上向き単粒研削法による超砥粒の評価*

松 尾 哲 夫** 大 島 栄 一**

Evaluation of Superhard Abrasive Grains by Overcut Fly-milling Test

Tetsuo MATSUO and Eiichi OSHIMA

An overcut fly-milling test with inclined workpiece has been made to accurately evaluate the chipping and wear characteristics of superhard abrasive grains (diamond, CBN) on various hard materials. The Al_2O_3 and SiC grains were also tested for comparison. The milling experiment was carried out on a surface grinder at a speed of 38 m/s and a feed of 4.0 m/min. The maximum depth of cut was 110 μm . The test was conducted both in dry and wet. The work materials used are hardened SUJ 2, cemented carbide, sintered alumina, etc. Thus, a quantitative evaluation of the chipping and attritious wear was made for each grain by tracing across the grooves with stylus instrument. The data obtained has been treated statistically. The CBN grain proved to be the most resisting to the chipping and attritious wear for the cutting of SUJ 2 steel, and hence, has the highest G -ratio. But, this grain has no ability to cut the cemented carbide or the ceramics used. As far as the diamond grain is concerned, the lowest G -ratio was obtained in the grinding of cemented carbide, followed by sintered Si_3N_4 , and the highest G -ratio was obtained on grinding silicon. The supply of grinding fluid leads to finer chipping and higher chipping probability.

Key words: diamond grain, CBN grain, fly-milling test, hard materials, chipping, wear

1. 結 言

近年、急速な技術革新に伴い機械部品の硬質化，セラミック化が進んでいる。これに伴いこれら硬質材料の切削・研削加工の研究が今日の生産加工上の重要課題となっている。言うまでもなく，ここでは通常超砥粒工具が使われるが，その利用度の高まりはまことに著しく，もはや一般砥石の時代は去り超砥粒の時代に入ったとの感がある。従って，現在まで超砥粒砥石の性能に関する研究報告が多く見られるが，砥粒として必須の性質である摩耗^{1)~3)}や微小破砕性⁴⁾⁵⁾（チップング特性）の研究については必ずしも多くはない。

筆者らは先に重研削用高じん性砥粒について単粒チップング実験を行った⁶⁾⁷⁾。しかしダイヤモンド砥粒とCBN砥粒の二つの超砥粒については焼入鋼，アルミナなど硬質材料に対するピン/円板型摩耗実験¹⁾²⁾を行った程度で破砕性の研究はまだ行っていない。

本研究は超砥粒砥石による硬質材料の重研削に関する基礎研究として行われたもので，ここでは同じ超砥

粒について得られた切削性，摩滅摩耗性及びチップング特性について述べる。

2. 実 験 方 法

2.1 単粒研削の原理

単粒研削は平面研削盤（1.1 kW）を利用して行うが，その原理を図1に示す。長さ100 mmの被削材が1.3/1000の勾配をもって研削盤テーブル上に固定されており，これに向かって単粒による上向き平面研削が行われる。この方式は，従来からStanislao⁴⁾やBrecker⁸⁾らによって採用された方式と類似のものである。すなわち，被削材を回転砥粒に向かって一定速

Fig. 1 Set-up for fly-milling test with an abrasive grain

* 原稿受付 昭和60年3月14日，昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和58年10月16日）にて発表

** 正 会 員 熊本大学工学部（熊本市黒髪2-39-1）

Fig. 2 Change in depth of cut due to attritious wear, (a), and sketch showing chipping fracture at a constant depth of cut, (b)

Table 1 Fly-milling test conditions

Abrasive grain*	Diamond (natural)	HK 8 000
	Boron nitride (CBN)	HK 4 700
	Regular alumina	HK 2 100
	Green SiC	HK 2 600
Work material	SUJ 2 steel (hardened)	HRC 63
	Cemented carbide (P 20)	HRA 90
	Sintered alumina	HRA 86
	Sintered Si_3N_4	HRA 90
	Silicon (crystal)	HV 1 020
Cutting speed	$V_g = 38 \text{ m/s}$	
Work speed	$V_w = 4.0 \text{ m/min}$ (feed $f = 1.1 \text{ mm/rev}$)	
Cutting fluid	Dry and wet (emulsion (2%), 1.2 l/min)	

* Grain size # 12 (CBN # 14-20)

