

アブレシブウォータージェット用ノズル内の高速混相流の特性*

(第2報, 運動量計測による固気液混相流の出口速度と相速度分布の実験的把握)

原島 謙 一*¹, 岩 瀧 牧 男*²
奥 井 健 一*², 島 田 邦 雄*²

Hydrodynamics Characteristics of High Speed Multi-Phase Flow in AWJ Nozzles

(2nd Report, Measurement of Exit Phase-Velocities and Velocity Change in Nozzles)

Ken-ichi HARASHIMA, Makio IWABUCHI,
Ken-ichi OKUI and Kunio SHIMADA

The experimental results on the abrasive water jet (AWJ) are described in this paper. AWJ is the high-speed water jet containing solid particles and is used for cutting of various industrial materials. In order to obtain the velocities of solid, gas and liquid phases at the mixing nozzle exit, the momentum of jet was measured. Phase velocity distribution in the axial direction of jet was also estimated based on the measured pressure distribution in the AWJ nozzle with the aid of the continuous and the momentum equations. The result shows that the decrease of the liquid-phase velocity in the mixing nozzle is small in the case of the gas-liquid two-phase flow, and the velocity of liquid phase is remarkably reduced on the contrary in the gas-liquid-solid three-phase flow. In the latter case, the total momentum of jet is reduced comparing with two-phase flow. It is also found that the mean velocity of solid particles at the mixing nozzle exit is about 30% of the velocity of liquid phase.

Key Words: Jet, Multi-phase Flow, Nozzle, Pressure Distribution, Velocity Distribution, Momentum Theory, Abrasive Water Jet, Cutting, Shock Wave

1. 緒 言

アブレシブウォータージェット (AWJ) 加工は, 高速水噴流に研磨材を混入させて, 研磨材のもつ切削性を利用して, ウォータージェットの切断効果を高めた加工法である. この加工法に使用する AWJ ノズル全体の構造は, 図1に示すように, ウォーターノズル, ミキシングスロート, レデューサー, ミキシングノズルで構成されている. 一方, AWJ 加工の操作条件, すなわち, 噴射圧力・ノズル各部の寸法・切断対象までの距離 (スタンドオフ距離) ・研磨材流量などの切断パラメータは経験的に確立されている⁽¹⁾⁽²⁾. しかし, その最適条件を見いだし, 加工技術をさらに高精度化するためには, これまでのような各切断パラメータと壊食量を評価するだけでは不十分である. このため, 著者らは噴流の特性を支配する AWJ ノズル内高速混相流の流動状態解明のための一連の研究, すなわち, 出口運動量と AWJ ノズル内圧力分布の測定結果をもとに, 運動量理論による流動

状況予測手法の確立を目的に研究を進めている. この論文は, 第1報⁽³⁾に続いて, 高速水噴流が, 空気および固体粒子を加速する際の, 固気液混相流の AWJ ノズル出口相速度とノズル内部圧力分布の測定結果, およびそれから推定されるノズル内部の相速度分布と固気の加速の状況について述べたものである.

AWJ ノズルからでた後の噴流および粒子速度については, これまでに数多くの結果が報告されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾が, ノズル内での混相流速の変化を各相について定量的に示したものは少ない. しかし, 固体粒子速度は AWJ ノズル内部の流動状態によって決まると考えられ, その

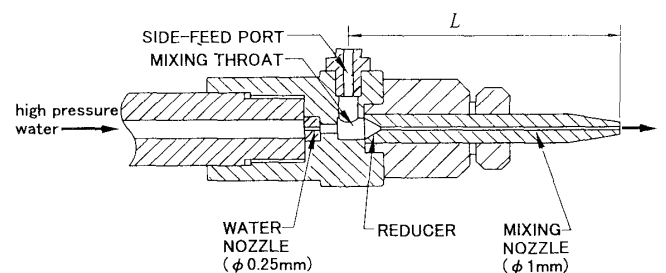


Fig.1 AWJ Nozzle

* 原稿受付 1998年10月9日.

*¹ 正員, (株)スギノマシン装置設計部(☎936-8577 滑川市栗山2880).

*² 正員, 富山大学工学部(☎930-8555 富山市五福3190).

