解説

Review

最近の鍛造用皮膜・潤滑剤の評価方法について

五十川幸宏*¹, 伊藤樹一*²

Recent Evaluation Method for Forging Lubricants

Sachihito Isogawa and Shigekazu Ito

Synopsis

The forging has the following features compared with other metal working methods.

- 1. The surface expansion ratio at the forging is extremely large.*
- 2. The normal pressure at the forging is extremely large.*
- 3. The supply of the lubricant at the forging is difficult.*

The tribo-simulator for the forging that can take out only the friction energy that shows the feature between the tool and the work of the forging process described now is desired.

In this explanation, the behavior of the surface expansion ratio and the normal pressure change in a basic deformation behavior at the forging is summarized. The feature of the tribo-simulator for the forging that has been proposed so far and the result achieved by it are shown, and the way it should be of the tribo-simulator in the future is described.

1. まえがき

鍛造加工の分野では、原価低減のための生産速度の向上に加えて、ネットシェイプ化による後加工工程の省略、従来では不可能であった難加工材に対する鍛造技術の確立などがこれまでも増して必要とされている。これらを達成するために、被加工材料の改良開発、工程設計技術の高度化、加工工具の高寿命化などに対する研究が積極的に行われている。これらと平行して高性能な被膜・潤滑剤の開発は、摩擦の低減による鍛造荷重の軽減や型寿命の向上による量産技術の確立のために必要不可欠である。

新しい被膜・潤滑剤の開発に際して、その特性を評価するための汎用の基礎的摩擦試験¹⁾としてパウデン試験法がある。しかし、接触面圧が実加工時と比較して低く、大きな塑性流動を伴わないために鍛造時の挙動を見積ることは困難である。鍛造用被膜・潤滑剤の評価方法としてはリング圧縮法²⁾が広く用いられている。本手法は、摩擦係数が絶対値として求まるため、極めて有用な手法であるが、据込みに準じた変形様式のため表面積の拡大比が高々

3倍程度であり、後方押し出しのような実際の加工にて生ずる表面積拡大比が5～40の場合³⁾と比較すると小さく、塑性流動が大きい場合の被膜・潤滑特性の適用限界を求めるには問題がある。その他、圧縮回転法、くさび引っかき法などの種々の試験法⁴⁾が提案されているが、塑性流動が比較的少なく、かつ特殊な試験装置を必要とするため、広く利用される状況にはない。

一方、従来より被膜・潤滑剤の開発メーカは、基礎試験により評価し、最適と思われる製品をユーザに提案し、ユーザでの実機テストを受けてきた。ユーザでの実機テストを行うに当たっては、多大なリスクを犯して実生産を休止して実験のためだけの稼働を行う。数千から数万個の量産レベルまで試作を行い、製品に対する焼付き程度の差異や、金型の摩耗・損傷の程度を数種の被膜・潤滑剤について調べるため多くの時間と経費を費やしている。これらを避けるために、開発メーカ自らが生産設備を導入したり、研究機関のプレスを借用して、実生産に近い状態まで連続鍛造を行い、それによって被膜・潤滑剤の評価を行う場合もある。

2007年6月21日受付

* 1 大同特殊鋼(株)研究開発本部, 工博 (Dr., Eng., Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

このような現状において、現実的な塑性変形（高い面圧と大きな塑性流動）を良く模擬できる被膜・潤滑剤の評価試験方法の確立は、被膜・潤滑剤の開発メーカーのみならずユーザにとって強く期待されている。本解説では、これまでの鍛造用被膜・潤滑剤の評価試験方法を概括して、将来のトライボ評価試験法のあるべき姿を探りたい。

2. 実加工時の変形挙動

鍛造加工される部品の形状は、その機能および特性により種々である。しかし、鍛造加工における部品の成形工程は、(1) 据込み、(2) 前方押し出し、(3) 後方押し出しの3つの基本的な変形様式の単独あるいはそれらの組合せからなる。実変形においては、上記の基本3変形様式が単独ある

