



鉄鋼材料と切削加工

江田 弘
Hiroshi Eda

茨城大学 工学部 教授

Iron-steel Materials and Their Cutting Processes

1 鉄鋼切削の一般論

1.1 切 削

“切る”は、切り口同士を合わせると、元通りに一体化し、“削る”は、切り口同士を合わせても食い違いが生じており、永久にひずみが残ってしまうこと、と云われている¹⁾。

たとえば、前者は、電子顕微鏡観察の薄膜を作成するガラスナイフをダイヤモンド工具で作る際に、2つの新生面が食い違いがなく合わることを経験しているでしょう、ゴムや生体の外科手術の切り口もそうである。つまり、塑性ひずみが無視できるほど小さく弾性ひずみのみで加工表面が生じている。

設計図面は、用いる部品の形状誤差、寸法変化および加工表面の歪みを考慮せずに、概念の思考実験結果通りに描くことができる。しかし、加工できない設計は意味がないことになる。

切削(Cutting)は、効率よく精度を満足する加工方法の一つとして、絶えず切削歪みが少ない条件さがしや方法の究明が行われてきた。

しかしながら現在まで、切りくずの長さ l が分離した新生の切削表面の長さ L と全く合致する切削比 $r_c=1$ 歪み零、すなわち弾性ひずみのみで鉄鋼材料の切削は行われてはいない。

1.2 材料からみた切削加工の原理

材料の加工条件と方法は、状態図と応力(σ)－ひずみ(ϵ)線図から定めることが基本である。

1.2.1 状態図

状態図は、人間の戸籍謄本と同じようなもので、組織を

見るとどのような物理化学的性質をもつのかおよそのことが予測できる²⁾。

鉄($C < 0.02\text{mass}\%$)と鋼($0.02 \leq C \leq 2.1\text{mass}\%$)の状態図は、安定なFe-黒鉛系と、準安定なFe-Fe₃C系との2組の状態図を重ね合わせて複雑な状態図を示している。

鋼の物性は熱処理によって幅広く変えることができる。たとえば、0.25mass%C鋼の引張強さ σ_t は；マルテンサイト組織1200～1300MPa、ベイナイト組織600～1200MPa、フェライト＋パーライト組織450～600MPaとなる。またFeとCとの炭化物の硬さHVは、Fe₃C(HV=1200～1500)、M₂₃C₆(HV=1300～1800)、M₆C(HV=1600～2250)、Mo₂C(HV=2100～2500)、M₇C₃(HV=2000～2700)、WC(HV=2600～3000)、MC(HV=2300～3200)、TiC(HV=3100)、SiC(HV=3600)などの合金粒子を多数生成する。

他方、鋼は結晶構造が隙間の多い体心立方晶(フェライト α ；低温安定型、格子の寸法2.87Å)から、原子が密に詰まった面心立方晶(オーステナイト γ ；高温安定型、格子の寸法3.58Å、 γ 鉄は α 鉄の100倍の2.1mass%のCを最大固溶できる)の $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 相変態ができ、多種多様な鉄鋼材料を作ることができる。さらに材料を制御するために添加する合金元素と不純物元素の混入によって幅広い多様性が与えられる。一般にC、Si、Mn、P、Sの鉄鋼5元素によって多くの機能を付与できる。

以上のことを述べた理由は、鉄鋼組織は、単一相をもつ例は稀で、多くの場合第二相粒子、介在物等をもつ多相多結晶粒子からなる混合組織である。そこで単純に比体積が多い母相のみに切削工具の切削方法や条件を設定して加工することには問題があることがわかる。

特に現在のようにNear Net Shape(正味形状)に近い取代で切削加工する場合に影響が現れる。

1つの例として、 α Fe相- Fe_3C 相の2相合金を紹介しよう。

	α Fe相	Fe_3C 相
硬さ	HV=120	HV=1200~1500
引張強さ	$\sigma_t=392\sim588\text{MPa}$	$\sigma_t=3920\sim5880\text{MPa}$
ポアソン比	$\nu=0.28$	$\nu=0.46$
縦弾性係数	$E=2.1\times10^5\text{MPa}$	$E=2.16\times10^5\text{MPa}$

一般に切削工具の硬さは工具寿命の観点から被削材の約4.5倍以上が望ましい。

α Fe- Fe_3C 合金の切削は母相の比体積が約90%以上の場合が多いので、工具は高速度鋼(HV=700~1200)、超硬工具(HV=1000~1700)が使われる。しかしこのとき0.1~1.5 μm の Fe_3C 微粒子は切削されずに原形に近いまま残在する。サブミクロンの仕上がり面粗さを得るには、これを切削する必要がある。そのときの工具はセラミックスSiC(HV=2500~3600)やCBN(HV=4500~5200)を使用することが望ましい。

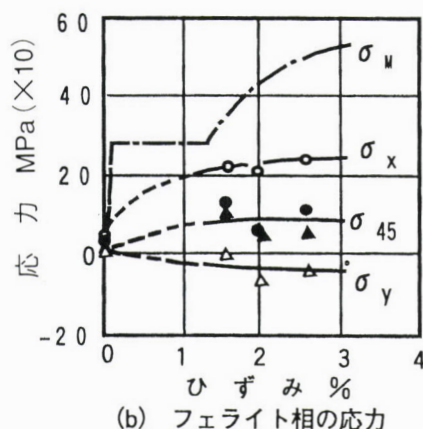
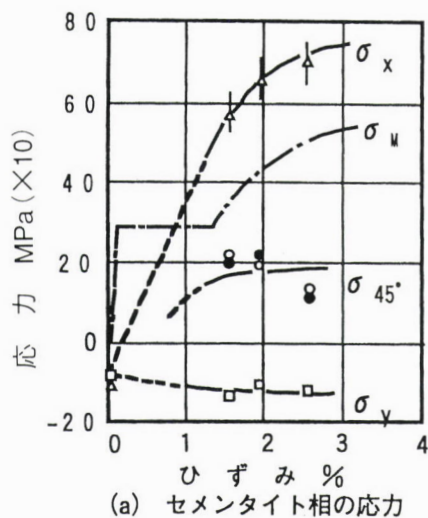


