

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03844

研究課題名（和文）不均一変形の力学モデリングプロセスの確立と変形集中を低減する材料の開発

研究課題名（英文）Establishment of mechanical modeling process of nonuniform deformation and development of deformation concentration-reduced material

研究代表者

内田 真（Uchida, Makoto）

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90432624

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：工業材料は微視的には不均質な構造を有しており、巨視構造と微視構造の寸法比が1に近づくと両スケールの不均一変形が干渉して寸法効果が生じる。本研究では材料に生じる不均一変形を定量化し、それを直接モデル化するプロセスを構築する。これにより、変形集中を抑制する材料の開発に貢献することを目指す。

曲線状のゲージ部を有する多結晶試験片を用いた引張試験を実験および解析から評価し、微視及び巨視的不均一変形の相互作用について考察した。一連の研究結果から、材料の微視的不均一変形を有限領域の塑性コンプライアンスこう配と応力場を用いて記述することで不均一変形の寸法効果を評価できることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料の損傷の前駆現象である変形集中を抑制することは工業製品の安全性を高める上で極めて効果的である。有限要素法を用いれば、材料の応力ひずみ関係から連続体スケールの不均一変形を予測することが可能になるが、製品寸法が微小になるほど、材料の微視構造が製品の变形状態に影響することによって予測精度が低下する。本研究では、そのような材料の微視構造が誘発する不均一変形を実験から定量化し、それを予測可能なモデルを提案した。本研究により獲得した一連の成果は、材料の不均一変形の予測精度を改善するとともに、変形集中抑制を実現可能な材料開発に貢献するものと確信している。

研究成果の概要（英文）：Engineering materials typically have a heterogeneous microstructure. When the size difference between micro and macrostructure is small, the interaction of nonuniform deformation in both scales induces the size effect. In this study, the direct mechanical modeling process of the non-uniform deformation characterized by the material microstructure with a finite size is established using the quantitatively evaluated strain fields. It will contribute the development of the engineering material suppressing the deformation concentration.

Experimental and numerical studies on the tensile test of polycrystalline specimens having a curved gage section were performed to discuss the interaction between micro and macroscopic non-uniform deformation. From the series of the obtained results, we proposed the nonlocal mechanical model, which can represent size-dependent non-uniform deformation, using the plastic compliance gradient and stress field for the finite region of the heterogeneous material.

研究分野：固体力学

キーワード：不均一変形 不均質構造 DIC FEM 均質化法 ひずみこう配 非局所

## 1. 研究開始当初の背景

工業材料は微視的な不均質性を有しており、それが巨視領域の力学特性に大きく影響する。特に、微視領域と巨視領域の寸法比が1に近づくほど、微視的不均質性によって生じる不均一変形が、巨視領域の不均一変形に影響を及ぼすことにより、材料構造の寸法に依存した力学特性を示すことが考えられる。このような微視的および巨視領域に生じる不均一変形の相互作用によって生じる寸法効果を解明するためには、実験および解析による不均一変形の定量化、およびそれに基づいた力学モデルの設計が不可欠である。

デジタル画像取得の簡易化に伴い、デジタル画像相関 (Digital Image Correlation, DIC) 法を用いた全視野ひずみ計測技術が広く普及してきた。加えて、DIC と有限要素法 (Finite Element Method, FEM) のカップリングによる応力評価手法も提案されている。DIC によるひずみ場評価の一番重要な点は、不均一変形下でひずみや応力の時空間情報を取得可能なことにある。特に、き裂や介在物周りの変形集中の定量評価は、材料の損傷を正確に把握するための最も重要なデータとなる。DIC や DIC-FEM カップリング手法から得られるひずみや応力の時空間情報データを最大限に有効活用して非局所的な力学現象をモデル化していくためには、不均一変形を特徴づけるための材料定数の明確化、およびそれを求めるフィッティングプロセスを確立することが極めて重要な課題であり、これらの実現は連続体力学の有用性を飛躍的に高めるとともに、変形集中の低減による材料の損傷防止に大きく寄与することが期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、不均質な微視構造を有する材料に生じる微視的な不均一変形と境界条件によって生じる巨視的な不均一変形の相互作用を定量化し、材料に生じる不均一変形の寸法効果を明らかにすることを目的とする。まず、粗大多結晶構造を有する純銅試験片に応力こう配を伴う引張試験を実施し、巨視的不均一変形に及ぼす粒径の影響を評価する。実験では、DIC を用いて試験片表面のひずみ場を測定し、結晶粒の異方性による微視的な強度場と、曲率の異なる曲線状ゲージ部に生じる巨視的な応力こう配の相互作用について考察する。さらに、実験を模した数値解析を実施し、実験により得られたサイズ効果が解析で再現可能かどうかを調査する。

