

論文

コーティング型冷間鍛造用潤滑剤の性能評価

阮立群\*1 今村康博\*2 丸茂康男\*3 濟木弘行\*4

Evaluation of coating-type lubricants in cold forging

Liqun RUAN, Yasuhiro IMAMURA, Yasuo MARUMO and Hiroyuki SAIKI

1. 緒言

高性能冷間鍛造用潤滑剤の性能評価を行う場合、鍛造中の摩擦界面の表面積拡大、温度、面圧、すべり速度、工具表面粗さ、材料の表面構造等が性能試験にできるだけ正確に反映されて取込まなければならない。特に、加工中に接触界面で生じる表面積の拡大は潤滑膜厚さを減じさせる。また、界面温度は潤滑剤の物理的・化学的特性に影響を及ぼす重要なパラメータとなる。そこで、前報<sup>1)</sup>では、前後方押し出しや歯形工具の押し込みの剛塑性有限要素法解析を行い、鍛造加工における厳しい局所変形部の表面積拡大を評価した。さらに、塑性変形による加工発熱や工具面上のすべりに起因する工具-被加工材料界面の温度上昇を評価した。これらの結果に基づき、実際の冷間鍛造条件を具現できる局所引抜き型摩擦試験機を開発した。この試験機は鍛造における厳しい表面積拡大、連続鍛造におけるダイス表面温度環境および多工程鍛造における前工程までのトライボ条件変化などを考慮できる。

本報告では、試験潤滑剤として主に燐酸塩系被膜潤滑剤(燐酸塩被膜+金属石鹸)、燐を含まない環境に優しい硬質被膜潤滑剤および簡易被膜型潤滑剤を選び、上記の試験機を利用して温度条件および工具条件を変えて性能評価を行う。

2. 実験条件および方法

開発した局所引抜き型摩擦試験機<sup>1)</sup>を利用して、冷間鍛造用高性能潤滑剤の性能試験を行う。摩擦試験では、Fig.1に示すような様々な表面積拡大に対応できる波形ダイス<sup>1)</sup>を用いて基準となる油系潤滑剤、高性能燐酸塩系被膜潤滑剤(燐酸塩被膜+金属石鹸)、燐を含有しないCa系被膜潤滑剤および簡易被膜型潤滑剤の摩擦特性を調べた。油系潤滑剤の性能試験には引抜き棒鋼としてSCR420を用いた。被膜潤滑剤の性能試験には引抜き棒鋼として、SCM435 ( $\sigma=904 \text{e}^{0.12} \text{MPa}$ )およびS15C ( $\sigma=800 \text{e}^{0.1} \text{MPa}$ )を用いた。これらの棒鋼表面に潤滑処理を施し試験を行う。

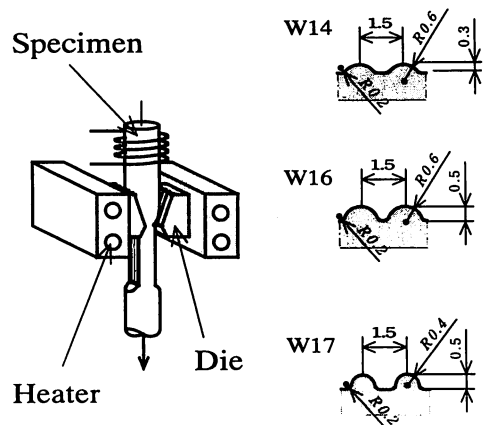


Fig.1 Tool geometrical configurations

平成13年5月7日受付

- \*1 助手 学術博 知能生産システム工学科
- \*2 技術官 知能生産システム工学科
- \*3 助教授 工博 知能生産システム工学科
- \*4 教授 工博 知能生産システム工学科

### 3. 油系潤滑剤の性能評価

ここでは、燐酸塩系被膜潤滑剤の性能の優位性を確認するため、4種類の工業用油系潤滑剤A～Dの性能試験を棒鋼SCR420 ( $\phi$  12mm) でダイスW14を用いて行った。その結果、Fig.2に示すように全ての潤滑剤が0.4以上の大きな摩擦係数を示した。これは材料が高面圧を受けるため、潤滑油が摩擦面に残らないからである。したがって良好な潤滑性能を維持するためには、潤滑膜が切れにくく、材料に対する密着性の良い被膜系潤滑剤の使用が必要になる。現在、燐酸塩系被膜潤滑剤が冷間鍛造用高性能潤滑剤として最もよく使用されている。次節では、本研究の比較基準にもなる燐酸塩系被膜潤滑剤の評価を行う。

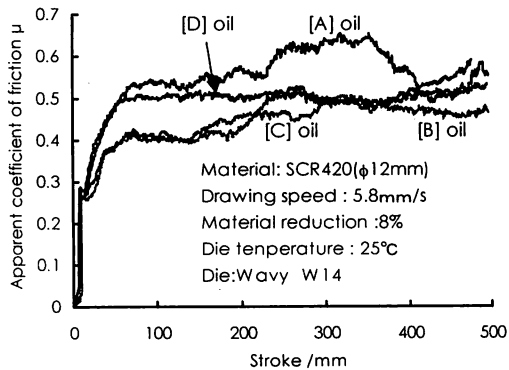


Fig.2 Variation of apparent coefficient of friction with drawing stroke for oil lubricants A,B,C and D

