

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249001

研究課題名(和文) 自己組織化金属ナノワイヤ面ファスナーの創製と電子輸送・ナノ力学機構の解明

研究課題名(英文) Development of self-organized conductive nanowire-surface-fastener and elucidation of its electron transport mechanism and nano-mechanical phenomena

研究代表者

巨陽(Ju, Yang)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：60312609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、自己組織化によりパターン状の3次元金属ナノワイヤ配列の多チャンネル電子輸送機能とナノワイヤ間の接合機能を有機に融合した電気伝導ナノワイヤ面ファスナー(ECNSF)を世界に先駆けて開発した。これにより、電子パッケージの高温環境下での使用やフレキシブル基板への接続などを可能にする次世代エレクトロニクス実装技術を提案した。また、金属ナノワイヤの多チャンネル電子輸送機構の解明やナノワイヤ間に働くファンデルワールス力及びナノワイヤのフック&ループ構造の力学現象の解明を実現した。これにより、従来の延長線上に存在しない革新的な常温実装技術を世界で初めて創成した。

研究成果の概要(英文)： This research is to develop, ahead of the rest of the world, next-generation electronics packaging technology that will make it possible to use electronic packages in high-temperature environments and to connect them to flexible substrates. This has been achieved by developing an electrically conductive nanowire surface fastener (ECNSF) that, through self-organization, organically combines the multiple-channel electron transport function of patterned three-dimensional metallic nanowire arrays with the bonding function between nanowires. Furthermore, this research has also been succeeded with creating, for the first time in the world, innovative cold-temperature packaging technology that is not an extension of conventional technologies by clarifying the multiple-channel electron transport mechanism of metallic nanowires, the van der Waals force that acts between nanowires, and the mechanical phenomena of the hook and loop structures of nanowires.

研究分野：材料力学

キーワード：ナノ材料 マイクロ・ナノデバイス ナノワイヤ配列 面ファスナー 常温実装

### 1. 研究開始当初の背景

エレクトロニクス実装は「エレクトロニクス実装学会」が存在するほど重要な学問分野であり、我が国の経済発展を担う重要不可欠な産業である。近年、グリーン・イノベーションの創出や低炭素社会の実現に向けて、多くの研究者はエネルギーの高効率利用を実現するための高温環境下で使用可能な耐高温はんだの開発 (Y. Yamada et al., *Microelectronics Reliability*, 46, 1932, 2006) や、鉛フリーはんだの使用により発生したリフロー温度の上昇を克服するためのナノ粒子はんだの開発 (C. Y. Lin et al., *Journal of Alloys and Compounds*, 470, 328, 2009) などを精力的に行っている。しかしながら、これらの研究はいずれも従来のはんだ技術を改良するものであり、リフロー過程におけるエネルギーの消費量を大幅に削減することは困難である。一方、近年各種の金属ナノワイヤの創製に関する研究が盛んに行われてきた。しかしながら、そのほとんどはナノワイヤの機能性に注目して、ナノセンサ、ナノデバイスの開発を目指すものであり、構造材料としての強度機能に注目する研究はほとんど行われていない。最近では、カーボンナノチューブとガラス基板間の接着力の研究 (L. Qu et al., *Science*, 322, 238, 2008) が報告され注目を集めているが、ナノワイヤの電気伝導特性と力学強度特性を同時に利用する研究は未だ報告されていない。本研究の代表者は、高秩序・高品質金属ナノワイヤの創製及び評価に関する研究を精力的に行ってきた。最近、高秩序・大面積・高密度の Au ナノワイヤアレイの作製に成功し、同じオーダーのせん断方向及び垂直方向の接着強度と高い電気伝導特性を世界で初めて同時に実現した (Y. Ju et al., *Nanotechnology*, 23, 365202, 2012)。本研究では、これまでの研究成果をさらに発展させ、金属ナノワイヤ配列の多チャンネル電子輸送機構及びナノワイヤ間のナノ力学特性を解明することにより、高接合強度を有する3次元電気伝導ナノワイヤ面ファスナーという革新的な常温実装技術を創成し、はんだのリフロー過程におけるエネルギーの消費量を100%削減できるグリーンなエレクトロニクス実装技術を世界に先駆けて実現する。さらに、電子パッケージの高いリサイクル性及び ECNSF の高温耐久性を実現することにより低炭素社会の実現に貢献する。

