

工具鋼の現状と最近の動向

辻井 信博*・阿部 源隆*²

Current Status and Recent Trends of Tool Steels

Nobuhiro Tsujii and Genryu Abe

Synopsis : The development of the plastic working technology in recent years is greatly supported by the advance in the die technology, e. g. the die design and quality of tool steels etc. The plastic working conditions have become increasingly more severe, because of the requirements for more functional and precise products with higher strength. For these requirements, the production of high clean and high quality tool steels has been achieved by the improvements of manufacturing process, e.g. refining treatment in melting practice, forging technique and heat treatment etc. Moreover, it is now possible to select the tool steel grade suitable for the applications owing to a large number of newly developed tool steels. Aiming to furnish a guide for the appropriate selection of die materials, the present paper explains current status and trends in recent development of high performance tool steels.

Key words : tool steels; forging dies; plastic working; mechanical properties; heat treatment; melting practice.

1. はじめに

私たちは、数多くの工業製品を有効活用する中で生活を営んでおり、その素材は、金属、プラスチック、ゴム、ガラス、セラミックス、木材など非常に多種にわたっている。これらの素材を製品に加工する塑性加工技術の特徴は、複雑形状品、高精度品および高強度品を高効率に大量生産¹⁾できることにある。塑性加工に欠かせないものとして金型があり、近年の塑性加工技術の発展は、金型技術の進歩によるところが大きく、型材である工具鋼の品質向上がその一端をになっている。

工具鋼は、金型鋼、ダイス鋼とも呼ばれ、加工される素材や製法によって炭素鋼から高合金（鋼）まで広範な材質が使い分けられている。また、塑性加工条件は、最近の製品に対する高機能、高精密および高強度化ニーズにより益々過酷になってきている。これらニーズに対応すべく工具鋼の製造において、製鋼精錬などの製造技術の改善により、高纯净化、高品質化が達成され、さらに各種用途に対応する新しい鋼種群が開発され、より最適な鋼種選定が可能になってきている。以上のような背景をふまえ、型材選定における有用な指針を得ることを目的として、工具鋼の現状と最近の開発動向について解説する。

2. 工具鋼の分類と特性

2・1 工具鋼の分類

現在、JIS規格には炭素工具鋼、合金工具鋼および高速度

工具鋼として合計48種の鋼種が規格化されている。実用的には、これらのJIS規格鋼以外に各特殊鋼メーカー独自の鋼種がブランド化されており、それらは極めて多種におよんでいる。またプラスチック金型用鋼やガラス金型用鋼などに代表されるように、各種炭素鋼やステンレス鋼さらには高合金（鋼）などが金型用材料として使用されている。

図1は1.0% C炭素工具鋼のJIS-SK3を核に、JIS規格鋼と当社開発鋼について主要成分と特性の変遷を系統的に整理したものである。本図は、SK3を中心として左右方向に高合金化、高品質化を意味し、一方、上方ほど高C化、高耐摩耗化、また下方ほど低C化、高靱性化を示しており、型材選定時に有効な参考資料となるように作成されている。

