高速ウォータージェットの LIF-PTV 法による流速分布の測定*

Measurement of Velocity Profiles of High-Speed Water Jet Using LIF-PTV Method

阿部 宏幸** 吉田 宏** 吉田 憲司*** 片岡 勲***
ABE Hiroyuki YOSHIDA Hiroshi YOSHIDA Kenji KATAOKA Isao

Abstract The hydrodynamic structure of the high-speed water jet utilized in the jet grouting was experimentally investigated. The nozzle diameter of water jet ranged from 2 to 6mm, and the outlet pressure is up to 20 MPa, so the jet velocity reaches to several hundred meter per sec. The double-pulse Nd:YAG Laser and CCD camera with image intensifier were used to capture clear images of the water jet. From the captured images, velocity of water jet was measured using LIF technique combined with PTV at various locations from outlet of nozzle. The result showed the velocity of water jet remains its initial velocity at $400D$ (D : nozzle diameters) from nozzle outlet. Radial velocity profile inside the jet showed flat velocity profiles for pressures and locations from outlet in the present experiment.

Keywords: Flow structure, High speed water jet, Water jet velocity, LIF-PTV method, Velocity profile

1. 緒言

水をポンプで加圧しノズルから噴出させると、極めて大きな破壊力を持ち、物体を切削できることが古くから知られていた。近年では高速ウォータージェットは産業分野で幅広く応用されており、布、皮革、金属等の切削加工や表面洗浄、外科手術、土木建設工事(地盤の切削、コンクリート構造物の解体等)等に利用されている[1-3]。それらのうち、土木建設工事の分野では、地盤改良技術、杭打設工事、コンクリート切断技術が主要な応用技術であり、ウォータージェットの特性が有効に利用されており、他の方法では不可能であった工事がウォータージェットを用いることにより容易かつ確実に行われるようになった。

この中でも特に重要であり、かつ最近実用化が進んでいる技術にウォータージェットを用いた

地盤改良技術がある。高速ウォータージェットを用いた地盤改良工法は地上から所定の深さまで直径数十 cm 程度の比較的細い管を挿入し、管の先端部からセメントなどの固化材を含んだ高压ジェットを噴射させ、周囲の土砂を削りながら混合攪拌することにより、地中にセメント固化柱状体を構築する地盤改良工法である。Fig.1 に地盤改良に用いられているウォータージェットの噴射装置を示す。

高速ウォータージェットは高速(数百 m/s)、高压(30~200MPa)で気液二相流の複雑な構造をしているため、速度や、圧力等の流体力学的特性を計測するのが難しく、高速自由噴流の速度や圧力分布等の定式化もあまりなされておらず、構造について十分な知見は得られていない。よってノズルの設計に関しては実験的なアプローチが多

* 2014.5.12 受付

*** 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻 〒565-0867 大阪府吹田市山田丘 2-1

TEL: (06)6879-7256 FAX: (06) 6879-7256 E-mail: kataoka@mech.eng.osaka-u.ac.jp

** ケミカルグラウト株式会社技術本部技術開発部

い。さらなる高性能ウォータージェットを開発する為には、ノズルの改良が必要であり、そのためには高速自由噴流の基礎研究が必要である。これまでも、ウォータージェットの基礎的な特性の研究は行われてきたが[4-7]、このような高速のウォータージェットの速度等の正確な測定は極めて難しく行われてこなかった。近年、光学計器の発達により高速の対象物を、高感度で撮影する事が可能になった。それにあわせて、レーザー計測やPIV(Particle Image Velocimetry)、PTV(Particle Tracking Velocimetry)等の計測技術の発達により、より高度な計測が可能になり、高速自由噴流に関しても適応できるようになってきた。

本研究では高速ウォータージェットの構造解明を目的とし、高速度カメラと、光を増幅し、電子シャッターにより高速でシャッターを切れるイメージンテンシファイアーを使用した高速ウォータージェットの画像撮影、及び流速測定法を行った。ウォータージェットにローダミン B (Rhodamine B)を含んだ微小粒子を混入させ、この粒子からレーザーにより誘起された蛍光を測定することによりジェットの速度を計測する手法PTV(Particle Tracking Velocimetry)を用いて、高速ウォータージェットの速度分布を測定した。

Fig. 1 Photograph of high-speed water jet utilized soil improvement.

2. 実験装置

実験装置の概略を Fig.2 に示す。実験装置はウォータージェット噴射装置とその測定装置からなる。測定装置は Nd:YAG ダブルパルスレーザーとイメージンテ

ンシファイアー付き CCD カメラとそれらを制御するパソコンからなる。

Fig. 2 Schematic drawing of experimental setup.

