

(財)日本小型自動車振興会補助研究

# ぜい性材料の精密研削における加工条件と評価技術の確立 (第2報)

—セラミックス及び複合セラミックスの精密研削におけるELID研削の適用—

藤原 和徳・大柴 勝彦・小松 利安・上野 正雄・大森 整\*

## Establishment of Machining Conditions and Evaluation Technique in Precision Grinding for Brittle Materials (2nd Report)

—Electrolytic In-Process Dressing(ELID) Grinding Technique for Composite Ceramics—

Kazunori FUJIHARA, Katuhiko OSHIBA, Toshiyasu KOMATU, Masao UENO and Hitoshi OHMORI

### 要 約

ぜい性材料である複合セラミックスと単体の炭化けい素の加工において、ELID研削法と従来の研削法(Normal Grinding:以下N.G.と記す)との比較実験を行った結果、以下のことが分かった。

- (1) #4000の鑄鉄ボンダダイヤモンドホイールで、ELID法による仕上研削面は、表面粗さ(P-V値)が、レジンボンダダイヤモンドホイール研削より100nm程度小さく、また、SEM観察による条痕の形状からも優れていた。
- (2) ELID研削で連続定寸切込み加工を行った場合研削抵抗値は、安定した値を示した。
- (3) 複合セラミックス及び炭化けい素を研削した時の端面部のだれは、ELID研削した場合、 $0.5\sim 0.7\mu\text{m}$ となり、レジンボンダダイヤモンドホイール研削と比較して、 $1/10\sim 1/6$ の値を示した。

### 1. 緒 言

近年、セラミックス等のぜい性材料は精密機器・電子機器等の主要部品として広く使用され、その状況は年々増加している。最近の傾向では、単体のセラミックス材料からセラミックスに金属あるいはウイスカー等を添加した複合材料<sup>1)2)</sup>(CMC: Ceramic Matrix Composites)、金属にセラミックスを添加した材料<sup>3)</sup>(MMC: Metal Matrix Composites)等、複合セラミックスも数多く開発され、高機能材料として多方面への応用が期待されている。

しかし、ぜい性材料の多くは硬くてもろい性質から難削性を示し、加工能率や加工精度など多くの問題が山積みされている。このため、県内関連企業からは加工条件の確立や加工時間の短縮化などの問題解決が強く要望されている。

従来、これらぜい性材料の高精度加工法として、ラッピング・ポリシング法<sup>4)</sup>、メカノケミカルポリシング法<sup>5)</sup>等が用いられている。しかし、この方法では平面研削盤で荒加工した後、ラッピング及びポリシング盤へ加工機を取り替えるため、段取りに時間が掛かるという問題点がある。

そこで本研究は、著者の一人である大森が開発した、砥

石を電解し、砥粒を常に一定量突き出させることで、汎用精密平面研削盤でもぜい性材料の仕上げ加工が可能になったELID研削法<sup>6)</sup>を用いて、複合セラミックスの鏡面仕上げについて、従来のレジンボンダ砥石と比較しながら、単体の炭化けい素と共に検討を行った。

### 2. 実験方法及び加工条件

実験に供した試料は、一般に市販されている炭化けい素及び複合セラミックスであり、その特性を表1に示す。なお、複合セラミックスの組成はSiC:70%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ :20%、Al:10%<sup>7)</sup>である。

炭化けい素及び複合セラミックスを $15\times 15\times 5\text{mm}$ に切り出し、それぞれ4個の試料を研削用治具にワックスで固定した。

表1 複合セラミックス及び炭化けい素の特性

	CMC <sup>7)</sup>	SiC
密度(g/cm <sup>3</sup> )	3.28	3.1~3.2
硬度(GPa)	(HRa80)	27.5
破壊靱性(MN/m <sup>3/2</sup> )	6.0	3.0
熱伝導率(W/mk)	147	87
強化材粒径( $\mu\text{m}$ )	500	—

\* 理化学研究所(素形材工学研究室)

実験方法は、各試料を精密平面研削盤（カールユング社製JF520）でトラバース研削加工し、表面粗さ、研削抵抗及び表面観察を中心に行った。使用した砥石型名、加工条件及びELID条件をそれぞれ表2、3及び4に示す。砥石はWA#400の砥石でツルーイングした後、表4の条件で30分程度初期電解ドレッシングを行った。

