新冷間金型材ARK1®の開発

Development of New Cold Work Tool Steel ARK1®

阿部行雄* Yukio Abe
久保田邦親* Kunichika Kubota
田村　庸* Yasushi Tamura
加田善裕** Yoshihiro Kada
福元志保** Shiho Fukumoto
山岡美樹*** Miki Yamaoka

冷間工具鋼が用いられるプレス加工の分野では，多品種少量生産の社会的流れにより金型が早く，安く製作できることが求められている。そこで金型の造りやすさを追求することをコンセプトとした新冷間ダイス鋼ARK1を開発した。合金元素および組織の適正化を行い，①JIS　SKS3と同等の被削性，②スタンダードJIS　SKD11とほぼ同等の熱処理挙動（硬さ，熱処理変寸），③溶接性，靭性が良好，の特性が得られ，金型製作コスト低減および製作効率の向上が期待される。

A cold work tool steel, which are uesd for dies in blanking, drawing, etc., called ARK1 has been developed to meet the need for dies that can be manufactured at lower cost and with a shorter lead time. ARK1 steel has optimized amounts of additive elements and an optimized microstructure.It has machinability close to JIS SKS3 and temperd hardness and dimensional change behavior similar to JIS SKD11. It also has good weldability and toughness. As a result, it should reduce the cost and improve the productivity of manufacturing dies.

❶ 緒　言

1.1 背　景

自動車，家電部品などの製造に用いられるプレス加工の分野では，近年国際競争の激化や多品種少量生産のニーズ増大により，金型には耐久寿命よりも型加工費低減や型製作リードタイムの短縮が求められている。そこで加工しやすい型材のニーズが高まっている。

プレス加工の金型材としては冷間ダイス鋼であるJIS SKD11が最も代表的であり，10～100万個の中～大量生産に耐える耐摩耗性と，焼入れ焼戻しによる寸法変化や経年変形が小さいため広く用いられてきた。

一方上記の動向により被削性の良好な合金工具鋼であるSK，SKS材が抜き型の切刃として使用される場合があるが，これらの鋼種は油焼入れのため熱処理変形が大きく納期も長い。また精密型などで放電加工が用いられるが，SKS材などは低温焼戻しのため焼入れ残留応力による歪み，割れの懸念がある。

また最近被加工材としてステンレスや高張力鋼の適用が広がり，プレス成形時に凝着，焼付きを起こしやすくなっている。これを抑えるためTD処理やCVD処理といった表面処理が適用される。この場合母材は寸法調整が容易な理由から高温焼戻し可能なダイス鋼が用いられている。

そのほかにSKD11の改良鋼の8%Cr鋼も用いられており，高温焼戻し硬さを62HRCとSKD11の60HRCより高くでき，靭（じん）性もSKD11より良好である。しかしながら熱処理変寸や経年変形が大きいためスタンダードSKD11と異なる熱処理条件の設定が必要である。

以上の金型材を取り巻くプレス加工の動向と金型材に要求される特性を**表1**に示す。このような背景を踏まえ，現在そのニーズが高まっている金型の作りやすさを追求し，新冷間ダイス鋼ARK1（アークワン）の開発を行った。ARK1の目指す特長は，「ダイス鋼の長所である焼入れ性などの熱処理挙動や耐摩耗性をできるだけ維持しつつ，かつSKS材に匹敵するほどの良好な被削性を有する」ことである。主な目標特性は以下の3点であり，**図1**にARK1の特性の位置付けを示す。熱処理特性については最も処理量が多いスタンダードSKD11と同等とすることで同一熱処理機会での処理が可能となりコスト，効率面で有利と考えた。

（1）被削性はSKSに匹敵
（2）熱処理特性（硬さ，焼入れ性，熱処理変寸）はSKD11と同等
（3）溶接性，靭性が良好

以上の目標を満たすべくARK1の開発を行った。

* 日立金属株式会社　冶金研究所
** 日立金属株式会社　安来工場
*** 日立金属株式会社　特殊鋼事業部技術部
* Metallurgical Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.
** Yasugi Works, Hitachi Metals, Ltd.
*** Specialty Steel Division Engineering Department, Hitachi Metals, Ltd.

