

多軸力情報に着目した、ウォータージェット加工の 加工状態認識に関する基礎研究

東京工業大学 精密工学研究所

助教授 新野秀憲

(平成6年度研究開発助成 AF-94006)

ABSTRACT

This paper proposes a state recognition method of abrasive water jet cutting based on cutting force information, which are measured by a three-axis force sensor of strain gauge type. The cutting states such as separation of workpiece, penetration of water jet through workpiece and drag line have firstly been observed from the visualized information using a high-speed video camera and also from the finished workpieces. Both of the observed results are in good correspondence with each other, and in addition to it, it can be verified that the cutting force information facilitates to the real-time recognition of the characteristic features in cutting. Furthermore, a parameter "force waviness" is newly defined to determine a threshold for drag line detection.

1. 緒 論

航空宇宙産業に代表される近年の産業界では、CFRPなどの複合材料やセラミックス、アモルファス合金やハニカム構造材などの先端・先進材料の需要が極めて高くなってきている。こうした材料の中で特に、従来の機械加工では加工が困難な難削材や高脆材、あるいは加工熱によって甚だしい性能劣化を引き起こすような材料の占める割合が非常に高くなっている。こうした背景のもと、加工熱の発生が比較的少なく、また、脆性材料や複合材料の加工を得意とするウォータージェット加工は、先端・先進材料の加工法としての期待が非常に大きい。

しかしながら、ウォータージェットによって加工された工作物においては、工作物のき裂や分離不良、切断面の縞目模様やだれ、傾斜などの不具合が発生する。そのため、従来の機械加工をウォータージェット加工に置き換える場合、解決すべき多くの問題が残っている。また、ウォータージェット加工の歴史は非常に浅く、要求加工精度を満足する加工条件に関するデータベースの蓄積も十分とは言えない。

ところで、このような問題を解決するためには、基本的に、加工機構の解明に対する理論的、あるいは解析的アプローチ、さらには実験的アプローチが重要な鍵となることは言うまでもない。これらに関して従来から、水噴流の流体力学的挙動や高圧水噴流の微視的構造の研究が数多く行なわれ、成果を挙げている⁽¹⁾。また、切削機構及び切削性能に関する研究として、工作物の壊食量、切断深さ、あるいは切断面の傾斜などの加工結果と加工条件の関係を

実験データとして示した研究も多く行なわれている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしながら、以上の研究成果は主として加工後の工作物の状態を検討したものであり、加工中に発生する物理現象を積極的に検討した研究は現在のところほとんど行なわれていない⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

そこで、本研究ではウォータージェット加工の機構解明や将来的なウォータージェット加工の自動化・知能化に向けて、実現すべき最も重要な要素技術の一つと考えられる加工状態認識手法について検討を行った。具体的には、加工された工作物の仕上面や高速度ビデオカメラによる加工中の加工状態を詳細に観察し、それらと同時に得られる切削力情報との比較を行なっている。そして、それらの結果から、ウォータージェット加工において工作物に作用する切削力の主分力及び送り分力(定義は後述)の情報を総合的に評価することにより、加工中に発生する現象の認識がオンラインで可能であることを明らかにした。

2. 実験装置及び実験方法

図1に実験装置の概要を示す。超高压水の発生には(株)スギノマシン製アクアジェットポンプ AJP-35020(最大吐出圧力:372MPa, 吐出流量:2.0 l/min (343MPa 時))を使用し、発生した超高压水は配管を介してアプレシブヘッドへ導かれる。アプレシブヘッド((株)スギノマシン製 ABH-2002)はウォータノズル(ϕ 0.25mm)を通った超高压水とアプレシブ(研磨材)とを混合する役割を果たし、アプレシブが混入した超高压水は、アプレシブノズル(ϕ 1mm)を通過して工作物へ到達する。アプレシブヘッドは

