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3報)*

—カップツルアによるツルーイング機構—

庄 司 克 雄** 朴 承 鎬*** 松 井 正 己†

Studies on Truing of Diamond Vitrified Wheels (3rd Report)
—Truing Mechanism with Cup-truer—

Katsuo SYOJI, Cheng Hao PIAO and Seiki MATSUI

In the previous papers a new truing technique with the cup-truer was proposed for the preparation of diamond wheels. This paper describes the truing mechanism of diamond vitrified grinding wheels. The main results obtained are as follows: (1) The effect of truing with a cup-truer mainly depends on the impact of silicon carbide grains torn off from the truer against diamond abrasives and bond bridges. (2) The softer a cup-truer is, the larger grains will be torn off from the truer, leading to a higher truing rate and a rougher surface texture of the diamond wheel. (3) In truing with an impregnated diamond tool, which has almost no grains to be torn off, the grains sticking out most on the grinding wheel are removed in order. (4) In the early stage of grinding process, the protruding grains of silicon carbide filled as a filler in the vitrified bond are rapidly flattened. (5) For difficult-to-grind materials it is desirable to use a diamond vitrified wheel without a filler such as silicon carbide abrasives.

Key words: cup-truer, diamond vitrified wheel, truing, dressing, grinding

1. 緒 言

有気孔型のビトリファイドダイヤモンド砥石は、ツルーイングを行えばドレッシングが不要であるという点で、通常砥石と同じ感覚で使うことができる。これらの砥石では、現在、高集中度のものよりも集中度120以下のものが多用されており、所定の砥粒率を確保するためにGC砥粒などを骨材として添加するのが普通である。しかしGC砥粒は本来研削材であり、これがツルーイングやその後の研削においてどのような挙動を示すかは、大いに関心のあるところである。

第1報¹⁾ではインブリダイヤモンドを初めいくつかのツルーイング工具についてツルーイング効果を比較した。そしてこの結果をもとにカップ型のGC砥石を用いたツルーイング装置(カップツルア)が開発され、前報²⁾ではそのツルーイング特性を報告した。

本報では、ビトリファイドダイヤモンド砥石中に添加された骨材砥粒の挙動を中心に、カップツルアでツルーイングした場合のツルーイング機構を明らかにする。

2. 供 試 砥 石

実験に供したビトリファイドダイヤモンド砥石の仕様(砥石メーカーによる)を表1に示す。ダイヤモンドの砥粒率は容積比で25%に相当するので、これとほぼ同じ容積比の骨材砥粒が添加されていることになる。ダイヤモンド砥石の場合、骨材砥粒として通常

Table 1 Specification of diamond wheel

Grit size	270/325
Concentration	100
Bond	vitrified bond
Bond percentage	14% (volume percent)
Porosity	38%
Filler abrasive	silicon carbide #180
Wheel size	φ200×10×φ40.8 (mm)
Width of diamond wheel	6 mm
Width of silicon carbide wheel	4 mm

* 原稿受付 昭和63年1月29日。昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和62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)

*** 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)

† 正 会 員 東北学院大学工学部(多賀城市中央1-13-1)

Table 2 Truing conditions

Truing device	cup-truer
Truing wheel	GC 120 J 7 V
Size mm	$\phi 75 \times 10H \times \phi 55$
Truing infeed	10 μm
Table speed	100 mm/min
Impregnate diamond tool	
Grit size	# 60
Truing infeed	5 μm

GC 砥粒が用いられることが多いが、本研究では、光学顕微鏡によってダイヤモンド砥粒と骨材砥粒を容易に識別できるよう、特に黒色の C 砥粒 (# 180) を用いた。

砥石は、ツルーイング後の表面の状況を光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) により逐次観察できるよう、第 1 報¹⁾と同じ形状のものを使用した。すなわちビトリファイドダイヤモンド環の一部を切断して、検鏡片として自由に取外しできるようにした。また転写法によってツルーイング量を測定する際の基準にするため、砥石幅方向の一部をコア部分と同じ通常砥石 (C 砥粒) にしている。

3. 実験方法

ツルーイング実験および研削実験は、横軸平面研削盤を用いて行った。ツルーイングはカップツルアとインブリダイヤモンドで行った。それぞれのツルーイング条件を表 2 に示す。