表１　プレス加工の動向と金型材に要求される特性

Table 1　Trends in press working and preferred properties of die material

プレス加工の動向	型製作の状況	金型材への要求
型製作費用低減 短納期対応	型製作費低減 製作リードタイム短縮	被削性良好 真空焼入れ可能
高精度金型加工	放電加工	高温焼戻し可能
難加工材の加工	表面処理	熱処理変寸小

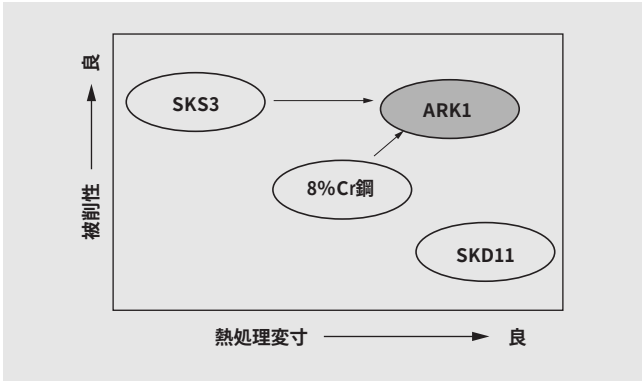


図１　ARK1の位置付け

Fig. 1　Position of ARK1 on dimensional change and machinability

❷　ARK1の開発

２．１ 実験方法

ARK1の開発にあたり最も重視した被削性については，ダイス鋼の基地組成をベースにSKD11に耐摩耗性を付与している硬質粒子のCr系炭化物（M_7C_3）量と快削元素Sの添加量の影響を調べた。具体的な組成範囲はC：0.5～1.5，Cr：6～12，S：0～0.12mass%である。炭化物量は断面積が1μm²以上のものについて画像解析により求めた面積率とした。金型の加工は面削り，穴明け，型彫りと各種切削方法の組み合わせのため，それぞれについて評価を行った。切削試験は硬さが180～230HB，試料寸法が40×50×200mmの焼なまし材にて行った。

熱処理特性に対しては基地組成を検討するため平衡熱力学計算ソフトThermo-Calc[1] を活用した。一般的なダイス鋼の焼入温度である1,030℃における基地組成がSKD11と同等である成分について，焼戻し硬さ，残留オーステナイト量および熱処理変寸の挙動を調べ，SKD11および8%Cr鋼と比較した。熱処理変寸はφ10×80mmの試料を1,030℃，1h保持後，5×10⁵Paの窒素ガス加圧冷却にて焼入れを行い，所定の温度にて1h，2回の焼戻し後に試料長手方向の寸法変化を測定した。変寸率は焼なまし時の試料寸法を基準に求めた。

上記特性の材料因子との関係を把握した上でThermo-Calcも活用して耐摩耗性，表面処理などほかの特性とのバランスを考慮し，ARK1の成分を設計した。

２．２ 被削性に及ぼす炭化物量およびS添加量の影響

図２に炭化物の分布を示す。白く見えるものが炭化物である。炭化物量の増加により炭化物粒径も大きくなっている。

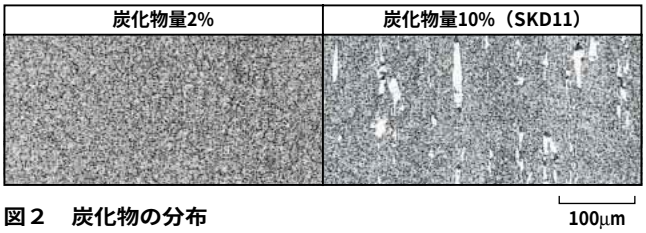


図２　炭化物の分布

Fig. 2　Microstructures of carbide distribution

図３～**５**に各種切削加工における被削性に及ぼす炭化物量およびS添加量の影響を示す[2]。**図３**はハイスエンドミルでの切削試験結果である。炭化物量，S添加量ともに工具寿命に大きな影響を及ぼす。**図４**はサーメットチップによる正面フライス加工の結果であるが，Sによる被削性向上効果より炭化物量の影響が大きい。**図５**はハイスドリルでの切削試験結果であるが，Sの効果が他の加工より顕著である。

図３～**５**より金型の主要な各種切削加工において被削性が目標のSKS3と同等以上となるには，炭化物面積率を2%以下に抑えるとともにS添加が必要であることがわかった。

