

令和 4 年 4 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05097

研究課題名(和文)成形界面のその場直接観察による振動付加成形加工のインプロセスモニタリング

研究課題名(英文) In-process monitoring of forming with pulsed ram motion by in-situ observation of forming interface

研究代表者

松本 良 (Matsumoto, Ryo)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50362645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：振動モーション付加塑性加工を対象に、塑性加工中の金型-被加工材界面の変形挙動および潤滑挙動のその場直接観察・計測に取り組み、以下の成果を得た。

- (1) ガラスを介して金型内部から金型-被加工材界面の一部をその場直接観察できる装置を設計・製作した。
- (2) 押し鍛造中の金型-被加工材界面をその場観察し、撮影画像の輝度値の変化から潤滑油の膜厚変化を推定した。
- (3) 潤滑油の膜厚変化と被加工材の塑性変形挙動から、振動付加による逐次潤滑現象について、議論・考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代塑性加工技術の一つである振動モーション付加塑性加工では、振動付加による加工現象の変化に未解明な点が多い。ガラスを介した金型-被加工材界面のその場観察・計測により、潤滑挙動を可視化したこと、撮影画像の輝度値から逐次潤滑現象を定量的に評価したことは意義がある。また高面圧下で動的な面圧変化やすべりをともなう金型-被加工材界面のその場観察・計測技術は、他の成形加工の界面にも展開可能であり、加工機構の直接的解明に有効な手法となり得る。

研究成果の概要(英文)：Plastic deformation and lubrication behavior at the interface between die and workpiece were in-situ observed during cold forming with oscillation. Following achievements were obtained. (1) Apparatus for the in-situ observation was originally designed and developed. For in-situ observation, the die was partly made with a ceramics glass, while the lubricant was colored by an oil-soluble colorant. (2) The trapped thickness of the lubricant at the interface was estimated by the brightness value of the in-situ observed images. (3) Re-lubrication phenomenon of the workpiece during cold forming with oscillation was discussed from the relationship between the thickness change of the trapped lubricant and the deformation behavior of the workpiece.

研究分野：工学，塑性加工，トライボロジー

キーワード：塑性加工 鍛造 トライボロジー その場観察 可視化 金型

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

構造部材の軽量化を背景に軽量・高強度材料や中空・薄肉部材の使用が急増している。しかしながら、これらの材料・部材の成形には高度な塑性加工技術が必要不可欠であり、先進的な塑性加工プロセスの研究・開発が急拡大している。このような加工プロセスの研究・開発の手段の一つとして、加工モーションの制御があげられる。

加工モーションを制御した塑性加工プロセスにおいて、成形限界の向上、成形形状の高精度化・複雑化、成形荷重の低減等が報告されている。従来とは異なる加工現象（摩擦低減、加工発熱制御、応力緩和等）が発現しているが、応力（荷重）やひずみ（変位）の負荷・除荷・反転が積極的に引き起こされることに起因して、加工現象の正確な理解に至らず、加工機構が未解明な点が多い。金型-被加工材界面の被加工材の弾性・塑性変形挙動やトライボロジー挙動を把握することが加工機構の解明に対して重要である。その場直接観察・計測による界面の可視化（印プロセスモニタリング）は最有力な手法である。

一方、インダストリー4.0等の次世代生産技術開発が求められる中、金型内センシング、モニタリングによる塑性加工プロセスの加工情報の収集と活用が注目されている。弾性・塑性変形の高精度な観察・計測が拡大しており、本研究のような金型-被加工材界面の観察・計測にも適用できるシーズが高まっている。以上のように、金型-被加工材界面の可視化に対するニーズとシーズが高まっている。

本研究では、金型-被加工材界面において塑性加工中に応力の負荷・除荷が繰り返され、さらに潤滑油の流入・流出が生じると推察される振動モーション付加塑性加工を題材にする。振動モーション付加塑性加工では、数 mm の振幅、数 Hz の周波数で金型を加工方向へ前進・後退を繰り返しながら、成形を進める。金型の前進・後退を繰り返すことで、金型-被加工材界面に負荷・除荷が繰り返され、摩擦の低減、成形限界の向上や成形荷重の低減が実現されている。しかしながら、金型-被加工材界面のその場観察は実現されておらず、加工機構は推察の域を出ていない。その場観察による可視化が実現できれば、加工機構の解明とともに振動付加条件とその効果に対する定量的評価へつながる可能性がある。

### 2. 研究の目的

振動モーション付加塑性加工を題材に、塑性加工中の金型-被加工材界面をその場観察・計測することを目的とする。振動モーション付加中の負荷時には被加工材の弾性・塑性変形にともなう潤滑油の閉込め挙動を、除荷時には被加工材の界面からの離脱や潤滑油の流動挙動をその場観察・計測する。そして、振動モーション付加塑性加工における潤滑機構の解明を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 金型-被加工材界面のその場観察装置の設計・製作

