

金型の損傷形態と寿命向上対策

辻井 信博*

1. 緒言

コンロッド、ギヤなどの自動車部品、アルミサッシなどの住宅用材、スプーンやペットボトルなどの身近な日用品、さらにプリント基板やリードフレームなどの電子部品に至るまでそれらを製造するために不可欠なのが金型である。それら金型の製作コスト低減や寿命向上は、製品のコスト低減や品質向上に直接反映されることから、金型に関する技術改善は私たちの暮らしにとっても重要な意味を持っている。

本稿では、各種素材の造形加工に不可欠な金型について、その使用中に発生する損傷形態を分類、考察し、現在得られている知見を基に型寿命向上のための対策を整理した。

2. 金型の損傷形態

冷間金型の寿命要因（廃却要因）には、摩耗、焼付き、割れ、折れ、欠け、変形などが挙げられる。また、熱間金型の場合は、摩耗、ヒートチェック（熱疲労き裂）、割れ、欠け、変形、へたりさらにダイカスト型の場合、溶損なども寿命要因として挙げられる。このような冷間および熱間金型に観られる基本的な損傷形態は、摩耗、変形、疲労破壊および割れの4つに分類できる。

図1は、金型の使用環境すなわち負荷応力（熱間金型の

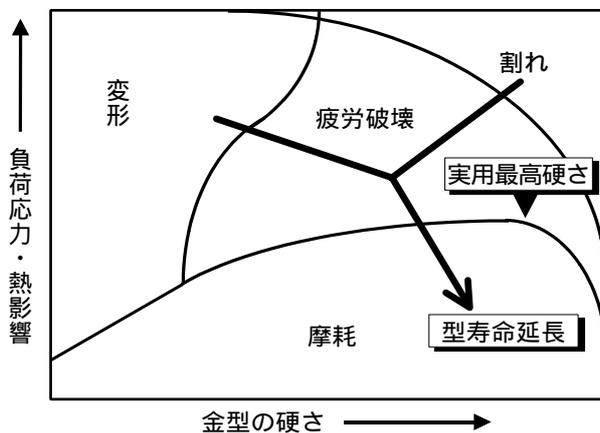


図1 金型使用環境と金型損傷形態との関係（概念図）

場合、熱影響も含む）や金型の硬さとこれら4つの損傷形態との関連を示した概念図である。変形は、負荷応力が高い場合や金型の硬さすなわち強度が低い場合に起こりやすく、一方、割れは負荷応力が高い場合において、金型の硬さが高いほど発生し易い。これら変形や割れが発生する場合の型寿命が比較的短いのに対し、摩耗は、比較的長寿命な金型に見られる損傷形態である。疲労破壊は図1に示すように、変形、割れおよび摩耗現象に囲まれる条件で起こる現象であり、数千から数万ショットでき裂が大きく進展するいわゆる“低サイクル疲労現象”と見なされている。冷間金型に見られる微小割れ、欠け、チッピング（微小欠けによる摩耗）の殆どはこの疲労破壊によるものと考えられる。また、熱間金型のヒートチェックも、熱サイクルに起因した低サイクル疲労現象である。

一般に、このような疲労破壊は、金型の硬さを高めるほど抑制される傾向にあり、それに従って型寿命が向上し、損傷形態も疲労破壊から摩耗へ移行する。ただし、実用的には、図1に示すように限界の硬さ（図中の实用最高硬さ）が存在している。詳しくは後述するが例えば、冷間金型および熱間金型の場合、それぞれ62～64HRC、53～55HRC辺りがそれに相当する。

3. 金型用工具鋼に求められる特性

3.1 工具鋼の顔（マイクロ組織）

鍛造や鋳造時などの厳しい環境にも耐え得るように設計された特殊鋼が、いわゆる“工具鋼”である。JISでは、工具鋼を炭素工具鋼、合金工具鋼および高速度工具鋼の3つに分類しているが、本稿では、冷間工具鋼と熱間工具鋼とに分けてそれぞれに求められる特性を説明する。

まず、図2が冷間工具鋼SKD11と熱間工具鋼SKD61の光学顕微鏡組織、つまり各工具鋼の特性を示す“顔”である。冷間および熱間工具鋼の基地組織は“マルテンサイト”と呼ばれる硬くて粘り金属組織である。工具鋼の場合、このマルテンサイト基地に非常に硬い炭化物が多数析出しているのが特徴である。しかしSKD11とSKD61とは、炭化物の析出状態が異なっており、図2に示すようにSKD11には、

