

振動付加鍛造中の成形界面のその場直接観察

大阪大学 大学院工学研究科 松本 良

1. はじめに

塑性加工における金型や加工品の不具合・異常は、金型－被加工材界面で生じるトライボロジー現象に起因することが多い。この加工界面でのトライボロジー現象は圧力、すべり、変形、温度等のさまざまな加工条件が複雑に連動して生じる現象であり、未解明な点も多い。

塑性加工中の加工界面でのトライボロジー現象を調べる実験的手法には、加工荷重、被加工材の変形挙動や加工後の被加工材および工具の表面状態から間接的に調べる手法とカメラ等により加工界面を直接観察する手法に大別される。後者では、特にその場観察が有効であり、工具全体もしくは一部をガラス等の透明な材料に置換して、加工中の工具（透明材料）－被加工材界面での接触状態、変形挙動、潤滑挙動等の現象をカメラでリアルタイムに直接観察することが取り込まれている。例えば、冷間引抜き界面でのマイクロ塑性流体潤滑¹⁾、被加工材凸部の冷間据込みによる接触面積比の変化²⁾、熱間しごき加工中の白色系潤滑剤の挙動³⁾、板の冷間曲げしごき加工中のテクスチャリング金型表面の潤滑挙動⁴⁾、鋼製ピンの摺動摩擦界面での発熱⁵⁾等の観察が報告されている。また冷間据込み⁶⁾や板のすべり接触⁷⁾における加工界面の観察では、観察画像に対する画像処理により接触面積比が算出されている。しかしながら、鍛造のような動的かつ高面圧下で被加工材が大変形する塑性加工では、ガラス等の透明材料の強度の観点から、その場観察は困難とされ、多くは取り込まれていない。

一方、サーボプレス等を活用した加工モーションを制御した先進的な塑性加工プロセスにおいて、成形限界の向上や成形荷重の低減等が実現されており、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⁸⁾。例えば、冷間鍛造プロセスにおける振動モーション付加では、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、加工を進める。金型－被加工材界面に負荷・除荷が繰り返され、焼付き・凝着の抑制、成形限界の向上や成形荷重の低減が実現されている^{9)~13)}。しかしながら、これらの発現メカニズムは未解明の点が多い。発現メカニズムの解明について、金型－被加工材界面の被加工材の弾性・塑性変形挙動および潤滑油の流動挙動を把握することがキーポイントであり、その場観察が最も有力な手法である。

2. 目的

振動付加鍛造における潤滑機構の解明を最終的に、本研究（本助成）では冷間鍛造における金型－被加工材界面のその場観察装置の作製と撮影画像の画像処理による潤滑状態の評価手法の考案に取り組む。

冷間前方押し鍛造を対象に、金型－被加工材界面のその場観察のために、鍛造中の負荷に耐えうる観察窓用ガラス材および潤滑油の可視化用マーカ剤を選定する。そして鍛造中のガラス－被加工材界面の撮影を行い、撮影画像の画像処理により画像から潤滑状態の評価を行う。また鍛造中の加工荷重、被加工材の変形形状からも潤滑状態を調べ、撮影画像および画像処理を用いた潤滑状態の評価手法について考察する。

3. 実用的な価値、実用化の見込など

冷間鍛造における金型－被加工材界面のその場観察装置の開発において、キーポイントとなる観察窓用ガラス材および潤滑油の可視化用マーカ剤は他の塑性加工での金型－被加工材界面の観察にも適用可能である。また撮影画像の画像処理による潤滑状態の評価手法は、潤滑状態の定量的な評価手法に発展する可能性を有し、他の塑性加工での潤滑状態との比較を容易にして、潤滑現象を統一的に整理できる可能性がある。

