高圧水の動的利用

－ウォータージェット技術の進歩－

Dynamic Use of High Pressure Water – Progress in Water Jet Technology

幾世橋 広

Hiroshi Kiyohashi

The utilization of the energy of a supersonic water jet outflowing from a small-diameter hole under high pressure makes a progressive advance in material cutting. The history of the high pressure water jet technology applied to many fields as well as mechanical engineering has been surveyed briefly, and recent investigations and progress in the technology have been reviewed by classifying the technology into nine jets under cutting mechanism.

1. はじめに

「水は方円の器に任ず」の故事成語のように、水は柔軟で弱々しいものに喩えられることもあるが、一方、「水滴りて石穿つ」とも言われ、ひとしずくの水でも、休みなく続けて落ちると、やがて固い石にも穴をあけてしまう力があることは、古くからよく知られている事実である。意識的に作られた“小孔”（これをノズルという）から、ある目的をもって噴射された高圧水の流れ“水噴流”のもつ破壊力などを利用する技術が“ウォータージェット技術”である。高圧水の利用は、いまや工鉱業ほか種々の分野にまで拡大している[1]。本文では、高圧水の動的利用の一形態と位置付けられる本技術の歩み、加工原理、加工具としての水噴流の種類と特徴、応用分野と研究開発の現状などについて概観する。

2. ウォータージェット技術の歩み

水噴流（水噴流を工具として用いる場合の技術用語は、一般に、“ウォータージェット”と表記されるが、以下、本文中では、これを区別せず“水噴流”と記す）の利用技術に関する研究には、①水噴流そのものの流体力学ならびにその標的物体への衝突効果を含む掘削、切削および破壊の理論、②水噴流を発生させるために必要な高圧水発生設備とノズルな

らびに、③種々の物体への水噴流衝突効果の応用などの分野がある。③は、①と②の進歩により進展する。ここでは、主として①と③について述べる。

今中[2]が1974年に水噴流の応用の可能性を予想したが、現在、かなりのものが実用化されている。このうち、破壊作用の応用を例にとろう。大別すると、標的物体を大きく破砕するための応用とそれを精密に切削するための応用とがある。前者は、切り口の質にはほとんど考慮を払わずに、除去する材料の量を最大にすることが目的である。後者は、切り口の質に最大の考慮が払われ、水噴流を従来の切削具あるいは穿孔具の代りに使うことが目的である。

水噴流の破砕への応用は、古くからあり未固結な鉱石（砂鉄や砂金など）の採掘に用いられた[3]。1852年にカリフォルニアで砂利採取へ用いられたとの記録がある[3]。1916年にはソ連で石炭採掘への応用実験が行われ、1939年には水力採炭法として実用化[4]された。その後、高圧水発生装置および耐圧ホースなどの進歩と時代の要請に応じて、その他の鉱業[5-7]、土木建設業における各種工法[8]へ応用されるようになった。

一方、固体材料の精密切削への応用研究は、高速化した航空機のレーダードームの雨食現象に着想を得て1960年代から開始され[9]、近年、本技術は実用化された。さらに高精度・高能率化を目指して現

東北大学工学部資源工学科

Department of Resources Engineering, Faculty of Engineering, Tohoku University

〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉 Aza - Aoba, Aramaki, Aoba - ku, Sendai 980

在も研究が進められている。水噴流加工法開発の初期の経緯は今中[10]が、その後の研究の動向は小林[11, 12]が概観している。

本技術は、さらに水アトマイズ法による金属微粉の作成[13]、各種産業における無機・有機物の剥離・洗浄[14]、汚染土壌の洗浄[15]、バリ取り[16]、医療分野[17]および食品産業[18]などにまで応用されるに至った。また、作業を安全に行うための作業基準[19]の作成および危険性の定量的評価の研究[20]も行われている。

水噴流利用技術に関する全般的な文献調査は、BHRA(英国流体力学研究協会、1990年からBHR Group Ltd.と改組)により行われている[2, 21, 22]。本技術の情報交換を行う国際会議：水噴流切削技術国際シンポジウム(ISJCT)は、1972年から2年ごとにBHRAにより、環太平洋地域水噴流技術国際会議(PRICWJT)は1987年から約3年ごとに開催されている。また、日本およびアメリカにおいても1983年から情報交換機構(日本ウォータージェット学会およびWater Jet Technology Asso.)が組織され活発な活動が行われている。1982年から2年に一度開催されているアメリカウォータージェット会議は、最近、国際色を帯びてきた。さらに、1990年よりInternational Society of Water Jet Technologyが発足し、国際学会誌[23]を刊行している。日本における本技術の普及と発展を計るための刊行物[24, 25]も作成されている。1993年には、ドイツおよびフランスでも関係組織が発足し、チェコ、中国および台湾でも学会結成の準備が進められている。

3. 水噴流加工の原理と特徴

3.1 水噴流の構造

ノズルより、噴出流体と同一流体がある半無限空間に噴出する流体の流れは、自由噴流とよばれ、流体が水の場合は水中水噴流といわれる。水中水噴流は、噴出後の速度の減衰が著しいので固体材料に対する加工能力が低くなり、特別な場合以外には、まだ広くは用いられていない。一般的には、水噴流を空气中に噴出する気中水噴流が用いられる。以下、主として後者について述べる。

