リング圧縮試験での摩擦せん断係数に及ぼす 試験条件の影響*

佃 誠**・高田 与男**・尾崎 幸一**

Effect of test conditions on measuring friction factor by ring compression*

UDC:669.715 : 620.173 : 539.386

Makoto TSUKUDA**, Kumio TAKADA** and Koichi OZAKI**

Variables in the ring compression test concerning the friction factor (μ) such as specimen size, thickness of lubricant film, surface roughness of specimen and die, temperature difference between specimen and die, and compression speed were examined using 2014 alloy. The surface roughness and the thickness of film have the most important effect on the friction factor, and the other variables have a little effect. The minimum thickness of the lubricant film to maintain lubricity corresponds to a half of the sum of roughness on the die and specimen.

(Received March 6, 1979)

1. 緒 言

潤滑は鍛造加工においても重要な因子で潤滑状態により成形荷重やメタルフローが変動する。アルミニウム合金熱間鍛造法では近年ほとんど抜き勾配がなく、しかも薄い肉厚で寸法精度の高い精密鍛造法や、型割り面のメタルフローを厳しく管理しなければならないシームレス鍛造法の技術が発達してきた。このためにも潤滑剤の重要性がますます高くなつてきている。

潤滑性の定量的な評価には、鍛造変形過程における摩擦係数を求めなければならない。摩擦係数の測定に種々の試験方法が提唱されているが^{1), 2), 3)}、これらの中で高温で比較的簡単に試験でき、しかも試験片を塑性変形して測定するリング圧縮試験法⁴⁾が最も実用的な方法であると考えられる。

リング圧縮試験法は広く用いられており、これで潤滑剤を比較した報告^{5), 6), 7)}も多い。しかし鋼材や冷間鍛造用の潤滑剤に関するものが多く、アルミニウム合金熱間鍛造用を目的とする報告は少ない。しかも試験方法すなわち実験条件の影響を詳述した報告は見当たらない。

一定の条件で潤滑剤を比較するためには、その潤滑剤の特性が発揮できるような実験条件を選定しなければならない。

本研究では各種の潤滑剤を評価するにあたり、実際の

鍛造作業条件に近くして、かつ標準的な実験条件を明らかにするために、リング試験片の寸法・塗膜厚さ・金敷および試験片の表面粗さ・圧下速度について摩擦せん断係数 (friction factor) との関係求めた。この結果は鍛造現場での潤滑に対する標準作業管理としてリング圧縮試験を実施する場合に有益であろう。

2. 実験方法

2.1 実験装置

リング圧縮試験には圧下速度を1.0~7.8 mm/secに調整できる堅型1000 ton 油圧プレスを用い、Fig. 1に示す圧縮装置で実験した。圧縮荷重を密封型200 ton ロードセルで、圧下量すなわち上部金敷の変位をひずみゲージ式変位計で検出した。変位は圧縮量と圧下速度を制御するために測定した。

金敷はJIS-SKT-4 焼入れ燃もどし処理材を用い、 ϕ 150 × t 50 mm で、圧縮面は表面粗さが $R_{\max}$ で2.0 μ となるように研磨した。金敷をくりかえし使用すると表面粗さが若干粗くなるが2.5 μ 以下には保つことができた。

試験片と金敷の温度は上・下金敷に挿入したCA熱電対で検出し、Fig. 1に示した付設の電気炉で所定の圧縮試験温度となるように調整した。

2.2 リング試験片

* 軽金属学会第51回秋期大会 (51-11) にて一部を講演発表した。

** 株式会社神戸製鋼所 (名古屋市)。Kobe Steel Ltd. (Nagoya)。

Fig. 1 Apparatus for compression test.

リング試験片は化学成分が Al-4.48% Cu-1.09% Si-0.73% Mn-0.63 Mg の 2014 合金 ϕ 500 mm DC 鋳塊で、結晶粒がほぼ揃っている内層部 ϕ 300 mm から切出した。鋳塊の組織は等軸晶で、平均マイクロ結晶粒径は 250 ~ 300 μ であった。鋳塊には均熱処理を 495°C $\times$ 24 hr で実施した。

2.3 実験条件

試験片の形状は外径：内径：高さの比を 6 : 3 : 2 と一定にした。試験片寸法の影響を外径 30.0, 50.0, 75.0 mm の 3 種類の試験片で求めた。

潤滑剤には油性で固形分 10% のコロイダル黒鉛の市販潤滑剤を用いた。原液を灯油で 10 倍に希釈し、金数表面にスプレーした。この潤滑剤の黒鉛純度は 99.5%，平均粒径 1 μ と称している。