CCD カメラは浜松ホトニクス社製 C7972-11 で画素は 1024×1024 ピクセルである。高速のジェットを撮影する場合にはシャッタースピードを非常に早くする必要があるため画像は暗くなる。そのため、光電子増倍管によるイメージンテンシファイアーを取り付けてある。このイメージンテンシファイアーはゲート回路を開く時間を電子的に制御できるため、実質的に 10ns の露光時間で撮影が可能となる。また、このイメージンテンシファイアーと CCD カメラをデジタル遅延回路を用いて同期させる事により、最小で $1\mu\text{s}$ 間隔で 2 枚の画像を撮影する事が出来る。これにより、PTV 法による速度の測定が可能となる。

Nd:YAG ダブルパルスレーザーは New Wave 社製 PIV SOLO-120 であり、出力は 83mJ /パルス、パルス幅は 6ns で 532nm のグリーンレーザーを出力する。レーザービームの径は 6mm であり、実験ではこれを円筒レンズにより厚さ 0.1mm、幅 150mm のシート光にして、ジェットの中心部を通過するように設定した。CCD カメラを用いてこのシート状のレーザーに照射されている部分のジェットの画像を撮影した。また、ジェットの流動の様子を撮影するためハロゲンランプを用いたバックライト撮影も合わせて行った。

本実験では、動作流体の水に Rhodamine B を含有した蛍光粒子(Lavision 社製の 1002192、直径 $20\mu\text{m}$ - $50\mu\text{m}$ 、密度 1190kg/m^3)を混入し、ノズルから噴射し Nd:YAG レーザーでジェットに対して照射する。ジェット中の蛍光粒子は Nd:YAG レーザー ($\lambda=532\text{nm}$) の波長によって励起し、最大 625nm の波長の光を放出する。カメラの前に光学フィルターを設置する。この光学フィルターは

565nm 以下の光は 1%以下しか透過しないので、粒子以外のジェットの水の光をほとんど遮る。よって粒子のみを撮影できる。これを連続して撮影し、PTV(Particle Tracking Velocimetry)法を適用することによって速度を計測できる。この方法(LIF-PTV 法)の概略を Fig.3 に示す。

Fig. 3 Schematic drawing of Laser induced fluorescent method.

3. 実験結果

本実験ではウォータージェットのノズル径 D として 2.5mm のものを用いた。水道水をプランジャーポンプを用いて最大 20MPa まで加圧してノズルからウォータージェットを吐出させた。実験ではノズル出口圧力を 1MPa から 20MPa まで変化させた。プランジャーポンプの出口には十分な体積をもつアキュムレータを設置してジェットが振動しないようにした。

ジェットの撮影はノズル出口からノズル径の 100D (250mm)、300D (750mm)、400D (1000mm)、600D (1500mm)、800D (2000mm) の位置で行った。撮影時間はイメージインテンシファイアーのゲート速度によって制御しこの実験では 10ns とした。Nd:YAG ダブルパルスレーザーのパルス幅は 6ns であるので、この CCD カメラの制御装置と同期させる事により、画像の露光時間は 6ns とすることが出来る。これにより、数百 m/s のジェットの鮮明な画像を撮影する事が可能となった。

3.1 ジェットの挙動

Fig.4 は通常のデジタルカメラで撮影したウオ

ータージェットの全体像である。この図は、ノズル出口圧力が 1MPa でノズル径は 2.85mm のものである (図にはスケールを入れてあるが斜め方向から撮影しているので参考値である)。このように地盤改良用の高速ウォータージェットはノズル出口直後から、多くの液滴を伴った流れとなっており、流れ方向にジェットの幅は大きく広がっている。通常の露光時間ではジェットの内部の流動の様子はほとんどわからない。

Fig. 4 Direct photograph of high-speed water jet captured with usual digital camera.

(a)0mm-23mm

(b)21mm-44mm

(c)75mm-300mm

(d)400mm-600mm

Fig. 5 Typical jet profiles captured by backlight method.