私共の身近な水噴流は、水道の蛇口(ノズル)からほとばしる水流である。水の吐出し圧力およびノズル出口の速度をそれぞれ P_0 および V_0 とすると、ベルヌーイの式より、 V_0 は次式から求められる。

$$V_0 = \left(\frac{2P_0}{\rho} \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 ρ は水の密度である。水道水のゲージ圧は $P_0 = 196 \text{ kPa} (2.0 \text{ kgf/cm}^2)$ 前後であり、ノズル出口の近くには空気を含まない透明な部分(噴流核といわれ、この部分では動圧が P_0 に等しい)が存在し、ノズル出口から相当離れたところまで存在することが特徴である。この部分の気液界面には間もなく波動が発生する。その振幅は、ノズル出口から離れるにつれて大きくなり、ついには水流は分断され、その先では水滴と空気との混合流となる。噴流核が存在する部分の噴流の軸方向の長さを初期区と呼んでいる。 $P_0 = 490$ ないし 981 kPa までは、以上のような構造を持ち、噴水や消火用水噴流はその例である[8]。固体の加工を行うには水圧をより高くする必要がある。また、加工を効率よく行うためには、後述のように、その高圧水噴流の構造を知らなければならない。ただし、低圧、高圧および超高圧などの境界をどこにおくかは、水噴流の応用分野によってかなり違っているので、注意する必要がある[28]。

Fig.1 は、1977年に柳井田ら[26]が $P_0 = 392 \text{ kPa}$ ないし 24.5 MPa までの水噴流を調べて作成した気中高圧水噴流の構造概念図(噴流の広がり幅が、噴流軸方向長さに対して誇張して示してある)である。加工工具として水噴流を用いる場合には、図中の噴流核長 X_p および水噴流が滴状化する距離 X_b ならびに、これらの距離における噴流の広がり半径 R が重要な因子となる。 X_p は、ノズル内壁面に形成される境界層と主流の内部乱れに強く影響される[26]。連続流のよどみ点圧力 P_s は、(2)式により与えられる。しかし、液滴の標的物体への衝突圧力は水撃圧 P_w となるため、(3)式により与えられる。

$$P_s = \frac{1}{2} (\rho V)^2 \quad (2)$$

Fig.1. A model of structure of high pressure water jet in air. (Cited from Ref.26).

$$P_w = \rho c V \quad (c \text{ は水中の音速}) \quad (3)$$

両式中の速度 V が一定ならば、 P_w は P_s より数倍大きくなる[27]。

3.2 水噴流による削孔・切削の原理

Fig.2 は、水噴流の衝突による標的物体(アルミニウム)の質量減少量 M がノズル出口(断面積を a とする)から標的までの距離 X (スタンドオフ距離という)によって変化する関係を、それらの無次元量の関数として示したものである。ノズル出口直径 D_0

Fig.2. Dimensionless erosion weight vs. stand-off distance. (Cited from Ref.11).

は1.0 mm、噴射時間は60 sである[11]。 $Mg/2aP_0 - X/D_0$ 曲線には、 P_0 の値によりそれらの極大値とその極大値が得られる X/D_0 の値は異なるが、 $X/D_0 \approx 50$ に小さな(第1)極大値 M_{P1} と $X/D_0 \approx 250$ ないし450に大きな(第2)極大値 M_{P2} が存在することがわかる。 M_{P1} および M_{P2} が生ずる X/D_0 の値は、一般に水噴流の構造と標的物体の物性によって決まる。 M_{P1} は X_p/D_0 付近に、 M_{P2} は X_b/D_0 と X/D_0 との間に生ずるようである。第1極大値付近の壊食は、噴流核が衝突した内側の部分には普通生じず、その外側に花びら状に生ずる[11]。必ずしも $M_{P1} < M_{P2}$ とはならず、 $M_{P1} > M_{P2}$ となる場合[29]、また岩石などでは M_{P1} が出現しない場合[30]もある。標的物体が X_b/D_0 と X/D_0 との間にある場合には、噴流圧力 P_0 が P_w として標的物体に作用すると考えられる。

上例のように、大きな力学エネルギーを持った水噴流が標的物体に衝突すると、どのような機構で削孔されたり切削されるのであろうか。従来からその

原理として、①動圧による破壊[31]、②衝撃荷重による破壊、③キャビテーション(以下、空洞現象と記す)壊食、④間隙水圧によるくさび効果、⑤研磨効果、⑥脈動負荷による疲労破壊、および⑦熱応力(水噴流と標的物体との温度が異なる場合)[32]などが挙げられている。しかし、これらの効果は複合して微妙にからみあっている[33, 34]。標的物体の諸特性(物理、化学、機械、組織学および熱的など)と噴射環境により、①ないし⑦のどの効果とその物体の加工に主体的に寄与するのかは異なるものと思われる。水噴流加工の機構に関する破壊力学的観点からの説明は、今後の課題である。以下に、加工特性因子および水噴流加工の特徴を要約しておく。

