



T. Nakamura

# 塑性加工における表面改質と界面制御(特別講演)

中村 保\*

## 1. 塑性加工におけるトライボロジーの課題と役割

塑性加工では、所望の機能、形状精度、および表面仕上げをもった製品を、低コストで生産性良く製作することが要求される。最近は、とくに歯車などの運動継ぎ手を含む複雑形状部品のネットシェイプ加工など、高精度化、高表面品質化および高強度化に対する要求がますます強くなっている。また、チタン合金や複合材料などの難加工材の加工にも適用が進んでいる。複雑形状部品や難加工材の塑性加工では、素材がきわめて大きな材料流動を生じ、工具面圧が高く、素材表面積拡大が顕著になり、摩擦面温度も上昇するため、摩擦抵抗の低減あるいは摩擦管制、表面仕上げ向上、焼付き防止、および工具摩耗低減などのトライボロジーに関する課題の解決が重要な鍵となっている。さらに、温・熱間加工では、工具と素材の接触表面層の温度がきわめて高くなるため、とくに摩擦環境温度によるトライボロジー関連の課題の解決が重要となる。

塑性加工における工具面摩擦力は、通常、素材の変形を妨げ、加工面圧の増大をもたらすことが多い。したがって、摩擦力の低下は加工力および加工エネルギーの低減に直接結びついている。そこで、潤滑の大きな目的は摩擦力の低減を図ることにある。

また、工具寿命を延長することは、生産性を上げ工具コストを低減するために重要である。その寿命は、面圧、温度、滑り速度などの過大な工具負荷による破壊や摩耗によって律せられるが、適切な潤滑剤、工具材料、工具表面処理によりその負荷を軽減することが可能である。さらに、温・熱間加工の場合はもちろん、冷間加工でも塑性変形仕事、摩擦仕事による温度上昇により、工具に対する熱的な負荷が増大する。このような熱的負荷を軽減するために、適切な潤滑剤や工具材料・表面処理などの適用による摩擦低下、焼付き防止、摩耗抑制、伝熱抑制などといったトライボロジーの役割が要求される。

一方、図1に示すように、圧延のかみ込み力、管の心金引きにおけるマンドレルの摩擦力、缶のしごき加

工におけるパンチ側面摩擦力、および深絞りにおけるパンチ頭部摩擦力は、変形を促進し、加工力の一部を負担している。また、鍛造のように摩擦条件によって素材材料流動がきわめて大きな影響を受ける場合には、摩擦管制によって素材材料流動の制御を行うとともに、摩擦力を積極的に活用した新成形プロセスの開発も可能である<sup>1)</sup>。

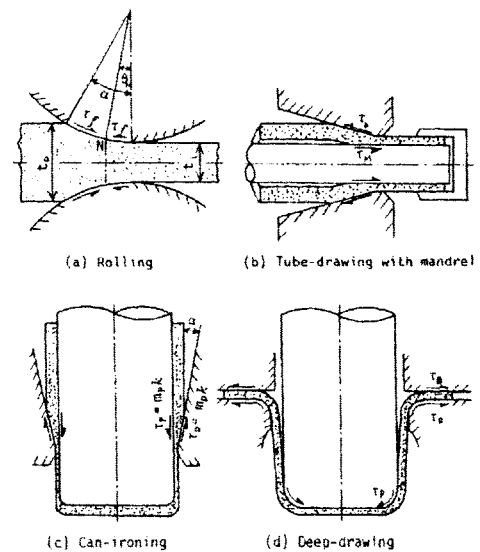


図1 塑性加工における摩擦力の有効利用の例<sup>1)</sup>

さらに、塑性加工では、加工の進みに伴い、被加工材の塑性変形に起因する表面トポグラフィーの変化や、工具との相互作用による表面構造の変化の結果として、製品表面が創成される。要求される表面仕上げとしては、光学ドラムや磁気ディスクなどの鏡面 ( $Rz=10^{-2}\mu\text{m}$ オーダー) から自動車ボデー表面 ( $Rz=100\mu\text{m}$ オーダー) まで幅広く分布している。とくに被加工材の鏡面化や平滑化は、工具のバニシ作用や工具面の転写によりもたらされるため、工具の表面仕上げに大きく依存するが、介在する潤滑剤の挙動も大きな役割を担っている。鏡面化を目的とする場合、工具と被加工材界面は、凝着や焼付きのない境界潤滑状態を維持することが要求される。

以上のような塑性加工における工具と素材間の摩擦抵抗制御および製品表面制御を行うためには、工具-素材界面の接触機構を良く理解し、その上で合理的な

工具表面処理などの表面改質技術の利用開発が必要になる。最近ではPVD/CVD/PCVDなどの硬質表面皮膜処理だけでなく、微細表面構造調整などの表面改質法が研究・開発されている。本稿では、塑性加工の工具・素材間での接触機構、摩擦法則、素材表面創成機構について理解を深めた上で、界面の摩擦抵抗制御の例として工具・素材界面の摩擦抵抗を積極的に活用した塑性加工法について紹介する。さらに、各種表面改質による耐焼付き性、耐摩耗性、界面抵抗制御の方法とその効果について解説する。

## 2 塑性加工における工具と素材間の接触機構と摩擦特性

### 2.1 接触機構と摩擦特性

工具と素材界面の接触機構は、くさび形突起モデルの変形に基づくものを中心に、数多くの研究者により検討されてきた。Bayら<sup>2)</sup>は、平滑工具による素材表面くさび形突起の平面ひずみ圧縮変形について、すべり線場解析を行い、工具と素材の接触率 $R$ を求めた。ただし、真実接触部の摩擦せん断応力は $\tau_r = mk = \text{一定}$  ( $m$ : 摩擦せん断係数、 $k$ : 素材のせん断降伏応力)と仮定している。この接触率 $R$ を用いて、接触面全域の平均摩擦せん断応力 $\tau_n = Rmk$ を求めると、図2のようになる。これによれば面圧比 $p/2k = 1.5$ 程度以下では摩擦係数 $\mu = \tau_n/p = \text{一定}$ となり、 $p/2k = 3$ 程度以上では摩擦せん断応力 $\tau_n$ は $\tau_r = mk = \text{一定}$ に近づくことがわかる<sup>3)</sup>。

Bayらの表面突起の変形解析では、素材のバルク塑

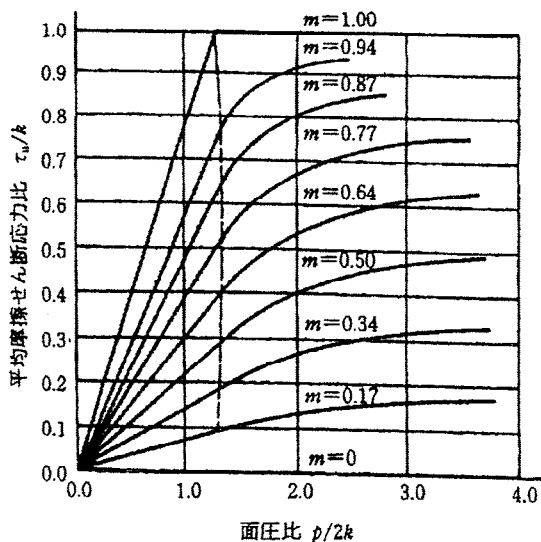


図2 摩擦法則を表す面圧比と摩擦せん断応力の関係<sup>2)</sup>

性変形を考慮していないが、素材のバルク塑性変形を考慮した接触機構については、Foggr<sup>4)</sup>の実験的研究が比較的早く行われている。この研究により素材のバルク塑性変形に伴い表面凹凸の平滑化が促進されることが指摘された。塑性加工の工具と素材の接触では、この素材バルク塑性変形によって接触率が大きな影響を受ける。

牧野内らおよび池ら<sup>5)</sup>は、素材のバルク塑性変形を伴う接触機構について理論的・実験的な検討を行った。くさび形突起の平面ひずみ圧縮変形について、バルク圧縮変形を弾塑性有限要素法により解析し、図3のように、平均面圧比 $p_m/\sigma_y$ と接触率 $R$ の関係を求めた。素材のバルク塑性変形率 $\lambda$ が小さいA、Bの条件では、面圧をかなり高めないと接触率の増加は生じないが、素材のバルク塑性変形率 $\lambda$ が大きいC、Dの条件では、小さな面圧比で接触率が顕著に高まることわかる。これは、C、Dの場合には、表面突起の押しつぶし面圧 $p_s$ が顕著に低下するためである。

このように、塑性変形を伴う素材と工具の接触メカニズムは極めて複雑で、これらの因子をすべて考慮した摩擦法則を簡単に式表示することは困難である。さらに、工具・素材界面に潤滑剤が存在するとその接触機構は、もっと複雑になる。

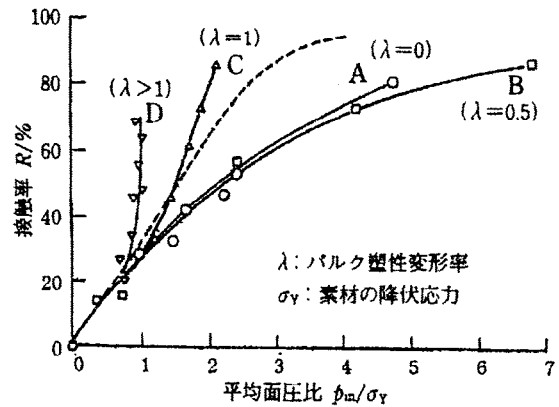


図3 接触率に及ぼす平均面圧比とバルク塑性変形率の影響<sup>5)</sup>

### 2.2 流体潤滑状態

図4に示すように、据込みにおける平面工具と素材面間では、スクイズ効果により流体潤滑膜が比較的容易に形成される<sup>6)</sup>。平面ひずみ圧縮において剛体工具が剛体素材に速度 $V$ で接近するとき、図4の破線で示す流体圧力分布が得られ、その圧力が、素材の降伏応

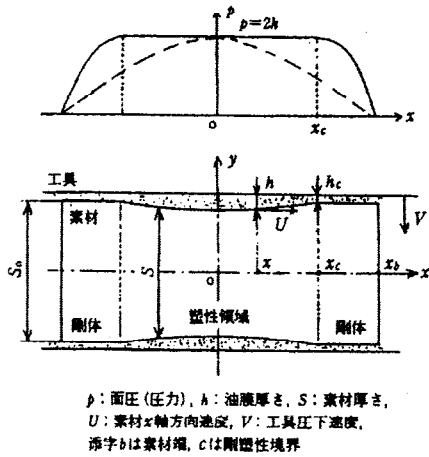


図4 平面ひずみ圧縮におけるスクイズ効果による PHL<sup>6)</sup>

力  $2k$  に達すると、中心部から塑性変形が開始し、さらに圧下が進むと塑性変形域が拡大し、図のような潤滑膜が形成される。全域が塑性変形したとき、潤滑膜の完全な捕捉が生じる。潤滑剤のせん断発熱を考慮すると、潤滑膜厚さ  $h$  の分布は、熱負荷が増加するにつれ、中心部で顕著に減少する<sup>7)</sup>。

一方、圧延や押出し、引抜きのような定常塑性加工では、古くから流体潤滑理論を用いて潤滑剤導入部における潤滑膜厚さの推定が行われてきた。図5に示すように、この導入部の工具と素材面間を二次元くさびによってモデル化し、圧延の速度効果を計算した結果

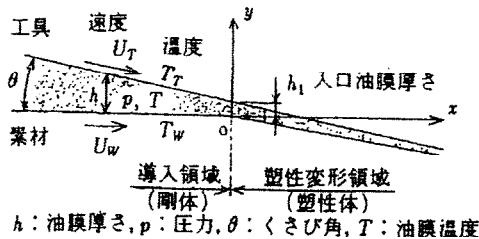


図5 潤滑剤導入部の二次元くさびモデル

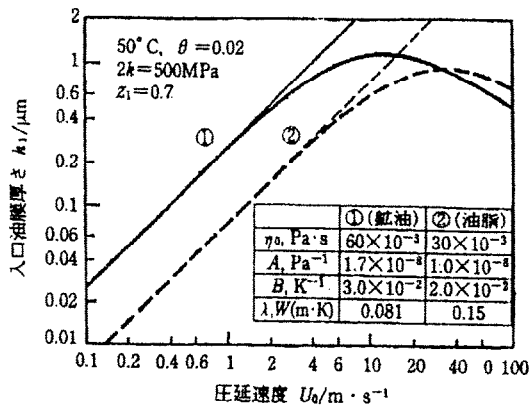


図6 圧延における潤滑剤導入による入口油膜厚さの計算例<sup>8)</sup>

を、図6に示す<sup>8)</sup>。圧延速度  $U_0=1$  または  $3\text{m/s}$  以上で温度上昇の影響が現れ、油膜厚さ  $h_1$  の増加が鈍り10または  $40\text{m/s}$  程度で最大値  $h_1=1\mu\text{m}$  程度に達し、それ以上の速度で減少する。

### 2.3 混合潤滑状態

図7は、塑性加工において良く現れる工具と素材間の界面状況をモデル的に示したものである。図では比較的平滑な工具面と、塑性変形によって粗くなった素材の接触状況が示されている。界面に導入された液体潤滑剤は、準微視的閉じこめ部分（マイクロプール部）と工具によって圧下修正された部分（境界潤滑部）からなっている。図8(a)は、アルミニウムの深絞りフランジの板押さえ面を示したもので、白色部分が圧下修正部、黒色部分がマイクロプール部である。図8(c)の断面曲線に見られるように、マイクロプール部は深さ約  $2\text{--}3\mu\text{m}$  の流体潤滑状態、圧下修正部は表面粗さ  $Rz=0.1\mu\text{m}$  程度の境界潤滑状態となり、いわゆる混合潤滑状態を呈する。

図7に示す接触モデルを前提として、圧下修正部の面積割合を接触率  $R$ 、その部分に作用する平均摩擦せん断応力を  $\tau_i$ 、マイクロプール部の摩擦せん断応力を  $\tau_m$  とすれば、摩擦面の平均摩擦せん断応力  $\tau_m$  は、次式のように表される。

$$\tau_m = R\tau_i + (1-R)p_i \quad (1)$$

また、圧下修正部の平均面圧を  $p_r$ 、マイクロプール部の潤滑剤の圧力を  $p_l$  とすれば、平均面圧  $p_m$  は、次式のように表される。

$$p_m = Rp_r + (1-R)p_l \quad (2)$$

したがって、平均摩擦係数  $\mu_m$  は、次式のように表される。

$$\mu_m = \tau_m/p_m = \{R\tau_i + (1-R)\tau_l\} / \{Rp_r + (1-R)p_l\} \quad (3)$$

ここで、マイクロプール部が圧力を受け持たず、 $\tau_l = p_l = 0$  が成立つとき、

$$\tau_m = \tau_i/p_r \quad (4)$$

となる。

### 2.4 微視的塑性流体潤滑状態

図7の接触機構モデルにおいて、軸受けなどのような一般の摩擦面では、摩擦対は巨視的塑性変形を伴わないため、工具による圧下修正部の面圧  $p_r$  は軟らかい材料の硬さ  $HV$  と同程度、すなわち  $p_r=3\sigma_r$  となる。こ

