

解説・展望

金型のトライボロジー —高精度・高効率生産のキー技術—

土屋能成

Trend of Process Tribology Focused from Die Life -Key Technology for Precious and Efficient Production-

Yoshinari Tsuchiya

要 旨

もの作りの現場に対して、高品質な製品を低コストでしかも地球環境に配慮して生産することが求められている。これを実現するためのキー技術の一つにプロセストライボロジーがある。この成形加工プロセスにおけるトライボロジーでは、基礎理論から、評価技術、応用まで広く研究されているが、ここでは主に金型の寿命向上の観点からその現状と動向を探る。まず加工プロセスにおけるトライボロジーの役割に触れるとともにトライボ特性を評価する試験方法の位置づけを述べ、その活用事例を紹介する。次にプロセストライボロジーを用いる対象として、加工限界の向上、型寿

命の向上、省エネルギーへの取り組みについて述べる。金型や表面処理の特性を有効に発揮させるための注意点や潤滑技術の新しい方向についてもまとめた。特に型寿命の向上に関して、①寿命決定基準の確定、②損傷観察、③損傷原因の考察、④突発現象の排除、⑤工程上の対策立案、⑥型材、潤滑剤の変更のステップを提案する。またプロセストライボロジーを扱う組織、人材育成の重要性に言及する。さらに今後の方向として、シミュレーションを活用した型負荷の見積りや型寿命予測技術について現状を示す。

キーワード

プロセストライボロジー、メンテナンストライボロジー、金型、摩擦試験機、型寿命、潤滑、寿命予測、型負荷

Abstract

There has been a growing demand for producing high quality products at low cost considering the global environment in the production line. Process tribology is one of the key technologies to fulfil this demand. The role of the process tribology and the standpoint of tribo-simulators are discussed and evaluated. The object of the process tribology is not only to improve the forming limit and the die life but also to save energy. Damage of metal forming dies is identified and two counterplans are proposed. One of the

counterplans is the flow chart reaching the goal to improve the die life and the other is the necessity to structure the system and to foster specialists dealing with process tribology. Points of the method of using die materials and surface coatings are shown for correct application, and new trends of lubrication technology are summarized. The present state of the technologies for measuring mechanical and thermal loads is also summarized, and the studies on predicting the die life are presented.

Keyword

Process tribology, Maintenance tribology, Die and mold, Tribo-simulator, Die life, Lubrication, Prediction of die life, Mechanical and thermal load

1. はじめに

近年経済発展が望まれるなかで同時に地球環境の保全が社会的要求として高まっている。自動車においても燃費の向上がCO₂の削減に直結するため、関連の技術開発が進められている。低燃費自動車の実現には摺動部の摩擦低下と車両の軽量化が効果的である。摩擦軽減には、潤滑油や材料の組み合わせが重要であるが、部品の精度を高めて不要な摩擦力を生み出さないことも必要である。このことは生産段階においていかに高精度な成形を行うかにかかっている。一方、軽量化には、安全性との両立が不可欠であるため、構造強度の適正配分が必要であり、アルミニウム合金やチタン合金、高張力鋼の採用が増加している。さらに耐久性や意匠性の確保のためにはステンレス鋼も用いられる。これらの材料はいわゆる難加工材で、焼付きやすかったり、成形荷重が大きくなるなど、金型への負荷が大きくなる要因になっている。

地球環境保全に関連して、生産プロセスにおいても省エネルギーや高効率生産、CO₂の削減が求められている。作業環境を保全する意味からは黒鉛系の潤滑剤を削減する要望が強く、油剤に関しても周辺環境への配慮から使用量を減らす動きが強い¹⁾。このような状況で高精度、高品質な製品を生産する必要に迫られているため、成形加工におけるトライボロジーすなわちプロセストライボロジーの重要性が生じてくる。

ここでは成形加工に必須な金型に視点を置き、高品質な製品を効率よく生産するために、プロセストライボロジーが現在どのように活用され、今後どう進展しようとしているのかについてまとめる。特に塑性加工用金型の損傷や寿命に対するトライボロジーの考え方について述べる。

2. 加工プロセスにおけるトライボロジーの役割

プロセストライボロジーは主に塑性加工における摩擦、潤滑、摩耗を扱う学問で、金型や被加工材、潤滑剤、外部条件の4要素が考慮される。摩擦対である被加工材と金型のうち被加工材が巨視的に塑性変形する点が機械要素のトライボロジー

とは異なる。プロセストライボロジーの考え方は、大きく分けて2方面に反映される。一つは生産設備のエネルギー低減であり、いま一つは製品の表面品質や形状精度の向上である。

前者の例としては、潤滑剤の使用による圧延電力の低減が知られている。圧延機の動力に占める各エネルギーのうち摩擦エネルギーは40～60%もの多くを占めている²⁾。**Fig. 1**に示すように潤滑剤の採用により30%程度圧延荷重が低下する事例も報告されており³⁾、潤滑条件の適正化による省エネルギーが図られている。

