

向流気液環状二相流におけるフラッディング について

渡辺 修, 塚本 勝, 進藤 益男

On the Flooding in Counter Current Gas-Liquid Two Phase Flow

Osamu WATANABE, Masaru TSUKAMOTO and Masuo SHINDO

向流気液環状二相流におけるフラッディング限界におよぼす管長さの影響を調べるため5種類の供試管を用いてフラッディングの実験を行い、また液膜が管を降下するにつれ変化する様子を実験的に求めた。その結果液膜は管軸方向に一様ではなく、このことを考慮に入れて本実験の範囲で管長さを考慮に入れた整理をした。

1 諸 言

垂直円管内の管壁に沿って液膜が降下し、それと反対方向に気体の流れがある向流気液環状二相流において液流量を一定に保ちつつ管中心部を上向きに流れる気体流量を徐々に増加していくと、液膜表面の波は成長し続けある限界に達すると不連続的に液の流動は反転し気体と同方向に排出される現象が生じる。このフラッディングと呼ばれる現象は、従来より熱サイホンに関する限界熱流束、濡壁塔、液膜蒸発機等における溢沓現象として研究されてきたものであるが、最近になり危急時における原子炉燃料棒の冷却問題などに関連して改めて注目されている。

現在までの研究は主として実験的に、また次元解析的に取り扱ったものが多く（例えば、亀井ら⁽¹⁾、Feind,⁽²⁾ Wallis⁽³⁾等）、理論的に解析したものにはShearer-Davidson⁽⁴⁾、井村ら⁽⁵⁾のものがある。これらの解析は相対速度をもつ気液界面の波の不安定性として取り扱っているが、降下液膜の様子が場所によらない、すなわち管長さの影響は考慮に入れない形式で行われている。実際には管軸方向に液膜の様子は変化しており、管長さの影響を考慮に入れなければならないと考えられる。また気体の流入方法も各種のものがあ、その影響ははっきりしていないようである。

本研究は主として、管長さがフラッディング限界に及ぼす影響を従来の研究と対比すること、および降下液膜

表面の波を実測することによって検討し、また気体の吹き込み管の直径を変化させ、その影響を調べる。

2 実験装置および実験方法

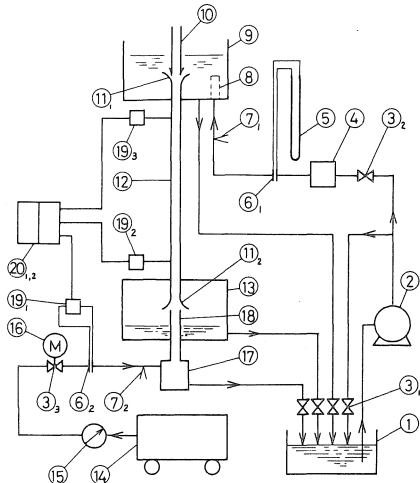
実験装置

実験装置の概略を図1に示す。供試管⑫、ベルマウス⑬、上部タンク⑨および下部タンク⑬の一部は内部流動状態を観察できるようにアクリル樹脂を用いた。供試管の内径は20mmであり、その上下端は水が滑らかに流入流出するようにベルマウスが取り付けられている。また供試管の長さは46, 71, 96, 146, 196cmの5種類、空気吹き込み管⑬は内径0.8, 1.2, 1.6, 2.0cmの4種類を用いた。試験液体は水、気体は空気を用いた。

水は貯水タンク①からポンプ②によって弁③、気泡・脈動吸収タンク④、流量測定用オリフィス⑥、を経て上部タンク⑨に押し上げられる。上部タンクへの流入口には水中および水面の乱れを極力避けるため、整流用金網⑧が取り付けられている。所定の流量に設定された水はベルマウスとベルマウス用流量調節弁⑩の隙間から流出し供試管の内壁に沿って液膜となって降下する。

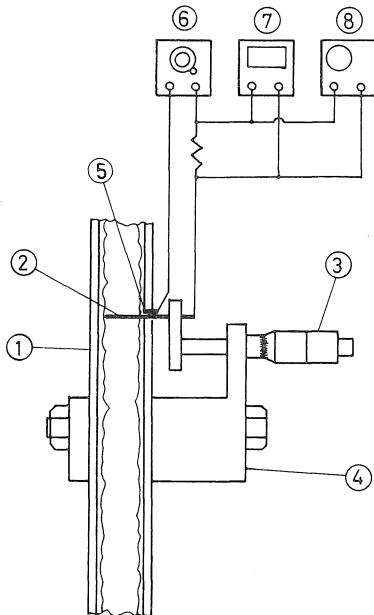
一方空気は圧縮機⑭によって加圧され、圧力調節弁⑮によって適当な圧力に調節された後、弁③、流量測定用オリフィス⑥、受液タンク⑰を通り空気吹き込み管を経て供試管へ流入する。水および空気の温度は銅・コンスタント熱電対⑦_{1,2}によって測定した。