* 技術研究所 高合金鋼グループ, 工博

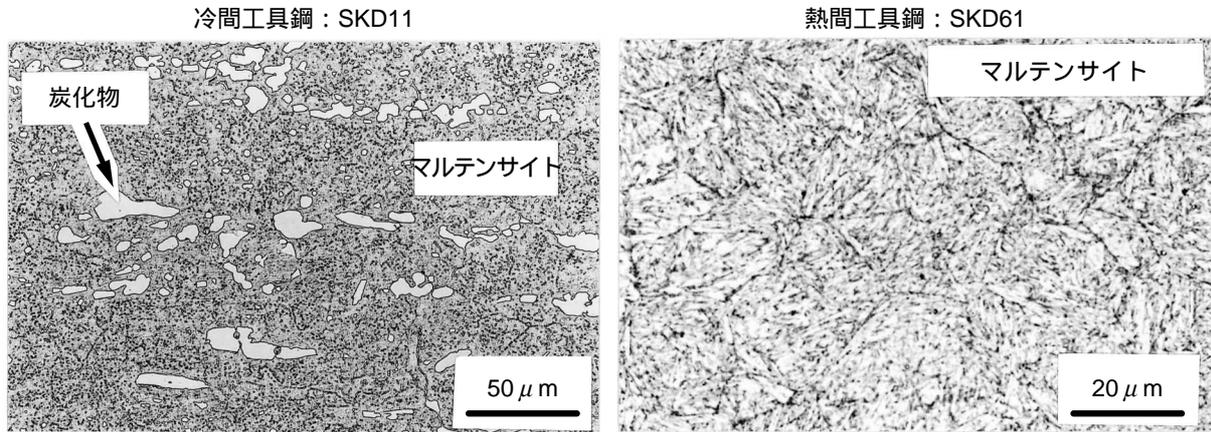


図2 工具鋼の光学顕微鏡組織

白い大きな炭化物が多数存在している。特に数十ミクロンの大型炭化物は、基地に比べ3倍近く硬い Cr_7C_3 であり、これは金型の耐摩耗性改善に非常に有効である。しかし、これら大型炭化物は、一つひとつが非常に脆いうえに鋼材中に一定方向に連なって分布する傾向にあるため、金型の靱性を低下させることになる。

図3は、各種特殊鋼の位置付けを主要元素であるCとCrで整理したものである。図3から明らかなように、冷間工具鋼は、耐摩耗性を重視するために、硬い炭化物が多数分布するよう高C - 高Cr鋼の設計となっている。一方、熱間工具鋼は、一般に金型サイズが大きく、熱環境が負荷されるため、むしろ靱性を重視するように中C - 中Cr鋼という設計となっている。

