

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：14301
研究種目：基盤研究(A)（一般）
研究期間：2018～2020
課題番号：18H03753
研究課題名（和文）金属ナノ材料の疲労とその力学

研究課題名（英文）Fatigue of nano-metals

研究代表者

澄川 貴志（Sumigawa, Takashi）

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：80403989

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、マイクロ～ナノサイズの純金属材料の引張圧縮疲労のメカニズムを明らかにすることを目的とした。銅マイクロ単結晶試験片を用いた実験によって、繰り返し数の増加とともに突き出し/入り込みが成長し、入り込み底から疲労き裂が発生する様子を確認した。また繰り返し加工硬化は生じず、突き出し/入り込みの様相もマクロ材のそれとは異なっていた。ニッケル単結晶試験片に低応力振幅試験を実施した結果、マクロ材の疲労限以下でも疲労損傷を生じた。寸法の異なる試験片を用いた実験から、疲労挙動に及ぼす材料寸法影響を明らかにした。透過型電子顕微鏡観察の結果、内部の転位構造は表面の影響を強く受けていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

各種半導体デバイスの内部には、ナノ～マイクロサイズの金属素子が多数存在する。これらのデバイスは、近年では自動車等の厳しい環境下で使用されるようになり、内部の金属素子の疲労破壊が問題となっている。ナノ～マイクロサイズの金属では、疲労破壊の発生原因とされる下部組織の寸法の観点から従来の金属疲労とは異なる挙動を示すことが予測されるが、その学理自体が存在しなかった。本研究では、その学理の基礎基盤の礎を構築することに成功しており、学術的意義や社会的意義は極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to investigate the mechanism of tension-compression fatigue in micro- to nano-sized pure metals. In micro-sized single-crystal copper (Cu) specimens, it was confirmed that the extrusions/intrusions grew with the increase in the number of cycles and that fatigue cracks appeared at the bottom of the intrusion. On the other hand, cyclic work hardening did not occur, and the appearance of the extrusions/intrusions was different from that of Cu bulk counterpart. Low stress amplitude tests using micro-sized single-crystal nickel (Ni) specimens showed that fatigue damage occurred even below the fatigue limit of the bulk. Experiments on specimens with different dimensions showed that the fatigue behavior changed with the change in material dimensions. Transmission electron microscopy revealed that the internal dislocation structure was strongly influenced by the surfaces of material.

研究分野：微小材料強度学、金属結晶学

キーワード：Fatigue Micro-sized metals Tension-compression In situ observation Single crystal

1. 研究開始当初の背景

近年では、イメージセンサー、各種力学センサー（圧力・振動・加速度等）およびパワーデバイス等の用途は多岐にわたり、とくに激しい振動や温度変化での使用が増加している。このため、従来の計算機用半導体デバイスよりも正常に動作しうる高い強度信頼性が求められている。デバイスを機能不全に陥れる最危険個所の一つは、電気伝導を担う金属の微細配線・素子部（厚さおよび幅：数 nm～数 μm ）である。とくに今後市場の急拡大が予測される自動車用途では、劣悪な振動と温度変化によってデバイス中の金属部は繰り返し負荷を受け、損傷してしまう。この「微小金属材料の疲労破壊」問題は、産業界では喫緊の重要課題とされている。

金属疲労については、長年多くの研究が行われ、そのメカニズムの詳細が特定されている。とくに疲労き裂発生については、繰り返し負荷によって転位壁と低転位密度領域によって構成されるはしご型構造^①が生じることが重要であり、この構造の形成によって塑性ひずみの局在化が起こる。この局在化領域は固執すべり帯 (Persistent slip band: PSB) と呼ばれ、材料表面には突き出し/入り込みと呼ばれる凹凸を生じる^{②,③}。固執すべり帯は母相に比べて約 10% 柔らかいことに加え、突き出し底部の応力集中に起因して疲労き裂の優先的な発生個所となる。これらの疲労構造（はしご型構造、固執すべり帯および突き出し/入り込み）の寸法は材料寸法に依存せず、1～2 μm 程度であることが知られている。しかし、数 nm～数 μm 寸法の微細な金属材料の中には、数ミクロンサイズの疲労転位構造は寸法の観点から存在し得ない。すなわち、マクロ材とは異なる特有の疲労挙動が存在するものと考えられる。

