

# 工具鋼の現状と高機能化の動向

横井大円\*1 清水敬介\*2 春名靖志\*3

## 1. はじめに

近年の環境問題、省資源・省エネルギー化への対応、消費者ニーズの多様化、製品ライフサイクルの短命化などを背景に、自動車、家電、情報機器産業における製造技術は多様化、高度化してきた。それに伴い、これらの産業の基盤を支える金型産業も大きく変化している<sup>1)~4)</sup>。

金型産業を取り巻く環境は、家電、自動車産業をはじめとする生産のグローバル化、東南アジア諸国の台頭などによりさらに厳しくなっている。コスト的に不利な国内部品メーカーでは、従来よりも高度な製造技術への取り組みが進み、金型の使用状況は従来と比べものにならないほど過酷になった。自動車関連では、環境問題や衝突安全性確保を背景に車体軽量化や剛性向上に取り組んでおり、高張力鋼板（ハイテン）など被加工材として高強度鋼の使用比率が向上した。同時にネットシェイプ化も進められており、金型寿命の低下が顕在化してきた分野も多い。また、製品の多様化および短命化などにより、多品種少量生産へ対応も重要な課題になっている。

金型を取り巻く環境の変化にともない、金型製作においては、高品質、低コスト、短納期への対応が以前にも増して重要になった。そのため、工具鋼に関しても、これらのニーズに対応できる信頼性の高い材料が望まれている。材料開発の面では、金型製造・エンドユーザーでの使用状況を考慮した材料開発、すなわち加工性、熱処理、表面処理なども包括した開発が不可欠になっており、金型寿命までを含めたトータルでのコスト、エネルギーロス最小化が目標となっている。

本稿では工具鋼の現状、基礎特性について概説するとともに、周辺技術を含めた高機能化の動向を紹介する。

## 2. 工具鋼の概要

### 2.1 工具鋼の種類

世界の粗鋼生産量が約13億5千万トン（2007年）に達

するなか、国内粗鋼生産量は約1億2,150万トン（2007年度）、国内特殊鋼生産量も約2,650万トン（2007年度）と増加傾向にある<sup>5)</sup>。工具鋼の生産量は目安として粗鋼生産量のおおよそ0.1~0.2%程度とされているように、国内工具鋼生産量は約26万トン（2006年度）であり、他の鉄鋼製品と同様に増加傾向を示している。

工具鋼は、冷間金型用、熱間金型用およびプラスチック金型用に大別される。冷間および熱間工具鋼の多くはJISで規格化されているが、プラスチック金型用鋼としては、AISIにP6、20、21が規格化されている程度でJISには規格されていない。鏡面度など要求特性に応じて適用される鋼種はSC、SCM、析出硬化系、ステンレス系など様々であり、各メーカーが独自に開発したプラスチック金型用鋼が多く用いられている。

図1に工具鋼のC量-Cr量（mass%）における区分を示す。また、表1にそれぞれ代表的な工具鋼の化学成分例を示した。工具鋼は、他の鉄鋼材料と比べて高C、高Crであり、さらにNi、Mo、V、Nb、W、Coなどの合金元素が大量に添加されているのが大きな特長といえる。

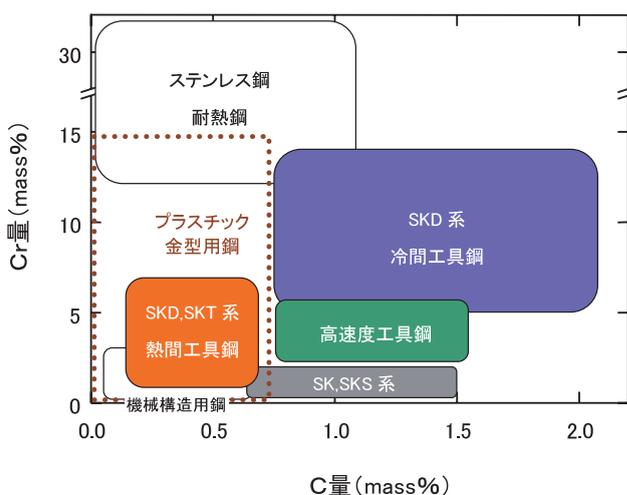


図1. 工具鋼のC量-Cr量（mass%）における区分

\*1 研究・開発センター 高合金鋼グループ、工博  
 \*2 研究・開発センター 高合金鋼グループ  
 \*3 研究・開発センター 高合金鋼グループ長、工博

表1. 熱間・冷間工具鋼の化学成分例 (mass%)

分類	鋼種名	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Co
熱間工具鋼	SKD4	0.39	≦0.4	≦0.6	-	2.50	-	5.50	0.40	-
	SDK61	0.37	1.00	≦0.5	-	5.00	1.25	-	1.00	-
	SKD62	0.37	1.00	≦0.5	-	5.00	1.25	1.25	0.40	-
	SKD7	0.33	≦0.5	≦0.6	-	3.00	2.75	-	0.55	-
	SKT4	0.55	≦0.35	0.80	1.65	0.85	0.35	-	-	-
冷間工具鋼	SKS3	0.95	≦0.35	1.05	-	0.75	-	0.75	-	-
	SKS31	1.00	≦0.35	1.05	-	1.00	-	1.25	-	-
	SKS93	1.05	≦0.5	0.95	-	0.40	-	-	-	-
	SKD1	2.10	≦0.5	≦0.6	-	13.5	-	-	-	-
	SKD11	1.50	≦0.4	≦0.6	-	12.0	0.90	-	0.25	-
	SKH51	0.85	≦0.4	≦0.4	-	4.15	5.00	6.1	1.90	-
	SKH55	0.90	≦0.4	≦0.4	-	4.15	4.95	6.2	1.95	5.0
	SKH57	1.27	≦0.4	≦0.4	-	4.15	3.50	10.0	3.35	10.0