潤滑剤のスプレー方法は圧縮試験温度 350°C に保持した金数に、塗膜の厚さがほぼ均一に塗布できるよう金数中心から約 400 mm の位置で 45° の方向から塗装用スプレーガンによって空気圧 4.5 kg/cm² で噴霧した。塗膜の厚さは試験毎に下部金数表面で圧縮試験に関与しない隅の部分に、30 $\times$ 30 $\times$ t 4.5 mm の鋼板を置いて潤滑剤を噴霧し、磁気抵抗膜厚計で測定した。この方法を採用するにあたって、上・下金数の塗膜厚さを測定し、小鋼

板での膜厚で充分代表しうることを検定した。

上下金数に潤滑剤をスプレーし、あらかじめ別の電気炉で圧縮試験温度 $\pm$ 20°C に加熱した試験片を塗膜を損傷しないように注意して下金数上に置き、上金数を試験片直上に吊下げた状態で圧縮試験温度 $\pm$ 2°C に 30 min 保持してから圧縮試験を開始した。

2.4 摩擦せん断係数の測定

リング試験片を圧縮し、変形前と変形後の内径（それぞれ ID₀, ID とする）と高さ（それぞれ H₀, H とする）から金数と試験片との間の平均的な摩擦係数 (μ) あるいは摩擦せん断係数 (m) を求める方法は最初久能 木ら⁸⁾が行なった。その後、実際の変形挙動により精度良く近似させるために理論的解析手法の改善が行なわれている^{9), 10)}。最近 Altan らが端面摩擦による自由表面の“たるみ変形”をも考慮した理論解析を上界法で行ない、摩擦せん断係数について圧下率と試験片内径の減少率との関係を求め、それを検量曲線にして報告している⁴⁾。

これによれば m 値は ID₀, ID, H₀ および H を測定し、内径減少率を $(ID_0 - ID)/ID_0 \times 100$, 圧下率を $(H_0 - H)/H_0 \times 100$ として計算すると、検量線から m 値を求めることができる。

m 値は圧縮潤滑面に作用する摩擦せん断力 (τ), 鍛造材料の平均変形抵抗 ($\bar{\sigma}$) とによって次式の関係で表わされる。

$$\tau = m \cdot \bar{\sigma} / \sqrt{3}$$

Altan らは圧縮過程での τ , m は一定であると仮定して解析した。 m 値は圧縮過程でのメタルフローの中立面の位置すなわち中立半径に対応して定まり、 m 値と内径変化との関係は次のようになる。 m 値が 0 の場合、すなわち理想潤滑状態では、中立面はリングの中心軸と一致する。摩擦がある状態では、 τ が大きいほどすなわち m 値が大きいほど中立面が外周側に移動する。理想潤滑状態および中立面の位置がリングの内径よりも中心側にある場合には圧縮とともに内径と外径が広がる。中立面が内径と外径の間にある場合には圧縮とともに内径が縮まり外径が広がる。 m 値が 1.0 においては、いわゆる完全固着状態となり、内径の減少量が最も大きくなる。

本研究では Altan らの検量線をもとにして、 m 値の間隔を比例配分法でさらに細分した曲線を作つて m 値を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 m 値に及ぼす試験片形状の影響

2014 合金試験片の外径：内径：高さの比を 6 : 3 : 2 に一定とし、外径が 30.0, 50.0, 75.0 mm のリング試験片により、潤滑剤として厚さ 0.2 mm のテフロンシート

Table 1 Effect of dimension on friction factor (m).

Ratio of out side dia.: inside dia.: height=
6: 3: 2 is same. Lubricant is 0.2 mm Teflon sheet.

out side dia. (mm)	reduction in height (%)		
	25	35	50
30.0	0.04	0.05	0.07
50.0	0.05	0.07	0.08
75.0	0.06	0.08	0.09
	0.06	0.05*	0.07*

* renewed lubricant.

