

© 1992 ISIJ

解 説

塑性加工における最近のトライボロジー技術

小 豆 島 明*

Recent Tribological Technology in Metal Forming

Akira AZUSHIMA

1. はじめに

塑性加工とは金属材料の容易に形を変えることができる性質(塑性)を利用して、目的の形状に弾性体の工具を用いて加工する方法である。この塑性加工には圧延、引抜き、押出し、鍛造、板成形などの多くの加工があり、どの加工方法においても、工具と材料間の界面において潤滑油が、次に挙げる理由により使用されることになる。

- (1)加工力の低減
- (2)冷却
- (3)製品表面品位の改善
- (4)焼付きや表面損傷の防止
- (5)工具摩耗の抑制

これらの塑性加工における潤滑の要請事項を満足させるためにこれまで多くのトライボロジー対策が成され、大きな成果を上げてきた。

本稿においては、最初に工具と材料間界面のトライボロジー現象を理解するために機械要素などの弾性体同士の接触界面でのトライボロジー現象と比較しながら塑性加工の接触界面での特徴を解説し、つづいて最近のトライボロジー技術について紹介する。

2. 塑性加工界面でのトライボロジー特性の特徴^{1)~3)}

塑性加工界面でのトライボロジー特性の特徴を以下に列挙し、軸受、歯車などの接触界面との比較を行う。

(1)塑性加工面の潤滑は一般に流体潤滑よりも境界潤滑に近い状態にある。

多くの塑性加工の界面の摩擦係数は、ほぼ 0.15~0.02 の間にあり、 $\mu < 0.01$ の機械要素界面の摩擦係数よりもかなり高い値になっており、図 1 に示すストライベック線図から、境界潤滑と流体潤滑とが混在した混合潤滑状態にあることが言える。このことから、流体潤滑が主流な軸受などの摩擦に比べて、塑性加工界面におい

ては境界潤滑特性をかなり考慮しなければならない。

(2)塑性加工面が材料の弾性限をはるかに越えた高い面圧下であり、しかもその面積がきわめて広い。

塑性加工面の荷重が高くなると、境界膜の破断を引き起こす可能性が考えられる。その境界膜の破断の臨界荷重は、温度や速度により影響を受けるが、実験より 200~300 kgf/mm² であることが示されている²⁾。この値は、一般の多くの塑性加工の界面にかかる面圧と比較するとかなり高い値であり、塑性加工面にかかる面圧が機械要素同士の接触に比べ油膜破断の大きな原因になるとは考えにくい。一方、潤滑油の破断は面圧よりも界面のすべり距離に大きく影響を受ける。塑性加工面のように接触面積が大きい場合にはすべり距離が大きくなる。その増加により界面の摩擦面温度は高くなり、接触時間も長くなるため、機械要素面に比べ塑性加工面は油膜の動的破断が起こり易い。

(3)塑性加工面の温度が高い。

塑性加工面温度は、荷重、速度、すべり距離や摩擦係数に影響を受け、冷間圧延加工の場合には材料の加工熱

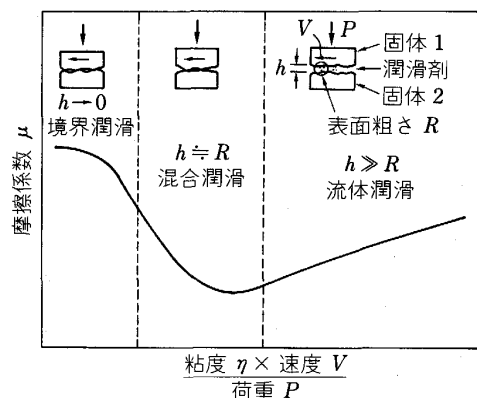


図 1 弾性接触に対するストライベック線図、ミクロ接触状況と潤滑メカニズム

平成 4 年 1 月 22 日受付 平成 4 年 9 月 4 日受理 (Received on Jan. 22, 1992; Accepted on Sep. 4, 1992)(依頼解説)

* 横浜国立大学工学部教授 工博 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240)

Key words: metalforming; tribology; simulation; tool; lubricant; coefficient of friction; surface properties.

も考慮すると 200°C 以上にもなることがある。一方、潤滑油膜は特定の温度（転移温度）以上になると、潤滑能力が著しく低下することが知られている。この転移温度は潤滑油によって少し異なるが 200°C 前後であるので、油膜破断の大きな原因となる。

冷間加工の材料の加工熱による温度上昇 ΔT_W は

$$\Delta T_W = \frac{\sigma_m \cdot \epsilon_m}{\rho c} \dots \dots \dots (1)$$

で考えられる。ここで、 σ_m は材料の平均降伏応力、 ϵ_m は平均塑性ひずみ、 ρ は密度、 c は比熱である。一方、塑性加工界面の摩擦熱による温度上昇 ΔT_f は板引抜きの場合、引抜き速度が高速でベクレ数が 5 以上のとき

$$\Delta T_f = 4 \mu p_m V \frac{1}{4.24 K_T + 3.76 K_W \left(\frac{V \cdot l}{x_W} \right)^{1/2}} \dots \dots \dots (2)$$

で考えることができる⁴⁾。ここで、 l は接触長さ、 μ は摩擦係数、 p_m は平均面圧、 V は速度、 K_T 、 K_W は工具と材料の熱伝導係数、 x_W は材料の温度伝導係数である。

具体的には界面温度上昇の一例として、軟鋼を断面減少率 50% で圧延、前方押出し及び後方押出ししたときの界面温度上昇を図 2 に示しておく⁵⁾。その他、Bishop による非定常の熱伝導に基づいた定式もある⁶⁾。

(4) 塑性加工界面内ですべり速度が材料の塑性変形により部分的に変化し、しかもその方向も変化することがある。

軸受などの機械要素の接触面とは異なり、材料の塑性変形によりすべり方向に速度が変化することになる。これは、流体膜が形成しているときには負圧の原因となる。特に、圧延の場合には中立点ですべり速度がゼロとなり、方向を逆転する。

(5) 塑性加工界面で加工中に新生面を露出する。

塑性加工界面でのトライボロジー特性を特徴づける最も大切な因子として、新生面の露出と材料の表面構造の変化が挙げられる。塑性変形により接触面が増大すれば、外部からの潤滑油の供給がなければ、その増加分につれて油膜は減少する。特に、表面膜拡大率の大きな鍛造加