### 2. 研究の目的

本研究は、自己組織化によりパターン状の3次元金属ナノワイヤ配列の多チャンネル電子輸送機能とナノワイヤ間の接合機能を有機に融合した電気伝導ナノワイヤ面ファスナーを、世界に先駆けて開発し、電子パッケージの高温環境下での使用やフレキシブル基板への接続などを可能にする次世代エレクトロニクス実装技術の開拓を目指した。また、金属ナノワイヤの多チャンネル電子輸

送機構の解明やナノワイヤ間に働くファンデルワールス力及びナノワイヤのフック&ループ構造の力学現象の解明を実現することにより、従来の延長線上に存在しない革新的な常温実装技術を世界で初めて創成することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究は、パターン状の3次元金属ナノワイヤ配列の多チャンネル電子輸送機能とナノワイヤ間の接合機能を有機に融合した電気伝導ナノワイヤ面ファスナーを世界に先駆けて開発し、金属ナノワイヤ配列の多チャンネル電子輸送機構及び、ナノワイヤ間のファンデルワールス力、そしてフック&ループ構造の力学機構を明らかにした。これにより、常温かつ高リサイクル性を有する次世代エレクトロニクス実装技術を提案した。3年継続により、(1)パターン状電気伝導ナノワイヤ面ファスナーの創製、(2)ECNSF の多チャンネル電子輸送機構の解明、(3)ECNSF のナノ力学特性の解明、(4)ECNSF 常温表面実装の実現、なる4項目の研究を推進し、目標を達成した。

### 4. 研究成果

(1) パターン状電気伝導ナノワイヤ面ファスナーの創製

#### ① 高空間秩序ポーラスアルミナの開発

空間的にナノレベルの超高精度に制御された陽極酸化ポーラスアルミナを開発した。また、陽極酸化に、細孔を制御するための独創的なプロセスを新たに開発し、陽極酸化においてくぼみ形成の前処理を行うことによって細孔の直径、配列のコントロールを実現した。さらに、ポア密度を従来の1/4以下を達成し、従来では存在しなかった低密度ポーラス材料の創製を実現した (図1)。

#### ② 3次元金属ナノワイヤ配列の作製

開発したポーラスアルミナをテンプレートとして用い、電着プロセスによりシリコン基板上に3次元Cuナノワイヤ配列作製に成功した (図2)。また、電圧や電流、温度、時間、水溶液濃度といった電着条件などを基に高品質単結晶3次元Cuナノワイヤ配列の作製プロセスの最適化を行った。

