cBN 砥粒切れ刃のマイクロ自生作用*

藤本正和** 市田良夫*** 佐藤隆之介*** 森本喜隆***

Micro Self-Sharpening of Cutting Edges in cBN Grinding

Masakazu FUJIMOTO, Yoshio ICHIDA, Ryunosuke SATO and Yoshitaka MORIMOTO

This paper describes the micro self-sharpening of cutting edges in cBN grinding. Plunge surface grinding experiments using a vitrified cBN wheel mounted a replaceable cBN segment into its peripheral side have been performed to observe the wear behavior of cBN grain cutting edges using a multiprobe SEM. The wear flat on the cutting edge is enlarged by ductile attritious wear and micro fracture that are repeated alternately. Therefore, a smooth surface due to ductile attritious wear and a rough surface due to micro fracture exist together on the wear flat. The size of the micro fracturing occurred on the wear flat ranges from 0.1 to 10 μm . Self-sharpening due to the micro fracture without a reduction in radial height of the cutting edge, that is, 'micro self-sharpening', takes place on the wear flat plane during grinding.

Key words: cBN wheel, cBN grain cutting edge, micro self-sharpening, micro fracture, ductile attritious wear, wear flat

1. 緒 言

砥石の自生発刃作用は、摩耗により鈍くなった砥粒切れ刃が研削中の負荷を受けて破碎し、新しい切れ刃を再生する現象であり、砥石の寿命特性を左右する要因の一つとしてよく知られている^{1)~3)}。しかし、cBN やダイヤモンド砥粒を用いた研削では、砥粒自身が高価で、かつ高い性能を有していることなどから、砥粒の大きな破碎はもとより、砥粒切れ刃先端での破碎の規模やその頻度も必要最小限に抑え、砥粒の損耗をできる限り抑制することが重要である。これまでこのような超砥粒ホイールの自生発刃作用について研究した例は少なく^{4)~6)}、その発生のメカニズムや研削特性への効果についてはいまだ十分把握されていないのが実状である。

そこで本研究では、cBN ホイールにおける自生作用の実態を明らかにすることを目的として、ホイール外周の一部を脱着可能な構造にした cBN ホイールによる研削実験を試み、研削の進行に伴う砥粒切れ刃の形状変化をマルチプローブ SEM による 3 次元観察から捉え、切れ刃の挙動を巨視的および微視的立場から評価した。その結果、巨視的には平坦に見える切れ刃であっても、その表面には微細な凹凸が存在し、微細な破碎に基づく自生発刃作用が生じていることを明らかにした。さらに、これらの微小破碎により形成される微小切れ刃の形態や分布などのマイクロトポグラフィについても定量的な評価を試みたので合わせて報告する。

2. 実験装置と方法

図 1 に実験装置の概要を示す。使用した cBN ホイールは、図の模式図に示すように、ホイールの一部 (cBN セグメントと呼ぶ) を取外したり、再び取付けることができる構造となっている。これにより研削過程の任意の段階で、セグメントを取外して cBN ホイール表面を直接観察することができる。また、cBN セグメントは図中の拡大図に示す形状を有し、高精度に位置決めすることが可能である⁶⁾。なお、このセグメント構造の cBN ホイールと同一仕様の通常の cBN ホイールも同一ロッドの

cBN 砥粒を用いて作製した。これらの cBN ホイールによる同一条件下での研削実験から、両ホイールの研削性能がほぼ同一であることを確認した。

研削実験は、横軸角テーブル形平面研削盤を用いて、テーブル 1 往復あたり一定の切込みを連続して与えて (上向き研削時のみ) 加工する平面プランジ研削方式で行った。被削材として高速度鋼 SKH51 を使用した。実験条件を表 1 に示す。

なお、cBN ホイールは、AE センサ付きロータリダイヤモンドドレッサ (ドレッサホイール: SD40Q75M) を用いて、cBN ホイール周速度 33 m/s、ドレッサ周速度 16.5 m/s、周速比 0.5、

