

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03425

研究課題名(和文)高精度多軸材料試験と機械学習により実現する板材成形シミュレーションの高度化

研究課題名(英文) Improvement of sheet metal forming simulation using precise multiracial material tests and machine learning

研究代表者

山中 晃徳 (Yamanaka, Akinori)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50542198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：金属板材の成形シミュレーションにおいて、板材の変形挙動を正確に予測するためには、多軸応力試験の結果に基づき材料モデルを同定する必要がある。本研究では、結晶塑性有限要素法を用いた多軸応力試験の数値シミュレーションと深層学習を用いて、材料モデリングを効率化するとともに成形シミュレーションを高度化することを主な目的とした。深層学習により訓練したニューラルネットワーク(NN)により、アルミニウム合金板の集合組織データから二軸引張変形時の応力-ひずみ曲線を高速に推定することが可能となった。さらに、訓練済みNNを用いて、集合組織データに基づく材料モデリングを可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果を公開し、一般に利用できる環境を構築することを目指して、アルミニウム合金の擬似集合組織の生成と極点図による可視化、訓練済みDNNを用いた応力-ひずみ曲線の推定、等塑性仕事面の可視化を可能とするWebアプリケーションを開発した。このアプリケーションでは、上記～の全てをWebブラウザ上で実行可能であり、多軸応力試験機や結晶塑性有限要素法のソースコードを所有しない場合でも、材料モデリングに必要な情報を得ることが可能となり、成形シミュレーションの高度化に寄与すると考える。

研究成果の概要(英文)：Calibration of yield functions and those parameters (material models) by multiaxial stress tests are important for performing accurate sheet metal forming simulation. However, the multiaxial stress tests needs special experimental apparatus. We have developed the deep learning-based material modelling methodology which estimated the biaxial stress-strain curves and the plastic work contour from crystallographic textured data of aluminum alloy sheets. We demonstrated that the trained neural network developed in this study successfully estimated the biaxial stress-strain curves from an image data of (111) pole figure within a few seconds. A web application was developed based on the trained neural network.

研究分野：計算材料科学

キーワード：機械学習 結晶塑性 アルミニウム合金 ニューラルネットワーク データ同化 フェーズフィールド法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の主要産業製品である自動車には、自動制御システムの搭載が急速に進んでいる。これにより制御系部品を新たに車載する必要があり、車体重量の増大、燃費低下が懸念されている。これを解決するため、車体パネル材を従来の鋼板から軽量なアルミニウム合金板へ転換することが期待されている。しかし、アルミニウム合金板はプレス加工で割れが生じるなどの加工不具合を生じやすく、アルミニウムボディの自動車は生産コスト高となる。したがって現在では、アルミニウム合金板のプレス加工時の加工不良防止、加工条件最適化を目的として、プレス成形加工の計算機シミュレーション(成形シミュレーション)が広く利用されている。この成形シミュレーションの正確さは、板材の複雑な変形挙動を表現しうる材料モデル(降伏関数とそのパラメータ)に大きく依存する。この材料モデルを同定するためには、多軸応力試験を実施する必要があるが、特殊な試験装置が必要であるなどの理由から、社会一般には普及していない。

これに対して研究代表者は、金属板材の変形挙動を詳細に解析可能な結晶塑性有限要素法(CPFEM)を用いて、成形シミュレーションを精度向上する研究を行ってきた。これまでに、CPFEMを用いた材料試験の数値シミュレーション(以後、数値材料試験と記す)方法を提案し、プレス加工において生じる二軸応力状態での金属板材の変形挙動を精度良く予測できることを示してきた(山中ら, 軽金属, 65 (2015), pp. 561-567. 橋本ら, 軽金属, 65 (2015), pp. 196-203.)。

