ダイヤモンドアブレイブワイヤによる 切断加工の研究 (第1報)*

——定圧切断特性——

伊 藤 哲** 村 田 良 司***

Study on Cutting-off Process with Diamond Abrasive Wire (1st Report)
—Fundamentals of Constant Pressure Cutting-off Process—

Satosi ITO and Ryoji MURATA

The cutting-off ability of diamond abrasive wire is experimentally studied. The wire has one layer of diamond abrasives around the core steel, so the cutting-off ability of the wire is continuously decreased due to falling off and wear of abrasive grains, and no recovering of the initial cutting-off ability is reached. It may be generally said that simple cutting-off ability of the wire is low compared with that of cutting wheel. But the wire can even cut off ceramics well while most abrasive grains keep sharp edges. And it is experimentally confirmed that; machining without coolant shows much lower cutting ability than that with coolant; ratio of tangential force to normal force is decided by material of workpiece and wear of abrasive wire, while it is slightly depended on wire running speed; wire tension and normal force. The ratio evidently affected with material ductility, for example 0.5 for alumina-ceramic, 0.54-0.55 for glass, 0.68-0.74 for brass and 0.8-0.87 for aluminum without apparent wire wear. The machining characteristics of diamond abrasive wire are simply represented by the ratios of cutting-off area to unit grinding forces and unit wire running length.

Key words: diamond abrasive wire, wire sawing, grinding force, effect of coolant, cutting-off of ceramics, cutting-off of metals, constant load cutting

1. 結 論

ワイヤによる砥粒加工は砥粒を含むスラリ及びブレンワイヤを用いるもの¹⁾とワイヤに固定した砥粒を用いるものとに大別され、後者の形式としては、ビーズ状砥石にワイヤを通し数珠状にしたもの^{2)~4)}、燃線に適当な間隔を空けて断続的に砥粒を電着したもの⁵⁾、単線のワイヤ外周全面にダイヤモンド砥粒を電着したいわゆるダイヤモンドアブレイブワイヤ⁶⁾⁷⁾などの諸方式が報告されている。

このうち、最後の単線方式は比較的細いワイヤを用いる場合に適しており、ぜい弱構造体や各部分の被加工性が互いに異なる各種複合材料 (FRP+金属, セラミック+金属) にはほとんどじょう乱を与えずに切断や微細加工を行うことができ、ファインセラミック等の

硬ぜい性材料の加工にも適している等の特徴があるので近年興味を持たれてきた。しかし、その特性に関する本質的研究はほとんど行われていない。そこで本報では単線方式のダイヤモンドアブレイブワイヤによる定圧切断加工法の基本特性を平面切断の場合について検討する。

なお、この場合、加工条件及びワイヤの強度にもよるが20~30 μm 程度までの直径のものが使用可能であるが、細径であるためワイヤの両端をワイヤ径を上回らずに接合してループ状にすることは、強度的に難しいので、往復運動方式で加工を行うものである。

2. 実験装置と方法

2.1 実験装置

実験に使用した加工装置はレーザテクノロジー社製ワイヤソー model 2005-D (モータ出力 12 W, 被削材取付可能寸法 50 mm×50 mm) である。図1に示すように、この装置では溝を切ったドラムにワイヤを約 30 m 巻きつけて収めてあり、ドラムを正転、逆転させてワ

* 原稿受付 昭和 61 年 12 月 3 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 機械技術研究所 (つくば市並木 1-2)

*** 正 会 員 機械技術研究所 (現, 茨城大学工学部; 日立市中成沢町 4-12-1)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

ワイヤを往復運動させて加工を行う。被削材取付部にはひずみゲージ方式の研削動力計を設置し、研削抵抗二分力を測定した。ガイドプリー軸の回転数をロータリーエンコーダで測定してワイヤの走行速度を求め、モータ電源の断続により速度制御を行う。切断は簡単のため重力による定圧切込みで行い被削材のワイヤへの押付力及びワイヤ張力はおもりにより調整する。約 $45\text{ }\mu\text{m}$ 程度のダイヤモンド砥粒を電着した約 0.2 mm 径のワイヤを用いた。