度で送り込むことにより溝の深さが漸増し、あるところで砥粒先端がチップングを起こし溝の深さが急減する。又その間砥粒の先端は摩滅的に摩耗する。試験中このような現象が繰り返される(図2参照)。ここで砥粒の摩滅摩耗量とチップング量は触針式粗さ計で溝の断面を2 mm間隔でトレースすることにより、以下のように求められる。なお、データの散乱はかなり大きいことが分かったので統計的にこれらの値を処理した。

表1に使用した被削材、供試砥粒及び実験条件を示す。

2.2 砥粒先端の摩滅摩耗量の測定

図3は実際に得られた切込み深さ測定結果の例を示すもので、上述のように溝の深さの急減(すなわちチップング)が時どき起きていること、そしてチップングの生じない区間においても砥粒先端の摩滅摩耗の進行により、実切込みは理論値(二点鎖線)より幾分下にそれている。なお、理論値より上に突出する測定点は、ぜい性材料の切削における特有の過切込み現象

Fig. 3 An example of the measurement of actual depth of cut

を意味する。

ここで、砥粒の摩滅摩耗 Δr_a とは研削1回当たりの砥粒先端の高さ変化を意味し、次式によって与えられる。

$$\Delta r_a = \frac{\pi D V_w}{V_g} (\tan A - \tan B) \quad (1)$$

ここに、 D は砥粒回転直径、 V_w は被削材の送り速度、 V_g は砥粒切削速度である。また、 A, B は溝の理論及び実勾配である。

2.3 チップング量の測定

上述のようにチップング量は砥粒の微小破砕量を意味し、その値 Δr_c (mm) は式(2)により与えられる。

$$\Delta r_c = a_b - a_f \quad (2)$$

ここで、 a_b, a_f はチップング前後における切込み深さである(図2参照)。

なお、 Δr_c は先の Δr_a と同様に切込みの値によって異なるので、本研究では $\Delta r_a, \Delta r_c$ を種々の切込みに対して示した。

2.4 チップング確率の求め方

砥粒のチップング確率($N\%$)、つまり与えられた一定切込みに対するチップングからチップングまでの平均研削数の逆数($\%$)は砥粒の持つ一つの重要なチップング特性値である。すなわち、勾配を付けずに一定切込みのもとで X 個の砥粒で研削を行い、それぞれの砥粒が示す破砕までの研削回数が $n_1, n_2, n_3, \dots, n_X$ であったとすると、求めるチップング確率 N は式(3)で求められる。

$$N = \frac{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3} + \dots + \frac{1}{n_X}}{X} \quad (3)$$

しかし、これを行うには膨大な回数(一定切込み研削実験を行う必要があり、この煩雑さを避けるため上述

の斜板の採用により簡単に求めた。すなわち、図2(a) 中点線で示したように切込み a で狭いバンド $a_1 \sim a_2$ ($10 \mu\text{m}$) を考え、この中では切込み一定として計算する。かくして N は切込みに対して求められる。

2.5 研削比の決定

本研究では砥粒の損耗量に対する削除量の比、すなわち研削比 G を砥粒を直径 d_g の球と仮定して理論的に求めた。この場合の砥粒損耗量をチップング分と摩擦減摩分に分け、それぞれに対する研削比 G_c と G_a を求めた。

すなわち、チップングに基づく摩耗量 V_c は式(4)により求められ、一方摩擦減摩による摩耗量 V_a は式(5)により求められる。

$$V_c = \frac{\pi}{2} d_g (\Delta r_c)^2 \quad (4)$$

$$V_a = \frac{\pi}{2} d_g \left(\frac{\Delta r_a}{N} \right)^2 \quad (5)$$

一方、チップング1回当たりの削除量 Z 、すなわち、チップング発生直後の切込み値 a_1' から次のチップング直前の切込み値 a_2' (その間の研削距離 $L=f/N$, f は研削1回当たりのテーブル送り) までに削られる削除量は式(6)によって与えられる。

$$Z = \frac{1}{\tan B} (Z_2 - Z_1) \quad (6)$$

ただし、

$$Z_2 = (2a_2' - a_2'^2)^{1/2} - \frac{(2a_2' - a_2'^2)^{3/2}}{3} - \left(\frac{d_g}{2} - a_2' \right) \sin^{-1} (2a_2' - a_2'^2)^{1/2}$$

$$Z_1 = (2a_1' - a_1'^2)^{1/2} - \frac{(2a_1' - a_1'^2)^{3/2}}{3} - \left(\frac{d_g}{2} - a_1' \right) \sin^{-1} (2a_1' - a_1'^2)^{1/2}$$

