ジルコニア-アルミナ複合砥粒の摩耗特性*

—砥粒と被削材の適合性に関する研究 (第4報)—

松 尾 哲 夫**

Wear Characteristic of the Zirconia-Alumina Grains

—Study on Compatibility of Abrasive Grains
with Various Work-materials (4th Report)—

Tetsuo MATSUO

The research of the zirconia-alumina grinding wheels has become of major interest lately. However, there are few reports about the wear characteristic of the zirconia-alumina grain or wheel types. In the previous studies we dealt with the wear and micro-chipping of different alumina grain types against several metals. In this research the same wear and chipping tests have been made with four typical zirconia-alumina grain types and two typical alumina grain types, using S55C, SKS31 and SUS27 steels for work material. Thus, the wear rate, as well as the chipping height and probability, was obtained, and these results were discussed from the results of metal removal and friction measurements or ESM microscopic observation. It was shown that the wear rate was higher in the zirconia-alumina grain types than the alumina grain types when rubbed on carbon or hardened tool steel. But, the completely reverse result is seen when rubbed on the stainless steel. The relative ranking of micro-chipping of the grains is in good agreement with that of the grain toughness, as indicated in previous report.

1. 緒 言

重研削による研削加工能率の向上は今日もなお研削加工技術上の一重要課題である。1964年ころよりジルコニア-アルミナ複合砥粒が重研削用として開発、賞用され、特に1969年25%ジルコニア砥粒(ZS砥粒)の出現によって特殊鋼の研削能率が飛躍的に向上した。しかし、被削材によって、この砥粒にも著しい適否があるようであり、その理由が不明なことが多い。それ故、現在この種の砥粒の持つ摩耗や微細破壊特性を明確にする必要が生じている。

従来、砥粒の摩耗や破壊性に関しては筆者らの研究を含め比較的多くの報告^{1)~11)}が見られるが、ジルコニア-アルミナ複合砥粒についてはきわめて少ない。

本研究は既報の単粒摩耗^{3),7)}およびチップング実験^{9),10)}と同じ方法によって4種類のジルコニア-アルミナ複合砥粒を含む計6種類の重研削用高じん性砥粒の機械的摩耗特性を調べたものである。

2. 実験方法

2.1 摩滅摩耗実験

使用した単粒摩耗実験装置は第1報³⁾と同形式のもので(図1(a)に略図)であるので、その詳細説明は省略するが、要するに直径約230mmの金属回転円板に単粒を定荷重、定速の下でこすり付け、その摩耗体積を測定するものである。砥粒の摩耗面積の測定にはニコン拡大鏡と面積計を用い、摩耗面高さの変化量は1000分の2ミリマイクロメータで測定した。円板は研摩され、常に清浄な状態に保たれた。試験の初期には砥粒先端の引っかき作用に基づく破壊的摩耗が入ってくることがあるので、すべて短時間(後述のすべり距離の約10%)予摩擦行のち新しい処女面にトラックを変え、ここで本試験

図1 砥粒摩耗(a)およびチップング(b)実験方法

* 原稿受付 昭和49年2月26日。昭和47年度精機学会福岡地方講演会(昭和47年11月13日)および昭和48年度精機学会春季大会学術講演会(昭和48年4月5日)にて発表。

** 正会員 熊本大学工学部(熊本市黒髪町2丁目)

表1 供試砥粒の物理的性質

砥粒	記号 (相当品)	ヌーブ 硬度	ぜい性指 数 (%)	圧壊強さ* (kg)
2A 砥粒	JIS 2A	2 100	35	40†
微結晶砥粒	SH	2 070	30	—
10% ジルコニア砥粒	R 71	1 550	13	—
25% ジルコニア砥粒	ZS	1 400	5	158
40% ジルコニア砥粒	AZ 40	1 350	15	94
ジルコニア砥粒	—	950	—	—

