

急拡大管における水中噴流の挙動に関する実験的研究(第2報)

— 管壁圧力分布と脈動流 —

Experimental Study on the Behavior of Ejected Flow at a Sudden Expansion (2nd report)

— Pressure Distribution and Pulsating Flow —

小林 敏雄*・蛭川 雅彦*・佐賀 徹雄*
Toshio KOBAYASHI, Masahiko HIRUKAWA and Tetsuo SAGA

1. ま え が き

前報¹⁾では急拡大管における一様流(清水)中に噴出ノズルによって噴流(空気)を噴出させ、水中噴流の様子および気液混合の様子を高速度撮影機を用いて観察し、流動状態の分類を試みるとともに、各流動状態に及ぼす幾何形状、噴流と急拡大部との相対位置および気液流量比の影響を考察した。しかし、それぞれの流動状態は当然、可視化観察結果のみならず、流れの特性値によっても分類されるはずである。本報では各流動状態における急拡大部下流の圧力分布の時間平均値および変動値の特徴を示すとともに、特に流動状態〔B〕の脈動現象の性質を明らかにする。

2. 実験装置と方法

図1に実験装置試験部の概略図を示す。管路中の一様流(水流)および空気噴流の制御方法は前報に詳述してある。本報では、気液流量比 N および噴出ノズル位置 l/D_1 を変化させることによって流動状態〔A〕、〔B〕、〔C〕、〔D〕および〔E〕を再現させ、それぞれの流動状態における下流管壁の圧力の時間平均値および各瞬間値を測定している。本報での急拡大部直径比は $D_2/D_1=1.6$ である。圧力孔は急拡大部に近い領域 ($0 \leq X \leq 2.5$) では $\Delta X/D_2=0.25$ おきに、急拡大部より離れた領域 ($2.5 \leq X/D_2 \leq 6.0$) では $\Delta X/D_2=0.50$ おきに、それぞれ円周上に4点設けられている。ここに X : 急拡大部始点から下流への距離、 ΔX : 圧力孔の X 方向間隔。圧力センサーとしては半導体圧力変換器(PLM-200GC)を用いている。図2に圧力孔および圧力センサーの取付状態を示す。圧力孔の内径は0.5mm、圧力センサー表面と管壁との距離は圧力孔中心で2mmである。センサーの信号は直流増幅器によって増幅されその時間平均値はデジタルポルトメータによって読みとられる。本報における平均化の積分時間は30sである。また、瞬時値はシンクロスコープによって記録されるとともにRMSボル

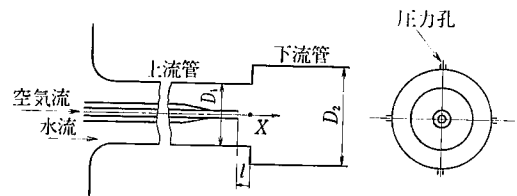


図1 試験部概略図

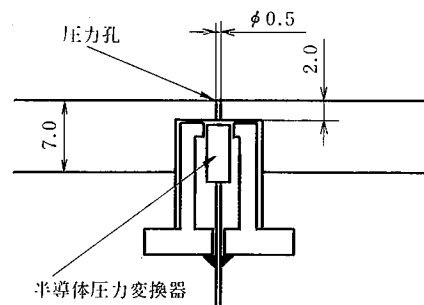


図2 圧力孔詳細

トメータによってRMS値が計算される。RMS値の積分時間は30sである。

3. 管壁圧力の時間平均値

前報での各流動状態に対応する管壁圧力の時間平均分布を図3に示す。圧力係数 C_p は $C_p=2(\bar{p}-p_0)/(\rho_l V_{11}^2)$ で定義される。ここに、 p_0 : 急拡大部始点 $X=0$ における静圧、 \bar{p} : 管壁圧力の時間平均値、 ρ_l : 液体密度、 V_{11} : 上流管における液相平均速度。流動状態〔A〕では C_p は X の増加とともに初めやや減少し、 $X/D_2=0.7$ 付近で極小となり、その後しだいに増加し、 $X/D_2=4$ 付近で圧力回復が完了する。これは単相流の場合と同じパターンである。流動状態〔B〕の流れは脈動流であり、キャビティの広がり角は周期的に変動し、各瞬間の圧力も変動する。しかし、圧力の時間平均分布は流動状態〔A〕のそれと類似の傾向を示す。流動状態〔C〕および〔D〕になると C_p は $X/D_2 \sim 1$ 付近で極大値をもち、その後