### 4. 燐酸塩系被膜潤滑剤の性能試験

本実験では、引抜き棒鋼としてSCM435およびS15Cを用いる。各棒素材に燐酸塩系被膜潤滑剤を用いているが、SCM435材とS15C材では潤滑剤を構成する各成分量 (Table1) が異なっているので、それぞれ潤滑剤A及びBと区別する。本試験機によってダイス温度環境を想定した条件下で平面ダイスと波形ダイスを使用して引抜き実験を行う。

#### 4. 1 摩擦係数に及ぼす加工面温度の影響

冷間鍛造で想定される摩擦界面の温度変化範囲内<sup>1)</sup>で、平面ダイスを用いてSCM435材に施した燐酸塩系被膜潤滑剤Aの摩擦係数 $\mu$ とダイス出口近傍の素材温度 $T_{out}$ を熱画像装置<sup>1)</sup>で計測した例をFig.3に示す。この例ではダイスを200°Cに初期加熱した場合としな

Table 1 Two types of lubricants

Chemical compounds	Amount of residue $g/m^2$			
	Lub. A (SCM435)		Lub. B (S15C)	
	before drawing	after drawing	before drawing	after drawing
Sodium stearate	1.63	0	2.32	0
Zinc stearate	0.7	0	1.03	0
Zinc phosphate	10.35	5.65	16.03	3.35

い場合に対して、室温 (約25°C) の素材を引抜いている。ダイスを200°Cに初期加熱した場合について見ると、 $T_{out}$ は焼付きや摩擦係数の著しい上昇がない限り、ほぼ一定温度となる。 $T_{out}$ は、ほぼ摩擦環境の温度であり、この例では約190°Cである。そのときの摩擦係数 $\mu$ はほぼ0.05である。

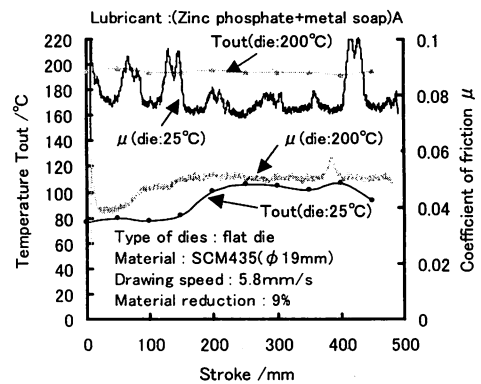


Fig.3 Variation of material temperature and interface friction with stroke (initial die temperature: 25°C)

ダイスを初期加熱しない場合でも温度が80°C以上に上昇する。摩擦係数 $\mu$ はダイス初期加熱の場合に比べて高くなっている。

さらに高温の $T_{out}$ において、摩擦係数を評価する場合には素材加熱を併用している。Fig.4に平面ダイスの場合と波形ダイスW14の場合を示す。いずれの場合も $T_{out}$ が300°Cを越えると潤滑性能が劣化していくことがわかる。

Fig.5は他の加熱条件における結果も含めて摩擦係数の温度依存性を見たものである。燐酸塩系被膜潤滑剤についてよく知られているように、摩擦界面相当温度 $T_{out}$ の増加につれて $\mu$ は減少し、250°C～300°Cで最小となる。300°Cを越えると潤滑性能が急に劣化しはじめ、ほぼ320°Cになると潤滑膜が燃焼して潤滑性能を完全に失い、引抜き限界となる。

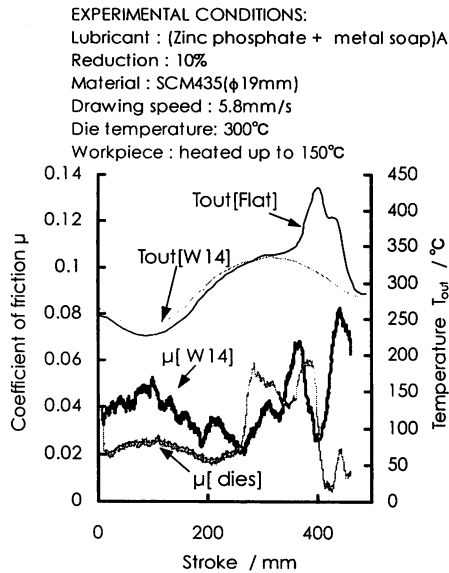


Fig.4 Variation of material temperature and interface friction with stroke (workpiece: heated up to 150°C)

また、燐酸塩系被膜潤滑剤 B を施した S15C 材料を波形ダイスで引抜いた場合の摩擦係数変化データを Fig.6 に示す。ただし、この場合は材料加熱を併用していないので高温側の計測値は示されていない。燐酸塩系被膜潤滑剤 A と B の性能はほぼ同じ傾向が認められるが、室温 (左端の実験点) の時、表面積拡大の大きな W17 では摩擦係数も 0.35 以上と大きくなり性能限界となるが、150 ~ 250°C では一応安定した良好な潤滑条件となっている。

