

# 局所しごき引抜き摩擦摩耗試験機による 最適鍛造トライボ条件の評価

熊本大学 工学部 知能生産システム工学科

教授 濟木弘行

(平成5年度研究開発助成 AF-93016)

## 1. 緒言

歯車、スプライン等の運動伝達部を含み、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いる。鍛造加工の分野では歯車や継ぎ手部の輪郭成形ではネットシェイプ加工が狙われている。スプライン軸の冷間鍛造、熱間及び温間と冷間サイジングの複合鍛造がその代表例である。これらの部品では表面の焼き付き、肌あれ傷などは許されない。鍛造品は数千から数万まで加工されるが、素材や工具の状態によって焼き付きの頻度や工具摩耗の状態が大いに变化する場合がある。焼き付きや摩耗を評価する尺度として、加工中の各瞬間の素材と工具の間の摩擦係数、潤滑剤の臨界膜厚さ、臨界面温度、臨界相対滑り距離などが調べられ貴重な判断材料があたえられつつある<sup>1)</sup>。これらのパラメータが潤滑剤及び加工条件によってどの様に変化するかを把握することは、鍛造プロセスの最適化において重要となる。本研究では上記のことを安易にかつ迅速に評価するために、鍛造加工における変形のシミュレートが可能な局所しごき引き抜き型摩擦摩耗試験機を提案し、潤滑膜を含む素材表面層の条件によってどの様に影響されるかを明らかにする。

## 2. 理論解析

鍛造加工における工具形状と材料の変形状態の関係をみるために二次元剛塑性有限要素法を用いて、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になる工具形状(後述)の決定や潤滑膜の性能限界を明らかにする方法について検討する。

### 2.1 軸対称押し出し鍛造における変形状態

既に実験及び有限要素法を用いて摩擦界面における変形状態が評価されてきている。潤滑膜にとって良好な潤滑状態を維持する上で、表面積拡大と温度上昇の限界を知ることが重要である。例えば、良く潤滑された据込みでは表面積の拡大はほぼ見かけの表面積拡大と見てよいが、前方及び後方押し出しにおいては、工具角部において局所的な表面積の拡大が見られる。図1では、軸対称変形で剛完全塑性材料を仮定した場合の工具角部を材料が通過する際に受ける表面積拡大の状態を有限要素法で解析し比較している。摩擦せん断係数 $m$ は磷酸塩被膜+金属石鹸を用いた場合を考え0.1としている。工具面の

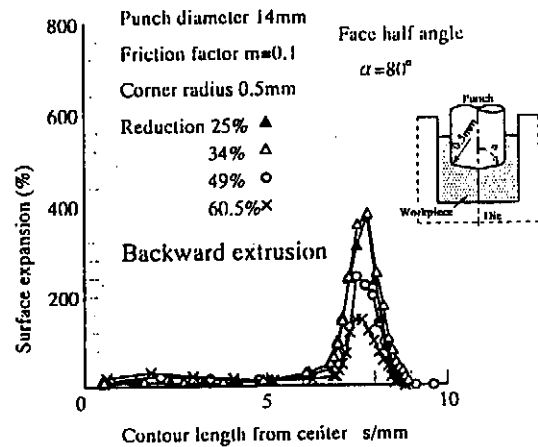


図1 a 後方押し出しにおける表面積拡大の変化

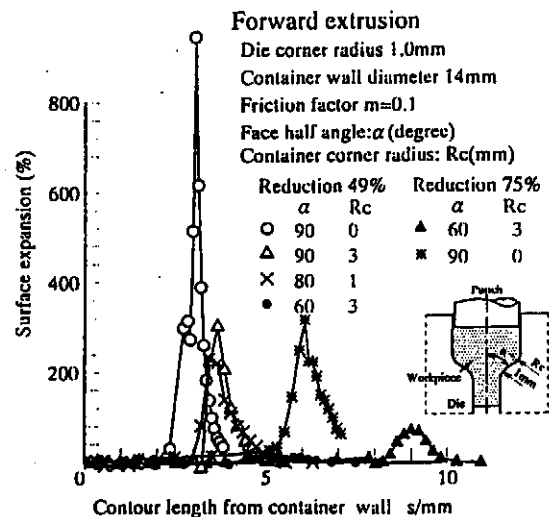


図1 b 前方押し出しにおける表面積拡大の変化

傾き、角隅のアーチ、断面減少率など工具形状で表面積拡大は、数十～数百%まで大きく変化している。勿論、当該すべり部へ材料表面がどの程度流れ込むかによって表面積拡大率が影響されるので摩擦せん断係数自体の値によってもこれは変化する。