降下液膜厚さの測定は触針法によって行った。その測定装置を図2に示す。この時に用いた供試管は196 cmの



- ① 貯水タンク
- ② ポンプ
- ③ 1, 2, 3 弁
- ④ 気泡・脈動吸収タンク
- ⑤ マノメータ
- ⑥ 1, 2 オリフィス
- ⑦ 1, 2 熱電対
- ⑧ 整流用金鋼
- ⑨ 上部タンク
- ⑩ ベルマウス用流量調節弁
- ⑪, 2 上下部ベルマウス
- ⑫ 供試管
- ⑬ 下部タンク
- ⑭ 圧縮機
- ⑮ 圧力調節弁
- ⑯ モーター
- ⑰ 受液タンク
- ⑱ 空気吹込み管
- ⑲ 1, 2, 3 圧力変換器
- ⑳ 1, 2 ひずみ計・マルチコーダ

図一 実験装置



- ① 供試管
- ② 移動電極
- ③ マイクロメーター
- ④ 取付台
- ⑤ 固定電極
- ⑥ 発振器
- ⑦ ユニバーサルカウンター
- ⑧ シンクロスコープ

図二 液膜測定装置

長さのものであり、測定点は管軸方向に8箇所である。電極はマイクロメーターによって半径方向に移動でき、発振器からの1 KHzの信号とカウンタによって各半径位置における液の存在時間率を求めることができる。

実験方法

水流量はマノメータ⑤を見ながらベルマウス用流量調節弁⑩と弁③_{1,2}によって上部タンクの水位を一定に保つ事により設定する。また下部タンク内の水位は常に一定に保っておく。その後弁③₃をゆっくり開け空気を増加し、フラiddingが発生するまで続ける。フラiddingの判別は供試管内の視覚的観察と供試管内の圧力の急変によって判定した。

以上を各供試管および各空気吹き込み管に対して行う。降下液膜厚さの測定は、空気を流さぬ場合と流す場合について行った。

表1に本実験範囲を示す。

表1 実験範囲

供試管長 cm	空気吹き込 み径 cm	W _g / W _l	液膜レイノルズ数 Re = $\frac{\rho_l U_l \delta}{\mu_l}$	液膜厚さ δ cm 式(3), 式(4)
46	2.0	0.0115~0.234	275.7~2736	0.0421~0.124
	1.6	0.0168~0.204	314.6~2408	0.0431~0.114
	1.2	0.0168~0.208	314.9~2383	0.0432~0.114
	0.8	0.0163~0.203	316.2~2384	0.0432~0.114
71	2.0	0.0120~0.165	360.8~2503	0.0438~0.114
	1.6	0.0102~0.183	352.6~2533	0.0437~0.115
	1.2	0.0135~0.191	351.1~2506	0.0437~0.115
	0.8	0.0107~0.139	349.7~2445	0.0438~0.113
96	2.0	0.0053~0.168	347.8~2580	0.0428~0.115
	1.6	0.0086~0.168	347.8~2282	0.0428~0.108
	1.2	0.0085~0.158	355.5~2314	0.0430~0.108
	0.8	0.0152~0.168	360.9~2016	0.0433~0.101
146	2.0	0.0080~0.128	361.7~2053	0.0433~0.102
	1.6	0.0081~0.121	386.9~2035	0.0441~0.101
	1.2	0.0083~0.127	371.7~1759	0.0434~0.094
	0.8	0.0089~0.129	373.6~2053	0.0438~0.102
196	2.0	0.0069~0.118	345.1~1740	0.0424~0.094
	1.6	0.0065~0.134	337.3~1956	0.0422~0.099
	1.2	0.0075~0.143	332.1~2009	0.0419~0.101
	0.8	0.0093~0.143	324.6~1665	0.0416~0.091

3 実験結果

従来の式による整理
本実験で得られたデータを亀井らの式(1)、井村らの式(2)によって整理した。

$$\frac{W_g}{W_l} = 198 \left(\frac{4 W_l}{\pi d \mu_l} \right)^{-1.225} \left(\frac{\sigma}{d^2 \rho_l g} \right)^{-0.23} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.71} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.13} \left(\frac{d^3 \rho_l^2 g}{\mu_l^2} \right)^{0.231} \quad (1)$$