多結晶構造は結晶方位や粒径、および粒の形状がランダムであるため、微視構造の不均質構造を定量化することが困難である。そこで、本研究ではさらに、3D プリンタを用いることにより、人工的な不均質構造を有する模型材料を成形し、規則性を有する不均質構造が材料の巨視的な不均一変形に及ぼす影響を解明することを試みる。寸法の異なる 2 次元ハニカム構造を有する試験片の 4 点曲げ試験を実施し、変位場や荷重たわみ関係に及ぼす周期構造の寸法の影響を評価する。最後に、得られた知見をもとに、微視的な不均質構造の寸法を反映した不均一変形を記述する非局所的な力学モデルの構築手法について考察する。

## 3. 研究の方法

微視的な不均一性によって生じる不均一変形と、材料の巨視構造に生じる不均一変形が干渉することで生じる寸法効果をあきらかにするために、以下に示す(1)~(4)の実験及び数値解析を実施した。

- (1) 曲線状のゲージ部を有する多結晶純銅の引張試験
- (2) 3D プリンタで成形した周期構造を有する試験片の曲げ応答
- (3) 2 次元均質化法を用いた多結晶金属の微視および巨視的不均一変形の評価
- (4) 微視構造に由来する不均一変形を評価するための非局所力学モデルの検討

## 4. 研究成果

- (1) 曲線状のゲージ部を有する多結晶純銅の引張試験

図 1 に示すような曲率が異なる曲線状のゲージ部を有する多結晶純銅板の試験片を多結晶構造によって生じる微視的不均一変形と、試験片形状によって生じる巨視的不均一変形の関連性を実験により評価した。試験片に生じるひずみ場は DIC で、応力場は DIC と FEM をカップリングした手法を用いてそれぞれ評価した。引張試験により得られた荷重変位関係 (図 2) から、試験片に生じる荷重は結晶粒径だけでなく、巨視的な応力こう配によっても変化すること、結晶粒径が大きくなるほど試験片形状による応答の変化が小さくなることが分かった。また、図 3 に示すひずみ場の履歴から、結晶粒径が大きくなるほど、結晶構造に起因する微視的不均一変形が強く生じることで、巨視的な応力こう配によって生じる変形集中が抑制されることが分かった。

