単粒切削における砥粒切れ刃の摩耗について*

——砥粒切れ刃の切削性能に関する研究(第1報)——

松 井 正 己** 庄 司 克 雄** 田 牧 純 一**

Wear of Cutting Point in Single Grain Cutting

——Study on Performance of Cutting Points of Grinding Wheel (1st Report)——

Seiki MATSUI, Katsuo SYOJI, Junichi TAMAKI

A new method for measuring accurately the wear depth of a single abrasive grain in the "fly-milling test" is introduced. The wear in the method was measured on the basis of the tip of a diamond tool which was mounted at a short distance away in the direction of the wheel axis. A change in shape of the cutting point was observed simultaneously with it. Cutting force pulses were furthermore measured with a piezo-electric dynamometer. The self-sharpenability of cutting points is discussed on a basis of these results. Some results obtained in this paper are summarized as follows:

- (1) The wear curve of cutting point is generally similar in shape to a flight of stairs with a gentle slope.
- (2) Wear rates of individual grains are highly variable.
- (3) Rate of wear by fracture of cutting points increases with increasing radial depth of cut, but rate of attritious wear is independent of it.
- (4) Self-sharpenability of cutting point is affected by a combination of grit and workpiece material.
- (5) Self-sharpenability of white aluminum oxide grits is better than that of green silicon carbide grits.

1. 緒 言

研削現象を複雑にしている原因の一つに、砥粒の破碎があげられる。一般の切削工具においては、刃先は単純に摩滅鈍化して寿命に至るが、砥粒切れ刃の場合には、切れ刃の切削性の立場からみると、互いに逆の効果をもっている「摩滅」と「破碎」が共存するため、単純な鈍化過程はとらない。

砥粒切れ刃の摩耗特性を研究する場合、単粒切削試験は他の試験法に比べていろいろな点で優れている。例えば、pin-on-disc 式の砥粒の摩耗試験の場合、砥粒の摩擦面に課せられた条件は研削の場合とは非常に異なったものであり、研削の際の挙動について有意義な結果が得られるかどうかは疑問である。

最近、Lal らは、fly-milling 試験と称して一連の単粒切削試験を行い、砥粒の摩耗特性について興味ある結果を報告している¹⁾²⁾。ただ、この場合注意すべきことは、「摩滅的」摩耗の中に微小破碎によるものが含まれていないかどうかである。事実、彼ら自身も、試験結果

の矛盾の原因の一つとして、微小破碎の影響を挙げている²⁾。

砥粒の微小な先端に生じた摩耗が摩滅摩耗***であるか、微小破碎によるものであるかを区別することは、非常に難しい問題である。筆者らは、砥粒切れ刃先端の時刻々の形状変化と切削力の変化を追跡することにより、両者を区別することを試みた。

また砥粒切れ刃先端の摩耗量を、比較的摩耗の少ないダイヤモンド工具を基準にして比較測定することにより、従来より精度よく測定することができた。この方法を使って、各種の被削材に対する砥粒の摩耗挙動の相異などを明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

図1は、実験装置の主要部を示す。砥粒はエポキシ系の接着剤によって軟鋼片(イ)の頭部に接着し、これを直径150mmのアルミニウム円板(ロ)の円周上に固定した。この円板を横型の精密平面研削盤の砥石軸に取付け、テーブルを砥石軸に垂直な方向に送って切削を行った。

*** ここでは、摩擦面の塑性変形によって生ずる凝着摩耗に、化学摩耗も含めて考えている。

* 原稿受付 昭和50年6月6日。昭和48年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和48年10月7日)にて発表。

** 正 会 員 東北大学工学部(仙台市荒巻字青葉)

イ：砥粒，ロ：アルミニウム円板，ハ：微動送りテーブル，ニ：シンクロモータ，ホ：ダイヤモンド工具，ヘ：シンクロスコープのトリガ遅延装置

図1 実験装置の主要部

さて通常の精密研削においては，連続切れ刃間隔は数十 mm 程度である³⁾。そこで連続切れ刃間隔を 15 mm と仮定し，通常の研削における標準テーブル速度を 5 m/min と考える。単粒切削の場合，これと同等の切りくずを削り出すためには，テーブル速度 v を

$$v = \frac{0.015}{\pi D} \times 5 = 0.157 \text{ (m/min)}$$

にとればよい。ここで D は，単粒先端の回転円の直径で 152 mm である。それ故，実験では，テーブル速度を 0.15 m/min，砥粒周速度 V を 1500 m/min とした。なおこのとき，砥粒切れ刃先端における最大砥粒切込み深さ $g_{\max}$ は，

$$g_{\max} = 2\pi D \frac{v}{V} \sqrt{\frac{\Delta}{D}} = 0.94 \text{ (}\mu\text{m)}$$

