

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20531

研究課題名（和文）電子風力による金属材料のナノスケール組織制御と機構解明

研究課題名（英文）Nanoscale Structure Control of Metallic Material Through Electrical Wind Force and Mechanism Clarification

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） 19,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高密度電子流をバルク材の金属合金に導入し、集団的な電子の衝撃力を電子風力として操作することにより金属原子に能動的に作用し、金属材料内原子配列の最適化や転位の移動・消滅などのナノスケール力学制御を実現することを目的としている。これによって、高密度電流による金属材料内の結晶構造、相組織などミクロスケールの組織制御を実現し、これまで両立困難であった金属材料の高強度と高延性や、高強度と高靱性などの力学特性のトレードオフを打破し、高強度、高延性、高靱性を同時に実現できる革新的力学特性を発現させる。さらに、電子風力による金属材料内原子配列の最適化、そして結晶組織制御に関する手法を提案する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子風力による金属材料内組織の制御とメカニズムの解明への挑戦は世界に先駆けた斬新な研究であり、これまで両立困難であった力学特性のトレードオフをブレイクスルーし、我が国の産業界に大きな変革をもたらすことにより、国際競争力維持・強化に大いに貢献できる。また、本研究は電子風力を金属内部の原子に意図的に負荷できることに着目し、原子配列の観点から原子移動に起因する転位の移動と消失、結晶構造と方位の変化、相組織の大きさや分布の変化など材料組織の制御手法を確立するとともに、その理論モデルの提案を目標としており、材料力学の学問体系を超え、新しい学理を追求するものであり、学術体系の変革が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The research aim is to realize nanoscale mechanical control such as optimization of atomic arrangement and dislocation migration and annihilation in metallic materials by introducing high-density electron current into bulk metal alloys and actively acting on metal atoms by manipulating collective electrons impact as electron wind force. This will realize micro-scale microstructural control such as crystal structure and phase structure in metallic materials by high-density current, thereby breaking the trade-off between mechanical properties such as high strength and high ductility, or high strength and high toughness, which have been difficult to achieve. The innovative mechanical properties that can simultaneously realize high strength, high ductility, and high and toughness at the same time will be created. Furthermore, we will propose the method to realize the optimization of atomic arrangement in metallic materials by electron wind force and for the control of crystal structure.

研究分野：材料力学

キーワード：原子配列 結晶構造 力学特性 電子風力 金属材料

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

世界的な資源逼迫・枯渇などの社会問題を解決し、低炭素社会、持続可能な社会を実現するため、日本発革新的かつ独創的な研究を推進し、自動車、飛行機、発電設備など大型構造物に使用されている構造材料の高機能化、長寿命化が必要不可欠である。一方、金属合金のような代表的な構造材料は物理的な手法で製造・加工されているため、不純物や格子欠陥、点・線・面欠陥、結晶粒、相組織などが存在し、材料設計で得られた理想的な力学特性をマクロスケールの構造材料によって実現することは未だに困難な状況にある。

また、金属材料は化学成分が同じでも形成のプロセスや使用条件によって材料の機械的特性が異なることが知られている。一方、高密度電流により材料内部の組織を改変できることはまだ新しい概念であり、そのメカニズム解明や理論モデルの提案はまだなされていない状況にある。材料内部組織の改良、制御などへの応用はそのニーズが非常に高いにも関わらず未だに実現されていない状況にある。

### 2. 研究の目的

本研究は、高密度電子流をバルク材の金属合金に導入し、集団的な電子の衝撃力を電子風力として操作することにより金属原子に能動的に作用し、金属材料内原子配列の最適化や転位の移動・消滅などのナノスケール力学制御を実現することを目的としている。これによって、高密度電流による金属材料内の結晶構造、相組織などミクロスケールの組織制御を実現し、これまで両立困難であった金属材料の高強度と高延性や、高強度と高靱性などの力学特性のトレードオフを打破し、高強度、高延性、高靱性を同時に実現できる革新的力学特性を発現させる。さらに、これらの現象を明らかにすることにより、電子風力による金属材料内原子配列の最適化、そして結晶組織制御に関する新しい原理を世界に先駆けて提案する。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、(1) 高密度電流による力学特性向上の実験的解析、(2) 電子風力による組織制御の実験的解析、(3) 結晶組織における電流流路の可視化、(4) 原子配列および転位の可視化技術の確立、(5) 電子風力によるナノスケール組織制御機構の解明、(6) 革新的力学特性の発現指針の確立、となる研究項目を設け、研究を推進する。

