

特別講演



Y. Tsuchiya

# 金型表面処理の技術動向と今後の展望

土屋 能成\*

## 1. まえがき

加工技術は自動車部品の開発とともに進歩し、それを潤滑技術や金型材料、表面処理技術が支えてきた。表面処理のうち硬質被膜はトライボ特性に優れるが、実用上2、3の留意点がある。ここでは成形加工技術と金型表面処理の発展を概観するとともに新たな加工技術に対応するための硬質被膜の課題を示し、今後に向けた研究開発の動向を紹介する。

## 2. 塑性加工技術の進展と潤滑技術、表面処理技術の関連

近年金型に施される表面処理の主流はチタンやバナジウムの炭化物や窒化物といった硬質物質を数ミクロンメートルの厚さに被覆するいわゆる硬質被膜処理である。特に冷間鍛造やプレス成形の金型ではその適用が多い。高強度な被加工材を高精度に成形するとともに金型の補修や交換頻度を少なくして生産性を上げる手段として必須の技術になっている。

硬質被膜が金型に適用されるのは1960年代から1970年代にさかのぼる。1960年にCVD(化学的蒸着法: Chemical Vapor Deposition)によるTiCがドイツで報告

され<sup>1)</sup>、1970年に日本の市場に出る<sup>2)</sup>のと同じ年にTRD(溶融塩浸漬法: Thermo-reactive Deposition and Diffusion)、いわゆるTD処理、によるVCが繊維機械部品に適用されている<sup>3)</sup>。さらにPVD(物理的蒸着法: Physical Vapor Deposition)では、1972年に発表されたARE(活性化反応蒸着法: Activated Reactive Evaporation)によるTiCが切削工用具用途に向けた研究の第一歩、と考えられている<sup>4)</sup>。現在硬質被膜の主流である3つの技術がほぼ同じ時期に実用化研究段階に入っていたことになる。少し遅れて1986年にCVDとPVDの長所を併せ持ったプラズマCVDが実用化された<sup>5)</sup>。当初、CVDでは高温CVDのTiC、TiN、TiCNが実用化され、PVDではイオンプレーティングによるTiN、TiCNが、TRDでは、高温塩浴法のVC、(V, Nb)Cおよび高温流動層炉法のVCといった被膜が実用化された。その後耐酸化性や耐凝着性に優れるといわれるCrNやTiAlNが市場に流通し、耐アルミニウム溶損性に優れたTiAlSiCNOといった多元素ナノコンポジット膜も開発された<sup>6)</sup>。並行して、被膜自体が低摩擦特性を示すDLC(Diamond-like Carbon)が金型にも適用されるようになる。実用化にあたっては被膜の改良とともに、事前に母材に窒化処理を施して被膜界面を強化したり、多層や

表1 日本の冷間鍛造技術とプロセストライボロジーの推移

年代	1960	1970	1980	1990	2000	2010
社会情勢	乗用車自由化	石油ショック	円高ショック	バブル崩壊	製造業の空洞化	グローバルコスト
冷間鍛造の対象	自転車、オートバイ、乗用車、カメラ部品など	スプライン・バベルギヤ	内・外ギヤ部品 CVJ部品	ヘリカルギヤ 異形断面部品	マイクロパーツ 高精度化 多様な鍛造精度	μm級の高低能力
冷鍛工法	複数同時押し出し 捨て軸・肉移動	工法の見直し (加工限界)	側方押し出し	充満度の改善 面の成形	自由端の制御	前面密閉成形
コーティング	CVD-TiC(独)	CVD-TiC(日) TRD-VC PVD-TiC	実用化段階 86:PCVD	DLC、ダイヤモンド膜	DLC	
塑性と加工特集号 (数字は号番号) トライボロジー関連	33:表面 53:型及び型材料 64:摩擦 87:摩擦・潤滑 118:摩擦測定法	139:塑性加工と潤滑 150:年間展望、潤滑(摩擦・ 摩擦を含む) 157:簡易打抜き型 190:高強度薄鋼板の加工 204:板成形における表面損 傷と型材料 227:塑性加工におけるトライ ボロジー	261:塑性加工用工具の材 質と寿命 265:塑性加工における焼付 き現象 285:塑性加工におけるトライ ボロジー	393:塑性加工におけるトライ ボロジーの最近の進歩 413:塑性加工のトライボロ ジーの基礎を探る 411:材料の微細表面形状 の加工と利用 455:塑性加工用トライボシ ミュレータの現状と将来	528:地球環境とこれからの 塑性加工トライボロジー技術 493:硬質工具材料 518:硬質被膜の特性と塑性 加工への応用 520:加工における摩擦 546:最先端金型技術 582:最近の金型への表面 処理	612:最新金型技術と技術伝 承の現状 630:熱間成形技術の最前 線 626:地球環境にやさしい加 工技術 640:冷間板成形のトライボ ロジーの最前線 650:金型の寿命向上のため の最先端技術
プロセストライボ ロジーの研究動向	塑性加工における潤滑機構 冷鍛型の寿命と製品精度 薄板冷延の潤滑油 冷延油膜厚さ 各種加工における摩擦・潤滑 潤滑剤封入押出	鋼の温間鍛造潤滑 板材引抜き試験による摩擦と 潤滑の研究 冷間圧延の潤滑機構 アルミ冷延油の黒化現象 冷延ステンレスの表面損傷	各種摩擦、摩擦試験法 平板引抜き表面損傷メカニズ ム 潤滑機構の理論と検証	表面突起の押しつぶし 板材成形の表面平滑化機構 表面処理鋼板のトライボ特性 評価 圧延潤滑機構 温間鍛造油、冷間鍛造油開 発	環境対応型潤滑剤 一液型潤滑剤 試験法、評価法の提案	