3.3 加工特性因子

3.3.1 水噴流の特性

ノズルの形状[32]・材質・表面仕上げ・直径、流体の性質・温度[35]。

3.3.2 加工条件

噴流のノズル出口圧力、噴射環境(流体の種類・圧力・温度)、スタンドオフ距離、ノズルの送り速度・噴射角度、切削様式、加工対象物体温度[7]。

3.3.3 加工対象物体の種類とその物性

単一・複合・延性・脆性材料、圧縮・引張・剪断強度[34]、破壊靱性・プロトジャコノフ係数[34]、縦弾性係数[31]、弾性波伝搬速度[36]、透水係数・空隙率・物体の組織と構造[34]、熱物性値[7]。

3.3.4 水噴流加工の特徴[37]

- 1) 高エネルギー密度加工法であるため、材料に対する変形・歪み・残留応力がない。
- 2) 発熱を伴わず、材料の熱変形・変性あるいはガス化が生じない。
- 3) 大気中への粉塵の飛散がなく、作業環境を良好に保てる。
- 4) 加工物とノズルは接触せず、自由な曲線・曲面の切断が可能であり、また、従来の刃物と比較して刃物の摩耗や目詰りが少ない。
- 5) 任意の点からの切断が可能であり、切抜き加工に最適である。
- 6) 切断代が小さく、材料の歩留りが良い。
- 7) 切断反力が小さいので、ノズル移動が容易でロボット化し易い。

3.5 水噴流加工の短所[38]

- 1) 切断中はほとんど被水しないが、100% 水を嫌う材料には適用できない。
- 2) 水噴流は気中で拡散するため、中空構造体の切断では上・下面が同一にならない。
- 3) 単一繊維構造物の微細切断では、保持機構に、まだ問題がある。
- 4) 噴流の反力および安全性の面から、特別の切断機構(ロボットなど)が必要である。

4. 加工具としての水噴流の種類

4.1 通常水噴流(Straight Water Jet(*); STWJ)

3.では、水道水程度の純度の水を用いた水噴流について述べた。これを通常水噴流と呼ぶ[5](*)：pure water jet, plane water jet とも言う)。水噴流の加工性能を高めるため、または特殊の目的のため、水に種々の物質を加えたり、ノズルに特別の工夫を凝らした水噴流が考え出された。以下に、幾世橋の分類[5]に従って述べる。

4.2 異種溶液添加水噴流

(Additive Water Jet; ADWJ)

STWJにおいて、噴流波動の原因である主流乱れを抑えれば、水噴流が滴状化する距離 X_0 を延ばすことができる。希薄高分子水溶液は、長鎖状分子が流れの乱れ機構へ影響を与えるため、乱流摩擦抵抗が溶媒自身の抵抗より小さくなる。Franz[39]は、PEO(Poly Ethylene Oxide)を水に添加した水噴流を用いてアルミニウムの切削実験を行い、ノズル吐出し圧 P_0 が高くなるほど、PEO添加の効果が強く現れ、 X_0 および加工深さ L がSTWJの数倍に増加することを1976年に明らかにした。水噴流メスによる肝臓手術の場合には、 $P_0 = 1.2 \sim 2.0$ MPaの生理食塩水噴流が用いられる[17]。

4.3 研磨材添加水噴流

(Abrasive Water Jet; ABWJ)

加工の原理中、研磨効果を著しく高めるように工夫した水噴流がABWJ(一般には、アブレシブジェットと呼ばれる)である。STWJの中に研磨材を入れてやれば、この研磨効果を高めることができ、超高压でなくとも硬い物体を切削することができる。BHRAは1980年に研磨材自給式の $P_0 = 68.6$ MPaのABWJを実用化し[40]、続いて米国のFlow Sys-

tem社が245 MPaのABWJを開発[41]した。ABWJで大切なことは、水噴流のエネルギーを消耗させることなく、均一な研磨材・水混合噴流をつくることである。この観点からBHRAは、1986年に研磨材を水に均一に懸濁させたスラリーをノズルに直接加圧供給するDIAJET(Direct Injection Abrasive Jet)を開発した[42]。

ABWJには、3.4のほか、さらに次の特徴がある。

- 1) 金属、鉱物(岩石、コンクリート)、脆性・複合材料(ガラス・AFRP, CFRP, GFRP, FRM, FRC)および複合体(鉄筋コンクリート、制振鋼板、スチールタイヤ)などの切断が可能である。
- 2) 切断代が一般に大きくなる(1.5~3.0 mm)。
- 3) 上・下面切断幅が、ノズル送り速度により変わる(STWJでも同じ)ので、切断面の質を重視する場合は、最適送り速度を見いだす必要がある。

ABWJの最大の問題点は、ノズルの摩耗と研磨材使用による高い運転経費である。切断能力に影響を及ぼす因子としては、①研磨材の諸物性、②研磨材の供給量、③水噴流のエネルギー、④ノズル送り速度および⑤水噴流と研磨材との混合の良否などが挙げられる。研磨材としては珪砂、ガーネット、アルミナ、シリコンカーバイド、銅スラグおよび鑄鉄グリットなどが用いられている[43]。ABWJの切削機構に関する研究も多くなり、理論的なアプローチも試みられている[44, 45]。

