 2012
- (15) 高橋駿(東大), R. S. Deacon, 大岩顕, 柴田憲治, 平川一彦, 樽茶清悟、単一 InAs 自己形成量子ドットにおける g 因子の異方性とその電氣的制御、日本物理学会第 67 回年会、大阪、3月24日 2012
- (16) 金井康(東大), R. S. Deacon, 大岩顕, 吉田勝治, 柴田憲治, 平川一彦, 樽茶清悟、自己形成 InAs 量子ドットジョセフソン接合における準位縮退領域の超伝導電流のサイドゲート制御、日本物理学会第 67 回年会、大阪、3月24日 2012
- (17) 高橋駿(東大), R. S. Deacon, 大岩顕, 柴田憲治, 平川一彦, 樽茶清悟、単一 InAs 自己形成量子ドットにおける g 因子の異方性とその電氣的制御、日本物理学会第 67 回年会、大阪、3月24日 2012
- (18) 平川一彦(東大):“ナノギャップ電極・ボトムアップナノ構造の融合と応用”:CREST ナノ界面技術の基盤構築研究領域、第一回公開シンポジウム「ナノ界面が生み出す次世代機能」、アキバプラザ、東京、10月25日(2011).
- (19) 吉田健治(東大)、梅野顕憲、坂田修一、平川一彦:“Ni ナノギャップ電極を用いた単一 C60 分子トランジスタの伝導特性”、2011 年秋季 第 72 回 応用物理学学会学術講演会、山形大学 小白川キャンパス、山形、8月29日～9月2日(2011)
- (20) 柴田憲治(東大)、N. Pascher、関享太、S. Schnez、T. Ihn、K. Ensslin、平川一彦:“単一自己組織化 InAs 量子ダッシュトランジスタの磁場中伝導特性”、2011 年秋季 第 72 回 応用物理学学会学術講演会、山形大学 小白川キャンパス、山形、8月29日～9月2日(2011)
- (21) 坂田修一(東大)、梅野顕憲、吉田健治、平川一彦:“フラーレン分子クラスター接合における電子状態”、第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、神奈川、3月24日～27日 (2011).
- (22) 堀内 功(東大)、車 圭晚、柴田憲治、野村政宏、平川一彦: “位置制御 InAs 量子ドットの成長とその光学的特性”、第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、神奈川、3月24日～27日 (2011).
- (23) 車圭晚(東大)、柴田憲治、堀内功、平将人、平川一彦: “ナノギャップ電極に結合した位置制御単一 InAs 量子ドットの伝導特性”、第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、神奈川、3月24日～27日 (2011).
- (24) 柴田憲治(東大)、関享太、K. M. Chal、E. Räsänen、平川一彦: “単一自己組織化 InAs 量子ダッシュトランジスタの伝導特性”、第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、神奈川、3月24日～27日 (2011).
- (25) 金井康(東大)、中山和貴、R. S. Deacon, 大岩顕, 柴田憲治, 平川一彦, 樽茶清悟、自己形成 InAs 量子ドット超伝導量子干渉計における強い近藤効果領域での位相測定、日本物理学会秋季大会、富山、9月24日 2011
- (26) 金井康(東大)、R.S. Deacon, 大岩顕, 高橋駿, 吉田勝治, 柴田憲治, 平川一彦, 樽茶清悟:“自己形成 InAs 量子ドットにおける g-テンソルの電氣的制御”, 日本物理学会第 66 回年次大会、新潟大学五十嵐キャンパス、新潟、3月25日～28日 (2011).
- (27) 高橋駿(東大)、小幡利顕, R.S. Deacon, 吉田勝治, 大岩顕, 柴田憲治, 平川一彦, 樽茶清悟、単一 InAs 自己形成量子ドットにおける光介在トンネル、日本物理学会秋季大会、富山、9月23日 2011
- (28) 池永恵梨子(東大), 守谷 頼, 増渕 覚, 平川一彦, 石田悟己, 荒川泰彦, 町田友樹:“AFM 陽極酸化による InAs 量子ドットへの強磁性ナノギャップ電極作製”、2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、神奈川、2011. 3. 24
- (29) 池永恵梨子(東大)、守谷 頼、柴田憲治、平川一彦、石田悟己、荒川泰彦、町田友樹:

“AFM 陽極酸化を用いた単一 InAs 量子ドットへの強磁性体ナノギャップ電極作製と単電子トランジスタへの応用”, 2011年秋季 第72回応用物理学会学術講演会、山形大、山形、2011. 8. 31

- (30) 大杉正樹(東京理科大)、津村公平、林朋美、渡辺英一郎、津谷大樹、野村晋太郎、高柳英明、“グラフェンを用いた超伝導量子干渉計”、第72回応用物理学会学術講演会、山形大学、2011年8月31日
- (31) 津村公平(物材機構)、大杉正樹、林朋美、渡辺英一郎、津谷大樹、野村晋太郎、高柳英明、“グラフェンを用いた超伝導量子干渉計の作製と輸送測定”、日本物理学会2011年秋季大会、富山大学、2011年9月21日
- (32) 洗平昌晃(東北大)、塚田捷、強束縛近似法計算における結晶場の効果、日本物理学会第66回年次大会、新潟大学、2011.3.26.
- (33) 平川一彦(東大)、梅野顕憲、吉田健治、坂田修一:”原子スケールナノギャップ電極の作製と単一分子デバイスへの応用”、ナノ量子情報エレクトロニクス連携研究拠点公開シンポジウム「ナノ量子情報エレクトロニクスの進展」、東京、12月22日 (2010).
- (34) 吉田 健治(東大)、梅野 顕憲、坂田 修一、平川 一彦:”通電断線法による Al 系超伝導トンネル接合の作製”、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学文教キャンパス、長崎、9月14日～17日 (2010).
- (35) 梅野 顕憲(東大)、佐藤 宗太、吉田 健治、坂田 修一、藤田 誠、平川 一彦:”自己組織化により構築された中空巨大球状分子を用いた単一分子接合”、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学文教キャンパス、長崎、9月14日～17日 (2010).
- (36) 坂田修一(東大)、梅野顕憲、吉田健治、平川一彦:”単一フラーレン分子トランジスタにおけるフランク・コンドンプロセクトの観測”、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学文教キャンパス、長崎、9月14日～17日 (2010).
- (37) 堀内功(東大)、K. M. Cha<sup>1</sup>、柴田憲治、平川一:”AFM 陽極酸化によるダッシュパターンを用いた InAs 量子ナノ構造の MBE 成長”、第 71 回 応用物理学会学術講演会、長崎大学文教キャンパス、長崎、9月14日～17日 (2010).
- (38) 柴田憲治(東大)、堀内功、K. M. Cha、関享太、平川一彦:”ALD 法で成膜された HfO<sub>2</sub> をゲート絶縁膜とする単一自己組織化 InAs 量子ドットトランジスタの伝導特性”、第57回応用物理学会関係連合講演会、東海大学、神奈川、3月20日～23日 (2010).
- (39) 車圭晚(東大)、柴田憲治、堀内功、神子公男、山本 良一、平川一彦:”InAs 量子ドット位置制御用 AFM 陽極酸化 GaAs 酸化物の組成と 熱的安定性 ”、第57回応用物理学会関係連合講演会、東海大学、神奈川、3月20日～23日 (2010)
- (40) 金井康(東大)、R.S. Deacon、大岩頭、吉田勝治、柴田憲治、平川一彦、樽茶清悟:”InAs 量子ドットジョセフソン接合におけるスピナー重項-三重項近藤効果における電気伝導”、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス、大阪、9月23日～26日 (2010).
- (41) 金井康(東大)、R.S. Deacon、大岩頭、吉田勝治、柴田憲治、平川一彦、樽茶清悟:”自己形成 InAs 量子ドットの軌道縮退点における軌道反交差のサイドゲート依存性”、日本物理学会第 65 回年会、岡山大学 3 月 20-23 日(2010)
- (42) 堂田泰史(物材機構)、南雲淑元、井上亮太郎、渡辺英一郎、津谷大樹、高柳英明、“グラファイト SQUID の超伝導特性”、第57回応用物理学関係連合講演会、2010年3月19日
- (43) 洗平昌晃(東北大)、塚田捷、分子架橋系の電子トンネル機構に関する理論研究:I-V 特性の Fowler-Nordheim プロットにおける屈曲の起源 日本物理学会、岡山大学 2010.3.20-23
- (44) 田村裕之(東北大)、「階層的振電相互作用モデルによる分子会合体中の励起子動力学的の研究」理論化学討論会、北海道大学 2010.5.23
- (45) 田村裕之(東北大)、「ポルフィリン集合体中の励起子動力学的の理論研究」日本物理学会、岡山大学 2010.3.21
- (46) 田村裕之(東北大)、「導電性高分子のドナーアクセプターヘテロ接合におけるエキシトン電荷分離の理論研究」東海大学 2010.3.18