図1 塑性変形による各方向のX線の応力の変化
図中一点破線は機械的応力(σ_M)

1.2.2 応力-ひずみ線図

図1は鉄鋼材料の代表的な組織である α Fe相- Fe_3C 相の弾塑性変形のフェライト相 α_F とセメントタイト相 σ_C の相応力と巨視的応力 σ_M を示す³⁾。

図中の σ_M は試料表面の巨視的応力で、相応力 σ_C 、 σ_F との間で、 Fe_3C 相の比体積 q とすると、 $\sigma_M=q\sigma_C+(1-q)\sigma_F$ の関係が成り立つ⁴⁾。つまり σ_M は負荷応力である。また図中の σ_x 、 σ_{45} 、 σ_y は一軸方向引張軸に対して 0° 、 45° 、 90° 方向の応力とした。この材料は1.39mass% C鋼、 Fe_3C 相の粒径 $\bar{d}\approx 1.2\mu\text{m}$ 、粒子中心間隔 $\bar{L}\approx 2.3\mu\text{m}$ 、比体積20.8vol%の焼鈍材である。Reimer⁵⁾は Fe_3C 相の降伏応力 σ_Y は α Feの $\sigma_Y=220\text{MPa}$ の約10倍であるとみている。また Fe_3C 相の破壊応力はCollinsら⁶⁾により 10^4MPa 、Webbら⁷⁾により $(4\sim 8)\times 10^3\text{MPa}$ の値が報告されている。因みにパーライト粒子の破壊応力は $(1.1\sim 1.2)\times 10^3\text{MPa}$ 程度で、ひずみ $\epsilon\approx 0.3$ 程度に達したとき発生するとされている⁸⁾。

以上のようにして、1.2.1の状態図、1.2.2の σ - ϵ 線図を中心に、被削材の物性を検討するが、そのとき大切なことは

[I] 各結晶の最大引張り強さ σ_B 、硬さHV、最大ひずみ $\epsilon_{\max}$ 、加工硬化率 H' 、破壊靱性値 Kc (特に K_{Ic} 、 K_{IIc})；
工具高温強度

[II] 熱伝導率；切削温度と熱停留

の大きさを知り、さらに

[I] から、切削応力、[II]から切削熱の停留量と切削温度を予めとらえて、比較検討しておくことである。

切削加工でよく用いられる方程式は、[I]については“力の釣り合い方程式”、[II]については“熱伝導方程式”の2つの微分方程式である⁹⁾。つまり切削過程を模擬(Simulate)することであるから、この応力と熱、温度の算出法をマスターしておけばおよそその対策が立てられる。

1.2.3 切削条件と方法の設定

表1は現在用いられている各種工具の主成分の諸特性、および表2はその成分構成を示す¹⁰⁾。さらに図2は工具材料の高温硬さを示す¹¹⁾。図3は各種工具の高温硬さと靱性(Kc)の位置づけを示している¹²⁾。

表1 各種硬質物質の諸特性

硬質物質	密度(g/cc)	融点(°C)	結晶構造	結晶硬さMHv(50~1,000gf)	ヤング率(10 ³ MPa)	熱膨張係数(ppm/°C)	熱伝導率(W/cm ² K)	酸化開始温度(°C)
ダイヤモンド	3.5	—	Cubic	10,000	10.5	3.2*	20**	630
CBN	3.5	—	Cubic	7,000	7.3	3.5	2	>1,100
B ₂ C	2.5	2,430	Rhombohedral	3,700	4.6	4.3	0.16	1,100
SiC	3.2	3,040	Hexagonal	2,500	3.9	4.3	0.85	1,100
WC	15.8	2,780	Hexagonal	2,100	7.1	5.2	0.42	500
TaC	14.5	3,920	Cubic	2,000	2.9	6.7	0.39	800
TiC	4.9	3,070	Cubic	3,200	4.6	7.2	0.052	1,100
TiN	5.4	2,950	Cubic	2,400	2.6	9.4	0.074	1,200
Al ₂ O ₃	4.0	2,030	Hexagonal	2,100	3.6	8.0	0.059	安定

* 400~11,200K ** 単結晶の値

表2 各種切削工具材料の成分構成

切削工具材料名	硬質相		結合相
	主成分	補助成分	
焼結ダイヤモンド	ダイヤ	—	Co
焼結CBN	CBN	—	Co, TiCなど
セラミックス	Al ₂ O ₃	TiC, TiN, ZrO ₂	—
サーメット	TiC, TiN	WC, TaC, Mo ₂ C	Ni, Co
コーテッド超硬 (コーティング層)	TiC, TiN, Al ₂ O ₃ など		—
超硬	WC	TiC, TaC, NbC	Co
コーテッドハイス (コーティング層)	TiN		—
ハイス 粉末ハイス	MC, M ₆ C		Fe, W, Mo, Cr, Co, V

