

## 論文

# 冷間鍛造用高性能潤滑剤の性能評価試験機の開発 (冷間鍛造トライボ条件の検討と局所引抜き型摩擦試験機の開発)

阮立群\*1 今村康博\*2 丸茂康男\*3 濟木弘行\*4

## Development of a new tribo-tester for evaluation of cold forging lubricants (Investigation of tribo-conditions in cold forging and development of a tribo-tester on localized rod-drawing method)

Liqun RUAN, Yasuhiro IMAMURA, Yasuo MARUMO and Hiroyuki SAIKI

### 1. 緒言

歯車、スプライン等の運動伝達部に用いられる一段と複雑で高精度及び高強度を要求される冷間鍛造品が増えてきている。冷間鍛造加工では、これらの部品をネットシェイプ加工することが求められている。このような場合、成形面圧の低減、鍛造品の表面などの肌あれおよび焼付き傷は許されないため、高性能鍛造用潤滑剤の使用は不可欠である。また、潤滑剤の開発に当たっては潤滑剤性能を迅速かつ正確に評価することが必要になる。

冷間鍛造のモデル試験を行う場合、個々の鍛造様式における摩擦界面の環境とモデル試験の摩擦環境を一对一で相似させることは簡単ではない。冷間鍛造における摩擦界面の環境を支配する因子のうち、温度、面圧、すべりおよび表面積拡大が最も重要な影響因子である。著者らはこれらの因子を考慮した高性能冷間鍛造用潤滑剤の性能評価法を提案する<sup>1,2)</sup>。

冷間鍛造用高性能潤滑剤の性能を正確に評価するためには、冷間歯形鍛造のような局所的に厳しい変形を伴う実際の鍛造生産に酷似できる試験機の開発が必要である。

本研究では、冷間鍛造加工における工具形状と材料の変形状態の関係を見るために、材料が鍛造される時

の表面積拡大及び摩擦面温度環境を二次元剛塑性有限要素法によって解析した、さらに、これらの結果に基づいて冷間鍛造条件を幅広く具現できる局所引抜き型摩擦試験機を開発した。

### 2. 表面積拡大の解析

鍛造加工における変形の厳しさを定量評価し、評価対象となっている鍛造トライボ条件をシミュレートするために必要となる工具形状の選択や開発中の潤滑剤性能を明らかにするためには、加工時の材料表面積拡大の検討が不可欠である。化成被膜を含む固体被膜潤滑剤は、通常十数マイクロメートル以下の膜厚さで摩擦面に初期捕捉されるが、表面積拡大や摩擦すべりによって膜厚が工具表面粗さ程度に薄くなれば被膜が破れる可能性が高まる。したがって、冷間鍛造で現れる基本の変形様式における摩擦界面で、局所的にどの程度の摩擦すべりと表面積拡大が生ずるかをあらかじめ評価しておくことが必要である。

#### 2.1 変形様式と表面積拡大

剛完全塑性材料を仮定した軸対称前方押し鍛造(せん断摩擦係数  $m=0.1$ 、材料のひずみ硬化指数  $n=0.1$ )において工具角部を材料が通過する際に受ける表面積拡大の評価結果を Fig.1 に示す。工具丸み角隅形状、摩擦条件、断面減少率などの成形条件によって、工具面でのすべりが拘束されるとそれに続く工具角部を通過する際、大きな表面積拡大が生ずる。この計算例では表面積拡大が数十～数百%まで大きく変化している。

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

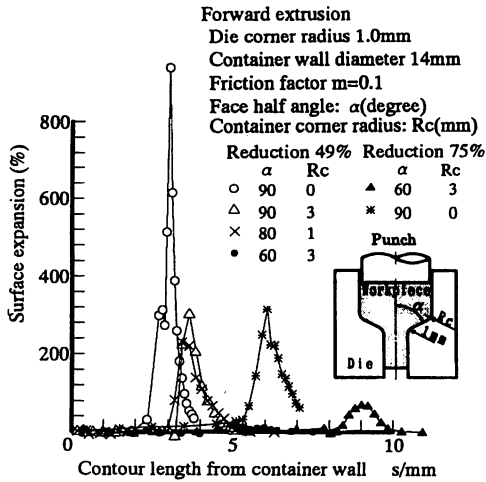


Fig.1 Surface expansion vs. contour length in forward extrusion -2D FE Simulation-

