

データ同化を用いた金属板材の材料モデリングと 超高精度プレス加工シミュレーションの実現

東京農工大学 大学院工学研究院 先端機械システム部門
教授 山中 晃徳
(2021 年度 重点研究開発助成 課題研究 AF-2021002-A2)

キーワード：プレス加工，材料モデリング，データ同化

1. 研究の目的と背景

プレス加工技術は、我が国のものづくり産業を支える最重要技術のひとつである。特に、自動車産業を背景として、金属板材のプレス加工技術の高度化は、国際競争力の維持のためにも必須の研究開発課題と位置付けられる。しかしながら、我が国では労働人口減少が加速するため、デジタルトランスフォーメーション（DX）の波に乗って、プレス加工技術のデジタル化や人工知能（AI）、Internet-of-Things（IoT）の活用は急務である。幸いなことに、塑性加工分野では、センサーデータを活用したプレス加工制御、加工不良検出、金型内部の見える化が長年研究されており、これまで開発されてきたセンシング・モニタリング技術を活かせば、塑性加工分野はプロセスインフォマティクスで他分野を牽引する大きな可能性を秘めている。

塑性加工分野では、有限要素法に基礎を置くコンピューターシミュレーションの利用は活発であり、プレス加工の仮想化が進められてきた。今後さらに求められることは、超高精度なプレス加工シミュレーションを短時間で実現する技術（いわばデジタルツイン）の確立である。そのためには、プレス加工シミュレーションに使用する降伏関数とそのパラメータ（以後、これらをまとめて材料モデルと記す）を簡易、かつ、正確に同定する材料モデリング方法の確立が必要である。材料モデリングの方法は、例えば多軸応力試験を利用する方法もあるが、特殊な試験装置や高度なスキルを必要とするなどの課題がある。さらに、多軸応力試験を利用して、材料モデルが同定できたとしても、塑性加工には摩擦状態などの不確定要素が多く、プレス加工シミュレーションの高精度化には容易ではない。特殊な多軸応力試験機を必要とせず、簡易な方法で、プレス加工シミュレーションを超高精度化するための材料モデリングを行い、同時に、プレス加工での未知状態（金型内部での摩擦状態など）を高精度に推定できる新しい手法が必要である。

そこで本研究では、ベイズの定理に基づくデータ同化を用いて、上記問題を解決することを目指した。データ同化は、地球科学、特に気象予報等の精度向上のために実用されており、数値シミュレーションと実験を統計数学で結びつける。これにより、実測できない状態の推定や未知パラメータの推定に有効である。塑性加工分野では、データ同化の適用例は少ないが、前述通り、センシング・モニタリ

ング技術が発展した塑性加工分野では、データ同化に使用できる実測データが豊富に存在し、これを利用することで、材料モデリングの簡易化やプレス加工シミュレーションの超高精度化を実現できる。よって本研究の目的は、データ同化を活用した材料モデリング手法と超高精度プレス加工シミュレーション技術の開発とし、その技術を産業界で利用しやすい形（ソフトウェア等）で提供することとした。

上記目的を達成するために、以下の研究項目を実施し、それぞれについて関連学会での研究成果発表および査読付き学術論文に発表した。

- ① 単軸引張試験とデジタル画像相関法（DIC）による計測データから異方性降伏関数のパラメータを逆推定する技術の構築^{1~4)}
- ② 金属板材の塑性加工での DIC 計測データから異方性降伏関数のパラメータおよび摩擦係数を逆推定する技術の構築^{5~7)}