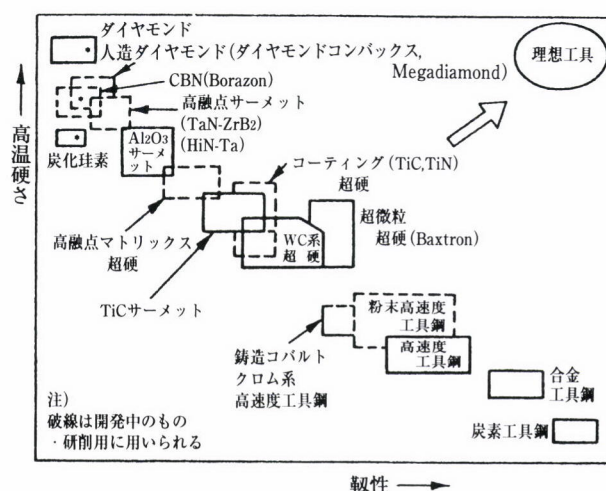


図3 切削工具の進歩

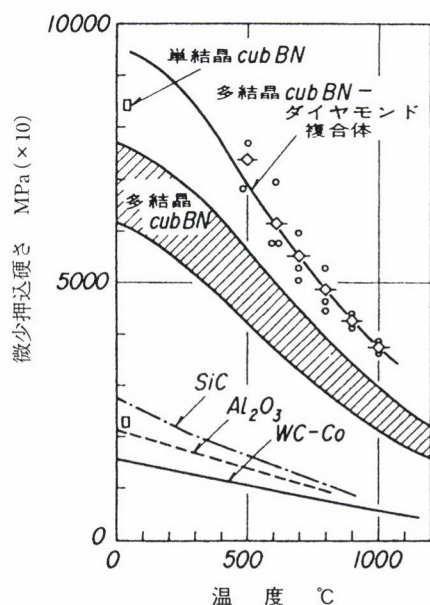
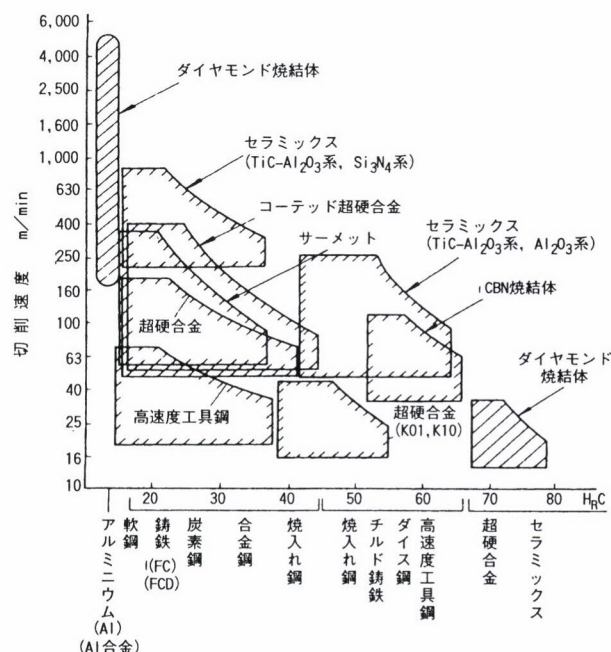


図2 ボラゾンと他の工具材料の高温硬さ

図4 被削材硬さと工具材種および適用切削速度¹³⁾

いま図3をもとに、図2に示す高温硬さを切削速度 V （切削温度 θ は、 V の指数 n 乗となる； $\theta \propto V^n$ ）に対応づけ、各種被削材料との関係を整理すると図4に示すようになる¹³⁾。

以上の結果、

αFe 相と Fe_3C 相の2相合金をサブミクロン ($Ra < 1\mu m$) の精度に効率よく切削するには、 $TiC+TiN$ 系サーメット工具を用いることになる。

理由は、超硬、高速度鋼工具では Fe_3C 相の切削は無理で、 Fe_3C 相の凸起が表面に生成する¹⁴⁾。

ただし、仕上面粗さ $Ra > 1\mu m$ の時には、 $WC+(Ti, Ta)C+Co$ 系のJISP20工具で十分である。工具寿命はいずれも実用値を満足できる。

ここで1.2.1と1.2.2を整理すると、

〔I〕工具すくい面の切削応力 σ_c 、 τ_c が工具の引張応力 σ_t 、せん断応力 τ_t より大値になると、折損や高温破壊を起し、一般の工具寿命60minより短くなる。故に、切削温度条件において、 $\sigma_c > \sigma_t$ 、 $\tau_c > \tau_t$ の工具材種の選定が望ましい。

〔II〕工具すくい面、または工具逃げ面の切削温度について、工具の高温強度 σ_t 、 τ_t が順に、 σ_c 、 τ_c 、または逃げ面の応力 σ_{re} 、 τ_{re} より大値となる工具材種の選定が望ましい。

また熱伝導率が低いと、切削領域の熱停留により高温塑性流動が顕著になるので、熱放散性が高い工具幾何形状に設計することも重要である。

一般に、鉄鋼材料に限らず材料の状態図と σ - ϵ 線図に

よって、また物性的にも一応、切削条件や方法が設定されたとしても、材料は一つとして同一組織を作ることには不可能に近い。結論を言えば、1章で述べた一般論で切削が無事望み通りできるほどたやすいことではない。このことは人間と同様で、仮に生まれや環境が同じであっても、容姿(組織)や性格(物性)は千差万別である。つまり、一人一人の人間現象の振舞いに対応するのと同じく、個性対応の技術が求められる。これまで、整理できている例を以下に紹介する。

2 鉄鋼材料特性現象と切削 Know-How

2.1 切削の原点

工具の幾何形状を整形せずに、結晶生成したままの不定形の工具(ダイヤモンド粒子、約1mm ϕ)で99.97mass%Feを切削した時の切削点(切りくず-切削表面(上図)、切削溝

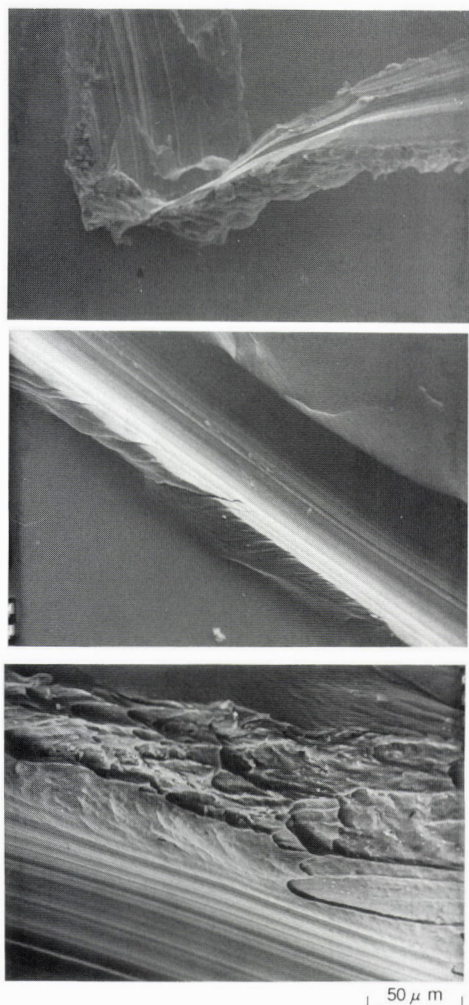


図5 ダイヤモンド粒子で純鉄表面を切込み100 μ mで切削した時の切削溝近傍生成状況
切削点(上図)、切削溝(中図)、切削溝側面盛り上り(下図)

