

# 金属基複合材料の切削加工技術

陳 平\*

Ping CHEN

High Performance Machining of Metal-Matrix Composites

## 1 はじめに

近年、金属基複合材料 (MMC) は優れた機械特性、高い比強度 (強度/比重)、比剛性 (剛性/比重)、耐摩耗性と熱的寸法安定性などをもつため、新しい高性能構造用材料として注目されている。MMCは鋳造、鍛造、粉末冶金、押出、圧延などの加工法で成形可能であるので、1970年代から台頭して以来、航空機、宇宙開発機械、原子力関連機械、繊維機械、自動車部品などに積極的に採用され始めている。自動車の排ガス浄化、出力向上、低燃費と軽量化に効くため、80年代初期よりMMC製ピストンを用いたディーゼルエンジンの量産が始まった<sup>1)</sup>。90年代のはじめに、MMCを使ったシリンダブロックが登場し、一部の普通乗用車のエンジンにも装備されている<sup>2)</sup>。MMCの需要量は毎年約20%近く増えつづけ、そのうち、アルミ合金複合材料が、2000年まで市場シェアを支配すると予測されている<sup>3)</sup>。

通常、成形後、MMCを実際の部品に使うために、二次加工が必要となる。各加工法のうち、切削加工は最も能率的、経済的な手段であるので、MMCの実用化に重要な役割を演じている。しかし、普通の金属材料の均一物質であることに対し、MMCは硬い異種物質 (強化素材) が母材に分散しているため、切削加工を行うとき、工具摩耗が激しく、加工に相当の困難が伴う。このことはMMCの実用化に大きな問題になり、機械加工技術には重大な課題となっている。MMCの高品位・高能率加工技術を確立するため、精密工学会切削加工専門委員会が1985年より新素材ワーキンググループを設け、4年間あまりにわたってMMCの切削・研削加工性について共同研究を行ってきた<sup>4)</sup>。現在も、これに関する研究は世界的に続けられている。本文はMMC材料の高能率切削加工技術について最近の研究成果を紹介する。

## 2 MMCの切削機構

MMCは強化繊維が母材金属に存在するため、被削性が悪く、切削機構も一般金属加工と異なる。多くの研究はまずMMC切削の機構、特に切削における繊維の破壊機構の解明を目指した。

研究方法の一つとして、走査型電子顕微鏡 (SEM) 内に切削装置を設け、MMCの極低速での二次元微小切削を直接に観察した研究がある<sup>5)</sup>。強化繊維の配置方式・方向がMMCの切削機構、繊維の破壊機構および仕上面生成に大きく影響を与えることが分かった。Fig. 1 (a) と (b) に長繊維MMC切削の観察例を示すが、繊維角が30°および60°では、繊維は工具によりせん断破壊され、他の角度では、繊維は曲げ破壊されることが判明した。また、繊維角は90°および120°の場合、切削点近傍の変形域が最も広く、仕上面性状が劣悪となることも分かった。

実際の切削加工条件における被削材の変形挙動の直接観察は非常に困難であるが、切削急停止法によって解明した研究がある<sup>6)</sup>。この方法は、切削急停止装置内に設けた切削

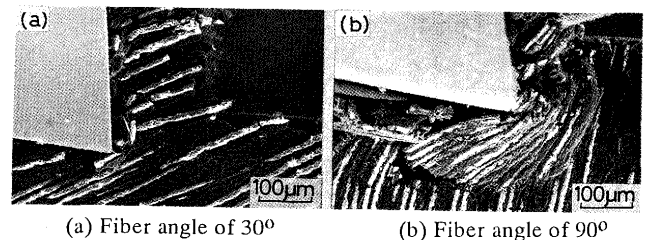


Fig. 1. SEM photographs show the effect of fiber angle on material deformation in cutting of fiber reinforced aluminum<sup>5)</sup>. (tool, carbide K10; V=20 $\mu$ m/s)

平成4年7月13日受付 平成5年9月10日受理 (Received on July 13, 1992; Accepted on Sep. 10, 1993)

\*豊橋技術科学大学助手 (Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibi-rigaoka Tempaku-cho Toyohashi 441)

Key words: metal-matrix composite; machining; drilling; tool wear; ultrasonic vibration; diamond-coated tool; rotary tool.