後者の例として、塑性加工における潤滑の役割を**Table 1**に示す。潤滑は、主に被加工材と金型材間の摩擦低減と反応抑制とを担っており、その

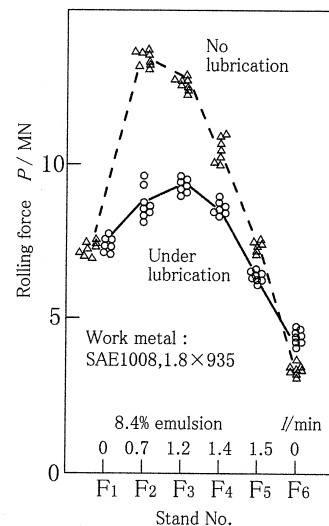


Fig. 1 Effect of lubrication on reducing rolling force of each stand of hot rolling.

Table 1 Role of lubricant in metal forming.

1. Reduction in friction
2. Improvement of surface quality of products
3. Protection against seizure and tool wear
4. Increase in releasability of products from die
5. Insulation from heat
6. Cooling die
7. Protection for oxidation of work metal

*Needs for lubricant
easily remove, easily maintenance
anti-oxidation, good wettability to die*

結果として損傷が防止され、高品質がもたらされている。また切削加工においては、工具の冷却、切削力の低減、凝着の防止などにトライボロジーが活用されている。鋳造においては、金型と溶湯とが接触するため、通常のトライボロジーとは少し異なる。ヒートチェックにおける塗型剤の断熱作用を考察したり⁴⁾ 離型時の焼付き挙動を考えたり^{5~10)} するときにトライボロジーの考えが反映される。さらに粉末冶金においては、圧粉や充てん挙動に及ぼす潤滑の影響が成形体密度との関連で重要になる。

3. トライボ特性評価試験

3.1 評価試験の位置づけ

トライボ特性を考えると、それが設計・試作段階におけるトライボ特性の事前予測であるのか、実際に寿命となった金型の向上策を求める状況にあるのか、によって評価のスタンスが違ってくる。言い換えると1回の成形実験における挙動を対象とするのか、繰返し実験による挙動変化を対象とするのかの違いといってもよい。**Table 2**にその違いをまとめる¹¹⁾。

前者における評価試験では、予測される条件因子のもとでその影響度の調査を行うことになるだろう。条件因子は事前に特定された上で、パラメータスタディによって特性が検討される。それによって製品品質が保証され、金型材料なり潤滑剤の選択が行われ、加工条件や工程設計に反映されることになる。つまり、この場合の評価試験はトライボ特性の限界を把握する試験と位置づけられる。

後者においては、実際に寿命となった金型をもとに寿命要因が推定され、寿命向上策を検討するための試験が行われる。この場合は、実際の加工条件や温度、雰囲気に近い試験条件が設定され、試験回数も実加工に近い個数が選択される。いわばトライボ特性の経時変化を把握する試験であり、生産段階のトライボ特性を確認するための評価試験と位置づけられる。

一方、評価目的に向かって試験をどう位置づけるかという点では共通した考え方がある。**Fig. 2**はそれをうまく表現している¹²⁾。

我々は、製品品質を向上させたいとか、寿命を向上させたいとかいった課題に直面したとき、**Fig. 2**の経路Aに示すように、とすれば「条件因子」を与えただけで直接「結果(アウトプット)」を求めがちである。一方、経路Bもあるが、複雑多岐にわたる条件因子を解きほぐしてメカニズムを導き、結果を得るのはなかなか難しく現実的ではない。そこで第3の道である経路Cが考えられる。つまり適切な試験方法を考案してその評価結果をもとに「結果」を得ようとする道である。ただしここでいう試験法は材料試験機で機械的性質を求めるような「測定方法」ではない。対象とする現象の機構を考えつつ、問題解決にどう役立つ

Table 2 Two types of tribo-simulator for metal forming.

type	single operation type	multi-operation type
purpose of evaluation	severity of forming conditions ex. critical working reduction to seizure	cumulative phenomenon ex. generation and growth of seizure
similarity in material test	tensile test	fatigue test
object of study	non-stationary phenomenon	stationary phenomenon
application	for development (research & development, production technology)	for improvement (production line, workshop)
examples	- backward extrusion test - ball penetration test - taper plug penetration test - drawbead test	- intermittent compression - twist test - draw type sliding test - U-shape bending test - shearing type test

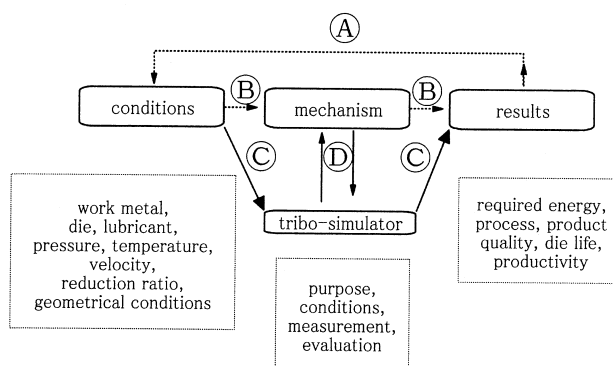


Fig. 2 Role of tribo-simulator in process-tribology system.