E-mail: msououka@sugino-machine.co.jp

支配因子を明らかにしておくことは、切断に最適な噴流操作条件を知る上で欠かせない。AWJ ノズル内の各相速度を直接測定することは実際上困難であるが、ノズル出口相速度とノズル内圧力分布の測定結果をもとに、運動量理論から内部の分布を推定することは可能である。

従来、噴流や粒子速度の測定にはLDV (Laser Doppler Velocimeter)⁽⁶⁾、LTA (Laser Transit Anemometer)⁽⁷⁾など光学系を用いた例が多く報告されている。しかし、AWJの場合、測定対象が小さいため、特に固体粒子速度の結果に対する信頼性は十分であるとはいえない。また、噴射による圧力(動圧)を圧電素子により測定し、速度に換算する方法⁽⁸⁾は、スタンドオフ距離により動圧が極端に変化することと、噴流の断面積の判定次第で運動量が異なるなどの難点がある。

このため本研究では、噴射時の反力を直接測定することにより、ミキシングノズル出口直後の運動量を求め、その値をもとに次元運動量理論から各相の噴射速度を算出することを試みた。この方法は測定が単純で、かつ、スタンドオフ距離の影響を無視できる利点がある。

2. 記号説明

A : 流路断面積	u : 断面平均相速度
L : 固気入口からの距離	W : 質量流量
P : 噴流から受ける力	ϕ : 体積流量比 $=Q/Q_L$
p : 圧力	σ : スリップ比 $=u/u_L$
Q : 体積流量	ψ : 無次元圧力 $=p/p_0$
添字 G : 気相 L : 液相 S : 固相(研磨材)	
e : ミキシングノズル出口	m : ミキシングノズル
n : ウォーターノズル	0 : 基準圧力(大気圧)

3. ミキシングノズル出口の噴流運動量の測定方法

3.1 測定原理 ミキシングノズル出口で AWJ ノズル全体が噴流から受ける反力 P と各相の運動量つまり質量流量 W と速度 u との積の間には次の関係がある。

$$P = \sum W u \quad \dots\dots (1)$$

気液二相流の場合、各相の W の値を既知とすると、 P の値を計測することにより、式(1)が成立するようなミキシングノズル出口での各相の速度を決めることは容易である。ただし、これによって得られる相速度は、各相の断面平均速度であり、各相の断面内での速度分布はないものと仮定された値である。固気液三相流の場合も、後述のように気相の運動量が固相と液相のそれに比べて省略可能であることを利用すれば、同様の考え方で固相と液相の速度を知ることができる。

3.2 噴流運動量測定装置 ミキシングノズル出口運動量を噴流反力として測定する機構および測定システムを図2に示す。ロードセルと圧力変換器を、超高压チューブ(直径9.5mm)を介して接続した AWJ ノズルを保持するノズルヘッドがあり、この部分全体を上方から二本のワイヤーで吊り下げ、軸方向に他から拘束されない状態をつくる。このとき、高压ポンプからの接続配管にはコイルチューブ(直径6.3mm)を用い、測定系における噴射方向への抵抗は測定量に対して無視できる。混相流が噴射されるとそれにとまなう反力が生じ、その力を AWJ ノズル軸方向に取り付けたひずみゲージ式ロードセルにより測定する。ロードセルとノズルヘッドは予め接触させておき、そのときの零点を調べておく。ま

