

# ウォータージェットを用いた砥石の インプロセスドレッシング (第2報)\*

— 噴射圧力・噴射角度がドレッシング特性に与える影響 —

井澤正樹\*\* 中澤宏紀\*\*\* 井口信明† 浅川直紀\*\* 平尾政利\*\*

In-process Dressing with Waterjet (2nd Report)

— Effects of Injection Pressure and Injection Angle on Dressing Properties —

Masaki IZAWA, Hironori NAKAZAWA, Nobuaki IGUCHI, Naoki ASAKAWA and Masatoshi HIRAO

In previous paper, cleaning and removal functions of a waterjet were examined and the effect was validated as a means of in-process dressing. This paper describes: a) the optimal injection pressure of a waterjet dresser depending on the grain size of the wheel and b) the dressing effect of a waterjet dresser in relation to its injection angle in grinding Ti6Al4V using a cBN wheel. The optimal injection pressure of a dresser differed depending on the grain size of the wheel, and the condition of a processed surface deteriorated when the injection pressures were not optimized in the in-process dressing with waterjet. It was clarified that higher waterjet pressure was required to remove chips as the grain size of a wheel became smaller in the dressing using wheels of a grain size from #230 to #1000. The collision speed of a waterjet with a wheel differed depending on the injection angle. When a waterjet collided with a wheel in a direction opposite to its rotation, the collision speed became higher and a better dressing result was obtained. Conversely, when a waterjet collided with a wheel in the same direction as its rotation, the dressing effect decreased. It became clear that the injection angle of a waterjet has considerable influence on the dressing effect.

**Key words:** waterjet, metal bonded wheel, surface grinding machine, in-process dressing, dressing effect, size effect

## 1. 緒 言

近年研削加工では、研磨加工に匹敵する精度の超精密研削加工が可能となってきた。研削加工は固定砥粒で加工を行うため研磨加工に比べて廃棄物が少ないこともあり、今後需要が増加していくものと考えられる。特に超精密研削加工においてはダイヤモンドやcBNなどを砥粒に用いた超砥粒ホイールが多く用いられる。これら超砥粒ホイールは砥粒の硬度が高いため、チタン合金をはじめとした高比強度合金や高ニッケル合金などの耐熱合金およびセラミックスなどといった比剛性の高い難削材の加工と関わりを深めている。しかしながらメタルボンド超砥粒ホイールは、自生作用に乏しく目詰まりを起こしやすい。超精密研削加工では微細砥粒が多用される傾向にあるため目詰まりがさらに頻発する。また研削加工時に生じたきりくずは、超砥粒ホイールのボンド表面または超砥粒切れ刃と被削材との間において、干渉・展延されて正常な切れ刃の働きを著しく阻害する。その結果、被削材仕上げ面粗さの著しい悪化を招くとともに、被削材の研削焼けや硬度低下、さらにはホイールの寿命自体が半減してしまうこともある。その対策として、困難な作業であるツルーイングやドレッシングを頻繁に行わなければ目詰まりを解消できず、加工能率を低下させている<sup>1)~3)</sup>。

そのため従来は加工を中断して行われていた超砥粒ホイールのドレッシングについて、インプロセス化の要求が高まっている。その実現に向けて、超砥粒ホイールのツルーイングおよびドレッシングをできるだけ単純で効果的な方法を用いることが

有効かつ重要であると考えられる。現在、電解インプロセスドレッシング法(ELID法)<sup>4)4)</sup>が実用例として報告されているが、装置が精密であり、適用できるホイールが限定されるため、研削加工全般に有効なインプロセスドレッシング法とは言い難い。

そこで本研究ではウォータージェット(以下WJ)を用いたインプロセスドレッシング法を提案する。これは図1に示すように研削加工時の砥石使用面にWJを直接噴射し、ホイールにダメージを与えずにきりくずのみを除去するものである。

