

## 技術トピックス

UDC 669.14.018.23 : 669.046.558 : 669.891

## Ca 脱酸快削鋼\*

高梨省吾\*\*

## Ca-Deoxidized Free-Machining Steel

Shogo TAKANASHI

## 1. ま え が き

最近の加工技術の進歩は目覚ましく、放電加工、電解加工、レーザー加工などの新技術も大幅に採用されつつあるが、今なお切削加工は除去加工の王座を占めており、今後ともこの傾向は続くものと予想されている。しかしながら、高学歴化による労働力資源の枯渇化、労働賃金の高騰という社会的・経済的すう勢に加え、不安全で不健康な環境からの解放という政治的施策の動向から、機械加工工場においても労働力集約度の低減はますます大きな課題となりつつある。そのために高速加工、自動加工（無人加工）が積極的に採用され、最近では適応制御 NC 工作機械、大型計算機を駆使した群管理システムの実現を見るに至っている。また工具材料も高能率化に対応すべく、より性能のすぐれたものへと開発が進められている。一方、被削材料については、より強靱な材料の開発に加え、高速加工、加工の自動化に対応すべく被削性の向上とそのバラツキの低減要求は強まる一方である。とくにバラツキの低減は安定生産の立場から重要視されている。これらのニーズを満たしていくことは我々素材メーカーの一つの大きな課題である。

Ca 脱酸快削鋼の発見は西独におけるこのバラツキに関する研究<sup>1)~4)</sup>に端を発するものである。すなわち、Ca を含む特殊脱酸剤の使用が鋼の被削性向上に寄与することが明らかにされた。このような現象はわが国においても鉛快削鋼の溶解ヒート間の被削性バラツキの実態調査研究の過程で推察され、その結果 Ca 脱酸が被削性向上に有効なことが把握されている。この西独の研究は世界の脚光を浴びることになったが、その後の発展はなく、現在では高々月産 100 t 程度の生産がなされているに過ぎない。これに対し、わが国においては広範な基礎研究と実用化研究により世界に先がけて量産が開始され、最近では月産数千 t におよぶ生産がなされ、世界の注目を集めるところとなつている。さらには本鋼に関する技術が欧米諸国に供与される段階にまで至っている。

本鋼は鉄鋼技術者の最大関心事の一つともいべき脱

酸技術の産物であり、ここ 10 年来の興味ある話題の一つにあげられ、精機学会切削性分科会の共同研究<sup>5)~8)</sup>をはじめとして数多くの研究機関、企業での研究がなされた。とくに精機学会の産学一体の研究はユーザーの本鋼に関する理解と認識を深め、本鋼の普及発展に寄与した点からも高く評価されている。また本誌にも有益な論文が多数掲載されているので今さらの感はまぬがれないが、以下に本鋼の技術的、工業的現状を概観したい。

## 2. Ca 脱酸快削鋼の冶金学的特徴

鋼の脱酸は製鋼造塊技術のキーポイントである。従来、キルド鋼では脱酸生成物を主とする  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$  などの酸化物系非金属介在物が残留し、これらは他の鋼質面への影響もさることながら、被削性の面からは硬質であるために切削工具にアプレシブとして作用し、有害とみなされている。これら脱酸生成物の溶湯系外への浮上、分離除去が制鋼技術の常に大きな課題であることは今さらここで言うまでもない。

Ca 脱酸快削鋼はこのように従来有害と見なされていた脱酸生成物（酸化物系非金属介在物）を脱酸法の調整によつて被削性にとつて好ましい組成、形態の調整するもので、従来の快削鋼のように S、Pb などの不純物元素を積極的に添加しないことに特徴があり、脱酸調整快削鋼とも呼称されている。したがつて清浄度は通常のキルド鋼とほぼ等しい。すなわち、含 Ca 合金によつて最終脱酸し、Ca を含む脱酸生成物を鋼中に残留せしめ、削被性向上に役立たせるものである。この鋼中の酸化物系非金属介在物は一般に  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$  から成っているが、これら介在物は組成割合によつて物理的、化学的性質を異にする。この三元状態図（液相面）を図 1<sup>9)</sup>に示す。被削性の面からこの中のいずれの組成が良いかについてはかなりの変遷、諸説があつたが、その後の研究によつて後に述べる切削条件—被削材の組合せによつて定まる切削所要エネルギー、ひいては切削温度によつて最適組成は変るべきであるとの見方に落付くようである。ただし、わが国の機械構造用 Ca 脱酸快削鋼の大部

