



入門講座

鉄鋼材料における析出物の利用－9

介在物活用による被削性制御

Machinability Control by Inclusions Utilization

白神哲夫

元 JFE 条鋼 (株)

Tetsuo Shiraga

1 はじめに

鉄鋼材料で析出物とは固相体析出を示すことが多いが、元々は析出とは液体（または固体）から固相体が遊離することを示す。とくに、鉄鋼材料では溶鋼から析出（晶出）するものを介在物と呼ぶ。このシリーズでは特異ではあるが、この介在物を有効利用している快削鋼について述べる¹⁾。

しかしながら、切削や快削鋼をそれほど理解されていない方も多いと思うので、概略を述べる。切削とは切削工具で被削材から切りくずを除去する加工である。鋼材の削られやすさを被削性と呼ぶが、被削性の評価方法には工具寿命、切削抵抗、切りくず処理性、仕上げ面粗さなどがある。しかしながら、被削性は鋼材の内質（介在物や析出物など含む）の影響はもとより、切削工具の材種・形状、切削条件、切削方法（切削装置を含む）などによっても影響を受け、一義的な評価は難しい²⁾。本稿では介在物・析出物の影響をすべて網羅できないため、工具と被削材の接触により、工具が摩耗するという観点から、トライボロジーの見方での介在物、析出物の影響を主体に述べたいと思う。

2 切削加工の特徴

被削材と工具の関係と切りくずの生成状況を図1に示す³⁾。切りくずはせん断（一次せん断）により、被削材から剥離され、その際に工具（すくい面）と切りくずが接触し、二次せん断を生じる。一次せん断域は200～400℃、二次せん断域は切削条件によっては1000℃にも達すると言われており、同時に高压でもある。さらに、工具（逃げ面）は被削材の仕上げ面とも接触する。ここは工具すくい面ほどには高温にならない。また、これらの領域ではいずれも新生面を生じるため、介在物や析出物との反応も生じやすい。このような条件下で、工具摩耗が生じ、上述した被削性評価項目に影響を及ぼすわけ

である。

被削材（鋼材）内部の介在物も種類、形状、分布状態などが被削性に影響を及ぼすとともに、工具面上に付着して、工具摩耗を抑制することが多く報告されており⁴⁾、本稿では後者を主体に述べるとともに、析出物は一般的には鋼材の強化という点では、強度上昇＝被削性劣化が一般的ではあるが、高温になるため、析出物の再固溶となる場合の影響も存在するので、それらも含めて述べる。

3 鋼材中介在物の影響

3.1 Ca快削鋼

1970年代にCa快削鋼が開発された⁵⁾。Caを数十ppm添加して、鋼材中に低融点酸化物（図2⁶⁾）に示すように、CaO単独の酸化物ではなく、Ca-Al-Si複合酸化物のアノーサイト、ゲーレンナイト）を生成させ、切削時に工具面上にベラークと呼ばれる付着物が生成することで、工具・被削材間の直接接触を妨げ、拡散摩耗を抑制することと、潤滑作用とで、切削工具寿命が著しく向上することが分かった。

また、図3に示すように介在物融点/平均切削温度で工具

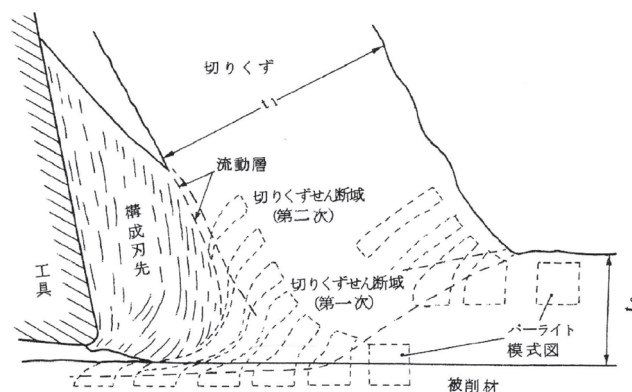


図1 被削材と工具の関係と切りくずの生成状況³⁾

寿命が最大となる領域が存在する⁷⁾。これは例えば、切削速度が大きいと切削温度が高くなり、介在物が溶融や反応などにより、工具面上に付着しやすくなる条件が存在することを示唆している。切削工具材種として、一般的には超硬系とハイス（高速度工具鋼）があるが、超硬は高速切削が可能だが、ハイスは焼戻温度を超える切削温度になると軟化するために超硬ほどは高速切削に適用できない。したがって、Ca快削鋼は超硬工具での切削に適している。このようにCa快削鋼はすべての切削条件で有効ではなく、今まではCa-S-Pbの複合化で多様な切削条件でも有効となるような対応がとられてきた。

