

技術報文

ウォータージェットによる高精度加工技術の研究

宗廣修興, 竹保義博, 岡野 仁^{*1}, 岡田芳雄, 兼広二郎, 池本義則^{*2}, 富永一義^{*2}

Studies on accurate processing technology by Water Jet

Shuko MUNEHIRO, Yoshihiro TAKEYASU, Hitoshi OKANO, Yoshio OKADA,
Jiro KANEHIRO, Yoshinori IKEMOTO and Kazuyoshi TOMINAGA

We investigated the process condition factor that influenced on cutting process by Quality Engineering, to obtain accurate process under the Water Jet. As a result, we found that the cutting speed and the abrasive nozzle diameter had a great influence on accurate process. The cutting accuracy necessary for accurate process was influenced by the cutting speed. We get efficient cut with accuracy by high water pressure(343MPa), short standoff distance(1mm) and small abrasive nozzle diameter(ϕ 0.8mm).

ウォータージェットによる高精度加工を行うため、切断加工に影響を及ぼす加工条件因子の選定を品質工学によって評価した。その結果、高精度加工のためには切断速度、アブレジブノズル径の影響が大きいことがわかった。高精度加工に必要な切断精度は、主に切断速度によって制約される。水圧を高く(343MPa)、スタンドオフ距離を短く(1mm)、アブレジブノズル径を小さく(ϕ 0.8mm)すると、切断精度を維持した高効率加工ができる。

キーワード：ウォータージェット、高精度加工、切断、品質工学

1. 緒 言

ウォータージェット加工技術は、直径0.1mm～1mm程度の細いビーム状の高速水噴流によって加工を行う技術である¹⁾。ノズルから噴出される水の流速は、60MPaでマッハ1を超え、240MPaでマッハ2を超える。この技術は高圧・高速の流体のもつ力学的作用(破壊、運搬作用など)と液体本来の性質(冷却作用など)の相乗効果によって、切断・洗浄・剥離などに用いられている。

ウォータージェット切断加工は、高エネルギー密度加工であるため、材料に対する変形・歪・残留応力がほとんどなく、加工反力も小さい。そして水を用いるため材料に与える熱影響は極めて小さいという特徴を有する。そのため、紙・ゴムなどの軟質材料をはじめ、水噴流に研磨材を加えるアブレジブジェットにより金属・ガラス・セラミックスなどの硬質材料や複合材料など様々な材料に適用できる。

この切断加工における原理として、軟質材料の場合、
2000.5.31 受理 応用加工技術部

^{*1}産業デザイン部 ^{*2}株式会社ジェテック

水噴流が固体材料に衝突して噴流がせき止められるときに生じる圧力が、その材料の強度より大きければ材料は破壊される。一方、金属などの硬質材料の場合は、水噴流から形成された液塊や液滴が材料に衝突するときに発生する衝撃力が材料の降伏応力を上回るので破壊されるとそれぞれ推察されている。また、アブレジブジェットの場合は、噴流によって加速された研磨材粒子の衝突によるエロージョン機構が優勢に働いているものと考えられている。

その加工能力については、小林ら²⁾による水噴流による各種金属材料の質量減少量とノズルから試験片までの距離(スタンドオフ距離)の影響、また、Hashish³⁾による切断深さに及ぼす水圧の影響、すなわち最大加工能力に及ぼす加工条件の影響についてこれまで報告されている。しかし、高精度加工を行うための加工性能に及ぼす諸条件の影響はノウハウに関する領域のため、十分に解明されているとはいえない。