d_g は 2 mm の球と仮定

従って研削比 G_c , G_a はそれぞれ式(6), (7)で求められる。

$$G_c = \frac{Z}{V_c} \quad (7)$$

$$G_a = \frac{Z}{V_a} \quad (8)$$

総合研削比 G は、 $G = Z / (V_c + V_a)$ であるので次式により求められる。

$$G = \frac{G_c \times G_a}{G_c + G_a} \quad (9)$$

(a) Effect of grain type

(b) Effect of work material

Fig. 4 Variation of attritious wear Δr_a with depth of cut

3. 実験結果及び考察

3.1 砥粒先端の摩滅摩耗

単粒研削より得られた砥粒先端の摩滅摩耗量 Δr_a (式(1)) を実切込みならびに切りくず厚さ h_g に対し示したのが図4である。ここで、各直線は回帰直線であり、同時に 95% 信頼区間を示す。切込みの増加につれ全般的に Δr_a はわずかに低下する傾向が認められる。まず、図4(a)のSUJ2材に対する結果ではA砥粒に比べD砥粒やGC砥粒では高い Δr_a 値が得られ、反対にCBN砥粒では最も低い値を示すことが

Fig. 5 SEM-micrographs of worn grain surface in cutting of SUJ 2, (a), and X-ray microanalysis of film formed on worn D grain surface in cutting of SUJ 2

分かる（使用した CBN 砥粒の粒径は他砥粒に比べ幾分小さいが、切込み量がせいぜい $100\ \mu\text{m}$ 位であるため砥粒先端部分について考えれば粒径の影響はほとんど無いと考えられる）。

通常、CBN 砥石は軸受鋼などの焼入鋼の研削には A 砥粒や GC 砥粒に比べ優れた研削性を有し、一方ダイヤモンド砥石は研削熱によるダイヤモンドの摩耗が激しく、研削温度が高い鋼の研削に不向きであることがよく知られているが⁹⁾、本研究結果はこれらの定説をよく裏付けている。

図 5 (a) は SUJ 2 研削における砥粒先端の摩耗面を観察した結果であるが、D 砥粒、CBN 砥粒とも A 砥粒と同様平坦な摩滅摩耗（凝着摩耗）の形跡が認められる。又、ところどころにクラックが存在した。特に超硬やセラミックスの研削でクラックが多く観察された（D 砥粒）。次に図 5 (b) は SUJ 2 研削後のダイヤモンド砥粒の摩耗面を X 線マイクロアナライザで解析した結果であるが、広い摩耗面が Fe 被膜で覆われている。この被膜の形成によって D 砥粒ではその切れ刃は鈍化し昇温も著しくなる結果、砥粒摩耗が顕著になるものと理解される。

次に図 4 (b) は試験したすべての硬質被削材を D 砥粒で研削して得られた Δr_a 値を比較したものである（D 砥粒以外の砥粒では、SUJ 2 とシリコン以外の被削材ではほとんど食い込みが不能であった）。この結果によると、一般に切込みの増加に伴い Δr_a はわずかながら低下する傾向にあるが、超硬合金のみ例外的

Fig. 6 Plots for chipping Δr_c vs. depth of cut

に逆に増加する。ここで、被削材による Δr_a 値の差を見ると、最軟質のシリコンの研削で最も低く、アルミナの場合がこれに次ぎ、超硬研削で最も高くなることから分かる。セラミックス研削に比べ超硬研削においてこのようにダイヤモンド砥粒の摩耗がより大きくなることは、超硬合金に対するダイヤモンド砥粒の持つ特有の高い凝着性（高摩擦性¹⁰⁾）によると考えられる。

なお、本図より研削液の供給によって Δr_a 値は多少増大することが分かる。

3.2 チッピング量

図 6 はチッピング量 Δr_c の測定結果の一例で、 Δr_c 値を切込みに対示す。ここでも回帰直線と 95% 信頼区間を示す。同一切込みに対する Δr_c 値にはかなりの散乱が認められる。砥粒、被削材の種類によって散乱の程度は異なり、特に A 砥粒で SUJ 2 を研削した場合の散乱は大きい。又、本図より、切込みの増加につれ比例的に破砕量も大きくなることが理解される。

図 7 (a) は SUJ 2 に対する各種砥粒の Δr_c の値を比較したものである。一方、(b) は種々の被削材に対する D 砥粒の Δr_c 値を比較したものである。これらの図より、SUJ 2 研削では D 砥粒が最も微細な破砕を起こし、サンプル数は少ないが CBN 砥粒は GC 砥粒に次いで大きな破砕を起こすことが明らかである。又同じ砥粒でも、アルミナや超硬合金でより高い Δr_c 値を招き、 Si_3N_4 板では SUJ 2 と同程度の細かい破