他方、統計学に基づくデータ同化や機械学習を用いて、実験とシミュレーションを融合することで、シミュレーションの精度向上を目指した研究が活発である。研究代表者の研究(科研費挑戦的萌芽研究, 2013-2015年度, 課題番号 25630322)においても、データ同化によるシミュレーションに必要なパラメータ推定手法を確立してきた(K. Sasaki et al., Comput. Mater. Sci., 141 (2018), pp. 141-152.)。研究開始当初(2017年)においては、塑性力学や塑性加工学においても機械学習を利用した先行研究は国内外で報告されていた。しかしながら、これらの研究のほとんどは、単軸引張特性などの基礎的な機械的特性に着目した研究がほとんどであった。本研究の目的に掲げる、金属板材のプレス加工時の力学状態を対象とした研究は、見当たらなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記の背景を踏まえ、「機械学習やデータ同化を用いることで、CPFEMによるアルミニウム合金板の材料モデリングと成形シミュレーションを高度化および効率化することが可能か?もし可能な場合には、その限界はどこか?」を学術的な問いとして掲げた。この問いに答えるべく、研究代表者らが独自に開発してきたフェーズフィールド法による材料組織予測シミュレーション、多軸材料試験法とCPFEMによるアルミニウム合金板材の成形シミュレーションを機械学習により高度化することを目的とした。

### 3. 研究の方法

研究期間中の研究課題は、主に以下の2点とした。

- (1) CPFEMを用いた成形シミュレーションの重要な入力情報となる、アルミニウム合金板材の集合組織を高精度に予測するために、フェーズフィールド法やモンテカルロ(MC)法を用いた再結晶組織形成シミュレーション法を構築する。
- (2) ディープニューラルネットワーク(DNN)を用いた深層学習により、多軸応力状態でのアルミニウム合金板材の応力-ひずみ曲線などを高精度に推定する手法を構築する。構築したDNNを用いて、成形シミュレーションの高度化の限界を明らかにする。

研究の方法は、上記(1)に対しては、結晶塑性高速フーリエ変換(CPFPT)法とマルチフェーズフィールド法を用いる。また、定量的な再結晶組織予測を行うために、データ同化による材料パラメータ推定手法を開発する。上記(2)に対しては、深層学習を行うために必要な学習データの蓄積には、CPFEMに基づく数値材料試験、数値材料試験の検証には多軸応力試験を用いた。

### 4. 研究成果

以下に、上記の3.研究の方法で示した研究課題(1)と(2)に対応する成果を記す。

#### (1-1) アルミニウム合金板材の再結晶組織形成シミュレーション手法

アルミニウム合金板材の成形性は、集合組織に大きく依存する。集合組織は、板材の圧延加工時に形成する圧延集合組織と熱処理時に形成する再結晶集合組織があり、そのどちらも板材の成形性を決定づける。したがって、本研究ではCPFPT法を用いた変形集合組織形成シミュレーションとモンテカルロ法またはマルチフェーズフィールド法を用いた再結晶集合組織形成シミュレーションを構築した(山中, 塑性と加工, 58 (2017), pp. 371-375)。

図1に、アルミニウム合金板材の圧延加工時に板材表面で生じる塑性ひずみ分布のシミュレーション結果を示す。CPFPT法を用いることで、従来のCPFEMに比べて高速なシミュレーションが可能であり、板材内の3次元応力分布やひずみ分布を解析できることを示した。図1に示す塑性ひずみ分布や蓄積エネルギー分布に基づき変形集合組織を評価した。また、再結晶粒の核形成位置を推定し、再結晶集合組織形成シミュレーションの入力データとした。

MC 法を用いた再結晶組織形成シミュレーション結果として、図 2 に変形集合組織と再結晶集合組織の結晶方位分布関数 (ODF) を示す (前田ら, 計算工学講演会論文集, 22, (2017), p. E-03-4)。アルミニウム合金板材の変形集合組織である S 方位、Cu 方位、Brass 方位の集積は再現できないことが明らかとなった。再結晶集合組織の一つである、Cube 方位には弱い集積が再現できることを明らかにした。しかしながら、変形集合組織と再結晶集合組織ともに、定量的な再現できなかった。この原因の一つとして、再結晶粒の粒界エネルギーや粒界モビリティ (易動度) の異方性 (以後、粒界異方性と記す) を表す物性値やパラメータが不明であると考へ、次節に示すデータ同化手法を開発した。

