

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H03839

研究課題名(和文)原子直視法による自由空間1nm級配線法の開発

研究課題名(英文)Development of free space 1 nm class wiring via direct atomic observation

研究代表者

木塚 徳志(Kizuka, Tokuji)

筑波大学・数理工学系・教授

研究者番号：10234303

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 5,200,000円

研究成果の概要(和文):その場高分解能観察電子顕微鏡法により、ナノチップ操作による自由空間ナノ配線法が開発された。この配線法で作製されたナノワイヤーやナノ接点を配線だけでなく、機能素子として応用する道が探索された。金属ナノワイヤー形成の基礎条件とワイヤーの構造と特性が解明された。ワイヤー成長時の荷重、印加電圧、配線速度、およびの温度を変え、形成されるナノワイヤーの幅、長さ、形状、電流-電圧特性、破壊電流密度、変形・破壊などの構造、電気伝導特性と機械的特性が明らかになった。こうした解析結果をもとに、各種金属のナノワイヤー成長の機構が解明された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トランジスタやダイオードの微細化が極限を迎えている現在、回路の集積化をさらに進め、かつ新機能を導入する方針の一つが、微細素子を自由に接合する微細配線法を実現することである。特に、ワイヤーボンディングに代表されるような、任意の長さで3次元空間的に配線できる自由空間配線法は、積層した回路基板上の任意の位置関係にある電極同士を自由に繋ぎ、最適化された集積回路の作製を可能にする。本研究は、研究代表者の開発してきた原子直視観察型の研究手法を適用し、この自由空間ナノ配線法を発展させた。本研究で得られた成果は、電子回路の微細化、高集積化、高機能化に関わる電子工学を進展させ、社会の発展に寄与するものである。

研究成果の概要(英文):Free space nanometer scale wiring using nanotip manipulation was developed by in situ high-resolution transmission electron microscopy. The application of the produced nanowires and nanocontacts to functional devices was investigated in addition to that as joining elements between the nanodevices. The fundamental conditions of nanowire formation, the structure and properties of the nanowires were elucidated. The acting force, applied voltages, wiring speed, and temperature during the wire growth were changed, and the width, length, current-voltage relation, fracture current density, deformation, fracture dynamics were investigated. From these results, the growth mechanism of the nanowires of various metals was explained.

研究分野：ノ・マイクロ科学・ナノマイクロシステム

キーワード：ナノワイヤー ワイヤーボンディング 自由配線 電子顕微鏡 その場観察 原子直視法 原子拡散 成長方位

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、ナノ探針操作を組み入れた「その場高分解能透過型電子顕微鏡法」(オペランド電子顕微鏡法)を1994年より世界に先駆けて開発し、この手法によって、ナノワイヤー形成の研究を現在まで進めてきた。これまでに、最も長い単原子細さのワイヤー(単原子ワイヤー)を作製し、多くの金属や半導体でナノワイヤーの形成機構と構造だけでなく、電気伝導・機械的・光学特等様々な特性を調べてきた。特に、2005年には、太さ2 nm、長さ70 nmのシリコンワイヤーを自由空間で配線することに成功した(Kizuka *et al*, Phys. Rev. B **72**, 035333 (2005) および Kizuka *et al*, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 5706 (2007))。さらに、研究開始時期には、金属でも、数ナノメートル幅、数百ナノメートルの長さで、しかも実用できるほど高速で、3次元的に配線できる技術を発見した(Kizuka *et al*, Scientific Reports. **5**, 13529 (2015))。この手法の発見は、これまで全く想定されていないほど微細な配線の道を拓くものであった。この発見とこれまでのナノワイヤー研究を基にして、原子直視型観察法を適用し、様々な材料を用いて自由空間ナノ配線を試み、新たなナノ配線法の研究を展開することが求められていた。

