

塑性加工におけるトライボロジーの課題と展望

Topics and Review for Tribology in Metal Forming Processes

中村 保*

Tamotsu NAKAMURA

Synopsis: Tribological problems influence working load, surface finish of work-metal, tool life and so on in metal forming processes. The friction resistance should be reduced or controlled to obtain optimum metal flow. The seizure on the interface between tool and work-metal should be avoided absolutely. The tool wear should be reduced to prolong tool life. The contact mechanisms on interface between tool and work-metal are investigated, and the friction rules are discussed, for examples, friction coefficient constant or friction shear factor constant. Furthermore, wear mechanism and seizure mechanism are discussed. The tribo-mechanisms are investigated in case of liquid lubricants, solid lubricants in cold metal forming and hot metal forming processes. Some tribo-simulators are introduced in sheet metal forming and forging processes. Some environmentally friendly lubricants cold and hot forging processes are reviewed.

Key words: tribology, metal forming, tribo-mechanism, tribo-simulator, environmentally-friendly lubricant

1. はじめに

1.1 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、低コストで生産性よく製作することが要求される。図1に示すように、塑性加工のトライボロジーの役割は、素材にとっては摩擦抵抗の低減・管制による材料流動制御と成形性向上、製品にとっては表面仕上げりと精度の向上、工具にとっては破損・焼付き・摩耗防止による工具寿命の向上である。これらの役割を果たすためには、図に示すような種々の影響因子を考慮して、最適にコントロールしなければならない。

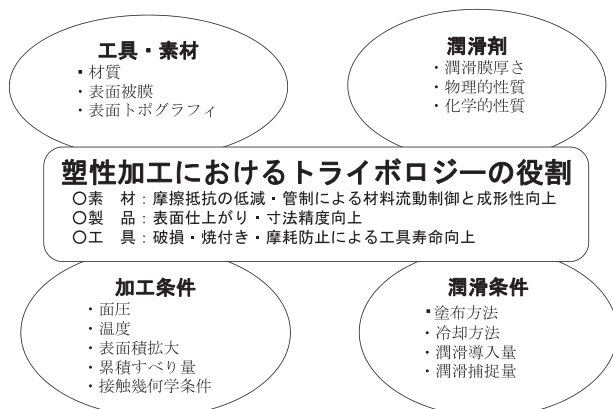


図1 塑性加工におけるトライボロジーの役割と各種影響因子

最近では、特に歯車などの運動継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、工具と素材の接触界面の温度がきわめて高くなるため、特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、すべ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、

原稿受付日 2017年3月31日

* 静岡大学工学部 名誉教授

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、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¹⁾。

さらに、塑性加工では、加工が進むに伴い、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 ($R_z=10^{-7}\text{m}$ オーダー) から自動車ボディ表面 ($R_z=10^{-5}\text{m}$ オーダー) まで幅広く分布している。特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トライボロジー関連の課題は、プロセス条件、接触の幾何学条件、潤滑条件、および工具と素材の条件などに影響されて現れるため、それらの課題の解決には、それらのトライボロジー現象を支配するメカニズムの解明とトライボ特性の評価、およびそれに基づいた潤滑剤、工具材料、工具表面処理などの開発が必要となる。

1.2 塑性加工に起因するトライボロジーの特徴

表1は、代表的な塑性加工における摩擦条件範囲を示したものである²⁾。板材成形の摩擦条件は、鍛造や押し出しのように大きな塑性変形を受ける加工に比較して、あまり厳しくないと考えられている。表に示すように、素材の降伏応力に対する工具面圧比 p/Y は1以下、素材の表面積拡大比 $R_s=A/A_0$ は0.5から1.5程度と小さく、また加工速度も 10^{-1}m/s (相対すべり速度 $=10^{-1}\text{m/s}$ 程度) まで、摩擦面温度も 150°C 以上になることはまれである。そのため、最近では薄板の曲げ、張出し、深絞りなどの成形において、塑性変形量や相対すべり量が小さい場合には防錆油をそのまま潤滑剤として流用する割合が増えている。しかし、例えば深絞りや張出し成形における成形限界の向上のためには、摩擦抵抗の低減や管制は依然として重要であり、また高張力鋼板、チタン板およびステンレス鋼板などの成形においては焼付きの抑制や製品表面損傷の防止といった課題がつねに顕在化してくる。さらに、 1500MPa 級以上の超高張

力鋼板の成形は、ホットスタンピングと呼ばれ、熱間状態で行われる場合が増加しているため、鋼板のメッキ処理方法や潤滑剤および潤滑方法の改善が重要になっている。

引抜き・しごき加工では、工具面圧比 p/Y は1~2程度、表面積拡大比 R_s も2程度までであるが、工具と素材の相対すべり速度は 10m/s の高速に達する場合があります。摩擦面温度は 300°C 以上に達することがある。その場合には、化成皮膜処理と金属せつけん潤滑で、超合金ダイスの使用が避けられない。特に引抜きでは、摩擦力の増加は引抜き力の増加、ひいては限界引抜き率の低下をもたらす。圧延では、工具面圧比は1~2程度、表面積拡大比も2程度まで、加工速度も 10m/s の高速に達する場合があります。引抜きと同程度であるが、ロールと素材の相対すべり速度は1けた小さい。そのため、摩擦面の温度上昇は、 200°C 程度まで、潤滑剤の導入量も引抜きに比較して多いため、ほとんどの場合、液体潤滑剤で間にあう。ただし、圧延の場合には、ロールと素材の摩擦力が素材のかみ込み力となるため、かみ込み限界以上の摩擦力が必要となる。

表1 塑性加工の摩擦条件範囲²⁾

加工法 条件因子	板材加工	引抜き・しごき 加工	圧延・回転加工	鍛造・押し出し加工
面圧 p (MPa) (面圧比 p/Y^*)	1~100 程度 (0.1~1 程度)	100~1 000 程度 (1~2 程度)	100~1 000 程度 (1~3 程度)	100~3 000 程度 (1~5 程度)
加工速度 v (m/s) (すべり速度 v_r)	10^{-2} ~ 10^{-1} のオーダー (0 ~ 10^{-1} のオーダー)	10^{-2} ~ 10 のオーダー (10^{-2} ~ 10 のオーダー)	10^{-2} ~ 10 のオーダー (10^{-2} ~ 10^0 のオーダー)	10^{-4} ~ 10^{-1} のオーダー (0 ~ 10^{-1} のオーダー)
摩擦面温度 T ($^\circ\text{C}$)	室温~ 150 程度	室温~ 300 程度	室温~ 200 程度 温・熱間温度	室温~ 400 程度 温・熱間温度
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)

* 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

圧延、引抜きなどと比較して、鍛造や押し出しでは、金型による素材の変形拘束が強く、高い圧縮応力状態で加工するため、工具面圧は素材降伏応力 σ_y の5倍程度、すなわち 3GPa 程度まで上昇する場合があります。また、きわめて大きな塑性変形が与えられるため、素材表面積拡大比 R_s は100以上に達する場合があります³⁾。また、鍛造では、据込み、軸押し出し、缶のせん孔などの形式、あるいは鍛造の部位によって、摩擦に直接影響を及ぼす条件(工具面圧 p 、表面積拡大比 R_s 、相対すべり量 ΔV 、温度 T など)が大きく変化する。例えば、円柱素材の据込み端面では、面圧 p は素材降伏応力 σ_y の1~1.5倍程度、表面積拡大比 R_s は最大でも2倍程度であるが、 R_s は外周で最大となり据込み量程度となる。これに対して、缶のせん孔におけるパンチ頭部では、面圧 p は素材降伏応力 σ_y の5倍程度、表面積拡大比 R_s はせん孔深さによっては100以上となる場合がありますが、相対すべり

量 ΔV はきわめて少なくなる。歯形のような突起プロフィール形状の鍛造では、歯先の丸み外端部で局所的にきわめて大きな表面積拡大が生じる⁴⁾。

以上のように、塑性加工のトライボロジーは、塑性加工の方法、加工条件、工具と素材の材質と表面状態、潤滑剤の種類と供給方法等によって、工具と素材の接触機構や摩擦特性が大きく変化すると考えられる。そこで、本稿では、まず塑性加工の工具と素材の接触について、ドライ、液体潤滑、固体潤滑の各摩擦・潤滑条件における接触機構と摩擦法則について考察する。また、塑性加工独特の摩擦条件下におけるトライボロジー特性を計測するためのトライボシミュレーターについて解説する。その上で、環境負荷軽減のため、油性潤滑剤による潤滑方法の改善、化成皮膜型潤滑剤の環境負荷軽減、および簡易塗布型潤滑剤開発・実用化の状況について紹介する。

2. 工具と素材の接触機構と摩擦法則

2.1 摩擦特性値

塑性加工における摩擦特性値として、摩擦係数 μ あるいは摩擦せん断係数 m のいずれを使うのが合理的か、春日らが提案した接触モデル⁵⁾に基づいて、工具によって圧下修正された境界潤滑状態にある、いわゆる真実接触面における摩擦せん断応力 $\tau_f = mk$ (一定) を仮定して、デンマーク工科大学のProf. Bay & Prof. Wanheim⁶⁾ が、図2に示すような摩擦法則のモデルを提案し、これが塑性加工における標準の摩擦法則として、多くの研究者や技術者に用いられてきた。しかし、 $\tau_f = mk$ (一定) の仮定が本当に成り立つのか、また素材全体が塑性変形すると工具と素材の接触率 R は増加するといわれているが、その場合の摩擦法則は変わらないのかという疑問は残されたままであった。この摩擦法則の課題に対して、最近、王ら⁷⁾ が、一石を投じる研究結果を提出している。

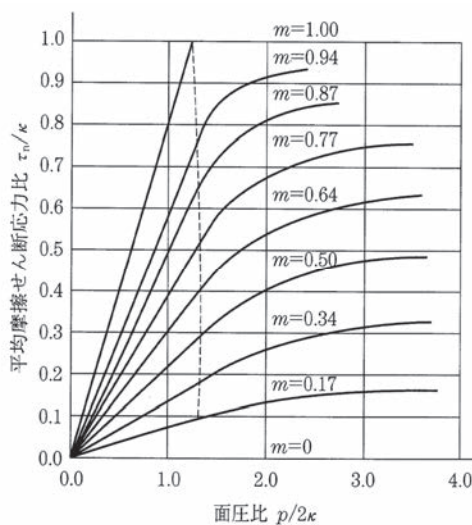


図2 素材表面突起押つぶしモデルによる摩擦法則 (Bayら⁶⁾)

図3に示すように、母材が塑性変形すると接触率 R は急増するが、図4に示すように、摩擦せん断応力 τ_f はそこに作用する面圧 p_r に比例して増加するため、境界潤滑面における摩擦係数 μ_b =一定説を提示した。この場合、見かけの接触面における平均摩擦せん断応力 $\tau_a = \mu_r \cdot R$ 、平均面圧 $p_a = p_r \cdot R$ となる。すなわち平均の摩擦係数 μ_a は、 $\mu_a = \mu_b$ (一定) となり摩擦係数一定則が明確に示された。王らは、図5に示すように、全面接触 (接触率 $R=100\%$) に達するまでは μ_a =一定、それ以上の面圧では摩擦せん断応力 τ_a =一定という実験結果を提示している。