ナノ～マイクロサイズの金属疲労の詳細は明らかになっていない。一般的に疲労には、応力振幅、応力比および応力勾配が大きな影響を及ぼす。未解明であるナノ・マイクロ金属の疲労の基礎を明らかにするためには、最も影響の大きい応力振幅に着目し、他の因子を排除した検討を行う必要がある。さらに、疲労は複雑な力学現象であることから、数値解析のみからのアプローチを行うことはできず、実験が必須である。このため、応力振幅のみの影響を取り入れた引張圧縮疲労実験を実施する必要があるが、とくにチャッキング時の予ひずみの導入や圧縮時の座屈の排除のためナノ・マイクロ材料に対する適用は極めて難しく、世界的にも実施例は殆ど無い。このことが、その疲労の詳細が一切明らかになっていない理由である。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロ～ナノスケールの金属の特異な疲労メカニズムの解明を行うことを目的とし、結晶方位を制御した微小試験片に対して引張圧縮疲労試験を実施した。疲労試験中の試験片の詳細観察や試験後の内部転位構造の観察により、その疲労メカニズムについて力学的な検討を行った。

3. 研究の方法

供試材は、銅 (Cu) およびニッケル (Ni) を用いた。それぞれの多結晶板に対して真空環境下で熱処理を行い、結晶粒の粗大化と残留応力を除去した後、エメリー紙およびダイヤモンドペーストを用いた湿式研磨を行った後、800 $^{\circ}\text{C}$ で 24 時間の真空熱処理（ベース圧力： 1×10^{-8} Pa）を行った。熱処理後の多結晶板に対して電子線後方散乱回折 (EBSD: Electron back-scattered diffraction pattern) 法を用いて表面の結晶粒形状および結晶方位を特定し、集束イオンビーム (FIB: Focused ion beam)（日立ハイテク製、FB2200）加工を用いて微小試験片を作製した。FIB によって導入された表面加工層は、アルゴンイオンミリング（加速電圧：0.3 kV、ミリング時間：5 min.）により除去した。図 1 は、(a) 作製した試験片の走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning electron microscope) 像および (b) 模式図を示す。試験片は、土台部、ゲージ部およびつかみ部からなるドッグボーン型形状を有しており、ゲージ部寸法は、10 μm （高さ） \times 2 μm （幅） \times 2 μm （奥行き）である。図 2 は、(a) 試験片の結晶方位を表すステレオ投影図および (b) シュミット因子を示す。投影図中のアルファベット (A～D) および数字 (1～6) は、Schmid と Boas の

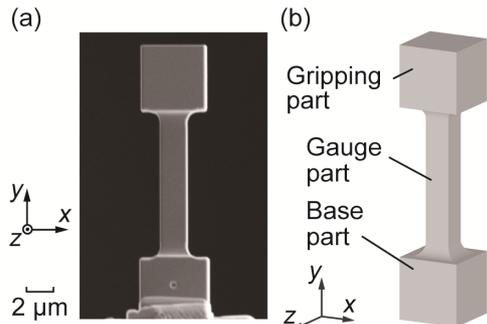


図 1 (a) 試験片の SEM 観察像および (b) 模式図。

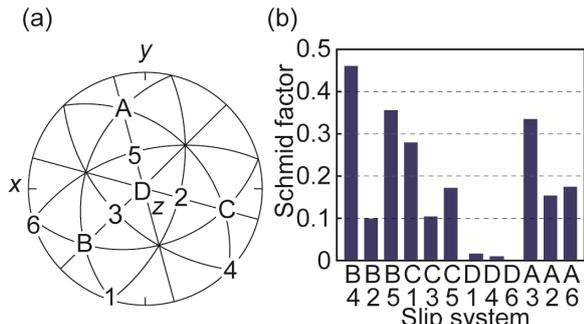


図 2 (a) 試験片の結晶方位を表すステレオグラフおよび (b) シュミット因子。

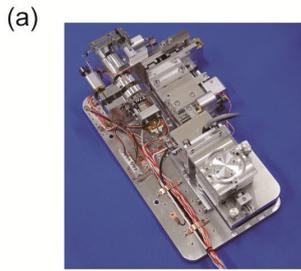


図 3 引張圧縮繰り返し負荷試験装置.