2.2 実験方法

被削材としては金属（アルミニウム：硬さ HR 15 T 52, 7:3 黄銅：硬さ HRB 66）、ソーダガラス、アルミナセラミック（京セラ A 479：硬さ HV 1650）を用い、ワイヤ張力、被削材押付力、ワイヤ走行速度、研削液の有無による研削抵抗二分力及びワイヤ寿命の変化を調べた。

湿式で切断する場合は毎秒 2, 3 滴の水道水を切断溝の上から滴下する。被削材は長方形の薄板を用いた。その標準断面寸法は $17\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ とする。

3. 実験結果

3.1 研削抵抗二分力比と累積切断面積

用いたワイヤは砥粒が一層しか電着されていないため、砥粒の脱落、摩耗に伴い当然切れ味は低下していく。研削抵抗の法線方向分力（＝被削材押付力） F_n とワイヤ走行方向分力 F_t との関係を見ると、図 2 に例示するように一般に二分力比 F_t/F_n は累積切断面積の増加に伴い減少していく。いわゆる摩擦係数 μ に相当する量であるこの比が減少することは砥粒の減耗によってワイヤ表面が滑らかになって行くことを意味し

Fig. 2 Relation between ratio of tangential force to normal force and accumulative cut-off area for alumina-ceramic

ている。図 2 はアルミナセラミックを湿式切断した場合の例である。新しい摩耗していないワイヤを用いる場合、切断開始当初は二分力比が急激に低下するが、次第にその低下速度はゆるやかになる傾向がある。これは初期には、電着してある砥粒のうち結合力の弱い一部の砥粒が脱落し、切断に寄与する切れ刃数が急激に減少して二分力比が低下するが、その後は砥粒自体が徐々に摩耗していくためであると考えられる。また二分力比はワイヤの摩耗特性のみならず被削材の切りくず生成時の変形特性とも関係する。摩耗していないワイヤの使用時の二分力比 F_t/F_n を被削材別にみるとアルミナセラミック（0.5）、ガラス（0.54～0.55）、黄銅（0.68～0.74）、アルミニウム（0.8～0.87）の順に大きい。これは被削材のじん性の順に対応していると考えられる。なおこの場合、黄銅は乾式、他は湿式切断の例である。

3.2 研削抵抗二分力比と切断条件

上記のように砥粒の摩耗によりワイヤの切断能力は時々刻々変化する。つまりそれは時間の関数である。

黄銅を乾式切断した場合の研削抵抗の法線分力とワイヤ走行方向分力の関係を図 3 に示す。これによれば同一被削材に対しワイヤの摩耗状態（砥粒の脱落＋砥粒の摩耗等）が同程度ならば、実験した範囲では押付力（法線分力）の大小によらず二分力比はほぼ一定であり、被削材押付力を増加させるとそれに比例して走行方向分力が増す。その比例定数はここでは 0.7 程度となっている。ワイヤ走行速度及びワイヤ張力が二分力比に及ぼす影響を図 4, 5 に示す。実験範囲ではどち

Fig. 3 Relation between normal force and tangential force

Fig. 4 Effect of wire speed on ratio of tangential force to normal force

らも二分力比にほとんど影響を与えていない。

ワイヤの走行方向が反転する際にはドラムの慣性のため、減速・停止・反転・加速という過程を経て定常速度で逆転走行を行うことになる。従ってワイヤ走行速度も過渡的に変化するのはやむを得ないが、上記のようにワイヤの研削抵抗二分力比はワイヤ走行速度にかかわらずほぼ一定と見なし得るので、反転期間の減速の影響はそう大きくないと考えられる。

3.3 切断能力の表現

ワイヤのノルマライズした切断能力の評価基準として単位の研削抵抗（換言すれば押付圧力）についての

Fig. 5 Effect of wire tension on ratio of tangential force to normal force

ワイヤの単位走行量当たりの切断面積を用いることとする。これは切断面積の増加速度が押付圧力に比例的でありワイヤの走行速度にも比例すると見なしたことに相当する。つまり微少時間内の切断ではワイヤの摩耗状態は一定であるから、 $A_n = dA / (dL \cdot F_n)$ 、あるいは $A_t = dA / (dL \cdot F_t)$ をワイヤの切断能力評価基準として用いることが可能である。なお A_t は A_n / μ である。ただし dA は微少時間内の切断面積 (mm^2)、 dL は微少時間内のワイヤ走行量 (m)、 F_n 、 F_t は法線方向、ワイヤ走行方向の研削抵抗分力 (N) である。このように定めた A_n 、 A_t はいわばワイヤの切れ味を表現する量である。

