

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)*

— 噴射圧力とドレッシング特性 —

平尾政利** 井澤正樹*** 井口信明† 白瀬敬一†† 安井武司**

Waterjet In-process Dressing (1st Report)
— Dressing Property and Jet Pressure —

Masatoshi HIRAO, Masaki IZAWA, Nobuaki IGUCHI, Keiichi SHIRASE and Takeshi YASUI

A new experimental method of in-process dressing has been conducted by means of water-jet, as well its application investigated in the present study. While the workpiece is difficult to be ground by the surface grinding machine, the high pressure waterjet is supplied to the grinding wheel as a supplementary method. The principle of this method can be simply described as that the waterjet is a kind of processing technique, which is able to strip the chips on the surface of the grinding wheel without damaging it by adjusting the injection pressure and stand-off distance. The dressing effects are examined according to the surface conditions of the grinding wheel and ground workpiece by a surface roughness and profile measuring device and a microscope. Because of the complexity of the interaction influences between the jet pump pressure and the stand-off distance on the dressing results, in this report at fixed stand-off distance condition the effects of the jet pressure on the grinding wheel of CBN #325 and finished surface of Ti6Al4V materials have been clarified. From the results of the experiments, it was found that the dressing life time of the grinding wheel and the roughness of the ground material finished surface have been improved distinctly when the injection pressure is 107.1MPa at stand-off distance 20mm. On the other hand much lower pressure will have no influence on dressing results, and much higher one will damage the CBN wheel.

Key words: waterjet, cubic boron nitride, metal bond wheel, surface grinding machine, in-process dressing, dressing effect

1. 緒 言

研削加工分野において、ダイヤモンドやCBNの砥粒を用いた超砥粒ホイールは、自動車産業、航空宇宙産業、エレクトロニクス・通信などの最先端技術分野での利用が増えてきている。それだけに超砥粒ホイールに対する需要も多様化し、同時にその加工の難度も加速度的に高まりつつある。この超砥粒ホイールは、チタニウム合金や高ニッケル合金などの耐熱合金や高強度合金およびセラミックスなどといった、比剛性(単位重量あたりの剛性)の高い難削材に対する高能率・高付加価値研削に適している反面、砥石の自生作用に乏しく目詰まりを頻発しやすい。また研削加工時に生じた切りくずは、CBNホイールのポンドマトリックスまたはCBN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。そのため、それ自体が困難であるツルレーングやドレッシングを頻繁に行っても目詰まりを解消できず、加工能率が悪いことも多い。その結果、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もほとんど半減させてしまう。^{1)~3)}

一方、工作機械分野においては工作機械の自動化に対する要求が高まっており、従来オフプロセスで行われていた超砥粒ホイールのドレッシングについても、インプロセス化の要求が高まっている。それゆえ、超砥粒ホイールのツルレーングおよびドレッシングを、できるだけ単純かつ再現性の高い方法で実現することが有効かつ重要である。目下、電解インプロセスドレッシング法(ELID法)やレーザドレッシング法などの研究が進められているが、いずれも適

用できる加工条件は限定されており、研削加工全般に適用するにあたってはまだまだ十分でない。

近年、ウォータージェットによる加工が土木、工業、医療および食品などの幅広い分野に応用されている。ウォータージェットとは、直径が0.1mmから1.0mm程度の細いビーム状の高速水噴流を用いる加工技術である。ポンプで加圧された水が高速でノズルから噴射されるため、水鉄砲と原理は同じであるが、加工点における単位面積当たりの加工エネルギーは極めて高密度である。水噴流の運動エネルギーで加工を行うため加工に伴う発熱が微少であり、噴射圧力を加減することにより他の部分に傷を付けずに、加工物のぜい弱な材料または組織のみを除去することが可能である。そのウォータージェットの加工特性を巧妙に利用したはつり加工が、最近多くの分野で利用されている。例として肝組織の切除に用いられるウォータージェットメスや、ウォータージェットを用いた鉄筋コンクリートの解体・打ち直し工事などが挙げられる。⁴⁾

そこで本研究では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を提案する。これは図1に示すように難削材の研削加工時の砥石使用面にウォータージェットを噴射し、砥石に対してダメージを与えずに切りくずのみを除去するものである。

