ビトリファイドダイヤモンド砥石のツルー イングに関する研究 (第2報)*

——カップツルアによるツルーイング——

松 井 正 己** 庄 司 克 雄** 朴 承 鎬***

Studies on Truing of Diamond Vitrified Wheels (2nd Report)
—Truing Performance of Cup-truer—

Seiki MATSUI, Katsuo SYOJI and Cheng Hao PIAO

A new truing technique with the cup-truer proposed in the previous paper has proved effective on diamond vitrified wheels. In this paper the performance of the cup-truer in truing peripheral wheels is examined in detail. The main results obtained are as follows: (1) The traverse feed of the cup-truer across a diamond wheel produces a tapered periphery of the wheel. This may be the same for any other kind of tool in so far as it is used in a similar manner. (2) Plunge-cut truing, i. e. the truing process with a reciprocating feed without a cross-feed of a cup-truer, provides a straight, taper-free periphery of the wheel by adjusting the cup-truer axis, perpendicularly to the grinder table. By tilting the cup-truer axis, moreover, tapered peripheral diamond wheels also can be trued. (3) In plunge-cut truing the smaller wheel speed or the larger truer feed speed gives the greater truing ratio. Truer rotating speed does not influence the truing ratio appreciably. (4) Excessive wheel speed in truing makes diamond abrasive edges dull.

Key words: diamond vitrified wheel, truing, truing device, cup-truer

1. 結 言

ビトリファイドダイヤモンド砥石は、レジンボンドやメタルボンドのものとは異なり、有気孔であるため、ツルーイングを行えばドレッシングは不要である。前報¹⁾ではビトリファイドダイヤモンド砥石のツルーイング法として推奨されているいくつかの方法についてツルーイング効果を検討した。その結果、ダイヤモンドをツルーイング工具とした場合には、ツルーイング能率は優れているが、平滑な逃げ面を持った偏平な砥粒切れ刃が形成され、ツルーイング直後の砥石の切れ味は低下することが明らかになった。そこで碗型砥石を使った新しいツルーイング装置(カップツルアとよぶ)を試作し、ツルーイング能率、ツルーイング効果の両面で満足し得る結果を得た。本報では、そのツルーイング特性について、さらに詳しく検討する。

2. カップツルア

本装置は、小型モータで強制回転するカップ砥石の端面を使ってツルーイングを行うもので、研削盤の機上で使用できる。本実験で使用したカップ砥石の端面寸法は、外径 75 mm、内径 55 mm で、砥石幅中央部の速度は約 600 m/min であった。カップ砥石の回転軸はユニット化されており、研削盤のテーブルに対し正しく垂直になるよう上下各 3 本のボルトで調整できるようになっている。

実験には、横軸平面研削盤を用いた。砥石軸は、インバータにより、常用速度の 1/10~1 倍に無段変速が可能である。ビトリファイドダイヤモンド砥石は、SD 270/325 L 75 V (直径 200 mm、ダイヤモンド部幅 7 mm) のものを使用した。なおツルーイング時には、研削液(ケミカルソリューション型)を使用した。

3. トラバース方式によるツルーイング

1号平形砥石を研削盤上でツルーイングする場合には、ツルーイング工具に砥石軸方向のトラバース送りを与えるのが普通である。前報では、すべてこの方法でツルーイングを行った。しかしこの方法では、ツルー

* 原稿受付 昭和 61 年 7 月 23 日、昭和 61 年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和 61 年 3 月 29 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 長春光学精密機械学院(中国吉林省長春市朝陽区衛星路 2 号)

イング工具の摩耗のために、砥石外周面に軸方向に傾斜面が形成される。

いま、1パスの切込み量を一定(Δ_t)にして、幅 B のダイヤモンド砥石を一方向からのみツルーイングしたときの砥石断面の修正過程を図1のように仮定する。ツルーイング工具がトラバース送りの途中で半径切込み量 Δ_t だけ摩耗してしまい、砥石後端に切残し部が存在する限り、トラバース送り開始点におけるツルーイング工具先端の位置は変わらない。ダイヤモンド砥石後端に y_1 の半径除去量が生じて初めて、ツルーイング工具先端は半径方向に y_1 だけ進むことになる。そのとき、砥石後端でのダイヤモンド砥石半径除去量を y_2 とする。同様の行程を繰り返して、 n 回目における砥石後端の後退量を y_n とすれば、

$$y_n = \frac{2A_0}{B} - y_{n-1} \quad (1)$$

である。ここで A_0 は、1パスのツルーイングによって除去されるダイヤモンド砥石の平均断面積、 y_n はトラバース送り開始点におけるツルーイング工具の実質半径切込み量である。このとき砥石外周には、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta_t - y_n}{B} \right) \quad (2)$$

