GFRP 切削における工具の摩耗機構*

長谷川 嘉雄** 花 崎 伸 作** 錦 美 誠***

Wear Mechanism of the Tool in Cutting GFRP

Yoshio HASEGAWA, Shinsaku HANASAKI
and Makoto NISHIKIMI

It was experimentally clarified how the wear occurs at a tool cemented the hard grain in a matrix binder such as a cemented carbide tool in cutting GFRP. Cutting two work materials of short glass fiber reinforced polyester resin and of glass beads reinforced polyester resin which contain same content of reinforcements, it was shown that the fibrous glass in resin causes the tool wear characteristic that the tool wear increases with increase of cutting speed over a certain cutting speed in

cutting GFRP. Then, GFRP-disk was cut with various kinds of cemented carbides tools. The tool of WC-Co grade wears less than the tool of alloyed WC-Co grade at same volumetric Co-content, and the tool wear increases with increase of Co-content in case of the tool of WC-Co grade. In case of the tool cemented the hard grain in a matrix binder, the tool wear seems to progress due to both the cutting away of the binder and the falling off of the hard grains, so the binder between the grains needs to be thin and its bonding strength needs to be high.

Key words: GFRP cutting, tool wear mechanism, wear-resistant tool

1. 緒 言

ガラス繊維が補強材となっている GFRP を切削する際の工具摩耗は、切削条件に対する依存性が単純でない^{1)~3)}。切削条件に対する工具摩耗の、この依存性は力学モデルを使った解析による説明が試みられている^{2)~4)}。この解析結果によれば、GFRP 切削時の工具摩耗特性は、硬度の高いガラスが繊維であるために現れる。そこで本報告では、この解析結果を確かめる意味で、アスペクト比が 1 に相当するガラスビーズを含有するポリエステル樹脂と粉碎して短くしたガラス短繊維強化ポリエステル樹脂を高速鋼工具で切削し、工具摩耗特性の比較を行い、次いで平織状ガラス繊維強化フェノール樹脂を多種類の超硬合金工具によって切削し、工具摩耗特性を調べ、硬質粒子を結合した工具材において、GFRP 切削時のざらつき摩耗がどのように生じるのか、どのような特性が GFRP 切削用工具として望ましいかを考察する。なお一部比較のためコーティング工具と CBN 工具を使用した。

2. 実験装置および方法

実験には大阪工作所製ジャパンカズマー

* 原稿受付 昭和 59 年 1 月 17 日、昭和 57 年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和 57 年 10 月 18 日)にて発表

** 正 会 員 大阪大学工学部(吹田市山田丘 2-1)

*** 正 会 員 住友電気工業(株)(伊丹市昆陽北 1-1-1)

ブ旋盤(40~2500 rpm 無段変速, 5.15 kW)を使用した。被削材は表 1 に示す 3 種類で、これらの材料の外丸削りを行った。ガラス短繊維強化ポリエステル樹脂およびガラスビーズ含有ポリエステル樹脂は含有物の形状のみ異なり、含有率およびマトリクス樹脂は同じである。このガラス短繊維は長繊維を粉碎して得たものであるが、これ以上の粉碎は困難であった。それでもアスペクト比が平均 35 もあるため、アスペクト比 1 に相当するものとしてガラスビーズ(直径 20~40 μm)を用いた。

使用工具としては短繊維強化材とビーズ含有材の工具摩耗を比較する実験では、十分な工具摩耗量を得るために高速鋼第 4 種 A 製⁵⁾ 8 完成 バイト(工具形状(0°, 0°, 10°, 10°, 30°, 30°, 0°))を使用し、工具材種による工具摩耗の違いを調べる実験では、表 2 に示す工具材種(チップ: TNG 332, ホルダ: N 22 R-33)を用いた。比較のため一部用いたコーティング工具は超硬合金母材の上に TiC, 特殊セラミック, Al_2O_3 を 3 層コーティングし

Table 1 Work materials

	Shape	Contents and condition of reinforcement
Glass beads reinforced polyester resin	Bar $\phi 40$	30% Beads dia. ; 20~40 μm
Glass short fiber reinforced polyester resin	Bar $\phi 40$	30% Fiber size; $\phi 10 \mu\text{m} \times L 350 \mu\text{m}$ (mean) Random orientation
Glass fiber reinforced phenolic resin	Disk $\phi 200$	50% Cloth, Glass clothes lie perpendicular to rotational axis