近年では収束イオンビーム加工（FIB）により採取した試

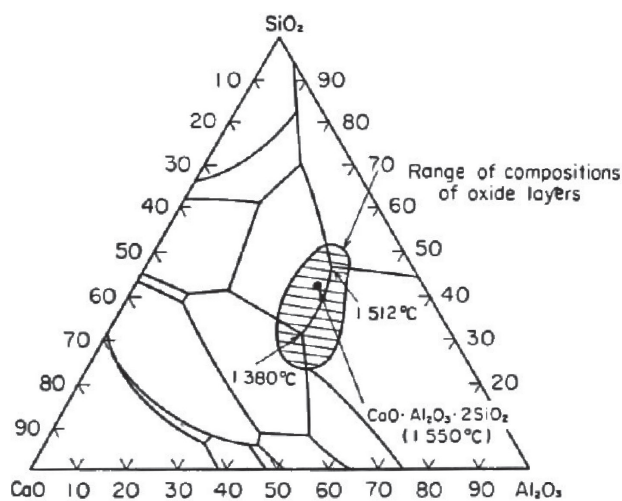


図2 Ca快削鋼切削時の工具面上に生成する酸化物の組成⁶⁾

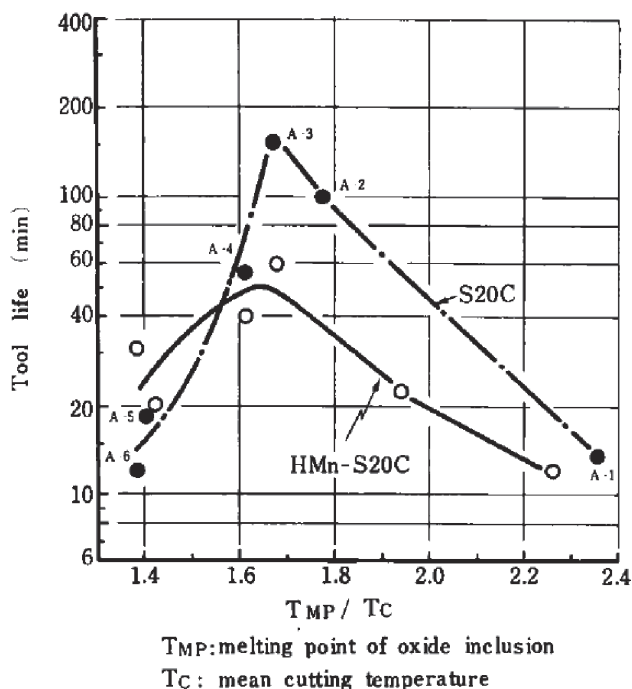


図3 S20C 及び高Mn・S20Cを切削時の工具寿命と介在物融点/切削温度の関係⁷⁾

験片での透過電子顕微鏡観察でベラークそのもののマイクロ組織の観察を行い、ベラーク生成のメカニズムをあらためて検討した例もある^{8,9)}。

3.2 BN快削鋼

BN（六方晶）は黒鉛と類似の結晶構造と物理的性質を有する（図4）。村上らによって、50ppm以上のBと100ppm以上のNを添加し、N/Bを制御することで、MnSと同程度のサイズの六方晶BN介在物を生成させたBN快削鋼が開発された¹⁰⁾。MnSと同程度のサイズであるため、MnSと同様に、その存在による効果も認められているが、新たに山根らによって、超硬での高速切削時に鋼中のBNそのものではなく、AlNが工具面上に付着し（図5）¹¹⁾、工具摩耗を抑制する考え方が示された。これはSUS系への適用検討も行われた¹²⁾。そのメカニズムを推定するために、超硬P10と鋼材S45Cを真空中、

