

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02476

研究課題名（和文）機械学習を駆使した金属板材成形の逆問題・最適化計算技術の開発

研究課題名（英文）Development of computational techniques for inverse problems and optimizations of sheet metal forming using 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）・教授

研究者番号：50542198

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：金属板材のプレス成形加工を再現する数値シミュレーションの高精度化のために、金属板材に生じる変形を模擬した多軸応力試験のデータに基づき、金属板材の変形を正確に解析できる数理モデル（材料モデル）が同定されてきた。しかしながら、この方法では、特殊な試験機と高度な実験スキルが必要である。この問題の解決のために、本研究では、有限要素法による成形シミュレーションに加えて、各種のデータ科学的手法（特に深層学習、ベイズ最適化、データ同化）を駆使することにより、金属板材内部の微細組織情報から機械的特性や成形加工性を定量的に順推定するのみならず、その逆推定や最適化も可能とする数値計算技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属板材をプレス成形加工する技術は、日本の主要製造業を支える重要技術である。しかし、国際競争の激化と少子高齢化のために、プレス成形加工に関する研究開発は一層の効率化・省人化が求められており、各種の機械学習方法、最適化理論、逆解析手法を駆使した技術が必要とされる。本研究では、深層学習やデータ同化を用いて、金属板材内部の微細組織情報から機械的特性や成形加工性を定量的に順推定するのみならず、その逆推定や最適化も可能とする数値計算技術を開発した。これは、金属板材の変形を再現するデジタルツインの構築であり、所望のプレス加工を実現するためのプレス成形加工条件の設計や新しい材料の設計に応用できる基礎となる。

研究成果の概要（英文）：In order to improve the accuracy of numerical simulation of sheet metal forming process, material models that accurately describe the plastic deformation of sheet metal have been identified based on multiaxial-stress test data. However, the conventional method requires special testing equipments and advanced experimental skills. In order to solve this issue, this study employs various data scientific methods, in particular, deep learning, Bayesian optimization, and data assimilation in addition to the sheet metal forming simulation using the finite element method. We developed several numerical calculation techniques that enable us to perform not only quantitative forward estimation of mechanical properties and formability of sheet metal from microstructural information, but also inverse estimation and optimization of microstructure.

研究分野：計算材料科学、計算固体力学

キーワード：データ同化 材料モデリング ベイズ最適化 深層学習 アルミニウム合金 材料設計 逆問題

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

金属板材をプレス成形加工する技術は、自動車産業などの日本の主要製造業を支える重要な技術である。しかし、国際競争の激化と我が国の少子高齢化のために、プレス成形加工に関する研究開発は一層の効率化・省人化が求められている。この問題の解決策のひとつに、プレス成形加工の数値シミュレーション(以下、成形シミュレーション)の援用がある。実現象を高精度に再現する成形シミュレーションを行うためには、プレス成形加工の際に金属板材に生じる変形を正確に解析できる数値モデル(以下、降伏関数とそのパラメータを含め材料モデルと呼ぶ)を決定する必要がある。従来、この材料モデルは、プレス成形加工の際に金属板材に生じる変形を模擬した多軸応力試験のデータに基づき同定されてきた。これにより、成形シミュレーションの精度が向上することは学術的に実証されてきたことである。しかしながら、多軸応力試験には特殊な試験機と高度な実験スキルが必要であり、これが産業界に広く普及するためのボトルネックとなっていると考えられる。

上記のような技術的課題に対して、本研究は、2017~2019年度に実施した科学研究費補助金 基盤研究(B)(課題番号:17H03425)から継続して、「機械学習を活用することで、金属板材の成形シミュレーションとその関連技術をどこまで高精度化できるか?その適用限界はどこか?」という学術的な問いの答えを追い求めることを背景としてきた。

2. 研究の目的

本研究では、「機械学習を駆使した金属板材成形の逆問題・最適化計算技術の開発」を研究課題名として、各種の機械学習方法、最適化理論、逆解析手法を駆使することにより、金属板材内部の微細組織情報から機械的特性や成形加工性を定量的に順推定するのみならず、その逆推定や最適化も可能とする数値計算技術を開発することを目的とした。研究期間は3年間であり、その間の研究項目は次の3項目に設定した。すなわち、金属板材内部の微細組織情報から材料モデル、機械的特性そして成形加工性を順推定する計算技術の開発、金属板材で所望の成形加工性を実現するための内部組織の最適設計技術の開発、金属板材の加工状態から材料モデルや加工状態を逆推定する計算技術の開発である。

