6061アルミニウム合金基複合材料 切削時の工具摩耗機構

花崎 伸作*・宮本 猛*・藤原 順介*
安富 雅典**・峠 睦***

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 49, No. 3 (1999), pp. 112-117

Tool wear mechanism in cutting short fiber reinforced 6061 aluminum alloy composites

Shinsaku HANASAKI*, Takeshi MIYAMOTO*, Junsuke FUJIWARA*
Masanori YASUTOMI** and Mutsumi TOUGE***

To clarify the tool wear mechanism in cutting fiber reinforced metal (FRM), turning three kinds of FRM were carried out. They are two kinds of SiC whisker reinforced Al (A6061) and Al_2O_3 short fiber reinforced Al (A6061). In cutting them, it is known that severe tool wear is observed. So, the tool wear mechanism in cutting them was investigated. Tool materials were five kinds of cemented carbides, two kinds of ceramics and the sintered diamond. In comparison in the cemented carbides, there is the difference of the tool wear by the Co content, the hard grain of the tool and the grain holding strength of the binder. And there is the difference of the wear mechanism in comparison in the three work materials. In cutting SiC whisker reinforced Al (A6061) with the cemented carbide, the tool wear seems to progress due to both of the simple abrasive wear and the falling off of the hard grains. This falling off is produced so that the binder is cut away by the very thin whisker. On the other hand, that in cutting Al_2O_3 short fiber reinforced Al (A6061) seems to progress due to only the simple abrasive wear. In cutting with two ceramic tools, the severe tool wear is observed in spite of the high hardness. In the diamond tool, the tool wear is very small and this is the most suitable tool in cutting FRM.

(Received July 8, 1998)

Keywords: FRM turning, tool wear mechanism, tool materials, Al_2O_3 short fiber, SiC whisker

1. 緒 言

繊維強化アルミニウム (FRM) は優れた高温強度特性、耐摩耗性を有しており、航空機用部品をはじめ自動車用部品、医療用機器の部品などへ利用されてきている。しかし、使用に際して切削加工を施す場合、含有されている硬質繊維のために工具摩耗が激しく、FRMの切削は容易ではないことが知られている。

複合材料のうち粒子強化金属の切削に関する報告は数多くなされており、工具摩耗に影響を及ぼす要因として粒子の硬度と含有量^{1)~3)}、粒子を取りまく母材の変形能⁴⁾が挙げられ、それら要因と工具摩耗との関連性が明らかになっている。また、超硬合金工具⁵⁾または単結晶ダイヤモンド工具⁶⁾を用いた切削も行われており、工具摩耗を主とした旋削被削性や高精度加工の可能性について調べているものもある。

しかし、短繊維強化金属に関する報告は比較的少ない。強化材がセラミックであることは粒子強化材と変わらないが、

繊維の配向、形状、弾性率などにより工具摩耗機構が異なると考えられる。これまで、FRMの加工特性⁷⁾、仕上げ面創成機構⁸⁾、単結晶ダイヤモンド切削による高精度切削加工⁹⁾に関する報告がなされており、仕上げ面生成機構が明確になり、高精度加工が可能となってきた。

本研究では、被削材種、工具材種によって工具摩耗特性が若干異なり、強化材が工具を擦過することにより機械的に摩滅させるだけという単純なアブレイブ摩耗¹⁰⁾ということでは説明が不十分という観点から、一般に仕上げ面精度に大きな影響を及ぼすと思われる工具摩耗機構を調べることを目的としている。工具として、超硬合金工具5種、セラミック工具2種、焼結ダイヤモンド工具の計8種類を用い、SiC whisker強化6061アルミニウム材とアルミナ短繊維強化6061アルミニウム材切削時の工具摩耗機構について検討を加えた。すでに、FRMの切削にはダイヤモンド工具が優れているという報告がなされているが、実用的に超硬合金工具が粗加工の際に多く用いられていることから、それら工具の摩耗機構につ

* 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)。Graduate School of Engineering, Osaka University (2-1, Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-0871)。

