据込み－押出し形摩擦試験法による 冷間鍛造用潤滑被膜の摩擦特性評価

王 志剛* 小見山 忍**

徳永 龍一** 山岡 祐一**

Development of Upsetting-Extrusion Type Tribometer for Evaluating Lubricant Coating Performance in Cold Forging

Zhigang WANG*, Shinobu KOMIYAMA**,

Ryuichi TOKUNAGA** and Yuichi YAMAOKA**

(Received on March 9, 2009)

A new upsetting-extrusion type tribometer has been developed to investigate the performance of lubricant coatings coated on the side surface of steel wire for cold forging. In this tribo-test, a lubricant coating is first destroyed by an upsetting process due to the free expansion of the material surface and then evaluated on the basis of extrusion. The frictional shear factor of the lubricant coating can be obtained by plotting the measured forging load and the position after forging of a centerline drawn on the billet in advance on the calibration curve obtained by Finite Element Method. A series of experiments was carried out using two types of bonderized coating and an applied alternative coating. It was revealed that the bonderized coating provides much better performance than the alternative coating when the lubricant coating is thinned by a large surface expansion during the extrusion.

Key words: forging, extrusion, tribology, friction test, lubricant, FEM.

1. 緒 言

近年、ボンデ被膜に代わる新しい潤滑被膜の開発が盛んである¹⁾。一般に、代替被膜は、鍛造加工をシミュレートした潤滑評価方法の結果に基づいて設計される。したがって実用性に優れた潤滑被膜の開発には的確な潤滑評価方法が必要であり、これまでも種々の試験法が提案されている。例えば、被加工材の表面積拡大比は小さいが摩擦係数が簡単に見積もられるリング圧縮試験法²⁾、より実加工に近い面圧と表面積拡大比で被膜評価ができるスパイクテスト³⁾、高い面圧と表面積拡大比が与えられるように工夫したテーパカップ試験法⁴⁾などが挙げられ、これらの潤滑評価方法を利用して設計された代替被膜が市場化されている。

ところで最近、パーツフォーマーなどの多段鍛造機を用いて複合的な加工により複雑な形状を有する冷間鍛造品が製造されている。そのような加工での潤滑被膜は様々な加工形態に繰り返し曝され、大きなダメージを受ける。現在

のところで、このような多段鍛造における市場評価ではボンデ代替被膜の性能は必ずしも十分とはいえない。前段加工の塑性変形によって、潤滑被膜の付着状態が変化し、特に金型に接触しない自由表面での被膜構造の破壊は深刻で、後段加工の潤滑状態に悪影響を及ぼすと思われる。

本研究では、パーツフォーマーなどの多段加工工程を想定し、線材などの円柱側面を対象に、端面拘束での据込み加工と押出し加工とを組み合わせた潤滑被膜評価方法を提案する。本評価方法を用いて、ボンデ被膜と試作した代替被膜との潤滑性能の差異を検討する。

2. 試験法原理および試験方法

2.1 試験法原理

Fig.1に据込み－押出し形摩擦試験法の原理図を示す。試験部は、上パンチ、下パンチ、サイドダイで構成されている。上パンチとサイドダイとははめ合いになっており、下パンチとサイドダイの間には2mmのクリアランスを有している。また、上パンチ端面全面と下パンチ端面の中心から7.7mmの範囲に同心円溝が加工されており、試料は、上下パンチにより端面拘束条件下で据込み加工される(Fig.1(a))。このとき、試料側面は自由表面で変形し、潤滑被膜に軸方向の圧縮と円周方向の引張りひずみが付与さ

* 岐阜大学工学部 〒501-1193 岐阜市柳戸1番1
Department of Mechanical Systems Engineering,
Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan.

** 岐阜大学大学院工学研究科 〒501-1193 岐阜市柳戸1番1
Graduate Student, Department of Mechanical Systems Engineering,
Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan.

Fig.1 Principle of upsetting-extrusion type tribometer

れる．さらに上パンチの下降加圧により試料側面を下パンチとサイドダイとのクリアランスに押し出す，押し出し工程に移行する (Fig.1(b))．このとき，前段の据込み加工で張出された試料側面の潤滑被膜は，大きな表面積拡大と高い面圧下での滑りに曝される．

本試験法における潤滑被膜の変形過程を明らかにするために有限要素解析を行った．Fig.2 に解析モデルを示す．解析には市販の有限要素解析ソフト DEFORM-2D を用いた．被加工材の初期端面は固着条件とし，被加工材側面部は潤滑被膜による潤滑状態として摩擦せん断係数を0.1とした．また，被膜の変形が重要と思われる箇所にはポイントを付け，加工による変形過程を追跡した．