\* 昭和53年8月7日受付 (Received Aug. 7, 1978) (依頼技術トピックス)

\*\* 東北特殊鋼(株) (Tohoku Steel Co., Ltd., 7-20-1 Nagamachi Sendai 982)

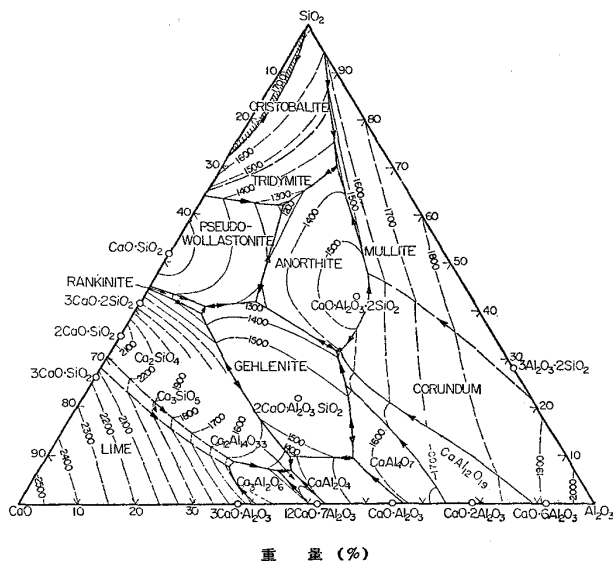


図 1 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 系状態図

分のものは Anorthite (CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) を主体とする組成に調整されている。

### 3. 介在物組成コントロールの意義

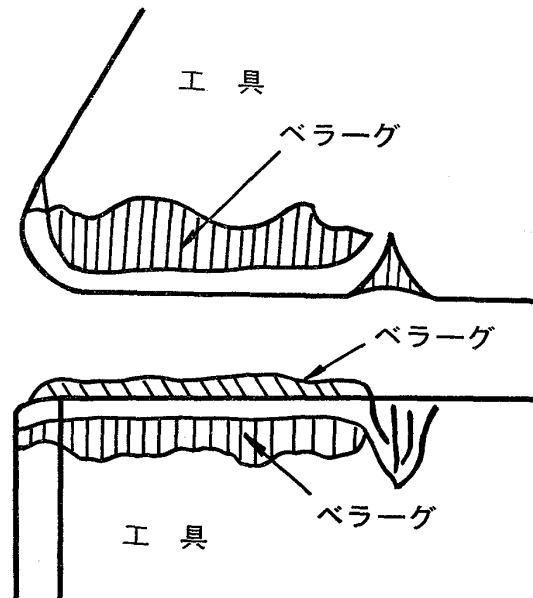
まず Ca 脱酸快削鋼の快削メカニズムについて若干ふれる。従来の 硫黄快削鋼は 硫化物の 応力集中による脆化、鉛快削鋼は鉛の融体脆化と潤滑によつて快削性が得られるのに対し、Ca 脱酸快削鋼では鋼中の含 Ca 脱酸生成物が切削中の工具表面に付着する。この付着物 (Belag

