

塑性加工における材料変形挙動の in-situ 観察とその応用

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

講師 杉原 達哉

(2019 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2019038-C2)

キーワード：トライボロジー，塑性変形，可視化，離形抵抗

1. 研究の目的と背景

近年、多品種少量生産の要求は塑性加工分野においても強まっており、単純な生産性の追及のみならず、寸法精度や表面性状、外観上には現われない残留応力などの品質に関わる多様なニーズに対して、低コストで、かつ自在に作り分ける技術が強く求められている。こういった要求を実現するために、加工中の材料変形や材質変化、金型-材料間の界面現象をより忠実に把握し、その上で対象に応じた最適なプロセスを決定するための技術が必要とされている^[1]。しかしながら、塑性加工では金型内で材料の塑性変形が完結するため、実際に型内で材料の塑性変形がいかに行進するかが容易にはわからない。そこで従来は、型内に様々なセンサやセンシング技術を導入することで、材料の変形挙動に関連する可能な限り多くの情報の獲得を試みる方法や、数値シミュレーションによって型内現象を再現する方法などが検討されてきた。しかしながら、前者は測定結果から現象を推定しているに過ぎないこと、後者は現象のモデル化の精度と数値計算上の精度が常に課題になることが問題となっており、塑性加工における材料の変形挙動を直接的に観察する手法の構築が強く求められている。

そこで本研究では、塑性加工における材料変形挙動を in-situ 観察するための新たな技術の確立を目的に、PIV を援用した塑性加工現象の可視化技術を構築することを試みた。そして、同技術を援用した応用技術の一例として、塑性加工における金型-材料間の凝着現象と材料の表面積拡大の関係について、詳細な検討を行った。

2. PIV を援用した材料変形挙動の可視化装置の開発

本研究では、塑性加工における金型-材料間近傍における材料の塑性変形挙動を模擬するために、インデンタ（くさび状圧子）による押し込み試験を援用した実験装置の開発を行った。図 1 に、本研究で開発した実験装置の概要を示す。同図に示すように、ガラスによって材料のガラス面側への変形を拘束することによって、ガラス面に沿って平面ひずみ状態を実現する。この状態において、押し込み試験中のインデンタ近傍の材料の変形挙動を高速度カメラで撮影した。図 2 に、本研究で使用したインデンタを示す。インデンタは高速度工具鋼鋼材製のものを使用し、インデンタ先端は超精密研削加工によって R0.02 以下に仕上げている。本研究では、塑性加工中に発生する様々な変形場を再現するために、異なる先端角（30, 60, 90, 120°）

を有するインデンタを用意した。また、加工対象の材料として、焼きなまし処理を行った純アルミニウムを用いた。

さらに、本研究では撮影した画像に対して粒子画像流速計測法（PIV）を適用することによって、材料の変形挙動の可視化を行った^[2,3]。図 3 に、PIV 解析のフローを示す。

