

# 切 削 技 術 の 進 歩

大阪大学工学部 長 谷 川 嘉 雄

## はじめに

近年切削技術は急速な発展を続けて、高能率、高精度の加工ができるようになった。これには切削工具材料の進歩が大いに貢献している。すなわち切削工具材料の進歩によって高速切削、重切削が可能となり、高速切削で切削の能率化、高精度化が実現され、また重切削で切削の能率化が実現された。高精度の切削を目ざしての加工法には高速切削のほかに低温切削、超音波振動切削、反転仕上削りなどがあげられる。これらの切削加工法は益子、隈部両氏の考案によるもので、低い切削速度のもとで仕上面の向上をねらうものである。

一方被削材のほうは科学技術が飛躍的發展をなすにつれて、たとえばジェットエンジンやミサイルに用いるある種の耐熱、強靱合金などのように、普通の切削では加工が困難なものが要求される。このような材料を切削するには加熱切削の方法がきわめて有効である。加熱切削の実用化には当然耐熱性の高い工具材料が必要である。

以上述べたように切削工具材料の進歩がなくては切削技術の進歩はありえないので、まずはじめに切削工具材料の進歩について述べ、次に上にあげた個々の特殊切削法について述べる。

## I. 切削工具材料の進歩

金属切削用の工具材料としては長い間炭素鋼が用いられ、この工具による鋼の切削速度は5~6 m/minであった。ところが1868年 Robert Mushet により空気中の冷却でも硬化する Mushet 鋼が発明され、切削速度は鋼に対して11m/min に引き上げられた。

1898年 F.W. Taylor が切削作業の合理化をはかるために行なった切削に関する研究の副産物として高速度鋼を発明し、切削技術は大きな進歩をもたらした。鋼の切削速度は16~20m/min まで上昇した。この初期の高速度鋼は次第に改良されて性能はますます向上した。すなわち1904年 Mathews によって18-4-1鋼 (18%W, 4%Cr, 1%V) が発明された。高速度鋼にコバルトを含有させると切削性能がよくなるのが1906年以降に知られ、1925年にはコバルトを多量に含有した超高速度鋼が発明され、鋼の切削速度は35~40m/min に上昇した。

またドイツでは炭化タングステンを主成分とし、これ

をコバルトをバインダとして焼結したものが始めて作られ、1927年クルップ社が Widia と名づけて市場に出した。Widia とはダイヤモンドのように硬いという意味である。この初期の超硬工具では高速度鋼の数倍の切削速度が得られたとはいえ、靱性が乏しく、また鋼切削において切くずが工具すくい面と溶着してくぼみ摩耗すなわちクレータ摩耗を生じて使用に耐えなかった。そこで高温においても鋼との溶着をおこしにくい炭化チタニウムを添加した鋼切削用超硬合金が生れた。その後超硬合金製造技術はさらに進歩し、あらたに炭化タンタラムの添加により鋼切削用品種の靱性が増し、従来より一層の高速切削が可能になる一方、初期の超硬合金の2倍以上の靱性を与えることができるようになった。かくて低速から高速まで、軽切削から重切削、断続切削まで広く使用されるようになり、切削加工に大きな改革をもたらした。工作機械の画期的発達を促した。

しかし技術の進歩は超硬合金よりさらに高速切削可能なセラミック工具材料の出現をうながした。これは酸化アルミニウムを主成分として焼結したものである。歴史的にはすでに1935年頃からドイツで用いられているが、鉄鋼の切削に本格的に用いられたのは1955年頃からである。日本に最初に紹介されたのはイギリスの Sintox である。セラミック工具の出現により非常に硬い材料の切削が可能となり、また従来よりも高速度の切削 (300~500m/min) ができるようになったが、何といたっても現