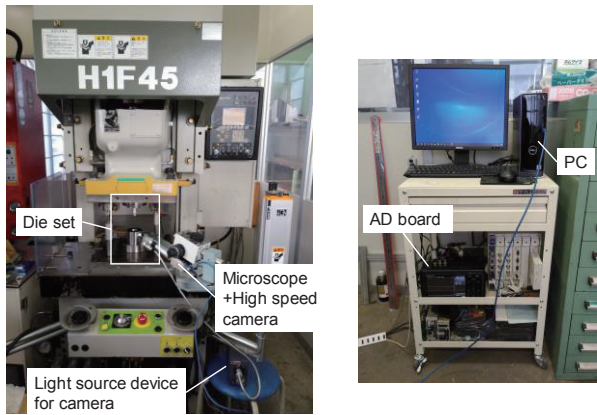
一方、インダストリー4.0やビックデータを背景に、金型内センシング、モニタリングによる塑性加工中の加工情報の収集と活用が注目されている。その場観察による金型－被加工材界面の撮影画像は、AIや機械学習に資する有益なデータの1つであり、荷重、温度等の他の加工情報と組み合わせることで、振動付加鍛造のような次世代塑性加工技術の開発やトライボロジー現象の学術的解明の一助となる可能性がある。

4. 研究内容の詳細

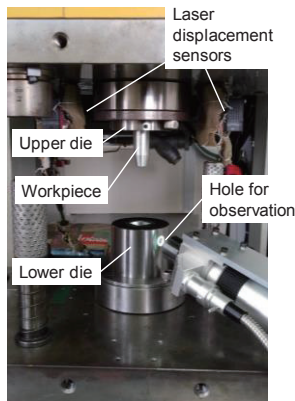
4.1 冷間前方押し鍛造中の金型（ガラス）－試験片界面のその場観察装置

4.1.1 観察装置の構成

Fig. 1 に実験装置の構成を示す。プレス機はサーボプレスを用いた。高速度カメラを用いて、鏡筒（LED光源に接続）とズームレンズを介して下側金型に設けた観察穴からガラス越しに試験片の変形と潤滑油の流れを観察した。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。



(a) Appearance of apparatus.



(b) Die set.

Fig. 1 Photographs of apparatus for in-situ observation of die-workpiece interface.

4.1.2 金型およびガラス

Fig. 2 に冷間前方押し鍛造用金型の形状を示す。ただし、各部の寸法の記述は省略する。本鍛造形状は金型-試験片界面のその場観察を想定して、FEM 解析により考案・設計したものである。上側ダイは中心部に穴を設け、穴の深さ方向と平行に 2 分割構造として、O リングを介して試験片を把持した。下側ダイは中心部に入口（上面）側，出口（下面）側ともに断面が正方形で入口側から出口側にむけてテーパ状の穴部を設け、テーパ面の 1 面には嵌込む観察窓用ガラスの形状に応じたガラス埋込み部を設けた。ガラス埋込み部はテーパ面の背面からテーパ面に対して垂直方向に最小直径 4mm の穴を設け、観察穴とした。下側ダイはテーパ面およびガラス埋込みテーパ面は 2 分割とした合計 5 分割構造とした。なおガラス埋込みテーパ面のダイは 2 形状のガラスに応じて 2 種類用意した。下側コンテナには下側ダイの観察穴に合わせて、直径 6mm の観察穴を設けた。

ガラスは円盤状（直径：12mm，厚さ：5mm）と円錐台状（上面直径：4mm，底面直径：5mm，厚さ 5mm）の 2 種類の形状を用意して、下側ダイのガラス埋込み部に手で嵌めた。ガラスは熱処理強化ソーダガラス，サファイアガラスで作製した。ガラス材の選定は 4.3 節に記す。