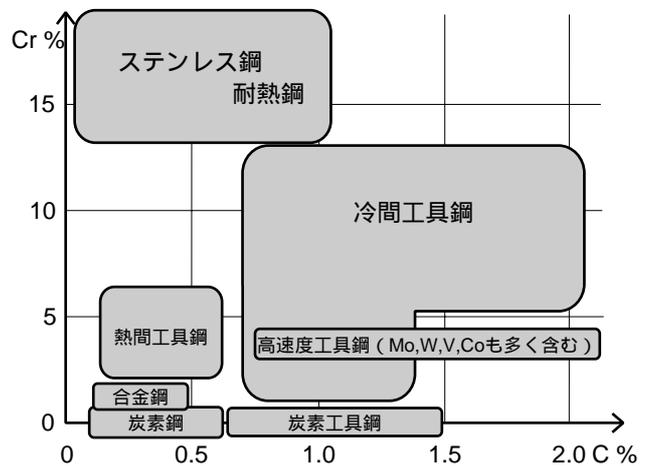


図3 各種特殊鋼のCとCr量

以上のように工具鋼の大まかな特性（強度，靱性，耐摩

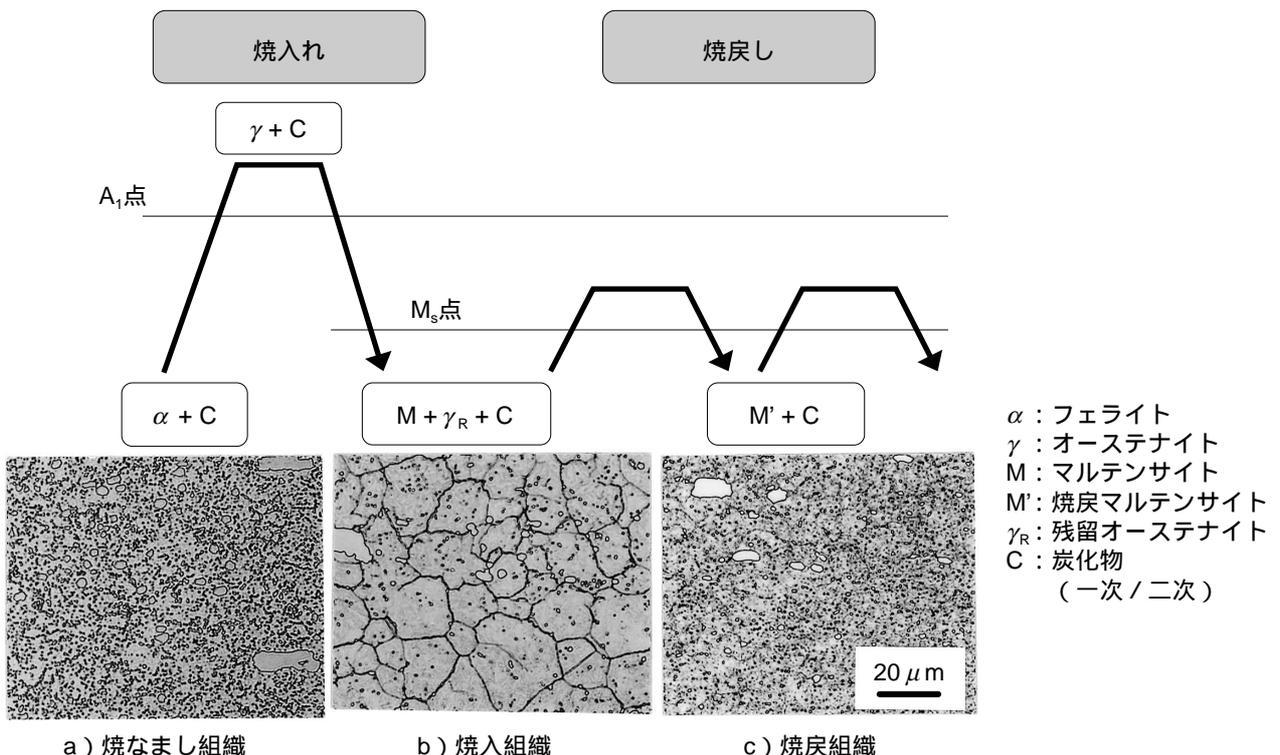


図4 QCM8の焼入焼戻パターンと組織変化

α : フェライト
 γ : オーステナイト
 M : マルテンサイト
 M' : 焼戻マルテンサイト
 γ_R : 残留オーステナイト
 C : 炭化物
 (一次 / 二次)

耗性)は、基地のマルテンサイトと硬質炭化物の分布状態によって決定される。

3・2 特性を引出す大切な熱処理

工具鋼に要求される特性は、一言でいえば“硬くて粘い”ということである。具体的には、冷間工具鋼には耐摩耗性、静的強度、疲労強度、靱性が要求され、熱間工具鋼には、高温での前記特性に加え耐熱性、耐酸化性が要求される。これらの特性を引出す熱処理が“焼入焼戻し”である。この焼入焼戻し処理の良否は金型寿命に大きく影響することから極めて重要である。

図4は、冷間工具鋼QCM8の焼入焼戻しパターンと組織変化を示した図である。ここでは熱処理条件についての詳細な解説は省くが、焼入れまま(b)では、“硬いが非常に脆い組織”であり焼戻し(c)により、初めて“硬くて粘い組織”が得られること、および各熱処理条件の最適値は、鋼種や使用条件によって多少異なることを認識しておかなければならない。

図5は、種々の冷間工具鋼、熱間工具鋼の焼戻し硬さ特性である。図5に示すように焼入れ硬さは、ほぼC量で決定される。焼戻し温度が上昇するに従い硬さは低下する傾向にあるが、中に500 辺りから再び硬さが上昇する鋼種がある。冷間工具鋼SKD11や熱間工具鋼SKD61がその代表である。この現象は、“二次硬化”と呼ばれ、Mo,W,V,Nbなどの炭化物の微細析出に起因している。工具鋼に要求される特性である静的強度、疲労強度、靱性、耐摩耗性に及ぼす焼戻し硬さの影響はかなり明らかとなっており、硬さが工具鋼の特性を知るうえで非常に有効な評価指標となっている。

例えば、図1に示したように、金型の硬さが上昇するに従い、静的強度が上昇し“変形”が抑制され、さらに疲労強度も向上することから、損傷形態は変形 疲労破壊 摩耗へと移行する。しかし、硬さの上昇は、逆に靱性の低下