4.4 空洞現象促進水噴流

(Cavitating Water Jet; CAWJ)

液体がノズル内を高速で流れたり、液体噴流が標的物体に衝突直後、高速の壁面噴流となり四方に流れるときには、そこで局部的に圧力が低下し、液体内に局所的に球形の蒸気相(気泡、空洞)が形成される(空洞現象)。この気泡が消滅する際に、大きな衝撃圧が発生したり、微細噴流が発生する。これらが固体壁面に壊食を生じさせる原因と考えられている。この現象は、固体表面と液流との相対速度が大きい個所や渦の中心および速度勾配の大きい剪断流れなどで発生する。ノズルでは、のど部壁面付近に発生し、のど部入口の形状によってその様子が著しく異なる。空洞現象によってノズル壁面が壊食を受けると、加工性能は著しく低下する[46]。STWJでは空洞現象が生じないような低速水噴流でも、特別に設計されたノズルを用いれば、その速度で空洞現象を生じさせ、加工・洗浄効率を向上させることがで

きる。Connら[47]は、自己共振により円環状の渦を連続的に発生させ、空洞現象を促進させる各種のノズルを、Yanaidaら[48]はホーン形のCAWJ用ノズルを開発した。Vijayら[49]はノズルの中にコマ状の物体を入れ、流れに剥離を起こさせている。空洞現象は、次式で定義されるキャビテーション係数 σ が0.6以下になると発生する([19]の13頁)。

$$\sigma = \frac{2(P_{\infty} - P_v)}{\rho V^2} \quad (4)$$

ここに、 P_{∞} および V_0 は代表点の静圧および流速、 P_v は蒸気圧である。

4.5 非定常水噴流(Unsteady Water Jet; USWJ)

STWJで加工効果が極大となる第2極大値 M_{12} が得られるスタンドオフ距離($X = X_m$)は、噴流が連続流領域から不連続液滴流領域に変わる部分であり、その理由も前述した。この X_m が小さい X で得られるように工夫した水噴流がUSWJである。周波数が比較的高いものを非定常水噴流あるいは断続水噴流(interrupted water jet)、低いものを脈動水噴流(pulsed water jet; PUWJ)または水噴流砲弾(water jet cannon; WJWC)と言う[5]。Nebeker[50]は、実験的にその破壊機構を考察している。Puchalaら[51]は、超音波発生装置で水噴流に圧力波を加え、噴流を水滴あるいは水スラグ流にするノズルを開発した。

4.6 脈動水噴流(PUWJ)

または砲弾状水噴流(WJWC)

高圧水噴流の連続的発生には、196 MPa[52]ないし245 MPa[53]程度までは多段プランジャーポンプ、それ以上400 MPa[52]ないし540 MPa[54]程度まではパスカルの原理による増圧機が、用いられている。さらに高圧の700 MPa級の増圧機の開発も進められている[52]がそれ以上の高圧連続噴流を上述の方法で得るのは困難で、ピストンによる衝撃[55]や液中火薬の爆発で、瞬間的に水柱を得る方法がとられる。本法で短時間ではあるが数千MPaの単発水噴流を得ることができる[11]。Watsonら[56]は、火薬の水中爆発によって $V = 9500$ m/sの超高速水噴流を得ている。

4.7 気層被覆水噴流(Air Coated Water Jet; ACWJ)

STWJは、水中では噴流の威力が距離 X および水深の増加と共に急激に減衰する[6]。八尋ら[8]は、

水中で有効射程を延ばせるACWJを考案した。圧縮空気を水噴流の噴射孔の周囲より、水噴流の速度の1/2以上の速度となるように噴射させて気層被覆を作る。静水圧 $P_{SUB} = 0.3$ MPaの水中で初期区を気層被覆のない場合に比べて約7倍に延ばした。Haferkampら[57]は、ABWJに本方法を採用し、 $P_{SUB} = 0.5$ MPaの水中で0.6～1.0 MPaの圧縮空気をを用いて気層被覆の効果を調べたが、 X/D_0 が小さい領域ではその効果はなく、 X/D_0 の増加と共に効果が現れた。しかし、切削深さは、 X/D_0 の増加と共に急激に小さくなった。それゆえ、空気被覆は P_{SUB} に敏感なので、水層被覆が有効であろうと述べている。

4.8 他具併用水噴流(Water Jet Assisted with Other Cutting Tool; WJAS)

硬岩用トンネル掘削機は、近年、著しく進歩し巨大化した。従って、これらの切削力の増大や機械の巨大化に対し、直接岩石を切削するビットは材質的に追従できず、莫大な消耗を招くに至った。硬岩切削のために生じた切削機の高出力、巨大化、高価格およびビットの損耗増大などを克服するために、高圧水噴流が機械的切削具と併用される動機となった[58]。切削効率は水噴流の噴射位置・方向の影響を受ける[59]。水中における金属材料の切断技術として、ノズル吐出し圧 $P_0 = 0.4 \sim 0.8$ MPaの水層被覆をアーク切断技術と併用した溶極式水噴流法が開発されている[60]。WJAS技術は石油井や地熱井の掘削の分野でも重要である[61]。Zhen-Fangら[62]は、自己共振形ノズルを採用し、従来形ノズルに比し15ないし50%掘進率を増加させた。