表面粗さは仕上げ加工後、非接触式表面形状測定機（ワイコ社製：TOPO-3D）で試料の中央部分を測定した。また、研削動力計（佐藤マシナリー製：AST-ZGS1）を用いて、荒加工時における砥石の周速度変化、ならびに長時間研削にともなう研削抵抗値を測定した。

表面観察は、仕上げ加工時の各加工方法ごとに走査型電子顕微鏡（日本電子製：JEL840）で行った。さらに、仕上げ研削加工後の試料端面を、接触式表面粗さ計で研削方向における、だれ深さ及び幅の測定を行い、それぞれの試料について、従来の研削とELID研削との比較を行った。

表2 使用砥石

	ダイヤモンド砥粒		cBN砥粒
	ELID研削用	従来研削用	
荒加工	SD325N100M	SD325N100B	B325N100M
中仕上げ加工	SD1000N100M	SD1000N100B	B1000N100M
仕上げ加工	SD4000N100M	SD4000N100B	B4000N100M

M: 鑄鉄ボンド B: レジンボンド

表3 加工条件

	荒加工	中仕上げ加工	仕上げ加工
砥石周速度(m/min)	1200	1200	1200
送り(mm/PASS)	2.0	1.0	0.5
工作物速度(m/min)	20	20	20
切り込み( $\mu\text{m}$ )	5.0	3.0	1.0
研削量( $\mu\text{m}$ )	50	30	15
スパークアウト回数	3	3	3
研削液	ノリタケケールCEM(50倍)		

表4 ELID電解条件

設定電圧(V)	80
設定電流(A)	14
パルス幅 $\tau$ ( $\mu\text{s}$ )	2/2(ON/OFF)
電極ギャップ(mm)	0.2

### 3. 結果及び考察

#### 3-1 各砥石による表面粗さ

図1は炭化けい素及び複合セラミックスを仕上げ加工した表面を、非接触式表面形状測定機により表面粗さ（P—

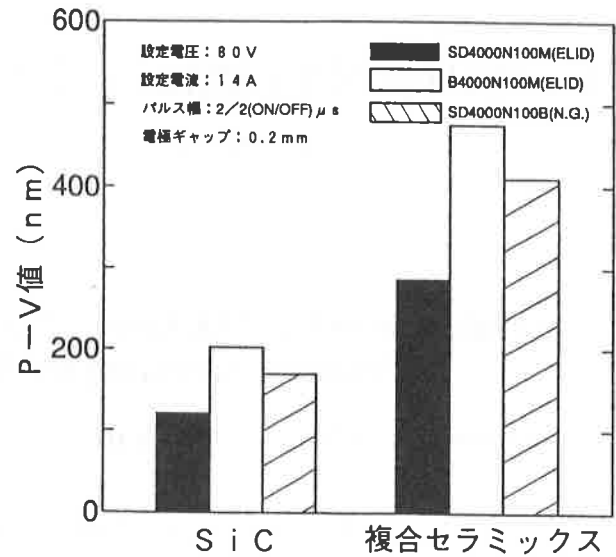


図1 各砥石による仕上げ加工後の表面粗さ

V値)を測定した結果である。また、図2に同測定機による三次元図を示した。

図1より、各砥石における炭化けい素と複合セラミックスとの表面粗さを比較すると、いずれの場合も複合セラミックスの方が2倍程度大きな値を示した。これは図2より、炭化けい素には非常に微細な研削条痕が見られるのに対し、複合セラミックスではマトリックス部分( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Al)が優先的に研削加工され、強化材として含有されている炭化けい素との間に段差が生じたため、P—V値が大きくなったものと考えられる。

鑄鉄ボンドダイヤモンドホイールと鑄鉄ボンドcBNホイールによる研削表面粗さを比較すると、cBNを用いた研削の方がダイヤモンドに比べ、1.6倍程度表面粗さが大きな値を示した。cBN砥粒の硬度は46.1GPa（ヌープ硬度）とダイヤモンド砥粒（68.6GPa）に比べ軟らかく、圧縮強度でも、ダイヤモンド砥粒の約9.8GPaに対し、cBN砥粒は約7.0GPaと機械的強度が低い。また、熱伝導率もダイヤモンド砥粒（7.0GW/m $\cdot$ K）の方がcBN砥粒（4.7GW/m $\cdot$ K）に対し高く、研削中に発生する熱を拡散しやすい。このことから、ダイヤモンド砥粒の方が砥粒の破碎や、熱的・化学的摩耗が抑制<sup>8)</sup>されたため、cBN砥粒の場合よりP—V値が小さくなったと考えられる。