高強度ガラスを観察窓用に金型表面の一部に組み込み、ガラスを介して金型内部から金型-被加工材界面の一部をその場観察・撮影できる装置を設計・製作する。振動モーション付加塑性加工のその場観察に適した塑性加工形態（主に加工形状）の決定およびガラス（材質、強度、形状）の選定に取り組み、金型を設計・製作する。設計・製作には有限要素シミュレーション解析を援用し、振動モーション付加の影響が発現する塑性加工形態を決定する。また潤滑油の可視化用マーカ剤も選定する。

#### (2) 金型-被加工材界面のその場観察装置による界面の観察・撮影

(1)で設計・作製するその場観察装置を用いて、塑性加工中の金型（ガラス部）-被加工材（アルミニウム）界面をその場観察・撮影する。振動モーション付加条件（振幅、振動回数等）や潤滑量が成形荷重、被加工材の変形形状、表面性状に及ぼす影響を調べる。

#### (3) 金型-被加工材界面のその場撮影画像の分析および潤滑機構の考察

(2)でその場撮影された画像から、潤滑状態を定量的に評価する。撮影画像の輝度値を算出し、潤滑油の膜厚を推定する。平均輝度値から推定した潤滑油の膜厚変化から、振動モーション付加における潤滑機構を考察する。

### 4. 研究成果

#### (1) 金型-被加工材界面のその場観察装置の設計・製作

図 1 に設計・製作した押し鍛造中の金型-被加工材界面のその場観察装置を示す。装置はリンク式サーボプレスに取り付けた。下側金型の側面に設けた観察穴から鏡筒とズームレンズを介して高速度カメラにより、ガラス越しに金型-被加工材界面を観察した。ただし、鏡筒には白色 LED 光源を接続した。観察窓用のガラスは熱処理強化ソーダガラス、サファイアガラスをはじめとする 10 種類程度のガラス・樹脂材を評価し、それらの中からセラミックス系ガラス（ナノセラム™）を選定した。

加工荷重とプレス機のスライド変位を AD ボードにより計測し、スライド変位信号をトリガとして高速度カメラによる撮影の開始時期を同期させた。撮影領域は下側金型に設けた観察穴の直径 ( $\phi 4\text{mm}$ ) にあわせて、約  $3\text{mm}$  (z 方向)  $\times$  約  $4\text{mm}$  (x 方向) として、撮影解像度は  $600\text{px} \times 800\text{px}$  とした。

鍛造形状は有限要素解析を援用して考案・設計した。有限要素解析において、金型-被加工材界面の摩擦係数と被加工材の変形・すべり状態、面圧の関係を詳細に調べた。ガラスの耐圧限界を考慮するとともに振動モーション付加による被加工材の塑性変形に変化が発現する鍛造形状を設計した。被加工材には A1070 工業用純アルミニウムを選定した。ここでは金型形状および鍛造形状の記述は省略する。

潤滑油にはポリブデンを使用した。潤滑油の流動に対する視認性を高めるため、着色剤、蛍光剤をはじめとする 10 種類程度の可視化用マーカ剤を評価し、それらの中から黒色の油性着色剤を選定した。以降、着色済み潤滑油を潤滑油と記す。