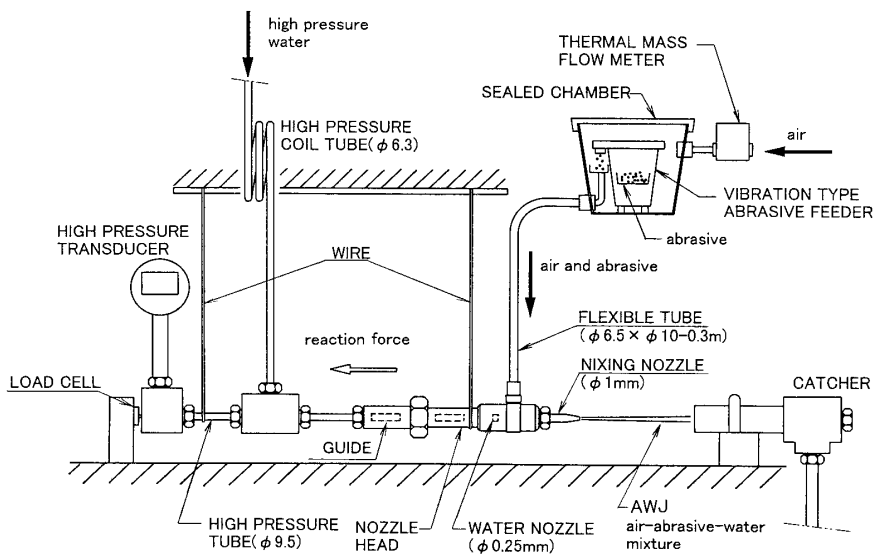


Fig.2 Experimental Setup for Measuring Momentum of AWJ

た、ノズルヘッドは、噴射前後でのノズルヘッドの向きを変えないように、両側で一定のすき間を保ったローラー付きガイドで支えてある。

水の流量は重量法で検定されたウォーターノズルの流量係数 (0.65) を用い、上流側でのひずみゲージ式圧力変換器による測定圧力から求められる。研磨材流量は振動フィーダの供給量で設定する。また空気流量は、振動フィーダを設置した密閉室内への流入空気量をサーマルマスフローメータで読みとる。ウォーターノズル直後の水噴射速度は、上記の検定結果を用いて、 $u_n = (2p_n / \rho)^{1/2}$ で与えられることを確かめてある。誤差解析による測定誤差は、空気流量が最大±2%、水流量および水噴射速度が最大±2.5%である。また、ロードセルによる反力の測定誤差は最大±0.2Nである。なお、噴射時の圧力脈動による水噴射速度の変動は、計測時間の間で±2%程度であり比較的安定している。

本実験では、直径 0.25mm のウォーターノズルと直径 1.0mm のミキシングノズルを用いる。AWJ ノズル全体の構造は第1報に示すものと同じであるが、噴流反力測定

用のミキシングノズルは圧力測定孔が省略されている。また、固気入口からミキシングノズル出口までの長さ L は、後で述べる AWJ ノズル内圧力分布測定実験も含めて、表1に示すとおりである。

4. ミキシングノズル出口の噴流運動量と相速度

4.1 気液二相流での運動量測定結果 表2に研磨材を含まない、高速気液二相流でのミキシングノズル出口噴流運動量 (ノズルの反力) の測定結果を示す。図3はこの結果を図示したもので、横軸はウォーターノズル直後の水噴射速度 u_n である。図には、 u_n の速度をもつ水噴流の運動量計算値 P_{Ln} と気相の運動量計算値 P_{Gn} をあわせて示す。実験値と P_{Ln} の値の比較からミキシングノズル出口運動量は水噴射速度 u_n が持つ運動量に対してあまり減少していないことがわかる。一方、ボイド率で95%以上をしめる混入空気の運動量は、気相速度が水噴射速度に等しいと仮定した場合でも全体の運動量の1%以下であり、実際の空気速度の場合ではほとんど無視できる。

4.2 ノズル出口の気液二相流の相速度 ミキシングノズル出口での気液の相速度 u_{Ge} , u_{Le} は次の方法で求められる。すなわち、連続式

$$Q_{Ge}/u_{Ge} + Q_L/u_{Le} = A_m \quad \dots\dots(2)$$

および、運動量保存式

$$P_e = W_G u_{Ge} + W_L u_{Le} \quad \dots\dots(3)$$

より u_{Le} を消去すると次式を得る。

$$A_m W_G u_{Ge}^2 + (W_L Q_L - W_G Q_{Ge} - A_m P_e) u_{Ge} + P_e Q_{Ge} = 0 \quad \dots\dots(4)$$

式(4)に運動量と流量の実測値を代入し、気相出口速度

Table 1 Length of Tested Mixing Nozzles

mixing nozzle	E	F	G	H	I
nominal length L mm	85	93	55	81.2	125
purpose of measurement	(a)	(a)	(b)	(b)	(b)
(a) pressure distribution	(b) reaction force of jet				

Table 2 Measured Momentum at Mixing Nozzle Exit

$W_L \times 10^3$ kg/s	9.87	13.7	16.8	19.6	22.0	24.2
$W_G \times 10^5$ kg/s	10.3	14.7	17.2	22.0	23.1	22.3
P N	3.0	5.7	8.6	11.7	14.6	18.0
u_n m/s	311	432	532	622	696	771