次章以降では、上記①と②について報告する。

2. データ同化方法

本研究では、非逐次データ同化アルゴリズムであるアンサンブル 4 次元変分法（En4DVar 法）⁸⁾ と DMC-TPE 法⁹⁾ に基づくデータ同化手法を用いた。どちらのアルゴリズムを用いた場合でも、時刻 t における系の状態および推定対象のパラメータを含む拡大状態ベクトル \mathbf{x}_t と、実験データを表す観測ベクトル \mathbf{y}_t を定義し、 \mathbf{x}_t および \mathbf{y}_t を確率変数と見なして、ベイズの定理に基づき \mathbf{x}_t の確率密度関数 $p(\mathbf{x}_t)$ の推定を行う。そして、ある時間範囲 $t = 0 \sim t_{\text{end}}$ における実験結果と数値シミュレーション結果とのデータミスマッチを表す評価関数 $J(\mathbf{x}_0)$ を最小にするように、数値シミュレーションの初期条件やパラメータを推定する。評価関数 $J(\mathbf{x}_0)$ は、 \mathbf{x}_t および \mathbf{y}_t の確率密度関数がガウス分布に従うとする仮定のもと、最尤推定法に基づいて導出され、次式で表される。

$$J(\mathbf{x}_0) = \frac{1}{2} (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0^b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0^b) + \sum_{t=0}^{t_{\text{end}}} \frac{1}{2} (\mathbf{H}_t(\mathbf{x}_t) - \mathbf{y}_t)^T \mathbf{R}_t^{-1} (\mathbf{H}_t(\mathbf{x}_t) - \mathbf{y}_t) \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x}_0^b は系の初期状態と推定対象のパラメータの初期推定値を含むベクトルである。 \mathbf{B} と \mathbf{R}_i は、それぞれ背景誤差共分散行列と観測誤差共分散行列であり、それぞれ \mathbf{x}_0^b と \mathbf{y}_i に含まれる誤差の大きさを表す。 H_i は、数値シミュレーションで計算した状態量と実験データを比較するために、時間内挿や空間内挿を行う観測演算子である。

非逐次データ同化では、評価関数 $J(\mathbf{x}_0)$ を最小にする \mathbf{x}_0 が、求めるべき最適推定値である。En4DVar 法を用いたデータ同化においては、 $J(\mathbf{x}_0)$ の勾配 $\nabla J(\mathbf{x}_0)$ を用いた変分法による $J(\mathbf{x}_0)$ の最小化計算、最小化計算によって更新された \mathbf{x}_0 に含まれるパラメータを用いた数値シミュレーションの実施、および新たに実施した数値シミュレーションの結果に基づく $\nabla J(\mathbf{x}_0)$ の再計算を繰り返すことで、最適推定値を探索する。DMC-TPE 法を用いたデータ同化においては、 $\nabla J(\mathbf{x}_0)$ を計算することなく、ベイズ最適化を用いて評価関数 $J(\mathbf{x}_0)$ を最小化する。このため、DMC-TPE 法を用いれば、様々な問題にも容易に実装することが可能である。

3. 単軸引張試験と DIC 法によるひずみ分布データに基づく異方性降伏関数のパラメータ逆推定

単軸引張試験の結果と DIC 法で計測したひずみ場の実験データを用いて、En4DVar 法を用いた非逐次データ同化によって材料モデルのパラメータや材料の変形状態を推定する技術を開発した。本研究では、開発した技術の実証のために数値実験^{1,2)}を実施したほか、アルミニウム合金を対象として Hill'48 降伏関数の 6 つのパラメータと Swift の加工硬化則の 3 つのパラメータを逆推定した^{3,4)}。以下では後者の結果を示す。

3.1 単軸引張試験とデジタル画像相関法によるひずみ分布計測

材料モデルのパラメータ推定に必要な実験データを取得するために、図 1 に示すような A5052 アルミニウム合金のドッグボーン型試験片を用いた単軸引張試験を実施し、DIC 法によるひずみ分布計測を行った。この計測のために、試験片表面にはスプレー塗料によってスペckル（ランダム）パターンを塗布した。単軸引張試験は、島津製作所製の卓上形精密万能試験機オートグラフ AGS-X 10 kN を使用し、試験片の上部に引張速度 0.5 mm/s で変位を与えた。DIC 法によるひずみ計測のために、The Imaging Source 社製の産業用 CMOS カメラ DFK33UP1300 を 2 台用いて、フレームレート 10 Hz で撮影を行った。取得した画像の組をオープンソースライブラリである MultiDIC¹⁰⁾ を用いて解析することで、試験片表面の変位分布およびひずみ分布を算出した。