WJとは直径が0.1mmから1.0mm程度のビーム状の高速水噴

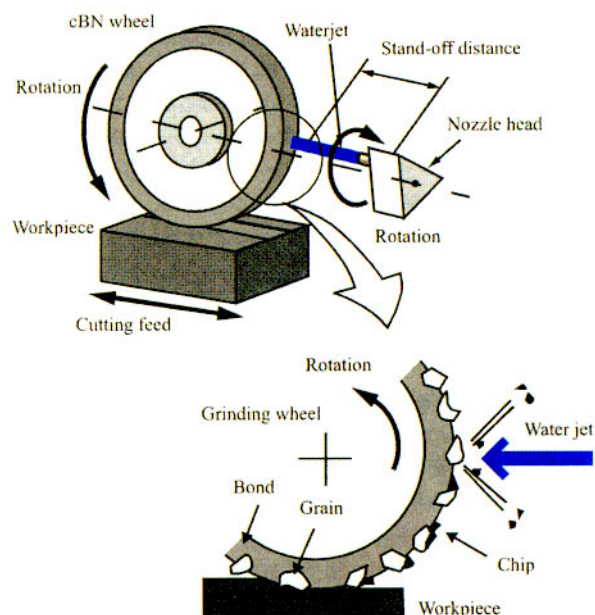


Fig.1 Principle of waterjet in-process dressing

\* 原稿受付 平成16年7月13日  
 \*\* 正会員 富山工業高等専門学校(富山市本郷町13)  
 \*\*\* 学生会員 金沢大学大学院  
 † 正会員 黒田精工(株)(川崎市幸区下平間239)  
 \*\* 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)



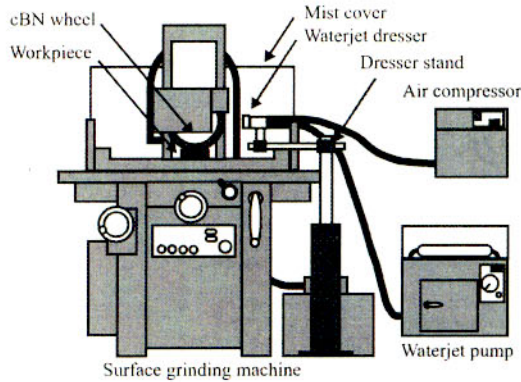


Fig.2 Configuration of experimental apparatus

流によって切断，はつり，洗浄などを行う加工技術である。水噴流の運動エネルギーで加工を行うため加工部の温度上昇が微小であり，噴射圧力の増減により加工物の脆弱な材料・組織のみを除去することが可能である。また WJ は複雑な装置・機構を必要とせず，加工物に制限が伴わない<sup>5)6)</sup>。

前報では WJ の加工特性を利用して，きりくずの除去を目的としたインプロセスドレッシングを試み，その効果を確認した。本報では cBN ホイールの粒度と WJ の噴射角度によるドレッシングへの影響を調べた。

## 2. 実験装置

本研究で用いた実験装置の構成を図 2 に示す。本研究では平面研削盤での加工に WJ をインプロセスドレッサとして適用した。この WJ ドレッサは圧縮空気によってノズルヘッドが回転し，WJ ポンプより超高压水が供給される。この超高压水がノズルを介して WJ として cBN ホイールの使用面に噴射される。図 1 のノズルヘッドには，WJ を噴射するノズルが 1 個組みこまれており，圧縮空気によって回転する。cBN ホイール，ノズルヘッドの双方が回転することにより，研削中のホイール使用面全体に WJ が噴射される。

図 1 の状態ではノズルヘッド 1 回転につき cBN ホイールに 2 回 WJ が噴射されるため，上下 2 つのスタンドオフ距離（WJ ノズルからホイール使用面までの距離；以下  $S_d$ ）が生じる。WJ 加工においては  $S_d$  が大きくなると加工効果が急激に減少することが知られている。そこで本報では，cBN ホイールとノズルヘッドの位置関係を変更して上下の  $S_d$  が異なる場合には， $S_d$  の最小値を代表値とした。実験に用いたメタルボンド cBN ホイールはあらかじめ単石ダイヤモンドドレッサによりツルイーグを施した後に，砥粒の突き出しを確保するため，GC および WA のブロック砥石によりオープンドレッシングを施している。