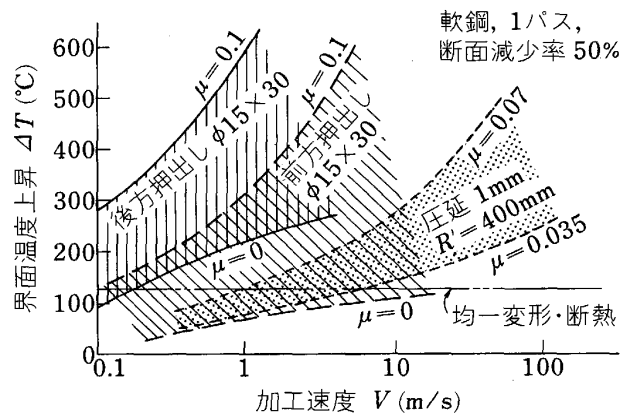


図 2 界面温度上昇の予想、 V と μ の影響⁵⁾

工や押出し加工においては新生面が露出する部分への潤滑油膜が薄くなると、油膜破断を引き起こす原因となる。一方、界面での材料の表面構造の変化により多量の潤滑油が接触面に介在すると表面品位の劣化を引き起こす原因となる。

以上に挙げた項目の各種塑性加工における具体的な数値を表 1 に示しておく⁷⁾。このような塑性加工界面におけるトライボロジー特性の特徴を考慮に入れ、問題解決に当たらなければならない。

3. 塑性加工界面のマイクロ接触状況

塑性加工界面の工具-潤滑油-材料の一つの体系の中で上に述べたトライボロジー特性を考慮したとき、図 3 に示す接触面でのマイクロ接触状況モデルの概念図が提案されている⁸⁾⁹⁾。工具と材料が接触（塑性変形）を開始する点では、工具と材料との速度による潤滑油の動水圧効果により表 1 に示すくさび効果による導入量あるいはスクイズ効果による捕捉量が各種加工条件より定量的に決められる。また、工具と材料の凹部では潤滑油を界面に持ち込む効果として作用する。塑性変形域の界面においては、図 3 に示すような材料-工具が微視的に接触する境界潤滑領域、材料-工具界面の凹部において静水圧を生じている流体潤滑領域及び静水圧を生じていない領

表 1 塑性加工における摩擦条件範囲⁷⁾

条件因子	加工法	板 材 加 工	引抜き・しごき加工	圧延・回転加工	鍛造・押出し加工
面圧比 p/Y^* (面圧 p (MPa))		0.1~1 程度 (1~100 程度)	1~3 程度 (100~1000 程度)	1~3 (100~1000 程度)	2~5 程度 (100~3000 程度)
速度 v ($m \cdot s^{-1}$) (相対すべり速度 Δv)		$10^{-3} \sim 10^{-1}$ のオーダー ($0 \sim 10^{-2}$ のオーダー)	$10^{-2} \sim 10^2$ のオーダー ($10^{-2} \sim 10^2$ のオーダー)	$10^{-2} \sim 10^2$ のオーダー ($10^{-2} \sim 10^0$ のオーダー)	$10^{-3} \sim 10^{-1}$ のオーダー ($0 \sim 10^{-1}$ のオーダー)
摩擦面温度 T (°C)		室温~150 程度	室温~300 程度	室温~150 程度 温・熱間温度	室温~400 程度 温・熱間温度
被加工材の表面積拡大比 A/A_0^{**}		0.5~1.5	1~2	1~2	1~100 程度
摩擦面への潤滑剤の供給形態		捕 捉	導 入	導 入	捕 捉 (導入)

[注] * Y : 被加工材の単軸降伏応力 ** A/A_0 : 被加工材の加工後と前の表面積の比

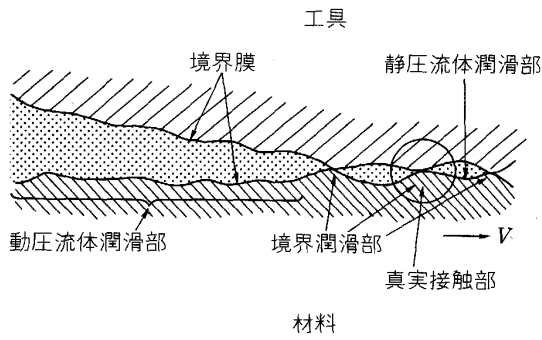


図 3 塑性加工潤滑面のマイクロ接触状況モデル

域などが混在共存して混合潤滑を呈している。加工条件が厳しくなると、境界潤滑域が増加し局部的に金属接触が発生し、固体摩擦域が出現することになる。

この塑性加工界面の接触モデルの機械要素の軸受などの弾性体同士の接触との大きな違いの一つは、図4に示すような混合潤滑域において界面に持ち込まれた材料凹部の潤滑油、または材料の塑性変形により生じたポケットに封じ込められた潤滑油に静水圧 q が発生することである。この静水圧 q が真実接触域に作用する圧力 p に近づき、凹部またはポケット内の潤滑油にも動水圧作用が発生すると考えると、図5に示すような凹部に封じ込められた潤滑油が凹部周辺の接触領域に浸出して流体潤滑作用をするマイクロ塑性流体潤滑の可能性が示唆された¹⁰⁾¹¹⁾。著者らは、透明な硬質石英ガラスを引抜きダイとして用いて、実体顕微鏡で引抜き加工中の材料-工具間の界面での潤滑油の挙動を直接観察する装置を開発し、写真1に示すように、接触域内において凹部に封じ込められた潤滑油が周囲の界面に浸出していることを直接観察した¹²⁾。この実験においては、板厚 1 mm のアルミニウム材の試験片表面に規則的なくさび形凹部をもった引抜き材料を用い、引抜き速度 0.8 mm/s、圧下率 9.7% の引抜き条件で粘度 100 cSt (40°C) の潤滑油を使用した。

このような塑性加工界面におけるトライボロジー特性を理解して、潤滑メカニズムの形態を検討しなければならない。弾性体同士の接触の場合と同様、導入 (捕捉) 油膜厚み h と工具と材料の表面粗さの和 R との関係から、塑性加工の場合にも次のように潤滑メカニズムを大まかに分類することができる¹³⁾。