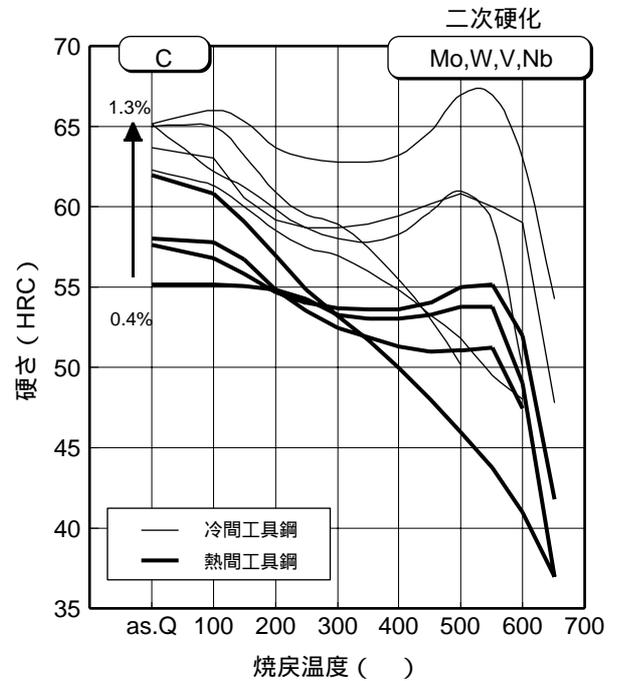


図5 各種工具鋼の焼戻し硬さ特性

を引起こすため、割れの発生する危険性が大きくなる。

4. 冷間金型の損傷形態と寿命向上対策

4・1 早期割れ

図6に冷間金型の割れに対する対策を整理した。早期割れは、靱性不足による場合と強度不足による場合とがある。両者に共通する対策は、加工条件や金型形状を見直すことにより金型への負荷応力を低減することである。一方、金型の硬さ設定や鋼種選定は、その原因により対策が正反対となる。割れの原因が靱性不足か、強度不足かの見分け方

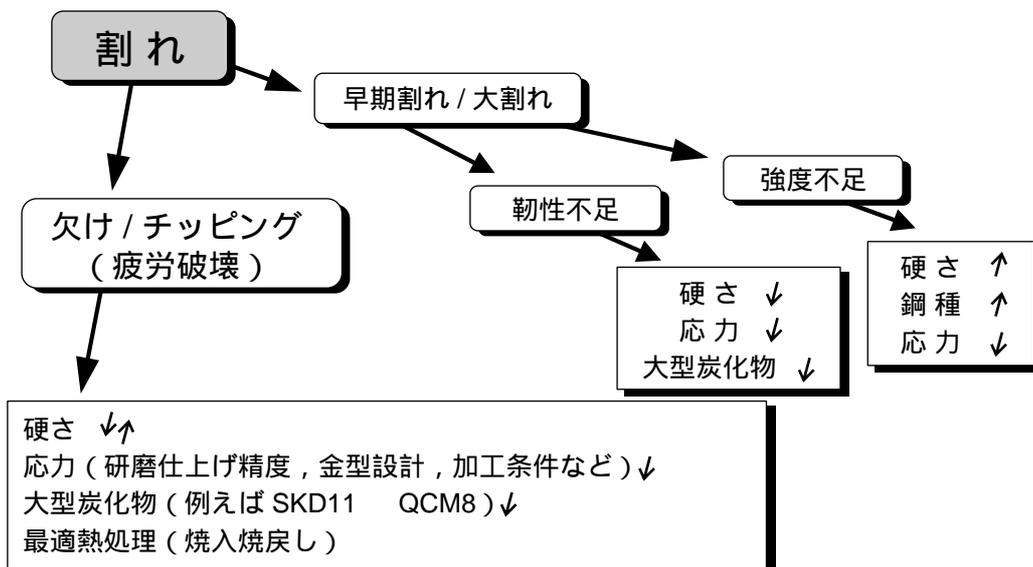
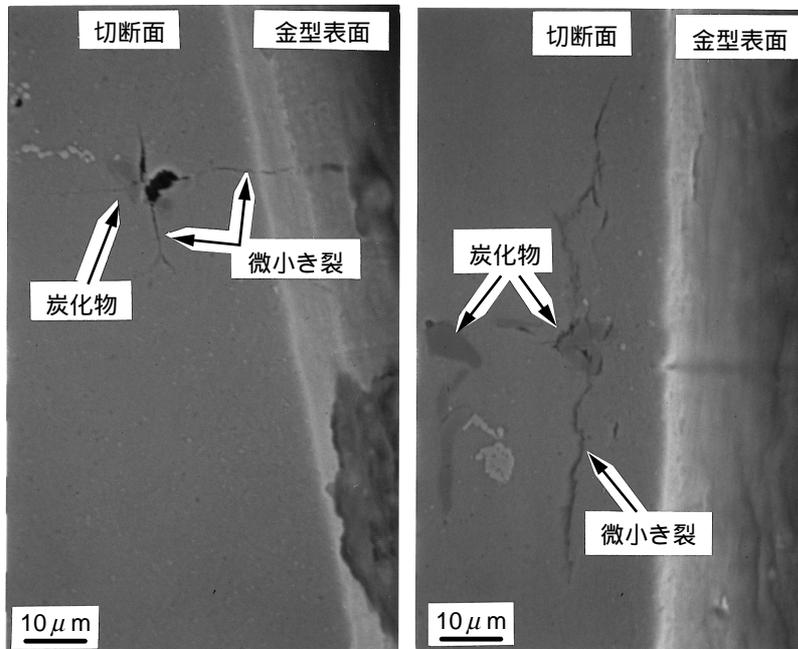