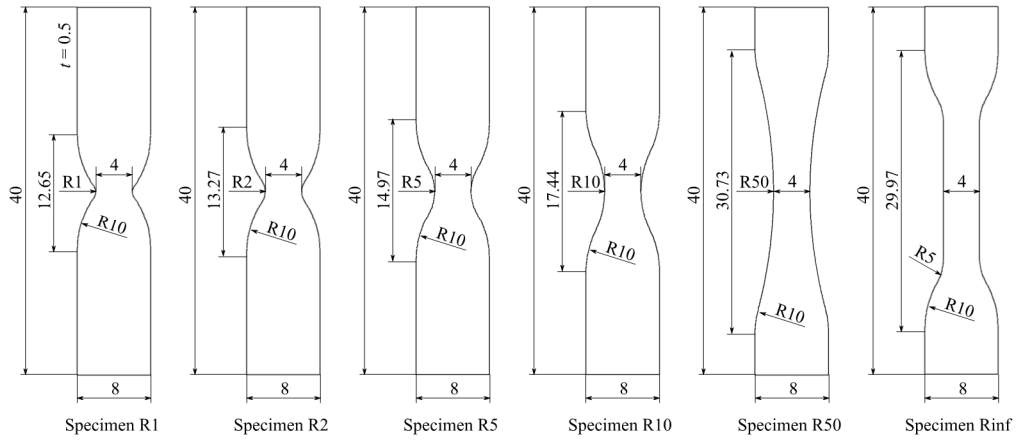
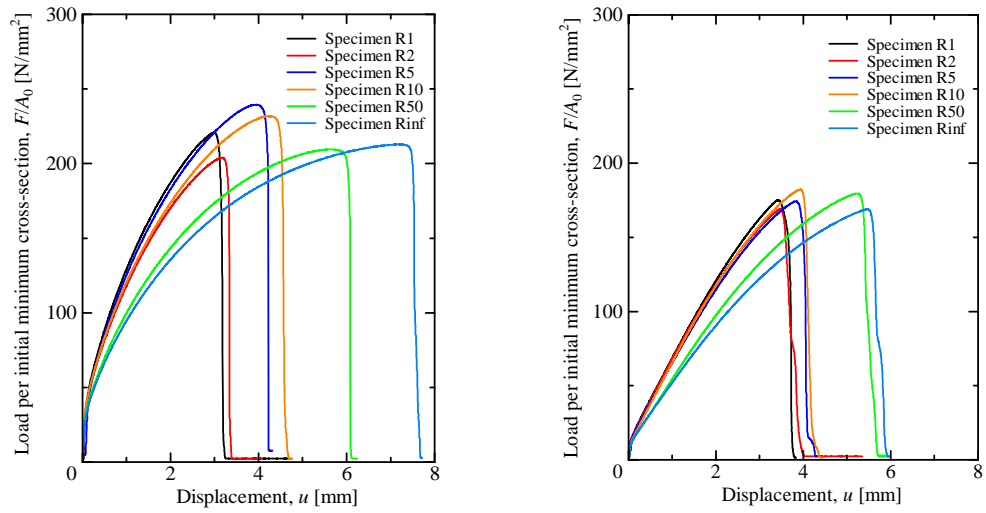


図1 曲率の異なる曲線状ゲージ部を有する引張試験片



(a) 450°C焼鈍試験片 (結晶粒小)

(b) 850°C焼鈍試験片 (結晶粒大)

図2 荷重変位関係に及ぼす結晶粒径の影響

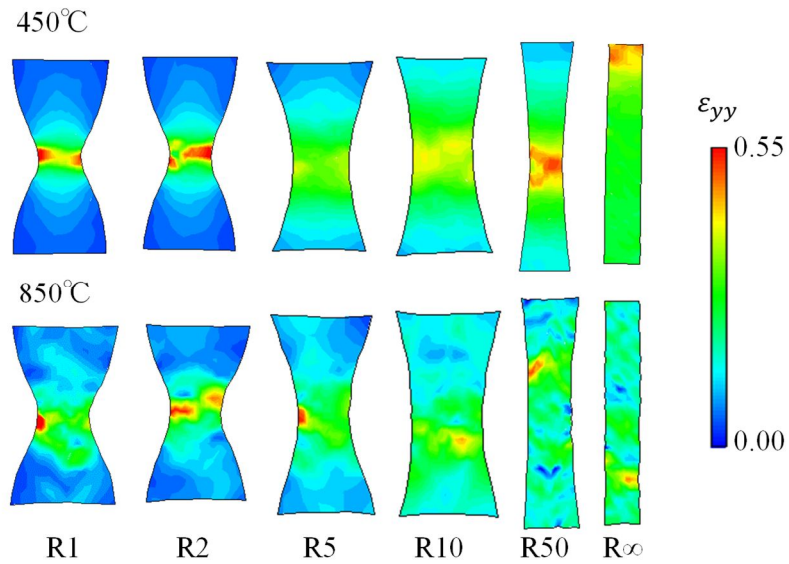
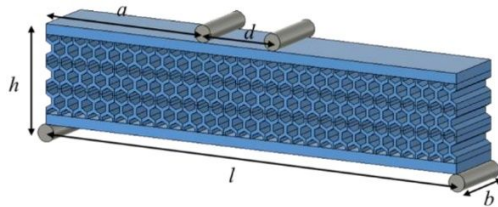


