切りくず観察によるアブレシブジェット加工メカニズム*

平尾政利^{*1}, 牧野 亮^{*2}

Machining Mechanisms of Abrasive Jet through Observing Chips

Masatoshi HIRAO^{*3} and Ryo MAKINO^{*3} Faculty of Engineering, Kanazawa University,
2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa, 920-8667 Japan

An abrasive jet is a water jet that contains abrasive grains, and has a greater processing force than that of a water jet. It is quite difficult to know how an abrasive moves in a high speed water jet, and the machining mechanism involved has not been revealed yet. In order for abrasive jets to be used effectively in a wide range of fields, their mechanism must be clarified. We analyzed the surfaces of workpieces processed by an abrasive jet and the forms of chips to know the machining mechanism involved. It was revealed that in the case of a water jet, the surfaces of workpieces deteriorated in both the upper and lower sections, while an abrasive jet produced good surfaces in the upper section, but its surfaces deteriorated as it moved down the workpiece. This is because the abrasive's speed is great enough in the upper section to grind the surface of the workpiece, but when it slows down as the machining proceeds through the workpiece, the abrasive loses its effect. It shows that in the lower section the erosion mechanism of an abrasive jet is the same as that of a water jet. It corresponds to the results obtained from the analysis of chip forms, too.

Key Words: Abrasive jet, Water Jet, Machining Mechanism, Surfaces of Workpieces, Forms of Chips

1. 緒 論

ウォータージェットは、任意の点から自由な曲線、曲面の加工が非接触で行える上、従来の刃物と比較して摩耗や目詰まりがないという利点から幅広い分野で応用されている。さらに、砥粒(研磨剤)を混入したアブレシブジェットは、ウォータージェットに比べ加工能力が高く工業的利用価値が高い⁽¹⁾。現に、アブレシブジェットは、ウォータージェットと比較して単に切断能力が向上するばかりでなく切断面が良好になる等、ウォータージェットの加工作用にはない新たな作用があることが確認されている⁽²⁾。しかし、混入された砥粒の超高速噴流内での挙動は明らかになっておらず、未解明な部分が多い。したがって、これから新しい加工分野へアブレシブジェットの適用範囲を広げるために、ここで可能な限りその加工メカニズムを明らかにしておく必要がある。

一般の切削加工や研削加工においては、加工後の切りくずから、その加工状態や加工メカニズムが検討さ

れてきている⁽³⁾⁽⁴⁾。しかしながら、ジェット加工においては、加工後の切りくずからその加工メカニズムを解明した研究は比較的少ない。

そこで、本論文では、アブレシブジェットによる加工後の加工面や切りくずの形状を詳細に計測・分析し、特に、ウォータージェット加工と比較することにより、アブレシブジェット中のアブレシブ粒子が加工に如何なる作用を及ぼしているのか検討することとした。

2. 実験方法

2.1 水噴流発生装置 アブレシブジェット加工装置を図1に示す。超高圧水の発生は、アクアジェットポンプ(スギノマシン製 AJP-35025 S)により行った。ウォータージェット流中へのアブレシブ粒子の供給は、図1に示すアブレシブヘッド内で発生する負圧力⁽⁵⁾を利用した直接供給の方法で行った。供給量は、供給装置に取付けている振動体(超硬製)の振動率を変化させることによって制御した。ノズル部の構成は、次の仕様から成っている。ウォータージェット発生の場合は、ダイヤモンド製のウォーターノズルとそれを取付けるためのアクアヘッド。一方、アブレシブジェット発生の場合には、超高圧水とアブレシブを混合し

* 原稿受付 1999年6月14日。

^{*1} 正員, 金沢大学工学部 (〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)。^{*2} 金沢大学大学院。

E-mail: hirao@t.kanazawa-u.ac.jp

Table 1 Experimental conditions of Abrasive jet and Water jet

	Abrasive jet	Water jet
Pump pressure(P)	300MPa	300MPa
Water jet nozzle diameter(Dw)	0.2mm	0.2mm
Abrasive jet nozzle diameter (Da)	1mm	
Traverse rate of nozzle(Vn)	1mm/s	1mm/s
Stand off distance(S.D)	3mm	3mm
Work piece	Lead(HV:50.27)	Lead(HV:50.27)
	Aluminum(HV:490.66)	Aluminum(HV:490.66)
	SS400(HRB:85)	SS400(HRB:85)