になる。ここで Δ は砥石半径切込み量 (15 μm と仮定) である。

テーブル送りは，研削盤テーブル上に取付けた微動送りテーブル(ハ)で与えた。(ニ)は微動送りテーブルの送りねじを回転させるためのシンクロモータである。

砥粒は，WA および GC 砥粒を使用した。粒度は，いずれも #16 である。表 1 に，使用した被削材のマイクロビッカース硬度と実測による比研削抵抗値⁴⁾を示す。

砥粒切れ刃の摩耗量は，図 2 に示すように，円板の円周上で円板軸方向にわずかにずれた位置にダイヤモンド工

表1 被削材の硬度と比研削抵抗

被 削 材	マイクロビッカース硬度	比研削抵抗 (kg/mm ²)
S 45 C (市販材)	230	1 900
S 45 C (焼入材)	710	2 300
ねずみ鉄	320	900
フェライト	420	300
シリコン	850	500

図2 回転円板とシンクロスコープのトリガ遅延装置

図3 砥粒切れ刃の摩耗量と形状変化の測定法

具(図 1, ホ)を取付け，それによって作られた切削痕を基準にして，砥粒切れ刃の切削痕深さの変化を測って求めた。なおダイヤモンド工具の摩耗は，砥粒切れ刃のそれに比べて，十分無視できることも確かめられた。図 3 は，ダイヤモンド工具と砥粒切れ刃による切削痕の断面形状を，触針式表面検査機によって求めたものの一例である。図で左の一組の切削痕(②)は，右の一組の切削痕(①)から 1 パス後(切削距離=工作物長さ: 20 mm)の切削痕の断面形状で，これによって砥粒切れ刃先端の摩耗量が測定できると同時に，その形状変化も観察できる。なお断面形状の測定は，切削方向に沿って 3 か所，すなわち工作物の端に非常に近い部分 2 か所と工作物の中央部で行った。

さらに，砥粒切れ刃の破碎や摩滅に伴う切削性能の変化を調べるために，切削力を測定した。切削力の測定は，圧電型の動力計により，研削面に垂直な成分と平行な成分に分けて測定した。圧電型動力計は，被削材ごとに別のものを使用した，それらの固有振動数は 70～

図4 シンクロスコープによる切削力の記録例

図6 S45C(焼入材)の切削におけるWA砥粒の摩滅摩耗率(a)と総摩耗率(b)

被削材: S45C(市販材)
図5 WA砥粒の摩耗曲線

100 kHzの範囲にあった。また、連続する何回かの切削力を観察するために、図2に示したようにフォトトランジスタを埋め込んだ円板(図1, へ)を低速で回転することにより、シンクロスコープの外部トリガの時期を連続的に変えて、各回の切削力の記録が重ならないよう工夫した。図4は、シンクロスコープによる記録例である。

砥粒切れ刃の半径切込み量は、切削痕の深さから測定したが、摩耗量を比較する場合、半径切込み量を含め、切削条件はできるだけ一定であることが望ましい。半径切込み量の設定は、あらかじめ砥粒切れ刃先端がかすかに工作物表面に触れる位置を圧電型動力計を使って求め、その位置から研削盤の砥石切込みハンドルを使って与えた。砥粒切れ刃先端の摩滅や破砕が激しい場合は、工作物長さ20 mmの間で摩耗する量が大きく、切削距離のすべてにわたって切込み量を一定に保つことは難しかったが、そうでない場合は、熟練すれば $\pm 2 \mu\text{m}$ 程度の範囲で半径切込み量を一定にすることは、比較的容易であった。

3. 実験結果と考察

3.1 砥粒切れ刃の摩耗曲線

図5は、S45C(市販材)をWA砥粒で切削したときの砥粒切れ刃の摩耗曲線と形状変化の一例である。ここで砥粒切れ刃の摩耗量とは、ダイヤモンド工具を基準にして測定した、砥粒切れ刃先端の半径方向の減少量である*。また図の摩耗曲線の下に示した矢印は、表面検査機を使って求めた切削痕の断面形状から、砥粒切れ刃に急激な

形状変化が認められた箇所を示している。急激な形状変化は、必ずしも砥粒切れ刃先端に生ずるとは限らないが、切れ刃の側面に生じた場合には、摩耗量の急激な変化は起こらない。

図から明らかなように、一般に砥粒切れ刃の摩耗曲線は、緩やかな傾斜部分と摩耗量が急激に変化する階段部分より成る。傾斜部分では、一般に、砥粒切れ刃の形状はほとんど変化しないか、あるいは緩慢な変化を示し、明らかに摩滅的な摩耗によるものと考えられる。これに対して、階段部分では急激な形状変化があり、砥粒切れ刃先端の破砕による摩耗であると考えられる。