2・2 汎用工具鋼の特性

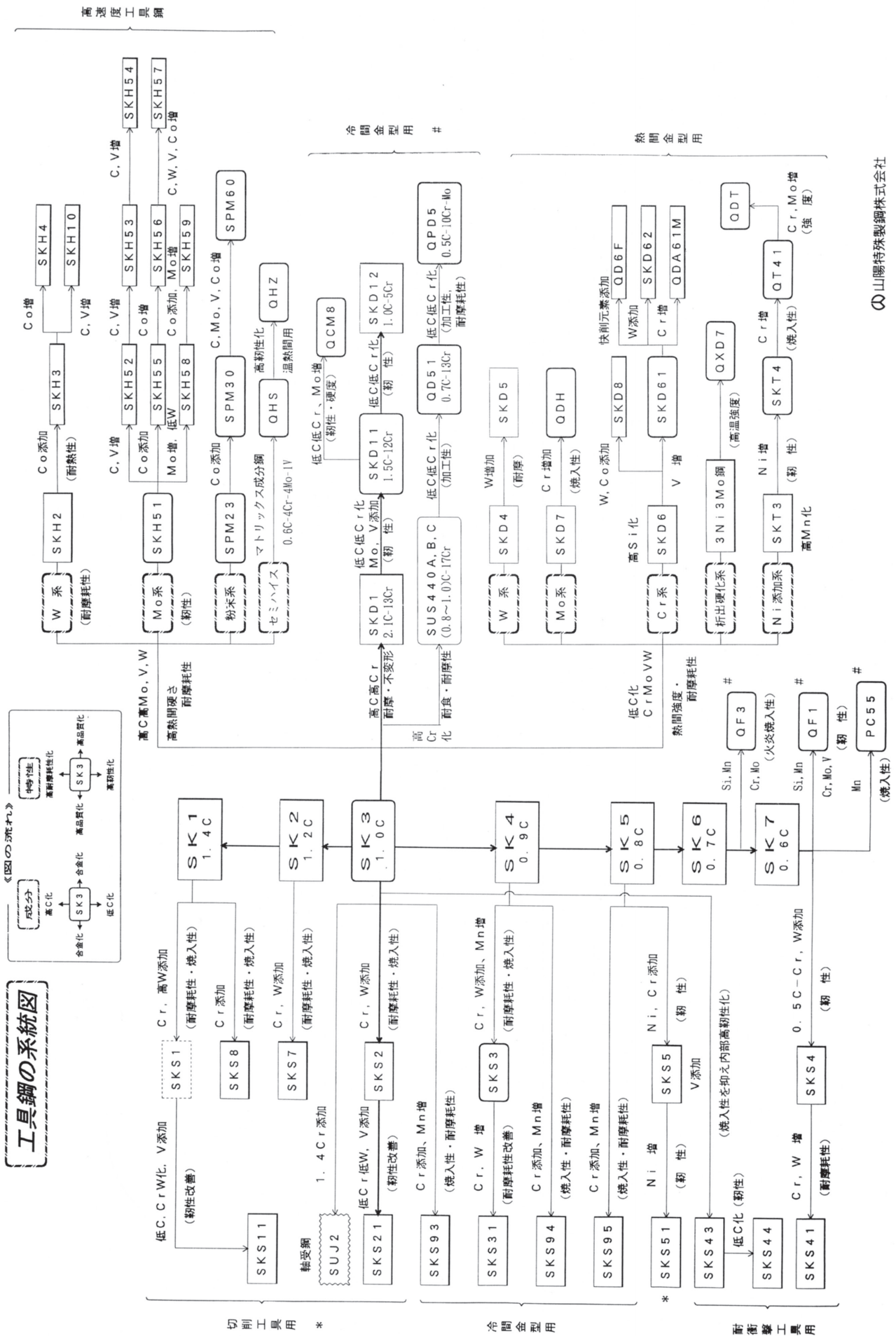
JIS-SK3, SKS3, SKD11は、冷間三鋼種と呼ばれ古くから使用されてきた代表的な冷間金型用鋼である。さらに切削ドリル用などの素材として使用されているSKH51も、冷間金型用として多く使われている。冷間における塑性加工は、被加工材の強度が高いため、使用される工具鋼には高い強度と耐摩耗性が要求される。

SKD11は、高C—高Cr化により耐摩耗性に優れた硬質炭化物を分散させた最も代表的な冷間工具鋼である。

熱間加工用金型には、SKT4改良鋼（QT41など）とSKD61系が多く使用されている。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と耐ヒートチェック性が要求される熱間塑性加工プレスや押し出しおよびダイカストなどの金型に適用されている。冷間工具鋼が、高C系（0.9~2.4%）であるのに

* 技術研究所特殊鋼研究室

* 2 技術研究所特殊鋼研究室（現技術企画部技術開発室）



山陽特殊製鋼株式会社

図1 工具鋼の系統図

対し、本熱間工具鋼はその金型寸法も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。このことは、図1で示したように冷間工具鋼が図中上方に、熱間工具鋼が右下方に集中していることから理解できる。

3. 製造および熱処理技術の発展

最近の工具鋼の品質向上は、後述するような新鋼種の開発以外に、その製造技術や熱処理技術の改善効果に負うところも極めて大きい。当社においても取鍋精錬(LF)-真空脱ガス(RH脱ガス)工程の導入と改善²⁾により、主要成分元素の高精度コントロールが可能となり、さらに品質を劣化させる非金属介在物の低減および酸素、S、Pなどの不純物元素³⁾の極低減化が達成されている。図2⁴⁾に、著者が確認したSKD61の靱性に及ぼすPの影響を示す。低P化により靱性値は向上し、その効果は、焼戻温度が高いほど顕著である。表1は、当社が製造している代表的な工具鋼の最近における主要成分のバラツキを調査した結果である。LFの導入と厳重な品質管理により成分バラツキが、極めて小さく抑えられていることが判る。これにより、熱処理硬さを初めとする機械的性質の高位安定化や熱処理ひずみの均質化が実現されている。

一方、工具鋼の特性を大きく左右する熱処理技術⁵⁾の進歩が、工具鋼の品質向上に寄与している。工具鋼の熱処理工程のなかで重要な因子の一つは、焼入冷却速度である。強度⁶⁾⁷⁾、靱性⁸⁾⁹⁾、軟化抵抗性および耐ヒートチェック性¹⁰⁾などの諸特性に及ぼす焼入冷却速度の影響が広範な研究により明らかとなり、加圧真空焼入法を始めとする種々の熱処理方法^{11)~16)}が工具鋼に適用されている。