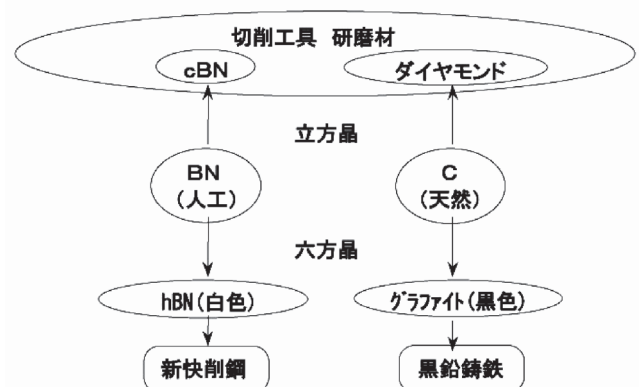


図4 BNとCの結晶構造の関係

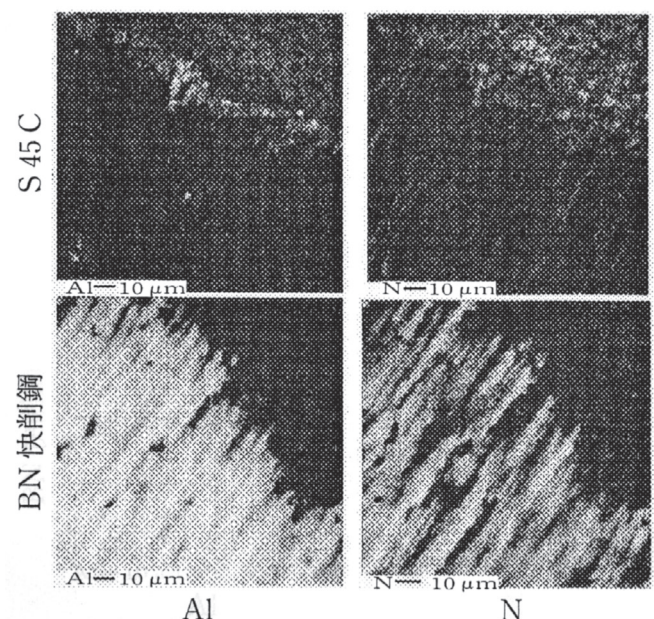
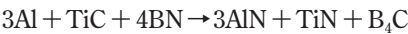


図5 BN快削鋼を切削時の工具すくい面上の付着物¹¹⁾

1200℃で30分間、1.7MPaで圧下し、その間にAlNコーティングの有無で工具や被削材の成分の拡散を調べたが、AlN有でのみ拡散なしとの結果となった。さらに、このAlNがどこから来たのかを確認するために、同様の条件でAl箔とBN粉末を工具と鋼材間にはさみ、取り出した後、X線回折によって調べた結果、工具面上にAlNの存在が認められた(図6)¹³⁾。可能性のある反応として、以下が検討され、鋼中のAlとBNのNが工具面上で反応してAlNが生成したと考えられ、鋼中介在物(BN)そのものではなく、反応により生成した新たなAlNが被削性に影響を及ぼすことが示された。



3.3 Pb快削鋼

Pbを鋼材に添加しているというのかなり特異な状態と思われる。しかしながら、快削鋼の世界ではPbほど有効なものはないとのことで、今なお使用されている。地球環境問題から、使用制限がかかる中で、代替鋼(非鉛快削鋼)が多数開発されているものの¹⁴⁾、完全な代替ができない状態のため、いわゆるRoHS指令でも適用除外となっている。Pbは鋼材中では固溶せず、単体で存在している。周知のように、低融点であり切削で高温になると、溶融し液体金属脆化により、切りくずが切断しやすくなるため、自動車業界を主体に製品加工時の自動化の動きに沿って、広く採用されてきた経緯がある¹⁵⁾。

ここでは潤滑作用としてのPbの影響について述べる。低炭素硫黄・鉛複合快削鋼(JISではSUM24Lなどで規定がある)はSが約0.3mass%(以下、%)、Pbも約0.3%と鋼材の他の分野から見ると異常な添加がなされている。当然なが