4.9 回転水噴流(Rotating Water Jet; ROWJ)および振動水噴流(Oscillating Water Jet; OSWJ)

STWJを噴射するノズルを同心あるいは偏心させて公転しながら標的物体に衝突させると、洗浄あるいは掘削効率が增加することが、Kolchanov & Severin[63]によって1959年に報告されている。同じく、STWJをノズルの移動方向あるいは移動方向に直交する方向に振動させることによって洗浄や切削効率が向上することが、Erdman-Jesnitzerら[64]およびVeltrup[65]によって1976年に明らかにされている。これらの水噴流は、近年コンクリートのはつり工法などに実用化されている[66]。

5. 研究開発の動向

最も伝統のある本技術に関する国際会議(ISJCT)に採択された国別論文数と過去11回(1992年まで)の全論文数から判断すると、研究開発が盛んな国はアメリカ、日本、イギリス、およびドイツの順となり、また本技術は年を追って各国へ普及していることが分かる[67]。ISJCTに採択された論文が取り扱っている水噴流の種類を各回会議別に調べると、第1回(1972)から第7回(1984)まではSTWJを扱った論文が最も多く、第8回ではWJAS、第9回(1988)、第10回(1990)[68]および第11回(1992)[69]ではABWJが最も多く、突出している。ABWJの論文は、第4回(1978)に初めて提出された。

第11回目のISJCTは、ICJCT[69]と改称されているが、以下に、最近の2回の会議で発表された論文の概要を紹介する。なお、< >内の数字は第10回[68]の論文番号、および< >内のイタリックの数字は第11回[69]の論文集の論文掲載頁を示す。

5.1 基礎的研究

5.1.1 噴流の特性

<37>は、噴流の脈動を減衰させるノズルの構造を検討し、<1>、<2>および<63>では、レーザー流速計を用いて速度を、<5>ではX線透過率計を用いて噴流内の水および研磨材の分布を測定して、ABWJの構造を調べている。<4>では、ノズル中心部から空気を吹込む環状噴流による鋼球の加速特性を理論的に検討している。<6>は、ノズル部混合型ABWJおよびDIAJETの研磨材の速度、エネルギー伝達効率およびエネルギー密度比などが研磨材供給量によってどのように変化するかを明らかにする理論式を導き、DIAJETはより高压で用いる方が有利であることを示している。<47>では研磨材添加超音速空気噴流を理論的に調べ、<101>ではABWJの半理論モデルを導いている。<295>は火薬推進水噴流の理論的研究である。<413>では水中STWJの特性を詳細に調べ、その成果をピーニングへ応用している。<577>では予混合ABWJへの各種パラメータの影響を調べている。

5.1.2 新ノズルの開発

<12>では、清水と研磨材をそれぞれノズル上流部の環状スリットおよびノズル中心部から供給する旋回流ノズルを、<15>では多孔質材料でノズルを作り、ノズルの内表面に清水膜を形成させ、研磨材による摩耗の防止方法を提案している。<13>では、

研磨材・水噴流混合ノズルの心合せを主水噴流ノズルの調整により、正確度を高め、切断寸法の精度を改善している。<21>は、装置設計の留意点を示している。<18>では研磨材添加超音速空気噴流の加工特性を実験的に調べている。<329>では、ファジー理論によるアプレシブノズルの交換時期の判定をオンラインで行うことを提案している。

5.1.3 新型超高压ポンプの開発

蓄圧器不要の小型・軽量・低価格ポンプを供給するために開発した、<305>では整相増圧機、および<319>では超高速タービンポンプを紹介している。

5.1.4 脆性壊食機構および切削特性

<3>ではSTWJの加工機構を材料疲労の観点から実験的に、<7>では亀裂ネットワークモデルを用いて脆性材料の壊食実験結果を理論的に説明している。<10>では、実験的に材料定数と各材料ごとの切断限界圧力を求め、任意の圧力およびノズル送り速度に対する切断深さの予測式を導いている。<11>では、DIAJETの噴射反力が理論値に近いことを指摘し、切断面の微視的観察結果から加工面はマイクロマシニングにより構成されていることを示している。ABWJ加工時の縞模様形成に対する、<17>は理論的および<593>は動力学的研究である。<483>では脆性材料に対する、<525>では延性材料に対する溝切りのモデル化が行われている。<555>ではABWJ旋盤加工のモデル化を行っている。

5.2 金属加工への応用研究

<347>では、ABWJ切削の他の切断方法に対する競争力を改善する方法を提案し、<605>ではABWJによる三次元加工、<621>ではABWJ加工中に形成されるバリについてそれぞれ検討している。<359>では、ABWJに回転運動を与えると孔あけ効率が改善されると報告している。<503>では研磨材の回収について論じている。<16>では、アモルファス金属箔の切断へABWJを適用すると、重ね合わせる(最高100枚)ことにより、打抜きプレスおよび放電加工などより良好な切削面が得られることを示している。<17>では、切断線に対して前進角およびテーパ補正角をとってノズルを送ると、従来の切断法に比較し3-4倍の速度で同一精度の加工ができると述べている。<25>では、アルミニウム、黄銅、銅、鋼およびチタンの切断に対する各種切削パ