鑄鉄ボンドダイヤモンドホイールでのELID研削と、レジンボンドダイヤモンドホイールの場合の比較では、レジンボンドの方がP—V値は1.3倍程度大きな値を示した。これは、図2(a)及び(b)より、レジンボンドの場合には非常に深い研削条痕が見られるのに対し、鑄鉄ボンドを用いたELID研削では、強化材とマトリックスの間に段差はあるものの、良好な研削条痕であったために、P—V値が小さ

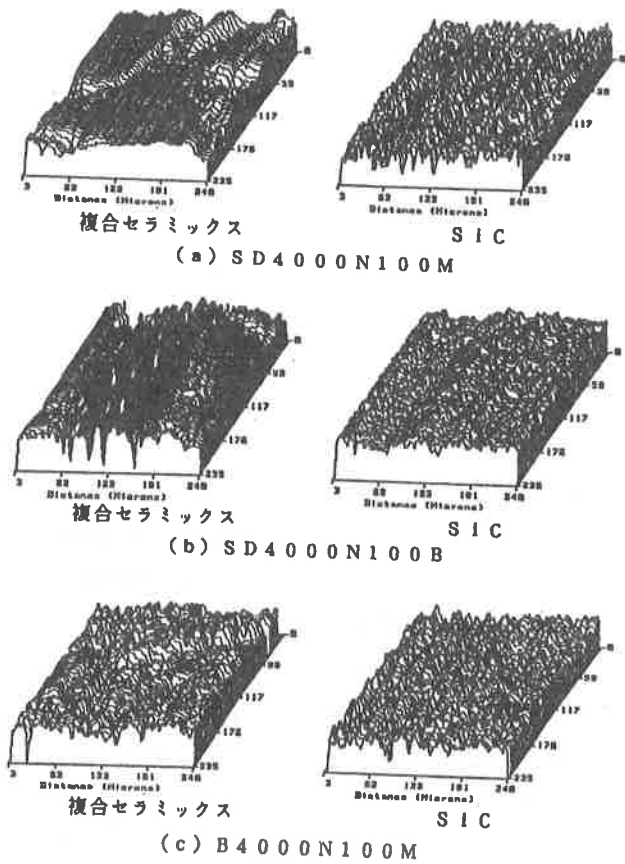


図2 三次元表面形状測定結果

くなったと考えられる。

### 3-2 研削抵抗

炭化けい素及び複合セラミックスについて表2の3種類の荒加工用砥石を用い、 $20\mu\text{m}$  ( $5\mu\text{m} \times 4$ 回) 切り込んだ時の法線方向の研削抵抗を図3に示す。いずれの砥石も、砥石周速度を $900 \sim 1800\text{m/min}$ に変化させても大きな変化は見られず、研削抵抗値はほぼ一定の値を示した。いずれの砥石周速度においても、鑄鉄ボンダイヤモンドホイールと鑄鉄ボンcBNホイールを比較すると、cBNホイールの方が5倍近い研削抵抗値を示した。

さらに、複合セラミックスを3種類の荒加工用砥石を用いて長時間研削を行った時の、研削抵抗値の推移を図4に示す。

鑄鉄ボンダイヤモンドホイールを用いたELID研削では、研削開始時から異常研削音が発生し、研削抵抗も $50\text{N}$ を示し、 $750\text{mm}^3$ 除去したところで研削抵抗値は $90\text{N}$ という高い値を示した。また、レジンボンダイヤモンドホイールの場合、研削開始時が $22\text{N}$ であり、その後研削を続けるに従い研削抵抗も直線的に増加し、 $2300\text{mm}^3$ 除去時で約 $40\text{N}$ となった。これに対し、鑄鉄ボンダイヤモンドホイールを用いたELID研削では研削開始時は $12\text{N}$ で、 $1600\text{mm}^3$ 除去時で $30\text{N}$ を示し、その後はほぼ一定の研削抵抗値で推移した。

