- 9) Coherent Radiation Laboratories, CO² "Application" (1970)
- 10) E. V. Locke, E. D. Hoag and R. A. Hella: "Deep Penetration Welding with High-Power CO₂ Lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-8, No. 2 (1972); E. V. Locke and R. A. Hella: "Metal Processing with a High Power CO₂ Laser", IEEE/OSA Conference on Laser Engineering and Applications, 1973
- 11) T. A. Osial: "The Laser Today, Tomorrow and Later", Westinghouse Research Lab. Scientific Paper 67-ICI-INLAS-P2 (1967)
- 12) Y. Arata and I. Miyamoto: "Processing Mechanism of High Power Density Beam", Transactions of JWRI, Vol. 2, No. 2 (1973)
- 13) J. P. Carstens and C. O. Brown: "Rock Cutting by Laser", 46th Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME (1971)

高速の液体ジェットによる切断*

今 中 治**

Cutting with High-Velocity Liquid Jets*

by Osamu Imanaka**

1. はじめに

ここに述べようとする液体ジェット加工 (Liquid Jet Machining) とは、直径が 0.1 mm オーダで速度が空中音速の数倍の液体ジェット (液体は主として水) を用いて、材料に比較的微細な切断か穴あけまたは破砕などの除去加工を行なおうとする新しい形式の噴射加工法である。この液体ジェット加工 (以下LJM と略記する) について、電子技術総合研究所における研究結果をもとに、加工装置の原理、切断特性、加工機構のあらましを紹介し、本加工法の特徴、適用が予想される分野について解説する。

なお、研究初期の考え方とか、ある時点までの研究概要については、既発表の文献¹⁻¹⁹⁾をあわせ参照されたい。

2. 液体ジェット加工の開発現況

航空機の雨食 (rain erosion) 現象に着想を得て、筆者らが LJM の開発に着手したのは、昭和34年のことであった。そして加工実験装置 1号機の試作を終えたのが昭和37年の暮れであった。つづいて 2号機を昭和40年度に、3号機を昭和43年度に完成した。この3号機で吐出圧力は 10 kbar (約10,000 kg/cm²) に達することができた。

ところで、「高速の液体を利用して固體材料の加工ができないだろうか」という考え、つまり高速の液体のもつエネルギーを加工エネルギーとして利用しようとする発想は、アメリカ、イギリス、ソビエトなどでも生まれており、それぞれ独立に研究が進められて、1970年ごろにはプロトタイプの実用機も出現するにいたった。この機運をとらえて、1972年4月に "Jet Cutting Technology" に関する第1回国際シンポジウム²⁰⁾が開催された。

本シンポジウムは、British Hydromechanics Research Association (BHRA) の主催により、イギリスの Warwick 大学で行なわれたものである。提出論文は35編であり、図1(a)に示すように、アメリカ、イギリス、日本、カナダ、ソビエト、アイルランドの6カ国にわたっている。発表者の所属としては、大学、国公立研究所などの公的機関に属するものが60%強で、私企業は40%弱という割合である。

内容としては、図1(b)に示す7つのセッションに分けて発表されたが、岩石掘削に関するものが9編でもっとも多く、ジェットの流体力学など基礎的事項に関するもの (その他の応用) が7編ずつで、岩石掘削に次ぐ²¹⁾ちなみに、わが国から提出されたのは "岩石掘削" 3編²²⁾、"その他の応用" 1編²³⁾である。本シンポジウムの概要は、出席者の1人である浜田²⁴⁾によってまとめられているが、参加者は14カ国192名におよんでいる。

* 原稿受付 昭和49年4月18日

** 電子技術総合研究所 Electrotechnical Laboratory

図1 Jet Cutting Technology に関する第1回国際シンポジウムへの提出論文数

この盛況に鑑み、第2回の国際シンポジウムが1974年4月にイギリスの Cambridge の St. John's College で開催された。これについては、正式の Proceedings の刊行をまって、別の機会に紹介する予定であるので、西ドイツ、フランスからも提出論文があったことを付記するにとどめる。

3. 加工装置の原理

LJM の方式には、連続ジェット方式とパルスジェット方式の2つが考えられるが、普通の切断加工には前者のほうが適当である。筆者らの実験装置（3号機）の原理は図2に示すとおりで、増圧機によって加圧した液体を