と呼ばれる) が工具と切りくず、被削材との直接接触を妨げ、一般に高速切削下では不可避免的に発生して工具の寿命を支配するとされている熱拡散摩耗を抑制する。このことによつて工具寿命を延長することが基本的な特徴となつている。図 2<sup>10)</sup>に Belag の付着状況を例示する。この Belag は TiC (TaC) 含有率の高い工具ほど付着しやすいとされている<sup>11)12)</sup>。この Belag 付着に対する Ti の役割については、切削中の含 TiC 工具表面に生成する Ti の酸化物 (TiO<sub>2</sub> または Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>13)</sup>) と含 Ca 介在物との密着性によるとの説<sup>14)</sup>があり、この点からも Ca の存在が不可欠との見方が強い。しかしその機構の解明は未だ十分とは言えないようである。なお、Ti 酸化物の役割に着目して、Ca 脱酸快削鋼と類似の快削メカニズムを有する快削鋼として Ti 脱酸快削鋼<sup>15)</sup>が開発されている。いずれにせよ介在物の工具付着に関しては切削中の工具刃先温度と介在物融点もしくは軟化点の間には密接な関係のあることが見い出され、切削温度に見合った最適な介在物組成の存在することが明らかにされている<sup>16)17)</sup>。この切削温度は先にも述べたように切削条件-被削材の組合せによつて定まるものであり、鋼種とその熱処理状態および切削条件によつて最適介在物組成の異なることが明確になつてきている。図 3<sup>16)</sup>はこのことを示す一例である。

最近のわが国の自動車工業における超硬工具による機械構造用鋼の切削加工事例54件の切削温度の推定平均値は約 850°C<sup>10)</sup>であり、適切な介在物融点は 1400°C~



(×16)



供試材: S53C Ca 脱酸快削鋼, 焼ならし状態  
 工具: P10 (-5, -5, 5, 5, 30, 0, 0.4R)  
 送り: 0.20mm/rev  
 切込: 2.0mm  
 切削速度: 250m/min  
 切削時間: 12min

図 2 Ca 脱酸快削鋼切削時のベラーグ付着状態

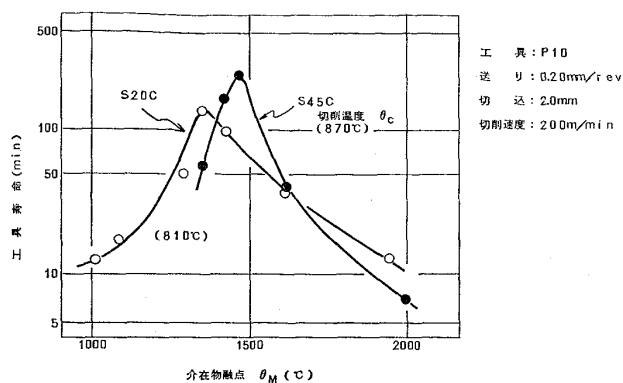


図 3 鋼種と最適介在物組成との関係

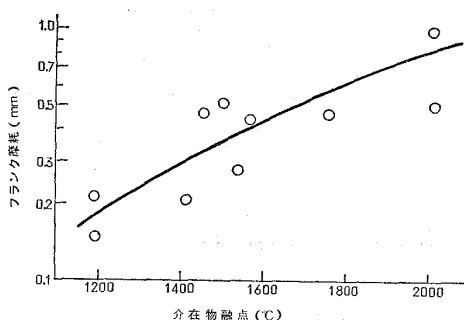


図 4 介在物融点とフラング摩耗

被 削 材 : SCM22 焼ならし  
工 具 : SKH57 (0. 15. 7. 7. 10. 0. 0.5R)  
送 り : 0.12mm/rev, 切込 : 1.0mm  
切削速度 : 80m/min  
切 削 油 : 不水溶性, 切削時間 : 50min

図 4 介在物融点とフラング摩耗

1500°C となるから、機械構造用鋼に関する限り、わが国の大部分の Ca 脱酸鋼の介在物がこの融点領域に調整されていることは妥当であるといえることができる。上記の切削温度を基準とした最適介在物組成の概念は機械構造用鋼以外の特殊用途鋼を Ca 脱酸快削鋼化するに当り、有効な指標となつている。

以上、超硬工具による切削を対象としての最適組成に関して述べたが、Ca 脱酸快削鋼は Belag 付着による快削効果のみならず、元来不向きとされていた高速度工具鋼による切削においても工具寿命が延長されるという知見も得られている<sup>10)18)19)</sup>。すなわち、図 4<sup>10)</sup>に示すように介在物融点の低いものほど高速度鋼工具の摩耗は少い。このことは合成介在物のかたさと摩擦試験の結果によつて裏付けられている<sup>20)</sup>。ただし、介在物の低融点化には鋼材の健全性確保という面から制約があり、さらに特殊な脱酸剤を含めた脱酸技術開発の余地が残されていると言えよう。