炭化けい素を同様に荒加工用砥石で研削した場合の研削

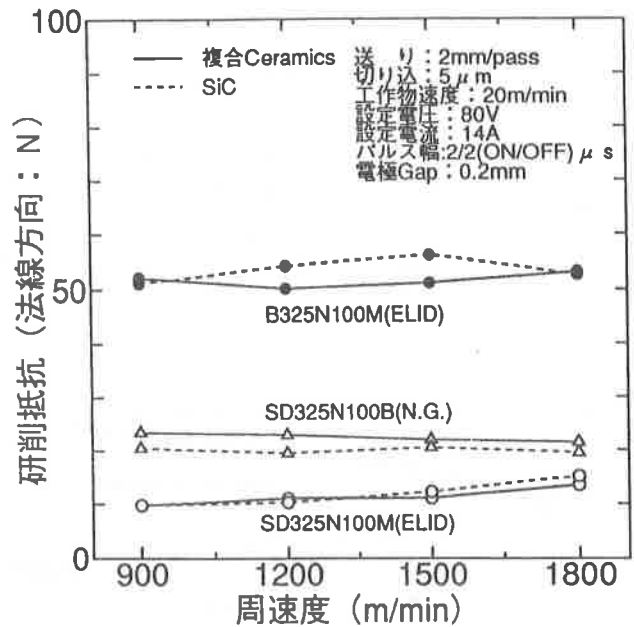


図3 各砥石と周速度の関係

抵抗値を図5に示す。鑄鉄ボンcBNホイールを用いた場合は、複合セラミックスと同様、研削開始時から異常研削音が発生し、研削抵抗値も $48\text{N}$ と高い値を示したため、研削を中止した。

鑄鉄ボンダイヤモンドホイールを用いたELID研削とレジンボンダイヤモンドホイールを用いた従来の研削とは、両者とも研削開始時から $1250\text{mm}^3$ 除去するまではほとんど同様な挙動を示すが、それ以降ELID研削は、研削抵抗に変化は認められずほぼ一定の値、 $28\text{N}$ であるのに対し、レジンボンではその後も直線的に増加し $2300\text{mm}^3$ 除去時で $38\text{N}$ を示した。

