

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540314

研究課題名(和文) ナノコンタクトを利用した微小領域のエネルギーフローと単分子磁石の研究

研究課題名(英文) Nano-contact experiments: Energy flow in nano-region and Single molecule magnet

研究代表者

大塚 洋一 (Ootuka, Youiti)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：50126009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：2本の電線が数個の原子や分子だけでつながっているナノ接点に電流を流したとき、発熱によって接点近くの電子や原子の温度がどのように変わるかを、超伝導ナノコンタクトに0.2 μ mの微小な温度計を取り付けて測ることに成功した。また電子温度の上昇による超伝導・常伝導転移を合わせて観測した。発熱による温度上昇の割合は約50K/ μ Wであり、類似実験より2桁以上高い感度である。温度計温度の上昇は、電流が小さい領域では電流極性にはよらないが、電流の増加と共に極性に依存するケースが見られた。

研究成果の概要(英文)：By attaching small resistance thermometers to aluminum mechanically-controllable break junction, we measured temperature rise in the immediate vicinities of the nano-contact due to Joule heating at very low temperatures. At the same time we found an evidence of superconductor-to-insulator transition in the I-V curve of the junction, which means the electron temperature exceeds T_c . The rate of temperature rise to heating is about 50 K/ μ W, which is two- or three- orders of magnitude larger than the values in similar experiments. The temperature rise was independent of the direction of the current through the junction at low-bias conditions, but in some cases it began to depend when the current increased.

研究分野：低温物理学

キーワード：ナノコンタクト 温度測定 熱緩和 超伝導ポイントコンタクト 非平衡状態 ナノSQUID 単分子磁石

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は微小ジョセフソン接合の超伝導・絶縁体転移、強磁性体単電子トランジスタの磁気クーロン振動、コロイド粒子を島電極とする単電子トランジスタ、単一カーボンナノチューブの伝導、グラファイト超薄膜の超伝導近接効果やスピン注入など様々な微小導体系の極低温における電気伝導の研究を行ってきた。さらに希釈冷凍温度域での機械的破断法 (mechanical break junction, MBJ) の開発を行い、これを用いて単分子架橋系、特に超伝導金属を電極とした水素やフラーレン分子の架橋系や単原子接点の研究を行った。これらの接合の電流・電圧特性は超伝導ギャップ構造による強い非線形性を示し、これを手がかりとして伝導チャネル毎の透過率を決定した。

この超伝導ナノ接合にさらに高バイアス電圧を加えると、分子や原子の振動励起非弾性散乱や干渉効果による新たな非線形が現れることが知られているが、研究代表者はこれとは異なる顕著な構造を電流電圧特性に見だし、これが電子系の加熱による常伝導への相転移によってもたらされる構造であると結論した。

単分子接合や単分子架橋系における局所加熱(local heating)については既にいくつかの実験が報告されていた。しかし局所温度はいずれの場合も格子温度であり、ナノ接合における局所電子温度を調べたものはない。電子系 格子系というエネルギーフローからすれば電子温度 > 格子温度が当然のように思われるが、これも自明ではない。実際 Z.Huang らはバイアス電圧の増加と共に格子温度は当初増大するが、ある値で極大となり以後は減少に転じるとの結果を報告している。彼らはこの結果が電子電子相互作用と電子格子相互作用の競合を扱った D'Agosta らの理論によって説明できるとしているが、電子温度の計測を行わない限りはその最終確認にはならない。

単分子磁石 (Single-Molecule Magnet, SMM) は複数の磁性金属イオンクラスターを含む錯体分子であり、クラスター内の強い相互作用によって分子は大きな全スピン S をもつと共に、強い一軸性異方性のためスピンの反転にヒステリシスを生じ、あたかも分子 1 つが孤立した単磁区磁石のように振る舞う物質である。物理分野で SMM は巨視的トンネル現象の研究の舞台としてまず注目された。SMM のスピンの反転するには、数 10 K のエネルギーをもつ中間状態を経る必要があるため、熱励起によるスピン反転は低温で強く抑制され、これに代わる磁化反転過程として量子トンネリングによる遷移が重要となる。大きなスピン状態間の反転は巨視的量子トンネル (MQT) 現象の一つと見なすことができ、特定の共鳴条件でのみ磁化は緩和する。このような微小磁石は高密度磁気記録の他、分子スピントロニクスへの提案や量子演

