受賞記念講演

微粒・高強度アルミナ基セラミックスの開発

高橋 俊行

東芝タンガロイ(株), 〒407-0036 韮崎市大草町上条東割114.

Development of Fine and High-Strength Al_2O_3 Based Ceramics

Toshiyuki Takahashi

Toshiba Tungaloy Co., Ltd., 114 Kamijyouhigashiwari Okusa-cho, Nirasaki 407-0036.

Received February 9, 1998

SYNOPSIS

Al_2O_3 based ceramics is considered to be useful for high speed cutting of steel and low machinability material because of its higher chemical and thermal stabilities than those of coated cemented carbides or cermets. However, it has many problems to be solved in the mechanical properties which is necessary for the cutting tool.

This study is concerned with the improvements of mechanical properties and cutting performance of the Al_2O_3 ceramics. After the cutting performance of Al_2O_3 -TiC ceramic tools having 10~50mass%TiC and various grain size was investigated, the strengthening of TiC-free white ceramics which has excellent wear resistance in high speed cutting was studied. The flank wear in the turning test of gray cast iron decreased with decreasing TiC content and increasing TiC grain size. The tool having 20~30mass%TiC and finer TiC grain size showed a superior resistance to flaking and flank wear in the turning test of alloy tool steel. The room temperature transverse-rupture strength of the fine grained white ceramics reached about 1.3GPa in contrast to 0.7~0.9GPa of conventional one.

KEY WORDS

 Al_2O_3 ceramics, cutting tool, mechanical property, wear mechanism

1 緒 言

セラミックスは金属成分を含まないため、超硬合金、サーメットなどと比較して、化学的・熱的安定性に優れ、古くから切削工具への応用が検討されてきた。現在市販されている工具用セラミックスの種類と特徴を Table 1 に示す。初めて実用化された工具用セラミックスは純 Al_2O_3 (白セラミックスとも言う) であったが、これは耐摩耗性には優れるが、強度・靱性が低いため、用途は衝撃の小さな仕上切削領域に限られた。この Al_2O_3 セラミックスの靱性改善を図ったのが TiC を添加した、いわゆる黒セラミックス¹⁾であり、主に鋳鉄や高硬度材の切削に使用されている。最近では、更に高靱化を図った Al_2O_3 -SiC (whisker) セラミックス²⁾が耐熱合金の加工に、 Si_3N_4 系セラミックス (サイアロンを含む) が鋳鉄の湿式・粗切削で用いられるようになった。このようにセラミックス工具は強度・靱性を改善しながら、超硬合金 (被覆超硬合金を含む) やサーメットが不向きとされる領域で進歩してきた。

一方、近年の被削材についてみると、省エネルギーや環境問

題を背景に、部品の小型化・軽量化が進行し、そのため強さ、硬さの高い、いわゆる難削材の割合が多くなってきた。また、切削様式についても加工時間の短縮を図るために高速・高送り切削が要求されるなど、工具材料に求められる特性も多様化してきた (被削材、切削条件により工具の損傷形態は種々異なり、これに対応した材料特性が求められる)。

セラミックスの中でも Al_2O_3 基セラミックスは被削材との耐反応性に優れており、難削材切削や高速切削に対し有利と思われる。このことから、著者らは優れた Al_2O_3 基セラミックス工具の開発を目的とし、その諸性質と切削性能との関係について検討してきた³⁻⁵⁾。本稿では、主に Al_2O_3 -TiC セラミックス工具の切削性能と Al_2O_3 セラミックスの高強度化について述べる。

2 Al_2O_3 -TiC セラミックス工具の切削性能

初めに、従来から用いられている Al_2O_3 -TiC セラミックス (黒セラ) の切削性能に及ぼす TiC 量および粒度の影響について検討した³⁻⁵⁾。粒度がそれぞれ粗 (C)、細 (F) 2通りの Al_2O_3 粉末 (約

Table 1 Classification and some features of commercial ceramics for cutting tool.

Classification	Strength (GPa)	Toughness (MPa · m ^{1/2})	Thermal conductivity (W/m · K)	Application
Pure Al ₂ O ₃	0.4~0.7	3.0	15	gray cast iron or steel for finishing(high speed cutting)
Al ₂ O ₃ -TiC	0.8~1.0	4.0~4.5	20	gray cast iron or hardened steel for turning
Al ₂ O ₃ -SiC (whisker)	1.0~1.2	6.0~7.0	20	alloyed heat-resisting steel
Si ₃ N ₄	1.0~1.4	6.0~8.0	20~60	gray cast iron for rough and wet cutting

Table 2 The Composition and some properties of Al₂O₃-TiC ceramics specimens.