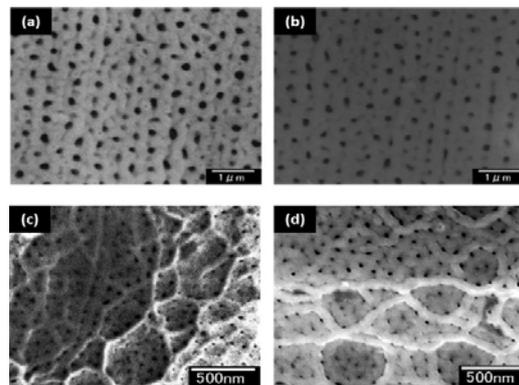


図1 独自に開発した低密度ポーラスアルミナのSEM写真

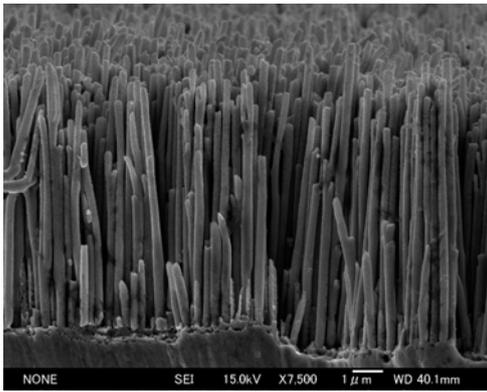


図2 3次元Cuナノワイヤ配列のSEM写真

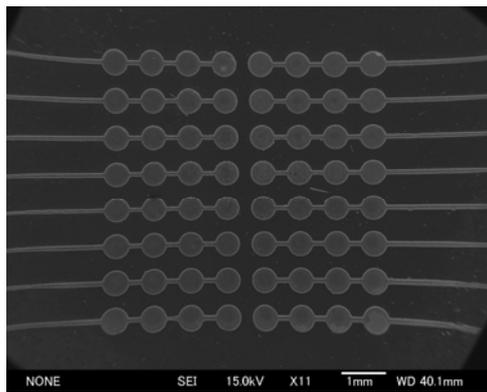


図3 パターン状電気伝導ナノワイヤ面ファスナーのSEM写真

### ③ パターン状電気伝導ナノワイヤ面ファスナーの創製

アルミニウムの陽極酸化プロセス、電着プロセス、微細加工プロセスによりパターン状電気伝導ナノワイヤ面ファスナーの創製を実現した。まずシリコン基板上にスパッタ蒸着法によりパターン状のクロム薄膜を形成し、その後同様にしてパターン状のCu薄膜を形成した。ここでクロムはCu薄膜の定着のために用いた。次にシリコン基板上にレジストを塗布し、レジスト上にCu薄膜を形成した。このCu薄膜は陽極酸化プロセス及び電着プロセスで電極として用いた。続いてレジスト及びCu薄膜上に絶縁膜をコーティングし、電着プロセスでの絶縁性をもたせた。そしてCu薄膜上にパターン状のアルミニウムを蒸着し、陽極酸化プロセスによりポーラスアルミナを形成した。また、電着プロセスにより、作製したポーラスアルミナ内へCuを充填した。さらに、レジストを除去し、水酸化ナトリウム水溶液を用いたエッチングプロセスによりポーラスアルミナを除去することによって、ECNSFの創製を実現した(図3)。

### ④ パターン状ECNSFの最適化

ECNSFの多チャンネル電子輸送機能及び金属ナノワイヤ間に働く接合力に関する知見を反映させ、アルミニウムの陽極酸、電着、微細加工プロセスにおける溶液の選定や、溶液濃度、電圧、電流、温度、時間など各パラメ

ータの調整を行い、パターン状ECNSFの最適化を実現した。

### (2) ECNSFの多チャンネル電子輸送機構の解明

#### ① 金属ナノワイヤの導電率のその場計測

独自に開発したマイクロ波原子間力顕微鏡を用いて、金属ナノワイヤの導電率のその場計測を実現した。また、作製した各寸法の単結晶金属ナノワイヤのキャリア濃度及び移動度を解析することにより、ナノワイヤ表面の電子散乱や表面の熱放出効果などが自由電子の輸送機構に及ぼす影響を明らかにした。

#### ② ECNSFの多チャンネル電子輸送機構の解明

作成したECNSFを用いて、Cu薄膜をコーティングした導電性基板に接続させ、単一ECNSFの多チャンネル電子輸送機能を評価した。また、ナノワイヤの直径、密度などによるECNSFの多チャンネル電子輸送機能に及ぼす影響を明らかにした。

#### ③ ECNSF接着試験体の多チャンネル電子輸送機能の解析

二つのECNSFを接着させ、ECNSFの電気的伝導特性を評価した(図4b, d, f)。また、ECNSFの面積やナノワイヤの直径、長さ、配列密度などに支配されるECNSFの多チャンネル電子輸送機能の評価モデルを構築した。さらに、パターン状ECNSFの面積や、個数、周期などとECNSFの電気伝導特性との関係を実験と理論の両面で明らかにした。