算への応用可能性も議論されている。分子スピントロニクスへの展開についてはまだ理論提案のレベルにあるが、一部 SMM の単分子トランジスタを作りクーロンブロッケイドを観測したという先駆的報告も出始めている。我が国においては錯体化学の観点から単分子磁石関連物質を合成する有力な研究者がいるが、ナノ物性に踏み込んだ研究はほとんど無いのが現状である。

研究代表者は、ナノ接合の研究と並行して、微小ジョセフソン接合の超伝導・絶縁体転移研究から得た着想を基に、微小トンネル接合型 SQUID の開発を行ってきた。さらにこのマイクロ SQUID を利用して代表的 SMM 分子である Fe8 微結晶について極低温で磁化測定を行い、磁化の MQT を特徴付ける階段状の磁化曲線の観測に成功し、磁場掃引速度に依存したトンネル確率の変化を確認することができた。

2. 研究の目的

ナノギャップ電極対を用いて形成した原子ポイントコンタクトや分子架橋系について極低温で以下の研究を行う。

(1) 強くバイアスしたナノ接合における局所電子温度及び局所格子温度の上昇を計測し、ナノ領域における電子間相互作用と電子-格子相互作用によるエネルギーフローを明らかにする。超伝導・常伝導転移の観測で定点ではあるが電子温度を知ることができる。格子温度は従来のテレグラフ雑音などの他、接合近傍に微小抵抗温度計を設置するという方法で局所格子温度の直接測定も試みる。これによってナノ接合におけるエネルギー緩和の構造を調べる。

(2) 単分子磁石 (SMM) として振る舞う Fe8 分子を島電極とする単分子トランジスタ構造を作製し、伝導をプローブとした単一 SMM 分子の磁化反転の検出を行う。

3. 研究の方法

(1) 希釈冷凍温度域の機械破断 (MBJ) 法を主要手段として研究を行う。

(2) 超伝導 MBJ に見られるジュール過熱による常伝導転移をプローブとして、金属ナノ接合や分子接合の電子温度の計測を行う。また、コンタクトの電流雑音や独立した小型温度計の取付けによって接合及び接合近傍の格子温度の計測を行う。この両者の結果を通して、ナノ接合におけるエネルギーフローの特徴を議論する。

(3) 金属/絶縁膜/金属の三層構造-MBJ 試料を使い、下層をゲート電極とした単分子トランジスタ構造を実現する。これを用いて SMM-単分子トランジスタを形成し、電流-電圧特性を詳細に計測し、SMM の電子状態及びスピン状態と伝導との関係を議論する。

4. 研究成果

(1) 極低温 MBJ ステージの改良

MBJ 実験では試料基板を機械的に変形させてナノコンタクトをその場で形成する。希釈冷凍機でそのような変形を行うために、低温でも固体にならないヘリウムを圧力媒体としたペローズの変形による力発生機構を独自に開発して使用してきた。力の精密制御のためにこれまでメカシリンダー（モーター制御によるピストン制御装置）を用いていたが、シリンダー体積の限界があるため液体ヘリウムの蒸発に伴うドリフトを長時間に亘って補償し続けることはできなかった。この制約を逃れるために、ピエゾバルブを用いた圧力の線形制御システムを開発した。これによって接合間隔を制御するヘリウム圧力を一定に保持できる時間の制約がなくなった。

(2) 単分子トランジスタ

単分子磁石分子の単分子トランジスタの形成のための技術開発としてフラーレン C_{60} を用いた単分子トランジスタの試作を行った。ソース・ドレイン電極にはさまれた単分子に十分な電界効果を与えるには、当該分子に極めて接近した位置にゲート電極を作りこむ必要がある。簡単な見積もりを行うと、直径 0.5nm の島電極の電荷状態を変えるに必要なゲート電圧 V_g は $V_g = 0.4 \times D(\text{nm})[\text{V}]$ となる。ここで D は島電極とゲート電極の距離である。可変接合の MBJ でこれを実現するために、薄い絶縁膜で隔てられた 2 層の金属薄膜を用いる方法を試みた。まず、ポリイミド (Uワニス) をスピンコートしたリン青銅板を基板とし、電子線リソグラフィとリフトオフを繰り返すことで、その上にアルミニウム / 酸化アルミニウム / C_{60} + アルミニウムの 2 層構造を有する MBJ 試料を作製した。下層アルミニウムはゲート電極、酸化アルミニウムはゲート絶縁膜である。絶縁膜は下層アルミニウム電極をリフトオフで作製した後、高湿度 40% の雰囲気中に 2 時間放置し形成した。当初 2 層間に大きな電気的リークがあったが、2 層の重なり部分の面積を最小化するなどの対策で十分な絶縁性をもつ試料を得ることができるようになった。