- $h \rightarrow 0$ のとき 境界潤滑, 固体摩擦
- $h \approx R$ のとき 混合潤滑 (流体潤滑・境界潤滑・固体摩擦), ミクロ塑性流体潤滑
- $h > R$ のとき マクロ塑性流体潤滑

図6に各潤滑メカニズムのマイクロ接触状況の概念図を示しておく。

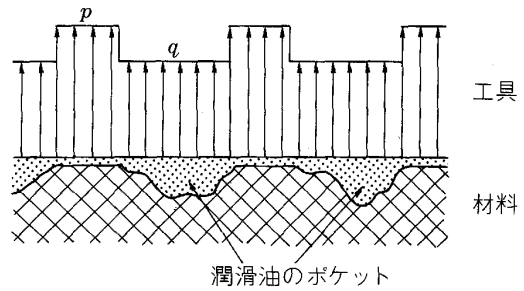


図 4 静水圧が作用した潤滑状態

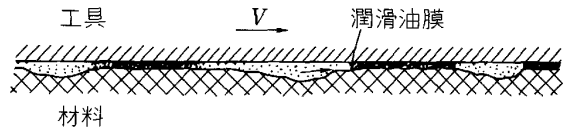


図 5 ミクロ塑性流体潤滑のモデル

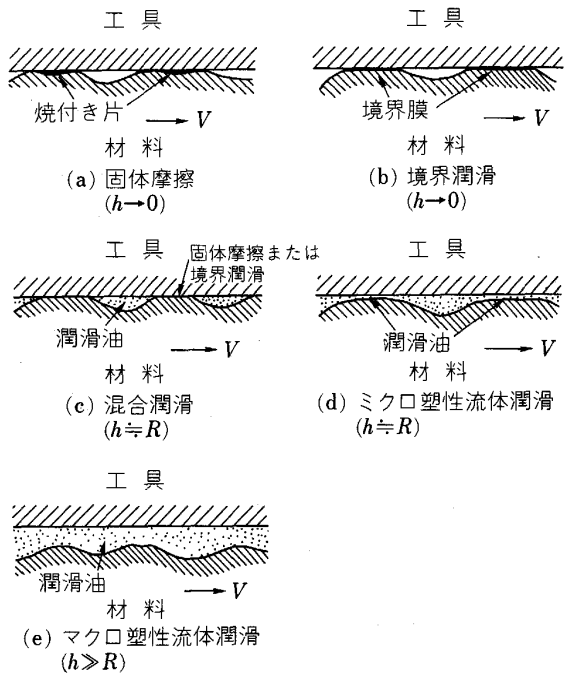


図 6 各潤滑メカニズムのマイクロ接触状況モデル

4. 要請事項を満足させるための方法¹³⁾

塑性加工における一つの簡単なトライボロジー要請事項を解決するに当たっても多くのトライボロジー条件を設定し、その結果を測定して条件の修正を繰り返すための試行を数多く行わなければならない現状にあり、莫大な費用と時間が必要となる。この状況を改善するためには3章で説明した塑性加工における工具と材料界面でのマイクロ接触状況と潤滑メカニズムを理解することが必要

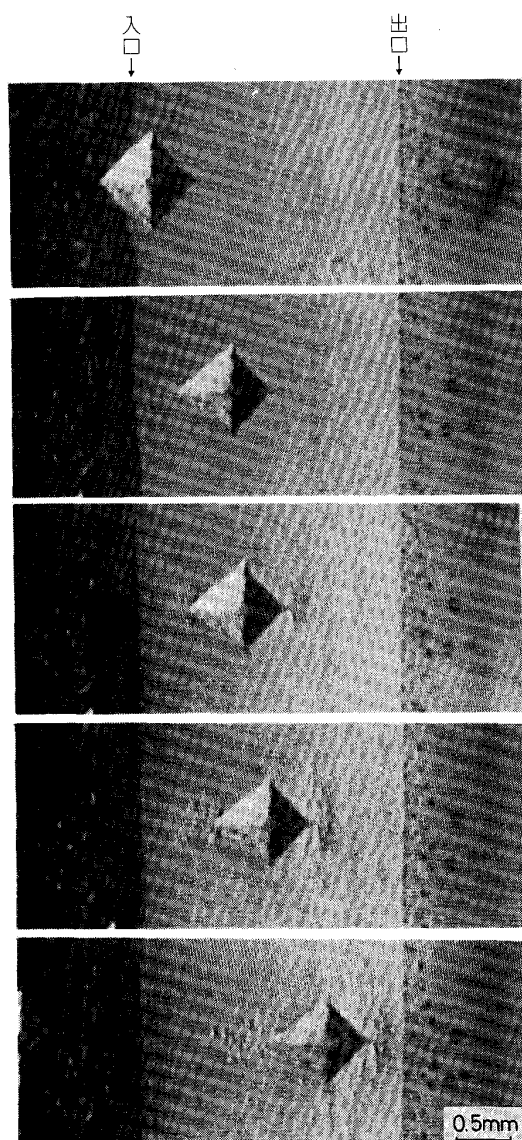


写真 1 ピラミッド型凹部を持った材料の引抜き中の界面の連続直接観察¹²⁾

であり、図7に示す実機生産条件におけるトライボプロセスの体系の中の中央のブラックボックスの仕組みを明らかにする仕事をしなければならない。この仕組みが理解できれば、ある程度の試行は避けられないにしても、所要の費用と時間はずっと少なくなるはずである。中央のトライボロジー的プロセスの本当のブラックボックスは工具と材料間のマイクロ接触状況である。

しかし、現在このマイクロ接触状況がまだ定量的に体系化されていない段階では、要請事項を解決するためにはシミュレーション試験を行わなければならない。シミュレーション試験を行うに際しては、トライボロジー条件を完全に再現することは困難であるので、重要でないトライボロジー条件は無視せざるをえない。どの条件がシミュレーション試験に大切であるかを判断することが大

切である。シミュレーション試験法の概念図を図8に示す。エンジニアリングインプットからトライボロジー条件を適当に選択して評価実験を行い、トライボロジー結果を収集する。このデータと実機のデータとを比較し、異なる場合には界面のマイクロ接触状況を考慮しながらトライボロジー条件を調整して、実機データに近づけるようにする。両者のデータで、ほぼ満足が得られたときのトライボロジー条件がシミュレーションのための基準を与えることになる。当然のことながらシミュレーターの工具-潤滑油-材料のトライボ要素が実機と構造・機能・性質上類似するようにしなければならない。