Specimen and sintering temp.	TiC content (mass%)	Grain size (μm)		HV10 (98N)	T.R.S. (MPa)	K _c (IF) (MPa · m ^{1/2})
		Al ₂ O ₃	TiC			
F-F (1723K)	10	1.2	1.0	1950	900	3.0
	20	1.0	"	2000	950	3.5
	30	"	"	2050	1000	4.0
	50	"	"	2100	900	4.3
F-C (1873K)	10	1.4	1.8	1850	850	3.2
	20	"	"	1900	900	3.8
	30	1.2	2.0	1950	950	4.0
	50	"	"	2050	900	4.5
C-F (1873K)	10	2.2	1.2	1900	850	3.1
	20	"	"	1950	950	3.5
	30	1.8	"	1950	1000	4.1
	50	"	"	2050	900	4.5
C-C (1973K)	10	3.0	2.0	1800	800	3.2
	20	2.5	"	1850	900	3.8
	30	2.2	2.3	1950	900	4.3
	50	"	2.5	2050	900	4.6

0.8, 0.3μm) および TiC 粉末 (約 1.5, 0.8μm) を用い、10~50mass%TiC 組成の試料 (以下、Al₂O₃ 粒度-TiC 粒度の組み合わせにより、F-F, F-C, C-F, C-C という) を Ar 気流中、20MPa の圧力下で 1hr ホット・プレスして作製した。ホット・プレス温度は、十分な緻密化と焼結体の粒度を考慮し、粉末粒度の組み合わせにより変化させた (Table 2 参照)。これらの試料を用いて、その組織や機械的性質と切削性能との関係について調べ、考察を加えた。

Fig.1³⁾ に原料粉末粒度の組み合わせが異なる Al₂O₃-30%TiC 試料の焼結体 SEM 組織例を示す。組織中、白いコントラストを示す相が TiC、灰色相が Al₂O₃ である。F-F 試料の組織が最も微粒で、C-C のそれが最も粗粒であるのは当然であるが、F-F に比べ、F-C の Al₂O₃ や C-F の TiC がやや粗粒となっている。これはホット・プレス温度が F-F に比べ高いためと思われる。

Table 2³⁾ に各試料の組成と諸性質を示す。いずれの組合せでも TiC 量が多くなるほど Al₂O₃ の平均粒度は小さくなり、TiC

Fig.1 SEM microstructures of Al_2O_3 -30%TiC ceramics specimen. Etched in vacuum at 1573K.

Fig.2 Effects of TiC content and grain size of Al_2O_3 -TiC ceramics tools on flank wear (V_B) in turning tests of FC350 for 1.2×10^3 s.

の粒度は粗くなる傾向を示す。HVはいずれの場合もTiC量の増加に伴い上昇する傾向を示し、また同一組成で比較するとF-Fの方がC-Cより高く、F-CやC-Fはこの中間の値を示すことが分かる。また抗折力(T.R.S.)は約30%TiCで最大を示したが、全体にF-Fの方がC-Cよりもやや高い値を示す。K_C(JIS R-1607 IF法)はTiC量が多いほど高くなる傾向を示し、粒度による大差は認められない。

Fig.2³⁾には各種工具で鋳鉄(FC350)を切削したときの逃げ面摩耗量(V_B)とTiC量との関係を示した。一般に高硬度の工具ほど耐摩耗性に優れるが⁹⁾、 Al_2O_3 -TiCセラミックス工具の場合はTiC量の多い高硬度の工具ほど耐摩耗性が低下する(V_B が大)。また粒度の影響をみると、C-CやF-C工具の V_B はF-FやC-F工具よりも小となり、TiCが粗粒ほど耐摩耗性に優れ、 Al_2O_3 粒度は V_B にほとんど影響しないことが分かる。Fig.3に工具逃げ面の摩耗状態を示す。F-F工具の摩耗条痕の幅は最も細かいのに対し、C-Cのそれは最も広く、C-FとF-Cはそれぞれ前者および後者によく一致している。すなわち条痕の幅はセラミックス工具のTiC粒度に依存していることが明らかになった。鋳鉄を切削する場合は、細かい切り屑が生じる。こ

Fig.3 SEM micrographs of flank surface of Al_2O_3 -30%TiC ceramics tools after turning tests of FC350 for 1.2×10^3 s. Cutting conditions, the same as Fig.2.