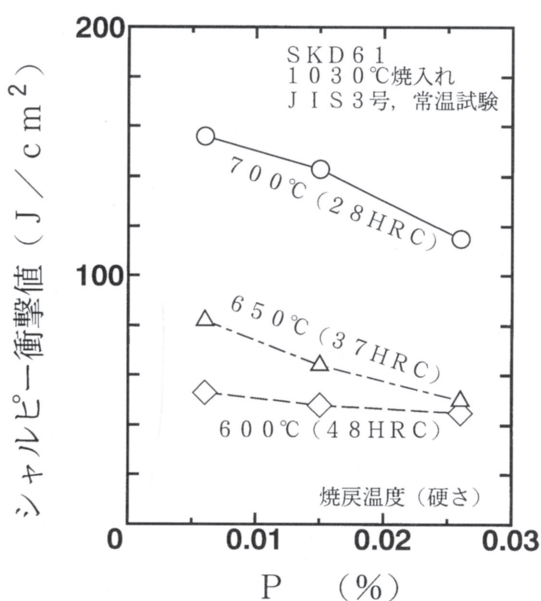


図2 SKD61の靱性に及ぼすPおよび焼戻温度の影響

表1 当社主要工具鋼の成分バラツキ

元素	QDA61	QC11
C	±0.01%	±0.02%
Cr	±0.05%	±0.30%
Mo	±0.01%	±0.02%
V	±0.01%	±0.01%

±2σ, 95.5%

4. 新工具鋼の開発

4.1 冷間工具鋼

冷間工具鋼の焼入焼戻硬さ特性と衝撃特性をそれぞれ図3および図4に示す。冷間金型の硬さは、一般的に58HRC以上必要であり、二次硬化を示さないQKS3(JIS-SKS3)などの低合金工具鋼は、200°C程度の低温焼戻しが採用される。一方、QC11(JIS-SKD11)に代表される高合金工具鋼では、用途により低温焼戻しと500°C以上の高温焼戻しを使い分けされている。JIS-SK3は、十分な硬さを得るためには焼入れの際、水冷を必要とするが、最近のプレス金型にはSK3の焼入性を向上させることにより、油冷でも高硬さの得られる改良鋼QK3Mが、広く採用されている。

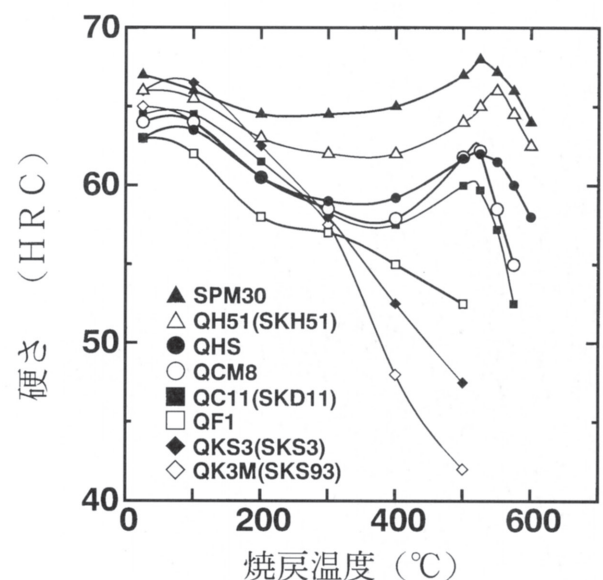


図3 各種冷間工具鋼の焼戻硬さ

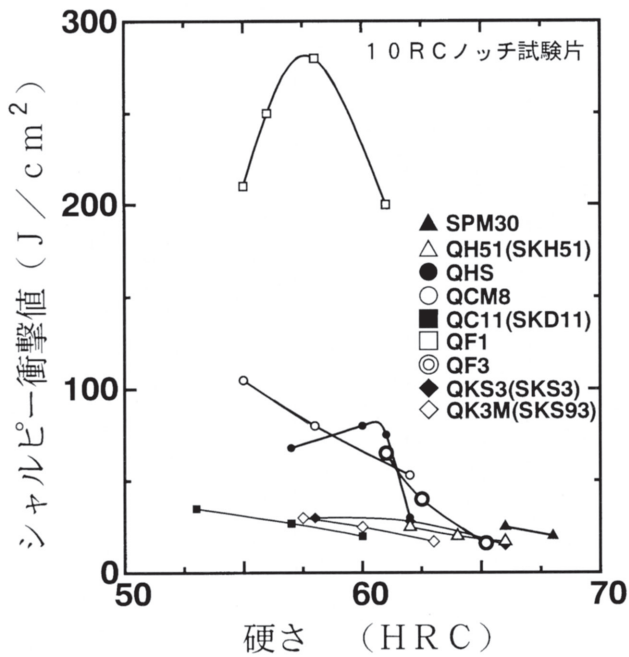


図4 各種冷間工具鋼の靱性と硬さとの関係

QF1は二次硬化を示さない低合金工具鋼の中で最高の靱性を有しており、特に靱性の必要とされるスパナなどの作業工具や洋食器など浅いインプレッションのプレスダイおよび少量生産用金型や刃物に適している。