図6 冷間金型における割れ対策



材 質：マトリックスハイス
 硬 さ：60HRC
 ショット数：10,000ショット

図7 冷間ダイの損傷形態

は非常に難しいが、金型が変形したり寸法変化を起こしている場合は、強度不足を疑う必要がある。

4・2 疲労破壊

冷間金型に発生する欠けやチッピングは、疲労破壊によるものである。欠けやチッピングは、き裂の発生、き裂の伝播、き裂の枝別れ・迂回、複数き裂の連結という過程で生じることから、初期き裂の発生を抑える目的として硬さを上げる対策は有効である。一般的には、硬さが高くなるに従い疲労強度は上昇するが、反面切欠き感受性が高くなり割れ発生への恐れが増すことから、加工条件により異なるが62～64HRC程度が適正と考えられる。これが図1で示した冷間金型の場合の実用最高硬さである。後述するが熱間金型の場合は、この値が53～55HRC程度となる。

実際に金型表面に旋盤目が残っている場合や型のコーナーが非常にシャープな場合など応力集中部が存在するときは、硬さの上昇は割れを誘発する恐れがある。従って、図6に示したように、硬さ変更について検討する前に、まず応力集中の軽減、高靱性工具鋼の採用或いは熱処理条件の最適化などの観点から対策を講じることが重要である。金型への応力集中を軽減することは何よりも効果的であり、例えば損傷箇所の研磨仕上げ精度を上げることが有効な場合が多い。また、コーナーRの形状、テーパ角度の見直しなど、応力が局部に集中しないような型設計への配慮も必要である。さらに微視的には金型素材である工具鋼中の応力集中箇所すなわち大型炭化物や非金属介在物（特に酸化物系介在物）を低減することも重要である。

図7は、1万ショット後の冷間ダイを切断して内部の損傷状態を走査型電子顕微鏡で観察した一例である。図中矢印で示すように、き裂が金型内部の炭化物から発生し、金型

表面に伝播していることがわかる。これは、冷間工具鋼中の大型炭化物が、耐摩耗性には非常に有効であるが、疲労き裂を発生させる応力集中箇所にもなることを示している。図8には、汎用冷間工具鋼SKD11と8Cr系冷間工具鋼QCM8および粉末ハイスの引張圧縮疲労試験結果を示す。炭化物が微細に分散したQCM8の疲労寿命は、SKD11よりも高く粉末ハイスの延長上にあることがわかる。

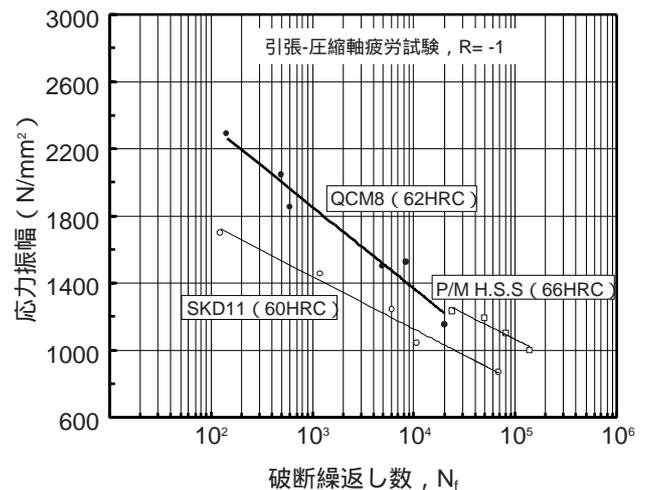


図8 冷間工具鋼の低サイクル疲労強度

最後に確認しておかなければならないのが、熱処理状況である。適切な熱処理が実施されていることはもちろんであるが、さらに靱性を向上させるためには、焼入温度の低下や焼戻回数の増加などが有効である。

4・3 摩耗

摩耗現象は、図9に示すように“引っかき摩耗”と“凝

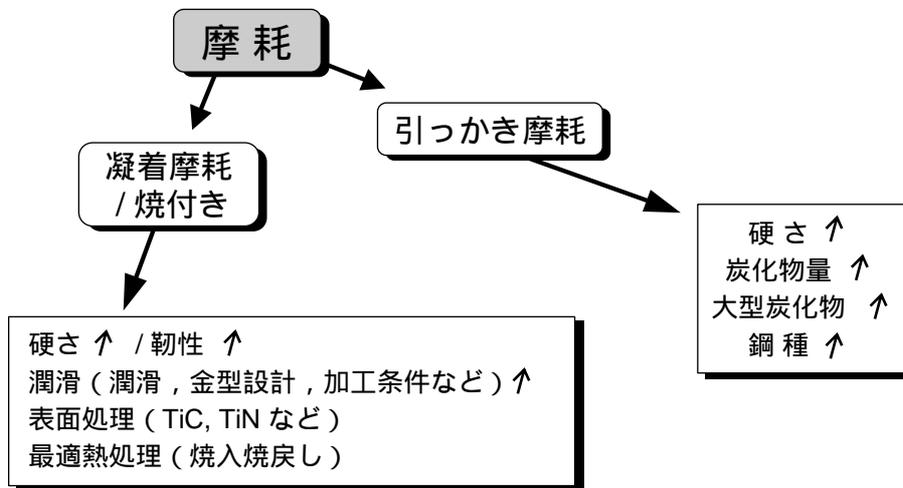


図9 冷間金型における摩耗対策

着摩耗” とに分類される。引っかけ摩耗は、硬質の摩耗粉などにより金型表面が機械的に削り取られる現象である。対策としては、硬さを高めることや炭化物を多く含んだ鋼種（SKS SKD SKH 粉末ハイス 超硬合金）の適用が挙げられる。