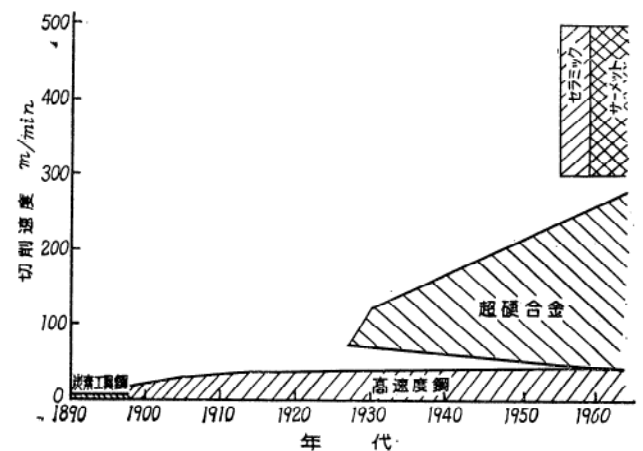


図1 切削工具材料の進歩

在のところ、もろいという欠点がある。そのためこれを使用するための工作機械に制限があり、あまり大きい衝

撃のかかる切削に耐えない。そのため非常にさわがれて出現したわりに現在足ぶみ状態であるが、今後の発展が期待される。

最近ではセラミック工具の脆性を補う意味で炭化チタニウムを主成分とした工具がサーメット工具と呼ばれて出現した。この工具はセラミック工具と同程度の高速切削が可能で、この点では超硬工具をはるかにしのぐので大いに期待される新しい工具であるが、いまのところ靱性の点では超硬工具に及ばない。

図1は切削工具材料の進歩により切削速度がいかに変わったかを示すものである。

## 2. 特殊切削法

### 1. 高速切削

上述したように切削工具材料の進歩によって切削速度はますます高速化されてきた。切削速度を高めて切削すると次にあげるような利点がある。

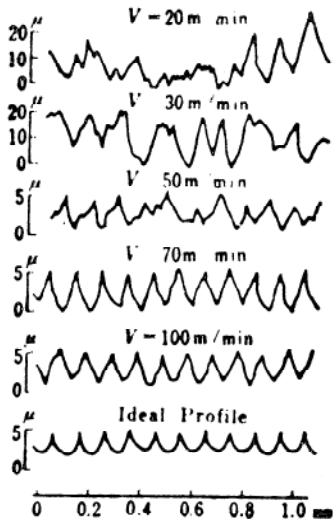


図2 切削速度による仕上面あらさの変化 (佐田)

被削材：クロムモリブデン鋼 SCM4

工具：超硬 S<sub>2</sub> すくい角 0°

切込：2mm

送り：0.1 mm/rev

(i) 切削能率の向上 切削速度を高めるほど単位時間当りの切削体積が増大し、切削能率が向上する。

(ii) 仕上面の改善と寸法精度の向上 図2に1例を示すように切削速度を高めると仕上面あらさは次第に良好となる。図示の場合には切削速度が100 m/minになると規則的な波形におちつき、仕上面あらさは一定になる。この原因の一つとして切削速度の上昇による構成刃先の消滅が考えられる。構成刃先とは軟鋼、アルミニウムなどのような柔軟な材料を切削するとき、切くずの一部が刃先に付着したものであって、きわめて硬くこれが実際の切削を行なう。また構成刃先が消

滅すると、構成刃先による過切込みがなくなるので、仕上寸法が所期の寸法に近くなり工作精度が向上する。

(iii) 加工変質層の減少 切削工具により金属の表面が一定方向に切削されると、切削抵抗のために仕上面

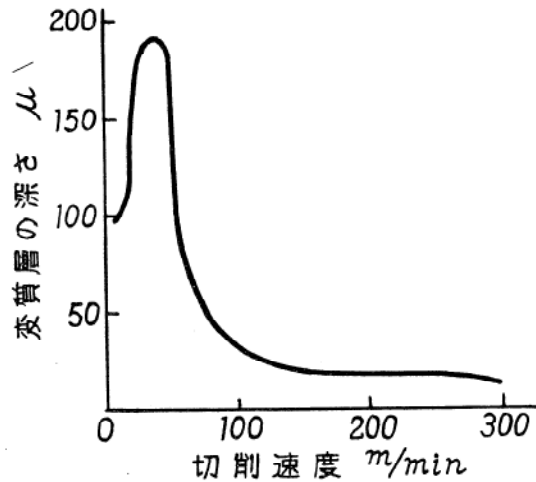


図3 変質層の深さに及ぼす切削速度の影響 (Swidlo 他)