(中図)、切削溝の側面盛り上り(下図))の様子を図5に示す¹⁴⁾。結晶粒内の塑性すべり線(中図)、粒界の食い違い生成(中図)、切削方向へ流動する結晶粒(下図)、延性破壊によるCup-ConeのDimple pattern(下図)が明瞭に観察できる。

一連の塑性流動は表面下の内部組織にも生成する。いわゆる切削加工変質層である。

個体と気体、液体の物性の差はあるものの、切削界面で起るこのような現象は、飛行機やロケット、および船や潜水艦が空気や水を触先で切削し、流体の速度境界層(切削力に対応)や温度境界層(切削熱に対応)を生成する現象と類似している。

切削の良否の判断は、前述の境界層生成からも想像できるように、切削抵抗による切削応力と切削温度による。そして工具種類、工具形状、切削油剤の使用有無、種類ならびに濃度、そして切削機械の種類と切削方法などの切削条件が設定される。

2.2 マルテンサイト鋼の切削

一般にマルテンサイト(α')鋼の引張強さ σ_B はCの固溶量(wt%)によって変化し、次式で表わせる。

$$\sigma_B = 1.7 \times 10^3 C^{1/3} \text{ (MPa)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

α' 鋼の切削はCBN(Cubic)、WBN(Wurtzite)、HBN(Hexagonal)、いわゆるボラゾン(GE商品名Borazon)工具を用いる¹⁵⁾。切削取り代が数10 μ mオーダならば、BN砥石を用いて対応する方法が有効である。

α' 鋼の切削は硬さHRC>45の時には特にBN工具が有効である。35<HRC<45を境界にして α' 相と α Fe+Fe₃C相の量比によって被削材の延性と脆性の影響の強さが変わるためである¹⁶⁾。図6はJIS SUJ2を焼入れ(HRC=65、95% α' 相)と、焼戻し材(HRC=45、50% α')、32(10% α')、13(0% α' で α Fe+Fe₃C)で、送り分力、切削温度、仕上面粗さおよび見掛けの切削比(送り/切りくず厚さ= r_c 、切削幅を無視したため $r_c > 1$ となった。一般には $r_c \leq 1$)を硬さに対して表わしている。

一方HRC<35のフェライト、セメンタイト主組織の鉄鋼は、JIS P、M系超硬工具かセラミックスおよびサーメット工具で対応できる。

2.3 オーステナイト組織、ペーナイト組織をもつ鋼

引張強さ $\sigma_B > 600$ MPa、硬さ35<HRC<45付近の、強靱な、いわゆる伸び絞りがあり粘り、そして比較的硬く、耐熱的で高強度の特性をもつ被削材の最適工具選定の問題がある。ステンレス鋼、ダイス鋼、金型鋼、ロール鋼、車輪タイヤ鋼、マンガン鋼、ボロン鋼などに使われている。従来この領域に対応できる最適工具はなかったが、PVD、

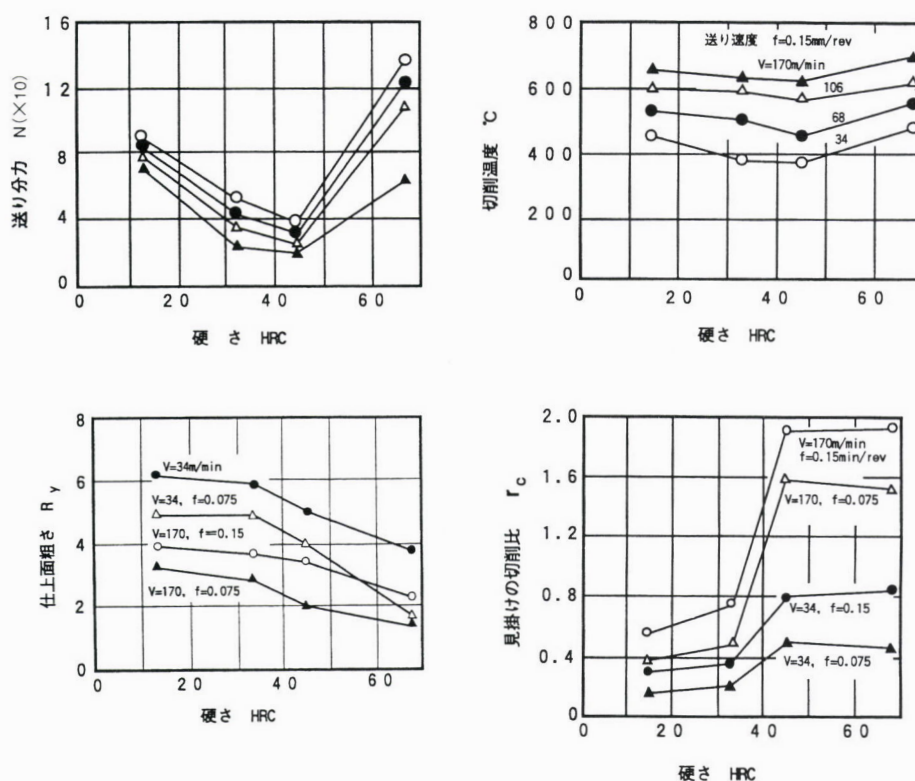
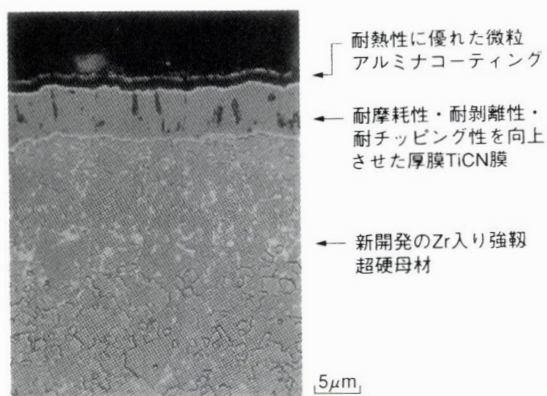
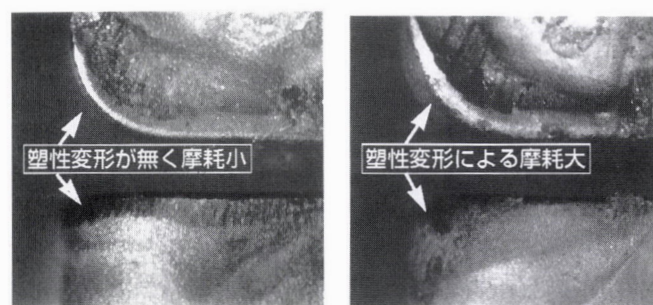