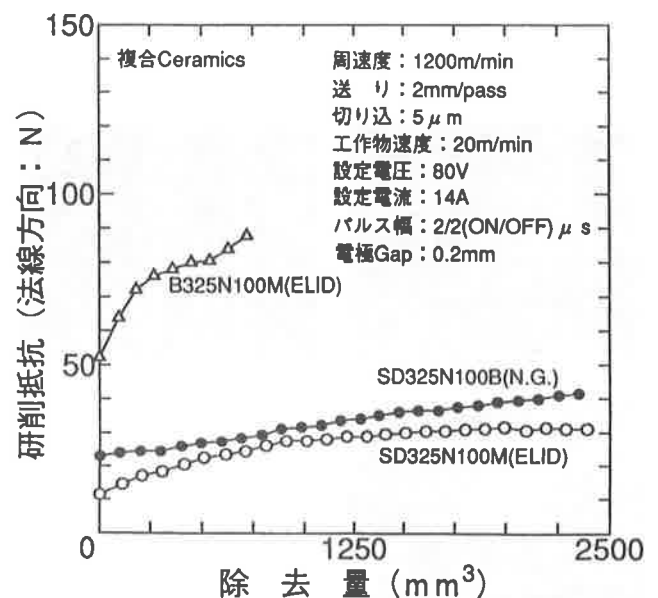


図4 複合セラミックスにおける粗研削時の研削抵抗

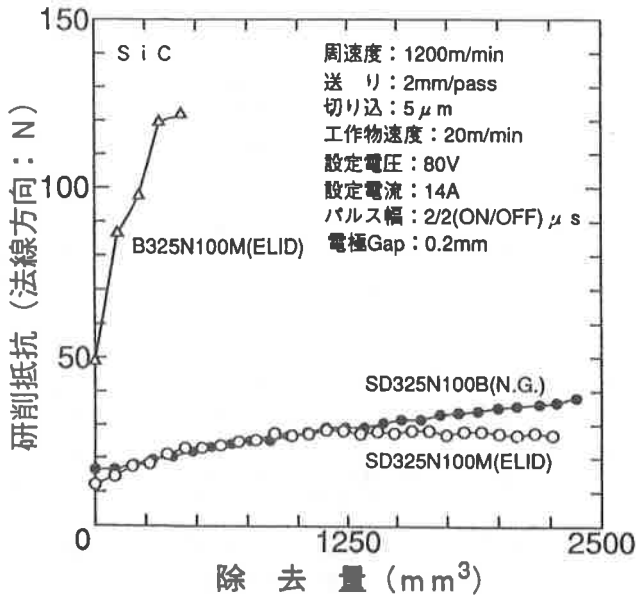


図5 炭化けい素における粗研削時の研削抵抗

鋳鉄ボンドとレジンボンドのボンド材を比較した場合、レジンボンドは非常に軟らかく縦弾性係数（ヤング率）が小さい。よって、複合セラミックス及び炭化けい素の研削でレジンボンドを用いると、ホイールの変形によって工作物とホイールの接触部面積が広くなり<sup>9)</sup>、そのために研削抵抗が増加すると考えられる。

### 3-3 SEM観察結果

複合セラミックスの仕上加工後の研削面のSEM観察結果を図6に示す。

図6(a)の鋳鉄ボンドダイヤモンドホイールで研削した場合、強化材として含有されている炭化けい素部分には、図2の表面粗さ測定結果からも明確なように非常に微細な研削条痕が示され、延性モード研削が行われたことが推察できる。

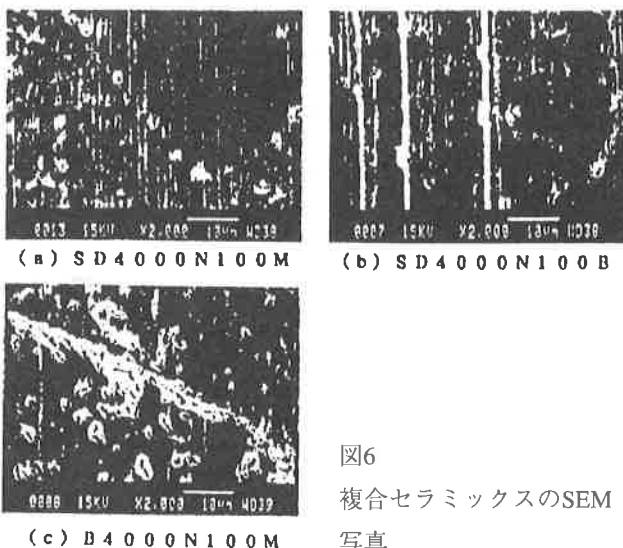


図6 複合セラミックスのSEM写真

これに対し、図6(b)のレジンボンドダイヤモンドホイールで研削した面は、強化材である炭化けい素及びマトリックス部の両方にわたり、ぜい性破壊を伴った研削条痕と延性モード研削が行われたと考えられる研削条痕が混在した状態であった。また、炭化けい素とマトリックス部分との境界も不明確であった。

図6(c)の鋳鉄ボンドcBNホイールで研削した場合は、レジンボンドダイヤモンドホイールと同様ほぼ全面にぜい性破壊を伴った研削条痕が見られた。特に、強化材とマトリックスの境界部分で、著しく破壊したと思われる破面が見られた。

### 3-4 研削端面のだれ

鋳鉄ボンドダイヤモンドホイールを用いたELID研削後とレジンボンドダイヤモンドホイールを用いた研削後との端面のだれを測定した結果を図7に示す。

炭化けい素をELID研削した場合、0.5 $\mu$ m程度のだれ深さに対し、レジンボンド研削の場合は約20倍の10 $\mu$ mを示した。また、複合セラミックスをELID研削した場合は、0.7 $\mu$ m程度に対し、レジンボンド研削の場合は約6倍の4.5 $\mu$ mを示した。さらに、だれの幅はレジンボンド研削の方が、ELID研削と比べて6倍と高い値を示す結果となった。

このように、端面のだれに明確な差がでる要因として、鋳鉄ボンドとレジンボンドのボンド材の硬度を比較すると、後者は前者に比べ柔軟性が高いことから、砥石が工作物端面に接触すると砥石に弾性変形が生じ、設定切り込みに対し切り残しが起こり<sup>10)</sup>、その結果ふちの部分が優先的に除去されるためと考えられる。