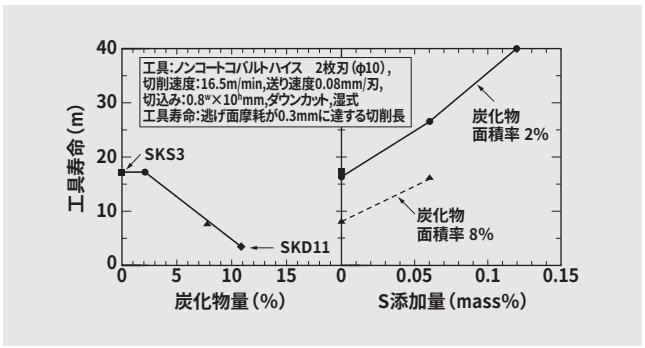


図３　被削性に及ぼす炭化物量およびS添加量の影響（エンドミル加工）[2]

Fig. 3　Effect of carbide fraction and S content on machinability（end milling）

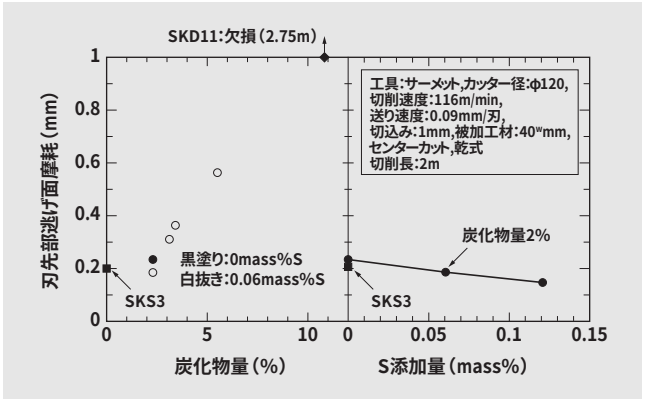


図４　被削性に及ぼす炭化物量およびS添加量の影響（正面フライス加工）

Fig. 4　Effect of carbide fraction and S content on machinability（face milling）

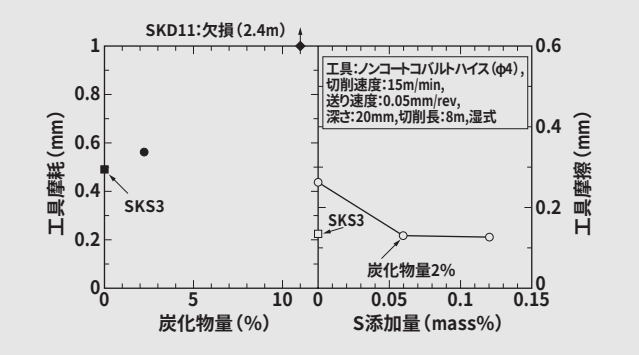


図５　被削性に及ぼす炭化物量およびS添加量の影響（ドリル加工）

Fig. 5　Effect of carbide fraction and S content on machinability (drilling)

２．３ 熱処理特性に及ぼす基地組成の影響

図６に焼戻し曲線，残留オーステナイト量および熱処理変寸を示す。熱処理変寸は焼入れ時の残留オーステナイト量や焼戻し過程の残留オーステナイトの分解および炭化物の析出反応など，多くの冶金学的因子が複雑に相互作用を及ぼす[3]。SKD11は焼入れ時にはマルテンサイト変態による膨張と残留オーステナイトの存在による収縮の収支より全体として膨張する。焼戻しが400℃までは炭化物の析出によるマルテンサイト中のC量の低下に伴い収縮と硬さの低下が生じる。450℃前後より残留オーステナイトの分解が始まるため膨張へと転じる。さらに微細な特殊炭化物も析出するため硬さも上昇する。530℃以上になると析出炭化物の凝集のため硬さは低下し，変寸も小さくなっていく。8%Cr鋼では焼戻し硬さをSKD11より高めるために合金元素を多く含有しているため残留オーステナイトの分解が遅れ，500℃以上で急激に分解するため熱処理変寸が大きくなる。