かを考察するための試験方法である。そこで「試験方法」と「メカニズム」との間で何回もやりとりすること（経路D）が必要になってくる。経路Aで試行錯誤を繰返すよりも一見回りくどい経路C+Dが、結局速く「結果」に到達することになる。

3.2 評価試験方法

塑性加工における摩擦の特徴の一つに、一方の材料が巨視的塑性変形を起こし、それに伴って材料の表面積の変化、多くは表面積の拡大が起こることがある。新生面が露出しやすくなるとともに表面の微視的構造が変化する。また摩擦発熱と塑性変形による温度上昇も起こる。さらに金型と材料間の摩擦状態を決定するのに大きな役割を果たしている潤滑剤の挙動が上述の変化によって影響される。つまり界面の油膜厚さを決定する油量や界面への導入、捕捉などの挙動が加工法、加工条件によって違ってくる。このような塑性加工の特徴をすべて試験法に盛り込むのはきわめて難しい。さらに試験法としては摩擦力と垂直力が測定でき、試験条件を広範囲に変化させることが望ましい¹³⁾。

これまで評価の目的によって様々な試験法が考案されてきている^{13, 14)}。また最近日本塑性加工学会誌が評価試験法を特集している¹⁵⁾。上記まとめによれば、試験方法は3つに分類される。すなわち汎用基礎的摩擦試験法、塑性加工用基礎的摩擦試験法、塑性加工モデル摩擦試験法である。

汎用基礎的摩擦試験法の代表例は四球式試験やピン・ディスク式試験で、軸受などの機械要素の摺動面における摩擦状態を評価するための試験法である。これらの試験法を用いるときには、把握したい対象加工方法の潤滑状態をどの程度反映させられるのかを十分検討する必要がある。

塑性加工用基礎的試験法は、少なくとも摩擦対の一方が塑性変形するという特徴を備え、単純な接触面形式を採用して評価目的に応じたデータがとれるように工夫されている。

塑性加工モデル摩擦試験法は、実際の塑性加工と同じかそれに近い接触形態もしくは一部分をモデル化した形態で、加工条件に近い試験条件の下で評価を行う試験方法である。引抜き形、押出し

形、圧延形などがある。

3.3 評価試験の活用事例

基礎的な検討では、後方せん孔における表面積の拡大を求めたり¹⁶⁾、焼付きの発生に及ぼす炭化物間隔の影響を調べたり¹⁷⁾、工具と素材の適合性評価が行われている^{18, 19)}。

一方、応用評価では、3.1節で述べたように、評価試験の位置づけによって活用の仕方も異なる。1回の成形による挙動評価試験では、後方せん孔試験を用いたB₂O₃の潤滑性能評価²⁰⁾やボール通し試験による潤滑剤の開発²¹⁾、円錐状の試験片を押し込む形式のスパイクテストによる成形性の評価²²⁾などが行われている。繰返し挙動評価では、長時間試験も含めて、引抜き形摩擦試験によるアルミニウム合金板の焼付き性評価²³⁾や軟化挙動を把握する試みが²⁴⁾などが行われている。

4. プロセストライボロジーの活用と展開

4.1 加工限界の見極めと向上

プレス成形において、厚板を素材にして冷間鍛造と組み合わせた部品成形²⁵⁾が増加している。歩留まりよく肉厚差のある断面形状品を成形できる特徴があるが、従来のプレス成形よりは高荷重になるため、型材や潤滑剤の選択に留意する必要がある。また成形性と強度が両立した鋼板の開発が望まれる。

野々山らは、後方せん孔試験を用いて温間におけるガラス系潤滑剤の性能を評価し²⁰⁾、潤滑方法などを工夫することで、高硬度なばね鋼に概略12×42×53mm深さの鏢形状断面の深穴を成形した²⁶⁾。また五十川らはスパイクテストでステンレスの温間鍛造用潤滑剤の評価や工具の摩耗を評価している²⁷⁾。今後ますます鍛造部品のネットシェイプ成形が進むにつれて、加工限界を追求する製品が多くなると思われる。それに伴って評価試験法も工夫されてくるだろう。

4.2 型寿命の向上

Fig. 3に塑性加工金型に起こりうる損傷とそれに関係する金型材料特性因子との関連をまとめた²⁸⁾。摩耗、かじり（焼付き）、へたり、だれ（塑性流動）、ヒートチェックといった金型損傷の改善には、金型の高温度強度や耐酸化性、熱疲労強度

