

# 冷間鍛造工程における摩擦係数の成形速度依存性の解明 ならびに焼付きのリアルタイム検出・予測

静岡大学 工学部機械工学科  
教授 早川 邦夫

(2021年度 一般研究開発助成 AF-2021006-B2)

キーワード：冷間鍛造，摩擦係数，焼付き，有限要素解析

## 1. 研究の背景と目的

冷間鍛造での環境対応型潤滑剤の開発に合わせて，その潤滑性能を評価するための試験法が開発されてきた。申請者らも前方押し型鍛造や後方押し型鍛造を模擬した試験法を開発してきた。前方押し型鍛造では局所的に大きな圧力が素材に作用する。また，後方押し型鍛造ではパンチ先端での素材の大きな表面積拡大が生じる。環境対応型潤滑剤がこれらに適應できるかどうかを調査することは，実用化にむけて非常に重要である。

これらの試験法では，有限要素解析を援用することで潤滑剤の使用環境に近い状態での摩擦係数が同定できる。これは，実際の鍛造部品の工程設計に数値解析が用いられる近年の動向に対して，入力すべき摩擦係数が精度よく見積もることができるという大きなメリットを有している。また，通常の生産機械を用いることができる点も実生産に近い状況での摩擦係数を同定することに大きく貢献する。

しかし，潤滑性能評価においてはまだいくつか課題が残されている。ここでは，その中でも，

- 1) 摩擦係数の成形速度依存性の評価
- 2) 急激な潤滑状態の変化のリアルタイム検出・予測

について調査を行う。

1) については，固体潤滑剤に対して定性的に潤滑状態の加工速度依存性を指摘している論文は多くあるが，加工速度依存性を考慮した摩擦係数の同定という定量的な試みについては，国内外でまとまった研究成果はない。かつて，鉄鋼およびアルミニウム合金について，加工速度の影響を考慮した環境対応型固体潤滑剤の摩擦係数を同定しようとしたが，得られた摩擦係数の値は不合理であった<sup>1)</sup>。これは，摩擦係数を見積もる際に用いる較正線図を作成する際の数値計算において，精度の低い変形抵抗曲線や熱伝達係数を用いたことが原因と考えられた。そこで，本研究では，後方押し型摩擦試験法を対象とし，より高精度な材料（素材および工具）の変形抵抗曲線，熱伝達係数などの境界条件を用いてより高精度な較正線図を作成し，摩擦係数の加工速度依存性を明らかにする。

2) については，潤滑性能試験において，固体潤滑剤の素材変形への追従性が低いと，素材表面が工具に凝着する「焼付き」が発生する。従来では，焼付きの状況は，実験後の素材および工具表面の観察によりその程度を評価することのみが行われていた。そこで，本研究では実験中の

工具に作用する力（加速度）をピエゾ素子を組み込んだ固定用ボルト（ピエゾボルト）にてピックアップし，その過渡情報を信号処理することで，焼付きの発生タイミングやその程度を定量化し，検出や予測技術に応用する。ここでは，2018年度天田財団一般研究助成（AF-2018005）により助成を受けた「サーボプレスによるチタン合金ボルトの温間鍛造プロセスの開発」<sup>2)</sup>において開発された冷温間チタン合金用の前方軸-後方押し型摩擦試験法を用い，試験中の摩擦の変化や凝着の際の変化を効果的に取得できるようにボルト取付け位置の検討，信号変化の解析を実施する。

## 2. 摩擦係数の成形速度依存性の評価

### 2.1 実験装置の概要

図1に示す前-後方直缶押し型摩擦試験（WCL試験）は，パンチ表面での表面積拡大が大きい後方押しを模擬したものである<sup>1)</sup>。パンチ表面の摩擦状態により，前方および後方の押し高さ  $H_L$  および  $H_U$  が異なることから，潤滑剤の摩擦特性を評価できる。また，あらかじめ数値解析にて作成した  $H_L$  および  $H_U$  とストローク  $S_P$  の関係に及ぼす摩擦係数  $\mu_P$  の影響を示す較正線図を用いることで，パンチ面の  $\mu_P$  を推定できる。