### 2.2 波形工具の押し込みと材料充満挙動

局所引抜き試験での変形様式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む変形を解析してみた。図2は、波形工具の二次元突起頂部の丸み半径  $r$  と押し込み量に当たるフィード  $f$  が頂部要素の表面積拡大率 (%) SE に与える影響を示したものである。すなわち、表面積拡大は工具の端の輪郭半径の減少とフィードの増加につれ増加することがわかる。摩擦条件が表面積拡大によって影響されないなら、フィード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。たとえば、 $r=0.5$  mm と  $r=0.8$  mm の工具では、フィードが  $0.4$  mm に達したとき、表面積拡大がそれぞれ  $500\%$ 、 $375\%$  になる傾向がある。

これらの曲線は、最小二乗法を使うことにより、以下に示すようにフィード  $f$  と工具輪郭半径  $r$  で表すことができる。

$$SE(\%) = 1100 f^{1.5} r^{-0.9} \quad \dots \dots (1)$$

この式を利用して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。

## 3. 実験条件及び方法

### 3.1 局所しごき引き抜き摩擦試験装置

これまで、様々な摩擦試験法が利用されているが<sup>2)~5)</sup>、ここでは素材加工時の履歴を含む表面を摩擦試験するために、鍛造素材となる棒鋼あるいは線材をそのまま引き抜き、鍛造加工の摩擦状態に近い状態を容易に実現する局所引抜きタイプのトライボ試験機を新たに試作した。

図3に試験装置の略図を示す。円形断面の棒鋼の一部を波形ダイス(後述)を用いて引き抜く形式である。ダイセットベースとシューに固定された1対の引抜きダイスを油圧シリンダーで水平方向に押し付け(最高200 kNまで可能)、スペーサーでダイス間隙を設定する。試験片の棒鋼(初期長さ1100 mm)は島津製250 kN容量のインストロン型万能試験機の引張り試験用チャックと引抜き前のスペーサー部にある案内ローラーで支えられる。クロスヘッドに乗せられたダイセット(引抜きダイスと荷重測定体が組み込まれている)を移動することで引抜きが行われる。この万能試験機を利用する場合には、可能な引抜き行程は500 mmで引抜き速度の上限は50 mm/sである。

実験では引き抜き工程に対してダイスにかかる水平分力と垂直分力(及び引き抜き力)をダイセットベースの3本の梁に貼られた歪みゲージ出力で計測できる。平面ダイスの場合はダイス面の平均摩擦係数を次式で評価す