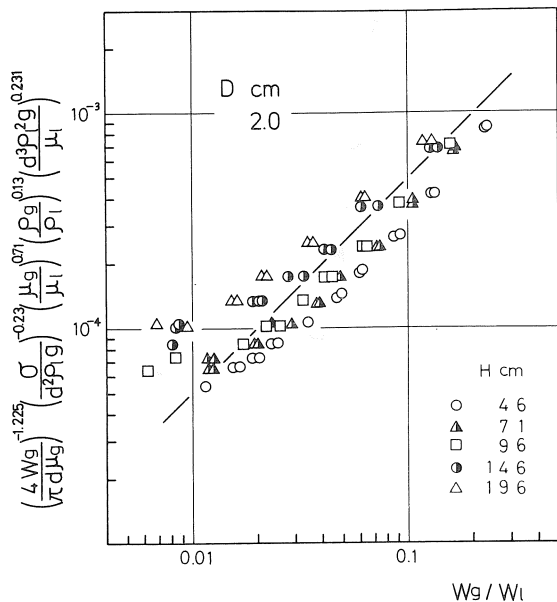
$$\frac{G}{L} \left(1 + \frac{L}{G} \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{\dot{S}_g}{S_l} \right) = \frac{S_g}{S} \frac{1}{L} \left(\frac{\sigma \rho_g}{\delta} \right)^{0.5} \cdot \left(\zeta - \frac{1}{R/\delta - 1} \right)^{0.5} \quad (2)$$

式(2)で δ は

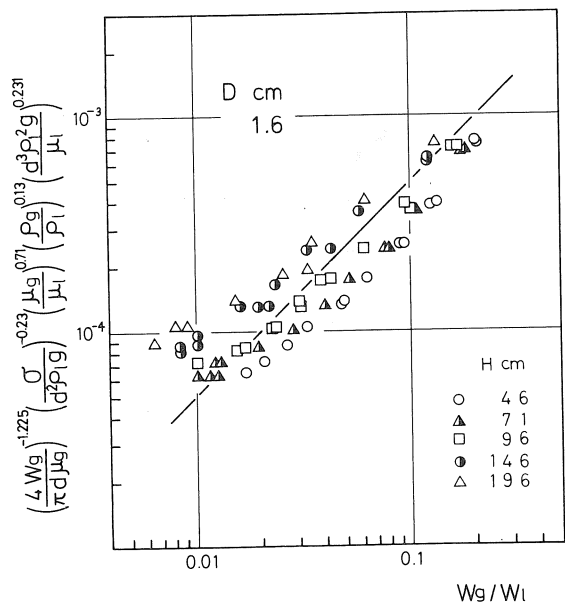
$$\delta = \left(\frac{3 \mu_l^2}{\rho_l^2 g} \right)^{1/4} Re^{1/4} \quad (Re \leq 400) \quad (3)$$

$$\delta = 0.369 \left(\frac{3 \mu_l^2}{\rho_l^2 g} \right)^{1/4} Re^{1/4} \quad (Re > 400) \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho_l U_i \delta}{\mu_l} = \frac{Ld}{4 \mu_l (1 - \delta/d)}$$