Table 2 Tools

	Thermal conductivity W/m·K	Hardness HRA	Deflection strength GPa	Co-content	Remarks
P 10	25	91.7	1.62		Cemented carbide cutting tool (Multi carbide)
P 30	42	90.3	1.96		
D 1*	80	92	1.76	Low ↓ High	WC-cemented carbide
D 2	84	90.5	2.06		Shock-resistant and wear-resistant tool
D 3	75	90	2.45		
G 5	71	89	2.65		
G 6	71	87	2.74		

* Fine grain WC

Table 3 Cutting condition

Cutting speed m/s	0.167-5.0
Feed rate mm/rev	0.05, 0.10, 0.15, 0.30
Depth of cut mm	1.0
Dry cutting

(a) Work material: glass short fiber reinforced polyester resin
(b) Work material: glass beads reinforced polyester resin

Fig. 1 Section profiles of abraded tools

 $l=10, 50, 100, 300, 500 \text{ m}$, $f=0.15 \text{ mm/rev}$, $V=5.0 \text{ m/s}$

たものである。CBN 工具はビッカース硬度 $HV=4\,000\sim 4\,500 \text{ kg/mm}^2$ である。これらの工具材種間の工具摩耗を比較することにより、工具摩耗と工具材の構成成分との関係が比較検討でき、どのような機構で工具摩耗が進行するのかの手掛かりが得られる。切削条件は表 3 に示すとおりである。工具摩耗量はコーナ先端から 0.6 mm の位置での主逃げ面の摩耗幅を測定した。切削抵抗の測定には抵抗線ひずみゲージを貼りつけた工具動力計を使用し、動ひずみ計を介してペン書きオシログラフに記録させた。

3. 実験結果および考察

3.1 短繊維強化材およびビーズ含有材における工具摩耗特性

図 1 は両被削材をそれぞれ高速度鋼工具 ($0^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 30^\circ, 0^\circ$) で切削した場合の切削の進行に伴う主切刃に垂直な断面の摩耗部形状の変化を示す。両被削材における摩耗形状はほぼ同じで、摩耗面が負の逃げ角

(a) Work material: short glass fiber reinforced polyester resin

(b) Work material: glass beads reinforced polyester resin

Fig. 2 Dependence of tool wear on cutting speed in two work materials
Tool: SKH 4 A ($0^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 30^\circ, 0^\circ$), $l=300 \text{ m}$

の逃げ面をなすような形状となっている。切削速度によって摩耗量は変化するが、摩耗形状にはほとんど差が認められない。また送りを大きくした場合、摩耗面の切削運動方向に対する角度がやや大きくなる傾向が認められた。図より、工具摩耗は同様の単調な増加傾向になっていることがわかる。図 2 は両被削材について、工具摩耗に及ぼす切削速度と送り(切取り厚さ=送りの $1/\sqrt{3}$)の影響をみたものである。(a) 図の短繊維強化材の場合、切削速度 1.33 m/s 以上では工具摩耗が切削速度の増加とともに急増していて、長繊維強化材の場合^{3)~5)}と同じ特性を示している。送りの影響は、低速域では顕著でなく、高速域では長繊維材の場合と異なり、送りを $0.05, 0.15, 0.30 \text{ mm/rev}$ と大きくしたとき単調な変化を示さず、 0.15 mm/rev で最大、 0.30 mm/rev の場合がこれに次ぎ、 0.05 mm/rev の場合が最小である。これに対し、ビーズ含有材の場合は工具摩耗の切削速度依存性は大きくなく、ほかの硬質粒子含有プラスチック切削時の工具摩耗特性¹⁾⁶⁾とほぼ同じである。しかし送りの影響は(a) 図の短繊維強化材の場合と同じで、送り 0.30 mm/

Fig. 3 Dependence of cutting force on cutting speed
Tool: SKH 4 A (0°, 0°, 10°, 10°, 30°, 30°, 0), $f=0.15$ mm/rev

rev では 0.15 mm/rev の場合よりやや小さくなっている。

短繊維強化材の場合、工具摩耗が切削速度の高い領域で急増している特性は、力学モデルを使った解析により説明される。すなわち、ガラス繊維が短くとも切削速度が大きくなれば、長繊維材の場合と同じである³⁾。