** 大阪電気通信大学 (寝屋川市)。Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University (Neyagawa-shi, Osaka)。

*** 熊本大学工学部 (熊本市)。Faculty of Engineering, Kumamoto University (Kumamoto-shi, Kumamoto)。

Table 1 Work materials

Symbol	Matrix	Reinforcement Diameter×Length (μm)	Manufacturing method	Heat treatment	Tensile strength (MPa)
SiC _w /6061	A6061	SiC-whisker (25%) 0.2~0.5×3~10	Squeeze cast As cast	As cast	400~450
SiC _w /6061P	A6061	SiC-whisker (25%) 0.4×2~6	Powder metallurgy Extrusion	T6	588
Al ₂ O ₃ /6061	A6061	Al ₂ O ₃ short fiber (15%) 1~6×5~40	Squeeze cast Extrusion	T6	360

Table 2 Tool materials

Symbol	HRA	Deflection strength (GPa)	Fracture toughness
K10	91.0	1.91	
P30	90.3	1.96	
G1	92.0	1.76	
G2	90.5	2.06	
G5	89.0	2.65	
CB	94.5	0.88	3.8
CSiC	94.4		8.0
DC			

Table 3 Cutting conditions

Cutting speed	(m/min)	6, 20, 60, 200
Feed rate	(mm/r)	0.1
Depth of cut	(mm)	0.5
Cutting distance	(m)	50

いて調べた。

2. 実験装置および方法

実験には、大阪工作所製ジャパソブ旋盤360HB-X (回転数40~2500 r/min, 送り0.05~56 mm/rev, 出力8 kW) を使用し、Table 1 に示す三種類の被削材について外周旋削を行った。これらの被削材は、SiC ウィスカまたはアルミナ短繊維により強化されており、それぞれ SiC_w/6061, SiC_w/6061P, Al₂O₃/6061 と記すことにする。SiC_w/6061 は鋳造法によるもの、SiC_w/6061P は粉末冶金法によるもので、SiC_w/6061 に比べて SiC_w/6061P の引張強度は588 MPa と大きくなっている。Al₂O₃/6061 は、強化材が SiC ウィスカに比べて、直径が約10倍程度大きいアルミナ短繊維であり、引張強度は3種類の被削材のうちで、360 MPa と最も低い。

使用工具としては、工具材種による工具摩耗の違いから工具摩耗機構に考察を加えるため、Table 2 に示す8種類の工具材種を用いた。工具形状は(−5°, −5°, 5°, 5°, 30°, 0°, 0.8)を用いている。G1, G2, G5 は、WC と Co からなりコバルトの体積含有率が G1 < G2 < G5 の順で、G1 の WC は微粒である。P30 は、G2 とコバルトの体積含有率がほぼ等しく、WC の一部を TiC+TaC で置き換えた複炭化物合金である。また、比較のために Al₂O₃ と WC からなる黒セラ

Fig. 1 Optical micrographs of tips (Work material: SiC_w/6061, Tool: G2, $V=20$ m/min). (a) flank, (b) rake

ミック工具 (略記号 CB と示す)、SiC ウィスカ強化アルミナセラミック工具 (略記号 CSiC と示す) および焼結ダイヤモンド工具 (略記号 DC) を使用した。切削条件は、Table 3 に示す通りである。被削材の量的制約から、SiC_w/6061 および Al₂O₃/6061 については、まず機械的な摩耗の機構を明らかにするため低速切削を主として実験を行い、SiC_w/6061P の場合には切削速度200 m/min までの旋削を行った。

3. 実験結果

3.1 工具摩耗部の観察

Fig. 1 は、超硬合金工具 G2 を用い、切削速度20 m/min で SiC_w/6061 を切削したときの工具の逃げ面およびすくい面の光学顕微鏡写真である。逃げ面では、ほぼ切れ刃に平行な摩耗が形成され、切取り厚さの影響がないことを示している。すくい面では逃げ面に比べ、擦過されている形跡は見られるが、大きな摩耗は生じていない。本研究の速度域では、切削速度の違いによる工具摩耗形態に相違は見られなかった。また、他の超硬合金工具およびセラミック工具についても摩耗幅の違いはあるが形態は同様のものであった。

次に、工具摩耗部の SEM 観察を行った一例を示す。Fig.