XY直交2軸に組んだボールネジ組み込み形直動形案内面上に治具を介してZ軸方向に取り付けられ、制御用コンピュータから出力される電圧により速度制御されるACサーボモータによって駆動される。また、位置検出は、ACサーボモータに組み込まれたエンコーダの出力を制御コンピュータに取り込むことにより行なっている。なお、すべての実験において、アブレイブヘッドの送り方向は、図1に設定した座標系においてX軸の負方向である。

工作物に作用する加工力は、図2に示すように、八角形リング構造と平行平板構造とで構成される歪ゲージ方式の検出ユニットを新たに製作し、これを加工テーブルの四隅に配することによって測定している。本センサシステムでは、X軸及びY軸方向分力は最大50N、また、Z軸方向分力は最大100Nまで検出可能であり、各々の固有振動数は、X軸方向が138Hz、Y軸方向が135Hz、Z軸方向が193Hzであった。

以上のほかに、加工状態を抽出するために、加工後の工作物の観察を行なうとともに、加工中の状態をビデオカメラにより撮影している。加工現象の撮影には、超高速カラービデオカメラ((株)ナック製MEMRECAM Ci-3:最高2000コマ/秒、最高シャッター速度1/24,000秒)を使用した。さらに、工作物中に存在する水噴流の状態が明確となるよう、板厚30mmの透明なメタクリル樹脂を工作物に選んだ。

実験は、吐出圧力200MPaに対して送り速度を1, 2, 3及び4mm/secの4通り、また、送り速度2mm/secに対して吐出圧力を150MPa, 250MPa及び300MPaの3通りに設定した合計7通りの条件のもとで行なった。なお、砥粒にはガーネット(#80)を使用し、スタンドオフ距離を2mmと設定したほかに、加工力の測定周波数は100Hzとした。

3. 多軸力情報に基づく加工状態認識

種々の加工条件により行なった実験の結果、(1)工作物終端での分離不良、(2)水噴流の工作物不貫通、(3)水噴流の湾曲、並びに(4)縞目模様発生等の4つの加工状態を観察することができた。そこで、加工後の工作物の状態とビデオに記録した加工過程との両方を観察し、総合的な加工力情報による加工状態の認識方法について検討する。なお、ここで、X軸方向に作用する力を送り分力、Z軸方向に作用する力を主分力と呼ぶことにする。

3. 1 工作物終端での分離不良の認識

ノズルが工作物の終端に近付くと、工作物の下部に三角形に切断されずに残る部分が発生することがある。ここでは、これを「分離不良」と呼ぶことにし、超高速ビデオカメラを用いて観察を行なった結果によれば、この場合には、図3(a)に示すように、工作物の終端において水噴流は(i)水噴流が切断前面に沿って流れる状態、(ii)水噴流が切断前面と工作物端面の二つに分かれて流れる状態、(iii)水噴流が工作物端面に沿って流れる状態、の大きく3つの状態を経て工作物の送り方向へ抜けることが明らかになった。このような状態に対応する送り分力及び主分力の変化をそれぞれ図3(b)及び(c)に示す。