抵抗を受ける鋳鉄棒を衝撃せん断させることによって、工具-被削材間の相対速度を瞬間的に零にさせることである。

Fig. 2は、切削急停止法で得られた超硬工具切れ刃近傍の被削材断面のSEM写真で、SiCウイスキー強化アルミ合金(SiCw/Al)の切削における材料の変形挙動を示す<sup>6)</sup>。ウイスキーは刃先に到達する前に段々と曲げられ、もともと無方向に交錯し合っていたウイスキーが切削方向に押倒され、刃先の直前でばらばらに砕けていることが分かった。これらの非常に硬いSiC粒子は切れ刃を通過し、仕上げ面と切りくずの底面に分かれて流れ、工具表面にアブレイブ摩耗を引き起こすと考えられる。

には効果がほとんどない<sup>4)6)</sup>。また、強化繊維含有率の高いほど、MMCの切削では工具摩耗が激しくなる。工具材種の耐摩耗性については、超硬工具やTiNコーティッド工具やCBN工具も摩耗が速く進行するが、アルミナコーティッド工具が比較的的良好である。一方、焼結ダイヤモンド工具では摩耗の進行が非常にゆるやかである。しかし、フライスなどの断続切削の場合、ダイヤモンド工具の刃先が破損することがある<sup>9)</sup>。

### 3・1・2 仕上げ面品質

仕上げ面の表面性状は製品の信頼性に重要な影響を与える。MMCの仕上げ面の形態が切削工具の材種によって変わって来る<sup>6)10)</sup>。Fig. 3に示すように、超硬工具による仕上げ面では光沢があり、多くの繊維が短く破砕され、切削方向に押倒されている。これは工具摩耗によって仕上げ面表面変形が大きく、パニング作用が大きいためと考えられる。なお、焼結ダイヤモンドでは、切れ味の良いため、強化繊維(ウイスキー)を直接接触して破壊し、或は引抜き、仕上げ面表面に繊維の破面や微小な穴や溝が見られ光沢がない。また、表面に切削方向にほぼ垂直な繊維が多く、表面の変形が少ない。しかし、両者の表面粗さの差がほとんどない。

仕上げ面表面粗さに影響する因子を調べると、母材金属単体の加工では切削速度依存性が大きいのにに対し、MMCでは切削速度の増加に伴い粗さの変化がほとんどない<sup>4)</sup>。送り速度を早くすると送りマークが高くなるので表面粗さが増大するが、その影響の実験値が理論値より小さい<sup>7)</sup>。また、切削距離が増す(工具摩耗が進行する)につれて表面粗さがわずかに減少しているが、工具摩耗に対する依存性は認められない。しかし、超硬工具では、工具摩耗が激しいた

## 3 MMCの切削加工性

### 3・1 旋削加工

旋削加工は各種切削加工法の中に最も基本的なものであるため、MMCの切削加工、特に切削機構について多くの研究は旋削加工で行われてきた<sup>4)6)7)</sup>。以下は、主にウイスキー/短繊維を含有するMMCの旋削加工について説明する。

#### 3・1・1 工具摩耗

一般に、工具摩耗状態の観察および摩耗機構の究明は光学顕微鏡と電子顕微鏡を用いて行われている。MMC切削における工具摩耗観測の結果、超硬工具の摩耗がすくい面と逃げ面両面に発生したが、主たる摩耗は後者であることが分かった。工具逃げ面摩耗は切削速度に依存せず、切削距離に比例すると多く報告されている<sup>4)6)8)</sup>。このことは前述した工具のアブレイブ摩耗機構と一致している。生産の効率化を考慮すると、MMCの切削をなるべく高速、重切削で行ったほうが有利である。切削油剤の使用は工具摩耗軽減

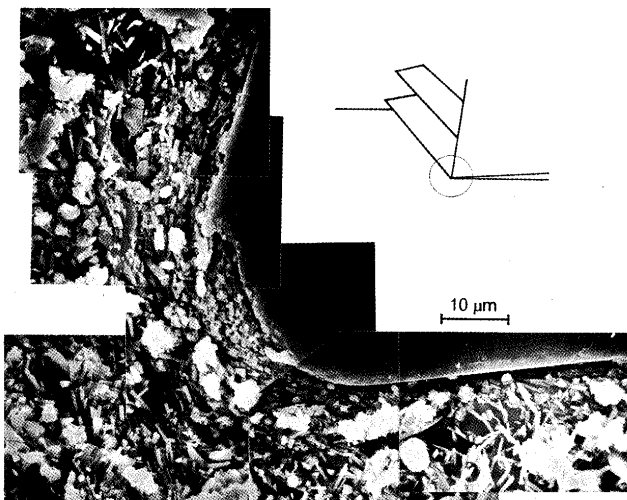


Fig. 2. Behavior of SiC whiskers in front of the cutting edge<sup>6)</sup>. They are broken into pieces and extruded towards the machined surface and chip underlayer.  
(tool: carbide K10; V=33m/min; SEM photograph)