3.2 破砕と摩耗

このように緩やかな傾斜をもった階段状摩耗曲線の傾斜部分を摩滅摩耗、階段部分を破砕による摩耗と考えれば、傾斜部分の勾配から、砥粒切れ刃の単位切削回数あたりの摩滅摩耗量(以下、摩滅摩耗率とよぶ)を求める

* 摩耗量は累積量である。摩耗曲線が部分的に右下がりになるのは、測定誤差のためである。

表2 摩滅摩耗率 ($10^{-3} \mu\text{m}/\text{cut}$)
($\Delta=15 \mu\text{m}$)

被 削 材	WA 砥粒	GC 砥粒
S45C (焼入材)	0.7	—
ねずみ鋳鉄	1.2	0.2

表3 総摩耗率 ($10^{-3} \mu\text{m}/\text{cut}$)
($\Delta=15 \mu\text{m}$)

被 削 材	WA 砥粒	GC 砥粒
S45C (市販材)	1.3	2.1
S45C (焼入材)	3.3	17.8
ねずみ鋳鉄	2.4	0.2
フェライト	5.1	3.8
シリコン	12.2	0.5

ことができる。

S45C(焼入材)の切削におけるWA砥粒の摩滅摩耗率を半径切込み量 Δ について比較したものを図6(a)に, また破碎も含めた単粒切削回数あたりの総摩耗量(総摩耗率とよぶことにする)を図6(b)に示す。半径切込み量 Δ が大きくなれば, 砥粒切れ刃の1回の切削長さは $\sqrt{\Delta}$ に比例して長くなるが, それを考慮しても, 摩滅摩耗率は半径切込み量には無関係であるように思われる。これは摩耗量として, 重量でなく切れ刃先端の摩耗高さを考えているためで, 摩耗高さは砥粒全体に作用する荷重よりは, むしろ切れ刃先端の圧力, すなわち被削材の降伏応力によって決まるためであると考えられる。

一方, 破碎も含めた総摩耗率は, 砥粒によってかなりのばらつきはあるが, 半径切込み量の増加に伴って, 明らかに増加している(図6(b))。これは, 摩耗量に対して支配的である破碎の頻度, 大きさが, 半径切込み量が大きくなるに従って増大するためである。

なお, 各種材料を切削したときの, WA砥粒とGC砥粒の摩滅摩耗率および総摩耗率の平均値を, それぞれ表2, 表3に示す。

3.3 砥粒切れ刃の自生作用

図7は, S45C(焼入材)をWA砥粒で切削したときの, 砥粒切れ刃の形状と切削力の垂直成分の時間的変化を示したものである。砥粒切れ刃の形状変化から, ある程度, 自生作用が起こっているのが認められる。これは, 切削力の減少からも明らかである。しかし, 一般に自生作用を繰返しながらも先端の鈍化は次第に進み, 切削力は変動しながら増大する傾向をもつ。WA砥粒の自生作用は, S45Cの切削の場合ばかりでなく, 鋳鉄の切削の際にも認められた(図8)。しかしこの場合には, S45Cの場合に比べて, 摩滅摩耗率が大きく(表2参

図7 S45C(焼入材)をWA砥粒で切削したときの砥粒切れ刃の形状と切削力の変化

図8 ねずみ鋳鉄をWA砥粒で切削したときの砥粒切れ刃の形状と切削力の変化

図9 S45Cの切削におけるGC砥粒の摩耗曲線の例

照), 自生作用の程度も小さいようである。

これに対して, GC砥粒でS45C(市販材)を切削した場合には, ほとんど自生作用が認められない(図9(a)). この傾向は, S45C(焼入材)の切削の場合にはより顕著である(図9(b)). 砥粒切れ刃は激しい摩耗と共に急速に鈍化し, 先端は平たんになる. この場合の総摩耗率は, 図10に示すように, 明らかに半径切込み量と共に増加する. またS45C(焼入材)の場合でも, 半径切込み量が $5\mu\text{m}$ 程度である場合には, 緩やかな傾斜をもった階段状曲線に近い摩耗曲線になる場合もある. これらの事実は, 前節図6の結果から考えて, GC砥粒によるS45C材の切削の場合にも, 破碎摩耗が支配的であることを裏付けている. ただ, 摩滅と破碎が互いに独立に起こるとは考えられない. 従来から言われているような, いわゆる不適合砥粒の高摩滅摩耗が二次的に激しい微小破碎を誘発しているということは, 十分考えられることである。