Fig.7 にダイス W17 を用いて温度を変化させた際の摩擦係数  $\mu$  を示している。行程 220mm まででは、初期ダイス温度 150°C ~ 300°C の相違による摩擦係数  $\mu$  の差はあまり見られず室温の場合よりかなり低い。しかし、ダイス温度 300°C においては行程初期のうちに引抜き限界が現れている。潤滑膜は温度上昇につれて滑り性能が良くなるが、その一方で潤滑膜の耐熱抵抗が低下すると考えられる。したがって、厳しい変形に対して潤滑膜が破れやすく材料が焼付く。

#### 4. 2 摩擦係数に及ぼす加工速度の影響

摩擦速度の増加は、前報<sup>1)</sup>で述べたように摩擦界面の温度に影響する。Fig.8 (a), (b) は、波形ダイス W14 を用いて引抜き速度を変更した場合の界面温度と摩擦係数の変化を表す。初期ダイス温度は 25°C である。引抜き速度が速い 12.5mm/s の場合には  $T_{out}$  が 140°C まで増加し、摩擦係数はその影響を受け 0.07 程度まで減

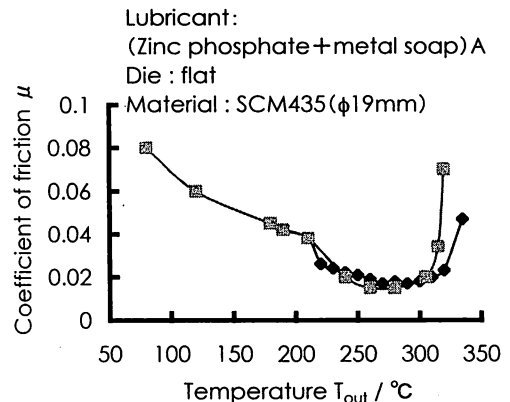


Fig.5 Variation of coefficient with friction with interface temperature of flat die for lubricant A

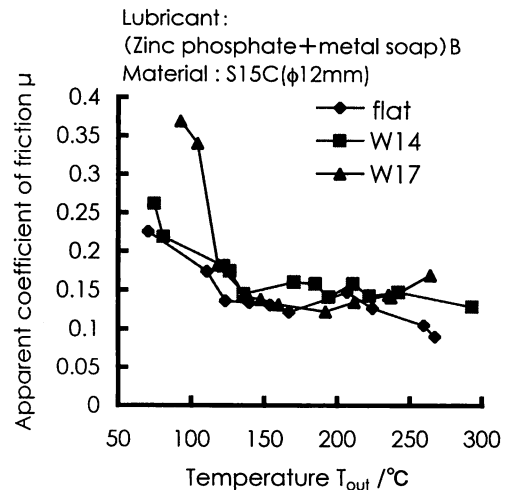


Fig.6 Variation of coefficient of friction with on interface temperature of die for lubricant B

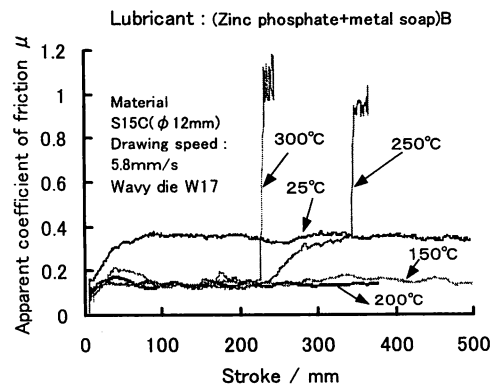


Fig.7 Variation of friction coefficient with interface temperature for wavy die W17

少している。ただし、平面ダイスの場合の Fig.5 に示す摩擦係数よりも表面積拡大の影響を受けて大きくなっている。温度依存性の大きな潤滑剤の場合、加工速度は界面温度に影響し、摩擦係数に著しい影響を与えるので、潤滑剤の性能評価には温度評価が極めて重要になる。

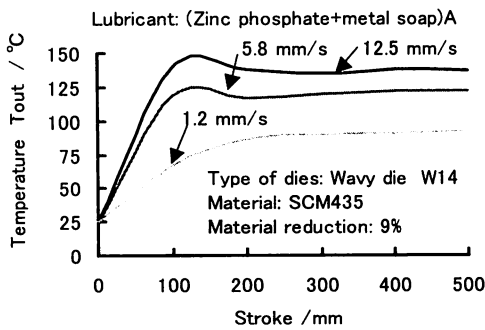
#### 4. 3 摩擦係数に及ぼす表面積拡大の影響

素材の表面積の拡大は、被膜系潤滑剤の膜厚さを支配し、局所的な膜破断にも影響する重要因子であるので、検討対象の問題に応じて選択しなければならない。ここでは、波形ダイス (W14, W17) と平面ダイスでの結果を比較する。棒材は S15C 材 ( $\phi$  12mm) で磷酸塩系被膜潤滑剤 B を使用する。棒材の断面減少率は 8%、棒材の引抜き速度は 5.8mm/s である。ダイス初期温度

