佐賀徹雄* ○瀬川茂樹* 小林敏雄* Deog Hee Doh**

Analysis of the Pulse jet by stereo-PIV

Tetsuo Saga, Shigeki Segawa, Toshio Kobayashi Deog Hee Doh

Pulsed jets that are considered as the most conspicuous unsteady phenomenon are fundamental flow in the field of hydraulic machinery, combustion engines, etc. In the present paper, the structure of the pulsed jet from a circular nozzle was analyzed by the flow visualization of PLIF and the velocity measurement of stereoscopic PIV. The temporal and spatial structure change of the mushroom ring vortex formed near the front of the pulse jet is discussed.

Key words : pulse jet, temporal and spatial structure, stereoscopic PIV, PLIF

1. はじめに

静止流体中に噴出する定常乱流自由噴流については過去多くの研究が行われその構造が詳細に解明されている。過渡的に変動する非定常噴流では、ディーゼル噴霧流に関する研究¹⁾、脈動噴流²⁾、間欠噴流³⁾、突発噴流⁴⁾などの研究報告例がある。しかし、噴流内部の過渡的、空間的、構造の変化を報告した例は少ない。そこで、本研究では突発噴流を対象として、噴流のせん端部分で形成される渦の内部構造の過渡

的な変化を3D-PIVを用いて解析した。モデルはヘッドタンクに貯えた水を、電磁弁の開閉により円形ノズルから静水中に突発的に噴出する噴流を対象とした。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概要を図1に示す。作動流体は脱気した水道水を用いた。サージタンク①の水をポンプ②でヘッドタンク③に揚げ、透明アクリル製のテストタンク⑤(200mm×200mm×500mm)との水位差H(500mm)を一定に保つようにオーバーフローさせて電磁弁④の開閉により円形ノズル⑥(外径4mm、内径(d)3.4mm、長さ120mm)から⑤の静水中に水平に噴出させる。⑤の水位はレベルタンク⑦で一定に保たれている。その後、供試流体は⑦から①へ戻る循環経路が組まれている。本実験で使用した電磁弁は応答速度 $5\text{ms} \pm 0.5\text{ms}$

① Surge Tank	⑧ Computer
② Pump	⑨ Pulse Generator
③ Head Tank	⑩ Synchronizer
④ Solenoid Valve	⑪ ND:YAG Laser
⑤ Test Tank	⑫ CCD Camera I
⑥ Circular Nozzle	⑬ CCD Camera II
⑦ Level Tank	

Fig.1 Schematic of experimental setup

Fig.2 Timing chart

* Instituted of Industrial Science, University of Tokyo, 4-6-1, komaba, meguroku, Tokyo

** Korea Maritime University

である。ノズル出口の噴流中心部の速度と d に基づく Re 数は約 950 である。電磁弁の開閉と撮影のタイミングチャートを図 2 に示す。画像の記録は、1) パーソナルコンピュータ⑧からスタート信号をパルスジェネレーター⑨へ送る。2) ⑨の制御で電磁弁④を開くと共に設定した遅延時間後でシンクロナイザー⑩に信号を送る。3) シンクロナイザー⑩は、ダブルパルス YAG レーザ (波長: 532nm、シート厚さ: 0.3mm、120mJ) ⑪で流れ場を時間間隔 ΔT 、照明時間 5 ns で 2 回レーザ照射し、2 台の PIV カメラ (カメラ角度: 25 度、使用レンズ: 105mm マクロレンズ、解像度: 1000Pixel $\times$ 1016Pixel $\times$ 8 bit) ⑫と⑬をレーザ照射と同期させて流れ場を撮影する。4) 画像をホストコンピュータのイメージメモリに記録する、4 ステップで行った。図中の ΔT は流速により 100 μ sec. $\sim$ 900 μ sec. の範囲内で設定した。なお、遅延時間 t は 0.025 秒間隔で変化させた。

2. 2 可視化画像

図 3 に LIF による突発噴流の経時的な構造変化を示す。使用したトレーサはローダミン B の水溶液 (0.1g/4 l) である。噴流のせん頭部で環状渦が形成される様子が示されている。

Fig.3 PLIF Visualizations

Fig. 4 Nozzle and test sections

2. 3 速度解析

噴流の流速計測は、希釈した水溶性修正液 (0.0025%) 内に含まれる酸化チタン微粒子 (平均粒系約 1 μ m、比重 3.9) をトレーサ粒子とし、ステレオ PIV により速度 3 成分を計測した。座標系はノズル出口の中心を原点にして噴流の軸方向を z 軸に、これと直交する半径方向の水平方向を x 軸に、垂直方向を y 軸とした。図 4 にノズルと計測断面を模式的に示す。速度の解析は、ケース 1) 噴流軸中心の y - z 断面の $t=0.25$ s の v, w 速度 2 成分、ケース 2) 噴流軸中心の y - z 断面の $t=0.35$ s から $t=0.525$ s までの u, v, w 速度 3 成分、ケース 3) 噴流軸に直交する x - y 断面 ($z/d=5, 7.5, 10, 12.5$) の $t=0.35$ s から $t=0.525$ s までの u, v, w 速度 3 成分の計測を行った。表 1 に計測位置、計測領域のサイズ、画像分解能および検査窓のサイズを示す。

Table 1 Measurement conditions

	Measurement Section		Measurement Region (mm)	Resolution (mm)	Interrogation window size (mm)
	x - y	y - z			
Case-1		○	10 $\times$ 10	0.01	0.32 $\times$ 0.32
Case-2		○	30 $\times$ 30	0.03	0.96 $\times$ 0.96
Case-3	○		20 $\times$ 20	0.02	0.64 $\times$ 0.64