(a) Effect of grain type

(b) Effect of work material

Fig. 7 Variation of chipping Δr_c with depth of cut

砕を起こす。さらに、シリコンの研削ではそれよりわずかながら Δr_c 値は低くなる。

なお、研削液の供給によってアルミナ、SUJ 2 の場合とも Δr_c 値が数十%程度低くなる。後述するように、研削液の供給により破碎の確率が上昇することが分かったが、このことより研削液の供給によって小さな破碎が数多く生ずることが理解される。なお砥粒や被削材によって Δr_c 値に差が生ずるのは、破碎衝撃力に対する砥粒の抵抗力の差と深いかかわりを持つと考えられる（これに関して現在研削抵抗の測定を行っているところである）。

なお、上述はすべて砥粒のチップングであったが、被削材の条痕の観察から、切込みの深いところで溝の両側に微小な欠けが多く認められた。特にアルミナやシリコン材で著しいことが分かった。

3.3 チップング確率

D, CBN 砥粒を含む4種類の砥粒による SUJ 2 の

Fig. 8 Effect of work material on chipping probability, N

研削から得られるチップング確率 N を切込みの関数として求めた。その結果は省略するが、CBN 砥粒は際立って低い N 値を示し、D 砥粒がこれに次ぎ（約3倍）、A 砥粒や GC 砥粒は更にその2~3倍高い N 値を示した。

図8には全被削材に対し得られたダイヤモンド砥粒のチップング確率 N を比較したものであるが、これによるとシリコン研削ではその低い被削材硬度のためかチップングは発生しにくく、反対に窒化けい素研削では極めて頻繁に発生し、かつ切込みの増加に伴い N 値はほぼ比例的に上昇することが分かる。ここで、上述のチップング量 Δr_c の結果と照合すると、同じセラミックスの研削でもアルミナ研削に比べ窒化けい素研削では微細なチップングがより頻繁に生ずることが理解される。又、超硬とアルミナの両研削では Δr_c 、 N とも大差がない。

3.4 累積チップング確率

図9(a)はSUJ 2研削から得られた各砥粒の累積チップング確率 P (%) を切込みに対し示している。図9(b)は各被削材に対し得られたD砥粒の P 値である。上述図8の N 値で見られる序列と変わりはないことは当然であるが、ここでは各砥粒の切込み得る最大切込み深さを知ることができる。これによると、乾式の場合のA砥粒やGC砥粒では切込み40 μm 程度ではほぼ100%チップングを起こすのに対し、D砥粒では60~70 μm まで破碎に耐えることが分かる。また、CBN砥粒では切込み60 μm でも30~40%程度のチップング P にとどまり、更にシリコン研削では切込み120 μm 程度でもなお60%程度のチップングにとどまる。なお、研削液の影響はA, GC砥粒ではそれほど顕著でないが、D砥粒では研削液供給によって著しくチップングを起こしやすくなる。この理由と

(a) All the grains on SUJ 2

(b) D grain on all the work materials

Fig. 9 Plots of cumulative chipping probability P

して熱衝撃が考えられる。

3.5 研削比

図 10 は SUJ 2 の単粒研削に対し得られた研削比 G を切込みに対し示したものである。この G の計算 (式 (9)) の基になる G_c , G_a も切込みに対し求められた。その図面は紙面の都合上割愛するが、 G_c は切込みの増加と共に低下し、一方 G_a は上昇することが知られた (図 11 参照)。 G_c が切込みの増加につれてこのように低下するのは切込みの増加につれて削除率が増加するにもかかわらず Δr_c や N が急激に増加するためである。一方、 G_a が切込みの増加につれて上昇するのは削除量に対する摩擦摩耗量の割合が低いためである。 G_c , G_a のこのような変化から求められる G は図 10 のように切込み 20~40 μm あたりで最大値をとることになる。

Fig. 10 Grinding ratio G for all the grains on SUJ 2 Fig. 11 Grinding ratio G_a , G_c , and G for D grain on sintered alumina

同じような傾向が筆者らの高じん性砥粒のチップング実験に関する先の研究⁷⁾でも明らかになっている。ここで、 G の最大値を各砥粒について比較すると、CBN 砥粒で約 750 の最大研削比を示し、D 砥粒ではこれよりかなり低くなる。又、最大の G 値を与える切込みは CBN 砥粒に比べ高い方に移る。図 11 は D 砥粒でアルミナ板を研削した場合の研削比 G_a , G_c 及び G を切込みに対し示す。この場合もある切込みで G 値が最大値を取ることが明白である。