3. 研究の方法

本研究では、上記2に記載した研究項目に対して、次の方法を採用した。 に対しては、前記基盤研究(B)(課題番号:17H03425)で構築した、金属板材内部の結晶粒内の原子配向(結晶方位および集合組織)から単軸変形時の応力-ひずみ曲線を深層学習により高速推定する技術(肥沼ら、*塑性と加工*, 61(2020)48-55 および K. Koenuma et al., *Materials Transactions*, 61(2020)2276-2283)を応用した。 に対しては、 の計算技術にガウス過程回帰に基づくベイズ最適計算を適用した。 については、デジタル画像相関法によるひずみ計測とベイズの定理に基づくデータ同化を融合させた新しい材料モデルの逆推定技術を開発した。

4. 研究成果

以下では、上記の研究項目①~③に対する研究で得られた成果を示す。

金属板材内部の微細組織情報から材料モデル、機械的特性そして成形加工性を順推定する計算技術の開発

本研究課題は、主に2020年度に実施した。前記の通り、研究代表者らが先行研究で開発した深層学習による金属板材の応力-ひずみ曲線の高速推定技術(以下、Deep Neural Network-based Numerical Material Test: DNN-NMTと記す)を応用し、二軸引張応力状態での応力-ひずみ曲線の推定技術を開発した。この研究成果は、学術論文(A. Yamanaka et al., Deep neural network approach to estimate biaxial stress-strain curves of sheet metals, *Materials & Design*, 195(2020)108970)に発表した。さらに、この研究成果を発展させ、アルミニウム合金板材の集合組織から直接的に、材料モデル(降伏関数)のパラメータを順推定できる深層ニューラルネットワークも構築し、以下記載の の研究に応用した。

金属板材で所望の成形加工性を実現するための内部組織の最適設計技術の開発

本研究課題は、主に 2021 年度に実施した。前記の DNN-NMT を応用することで、アルミニウム合金板内部の微細組織情報から力学特性（強度や加工性）および、材料モデルのパラメータを短時間（数秒以内）で推定可能となった。この計算技術を用いて、アルミニウム合金板に所望の成形加工性を発現させるための集合組織を最適設計する方法を開発した。この最適設計法は、ガウス過程回帰に基づくベイズ最適化を用いるため “Bayesian Texture Optimization using DNN-NMT : BayesTexOpt” と命名した。BayesTexOpt の概念図を図 1 に示す。この最適設計法では、はじめに金属板材の集合組織データ（図中記号 x ）から DNN-NMT により材料モデルのパラメータ同定を行う。次に、その材料モデルのパラメータを用いて、成形シミュレーションを行い、成形性を表す指標を目的関数（図中記号 $y(x)$ ）として評価する。その目的関数を最小化（または最大化）するように、ベイズ最適化で「より良い集合組織データ x 」を探索する。これを繰り返すことで、所望の成形性を実現するための集合組織の設計が可能となる。この最適設計法は、で開発した DNN-NMT を用いることで、集合組織データから数秒以内に材料モデルのパラメータを同定できることが重要である。

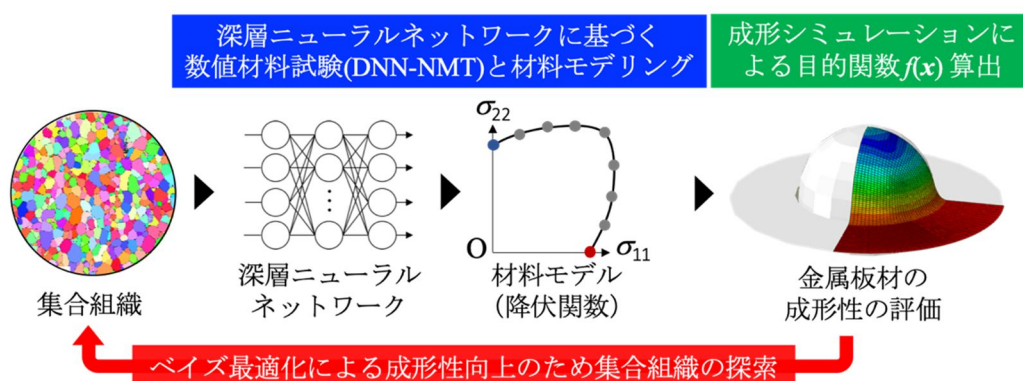
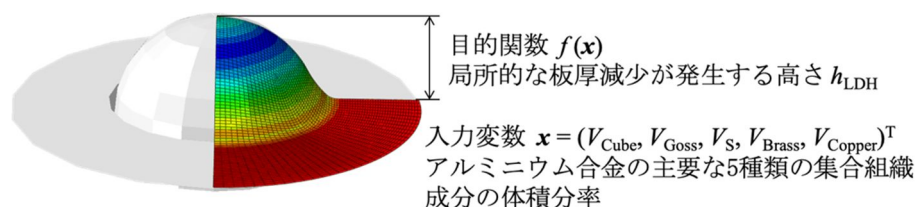