- (47) 平川一彦(東大):“ナノギャップ電極/ナノ量子系接合の物理と応用”、東大生研一阪大産研 研究所間交流プログラム、大阪大学、大阪(2009)
- (48) 柴田憲治(東大)、千葉茂生、平川一彦:“ナノギャップ電極と結合した単一自己組織化 InAs 量子ドットの光応答の観測”、第70回応用物理学会学術講演会、富山大学、富山、9月8日～11日(2009).
- (49) 坂田修一(東大)、梅野顕憲、吉田健治、平川一彦:“フィードバック制御通電断線法を用いた Cu 細線の断線素過程の解明”、第70回応用物理学会学術講演会、富山大学、富山、9月8日～11日(2009).
- (50) 坂田修一(東大)、梅野顕憲、吉田健治、平川一彦:“通電断線中の Cu 金属ドット SET の自然形成およびその電気伝導特性”、第70回応用物理学会学術講演会、富山大学、富山、9月8日～11日(2009).
- (51) 梅野顕憲(東大)、吉田健治、坂田修一、平川一彦:“金微小接合におけるエレクトロマイグレーションの温度依存性解析による素過程の検討”、第70回応用物理学会学術講演会、富山大学、富山、9月8日～11日(2009).
- (52) 吉田健治(東大)、梅野顕憲、坂田修一、平川一彦:“原子レベルの Ni 極微細接合における接合電圧と構造安定性”、第70回応用物理学会学術講演会、富山大学、富山、9月8日～11日(2009).
- (53) 柴田憲治(東大)、M. Jung、K. M. Cha、関享太、平川一彦:”ナノギャップ電極と結合した単一自己組織化 InAs 量子ドットの電子状態の成長温度依存性”、第56回応用物理学関係連合講演会、筑波大学、茨城、3月30日(2009).
- (54) 吉田健治(東大)、梅野顕憲、坂田修一、平川一彦:”フィードバック制御通電断線法を用いた Ni ナノ細線破断メカニズムの解明”、第56回応用物理学関係連合講演会、筑波大学、茨城、3月30日(2009).
- (55) 高橋駿(東大)、五十嵐悠一、R.S. Deacon、吉田勝治、大岩頭、柴田憲治、平川一彦、樽茶清悟:”InAs 単一自己形成量子ドットにおけるスピン軌道相互作用の定量的評価とその制御”、日本物理学会2009年年次大会、東京、3月27日～30日(2009).
- (56) 金井康(東大)、Russell S. Deacon、吉田勝治、柴田憲治、平川一彦、大岩頭、樽茶清悟:”自己形成 InAs 量子ドット/超伝導接合系における超伝導特性のサイドゲート制御”、日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、熊本(2009).
- (57) R.S. Deacon(東大)、A. Oiwa、K. Yoshida、K. Shibata、K. Hirakawa、S. Tarucha、”Kondo correlations and Andreev conductance in self-assembled InAs quantum dots contacted with superconducting and normal leads”、日本物理学会 2009 年年次大会、東京、3月27日～30日(2009).
- (58) 小林弘侑(東大)、守谷頼、増淵寛、柴田憲治、平川一彦、石田悟己、荒川泰彦、町田友樹:”AFMリソグラフィによる単一 InAs 量子ドットへのナノギャップ電極作製”、2009 年秋季 第70 回応用物理学会学術講演会、富山大学、富山、2009. 9. 10
- (59) 浜屋宏平(東大)、柴田憲治、平川一彦、石田悟己、荒川泰彦、町田友樹、強磁性電極/半導体量子ドット/非磁性電極ナノ構造におけるスピンプロケード効果、日本物理学会 2009 年秋季大会、熊本大学、熊本、2009. 9. 25
- (60) 浜屋宏平(東大)、柴田憲治、平川一彦、石田悟己、荒川泰彦、町田友樹:”単一量子ドット/強磁性電極ナノ接合におけるスピンプロケイドの観測”、第14回 半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-14、慶応義塾大学、神奈川、2009. 12. 20
- (61) 田村裕之(東北大)、「導電性高分子中のエキシトン電荷分離の量子動力的研究」理論化学討論会、東京大学 2009.5.29
- (62) 吉田健治(東大)、梅野顕憲、坂田修一、平川一彦:”フィードバック制御通電断線法を用いた原子スケール空隙を有する強磁性電極の作製”、第69回応用物理学会学術講演会、中部大学、愛知、9月2日～5日(2008).
- (63) 梅野顕憲(東大)、吉田健治、平川一彦:”金ナノ接合における通電時の部分破壊・修復モードの存在”、第55回応用物理学関係連合講演会、日本大学、千葉、Mar. 27~30(2008).