WCL試験法では，ダイス面の摩擦係数  $\mu_D$  も試験片の形状に影響を及ぼすため，先行して  $\mu_D$  を推定するためのWC試験を行う。WC試験では，パンチのランド部長が  $B=0.5$  mm であり，加工に及ぼす  $\mu_P$  の影響を無視できる。WCL試験と同様に，あらかじめ数値解析にて作成した較正線図から  $\mu_D$  を推定する。

### 2.2 潤滑剤

本研究では，図2に示すような2液2層型の環境対応型潤滑剤を使用した。上塗り層は摩擦低減効果と材料流れの向上の役割を担い，下塗り層は材料へ強固に密着し焼付き防止の役割を担う。化成被膜潤滑剤と比較して環境対応型潤滑剤は潤滑処理工程を短縮し，その過程の中での廃棄物の量を抑えた潤滑剤である<sup>3)</sup>。

### 2.3 実験および解析条件

表1は，本研究における試験条件を示す。試験には，サーボプレス（AIDA NS1-1500）を使用した。材料には，SCM420（JIS）を用いた。試験片の表面処理条件として側

面旋削加工，アルカリエッチング，ショットブラストの3種類の試験片を用意した．1つの試験片条件に対して4種類のストロークと2種類の成形速度でWCおよびWCL試験を行い，成形速度の摩擦係数に及ぼす影響を調査した．較正線図の作成には，有限要素解析ソフトウェア Simufact Forming を使用した．工具モデルは伝熱を考慮した剛体として扱い，材料のモデルパラメータは単軸圧縮試験を行い解析ソフト中の材料モデルのパラメータをフィッティングして作成した．また，WC試験では $\mu_P$ の試験片変形状への影響は無視できるため， $\mu_P = 0.1$ と仮定し解析を実行した．

#### 2・4 摩擦係数の推定の結果

図3は，WCL試験による $\mu_P$ - $S_P$ 関係図を示す．ここで，WC試験で推定した $\mu_D$ は成形速度による差が確認できたため，各成形速度における $\mu_D$ の平均値（1spmでは $\mu_D = 0.053$ ，20spmでは $\mu_D = 0.042$ ）をWCL試験の較正線図に使用した．図3から， $\mu_P$ は20spmの場合の方が1spmのそれよりも低く，速度依存性が認められる．

図4は， $S_P = 16$  mmにおける1spmと20spmの場合の試験直後の試験片の温度分布解析結果を示す．20spmの方が1spmよりも試験片の温度が高い．これは，成形速度が速いほど変形熱がパンチやダイスへ熱伝達する時間が短く断熱状態に近くなるためである．試験片が高温となることで材料の変形抵抗も下がる．

また，2液2層型潤滑剤の融点は，上塗り層が179～180℃，下塗り層の一部である固体潤滑剤は175～180℃の範囲である．図4から，20spmにおいて試験片全体は200℃以上であり，潤滑剤が融点に達した可能性がある．そのため，潤滑膜のせん断抵抗が減少することで，界面の滑りが良好となった可能性がある．さらに，WCL試験においては下パンチ面よりも上パンチ面のベアリング面積の方が広く，摩擦発熱によって上パンチ面の方がより高温となるため，この傾向は上パンチ面で先に生じやすいと考えられる．