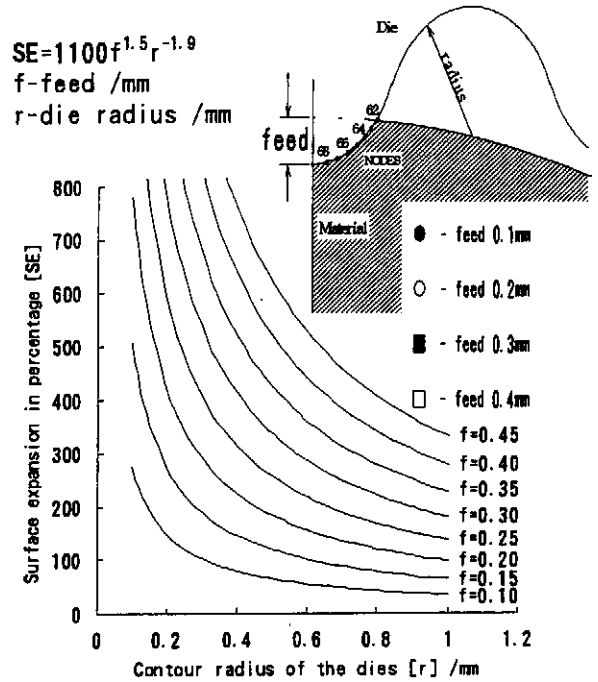


図2 表面積拡大曲線

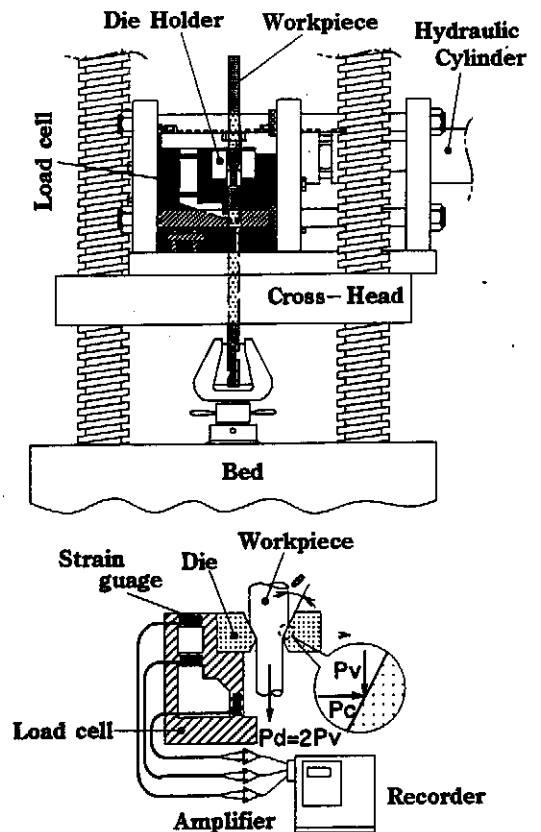


図3 引き抜き式摩擦試験装置と水平分力  $P_c$  と垂直分力  $P_v$  計測用ロードセル

る。

$$\mu = \tan\{\tan^{-1}(P_v/P_c) - \theta\} \quad \dots\dots (2)$$

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すれば上式の摩擦係数を（有効接触面積／投影面積）で除する補正が必要である。これを相当平均摩擦係数と呼ぶことができるが、有効接触面積の評価には理論解析が必要であるので、当面、摩擦係数として便宜上式式を利用するが有効面積として接触面積を選ぶことにした。

実験はダイスを取り替えず数回連続で50 mm/sの速度で引き抜きを行い、ダイスに鍛造過程で被る負荷と同程度のものを与える。ダイス表面温度は熱画像装置で計測する。引抜き後のダイスへの焼き付き量やダイス摩耗量は0.1 μgまで計測可能な電子天秤で計測する。潤滑被膜の破損の程度を調べるために、引抜き実験前後の材料表面成分のEPMAを行う。

### 3.2 試験材料及び潤滑剤

鍛造加工では、摩擦、焼き付き、工具摩耗を減らす目的で多くの場合、素材表面は磷酸塩被膜処理され金属石鹸で潤滑されている。本研究では、磷酸亜鉛被膜を施したS10C棒鋼、鍛造で実際に用いられている高性能潤滑剤や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。これらの材料の機械的性質を表1に示し、潤滑剤の分類を表2に示す。

### 3.3 工具形状

前章でも示したように、波形工具を用いることで被加工材料の表面積拡大を大きく取れる。そこで、本研究では、図4aに示すような波形ダイスと基準となるフラットダイスを用いた。図4bにこれらのダイスのプロフィールを示す。波形の丸み部の半径と波の高さを変更することで、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。

有限要素法解析による各ダイスの表面積拡大は、ダイスW14, W15, W16, W17の順で300%~700%と大きくなる。

なお、試験前のこれらの工具表面粗さは、およそRz=1.5 μmである。

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1 波形ダイス形状と摩擦状態

図5は、図4bに示すダイスで潤滑剤No.1を用いてS10C材の引抜き試験を行った結果である。断面減少率は12%である。フラットダイスの場合の摩擦係数μは、0.05~0.06で安定しており、300mm程度引抜いてもほとんど変化しない。波形ダイスでは輪郭長さが18~48%程度増加しているが、摩擦係数μは、引抜き初期においてははるかに大きな値になり、80~330%増加している。また、破断に至る場合(μ=0.3)には500%以上増加している。これは局所的な表面積拡大率と対応している。