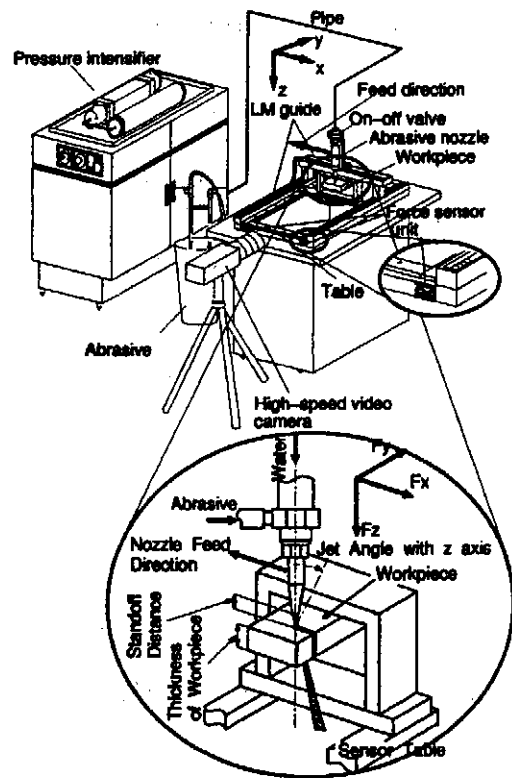


Fig. 1 Overview of the experimental apparatus

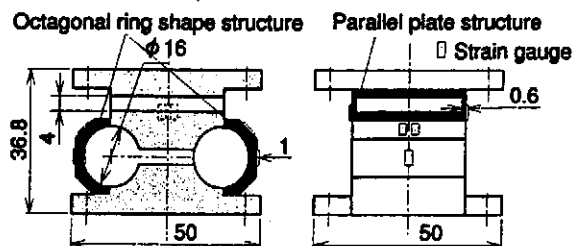


Fig. 2 Structure of sensor unit

分離不良時に加工力情報に現れる最も顕著な特徴は、(a) 送り分力はその符号を反転し極値を示したのちゼロに漸近し、(b) 主分力は送り分力に対して先行して極値を示したのち送り分力とともにゼロに漸近することである。このような特徴を示すのは、上記3つの過程において水噴流が工作物に作用する面が変化することによると考えられる。したがって、上記の特徴を検出することにより分離不良を認識できることになる。特に重要なことは、主分力と送り分力の両方の特徴が同時に検出された場合に分離不良の認識が可能であり、どちらか一方の情報だけでは他の加工状態との識別はできないということである。

3. 2 水噴流湾曲の定性的認識

図4は、水圧を200MPaと一定にし、送り速度を1, 2, 3, 並びに4mm/secと変化させた場合の水噴流の状態を撮影したものである。送り速度の上昇につれて、水噴流の鉛直方向に対する湾曲の度合いが大きくなり、4mm/secにて工作物中ではねかえりを生じている様子が観察される。

各条件における主分力と送り分力について、平均値と標準偏差を計算した結果を図5及び図6に示す。これらの結果から、水噴流が工作物を貫通している状態では、水噴流の湾曲度の増大にともない主分力の平均値が増大していることがわかる。ただし、送り速度が4mm/secの場合に主分力が示す平均値は、次節で示すように水噴流が工作物を貫通できなくなった状態のものであり、その意味は異なる。

したがって、3. 3節で述べる水噴流の工作物貫通か不貫通かの判定を行なった上で、貫通状態であれば、湾曲状態の定性的な傾向を主分力の平均値によって認識することが可能である。

3. 3 水噴流の工作物貫通状態の認識

ウォータージェットの水圧が低すぎる場合、送り速度が速すぎる場合、砥粒の供給が十分でない場合、あるいは工作物の厚さが厚すぎる場合など、加工能力が不十分なきには、水噴流が工作物を貫通することができずに工作物中ではねかえりを生ずることがある。