石川の表<sup>7)</sup>の一部に追記

\* 岐阜大学次世代金型技術研究センター 特任教授

傾斜組成で成膜して密着性を向上させる工夫も行われてきた。

このような硬質被膜の発展は塑性加工技術が発展するための要請に基づくところが大きい。表1に石川による冷間鍛造技術の推移のまとめ<sup>7)</sup>の一部とプロセストライボロジー(加工における摩擦・摩耗・潤滑に関する学問領域)の進展<sup>8, 9)</sup>を10年ごとにまとめて示す。これによれば冷間鍛造技術の発展は自動車部品の適用拡大ニーズによるところが大きい。冷間鍛造の対象部品からその技術の変遷を見ると、オートバイや家電品、カメラ部品といった小さな部品の製造から歯車やスプライン箇所を持った軸物部品といった複雑形状で高い精度が要求される部品に拡大してきている。このような部品の加工を実現するために捨て軸や側方押出という工法が開発されるとともに、高精度な部品成形のために、熱間鍛造が冷間鍛造に置き換わったり温間鍛造が施行されたりするようになる。必然的に金型に負荷される力が過大になることへの対応として金型材料も進歩し、冷間ダイス鋼から高速度工具鋼、超硬合金へと高強度化することになる。70年代後半からの硬質被膜の実用化もこの動きに呼応して工法開発に貢献することになる。90年代以降工法の開発はさらに進み、閉塞鍛造や分流鍛造、背圧形状制御といった技術が開発されることになる。経済情勢に対応するための低コスト化や環境に配慮した生産方式への変化もこの時代の特徴である。この時代の生産技術のキーワードはネットシェイプ成形、高精度成形、グローバルな低コスト生産になる。この時期、金型材料・表面処理の進展では、超微粒子超硬合金の開発やPVDの改良、被膜種類の増加があげられる。

このような加工技術の進展は、潤滑剤の改良、開発と金型材料、表面処理の改良、開発によるところが大きい。いわゆるボンデ処理、リン酸塩の化成処理被膜、が第2次世界大戦終了後加工分野に広まったのを契機にして、冷間鍛造で製造される製品が急増した。油剤においては極圧添加剤の適用で耐焼付き性能が向上して高強度材やステンレス材料の部品成形が進んだ。しかし90年代以降は環境保全や循環可能型社会の実現を目指して化成被膜処理に対してはスラッジレスや代替品の開発が指向されるようになる。油剤に関しては極圧添加剤のない製品開発や油剤の使用量を減らしたりまったく使用しない技術開発が進んだ。このような流れの中で金型への硬質被覆処理は、潤滑剤が受け持っていた摩擦低減や耐摩耗性、耐焼付き性の効果を分担して世の中のニーズに対応する重要な役割を担ってきた。さらに被加工材料では高張力鋼板や合金鋼といった高強度材料の採用が増え、炭素繊維強化複合材料や各種クラッド材で構成される製品が増えて、成形精度や面品質の確保のために新しい技術開発が求められている。今後も、生産のグローバル化にともなう地球規模の経済情勢の変動に対応しつつ、「いいものを効率的に安く生産して供給する」というものづくりの基本を維持するためにプロセストライボロジーの重要性が増加するものと思われる。

### 3. 金型に適用される表面処理の種類とトライボ特性

金型に用いられる表面処理には、熱間成型型やダイカスト金型など熱負荷の高い金型に適用される窒化処理や金型の補修に使われる肉盛溶接や溶射、大型のプレス型に採用される硬質クロムメッキがあるが、小型のプレス型や鍛造型には硬質被膜が欠かせない。ひと口に硬質被膜といっても多種多様で、処理方法や被覆物質によって特性が異なる。利用者が金型に表面処理を採用する場合、各表面処理メーカーの商品名で比較、検討することが多いと思われるが、本来は処理方法や被膜の物質名までさかのぼって検討することが望ましい。

硬質被膜のトライボ特性として耐摩耗性や耐焼付き性に優れることがあげられる。この理由として被膜がTi, V, Crといった遷移金属の炭化物や窒化物であるため硬さが2,000HVから5,000HVと非常に高いこと、及びこれらが化学的に安定な物質であるためにアルミニウムや銅など他の金属と反応しにくく凝着しにくいことがあげられる。耐焼付き性に優れる一例を図1<sup>10)</sup>に示す。この図はしごき型摩擦試験で潤滑油の摩擦係数に及ぼす各種添加剤の影響を調べたもので、冷間ダイス鋼(SKD11)とバナジウム炭化物(VC)被覆を比較している。SKD11の場合は添加剤によって摩擦が高くなる場合や安定して小さく維持されるものまでその効果はさまざまである。摩擦が低く維持される添加剤はいわゆる極圧添加剤で、その成分と材料をダイスの金属成分の反応によって保護膜が形成される効果が出ているものと考えられる。一方、VC被覆の場合は添加剤の有無や種類によらず、低い摩擦係数で安定している。添加剤のない基油においても低い摩擦が維持されるのはVC自体に凝着しにくい特性があるためで、添加剤由来の保護膜の効果をVCが代替しているといえる。

