

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20964

研究課題名（和文）塑性境界層に着目した極限摩擦理論の再構築とその応用

研究課題名（英文）Constructing new friction model focusing on plastic boundary layer

研究代表者

杉原 達哉（Tatsuya, Sugihara）

大阪大学・工学研究科・講師

研究者番号：90637539

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、摺動する材料に塑性変形が生じるほど過酷な条件下における摩擦，すなわち極限摩擦の理解を目的として，極限摩擦にともなう材料の塑性変形挙動の可視化手法の確立と，それに基づく極限摩擦現象のモデル化・理論化を試みた．そして，インデンタによる押し込み試験とPIV解析によるその場観察手法を構築し，極限摩擦の帰結として生じる『塑性境界層』に着目した検討を行った．その結果，塑性境界層における材料の変形挙動は，材料をビンガム塑性体としてモデル化することで記述できること，界面の摩擦状態については，ビンガムモデル中の粘性係数の値によって表現できることなどを明らかにした．

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は，極めて過酷な環境下における摩擦について，摩擦摺動にともなう材料の塑性変形挙動を可視化するとともに，摩擦摺動の帰結として生じる塑性変形場から逆問題的に界面の摩擦状態のモデル化を試みるという挑戦的な課題であり，極限環境下における摩擦現象そのものの深い理解を目指すという点において，学術的意義は極めて大きい．また，本研究で得られた知見は，摩擦摺動をともなう様々な分野の発展に貢献するものであり，極めて多大な社会的波及効果を有している．

研究成果の概要（英文）：We study plastic flow in the vicinity of a severe friction interface in indentation process using high speed in-situ imaging and particle image velocimetry (PIV) analysis. Displacement and strain fields in the indentation zone are obtained at high-resolution for different indenter angles and two lubricating conditions. These fields can be used to demonstrate essential features of the material flow phenomena. The deformed layer close to the indenter wall fit a classical boundary layer profile in the framework of a Bingham-solid. Equivalent Bingham viscosities and boundary layer scaling relations are obtained. The viscosity values appear to reflect the nature of the severe friction interaction at the indenter-material interface and can potentially be used as a discriminating parameter for evaluating contributions to deformation and dissipation arising from interface friction.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー 摩擦 塑性変形 可視化

1. 研究開始当初の背景

(1) 摺動する材料に塑性変形が生じるほど過酷な条件下における摩擦，すなわち極限摩擦は，一般的な Coulomb-Amonton の摩擦法則には従わず，その特異なトライボ特性の解明と，それらを定量的かつ統一的に示すモデルの構築が強く求められている^[1]。

(2) 例えば，高温・高圧下で常に活性な新生面と摺動する工具-切りくず間の摩擦は，典型的な極限摩擦状態にあり，切削加工現象における不確定な要素の一つとして知られている．そして，これまでに数多くのモデルが提案されているものの^[1-5]，いずれも様々な仮定のもとで経験的に記述された式であることから，実際の現象との乖離が度々指摘されている^[1]ほか，モデル中の定数部分を決める物理的因子は何なのか，摩擦を減らすためには工具表面・形状はどうあるべきなのか，加工条件の違いが摩擦応力分布にどう影響するのか，といった様々な『問い』が残存している．

(3) こういった過酷な環境下における摩擦現象の理解やモデル化を妨げた来た要因の一つは，これまでは伏せられた目に見えない状態にある摩擦摺動面に対して，「investigate the resultants of the contact system at various stages and attempt to reconstruct a picture of what is going on.” (D. Taylor, 1977)」という“post-mortem”的なアプローチに頼らざるをえなかった点にあると考えられる．

2. 研究の目的

(1) 本研究では，上述の現状を打破するため，摩擦界面近傍における材料の塑性流動現象に着目する．著しく大きな垂直・せん断応力が発生する極限摩擦の界面においては，摩擦応力によって材料内部に塑性変形が生じる．この摩擦応力に起因する塑性変形は，摩擦界面近傍に集中し，流体力学分野で議論される境界層に類似した，“塑性境界層”を形成する（図 1）．そして，極限摩擦による材料の塑性流動は，界面で生じた摩擦応力が帰結した結果であることから，この塑性境界層に関する特定の特徴・情報を抽出することによって，界面の摩擦状態を的確に，逆問題的に明らかにすることが期待できる．