そこで、ウォータージェットによる高精度加工を行うために、切断加工に影響を及ぼす加工条件因子の選定を

品質工学⁴⁾によって行い、それらの条件の加工精度に及ぼす影響を調べた。

2. 品質工学による加工条件の選定

2.1 切断加工における基本機能

品質工学における基本機能は、高精度加工ということと転写性とした。指示寸法Mとしてウォータージェットで切断を行うと加工寸法yは切断幅dの半値(d/2)だけ小さくなる。その切断幅は加工媒体が流体であるため、条件によって異なる。そこである条件での指示寸法M₀のときの加工寸法y₀を基準として、同一条件の他の指示寸法M、加工寸法yとの差をとることによって(d/2)をキャンセルする基準点比例式として解析を行った。

$$y - y_0 = \beta(M - M_0)$$

2.2 信号因子と誤差因子

信号因子を指示寸法Mの3水準(φ10mm, φ3mm, φ3mm)とした。加工寸法の計測は、万能座標測定機(ミットヨ, LEGEX707)により円周上の6点を計測することによって平均直径を求めた。ここで、ワーク上面と下面の寸法が加工条件によって異なることが考えられるので計測場所(上面, 下面)を誤差因子(2水準)とした。

2.3 制御因子

制御因子を表1に示す8つとし、それぞれ水準を設定した(従来条件を□で示す)。ここで、アブレシブ(研磨材)は、ガーネット粉末を用いた。ノズルヘッドの構造を、図1に示す。

2.4 切断実験及び解析

試験片は、ステンレス(SUS304:t10mm)平板とし、ウォータージェット加工機(スギノマシン,C2015NN-AB)によって指示寸法Mの円柱切断を行った。直交表L₁₈に制御因子を割り付けて切断加工・寸法計測後、各条件のSN比及び感度の解析を行った結果を表2に示す。その際、直交表割り付け18条件中4条件で完全に切断されな

表1 制御因子と水準

	制御因子	水準1	水準2	水準3
A	加工環境	空中	水中	
B	水圧(MPa)	245	294	343
C	ウォーターノズル径(mm)	0.15	0.20	0.25
D	アブレシブノズル径(mm)	0.8	1.0	1.5
E	アブレシブ粒度	#60	#80	#100
F	アブレシブ供給量(g/min)	200	250	300
G	切断速度(mm/min)	25	50	100
H	スタンド距離(mm)	1.0	2.0	3.0

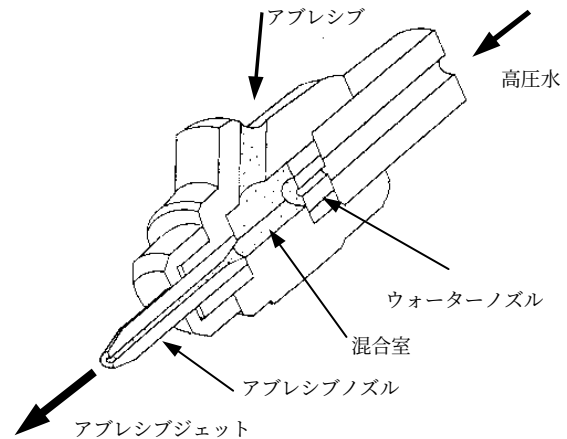


図1 ノズルヘッドの構造⁵⁾

い結果となったため、その条件のSN比及び感度は欠測値となる。そこで、欠測値は0次近似として他の条件のSN比及び感度のそれぞれ最低値()から3db減じた値()を代入して3次近似値まで求め、各制御因子のSN比と感度を求めた結果を図2に示す。

図2から、転写性に最も影響を及ぼす因子は、SN比の変化の大きいG(切断速度)であることがわかる。

この中のB,E,Fは水準2のSN比が低くなる谷型を示しており、交互作用の影響が考えられる。この3つの因子を検討すると、切断能力は、主として高速なアブレシブ粒子による切削能であるので、いかに切削力のある粒子を多量に高速に加速できるかによる。高圧水はマッハ2を超える高速流体であるが、低速で流入するアブレシブを加速させるためにはエネルギーが消費される。水の運