すえ込みおよび後方押し鍛造における材料流動の様子と表面積拡大率の計算例を Fig. 2 (せん断摩擦係数  $m=0.2$ , 材料のひずみ硬化指数  $n=0.1$ ) に示している。接触末端域や工具角出口域で最大表面積拡大が生ずることが分かる。

突起部などの局所押し込み変形においても局所的な表面積拡大が生ずる。この典型的モデルとして円筒(半径  $r$ ) 押し込みの計算例を Fig.3 に示した。局所的な表面積拡大率の最大値は、押し込み量  $S/r$ , 押し込み工具面のせん断摩擦係数  $m$ , 材料のひずみ硬化指数  $n$ , 他工具の拘束条件(断面減少率, 底厚み, 摩擦条件)によって大きく変化している。

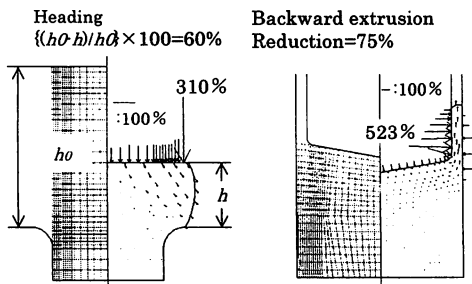


Fig.2 Results of simulation of flow pattern and surface expansion ( $n=0.1$ ,  $m=0.2$ )

$S/r=50\%$	$m=0.1$	$n$	0.02	0.05	0.1	0.2	
			Se(%)	436	310	208	131
	$n=0.02$	$m$	0	0.1	0.3	0.5	
			Se(%)	801	436	253	206
		$m=0.1$	S/r(%)	20	30	40	50
		$n=0.02$	Se(%)	87	164	284	436

Se: Maximum surface expansion

S/r: Stroke/radius

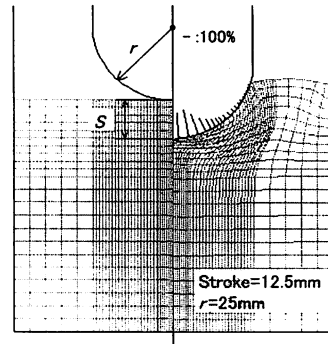


Fig.3 Surface expansions simulated in the indentation of the cylinder

## 2. 2 波形工具の押し込みと材料充填挙動

新たに提案する潤滑剤の性能試験法は、ダイス引抜き方向に山の嶺線を持つ波形二次元引抜きダイスで被加工材料を挟み引抜く方式である。これによって鍛造加工で遭遇する表面積拡大, すべり, 面圧条件を広くシミュレートできるようにしている。この局所引抜き試験における変形を明らかにするためには, 三次元の変形解析が必要である。しかし, 解析を容易にして表面積拡大の特徴を明らかにするために, 引抜き軸方向へのすべりや伸び変形を無視し, 波形工具を円柱素材に平面ひずみ下で押し込み変形を解析してみた。

Fig.4 は, 波形工具の二次元突起頂部の丸み半径  $r$  と押し込み量  $S$  が頂部に位置する要素の表面積拡大率  $SE_B$  (%) に与える影響を示したものである。ここでせん断摩擦係数  $m=0.1$ , ひずみ硬化指数  $n=0.062$  を使用した。表面積拡大は工具丸み半径の減少と押し込み量の増加につれて増加する。摩擦条件が表面積拡大によって影響されないなら, 押し込み量と丸み半径を変更することによって幅広く表面積拡大率を変更できることを示している。

また, 本研究の代表的モデル工具である波形ダイス W14 (丸み半径  $r=0.6\text{mm}$ , 波長  $1.5\text{mm}$ , 山高さ  $0.3\text{mm}$ ) と W17 (丸み半径  $r=0.4\text{mm}$ , 波長  $1.5\text{mm}$ , 山高さ  $0.5\text{mm}$ ) について, 二次元剛塑性有限要素解析によって表面積拡大を求めた。押し込み量  $S$  と丸み半径  $r$  の変化によって表面積拡大は異なる。同等な押し込み量における表面積拡大率の計算例(せん断摩擦係数  $m=0.2$ , 材料のひ

ずみ硬化指数  $n=0.1$ ) を Fig.5 に示している. この場合、局所的な表面積拡大率の最大値は丸み半径  $r$  の小さいダイス W17 の方が大きくなる.