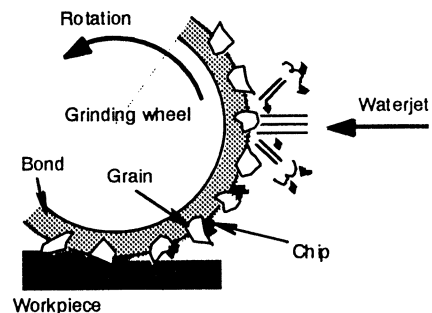


Fig.1 Principle of waterjet in-process dressing

* 原稿受付 平成 10年 3月 13日

** 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)

*** 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 大阪大学工学部 (吹田市山田丘 2-1)

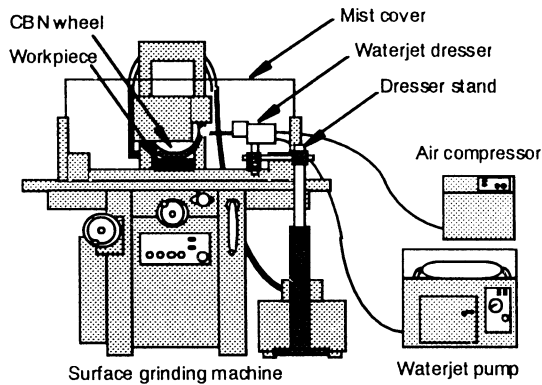


Fig. 2 Constitution of experimental apparatus

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。一連の実験を遂行するにあたり、本研究で用いる研削盤はごく基本的な平面研削盤を使用した。その平面研削盤上にウォータージェット装置をインプロセスドレッシングとして設置し、CBNホイールの使用面に噴射する。このウォータージェットドレッシングにはノズルヘッドの回転駆動用としてエアコンプレッサから圧縮空気が、ウォータージェット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ウォータージェットとして噴射される。なお図3に本研究で提案するインプロセスドレッシングの概要を示す。図中のノズルヘッドには、ウォータージェットを噴射するノズルが1個組み込まれており、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CBNホイール表面に約75秒間隔で一様にウォータージェットが噴射される。ノズルヘッドの1回転につきCBNホイールに2回ウォータージェットが噴射されるため、上下2つのスタンドオフ距離（ウォータージェットノズルからCBNホイール使用面までの距離）は同一とし、ノズルヘッドの回転軸は、ホイールの中心線およびその回転軸（平面研削盤の主軸）との交点に向けて設置した。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シングによりツルレーイングを施した後に、GCブロック砥石によって通常のドレッシングを施している。また、CBNホイールの表面および被削材の仕上げ面を表面粗さ・輪郭形状測定器を用いて計測した。

3. 実験方法

3.1 インプロセス壊食実験

本研究ではウォータージェットをインプロセスドレッシングとして用いるが、ウォータージェットの噴射圧力が過大である場合には、研削時に砥粒に付着する切り屑のみでなく、CBNホイール自体も壊食を受けることが予測される。

そこで本実験では、平面研削盤上で無負荷状態で回転するCBNホイール使用面にウォータージェットを噴射し、種々のウォータージェットの噴射圧力下において、ドレッシングによって生ずるCBNホイール

Table 1 Conditions of in-process erosion test

Grinding wheel	φ180×10 mm, Straight Metal bond, CBN # 325
Wheel speed	33 m/s
Injection pressure of waterjet	72.2 - 124.5 MPa
Stand-off distance	20 mm
Nozzle diameter	0.2 mm
Nozzle revolution diameter	40 mm
Nozzle revolution number	1120 rpm