Fig. 2 SEM photographs of worn surface (Tool: G1, $V=20$ m/min). (a) SiC_w/6061, (b) Al₂O₃/6061

2(a)はSiC_w/6061, Fig. 2(b)はAl₂O₃/6061を被削材としたものであり, 超硬合金工具G1の逃げ面のSEM写真である。Fig. 2(a)では, $0.2\mu\text{m}$ 程度の細かいウィスカがバインダ相を削り取るによりWCが脱落したと思われる凹凸の激しい摩耗面になっている。一方, Fig. 2(b)では, 図(a)と同様脱落部も見られるが脱落部以外(写真下部)は比較的平滑で, アルミナ短繊維によるすり減り摩耗が生じている。

Fig. 3に示すSEM写真は, CSiC工具の摩耗部全体図とその先端の拡大図である。被削材は, SiC_w/6061Pである。拡大図からわかるように小さなき裂・割れが数多く発生しており, 一部欠け(図中A)が見られる。全体図では, 切削方向に無数の筋ができており, セラミック工具の摩耗は, 抗折力が低いことによる欠け, または構成粒子の脱落が主原因であると考えられる。一般に, 衝撃により工具が小規模に欠損した場合チップングと呼ばれているが, ここでは区別するため抗折力が低い場合に生じる工具のミクロな損傷のことを欠けと呼ぶことにする。

Fig. 4は, DC工具の摩耗部のSEM写真である。被削材はSiC_w/6061Pであり, 切削速度200 m/minのときのものである。少し切れ刃部に欠けが見られるが, その欠けの下部には切削方向の擦過痕が見られないことから, この摩耗は研磨時の欠陥が原因で生じた初期摩耗であると考えられる。

以上, 工具摩耗部の観察と工具の特性から摩耗機構について考察を行ったが, 詳しくは工具摩耗機構の章で述べる。

3.2 SiC_w/6061切削時の工具摩耗特性

Fig. 5はSiC_w/6061について超硬合金工具P30およびK10, CB, DCの各工具を用いて外周旋削を行ったときの逃げ面摩耗の切削速度依存性を調べた結果である。P30およびK10工具の逃げ面摩耗幅は切削速度6 m/minで少し差は見

Fig. 3 SEM photographs of worn surface (Work material: SiC_w/6061P, Tool: CSiC, $V=60$ m/min). (a) $\times 5000$, (b) $\times 350$

Fig. 4 SEM photograph of worn surface (Work material: SiC_w/6061P, Tool: DC, $V=200$ m/min).

られるもののほぼ同じで, 切削速度に対する依存性も認められない。DC工具についても同様に速度依存性は認められず, 他の工具と比べて逃げ面摩耗幅は非常に小さくなっている。CB工具の場合は逃げ面摩耗は切削速度6および20 m/minではK10とほぼ同じであるが, 切削速度60 m/minで特に大きく, 全体的に逃げ面摩耗幅は切削速度の増加とともに増大している。

Fig. 6ではSiC_w/6061に対して超硬合金の構成成分の比率を変えた工具三種で旋削した場合の逃げ面摩耗の速度依存性を比較したものである。工具間の差は微量であるがG5の場合の逃げ面摩耗が大きく, 続いてG1, G2の順となってい

Fig. 5 Relation between flank wear width and cutting speed (Work material: SiC_w/6061).

Fig. 6 Relation between flank wear width and cutting speed (Work material: SiC_w/6061).

Fig. 7 Relation between flank wear width and cutting speed (Work material: SiC_w/6061).

る。また、それぞれの工具について本実験の切削速度域では速度依存性は認められなかった。

Fig. 7 は SiC_w/6061 について結合剤の含有率を同じにして、炭化物を WC のみと WC の一部を TiC+TaC で置き換えた場合、すなわち単一炭化物合金と複炭化物合金工具の摩耗の違いを調べたものである。双方とも速度依存性は認められないが、硬度の高い複炭化物を含む P30 の方が G2 より逃げ面摩耗が大きくなっている。

Fig. 8 は、被削材 SiC_w/6061 について初期摩耗後の摩耗速度と切削速度の関係を示したものである。工具 7 種とも Fig. 5~Fig. 7 での 50 m 切削後の摩耗幅と切削速度との関係とはほぼ同じ傾向を示している。DC 工具の切削速度 6 m/min で他の速度に比べて摩耗速度に差が見られるが、3.1 で述べたように摩耗は研磨時の欠陥により生じたものと考えられる。工具摩耗に及ぼす初期摩耗の影響を分ける必要がある

Fig. 8 Relation between flank wear width rate and cutting speed (Work material: SiC_w/6061).

Fig. 9 Relation between flank wear width and cutting speed (Work material: Al₂O₃/6061).

Fig. 10 Relation between flank wear width and cutting speed (Work material: Al₂O₃/6061).