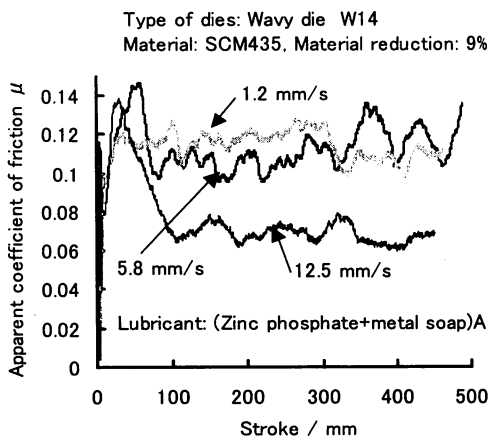
が 25°C, 200°C, 300°C の結果を Fig.9 (a), (b) ~ Fig.11 (a), (b) に示す。

初期温度が 25°C であった素材温度  $T_{out}$  は、平面ダイスで 75°C, 最も表面積拡大の大きい W17 ダイスで 110°C まで上昇している。平面ダイスの場合には摩擦係数が 0.15 で十分な潤滑性能を発揮している。波形ダイス W17 は W14 より丸みが小さく、波高さが大きく、表面積拡大率が大きくなっているため、潤滑剤の摩擦係数は、W14 で 0.22, W17 で 0.33 と高くなっている。このように表面積拡大の影響がはっきりと見られる。各種波形ダイスを使用することで、同じ潤滑剤を使用しても局所変形の厳しさに応じて摩擦係数が異なることが分かる。

ダイス初期温度を 200°C まで上げると、潤滑剤 B も

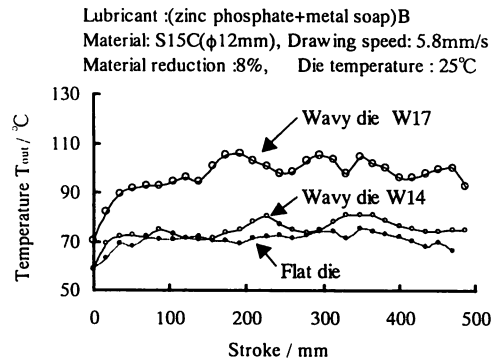


(a)

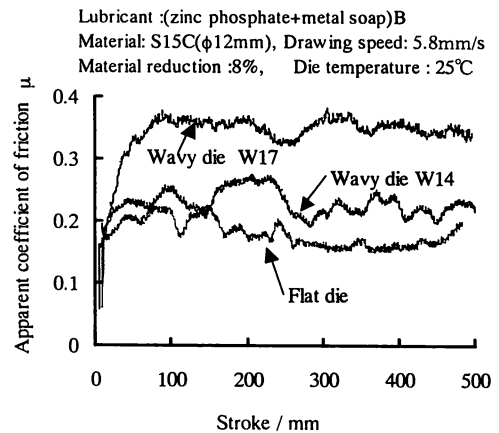


(b)

Fig.8 Influence of drawing speed on temperature and interface friction



(a)



(b)

Fig.9 Influence of surface expansion on temperature and interface friction(initial die temperature=25°C)

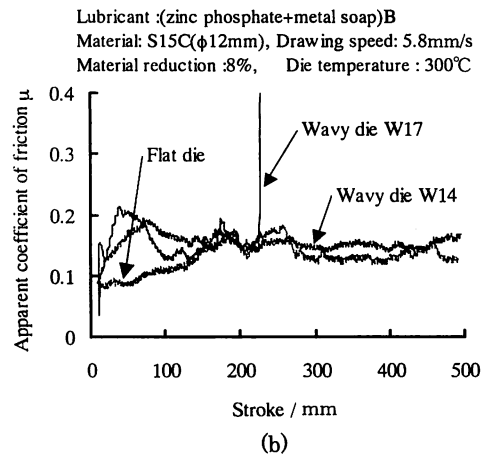
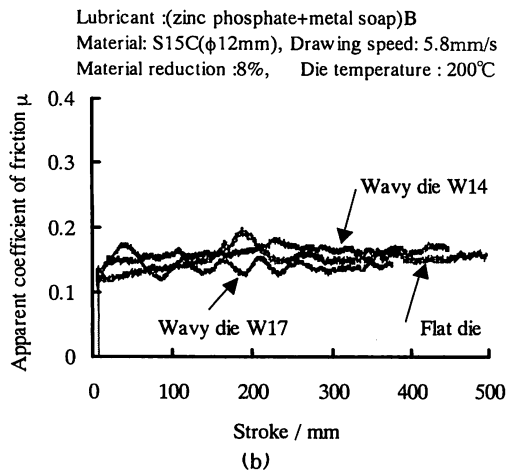
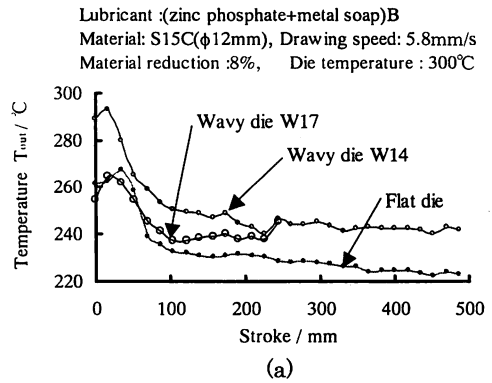
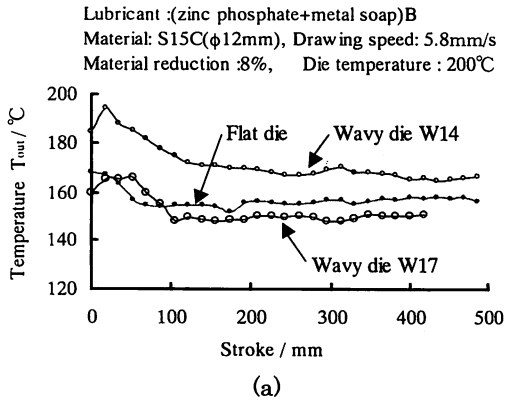