いは同時に生じながら変形が進む。したがって、多くの場合に実部品の変形を基本3形式に分解してトライボ特性を評価することにより、被膜・潤滑に関わる特性の実加工への適用限界を評価できると考える。

Fig.1 は、円柱状試験片を据込んだ時の金型と接触する面の表面積拡大比を示した。据込み時の最大の問題は、試験片端面と側面をつなぐエッジ部のまくれ込み現象（フォールディング）の問題である。上・下の平ダイスで圧縮変形させているので、メタルフローは半径方向に生じ、特に側面の拘束がなければ、焼付きで生産がとまることはない。しかし、側面が直角にメタルフローの方向を曲げられてダイス面に接触し圧縮加工を受けるので、極めて大きな面圧とひずみが発生する。

(a) Surface expansion ratio at contact surface and lateral surface

(b) Deformed shape(m=0.1)

Fig.1. Surface expansion ratio in Upsetting.

(a) Surface expansion ratio after forward extrusion

(b) Normal pressure depend on reduction of area

Fig.2. Surface expansion ratio and normal pressure in Forward Extrusion.

Fig.2 は、円柱状試験片を前方押し出した時の、変形前の素材先端端面からの表面積拡大比とそのときの面圧を示したものである。Fig.2-(a) でわかるように、表面積拡大比は、高々 2.5 程度である。通常ならば、表面積拡大比が 40 程度まで追従するリン酸亜鉛被膜を使用するほどの困難な成形ではない。一般に油潤滑で加工が可能である。しかし、Fig.2-(b) に示すように、ダイス角と減面率に依存して接触面圧は大きく変化するので、圧力に対する被膜・潤滑剤の性能が重要である。

据込み一押しのような連続加工の場合には、据込み面の局部ひずみが次工程の押し出で大きく拡大されるため、初期の被膜の厚みが確保されない場合、焼付き発生の原因となる。また、押し出部材の先端にエッジ部があると被膜の密着効果が低下するのでこれもまた焼付きの原因となる。

Fig.3 は、円柱状試験片の後方押し出し時の変形挙動を、内表面の各位置に対して面圧と表面積拡大比⁵⁾で示した。後方押し出し時に使用されるパンチ先端 R2.5、ランド長さ 2 mm で押し出した時の内表面の表面積拡大の状況を Fig.3-(a) に示した。Fig.3-(b) に示すように、パンチコーナ R2.5 の部位から急激に拡大され、またメタルフローは一瞬にして直角に近い角度で曲げられるため、被膜の追従性は極めて高い状態が要求される。パンチとの接触面のメタルフローは、図中の A-B 間、すなわちパンチの R 部で拡大されるため変形は極めて不安定であり、被膜の密着性と追従性も含めた潤滑状態のバラツキが成形挙動に大きく影響を及ぼすと考えられる。

(a) Schematic illustration of work piece before and after deformation

実際の加工は、上記に示した 3 つの基本変形様式の組合せであるので、トライボ特性も基本変形の場合に生ずる問題をうまく区別することにより評価が可能であると考えられる。

3. トライボ特性評価法および試験機

鍛造加工におけるトライボ特性評価の目的の一つは、実加工における工具と被加工材境界面の接触状態を実験室的な規模で模擬することである。すなわち摩擦係数や金型の摩耗量、被加工材と工具との焼付き限界などのトライボ特性値を定量的に計測し、トライボ性能の評価やその機構の解明を行うことである。その観点から、トライボシミュレータは素材と工具間の摩擦抵抗を直接計測できることが好ましい。

Table 1⁶⁾ に塑性加工における各種摩擦条件を示した。鍛造加工は、面圧、摩擦界面温度、表面積拡大比のどれをとっても他の塑性加工と比べて厳しい苛酷な加工である。とくに鍛造加工を困難にしている点は、加工中に外部からの潤滑剤の供給が困難な状態で工具面圧が高く表面積拡大比が大きいことであり、この 2 つの条件因子は鍛造加工のトライボ特性評価値として最低限具備すべき条件と考えられる。