図 2 に、DIC 計測で得られた試験片表面に生じる z 方向変位および対数ひずみの分布を示す。試験開始後の 19 秒以降に、試験片平行部での変位分布が不均一となった。その後の 21 秒以降では、試験片中央部にくびれが発生し、進展した。本研究では、万能試験機のロードセルから得られる試験荷重と、図 2 に示す変位およびひずみ分布の計測

データを、材料モデルのパラメータを逆推定するために用いた。

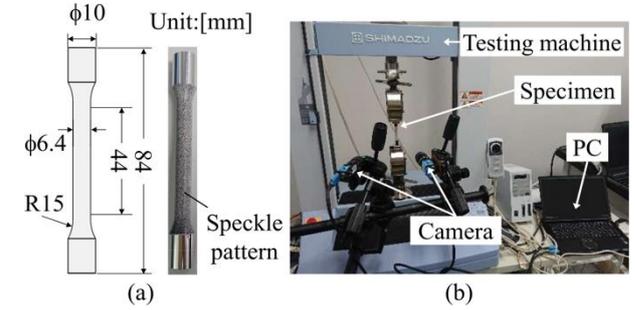


図 1 (a) 単軸引張試験に用いたドッグボーン型の A5052 アルミニウム合金試験片の形状。(b) 単軸引張試験と DIC 計測に用いた実験装置³⁾

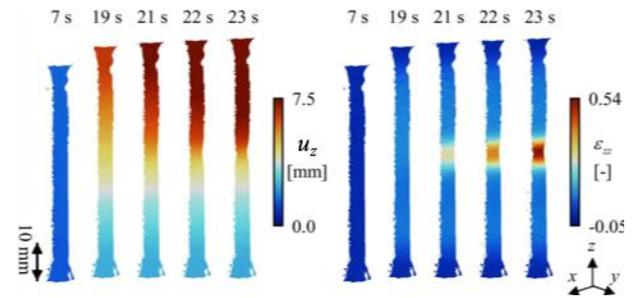


図 2 DIC 法により計測された単軸引張試験中の試験片の表面での変位 u_z とひずみ ϵ_z の分布³⁾

3.2 データ同化結果

汎用有限要素解析ソフトウェア Abaqus/Standard を用いて、単軸引張試験を模擬する数値シミュレーションとデータ同化を実施した。試験片のうち、つかみ部を除いた部分を 1/4 モデルを用いて解析を行った。低減積分ソリッド要素 (C3D8R) を用いて、有限要素モデルを 3430 要素で分割した。境界条件は、単軸引張試験を模擬するように設定したが、数値シミュレーションでのひずみ速度は、実験条件よりも大きく設定した。しかしながら、アルミニウム合金のひずみ速度依存性は一般に小さいため、その影響は無視できると考えた。物性値として、ヤング率は 70 GPa、ポアソン比は 0.33 とした。塑性特性は、塑性異方性を考慮し、次式の Hill'48 降伏関数を用いた。

