

# 過渡状態における旋回液体噴流の発生領域の予測

井口 大亮\*・大参 達也\*<sup>2</sup>・井口 学\*<sup>2</sup>

Prediction of Occurrence Region of Swirling Liquid Jet in Transient Period

Daisuke IGUCHI, Tatsuya OHMI and Manabu IGUCHI

## 1. 緒言

前報<sup>1)</sup>では、円筒容器の底部中心から液体を吹き込んだ際に形成される旋回液体噴流に関して、液体を吹き込み続けることで徐々に浴深が増加していく過渡状態(Transient)での特性調査を実験的に行った。実験項目の一つとして旋回液体噴流の発生領域を取り上げ、定常状態(Steady state)すなわち、吹き込んだ液体と同量の液体を引き抜き循環させることで浴深を一定に保った状態における旋回発生領域との比較を行い、両者の差異を明確にした。また過渡状態での実験では、液体を吹き込む前にあらかじめ一定量の液体を容器内に投入しておき、この初期液面高さが旋回発生領域に与える影響についての検討も行った。本報告では過渡状態における旋回発生領域の境界に対する実験式を、定常状態での実験式<sup>2)</sup>を参考にして導く。

## 2. 実験装置および方法

実験装置の概要を Fig. 1, 2 に示す。Fig. 1 は従来の定常状態における実験用の装置であり、内径  $D$  の円筒容器の底部中央に設置した内径  $d_{nen}$  のノズルから浴中に液体を噴流状態で吹き込み、同じ量の液体を容器側壁近傍に設置した4個のドレインノズルから排出し、ポンプを用いて循環させている。したがって、浴深  $H_L$  は一定に保たれている。Fig. 2 は過渡状態における実験用の装置である。別の大きな容器の液体を一定流量で吹き込む構造になっている。

いずれの場合も容器内径  $D$  を 0.13, 0.20, 0.30 m にとり、液

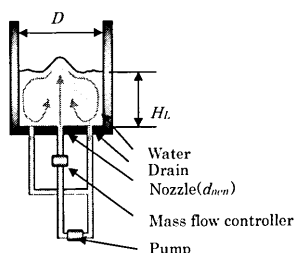


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus (steady state).

体吹き込みのノズル内径  $d_{nen}$  は  $1.3 \times 10^{-2}$  m に固定している。実験は水モデル実験とし、イオン交換水を使用している。

## 3. 旋回液体噴流の発生領域の予測

### 3.1 定常状態における旋回液体噴流の発生領域の境界に対する実験式

定常状態で浴内に形成された液体噴流は、浴深  $H_L$  と液流量  $Q_L$  がある条件を満たすとき、容器中心軸の周りに旋回する。旋回発生領域は Fig. 3 に示すようにアスペクト比  $H_L/D$  と修正ロスビー数  $Ro_m$  を用いて整理できることが分かっており、この領域の境界は四つの境界(I)~(IV)に分けられる。各境界に対して次の実験式が提案されている<sup>1,2)</sup>。

(a) 境界(I)

$$H_L/D = 0.0131 Ro_m^{-1/2} \dots \dots \dots (1)$$

(b) 境界(II)

$$H_L/D = 6.24 Ro_m^{1/3} \dots \dots \dots (2)$$

(c) 境界(III)

$$H_L/D = 1.69 \dots \dots \dots (3)$$

(d) 境界(IV)

境界(IV)については、下記の2種類の実験式が提案されている。これらは、アスペクト比の小さいところでは互いによく一致するが、アスペクト比が大きいたちころでは差が大きくなる。この領域では、あたかも池の噴水が水面を突き抜けるように液体噴流の吹き抜けが起こり、落下する液体が浴表面の運動を激しくさせるため、旋回が起こっている

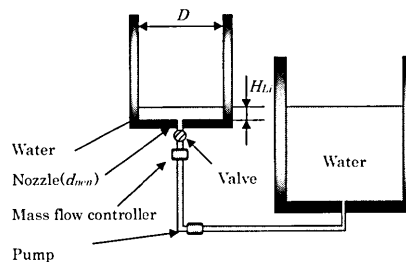


Fig. 2. Schematic of experimental apparatus (transient).

