気液対向二相流のフラッディング*

(第1報, 垂直な円形および環状流路に発生するフラッディング)

鈴木 康一^{*1}, 鳥飼 欣一^{*1}
平田 昭彦^{*2}, 宇佐美 俊^{*3}

Flooding of Counter-Current Two-Phase Flow of Gas and Liquid

(1st Report, On Flooding in Vertical Circular and Annular Channel)

Koichi SUZUKI, Kinichi TORIKAI,
Akihiko HIRATA and Shun USAMI

Experimental investigations are performed on flooding which occurs in vertical circular and annular channels. Water film flows down along the channel surface through porous cylinders, and air is raised from the channel bottom by a suction pump. The flooding velocity of the circular tube is proportional to the diameter in agreement with earlier investigations. For the annular channel, a ratio of liquid flow rates of both channel surfaces has a strong effect on the flooding velocity. The conventional method cannot predict the flooding velocity. In the present study, a characteristic diameter of the annular channel is determined by the ratio of liquid flow rates for Reynolds number of liquid and gas. The flooding velocity is approximately indicated as a uniform curvature with the Reynolds number of liquid.

Key Words: Pipe Flow, Multiphase Flow, Annular Channel, Flooding, Liquid Film

1. 緒 言

前報⁽¹⁾では, 垂直円管を流れる気液二相流のフラッディングを中心とした流動模様, 気液界面の変動および管摩擦について報告した。

垂直円管の管壁に液相を膜状に自然落下流動させると, 下流にゆくに従い液膜表面の波立ちが激しくなり, その波高は液相流量が増加して液膜が厚くなるほど高くなり, かつ上昇する気相の速度が速くなるほど波立ちが激しくなる。そして管の下部で液相のブリッジが形成されてフラッディングが始まり, 管から流出する液相の流量は気相流速の増加とともに減少し, ついに液相は下に流れ落ちることなく全部が吹き上げられてしまう。このようにフラッディングは液相のブリッジの形成によって始まるが, ブリッジの形成は気液の条件⁽²⁾⁽³⁾のほかに, 特に流路の形状が関係してくると考えられる。川崎⁽⁴⁾, 数上⁽⁵⁾, 刑部⁽⁶⁾は, 狭い矩形流路に発生するフラッディングについて報告し, また植田⁽⁷⁾は二重管(環状流路)や3本および4本バンドル

におけるフラッディングを報告している。しかし, 環状流路に発生するフラッディングに関する詳細な研究はまだ例が少なく, 最近では小泉ら⁽⁸⁾の研究例が見られる程度である。

本研究では, 長さが1 m, 内径14, 20, 28, 34 mmの4種類の垂直円管と外管の内径が34 mmに対して内管の外径が14 mmと20 mmの2種類の垂直環状流路の空気-水系の気液対向二相流について, フラッディング開始から液相がすべて吹き上げられてしまうまで実験を行い, 前報⁽¹⁾の結果も合わせて円管および環状流路のフラッディング速度の整理を試み, 従来の整理方法と比較検討を行った。