なお、研削液の供給によってこれら研削比の値はほとんど変わらない。次に図 12 はすべての被削材に対し得られた G 値対切込みの関係をまとめて示すものである。最も軟質なシリコン板の研削で際立って高い研削比 G が得られ、反対に超硬合金で最低値を示し、窒化けい素の研削比がこれに次いで低くなっている。

Fig. 12 Grinding ratio G for D grain on all work materials

4. 結 言

上向き単粒研削によって各種硬質材料に対する超砥粒の切削性、チップング破砕性、摩滅摩耗性を調べた。おもな結果は次のようである。

- (1) SUJ 2 鋼研削ではCBN 砥粒が際立って高い耐チップング破砕性を持ち、かつ摩滅摩耗 Δr_a も最小であり、結果として最高の研削比を示す。一方、D 砥粒はCBN 砥粒のみならずA 砥粒に比べても Δr_a は大きい、チップング確率はA 砥粒より低くなり、その結果研削比はCBN 砥粒に次いで高くなる。
- (2) CBN 砥粒はA, GC 砥粒と同様に超硬合金、アルミナ、窒化けい素材の単粒研削ではまったく食い込む能力を有しない。
- (3) D 砥粒によるアルミナ研削では Δr_c は最大となるが、チップング確率は低く、窒化けい素研削では Δr_c は比較的小さいがチップング確率が最高となる。また、超硬研削では Δr_a が最も大きく Δr_c も高い。シリコン研削ではチップングは最も生じにくく Δr_a も極めて小さい。
- (4) 研削比 G はある切込み (20~40 μm) で最大

値を取る。その最大値はSUJ 2 研削ではCBN 砥粒とD 砥粒に対しそれぞれ750, 420 ぐらいである。又、同じD 砥粒ではアルミナ、窒化けい素、超硬合金及びシリコンに対して最大研削比はそれぞれ350, 220, 130 及び10 000 である。

- (5) 研削液の供給は一般に Δr_c を低下させ、チップング確率と Δr_a 値を高める傾向にある。SUJ 2 研削で高切込み域で研削液供給によって G 値は高くなるが、セラミックや超硬合金研削の場合研削比は変化しない。

終わりに実験実施にあたり熱心に協力された当時熊本大学学生緒方明宏、柴田泰匡の両君にお礼申し上げます。又、超砥粒の準備にご協力頂いたノリタケダイヤ(株)河端則次、早坂謙司両氏、ならびに被削材をご提供頂いた日本タングステン(株)、東芝タンガロイ(株)、九州電子金属(株)および山陽特殊製鋼(株)に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 松尾哲夫, 豊浦 茂: 各種硬質セラミックス材料に対する超砥粒の摩耗, 窯業協会誌, **90**, 8 (1982) 25.
- 2) T. Matsuo: Wear Characteristic of General and Super-hard Abrasive Grains against Various Hard Materials, Ann. CIRP, **30**, 1, (1981) 233.
- 3) 高橋正樹, 石村昭彦, 青山藤詞郎, 稲崎一郎, 佐藤純一: CBN 砥粒の研削性能に関する研究 (第2報) — 摩滅特性, 精密機械, **50**, 6 (1984) 922.
- 4) J. Stanislaw & P. J. Gielisse: Material Removal Phenomena in Ceramics, Tech. Report, AD-704611, Univ. of Rhode Island, (1969).
- 5) L. J. Bredell: Microcutting of Steel using Pyramidal Diamonds with Different Apex Angles, Wear, **76**, (1982) 177.
- 6) 松尾哲夫, 大島栄一: 重研削用高靱性砥粒のチップング破砕特性 (I), 精密機械, **37**, 6 (1971) 403.
- 7) 松尾哲夫, 大島栄一: 重研削用高靱性砥粒のチップング破砕特性 (II), 精密機械, **38**, 10 (1972) 871.
- 8) J. N. Brecker, R. Komanduri and M. C. Shaw: Evaluation of Unbonded Abrasive Grains, Ann. CIRP, **22**, 2, (1973) 219.
- 9) 例えば, 中島利勝, 鳴瀧則彦: 機械加工学, コロナ社 (1983) 125.
- 10) 松尾哲夫, 豊浦 茂, 河端則次: 各種セラミックス及び超硬合金に対する超砥粒の摩擦特性, 窯業協会誌, **92**, 3 (1984) 135.