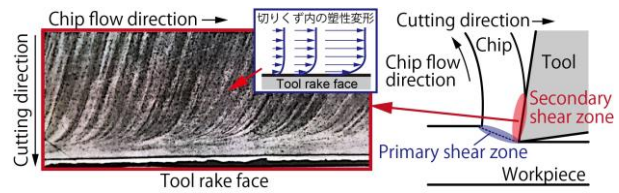


図 1：切削加工の二次塑性域で生じる塑性境界層

(2) そして，これらの検討を遂行する上で不可欠となるのが，極限摩擦によって生じる塑性境界層における動的挙動の定量的な評価である．本研究ではそれを実現するため，「粒子画像流速計測法（PIV）を援用した材料の塑性流動現象の in-situ 観察手法」の確立を図る．本手法の確立によって，極限摩擦環境下における材料の塑性変形挙動が直接的に観察可能となるだけでなく，従来獲得が困難であった材料の変形挙動に関する動的かつマイクロスコピックな情報（すべり線場，ひずみ・ひずみ速度分布など）の獲得が期待できる．

(3) 以上のように，本研究は，「摩擦界面に生じる塑性境界層に着目した理論に基づくアプローチ」と「塑性流動現象をその場観察するためのコア技術構築」を両輪として研究を展開することで，極限摩擦現象のモデル化・理論の再構築を狙うとともに，それらに基づいた新たなトライボロジー技術を構築することを目的とする．

3. 研究の方法

(1) 本研究では，工具-切りくず界面の過酷な摩擦にともなう材料の塑性変形挙動を再現し，可視化するための具体的な手法として，くさび状圧子（インデンタ）による押し込み試験を活用した装置を開発した．図 1 に示すように，ガラス面に沿って平面ひずみ状態の変形を実現した状態で，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する．そして，撮影した画像に対して PIV 解析を行うことで，インデンタ近傍における材料内部の変位分布，ひずみ/ひずみ速度分布，すべり線場の獲得を目指した^[6]。

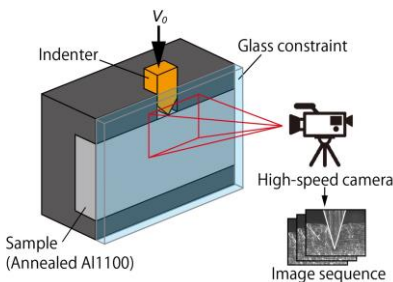


図 2：極限摩擦の In-situ 観察装置

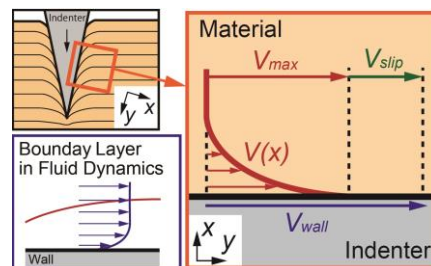


図 3：塑性境界層の評価

(2) さらに、インデンタ近傍において生じる塑性境界層の特徴を定量化するため、インデンタ壁面の摺動速度 V_{wall} 、材料の変形速度分布 $V(x)$ 、インデンタ壁面における材料の変形速度 V_{max} ($V_{max} = V(0)$)、インデンタ壁面での材料のすべり速度 V_{slip} ($V_{slip} = V_{wall} - V_{max}$)などの算出を試みた (図 3)。

4. 研究成果

(1) 本研究ではまず先端角 $\alpha_0 = 30^\circ$ 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 4 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 4 (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 5 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 (d)) 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 (d))、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にともなって、材料の変形挙動が大きく変化していることが示された。