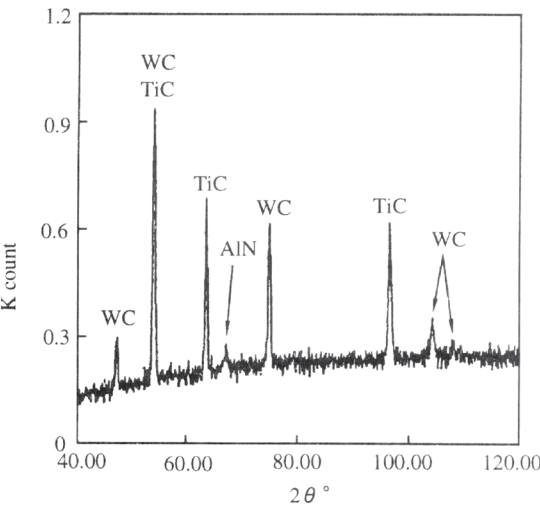


図6 超硬・(BN粉末・Al箔)・S45Cの反応試験後の工具面上でのX線回折結果¹³⁾

ら、切りくず処理性は非常に良好(切りくずが小さく折断する方が良好)であるが、ある特定の切削条件では切りくず処理性が劣る(切りくずがつながる)ことがあった。表1に示すように¹⁶⁾、Pb無添加(Pb=0)では切削速度が大きくなるほど、切りくず処理性が劣化する。鉛を添加していくと、この表内の切削条件ではすべて良好となるも、鉛添加が増えると、中間の切削速度で切りくず処理性が劣化することが判明した。その際に生成した切りくずの裏面(工具と接触した面)を観察すると、図7に示すように¹⁶⁾ Pbの粒が認められた。切削温度がPbの融点近傍(300~400℃付近)になったとき、Pbが切りくず面に絞り出され、溶融凝固したものと考えられ、これによって、Pbによる脆化作用よりも潤滑作用が上回り、切りくずがつながったものと考えられている。

4 工具面・被削材の接触により生成する付着物の影響

4.1 Si添加鋼

前章で記したように、鋼材中の介在物が切削現象に直接ではなく、反応によって工具面上に他の物質を生成して影響することも認められた。ここでは単純に鋼中に添加したSiの影響について述べる。

①Si量を0.02~1.6%添加した43HRC(約423HV)の硬さの熱間工具鋼を用いて、TiCNコーティング超硬工具でフラ

表1 切りくず処理性に及ぼすPb添加の影響¹⁴⁾

Pb \ V	25	50	75	100	150
0	○	○	○	×	×
0.12	○	○	○	○	○
0.23	○	○	×	×	○
0.33	○	×	×	×	×
Pb-B	○	○	○	○	○

Pb:wt%, ○:broken, X:continuous
V:m/min, d=2.0mm, f=0.05mm/rev

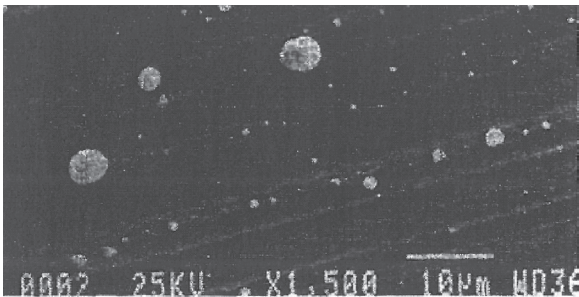


図7 Pb快削鋼切削時の切りくず裏面(工具接触部)のPbの状態¹⁶⁾

イス加工（断続切削で空転時に雰囲気中の酸素が供給される状態）した結果、Si量の増加に伴い、工具寿命が向上した。切りくずの工具との接触面をSIMSやAFM（原子力間顕微鏡）を用いて調べると、図8のようになった¹⁷⁾。低Siでは付着物粒子が大きく、Fe-Cr-Oが生成しているのに対して、高Siでは付着物粒子が平滑化して、Fe-Si-Oが生成していた。Fe-Si-Oの方が共晶温度が低く、切削温度が付着した酸化物の融点近くになったため、酸化物が軟化し、潤滑作用を有したと推定されている。