図 3 は図 2 でもっとも工具摩耗が激しい送り 0.15 mm/rev の場合について、切削抵抗主成分の切削速度依存性を示す。ガラス短繊維強化材の場合、ガラス繊維の強化作用により、ビーズ含有材の場合よりも大きな切削抵抗を示している。両被削材の場合とも工具摩耗の増大とともに抵抗値は増大するが、ビーズ含有材の場合の方が増加率が高い。この切削抵抗から、ガラス短繊維強化材で工具摩耗が急増する切削速度 1.33 m/s における切削温度に等しい切削温度になるビーズ含有材の切削速度を、仮に工具摩耗面と切削面間で移動熱源理論を適用して求めると $[\text{切削温度上昇} \propto \text{切削抵抗} \times (\text{切削速度})^{1/2}]$ 3 m/s となり (また発生熱量が 100% 工具に流入するとすれば 2 m/s となる)、この速度でビーズ含有材では工具摩耗の急増現象が生じていないことから、短繊維強化材切削時の工具摩耗急増現象は、切削温度に依存していないと考えられる。

GFRP を切削する際の工具摩耗は、切れ刃に対するガラス繊維の方向によって切取り厚さの影響が異なる。マクロ的にはガラス繊維の方向性を考えなくてもよいランダム配向の材料を切削した場合、ガラス繊維の長さに対して切取り厚さが十分小さければ、低速域では切取り厚さが小さいほど工具摩耗が大きく、高速域では逆になる³⁾。高速域において切取り厚さの増大とともに工具摩耗が増大するのは、切れ刃と平行に近い配向のガラス繊維が存在し (切削主運動方向に垂直な平面内で切れ刃に垂直なガラス繊維配向では、高速域で切取り厚さは工具摩耗に影響しない)、切れ刃に垂直な面内で被削材内部向きの切削抵抗成分が切取り厚さの増大とともに大きく

(a) Work material: short glass fiber reinforced polyester resin

(b) Work material: glass beads reinforced polyester resin

Fig. 4 Dependence of feed force on cutting speed
Tool: SKH 4 A (0°, 0°, 10°, 10°, 30°, 30°, 0)

なる場合である³⁾。本実験の場合、被削材内部向きの抵抗成分に相当する送り分力は、図 4 に示すように工具摩耗がほとんど無視できる切削距離 1 m においても、高速域では 300 m 切削後の工具摩耗の場合と同じ傾向が認められる。なお短繊維強化材では切取り厚さが大きくなると切れ刃が切れずに引き抜かれるガラス繊維が多くなると考えられ、これは直接に工具摩耗を軽減させる効果を持つ。ビーズ含有材の場合、切削状態は送り 0.15 mm/rev 以下ではほとんど差が認められず粉末状の切りくずを生じたが、送り 0.30 mm/rev では切削速度の増大につれて大きなき裂型の切りくずを生ずるようになった。工具摩耗が送り 0.30 mm/rev の場合、0.15 mm/rev の場合より増大せず同程度となっているのはこのためと思われる。なお、図 4 (b) に示すようにビーズ含有材でも切削距離 300 m においては、工具が摩耗しているため送り分力が送りに対して工具摩耗と同じ傾向になっている。しかし工具摩耗の小さい切削距離 1 m においては、工具摩耗の傾向と一致した明確な傾向は認められず、切削速度 5.0 m/s ではむしろ送りの順に一致している。

以上の実験に用いた被削材は、前述のようにマトリクス、含有されているガラス物質の含有率が同じで、ガラ

Fig. 5 Dependence of tool wear on cutting speed in various Co-content of cemented carbide tool
Work material; glass fiber reinforced phenolic resin

ス含有物が一方は短繊維であり, 他方はガラスビーズである点のみ異なる。また使用工具は材質, 形状も同じである。したがって, 工具摩耗の切削速度依存性の違いは, 含有物の形状の違いに基づくものである。そしてガラス繊維が短くとも長繊維の場合と同様, ある切削速度以上で工具摩耗が急増する特性を持つことがわかる。工具摩耗の切取り厚さに対する依存性は高速域では見かけ上両被削材で同じであるが, その機構は異なるようである。