Fig.10 Influence of surface expansion on temperature and interface friction(initial die temperature=200°C)

Fig.11 Influence of surface expansion on temperature and interface friction(initial die temperature=300°C)

潤滑性能が改善し、いずれの場合も摩擦係数が0.15前後まで低下する。表面拡大率の影響はあまり見られない。

ダイス初期温度が250°Cを越えるとさらに摩擦係数が低下する。平面ダイスでは初期行程において $T_{out}$ が250°C程度に達すると摩擦係数は0.1以下まで低下する。一方、表面積拡大が大きいW17の場合には、引抜き行程200mmを越えた付近で摩擦係数が急増し、引抜き限界となる。界面域温度 $T_{out}$ が250°Cまでは、摩擦係数は低下するが膜厚さも減少していると思われる。

#### 4. 4 工程累積の影響

多工程の鍛造では、加工熱による温度上昇と共に、被膜潤滑剤の厚さの低下や劣化が生ずる。ここでは、多工程の影響を調べるために平面ダイスで加工後、続いて波形ダイスW14を用いて二段引抜きを行い、潤滑

性能を調べた。潤滑剤Aもしくは潤滑剤Bを施したS15C材の一段引抜き後の潤滑剤の残留状況をTable1およびFig.12に示す。潤滑剤Aに比べ潤滑剤Bの磷酸塩被膜の残留量は少なく、初期の1/5程度まで低下している。また、潤滑剤Aに比べ、石けん成分の残留が極めて少なく、鉄の成分も多く見られる。

二段引抜きにおける後段引抜き時の摩擦係数の変化例をFig.13に示す。連続加工を想定し初期ダイス温度を変化させた結果である。行程初期では初期ダイス温度の相違による摩擦係数の差はあまり見られない。前加工がない場合と比べて摩擦係数がやや高く、初期ダイス温度が150°C以上の全ての場合において、引抜き限界が現れている。したがって、潤滑膜の厚さ減少や潤滑剤の加工に伴う性能劣化を引抜き限界条件と摩擦係数値から評価できる。

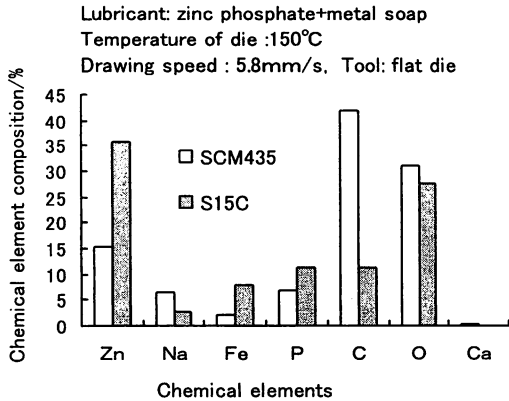


Fig.12 Chemical compounds and chemical elements left on the drawn specimens

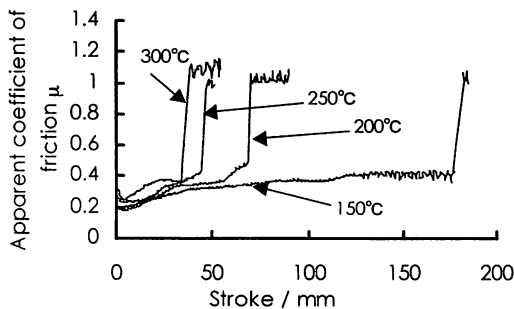


Fig.13 Influence of two-stage drawing on interface friction (1st stage: flat die, 2nd stage: wavy die W14)

## 5. 燐を含まない硬質被膜潤滑剤の性能評価

### 5. 1 試験材料及び潤滑剤

本実験では、燐を含まない硬質膜を施した高強度ボルト用 SCM435 棒鋼を試験に用いる。潤滑剤の分類を Table 2 に示す。ここで比較の基準となる潤滑剤は、燐酸塩系被膜潤滑剤 (No.1) である。

### 5. 2 連続引抜きの場合の表面積拡大と摩擦状態

Fig.14 に平面ダイスを用いて 4 種類の潤滑膜を施した棒材を引抜いたときの摩擦係数を示す。基準潤滑剤 No.1 では摩擦係数  $\mu$  は約 0.1 で、潤滑剤 No.2, No.3, No.4 では、それぞれ約 0.11, 0.12, 0.13 となり、これらの潤滑剤はほぼ同程度の潤滑性能を示している。

Fig.15 および Fig.16 に波形ダイス W16 および W17 を用いて 4 種類の潤滑剤を試験した場合の摩擦係数変化を示す。ダイス W16 の場合、行程 500mm まででは、

