

# 垂直上昇気液環状二相流の実験的研究 (第1報、液膜特性に及ぼす圧力の影響)

中里見 正夫\*・清水 英男\*・落合 積\*・角野 康秀\*

Experimental Study of Vertical Upward Gas-Liquid Two-Phase Annular Flow  
(1st Report, Effects of System Pressure on Characteristics of Liquid Film)

Masao NAKAZATOMI\*, Hideo SHIMIZU\*, Tsumoru OCHIAI\* and Yasuhide KAKUNO\*

## Abstract

System pressure in gas-liquid two-phase annular flow causes a significant change in gas-liquid interfacial structures. The purpose of this study is to investigate the pressure effects on the characteristics of the liquid film in vertical gas-liquid annular flow. The void fractions were measured by the point electrode probe method and the film thickness data were obtained from these data. It was found that there exists a region in which the mean film thickness, the base film thickness and maximum height of wave crest versus superficial gas velocity curves show a decrease rapidly under high pressure conditions. In this study, system pressure in the closed circulation loop was changed from 0.3 to 20 MPa at constant fluid temperature in vertical upward flow.

**Key Words:** Annular flow, Pressure effect, Liquid film, Mean liquid film thickness, Maximum wave height

## 1. 緒言

気液環状二相流領域における主要な流動パラメータに関する研究は実験的に数多く報告されており、近年これらをまとめたものも発表されている<sup>(1)</sup>。それらによると、液相の物性値を変化させ流動パラメータへの影響はこれまでに報告されているが、気相の物性値を大幅に変化させた研究は見当たらない。本報は、環状流領域における流動パラメータが実験系内圧力の大幅な変化に対し、どの程度の影響を受けるかを取り上げる。その第一に液膜特性、第二に液膜上の波の特性および第三に流動形態の遷移等を順次取り上げる予定である。また、エントレメント特性については既に投稿中である<sup>(2)・(3)</sup>。

本報では液膜特性として平均液膜厚さ、基底液膜厚さおよび最大波高に注目し、大幅な圧力変化に対する測定結果を詳細に報告する。

平均液膜厚さを推算するための相関式は圧力の大幅な変化に対し単一の式で対応できた。基底液膜厚さおよび最大波高の詳細なデータが得られたので提示する。

## 2. 使用した主な記号

D : 供試管の内径	mm
g : 重力の加速度	m/s <sup>2</sup>
j : みかけの速度	m/s
$j_{g*}$ : 無次元気体速度 = $j_g \cdot (\rho_g^2 / \sigma \cdot g \cdot \Delta \rho)^{1/4}$	
$j_{l*}$ : 無次元液体速度 = $j_l \cdot (\rho_l^2 / \sigma \cdot g \cdot \Delta \rho)^{1/4}$	
$m_g$ : 気液の密度差と気相の密度比 = $\Delta \rho / \rho_g$	
$m_l$ : 気液の密度差と液相の密度比 = $\Delta \rho / \rho_l$	
P : 圧力	MPa
R : 供試管半径	mm, m
$R^*$ : 無次元管半径 = $R \cdot (g / \nu_l^2)^{1/3}$	
$t_c$ : 最大波高	mm
$t_{rb}$ : 基底液膜厚さ	mm

\* 宇部工業高等専門学校制御情報工学科

- $t_{lm}$  : 平均液膜厚さ mm
- $y$  : 管壁からの距離 mm
- $\alpha$  : ボイド率 =  $1 - \eta$
- $\bar{\alpha}$  : 管断面平均ボイド率
- $\eta$  : ホールドアップ =  $1 - \alpha$
- $\nu$  : 動粘性係数  $m^2/s$
- $\rho$  : 密度  $kg/m^3$
- $\Delta\rho$  : 気液の密度差 =  $\rho_l - \rho_g$   $kg/m^3$
- $\sigma$  : 表面張力  $N/m$

添字

- cal : 計算値      exp : 実験値      g : 気体
- l : 液体           $\bar{\cdot}, m$  : 平均

### 3. 実験装置および方法

実験装置および供試管は既報<sup>(2)・(4)</sup>と同一のものである。図1は供試管の概要を示す。管はステンレス鋼管製で、全長 10.4 m、内径 19.2 mm (NP 部とその前後のみ 19.9 mm) であり垂直に設置されている。気水混合部は、長さ 110 mm の二重管形式に製作され、供試管と同内径の内管に直径 3 mm の小孔が円周方向に 8 個、管軸方向に 4 段 (15 mm 間隔、ちどり配列)、合計 32 個開口されている。液体はこの小孔から供試管内へ導入される。