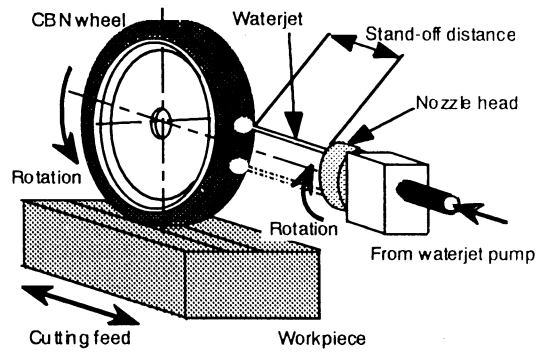


Fig. 3 Outline of waterjet in-process dressing

の壊食や表面性状の変化について検討した。表1に本実験の実験条件を示す。

3.2 インプロセスドレッシング実験

本実験ではCBNホイールを用いた難削材の研削時における目詰まりに対し、その改善策として提案したウォータージェットによるインプロセスドレッシングの効果を実際の研削加工において検討した。平面研削盤上でメタルボンドの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直線往復研削を行う。同時にウォータージェットドレッシングによるインプロセスドレッシングを行い、種々のウォータージェット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い、CBNホイールおよび被削材の受ける影響を調べるため、CBNホイールの軸方向表面粗

Table 2 Conditions of in-process dressing test

Grinding wheel	φ180×10 mm, Straight Metal bond, CBN # 325
Wheel speed	33 m/s
Feed speed	10 m/min.
Depth of cut	5 μm
Workpiece	Ti6Al4V
Injection pressure of waterjet	54.7 - 124.5 MPa
Stand-off distance	20 mm
Nozzle diameter	0.2 mm
Nozzle revolution diameter	40 mm
Nozzle revolution number	1120 rpm

さ、被削材の軸方向・接線方向仕上げ面粗さを計測した。表2に本実験の実験条件を示す。

4. 実験結果および考察

4.1 インプロセス壊食実験

図4は本実験においてウォータージェットの噴射時間が300s前後のCBNホイール使用面の拡大写真である。噴射圧力の高い107.1MPaおよび124.5MPaのホイール表面にはCBN砥粒の脱落痕が見られる（図中丸部）。これはウォータージェットの衝撃により、CBN砥粒を保持する砥粒近傍のメタルボンドが壊食を受け、砥粒の脱落が発生したものと考察される。図5にウォータージェットの噴射時間の進行に伴うCBNホイールの表面粗さRzの影響を示す。噴射圧力72.2MPaおよび89.6MPaの実験結果ではウォータージェットの衝撃により、ウォータージェットの噴射開始直後に若干のRz値の増加が見られるものの、その後はCBNホイールの表面粗さに変化はほとんど見られず、ほぼ一定値を保っている。この結果において、この両者の初期時点でのRz値の増加は、実験前に行うGC砥石によるドレッシングのためにCBNホイール表面に残留したGC砥石粉が除去されたことによると考察さ