工具鋼は、用途によって多種多様な使い方がなされてお  
り、その要求特性は多岐にわたる。図2に工具鋼の硬さー

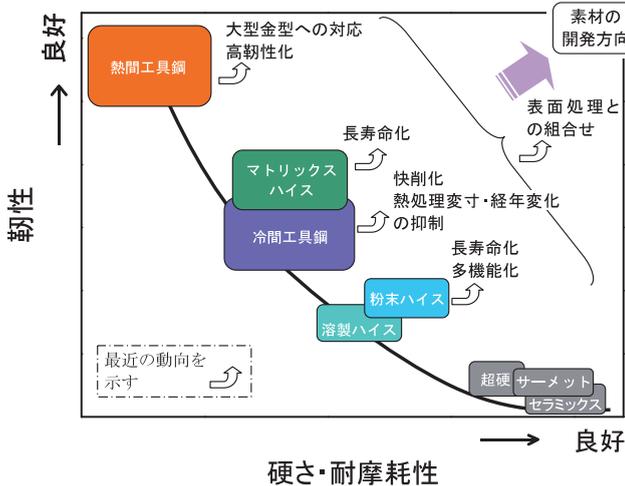


図2. 工具鋼の硬さー靱性における位置付けと開発動向

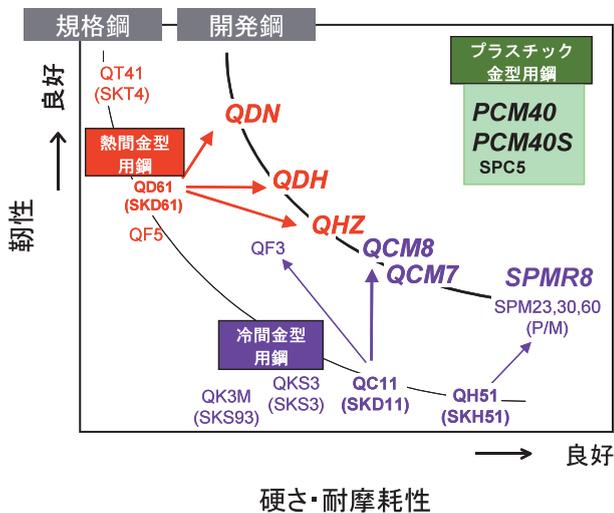


図3. JIS規格鋼と開発鋼位置付け

靱性における位置付けと最近の開発動向をまとめた。金型  
には、粉末ハイス、溶製ハイス、冷間工具鋼、マトリック  
スハイス、熱間工具鋼が用いられており、実用的にはJIS  
規格鋼の他に、各特殊鋼メーカーにより開発されたブラン  
ド鋼が用いられている。その一例として、図3にJIS規格鋼  
と弊社開発鋼の位置付けを示した。それぞれの開発動向に  
ついては後述するが、材料の特性向上と併せて熱処理の最  
適化、表面処理との組み合わせ、損傷解析、寿命予測など  
周辺技術の多様化、高度化への対応が重要になっている。

## 2.2 熱間工具鋼の基本特性

熱間金型は、金型寸法が比較的大きく、特に靱性が重視  
されるため、低C系 (0.25~0.6%) が採用されている。  
図4にSKD61のミクロ組織 (焼入焼戻し状態) の一例と  
して、a) 光学顕微鏡写真、b) 電子顕微鏡写真を示す。  
熱間工具鋼では、靱性面を重視し、かつ耐摩耗性を確保す  
るため、サブミクロンの炭化物を分散させている。熱間加  
工用金型には、SKT4系とSKD61系が多く使用される。前  
者は、鍛造時に大きな衝撃力が働くハンマー用金型として、  
後者は、強度とともに、耐摩耗性、耐ヒートチェック性、  
耐割れ性が要求される温間・熱間鍛造金型やアルミ押し  
出し、ダイカストなどの金型に適用されている。図5に代  
表的な損傷形態の一つであるヒートチェック (亀甲状の割れ)  
による割れ進展の模式図と損傷した金型断面のミクロ組織  
の一例を示す。被加工材からの熱影響により型材表面は軟  
化し、加熱・冷却の繰り返しにともなう局所的な膨脹・収  
縮によってヒートチェックを生じる。ヒートチェックは合  
流、合体しながら成長し、剥離や割れの原因となる。ダイ

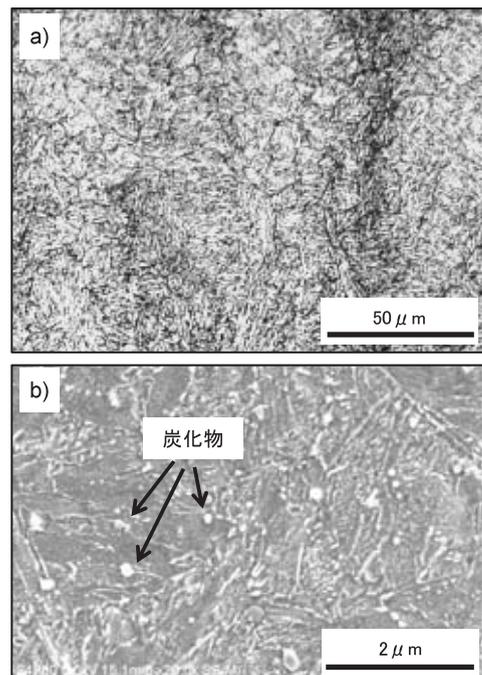


図4. SKD61のミクロ組織

カストなどの意匠性が重視される用途ではヒートチェックによる表面の荒れ自体が問題になる。熱間金型の損傷形態にはヒートチェックの他に割れ、摩耗、焼付き、溶損などがあり、熱間工具鋼には靱性、高温強度、軟化抵抗、耐摩耗、耐焼付き、耐溶損性などが必要とされる。また、金型の大型化に対応した焼入性、靱性の確保も課題になっている。