Fig.3 に据込み工程における相当ひずみ分布，Fig.4 に押し出し工程における相当ひずみ速度分布をそれぞれ示す．Fig.3 中の P2, P3 付近の被膜が，下パンチ端面に倒れ込むまでの自由表面状態で被った相当ひずみは0.6程度であり，下地表面のあれとともに被膜の表面構造はかなり変化するものと思われる．押し出し工程において，下パンチ側の被加工材の変形はパンチ肩 R 部に集中しており，P2, P3 付近の被膜は比較的変形の小さい拘束溝付近から表面積拡大を伴いながら押し出され，下パンチを潤滑している．このように本試験法は，被加工材側面で自由変形し，下パンチ端面に倒れ込んだ被膜の押し出し時の潤滑性能を評価している．

本評価方法では，下パンチのランド部長さ (L) を変更することにより，滑り距離を任意に設定できる．本試験でのランド部長さは0.5mm と 3.0mm の2種類とした．加工後の下パンチ引き抜き時に発生する焼付きを抑制するために，ランド部とサイドダイには 1° 以下の抜き勾配を付与した (Fig.1(Detail of B))．

Fig.2 FEM model

Fig.3 Equivalent strain by FEM (stroke : 13.0mm)

Fig.4 Equivalent strain rate by FEM (stroke : 23.5mm)

2.2 据込み工程の役割

Fig.5 に試験中の試料形状の変化，および押し出し時に内壁面に回り込む部位の据込み前後での被膜表面 SEM 像を示す．据込み前 (E) にはボンデ被膜特有の結晶が観察されるが，据込み途中 (F) では結晶形状が崩れている．押し出し前までに下パンチ端面に倒れ込んだ被膜 (G) は接触圧力によって平坦化されている．据込みによる被膜構成成分の強度変化を Fig.6 に示す．ボンデ被膜由来のリンと，そ

の上層に位置する石けん層由来の炭素の検出強度は、据込みによって低下がみられ、特に炭素の低下量が多い。この結果から、据込みにおける自由表面での張出し過程において潤滑被膜の構造は下地表面のあれとともに崩壊し、脱落が促されていることが推測できる。被膜が下パンチ端面と接触するようになると脱落はそれ以上進まなくなる。

Fig.5 Appearance of billet surface after forging process

Fig.6 Variations in lubricant layer by upsetting

後述するように、本試験法において摩擦状態の推定は有限要素解析に基づく校正線図を用いる。有限要素解析に必要な試料の塑性変形特性はこの据込み工程における加工荷重の変化から求める。Fig.7に据込み工程における下パンチ荷重の推移を示す。試料は原線（直径 14.00mm）からの伸線加工履歴を有するため、予ひずみを考慮した n 乗法則に従うとして有限要素解析により求めた試料の塑性変形特性の近似式 σ (MPa) を図中に示した。

Fig.7 Variations in forging load with punch stroke in upsetting process

2.3 摩擦せん断係数校正線図

Fig.8 に下パンチと試料間およびサイドダイと試料間の摩擦せん断係数を 0.1 と仮定し、下パンチランド長さを 3mm として有限要素解析で求めた、パンチストロークとパンチランド部における表面積拡大比の平均値との関係を示す。内壁部の表面積拡大比はパンチストロークの増加により急激に大きくなり、35 以上にも達する。外壁部の表面積拡大比は 5 以下である。

Fig.8 Relationship between surface expansion ratio and punch stroke by FEM analysis

本評価法では、表面積拡大比の大きい下パンチと試料間の摩擦せん断係数 m_p および表面積拡大比の小さいサイドダイと試料間の摩擦せん断係数 m_d を同時に求めるために、下パンチ荷重 P と試料中心線位置を計測する。計測値を用いて鍛造でよく用いられている拘束係数と体積比を算出し、摩擦せん断係数校正線図にプロットすることによって摩擦せん断係数を求める。拘束係数 f (Constraint coefficient) は式 (1) より求められる。

$$f = \frac{P}{A\sigma} \quad (1)$$

ここで、 P は下パンチ荷重、 A は下パンチ断面積、 σ は P に対応するパンチストロークにおける被加工材平均変形抵抗で、以下のように算出される。

被加工材の塑性変形特性は式 (2) の n 乗法則に従うと仮定し、同一摩擦条件における異なる 2 種類の被加工材の荷重比を求め、そのパンチストロークにおける被加工材の相当ひずみの平均値 ε_m を式 (3) より算出する。

$$\sigma = C(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{C_1(\varepsilon_{01} + \varepsilon_m)^{n_1}}{C_2(\varepsilon_{02} + \varepsilon_m)^{n_2}} \quad (3)$$