Fig.5 は同じ条件のウォータージェットを 10ns の露光時間でハロゲンランプを用いてバックライト撮影した画像である。それぞれの図の下の数値

はノズル出口からの距離である。また、Fig.4 にこれらの画像を撮影した概略の位置を示している。この図からわかるように、ウォータージェットはノズル出口直後では連続流となっているが、ジェット界面に擾乱波が発生して大きく成長し、波の先端からは液滴が発生している。Fig.4 において観察されているのはこうして発生した液滴である。ノズル出口から 50mm 程度まではジェットはほぼ左右対称で直線的であるが、その後ジェットの界面は大きく変形し非対称となり分裂し、大きな液塊が発生している。ジェットの速度は大きく変動し乱れた流れとなっている事がわかる。

3.2 LIF-PTV 法による速度の測定結果

Fig.6 に LIF-PTV 法による速度の測定に用いた 2 枚の連続した画像の一例を示す。2 枚の画像を撮影するため、デジタル遅延回路として Stanford Research System 社製 DG535 を用いた。画像の遅延時間は 4 μ s であり、その精度は 1.5ns である。Fig.6 の右側の画像は左側の画像の撮影後 4 μ s 後に撮影したものである。図で流れ方向は下向きである。対応するローダミン粒子が、下向きに移動している事がわかる。これらの粒子の移動距離から速度を求めることが可能となり、この速度をもってその粒子の位置での瞬時のジェット速度とする（ローダミン粒子は十分小さく流れに追従していると仮定する）。

画像の撮影サイズは 17.5mm $\times$ 17.5mm であり、ピクセル数は 1024 ピクセル $\times$ 1024 ピクセルであり空間分解能は 17.1 μ m/ピクセルである。この画像の空間分解能と画像の遅延時間から、ここでの LIF-PTV 法による速度の測定精度は 3.89m/s と見積もられる。

このような連続した画像を各圧力、ノズル出口からの各位置について 200 組撮ることによってジェットの半径方向の各位置における瞬時の速度の分布を求めた。なお画像から速度を求めるにあたってはアートテクノロジー株式会社の PTV ソフトウェア ZVECTOR を用いた。ここでの LIF-PTV 法による測定が可能であるためには、粒子群が同一平面内に存在することが必要である。Fig.6 に示すように撮影した多数の 4 μ s 遅延した画像において、粒子が新たに現れたり、消えたりするものはほとんど観察されなかった。またここでの画像撮影に遅延時間は 4 μ s と短く、レーザーシートの厚さが 0.1mm であることを考えると、

蛍光粒子がレーザーシートを通過するには 25m/s 程度の大きな半径方向の速度を持つ必要がある。しかしながら、測定された速度は流れ方向の成分がほとんどであり、半径方向の速度成分は極めて小さかったこと、ならびに Fig.4 に見られる様なジェットの広がりから半径方向速度は 25m/s より十分小さいと考えられることから、粒子群は同一平面内に存在しているとの仮定は妥当なものであると考えられる。

Fig.7 から Fig.10 は圧力 1MPa、5MPa、10MPa、20MPa におけるノズル出口からの距離 100D、200D、300D、400D、600D、800D の各位置でのジェットの半径方向の速度分布の測定結果を示す。ここで r はジェット中心からの位置であり、 R はノズルの半径である ($D/2$)。またこれらの図の 100D の位置の図にはノズル出口圧力 P を用いて次式のベルヌーイの式から求めた流速 u を示している。

$$u = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (1)$$

ここで ρ は水の密度である。

これらの図からわかるように、半径方向の各位置でのジェットの速度はおおむね式(1)による速度に近い値となっている。また速度は大きく変動していることがわかる。この速度の変動は、先に述べた LIF-PTV 法による速度の測定誤差 (3.89m/s) やジェットによるレーザーシートや粒子からの蛍光の屈折等の影響が含まれていると考えられ、その変動の値は大きく (10m/s 程度)、Fig.5 に示したようにジェットの界面が大きく非対称に歪み、波が発生し液滴が飛散することによるものと考えられる。この変動は、乱流等のジェットの流体力学的構造に強く関係していると考えられる。しかしながら本実験においてはその変動の分散・ゆらぎ等の統計量を求めるには十分なデータ数がなく、分散・ゆらぎと距離 D 、 r との関係を定量的に議論するには至らなかった。Fig.7 から Fig.10 によりわかるように速度の変動は、圧力が大きくなるに従い、またノズルからの距離が大きくなるに従い大きくなっている。

また、Fig.7 から Fig.10 でノズル出口からの距離が大きくなるに従い速度の計測点が半径方向に広がっているのは、ジェットの幅が流れ方向に広がっていることによる。圧力が高く、ノズルか