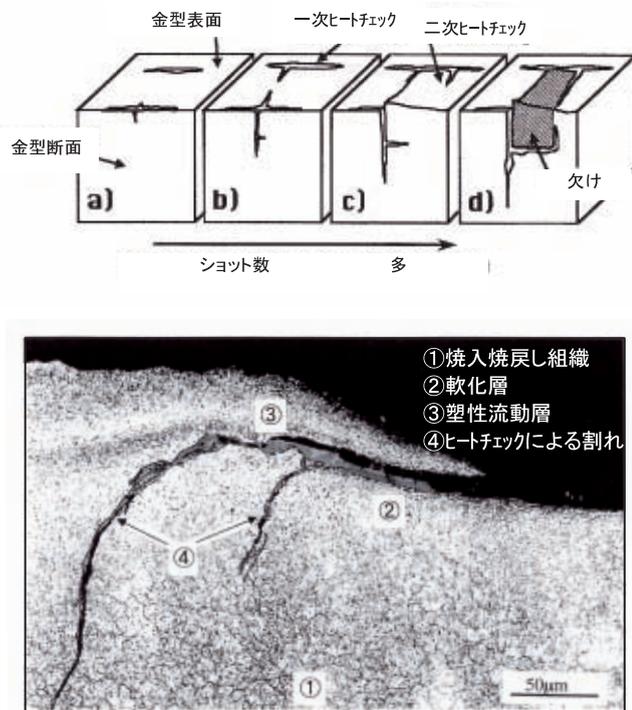


図5. 損傷金型の断面マイクロ組織

### 2.3 冷間工具鋼の基本特性

冷間工具鋼には硬さ、強度および耐摩耗性が要求されるため、高C (0.7%~2.4%) で、Cr、Mo、V、Wなど硬質炭化物を形成する合金元素が多く添加されている。図6に各種炭化物とマトリックス（基地）の硬さを示す。炭化物はマトリックスと比べて高硬度であり、耐摩耗性を確保する上で重要な役割を果たす。熱間系と比べると、分散させる炭化物は大きく、かつ含有量も多いのが特徴である。一般的に、硬質炭化物が多いほど耐摩耗性は向上するが、靱性は逆に低下することが知られており、成分設計によって工具鋼の特性は大きく異なる。図7に各鋼種の焼入焼戻し硬さ曲線を示す。工具鋼の多くは500~600℃で生じる二次硬化を利用することで高硬度と靱性の両立を図っており、熱間系が約35~55HRCで使用されるのに対し、冷間系の多くは約55~65HRCで使用される。

JIS-SK3、SKS3、SKD11は冷間三鋼種と呼ばれ、古くから使用されてきた代表的な冷間工具鋼である。冷間プレス、冷間鍛造、ファインブランクング、シャープ刃などの用途に用いられている。高速度工具鋼（溶製ハイス）は切削ドリルなどの素材として使用されているSKH51が代表鋼

種であり、冷間金型用としても使われている。冷間金型の損耗形態には、摩耗、欠け、変形、大割れ、焼付き、チッピングなどがあり、用途と損耗状態に応じた型材の選択が重要である。従来、冷間金型では耐摩耗性が重視されてきたが、被加工材の高強度化やニアネットシェイプ化による応力集中箇所の増加にともない、過負荷による割れ、繰返し応力の負荷による疲労破壊で寿命に至るケースが増加しており、割れ・欠けの抑制は大きな課題である。

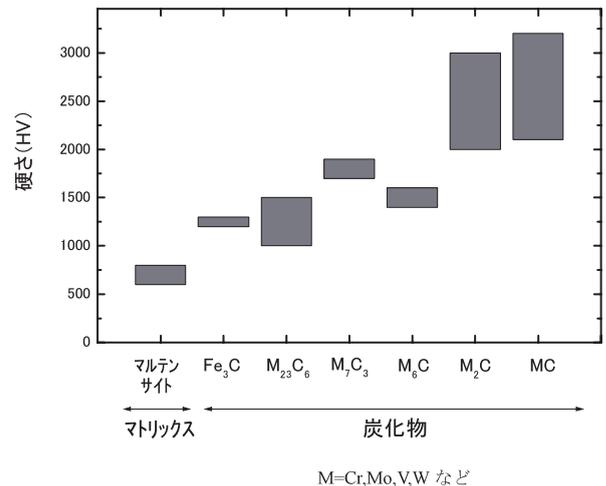


図6. 各種炭化物およびマトリックス硬さ

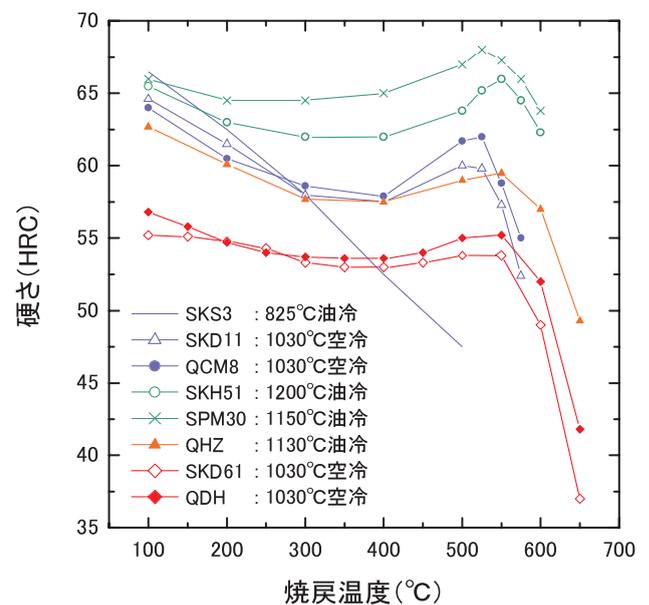


図7. 焼入焼戻し硬さ曲線

### 2.4 プラスチック金型用鋼の基本特性

プラスチック金型にはSC系、SCM系、析出硬化系、ステンレス系など多種多様なプラスチック金型用鋼が用いられている。先述したように、プラスチック金型用鋼としては、AISIにP6、20、21が規格化されている程度であり、各特殊鋼メーカーが独自に開発したプラスチック金型用鋼の占める割合が高い。プラスチック金型は他の金型よりも

高い加工精度が要求されることが多く、かつ短納期が求められるため、プリハードン状態で顧客に納入され、直彫り加工されることが多いのも特徴の一つである。SC系、SCM系は自動車用バンパー、インパネなど大物金型用に用いられており、被削性、設計変更に伴う肉盛溶接後の表面仕上げ性などが求められる。析出硬化系は家電・OA機器などの外装品、自動車用ランプ用などに用いられており、被削性、溶接性ととも高い鏡面磨き性、シボ加工性などが必要とされる。ステンレス系は光ディスクのケース、光学レンズ、光学・電子機器用精密部品用などに用いられており、さらに高い鏡面磨き性が必要となる。図8に硬さと鏡面度の関係を示したように、一般的には硬さが高いほど高い鏡面度が得られるが、鏡面度には金型材内質の影響も大きく、介在物の脱落によるピンホールの発生、不均一な組織、硬さのばらつき等に起因する鏡面加工面におけるうねり等を極力抑えることが重要である。したがって、プラスチック金型用鋼には高 cleanliness、均一微細なミクロ組織、偏析が少ないことが求められ、特に高い鏡面度が要求される用途に対しては、必要に応じてESR（エレクトロスラグ再溶解炉）やVAR（真空アーク溶解炉）などの再溶解材が適用されている。