求めた ε_m を式 (2) に代入し、そのパンチストロークに対応する被加工材の平均変形抵抗を算出する。このように求めた拘束係数 f を用いることによって異なる被加工材を用いても、同一の摩擦せん断係数校正線図で対応可能となるとともに、摩擦せん断係数の変化に対応する鍛造加工の状況変化が捉えやすくなる。Fig.9 に摩擦せん断係数校正線図と、異なる変形特性の被加工材について摩擦条件を変化させ有限要素解析を行った結果を示す。異なる試料材質に対して十分に対応できていることがわかる。

Fig.5 に示したように、試料軸方向の中心にあらかじめ中心線を罫書いておき、その中心線の鍛造加工後位置からカップ開口部端面までの体積と試料全体積の半分との比 ϕ (Volume ratio) を求め、摩擦せん断係数校正線図に用いた。中心線の加工後位置は、据込み工程から押出しの一方方向流れに移行する時点（ストローク 22.3mm 付近）までの、サイドダイおよび下パンチと試料間の摩擦状態によりほぼ決定される。Fig.9 に示すように内壁部の摩擦せん断係数 m_p は下パンチ荷重の計測値から得られる拘束係数 f に応答性がよい。

Fig.9 Calibration curve by FEM analysis for calculating frictional shear factor and comparison of materials

3. 実験条件および焼付き評価基準

実験には 1000kN 油圧プレス機を用いた。Table 1 に実験条件を示す。Lub.A および Lub.B は、主に鋼線分野で用いられているボンデ系被膜、Lub.C は、無機塩をベースに潤滑剤を混合することで試作した水溶性の代替被膜である。被膜処理はそれぞれの常法で行い、被膜量が約 10g/m² になるように調整した。実験は再現性を確認するために、同一条件で 3~4 回を行い、全てのデータを検討対象とした。

本研究では目視で焼付き状態を評価した。Fig.10 に加工後試料内面の焼付き状態についての評価基準を示す。焼付きが見られないか一部に僅かな筋のみが見られる場合を正常、内壁面の一部に顕著な焼付き痕が見られる場合を部分焼付き、内壁面全面に亘って焼付いている場合を全面焼付きとし、3 段階に大別して評価を行った。

Table 1 Experimental conditions

Billet	SWRM8, ϕ 11.95mm $\times$ 28.0mm Tensile strength : 462MPa
Lubricant	Lub.A : Zinc phosphate and soap Lub.B : Zinc phosphate and lime Lub.C : Water soluble type
Tool (Punches and Side die)	Material : Cemented carbide (WC - 15%Co) Surface roughness of punch : 0.74 μ m Rz
Processing conditions	Punch stroke : 25mm Punch speed : 10mm/sec

Fig.10 Rating scale of seizure

4. 実験結果

4.1 据込み工程の影響

Fig.11 に、据込み工程でダメージを受けた被膜に押出し加工を行った試料内面 (H) と、一般の押出し加工を想定し、押出し工程直前の試験片にダメージを受けていない被膜を処理して押出し加工を行った試料内面 (I) の外観、SEM 像、残存被膜構成成分強度の比較を示す。

前者 (H) の内壁面は被膜の残存が極めて少ない鏡面であるが、後者 (I) では壁面全体がくすんでおり多量の被膜が残存している。この様子は SEM 像での観察からも明確にみられ、(H) の表面が全体的に平坦化されており、(I) では素材表面を覆いつくす被膜の様相が観察される。被膜構成成分の存在状態を比較すると、(H) ではボンデ被膜由来のリンとその上層に位置する石けん層由来の炭素の検出強度が非常に低いが、(I) ではリン、炭素ともに検出強度が大きく、押出し加工時の加工界面に十分な被膜が供給されたと推定される。

本試験法における、据込み工程による被膜へのダメージが、押出し加工時の被膜の潤滑性能に、大きな影響を与えている。

Fig.11 Effect of upsetting process on lubrication performance

4.2 カップ内外表面の潤滑状態

Fig.12 にパンチランド長 0.5mm におけるパンチストロークと荷重との関係を示す。被膜間の潤滑状態の差異，加工途中での焼付き発生の有無が荷重差として現れている。

Fig.13 にパンチランド長 0.5mm で加工した Lub.A 被膜処理品の内外壁面の SEM 写真像を示す。表面積拡大が小さい外壁面と比較して表面積拡大の大きい内壁面は平坦化されており，被膜の残存状態は極めて薄層であることが推測される。Fig.14 は，上記加工品内壁面をストローク方向に観察した断面 SEM 写真像である。押し出し工程における加工ストローク中期と後期とでは表面積拡大比が大きく異なるため，後期での被膜厚みは極端に薄くなっていることが確認できる。このように本評価方法での内壁面においては潤滑被膜の薄膜状態での潤滑性や耐焼付き能力が問われる。