* 粒度 10 番 (日本カーリット関川秀一氏による), † 推定値

を実施した。砥粒サイズは #12 であったが、1 kg 程度の荷重では試験中破壊する砥粒が見られたので、試験荷重はおもに 450 g を選んだ。摩擦速度は 300 および 600 m/min とした。すべり距離は円板材質に応じ最小 1600 m から最大 6000 m とした。

摩耗試験中砥粒にかかる接線力の測定は鋼製リング上にはられたひずみゲージによって可能であった。また、砥粒摩耗面の観察には走査型電子顕微鏡 (JSM-U3) を使用し、円板に生じたみぞ

の体積 (円板除去量) 測定のためには小坂式形状測定機 (SE3) を利用した。

2.2 チッピング破壊実験

単粒チッピング破壊摩耗実験の方法は前々報⁹⁾で詳しく述べたのでここでは簡単に説明するが (図 1(b) 参照), カズスーブ昌運高速旋盤を用いて行った。単粒研削条件は砥粒切削速度 1800 m/min, 回転半径 185 mm, 送り 0.7 mm/rev, 被削材勾配 1500 分の 1 で前回と同一であった。1 試験条件あたり約 30 個の砥粒を供試し、その平均値を取った。すべての条痕の長さをニコン拡大鏡で読取るによりチッピング破壊特性値, すなわちチッピング確率 $N(\%)$, チッピング量 Δt_c (mm) を求めたが、その計算方法⁹⁾はすでに記述したので省略する。

2.3 供試砥粒および被削材

供試砥粒は 10, 25, および 40% のジルコニア (ZrO_2) を含む 3 種類の代表的ジルコニア-アルミナ複合砥粒および純ジルコニア砥粒, それに比較砥粒として 2A およ

図2 アルミナ-ジルコニア二元平衡状態図

図3 砥粒摩耗量対摩擦距離の関係曲線の一例

び微結晶アルミナ系砥粒の計 6 種を選んだ (表 1 参照)。このうち 2A 以外の砥粒は JIS による記号が無く、各砥粒メーカーによりそれぞれ独自の記号が付けられている。本表には供試砥粒の記号をあげている。図 2 は Al_2O_3 - ZrO_2 二元状態図¹²⁾を参考までに引用したものであるが、40% ジルコニア砥粒がほぼ 100% 近いアルミナ-ジルコニア共晶組織を持つことが知られ、10% ジルコニア砥粒では約 25% の共晶組織の部分と 75% のアルミナの部分とが混在していることが確認されている。

被削材 (円板材) としては中炭素鋼 S55C ($H_R B 93$) (チッピング破壊実験には S45C ($H_R B 91$) を使用), ステンレス鋼 SUS27 ($H_R B 98$) および焼入工具鋼 SKS31 ($H_R C 63$) を使用した。

3. 単粒摩耗実験結果および考察

3.1 単粒摩耗曲線

種々の摩擦条件より得られた砥粒摩耗曲線の例を図 3

図4 砥粒の摩耗に及ぼす荷重の影響

に示す。第1報³⁾同様に、同じ砥粒でも個々の砥粒によって摩耗量の値にかなりの開きが生じている。一般に硬質砥粒を粘り円板材にこする場合にばらつきは大きく、軟質砥粒を高硬度円板材に摩擦する場合は小さいようである。いずれにせよ、本図より砥粒の摩耗体積はすべり距離に比例し、かつ図4より荷重にもほぼ比例することが明らかである。今、荷重を P 、すべり距離を L とすると砥粒摩耗量 W は式(1)で表される。

$$W = KPL \quad (1)$$

ここに、 K は円板材料、砥粒による定数で、摩耗率(厳密には比摩耗量 specific wear volume と呼ばれる)を意味する。

3.2 砥粒摩耗率の比較

図3の例に見られるようにそれぞれ6個の砥粒より砥粒摩耗率の平均値を求め、この値を、横軸に砥粒のヌープかたさを取って、示したのが図5~7である。

まず、図5のS55C板に対する摩耗率を見ると、2Aや微結晶などアルミナ系砥粒に比べジルコニア-アルミナ系砥粒は高い摩耗率を有している。25%ジルコニア砥粒は例外的に低い値を示すが、一般に砥粒硬度が低いほど摩耗率が高くなる。600 m/minの速度においても同じことが言える。