#### 4. 含 Ca 介在物組成のコントロールと溶製法

周知のように Ca の鉄鋼への利用の歴史は古く、脱酸、脱硫、接種などの目的で用いられてきた。また最終脱酸剤として Ca 合金を用いると非金属介在物の組成や形態

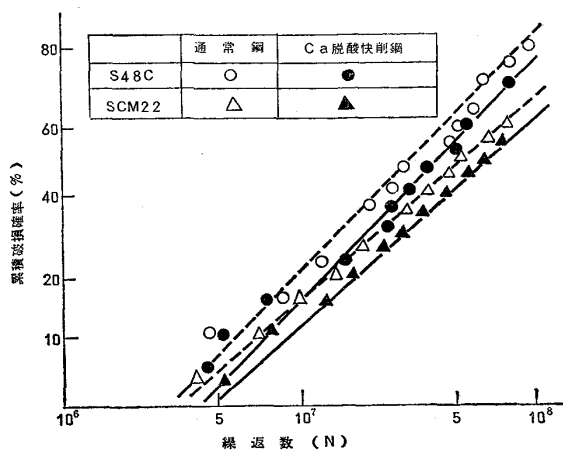
が変化し、良質な鋼が得られることも古くから報じられてきた<sup>21)</sup>。Ca は酸素との親和力がきわめて強く、すぐれた脱酸力を有するが、製鋼温度における蒸気圧は高く、脱酸に寄与する以前に蒸発するものが多い。したがつて Ca による脱酸に関しては化学量論的には不明な点が多かつたが、比較的最近溶鉄中の Ca の溶解度、脱酸力などについても検討が進められ<sup>22)23)</sup>、次第に明らかにされつつある。

Ca 脱酸快削鋼の介在物コントロールの基礎研究については、わが国の研究<sup>24)</sup>には見るべきものが多く、脱酸条件と介在物組成との関係については幾多の有用な知見が得られている。また実用アーク炉溶解においても、出鋼時の Si, Ca および Al による同時脱酸 (ただし Al の添加量を制限) によつて目標とする組成を得るための研究<sup>25)</sup>もなされており、実生産で活用されている。しかし、脱酸に用いる合金の種類、使用方法、他の脱酸剤との組合せ、添加時期および溶鋼酸素量のちがいによつて状況は異なり、幾多の経験的技術の蓄積を必要とする。なお、ここ数年来、製鋼工場内の作業環境改善ならびに Ca の添加歩留の向上を意図して、ワイヤーフィード法<sup>26)</sup>による Ca の添加もなされており、目標介在物組成に適合する種々の組成の含 Ca ワイヤーが開発され、実用に供されている。

#### 5. Ca 脱酸快削鋼の諸特性

前にも述べたように本鋼においては積極的に介在物を添加するものではなく、清浄度も通常のキルド鋼とほぼ同程度であり、脱酸生成物としての酸化物系介在物の組成、形態のみを異にする。ただし、通常のキルド鋼のほとんどは Al が脱酸剤として使用され、脱酸に寄与した残余の Al が含有されており、この Al が結晶粒度の微細化に寄与しているのに対し、本鋼では介在物組成コントロールの面から Al の使用は制限されるため、結晶粒度調整に寄与する残余 Al は期待されない。したがつて通常のキルド鋼に比べれば粗粒化しやすい傾向にあるが、焼入れ焼もどし、焼ならし後の機械的性質にはほとんど影響は認められていない<sup>27)</sup>。ただし比較的高温長時間の加熱を受ける浸炭用鋼については、Al 以外の粒度調整元素を添加する必要がある、この元素としては現在では多くの場合 Nb が用いられている。

疲れ強さに関しては本鋼と通常のキルド鋼間でほとんど差異はなく<sup>28)29)</sup>、むしろ Ca-Si 脱酸の清浄度への寄与によつてすぐれた耐疲れき裂の伝ば特性を有するとの報告<sup>29)</sup>もある。さらに図 5<sup>28)</sup>に示すように高面圧下での転動疲れ強さが通常のキルド鋼よりもわずかではあるがすぐれている。この点については硬質の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を含まないためと推定されている<sup>30)</sup>。この特徴は従来の快削鋼に見られないものであり、適用分野を広めた大きな引金となつている。また溶接性、熱間および冷間の塑性加工