* ドレッシング：本研究では主として目詰まりの防止を意味する。

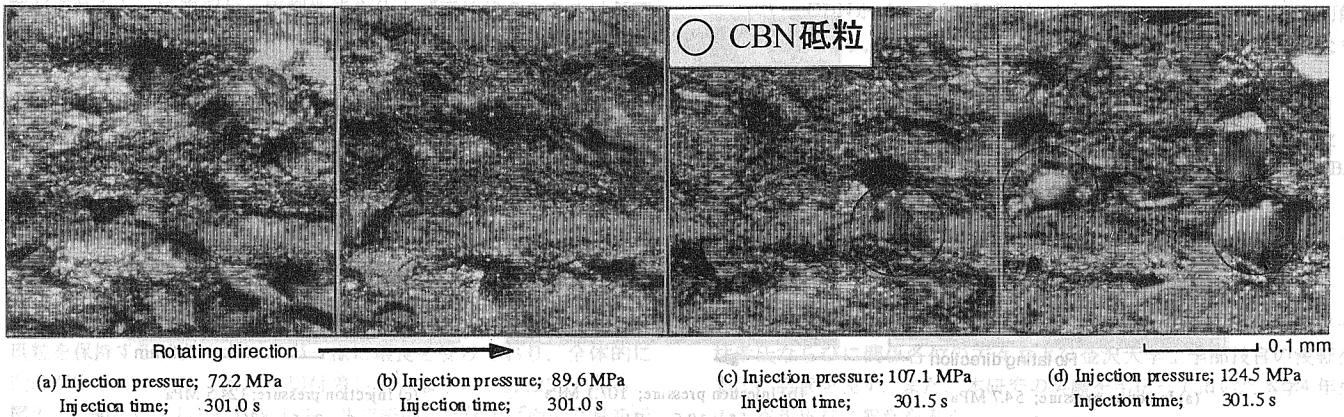


Fig.4 Photograph of CBN wheel surface on in-process erosion test

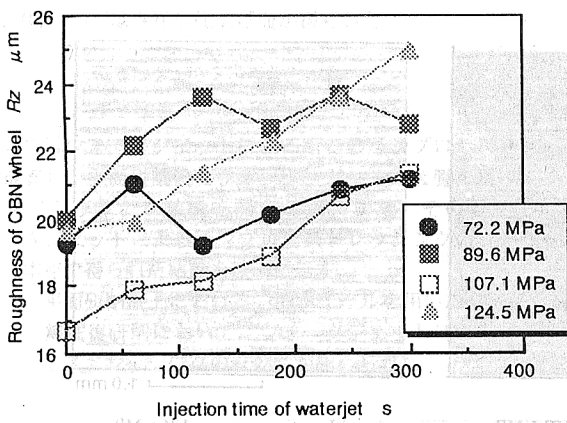


Fig.5 Relationships between injection pressure of waterjet and roughness of CBN wheel

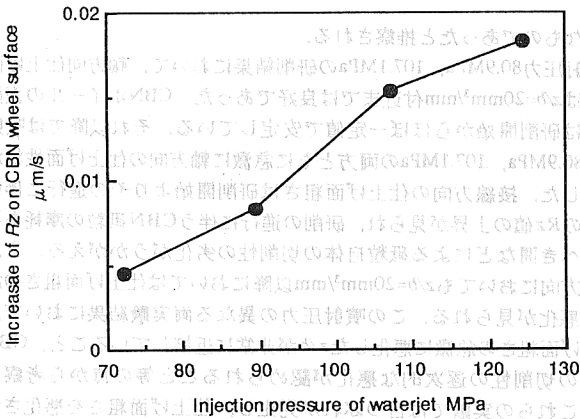
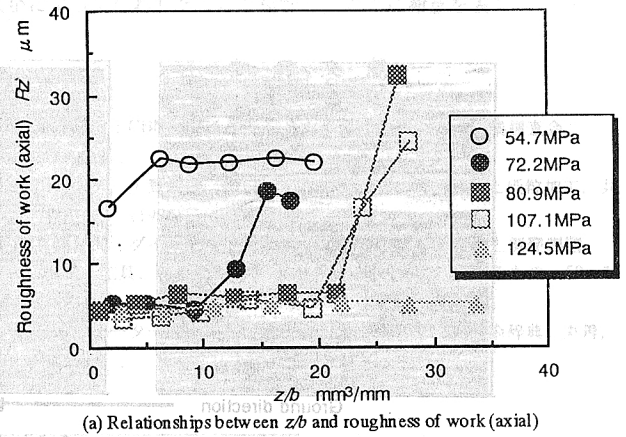
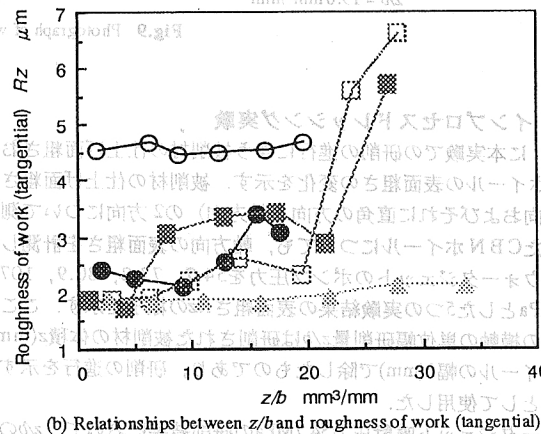


Fig.6 Relationship between injection pressure of waterjet and increase of Rz on CBN wheel surface