SKS31材に対する摩耗においても、ほぼ同様の順位が見られ、ジルコニア含有量が多くて軟質となると摩耗は多くなる。ただし、ここでも25%ジルコニアは例外的に2A砥粒と同程度の低い摩耗率を示している。初報³⁾においてS55Cや焼入鋼に対する砥粒の摩耗には微細破壊的摩耗は少なく、凝着摩耗が主であるため軟質な砥粒(じん性の高い砥粒)ほど摩耗が多いことを述べたが、以上の結果において軟質砥粒の摩耗が多いのも、やはり凝着摩耗の増加によると考えられ、速度上昇につれ摩耗

図5 S55Cに対する砥粒の摩耗率

図6 SKS31に対する砥粒の摩耗率

図7 SUS27に対する砥粒の摩耗率

率の増大することからも説明される。なお、25%ジルコニア砥粒の持つ高摩耗抵抗の理由は、比較的柔らかい $ZrO_2-Al_2O_3$ 共晶組織のマトリックスと切れ刃として作用するであろう硬質の初晶アルミナの2相が形づくる本砥粒特有の萁盤じま状組織(図2参照)にあると考えられる。なお、図6中にSKS31と類似の焼入工具鋼(A-6)に対し、先に得られた摩耗率⁵⁾の値をあわせ示すが、両者はきわめてよく一致している。また、焼入軸受鋼の精密研削に関するPhalitzschの最近の研究¹³⁾によってもジルコニア-アルミナ系砥石は砥粒の摩滅摩耗によって

(a) S55C, 450g, 300m/min, $s=4000\text{m}$ (b) SUS27, 450g, 300m/min, $s=1600\text{m}$

矢印はすべり方向を示す

図8 砥粒摩耗面の走査型電子顕微鏡観察 ($\times 500$)

WA砥石より劣ることが指摘されている。以上の結果より炭素鋼や焼入鋼に対しては軟質なジルコニア-アルミナ系砥粒は摩滅摩耗の点で不向きなことは確かである。

次に、SUS27円板に対する砥粒摩耗率(図7)を見ると、上述のS55CあるいはSKS31材に対する場合に比べ全般的に著しく高くなっている(これは初報³⁾にも触れたように微細な破壊的摩耗の存在によるものであり、3.4節で述べる高接線力や高被削材除去量とも深い関係がある)。さて、本鋼に対する各砥粒の摩耗率を見ると、砥粒硬度に対するその序列が先の2円板材の場合と全く逆であって、ここでは40%ジルコニア、25%ジルコニア砥粒など軟質な砥粒が概して低摩耗率となっている。石黒の研究¹⁴⁾によると、同一の一定研削量に対する砥石の損耗はSUS27研削の場合、微結晶アルミナ砥石に比べ25%ジルコニア砥石では65%くらいに少なくなっているが、このことは本データともよく一致する。SUS27に対してはじん性の高い砥粒が摩耗の点で有利なことはすでに第1報³⁾で触れたところであって、その理由は2Aや微結晶砥粒など硬質高ぜい性砥粒では、特に微細な破壊的摩耗が発生するためと解釈される(図8下段2A砥粒摩耗面参照)。また、速度の影響も上記2円板材料の

場合と正反対に、ここでは摩擦速度の上昇につれ摩耗率は低下する。この理由も破壊的摩耗の減少に一因があると考えられる。

3.3 砥粒摩擦面の観察

図8は砥粒摩耗平坦面の走査型電子顕微鏡写真を示す(矢印はすべり方向を示す)。S55C円板に対する場合、2A砥粒は比較的なめらかな面が見られ、40%ジルコニア砥粒ではすべり方向に塑性流動の形跡がわずかながら認められ、凝着摩耗の程度が大きかったことが想像される。これに対し25%ジルコニア砥粒では独特の碁盤じま組織が明りょうに観察され、ここには塑性流動の跡は見られない。