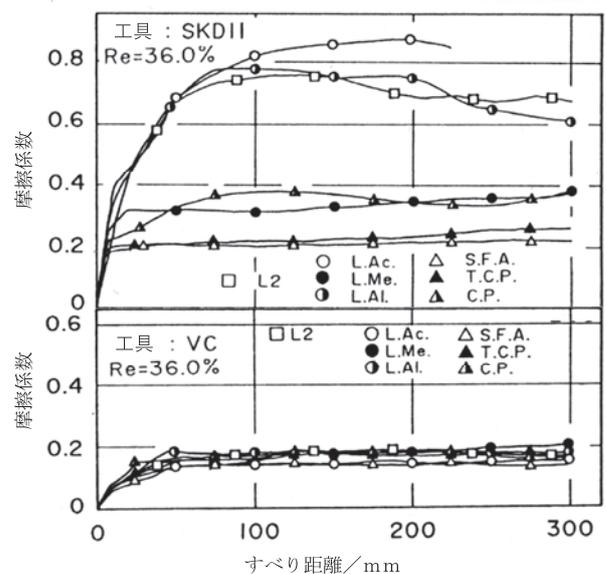


図1 摩擦係数に及ぼす添加剤の効果<sup>10)</sup>

また、金型材質によって摩擦係数に及ぼす潤滑剤の粘度の影響度合いが異なる<sup>11)</sup>が、SKD11では低粘度油の場合摩擦係数が高くなるのに対してセラミックスや超合金では粘度の影響がほとんど認められない。低粘度油において潤滑膜が切れて相手材料とダイスが直接接触しても凝着しにくいために摩擦係数が上昇しないといえる。これらの構成物質は炭化物や窒化物、酸化物であり、硬質被膜と同類である。硬質被膜でも同様の効果が期待でき、潤滑油の低粘度化や油膜の切れやすい強加工においてこの効果が発揮されるだろう。さらにセラミックや硬質被膜系の型材質は断面減少率の大きい強加工において摩擦係数の増加が抑えられ、広い加工範囲で効果を発揮する<sup>12)</sup>。

硬質被膜の優れた耐焼付き性が凝着を防いで高品位な製品表面を形成する例を図2に示す<sup>13)</sup>。これはS10Cの焼鈍材を無潤滑で後方穿孔押出してカップを成形した時のパンチランド部とカップ内面を観察したものである。VCパンチには焼付きは認められず、カップ内面もパンチの表

面を反映した鏡面になっている。ほかのパンチでは焼付きによってカップ内面にスジ状痕やむしれ傷が形成されているのと好対照である。このように優れた耐焼付き性能を持つ被覆材によって滑らかな金型の表面性状を転写させることができるので高品位な表面を製品に作り込むことができる。

このような優れた特性を実際の金型で引き出すために気を付けなければならない点がある。一つは金型の表面粗さで、一つは母材硬さである。耐焼付き性は金型の表面粗さに影響されて粗面の場合には耐焼付き性が劣化する。図3に引抜き時の摩擦係数に及ぼすダイス表面粗さの影響を示す<sup>14)</sup>。表面が滑らかな時には引抜き距離に対して安定した低い摩擦係数が維持されるが、表面粗さの増加とともに摩擦係数が引抜き距離に対して漸増するようになり、さらに引抜き途中で急増するように変化し、また急増の変化が短距離で生じるようになる。表面粗さの影響は硬質膜ほど強く表れるので被覆する場合は事前の表面粗さをなるべく小さく、ラップ仕上げ程度までに調整することが望ましい。板成形のかじり発生においても同様の影響が示されている<sup>15)</sup>。

硬質被膜の優れた特性を発揮させるためのもう一つの留意点は母材硬さを確保することである。平板引抜き試験で型かじり発生までの摺動回数を比較した研究<sup>16)</sup>では、TiCにおいてもVCにおいても母材硬さが低いほど早く型かじりが生じた。硬質膜をバックアップする母材強度の重要性が示されているといえる。近年、板成形にしる鍛造加工にしる、高強度材料の成形が増加して金型に負荷される面圧が高くなる傾向にある。面圧に堪える母材硬さに調整することが望まれる。

母材硬さに関する注意点では繰り返し表面処理をおこなう場合の被膜直下の母材軟化の問題がある<sup>17)</sup>。CVDやTD処理でTiCやVCを成膜すると母材中の炭素を一部使用するの、特に繰り返し処理を行う場合に層直下の母材中炭素が減少して硬度低下を起こすようになる。もともと固溶炭素量の少ない高速度工具鋼や熱間ダイス鋼で起こりや