を用い圧縮試験をした。圧縮試験温度100℃、圧下率25, 35, 50%でm値を求めた。テフロンシートを用いたのは200℃以下では潤滑性が非常に良好であることと、シートなので圧縮前の潤滑膜厚さが一定であるためである。

その結果をTable 1に示す。試験片の径が大きくなるとともにm値はやや大きくなり、また圧下率が増すにつれて大きくなる。変形が進むにつれてm値が増加するのは、圧縮とともに潤滑膜が薄くなり、一方試験片の表面は粗くなる¹⁰⁾ために摩擦力が増加した結果と考えられる。この証明としてφ75.0 mmの試験片で25%圧縮してから、テフロンシートを新しいのに替えてさらに圧縮して求めたm値もTable 1に併記した。潤滑膜が新しくなるので、連続して圧縮した場合よりもm値が小さい値となつていく。

大きな試験片ほどm値が大きくなる原因は明らかではないが、大きさの影響は圧下率の影響よりも小さい。試験片が小さすぎると寸法計測の誤差が大きくなり、これがm値に影響する。また圧縮面積すなわち潤滑面積が小さいと塗膜の不均一さの影響の程度が大きくなり、これがm値の偏差に効いてくることも考えられる。

一方φ75 mmの試験片で50%圧下すると厚さが12.5 mmとなり、この厚さは精密鍛造品の肉厚としては厚すぎる。試験条件を実際の鍛造作業条件に近づけるために、製品肉厚とほぼ同等で、かつ比較的大きな試験片としてφ50 mmが適当である。φ50 mm試験片を50%の圧下率で圧縮すると厚さが8 mmになり、これはやや厚目の精密鍛造品の肉厚に相当する。

リング圧縮試験片の大きさとしてφ50 mmを用いることにした。

3.2 潤滑膜厚さの影響

鍛造作業においては金型への潤滑をほとんどの場合スプレーで行なっている。塗膜の厚さはスプレーガンの単位時間当りの噴霧量が一定であれば潤滑液中の固形分濃

Fig. 2 Effects of dilution and spray time on friction factor.

度とスプレー時間に比例する。しかし実測してみるとスプレー開始直後の短い時間のうちに厚くなり、それ以後はスプレー時間に比例して膜厚が増加する。この初期の厚さは黒鉛平均粒径の1~2倍であり、これは新しい金敷表面に黒鉛の1~2粒子分がまず付着し、その後は黒鉛層の上に積み重なることを意味している。また最初に黒鉛粒が金属表面に付着する場合に比べて、すでに黒鉛層ができた上に積み重なるほうが付着しにくいために、スプレー時間当りの膜厚増加が少なくなる。本研究には用いていないが、水溶性あるいはエマルジョン型の潤滑剤の付着性は油性とかなり差があり、油性が最も良い。また金敷の温度や潤滑剤中の添加物などの影響も受ける。したがって所定の膜厚に塗布するための条件は潤滑剤毎に設定しなければならない。

しかし塗布した膜厚と潤滑性とは一定の関係がある。Fig. 2に油性コロイダル黒鉛を用い、潤滑剤のスプレー条件を変えることにより塗膜厚さを変えてm値を測定した結果を示す。圧縮試験温度350℃、圧下率は50%である。希釈倍率が小さいほど、スプレー時間が長いほど塗膜は厚くなる。しかしm値は希釈倍率3~15倍ではスプレー時間によらず一定なのに、21, 24倍になるとスプレー時間が短いほどm値が大きくなる。

Photo 1に圧縮したリングの外観を示す。m値が大きい場合には潤滑膜が不均一であることが見受けられる。

Fig. 2の結果を塗膜厚さとm値との関係として書き改めるとFig. 3のようになる。m値は膜厚が約2.5 μより厚い場合には一定であるが、これより薄くなると急に増大する。これは膜厚が薄すぎると、いわゆる潤滑切れを生じてm値が増大することを示している。試験に供する潤滑剤の潤滑性が保たれながら変形するためには最小限以上の塗膜厚さが必要となる。

3.3 表面粗さの影響

Fig. 4に金敷の表面粗さを2.0~2.8 μにし、試験片

Photo 1 Appearance of compressed ring specimens.

Fig. 3 Effect of film thickness of lubricant on friction factor.

の表面粗さを $0.1 \sim 36 \mu$ に変えて圧縮試験した場合の m 値を示す。潤滑剤の膜厚は 10μ で、圧縮試験条件は 3.2 項と同様である。

機械加工後の試験片の表面粗さは約 3.6μ である。これを #100 エメリー研摩によって約 12μ に、バフ研摩にて約 0.1μ にした。またサンドブラストで約 36μ にした。

試験片の表面粗さが $3.6, 12 \mu$ での m 値が小さく、ほぼ鏡面にした 0.1μ においてはやや大きくなり、 36μ ではさらに大きな m 値になった。