2. 記 号

d : 環状流路の内管外径 mm

D : 円管の内径または外管の内径 mm

D_{eq} : 流路の(水力的)等価直径 mm

D_{FR} : 流路の液相流量比配分直径 mm

Fr : フルード数 $= [\rho_g(U_g + U_l)^2 / \rho_l g y_l]^{1/2}$

g : 重力の加速度 m/s²

L : 管または流路の長さ m

Re_g : フラッディング発生時の気相レイノルズ数

$Re_g = 4\rho_g Q_g / \pi \mu_g D_{eq}$

* 原稿受付 1995年9月18日。

^{*1} 正員, 東京理科大学理工学部 (〒278 野田市山崎2641)。

^{*2} (株)東芝 (〒183 府中市東芝町1)。

^{*3} 大阪商船三井船舶(株) (〒105 91 東京都港区虎ノ門2-1-1)。

- Q_g : 気相の体積流量 m^3/s
 Q_l : 液相の体積流量 m^3/s
 Re_g^* : 代表長さに D_{FR} を用いた気相レイノルズ数
 Re_l : 液相 (液膜) レイノルズ数
 $= 4\Gamma/\mu_l = 4\rho_l Q_l/\pi\mu_l D_{eq}$
 Re_l^* : 代表長さに D_{FR} を用いた液相 (液膜) レイノルズ数
 U_g : フラッディング発生時の見掛けの気相平均速度 m/s
 U_l : 見掛けの液相 (液膜) 平均速度 m/s
 U_g^* : フラッディング発生時の気相の無次元速度
 $= U_g \rho_g^{1/2} / [gD(\rho_l - \rho_g)]^{1/2}$
 U_l^* : フラッディング発生時の液相の無次元速度
 $= U_l \rho_l^{1/2} / [gD(\rho_l - \rho_g)]^{1/2}$
 X : 表面張力を考慮した無次元数
 $= (1/Re_l)^{1/3} \cdot (\rho_l g D^2 / \sigma)^{1/4} \cdot (\mu_g / \mu_l)^{2/3}$
 y_l : 液膜厚さ mm
 Γ : 壁面の単位幅当たりの質量流量 kg/ms
 μ_g : 気相の粘性係数 $\text{Pa}\cdot\text{s}$
 μ_l : 液相の粘性係数 $\text{Pa}\cdot\text{s}$
 ρ_g : 気相の密度 kg/m^3
 ρ_l : 液相 (液膜) の密度 kg/m^3
 σ : 液相 (液膜) の表面張力 N/m

3. 実験

3.1 実験装置 環状流路の実験装置の主要部を図1に示す。テストセクションには、透明なアクリル管を同軸に配置して、内管と外管で環状流路を作る。テストセクション下端の外管出口の形状はベルマウスとし、内管は直管切落とした。テストセクション

Fig. 1 Experimental apparatus

の上端には、平均粒径 $100\ \mu\text{m}$ の黄銅粒子の焼結合金の多孔質管を備え、これらにヘッドタンクからロータメータを通し、水を導きしみださせて、外管内壁および内管外壁に水の液膜を作り流下させた。流下液相の体積流量をロータメータでテストセクション下端では、両壁を流下する液相を採取容器でそれぞれ別々に採取し同時に質量流量を測定した。

気相には空気を用い、ブロワの吸引口をテストセクションの上端の気液分離器につなぎ、テストセクション下端より空気を吸引する。気相の流量はブロワ入口のバルブで調節しロータメータで体積流量を測定した。液相 (液膜) および気相の流速 U_l および U_g は、それぞれの体積流量を流路断面積で割った見掛け流速とした。

テストセクションの長さは $1\ \text{m}$ で、外管内径が $34\ \text{mm}$ について内管外径が $14\ \text{mm}$ と $20\ \text{mm}$ の2種類である。単管については、前報⁽¹⁾では管内径が $20\ \text{mm}$ で長さが $1\ \text{m}$ と $2\ \text{m}$ の2種類であったが、本実験では、長さが $1\ \text{m}$ 、管内径が $14, 20, 28\ \text{mm}$ および $34\ \text{mm}$ の4種類について実験を行った。

3.2 実験 環状流路において、内管の外壁と外管の内壁に流下させる液相の質量流量は、内管:外管をそれぞれ $10:0, 7:3, 5:5, 3:7, 0:10$ とした。両壁を流下する液相の総質量流量および流路の等価直径 (水力学的直径) D_{eq} から求めた液相レイノルズ数を設定し、気相流速を増加させて、液膜のブリッジが上昇し始めるところを目視観察し、かつテストセクションから流出する液相の質量流量が減少を始めるところをフラッディング開始とした。そのときの気相流速をフラッディング速度 U_g とした。そして、各設定液相レイノルズ数について、液相流出流量が零になるまで実験を行った。

4. 結果と考察

4.1 垂直円管に発生するフラッディング 管長が $1\ \text{m}$ 、管内径 D が $14, 20, 28, 34\ \text{mm}$ の直管に発生するフラッディングの開始速度を気相レイノルズ数 Re_g で表し、液相レイノルズ数 Re_l について整理した結果を、前報の実験結果と合せて図2に示す。これを見ると、 Re_l が増加すると、すなわち液膜の厚さが増すと、いずれの管径についてもフラッディング開始時の気相レイノルズ数 Re_g が小さくなる。また細い管ほどフラッディングが起こりやすいことがわかる。このことは、前報⁽¹⁾でも述べたが、液膜厚さが増加するほどブリッジが形成しやすくなるので、気相流速が低くてもフラッディングが発生することを示している。前