3.2 平織状ガラス繊維強化材切削における各種工具材種の耐摩耗性

GFRP を種々の超硬合金, サーメット, セラミック, 高速度鋼工具により切削した場合, もっとも耐摩耗性の大きいのは超硬合金 K 種であり, M 種がこれに次ぎ, サーメット, セラミックは工具摩耗がかなり激しい⁷⁾⁸⁾。高速度鋼工具も摩耗が激しく不適である。そこで超硬合金についてどのような組成, 構造が適するののかの手掛かりを得るためにいくつかの実験を行った。図 5 は WC と Co よりなる超硬合金につき WC と Co の比率を変えた場合の工具摩耗を比較したものである。この中で D1 はほかの材種と異なり WC が微粒となっている。これらの超硬合金はいずれも耐摩・耐衝撃工具用であって, 切削用の材種ではないが, D2 の場合 K 10 よりも若干摩耗が少なかった。図より切削速度 3.3 m/s 以上の D1 を除いて, Co の比率の高い工具ほど摩耗が激しい。なお, GFRP 切削時の工具摩耗の特性である低速域での摩耗一定の領域と摩耗が急増する領域とがいずれの工具でも認められる。D1 の場合低速域では工具摩耗が最低レベルであるが, 切削速度 3.0 m/s 以上ではほかの材種よりも摩耗の急増程度が大きく, 3.5 m/s 以上では Co 含有率の大きな D2 よりも摩耗が激しくなっている。これは WC が

Fig. 6 Comparison of tool wear between WC tool and multi-carbide tool

Work material: glass fiber reinforced phenolic resin

微粒であることによると思われるが, その機構については後述する。なお, ねじれぎりによる GFRP 板の穴あけにおいて K 種微粒合金が必ずしも耐摩耗性良好でないと報告されている⁹⁾。

図 6 は結合剤である Co の体積含有率をほぼ同じにして, 炭化物を WC 単独の場合と TiC, TaC を加えて多元炭化物とした場合の耐摩耗性を比較したものである。(b) 図は (a) 図よりも Co の比率が高い場合である。上述のように (a) 図の D1 は WC が微粒であり, P10 よりも WC の粒径がやや小さい。そのため (a) 図では粒径の影響を含んだ結果になっている。両図より Co の体積含有率が同じであれば, 多元炭化物合金の方が摩耗が大きいことがわかる。また図 5 より, 炭化物が WC のみの場合には Co 含有率が高いほど摩耗が大きいが, 図 6 の P10 と P30 を比較すると Co 含有率のやや高い P30 の方が摩耗が小さくなっている。

工具摩耗面を SEM で観察したところ超硬品種によって摩耗面の状態にほとんど差が認められなかった。図 7

Fig. 7 Abraded surfaces of tool
 $V=5.0$ m/s, $f=0.1$ mm/rev, $l=300$ m, Tool; G 5, Work material; glass fiber reinforced phenolic resin

は超硬品種 G 5 の摩耗面の SEM 像である。(a) 図から、炭化物粒子間の結合剤が削り取られ、炭化物粒子が脱落していることがわかる。すなわち GFRP 材を切削すれば、被削材中のガラス繊維は必ず破断される。ガラス繊維の破面には鋭い角が存在するので、この部分で結合剤部を削り取るものと考えられる。結合剤部が削り取られて炭化物粒子を保持する力が弱くなり、ガラス繊維と接触したときに作用する力がこれを上まるとこの炭化物粒子は脱落する。なお図 7 (a) およびほかの SEM 像の観察によれば、炭化物粒子自体の摩耗は明らかでない。炭化物粒子の脱落に比べ、炭化物自体の摩耗は無視するものである。

図 7 (b) は同じ工具の低倍率の写真である。摩耗部から未摩耗部に移った領域の一部に付着物が認められる。この付着物はかなり強く付着しており、表面は滑らかである。これは切残し部のガラス繊維が工具の摩耗面を擦過する間に变形温度に達して变形し、摩耗面に続く未摩耗部に付着したと考えられる。図 8 はこの工具の摩耗部の切れ刃に垂直な断面の形状である。断面は単調な曲線ではなく、摩耗部下半分でふくらんで、突き出した形状になっている。これは切残し部のガラス繊維が、上述のように工具摩耗面との摩擦により温度が上昇し摩耗部の終端近くで变形温度に達し、ガラス繊維の硬度が低下して工具の摩耗が緩和された結果と考えられる。