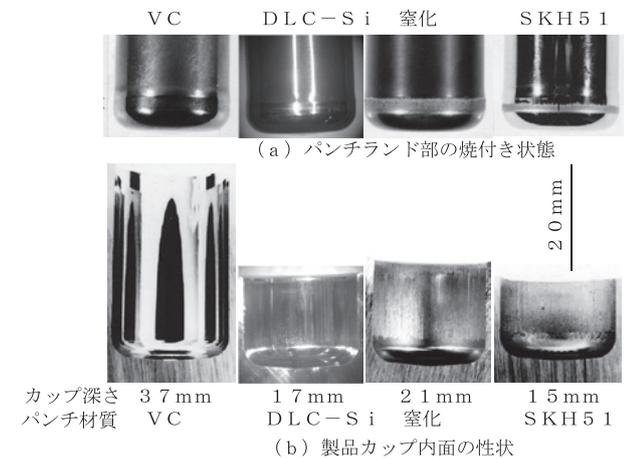


図2 後方穿孔加工後のパンチランドの焼付きと製品カップ内面性状のパンチ材質による違い<sup>13)</sup>

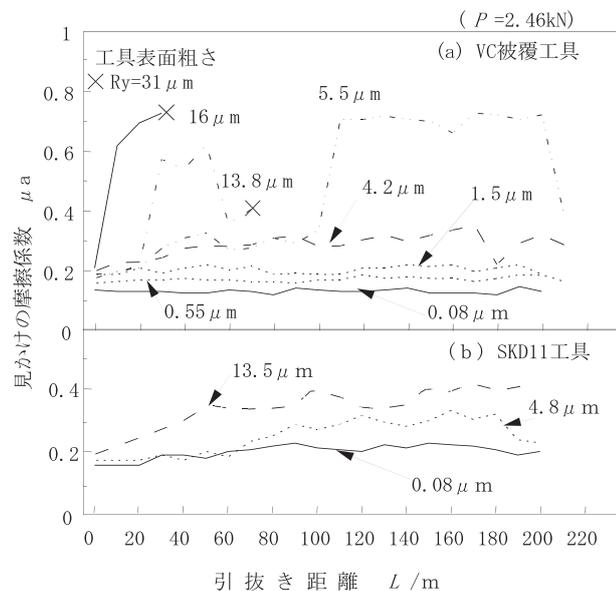


図3 見かけの摩擦係数に及ぼす工具表面粗さの影響<sup>14)</sup>

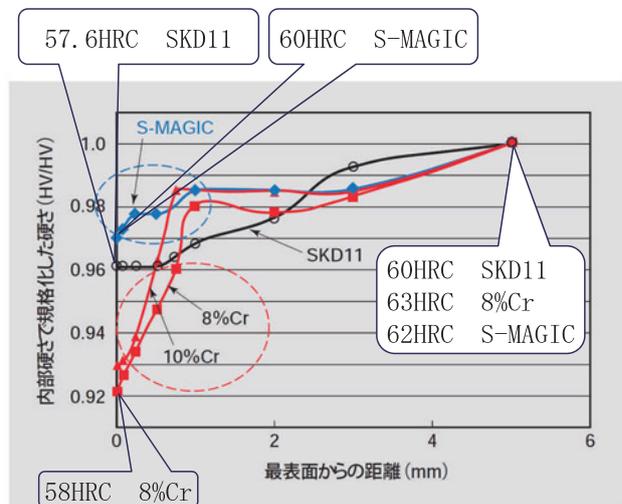


図4 TiC処理3回後の表面硬さ分布(文献17)に追記

すい現象であるが、冷間ダイス鋼においてもこれを改良した工具鋼が開発されている<sup>17)</sup>。図4にCVDでTiCを3回被覆処理した後の母材硬さ分布に及ぼす鋼種の影響を示す。母材硬さの高い8%Cr鋼や10%Cr鋼の表面近傍における硬さ低下の割合が大きくなっている。実際の硬さ値を推定して併記してみるとこれらはSKD11並みであるが改良鋼(S-MAGIC)では硬さ値でも高いことがわかる。表面処理を踏まえた型材開発の好例である。

一方、処理技術としては従来、成膜処理後に別途熱処理をおこなって内部の炭素を表面に拡散して炭素濃度を回復することが行われているが、母材低下を起こさないような表面処理方法の開発<sup>18)</sup>も行われている。

硬質被膜の特性を発揮させるには金型形状に対する配慮も必要になる。図5は六角トリミングパンチの寿命改善事例<sup>19)</sup>である。トリミングの切り刃形状のまま被覆した場合寿命向上効果は全く認められないが、刃先にRをつけたり、小さく面取りを行うと寿命が改善している。これは切り刃形状のままであると先端に小さなバリが残っておりそれを包む形で被覆されるので、トリミング加工の初期にバリごと被膜が折損して脱落するために寿命が改善しないといわれている。R加工や面取りでバリを除いた場合には初期損傷が起きなくなるために寿命改善効果が得られたわけである。分割型の合わせ面のエッジにおいてもR加工を施して段差の影響を軽減するといった工夫が必要である。このような点に注意することで本来の硬質被膜の特性を発揮させることができる。

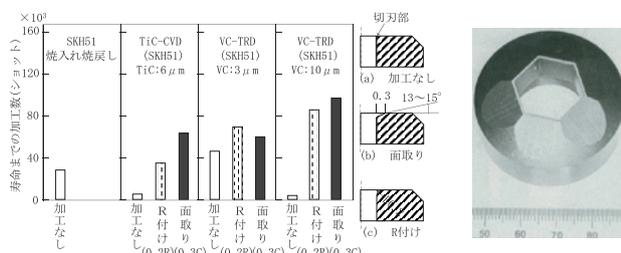


図5 六角トリミングパンチの切り刃仕上げ方法と寿命の関係<sup>19)</sup>

#### 4. 塑性加工における表面処理の位置づけと課題

これまで見てきたように硬質被膜は、高精度で高品位な表面をもつ部品生産に必須であり、金型の寿命改善に大きく貢献し、レアメタルに代表される資源問題や地球環境問題を解決する有力なツールである。一方で課題も存在する。一つは硬質膜自体に低摩擦特性を持つものが少ないこと、一つは高温での使用に耐える特性を持った硬質膜が少ないこと、さらに一層の高精度被覆に対応できていない、の3点を指摘しておきたい。低摩擦特性についてはDLCが現在の最右翼に位置づけられるが、いろいろな種類のDLCがあって標準規格がないために比較しづらい現状にある。