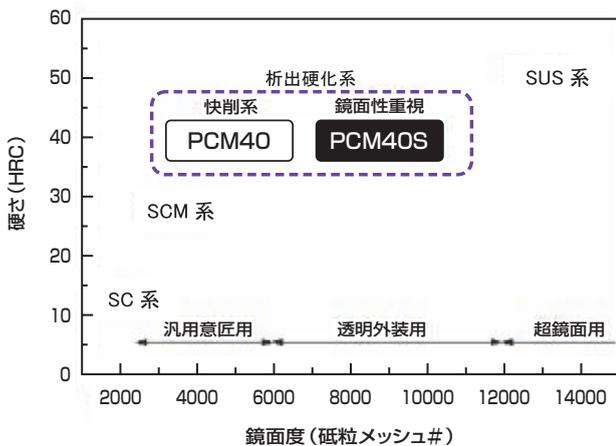


図8. 硬さと鏡面度の関係

### 3. 熱間工具鋼における最近の動向

金型を用いる熱間加工には、温・熱間鍛造、アルミニウム・マグネシウムダイカスト、アルミニウム・銅押しなどがある。最近の熱間加工品の大型化、複雑形状化、リブの薄肉化、水冷孔やピン孔の増加などにもない、大割れの危険性を軽減する信頼性の高い工具鋼、靱性のばらつきの小さい工具鋼に対する要求が高い<sup>(6)~(8)</sup>。

熱間系ではSKD61をベースに合金設計、製造プロセスの観点から改良が進められた。熱間金型の主要な損耗形態は摩耗、変形、割れであり、熱間工具鋼には高温強度、軟化抵抗、靱性（耐衝撃性、破壊靱性、き裂進展）の向上が必要とされる。また、用途に応じた諸特性を具備すること

も必要であり、例えばダイカストなどでは水冷孔の耐食性向上<sup>9)</sup>などの取り組みが行われている。

合金設計の面では、主に高Mo、低Si化による新鋼種開発が進められた。前者は高温強度、耐ヒートチェック性、焼入性、後者は延性、靱性の向上に大きく影響する<sup>(10)、(11)</sup>。一例として、図9に熱間工具鋼の高温軟化抵抗性を示す。初期硬さが同じであっても、合金成分によって高温軟化抵抗性は大きく異なり、例えばSKD61よりも高Mo化し、さらに低C、低Cr化したQDHは、SKD61よりも優れた高温軟化抵抗性を示すことが分かる。また、図10に硬さとシャルピー衝撃値の関係、図11に硬さと破壊靱性値の関係を示す。低Si化は鋼材内部性状の改善に大きな効果があり、例えばSKD61よりも低Si化したQDNは、SKD61よりも優れた靱性を示すことが分かる。低Si化により高温強度の増大、耐ヒートチェック性の改善など多くの利点が得られるが、一方で、切削性を悪化させるという問題点が指摘されてきた。そのため、Siの調整、快削元素の添加、機械加工法の改良など様々なアプローチがなされている<sup>(12)、(13)</sup>。

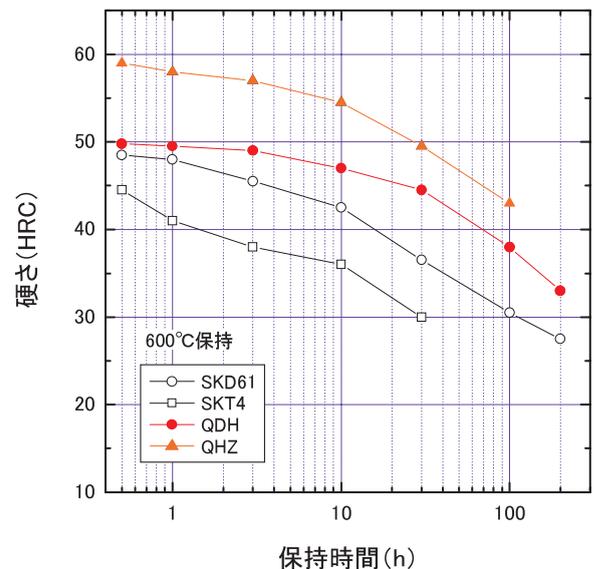


図9. 高温軟化抵抗性

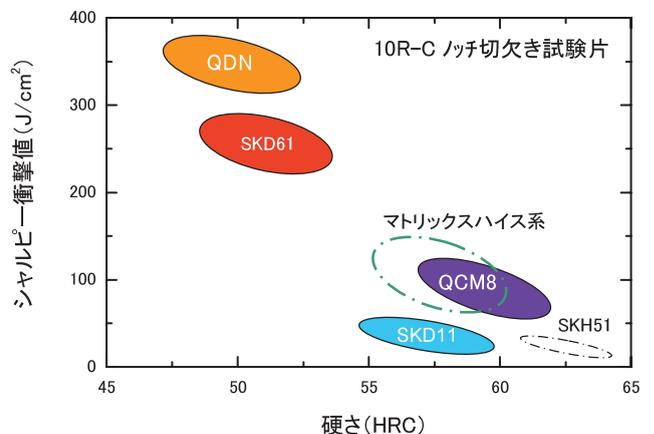


図10. 硬さとシャルピー衝撃値の関係

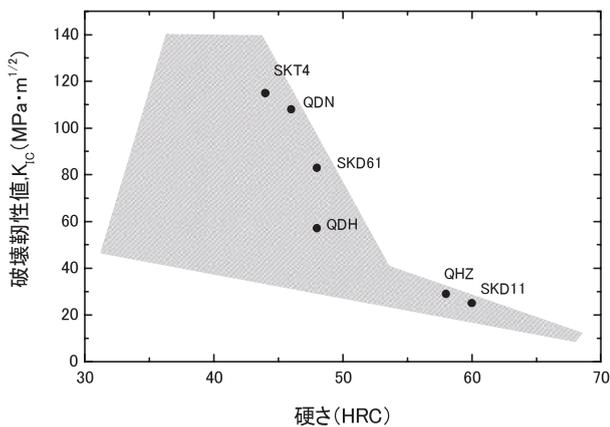


図11. 硬さと破壊靱性値の関係

温間鍛造など高い熱・機械的応力負荷が加わる用途では、ハイスのマトリックス成分を基本に、高温強度と靱性をバランスさせたマトリックスハイスの採用が増加した。図10に示したように、マトリックスハイスは55～60HRCの硬さで高い靱性が得られることから、冷間系でもその用途は拡大している<sup>14)、15)</sup>。