3. 実験結果と考察

3. 1 PLIF による可視化

本実験装置では電磁弁の構造上、弁を開けた瞬間に z 軸方向に負圧が生じる。このために、わずかではあるがノズル内に周囲流体が引き込まれ、 $t=0.15$ s にノズル先端から噴流が噴出しはじめる。約 $t=0.25$ s に噴流のせん頭部では前方の静止流体の抵抗によりノズル径の約 2 倍の環状渦が形成され、周囲流体が取り込まれる。その後、環状渦はその形状を保ちながら下流側へと移動する。一方、電磁弁を閉じる時に z 軸方向への急激な圧力上昇が生じノズル出口からの噴流速度が急激に増加する。このため噴流後部の速度が前部に比べ速くなり、後部からの流体塊によりせん頭部が崩壊される。

ここでは、噴流せん頭部での時間的、空間的な過渡的な構造変化を $t=0.35$ s から $t=0.525$ s の間の PIV 計測により解析した。

3. 2 速度計測

3. 2. 1 面内速度の 2 成分計測

図 5 に噴出初期の可視化画像(a)と、ケース 1) の条件で解析した v, w 速度と渦度分布を(b)に示す。図 6(a)は $y/d=0$ の z 軸上の w の分布である。 w は (w の最大値を与える位置を図 5 (b) に●印で示す) $z/d=2$ 近傍で最大速度となる。図 6(b)は $z/d=2$ の y 軸上の w の分布をしたものである。図 5(b)からもわかるよう、 $y/d=\pm 1.0$ 付近では環状渦により噴流に周囲の流体が巻き込まれて逆流が生じていることがわかる。逆流

(a) Flow pattern (b) velocity distribution and vorticity

Fig.5 Structure near the jet front

(a) z-axis (b) y-axis

Fig.6 Velocity profile of centerlines

Fig.7 Temporary change of Jet structure

の最大値は噴流中央部の約 9%程度であった。

3. 2. 2 面内速度の 3 成分計測

図 7 に $t=0.35s$ から $0.025s$ 間隔で撮影した画像を示す。図の下方にノズル出口からの距離を示す。図 8 にケース 2) の条件で解析した噴流中心軸上の w を経過時間をパラメーターにして示す。噴流せん頭部は $t=0.35s$ から $t=0.5s$ までの間はほぼ $0.28m/s$ の等速度で平行移動している。噴流せん頭部の中

Fig.8 Velocity profile(w) on the centerline of the Jet

Fig.9 Velocity distribution(u,v) (y-z plane, x/d=0)

心から約1d 後方に、わずかではあるが速度が低くなる領域が現れる。 $t=0.5s$ では噴流後部の速度が電磁弁を閉じた時の圧力上昇により急激に加速され、 $z/d=5.8$ 付近で w は $0.64m/s$ となっている。この0.025 秒後には噴流後端の速度は急激に減速して $0.1m/s$ 程度となることが分かる。図9 に噴流せん頭部の中央位置が $z/d=5, 7.5, 10$ に到達したときの $y-z$ 断面の v, w 速度ベクトル分布を w の等速度線と重ねて示す。いずれの時刻においても噴流せん頭部の速度分布はほぼ相似な形状である。つぎに、噴流と直交する断面内の経時的な形状変化を $z/d=5$ の断面で調べた結果を示す。図10 にケース3)の条件で解析した $x-y$ 断面内の速度分布を示す。図11 と図12 には $t=0.375s$ と $0.4s$ の w 速度成分の x 方向の変化量 dw/dx を等値線で、 u, v 速度成分を矢印で示す。図10 と図11,12 から噴流の挙動を考察する。 $t=0.35s$ ではこの断面に噴流の先端部分が到達して噴流中心位置で速度がわずかに高くなる。 $t=0.375s$ では、図9 にも示したように噴流せん頭の中央部がこの断面に到達し、噴流の半径方向へ向かう u, v 成分が大きくなる。 dw/dx は x/d が 0.75 付近で最大となる。図12 で示す $t=0.4s$ ではすでに噴流せん頭部はこの計測断面を通過しており、後続の噴流部の構造が出現している。この断面では u, v 速度成分は噴流の軸中心方向へ向かっている。図13 に dw/dx の分布を示す。 t により噴流の内部構造が変化する状況が明瞭にとらえられている。

4. まとめ

突発噴流の過渡的な構造変化を PILF による可視化とステレオ PIV による速度計測により解析した。

- 1) ノズルから噴出した噴流は、静止流体の抵抗によりせん頭部で環状渦を形成する。環状渦の外径はノズル径の約2 倍程度である。
- 2) 噴流は、せん頭では噴流中心軸から外向きの流れが、せん頭部に後続する噴流部では内向きの流れが生じている。

参考文献

- 1) たとえば、曹ほか3名、可視化情報、19-Suppl.-No1、(1999-7)、229-38
- 2) 池田ほか5名、可視化情報、Vol.20-No78、(2000-7)、32-38
- 3) 田中、機論、49-448、(S58-12)、2783-2793
- 4) 白樫ほか2名、機論、52-475、(S61-3)、1032-1039

Fig.10 Temporary change of velocity distribution ($z/d=5$, $x-y$ sections)

Fig. 11 Distribution of dw/dx ($t=0.375s$)

Fig. 12 Distribution of dw/dx ($t=0.4s$)

Fig. 13 Distribution of dw/dx on x -axis ($z/d=5$)