Table 2 Chemical compositions of lubricants

番号	潤滑剤構成
No.1	燐酸亜鉛被膜処理+金属石鹸
No.2	ステアリン酸カルシウム系金属石鹸 A
No.3	ステアリン酸カルシウム系金属石鹸 B
No.4	P T F E(テフロン)を 5%添加した Ca 系金属石鹸

潤滑剤の No.1, No.2 及び No.3 の摩擦係数  $\mu$  は 0.1 前後となり、大きな相違が見られない。潤滑剤 No.4 の場合、摩擦係数  $\mu$  は約 0.25 以上と最も大きく行程 250mm 以降、変動が大きい。連続引抜きの場合、潤滑剤 No.1 と No.3 では大きな行程においても安定した摩擦状態となっている。No.2 の摩擦係数  $\mu$  は最初の 1 本目では低い  $\mu$  値を示しているが、引抜きが進むにつれて次第に高くなる。

ダイス W17 の場合も同様に潤滑剤 No.4 は摩擦係数  $\mu$  が最も高く、約 0.4 程度まで達している。いずれのダイスにおいても潤滑剤 No.4 の低い潤滑性能が認められる。これは潤滑剤 No.4 の棒鋼表面への接着強度が弱いことを示していると考えられる。そのため、大きな表面積拡大を伴う母材変形に追従できない。

潤滑剤性能は表面積拡大の違いによってそれぞれ異なるが、例として平面ダイス、波形ダイス W16 及び W17 で潤滑剤 No.2 を用いて SCM435 棒材を連続引抜きした場合の摩擦係数変化を Fig.17 に示す。

平面ダイスでは摩擦係数  $\mu$  が約 0.1 という低い値を示した。加工条件が一番過酷な W17 ダイスでは 1 本目の摩擦係数  $\mu$  は約 0.16 となり、2 本目では、0.18 まで増大した。4 本目では摩擦係数  $\mu$  は約 0.2 と高い値となった。摩擦係数はダイス先端半径の減少とともに増加する。摩擦係数は行程の進展に伴い増加し、表面積拡大率が大きければ大きいほど、大きな傾きで増加するという傾向も現れている。

### 5. 3 工具面の焼付き量

Fig.18 は 4 種類の潤滑剤を用いて SCM435 材を引抜いた場合の 3 種類のダイス表面焼付き量である。焼付き量は試験前後のダイスの重量を測定することで求めた。

各ダイスを比較すると潤滑剤 No.1 を使用した場合には、加工条件が一番過酷で表面積拡大率の大きい W17 ダイスの表面への焼付き量が多い。他の潤滑剤に

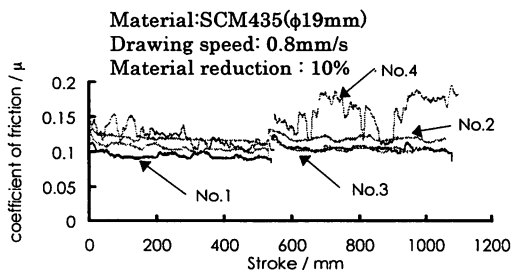


Fig.14 Variation of friction coefficient with drawing stroke for No.1, No.2, No.3 and No.4 (deformation induced by flat die)

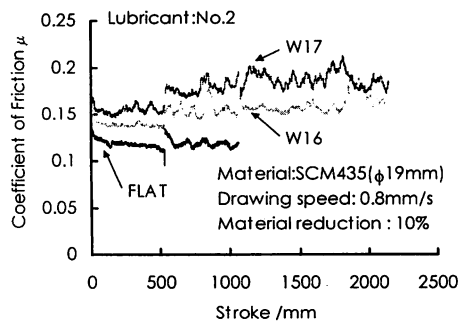


Fig.17 Influence of die geometry on interface friction for lubricant No.2

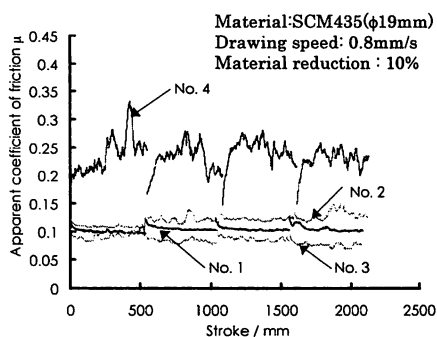


Fig.15 Variation of friction coefficient with drawing stroke for No.1, No.2, No.3 and No.4 (deformation induced by wavy die W16)

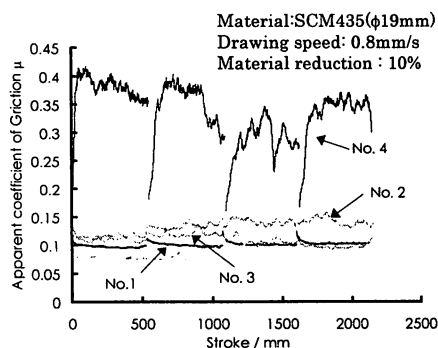


Fig.16 Variation of friction coefficient with drawing stroke for No.1, No.2, No.3 and No.4 (deformation induced by wavy die W17)