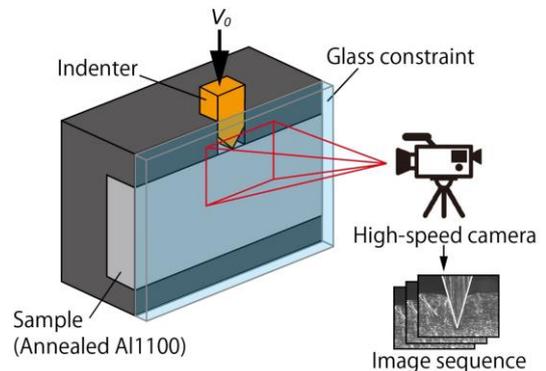


図 1 塑性加工の In-situ 観察装置

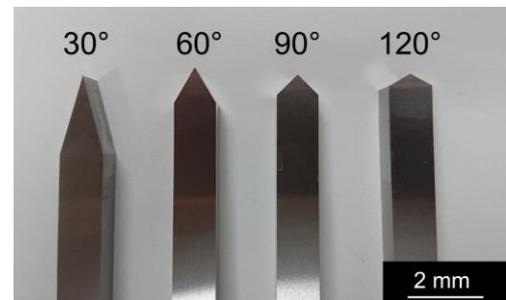


図 2 本研究で使用したインデンタ

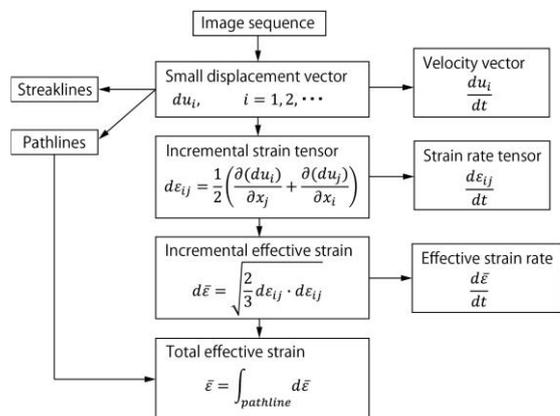


図 3 PIV 解析のフロー

高速度カメラで撮影したデータを同フローに基づいて処理することで、インデンタ近傍における材料内部の速度分布、ひずみ速度分布、ひずみ分布、すべり線場などの情報が獲得できる。

3. In-situ 観察に基づく材料の変形挙動の可視化

本研究では、まず先端角 30° のインデンタを用いた場合の押し込み試験（押し込み速度 1 mm/s ）について、材料の塑性変形挙動の可視化を試みた。図 5 は、同条件におけるインデンタ近傍の材料の経時変化を示している。同図に示すように、インデンタ側面に対して直交方向に引いたすべり線場（図 5 (a)）の変化を追うことで、同条件では材料がインデンタ側面に巻き込まれるようにして変形していることがわかる。これは、インデンタ近傍の材料は、主にインデンタ側面-材料間の摩擦力によって、せん断変形していることを示している。

さらに、塑性加工中に発生する様々な変形場を再現するために、異なる先端角 ($60, 90, 120^\circ$) を有するインデンタを用いて押し込み試験を行った。図 6 に、各先端角を有するインデンタ近傍における、材料のすべり線場を示す。同図に示すように、先端角 30° のインデンタ（図 4 (c)）では、材料の変形はインデンタ側面近傍のみで生じていたのに対して、先端角が 60° （図 5 (a)）、 90° （図 5 (b)）と大きくなるにつれて、材料の変形領域が拡大していることが確認できる。さらに、先端角 120° のインデンタを用いた場合においては（図 5 (c)）、先端角の小さいインデンタで見られたようなインデンタ側面に巻き込まれるようなせん断変形挙動が消失し、インデンタ近傍の材料はせん断変形を生じることなく沈み込んでいることがわかる。以上のように、インデンタの先端角度の変化とともに、材料の変形挙動が大きく変化していることが示された。

さらに図 7 は、先端角 30° のインデンタを用いた場合について、材料内部における垂直方向 (V_V) および水平方向の速度分布 (V_H) を示した結果である。同図からわかるように、同条件では V_V はインデンタ側面-材料界面のごく近傍において局所的に生じているのに対して、 V_H は材料内部においてほぼ一様に分布している。これは、先端角の小さいインデンタの近傍においては、インデンタ側面-材料界面の摩擦力によってせん断変形が生じているのと同時に、インデンタの押し込みによって材料が左右方向に分離していることを示している。一方で、図 8 は、先端角 120° のインデンタにおける各方向の速度分布を示している。同図に示すように、先端角の大きいインデンタ直下では、材料内部にはインデンタの押し込み速度 (1 mm/s) とほぼ同程度の速度で鉛直方向に移動している領域が広く存在しており、水平方向への変形はこの領域外でのみ生じている。これは、先端角の大きいインデンタの直下においては、材料が圧縮変形を受けることによって加工硬化領域 (Dead metal zone) を形成し、この領域がインデンタと一体となって材料を変形させていることを示している。

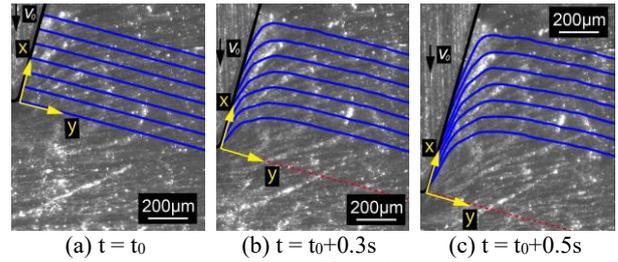


図 4 材料のすべり線場 (先端角 30°)

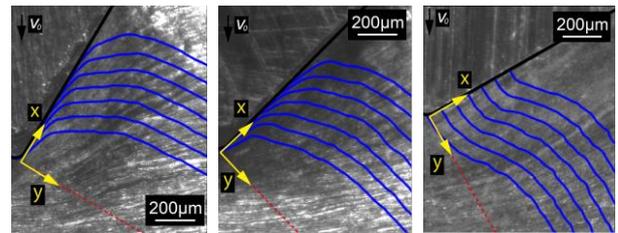


図 5 材料のすべり線場 ($t = t_0 + 0.5\text{ s}$)