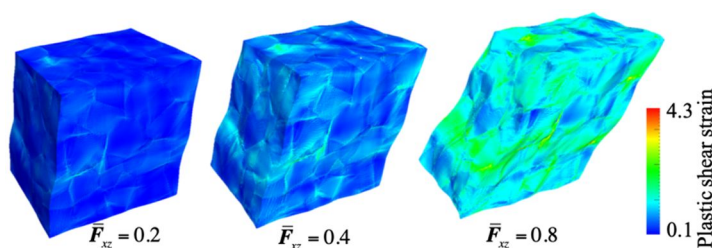


図 1 CPFIT 法を用いた変形組織形成シミュレーションで得られる塑性ひずみ分布

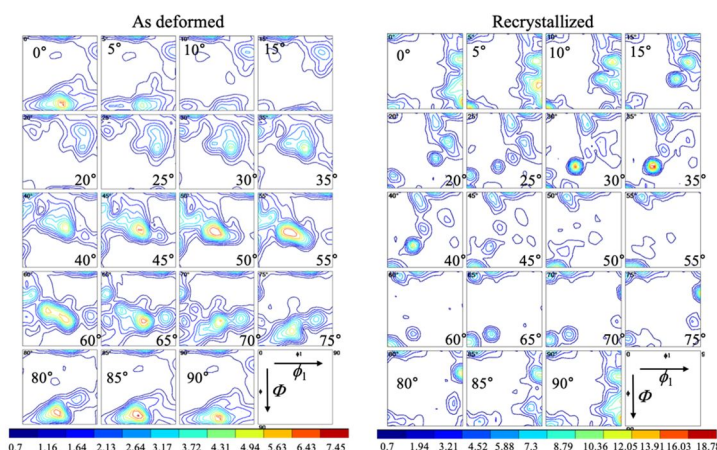


図 2 CPFIT 法および MC 法を用いた圧延集合組織 (左) と再結晶集合組織 (右) の ODF

### (1-2) データ同化による粒界異方性の逆推定手法の開発

再結晶集合組織の形成を定量的に予測するためには、実験データから粒界異方性を逆同定する手法が必要である。研究代表者らは、過去の研究 (K. Sasaki et al., Comput. Mater. Sci., 141 (2018), pp. 141-152.) において、アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) によるデータ同化手法を構築してきた。本研究では、マルチフェーズフィールド法による再結晶粒成長シミュレーションに EnKF を実装し、粒界異方性を逆推定する手法を開発した。

図 3 に、双子実験と呼ばれる数値実験において、再結晶粒界となる 7 対応粒界の粒界エネルギーおよび粒界モビリティのパラメータを推定した結果を示す (山中, 軽金属, 69 (2019), pp. 591-601.)。EnKF を用いたデータ同化により、結晶粒分布の時間変化