QCM8は、JIS-SKD11に代わり最近注目を浴びている8Cr系冷間工具鋼¹⁷⁾¹⁸⁾である。高温焼戻しにおいても62~63HRCという高硬度が得られるうえ、靱性値はSKD11のおよそ4倍にも達する。図5には、QCM8のコスト・パフォーマンスを示している。QCM8は、硬さ、靱性、耐摩耗性および経済性のあらゆる点でSKD11やマトリックスハイスに比べバランス的に優れた鋼種といえる。さらに、QCM8は、機械的特性および熱処理変寸の等方性(図6)におい

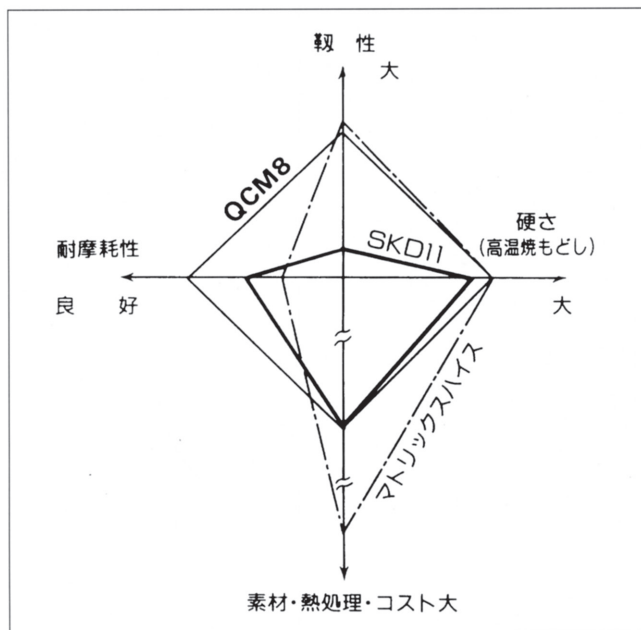


図5 QCM8のコスト・パフォーマンス図

て優れているうえ、被削性(図7)、ワイヤー放電加工性および表面処理性などの各種処理性¹⁹⁾においても良好なことから、自動車部品を初めとする冷間プレス用金型を中心に急速に普及しつつある。

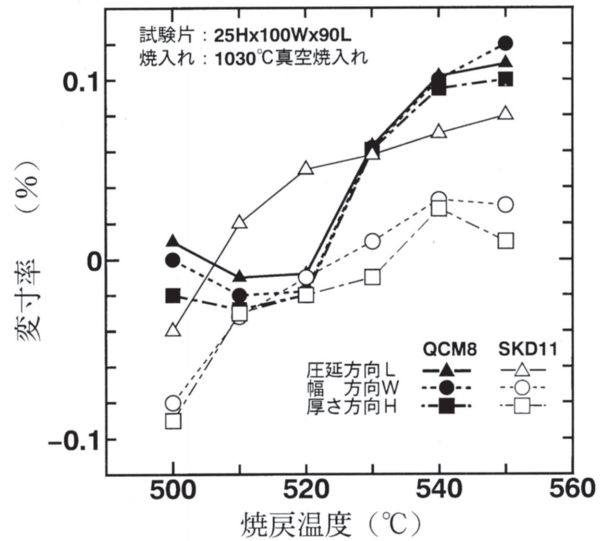


図6 QCM8とSKD11の熱処理変寸特性比較

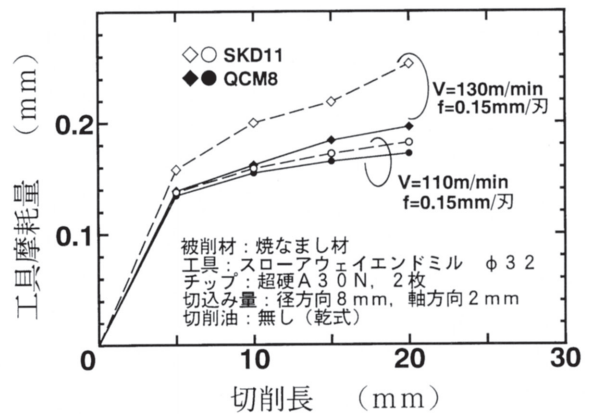


図7 QCM8とSKD11のエンドミル加工性比較

QHSは、JIS-SKH51の焼入れ状態でのマトリックス組成0.6%C-4.4%Cr-2.3%Mo-2.2%W-1.8%V²⁰⁾を基本成分として開発したマトリックスハイス²¹⁾である。本鋼は、工具鋼の製造過程で凝固時に生成する巨大炭化物を低減させることにより、60HRCという高硬度と極めて高い靱性を兼ね備えた工具鋼である。これらの特性は、工具摩耗やチッピングが問題となるファインブランキング用金型として非常に適している。また、QHSは、高温強度も高いため、冷間から温間および熱間にいたる幅広い領域のプレス用工具鋼に適用可能である。