これを用いて液体ヘリウム温度で実験を行い、層間の絶縁を保ったまま上下層それぞれについて破断・再接合できることを確認した。量子抵抗より十分高い抵抗状態に接合を調整し、ゲート電圧による変化を調べた所、ソース・ドレイン抵抗が少し変化する接合も見られた。しかし破断・再接合が可能な繰り返し回数は限られ、突然再接合ができなくなってしまいうという現象が起きた。従来の単層 MBJ 試料では実験上のミスがない限り繰り返し再接合が可能であったことと著しく対照的である。実験後に試料を SEM で調べたところ、接合部位で試料が大きく変形しており、2 層間の剥離が原因であると考えられる。下層 Al をゲート電極として上層ナノコンタクトの電流電圧特性への影響 (FET 特性) を調

べたが、測定できたナノ接合の個数が限られており、明確なゲート電圧効果の確認には至らなかった []。

このように積層型 MBJ は繰り返し耐性に難があることがわかり、別法として Electromigration (EM) による Au- C_{60} -Au 単分子トランジスタの作製を試みた。電子線リソグラフィにより表面を熱酸化した高ドーパ型 Si 基板に 0.1 μm 幅のくびれを持つ金細線を作り、これに C_{60} 希薄溶液を滴下し乾燥した後、EM を行った。EM は接合の抵抗値及びその時間あたり増加率をモニターしながら引加電圧を制御する方法で行った。高い歩留まりで量子抵抗以上の接合を作製することができ、クーロンブロッケード様の電流-電圧特性を示すものも得られたが、明瞭なゲート電界効果は観測できていない []。

以上のように単分子トランジスタの実現に向けた研究を行ったが、残念ながら極低温で動作する単分子トランジスタを作る有効な方法を開発するには至らなかった。分子架橋試料が形成されるのはいずれの場合でも確率的であり、MBJ 法では多数回の破断・再接合を繰り返すなかで見つけるしかない。EM 法は予め試料を準備できるがパラメータのその場調整が困難であり、新たなブレークスルーが必要である。

(3) 単分子磁石の磁化測定及び微小トンネル接合型マイクロ SQUID の開発

単分子磁石の磁化反転現象の観測などに用いてきた微小トンネル型マイクロ SQUID はアルミニウムを材料としているため、その動作は 1 K 以下の極低温が必要であった。この条件を緩和し、さらに高磁場での測定を可能とするためにニオブ (超伝導臨界温度 9 K) を材料としたマイクロ SQUID の開発を行った []。Nb は高融点金属であると共に、化学的に活性であるため、薄膜では T_c が低下し超伝導転移を起こさないケースすらある。またアルミでは酸素導入によって容易に良質なトンネル障壁を形成できるのに対して、半導体である酸化ニオブはトンネル障壁として問題がある。超高真空電子線蒸着と耐熱性ポリマー-PES (Poly (penylene ether-sulfone)) を犠牲層とする三層レジスト法を用いたリフトオフ及びアルミナのスパッタ蒸着によって $T=4\text{K}$ でも動作するトンネル接合型マイクロ SQUID を作製した。2 T の磁場中でも感度を有する。

走査型 SQUID 顕微鏡は既に複数の開発報告があるが、マイクロ SQUID を用いることによって 1 T 程度までの高磁場中でのイメージングが可能な装置の開発を目指し、極低温 XY ステージを試作した []。ステージ駆動はヘリウム圧力による小型ペローズの伸縮を用いる独自の方法を試みた。また、静電容量型の変位センサーも合わせて開発した。既存の希釈冷凍機に取り付けを行い、その動作を室温で確認し、約 7 μm の位置精度を得た。