ツルーイングした砥石面の観察は、次のような手順で行った。まず表 2 に示したツルーイング条件でツルーイングを行い、ツルーイング量を転写法により測定する。この際、基準面となる C 砥石部は、あらかじめ単石ダイヤモンドで切削して、ダイヤモンド砥石部との間に適当な段差を設けておく必要がある。そして検鏡片を取り外し、金属顕微鏡で観察し、写真撮影をしておく。次にスパッタリングにより試片表面に金を被覆し、SEM による観察をする。SEM 写真上の一つひとつの砥粒について、同一場所の金属顕微鏡写真を対照させれば、ダイヤモンド砥粒か C 砥粒かを判別することができる。一連の観察が終わったら、再び検鏡片をアルミニウム円板に戻し、次のステップのツルーイングを行う。検鏡片をもとに戻す際には、円周方向に段差が生じないように十分に注意した。

4. ツルーイング実験結果

4.1 砥粒の分布図

図 1 にカップツルア (砥石 GC 240 J) を使ってツ

Fig. 1 SEM stereo pair of diamond wheel surface trued with a cup-truer

Fig. 2 Distribution map of D and C grains

ルーイングした後の砥石表面の SEM 写真を示す。この写真と金属顕微鏡写真とにより、ダイヤモンド砥粒 (D 砥粒) と C 砥粒とを識別し、さらに立体視によって上中下の 3 層に分類して砥粒の分布図を求めた。その結果を図 2 に示す。図によれば、D 砥粒に比べて C 砥粒の個数がやや多くなっている。しかも両者は完全に混ざり合って分散しているのではなく、C 砥粒群を骨格にして、その間に D 砥粒群が散在するような組織構造になっている。さらに図 1 と図 2 とを参照して気がつくことは、C 砥粒と D 砥粒の粒径にほとんど差がないことである。原砥粒は、D 砥粒の # 270/325 に対して、C 砥粒は # 180 であるから、粒径で約 1.5 倍の相違がある。したがって、ツルーイング面に現れ

Fig. 3 Diagram representing the rise and fall process of abrasive grains as a function of truing removal

る砥粒の粒径が原砥粒に比例するならば、両者の大きさには当然差が認められるはずである。しかし実際には、このようにほとんど差が認められなかった。これは、D砥粒がツルーイングに際して、ほとんど破碎を起こさずに脱落するのに対し、C砥粒は原砥粒よりもかなり小さくなるまで残留することを示唆している。

4.2 ツルーイングにおける砥粒の消長過程

続いて10回のツルーイングを行った。各回のツルーイングは4パスのツルーイングからなり、ツルーイングの条件は表2の条件に従った。そして各回ごとに検鏡片を取り外し、図1,2と同一場所について上記の観察を行い、ツルーイングに伴うそれぞれの砥粒の消長過程を追跡した。図3は、このようにして求めた図の砥粒の消長を線図に表したもので、干渉を受けてから脱落するまでを太線で示してある。線図内の番号は、図2の砥粒に付された番号である。また横軸は、ツルーイングによって除去された砥石半径減の累積量である。

図3から明かなように、カップツルアを用いてツルーイングした場合には、工具と直接接する可能性のある上層部

(表層部)の砥粒だけでなく中層部やさらに下層部にある砥粒までが干渉を受け、しかもそのうちいくつかは脱落している。ツルーイングの際に干渉を受けた砥粒は、被覆した金の薄膜が剥落するので、SEMによって容易に識別できる。これは、ツルーイング工具であるGC砥石の砥粒がツルーイング時の衝撃によって脱落し、それがダイヤモンド砥石内に入り込んで、奥まったところにある砥粒や結合剤橋を破壊するためであると考えられる。この場合、ダイヤモンド砥石からの脱落粒子の二次作用によって、さらに砥粒や結合剤橋の破壊が波及し、ツルーイングが促進されることも当然考えられる。図4に示したダイヤモンド砥粒では、すくい面に相当する前面の金被膜が剥落し、脱落粒子の衝突があったことが予測される。

またカップツルアにおいては、横軸平面研削盤の場合、円筒（ダイヤモンド砥石）と平面（カップツルア）の接触になり、円筒と円筒の場合（例えばブレーキタイプのツルーイング装置など）に比べ相対曲率が小さいことも脱落砥粒の巻き込みに寄与していると思われる。

4.3 カップツルアの結合度および粒度の影響

図5は、ツルーイング比およびツルーイング後の砥石を使って研削した仕上面粗さに対するカップツルアの結合度の影響を調べた結果である。ツルーイングをダイヤモンド砥石によるツルーイング工具（GC砥石）の研削と考えた第2報²⁾の考え方に従えば、GC砥石の結合度が高いほどダイヤモンド砥粒切れ刃に作用する切削力は大きくなるから、ツルーイング比は大きくなるはずである。図5の結果は、これと矛盾する。一方、ツルーイング過程を工具であるGC砥石の側か

Fig. 4 SEM stereo pair of a diamond abrasive attacked on the rake surface

Fig. 5 Influence of hardness of cup wheels on the truing ratio and reference roughness