Fig.1 Schematic illustration of the experimental setup

Table 1 Grinding conditions

Grinding method	Plunge surface grinding (Up-cut)
Grinding wheel	cBN80L100V Dimensions: $\phi 200 \times t 10$ mm
cBN grain	Single crystal cBN (Type 1)
Peripheral wheel speed v_s	33 m/s
Work speed v_w	0.15 m/s
Wheel depth of cut a	10 μm
Grinding fluid	Soluble type, 2 % dilution
Workpiece	High speed steel JIS SKH51 (65 HRC) Dimensions: $100^l \times 5^f \times 30^h$

* 原稿受付 平成 18 年 12 月 19 日

** 学生会員 宇都宮大学大学院 (栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

*** 正 会 員 宇都宮大学工学部 (栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

Fig.2 Change in 3D-image of cBN grain cutting edges on wheel working surface with accumulated stock removal V'_w

ドレッシングリード 0.1mm/rev, ドレッシング切込み $2\mu\text{m} \times 5$ 回の条件でドレッシングを行い, 実験に供した。

cBN ホイール作用面の観察は, 4つの電子線プローブを備えたマルチプローブ SEM/EDM3000 (以後 3D-SEM と呼ぶ) を用いて行い, 砥粒切れ刃の全体形状および切れ刃先端の微視的構造を 3 次元解析して, 自生作用の実態を捉えた。なお, SEM 観察と平行して EDX による元素分析および CCD デジタル顕微鏡による表面観察を適宜行い, 砥粒, ボンド, 付着切りくず, 充填材等の判別を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 砥粒切れ刃の摩耗形態

単位研削幅当りの累積研削除去量 V'_w の増加に伴うホイール作用面の変化を 3D-SEM で観察した結果の代表的な一例を図 2 に示す。ドレッシング直後の作用面には, 凹凸面や平坦な表面をもつ砥粒などさまざまな形状の砥粒が観察される。これらの砥粒の多くは, 研削の進行と共に摩滅や破碎を繰り返し漸次その形状を変化させているのが把握される。また, 一部脱落する砥粒もみられる。代表的な砥粒について, 研削の進行に伴う砥粒先端形状の変化を追跡観察し, その変化の特徴を捉えてみると, おおよそ表 2 のように分類される。

砥粒 a と b は, 研削開始 (研削除去量 $V'_w=0$) から $V'_w=2000\text{ mm}^3/\text{mm}$ の間で一部破碎し, その後 $V'_w=2000$ から $6000\text{ mm}^3/\text{mm}$ の間で脱落し, 消滅している。この種の摩耗は, 研削の初期の段階 (初期摩耗域) でよくみられる形態である。

次に, 砥粒 c と d は $V'_w=0$ から $10000\text{ mm}^3/\text{mm}$ の間で摩滅摩

Table 2 Classification of wear forms of cBN grains on wheel working surface

Grain	Wear forms (A: Attritious wear, F: Fracture, MF: Micro fracture, R: Releasing)					
a	— F —>	— R —>				
b	— F —>	— R —>				
c	— A —>	— A·MF —>	— F·R —>			
d	— MF —>	— A —>	— MF —>	— R —>		
e	— A —>	— A —>	— M·FA —>	— F —>	— A —>	
f	— MF —>	— A·MF —>	— A —>	— MF —>	— A —>	
g	— MF —>	— A —>	— MF —>	— F —>	— A·MF —>	
h	— A —>	— MF·A —>	— A·F —>	— A —>	— A —>	
i	— A —>	— MF·A —>	— MF·A —>	— MF·A —>	— A·MF —>	
j	— A —>	— A —>	— A·MF —>	— A —>	— A —>	
k	— A —>	— A —>	— A —>	— A —>	— A·MF —>	
l	— A —>	— A —>	— A —>	— A —>	— A —>	
m	— A —>	— A —>	— A —>	— A —>	— A —>	
n	— A —>	— A —>	— A —>	— A —>	— A —>	
	0	2000	6000	10000	14000	14500
	Stock removal V'_w mm^3/mm					