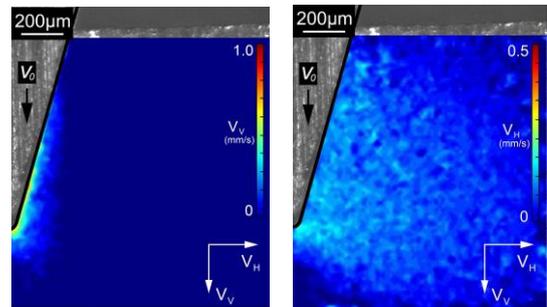


図 6 材料内部における速度分布 (先端角 30°)

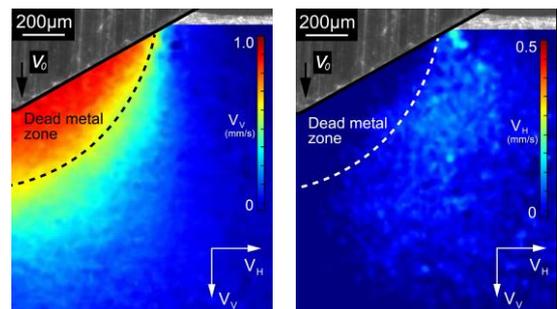


図 7 材料内部における速度分布 (先端角 120°)

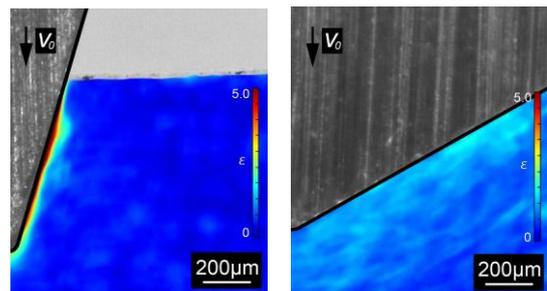


図 8 材料内部におけるひずみ分布

これらのインデンタ先端角度の違いに起因する材料変形挙動の変化は、図8に示す材料内部におけるひずみ分布にも反映されており、先端角30°のインデンタ（図8(a)）ではインデンタ側面近傍のみに局所的にひずみが集中しているのに対して、先端角120°のインデンタ（図8(b)）では、インデンタ下部の広範囲にわたってひずみが分布していることがわかる。

これらの結果に示すように、本開発装置においては、先端角の異なるインデンタを用いることによって、材料の切断による分離や摩擦摺動にともなうせん断変形、ならびに、材料の圧縮変形やそれにとまう加工硬化領域の形成など、塑性加工の材料-金型間で生じる様々な変形場を再現することができ、さらにそれらにおける材料流れや変形挙動の分布を定量的に評価できることが明らかとなった。

4. In-situ 観察の援用による金型-材料間の凝着現象の解明

4・1 表面積拡大と凝着力・離形抵抗

本研究では、開発した装置を用いた応用事例として、塑性加工における金型-材料間の凝着現象の解明を試みた。材料の大規模な塑性変形をとまう塑性加工においては、表面積が大きく拡大することにとまない、材料表面で極めて活性な新生面の露出が生じるため、材料-金型/工具間で著しい凝着が発生する^{4,6)}。この凝着の発生にとまない、金型から成型品を取り出す際に著しい離形抵抗が発生し、金型損傷や加工面品位低下の原因となることが知られている。

本研究では、表面積拡大と凝着力・離形抵抗の関係を評価するために、表面積拡大の指標として、表面積拡大量、および、表面積拡大比を定義した。図9は、先端角 2α のインデンタを、圧入距離 D だけ押し込んだ状態を示している。同図に示すように、長さ L の範囲の材料がインデンテーションによって $L+\Delta L$ に拡大した場合について、単位奥行き長さあたりの表面積拡大量を ΔL 、表面積拡大比を $\varphi = \Delta L/L$ で定義する。このとき、

$$\Delta L = \frac{D(1 - \sin \alpha)}{\cos \alpha} \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} \quad (2)$$