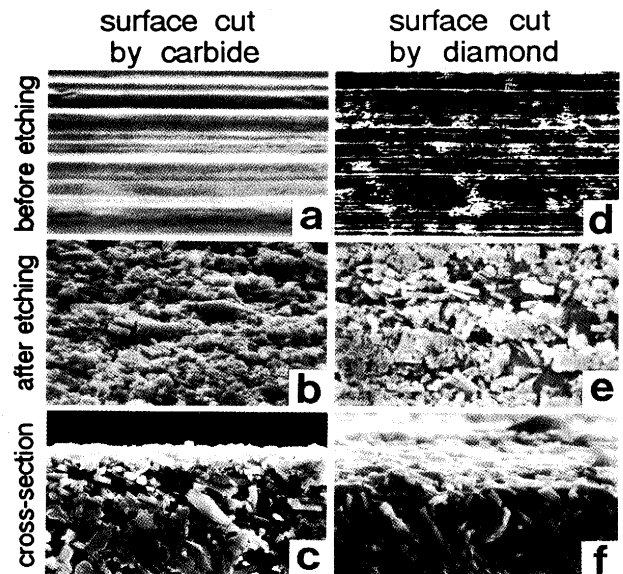


Fig. 3. Comparison of microstructures of the machined surfaces<sup>6)</sup>.

めに加工精度が低い。

### 3.1.3 切り屑

一般に、切り屑の形状は、材料物性および切削変形の条件に影響される。母材金属に比べ、MMCは脆く、その脆性は強化繊維の含有率が高くなればなるほど高くなる<sup>11)</sup>。そのため、切削におけるMMCの変形が不均一で、せん断面に集中して鋸歯状切り屑を生成する<sup>4)6)12)</sup>。SiCw/Alの場合、一般に切り屑がある長さまでつながっているため切り屑処理上に特に問題がないが、高速切削時に切り屑の各セグメントが分離して粉末状になる<sup>9)</sup>。

### 3.2 穴あけ

#### 3.2.1 短繊維MMCの加工

穴あけ加工は機械加工のなかで重要な加工である。短繊維MMCの穴あけ加工について多くの研究が行われてきた<sup>9)12)13)</sup>。穴明けの基本的な切削原理は旋削加工と同じであるので、主な実験結果も上述のMMCの旋削加工と一致している。

ドリル摩耗の形態は旋削加工と同じくアブレイブ摩耗である。摩耗は切削距離に比例して切れ刃全長とチゼルエッジにも発生する<sup>4)</sup>。最大摩耗幅はドリルのコーナー近くにある。同じ深さの穴明けをすると、送り量が大きいほど実際の切削距離が短くなるため、摩耗が少ない。したがって、前述の旋削加工と同様に他の条件が許す限り、高速、高送り切削とすべきである。

工具材種の耐摩耗性については、超硬ドリルの寿命が高速度鋼(HSS)ドリルより10数倍に延長される(Fig. 4参照)<sup>12)</sup>。TiNコーテッド超硬ドリルは、寿命と表面粗さの両者とも比較的優れている。一方、多結晶ダイヤモンドチップを使用したドリルが一定条件で超硬ドリルより1500倍の工具寿命もあると報告されている<sup>9)</sup>。

#### 3.2.2 長繊維MMCの加工

M40炭素長繊維を70%含むCF/AC 4の穴加工実験の結果、超硬合金およびHSSドリルの損傷は同じくアブレイブ摩耗が支配的であることが分かった<sup>4)</sup>。この場合、超硬ド