しかし、同様の試験を行い、同様の結果（高Siほど工具寿命が大）が得られても、高SiではA3点が高くなり、切削温度がA3点を超えないため、凝着が生じにくく、寿命が向上するとの見方もされている¹⁸⁾。

②浸炭相当鋼焼入れ材（約700HV）でのSi添加の影響を旋削試験（連続切削、TiAlNコーティングCBN工具）で調べた結果では、Si量増加にしたがって、工具面上に付着する凝着

物が結晶性のFe酸化物からアモルファス状のSi酸化物に変化し、図9に示すように、工具コーティング中のAlが凝着物に拡散して摩耗が進行するとされた¹⁹⁾。

③また、60HRC（約700HV）の硬さの冷間工具鋼（SKD11）の化学成分調整した鋼材（Siは最大2%）を用い、TiAlNコーティング超硬工具で断続切削した結果、高硬度鋼の切削ではSi添加でも高Al（0.9%）のためか、Si酸化物ではなく、高温・高圧下で安定して形成されるAl系酸化物とFeの付着を抑制するMnSが同時にベラゲとして生成されるような成分系が望ましいとした²⁰⁾。また、酸化物の生成が高温・高圧状態での鋼中元素の拡散の計算から求められ、工具面上では高圧となり、酸素の供給がされにくくなり、低酸素分圧下となり、元素が相対的に高移動度を有することでAl系やMn-Si系酸化物が形成されることを解析した²¹⁾。

同じようなSi添加鋼において、①では被削材硬さが43HRCで、断続切削でSi酸化物が生成して、寿命向上（TiCNコーティング工具使用）、②では被削材硬さが700HV（60HRC相当）で、連続切削でSi酸化物が生成するが、TiAlNコーティング工具中のAlが酸化物中に拡散して寿命劣化。③では被削材硬さが60HRCで、断続切削でTiAlNコーティング工具使用も、Si酸化物は生成せず、Al酸化物が生成し、寿命向上。①と②の違いは被削材硬さ（切削温度に関係）、断続か連続か（酸化のしやすさ）、工具にAlの含有の有無（拡散の差）などが影響していると考えられ、②と③の違いは被削材硬さ、断続切削は同等だが、工具にAlの含有の有無が影響しているようにも思えるが、Si酸化物そのものの生成の有無があり、被削材中のAl量が0.9%と桁違いのためとも思われる。

このようにSiの影響が逆になったり、付着物の生成種類や状態が異なるのは、切削方式（断続か連続か）や被削材の硬さ（約400HVと約700HV）、工具材種（コーティング含む）の違いも影響している可能性もあり、切削温度の影響も含めて、系統的な試験・解析が必要と考えられる。