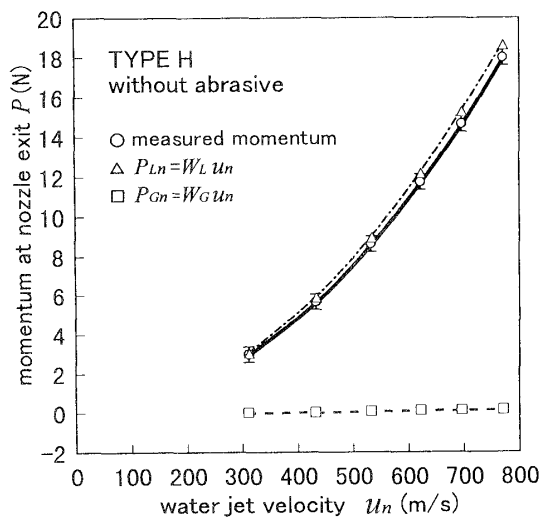


Fig.3 Momentum at Mixing Nozzle Exit

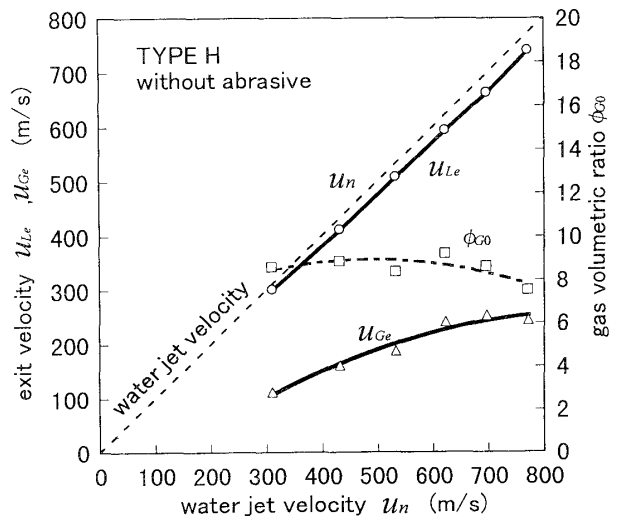


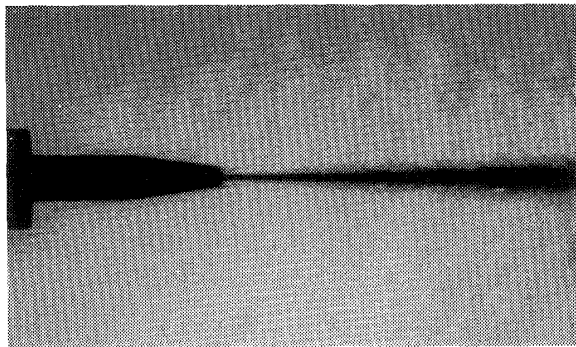
Fig.4 Velocity at Mixing Nozzle Exit

u_{Ge} についての2次式を解いて u_{Ge} を求め、さらに式(3)を用いて u_{Le} が得られる。ここで、ミキシングノズル出口の空気流量 Q_{Ge} は大気圧下での値 Q_{G0} に等しい。

上式より求めた液相および気相のミキシングノズル出口速度を図4に示す。液相つまり水の出口速度はウォーターノズル直後の水噴射速度からあまり減少していない。液相については、ミキシングノズルからの噴流の状態を撮影したシュリーレン写真(図5)を調べると、噴流から伸びるマッハ線が観測され、液相がノズル出口で超音速流れを維持していることがわかる。一方、気相の出口速度は、最大で約 250m/s であり、気体単相での音速以下である。

このように、液相は気相よりも大きな速度を保ったままミキシングノズルから噴出する。さらに、ミキシングノズルでの運動量減少が少なく、この部分での摩擦損失が小さいことを考え合わせると、ミキシングノズル内の流れは水噴流(液相)が気相に包まれてノズル壁面にほとんど触れない、逆環状流の状態で流れていると推定される。

4.3 固気液三相流での運動量測定結果 図6は水



(TYPE H without abrasive $u_n \approx 636\text{m/s}$)