### 4. 研究成果

#### (1) 高密度電流による力学特性向上の実験的解析

Ti-6Al-4V 試験片に対し電子の密度および速度、作用時間が異なる交流高密度電流を網羅的に印加することにより、電流印加前後の引張、疲労、クリープ特性を定量的に評価し、高密度電流による金属材料の力学特性向上に関するデータを蓄積した。その例を図1と図2に示す。また、強度と延性、強度と靱性など力学特性のトレードオフの打破に最適な電流条件を特定した。さらに、電流印加時にジュール熱の影響を検証するため、リアルタイムの高速温度場計測装置を開発した。

#### (2) 電子風力による組織制御の実験的解析

項目(1)の実験と並行して、高密度電流の密度や速度、印加時間などがTiAl合金の結晶組織に及ぼす影響を高精度計測可能な電子線後方散乱回折および広範囲計測可能なX線回折によ

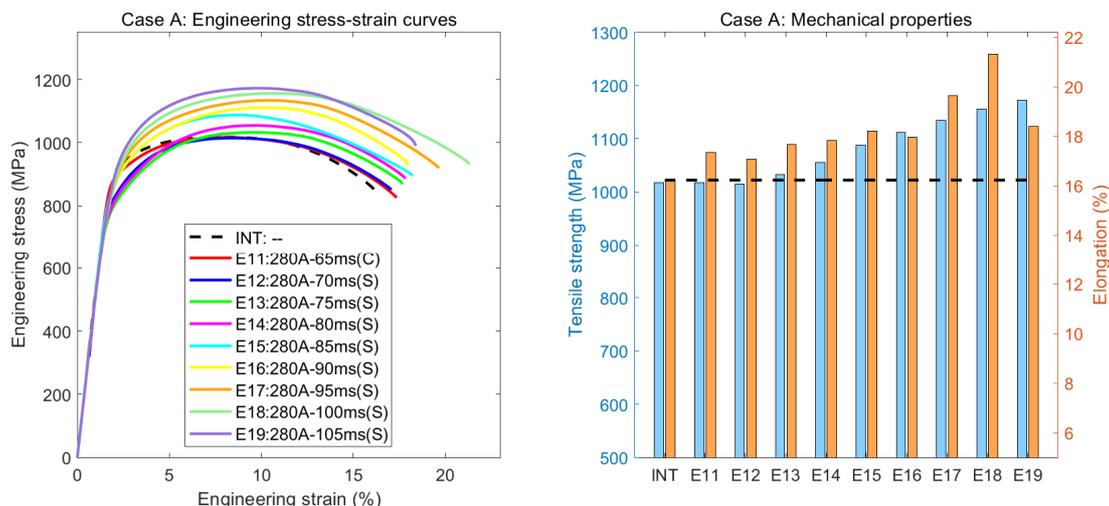


図1 電流密度 140 A/mm<sup>2</sup>、印加時間 65 ms~105 ms での強度と延性の向上

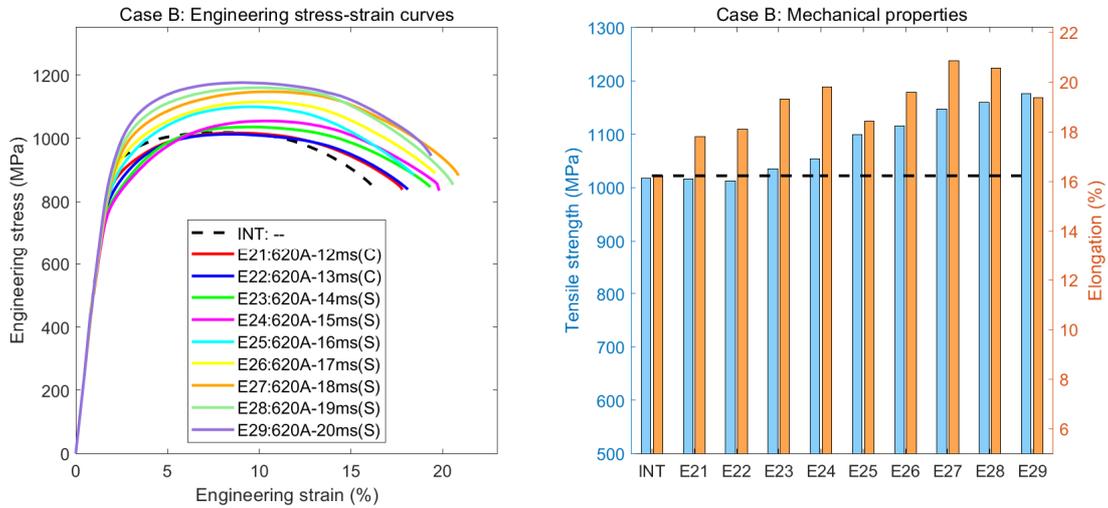


図2 電流密度 310 A/mm<sup>2</sup>、印加時間 12 ms~20 ms での強度と延性の向上

り実験的に明らかにした。図3には高密度電流による結晶粒の微細化と転位密度の増加、図4には高密度電流による相の増加と整合界面(境界)の増加を示す。また、高密度電流による力学特性を向上した試験片に対して、結晶構造、粒径、方位、相組織などのナノスケールでの解析手法を確立した。