Fig.4⁷⁾ は、鍛造加工で製造される製品の一部について、トライボ特性の評価パラメータとして、面圧と表面積拡大比を取り上げ、その範囲を示したものである。歯車類は、塑性変形に伴う素材表面の拡大よりも加工時の工具面圧がその成形を困難なものにしており、被膜の耐圧性が重要

(b) Distribution of surface expansion ratio

Fig.3. Relationship between normal pressure and surface expansion ratio in backward extrusion.

Fig.4. Lubricating condition for forging components by numerical simulation.

である。一方、等速ジョイントなどに関しては、カップの部分は極めて大きな表面積の拡大を受けているので、加工時には被膜の追随性が大きな指標となる。このように、製品ごとに成形時の重要なトライボ因子は異なる。

Table 2 と Fig.5 ～ Fig.15 にこれまでに提案された試験方法の中から実際に実用試験として用いられている評価試験方法をまとめた。リング圧縮試験は、塑性流動が大きい場合に対しての適用には問題があるが、鍛造用被膜・潤滑剤の評価方法としては室温 (Rt) から高温まで広く用いられている。摩擦係数を絶対値として求めることができるため、油性潤滑剤の摩擦係数を低減させる効果などの評価には利用可能と考えられる。最近では、リング圧縮試験法を用いて塩素を含まない潤滑油など無害な潤滑油の開発のために、極微量の潤滑油を噴霧するセミドライ加工⁸⁾での摩擦状態が測定されている。

Table 1. Frictional condition for metalworking.

Forming	Sheet metal forming	Drawing, Ironing	Rolling, Rotary forging	Forging, Extrusion
Parameter				
Normal pressure ratio P/Y^*	0.1 ~ 1	1 ~ 3	1 ~ 3	2 ~ 5
Normal pressure (MPa)	1 ~ 100	100 ~ 1000	100 ~ 1000	100 ~ 3000
Velocity $V/m \cdot s^{-1}$	0 ~ 10^{-1}	$10^{-2} \sim 10^2$	$10^{-2} \sim 10^2$	$10^{-3} \sim 10^{-1}$
Relative sliding speed $v / mm \cdot s^{-1}$	0 ~ 10^{-2}	$10^{-2} \sim 10^0$	$10^{-2} \sim 10^0$	0 ~ 10^{-1}
Temperature of frictional interface $T/^\circ C$	Rt ~ 150	Rt ~ 300	Rt ~ 150 Warm, Hot working	Rt ~ 400 Warm, Hot working
Surface expansion ratio A/A_0^{**}	0.5 ~ 1.5	1 ~ 2	1 ~ 2	1 ~ 100
Supplying condition of lubricants to frictional interface	Trapping	Infusion	Infusion	Trapping Infusion

*Y: Tensile strength of work ** A/A_0 : Surface expansion ratio of work

Table 2. Various kind of Tribo-simulator for forging.

Testing method	Deformation type	Deformation condition			Obtainable information				Change parameter	
		Normal pressure ratio P/Y^*	Relative sliding speed $v / mm \cdot s^{-1}$	Surface expansion ratio A/A_0^{**}	Tool wear	Ejection load	Friction coefficient	Contact thermal conductance	Work temperature	Tool temperature
Ring Compression Test	Upsetting	2 ~ 3	~ 50	1 ~ 3	×	×	○	○	○	○
Backward Extrusion Test	Extrusion	2 ~ 5	~ 300	5 ~ 20	×	○	△	△	○	○
Forward-Backward Extrusion Test	Extrusion	2 ~ 5	~ 300	5 ~ 20	×	○	○	△	○	○
Injection Upsetting	Extrusion / Die forging	—	—	5 ~ 12	×	×	○	×	○	△
Spike Forging Test	Extrusion / Die forging	2 ~ 3	~ 130	5 ~ 13	△	○	△	△	○	○
Taper Cup Test	Extrusion	2 ~ 3	—	5 ~ 40	×	○	○	△	○	○
Ball Penetration Test	Ironing / Varnishing	2 ~ 3	~ 50	1 ~ 2	×	×	○	△	○	△
Intermittent Sliding Friction Test for Forging	Upsetting / Die forging	2 ~ 3	~ 200	1 ~ 2	○	×	○	○	○	△
Tribo-tester on localized rod-drawing method	Drawing / Ironing	2 ~ 5	~ 100	1 ~ 7	×	×	○	×	○	○
Flange Header Test	Upsetting / Die forging	2 ~ 3	~ 130	1 ~ 15	△	×	△	×	○	△

*Y: Tensile strength of work ** A/A_0 : Surface expansion ratio of work

○: Easy, possible △: Possible ×: Impossible

2章で示した、後方押し出し法の一つとして、後方穿孔加工法は、パンチの成形 R 部やランド部の長さを種々に変えることにより焼付きに対する敏感性を変化させ、実験法³⁾としたものである。この試験法は、実用試験法として潤滑剤や型材の潤滑特性評価が行われており、成形後のパンチの引抜き力による評価のほかに被加工材の表面近傍の材料流れやパンチ表面の残留応力を測定するなど、一つの評価⁹⁾試験から得られる情報だけでなく多角的にトライボ特性をとらえようと試みられている。しかし、パンチの R 部での急激な塑性変形は、トライボ特性評価値として摩擦抵抗に大きな影響を及ぼす面圧と大きな表面積拡大比の安定的な観察が難しく、実験データの定量化を困難にしている。

その点を解決するための実用的な評価試験法として、テーパカップ試験法⁵⁾が提案されている。本手法は、後方押し出し時のパンチの成形 R 部での急激な表面積拡大の変化を避けるために、テーパ状のパンチを用いて押し出しをすることにより、Fig.5 に示したようにテーパパンチ面に渡り大きな表面積拡大を確保できる。そのため、安定した被膜の評価が可能となった。Fig.6 は、テーパカップ試験による化成被膜 (Lub.A)、一液潤滑液 (Lub.B,C) および油性潤滑油 (Lub.D) の評価結果を示している。一定の押し込み深さや、加工度 (表面積拡大比) を確保する際にいかに低荷重で成形を行うかが被膜・潤滑油の種類により判定できる。また、Fig.7 に、種々の硬質皮膜処理をほどこしたテーパパンチを用いた連続鍛造時のせん断摩擦係数の変化を示す。使用中の摩擦係数が下がる理由は、加工により表面粗さが低下するためであり、TiC のような硬い被膜より TiN のような軟らかい硬質皮膜のほうが摩擦係数の低下速度が顕著である。このように、テーパカップ試験により実

Fig.6. Relationship between forging depth and forging load in Taper Cup Test.

Fig.7. Change of friction shear factor in the sequence of Taper Cup Test.

(a) Schematic illustration of work piece before and after deformation

(b) Distribution of surface expansion ratio

Fig.5. Relationship between normal pressure and surface expansion ratio in Taper Cup Test.

加工における成形状態の変化が直接計測できる。

後方押しにおける摩擦係数の測定を可能とするために、複合押しし形鍛造用摩擦試験法による潤滑性能の比較評価法が開発されている。この中で、Fig.8 に示すような後方穿孔押しし形摩擦試験法（前・後方缶押し法）^{10),11)} が提案されている。基本的な変形機構は、先にのべた後方押し法と同じであるが、上パンチと下パンチのベアリング部長さを変えることにより摩擦抵抗に及ぼす材料流動の変化から穿孔荷重のバランスを数値計算にてあらかじめ求めておき、大きな表面積拡大比の場合でも摩擦係数が

絶対値として求められることに特徴がある。本試験方法を用いて、A6061 材に対する化成被膜と耐焼き付性の関係が求められている。

後方押し試験は実用試験であるが、これに近いトライボ状態で簡易な試験法として Fig.9 に示すスパイクテストが提案¹²⁾ されている。この試験法の特徴は、円柱状試験片の端面に塗布された被膜の特性を、ロート形状の金型に前方押しする時の摩擦抵抗と側方への摩擦抵抗とがバランスする時の成形荷重の大・小と押し長さ（スパイク高さ H ）で評価することである。ここでは、押し込み時の工

Fig.8. Design of tribo-testing method based on forward-backward can extrusion.

Fig.9. Spike Forging Test.

具端面の摩擦抵抗を絶えず一定に制御するために、上工具端面には同心円の溝が施され、固着摩擦状態により据込みパンチの摩擦エネルギーを常に一定としている。押込み深さの制御 (Die Gap X) により表面積拡大比を 10 以上にすることが可能で、観察したい場所のみの摩擦抵抗を評価できる点にある。Fig.10¹³⁾ に、押込み量 X を変えた時のせん断摩擦係数 m とスパイク高さ H と成形荷重 F_s の関係を数値計算により求めた特性曲線図上に示す。摩擦抵抗が小さい時には、スパイク高さ H として表される前方押し長

Fig.10. Experimental data of Spike Forging Test on the characteristic curve at 400 °C .

さが長くなり、成形荷重 F_s が小さくなる。種々の被膜 A～F を評価すると、特性曲線図上でその性能の序列が評価できる。また、押込み後の試験片を取り出すときのエジェクト荷重より連続成形の可能性も評価可能である。本試験法を用いて、環境負荷を軽減する冷間鍛造用油性潤滑剤が開発¹⁴⁾ されている。

評価項目として焼付き限界の推定がある。これに対しては Fig.11 に示すボール通し試験¹⁵⁾ がもっとも簡易に行われる。ボール径と試験片の内径を変化させることによって加工度を変え、その時のボール押込み力の変動や試験片内面の観察、材料流動の違いなどから総合的に焼付き防止能を評価できる。Fig.12 に市販潤滑剤を評価した一例を示す。押込み深さ S が大きいほど耐焼付性能は高いと判断される。この場合、化成処理膜の焼付き防止能が高く、極圧添加剤や粘度の効果が示され、この試験法を用いて冷間鍛造用油剤が開発¹⁶⁾ された。しごき変形であり表面積拡大比があまり大きくとれないなどの問題はある。

引き抜いた線材表面に強固な被膜を形成した状態でのトライボ特性を評価する方法として、通常の引抜き法では表面積拡大比も接触面圧も大きくとれないが、Fig.13 に示す局所引抜き型トライボ試験法¹⁷⁾ では、ダイスの面を平面から各種歯形形状に変更することで表面積の拡大比を局所的に 7 程度まで可能としている。Fig.4 に示したように、歯だし鍛造時の表面積拡大比はせいぜい 10 以下であり、面圧の大きさがポイントとなる。Fig.13-(b) に示す種々の歯形を用いて引抜きを行うと、Fig.14 に示すような歯形

(a) Schematic arrangement of the Ball Penetration test

(b) Geometry of work piece and relationship between R, DB and DW

Fig.11. Design of tribo-testing method based on Ball Penetration Test.

形状に依存した荷重特性が計測できる. スプライン歯車などの歯の絞り加工を行う場合の工具形状や被膜・潤滑特性

の評価に適している.

Fig.12. Reduction of cross-section area R and distance from top end of work piece S where galling occur.

Fig.13. Experimental set-up and Die geometry in Localized rod drawing simulation.

Fig.14. Influence of die geometry on interface friction.

Fig.15 に示すフランジヘッダー試験法¹⁸⁾は、線材を用いてボルトなどを製造するプロセスにおいて、ボルト座面の焼付きを評価するのに適している。後方押し出し時ほどの表面積拡大比は生じないが、メタルフローが直角に曲げられ局所的な面圧が大きくなる場合などに適用される。特に、量産されている線材から直接割愛した試験片を用いた試験が可能であり、より実用的な試験法である。

4. まとめ

環境問題に対する認識が高まり、環境汚染をもたらす加工用被膜・潤滑剤の使用が厳しく制限されるようになった。このような状況で、鍛造加工の特徴である、高面圧、大きな表面積拡大比、そして接触界面の高い温度を摩擦界面で直接安定して繰返し計測できるトライボロジーシミュレータがあれば、環境に易しい被膜・潤滑剤の開発は大きく前進すると思われる。

現実には実鍛造加工時のトライボ状況をすべて再現可能な試験法は見あたらないので、それぞれの変形様式にあわせた試験法を選択し評価が進められている。しかし、それぞれの試験から得られた結果が同一のデータベースとして構築され、統一して解釈されることは極めて困難である。

Fig.15. Flange Header Test.

また、被膜・潤滑剤の違いによるミクロなトライボ条件の変化は、被加工材の表面および内部のひずみに微妙な影響を与え、たとえば歯車などのように加工後に浸炭熱処理を施す場合、その結果熱処理後の変形ひずみの差異などをもたらす可能性もある。マクロな加工条件を正確に再現できるとともに、加工限界も含め数値計算上でミクロなトライボ条件まで含めた検証を可能にするためには実体加工条件を確実に再現できる評価試験法の出現に対する期待が強い。

(文 献)

- 1) 日本塑性加工学会編:塑性加工におけるトライボロジー, コロナ社, 1988, 67.
- 2) Male, A.T. and Cockcroft, M.G.: J. of the Inst. of Metals, **93** (1964), 38.
- 3) 水野高爾, 小島之夫, 北村憲彦, 朱偉成: 塑性と加工, **25** (1984), 929.
- 4) 日本塑性加工学会編: 塑性加工におけるトライボロジー, コロナ社, 1988, 71.
- 5) 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** (2007), 303.
- 6) 日本塑性加工学会編: 塑性加工におけるトライボロジー, コロナ社, 1988, 65.
- 7) 土井善久, 伊藤樹一, 吉田広明, 五十川幸宏: 塑性加工連合講演会論文集, **56** (2005), 611.
- 8) 松本良, 小坂田宏造: 塑性と加工, **44** (2003), 535.
- 9) 野々山史男, 北村憲彦, 渡辺三千雄, 団野敦: 塑性と加工, **34** (1993), 1166.
- 10) T. Nakamura, S. Tanaka, K. Hayakawa and I. Takahashi: Tribo-Testing method for Estimating Tribo-Characteristics at Piercing Punch in Backward Can Extrusion, Lubricating Engineering, **59** (2003), 4, 12.
- 11) 鷺坂芳宏, 中村保, 田中繁一, 早川邦夫: 塑性と加工, **48** (2007), 56.
- 12) S. Isogawa, A. Kimura, and Y. Tozawa: CIRP Ann., **42** (1992), 1, 263.
- 13) S. Isogawa and Y. Tozawa: Evaluation of Additives in Cold Forging Oil by Spike Forging Test, 30th ICFG Meeting, (1997).
- 14) 深谷輝雄, 吉田広明, 伊藤樹一, 五十川幸宏: 塑性加工連合講演会論文集, **56** (2005), 615.
- 15) 北村憲彦, 大森俊英, 団野敦, 川村益彦: 塑性と加工, **34** (1993), 1178.
- 16) 北村憲彦, 大森俊英: 塑性と加工, **39** (1998), 452.
- 17) H. Saiki, N. Gracious and R. Liqun, J. of Mat. Proc. Tech., **63** (1997), 238.
- 18) 伊藤樹一, 吉田広明, 五十川幸宏, 堂田邦明: 塑性加工連合講演会論文集, **56** (2005), 613.