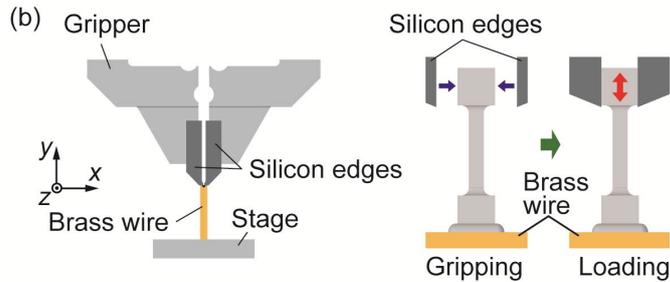


図 4 試験片のチャッキング方法.

表記法に従い、それぞれすべり面およびすべり方向を示してある。この表記法のもとでは、最大のシュミット因子を有するすべり系（主すべり系）は B4 と表される。試験片は、主すべり系 B4 が優先的に活動する単一すべり方位に配向されている。

試験には、マイクロサイズの試験片に対する正確な負荷軸調整、負荷軸調整および繰り返し負荷を可能とする専用の負荷試験装置を用いた（図 3）。本装置は、6 自由度の負荷軸調整機構を有し、 piezo素子を組み込んだグripper機構によって試験片一端の着脱を可能としている（図 4）。このため、正確な引張圧縮変形の負荷および予ひずみの導入を排除した試験片の把持を行うことができる。本負荷装置を電界放出型走査型電子顕微鏡（FE-SEM）中へ組み込み、その場観察を行いながら変位振幅一定、変位比 $R = -1$ および周波数 1 Hz の下、試験片に繰り返し負荷（正弦波）を与えた。

4. 研究成果

図 5 は、実験より得られた、繰り返し数に対する (a) 変位振幅および (b) 荷重振幅の変化を示す。試験を通して変位振幅は一定であり、試験片は繰り返し加工硬化を示さなかった。図 5(b) の右軸には、荷重振幅を試験片の初期断面積によって除して得られた公称応力振幅を主すべり系に分解した分解せん断応力振幅を示す。試験片には、30~40 MPa の分解せん断応力振幅が負荷されている。図 6 は、繰り返し数 (a) $N = 0$ 、(b) $N = 25$ 、(c) $N = 50$ 、(d) $N = 1000$ 、(e) $N = 2000$ および (f) $N = 3500$ におけるその場観察像を示す。ゲージ部上方から突き出し/入り込みを伴う損傷を生じ、繰り返し数の増加と共に損傷が下方に伝ばしていく様子が確認された。試験後の詳細な FE-SEM 観察では、疲労損傷部の突き出し/入り込みは、ゲージ部を貫通するナノサイズの板状組織（厚さ 15 nm~25 nm）によって構成されており、ゲージ部片側面の入り込みが対向する側面の突き出しに対応していた。最終的に突き出しの高さおよび入り込みの深さは、試験片のゲージ幅の約 40%に相当していた。試験片内部の TEM 観察の結果、突き出し/入り込み発生部にはマクロな Cu で見られるはしご型転位構造は存在せず、転位の壁 (wall) によるネットワーク構造の存在が確認された。試験片が負荷を通して繰り返し加工硬化を示さなかったことは、マクロ材の繰り返し負荷初期段階で見られる強固な転位組織の形成（双極子が集合したベイン (vein) の形成）が行われなかったことを示唆している。