ら見れば、ダイヤモンドによるドレッシングと見なすことができる。その際、結合剤橋の破壊によってGC砥石から脱落する粒子の大きさは、結合度が低いほど大きくなることが知られている³⁾。したがってGC砥石からの粒子の巻き込みに伴う衝撃によって、ダイヤモンド砥石内の砥粒や結合剤橋が破壊されツルueingが促進されると考えれば、当然脱落粒子のサイズが大きいほどツルueing比は大きくなるはずである。一方、大きな脱落粒子の巻き込みがあれば、当然ダイヤモンド砥石表面の切れ刃密度は粗になるはずであり、逆にツルueing工具の結合度が高くなって脱落粒子が小さくなれば、ツルueing過程が砥石表面に近い領域だけで行われるようになるから、ツルueing面の切れ刃密度は次第に密になると考えられる。このように考えれば、図5の結果は良く説明できる。

4.4 インプリダイヤモンドによるツルueing

これに対してインプリダイヤモンドを使ってツルueingした時の砥粒の消長過程を図6に示す。図7はインプリダイヤモンドによるツルueing直前の砥粒の分布図で、カップツルueでツルueingしたものである。前の場合と同様に図6の番号は、図7の砥粒番号である。

図6の線図では、明らかに図3の場合と異なり、上層部の砥粒から次第にツルueingされてゆき、深層にある砥粒はほとんど干渉を受けていない。しかも脱落するのはほとんどがD砥粒で、C砥粒は先端が後退するだけで脱落するものは少ない。インプリダイヤモンドの場合、工具からの脱落粒子はほとんど期待できず、脱落したとしても粒子の数は少ない。したがってツルueingは、インプリダイヤモンドによるラビング作用もしくは切削作用によって進行し、ツルueingに直接関与するのは極く表層部の砥粒だけとなる。その場合、ダイヤモンド砥石内のC砥粒は、D砥粒の陰に隠れるような形でインプリダイヤモンドの

Fig. 6 The rise and fall process of abrasive grains in truing with an impregnated diamond tool

Fig. 7 Distribution map of abrasive grains on wheel surface trued with impregnated diamond tool

干渉を受けるため、作用力は比較的小さい。したがってC砥粒を把持している結合剤橋が破壊されることは少なく、C砥粒の先端には大きな逃げ面が成長することになる。これに対してD砥粒は耐摩耗性が大きいためインプリダイヤモンドのラビング作用によっても容易に摩耗することはない。最初は結合剤橋の弾性変形によって耐えられるが、ツルueing工具の切込み量が増大するに伴って作用力が増加し、ついには脱落に至る。図8はインプリダイヤモンドでツルueing

Fig. 8 SEM stereo pair of wheel surface trued with impregnated diamond tool

Table 3 Grinding conditions

Work material	calcium titanate
Size mm	3.2(W)×52(L)
Wheel surface speed	1880 m/min
Work speed	1 m/min
Infeed per pass	10 μm

グしたダイヤモンド砥石のSEM写真の一例である。

D砥粒が比較的シャープであるにもかかわらず、C砥粒には大きな逃げ面が形成されているものが多い。このような砥石で研削した場合、当然C砥粒も切削に関与するため、大きな研削抵抗が発生することになる¹⁾。特にセラミックのように垂直分力に対して接線力が非常に小さい被削材の研削においては、結合剤橋には大きな圧縮力だけが作用することになる。したがって、このように大きな逃げ面を持ったC砥粒は容易に脱落せず、逃げ面の成長が続くので、研削抵抗はますます低下することになる。

5. 研削実験

ツルーイングによって形成された砥粒切れ刃、特に骨材砥粒が研削過程においてどのような挙動を示すかを明らかにするために、SEMによる追跡観察を行った。被削材および研削条件を表3に示す。ツルーイングはカップツルアを用い、表2の条件で行った。

図9は、ツルーイング直後の状態を示す。ツルーイング時の砥石の回転方向は下から上の方角であり、以下において述べる研削においても同じである。D砥粒はもちろん、C砥粒も比較的シャープで逃げ面はほとんど形成されていない。

図10は、総切込み量で15 mm研削したときの状態である。C砥粒先端の摩耗が急速に進み、逃げ面が形成されている。このようにC砥粒の先端にだけ逃げ面が形成されるのは、C砥粒が特に突出しているためではなく（図9参照）、D砥粒は干渉部分にある被削材をほとんど切削により除去してしまうのに対し、C砥粒は切削能力がないために結合剤橋が弾性変形し先端がラビング状態になるためである。その結果、C砥粒先端においては摩滅が急速に進み、逃げ面が形成される。

