薄形外周刃砥石による精密研削切断に 関する研究 (第1報)*

——研削抵抗と砥石の摩耗について——

松 井 正 己** 庄 司 克 雄** 寺 本 仁***

Studies on Outer-blade Slicing (1st Report)
—Grinding Force and Wheel Wear—

Seiki MATSUI, Katsuo SYOJI and Hitoshi TERAMOTO

The outer-blade slicing parallels the cut-off grinding and the creep-feed grinding in configuration. But it quite differs from them in that a very thin cutting blade is used, which undergoes an elastic deformation. From this viewpoint experimental studies have been carried out using GC grit blades 0.5 mm thick and the following results are obtained. (1) An upward grinding force occurs in up-cut slicing process, which may be due to side face grinding following the elastic deformation of blade. (2) The upward grinding force has a usual sensitivity for grinding conditions. (3) Attritious wear predominates in the wheel wear under a small v/V ratio, while bond fracture does under a large v/V ratio. (4) The grinding performance of cutting edges on the side face has an important influence on chipping of the workpiece.

Key words: slicing, grinding, cutting blade, grinding force, wheel wear, chipping, Sendust

1. 緒 言

電子工業界の急速な発展に伴って、エレクトロセラミックスを初めとする硬ぜい材料の使用量は、ますます増加する傾向にある。これらの材料は、圧延などの塑性加工が難しいため、専用砥石を使った精密研削切断によって薄板化を行っている。

精密研削切断は、内周刃によるものと外周刃によるものに大別される。前者は半導体ウエハなど素材径の大きいものや切断精度を要するものの切断に適している。これに対して後者は、複数の砥石を同軸に組み込んだマルチカットが可能であり、能率の点で格段に優れている。

外周刃による精密研削切断は、研削形態は研削切断（いわゆるカットオフ研削）に類似しているが、加工精度やとくに薄刃砥石を使用する点でカットオフ研削とは異なっており、とくに研削機構は全く異種のものであると考えるべきである。また、高切込み低速送り研削であるということでクリープフィード研削の一種で

あるとみなされる場合もある。しかし溝加工など本来のクリープフィード研削では砥石側面の研削性能が問題になることはほとんど無いが、後述するように精密研削切断では、外周にある砥粒切れ刃よりも側面の砥粒切れ刃の切削性能の方がむしろ重要である場合が多い。

このように、精密研削切断における諸現象を正しく理解するためには、カットオフ研削やクリープフィード研削とは違った角度から研削機構を検討する必要がある。しかしカットオフ研削やクリープフィード研削に関しては、古くから多数の研究報告が公表されているにもかかわらず、外周刃精密研削切断に関しては、系統的な研究報告は、ほとんど公表されていないのが現状である。

本報では外周刃精密研削切断における研削特性と砥石の摩耗に及ぼす加工条件の影響について述べる。

2. 実 験 装 置

実験には、横軸の平面研削盤を使用した。左右のテーブル送りは、ねじ伝動に改造し、直流サーボモータで駆動しており、0~25 mm/minの範囲で無段変速できるようにした。砥石軸は、電動機にインバータを付設することによって、300~7 200 rpmまで無段変速可能

* 原稿受付 昭和61年9月24日、昭和59年度精機学会春季大会学術講演会（昭和59年3月26日）にて発表

** 正 会 員 東北大学工学部（仙台市荒巻字青葉）

*** 正 会 員 新日本製鉄（株）（大分市西の州1）

Fig. 1

(a) Arrangement of the slicing blade and workpiece in the present paper

(b) Illustration of the slicing distance and depth

にした。

外周刃による精密研削切断には、工作物が硬ぜい材料であるという理由から、ダイヤモンド砥石を使う場合が多い。しかし研削特性を精度良く調査する場合には、砥石の初期状態をつねに一定にそろえる必要がある。その点で、ダイヤモンド砥石より通常砥石の方が有利である。そこで本実験では、外径 150 mm、厚さ 0.5 mm の GC 240 RB の砥石を標準とし、磁気ヘッド材であるセンダスト（東北金属，SD-1）を工作物に選んだ。