図 6 は、実験より得られた繰り返し数の増加に伴う突き出し/入り込みの変化を示す。試験片右側面の突き出しは、そのすべりの延長上の左側面では入り込みに対応しており、繰り返し数が増加して突き出し/入り込みの様相が変化してもその関係は変わらなかった。すなわち、試験片で観察される突き出し/入り込みは、幅一定のすべりプレートの単純なずれによって生じている。マクロ材では、PSB の内部では正負の転位の反応によって空孔濃度が上昇し、PSB の膨張によ

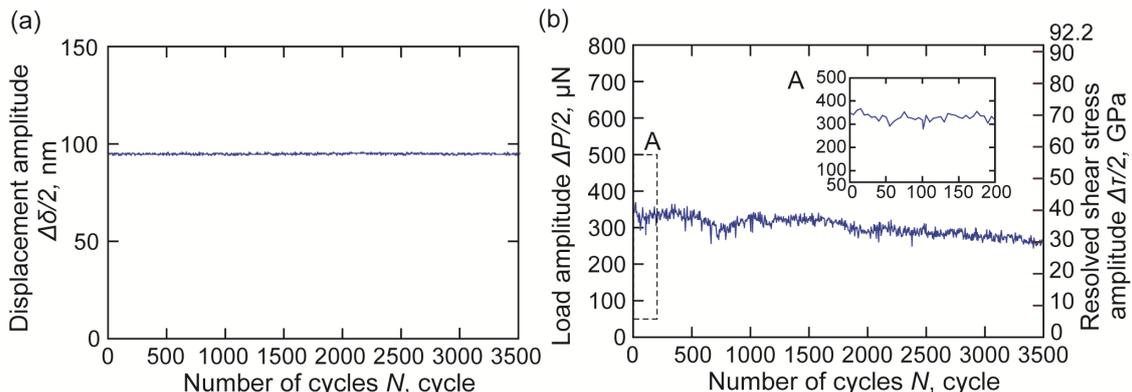


図 5 (a) 変位振幅の変化および (b) 荷重（応力）振幅の変化.

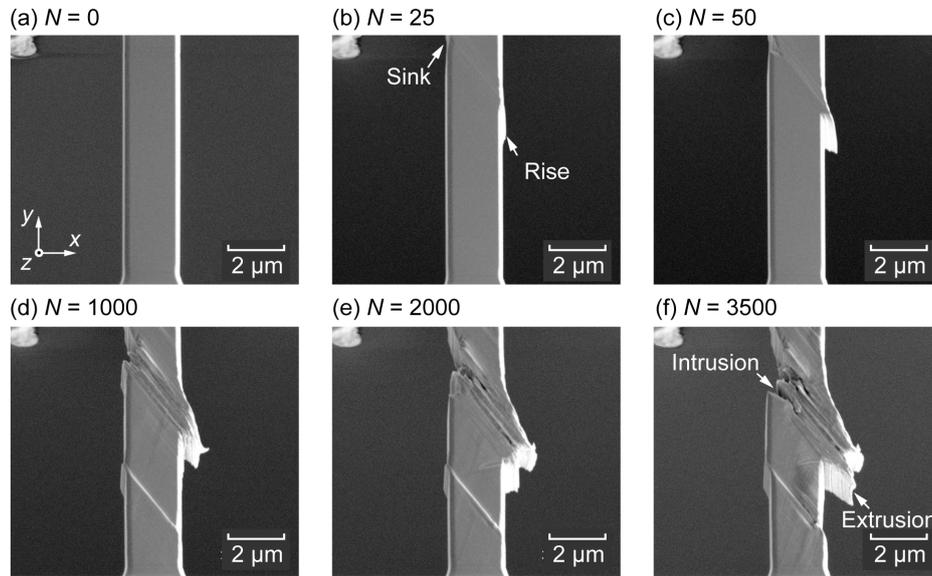


図6 引張圧縮疲労試験中の試験片の様相の変化.