Fig. 1 Experimental equipment

て噴射するアブレシブヘッドとアブレシブノズルである。

2・2 加工条件 表1に、アブレシブジェットおよびウォータージェットによる加工条件を示す。被加工材として、厚さ2, 5, 25 mmの金属板(鉛, アルミ, SS400)を用いた。アブレシブジェット加工では、粒度#60のガーネットをアブレシブとして使用した。供給量は、前報の実験で得られた最大の壊食量を示す300 g/minとした⁽⁶⁾。

2・3 切りくずの回収方法 ウォータージェット加工では、回収皿に溜まった切りくずと水をろ過器に通すことにより切りくずのみを採取する。

しかし、アブレシブジェット加工では、回収皿に水、アブレシブ粒子、切りくずが混在した状態で溜まるため、ろ過後にも多量のアブレシブ粒子と切りくずが存在し、切りくずのみを回収することは困難である。そこで、磁性を有しない切りくずを浮遊選別法⁽⁷⁾により回収した。

2・4 切りくずの観察方法 回収した切りくずの寸法や形状を評価するため、切りくずの面積を計測し、

また、アスペクト比を求めた。アスペクト比は、切りくずの横の長さ/縦の長さで与えられる値である。したがって、アスペクト比が零に近い値ほど細長い形状の切りくずとなり、一方、1に近い値ほど縦横の長さが等しい形状の切りくずとなる。

切りくずの面積は、切りくずの横の長さとの縦の長さの積で求めた。

3. 実験結果

3・1 プロファイルの測定 図2(a), (b)は、それぞれウォータージェットにより厚さ5 mmの鉛板、アブレシブジェットにより厚さ25 mmの鉛板を切断加工し、その断面プロファイルを表粗さ・輪郭形状測定器(小坂研究所製 SEF-30 D)を使用して測定したものである。測定は、試料表面から内部へ $D=1.5$, 3.0 mm(ウォータージェット加工) $D=3.0$, 18 mm(アブレシブジェット加工)入った位置で行った。図3に、図2に対応する切断面の光学顕微鏡写真を示す。

図2, 3から、ウォータージェットとアブレシブジェット加工では、加工面の状態が大きく異なることがわかる。

ウォータージェットでは、連続流領域において水の流れに沿って形成される筋模様がみられ、おもに水滴、水塊の衝撃と動圧が作用し加工が進むため⁽⁸⁾、上部・下部ともに加工面が悪化し、同程度のプロファイルとなる。一方、アブレシブジェットによる加工面は、 $D=3.0$ mmのプロファイルをみてもわかるとおり、比較的上部では良好であり、この部分でアブレシブ粒子を混入したことによる影響が強く表れている。しかし、加工面下部になるに従い、アブレシブ粒子を混入したことによる影響はみられず、ウォータージェット加工とほぼ同様なプロファイルが得られた。このような加工面の状態はアルミやSS400を被加工材とした

Fig. 2 Profiles of machined surfaces

Fig. 3 Photographs of machined surfaces

場合にも観察された。

3・2 切りくずの観察 アブレシブジェットによる加工面上部は、ウォータージェット加工とは異なり良好なものとなった。そのため観察する切りくずの中にも相違が認められるはずである。

図4は、切断加工後、任意に回収した100個の切りくずをその面積が小さいものから順に並べ整理したものである。図4(a), (b)はそれぞれ図2, 図3(a), (b)に対応している。図5に、図4に対応する切りくずのアスペクト比を示す。図5(a)は、ウォータージェット加工後の切りくずのアスペクト比を、図5(b)は、アブレシブジェット加工後の切りくず面積が小さ

いほうから数え、1～50個目の切りくずのアスペクト比を、図5(c)は、51～100個目の切りくずのアスペクト比をそれぞれ示している。

これらの図から、切りくず面積に関しては、アブレシブジェット、ウォータージェット加工ともに、その分布形態はほぼ同じである。しかし、ウォータージェット加工の方がアブレシブジェット加工の場合よりも一般に大きくなる。

また、切りくずのアスペクト比は、ウォータージェット加工では小さな値(細長い切りくず)となる。一方、アブレシブジェット加工の場合には、比較的面積の小さい切りくずはアスペクト比が大きく(縦横に等

Fig. 4 Area of chips

Fig. 5 Distributions of aspect ratio on chips

Fig. 6 Photographs of collected chips

しい切りくずに)なる傾向がみられ, 比較的面積の大きい切りくずはアスペクト比が小さく(細長い切りくずに)なることがわかる。

実際に, 図5(a), (b), (c)に対応する切りくずの一例を図6に示す。図6にみられるように, ウォータージェット加工後の切りくずは細長いものが多く, 一方, アブレシブジェット加工後の切りくずは, その面積が小さいものは丸く, 大きいものは細長くなっていることが確認できる。このような切りくず形状(形態)