(a) $d=2.0\text{cm}$

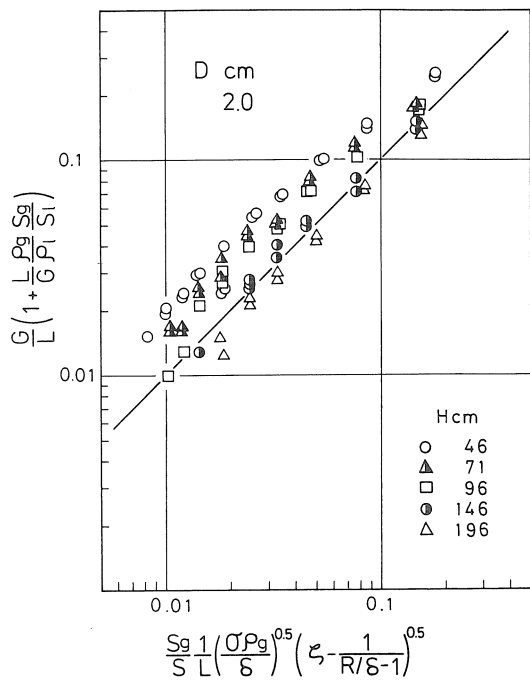


(b) $d=1.6\text{cm}$

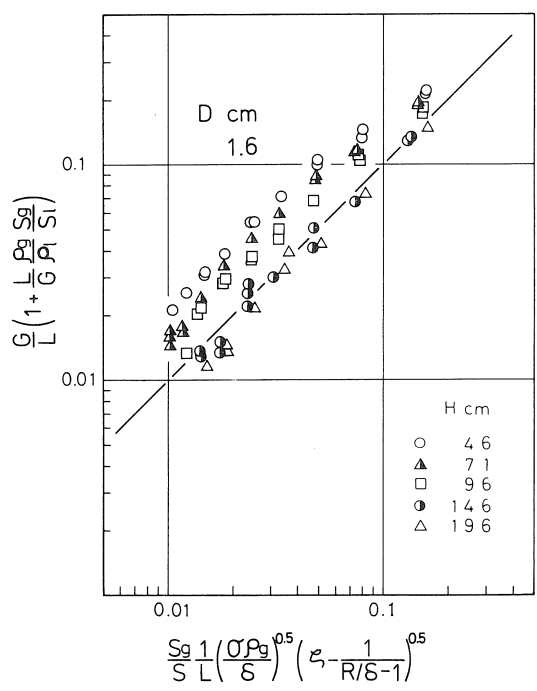
図-3 亀井らの式による整理

であり, ξ は

$$\xi = 0.046 \left(\frac{d^2 \rho_l g}{\sigma} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.12} \quad (5)$$



(a) $d=2.0\text{cm}$



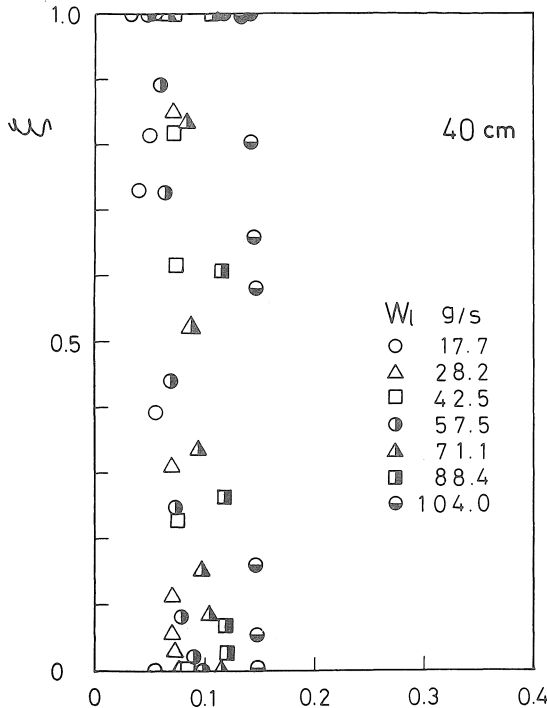
(b) $d=1.6\text{cm}$

図-4 井村らの式による整理

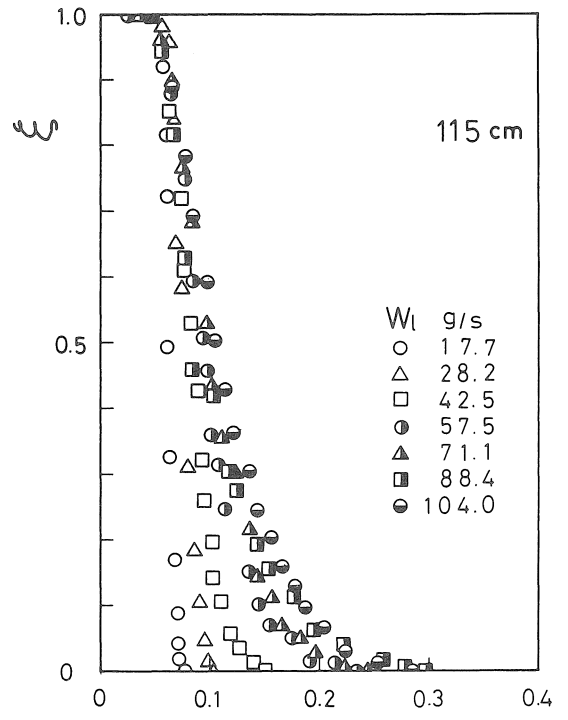
である。この λ は液膜上の波の波長が平均液膜厚さ δ に比例するという仮定から求められたものである。