製造プロセス面では、製鋼工程での不純物濃度、非金属介在物および偏析の低減、圧鍛方法の改善による強靱性の向上、異方性の低減など品質の安定化が図られてきた<sup>16)</sup>。種々改善により、汎用規格材の品質ばらつきは従来よりも大幅に低減しており、寿命の安定化に貢献している。一方で、ダイカストなどの金型の大型化や生産の高サイクル化が進む分野では、SKD61高品位材の適用が広がっている<sup>17)、18)</sup>。SKD61高品位材は汎用材と合金添加量は基本的に同じであるが、不純物元素を極力低減し、ESRやVARなどの特殊溶解、均質化熱処理などを適用している。これらは大型品の靱性改善を狙ったものであり、金型寿命の安定化に寄与している。海外ではダイカスト用途のSKD61の受入れ基準としてNADCA（北米ダイカスト協会）の品質基準<sup>19)</sup>がよく知られており、日本でも規格鋼のプレミアム・グレードに対する認識が高まりつつある。

また、金型の大型化にともない、熱処理、特に焼入れ処理の役割がさらに重要になっている。焼入冷却速度の低下に伴い靱性は低下することが知られており、特定温度域（粒界炭化物析出域や上部ベイナイト変態温度域）での急速焼入れ冷却が重要である。一方で、金型は複雑形状化、局所的に薄肉化しており、焼入処理を行う際には、低ひずみで、割れや変形を生じないことが求められる。最近では、10パールを超える高加圧タイプのガス加圧式真空炉や油冷が可能な真空熱処理炉など設備面の改良、コンピュータ解析を利用した均一冷却が進められている。加えて、熱処理の安定化と金型の特性を低下させる組織の出現を長時間側に移行させた工具鋼の開発など、熱処理の安定化に向けた取り組みも行われた。また、金型寿命を大幅に低減させ

る局所的な早期ヒートチェックや早期摩耗も多くなっており、損傷状態に対応した表面処理の適用も増加した。

#### 4. 冷間工具鋼における最近の動向

金型を用いる冷間加工には、冷間鍛造、転造、曲げ・絞り加工、ファインブランキング、ロール成形などがある。冷間金型は熱間金型に比べて高硬度で使用され、かつ高応力が負荷されるため、割れ、摩耗により早期寿命に到ることも多い。一般的に、硬さが60～63HRCを越えると、引張強さ、疲労強度が急激に低下することが知られており、靱性との両立をいかに図るかがポイントとなる。硬さが高いほど金型寿命に及ぼす金型表面の仕上げ精度、使用中の表面損傷の影響も大きくなるので注意が必要となる<sup>20)、21)</sup>。

最近の冷間金型の動向としては、金型の長寿命化、高精度化に伴う使用中の金型精度の維持、金型リードタイムの短縮およびコスト低減のための加工性向上、熱処理変寸の低減がさらに重視されるようになった。また、高負荷の冷間鍛造、プレス型では、PVD、CVD、TDなど金型表面に硬質膜を付与する表面処理の役割も大きい。

冷間系ではSKD11、SKH51をベースに開発が進められた。冷間金型の主要な損耗形態は摩耗、剥離、欠け、大割れ、変形および焼付きであり、冷間工具鋼には硬さ、耐摩耗性、強度および靱性の向上が求められる。これらの基本特性と併せて、熱処理変寸および経年変化に対する寸法安定性、被削性、表面処理性などの諸特性も適用する用途に応じて求められる。

合金設計の面では、SKD11をベースに合金成分の最適化による炭化物制御が進められた。図12にSKD11と8%Cr系の一例としてQCM8のミクロ組織を示す。SKD11に対し、低C-低Cr化することにより、SKD11の割れ、欠けの要因となっていた粗大炭化物の生成が抑制されていることが分かる。さらに、高Mo化したことで、図7に焼入焼戻し硬さを示したように、高温焼戻しで約62HRCの硬さが得られる。SKD11と比べて炭化物は均一微細に分散しており、図10に示したように衝撃値はSKD11の3～4倍で硬さと靱性のバランスに優れていることから、割れ、欠けが生じやすい用途を中心に幅広く利用されている。

硬質炭化物は切削チップにダメージを与えることから、炭化物の制御は被削性の改善に対しても有効である。最近では、さらに快削元素を添加し、切削性の改善を図った鋼種も多く開発されている<sup>22)～25)</sup>。一例として図13に冷間工具鋼のエンドミル被削性を示す。粗大炭化物を低減したQCM8の被削性はSKD11よりも良好であり、快削元素を添加したQCM7ではさらに被削性が向上していることが分かる。一般的に快削元素を添加すると、靱性が大幅に低下することが知られているが、QCM7のように快削元