3.4 研削液の効果

乾式切断と湿式切断における切断能力の比較を行うと、摩耗していないワイヤを用いてアルミニウムを切断した場合、 A_n 、 A_t も湿式の方が2倍程度の大きさである（図6）。これは同じ大きさのものを切断する場合、押付力とワイヤ走行速度が同じなら半分の所要時間で切断できることを示している。

ガラスを乾式と湿式切断を組み合わせて切断した場合の A_n 、 A_t の変化を図7に示す。湿式で切断を行っていくと累積切断面積の増加に伴い A_n 、 A_t は低下していくが、乾式切断に切り替えた時点（A点）では A_n 、 A_t の低下の割合が湿式の場合より増加する。再び湿式切断に切り替えた時点（B点）で A_n 、 A_t 共に回復し、更に乾式切断に切り替えると切断途中でワイヤが断線した（C→D点）。乾式から湿式切断に切り替えた時点での見かけの切断能力が増大することから、湿式切断の方が、同じ摩耗状態でもワイヤの等価的切込みが増

Fig. 6 Difference between wet and dry grinding of aluminum

Fig. 7 Variation of A_t and A_n in glass grinding with and without coolant

大すると思われる。これは切りくずが乾式の場合よりも速やかに排出され、切れ刃と被削材の間に存在しにくいので、切れ刃の食付きが良くなるためと考えられる。

3.5 各種被削材での切断能力の変化特性

図8は黄銅の乾式切断の実験結果であり、ワイヤ走行速度と張力を2水準変化させている。全体的な傾向としては累積切断面積の増大に伴って A_n , A_t 共に減少して行き最終的にはワイヤが摩耗して切断不能になった。しかし実験データはかなりばらついている。したがって部分的には A_n , A_t が変動している部分が

Fig. 8 Relation between accumulative cut-off area and A_t , A_n in dry grinding of brass

ある。

ワイヤ走行速度の影響は平均的にみて速度の大きいほうが A_n , A_t 共に若干大きい値を示している。またワイヤ張力については張力の小さい方が A_n , A_t がわずかに大きいという結果となった。

図9にはアルミニウムの湿式切断での同様な実験結果を示す。やや高めの押付力 ($F_n=0.54\sim0.56N$) の場合は A_n , A_t 共に急速に低下し、断線が起りやすいのでワイヤ寿命も短い。押付力が低めの場合でも同様に A_n , A_t が急速に低下するが、その後 A_n , A_t はほぼ一定の値を維持してワイヤ寿命が長い。なお、平均的にみてワイヤ走行速度の影響はほとんど認められなかった。

図10にはアルミナセラミックの湿式切断の例を示す。累積切断面積が大きくなった時点でデータがばらついているが、傾向としては研削抵抗二分力比は研削当初はアルミニウムと同様に急激に低下する。しかしアルミナセラミックの場合はその後も二分力比は低下を続け、また A_n の値も切断面積の増加に伴って減少

Fig. 9 Relation between accumulative cut-off area and A_t , A_n in wet grinding of aluminum

する。一方 A_t は切断が進むと減少するが、切断開始当初は増加傾向を見せる。これは切断開始当初は二分力比が急激に低下しワイヤ走行方向研削抵抗分力が切断能力の減少よりも急速に低下するためと考えられる。

このことからワイヤは当初は良好な切断能力を持っているものの、切断開始後すぐに結合力の弱い砥粒が脱落していくため被削材によらず切断能力が急激に低下し、その後は砥粒の摩耗に伴い切断能力が低下するためアルミニウムでは摩耗が進展せずに切断能力を維持し、アルミナセラミックの切断では摩耗の進行が著しいので切断能力 A_n , A_t の低下が早いと考えられる。