ラメーターの影響を最大圧力900MPaまでの範囲で詳細に調べている。〈451〉では低圧力(35MPa)のDIAJET(PREMAJET)によるステンレスの切断を、〈543〉ではABWJによる蒸気タービン構成要素の切断を紹介している。

5.3 金属加工以外への応用

5.3.1 岩石などの切削

〈75〉では、CAWJの岩石切削への実用化について論じ、〈267〉ではOSWJによる花崗岩切削への各種因子の影響を調べている。〈233〉では、岩石の精密掘削と切削への低圧ABWJの効用について論じている。〈135〉では、岩石のABWJ切削における研磨材の形と粒度分布の変化の影響を調べている。〈28〉では、坑道掘進システムの開発を目的として、硬岩(砂岩、圧縮強度: 150 MPa)の切削特性に及ぼすABWJノズルの仕様、研磨材の種類およびその他の切削パラメータの影響を実験的に評価している。〈371〉では、硬岩の切削と掘削への鑄鉄グリット研磨材の適用について述べている。〈389〉は石油井掘削用ビットへのABWJ併用を検討している。〈32〉は、元ガス田および油田であった地層の上部石炭層を採掘するために、坑井ケーシングを安全に切断するシステムの開発について述べている。〈29〉では、原子炉解体にDIAJETを用いたときの汚染物質を極力減らすことを目的とし、少ない水量と研磨材で切削効率を高めることを検討している。〈255〉ではDIAJET利用土木工事における経済性の評価を論じ、〈281〉では、毒液で汚染された地層の回復工事へのDIAJETの適用について検討している。WJASに関する論文、〈123〉では切削具の理論的評価、〈217〉では切削具に対する水噴流の位置の重要性、および〈149〉では微粉炭量が少なくなる切削具について述べている。〈167〉、〈185〉および〈205〉は、WJASの坑内採炭機への適用を検討している。〈26〉では、600℃まで加熱した砂岩のSTWJによる切削実験を行い、切削深さと、岩石温度、岩石の力学的・熱的物性値ならびに切削パラメータとの関係式を導いている。

5.3.2 深い水中における切削

〈34〉は、海底における利用を目的として研磨材自給式ABWJおよびDIAJETによる水中切削実験を行い、前者では150 m水深で不可、後者では600 m水深下で切削可能であることを示している。〈36〉

では、〈34〉と同様の検討の他、ABWJの切削性に及ぼす空気被膜噴流の効果を調べている。〈37〉では、DIAJETは500 m水深下で有効であると述べている。

5.3.3 錆び取りおよびはつり

〈14〉は、旋回流型混合ノズルを用いたABWJの錆び取りへの応用について述べ、〈23〉では、路面の水の除去には作動液に不凍液(エチレングリコール)を添加すると除去効率が向上することを示している。〈461〉では、超高压STWJによる熱吹き付け被膜の除去、および〈405〉ではコンクリート表面処理について論じている。〈443〉では各種工場における洗浄例を紹介している。

6. おわりに

高压水の動的利用の一形態と位置付けられるウォータージェット技術の歴史、加工原理、分類と特徴および応用分野と研究開発の現状について概観させて頂いた。今後の展望および高温岩体やマグマからの抽熱技術開発の一環として著者らがやっている高压水噴流によるそれらへの掘削・切削に関する基礎研究などについては、本稿構成の不便からふれることができなかった。本技術についてより詳細な情報の入手を望む読者には、現在、上梓中の『ウォータージェット技術事典』〈67〉を参照されることをお勧めしたい。

参考文献

- [1] 蒔田董, 西原正夫編著:『高压流体技術』, 丸善, 1992年
- [2] 今中治: 機械の研究 26, 990-996(1974), “液体ジェット加工における諸問題”
- [3] R. Brown (ed.): Jet Cutting Technology - a review & bibliography, BHRA, 1982.
- [4] ムーチニク, イグナトフ編[外尾善次郎(訳)]:『水力採炭と水力輸送(上巻)』, 東京大学出版会, 1961年
- [5] 幾世橋広: 日本機械学会誌 90-829, 1487-1494 (1987), “ウォータージェット利用技術と最近の開発動向”
- [6] 幾世橋広, 京宗輔, 石浜渉: 日本機械学会誌 84-757, 1363-1369(1981), “地熱エネルギー資源としての高温岩体の利用技術”
- [7] 幾世橋広: ターボ機械 17, 747-752(1989), “ウ