一方、凝着摩耗はワークの一部が金型に凝着（合金化）し、その箇所が剥離して金型表面を摩耗させる現象であり“焼付き”とも呼ばれる。引っかけ摩耗に対してこの凝着摩耗は短寿命の原因となる異常摩耗として位置付けられる。微視的には凝着部がせん断で引きちぎられる現象であるから、金型素材に対し所要の硬さに加え韌性が同時に要求される。

実用的には型材の特性向上のみによる対策には限界があり、むしろ焼付きを起こさないような対策、言い換えれば金型表面とワークとの摩擦係数を下げる工夫が先決である。特に潤滑の影響は大きく、潤滑剤の均一塗布や潤滑切れを起こさないような金型設計（例えばパンチ先端面のテーパ角度の最適化）や加工条件の最適化が必要である。また、TiCやTiNなどの硬質表面処理も摩擦係数を下げるために効果的である。

5. 熱間金型の損傷形態と寿命向上対策

5.1 ヒートチェック

廃却された熱間金型に多く観察されるのが“ヒートチェック”と呼ばれる熱疲労き裂である。図10に代表的なヒートチェックを示す。矢印で示すように金型のコーナー部のみならず平坦面にも亀甲状の割れが観察される。これらの割れが“ヒートチェック”と呼ばれる損傷である。

図11は、ヒートチェックにより損傷した熱間鍛造金型表面の代表的な顕微鏡組織である。健全部のミクロ組織であり、鍛造中にワークからの入熱により焼戻軟化した領域である。金型表面は、鍛造条件にもよるが初期の

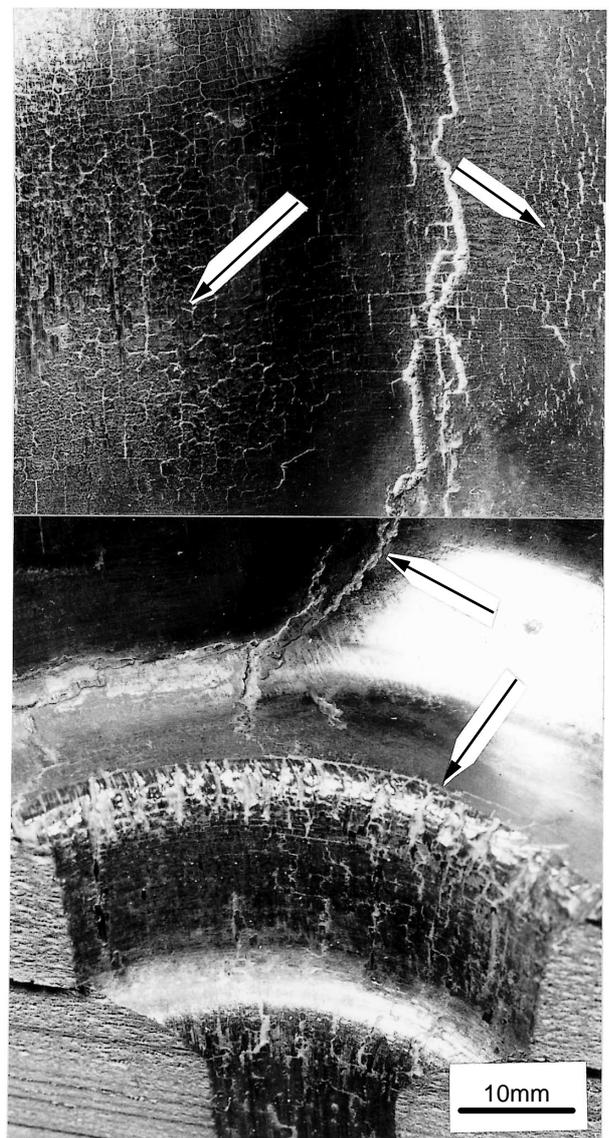
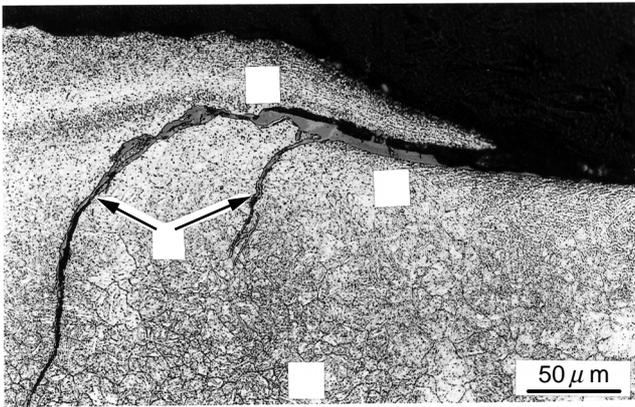