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = 1 \quad (2)$$

ここで、 σ_{ij} ($i, j = x, y, z$) は、Cauchy 応力テンソルの成分である。 F, G, H, L, M, N は、材料の塑性異方性を表すパラメータである。材料の加工硬化は、等方性を仮定し、次式により表される Swift の加工硬化則によって記述した。

$$\bar{\sigma} = C(\bar{\epsilon}^p + \epsilon_0)^n \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 $\bar{\epsilon}^p$ は相当塑性ひずみである。 C 、 ω_0 、および n は、材料の加工硬化特性を表すパラメータである。Abaqus/Standard に、Hill'48 降伏関数および Swift の加工硬化則を導入するために、ユーザーサブルーチンライブラリである unified material model driver for plasticity (UMMDp)¹¹⁾ を用いた。本研究では、降伏関数および加工硬化則に含まれる合計 9 つのパラメータ (F 、 G 、 H 、 L 、 M 、 N 、 C 、 ω_0 、 n) を、En4DVar による推定対象とした。その他の計算条件は、文献 3) を参照されたい。

図 3 に、評価関数 $J(\mathbf{x}_0)$ の最小化計算における $J(\mathbf{x}_0)$ の値の推移を示す。繰り返し数の増加とともに $J(\mathbf{x}_0)$ が単調減少することから、最小化計算が適切に実施されたことがわかる。表 1 に、 \mathbf{x}_0^b の確率密度関数の近似におけるアンサンブル平均 (つまりパラメータの初期推定値) と、 $J(\mathbf{x}_0)$ の最小化計算の終了時点で得られた、パラメータの最適推定値を示す。いずれのパラメータも、負の値などの明らかに不合理な解になることなく、尤もらしい推定値を得た。

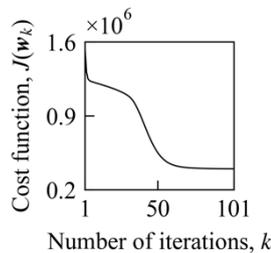


図 3 評価関数の最小化計算の結果³⁾

表 1 En4DVar 法で推定した Hill'48 降伏関数および Swift の加工硬化則のパラメータの初期推定値と最適推定値³⁾

Parameter	Initial guess value	Optimally estimated value
C [MPa]	543.6	357.1
ω_0 [-]	3.632×10^{-3}	3.728×10^{-3}
n [-]	0.2518	0.1075
F [-]	1.018	0.984
G [-]	0.996	1.097
H [-]	1.010	0.867
L [-]	3.024	3.015
M [-]	2.977	3.476
N [-]	2.953	2.665

図 4 に、DIC 計測した試験片表面の対数ひずみの分布と、パラメータの初期推定値および最適推定値を用いてそれぞれ実施した数値シミュレーションの結果を示す。初期推定値を用いて実施した数値シミュレーション、すなわち、En4DVar 法によるパラメータ推定前の数値シミュレーションでは、くびれが発生などの実験結果を再現できていない。一方で、最適推定値を用いた場合には、21 秒以降でくびれが発生することなど、実験で観察された変形挙動が再現されている。したがって、材料モデルに含まれる 9 つの