図6 焼入れ、焼戻し送り分力、切削温度、仕上面粗さおよび見掛けの切削比

図7 超硬-TiCN-微粒 Al_2O_3 コーティング工具AC1000

開発工具(15分切削)

A社同系工具(7分切削)

$V=240\text{m/min}$, $f=0.33\text{mm/rev}$, $d=1.5\text{mm}$

図8 図7の工具による工具損傷例

CVDの被覆技術の進歩によって実用上、一応安心して使える段階に達している¹⁷⁻¹⁹⁾。

被覆剤は、旧来のTiC、TiNからCrN、 CrO_2 、TiALN、TiALCN、TiCN、TiCN+C、TiN+C、 TiB_2 、WC、MoN及びMo被覆が開発され、なかでも耐荷重性、凝着力、耐摩耗性、硬さ及び疲れ強さの特性から評価すると、TiALNが硬く、金属被覆性の上で優れている。以上の合金 [Metal] と高温硬さが高く、摩擦・摩耗が少ないセラミックス (Ceramics) を合成したのがサーメット (Cer met) 工具である。サーメットはオーステナイト系SUS、上・下部ペーナ

イト組織の切削には最も向いている。

図7は超硬合金(Zr含有WC系)上にTiCN、さらにその上に微粒 Al_2O_3 をCVDにて被覆した。この工具は従来にない高温硬さ $\text{HV}=1050(800^{\circ}\text{C})$ と破壊靱性 $K_{IC}=9\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ をもち、 γ 相のSUS、ペーナイト鋼に有効である。

図8はSCM435(HB260)の切削後のすくい面と逃げ面の塑性変形の改善例を従来工具に比較して示す。図9は自動車のエンジン、工作機械摺動面に使われる鋳鉄切削用工具を、図10はその工具による切削例を示す。切削条件は図8の場合と同じである。

最近の鋼切削の方針は

〔Ⅰ〕より高速、高能率、長寿命、工具費低減を目標とする。

〔Ⅱ〕ドライ切削(環境対策)を可能とする。

また鋳鉄切削の方針は

〔Ⅰ〕断続切削でも欠けない強度と、高硬度黒皮切削でも高耐摩擦性で高速切削が可能になること。

図7、9は耐摩擦性と耐欠損性を向上したZr含有の超硬母材にCVDによる Al_2O_3 粒子と、膜厚とコーティング条件を調整し、剥離性を強化する技術でTiCN膜を強靱に界面結合させた工具を示す。例えば図10は膜剥離が極めて向上したことを示している。

次に折出硬化型の熱間工具鋼の如く、焼戻しマルテンサイトによって、残留オーステナイト、(上・下部)ペーナイ

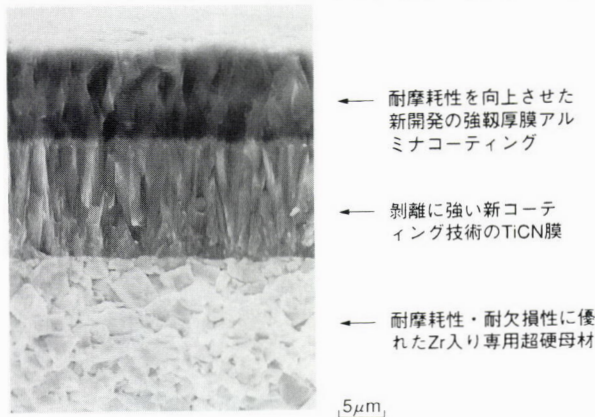
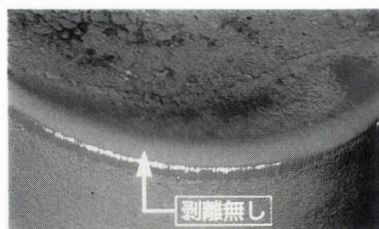
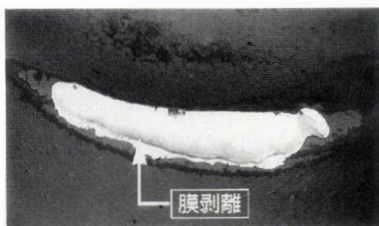


図9 断続切削、黒皮荒加工に有効な工具AC500G



開発工具(14分切削)



A社同系工具(5分切削)

$V=350/\text{min}$, $f=0.35\text{mm}/\text{rev}$, $d=1.5\text{mm}$,
湿式, FC250, HB=220

図10 図9の工具による工具損傷の例

ト、MC(Vリッチ)、 M_6C (Mo、Wリッチ)、 M_7C_3 (Crリッチ)、 M_2C (Moリッチ)、マルテンサイト等の組織が2つ以上混在する場合がある。工具鋼の硬さ(例えば0.2C-3Cr-W-Mo-V-Co系)はHRC=42~46であるから切削工具としては、図9に示したサーメット系被覆工具が無難である。切削対象組織はペーナイトとして条件を設定するがその際、強度 $\sigma_B=1400\sim1650\text{MPa}$ 、0.2%耐力 $\sigma_{0.2}=900\sim1300\text{MPa}$ 、伸び $\phi=16\sim22\%$ 、絞り $\psi=60\sim73\%$ と高靱性のため切削温度が高くなる。