さらに、波形ダイス W17 において (せん断摩擦係数  $m=0.1$ )、材料のひずみ硬化指数の違いが表面積拡大率にどの程度影響するかを Fig.6 に示す. この場合、 $n$  の値が小さいほど表面積拡大が大きくなっている.

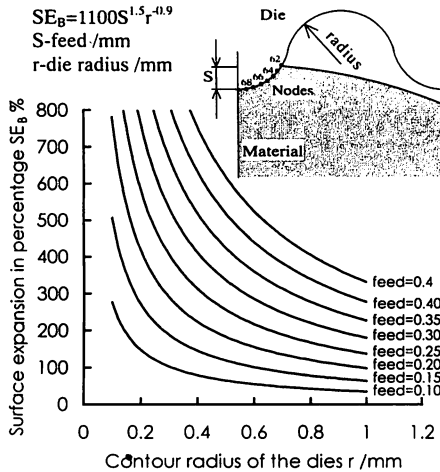


Fig.4 Surface expansion calibration curves. Approximate equation:  $SE_B = 1100S^{1.5}r^{-0.9}$

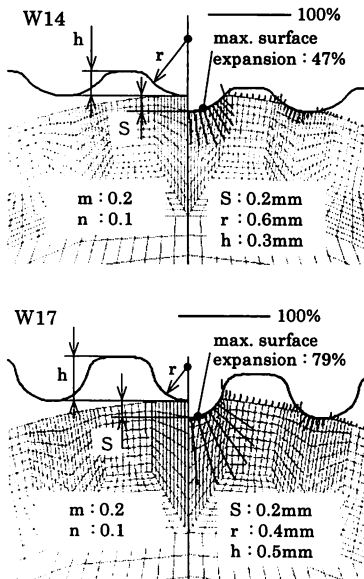


Fig.5 Surface expansions simulated in the indentation of the wavy dies W14 and W17

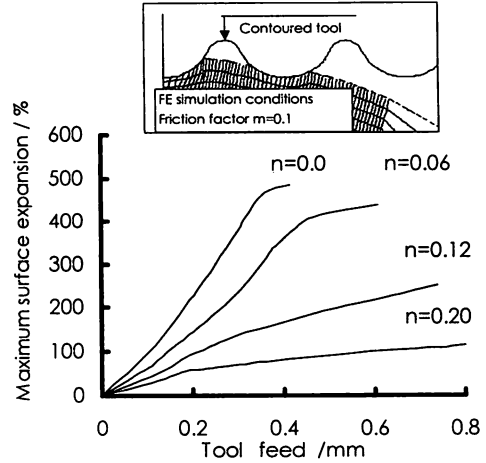


Fig.6 Surface expansion distributions for indentation simulation [Die W17]

2. 3 波形工具の局所引抜きにおける表面積拡大率

Fig.4 の曲線は最小二乗法を使うことにより、押込み量  $S$  と工具丸み半径  $r$  で次のように表される.

$$SE_B(\%) = 1100S^{1.5}r^{-0.9} \quad (1)$$

このようにして得た表面積拡大率  $SE_B(\%)$  の式を利用することで、様々な表面積拡大率に対応する波形工具の設計ができる.

実際の表面積拡大率を求めるには軸方向の伸びによって引き起こされる表面積拡大も加える必要がある. この軸方向伸びによる表面積拡大を含む表面積拡大率は

$$SE(\%) = (1 + Re(\%)/100)SE_B(\%) + Re(\%) \quad (2)$$

で計算できる. 式中の  $Re$  は材料を引抜き加工するときの断面減少率である.