図 1 アルミニウム合金板に所望の成形加工性を発現させるための集合組織の最適設計法 BayesTexOpt (Bayesian Texture Optimization using DNN-NMT) の概念図



ベイズ最適化により得られた最適集合組織

反復回数	V_{Cube}	V_{S}	V_{Goss}	V_{Brass}	V_{Copper}	V_{Random}	$f(x)$ (改善量)
40	1.6%	36.8%	7.6%	3.9%	41.8%	8.3%	39.24 mm (+0.34)

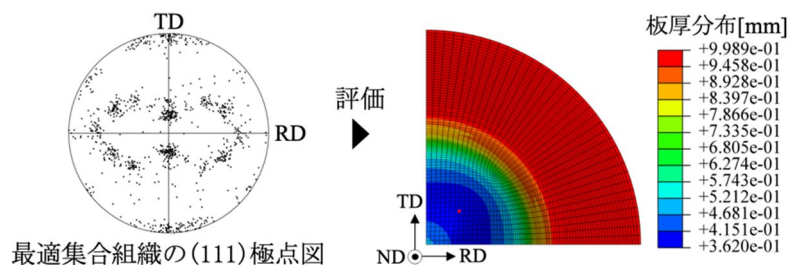


図 2 BayesTexOpt の適用事例：アルミニウム合金板の張出し加工性を改善するための集合組織の最適設計の目的関数の定義と最適設計により得られた集合組織

BayesTexOpt の適用可能性を検証するために、アルミニウム合金板に所望の Lankford 値（塑性変形の異方性を示す特性値）を付与するための集合組織を最適設計を行い、目的通りの最適設計が可能であることを検証した。この研究成果は、国際共著論文として発表した (R. Kamijyo *et al.*, Bayesian texture optimization using deep neural network-based numerical material test, *International Journal of Mechanical Sciences*, 23 (2022), 107285)。この学術論文に用いた

DNN-NMT や BayesTexOpt の計算結果を可視化するツール群は、GitHub リポジトリにて公開した (<https://github.com/Yamanaka-Lab-TUAT>)。

さらに図 2 に、BayesTexOpt をアルミニウム合金板の張出し加工性の改善に適用した事例を示す。ここでは、アルミニウム合金板に張出し加工を施した際に、板材にくびれ(最終的な破壊に至る前兆となる局所的な板厚減少)が生じるまでの張出し高さを最大化するための集合組織を最適設計した。図 2 下段には、最適設計した集合組織の(111)極点図とその集合組織を含むアルミニウム合金板を張出し加工した際の板厚分布を示す。この研究成果は、塑性加工分野の学会で口頭発表を行なった(上條ら, ニューラルネットワークと最適化理論を用いたアルミニウム合金板の成形性向上のための集合組織最適化, 日本塑性加工学会第 72 回塑性加工連合講演会, (2021))。

金属板材の加工状態から材料モデルや加工状態を逆推定する実験・計算技術の開発

2021 年度後半から 2022 年度は、データ同化を用いて実験・計測データから材料モデルのパラメータを逆推定する新技術の開発を行った。ここでは、図 3 に示すように、材料表面に塗布したランダム模様をデジタルカメラで撮影することにより、材料に生じるひずみを非接触で計測する 3 次元デジタル画像相関 (Digital Image Correlation: DIC) 法と、非逐次データ同化アルゴリズム