耗と微小破碎を繰り返し, 砥粒 c は $V'_w=6000 \sim 10000\text{ mm}^3/\text{mm}$ の間で, 砥粒 d は $V'_w=10000 \sim 14000\text{ mm}^3/\text{mm}$ の間で脱落している。さらに砥粒 e, f, g, h, i は, 研削中摩滅, 部分破碎, 微小破碎を繰り返しながら研削終了 ($V'_w=14500\text{ mm}^3/\text{mm}$) の段階まで作用面に残留した砥粒である。これらの摩耗過程, つまり摩滅しては破碎するという現象を順次繰り返しながら形状を変化させていく摩耗の過程が, 従来から知られてきた自生作用としての効果をもたらす典型的な摩耗の形態と考えることができる。

一方, 砥粒 j, k, l, m, n は, 研削初期から研削終了までの間, おもに摩滅が進行して砥粒の先端が漸次平坦な形状に変化している砥粒のグループである。これらの摩耗過程は従来から知られてきた摩滅摩耗の典型的な形態に分類される。しかしながら,

Fig.3 Change in 3D-image of top surface of grain k in Fig.2 with accumulated stock removal V'_w

これらの砥粒においても、その先端面を注意深く観察してみると、わずかながら凹凸が観察され、しかもその凹凸の形状が研削の進行と共に漸次微妙に変化しているのを確認することができる。

そこで本研究では、このような摩滅摩耗の形態と挙動をさらに詳細に追究することにする。

3.2 摩耗平坦面の微細構造

表2に示した砥粒の中でおもに摩滅摩耗が進行する砥粒について、その砥粒先端の変化をさらに高倍率で観察してみた。代表例として、砥粒kについて観察した結果を3次元像で示すと図3のようになる。研削の進行に伴い砥粒先端の形状が次第に平坦化していく過程を把握することができる。このような摩耗により砥粒先端に形成される全体的に平坦な面は、一般に「摩耗平坦面」あるいは「摩滅面」と呼ばれている。

まず、摩耗平坦面の微細構造を検討するに先立ち、砥粒先端の半径方向の摩耗深さを砥粒半径摩耗 ΔR_g とし、これを砥粒の3次元プロファイルの変化から測定した。砥粒周辺の摩耗しない部分を基準面とし、これと砥粒先端の平坦面との高低差を測定することにより砥粒半径摩耗 ΔR_g を求めた。測定結果を図4に示す。図中 ΔR は転写法により測定したホイール半径摩耗であり⁶⁾、 ΔR_g は ΔR よりも少し小さい値を示しているがほぼ同様の傾向を示している。これより砥粒kの先端が $V'_w = 14500 \text{ mm}^3/\text{mm}$ までの研削実験が終わるまでにおおよそ $35 \mu\text{m}$ 摩耗していることが把握される。

さて、図3の観察例において、ドレッシング直後の切れ刃先端の形状は比較的平坦に成形されているが、研削除去量 $V'_w = 2000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 研削した後ではさらに平坦な形状に変化しているのがわかる(このときまでの砥粒半径摩耗 ΔR_g は約 $6 \mu\text{m}$ である)。ただし、摩耗平坦面には多数の微細な凹凸が存在しているのが観察される。すなわち、全体的には平坦な形状を呈してい

Fig.4 Relationship between radial grain wear ΔR_g and stock removal V'_w

Fig.5 Change in roughness of wear flat with accumulated stock removal V'_w

るが、その表面には数 μm 程度の微細な凹凸が存在している。さらに、砥粒先端は $V'_w = 2000$ から $6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ の間で約 $9 \mu\text{m}$ 、 $V'_w = 6000$ から $10000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ の間でほぼ $10 \mu\text{m}$ 摩耗しており、このような摩耗の進行に伴い摩耗平坦面の面積も漸次拡大している。同時に、表面の微細な凹凸もわずかに大きくなる傾向が見られる。また、 $V'_w = 6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 付近から平坦面には研削