5. 要請事項を解決するためのトライボロジー技術

図7に示すエンジニアリングアウトプットの問題を解決するためには、加工機械、工具、潤滑剤、材料などの個々のエンジニアリングインプットからトライボロジー条件を見出す努力がシミュレーション試験法などを用いてなされている。ここでは、塑性加工界面の体系である工具-潤滑剤-材料の中から個々の要素を取り上げ、要請事項を解決するために新しいトライボロジー技術がどのように開発されてきているかについて説明を加える。

5.1 工具

近年、塑性加工における加工条件が高生産性化、難加工材の使用などの観点から苛酷化しており、工具の面から見るとエンジニアリングアウトプットが寸法及びあらさ変化の結果に与える影響は大きくなってきている。その対策として耐摩耗性、耐かじり性（耐焼付き性）の向上した工具の開発に力が注がれてきており、ここ10年の間にかなり成果を挙げるところまできている。その初期には、塑性加工用の高性能工具としては切削加工用工具で使用されていた高速度鋼や超硬合金を使用することで解決をはかっていたが、塑性加工界面のマイクロ接触状況が理解されはじめ、工具の摩耗やかじりを実験的にシミュレーションできる試験法が開発されるに至って、表面処理工具を含め多品種の工具が使用できる環境が整ってきた。この開発状況を各塑性加工方法ごとに説明する。

(1) 鍛造・プレス加工用工具

表2に現在鍛造及びプレス加工用に用いられている工具材料の一覧を示す⁷⁾。耐摩耗性の観点からみると、工具材料としては炭素工具鋼、低合金工具鋼、ダイス鋼、高速度鋼、超硬合金の順に耐摩耗性に要求度の大きい順に耐摩耗性に依じて使い分けされている。この順は工具材料内部に存在する炭化物を含有する量に対応しており、機械工作が困難になるとともにコストが高くなることは言うまでもない。

一方、表2の右欄に示した表面処理材は比較的安価で強靱な工具材料の表面を硬くかつ材料と凝着を起こしにくい物質によっておおうという考え方から発展し、現在

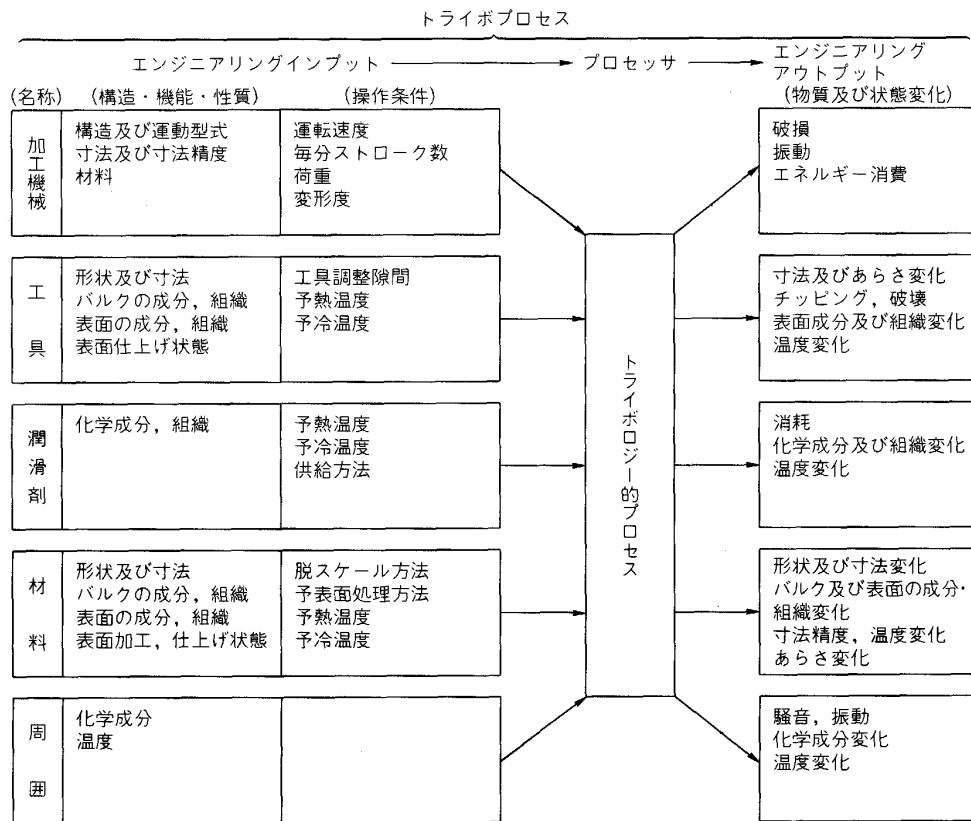


図 7 実機生産条件におけるトライボプロセスの体系

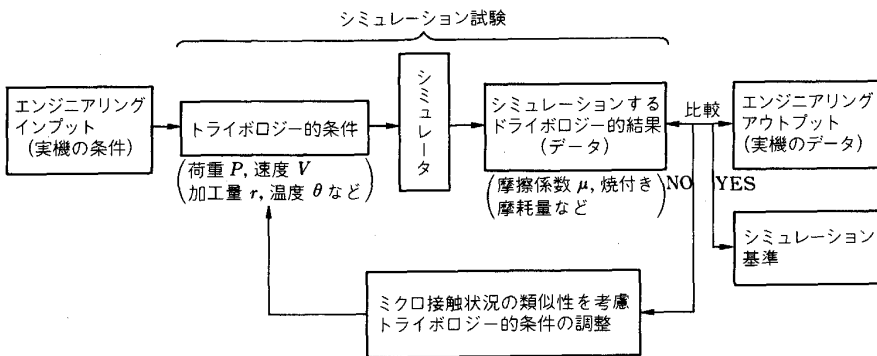


図 8 シミュレーション試験方法

では鍛造・プレス加工用には多く使用されている。現在使用されている表面処理工具は硬質クロムメッキ及び CVD, PVD, TRD (熱反応析出・拡散) プロセスによるチタンまたはバナジウムに代表される炭化物あるいは窒化物などを皮膜したものが使われている。この種の CVD, PVD, TRD の表面処理工具は他の表面処理材や工具鋼に比べて耐摩耗性, 耐かじり性に優れていることが示されている。

