

# オイル層を有する水浴の過渡状態における 旋回液体噴流の発生領域予測

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 in Water Bath with Top Oil Layer

Daisuke IGUCHI, Tatsuya OHMI and Manabu IGUCHI

## 1. 緒言

円筒容器の底部中心に設置した単孔ノズルから液体を吹き込み続けると、浴がある深さに達したときに液体噴流が旋回を始めるが、さらに吹き込みを続けるとやがて旋回は停止する。前報<sup>1)</sup>では、このような徐々に浴深が増加していく過渡状態(Transient)における旋回液体噴流の、発生領域の境界の予測を水単相流の場合について行った。本研究では、予め浴内にスラッグのモデルであるオイルを所定量入れておいて水の吹き込みを開始したときに現れる旋回液体噴流について発生領域の境界に対する実験式を導いた。

## 2. 実験装置および方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。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、別の大きな容器に貯めておいた水を浴中に噴流状態で吹き込む構造になっている。容器内径  $D$  は 0.13 m、ノズル内径  $d_{nen}$  は  $1.3 \times 10^{-2}$  m である。オイルには Table 1 に示すように3種類のシリコンオイルとノルマルペンタンを用いた。

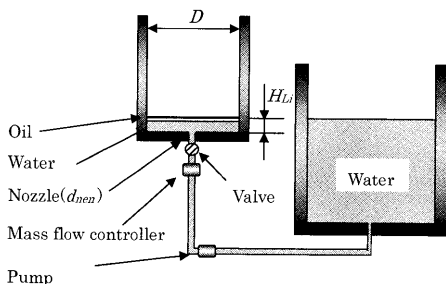


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus (transient).

## 3. 旋回液体噴流の発生領域の予測

### 3.1 定常状態における単相旋回液体噴流の発生領域の境界に対する実験式

液体噴流の旋回現象は、定常状態(Steady state)すなわち、吹き込んだ液体と同量の液体を容器の底部の隅に設置した4個のノズルから引き抜き、ポンプを用いて循環させることで浴深を一定に保った状態においても発生する。単相の液体を循環させたときの旋回発生領域は、Fig. 2 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、その境界は四つの境界(I)~(IV)に分けられる。著者らは各境界に対して次の実験式を提案している<sup>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)

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

Table 1. Physical properties of liquids.

	Water	Silicone oil 1cSt	Silicone oil 10cSt	Silicone oil 100cSt	N-pentane	Molten steel
Temperature (K)	298	298	298	298	298	1973
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	997	818	935	960	630	7210
Surface tension $\sigma$ (mN/m)	72.7	52.7	52.7	53.0	57.8	1000
Kinematic viscosity $\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)	0.89	1.0	10	100	0.37	0.929

平成18年7月13日受付 平成19年2月2日受理 (Received on July 13, 2006; Accepted on Feb. 2, 2007)

\* 北海道大学大学院工学研究科材料科学専攻 (Graduate Student, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

\*<sup>2</sup> 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)

(d) 境界(IV)

この境界については、下記の2種類の実験式が提案されている。

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

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

そもそもロスビー数とは地球の自転に対する大気の流れを整理するために用いる無次元数で、慣性力と回転力の比を表す。本系においては、ノズル出口における水噴流の慣性力と、円筒容器内の液体の持つ遠心力の比を用い、修正ロスビー数  $Ro_m$  として以下のように定義した。

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

ここで  $g$  は重力加速度である。アスペクト比の小さい領域では式(4)、(5)は互いによく一致しているが、アスペクト比が大きい領域では両者の差が大きくなる。後者の領域では、液体噴流の吹抜けが起こるため、旋回が起こっている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下していないが、本稿では式(5)を元に比較を行った。

3.2 オイル層のある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 初期アスペクト比  $H_{Li}/D$  が0.3以下の場合

Fig. 3に示すように、オイル層のある過渡状態における旋回発生領域は、定常状態ならびに水単相の過渡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が、オイルの種類に依存しない<sup>3)</sup>。本報告では、境界(I)~(IV)に対して新たに実験式を提案する。ただし前報<sup>1)</sup>によれば、初期アスペクト比  $H_{Li}/D$  が0.3以下の場合には、旋回発生領域に及ぼす  $H_{Li}/D$  の影響は現れないことが分かっているため、ここでもそれに倣って解析を進める。

旋回現象の発生には浴表面に噴流が達したときの流量  $Q_{Ls}$  と噴流の広がり重要な役割を演じる。ノズル出口での液体の流量は  $Q_L$  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  $H_L$  の浴表面における流量  $Q_{Ls}$  は次式で与えられる<sup>2)</sup>。