表2 直交表L₁₈によるSN比と感度の0次近似値

	A	B	C	D	E	F	G	H	SN比(db)	感度(db)
1	1	1	1	1	1	1	1	1	23.949	0.0128
2	1	1	2	2	2	2	2	2	14.176	0.0355
3	1	1	3	3	3	3	3	3	2.768	0.1174
4	1	2	1	1	2	2	3	3	(-0.232)	(-2.9879)
5	1	2	2	2	3	3	1	1	24.009	0.0171
6	1	2	3	3	1	1	2	2	11.94	0.0378
7	1	3	1	2	1	3	2	3	16.762	0.026
8	1	3	2	3	2	1	3	1	(-0.232)	(-2.9879)
9	1	3	3	1	3	2	1	2	27.171	0.0121
10	2	1	1	3	3	2	2	1	(-0.232)	(-2.9879)
11	2	1	2	1	1	3	3	2	9.159	0.0411
12	2	1	3	2	2	1	1	3	8.645	0.018
13	2	2	1	2	3	1	3	2	(-0.232)	(-2.9879)
14	2	2	2	3	1	2	1	3	9.971	0.0547
15	2	2	3	1	2	3	2	1	21.083	0.0198
16	2	3	1	3	2	3	1	2	11.884	0.043
17	2	3	2	1	3	1	2	3	18.409	0.0237
18	2	3	3	2	1	2	3	1	14.593	0.0283

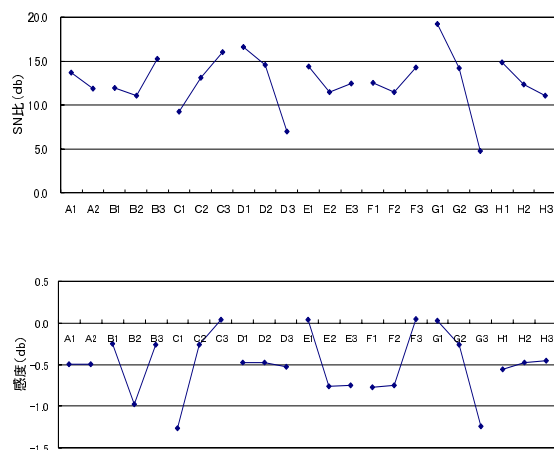


図2 要因効果図

運動エネルギーは流速と流量に關係する。流速は水圧の1/2乗に比例し、水の流量はウォーターノズル径の2乗と流速に比例する。また、加速されるアブレシブの粒子径及び量も關係する。つまり粒子径が大きいと研削力は大きい、加速され難かったり、量が多くなると水流の流速が遅くなるなどの影響で、水圧、アブレシブ粒度及び供給量の各水準間で交互作用が現れたものと考ええる。

2.5 確認実験

図2からSN比の高い条件を組合せた最適条件は、A1B3C3D1E1F3G1H1となる。また、従来条件の組み合わせは、表1に示すA2B2C2D2E2F2G1H2である。それぞれSN比 η 及び感度Sの推定を行うとともに、この実験の再現性を確認するため、最適条件と従来条件で確認実験を行い、SN比及び感度を評価した結果を表3に示す。

推定と確認実験の利得がほぼ等しいことから、この実験の再現性はあるものと考えられる。

この結果より、転写性は、図2のSN比から水準間で大きく変化する切断速度、アブレシブノズル径が影響を与えやすいことが確認できた。

表3 確認実験結果

A B C M P	SN比(db)		感度(db)	
	推定	確認	推定	確認
最適条件	35.141	40.062	1.8133	-0.0025
従来条件	15.722	19.018	0.7325	0.0218
利得	19.419	21.044	1.0808	-0.0243

3. 実験結果及び考察

3.1 加工評価

切断条件の違いによる加工性能の差を明確化するため、試料を高硬度の合金工具鋼(SKD11(HRC58): t 13.1mm)とし、スリット加工を行った。高精度加工で問題となる転写性を評価するために、ワーク上面と下面の切断幅及び切断長さを投影機(ミットヨ, PJ500)によって計測した。