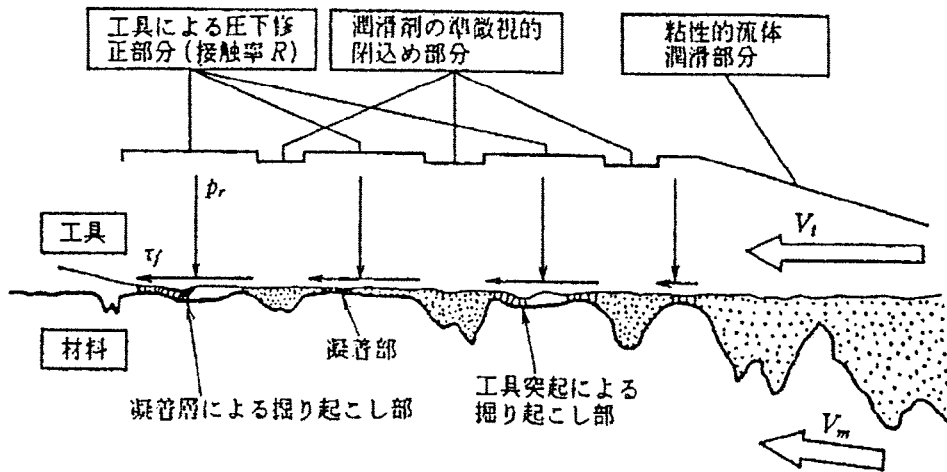


図7 工具と被加工材料面間の接触機構モデル

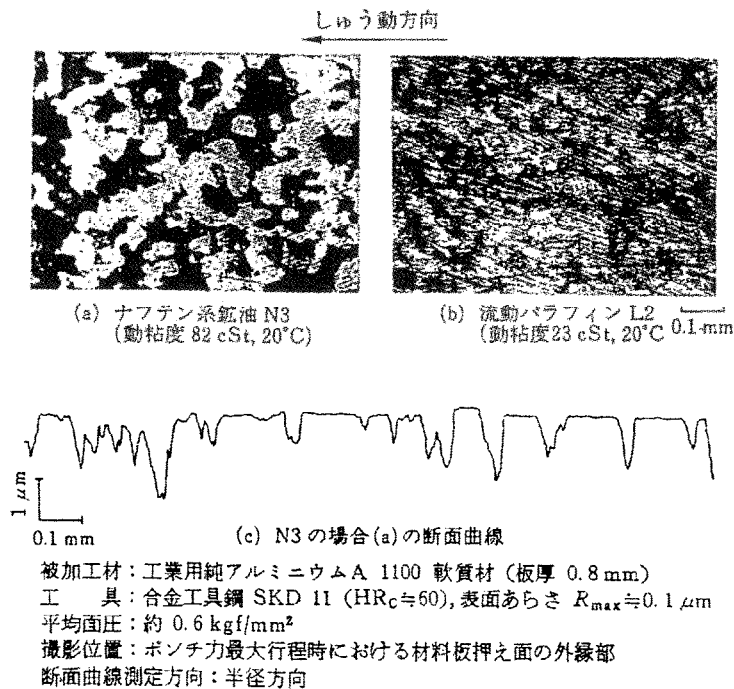


図8 深絞りにおける被加工材板押さえ面

れに対して、塑性加工では、図3に示したように、素材の母材部が塑性変形を伴うため、圧下修正部の面圧は、 $p_r = \sigma_r$  程度まで減少することがある。このような場合に、マイクロプール部の圧力が上昇すると、 $p_r = p_i$  となり、潤滑剤と高圧粘度と  $\eta$  と速度  $V$  の積が大きくなると、図9のように、マイクロプール部の液体潤滑剤が圧下修正部に流出し、境界潤滑膜の厚さを増大させることがある<sup>9)</sup>。水野ら<sup>10)</sup> は、このような流体潤滑メカニズムを提案し、いわゆる、マイクロ塑性流体潤滑 (Micro Plasto-HydroDynamic Lubrication; MPHDL) と名付けた。図10はその潤滑状態における平均摩擦せん断応力  $\tau_m$  と  $\eta V$  の関係を示したものである。  $\tau_m$  が

$\eta V$  の対数に比例する領域が生じており、摩擦面全体で粘性抵抗に支配されていることがわかる。

また、小豆島らは、このMPHDLの発生を実験的に検

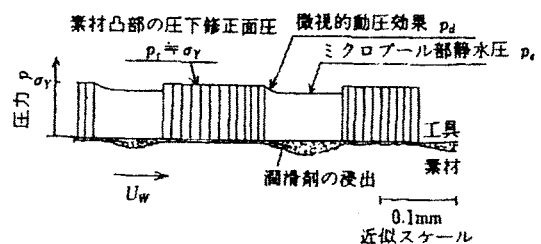


図9 ミクロ塑性流体潤滑のモデル<sup>9)</sup>

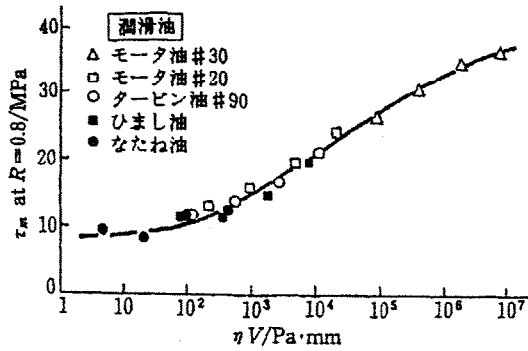


図10 摩擦せん断応力の  $\eta V$  依存症  
(材料:銅, 接触率0.8, 平均油膜厚さ  
0.3-0.6  $\mu\text{m}$ )<sup>10)</sup>

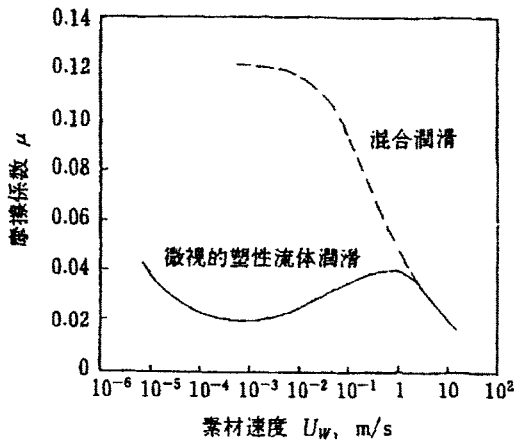


図11 引抜きのMPHL状態における摩擦係数の例<sup>11)</sup>

証している<sup>9)</sup>。阮ら<sup>11)</sup>は、図11に示すように、引抜きの実験において、MPHL状態では混合潤滑状態に比較してかなり低い摩擦係数  $\mu = 0.02 \sim 0.04$  が得られることを示している。

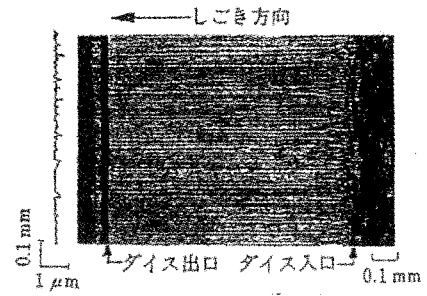
## 2.5 境界潤滑状態

潤滑剤の導入量や捕捉量が少なくなり、工具面圧が増大すると、圧下修正部が拡大する。図12はそのような接触状況の一例として、アルミニウム板材の引抜きダイスとの接触面を示したものである。この摩擦面にはすべり方向に線条痕が見られるが、その表面粗さ  $R_z$  は約  $0.2 \mu\text{m}$  であり、工具表面粗さとほぼ同程度となっている。このような摩擦面

は境界潤滑状態になっていると考えられるが、その境界潤滑膜はどの程度の厚さになっているだろうか。

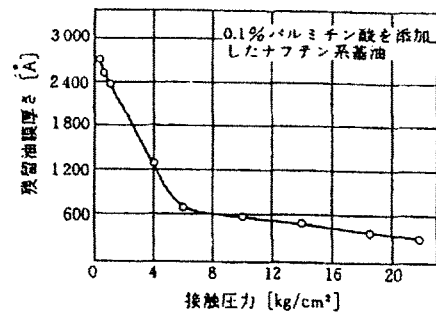
曾田は境界潤滑の概念を次の3つに分類している<sup>12)</sup>。

- (1) 潤滑剤の単分子膜 (分子中の極性原子団に基づく配列, 厚さ数  $\text{\AA}$  ~ 数十  $\text{\AA}$ )
- (2) 数分子層 (分子の偏極に基づく配列, 厚さ数十



被加工材料:工業用純アルミニウムA1050  
工具:SKD 11( $HRC \approx 60$ ,  $R_{max} \approx 0.1 \mu\text{m}$ )  
潤滑剤:ストックオイル  
しごき率:5%  
しごき距離:100 mm

図12 境界潤滑状態における被加工材料の摩擦面



試験方法:鋼製の二つの小円板を試料油中に沈め、一定の垂直荷重を加えて、油膜厚さが定常になるまで保持したのち、その残留油膜厚さを電気容量によって測定する

図13 接触面圧と残留油膜厚さとの関係<sup>13)</sup>

$\text{\AA}$  ~ 数千  $\text{\AA}$ )

- (3) 一種の薄膜 (コロイド的性質を持った薄膜, 厚さ数千  $\text{\AA}$  ~ 数万  $\text{\AA}$ ).

図13に示されるように、接触面圧の増加に伴い、残留油膜厚さが減少していくが、 $10 \text{\AA}$  程度の油膜厚さが残留することがわかる<sup>13)</sup>。この値を参考にすると、図8あるいは12の境界潤滑面の油膜厚さは上記(2)程度となっていると考えられる。しかし、境界潤滑状態とはいえ局部的には油膜破壊すなわちマイクロ凝着部が生じていると考えられる。

## 2.6 固体潤滑剤の潤滑機構

冷間・温間・熱間鍛造のいずれにおいても、高面圧、高温、顕著な表面積拡大などの過酷な摩擦条件になると、鉱油系などの液体潤滑剤では潤滑効果が不十分となる。そのような場合には、化成皮膜や各種固体潤滑剤が用いられる。塑性加工におけるこれら固体潤滑剤

の作用メカニズムが、少しずつ明らかにされている<sup>14)</sup>。

図14は、各種固体潤滑剤の摩擦係数  $\mu_m = \tau_t/p$  を面圧  $p$  に対して示したものである。いずれの固体潤滑剤でも、摩擦係数  $\mu_m$  がほぼ一定になっている<sup>14)</sup>。この

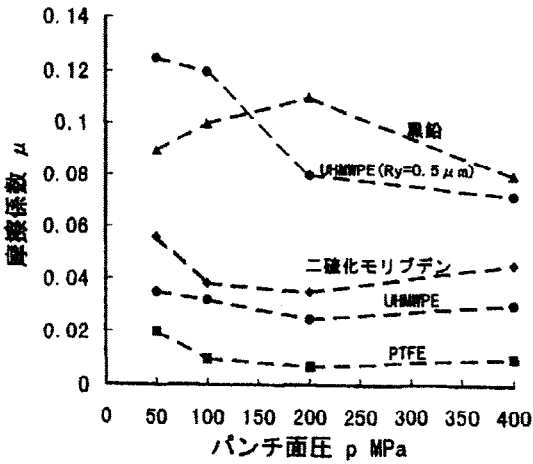


図14 各種固体潤滑剤の面圧に対する摩擦係数の変化<sup>14)</sup>

ように、工具あるいは素材と固体潤滑剤の界面の摩擦係数  $\mu_m$  がほぼ一定となる摩擦特性を前提として、固体潤滑剤を工具面と円柱素材の界面に介在させて、据込み加工を行う場合について、有限要素法数値シミュレーションを行った。ただし、固体潤滑剤は変形抵抗  $\sigma_Y=20\text{MPa}$  (一定) の剛完全塑性体、円柱素材は  $\sigma_Y=100 \epsilon^{0.2}\text{MPa}$  の  $n$  乗硬化塑性体とした。

図15は、素材と固体潤滑剤の界面摩擦係数  $\mu_m=0.15$  として、工具と固体潤滑剤界面の摩擦係数が  $\mu_D=0.05$  と小さい場合のシミュレーション結果である<sup>14)</sup>。固体潤滑剤は素材の塑性変形に追従してゆき、圧下率が  $Re=60\%$  でも工具と素材は直接接することなく、十分な潤滑効果が発揮されている。これに対して、図16に示すように、 $\mu_D=0.10$  の場合には、 $Re=60\%$  近傍で、固体潤滑剤が素材の表面積拡大に追従できずに、最外周部で潤滑膜切れが生じている<sup>14)</sup>。

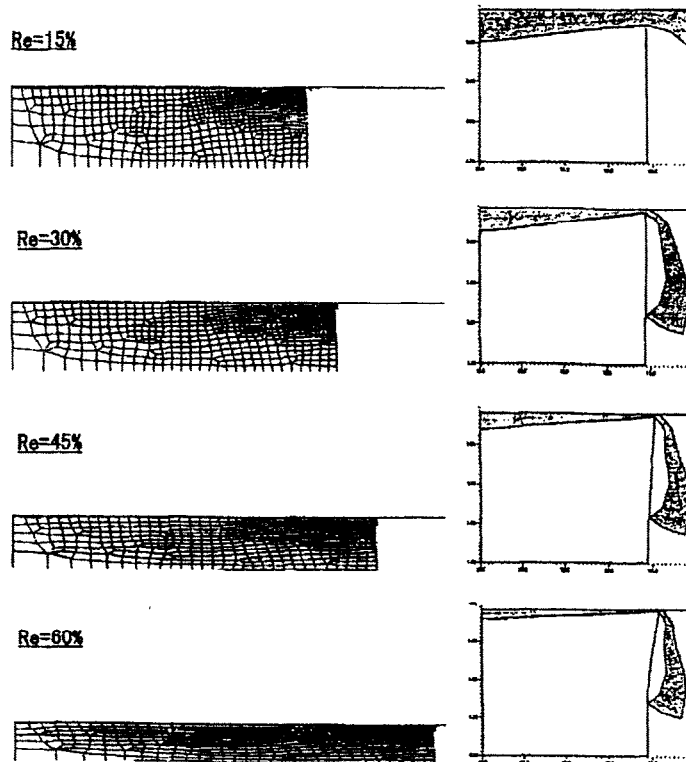


図15 FEMシミュレーションによる固体潤滑剤の潤滑挙動<sup>14)</sup> ( $\mu_m=0.15$ ,  $\mu_D=0.05$ )

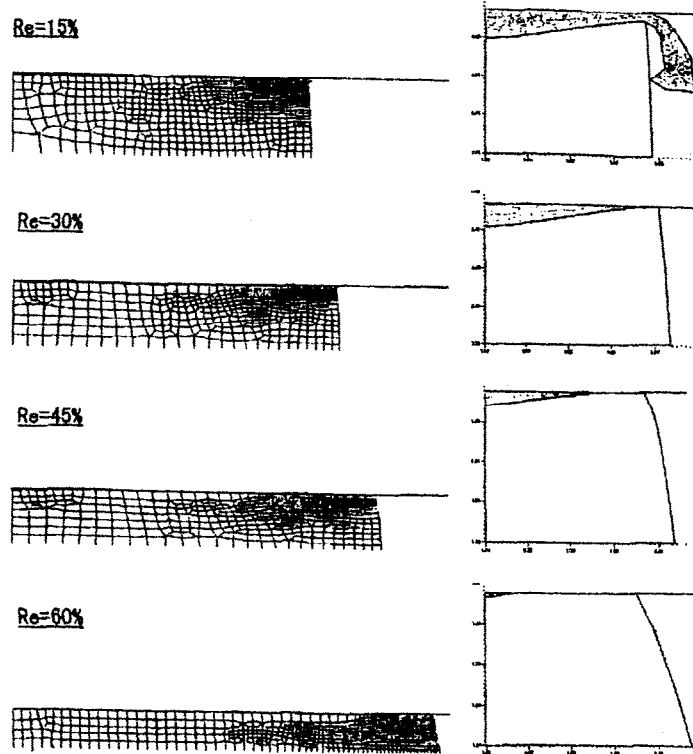


図16 FEMシミュレーションによる固体潤滑剤の潤滑挙動<sup>14)</sup> ( $\mu_M=0.15$ ,  $\mu_D=0.10$ )

## 2. 7 高温における摩擦・潤滑機構

高温塑性加工といっても、加工法、加工条件、素材等によって工具と素材界面の温度および接触時間はかなり異なる。現在実用化されている塑性加工の中で最も過酷な摩擦条件と考えられる継ぎ目無鋼管の熱間穿孔プラグでは、1穿孔中に1300℃、数百MPaの高温・高圧、素材新生面に数分間さらされることになる。このように接触条件に大きな差異はあるが、高温塑性加工における工具と素材の接触面の特徴としては、次のようなことが考えられる。

- (a) 素材表面の酸化が著しく生じる。
- (b) 接触面近傍の温度が高く温度勾配が大きい。
- (c) 工具表面の熱劣化が著しい。

このような条件における工具と素材の接触界面構造をモデル的に描くと図17のようになる<sup>15)</sup>。工具側には窒化層、クロムメッキ層、あるいは酸化膜などの硬質被覆層があり、材料側には酸化被膜層が形成される。加工が進むと表面積拡大や相対すべりにより酸化被膜層に亀裂や剥離が生じる場合がある。

図17のような接触状態における平均摩擦せん断応力 $\tau_m$ は次式のように表わされる。

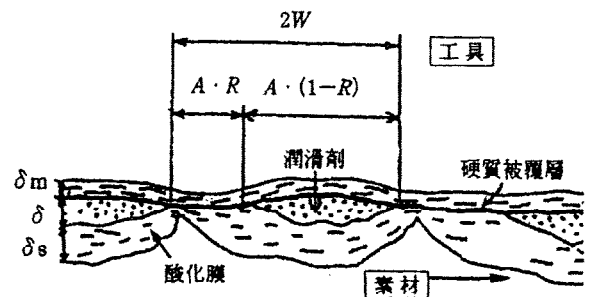


図17 熱間加工における工具と干被加工材料面間の接触機構モデル<sup>17)</sup>

$$\tau_m = \tau_b R (1 - \alpha) + \tau_w R \alpha + \tau_l (1 - R) \quad (5)$$

ここで、 $\tau_b$ は酸化膜を含めた境界潤滑膜等の境界膜の摩擦せん断応力、 $\tau_w$ と $\alpha$ は境界膜の破断による凝着部の摩擦せん断応力とその割合、 $\tau_l$ は潤滑膜の摩擦せん断応力、 $R$ は真実接触域の占める割合（接触率）である。

流体潤滑剤を用いた場合には、その摩擦せん断応力 $\tau_l$ は他の摩擦せん断応力に比較して小さいとして無視できる場合があるが、高温塑性加工で良く用いる固体潤滑剤ではその摩擦せん断応力 $\tau_l$ を無視することは難しい。そこで、焼付き等の凝着部が生じない状態では、平均摩擦せん断応力 $\tau_m$ に占める境界潤滑膜と

固体潤滑膜の摩擦せん断応力の占める割合がかなり高くなると考えられる。

### 3. 塑性加工における製品の表面創成

#### 3.1 自由表面あれ現象

板材成形における製品の表面は、工具面に直接接触しない自由表面か、あるいは降伏応力以下の弱い接触面で構成されることが多い。特に自由表面は、加工前に平滑な面（例えば圧延による平滑仕上げ面では $Rz=0.1\mu\text{m}$ 程度）であっても、図18(a)に示すように、素材の塑性変形に伴って表面あれを生じる。その程度が顕著な場合には、たとえば“オレンジ・ピール”と呼ばれ、表面損傷の一種として嫌われている。

素材の塑性変形に伴う自由表面あれ現象に関しては、Kienzle<sup>16)</sup>以来、数多くの研究が行われてきた。それらの研究によれば、表面粗さ（例えば中心線平均粗さ $Ra$ ）は、素材の塑性変形量（例えば相当ひずみ $\epsilon_{eq}$ ）および結晶粒径 $d$ によって

$$Ra = k \cdot d \cdot \epsilon_{eq} \quad (6)$$

と表されることが一般的に知られている。比例定数 $k$ は金属結晶のすべり系の数が少ないほど大きくなること<sup>17)</sup>、同一材質でも主ひずみ $\epsilon_1$ と $\epsilon_2$ の差が顕著なほど大きくなること等が知られている<sup>18)</sup>。

一方、表面凹凸の波長についての研究は比較的少ないが、アルミニウム薄板の等2軸引張りの例では、平均波長 $\lambda m$ は平均結晶粒径 $d$ にほぼ比例して増加し、

$$\lambda m = (13 \sim 14) d \quad (7)$$

の関係で表される<sup>18)</sup>。また、主ひずみに差があるとき、表面凹凸の大きさおよび波長も方向によって差異が現れること、および板材成形においては表面あれ現象が塑性不安定現象を助長することなどが明らかにされている<sup>19,20)</sup>。

#### 3.2 微細表面形状の制御

図19の曲線は、バルク塑性変形を伴わない場合について、二次元くさび形突起モデルの表面粗さ比 $Ra/Ra_0$ に及ぼす平均面圧 $p_m$ と相対すべり量 $L_s$ の影響を分離して測定し、3次元表示したものである<sup>21)</sup>。素材表面凹凸の平滑化は、平均面圧 $p_m$ と相対すべり量 $L_s$ の増加によって顕著に促進されることがわかる。これは、相対すべり量による摩擦せん断応力 $\tau_f$ の作用によって表面突起部の降伏面圧 $p_f$ が低下するためであると考えられる。白抜き記号は円板の自由据込み変形における表面粗さ比の実験値をプロットしたもので、素材のバルク塑性変形に伴って生じる面圧 $p_m$ と相対すべり量 $L_s$ も、素材表面凹凸の平滑化過程に対して、ほぼ同じ影響を及ぼすことがわかる。

バルクの塑性変形の影響は、通常、圧縮方向に対して直角方向への拡大を許すか否かという形で現れる。バルクの塑性変形により横方向の拡張が容易であると、同じ接触率を達成するのに必要な接触面圧は低下するが、一方で工具をさらに押しつけても接触面圧は

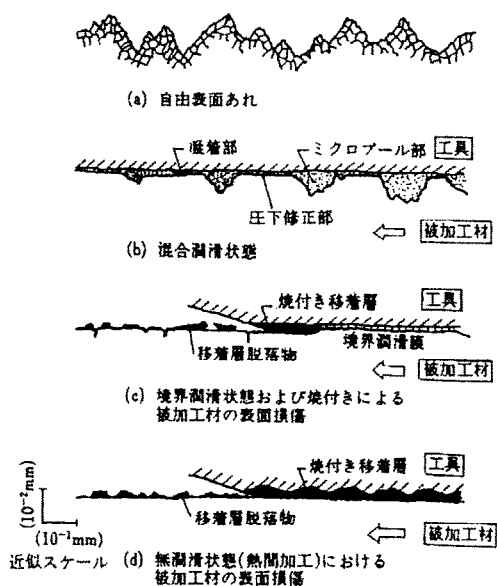


図18 潤滑状態と表面損傷

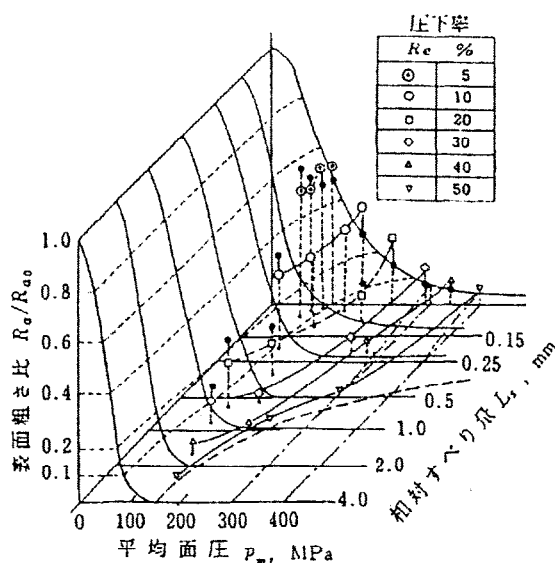


図19 くさび形突起モデル材料の表面平滑化に及ぼす平均面圧と相対すべり量の影響（実線はバルク変形が無い場合、プロット点は円板の自由据込み<sup>21)</sup>）



上がらず比較的低い接触率のままバルク変形が進行するという状況となる<sup>22)</sup>。高い接触率を達成するにはバルク変形を抑制することが基本である。

さらに微細工具面の3次元形状を転写することを意図する場合、相対すべりの効果を利用することができないので、圧子の押し込みのような降伏応力の3倍程度の接触面圧では接触率の十分な高まりは実現できない。加工前の表面粗さによるが、比較的シャープな粗さをもつ#2000研磨紙仕上げでは85%程度となる。しかし鏡面加工のように斜面の角度が緩いと盛り上がりが容易になり95%程度が可能である。3次元微細表面形状の転写は工具の曲率半径が相対的に大きくなってくると材料表面の凹部の盛り上がりによる平面工具への密着が基礎的な過程となる。基本は静水圧縮応力を高めて盛り上がりを促進することになるが、注目する加工部位が限られているなら多段成形としてバルクの流れを利用して微視的盛り上がりを生じやすくすることは可能である<sup>23)</sup>。

極めて高い平滑化をめざす場合には、微量の潤滑剤の存在でも、それが孤立したマイクロプールを形成し面圧を負担して残存するという機構により平滑化の大きな障害となること<sup>24)</sup>、また微視的すべりも転写には悪影響を及ぼすことに、注意すべきである。

### 3.3 製品表面損傷

#### (a) 混合潤滑状態における表面損傷

図7のような混合潤滑状態においては、工具面による圧下修正部の境界潤滑面においてマイクロ凝着が大規模な表面損傷に発展することは比較的まれであり、表面粗さRzは通常数μm以下である。しかし、図8(b)に示すように深絞りのフランジ面においても、境界潤滑性能が劣る潤滑剤(ここでは、流動パラフィン12)を用いた場合には圧下修正部を貫いてかなり激しい条痕を伴う表面損傷が観察される。この条痕の深さは数μm程度であるが、工具面をそのままの状態で繰返し摺動を続けると、いわゆる“型かじり”と呼ばれる顕著な表面損傷に発展する恐れがある。

実際の薄板のプレス成形において、型かじりによる表面損傷の抑制が重要な課題となる。図20は板材成形の各部位における型かじり発生比率を示したもので、絞りビード部が最も多く、ダイス肩部、しごき部の順序になっている<sup>25)</sup>。

図21は、帯鋼板(SPCC, 1.6mm厚さ)の型かじり試験法を用いて、平均接触面圧 $p_m$ と接触長さ $L_c$ を変更し

型かじり発生部位	発生比率 (%)				
	10	20	30	40	50
絞りビード	██				
ダイス肩	██				
しごき部	██				
ダイフェース上の欠陥	██				
ダイフェース表面	██				
異物	██				
しわ発生部	██				
型材の継ぎ目	██				
ジョググルライン	██				

図20 板材成形各部位における型かじり発生率<sup>25)</sup>

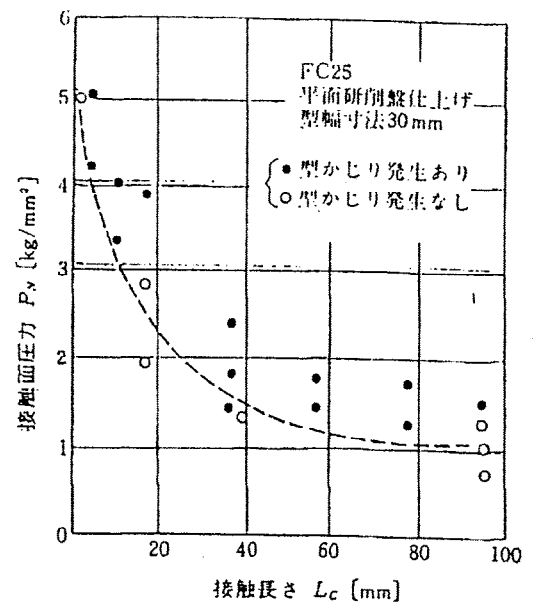
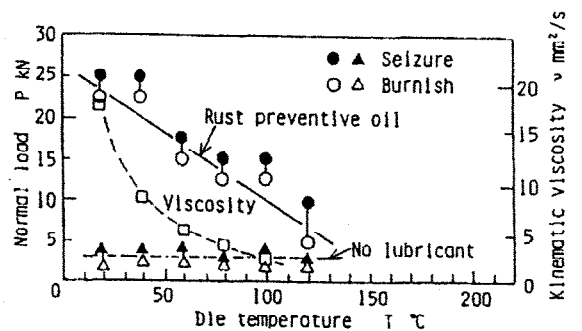


図21 接触長さ $L_c$ と型かじり発生の接触面圧の関係<sup>26)</sup>



Die: SKD 11, Work metal: Mild steel, Velocity: 30 mm/s

図22 帯板の型かじり摩擦試験における焼付き発生限界荷重に及ぼす温度の影響<sup>26)</sup>

たときの型かじり発生条件を示したものである<sup>26)</sup>。型材質はFC25、潤滑剤は防錆油のみである。接触長さ $L_c$ が長くなるにしたがい、型かじり発生面圧は顕著に減少している。図22は同じ試験法を用いて型面温度の影響を調べた結果である<sup>27)</sup>。無潤滑の場合は温度に関係な

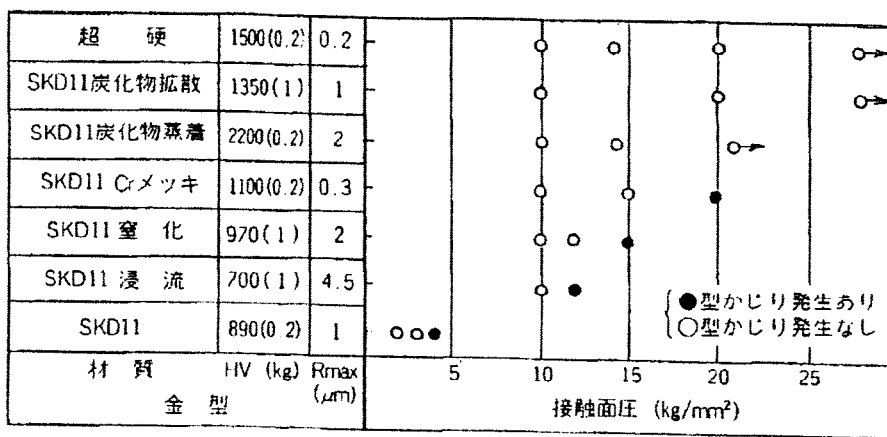
くほぼ一定の低い荷重で型かじりが発生しているが、潤滑油を用いた場合には、温度上昇に伴い型かじり発生荷重は顕著に減少している。これは、温度上昇に伴う潤滑剤の粘度低下により、界面の油膜厚さが顕著に減少するためと考えられる。さらに、型の表面粗さが大きいほど、また摺動距離が長いほど、型かじり発生面圧は減少することが知られている<sup>26)</sup>。

最近では、このような焼付きを生じやすい型部に硬質表面皮膜処理を施すことにより、型かじりの発生を極めて少なく抑制することが可能になっている。図23は各種表面処理型材を用いて帯板摺動による型かじり試験を行った結果で、炭化物被覆の場合には限界面圧が

最も高くなっている<sup>26)</sup>。

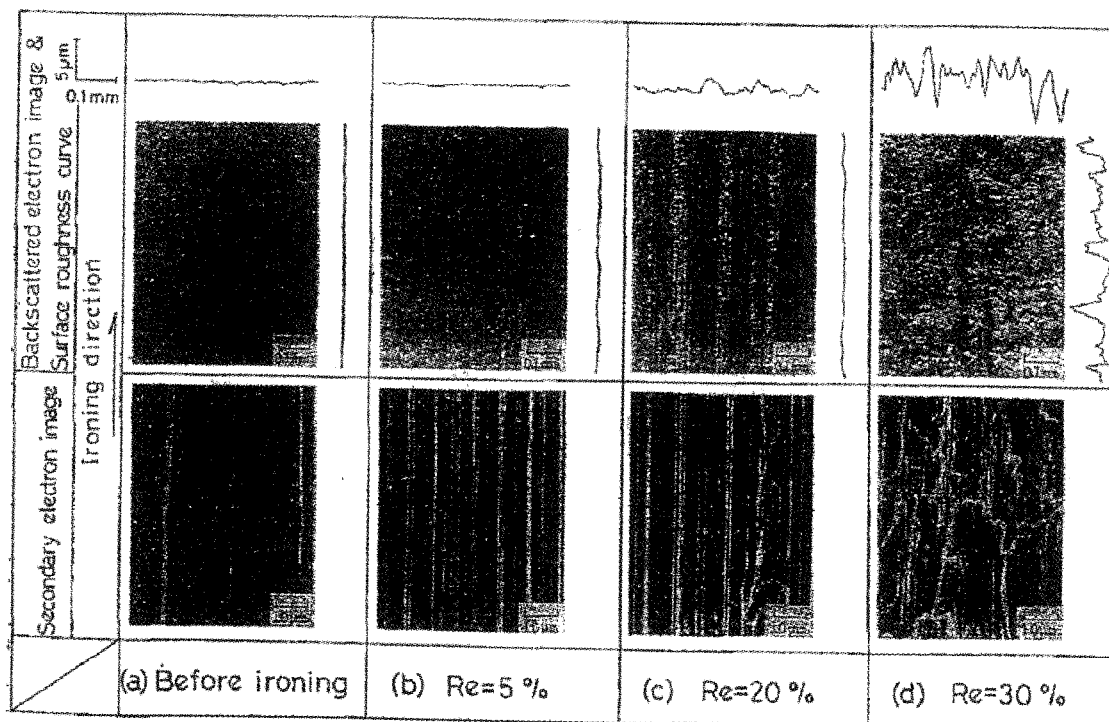
(b) 境界潤滑状態における表面損傷

工具面圧が素材の降伏応力程度以上に高まり、潤滑膜厚さが工具表面粗さ以下になると、図12に示したように、マイクロボール部が消滅し接触面のほぼ全域あるいはかなり広い領域が境界潤滑状態となる。このような摩擦面では、焼付きが発生しなければ工具面とほぼ同程度の平滑面が形成されるが、温度上昇、表面積拡大、相対すべり量の増大などの擾乱があると、図18(c) および (d) に示したように、途端に焼付きが発生し、大規模な表面損傷を引起こしてしまう。板材成形でも、工具面により板厚減少が強制されるような場合、



供試材：1.6t spcc, 潤滑：防錆油

図23 金型の表面改質処理による型かじり発生面圧の改善<sup>26)</sup>



$\alpha=10^\circ$ , 潤滑剤：P3,  $k=300\text{mm}$

図24 しごき加工前後の被加工材表面の走査型電子顕微鏡写真<sup>28)</sup>

例えばしごき変形を伴うような場合には、このような境界潤滑状態からの大規模な焼付きが生じ易い。

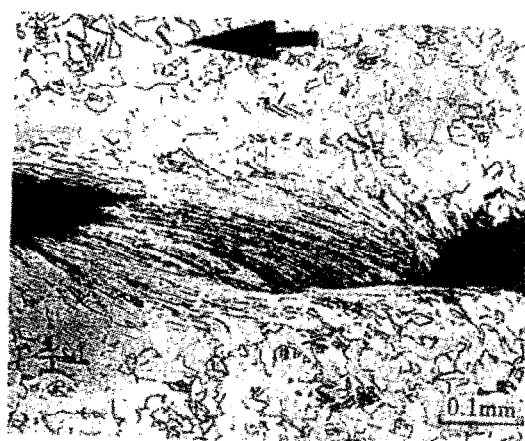
図24はしごき形摩擦試験による低炭素鋼板の表面損傷状態を示すSEM写真である。しごき率の増加に伴い、擦過傷面、線条痕面、むしれ面と激しい表面損傷に移行することがわかる<sup>29)</sup>。これに伴い摩擦係数も0.1前後から0.5程度まで顕著に増加する<sup>29)</sup>。

#### (d) 焼付きの発生・成長メカニズム

工具・素材面間の焼付きによる表面損傷は、一般につぎのような過程を経て発生・成長すると考えられる。

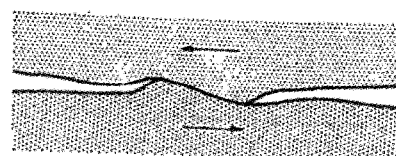
- (1) 温度上昇、新生面露出、相対すべりに伴う機械的擾乱等による潤滑膜、金属酸化膜等の表面膜破断
- (2) 高面圧下での金属接触による凝着
- (3) 相対すべりによる素材表面近傍での激しいせん断変形と内部クラックの発生
- (4) 素材表面移着層の発生・成長、場合によっては脱落

図25は、混合潤滑状態において生ずるような局部的表面移着層の形成機構を示したもので、いわゆる金属接触部のwedgeまたはprowと呼ばれる結合部が形成されている<sup>30)</sup>。2面の相対すべりにより、金属結合部は図26 (a)のように変形するが、変形部は加工硬化するため、せん断変形面は変形抵抗の小さな素材の内部へ移行しwedgeが形成される。このようにして形成される移着層はさらに成長するか、あるいは工具界面の凝着力が弱い場合には、工具面から脱落する場合も生ずる。

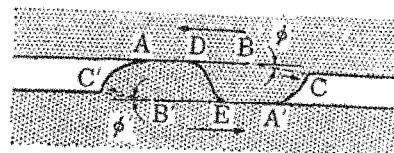


試験材料：無炭素鋼  
平均面圧：17 g/mm<sup>2</sup>  
すべり距離：40 mm  
すべり速度：0.33 mm/s  
潤滑条件：無潤滑

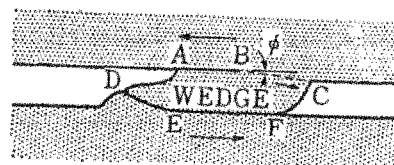
図25 凝着部Wedgeの断面写真<sup>30)</sup>



(a) 接合部付近における塑性変形

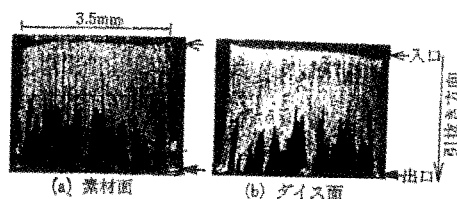


(b) 両突起のせん断変形によって形成される wedge



(c) 一方の突起のせん断変形によって形成される wedge  
B-C, B'-C' : せん断変形面

図26 凝着部Wedgeの形成モデル<sup>30)</sup>



潤滑剤：パラフィン系鉱油 (粘度 83cSt, 20℃)  
引抜き行程：85 mm  
引抜き速度：0.6 mm/s  
引抜きダイス半角：10°  
引抜き率：15%  
面圧：50 kg/mm<sup>2</sup>  
素材：軟鋼板 (表面あらし  $R_{max} \pm 5 \sim 6 \mu\text{m}$ )  
ダイス：SKD 11 (硬さ  $R_c \pm 58$ , 表面あらし  $R_{max} \pm 0.2 \mu\text{m}$ )  
白色部分：境界潤滑領域  $S_b$   
黒色部分：焼付き領域  $S_w$

図27 引抜きダイス摩擦面における焼付き状態<sup>31)</sup>

図27は軟鋼の引抜きにおけるダイ面と素材面の典型的な焼付き状態を示したものである<sup>31)</sup>。ダイと素材の全接触面積 $S_a$ の中、黒色部分が焼付き領域 $S_w$ である。図28は焼付き面積 $S_w$ に対してそこに作用する摩擦力 $F_w$ をプロットしたもので、潤滑条件に拘らずほぼ一つの直線関係が成り立つ。すなわち、焼付き領域の摩擦せん断応力 $\tau_w$ は、約300MPaとなり、素材のせん断降伏応力 $k$ とほぼ同程度になることが確認されている。

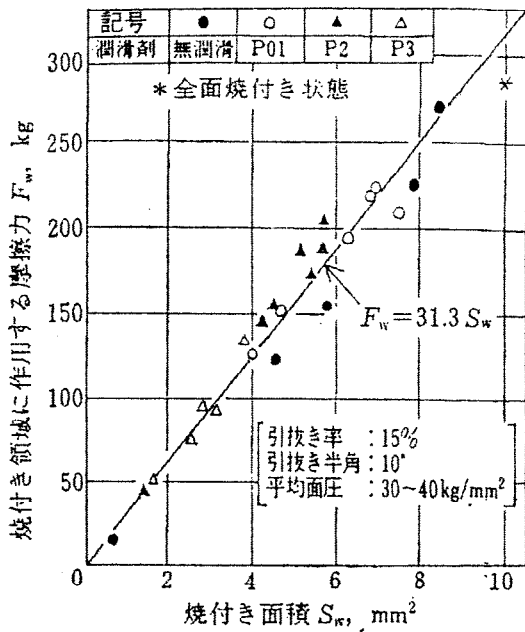


図28 焼付き面積とその領域に作用する摩擦力の関係<sup>31)</sup>

### 3. 4 摩耗機構

一般に、相対すべりを伴う摩擦面の摩耗現象は、アブレシブ摩耗、凝着摩耗、腐食摩耗によって生じる。塑性加工では、工具の摩耗は、被加工材の寸法精度の劣化を招くため、これを抑制することが要求される。塑性加工では、凝着摩耗が多く生じるが、アブレシブ摩耗や腐食摩耗もみられる。

凝着摩耗は、図23に示すような工具と素材間に凝着や焼付きが発生し、この凝着部において工具表面の一部が摩耗粉として脱落することにより生じる。摩耗粉の大きさは、凝着の程度や工具表面層の強度等によって左右されると考えられる。一般の摩擦面における摩耗法則は、Archard<sup>32)</sup>によって、次式のように与えられている。

$$V = k \cdot P \cdot L / 3 \sigma_f \quad (8)$$

ここで、 $V$ は摩耗体積、 $k$ は摩耗係数、 $P$ は荷重、 $L$ は摩擦距離、 $\sigma_f$ は工具材料の降伏応力を表す。図29は各種金属の組合せによるピン/ディスク型摩耗試験結果を示したものである<sup>33)</sup>。摩耗量はほぼ摩擦距離に比例して増加するが、凝着の生じやすい全率固溶体を作るCu/Niの組合せで摩耗が最も大きく、固溶度の小さいFe/Agの組合せで最も小さくなっている。

アブレシブ摩耗は、硬い粉末粒子や硬い材料による掘起こしによって生じるが、その場合の摩耗量も、式(8)と類似で、荷重と摩擦距離に比例し、硬さに反比例する。塑性加工でこのタイプの摩耗は、素材表面の

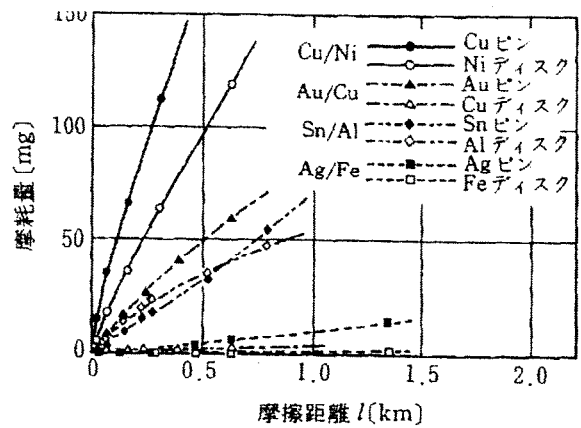


図29 ピン・ディスク型摩耗試験機による各種金属組合せにおける摩耗量<sup>33)</sup>(無潤滑, 速度44m/s, 荷重11N)

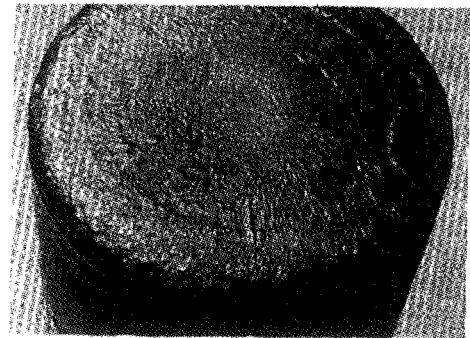


図30 前後方押し形熱間鍛造用パンチ先端の摩耗状態<sup>34)</sup>

酸化物、塵埃中の硬い粒子、工具から脱落した硬い粒子などによって生じると考えられる。

腐食摩耗は、潤滑剤中の極圧添加剤が工具表面と反応してその反応生成物が工具母材強度に比べて弱くなると容易に脱落して摩耗を助長することがある。また、熱間加工では、大気中で工具表面に酸化膜が形成されるが、その酸化膜が強固で素材との凝着を抑制する場合(例えばFe3O4)には、かえって摩耗が減少するが、脆弱な酸化膜(例えばFe2O3)の場合は摩耗が促進される。

図30は、工具寿命が尽きた熱間の前後方押し用パンチの先端の表面状態を示したもので、凝着や焼付き以外に、加熱による表面の塑性流動と酸化膜の腐食摩耗によって著しい損傷を生じている<sup>34)</sup>。

### 4. 界面摩擦力による素材材料流動の制御

塑性加工における工具面摩擦力は、通常、素材の変形を妨げ、加工面圧の増大をもたらすことが多い。し

かし、図1に示したように、圧延のかみ込み力、管の心金引きにおけるマンドレル側面の摩擦力、缶のしごき加工におけるパンチ側面の摩擦力、および深絞りにおけるパンチ頭部摩擦力などは、素材の塑性変形を促進し、加工力の一部を負担している<sup>1)</sup>。さらに、図31に示すように、摩擦力による線材を駆動して連続的に線材押し出しを行う方法も開発されている。

鍛造においても、図32に示すように、ボス付き円管の冷間押し出しにおいて、コンテナ速度 $V_c$ を製品外壁部流出速度 $V_w$ より速くしたり遅くしたりすることにより、摩擦の向きを変えてボス部の高さを制御する方法が試みられている。

図33は、摩擦力を積極的に活用して底付き薄肉缶を成形する摩擦押し出し法である<sup>1)</sup>。コンテナ内に挿入した素材をパンチとアンビルパンチ間で加圧し、コンテナ内壁に高面圧で押し付ける。この加圧状態のままアンビルパンチを後退させつつパンチで穿孔すると、素材側壁が固着状態でコンテナ内壁に残され、缶壁が形成される。理想的には容器深さ $h$ はパンチ行程 $S$ に一致することになる。

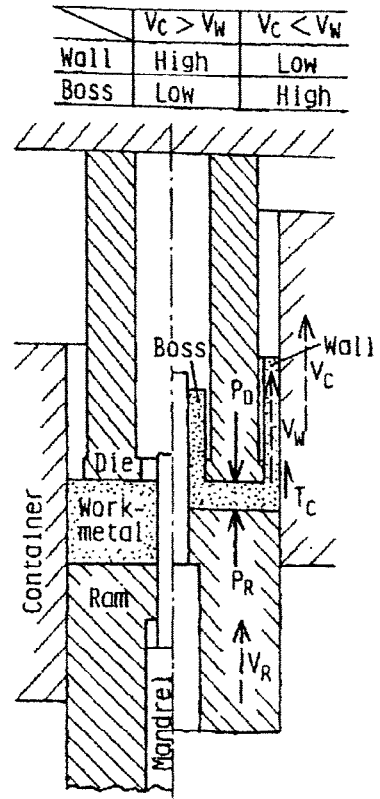


図32 界面摩擦力を活用したボス付き円管の押し出し<sup>1)</sup>

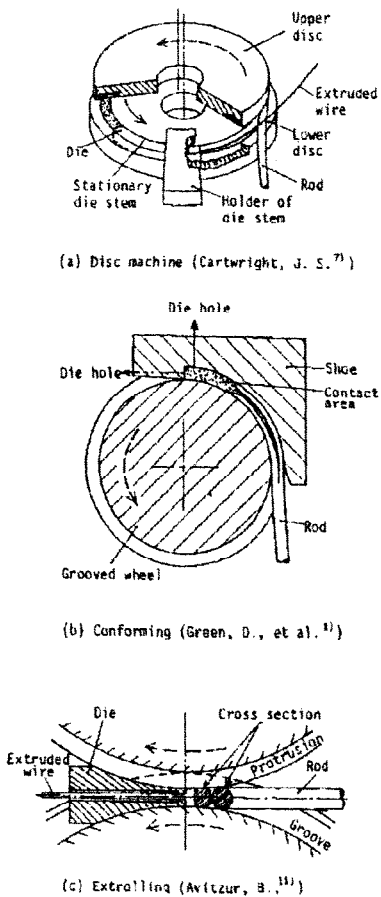


図31 界面摩擦力を活用した線材の連続押し出し<sup>1)</sup>

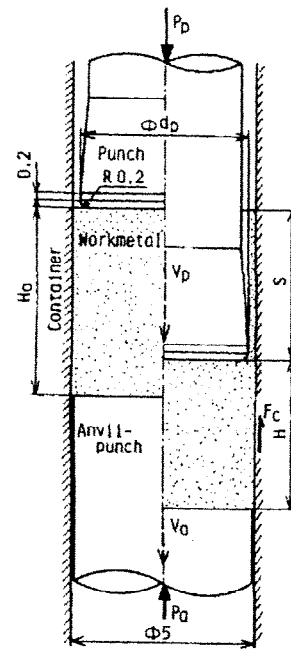


図33 界面摩擦力を活用した底付き薄肉缶の押し出し<sup>1)</sup>

図34は、摩擦押出と慣用の後方押しにおける押し比Rに対する相対パンチ面圧 $p_m/Y$ の関係を比較して示したものである<sup>31)</sup>。図中の実線と破細線は、上界法によって計算した理論曲線で、それぞれ摩擦押出しと後方押しの場合を表している。黒塗りの記号で示すように、摩擦押出しの相対面圧 $p_m/Y$ の実測値は、軟銅、銅、アルミニウムの順に高まっているが、いずれも実線で示す理論曲線の $m=1.0$ と $0.9$ の中間的な傾向を示している。とくに、軟銅と銅では、 $p_m/Y=2.54$ 程度の低面圧比で、押し比 $R=33R$ までの成形が実現できることがわかる。

図35および図36は、工具面摩擦力を活用して中空薄

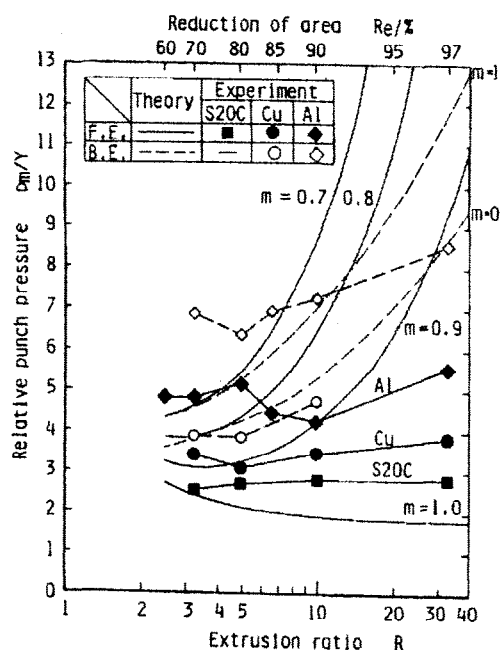


図34 界面摩擦力を活用した底付き薄肉缶の出しにおける押し比と相対パンチ面圧<sup>31)</sup>

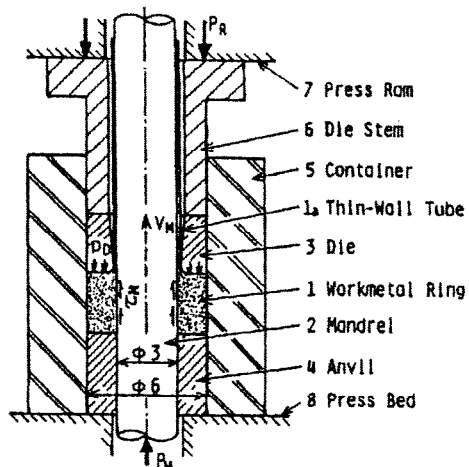


図35 マンドレルの界面摩擦力を活用した管の摩擦押出し<sup>35)</sup>

肉管<sup>35)</sup>、および薄板<sup>36)</sup>を製造する方法を示したものである。図35ではマンドレル、図36ではアンビルを駆動することにより、その工具面摩擦力によって素材を流動させる方法である。いずれも、図34と同様に、相対パンチ面圧 $p_m/Y=2.54$ 程度で、慣用押しに比較してかなり低くなることが確認された。

図37は、閉塞鍛造における型隅への素材充満を低い加工面圧で実現するため、コンテナを往復駆動してその摩擦力を有効に活用する方法を提案したものである<sup>37)</sup>。また、図38は、缶の前後方押しにおいて、テーパ付

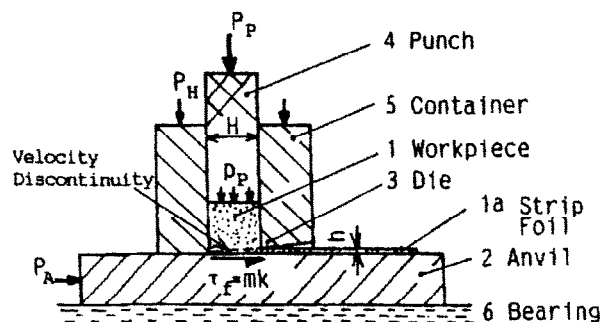


図36 アンビルの界面摩擦力を活用した薄板の押し<sup>36)</sup>

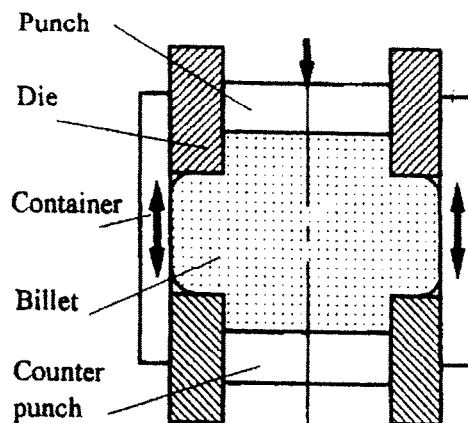
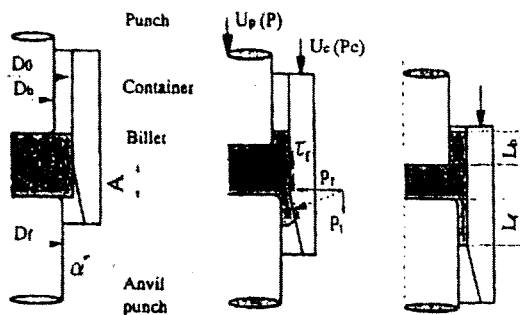


図37 コンテナの往復駆動による閉塞鍛造における型隅への素材充満<sup>37)</sup>



(a) Initial stage (b) Intermediate stage (c) Final stage

図38 テーパ付きコンテナの駆動による缶の前後方押し<sup>38)</sup>

きコンテナを駆動して材料流動を促進する方法を提案したものである<sup>38)</sup>。

## 5. 表面改質と表面微細構造による界面 トライボロジー特性の制御

### 5.1 塑性加工用工具材料と硬質表面皮膜処理

塑性加工用工具材料としては、表1<sup>39)</sup>に示すような銅合金、鋳鉄、構造用鋼、工具鋼、超硬合金の他に、ダイヤモンド、最近ではセラミックス材料まで使用されるようになった。これらは、加工法、加工数量、素材材料、加工条件の厳しき等によって使い分けられている。それらの代表的な工具材料の組織を図39<sup>40)</sup>に示す。最も広く使われている工具鋼の場合、基質中に炭化物が分散した組織となり、これが強度を高める要因となる。さらに、この炭化物粉末としてWC、TiC、TaCなどを用い、Co等の結合剤によって焼固めて作製する超硬合金はさらに硬い工具材料として使われている。

これらの工具材料は、いずれも組織全体の強度や硬さをほぼ均質に高める方法で製造されるが、塑性加工用工具の表面だけに母材とは異なる層を形成させて、耐凝着性と耐摩耗性を高める方法として、表2に示すような各種表面改質法が開発・実用化されている<sup>39)</sup>。これらの表面改質法の多くは、母材表面にそれより硬い単一の皮膜層を形成させるものである。例えば、図

39に示すクロムめっきではクロム単一層、PVD,CVD,PCVDでは物理蒸着、化学蒸着、溶融塩浸漬法、プラズマ蒸着によりTiC, VC, NbC, CrC, W<sub>2</sub>C, W<sub>3</sub>C等の炭化物層や、TiN, CrN等の窒化物層を形成させる。また、2つ以上の多層被覆層からなるものや、DLC表面皮膜処理のように硬い炭素系組織層を形成させるものもある。さらに、溶射により、金属、炭化物、セラミックス等に皮膜を形成させる方法も開発されている。

温・熱間加工では、工具表面の過熱による損傷を防ぐため、母材表面から窒素、炭素、硫黄、ほう素等を拡散させて窒化層、炭窒化層、ほう素化合物層を形成させる方法が使われている。さらに、最近では、工具表面だけでなく、母材内部まで傾斜組織構造になるような工具の開発も行われている<sup>41)</sup>。

### 5.2 表面改質による界面トライボロジー特性の制御

塑性加工用工具の表面改質を行う主たる目的は、耐凝着性の向上、耐摩耗性の向上である。その上で、塑性加工工具は、高面圧、高速度、高温下で繰り返し使用されるため、それらの条件下で表面改質皮膜の剥離が生じると、一挙に焼付きに至るため、表面改質膜の母材との強い密着性が要求される。表面改質皮膜の耐凝

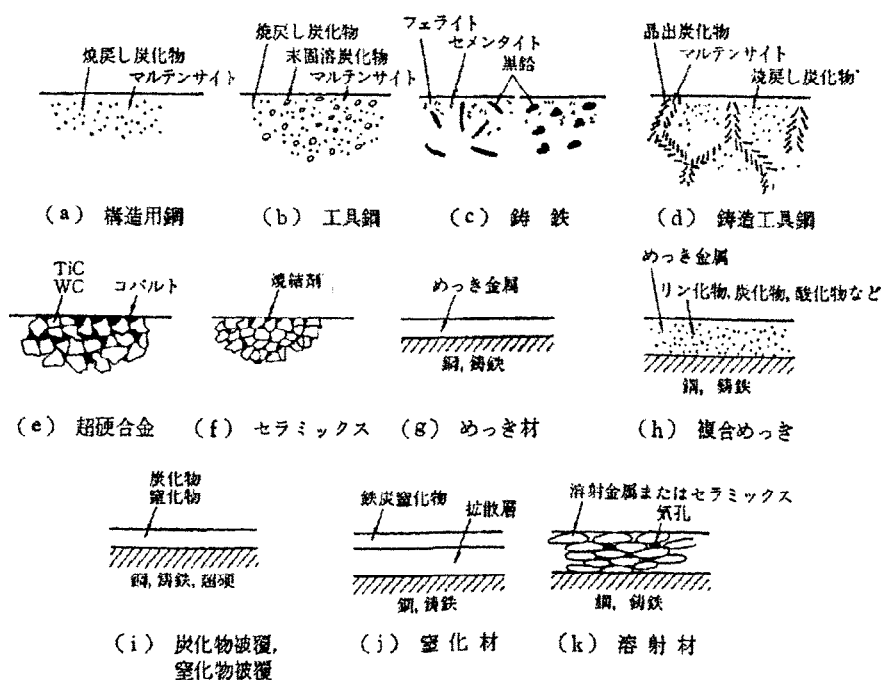


図39 工具材料の組織<sup>40)</sup>

表1 塑性加工用工具として使われる材料の組成・組織・硬さ<sup>39)</sup>

種類		概略組成 (%)	組織		第2相量		使用硬さ
			主相	第2相	wt%	vol%	
亜鉛合金	ZASなど	3~4.5Al, 3~12Cu, <1Ti	Zn	Zn Cu Ti Cu		20 ~30	HV110~170
アルミニウム合金	超タデュラルミン	5~6Zn, 2~3Mg, 1~2Cu	Al	Mg-Zn			HB60~160
銅合金 鋳鉄	アルミニウム青銅, アンブコ, IIZ合金 CE-2	10Al, 4Fe, 4Ni, 14Al, 5Fe, Al, Sn, Fe	Cu Cu	FeAl FeAl			HB300 HB300~400 HB350~380
	ねずみ鋳鉄	3~3.2C, 1.6~1.8Si, 0.5~0.8Mn	Fe	黒鉛		7~10	HB160~200
	合金鋳鉄	2.8~3.2C, 1.8~2.3Si, 0.8~1.0Mn, 0.4~0.5Cr, 0.4~0.5Mo	Fe	Fe <sub>3</sub> C		30 ~50	HB200~250
	ダクタイル鋳鉄	3.0~3.8C, 2.0~3.0Si, 0.3~1.3Mn	Fe	黒鉛 Fe <sub>3</sub> C		10 ~30	HB140~250
中炭素構造用鋼	SC, SNCM, SNC, SCM	0.3~0.6C, <2Cr, <0.3Mo, <3Ni, <1Al	Fe	なし	0	0	HRC20~50
工具鋼	炭素工具鋼 SK	0.6~1.2C	Fe	Fe <sub>3</sub> C	2		HRC55~60
	合金工具鋼 SKS	0.8~1.2C, <2Cr, <2W, <1Mo, <1V	Fe Fe	Fe <sub>3</sub> C M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	4 3		HRC50~62
	冷間ダイス鋼 SKD	1~2C, 5~13Cr, <1Mo, 1~2V	Fe Fe	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub> M <sub>23</sub> C <sub>4</sub>	13 19		HRC57~62
	熱間ダイス鋼 SKD	0.25~0.45C, 3~6Cr, 1~3Mo, 5~10W, 0.3~1V	Fe	MC M <sub>6</sub> C M <sub>23</sub> C <sub>4</sub> M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>			HRC45~53
	熱間鍛造用鋼 SKT	0.5~0.8C, 0.3~3Ni, 0.5~1.5Cr, 0.2~0.5Mo, 0.1~0.3V	Fe	MC+M <sub>6</sub> C			HRC45~53
	高速度工具鋼 SKH	0.7~1.5C, 4~5Cr, 2~18W, 2~8Mo, 1~5V, 0~12Co	Fe Fe	M <sub>6</sub> C+MC		8+2 4+6	HRC58~70
Co基	ステライト	2~3C, 15~25Cr, 5~10Fe, 10~25W	Co	M <sub>6</sub> C+ M <sub>23</sub> C <sub>4</sub>		30 ~40	HRC45~60
粉末合金	粉末高速度工具鋼	高速度鋼より高C, 高V, 高Co	Fe	M <sub>6</sub> C+ MC		4+6	HRC60~70
	フェロチック	45Vol% TiC, 残り合金鋼	Fe	TiC		45	HRC60~70
	超硬合金	5~20% Co, 残り WC	WC	Co	5~20		HRA~90
非金屬	セラミックス	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5~10		HV1 500~ 1 800
		Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3~5		HV1 200~ 1 300
	樹脂	セメント	セメント+アルミナ				HV70~100
	樹脂	エポキシレジン+ファイバー					

(注) 第2相の種類および量はその一例を示す。



表2 おもな表面処理層の組成・組織・硬さ<sup>38)</sup>

処 理 方 法		組 織		第2相量		表面硬さ
		主 相	第2相	wt%	vol%	
溶融塩浸漬	バナジウム炭化物被覆	WC	なし	0	0	HV2200~3000
	ニオブ炭化物被覆	NbC	なし	0	0	HV2000~2400
	クロム炭化物被覆	Cr-C	なし	0	0	HV1500~2000
	バナジウム炭窒化物被覆	VCN	なし	0	0	HV1200~1700
	クロム炭窒化物被覆	CrCN	なし	0	0	HV1200~1400
CVD	チタン炭化物被覆	TiC	なし	0	0	HV2200~3500
	チタン窒化物被覆	TiN	なし	0	0	HV1800~2100
	タングステン炭化物被覆	W <sub>2</sub> C	なし	0	0	HV2200~2300
PVD	チタン窒化物被覆	TiN	なし	0	0	HV1800~2100
	チタンアルミ窒化物被覆	TiAlN	なし	0	0	HV3500~4500
	iカーボン被覆	aC	なし	0	0	HV5500~6000
PCVD	チタン窒化物被覆	TiN	なし	0	0	HV2000~2500
	チタン炭化物被覆	TiC	なし	0	0	HV2800~3200
	非晶質カーボン被覆	aC-Si	なし	0	0	HV2000~2500
イオン注入		Fe	Fe <sub>4</sub> N Fe <sub>2</sub> N			HV1000~1100
拡 散	窒 化	Fe <sub>2-3</sub> N Fe <sub>4</sub> N	なし	0	0	HV900~1800
	ボライディング	FeB Fe <sub>2</sub> B	なし	0	0	HV1400~2000
	浸 硫	FeS	なし	0	0	HV100~200
溶 射	タングステン炭化物溶射	WC	Co		5~12	HV700~1000
	自溶合金溶射	Ni-Cr	NiB CrB		20~30	HRC20~60
	モリブデン溶射	Mo	なし	0	0	HV600~800
めっき	クロムめっき	Cr	なし	0	0	HV700~1100
	ニッケル-りんめっき	Ni	Ni <sub>3</sub> P		40~50	HV800~1100

(注) 硬さは概略値  
a: アモルファス

着性の向上と摩擦抵抗の測定に関する研究は数多く行われ、その有効性が確認されている。耐摩耗性に関する研究は、実験量が膨大になるため比較的少ないが、硬さの高い表面改質膜の耐摩耗性の向上に関してはその有効性が確認されている。さらに、温・熱間加工に耐熱性の向上のための表面改質はまだ不十分であり、工具寿命の大幅な改善のための表面改質膜の研究開発が強く期待されている。

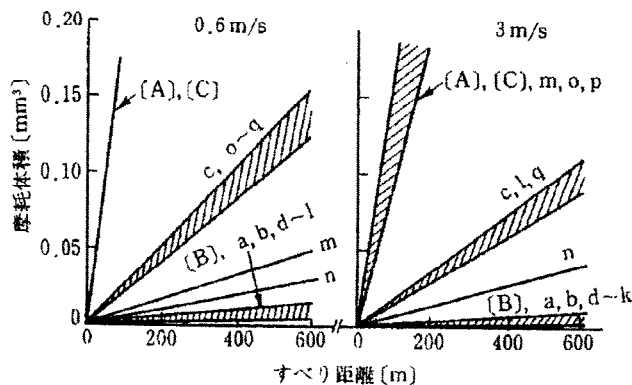
工具表面改質皮膜の耐摩耗性を評価したものとして、図40は大越式摩耗試験機を用いて各種表面改質皮膜の摩耗体積を比較した結果である<sup>39)</sup>。①工具鋼やアルミニウム青銅の非表面改質材、②窒化・浸流・ポライディング等の表面改質材、③めっき材、④超鋼合金およびPVD、CVD、PCVD表面硬質皮膜処理材の順に摩耗体積の増加率が減少している。これは、式(8)のArchardの摩耗法則に示されるとおり、工具表面近傍の硬さ $H \approx 3\sigma_p$ が高いほど摩耗体積 $V$ が少なくなることによって起きているためである。これらの傾向は、図41に示す鋼板の曲げにおけるダイス丸み部の摩耗断面積、および図42に示す鋼板の引抜き摩耗の深さにおいても同様に現れている<sup>39)</sup>。図42における摩擦係数 $\mu = F/P$ は、焼付きが生じると行程の進みに伴い急増するが、この $\mu$ の急増と摩耗深さはほぼ対応していること

がわかる。これは、工具と素材間の凝着が生じやすい程、摩耗が多くなることと対応し、いわゆる凝着摩耗が支配的であることを表している。

工具表面の硬い改質皮膜は、その表面粗さが大きいと、塑性加工のように素材表面を塑性流動させる抵抗が増大するため、図43に示すように、摩擦係数を増大させるだけでなく、凝着を助長し焼付きを発生させる恐れが強くなるので、注意を要する<sup>39)</sup>。

PVD皮膜でもその配向あるいは添加元素によって耐凝着性が異なる場合がある。図44は、ピンディスク型の摩擦試験機を用いて無潤滑で試験した場合に、TiN皮膜の優先配向(111)にB元素を添加することにより、耐凝着性が向上することを示している<sup>42)</sup>。

化学蒸着(CVD)皮膜は、通常1000°C近傍の温度で工具母材と反応させて皮膜形成を行うため、母材との強い密着強度が得られるが、物理蒸着(PVD)皮膜は、通常400-600°C程度の温度で工具表面にスパッタリング等で皮膜を付着させるため、母材との密着強度は比較的弱いと言われている。化学蒸着(CVD)皮膜は母材との密着強度は強いが、1000°C程度の高温処理を行うため、工具の寸法や形状変化が起りやすく、寸法精度を要求される複雑形状の工具への適用は難しい。



非表面処理材

(A) 焼入れ焼戻し SKD 1, (B) 超硬合金, (C) アルミニウム青銅

表面処理材

a. VC 被覆	溶融塩	SKD 1	j. TiN 被覆	PCVD	SKH 51
b. NbC 被覆	"	"	k. i-C-Si 被覆	"	"
c. Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> 被覆	"	"	l. WC+Co 被覆	溶射	S 45 C
d. VCN 被覆	"	SKH 51	m. WC+Co	放電硬化	SKH 51
e. CrCN 被覆	"	"	n. クロムめっき		S 45 C
f. TiC 被覆	CVD	SKD 1	o. 窒化		SNCM 1
g. TiC 被覆	PVD	SKD 11	p. 浸流		SK 4
h. i-Carbon 被覆	"	SKH 51	q. ポライディング		SKD 1
i. TiC 被覆	PCVD	"			

図40 各種表面処理材の摩耗量の比較<sup>39)</sup>

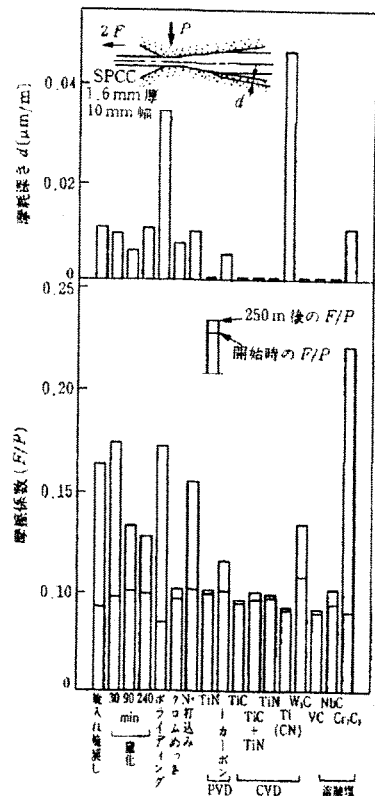


図41 鋼板の曲げにおける各種表面処理材の摩耗量の比較(加工速度200shot/min, 加工数30,000, ダイSKD11)<sup>39)</sup>

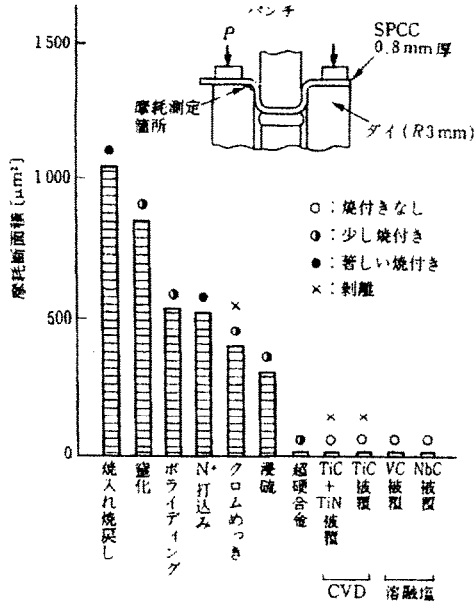


図42 鋼板の引抜きにおける各種表面処理材の摩擦係数と摩耗量の比較 (引抜き速度5m/min, 引抜率12%, 引抜き距離250m, ダイス半角5°, 防錆潤滑油, ダイスSKH51)<sup>39)</sup>

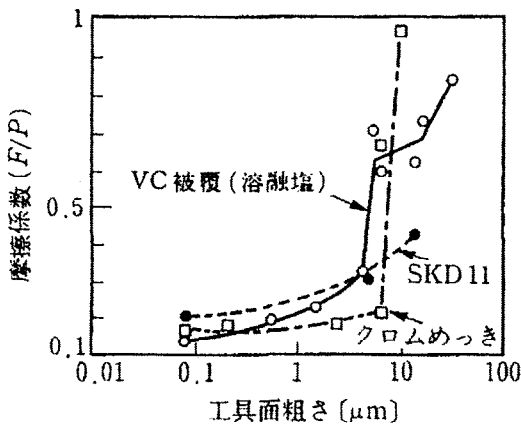


図43 鋼板の引抜きにおける摩擦係数に及ぼす工具表面粗さの影響<sup>39)</sup>

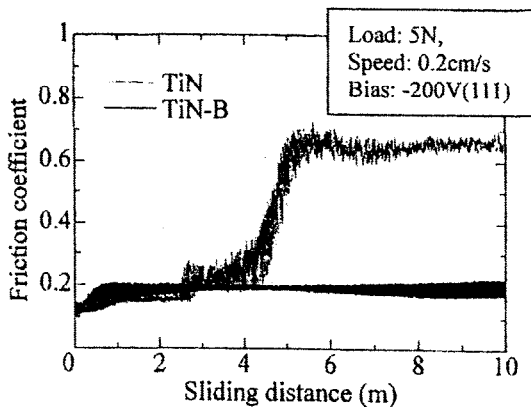


図44 ピン・ディスク形摩擦試験によるTiN (111) 優先配向皮膜とTiN-B皮膜の摩擦係数変化<sup>42)</sup>

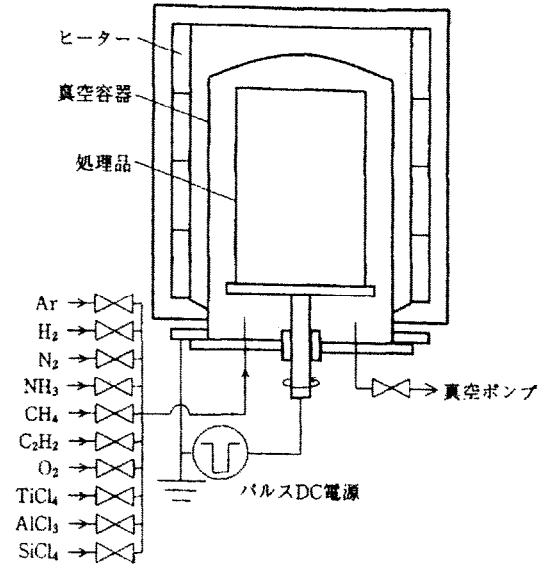


図45 プラズマCVD装置外観図<sup>43)</sup>

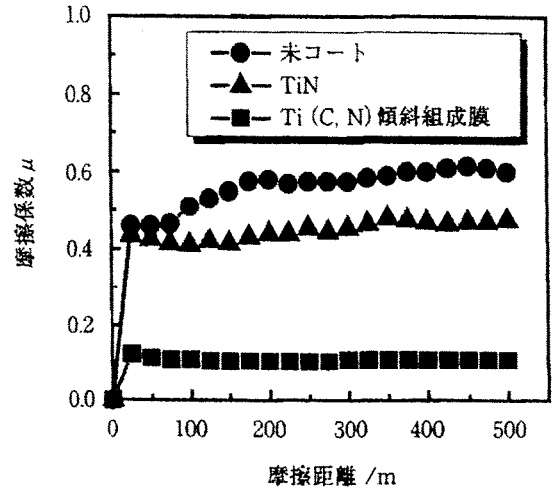


図46 ボールonディスク形摩擦試験におけるPCVDによるTiN単層皮膜とTi(C,N)傾斜組成皮膜の摩擦係数 (ボールSiC荷重10N, 摩擦速度100mm/s)<sup>43)</sup>

プラズマCVDは、図45に示すように<sup>43)</sup>、原料としガスを、プラズマ化学反応により皮膜を形成させるため、低温で密着性・緻密性に優れた皮膜を、複雑形状の工具でも着き廻り良く被覆できるという特徴を有する。また、真空状態を維持したままガスの交換ができるため、1つの装置で1回の皮膜処理工程で窒化浸炭等の拡散処理改質と硬質皮膜処理の複合処理が簡単に実施できる。図46は、ボールonディスク型摩擦試験機を用いて、PCVD皮膜としてTi (C, N) 傾斜組成膜、TiN単層皮膜を形成したディスクに対してSiCボールを摺動した場合の摩擦係数 $\mu$ を示している。TiN単層皮膜の場合は、皮膜処理していない場合と同程度の

表3 冷間塑性加工用金型に対するPCVD適用効果例<sup>43)</sup>

適用品名	金型材質	耐久性効果
冷間穴抜きパンチ (被加工材: Si2C, 肉厚3.1mm)	SKH51	・未コーティング : 20000ショット ・PCVD (TiCN/TiN 多層膜) : 330000ショット
冷間圧造ダイ (被加工材: ボールジョイント部ソケット SCM415, 肉厚5mm)	SKH51	・CVD法 (TiC) : 15000個 ・PCVD (TiCN/TiN 多層膜) : 48500個
冷間成形ダイ (被加工材: SUS304, 肉厚1.6mm)	SKD11	・TRD (VC) : 25000個 ・PCVD (TiCN/TiN 多層膜) : 120000個
トリミングダイ (被加工材: ボルト)	粉末ハイス	・CVD : 30000ショット ・PCVD (TiCN/TiN 多層膜) : 61900ショット
冷間鍛造パンチ (被加工材: ボルト)	SKH55	・未コーティング : 45000個 ・PVD (TiN) : 45000個 ・CVD (TiN/TiCN/TiC) : 75000個 ・PCVD (TiCN/TiN 多層膜) : 150000個
鋼管加工用マンドレル (被加工材: SUS304, 肉厚4→2mm)	粉末ハイス	・TRD (VC) : 530本 (再コーティング品は新品の半分以下) ・CVD : 780本 (再コーティング品は新品の半分以下) ・PCVD (TiCN/TiN 多層膜) : 1200本 (再コーティング品は1815本)
座押パリングパンチ (被加工材: SUS304, 肉厚0.5mm)	SKH51	・CVD (TiC: 6 $\mu$ m) : 15000ショット ・PCVD (TiCN/TiN 多層膜) : 52000ショット
モーターケース加工用パンチ (被加工材: 肉厚1.5~3.5mm)	DC53	・未コーティング : 60000ショット ・Crメッキ : 70000~80000ショット ・CVD (TiN/TiCN/TiC) : 200000ショット ・PCVD (TiCN/TiN 多層膜) : 400000ショット

高い摩擦係数を示すが、Ti (C, N) 傾斜組成膜では、 $\mu = 0.11$ 程度の低い摩擦係数を示すことがわかる<sup>43)</sup>。表3は、冷間加工用金型に対してPCVD皮膜を用いて、寿命向上の効果が顕著であった例を示す。これらの例では、CVD皮膜に比べてもさらに寿命延長の効果が見られることがわかる<sup>43)</sup>。

### 5. 3 DLC表面改質による界面トライボロジー特性の制御

DLC (Diamond-Like Carbon) 皮膜は、PVDやPCVDによって形成され、種々の皮膜組織および硬さを有するが、比較的低い摩擦抵抗を示すため、工具表面改質皮膜としてかなり有望視されている。母材への密着性についても、中間層の形成や表面粗さの調整によりかなり改善され、一部、塑性加工用工具表面改質処理として実用化が始まっている。

図47はPCVD処理によるDLC-Si皮膜工具を用いて、しごき型摩擦試験を行った結果である<sup>44)</sup>。表面処理していない工具に比較して、無潤滑でも焼付きは発生せず耐凝着性に優れるとともに、CrN皮膜に比較して低摩擦特性 (摩擦係数  $\mu = 0.17$ ) を有することがわかる。

図48は、繰返し板材成形向け摩擦試験機を用いて、DLC-Si皮膜を施した高速度工具鋼 (ハイスSKH51) 球でステンレス鋼板SUS304を無潤滑で400回 (総すべり距離77.2m) 成形した場合の摩擦係数  $\mu$  の変化を示し

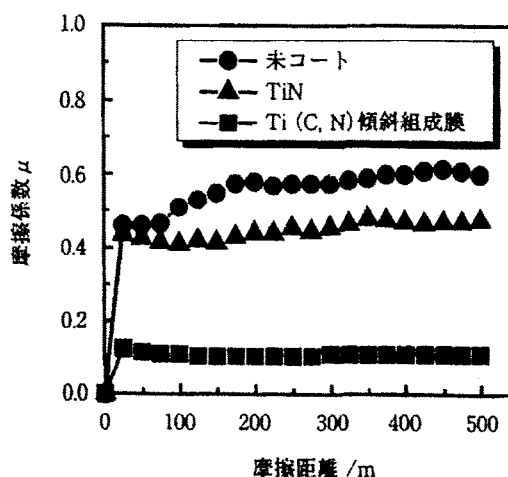


図47 しごき型摩擦試験におけるPCVDによるDLC-Si皮膜の摩擦係数<sup>44)</sup>

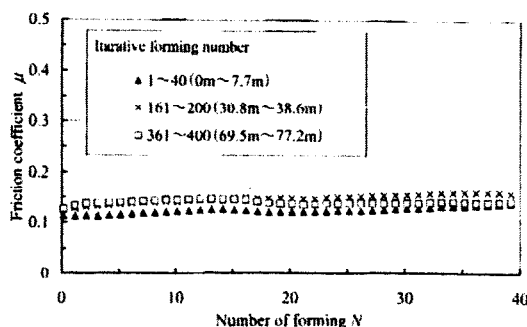


図48 DLC-Si皮膜SKH51工具によるステンレス鋼板の繰返し板材成形向け摩擦試験機における摩擦係数<sup>45)</sup>

た結果である<sup>45)</sup>。摩擦係数 $\mu$ はほぼ0.1程度で、焼付きはもちろんわずかな凝着も生じていない。これは、ステンレス鋼とDLC-Si皮膜が、この摩擦試験程度の面圧( $p=70\text{MPa}$ )とすべり速度( $V=400\text{mm/s}$ )では凝着が生じない組み合わせであることを示している。

DLC皮膜の剥離を防止するため、超合金ダイスのラッピング面をサンドブラストで $Rz=3\mu\text{m}$ 程度まで粗くした面に直接DLC皮膜を膜厚 $2\mu\text{m}$ 形成させた。このダイスを用いてステンレス鋼板SUS304を無潤滑で繰り返し深絞りを行い、図49に示すように、約2万回まで剥離なく、ダイス表面粗さ $Rz=1.4\mu\text{m}$ を維持して成形を続けることが可能になることを示した<sup>46)</sup>。

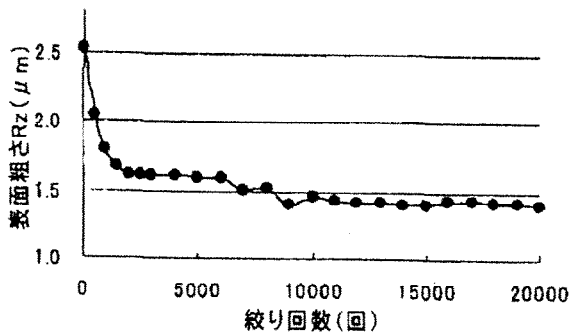
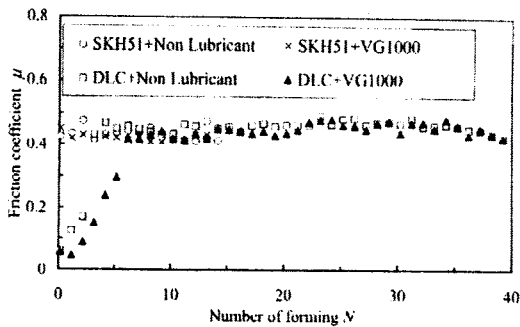
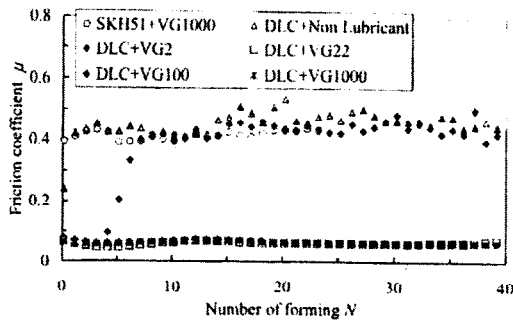


図49 ステンレス鋼板の深絞りにおけるショットブラストダイスの表面粗さ変化<sup>46)</sup>



(a) 圧延方向に平行な摺動



(b) 圧延方向に垂直な摺動

図50 DLC-Si皮膜SKH51工具による純チタン板の繰返し板材成形向け摩擦試験における摩擦係数<sup>45)</sup>

図50は、純チタン板TP340Cを用いて繰返し板材成形向け摩擦試験を行った場合の摩擦係数 $\mu$ を示した結果である<sup>45)</sup>。(a)圧延方向に平行に摺動した場合には、DLC-Si皮膜鋼球に高粘度鉱油VG1000を適用しても数工程で焼付きが発生している。それに対して、(b)圧延方向に直角に摺動した場合には、DLC-Si皮膜鋼球に中粘度鉱油VG22を適用すると40工程でも焼付きは発生せず、摩擦係数は $\mu=0.08$ 以下の安定した値を示している。しかし、無潤滑では最初から焼付きが発生し、VG2では5工程目から摩擦係数が急上昇する。図51は図50に対応する鋼球摩擦表面下0.5mmの温度上昇量 $T_r$ を示す。焼付きが発生して摩擦係数が $\mu=0.4$ 程度になる場合には、温度上昇量は $T_r=60^\circ\text{C}$ 程度まで上昇する。これに対して、焼付きが発生しない場合には温度上昇量は $T_r=10^\circ\text{C}$ 程度にとどまっている。ここで用いたチタン板の場合、潤滑膜が全くないと凝着が生じるが、圧延方向に垂直に摺動した場合にある程度の油膜が形成されると凝着が妨げられ焼付きに至らないものと考えられる。

図52は、純アルミニウム板(A1050)を用いた場合の摩擦係数 $\mu$ を示したものである<sup>45)</sup>。ハイスSKH51球を無潤滑で摺動した場合には、 $\mu=0.7$ 以上の高い値

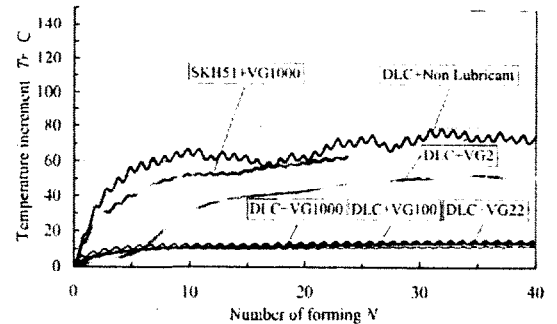


図51 DLC-Si皮膜SKH51工具による純チタン板の繰返し板材成形向け摩擦試験における摩擦面温度<sup>45)</sup>

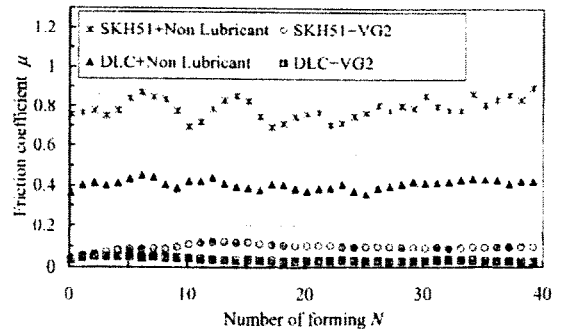


図52 DLC-Si皮膜SKH51工具による純アルミニウム板の繰返し板材成形向け摩擦試験における摩擦係数<sup>45)</sup>

を示すが、DLC-Si皮膜ハイス球を無潤滑で摺動した場合には、 $\mu = 0.4$ 程度とやや小さい値を示した。しかし、アルミニウムの凝着はなくならなかった。これに対して、DLC-Si皮膜処理をしなくても、VG2で潤滑すると焼付きは生じないが、DLC-Si皮膜処理をした方が低い摩擦係数を示している。

図53は、円筒端面同士の摺動型摩擦試験により、ハイスSKH51、ハイスSKH51にVC皮膜処理、ハイスSKH51にDLC-Si皮膜処理した工具に対して、アルミニウム合金A6061を鉱油VG100潤滑した場合の摩擦係数を相対すべり速度 $V_m$ に対して示したものである<sup>47)</sup>。ハイスSKH51のみの場合には速度 $V_m = 0.4$  m/s以上で、焼付きが発生し摩擦係数 $\mu$ が急上昇している。これに対して、皮膜処理工具では、 $V_m = 0.8$  m/sまでの速度範囲で焼付きが抑制され、DLC-Si皮膜処理工具の方がVC皮膜処理工具より低い摩擦係数を示すことがわかる。また、図54は摩擦係数に及ぼす工具表面粗さ $R_z$ の影響を示したもので、 $R_z = 0.04 \mu\text{m}$ では $\mu = 0.1$ 以下の低い摩擦係数であるが、表面粗さの増加に伴い摩擦係

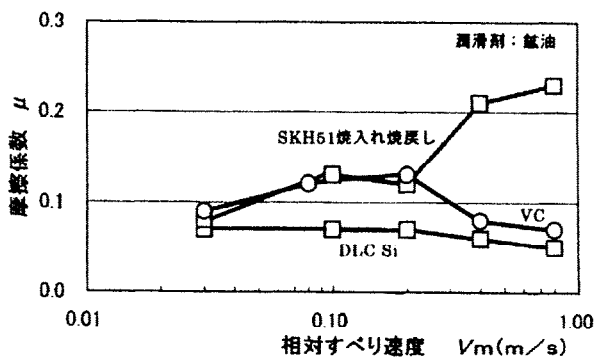


図53 DLC-Si皮膜SKH51工具による円筒端面同士の摺動型摩擦試験における摩擦係数に及ぼす試験速度の影響<sup>47)</sup>

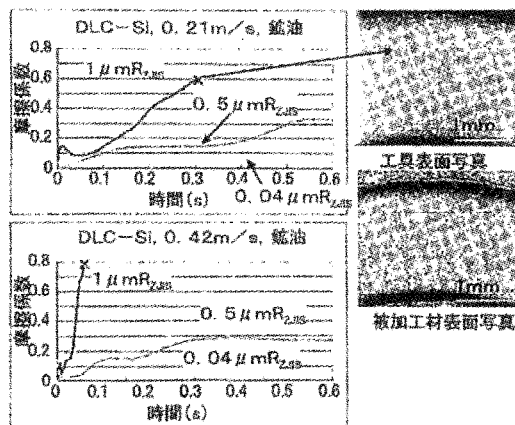


図54 DLC-Si皮膜SKH51工具による円筒端面同士の摺動型摩擦試験における摩擦係数に及ぼす工具表面粗さの影響<sup>47)</sup>

数も増加し、 $R_z = 1 \mu\text{m}$ では焼付きが発生している。さらに、図55はDLC-Si皮膜処理工具を無潤滑で、室温から500℃までの範囲で試験した場合の摩擦係数 $\mu$ を示した結果である。室温の摩擦係数は $\mu = 0.2 \sim 0.3$ 程度で一定であるが、試験温度の上昇とともに摩擦係数も増加し、300℃以上では焼付きが生じ、 $\mu = 0.8$ 以上まで高まることがわかる。