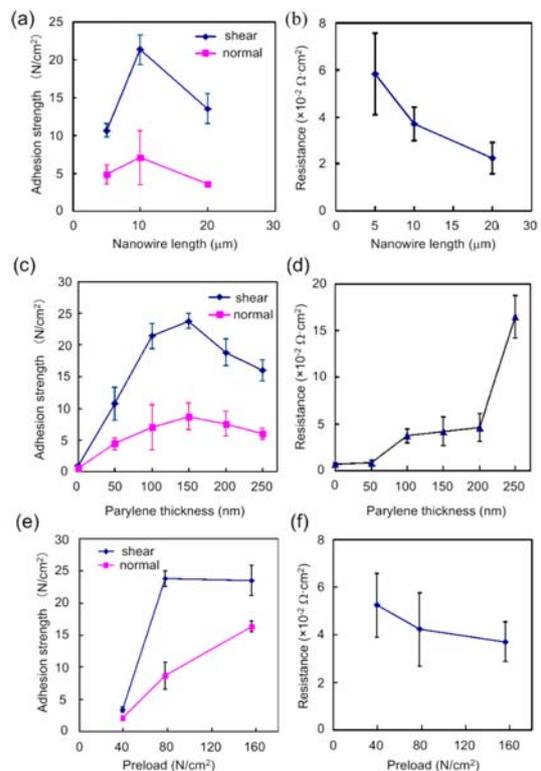


図4 ECNSFの機械的強度特性および電気的伝導特性の評価

### (3) ECNSFのナノ力学特性の解明

① 金属ナノワイヤ間のナノ力学特性の解析  
ナノワイヤ間のファンデルワールス力を解析するために、1本のナノワイヤと平表面間の凝集エネルギーを計測した。また、ナノワイヤのフック&ループ構造の力学特性の解析には、基板上に生成したナノワイヤに原子間力顕微鏡用シリコンカンチレバーの先端を近づけて曲げ変形させ、変形したナノワイヤとAFM探針間に形成したフック&ループの引張応力を、AFMカンチレバーのたわみにより計測した。

### ② ECNSFのナノ力学特性の解析

作成したECNSFを用いて、Cu薄膜を有する基板に接着させ、ECNSFへの予荷重とECNSFの電気抵抗との関係を計測した。また、電気抵抗と接触表面積の関係からECNSFのファンデルワールス力の評価モデルを構築した。さらに、ファンデルワールス力を分離したECNSFのフック&ループ構造のナノ力学特性の評価モデルを構築した。

### ③ ECNSF接着試験体の機械的強度特性の解析

二つのECNSFを接着させ、ECNSF接着試験体の引張強度、せん断強度について試験を行った(図4 a, c, e)。SEMやTEMなどの電子顕微鏡観察によりECNSFの破壊形態を明らかにした。また、ナノワイヤ性状やナノワイヤ密度、ナノワイヤ面ファスナー構造がECNSF接着の機械的強度特性に及ぼす影響を明らかにした。

### (4) ECNSF常温表面実装の実現

#### ① ECNSFによる電子パッケージの表面実装の実現

電子パッケージ及び配線基板上的ECNSF作製を行った。また、ECNSFによる電子パッケージと配線基板との接合を実現した。さらに、電子パッケージの繰り返し装着についても評価を行った。

#### ② ECNSFの電流伝導特性の制御

ECNSF接着試験体の多チャンネル電子輸送機能の解析で得られた知見を利用して、ECNSFの寸法、周期、ピン数の最適化を行い、ECNSFの電流伝導特性の制御を実現した。

#### ③ ECNSFの機械的強度特性の制御

ECNSF接着試験体の機械的強度特性の解析で得られた知見を利用して、ECNSFの寸法、周期、ピン数の最適化を行い、ECNSFの機械的強度特性の制御を実現した。

### 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 28 件)

① J. Chen, Y. Zhao, Y. Zhu, S. Liu, Y. Ju, Narrow Line-Width Ytterbium-Doped Fiber Ring Laser Based on Saturated Absorber, IEEE Photonics Technology