## 2. 研究の目的

トランジスタやダイオードの微細化が極限を迎えている現在、回路の集積化をさらに進め、かつ新機能を導入する方針の一つが、微細素子を自由に接合する微細配線法を実現することである。特に、ワイヤーボンディングに代表されるような、任意の長さで3次元空間的に配線できる自由空間配線法は、積層した回路基板上の任意の位置関係にある電極同士を自由に繋ぎ、最適化された集積回路の作製を可能にする。本研究を開始した時期、本研究代表者は、前項で述べたように、ナノチップ操作により生じる応力誘起拡散とエレクトロマイグレーションを利用して、わずか数ナノメートル幅の金属配線を、数百ナノメートルの長さで配線できる技術を見出した。この手法は、配線の細さだけでなく、従来のワイヤーボンディング法とは異なり、(1)非加熱、(2)巻き取り線が不要、および(3)10 TA/m<sup>2</sup>級の高い破断電流密度等の優れた特徴を有していた。本研究の目的は、原子直視観察型の研究手法を適用し、この自由空間ナノ配線法を発展させることである。

## 3. 研究の方法

ナノワイヤーに限らず、ナノメートルサイズの構造を持つ素子の特性は、結晶の単位構造と平均的な組成だけではなく、元素や原子空孔も考慮した個々の原子の配列に依存する。したがって、構造は原子単位で局所的に制御されなければならない、その評価もそれに見合った空間分解能が必要になる。さらに、素子としての電気的および機械的性質の評価は必須であることは言うまでもない。従来、こうしたナノサイズ素子作製と評価は、それぞれ個別に、つまり、「作製」と「評価」は基本的に別々に行われてきた。これは「作製」と種々の「評価」を、全て、一度に実現する汎用技術がなかったためであり、それがこの分野の実験研究を滞らせている大きな原因になっていた。本研究では、本研究代表者がこれまでに開発してきたナノ構造の原子レベル操作が可能なピエゾ機構を導入した原子直視型の「その場高分解能透過型電子顕微鏡」(図1、Kizuka, Phys. Rev. B **77**, 155401 (2008)他)を応用し、これらの問題を全て解決し、以下の実験方法にしたがって調査を進めた。

### 実験項目 I: 様々な金属のナノワイヤー形成の基礎条件と特性の解明

本研究代表者が発見した自由空間ナノ配線法を用いて、本研究の中心になる様々な金属のナ

ノワイヤーを、様々な条件のもとで作製した。材料には、自由空間ナノ配線に適すると期待される金属であるマグネシウム、ジルコニウム、ハフニウムその他、従来のワイヤーボンディングで使用されている微細配線として信頼性の高い金属である金、これまでには配線に用いられてこなかったが高強度の高融点金属であるタンタル、モリブデン、タングステンなどを選択した。具体的には、以下の手順のように調査を進めた。

(1) 金属のナノチップと電極基礎部に相当する基板金属を用意し、透過型高分解能電子顕微鏡内部で接触させ、その後、この接点を引き伸ばしナノワイヤーを形成させた。つまり、本研究では、簡便で、ワイヤー素材となる領域にナノチップを接触させて引き伸ばすだけでワイヤーを成長させることを試みた。

(2) この方法でワイヤーが形成する時の以下に示す条件を調べた。

結晶学的条件：引っ張り時の接触面および結晶軸

印加電圧：引っ張り時のナノチップと電極基礎部間の電圧

温度：本手法は、まず、常温でナノワイヤー形成可能であるが、より適切なワイヤー形成温度を調べた。特に、融点の高い、拡散の遅い材料には、この温度制御が重要になるために、電子顕微鏡内加熱のための加熱機構を、本装置に合わせて独自に設計し導入した。

(3) 上記の条件ごとに、ナノワイヤー形成時の過程を、その場で、原子配列レベルの空間分解能で電子顕微鏡観察し、その観察像を動的に記録した。記録動画をミリ秒単位で解析し、形成されたナノワイヤーの幅、最大長、形状、成長方位、粒界・界面、格子欠陥、および成長速度、変形、破断等を原子配列レベルで局所解析した。これを元に、ワイヤー成長の駆動力となる応力誘起原子拡散やエレクトマイグレーションの過程を調べた。