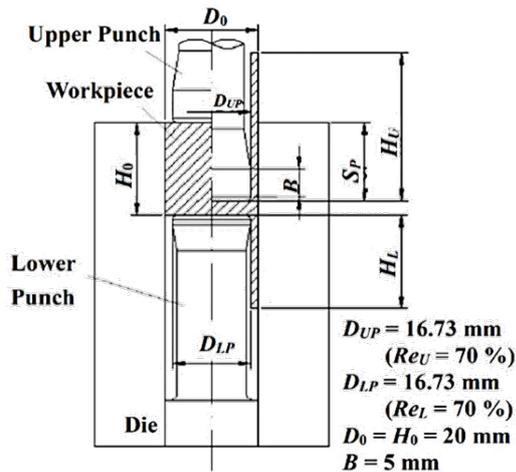


図1 前後方缶押し型摩擦試験法

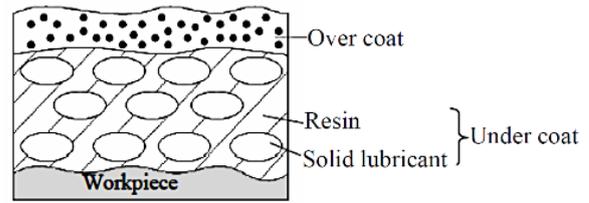


図2 2液2層型環境対応型潤滑剤の概要図

表1 摩擦係数の成形速度依存性の試験条件

Workpiece	SCM420, $\phi 20 \times 20$ mm
Lubricant	DLT Lubricant
Forming speed / spm	1 and 20
Stroke $S_P$ / mm	11.5, 13.5, 15.5 and 17.5
Tool coating	AlCrN

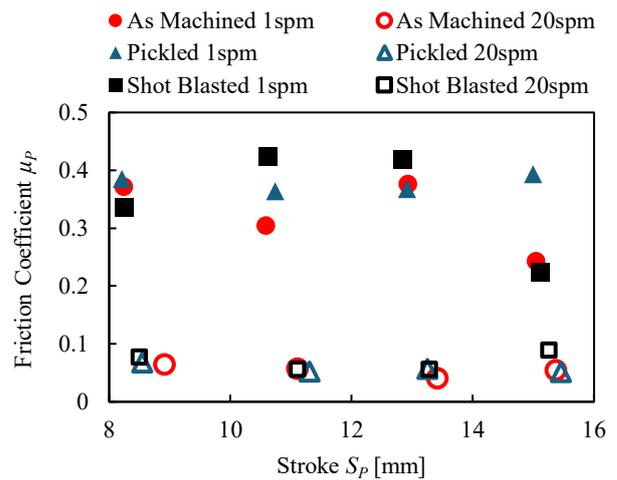


図3 パンチ面摩擦係数とストロークの関係

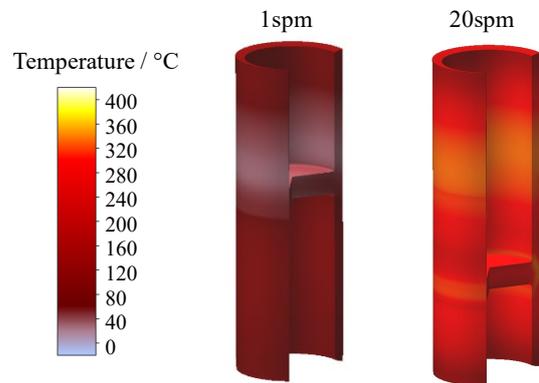


図4 解析による試験片温度分布

#### 2・5 試験片の表面の観察

図5は，1spmと20spmでの試験後の試験片の表面を示す．1spmでは潤滑剤の下塗り層が残存しているが，20spmでは下塗り層の膜切れが生じ金属表面が露出している．また，有限要素解析結果からも，ダイス面の一部で20spmの方が1spmよりも表面積拡大率が大きくなってお

り、ダイス面での過大な表面積拡大率により、20 spm においては試験片の潤滑膜切れが生じたと考えられる。また、高温下での成形により潤滑膜が軟化し強度が低下した可能性も考えられる。ただし、工具のコーティング膜により、焼付き・凝着は生じなかった。

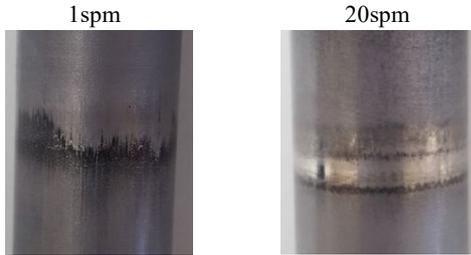


図5 試験後の試験片表面

### 3. 急激な潤滑状態の変化のリアルタイム検出・予測

チタン合金 (Ti-6Al-4V) 製ボルトは温間多段鍛造によって製造されるが、チタンは難加工材であるため、多段鍛造第1工程の前方押し出し時に焼付きが生じやすく、その後の成形が困難になるという問題がある。近年、センサーを用いた成形中の金型の異常検知や荷重負荷のモニタリングが注目されている。例えば、金らはボルト型ピエゾセンサーを鍛造用金型に実装することで、潤滑条件の評価や金型の異常検知の可能性を示している<sup>1)</sup>。そこで、本研究では押し出し型鍛造を模擬した摩擦試験にボルト型ピエゾセンサー<sup>4)</sup>を実装し、摩擦係数とセンサーの出力波形を比較して、チタン合金鍛造におけるトライボ特性の評価を行った。