熱間鍛造金型やダイカスト金型など高温材料を対象とする金型向けの被膜には、耐酸化性に優れ、高温強度が高いことが望まれるが、従来の炭化物や窒化物では不十分である。さらに、母材の熱軟化を防ぐような高い断熱特性を持つ被膜はない。被膜が高い断熱性を持てば加工に伴う母材の熱軟化を防止できるので潤滑剤による金型冷却の必要性が低下し、被加工材の温度低下が小さくなって高い変形能を維持した成形が可能になる。生産量で90%近くを占める<sup>20)</sup>にもかかわらず熱間成形金型の寿命は冷間成形金型の十分の一以下である。これを改善できる母材や表面処理が求められている。

### 5. 最近の被膜開発の動向と今後の期待

#### 5.1 低摩擦特性被膜

表面被膜に期待される低摩擦の意味をふたつに区別して考えてみたい。一つは言葉通り境界潤滑状態の尺度である $\mu = 0.1$ より小さい摩擦状態と、この数値以上であっても例えば $\mu = 0.2$ とか0.3ですべり距離や試験回数によらず摩擦が安定して推移する場合である。摩擦が安定していることは潤滑剤が消失しても焼付きが小さく抑えられ、摺動界面がそれほど損傷していないことの表れで、表面被膜が機能していることを意味している。従来の被膜は潤滑剤と併用すればこのような値を示すが、無潤滑では焼付きのないもの高い摩擦を示していた。近年無潤滑状態でも比較的小さな摩擦係数を示す被膜が開発されつつあるので、2, 3の事例を紹介しておきたい。

##### a) 塩素の低摩擦効果

図6に示すのはTiN被膜における塩素(Cl)の低摩擦効果である<sup>21)</sup>。プラズマCVD法で成膜したTiNには原料ガス成分の塩素が固溶する。この塩素量によって摩擦係数が異なり、2.3at.%Clまでは $\mu = 0.5$ から0.6といった高い摩擦係数であるが、4.9at.%Clではおおよそ0.15まで低下する。これは塩化物が酸化を防いでいることによると考えられている。塩素が腐食に対して悪影響を示さない程度に固溶していると低摩擦化に貢献するようである。

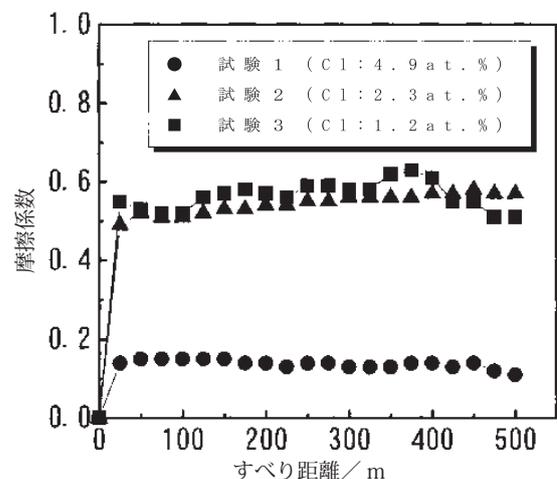


図6 摩擦係数の変化に及ぼす塩素組成の影響<sup>21)</sup>

同様の効果はあらかじめ成膜した TiN に Cl をイオン注入した研究においても認められている<sup>22)</sup>。図 7 に示すように、注入量が多いほど低摩擦で、安定した値で推移している。同じハロゲン元素であるフッ素では効果がなく、Cl 特有の現象である。ここでは Cl の触媒作用によって TiN が酸化物に変化した効果だと説明されている。Cl による低摩擦化のメカニズム解明を含めて今後の進展を期待したい。

b) バナジウム酸化物の生成による摩擦低減

高張力鋼板を 30 万回冷間プレス成形したあとの TD 処理による VC 被膜表面を透過電子顕微鏡で観察した研究<sup>23)</sup>で、図 8 に示すように、被加工材の鉄酸化物の凝着層の下にバナジウム酸化物層が検出された。高い金型寿命の原因はバナジウム酸化物の摩擦低減効果であるとしている。この分析結果をもとに被膜成分が Al, Cr, V, N で膜厚 15 $\mu\text{m}$  の被覆材が開発された。これをハイテン材の曲げ絞型に適用したところ高い寿命向上効果が得られている。この結果は、膜厚が 15 $\mu\text{m}$  と通常の硬質膜の厚さが数  $\mu\text{m}$  であるのに対してかなり厚いことと、表面の仕上げ形状を突起がないように工夫するといったことの相乗効果であると思われる。

同様のバナジウム酸化物による摩擦低減効果の例がまとめて解説され<sup>24)</sup>、CrAlVN 被膜の高温摩擦試験における摩擦係数に及ぼす V 組成の影響について紹介されている。