図3 試験片表面に生じるひずみ場に及ぼす試験片曲率および結晶粒径の影響

(2) 3D プリントで成形した周期構造を有する試験片の曲げ応答

多結晶組織は結晶粒のサイズや形状，方位などがランダムであるため，微視構造の特徴を定量化するのが難しい．そこで，3D プリントを用いて人工的な周期微視構造を有する試験片として図 4 に示すような八ニカム構造を有する試験片を作成し，4 点曲げ試験により八ニカム寸法が材料の曲げ応答に及ぼす影響を評価した．得られた荷重たわみ関係を図 5 に示す．図より，試験片に対する八ニカムの相対寸法が小さくなるのに伴い曲げ剛性が増加していることがわかる．このような寸法効果は八ニカムサイズが増加するほど八ニカムの辺部に与えられるモーメントが増加した結果，図 6 のように微視的な変形が増加するためであり，多結晶体における結晶粒の寸法効果に対応するものであると考えられる．



(a) 八ニカム構造曲げ試験片

	$h$	$l$	$b$	$a$	$d$
LH-Small	22.5	90.0	20.0	35.0	20.0
LH-Middle	22.5	90.0	20.0	35.0	20.0
LH-Large	22.5	90.0	20.0	35.0	20.0

(b) 試験片寸法

図 4 八ニカム構造試験片の 4 点曲げ

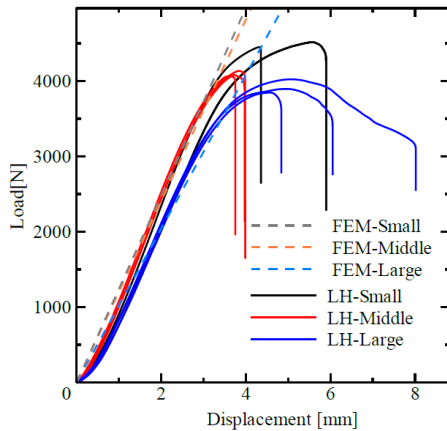


図 5 荷重たわみ関係

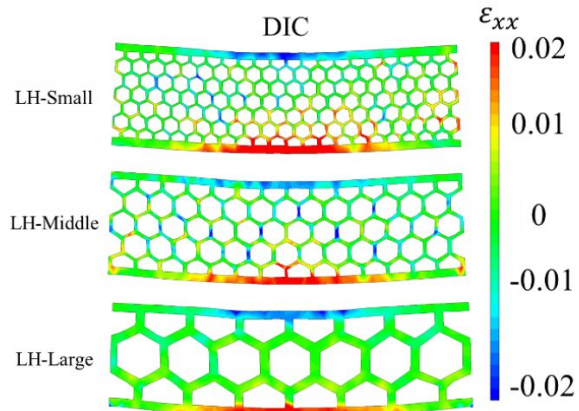


図 6 DIC によるひずみ分布

(3) 2 次均質化法を用いた多結晶金属の微視および巨視的不均一変形の評価

微視及び巨視的な不均一変形に及ぼす領域間の寸法比の影響を評価するために，2 次均質化法を用いて実験と同様な状況の数値解析を実施した．図 7(a) に示すような 3 種類の曲率の曲線状ゲージ部を有する試験片を巨視構造とし，それぞれの積分点に対して同図(b)に示す多結晶微視構造を与えて並列解析を実施した．数値解析得られた荷重変位線図を図 8 に示す．巨視的な試験片寸法に対する結晶粒の相対的な寸法が大きくなるほど最大応力以降の荷重が低下していることがわかる．