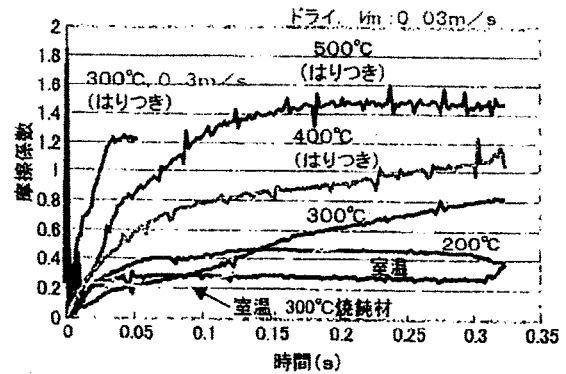


図55 DLC-Si皮膜SKH51工具による円筒端面同士の摺動型摩擦試験における摩擦係数に及ぼす試験温度の影響<sup>48)</sup>

#### 5. 4 溶射その他の表面改質による界面トライボロジー特性の制御

高張力鋼板の成形では加工面圧の増大等により皮膜の剥離が生じやすい。図56は鋳鉄FCD450にWC溶射皮膜およびCrメッキを施した工具を用いて、590MPa級の高張力鋼板の平板摺動を行った場合の摩擦係数を示したものである<sup>48)</sup>。SKD11工具およびCrメッキ工具では、10回および20回で焼付きが発生している。これに対して、FCD工具では、100回の繰返しの間ほぼ摩擦係数 $\mu = 0.11$ 程度であるが、工具面は激しく摩耗していた。WC溶射皮膜工具では、焼付きも生じず摩擦係数 $\mu = 0.1$ 以下の低い値を示している。

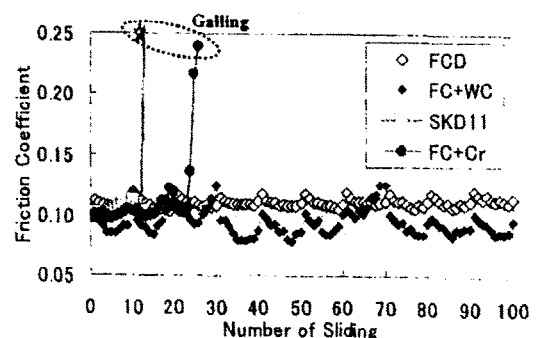


図56 鋳鉄FCD450のWC溶射皮膜とCrメッキ工具による高張力鋼板の平板摺動工具による摩擦係数変化<sup>48)</sup>

その他、レーザ照射により工具表面にチタン系皮膜あるいは窒化物系皮膜形成の試みがある<sup>49)</sup>。

温・熱間加工における工具寿命は5,000回程度で、その工具寿命の改善が重要課題となっている。通常、窒化処理や浸硫処理が行われているが<sup>50)</sup>、それらの表面改質による寿命改善はあまり顕著ではないため、これらに替わる表面改質法の開発が強く望まれる。

### 5. 5 表面微細表面構造による界面トライボロジー特性の制御

素材表面に微細表面構造を形成し、潤滑剤のマイクロプールによる潤滑効果を発揮するように工夫した試みは数多くあるが、金型に微細表面構造を形成させて潤滑特性を改善しようとする試みは比較的少ない。図57に示すように、硬質化合物皮膜(DLCまたはCrN)に数 $\mu\text{m}$ 程度の微細孔を形成する方法が開発された<sup>51)</sup>。この方法で微細孔を有する深絞りダイスを用いて鋼板SPCCの繰返し深絞りを行った結果、図58に示すように、微細孔を有するダイスでは深絞り最大荷重が減少することが明らかになった。さらに、図59に示すよう

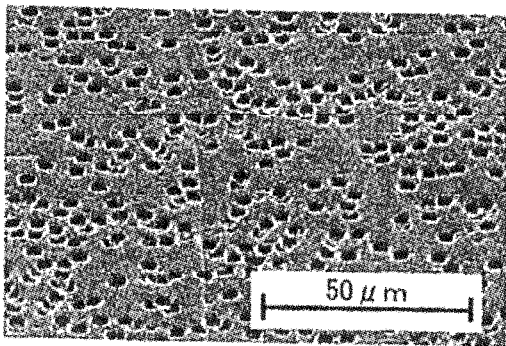


図57 硬質表面処理皮膜への微細孔形成プロセス<sup>51)</sup>

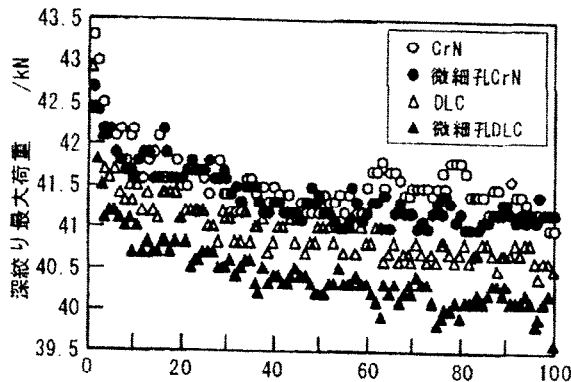


図58 軟鋼板SPCC板の深絞りにおける微細孔を有する表面処理CrN皮膜の最大荷重<sup>51)</sup>

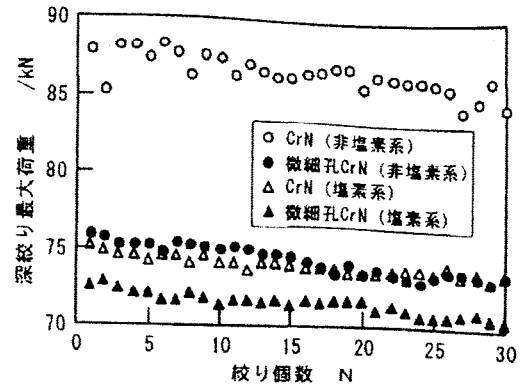


図59 ステンレス鋼板の深絞りにおける微細孔を有する表面処理CrN皮膜の最大荷重<sup>51)</sup>

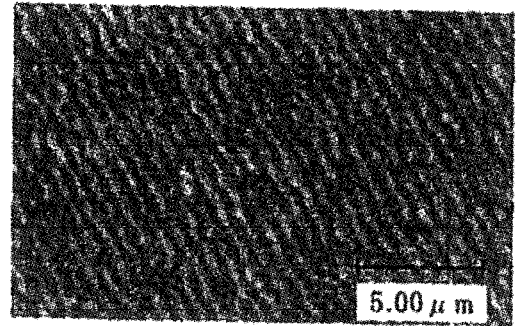


図60 フェムト秒レーザによる周期構造皮膜<sup>52)</sup>

に、ステンレス鋼板SUS304では、微細孔を有するCrN皮膜では非塩素系潤滑剤でも塩素系潤滑剤と同程度の深絞り荷重まで減少することが示された。

フェムト秒レーザを照射すると図60に示すような周期構造が形成される。この周期構造はピッチ $0.7\mu\text{m}$ 程度は深さ $0.15\mu\text{m}$ 程度の表面構造である。この周期構造をリング圧縮工具に形成し摩擦試験を行った結果、摩擦係数で $\mu=0.12$ から $0.08$ 程度まで減少することが示された。また、張出し用パンチにこの周期構造を形成した場合にも摩擦力の低減が認められた<sup>52)</sup>。

## 6. おわりに

塑性加工における工具と素材間の摩擦抵抗制御および製品表面制御を行うためには、工具-素材界面の接触機構を良く理解した上で合理的な工具表面処理などの表面改質技術の利用開発が必要になる。そこで、塑性加工の工具・素材面間の接触機構、摩擦法則、素材表面創成機構について解説した上で、界面の摩擦抵抗制御の例として工具・素材界面の摩擦抵抗を積極的に活用した塑性加工法について紹介し、

PVD/CVD/PCVDなどの硬質表面皮膜処理や微細表面構造調整などの表面改質法等の各種表面改質による耐焼付き性、耐摩耗性、界面抵抗制御法とその効果について解説した。各種のPVD/CVD/PCVD表面改質技術が開発され、冷間塑性加工における耐焼付き性と耐摩耗性を格段に改善することが可能となってきている。しかし、温・熱間加工における耐熱性を改善する皮膜の開発は、まだまだ不十分である。また、板材成形や鍛造等においては、界面摩擦抵抗を積極的に利用したり、加工部位により摩擦抵抗を変えて最適に制御することにより、成形限界を格段に向上させたりすることが可能になる場合がある。そのような場合には、工具だけでなく被加工材の表面改質あるいは微細構造と潤滑剤との組み合わせにより、界面の摩擦抵抗を最適に制御することが必要になる。今後、工具に限らず被加工材も含めた表面改質技術と微細構造形成技術の開発とその応用技術の発展が期待される。

#### 参考文献

- 1) 中村保：塑性と加工, 28-319(1987),783-790.
- 2) Bay,N., & Wanheim,T.:Wear, 38(1976),201-209.
- 3) Cristensen,P., Everfelt,H. & Bay,N.:Annals of CIRP, 35-1(1986),141-146.
- 4) Fogg,B.:Proc. Instrn. Mech. Engrs., 182-Pt3K(1983),152-161.
- 5) Ike,H. & Makinouchi,A.:Wear, 140(1990),17-38.
- 6) 大矢根守哉・小坂田宏造：日本機会学会論文集(第3部), 34-261(1968),1001-1008.
- 7) Wilson,W.R.D.:Trans. ASME, J. Lubr. Technol., 96-4(1974), 539-546.
- 8) 日本塑性加工学会編：塑性加工におけるトライボロジー, (1988),67-74.
- 9) 小豆島明・坪内昌生・工藤英明・古田憲明・峯村憲：塑性と加工, 30-347(1989),1631-1638.
- 10) Mizuno,T & Okamoto,M.:Trans. ASME, J. of Lubr. Technol., 104(1982),53-59.
- 11) 阮峰・工藤英明・坪内昌生・堀隆弘：塑性と加工, 28-312(1987), 41-48.
- 12) 曾田範宗：摩擦と潤滑(1961), 99,岩波.
- 13) Allenn,C.M. & Drauglis,E.: Wear,14(1969), 363.
- 14) Nakamura, T, Tanaka, S., Hayakawa, K., Fukai, Y.,Trans. ASME, J. Tribology, 122(2000), 803-808.
- 15) 済木ら, 温熱間鍛造における接触熱抵抗の簡易評価式, 日本機械学会論文集, C編, 61-589(1995), 3762-3768.
- 16) Kienzle,O. u. Mietzner,K.:Atlas Umgeformter Metallischer Oberflächen, Springer Verlag , (1967).
- 17) 小坂田宏造・大矢根守哉：機論, 36-286(1970), 1017.
- 18) 河合望・中村保・鶴飼雄治郎：機論, 51-486(1985), 2100.
- 19) 山口克彦・西村信吾・高倉章雄・福田正成：塑性と加工, 21-231(1980), 315.
- 20) 山口克彦・西村信吾・高倉章雄・福田正成：塑性と加工, 21-237(1980), 909.
- 21) 中村保・近藤一義・西ヶ谷知栄：機論, 56-530(1990), 2794-2801.
- 22) 池 浩・牧野内昭武, 塑性と加工, 32-366(1991), 848-855.
- 23) Ike, H. and Plancak, M. Metalforming 2000, (2000), 63-69, Bulkema.
- 24) 池 浩・井上 純：塑性と加工, 30-336(1989), 97-102.
- 25) 古林忠：塑性と加工, 19-204(1978), 25.
- 26) 古林忠・山口克暎・平坂正人・吉原直武：塑性と加工, 19-204(1978), 9.
- 27) 平坂正人：塑性と加工, 28-319(1987), 799.
- 28) 河合望・堂田邦明・中村保・広瀬圭介：機論, C, 48-433(1982), 1473.
- 29) 河合望・堂田邦明・箕原和彦：機論, 52-479(1986), 2022.
- 30) Cokcs,M: J. of Applied Phisics, 33-7(1962), 2152.
- 31) 河合望・中村保・岩田政成：機論, 43-369(1977), 1947.
- 32) Archard,J.F.: J. Appl. Phys., 24(1953), 981.
- 33) 笹田直：潤滑, 22-3(1977),169.
- 34) 日本塑性加工学会編：プロセストライボロジー, (1993),23.
- 35) 中村保：機論 (C編), 54-501(1988),1150-1156.
- 36) 中村保/平岩正至・富沢康治：機論 (C編), 59-557(1993),193-198.
- 37) 小坂田宏造・花見真司・王欣：塑性と加工, 37-426(1996),723-728.
- 38) 王欣・小坂田宏造・花見真司：塑性と加工, 38-440(1997),824-828.
- 39) 日本塑性加工学会編：プロセストライボロジー, (1993),24-34.
- 40) 日本塑性加工学会編：塑性加工におけるトライボロジー(1988),151-152.
- 41) 桑原光雄：第30回鍛造実務講座テキスト, (2003),



- 73-83.
- 42) 小豆島明・飯草直大・服部広行：第56回塑性加工連合講演会講演論文集，(2005),319-320.
  - 43) 河田一喜：塑性と加工，45-518(2005), 153-157.
  - 44) 窪田寛之・堂田邦明・土屋能成・谷口幸典：H17年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2005),49-50.
  - 45) 中村保・葭野民雄・田代庸司・柴田潤一・土屋能成・青山健一：H17年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2005),57-58.
  - 46) 野口裕之・村川正夫・片岡征二：H17年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2005),51-52.
  - 47) 土屋能成・松井宗久・五十嵐新太郎・太刀川英男：H17年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2005),55-56.
  - 48) 片岡知克・山崎雄司・中垣内達也・小野義彦・松田誠三・平井更之右：第56回塑性加工連合講演会講演論文集，(2005),309-310.
  - 49) 森田全紀・E.C.Santos・松本良・塩見誠規・小坂田宏造・高橋雅也：第56回塑性加工連合講演会講演論文集，(2005),297-298.
  - 50) 岡島琢磨・酒井貴文・伊藤樹一・吉田広明・五十川幸宏：H17年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2005),61-62.
  - 51) 白川信彦・三浦健一・出水敬・大西潔・辻村映規・原一也：第56回塑性加工連合講演会講演論文集，(2005),307-308.
  - 52) 松井啓介・飯塚高志・高倉章雄・沢田博司・川原公介：第56回塑性加工連合講演会講演論文集，(2005),299-300.