場合には摩耗速度を用いるのがよいと考えられるが、Fig. 8 から知られるように工具材種間の耐摩耗性の優劣は、50 m 切削後の摩耗幅と同様な傾向を示すことより以後 50 m 切削後の摩耗幅を用いて比較することにする。

3.3 Al₂O₃/6061 切削時の工具摩耗特性

Fig. 9 は Fig. 5 と同様の工具材種を用いて被削材 Al₂O₃/6061 について逃げ面摩耗の切削速度依存性を調べた結果である。SiC_w/6061 の場合と比較して逃げ面摩耗幅は小さく、使用した 4 種の工具材種について速度依存性は認められない。SiC_w/6061 では超硬合金 P30 と K10 の逃げ面摩耗幅はほぼ同じであるのに対して、Al₂O₃/6061 の場合、K10 の逃げ面摩耗幅が P30 のそれより 2 倍程度大きくなっている。また、CB の逃げ面摩耗幅が P30 とほぼ同じとなっており、SiC_w/6061 の場合とは工具摩耗機構が異なっていると考えられる。DC

Fig. 11 Relation between flank wear width and cutting speed (Work material: Al₂O₃/6061).

については SiC_w/6061 の場合と同様逃げ面摩耗は非常に小さい。

Fig. 10 は Al₂O₃/6061 に対して Fig. 6 と同様、超硬合金の構成成分の比率を変えた工具三種で比較を行ったものである。この場合 Fig. 6 の SiC_w/6061 の場合と比べてさらに各工具間の逃げ面摩耗の差が小さくなっているが、逃げ面摩耗幅は大きい方から G5, G2, G1 の順になっており、SiC_w/6061 の場合と若干異なる結果となっている。工具摩耗に及ぼす切削速度依存性はこの場合も認められなかった。

Fig. 11 は Al₂O₃/6061 について Fig. 7 と同様、P30 と G2 の比較を行ったものであるが、SiC_w/6061 の場合とは逆の結果であり炭化物 WC だけを含む G2 の方が P30 より逃げ面摩耗が大きくなっている。このことから Al₂O₃/6061 と SiC_w/6061 とは工具摩耗機構が異なっていると考えられる。

3.4 SiC_w/6061P 切削時の工具摩耗特性

Fig. 12 は SiC_w/6061P を切削する際の逃げ面摩耗の切削速度依存性を調べた結果である。工具材種は、CB, CSiC, DC および K10 の 4 種類である。切削速度を 200 m/min までひろげているが、SiC_w/6061 と比較して若干逃げ面摩耗幅に差は見られるものの、傾向はほぼ同じであると言える。CSiC を用いた場合、CB より逃げ面摩耗幅は小さいが、CB と同様摩耗幅は切削速度とともに増大している。DC については SiC_w/6061 の場合とほぼ同様の結果となっている。なお、図には示していないが湿式切削と乾式切削とで工具摩耗に差はほとんど現れなかった。

4. 工具摩耗機構

以上のように、特に超硬合金工具間での逃げ面摩耗幅の差は最大で 0.04 mm 程度と小さく、一般的にはばらつきの範囲であるが、傾向的に有意であると思われるので考察を行う。

4.1 Al₂O₃/6061 切削時の工具摩耗機構

Al₂O₃/6061 の場合についてまず考える。Fig. 10 より Co 含有率の小さい G1 がわずかながら逃げ面摩耗が小さく、Co 含有率が大きく WC の含有率が若干小さい G5 の逃げ面摩耗が大きくなっている。これは、WC と比べるとバインダ相である Co は硬度が低く、すり減り摩耗のみの場合、工具の耐摩耗性は WC の量で決まるため、WC の含有率の差が摩耗の差になったと考えられる。Fig. 11 では炭化物を含む P30 で摩耗が少なく、これは炭化物の生成によって耐摩耗性が大きくなり、工具摩耗が少なくなったためと考えられ

Fig. 12 Relation between flank wear width and cutting speed (Work material: SiC/6061P).