Fig.7 に、式 (1) によって得られる平面ひずみ変形における表面積拡大率と押込み量の関係を示す. ダイス W14 と W17 を材料に押込んだ時の軸方向伸びを無視した表面積拡大率の最大値はそれぞれ 286% と 887% となる. Fig.8 はダイス W14 と W17 を使用する場合、式 (2) で求めた断面減少率の変化に伴う表面積拡大率である. 引抜き範囲内の断面減少率では表面積拡大への影響がそれほど大きくはない.

近似式 (1) のもとになった Fig.4 の解析条件で、せん断摩擦係数  $m=0.1$  は下限に近い摩擦条件であり、冷間鍛造材料として硬化指数  $n=0.062$  の条件は最小値に近い. したがって、Fig.7 及び Fig.8 に表す表面積拡大率は、生じる最大値になっていると見て良い. 提案

したトライボ性能試験法では、波形式の形状および断面減少率を適当に選ぶことで表面積拡大を自由に設定できるのが特徴である。

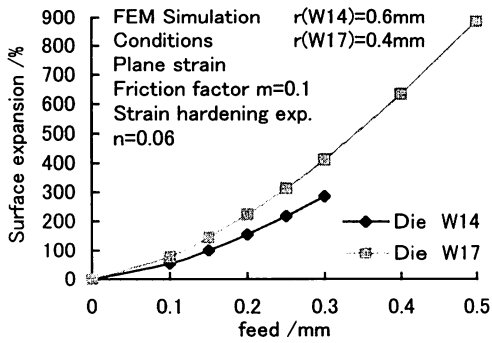


Fig.7 Surface expansion profiles in plane strain deformation for dies W14 and W17

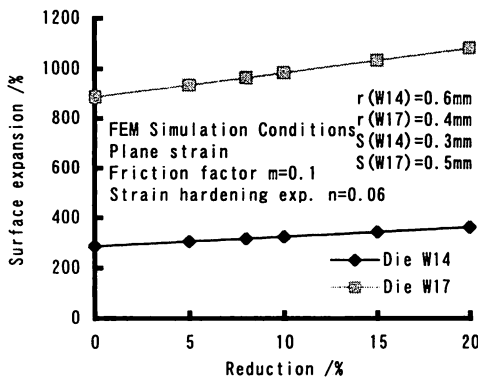


Fig.8 Surface expansion profiles with reduction for dies W14 and W17

### 3. 加工発熱の評価

冷間鍛造は室温で行われる加工であるが、実際には大量連続生産において工具の温度は一般に200℃程度になることがしばしば見られ、最高温度で400℃に達したとの報告もある。潤滑膜には良好な潤滑状態を維持できるための限界がある。したがって、変形発熱および摩擦発熱による温度上昇を予測しておくことが必要である。また、多段鍛造における前工程で材料温度が上昇することも考慮せねばならない。

#### 3. 1 断面減少率と加工発熱

変形集中とすべりの重なる軸対称歯形プロファイルの押し込み加工を繰り返し行った場合を例に取り、定常熱サイクルに達したときの温度場を計算してみた。ポンチ角出口近傍で到達する最高温度の結果例を Fig.9 に示した。やや小さな熱コンダクタンスで接触する場合に対して、せん断摩擦係数  $m$  を 0 から 0.3、また材料の断面減少率を 20% から 90% まで変化させた。また、ポンチ断面形状はモジュール 2、鍛造時間 0.07 秒、サイクルタイム 3.5 秒で中炭素鋼を鍛造している。材料温度は、 $Re=90\%$  の場合、最大で 450℃ 程度増加するが、初期温度 50℃ のポンチが 320℃ ~ 370℃ に到達している。すべり速度が最大 0.03m/s で小さいため摩擦による温度上昇は計算範囲で 60℃ 程度であった。この結果は摩擦係数と断面減少率が界面の温度上昇に対して大きく影響していることを示している。