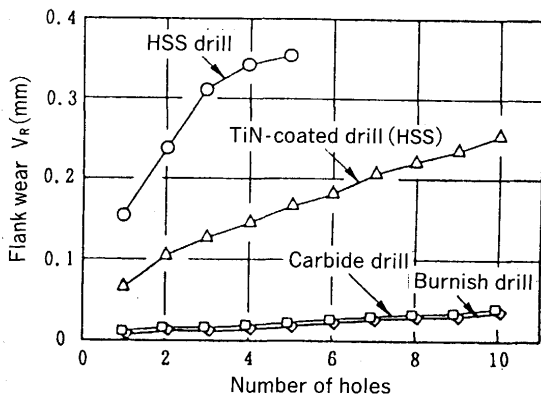


Fig. 4. Comparison of flank wear curves of different tool materials<sup>12)</sup>.  
(work, SiCw/6061; drill,  $\phi$ 6mm;  $n=415$ rpm;  $t=6$ mm)

リルはHSSドリルに対し2~3倍の耐摩耗性を示している。

穴加工で得られた仕上面は、繊維の毛羽立ちなどは見られず比較的良好であると報告されている<sup>4)</sup>。また、穴出口では繊維の毛羽立ちが発生するが、超硬ローソク形ドリルによるかえりが最も小さく、長繊維MMCの穴加工には推奨されている。

## 4 MMCの特殊加工法/加工工具

前述したように、一般工具では激しい工具摩耗が発生するため、MMCの切削は困難で、加工コストも非常に高い。この問題に対処するため、MMCの被削性を考慮し特殊な切削法/加工工具が提案され、評価されている。以下、それらを紹介する。

### 4.1 超音波振動切削

超音波振動切削は、切削工具を一定の振幅・周波数で超音波振動させながら切削加工を行う切削法である。各方式の振動に切削方向に振動する方法がもっとも効果的である<sup>14)</sup>。

Fig. 5に、旋削用超音波振動切削装置の例を示す<sup>15)</sup>。電気発振器により20kHzの方波電圧信号によってピエゾセラミックスを振動させる。振幅はステンレス鋼製のホーンによって拡大され、切れ刃のところで最大振幅が得られる。

SiCw/Al複合材料に対し旋削実験した結果、振動切削を行った場合、通常切削に比べ超硬工具の平均摩耗速度が約50%減小し、工具寿命が約2倍延長している<sup>15)16)</sup>。なお、超音波振動切削法は繊維強化プラスチック(FRP)などの他の複合材料の切削にも有効であると報告されている<sup>17)</sup>。

MMC切削に超音波振動切削の機構を究明するために、切削した仕上げ面表面の変形挙動を腐食後SEMで観察した<sup>15)</sup>。その結果、従来切削の表面変質層(Fig. 3参照)に対照的に、振動切削の仕上げ面では多くのウイスキーがまだ変形前のように無方向に分布している。このことによって、振動切

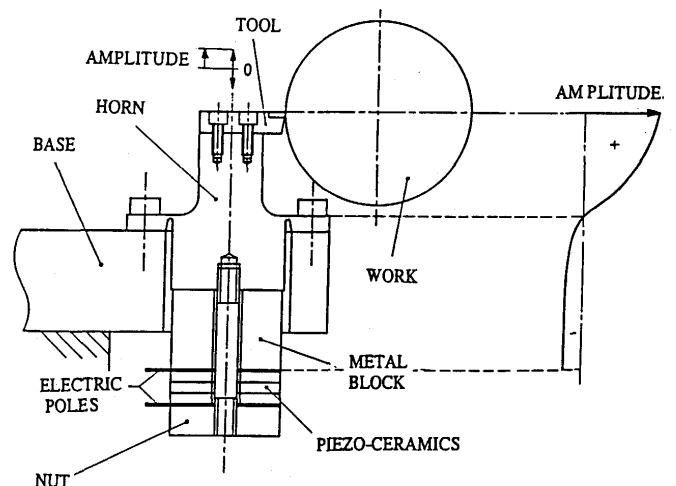


Fig. 5. Set-up of the ultrasonic vibration cutting device<sup>15)</sup>.