- (64) 柴田憲治(東大)、M. Jung、平川一彦、石田 悟己、荒川泰彦:”ナノギャップ電極と結合した自己組織化 InAs 量子ドットにおける高い近藤温度( $T_K \sim 85$  K)の観測”、第 55 回応用物理学関係連合講演会、日本大学、千葉、Mar. 27~30 (2008).
- (65) 高橋駿(東大)、五十嵐悠一、R.S. Deacon、大岩顕、柴田憲治、平川一彦、樽茶清悟:”InAs 単一自己形成量子ドットにおけるスピン軌道相互作用の定量的評価”、日本物理学会 2008 年秋季大会、岩手、9 月 20 日~23 日(2008).
- (66) 金井康(東大)、Russell S. Deacon、吉田勝治、柴田憲治、平川一彦、大岩顕、樽茶清悟:”自己形成 InAs 量子ドット/超伝導接合系における超伝導電流の観測”、日本物理学会 2008 年秋季大会、岩手、9 月 20 日~23 日(2008)
- (67) 北島未来(東大)、浜屋宏平、柴田憲治、M. Jung、川村稔、平川一彦、石田悟己、荒川泰彦、谷山智康、町田友樹:”強磁性電極/半導体量子ドット/非磁性電極ナノ接合における電気伝導特性”、2008 年春季 第 55 回応用物理学学会、2008. 3. 30

(国際会議)

- (1) K. M. Cha(東大)、K. Shibata, and K. Hirakawa: “Nucleation and morphology of site-controlled InAs QDs grown by molecular beam epitaxy”, The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE-17), Nara, Japan, Sep. 23-28 (2012)
- (2) K. Shibata (東大), A. Umeno, K. M. Cha, and K. Hirakawa: “Terahertz photon-assisted tunneling in self-assembled InAs quantum dots”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductor (ICPS2012), ETH, Zurich, Switzerland Jul.29-Aug. 3 (2012), .
- (3) K. Yoshida(東大), and K. Hirakawa: “Gate-tunable large magnetoresistances in ferromagnetic Ni-C60-Ni single molecule transistors”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductor (ICPS2012), ETH, Zurich, Switzerland ul.29-Aug. 3 (2012), (oral).
- (4) K. M. Cha(東大), K. Shibata, and K. Hirakawa: “Position- and size-controlled growth of InAs QDs and their applications to single electron transistors”, International Conference on Superlattices, Nanostructures, and Nanodevices (ICSNN), Dresden, Germany, Jul. 22-27 (2012)
- (5) K. Hirakawa(東大), A. Umeno, K. Yoshida, and S. Sakata: “Elementary process of electromigration and fabrication of atomic-scale nanogap electrodes for single molecule transistors”, Global COE Symposium on Secure-Life Electronics, University of Tokyo, Tokyo, Jan. 17-18 (2012).
- (6) H. Takayanagi (東京理科大) and K. Tsumura, “Graphene-SQUID”, MANA International Symposium 2012, Tsukuba, Feb. 29 (2012)
- (7) K. Hirakawa(東大), A. Umeno, K. Yoshida, and S. Sakata: “Elementary process of electromigration and fabrication of atomic-scale nanogap electrodes for single molecular junctions”, 10<sup>th</sup> QNANO Japan-Sweden Workshop, Visby, Sweden, Jun. 12-14 (2011).
- (8) R. S. Deacon(東大), Y. Kanai, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura and S. Tarucha, “Electrically tuned spin-orbit interaction in a single InAs quantum dot”, International Workshop on Quantum Nanostructures and nanoelectronics QNN2011, Tokyo, Japan, 4 October (2011)
- (9) M.Tsukada(東北大), A.Masago and M.Shimizu, “Theoretical Simulation of Kelvin Probe Force Microscopy Images of Si Surfaces with an Embedded Impurity”, ACSIN11, St. Petersburg, Russia, 2011.10.3-7
- (10) K. Hirakawa(東大), A. Umeno, K. Yoshida, and S. Sakata: “Elementary process of electromigration at metallic nanojunctions in the ballistic regime”, UW-UT Joint Symposium, University of Wurzburg, Germany, Oct. 4-5 (2010).
- (11) K. M. Cha(東大), K. Shibata, T. Ueda, and K. Hirakawa: “Site- and shape-controlled growth of isolated and coupled InAs quantum dots using AFM anodic oxidation”,

- 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Berlin, Germany, Aug. 23-27 (2010).
- (12) K. Shibata (東大), K. Seki, K. M. Cha, I. Horiuchi, and K. Hirakawa: "Growth of self-assembled InAs quantum dashes and their applications to single electron transistors", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), COEX, Seoul, Korea, Jul. 25-30 (2010).
  - (13) K. M. Cha (東大), K. Shibata, I. Horiuchi, M. Kamiko, R. Yamamoto and K. Hirakawa: "Chemical composition and thermal stability of AFM anodic oxides as nanomasks for site-controlled growth of InAs quantum dots", the 37th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2010), Takamatsu, Japan, May 31-Jun.4 (2010).
  - (14) K. Yoshida (東大), A. Umeno, S. Sakata, and K. Hirakawa: "Structural stability of Ni quantum point contacts under electrical stresses", American Physical Society March Meeting 2010, Portland, Oregon, USA, Mar. 15-19 (2010).
  - (15) K. Shibata (東大), K. M. Cha, K. Seki, I. Horiuchi, and K. Hirakawa: "Control of tunnel coupling strength between self-assembled InAs quantum dots and metal electrodes by tuning In-Ga intermixing", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP), Komaba Campus, Univ. of Tokyo, Tokyo, Mar. 9-11 (2010).
  - (16) A. Umeno (東大), K. Yoshida, S. Sakata and K. Hirakawa: "Elementary process of electromigration and its application to fabrication of nanogap electrodes for molecular junctions", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP), Komaba Campus, Univ. of Tokyo, Tokyo, Mar. 9-11 (2010).
  - (17) K. Yoshida (東大), A. Umeno, S. Sakata, and K. Hirakawa: "Electromigration at quantum point contacts of ferromagnetic metals under intense electrical stresses", Joint Workshop on Frontier Photonics and Electronics, Sydney, Australia, Mar. 4-5 (2010).
  - (18) R. S. Deacon (東大), S. Takahashi, Y. Kanai, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa and S. Tarucha, "Superconducting nanogap junction and the application to spin-based quantum information technology", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena QNSP, Tokyo, Japan March 9-11(2010).
  - (19) Y. Kanai (東大), R.S. Deacon, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Electrical control of Kondo effect and superconducting transport in a sidegated InAs quantum dot Josephson junction", APS March meeting, March 15-19, 2010; Portland, Oregon (2010).
  - (20) Y. Kanai (東大), R. S. Deacon, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Electrical control of spin-orbit interaction in self-assembled InAs quantum dots", The 30th International Conference of Physics in Semiconductor, MoB1-4, Seoul, Korea July 26-30, (2010)
  - (21) R. Moriya (東大), H. Kobayashi, K. Shibata, S. Masubuchi, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, T. Machida: "Fabrication of single electron transistor based on a self-assembled quantum dot by using atomic force microscope local oxidation", The 37th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2010), Takamatsu, Japan, 2010. 6. 4
  - (22) T. Machida (東大), K. Hamaya, R. Moriya, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Ishida, and Y. Arakawa: "Spin-dependent transport in a single quantum dot connected to ferromagnetic nanogap electrodes", Joint Workshop on Advances in Nanophotonics and Spintronics, Wurzburg, Germany, 2010. 10. 4
  - (23) T. Machida (東大), K. Hamaya, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Ishida, and Y. Arakawa: "Spin-dependent transport in a single InAs quantum dot attached to ferromagnetic