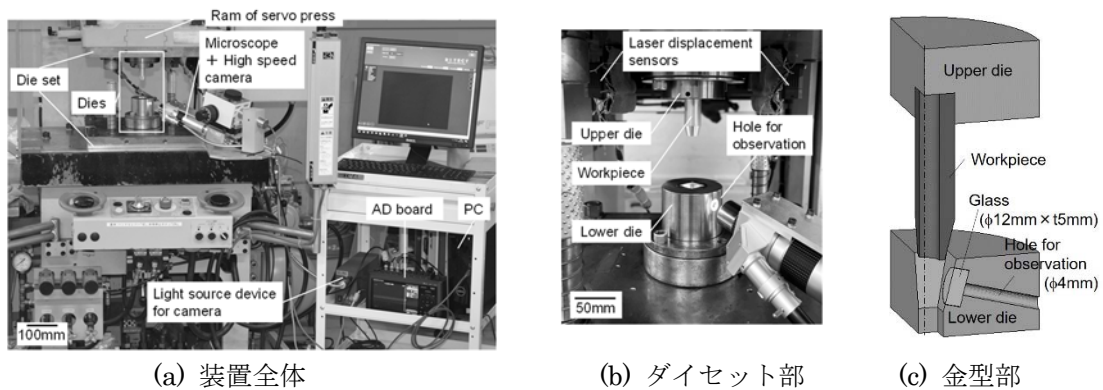


図 1 設計・作製した金型-被加工材界面のその場観察用装置および金型構成（一部の機器は保有物品を流用）

### (2) 金型-被加工材界面のその場観察装置による界面の観察・撮影

図 2 に本研究での振動モーションのストローク-時間線図の一例を示す。スライドの後退（上昇）・前進（下降）を繰り返しながら、上側金型に取り付けた被加工材を徐々に前進させ、下側金型の出口部に向けて押出した。本研究では後退ストローク ( $s_r$ )、前進ストローク ( $s_a$ )、加工ストローク ( $s_f = s_a - s_r$ ) を振動各段で一定とし、 $s_0 = 10\text{mm}$ 、 $s_r = 3\text{mm}$ 、 $s_a = 4\text{mm}$ 、 $s_f = 1\text{mm}$ 、振動回数 ( $n_{total} = 3$ ) で総加工ストローク ( $s_{total} = s_0 + s_f \cdot n_{total} = 13\text{mm}$ ) を標準条件とした。

図 3 に振動付加なしの場合の押し鍛造中の下側金型-被加工材界面の撮影画像を示す。まずガラスが破損することなく、界面をその場観察できた。無潤滑と潤滑ありの場合で、撮影画像の明度が異なり、またストロークの進行とともに撮影画像の明度は低下し、潤滑状態を反映した撮影画像であることが推察された。次に図 4 に振動付加の場合の押し鍛造中の下側金型-被加工材界面の撮影画像を示す。ただし、潤滑ありの場合は振動各回 ( $s = 10, 11, 12\text{mm}$ ) での後退開始時と再接触時の撮影画像も示す。振動付加中の  $s = 10 \sim 13\text{mm}$  では、潤滑ありの場合は振動付加なしの場合（図 3）と比較して、明度が低下した。

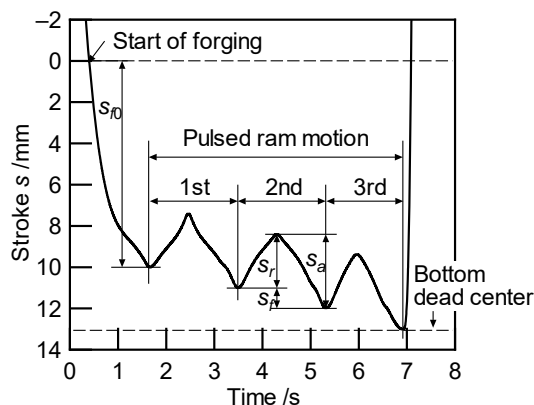


図 2 本研究での振動モーションにおけるストローク-時間線図の一例

### (3) 金型-被加工材界面のその場撮影画像の分析および潤滑機構の考察

その場撮影画像について、各画素点の RGB 値を輝度値 ( $Y = 0$  (黒)  $\sim 255$  (白)) へ変換した。本撮影条件下では、着色済み潤滑油の明度は低く、輝度値が高いほど金型-被加工材界面の潤滑膜厚 ( $t_L$ ) が薄いと判断した。輝度値と潤滑膜厚の関係は、別途、非鍛造環境下で潤滑膜厚を制御した状態で求め、Lambert の法則を応用し、輝度値から膜厚への変換式を求めた。