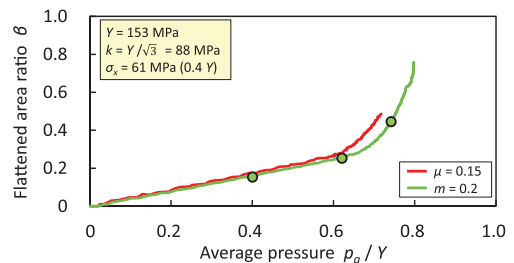
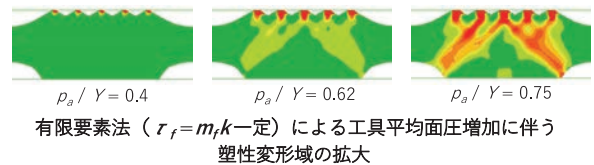


図3 工具平均面圧の増加に伴う接触率の増加⁷⁾

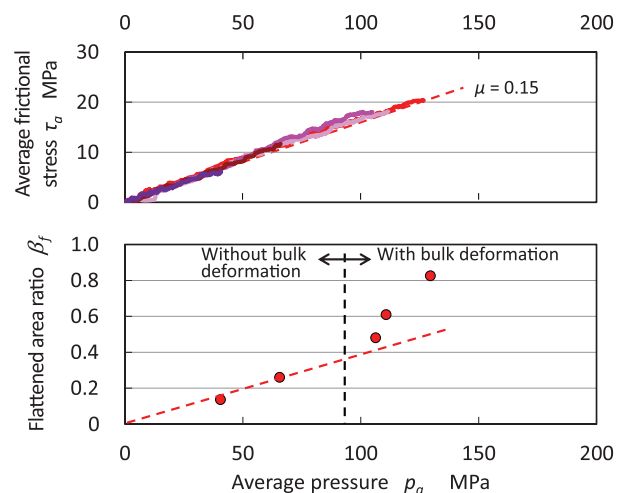


図4 摩擦試験における工具平均面圧の増加に伴う平均摩擦せん断応力と接触率の変化⁷⁾

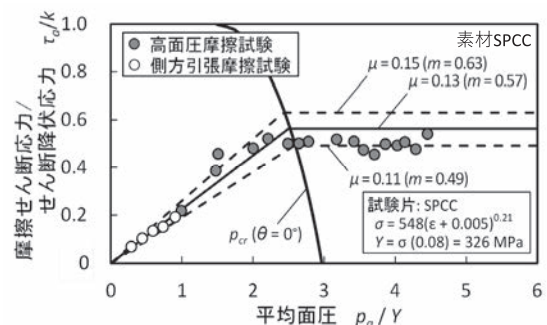


図5 ドライ加工における摩擦法則⁷⁾

2.2 摩耗特性値

塑性加工工具の摩耗特性値の評価尺度については、水野が資料として丁寧にまとめている⁹⁾。摩耗量を表す評価尺度は、摩耗体積 W [m³]あるいは摩耗深さ d_w [m]である。摩耗率 w は、摩擦滑り距離 L [m]当たりの摩耗体積 $w=W/L$ [m²]、あるいは摩耗深さ $w=d_w/L$ [-]で表される。比摩耗量 w_s は単位荷重 P 当たりの摩耗率として、 $w_s=W/PL=w/P=d_w/p_mL$ で表わされる。摩耗の発生機構として、凝着摩耗、研摩摩耗、腐食摩耗、疲労摩耗が考えられるが、塑性加工における工具の摩耗は、次式のようなHolm⁹⁾あるいはArchard¹⁰⁾の摩耗式によって律速されると考えられる。

$$w=K(PL/H)=K(p_mL/H) \quad (1)$$

ここで、 p_m [N/m²]は平均面圧、 H は工具の硬さで p_m と同じ単位[N/m²]で表すと、摩耗係数 K [-]は無次元となる。

2.3 焼付き特性評価尺度

塑性加工において工具と素材間の局所的な凝着から焼付きに発展する場合に、その焼付き程度を定量的に評価するための特性値あるいは評価尺度については、まだ十分に議論されたことがないため、共通の焼付き特性値は定められていない。トライボロジー研究者、塑性加工技術者ごとに、塑性加工後の製品や工具の表面状態を観察して、焼付き程度を無・小・中・大のように定性的に分類して評価したり、その焼付き面積率や表面粗さを測定して評価したりする程度である。また、焼付きが発生すると、焼付き部の摩擦係数等の摩擦特性値が急激に増加するため、その摩擦係数 μ の急増によって評価する方法も提案されている¹¹⁾。

$$\mu=\mu_b(1-\gamma_w)+(k/p_m)\gamma_w \quad (2)$$

ここで、 μ_b は境界潤滑の摩擦係数、 γ_w は焼付き面積率、 k は素材のせん断降伏応力、 p_m は平均面圧である。

3. 液体潤滑剤の潤滑機構

液体潤滑剤による潤滑機構については、古くから多くの研究が行われてきた。図6 (a) は典型的な混合潤滑状態の摩擦面で、平坦な工具面で圧下修正された境界潤滑部と液体潤滑剤が封入されたマイクロプール部からなる¹²⁾。図7は、この混合潤滑状態を表すモデル図を示すが、境界潤滑部では工具凸部の掘起し等によって潤滑膜の破断が生じ、ミクロナ凝着が生じていると考えられてきた。図8は、素材に酸化被膜を形成しナノサイズの球状工具を押込んだ場合に、スズ酸化被膜が破壊され、母材のスズが一部染み出した状況を示したSEM写真である¹³⁾。図9は、表面突起同士の間接接触によって表面積が拡大し、スズ酸化膜が破壊して下地のスズが染出しスズ同士の直接接触が生じる様子を、FEMシミュレーションによって再現したものである¹⁴⁾。図9の右側の図に示すようにスズ同士の直接接触が生じた瞬間に、接触電気抵抗が酸化膜の抵抗 $10^6\Omega$ 程度から急激に2

Ω 程度まで低下することが確認される。すなわちスズ同士の凝着が生じることを表す証左と考えられる。

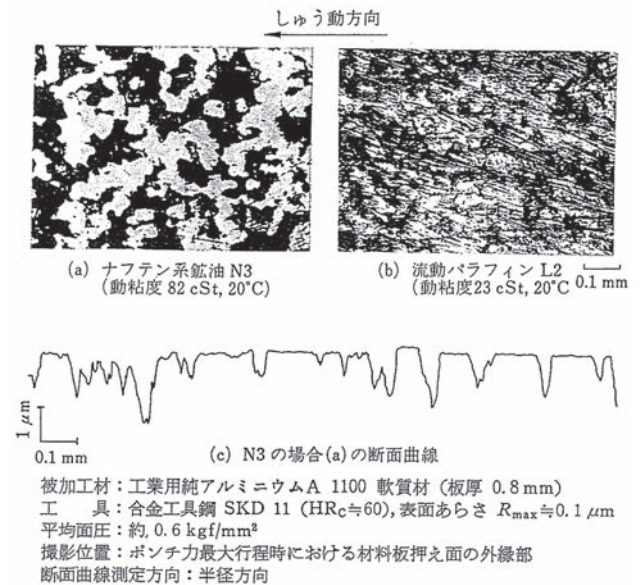


図6 深絞りしわ抑え面における被加工材摩擦面¹²⁾

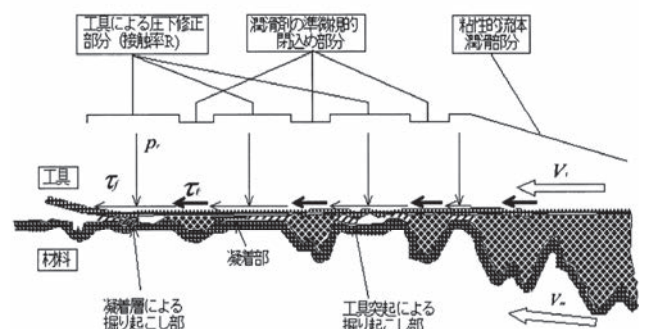


図7 混合潤滑状態を表す工具-素材接触界面モデル¹²⁾

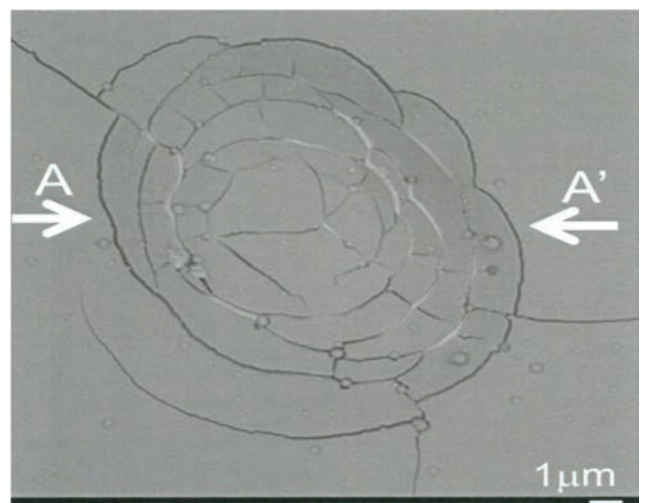


図8 ナノサイズ突起の押込みによるスズ素板上のスズ酸化膜の破壊¹³⁾

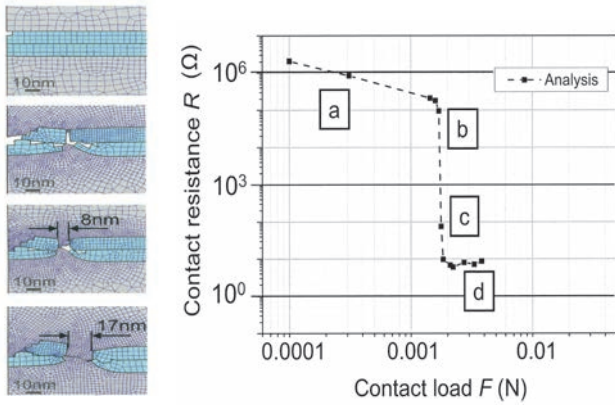


図9 スズ酸化膜の破壊現象と接触電気抵抗の変化を示す有限要素法解析シミュレーション¹⁴⁾

境界潤滑膜の強度が弱く破損しやすい流動パラフィンのような潤滑剤を用いた場合には、図6 (b) に示すように、図9のミクロ凝着部の摺動による顕著な表面損傷が生じることになる。いわゆる型かじり現象の発生である。

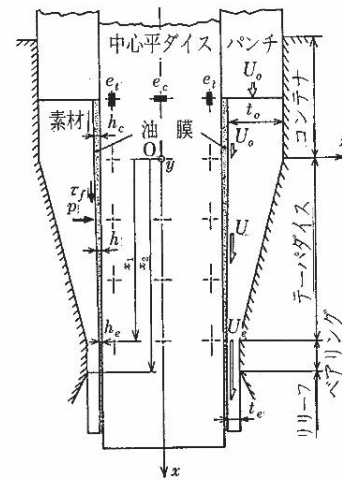
冷間鍛造では、表1に示したように、工具面圧が降伏応力の数倍、摩擦面温度もかなり高く、素材表面積が顕著に拡大するため、液体潤滑剤のミクロプール部はほとんどなくなり、境界潤滑状態が広範囲を占めるようになる。このような潤滑状態で工具表面凸部の摺動等が生じると、潤滑膜や酸化膜の破断が顕著になり、素材の一部が工具面に移着して大規模な焼付きに至る。著者らは¹⁵⁾、図10に示すような前方押し型摩擦試験機を用いて、焼付き発生機構の解明を行った。その結果、図11に示すように、加工初期に塗布した潤滑剤の平均膜厚 h_e が押し出し行程に伴う表面積拡大によって減少し、とくに押し出し出口付近の h_e が工具表面粗さ $R_z=0.2\mu\text{m}$ 程度に達すると焼付きが発生することが明らかになった。この焼付き発生の臨界油膜厚さは工具表面粗さに伴い増加することが確認されている¹⁶⁾。