また，このような荷重の低下は試験片の曲率が大きくなるほど顕著であった．図 9 に試験片に生じたひずみを実験と数値解析で比較した結果を示す．結晶粒径が小さければ，実験・解析とも最小断面部に変形が集中しているが，結晶粒径が大きいとき，実験では最小断面部以外にも変形が分散しているのに対し解析ではそのような変形の分散が表現できていない．これは均質化法を用いた解析では巨視的構造が均質材として取り扱われるためである．この結果から，微視的な不均質構造に由来する不均一変形を表現するためには，実験により得られた不均一変形の特徴を捉え，それを直接モデル化することが必要であることが示唆される．

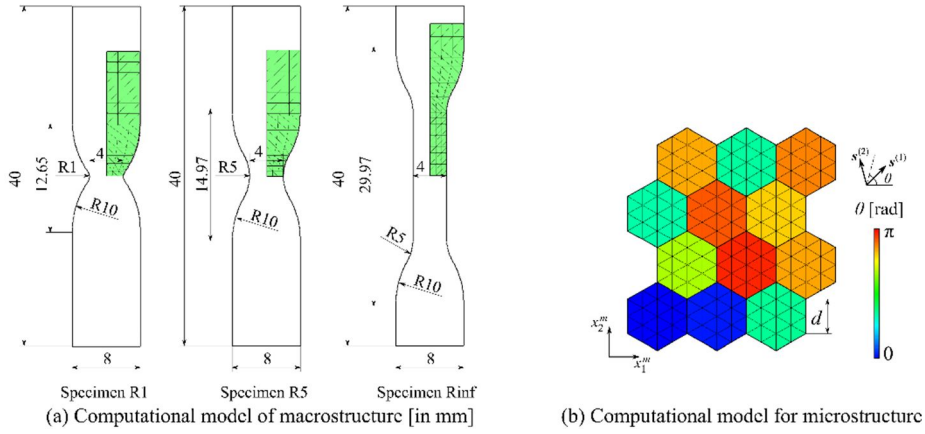


図7 2次均質化法による曲線ゲージ試験片の解析モデル

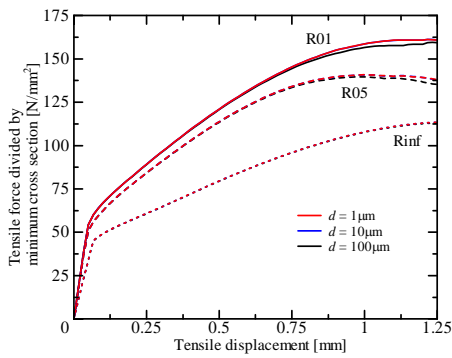


図8 荷重変位関係の解析結果

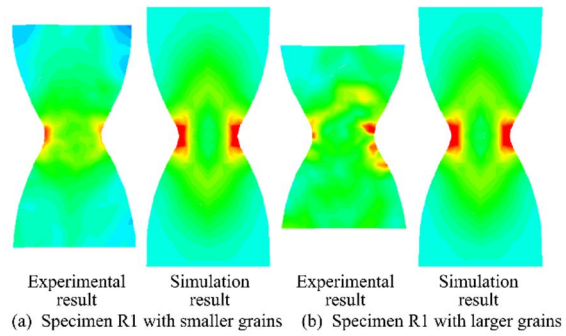


図9 ひずみ場の実験および解析結果の比較

(4) 微視構造に由来する不均一変形を評価するための非局所力学モデルの検討

2次均質化法による解析から、微視的不均質性に由来する不均一変形を表現するためには、実験により得られたひずみ場を直接モデル化する必要があることが示唆された。そこで本研究では、相当塑性ひずみ速度  $\dot{\epsilon}^{px}$  を局所ひずみ速度  $\dot{\epsilon}^{Lx}$  と非局所ひずみ速度  $\dot{\epsilon}^{NLx}$  に分け、局所ひずみ速度は塑性コンプライアンス  $c^x$  と局所応力  $\dot{\sigma}^x$ 、非局所ひずみ速度は塑性コンプライアンスのこう配  $d_i$  と非局所応力  $\dot{\sigma}^0$  によって与えられるとした非局所な力学モデルを構築した。

$$\dot{\epsilon}^{px} = \dot{\epsilon}^{Lx} + \dot{\epsilon}^{NLx} = c^x \dot{\sigma}^x + d_i \Delta x_i \dot{\sigma}^0 \quad (B)$$