4.1.3 試験片，潤滑油およびマーカ剤

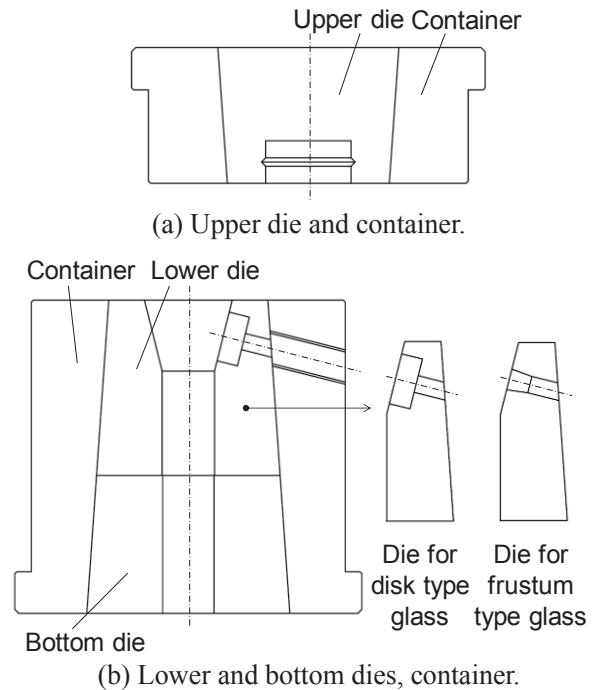


Fig. 2 Dies for in-situ observation of die-workpiece interface in cold extrusion type forging.

試験片は A1070 工業用純アルミニウムを使用し，外径 20mm，内径 12mm，高さ 54mm の中空円筒状とし，下面部は先端部直径 14mm，勾配角度 13°（テーパ長：約 13mm）のテーパ形状とした。なお鍛造による断面減少率は 0.65 とした。

潤滑油は鉱油（動粘度：32mm²/s（40°C）），ポリブテン（動粘度：280mm²/s（40°C）），脂肪酸エステル系作動油（動粘度：2000mm²/s（40°C））を用いた。潤滑油の流動に対する視認性を高めるため，すべての潤滑油はマーカ剤 Colormate green MD（シラド化学（株）製）を約 1vol% の割合で混ぜて濃青色に着色した。マーカ剤の選定は 4.4 節に記す。

4.1.4 鍛造条件および鍛造手順

鍛造開始時に試験片先端部のテーパ面（円断面）と金型テーパ面（四角断面）が接触した場合，試験片表面に塗布した潤滑油の大部分が観察窓外である下側金型の四隅へと押し出された。そこで Fig. 2 で示した金型を用いて，試験片先端部の円断面状のテーパ面を四角断面状のテーパ面に無潤滑で予加工（ストローク：16mm）し，鍛造開始時に平面同士の接触となるようにした。

予加工後の試験片の表面全体に刷毛で潤滑油を塗布した。着色剤と混合した潤滑油はさらに石油ベンジンで希釈し，希釈した潤滑油の塗布体積を調整することで，膜厚 20~350μm に調整した。本加工は平均加工速度 6.7mm/s，ストローク 13mm で行った。

4.2 撮影条件および撮影画像の評価方法

4.2.1 撮影条件

下側金型に設けた観察穴の大きさにあわせて，撮影範囲を縦方向約 3mm×横方向約 4mm とし

て、ズームレンズの拡大倍率を 80 倍、600pixel × 800pixel の画像を撮影した。高速度カメラはシャッター速度を 1/1000 秒とし、1 秒間の撮影枚数を 800 枚に設定した。

4.2.2 撮影画像の評価方法

本研究では撮影画像のグレースケール画素値（輝度）により、潤滑状態の定量的な評価を試みた。画像処理は Python で記述したプログラムにより行った。撮影したカラー画像（ビットマップファイル）の各画素点の RGB 値をグレースケールに変換して、全画素点での輝度の平均値を撮影画像の画素値とした。画素値は 0（黒）から 255（白）の間の値を取る。本撮影条件下では、着色潤滑油の色は暗く、A1070 試験片の表面色は明るいいため、画素値が高いほど金型-試験片界面の潤滑油膜厚が薄くなったと判断した。

4.3 観察窓用ガラス材の耐圧実験結果

ガラス材には石英ガラス、熱処理強化ソーダガラス、耐熱結晶化ガラス (Nextrema®)、サファイアガラス、ポリカーボネート、アクリル樹脂（ポリメタクリル酸メチル樹脂）を準備し、据込み圧縮および冷間前方押し鍛造での耐圧実験により選定した。以降では、便宜上、ポリカーボネート、アクリル樹脂もガラスと記す。