式1)で整理したものを図3(a),(b)に示す。(a)の

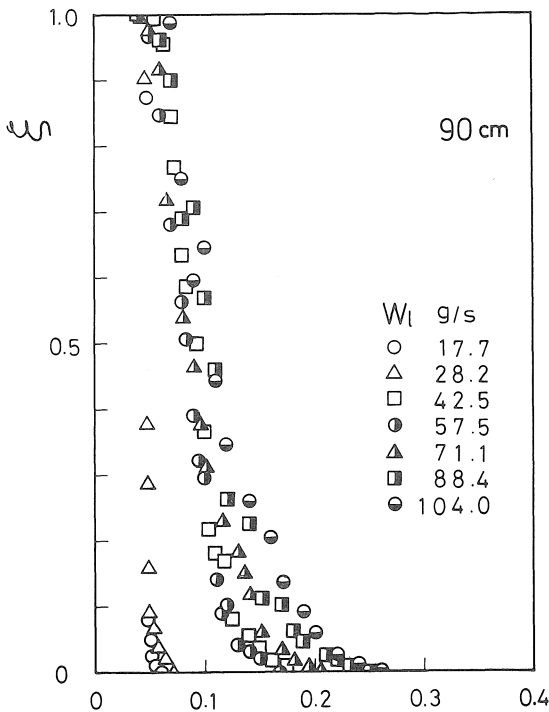
方は空気吹き込み管径2.0 cmのものであり、(b)は1.6 cmのものである。同様な整理を空気吹き込み管径1.2 cm, 0.8 cmのものに対しても行ったが大きな変化はなかった。



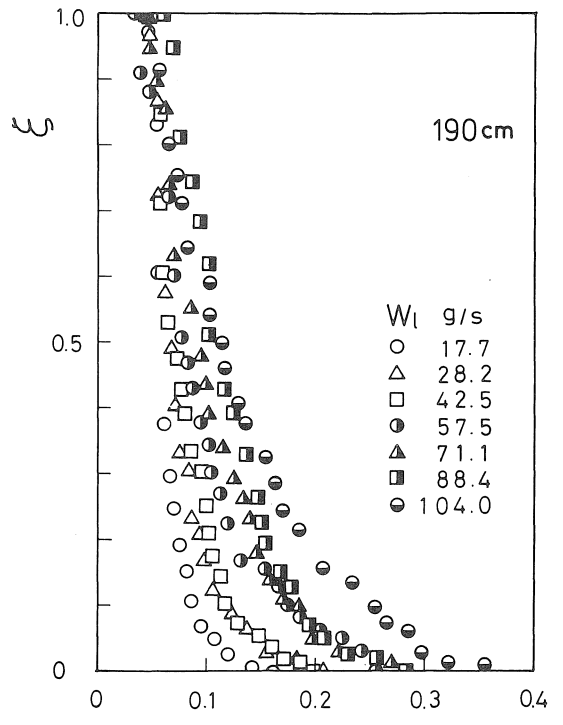
(a) 流入口より40cmの位置 δ_h cm



(c) 流入口から115cmの位置 δ_h cm



(b) 流入口から90cmの位置 δ_h cm



(d) 流入口から190cmの位置 δ_h cm

図一五 向流気体のない場合の降下液膜の存在時間率

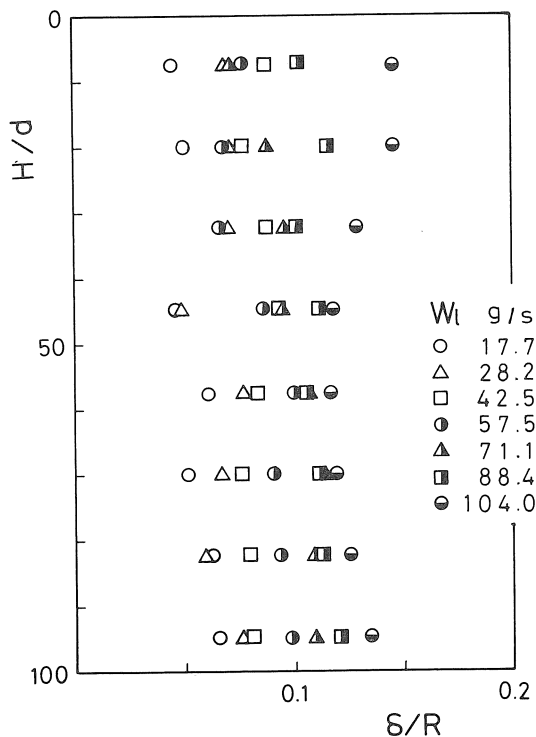
本図から空気吹き込み管の直径の影響は小さいことがわかる。一方管長さの影響は著しい。

次に式(2)で整理したものを図4(a), (b)に示す。この整理法によっても亀井の式(1)による整理と同様、管長さの影響がはっきり出ている。この原因は、式(1)は管長さ一定のもとで求めた実験式であり、式(2)でも同様な実験と液膜表面波の波形が場所によらないとする仮定などによるものと考えられる。