(4)超伝導ナノコンタクトにおける電子過熱による超伝導・常伝導転移

超伝導金属薄膜で作製した MBJ 試料の極低温での電流電圧特性は非線形であり、接合抵抗が十分小さな接合では超伝導電流を、逆に接合抵抗が量子抵抗より十分大きな接合では超伝導ギャップパラメータの4倍の幅の伝導ギャップを生じる。これらは、多重アンドレーエフ反射モデルで統一的かつ定量的に理解することができる。これらの構造はいずれもギャップエネルギー程度の電圧領域で生じ、それ以上の電圧領域では微分コンダクタンスはほぼ一定値に漸近する。しかし、さらにバイアス電流を増やして行くと、ギャップ電圧より遙かに大きな電圧において、微分コンダクタンスに顕著な構造が生じる。この構造が生じる電圧 V は一定ではなく、接合抵抗の増加につれて増大する。一方、構造が生じる位置での電流値 I は接合抵抗の増加と共に減少し、両者の積、つまり電力 $P=IV$ は抵抗によらずほぼ一定であることがわかった。これはジュール熱によって構造が生じることを示唆する。これを確かめるために構造の前後の IV 特性を線形関数 $I=GV+I_{os}$ でフィッティングし、電流切片 I_{os} を求めたところ、低電圧側では正 ($I_{os} > 0$) であるが、高電圧側ではこれがほぼ無くなることがわかった。超伝導接合は高バイアス領域でアンドレーエフ反射による過剰電流 $I_{os} > 0$ があることは知られており、それが消失することからこの構造は接合部の超伝導体が常伝導状態に転移したことによって起こったと解釈することができる。

この構造の一般性を調べるために、Al の他、Sn、Pb、Sn-Pb 合金、Sn-C₆₀ 共蒸着膜の MBJ を作り測定を行った。その結果いずれの試料においても同様な構造を観測し、解釈の妥当性を確認した。各 MBJ 試料の測定結果を表1に示す。T_c は実測した超伝導転移温度とギャップエネルギーである。P_c は表示温度において構造が生じるジュール電力である。また P_c 以下の領域での過剰電流から評価した接合の伝導チャンネルの平均透過率 T_{av} も示した。典型元素である Al では平均透過率は高いが、Sn、Pb では比較すると低く、Pb-Sn 合金ではさらに低くなる。明らかにナノコンタクト部の不純物効果である。

| | Al | Sn | Pb | Pb-Sn | Sn-C60 |
|------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| T _c (K) | ~1.2 | 3.7 | 6.7 | 8 | 3.7 |
| (meV) | 0.26 -0.30 | 0.624 | 1.28 | 1.35 | 0.629 |
| P _c (μW) | 0.007 @0.1K | 0.25 @0.1K | 0.92 @4.2K | 0.14 @7.7K | 0.14 @0.1K |
| T _{av} | 0.94 | 0.87 | 0.85 | 0.6 | 0.86 |

表1：超伝導 MBJ の実験結果

(5)微小温度計の開発

実験は液体ヘリウム～希釈冷凍温度域で

おこなうため、1μm以下の大きさを持ち、この領域で感度を有する温度計が必要である。そのような感温素子として、以前に研究を行ったスズグラニュー膜を検討した。スズの微量蒸着と酸素導入による表面酸化を4回繰り返した膜をリフトオフで作製した。酸化の度合いによって極低温相は超伝導から絶縁体相に大きく変わるが、経時変化が大きく温度計と実用的ではないことが判明した。適当な保護膜を用いれば安定性は改善すると考えられるが、微細加工との適合性も検討する必要がありこれ以上の検討は断念した。

Au-Ge, Nb-Si, Nb-Ge などの半導体と金属の合金薄膜は低温温度センサーに使えることが知られている。そこで我々は微細加工プロセスへの適応が容易だと考えられる Au-Ge 薄膜を次に検討した。文献によれば、電気抵抗の温度変化は AuGe の組成比のみならず、蒸着方法や蒸着後の熱処理によって大きく変化するとされている。本実験では温度センサーを MBJ 試料上に作る必要があるため、高温での熱処理を行うことはできず、また微細加工はリフトオフ法に限られる。そこで一定比率の AuGe をフラッシュ蒸着することにし、低温で適度な感度を持つ薄膜作製の条件(比率及び膜厚)を探った結果、Au:Ge=7.7:92.3(モル比)、膜厚90nmを得た。

MCBJ 試料の接合近傍の温度を測るためには幅2μmの金属細線上に温度センサーを配置しなければならない。その方法として、電子線リソグラフィによる架橋パターンに対して斜め蒸着を行うことにした。2層レジスト法により一部を架橋構造とした細線パターンを描画し、Au:25nm+Cr:5nmを基板鉛直方向から蒸着した後、AuGeを±24°の2方向から順次蒸着し、その後リフトオフを行った。その結果、写真1のように幅200nm、長さ250nmのAuGe感温部分を持ち、他はAuで覆われたリード線を持つセンサーが得られた。ただし、作製条件にまだ制御が不足した部分があり、得られたセンサーの温度感度はばらつきが大きいのが現状である。