また、レジンボンドダイヤモンドホイールを用いて、炭

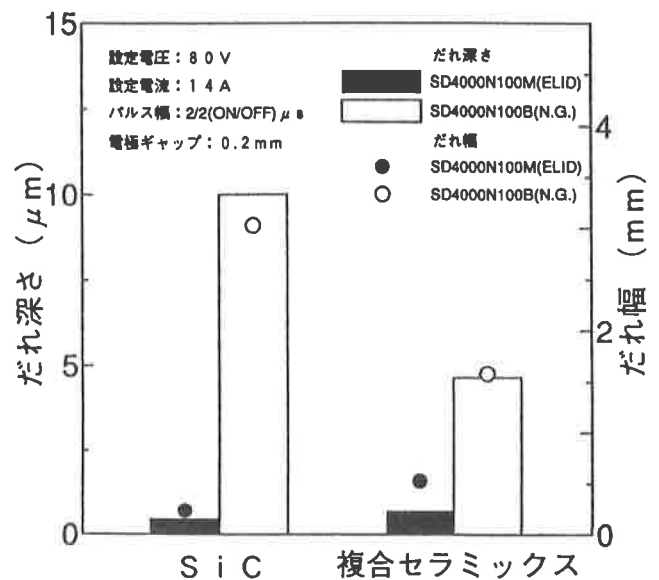


図7 研削方向における端面のだれ深さとだれ幅

炭化けい素と複合セラミックスを研削した場合、炭化けい素は端面のだれ深さが約2倍となった。これは、滑り摩損試験時の複合セラミックスの摩耗速度は、炭化けい素に比べ1/2程度<sup>7)</sup>であり、この耐摩耗性が研削時のだれに関与したためと考えられる。

#### 4. 結 言

炭化けい素及び複合セラミックスの研削加工について検討した結果、次のことが分かった。

- 1) 鋳鉄ボンドダイヤモンドホイールを用いて、炭化けい素及び複合セラミックスを、ELID研削した仕上表面粗さ(P-V値)は、レジンボンドダイヤモンドホイールより100nm程度小さな値を示した。
- 2) 仕上げ研削加工表面をSEM観察した結果、鋳鉄ボンドダイヤモンドホイールでELID研削したものは、非常に微細な研削条痕が確認できたのに対し、レジンボンドダイヤモンドホイールでは、局部的に深い研削条痕が見られた。
- 3) 炭化けい素及び複合セラミックスを長時間研削した時の研削抵抗は、レジンボンドダイヤモンドホイールでは直線的に増加するのに対し、ELID研削では1600mm<sup>2</sup>除去近辺から約30Nで安定に推移した。
- 4) 炭化けい素及び複合セラミックスの研削方向のに生じる端面のだれは、鋳鉄ボンドダイヤモンドホイールでELID研削した場合、0.7μm以下でありレジンボンドダイヤモンドホイールの約1/6の値を示した。

以上、研削抵抗値やだれの測定結果から、ELID研削は、複合セラミックスなどのぜい性材料を、精密研削加工する

際に、効果があることが分かった。

なお、本研究で使用した精密平面研削盤は、平成6年度日本小型自動車振興会の補助で設置したものです。また、実験材料はセラックス(株)に提供して頂きました。さらに、走査型電子顕微鏡観察を行うに当たり、当センター機械金属科の協力を厚く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) トーマス・ホームズ：金属酸化法による耐摩耗セラミック基複合材(CMC)、ニューセラミックス、(1993)、No.12
- 2) 向後保雄：CMCの強化機構、精密工学会誌、60、6、(1994)、780
- 3) 渡部晶：アルミニウム基複合材料の製造、精密工学会誌、60、6、(1994)、768
- 4) 河西敏雄：超精密生産技術大系第2巻実用技術、フジ・テクノシステム、1038
- 5) 安永暢男：超精密生産技術大系第2巻実用技術、フジ・テクノシステム、1087
- 6) 大森整：超精密鏡面加工に対応した電解インプロセスドレッシング(ELID)研削法、精密工学会誌、59、9、(1993)、1451
- 7) セラックス(株)：技術データから
- 8) 石川忠幸：超砥粒の特性と難削材への適用、精密工学会誌、58、12、(1992)、33
- 9) 海野邦昭：CBN・ダイヤモンドホイールの使い方、工業調査会、85
- 10) 鈴木他：X線ミラー用気相成長炭化けい素の延性研削、精密工学会誌、61、4、(1995)、571