	S48C	SCM22
試験片	12φ×22 l	12φ×22 l
熱処理	高周波焼入れ, 焼もどし	ガス浸炭焼入れ, 焼もどし
かたさ	H <sub>RC</sub> 63	H <sub>RC</sub> 62
回転数	46 240 rpm	46 240 rpm
面圧	600 kg/mm <sup>2</sup>	600 kg/mm <sup>2</sup>
潤滑油	タービン油 #140	タービン油 #140

図5 転動疲れ寿命試験結果

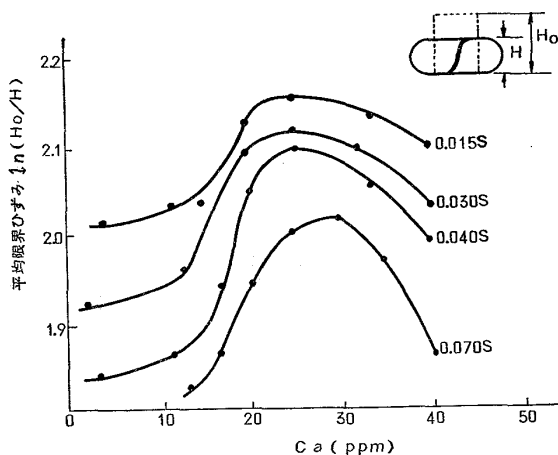


図6 Ca含有量と単純アプセットにおける割れ発生限界ひずみ

性の劣化がないという特徴<sup>29)</sup>も注目されることである。図6<sup>31)</sup>は冷間でのアプセット割れにおよぼすCaの影響を示したものであるが、Caの添加によつて冷間の塑性加工性は向上し、さらに硫黄の害を軽減する特徴がある。同様の知見は他の研究<sup>32)</sup>によつても確認されている。さらにこのようなCaの延性向上効果は引張試験によつても確認されている<sup>33)</sup>。

### 6. Ca脱酸複合快削鋼

以上のようにCa脱酸快削鋼は強度特性の劣化がなく、工具寿命からみた被削性が概ねすぐれているが、なお切削加工面からの欠点が残っている。すなわち、材料延性の低下がないことの当然の帰結として、切りくず破砕性に乏しいこと、ならびに高速度鋼ドリル加工において工具寿命延長効果がないという二点が挙げられる。事実これらの欠点が汎用性、加工の自動化に対して支障となつた。これらの欠点は機械設備や工具を含めた加工技術の改善によつてある程度カバーされ得るが、これには限界があるばかりか、設備投資を必要とする場合さえ生じてくる。このため、どうしても被削材料自身に破砕性を付与することが要望される。これに対し、従来の脆化型快削元素を併用することが考えられた。そうすることによつてCa脱酸快削鋼本来の強度面での特徴は失われることになるが、被削性のみを重視する場合には快削元素それぞれの役割を期待でき、いわゆる相乗効果によつて広汎な切削条件に対応し得ることになる。このような用途に対して、Ca+Pb, Ca+S, Ca+Pb+Sの複合快削鋼が開発され、実用化されてきている。これらの中でもCa+Pb+S鋼においてはねずみ鋳鉄と同程度の被削性が確保され、複雑多岐な加工を要する自動車部品用材料として相当量が生産されている。しかしながら強度面でのCa脱酸快削鋼本来の特徴は生かされるべきであり、実際上もそのニーズは強い。これに応え、さらにPb, S添加量を局限した微量Pb, 微量Sとの複合快削鋼が開発された。その過程において切りくずの破砕性におよぼすS, Pbの定量効果を求める研究がなされた。