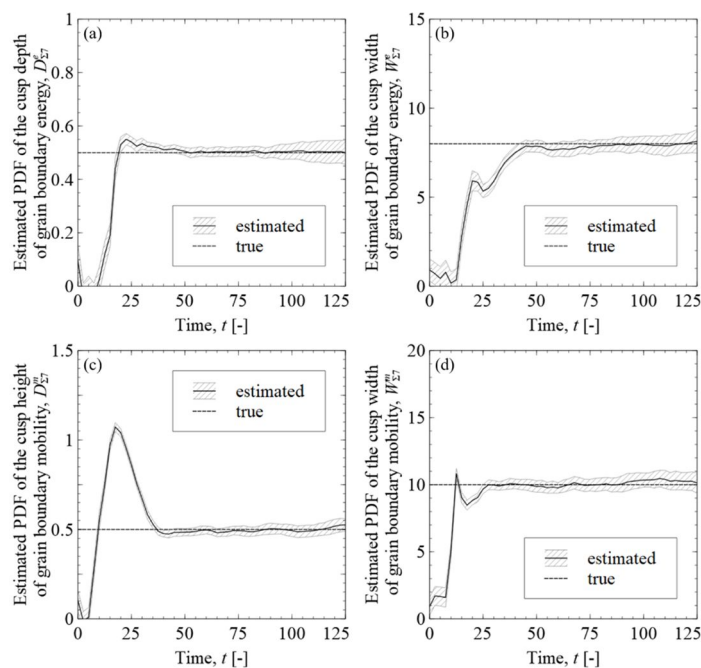


図 3 EnKF による粒界異方性パラメータの逆推定結果

情報のみから、粒界異方性を逆推定できることを実証した。ただし、EnKF を用いたデータ同化では、1 回のシミュレーションにおいて、条件異なる数 100 通りのシミュレーションを同時に実施する必要があり、計算コストが大きい。この問題を克服するために、最先端のデータ同化手法である局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) を基礎的なフェーズフィールドモデルに実装し、少ない計算コストでもパラメータ推定が実現できることを示した (A. Yamanaka et al., Mater Today Comm., (2020), in print)。今後の研究において、このデータ同化手法を再結晶組織形成シミュレーションに実装し、再結晶組織予測の定量性を向上させる必要がある。

### (2-1) 深層学習を用いたアルミニウム合金板材の二軸応力-ひずみ曲線の高速推定

DNN を用いた深層学習により、アルミニウム合金板材の集合組織情報から二軸引張変形時の

応力-ひずみ曲線を高速に推定する手法を開発した(肥沼ら, 塑性と加工, 61 (2020), pp. 48-55.)。深層学習においては、大量の訓練データが必要となる。本研究で必要な訓練データは、集合組織とそれに対応する応力-ひずみ曲線である。集合組織のデータを生成するために、アルミニウム合金の典型的な集合組織成分である Cube 方位、S 方位、Goss 方位、Cu 方位、Brass 方位を含む擬似的な集合組織データを生成するアルゴリズムを開発した。応力-ひずみ曲線は、擬似的な集合組織を入力とした数値材料試験により生成した。この手法により、5 万を超える訓練データを生成することに成功した。

図 4 に、深層学習により訓練した DNN を用いて推定したアルミニウム合金板の応力-ひずみ曲線を示す(肥沼ら, 日本塑性加工学会 2019 年度塑性加工春季講演大会講演論文集, (2019), pp. 241-242)。この訓練済み DNN は、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を組み込んでおり、集合組織の(111)極点図の画像を入力として、数値材料試験と同程度の精度で応力-ひずみ曲線を推定できることを実証した。訓練済み DNN で推定される応力-ひずみ曲線から等塑性仕事面を算出できるため、多軸応力試験機を所有していなくても、材料モデルの同定に有益な情報を与えることができる。