表1. 試験材料

材料	引張強さ	素材直径
S10C	242MPa	19mm
SCM435	539MPa	11.6mm

表2. 潤滑剤

番号	潤滑剤構成
No.1	磷酸亜鉛被膜処理+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.5	PTFE(テフロン)を5%添加したCa系金属石鹸

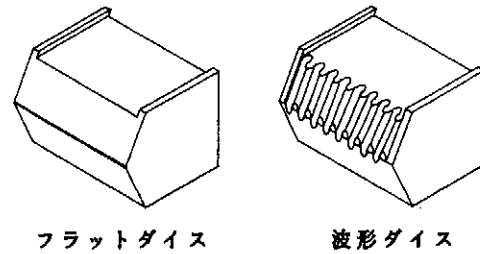


図4a フラットダイス及び波形ダイス

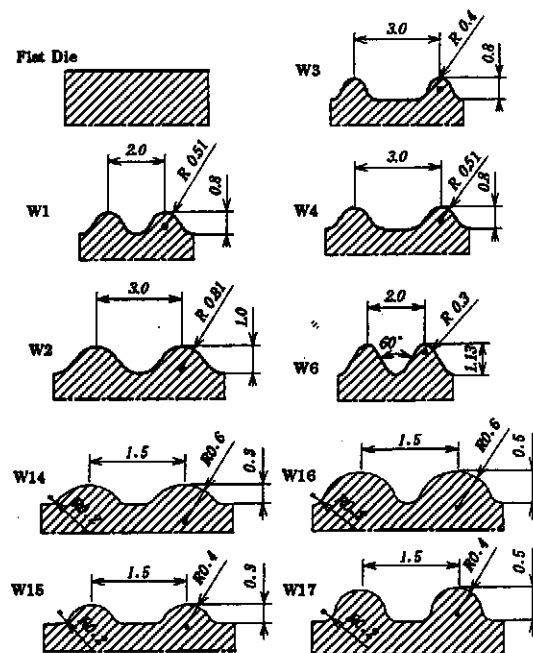


図4b 引き抜きダイスの各種プロフィール

#### 4.2 連続引抜きの場合のダイス形状と摩擦状態

波形ダイスW16, W17及びフラットダイスで潤滑剤No.2を用いてSCM435材を連続引抜きした場合のストロークに対する摩擦係数の変化を図6に示す。

フラットダイスでは摩擦係数 $\mu$ がおよそ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 $\mu$ はおよそ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。摩擦係数はダイス刃先端半径の減少とともに増加する。摩擦係数はストロークの進展に伴い増加し、表面積拡大率が大きいければ大きいほど、大きな傾きで増加するという傾向も示している。

#### 4.3 潤滑剤の摩擦状態への影響

異なる輪郭形状の波形工具において潤滑剤による摩擦係数の変化の様子を調べた。図7に表面積拡大600%のW16波形ダイスを用いてSCM435材を引き抜いた時の4種類の潤滑剤(表2参照)の摩擦係数の変化を示す。

行程500mmまでに潤滑剤のNo.1, No.2及びNo.3の摩擦係数 $\mu$ は0.14前後となり、大きな相違が見られない。No.5の場合、摩擦係数 $\mu$ は0.25以上と大きく、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では大きな工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り最大で0.2近くまで上昇する。