(3) 結晶組織における電流流路の可視化

独自に開発したナノ分解能を有する、試料の表面形状と電気伝導率を同時に計測できるマイクロ波原子間力顕微鏡を用いて、試料の各結晶面や結晶粒、相組織の導電率マッピングを実現した。また、試料に通電しながら、電流により発生するクーロン力が探針と試料表面間の原子間力に及ぼす影響を計測し、結晶組織における電流流路の可視化を実現した。

(4) 原子配列および転位の可視化技術の確立

電子風力による原子配列および結晶構造変化の動的挙動を可視化するため、高分解能透過型電子顕微鏡(HRTEM)によるその場観察を実施した。図5に電子風力による転位移動のリアルタイム観察の実施例を示す。独自のTEMホルダーを開発し、高分解能観察に必須の厚さ10 nm以下の薄片試料への電流印加を実現した。また、TEMホルダーには2軸傾斜式を採用し、像観察のみならず複数方向からの電子回折パターンを取得することにより、電流印加によって変化する原子間距離・結晶面・結晶構造の挙動を明らかにした。

(5) 転移運動の数値解析技術の確立

電子密度分布を考慮した密度汎関数理論に基づく原子スケールでのシミュレーションと分子動力学シミュレーションを融合し、電子風力による転位の運動を解析できるマルチスケールシミュレーション確立した(図6)。また、マルチスケールシミュレーションを用いて、電子風力が誘起する転位の運動による小傾角粒界の形成を系統的に解析し、小傾角粒界の形成による結晶粒の微細化機構を明らかにした。