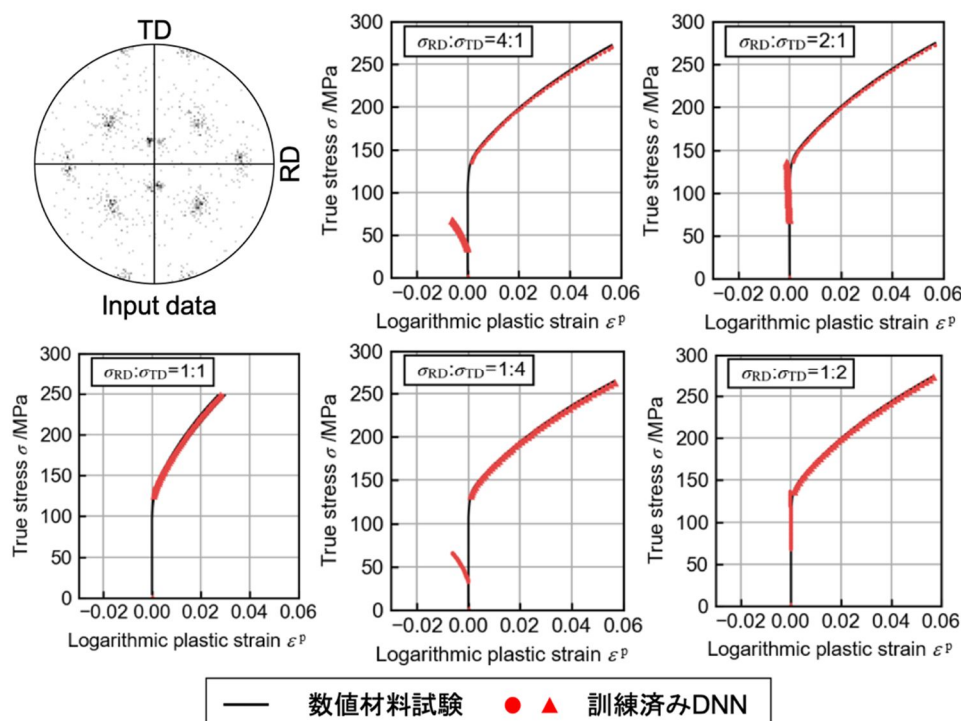


図 3 深層学習により訓練した DNN で推定したアルミニウム合金板材の二軸応力下での応力-ひずみ曲線 (Cube 方位の分率 0.24, S 方位の分率 0.46, ランダム方位の分率 0.3)

### (2-2) 深層学習を用いた材料モデルのパラメータ推定

深層学習を用いて、集合組織データから材料モデルのパラメータを直接推定する手法を開発した。本研究では、アルミニウム合金板材の変形挙動を精度よく再現できる材料モデル(降伏関数)として、広く使用される Yld2000-2d 降伏関数のパラメータを推定した。図 4 に深層学習により訓練した DNN を用いて推定した Yld2000-2d 降伏関数のパラメータを用いて算出した等塑性仕事面(低ひずみ域では、降伏曲面と一致する)を示す。DNN-2D と DNN-3D とともに、従来の方で求めた降伏曲面を精度よく推定できることを示した。

訓練済みの DNN を用いれば、降伏関数のパラメータは、数秒程度で推定可能である。本手法は、集合組織と降伏曲面の関係の理解を深め、成形性のよいアルミニウム合金板材の設計に貢献すると考える。

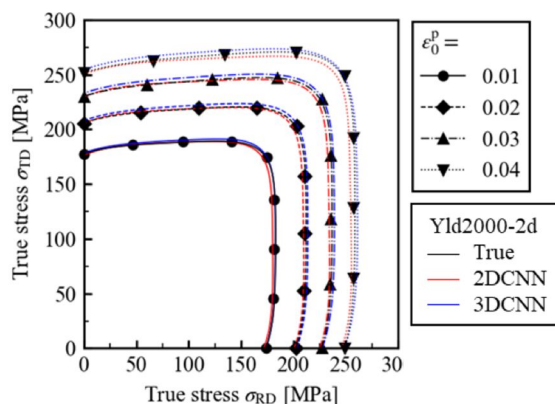


図 4 訓練済み DNN で推定した Yld2000-2d 降伏関数のパラメータから算出される等塑性仕事面(降伏曲面)。2DCNN と 3DCNN は、それぞれ入力データを(111)極点図と 3 次元結晶方位情報とする訓練済み DNN による推定結果を示す。

(2-3) 訓練済み DNN を活用した Web アプリケーションの開発

訓練済み DNN を用いることで、アルミニウム合金板材の応力-ひずみ曲線、材料モデルのパラメータおよび降伏曲面の変化を迅速に推定できる手法を開発した。本研究では、この成果を公開し、一般に利用できる環境を構築することを目指した。今後の研究でも機能拡充を進める計画ではあるが、上記成果(2-1)に基づき、擬似集合組織の生成と極点図による可視化、訓練済み DNN を用いた応力-ひずみ曲線の推定、等塑性仕事面の可視化を可能とする Web アプリケーションを開発した（肥沼ら、日本塑性加工学会 2019 年度塑性加工春季講演大会講演論文集, (2019), pp. 241-242）。このアプリケーション（図 5）により、上記①～④の全てを、Web ブラウザ上でマウスのみで操作可能である。この Web アプリケーションを公開することで、多軸応力試験機や CPFEM のプログラム（ソースコード）などを所有しない場合でも、材料モデリングに必要な情報を得ることが可能となり、成形シミュレーションの高度化に寄与する。

