ウォータージェット技術の将来

Prospect of Water Jet Technology

小林 陵二

Ryoji KOBAYASHI

- 1932年9月生まれ
- 流体工学，特にキャビテーション，乱流壁面噴流，境界層の安定性理論の研究を実施。現在，乱流遷移とウォータージェット技術開発の研究に従事
- 正員，東北大学工学部（〒980 仙台市荒巻字青葉）

1. はじめに

ウォータージェット技術というのは，直径が0.1 mm から1 mm 程度の細い水噴流によって固体材料の加工を行う技術である。図1は，吐出し圧力300 MPa で直径0.2 mm のウォータージェットによって合板を加工した一例である。近年，ポンプの高圧化に伴ってウォータージェットの応用範囲が急速に広がっており，紙，布地，皮革，ゴム，建材などの軟質材料から，プラスチック，複合材料，チタン合金などの金属材料，ガラス，岩石，鉄筋コンクリートなど硬い材料まで切断できないものはないほどである。

1988年10月，仙台で開催されたウォータージェット技術国際会議（9th International Symposium on Jet Cutting Technology）⁽¹⁾において，ウォータージェット技術の現状の問題点と将来への期待が討議された。本文ではその視点から，この技術について解説的に述べてみることにしよう。この技術の開発の経緯については幾世橋の解説がある⁽²⁾。

2. ウォータージェット技術の特徴と応用分野

ウォータージェットは，細い噴流であるが単位面

積当たりの加工エネルギーが極めて大きいのが第一の特徴である。噴流の直径が小さいので所要動力が少なく，水を使用するため維持費も安い。加工物に作用する力が局所的，衝撃的であるため，ハニカム構造のアルミニウム薄板や段ボール，積層布地の切断など変形しやすい構造のものや軟質材料の加工に適している。最近はロボットと組合わせてコンピュータ制御によって三次元的曲面をもつ複雑な形状の加工に応用されることが多くなった。自動車のフロントパネルやバンパ，内装材などの切断にウォータージェットが使われている。

加工点の温度が低いので，発火・爆発のおそれがある作業に用いて安全であり，また加工箇所の材料組織の熱変性を生じない。水のもつぬらしと洗浄作用は，粉じんをきらうコンクリート構造物の解体に有利であり，原子炉解体における隔壁の切断除去に使用することが考えられている。洗浄の分野では高圧化によって近年応用範囲が著しく広がっている。たとえば，多量の加工部品のばり取り，切りくずと切削油の能率的除去，精油など

図1 ウォータージェットによる合板の加工

プロセスエンジニアリングにおける配管・反応容器・熱交換器の洗浄があげられる。

建設・土木分野においてウォータージェット技術は既に実用段階にあるといえる。建築基礎関係では、都市の土木工事は低振動・低騒音であることが強く要請されるため、くいやシートパイル、H形鋼の打ち込みにウォータージェットが併用されている。また、硬い地盤における大口径大深度のくい打ちには従来工法に比べて有利である。地盤を改良するため、硬化剤を高速噴流として注入する工法は、建築、シールドトンネル、橋台の基礎工事および堤防の止水壁の構築に応用されている。

3. ウォータージェットによる加工のメカニズム

ウォータージェットによる加工法を工業技術として確立するためには、高速水噴流の構造を明らかにし、固体材料の加工過程や加工精度との関わりを解明しておくことが極めて重要である。加工性能に関与する主なパラメータは次のとおりである。

- (イ) ノズルからの吐出し圧力
- (ロ) ノズルの形状と出口直径
- (ハ) ノズルと加工材料の距離
- (ニ) ノズル送り速度
- (ホ) 加工材料の種類と厚さ

高速の水噴流を連続的に発生するには、150 MPa 程度まではプランジャポンプが用いられるが、それ以上1000 MPa までは油圧による増圧機が用いられる。さらに高圧では連続噴流を得るのは困難で、ピストンや銃弾を駆動源として水柱をノズルから瞬間的に押出し、短時間ではあるが 3×10^3 m/s 程度の噴流を得る方法がとられる。これはむしろ実験室的方法であって、そのような