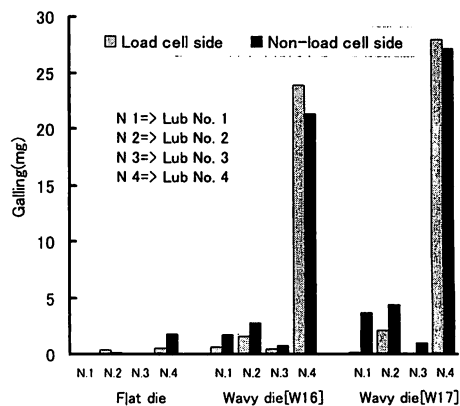


Fig.18 Influence of die geometry on galling weight

においても No.1 の場合と同じように、表面積拡大率の増加につれて焼付き量も増える傾向がある。潤滑剤 No.4 の場合、ダイス W17 の焼付き量は平面ダイスの約 10 倍程度となった。潤滑剤 No.3 はいずれのダイスにおいても焼付き量が少ない。これらの状況は摩擦係数とよく対応している。

#### 5. 4 材料表面層の化学成分分析

JXA-8900R 電子顕微鏡 EPMA を用い、潤滑剤の No.1 ~ No.4 において平面ダイス、波形ダイス W16 及び W17 で SCM435 材をストローク 700mm まで引抜いた場合の試験片表面層成分の分析を行った。

Fig.19 はダイス W16 を用いて引抜いた場合のストローク 700mm における材料表面層の化学成分を示す。Fe の成分割合は潤滑膜の破損や潤滑膜厚を評価する指標となるので Fe に注目する。基準潤滑剤 No.1 および潤滑剤 No.3 における Fe 割合は、潤滑剤 No.2 および

No.4 の場合に比べ少ないが、このことは潤滑膜が損なわれにくいことを示している。一方、潤滑剤 No.4 においては Fe の成分が最も多く潤滑膜強度が弱いといえる。ダイス W17 においても同様の傾向がみられる。平面ダイスを用いた場合には、各潤滑剤とも Fe 割合は少なく、潤滑膜はあまり損なわれてない。これらの結果は摩擦係数の変化状態と良く対応している。

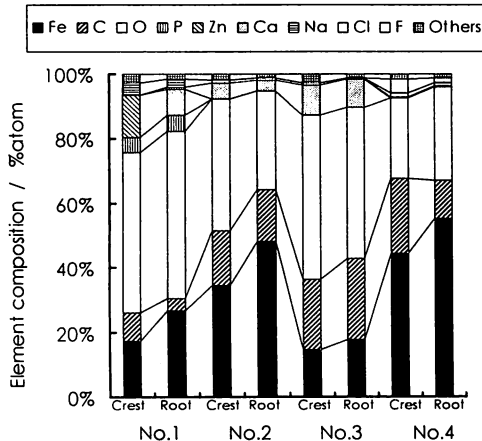


Fig.19 Chemical element composition taken at different regions of the drawn specimen when lubricants No.1, No.2, No.3 and No.4 for die W16

Fig.20 は潤滑剤 No.1 を用いた場合の引抜き前後の化学成分および各成分の量を示している。平面ダイスで引抜いた材料表面の Fe の成分は試験前の状況とほとんど変わらない。ダイス W16 を用いた試験片の谷部（試験片の谷部はダイスの山部である）では Fe の成分が 27% 増加している。当然、潤滑剤成分もそれぞれ実験前より減少している。W17 では試験片谷部の Fe の成分が 56% となった。これはダイス山部での表面積拡大が大きいため、潤滑膜が薄くなり破壊しやすいからである。逆に、W17 では試験片山部の Fe の成分は実験前とほぼ同じであり、W16 では試験片の山部よりかなり少ない。これは W17 においてダイス山部（試験片谷部に対応）からダイス谷部（試験片山部に対応）への潤滑剤の流れ込みが大きいためと思われる。しかし、ダイス W17 での試験片の谷部でも潤滑剤は残っている。

試験前後の材料表面成分を定性、定量的に分析した結果は Fe の成分の増減が表面積拡大率に関係していることを示している。

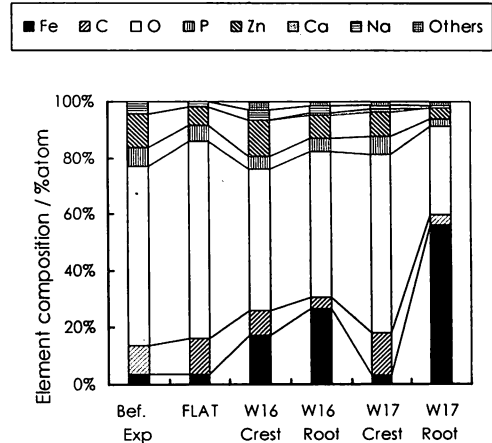


Fig.20 Chemical element composition taken at different regions of the drawn specimen when No.1 was used