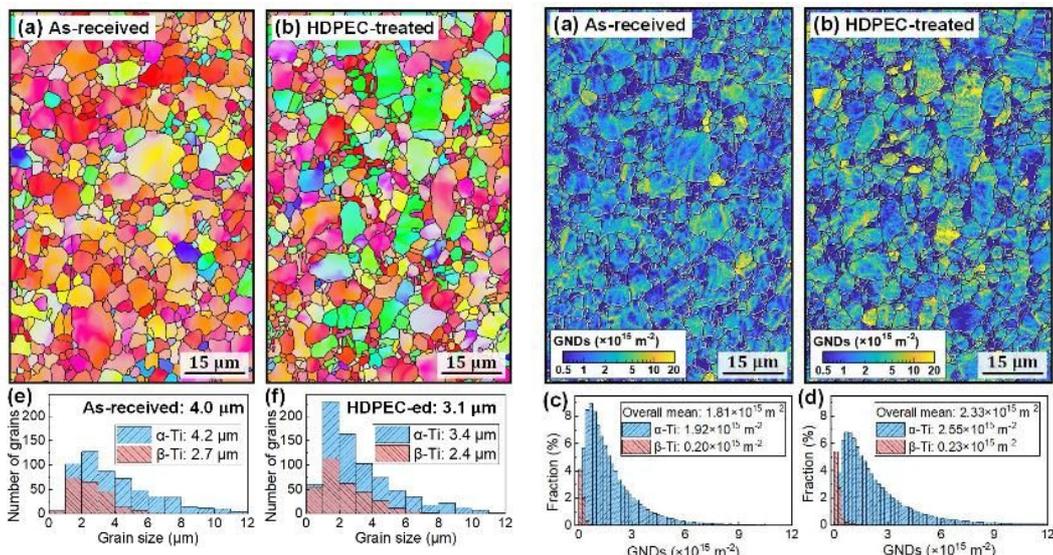


図3 高密度電流による結晶粒の微細化と転位密度の増加

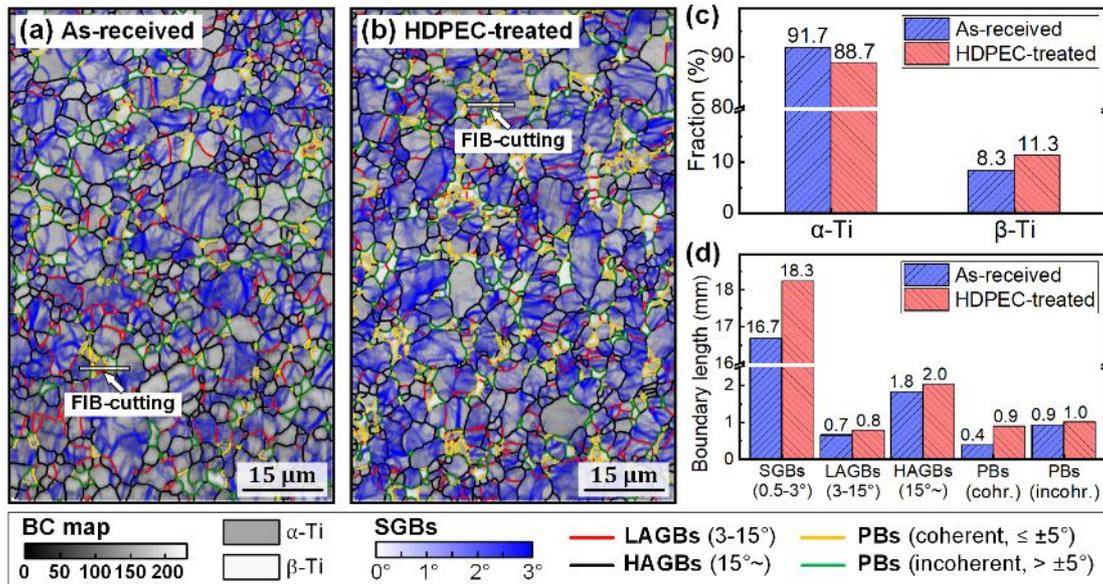


図4 高密度電流による 相の増加と整合界面（ / 境界）の増加

(6) 電子風力によるナノスケール組織制御機構の解明

開発された原子配列・転位の可視化手法により原子再配列と転位移動の動的解析を実施した。電子の密度や速度、作用時間、作用回数の条件と、各合金中の原子の移動や再配列との関係を定量的に評価し、電子風力による結晶構造改変の機構を明らかにした。また、電子風力による転位移動の理論モデルを構築し、電子風力により発生する結晶粒改変の機構を明らかにした。さらに、熱エネルギー、活性化エネルギー、結晶の構造と結晶の大きさを考慮に入れ、電子風力による相組織改変の機構を明らかにした。加えて、電子風力による材料内組織の制御に関する手法を提案した。

(7) 革新的力学特性の発現指針の確立

上記の研究成果を踏まえ、TiAl合金の各種力学特性を最大限に向上できる高密度電流印加条件の最適化を実現し、いままで実現できなかった高強度、高延性、高靱性などの革新的力学特性を実現する手法を確立した。また、結晶粒の微細化と転位密度の増加による強度向上、そして相と整合相界の増加による延性の向上を実現することにより、いままで実現困難な力学特性のトレードオフとされている強度と延性の同時向上技術を確立した。さらに、不動転位密度の増加と双晶、整合相界の増加を駆使した、他の金属材料にも応用できる、力学特性のトレードオフを打破できる手法を提案した。