水野らは、塑性加工特有な母材塑性変形を伴う条件では、図12に示すように、ミクロプール部の潤滑剤が平坦化された境界潤滑部に浸出するという微視的塑性流体潤滑状態 (Micro Plasto Hydro-Dynamic Lubrication) が現れることを示した¹⁷⁾。このMPHLでは、境界潤滑部に極薄い潤滑膜が形成されるため、摩擦係数 μ が0.01のオーダーまで低下するとともに、相対滑り速度 V_s の増加に伴い μ が増加する特性を示す。

Mengら¹⁸⁾は、素材の塑性変形と潤滑剤の流体流れを連立させた有限要素解析FEMシミュレーションにより、円柱素材の据込みにおける潤滑膜の挙動を解析した。素材は粘塑性体、潤滑剤ニュートン流体または限界せん断応力 τ_L を考慮した非ニュートン流体を想定して解析している。

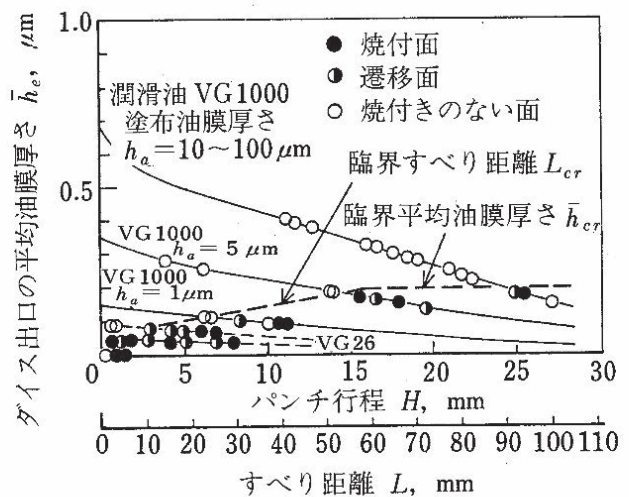
今後は、素材塑性変形による表面粗れ現象、工具の突起による掘起し現象、流体潤滑特性、境界潤滑状態におけるミクロ凝着現象、さらにそのミクロ凝着が大規模な焼付き

発生に至る現象を、基礎的なトライボロジーの課題として捉え、系統的に研究することが期待される。



工具：SKD 11 (HRC≒60)，素材：アルミニウム A 1050，押し出し比：3.7，パンチ速度：0.01 mm/s，潤滑剤：パラフィン系鉱油 (VG 2, 26, 1000)

図10 前方押し型摩擦試験法¹⁵⁾



工具表面あらさ： $(R_{max})_T \doteq 0.3\mu\text{m}$ ，
素材表面あらさ： $(R_{max})_W \doteq 2\mu\text{m}$

図11 常温の前方押し型摩擦試験における焼付き発生の臨界膜厚条件¹⁵⁾

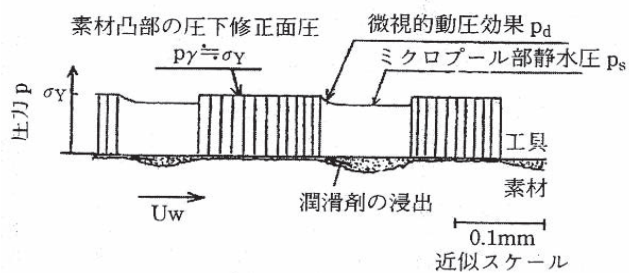


図12 微視的塑性流体潤滑のモデル図¹⁷⁾

4. 固体潤滑剤の摩擦特性と潤滑機構

図13 (a) は、粉末状態の各種固体潤滑剤を金型内に閉じ込めて摩擦試験用アンビルに押し付け、アンビルを摺動した場合の面圧 p と摩擦せん断応力 τ_f を測定した結果である。いずれの固体潤滑剤も τ_f は p とともに増加している。その結果を摩擦係数 $\mu = \tau_f/p$ として整理すると、図13 (b) のようになる¹⁹⁾。摩擦係数は潤滑剤毎にほぼ一定で、ポリテトラフルオロエチレンPTFE (通称テフロン) が $\mu = 0.01 - 0.02$ 程度、超高分子量ポリエチレンUHMWPEが $\mu = 0.03 - 0.04$ 程度、二硫化モリブデン MoS_2 が $\mu = 0.04 - 0.06$ 程度、黒鉛が $\mu = 0.08 - 0.11$ 程度となっている。これらの摩擦係数は、かなり平滑な工具 (表面粗さ $R_z = 0.2 \mu\text{m}$) を用いた場合の値であるが、少し粗い工具 (表面粗さ $R_z = 0.5 \mu\text{m}$) を用いると、UHMWPEでも $\mu = 0.08 - 0.13$ 程度まで高くなる。

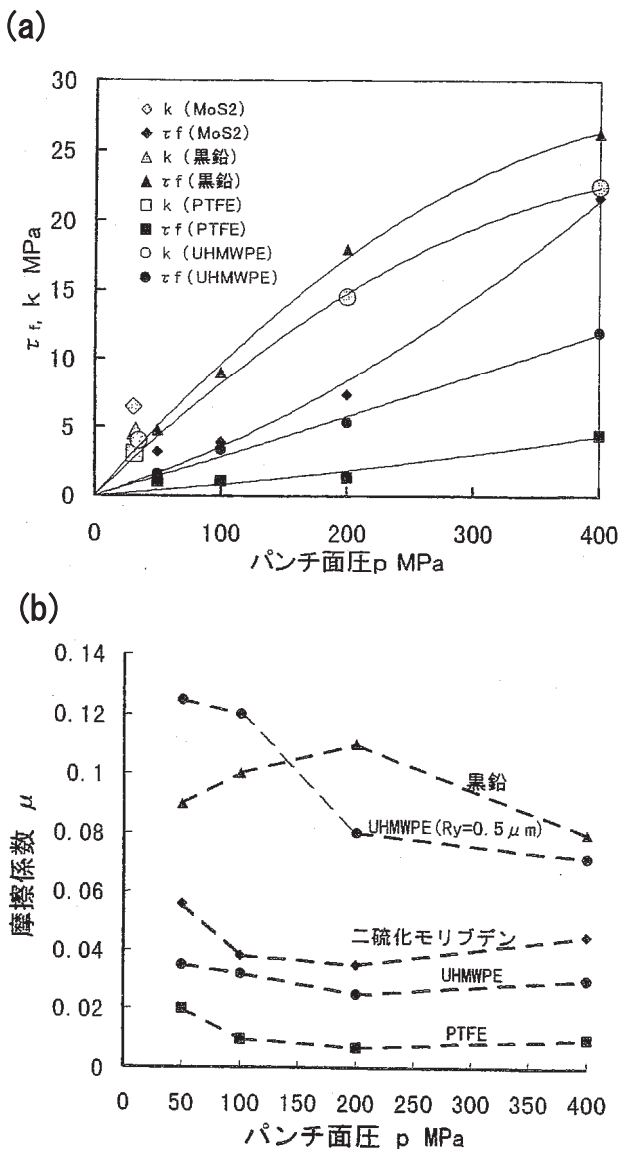


図13 固体潤滑剤のせん断変形特性と摩擦特性¹⁹⁾

図14は、円板の据込みにおける固体潤滑皮膜の潤滑挙動を示したものである¹⁹⁾。素材中心部の潤滑膜は界面に閉じ込められてその膜厚さはほとんど減少しないが、外周部では素材の表面積拡大に伴って潤滑剤が押し出され、その膜厚さは顕著に減少する。固体潤滑剤が素材に強固に密着し、工具面との滑り性が良い条件では、最外周の潤滑膜厚さは数 μm 程度残留する。これに対して、素材との密着性が悪く工具面との滑り性が悪い場合には、潤滑膜は素材の拡大に追従できず、外周部で工具と素材の直接接触が生じることが確認されている。冷間鍛造において最も優れた潤滑剤として多用されてきたリン酸塩皮膜+金属石けん潤滑剤 (通称ボンテライト・ボンダリユーベ) は、図15に示すように、化学的処理により母材に強固に密着して結晶組織を示すリン酸塩皮膜層とその上に金属石けん層が形成されている²⁰⁾。母材の塑性変形に伴い大きな表面積拡大を生じてもリン酸塩皮膜は追従して皮膜を維持し、金属石けんは工具との滑りを良くする働きをしている。図16に示すように、この潤滑剤の摩擦係数は $\mu = 0.05$ で、ほぼ一定となっている²¹⁾。

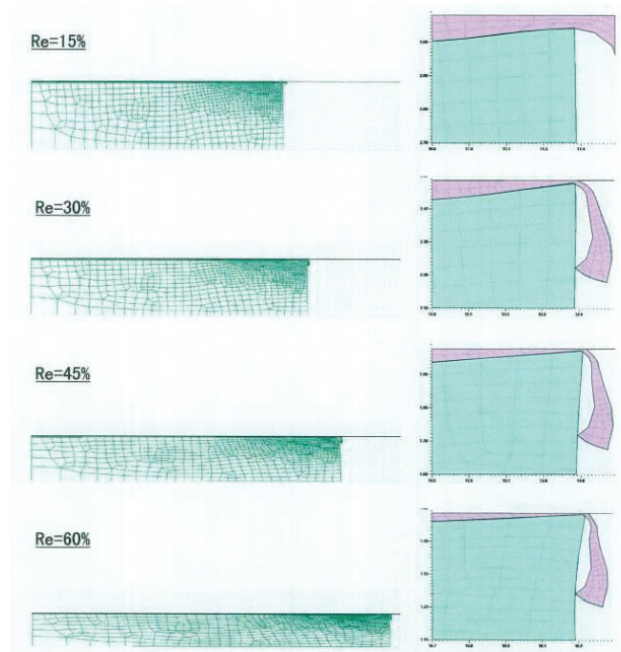


図14 円板の据込みにおける固体潤滑剤皮膜の潤滑挙動¹⁹⁾

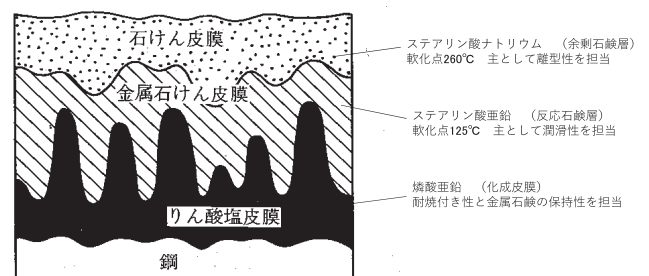


図15 リン酸塩皮膜+金属石けん潤滑剤の構造²⁰⁾

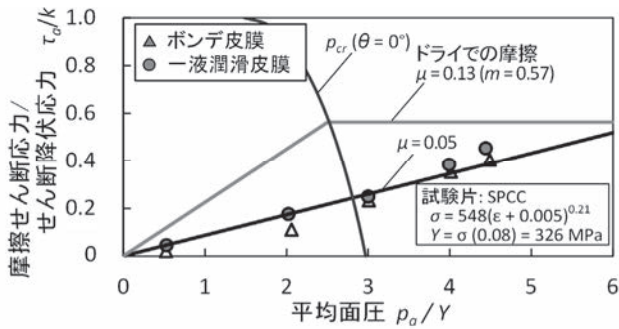


図16 固体潤滑皮膜の摩擦特性²¹⁾

王ら^{22,23)}は、据込み-前方カップ押し出し型摩擦試験法を開発して、固体潤滑膜の耐焼付き性能に及ぼす金型表面粗さおよび素材の下地表面処理方法の影響について解明を試みている。工具表面粗さを突出山部高さ R_{pk} で表すことにより、図17に示すように、焼付き発生状態を3Stageモデルで整理することができる。Stage Iでは工具の突出山部が固体潤滑の領域内にあるため焼付きが発生しないが、Stage IIでは、一部の突出山部が素材に食込んで、掘起し効果等により、焼付き発生リスクが高まる。一方、素材皮膜形成前の下地表面処理方法として、大きなショットプラストによる大きな凹凸形状に微細粒プラストによる細かな凹凸を付与した場合に、1液簡易塗布型潤滑剤の耐焼付き性能が大幅に向上することを確認している。