Letters, 査読有、29 巻、2017、439-441  
DOI:10.1109/LPT2017.2655081

② B. Zhang, Q. Luo, D. Kuang, Y. Ju, G. Song, Mechano-growth factor E peptide promotes healing of rat injured tendon, Biotechnology Lett, 査読有、38 巻、2016、1817-1825

DOI:10.1007/s10529-016-2162-8

③ Y. Morita, A. Ishiguro, Y. Ju, Experimental evaluation of the effect of deposited nanoparticle size on current enhancement of solar cells using the sputtering technique, Advanced Experimental Mechanics, 査読有、1 巻、2016、115-119  
DOI:10.11395/aem.1.0\_115

④ D. Guo, Y. Ju, et. al, Dielectric properties of BaTi205 thick films prepared on Pt-coated MgO (110) single-crystal substrate by laser chemical vapor deposition, Ceramics International, 査読有、42 巻、2016、11464-11467

DOI:10.1016/j.ceramint.2016.3.221

⑤ D. Guo, Y. Ju, C. Fu, Z. Huang, L. Zhang, (0 0 2)-oriented growth and morphologies of ZnO thin films prepared by sol-gel method, Materials Science-Poland, 査読有、34 巻、2016、555-563

DOI: 10.1515/msp-2016-0076

⑥ J. Jung, Y. Ju, Y. Morita, Y. Toku, Delaying effect of high-density electric current on fatigue crack growth in A6061-T6 aluminum alloy, Materials Transactions, 査読有、57 巻、2016、2104-2109

DOI:10.2320/matertrans.M2016240

⑦ J. Jung, Y. Ju, Y. Morita, Y. Toku, Effect of pulsed electric current on the growth behavior of fatigue crack in Al Alloy, Procedia structural integrity, 査読有、2 巻、2016、2989-2993

DOI:10.1016/j.prostr.2016.06.374

⑧ L. Zhou, Y. Ju, Y. Pei and D. Fang, Dual-band and thermos-mechanical design method for radome walls with graded porous structure, Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 査読有、30 巻、2016、1391-1406

DOI:10.1018/090205071.2016.1202149

⑨ Y. Morita, N. Kawase, Y. Ju, T. Yamauchi, Mesenchymal stem cell-induced 3D displacement field of cell-adhesion matrices with differing elasticities, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 査読有、60 巻、2016、394-400