らの距離が大きいところでは、速度の測定結果が得られていない。これは、この領域ではジェットからの液滴（ミスト）の発生が非常に多くなり、カメラが液滴で濡れてしまうため撮影ができなくなったことによる。また、測定されている条件でも、大量のミストによりローダミン粒子からのレーザー蛍光が遮られて、十分な数の粒子データが得られない場合があった。また高圧の 600D、800D ではジェットの広がりが大きく、CCD カメラで撮影する範囲の外にまでジェットが広がっているため、ジェットのすべての領域の速度を測定することが出来なかった。

Fig.7 から Fig.10 における半径方向における各位置の瞬時の速度データを平均して、平均速度の半径方向分布を求めた結果を Fig.11 から Fig.16 に示す。平均にあたっては半径方向距離 r が 0.4mm 間隔のデータを平均した（但、1MPa の 100D、200D については 0.2mm 間隔で平均）。

Fig.11 はノズル出口近くの 100D における平均速度分布である。ノズル出口圧力が 1MPa の場合にはジェットの速度分布はほぼ一様でありジェットの広がり 3R (1.5D) 程度でほとんど広がっておらず、収束した連続流に近いジェットとなっている。ノズル出口圧力が 5MPa になるとジェットは 6R 程度に広がる。中心部の速度は一様であるが、気液界面で速度が大幅に減少している。これはジェット速度が大きいため、気液界面で大きな剪断力が働くことによると考えられる。ノズル出口圧力が 10MPa になるとジェット幅は更に広がる。この場合もジェット中心部では速度分布は一様であるが、周辺部で速度は 5MPa の場合に比べてもさらに大きく減少している。

同様な傾向は Fig.12 の 200D の場合にも見られる。Fig.12 で 20MPa のジェットの広がりが小さくなっているように見えるが、これは 20MPa では非常にミストの発生量が多く、周辺部でのローダミン粒子の画像がほとんどとれなかったこと

によるもので実際のジェット幅は大きくなっている。

Fig.13 は 300D の場合の速度分布であるが、この場合には 1MPa の場合でもジェットの広がりは大きく 8R 程度にまでなっている。5MPa、10MPa では更にジェット幅が広がり 10MPa では速度分布は中心部でも一様ではなく、山形の分布になっている。

Fig.14 は 400D の場合の速度分布であるが、1MPa でもジェットは 10R 程度まで広がり、圧力によるジェットの広がりへの影響はあまり顕著ではなくなる。また、圧力が高くなるに従って、ジェット周辺の速度が小さくなっている。この図では圧力が大きい所でジェット幅が小さくなっているように見えるが、これはジェット周辺部でのミストの影響により、ローダミン粒子の信号が少なくなり、正確なデータが得られなくなったためであって実際には高圧の方がジェット幅は大きくなっている。

Fig.15 は 600D の場合の速度分布である。この場合には 1MPa でもジェット幅が撮影画像の幅 (14R) に達してしまっている。実際には、圧力の高い領域では、ジェットはこれ以上に広がっているが、撮影画像の制約から、これより外の速度は計測されていない。圧力が高くなるほど、速度のばらつきが大きく（サンプルデータ数が小さくなっている）、周辺部での速度の減少が顕著になっている。

Fig.16 は 800D の場合の速度分布である。ミストの発生が激しく撮影は 5MPa までしか行えなかった。まだ、ミストの量が非常に大きく、5MPa の場合でも周辺のミストによってローダミン粒子の信号が阻害されデータが得られなくなっている。しかしながら、この領域では 1MPa でも周辺の速度の低下が見られ、5MPa になると、速度分布は非対称となり、周辺で速度が大幅に減少している。

Fig. 6 An example of serial photographs captured by LIF for PTV.

Fig. 7 All measured velocity data for the case of 1MPa.

Fig. 8 All measured velocity data for the case of 5MPa.

Fig. 9 All measured velocity data for the case of 10MPa.

Fig. 10 All measured velocity data for the case of 20MPa.

Fig. 11 Averaged velocity profiles at the position of 100D.

Fig. 12 Averaged velocity profiles at the position of 200D.

Fig. 13 Averaged velocity profiles at the position of 300D.

Fig. 14 Averaged velocity profiles at the position of 400D.

Fig. 15 Averaged velocity profiles at the position of 600D.

Fig. 16 Averaged velocity profiles at the position of 800D.

Fig. 17 Velocity profiles in axial direction.