なる傾きをもった傾斜面が形成される。

1パスあたりのツルーイング量が小さい場合には、近似的に

$$y_n \doteq y_{n-1} \quad (3)$$

と考えることができる。したがって式(3)を式(1)に代入し、

$$y_n = \frac{A_0}{B} \quad (4)$$

が得られる。

さて、ツルーイング比 γ を、ツルーイングによるダイヤモンド砥石の体積除去量とツルーイング工具の摩耗体積との比と定義すると、ダイヤモンド砥石の直径を D_s 、カップ砥石の有効直径(=(内径+外径)/2)を D_t 、幅を b とすれば、

$$\gamma = \frac{D_s A_0}{D_t \Delta_t b} \quad (5)$$

Fig. 1 Model of a wheel profile in the truing process with traverse feed

Fig. 2 Typical change of the wheel profile in truing

Table 1 Influence of truing conditions to the inclination of the wheel periphery

Truing tool	GC 120 J		GC 220 J	GC 400 J	Single-point diamond
Δ_t μm	5	10	10	10	10
γ	0.05	0.100	0.06	0.01	—
y_n μm	0.23	0.50	0.29	0.05	6.7
$\Delta_t - y_n$ μm	4.8	9.5	9.7	10	3.3

In all tests the traverse speed of the truer v_t was 100 mm/min. The single-point diamond was 1.5 ct and only slightly used until then.

である。よって式(4)、(5)から A_0 を消去して、

$$y_n = \gamma \left(\frac{b}{B} \right) \left(\frac{D_t}{D_s} \right) \Delta_t \quad (6)$$

が得られる。

図2は、GC 120 J 7 V のカップツルアを使って右方向から $\Delta_t = 10 \mu\text{m}$ でツルーイングしたときのパス回数に伴う砥石断面形状の変化の一例である。図で左側約1/3の部分はGC砥石部で、あらかじめ単石ダイヤモンドで丁寧にツルーイングしてあり、テーブル面に対してほとんど平行であると考えて良い。この例の場合、最初から5パスの時点では、砥石後端に切残しが存在している。しかし10パス目では、ほとんど定常状態に達したと考えることができる。カップツルアでは通常

$$\gamma \left(\frac{b}{B} \right) \left(\frac{D_t}{D_s} \right) \Delta_t \ll 1$$

であるから、 Δ_t に比べて y_n は非常に小さい。したがって図のように砥石幅方向には Δ_t/B に等しい傾きが生じる。以上のようなツルーイング工具の摩耗による砥石外周の傾斜面は、カップツルアの場合に限らず、トラバース方式を採る限り、いずれの場合にも起こり得る。表1に、カップツルアでツルーイング条件を変えた場合と単石ダイヤモンドを使用した場合における傾きの状況を示す。

4. ブランジカット方式によるツルーイング

4.1 ツルーイングモデル

式(6)から、 y_n を大きくするにはダイヤモンド砥石幅 B をできるだけ小さくすれば良いことが分かる。その極限状態がブランジカット方式である。しかしツルーイング工具にトラバース送りを与えず、砥石軸に

Fig. 3 Illustration of the plunge-cut truing

垂直な方向のテーブル送りだけでツルーイングした場合、一般に砥石軸方向の砥石断面形状を修正することは不可能である。したがって通常のツルーイング工具では、ほとんどこの方式を採っていない。しかしカップツールではツルーイング工具に回転運動を与えているので、プランジカット方式でも形状修正が可能である。

いまプランジカット方式のツルーイングにおけるカップ砥石とダイヤモンド砥石との関係を図3のように考える。図の斜線部は、ダイヤモンド砥石とカップツール上面との巨視的な干渉域を表している。またPQは砥石軸に平行な砥石最外周上の直線で、後述するように巨視的な干渉域が終了する位置を示している。図3のツルーイングをダイヤモンド砥石によるカップ砥石上面の研削とみなせば、カップ砥石の平均周速度 V_t は干渉域への工作物の進入速度であるから、工作物速度に相当する。このときカップ砥石の周速度 V_t に比べてカップツールの送り速度 v_t は十分に小さいから、研削幅 b_t は、近似的に次のように求められる。

$$b_t = \sqrt{D_s \Delta_t} + \frac{B^2}{4D_t} \quad (7)$$

ここで D_t はカップ砥石の中央部の直径、 B はダイヤモンド砥石の幅である。

さらにカップツールは、カップ砥石が1回転する間に v_t により f (図3参照) だけ右方向に送られる。

したがって図3の研削は、図4に示すような工作物速度 V_t 、1パスあたりのトラバース送り f のトラバース研削に置き換えて考えることができる。この場合、見掛けの研削幅は、式(7)で与えられる b_t になり、砥石の前縁部は、図3におけるダイヤモンド砥石とGC砥石の接触弧に対応する。カップ砥石の端面上の任意の1点は、ダイヤモンド砥石の幅方向の中心(図3のM'点)で最初に研削された後、トラバース送りによ