#### 4.4 ダイス形状とダイス表面温度の関係

図8は各ダイス形状ごとに加工中の温度変化を示す。引抜きダイスの直下で計測される温度は摩擦係数の変化と対応して増加し、また、局所的な表面積拡大率とも対応している。

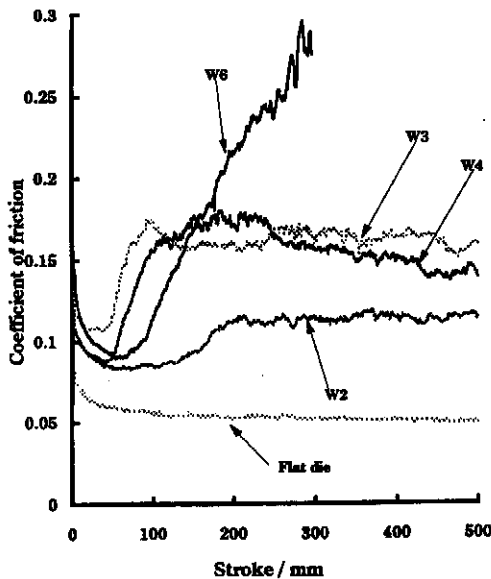


図5 各種ダイスを用いた場合の摩擦係数

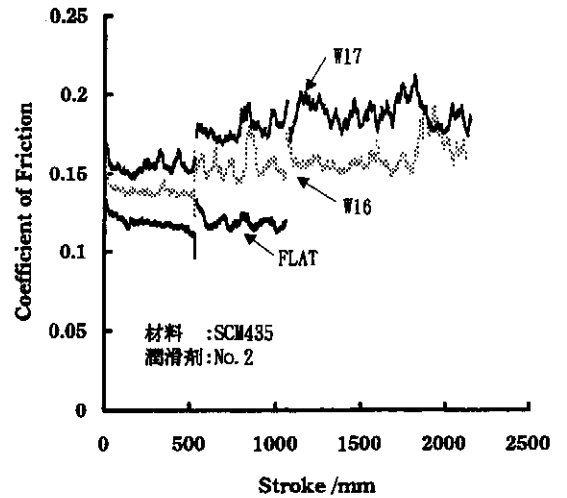


図6 連続引抜きの場合のダイス形状による摩擦係数

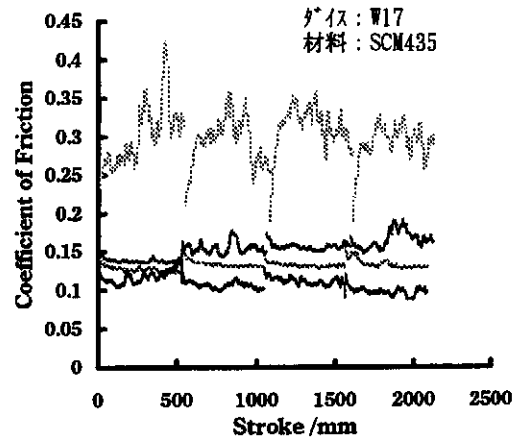


図7 潤滑剤の摩擦状態への影響

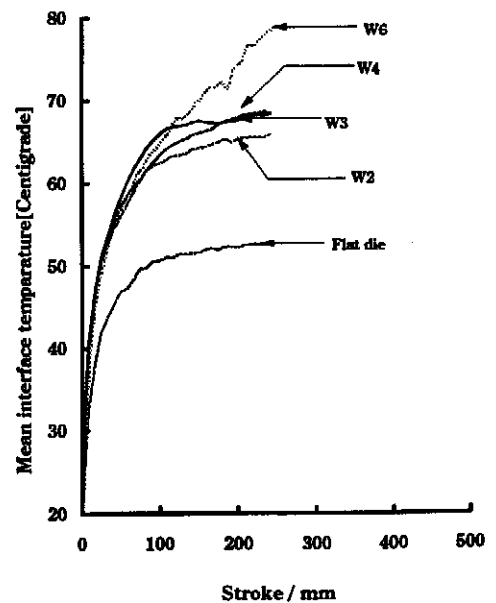


図8 ダイス形状と摩擦面近傍出口温度の関係

#### 4.5 工具面の焼き付き量

図9は4種類の潤滑剤を用いてSCM435材を引き抜いた場合の3種類のダイス表面の焼き付き量である。各工具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ダイスの表面に焼き付き量が多い。他の潤滑剤においても、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き付き量も増える傾向がある。潤滑剤No.5の場合、ダイスW17の焼き付き量はフラットダイスの約10倍程度となった。

#### 4.6 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.5において、フラット、W16、及びW17ダイスでSCM435材をストローク700mmまで引抜いた場合の試験片の表面層成分の分析を行った。図10は潤滑剤No.1を用いた場合の引き抜き前後の化学成分および各成分の量を示している。