平成 18 年 7 月 7 日 受付 平成 18 年 10 月 13 日 受理 (Received on July 7, 2006; Accepted on Oct. 13, 2006)

\* 北海道大学大学院工学研究科博士後期課程学生 (Graduate Student, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

\* 2 北海道大学大学院工学研究科材料科学専攻 (Division of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

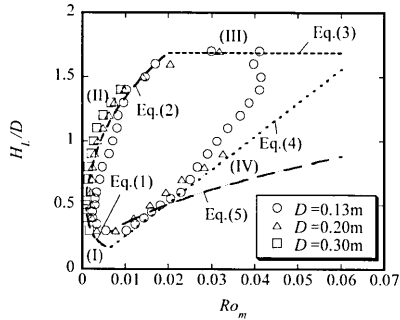


Fig. 3. Occurrence region of swirl motion of liquid jet (steady state).

かどうかの判定が難しく、いずれの実験式がより妥当であるかの判断はまだなされていない。今後、目視以外の方法によって旋回発生領域を決定し、式(4)、(5)のいずれが妥当か、別の式を導くべきか、あるいは境界(IV)をさらに細かく分割するほうがよいのかなどについての判断を下したい。

$$H_L/D = 26Ro_m \dots\dots\dots(4)$$

$$H_L/D = 3.6Ro_m^{1/2} \dots\dots\dots(5)$$

式(4)、(5)の物理的意味については文献<sup>2)</sup>を参照されたい。

修正ロスビー数は次式で表される。

$$Ro_m = Q_L^2 / (gd_{nen}^2 D^3) \dots\dots\dots(6)$$

ここでgは重力加速度である。

なお、予測式の切り替わるところは各予測式の交点であり、境界(I)~(IV)の境界ということになる。交点の近傍では予測の精度が落ちるが、これについては今後の課題としたい。

### 3.2 過渡状態における旋回液体噴流の発生領域の境界に対する実験式

#### 3.2.1 初期浴深H<sub>Li</sub>が0の場合

過渡状態における実験では、Fig. 2に示す内径Dの円筒容器の底部中央に設置した内径d<sub>nen</sub>のノズルから浴中に液体を噴流状態で吹き込み続け、浴深を時間に関して直線的に増加させた。この場合にも、あるアスペクト比H<sub>L</sub>/Dで液体噴流の旋回現象が発生し、やがて別のアスペクト比に達したときに停止することを明らかにした<sup>1)</sup>。Fig. 4に示すように、過渡状態における旋回発生領域は定常状態での旋回発生領域に比べてアスペクト比の大きな側へ移動している。本報告ではこの理由について述べるとともに、四つの境界(I)~(IV)に対して新たに実験式を提案する。

詳細は前報<sup>2)</sup>に譲るが、旋回現象の発生には浴表面に噴流が達したときの流量Q<sub>Ls</sub>と噴流の広がり重要な役割を演じることが分かっている。ノズルを出る際の液体の流量はQ<sub>L</sub>であるが、上昇する際に周囲の流体が巻き込まれるため、流量は大きくなり、浴深H<sub>L</sub>が一定のときの浴表面における流量Q<sub>Ls</sub>は次式で与えられる。

$$Q_{Ls} = Q_L \quad (H_L/d_{nen} < 3.3) \\ = 0.3Q_L H_L/d_{nen} \quad (H_L/d_{nen} \geq 3.3) \dots\dots\dots(7)$$

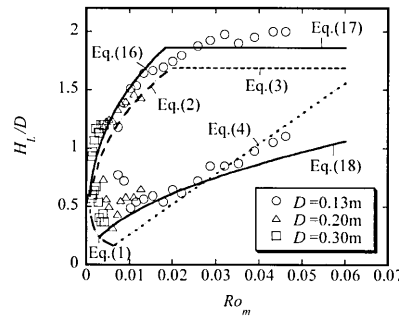


Fig. 4. Occurrence region of swirl motion of liquid jet in transient period (Initial bath depth was zero.).

また、噴流の半径方向への広がりを表す半値半幅b<sub>u</sub>は、ノズル出口のポテンシャルコア部を過ぎた領域では液流量Q<sub>L</sub>とノズル内径d<sub>nen</sub>に依存せず、次式で与えられる。

$$b_u = 0.09H_L \quad (H_L/d_{nen} \geq 3.3) \dots\dots\dots(8)$$

これらの式を基にして上記実験式(1)~(5)が導かれている。

本論文で対象としている過渡状態では、浴深が時間に関して直線的に増加しているため、噴流の周りには上向きの流れが存在しているとみなすことができる。すなわち、浴深が一定のときとは異なり、噴流の周りに次式で表される上昇速度U<sub>Bath</sub>が存在する。