さらに  $J_2$  流れ則に従って式(B)を多軸化することにより、有限領域に対して、式(C)に示す非局所弾塑性構成式を定式化した。

$$\dot{\sigma}_{ij}^x = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}^x - \sum_{\eta} 3G \left\{ c^x Q^{x\eta} + \left( \sum_{\xi} d^{x\xi} Q^{\xi\eta} f \right) \right\} \frac{\sigma_{ij}^{x'} \sigma_{kl}^{\eta'}}{\sigma^x \sigma^{\eta}} \dot{\epsilon}_{kl}^{\eta} = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}^x - \sum_{\eta} R_{ijkl}^{\eta} \dot{\epsilon}_{kl}^{\eta} \quad (C)$$

式(C)は、位置における応力ひずみ関係が、その位置の物理量だけでなく、強度がこう配を有する領域全体の变形によって変化することを示している。本構成式を用いることで、材料の微視構造の寸法に特徴づけられた不均一変形の記述が可能になると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Makoto Uchida and Yoshihisa Kaneko	4. 巻 92
2. 論文標題 Nonlocal multiscale modeling of deformation behavior of polycrystalline copper by second-order homogenization method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The European Physical Journal B	6. 最初と最後の頁 189, 11pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjb/e2019-100231-4	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 阪本 真士, 大塚 貴之, 内田 真	4. 巻 68
2. 論文標題 2次均質化法を用いた多結晶体の平面ひずみ圧縮変形における不均一変形の解析評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 pp. 839-844
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.68.839	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 Uchida Makoto, Kaneko Yoshihisa	4. 巻 4
2. 論文標題 Experimental modeling of nonuniform deformation in finite volume evaluation region of heterogeneous material	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Heliyon	6. 最初と最後の頁 e00578 ~ e00578
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.heliyon.2018.e00578	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 Akiyama Hiroyuki, Uchida Makoto, Kaneko Yoshihisa	4. 巻 794
2. 論文標題 Evaluation of Effect of Sample Size and Layer Direction on Mechanical Property of Specimen Manufactured by FDM-Type 3D Printer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 324 ~ 332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.794.324	査読の有無 無
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 Taniguchi Akito, Maeyama Takatoshi, Uchida Makoto, Kaneko Yoshihisa	4. 巻 794
2. 論文標題 Macroscopic and Microscopic Non-Uniform Deformations of Polycrystalline Pure Copper during Uniaxial Tensile Test with High Stress Gradient	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 246 ~ 252
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.794.246	査読の有無 無
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20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 M. Sakamoto, T. Otsuka and M. Uchida
2. 発表標題 Numerical Analyses of Micro- to Macroscopic non-Uniform Deformation During Plane Strain Compression Using Second-Order Homogenization Method
3. 学会等名 International Conference on Computational Plasticity 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阪本真士, 大塚貴之, 内田真
2. 発表標題 2次均質化法を用いた多結晶体の平面ひずみ圧縮変形における寸法効果の解析評価
3. 学会等名 日本塑性加工学会第70回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内田真, 前山貴俊, 兼子佳久
2. 発表標題 多結晶材料の巨視的なひずみ場の数値解析による予測手法の検討
3. 学会等名 日本機械学会M&M2018材料力学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前山貴俊, 内田真, 兼子佳久