4. 表面粗さ

上記のように一般に累積切断面積の増加に伴って切断能力が低下して行くが、ワイヤの使用当初の比較的切断能力の高い状態で切断を行ったときの切断面と切断能力 A_n , A_t が 1/10 程度に低下した時点での切断面

Fig. 10 Relation between accumulative cut-off area and A_t , A_n in wet grinding of alumina-ceramic

の表面粗さの比較を行った。

図 11 にアルミナセラミックの場合の触針式粗さ計による測定例を示す。被削材は薄板であるため切断送り方向には十分な測定長さがとれなかったため、ワイヤ走行方向と送り方向とでは測定条件が異なっている。

被削材送り方向粗さは R_a , R_{max} とともに切断能力低下に伴い 1/2 程度に低下している。これは切断能力の低下が送り速度の低下に直接結びつくためである。

一方、ワイヤ走行方向の粗さについてはばらつきが大きくはっきりとした傾向が求められない。これは完全にワイヤ走行方向に触針を動かしたのではなく多少傾斜してしまい、その傾斜の程度が測定ごとにばらついてしまったものと考えられる。しかし切断能力の低下に伴って大幅な粗さの変化がある様子は見られない。

5. 結 論

以上の実験的研究によってダイヤモンドアブレイブワイヤの基本的切断特性について以下の点が明らかになった。

- (1) 研削抵抗二分力比の大きさはワイヤ走行速度、ワイヤ張力、被削材押付力の影響をほとんど受け

Work material : alumina-ceramic
 Wire tension : 7.5N
 Wire speed : 339m/min
 Dry grinding
 Normal force : about 0.23N

Surface Roughness in wire passing direction

- ▲ cut off=2.5mm, traverse length=12.5mm
 ● cut off=0.25mm, traverse length=1.75mm

Surface roughness in feed direction

- cut off=0.08mm, traverse length=0.56mm

Fig. 11 Some examples of surface roughness in alumina-ceramic cut-off operation

ず、被削材種、砥粒の減耗量に左右される。二分力比の値は摩耗の少ない状態において本実験の場合アルミナセラミックで0.5、ガラスで0.54～0.55、黄銅で0.68～0.74、アルミニウムで0.8～0.87である。累積切断面積の増加に伴い砥粒の減耗量は増加し、二分力比は低下する。

(2) 切断量は押付力比例型であり、ワイヤの切断能力の表現方法としては単位研削抵抗についての単位ワイヤ走行量当たりの切断面積を用いて表現した。

(3) 乾式切断では湿式切断に比較して切断能力が非常に低下する。これは等価的な切込みの低下が含まれる。

(4) 砥粒の減耗が進んでいない状態では被削材種にかかわらずに良好な切断能力を示す。ただし、その後の切断能力の低下特性は被削材によって大きな差がある。

ダイヤモンドアブレンプワイヤは硬ぜい性材料等をじょう乱を与えずに切断するのに有用であるばかりでなく、切断砥石等では切断が難しい形状への応用が可能利点を持つ。しかしドレッシング不可能で砥粒切れ刃の自生作用が期待できず、摩耗の著しい切断条件では一定の切断能力を期待できない等の欠点もある。今後の研究課題としては長寿命ワイヤの開発、コンタリング加工特性の解明、仕上面粗さの向上などがあげられよう。

参 考 文 献

- 1) 最新切断技術総覧編集委員会編：最新切断技術総覧，産業技術サービスセンター（1985）96.
- 2) T. C. Truncu: Diamond Wire Machine Cuts Marble Quarrying Costs, Ind. Diamond Rev., **40**, 478, (1980) 329.
- 3) J. C. Decroly: Stone Extraction from the Quarry using Diamond Wire, Ind. Diamond Rev., **41**, 483, (1981) 80.
- 4) M. Pinzari: Quarrying Stone by Diamond Wire in Italy, Ind. Diamond Rev., **43**, 498, (1983) 231.
- 5) A. Larane: Diamond Wire Teams with Robot, Ind. Diamond Rev., **42**, 493, (1982) 336.
- 6) S. Herbert: Archaeological Research Finds a New Technique, Ind. Diamond Rev., **33**, 397, (1973) 455.
- 7) S. Herbert: A Smoother Route to the Microscope, Ind. Diamond Rev., **39**, 465, (1979) 273.