電子風力による金属材料内組織の制御とメカニズムの解明は世界に先駆けた斬新な研究であり、これまで両立困難であった力学特性のトレードオフをブレイクスルーし、我が国の産業界に大きな変革をもたらすことにより、国際競争力維持・強化に大いに貢献できる。また、本研究は電子風力を金属内部の原子に意図的に負荷できることに着目し、原子配列の観点から原子移動に起因する転位の移動と消失、結晶構造と方位の変化、相組織の大きさや分布の変化など材料組

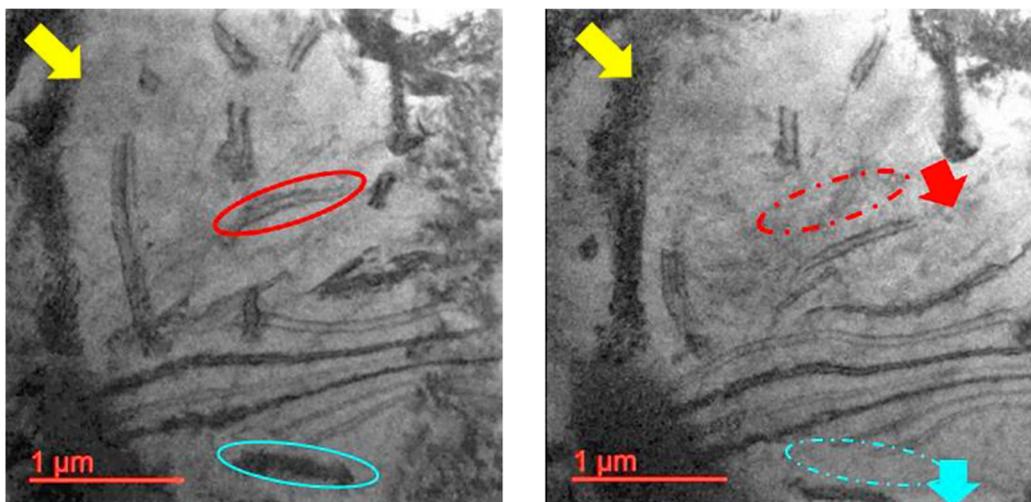


図5 電子風力による転位移動のリアルタイム観察

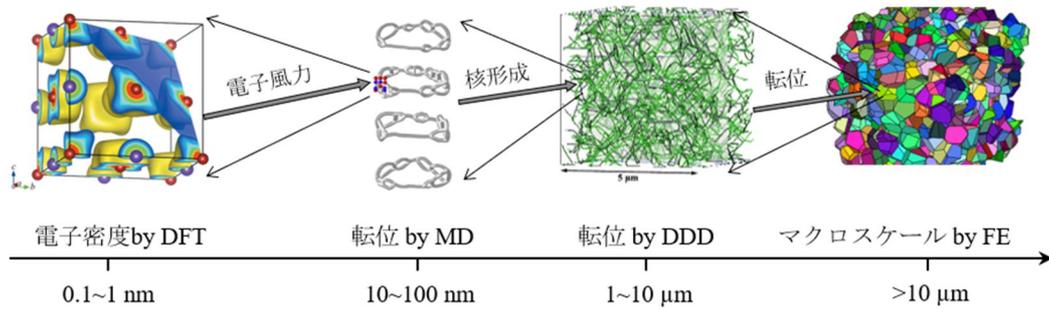


図6 電子風力による転位運動のマルチスケールシミュレーション

織の制御手法を確立するとともに、その理論モデルの提案をしており、材料力学の学問体系を超え、材料科学および固体物理の概念や方法論と融合して新しい学理を追求するものである。