ノズルから噴出させる方式を探っている。これでは単動形の増圧機を用いているが、実用機としては、図3²⁵⁾に例示するような複動形のものを使うのが普通である。

図3 複動形増圧機方式のジェット発生装置 (Kee, Kurko)

なお、液体ジェットを得るには上記以外の方式も考えられ、それらをまとめると表1のようになる²⁶⁾。表の水圧ポンプ方式では、得られる圧力は最高 2 kbar 程度であり、これ以上の圧力を望むときには、増圧機方式によらなければならない。増圧機方式でも、液体の固化、シリンダもしくはピストンの破壊、パッキンからの液体の漏れなどのため、得られる圧力の限界は 30 kbar 程度と考えられている。ちなみに、前述の国際シンポジウムで発表された装置は、わが国のものを除くと、最高 7 kbar であった。

パルスジェットの場合、ジェットの持続時間が短いので、瞬間のエネルギーを高くできる利点はある。しかし、装置の設計が複雑であり、また衝撃的な力がかか

図2 LJM 実験装置の原理 (電総研)

表1 液体ジェットの発生方式

連続ジェット	水圧ポンプ方式	
	増圧機方式(図2, 図3)	
パルスジェット	衝撃圧方式	ピストン衝撃による方式
		液中放電・液中爆発による方式
	Munroe 効果を利用した方式	ジェットの外部加速による方式
		環状空洞による蓄圧方式

るので装置寿命が短いという欠点をもつ。パルスジェットは岩石などの破碎には有利な面をもつが、一般の切断作業には連続ジェットを用いるのが普通である。

4. 液体ジェットの特性

本加工法に用いる液体は主として水であるが、常温常圧の水の等エントロピー線が水の状態図(図4²⁷⁾)の固相線と交わるのは、約 9 kbar においてであり、0°C の水のそれは約 7 kbar である。したがって、水を加工液として使用する場合は吐出圧力は、7 kbar 以下に選ぶのが安全である。しかし、加工の可能性の限界を検討するため、筆者らの装置は常用 10 kbar までの加圧ができるようになっているので、加工液としては、グリセリンを重量比で 1 : 1 に混合した水 (20°C における密度 1.13 g/cm³) を使用している。

図4 水の状態図 (Kohlrausch)

ところで、液体ジェットの平均衝撃力 F (試料保持台につけた弾性リングと抵抗線ひずみゲージで測定) とジェットの速度 U (増圧機ピストンの行路線図と F とから計算) は図5に示すようである。 U は高圧セル内の圧力 P のほぼ $\frac{1}{2}$ 乗に比例し、Bernoulli の式によるノズル出口での流出速度の理論値 U_{th} とほとんど同一の傾向をもっている。そして P が 10 kbar のとき、 U は 1300 m/s に達している。

図中には、 $\frac{1}{2} \cdot \rho a U^3$ (ρ : 液の密度、 a : ジェットの断面積) で計算したジェットのエネルギーレートをもあわせ記してある。なお、エネルギーレート密度、すなわち加工面単位面積あたり単位時間に供給される加工エネルギーは

図5 液体ジェットの特性

$\frac{1}{2} \cdot \rho U^3$ で計算できるが、10 kbar の P に対応するそれは約 $1.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ となり、レーザ加工のそれに匹敵するものである。

4. 切断特性

以下に筆者らによる実験結果を例示して、LJM による切断特性を述べよう。まず、ノズル出口と加工物表面との距離 L および加工物送り速度 v を一定にして、吐出圧力 P を変えたジェットを各種材料に垂直噴射した場合の切断深さ l は、図6に示すとおりである。各材料の比体積除去エネルギー (単位体積を除去するに要する加工エネルギー) w を計算すると、図の条件では、 w は $3.4 \times 10^5 \text{ J/cm}^3$ (ゴム) から $3.8 \times 10^7 \text{ J/cm}^3$ (硬鋼) の範囲にある。

このように材料によって切断特性は大きく変化する

図6 各種材料の切断深さ

が、同一加工物であっても、切断条件が異なれば切断特性もまた変わってくる。たとえば v の影響については、 v が大きくなるほど l が小さくなることはいうまでもない。しかし、単位切断長さ当たりの供給エネルギーが材料によってきま一定値以上のときには、 v のある範囲では、 v が大きいほど単位時間当たりの切断面積は大きくなる。実験結果の一例は図7のとおりで、この範囲では l は v^n にほぼ比例し、 $-1 < n < 0$ である。単位時間当たりの切断面積は $l \cdot v$ で計算できるが、この条件下では v が大きくなるほど $l \cdot v$ も大きいことがわかる。