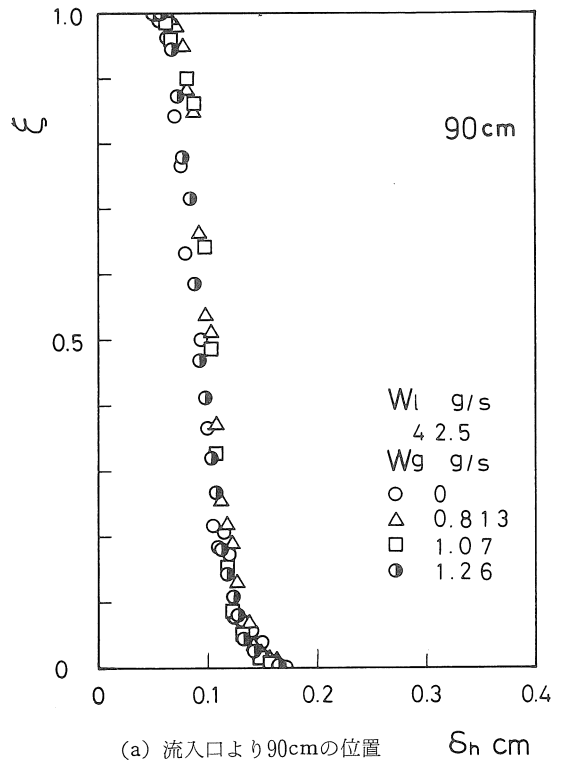
上のことから、液膜が管を降下するにつれ、どのように変化するかを実験的に求めた。

まず向流気体がない場合、水流入口からの距離を固定し、降下流量 W_l を変化させた場合の降下液膜の存在時間率を図5(a), (b), (c), (d)に示す。降下流量の範囲は $W_l=17.7\text{g/s}$ ($Re \approx 320$) 104.0g/s ($Re \approx 2000$) である。本図により、上端から40cmの位置においては波はほとんど起きていないが90cmの位置では波が発生しており、その波高は降下流量によってかなり異なることがわかる。また115cm, 190cmの所ではこの波がさらに大きく発達している様子が見られる。

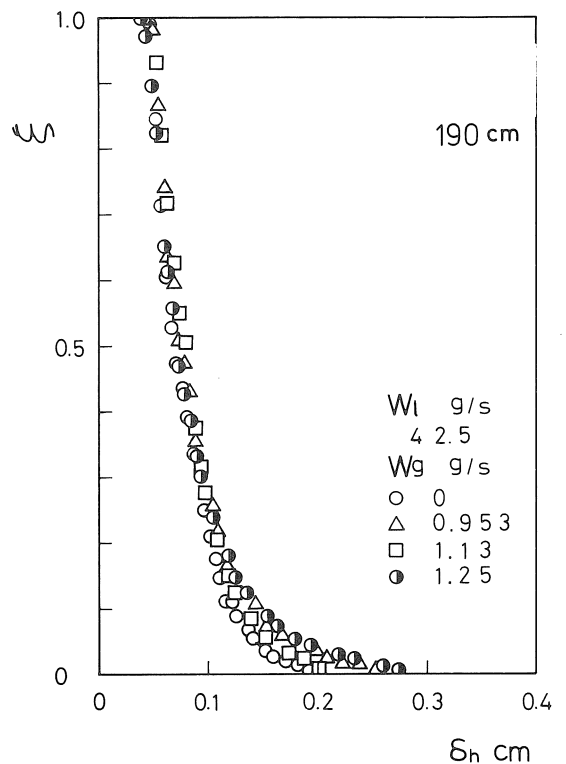
図6に上述のように実測した平均液膜厚さ δ を供試管半径 R で、水流入口からの距離 H を供試管径 d で無次元化したものの関係を示す。降下流量の増加に伴い平均液



図一六 平均液膜厚さの変化

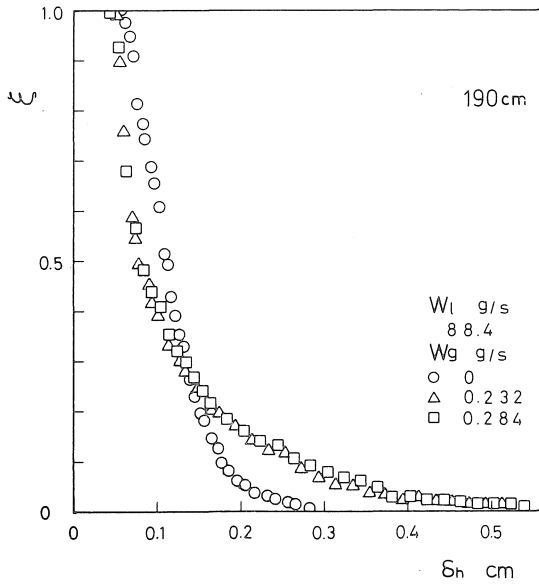


(a) 流入口より90cmの位置



(b) 流入口より190cmの位置

図一七 向流気体のある場合の降下液膜の存在時間率



図一八 向流気体のある場合の降下液膜の存在時間率
膜厚さは増加するが、その様子は水流入口からの距離によって大幅に異なり、管を降下するにつれ多少減少し再び増加する傾向が認められ、その境は $H/\alpha=40\sim60$ のあたりにあることがわかる。またこの平均液膜厚さは式(3)、(4)の値より若干大きな値を示している。