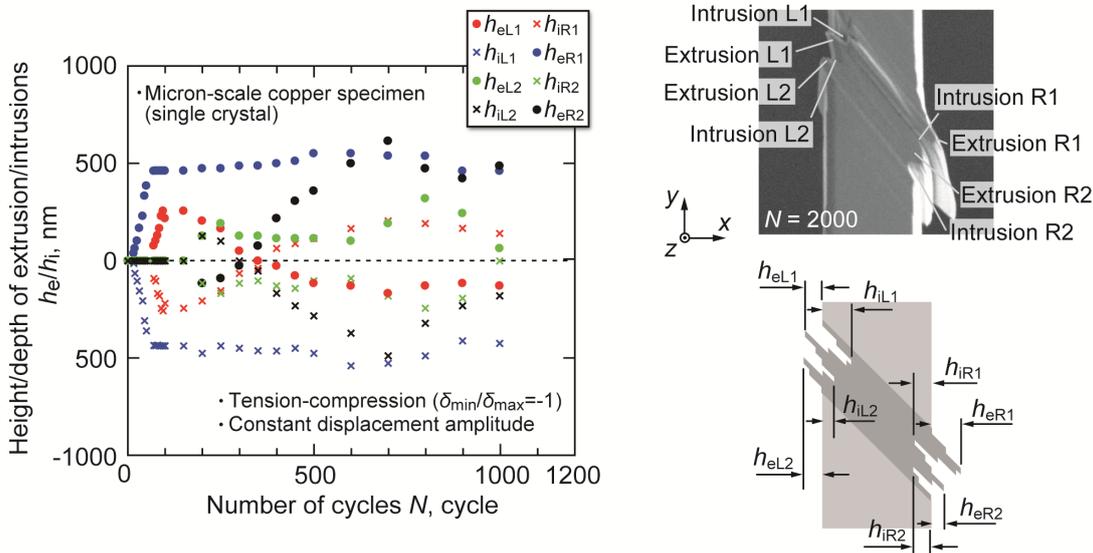


図7 繰り返し数の増加に伴う突き出し/入り込みの高さの変化.

て材料表面には突き出し/入り込みが生じる^④。すなわち、マイクロ材の突き出し/入り込み形成挙動はマクロ材のそれとは大きく異なっている。

単一すべり方位を有するNi単結晶では、寸法の異なるマイクロ試験片を準備した。Niは、Cuと同じ面心立方金属であり、転位のはしご型構造や突き出し/入り込みの形成等、Cuと同様の疲労挙動を示す。マクロ材の疲労限以下の応力振幅を用いて引張圧縮疲労試験を実施した結果、寸法の大きい試験片では、マクロ材と同様に疲労損傷は生じなかったが、小さい試験片では突き出し/入り込みの形成とともに疲労き裂が発生した。試験後、超高压透過型電子顕微鏡を用いた透過観察を行った結果、寸法の大きい試験片ではマクロ材と同様の疲労転位構造（ベイン+チャンネル）が観察された。このとき表面には極めて転位密度の低い領域が存在した。一方、寸法の小さい試験片では、ベイン構造は観察されず、転位壁で構成された特有の疲労転位構造が存在していた。これらの実験から、特定のサイズ以下のマイクロ試験片では、自由表面の強い関与により外部への転位の射出が容易となり、特有の疲労挙動を示すことがわかった。

<引用文献>

- ① Mughrabi, H, in: Haasen, P, Gerold, V, Kosterz, G (Eds.), The Strength of Metals and Alloys, Pergamon Press, Oxford, 1980, 1615-1639.
- ② Winter, ST, Pedersen, OR, Rasmussen, KV, Dislocation microstructures in fatigued copper polycrystals, Acta Metall. Vol.29(5), 1981, 735-748.
- ③ Mughrabi, H, The cyclic hardening and saturation behaviour of copper single crystals, Mater. Sci. Eng., Vol.33(2), 1978, 207-223.
- ④ J. Man, K. Obritlik and J. Polák, Extrusions and Intrusions in Fatigued Metals,