SUS27円板に対する摩耗面を見ると、いずれの砥粒もすべり方向に平行に顕著な塑性流動が見られ、共晶組織はもはや観察されない。ただ、40%ジルコニア砥粒においては比較的なめらかな摩耗面が見られるが低い摩耗率と関係があると考えられる。なお、2Aと10%ジルコニア砥粒では摩擦面上に部分的な破壊の跡が認められ、3.2節でも述べたようにこの現象がSUS27材に対し砥粒の大摩耗が生ずる一因と思われる。

図9 砥粒摩耗実験における摩擦係数

図10 円板除去量の測定結果

3.4 接線力ならびに円板除去量の検討

図9は砥粒摩耗試験中の摩擦係数 μ (定常状態における値)測定結果の一例である。S55C板との摩擦の場合ジルコニア砥粒は2A砥粒に比べわずかながら μ は高くなるが、SUS27の場合は反対に μ は低くなり、かつここでは摩擦速度が高くなると μ は低下することがわかる。このような摩擦係数の変化は3.2節に見られた砥粒摩耗率の変化と傾向がきわめてよく類似する。すなわち、同一円板材においては、同一すべり速度の場合、摩耗率の高い場合に μ の値も高くなっている。摩擦のための消費エネルギー u は式(2)で表される(ただし、 P は荷重、 V は摩擦速度)が、同じ V においてはこの u の値が高いほど、それだけ砥粒摩耗は多くなるものと解釈される。

$$u = P\mu V \quad (2)$$

次に、円板材除去量(砥粒摩擦に伴うみぞの体積)もまた砥粒摩耗率と多少関係があることが知られた。実験結果の詳細はまとめて報告の予定であるが、図10にその一部を示しているが、これによると、一般に砥粒摩耗率や摩擦係数の高いSUS27板においては低いS55C板に比べ円板材除去率が数倍高く、また摩擦速度が高くなると全般的にこの除去率は低下することがわかる。しか

図11 チッピング確率と切込み深さの関係

図12 チッピング確率と切込み深さの関係

し円板材料にかかわらず、ジルコニア-アルミナ砥粒の除去率は2A砥粒に比べ低くなることは注目される(各種砥粒の摩耗率の順位が円板材によって大きく変わるのに対し除去率はこのように円板材に無関係に、硬質砥粒ほど大きくなることが、その後の実験によっても確認されている)。

4. チッピング破壊実験結果および考察

4.1 チッピング破壊確率

チッピング実験より得られた砥粒のチッピング確率 N を切込み t に対し示したのが図11, 12である。まず図11のS45Cの場合について見ると、2Aあるいは微結晶砥粒に比べ25%および40%ジルコニア砥粒は低い N 値を有することがわかる。一般にじん性の高い砥粒ほど低い N 値を取るようであって、25%ジルコニア砥粒が40%のそれより N 値が低いのも、そのためであると考えられる。SUS27による実験結果(図12)においてもS45C材とほとんど同様の N 値の順位が見られる。すなわち、2A砥粒の N 値が最高で、微結晶砥粒がこれに次ぎ、ジルコニア-アルミナ各種砥粒のそれは、これよりかなり低く、特に25%ジルコニア砥粒のそれが最低で

図 13 チップング量と切込み深さの関係

図 14 チップング量と切込み深さの関係

ある。

4.2 チップング量

図 13 は S45C 板に対するチップング実験において得られたチップング量 Δt_c (1 回のチップング破壊による砥粒先端の破壊高さ⁹⁾) と切込み t の関係を各砥粒について示したものである。砥粒による Δt_c 値の差は概して小さく、かつこの値は砥粒のじん性と直接関係は無いように思われる。10% ジルコニア砥粒は微結晶砥粒と同程度の低い Δt_c 値を持ち、40% ジルコニア砥粒はこれより幾分高くなり、特に 25% ジルコニア砥粒は予想外に高い Δt_c 値を有することは注目される。図 14 は SUS27 についての結果であるが、S45C の場合と順位が比較的良好に一致する。すなわち、25% ジルコニア砥粒の Δt_c 値は高く、10% ジルコニアや微結晶砥粒は 2A 砥粒より低い Δt_c 値を示す。