Fig.6 Microstructure of wear flat plane (High magnification SEM image , 3D-image and contour map of top part A in Fig.3, MF: Micro fracture, UMF: Ultramicro fracture, DA: Ductile attritious wear, MCE: Micro cutting edge)

方向と平行に摩耗による条痕（摩耗条痕）が形成されるようになり、研削と直角方向の切れ刃表面の凹凸を大きくしているのがわかる。 $V'_w = 10000$ から $14500 \text{ mm}^3/\text{mm}$ の間ではさらに摩滅摩耗が進行し、砥粒先端は $10 \mu\text{m}$ 程度後退している。なお、 $V'_w = 14000$ から $14500 \text{ mm}^3/\text{mm}$ にかけて砥粒の側面C部付近に微小破砕が生じ、これに伴って摩耗平坦面が一部減少している状況が確認される。

このように、砥粒切れ刃の先端は全体として漸次平坦な形状に変化するが、その摩耗平坦面には微細な凹凸が存在し、その凹凸の形状も研削進行と共に漸次変化しているのが把握された。そこで、これらの切れ刃表面のプロファイルから摩耗平坦面上の微小凹凸の大きさ（振幅）を最大高さ粗さ R_z で評価してみる。すなわち、平坦面上の研削方向および研削と直角方向の2次元断面プロファイル（評価長さ $96 \mu\text{m}$ ）から粗さ R_z を求め、それらを各々研削方向の凹凸の大きさ h_g および研削と直角方向の凹凸の大きさ h_p とした。測定はいずれも任意に選んだ10カ所以上の視野で行い、それらの結果の平均値として h_g および h_p を求めた。結果を図5に示す。いずれの方向の凹凸も研削の進行とともにわずかに増大する傾向にあるが、 $V'_w = 6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ を越えるとはほぼ一定値を示すようになる。また、凹凸の大きさはおよそ $5 \mu\text{m}$ 以下の微小なものであることがわかる。また、研削方向の凹凸よりもそれと直角方向の凹凸の方が大きめとなっているが、これは前述した摩耗条痕の発生によりもたらされるものと考えられる。

そこで、このような微小な凹凸の形態とその形成機構を把握するため、さらに高倍率で切れ刃表面の観察を行った。代表例として、図3における $V'_w = 10000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 研削後の切れ刃表面

Fig.7 Microstructure of wear flat plane

A部の高倍率SEM像と3次元プロファイルを図6に示す。切れ刃表面には、平滑な摩耗面と微細な凹凸面が混在している。凹凸面の表面にはへき開段などの脆性破面特有のパターンがみられことから、これらの凹凸の生成がおもに微小脆性破壊によるものであることがわかる。また、これらの凹凸の形状から、微小破砕の規模が大きいもので $10 \mu\text{m}$ 程度、小さなものでは $1 \mu\text{m}$ 以下の極微小なものまでであることが把握される。一方、図中にみられる平滑な表面は凝着摩耗、熱・化学的摩耗、塑性流動による摩耗など、連続的に生じる摩耗により形成されたものと考えられ、滑らかな表面を呈している。ここでは、このような連続的に生じる摩耗を「延性摩耗（摩滅）」とよび、それにより生じる平滑な摩耗面を「延性摩耗面（摩滅面）」または「延性摩耗による摩耗平滑面」と呼び、「摩耗平坦面」と区別することにする。

以上の観察から、切れ刃の摩耗平坦面には「延性摩耗による平滑面」と「微小破砕による凹凸面」が混在しており、摩耗平坦面の表面構造は図7のように表すことができる。図6において、摩耗平坦面中に占める延性摩耗による平滑面の面積割合は10%程度であるが、その割合は研削条件や加工中の雰囲気など

Fig. 8 Change of cumulative micro cutting edge density C_m with accumulated stock removal V'_w

Fig. 9 Change of micro cutting edge density C_m at radial depth z with accumulated stock removal V'_w