に加工によって変質した層を生ずる。これを加工変質層という。図3に示すように、加工変質層の深さは低速領域を除くと、加工速度の増加によって一般に減少する傾向をもっている。このことは仕上面の性質として望ましい。

以上のように高速切削すればいろいろの利点があるが、他方切削速度が高くなると発熱量が増して切削温度が高くなり、工具の寿命の低下あるいは切削不能という現象が生じる。

ところで図4は Salomon による切削温度と切削速

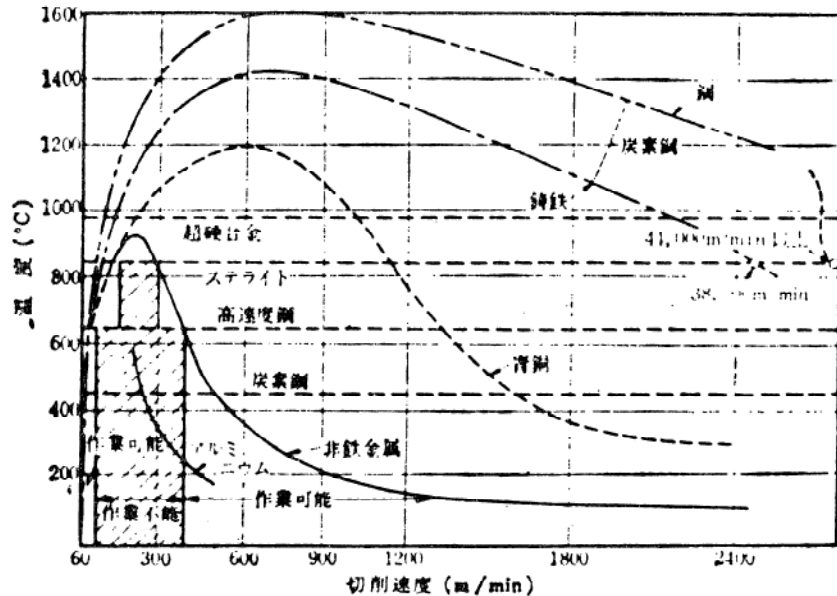


図4 Salomonの切削温度と切削速度の関係を示すもので、アルミニウム、銅および青銅のよ

うな非鉄金属を非常に高速度でフライス削りして得たものである。これによれば切削温度は初めは速度とともに上昇するが、ある所で最大値をとり、その後はかえって低下する。この結果から鋼や鋳鉄の場合における曲線を推定し、図4に一点鎖線、二点鎖線で示すような関係を発表した。この際工具の耐えうる温度で各曲線を水平に切ったとき、曲線がその水平線より上に出ていると、その領域に対する速度では切削が不能になる。この切削不能の範囲を死の谷と呼んだ。

切削工具や工作機械の進歩によって切削速度が上げられるようになると、多くの人が Salomon の提唱を確かめるため、切削速度をできるだけあげて超高速切削を行なった。その結果、一般に切削速度が図4の傾向をたどることについては否定的な見方が強い。

しかし、最近の航空機、ミサイルなどにおいては耐熱、強靱合金が使用される割合が多くなり、これらの材料は従来の加工法では加工能率が非常にわるい。超高速切削ならばあるいはこの問題が解決できるかも知れないという希望のもとに再び超高速切削への挑戦が開始されている。