る。このように硬度の高い成分を含む工具では耐摩耗性が大きくなる機構から、Fig. 9 の K10 と P30 の違いは、炭化物の硬度が WC より高いためと考えられる。K10 より CB で摩耗が少ないのは WC よりも Al₂O₃, TiC の硬度が高いためであると考えられるが、CB と P30 が同程度の摩耗であることの説明は工具に含まれる成分の硬度差だけでは不足である。粒子硬度の比較だけであれば P30 よりも CB の方が逃げ面摩耗は小さいはずであるが、GFRP の切削¹¹⁾においてもセラミック工具の低速域での摩耗が激しく、その原因として抗折力の低さを挙げている。抗折力は応力に抗する力であるが、Table 2 のようにセラミック工具は超硬合金工具に比べて 2 分の 1 以下である。つまり、FRM の切削においても抗折力が工具摩耗に関与していると考えられる。切削中、被削材に含まれる高硬度の繊維が工具と衝突する際に大きな応力が生じ、抗折力の低い工具の場合、その応力により欠けのような摩耗が生じると思われる。セラミック工具を用いた場合がそれであり、Fig. 3 に示したように微細な欠けが生じ、それらが蓄積された結果、P30 と同程度の摩耗が生じたと考えられる。以上 Al₂O₃/6061 の場合については大略均一で単純なすり減り摩耗の集積で摩耗が進行する機構であり、工具に含まれる粒子硬度とその含有率が耐摩耗性を決定する大きな比重を占めていると考えられる。さらに、工具の抗折力についてもまったく関係がないわけではなく、セラミック工具の場合の結果から抗折力が低い場合には、抗折力は工具摩耗機構にかかわってくると考えられる。

4.2 SiC_w/6061 切削時の工具摩耗機構

SiC_w/6061 の場合は、Al₂O₃/6061 の場合と少々機構が異なるようである。Fig. 6 より WC が同粒度である G2, G5 については硬質成分の比率の高い方が摩耗が少ない。これだけを見れば、Al₂O₃/6061 の場合と同様の機構と考えてもおかしくない。しかし、Fig. 7 より、Al₂O₃/6061 の場合と異なり硬度の高い炭化物を含む P30 の方が WC のみの G2 より摩耗が大きく、GFRP 切削の場合¹²⁾と同様炭化物粒子の脱落が生じ、摩耗を促進していると考えられる。GFRP の切削¹²⁾では直径 10~20 μm の太い繊維が破断され、そのとき生じた破面によりバインダ相を削り取り、その結果炭化物粒子を保持する力が弱くなり、繊維との接触時に炭化物粒子が脱落すると報告されている。SiC_w/6061 の切削においても SiC ウィスカが細いためバインダ相を削り取る作用をし、浮き出た状態の

炭化物が脱落するものと考えられる。P30とG2を比較した場合、抗折力はP30の方が小さくなっており¹³⁾、このことは結合剤であるCoによる保持力が小さいことを意味している。さらに、炭化物の粒径は0.5～数 μm であり、Co層の厚みは1 μm 以下が多いことから、工具摩耗機構として直径0.2～0.5 μm のウィスカによってバインダ相を削り取り、炭化物が脱落する機構が考えられる。したがって、Co体積含有率が同じで炭化物の粒径も同じであれば、WC単独の合金よりも複炭化物合金の方が保持力が弱いために脱落が早く生じ、工具摩耗が早く進行する。Fig. 6のG5については、抗折力は最も大きいWCの含有率が小さくCoの含有率が大きいためにバインダ相が削られやすくなっているため、摩耗幅は大きくなったと考えられる。G1については、炭化物粒子の保持力は粒子の表面積に比例すると考えられるが、G1の炭化物が微粒であり保持力が小さくなっているために脱落しやすく、G2より摩耗が大きくなっていると考えられる。Fig. 5に関してもこの工具摩耗機構が相当する。複炭化物を含むP30とWCを含むK10と比較した場合、 $\text{Al}_2\text{O}_3/6061$ の場合と異なり $\text{SiC}_w/6061$ の場合では、バインダ相を削り取る作用のために抗折力の小さいP30では脱落の影響が大きく作用し、この作用と炭化物粒子の硬度差の影響が相殺した結果、ほぼ同じ摩耗幅となったものと思われる。CBについては、粒子が高硬度であるにもかかわらず抗折力が低い、すなわち工具粒子の結合力が小さいために低速度域ではK10およびP30と同程度の摩耗が生じている。切削速度60 m/minにおいては、切削速度の影響を大きく受け、脱落による摩耗が大きくなっている。このように、 $\text{SiC}_w/6061$ の切削における工具摩耗機構としては、 $\text{Al}_2\text{O}_3/6061$ の切削で生じる均一で単純なすり減り摩耗に加えて、バインダ相を削り取り、工具中の硬質粒子の脱落により生じる摩耗が考えられることからFig. 6のG2よりG1で摩耗が大きいこと、G5とG2の差が $\text{Al}_2\text{O}_3/6061$ の場合より大きいこと、Fig. 5でP30がK10と同程度の摩耗を示すこと、Fig. 7のG2よりP30の摩耗が大きいことが説明される。なお、 $\text{Al}_2\text{O}_3/6061$ の場合、アルミナ短繊維は直径が1～6 μm と大きいため、バインダ相の削り取り作用はごく表層に限られるため、この機構による工具摩耗は少ないと考えられる。