Part 1, State of the art and history, *Philosophical magazine*, 89(16 (2009), pp. 1295-1336.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 25件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ryota Kaneko, Tetsuya Yukishita, Takashi Sumigawa, Takayuki Kitamura	4. 巻 695
2. 論文標題 Nonlinear Elasticity in Meta-Film Comprising of Nano-Helices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 137749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2019.137749	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 Kai Huang, Takashi Sumigawa, Takayuki Kitamura	4. 巻 133
2. 論文標題 Load-dependence of Damage Process in Tension-compression Fatigue of Microscale Single-crystal Copper	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 105415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2019.105415	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 Molly Bazilchuk, Takashi Sumigawa, Takayuki Kitamura, Zhiliang Zhang, Helge Kristiansen, Jianying He	4. 巻 165
2. 論文標題 Contact Area Measurement of Micron-sized Metal-coated Polymer Particles under Compression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 105214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmecsci.2019.105214	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 該当する
1. 著者名 金子遼太, 山本幹也, 澄川貴志, 北村隆行	4. 巻 68(11)
2. 論文標題 斜め蒸着法で作製した銅ナノらせん要素集合薄膜の優れた疲労強度特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 845-851
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.68.845	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 Takayuki Kitamura, Takashi Sumigawa, Kai Huang, Yabin Yan, Li-cheng Guo	4. 巻 100
2. 論文標題 Novel Experimental Contrivance on Competitive Cracking in Multilayered Nano-structures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 319-327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tafmec.2019.01.033	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 該当する

1. 著者名 Takashi Sumigawa, Shin Uegaki, Tetsuya Yukishita, Shigeo Arai, Yoshimasa Takahashi, and Takayuki Kitamura	4. 巻 A764
2. 論文標題 FE-SEM in situ Observation of Damage Evolution in Tension-compression Fatigue of Micro-sized Single-crystal Copper	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering A	6. 最初と最後の頁 138218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2019.138218	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 Ryota Kaneko, Eiichi Kaneko, Takashi Sumigawa, Takayuki Kitamura	4. 巻 2(1)
2. 論文標題 Development of Experimental Methodology on Fracture Toughness of Micro-Scale Polymer Resins under In Situ Observation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Material Design & Processing Communications	6. 最初と最後の頁 e102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mdp2.102	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 Takashi Sumigawa, Kim Byungwoon, Yuki Mizuno, Takuma Morimura, and Takayuki Kitamura	4. 巻 153
2. 論文標題 In situ observation on formation process of nanoscale cracking during tension-compression fatigue of single crystal copper micron-scale specimen	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 270-278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2018.04.061	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 Takayuki Kitamura, Takashi Sumigawa, Takahiro Shimada	4. 巻 187
2. 論文標題 Challenge toward nanometer scale fracture mechanics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 33-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2017.10.009	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 Pasquale Gallo, Takashi Sumigawa, Takayuki Kitamura, Filippo Berto	4. 巻 95
2. 論文標題 Static assessment of nanoscale notched silicon beams using the averaged strain energy density method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 261-269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tafmec.2018.03.007	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 該当する

1. 著者名 Molly Bazilchuk, Takashi Sumigawa, Takayuki Kitamura, Zhiliang Zhang, Helge Kristiansen and Jianying He	4. 巻 -
2. 論文標題 Deformation and fracture of micron-sized metal-coated polymer spheres: an in-situ study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 1800049-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adem.201800049	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 該当する

1. 著者名 Li-cheng Guo, Kai Huang, Takashi Sumigawa, Yabin Yan, Takayuki Kitamura	4. 巻 196
2. 論文標題 Unstable cracking behavior in nanoscale single crystal silicon: Initiation, unstable propagation and arrest	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 113-122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2018.04.014	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 該当する

1. 著者名 Yabin Yan, Kai Huang, Takashi Sumigawa, Takayuki Kitamura	4. 巻 193
2. 論文標題 Fracture criterion of mixed-mode crack propagation along the interface in nanoscale components	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 137-150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2018.02.014	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 該当する