加工パラメータとしては、図2の結果から影響の大きい切断速度、アブレシブノズル径とスタンドオフ距離、交互作用の見られた水圧とした。その他の条件は加工環境を空中とし、アブレシブの加速に影響を与えるウォーターノズル径は、中間値の ϕ 0.2mmとした。また、交互作用の見られたアブレシブは、粒度を汎用的に用いられている#80、供給量を200g/minとした。

3.2 水圧、スタンドオフの影響

まず、スタンドオフ距離の影響を図3に示す。

水圧が高いほど、スタンドオフ距離が短いほど切断幅の上下差は小さくなっている。その状態傾向は、スタンドオフ距離が離れるにしたがってワーク上面の切断幅が広がり下面の切断幅が狭くなっている。これは、アブレシブジェットの場合、高圧水をウォーターノズルで絞って高速流体として噴出させるが、混合室でアブレシブが流入することによって水流が乱されるとともに空気も巻き込んだ三相流となる。同一ノズルから噴射される高速流体のもつ運動エネルギーは流速の3乗に比例するので、供給アブレシブ量が一定の条件では、高圧ほど高速なのでエネルギー消費率は少ないので乱れは少ないものと考えられる。その乱れた水流をアブレシブノズルで収束させているが、ノズルから噴出する水流は十分に収束されていないので、スタンドオフ距離が長いほど水流は広がる。そのため、ワーク上面が広く削られ、下面に到達すると加工能力は減少して下面の切断幅は狭くなるものと考えられる。

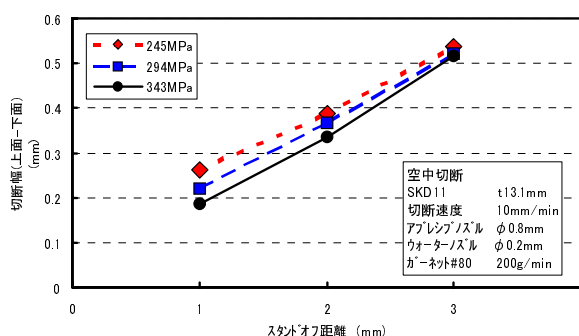


図3 切断幅と水圧、スタンドオフ距離の関係

3.3 アプレシブノズル径の影響

つぎに、アプレシブノズル径の影響を図4に示す。図3と同様に水圧が高いほど切断幅の上下差は小さくなっている。またアプレシブノズル径が小さいほど切断幅の上下差は小さくなっている。アプレシブを加えることによって高速水流は乱されるが、その流体をアプレシブノズルによって細く収束させるほど、切断部に対して高密度に入射させることができるのでエネルギーロスの少ない加工になり、断幅の上下差が少なくなるものと考えられる。

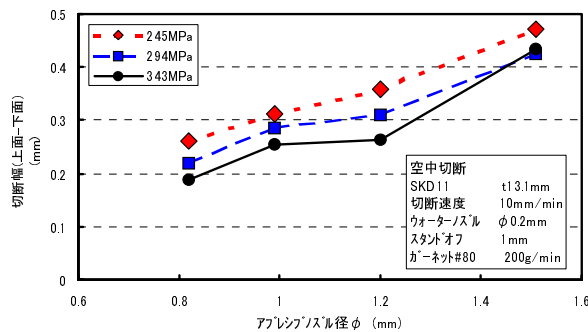


図4 切断幅と水圧、アプレシブノズル径の関係

3.4 切断速度の影響

続いて、切断速度の影響を図5に示す。この図から、切断速度が遅くなるに従ってワーク下面の切断幅がワーク上面に比べ広がっている。

Hashish⁹⁾ はアプレシブジェットによる切断機構として、鋭い角度で衝突する粒子による切削摩耗と大きな角度で衝突する粒子による変形摩耗とからなるといっている。アプレシブジェットによって板厚方向に逐次切削していくとワーク上面では鋭い角度で入射する粒子によって切削されるが、加工抵抗によってエネルギーは消費され、次第に流体のベクトルは加工方向と逆の方向にずれてくる。そうすると、加工面に対し粒子は大きい角度で入射するようになるので変形摩耗形態となる。