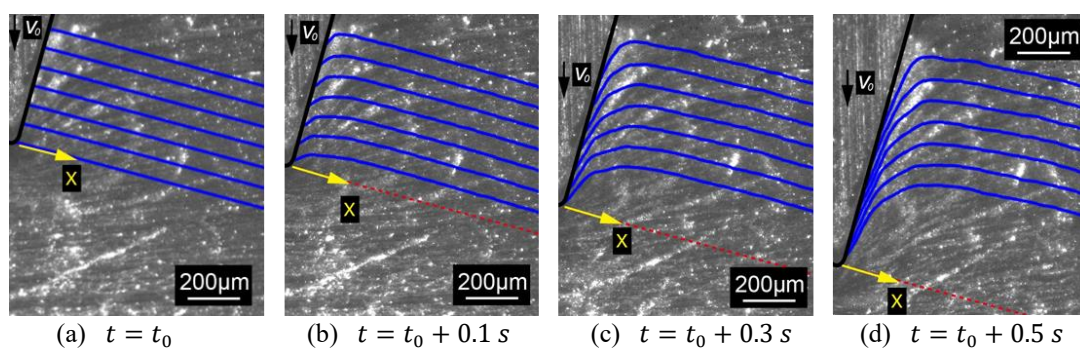


図 4 : インデンタによる押し込み試験における材料の塑性変形場 ($\alpha_0 = 30^\circ$)

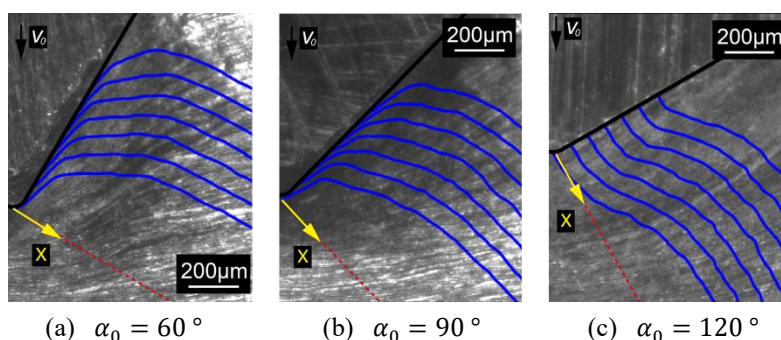
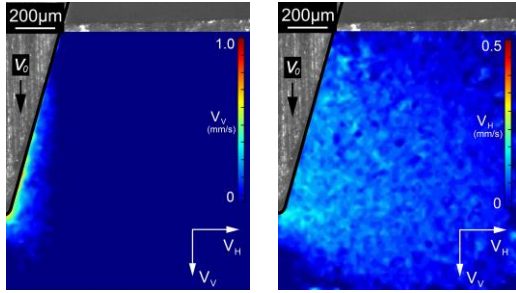


図 5 : インデンタによる押し込み試験における材料の塑性変形場 ($t = t_0 + 0.5 s$)

さらに図 6 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 7 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

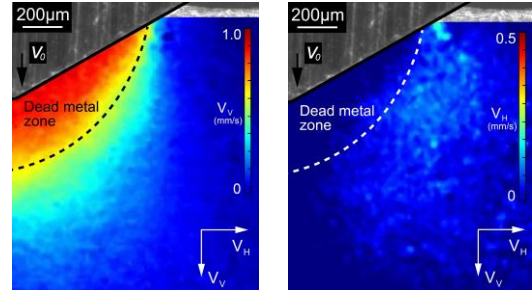
を変形させていることを示している[7].

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とも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。



(a) 垂直方向 (V_V) (b) 水平方向 (V_H)

図6：材料内部における速度分布 ($\alpha_0 = 30^\circ$)



(a) 垂直方向 (V_V) (b) 水平方向 (V_H)

図7：材料内部における速度分布 ($\alpha_0 = 120^\circ$)

(2) 図8(a)はインデンタ先端からの位置 $100 \mu\text{m}$ の位置における、インデンタ側面からの距離 x 材の位置における材料の変形速度分布 $V(x)$ の関係を示したもので、図8(b)は $V(x)$ をインデンタ壁面を摺動速度 V_{wall} で正規化したものである。同図に示すように、インデンタによって変形を受ける材料は、インデンタ壁面近傍でインデンタの摺動速度とほぼ同程度の速度で変形しているのに対し、インデンタ壁面から離れた位置ではほぼ静止した状態となっており、流体力学分野で議論される境界層に類似した“塑性境界層”の存在が確認できる。

ここで、ひずみ速度が比較的大きい条件下 ($> 10^3/\text{s}$) においては、金属材料は以下の式で表現される Bingham 塑性体としてふるまうことが知られている。

$$\tau = \theta + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここで、 θ はせん断降伏応力、 μ は粘性係数を示している。そして、 $t = t_0$ において材料はインデンタに対して静止しており、 $t_0 < t < t_0 + t_f$ の間、インデンタが一定の速度 (V_0) で押し込まれた場合、 $t = t_0 + t_f$ における変形場 $V(y, t_0 + t_f)$ は、次式で記述することができる。

$$\frac{V}{V_{max}} = -2\eta^2 \text{eftc}(\eta) + \text{eft}(\eta) + 2 \frac{\eta}{\sqrt{\pi}} \exp(\eta^2) \quad (2)$$