削では材料の変形が小さく、ウイスキーの破断も容易になることが分かった。被削材に高周波衝撃力を与えれば、脆いウイスキーの破断を容易にし、工具摩耗の低減に有効であると考えられる<sup>15)~17)</sup>。

超音波振動切削法は旋削加工のほか、超音波スクリュー振動による穴あけやネジ立てなどの加工にも応用できる<sup>18)</sup>。

4.2 ダイヤモンドコーテッド工具

ダイヤモンド工具はMMC切削に最も適した工具であるが<sup>4)6)</sup>、コストの高い欠点がある。近年、低圧気相合成法などによる膜状ダイヤモンドの合成技術が発展し、それを切削工具に応用し新しいコーテッド工具が誕生した<sup>19)20)</sup>。

実験的評価した結果、ダイヤモンドコーテッド工具は、過共晶Al-Si合金やFRPなどの難削材の切削に効果的であることが分かった<sup>21)22)</sup>。Fig. 6にFRP(繊維含有率52.1%)旋削における各工具の摩耗曲線の比較例を示す。ダイヤモンド

コーテッド工具は焼結ダイヤモンド工具で切削した場合とほぼ同程度の耐摩耗性および仕上面が得られる<sup>23)</sup>。同工具はMMCの切削にもダイヤモンド工具と同等な優れた切削性能を有すると期待できる。

しかし、薄いダイヤモンド膜が一旦摩耗して母材が露出すると、摩耗が激しくなる<sup>23)</sup>。また、ダイヤモンド膜と工具母材との付着強度などが切削中膜の破壊に影響を与える<sup>21)24)</sup>。だが、同工具の高性能化とコストダウンをはかる研究およびダイヤモンドコーティング技術の発展がつづき、エンドミル、ドリルなどの複雑な形状を有する工具にも応用可能であるため、ダイヤモンドコーテッド工具は難削材用切削工具として注目され期待されている。

4.3 従動式ロータリー切削法

従動式ロータリー切削法は、円板状チップが切削中、切れ刃に切削負荷が加えられることにより、回転しながら切削を行う加工法である(Fig. 7参照)。従来型工具の固定した切れ刃の一ヶ所だけに対し、ロータリー工具では切れ刃全周が循環しながら切削に関与する。また、工具-工作物間転がり運動が生じ、相対滑り摩擦および切削温度が低減する特徴がある。

ロータリー切削の原理は1950年代の初期より研究されてきて<sup>25)</sup>、Ti合金や超耐熱合金などの難削材の切削に適用すると報告され<sup>26)27)</sup>、米国が中心に実際の生産に使用されはじめている<sup>28)</sup>。最近、同切削法がMMCの切削にも提案され、その適用性について実験的に評価された<sup>29)30)</sup>。

Fig. 8にSiCw/Al複合材料の旋削加工における各種工具の摩耗曲線の比較例を示す<sup>29)</sup>。超硬合金製四角形工具および丸形固定工具の急速な工具摩耗に対し、同超硬合金製ロータリー工具では、工具摩耗が切れ刃に沿って均一に分散され、焼結ダイヤモンド工具とほぼ同等な優れた耐摩耗性を示した。

工具寿命に対する切削速度の影響をFig. 8に示す。工具寿命は逃げ面の最大摩耗幅が0.3mmに至るまでの切削時間、ま

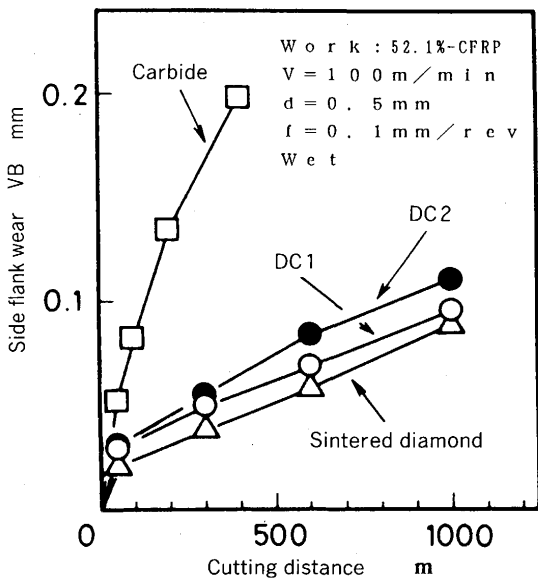
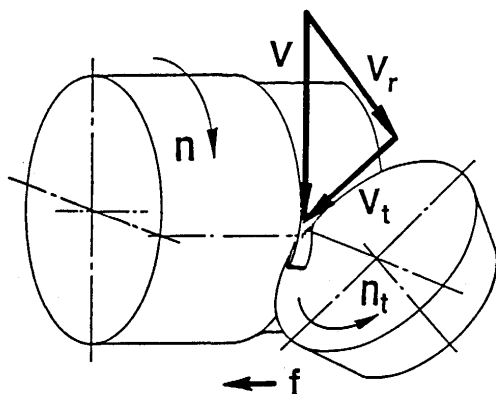
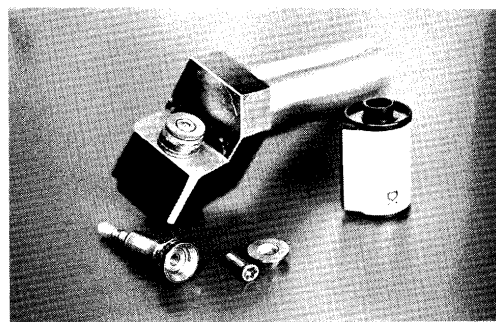