$$U_{Bath} = 4Q_L / (\pi D^2) \dots\dots\dots(9)$$

このような上昇流に取り囲まれた噴流、すなわち環状噴流については流体工学の分野での研究がみられる。本実験で対象としている噴流とは直接比較できないが、その結果<sup>3)</sup>を参考にすると、上向きの流れが存在していない場合に比べて、流量Q<sub>Ls</sub>はやや大きく、半値半幅b<sub>u</sub>はやや小さくなることが予想される。

$$Q_{Ls} = Q_L \quad (H_L/d_{nen} < 3.3) \\ = 0.3Q_L H_L/d_{nen} + k_1 Q_L \quad (H_L/d_{nen} \geq 3.3) \dots\dots\dots(10)$$

$$b_u = k_2 H_L \dots\dots\dots(11)$$

ここでk<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>は定数である。

Fig. 3, 4中の境界(III)は流量Q<sub>Ls</sub>ではなく、半値半幅b<sub>u</sub>のみに依存することが分かっている<sup>2)</sup>、まず境界(III)に着目する。旋回が止む条件は、浴表面における噴流の半径方向への広がりがある臨界値に達したときに旋回が止まると考えることによって整理できることから<sup>2)</sup>、その考えを過渡状態に適用すると次式が得られる。

$$(4b_u)_{Transient} / D = (4b_u)_{Steady} / D \dots\dots\dots(12)$$

式(12)の左辺のb<sub>u</sub>に式(11)を、右辺のb<sub>u</sub>に式(8)を代入して整理し、容器内径Dで除すことによって次式が得られる。

$$k_2 = 0.09(H_L/D)_{Steady} / (H_L/D)_{Transient} \dots\dots\dots(13)$$

ここで(H<sub>L</sub>/D)<sub>Steady</sub>は式(3)から明らかかなように1.69である。Fig. 4において、(H<sub>L</sub>/D)<sub>Transient</sub>の値はRo<sub>m</sub>の増加につれてやや大きくなっているが、第1次近似としてこれを一定値とみなして、Fig. 4から読み取ると1.86が得られ、

$$k_2 = 0.082 \dots\dots\dots(14)$$

となる。この値は環状噴流で知られている値<sup>3)</sup>にほぼ一致している。

式(14)を式(11)に代入すると

$$b_u = 0.082H_L \dots\dots\dots(15)$$

となる。式(8)の代わりに式(15)を用い、式(10)の $k_1$ をまず0とおいて、前報<sup>2)</sup>に示した方法に従って過渡状態における境界(I)~(IV)を求めると次式となる。

(a) 境界(I)

$$H_L/D = 0.0131Ro_m^{-1/2} \dots\dots\dots(1)$$

(b) 境界(II)

$$H_L/D = 7.06Ro_m^{1/3} \dots\dots\dots(16)$$

(c) 境界(III)

$$H_L/D = 1.86 \dots\dots\dots(17)$$

(d) 境界(IV)

$$H_L/D = 26Ro_m \dots\dots\dots(4)$$

$$H_L/D = 4.33Ro_m^{1/2} \dots\dots\dots(18)$$

浴深一定、すなわち定常状態(Steady state)の場合と比較して明らかのように、半値半幅 $b_u$ の影響を受ける境界は(II), (III)および(IV)である。

Fig. 4に示すように、過渡状態における旋回発生領域の境界(II), (III), (IV)は $k_1$ を0と仮定した式によって±30%程度の偏差で近似できている。この実験結果から判断する限り、噴流が上昇するにつれて巻き込まれる流量は浴深一定の場合と同じである( $k_1=0$ )と考えてよい。本実験の範囲では、周囲流体の上昇速度と上昇液体噴流のノズル出口での速度の比は最大で0.01となる。したがって、他の容器においても、速度比がこれよりも小さい範囲では $k_1=0$ とおいてよいであろう。なお、この図からはやはり式(4)と(18)の優劣はつけにくい。

3.2.2 初期浴深 $H_{Li}$ が0でない場合

本論文で提案した実験式が、初期浴深 $H_{Li}$ が一定でない場合にも適用できるかどうかを調べた。Fig. 5に示すように、境界(II), (III)の測定値は初期浴深の値に関わらずほぼ同じ値をとっており、しかも式(16), (17)によって比較的精度よく近似できる。