などの材料特性や被加工材との適合性を考慮する必要がある。もちろん同じ摩耗であっても冷鍛型の摩耗と熱鍛型の摩耗とは関連する金型特性が違ってくるし、純粋にトライボ特性だけを考えているだけでは解決しない。さらに実際の金型ではこれらの損傷が複合されて生じているのが普通で、相反する材料特性間のバランスをとることが求められる。また型の寿命向上という点、短絡的に高性能な型材や潤滑剤への置き換えが検討されがちである。寿命までの損傷経過を把握して寿命のメカニズムを推論しながら合理的に向上させることが必要である。

Fig. 4に金型の寿命を向上させる手順の一例を示す。まず寿命となる判定基準をはっきりさせる(ステップ1)。一定の基準と比較して製品の品質低下をもたらすことが寿命の判定になるのだろうが、それが外観なのか、精度なのか、強度なのかで対策が違ってくる。次にその品質低下をもたらす金型の損傷を観察して寿命原因を推定する(ステップ2)。さらに金型の損傷のうち寿命を最も効果的に上昇させるものを中心に損傷原因を考える(ステップ3)。以下損傷原因の特定(ステップ4)、対策立案(ステップ6)となるが、その損傷が特異的に生じたのか定常状態で生じたのかの見極めが必要である(ステップ5)。Fig. 4の例では、最終的に金型材料の選択に進んでいくことになるが、立案過程で作業手順の検討や潤滑剤の検討なども行うことになる。

ステップ2においては、観察結果をなるべく定

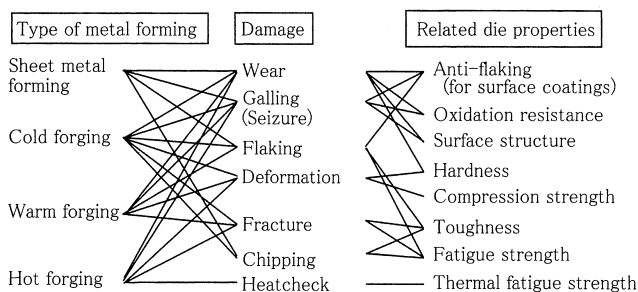


Fig. 3 Relationships between die damage and properties.

量的な値で整理し、データベース化することが大切である。例えば、金型では摩耗や焼付きの深さ、面積、場所、硬さや表面残留応力の変化など、製品では焼付きの場所、方向、量など、加工条件では加工荷重や加工温度、金型温度、潤滑剤の量や配管のトラブルまでが調べられ、記録されるとよい。

また寿命原因を推定するときには、キーワードに惑わされないことが肝心である。例えば「寿命原因は金型の摩耗だ」といってもこれは「金型表面が元の形状からその位置をマイナス側に変化させている」ことを表したにすぎず、この言い方、考え方では原因を捉えたとはいえない。損傷に至るモデルを考える必要がある。例えば、「マイナス側に変化したのは金型材料が外部に持ち去られたのか、単に流動して場所を変えただけなのか、持ち去られたのだとすると少しずつなのか、ある大きさの単位でなのか」等々。このような思考の繰返しで初めて、「加工時の熱負荷によって徐々に工具が軟化し、加工力に耐えきれず変形し、ひずみ量が大きくなってクラックが生じ、クラックの中が優先的に酸化され、もろくなってさらにクラックが大きくなり、ついには複数のクラックが連結して剥離し、金型表面から材料が離脱した」というようなモデルが描けるのである。逆に、「潤滑効果が十分で、金型の熱軟化よりは温度変動が大きいことによる熱応力の繰返しで、疲労によってクラックが生じ、最終的に摩耗した」というモデルの場合もあるだろう。同じクラック起源の摩耗であっても両者への対策は全く逆になる。

ステップ5の見極めを確実にするためには、日頃工程のチェックシートを作成して寿命数の変動記録をつけておくといよい。工程のFMEA (Failure Mode and Effect Analysis; 潜在故障解析)^{2,9)}を利用するのも一つの手段である。このような作業によって金型寿命の最低レベルを平均レベルに引き上げることが可能である。

一方、定常的に平均レベルに達している金型寿命を向上させるには工夫がいる。長年決まった手順で工程が動いており、製品品質の確保が優先されるために工程条件を変更する自由度は少ないからである。この場合にはTQC活動によく用いられているPDPC(Process Decision Program Chart)^{3,10)}を

使って検討すると効果的かもしれない。これを検討する過程で工場、生産技術、研究開発の各部署の協力が得られ、意志の疎通がはかれるからである。以上の分析を終えて対策を取ることになる（ステップ6）。当然最も効果的な改善のポイントを考えることになるが、まずは操作上、工程上で金型の負荷条件を軽減する改善策はないのかを検討するのがよい。そしてその対策を記録してデータベースとして蓄積し、技術として継承することをぜひ行ってほしい。この作業を実施して効果を確認し、寿命向上効果が安定した時点で、型材や表面処理もしくは潤滑剤の変更を行う。これらを変えるのは一番最後の手段である。こうすれば潤滑剤や型材の変更に伴う効果がはっきり捉えられ、これらの限界や他の金型に展開する成否の見極めがつけやすいだろう。操作、工程上の検討なしにやみくもに型材等の変更を行ってもその効果を独立して確認するのは難しい。