でそれぞれ定義が可能であり、表面積拡大量 ΔL は先端角 2α および圧入距離 D 、表面積拡大比 φ は先端角 2α のみによって決まることがわかる。また、凝着力の評価にあたっては、図10で示すようにインデンタを圧入→静止→引き抜きした際の抵抗を動力計で測定し、引き抜き時に生じる離形抵抗の最大値を凝着力と定義して評価した。

本研究ではまず、先端角60, 90, 120度の各インデンタに対して、先端角30度のインデンタを1 mm 圧入したときと等しい表面積拡大量が生じる圧入距離 D を表1のように求め、この条件にて凝着力の評価を行った。図11に、

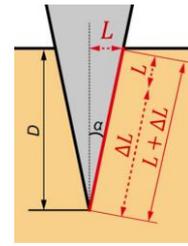


図9 表面積拡大の様子

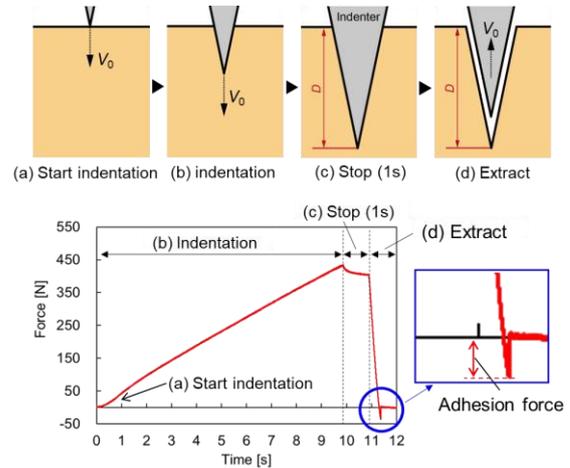


図10 離形抵抗の測定方法

表1 表面積拡大量一定の時の実験条件

先端角度 (°)	30	60	90	120
圧入距離 (mm)	1.00	1.33	1.85	2.86
表面積拡大量 (mm ²)	1.53	1.53	1.53	1.53

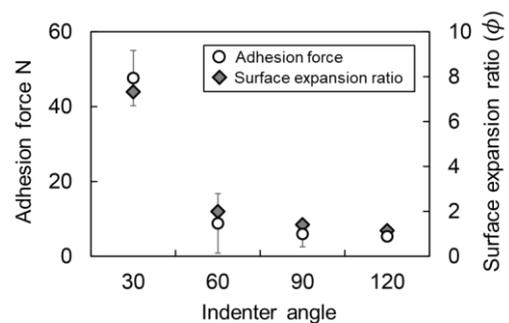


図11 表面積拡大量と凝着力の関係

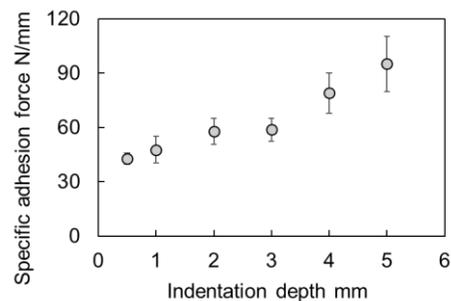


図12 押し込み量と凝着力の関係

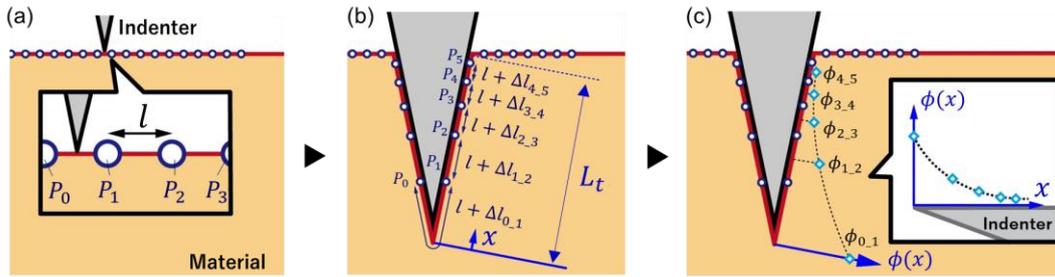


図 1 3 表面積拡大比分布の導出プロセス

各インデンタにおける凝着力を示す。同図に示すように、いずれのインデンタでも表面積拡大量が等しいにも関わらず、表面積拡大比の大きい先端角 30 度のインデンタでのみ凝着力が著しく増加していることがわかる。ここで、酸化被膜に覆われたアルミニウムの表面が拡大した場合、初期の拡大では酸化被膜も部材表面の拡大とともに薄く伸展するため、新生面の露出は生じない一方で、表面積が一定以上に拡大した場合、酸化被膜が破断して新生面が露出する。したがって、表面積拡大量と新生面露出量は必ずしも一致せず、新生面の露出は表面積が一定以上の比率で拡大した部位にのみ発生することから、凝着力に対しては表面積拡大比がより重要な指標となることを示していると言える。また、図 11 中には式(2)より導出した各インデンタを使用した場合の表面積拡大比をあわせて示しているが、表面積拡大比の傾向は凝着力の傾向とよく一致しており、このことから、凝着力と表面積拡大には強い相関があることを示している。