4.3.1 据込み圧縮

平金型による据込み圧縮では、下側金型の端面中央部にガラス形状に応じた埋込み用穴部を設けた。下側金型に嵌めたガラス上面に円柱状の試験片を中心軸が一致するように置き、無潤滑、室温で試験片を圧縮した。試験片は A1070 アルミニウムおよび C1100-O 銅で作製した。

円錐台状の石英ガラスと円盤状の熱処理強化ソーダガラスは面圧約 200MPa まで割れが生じなかった。石英ガラスでは円錐台状の方が円盤状より高面圧まで割れず、これは金型のテーパ状埋込み穴部に沈み込むことで衝撃を吸収したためと考えられる。ポリカーボネートとアクリル樹脂は弾性変形し、ポリカーボネートは約 100MPa、アクリル樹脂は約 150MPa で塑性変形が生じたが、割れには至らなかった。

以上より、前方押し鍛造では円錐台状の石英ガラス、円盤状の熱処理強化ソーダガラス、ポリカーボネート、アクリル樹脂を用いた。

4.3.2 前方押し鍛造

4.3.1 項で選定した材料および円錐台状のサファイアガラスを用いた。前方押し鍛造では据込み圧縮と比べて耐面圧が低下した。また熱処理強化ソーダガラスでは直径 15mm のものの方が直径 12mm のものに比べて耐面圧が約 50%に低下した。これはガラス面に対して斜め方向に圧力が負荷されることによるせん断力や、押し出し下方部ほど接触圧力が高くなることによるガラス角部（特に下方部）の応力集中が原因と考えられる。

実験結果より、その場観察装置には約 80MPa の面圧まで割れなかった直径 12mm の円盤状の熱処理強化ソーダガラスと約 100MPa の面圧まで割れなかった円錐台状のサファイアガラスを使用することとした。熱処理強化ソーダガラスはサファイアガラスより耐面圧が低い、直径 4mm の観察範囲に比べてガラス部分が直径 12mm と広く、金型表面とガラス表面の 0.5mm 程度の段差が観察範囲から遠ざかり、押し出しによるすべり変形を観察しやすい利点がある。ポリカーボネートとアクリル樹脂は破損することはなかったが、鍛造中の弾性変形により撮影画像が歪む問題が生じたため、使用を見送る。

4.4 潤滑油の可視化用マーカ剤の観察実験結果

潤滑油のマーカ剤には液体では銅クロロフィル+サラダ油混合液（濃緑）、Colormate green MD（濃青）、蛍光絵具（黄）、油絵具（黒）、墨汁（黒）、固体では Oil red 6B（赤）、蓄光粉末（黄）、ラメ粉入り絵具（赤）を準備し、冷間前方押し鍛造金型を用いて、手押し圧力下と鍛造下での観察実験により選定した。

4.4.1 手押し圧力下での観察

前方押し鍛造後の試験片表面にマーカ剤を混合した潤滑油を塗布し、下側金型に再度挿入して、手で押し出し方向に負荷をかけた。

液体マーカ剤では、銅クロロフィル、Colormate green MD、油絵具は潤滑油に様に溶け、着色された潤滑油をカメラで明瞭に撮影することができた。また墨汁は潤滑油に様に溶けなかったが、潤滑油中に点状に分散したため、流動を撮影することができた。一方、蛍光絵具は潤滑油には溶けず、発色も弱かったため、無着色の潤滑油の撮影結果と大差がなく、マーカ剤には適さなかった。

次に固体マーカ剤では、粒径 10 μ m 以下の Oil red 6B および粒径約 100 μ m の蓄光粉末は潤滑油とともに流動する様子を撮影できたが、粒径約 400 μ m のラメ粉は潤滑油中を流動しなかった。また蓄光粉末については十分に蓄光した粒子の発光状態を撮影したが、発光は確認できなかった。撮影視野が約 3mm × 約 4mm と狭く、潤滑油の膜厚も約 200~300 μ m と薄いことにより、撮影視野内の粒子数が少なく、カメラで撮影できる光量に達しなかったためと考えられる。