ここで、 $\eta = y/\sqrt{4vt}$ は無次元量、 $\text{eft}(\eta)$ ならびに $\text{eftc}(\eta)$ は、それぞれ誤差関数と相補誤差関数である。

図9は、 $\eta = y/\sqrt{4vt}$ の関数として、実験で得られた変形場 (図8) と(3)式で与えられた理論値を比較した結果である。同図において、理論値は(3)式内で唯一未知の値である動粘度 ($\nu = \mu/\rho$) の値を調整することによって、フィッティングを試みている。同図からわかるように、(2)式で与えられた理論値は実験で得られた変形場とよく一致しており、界面の摩擦によって生じた塑性変形場 (“塑性変形層”) は、(1)式で表現されるビンガム塑性体としてふるまう流体の変形挙動とよく一致していることが示されたと言える。

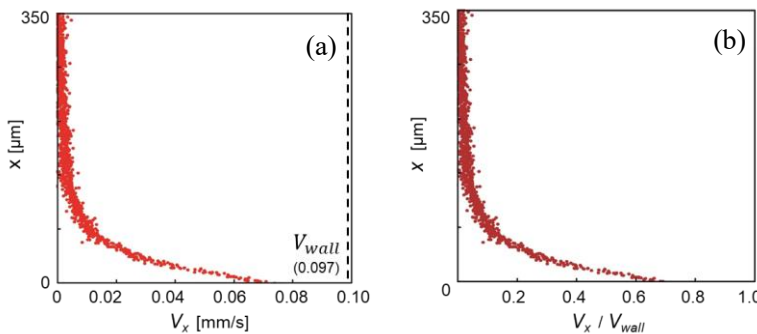


図8：材料内部の変形場

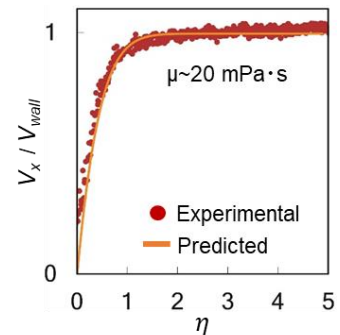


図9：理論値との比較

(3) 図 10 は、インデンタ先端角 $\alpha_0 = 30^\circ$ および $\alpha_0 = 60^\circ$ 、押し込み速度 $V_0 = 1.0 \text{ mm/s}$ の条件において、潤滑剤（パラフィン油）の有無による押し込み抵抗の違いを示したものである。同図に示すように、潤滑剤を供給することによって、インデンタ-材料界面の摩擦による変形が支配的となるインデンタ先端角 $\alpha_0 = 30^\circ$ の条件においては、界面摩擦の低減にともない押し込み抵抗が約 30%程度小さくなっている一方で、圧縮変形の占める割合が大きくなるインデンタ先端角 $\alpha_0 = 60^\circ$ の条件においては、押し込み抵抗にほとんど変化が見られない。さらに、図 11 は各インデンタを用いた場合について、潤滑剤の有無による材料の変形場 ($V(x)/V_{wall}$) の違いを示したものである。同図からわかるように、押し込み抵抗に変化が生じたインデンタ先端角 $\alpha_0 = 30^\circ$ の条件でのみ変形場に違いが見られ、界面における摩擦応力の帰結として、材料の塑性流動の様子が違いが表れていることがわかる。

ここで、図 12 は、潤滑剤供給時における材料の変形場に対して、(3)式によって求められる理論値との比較を行った結果であるが、無潤滑時（図 9）と比較して、変形場と一致する動粘度の値が、 $20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ から $5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ に小さくなっている。この結果は、潤滑剤を供給することによって、インデンタ-材料界面の摩擦にともなう材料の塑性変形が、より摩擦界面近傍に集中していることを示しており、摩擦にともなう塑性変形によるエネルギーの消失が抑制されていることを示している。さらに、界面の摩擦状態の変化にともなう塑性変形場への影響は、(2)式内における粘性係数の値によって表現することができることから、同値は界面の摩擦状態を表現するパラメータとなる可能性を示唆していると言える。