* 東京大学生産技術研究所 第2部

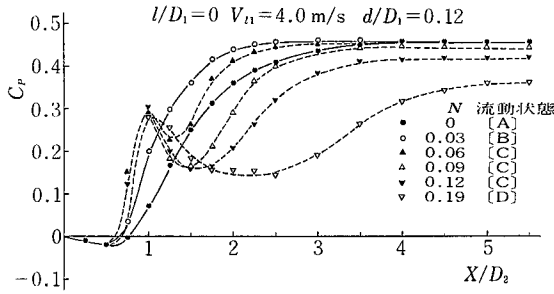


図3 時間平均圧力分布

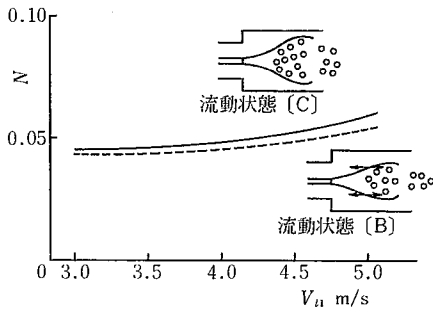


図4 流動状態 [B] と [C] の区別

減少して極小値をとり再び増加するという単相流とは著しく異なる傾向をもつようになる。この C_p の分布における極大値極小値の生じ始める気液流量比 N の境界を図4に実線で示す。図中の破線は視覚観察による流動状態 [B] と [C] の境界である。¹¹両者がほぼ一致することが示され、[B] と [C] を区別する物理量として C_p が有効であることがわかる。流動状態 [C]、[D] において C_p が極大値極小値をもつことは定性的には次のように説明することができる。すなわち、この流動状態における水中噴流の挙動を図5のように考え、断面2-3および断面3-4間に運動量保存則および液相流量保存則を適用する。液相速度が各断面で一様であると仮定し、気相の運動量および壁面せん断応力を無視すると各断面における平均圧力の関係は

$$\frac{\bar{p}_2 - \bar{p}_3}{\frac{1}{2} \rho_l V_{l1}^2} = 2 \left(\frac{A_1 - A_0}{A_2} \right)^2 \frac{(f_{g3} - f_{g2})}{(1 - f_{g2})(1 - f_{g3})}$$

$$\frac{\bar{p}_3 - \bar{p}_4}{\frac{1}{2} \rho_l V_{l1}^2} = 2 \left(\frac{A_1 - A_0}{A_2} \right)^2 \frac{(f_{g4} - f_{g3})}{(1 - f_{g3})(1 - f_{g4})}$$

となる。ここに f_{g2}, f_{g3}, f_{g4} はそれぞれ断面2, 3, 4における気体のボイド率である。断面2-3内ではキャビティは下流方向に拡がっているので $f_{g3} > f_{g2}$ と考えられる。したがって $\bar{p}_2 > \bar{p}_3$ となる。一方、断面4では流れ