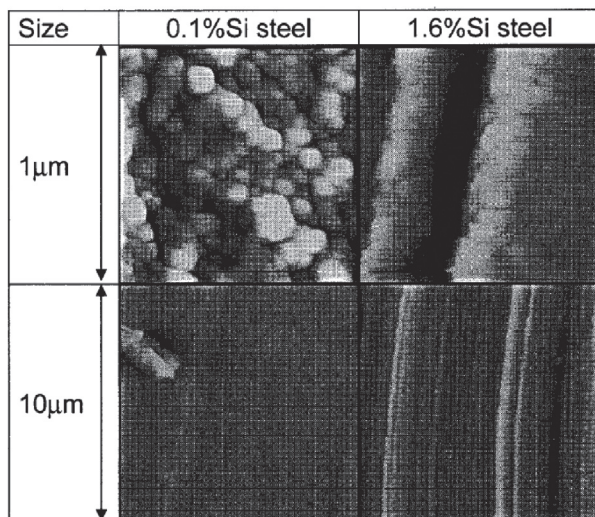


図8 Si添加鋼切削時の切りくず裏面（工具接触部）のAFM写真¹⁷⁾

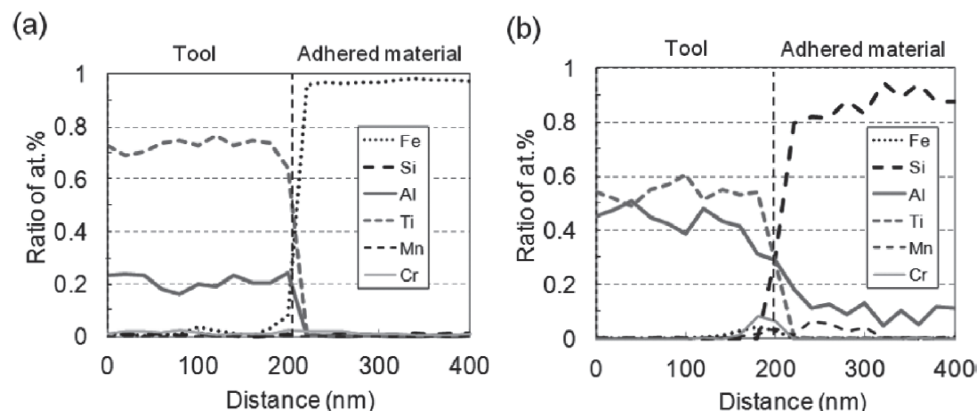


図9 Si添加鋼（(a) 0.2Si、(b) 0.6Si）の工具と付着物の界面のEDSライン分析結果¹⁷⁾

4.2 Si, Mn, Cr, Al添加鋼

以上のように、鋼中の介在物のみならず、単純な添加元素によっても、切削時の工具面上に付着物を生成することが分かった。間曾は0.55%CにSi, Mn, Cr, Alをそれぞれ1%単独および複合添加した鋼材を用いて摩擦摩耗試験を行い、断続切削時の工具面上の付着物の生成の再現を目指した。Si添加鋼の工具面上の付着物は、Fe-S-Oとなっている²²⁾。添加元素が異なると、FeとOとそれぞれの添加元素が検出された。摩擦摩耗試験時の摩擦係数はAl添加>Cr添加>Si添加≒Mn添加となり、これは付着物の融点または共晶温度との相関があるとしている。

これらの鋼材を旋削により連続切削し、工具逃げ面の境界摩耗部（切削時の切込み相当位置が工具と接触する部分で、連続切削ではあるが、大気と接触する部分でもある）を観察すると、Si添加鋼ではAl添加鋼に比べて、境界摩耗が少なくなっている。Si添加鋼での切込み部付近で生成したSi系酸化物が保護膜となったためと考えられている²²⁾。

5 析出物の影響

5.1 AlN

SCM415鋼(0.024%Al, 0.0106%N)の圧延まま(AlN析出なし)と900℃・2hの焼ならし(AlN析出)の2種類を作成し、旋削試験を行ったところ、AlNの析出していない圧延まま材の方が工具摩耗が少なかった。圧延まま材では工具すくい面上にAlとNの付着が認められ(図10)²³⁾、一方で、焼ならし材ではAlやNの付着は認められなかった。鋼中の固溶しているAlとNが高温高压の工具面上で反応してAlNが生成したと考えられている。

5.2 VC

通常の低合金鋼でのV添加(0.5%程度まで)材での切削で析出の影響についての報告はないが、高速度工具鋼では3%

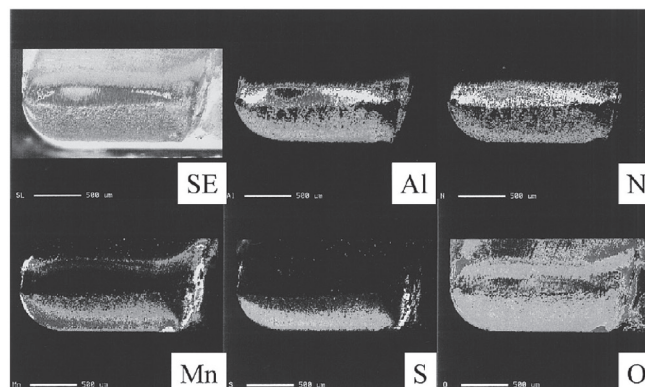


図10 SCM415鋼切削後の工具すくい面の元素付着状態²³⁾

程度Vを含有し、VCが多量に析出しており、これを切削工具として用いた切削試験時の報告がある²⁴⁾。被削材としてはS45Cを用いて、切削後の工具すくい面にV系酸化物が付着していることが確認されている。大気中の酸素が供給される乾式切削(切削液を使用しない場合)のため、VCが酸化・溶融し、切削終了時に急速凝固することで、非晶質のV系酸化物が生成したと考えられている。