以上のように熱処理特性にはCや合金元素が複雑な相互作用を及ぼす。そこでダイス鋼の一般的な焼入れ温度

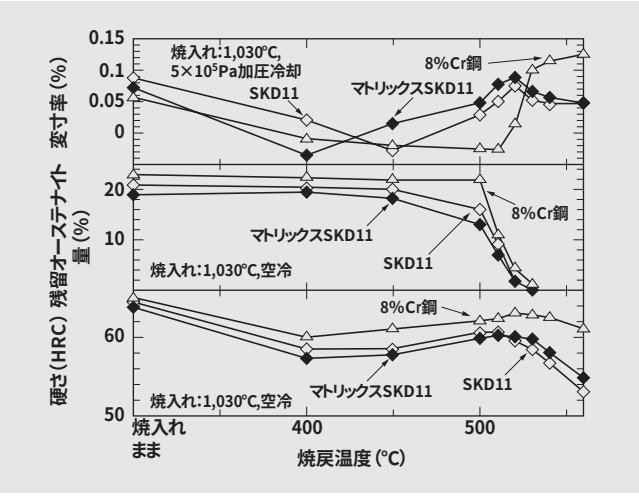


図６　焼戻し硬さ，残留オーステナイト量および熱処理変寸に及ぼす焼戻し温度の影響

Fig. 6　Effect of tempering temperature on tempered hardness, retained austenite, and dimensional change

の1,030℃における基地組成をSKD11と同じにした成分（マトリックスSKD11と称する）はSKD11とほぼ同様の熱処理特性であった。したがって熱処理特性を目標のSKD11と同等にするためには，焼入れ状態での基地組成をSKD11のそれに極力近づけることが必要である。

２．４ ARK1の成分設計

上記以外の特性として耐摩耗性を高めるためにはSKS3の軟質なセメンタイト（M_3C；1600HV）系炭化物ではなくSKD11のように硬質Cr系炭化物（M_7C_3；2,400HV）を分散させる必要がある。しかしながら炭化物の増量は被削性を損ねるため，両者のバランスを考えた炭化物量の設定が必要である。

TiC処理のような表面処理では母材中のCを利用して成膜が行われる。**図７**にTiC層の断面ミクロ組織を示すが，基地のC量が少ない場合は膜が薄くなる。そこでSKD11と同等の膜厚を得るためには，SKD11と同等の固溶C量が必要である。

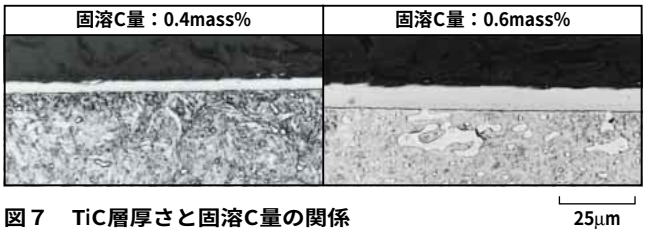


図７　TiC層厚さと固溶C量の関係

Fig. 7　Relationship between thickness of TiC layer and C content in matrix

以上より目標特性を得るためには，①耐摩耗性を考慮してSKSなみの被削性を維持する範囲で硬質のCr系炭化物量を残存させ，②Sを添加し，③熱処理特性および表面処理性から固溶C量を含む基地組成をSKD11のそれに極力近づけるような成分設計をすることが必要である。これらを考慮した最終的な成分の絞り込みはThermo-Calcを利用して行なった。**図８**に横軸に添加C量，縦軸に添加Cr量とした場合のThermo-Calcにて計算した1,030℃（焼入温度）における固溶C量およびCr系炭化物量を示す。本計算結果も踏まえ成分設計を行いARK1を開発した。

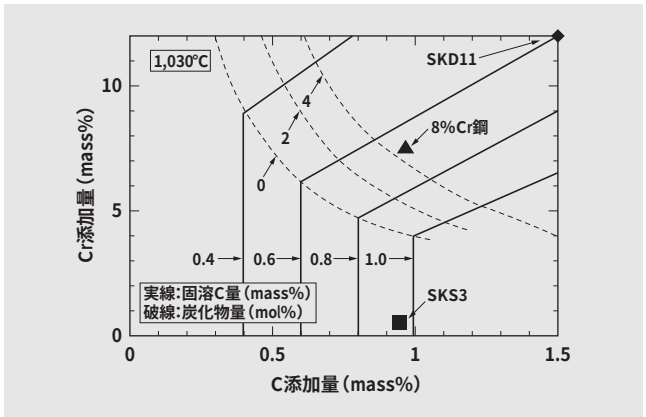


図８　Thermo-Calcによる1,030℃での平衡状態計算結果

Fig. 8　State of equilibrim calculated by Thermo-Calc at 1,030°C

❸ ARK1の諸特性

以下にARK1の諸特性を示す。供試材は断面寸法が65×205mmの素材より採取した。また被削性は180～220HBの硬さである焼なまし材にて，靭性，溶接性，耐摩耗性，表面処理性については1,030℃，5×10^{5}Paのガス加圧冷却で焼入れ後，58～60HRCの硬さになるよう調質して評価を行った。