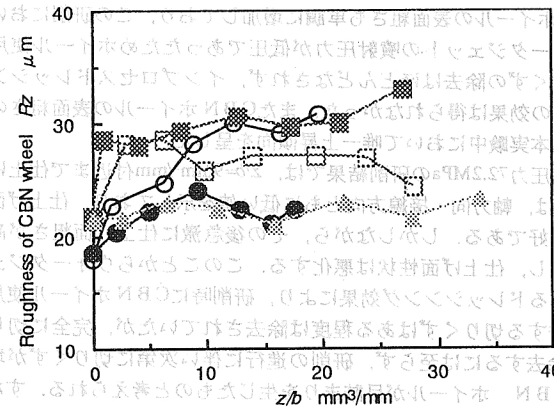
れ、ホイール自体のウォータージェットによる壊食は、認められない。これに対し噴射圧力107.1MPaおよび124.5MPaでは、噴射時間の経過に伴い表面粗さが増加している。ウォータージェットの衝撃により、CBNホイールのメタルボンドが壊食を受け、砥粒の突き出し高さの増加および砥粒の脱落が発生し、結果としてRz値を増加させたと推察される。また図6には図5のグラフの近似曲線の傾きとウォータージェットの噴射圧力の関係を示す。ウォータージェットの噴射圧力が高くなるに従い、壊食の進行も増加する傾向にあるため、Rz値の増加傾向も顕著となることが認められる。



(a) Relationships between z/b and roughness of work (axial)



(b) Relationships between z/b and roughness of work (tangential)