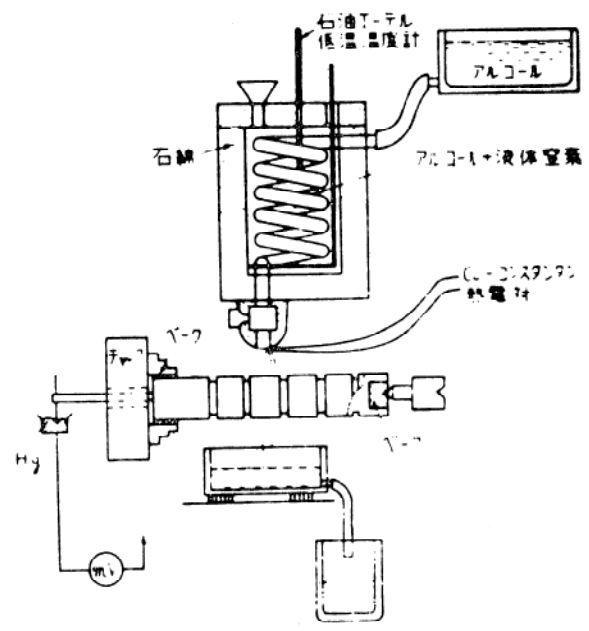


図5 低温切削装置  
銅の場合は全然効果が認められない。  
この低温切削法はブローチ加工などのように低い切削速度で加工が行なわれる分野には効果的である。ただし

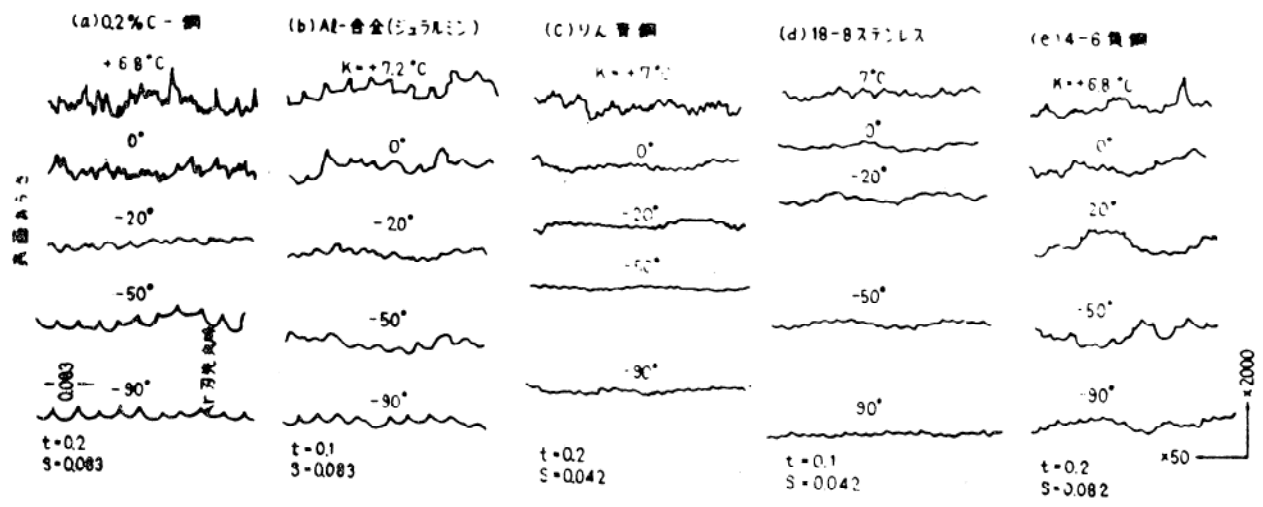


図6 低温切削における仕上面あらさ (益子, 隈部)

## 2. 低温切削

図5は益子, 隈部両氏が用いた低温切削装置で、冷却剤として液体窒素で冷却したメチルアルコールを使用し約1l/minの量で工作物にかけ、 $-90^{\circ}\text{C}$ までの各種低温が得られる。図6は得られた面のあらさ曲線である。この図から次のことがわかる。すなわち鋼の場合がもっともめいりょうな差を示し、常温では構成刃先のため面が非常にむしれているが、 $-20^{\circ}\text{C}$ では構成刃先は認められず、それ以下の温度では刃先の形状そのままの幾何学的送りマークが認められる。アルミニウム合金は $-90^{\circ}\text{C}$ まで冷却しないと構成刃先はとれない。りん青銅、18-8ステンレス鋼ではあまりよい結果は得られず、黄

銅のように低温ぜい性もなく、常温でも溶着現象のおきにくい材料では低温切削の効果はない。

## 3. 反転仕上削り法

図7において左から右へ向かって荒削りをすると、工作物表面の結晶粒は図の左方に示したように切削方向に大きくひずむ、このようにひずんでいる荒削り面をさらに荒削りと同方向に切込みを浅くして仕上切削を行なうと、仕上面の結晶粒は図の右方に示すようにさらに流れる。このひずみは仕上切削回数を繰返して行なうほどますます増加される。