4.3 メンテナンス・トライボロジー

生産設備の保全に関連したトライボロジーをメンテナンストライボロジーといい、今後環境対策に重要な役割を果たすと思われる。ここで総合的なメンテナンストライボロジーにより大幅な省エネルギーと経済効果を実証した製鉄所の例を紹介する³¹⁾。潤滑油の使用量削減や性状劣化管理、潤滑異常を診断する技術の開発、新しい潤滑剤の開発などの活動を通じて、年間20億円以上の直接経済効果を達成している（1985年当時）。また故障件数も活動中の5年間で1/10に減少した。単に故障解析に留まらず総合的なメンテナンストライボロジーを行うことがいかに生産効率を上げるかを如実に示した例といえる。当然鍛造やプレス加工においても作動油や加工油の削減に果たすトライボロジーの影響は大きく、このような考えが生産活動の現場に取り入れられてもよいのではないだろうか。

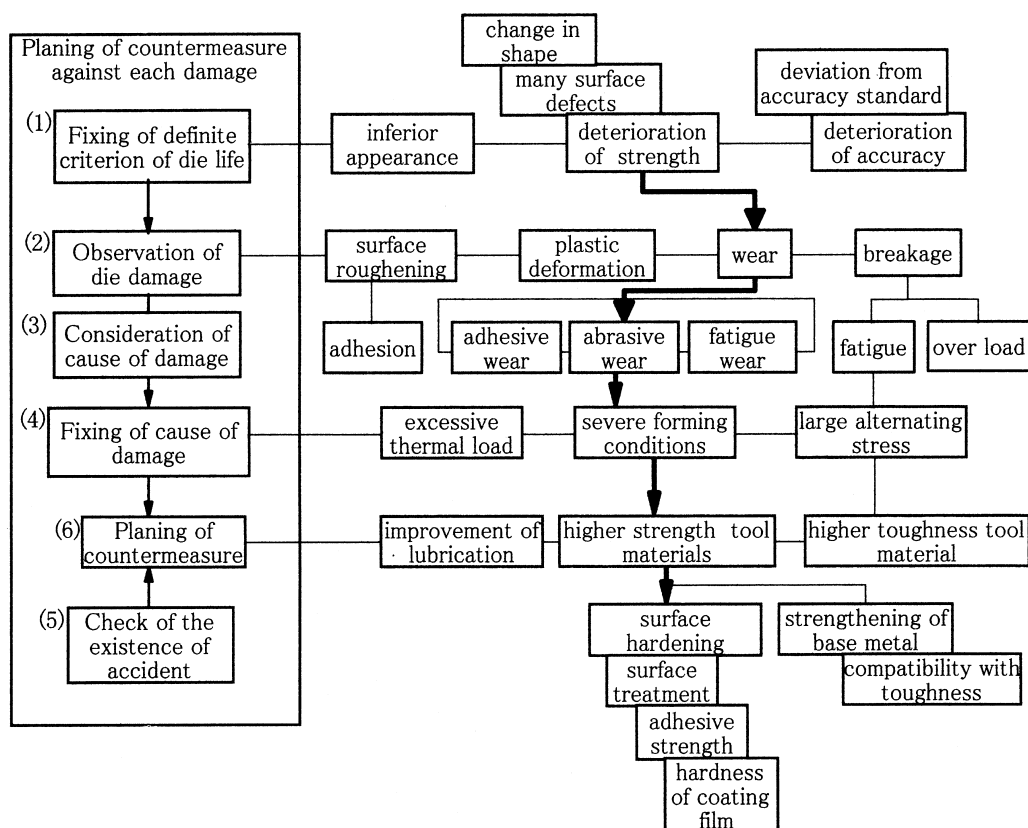


Fig. 4 An example of flow chart for improving die life.

ともすればメンテナンスは開発や生産に比べて軽視されがちである。金型の寿命向上を業務にする専門部署はほとんど設置されていない。経済効果のみならず省エネルギーや環境保全に直接貢献するこのような活動を日常的に実施する体制をぜひ確立する必要がある。

一方、実際に寿命向上活動に携わる人には塑性加工に関する知識以外に工具材料や表面処理、潤滑剤に関する基本的知識が必要である。特に工具鋼の種類や特徴、熱処理による金属組織の変化に関する知識は金型の損傷を観察し、メカニズムを推定するのに非常に役立つはずである。それによって寿命向上の取り組みが一層合理的に行えることになるだろう。どちらかという工具材料メーカーや潤滑剤メーカーに依存しがちな傾向は改められる必要がある。知識と考察に勝るトライボ特性評価試験はない。