## 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 3件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoon Sungmin, Cui Yi, Kimura Yasuhiro, Gu Shaojie, Toku Yuhki, Ju Yang	4. 巻 156
2. 論文標題 Improvement of low-cycle fatigue life of austenitic stainless steel by multiple high-density pulsed electric currents	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 106639 ~ 106639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2021.106639	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 Gu Shaojie, Cui Yi, Yoon Sungmin, Wang Zizheng, Kimura Yasuhiro, Toku Yuhki, Ju Yang	4. 巻 197
2. 論文標題 Rapid anisotropy recovery in deformed FCC metals by high-density pulsed electric current treatment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 110855 ~ 110855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vacuum.2021.110855	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 Cui Yi, Chen Zengtao, Gu Shaojie, Yang Wenzhi, Ju Yang	4. 巻 -
2. 論文標題 Investigating size dependence in nanovoid-embedded high-entropy-alloy films under biaxial tension	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Archive of Applied Mechanics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00419-021-02100-2	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 Yoon Sungmin, Kimura Yasuhiro, Toku Yuhki, Ju Yang, Park Soojeong, Kim Yunhae	4. 巻 8
2. 論文標題 Assessment of creep behavior using a damage-coupled model for martensitic stainless steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 21-00178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mej.21-00178	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 Gu Shaojie, Cui Yi, Kimura Yasuhiro, Toku Yuhki, Ju Yang	4. 巻 56
2. 論文標題 Relief of strain hardening in deformed Inconel 718 by high-density pulsed electric current	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Science	6. 最初と最後の頁 16686 ~ 16696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10853-021-06344-9	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 Yoon Sungmin, Kimura Yasuhiro, Cui Yi, Toku Yuhki, Ju Yang	4. 巻 62
2. 論文標題 Evaluation of Electric Current-Induced Improvement of Fracture Characteristics in SUS316	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 748 ~ 755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2020333	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 Cui Yi, Toku Yuhki, Ju Yang	4. 巻 32
2. 論文標題 Nanotwinning and tensile behavior in cold-welded high-entropy-alloy nanowires	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 315716 ~ 315716
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/abf7eb	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 Y.Kimura and Y.Ju	4. 巻 10
2. 論文標題 Equilibrium current density balancing two atomic flows in coupled problems of electromigration and thermomigration in unpassivated gold film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 085125(1)-(9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0011417	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 Y.Cui, Z.Chen and Y.Ju	4. 巻 12
2. 論文標題 Fracture of void-embedded high-entropy-alloy films: A comprehensive atomistic study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materialia	6. 最初と最後の頁 100790(1)-(16)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtla.2020.100790	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 Y.Cui, Y.Toku, Y.Kimura and Y.Ju	4. 巻 185
2. 論文標題 High-strain-rate void growth in high entropy alloys: Suppressed dislocation emission = suppressed void growth	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 12-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2020.03.056	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 Y.Cui, Y.Toku, Y.Kimura and Y.Ju	4. 巻 187
2. 論文標題 True origin of the size effect in cold-welded metallic nanocrystals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 106102(1)-(13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmecsci.2020.106102	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 Y.Cui, Y.Toku, Y.Kimura and Y.Ju	4. 巻 188
2. 論文標題 The deformation mechanism in cold-welded gold nanowires due to dislocation emission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computational Materials Science	6. 最初と最後の頁 110214(1)-(12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.commatsci.2020.110214	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 Y.Toku, Y.Togawa, Y.Morita and Y.Ju	4. 巻 285
2. 論文標題 Preferential growth of specific crystal planes based on the dimension control of single crystal SnO <sub>2</sub> nanobelts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Letters	6. 最初と最後の頁 129121(1)-(4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matlet.2020.129121	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5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 安田 和弘、木村 康裕、徳 悠葵、巨 陽
2. 発表標題 高周波電流を利用した金属薄膜内原子配列の高秩序化に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Gu Shaojie、 Cui Yi、 Kimura Yasuhiro、 Toku Yuhki、 Ju Yang
2. 発表標題 高密度パルス電流による予ひずみを有するインコネル718 の加工硬化の緩和
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 彭 彦鴻、木村 康裕、徳 悠葵、巨 陽
2. 発表標題 高周波電流による薄膜密着強度の向上に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丸本 裕貴、木村 康裕、徳 悠葵、巨 陽
2. 発表標題 高密度パルス電流による純チタン結晶組織への影響
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoon Sungmin、Ju Yang、Kimura Yasuhiro、Toku Yuhki
2. 発表標題 Fatigue damage recovery of austenitic stainless steel by high-density pulsed electric current
3. 学会等名 日本金属学会 2021年秋期（第169回）講演大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 金属の機械特性向上方法	発明者 巨 陽、丸本 裕貴、 顧 少杰、尹 盛文、 岩瀬 累	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2022-049181	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

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	徳 悠葵  (Toku Yuhki)  (60750180)	名古屋大学・工学研究科・准教授   (13901)	
研究分担者	木村 康裕  (Kimura Yasuhiro)  (70803740)	名古屋大学・工学研究科・助教   (13901)	

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