Fig.5 Schlieren Photograph of Jet

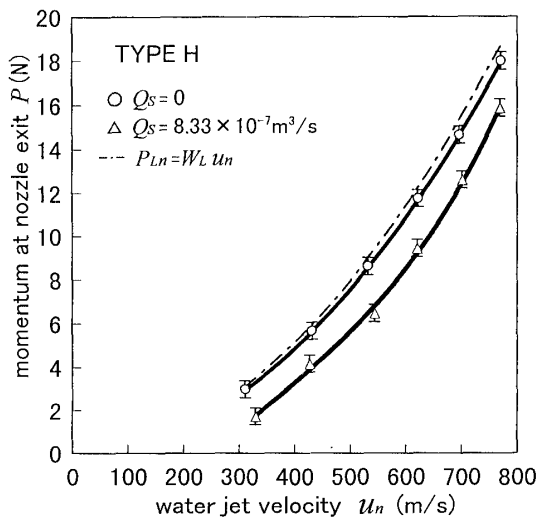


Fig.6 Momentum at Mixing Nozzle Exit

噴流に研磨材を混入した場合と、混入しない場合のミキシングノズル出口の噴流運動量の測定結果を比較したものである。研磨材の混入により、ノズル出口の運動量は研磨材のない場合よりも明らかに減少する。これは、固体粒子の質量流量比が水の 1/10 程度(気体の質量流量比は約 1/100)であり、これの加速に費やされるエネルギーが気液二相流の場合に比べて大きいことを意味する。したがって、ノズル出口速度も減少することになる。

4.4 ノズル出口の固気液三相流の相速度 三相流の場合も二相流と同様、ミキシングノズル出口において連続式

$$Q_{Ge}/u_{Ge} + Q_L/u_{Le} + Q_S/u_{Se} = A_m \quad \dots\dots(5)$$

と運動量保存式

$$P_e = W_G u_{Ge} + W_L u_{Le} + W_S u_{Se} \quad \dots\dots(6)$$

が成立する。しかし、これらの式は u_{Ge} , u_{Le} , u_{Se} の三つの未知の値を含むので、ここでは次のような方法を用いてそれぞれの値を求める。式(5)から

$$u_{Ge} = \frac{Q_{Ge}}{A_m - (Q_L/u_{Le} + Q_S/u_{Se})} \quad \dots\dots(7)$$

ここで、ボイド率が大きいことから、気相速度 u_{Ge} を求めるために、液相と固相を同一の見かけ速度 u_{LSe} をもつと見なしても、上の式で得られる u_{Ge} に大きな影響を与えることはない。すなわち、

$$u_{Ge} = \frac{Q_{Ge}}{A_m - (Q_L + Q_S)/u_{LSe}} \quad \dots\dots(8)$$

と表せる。また、図3で示したように、気相の運動量は他に比べて十分小さいので式(6)を

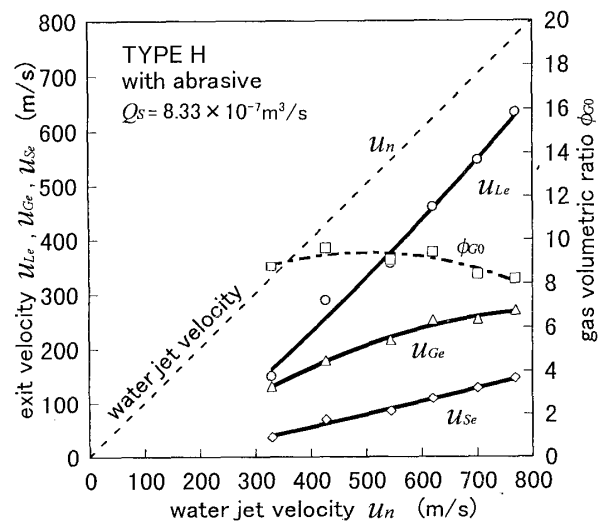


Fig.7 Velocity at Mixing Nozzle Exit

$$P_e \cong W_L u_{Le} + W_S u_{Se} \quad \dots\dots(9)$$

と近似して、固液の見かけ速度 u_{LSe} を求めることにより気相速度 u_{Ge} を決定することができる。次に、 u_{Ge} を既知として、式(5)と式(6)の連立式を解いて u_{Le} と u_{Se} を得る。なお、ここでも Q_{Ge} は大気圧下での値を用いる。

この方法で求めた各相速度を図7に示す。液相速度は研磨材を混入しない場合と比較して50%ないし80%に減速しており、水噴射速度 u_n が小さいほどその割合は大きい。これに対して気相速度は、この実験の範囲では、研磨材の混入による速度の大きな変化はみられない。一方、研磨材の速度は液相の約30% (50~150m/s) であり、この値は他の研究者による光学方式での粒子速度測定結果⁽⁷⁾⁽⁹⁾に近い値を示している。ただ、この研磨材速度は粒子全体の平均の速度であり、研磨材の全てがこの速度で噴出しているわけではないが、切断時の現象は平均的な値で十分説明可能である⁽¹⁰⁾。