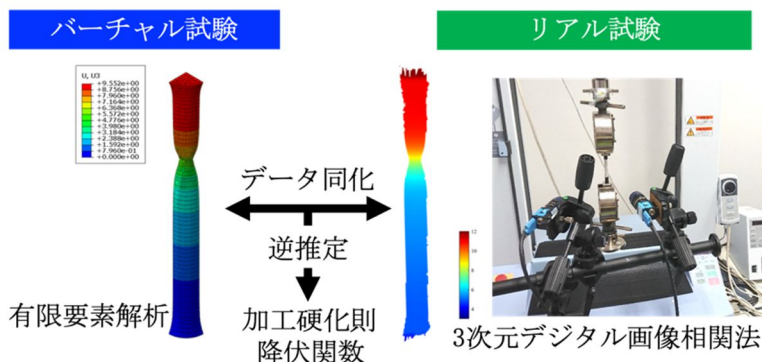


図 3 デジタル画像相関法によるひずみ計測と単軸引張試験(リアル試験)から得られる計測データを活用したデータ同化によるバーチャル試験と材料モデルのパラメータ逆推定方法の概要図

リズムであるアンサンブル 4 次元変分法 (Ensemble Four-dimensional Variational Method: En4DVar 法) を組み合わせ、単軸引張試験のデータから加工硬化則や異方性降伏関数のパラメータを逆推定する方法を開発した。この開発手法の適用可能性を検証するために、材料表面のひずみ分布の情報のみから、加工硬化則のパラメータを逆推定できることを数値実験により実証した。この研究成果は、国際会議にて口頭発表するとともに、国際共著論文として論文発表した (S. Sueki, A. Ishii, S. Coppieters, A. Yamanaka, Inverse characterization of a material model using an ensemble-based four-dimensional variational method, *International Journal of Solids and Structures*, (2023), in print)。さらに、数値実験で実証したことを、DIC 法で取得した実計測データを用いて確認も行い、図 4 に示すように逆推定した加工硬化則のパラメータを用いることで、実験で観察される材料の変形挙動(材料が破壊に至る兆候となるくびれ挙動)を高精度に再現することが可能であることを実証した。この研究成果は、学术论文に投稿した(末木, 石井, 山中, デジタル画像相関法とアンサンブル 4 次元変分法による材料モデルのパラメータ逆推定, 塑性と加工, (2023), 投稿中)。

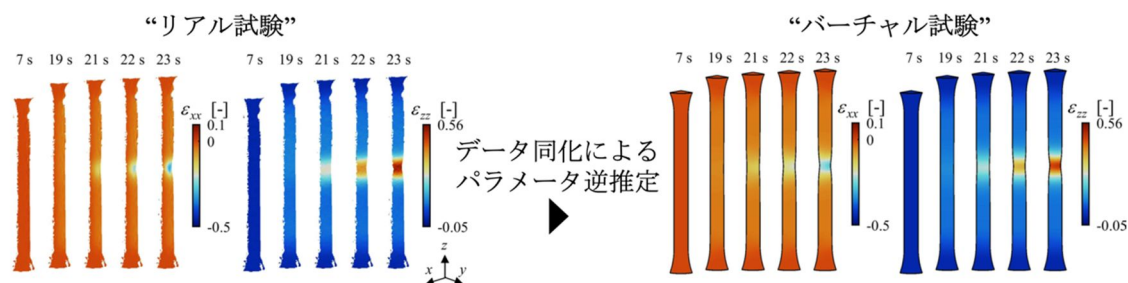


図 4 デジタル画像相関法を用いた単軸引張試験(リアル試験)とアンサンブル 4 次元変分法 (En4DVar) に基づくデータ同化により逆推定した加工硬化則のパラメータを用いて、バーチャル試験を実施することで再現したアルミニウム合金の変形挙動(くびれ挙動)

上記の材料モデルのパラメータの逆推定方法では、推定されたパラメータには単純な変形挙動の情報のみしか反映されていない可能性がある。そこで本研究では、上記の研究に加えて、プレス成形加工に供される金属板材の表面に生じるひずみ場をDIC法により計測し、そのひずみ場から材料モデルのパラメータを逆推定する手法を開発した（図 5 に概要図を示す）。開発した手法を、アルミニウム合金板材の穴広げ加工に適用した事例を図 6 に示す。従来の多軸応力試験（二軸引張試験）の実験データに基づき同定された材料モデルを用いた場合よりも、本研究の開発手法で逆推定した材料モデルのパラメータを用いた方が、成形シミュレーションによる材料の変形挙動を高精度に再現できることを実証した。さらに、この手法では、DIC 法で計測される材料表面のひずみ分布の情報のみから、材料モデルのパラメータだけではなく、板材の加工状態および摩擦係数などのプロセスパラメータも逆推定できることも実証した（須田, 石井, 山中, 非逐次データ同化を用いた板材成形の加工状態と材料モデルパラメータの同時推定, 2023 年度日本塑性加工学会春季講演大会, (2023)）。