(6)微小温度計付きアルミニウム MBJ 試料による実験

AuGe 抵抗温度計を取り付けた Al-MBJ 試料の作製に成功した。写真1は試料の電子顕微鏡写真である。水平方向にあるのが Al 細線でありその中央部は基板から離れた架橋状態にある。架橋部分の Al 細線は幅0.4μm、長さ2μmである。架橋の中央部は細くし、基板の曲げ変形によって破断し、ナノコンタクトができる。架橋の両方の基部に取り付けられているのが AuGe 抵抗温度計である。そのサイズは幅0.2μm、長さ0.25μmであり、上下の Au リード線につながっている。Al 細線の表面は高湿度雰囲気中で酸化し、AuGe と Al の間は電氣的に絶縁されている。AuGe センサーとナノコンタクトの距離は1.4μmである。

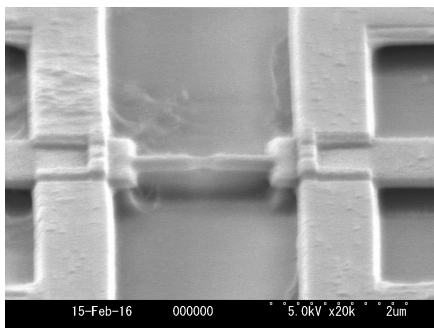


写真1：AuGe 抵抗温度計付き AI-MBJ 試料の走査型電子顕微鏡写真

この試料をヘリウム圧駆動の MBJ ステージにセットし希釈冷凍機で 50mK 以下まで冷却した。AuGe 温度センサーの抵抗は温度の低下と共に増大する半導体的な変化を示すことを確認した。さらに MBJ の破断・再結合を行い、様々な接合状態における MBJ の電流・電圧特性と二つの AuGe センサー抵抗の同時測定することができた。

接合に流すバイアス電流を増やすことによって両端の温度計が示す温度は敏感に変化する。ナノ接合のジュール損に対する温度計温度の上昇の割合は約 50K/ μ W である。同様なナノコンタクトの局所温度測定を報告している結果と比較したのが表 2 である。Tsutsui ら[]の試料は Au-MBJ 試料の両端にミアンダ状白金細線抵抗温度計を配した試料であり、Pt 細線の全長は約 100 μ m と長い。従って測定の局所性は明らかに本実験が優れる。また感度においても本実験の方が 2 桁以上高い。Lee ら[]は AFM 用カンチレバーのプローブ先端部に Au と Cr の接点を作り、その熱起電力からプローブ先端の局所温度を測るという巧妙な実験を行っている。導電性 AFM プローブ先端と熱電対接点の距離はわずか 0.3 μ m であり、測定の局所性は優れると思われるが、感度は本実験の 1000 分の 1 しかない。理由の一つは測定が室温であることにあるが、熱電対接点の上にある Au 薄膜が熱の良導体となっていることも考えられる。いずれにしても我々の試料ではこれまでの報告より格段に高い感度の測定が可能である。

| | 本研究 | Tsutsui et al. (ref.) | Lee et al. (ref.) |
|---------------------|-----|------------------------|--------------------|
| 温度計サイズ・距離(μ m) | ~ 1 | >10 | ~0.3 |
| 感度 (K/ μ W) | 50 | 0.4 | 0.04 |
| 測定温度域(K) | <1 | 80 | 300 |

表 2：局所温度計測に使われた温度計の比較

本試料による実験は研究期間の最終盤にはじめて成功したため、まだ結果を十分に整理・検討するに至っていない。以下では予備的な解析の結果を示す。今後解析を行うと共に、さらに実験を行う予定である

Tsutsui ら[]は量子コンダクタンスにほぼ等しいコンダクタンスを持つ Au のナノコンタクトに電流を流した時、温度計の温度上昇が電流の向きに依存すること、つまりジュール損による発熱が電流の上流と下流で異なることを主張している。我々は AI-MBJ で様々な抵抗を持つ AI ナノコンタクトについて同様な実験を行った。その結果、多くの場合温度上昇は電流の極性にはよらず対称であった。ただし少数ではあるが、低バイアスでは対称であるものも、バイアスを増すと非対称になるケース見られた。これがどのような場合に生じるかは今後確認を行いたい。