4.4 工具材料・表面処理の適正利用

多くの金型はいわゆる工具鋼で造られる。工具鋼の特性は焼入れ、焼戻し熱処理によって決定され、JIS規格でその標準条件が決められている。しかしこれは絶対的なものではなく、用途や必要とする特性によって規格をはずれた条件で処理される場合が生じる。例えば後工程で表面処理を行うときには、冷間ダイス鋼であっても高温戻しが実施されることがあるし、高速度工具鋼を冷鍛型に用いる際に、通常の焼入れ温度より80℃ほど低い条件で焼入れると靱性が向上する³²⁾。いずれの場合も靱性を重視した結果で特に大割れ対策として有効である。また耐焼付き性を重視した選択ではFig. 5に示すように炭化物の析出が多い熱処理条件を選択するとよい³³⁾。いずれの場合も単に硬さだけで特性が決まるわけではないことに留意する必要がある。

耐摩耗性や耐焼付き性を向上させるために、多くの場合硬質表面処理が施される。処理によって形成されるVCやTiC、TiNなどの炭化物や窒化物の皮膜はそれらの硬さに基づく効果以上に耐焼付き性に優れていることで効果を発揮する³⁴⁾。しかし本来の優れた性質を阻害する条件として、密着性と表面粗さに注意する必要がある。密着性に関しては表面処理を行う温度の影響が大きい。一

般に400～500℃で実施されるPVD（Physical Vapor Deposition：物理的蒸着法）より鋼の焼入れ温度付近で処理されるCVD（Chemical Vapor Deposition：化学的蒸着法）やTRD（Thermo-reactive diffusion and deposition）処理の方が高密着である³⁵⁾。一方、硬質皮膜の表面粗さが大きいと、Fig. 6に示すように、その突起で被加工材を機械的に削り取ったり、凹凸が焼付きの起点になったりして、本来の耐焼付き性を示さないことがある³⁶⁾。このことは皮膜の特性調査や評価試験に当たっても注意すべきことである。

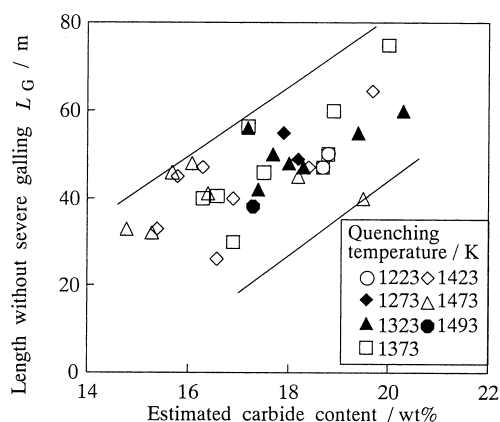


Fig. 5 Change in limit of drawing length without severe galling with carbide amount in high speed tool steel.

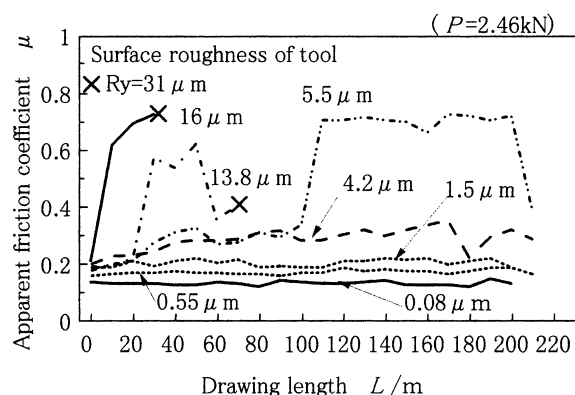


Fig. 6 Relationships between friction coefficients and drawing length for different surface roughness of VC coated tool.

セラミックスは耐摩耗性や耐焼付き性には優れるが、これまで塑性加工用の型には適用が進んでいなかった。しかしサイアロンを押し型に適用した好例がある³⁷⁾。熱間ダイス鋼を外周に焼きばめすることで引張応力が生じないようにして割れを防ぐ工夫がなされた。材料を組み合わせ、長所を引き出した点で今後の方向を示している。

一方プレス型では、低コスト化を狙って生産量に見合った型材の利用技術や材料の開発が行われており³⁸⁾、今後のもう一つの方向を示している。

4.5 潤滑技術の新展開

熱間圧延においては、最近の高速度鋼ロールの採用と相まって潤滑剤の採用が増えている。摩擦条件が非常に厳しいステンレス鋼の形鋼圧延では、カルシウム添加の油剤が開発されて、製品キズの低下、後工程の負担軽減に効果を上げている³⁹⁾。

冷間鍛造では、素材への化成皮膜処理と金型への硬質皮膜処理によって、型寿命はほぼ満足される状況にある。しかし一層のコスト削減のため、皮膜の短時間処理や加工途中での再処理が可能な水溶性潤滑剤が開発された⁴⁰⁾。また金型潤滑用として普通鋼用²¹⁾やステンレス鋼用の専用油剤が開発されている。