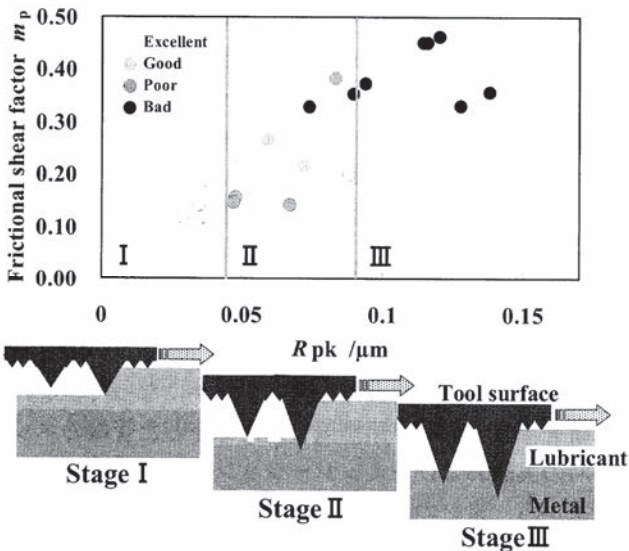


図17 固体潤滑剤の被膜厚さに対する工具表面の突出山部高さによる掘起し効果に基づく焼付き発生リスクを表す3Stageモデル²³⁾

5. 熱間加工における潤滑機構と表面損傷機構

炭素鋼の熱間鍛造では、素材加熱温度は800~1200℃であり素材に潤滑剤を塗布することは難しいため、加工の

直前に工具に油性あるいは水性黒鉛や、最近では白色系の水性潤滑剤をスプレー塗布して、金型冷却と潤滑剤塗布を行うことが多い。この工具と素材が接触した瞬間に、接触時間が0.1s程度と短時間であるため、平均温度600℃程度の界面温度となり、図18に示すような接触状態になると考えられる²⁴⁾。素材表面は酸化膜に覆われ、その酸化膜自身が焼付き防止や摩擦低減作用を有する。工具に塗布された潤滑剤は熱分解して一部はCO₂等のガス状態になり、一部は残渣として界面に閉じ込められる。これらの閉じ込められたガスや残渣は工具と素材の界面で熱絶縁物質として素材の熱が工具表面に伝達されるのを防いでいると考えられる。工具表面は、通常、浸炭や浸硫処理により、HV=1100程度まで硬化されているが、素材表面の繰返し接触により、図19に示すように、表面層0.1~0.2mm程度において、ヒートチェック、熱軟化、塑性流動が発生する²⁵⁾。このような表面影響層においては、さらに高温素材の摩擦接触が繰り返されると、図20に示すように、素材の凝着・離脱が繰り返され、工具表面層の剥離や顕著な摩耗が発生する²⁶⁾。そのため、通常、熱間鍛造の工具寿命は5,000個程度と極めて低い。この寿命延長は、塑性加工のトライボロジーにおける最も重要な課題であり、熱間鍛造業界からは、適切な工具の材質や表面処理、潤滑方法や潤滑剤の一刻も早い開発が期待されている。

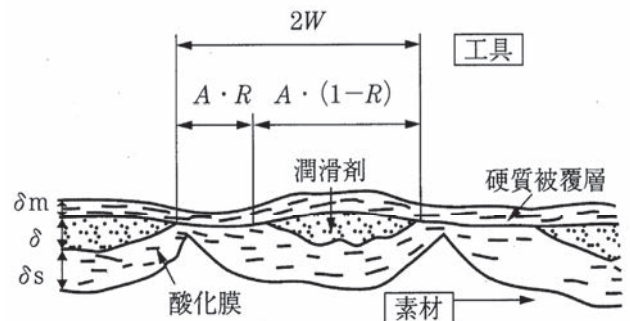


図18 熱間加工における工具-素材面間の接触界面モデル²⁴⁾

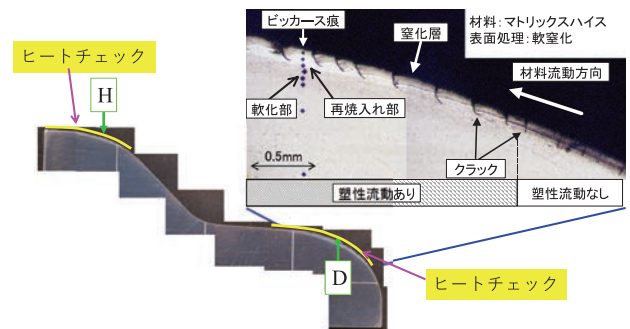


図19 熱間加工における工具表面近傍断面の塑性流動とヒートチェック²⁵⁾

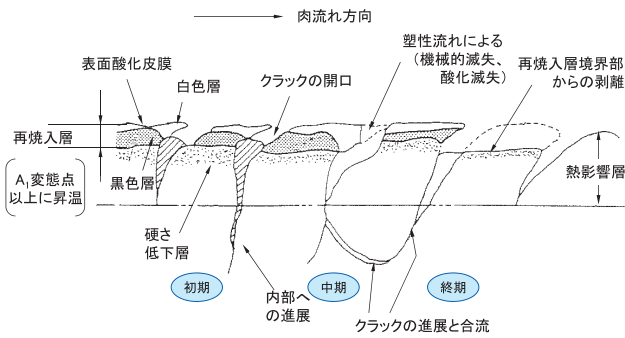


図20 温、熱間金型の損傷メカニズム²⁶⁾

6. トライボ・シミュレーター

6.1 工具面圧と摩擦せん断応力の直接測定

塑性加工の工具面に作用する面圧と摩擦せん断応力を直接測定する試みとしては、側圧ピンや傾斜ピンを用いる方法が古くから行われてきた²⁷⁾。Van Rooyenら²⁸⁾は、圧延ロールに埋め込んだ垂直ピンと傾斜ピンを用いて、圧延ロールと素材の接触弧上の面圧と摩擦係数の分布を測定した。中立点付近で摩擦の向きが反転し、面圧が最大となるいわゆるフリクションヒルの分布が測定されている。本村は²⁹⁾同様な方法を用いて、さらに詳細な摩擦係数の分布を測定している。

側圧ピン法では、工具面に孔を開けてピンを埋め込むため、検出ピンと周囲の工具表面との段差が生じたり、ピンと孔間に材料が入り込んで、測定誤差を生じやすい。面圧分布だけの測定には、工具面薄肉部の変位を検出する方法³⁰⁾や、感圧プレートを用いる方法³¹⁾があるが、摩擦せん断力まで測定することはできない。米山ら³²⁾は、図21に示すような巧妙な摩擦センサーを開発して、アルミニウムの熱間押し出しにおけるコンテナ内面の面圧分布と摩擦せん断応力分布を測定した。ダイス面から押し出しラムに向かって面圧、摩擦せん断応力ともに増加するが、摩擦係数 μ では、0.05~0.12程度となることを明らかにしている。

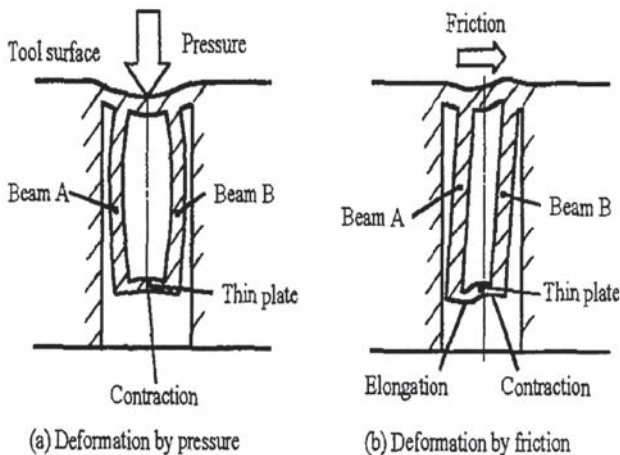


図21 局所的な工具面圧と摩擦せん断応力の測定原理³²⁾

さらに、半導体加工技術を利用して金型内蔵のマイクロセンサーの開発の試みが進んでいる³³⁾。このようなマイクロセンサーを高度化して、あらゆる塑性加工の工具に内蔵して、面圧と摩擦せん断応力の分布を測定することが可能になることを強く期待したい。

6.2 板材成形のトライボロジー特性の計測

6.2.1 板材成形のトライボロジー的課題

図22に、代表的な板材成形である深絞り・張出し成形における成形性に及ぼす摩擦特性の影響について示す。板材成形の工具面圧 p_m は、素材の降伏応力 σ_Y 以下の低い値である。また、表面積拡大比も0.5~1.5程度で少ない。しかし、素材の体積に対する表面積の比が大きいため、トライボロジー的課題は少なくない。ダイス面およびしわ押え面における摩擦抵抗(摩擦係数 μ_D, μ_H)は、深絞り加工の抵抗になるため、できるだけ潤滑を良くすることが必要である。とくにダイ・ラジヤス部の摩擦抵抗は、曲げ抵抗と併せて加工抵抗の大きな割合を占める。一方、パンチ頭部の摩擦抵抗(摩擦係数 μ_P)は、加工力の一部を負担するため、できるだけ大きくする必要がある。ただし、張出し成形では、パンチ頭部の摩擦を小さくして素材を均一に張り出すことが必要である。図23は、工具と素材の相対滑り速度 v_s がかなり低い場合の摩擦係数 μ を測定した結果である³⁴⁾。 $v_s=5\mu\text{m/s}$ 以下では、 $\mu=0.37$ という高い値であるが、 $v_s=50\mu\text{m/s}$ 以上では、 $\mu=0.25$ まで低下する。したがって、深絞りでは、相対滑り速度が遅いパンチ頭部の摩擦係数 μ_P は高く、相対滑り速度が速いダイス面としわ押え面の摩擦係数 μ_D, μ_H は低くなり、深絞り成形にとっては好ましい摩擦特性となっている。

板材成形の中でも、しごき加工は板厚さを強制的にしごいて薄くするため、工具面圧 p_m は、素材の降伏応力 σ_Y の1~2倍程度まで高まり、潤滑にとっては比較的厳しい条件になる。そのため、型かじりなどと呼ばれる焼付きのリスクにさらされる。したがって、適切な焼付き特性評価尺度が必要になる。