(4) 上記と同時に、ワイヤーに電圧を印加し、電流 - 電圧特性や破断電流密度等を調べた。

#### 実験項目 II：成長させたナノワイヤーを用いたワイヤーボンディング

実験項目 I の成果をもとにして、任意の位置にある 2 つの電極間を 3 次元的に配線 (ワイヤーボンディング) する操作を試みた。例えば、ワイヤーを単に一方方向に伸ばすのではなく、途中で曲げることを試みた。具体的には、以下のよう調査を進めた。

(1) ナノチップを 2 つ用意し、両者を接触させた。

(2) 接触後、ナノチップを移動し、ナノワイヤーを形成させて伸ばした。

(3) ワイヤーを伸ばしていく途中で、伸ばす方向とは異なる方向に、ナノチップを移動し、ワイヤーを曲げた。

(4) ワイヤーの幅、結晶方位、チップ操作速度を変えて、ワイヤーの湾曲、破断などを調べた。

(5) 以上の観察から、任意の電極間の 3 次元配線の可能性を調べた。

#### 実験項目 III：自由空間ナノワイヤーを用いた新規デバイス開発

形成されたナノワイヤーとワイヤーボンディング境界を、単に配線や接点として利用するだけでなく、その特異な構造に起因する特性を用いた機能素子として応用する道を拓くことを探索した。具体的には、以下のよう調査を進めた。

(1) ナノワイヤーやナノチップ接点に、パルス波を通電して急温・急冷し、非平衡構造を作製した。

(2) 作製した非平衡構造に、通電して加熱し、安定化させた。

(3) この過程を、原子レベルでその場観察して、ナノワイヤーやナノチップ接点の大きさ、形状、結晶構造、結晶方位、欠陥構造を解析した。

- (4) この構造解析と同時に、これらの構造の電気伝導を調査した。
- (5) 各時点の構造と電気伝導を解析し、両者の対応から機能素子としての応用を探索した。

#### 4. 研究成果

本研究では、前述の実験項目について調査を進め、自由空間ナノ配線法を開発した。また、ナノワイヤーを配線だけでなく、機能素子として開発を進めた。

##### I ナノチップ操作による金属ナノワイヤー形成の基礎条件と特性の解明

本研究者が発見した自由空間ナノ配線法を、各種金属に応用した。自由空間配線に適すると期待される金属である亜鉛、マグネシウム、ジルコニウム、ハフニウムその他、従来のワイヤーボンディングで使用されている微細配線として信頼性の高い金属である金、これまでには配線に用いられてこなかったが高強度の高融点金属であるタンタル、モリブデン、タングステンなどに適用し、まず、ナノワイヤー形成の基礎条件を探索した。具体的には、ナノチップ操作時にかかる荷重・応力、印加する電圧、配線速度、および成長時の温度を変え、形成されるナノワイヤーの幅、長さ、電流 - 電圧特性、破壊電流密度、変形・破壊などの構造、電気伝導特性と機械的特性が明らかにした。こうした構造と特性解析結果をもとに、各種組成のナノワイヤー成長に関わる原子拡散の起源を明らかにして、ワイヤー成長の機構を解明した。

代表的な結果について以下に述べる。亜鉛のナノワイヤーは、幅数ナノメートルで 100 nm の長さ以上に成長した。このときの成長結晶方位と側表面、それぞれのワイヤーの形成比率が明らかになった。

マグネシウムのナノワイヤーに関しては、幅数ナノメートルで 10 nm 程度の長さまで成長した。このときの成長結晶方位と側表面、それぞれのワイヤーの形成比率が明らかになった。亜鉛とマグネシウムでは、同じ六方最密構造でありながら、成長方位と側表面方位は異なった。これは、それぞれの金属の表面エネルギーをもとに説明されることがわかった。

本研究により、自由空間配線法で成長するナノワイヤーの形状と結晶方位が解明された。これらの形状と結晶方位は、表面エネルギーをもとに説明できることが示された。こうした得られた結果をもとに、ナノワイヤーが成長するための条件が導かれた。それは以下の通りである。