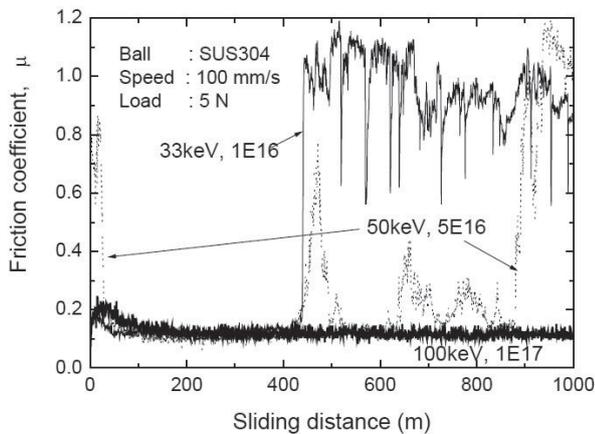


図 7 TiN 膜の摩擦係数に及ぼす Cl イオン注入条件の影響<sup>22)</sup>

Coating process	TRD	PVD	PVD	PVD	CVD
Coating composition	VC	CrN	AlCrSiN	TiAlN	TiC
Life of dies	300,000	12,000	12,000	40,000	20,000

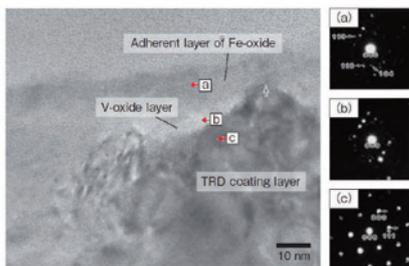


図 8 冷間プレス金型の寿命及びハイテン材成形後の TRD 被膜断面 TEM 観察結果<sup>23)</sup>

図 9 に示すように室温の試験ではバナジウム組成によらず摩擦係数はおよそ 0.7 で推移する。500 $^{\circ}\text{C}$ においては 0.16%V のときに摩擦係数の平均は 0.9 で変動も 1.1 から 0.4 と最も大きくなった。0.22%V では  $\mu = 0.5 \pm 0.1$  と変動が小さくなった。さらに V 量が増加するとすべり距離に対して変化が大きくなる。試験温度 700 $^{\circ}\text{C}$ では、0.28%V のとき摩擦係数は 0.2 $\pm$ 0.05 と、すべての試験条件で最も小さく、安定した。バナジウム酸化物の形成と溶融が影響していると説明されている。

5.2 耐熱性の向上

硬質被膜の耐熱性の改良も進んでいる。図 10 に示す<sup>25)</sup>のは (TiAlN 系の膜に Cr や Si などを加えて耐酸化性を向上させた例で、800 $^{\circ}\text{C}$ までは酸化増量がなく、1,200 $^{\circ}\text{C}$ においてさえ 0.03%の増加に過ぎない特性が示されている。

さらに別の高温試験では<sup>26)</sup>、図 11 に示すように TiAlN 膜では 900 $^{\circ}\text{C}$ 以上で酸化増量が大きくなる一方、AlCrN 膜では 700 $^{\circ}\text{C}$ 付近から徐々に熱分解に伴う重量減少を起こしてしまう。これに対して各種元素を配合した TiCrAlN 被膜は 1,100 $^{\circ}\text{C}$ 付近まで重量変化はほとんど認められていない。

この開発技術から新しい被膜が市販されて実用金型において効果を上げている<sup>27)</sup>。図 12 は高温のピンオンディスク試験の結果とこれを被覆した実用成形型における実証試験結果を示す。100 キロハイテンのプレス成形で従来の硬質被覆材に比べて 1.6 倍から 15.7 倍の寿命向上効果が得られている。

5.3 多元素被膜、多層膜への期待

これまで見てきたように最近の PVD や PCVD 系の被膜では多くの元素から構成される多元素膜がいろいろと開発されている。例えば、これまでの窒化チタン (TiN) のように 2 元素からなる被膜の適用が多かったが、さらにアルミニウムやシリコン、ボロンなどを添加して 7 元素からなる被膜も生み出されている<sup>6)</sup>。これによって耐熱性や耐酸化性が向上してダイカスト金型への適用が進んでいるようである。