5.3 微細炭化物

家口は切削時に微細炭化物の再固溶による固溶炭素の影響について、S15C鋼を用いて調べている²⁵⁾。920℃からの空冷(サンプルA: 固溶炭素微少)と600℃まで空冷後に急冷(サンプルB: 固溶炭素微少+微細炭化物)の2種類のサンプルを作成し、切削試験を行い、切削抵抗で評価している。サンプルのTEM写真を図11に示す²⁵⁾。微細炭化物はε炭化物とみられている。サンプルBで低速切削時に切削抵抗の極大を示し、この時に微細炭化物が固溶し、動的ひずみ時効を生じたことを述べている。切りくずの温度を計算で求め、一次せん断域では260~440℃なので、10³/sと言われているひずみ速度では動的ひずみ時効は生じないとし、二次せん断域では500~700℃程度になり、計算で求めた動的ひずみ時効を生じる温度と合致するとした。

5.4 析出物とダイヤモンド工具

硬質な材料(鋼材とは限らない)を切削するためには硬さの大きい工具材種を選択するのが常道である。最も硬いダイヤモンドが切削工具として用いられるのも普通と思われるが、鋼材を切削するにはダイヤモンド工具は摩耗しやすいことが知られている。寺内らは鋼をダイヤモンド工具を用いて切削する際の工具摩耗と析出物(炭化物)との関係を調べている²⁶⁾。これらの鋼材は炭素鋼系は焼入れ・焼戻し、ステ

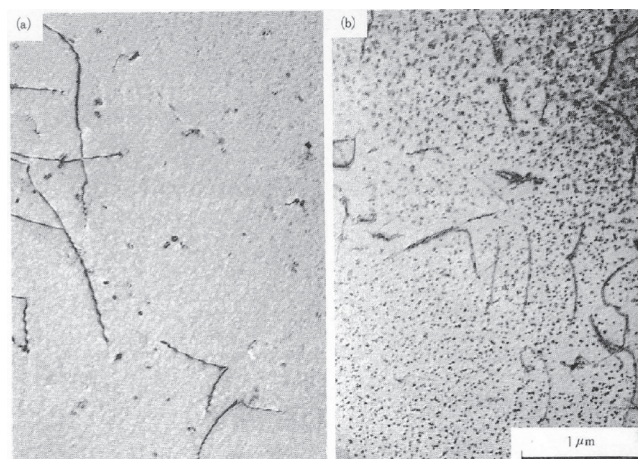


図11 S15C鋼の電子顕微鏡写真((a) 900℃加熱後、放冷、(b) 900℃加熱後、600℃まで放冷し、その後、急冷)²⁵⁾

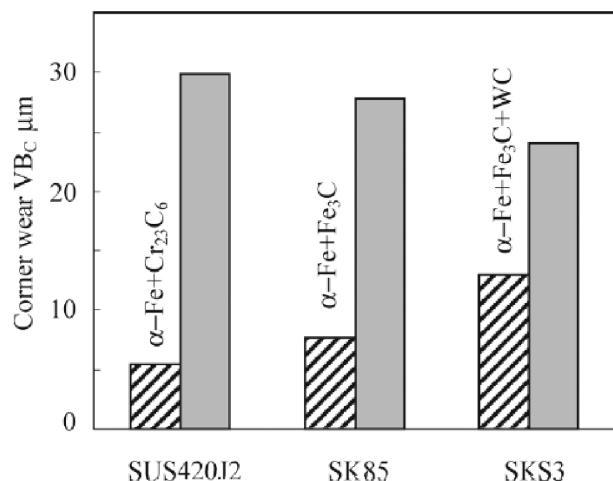


図12 焼入れ焼戻し材と焼入れまま材のダイヤモンド工具での摩耗²⁶⁾
(ハッチ：焼入れ焼戻し、灰色：焼入れまま)