QF3は、自動車ボディのような大物プレスの金型において、必要な箇所のみバーナーで焼入硬化させるフレームハードニング用鋼である。本用途には、安定したフレームハードニング性が求められることから、QF3は、特殊元素添加により結晶粒の微細化を図り、安定した硬化特性と高い靱性を有するように成分設計している。

4・2 熱間工具鋼

熱間金型用鋼は冷間金型用鋼に比べその使用環境が複雑かつ厳しいことから、より多くの研究と新鋼種の開発が行われている²²⁾。熱間金型用鋼の焼入焼戻硬さを図8に示す。熱間鍛造時、その金型表面は、被鍛造材からの熱により600~700℃まで昇温することが知られており、熱間工具鋼は、耐熱性を保持させるために、600℃前後の高温焼戻しが施される。また、同様の理由から、使用中の耐軟化抵抗性も非常に重要な特性であり、各鋼種の本特性を図9に示す。

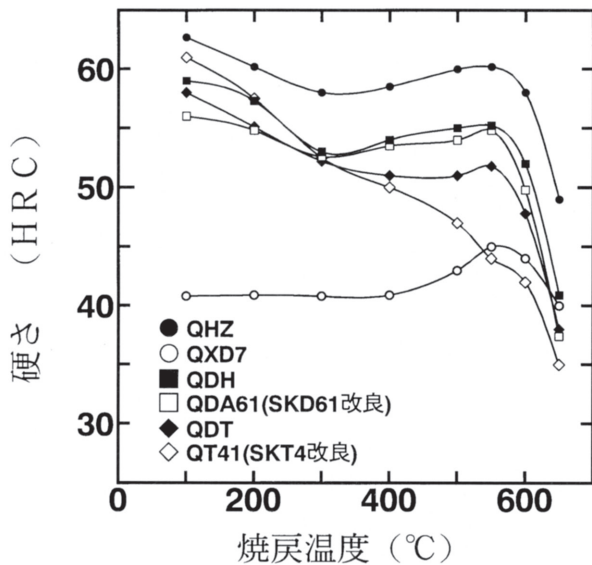


図8 各種熱間工具鋼の焼戻硬さ

QDTは、QT41の高温強度を向上させたハンマーおよびプレス用工具鋼である。図8に示すようにその焼戻特性は、二次硬化を示し、SKD61系に近い特性を有している。QDTの高温強度（図10）や耐軟化抵抗性（図9）は、QDA61に匹敵するためプレス用やダイカスト用金型鋼としての適用も期待される。