DOI:10.1016/j.jmbbm.2016.02.025

- ⑩ D. Guo, Y. Ju, Preparation of Cu<sub>20</sub>/ZnO p-n junction by thermal oxidation method for solar cell application, *Materials Today: Proceedings*, 査読有、3 卷、2016、350-353  
DOI:10.1016/j.matpr.2016.01.019
- ⑪ Y. Jiang, Y. Ju, L. Yang, Nondestructive In-situ Permittivity Measurement of Liquid Within a Bottle Using an Open-Ended Microwave Waveguide, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 査読有、35 卷、2016、7 (1-6)  
DOI: 10.1007/S00542-015-0322-8
- ⑫ L. Zhang, Y. Song, A. Hosoi, Y. Morita, Y. Ju, Microwave atomic force microscope:MG63 osteoblast-like cells analysis on nanometer scale, *Microsystem Technologies*, 査読有、22 卷、2016、603-608  
DOI:10.1007/s00542-015-2620-6
- ⑬ Y. Morita, S. Yamamoto, Y. Ju, Development of a new co-culture system, the "separable-close co-culture system", to enhance stem cell to chondrocyte differentiation, *Biotechnology Letters*, 査読有、37 卷、2015、1911-1918  
DOI:10.1007/s10529-015-1858-5
- ⑭ Y. Ju, T. Tasaka, H. Yamauchi T. Nakagawa, Synthesis of Sn nanoparticles and its size effect on melting point, *Microsystem Technologies*, 査読有、21 卷、2015、1849-1854  
DOI:10.1007/s00542-014-2397-z
- ⑮ P. Wang, Y. Ju, M. Chen, Room-temperature electrical bonding technique based on copper/polystyrene core/shell nanowire surface fastener, *Applied Surface Science*, 査読有、349 卷、2015、774-779  
DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.05.072
- ⑯ Y. Morita, T. Sato, S. Watanabe, Y. Ju, Determination of precise optimal cyclic strain for tenogenic differentiation of mesenchymal stem cells using a non-uniform deformation field, *Experimental Mechanics*, 査読有、55 卷、2015、635-640  
DOI: 10.1007/s11340-014-9965-0
- ⑰ B. Xu, Y. Ju, Y. Cui, G. Song, Carbon nanotube array inducing osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells, *Materials Science and Engineering C*, 査読有、51 卷、2015、182-188  
DOI: 10.1016/j.msec.2015.02.052
- ⑱ A. Hosoi, Y. Yamaguchi, Y. Ju, Y. Sato, T. Kitayama, Detection and quantitative evaluation of defects in glass fiber reinforced plastic laminates by microwaves, *Composite Structures*, 査読有、128 卷、2015、134-144  
DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.03.050
- ⑲ A. Hosoi, T. Yano, Y. Morita, Y. Ju, Quantitative evaluation of the displacement distribution and stress intensity factor of fatigue crack healed by a controlled high-density electric current field, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 査読有、37 卷、2014、1025-1033  
DOI: 10.1111/ffe.12175
- ⑳ Y. Morita, K. Azuchi, Y. Ju, S. Suzuki, B. Xu, S. Yamamoto, Determination of tenogenic differentiation in human mesenchymal stem cells by terahertz waves for measurement of the optical property of cellular suspensions, *Measurement Science and Technology*, 査読有、25 卷、2014、065703-1-8  
DOI: 10.1088/0957-0233/25/6/065703
- ㉑ B. Xu, Y. Ju, Y. Cui, G. Song, Y. Iwase, A. Hosoi, Y. Morita, tLyP-1-conjugated Au-Nanorod @SiO<sub>2</sub> core-shell nanoparticles for tumor-targeted drug delivery and photothermal therapy, *Langmuir*, 査読有、30 卷、2014、7789-7797  
DOI: 10.1021/la500595b
- ㉒ B. Xu, Y. Ju, G. Song, Role of p38, ERK1/2, focal adhesion kinase, RhoA/ROCK and cytoskeleton in the adipogenesis of human mesenchymal stem cells, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 査読有、117 卷、2014、624-631  
DOI:10.1016/j.jbiosc.2013.10.018
- ㉓ L. Hu, Y. Ju, M. Chen, A. Hosoi, S. Arai, Growth of Cu<sub>2</sub>O flower/grass-like nano architectures and their photovoltaic effects, *Applied Surface Science*, 査読有、305 卷、2014、710-715  
DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.03.182
- ㉔ Y. Ju, H. Yamauchi, H. Oshima, K. Tanaka, Reflow of lead-free solder by microwave heating, *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 査読有、8 卷、2014、33-41  
DOI: 10.1504/IJMSI.2014.064771
- ㉕ A. Hosoi, H. Koto, Y. Ju, Fabrication of AFM probe with CuO nanowire formed by stress-induced method, *Microsystem Technologies*, 査読有、20 卷、2014、2221-2229  
DOI: 10.1007/s00542-014-2317-2
- ㉖ L. Hu, Y. Ju, A. Hosoi, Growth of 3-D flower/grass-like metal oxide nanoarchitectures based on catalyst-assisted oxidation method, *Nanoscale Research Letters*, 査読有、