一方で、図 12 は、先端角 30 度のインデンタを用い、圧入距離 D を変化させた場合について、圧入距離と単位圧入距離あたりの凝着力(各条件の凝着力の値を圧入距離で除したもの)の関係を示している。同図に示すように、インデンタ先端角は変わらないためいずれの条件でも表面積拡大比は等しいにも関わらず、圧入距離の増加とともに単位圧入距離あたりの凝着力が増加していることがわかる。この結果から、式(2)で定義されるようなマクロスコピックな表面積拡大比 ($\Delta L/L$) では、表面積拡大と凝着力の関係の理解には不十分であることが示されたと言える。

4・2 表面積拡大比分布の獲得

上記のように、マクロスコピックな表面積拡大比の定義では説明できない現象が存在する理由として、マクロスコピックな表面積拡大比の定義では、インデンタ-材料の接触面内において、表面積拡大比は一定であると仮定しているものの、実際には表面積拡大比は接触面内で分布を有していることが原因であると考えられる。そこで、本研究では前章までで述べた in-situ 観察手法を援用することにより、より微視的な表面積拡大比である「表面積拡大比分布」の獲得を試みた。図 13 に、表面積拡大比分布の導出プロセスを示す。同図に示すように、本研究では下記のプロセスに基づいて表面積拡大比分布の獲得を行った。

1. 材料表面に間隔 l で仮想的な追跡マーカを設置
2. インデンタ押し込み後の追跡マーカ P_n および P_{n+1} の距離 $l + \Delta l_{n,n+1}$ を算出
3. 追跡マーカ P_n のインデンタ先端からの位置 x_n もあわせて算出
4. 追跡マーカ P_n および P_{n+1} の中間点 $x_{n,n+1}$, P_n および P_{n+1} 間の表面積拡大率 $\phi_{n,n+1}$ を以下に基づき導出

$$x_{n,n+1} = \begin{cases} 0 & (n = 0) \\ (x_n + x_{n+1})/2 & (n > 0) \end{cases}$$

$$\phi_{n,n+1} = (l + \Delta l_{n,n+1})/l$$

5. インデンタ先端からの位置 $x_{n,n+1}$ における表面積拡大率を $\phi_{n,n+1}$ として、表面積拡大率分布 $\phi(x)$ を獲得