今後高精度加工が追求される動きのなかで、特性の優れた油剤が引き続き求められるとともに、コストや洗浄性、廃棄処理性といった観点からの見直しも行われると思われる。

また環境保護の立場からプレス成形用に、金型を冷却することで生じる氷⁴¹⁾や霜⁴²⁾を利用した潤滑や、水圧を付加させた潤滑⁴³⁾、水を媒体にして固体潤滑剤を分散させた潤滑⁴⁴⁾が試みられている。さらにチタン板やステンレス板を成形する際の潤滑剤に小麦粉の水懸濁液を用いる研究がある⁴⁵⁾。潤滑性能やコストを多少犠牲にしても脱石油系潤滑剤の探索が進むものと思われる。

温・熱間鍛造では、従来、黒鉛系の潤滑剤が多用されてきたが、作業環境や廃水処理の改善を目指して白色系潤滑剤への転換が進んでいる。

4.6 型負荷の見積り

金型の寿命を考察する上で、外的条件である応力や熱的負荷を知ることは最も重要である。しか

し量産過程においてこれらを求めることは容易ではない。先に述べた評価試験法によっていろいろなデータがもたらされたにしても、実際の加工において負荷条件が未知であっては、そのデータを活用するすべがない。

このギャップを埋める試みが行われている。すなわち済木ら^{46, 47)}は、熱負荷を見積るための試験装置を考案し、数値シミュレーションによって金型表面における温度上昇を見積っている。それによって軟化に起因する型寿命を予測する試みを始めている。

応力的な見積りでは、Hansenら⁴⁸⁾が成形途中の面圧や摩擦力の変化を計測できる試験法を考案して、摩擦係数の変化を捉えられるようにした。また最近盛んになっている数値シミュレーションに活用できるように、摩擦に及ぼす各種成形変数(すべり速度、ひずみ速度、ひずみなど)の影響を測定できる板成形摩擦試験法が考案されている⁴⁹⁾。

4.7 金型寿命の予測

金型寿命の向上はそれ自体が生産効率を上昇させる効果があるため重要なことであるが、もう一歩進めてそれを予測できるようになると画期的なことになる。予測できるということは、寿命のモデルが構築されて定量化されることである。数値シミュレーションと組み合わせることで、工程設計や型設計へのフィードバックが可能になるだろう。設計の段階で型寿命を考慮し、工程や型構造を最適化できることになる。

しかし摩耗や焼付き現象をモデル化することはこれらに關与する要因が非常に多く、また相互に影響し合うためにそう単純ではない。機械要素の摩擦では古くから機能維持のための方法論⁵⁰⁾やゼロ摩耗、可測摩耗の概念⁵¹⁾が提示され、摩耗マップ⁵²⁾が提示されている。しかしプロセストライボロジーにおいて現在提案されている予測技術は、材料の疲労予測を応用した考え方が主である^{53~55)}。一般に高硬度な金型の疲労強度には、材料を製造する段階で制御が難しい非金属介在物の影響が大きく、その予測精度を実際の金型に適用できるほど定量的に向上させるのは容易ではない。さらに疲労以外の原因による寿命モデルを考

案する必要もある。現状ではパラメータスタディによって負荷条件や型形状の変更によるトライボ特性や熱負荷の変化を知り^{5,6)}、その結果を寿命向上策の検討に用いるのが妥当な状況であろう。ただ今後については、3次元シミュレーションの実現や計算の高速化、ニューラルネットの利用^{5,7)}、モデルの構築によって、寿命を事前検討する技術が確立されることを期待したい。

5. まとめ

プロセストライボロジーの4つの要素、金型、被加工材、潤滑剤、外部条件のうち、金型を中心に関連する技術の動向をまとめた。評価試験を活用して型寿命を向上させる点に力点が置かれ、他は散漫になったかもしれない。基礎理論や潤滑の考え方などここで取り上げなかった内容については参考文献をご参照いただきたい。今後現象解析とそのモデル化が進み、数値解析との融合によって成形加工における複雑なトライボ現象が少しでも解明され、生産の場に活用されることが望まれる。