1. 著者名 Le Van Lich, Takahiro Shimada, Jie Wang, Kairi Masuda, Tinh Quoc Bui, Van-Hai Dinh, Takayuki Kitamura	4. 巻 190
2. 論文標題 Continuum thermodynamics of unusual domain evolution-induced toughening effect in nanocracked strontium titanate	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 232-244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2017.12.030	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 該当する

1. 著者名 Xu Hou, Huiyu Li, Takahiro Shimada, Takayuki Kitamura, Jie Wang	4. 巻 123(12)
2. 論文標題 Effect of geometric configuration on the electrocaloric properties of nanoscale ferroelectric materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 124103 (8 pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5020584	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 該当する

1. 著者名 Xiaoyuan Wang, Yabin Yan, Takahiro Shimada, Jie Wang, Takayuki Kitamura	4. 巻 123(11)
2. 論文標題 Ferroelectric critical size and vortex domain structures of PbTiO ₃ nanodots: A density functional theory study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 114101 (7 pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5013049	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 該当する

1. 著者名 Jie Wang, Yajun Zhang, Mohapatra Prakash Kumar Sahoo, Takahiro Shimada, Takayuki Kitamura, and Tong-Yi Zhang	4. 巻 8
2. 論文標題 Giant magnetoelectric effect at the graphone/ferroelectric interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12448 (9 pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-30010-x	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 該当する

1. 著者名 Tao Xu, Takahiro Shimada, Yasumitsu Araki, Masataka Mori, Gen Fujimoto, Jie Wang, Tong-Yi Zhang, and Takayuki Kitamura	4. 巻 5
2. 論文標題 Electron engineering of metallic multiferroic polarons in epitaxial BaTiO ₃	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 npj Computational Materials	6. 最初と最後の頁 23 (7 pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41524-019-0163-6	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 該当する

1. 著者名 Masaya Ukita, Atsutomo Nakamura, Tatsuya Yokoi, Katsuyuki Matsunaga	4. 巻 98
2. 論文標題 Electronic and Atomic Structures of Edge and Screw Dislocations in Rock Salt Structured Ionic Crystals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Philosophical Magazine	6. 最初と最後の頁 2189-2204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14786435.2018.1478146	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 Yabin Yan, Takashi Sumigawa, Xiaoyuan Wang, Wufan Chen, Fuzhen Xuan, Takayuki Kitamura	4. 巻 171
2. 論文標題 Fatigue curve of microscale single-crystal copper: An in situ SEM tension-compression study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 105361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmecsci.2019.105361	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 該当する

1. 著者名 日笠 健, 澄川 貴志, 田中 秀平, 金子 遼太, 北村 隆行	4. 巻 86(886)
2. 論文標題 飛び移り微視構造メタマテリアルの切欠き感受性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集 (A編)	6. 最初と最後の頁 19-00398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00398	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 Takashi Sumigawa, Ken Hikasa, Akihiro Kusunose, Hiroki Unno, Kairi Masuda, Takahiro Shimada, and Takayuki Kitamura	4. 巻 4
2. 論文標題 In-Situ TEM Observation of Nanodomain Mechanics in Barium Titanate under External Loads	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 54415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.4.054415	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 Yabin Yan, Wufan Chen, Takashi Sumigawa, Xiaoyuan Wang, Takayuki Kitamura, Fuzhen Xuan	4. 巻 206
2. 論文標題 A quantitative in situ SEM bending method for stress relaxation of microscale materials at room temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11340-020-00611-7	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 該当する

1. 著者名 Kai Huang, Takashi Sumigawa, Takahiro Shimada, Shuhei Tanaka, Youhei Hagiwara, Licheng Guo, Takayuki Kitamura	4. 巻 206
2. 論文標題 An experimental study on atomic-level unified criterion for brittle fracture	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsolstr.2020.08.006	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 該当する