Fig.4 An example of flaking occurring parallel to the crater surface of coarse grained tool. Work piece is SKD11. (a)-crater surface, (b)-flank surface.

の切り屑は硬質なセメントイトなどを含み、切削時にセラミックス工具のホーニング近傍の組織を破壊する。この破壊された組織の一部が逃げ面と被削材との間に入り込み、摩耗を促進させると思われる。そうするとTiC量が多く、TiCが微粒の工具ほど V_B が大となる理由は、TiC量が多いほど脱落するTiC量が多くなることと、TiCは Al_2O_3 よりも硬質で、更に微粒TiCの方がより高強度で引っ掻き作用が大となるためと思われた。なお、ここでは図を示さないが、ダクタイル鋳鉄を切削した場合は鋳鉄とは逆に、TiC量が増加するほど V_B は減少する傾向を示し、粒度による差は認められなかった。

一方、 Al_2O_3 -TiC工具でSKDなどの高硬度材を切削する場合、フレーキングにより工具寿命となることが多い。Fig.4にその例を示したが、フレーキングは高硬度材切削において特有な、工具すくい面に平行に生じる剥離状欠損である。

Fig.5³⁾には各種工具でSKD11を切削したときに、フレーキングを生じて工具が寿命となるまでの切削時間とTiC量との関係を示した。C-CやF-C工具はTiC量にはほぼ関係なく、短時間でフレーキングを生じて寿命となるが、微粒TiCを添加したF-FやC-F工具は前者よりも長寿命となり、20~30%TiC工具で最も良好な耐フレーキング性を示した。すなわち、同一

Fig. 5 Effects of TiC content and grain size of Al_2O_3 -TiC ceramics tools on cutting time to flaking in turning tests of SKD11. Cutting speed, $V=2.5\text{m/s}$; depth of cut, $d=0.5\text{mm}$; feed rate, $f=0.1\text{mm/rev}$; coolant, not used.

Fig. 6 Crater wear of Al_2O_3 -30%TiC (F-F) ceramics tool in turning tests of SKD11 for $3 \times 10^2 \sim 12 \times 10^2\text{s}$. Each arrow shows crack formation on crater surface. Cutting conditions, the same as in Fig. 4. (a) $3 \times 10^2\text{s}$, (b) $6 \times 10^2\text{s}$, (c) $9 \times 10^2\text{s}$, (d) $12 \times 10^2\text{s}$.

組成で比較した場合、TiC 粒度により寿命に大差が生じる興味深い結果となった。

Fig. 6⁴⁾には Al_2O_3 -30%TiC の F-F 工具で SKD11 を切削したときの、すくい面摩耗の進行状況を切削時間との関係で示した。これより、鋳鉄切削には見られない大きなすくい面摩耗がプレホーニング内に生じることが分かる(送り、切り込みが小さい場合はホーニング内にすくい面摩耗が生じる)。又 $9 \times 10^2\text{s}$ 以降、すくい面にクラックが観察され、切削時間の経過とともに工具内部に進行することが分かる。フレーキングは、このクラックにより生じられると思われることから、クラックの発生する原因について考察した。

Fig. 7⁴⁾に F-F 工具の摩耗状況を模式的に示す。10%TiC 工具では、すくい面摩耗は小さいが、逃げ面摩耗が大きく、TiC 量が多くなるほどすくい面摩耗が大、逃げ面摩耗が小となる。

Fig. 7 Schematic drawing of crater and flank surface of Al_2O_3 -TiC (F-F) ceramics tools in turning test of SKD11 for $1.2 \times 10^3\text{s}$.

Fig. 8 Effects of cutting speed and TiC content on flank wear (V_B) in turning tests of FC350. Depth of cut (d), feed rate (f), cutting time (T), indicated in the figure.

すくい面摩耗、逃げ面摩耗のいずれが大となっても、工具すくい面に働く剪断力が大となり、クラックが発生・成長し、ついにはフレーキングに至ると考えられる。すなわち TiC 量には適量が存在し、本研究の範囲内では 20~30%TiC で剪断力が極小となり、また抗折力の高い F-F 工具が優れた結果を示したものと思われた。

以上より、同量の 30%TiC を含む黒セラミックスでも、鋳鉄切削では TiC が粗粒の工具、高硬度材切削では微粒の工具と、それぞれ TiC 粒度の異なる工具が優れることが分かった。

次に高速切削に適したセラミックス工具を得るために、鋳鉄 (FC350) および炭素鋼 (S48C) を被削材とし、 Al_2O_3 -TiC (C-C) および比較用の Al_2O_3 -15%ZrO₂ セラミックス工具を用いて切削した時の V_B に及ぼす切削速度の影響を調べた⁵⁾。Fig. 8 には FC350 切削の結果を、Fig. 9 には S48C 切削の結果を示した。

Fig.9 Effects of cutting speed and TiC content on flank wear in turning tests of S48C.