境界(IV)に関しては、初期浴深のアスペクト比 $H_{Li}/D$ が0.3までは修正ロスビー数の小さい場合を除き、測定値は互いに重なり合っている。本論文で対象としている旋回現象は深水波型の旋回現象であり、この旋回運動はアスペクト比が0.3よりも大きいところで現れることから、初期浴深のアスペクト比 $H_{Li}/D$ が0.3以下であれば、旋回現象の現れる浴深に対する初期浴深の影響はないとみなしてよいことになる。初期浴深が0.4を超えると、明らかにその影響が現れており、境界(IV)は次式で表される。

$$H_L/D = 26Ro_m + H_{Li}/D \quad (H_{Li}/D > 0.3) \dots\dots\dots(19)$$

$$H_L/D = 4.33Ro_m^{1/2} + H_{Li}/D \quad (H_{Li}/D > 0.3) \dots\dots\dots(20)$$

Fig. 5中に、 $H_{Li}/D=0.4, 0.5$ に対して式(19), (20)を用いて計算した値をすべて書き込むと煩雑になるので、式(20)のみ

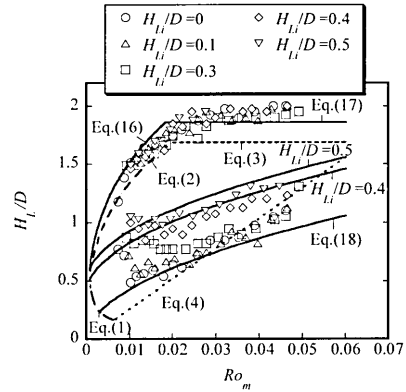


Fig. 5. Effect of initial bath depth on occurrence region of swirl motion of liquid jet (transient).

の結果を記入したが、測定値はこの式によって精度よく近似できている。式(19)を用いても同様な結果が得られた。したがって、この図からも式(19), (20)の優劣はつけがたい。

境界(I)についても、 $H_{Li}/D > 0.3$ のときには式(1)を下記のように修正する必要がある。

$$H_L/D = 0.0131Ro_m^{-1/2} + H_{Li}/D \quad (H_{Li}/D > 0.3) \dots\dots\dots(21)$$

4. 結論

過渡的な状態にある液体噴流の旋回発生領域の境界に対して次式を提案した。

(a) 境界(I)

$$H_L/D = 0.0131Ro_m^{-1/2} \quad (0.3 \geq H_{Li}/D) \dots\dots\dots(1)$$

$$H_L/D = 0.0131Ro_m^{-1/2} + H_{Li}/D \quad (H_{Li}/D > 0.3) \dots\dots\dots(21)$$

(b) 境界(II)

$$H_L/D = 7.06Ro_m^{1/3} \dots\dots\dots(16)$$

(c) 境界(III)

$$H_L/D = 1.86 \dots\dots\dots(17)$$

(d) 境界(IV)

$$H_L/D = 26Ro_m \quad (0.3 \geq H_{Li}/D) \dots\dots\dots(4)$$

$$H_L/D = 26Ro_m + H_{Li}/D \quad (H_{Li}/D > 0.3) \dots\dots\dots(19)$$

$$H_L/D = 4.33Ro_m^{1/2} \quad (0.3 \geq H_{Li}/D) \dots\dots\dots(18)$$

$$H_L/D = 4.33Ro_m^{1/2} + H_{Li}/D \quad (H_{Li}/D > 0.3) \dots\dots\dots(20)$$

記号

|            |               |                     |
|------------|---------------|---------------------|
| $D$        | : 容器内径        | [m]                 |
| $d_{nen}$  | : 水吹込み用ノズルの内径 | [m]                 |
| $H$        | : 容器高さ        | [m]                 |
| $H_L$      | : 浴深          | [m]                 |
| $H_{Li}$   | : 初期浴深        | [m]                 |
| $H_{Li}/D$ | : アスペクト比      | [-]                 |
| $Q_L$      | : 水流量         | [m <sup>3</sup> /s] |
| $Q_{Ls}$   | : 浴表面における水流量  | [m <sup>3</sup> /s] |

文献

- 1) D.Iguchi, T.Ohmi and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), No. 8, 475.
- 2) M.Iguchi, D.Iguchi and J.Yoshida: *Mater. Trans.*, **45** (2004), No. 5, 1764.
- 3) 社河内敏彦: 噴流工学, 森北出版, 東京, (2004), 148.