5. 結 言

本実験の結果、次のことが明らかになった。

- (1) 炭素鋼、焼入工具鋼に対する摩耗は軟質砥粒ほど多く、したがってジルコニア-アルミナ複合砥粒は 2A、微結晶アルミナ砥粒に比べ摩耗率は高くなる。ただし、25% ジルコニア砥粒は 2A 砥粒に近い低い

摩耗抵抗を有している。SUS27 に対する摩耗率は柔らかいジルコニア-アルミナ砥粒ほど低くなる。

- (2) 同じ円板では、その除去率は砥粒のじん性が低いほど多くなる。全般的に SUS27 鋼では、他の 2 円板材に比べ摩擦係数が高く、円板除去量も多くなり、結局砥粒摩耗が多くなるものと考えられる。
- (3) チップング破壊の頻度は S45C、SUS27 材とも、砥粒じん性の高いほど低く、したがってジルコニア-アルミナ砥粒では低くなる。特に 25% ジルコニア砥粒が最もチップングを生じにくい。しかし、この砥粒はこわれる量が多い。これに対し 10% あるいは 40% ジルコニア砥粒は小さな破壊を起こす。

おわりに、本研究の一部は本学・大島栄一氏ならびに当時大学院学生・木下和久、橋本政弘、坂本博宣の諸君の協力によることを記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) E. J. Duwell and W. J. McDonald: Some Factors that Affect the Resistance of Abrasive Grits to Wear, *Wear*, 4 (1961) 372.
- 2) 高沢孝哉: 硬脆材料の摩耗 (2), *機械の研究*, 22, 7 (1970) 976.
- 3) 松尾哲夫, M. C. Shaw: 砥粒と被削材の適合性に関する研究, *精密機械*, 36, 4 (1970) 38.
- 4) K. Takazawa: Mechanical Properties of Abrasive Grain Affecting Grinding Performance, *Proc. Int. Grinding Conf.*, April 18-20 (1972) 75.
- 5) G. K. Lal, T. Matsuo and M. C. Shaw: An Investigation of the Wear of Abrasive Grains by Rubbing on Ferrous and Non-ferrous Surfaces, *Wear*, 24, 3 (1973) 279.
- 6) R. F. Scrutton, G. K. Lal, T. Matsuo and M. C. Shaw: An Investigation of the Wear of Abrasive Grains by Rubbing on Diamond Disks, *Wear*, 24, 3 (1972) 295.
- 7) T. Matsuo and E. Ohshima: Wear and Microchipping of Single Abrasive Grains, *Ann. C. I. R. P.*, 22, 1 (1973) 101.
- 8) 松尾哲夫: 砥粒の機械的摩耗に関する研究, *砥粒加工研究会会報*, 17, 7 (1973) 958.
- 9) 松尾哲夫, 大島栄一: 重研削用高靱性砥粒のチップング破壊特性について (I), *精密機械*, 37, 6 (1971) 403.
- 10) 松尾哲夫, 大島栄一: 重研削用高靱性砥粒のチップング破壊特性について (II), *精密機械*, 38, 10 (1972) 89.
- 11) G. K. Lal and M. C. Shaw: Wear of Single Abrasive Grains in Fine Grinding, *Proc. Int. Grinding Conf.*, CMU, Pittsburgh (1972) 107.
- 12) 橋本和彦: 最近の砥粒の種類と性質, *砥粒加工研究会会報*, 16, 173 (1973).
- 13) 井上英夫: 研削加工の研究動向, *砥粒加工研究会会報*, 16, 178 (1973) 29.
- 14) 石黒繁郎: 超重研削用砥粒の発達と研削性能, *砥石技術ニュース*, 1, 2 (1972) 22.