- nanogap electrodes”, International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP), Komaba, Tokyo, 2010. 3. 10
- (24) T. Machida (東大): “Spin-dependent transport in a single InAs quantum dot connected to ferromagnetic nanogap electrodes”, Workshop on Innovative Devices and Systems (WINDS), Hawaii, USA, 2010. 12. 8
- (25) M. Tsukada (東北大), A. Masago and M. Shimizu, Theory of KPFM image simulation and application to Si surfaces, ncAFM2010, Kanazawa, Aug. 1-4, 2010.
- (26) M. Tsukada (東北大), H. Tamura and K. McKenna, Theory of laser assisted field evaporation from insulating oxides, 52th International Field Emission Symposium, Sydney, Australia, Jul. 6, 2010
- (27) M. Araidai (東北大) and M. Tsukada, Theoretical Calculations on Inflection Behavior in Fowler-Nordheim Plot in Molecular Junction, SSSJ-A3 Foresight Joint Symposium on Nanomaterials and Nanostructures. University of Tokyo, Jul. 5-7, 2010
- (28) K. Shibata (東大) and K. Hirakawa: "Very high Kondo temperature ( $T_K \sim 80$  K) in single self-assembled InAs quantum dots coupled to metallic nanogap electrodes", APS Physics, March Meeting, Pittsburgh, PA, USA, Mar.16-20 (2009).
- (29) A. Umeno (東大), K. Hirakawa: "Elementary process of electromigration investigated by novel spectroscopic approach to electrical break junction", APS Physics, March Meeting, Pittsburgh, PA, USA, Mar.16-20 (2009).
- (30) K. Shibata (東大), M. Jung, K. Hirakawa, A. Oiwa, and S. Tarucha: "Control of tunneling coupling between self-assembled InAs quantum dots and metal electrodes by tuning In-Ga intermixing", the 36th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2009), Santa Barbara, USA, Aug. 30-Sep. 2 (2009).
- (31) K. Shibata (東大), M. Jung, K. M. Cha, M. Sotome, and K. Hirakawa: "Spin-half Kondo effect up to 80 K in self-assembled InAs quantum dots coupled to nanogap electrodes", EDISON16, Montpellier, France, Aug. 24-28 (2009).
- (32) A. Umeno (東大), K. Yoshida, S. Sakata and K. Hirakawa: “Elementary process of electromigration at gold nanojunctions”, 14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS14), Kobe, Japan, Jul. 19-24 (2009).
- (33) K. Shibata (東大), K. M. Cha, K. Seki, and K. Hirakawa: "Control of tunneling transparency between self-assembled InAs quantum dots and metal electrodes by tuning In-Ga intermixing", International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics (ISQNN2009), Komaba, Tokyo, Japan, Nov. 18-20 (2009).
- (34) A. Umeno (東大), K. Yoshida, S. Sakata, and K. Hirakawa: "Elemental process of electromigration at metal nanojunctions in the ballistic regime", International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics (ISQNN2009), Komaba, Tokyo, Japan, Nov. 18-20 (2009).
- (35) R. S. Deacon (東大), Y. Kanai, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Gate Tunable Proximity Supercurrent in Single Self-Assembled InAs Quantum Dots", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNNT2009), Atsugi, Japan (2009).
- (36) R. S. Deacon (東大), Y. Tanaka, A. Oiwa, R. Sakano, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Andreev localized states and Kondo effect in InAs quantum dots contacted with superconducting and normal electrodes", the 18th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS18), Kobe Japan, July 19-24 (2009).
- (37) S. Takahashi (東大), R. S. Deacon, K. Yoshida, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Large anisotropy of spin orbit interaction in a single InAs self assembled quantum dot", 14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems (NGS14), July 13-17, Sendai, Japan (2009).

- (38) Y. Kanai(東大), R. S. Deacon, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, A. Oiwa and S. Tarucha: "Electrical control of Kondo effect and superconducting transport in a sidegated InAs quantum dot Josephson junction", International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics (ISQNN2009), Tokyo, Japan, Nov. 18~20 (2009).
- (39) Y. Kanai(東大), R.S. Deacon, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa and S. Tarucha: "Electrical control of spin-orbit interaction in self-assembled InAs quantum dots", International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics (ISQNN2009), Tokyo, Japan, Nov. 18~20 (2009).
- (40) M. Tsukada(東北大) and M. Araidai, On the model of the transition from direct tunneling to field emission tunneling regime of self-assembled monolayers, 26th European Conference on Surface Science (ECOSS26), Parma, Italy, Aug. 30 - Sep. 6, 2009.
- (41) K. Yoshida(東大), S. Masubuchi, M. Ono, K. Hirakawa, and T. Machida: "Nanoscale patterning of graphene using AFM local anodic oxidation", International Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics, and Modeling (ISGD2008), University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Japan, Nov. 17-19 (2008).
- (42) K. Shibata(東大) and K. Hirakawa: "Very high kondo temperature ( $T_K \sim 80$  K) in self-assembled InAs quantum dots laterally coupled to nanogap electrodes", IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008 (NMDC 2008), Kyoto University, Kyoto, Japan, Oct. 20-22 (2008).
- (43) A. Umeno(東大), K. Yoshida, and K. Hirakawa: "Bias-induced formation of conductive channels across metallic nanogap electrodes", IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008 (NMDC 2008), Kyoto University, Kyoto, Japan, Oct. 20-22 (2008).
- (44) K. M. Cha(東大), K. Shibata, and K. Hirakawa: "Site-controlled growth of InAs quantum dots and its application to single electron transistors", 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2008), Vancouver, Canada, Aug.3-8 (2008).
- (45) K. Hirakawa(東大), K. Shibata, M. Jung, A. Umeno, T. Machida, Y. Arakawa, A. Oiwa, and S. Tarucha: "Physics and application of single quantum dot transistors", International Symposium on Secure-Life Electronics -Advanced Electronics for Quality Society and Life-, University of Tokyo, March 6-7 (2008)
- (46) S. Tarucha(東大): "Kondo Effect and Superconductivity Observed in Single InAs Quantum Dots Coupled to Superconducting Leads (invited)", 9th International Symposium on Foundation of Quantum Mechanics in the light of New Technology (ISQM-Tokyo08), Saitama (Japan), August 25-28 (2008).
- (47) R. S. Deacon(東大), Y. Kanai, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Supercurrent in single InAs quantum dots coupled to aluminium electrodes", 29th International Conference on Semiconductor Physics (ICPS2008), Rio de Janeiro, Brazil, July 27-August 1, (2008).
- (48) K. Tagami(東北大) and M. Tsukada, Theoretical simulation of nc-AFM images of mica surface in water, APS March Meeting, New Orleans, USA, Mar. 12. 2008
- (49) M.Harada(東北大) and M.Tsukada, Atomic Force Microscopy Simulation in Aqueous Environment by RISM Theory, APS March Meeting, New Orleans, USA, Mar. 12. 2008
- (50) M.Tsukada(東北大) & N.Watanabe, Theoretical simulation of tapping mode AFM in water, APS March Meeting 2008, New Orleans, USA, Mar. 13. 2008
- (51) M.Tsukada(東北大), Theory of Scanning Probe Microscopy and Transport for Nano-Structures, WPI&IFCAM Joint Workshop Challenge of Interdisciplinary Materials Science to Technological Innovation of the 21st Century, Feb. 18-19, 2008