３．１ 被削性

図９～**13**に各種切削加工における切削試験結果を示す。**図９**はエンドミル加工での切削試験結果であるが，ARK1は目標であるSKS3に匹敵する被削性を達成している。またSKD11の2倍以上の切削速度でも同等以上の工具寿命が得られ，切削効率を2倍以上にすることが可能である。**図10**はエンドミル側面加工による工具の逃げを示す。工具の逃げは加工機械での設定切削幅と実際の切削幅の差であり，この差が小さいほど高精度の加工となる。深彫り加工を行う場合，工具の突出し量が大きくなるため工具に逃げが生じるが，ARK1は工具の逃げが小さく，高精度の加工が期待できる。**図11**，**12**は正面フライス加工の切削試験結果である。ARK1はSKS3よりは工具摩耗が大きいものの，SKD11や8%Cr鋼では工具

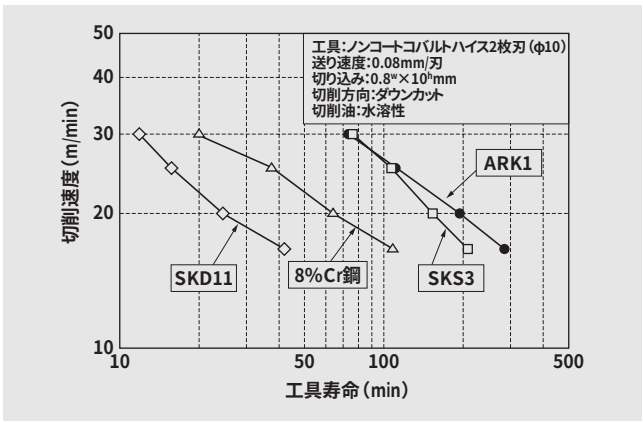


図９　エンドミル加工における被削性

Fig. 9　Machinability of ARK1 in end milling

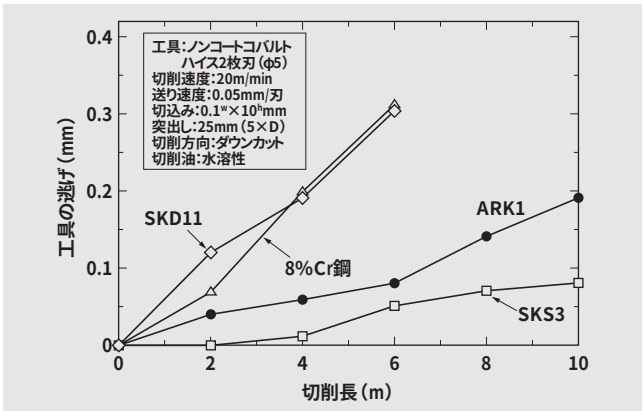


図10　エンドミル加工における工具の逃げ

Fig. 10　Dimensional accuracy of work material in end milling

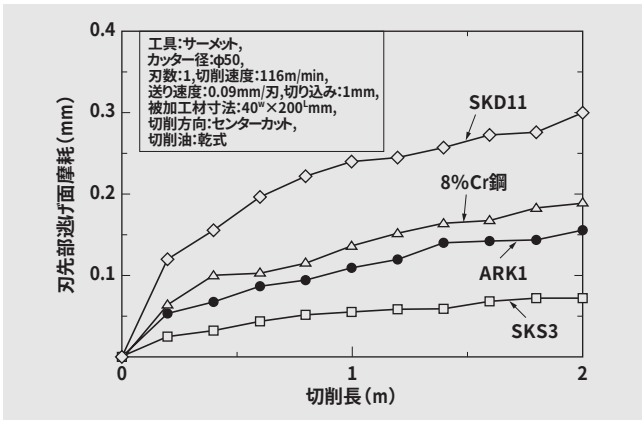
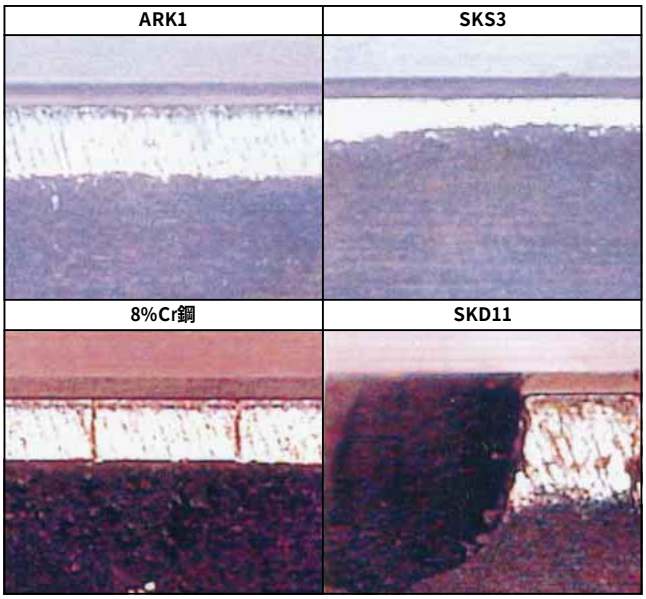