以上より、前方押し鍛造におけるマーカ剤の評価には、液体マーカ剤は銅クロロフィル、Colormate green MD、油絵具、墨汁、固体マーカ剤は Oil red 6B、蓄光粉末を用いることとした。

4.4.2 前方押し鍛造

鍛造により界面には約 50~100MPa の圧力が加わり、潤滑油の膜厚は手押し圧力下での約 200~300 μ m から 50 μ m 以下になった。膜厚が薄くなったことにより、銅クロロフィル、墨汁、Oil red 6B は鍛造開始直後からマーカ剤としての視

認性が低下した。また蓄光粉末は潤滑油中に存在を確認できたが、鍛造中に試験片表面に粒子が埋まり、試験片とともに押し出し方向へすべったため、潤滑油の流動を撮影できなかった。一方、Colormate green MD と油絵具は鍛造中も潤滑油の着色が残ることが確認できた。ただし、油絵具はガラス表面に顔料が付着し、マーカ剤として流動していない箇所が見られた。

以上より、鍛造中の界面の撮影実験に用いるマーカ剤は Colormate green MD とした。濃青色に着色された領域に潤滑油が存在し、青色が薄いほど潤滑油の膜厚が薄いとみなすこととした。

4.4.3 潤滑油の膜厚と画素値の関係

撮影画像の画素値におよぼすマーカ剤混合潤滑油の膜厚の影響を調べるために、鉱油（動粘度：32mm²/s (40°C)）、ポリブテン（動粘度：280mm²/s (40°C)）、脂肪酸エステル系作動油（動粘度：2000mm²/s (40°C)）の粘度の異なる3種類の潤滑油を用いて潤滑油膜の撮影を行った。潤滑油には Colormate green MD を混合した。A1070 アルミニウム製治具の溝部分に潤滑油を塗布し、塗布面を前方押し出し鍛造用金型に嵌めた熱処理強化ソーダガラスの表面に向けて配置し、治具を指で保持した。潤滑油膜とガラスは接触させず、無負荷状態の油膜を撮影した。

マーカ剤混合潤滑油の膜厚毎の撮影画像の画素値の算出結果を Fig. 3 に示す。潤滑油の種類によらず、膜厚が 10~60μm では膜厚が厚いほど画素値は低下した。一方、膜厚が 60μm 以上では着色が十分に濃く、画素値はほぼ一定となり、膜厚が 10μm 以下では着色が薄く、画素値は無潤滑状態とほぼ等しくなった。

以上より、膜厚が 10~60μm 程度の範囲では画素値により潤滑油の膜厚の変化を定量的に評価できることが示唆される。

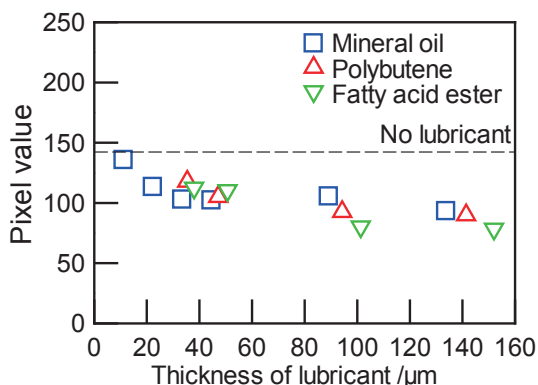


Fig. 3 Relationship between pixel value of photograph of lubricant applied on tool surface and thickness of lubricants.

4.5 冷間前方押し出し鍛造中の金型（ガラス）－試験片界面のその場観察結果

4.4.3 項で用いた3種類の潤滑油を用いて鍛造中のガラス－試験片界面の撮影を行った。ただ

し、潤滑油の塗布厚さは鉱油では 100μm、ポリブテンでは 250μm、脂肪酸エステル系作動油では 350μm であった。鍛造初期に界面に閉込められる潤滑油の理論膜厚は、鉱油では 4.6μm、ポリブテンでは 9.5μm、脂肪酸エステル系作動油では 18.8μm と求められ、4.4.3 項で示唆された評価可能な膜厚の下限付近となった。