Fig. 4 Translation of a plunge-cut truing into a traverse grinding

て、カップ砥石1回転あたり f の割合で右方向に送られる。したがってダイヤモンド砥石の両端部は、つねに中央部に対して

$$\tau_r = \frac{B^2}{4D_t} \cdot \frac{1}{v_t} \quad (8)$$

だけ遅れてその点を研削することになる。すなわち図3のP、Q点は、中央部のMに比べ、式(8)で与えられる τ_r だけ、研削に時間遅れが生ずる。したがって図4に示したように、ダイヤモンド砥石のM点とP(およびQ)点の間には摩耗差が生じ、厳密にはPMQは中へこになる。しかし前述のように砥石前縁はつねに円弧になるため、ツルーイング切込み量 Δ_t のほとんどをこの部分が負担し、M点とP点の間の摩耗差は無視できる程度となる。したがって、ダイヤモンド砥石の断面はフラットにツルーイングされる。この場合、砥石平坦度に関する研削幅は図4のMPで、式(7)の第2項に等しいから、前章のトラバース方式によるツルーイングの場合に比べ、砥石幅が $B/4D_t$ 倍に縮小されたことになる。

ところでツルーイング比 γ は、研削の場合の砥石摩耗比(研削比の逆数)に相当するから、研削モデルに置き換えたときの平均切りくず断面積 a_t が大きいほどツルーイング比は大きくなると考えられる。プランジカット方式のツルーイング過程を図4のような研削モデルで置き換えた場合、平均切りくず断面積 a_t は、トラバース時の半径切込み量を Δ' として、

$$a_t = \frac{V_t b_t \Delta'}{j V_s B l_c} \quad (9)$$

で与えられる。ここで j は、ダイヤモンド砥石の単位表面積あたりの有効切れ刃数である。また l_c はダイヤモンド砥粒切れ刃の研削長さで、切れ刃が図3の斜線部を通過する間にカップ砥石を研削する軌跡の長さである。したがってダイヤモンド砥石の周速を V_s 、カップ砥石の周速度を V_t とすれば、

$$l_c = \sqrt{D_s \Delta_t} \left(\frac{\sqrt{V_s^2 + V_t^2}}{V_s} \right) \quad (10)$$

になる。

Fig. 5 Typical profile geometry of a wheel trued in the plunge-cut technique using a cup-truer with the axis perpendicular to the grinder table

一方、ツルアの送り速度 v_t に伴うカップ砥石 1 回転あたりのトラバース量 f は、

$$f = \pi D_t \left(\frac{v_t}{V_t} \right) \quad (11)$$

で求められる。したがって図 4 により、トラバース研削における半径切込み量 Δ_t は、

$$\Delta_t' = \frac{f \Delta_t}{b} \quad (12)$$

になる。ここで Δ_t は、ツルージングの半径切込み量である。式 (9) に式 (7), (10), (12) を代入し、

$$a_t = \frac{\pi D_t v_t}{j B (\sqrt{V_s^2 + V_t^2}) \sqrt{\frac{\Delta_t}{D_s}}} \quad (13)$$

が得られる。したがってツルージング比を大きくするには、 V_s を小さくするか、 Δ_t もしくは v_t を大きくすればよい。

4.2 実験による検証

図 5 は、プランジカット方式によるツルージングを行ったときの砥石断面形状をチタン酸カルシウムの転写試片に転写して測定した一例である。図 2 のように約 $10 \mu\text{m}$ の傾きがあったものを、切込み量 $10 \mu\text{m}$ で約 30 回ツルージングして得られた結果である。このようにプランジカット方式によれば傾きがほとんどない平坦なツルージング面を得ることができる。

ただしプランジカット方式の場合、カップ砥石の回転軸が研削盤のテーブル面に対して正しく垂直になるように調整されていないと、その傾き誤差がツルージング面に転写される。図 6 は、カップ砥石の回転軸をダイヤモンド砥石軸を含む面内で故意に傾けて、プランジカット方式でツルージングを行い、ツルージング面の傾斜角に対する影響を調べた結果である。図のように、カップ砥石の回転軸の傾き角とツルージング面の傾斜角との間には、ほぼ 1 対 1 の対応がある。したがって傾きのないツルージング面を得るためには、カップ砥石の回転軸は、テーブル面に正しく垂直になるように調整する必要がある。また逆に、傾斜したツルージング面を得たい場合には、カップ砥石の回転軸を傾けることによって、容易に目的を果たすことができる。

次に式 (13) の結果を実験的に検証するために、各ツルージング因子とツルージング比との関係を求めた。

Fig. 6 Comparison of the inclination of a wheel surface trued obliquely and that of the tilted cup-truer