Fig. 6. Tool wear in cutting 52.1%-CFRP<sup>22)</sup>. (DC 1, 2: diamond-coated tool 1,2)



(a) Rotary cutting model.



(b) Rotary Cutting Tool.

Fig. 7. Self-propelled rotary cutting tool. The circular insert turns while it cuts.

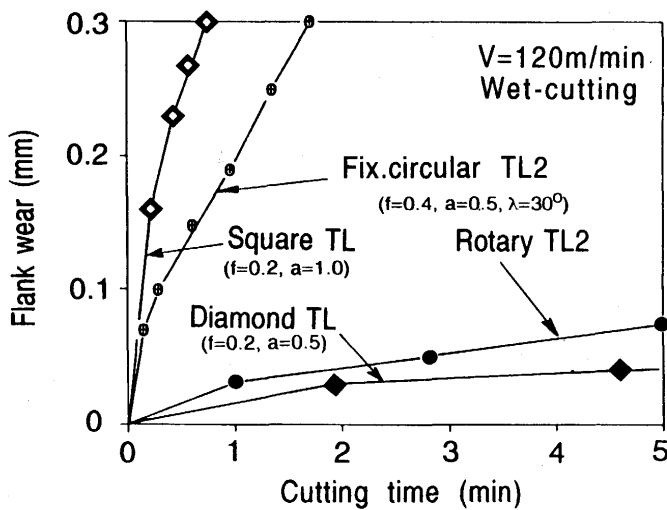


Fig. 8. Comparison of wear curves of the different tools in cutting SiCw/Al composite<sup>29)</sup>. The rotary carbide tool exhibits superior wear-resistance comparable to the poly-crystalline diamond insert.

たは切削距離とした。同図によると、丸形工具と四角形工具の工具寿命が何れも数十秒のものに対し、ロータリー工具の工具寿命が従来型工具より大幅に延長することが分かった。一定条件で同工具寿命は丸形工具より50倍、四角形工具より110倍以上も延びた<sup>30)</sup>。

なお、ロータリー工具に丸形チップが使用されているため、同切削法が外周や平面などの曲率半径の大きい曲面の加工に制限されている。

## 5 おわりに

金属基複合材料は従来の加工方法および工具を用いて、希望の形状と寸法に加工することができるが、激しい工具摩耗のことが同材料の高エネルギー加工上で最も大きな制約となる。MMCは特殊な構造をもつため、切削加工においては、それらの材料特性および加工特性を考慮し特殊な加工技術で行わなければその制約を抑えることは困難である。具体的な加工要求に応じて切削工具・工具材種、加工方法および加工条件を適正に選択すれば、MMCの高エネルギー加工が可能であると思われる。

最後に、日頃ご指導頂く豊橋技術科学大学星鐵太郎教授、堀内宰教授、小林俊郎教授に心より感謝致します。

## 文 献

- 1) 菅沼徹哉, 田中淳夫: 鉄と鋼, **75** (1989), p.376
- 2) 原田 衛: 日経メカニカル, **5** (1991), p.54
- 3) News at a glance, Adv. Materials & Processes, **135** (1989), p.13
- 4) 切削加工専門委員会: FRMの切削・研削加工性(被削性小委員会研究報告), (1989), [精密工学会]
- 5) 花崎伸作, 峠 陸, 宮本 猛, 藤原順介: 精密工学会誌, **56**(1990),