ところが荒削り方向と逆方向から仕上削りを行なうと、切削方向に大きく流れた結晶粒の塑性変形した大部分を

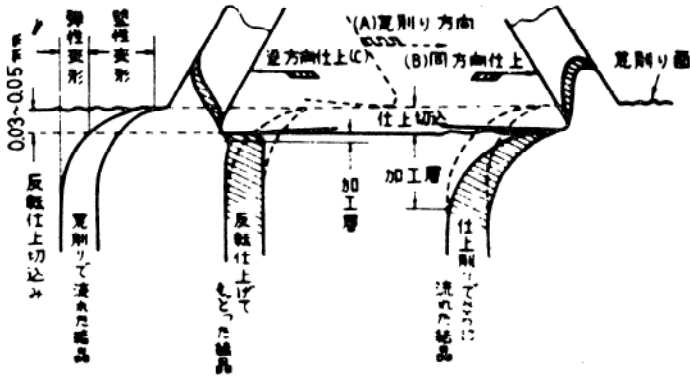


図7 反転仕上削りの図解 (益子, 隈部)

削り取ると、下の弾性変形の部分はもともどおり、加工面の残留ひずみが非常に少なくなって仕上面あらさが向上する。これが反転仕上削り法である。反転仕上削り法では荒削りによりうけた塑性変形部分を削り取ることが必要であって、この量は炭素鋼の場合0.03~0.05mmが最適である。

反転仕上削りを実施するには図8に示すように、(a)の平削りではバイトを荒削りと逆方向から切削させ、(b)の旋盤外丸削りでは品物を左右反転して仕上削りすればよい。(c)の穴加工ではドリルまたは荒リーマ通した穴の反対側から仕上げリーマ通しすればよい。

仕上げ面あらさの1例として図9に平削りにおける同方向仕上げと反転仕上げの仕上げ面あらさを示す。また図10は700°Cで30分焼なましした0.1%炭素鋼の外周に角ねじを切り、これを二次元切削したものの表面加工層を示している。(A)は最初に荒削りしたもので、(B)は荒削り

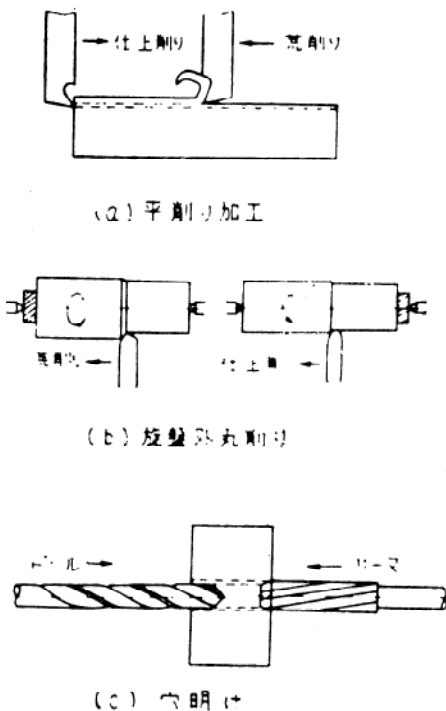


図8 反転仕上削り方法 (益子, 隈部)

と同方向に0.05mmの切削厚さで仕上げ削りしたもので、(C)は(A)を逆方向に0.05mm反転仕上削りしたものである。(B)では荒削り面より表面かたさは上昇しているが、反転仕上削りでは表面まで母材かたさはほとんど変わっていない。

#### 4 超音波振動切削

バイトに超音波振動を与えて切削加工を行なうもので、振動の与えかたはバイトの刃先が切削方向に振動する場合がもっとも効果的である。図11に超音波振動切削装置を示す。図において(1)は振動子で冷却槽内に入れられている。(2)はホーンでexponential形の円すいをなし、振動の機械的増幅に役立つ。(3)は締付ボルトで振動の節でホーンを固定する。バイトはホーンの先に銀ろう付けしてある。