ンレスは溶体化・応力除去処理されており、摩耗は工具逃げ面の先端部に当たるコーナー摩耗幅を測定し、鋼材の硬さとの相関はないことを確認している。炭化物の析出との相関がありそうだということで、焼入れままで、炭化物を固溶させたものとの比較を行った。結果を図12に示す²⁶⁾。炭化物の析出したものは摩耗量が少ないが、固溶させたものは摩耗量が增大している。メカニズムまでは記載がないが、炭化物がダイヤモンド工具の摩耗を抑制しているとした。

6 おわりに

快削鋼は介在物の有効利用という点では鋼材の中でも特異なものであろう。また、切削現象そのものも高温・高圧であり、単に介在物の種類・量・形状などの影響だけでなく、析出物や固溶元素を含めて、本稿で示したようにトライボロジーの見方も必要になってくると思われる。Pb快削鋼は環境問題から使用制限が出てくる可能性があるため、非鉛快削鋼の開発が進められているものの、完全代替は難しい状況である。このようなトライボロジーの観点から新たな展開をされることを望む。

また、切削現象を活用することで、本稿では述べなかったが、被削材表面(仕上げ面)のナノ結晶化も示されつつあり、切削を単なる加工方法としてではなく、製品への材質付与との位置づけであれば、切削を重要視した研究開発も進むのではないかと感じている。若い方々に期待したい。

参考文献

- 1) 白神哲夫：ふえらむ, 21 (2016), 70. など
- 2) 古澤貞良：第96・97回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1984), 23.

- 3) 荒木透：第96・97回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1984), 1.
- 4) 第96・97回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1984) など
- 5) 大野鐵：第96・97回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1984), 157.
- 6) 田阪興, 赤沢正久, 片山昌, 黒岩和也：鉄と鋼, 57 (1971), 2076.
- 7) 伊藤哲朗, 高橋徹夫, 木村篤良, 山野清市：電気製鋼, 44 (1973), 29.
- 8) 渡里宏二, 藤原順介, 松永和則：精密工学会誌, 78 (2012), 517.
- 9) 渡里宏二, 藤原順介, 西隆之, 江頭誠：精密工学会誌, 78 (2012), 787.
- 10) 村上俊之, 白神哲夫：NKK技報, 178 (2002), 1.
- 11) 白神哲夫, 山根八洲男：材料とプロセス, 12 (1999), 475.
- 12) 江村聡, 川尻将洋, 関小華, 山本重男, 櫻谷和之, 津崎兼彰：鉄と鋼, 98 (2012), 358.
- 13) 山根八洲男, 田中隆太郎, 関谷克彦, 鳴瀧則彦, 白神哲夫：精密工学会誌, 66 (2000), 229.
- 14) 白神哲夫：ふえらむ, 15 (2010), 497.
- 15) 木村篤良：第96・97回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1984), 129.
- 16) 白神哲夫, 石崎哲行, 田川寿俊：鉄と鋼, 73 (1987), S1224.
- 17) 海野正英, 瀬羅知曉, 岡田康孝, 村上大介, 村上禮三, 椿野晴繁：鉄と鋼, 89 (2003), 601.
- 18) 藤井利光, 松田幸紀：電気製鋼, 71 (2000), 119.
- 19) 岩崎竜也, 間曾利治, 渡里宏二：鉄と鋼, 104 (2018), 208.
- 20) 森下佳奈, 小関秀峰, 井上謙一, 森戸茂一, 大庭卓也：精密工学会誌, 82 (2016), 372.
- 21) 森下佳奈, 森戸茂一, 大庭卓也：精密工学会誌, 82 (2016), 285.
- 22) 間曾利治：まてりあ, 56 (2017), 397.
- 23) H.Yaguchi, K.Ozaki and M.Somekawa：ISIJ Int., 44 (2004), 598.
- 24) 福丸大志郎, 福元志保, 中津英司：材料とプロセス, 26 (2013), 315, CD-ROM.
- 25) 家口浩：神戸製鋼技報, 43 (1993), 111.
- 26) 寺内俊太郎, 松田茂敬, 古城直道, 杉本隆史：鉄と鋼, 97 (2011), 631.

(2019年12月10日受付)