特に断続で湿式切削するような場合には熱衝撃を受け、工具は熱き裂を起こす^{20,21)}。

この時はドライカット(乾式)が望ましい。その理由は工具表面温度がその下層より温度が低下する温度逆転層を生成し、同時に切りくず通過直後に急冷却され、主応力 σ_1 が引張応力を突発的に増大し、き裂が発生するからである²⁰⁾。

2.4 鉄鋼の切りくず破碎とバリの抑制

(1)切りくず破碎

鉄鋼の切りくず処理は、CAD/CAM/CAEの投入でチップブレーカーのバーチャルリアリティ的な設計が可能になり、力学的な最適シミュレーション結果が容易に得られるようになった¹³⁾。それでも困難な場合がある。

例えばFe基ベースの超耐熱鋼、急冷凝した非晶質フェライト、強靱な耐熱・耐摩耗を要すタイヤ鋼などがある。

一例として新幹線車輪のタイヤ鋼(STY80、 $\sigma_B=1000\text{MPa}$ 、 $\phi=12\%$ 、 $\psi=18\%$ 、HS=50)は重切削(切込み $d=8\text{mm}$ 、 $f=1.8\text{mm}/\text{rev}$ 、 $V=53\text{m}/\text{min}$)を施すため、幅数+mm、厚さ数mmの連続形切りくずが排出し、作業者を含め危険な作業になる。著者らは恩師五十嵐教授らと図11に示す在姿型車輪旋盤用に開発した丸駒バイトのチップブレーカーを力学的に最適設計し、図12に見られるごとく、4~5

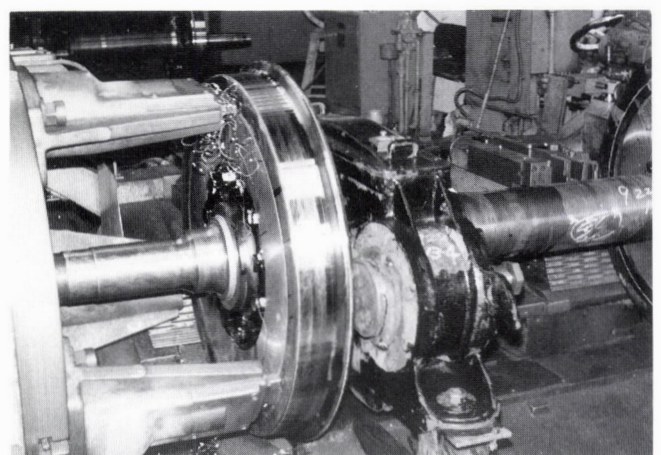
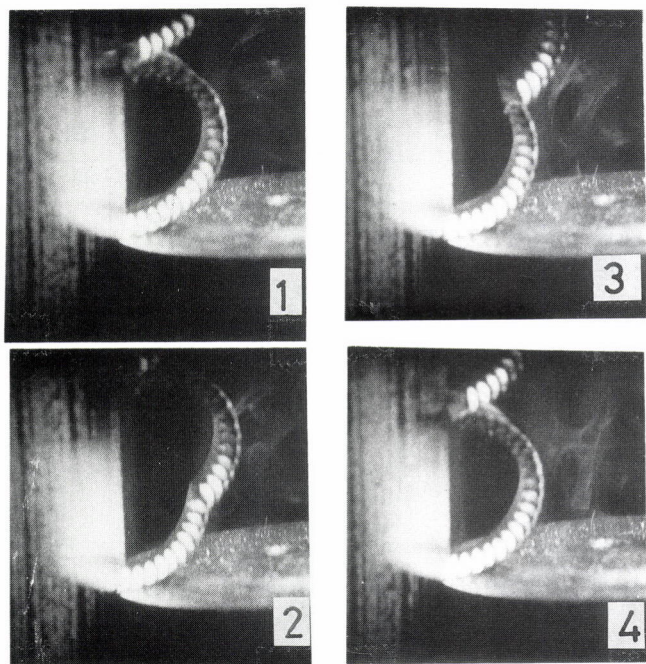


図11 新幹線用在姿型車輪旋盤



V=53m/min, f=1.8mm/rev, d=8.0mm,
乾式, STY80タイヤ鋼

図12 丸駒バイトによる重切削切りくず破碎

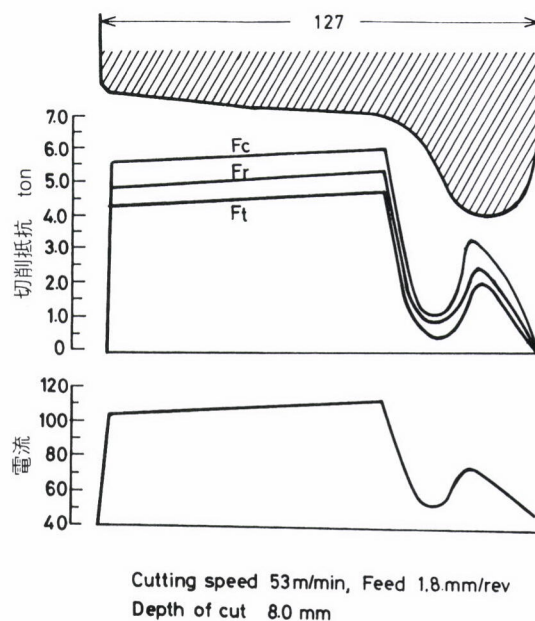
cmのピッチで破碎できるようにした。たとえば踏面切削中の切削抵抗は図13に示すごとく、主分力 $F_c=5.5\sim 6.0\text{ton}$ 、背分力 $F_r=4.8\sim 5.2\text{ton}$ 、送り分力 $F_t=4.3\sim 4.6\text{ton}$ 、電流は102~106Aとなり、一般の鉄鋼切削の約100倍にもなる。