4.3 $\text{SiC}_w/6061\text{P}$ 切削時の工具摩耗機構

Fig. 12の $\text{SiC}_w/6061\text{P}$ についても $\text{SiC}_w/6061$ と同じ工具摩耗機構であると考えられる。全体として $\text{SiC}_w/6061$ の場合より摩耗幅は少し小さくなっている。これは、 SiC ウィスカの直径が若干 $\text{SiC}_w/6061$ のそれよりも大きいため、バインダ相を削り取るにより脱落する作用が少なくなっているためと考えられる。また、 CSiC についてはCBより摩耗が小さ

い。これは、 CSiC の破壊じん性がCBに比べ2倍程度大きく、また SiC ウィスカが Al_2O_3 より高硬度であるためである。

高速域での工具摩耗には、切削温度上昇、凝着摩耗など多くの要因が含まれてくるため、工具摩耗機構とくに機械的な摩耗についてだけ議論するには適していない。本研究では前述の理由により、一部を除いて高速域での切削は行っておらず、高速域での工具摩耗の速度依存性についての検討は今後の課題としたい。

5. 結 言

$\text{SiC}_w/6061$ 、 $\text{SiC}_w/6061\text{P}$ および $\text{Al}_2\text{O}_3/6061$ について各種工具を用いて外周旋削を行った結果次のことがわかった。

(1) $\text{Al}_2\text{O}_3/6061$ 切削時の超硬合金工具の摩耗機構としては、均一で、単純なすり減りが挙げられる。そのため、逃げ面摩耗幅を決定する要因として工具を構成する粒子の硬度および含有率が主に挙げられる。

(2) $\text{SiC}_w/6061$ および $\text{SiC}_w/6061\text{P}$ 切削時の超硬合金工具の摩耗機構としては、 $\text{Al}_2\text{O}_3/6061$ と同様単純なすり減り摩耗に加えて、工具中のバインダ相を細いウィスカが削り取り粒子が脱落する摩耗が挙げられる。よって逃げ面摩耗幅には、工具中粒子の硬度および含有率に加えて粒子保持力が大きくかかっている。

(3) セラミック工具を用いた場合、抗折力が低いために欠けや脱落による摩耗が発生し、本研究で行った速度域でも、その摩耗量は比較的大きなものとなった。

参 考 文 献

- 1) 顔 炳華, 王 則象: 軽金属, 43 (1993), 189.
- 2) 長谷川正, 章 麗萍, 三浦恒正, 西脇信彦: 軽金属, 44 (1994), 359.
- 3) 長谷川正, 三浦恒正, 西脇信彦: 軽金属, 44 (1994), 543.
- 4) 花崎伸作, 峠 陸, 佃 市三: 精密工学会誌, 55 (1989), 1091.
- 5) 加藤数良, 時末 光, 井上稔朗: 軽金属, 48 (1998), 83.
- 6) 嶋貫宏泰, 長谷川正, 安野拓也, 高橋 徹, 西脇信彦: 軽金属, 46 (1996), 632.
- 7) 嵯峨常生, 池田 茂: 軽金属, 41 (1991), 264.
- 8) 新井 実, 中山一雄, 王 曉波: 精密工学会誌, 57 (1991), 172.
- 9) 古沢利明, 日野 裕, 野呂瀬進, 磯貝 毅, 中村 示, 山田国男, 貴志浩三: 精密工学会誌, 59 (1993), 827.
- 10) 花崎伸作, 深江 守, 長谷川嘉雄: 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1987), 655.
- 11) 佐久間敬三, 瀬戸雅文: 日本機械学会論文集, 44 (1978), 1752.
- 12) 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 錦美 誠: 精密機械, 50 (1984), 1747.
- 13) 吉田邦彦: 超硬工具, 日刊工業新聞社, (1978), 45.