- (1) 成長するナノワイヤー構造のエネルギーが低いこと
- (2) 成長時に剪断しにくい方向を引っ張り方向に選択すること
- (3) ナノワイヤーが引っ張り力に対して十分な強度をもち、その引っ張り力を駆動力として成長に必要な原子拡散が促進されること

逆に、これらが満たされないときには、こうした大きなワイヤー成長は見られなかったが、この知見を元に条件を変えると、成長が促進された。本研究で導かれた成長条件は、自由空間ナノ配線の基礎になるものである。

##### II 成長させたナノワイヤーを用いたワイヤーボンディング

自由空間配線の目的に沿って、任意の位置にある 2 つの電極間を 3 次元的に配線(ワイヤーボンディング)する操作を試みた結果、これまで、ワイヤーを一方向に伸ばす直線的配線が主であったが、ワイヤーを曲げて配線できることが明らかになった。マグネシウムワイヤーの場合、ナノチップを 2 つ用意し、両者を接触させた後、ナノチップを移動し、ナノワイヤーを形成させて伸ばした。このとき、伸ばす方向とは異なる方向(逆方向)に、ナノチップを移動させて圧縮すると、ワイヤーは破断せずに曲がった。この湾曲では、湾曲部に粒界が形成されて、曲げの歪みが緩和されていることが判明した。この結果から、直線的な配線だけでなく、任意の方向に曲げ

た配線が、ナノレベルで可能であることと、その機構が解明された。

### III：自由空間ナノワイヤーを用いた新規デバイス開発

形成されたナノワイヤーは、特徴的な大きさと形状を示した。これらの特徴に対応して電気伝導が変化することが定量的に示された。特に、原子拡散を助長するために導入されたパルス通電は、非晶質や微結晶構造などの特異な構造と組織をナノワイヤーや接点にもたらした。例えば、非晶質になったときのコンダクタンスは、結晶時と比べて減少することが判明した。こうした構造と電気伝導を対応させて、これらを、単に配線や接点として利用するだけでなく、その特異な構造に起因する特性を用いた機能素子、例えばメモリ素子やスイッチング素子として応用できることが明らかになった。特に、非晶質化した構造を、段階的に結晶化させていくと、コンダクタンスも段階的に変化した。この相変化は、多段式メモリ素子に応用できることが見出された。

その場高分解能観察電子顕微鏡法により、ナノチップ操作による自由空間ナノ配線法が開発された。この配線法で作製されたナノワイヤーやナノ接点を配線だけでなく、機能素子として応用する道が探索された。金属ナノワイヤー形成の基礎条件とワイヤーの構造と特性が解明された。ワイヤー成長時の荷重、印加電圧、配線速度、およびの温度を変え、形成されるナノワイヤーの幅、長さ、形状、電流 - 電圧特性、破壊電流密度、変形・破壊などの構造、電気伝導特性と機械的特性が明らかになった。こうした解析結果をもとに、各種金属のナノワイヤー成長の機構が解明された。自由空間配線の目的に沿って、任意の位置にある2つの電極間を3次的に配線する操作を試みた結果、これまで、ワイヤーを一方向に伸ばして配線するだけでなく、ワイヤーを曲げて配線できることが明らかになった。この湾曲では、湾曲部に粒界が形成されて、曲げの歪みが緩和されていることが判明した。この結果から、直線的な配線だけでなく、任意の方向に曲げた配線が、ナノレベルで可能であることが示され、その機構が解明された。形成されたナノワイヤーの特徴に対応して電気伝導が変化することが定量的に示された。特に、原子拡散を助長するために導入されたパルス通電は、非晶質や微結晶構造など、特異な構造を、ナノワイヤーや接点にもたらした。例えば、非晶質になったときのコンダクタンスは、結晶時と比べて減少することが判明した。この結果、自由空間配線法で作製された配線や接点を、接続の構造要素として利用するだけでなく、その特異な構造に起因する特性を用いた機能素子、例えばメモリ素子やスイッチング素子として応用できることが明らかになった。