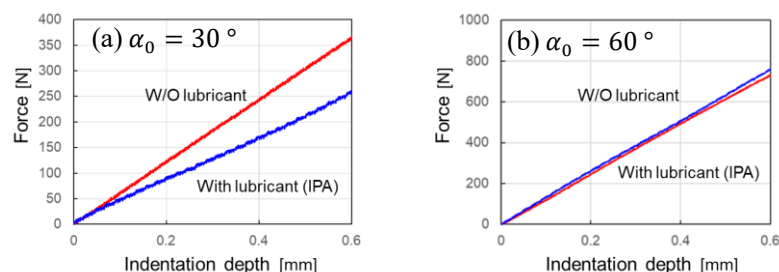


図 11：材料内部の変形場

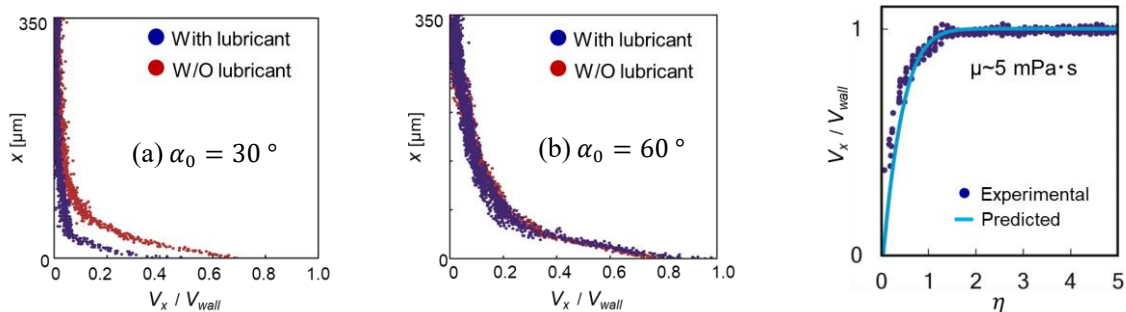


図 12：潤滑剤の有無による材料内部の変形場

図 13：理論値との比較

<引用文献>

- [1] P. J. Arrazola, T. Özel, Investigations on the effects of friction modeling in finite element simulation of machining, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 52, No. 1, pp. 31-42, 2010
- [2] A. Svoboda, D. Wedberg, LE. Lindgren, Simulation of metal cutting using a physically based plasticity model, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol. 18, 075005, 2010
- [3] A. Malakizadi, K. Hosseinkhani, E. Mariano, AD. Prete, L. Nyborg, Influence of friction models on FE simulation results of orthogonal cutting process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume Vol. 88, pp. 3217–3232, 2017
- [4] H. Bil, SE. Kılıç, AE. Tekkaya, A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, No. 9, pp. 933-944, 2004
- [5] THC. Childs, Friction modelling in metal cutting, Wear, Vol. 260, No. 3, pp. 310-318, 2006
- [6] H. Yeung, K. Viswanathan, WD. Compton, S. Chandrasekar, Sinuous flow in metals, PNAS, Vol. 112, No. 32, pp. 9828-9832, 2015
- [7] AG. Atkins, D. Tabor, Plastic indentation in metals with cones, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 13, No. 3, pp. 149-164, 1965

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 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tatsuya Sugihara, Anirudh Udupa, Koushik Viswanathan, Jason M Davis, Srinivasan Chandrasekar	4. 巻 6
2. 論文標題 Organic monolayers disrupt plastic flow in metals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabc8900
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.abc8900	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 該当する

1. 著者名 Sugihara Tatsuya, Kobayashi Ryota, Enomoto Toshiyuki	4. 巻 168
2. 論文標題 Direct observations of tribological behavior in cutting with textured cutting tools	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Machine Tools and Manufacture	6. 最初と最後の頁 103726 - 103726
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijmactools.2021.103726	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Xiaoke LIN, Tatsuya SUGIHARA, Toshiyuki ENOMOTO
2. 発表標題 Direct observation of surface expansion and its influence on adhesion force at die-workpiece interface in metal forming
3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (ICPE2022)（国際学会）
4. 発表年 2022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
---------	---------