- (52) K. Shibata(東大), M. Jung, C. Buizert, A. Oiwa, K. Hirakawa, T. Machida, S. Tarucha: "Electron tunneling through single self-assembled InAs quantum dots coupled to nanogap electrodes", 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2007), Kyoto, Japan, Oct. 15-18 (2007).
- (53) T. Machida(東大) (Institute of Industrial Science, University of Tokyo): Electrical control of spin transport in a single quantum dot attached to ferromagnetic leads, 8th Sweden-Japan QNANO Workshop, Lund, Sweden, 2007. 12. 14

② ポスター発表 (国内会議 18 件、国際会議 62 件)

(国内会議)

- (1) 津村公平(東京理科大)、古川直紀、大杉正樹、渡辺英一郎、津谷大樹、高柳英明、“グラフエノン/超伝導体接合に対する光照射効果”、第60回応用物理学会春期学術講演会、神奈川工科大学、年3月28日(2013)。
- (2) 柴田憲治(東大)、K. M. Cha、Y. Zhang、H. Yuan、岩佐義宏、平川一彦：“単一自己組織化量子ドットの電子状態制御とテラヘルツデバイスへの展開”、CREST 第2回公開シンポジウム「ナノ界面が生み出す次世代機能」、科学技術振興機構東京本部別館、東京、12月10日(2012)。
- (3) 吉田健治(東大)、坂田修一、濱田幾太郎、洗平昌晃、梅野顕憲、塚田捷、平川一彦：“単一分子トランジスタにおける機能性伝導”、CREST 第2回公開シンポジウム「ナノ界面が生み出す次世代機能」、科学技術振興機構東京本部別館、東京、12月10日(2012)。
- (4) 洗平昌晃(東北大)、塚田捷、Franck-Condon Blockade 現象に関する理論解析、日本物理学会 第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月 24 日～27 日。
- (5) M. Araidai(東北大) and M. Tsukada, Theoretical Models on Franck-Condon Blockade of Molecular Bridges, 2012 WPI-AIMR Annual Workshop, Feb. 20-23, 2012, Sendai, Japan.
- (6) 洗平昌晃(東北大)、赤木和人、塚田捷、拡張アンサンブル法によるバルク水の研究、第2回計算物質科学イニシアティブ(CMSI)研究会、東北大学、2012 年 1 月 30 日～31 日。
- (7) M. Araidai(東北大) and M. Tsukada, Theoretical Calculations on Franck-Condon Blockade of Molecular Bridges, The 6th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS6), Dec. 11-15, 2011, Tokyo, Japan.
- (8) 洗平昌晃(東北大)、塚田捷、金原子鎖における非断熱エレクトロマイグレーション II、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月 21 日～24 日。
- (9) M. Araidai(東北大) and M. Tsukada, Theoretical study on Electromigration beyond the Adiabatic Picture, 2011 WPI-AIMR Annual Workshop, Feb. 21-24, 2011, Sendai, Japan.
- (10) 小林弘侑(東大)、守谷頼、増渕覚、柴田憲治、平川一彦、石田悟己、荒川泰彦、町田友樹：“AFM リソグラフィーによる単一 InAs 量子ドットへのナノギャップ電極作製”、2009 年秋季 第 70 回応用物理学会学術講演会、富山大学、富山、2010. 9. 10
- (11) 池永恵梨子(東大)、守谷頼、増渕覚、柴田憲治、平川一彦、石田悟己、荒川泰彦、町田友樹：“AFM 陽極酸化法を用いた強磁性 NiFe ナノギャップ電極の作製”、公開シンポジウム「ナノ量子情報エレクトロニクス」の進展」、東京、2010. 12. 22
- (12) 柴田憲治(東大)、梅野顕憲、車圭晚、吉田健治、坂田修一、関享太、町田友樹、大岩顕、樽茶清悟、平川一彦：“ナノギャップ電極/単一ナノ量子系接合の物理と応用”、ナノ量子情報エレクトロニクス公開シンポジウム、東京大学駒場キャンパス、東京、4月22日(2009)。
- (13) 田村裕之(東北大)、「量子ドット-色素分子間の励起エネルギー移動の第一原理的研究」、理論化学討論会、東京大学、2009.5.28
- (14) 洗平昌晃(東北大)、塚田捷、金接合系の構造と表面原子拡散、日本物理学会 第 64 回年次大会、立教大学、2009.3.27-30

- (15) 塚田捷(東北大)、大塚勇太 “ポリアセンおよびペンタセン誘導体の結晶構造とバンド構造”  
日本物理学会秋季大会、岩手大学、2008.9.22
- (16) 洗平昌晃(東北大)、塚田捷、金原子のエレクトロマイグレーションに関する第一原理計算  
日本物理学会 2008 年秋季大会、岩手大学 2008.9.20-23
- (17) R. Deacon (東大), A. Oiwa, Y. Kanai, R. Yoshida, and S. Tarucha: “Electrical transport in single InAs quantum dots coupled to ferromagnetic electrodes”, 日本物理学会第 63 回年会、近畿大学、平成 19 年 3 月 22–26 日.
- (18) M. Harada (東北大), M. Tsukada, AFM simulation in aqueous environment using RISM method, 第 27 回表面科学講演大会 東京大学生産技術研究所, 2007 年 11 月

(国際会議)

- (1) K. Yoshida (東大), I. Hamada, S. Sakata, A. Umeno, M. Tsukada, and K. Hirakawa: “Gate-electric field control of tunnel magnetoresistance in Ni-C60-Ni single molecule transistors”, 6th International Meeting on Molecular Electronics 2012 (ElecMol' 12), Grenoble, France, Dec. 3-7 (2012) (poster).
- (2) S. Sakata (東大), Y. Kitagawa, M. Obi, K. Yoshida, K. Ishii, and K. Hirakawa: “Anisotropic molecular orbital effect and renormalization of molecular levels with configuration change in a single H2TPP molecule transistor”, 6th International Meeting on Molecular Electronics 2012 (ElecMol' 12), Grenoble, France, Dec. 3-7 (2012) (poster).
- (3) K. Shibata (東大) and K. Hirakawa: “Terahertz photon-assisted tunneling in single InAs quantum dot transistors”, International symposium on Frontiers in THz technology (FTT 2012), Nara, Japan, Nov. 26-30 (2012) (poster)
- (4) K. M. Cha (東大), K. Shibata, and K. Hirakawa: “Size limiting effect of site-controlled InAs quantum dots grown at high temperatures”, 31st International Conference on the physics of semiconductors (ICPS2012), ETH, Zurich, Switzerland, Jul.29-Aug. 3 (2012) (poster)
- (5) K. Muro (千葉大), H. Lin, H. Ito, T. Sato, K. Shibata, and K. Hirakawa: “Magnetic field effect on the photoluminescence excitation spectra of single InAs/GaAs quantum dots”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012), ETH, Zurich, Switzerland Jul. 29- Aug. 3 (2012) (Poster)
- (6) K. Muro (千葉大), L. Han, H. Ito, T. Sato, K. Oto, K. Shibata, and K. Hirakawa: “Magnetic field effect on the excited states of self-assembled InAs/GaAs quantum dots”, The 20th International Conference on "High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF-20), Chamonix Mont-Blanc, France, Jul. 22– 27 (2012) (Poster).
- (7) E. Ikenaga (東大), R. Moriya, H. Kobayashi, S. Masubuchi, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, and T. Machida: “Fabrication of nanogap electrodes attached to a single self-assembled InAs quantum dot using atomic force microscope local oxidation”, The 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-31), Zurich, Switzerland, 2012.7. 31
- (8) K. Yoshida (東大), A. Umeno, S. Sakata, and K. Hirakawa: “First demonstration of single C60 transistors using Ni nanogap electrodes”, International Workshop on Quantum Nanostructures and Nanoelectronics (QNN2011), Tokyo, Japan, Oct. 3-4 (2011), (poster).
- (9) A. Umeno (東大), K. Yoshida, S. Sakata, and K. Hirakawa: “Non-thermal electromigration in metallic nanojunctions”, International Workshop on Quantum Nanostructures and Nanoelectronics (QNN2011), Tokyo, Japan, Oct. 3-4 (2011), (poster).
- (10) K. Shibata (東大), K. Seki, N. Pascher, P. J. J. Luukko, E. Räsänen, T. Ihn, K. Ensslin, and K. Hirakawa: “Electronic structure in single self-assembled InAs