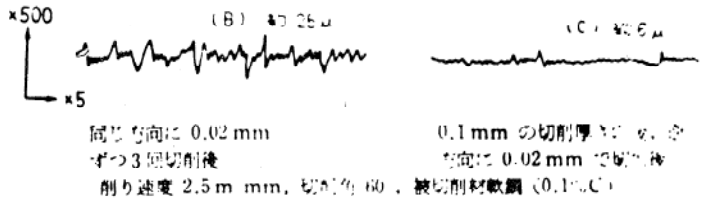


図9 平削りにおける同方向仕上げと反転仕上げの仕上げ面あらさ (益子, 隈部)

超音波振動切削の主な効果は次のとおりである。

(i) 切削抵抗の減少 図12のように普通の切削にくらべ、非常に小さな値を示しており、ほとんど刃先の力だけで破壊されているようである。

(ii) 仕上げ面あらさの向上 図13はアルミニウムを0.2m/minという非常に遅い切削速度、0.05mmの切削厚さで平削りした場合の仕上げ面あらさで、振動を与えない場合は完全なむしれ形切くずとなるが、18.5kcの振動を与え、振幅をだんだん大きくしてゆくと完全に流れ形切くずとなって、振幅5~6μmのとき仕上げ面がもっともよくなり、数百メートルの高速切削のときと同様なよい面が得られる。

(iii) ばりのない加工 普通切削ではせん断面前方

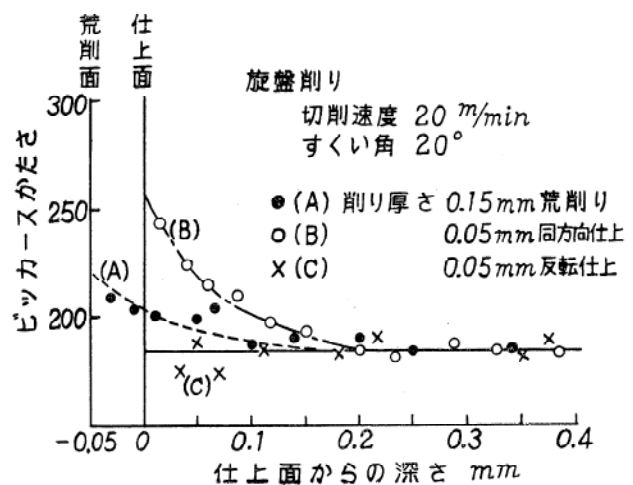


図10 荒削りおよび仕上げ削りにおける加工硬化層 (益子, 隈部)

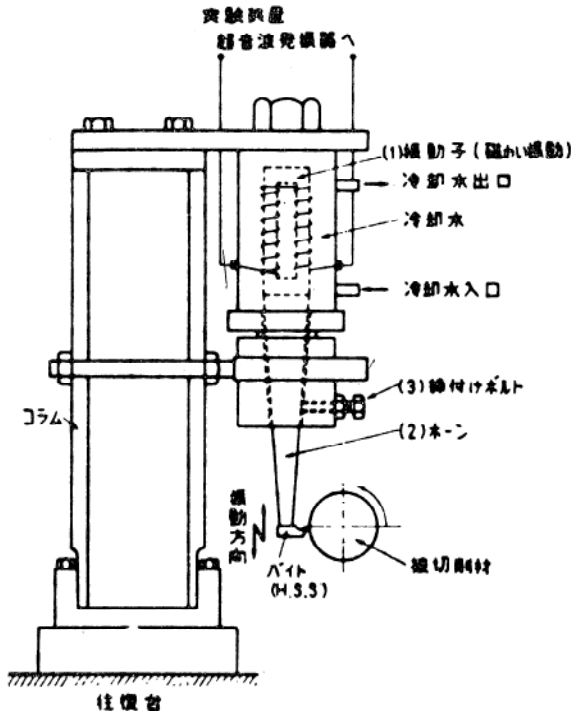


図11 超音波振動切削装置 (益子, 隈部)