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

$$= 0.3mQ_L H_L/d_{nen} \quad (H_L/d_{nen} \geq 3.3) \dots\dots\dots (7b)$$

ここで、 $m$  はオイル層の影響を考慮するために導入した定数であり、その値は後で実験結果との比較によって決定する。一方、噴流の半径方向への広がりを表す半値半幅  $b_u$  は次式で与えられる。

$$b_u = kH_L \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $k$  は定数であり、これも実験結果との比較によって決定する。単相の液体を循環させて浴深を一定に保ったときの  $m$  と  $k$  の値はそれぞれ1と0.09である。これらの式を基にして上記実験式(1)~(5)が導かれている。

(a) 境界(III)に対する実験式

Fig. 3中の境界(III)は流量  $Q_{Ls}$  ではなく、半値半幅  $b_u$  のみに依存するので、前報<sup>1)</sup>と同様に、まず境界(III)に着目する。ただし、図が繁雑にならないようにするため、図中に(I)~(IV)の記号は描いていない。旋回が止む浴深は、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<sup>1,3)</sup>、次式で表される。

$$(4b_u)_{Transient}/D = (4b_u)_{Steady}/D \dots\dots\dots (9)$$

式(9)の左辺の  $b_u$  に式(8)を、右辺の  $b_u$  に

$$b_u = 0.09H_L \dots\dots\dots (10)$$

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。

$$k = 0.09(H_L/D)_{Steady} / (H_L/D)_{Transient} \dots\dots\dots (11)$$

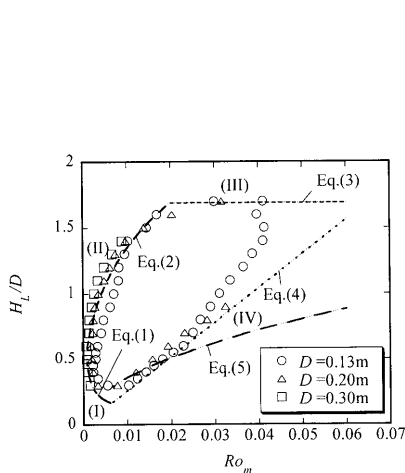


Fig. 2. Occurrence region of swirl motion of liquid jet (steady state).

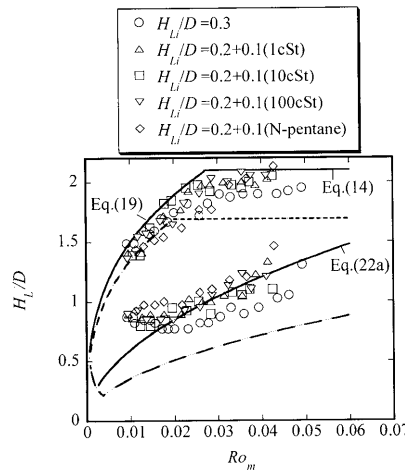


Fig. 3. Boundary of occurrence region of swirl motion in transient period [two-phase,  $D=0.13$  m,  $d_{nen}=13$  mm].

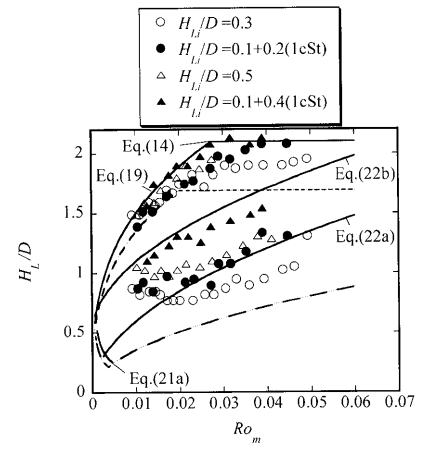


Fig. 4. Boundary of occurrence region of swirl motion in transient period [two-phase, thick,  $D=0.130$  m,  $d_{nen}=13$  mm].

ここで  $(H_L/D)_{\text{Steady}}$  は式(3)から明らかなように1.69であり、 $(H_L/D)_{\text{Transient}}$  をFig. 3から読み取ると2.10が得られ、式(11)に代入することによって

$$k=0.072 \dots\dots\dots(12)$$

となる。

式(12)を式(8)に代入すると

$$b_u=0.072H_L \dots\dots\dots(13)$$

となる。結局、境界(III)は次式で近似できる。

$$H_L/D=2.10 \dots\dots\dots(14)$$

(b) 境界(II)に対する実験式

つぎに、測定値が多くある境界(II)について検討する。前報<sup>3)</sup>を参考にすれば、境界(II)は次式で表される。

$$\rho_{L2}g[Q_{Ls}/(4\pi b_u^2)]^2/(2g)/(\rho_{L2}H_L)=0.0180 \dots\dots\dots(15)$$