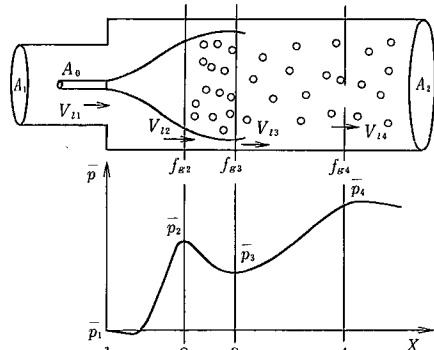


図5 急拡大部における流れと圧力分布

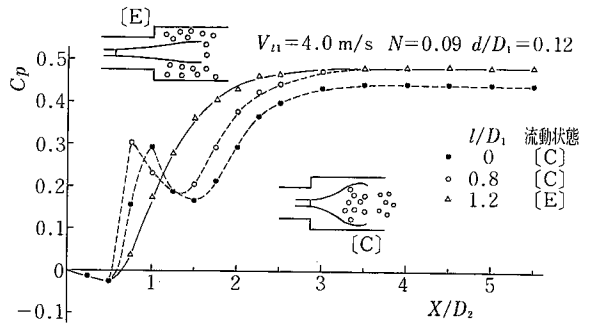


図6 ノズル位置と時間平均圧力分布

は気泡流とみなすことができ、断面3, 4のフローパターンの変化に対応してボイド率の関係は $f_{g3} > f_{g4}$ となる。したがって、 $\bar{p}_3 < \bar{p}_4$ が得られ、極大点極小点の存在が説明されることになる。図3において、 C_p の極大値とその位置が流動状態 [C]、[D] で N に依らず一定となるのは、 N の増加とともにキャビティの広がり角も増加するが、[C] あるいは [D] での N では広がり角が飽和しているためである。一方、 C_p の極小値を与える位置は N の増加とともに下流方向に移動するが、これはこの範囲で N の増加とともにキャビティの長さが増えるためである。

同一の V_l 、 N の場合でもノズル位置の相違により流動状態は変化する。¹¹この変化に対応して C_p の分布も異なってくる。図6に C_p に及ぼすノズル位置の影響の一例を示す。ノズル位置が急拡大部に近い場合 ($l/D_1 = 0, 0.8$) には流動状態は [C] であり、 C_p には極大点極小点が存在する。しかし l が大きくなる ($l/D_1 = 1.2$) と流動状態は [E] となり、 C_p の分布も急変し、図3の [B] と似た傾向を示す。すなわち、キャビティが動揺するような場合には分離された気泡は液相に十分混合され、均一な分布に近づき時間平均的には単相の流れと類似した効果をもつものと思われる。