図2 壊食曲線⁽³⁾

未知の高速領域において噴流がどのように形成され、固体材料にどのような損傷を与えるかを実験的に調べることが目的である。

実用の対象となるのは前者の連続噴流である。連続噴流は、周囲の流体によって、水噴流が空气中に噴出する場合と水中に噴出する場合に分かれる。後者の水中水噴流は、噴出後の速度の減少が著しいので固体材料に対する加工能力は低く、水中の比較的軟質の材質のものに対して用いるか、キャビテーションによる壊食作用と併用してその能力の向上を計ることが行われる。

3・1 壊食曲線 図2は、ウォータージェット壊食による各種金属材料の質量減少量 M がノズル出口から試片までの距離 x によっていかに変化するを示している⁽³⁾。ノズル出口直径 d は1.1 mm, 吐出し圧力 P_0 が70 MPa, t_0 は噴射時間である。これは加工の初期段階に対する実験であるが、高速噴流の構造と加工能力の関係をj知る上で参考になる。図2からわかるように、質量減少量 M は、ノズル近くよりむしろノズルからある程度はなれた位置 (x/d) において最大となる。また、極大を示す位置 x/d が2箇所ある。ノズルに近い方を第1ピーク、遠い方を第2ピークと呼ぶことにする。第1ピークは、図2の軟鋼とステンレス鋼で $t_0=300$ s のときは現れないが、噴射時間 t_0 を長くするといずれも生ずることになる。壊食曲線 $M-(x/d)$ は試片の材質が異なると全体として変化するが、第1ピークと第2ピークの位置 x/d はほとんど変化しない。このことは、これらの二つのピークの発生はむしろ噴流の構造と密接な関係があることを示唆している。

3・2 噴流の構造と壊食形態の相関 壊食曲線の第1ピーク位置と第2ピーク位置とで壊食のメカニズムは異なるのであろうか。そのことを明らかにするためには、噴流の構造を調べ、壊食状態との対応を観察することが必要である。ノズルから噴射される噴流の速度 V は、おおよそ次の式によってノズルの入口の吐出し圧力 P_0 から算出される。

$$V \approx \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}}$$

ここに、 ρ は水の密度である。 P_0 が60 MPa 以上では速度 V は空気の音速を超える速さである。図

3は、 $P_0=50$ MPaの場合について、ノズルからの距離 x/d が種々の大きさの位置における噴流の状態を影写真法により撮影した瞬間写真である。せん光時間が $0.8\mu\text{s}$ のフラッシュを使用しているがまだ噴流の瞬間の状態を十分にとらえていないとはいえない。しかし、噴流のおおよその構造を知ることができよう。図4は、アルミニウム試片を種々の位置 x/d に置いて $t_0=60$ s 噴射した場合の壊食状態を示したものである。第1ピークより上流側 ($x/d<180$) では、図3の(a), (b)のように、噴流は連続的構造を保っており、その周りに微細な液滴が存在している。それに対応する壊食状態は、図4の(a), (b)に示すように、花びら状壊食を呈し、噴流中心はあまり壊食を受けない。50 MPaのせき止め圧はアルミニウムの破壊強度以下であるからである。第1ピーク近傍から下流では、図3の(c)のように噴流形状は大規模に変形し、第2ピーク近くで液塊・液滴状に分裂し、第2ピークを過ぎると半径方向への拡散が急

激に進行する。それに対応する壊食状態は、図4の(c)のように第1ピークを過ぎると花びら状壊食から噴流中心部が集中的に壊食を受ける状態に移行し、第2ピーク近傍では(d)となり、第2ピークを過ぎると壊食面積が大となり壊食は著しく弱まる。第1ピーク付近における噴流周りの液滴の大きさは約 $10\mu\text{m}$ 程度、第2ピーク付近では $100\mu\text{m}$ 程度の液塊になって衝突していると推定される⁽⁴⁾。

これらの実験からもわかるように、高速水噴流による固体表面の壊食は第1ピーク付近と第2ピーク付近とではそのメカニズムが異なる。第1ピーク付近では噴流中央部のコアに相当する箇所に

図3 噴流の構造 (瞬間写真)⁽³⁾
($P_0=50$ MPa)