1. 著者名 Kai Huang, Takashi Sumigawa, Takayuki Kitamura	4. 巻 A806
2. 論文標題 Experimental evaluation of loading mode effect on plasticity of microscale single-crystal copper	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Material Science and Engineering A	6. 最初と最後の頁 140822
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2021.140822	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 該当する

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Fatigue of Micro-sized Copper Single Crystal Specimen under Fully-reversed Axial Loading
3. 学会等名 5th International Conference on Materials and Reliability (ICMR-2019) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澄川貴志
2. 発表標題 SEMピコインデントを用いた微小材料の強度特性評価
3. 学会等名 ブルカージャパン株式会社京都大学ナノテクノロジーハブ拠点共催 『試料最表面の形状・物性を探る』～ナノプローブ表面特性評価技術セミナー～ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澄川貴志
2. 発表標題 マイクロ金属の引張圧縮疲労
3. 学会等名 日本機械学会 マイクロ・ナノ工学部門主催 第10回マイクロ・ナノ工学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澄川貴志
2. 発表標題 マイクロ金属の疲労挙動観察
3. 学会等名 日本金属学会 2019年 秋季（第165回）講演大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澄川貴志
2. 発表標題 電子顕微鏡内での微小材料の強度評価実験
3. 学会等名 RC278「産業変革期の電子実装技術における信頼性設計と熱制御に関する研究分科会」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澄川貴志
2. 発表標題 マイクロサイズの銅単結晶試験片の引張圧縮繰り返し変形挙動
3. 学会等名 M&M2019 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安井千央
2. 発表標題 双晶境界を有するマイクロ銅の引張圧縮疲労過程その場観察
3. 学会等名 M&M2019 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日笠健
2. 発表標題 ひずみ負荷を受ける微小強誘電体中のナノドメイン構造変化のその場観察
3. 学会等名 日本材料学会 第5回材料WEEK ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子遼太
2. 発表標題 Siナノ非線形ばねの作製とその場観察引張試験
3. 学会等名 日本材料学会 第4回マルチスケールシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日笠健
2. 発表標題 微小BaTiO ₃ 単結晶中のナノドメイン構造の引張負荷応答
3. 学会等名 日本材料学会 第4回マルチスケールシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Formation of Slip Bands in Nano-polycrystalline Copper sandwiched between Brittle Materials
3. 学会等名 European conference on fracture (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Sumigawa
2. 発表標題 Fatigue of single-crystal gold micro-specimen by resonant vibration
3. 学会等名 1st International Conference on Theoretical, Applied, Experimental Mechanic (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Kitamura
2. 発表標題 Challenge toward Fracture Mechanics in Atomic Scale
3. 学会等名 European conference on fracture (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 澄川貴志
2. 発表標題 ナノ・マイクロ材料の力学特性評価実験
3. 学会等名 日本材料学会 第69期第1回マルチスケール材料力学部門委員会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澄川貴志
2. 発表標題 マイクロ金属の引張圧縮疲労特性
3. 学会等名 溶接学会 第131回マイクロ接合研究委員会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大村知輝
2. 発表標題 円孔欠陥を有する飛び移り座屈構造メカニカルメタマテリアルの力学応答
3. 学会等名 日本材料学会 第6回材料WEEK ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高田聡志
2. 発表標題 [001]多重すべり方位を有するマイクロ銅単結晶の引張圧縮疲労挙動
3. 学会等名 日本材料学会 第6回材料WEEK ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河村啓
2. 発表標題 VO2ナノ薄膜におけるモット転移温度の面内 単軸ひずみ負荷応答
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川勝信貴
2. 発表標題 引張圧縮繰り返し負荷を受けるマイクロNi単 結晶の疲労挙動とその寸法依存性
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻 エネルギー材料設計研究室
<http://www.force.energy.kyoto-u.ac.jp/>

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
研究 分 担 者	中村 篤智 (Nakamura Atsutomo) (20419675)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	
研究 分 担 者	嶋田 隆広 (Shimada Takahiro) (20534259)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	

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
---------	---------