研究速報

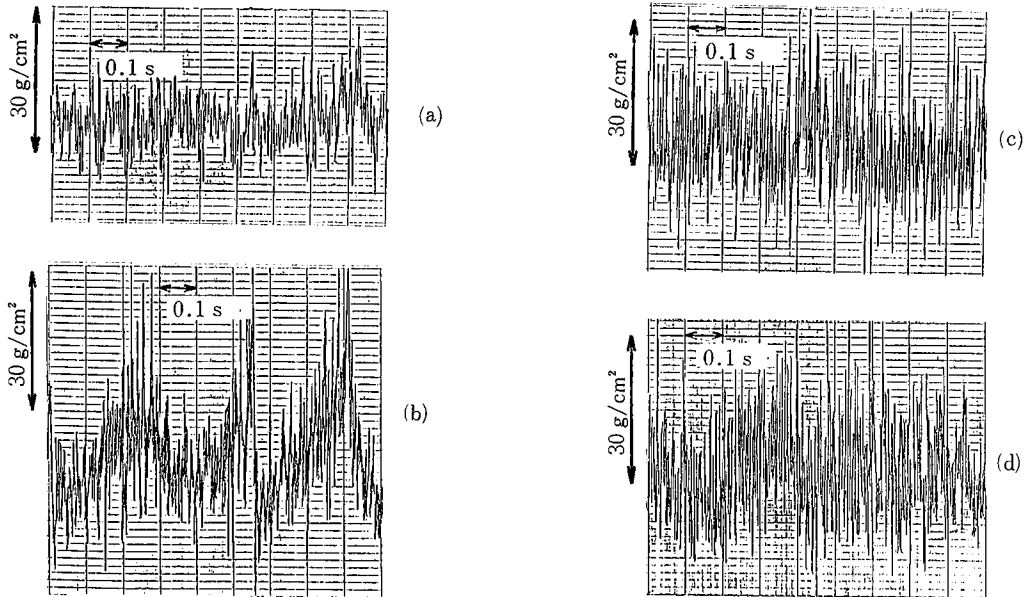


図7 圧力波形例 $X/D_2=1.0$

(a) 流動状態 A (b) 流動状態 B (c) 流動状態 C (d) 流動状態 D

4. 管壁圧力の変動値

管壁圧力の変動値 p' も変動状態の変化に対応して顕著な変化を示す. 流動状態 [A], [B], [C], [D] における圧力波形の一例を図7に示す. N が増加するにしたがって振幅・振動数ともに増大すること, [B]において低周波の脈動が存在することがわかる. 圧力変動の代表値としてここでは p' のRMS値 $\sqrt{p'^2}$ を採用する. $\sqrt{p'^2}$ の X 方向分布の N による変化を第8図に示す. 流動状態 [A] あるいは単相流の場合は, $\sqrt{p'^2}$ は X の増加にしたがって初め漸増し, $X/D_2 \sim 2$ の直前でピークに達しその後はゆるやかに減少する. 流動状態 [B], [C] あるいは [D] では [A] の場合よりも $\sqrt{p'^2}$ のピーク値は大きく, またピーク値を与える X の位置は上流側へ移動している. これは [B], [C], [D] では急拡大部でのキャビティの拡がりが大きく, 気液界面の乱れが増大するためである. また図より N が増加し, 流動状態 [D] になると下流側でも $\sqrt{p'^2}$ の値は [A], [B], [C] の場合に比べて大きな値をとることがわかる. $\sqrt{p'^2}$ の $X/D=1$ における位置での N による変化を示したのが図9である. N が小さい範囲 ($N < 0.03$) では N の増加とともに $\sqrt{p'^2}$ は増加し, $N \sim 0.03$ でピーク値をとりその後次第に減少してほぼ一定となり, $N \sim 0.12$ 付近で再び増加している. 流動状態と対応させると $\sqrt{p'^2}$ がピーク値をもつのは流動状態 [B] であり, [C] および [C-D 遷移領域] ではほぼ一定の値となっている. また [D] になると急激に増大する. $\sqrt{p'^2}$

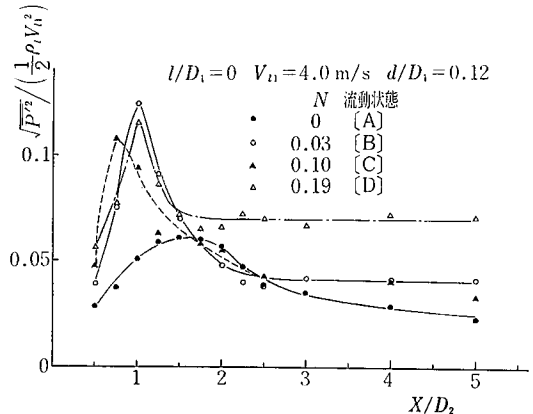


図8 変動圧力のRMS値の分布

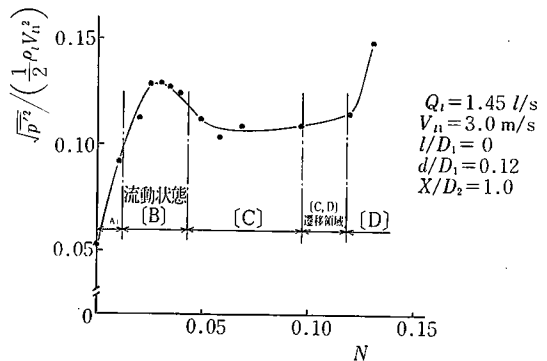


図9 変動圧力のRMS値の N による変化

が流動状態〔B〕で大きくなるのは流れが脈動流であるためであり、一方流動状態〔D〕で大きくなるのは、キャビティから分離した気泡同士が再び合体し合い波状流を形成するためであろう。

5. 脈動流

高速度撮影結果から二種類の脈動流〔B〕および〔E〕が存在することを報告したが、このうち〔E〕における脈動の振動数は空気管路系の定在波の振動数に等しく、流れ学的に興味深いのは〔B〕における脈動現象である。本報では〔B〕における脈動現象に限定し、ノズル入口および下流管の $X/D_2 = 1.0$ の位置の圧力孔からの信号を周波数分析することによって脈動流の振動数と N, V_{11} および下流管長さの関係を明らかにする。