上述の工具の摩耗プロセスから、図 5、図 6 の結果は次のように説明できる。すなわち、図 5 では炭化物が微粒である D 1 を除き、Co の含有率の高い品種ほど摩耗が激しい。Co の含有率が高いと Co 相の厚みが大きくなり、Co 相がガラス繊維破面の鋭い角で削り取られる際、容易に深くまで削られる。その結果、炭化物粒子の脱落が早くなる。すなわち、摩耗の進行が早くなる。微粒合金の場合、一定体積の合金中の全炭化物粒子の表面積が大き

Fig. 8 Section profile of abraded tool
 $V=5.0$ m/s, $f=0.1$ mm/rev, $l=300$ m, Tool; G 5, Work material; glass fiber reinforced phenolic resin

いため、Co 相の厚みは小となる。それゆえ、Co 相は削られにくいと考えられ、この点からは摩耗が生じにくいことになる。一方、個々の炭化物粒子の保持力は表面積に比例すると考えられ、炭化物が微粒であれば保持力は小さくなる。炭化物と变形温度以下のガラス繊維は両者ともぜい性であるから、両者が接触した際に凸部どうしが引っかかりて作用する力は粒子の大小にかかわらず（極端に異なる場合を除く）ほぼ同一と考えられる。したがって、Co 相が削られる深さは浅くても炭化物粒子に作用する力が大きくなると粗粒の場合よりも粒子の脱落が生じやすく、摩耗が大きくなる。既に報告したごとく、GFRP の切削においては、ある程度切削速度が大きくなるとガラス繊維と工具との接触圧が切削速度に比例して増大する³⁾。そのため、ある切削速度以上では粗粒合金よりも炭化物粒子の脱落が早くなる。なお、工具を擦過するガラス繊維の温度が变形温度以上になれば、やはり炭化物粒子の脱落は緩和される。すなわち、切残し部のガラス繊維が变形温度に達する切削速度以上では、切削速度の増加に対して摩耗増加がゆるやかになる。

超硬合金中の炭化物を多元炭化物とした場合の効果について考える。図 6 に示す P 10 と D 1, P 30 と D 2 とを比べると表 2 に示すごとく、抗折力はそれぞれ P 10, P 30 の方が小さくなっている。超硬合金中の Co 含有率を同一として、(TiC+TaC) の比率を大にし、WC の比率を小とすると抗折力が小さくなることが知られている¹⁰⁾が、これは TiC, TaC の添加により結合剤である Co による炭化物粒子結合力、すなわち保持力が小さくなることを意味する。したがって、Co の体積含有率が同じで、炭化物の粒径も同じであれば、WC 単独の合金よりも多元炭化物合金の方が炭化物の脱落が早く、工具の摩耗が早く進行する。P 10 と P 30 とを比較すると P 10 の方が Co の含有率が小さいが、(TiC+TaC) の比率は大きい。両方の効果は相殺的であるが、(TiC+TaC) の効果が勝った結果 P 10 の方が炭化物粒子の脱落が早く摩耗が大きくなったと思われる。

以上の考察はほかの工具材種にもあてはまる。すなわち、硬質粒子を結合したタイプの工具材の場合、硬質粒子の硬度よりも結合剤の性質の方が問題になり、結合力

Fig. 9 Abraded surface of coating tool
 $V=0.33$ m/s, $f=0.1$ mm/rev, $l=300$ m, Work material; glass fiber reinforced phenolic resin

の強い、硬質粒子と結合剤の組合せであって、結合剤の割合は結合力の低下が小さい場合には少ない方がよい。また結合剤の硬度は高い方がよい。したがってサーメット工具は超硬合金工具に比べて良いとはいえない。著者らが既に報告した結果⁹⁾では、TiC系サーメット工具は超硬合金 K 10, M 10, P 10 より摩耗が激しくなっている。