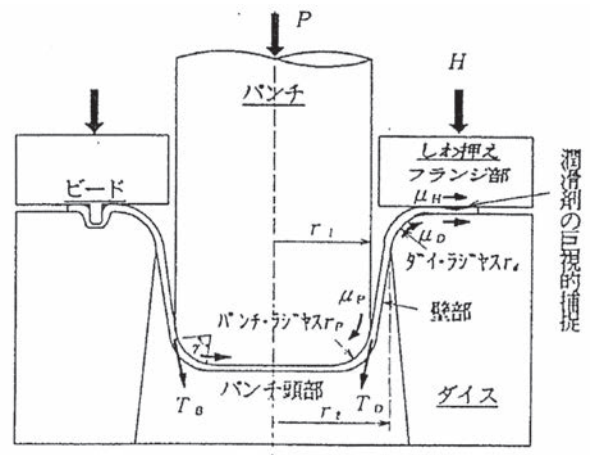


図22 深絞り・張出し成形における各部の摩擦の作用

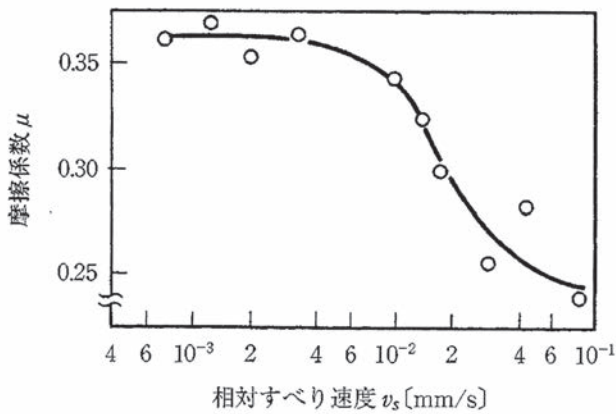


図23 帯板引張スライダー型摩擦試験による滑り速度の影響³⁴⁾

6.2.2 板材成形の摩擦特性値の計測技術

板材成形向け摩擦試験法は、塑性加工のトライボロジーの専門書に整理してまとめられている。春日³⁵⁾が開発した深絞り型摩擦試験機により、深絞り板押さえ面の摩擦係数 μ_H が正確に測定されている。この試験機を用いて、黄銅、軟鋼、銅、アルミニウム板に各種潤滑剤を適用して得られた摩擦係数 μ_H と絞り応力最大値 σ_{max} との関係は、板材成形における摩擦特性値を適切に与えるデータとしてきわめて重要なものである。摩擦係数 $\mu_H=0\sim 0.25$ までの増加により、絞り応力最大値 σ_{max} は約3割程度増加することが知られている。

深絞りのフランジ面の摩擦を測定する替りに、帯板に平面あるいは円筒面工具を押し付けて、押付け力と摩擦抵抗を測定する形式の摩擦試験機は、これまで数多く用いられている。この形式の試験機では、垂直荷重と摩擦力を比較的正確に測定できるため、板材成形における種々の工具、素材、潤滑剤の組合わせに対する摩擦係数のデータベース構築には適切であると考えられる。

板材成形では同じ金型を用いて、数千～数万個の板素材を連続して板材成形することが多い。このような繰返し板材成形において、加工回数が増加するに伴い、金型表面状態が変化したり、摩擦面温度が上昇したりするため、摩擦係数 μ は変化することが多い。そのような繰返し成形における摩擦係数の変化を計測するための摩擦試験法として、繰返しビード成形型摩擦試験法が提案されている³⁶⁾。この試験法では、40回程度の繰返しビード成形を行い、その全工程の摩擦係数と摩擦面温度の連続的な計測を行っている。さらに、平板しゅう動型摩擦試験機を用いて、表面処理鋼板の摩擦係数を繰返し累計しゅう動距離に対して測定し、摩擦係数変化を摩擦仕事の概念導入した非線形摩擦則によって表示する試みがなされている³⁷⁾。

6.2.3 板材成形の耐焼付き特性の計測技術

円缶のしごきダイス面の摩擦抵抗を直接測定する方法がないため、図24に示すような帯板しごき型摩擦試験法を用

いてテーパダイス面の摩擦力と垂直荷重を正確に測定する方法が良く用いられている³⁸⁾。また、しごき加工の替りに帯板や線材の引抜き型摩擦試験法が多く用いられている。しごき型摩擦試験法や引抜き型摩擦試験法では、しごき率(引抜き率)、加工速度、加工距離、板素材材質、金型材質と表面処理を系統的に変更して、耐焼付き特性の評価が行われている³⁹⁻⁴²⁾。

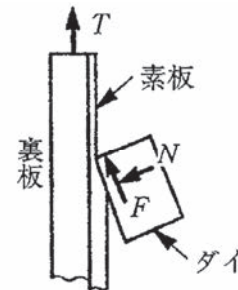


図24 帯板しごき型摩擦試験³⁸⁾

6.3 鍛造におけるトライボロジー特性の計測

6.3.1 鍛造のトライボロジー的課題

鍛造は複雑形状の製品を圧縮応力の高い状態で加工するため、金型にかかる面圧と摩擦せん断応力がきわめて高くなる。金型にかかる荷重や面圧は金型強度の極限まで高まるため、その応力負荷をできるだけ低減することが重要である。工程設計を適切に行うことにより、このような負荷荷重を低減できるが、摩擦抵抗を下げることも重要である。しかし、複雑形状の製品を鍛造する場合、摩擦抵抗は変形状態や加工部位によって大きく異なり、その各部位の摩擦係数を的確に測定することはきわめて困難である。また、素材は大きな塑性変形を伴うため、表面積拡大は局部的にきわめて大きくなる場合があり、焼付きが生じるリスクがきわめて高い。このように鍛造形式や製品部位ごとに異なる条件における耐焼付き特性を的確に評価する試験方法が必要になる。

さらに、温・熱間鍛造では、摩擦抵抗の大小により、素材の流動状態が変化するため、鍛造形式や鍛造素材の部位ごとに的確な摩擦特性値を計測することが求められている。また、金型寿命は冷間鍛造に比較して、きわめて短いいため、その金型摩耗の計測、摩耗量の予測、さらに寿命延長がきわめて重要な課題となる。

6.3.2 冷間鍛造の摩擦特性計測技術

種々の形式の鍛造における摩擦特性値を直接測定する方法は、残念ながらまだ開発されていない。ただし、図25に示すように、素材の塑性変形は伴わないが、板素材を金型内に拘束して圧縮しアンビルに押付け、アンビルをしゅう動させるタイプの摩擦試験法がある⁴³⁾。このタイプの摩擦試験では、高面圧下で摩擦力 F と圧縮荷重 P を直接正確に測定することが可能である。

リング圧縮型摩擦試験法は、リング状素材を圧縮すると、端面の摩擦の大小に応じて、内径の縮小・拡大が生じる。あらかじめ、FEM（有限要素解析法）成形シミュレーションを用いて、摩擦係数 μ を仮定して、圧縮率 R_e と内径縮小率 E の関係を表すノモグラフを作成しておけば、実測値をプロットすることにより、端面の平均の摩擦係数を推定できる。この方法は、1954年に久野木⁴⁴⁾によって提案され、荷重の測定を必要としない簡便な摩擦試験法として、非常に良く利用されてきた。ただし、据込み形の鍛造形式であり、圧縮率60%でも平均の表面積拡大比は2.5で、さほど大きくない。軸の前方押し出し形鍛造におけるテーパダイス面の摩擦係数を計測する方法として、図26に示すような摩擦試験法が提案されている⁴⁵⁾。さらに厳しい鍛造条件として、テーパパンチのせん孔における摩擦係数を計測する方法として、図27に示すような摩擦試験法が提案されている⁴⁶⁾。いずれも荷重の測定を必要としないで、FEM成形シミュレーションにより摩擦係数を仮定して作成したノモグラフを用いて、テーパダイス面あるいはテーパパンチ面の平均摩擦係数を計測することが可能である。

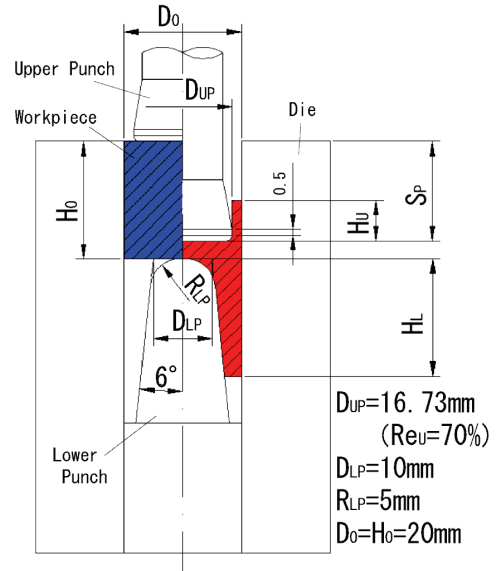


図27 前方テーパ缶－後方直缶押し出し型摩擦試験⁴⁶⁾

6.3.3 冷間鍛造の耐焼付き特性計測技術

鍛造では面圧が高く表面積拡大が大きいなど厳しい摩擦条件下にあるため、耐焼付き特性を計測する方法が数多く提案されている。パンチ穿孔加工の表面積拡大比は100～200倍に達するため³⁾、焼付き発生までのパンチ穿孔深さで比較する方法が良く用いられる⁴⁷⁾。円環素材に鋼球を押し通すボール押し型摩擦試験法⁴⁸⁾により焼付き発生までのボール押し込み距離を評価尺度とする方法、円柱素材をあらかじめ据込んで表面の固体潤滑剤が剥離した後にしごき加工を行い焼付き発生までのしごき距離を評価尺度とする方法⁴⁹⁾、テーパパンチを穿孔した場合の荷重が急増するまでのパンチ穿孔深さを評価尺度とする方法⁵⁰⁾などが提案されている。図26、27のテーパダイスあるいはテーパパンチに焼付きが発生するまでのパンチ穿孔深さも耐焼付き性の評価尺度として用いられている。

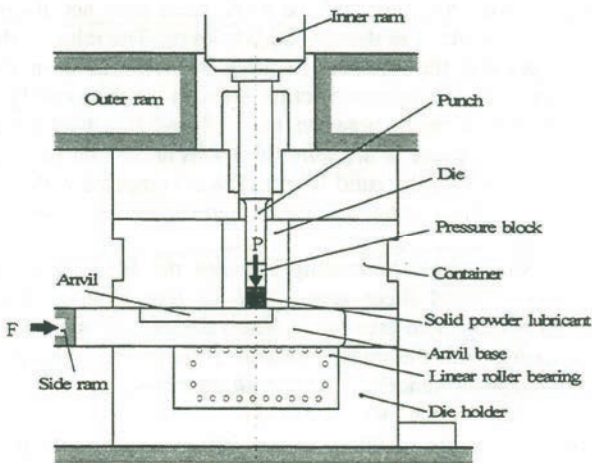


図25 素材を金型内に拘束してアンビルに押し付け摺動する形式の摩擦試験法⁴³⁾

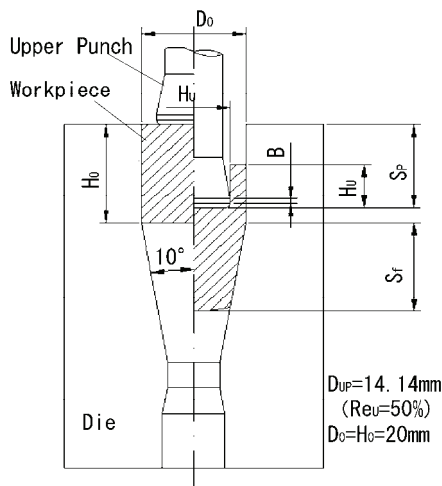


図26 前方軸－後方缶押し出し型摩擦試験⁴⁵⁾

6.3.4 温・熱間鍛造の摩擦特性計測技術

温・熱間鍛造の摩擦特性値を的確に評価する方法はかなり難しい。リング圧縮摩擦試験法を用いて、リング素材を加熱する方法は比較的簡便な試験法として用いられる⁵¹⁾。Ceronら⁵²⁾らは加熱した素材にテーパパンチを穿孔しながら回転し、パンチ荷重とトルクから摩擦係数を測定している。曾谷ら⁵³⁾は、鋼管の熱間穿孔マンドレル摩擦特性値を測定する摩擦試験機を開発し、素材温度800～1000℃における摩擦係数を測定している。澤村ら⁵⁴⁾は、図28に示すように、回転工具を用いて1000～1200℃まで加熱したリング素材を、加熱した工具で圧縮しながら垂直荷重とトルクを測定する摩擦試験法を提案している。さらに、上型の裏面からφ0.4mmの細穴を明け、試験面より0.5, 1, 2mmの位置まで熱電対を差し込んで温度を計測し、試験面の温度を推定している。