2. 発表標題 巨視ひずみ勾配を受ける多結晶純銅の力学的応答に及ぼす試験片寸法の影響の実験的評価
3. 学会等名 日本機械学会M & M2018材料力学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阪本真士, 大塚貴之, 内田真
2. 発表標題 2次均質化法を用いた多結晶体の平面ひずみ圧縮変形における寸法依存性の解析評価
3. 学会等名 日本鉄鋼協会生産技術部門第151回圧延理論部会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八瀬奨之, 兼子佳久, 内田真
2. 発表標題 3Dプリンタで成形したハニカム周期構造はりの4点曲げ試験における力学的特性の評価
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第95期定時総会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林智也, 内田真, 兼子佳久
2. 発表標題 データ同化解析によるPPおよびPAIに生じる不均一変形予測に関する検討
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第95期定時総会講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 内田真, 谷口亮仁, 前山貴俊, 兼子佳久
2. 発表標題 応力こう配を有する多結晶純銅試験片の引張試験における微視および巨視領域における不均一変形
3. 学会等名 第67期日本材料学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前山貴俊, 内田真, 兼子佳久
2. 発表標題 巨視的ひずみ勾配を受ける多結晶純銅の微視的不均一変形の評価
3. 学会等名 日本実験力学会 2018年度年次講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Makoto Uchida, Akito Taniguchi, Yoshihisa Kaneko
2. 発表標題 Nonlocal multiscale modeling of deformation behavior of polycrystalline copper by second-order homogenization method
3. 学会等名 The 9th International Conference on Multiscale Materials Modeling (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akito Taniguchi, Takatoshi Maeyama, Makoto Uchida, Yoshihisa Kaneko
2. 発表標題 Macroscopic and Microscopic Nonuniform Deformation of Polycrystalline Pure Copper during Uniaxial Tensile Test with High Stress Gradient
3. 学会等名 The 14th Asia-Pacific Symposium on Engineering Plasticity and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Akiyama, Makoto Uchida, Yoshihisa Kaneko
2. 発表標題 Evaluation of Effect of Sample Size and Layer Direction on Mechanical Property of Specimen Manufactured by FDMtype 3D Printer
3. 学会等名 The 14th Asia-Pacific Symposium on Engineering Plasticity and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前山貴俊, 谷口亮仁, 内田真, 兼子佳久
2. 発表標題 多結晶純銅の微視的不均一変形に及ぼす巨視ひずみ勾配の影響の評価
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第94期定時総会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阪本真土, 大塚貴之, 内田真
2. 発表標題 2次均質化法を用いた多結晶材料の変形における寸法依存性評価
3. 学会等名 第69期日本材料学会学術講演会(新型コロナウイルスのため学会中止, 講演原稿のみ公表)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堤健将, 内田真, 兼子佳久
2. 発表標題 粗大結晶粒を有する純銅の曲げ変形に及ぼす試験片寸法の影響の評価
3. 学会等名 第69期日本材料学会学術講演会(新型コロナウイルスのため学会中止, 講演原稿のみ公表)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三田悠平,内田真,兼子佳久
2. 発表標題 磁石を用いた周期的微視構造を有する模型材料の変形挙動の評価
3. 学会等名 第69期日本材料学会学術講演会(新型コロナのため学会中止,講演原稿のみ公表)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林智也,内田 真,兼子佳久
2. 発表標題 データ同化を用いた熱可塑性樹脂の時間依存性挙動の予測
3. 学会等名 第6回材料WEEK 材料シンポジウムワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三田悠平,内田真,兼子佳久
2. 発表標題 周期的に磁石を配列させた模型材料を用いた引張変形挙動に及ぼすサイズ効果の検討
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 2021年

1. 発表者名 堤健将,内田真,兼子佳久,中谷亮太
2. 発表標題 4点曲げ試験における多結晶純銅の不均一な塑性変形に及ぼす試験片寸法の影響の評価
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 2021年

1. 発表者名 内田真, 堤健将, 兼子佳久, 阪本真士
2. 発表標題 多結晶純金属の微視および巨視的な不均一変形を評価するための非局所弾塑性構成式の定式化
3. 学会等名 第70期日本材料学会学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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

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