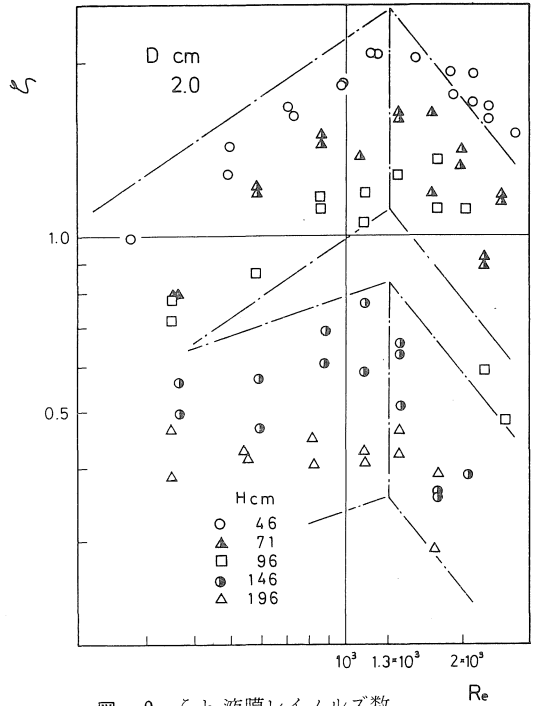
次に向流気体がある場合の液膜の様子の一例を図7(a)(b)に示す。(a)は水流入口から90cm、(b)は190cmの位置であり、水流量は共に $W_l=42.5\text{g/s}$ である。90cmの位置では空気流量の影響は顕著ではないが、190cmの位置では最大液膜厚さが空気流量の増大とともに大きくなるのがわかる。同じく190cmの位置における $W_l=88.4\text{g/s}$ の時の液膜を図8に示す。この時は液膜がブリッジしてフラッキングが発生する寸前のものであり、気体流量の増加によって波高が著しく高くなっているのがわかる。ただこのような場合にも、水流入口から40cmの位置ではほとんど液膜には波が発生していない。

このように、向流気体がない場合でも水流入口からの距離および降下流量が増せば波が成長するうえに、向流気体の存在によって一層、液膜は不安定になることが知れる。そしてフラッキングが常に下端から発生するという視覚的観察と一致する。

4 新しい整理式の提出

3節の結果から式(1)、式(2)とも供試管長の影響を十分にとり入れず満足できるものではなかった。また降下液膜厚さは水流入口からの距離に関係し、フラッキング発生に大きな影響を与えていることがわかった。そこで

我々は井村らの式(2)を改良する立場をとりこの式の中のとを管長さの影響も含むよう整理を試みた。式(2)に各測定値を代入して逆にとを求め(δについては井村らと同じとする)、このとを液膜レイノルズ数に対して整理したものが図9である。



図一九 ζと液膜レイノルズ数

その結果、全領域を統一する式は得られなかったが $Re=1300$ 以上と未滴、そして供試管長96cm以下と146cm以上の4領域に分けて、次の如くとを整理した。ただしこの時空気吹き込み管2.0cmのデータを使用してある。

$$\left. \begin{aligned}
 & Re < 1300 \\
 & \zeta = 0.022Re^{0.661} \left(\frac{H}{d} - 22\right)^{-0.191} \quad 46 \leq H \leq 96 \\
 & \zeta = 0.6Re^{0.347} \left(\frac{H}{d}\right)^{-0.553} \quad 146 \leq H \leq 196 \\
 & Re \geq 1300 \\
 & \zeta = 5.9 \times 10^5 Re^{-1.275} \left(\frac{H}{d}\right)^{-0.953} \quad 46 \leq H \leq 96 \\
 & \zeta = 1.5 \times 10^5 Re^{-1.275} \left(\frac{H}{d}\right)^{-0.751} \quad 146 \leq H \leq 196
 \end{aligned} \right\} (6)$$

液膜レイノルズ数 Re が1300を境として Re の指数が正負逆になっていること、および (H/d) の影響が著しいことが認められる。これは降下液膜の流動状況が Re によりまた供試管長によって大きく変化していることを示すものである。