次にNCやCNC切削による切りくず破碎方法を紹介する。この方法は旋削に限らずドリルなど連続形の切りくずが排出する時に適用できる。加工指令のプログラムの送り速度 $f=\text{mm/rev}$ に対して、希望する切りくず破碎間隔毎に、設定送りの $f/(10\sim 20)$ の小送りを数10~20パルスくらいずつ入れたプログラムを作成すればよい。ほとんどの鉄鋼材料に適用し、予測通りの切りくずの破碎ができた。

(2) 切削バリの抑制

切削エネルギー($5\sim 10\text{J/cm}^3$)の90%以上は塑性変形エネルギーが占め、弾性変形エネルギーは数%である²⁾。もし弾性変形のみで切削が完了できればバリは零となる。この技術は理論的に可能であるが現在の技術水準では実現は難しい。バリは切削加工変質の塑性流動(歪)が切削終了端から流動した突起である。例えば、ドリルの抜け孔側、フライスのデイスエンゲージ稜縁、タップ、リーマの抜け孔側など旋削に限らずよく見られる。

一例として、超音波切削で切りくず体積を減少すると同時に、かつこの方法は加速度が(7,000~10,000)Gになる衝撃加工であるから、限りなく塑性歪みを減じ脆性的に切削ができ、バリが小さくなる。機械的な方法としては、例えば旋削のNC、CNC加工の場合、切削終了端に近づいた時



V=53m/min, f=1.8mm/rev, d=8.0mm,
乾式, STY80鋼

図13 新幹線車輪の切削3分力と電流

に、それまでの送り速度 f を減じ、 $f/(10\sim 50)$ の送り速度にプログラム化する。そうすると切削方向への塑性流動が減少し、結果としてバリの切削端部からの突出量は少なくなる。

2.5 鉄鋼切削と工具の刃付品質

剣道の宮本武蔵名人を引き合いに出すまでもなく、材料の切削名人は工具刃付の名人でもある。その例を以下に述べる。

フライス、ドリル、タップ、リーマ、鋸刀、チエザー、シャーカッター等の切削は、高速度鋼、工具鋼等が工具として用いられている。

図14は左側から右へ順にWA150PmV、SDC140R100B、CBN140R100B砥石を用いて、最終仕上げを研削速度1800m/min、工作物速度10m/min、切込み $d=20\mu\text{m}$ 、乾式で、旋削工具SKH55を刃付した工具すくい面(上側)、逃げ面

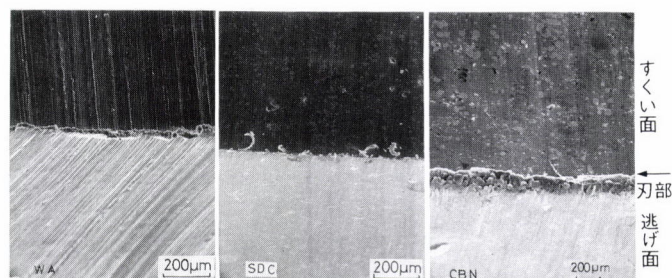


図14 SKH55工具の刃付状況

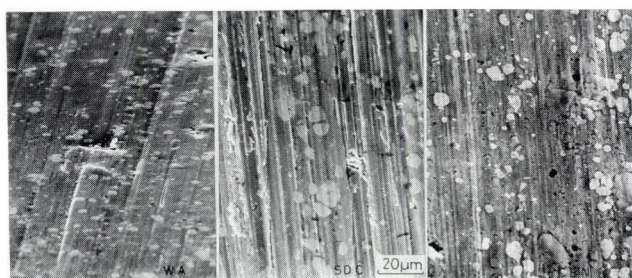


図15 SKH55高速度鋼工具のすくい面炭化物と基地(α' 相)の損傷

(下側)と刃先(中央部)を示す。

刃付のための工具再研磨の品質は、工具強化の各炭化物粒子のき裂破壊が少なく、基地組織の研削残留応力(弾性変形)が圧縮側ほど良く、かつ研削塑性流動(盛り上り、仕上面粗さ)が小さいほど、ならびに研削加工表面層の硬さが高値側にあるほど切れ味(切削力と切削熱が小)がよく長工具寿命となる。図15は図14の工具すくい面の炭化物粒子と塑性流動〔砥粒条痕の側面盛り上り(Side flow)〕の拡大した様子を示す。

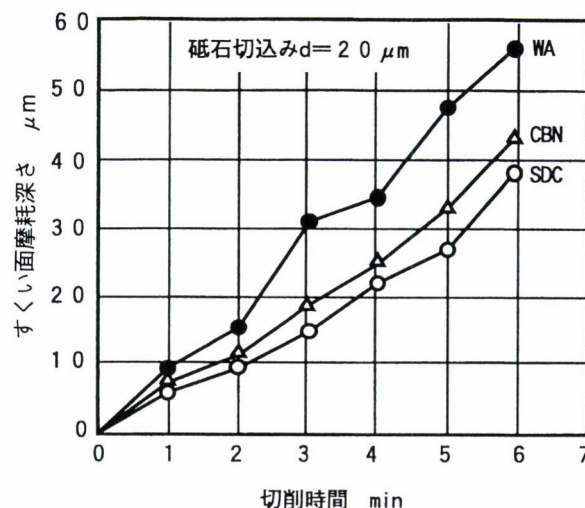
ダイヤモンドSDCの刃付が最良で、次にCBNがほぼ同程度で良好であったが、WA砥石の場合炭化物(砥石硬さ<4.5×高速度鋼)は研削されず表面凸起となり、基地塑性流動が大、他に残留応力は引張り(他は圧縮)、加工軟化層(他は硬化層)を生成した。SDC砥石は再研磨表面の品質は良いが、砥石摩耗が大きい。特に乾式の時研磨領域の温度が1000~1500℃にもなるので工具費を含めるとCBN研削が最良である。図16はSKH55旋削工具工具を刃付し、S25Cを切削した時の工具すくい面摩耗深さを示す。切れ味、工具寿命はSDCが最良で、次にCBN、最後にWAとなる。