に大なり小なり塑性域を生じないと切削加工ができないから、これが工作物表面にばりとなって残るが、超音波振動切削では全然ばりが生じない。したがってばり取工程をはぶくことができるので、切削時間が多少長かかってもコスト低減に役立つ。

しかし高価な超音波発生装置を必要とするのが欠点で

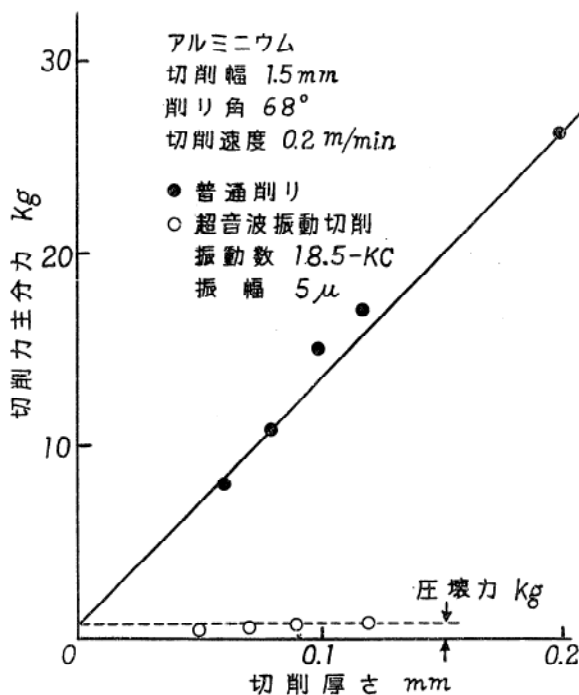


図12 超音波振動切削と普通削りとの切削力の比較 (益子, 隈部)

ある。

### 5 加熱切削

加熱切削は1941年ドイツのクルップ社が大きな鋼塊の荒削りに用いたのが最初とされている。

加熱切削の主な利点は次のとおりである。

(i) 切削困難な材料の切削が可能 ジェットエンジンやミサイル用の耐熱合金や焼入れ鋼のように常温では非常に硬くて削れないような材料も切削可能になる。

(ii) 切削抵抗の減少 図14に示すように切削抵抗が常温における切削の $\frac{1}{2}$ 程度にまで減少するから動力が少なくてすみ、また同じ工作機械を使って重切削ができる。

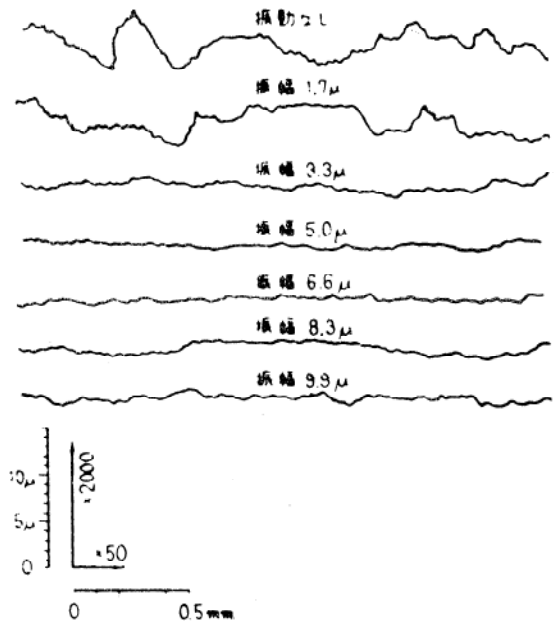


図13 アルミニウムの仕上面あらさ (益子, 隈部)

(iii) 仕上面あらさの向上 切くずが流れ形になって切削抵抗の変動が少なくなること、構成刃先ができてくなくなることの二つの理由から仕上面は非常に平滑になる。図15に仕上面あらさの1例を示す。この場合には400°C くらいに加熱すれば $1\mu$ のあらさが得られる。これ以上温度を高めても仕上面は向上しない。

しかし一方次のような欠点がある。

(i) 加熱のために余分な装置や経費を要し、またその調整などのために作業者の手数が増す。

(ii) 加熱方法が不適當であると、工作物の熱膨脹によって寸法精度が低下したり、結晶組織が変化したり、工作機械をいためたりするおそれがある。

実際に加熱切削が使われているのは、常温では硬くて削れない材料の切削、あるいは常温で削れるが削りしろが多いときに、加熱によって材料を軟くし重切削して切削能率を高める場合などである。