5. ミキシングノズル内の相速度分布

5.1 ノズル内の気液二相流の相速度 ミキシングノズル内の液相、気相の速度は次の関係式を利用して求められる。

$$Q_G/u_G + Q_L/u_L = A_m \quad \dots\dots(10)$$

$$Q_L = A_L u_L \quad \dots\dots(11)$$

$$Q_G = A_G u_G = Q_{G0} p_0 / p \quad \dots\dots(12)$$

ここで、 A_G 、 A_L はノズル内での気相、液相の断面積である。また、 p はノズル内圧力、 p_0 は大気圧である。液相の速度は図4で明らかのように、ウォーターノズル出口直後の水噴射速度 u_n とミキシングノズル出口液相速度

u_{Le} との差が小さいため、液相速度がこの間で直線的に減速すると仮定しても実際との差は小さいと考えてよい。このように液相の速度を仮定すると、式(11)により、 $A_L = Q_L/u_L$ が定まり、式(10)と式(12)を利用して、ノズル内圧力分布の測定結果からノズル内の気相速度を求めることができる。図8、図9は気液二相流の場合の、固気入口からの距離に対する圧力分布と、直線近似した液相速度、およびこれを利用して求めた気相の速度分布を示したものである。圧力の減少とともに気体の体積は増加し、その結果、気相はミキシングノズル内では加速されていく。しかし、 $u_G = u_L$ となることはなく、常にスリップ比 $\sigma = u_G/u_L$ は1以下である。 $u_n = 771\text{m/s}$ (図8) では、気相速度は気体単相の音速を超え、最大でマッハ数 $M = 1.9$ に達する。そして、第1報でも述べたように、出口近傍で気相単相流での垂直衝撃波に類似の現象が発生し、圧力は大気圧まで回復し、気相速度は大気圧での