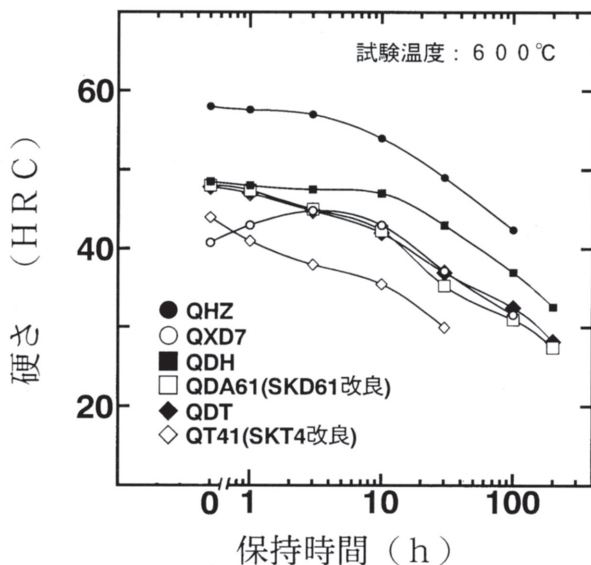


図9 各種熱間工具鋼の高温軟化抵抗性

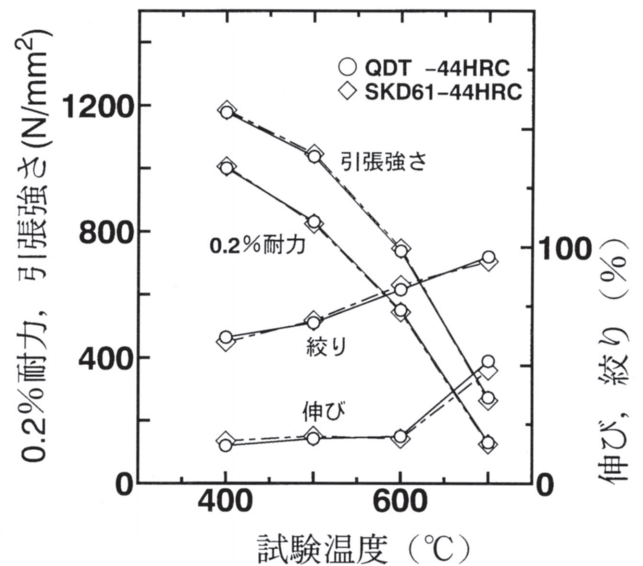


図10 QDTの高温引張強度特性

QXD7は、主に自動車部品であるコンロッド、クランクシャフトなどの熱間プレス用金型として多く使用されている析出硬化系熱間工具鋼である。その最大の特徴は、プリハードン状態で購入後、型彫り加工のみで使用でき、鍛造中に、強度の必要な型彫り面のみ、ワークからの熱影響により硬化する性質を有していることである。従来の析出硬化系工具鋼は硬化域の靱性不足により割れが助長されていたが、QXD7は、この点を改善した新しい工具鋼である。通常38~44HRCのプリハードン状態での納入となるので、熱処理が不要であり大幅な加工期間の短縮がはかられる。このように本鋼は、機能性と短工期性を兼ね備えた工具鋼であり、その適用は、今後、益々増加すると予想される。

QDA61MはQDA61の焼入性を大幅に改善させた高靱性熱間工具鋼であり、大型金型においても十分な靱性を有している。アルミニウム押出技術の進歩および3900t級の大型押出機の導入により幅600mmクラスの大型ダイスの需要が増大しており²³⁾、本用途やダイカスト用などへのQDA61Mの適用が進められている。

QDHは、3Cr-3Mo系鋼の優れた高温強度を引継ぎ、その弱点であった焼入性を大幅に改善した高強度熱間工具鋼である。プレス、ホットホーマなどの温間・熱間加工でのダイスやパンチなどに広く使用されている。QDHは高温強度の他、図11に示すように耐ヒートチェック性にも優れ、溶湯温度の高いアルミダイカスト用金型にも適している。

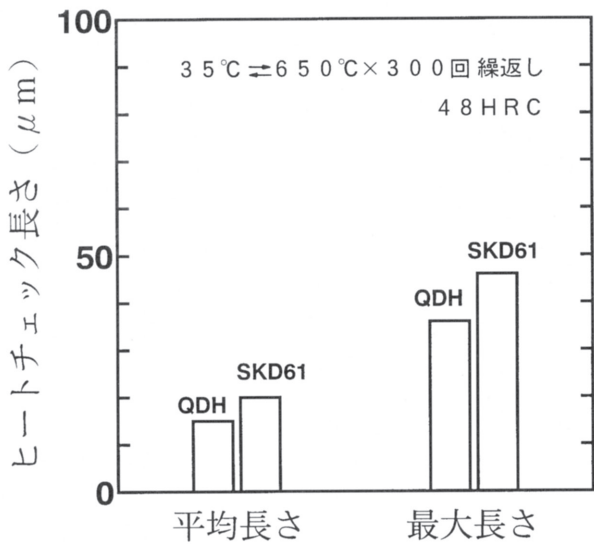


図11 QDHとSKD11の耐ヒートチェック特性比較

QHZはマトリックスハイス系鋼であるが、図12に示すように、熱間工具鋼として十分に耐えうる高い靱性を有している。QHZの高温強度はQDHよりもさらに優れており、硬さも従来の熱間工具鋼では不可能であった55HRC以上が得られることから、高温強度の必要なホットホーマ金型や溶損摩耗の激しいダイカストスリーブなどへの適用が図られている。例えば、溶湯温度が770℃の高Si系アルミ合金のダイカストスリーブにQHZを適用することにより、従来材SKD61の2倍以上に相当する9000ショットの長寿命を達成した事例もある。

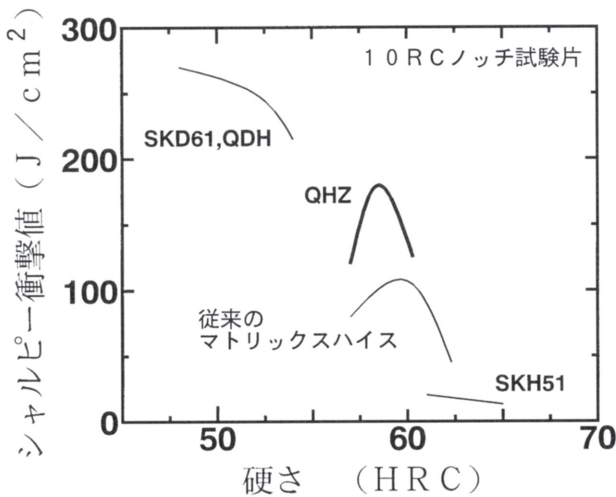


図12 各種熱間工具鋼の靱性と硬さの関係

4・3 プラスチック金型用鋼

図13に、各種プラ型用鋼の特性位置付けを示す。PC55は、雑貨、家電製品および自動車外装部品などに使用される汎用のプラスチック金型用鋼である。プラ型には特に鏡面仕上性やシボ加工性が要求され、これらの特性は鋼材中の非金属介在物、炭化物および組織の均質性に依存する。PC55は、前述した製鋼技術の改善により、上記表