本研究項目 に関する一連の研究成果は、関連国内学会の解説論文において紹介し、材料モデリングや成形シミュレーションの高精度化に向けて、計測と計算を融合した新しい手法であることを解説した（山中, 非逐次データ同化の塑性加工分野への応用, ぷらすとす（日本塑性加工学会誌）, (2023)）。なお、本研究項目 は、後続の科学研究費補助金 基盤研究（B）（課題番号：23H01297）において、金属材料の破壊挙動の予測に応用する計画である。

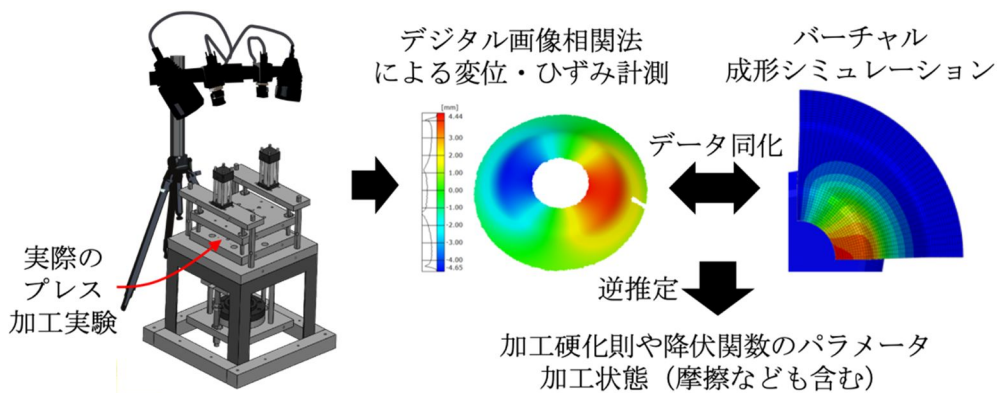


図 5 プレス成形加工に供される金属板材の表面に生じるひずみ場をデジタル画像相関法により計測し、得られた変位場・ひずみ場から材料モデルのパラメータや加工状態を逆推定する手法の概念図