図11　正面フライス加工における被削性

Fig. 11　Machinability of ARK1 in face milling



工具：サーメット，カッター径：φ50mm，
切削速度：211m/min，送り速度：0.12mm/刃，
切り込み：1mm，センターカット，乾式　切削長：2m

図12　工具の損傷状況（正面フライス加工）

Fig. 12　Damage of tools by face milling

に熱亀裂が生じるような高速切削（切削速度211m/min）においても摩耗が順次進む安定した切削を行うことができる。**図13**にドリル加工での切削試験結果を示すがARK1はSKS3と同等の被削性である。

３．２ 熱処理特性

図14に焼戻し曲線を示す。ARK1は目標であるSKD11とほぼ同等の硬さ挙動を示す。またSKS3と異なり500℃以上の高温焼戻しにおいても60HRCに近い硬さが得られる。なおARK1は素材の厚みが100mmであっても十分空気焼入れが可能な焼入れ性を有している。**図15**に熱処理変寸の焼戻し温度依存性を示す。素材圧延方向の変寸はほぼSKD11と同等の挙動を示す。一方素材圧延垂直方向は圧延方向と同等であり，SKD11に比べARK1は方向性が少なく，等方的である。

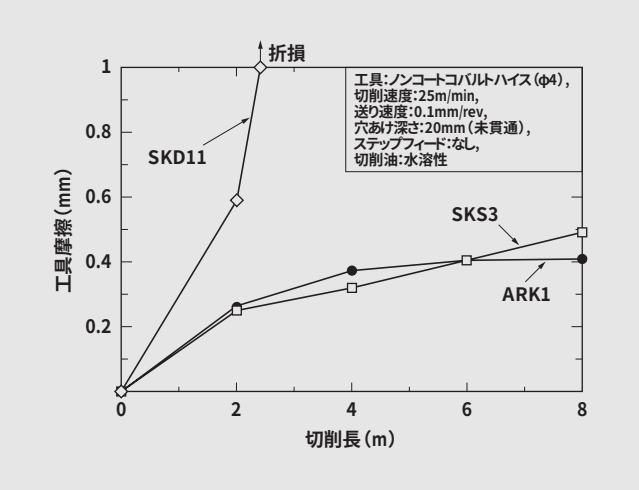


図13　ドリル加工における被削性

Fig. 13　Machinability of ARK1 in drilling

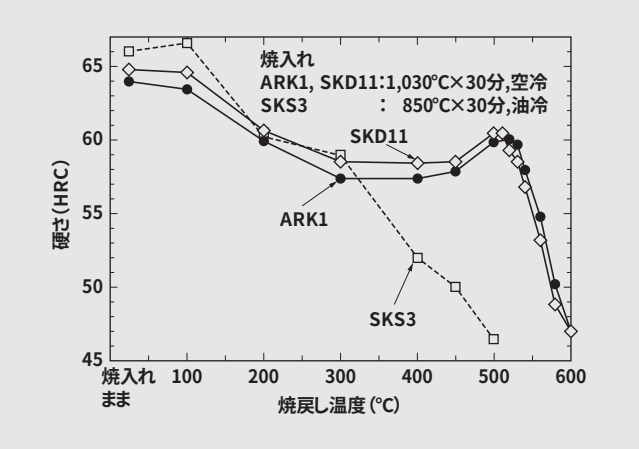


図14　焼入れ焼戻し硬さ

Fig. 14　Quenched and tempered hardness of ARK1

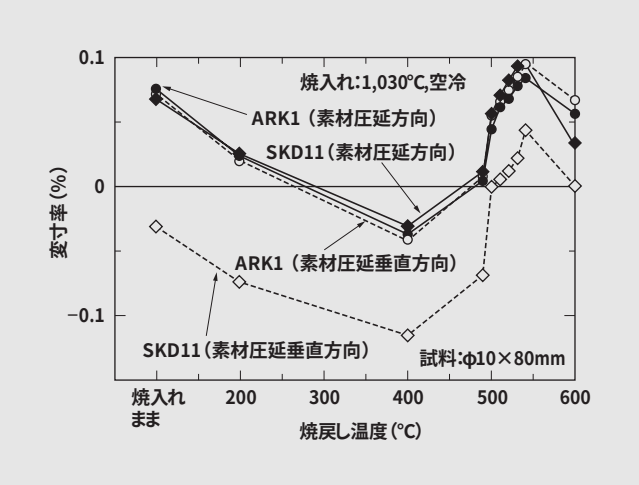