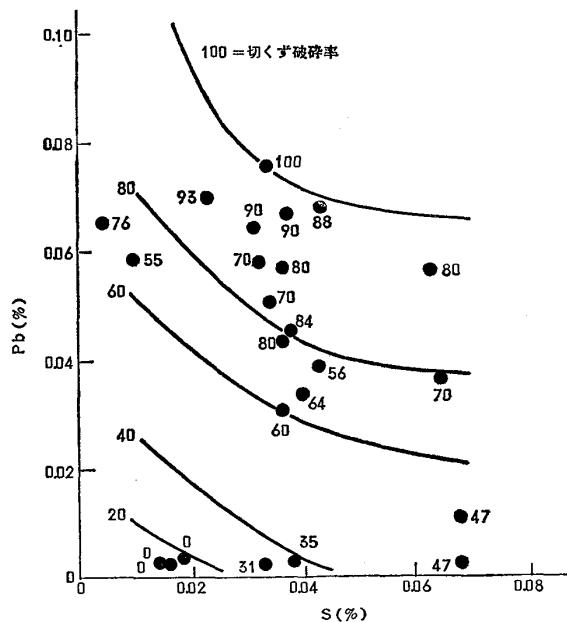


図7 Ca脱酸快削鋼の切りくず破砕性におよぼすPb, Sの効果

図 7<sup>34)</sup>はその結果の一例である。さらにこの結果に対して切削温度域での材料延性との結びつきからも十分な検討<sup>35)</sup>がなされている。これらの研究から実用加工領域における切りくず破碎性の改善には、0.05%Pb, 0.03%S程度で十分であるとの結論が得られている。しかし高速鋼ドリルの寿命はほぼ脆化型快削元素の添加総量で定まり、この点に関してはこの微量複合系では必ずしも十分とは言えず、切削条件には若干の制約を受けることがあり、さらに改善すべき余地が残されている。

## 7. Ca 脱酸快削鋼の実用状況と適用鋼種の拡大

1968年に本格量産が開始されてから、Ca 脱酸快削鋼は自動車部品をはじめとして産業機械、建築器材およびその他多くの分野に供給されており、適用部品は数 10 点に達している。写真 1 にわが国で最初の量産対象となつた自動車部品 (スリーブヨーク) を示す。この部品は一種のボールジョイントであるが、BTA 工具による深孔あけ加工で通常のカールド鋼に比し 3 倍以上の工具寿命が得られ、かつ高面圧でのボール接触でも通常鋼と同等以上の耐久性が得られることから好評を得、現在では月間約 300 t が供給されている。なおこの件については米誌<sup>36)</sup>にも報告され、諸外国から関心を寄せられている。

この部品を含めて Ca 脱酸快削鋼の代表的な適用例を表 1 に示す。

Ca が他の快削元素と異なり鋼の本来の特性を損わないという特徴に着目し、広く他の特殊用途鋼にも適用すべく研究開発が進められており、すでにその一部は実用化段階にある。たとえば、熱間鍛造型加工費の低減と型寿命向上が同時に得られ、現在クランクシャフト、大型ギヤブランクの型打鍛造型に利用される。図 8 に SKT4