図4 壊食の状態⁽³⁾
(Al, $P_0=50$ MPa, $t_0=60$ s)

(a) 切断溝 (溝幅約 3 mm)

(b) 切断面

図5 砂岩の切断⁽⁶⁾

壊食は起こらず、むしろその周辺が噴流の掘削作用によって花びら状に選択的に壊食される。壊食量 M が最大となる第2ピーク付近では、壊食は、液塊ないし液滴の衝突によって発生するウォーターハンマ（水撃）現象の衝撃圧 ρaV （ a は水の音速）によって生ずる⁽⁶⁾。

3.3 ノズル送り速度の影響 図5は砂岩を水噴流によって切断した一例で⁽⁶⁾、(a)はその切り口、(b)は切断面を示している。(b)において噴流は上から下方に垂直に噴出され、ノズルは右から左へ送られている。材料の厚さが厚く噴流が材料を貫通しない場合には、その先端で切削能力を失うと送り方向と反対方向に噴流が逃げるため、わん曲した切削面を生ずる。

同じ材料で吐出し圧力 P_0 が同じであっても、送り速度を大きくすると切削深さは減少する。

加工材料の切断部の幅は、送り速度の大きさによって図6のように変わる⁽⁷⁾。送り速度が遅すぎると図の右端の例のように噴流の流出側の幅が広くなり、速すぎると図の左端のように狭くなる傾向があるため、一様な幅で切断するには最適の送り速度が存在する。

噴流に送りを付して材料を切断する場合に比較して、穴あけの場合には穴の中にたまった液体ないし返り液流との干渉によって加工効率は一般に低くなる。岩石、コンクリートなどでは、内部水圧による破碎作用が加わる。

3.4 ポリマ添加の効果 水噴流にポリマを添加すると、加工能率が明らかに向上する。図7は、ポリマとしてPEOを添加したときの壊食曲線の変化を示しており、水のみの場合に比較して1000 ppm添加した場合の壊食量は2.7倍に達す

る⁽⁸⁾。

第1ピークおよび第2ピークの位置 x/d は、ポリマの濃度によって変化しないので、噴流の巨視的な構造は変わっていないと推測される。ポリマを添加した噴流の構造を図3と同様の影写真法によって観察すると、図8に示すように、噴流が液塊に分裂する巨視的な構造はあまり変わらないが微小液滴の発生が著しく少なくなっている。

4. アブレシブジェットへの期待

ウォータージェットに砥粒を添加すると切れ味が一段と良くなる。このような方式はアブレシブジェットと呼ばれる。硬い材料の加工にあたって、

図7 壊食曲線（ポリマ濃度の影響）⁽⁸⁾
(Al, $P_0=50$ MPa, $t_0=60$ s)
C: ポリマ濃度

図6 ノズル送り速度による切断幅形状の変化⁽⁷⁾
右から 100, 200, 300, 400, 500 mm/min
(GFRP 材, $P_0=250$ MPa)

(a) $C=0$ ppm

(b) $C=1000$ ppm

図8 噴流の構造（ポリマ濃度の相違）⁽⁸⁾
($P_0=50$ MPa, $x/d=285\sim315$)

吐出し圧力 P_0 が 500~1 000 MPa の超高压ウォータージェットを使用するより、むしろ 100~300 MPa 程度の使いやすい圧力範囲でアブレシブジェットを使用すれば、同じ効果が得られるので、最近、広く使用されるようになった。図 9 は、アブレシブジェット用ヘッドの構造図である。水噴流がウォーターノズルから出たのち、砥粒が混入され、アブレシブノズルから噴出される。砥粒としては、けい砂、溶融アルミナ、スチールグリッド、ガーネット、シリコンカーバイドなどが使われる。ガーネットが最も効果が大きいので比較的多く用いられているが、維持費がやや高い。砥粒は使用によって粒度や形状が変化するので、再使用されることは少なく、使い捨てのことが多い。砥粒を混合室の中で水噴流に適度に混入し、その砥粒を効果的に加速するためのヘッドの構造の研究が進められている。アブレシブノズルの損耗も無視できない問題である。