## 3. 実験方法

### 3.1 噴射圧力検討実験

表 1 に噴射圧力検討実験の条件を示す。本実験では cBN ホイールを用いた難削材の研削において，研削中におこる目詰まりの改善策として，WJ によるインプロセスドレッシングの効果を検討した。平面研削盤上でメタルボンド cBN ホイールを使用し，Ti6Al4V の被削材に対し水溶性研削液を用いた通常の湿式でのブランチ研削を行う。同時に WJ ドレッサによるインプロセスドレッシングを行い，種々の WJ 噴射圧力下におけるドレッシング効果を検証した。また研削の進行に伴う cBN ホイールおよび被削材の受ける影響を調べるため，cBN ホイールの使用面

Table 1 Experimental conditions for injection pressure

Grinding wheel	#230, 325, 600, 800, 1000 (BN-N-75-MB2)
Wheel dimension	$\Phi 180 \times 10 \times 31.75$ mm
Wheel rotational speed	$3360 \text{ min}^{-1}$
Depth of cut	$1 \mu\text{m}$ (#1000), $2 \mu\text{m}$ (#230 - #800)
Feed speed	1.4 m/min
Workpiece	Ti6Al4V
Injection pressure of WJ	98, 107, 115, 125, 133, 142, 151 MPa
Stand-off distance	20 mm
Nozzle diameter	0.2 mm
Nozzle rotational radius	20 mm
Nozzle rotational speed	$850 \text{ min}^{-1}$

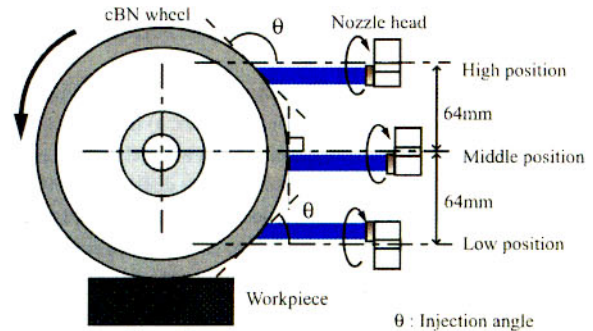


Fig.3 Schematic illustration of dressing position

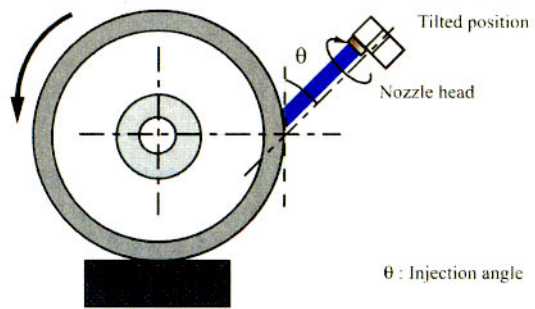


Fig.4 Schematic illustration of tilted dressing position

を観察し，被削材の軸方向の仕上げ面の表面粗さを計測した。

### 3.2 ドレッシング位置・噴射角度検討実験

本実験の概略を図 3 に示し，表 2 に実験条件を示す。ただし，表 1 と同じ条件の項目については表 2 では省略する。前実験と同様，水溶性研削液を用いた湿式でのメタルボンド cBN ホイールによる Ti6Al4V のブランチ研削時に，WJ によるインプロセスドレッシングを行った。この実験では WJ ドレッサのノズル位置について，図のように 3 段階に変化させることで cBN ホイール使用面に対する噴射角度を変化させ，それぞれの噴射角度によるドレッシングの効果を検証した。

また，図 3 のように WJ ドレッサのノズル位置を変更したことによる影響の有無を検証するために，図 4 に示す Tilted position (以下 [Tilted]) のノズル向きで実験を行った。このドレッシング角度は Low position (以下 [Low]) と同じとし，ノズルヘッドの位置を移動したものである。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 噴射圧力検討実験

3.1 で述べた実験について，WJ のノズルの位置を図 3 の Middle position (以下 [Middle]) とし，研削の進行に伴う被削材の仕上



げ面粗さの変化を図5に示す。被削材の仕上げ面粗さは、研削方向に対して直角の方向(軸方向)について測定した。図にはcBNホイールを用いて、WJを用いずに通常研削した場合と、WJの噴射圧力を115、125、133、142、151MPaとした実験結果の表面粗さRaの変化を示す。