#### 3.1 実験の概要

図6は、中村らが提案した前方軸-後方缶押し出し型 (RC型) 摩擦試験を参考に開発した、本研究のためのRC型試験の概念図を示す<sup>2)</sup>。ダイインサートとダイケースは締め込み嵌めされている。テーパダイス面-素材間の摩擦係数  $\mu$  が大きいほど、前方押し出し量  $S_f$  は小さく後方押し出し量  $H_U$  は大きくなる。有限要素解析ソフトウェア Simufact Forming を用いて、 $\mu$  を変更してストローク  $S_p$  と  $H_U$  に関する校正線図を作成した。その後、試験後の試験片寸法から真の  $S_f$  を求め、校正線図にプロットし、内挿法を用いて  $\mu$  を同定した。

図7は、ダイケース外周の円周方向変位を測定するためのリング型治具の概要を示す<sup>4)</sup>。この治具により、成形時に生じるダイスへの内圧による周方向変形を締結のためのボルト型ピエゾセンサーの軸方向変形に変換してセンシングする。

表2は、実験条件を示す。試験片には大気酸化を行い、表面の酸化膜を厚くした。その時間  $t_{oxid}$  を変更させて、膜厚の異なる試験片を用意した。

#### 3.2 ダイケース半径方向変位の解析

有限要素解析ソフトウェア Simufact Forming を用いて、治具取り付け位置のリングの半径方向変位について解析を

行った。表3は解析条件を、図8は解析結果を示す。図8より、試験片温度が高いと半径方向変位の傾きが増加するストロークが小さくなることがわかる。同様に、 $\mu$  が大きいと傾きの増加が生じるストロークが小さくなることがわかる。形が進むにつれ半径方向変位が大きくなること、すなわち、この傾き増加のタイミングの違いにより、ダイス内部での摩擦係数の同定を試みた。

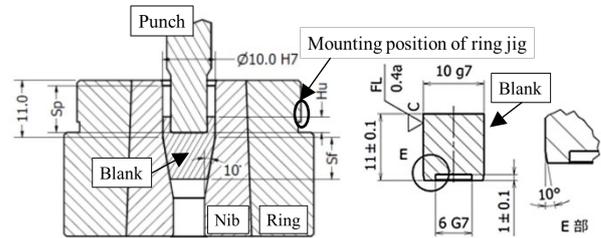


図6 チタン合金の前方軸-後方缶押し出し型摩擦試験法

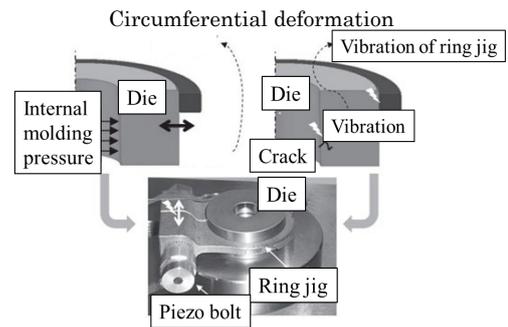


図7 リング型治具の概要

表2 リアルタイム検出のための実験条件

Blank Temperature, °C	20	300	600
Punch stroke, mm	3.7		
Punch speed, mm/s	5		
Lubricant	Dry		
Atmospheric oxidation treatment duration $t_{oxid}$	20 min / 2 h		

表3 工具弾性変形の解析条件

Blank temperature, °C	20, 600
Punch stroke, mm	4.0
Punch speed, mm/s	5
Friction coefficient $\mu$	0.1, 0.2, 0.3