潤滑性を保ちながら変形するには、まず金敷・試験片の間に潤滑剤が閉じ込められていなければならない。これには金敷・試験片の表面粗さが影響する¹⁰⁾。潤滑膜厚さにくらべて表面粗さが大きいと金敷と試験片の凸部が潤滑膜を突抜けて接触する部分が多くなる。すなわち境界潤滑状態の接触率が変形の初期から高いために摩擦力が大きくなる。Fig. 4 の結果では表面粗さ 36μ の場合がこれに相当する。

表面粗さ R_{max} は表面の凹凸の最大深さの平均値であるから、この凹凸を V 溝状と仮定すれば、潤滑剤を溝に埋め込むためには、溝の体積に相当する黒鉛量が必要となる。これを黒鉛の膜厚で表わすと表面粒さの $1/2$ となる。このことは同様に金敷側にも必要であるから、必要最小限の膜厚は金敷と試験片の両表面粗さの合計値の

Fig. 4 Effect of specimen surface roughness on friction factor.

$1/2$ となる。

機械加工した試験片の表面粗さは $3.3 \sim 3.9 \mu$ 、金敷の表面粗さは $2.0 \sim 2.5 \mu$ であるから、この場合の限界潤滑膜厚さは $2.7 \sim 3.4 \mu$ となる。この値は Fig. 3 に示した実験値の 2.5μ とよく一致している。

鏡面仕上げなどで平滑にしすぎると m 値がやや増大する。これは、潤滑剤を試験片と金敷の間にトラップしておくためにはある程度の大きさの凹凸が必要で、それは潤滑剤の粒度より大きな凹凸がなければならないことを意味している。

3.4 温度差の影響

現場での鍛造作業では金型と素材の間に温度の差があり、一般的に素材温度のほうが高い。したがって、金型と材料との界面温度は変形中に時間とともに変化する。この温度差が潤滑性に及ぼす影響について実験した。

Fig. 5 に金敷温度を 300°C とし、試験片温度を $150 \sim 450^\circ\text{C}$ に変えて、温度差 (ΔT とする) を最大 $\pm 150^\circ\text{C}$ にして測定した m 値を示す。金敷温度 (T_d とする) が試験片温度 (T_s とする) より低い場合は m 値がほぼ一定であり、 T_d が高いとやや低くなる。しかしその変動はわずかである。

Fig. 5 Effect of temperature difference between die and specimen on friction factor. Lubricant is colloidal graphite in oil.

本実験に用いた潤滑剤の温度特性は別途に報告するが、塗膜厚さ・表面粗さなどの諸条件を一定にした場合、 m 値は250°Cで0.06, 350°Cで平均0.13, 400°Cで平均0.22, 450°Cでは平均0.21である。もし試験片の温度によつて潤滑性が大きく影響を受けるとすれば、 m 値は T_s が400°C以上では約0.2になるはずなのに、実験結果では T_s が450°C, 温度差 ($\Delta T = T_s - T_d$) が150°Cでも m 値は0.13にしかすぎない。

Fig. 6に試験片の内部と金敷・試験片界面にCA熱電対を挿入して、 T_s が400°Cと200°Cとで $\pm 100^\circ\text{C}$ の ΔT がある場合について実験した温度-時間曲線を示す。この場合試験片に約9 tonの荷重を加えて金敷と試験片を密着させているので、界面に挿入した熱電対先端が試験片側に圧入され、試験片のほうの温度を示している。試験片内部の温度 T_{s2} , T_{s3} は接触後の時間経過とともに緩やかに金型温度に近づくが、界面の T_{s1} は接触後約5 sec以内で急激に金型温度 T_d に近づく。潤滑膜の温度は T_d と T_{s1} との間にあると考えられるので、金敷と試験片に与えた温度差よりも潤滑膜と試験片との温度差は少なく、潤滑性はこれに支配されたと考えられる。

本実験は圧下速度2.0 mm/secであるから50%圧下するのに約4 sec必要である。Table 2にFig. 6の曲線の0~4 sec間を積分して求めた T_{s1} の平均温度を示す。 ΔT が -150°C では240°C, ΔT が $+150^\circ\text{C}$ では375°Cの平均界面温度となる。使用した潤滑剤の250~300°Cでの m 値は0.06~0.13の範囲であることから、Fig. 5の結果とほぼ一致する。

黒鉛の潤滑性は黒鉛粒子のへき開すべりと粒子間のすべりによる¹¹⁾ものであるが、潤滑膜が厚い場合はいずれにせよ潤滑膜の内部ですべりを生ずるであろう。もし潤滑膜の両側に温度差があり、しかもそれが潤滑性に差が現われるほどの温度差であれば、潤滑性の良い温度側ですべりが生ずるはずである。この実験に用いた潤滑剤は温度が高くなるほど m 値が高くなるので、当然温度の

Fig. 6 Temperature-time curves when specimen temperature (T_s) is different from die temperature (T_d).