(c) Relationships between z/b and roughness of CBN wheel surface

Fig.7 Results of in-process dressing test

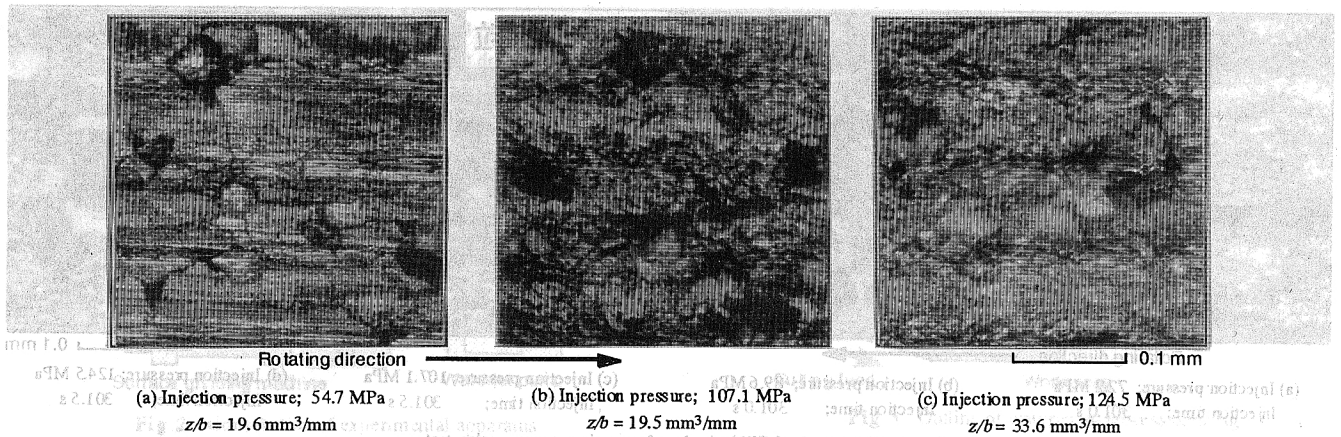


Fig.8 Photograph of CBN wheel surface on in-process dressing test

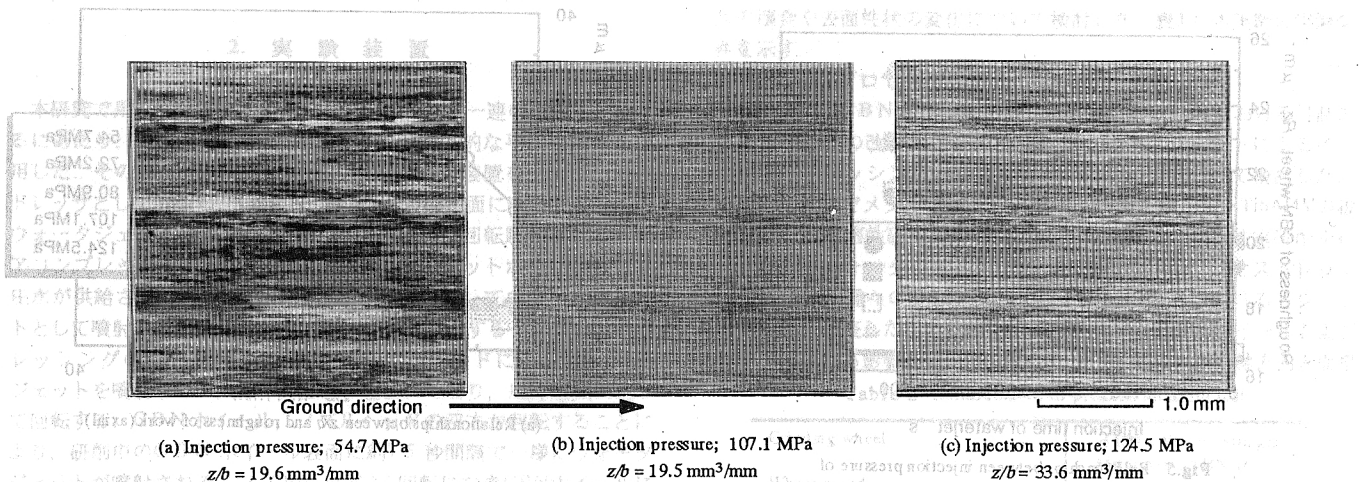


Fig.9 Photograph of work surface on in-process dressing test

4.2 インプロセスドレッシング実験

図7 に本実験での研削の進行に伴う被削材の仕上げ面粗さおよび CBN ホイールの表面粗さの変化を示す。被削材の仕上げ面粗さは、研削方向およびそれに直角の方向（軸方向）の2 方向について測定した。また CBN ホイールについても、軸方向の表面粗さを計測した。図にはウォータージェットのポンプ圧力を54.7, 72.2, 80.9, 107.1, 124.5MPaとした5つの実験結果の表面粗さRzの様子を示す。ここで、グラフの横軸の単位幅研削量z/bは研削された被削材の体積z(mm³)を CBNホイールの幅b(mm)で除したものであり、研削の進行を示すパラメータとして使用した。

ウォータージェット噴射圧力54.7MPaの研削結果において、z/bの少ない段階から既に被削材の仕上げ面粗さは高い値を示している。また CBN ホイールの表面粗さも単調に増加しており、この研削においてはウォータージェットの噴射圧力が低圧であったためホイール使用面の切りくずの除去はほとんどなされず、インプロセスドレッシングとしての効果は得られなかった。また CBN ホイールの表面粗さのグラフは本実験中において唯一上昇傾向を呈した。

噴射圧力72.2MPaの研削結果では、z/b=9mm³/mm付近まで仕上げ面の Rz は、軸方向・接線方向ともに低い値を示しており、仕上げ面性状は良好である。しかしながら、その後急激に仕上げ面粗さが高い値を示し、仕上げ面性状は悪化する。このことからウォータージェットによるドレッシング効果により、研削時に CBN ホイール使用面に付着する切りくずはある程度は除去されていたが、完全に切りくずを除去するには至らず、研削の進行に伴い次第に切りくずが堆積し、 CBN ホイールが目詰まりを生じたものと考えられる。すなわち、本実験においては噴射圧力72.2MPaのウォータージェットではインプロセスドレッシングとしての効果は低く、目詰まりを防ぐには不

十分なものであったと推察される。

噴射圧力80.9MPa, 107.1MPaの研削結果において、軸方向仕上げ面粗さはz/b=20mm³/mm付近までは良好であった。 CBNホイールの表面粗さは研削開始からほぼ一定値で安定している。それ以降では噴射圧力80.9MPa, 107.1MPaの両方ともに急激に軸方向の仕上げ面性状が悪化した。接線方向の仕上げ面粗さは研削開始よりその進行に伴い若干の Rz 値の上昇が見られ、研削の進行に伴う CBN 砥粒の摩耗あるいはへき開などによる砥粒自体の切削性の劣化がうかがえる。また接線方向においてもz/b=20mm³/mm以降においては仕上げ面粗さの急激な悪化が見られる。この噴射圧力の異なる両実験結果において、仕上げ面粗さの急激に悪化したz/bが非常に近接していること、 CBN 砥粒の切削性の逐次的な悪化が認められること等の点から考察して、これらの実験では目つぶれが発生し、仕上げ面粗さを悪化させたものと推察される。すなわちこれらの研削においては、ウォータージェットによるインプロセスドレッシングの効果によって、 CBN ホイールの表面性状は良好な状態が保たれており、ホイール表面に突き出す CBN 砥粒の切削性は切りくずによる阻害を受けず、その研削性能は CBN ホイールの目立て間寿命まで維持されたものと考察される。