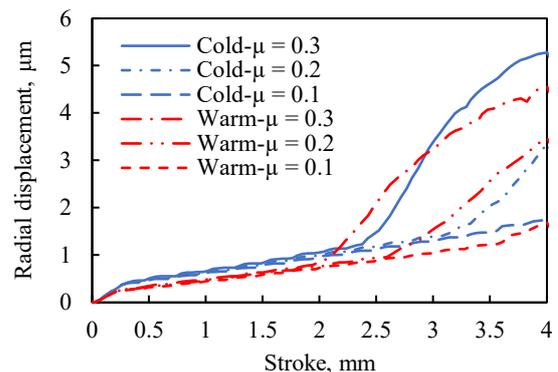


図8 工具変形-ストローク関係の解析結果

### 3.3 実験結果および考察

図9は、試験片温度ごとに求めた $\mu$ を示す。図9より、試験片温度が大きくなると $\mu$ は大きくなり、ばらつきが大きくなっていることがわかる。また、冷間での試験では1回目のみ $\mu$ は他に比べて大きい、試験後の観察により酸化膜のはく離が他の試験片に比べて広範囲に亘っていた。

図10は、 $t_{oxid}=20\text{ min}$ 、加工温度 $300^\circ\text{C}$ でのピエゾセンサーの出力波形を示す。また、同条件での出力電圧変化の傾きをとった図を図11に示す。図11を見ると、丸で囲った部分に変曲点がある。これは、冷間加工の1回目および温間での試験結果すべてに見られた。成形開始から変曲点までの時間を $t_{flex}$ とし、 $\mu$ との関係を表した図を図12に示す。図12より、同条件にて $\mu$ が大きいほど $t_{flex}$ が小さいことがわかる。さらに、同程度の $\mu$ の場合、試験片温度が高いほど $t_{flex}$ が小さくなる傾向にあることがわかる。解析より、 $t_{flex}$ は試験片の充満時に対応する。実験では、 $t_{flex}$ は酸化膜のはく離・凝着の違いによって変化する。また、試験片温度の変化の $t_{flex}$ への影響については、温度による材料の変形抵抗に違いによって、充満のタイミングが変化する。以上から、試験片温度および $t_{flex}$ の大きさから $\mu$ の推定ができるものと期待できる。また、 $\mu$ が大きくなった冷間1回目のように $t_{flex}$ の有無で成形時の異常を検知することができることが期待される。

しかし、本研究では、室温での1回目の実験で見られたような凝着の発生を、センサーの出力から捉えることができず、今後の研究課題として残された。

### 4. 結言

本研究では、鍛造の潤滑性能試験において、2つの課題について調査した。それぞれの課題に対して以下の結論が得られた。

- 1) 摩擦係数の成形速度依存性の評価について、
  - i) 成形速度 $20\text{ spm}$ の場合、 $1\text{ spm}$ と比較して、パンチ及びダイスのクーロン摩擦係数は低下する。成形速度が大きいくほど、摩擦界面は高温となり潤滑剤が融点に達する、あるいはせん断抵抗が減少し滑りが良好になったためと考えられる。この傾向は摩擦発熱により高温になりやすい上パンチ面で先に生じると考えられる。
  - ii) 試験片の表面の観察から、 $1\text{ spm}$ では潤滑剤の下塗り層が材料の変形に追従しているのに対し、 $20\text{ spm}$ では膜切れを起こし金属面が露出している。 $20\text{ spm}$ におけるダイス面上の表面積拡大率が $1\text{ spm}$ のそれよりも大きいためと考えられる。

2) 急激な潤滑状態の変化のリアルタイム検出・予測について、

iii) RC型摩擦試験において、解析結果からは、試験片とダイスとの接触や充満の状態に応じた金型外径寸法の弾性変形が現れる。その変形をボルト型ピエゾセンサーからの出力の変化によって捉えることが可能である。