Fig.17はFig.11からFig.16の半径方向速度分布を平均して断面平均速度を求め、そのノズル出口からの影響を見たものである。この図からわかるように平均速度は各圧力とも600Dまではあまり減衰していないことがわかる。また、Fig.7からFig.10で示した様に、平均速度の値は、ノズル出口圧力からベルヌーイの定理を用いて求めた速度に近い値を示しており、測定結果は妥当なものであると考えられる。しかしながら、Fig.7からFig.16の結果からわかるように、ノズル出口からの距離が400Dあたりから、速度のばらつきが非常に大きくなると共に、ジェット周辺部で

も速度の減少が著しくなっている。従って、速度が一様で、ジェットの切削能力が維持されるのはおおむねノズル出口から 300D から 400D までと考えられる。これは従来のジェット衝撃圧力の測定結果とも[7]整合性を持ったものとなっている。

3. 結 言

地盤改良に用いられる高速ウォータージェットの流動構造を実験的に解明するため、Nd:YAG レーザーとイメージインテンシファイアー付き CCD カメラを用い、ローダミン B を含有した蛍光粒子をトレーサとして、LIF-PTV 法により、速度分布を測定した結果について報告した。ジェットの半径方向各位置における瞬時の速度は大きく変動しており、その変動幅はノズル出口からの距離が大きくなるほど、またノズル出口圧力が大きくなるほど大きくなることが明らかとなった。ジェットの半径方向速度分布はノズル出口から 100D の位置ではほぼ様な分布であるが、ノズルからの距離が増加するに従い、ジェット周辺部で速度が低下し、特に圧力が高い領域では山形の分布、非対称な分布になっていくことが示された。断面平均速度はノズル出口からの距離が 600D 程度まではあまり減衰しなかった。しかし速度分布や、速度変動を考慮するとジェットの切削能力が維持されるのは 300D から 400D 程度までと考えられる。

ここでの実験はノズル出口径が 2.5mm の場合について行った。実際の地盤改良に用いられるノズル出口径は 2mm から 6mm である。経験的にはノズル出口径がこの範囲で変化しても、ジェットの構造はほぼ同様であることが知られており、ジェットの切削距離もノズル径にほぼ比例していることが知られている[7]。従ってここで得られた流動構造は近似的に他のノズル径に対しても適用出来ると考えられる。

また、本研究においてジェットの切削能力が維持されるのは 400D 程度となる結果が得られた。地盤改良に際しては Fig.1 に示すように噴射管から斜めあるいは垂直にジェットを噴射し回転させて円柱状に掘削しコンクリートを流し込む。本研究で用いた 2.5mm の出口ノズル径の場合には 400D の切削距離は約 1m であるので、半径 1m(直径 2m)の改良体(円柱状のコンクリート)が作成できる。現在用いられている地盤改良の改良体

の直径は 2m から 5m 程度であるので、ここでの結果は実際の地盤改良工事の実績とも整合性を持ったものとなっている。

ここでの研究結果はより高圧、大流量、大口径のノズルを開発する際や複数のジェットを組み合わせより高性能な切削装置を開発する場合に設計の基礎的な知見として役立てることができると考えられる。

Nomenclature

D	: nozzle diameter	[m]
P	: pressure	[Pa]
R	: nozzle radius	[m]
r	: radial position	[m]
u	: velocity	[m/s]
ρ	: density	[kg/m ³]

参考文献

- [1] The Water Jet Technology Society of Japan, Water Jet Technology Handbook, Maruzen, Tokyo (1993).
- [2] Kiyohashi, H., Application of Water Jet Technology and Recent Developments (in Japanese), J. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.90, (829), 1487-1494 (1987).
- [3] Yoshida, H., Current Status of the Application of Water Jet Technology in the Field of Industries, J. of Jet Flow Engineering, Vol.19, (2), 12-26 (2002).
- [4] Phinney, R.E., The Breakup of Turbulent Liquid Jet in Gaseous Atmosphere, J. of Fluid Mechanics, Vol.60, 689-701 (1973).
- [5] Kobayashi, R., Arai, T. and Yamada H., Structure of a Water Jet and Damage Process of Metals in Jet Cutting Technology, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.53, (489), 1539-1542 (1987).
- [6] Yanaida, K. and Ohashi, A., Flow Characteristics of Water Jets in Air, Proceedings of 4th International Symposium of Jet Cutting Technology, Paper A3, BHRA (1978).
- [7] Yahiro, Y. and Yoshida, H., On the Characteristics of High Speed Water Jet in the Liquid and its Utilization of Induction Grouting Method, Second Int. Symp. on Jet Cutting Technol. G4, Cambridge (1974).