図 9 に軟鋼板の無潤滑での U 曲げ試験における 30 000 ショット後のダイコーナ部の摩耗量の結果の比較を示す¹³⁾。この摩耗量は幅中心部で測定した形状プロフィールから面摩耗面積を求めたものである。この結

果から CVD 及び TRD の表面処理工具の摩耗は他の表面処理工具に比べて非常に少ないことが分かる。また、軟鋼の加工において表面処理工具は耐かじり性にも優れていることが良く知られている¹⁵⁾。

しかし、これらの皮膜の弾性係数は工具鋼の約 3 倍近くあり、また熱膨張係数も母材と異なるので、加工圧力及び温度上昇によって皮膜内に応力が発生し、破壊し易くなるので使用するときには注意を払わなければならない。また、皮膜をつける工具の面仕上げが非常に重要であることが認識されている。図 10 に著者らが開発した潤滑性評価試験機¹⁶⁾による摩擦係数及び焼付きに及ぼす工具の表面粗さの影響を示す¹⁷⁾。表面処理工具にお

表 2 工具材料の組織⁷⁾

(熱処理その他の条件によって多少変動する。鋼は焼入れ状態)

種類	組織		化合物		種類	組織		化合物	
	基質	化合物	wt %	vol %		基質	化合物	vol %	
鋼	S 45 C	Fe	—	0	溶融塩 浸漬法	VC	—	100	
	SK 4	Fe	Fe ₃ C	2		NbC	—	100	
	SK 2	Fe	Fe ₃ C	4		Cr-C	—	100	
	SKS 2	Fe	M ₂₃ C ₆	3	CVD	TiC	—	100	
	SKD 61	Fe	MC+M ₆ C	3		TiN	—	100	
	SKD 11	Fe	M ₇ C ₃	13	PVD	TiN	—	100	
	SKD 1	Fe	M ₇ C ₃	19		ボライ ディング	FeB + Fe ₂ B	—	100
	SKH 9	Fe	M ₆ C+MC	14	表面 処理 材	窒化	Fe ₂₋₃ N Fe ₄ N	—	100
	SKH 54	Fe	M ₆ C+MC	14		溶射	Co	WC	90~95
	ねずみ鑄鉄	Fe	黒鉛				7~10	Ni-Cr	NiB CrB
白鑄鉄		Fe	遊離セメン タイト	30~50		Mo	—	0	
まだら鑄鉄		Fe	黒鉛+遊離 セメント	5+20		Al ₂ O ₃	—	0	
粉末高速度 工具鋼	Fe					めっき	Cr	—	0
	フェロチック	Fe	TiC	45			Ni	Ni ₃ P	40~45
	超硬	Co	WC	80~95					
Co 基合金	ステライト	Co	M ₆ C+M ₂₃ C ₆	30~40					
	アルミ青銅	Cu	FeAl	少					
銅 合 金	アンブコ	Cu	FeAl (+Cu ₂ Al)	少					
	HZ 合金	Cu	FeAl (+Cu ₂ Al)	少					

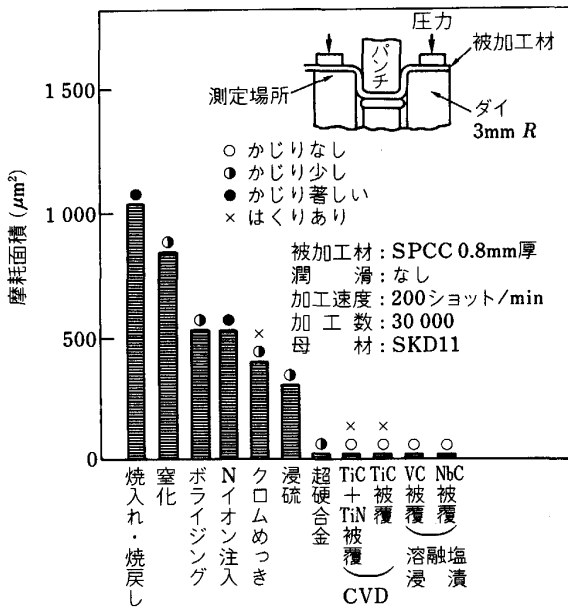


図 9 板曲げにおける各種表面処理型の摩耗量の比較¹³⁾

いても表面粗さを大きくすると、従来材に比べて耐かじり性が劣ることがあるので、表面粗さの管理が大切である。更に、軟鋼以外の潤滑の難しいステンレス鋼やアルミニウムなどの材料の加工に表面処理工具を利用しよう

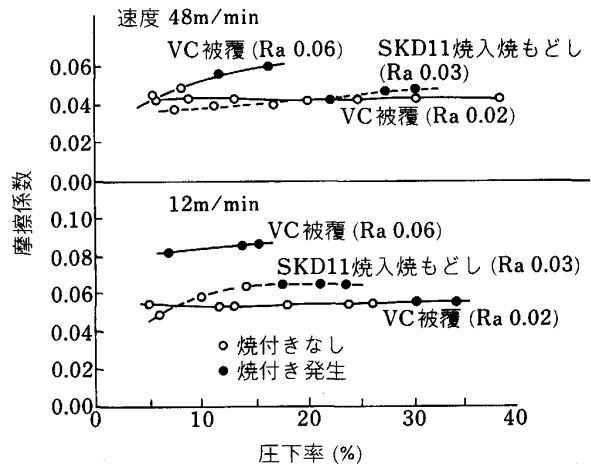
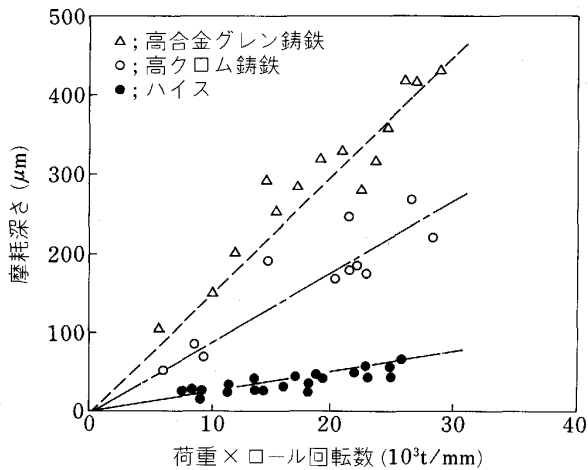