ここで、 $\rho_{L2}$ は水の密度、 $g$ は重力加速度である。式(15)の $Q_{Ls}$ と $b_u$ に式(7b)、(13)を代入すれば次式が得られる。

$$H_L/D=8.38m^{2/3}Ro_m^{1/3} \dots\dots\dots(16)$$

境界(II)に対する測定値に合うように $m$ の値を決定すると

$$m=0.758 \dots\dots\dots(17)$$

となる。これより、 $Q_{Ls}$ と境界(II)はそれぞれ次式で表される。

$$Q_{Ls}=Q_L \quad (H_L/d_{nen}<3.3) \dots\dots\dots(18a)$$

$$=0.227Q_L H_L/d_{nen} \quad (H_L/d_{nen}\geq 3.3) \dots\dots\dots(18b)$$

$$H_L/D=6.96Ro_m^{1/3} \dots\dots\dots(19)$$

式(13)、(18b)より、オイルの層を通過することによって水噴流の広がりは小さくなり、流量も小さくなるのが分かる。

(c) 境界(I)に対する実験式

前報<sup>3)</sup>を参考にすれば、境界(I)は次式で表される。

$$[Q_{Ls}/\{\pi D^2/4\}]^2/(2gD)=1.25 \times 10^{-5} \dots\dots\dots(20)$$

$Q_{Ls}$ に式(18b)を代入して整理すると次式となる。

$$H_L/D=0.0173Ro_m^{-1/2} \dots\dots\dots(21a)$$

(d) 境界(IV)に対する実験式

煩雑になるので詳細は省略するが、前報<sup>3)</sup>を参考にすれば以下の実験式が得られる。

$$H_L/D=6.03Ro_m^{1/2} \dots\dots\dots(22a)$$

ここで、 $\rho_{L1}$ はオイルの密度、 $H_{Li}/D$ はオイル層の初期アスペクト比である。Fig. 3においてオイル層のある場合の旋回発生領域の境界(I)~(IV)は、ここで導いた式(21a)、(19)、(14)、(22a)によって近似できている。

3・2・2 初期アスペクト比 $H_{Li}/D$ が0.3よりも大きい場合

Fig. 4において、黒い丸印と三角印で示したスラグ層の

ある場合の境界(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(19)、(14)によって近似できる。

境界(I)に対しては次式を導いた。

$$H_L/D=0.0173Ro_m^{1/2}+H_{Li}/D \quad (H_{Li}/D>0.3) \dots\dots\dots(21b)$$

境界(IV)に関しては、単相流の場合と同様に初期浴深が0.4を超えると、明らかにその影響が現れており、境界(IV)は式(22b)で表される。

$$H_L/D=6.03Ro_m^{1/2}+H_{Li}/D \quad (H_{Li}/D>0.3) \dots\dots\dots(22b)$$

Fig. 4中に、 $H_{Li}/D=0.3, 0.5$ に対する測定値を実験式と比較して示す。黒い丸印と三角印で示した測定値は式(22a)、(22b)によって近似できている。なお、単相流の $H_{Li}/D=0.5$ に対する実験式は式(23)で与えられるが、煩雑さを避けるために描いていない。

$$H_L/D=4.33Ro_m^{1/2}+H_{Li}/D \quad (H_{Li}/D>0.3) \dots\dots\dots(23)$$

4. 結論

オイル層のある浴内の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)

$$H_L/D=0.0173Ro_m^{-1/2} \quad (H_{Li}/D\leq 0.3) \dots\dots\dots(21a)$$

$$H_L/D=0.0173Ro_m^{-1/2}+H_{Li}/D \quad (H_{Li}/D>0.3) \dots\dots\dots(21b)$$

(b) 境界(II)

$$H_L/D=6.96Ro_m^{1/3} \dots\dots\dots(19)$$

(c) 境界(III)

$$H_L/D=2.10 \dots\dots\dots(14)$$

(d) 境界(IV)

$$H_L/D=6.03Ro_m^{1/2} \quad (H_{Li}/D\leq 0.3) \dots\dots\dots(22a)$$

$$H_L/D=6.03Ro_m^{1/2}+H_{Li}/D \quad (H_{Li}/D>0.3) \dots\dots\dots(22b)$$

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]
- $H_L/D$  : 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*, **93** (2007), No. 3, 262.
- 2) D.Iguchi, T.Ohmi and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), No. 8, 475.
- 3) M.Iguchi, D.Iguchi and J.Yoshida: *Mater. Trans.*, **45** (2004), No. 5, 1764.