最近, 高沢は, 砥粒エッジの静的な破碎試験を行い, 興味ある結果を報告している⁵⁾. それによると, WA砥粒の場合には, A砥粒やC系砥粒に比べて, 時間の経過に伴うエッジの破碎抵抗の増大が比較的小さい傾向がある. これは, WA砥粒では, 破碎後も比較的小さいエッジが出現する傾向があるのに対し, 他の砥粒では, 次第

図10 S45C(焼入材)の切削におけるGC砥粒の総摩耗率の半径切込み量による比較

にエッジが鈍化し, 破碎抵抗が増大する傾向の強いことを意味している. このように, WA砥粒は他の砥粒に比べて本質的に自生作用を起こしやすい性質を持っているようである。

さてWA砥粒でも, S45C材に比べて鋳鉄の切削の際には切れ刃の自生が起こり難いことは前述したが, さらにフェライトやシリコンの切削の際には, この傾向が顕著である. 図11(a), (b)は, それぞれWA砥粒でフェライト, シリコンを切削したときの, 切れ刃の摩耗曲線と切削力の切削距離に伴う変化を示したものであるが, 特にシリコンの場合には, GC砥粒でS45C(焼入材)を切削したときのような挙動を示す. フェライトもシリコンも硬度の割に比研削抵抗が小さく(表1参照), ぜい性材料に特有の性質をもった材料である. A砥粒, 特にWA砥粒は, C砥粒に比べて熱衝撃抵抗が小さいといわれている⁵⁾⁶⁾. 比研削抵抗が小さいにもかかわらず摩耗量がきわめて大きいことの説明として, このような熱の影響や被削材との相互拡散効果などが考えられる. なおこの問題については, 今後さらに検討するつもりである。

一方, GC砥粒で鋳鉄を切削した場合には, 図12に示すように, 砥粒切れ刃の形状はほとんど変化せず, また切削力もほぼ一定値を保つ. この種の試験は数個の砥粒について行ったが, いずれも同様の結果になった. またGC砥粒でシリコンを切削した場合にも, 摩耗は非常に小さく, 切削力の増大もほとんど認められなかった。

4. 結 論

単粒切削における砥粒切れ刃の摩耗量を, ダイヤモンド工具を基準にして比較測定する方法を提案した. 同時に砥粒切れ刃の形状変化と切削力の測定も行った.

得られた結果を要約すると, 次のようになる.

(1) 一般に砥粒切れ刃の摩耗曲線は, 摩滅摩耗が支配

図 11 WA 砥粒でフェライト (a), シリコン (b) を切削したときの砥粒切れ刃の摩耗曲線と切削力の変化

図 12 ねずみ鉄の切削における GC 砥粒の摩耗曲線の例

的な緩やかな傾斜部分と破砕が支配的な階段部分に分けられる。しかし切削条件や砥粒と被削材の組合せによっては、その一方のみの場合もある。

- (2) 切削条件や砥粒と被削材の組合せが同じであっても、砥粒切れ刃の摩耗量は砥粒によって大きなばらつきを示す。
- (3) 破砕は、半径切込み量が大きくなるに伴って、発生頻度や大きさが増大するが、砥粒切れ刃先端の摩滅摩耗量は、半径切込み量には無関係である。

- (4) 砥粒切れ刃の自生作用は、被削材との組合せによって、起こる場合と起こらない場合がある。また一般に、GC 砥粒は WA 砥粒に比べて自生作用が起こりやすいようである。

以上は、限られた実験条件における、限られた対象についての実験である。砥粒切れ刃の摩耗特性や砥粒と被削材の適合性について断定的な結論を下すには、さらに広範囲な、かつ系統だった実験の積み重ねが必要であろう。

参 考 文 献

- 1) G.K. Lal and M.C. Shaw: Wear of Single Abrasive Grain in Fine Grinding, Proc. Int. Grinding Conf., Pittsburgh, (1972).
- 2) G.K. Lal and M.C. Shaw: On the Attritious Wear of Abrasive Grain, Wear, 25, (1973) 255.
- 3) 松井正己, 庄司克雄: 統計的手法による研削機構の考察 (第3報), 二, 三の実験的考察, 精密機械, 37, 10 (1971) 708.
- 4) 松井正己, 庄司克雄: 統計的手法による研削機構の考察 (第4報), 同時研削砥粒切れ刃数と比研削抵抗, 精密機械, 39, 5 (1973) 534.
- 5) K. Takazawa: Mechanical Properties of Abrasive Grains Affecting Grinding Performance, Proc. Int. Grinding Conf., Pittsburgh, (1972).
- 6) D. R. Miller: Friction and Abrasion of Hard Solids at High Sliding Speeds, Proc. Roy. Soc., 269, (1962) 368.