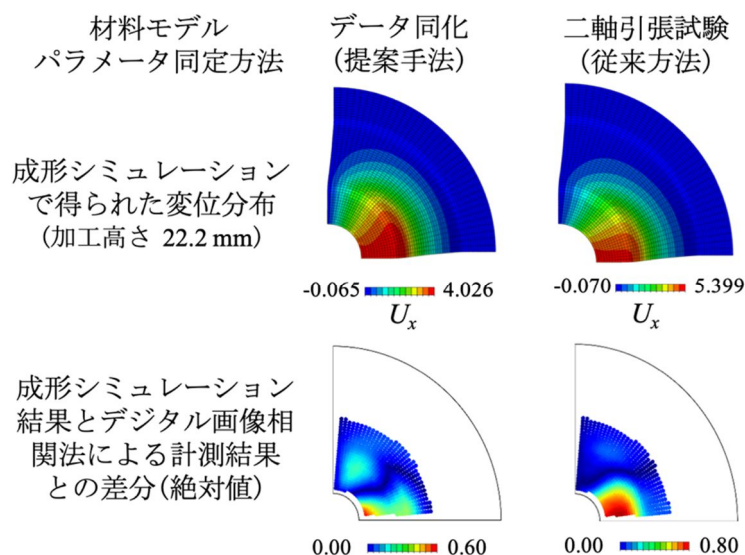


図 6 アルミニウム合金板材の穴広げ加工に図 5 に示した提案手法を適用し、板材の変形挙動を高精度に再現した事例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ryunosuke Kamijyo, Akimitsu Ishii, Sam Coppieters, and Akinori Yamanaka	4. 巻 223
2. 論文標題 Bayesian texture optimization using deep neural network-based numerical material test	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 107285 ~ 107285
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmecsci.2022.107285	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 山中晃徳	4. 巻 5
2. 論文標題 金属板材の数値材料試験のデータ科学的応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ぶらすとす	6. 最初と最後の頁 203 ~ 207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32277/plastos.5.52_203	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 Takahashi Kazuki, and Yamanaka Akinori	4. 巻 190
2. 論文標題 Quantitative three-dimensional phase-field modeling of dendritic solidification coupled with local ensemble transform Kalman filter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computational Materials Science	6. 最初と最後の頁 110296 ~ 110296
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.commatsci.2021.110296	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 Yamanaka Akinori, Kamijyo Ryunosuke, Koenuma Kohta, Watanabe Ikumu, and Kuwabara Toshihiko	4. 巻 195
2. 論文標題 Deep neural network approach to estimate biaxial stress-strain curves of sheet metals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials & Design	6. 最初と最後の頁 108970 ~ 108970
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matdes.2020.108970	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 Sae Sueki, Akimitsu Ishii, Sam Coppieters, Akinori Yamanaka	4. 巻 未定
2. 論文標題 Inverse characterization of a material model using an ensemble-based four-dimensional variational method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 112350 ~ 112350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsoIstr.2023.112350	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 Sae Sueki, Akimitsu Ishii, Akinori Yamanaka	4. 巻 なし
2. 論文標題 Bayesian data assimilation for inverse material modelling using 3D-digital image correlation measurement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of JSME International Conference on Materials and Processing 2022	6. 最初と最後の頁 Tu-3B-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Akinori Yamanaka, Kohta Koenuma, Ryunosuke Kamiyjo, Ikumu Watanabe and Toshihiko Kuwabara
2. 発表標題 Estimation of biaxial stress-strain curves for aluminum alloy sheets using deep neural network
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2020+1) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上條龍之介, 山中晃徳, 渡邊育夢, 桑原利彦
2. 発表標題 畳み込みニューラルネットワークを用いたアルミニウム合金板材の二軸引張変形挙動の推定
3. 学会等名 日本塑性加工学会 2021年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上條龍之介, 石井秋光, 山中晃徳
2. 発表標題 ニューラルネットワークと最適化理論を用いたアルミニウム合金板の成形性向上のための集合組織最適化
3. 学会等名 日本塑性加工学会 第72回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川崎真広, 山中晃徳, 高橋和希, 三好英輔
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フェーズフィールドシミュレーションのデータ同化: 数値実験による検証
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryunosuke Kamijyo, Akinori Yamanaka, Kohta Koenuma, Ikumu Watanabe and Toshihiko Kuwabara
2. 発表標題 Estimation of biaxial tensile deformation behavior of aluminum alloy sheet using deep learning
3. 学会等名 14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須田充彦, 上條龍之介, 石井秋光, 山中晃徳
2. 発表標題 金属板材成形シミュレーションへの非逐次データ同化の適用
3. 学会等名 日本塑性加工学会 2022年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山中晃徳, 須田充彦, 石井秋光
2. 発表標題 金属板材成形のための非逐次データ同化を用いた材料モデリング
3. 学会等名 日本塑性加工学会 第73回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 須田充彦, 石井秋光, 山中晃徳
2. 発表標題 非逐次データ同化を用いた板材成形の加工状態と材料モデルパラメータの同時推定
3. 学会等名 日本塑性加工学会 2023年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sae Sueki, Akimitsu Ishii, Eisuke Miyoshi, and Akinori Yamanaka
2. 発表標題 Material Model Calibration using 3D-DIC measurement and Bayesian Data Assimilation
3. 学会等名 The World Congress on Computational Mechanics & 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics 2022 (WCCM-APXOM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Michihiko Suda, Ryunosuke Kamijyo, Akimitsu Ishii, and Akinori Yamanaka
2. 発表標題 Calibration of Material Model for Sheet Metals Using Digital Image Correlation and Bayesian Data Assimilation
3. 学会等名 The World Congress on Computational Mechanics & 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics 2022 (WCCM-APXOM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022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 深層学習を用いた数値材料試験 (DNN-NMT) https://github.com/Yamanaka-Lab-TUAT/DNN-NMT DNN-NMTとベイズ最適化を用いた最適化ツール(BayesTexOpt) https://github.com/Yamanaka-Lab-TUAT/BayesTexOpt 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	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)	
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・主幹研究員 (82108)	
研究分担者	箱山 智之 (Hakoyama Tomoyuki) (20799720)	岐阜大学・工学部・助教 (13701)	

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		
ベルギー	KU Leuven		