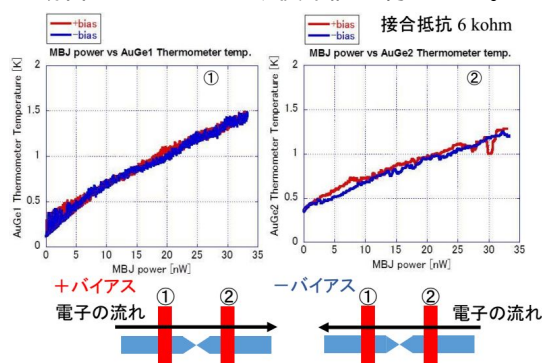


図 1：温度上昇のバイアス依存性

IV 特性に見られる AI 接合部の超伝導・常伝導転移による構造を本試料でも確認した。転移を起こす Joule 電力は 7.5nW であり、以前に行った実験結果(表 1)とはほぼ一致する。この時接合部の AI の電子温度は T_c になると考えられる。一方同時測定した AuGe 温度はこのとき約 0.6K であった。また、AuGe センサーが T_c を示すためには接合の Joule 電力を 30nW 以上にする必要がある。AuGe センサーは接合から 1.4 μ m 離れており、また Au リード線につながれている。これらを考慮したシミュレーションを行い試料中の電子温度及び格子温度について考察を行う予定である。

さらに二つの AuGe 抵抗の一方をヒーターとし、他方を温度計として使用することによって、ナノコンタクトの熱伝達を調べた。接合抵抗による熱伝達の変化を確認した。接合抵抗が 1k の場合、伝達率は $T/P=0.06$ (K/ μ W)であり、接合に電流を流した場合の係数より桁違いに小さい。その理由も今後の検討課題である。

< 引用文献 >

幸坂健史, C60 単分子トランジスタの作製と単分子接合系の電気伝導の研究 (筑波大学数理工学研究所, 修士論文, 2013 年 3 月)
 廣瀬桃子, Nb を用いた微小トンネル接合

型マイクロ SQUID の開発、筑波大学数理物質科学研究科修士論文、2014 年 3 月

大賀和人、希釈冷凍温度域 SQUID 顕微鏡の開発、筑波大学数理物質科学研究科修士論文、2014 年 3 月

M.Tsutsui, T.kawai and M.taniguchi, Scientific Reports 2,217(2017).

W.Lee et al. Nature 498 209(2013).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 10 件)

Yukihiro Shibata, Youti Ootuka, Local electron- and lattice-heating in superconducting atomic point-contacts、19th International Conference on Superlattice, Nanostructures and Nanodevices (ICSNN2016)、2016.7.25-30、香港市立大(香港)(accepted) .

Yukihiro Shibata and Youti Ootuka, Local heating in superconducting atomic point-contacts、Frontiers in Quantum Materials and Devices Workshop、2016.6.13-14、理研(RIEKN)(埼玉県和光市)(accepted).

柴田倅宏、大塚洋一、超伝導ナノコンタクトにおける局所温度計測 III、日本物理学会第 71 回年次大会、2016.3.22、東北学院大(宮城県仙台市)。

柴田倅宏、大塚洋一、超伝導ナノコンタクトにおける局所温度計測 II、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015.9.18、関西大学(大阪府吹田市)。

青木仁、柴田倅宏、大塚洋一、超伝導ナノコンタクトにおける局所温度計測、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014.9.9、中部大学(愛知県春日井市)。

柴田倅宏、青木仁、大塚洋一、超伝導ナノコンタクトにおける過熱効果、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014.9.9、中部大学(愛知県春日井市)。

廣瀬桃子、大賀和人、大塚洋一、Nb を用いたトンネル接合型マイクロ SQUID の開発、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013.9.26、徳島大学(徳島県徳島市)。

大賀和人、廣瀬桃子、大塚洋一、トンネル接合型マイクロ SQUID を用いた高磁場動作可能な走査型 SQUID 顕微鏡の開発、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013.9.25、徳島大学(徳島県徳島市)。

幸坂健史、大塚洋一、2 層 MBJ 法による単分子トランジスタの作製、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012.9.20、横浜国立大学(神奈川県横浜市)。

大賀和人、齋藤政通、松下慎平、廣瀬桃

子、大塚洋一、トンネル接合型マイクロ SQUID の広帯域測定、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012.9.19、横浜国立大学(神奈川県横浜市)。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://lt.px.tsukuba.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

大塚 洋一(OOTUKA, Youti)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：50126009

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし