

鍛造加工における新しいトライボ特性評価法の提案

New Evaluation Method of Tribo-Performance in Forging

白川 信彦*

和田林 良一*

Nobuhiko Shirakawa

Ryoichi Wadabayashi

(2001年7月11日 受理)

A new evaluation method of tribo-performance in cold forging has been developed. In this method, a round bar workpiece is extruded into 2 stage tapered flat die, and the frictional resistance between the die and work can be evaluated only by measuring the shape of deformed workpiece. In the test, the height and width of deformed workpiece is measured, and this test doesn't need the measurement of the extrusion pressure, which is also influenced by the flow stress of the material. In comparison with a nomogram obtained from FEM analysis, the frictional resistance can be expressed quantitatively as the friction coefficient. Experimental result about 8 types of lubricants for aluminum alloy workpiece shows that this method is useful for evaluating not only the effect of decreasing frictional resistance but also the galling prevention property of lubricants.

キーワード：摩擦試験，トライボロジー，冷間鍛造，潤滑剤，摩擦係数，FEM

1. はじめに

近年，プレス加工の分野では，環境にやさしい潤滑剤の使用や新しい硬質皮膜コーティングの金型への適用が盛んに試行されているが，加工時にこれらの潤滑剤やコーティング皮膜が効果的に機能しているかどうかを明確に把握することは容易ではない^{1), 2)}。従来，鍛造加工に関してこのような金型-素材間の接触条件が変化した場合の影響を調べるには，摩擦係数が容易に求められるリング圧縮試験³⁾がよく用いられてきたが，著しい表面積の拡大を伴う加工の場合，必ずしもその評価結果が実際と一致しないといった問題点が指摘されていた。これに対し，前後方押し出し試験⁴⁾やボール押し出し試験⁵⁾，スパイクテスト⁶⁾など様々な試験法が提案されてきた。しかしながらそれらの試験法についても，焼付きを生じた場合の金型修復が困難であったり，荷重変化を評価の基準とするために摩擦抵抗だ

けでなく素材の変形抵抗のばらつきにも起因する誤差が含まれるなど，その方法や評価基準においては未だ完全なものではなく，検討の余地がある。

そこで本研究では，冷間鍛造での金型と被加工材との接触における摩擦・摩耗・焼付きなどの状況を簡単に評価する方法を開発することを目的として，2段階テーパの平面ダイに円柱素材を平板状に押し出し，そのときの被加工材の変形の様子から摩擦抵抗の大きさを評価するシミュレート実験を行った。同時に市販の3次元有限要素解析プログラムによる数値解析を行い，実験結果と比較することによって摩擦係数を推定し，潤滑剤の性能を定量的に評価することを試みた。

2. 供試材料および実験方法

(1) 供試材料

実験に用いた材料はAl-Zn-Mg系合金であるA7075-O材で，直径14mmの丸棒材を高さ28mmの円柱状に切り出して使用した。切り出した試験片はアセトンで

* 生産技術部 塑性加工グループ

脱脂し、硝酸で表面調整後、潤滑剤を塗布した。一部の潤滑剤については、フッ化アルミ系の化成皮膜処理を併用した。使用した潤滑剤は、表1に示す8種類である。以下本文では、それぞれ表中の略号で示す。

(2) 実験用金型および実験方法

本実験で採用した加工方式は前方押しであり、コンテナ内にセットされた円柱試験片を平行に設置された2段のテーパ金型内に押し出す「平面ダイ押し」とした。平面ダイ押しの大略図を図1に示す。テーパ形状の決定には後述の有限要素法数値解析を用い、摩擦係数が変化した場合に押し出し後の変形形状にできるだけ大きな違いが出るようなテーパ形状とした。押し出された試験片は図2に示すような形状になるが、摩擦条件によって押し出し部の長さ L と最大幅 B が変化する。すなわち、摩擦係数が高いと幅方向への広がりが大きくなり、低いと押し出し長さが長くなる。したがって荷重を測定しなくても、この押し出し長さ L と最大幅 B の比 (L/B 、以下本文では形状比と称する) によって定量的にトライボ特性を比較評価することができる。

テーパ付きの平面ダイにはSKD11材を用い、ワイヤカット放電加工により形状加工したものを焼入れ/焼戻し後、#1000のエメリペーパーで表面を調整した。また実験においても、1回の押し出し加工ごとにダイを取り出し、定盤上で#1000のエメリペーパーで調整したが、本実験の場合、金型が平面で構成されているため非常に簡単に研磨でき、条件を揃えることが容易であった。

実験には300kNの油圧万能材料試験機を用い、変形形状との相関性を検討するために、押し出し荷重の測定も行った。加圧速度は、約0.2mm/sで一定とした。

また、実際の冷間鍛造への適用として同じ潤滑剤を用いた後方せん孔押し出し試験を行い、押し出し最大荷重による評価結果と比較した。この時の供試材料は平面ダイ押し試験と同じA7075-O材で、直径20mm、長さ20mmの円柱状試験片を用いて、孔径14.2mm(減面率60%)、深さ29mmのせん孔加工とした。

3. 有限要素法による数値シミュレーション

数値シミュレーションには、市販の3次元鍛造解析ソフトウェアであるGRADE/Forge⁷⁾を使用した。GRADE/Forgeは、収束演算が不要な動的陽解法と呼ばれる解法が採用されると共に、空間固定要素であるオイラー要素を採用して変形領域のリメッシュを不要にしたプログラムであり、安定した解を得ることができる。本解析においては、対称性により1/4部分の金型と素材をモデル化し、オイラー要素数約55,000で

表1 実験に使用した潤滑剤の種類

Table 1 Sample lubricants tested

略号	潤滑剤種類
MOS	二硫化モリブデンを無機系樹脂に配合(スプレー)
4649	二硫化モリブデンを水中に分散(浸漬)
G719	動粘度130cSt(40℃)の鉍物油(浸漬)
PTFE	テフロン+有機モリブデン化合物(スプレー)
B&MOS	フッ化アルミ化成皮膜+MOS
B&4649	フッ化アルミ化成皮膜+4649
B&G719	フッ化アルミ化成皮膜+G719
B&235	フッ化アルミ化成皮膜+ステアリン酸ソーダ

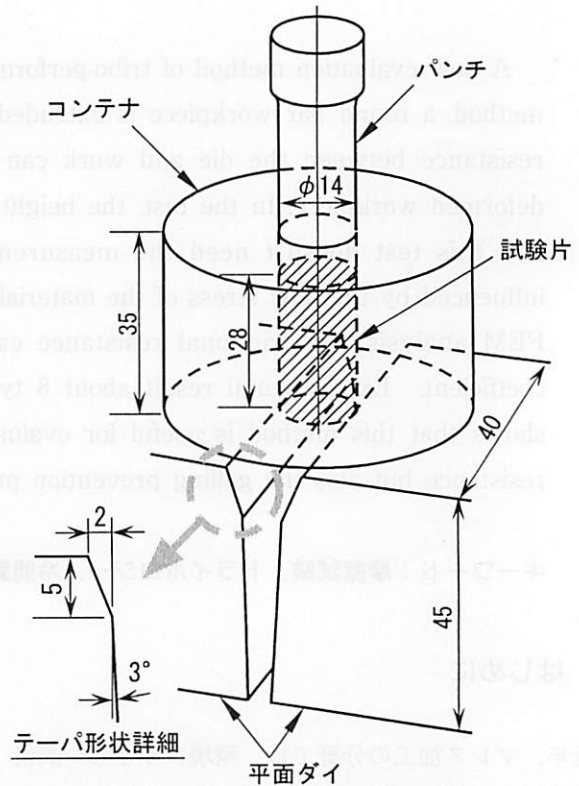


図1 平面ダイ押し試験

Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

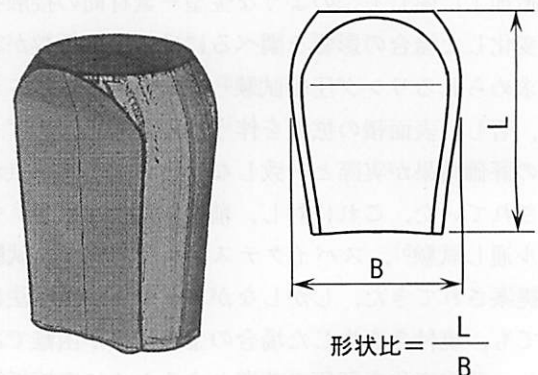


図2 試験片の変形と形状比

Fig. 2 Extruded workpiece and height/width ratio

計算を行った。金型は剛体として計算し、被加工材の変形抵抗 σ は、実験材料であるA7075-O材の端面拘束圧縮試験の結果から、 $\sigma = 350 \epsilon^{0.16} \text{MPa}$ (ϵ : 相当ひずみ)の式に従うものとした。計算に要した時間は1摩擦条件あたり約25~30時間であった。

検討した金型形状は、テーパ半角 3° の一定のものと2段テーパのもの(図1に示す形状)の2種類とした。図3に摩擦係数 $\mu = 0, 0.25$ における形状変化(パンチストローク28mm)を示す。テーパ半角一定の結果と比べて、2段テーパ金型での計算結果のほうが、摩擦係数による形状の差異がより大きくなっていることがわかる。この結果から、実験には前述のと

おり2段テーパ金型を採用することにした。

実験結果を摩擦係数として定量化するために、この外形形状データから押し出し長さL、最大幅Bを求め、押し出しの進行に伴う形状比(L/B)の変化を調べて較正曲線を作成した。各摩擦係数に対して得られた較正曲線を図4に示す。

4. 実験結果と考察

(1) 変形形状と摩擦抵抗の関係

平面ダイ押し出し試験によって得られた変形形状の例およびそれらの形状比と押し出し荷重の値を表2に示す。

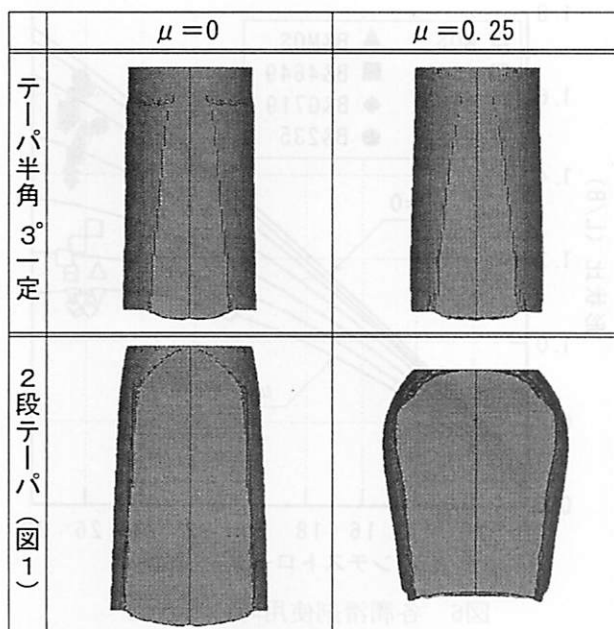


図3 FEM解析で求めた押し出し後の試験片形状 (金型形状、摩擦係数による試験片形状の差異)

Fig. 3 Influence of die shape and friction coefficient on extruded workpiece (FEM analysis)

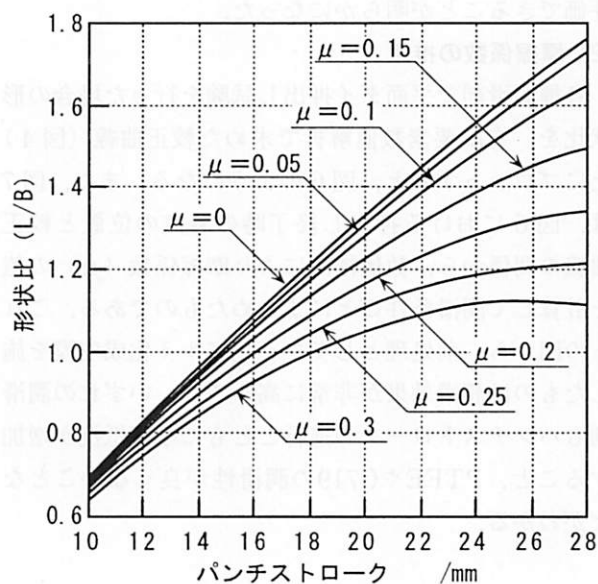


図4 FEM解析による較正曲線

Fig.4 Nomogram resulting from FEM analysis

表2 平面ダイ押し出し試験による変形形状の例
Table 2 Examples of extruded workpieces with 4 types of lubricants

変形形状				
潤滑剤	B&235	B&4649	4649	G719
形状比	1.64	1.56	1.23	1.07
押し出し荷重 /kN	55.2	63.9	78.0	105.9

形状写真から、潤滑剤の種類によって変形形状が大きく異なっていることがわかる。また、図5には、8種類の潤滑剤についてそれぞれ3～5回の繰り返し試験を行い、押し出し荷重と形状比の関係をすべてプロットしたものを示す。潤滑剤の種類に関係なく、押し出し荷重が大きいほど形状比の値が小さくなっており、その相関性も非常に高いことがわかる。同種・同質の材料で試験する限り、押し出し荷重は加工中の金型と材料間に作用する摩擦抵抗にのみ影響されて変化すると考えられるので、形状比の値が小さいほど高い摩擦抵抗が作用したと考えることができる。これらの結果から、平面ダイによる押し出し試験後の形状比の大きさを比較することによって、潤滑剤の摩擦抵抗低減効果を評価できることが明らかになった。

(2) 摩擦係数の推定

各種潤滑剤で平面ダイ押し出し試験を行った場合の形状比を、有限要素数値解析で求めた較正曲線(図4)上にプロットすると、図6のようになる。また、図7は、図6における押し出し終了時の各点の位置と較正曲線の関係から、数値補間により摩擦係数(μ)の値を計算して潤滑条件ごとにまとめたものである。これらの図から、前処理としてフッ化アルミ化成皮膜を施したものは潤滑効果が非常に高いこと、いずれの潤滑剤もパンチストロークの進行とともに摩擦抵抗が増加すること、PTFEやG719の潤滑性が良くないことなどがわかる。

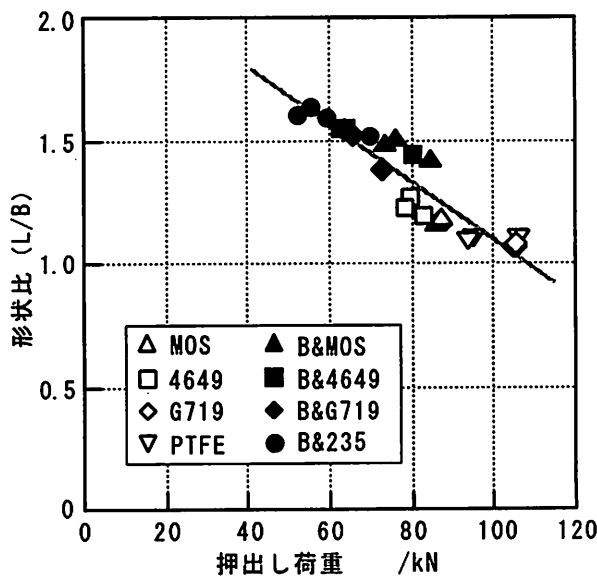


図5 押し出し荷重と形状比の関係
Fig.5 Relation between extrusion load and height/width ratio

(3) 後方せん孔押し出し荷重との比較

図8に、各潤滑剤を用いて後方せん孔押し出し試験を行ったときの押し出し荷重と、平面ダイ押し出し試験で得られた摩擦係数の関係を示す。冷間鍛造において、後方せん孔押し出しにおける押し出し荷重は潤滑剤の摩擦低減効果を評価する指標とされているが、図8に見られるように、二、三の例外を除けば、平面ダイ押し出し試験で得られた摩擦係数と非常に良い相関を示している。

ここで、二硫化モリブデン系潤滑の4つの実験点(△▲□■)にのみ着目すると、後方せん孔押し出し荷

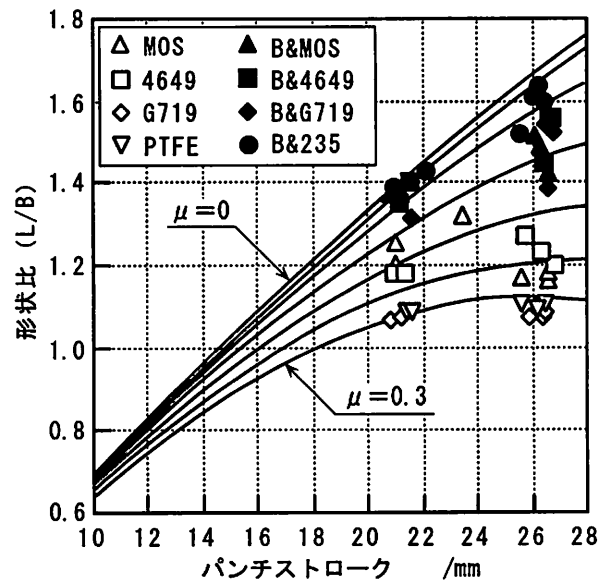


図6 各潤滑剤使用時の形状比
Fig.6 Nomogram and experimental results with various lubricants

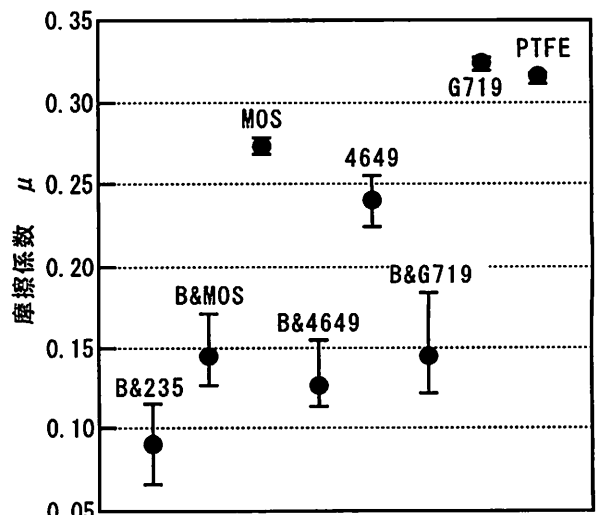


図7 各潤滑剤使用時の摩擦係数
Fig.7 Friction coefficient for various lubricants

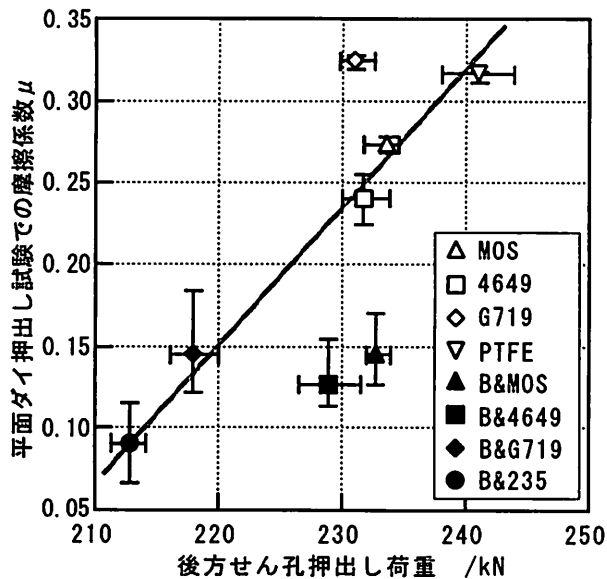


図8 後方せん孔押し荷重と平面ダイ押し試験で得られた摩擦係数の関係

Fig.8 Relation between load in backward can extrusion and friction coefficient in new test

重はほとんど変わらないにもかかわらず、平面ダイ押し試験で得られた摩擦係数の値は化成皮膜処理を施した場合(▲■)に大きく低下したことがわかる。化成皮膜処理は、潤滑剤の保持効果を向上させて被加工材と金型材のメタルタッチを防止し、耐焼付き性を向上させることから、本報で提案した平面ダイ押し試験での評価法は、潤滑剤の保持効果や耐焼付き性をより明確に示すことができると思われる。

5. まとめ

冷間鍛造における潤滑剤のトライボ特性評価法として「平面ダイ押し試験法」を考案し、その実用性に

ついていくつかの潤滑剤を用いた実験を行った。その結果、本試験法は潤滑剤の摩擦抵抗低減効果を評価することが可能であり、有限要素解析による計算結果と比較することによって摩擦係数の形で定量的に評価できることが明らかになった。また本試験法は、特に潤滑剤の耐焼付き性を評価するのに有効であり、試験法も簡単で実用的な評価法であるといえる。

なお、本実験ではアルミニウム合金材を対象としているが、軟鋼材相当の材料データを用いてFEM解析を行ったところ、若干のずれはあるものの、ほぼ同様の計算結果が得られている。厳密に摩擦係数で比較評価する場合には校正曲線を求め直す必要があるが、他の材料、潤滑剤の組み合わせにおいても本試験法を適用して潤滑性能を比較することは可能である。

また、一般に加工速度によって潤滑状態が変化することはよく知られているが、潤滑条件以外の加工条件を同一にして比較評価する限り、本試験法を適用することができる。

参考文献

- 1) 濟木弘行, 中村保, 塑性と加工, 39-455, 1185 (1998)
- 2) 五十川幸宏, 土屋能成, 塑性と加工, 39-455, 1207 (1998)
- 3) 久能木真人, 科学研究所報告, 30-2, 63 (1954)
- 4) Nakamura T., Bay N. & Zhang Z.L., Trans ASME, J. of Tribology, 119-3, 501 (1997)
- 5) 北村憲彦, 大森俊秀, 団野敦, 川村益彦, 塑性と加工, 34-393, 1178 (1993)
- 6) Isogawa S., Kimura A. & Tozawa Y., CIRP Ann., 42-1, 263 (1992)
- 7) 木下篤, 日本機械学会誌, 100-939, 219 (1997)