図10 熱間ダイのヒートチェック

500HVからおよそ300HVまで軟化してしまう場合もある。軟化域では、のような塑性流動が起こり摩耗の原因とな



標準の焼入焼戻組織 軟化領域
塑性流動 ヒートチェック

図11 熱間鍛造金型の損傷した金属組織

る。また、図10に示すように、酸化物の生成を伴ったき裂が金型表面から発生し内部へ伝播している様子が観察されるが、これがヒートチェックの金型内部の形態である。このヒートチェックが、金型表面直下で連結すると欠けや摩耗の原因となる一方、金型内部へ奥深く進展した場合は、大割れの起点となる。

図12に熱間鍛造金型の損傷形態と寿命向上のための対策を整理した。まず、ヒートチェックのき裂が深く進展した場合、大割れの原因となり、その対策としては、金型素材の破壊靱性を上げる必要がある。具体的には、硬さを下げるか、より高靱性タイプの工具鋼を適用するか、場合によっては金型予熱温度を十分取っているかのチェックも必要である。

一方、通常のヒートチェック起因の損傷寿命を向上させるためには、その発生機構が熱疲労現象に基づくものであることを考慮しつつ、き裂発生およびき裂伝播の抑制という観点から検討する必要がある。き裂発生を抑制するためには、まず金型の硬さを上げることが効果的である。しかし、硬さの上げ過ぎは、微小き裂が一旦発生すると一挙に伝播する可能性が高くなり、逆に寿命低下を引起す場合がある。硬さを上げ過ぎると熱衝撃による一発割れの危険性も大きくなるため、実用的には53～55HRCが限界とされている。

一方、図11に示したように金型表面直下はショット数が増加するに従い、軟化（すなわち強度低下）していくことから、耐軟化抵抗性の高い工具鋼（SKD61 QDHなど）の適用が非常に有効である。金型表面の強度を向上させる目的から窒化などの表面処理もヒートチェックに対し有効である。しかし、窒化層は非常に脆いために硬化深さが深過ぎると、き裂がその深さまで一挙に伝播し、割れ、欠けを助長する場合がある。実際には、窒化は摩耗を抑える効果があり、多くの金型に採用されていることから、使用条件や用途により最適窒化条件を選定する必要がある。一般的には、熱間鍛造型では耐摩耗性も重視されることから、最高硬さ：約1000HV、硬化深さ：100～150ミクロン程度が多く適用されている。一方、ダイカスト型では、最高硬さ：約800HV、硬化深さ：50～100ミクロン程度のマイルドな窒化が最適とされている。