- ータージェットの地熱抽出技術への応用－高温岩体・マグマの掘削および切削技術－”
- [8] 八尋暉夫, 吉田宏, 西謙治: 『ウォータージェットを利用した地下工法』, 鹿島出版会, 1983年
- [9] A.A.Fyall: Phil. Trans. Roy. Soc., A, **260**-1110, 161-167(1960), “Practical Aspects of Rain Erosion of Aircraft and Missiles.”
- [10] 今中治: ウォータージェット **1**, 4-15(1984), “ウォータージェット加工法開発の経緯”
- [11] 小林陵二: 日本機械学会論文集(B) **52**-483, 3645-3649(1986), “高速ウォータージェットによる固体材料の加工(研究展望)”
- [12] 小林陵二: ターボ機械 **17**, 674-680(1989), “ウォータージェット技術開発の現状と将来展望”
- [13] 西野良夫: Proc. Int. Symp. Water Jet Technology, Tokyo, III-1-III-25(1986), “高水圧を利用した金属粉末の製造技術と用途－アトマイズ加工について”
- [14] 広瀬四十三, 山形博信: ターボ機械 **17**, 737-746(1989), “ウォータージェットの加工, 洗浄分野への応用”
- [15] 小山内裕: 日本ウォータージェット学会第6回講演集, 140-146(1990), “汚染土壌の洗浄及びそのプラント”
- [16] 杉本大悟: ウォータージェット **5**, 2-6(1988), “ウォータージェットの半導体分野への応用－ICのバリとり装置について－”
- [17] 西坂剛: ターボ機械 **17**, 768-771(1989), “ウォータージェットの医療への応用”
- [18] 中谷正雄: ウォータージェット **7**, 1-14(1990), “食品への高圧利用技術”
- [19] 中央労働災害防止協会編: 『ウォータージェット加工機の安全対策に関する調査研究委員会報告書』, 中央労働災害防止協会, 1991年
- [20] 片倉寛, 山根隆一郎: ターボ機械 **17**, 714-718(1989), “ウォータージェットの危険性について”
- [21] C.A.Richardson, W.A.Thornton: Jet Cutting Technology - A Bibliography, BHRA, 1973.
- [22] R.Higgingbotham(ed.): Jet Cutting & Cleaning Bibliography, BHRA, 1988.
- [23] ISWJT: International Journal of Water Jet Technology, **1**,(1990).
- [24] 日本ウォータージェット学会用語小委員会編: 『ウォータージェット用語集』, 日本ウォータージェット学会, 1988年
- [25] 日本ウォータージェット学会用語小委員会編: 『ウォータージェット用語解説集(その1)』, 『同(その2)』, 日本ウォータージェット学会, 1991年, 1992年
- [26] 柳井田勝哉, 大橋昭: 日本鉱業会誌 **93**-1073, 489-494(1977), “気中高速水噴流特性に関する研究－霧化液滴領域について(第2報)”
- [27] 日本流体力学会編: 『流体力学ハンドブック』, 丸善, 1987年
- [28] 幾世橋広: REFORM, 1993年3月号, 21-29(1993), “総論: ウォータージェット洗浄(表面処理)工法の現況と分類”
- [29] H.Murai, S.Nishi: Proc. 5th American Water Jet Conf., 67-98(1989), “Structure of Water Jet and Erosion of Materials.”
- [30] H.Kiyohashi, M.Kyo, M.Shinkawa, W.Ishihama: The Technology Report of the Tohoku University, **45**, 137-168(1980), “Effect of Rock-Temperature and Standoff Distance on Water Jet Drilling Performance for an Imitation Hot Dry Rock.”
- [31] 柳内拙郎: ウォータージェット **5**, 25-46(1988), “なぜウォータージェットで物が切れるか”
- [32] 幾世橋広, 木下豊弘: 『気液界面の高速流動に関する調査研究分科会成果報告書』, 110-123(1979), 日本機械学会, “噴射切さく, 破碎および洗浄”
- [33] 小林良二: ウォータージェット **1**, 16-22(1984), “アプレシブ・ジェットによる鉄材の切断について”
- [34] 松木浩二: ウォータージェット **6**, 56-68(1989), “ウォータージェットによる岩石の切削機構について”
- [35] K.Uranishi: Proc. 9th ISJCT(International Symposium on Jet Cutting Technology), 479-494(1988), BHRA, “Effect of Superheat on High Speed Water Jet.”
- [36] 木下豊弘: 日本機械学会誌 **76**-649, 128-137(1973), “高速液噴流技術とその応用”
- [37] 杉野芳宏, 柳内拙郎, 山形博信: 精密工学会誌 **52**, 968-971(1986), “ウォータージェット加工機の開発動向”
- [38] 広瀬四十三: ニューセラミック **3**, 81-87(1990), “アプレシブウォータージェットによる難削材加工”
- [39] N.C. Franz: Proc. 3rd ISJCT, 67-75(1976), BHRA, “The Interaction of Fluid Additives and Standoff Distance in Fluid Jet Cutting.”
- [40] R.E.P.Barton, D.Saunders: Proc. 6th