水噴流が工作物を貫通している場合は、水噴流の傾きによって受ける作用力と工作物の切断に必要な切削力との合力が、工作物に作用する力として力センサによって検出される。

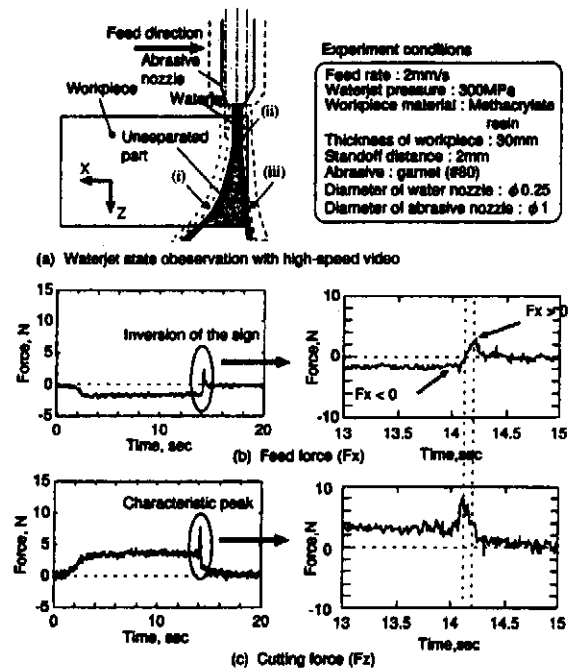


Fig. 3 Cutting state with bad separation of workpiece

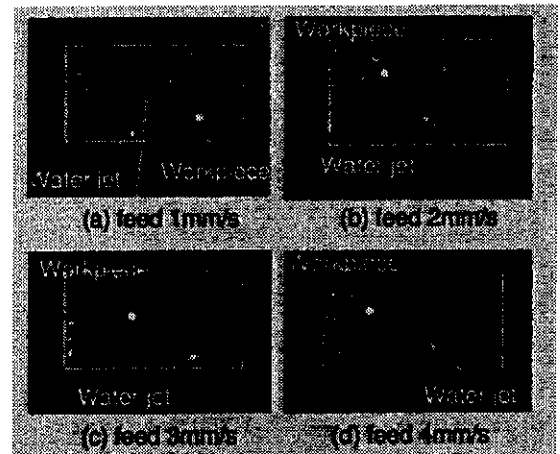


Fig. 4 Water jet state in various feed rate

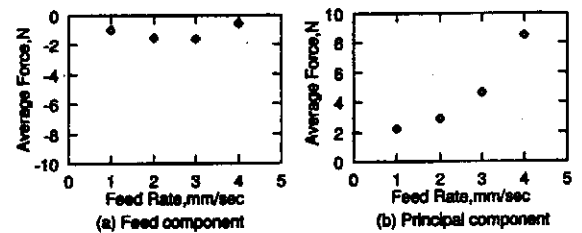


Fig. 5 Relationship between average force and feed rate

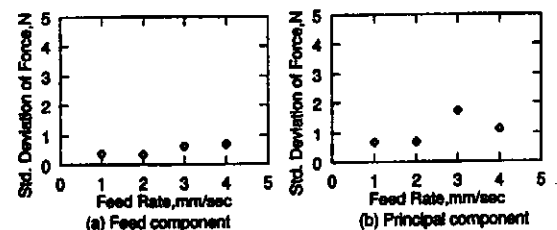


Fig. 6 Relationship between standard deviation of cutting force and feed rate

これに対して、水噴流が工作物を貫通しない場合には、検出される加工力の特徴は、貫通している場合に比べて、図7に示すように、(i) 主分力は、その静的成分(平均値)は大きくなり、(ii) 送り分力は小さくなることである。

ここで、主分力の特徴は、観察された加工過程から次のように説明できる。図7(a)に示すように、水噴流は工作物の途中ではねかえりを生じ、工作物は水噴流をせきとめているため、水噴流の作用力、すなわちウォーターノズルの断面積に水噴流の圧力を乗じて計算される力のすべてが力センサによって検出される。ところで、図7(c)中(*)印で示した部分では一時的に主分力が減少しているが、加工後の工作物を観察した結果、(*)印に相当する箇所でも部分的に水噴流が貫通していることを確認している。このことから、主分力によって水噴流の貫通状態を鋭敏にとらえることが可能であると言える。

一方、送り分力の特徴的な点は次のように説明することができる。図7(a)において水噴流は工作物切断前面(I)と(II)で示した部分の大きく二つの部分に作用することが超高速ビデオカメラの撮影結果より確認される。したがって、正常加工時には(I)への作用力が送り方向に働くが、水噴流が工作物を貫通しない場合には、(II)に作用する力が送り方向と反対方向に働くため、これらの合力は正常加工時に比べて小さくなると考えられる。

以上のことから、水噴流が工作物を貫通しているかどうかの認識については、主分力の静的成分を監視することが有効であり、近似的に(水噴流の圧力)×(ウォーターノズルの断面積)の値を閾値として利用することが可能であることがわかる。また、送り分力の経時変化を併せて監視することにより認識の確度が向上することが期待される。

