

## 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1報)

## — 流動状態の分類と存在領域 —

Experimental Study on the Behavior of Ejected Flow at a Sudden Expansion, 1st report

— Classification of Flow Patterns —

小林 敏 雄\*・蛭 川 雅 彦\*・佐 賀 徹 雄

Toshio KOBAYASHI, Masahiko HIRUKAWA and Tetsuo SAGA

## 1. ま え が き

気液混相の流れは原子炉の冷却系、ボイラ蒸発管、化学プラントなど工業上多くの分野に現れ、流れの不安定現象や振動の原因となっていることも多い。これらの機器・装置の各構成要素の中でしばしば問題視されるのは急拡大部における気液二相流の挙動である。従来のこの種の研究では急拡大部に入る流れが十分に均一に混合された気液二相流であるような場合を取り扱ったものが多く、<sup>1)~4)</sup> 例えば水平急拡大管内の気液二相流は気泡型、分離流型およびスラグ流型の3種類の流動状態に分類できることが報告されている。<sup>5)</sup> しかし、実際の化学プラントや流体装置の管路系では急拡大部における気液二相流が液相と気相噴流に分離された流れ（いわゆる水中噴流）であることも多い。このような流れに対して詳しい研究はなされていない。

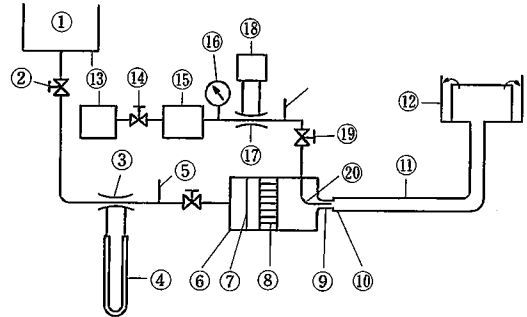
本報では急拡大管における水中噴流の挙動を観察・測定することによって流動状態の分類を試み、各流動状態の特徴および存在領域を実験的に明らかにすることを目的としている。

## 2. 実験装置と方法

管路の急拡大部の僅か上流において液相（清水）流中に気相（空気）をノズルを用いて注入し水中噴流を形成させる。急拡大部におけるこの水中噴流の挙動を高速度撮影によって観察し、流動状態の分類と存在領域の明示を試みる。

実験装置は液相管路系、気相注入系および測定系より成る。それらの概略図を図1に示す。液相管路系はヘッドタンク①、流量調節弁②、オリフィス③、整流室⑥、水平上流管⑨、急拡大部⑩、水平下流管⑪および下流タンク⑫から成る。ヘッドタンク（ヘッド：水平管路中心軸より4m）からの流れは整流室（254mmφ×1500mm、整流網⑦：20メッシュ1枚、整流格子⑧：□25×100 燐青銅ハネカム、1段）で整流され、絞られた後に上流管 $D_1=25\text{mm}\phi$ を経て急拡大部に導かれる。急拡大部付近の詳細図を図2(a)に示す。急拡大部を通過した流れはアクリル製の下流管（ $D_2=40\text{mm}\phi$ 、長さ2.9m）を経て下流タンク（ヘッド：水平管路中心軸より0.6m）に達し

\*東京大学生産技術研究所 第2部



- |          |         |             |
|----------|---------|-------------|
| ① ヘッドタンク | ⑨ 上流管   | ⑬ コンプレッサ    |
| ② 流量調節弁  | ⑩ 急拡大部  | ⑭ 減圧弁       |
| ③ オリフィス  | ⑪ 水平下流管 | ⑮ サージタンク    |
| ④ マノメータ  | ⑫ 下流タンク | ⑯ プルドン管圧力計  |
| ⑤ 温度計    |         | ⑰ 層流流量計     |
| ⑥ 整流室    |         | ⑱ ベッツ型マノメータ |
| ⑦ 整流網    |         | ⑲ ニードルバルブ   |
| ⑧ 整流格子   |         | ⑳ ノズル       |

図1 実験装置概略

大気に解放される。気相注入系はコンプレッサ⑬、減圧弁⑭、サージタンク⑮、層流流量計⑰、ニードルバルブ⑱および注入ノズル⑳から成る。注入空気はコンプレッサで約 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ に加圧された後に減圧弁によって減圧され、サージタンク（容積 $7.3 \times 10^{-3}\text{m}^3$ ）で圧力変動を除去された後に流量を調節されノズルより水中噴流として噴出される。ノズルの詳細図を図2(b)に示す。本報で用いられたノズルは内径 $d=3\text{mm}\phi$ 、 $6\text{mm}\phi$ の2種類である。