噴射圧力115、125MPaのインプロセスドレッシングにおいて、研削量が増加するにしたがって被削材の仕上げ面が悪化していることがわかる。特に115MPaの噴射圧力ではその傾向が顕著に現れている。図6(a)に示すホイール使用面写真からきりくずの付着が観察されることより、WJの噴射が低圧であったためインプロセスドレッシングの効果も低く、ホイール使用面に付着したきりくずが除去しきれずに、目詰まりを起こしたものと考えられる。125MPaの場合においても120mm<sup>3</sup>程度研削した付近から仕上げ面が徐々にRaが増加する傾向を示している。これは115MPaよりもドレッシング効果は高く現れたが、ホイール使用面のきりくずを完全には除去しきれなかったものと考えられる。

噴射圧力133MPa、142MPaのインプロセスドレッシングでは良好な仕上げ面を得られた。特に142MPaにおいては、研削量が増加しても仕上げ面のRaは研削開始時と同等の値を示している。ホイール使用面もきりくずの付着が見られず良好な使用面を維持している(図6(b))。これはWJによるインプロセスドレッシングの効果によって、cBNホイールの使用面性状が良好な状態で保たれたものと考えられる。そのため#1000のcBNホイールにおいては、142MPaの噴射圧力が最適噴射圧力であるといえる。

噴射圧力が151MPaの研削結果においては、研削開始直後から仕上げ面が悪化していることがわかる。図6(c)に示すように、ホイール使用面には砥粒の突き出しがほとんど確認できず、研削加工が良好に行える状態ではない。砥粒付近のボンド部が壊食されたことにより、ホイール使用面の砥粒が脱落していった痕跡である。

以上の結果より、インプロセスドレッシングとして用いたWJには、研削量が増加しても仕上げ面が良好な噴射圧力が存在する。これは適切な噴射圧力によって、ホイールボンド部にダメージを与えず堆積したきりくずのみを除去し、WJによるインプロセスドレッシングの効果を得られたものといえる。またWJの

噴射圧力が最適値よりも高い場合はボンドの壊食が起こり、噴射圧力が最適値よりも低い場合にはきりくずが堆積する。いずれの場合にもホイール使用面の性状が悪化するため、WJの噴射圧力が適切でないときは仕上げ面粗さが著しく悪化する。

インプロセスドレッシングに用いたWJの噴射圧力については、上述のようにホイール使用面の性状が悪化せず、仕上げ面粗さの悪化がわずかである噴射圧力が存在した。これを最適噴射圧力として扱う。#1000では図5から142MPaが最適噴射圧力であるとわかったように、#230～#800でも同様な実験を行った結果、#230、#325、#600、#800では最適噴射圧力はそれぞれ107、107、125、125MPaであった。ここで図7に各ホイール粒度に対する最適な噴射圧力とそのときの仕上げ面粗さの関係を示す。ホイールの粒度が高くなるに従って仕上げ面粗さが小さな値をとることは自明であるが、同時に良好な仕上げ面を得るための最適噴射圧力も高くなることからわかる。これは研削時に生成されるきりくずが砥粒と共に微細になるためであると考えられる。

ここで図8のように砥粒ときりくず付着のモデルを仮定した。砥粒は球形で、直径の1/3がボンドから突き出しており、きりくずは突き出し部の前半分に付着する。またボンドテールにあたる位置にもきりくず付着部を持ち、その後縁距離は砥粒直径の1/3とした。

そこでWJの運動エネルギーをきりくず付着面積で除算することにより単位面積当りのエネルギーを求めると、式(1)が得られる。

$$P_{wj} = \frac{1}{2} \rho v_{wj}^2 \quad (1)$$

砥粒ときりくずの付着面積を $A_1$ 、ボンドときりくずの付着面積を $A_2$ とすると、きりくずの付着面積 $A$ は式(2)で表される。

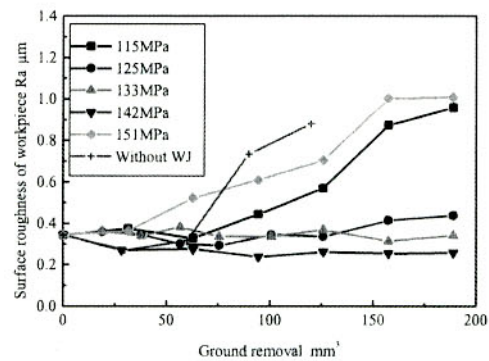


Fig.5 Relationship between ground removal and surface roughness (#1000)