図 10 軟鋼板の摩擦係数及び焼付きに関する型面粗さの影響¹⁷⁾

と試みる場合には今後十分な評価試験を行わなければならない。

(2) 圧延用ロール

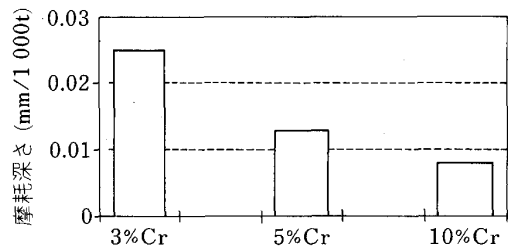
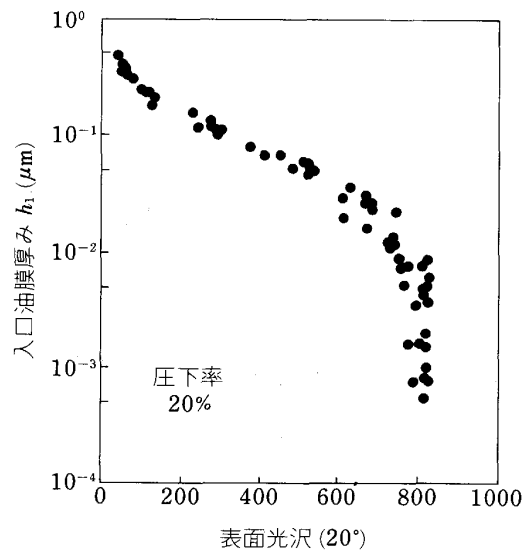
現在、圧延用ロールに最も必要とされている要請事項は、ロール原単位の向上やロール組替時間の減少を可能とするロール摩耗を減少させることである。最終的にはロールをメンテナンスフリーにする事により、将来無人化工場を可能とすることのための大きな課題である。仕

図 11 熱間仕上げ圧延ロールの摩耗¹⁸⁾

上げ熱延用ワークロールとしては前段にアダマイト系、後段にニッケルグレン鑄鉄が一般に用いられているが、耐摩耗性の点から高クロム鑄鉄や高クロム鑄鋼が用いられてきている。更に、耐摩耗性の向上のために現在ハイス系ロールの使用が検討され、一部実用に供されるまでに至っている。図 11 に示すようにハイス系ロールを使用すると従来のロールに比べ耐摩耗性が約 1/5 になることが多くのシミュレーション試験から確認されている¹⁸⁾。ハイス系ロールの製法には、鑄造法、鍛造法、粉末法があるが、その評価は現在行われているところである。鑄造法としては主に CPC (Continuous Pouring Process for Cladding) 法を利用して複合ロールが作られている。その複合ロールとは、芯材を鍛造合金鋼、外郭層をハイス材としたものである。

冷間圧延用ワークロールとしては、1.8%Cr 系鍛鋼からはじまり 3%Cr 系鍛鋼が用いられ、現在では 5%Cr 系鍛鋼が用いられてきている。この 5%Cr 系鍛鋼においても、セミハイス系や Ti 添加型などの新しいロール材料が耐摩耗性の観点から開発されており¹⁹⁾、更に、高 Cr 化の延長線上で 10%Cr 系鍛鋼が使用されている例もある。図 12 に 3%、5% 及び 10%Cr 鍛鋼を第 1 スタンドで使用したときの 1000 t 当たりの摩耗量を示す²⁰⁾。Cr の含有量が増えるごとにロール摩耗量は減少し、10%Cr 鍛鋼は 3%Cr 鍛鋼の 1/3 になっている。このような高 Cr のロール材料は難研削であるので十分注意が必要である。

一方、硬質クロムメッキした表面処理ロールが広く用いられている。クロムメッキロールを、スキンパスロールに用いると 3~10 倍の耐摩耗性の向上効果が確立され、通常の冷延ロールとして用いても約 3 倍の寿命増加が報告されている²⁰⁾。これ以上の寿命延長を考えると、新しい表面処理ロールの開発、セラミック材料の使用について研究をつづけていく必要がある。

図 12 高クロム鍛鋼ロールの摩耗²⁰⁾図 13 入口油膜厚みと表面光沢の関係²¹⁾

5.2 材料

最近、製品コストを低くし、塑性加工製品の付加価値を高める観点から、図 7 の材料のエンジニアリングアウトプットの項目のあらさ変化と寸法精度に対する要請が強い。即ち、可能な限り鏡面に近い製品及び機械加工品を同等の寸法精度を保った製品を塑性加工プロセスで作るという要請である。ここでは、主として塑性加工によって鏡面に近い製品を作るためのトライボロジー技術についてしごき加工と圧延加工を例にとって説明する。

(1) しごき加工による鏡面化

アルミニウムまたはアルミニウム合金の複写機の感光ドラムの鏡面の素管を塑性加工プロセスだけで作る要請がある。この要請を実現するための塑性加工プロセスとしては円管を最後にしごき加工する方法を用いなければならない。しごき加工のような定常加工において加工後の表面性状は、工具と材料の表面性状と界面への潤滑油の導入油量(油膜厚さ)によって大きく影響を受けることになる。工具と材料の表面がほぼ鏡面の場合、加工後の材料表面は油膜厚さによって影響を受ける。同じ定常加工である圧延加工の場合の表面光沢に及ぼす油膜厚さの影響を図 13 に示す²¹⁾。この図の縦軸の油膜厚みは、

実験値を用いてレイノルズ方程式より計算した値である。3章で示した工具と材料間のマイクロ接触状況及び潤滑メカニズムを参考にしてこの図を考察する。油膜厚みが厚くて表面光沢が低い範囲はほぼ流体潤滑であり、油膜厚みが薄くなるにつれて表面光沢が上昇する範囲は流体潤滑と境界潤滑とが混在する混合潤滑となり、油膜厚みがいくら薄くなっても表面光沢が一定の高い値を維持している範囲ではほぼ境界潤滑と考えて良い。