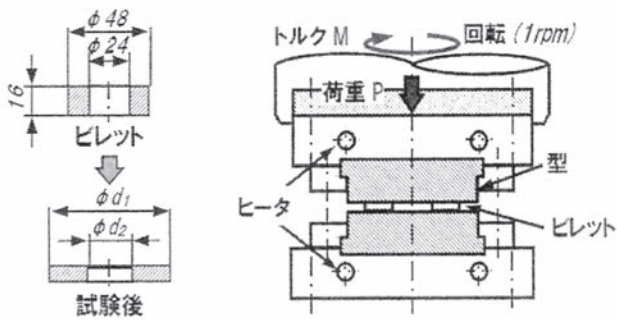


図28 回転工具を用いたリング圧縮摩擦試験⁵⁴⁾

6.3.5 温・熱間鍛造の摩耗特性計測技術

森下ら⁵⁵⁾は、鋼の熱間鍛造における摩耗と金型寿命予測方法として、機械的負荷を累積摩擦仕事量 E_f 、熱的負荷を焼戻し反応量 λ 値、金型材料の高温強度を降伏強度比 γ 値として、摩耗量 W を予測する式を用いて、金型寿命を予測する試みを行っている。

岡島ら^{56,57)}は、テーパパンチ穿孔型摩擦試験法を用いて、従来の面圧、しゅう動距離、金型強度のみを考慮した摩耗予測モデルに、パンチ表面温度の影響を考慮した修正摩耗式を提案している。

6.3.6 温・熱間鍛造の熱伝達特性計測技術

済木ら⁵⁸⁾は、モデル鍛造型熱劣化試験機による温度測定と有限要素解析により、工具と素材間の界面熱伝達係数を接触熱コンダクタンスとして推定している。また、中西ら⁵⁹⁾は、鍛造加工の解析への導入を狙った界面熱伝達係数 h_c の考え方と測定法を提案している。図29に示すように、リング状のパンチを面圧一定に制御しながら素材に接触させ、加工中のパンチ内部の温度を測定した。この測定系について界面熱伝達係数 h_c を仮定して有限要素解析を行い、接触時間 t_s と温度上昇 ΔT_K の校正曲線を描く。この校正曲線に実験結果をプロットして、界面熱伝達係数 h_c を推定する。

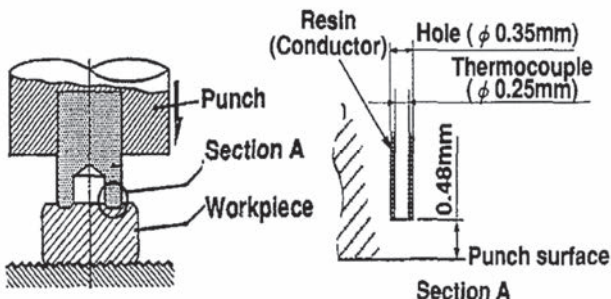


図29 リング状パンチ押し込み時の界面熱伝達係数測定方法⁵⁹⁾

7. 振動荷重による液体潤滑性能の改善

油性あるいは水性の液体潤滑剤は、その適用範囲は極めて

て狭い。これは冷間鍛造では、表1に示したように、工具・素材界面の面圧が極めて高く、表面積拡大比が極めて大きいため、液体潤滑剤では界面から流出したり、界面への導入が困難になるためである。この課題を克服するため、工藤⁶⁰⁾は、素材に潤滑剤をプールする凹みを付けて、いわゆる封入潤滑鍛造を提案している。また、ドイツのFelss社の振動押し法 (FM Forming)⁶¹⁾では、適当な周波数で金型を前後に振動させながら、素材を前方押し出す方法を実用化している。この方法では、通常の前押しに比較して、押し荷重が4割以上軽減できる。奥村らは、この振動押し法を用いて塩素フリー潤滑油による合金鋼およびステンレス鋼製スプラインシャフトの押し出しに成功している⁶²⁾。この方法では、金型の前後方向振動によってダイスと素材界面が離れた瞬間に潤滑油が界面に導入される。

最近、サーボプレスが開発され、スライドのパルスモーションにより、簡便に荷重振動を与えられるようになった。前野らは⁶³⁾、このモーションを利用することにより、ステンレス鋼製平歯車の板鍛造において、荷重振動を用いた潤滑油導入による摩擦の低減効果を確認している。さらに、前野⁶⁴⁾らおよび山本⁶⁵⁾は、内スプラインの後方押し出しにおいて、図30に示すように、荷重除荷時に、ダイスと素材界面に隙間が生じて、適切な保持時間を置くことにより、界面に潤滑油が導入されやすくなり、良好な潤滑効果が得られることを確認している。

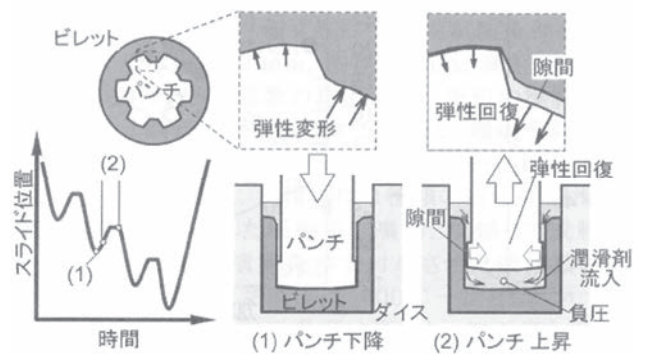


図30 振動後方押し出しによる内スプライン成形⁶⁵⁾

松本⁶⁶⁾は、図31に示すように、サーボプレスのパルスモーションを用いて、逐次潤滑パルス穴成形加工法を提案している。パンチ中心に潤滑油を供給する細孔を明け、パンチを後退させるときに、パンチ頭部と素材の空洞部ができ、負圧となって潤滑油が吸込まれる。この方法で、パンチ前進行程と後退行程に適切な距離を設定することにより、アルミニウム材料の穿孔で焼付きがない平滑な内面性状を確保できることを確認している。

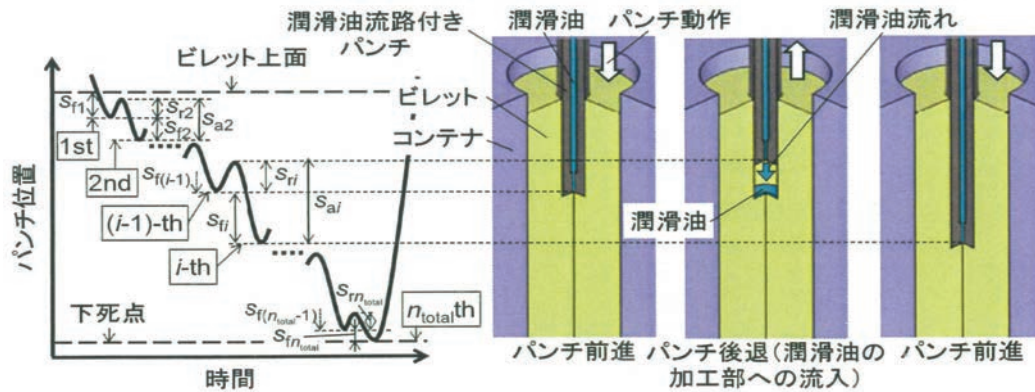


図31 パルスモーションによる潤滑経路付きパンチ穿孔⁶⁶⁾

8. 化成被膜型潤滑剤の耐焼付き性能限界と環境負荷軽減技術開発

1930年代に、ドイツで、初めて鋼の冷間鍛造用に開発・実用化された化成被膜型のリン酸亜鉛被膜・ステアリン酸亜鉛等の潤滑剤は、通称、ボンデライト・ボンダリユーベという商品名で、現在でも、最も潤滑性能に優れた鋼の冷間鍛造用固体潤滑剤として多用されている⁶⁷⁾。しかし、その被膜形成には30分程度の処理時間がかかり、その処理過程で発生するスラッジや廃液の処理に環境負荷がかかる。これらの課題を解決するため、我が国では、2000年前後から、処理工程が少なく、管理が簡便で、産業廃棄物の発生を低減できる環境対応型潤滑剤が開発・実用化されてきた^{68~71)}。

図32に、表面積拡大比と摺動距離の関係で表した化成被膜型潤滑剤の適用範囲に対して、実用化あるいは開発段階にある簡易塗布型潤滑剤の適用範囲を示す⁷⁰⁾。現状では、簡易塗布型潤滑剤や油性潤滑剤の潤滑性能は、化成被膜型潤滑剤には及ばないが、種々の改善の試みが行われている。

化成被膜型潤滑剤が、どの程度の素材表面積拡大比まで追従できるか。団野らは、図33に示すように、缶の後方押しにおけるパンチ穿孔深さに伴う素材表面積拡大比を実測した³⁾。押し出し比やパンチ先端の丸み半径によって異なるが、穿孔深さ50mm以上では、表面積拡大比が100倍以上に達することがわかる。加田ら⁷²⁾は後方押し時のパンチ穿孔時に押し出し荷重が急増するときに焼付きが発生し、その限界深さは、50mm程度であることを確認している。

化成被膜型潤滑剤の処理時間の迅速化と環境負荷軽減を図るため、低温・低スラッジ型リン酸塩被膜の形成技術が開発されている。表面調整剤と改良型化成処理の導入により、50-60℃の低温処理が可能で、スラッジ量が半減し、緻密で微細なリン酸塩被膜が形成される。また、電解型リン酸塩被膜形成処理方法が開発され、10s程度の短時間に潤滑処理が可能になり、スラッジの発生を抑制できることが明らかにされている⁷³⁾。