本研究は、研究代表者の主催する研究室に配属された音田光一氏、菊池章吾氏、手面 学氏、山田浩平氏、村田 智氏、鈴木泰周氏、山邊冠夢氏、中西真之氏、靄岡侑生氏、小尾拓野氏、落合祐介氏をはじめとする筑波大学学生、大学院修士課程大学院生とともに実施された。また、同研究室の寺澤知潮博士にも協力していただいた。こうした方々と実施された本研究の成果は、別項に記載した原著論文と学会で発表された他、筑波大学学生、大学院院生個々の卒業論文と修士論文にもまとめられた。本報告の一部は、関係諸氏から承諾を得て、こうした文献や発表を参考にし、また引用して記載している。ここに関係諸氏に深く謝意を表す次第である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuuki Tsuruoka, Takuya Obi, and Tokushi Kizuka	4. 巻 1
2. 論文標題 Reversible phase-transition control in nanometer-sized zirconium wires via pulse-voltage impression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Express	6. 最初と最後の頁 10050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2632-959X/ab951e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yusuke Ochiai, Takuya Obi, Yuuki Tsuruoka, and Tokushi Kizuka	4. 巻 20
2. 論文標題 Element mapping in single-atom-width platinum-iridium wires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 2169-2174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c00263	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kammu Yamabe and Tokushi Kizuka	4. 巻 57
2. 論文標題 Diffusion-induced mechanical controllable wiring of magnesium nanowires	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 115002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.115002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yasuchika Suzuki and Tokushi Kizuka	4. 巻 11
2. 論文標題 Structure control of tungsten nanocontacts via pulsed voltage applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Express	6. 最初と最後の頁 55202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.11.055202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masayuki Nakanishi, Yasuchika Suzuki, and Tokushi Kizuka	4. 巻 58
2. 論文標題 Structural transformation between crystal and amorphous states and relating conductance variation in pure molybdenum nanocontacts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 35002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/aafb02	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamabe Kammu, Kizuka Tokushi	4. 巻 18
2. 論文標題 Growth Texture and Mechanism of Zinc Nanowires Produced by Mechanical Elongation of Nanocontacts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Nanosci. Nanotechnol.	6. 最初と最後の頁 116 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1166/jnn.2018.14600	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Yasuchika, Kizuka Tokushi	4. 巻 18
2. 論文標題 Atomistic Structural Variation via Electromigration in Molten-State Gold Nanocontacts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Nanosci. Nanotechnol.	6. 最初と最後の頁 328 ~ 332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1166/jnn.2018.14594	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tokushi Kizuka and Satoshi Murata	4. 巻 86
2. 論文標題 Atomic configuration and conductance of tantalum single-atom contacts and single-atom wires	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 94601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.094601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yasuchika Suzuki and Tokushi Kizuka	4. 巻 11
2. 論文標題 Single-Atom-Sharpener Tungsten Tips: The Ultimate Finest Structures	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Express	6. 最初と最後の頁 45201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.11.045201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Onda Koichi, Kizuka Tokushi	4. 巻 18
2. 論文標題 Deformation Behavior and Critical Shear Stress of Copper Nanocontacts Studied by In Situ Transmission Electron Microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Nanosci. Nanotechnol.	6. 最初と最後の頁 90 ~ 94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1166/jnn.2018.14571	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Yamada and Tokushi Kizuka	4. 巻 7
2. 論文標題 Transformation from slip to plastic flow deformation mechanism during tensile deformation of zirconium nanocontacts	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 42901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep42901	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Yamada and Tokushi Kizuka	4. 巻 85