- quantum dashes detected by nanogap metallic electrodes”, International Workshop on Quantum Nanostructures and Nanoelectronics (QNN2011), Tokyo, Japan, Oct. 3-4 (2011), (poster).
- (11) K. M. Cha (東大), K. Shibata, and K. Hirakawa: “Single electron transport through site-controlled InAs quantum dots proved by nanogap electrodes”, 15th International Conference on Narrow Gap Systems (NGS15), Virginia Tech Blacksburg, VA. USA, Aug. 1-5 (2011), (poster).
  - (12) P. Luukko, K. Shibata, K. Hirakawa, and E. Räsänen: “Quantitative modeling of InAs quantum dashes”, The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS19), Tallahassee, Florida, USA, Jul. 25-29 (2011), (poster)
  - (13) K. M. Cha (東大), I. Horiuchi, K. Shibata, M. Nomura, and K. Hirakawa: “Improved size uniformity of site-controlled InAs quantum dots at high growth temperatures”, The 15th conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS15), Tallahassee, Florida, USA, Jul. 25-29 (2011), (poster).
  - (14) K. Shibata (東大), N. Pascher, K. Seki, S. Schnez, T. Ihn, K. Ensslin, and K. Hirakawa: “Electronic structure of self-assembled InAs quantum dashes detected by nanogap electrodes”, The 15th conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS15), Tallahassee, Florida, USA, Jul. 25-29 (2011), (poster).
  - (15) Y. Kanai (東大), R.S. Deacon, A. Oiwa, S. Takahashi, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Electrical control of g-tensor in self-assembled InAs quantum dots, Spintech6, Matsue Shimane, Japan, 3 August 2011
  - (16) Y. Kanai (東大), K Nakayama, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S.Tarucha, Phase measurement in strong Kondo regime in a self-assembled InAs dot superconducting quantum interference device, LT26, Beijing, China, 11 August 2011
  - (17) S. Takahashi (東大), T. Obata, R. S. Deacon, K. Yoshida, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa and S. Tarucha, Photon and phonon assisted tunneling through a single InAs self-assembled quantum dot, Spintech6, Matsue Shimane, Japan, 3 August 2011
  - (18) Y. Kanai (東大), K. Nakayama, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Phase measurement in Kondo regime in a self-assembled InAs dot superconducting interference device, International Workshop on Quantum Nanostructures and nanoelectronics QNN2011, Tokyo, Japan, 4 October 2011
  - (19) E. Ikenaga (東大), R. Moriya, S. Masubuchi, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, and T. Machida: “Fabrication of a nanogap electrode based on ferromagnetic material by using AFM local oxidation”, 15th conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS 15), Tallahassee, Florida, USA, 2011.7. 25
  - (20) E. Ikenaga (東大), R. Moriya, S. Masubuchi, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, and T. Machida: “Fabrication of a ferromagnet-based nanogap electrode by using AFM local oxidation”, International Workshop on Quantum Nanostructures and Nanoelectronics (QNN2011), Komaba, Tokyo, Japan, 2011.10. 3
  - (21) K. Tsumura (物材機構), M. Ohsugi, T. Hayashi, E. Watanabe, D. Tsuya, S. Nomura, and H. Takayanagi, “Development of graphene-based superconducting quantum interference device”, MANA International Symposium 2011, Tsukuba, Mar. 3 (2011).
  - (22) K. Tsumura (物材機構), M. Ohsugi, T. Hayashi, E. Watanabe, D. Tsuya, S. Nomura, and H. Takayanagi, “Development of superconducting interference device based on graphene”, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, Aug. 16 (2011).

- (23) K. Tsumura (物材機構), M. Ohsugi, T. Hayashi, E. Watanabe, D. Tsuya, S. Nomura, and H. Takayanagi, "Fabrication and Transport Measurement of Graphene-based Superconducting Interference Device", International Workshop on Quantum Nanostructures and Nanoelectronics (QNN2011), Tokyo, Oct. 3 (2011)
- (24) M. Araidai (東北大) and M. Tsukada, Theoretical study on Electromigration beyond the Adiabatic Picture, 11th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructure (ACSIN11), Oct. 3-7, 2011, St. Petersburg, Russia.
- (25) S. Sataka (東大), A. Umeno, K. Yoshida, and K. Hirakawa: "Observation of Franck-Condon blockade in a single C60 transistor", 5th International Meeting on Molecular Electronics, ElecMol'10, Grenoble, France, Dec. 6-10 (2010).
- (26) K. M. Cha (東大), K. Shibata, I. Horiuchi, M. Kamiko, R. Yamamoto, and K. Hirakawa: " Chemical composition and thermal stability of AFM anodic oxides as nanomasks for site-controlled InAs QDs ", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), COEX, Seoul, Korea, Jul. 25-30 (2010).
- (27) K. Shibata (東大), K. Seki, K. M. Cha, I. Horiuchi, and K. Hirakawa: "Fabrication of single electron transistors using single self-assembled InAs quantum dashes coupled to nanogap metallic electrodes", the 37th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2010), Takamatsu, Kagawa, Japan, May. 31-Jun.4 (2010).
- (28) K. Shibata (東大), S. Chiba, and K. Hirakawa: "Photoexcited charge sensitivity and stability of self-assembled InAs quantum dots coupled to nanogap electrodes", Quantum Dot 2010, East Midlands Conference Center, Nottingham, UK, Apl. 26-30 (2010).
- (29) A. Umeno (東大), K. Yoshida, S. Sakata and K. Hirakawa: "Elementary process of electromigration at metallic nanocontacts", MRS Workshop on Nanocontacts and Nanointerconnects, Moscone West, San Francisco, CA, USA, Apl. 5 (2010).
- (30) K. Shibata (東大), K. Seki, K. M. Cha, I. Horiuchi, and K. Hirakawa: "Growth of self-assembled InAs quantum dashes and their applications to single electron transistors", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena(QNSP), Komaba Campus, Univ. of Tokyo, Tokyo, Mar. 9-11 (2010).
- (31) K. Yoshida (東大), A. Umeno, S. Sakata, and K. Hirakawa: "Electromigration at Ni quantum point contacts under intense electrical stresses ", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena(QNSP), Komaba Campus, Univ. of Tokyo, Tokyo, Mar. 9-11 (2010).
- (32) K. M. Cha (東大), K. Shibata, I. Horiuchi, M. Kamiko, R. Yamamoto and K. Hirakawa: "Chemical composition and thermal stability of GaAs oxides grown by AFM anodic oxidation for site-controlled growth of InAs quantum dots", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena(QNSP), Komaba Campus, Univ. of Tokyo, Tokyo, Mar. 9-11 (2010).
- (33) K. Shibata (東大), S. Chiba and K. Hirakawa: "Charge sensitivity and stability of self-assembled InAs quantum dots coupled to nanogap metallic electrodes", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena(QNSP), Komaba Campus, Univ. of Tokyo, Tokyo, Mar. 9-11 (2010).
- (34) Y. Kanai (東大), R. S. Deacon, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Tarucha: "Electrical control of spin-orbit interaction in self-assembled InAs quantum dots", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena QNSP, Tokyo, Japan, March 9-11 (2010).
- (35) G. Allison (東大), A. Oiwa, S. Kumar, D. DiVincenzo, M. Ketchen, K. Hirakawa, H. Takayanagi, S. Tarucha: "A novel spin based qubit in quantum dots coupled to a superconducting resonator ", International Symposium on Quantum

- Nanostructures and Spin-related Phenomena QNSP, Tokyo, Japan , March 9-11 (2010).
- (36) S. Takahashi(東大), R. S. Deacon, K. Yoshida, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, S. Tarucha: "Large anisotropy of spin-orbit interaction in a single InAs self-assembled quantum dot", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena QNSP, Tokyo, Japan, March 9-11 (2010).
- (37) G. Allison(東大), A. Oiwa, S. Kumar, D. DiVincenzo, M. Ketchen, K. Hirakawa, H. Takayanagi, S. Tarucha: "A novel spin based qubit in quantum dots coupled to a superconducting resonator ", Quantum dot 2010, Nottingham UK, April 26-30 (2010).
- (38) R. Moriya(東大), H. Kobayashi, E. Ikenaga, K. Shibata, S. Masubuchi, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, and T. Machida: "Demonstration of a single-electron transistor composed of a self-assembled quantum dot and nanogap electrode fabricated by atomic force microscope local oxidation", The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (HMF-19), Fukuoka, Japan, 2010.8.5
- (39) Y. Doda (物材機構), H. Nagumo, R. Inoue, E. Watanabe, D. Tsuya, and H. Takayanagi, "Superconducting Characteristics of SQUID based on Graphite", MANA International Symposium 2010, Tsukuba, Mar. 5 (2010).
- (40) Y. Doda (物材機構), H. Nagumo, R. Inoue, E. Watanabe, D. Tsuya, and H. Takayanagi, "Development of SQUID with Graphite/Superconducting Junctions", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena, Tokyo, Mar. 9 (2010).
- (41) H. Tamura(東北大), "Explicit quantum dynamical analysis of exciton dynamics in molecular aggregates based on the hierarchical electron-phonon model", CECAM workshop, Theoretical, Computational, and Experimental Challenges to Exploring Coherent Quantum Dynamics in Complex Many-Body Systems, Dublin, May. 9. 2010
- (42) M. Araidai (東北大) and M. Tsukada, Theoretical Calculations of Electron Transport in Molecular Junction: Inflection Behavior in Fowler-Nordheim Plot and Its Origin, 2010 WPI-AIMR Annual Workshop, Sendai, Japan, Mar. 25-27, 2010.
- (43) M. Araidai(東北大) and M. Tsukada, Theoretical Calculations of Electron Transport in Molecular Junction: Inflection Behavior in Fowler-Nordheim Plot and Its Origin, International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP), University of Tokyo, Mar. 9-11, 2010.
- (44) K. Shibata(東大), M. Jung, K. M. Cha, M. Sotome, and K. Hirakawa: "Control of tunnel coupling strength between InAs quantum dots and nanogap metallic electrodes through In-Ga intermixing", 14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-14), Kobe, Japan, Jul. 19-24 (2009).
- (45) M. Jung(東大), W. Song, J. S. Lee, N. Kim, B. -C. Woo, J. Kim, and K. Hirakawa: "Nanogap formation of indium oxide core/shell heterostructure nanowires", 14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-14), Kobe, Japan, Jul. 19-24 (2009).
- (46) R. S. Deacon(東大), A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Kondo Correlations and Andreev Conductance in Self-Assembled InAs Quantum Dots Contacted with Superconducting and Normal leads", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNNT2009), Atsugi, Japan (2009).
- (47) S. Takahashi(東大), Y. Igarashi, K. Yoshida, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Quantitative Evaluation and Tuning of Spin-Orbit Interaction in InAs

- Self-Assembled Quantum Dots”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNNT2009), Atsugi, Japan (2009).
- (48) K. Hamaya(東大), K. Shibata, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, T. Machida: “Electron transport in a Semiconductor-Quantum-Dot Spin Diode”, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS), Kobe, Japan, 2009. 7. 21
- (49) M. Araidai(東北大) and M. Tsukada, Theoretical Study on Transition of Electron Tunneling Mechanisms in Molecular Junctions, 10th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN10) , Granada, Sep. 21-25, 2009
- (50) H. Tamura(東北大), “Quantum dynamics of exciton dissociation in semiconducting polymers”, ACSIN-10, Spain, 9.22, 2009
- (51) M. Araidai(東北大) and M. Tsukada, Microscopic Model for Inflection Behavior on Fowler-Nordheim Plot of I-V Characteristics in Molecular Junctions, 17th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM17), Dec. 10-12, 2009, Atagawa
- (52) H. Tamura(東北大), “Hierarchical electron-phonon model for extended system: Exciton dissociation in semiconducting polymers” International Symposium on Reaction Dynamics of Many-Body Chemical Systems, Kyoto, 6.22, 2009
- (53) M. Araidai(東北大) and M. Tsukada, First-Principles Study on Single-Atom Electromigration along Gold Atomic Chain, 2009 WPI-AIMR Annual Workshop, Mar. 1-6, 2009, Miyagi-Zao Royal Hotel, Zao, Miyagi, Japan.
- (54) K. Shibata(東大) and K. Hirakawa: "The Kondo effect observed up to  $T_K \sim 80$  K in self-assembled InAs quantum dots laterally coupled to nanogap electrodes", 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2008), Vancouver, Canada, Aug.3-8 (2008).
- (55) A. Umeno(東大), K. Yoshida, and K. Hirakawa: “Precise fabrication of metallic nanogap electrodes for single molecule junctions”, UT-NIM Bilateral Workshop on Nanoscale Systems, Munich, Germany, Jul. 10-11 (2008).
- (56) S. Takahashi(東大), Y. Igarashi, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha: "Quantitative evaluation of spin-orbit interaction in InAs quantum dots", 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), Amsterdam, Netherlands, Aug.6-13 (2008).
- (57) Y. Kanai(東大), R S Deacon, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, A. Oiwa, and S. Tarucha: "Observation of supercurrent in single InAs self-assembled quantum dots coupled to superconducting leads", 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), Amsterdam, Netherlands, Aug.6-13 (2008).
- (58) M. Araidai (東北大) and M. Tsukada, Ab-Initio Study on Single-Atom Electromigration along Gold Chain, International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-5), Nov. 9-13, 2008, International Conference Center, Waseda University, Tokyo, Japan.
- (59) M. Araidai(東北大) and M. Tsukada, Ab-Initio Study on Mechanistic Transition of Electron Transport in Molecular Junction, 16th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM16), Atagawa, Dec. 11-13, 2008
- (60) K. Hamaya(東大), M. Kitabatake, K. Shibata, M. Jung, M. Kawamura, S. Ishida, T. Taniyama, K. Hirakawa, Y. Arakawa, and T. Machida: “Semiconductor quantum-dot spin valves with a few electrons”, 52nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Tanpa, USA, 2007. 11. 8