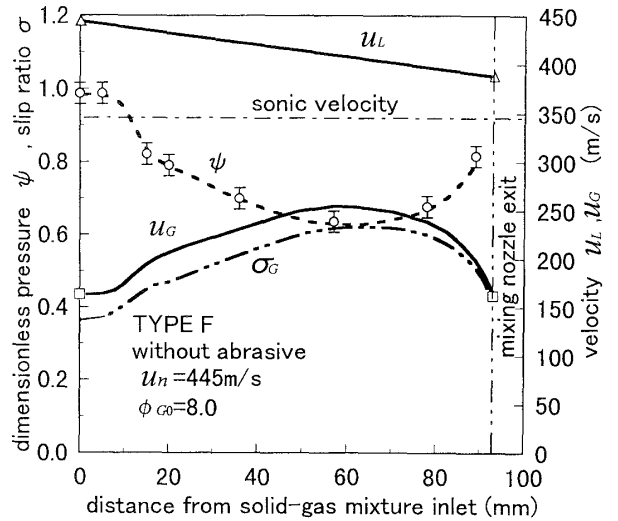


Fig.9 Estimated Gas-Phase Velocity

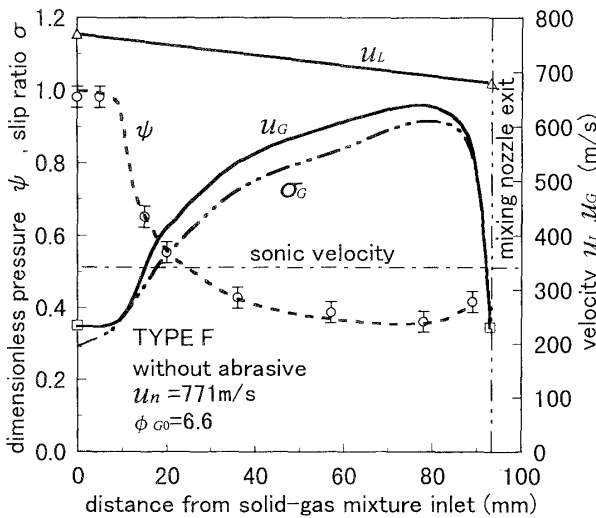


Fig.8 Estimated Gas-Phase Velocity

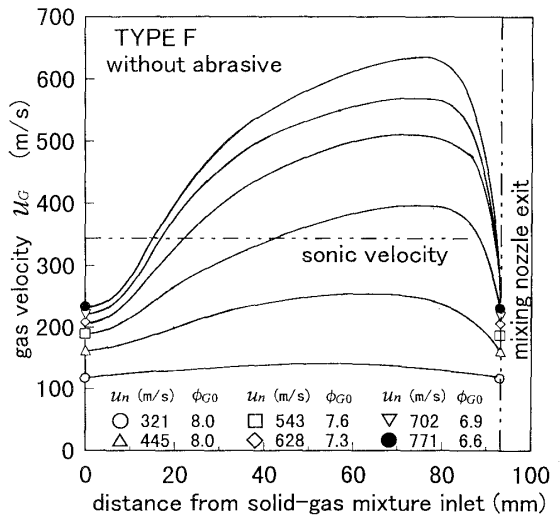


Fig.10 Gas-Phase Velocity Effect of Water Injection Velocity

値まで減少すると考えられる。一方、 $u_n=445\text{m/s}$ (図 9) では、気相速度はノズル内で音速を超えず、そのときの圧力変化は出口に向かって大気圧まで緩やかに回復する傾向がみられる。

図 10 は気相速度分布の変化を各水噴射速度に対して求めたものである。 $u_n=500\text{m/s}$ をこえると、ミキシングノズル内のある範囲で超音速の状態となる境界があり、超音速領域が現れる場合には、ノズル出口付近での急激な圧力回復に伴い、気相速度も急激に減少する。

5.2 ノズル内の固気液混相流の相速度 ミキシングノズル内の各相速度は、ノズル内運動量分布が分かれば、ノズル内圧力分布の測定結果を用いて、式(5)~(9)と同じ形式の任意断面に対する固気液混相流の連続式と運動量式によって求めることができる。計算に必要なノズル内運動量を知るため、ミキシングノズル長さを変えた場合の噴流運動量を測定した。この結果を図 11 に示す。噴流の運動量はノズル長さの増加に伴い減少しているが、その割合はノズル入口付近で大きく、固気入口から一定の距離以降では、距離におおよそ比例して減少する傾向がみられる。簡単のため、ここでは運動量の減少を直線近似することによってノズル内の各相速度を求める。また、研磨材混入時の加速状況が明確でないため、固相のノズル軸方向速度は混入時の速度 0m/s として計算する。

図 12 に上述の仮定にもとづく、固気液三相流の速度計算結果および圧力分布測定結果を示す。液相、気相の速度は図 8 に示す、研磨材を含まない場合に比べて減少するが、流れ方向に沿う各相速度および圧力の分布は同様の傾向を示している。固相 (研磨材) 速度は混入後わずかの間に最高となり、出口に向かって徐々に減少して

いく結果となった。実際には混合後も粒子は加速され続けると考えられ、ここで用いた運動量分布の仮定が必ずしも妥当かどうかは現状では判定できない。固相の速度分布の妥当性の検証には AWJ における粒子の抗力係数や摩擦係数などを適用した理論の導入が必要と考えられる。

6. 結 言

ミキシングノズルを高速で流れる固気液混相流のノズル出口での噴流運動量から各相速度を求め、さらに流れ方向の圧力分布測定結果を用いて、AWJ ノズル全体の高速混相流の流動特性を調べ、次のことを明らかにした。

- (1) 研磨材を含まない気液二相流では、ミキシングノズル内での液相速度は高速を維持したまま流れ、摩擦損失は小さい。流動状態は逆環状流と推定される。
- (2) 研磨材を混入した場合、ミキシングノズル内での液相速度が相当程度に減少し、AWJ ノズル出口での噴流全体の運動量は気液二相流に比べ減少する。
- (3) 運動量測定結果から導かれた粒子の出口平均速度は、液相の速度の約 30% である。
- (4) 気相の速度は $u_n=500\text{m/s}$ をこえると、ミキシングノズル内のある範囲で超音速となる。
- (5) 実験結果から推定された運動量分布を用いて、固気液混相流の相速度分布を求めることができるが、固相速度の妥当性については今後の検証が必要である。