Table 2 Experimental conditions for dressing position	
Grinding wheel	#230 (BN-N-75-MB2)
Injection pressure of WJ	90, 98, 107, 115, 125, 133 MPa
Stand-off distance	[High] 50 / 20 mm, $\theta=135^\circ$
(upper / lower), Injection angle	[Middle] 20 / 20 mm, $\theta=90^\circ$
	[Low] 20 / 50 mm, $\theta=45^\circ$
	[Tilted] 20 / 50 mm, $\theta=45^\circ$

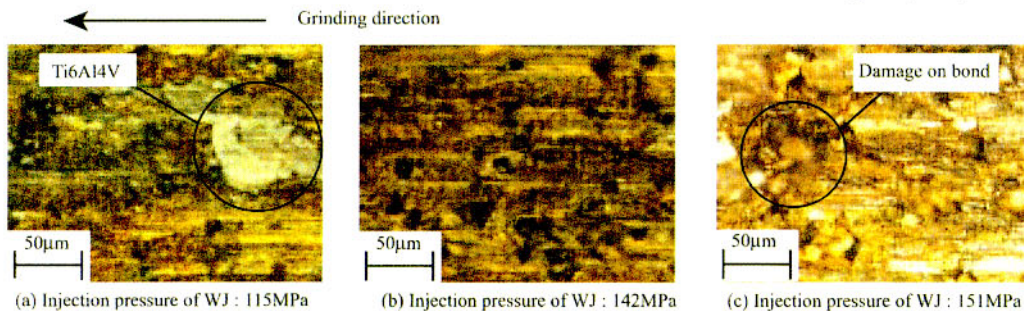


Fig.6 Surface of cBN wheel (#1000), Ground removal: 189 mm<sup>3</sup>



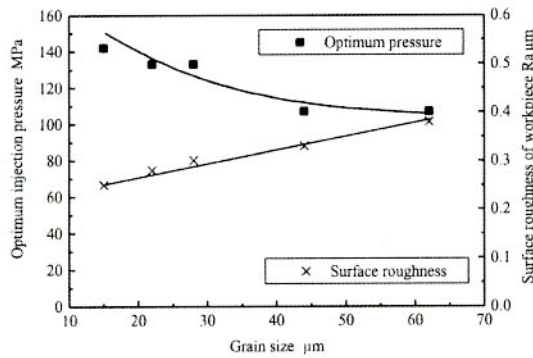


Fig. 7 Effect of grain size on optimum pressure and surface roughness

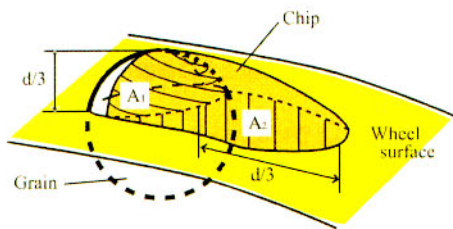
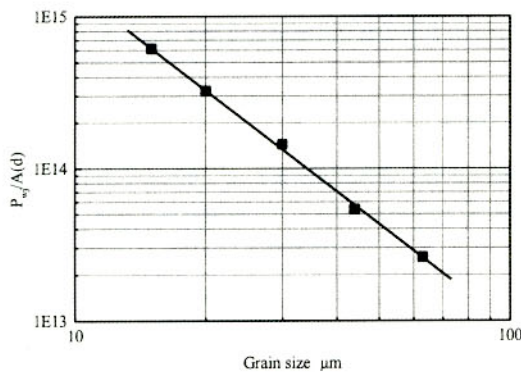


Fig. 8 Schematic illustration of chip adhesion


 Fig. 9 Relationship between grain size and  $P_{wj}/A(d)$ 

$$\begin{aligned}
 A &= A_1 + A_2 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 2\pi \int_{\frac{d}{6}}^{\frac{d}{2}} \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - x^2} \sqrt{1 + \frac{x^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2}} dx + \frac{2\sqrt{2}}{3} \pi l \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{3} \\
 &= \left(\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{2}}{9}\right) \pi d^2
 \end{aligned} \quad (2)$$