- ISJCT, 489-501(1982), "Water/Abrasive Jet Cutting of Concrete and Reinforced Concrete."
- [41] M.Hashish: Proc. 6th ISJCT, 447-464 & 465-487(1982), BIIRA, "The Application of Abrasive Jets to Concrete Cutting." & "Steel Cutting with Abrasive Water Jets."
- [42] R.M.Fairhurst, R.A.Heron, D.H.Saunders: Proc. 8th ISJCT, 395-402(1986), BHRA, "'DI-AJET' - A New Abrasive Water Jet Cutting Technique."
- [43] 中谷正雄, 佐竹修一: ウォータージェット 1, 14-22(1984), "アブレーシブウォータージェット"
- [44] M.Hashish: J. Eng. Materials and Technology, Trans. ASME, 106, 80-100(1984), "A Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive Water - Jets."
- [45] M.Hashish: J. Eng. Materials and Technology, Trans. ASME, 111, 221-228(1989), "Pressure Effects in Abrasive - Waterjet(AWJ) Machining."
- [46] 小林陵二: ウォータージェット 1, 1-13(1984), "キャビテーション"
- [47] A.F.Conn, V.E.Johnson, G.L.Chahine, G.S.Frederick, W.T.Lindenmuth: Proc. 7th ISJCT, 1-12(1984), BHRA, "Some Unusual Applications for Cavitating Water Jets."
- [48] K.Yanaida, M.Nakaya, K.Eda, N.Nishida: Proc. 3rd U.S. Water Jet Conference, 336-349(1985), "Water Jet Cavitation Performance of Submerged Horn Shaped Nozzles."
- [49] M.M.Vijay, C.Zou, S.Tavoularis: Proc. 10th ISJCT, 37-67(1990), BHRG, "Study of the Characteristics of Cavitating Water Jets by Photography and Erosion."
- [50] E.B.Nebeker: Proc. 7th ISJCT, 51-68(1984), BHRA, "Potential and Problems of Rapidly Pulsing Water Jets."
- [51] R.J.Puchala, M.M.Vijay: Proc. 7th ISJCT, 69-82(1984), BHRA, "Study of an Ultrasonically Generated Cavitating or Interrupted Jet: Aspect of Design."
- [52] 山形博信, 広瀬四十三, 高見邦英: 資源・素材'90 (つくば) 分科研究会資料[Q], 資源・素材学会, 27-30(1990), "高圧ウォータージェットポンプの過去・現状及び将来 - 高圧三連プランジャポンプと超高圧増圧機形ポンプ -"
- [53] カタログ "IIAMMELMANN, High Pressure Pump Series HDP 450", HAM8 4-9-88 stuengl.
- [54] カタログ『超高圧ウォータージェット』若月技研(株), (1989).
- [55] L.L.Pater: Proc. 7th ISJCT, 83-90(1984), BHRA, "Experiments with a Cumulation Pulsed Jet Device."
- [56] A.J.Watson, A.J.Moxon: Proc. 3rd U.S. Water Jet Conference, 145-159(1985), "Ultra High Velocity Water Jets."
- [57] H.Haferkamp, H.Louis, G.Meier: Proc. 10th ISJCT, 512-523(1990), BHRA, "Deep-Sea Application of Abrasive Water Jets: Feasibilities and Limitations."
- [58] 藤田輝繁: ウォータージェット 2, 1-13(1985), "高圧水ジェット併用による自由断面トンネル掘削機"
- [59] E.D.Thimons, K.Nienhaus, H.Wiegelt: Proc. 8th ISJCT, 79-92(1986), BHRA, "The Development of a Water - Jet - Assisted Shearer Loader."
- [60] 小川洋司, 住友敬: ウォータージェット 7, 9-18(1990), "水中切断技術の研究開発(その2)"
- [61] C.Bardin, H.Cholet: Proc. 7th ISJCT, 33-50(1984), BHRA, "Jet - Assisted Oil Drilling."
- [62] L.Zhen-Fang, T.Chuan-Lin, W.Guang-Hui: Proc. 10th ISJCT, 135-144(1990), BHRG, "A New Type of Nozzle for Oil Well Drill Bits."
- [63] V.D.Kolchanov, L.P.Severin: Zap. LGI (Leningrad Gornyi Institute, Zapiski), 41, 81-87(1959), "Breaking Materials with a Rotating Jet of Water." (ロシア語)
- [64] F.Erdmann-Jesnitzer, A.M.Hassan, H.Louis: Proc. 3rd ISJCT, C3-27-C3-47(1976), BHRA, "A study of the Oscillations Effects on the Cleaning and Cutting Efficiency of High Speed Water Jet."
- [65] E.M.Veltrup: Proc. 3rd ISJCT, C1-1-C1-13(1976), BHRA, "Application of Oscillating Nozzles for Cutting and Cleaning."
- [66] 清水明男: ウォータージェット技術に関する国際シンポジウム論文集, 2-17(1993), 日本ウォータージェット学会, "建設業におけるウォータージェット技術の利用"
- [67] 幾世橋広: 『ウォータージェット技術事典』, 日本ウォータージェット学会編, 丸善, 1993年(10月刊行予定)
- [68] D.Saunders(ed): Jet Cutting Technology (Proc. 10th ISJCT, BHRG, 1990), Elsevier Applied Science, 1991.
- [69] A.Lichtarowicz(ed): Jet Cutting Technol (Proc. 11th Inter. Conf., 1992), Kluwer Academic Publishers, 1992.

〔1993年7月28日受理〕