ノズル口径 d_0 については、他の条件が一定であれば、 l はほぼ $d_0^{1.5}$ に比例して増加し、切口の幅は d_0 に比例するとみてよい。 L については d_0 との関連で考え

図7 加工物送り速度と切断深さ

$d_0 = 0.10\text{mm}$
 $P = 10.0\text{kbar}$
 $v = 0.4\text{mm/s}$

写真1 鋼の切断痕断面

なければならないが、 L/d_0 が大きくなると、ジェット
の形が崩れるために、 l が小さくなるとともに、加工物
上面の切口の幅が広がる。

切断精度を示す一例として、鋼($H_v=174$)の切断痕
について、加工物送り方向に垂直な断面を写真1に掲げ
る。

5. 加工機構

対象とする材料の性質によって破壊・変形の様相が異
なるため、その加工機構も一般則をもって律することは
困難である。しかし、加工の進行に、噴流の動圧作用と
か、断続液塊あるいは液滴による衝撃作用が、重要な役
割を果たすことは事実である。ある種の延性材料に対し
ては、加工物に直接衝突するジェットの作用に加えて、
衝突後に加工面に沿って流れる液流のせん断作用も無視
できない。この作用は、固体工具による加工では見られ
ないものである。また加工面には、繰り返し衝撃による
疲れ破壊のあとが認められることも事実である。

引張り破壊を起こしやすいぜい性材料では、つぎの諸
点も考えに入れなければならない。すなわち、衝撃点か
ら放射状に伝播した圧縮波は、材料内部に空間欠陥とか
密度急変部分が存在すると、それらを反射面として引張
波となる。これによって誘起された引張応力が材料の引
張強さよりも大きければ、破壊が生じるわけである。

また、圧縮波とせん断波とにまたがって形成される
von Schmidt の波頭によるせん断応力の作用も考えら
れる。そして、ぜい性材料においては、クラックが生じ
ると、クラック内にはいった液の圧力によるくさび作用
も無視できない。

これらのほかに、キャビテーション効果が材料破壊に
重要な役割を果たすことも考えられる。

6. LJM の特徴と問題点

これまでに述べたことからわかるように、LJM は高
エネルギー密度の新しい加工法として興味深いもので
ある。以下に LJM の利点を列記してみよう。

まず、高エネルギー密度ではあるが細いノズルを
用いるときには、所要動力はそれほど大きくなくてもよ
く、加工物に作用する力も小さい。加工力が小さいこと
は、軟質材料とか変形しやすい構造の加工物（たとえば
段ボールなど）の加工に対して有利である。そして、加
工力が一方向だけに働いて、横分力のないことも特徴の
1つである。また、細いジェットを用いることは、加工
しろが小さいことにもなる。

加工物に直接接触する工具を用いないで、加工エネル
ギを液体ジェットを媒体として与えるため、フレキシブ

ルな加工が可能である。たとえば、ならい切断とか NC
切断を考える場合、ノズルの加工に留意して、噴射方向
に直角な断面形状が対称であるようなジェットを用いる
と、途中の切断経路に無関係に均一な切口が得られるわ
けで、それが、バイト、カッタ、砥石などを用いる在来
法に比べて有利な点である。

そして、切断を加工物の任意の箇所から開始でき、任
意の点で終われることも重要な利点と考えられる。不規
則な表面形状の加工物への適用も可能である。たとえ
ば、図8のような波板を複雑な輪郭に切抜く作業などに
使えるわけである。

図8 LJMによる波形の切断

液体を用いての加工であるため、副資材の管理が容易
である。加工液として一般に水を用いるのであるから、
副資材費はきわめて安くなる。また、その使用量もわず
かである（ジェットの太さ、速さをそれぞれ $0.1\text{mm}\phi$ 、
 1000m/s とした場合、液の使用量は 28l/h 程度であ
る）。

液体のもつ各種作用（たとえば化学作用、溶解作用、
冷却作用、運搬作用など）を力学的作用に複合して利用
できる。流量がある程度大きければ、加工と同時にチッ
プを排除して、洗浄作用を兼ねさせることができるので
ある。粉塵をきらう作業に適用して効果のあることはい
うまでもない。