測定系は流量測定と挙動観察とから成る。液相の流量はオリフィス差圧のU字管マノメータ（使用液体：テトラブromエタン、比重2.96）による測定により、気相流量は層流流量計（友栄製1型、3型）により求められる。本報での流量範囲および気液流量比は次のとおりである。

液相流量 $Q_l$ :  $1.21 \sim 2.41 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ 気相流量 $Q_g$ :  $0 \sim 0.45 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$  (標準状態)気液流量比 $N$ :  $0 \sim 0.19$ 

(なお、液相流量範囲は水平上流管⑨内の平均流速 $V_{11}$ に換算すると $V_{11}: 2.53 \sim 5.30\text{m/s}$ )

水中噴流の挙動は高速度撮影装置（フォトソニック16-1 PL）で撮影される。撮影状況を写真1に、撮影条件を

研究速報

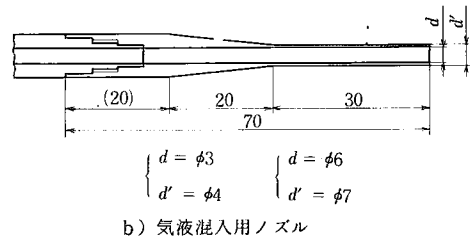
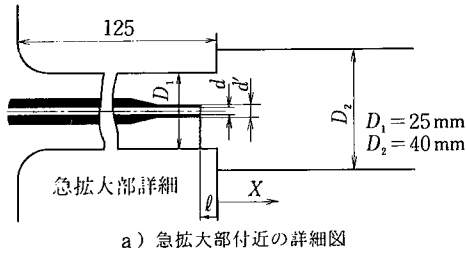


図2 実験装置詳細図

表1 高速度撮影装置による記録条件

フィルム	白黒ネガティブフィルム コダック4x-7224, ASA 400
照明光源	クセノン300W
レンズ	30~70mm F3.5
フィルム送り速度	250コマ/秒
シャッター速度	1/337.5秒
絞り	F5.6
タイムマーク	10 Hz

表1に示す。撮影された16ミリフィルムは映写解析装置(ナック16B/MB)によって画面を静止・拡大された後に解析される。本報でのこの装置の拡大率は25倍、高速度撮影装置の送りコマ速度は250コマ/sである。

3. 流動状態の分類と存在領域

急拡大部における水中噴流の挙動は気液流量比 $N$ 、噴流噴出口と急拡大部の相対位置 $l/D_1$ と寸法比 $d/D_1$ の影響を受けると予想される。ここに $l$ は図2(a)に示すように急拡大部始点よりノズル先端までの距離である。 $l/D_1 = 0$ 、 $d/D_1 = 0.12$ の場合の水中噴流の挙動は気液流量比 $N$ 、および液相速度 $V_{l1}$ に対して4種類の流動状態に大別される。各流動状態の存在領域を図3に示す。 $V_{l1}$ を一定にして $N$ を増加すると流動状態は順次、[A]、[B]、[C]、[D]と変化する。流動状態[A]は $N$ の小さな領域で存在し、下流管における流れは気相注入の影響を強くは受けず単相流としての取扱いが可能な状態である。この状態では写真2に示すようにノズル径とほぼ等しい径のキャビティ(気泡塊)が伸びており、その先端から小さな気泡が分離し下流側へ運ばれる。キャビティの長さは $N$ の増加とともに増加し、キャビティの広がり角も $N$ の増加とともに大きくなる。流動状態[B](写真3参照)では後述するようにキャビティの長さあるいは広がり角が周期的に変動するよう脈動流が存在する。またキャビティの後尾付近は白濁し、そこから気泡が周期的に分離する。 $N$ が増加すると流動状態は[C](写真4参照)となる。この領域では急拡大部における脈動は存在せず、キャビティの表面全体が白濁している。キャビティの広がり角は流動状態[B]の場合の広がり角の時間平均値よりも大きな値をもつ。一例として $V_{l1} = 4.0$  m/s、 $N = 0.06$ の場合の広がり角は約 $50^\circ$ である。さら

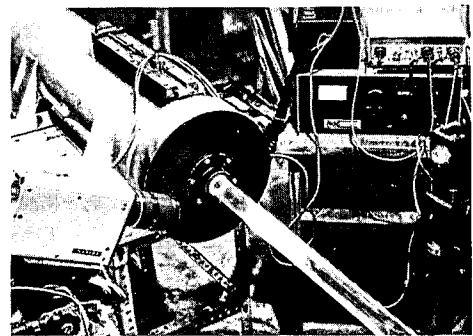


写真1 高速度撮影装置

に $N$ が増加すると流動状態[D](写真5参照)となる。この領域では急拡大部におけるキャビティの界面は透明状になり管中心部が空気で満たされた環状流となっていることがわかる。キャビティの長さは流動状態[B]、[C]に比べ長くなり、分離する気泡の直径も大きくなる。流動状態[C]と[D]の間には両者が混在する領域(ここでは遷移領域とよぶ)が存在する。