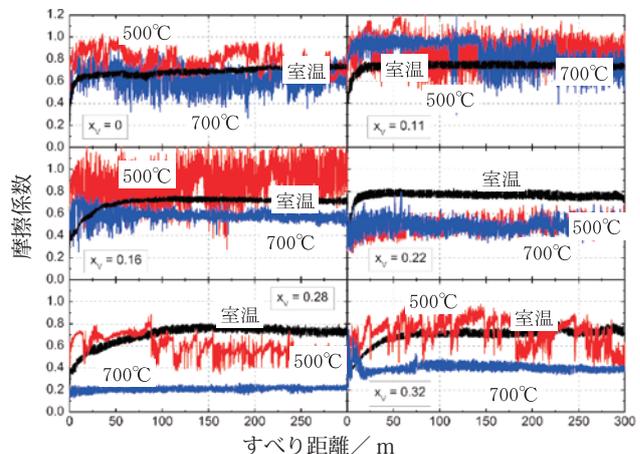


図 9 高温摩擦試験の摩擦係数変化に及ぼす CrAlVN 被覆中 V 組成の影響<sup>24)</sup>

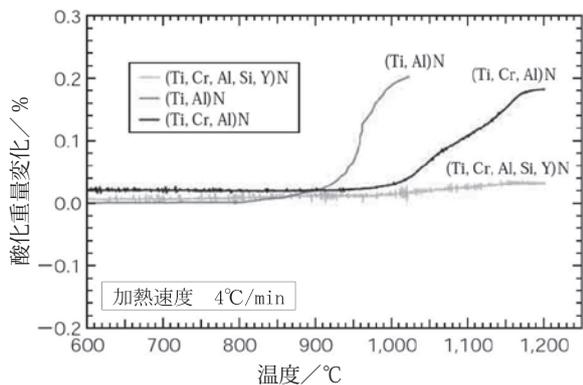


図 10 1,200°Cまでの乾燥空気における酸化重量増加曲線に及ぼす被膜組成の影響<sup>25)</sup>

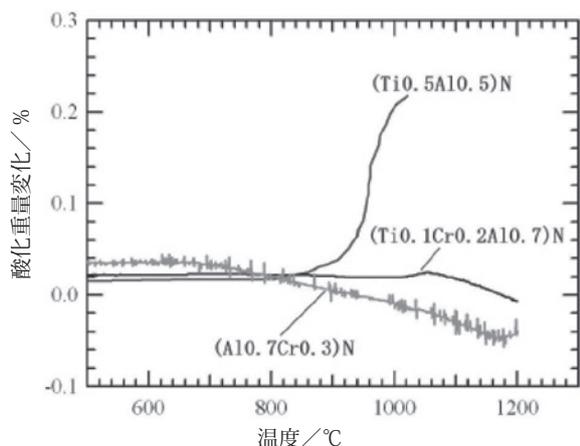
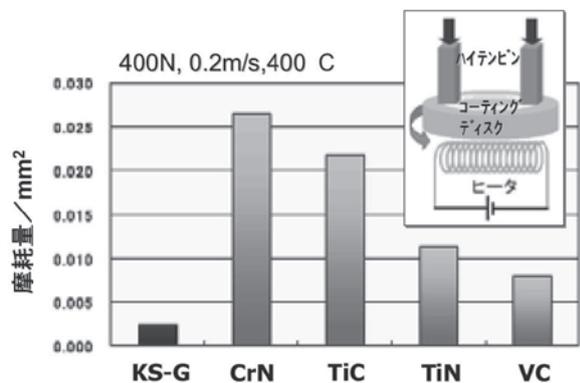
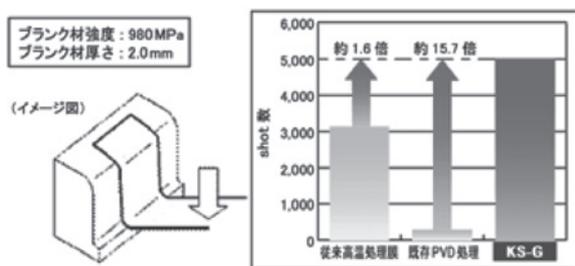


図 11 高A1含有窒化物硬質薄膜の高温特性<sup>26)</sup>



(a) 高温摺動試験による各種金型用被膜の耐摩耗性



(b) ハイテン材の曲げ型による寿命評価の一例

図 12 高耐久性ハイテンプレス成形金型用表面処理<sup>27)</sup>

酸化膜を活用することで摩擦を下げたり、耐熱性を上げて耐摩耗性を向上させた被膜が今後実用金型へ広まることを期待したい。

5.4 表面・界面の制御

耐剥離性の向上や厚膜化を狙い、単位厚さがナノレベルである多層膜や成分組成を徐々に変化した傾斜組成膜によって被膜内部の残留応力を制御する研究もある。さらに被膜直下の母材を強化するために事前に窒化処理を実施したり<sup>28)</sup>、浸炭同時成膜<sup>18)</sup>を行う開発も行われている。図 13 は窒化と PVD の組合せでスクラッチ試験の臨界荷重が上昇することを示している。PVD の方法によらず事前窒化の効果が現れている。

一方で、処理方法の工夫で滑らかな表面性状を得たり、積極的に表面形状パターンを設計して使用目的に応じた摩擦状態を得ようとする研究もある。表面形状パターンの金型への適用は造りこみの費用対効果やパターンの耐久性の点で実用化には時間がかかると思われるが、機械摺動部品やマイクロ成形工具では実例が出て来ている<sup>29)</sup>。図 14 に摩擦係数に及ぼすディンプルパターン形状の影響を示す。

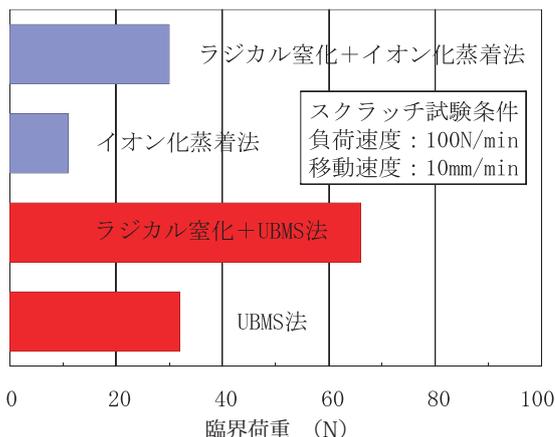


図 13 臨界荷重に及ぼす複合硬化処理の効果<sup>28)</sup>  
(DLC 膜厚: 1 μm, 基材: SKH51, ラジカル窒化条件 500°C × 2hr)