面仕上性の他、機械的性質の等方均質化がはかられている。

近年のプラスチック製品の多様化にともない成形用金型に対し、一層の耐摩耗性、耐腐食性および鏡面仕上性が求められている。QCM8は、SKD11に比べ靱性、耐摩耗性、加工性および鏡面仕上性に優れていることからエンブラなどの耐摩耗用金型材に適している。また、QPD5は、加工性に優れたマルテンサイト系ステンレス鋼であり、58HRCという高い硬さが得られるため、SUS420J2系が使用されている光ディスクや各種レンズなどの高硬度、耐食プラ型において、さらに耐摩耗性と耐久性が改善される。

QSH6は、SUS304と同等以上の耐食性を有する析出硬化型ステンレス鋼である。QSH6は、SUS630と比較し、耐食性の大幅な向上とともに強度や機械加工性も優れている。従って、耐食性と強度が要求される塩化ビニールと難燃樹脂用の金型用鋼に適している。

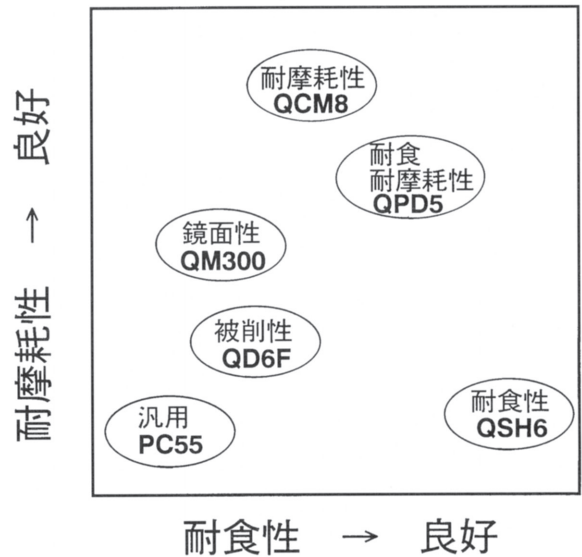


図13 各種プラ型用鋼の特性位置付け

4・4 粉末高速度工具鋼

粉末高速度工具鋼（粉末ハイス）は、炭化物が極めて微細均一であり従来の溶製ハイスと比べより高合金化が可能であり、高硬度と高耐摩耗性を兼ね備えた工具鋼である。粉末ハイスの強度、靱性および疲労強度は、炭化物粒径に大きく影響される⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾。図14は、粉末ハイスの特性に及ぼす炭化物粒径の影響を示しており、2~3μmの粒径において最も安定した特性が得られる⁽²⁶⁾。

SPM23、SPM30およびSPM60は、真空溶解→ガスアトマイズ工程で製造された高品質粉末を用い、前記知見を基に適切な炭化物粒径に調整し、製造された高靱性粉末ハイスであり、特にファインブランキング型などの精密金型に適している。

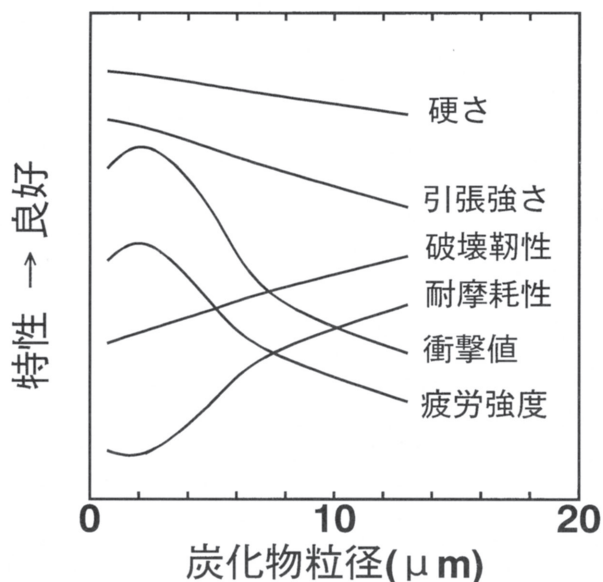


図14 粉末ハイスの諸特性に及ぼす炭化物粒径の影響

5. 今後の開発動向

最近の工業製品に見られる高機能化、高精度化、高強度化および小ロット多品種化傾向は今後とも継続していくものと考えられる。従って、金型用鋼の開発は型寿命向上を目的とした高性能・高精度化と、金型製作の短納期化に役立つ高加工性化、プリハードン化および省力・低コスト化を狙った簡易金型化の方向に進むものと予想される。