5. キャビテーションの応用

キャビテーションという現象は、高速の流体機器において性能低下と損傷をもたらすので、できるだけ回避すべきものと考えられてきたが、ウォータージェット技術においてはキャビテーションの衝撃作用を利用して効果をあげることが行われている。

海洋構造物の切断や海底掘削など、水中において水噴流を利用する場合には、水噴流のみではノズルから噴出したのちの速度の減衰が著しく、また気中水噴流のような液塊による衝撃作用がないので固体材料に対する加工能力が低い。噴流速度を増してキャビテーション係数 σ が 0.6 以下にな

図 9 アブレシブヘッドの断面図

ると、噴流周りの混合領域にキャビテーションが発生する。図 10 は噴流にキャビテーションが激しく発生している状態を示している⁽⁹⁾。黒い雲状の塊がキャビテーション気泡の集合であり、キャビテーション気泡の消滅の際に発生する強い衝撃圧が加工材料に対する破壊力となる。

6. 医療分野

低圧のウォータージェットメスが肝臓の手術に使用されている。噴流には生理的食塩水を使用し、吐出し圧力は 1.5 ないし 2.0 MPa で、噴流の太さは約 0.2 mm である。肝臓内には大小多数の血管が走っており、肝臓の部分切除に際し血管を切断すれば多量の出血が起こる。ウォータージェットメスを使用して吐出し圧力を適度に調節すると、硬さの異なる血管を残して肝実質のみを切断することができるため⁽¹⁰⁾、輸血に関わる諸問題を回避できる利点は大きい。残った血管は、糸でしばるか電氣的に凝固させてあとで切断する。既に 60 回の臨床例があり、出血量は従来の方法の約 10 分の一といわれる⁽¹¹⁾。レーザメスや超音波メスに比較して、切断面の細胞組織の変性や壊死がないことも優れている点である。

胆石や腎石を、手術をしないでウォータージェットによって粉碎する試みがなされたこともある⁽¹²⁾。

7. おわりに

さきの国際会議からもわかるように、わが国のウォータージェット技術は、基礎研究から応用分野の広い範囲にわたって世界のトップレベルにある

図 10 キャビテーションジェット⁽⁹⁾
($\sigma=0.03$)

といえる。しかし、この新しい技術が広く実用されるように発展するためには、それを支える基礎研究の層を厚くすることが必要である。一方では、高圧ポンプの小形化、設備費の低減、耐久性のある高性能ノズルの開発などが当面の問題である。応用の対象によっては、加工の精度も重要になってくる。高圧機器ならびに高速噴流を取扱うので安全性の観点からの検討が必要である。

ウォータージェット技術は、今後いつそう、機械工業の分野で広く使用されることが期待されている。流体力学と加工学のみならず機械工学全般の分野の方々の関心を願うものである。

文 献

(1) *Proc. 9th Int. Symp. Jet Cutting Technol., Sendai, (1988*

- 10).
- (2) 幾世橋, 機誌, 90-829(1987), 1487.
- (3) 小林・ほか2名, 機論, 53-489, B (1987), 1539.
- (4) 小林, 機論, 52-483, B (1986), 3645.
- (5) Hwang, J.-B. and Hammitt, F.G., *Proc. 3rd Int. Symp. Jet Cutting Technol., Chicago, (1976-5), Paper B2.*
- (6) Summers, D.A. and Henry, R.L., *Proc. 1st Int. Symp. Jet Cutting Technol., Coventry, (1972), B142.*
- (7) 柳内, ウォータージェット技術研究会第2回研究発表講演会論文集, (1985-7), 45.
- (8) Kobayashi, R. and Arai, T., 文献 (1) の155ページ.
- (9) Shimizu, S. and Yamaguchi, A., 文献 (1) の1ページ.
- (10) 西坂, ウォータージェット, 1-4 (1984), 1.
- (11) Uchino, J., ほか5名, 文献 (1) の641ページ.
- (12) Jessen, K., ほか5名, *Proc. 7th Int. Symp. Jet Cutting Technol., Ottawa, (1984-6), 395.*

(原稿受付 1988年11月2日)