2. 論文標題 Plastic flowlike deformation and its relation to aperiodic peaks in conductance histograms of molybdenum nanocontacts	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 104601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.85.104601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Yamada and Tokushi Kizuka	4. 巻 8
2. 論文標題 Bias voltage dependence of silver and molybdenum single-atom-width wire formation	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nanosci. Nanotechnol. Lett.	6. 最初と最後の頁 702-704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1166/nnl.2016.2211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Yusuke Ochiai, Takuya Obi, Yuuki Tsuruoka, and Tokushi Kizuka
2. 発表標題 Structure and conductance of atomic-sized PtIr wires studied by in situ transmission electron microscopy
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 落合祐介、小尾拓野、靄岡侑生、木塚徳志
2. 発表標題 その場電子顕微鏡法によるPtIr原子ワイヤーの元素分析
3. 学会等名 日本金属学会春期第166回講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 落合祐介、小尾拓野、靄岡侑生、木塚徳志
2. 発表標題 その場電子顕微鏡法による PtIr ナノ接点の構造とコンダクタンス評価
3. 学会等名 日本表面真空学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 靄岡侑生、木塚徳志
2. 発表標題 ジルコニウムナノ接点のパルス通電構造ダイナミックスのその場透過型電子顕微鏡観察
3. 学会等名 日本表面真空学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 靄岡侑生、木塚徳志
2. 発表標題 パルス通電法によるジルコニウムナノ接点のその場電子顕微鏡観察
3. 学会等名 日本金属学会秋期第165回講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayuki Nakanishi, Yasuchika Suzuki, and Tokushi Kizuka
2. 発表標題 In situ atomistic observation of phase transition in molybdenum nanocontacts
3. 学会等名 Tsukuba Global Science Week - Interdisciplinary Workshop on Science and Patents, Epochal Tsukuba, Tsukuba (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuya Okamoto, Manabu Tezura, and Tokushi Kizuka
2. 発表標題 In situ TEM of crystal growth in TiNi
3. 学会等名 Tsukuba Global Science Week - Interdisciplinary Workshop on Science and Patents, Epochal Tsukuba, Tsukuba (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中西真之、木塚徳志
2. 発表標題 パルス通電によるハフニウムナノ接点非晶質化のその場電子顕微鏡観察
3. 学会等名 日本金属学会、東北大、仙台
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kammu Yamabe and Tokushi Kizuka
2. 発表標題 In situ Transmission Electron Microscopy of Formation of Zinc Nanowires
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kammu Yamabe and Tokushi Kizuka
2. 発表標題 In situ transmission electron microscopy of nanowire growth of hexagonal-closed-packed structure metals
3. 学会等名 Tsukuba Global Science Week Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masayuki Nakanishi, Yasuchika Suzuki and Tokushi Kizuka
2. 発表標題 In Situ Transmission Electron Microscopy of Pulsed Voltage Action for Molybdenum Nanocontacts
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuchika Suzuki and Tokushi Kizuka
2. 発表標題 In Situ Transmission Electron Microscopy of Pulsed Voltage Action for Atomistic Behavior of Gold Nanocontacts
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuuki Tsuruoka, Yasuchika Suzuki, Masayuki Nakanishi, and Tokushi Kizuka
2. 発表標題 In Situ Transmission Electron Microscopy of Niobium Nanocontacts
3. 学会等名 Tsukuba Global Science Week Interdisciplinary Workshop on Science and Patents (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuchika Suzuki and Tokushi Kizuka
2. 発表標題 Atomistic behavior of electromigration in gold nanocontacts during application of pulsed electric currents
3. 学会等名 5th International Workshop on Nano and Microstructure Design (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kammu Yamabe and Tokushi Kizuka
2. 発表標題 Formation of zinc nanowires via elongation of nanocontacts
3. 学会等名 International Workshop on Science and Patents (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masato Nozaki, Kanmu Yamabe, and Tokushi Kizuka
2. 発表標題 In situ transmission electron microscopy of mechanical response during growth of zinc nanowires,
3. 学会等名 International Workshop on Science and Patents (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 鈴木泰周、木塚徳志
2. 発表標題 その場電子顕微鏡法によるパルス通電時の金ナノ接点の観察
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山邊冠夢、木塚徳志
2. 発表標題 亜鉛ナノ接点の引き伸ばしによるナノワイヤー成長
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

筑波大学 材料組織学研究室 (木塚研究室) <a href="http://www.ims.tsukuba.ac.jp/~kizuka_lab/index.html">http://www.ims.tsukuba.ac.jp/~kizuka_lab/index.html</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------