噴射圧力124.5MPaの研削結果においては研削開始から実験を終了するまで、目詰まり・目つぶれともに発生せず、軸方向・接線方向ともに仕上げ面の Rz 値は低い値を示し、仕上げ面性状は良好な一定の状態を保った。 CBN ホイールの表面粗さも実験に用いる初期状態からほぼ一定の値を示した。しかしながら、インプロセスドレッシングの結果をふまえて推察すると、ドレッシングに用いたウォータージェットの噴射圧力が高く CBN 砥粒を保持するボンドが壊食されたため、砥粒が目つぶれを起こす以前に脱落し、また同時に新しい砥

粒が切れ刃として隆起し、研削性能や仕上げ面性状そのものは低下せず、研削の進行に伴う諸影響が認められなかったものと考えられる。こうした自生作用が活発になると、研削比の低下や加工面精度の悪化が懸念されるため、本研究におけるウォータージェットの噴射圧力は仕上げ面性状より、107.1MPaが最適値であると考えられる。

ここで図8に本実験で得られたCBNホイールの表面写真を示す。(a)と(b)が $z/b=19.5\text{mm}^3/\text{mm}$ 付近の噴射圧力54.7MPaおよび107.1MPaのもので、(c)は $z/b=33.6\text{mm}^3/\text{mm}$ の噴射圧力124.5MPaのものである。(a)では目詰まりによって砥粒が溶着した切りくずが埋もれているが、(b)ではインプロセスドレッシングの効果により切りくずが除去されている様子が認められる。また(c)ではウォータージェットにより、CBN砥粒を保持するメタルボンドが一様に壊食を受けており、全体的に凹凸が少なく、切りくずが一切付着していないのが特徴的である。図9には図8に示したCBNホイールで研削した仕上げ面の写真を示す。(a)ではウォータージェットによるインプロセスドレッシングの効果を得られなかったため、仕上げ面は凹凸が激しく劣悪なものであるが、(b)、(c)では良好な仕上げ面が得られた。

5. 結 言

本報ではウォータージェットによる砥石のインプロセスドレッシングを提案し、平面研削盤とウォータージェット装置を用いてインプロセスドレッシング装置を開発した。また、その装置を用いてウォータージェットによるインプロセスドレッシングの有効性を検証した。本報で得られた結論を以下に示す。

- (1) 平面研削盤上におけるCBNホイールを用いたTi6Al4Vの直線往復研削において、ウォータージェットによるインプロセスドレッシングの有効性が認められた。

- (2) CBNホイール使用面に付着する切りくずのみの除去が可能となり、ホイールの目立て間寿命までの使用が可能となった。またその際のウォータージェットの噴射圧力は107.1MPa付近に最適値が存在した。
- (3) ウォータージェットの噴射圧力が低圧であると、インプロセスドレッシングとしての効果が得られず、高圧であるとCBNホイール自体を壊食することが確認された。

謝 辞

本研究に関して助言と協力を頂いた黒田精工（株）開発センター林孝氏ならびに関係各位の方々および金沢大学工学部技官の浅野久志氏に謝意を表す。また、本研究の実験を手伝って頂いた本学4年生の大谷邦雄君に謝意を表す。

なお本研究は、財団法人メカトロニクス技術高度化財団の研究助成金によって行われたことを付記し、ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 海野邦明：CBN・ダイヤモンドホイールの使い方，工業調査会，（1991）。
- 2) 川村未久，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）。
- 3) 高橋邦夫：ダイヤモンド・CBNホイールをめぐる現状と開発課題，機械と工具，特集・ニーズに応じて、いま追求されているもの，59，1（1992）。
- 4) 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）。