は, アルミやSS 400を被加工材とした場合にも同様のパターンがみられた。

4. 考 察

アブレシブジェットによる加工面上部は, ウォータージェットによる加工面より良好である。しかし, 下部になるに従い, ウォータージェットによる加工面とほぼ同様な状態となった。このことから, 混入したアブレシブ粒子の影響は, 主として加工面上部において

Fig. 7 State of surface and chips machined by an abrasive jet with 2 mm thick lead

表れているものといえる。

切りくずを観察した結果、アブレシブジェット加工では、大きく分けて図6(b)の面積の小さい丸い切りくずと図6(c)の面積の大きい細長い切りくずの2種類である。図7に、厚さ2mmの鉛板をアブレシブジェットにより加工した際の(a)断面プロファイル、(b)断面写真、(c)切りくず面積、(d)アスペクト比、(e)切りくず写真を示す。この際、大半の切りくずは面積が小さく丸く、加工面は良好になることがわかる。したがって、これとほぼ同形状の図6(b)の切りくずが、上部で排出され、加工面が良好になったといえる。さらに、もう一方の図6(c)の切りくずは、ウォータージェット加工後の図6(a)の切りくずと酷似しており、この切りくずが下部で排出されたため、その点のプロファイルがウォータージェット加工と同程

度になったといえる。これらのことから、アブレシブジェットは、上部でそれ特有の加工メカニズム、下部でウォータージェットの加工メカニズムによって加工が進んでいると考えられる。

具体的に、アブレシブジェットの加工面上部で排出されたと考えられる図6(b)の切りくず(直径が約50 μm)は、加工面下部の凹凸の大きさとその寸法がほぼ一致し、上部でアブレシブ粒子には加工面の凹凸を削り取る研削作用があることが確認できる。

厳密に言えば、アブレシブジェット加工では、砥粒の混在した水(以後、スラリー)により加工が進行する。噴流の中心部のスラリーが、おもに切断作用を有し、噴流の外側にあるスラリーがその速度の十分速い上部でウォータージェットの加工面ではみられた約50 μm の凹凸を削り取っているのである。しかし、こ

の外側のスラリーも加工抵抗の増加とともに速度が遅くなると切断表面に作用することができなくなり、次第に加工能力を失う。そのため、下部では切断表面に対して砥粒混入による影響が消え失せ、ウォータージェットの壊食作用とほぼ等しくなった結果、表面粗さが悪化したのである。

5. 結 言

ウォータージェットとアブレシブジェットによる切断加工を金属材料に行い、加工面と切りくずを詳細観察した結果、以下の結論を得た。

(1) アブレシブジェット中のアブレシブ粒子は、加工能力を高める作用を有するだけでなく、加工面上部においては研削作用を営む。

(2) アブレシブジェット加工は、砥粒の流速が遅くなる加工面下部で、切断表面に対してウォータージェットの壊食作用とほぼ同じ機構となる。

(3) 鉛板に関するアブレシブジェット加工の切断機構は、アルミニウムや SS 400 材の場合も同様なものであった。

本研究を進めるにあたり、適切なご助言、ご指導を

いただいた金沢大学工学部人間・機械工学科の浅野久志技術官、並びに、現(株)キョーリツコーポレーションの羅天軍氏に厚く感謝致します。また、日頃よりご支援をいただいている(株)スギノマシンに深くお礼申し上げます。

文 献

- (1) Hashish, M., Characteristics of Surfaces Machined With Abrasive-Waterjets, *Trans. ASME, J. Eng. Materials Tech.*, Vol. 113 (1991), 354-362.
- (2) Capello, E., Monno, M. and Semeraro, Q., On the Characterization of the Surfaces Obtained by Abrasive Water Jet Machining, *12th Int. Conf. Jet Cut. Tech.*, (1994), 601-167.
- (3) 中山一雄, 鋸歯状切り屑の生成について, 精密機械, (1977-1), 43, 117.
- (4) 奥島啓式・ほか2名, 金属切削における切粉の挙動について, 機論, (1959-10), 25-158, 972.
- (5) Hirao, M. and Luo, T., Water Jet Machining Property, *J. Jet Flow Eng.*, 12-3 (1995), 4-8.
- (6) 平尾政利・羅天軍・白瀬敬一・安井武司, 機論, 64-628, C (1998), 351-356.
- (7) 小川明, サイクロン分離機, (1980), 17-25, アース社.
- (8) Hashish, M., Visualization of the Water Jet Cutting Process, *Experiment Mech.*, (1987), 159-169.