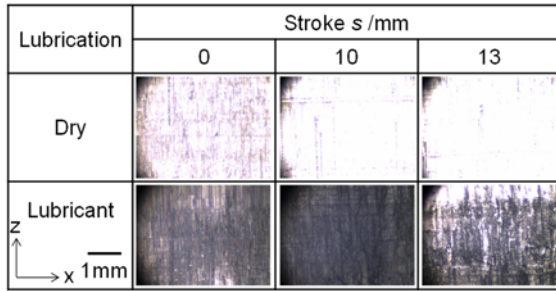


図 3 振動付加なしの場合の押し鍛造中の金型－被加工材界面のその場撮影画像

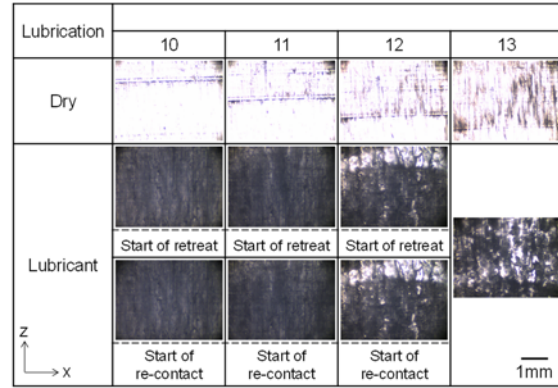


図 4 振動付加の場合の押し鍛造中の金型－被加工材界面のその場撮影画像

図 3 および図 4 をはじめとする各撮影画像から算出した潤滑油の推定平均膜厚 ( $t_{L-mean}$ ) を図 5 に示す. ただし, 潤滑ありの場合のみ 2 回の鍛造結果を示す. これらの  $t_{L-mean}$  では鍛造条件毎に多少のばらつきがあったが, 傾向は同一であった. 潤滑ありの場合,  $s=0$ mm から  $t_L < t_{L0}$  ( $= 80\mu\text{m}$ ) となり, これは金型－被加工材の接触直後に潤滑油の多くがその場観察部の外側に押し出されたことが推察される. また  $s=0\sim 10$ mm では  $t_{L-mean}$  は上昇しており, これは鍛造の進行とともに面圧が高まり, その場観察部である下側金型－被加工材間の中心部へ, 閉込められた潤滑油が集まり, 観察部での  $t_L$  が厚くなったと考えられる. 一方,  $s=10\sim 13$ mm にかけて  $t_{L-mean}$  は低下した. これは閉込められた潤滑油が引伸ばされたためと考えられる. また振動付加の場合は, 振動各回 ( $s=10, 11, 12$ mm) において,  $t_{L-mean} = 6\mu\text{m}$  程度の膜厚上昇が計測された.

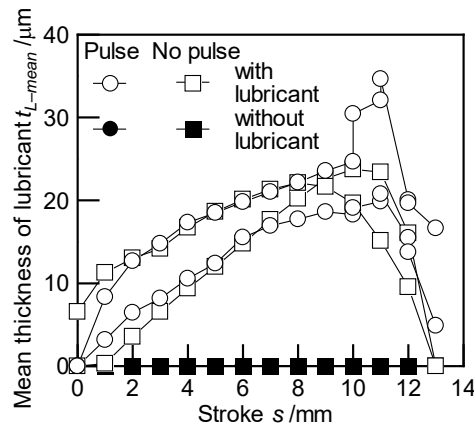


図 5 その場撮影画像から算出した潤滑油の推定平均膜厚

#### (4) 国内外における位置づけとインパクト

振動付加塑性加工をはじめとする加工モーション制御の塑性加工プロセスの研究・開発は, 実用化にむけた研究・開発が国内外で取り組まれている反面, 加工現象の発現機構に関する学術的研究は少ない. 振動付加塑性加工については, 特定の成形条件において, 摩擦・潤滑に変化が生じて成形性の向上や成形荷重の低減等が得られることが成形中の荷重変化, 成形後の金型, 被加工材の状態から間接的に推察されている. しかしながら, 金型－被加工材界面の潤滑状態をその場観察・計測した研究事例はなく, 本研究においてその場観察・撮影できたことは意義がある.

一方, ガラスを介した塑性加工中の金型－被加工材界面のその場観察について, トライボロジー特性の解明のために静的負荷(超低速, 低面圧)状態での取り組み研究事例はいくつかあるが, 振動付加のような動的負荷状態ではほとんど取り組まれておらず, この観点からも, 振動付加塑性加工中の金型－被加工材界面をその場観察・撮影できたことは意義があるものと考えられる.

#### (5) 今後の展望

今後, 振動付加条件の拡張や金型－被加工材界面の観察場所の変更等により, 振動付加時の潤滑現象をより明瞭にその場観察することに取り組む予定である. またその場撮影動画(画像)について, 機械学習分析を援用して, データ分析の観点から潤滑現象との関係性を調べることも取り組む予定である.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 松本 良, 中村悠作, 藪野惣祐, 宇都宮 裕
2. 発表標題 冷間鍛造中の金型 - 被加工材界面の潤滑状態のその場観察と画像解析による評価の試み
3. 学会等名 第28回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村悠作, 山西隆太, 松本 良, 宇都宮 裕
2. 発表標題 冷間鍛造中の金型 - 被加工材界面のその場観察および画像解析
3. 学会等名 2021年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村悠作, 松本 良, 宇都宮 裕
2. 発表標題 振動モーション付加鍛造中の金型 - 被加工材界面のその場観察および画像解析
3. 学会等名 第72回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Matsumoto
2. 発表標題 Brief Overview of Forging Processes with Oscillation
3. 学会等名 54th International Cold Forging Group Plenary Meeting (ICFG 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 良
2. 発表標題 振動付加鍛造における金型 - 被加工材界面の潤滑挙動のその場観察
3. 学会等名 日本塑性加工学会プロセス可視化・知能化分科会第5回技術セミナー
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