3. 4 縞目模様発生認識

3. 4. 1 縞目模様生成ピッチの認識

工作物の切断面(側面)上にうねり、いわゆる縞目模様が発生する場合に、その加工過程を超高速ビデオカメラで観察すると、水噴流の下方部分が周期的に変動しながら進行していることが明らかになった。さらにこれを切断前面上の各微小部分に着目してみると、各部分は間欠的に進行していることがわかった。具体的には、同じ場所に一定時間停滞したのち、ある距離だけ移動し、また停滞するという一連のスティック・スリップ的な挙動を繰り返す。このことに関しては、加工後の工作物の縞目模様がビ

デオ映像で記録された水噴流の停滞部分と一致することからも確認しているが、この現象が発生する基本的な機構についてはまだ十分な検討を行っていない。

ところで、縞目模様が形成される過程では、水噴流の下部が停滞するがノズルは一定の速度で送られるために、工作物に作用している水噴流は鉛直方向に対する角度が増加する。その後、工作物下部の水噴流が移動することによってこの角度は減少する。このような角度の周期的変動のために、この変動周期に相当する力の変動が検出される。すなわち、図8(a)及び(b)はそれぞれ、縞目模様が発生したときに検出した送り分力と主分力の一例であり、送り分力と主分力の双方に、水噴流の変動が原因と考えられる変動成分が観察できる。さらに、主分力に比べ送り分力の方がこの水噴流のスティックスリップ的な挙動に起因する振動成分が明瞭なことがわかる。

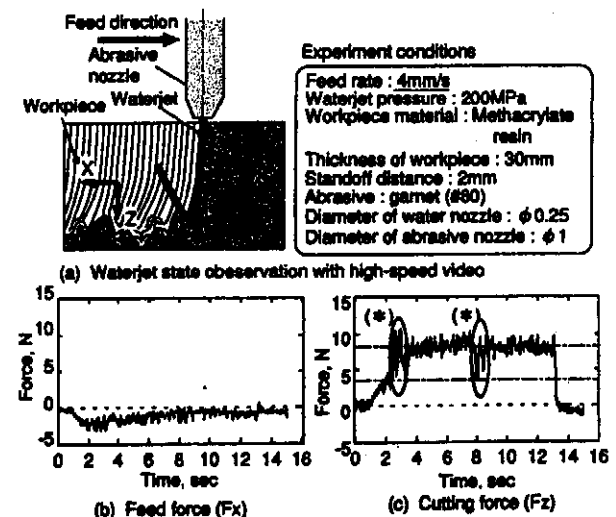


Fig. 7 Cutting state with bad water jet penetration

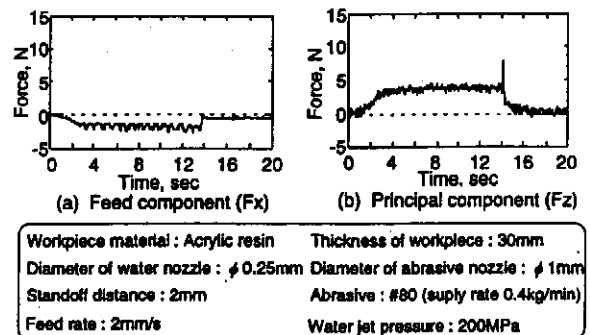


Fig. 8 Cutting state with drag line

そこで、縞目模様の生成周波数、水噴流の変動周波数、並びに送り分力及び主分力の変動成分の周波数の関係を調べたところ表1に示すような結果になった。この表から、送り分力の変動周波数、主分力の変動周波数、縞目模様の生成周波数、並びに水噴流の変動周波数が一致していることがわかる。このことから、縞目模様発生は、送り分力あるいは主分力の変動周波数を検出することにより可能である。また、送り速度と変動周波数から縞目模様のピッチを計算することも可能となる。