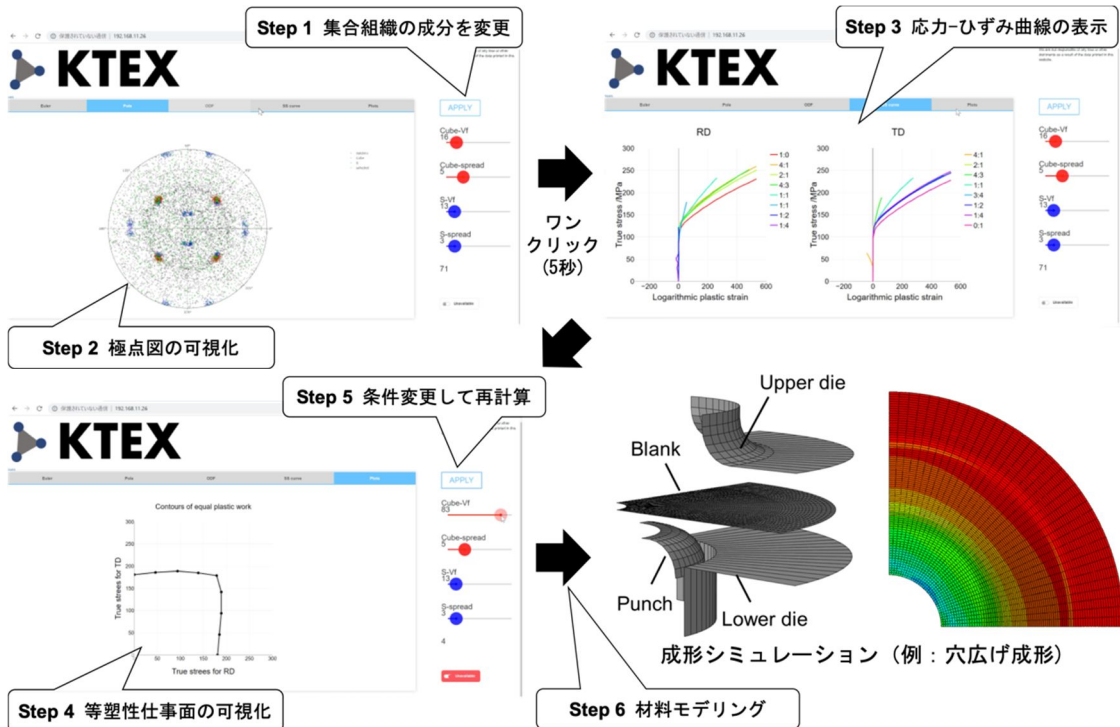


図 5 深層学習で訓練した DNN を活用した Web アプリケーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 肥沼康太, 山中晃徳, 渡邊育夢, 桑原利彦	4. 巻 709
2. 論文標題 深層学習を用いたアルミニウム合金板の集合組織に依存した応力-ひずみ曲線とr値の推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 塑性と加工	6. 最初と最後の頁 48-55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.9773/sosei.61.48">https://doi.org/10.9773/sosei.61.48</a>	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 Akinori Yamanaka, Kazuki Takahashi	4. 巻 not decided
2. 論文標題 Data Assimilation for Three-dimensional Phase-field Simulation of Dendritic Solidification using the Local Ensemble Transform Kalman Filter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Today Communications	6. 最初と最後の頁 accepted
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) not decided	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 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 0件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Kazuki Takahashi, Akinori Yamanaka
2. 発表標題 Data Assimilation for Three-dimensional Phase-field Simulation of Binary Alloy Solidification
3. 学会等名 Asian Pacific Congress on Computatioanl Mechanics (APCOM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akinori Yamanaka, Yuri Maeda
2. 発表標題 Bayesian Data Assimilation Solver for Phase-field Models with Python
3. 学会等名 Asian Pacific Congress on Computatioanl Mechanics (APCOM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akinori Yamanaka, Kazuki Takahashi
2. 発表標題 Ensemble-based data assimilation method for phase-field simulation of binary alloy solidification
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Phase-Field Modelling in Materials Science (PF19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akinori Yamanaka, Yuri Maeda and Kengo Sasaki
2. 発表標題 EnKF-based data assimilation for multi-phase-field simulation of grain growth
3. 学会等名 International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (ICCES 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山中晃徳, 肥沼康太, 上條龍之介, 渡邊育夢, 桑原利彦
2. 発表標題 機械学習と結晶塑性有限要素法を用いたアルミニウム合金板材の変形挙動推定
3. 学会等名 軽金属学会第137回秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山中晃徳, 上條龍之介, 肥沼康太, 桑原利彦
2. 発表標題 結晶塑性有限要素法に基づく数値二軸引張試験と深層学習による材料モデリング
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 肥沼康太、山中晃徳、上條龍之介、桑原利彦
2. 発表標題 敵対的生成ネットワークを用いたアルミニウム合金の集合組織の逆推定
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 前田悠里、庄司香織、山中晃徳
2. 発表標題 フェーズフィールドモデルに用いる逐次データ同化手法の推定精度評価
3. 学会等名 日本機械学会 第32回計算力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上條龍之介、肥沼康太、庄司香織、山中晃徳