Fig. 4 にそれぞれのストロークでの撮影画像から算出した画素値を示す。無潤滑の場合では画素値は緩やかに低下したものの210~240の高い値を維持した。一方、潤滑油を塗布した場合は脂肪酸エステル系作動油、ポリブテン、鉱油の順で画素値は低く、いずれもストローク 2mm から 4mm にかけて画素値は 20~30 程度低下した後、鍛造終盤にかけて画素値が上昇した。そして、ストローク 12mm ではいずれも画素値は 150~170 程度となり、撮影画像の目視結果とも良い対応関係が得られた。画素値の一時的な低下は、試験片と下側金型の接触開始直後に潤滑油の閉込めが生じ、観察部の膜厚が一時的に厚くなったためと考えられる。また高粘度潤滑油の方が低下度は大きく、金型－試験片間に閉込められた潤滑油量は前述の理論閉込め膜厚と同じく、脂肪酸エステル系作動油、ポリブテン、鉱油の潤滑油の順で多かったと考えられる。一方、鍛造終盤ではいずれの潤滑油の場合も画素値は高く、潤滑膜厚は非常に薄くなったと考えられる。

4.4.3 項で示した潤滑油の膜厚と画素値の関係では無潤滑での画素値は約 150 であったが、無潤滑での鍛造では画素値は 200 以上の値となった。これは試験片に圧力が加わることで、ガラス－試験片間の真実接触面積が増加し、光の反射量が増加したためと考えられる。

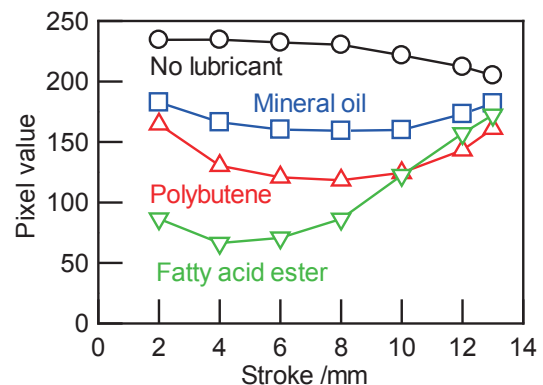


Fig. 4 Relationship between pixel value of photograph of glass-workpiece interface and forging stroke in extrusion type forging with lubricants.

4.6 潤滑状態の考察

鍛造後試験片の高さと最大直径から潤滑状態の考察を行った。鍛造の初期に試験片には押し出し方向への流動および下側金型テーパ部への充満の変形が生じる。潤滑効果が高いほど試験片

は下側金型テーパ出口側へ押出され、下側金型テーパ入口側角部への充填が遅れるため、下側金型テーパ入口部からはみ出して半径方向へと広がる試験片の体積が小さくなる。以上から、高さが高く、最大直径が小さい試験片ほど良い潤滑状態で鍛造されたと判断できる。4.5 節での鍛造実験での鍛造後の試験片形状の測定結果を Table 1 に示す。いずれの潤滑油の場合も無潤滑の場合と比較して試験片高さが 2~3mm 高く、最大直径も 2~3mm 小さく、脂肪酸エステル系作動油、鉱油、ポリブテンの順で潤滑効果が高かったと判断できる。

次に鍛造中の加工荷重—ストローク線図を Fig. 5 に示す。ストローク 8mm 付近で試験片が下側金型のテーパ部全面に充填し、以降は押し出し方向への流動と上側金型と下側金型の間での半径方向への流動が生じたため、加工荷重の上昇度が大きくなった。いずれの潤滑油の場合も、無潤滑の場合と比較してストローク 13mm での加工荷重が約 30~40kN 低く、脂肪酸エステル系作動油、鉱油、ポリブテンの順で高くなった。したがって、脂肪酸エステル系作動油、鉱油、ポリブテンの順で潤滑効果が高かったと判断でき、鍛造後の試験片形状から判断した潤滑効果と対応した結果となった。

一方、4.5 節での画素値からは潤滑油の閉込め量が脂肪酸エステル系作動油、ポリブテン、鉱油の順で多いと判断した。潤滑油の閉込め量と潤滑効果に対応しないのは潤滑油の特性の差によるものと考えられ、画素値による潤滑状態の定量的評価には観察手法のさらなる工夫や有効な実験条件のさらなる考察が必要である。

Table 1 Dimensions of workpiece after extrusion type forging with lubricants.