パラメータを逆推定し、その結果として、実験データに近づくように数値シミュレーションの精度を向上できることを実証した。

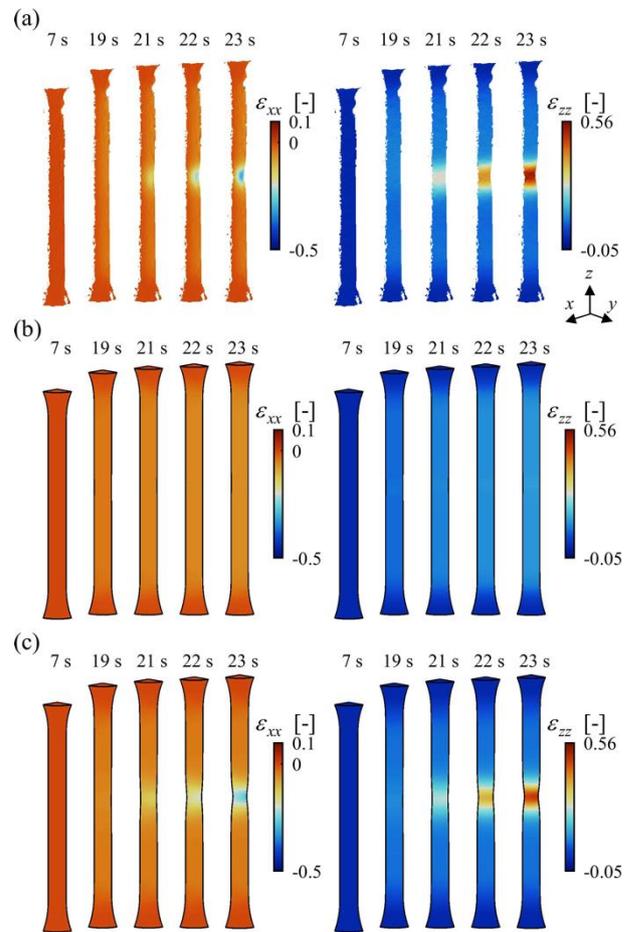


図 4 (a) DIC 計測した対数ひずみ (ϵ_{xx} と ϵ_{zz}) と (b) 表 1 に示すパラメータの初期推定値および (c) 最適推定値を用いたシミュレーションで得られた対数ひずみ (ϵ_{xx} と ϵ_{zz}) の比較³⁾

4. 金属板材の塑性加工の DIC 計測データに基づく異方性降伏関数のパラメータおよび摩擦係数の逆推定

金属板材の成形シミュレーションの高精度化のためには、成形シミュレーションに用いる材料モデルのパラメータのみならず金型間や金型/プランク間での摩擦係数を同定することが重要である。摩擦係数の測定には、摺動速度を再現した摩擦試験などが行われてきたが、本研究では、穴広げ成形試験および DIC 法で計測したひずみ分布データに対して、DMC-TPE 法に基づく非逐次データ同化を適用し、Yld2000-2d 降伏関数¹²⁾ のパラメータ⁶⁾ のみならずおよび摩擦係数⁷⁾ を逆推定する技術を開発した。

4.1 穴広げ成形試験

データ同化計算に必要な実験データを得るために、アルミニウム合金板の穴広げ成形試験と DIC 法によるひずみ場計測を実施した。供試材は、公称板厚は 1.0 mm の A5052-O アルミニウム合金板を用いた。図 5 に、穴広げ成形試験

に用いた金型、パンチとブランクの寸法を示す。x 軸と y 軸は、それぞれ板材の圧延方向 (RD) および圧延直角方向 (TD) と平行と定義した。金型の摩耗を低減するために、ブランクとパンチの間には、両面にワセリンを塗布したテフロンシートを挿入した。穴広げ成形試験においては、ブランクをビードで固定し、ブランク外縁部からの材料流入を抑えた状態のもとで、パンチ高さ $h = 24 \text{ mm}$ まで上昇させた。試験中は、上ダイ上部からブランクをデジタルカメラで撮影した。デジタルカメラの撮影周期は 3 Hz とする。ブランクに発生した変位分布およびひずみ分布の算出には、GOM Correlate Professional 2021 を使用した。