Fe成分の増加は潤滑膜の破損や潤滑膜厚の減少を示し、これは潤滑性能の低下を意味すると考えられる。従って、Fe成分量は潤滑性能を評価する一つの指標となり得る。フラットダイスで引き抜いた材料表面の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成分が56%となった。これはダイスの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では試験片の山部Fe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。したがって図6に示すように表面積拡大700%のダイスW17でも安定して引抜き加工できる。試験前後の材料表面成分分析の結果はFe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。表面成分を定性、定量的に分析した結果は、本研究の試験法で求めたダイス形状、潤滑剤及び表面積拡大率の関係とよい相関がある。

### 5. 結言

本研究では、高性能鍛造潤滑剤の性能試験をすることを前提に、潤滑処理された棒素材をそのまま用い、様々な表面積拡大率と母材の塑性変形を与えつつ滑りを強制させることができる局所引抜き型トライボ試験法を新たに考案し、試験装置を開発した。

この試験装置を用いて工具形状、潤滑剤、素材表面処理の摩擦状態への影響を検討し、貴重な結果を得た。また、EPMAを利用して材料の表面積拡大と潤滑膜破壊との関係を明らかにすることができた。

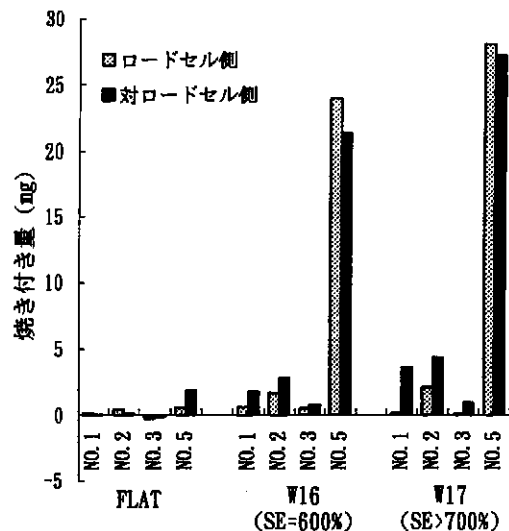


図9 工具面の焼き付き量

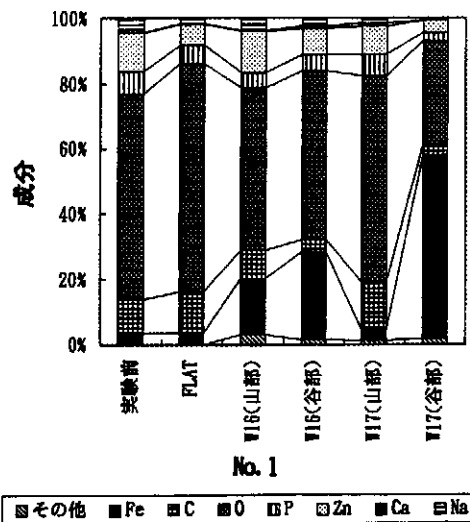


図10 材料表面層の化学成分分析

本試験機を用いて、対象となる鍛造成形部品の加工条件に近い工具条件を選ぶことによって高性能潤滑剤の性能や鍛造素材の成分・組織設計とトライボ条件の関係を求め得ることが解った。これらの結果は、鍛造プロセスの最適化に重要な役割を果たす。

### 6. 謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成を頂いて実施したものであることを明記し、ここに甚大なる謝意を表します。また、本研究の遂行において、多方面にわたり御協力を頂いた住友金属工業株式会社に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 中村：塑性と加工，**34-393**(1993)，1082.
- 2) 大矢根ほか：塑性と加工，**20-222**(1979)，664.
- 3) Kudo, H. et al : Ann. CIRP, **24-1**(1975), 185.
- 4) 池：理研報告，**52-6** (1976)，195.
- 5) 佐藤ほか：塑性と加工，**28-323**(1987)，1289.

## 本研究に関する論文等

- 1) 濟木ほか：45回塑加連講論，(1994)，817.
- 2) 濟木ほか：46回塑加連講論，(1995)，399.
- 3) 濟木ほか：平8春塑講論，(1996)，358.
- 4) Saiki, H et al: Advanced Technology of Plasticity  
1996, **1**(1996)，343.
- 5) Saiki, H. et al: ASME Paper No. 96-Trib-59.
- 6) Saiki, H et al.: Journal of Materials Processing  
Technology, **63**(1997)，238.