N を一定に保ち V_{11} を変化させたときの振動数 f を図10に示す。図より f は V_{11} に比例し、無次元振動数 fD_2/V_{11} はノズル径によらず約0.03である。一方、 f は N によって変化する。 V_{11} を一定に保ち N を変化させたときの f を表1に示す。 N が増加すると fD_2/V_{11} は減少する傾向にある。従来より管路中での気液二相流の振動として、ヘッドタンクなどの上流側圧力容量と負性抵抗を有する管路の動的干渉による圧力降下振動^{2),3)} や下流管における定在波振動(いわゆる気柱振動)がよく知られている。本研究における〔B〕での脈動現象は①急拡大部でのキャビティの伸長縮小の振動であること、②ノズル位置を $l/D_1 = 0$ より下流側(すなわち急拡大部より下流側)へ移動すると脈動流は生じなくなること、③下流管長さを変化させても脈動流の振動数は変化しないこと(図11参照)、④気泡流中の圧力波の伝播速度を用いて計算された定在波振動数は本研究の振動数と著しく異なること⁴⁾ などのため上述の圧力降下振動や定在波振動とは異なり、急拡大部におけるキャビティの安定性に関係する自励振動であると予想される。

6. あとがき

急拡大部付近の水中空気噴流の挙動を高速度撮影結果より分類し、管壁圧力分布の特性と流動状態との対応を考察した。その結果次の結論を得た。

- (1) 流動状態〔C〕,〔D〕において時間平均圧力分布に極大値極小値が存在する。一方、流動状態〔B〕,〔E〕における脈動流の時間平均圧力分布は単相流のそれと類似している。
- (2) 流動状態〔B〕,〔C〕,〔D〕における変動圧力のRMS値の分布は $X/D_2 \sim 1$ 付近で極大値をもつ。特に、〔B〕,〔D〕においてこの性質は顕著にみられる。また、〔D〕においては下流測定点でもRMS値は大きな値をとる。
- (3) 流動状態〔B〕と〔C〕の分類に時間平均圧力

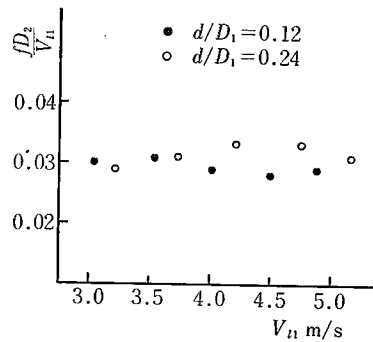


図11 脈動流の振動数と下流管長さ

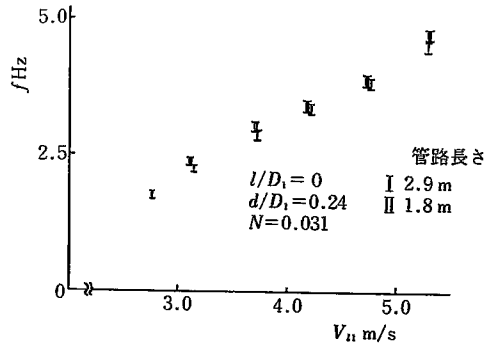


図10 脈動流の振動数(流動状態〔B〕)

表1 脈動流の振動数と気液流量比

N	$V_{11} = 3.0 \text{ m/s}$		$V_{11} = 4.0 \text{ m/s}$		fD_2/V_{11}
	f Hz	fD_2/V_{11}	N	f Hz	
0.020	2.4~2.5	0.032~0.033	0.023	3.5~3.7	0.035~0.037
0.025	2.3	0.031	0.031	3.1~3.2	0.031~0.032
0.030	2.1~2.3	0.028~0.031	0.035	2.7~3.1	0.027~0.031

分布の利用が有効である。

- (4) 流動状態〔B〕における脈動現象は下流管の定在波振動でも上流管負性抵抗による圧力降下振動でもなく、急拡大部におけるキャビティの安定性に関係する独特の振動現象である。
- (5) 流動状態〔E〕における脈動現象は空気管路系の定在波振動であり、本装置固有のものである。最後に本研究の主たる部分は文部省科学研究費補助金(昭和53,54年度一般研究B)に依ったことを付記する。(1980年6月25日受理)

参考文献

- 1) 小林・蛭川・佐賀, 急拡大管における水中噴流の挙動に関する実験的研究, 生産研究 32-9 (1980)
- 2) 大矢, 日本機械学会論文集 38-308 (1972)
- 3) 赤川他, 日本機械学会講演論文集 No. 780-11 (1978)
- 4) 石原・小林, 水平急拡大管における気液二相流の流動に関する一実験 昭和53,54年度科学研究費補助金成果報告 1980.3. pp. 2-33