これらより、 V_B に及ぼす切削速度の影響は被削材の相違により極めて対象的な結果が得られ、いずれの工具も高速度ほどFC350切削時の V_B は小となり、S48C切削時の V_B は大となった。しかし、いずれの被削材の場合もTiC量の少ない工具ほど V_B は小となる傾向を示し、 Al_2O_3 -10%TiC工具は比較に用いた Al_2O_3 -ZrO₂工具と同等の耐摩耗性を示すと見なされた。これらから高速切削の場合は、工具中のTiCと被削材との反応により、工具摩耗が進行すると考えられた。すなわち高速切削にはTiCを含まない白セラミックスの有用性が改めて認識された。

しかし、既述のように白セラミックスは耐摩耗性には優れるが、耐欠損性に問題がある(切削工具では常に機械的・熱的衝撃を受けるため、低強度の工具ほど欠損しやすい)。よって、次に組織の微細化による Al_2O_3 セラミックスの強度改善について検討した。

3 高強度白セラミックス

Table 3には微粒 Al_2O_3 セラミックス(以下、SF- Al_2O_3)と、比較用の従来 Al_2O_3 セラミックス(以下、C- Al_2O_3)の作製条件を示した⁶⁾。SF- Al_2O_3 試料の作製には微細かつ均粒の原料粉末を用いた。予備実験により、SF- Al_2O_3 およびC- Al_2O_3 の緻密化完

Fig.10 Microstructures of SF- and C- Al_2O_3 ceramics. Etched in a air at 1423K.

了温度はそれぞれ約1573K、約1823Kであることを確かめたが、ここでは粒成長をできるだけ抑制し、微粒組織を得ることを目的としたことから、焼結によっては完全に緻密化させず、最終的な緻密化をHIP処理により行うこととした。すなわち相対密度が98%となるような温度で焼結した(Table 3参照)。

Fig.10⁶⁾にSF- Al_2O_3 およびC- Al_2O_3 の組織を示した。SF- Al_2O_3 の粒度は約0.8 μm と微粒・均一組織を示すのに対し、C- Al_2O_3 は約4 μm と粗粒でかつ不均一な組織を示すことが分かる。

Fig.11⁶⁾には両セラミックスの室温抗折力を示す。C- Al_2O_3 の平均抗折力が約0.65GPaであるのに対し、SF- Al_2O_3 のそれは約1.3GPa、最高約1.5GPaと極めて高強度を示すことが分かる。この時の破壊の起源例をFig.12に示したが、SF- Al_2O_3 の場合、数 μm 程度の微粒 Al_2O_3 の集合体であるが、C- Al_2O_3 の場合は10~20 μm 程度の異常粒成長した Al_2O_3 などであり、両者の寸法には大差がある。すなわちSF- Al_2O_3 が高強度を示したのは、均粒組織のため粗粒の Al_2O_3 等が少なく、破壊の起源の寸法がC- Al_2O_3 に比べて小さいことが主因と思われた。また抗折力の温度依存性については、両者とも高温となるほど低

Table 3 Preparing conditions of Al_2O_3 ceramics specimen.

	Powder grain size (μm)	Purity (%)	Sintering condition	HIP condition	MgO content (ppm)
SF- Al_2O_3	0.2	99.99	1523K×2hr (2Pa)	1473K×3hr (Ar : 0.15GPa)	500
C- Al_2O_3	0.4	99.9	1773K×2hr (2Pa)	1723K×3hr (Ar : 0.15GPa)	500

Fig. 11 Room temperature transverse-rupture strength of SF- and C-Al₂O₃ ceramics.

Fig. 12 Fracture surface of SF- and C-Al₂O₃ ceramics, showing fracture sources indicated by arrows.