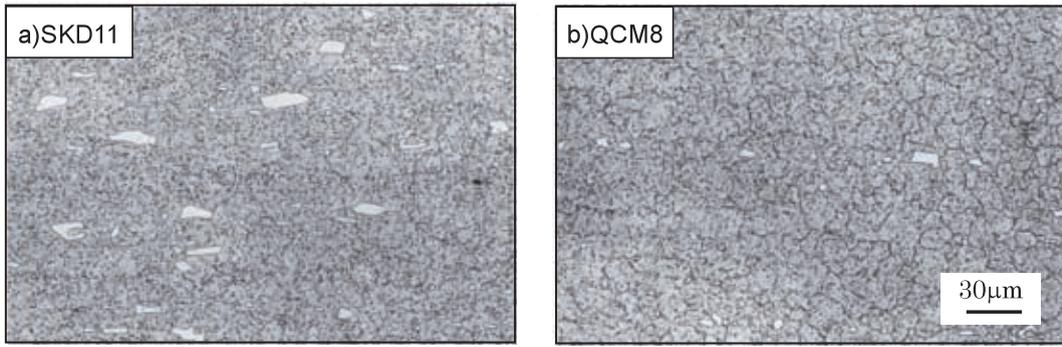


図12. SKD11およびQCM8のマイクロ組織

素の添加と炭化物の制御を同時に図ることにより、靱性と被削性を両立した鋼種が実用化されている。

QCM7は良好な被削性を有していることから切り屑排出量の多い自動車用冷間プレス金型などに適用されている

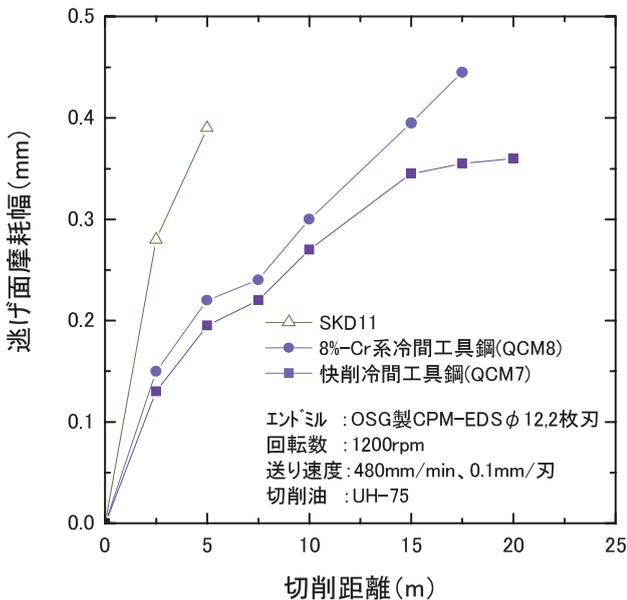


図13. 冷間工具鋼のエンドミル被削性

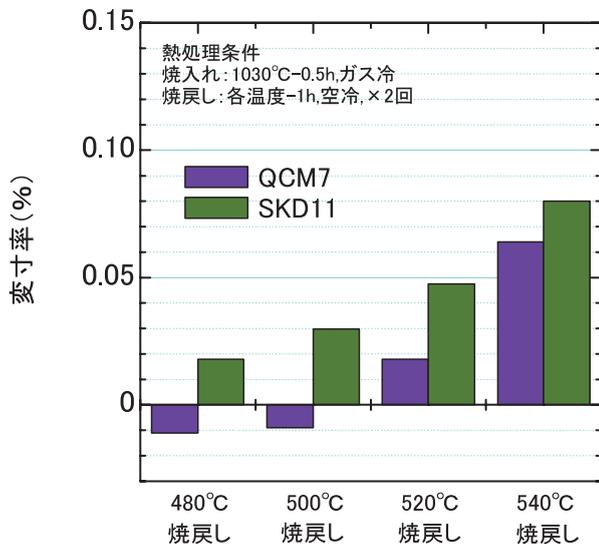


図14. SKD11, QCM7における熱処理変寸

が、同時に熱処理変寸が小さいことも大きな利点となっている。図14にSKD11、QCM7における熱処理変寸を示す。QCM7は高温焼戻し時の残留オーステナイトの分解に伴う急激な膨張を抑制するように組織制御されており、480°C～510°C焼戻しにおいてマイナス～ゼロ変寸が得られている。プレス金型では、試打ち前の組み付け、手直しに多くの時間を要しており、変寸の小さいQCM7を適用することで、リードタイムの短縮が実現されている。

製造プロセスの面では、熱間工具鋼と同様の取り組みが行われてきたほか、溶製法では合金添加量が多いことに起因する製造上の問題点の解消が進み、より安定した品質を提供できるようになった。他方、粉末工法を利用した粉末高速度鋼（粉末ハイス）の適用も進んだ。粉末ハイスは、従来の溶製ハイスと比べより高合金化が可能であり、かつ炭化物を均一微細に分散させることが可能である。粉末ハイスでは、チップングの起点となる炭化物が微細化したため、耐摩耗性・耐チップング性が飛躍的に向上したが、さらに過酷な用途では介在物がチップングの起点になる可能性も高く、さらに高性能化を目指し高纯净度が図られている<sup>26)</sup>。また、溶製法に比べ、合金元素添加の自由度が高く、耐食性の付与など目的に応じた合金設計も可能である。一例として、図15に高靱性・高耐食粉末ハイスSPMR8の位置付けを示す。SPMR8は従来の粉末ハイスの強度、耐

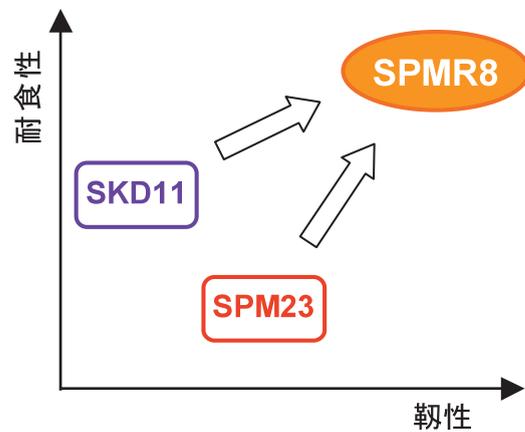


図15. SPMR8の位置付け

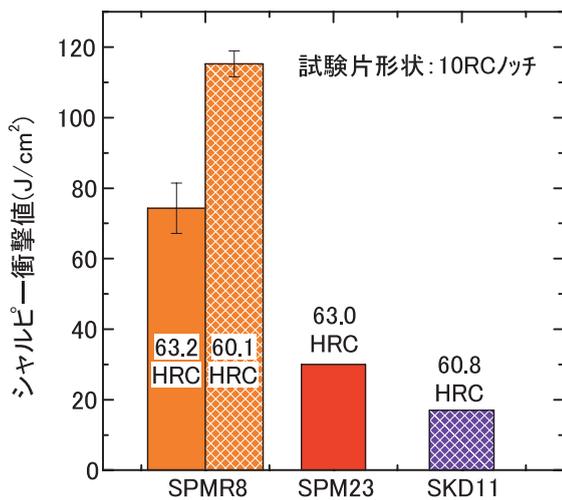


図16. SPMR8のシャルピー衝撃特性

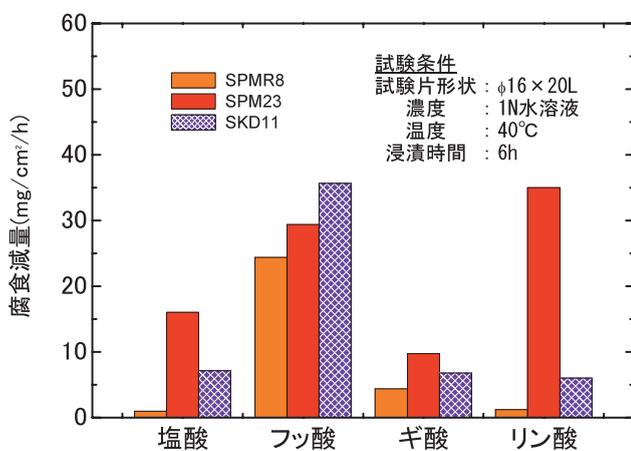


図17. 各種酸における浸漬試験結果

摩耗性に加え、図16に示したように高硬度域で非常に高い靱性を有し、かつ図17に示したようにプラスチックの難燃剤として添加されているハロゲン系、リン系などの酸環境に対して優れた耐食性を示す。これらの特長から、プラスチック押し出し、射出成形用スクリューの他、冷間鍛造、ファインブランキングなど幅広い用途への適用が期待される。