(a) High magnification images of top part B in Fig. 3 ($V'_w=14000 \text{ mm}^3/\text{mm}$) (b) High magnification images of top part B' in Fig. 3 ($V'_w=14500 \text{ mm}^3/\text{mm}$)

Fig. 10 Micro self-sharpening due to micro brittle fractures (MF: Micro fracture, UMF: Ultramicro fracture, DA: Ductile attritious wear, MCE: Micro cutting edge)

により変化すると考えられる。例えば、微小破砕が発生せずに摩耗平坦面の全部が延性摩耗面で占められることもあり得る。

3. 3 微小切れ刃の分布

以上のように、摩耗平坦面には微細な凹凸が存在することから、これらの微細な凹凸の突起部を微小切れ刃と考え、その分

布を 3D プロファイルから測定してみた。切れ刃表面上任意に選んだ $96 \times 96 \mu\text{m}^2$ の視野 10 カ所以上で測定し、その平均値を求めた。結果の一例を図 8 に示す。ここで z は切れ刃先端からの半径方向深さであり、 C_m は z までの累積微小切れ刃密度である。また、研削除去量の増加に伴う微小切れ刃密度の変化を z

をパラメータとして示すと図 9 のようになる。 C_m はかなり複雑な変化を示している。つまり、 $V'_w = 6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ までは減少するが、 $V'_w = 10000 \sim 14000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ で大きくなり、 $V'_w = 14500 \text{ mm}^3/\text{mm}$ で再び減少している。測定の間隔（測定する V'_w の間隔）が粗いため、研削過程での C_m の変化の傾向を捉えることは難しいが、図から C_m が研削中絶えず変化している状況にあることを知ることができる。すなわち、研削中延性摩滅による平滑化と微小な破碎が繰り返され、これにより切れ刃表面の凹凸が絶えず変化していることを示している。

3.4 微小破碎による自生作用

このような微小破碎による凹凸の形成が研削中どのように生じるのかその実態を捉えるため、観察の間隔（観察する V'_w の間隔）を短くして、切れ刃表面の微細な変化を追跡してみた。結果の一例を図 10 に示す。これは図 3 における $V'_w = 14000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 研削後の B 部が $V'_w = 14500 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 研削後の B' 部に変化する状況を高倍率で観察したものである。この研削除去量 $500 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 研削する間での砥粒半径摩耗 ΔR_g は $1.5 \mu\text{m}$ 程度であるが、表面の形態はかなり変化しており、図中○印で示す部分等がほぼ同じ形態を留めているだけである。

これらの図より、平滑に延性摩滅した部分が微小破碎し、微細な凹凸を形成しているのが把握される。逆に、鋭い突起部が延性摩滅により平滑化している状況もみられる。すなわち、砥粒切れ刃の摩耗平坦面の形成は、延性摩滅と微小破碎の繰り返しによって行われていることを示している。また、摩耗平坦面の全体的な凹凸は $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 程度であるが、破碎面の微視的な形態変化から、微小破碎の規模が大きいもので $10 \mu\text{m}$ 程度、小さいものではサブ μm オーダの極微小なものまでであることが把握される。すなわち、破碎の規模はおおよそ $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ の範囲に及んでいる。

砥粒切れ刃の破碎だけでなく、砥粒脱落をも含む従来の自生作用に対する概念に対して、以上のように、切れ刃先端のごく一部で発生して、切れ刃先端の後退をほとんどもたらさないような微小な破碎に基づいて行われる切れ刃の再生現象をここでは「マイクロ自生作用」と呼ぶことにする。

3.5 マイクロ自生作用と研削特性の相関

マイクロ自生作用が cBN ホイールの研削特性にどのような効果をもたらすのかを、研削過程における研削抵抗および仕上面粗さ（研削方向と直角方向）の変化から検討してみる。研削抵抗二分力および仕上面粗さ Ra の測定結果を図 11 に示す。抵抗二分力はいずれも、研削の初期で急減し、その後わずかに増加する傾向を示すが、 $V'_w = 6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 付近からほぼ一定値を維持するようになる。摩滅摩耗による平坦化が進行しても抵抗の増加があまり生じないのは、前述したように、切れ刃の平坦面では延性摩滅だけでなく微小破碎が繰り返し発生して、微小切れ刃を生成するためと考えられる。すなわちマイクロ自生作用の効果が現れることによるものと考えられる。