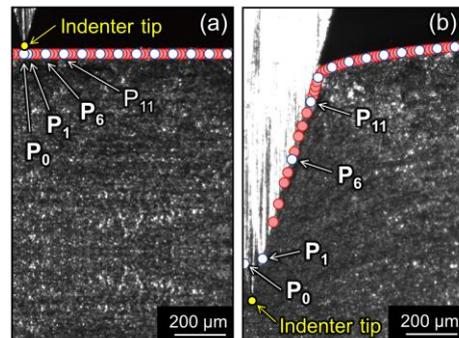


図 1 4 圧入前後における追跡マーカ

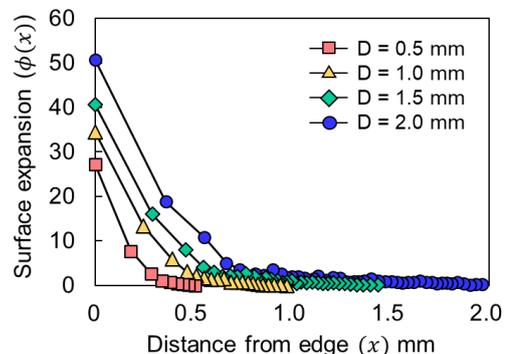


図 1 5 各圧入距離における表面積拡大比分布

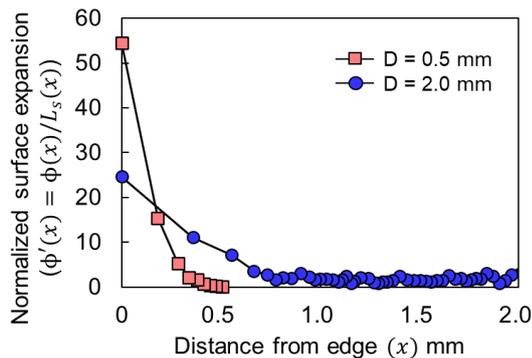


図 16 単位圧入距離あたりの表面積拡大比分布

図 14 は圧入前後における追跡マーカ、図 15 は上記プロセスによって得られた各圧入距離における表面積拡大比分布を示している。これら図に示すように、表面積拡大比の分布は一樣ではなく、インデンタ先端近傍で集中的に表面積が拡大していることがわかる。さらに、図 16 はインデンタ先端からの距離 x の位置における摺動距離を $L_s(x)$ ($L_s(x) = L_s - x$) として、各位置における単位摺動距離あたりの表面積拡大比分布 $\phi'(x) = \phi(x)/L_s(x)$ を導出した結果である。同図から分かるように、圧入距離の増加にともなって単位摺動距離あたりの表面積拡大比分布、つまり各部位における表面積の拡大のしやすさが変化しており、圧入距離が短い場合においてはインデンタ先端近傍の材料表面が集中的に拡大しているのに対し、圧入距離が増加することによって先端部分での変形量が低減し、よりインデンタ先端から離れた部分での表面積が拡大している。これは、圧入開始後に先端部分で集中的にひずみが生じることで加工硬化が発生し、先端部分での表面積拡大が困難になったことが原因であると考えられる。ここで、上述の通り、新生成面の露出は一定以上の表面積拡大比においてのみ発生することから、圧入距離の増加にともなって先端部以外での表面積拡大が進行し、一定以上の表面積拡大比となる面積の割合が増加することで、図 12 で示したように圧入距離の増加にともなう単位圧入距離当たりの凝着力の増加に繋がったと予想される。

以上のように、本研究で開発した塑性加工における材料変形挙動の in-situ 観察を援用することによって、より微視的かつ定量的な特徴量の抽出が可能となり、塑性加工に関連する様々な現象の解明に繋がる可能性が示されたとと言える。

5. まとめ

本研究では、塑性加工における材料変形挙動の in-situ 観察を目的として、インデンタによる押し込み試験と PIV 解析を援用した塑性加工現象の in-situ 観察装置の開発に取り組んだ。その結果、先端角の異なるインデンタを用いることによって、材料の切断による分離や摩擦摺動にともなうせん断変形、ならびに、材料の圧縮変形やそれにとまなう加工硬化領域の形成など、塑性加工の材料-金型間で生じる様々な変形場を再現することができ、さらにそれらにおける材料流れや変形挙動の分布を定量的に評価できることが明らかとなった。

さらに、開発装置の援用によって塑性加工における金型-材料間の凝着現象の解明に取り組み、表面積拡大比分布を定量的に評価することによって、表面積拡大と凝着力との関係性を明らかにした。以上の結果から、本研究で開発した塑性加工における材料変形挙動の in-situ 観察手法は、塑性加工におけるより微視的かつ定量的な特徴量の抽出が可能となり、様々な現象の解明に応用できることを明らかにした。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2019 年度奨励研究助成 (若手研究者枠) により遂行されたものであり、ここに記して深甚なる謝意を表します。また本研究の遂行にあたり多大なるご助言を頂いた Purdue 大学 S. Chandrasekar 教授、研究遂行に協力いただいた大阪大学榎本研究室の学生諸君 (Lin Xiaoke 君、木下誠司君、川西奎哉君) に感謝いたします。

参考文献

- 1) 石川孝司, 塑性加工の将来展望, 塑性と加工, Vol. 57, No. 668, pp. 831-832, 2016
- 2) A. Udupa, T. Sugihara, K. Viswanathan, S. Chandrasekar, Physical Review Applied, No. 11, 014021, 2019
- 3) T. Sugihara, A. Udupa, K. Viswanathan, JM. Davis, S. Chandrasekar, Science Advances, Vol. 6, No. 51, eabc8900, 2020
- 4) D. Duran, İ. Özdemir, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol 138, No. 7, pp. 1-7, 2016
- 5) Y. Sagisaka, T. Nakamura, K. Hayakawa, I. Ishibashi, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 15, pp. 96-101, 2013
- 6) J. Noh, B.B. Hwang, H.Y. Lee, Metals and Materials International, Vol 21, No. 6, pp. 1091-1100, 2015