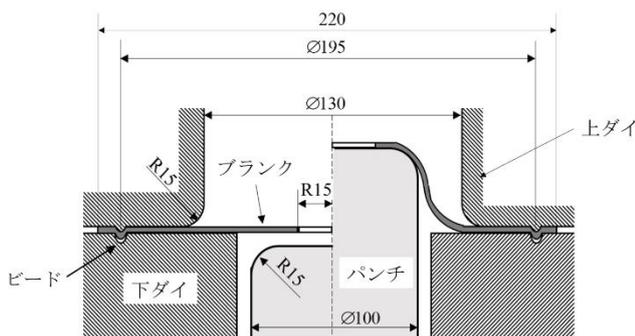


図5 穴広げ成形試験に用いた金型およびブランク寸法⁷⁾

4・2 データ同化結果

データ同化を行う際の観測ベクトルには、DIC 法で計測した変位分布およびひずみ分布の他に、単軸引張試験の測定結果を用いて計算した r 値を含めた。DMC-TPE 法を用いたデータ同化では、推定対象のパラメータの初期推定値と値域を定義する必要があり、Yld2000-2d 降伏関数の異方性パラメータの初期推定値は、 $\alpha_i = 1.0 (i = 1, 2, \dots, 8)$ および $M = 8.0$ とした。摩擦係数の初期推定値は、 $\mu_1 = 0.3$ および $\mu_2 = 0.03$ を用いた。異方性パラメータおよび次数パラメータの推定範囲は、 $0.7 \leq \alpha_i (i = 1, 2, \dots, 8) \leq 1.3$ と $6.0 \leq M \leq 10.0$ とした。摩擦係数の推定範囲は、実験においてはブランクとパンチ間にワセリンを塗布したテフロンシートを挿入するため $0.0 \leq \mu_1 \leq 0.6$ 、 $0.0 \leq \mu_2 \leq 0.06$ とした。穴広げ成形シミュレーションは、Abaqus/Standard を用いて実施し、Yld2000-2d 降伏関数および Swift の加工硬化則を導入するために、UMMDp¹¹⁾ を用いた。

図6に、データ同化の過程で得られた評価関数 $J(x_0)$ の推移を表す。成形シミュレーションの繰り返しの伴い、 $J(x_0)$ は減少し、 $J(x_0)$ の最小値の更新に成功した。表2に、Yld2000-2d 降伏関数のパラメータおよび摩擦係数の推定結果を示す。次数 M は、面心立方格子金属の推奨値に近いことがわかる。摩擦係数 μ_2 は、初期推定値から大きく減少したことがわかる。

表2に示したパラメータおよび摩擦係数の最適推定値を用いて実施した穴広げ成形シミュレーションの計算結果が、DIC 法で計測した実験データを再現可能か検証した。図7に、パンチ高さ 22.2 mm の時点における、最適推定値

を用いた穴広げ成形シミュレーションで得られた x 軸方向変位 U_x と、DIC 法での計測結果との差分 (絶対値) を示す。最適推定値を用いることで、DIC 法での計測結果に即した変位分布を得られることが確認できる。すなわち、本研究で開発したデータ同化手法を用いることで、1 回の実験データから降伏関数のパラメータおよび摩擦係数の逆推定が可能となり、成形シミュレーションの精度が向上することが示された。

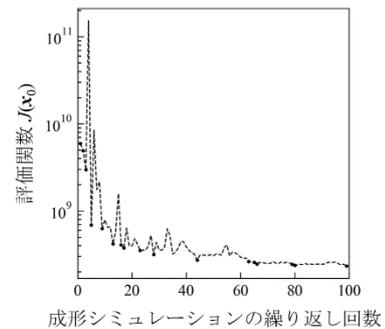


図6 DMC-TPE 法によるデータ同化計算から得た評価関数 $J(x_0)$ の推移。図中の黒点は、 $J(x_0)$ の最小値が更新されたことを示す⁷⁾。

表2 データ同化による Yld2000-2d 降伏関数のパラメータ ($\alpha_1 \sim \alpha_8, M$) および摩擦係数 (μ_1, μ_2) の最適推定値⁷⁾

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
1.082	0.928	1.163	1.088	1.051	1.187
α_7	α_8	M	μ_1	μ_2	
0.871	0.736	7.892	0.0961	0.0515	