ところで、貫通加工が行なわれない場合には、送り分力と主分力の変動周波数との間の一致が認められなくなる。例えば表1において、吐出圧力が200MPaで送り速度が4mm/sの場合には貫通加工が行なわれなかったため、変動周波数の一致は認められない。したがって、3.3節で提案した方法で工作物貫通状態を認識した上で、力成分の変動周波数に基づいた本節の縞目模様発生認識手法が適用できることになる。

3.4.2 縞目模様認識のための閾値の設定方法

縞目模様の認識においては、その発生の有無に加え、発生している縞目模様の振幅が要求加工精度以内かどうかを判定できることが重要である。すなわち、縞目模様判定の閾値の設定方法が重要となる。そこで、縞目模様それ自身を表す代表値と切削力から得られる代表値を適切に選び、それらの間の関係を明らかにすることがまず必要となる。

縞目模様は1.3mm程度の長周期成分を有する加工面上の凹凸であることから、これを表面うねりにより評価することとし、ろ波中心線うねりをその代表値として選ぶことにする。これに対して、加工力の変動成分の定量的評価としては、加工力の分散値や標準偏差を利用するのが有効と考えられる。ここでは、ろ波中心線うねりとの対応を考慮し、ろ波中心線うねりの計算と同様の方法で切削力処理する方法を考えて、以下の式で与えられる値 F_a を切削力うねりと定義し、これを切削力の代表値とする。

$$F_a = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \left| \{f(x)\}_F \right| dt$$

ここで、 $\{f(x)\}_F$ はろ波中心線うねり曲線に対応する切削力の中心線曲線である。また、 t_1, t_2 はそれぞれ評価の開始及び終了時刻である。

そこで、両者の関係を明らかにするために、評価対象時間間隔($t_2 - t_1$)を、縞目の1ピッチが生成す

る時間とし、また、工作物の切断面の下端から1mmのところを触針式表面形状検査器の触針(半径 $2\mu\text{m}$)をウォータージェットノズルの送り方向に走査させ、測定結果からろ波中心線うねりを計算した(カットオフ値0.25mm)。

図9はろ波中心線うねりと送り分力のうねりとの関係を示したものである。全体において切削力うねりに対してろ波中心線うねりが単調に増加することがわかる。ここには示していないが、主分力のうねりに比べると、送り分力のうねりの方がろ波中心線うねりに対してばらつきが小さくなった。これは、送り分力方向に比べて主分力方向は高圧力の水噴流の衝撃を受けやすく、これが切削力成分に重畳するためであると考えられる。以上より、主分力、または送り分力に適切な閾値を設定することにより縞目模様の大きさを制御できることがわかる。すなわち、このことは所望の加工面性状を満たす加工条件の自動決定システムへの展開が可能であることを示している。

Table 1 Frequency of force, drag line generation, and water jet oscillation

Cutting condition		Frequency of cutting force		Freq. of drag line generation (Hz)	Freq. of waterjet oscillation (Hz)
Feed rate (mm/s)	Pressure (MPa)	Feed (Hz)	Principal (Hz)		
2	150	1.27	1.27	1.20	1.20
2	200	1.27	1.27	1.28	1.28
2	250	1.27	1.27	1.28	1.28
2	300	1.27	1.27	1.28	1.28
1	200	0.58	0.58	0.64	0.64
2	200	1.27	1.27	1.28	1.28
3	200	1.75	1.75	1.92	1.92
4	200	2.34	2.53	2.34	2.40