図 1 に、本実験における切断法を図示する。この図のように、工作物はカーボン台に加工用接着剤で接着しカーボン台ごと切断した。フランジからの砥石突出し量は、7 mm を標準とし、カーボン台を含めた切断深さ（砥石半径切込み量）は、いずれの場合にも 6 mm に設定した。センダストは $40\text{ W} \times 50\text{ L} \times 5\text{ H mm}^3$ で、同図 (b) のように切断間隔は 1 mm にした。また転写法によって砥石の断面形状の変化を測定する際には、図 1 (a) に示したように工作物の一端にセンダスト材の転写片を接着して切断を行った。研削液には、ソリュブル型の水溶性研削液

を使用し、砥石の後方だけでなく、両側面からも注水した。

3. 研削抵抗

研削抵抗は八角弾性リング型の動力計を使って、垂直と水平方向の二分力を測定した。図 2 に、アップカット (a) とダウンカット (b) の場合の 2 分力の記録例を示す。図で垂直分力の正方向は下向きの力を、水平分力の正方向は砥石軸直下における砥石周速ベクトルと逆向きの力を示している。また ①～⑤ は、それぞれ、①：研削開始時、②：工作物の前端が砥石軸の真下に来たとき、③：工作物の中央が砥石軸の真下に来たとき、④：工作物の後端が砥石軸の真下に来たとき、⑤：工作物の後端が砥石との干渉域から脱するとき、を示している。

図から明らかなようにアップカットの場合は②の少し前で、工作物と砥石との接触弧長が一定値に達する。②以後も工作物と砥石側面との接触面積は増加するので、それに伴って垂直分力も漸増を続ける。そして、③を過ぎたところで最大値をとり、それ以後は急激に減少する。水平分力もこれとほぼ同じような傾向を示す。

これに対してダウンカットの場合、垂直分力は非常に特徴的な挙動を示す。すなわち研削開始直後は研削抵抗は下向きで徐々に増大するが、②以後は漸減し、③を過ぎたところで逆転して上向き分力が作用することになる。その後、上向き分力は増大を続け、④の位置で最大になった後、減少する。他方、水平分力は研削開始後わずかながらテーブル送りと逆向きに作用するが、それ以後はテーブル送りと同じ向きになる。ただしその大きさはアップカットの場合に比べて約 1/2 程度である。

Fig. 2 Typical traces of grinding forces in (a) up-cut grinding and (b) down-cut grinding

Fig. 3

(a) Deformation model of blade in grinding
(b) Grinding forces exerted by each point of blade in slicing

精密研削切断においては、とくに工作物の切断幅が小さい場合、カーボン台からの工作物の剥離が問題になる。接着層に対して水平分力はせん断力として作用し、上向き分力は引張力として働く。したがって、もし上向き分力を最少に抑えることができるなら、水平分力の小さいダウンカットの方が接着の剥離という点では有利である。そこで以下の実験では、ダウンカットを中心に検討することにした。

3.1 研削切断モデル

このようにダウンカットにおいては、垂直分力は同じように高切込み研削であるクリープフィード研削に比べて非常に特異的であるが、これは次のように説明できる。

砥石軸は、工作物送り方向に垂直であることが望ましいが、実際には必ず誤差が存在し、切断幅は砥石幅よりも大きくなるのが普通である。したがって研削中の砥石は図3(a)に示したように変形しながら進行すると考えられる。その結果、クリープフィード研削などと異なり、砥石側面も直接研削に関与することになる。図3(b)は、砥石が時計方向に回転していると考えて、砥石の外周と側面の各部において発生する研削抵抗とその2分力を模式的に示したものである。すなわち砥石作用面においては、砥石の速度ベクトル方向の接線力と面に垂直な法線力が作用すると仮定すれば、いま考えている2分力に関する切削力は、それぞれ F_a , F_b , F_c で例示したようになる。ここで、A点は、砥石外周面上

の点であり、B, Cは砥石側面上の点である。

図2(b)の①～②の状態では、図3(b)から明らかに、砥石の右半分の外周面と側面が関与し、AおよびB点に示したような切削力が作用する。したがって2分力はそれぞれ F_{an} と F_{bn} , F_{at} と F_{bt} の和であるから、いずれも②の位置に近づくほど大きくなる。なお研削開始直後にテーブル送りと逆向きの力が発生するのは、A'点のように切削位置の高い外周面では、工作物に作用する切削力(F_a')の水平成分 F_{at}' がテーブル送りと逆向き(右向き)になるためである。したがって、切断深さが大きいほどこの現象は顕著になるはずである。さらに切断が進行して砥石と工作物の弾性接触により砥石の左半分の側面が研削に関与始めると、C点に示したように上向きの成分 F_{cn} が発生する。この成分は、左側面の作用面積が増加するに従って増大する。そして④の状態では、砥石と工作物は左半分だけで接触することになり、それ以後は接触面積が減少する。したがって④の状態では垂直研削分力は最小値(上向きの最大値)をとる。