図15　熱処理変寸の焼戻し温度依存性

Fig. 15　Effect on tempering temperature of dimensional changes

3.3 靭性

図16に10Rノッチシャルピー試験結果を示す。ARK1は8%Cr鋼やSKD11よりも高靭性である。

3.4 溶接性

表2に溶接性の結果を示す。ARK1はSKD11や8%Cr鋼に比べ割れが少なく溶接性は良好である。

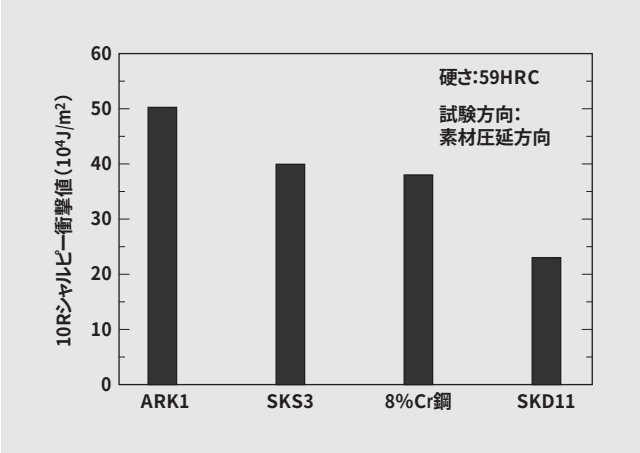


図16　シャルピー衝撃値

Fig. 16　Charpy impact value of ARK1

表2　溶接性

Table 2　Weldability of ARK1

予熱温度	溶接性（左：直盛り，右：2層盛り）					
	ARK1		SKD11		8%Cr鋼	
200℃	○	○	×	×	△	△
300℃	○	○	×	×	○	△
400℃	○	○	×	△	○	○
500℃	○	○	○	○	○	○

溶接方法：被覆アーク溶接，溶接棒：DF3B-B
後熱：420℃，試験材の硬さ：58〜60HRC
○：割れなし，△：少し割れあり，×：割れ多い

3.5 耐摩耗性

耐摩耗性を評価するためにプレス打抜き試験を実施した。評価材を下型にし，被加工材にSK5（厚さ0.5mm；硬さ170HV）を用いて打抜き10万個後の下型コーナー部の損傷状況を調べた。**図17**に損傷部のSEM像を示す。（　）内の数字はSKS3の摩耗量（損傷部の断面プロファイルより求めたもの）を1としたときの損傷指数である。摩耗の生じた型コーナー部を詳細に観察すると，硬質炭化物を残して周囲の基地がスジ状に摩耗していた。ARK1はSKD11よりも損傷は激しいものの，硬質のCr系炭化物を残存させているため，SKS3よりも耐摩耗性は良好である。