切断速度が速くなると、変形摩耗領域が広がるため、

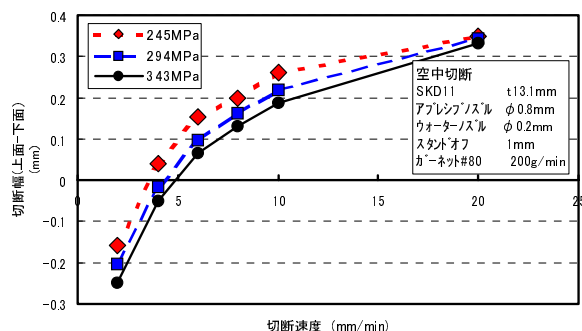


図5 切断幅と水圧、切断速度の関係

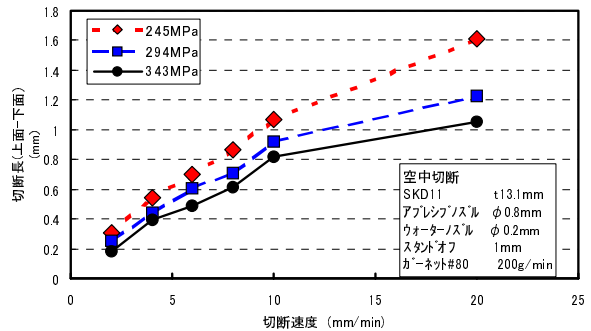


図6 切断長さ（上面-下面）と水圧、切断速度の関係

除去能力の低下によって切断幅は狭くなり、噴流の直進性が悪くなるので加工軌跡からずれを生じる。

逆に、加工速度が遅くなると変形摩耗領域は少なくなるが、加工能力を十分に持った噴流の広がりによって、下面の切断幅が広がるので、高精度加工の障害となる。

これから、高精度加工に必要な切断幅の上下差が0になる切断速度を求めることができる。

最後に、ワーク上面と下面の加工遅れを切断長さの差として調べた結果を図6に示す。

図5と図6から上面と下面の切断幅が等しくなる条件でも加工の遅れは0.4mm前後生じている。ウォータージェットは高エネルギー密度加工であるが流体を用いるため、加工能力以上の高硬度材料や厚板になると加工遅れが生じてしまうため、高精度加工の障害となる。

このように、直線の切断加工であれば、切断幅の上下差がない切断速度を適用すればよい。しかし、形状加工の場合は、加工遅れを考慮してコーナー部等でノズル送りのプログラムを検討する必要がある。

遅れを抑制する加工能力を向上するためには、ウォータージェットの拡大、交互作用の見られたアプレシブの種類及び供給量の調整が今後の課題となる。

4. 結 言

ウォータージェットによる高精度加工を行うために、切断精度に及ぼす加工条件因子の影響を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) ウォータージェットにおける高精度切断加工に影響を及ぼす加工条件因子の選定を品質工学によって評価したところ、切断速度、アプレシブノズル径の影響が大きいことがわかった。
- (2) 切断精度は、主に切断速度によって制約される。切断精度を維持した高効率加工には、水圧を高く、スタンドオフ距離を短く、アプレシブノズル径を小さくすると良いことがわかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、噴流技術についてご指導頂きました広島工業大学教授 清水誠二氏に深く感謝の意を表します。

文 献

1)日本ウォータージェット学会編：ウォータージェット技術辞典，丸善，1993,p.1.

- 2)小林陵二，新井隆景，山田泰司：日本機械学会論文集 B編，53-489，1539-1542(1987).
- 3)M. Hashish:Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol., 106, 88-100(1984).
- 4)矢野宏：品質工学入門，日本規格協会，1995,p.62-84.
- 5)小林陵二：ターボ機械，17-11，13(1989).
- 6)M. Hashish:Trans. ASME, J. Eng. Ind., 115, 44-50(1993).