図11は、総切込み量で45 mm研削したときの状態である。C砥粒先端の摩滅はさらに進むが、その結果、先端は後退し、D砥粒の陰に隠れるため逃げ面の成長速度はやや停滞する。SEM観察前には、トリクロルエチレンを用い、7 min間超音波洗浄を行っているが、砥粒の周囲には切りくず粉が激しく付着している。

図12は、総切込み量で165 mm研削したときの状態である。図11に比べてC砥粒の逃げ面は、さほど成長していないが、D砥粒の先端が摩滅しはじめたのが認められる。

6. 考察

第1章で述べたように、低集中度のビトリファイドダイヤモンド砥石では、普通GC砥粒などが骨材として添加される。カップツルアを使用したツルーイングでは、骨材砥粒だけに逃げ面が形成されるというようなことはなく、鋭い切れ刃が形成されることが明らかになった。しかしツルーイング状態でD砥粒だけが特に突出しているというようなことはなく、その後の研削では骨材砥粒の先端に逃げ面が形成され、急成長

Fig. 9 SEM stereo pair of wheel just after truing with cup-truer

Fig. 10 SEM view of wheel surface in Fig. 9 after 1500 grinding passes

Fig. 11 SEM view of wheel surface in Fig. 9 after 4500 grinding passes

Fig. 12 SEM view of wheel surface in Fig. 9 after 16500 grinding passes

する。逃げ面の生じた砥粒は、激しいラビング作用を伴うので摩擦熱の発生など、研削時に悪影響を及ぼすのは当然である。

これに対処する方策として三つ考えられる。一つは破碎性の良い骨材を用いることである。本研究では、D砥粒との識別の都合上C砥粒を用いており、一般に使用されているGC砥粒よりは、硬さや破碎性においてやや劣る⁴⁾。したがって実際の場合には本報より好結果が期待できるが、両者の差はわずかであろう。研削性能の点からは非常に破碎性が高く逃げ面の成長が抑制されるような材料が望ましいが、砥石製造上は結合剤との親和性、熱膨張率、融点、機械的強度などが問題になり、今後この方面での研究が期待される。

第二は、研削条件の問題である。たとえばクリープ研削あるいは砥石と工作物が平面同士で接触するような研削方式⁵⁾を採れば、個々の切れ刃の切込み量は小さくなるので骨材砥粒はD砥粒に庇護され逃げ面の成長は緩和される。

そして第三は骨材砥粒を全く使わない高集中度砥石である。横川はCBN砥石において、早くから高集中度砥石の必要性を提唱しているが⁶⁾、セラミックスなど難削材の研削に、最近集中度200程度のダイヤモンド砥石が使用される例が増えていると聞いている。価格やツルueingの問題が解決されれば、今後ますます需要が増大すると考えられる。

7. 結 論

得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) ツルueing工具であるGC砥石の脱落粒の衝突によって、ダイヤモンド砥石の結合剤が破壊

され、ツルueingが促進される。

- (2) ツルueing工具であるGC砥石の結合度が低いほど大きな脱落粒が発生するため、ツルueing比は高くなるが、ダイヤモンド砥石の表面組織は粗になる。
- (3) インプリダイヤモンドでツルueingした場合には、表層の砥粒から順にツルueingされ、特に骨材砥粒には大きな逃げ面が形成される。
- (4) 研削初期に骨材砥粒先端の摩耗が進行するが、その後は周囲のダイヤモンド砥粒に支えられ、摩耗の進行は停止する。
- (5) 骨材砥粒の逃げ面摩耗が問題になるような難削材の研削には、高集中度のビトリファイドダイヤモンド砥石が望ましい。

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ueingに関する研究 (第1報) ——各種ツルueing法のツルueing効果について, 精密工学会誌, **52**, 2 (1986) 291.
- 2) 松井正己, 庄司克雄, 朴 承鎬: ビトリファイドダイヤモンド砥石のツルueingに関する研究 (第2報) ——カップツールによるツルueing, 精密工学会誌, **53**, 3 (1987) 486.
- 3) 松井正己, 庄司克雄: ドレッシングにおける砥粒切れ刃形成に及ぼす砥石結合度の影響——研削砥石のドレッシングに関する研究 (第2報), 精密機械, **49**, 10 (1983) 1410.
- 4) 松井正己, 庄司克雄: 砥粒の動的圧壊試験に関する研究, 精密機械, **46**, 11 (1980) 1416.
- 5) 溝口正人, 庄司克雄, 松井正己: シリコンウエハの平面ホーニングに関する研究, 砥粒加工学会誌, **32**, 241 (1988) 41.
- 6) 横川宗彦, 横川和彦: ボラソンCBNホイール (砥石) の研削性能—16, 機械と工具, **30**, 3 (1986) 97.