下するが、SF-Al₂O₃の方が低下率は大きくなり、両者の抗折力の差が小となる。

Fig. 13⁹⁾にクリープ試験の結果を示した。これよりC-Al₂O₃は1473Kでもほとんど変形せず約 1.8×10^3 s後に破断したのに対し、SF-Al₂O₃は同一温度、荷重下でC-Al₂O₃に比較して著しくひずみ量(ϵ)が大となるのが特徴である。試料の張力面観察により、SF-Al₂O₃のひずみ量が小さい場合、多数の微視的クラックが粒子間に観察され、ひずみ量が大きくなるに従いそれらが連続・連結してクラックが成長することが分かった。すなわち、SF-Al₂O₃セラミックスは張力方向に粒界すべりが生じ、微小クラックを生成することで変形する。これに対し、粗粒のC-Al₂O₃は粒界すべりが生じにくいいため変形しにくいと考えられた。なお、SF-Al₂O₃でクラックが多数発生しても試料

Fig. 13 Bending creep curves of SF- and C-Al₂O₃ ceramics. Testing temperature, indicated in the figure.

Fig. 14 Effects of cutting time on flank wear of four sorts of ceramics tools in turning tests of FC350. Cutting conditions, indicated in the figure.

が破断しなかったのは、これが試料破断のための臨界寸法を越えなかったためであると思われる。

次に、上記のような特性を示す微粒Al₂O₃セラミックスの切削性能について調べた⁷⁾。試験にはSF-Al₂O₃、C-Al₂O₃と、比較用にAl₂O₃-30%TiC (F-F)およびAl₂O₃-40%ZrO₂セラミックスを用いた。なお、SF-Al₂O₃の抗折力は、Al₂O₃-30%TiCセラミックスよりも高いものの、破壊靱性値はC-Al₂O₃と同等でAl₂O₃-30%TiC、Al₂O₃-40%ZrO₂セラミックスよりも小さい。

Fig. 14には鋳鉄(FC350)を切削したときの V_B と切削時間との関係を示す。これよりSF-Al₂O₃の V_B が最も小さく、C-Al₂O₃、Al₂O₃-30%TiC、Al₂O₃-40%ZrO₂セラミックスの順に V_B が大となる。Fig. 15に試験後の工具逃げ面摩耗部の表面組織を示す。いずれの場合にも細かな擦過痕が見られることから、摩耗の進行はアブレイシブ摩耗によると思われる。またSF-Al₂O₃の擦過痕の凹凸が最も浅く、C-Al₂O₃、Al₂O₃-30%TiC、Al₂O₃-40%ZrO₂の順に深くなり、特にAl₂O₃-40%ZrO₂の場合に著しい。これは V_B の順序とよく対応している。鋳鉄切削の場合は刃先の破

Fig.15 SEM micrographs of flank surface of four sorts of ceramics tools after turning tests of FC350. (a) SF- Al_2O_3 , (b) C- Al_2O_3 , (c) Al_2O_3 -30%TiC, (d) Al_2O_3 -40% ZrO_2 .

Fig.17 SEM micrographs of flank surface of four sorts of ceramics tools after turning tests of S45C. (a) SF- Al_2O_3 , (b) C- Al_2O_3 , (c) Al_2O_3 -30%TiC, (d) Al_2O_3 -40% ZrO_2 .

Fig.16 Effects of cutting time on flank wear of four sorts of ceramics tools in turning tests of S45C. Cutting conditions, indicated in the figure.

Fig.18 Number of shocks to fracture of four sorts of ceramics tools in intermittent cutting tests. Cutting conditions, indicated in the figure.

壊によりセラミックス工具の摩耗が進行することを先に述べたが、SF- Al_2O_3 は高強度のために、粒子が脱落しにくく、結果として摩耗が少なくなったと思われる。 Al_2O_3 -30%TiC工具は脱落したTiCが硬質なために摩耗が進行しやすく、 Al_2O_3 -40% ZrO_2 の場合は、HVが他のセラミックスに比べて低いためにアブレイシブ摩耗が生じ易く、 V_B が大となったと思われる。

Fig.16に炭素鋼(S45C)を同様に4種セラミックス工具で切削したときの結果を示す。SF- Al_2O_3 の V_B が最も小さく、C- Al_2O_3 は約 2.1×10^2 sの短時間で欠損した。鋼切削では刃先温度が高くなる¹⁰⁾ことから、クリープ変形し易いSF- Al_2O_3 の方がC- Al_2O_3 よりも耐摩耗性に劣ると予想されたが、結果は4種工具中最も優れた。Fig.17に逃げ面摩耗部の表面組織を示すが、いずれの工具も激しい凹凸面を呈している。特にC- Al_2O_3 工具では破面組織のような摩耗面を示していた。切削温度が高温になると凝着・分離摩耗が進行するが、低強度のC- Al_2O_3