## 6. 簡易被膜型潤滑剤の性能評価

新たに開発された簡易被膜型冷間鍛造用潤滑剤の性能試験を本モデル試験法で行った。

ここでは、白色水性潤滑剤 w-69A (Phosfonate+phosfonate metal soap) の潤滑性能を評価した。材料は S15C の棒鋼を使用した。材料表面に脱脂、水洗、乾燥、簡易被膜付け及び乾燥を経て潤滑被膜を形成させた後に引抜き試験を行った。

Fig.21 は潤滑剤 w-69A の温度特性を調べた結果である。ダイス初期温度 150℃ の場合はダイス初期温度 25℃ の場合より摩擦係数が低下するが、ダイス初期温度 200℃ の場合はダイス初期温度 25℃ の場合より摩擦係数は高くなる。潤滑剤 w-69A はダイス初期温度が 150℃ の場合、行程 300mm までの摩擦係数は約 0.16 と低く、良好な潤滑性能を示している。

Fig.22 は潤滑剤 w-69A を用いた場合のダイスへの焼付き量とダイス温度との関係である。摩擦係数が高い 200℃ の場合は焼付き量も多いが、摩擦係数が小さい 150℃ の場合は焼付き量も少なくなっている。温度の影響は焼付き量にも反映されていることがわかる。

## 7. 結 言

著者らが開発した局所引抜き型摩擦試験機を利用して、冷間鍛造に用いられる燐酸塩系被膜潤滑剤、燐を含有しない硬質被膜潤滑剤および簡易被膜型潤滑剤の



性能試験を行った。得られた結論は下記のとおりである。

(1) 磷酸塩系被膜潤滑剤の潤滑性能は摩擦界面温度の影響を強く受ける。界面温度の上昇によって摩擦係数は低下するが300℃を越えると性能は劣化し加工限界に至る。室温では、被加工材料の表面積拡大率を大きくすると摩擦係数に大きな差が認められるようになる。一方、温度が高くなると摩擦係数の差が減少する。しかし、表面積拡大率の大きいW17ダイスでは、温度200℃を越えると、行程200mm以上で加工限界に至る。前加工で被膜厚さが減少すると、続く加工では相対的に低い温

度、短いすべり距離および小さな表面積拡大率で加工限界に至る。

(2) 大きな表面積拡大を引起こす波形ダイスを利用して試験することで、燐を含有しない硬質被膜系潤滑剤の潤滑性能を評価することができた。具体的には、摩擦係数の計測、ダイスへの焼付き量の計測、ダイス表面および素材表面のEPMAを行うことで、潤滑剤性能を正確に評価した。3種類の潤滑剤のうち、潤滑剤No.3(ステアリン酸カルシウム系金属石鹼B)は磷酸塩系被膜潤滑剤に匹敵する潤滑性能を示した。

(3) 簡易被膜型潤滑剤の性能に及ぼす摩擦界面温度の影響を評価した。ダイス初期温度150℃の場合の潤滑性能が良好であった。200℃の場合では、室温の場合より潤滑性能は低下した。

以上のことより、本試験法は冷間鍛造で使用される異なるタイプの潤滑剤の実用性能評価に非常に有効であることが示された。現在、多くの潤滑剤メーカーで冷間鍛造用高性能潤滑剤が次々に開発されているが、本試験法はこれらの潤滑剤の性能評価を迅速に、容易にかつ正確に評価するのに非常に優れた試験法であるといえる。

#### 謝 辞

本研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成を受けて行われた。また、住友金属工業(株)、日立金属(株)および日本パーカライジング(株)には試験材料の提供等、本研究にご協力頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 阮立群・今村康博・丸茂康男・濟木弘行：熊本大学工学部研究報告，Vo.50, No.1 (2001)，1。

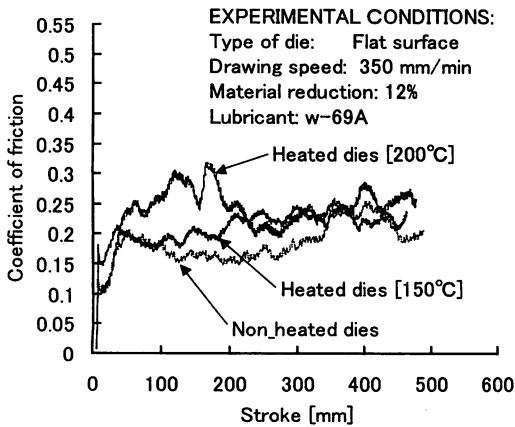


Fig.21 Variation of friction coefficient with initial die temperature for w-69A

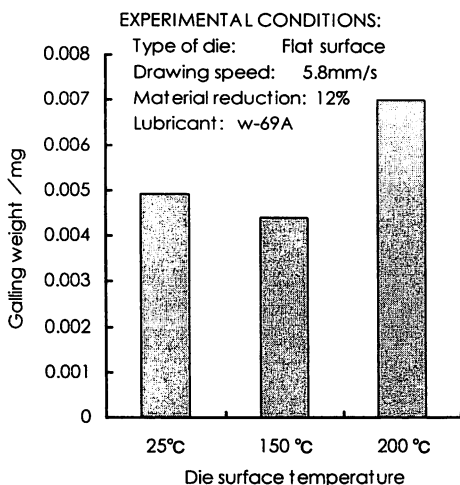


Fig.22 Influence of initial die temperature on galling weight