一方、表面粗さは、研削量の増加と共にほぼ直線的に増加する傾向を示している。摩滅摩耗が進展して切れ刃が全体的に平坦化するものの、その表面には微細な凹凸が形成されることや研削中砥粒の脱落や破碎も漸次生じていることから、研削の進行と共に作用面上の切れ刃分布が次第に粗となり、かつ切れ刃先端の不揃いが徐々に生じるようになるものとみられ、これらが仕上面の粗さを増加させる要因となっていることが考えられ

Fig.11 Changes of grinding forces and ground surface roughness with accumulated stock removal V'_w

る。このため、このような粗さの増加率をより低減しようとするには、マイクロ自生作用の発生を適宜制御することも必要である。例えば、表 1 の条件における工作物速度 v_w を 0.15 m/s から 0.1 m/s にすると、マイクロ自生作用の発生が若干抑制され、この結果粗さの増加率がかなり低減されるようになることを既に確かめている⁷⁾。しかしながら、マイクロ自生作用と粗さとの相関についてはさらに詳細な検討が必要である。また、前述した研削抵抗も含めた研削特性全体に及ぼすマイクロ自生作用の効果についても今後さらに研究を進める予定である。

4. 結 言

研削過程における cBN 砥粒切れ刃の摩耗挙動をマルチプロンプ SEM により 3 次元観察し、これを基に自生作用について検討した結果、本実験条件の範囲で以下の結論を得た。

- (1) 砥粒切れ刃は摩滅摩耗により平坦化し、全体的に平坦な面、すなわち「摩耗平坦面」を形成するが、その表面には $3 \sim 5 \mu\text{m}$ の微細な凹凸が存在している。
- (2) 摩耗平坦面は延性摩滅と微小脆性破碎の繰り返しによって形成され、その表面には延性摩滅により形成される平滑面と微小破碎により形成される凹凸面が混在している。
- (3) 摩耗平坦面上での微小破碎の規模は、大きいもので $10 \mu\text{m}$ 程度、小さいものではサブミクロンオーダの極微小なものまでである（破碎規模はおおよそ $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ の範囲にある）。
- (4) (1)～(3)と関係して、砥粒切れ刃の先端部（摩耗平坦面）では、先端面の後退を伴わないほどの微小な破碎に基づくマイクロ自生作用が発生している。

参 考 文 献

- 1) 渡辺半十: 研削砥石の研削作用に関する研究, 精密機械, **18**, 8 (1952) 8.
- 2) 吉川弘之: 研削砥石の自生機構, 日本機械学会論文集 (第 3 部), **28**, 190 (1962) 655.
- 3) S. Malkin and N. H. Cook: The Wear of Grinding Wheels. Part 2- Fracture Wear, ASME Journal of Engineering, for Industry., **93**, (1971) 1129.
- 4) Y. Ichida, N.B. Fredj and N. Usui: The Micro-Fracture Wear of Cutting Edges in CBN Grinding, The 2nd Int. ABTEC Conf., JSGA, **11**, (1995), 501.
- 5) Y. Ichida and K. Kishi: The Development of Nanocrystalline cBN for Enhanced Superalloy Grinding Performance, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, **119**, (1997), 110.
- 6) M. Fujimoto, Y. Ichida, R. Sato and Y. Morimoto: Characterization of Wheel Surface Topography in cBN Grinding, JSME International Journal, Series C, **49**, 1 (2006) 106.
- 7) 藤本正和, 市田良夫, 佐藤隆之介, 森本喜隆: cBN 砥粒切れ刃の微視的挙動に関する研究—定常摩滅領域における切れ刃摩耗挙動の三次元解析—, 2006 年度精密工学会秋季大会講演論文集, (2006) 23.