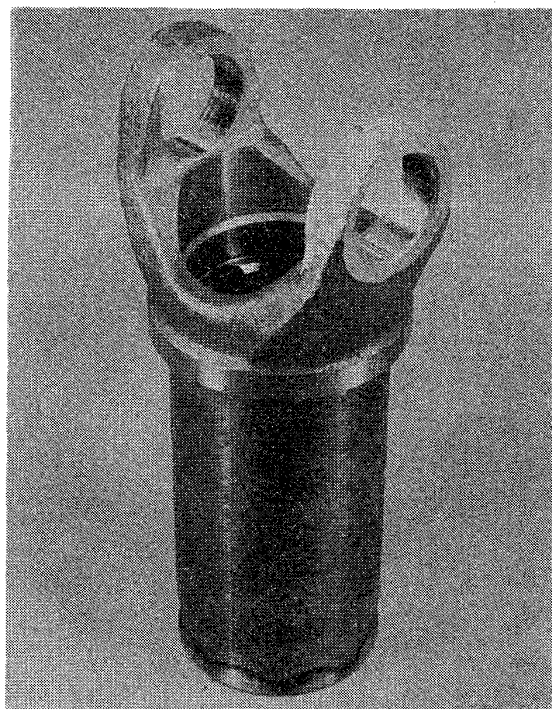


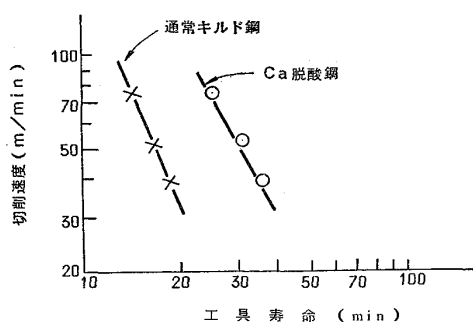
写真 1 Ca 脱酸快削鋼の最初の適用部品

の Ca 脱酸快削鋼と通常のカールド鋼の超硬工具による正面フライス切削における工具寿命線図を示す。この実績をもとに SKD61 などの熱間ダイズ鋼についても実用化研究が進められている。

ステンレス鋼についても耐食性の劣化がなく、かつ被削性の向上したものが得られ、耐食プラスチック用金型、配管バルブなどに実用化が進められている。しかしこのような高 Cr 材については、常に  $Cr_2O_3$  の生成を念頭におく必要があり、有効な含 Ca 介在物を安定して得

表 1 Ca 脱酸快削鋼の実用状況

分類	記号	適用鋼種例	業 種	適用 部 品 例
Ca	Y	S 5 3 C S K T 4	四輪 (乗用車) 金型	スリーブヨーク 金 型
Ca+S	Y S	S C M 2 2 S C M 3 S 3 5 C ~ S 4 8 C	四輪 (トラック) 建築機器	アイドラギア・クランクシャフトギア ドアチェック・メインシャフト クレーン用サイドホイール、シンクロナイザーハブ
Ca+微量 Pb+微量 S	Y M	S C M 2 2 S 4 8 C S C M 3	四輪 (乗用車) 二輪 工作機械 農業機械	スリーブヨーク、フランジヨーク、ボールヨーク ミッションギア、クランクシャフト、クラッチハブ、 スピンドル、ブラケット、ストライキングレバー、 チエングロックガイドローラ、リングギア、 シンクロナイザーハブ、ローラシェル、 ホイールチューブ、ウオームギア、ピニオンギア、
Ca+Pb +S	Y F S	S 4 8 C	四輪 (乗用車)	クランクシャフト



加工様式：正面フライス加工  
 工具：STi25 (SNe-42B3)  
 カッター：DN-160R  
 送り：0.07mm/刀  
 切込：2.0mm  
 切削油：なし  
 被削材かたさ：H<sub>R</sub>C40

図 8 SKT4Ca 脱酸鋼の切削工具寿命

るには脱酸方法についての抜本的な検討が必要と思われる。いずれにせよ、現在では比較的高 Si を許容される銑鋼や JIS 以外の特殊鋼種に限定されている。さらに機械構造用鋼同様、汎用鋼化するには切りくず処理性、高速度鋼工具ドリル加工への適応が不可欠となることに加え、耐食性との兼ね合いも考慮せねばならず、今後に残される問題は少くない。

最近、電磁的な環境での特殊な用途に対して非磁性鋼が脚光を浴びている。とくに高 Mn 鋼は貴重な資源の節約という立場から注目されている。しかし、高 Mn 鋼は Hadfield 鋼で代表されるように極めて削りにくい。この点の改善に Ca 脱酸と 0.05% S の添加により成功し、たとえば核融合実験炉の周辺材料として実用化が検討されている。この場合にも切削温度を基準とした含 Ca 介在物組成の調整がなされている。

この他、高炭素クロム軸受鋼、中空鋼などにも適用され効果をあげつつある。

## 8. あとがき

Ca 脱酸快削鋼は急速に実用化が進められており、わが国が世界をリードし、国際的に最高の水準にあると言えよう。この陰にはわが国の製鋼技術は言うにおよばず、これを支える介在物同定をはじめとして微量元素の分析技術や溶鋼温度、成分の精密測定技術などの一連の周辺技術の進歩に加え、自動車メーカーをはじめとするユーザー各位の絶大なる御支援、御協力があつたことを強調したい。しかしこの鋼はまだ歴史が浅く、解決すべき問題も残されている。今後とも加工技術の進展を含めユーザー動向を十分に反映して、よりすぐれたものへと育成してゆくことが重要である。