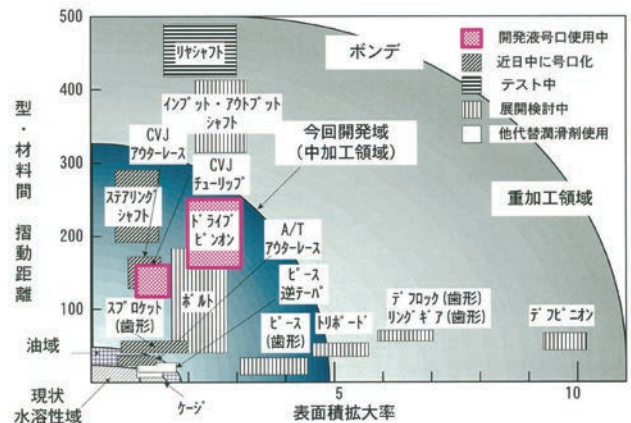


図32 冷間鍛造用潤滑剤の適用範囲⁷⁰⁾

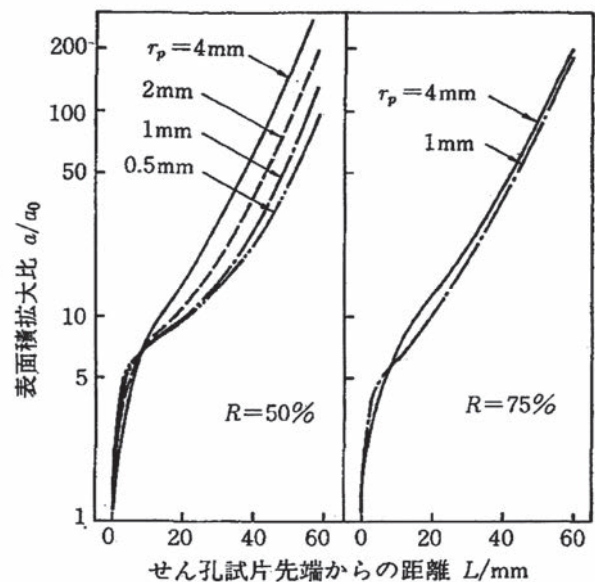


図33 後方押し缶内面の表面積拡大比分布³⁾

9. 簡易塗布型固体潤滑剤の開発と実用化

櫻村ら⁷⁰⁾は、化成被膜型潤滑剤に替わる簡易塗布型水溶性潤滑剤として、水に脂肪酸、リン酸系極圧添加剤、高分子樹脂を分散した水溶性ベースに、亜鉛・モリブデン化合

物を添加した潤滑剤を開発・実用化した。この潤滑剤は、鍛造加工時の変形熱と摩擦熱により、素材の鉄と反応して密着性が高まり、大きな表面積拡大にも追従する性能を発揮する。図34に示す一貫流しのプレスラインは、この簡易塗布型潤滑剤を用いて、図35に示すドライブピニオンシャフトの鍛造の実用化に世界で初めて成功した記念すべき事例である。鍛造後の製品に残留する潤滑剤成分量をEPMAで分析した結果、成形回数が増えるほど、モリブデン、リン、硫黄、亜鉛、ナトリウム成分が増加する傾向が見られ、これらの反応生成物が形成されていることを確認された。その後、小出ら⁷⁴⁾は、この潤滑剤によるリヤアクスルシャフトやクラッチハブの冷間鍛造に成功した。これらの成功によって、わが国では、簡易塗布型潤滑剤の開発に弾みが付き、多くの潤滑剤メーカーから各種の冷間鍛造用潤滑剤の開発・実用化が一気に進んだ。

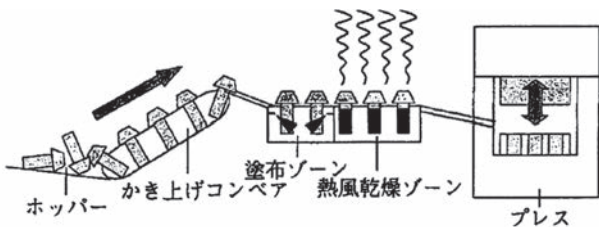


図34 ドライブピニオンシャフトの一貫生産ライン⁷⁰⁾

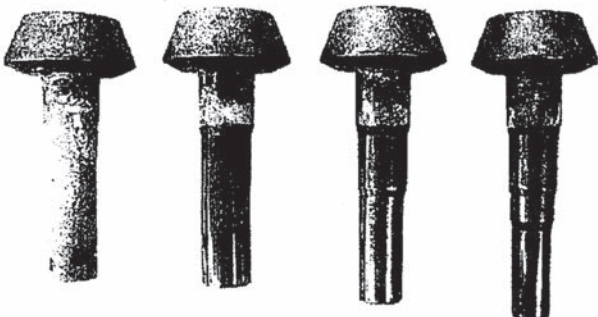


図35 ドライブピニオンシャフトの成形工程⁷⁰⁾

吉田ら⁶⁹⁾が開発した1液簡易塗布型潤滑剤は、図36に示すように、水に溶解させたベース成分と分散させた潤滑成分からなり、加温した素材に塗布して乾燥させると、素材界面近傍の温度が高くなり、溶媒の水が揮発する段階で、ベース剤が素材表面側に皮膜を形成し、その上に潤滑成分が被膜を形成して、2層構造の被膜を形成する。実際の皮膜は必ずしも完全な2層構造ではないが、濃度勾配を有する傾斜型2層被膜を形成することが確認されている。この1液簡易塗布型潤滑剤を用いて、図37に例示するようなスプライン付きシャフトやハブの押し出しが数十万個の金型寿命まで成形可能になることを確認している。

石橋らは⁷¹⁾、従来の化成皮膜型潤滑剤の2層被膜構造のアナロジーから図38の概念図のような2液2層簡易塗布型

潤滑剤を開発した。白色系潤滑剤の下塗り層は、高分子（ポリアミド）樹脂と無機塩からなり、上塗り層はワックスと金属石けんからなる。MoS₂系潤滑剤の下塗り層は、MoS₂および黒鉛と無機塩からなり、上塗り層はワックスと金属せつ鹼からなる。素材表面への密着性を高めるため、ショットブラストとアルカリ脱脂洗浄を省くことはできないが、化成被膜型潤滑剤に比べて、処理工数を短縮でき、排水や廃液を大幅に減らすことができる。また、これらの潤滑剤は吸湿性を抑制してあるため、必ずしも潤滑皮膜処理後すぐに鍛造する必要はない。

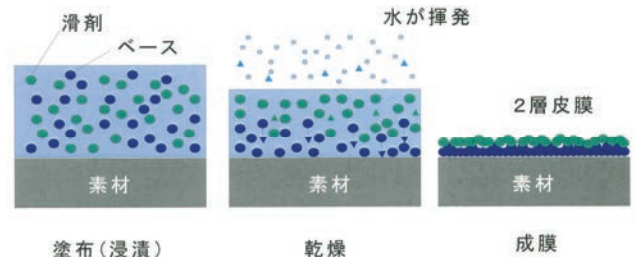


図36 1液簡易塗布型潤滑被膜形成モデル⁶⁹⁾



図37 1液簡易塗布型潤滑被膜による鍛造部品例⁶⁹⁾

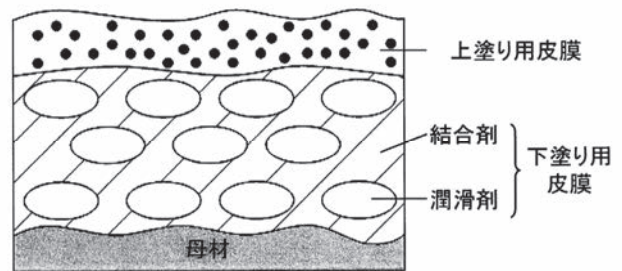


図38 2液2層簡易塗布型潤滑被膜形成モデル⁷¹⁾

据込み型のリング圧縮摩擦試験、前方押し出し型前方軸・後方直缶押し出し型摩擦試験、さらに素材表面積拡大比が大きいパンチ穿孔型前方テーパ缶・後方直缶押し出し型摩擦試験を用いて、これらの潤滑性能を評価した結果、化成被膜型潤滑剤とほぼ同程度の耐焼付き性を示し、焼付き発生がない場合の摩擦せん断係数は化成被膜型潤滑剤より低い値を示す場合があることが確認された。さらに、白色系2液2層簡易塗布型潤滑剤を用いて、図39に示すような



図39 2液2層簡易塗布型白色系潤滑剤による鍛造部品⁷¹⁾

SCM415合金鋼製の傘歯車、およびスプライン形状部品を数万個連続して冷間鍛造する実績が得られている。

鷺坂ら⁷⁵⁾は、突起付きダイス前方押し出し型摩擦試験によって、アルミニウム合金の潤滑性能評価を行った。その結果、厳しい摩擦条件化でも、慣用のフツ化アルミニウム被膜に比べて、白色系2液2層簡易塗布型潤滑剤が優れた耐焼付き性能を発揮することが確認されている。現在、アルミニウム合金の冷間鍛造用潤滑剤として実用化している。

ることがわかる。図43に示すように、高分子樹脂系潤滑剤でも、金型温度が150℃～200℃で付着効率が最も良好になり、15μm程度の膜厚さを確保することが可能である。これは150℃以下では流れ落ちる量が多くなり、200℃以上では弾かれる量が多くなるためと考えられる。

10. 熱間鍛造における白色系潤滑剤の効果

鋼の熱間鍛造用潤滑剤としては、離型性、潤滑性が良く金型寿命が長い黒鉛系潤滑剤が用いられてきた。しかし、作業環境が悪く、配管腐食や電気系統のトラブルが発生しやすく、廃液量・産廃量が多いため、これに替わって、1979年に米国でカルボン酸系短鎖状高分子化合物をベースとする水溶性の白色系潤滑剤が開発された⁷⁶⁾。熱間鍛造用潤滑剤は、金型塗布→乾燥→鍛造→金型塗布→のサイクルを繰り返すため、図40に示すように、それぞれの工程において、均一濡れ性、付着性、冷却性、皮膜乾燥性、皮膜均一性、皮膜保持性、皮膜密着性、皮膜耐熱性、高温潤滑性、再溶解性のような性能が要求される。図41に示すように、黒鉛系潤滑剤は黒鉛粒子が層状に皮膜を形成し、層のずれによって潤滑を行い、黒鉛粒子そのものが残渣となって離型する。白色系潤滑剤の場合は、形成した皮膜が燃焼ガス化しながら潤滑を行い、燃焼後の残渣（炭化物）が介在物となって離型する。図42に示すように、皮膜厚さを3μm一定にし、圧縮率を変化させて摩擦係数を測定したところ、黒鉛系の摩擦係数の方が低くなり、潤滑性良好な結果を示した。しかし、高分子樹脂系潤滑剤も膜厚さが厚くなり、15μm程度になれば、黒鉛系とほぼ同程度の摩擦係数とな