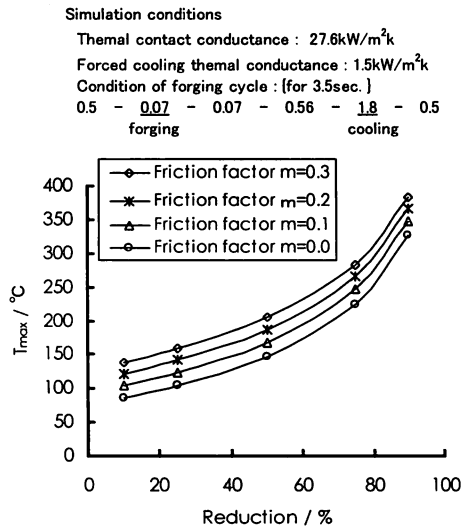


Fig.9 Influence of reduction on maximum die surface temperature [ $T_{max}$ ] for interface friction range of  $m=0.0-0.3$

#### 3. 2 摩擦界面温度の推定

摩擦仕事のみによる接触界面（摩擦界面）の温度上昇分を次のように近似的に評価する。工具と素材の接触界面において摩擦仕事の 95% が熱に変換し、界面を最高温度とした三角山形の温度分布が生ずると仮定する。摩擦熱は、材料と工具へ温度伝導率に応じて伝導する。その伝達距離  $\delta$  は、有限要素法解析より  $\delta = 1.5 (t_c \lambda / \rho c)^{0.5}$  と近似できる<sup>3)</sup>。摩擦界面において冷

間鍛造加工発熱（摩擦すべり仕事）は材料と工具の相対滑り速度  $V_{sm}$ 、せん断摩擦力  $\tau_r$  および接触時間  $t$  の積で決められる。摩擦界面上昇温度は被加工材料と工具の密度  $\rho$ 、比熱  $c$  および熱伝導率  $\lambda$  などの物性値と関係しているが、すべり距離  $l_s$  を用いて、摩擦界面上昇温度  $\Delta T_f$  は次式で計算できる。

$$\Delta T_f = 1.26 \tau_r (l_s V_{sm})^{1/2} / \{ (\rho_T c_T \lambda_T)^{1/2} + (\rho_M c_M \lambda_M)^{1/2} \} \quad (3)$$

ここで、添え字 T と M はそれぞれ工具及び被加工材料に対応する。

Fig.10 に炭素鋼を超硬工具で摩擦する場合の計算結果例を示す。すべり距離 0.01m で、摩擦応力  $\tau_r$  を 10 ~ 300MPa まで変化させた時の相対すべり速度に対する摩擦界面到達温度を示している。この図より摩擦すべり速度とせん断摩擦応力が摩擦界面の温度上昇に及ぼす影響がわかる。冷間鍛造ではせん断摩擦応力が数十 MPa 程度にはなり得るので、高速鍛造では摩擦のみによっても 200 ~ 300℃ の温度上昇も生じる。したがって、これを考慮した摩擦試験温度の設定も必要になる。

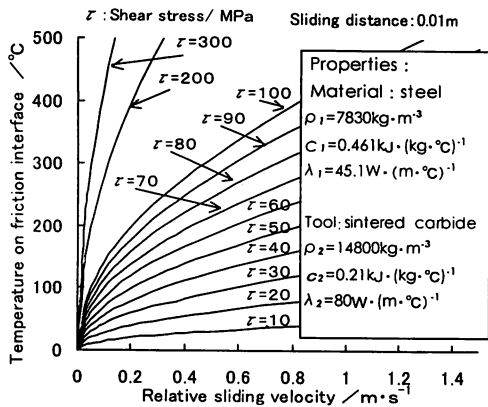


Fig.10 Variation in interface temperatures due to frictional work with relative sliding velocity

#### 4. 局所引抜き型摩擦試験機の開発

##### 4. 1 摩擦試験機の特徴

上記のように、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、摩擦すべり速度等のパラメータを性能試験にできるだけ正確に取り込まなければならぬことが明らかになった。これらの検討に基づき、本研究では、鍛造において工具が被る負荷と同等の負荷を容易に実現できる局所引抜き型摩擦試験機を開発した。この試験機の特徴は以下のようにまとめられる。