報の $D=20$ mm, $L=2$ m の結果から見ると, 液相の流量が増加してくると同じ管径でも長さの差が見られるが, 管径の違いによる影響から見るとそれは極めて小さい。

また, 管径 D とフラッディング速度 U_g を液相レイノルズ数 Re_l について整理した結果を図3に示す。この結果から, フラッディング速度は各液相レイノルズ数について比較的良好に整理され, U_g は管径 D におおむね比例している。神永⁽²⁾ らのオーバフロー方式では, U_g は $D^{0.5}$ に比例するという結果を得ているが, フラッディングは管の端部の形状や液相の注入方式によって異なってくるといわれているので, これは本実験のような多孔質管からしみだす方式との差異によるものと考えられる。

さらに, Wallis⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ の整理法を用いて気相と液相の無次元速度 U_g^* , U_l^* で整理した結果を前報⁽¹⁾ と合せて図4に示す。 U_l^* が大きくなると, すなわち, 液相レ

Fig. 2 Flooding velocity in vertical circular tube ($L=1$ m, $D=14, 20, 28, 34$ mm)

Fig. 3 Flooding velocity with diameter in vertical circular tube ($L=1$ m)

イノルズ数 Re_l が大きくなると, U_g^* は管径 D により少し異なるが, おおむね管径 D によらず式(1)で整理することができる。本実験の結果は, Wallis⁽⁹⁾ の空気-水系の実験式とは異なるが, 粘性の高い液のフラッディングの実験式⁽¹⁰⁾ に近い。

$$U_g^{*1/2} + 0.531 U_l^{*1/2} = 0.91 \dots \dots \dots (1)$$

次に, 鈴木, 植田⁽³⁾ の整理法を用いて, フラッディングの開始を液膜の表面張力を考慮した無次元数 X とフルード数 Fr の整理結果を図5に示す。前報の結果も合せて管長 L が 1 m, 管径 D が 14, 20, 28 mm および 34 mm の 4 種類について整理した結果, 管長 L が 1 m, 管径 D が 18 mm の鈴木, 植田の結果⁽³⁾ とわずかに異なるが, おおむね一つの曲線でまとめることができ, 式(2)で表すことができる。

Fig. 4 Flooding velocity in vertical circular tube (Wallis' method⁽¹⁰⁾)

- (2) $Fr = 10.80 \log_{10} X + 24.24$
 ($L=1$ m, $D=20$ mm) by present experiment
 (3) $Fr = 8.29 \log_{10} X + 19.18$
 ($L=1$ m, $D=18$ mm) by Suzuki and Ueda⁽³⁾
 (4) $Fr = 11.94 \log_{10} X + 25.0$
 ($L=1.5$ m, $D=18$ mm) by Suzuki and Ueda⁽³⁾

Fig. 5 Flooding velocity in vertical circular tube (Method by Suzuki and Ueda⁽³⁾)

$$Fr = 10.80 \log_{10} X + 24.24 \quad \cdots \cdots (2)$$

以上の結果から、異なる管径の垂直円管に発生するフラッシング開始の気液の条件は、気液混合部の形状および混合方式によって異なるものの、概略一つの式でまとめることができる。これは、前報で求めたものを含めて、より一般化したものである。

4.2 垂直環状流路に発生するフラッシング

テストセクションには、管長 $L=1$ m、外管の内径 $D=34$ mm に対して内管の外径 $d=20$ mm と 14 mm の2種類とし、それぞれの環状流路におけるフラッシング開始時の液相レイノルズ数 Re_l と気相レイノルズ数 Re_g の関係を等価直径 $D_{eq}=14$ mm について図6に、 $D_{eq}=20$ mm について図7に示す。本研究では、環状流路における Re_l および Re_g を水力学的等価直径 D_{eq} の円形流路の液膜レイノルズ数および気

相レイノルズ数と仮定した。図6, 7には、 $D=14, 20, 28$ mm の垂直円管の結果を合せて示す。両結果とも内管と外管を流下する液相の流量の割合によってフラッシング発生時の気相レイノルズ数 Re_g すなわちフラッシング速度が異なることを示している。そして液相流量の合計が大きいほど、すなわち Re_l が大きい