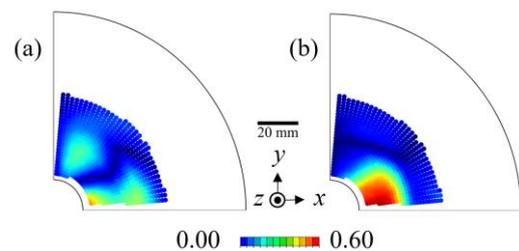


図7 (a) DMC-TPE 法によるデータ同化と (b) 二軸引張試験の結果から推定した Yld2000-2d 降伏関数のパラメータおよび摩擦係数を用いて算出したブランク表面での x 軸方向変位 U_x と DIC 法による計測結果との差分 (絶対値による誤差評価)。(b) の条件では、従来研究を参考に摩擦係数 $\mu_1 = 0.3$ 、 $\mu_2 = 0.03$ と設定した⁷⁾。

5. まとめと今後の展開

本研究では、データ同化を活用した材料モデリング手法と超高精度プレス加工シミュレーション技術の開発を目的とし、最終的に開発した技術を産業界で利用しやすい形 (ソフトウェアなど) で提供することを目指した。研究期

間内に、開発したデータ同化手法を用いた材料モデリング手法を実証するために、はじめにアルミニウム合金の単軸引張試験と DIC 計測したひずみ分布データから Hill'48 降伏関数と Swift 式のパラメータの逆推定が可能であることを示した。次に、アルミニウム合金板材の穴広げ加工試験との DIC 計測したひずみ分布データから Yld2000-2d 降伏関数のパラメータおよび摩擦係数が逆推定であることを実証した。これらの研究開発成果は、関連学会での解説論文でも報告した^{1,3)}。現在は、開発したデータ同化技術を基礎として、国内企業とともにデータ同化ソフトウェア開発を進めている。さらに、開発技術の応用先として、フェーズフィールド法による金属板材でのき裂進展シミュレーションにも適用し、DIC 計測したひずみ分布データからフェーズフィールドモデルのパラメータ逆推定、それによるき裂進展挙動の再現精度向上が可能であることを実証した^{1,4)}。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、重点研究開発助成を賜りました公益財団法人天田財団に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 末木咲衣, 石井秋光, 山中晃徳, 日本計算工学会第 27 回計算工学講演会講演予稿集, (2022), C-11-03.
- 2) Sueki, S., Ishii, A., Coppieters, S., Yamanaka, A., *Int. J. Solids Struct.*, **279** (2023), 112350.
- 3) 末木咲衣, 石井秋光, 山中晃徳, 塑性と加工, **64** (2023), 195-201.
- 4) Sueki, S., Ishii, A., Yamanaka, A., *Mater. Trans.*, **65** (2024), in print.
- 5) 須田充彦, 上條龍之介, 石井秋光, 山中晃徳, 日本塑性加工学会 2022 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2022), 139-140.
- 6) Sasaki, K., Suda, M., Ishii, A., Coppieters, S., Yamanaka, A., SSRN, (2024), <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4770081>
- 7) 須田充彦, 石井秋光, 山中晃徳, 日本塑性加工学会 2023 年度塑性加工春季講演大会講演論文集, (2023), 21-22.
- 8) Liu, C., Xiao, Q., Wang, B., *Mon. Weather Rev.*, **136** (2008), 3363-3373.
- 9) Ishii, A., Yamamoto, A., Yamanaka, A., *STAM Methods*, **3** (2023), 2239133.
- 10) Solav, D., Moerman, K. M., Jaeger, A. M., Genovese, K., Herr, H. M., *IEEE Access*, **6** (2018), 30520-30535.
- 11) Takizawa, H., Kuwabara, T., Oide, K., Yoshida, J., *J. Phys. Conf. Ser.*, **734** (2016), 032028.
- 12) Barlat, F., Brem, J. C., Yoon, J. W., Chung, K., Dick, R. E., Lege, D. J., Pourboghrat, F., Choi, S.-H., Chu, E., *Int. J. Plast.*, **19** (2003), 1297.
- 13) 山中晃徳, ぶらすとす, **6** (2023), 248-252.
- 14) Yamanaka, A., Suda, M., Sueki, S., Sasaki, K., Funamoto, R., *Mater. Res. Proc.*, **41** (2024) 1190-1195.