従来の粉末-HIP法の他に、熔融した金属に不活性ガスを噴霧し、液滴状にした後、基盤上に堆積させ、凝固させるスプレーフォミングなどの新しい工法も実用化されつつある<sup>27)</sup>。

その他、組織制御により強靱性を改善する方向として、残留オーステナイト ( $Y_R$ ) の有効利用が注目されている<sup>28)~30)</sup>。従来、工具鋼では  $Y_R$  は硬さや耐力の低下、熱処理前後の寸法精度、経年変化に不利という観点から、その量をなるべく少なくする努力がなされ、積極的に利用されてこなかった。硬いマルテンサイト素地中に軟らかい  $Y_R$  を分散させることにより、降伏強度を下げることやCの吸収効果を含めた焼戻脆性抑制作用以外に、1) 衝撃を吸収する、

2) き裂を鈍化させる、3) き裂経路を変化させるなどの効果があり、靱性、耐疲労特性向上への有効利用が期待される。

## 5. プラスチック金型用鋼における最近の動向

プラスチック金型では鏡面加工、シボ加工した意匠面がプラスチック製品の表面性状の合否に直結することから、プラスチック金型用鋼には要求される品位に応じた安定した鏡面磨き性が求められる。一方で、コストダウン、リードタイム短縮も重要な課題であることから、被削性、放電加工時の表面精度の向上なども必要となる。従来、エンブラ用途などにおいて成形中に発生するガスで金型が腐食するといった問題に対し耐食性が求められるケースが多かったが、最近では超精密金型における冷却制御の面から耐食性を具備する必要性が高まっている。これは冷却孔で発錆が生じると冷却能が低下し、プラスチック製品の寸法精度確保が困難になるためであり、水冷孔の発錆抑制は金型メンテナンスコストの低減にも寄与している。また、ガラス繊維、炭素繊維などの補強材が添加されている樹脂材も多くなっており、耐摩耗性と耐食性の両方を併せて有することも要求される。また、製品の高精度化にともない、薄肉部を有する金型も多くなっており、耐割れ性の向上が求められる用途も増加している。

大型金型ではSCM系が幅広く使用されてきたが、鏡面仕上げ性が不足する事例も多くなっている。鏡面磨き性に優れた析出硬化系、ステンレス系は再溶解材が大半であり、材質変更は大幅なコストアップの要因となっていた。弊社では、長年の軸受鋼の製造で培った高 cleanliness 鋼の製造技術を応用した弊社独自の製造プロセスにより cleanliness を高めたPCM40、PCM40Sを図8に示したように析出硬化系として有しており、コストパフォーマンスに優れた量産精密プラスチック金型用鋼として幅広い用途への適用が期待される。

今後、プラスチック金型用鋼では、高い鏡面度と他の諸特性を兼ね備えることにより、つまりプラスチック金型用鋼の高機能化によりトータルコストダウンに寄与していくことが課題になると考えられる。

## 6. 周辺技術動向

金型に適用される表面処理は、表面焼入法（高周波焼入れ、レーザー焼入れなど）、拡散浸透法（浸炭、窒化、TRDなど）、表面被覆法（CVD、PVD、肉盛溶接、溶射、酸化など）、高速衝突処理法（ショットピーニング、WPCなど）に大別される。

熱間金型では窒化处理が主体であり、ガス窒化、プラズマ窒化、タフトライドなどの塩浴窒化などが適用されてい

る。最近では温熱間鍛造型を中心に浸硫酸化処理による熱間摺動特性の改善が注目される<sup>31)、32)</sup>。表面処理を利用した熱間金型の寿命改善に関しては、「金型のヒートチェック研究部会」で共同研究が進められ、多くの知見が得られている<sup>33)</sup>。

冷間金型ではTRD（熱反応析出・拡散）、CVD（化学的蒸着）、PVD（物理的蒸着）法による硬質被覆が主流である。これらの方法は何れも一長一短があり、硬質被膜の種類によっても特性が異なる。TRDやCVD法は複雑形状への適用が可能で膜の密着性に優れており、高面圧が負荷される用途や耐焼付き性が要求される用途に適用されている。処理温度が1000℃と高く母材の変形や変寸が生じやすいため、処理前後のひずみ低減が課題となっている。一方、PVD法はCVD法よりも処理温度が低く、変形、変寸が抑えられる。膜の密着性はCVDやTRD法よりも劣るため、低面圧で寸法精度が要求される金型に適用される。複雑形状への適用が難しいこと、膜が剥離し易いことが課題であり、下地処理や母材の特性改善などによる密着性向上が期待される。他に、プラズマCVD（PCVD）法では原料にガスを用い、低温のプラズマ化学反応により、密着性および緻密性に優れた膜の形成が可能である<sup>34)</sup>。また最近では、窒化、浸炭などの拡散硬化処理+硬質被膜からなる複合表面処理が注目されている<sup>35)、36)</sup>。複合表面処理では、図18に示すように母材と硬質皮膜の硬度差を窒化などの拡散処理で補った傾斜構造になっており、硬質皮膜の剥離強度が大きく向上することが知られている。実用面でも、複合表面処理の適用による金型寿命の改善事例が数多く報

告されており<sup>37)、38)</sup>、損傷状態に応じて様々な組み合わせを選定することが可能である。高応力が負荷された時の基材と硬質被膜との界面における割れなど接合界面の制御が今後の課題になると考えられる。また、硬質被膜の種類も多様化しつつあり、DLC（Diamond-Like Carbon）のように表面平滑性と自己潤滑性を兼ね備えた膜では、冷間プレスにおける無潤滑加工の可能性が期待されている。

その他、レーザー溶接<sup>39)</sup>、レーザーピーニング<sup>40)</sup>、EDC（放電表面処理）<sup>41)</sup>なども金型への適用が試みられており、今後の技術開発が望まれる。

最近では、金型の損傷評価、寿命予測技術<sup>42)、43)</sup>を利用することで種々条件を最適化することが可能になっており、金型寿命の向上、部品製造におけるエネルギーロスの最小化が期待される。

## 7. まとめ

本稿では、工具鋼の現状と周辺技術を含めた高機能化の動向について述べた。各種産業の基盤を支える金型業界において、低コスト、高品質、短納期は今後ますます重要になる課題であり、その追求において、工具鋼の果たす役割は大きい。グローバル化が進む中、国内材の安定した品質、用途に応じた鋼種の供給体制が改めて評価されているが、今後、さらに製造・品質面でのレベルアップを図っていくことが求められる。一方で、表面処理技術など周辺技術との融合、相乗効果による性能向上も重要な課題である。解析技術の進歩も金型寿命の向上、金型製造コストの低減に貢献しており、様々な技術分野、多様な角度からの取り組みが今後必要になると考えられる。