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る。有毒性のガスを発生する作業
に対しても同様である。これとは別の機構に基づくこと
ではあるが、噴射距離が延びるとジェットが微粒化する
ことも、作業の安全性を保証する利点と考えられよう。

ところで、加工しろの小さいことを本節のはじめに述
べたが、同様の特徴をもつ電子ビーム加工 (EBM) とか
レーザ加工 (LBM) などの新しい加工法との比較をする
と、つぎようになる。

第一の相違点は、本質的に熱加工である EBM とか
LBM に比べて、LJM では加工点温度が格段に低いこと
である。したがって LJM は、熱に敏感な材料に対して

とか、爆発性雰囲気中においても適用が可能である。

供給エネルギーについては、LJM では吐出圧力 P とノズル口径 d_0 によって制約されるだけで、原理的には P をさらに増大することも可能であり、ポンプ容量の増大によって d_0 を大きくすることは、より容易である。すなわち、加工エネルギーの増大は容易であり、加工エネルギー密度を向上する余地もあるわけである。加工効率とはかくとして、加工能率の増大だけが問題になるときには、その解決策はあるわけである。これに反して、EBM, LBM などにおいては、達成できる加工エネルギーに制約がある²⁸⁾ことも事実である。

以上が、EBM, LBM に対して LBM がもつと考えられる利点であるが、LJM がオールマイティというわけではなく、加工の微細さの点では劣ることは否めない。それぞれがそれぞれの適した分野において、長所をさらに延ばすように用いられることはいうまでもない。

さてここで、LJM の欠点とか問題点についても触れておこう。LJM の欠点としては、エネルギー効率は必ずしも高くなくことが第一にあげられる。しかし、上に述べたように、エネルギー効率を犠牲にしても加工能率を上げたい場合もあるはずである。また、動力費が生産コストの中で占めるウェイトは、それほど高くはないのが普通である。したがって、これが致命的な欠点となるとは考えにくい。

つぎに、液体を使うということは、液体と加工物材料の性質によっては、濡れが問題になることもある。が、裏面まで貫通した完全切断の場合には、加工物に残留した液量はそれほど多くはない。むしろ貫通後のジェットが何かに衝突して生じる飛沫のほうが目立つ程度である。上記の残留液量を少なくするためには、 P を高めて v を上げるとよい。濡れ程度を小さくするには、加工液である水に、ある種の水溶性長鎖状高分子を添加することも効果的である²⁹⁾。

そして問題点として、作業室が高湿度になること、噴霧の生成によって加工点付近の視界が狭くなることも考えられる。しかしこれは、ダクトの設置、その他によって、ある程度解決できることである。

また騒音については、まったく無音とはいいいくいが、液体ジェットそのものの音圧はかなり低いと考えてもよい。ジェットを空気中に自由噴射するときには、ある程度の音圧に達することは事実であるが、加工物に当たって切断が進むと音圧は低くなる。また、発生する音のほとんどは油圧装置に由来する。音が問題になるときには、油圧装置を隔離・配管して、圧油だけを加工機本体まで運ぶのも一策であろう。

7. 適用が予想される分野

LJM はようやく実用化され始めたという段階にあるため、現在の時点で適用分野を確言することはむずかしい。しかし、図1からもわかるように、土木建設の分野での適用が真剣に考えられていることは確かである。

本特集の切断では、前節に述べた特徴を生かすかたちの作業、なかでも比較的軟質の有機材料への適用が早い時期に実現するものと予想される。たとえば、ゴム、木材、食品、皮革、プラスチック（発泡材を含む）、布、紙製品（段ボールを含む）、コルク、炭素製品などである。アスベストセメント、煉瓦などの無機材料への適用も可能である。

金属材料に対しては、軟質の薄板とかハニカム構造のものは例外として、あまり広くは用いられないのではなかろうか。

8. おわりに

いわゆる新しい加工法もしくは特殊加工法 (Unconventional Machining, Nontraditional Machining) は、LJM が航空機の雨食現象を発端として開発されたように、往々にしてトラブルを逆用して生まれることが多い。これが実用化されるには、在来加工法では加工の困難な材料を加工できるとか、微細加工もしくは高精度加工、高能率加工が可能であるとかの特徴をもつ必要がある。したがって、特殊加工は在来加工法に置き換わるものではなく、オールマイティでもない。在来加工が達成できない分野で、その威力を発揮するものである (図9)。新しい加工法の実用にあって留意すべきことである。