ヒートチェック対策として、硬さ（すなわち高温強度）の他に重要なのが靱性である。ヒートチェックに必要なとされる靱性は、シャルピー衝撃値よりも絞り値などで測定で

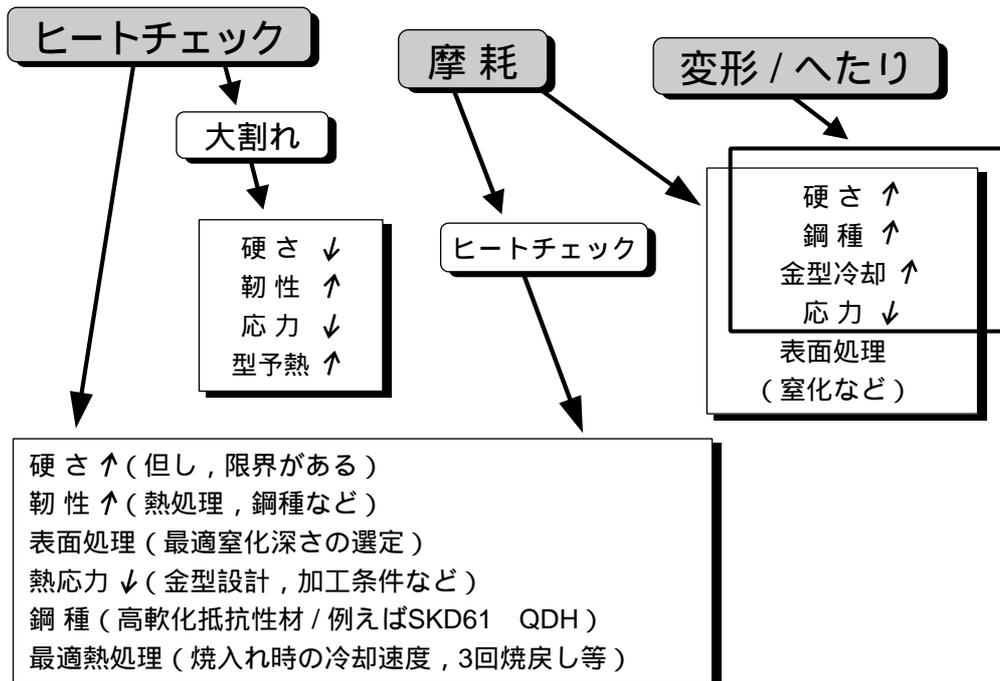


図12 熱間鍛造金型の損傷形態と寿命向上対策

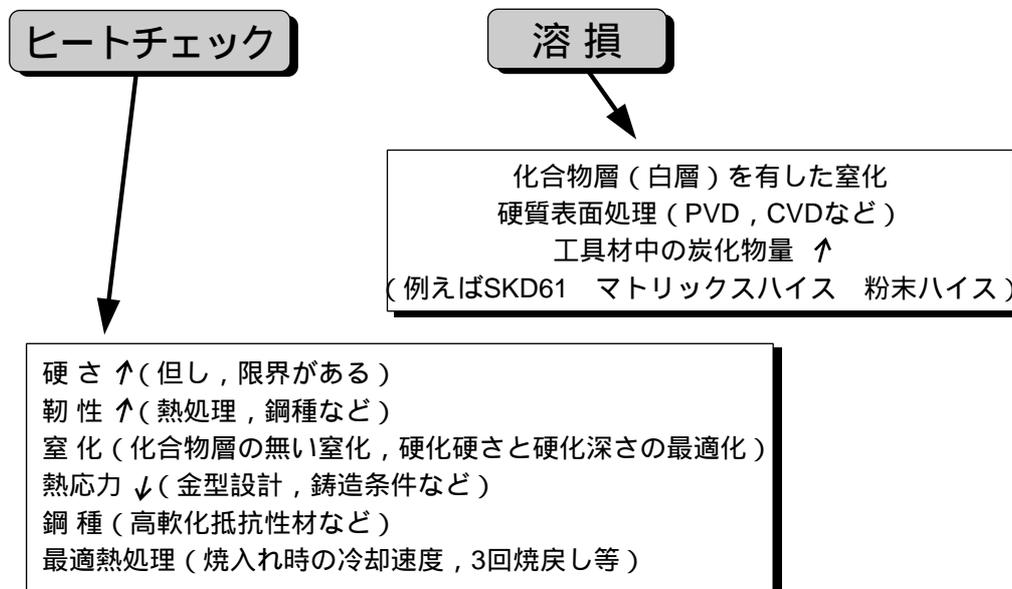


図13 ダイカスト金型の損傷形態と寿命向上対策

きる延性で評価される場合が多い。理想的には、冷間工具鋼と同様に熱間工具鋼にも“硬くて粘い”という特性が求められる。熱間工具鋼の延性の改善には、焼入焼戻条件の設定、すなわち焼入冷却速度や焼戻条件の適正な選定が重要である。

また冷間金型の項で述べたように熱間金型においても金型設計や加工条件を加味した応力低減対策が必要である。例えば、応力集中を緩和させる策として分割型の採用や型形状変更の検討また加工荷重低減の対策としてプリフォーム変更などの工程設計や偏荷重が生じないような成形方法の考案などが挙げられる。以上のようなヒートチェックの対策は、各種熱間金型に共通の課題であり、図13に示すダイカスト型の場合も同様である。

5・2 摩耗，変形，へたり，溶損

熱間金型の摩耗には、前述したヒートチェックによる微細な欠けが原因しているものと高温強度不足による塑性流動などが原因しているものがある。ヒートチェック起因の場合の対策は、前項と同様である。一方、高温強度不足（軟化抵抗不足も含む）が原因の場合は、変形やへたりにも共通する対策として図12に示す項目が挙げられる。特に、

熱間金型の場合は、金型の冷却を如何に均一に上手く行うかも大きな改善ポイントとなる。

図13には、ダイカスト金型に特有の損傷である“溶損”に対する対策も整理している。溶損は、射出されたアルミ、マグネシウムなどの合金が金型材と反応して合金化することにより、金型の摩耗や焼付きを起こす現象である。効果的な対策は、溶湯アルミやマグネシウム合金と金型材の主成分であるFeとの接触を出来るだけ抑えることである。具体的には、窒化層、TiC，CrNなどを表面処理する方法や金型素材にマトリックスハイスのような出来るだけ炭化物を多く含有する工具鋼を適用することなどが有効である。

6．結論

近年の塑性加工条件は益々過酷化してきており、型寿命改善には、金型素材である工具鋼の特性改善や熱処理条件の改善とともに、金型損傷状況そのものをしっかり観察し、ここで述べたように負荷応力を軽減させるための型設計、各種の加工条件も同時に検討することが大切である。