## 参考文献

- 1) 奥野利夫, 田村庸: 塑性と加工, 40-465 (1999), 925-931.
- 2) 松田幸紀: 塑性と加工, 42-480 (2001), 3-7.
- 3) 加田善裕: プレス技術, 43-4 (2005), 18-22.
- 4) 並木邦夫: 電気製鋼, 73-3 (2002), 183-188.
- 5) 鉄連統計 (2007年).
- 6) 栢原芳郎: 特殊鋼, 53-6 (2004), 12-15.
- 7) 小森誠, 廣田智之: 特殊鋼, 53-6 (2004), 16-19.
- 8) 榎本洗治: 特殊鋼, 53-6 (2004), 20-23.
- 9) 吉田潤二: 素形材, 46-3 (2005), 45-49.
- 10) 塩田哲郎, 井上幸一郎, 太田明男, 安居英則, 小森誠: 型技術者会議2005, (2005), 154-155.
- 11) 横井大円: 特殊鋼, 53-6 (2004), 40.
- 12) 田部博輔: 特殊鋼, 53-6 (2004), 5-11.
- 13) 海野正秀, 瀬羅知暁, 岡田康孝, 村上大介, 村上禮三, 椿野晴繁: 鉄と鋼, 89-5 (2003), 89-94.

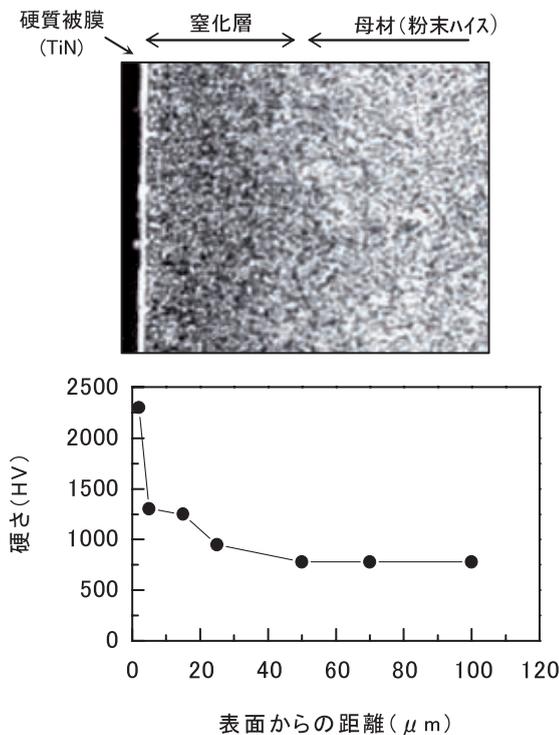


図18. 複合表面処理（窒化+硬質被覆）した金型表面の断面ミクロ組織および硬さ分布

- 14) 福元志保, 安藤光浩: 型技術者会議2005, 型技術者協会, 240-241.
- 15) 中濱俊介: 特殊鋼, 53-6 (2004), 41.
- 16) 清水欣吾: 工具鋼, (2000), 176, 日本鉄鋼協会.
- 17) 長澤政幸, 山口基, 安藤光浩, 田村庸, 片岡公太: 型技術者会議2005, (2005), 230-231.
- 18) 井上幸一郎, 大藤孝, 市岡雄二, 荒木利彦: 型技術者会議2005, (2005), 228-229.
- 19) NADCA: ACCEPTANCE REFERENCES, Level of micro banding or micro chemical segregation in annealed H-13 steel, Product#207, (1990).
- 20) 西田友久, 武藤睦治, 辻井信博: 日本機械学会論文集A編, 59-566 (1993), 2213-2219.
- 21) 松村勤, 夏目喜孝: 塑性と加工, 20-225 (1979), 957-961.
- 22) 吉田潤二: 塑性と加工, 45-527 (2004), 1017-1021.
- 23) 阿部行雄, 久保田邦親, 田村庸, 加田善裕, 福元志保, 山岡美樹: 日立金属技報, 17 (2001), 87-92.
- 24) 久保田邦親, 小松原周吾, 扇原孝志, 鳴海雅稔, 山岡美樹: 日立金属技報, 21 (2005), 45-52.
- 25) 館幸生, 清水敬介, 辻井信博, 磯本辰郎: 型技術者会議2000, (2000), 208-209.
- 26) 日原政彦, 永島洋: 型技術者会議2005, (2005), 248-249.
- 27) 日原政彦, 永島洋: 型技術, (2005), 74-75.
- 28) 須藤興一: 熱処理, 32-1 (1992), 33.
- 29) 松田幸紀, 須藤興一: 電気製鋼, 64-3 (1993), 140.
- 30) 横井大円, 辻井信博, 横山嘉彦, 深浦健三: 鉄と鋼, 89-6 (2003), 96.
- 31) 森下雅則, 麻田祐暉, 千葉芳孝, 原康介, 安藤光浩, 田村庸: 型技術, 7 (1999), 176-177.
- 32) 製品紹介: 電気製鋼, 74-2 (2003), 133.
- 33) 型技術協会 熱間金型の寿命改善委員会編: 熱間用金型の寿命対策, 日刊工業新聞社, (2001).
- 34) 河田一喜: 塑性と加工, 45-518 (2004), 153-157.
- 35) 池永勝, 鈴木秀人: 熱処理, 41-6 (2001), 305-312.
- 36) 安丸尚樹: まてりあ, 35-9 (1996), 969-975.
- 37) 池永勝, 鈴木秀人: 熱処理, 41-6 (2001), 305-312.
- 38) 森下雅則, 横井大円, 清水敬介: 型技術者会議2001, (2001), 166-167.
- 39) Klaus Schmid, 藤原美昭: 型技術者会議2005, (2005), 236-237.
- 40) 八代浩二, 佐野正明, 倉元眞實: 型技術者会議2005, (2005), 156-157.
- 41) 高石和年, 岩城忠則, 近藤俊朗, 南幸一, 佐々木和幸, 阿部保記: 塑性と加工, 25-518 (2004), 183-187.
- 42) 森下弘一, 鈴木寿之: 塑性と加工, 45-520 (2004), 310-314.
- 43) 土屋能成: 豊田中央研究所R&Dレビュー, 34-4 (1999), 3-12.