9 卷、2014、1-8

DOI: 10.1186/1556-276X-9-116

- ⑳ P. Wang, Y. Ju, A. Hosoi, Core-Shell Nanowire Based Electrical Surface Fastener Used for Room-Temperature Electronic Packaging Bonding、Electronic Materials Letters、査読有、10 卷、2014、503-507  
DOI: 10.1007/s13391-014-8005-7
- ㉑ H. Teshima, K. Kojima, Y. Ju、Fabrication of Anodic Aluminum Oxide Template and Copper Nanowire Surface Fastener、Journal of Electronic Packaging、査読有、136 卷、2014、044510-1-4、  
DOI: 10.1115/1.4028316

[学会発表] (計 43 件)

- ① 宋楊, 徳悠葵, 森田康之, 巨陽、ナノワイヤ面ファスナーのための低細孔密度ポーラスアルミナテンプレートの開発、日本機械学会 M&P2016、第 24 回機械材料・材料加工技術講演会、2016/11/25-26、早稲田大学 (東京都)
- ② 徳悠葵, 野田修二, 森田康之, 巨陽、熱疲労を受けるナノワイヤ面ファスナーの接続強度および電気的特性の評価、日本機械学会 第 29 回計算力学講演会、2016/9/22-24、名古屋大学 (愛知県)
- ③ Y. Toku, S. Nota, Y. Morita, Y. Ju、Influence of thermal fatigue on the connection strength of nanowire surface fastener、2016 M&M International symposium for young researchers (国際学会)、2016/8/10-12、New York (USA)
- ④ 川島大輝, 巨陽, 森田康之, 徳悠葵、マイクロビーズを利用したナノ多孔質膜の細孔密度の制御、日本機械学会東海学生会 第 47 回学生員卒業研究発表講演会、2016/3/16、愛知工業大学 (愛知県)
- ⑤ 徳悠葵, 草間美香, 巨陽、ナノ加工プロセスによるナノワイヤ群のフック形成に関する研究、日本機械学会機械材料・材料加工部門、2015/11/13-15、広島大学 (広島県)
- ⑥ M. Kusama, Y. Toku, Y. Ju、The Shape Control and Performance Evaluation of Nanowire Surface Fastener、International Conference on Advanced Technology in Experimental、Mechanics2015 & The 14th Asian Conference on Experimental Mechanics (国際学会)、2015/10/4-8、豊橋技術科学大学 (愛知県)
- ⑦ S. Nota, Y. Morita, Y. Ju、Development of Highly Ordered Silicon Nanowire Array、International Conference on Advanced Technology in Experimental、Mechanics 2015 & The 14th Asian

Conference on Experimental Mechanics (国際学会)、2015/10/4-8、豊橋技術科学大学 (愛知県)

- ⑧ 巨陽、機能性ナノマテリアルの創製と展開、日本機械学会 2015 年度年次大会 (招待講演)、2015/9/13-16、北海道大学 (北海道)
- ⑨ Y. Ju、Quantitative Evaluation of nanometer-scale electrical properties by microwave AFM、The 45th European Microwave Conference (招待講演) (国際学会)、2015/9/6-11、Paris (France)
- ⑩ 小島康平, 巨陽、ポーラスアルミナテンプレートの最適化及びナノワイヤ面ファスナーの創製、日本機械学会 2014 年度年次大会、2014/9/7-10、東京電機大学 (東京都)
- ⑪ 野田修司, 森田康之, 巨陽、高秩序シリコンナノワイヤアレイの開発、M&M2014 カンファレンス、2014/7/19-21、福島大学 (福島県)

[図書] (計 2 件)

- ① Y. Cui and Y. Ju、Springer Publishing Ltd.、Advances in Nanocomposites、2016、151-175
- ② Y. Morita, T. Sato, S. Watanabe, Y. Ju、Springer Publishing Ltd.、Mechanics of Biological Systems and Materials、2016、149-154

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/ju/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

巨陽 (JU, Yang)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：60312609

### (2) 研究分担者

森田 康之 (MORITA, Yasuyuki)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：90380534

細井 厚志 (HOSOI, Atsushi)  
早稲田大学・理工学術院・准教授  
研究者番号：60424800

### (3) 連携研究者

村岡 幹夫 (MURAOKA, Mikio)  
秋田大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：50190872