上述のように硬質粒子を結合した工具では、粒子の脱落により工具摩耗が進行しており、結合剤が“弱点”になっている。そこでこの“弱点”のないコーティング工具 (TiC など 3 層) および粒子の結合が強いと考えられる CBN 工具で切削を行った。図 9 はコーティング工具により切削速度 0.33 m/s で 300 m 切削後のコーナ部摩耗面の SEM 像である。コーティング層が摩滅し、母材の超硬合金が露出しているのがわかる。切削速度 5.0 m/s の場合には、やはりコーティング層が摩滅し、母材の超硬合金層が露出したが、摩耗部から逃げ面末摩耗部に移った部分に図 7 (b) に示したのと同様の付着物が生じた。また逃げ面摩耗幅は切削速度 0.33 m/s の場合の方が 5.0 m/s の場合よりも広く、図 5 に示した超硬合金や K 10, M 10 などよりも広い。しかし、切削速度 5.0 m/s の場合には図 5 に示した超硬合金や K 10, M 10 よりもかなり摩耗幅が狭く、高速においては耐摩耗性がすぐれているようである。切削速度 5.0 m/s の場合、前述の超硬合金と切削状態に差は認められず、本実験に使用した被削材では刃先前方で砕ける現象⁵⁾は生じていなかった。切削速度 5.0 m/s の場合の方が 0.33 m/s の場合よりも摩耗幅が狭いのは、切削温度上昇に伴う工具摩耗面を擦過するガラス繊維の硬度低下によると考えられる。ガラスは室温から温度上昇につれて硬度は低下する¹¹⁾。コーティング相はガラスの変形温度である 720 K 程度まではほとんど硬度の低下はないと考えられ、コーティング層の摩耗は緩和される。これに対して超硬合金の場合マクロ的には同じ温度範囲での硬度低下は非常に

小さいが、この硬度低下はおもに炭化物に比べ融点の低い結合剤の硬度低下に基づくと考えられる。結合剤の含有率は小さいことから結合剤自身の硬度低下は無視できないと考えられ、前述のプロセスによる炭化物粒子の脱落はガラスの変形温度近くまでは緩和されず、図 5 に示すような特性を示すと考えられる。

なお CBN 工具では切削速度 0.33 m/s, 5.0 m/s のいずれにおいても切削距離 300 m では、工具の摩耗はほとんど認められず GFRP 切削用工具としては良好であるといえる。

4. 結 論

- (1) GFRP 切削時の工具摩耗が切削速度の増加に対し、ある切削速度から急増するのはガラスが繊維状であるために生じる。
- (2) GFRP を切削する場合、超硬合金工具の中では多元炭化物合金よりも WC 単独のものが摩耗が少なく、また結合剤は少ない方が摩耗が少ない。
- (3) 硬質粒子を結合した工具材一般に拡大すれば、工具摩耗は粒子の脱落によって進行すると考えられるので、粒子間の結合相を薄くし、かつ結合力を強くする必要がある。

参 考 文 献

- 1) 津枝正介ほか：強化プラスチックの断続切削における工具摩耗 (第 1 報), 日本機械学会論文集, **34**, 266 (1968) 1813.
- 2) 長谷川嘉雄ほか：GFRP 切削時の工具摩耗の機構, 精密機械, **41**, 5 (1975) 473.
- 3) 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 藤原順介：GFRP の切削加工における工具摩耗, 日本複合材料学会誌, **10**, 1 (1984) 29.
- 4) 長谷川嘉雄, 花崎伸作：強化プラスチックの断続切削における工具摩耗 (第 2 報), 日本機械学会論文集, **34**, 266 (1968) 1821.
- 5) 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 里中 忍：GFRP 切削時の工具摩耗特性, 精密機械, **44**, 11 (1978) 1334.
- 6) S. Hanasaki: Verschleißverhalten von Werkzeugen bei der Zerspaltung glasfaserverstärkter Kunststoffe, *ZwF*, **76**, 1, (1981) 8.
- 7) 佐久間敬三, 瀬戸雅文：強化プラスチック (GFRP) 切削における工具摩耗 (工具材種の影響), 日本機械学会論文集, **44**, 381 (1978) 1752.
- 8) 長谷川嘉雄ほか：GFRP 切削時の工具摩耗特性に及ぼす工具材種の影響, 精密機械, **47**, 6 (1981) 651.
- 9) 佐久間敬三, 横尾嘉道, 瀬戸雅文：強化プラスチック (GFRP・CFRP) の穴あけに関する研究 (工具材種と摩耗挙動), 日本機械学会論文集 (C 編), **49**, 446 (1983) 1799.
- 10) 吉田邦彦：超硬工具, 日刊工業新聞社 (1978) 45.
- 11) J. H. Westbrook: Hardness-temperature Characteristics of Some Simple Glasses, *Phys. and Chem. of Glasses*, **1**, 1, (1960) 32.