Fig.15 に押し出し加工後のカップ底部の SEM 写真像を示す。押し出し加工における潤滑被膜の供給源である底部では，被膜表面は同心円溝付近 (a) から外壁部 (b) に向かって滑る過程で平坦化されている。

Fig.12 Relationship between forging load and punch stroke in extrusion process

Fig.13 Surface appearance of forged cup

Fig.14 State of lubricant layer on inside of forged cup

Fig.15 Surface appearance of forged cup bottom

4.3 潤滑被膜の特性差

実験結果を摩擦せん断係数校正線図にプロットし，内外壁面での摩擦せん断係数を求めた。なお，加工過程での潤滑状態評価は，表面積拡大比が比較的大きいストローク 23.5mm と 24.5mm とで行った。ランド長さ 0.5mm における実験結果を Fig.16, Fig.17 に示す。表面積拡大比が小さい外壁面での摩擦せん断係数は各被膜共に 0.1 前後で差異は小さいが，表面積拡大比が大きい内壁面での差異は大きく，顕著な焼付きが見られた Lub.C では摩擦せん断係数の大きな上昇がみられた。なお，部分焼付きがみられた Lub.A および Lub.B については，比較的摩擦せん断係数が高めであるが，パンチストロークによる変化が少ないことから，このストローク範囲では焼付き部位の拡大が起こらなかったものと思われる。

Fig.16 Calibration curve and experiment result for punch land length 0.5mm and stroke 23.5mm

Fig.17 Calibration curve and experiment result for punch land length 0.5mm and stroke 24.5mm

Fig.18 と Fig.19 に表面積拡大毎の外壁部摩擦せん断係数 m_d と内壁部摩擦せん断係数 m_p を示す。両図の横軸は、便宜上ランド長さ 3.0mm, $m_p=m_d=0.1$ の場合の表面積拡大比を用いた。

Fig.20 にパンチランド長さによる各被膜の摩擦せん断係数および焼付き状態の変化をまとめて示す。Lub.A および Lub.B は、本実験範囲の表面積拡大比において摩擦せん断係数の変化は小さいが、ランド長さの増大によって焼付きを起す確率は増加している。一方、Lub.C は表面積拡大が小さい範囲では摩擦せん断係数が小さいが、表面積拡大の増大により焼付きに至りやすくなり摩擦せん断係数が上昇する。これらの結果から、Lub.C の表面積拡大や滑り距離への耐性は、Lub.A および Lub.B との比較で劣っていると推測できる。本実験の範囲では、Lub.A と Lub.B の性能に大きな差異は見られなかった。

Fig.18 Relationship between frictional shear factor and surface expansion ratio for punch land length 0.5mm

Fig.19 Relationship between frictional shear factor and surface expansion ratio for punch land length 3.0mm

Fig.20 Comparison of anti-seizure ability among lubricants

5. 結 論

多段鍛造加工の実状を考慮した鍛造形潤滑被膜評価方法の確立を目指し、円柱側面の潤滑被膜を対象とした据込み-押出し形摩擦試験法を開発した。本試験法の特徴は以下の通りである。

- 1) あらかじめ罫書いた中心線の加工後位置と成形荷重とを用いた校正線図により、表面積拡大比が大きく異なる二つの摩擦面の摩擦せん断係数を同時に得ることができる。
- 2) 評価対象の被膜にダメージを与える端面拘束据込み工程と、押出し工程とを組み合わせることによって多段鍛造における潤滑被膜の密着強度や耐剥離性などを加味した評価が可能となる。
- 3) 端面拘束据込み工程を試験法内に組み込み、摩擦せん断係数を推定する際に必要な被加工材の変形抵抗曲線の取得作業を省くことができる。
- 4) 本試験法を用いて試作したボンデ代替被膜を評価した結果、ボンデ系被膜と比較して、代替被膜は表面積拡大により焼付きに至りやすかった。

参 考 文 献

- 1) 榎村徳俊：プロセス・トライボロジー分科会年間報告書，(2000)，79-91.
- 2) Male, A. T. & Cockcroft, M. G. : J. of the Inst. of Metals, **93** (1964), 38-46.
- 3) 五十川幸宏・柳原和夫・木村篤良・戸澤康寿：42 回塑加連講論，(1991)，623-626.
- 4) 伊藤樹一・吉田広明・五十川幸宏・土井善久・堂田邦明：塑性と加工，**48**-555(2007)，303-307.