3.2 研削条件の影響

このように研削切断においては、砥石の側面と工作物との弾性接触により、研削抵抗に上向き成分が発生する。これは、前述したように、工作物接着剤の剥離の直接原因になるので、できるだけ小さい方が望ましい。そこで研削抵抗の垂直分力 N における下向きの最大値を N_d 、上向きの最大値を N_u (図2(b)参照)として、研削条件との関係を調べた。

図4は、砥石円周速度 $V=2840$ m/min、テーブル速度 $v=20$ mm/minとしたときの切断回数に伴う N_d と N_u および接線力の最大値 T の変化の一例である。この例の場合、下向きの垂直分力 N_d と接線力は、切断回数に伴ってわずかに増加するだけでほとんど一定になった。他方、上向きの垂直分力 N_u は、最初非常に小さいが、切断回数の増加に伴って変動しながらも徐々に増大し、切断回数120回後には、切断開始時の

Fig. 4 Typical variation of grinding forces in slicing under milder slicing conditions

Fig. 5 Typical variation of grinding forces in slicing under harder slicing conditions

5 倍になった。これに対して 図 5 はテーブル速度を $v=50 \text{ mm/min}$ とやや大きくした場合の結果である。この場合、切断開始初期の研削抵抗の値は図 4 に比べていずれもやや大きくなるが切断回数を増しても、その値はほとんど変わらない。

このように研削条件について、研削特性が大きな影響を受けることが予想される。そこでテーブル送り速度と砥石周速度を変えて、切断回数に伴う研削抵抗の変化に対する影響を調べた。図 6 はその結果である。いずれの場合も、矢印は切断回数に伴う研削抵抗の変化を示しており、矢印の先端は、切断回数 120 回後における研削抵抗の大きさを表している。これらの結果によれば、工作物送り速度 v が小さいほど、あるいは

砥石周速度 V が大きいほど切断初期の研削抵抗は小さくなる。しかしこのように、いわゆる砥粒切込み深さが極端に小さくなるような条件下では、切断回数に伴う研削抵抗の増加率は大きくなるようである。

そこで、研削中の砥粒切込み深さに直接関係する量として、速度比 v/V を計算し、図 6 を書き直すと図 7 のようになる。明らかに速度比 v/V が小さくなるほど、切断初期の研削抵抗は小さいが、切断回数に伴う研削抵抗は大きくなる。

これに対して、速度比が大きくなると切断初期の研削抵抗は大きくなるが、切断回数の増加に伴って、むしろ研削抵抗が減少する。これは砥粒切込み深さが小さい場合には切れ刃が目つぶれを起こし、研削性能が急速に低下するのに対し、砥粒切込み深さが過大になると切れ刃が目こぼれ状態になり、逆に研削抵抗が減少することを表している。しかもこれらの傾向は N_d や T に比べて N_u の方が顕著であり、外周の切れ刃に比べて砥石側面の切れ刃が研削条件に敏感であることを示唆している。

4. 砥石摩耗量

次に砥石の摩耗量に対する研削条件との関係について調べた。砥石の摩耗量は、図 1 に示したように、工

Fig. 6 Relations of (a) grinding forces and table speed, and (b) grinding forces and wheel speed. An arrow shows a change of the grinding force after 120 passes

Fig. 7 Relation of grinding forces and speed ratio v/V

Fig. 8 Radial wheel wear and a typical variation of blade profile with the number of slicing passes

Fig. 9 Cumulative wheel wear as function of wheel speed V and work speed v

作物の前端に接着した試片に転写された砥石の断面形状から求めた。砥石の断面形状の測定は、大型投影機（スクリーン径 $\Phi 1000$ mm）を用いて測定した。

図8は、このようにして求めた切断回数に伴う砥石外周の後退量 w_d と砥石の断面形状の変化の一例である。このように砥石は、外周が後退するだけでなく両側のエッジが次第にだれて丸味を帯びて来る。そこで砥石摩耗量としては、 w_d ではなく、砥石断面面積の減少量 w_a (mm^2) で評価することにした。