- (61) M. Kitabatake (東大), K. Hamaya, K. Shibata, M. Jung, M. Kawamura, S. Ishida, T. Taniyama, K. Hirakawa, Y. Arakawa, and T. Machida: "Gate control of spin transport in a ferromagnet/InAs quantum-dot spin valve", 52nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Tampa, USA, 2007. 11. 8
- (62) K. Tagami (早稲田大), Molecular dynamics simulation of compressed green fluorescent protein molecule by AFM tip, 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, Univ. Tokyo, Nov.11-15, 2007

#### (4)知財出願

- ①国内出願 (1件)
- ②海外出願 (0件)

#### (5)受賞・報道等

##### ①受賞

1) 津村公平(東京理科大)、古川直紀、大杉正樹、渡辺英一郎、津谷大樹、高柳英明、  
"グラフェン/超伝導体接合に対する光照射効果"、第60回応用物理学会春期学術講演会、  
Poster Award、神奈川工科大学、2013年3月28日

2) 第27回(2009年秋季)応用物理学会講演奨励賞

受賞者:梅野頭憲(東大生研, CREST-JST, 東大ナノ量子)

講演題目:「金微小接合におけるエレクトロマイグレーションの温度依存性による素過程の検討」(共著者:吉田健治, 坂田修一, 平川一彦)

##### ②マスコミ(新聞・TV等)報道

- 1) 新しいエレクトロマイグレーションの機構を発見し、分子デバイス作製に大きく貢献した
- ・日刊工業新聞、2009年5月4日「単一分子トランジスタ 作製効率30倍に向上」
  - ・化学工業日報、2009年5月7日「電流ではなく"臨界電圧" エレクトロマイグレーション現象 東大が機構解明」
  - ・日経産業新聞、2009年5月12日「大電流による金属断線 一定電圧で電子・原子衝突 東大解明 LSI信頼性向上」
  - ・NIKKEI Tech-ON (on line)、2009年5月7日「電圧が決め手---東大生研、エレクトロマイグレーションの機構を明らかに」
- 2) 量子ドットにおいてスピン軌道相互作用の電氣的制御に成功
- ・日経新聞、2011.7. 25「新型半導体素子 電力ほぼゼロ」

#### (6)成果展開事例

##### ①実用化に向けての展開

・金属ナノギャップ電極を形成するに際し、通電断線過程を評価するために我々が開発したエレクトロマイグレーション分光という評価手法が、学会で受け入れられつつあり、様々な研究機関で用いられ始めている。

##### ②社会還元的な展開活動

・本研究成果をインターネット(URL: <http://thz.iis.u-tokyo.ac.jp>)で公開し、一般に情報提供している。

## § 6 研究期間中の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2011年10月 3-4日	International Workshop on Quantum Nanostructures and Nanoelectronics (QNN)	東京大学生 産技術研究 所コンベン ションホー ル	約130人	松本チーム、理研石橋研究 員と合同で、成果報告と情 報交換を図る公開シンポジ ウムを開催。F. Balestro (Neel 研), H.Q. Xu (Lund 大), 本久先生(北大)を招 待講演者として招聘した。
2010年3月 9-11日	International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP)	東京大学数 理科学研究 科講堂 (駒場)	161名 (うち海外 12カ国より 30名出 席)	本CRESTと研究テーマの関 連が深い樽茶 ICORP、平山 ERATO と共催で、左記の国 際シンポジウムを開催し、成 果報告とともに、最新の研究 の進展について、集中的に 議論を行った(公開)。 特に、3月10日には、 CREST スペシャルセッション として、外部からの招待講演 (分子接合:木口学先生(東 工大)、量子ドット: G. Bastard 先生(エコールノル マル・パリ))に引き続き、チ ーム内からの発表という形 で、成果報告を行った。

## § 7 結び

本研究は、単一分子トランジスタと単一量子ドットトランジスタというナノギャップ電極/ナノ量子系接合を中心として、研究を遂行した。

単一分子トランジスタについては、我々としては初めての試みだったので、必ずしも予定通りには進捗しなかったが、作製プロセスにおける大きなブレイクスルーやトランジスタ構造ならではの電子状態に関する情報が得られるようになったので、大きな成果が挙げたと言える。特に、強磁性電極単一分子トランジスタは世界で初めて実現できた。また、原子スケールでの電子状態の理解に関して、理論グループとの密な議論は大変有益であった。

ただ、これらの成果は我が国では最先端を走っていると言えるが、当初目的としていた単一分子構造のテラヘルツ分光や量子情報処理への応用までは届かなかった。海外では分子内核スピンの検出という量子情報処理に向けた研究も進みつつあり、さらに研究のスピードを上げる必要があると感じている。

自己組織化量子ドットについては、量子ドットの位置と形状の制御に関しては、時間はかかったものの世界でも最高レベルの質を有する位置制御量子ドットの成長ができるようになり、単一電子トランジスタの作製にも成功し、大きな成果が挙げた。現在、位置制御した量子ドットにさらに AFM で追加工して、量子リング構造もできるようになっており、今後の発展が期待される。

量子ドットの伝導に関しては、平川グループで結晶成長を行い、量子伝導の計測を、我々を含め、大岩、町田、高柳グループで行うという共同研究体制で研究を遂行した。この共同研究は大変うまくいき、多くの成果が生まれている。今後さらに量子情報処理技術への展開も期待される。以上のようにチーム内の共同研究はスムーズかつ有効に機能した。

他チームとのコラボレーションに関しては積極的に行い、(中断しているものも含め)いずれも発展しそうな感触を得ている。CREST の会合で研究総括より他チームとのコラボレーションを積極的に行うようにとのアドバイスを頂いていたが、それを心にとめておいたことが大変よかった。