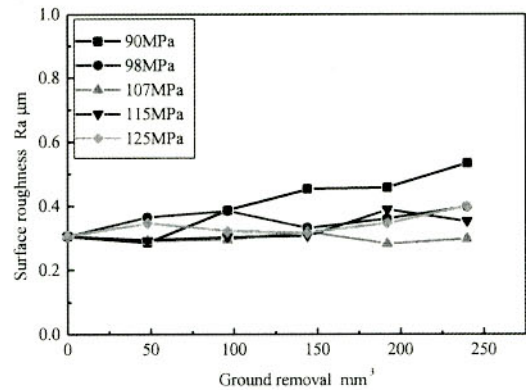
以上より、きりくずの付着部(きりくずと砥粒・ボンドの接触面積)について単位面積当りのWJの運動エネルギーは式(3)で表される。

$$\frac{1}{2} \rho v_{wj}^2 / A \propto P_{wj} / A(d) \quad (3)$$

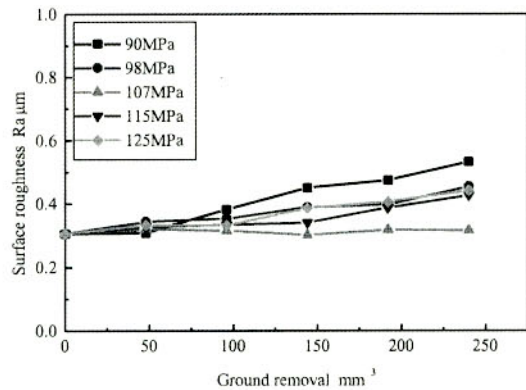
ここで両対数グラフの縦軸に  $P_{wj}/A(d)$ 、横軸に砥粒径をプロットすると図9のようになる。図より砥粒が微細になるほど  $P_{wj}/A(d)$  は大きくなっている。このことから、寸法効果により砥粒が微細になるほどきりくず除去に必要なエネルギーは大きくなり、最適噴射圧力が高压になったものと考えられる。

#### 4.2 ドレッシング位置・噴射角度検討実験

図10(a),(b)にそれぞれ図3の[Low]、図4の[Tilted]の研削過程における被削材仕上げ面粗さを示す。これらを比較する



(a) [ Low ]



(b) [ Tilted ]

Fig. 10 Relationship between ground removal and surface roughness

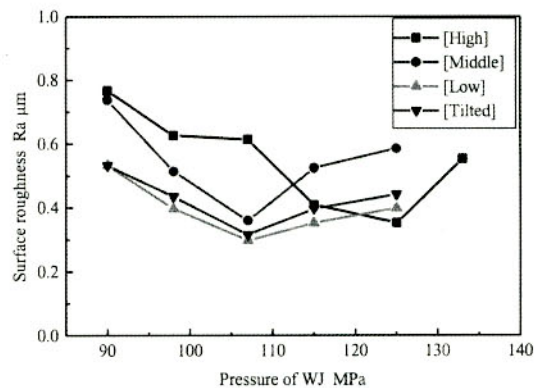


Fig. 11 Relationship between pressure of WJ and surface roughness of workpiece, Ground removal: 240mm³

ことで、Sdと噴射角度が同じ条件について、WJ噴射位置の影響を検討する。

図10(a),(b)を比較すると、どの噴射圧力や研削過程においても被削材仕上げ面粗さは0.02μm程度の差であり、ほぼ同じ結果が得られた。このことからドレッシング角度が同じ場合、WJ噴射位置による影響はないものといえる。

続いて、図3に示した3つのドレッシング位置(角度)について、それぞれ240mm³研削したときの結果を比較した。その際の被削材仕上げ面粗さを図11に示す。[High]はWJがホイールに衝突する際、ホイールの回転方向に対して順方向に衝突するため噴流の衝突速度が小さくなる。そのため[High]における最適噴射圧力は[Middle]よりも高压であったものと考えられる。ホイールの回転速度はWJの噴流速度に対して約10%に及ぶため、ホイールの回転方向がドレッシング効果に影響を及