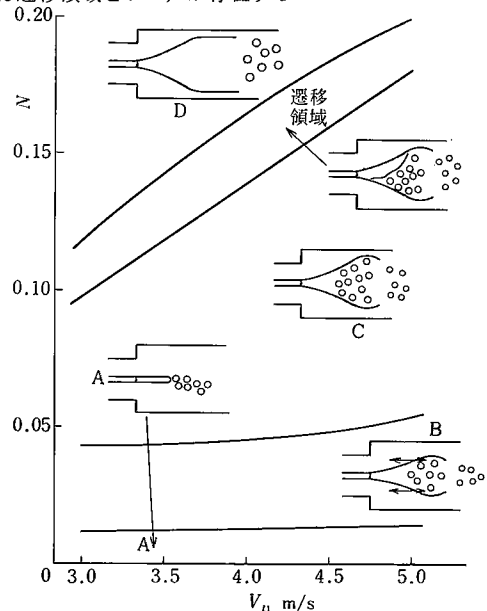


図3 流動状態の分類と存在領域1 ( $d/D_1 = 0.12$ 、 $l/D_1 = 0$ )

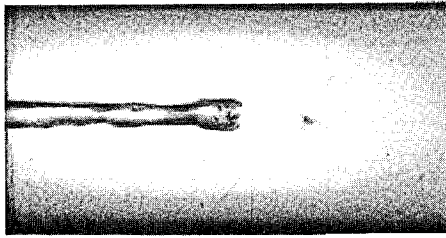


写真2 流動状態[A]

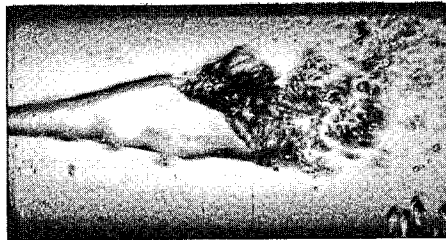


写真3 流動状態[B]

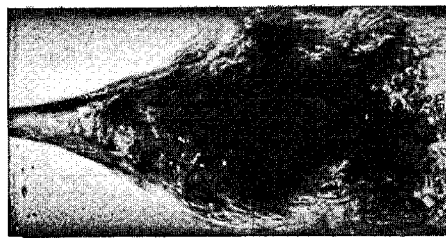


写真4 流動状態[C]



写真5 流動状態[D]



写真6 流動状態[E]

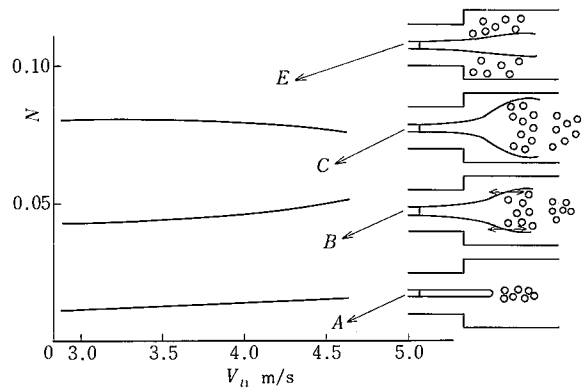


図4 流動状態の分類と存在領域2 ( $d/D_1 = 0.12$ ,  $l/D_1 = 1.2$ )

= 0の場合と同様に[A], [B], [C]と変化していき、それぞれの境界も  $l/D_1 = 0$  の場合とほとんど同じである。しかし、さらに  $N$  が増加すると流動状態は[C]から[E]に変化する。[E]では写真6に示すように流れはキャビティが長く伸びた環状流であり、キャビティの中心軸は振動し、分離した気泡は急拡大部の逆流領域に混入する。[C]と[E]の境界に及ぼす液相速度およびノズル位置の影響を図5, 6に示す。図より[C]から[E]へ変化する  $N$  の値は  $V_h$  が変化してもほぼ一定であるが、 $l/D_1$  の増加とともに減少することがわかる。