Fig. 6 Flooding velocity in vertical annular channel ($L=1$ m, $D=34$ mm, $d=20$ mm, $D_{eq}=14$ mm)

Fig. 7 Flooding velocity in vertical annular channel ($L=1$ m, $D=34$ mm, $d=14$ mm, $D_{eq}=20$ mm)

- (1) $U_g^{*1/2} + 0.531U_l^{*1/2} = 0.91$
for cylindrical tube by present experiment
- (5) $U_g^{*1/2} + U_l^{*1/2} = 0.88 \sim 1$
by Wallis⁽⁹⁾
- (6) experimental result ($D_{eq} = D - 0.8d$)
for annular channel by Koizumi, et al.⁽⁸⁾

Fig. 8 Flooding velocity in vertical annular channel ($D_{eq}=14$ mm, Wallis'⁽¹⁰⁾ method)

- (1) $U_g^{*1/2} + 0.531U_l^{*1/2} = 0.91$
for cylindrical tube by present experiment
- (5) $U_g^{*1/2} + U_l^{*1/2} = 0.88 \sim 1$
by Wallis⁽⁹⁾
- (6) experimental result ($D_{eq} = D - 0.8d$)
for annular channel by Koizumi, et al.⁽⁸⁾

Fig. 9 Flooding velocity in vertical annular channel ($D_{eq}=20$ mm, Wallis'⁽¹⁰⁾ method)

ほどその差は大きくなる。また流路かんげきの大きい (図7) ほうが Re_g は大きく、かつ内管と外管の液相流量の違いによる Re_g の違いは顕著である。図6および図7には、垂直円管の結果も載せてあるが、この場合も円管の直径が大きいものほど Re_g は大きく、環状流路の場合と定性的に同様である。

4・3 環状流路についての従来の整理法

Wallis⁽¹⁰⁾ 整理法により、気相と液相の無次元速度、 U_i^* および U_o^* を用いて整理した結果を、 $D_{eq}=14$ mm について図8に、 $D_{eq}=20$ mm について図9に示す。本実験結果は、 $(U_i^*)^{1/2}$ が小さい領域では、両方の環状流路ともほぼ近い値を示すが、大きい領域では、両方とも環状流路の両壁を流下する液相流量によってフラッディング速度の差が大きくなっていく。また、小泉ら⁽⁸⁾ の内径 40 mm の外管に同軸に外径が 20~36 mm の4種類の直管を配置した環状流路の実験結果では、最初に外管と内管を流下する液相質量流量の割合を周長比で配分して、垂直円管の場合も含めて水力学等価直径を用いて Wallis の整理法⁽¹⁰⁾ で整理しているが、流路かんげきによるフラッディング速度の差が大きく、代表直径に水力学直径を用いることは、不適当であると述べている。そこで、代表直径を $D_{eq}=D-ad$ として $a=0.8$ としたときに、円管の場合も含めて環状流路のフラッディング速度がほぼ一つの曲線にかなり近くまとめられ整理できるという結果を得ている。

次に、垂直円管の場合と同様に鈴木、植田の整理

法⁽³⁾ により、整理してみた。その結果を $D_{eq}=14$ mm について図10に、 $D_{eq}=20$ mm について図11に示す。無次元量 X が 10^{-2} 程度以上では、等価直径 $D_{eq}=14, 20$ mm ともその差は小さく特に $D_{eq}=14$ mm については、本実験の垂直円管の場合にかなり近い値を示している。しかし、液相流量が多い X が小さい範囲では、内管と外管の差が大きくなって、従来の整理法ではよくまとめられない。

4・4 液相流量比配分直径による整理方法の提案

従来の整理法では、環状流路の代表長さに、水力学直径や $D_{eq}=D-ad$ ⁽⁸⁾ を用いて整理していた。しかし前述したように、内管と外管の管壁に流下させる液相のそれぞれの質量流量によってフラッディング速度が異なる。そこで、代表長さに液相の質量流量比によって配分した流量比配分直径 D_{FR} [mm] を用いてみた。すなわち、内管の外壁を流下する液相の質量流量と外管の内壁を流下する液相の質量流量の比が 3:7 の場合、 $D_{FR}=0.3d+0.7D$ を代表長さとした、このよ