3.6 表面処理性

図18にTD処理を施してスクラッチテストを行なった試料の断面ミクロ組織を示す。ARK1は膜厚および膜の密着性がSKD11とほぼ同等である。

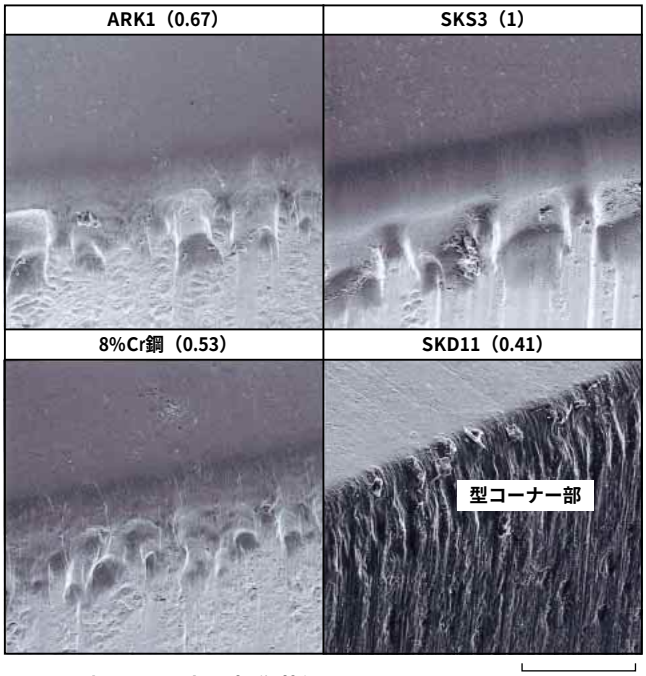


図17　型コーナー部の損傷状況
（ ）内はSKS3の摩耗量を１としたときの値

Fig. 17　Scanning electron micrograph of wear in blanking die wear test

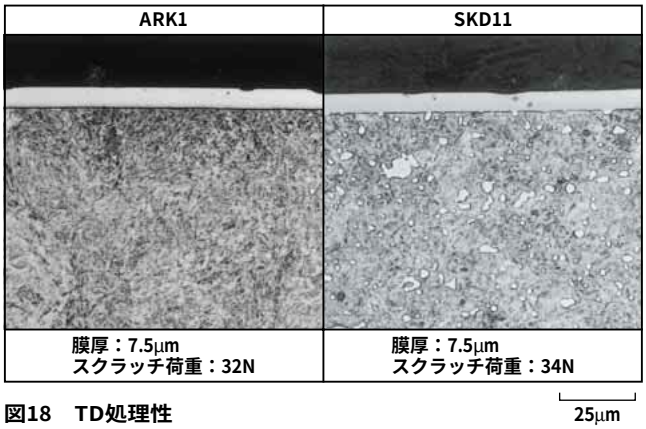


図18　TD処理性

Fig. 18　Layer thickness of scratched specimens coated using TD process

❹　ARK1の使用実例

ARK1は板金プレスの曲げ型や絞り型，ストリッパープレートやシャー刃, プリント基板型に使用されている。自動車部品用絞り型（1.6mm鋼板）での使用実例を**表３**に示すが，ARK1を適用することで加工コストはSKD11の30～40%低減され，TD処理後の変寸はSKD11と同等である。またTD処理を行うことで受注ロット完了まで耐えうる型寿命が得られている。**表３**に他の使用事例を合わせて示すが加工能率の向上のみならず，廃却寿命が従来材より向上した例もある。

表３　ARK1 の使用実例

Table 3　Examples of machinability and die life of die made of ARK1

用　途	従来材	ARK1評価結果
絞り型	SKD11 ＋TD 58～60HRC	加工費：約30%低減 TD処理後の変寸：従来材と同等 寿命：20万個同等
曲げ型	SKD11 58～60HRC	加工能率：約40%向上 熱処理変寸：従来材と同等 寿命：3万個継続中
シャー刃	SKD11 52～54HRC 10～15k個	加工能率：約30%向上 熱処理変寸：従来材と同等 寿命：5000個継続中
圧力板	8%Cr鋼 58～60HRC	割れ廃却寿命：1.3～1.5倍
ストリッパープレート	8%Cr鋼 ＞58HRC	加工能率：約20～30%向上 熱処理変寸：従来材の約1/2

❺　結　　言

金型の造りやすさを追求することをコンセプトとして，成分・組織の検討を行い，以下のような特長を持つ新冷間ダイス鋼ARK1を開発した。

（1）被削性はSKSと同等
（2）熱処理特性（硬さ, 焼入れ性, 変寸）はSKD11と同等
（3）溶接性，靭性が良好

ARK1は「ダイス鋼の長所である焼入性などの熱処理挙動や耐摩耗性をできるだけ維持しつつ，かつSKS材に匹敵するほどの良好な被削性を有する」冷間ダイス鋼である。ARK1の使用により金型製作の低コスト化および効率向上が期待できるものと考える。

参考文献

1）B. Sundman, B.Jansson and J. O. Andersson: Calphad, **9**（1985）2, 153.
2）阿部行雄，久保田邦親，田村庸：材料とプロセス，**13**（2000），524.
3）例えば日本鉄鋼協会編：鉄鋼便覧第3版，（1982），丸善.

注）ARK1：登録商標