- (1) 潤滑処理された棒素材をそのまま引抜くので、素材加工時の履歴の含まれた面をそのまま摩擦試験することができる。
- (2) 引抜き試験では棒材と工具面に高い接触面圧が生じ、かつ棒材は大きな表面積拡大を受けるので歯形鍛造のような厳しい局所変形を実現できる。
- (3) 数千回から数万回の鍛造において鍛造工具が受ける負荷と同程度の負荷を試験工具に短時間でかけることができる。
- (4) 工具プロフィール形状を変更することで棒材の表面積拡大を容易に変更できる。
- (5) 加熱システムが組み込まれているので、実加工における温度環境と近い摩擦界面温度条件を実現できる。

この試験機の詳細を以下で述べる。

##### 4. 2 試験機の構成

本体試験機 (Fig.11) は引抜き用の 250kN 主駆動水平油圧シリンダー、ダイスに負荷をかけ断面減少を与える 200kN 油圧シリンダー、ロードセルを組込んだダイセット、変位計および引抜き用チャック等で構成されている。

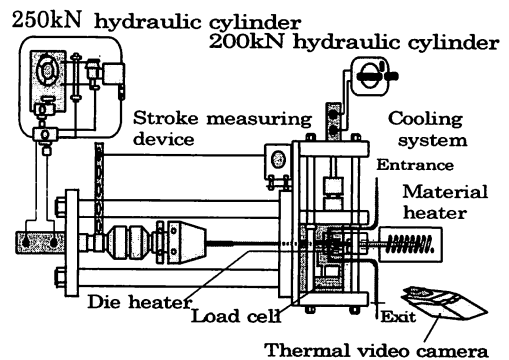


Fig.11 Experimental setup

試験では様々な断面プロフィールのダイスで棒材を主駆動シリンダーを用いて引抜く。試験用の棒材（初期長さ 1000mm）は試験機のチャック（取付可能な棒材直径、10mm ~ 22mm）とスパーサー部にある案内ローラーで支えられる。棒材は一對の引抜きダイスで横油圧シリンダーを用いて半径方向に押し付けられる。工具-棒材の平均接触面圧は素材変形抵抗の 2 ~ 2.5 倍であり、鍛造過程で被る負荷と同程度の圧力がダイスに与えられる。スパーサーでダイス間隙を調節し断面減少率を設定する。可能な引抜き工程は 500mm であり、

引抜き速度は任意に変更でき、上限は 12.5mm/s である。

ダイス出口近傍のダイスと材料温度を記録するために、ダイスの真上に熱画像装置（温度精度±1.5℃）が配置されている。温度校正には熱電対を利用する方法を用いた。

#### 4. 3 負荷計測と摩擦係数の算出

ダイス負荷を計測するロードセル (Fig.12) は 3 本の梁で構成されており、これらの梁のみでダイスが支えられている。ダイスに働く水平分力  $P_c$  と垂直分力  $P_v$  は梁に貼られた歪みゲージのブリッジの出力電圧  $mV$  ( $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ) により求められる。力の作用点の位置および方向を変化させて検定を行い、最小自乗法を用いて次の計算式が求められた。

$$P_v \text{ (kN)} = (0.59\epsilon_1 - 1.81\epsilon_2 - 5.28\epsilon_3) \times 10^2$$

$$P_c \text{ (kN)} = (-6.01\epsilon_1 - 4.67\epsilon_2 + 0.17\epsilon_3) \times 10^2$$

工具材料接触界面の相当摩擦係数は、

$\mu = (1/C) \tan\{\text{Arctan}(P_v/P_c) - \theta\}$  で計算できる。ここで、 $P_v$  は引抜き力の 1/2、 $P_c$  はダイス押広げ力、 $\theta$  はダイス半角 ( $20^\circ$ ) である。C は輪郭長さ補正の係数で、平面ダイスに対して  $C=1$ 、波形ダイスに対しては平面に対する輪郭長さ比で近似できる。すなわち、波形ダイスの場合は、ダイス面の平均面圧がほぼ同様であると考えれば上式の摩擦係数を  $[C = \text{有効接触面積} / \text{投影面積}]$  で除する補正が必要になる。