Table 2 Mean temperature of interface in specimen and anvil during 0 to 4 sec. from contacted.

mean tempera- ture.	ΔT ($^{\circ}\text{C}$) temp. of anvil; 300°C						
	-150	-100	-50	0	+50	+100	+150
T_{SI} ($^{\circ}\text{C}$)	240	260	280	300	325	350	375

Table 3 Effect of compression speed on friction factor (m). forging temperature 350°C Colloidal graphite in oil.

compression speed (mm/sec)	reduction in height (%)	friction factor m
0.5	35	0.14 0.13
2.0	50	0.11 0.10
7.0	50	0.15 0.14

低い側の潤滑層ですべりが生ずる。

Fig. 5の結果では ΔT が正の場合、 ΔT が0の m 値と同等であり、 ΔT が負の場合、 T_s が低くなるほど m 値がやや減少している。前者は試験片温度によらず金敷温度で m 値が決まり、後者は試験片温度によつて m 値が決まるので、試験片の温度が低いほど m 値は小さくなる。しかしTable 2に示したように実際の金型と試験片の界面においては、熱伝導のために、与えた温度差 $\pm 150^\circ\text{C}$ に対して、実測した温度差は $\pm 75^\circ\text{C}$ 以下と大幅に小さくなるので、 m 値に大きな差異が現われなかった。一般的に熱容量は鍛造素材よりも金型のほうが大きいので、素材の温度が高くても潤滑膜の温度は金型温度に近づき、潤滑性もこの条件で作用することになる。

3.5 圧下速度の影響

圧縮試験温度 350°C で、前記と同様の試験片・潤滑剤および塗布条件にて、圧下速度を 0.5, 2.0, 7.0 mm/sec と変えて測定した m 値を **Table 3** に示す。圧下速度が速くなるほど m 値が若干大きくなるが、その差は僅少で圧下速度が大きく影響することはない。

4. 結 論

潤滑剤の比較評価にあたり、リング圧縮試験で摩擦せん断係数の m 値を求めるための試験条件として m 値におよぼす主な因子の影響について実験し、以下の結果を得た。

1) 試験片の寸法が大きくなるほど m 値は大きく測定される傾向があるが、外径 30~75 mm では大きな差はなかった。鍛造製品の肉厚を考慮すると 50 mm が適当である。

2) 潤滑塗膜厚さはスプレーによつて金型表面に最初に付着する際は、短時間に黒鉛粒径の 1~2 倍の厚さになるものの、その後はスプレー時間が長くなるほど、また使用する潤滑剤に適した希釈倍率の範囲でスプレーしやすい倍率にするほど厚い塗膜を作ることができる。

3) 一定の圧下率まで潤滑特性を保ちながら変形するには、金敷・試験片の表面粗さに応じた最小膜厚さ以上の厚さが必要である。限界最小塗膜厚さは両表面粗さの

和の 1/2 に相当する。

4) 試験片の加熱温度を変えて、金敷温度との間に温度差を付けても、圧縮すると潤滑剤膜の温度は急激に両者の中間温度に近づき、金敷温度に近い性状を示す。また潤滑層の厚さによつては良好な潤滑性を示す温度のほうに従い、その温度での性状を示す。

5) 圧下速度 0.5~7.0 mm/sec の範囲では m 値の変動は小さい。

参 考 文 献

- 1) J. Schey, A. Lonn: *ASME* 報告 No. 74-Lubs-5 (1974), 1.
- 2) 時沢, 山田, 松木: 軽金属, **19** (1969), 142.
- 3) 河合, 中村: 塑性と加工, **11** (1970), 798.
- 4) T. Altan, C. H. Lee: *Trans. of ASME*, Aug. (1972), 775.
- 5) R. A. Ketterer: *ASME* 報告 No. 74-Lubs-11.
- 6) A. Male, M. Cockcroft: *Journ. of inst. of Met.*, **93** (1964), 39.
- 7) V. Nagpal, T. Altan: Battelle columbus Lab. 報告, Topical Rep. No. 11. (1976).
- 8) 久能木: *Journ. of Sci. Inst.* (Tokyo), **50** (1956), 215.
- 9) J. B. Haukyard: *Inst. J. Mech. Sci.*, **9** (1967), p. 163.
- 10) 小坂田: 塑性と加工, **12** (1971), 313.
- 11) 土肥: 固体潤滑ハンドブック, 幸書房, 72.