は凝着・分離を繰り返す易く、結果として摩耗量が多くなり、また Al_2O_3 -30%TiCセラミックス工具の摩耗がC- Al_2O_3 に次いで多くなったのは、TiCがFeと反応し易いためと思われた。

Fig.18に耐欠損性試験の結果を示す。4本のスリットの入った炭素鋼(S45C)を切削することにより強制的に衝撃を与え、工具が欠損するまでの衝撃回数を調べた。SF- Al_2O_3 やC- Al_2O_3 工具は Al_2O_3 -40% ZrO_2 や Al_2O_3 -30%TiCよりも著しく耐欠損性に劣る。ここでSF- Al_2O_3 とC- Al_2O_3 を比較すると、ややSF- Al_2O_3 の方が優れる。耐欠損性試験後のSF- Al_2O_3 を観察すると、切刃に対し平行にクラックが認められ、これが進展し工具が欠損したと思われる。欠損はクラックの生じ易さと進展し易さに影響されるが、破壊靱性値はSF- Al_2O_3 とC- Al_2O_3 では差が無いことから、抗折力が高い分だけSF- Al_2O_3 の方がC- Al_2O_3 に比べて耐欠損性に優れたと解される。しかし、工具として使用するには、十分な耐欠損性とは言えず、今後更に検

討する余地がある。

4 結 言

Al₂O₃ 基セラミックス工具の改良を目的とし、Al₂O₃-TiC セラミックスの性質と切削性能の関係、および高強度白セラミックスについて検討し、以下のような結果を得た。

- 1) 同量の30%TiCを含む黒セラミックスにおいて鑄鉄切削ではTiCが粗粒の工具、高硬度材切削では微粒の工具と、それぞれTiC粒度の異なる工具が優れることが分かった。
- 2) 本研究で調製した微粒白セラミックスは室温抗折力が約1.3GPaと従来品に比べ著しく高い値を示した。しかし切削工具としての耐欠損性は更に改良する必要があった。

国内におけるセラミックス工具の割合は超硬合金、サーメットに比べて未だ小さなものである。しかし、被削材の難削化、切削条件の高速化などに伴い、セラミックス工具の応用範囲は今後更に拡大するものと思われる。これらの要求に対し、セラミックス材料の特性を生かした新しい工具材料の開発に取り組んでいきたいと考えている。

謝 辞

今回の受賞に際し、多くの援助とご指導を賜りました東京大学名誉教授 鈴木寿先生、元東芝タンガロイ(株)技術部部长(現(株)ニューセラ技研社長)勝村祐次博士に深く謝意を表します。並びに本開発を遂行するに当たりご協力頂きました東芝タンガロイ(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) E.D.Whitney: Powder Met. Intern., 10(1978)16.
- 2) H.Addhoun and D.Broussaud: "Interaction of ceramic cutting tool with Nickel-based alloys", Materials Science and engineering, A109(1989)379-387.
- 3) 勝村祐次, 高橋俊行, 木曾弘隆, 鈴木 寿: "Al₂O₃-TiC セラミックス工具の切削性能に及ぼす TiC 量と粒度の影響", 粉体および粉末冶金, 37(1990)566-570.
- 4) 勝村祐次, 高橋俊行, 鈴木 寿: "Al₂O₃-TiC セラミックス工具におけるフレーキング現象", 粉体および粉末冶金, 38(1991)591-596.
- 5) 高橋俊行, 勝村祐次, 木曾弘隆, 鈴木 寿: "Al₂O₃-TiC セラミックス工具による鑄鉄, 鋼の高速切削", 粉体および粉末冶金, 39(1992)1028-1032.
- 6) 高橋俊行, 勝村祐次, 鈴木 寿: "微粒組織を有する白セラミックスの諸性質", 粉体および粉末冶金, 40(1993)805-808.
- 7) 高橋俊行, 勝村祐次, 鈴木 寿: "微高強度白セラミックスの切削性能", 粉体および粉末冶金, 41(1994)33-37.
- 8) 高橋俊行, 勝村祐次, 鈴木 寿: "Al₂O₃ セラミックスの組織と二, 三の機械的性質に及ぼす添加 MgO 量の影響", 粉体および粉末冶金, 42(1995)900-904.
- 9) 臼井英司: 切削・研削加工学, 共立出版, (1971)159.
- 10) 平尾政利, 佐田登志夫: "切削工具面の局部温度測定", 精密機械, 40(1974)156-161.