Fig. 7 Influence of the wheel surface speed V_s in truing operation on the truing ratio

ダイヤモンド砥石のツルージングによる除去体積は、GC 砥石部を基準にして、転写法によって求めた。

図 7 は、他の条件を一定にして砥石周速度 V_s とツルージング比 γ との関係を調べた結果である。カップ砥石には GC 120 J 7 V の砥石を使用し、ツルージング時の 1 パスあたりの半径切込み量は $10 \mu\text{m}$ にした。式 (13) によれば、 V_s が大きくなるほどダイヤモンド砥粒の研削断面積 a_t は小さくなる。したがって他の条件が一定であれば、 V_s が大きくなるほどツルージング比は小さくなることが予測されるが、図 7 の結果は、これと定性的に良く一致する。

次に図 8 は、ツルージング比に対するカップツルアの送り速度 v_t の影響を調査した結果である。この結果によれば、ツルージング比は v_t の増加に伴って増大し、前節の理論解析と一致する。ただし図 8 の結果は、無制限に拡張されるわけではない。ツルア送り速度 v_t がさらに大きくなっても、 $V_s \gg v_t$ である限り、式 (13) は成立する。しかし v_t/V_s が大きくなると、ダイヤモンド砥石がカップ砥石と接触するときの衝撃が増大する。そのうえ、ダイヤモンド砥石の回転速度が小さ

Fig. 8 Influence of the truer feed speed v_t on the truing ratio

Fig. 9 Influence of the wheel surface speed V_s on the truing effect estimated by the normal grinding force

Grinding conditions

Wheel surface speed; 1550 m/min, Work speed; 5 m/min, Wheel depth of cut; $30 \mu\text{m}$

くになると、1パス中に衝撃の影響が除去されないために、ダイヤモンド砥石の外周にびびり状のうねりが生じる。このため、1パス中のダイヤモンド回転数は、10回以上であることが望ましい。したがって、

$$\left(\frac{b}{v_t}\right) \frac{V_s}{\pi D_s} \geq 10 \quad (14)$$

なるように v_t もしくは V_s を調整する必要がある。

このように、ツルイーグ比に対するダイヤモンド砥石の周速度 V_s およびツルア送り速度 v_t の影響を調べたが、前節の研削モデルに基づく解析結果は、これらの実験結果を定性的に良く説明している。

4.3 ツルイーグ効果

以上は、主にツルイーグ能率に重点を置いて各ツルイーグ因子の影響を検討した結果である。そこで次に、ツルイーグ後の切れ刃の研削性能について検討する。図9は、ツルイーグ直後の砥石でチタン酸カルシウム(幅3.6mm、長さ53mm)を砥石周速1550 m/min、工作物速度5 m/min、半径切込み量 $30 \mu\text{m}$ で30回研削したときの研削抵抗(法線分力)の平均値をツルイーグ時の砥石周速 V_s の関数としてプロット

Fig. 10 SEM stereo pair of a wheel surface trued at 1870 m/min of V_s and 100 mm/min of v_t

したものである。このようにツルア送り速度を一定にした場合、砥石周速が大きいほど、砥石抵抗は大きくなる。これはツルイーグ時の砥粒研削断面積 a_t が小さくなると、先端の鈍化した切れ刃が形成されるためである。図10は、ツルイーグ時の砥石周速を $V_s = 1870 \text{ m/min}$ 、ツルア送り速度を $v_t = 100 \text{ mm/min}$ とした時のツルイーグ面のSEM写真の一例である。このように切削断面積が小さい場合には、逃げ面の大きく発達した切れ刃が観察されるようになる。

5. 結 論

前報で提案した碗型砥石を使った新しいツルイーグ装置(カップツルア)のツルイーグ特性について検討し、以下に示すような結果を得た。

- (1) トラバース方式でツルイーグを行った場合、ダイヤモンド砥石のツルイーグ面がトラバース方向に傾斜する。これはカップツルアに限らず、他のツルイーグ工具の場合も同じである。
- (2) ブランジカット方式の場合、ツルア回転軸をテーブルに垂直に調整することによって傾斜のないツルイーグ面を得ることができる。またツルア回転軸を傾けることによって傾斜面のツルイーグを行うこともできる。
- (3) ブランジカット方式においては、ダイヤモンド砥石の周速が小さく、ツルア送り速度が大きいほど、ツルイーグ比は大きくなる。
- (4) ツルア送り速度を一定にした場合、ツルイーグ時の砥石周速が大きすぎると、逃げ面の大きな切れ刃が形成され、砥石の研削性能は低下する。

参 考 文 献

- 1) 松井正己, 庄司克雄, 山尾昌道: ビトリファイドダイヤモンド砥石のツルイーグに関する研究(第1報)——各種ツルイーグ法のツルイーグ効果について, 精密工学会誌, 52, 2 (1986) 291.