高い表面光沢を得るためには、この図のほぼ境界潤滑領域になるような油膜厚みに制御して、材料表面が工具の表面によって拘束される条件を作らなくてはならない。このような条件を操業上安定させることは、焼付きの発生を考えるとかなり困難であると言わざるを得ない。これをしごき加工で可能とするためには生産性を無視して、低速度で高粘度の潤滑油を使用することで可能になるとの報告がある²²⁾。それとは別に、内面しごきにより円筒の表面を鏡面化しようとする試みもなされている²³⁾。しかし、もう一度3章でのマイクロ接触状況をよく検討して見ると、しごき加工界面での焼付きを防止し、鏡面の表面の製品を作る方法をしてマイクロ塑性流体潤滑のメカニズムの利用が考えられる。即ち、鏡面の工具で表面に適度な凹部をもつ材料をしごく時、入口部では動力学的な導入油量の他に材料表面凹部にも潤滑油が捕捉されて加工界面へ導入される。加工域が凹部以外の接触領域において焼付きが発生しそうなときに凹部から捕捉された潤滑油がそのような接触域へ浸出することにより焼付きを防止し、出口部で凹部が消滅するメカニズムである。この方法により高い表面光沢の複写機ドラムを作った例を写真2に示す²⁴⁾。これはアルミニウム合金パイプを押し出しにより作り、しごき加工の前に表面をアルカリ腐食により適度の凹部をつけ、しごき加工を行うものである。

(2) 圧延加工による鏡面化と表面制御

最近のステンレス鋼やアルミニウム箔圧延においては、生産性を向上して表面光沢の優れた製品を高圧延速度あるいは大径ロールで生産する要請がある。前にも述べたようにロール及び材料表面が鏡面の場合には導入油量によって表面光沢が影響を受けるので、高圧延速度、大径ロールにおいても高い表面光沢を維持するためには圧延油の粘度を低く抑えることしか解決の道はない。その場合、焼付きが発生し易い条件になっているので圧延油の添加剤及び冷却に極力注意を要する。

更に、ステンレス鋼の冷間圧延のように8から12パスで圧延されている場合には、熱延上がりの凹凸の激しい表面をどのように平滑化していくかと各パスでのロールの表面あらしをどのように管理するかが大きな鍵となる。一般に加工方向に凹凸のみぞを持った材料の方がランダムな凹凸や幅方向の凹凸のみぞを持った材料より平滑化され易いとの報告が多くされている。図14に

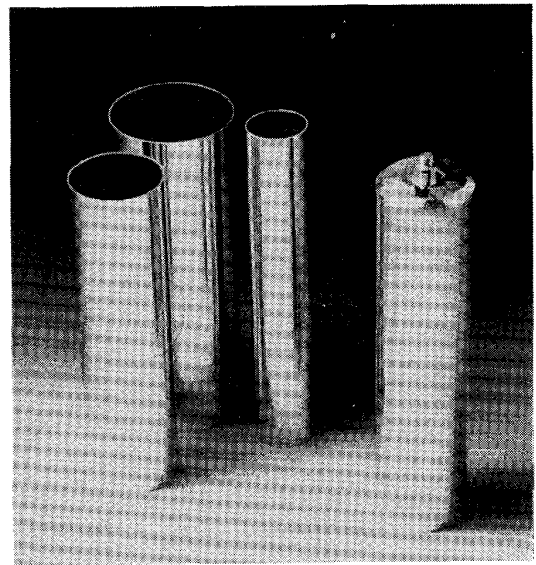


写真2 ミクロ塑性流体潤滑を利用して作られたアルミニウム複写機ドラム²⁴⁾

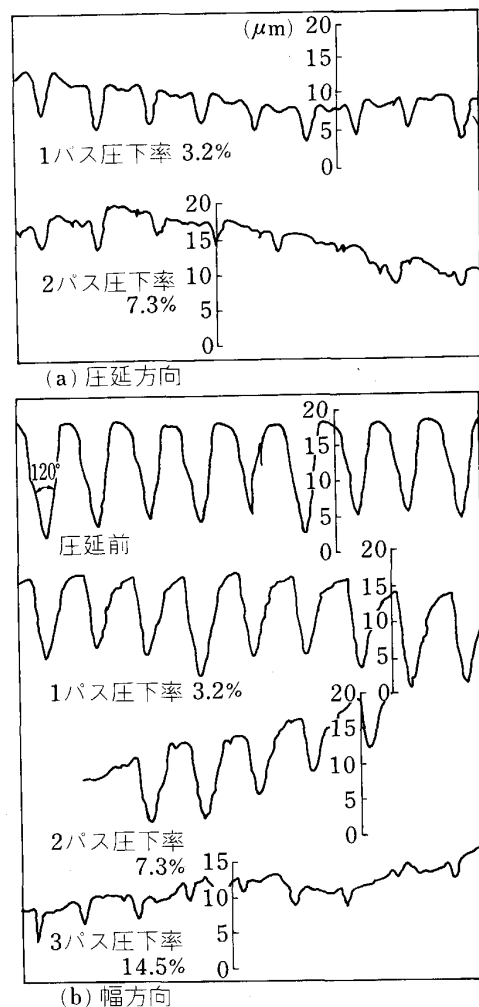


図14 グリース潤滑で圧延後のみぞのプロフィール²⁵⁾

Atala らの結果を示す²⁵⁾。圧延方向に凹凸の縞模様を持った材料の方が、幅方向の凹凸の縞模様を持った材料に比べて低い圧下率から容易に平坦化されることを示している。この結果から、ステンレス鋼の冷間圧延においては初期のパスで圧延方向に大きな研磨みぞを持ったロールにより熱延上がりの大きなランダムな凹凸を表面を持った材料を圧延し、その後のパスでどのようにその圧延方向の凹凸を平滑化していくかが今後の研究の対象となろう²⁶⁾。

つづいて、加工プロセスの中で最も制御化された圧延プロセスにおいて最後に残されていた材料表面の管理と制御の問題が最近クローズアップされてきている。現在、傷検出という観点から自動検出装置の導入がはかられているが、一般には人間の目によって行われているのが現状である。材料表面を管理・制御するためには、表面性状をオンラインによって検出するためのセンサーの開発とその計測値をパラメーターとして制御するための定量的な関係式の導出が必要である。現在、板表面光沢の制御システムの提案や表面性状のオンライン計測システムの開発が行われ始めたので、この分野の今後の発展が期待される²¹⁾²⁷⁾。図 15 に著者らの開発しているオンライン表面計測のためのレーザ光を用いる装置の概念図を示しておく。