5・1 高性能、高精度化

例えば、高張力鋼板やステンレス鋼板の冷間プレス加工や高S系耐摩耗アルミ合金のダイカスト鑄造のような被加工素材の高強度化がさらに進むであろう。また温間鍛造によるニアネットシェイプ化やスクイズ法に代表される新しいダイカスト技術の導入などに伴い、金型の受ける負荷は著しく過酷になって来ると予想される。このような用途には、従来鋼以上の強度と靱性を兼ね備えた高性能金型鋼が必要とされる。

また、電子部品などの小型化に伴い、従来になかったシビアな金型寸法精度が要求されるケースが増加してきている。このような精密冷間プレス金型には、熱処理時の寸法変化および経年変化が少ない金型鋼が望まれる。

さらに、金型への各種表面硬化処理や超サブゼロ処理および真空焼入れの適用も進んでおり、これら処理性に優れた鋼種の開発が必要となる。

5・2 短納期化、簡易金型化

製品の多品種小ロット化の傾向に伴い、金型製作の短納期化や簡易金型化が益々進むと考えられる。例えば、自動車ボディ成形用冷間プレス金型用材は、圧鍛材から鑄鋼に移ってきている。また、熱処理を簡易化したフレームハード鋼や析出硬化系熱間工具鋼に代表されるプリハードン鋼の採用も増えるであろう。

一方、これまでの型材の高靱性化により、被削性は、劣化の方向にあり、これを改善することも、今後の重要な課題の一つと考えられる。

5・3 金型設計のCAD, CAE化

金型の複雑・精密・短納期化に対応するために金型設計においてCAD, CAE導入が進んでいる²⁷⁾。特に金型の強度解析においては型材の物理的および機械的特性値が必要であり、信頼性の高いデータの蓄積が望まれている。

6. おわりに

私たちの生活は、工業製品の発展により向上してきた。この傾向は今後さらに加速され、各種製品に対する一層の高性能化・多様化が求められるとともに、金型の寿命向上および高位安定化への期待は非常に大きいといえる。以上、最近の塑性加工技術に対応した高性能金型用鋼について紹介しつつ今後の動向について記述した。本文が、金型設計に何らかの参考になれば幸いである。

文 献

- 1) 型技術便覧 (型技術協会編), (1989), p.3, [日刊工業新聞社]
- 2) 上杉年一: 鉄と鋼, 74 (1988), p.1889
- 3) 奥野利夫: 微量元素の偏析部会調査報告書「鋼中微量元素の偏析と粒界脆化」, 鉄鋼基礎共同研究会, (1976), p.97
- 4) 辻井信博: 私信
- 5) 大和久重雄: 塑性と加工, 20 (1979), 222, p.592
- 6) 上原紀興, 並木邦夫, 高橋国男: 電気製鋼, 52 (1981), p.165
- 7) 伊藤一夫, 常陸美朝, 松田幸紀: 電気製鋼, 53 (1982), p.248
- 8) T. Okuno: Trans. Iron and Steel Inst. Japan., 27 (1987), p.51
- 9) S. Pettersson, O. Sandberg and B. Johnson: Heat Treatment of Metals, (1993), p.49
- 10) 伊藤一夫, 常陸美朝: 電気製鋼, 50, (1979), p.181
- 12) 紀田兼昭: 型技術者会議講演論文集, (1991), p.239
- 13) 柏谷信夫: 工業加熱, 26 (1989), 6, p.35
- 14) 鳴海孝雄: 工業加熱, 26 (1989), 1, p.19
- 15) 西村堅一郎, 金子雅哉: 第31回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集, (1990), p.1
- 16) 相沢 力: 電気製鋼, 57 (1986), p.214
- 17) 阿部源隆, 中村秀樹, 調 英夫: 日本金属学会会報, 25 (1986), p.438
- 18) T. Arai: Journal of Materials Processing Technology, 35 (1992), p.515
- 19) 中村秀樹: 金属プレス, 23 (1991), 11, p.43
- 20) 佐藤知雄, 西沢泰二, 村井弘佑: 鉄と鋼, 45 (1959), p.1346
- 21) Trans. Iron and Steel Inst. Japan., 27 (1987), p.315 (New Technology, by Sanyo Special Steel Co., Ltd.)
- 22) 奥野利夫, 田村 庸: 鉄と鋼, 79 (1993), p.1013
- 23) 杉尾栄治, 中村仁人, 道阪浩三: アルトピア, 21 (1991), 8, p.9
- 24) 西田友久, 武藤睦治, 辻井信博: 材料, 41 (1992), p.1403
- 25) 西田友久, 武藤睦治, 辻井信博: 日本機械学会論文集, 59A (1993), p.2213
- 26) A. Yanagitani, N. Tsuji, N. Katayama, G. Abe and Y. Tanaka: Proc. of 1994 Powder Metallurgy World Congress, (1994), p.2129
- 27) 濱家信一, 前川佳徳: 型技術, 6 (1991), 7, p.49