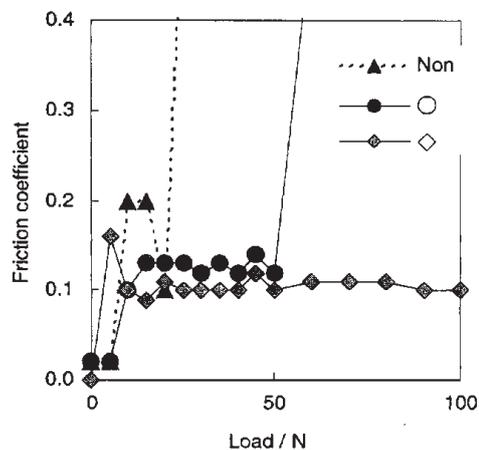


図 14 摩擦係数に及ぼすディンプルパターン形状の影響<sup>29)</sup>

## 6. おわりに

硬質被膜は耐摩耗性や耐焼付き性に優れることから金型の寿命向上に欠かせないものになっている。加えて硬質被膜を導入することで、強加工が可能になることによる工程短縮や昨今の高強度材料やいわゆる難加工材の成形が可能になる。さらに潤滑剤の使用量を減らしたり、低粘度化したり、極圧添加剤を含まない潤滑油に切り替えることも可能になってきている。課題として挙げた低摩擦被膜や耐熱被膜もそのニーズに応える形で開発が進み徐々に実用化されていくことであろう。また硬質被膜と母材との境界面の解消技術が進み密着性が向上して剥離しにくい被膜が開発されていくものと思われる。現在潤滑剤が担っている低摩擦、耐摩耗、耐焼付きなどの特性は硬質被膜で代替可能になるかもしれない。

新たな動きとしては、今後電気自動車用の電池部品やロボット、コンピュータビークル用部品など機能的、高精度で多様な製品が増加する一方、航空機用の繊維強化複合材料製の部品に代表される軽量化部材の加工が増えると思われる。これに対応するために微細加工用金型や高精度製品に向けた一層の高精度成膜が求められるであろう。被膜厚さの制御技術や付き回り性、切り刃など金型のエッジやつなぎ加工部の均一成膜技術の改良・開発が望まれる。

また高温成形金型においては耐熱性のほかに優れた断熱性を持った被膜が要望される。現状は、母材を熱負荷から保護して熱軟化に伴う強度低下を防ぐために潤滑剤を大量に噴射して金型の冷却を行っている。断熱被膜が開発されることで冷却用潤滑剤の使用量が減り、潤滑剤の噴射に伴う急速冷却による金型の大割れや熱振幅の繰り返しに伴う疲労クラックの抑制が期待される。これまで硬質被膜は被膜を必要とする周辺技術の要望によって育てられてきた。今後もいろいろなニーズによって表面処理が発展し、この発展によって周辺技術も成長するという好循環が続くことを願ってやまない。

なお本稿は解説記事<sup>30)</sup>をベースにしている。重複をご容赦下さい。

### 参考文献

- 1) Ruppert, W.: Metaloberfläche, 14 - 7 (1960), 193 - 198.
- 2) 平原民雄他: 塑性と加工, 19 - 204 (1978), 82 - 87.
- 3) 新井透: 塑性と加工, 19 - 204 (1978), 88 - 93.
- 4) 安岡学: 精密工学会誌, 66 - 4 (2000), 527 - 530.
- 5) 河田一喜: 塑性と加工, 45 - 518 (2004), 153 - 629.
- 6) 河田一喜: 塑性と加工, 50 - 582 (2009), 625 - 629.
- 7) 石川孝司: 塑性と加工, 52 - 600 (2011), 50 - 54.
- 8) 土屋能成: 塑性と加工, 52 - 600 (2011), 31 - 35.
- 9) 土屋能成: 塑性と加工, 56 - 650 (2015), 1 - 2.
- 10) 河合望他: 機論 C, 52 - 479 (1986), 2022-2028.
- 11) 後藤善弘他: 昭 61 塑加春講論 (1986) 107-110.
- 12) 後藤善弘他: 昭 60 塑加春講論 (1985) 369-372.
- 13) Tohru Arai et al.: Metal Transfer and Galling in Metallic Systems (1986), 197, AIME.
- 14) 土屋能成他: 塑性と加工, 34-393(1993), 1184-1189.
- 15) 須藤忠三他: 塑性と加工, 17-190 (1976), 867-874.
- 16) 白鳥正美: 塑性と加工, 50-582 (2009), 610-614.
- 17) 久保田邦親: 日立金属技報, 21 (2005) 45-52.
- 18) 青井芳史他: メカニカルサーフェステック, 013 (2013-4) 21-23.
- 19) 新井透, 第 59 回塑性加工講習会テキスト,(1992), 52.
- 20) 経済産業省大臣官房調査統計グループ: 政府統計平成 24 年—2012—鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計年報(平成 24 年)
- 21) Kazuki Kawata et al.: Thin Solid Films, 407(2002), 38-44.
- 22) 三尾淳他: 東京都立産業技術研究所研究報告, 6 (2003)
- 23) 本多史明他: 日立金属技報 31(2015),40-47.
- 24) Robert Franz et al.: Surface & Coatings Technology, 228(2013),1-13.
- 25) 山本兼司他: 神戸製鋼技報, 59-1 (2009) 18-24.
- 26) 山本兼司: 高温学会誌, 33-2 (2007) 84-89.
- 27) 久本他: SOKEIZAI, 52-12 (2011) 39-43.
- 28) 近藤恭二: ぎふ技術革新センター運営協議会ミニローキンググループ事業「金型寿命向上WG」公開講演会資料, (2014/7/2).
- 29) 波形秀樹他: 粉体および粉末冶金, 53-2 (2006), 192-196.
- 30) 土屋能成: 素形材, 57-8 (2016) 2-8.