図9は、切断回数に伴う摩耗面積の変化を砥石周速 V と工作物送り速度 v をパラメータにして比較したものである。前述の目つぶれ型の条件では、切断回数に伴う摩耗率は小さく、摩耗曲線は緩やかな弧を描いて上昇する。

Fig. 10 Relation of wheel wear and v/V ratio

Fig. 11 Comparisons in size and frequency of chipplings on the upper and lower surface as a parameter of the number of slicing passes

いま、切断回数50回までの1回あたりの平均摩耗量を摩耗率と定義し、速度比 v/V についてプロットすると図10のようになる。このように砥粒切込み深さが小さくなる条件では、摩耗率が非常に小さいが、砥粒切込み深さの増大に伴って、摩耗率は急激に増加する。これは砥粒切込み深さの増加に伴って砥石の摩耗状態が目つぶれ型から目こぼれ型に変化する様子を裏付けている。

Fig. 12 Comparison in size and frequency of chippings as a function of table speed

Fig. 13 Relation of chipping versus the upward grinding force

5. 工作物エッジのチッピング

精密研削切断では、切断時に生じる工作物エッジの欠けが問題になることが多い。図 11 は、工作物の上下面それぞれのエッジにおけるチッピングの大きさと数を切断回数を変数にして比較したものである。ここでチッピング δ とは、切断面に直交する面（工作物の上面と下面）のエッジに生じた欠けの幅であり、数は工作物の全長 50 mm 内の欠けの総数である。このようにダウンカットの場合、工作物の上面よりも下面、すなわちカーボン台との接着面の方がチッピングの大きさも数も大きかった。アップカットでは、この傾向は全く逆転した。これは、ダウンカットの場合、砥石軸の右半分における研削では工作物上面のエッジに圧縮応力が作用するのに対し、下面では引張応力が作用するためであると考えられる。

図 12 は、工作物送り速度による影響を調べた結果で、切断初期における値を示す。明らかに工作物送り速度が大きくなって砥粒切込み深さが大きくなると、チッピングの大きさも数も大きくなる傾向を持つ。

さて前述したように、工作物エッジのチッピングの発生は砥石側面の研削性能と密接な関係があると考えられる。そこで上向き分力の最大値 N_u とチッピングの大きさとの関係を調べた。図 13 はその結果である。チッピングの大きさは各試験片について、チッピングの最も大きいものから順に 10 個を取り出し、その平均値で表した。両者の間には、明らかに相関が見られ、 N_u が大きくなるほどチッピングは大きくなる傾向がある。

6. 結 言

GC の外周刃を使って、センダストの精密研削切断を行った。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) アップカット切断の場合、工作物にはテーブル送りと逆向きの水平成分と下向きの垂直成分を持った研削抵抗が作用する。水平成分はダウンカット切断の場合よりも、やや大きくなる。
- (2) ダウンカット切断の場合、研削抵抗の水平成分は、テーブル送りと同じ向きであるが、垂直成分は最初下向きであるが、後に逆転して上向きになる。
- (3) このようなダウンカット切断における上向き成分は、砥石の弾性変形による砥石側面での研削に起因している。
- (4) 砥粒切込み深さが小さくなる条件では、研削抵抗は最初小さいが、研削回数に伴う増加率は大きい。砥石切込み深さが大きくなる条件では、その逆になる。
- (5) 砥石切込み深さが小さい場合には、砥石摩耗は目つぶれ型になり、逆に大きい場合には目こぼれ型になる。これは、とくに砥石側面において著しい。
- (6) 工作物エッジのチッピングは、ダウンカット切断においては、上面よりも下面に多く発生する。
- (7) 工作物エッジのチッピングは、砥粒切込み深さが大きいほど、大きさも数も大きくなる。また砥石側面の研削性能もチッピングの発生に重要な影響を及ぼすことが明らかになった。

謝 辞

実験装置の製作その他でご協力いただいた東北大学工学部精密工学科技官田中憲司氏ならびに工作物（センダスト SD-1）をご提供いただいた東北金属工業（株）に心から感謝の意を表する。