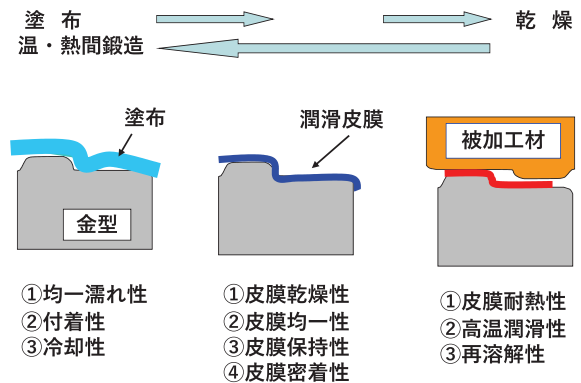


図40 温・熱間鍛造潤滑剤の必要性能⁷⁶⁾

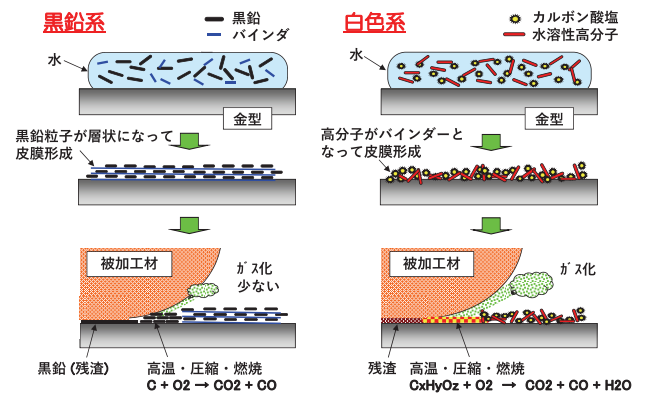


図41 熱間鍛造離型剤の作用機構⁷⁶⁾

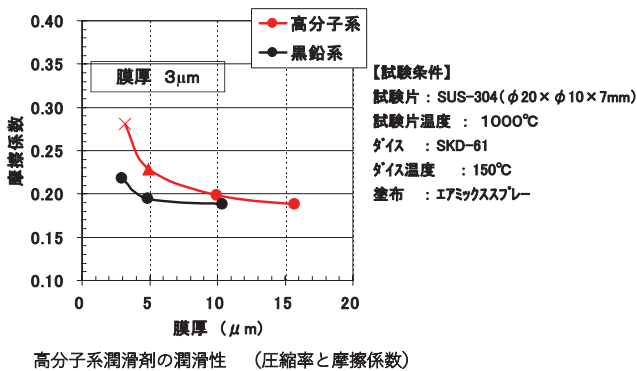


図42 高分子系潤滑剤の熱間リング圧縮摩擦試験結果⁷⁶⁾

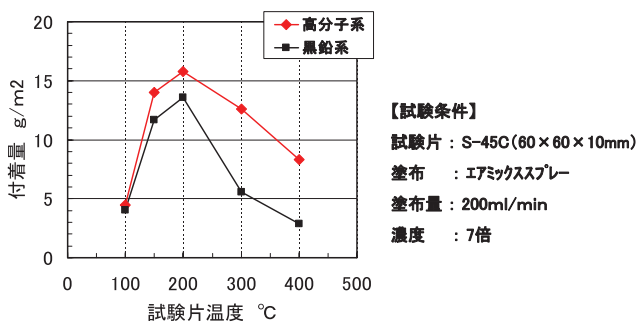


図43 金型温度と高分子系潤滑剤の付着量⁷⁶⁾

11. おわりに

最近、簡易塗布型潤滑剤は、化成被膜型潤滑剤の耐焼付き性能に匹敵する程度にまで改善が進んでいる。とくに、素材表面のウェットプラストによる前処理によって、潤滑性能の改善効果は顕著になっているようである。また、FEMシミュレーションを用いて、素材表面の凹部に物理的に閉じ込められた固体潤滑剤が、どの程度の表面積拡大比、面圧、滑り距離まで耐えられるか等について解明する試みも行われている⁷⁷⁾。今後は、冷間鍛造における潤滑機構、焼付き機構、摩耗機構等の地道な基礎的解明と、その成果に基づいて、さらに液体潤滑剤の繰返し潤滑法や、簡易塗布型潤滑剤の開発が進むことを期待したい。

参考文献

- 1) 中村保:摩擦力を活用した塑性加工,塑性と加工,**28**-319, pp.783-790, (1987),
- 2) 日本塑性加工学会編:プロセストライボロジー, (1993), 65-89, コロナ社.
- 3) 団野敦・阿部勝司・野々山史男:塑性と加工,**24**-265 (1983), 213-220.
- 4) G. Ngaile and H. Saiki:Lubrication Engineering, **55**-2 (1999), 24-32

- 5) 春日保男・山口勝美・加藤勝人:日本機械学会論文集(第3部),**33**-252 (1967), 1302-1308.
- 6) Bay, N. & Wanheim, T.: Real area of contact and friction stress at high pressure sliding contact, *Wear*, **38** (1976), 201-209.
- 7) 王志剛:塑性と加工,**55**-640 (2014), 391-395.
- 8) 水野高爾:塑性と加工,**45**-520 (2004), 315-319.
- 9) Holm, R.: *Mechanical Wear*, (1950), 309, ASM.
- 10) Archard, J. F.: *J. Appl. Physics*, **24** (1953), 981.
- 11) 中村保:塑性と加工,**20**-227 (1979), 1107-1114.
- 12) 河合望・中村保:塑性と加工,**19**-204 (1978),61-69.
- 13) Shimizu, T., Horie, T., Watanabe, N., Fujii, S., Yamagata, Y., Kondo, T., & Onuma, M.:*Proceedings of the IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts*, (2014), 403-406.
- 14) Kondo, T., Nakata, H., Sekikawa, J., Kubota, Y., Hayakawa, K. & Nakamura, T.: *Proceedings of the IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts*, (2014), 73-78.
- 15) 中村保,松井伯夫:日本機械学会論文集,C編,**52**-484 (1986), 3332-3338.
- 16) 中村保,金原秀幸:日本機械学会論文集,C編, **54**-506, (1988), pp.2388-2395.
- 17) Mizuno, T.& Okamoto, M.: *Trans. ASME, J. of Lubrication Technology*, 122-4 (1982), 53-59.
- 18) Meng, Y.G., Wen, S.G. & Saiki, H.: *Wear*, 160 (1993), 163-170.
- 19) Nakamura, T., Tanaka, S., Hayakawa, K. & Fukai, Y: *J. of Tribology, Trans. ASME*, **122** (2000), 803-808.
- 20) 清水秋雄:SOKEISZAI, 51-10 (2010), 23-28.
- 21) Wang, Z.G., Yoshikawa, Y., Suzuki, T. & Osakada, K.: *CIRP Annals*, 63-1 (2014), 277-280
- 22) 王志剛・小見山忍・徳永龍一・山岡祐一:塑性と加工,51-591 (2010), 336-341.
- 23) 小見山忍・王志剛・徳永龍一・山岡祐一:塑性と加工,51-591 (2010), 342-347.
- 24) 済木弘行ら:日本機械学会論文集,C編,61-589 (1995), 3762-3768.
- 25) 土屋能成,中西広吉,松井宗久,田中俊明,鈴木寿之,野上芳和,明石忠雄:R&D Review of Toyota CRDL, 36-4 (2001), 47-54.
- 26) 古谷匡:SOKEISZAI, 54-7 (2013), 16-21.
- 27) Siebel, E. & Leug, W. : *Mit. KWI.*, **15** (1933), 1-14.
- 28) Van Rooyen, G. T. & Backofen, W. A.: *J. Iron & Steel Inst.*, **186** (1957), 235.

- 29) 本村:鉄鋼協会第31回圧延理論分科会資料12 (1967).
- 30) Pawelski, O. & Armstoft, O.: Arch. Eisenhüttenwesen, **38**-7 (1967), 527-536.
- 31) 松原茂夫・工藤英明:塑性と加工,**32**-364 (1991), 589-594.
- 32) 米山猛・高橋昌也:塑性と加工,**45**-521 (2004), 470-474.
- 33) 小山純一・楊明:塑性と加工,**51**-596 (2010), 898-902.
- 34) Sengupta, A. K.: J. Mech. Working Technol., **5** (1981), 181.
- 35) 春日保男:機械学会誌,**58**-434 (1955), 240.
- 36) 中村保・早川邦夫・田中繁一・今泉晴樹・柴田潤一・杉澤宗紀:塑性と加工,**46**-528 (2005), 71-76.
- 37) 橋本浩二・吉田亨・栗山幸久・伊藤耿一:塑性と加工,**47**-544 (2006), 399-403.
- 38) 河合望・中村保:日本機械学会論文集C編,**39**-326 (1973), 3190-3198.
- 39) 須藤忠三・林豊・西原実:塑性と加工,**17**-190 (1976), 867-874.
- 40) 吉川勝幸・佐藤悌介・村上弘樹 :塑性と加工,**25**-285 (1984), 942-947.
- 41) 河合望・中村保・宮本重信:日本機械学会論文集C編,**47**-417 (1981), 644-653.
- 42) 河合望・中村保・堂田邦明・広瀬圭介:日本機械学会論文集C編,**48**-433 (1982), 1473-1481.
- 43) Nakamura, T., Tanaka, S., Hayakawa, K. & Fukai, Y: J. of Tribology, Trans. ASME, **122** (2000), 803-808.
- 44) 久野木真人:科学研究所報告,**30**-2 (1954), 63.
- 45) Nakamura, T. Bay, N. & Zhang, Z-L: J. of Tribology, **119**-3 (1997), 501-506.
- 46) Nakamura, T. Bay, N. & Zhang, Z-L: J. of Tribology, **120**-4 (1998), 716-723.
- 47) 北村憲彦・大森俊英・団野敦・川村益彦:塑性と加工,**37**-429 (1996), 1083-1088.
- 48) 北村憲彦・大森俊英・団野敦・川村益彦:塑性と加工,**34**-393 (1993), 1178-1183
- 49) 王志剛・小見山忍・徳永龍一・山岡祐一:塑性と加工,**51**-591 (2010), 336-341.
- 50) 伊藤樹一・吉田広明・五十川幸宏・土井善久・堂田邦明:塑性と加工,**48**-555 (2007), 303-307.
- 51) Li, L. X., Peng, D. S. Liu, J. A. & Liu, Z. Q. : J. Mater. Process. Technol., **112**-1 (2001), 1-5.
- 52) Ceron, E., Bay, N., Aida, T., Dohda, K. & Nicolaisen, T. E. :Proc. NAMRC. (2012), NAMRC40-7814.
- 53) 曾谷保博・平川智之・岡本芳秀・畑中政之:塑性と加工,**34**-393 (1993), 1160-1165.
- 54) 澤村政敏・与語康宏・上山道明・岩田徳利:平成24年度塑性加工春季講演会講演論文集,(2012), 137-138.
- 55) 森下弘一・鈴木寿之:塑性と加工,**45**-520 (2004), 310-314
- 56) 岡島琢磨・伊藤樹一・吉田広明・五十川幸宏・石川孝司:塑性と加工,**50**-586 (2009), 1034-1038.
- 57) 岡島琢磨・伊藤樹一・吉田広明・五十川幸宏・石川孝司:塑性と加工,**51**-593 (2010), 587-591.
- 58) 清水弘行・南明宏・御祓如英也:塑性と加工,**30**-336 (1989), 51-56.
- 59) 中西広吉・野々山史男・澤村政敏・団野敦:塑性と加工,**37**-421 (1996), 207-212.
- 60) 工藤英明・篠崎吉太郎:塑性と加工,9-90 (1968), 466-476.
- 61) Felss社特許:特許第3572544号
- 62) 奥村英之・荒川泰行:YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW, (2006), 1-5.
- 63) 前野智美・市川雄基・森謙一郎:平成25年度塑性加工春季講演会論文集,(2013), 81-82.
- 64) 前野智美・菅原稔・森謙一郎:第65回塑性加工連合講演会論文集,(2014), 281-282.
- 65) 山本一:第311回塑性加工シンポジウムテキスト,(2014), 7-13.
- 66) 松本良:プレス技術,**49**-11 (2011), 28-31.
- 67) 村松勤・高橋明夫:インパクトマシニング,(1975), 253-279.
- 68) 永田秀二・今井康夫・村松由男:日本パーカライジング技報,**10** (1998), 57.
- 69) 吉田昌之・今井康夫・山口英宏・永田秀二:日本パーカライジング技報,**15** (2003), 3-9.
- 70) 櫻村徳俊・竹内雅彦・小田太・河原文雄・尾嶋平次郎・伴野満:塑性と加工,**41**-469 (2000), 17-22.
- 71) 石橋格・関澤雅洋・中村保:塑性と加工,**52**-611 (2011), 1263-1267.
- 72) 加田修・宮西慶・野瀬由香里・柳秀和:第65回塑性加工連合講演会論文集,(2014), 275-276.
- 73) 小林直行・森山敦志・吉田昌之:日本パーカライジング技報,**17** (2005), 3-9.
- 74) 小出洋三・伴野満:鍛造技報,86 (2001), 25-30.
- 75) 鷺坂芳弘・石橋格・中村保・笹岡瑛嗣・早川邦夫:平成23年度塑性加工春季講演会論文集,(2011), 35-36.
- 76) 池田修啓:塑性と加工,54-630 (2013), 581-585
- 77) 鷺坂芳弘・石橋格・中村保・笹岡瑛嗣・早川邦夫:第62回塑性加工連合講演会論文集,(2011), 103-104.