参考文献

- 1) 東秀和, 藤原槇太郎: 素形材, **39**-12(1998), 12
- 2) 寺門良二: 日本機械学会誌, **81**-719(1978), 1069
- 3) 神居詮, 寺門良二: 塑性と加工, **17**-182(1976), 202
- 4) 金型のヒートチェック研究部会: 共同研究成果発表講演会予稿集, (1995), 日本熱処理技術協会
- 5) ダイカストの生産技術に関する研究, ダイカストの生産技術研究部会編, (1993), 127, 日本鋳物協会
- 6) 土屋能成, ほか: 第120回日本鋳物協会全国講演大会講演概要集, (1992), 73
- 7) 川浦宏之, ほか: ref. 6), 74
- 8) Tsuchiya, Y. et al : 19th NADCA Trans., (1997), 315
- 9) Chen, Z. W. and Jahedi, M. Z. : Int. J. Cast Metals Res., 11 (1998), 129
- 10) 糸井高士, ほか: 日立金属技報, 15(1999), 91
- 11) 土屋能成: プロセストライボロジ分科会年間報告書 (1994年), (1995), 155
- 12) 水野高爾: 日本塑性加工学会技術懇談会テキスト, (1985), 34
- 13) 塑性加工におけるトライボロジ, 日本塑性加工学会編, (1986), 83, コロナ社
- 14) プロセストライボロジー—塑性加工の潤滑—, 日本塑性加工学会編, (1993), 66, コロナ社
- 15) 日本塑性加工学会: 塑性と加工, **39**-455(1998), 1179
- 16) 団野敦, ほか: 塑性と加工, **24**-265(1983), 213
- 17) 土屋能成, ほか: 塑性と加工, **38**-433(1997), 141
- 18) 堂田邦明, ほか: 日本機械学会論文集(C編), **58**-547 (1992), 277
- 19) 堂田邦明, ほか: 日本機械学会論文集(C編), **59**-563 (1993), 266
- 20) 野々山史男, ほか: 塑性と加工, **34**-393(1993), 1172
- 21) 北村憲彦, ほか: 塑性と加工, **39**-448(1998), 452
- 22) Isogawa, S. et al. : CIRP Ann., **42**-1(1992), 263
- 23) 土屋能成, ほか: 第44回塑性加工連合講演会講演論文集, (1993), 625
- 24) 澤村政敏, ほか: 塑性と加工, **39**-455(1998), 1258
- 25) 中野隆志: 素形材, **37**-9(1996), 11
- 26) 山田通: 素形材, **36**-10(1995), 19
- 27) 五十川幸宏, ほか: 平成10年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1998), 261
- 28) 新井透: 第51回塑性加工講習会テキスト, (1989), 1
- 29) 鈴木順二郎, ほか: FMEA・FTA実施法, (1996), 日科技連
- 30) QC手法開発部会: 新QC七つ道具, (1992), 日科技連
- 31) 坂井勝義, 倉橋基文: 潤滑, **33**-3(1988), 181
- 32) 鋼の熱処理改訂5版, 日本鉄鋼協会編, (1969), 509, 丸善
- 33) 土屋能成, ほか: 塑性と加工, **38**-433(1997), 135
- 34) Arai, T., Tsuchiya, Y., : Metal Transfer and Galling in Metallic Systems, The Metallurgical Society of AIME (1986), 197
- 35) 土屋能成, ほか: 塑性と加工, **37**-429 (1996), 1065
- 36) 土屋能成, ほか: 塑性と加工, **34**-393 (1993), 1184
- 37) 岩瀬悟, ほか: 第47回塑性加工連合講演会講演論文集, (1996), 309
- 38) 小川淳, ほか: 平成11年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1999), 201
- 39) 井澤勝, ほか: 第48回塑性加工連合講演会講演論文集, (1997), 477
- 40) 竹内雅彦, ほか: 平成10年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1998), 255
- 41) 小林勝, ほか: 平成10年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1998), 257
- 42) 中村和彦, ほか: 平成8年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1996), 446
- 43) 中村和彦, ほか: 第48回塑性加工連合講演会講演論文集, (1997), 345
- 44) 片岡征二, ほか: 平成10年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1998), 429
- 45) 吉村博文, ほか: 第48回塑性加工連合講演会講演論文集, (1997), 359
- 46) 濟木弘行: 鍛造技法, 17(1984-5), 10
- 47) 濟木弘行, 南明弘: 鍛造技法, 39(1989-10), 1
- 48) Hansen, B. G. et al : J of Mech. Work. Tech., 13(1986), 189
- 49) Saha, P. K. and Wilson, W. R. D : Wear, 172(1994), 167
- 50) H. チコス著, 桜井俊男監訳: トライボロジー(1980), 166, 講談社

- 51) Bayer, R. G. et al : Wear, 5(1962), 378
- 52) Adachi, K. et al : Wear, **203-204**(1997), 291
- 53) 宮原光雄,ほか : 第45回塑性加工連合講演会講演論文
集, (1994), 29
- 54) 久保田邦親, ほか : 平成11年度塑性加工春季講演会講
演論文集, (1999), 261
- 55) 藤川真一郎, ほか : 平成8年度塑性加工春季講演会講演
論文集, (1996), 208
- 56) 中西広吉, ほか : 塑性と加工, **37**-421(1996), 207
- 57) 濟木弘行, ほか : 平成10年度塑性加工春季講演会講演
論文集, (1998), 343

(1999年7月20日原稿受付)

著者紹介



土屋能成 Yoshinari Tsuchiya

生年：1951年。

所属：加工基盤研究室。

分野：金型材料，表面処理のトライボロ
ジー。加工熱処理による材質強化。

学会等：日本塑性加工学会，日本鉄鋼協
会会員。
工学博士。