測定量は、図1に沿って上流側から示すと次のようである。(1) 視察部 VS において流動の目視および写真撮影を行った。(2) 移動式点電極プローブ NP による管半径方向ボイド率分布の測定<sup>(6)・(7)</sup>、このデータから管断面平均ボイド率、平均液膜厚さ、基底液膜厚さ、最大波高および波の最大通過頻度等を求めた。(3) 圧力損失および管内静圧の測定 P1~P3、このデータから壁面せん断応力および静圧差の振幅<sup>(8)・(9)</sup>を求めた。(4) 可変動電流装置 VC は、リング状のセンサ (厚さ 1 mm, 間隔 5 mm) 6 組と周方向に長さ 3 mm のセンサ (厚さ 0.3 mm, 間隔 4 mm) 3 組の 2 種類 (合計 9 組) から構成されている。この装置を用いて液体体積率の時系列信号 ( $\eta$ -信号) の測定<sup>(10)</sup>を行った。このデータの解析から液体スラグの平均長さおよび平均通過頻度、気体スラグの平均長さ、液体塊の平均速度等を求めた。(5) エントレメントの等速吸引プローブ EPD を用いて管断面内液滴流量の分布を求めた<sup>(2)</sup>。

実験条件は、表1に示す通りである。なお、動作流体

には空気と水道水を用いた。

### 4. 測定結果および考察

点電極プローブを管半径方向へ移動しボイド率分布を測定した<sup>(5)・(6)</sup>。この実験データから平均液膜厚さ、基底液膜厚さ、最大波高および波の最大通過頻度等が求

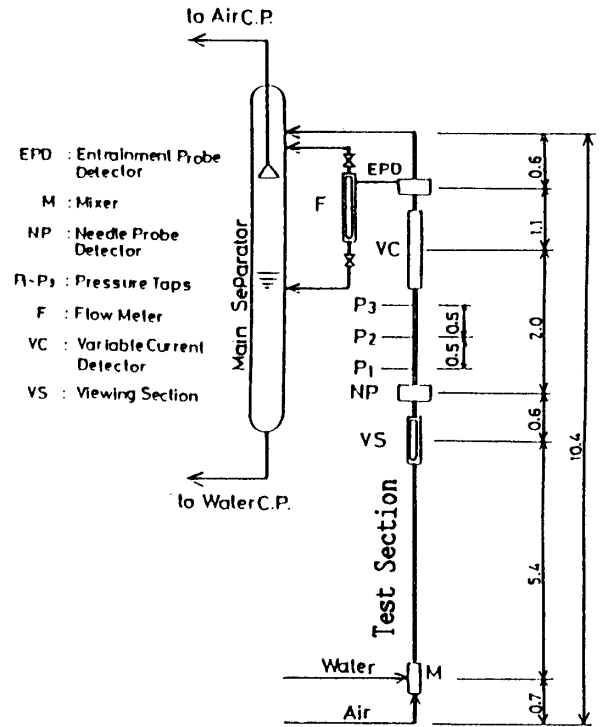


図1. 供試管の概要と長さ (m)

表1. 実験条件

P MPa	$J_l$ m/s	$J_g$ m/s	$\rho_g/\rho_l$ —	$\theta$ °C	D mm
0.30	0.02~1.0	3.8~26.0	0.0034	28~32	19.2
1.3	0.02~0.05	2.3~8.7	0.0144	27~29	
2.6	0.02~0.2	1.9~9.0	0.0286	28~32	
5.0	0.02~1.5	1.4~9.5	0.0586	28~32	
7.0	0.10~0.5	2.0~9.7	0.0801	29~33	
10.0	0.02~1.5	1.0~10.0	0.114	28~32	
15.0	0.02~1.5	0.8~10.0	0.170	28~32	
20.0	0.02~1.5	0.6~10.0	0.225	28~32	