Lubricant	No lubricant	Mineral oil	Polybutene	Fatty acid ester
Height /mm	38.93	41.61	41.06	41.95
Maximum diameter /mm	33.90	31.30	31.97	31.00

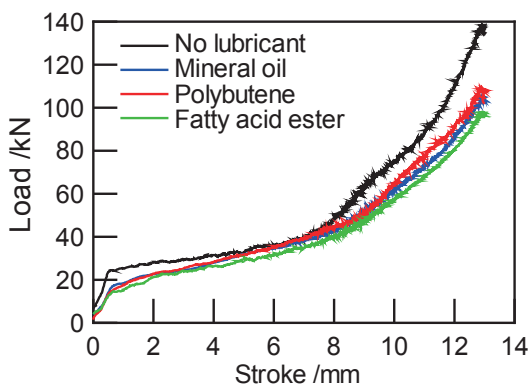


Fig. 5 Forging load–stroke curve in extrusion type forging with lubricants.

5. まとめ(結言)

本研究ではガラス製観察窓を設けた鍛造用金型と高速度カメラによる冷間前方押し出し鍛造中の金型—被加工材界面の潤滑状態のその場観察に取り組んだ。また撮影画像の画素値による潤滑状態の定量的評価を試みた。

- 1) 観察窓用ガラス材を検討・選定した。円盤状熱処理強化ソーダガラスおよび円錐台状サファイアガラスは 80~100MPa 程度の面圧まで破損せず、純アルミニウム程度の強度の素材の鍛造であれば、観察窓に使用できると判断できた。
- 2) 潤滑油の可視化マーカ剤を検討・選定した。液体状の Colormate green MD を潤滑油に 1vol%程度混合することで、無負荷状態の界面では 10~60 μ m の潤滑膜厚を画素値による定量的な評価が可能であった。
- 3) 冷間前方押し出し鍛造中の金型—被加工材界面の撮影画像について、加工界面への潤滑油の閉込め膜厚の理論値と画素値には相関関係があることが分かったが、潤滑油の粘度および塗布膜厚と画素値の相関関係は不明確であった。さらなる検討を継続するとともに、振動付加鍛造中の潤滑機構を解明する予定である。

本研究は金型技術振興財団平成 30 年度「研究開発助成」を受けて実施したことを付記し、感謝の意を表す。また本研究の一部は科学研究費補助金・基盤研究(C) (課題番号: 19K05097)を受けて実施したことを付記し、感謝の意を表す。

6. 参考文献

- 1) 小豆島明ほか: 塑性と加工, 30-347 (1989), 1631-1638.
- 2) S. Weidel et al.: Prod. Eng. Res. Dev., 4-(2-3) (2010), 107-114.
- 3) 石川昭都ほか: 67 回塑加連講論, (2016), 103-104.
- 4) 小林裕生ほか: 68 回塑加連講論, (2017), 191-192.
- 5) Y. Matsuzaki et al.: Tribol. Lett., 66-4 (2018), 142.
- 6) A. Azushima et al.: CIRP Ann. Manuf. Technol., 45-1 (1996), 205-210.
- 7) S. Lo et al.: J. Tribol., 124-2 (2002), 229-238.
- 8) K. Osakada et al.: CIRP Ann. Manuf. Technol., 60-2 (2011), 651-672.
- 9) 前野智美ほか: 塑性と加工, 50-585 (2009), 951-955.
- 10) R. Matsumoto et al.: CIRP Ann. Manuf. Technol., 60-1 (2011), 315-318.
- 11) P. Groche et al.: CIRP Ann. Manuf. Technol., 63-1 (2014), 285-288.
- 12) T. Ishikawa et al.: CIRP Ann. Manuf. Technol., 63-1 (2014), 289-292.
- 13) Q. Zhang et al.: J. Mater. Process. Technol., 244 (2017), 166-177.