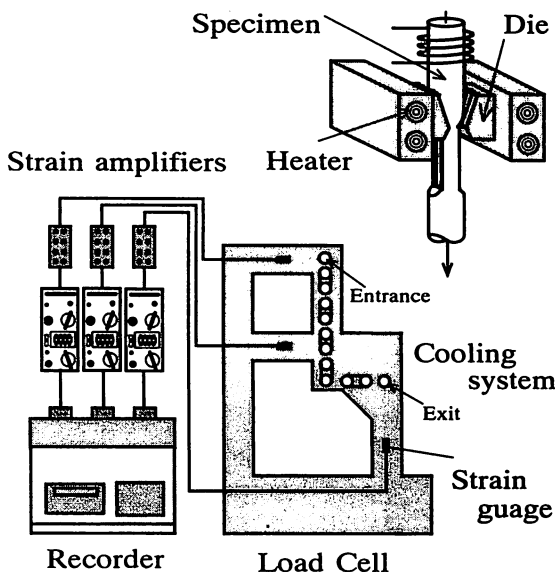


Fig.12 Load cell

#### 4. 4 温度の設定と制御

この試験機はダイスを組み込む各ホルダーにヒーターを内蔵し、ボルトスライダや温調器を用いてダイスを加熱するシステムを装備している。ロードセル内のダイス固定部の周囲は冷却用管路を用いて冷却され、ひずみゲージを保護している。また、棒材を加熱する管状炉も備えている。この加熱と冷却システムによって、ダイス温度は室温～350℃の範囲で任意の温度に安定して制御できる。

#### 4. 5 各種ダイス形状

ダイスの加工面は、平面と引抜き方向に対して平行な波形の山を持つものがある（波形ダイス）。

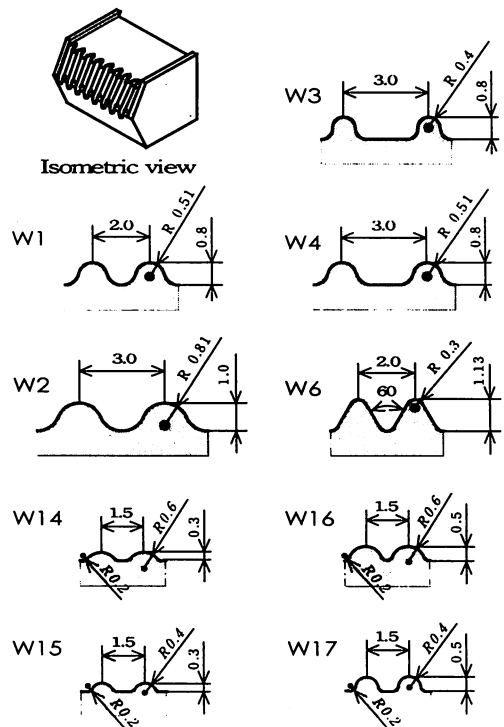


Fig.13 Tool geometrical configurations

Fig.13 に示すように、引抜き工具界面に色々な変形パターンを与えるために、平面ダイスより輪郭長さを 18～48% 程度増加させた波形ダイスを用意した。ダイスの波の高さ、先端丸み（半径）及び輪郭形状を変更することで変形を一段と局所化でき、鍛造加工で表れる様々な厳しい変形状態を実現することができる。その表面粗さは  $1.5 \mu mR_z$  前後にラップ仕上げされている。

次報では、この試験機を用いて行った高性能冷間鍛造用潤滑剤の性能試験について報告する。

## 5. 結 言

表面積拡大や摩擦すべりは、変形の幾何学と拘束条件、被加工材料特性である加工硬化指数および摩擦条件などによって大きく変化する。また、摩擦界面の温度は、摩擦すべり仕事、摩擦すべり速度および変形熱によって大きく依存する。したがって、潤滑剤の性能評価にはこれらの条件を正しく取り入れる必要がある。

この要求に応えうる新形式の局所引抜き型摩擦試験法を提案し、試験機の試作を行った。

## 参考文献

- 1) 濟木弘行・阮 立群・丸茂康男・今村康博：45回 塑加連講論，(1994)，817.
- 2) 濟木弘行・G. ンガイレ・阮 立群：46回塑加連講論，(1995)，399.
- 3) 濟木弘行・南 明宏：鍛造技報，Vo1.14, No. 39 (1989)，1.