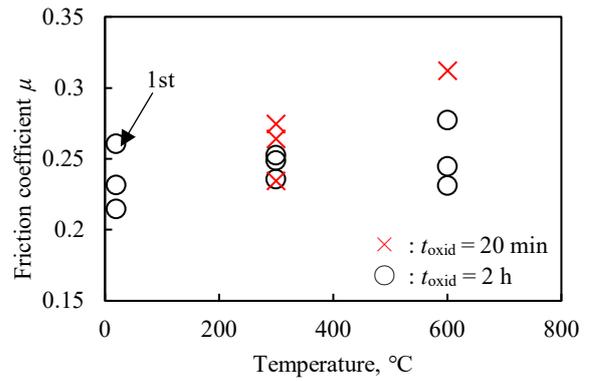


図9 摩擦係数と素材温度の関係

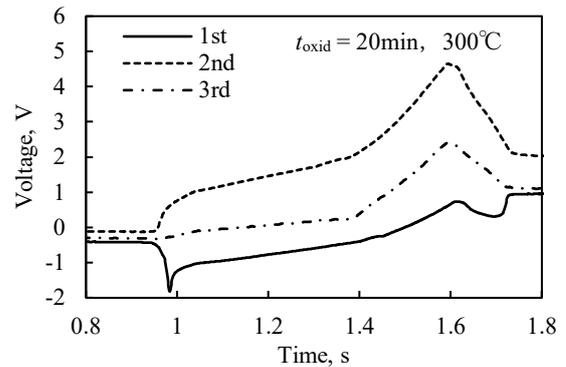


図10 センサー出力例 (温間加工時)

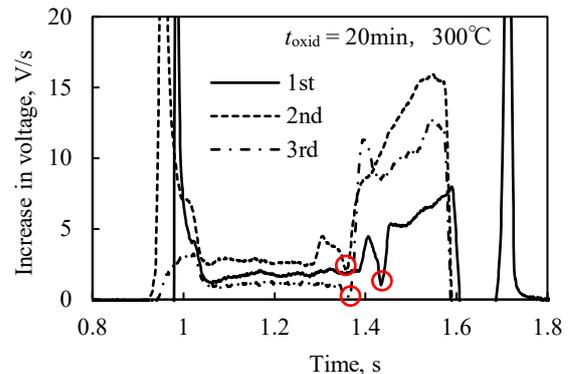


図11 センサー出力の時間増分 (温間加工時)

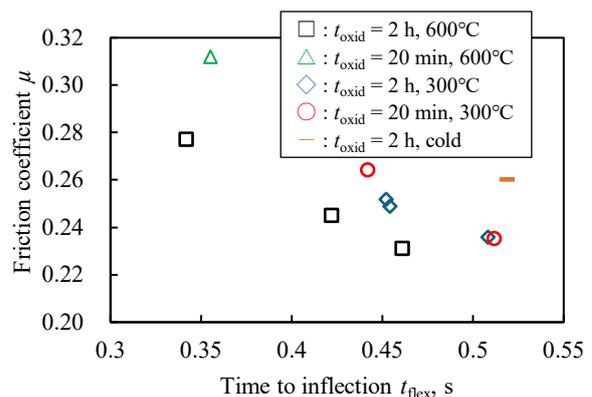


図12 摩擦係数とセンサー出力変曲点時刻の関係

iv) 実験では、出力の急激な増加時刻と摩擦係数の大きさの相関が示唆されたが、ばらつきも大きく、より多くの実験、より最適なリング型治具の設計・製作が必要であることが分かった。

v) 実験では凝着の発生が生じたが、その変化をセンサーによって明確に捉えることはできなかった。

### 謝 辞

本研究は、天田財団 2021 年度一般研究開発助成 AF-2021006-B2 のもと行われた。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 鷺坂芳弘: 冷間鍛造における摩擦特性評価法の研究, 静岡大学博士論文 (2007), 53-56.
- 2) 早川邦夫: 前方軸-後方缶押し鍛造によるチタン合金のトライボロジーの温度依存性の研究, 天田財団助成研究成果報告書 (2021), 64-68.
- 3) 鷺坂芳弘・石橋格・中倉敏成・中村保・早川邦夫: アルミニウム合金の冷間鍛造における環境対応型潤滑剤の性能評価, 塑性と加工, **57-664** (2016), 473-478.
- 4) 金秀英: ボルト型ピエゾセンサーを用いた金型内現象の計測, 塑性と加工 (日本塑性加工学会), **58-681** (2017), 878-882.