## 文 献

1) H. OPITZ and G. OSTERMANN: Stahl u. Eisen 79 (1959), p. 514

- 2) H. OPITZ and W. KONIG: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962), p. 831
- 3) H. OPITZ, M. GAPPISCH, and W. KONIG: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962), p. 841
- 4) H. OPITZ, et al: Stahl u. Eisen, 83 (1963), p. 1209
- 5) 精機学会切削性分科会: 精密機械, 34 (1969), p. 680
- 6) 精機学会切削性分科会: 精密機械, 35 (1969), p. 169
- 7) 精機学会切削性分科会: 精密機械, 35 (1969), p. 227
- 8) 精機学会切削性分科会: 精密機械, 37 (1971), p. 331
- 9) A. MUAN and E. E. Osborn: Phase Equilibria Among Oxide in Steel Making, Reading, Massachusetts, (1965), p. 95
- 10) 藤原達雄, 伊藤哲朗: 金属学会会報, 15 (1976), p. 614
- 11) A. WICHER and R. PAPE: Stahl u. Eisen, 78 (1967), p. 1169
- 12) 伊藤哲朗, 加藤剛志, 木村篤良, 吉田鎮雄: 自動車技術, 23 (1969), p. 1067
- 13) J. STANISLAO, M. H. RICHMAN, and C. F. JAMES, Jr.: Trans. ASME. series B, 90 (1968), p. 98
- 14) 荒木透: Ca 快削鋼に関するシンポジウム予稿集, 精機学会, (1968)
- 15) 荒木透, 山本重男: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1912
- 16) 伊藤哲朗, 高橋徹夫, 木村篤良, 山野清市: 電気製鋼, 44 (1973), p. 29
- 17) 佐田登志夫, 平尾政利, 西川勝彦: 精密機械, 41 (1975), p. 442
- 18) 藤原達雄, 伊藤哲朗, 加藤剛志, 山田博之: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 619
- 19) V. A. TIPNIS, R. A. JOSEPH, and J. H. DOUBRAVA: SAE Paper NO. 730115i, (1973)
- 20) T. FUJIWARA, S. ABEYAMA, A. KIMURA, S. NAKAMURA, and T. ITOH: Proceedings of International Symposium on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, (1977), p. 129
- 21) たとえば H. GOLDSCHMIT: Iron Age, 82 (1908), p. 232
- 22) D. L. SPONSELLER and R. A. FLUIN: Trans. Met. Soc. AIME, 230 (1964), p. 876
- 23) 宮下芳雄, 西川勝彦: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1969
- 24) たとえば白岩俊男, 荒木泰治, 藤野允克: 鉄鋼協会共同研究会特殊鋼部会特別講演資料 (1969)
- 25) T. SUGIYAMA, T. TAKAHASHI, and T. ITOH: Proceedings of the 5th Japan-USSR Joint Symposium on Physical Chemistry of Metallurgical Processes, ISIJ, (1975), p. 316
- 26) 音谷登平, 形浦安治, 出川通: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 41
- 27) 伊藤哲朗: マシナビリティ, 6 (1971), p. 38
- 28) 伊藤哲朗, 高橋徹夫, 木村篤良, 山野清市: 電気製鋼, 44 (1973), p. 5
- 29) 荒木透, 石滋宣, 佐川竜平: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 2042
- 30) 伊藤哲朗: 機械の研究, 29 (1977), p. 197
- 31) 伊藤哲朗, 阿部山尚三: 電気製鋼, 44 (1973), p. 81

- 32) 日下邦男, 岩丸正明: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 2057  
33) 宮下芳雄, 西川勝彦: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 1456  
34) 伊藤哲朗, 高橋徹夫, 阿部山尚三, 木村篤良: 電気製鋼, 44 (1973), p. 38  
35) T. ITOH, T. TAKAHASHI, S. ABEYAMA, and A.

- KIMURA: Proceedings of International Symposium "Influence of Metallurgy on Machinability", ASM, (1975), p. 189  
36) A. G. GRAY: Metal Progress, (1971) Oct. p. 82