被削材の加熱方法には全体加熱法と局部加熱法がある

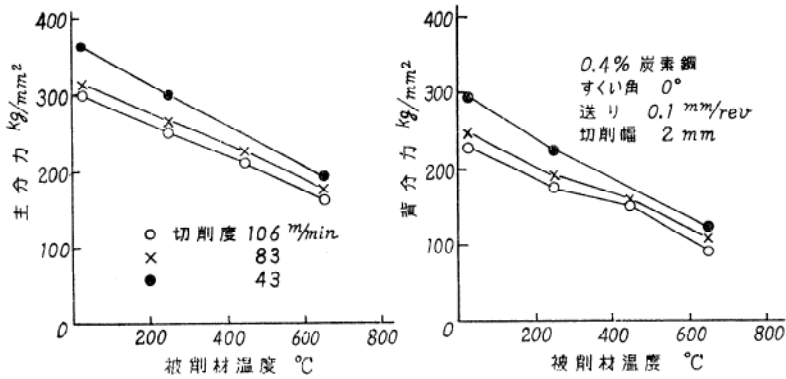


図14 0.4%炭素鋼の加熱による比切削抵抗の減少 (中山)

が、後者の方法では工具が進行する直前を局部的に加熱して、加熱した部分を直ちに削りとってしまうので、工作物内部はほとんど加熱されず、全体加熱法とはちがって熱膨脹が少く、加工精度が高い。また工作物の結晶組織はほとんど変化せず、表面も酸化しない。

局部加熱法には火炎加熱法、電気抵抗加熱法、高周波誘導加熱法、電弧加熱法などの方法がある。

以上狭義の切削加工すなわち刃物による加工について概略述べたが、切削加工法を広義に解釈して加工中工作物から不必要な部分を取り去る方法とみれば最新の加工法として電子ビーム加工、レーザー加工などがある。

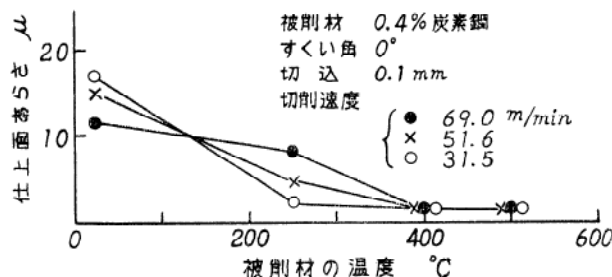


図15 加熱による切削方向の仕上面あらさの減少 (中山)

電子ビーム加工は高真空中熱陰極からでた電子線を電子レンズの作用で収束させて局部的に加熱することによって工作物を蒸発させるものであって、微小穴や複雑な形状のスリットなどの精密加工を行なうことができる。さらに従来加工困難だった金属類ならびに宝石やダイヤモンドの加工に威力を発揮するものと思われる。ただし $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$ mmHgの真空が要求されること、また高電圧を取扱うための危険性やX線防護の問題などがある。

レーザー加工は固体レーザーとして用いられるルビー棒に励起用光線が作用すると光子放射が連鎖的に誘導され、その出力光線が高エネルギー高指向性をもつことを利用して微小穴やスリットなどの精密加工を行なうものである。この加工は電子ビーム加工にくらべて大気中で行なうことが特長である。

### おわりに

切削は切削工具材料の進歩によってますます高速化、重切削化される傾向にある。しかしある種の被削材については低速で切削が行なわれる低温切削が有効な切削法として利用されるであろうし、超音波振動切削、反転仕上削り法もその特性をいかして今後の発展が期待される。

また加熱切削も、普通の切削では硬くて加工が困難な材料が要求される度合が多くなるにつれて、これらの材料の有効な切削法としてさかんに利用されてゆくであろう。

さらに、科学の進歩に伴い、電子ビーム加工、レーザー加工のような物理現象を利用した新しい方法が開発されていくものと思われる。