図9 特殊加工の適合分野

それと同時に、新しいものが現われたとき、その短所だけが強調されて、その長所を取りあげる余裕の示されないのも世の常である。ある時点で新しいというもの、は、その時点では当然、未完成であることを意味する。

利点よりは欠点が目立つわけである。未来への発展性よりも現在のひ弱さが気になるのである。この辺をもご賢察のうえ、今後のご教示、ご協力をお願いして筆をおく。

文 献

- 1) 今中治：高速の液体で加工ができるか(1)―高速の液体による材料の破壊―，機械工作，10—61 (1963)，39
- 2) 今中治：同上(2)―雨食現象に関する解析ならびに固体衝撃と液体衝撃との関連―，同上，10—62 (1963)，75
- 3) 今中治：同上(3)―液体の微粒化現象―，同上，10—64 (1963)，41
- 4) 今中治：ガラス精密加工の手引(8)―液体衝撃加工―，工業材料，11—10 (1963)，97
- 5) 今中治：液体衝撃加工，電試ニュース，No. 162 (1963)，1
- 6) 今中治：高速液体ジェット加工の実験はじまる，同上，No. 194 (1966)，1
- 7) 今中治：高速液体ジェット加工の実験すむ，同上，No. 225 (1968)，1
- 8) 今中，藤野，篠原：高速液体ジェット加工法，その現状と展望，金属，38—1 (1968)，40
- 9) 今中，藤野，篠原：高速液体ジェット加工法の進歩と可能性，金属 38—21 (1968)，71
- 10) 今中治：水を利用した新しい加工技術，応用機械工学，9—1 (1968)，113
- 11) O. Imanaka, S. Fujino and K. Shinohara: Application of High-Velocity Liquid Jets to Machining, Bull. Japan Soc. Precision Engg., 3-4 (1969), 97
- 12) 今中，藤野，篠原：高速の液体ジェットによる材料加工とその応用，金属材料，9—8 (1969)，8
- 13) 今中，藤野，篠原，川手：高速液体ジェットの加工への活用，マシナリー，33—498 (1970)，1
- 14) 今中治：無機材料の精密加工法，(33)ガラスの噴射加工(その3)，機械の研究，22—5 (1970)，759
- 15) 今中治：液体ジェット加工法，材料加工，1—3 (1971)，43
- 16) 今中治：高速液体ジェット加工，セラミックス，6—10 (1971) 783
- 17) 今中治：高速の液体ジェットによる加工(1)―各種材料の加工特性―，木工機械，No. 53 (1972)，9
- 18) 今中，藤野，篠原，川手：同上(2)―木材の切断特性―，同上，No. 54 (1972)，5
- 19) 今中治：同上(3)―内外の動向と今後の問題点―，同上，No. 55 (1972)，5
- 20) T. Kinoshita, K. Hoshino and K. Takagi: Rock Breaking with Continuous High Speed Water Jet Stream, Proc. 1st Intern Symp. Jet. Cutting Techn. (1st I. S. J. C. T.), BHRA, (1972), B2
- 21) K. Matsumoto, H. Hamada, T. Fukuda and A. Shizyo: High Pressure Jet Cutting, ibid., B4
- 22) K. Hoshino, T. Nagano and H. Tsuchishima: Rock Cutting and Breaking Using High Speed Water Jets Together with "TBM" Cutters, ibid., B6
- 23) O. Imanaka, K. Shinohara and Y. Kawate: Experimental Study of Machining Characteristics by Liquid Jets of High Power Density up to 10^8 W cm⁻², ibid., G3
- 24) 浜田秀夫: Jet Cutting Technology に関する第一回国際シンポジウムに出席して，精密機械，38—11 (1972)，890
- 25) W.R. Kee and M.C. Kurko: Development of a Jet Cutting Machine System, Proc. 1st I. S. J. C. T., BHRA, (1972), G5
- 26) 木下豊弘：高速液噴流技術とその応用，日本機械学会誌，76—649 (1973)，128
- 27) F. Kohlrausch (久保用，ほか監訳)：実験物理学，別巻，物理定数表・他，商工出版，(1957)，58
- 28) Anon.: Wt. Bb., 104—12 (1971)，975
- 29) N.C. Franz: Fluid Additives for Improving High Velocity Jet Cutting, Proc. 1st I. S. J. C. T., BHRA, (1972), A7