5.3 潤滑剤

塑性加工におけるトライボプロセスによって発生した問題を解決するためにとられる最初の対策としては、ほとんどの場合潤滑剤をいじることで始まることが多い。

ここでは大きな流れについての簡単な説明にとどめることにしたい。潤滑剤に要請されている多くのことは昔と今も変わらないが、最近作業環境を改善したいという新しい要請を伴う潤滑剤の開発、製品のコスト低下のための新しいプロセスに伴う潤滑剤の開発、生産性を向上するための潤滑剤の開発が大きな流れとなっている。

作業環境の改善としては、熱間鍛造における黒鉛系潤滑剤に代わる白色潤滑剤の開発の要請が一番に挙げることができる。黒鉛に代わるものとしては、高分子樹脂、短鎖状合成重合体、低融点ガラスなどを用いた新しい潤滑剤が開発されている²⁸⁾。また、冷間鍛造に用いられているりん酸皮膜処理に代わる液体潤滑油の開発が、環境改善、コスト低下の点から要請されており、りん酸エステルとりん酸を併用した新しい冷間鍛造用潤滑油が開発されている²⁹⁾³⁰⁾。

生産性の向上としては、タンデムミルを用いたステンレス鋼冷間圧延において高い表面光沢を維持しつつ耐焼付き性の優れた圧延油としてマイクロエマルジョンが登場しているが、一方従来の高い表面光沢を作るエマルジョン油で耐焼付き性を向上させる圧延油の開発もされている。

以上、個々の要素の最近のトライボロジー技術につい

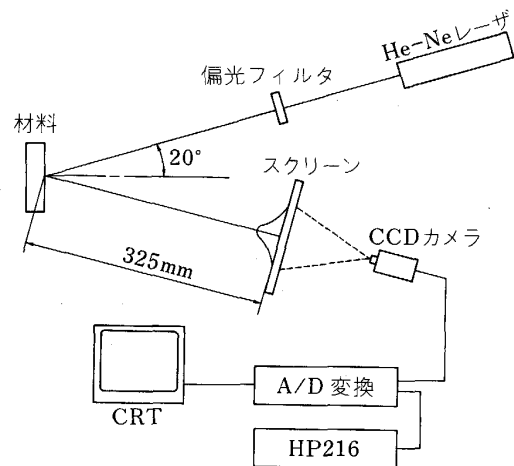


図 15 オンライン表面計測のためのレーザ光を用いた装置の概念図²⁷⁾

て説明したが、実際には工具-潤滑油-材料の一つの体系の中で考えられるべきである。特に、全ての塑性加工プロセスにおいて最も大切である焼付きを解決するためには、工具-潤滑油-材料の要素を総合的に把握したシミュレーション試験法を開発しなくてはならない。本稿においては、紙面の都合により焼付きに関連した説明を省略する。

6. おわりに

著者の最初の考えでは、最近開発された塑性加工におけるトライボロジー技術が従来の試行錯誤的な方法ではなく、塑性加工のマイクロ接触状況及び潤滑メカニズムを把握した上に成されてきているとの例を示すはずであった。見直してみると、まだまだ不十分な点が多いことに気づくばかりである。最後に、今後更に新しいトライボロジー技術が開発されることを期待するものである。

文 献

- 1) 曾田範宗: 塑性と加工, 7 (1966), p. 249
- 2) 曾田範宗: 日本機械学会誌, 62 (1959), p. 1498
- 3) 小豆島明: 第 93 回塑性加工学会シンポジウムテキスト (1984), p. 11
- 4) 小豆島明: 塑性と加工, 29 (1988), p. 492
- 5) 水野高爾: 第 38 回塑性加工講座テキスト (1984), p. 1
- 6) J. F. T. Bishop: J. Mech. and Appl. Math., 171 (1956), p. 245
- 7) 塑性加工におけるトライボロジー (日本塑性加工学会編) (1988), p. 83 [コロナ社]
- 8) 春日保男, 山口勝康, 加藤勝人: 日本機械学会論文集, 33 (1967), p. 1294, p. 1302, p. 1309
- 9) 工藤英明: 塑性と加工, 13 (1972), p. 529
- 10) T. Mizuno and M. Okamoto: Trans. ASME, Ser. F, 104 (1982), p. 53
- 11) 阮 鋒, 工藤英明, 坪内昌生, 堀 隆弘: 塑性と加工, 28 (1987), p. 41
- 12) 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** (1989), p. 1631
- 13) 工藤英明, 小豆島明: 塑性と加工, **27** (1986), p. 72
 - 14) 文献 5), p. 170
 - 15) 新井 透, 土屋能成: 昭 61 春塑加講論 (1986), p. 143
 - 16) 小豆島明: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 696
 - 17) 但馬浩一郎, 早川 徹, 小豆島明: 平 3 春塑加講論 (1991), p. 389
 - 18) 橋本光生, 吉田幸一郎, 大友清司, 倉橋隆郎: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 450
 - 19) 小林 真, 山田恭裕, 古角文雄, 植田憲治, 青木賢一: 同上, p. 470
 - 20) 出石智也: 塑性と加工, **32** (1991), p. 458
 - 21) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴, 出川浩樹: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 576
 - 22) 村川正夫, 古閑伸裕, 大川陽康: 塑性と加工, **30** (1989), p. 365
 - 23) 河合 望, 斎藤正美, 堂田邦明, 林 伸和, 榎津 豊, 王 志剛: 平元春塑加講論 (1989), p. 407
 - 24) H. Kudo and A. Azushima: Proc. 2nd ICTP (1987), p. 373
 - 25) H. F. Atala and G. W. Rowe: Wear, **32** (1975), p. 249
 - 26) 小豆島明, 鈴木 肇: 平 2 春塑加講論 (1990), p. 265
 - 27) 小豆島明, 鈴木 孝: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 1376
 - 28) 中村 保, 石橋 格: 月刊トライボロジ (1990) 12, p. 10
 - 29) 小松崎茂樹, 小松豊翁, 奈良原俊和: 塑性と加工, **29** (1988), p. 748
 - 30) 大森俊英, 川村益彦: トライボロジスト, **35** (1990), p. 181