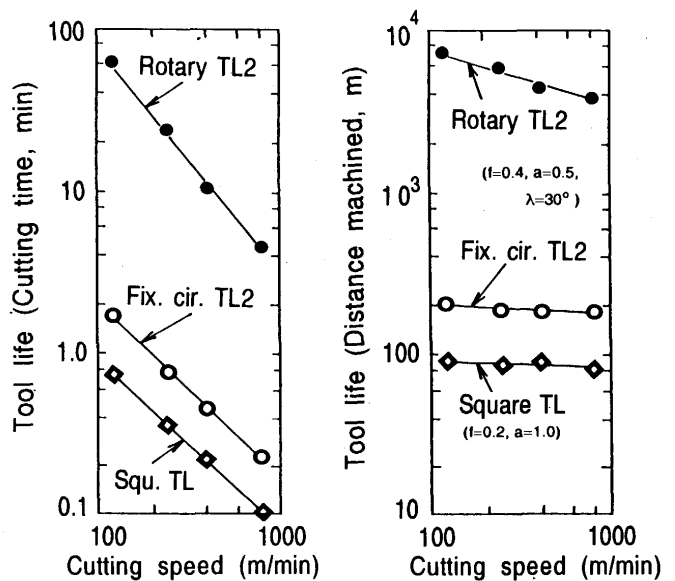


Fig. 9. Tool lives as a function of cutting speed. Carbide tool life has been enhanced dramatically by rotary cutting<sup>30)</sup> (tool, K10; work, SiCw/Al).

- p.2225
- 6) P.Chen and Y.Miyake: Proc. of Int. Conf. & Workshop on Factors Infl. Machining (1989), p.69 [ASM Int.]
- 7) N.Tomac, K.Tønnessen: CRIP Annals 1992, **41** (1992), p.55
- 8) 花崎伸作, 藤原順介, 峠 陸, 深江 守: 1989年度精密工学会秋季大会講演論文集, (1989), p.463 [精密工学会]
- 9) L.Cronjäger, D.Meister, CRIP Annals 1992, **41** (1992), p.63
- 10) 新井 実, 中山一雄, 王 曉渡: 精密工学会誌, **57**(1991), p.172
- 11) T.Kobayashi, M.Yosino, H.Iwanari, M.Niinomi, K.Yamamoto: Proc. of Int. Symp. on Advances in Cast Reinforced Metal Comp. (1988), p.205 [ASM Int.]
- 12) 森内祐之, 小川 誠, 中山一雄: 昭和63年度精密工学会秋期大会講演論文集, (1988), p.81 [精密工学会]
- 13) FRMのドリル加工, 加工データファイル, (1988) Mar., [動機振興協会技術研究会]
- 14) 隈部淳一郎: 精密加工超音波工学-基礎と応用(1979), [実教出版(株)]
- 15) 星 鐵太郎, 田村成昭, 陳 平: 技術・分析・工作センター年報, **10** (1991), p.85 [豊橋技術科学大学]
- 16) 大石健司: 精密工学会誌, **56** (1990), p.1253
- 17) 飯島 昇: 機械と工具, **31** (1989), p.709
- 18) 鈴木康夫, 加茂 進, 宇野正美: 精密工学会誌, **57**(1991), p.1023
- 19) 奥住文徳, 松田順一, 見義一兄: 粉体および粉末冶金, **35**(1988), p.30
- 20) 大竹尚登, 木本裕司, 吉川昌範: 精密工学会誌, **55**(1989), p.1945
- 21) 渡邊政嘉, 吉川昌範: 精密工学会誌, **56** (1990), p.2237
- 22) 鳴滝則彦, 山根八州男, 白井 年, 鳥野伸也, 伊藤利通: 1990年度精密工学会春季大会講演論文集, (1990), p.839 [精密工学会]
- 23) 木曾弘隆, 渋谷邦夫, 田口富雄, 町田清治: 1990年度精密工学会秋季大会講演論文集, (1990), p.357 [精密工学会]
- 24) M.Murakawa, S.Takeuchi: Diamond and Diamond-Like Films and Coatings, (1991), p.757 [Plenum Press]
- 25) M.C.Shaw, P.Smith and N.Cook: Trans. of ASME, **74**(1952), p.1065
- 26) 岩田一明, 元田隆文: 精密機械, **37** (1971), p.425
- 27) R.Komanduri, D.C.Flom & M.Lee: High Speed Machining, PED-Vol. **12** (1984), p.15 [ASME]
- 28) F.Mason: American Machinist, **135** (1991), p.43
- 29) 陳 平, 星 鐵太郎: 精密工学会誌, **57** (1991), p.1792
- 30) P.Chen: CIRP Annals 1992, **41** (1992), p.59