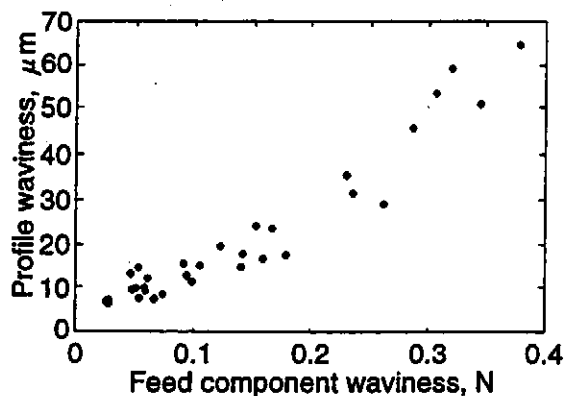


Fig. 9 Relationship between feed component and profile wavinesses

4. 結 言

本研究では、将来的なウォータージェット加工の自動化、知能化に向けて、ウォータージェット加工においてこれまでほとんど取り上げられることがなかった加工状態認識を工作物に作用する加工力情報を用いて行なった結果、複数の加工力情報を総合的に評価することにより種々の加工状態認識が可能であることを示した。加工状態とその認識に必要な加工力情報との対応をまとめたものが表2である。ここで、具体的に本研究で得られた成果をまとめると次のようになる。

- (1) 工作物終端で発生する分離不良は水噴流が二つに枝分かれするために起こる現象で、これは主分力の鋭いピークと送り分力の符号反転を同時に検出することにより認識が可能である。
- (2) 水噴流が工作物を貫通している場合においては、主分力の平均値の大きさは水噴流の湾曲度と定性的に一致する。
- (3) 水噴流が工作物を貫通しているか否かは、主分力が水圧と噴流の断面積で与えられる力に達しているかどうかによって判定できる。さらに、不貫通状態になる過程において送り分力が減少する傾向を利用すれば、 k 貫通状態の予測機能の付加が可能となる。
- (4) 縞目模様生成の周期は主分力及び送り分力の変動に対応し、切削力の変動周期と送り速度とから、縞目模様のピッチを求めることが可能である。
- (5) 縞目模様、すなわち表面うねりの大きさを認識するために、新たに「切削力うねり」なるパラメータを定義し、実験的に検討した結果、送り分力のうねりが表面うねりと良い対応関係にあることが明らかになった。

Table 2 Relations between cutting force information and cutting state

		Cutting Force Information							
		Feed component				Principal component			
		Avg.	Std. Dev.	Static	Freq.	Avg.	Std. Dev.	Static	Freq.
Cutting State	W.J. Penet.	○	○			○			
	W.J. Bend.	○				○			
	Uncut Port.			○				○	
	D.L. Detect.		○		○		○		○
	D.L. Pitch				○				○

○ : valid information

謝 辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団及び平成7年度文部省科学研究補助金奨励(A)(07750131)の助成により行なった。また、本研究を始めるにあたり実験装置及び技術的な面で株式会社スギノマシンの各位には多大なる御協力と御助言をいただいた。そして、本研究で使用した超高速ビデオカメラは、株式会社ナックの御厚意により使用させていただいた。記して感謝いたします。

参考文献

- [1] 例えば、松山欽一、上野秀治、アプレシブウォータージェットの噴流構造の観察(第1報)片持ち梁法を用いた噴流動圧分布測定のための新しい観測方法、噴流工学、13-1(1996)、33-39.
- [2] Ansari, A.I., and Hashish, M., Effect of Abrasive Waterjet Parameters on Volume Removal Trends in Turning, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, 117 (1995), 475-484.
- [3] Ramulu, M. and Arola, D., The Influence of Abrasive Waterjet Cutting Conditions on The Surface Quality of Graphite/Epoxy Laminates, *Int. J. Machine Tools Manufacturing*, 34-3 (1994), 295-313.
- [4] Hashish, M., Characteristics of Surfaces Machined With Abrasive-Waterjets, *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol.*, 113 (1991), 354-362.
- [5] 福西祐、小林陵二、内田幸太、ウォータージェット加工における縞模様粗さ発生の数値シミュレーション、日本ウォータージェット学会研究発表論文集、No.9 (1994)、23-27.
- [6] Hashish, M., A Modeling Study of Metal Cutting With Abrasive Waterjets, *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol.*, 106 (1984), 88-100.
- [7] 松山欽一、西口公之、青倉勇、アプレシブウォータージェット切断での切断前面開拓現象について、日本ウォータージェット学会研究発表論文集、No.7 (1991)、37-48.