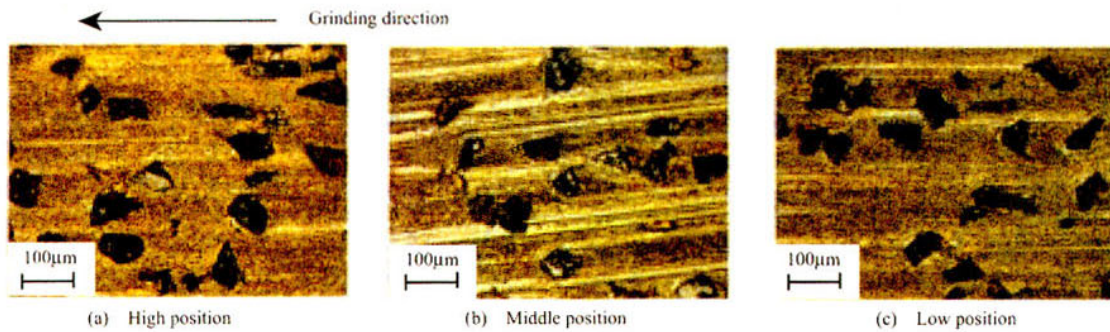


Fig.12 Surface of cBN wheel (#230), Ground removal: 240 mm<sup>3</sup>

ぼすものと考えられる。一方、[Low]ではWJがホイールに衝突する際、回転方向に対して逆方向であるため噴流の衝突速度が大きくなり、[Middle]よりも最適噴射圧力が低圧になるものと予想された。しかし、実際は[Middle]、[Low]の最適噴射圧力は共に107MPaであった。

これはSdが壊食作用に大きく影響するというWJの特徴が原因であると考えられる。すなわち[Middle]におけるSdは、ノズルヘッドの回転軸の上側下側共に20mmであるのに対し、[Low]では20mmと50mmであり、Sdが50mm時における噴射はインプロセスドレッシングに有効ではない<sup>1)</sup>。[Middle]ではノズルヘッド1回転中に2回有効な噴射がされるのに対し、[Low]では1回しか有効な噴射がない。そのため[Low]では高い圧力が必要となったものと考えられる。

ここで本実験のドレッシング効果について整理すると、[Low]と[Tilted]では同様に最大となり、[High]では最小となった。なお、このときのホイール使用面の写真を図12に示す。

## 5. 結 言

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1)ウォータージェットを用いたインプロセスドレッシングにおいては、ホイールの各粒度について最適噴射圧力が存在し、噴射圧力がそれ以上でもそれ以下でも加工面は悪化する。
- (2)#230～#1000の各粒度におけるドレッシング効果について、粒径が小さいホイールほど寸法効果のため、きりくず除去に必要なウォータージェットの噴射圧力が高くなる。

- (3)ウォータージェットのホイールに対する噴射角度は、ドレッシング効果に強く影響する。

## 謝 辞

本研究に関して助言と協力を頂いた金沢大学工学部技術専門職員の浅野久志氏に謝意を表す。また、本研究に多大な貢献をされた当時の金沢大学大学院生、森達也氏(現(株)富士通中部システムズ)ならびに片山裕典氏(現川崎重工業(株))に格別の謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 海野邦昭: cBN・ダイヤモンドホイールの使い方, 工業調査会, (1991) 15.
- 2) 河村末久, 矢野章成, 樋口誠宏, 杉田忠彰: 研削加工と砥粒加工, 共立出版, (1984) 1.
- 3) 精密工学会: 研削工学, オーム社, (1987) 3.
- 4) 大森整: ELID 研削加工技術, 工業調査会, (2000) 17.
- 5) 日本ウォータージェット学会: ウォータージェット技術辞典, 丸善, (1993) 1.
- 6) 資材・素材学会: ウォータージェット掘削・応用百科, 丸善, (1996) 30.
- 7) 平尾政利, 羅天軍, 白瀬敬一, 寺崎尚嗣, 安井武司: ウォータージェットの加工特性 — 壊食量に及ぼす噴流速度と圧力分布の影響 —, 噴流工学会誌, 12, 3, (1995) 4.
- 8) 平尾政利, 井澤正樹, 井口信明, 白瀬敬一, 安井武司: ウォータージェットを用いた砥石のインプロセスドレッシング (第1報), 精密工学会誌, 64, 9, (1998) 1335.