Table 1 Characteristic diameter of annular channel D_{FR} [mm]

Liquid flow ratio Inner tube : Outer tube	$D = 34$ mm		$D = 34$ mm	
	$d = 20$ mm	$D_{eq} = 14$ mm	$d = 14$ mm	$D_{eq} = 20$ mm
	$D-0.8d$ ⁽⁸⁾	$D-0.8d$ ⁽⁸⁾	$D-0.8d$ ⁽⁸⁾	$D-0.8d$ ⁽⁸⁾
10 : 0	$D_{FR} = 20$ mm	$D_{FR} = 14$ mm		
7 : 3	24.2	20		
5 : 5	27	24		
3 : 7	29.8	28		
0 : 10	34	34

Fig. 10 Flooding velocity in vertical annular channel ($D_{eq}=14$ mm, Method by Suzuki and Ueda⁽³⁾)

Fig. 11 Flooding velocity in vertical annular channel ($D_{eq}=20$ mm, Method by Suzuki and Ueda⁽³⁾)

Fig. 12 Flooding velocity in vertical annular channel employed by characteristic diameter

うにして求めた流量配分直径を表1に示す。 D_{FR} を代表長さに用いたフラッディング開始時の液相レイノルズ数 Re_l^* と気相レイノルズ数 Re_g^* の関係を図12に示す。図12には、各環状流路の水力学的直径 D_{eq} と同じ直径をもつ $D=14$ mmおよび 20 mmの垂直円管のフラッディング速度を合せて示す。図12からわかるように、垂直環状流路のフラッディング速度については、内管直径が 14 mmおよび 20 mmの場合も両壁を流下する液相の質量流量比に関係なく一つの曲線でよくまとめることができる。この結果は、垂直環状流路の場合、液相の質量流量比配分直径を用いることにより、流路のかんげきについてフラッディング速度を推定することができることを示している。

5. 結 論

垂直円管および垂直二重管で作られる環状流路に発生するフラッディングについて、大気圧下の空気-水系の気液対向二相流で実験を行った。その結果を従来の研究結果と比較検討し、実験の範囲で、次の結論を

得た。

(1) 垂直円管内に発生するフラッディングの開始速度は、同じ液相レイノルズ数において、管径の大きいほうがフラッディング速度は速く、それは直径に比例する。

(2) 環状流路の場合は、流路のかんげきのほか内管と外管を流下する液相の流量によってフラッディング速度は異なり、かんげきの大きいほうがフラッディング速度が速く、また内管を流下する液相の流量が多いほどフラッディングは発生しやすい。

(3) Wallisの整理方法および植田の整理方法は、円管については有効であるが、環状流路については、内管外壁と外管内壁を流下する液相の流量によって異なり、まとまりはよくない。

(4) 環状流路の場合、代表長さに水力学的直径の代わりに内管外壁と外管内壁を流下する液相の質量流量の比によって配分した液相流量配分直径を用いることにより、フラッディングの気相レイノルズ数は、液相質量流量の比にかかわらず各流路かんげきについてほぼ一つの曲線で整理することができる。

文 献

- (1) 鳥飼欣一・鈴木康一・田原博寿・平田昭彦, 機論, 58-548, B (1992), 1037.
- (2) 神永文人・遠藤才二郎, 第24回伝熱シンポジウム講演論文集, (1987), 440.
- (3) 鈴木新一・植田辰洋, 機論, 44-377 (第2部), (1988), 164.
- (4) 川崎裕仁・刑部真弘・田坂完二, 第24回伝熱シンポジウム講演論文集, (1987), 443.
- (5) 数土幸夫・薄井徹・神永雅紀, 第24回伝熱シンポジウム講演論文集, (1987), 446.
- (6) 刑部真弘・久保利介, 第28回伝熱シンポジウム講演論文集, (1991), 778.
- (7) 植田辰洋・鈴木新一, 機論, 44-377 (第2部), (1988), 174.
- (8) 小泉安郎・宮下徹・植田辰洋, 第29回伝熱シンポジウム講演論文集, (1992), 718.
- (9) Wallis, G. B., A. E. E. W. R. (1961), 123.
- (10) Wallis, G. B., One Dimensional Two Phase Flow, (1969), 336, McGraw Hill.