ノズル径が流動状態に及ぼす影響は本実験の範囲( $d/D_1 = 0.12 \sim 0.25$ )では余り大きくない。

#### 4. 脈 動 流

流動状態の高速度撮影装置による観察結果より、流動状態[B]と[E]で2種類の脈動現象が存在することが明らかになった。流動状態[B]では写真7の(1)~(4)に示すようにキャビティの広がり角が周期的に変動するような脈動流が生じ、その振動数は  $V_h, N$  によって変化する。このキャビティの広がり角の時間変化の一例を図7に示す。流動状態[E]では写真6に示すようにキャビティの中心軸が振動するような脈動流が生じる。この振動数は  $V_h, l/D_1$  に依存しないが空気流量に依存する。

#### 5. 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装置を用いて観察し、次の結論を得た。

- (1) 気液流量比, 液相速度, ノズル位置によって大別して5種類の流動状態に分類できる。
- (2) これらの流動状態の中にキャビティの安定性に関する脈動流が発生する領域が存在する。この脈動流の振動数は気液流量比, 液相速度の変化に伴い変化する。

なお、本研究は文部省科学研究費の補助があったこと

一方、ノズル位置も流動状態に影響を与える。 $d/D_1 = 0.12$ ,  $l/D_1 = 1.2$  の流動状態の分類を図4に示す。 $V_h$  を一定に保ち  $N$  を増加していくと流動状態は  $l/D_1$

研究速報

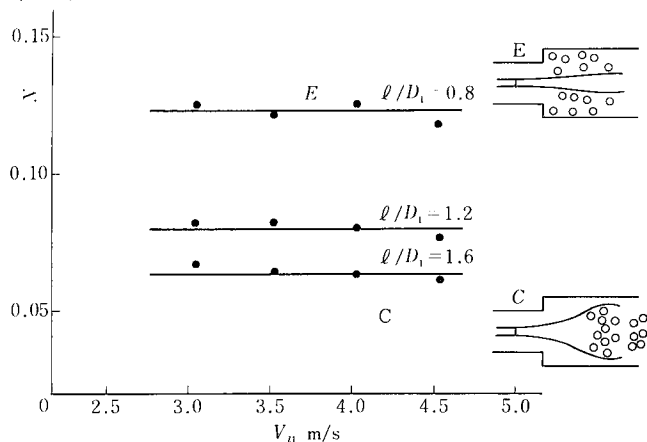


図5 流動状態〔C〕,〔E〕の存在領域と液相速度 ( $d/D_1 = 0.12$ )

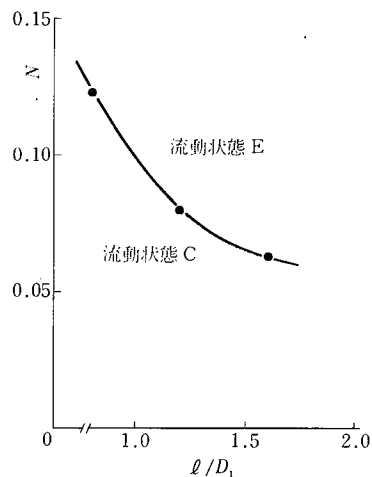


図6 流動状態〔C〕,〔E〕の存在領域とノズル位置 ( $d_1/D_1 = 0.12, V_{t1} = 3.0 \text{ m/s}$ )



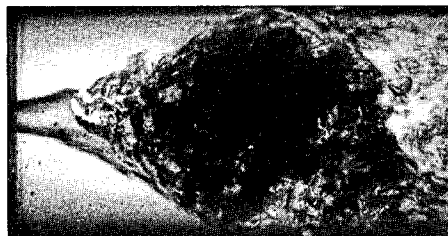
(1)



(3)



(2)



(4)

写真7 流動状態〔B〕における脈動流の連続写真(20/250秒間隔)

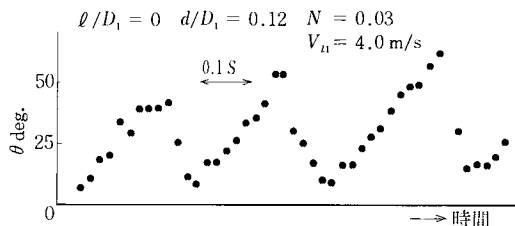


図7 キャビティの広がり角の時間変化

を付記する.

(1980年5月31日受理)

参考文献

- 1) P. A. Lottes, et al, Nuclear Science and Engineering 9 (1961)
- 2) O. J. Mendler, et al, Trans. ASME, Journal of Heat Transfer 83 (1961)
- 3) 世古田ほか, 日本機械学会論文集 33-255 (1967)
- 4) 原, 日本機械学会講演論文集 No. 780-11 (1978)
- 5) 佐藤ほか, 熊本大学工学部研究報告 19-2 (1970)