最後に実験に関して種々便宜をはかっていたくとも、貴重なご助言をいただいた富山県立大学藤川教授に感謝の意を表する。

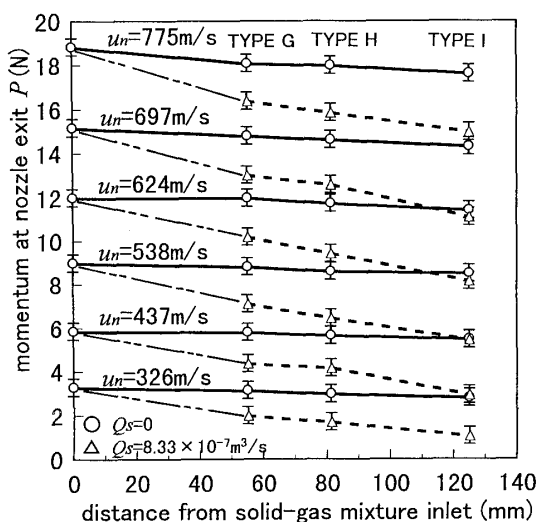


Fig.11 Momentum by Different Mixing Nozzle Length

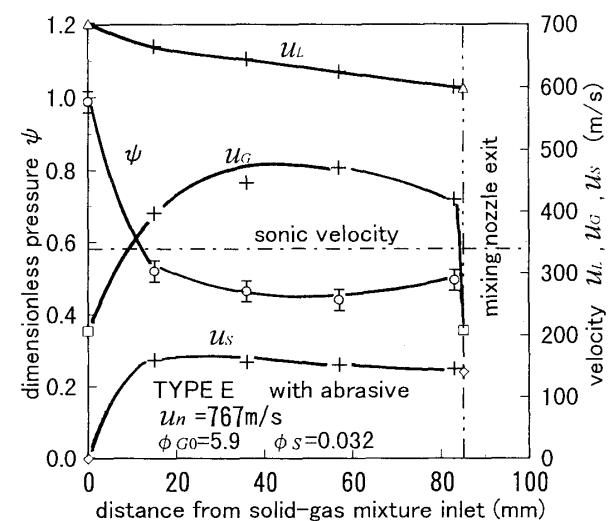


Fig.12 Estimated Solid-Phase Velocity

文 献

- (1) 清重正典, 研磨材を含むウォータージェットの切断能力について, ターボ機械, Vol.17, No.11, 1989, pp.34-41.
- (2) Hashish, M., Optimization Factors in Abrasive-Waterjet Machining, Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.113, 1992, pp.29-37.
- (3) 原島謙一, 岩淵牧男ら, アブレシブウォータージェット用ノズル内の高速混相流の特性 第1報 一次元スリップモデルによる特性解析と実機データにもとづく考察, 日本機械学会論文集(B編), 65巻, 634号, 1999, pp.1907-1913.
- (4) Isobe, T. et al., Distribution of Abrasive Particles in Abrasive Water Jet and Acceleration Mechanism, Proc.9th Int. Sym. on Jet Cutting Tech., BHRA, 1988, pp.217-238.
- (5) 福西祐, 小林陵二, 犬飼朗, アブレシブジェットにおける砥粒の加速特性の計測, 日本機械学会第68期全国大会講演会講演論文集, Vol.B, No.900-59, 1990, pp.443-445.
- (6) Neusen, K.F., Gores, T.J. and Amano, R.S., Axial Variation of Particle and Drop Velocities Downstream from an Abrasive Water Jet Mixing Tube, Jet Cutting Technology-Proceedings of the 12th International Conference, 1994, pp.93-103.
- (7) Chen, W.L., Geskin, E.S., Measurement of the Velocity of Abrasive Water Jet by the Use of Laser Transit Anemometer, Jet Cutting Technology-Proceedings of the 10th International Conference, 1990, pp.23-36.
- (8) Swanson, R.K., Kilman, M., Cerwin, S. and Tarver, W., Study of Particle Velocities in Water Driven Abrasive Jet Cutting, Proceedings of the 4th U.S. Water Jet Conference, Berkeley, CA, 1987, pp.103-107.
- (9) Neusen, K.F., Gores, T.J., and Labus, T.J., Measurement of Particle and Drop velocities in a Mixed Abrasive Water Jet Using a Forward-Scatter LDV System, Proc. 11th Symp. on Jet Cutting Technology, 1991, pp.63-73.
- (10) 松山欽一, 上野秀治, アブレシブウォータージェットの噴流構造観察(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の開発, 噴流工学, Vol.13, No.1, 1996, pp.33-39.