2. 発表標題 深層学習による集合組織に依存したアルミニウム合金板材の変形特性の高速推定
3. 学会等名 日本機械学会 第32回計算力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 肥沼康太、上條龍之介、庄司香織、山中晃徳
2. 発表標題 アルミニウム合金のミクロ組織設計に資する条件付き敵対的生成ネットワークの構築
3. 学会等名 日本機械学会 第32回計算力学講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 高橋和希、庄司香織、山中晃徳
2. 発表標題 局所アンサンブル変換カルマンフィルタを用いた合金凝固シミュレーションのデータ同化
3. 学会等名 日本機械学会 第32回計算力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋和希、山中晃徳
2. 発表標題 合金凝固のフェーズフィールドシミュレーションへの局所アンサンブル変換カルマンフィルタの適用
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohta Koenuma, Akinori Yamanaka and Toshihiko Kuwabara
2. 発表標題 Prediction of biaxial tensile deformation behavior of aluminum alloy using crystal plasticity finite element method and machine learning
3. 学会等名 2019 TMS Annual Meeting & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Koenuma, Akinori Yamanaka, Ikumu Watanabe, Toshihiko Kuwabara
2. 発表標題 Prediction of Biaxial Tensile Deformation Behavior of Aluminum Alloy Sheets using Crystal Plasticity Finite Element Method and Machine Learning
3. 学会等名 The 9th International Conference on Multiscale Materials Modeling (MMM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 肥沼康太、山中晃徳、桑原利彦
2. 発表標題 結晶塑性有限要素法と深層学習による金属板材の二軸応力ひずみ曲線の推定
3. 学会等名 日本塑性加工学会 2019年度塑性加工春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山中晃徳、肥沼康太
2. 発表標題 データ同化による異方性降伏関数の逆問題推定
3. 学会等名 日本塑性加工学会 2019年度塑性加工春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 肥沼康太、山中晃徳、桑原利彦
2. 発表標題 深層学習を用いたアルミニウム合金板材の二軸引張変形の推定
3. 学会等名 軽金属学会第136回春期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山中晃徳、桑原利彦、佐々木健吾
2. 発表標題 データ同化によるアルミニウム合金の異方性降伏関数の推定
3. 学会等名 軽金属学会第136回春期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akinori Yamanaka, Yuri Maeda, Kengo Sasaki
2. 発表標題 Estimation of Grain Boundary Anisotropy using Multi-phase-field Model based on the Ensemble Kalman Filter
3. 学会等名 The 9th International Conference on Multiscale Materials Modeling (MMM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田悠里, 山中晃徳
2. 発表標題 結晶塑性FFT法による静的再結晶シミュレーション
3. 学会等名 第22回計算工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山中晃徳
2. 発表標題 結晶塑性有限要素法によるアルミニウム合金板の数値材料試験と成形シミュレーションへの応用
3. 学会等名 軽金属学会 第104回シンポジウム「アルミニウム合金板材の成形シミュレーション高精度化技術」
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京農工大学 山中研究室  
<http://web.tuat.ac.jp/~yamanaka/index.html>

## 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	渡邊 育夢  (Watanabe Ikumu)  (20535992)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・主任研究員    (82108)	
研究分担者	桑原 利彦  (Kuwabara Toshihiko)  (60195609)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・卓越教授    (12605)	