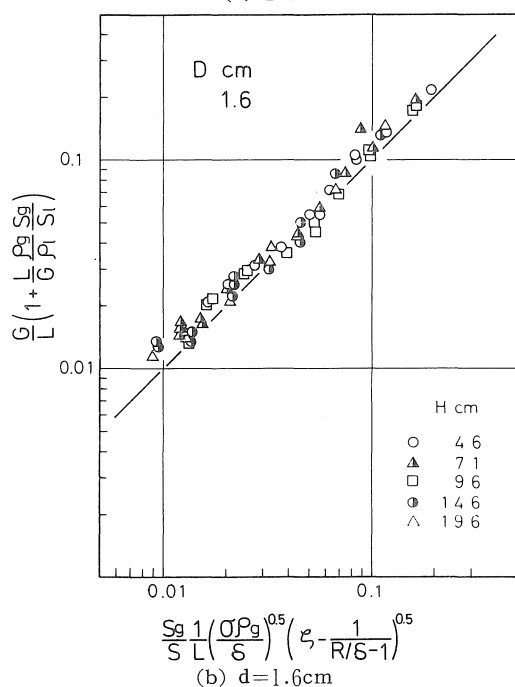
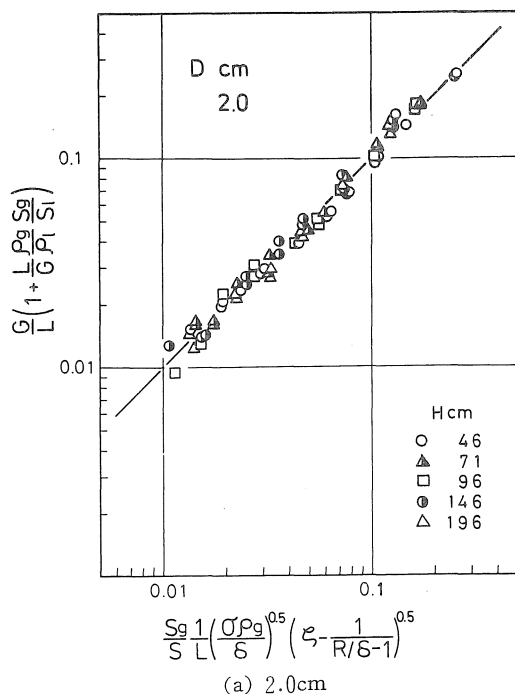


図-10 式 (b) の ξ を用いた整理

この整理式(6)を用いて式(2)によって整理したものが図10(a), (b)である。本図から管長さの影響も含めて整理できることがわかる。

5 結 言

向流気液環状二相流におけるフラッディング限界に関

して、主として管長さの影響を調べるため、供試管長46, 71, 96, 146, 196cmの5種類を用い、液体には水、気体には空気を用いて実験を行った。その結果下記のことを認めた。

(1) 供試管に沿って平均液膜厚さ、および液膜表面の波の流動状況は大きく変化するためフラッディング発生条件は供試管長に大きく影響される。

(2) 波(液膜厚さ)の状況は場所によらないとする仮定に立つ井村らの整理式(2)では不十分なため、それを補正する整理式(6)を立てた。この整理式によって本実験の範囲でフラッディング限界を整理した。

記 号

H : 供試管長 cm

G : 空気のみかけ質量速度 = W_g/S g/cm²s

L : 液体のみかけ質量速度 = W_l/S g/cm²s

U : 流速 cm/s

W : 質量流量 g/s

S_g : 気体の占める断面積 cm²

S_l : 液体の占める断面積 cm²

S : 供試管の断面積 = $S_l + S_g$ cm²

R : 供試管の半径 = $d/2$ cm

Re : 液膜レイノルズ数

d : 供試管内径 cm

g : 重力加速度 cm/s²

δ : 平均液膜厚さ cm

μ : 粘性係数 g/cm²s

σ : 表面張力 dyn/cm

ρ : 密度 g/cm³

ξ : 液膜の存在時間率

添 字

g : 気体

l : 液体

参考文献

- (1) 亀井・ほか2名, 化学工学, 18—8 (昭和29—8), 364
- (2) K. Feind, VDI-Forsch. h., 481 (1960)
- (3) G. B. Wallis, One-Dimensional Two-phase Flow 339 (1969), McGraw-Hill
- (4) C. J. Shearer and J. F. Davidson, J. Fluid Mech., 22-2 (1965), 321
- (5) 井村・ほか2名, 機械学会論文集, 42-362 (昭和51—10), 3247