3 鉄鋼切削の今後の方向

切削機械は、正味切削時間Chip-to-chip①を増大するために非切削時間Tool-to-tool工具交換時間②、Work-to-work工作物交換時間③の短縮が図られている。現在③は全作業時間の50%強が占められ、①は30%台しかない。③は残り20%である。その方向は、

- (1) 主軸回転の高速・高加減速化
- (2) 送りの高速化；30m/min以下から60~80m/min台へ、加速度 $\alpha=0.2\sim0.3G$ から1~2Gが容易に得られ、クイックモーションが達成され、更に高 α に向かう。
- (3) ドライカッティング技術の拡大

この方向は、生産リードタイムとフレキシビリティの増大である。必然切削能率は向上するが精度低下が伴う。これをカバーするのは鉄鋼切削のスーパーバイザーシステ



V=50m/min, f=0.10mm/rev, d=1mm, 湿式

図16 各種砥石による刃先工具SKH55のすくい面摩耗

ム、データベース、適応制御機能の構築である。即ち鉄鋼切削システムの自社内確立が鍵となる。

4 まとめ

どんな立派なコンピュータを用い、目を見張るようなCAD/CAM/CAEによってCG設計図を描いても、設計情報が切削できなければ、設計写像を具体的に構造化することは不可能である。

鉄鋼切削には自ずと切削能率と精度にその達成範囲がある。他の加工方法や条件と連携しながら有効な切削加工の環境がこれからもより広汎に研究開発が進められていくことであろう。

5 あとがき

確かに日本の生産技術は世界のトップにある。しかしながらこれらの基本学術は欧米研究の蓄積が礎になっている。今、日本は最も重大な時期にある。昭和40、50年代を走った著者らの世代は乏しい給料を工面し、参考資料は勿論、学会、研究会、海外出張は総て自弁であり、海外には自衛隊の御飯の缶詰と梅干し等保存用御飯や缶詰を持って出掛け、ホテルの一室に閉じ籠り一人食事をとった。

今の研究室は科学技術基本計画や同法律、また産官学共同研究、奨学寄付金等いろいろな制度によって支援されている。一所懸命刻苦勉強すれば必ず評価され報われる。そしてこのような環境が整った今、若い研究者にとって、根源的、本質的研究に迫れる絶好の機会である。内実共に世界のトップの、そして人類愛に燃えた挑戦が日本の研究に

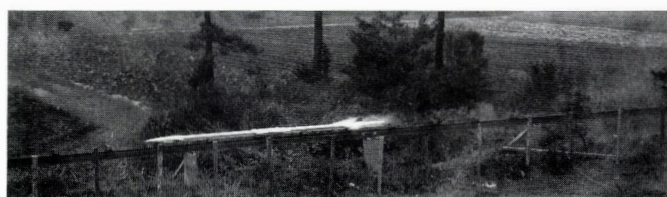


図17 ロケット航行の空気境界層から切削加工変質層のヒントを得た

求められている。著者の例で大変恐縮ですが、切削研究の動機は図17に示す学生時代のロケットの研究であり、境界層理論(切削加工変質層に適用)への興味であった。これを応用し切削速度 $V=1200\text{m/s}$ の切削を行った¹⁵⁾。23年経過した今も世界最速記録である。

今日の工学の対象は生体や生命の仕組み、その要素の相互作用等情報物理の工学への適用が一つの大きな流れである。誠実、かつ勇敢な実践を期待している。

終わりに、このような機会を与えて下さいました鉄鋼協会に深甚の謝意を表わす。

参考文献

- 1) 星 光一：私信，金属切削，工業調査会，(1960)，74.
- 2) 日本機械学会編：生産加工の原理，1 (1998)，38.
- 3) 英 崇夫，藤原晴夫：日本機械学会関西支部第48期講演論文集，(1973) 88.
- 4) H. EDA：Bull JSME 21, 154 (1978) 736；日本機械学会論文集，43, 372 (1977)，3112.
- 5) L. Reimer：Z. Metallkde., 46, 1 (1955)，39.
- 6) M. J. Collins and D. A. Woodford：JISI, 203 (1965)，184.
- 7) W. W. Webb and W. D. Forgeng：Acta Met., 6 (1958)，462.
- 8) 井上 毅，木下修司：鉄と鋼，65, 7 (1976)，875.
- 9) 文献2)，321.
- 10) 土井英和：新金属材料，夏季号，(1982)，17.
- 11) 江田 弘 他：日本金属学会報15, 4 (1976) 326, Proc. Int. Conf. Cutting Tool Materials, ASM. (1981)，265.
- 12) 江田 弘 他：潤滑，26, 5 (1981)，331.
- 13) 狩野勝吉：難削材の切削加工技術，工業調査会，(1989)，82，機械技術，46, 10 (1998)，113.
- 14) H. EDA et al：Bull. JSPE. 14, 1 (1980) 37；日本金属学会誌，42, 11 (1978)，1077.
- 15) H. EDA：Proc. Int. Conf., ASME, In Cincinnati, (1980) 265, Proc. Int. Conf. 21th MTDR, In Swansea UK, (1980)，265.
- 16) H. EDA：Bull JSPE, 16, 4 (1982)，275.
- 17) M. Weck, N. Hennes：Manufacturing Engineering, 121, 3 (1998)，54.
- 18) 伊藤 実，木村寿良：機械技術，46, 10 (1998) 23, Y. Doi et al；Proc. Int. Conf., Cutting Tool Materials, ASM, (1981)，193.
- 19) 山田保之 他：日本機械学会論文集(C編)64, 624 (1998)，3197.
- 20) 江田 弘，垣野義昭：精密機械，50, 4 (1984)，1581.
- 21) Y. Kakino et al：Proc. of 1998 Japan-USA Symposium on Flexible automation, 259.

(1998年11月2日受付)