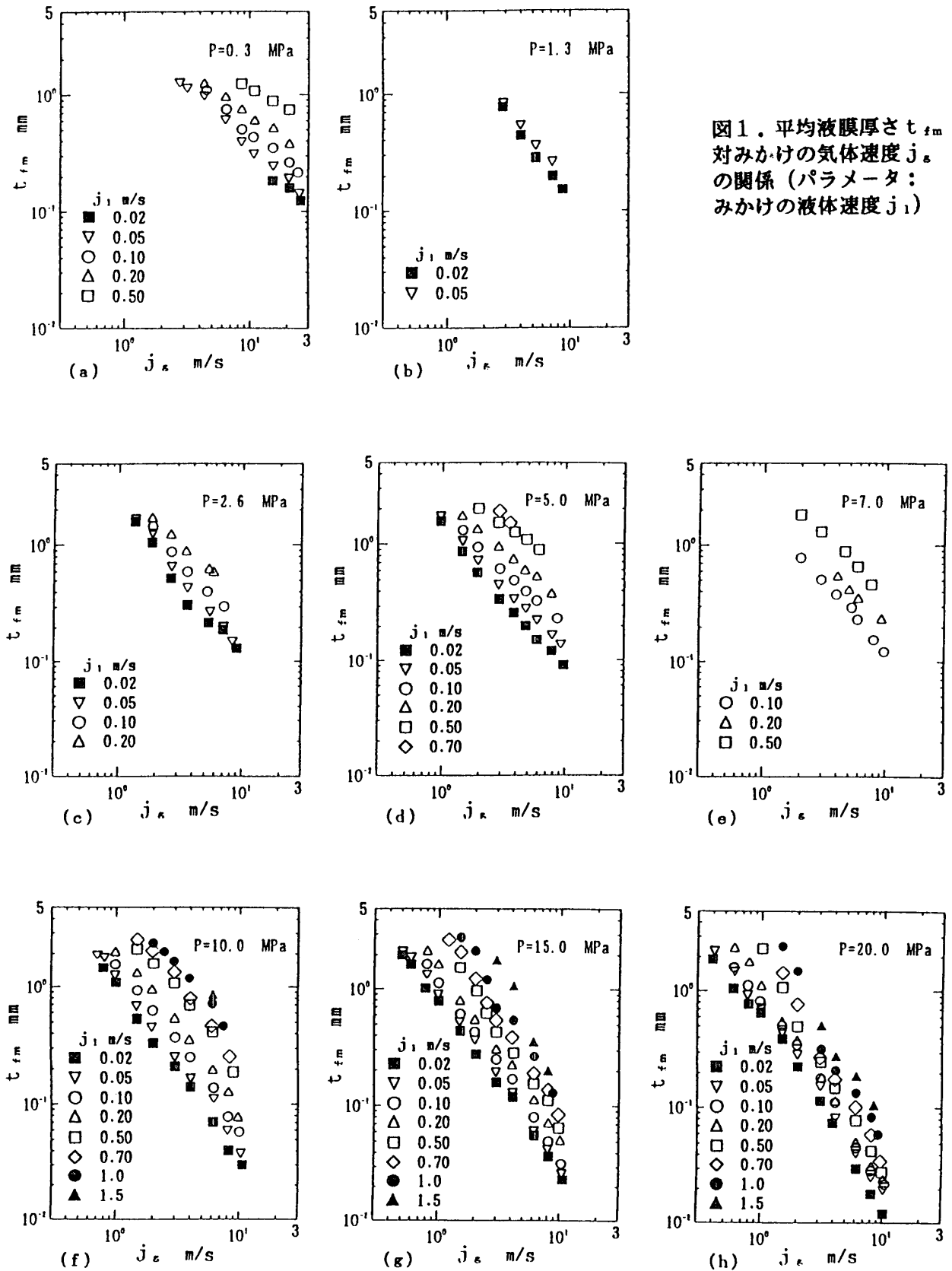


図1. 平均液膜厚さ  $t_{fm}$  対みかけの気体速度  $j_g$  の関係 (パラメータ: みかけの液体速度  $j_l$ )

められる。液体プラグ消失後の団塊波流領域の一部と環状流領域に対する液膜特性に関する測定結果を以下に示し検討する。

#### 4.1 平均液膜厚さ

平均液膜厚さ  $t_{fm}$  を圧力別にみかけの気体速度  $j_g$  に対して示したものが図1である。図1(a)~(h)は圧力  $P=0.3, 1.3, 2.6, 5, 7, 10, 15$  および  $20$  MPaにそれぞれ対応し、パラメータにみかけの液体速度  $j_l$  をとっている。

$t_{fm}$  の一般的特性として、 $j_g$  の増加と共に減少し、また  $j_l$  の増加と共に増大することは既に知られている

が、本実験の全ての圧力に対しても定性的に同様であることが確認された。しかし、 $t_{fm}$  に対する圧力の影響は複雑である。つまり、 $P \geq 10$  MPaの領域では  $j_g$  の大きい領域において  $t_{fm}$  は急減している。また、 $j_l$  が増加しても  $t_{fm}$  はそれほど大きくならない。

図2は  $t_{fm}$  に及ぼす圧力の影響を見たものである。図2(a)~(f)は  $j_l=0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5$  および  $1.0$  m/s にそれぞれ対応し、パラメータには圧力  $P$  を取っている。図2から明らかなように、 $t_{fm}$  は  $j_g$  の大きい領域で  $j_l$  および  $P$  の影響を強く受けている。

図1および図2から、圧力の影響は非常に大きいこと

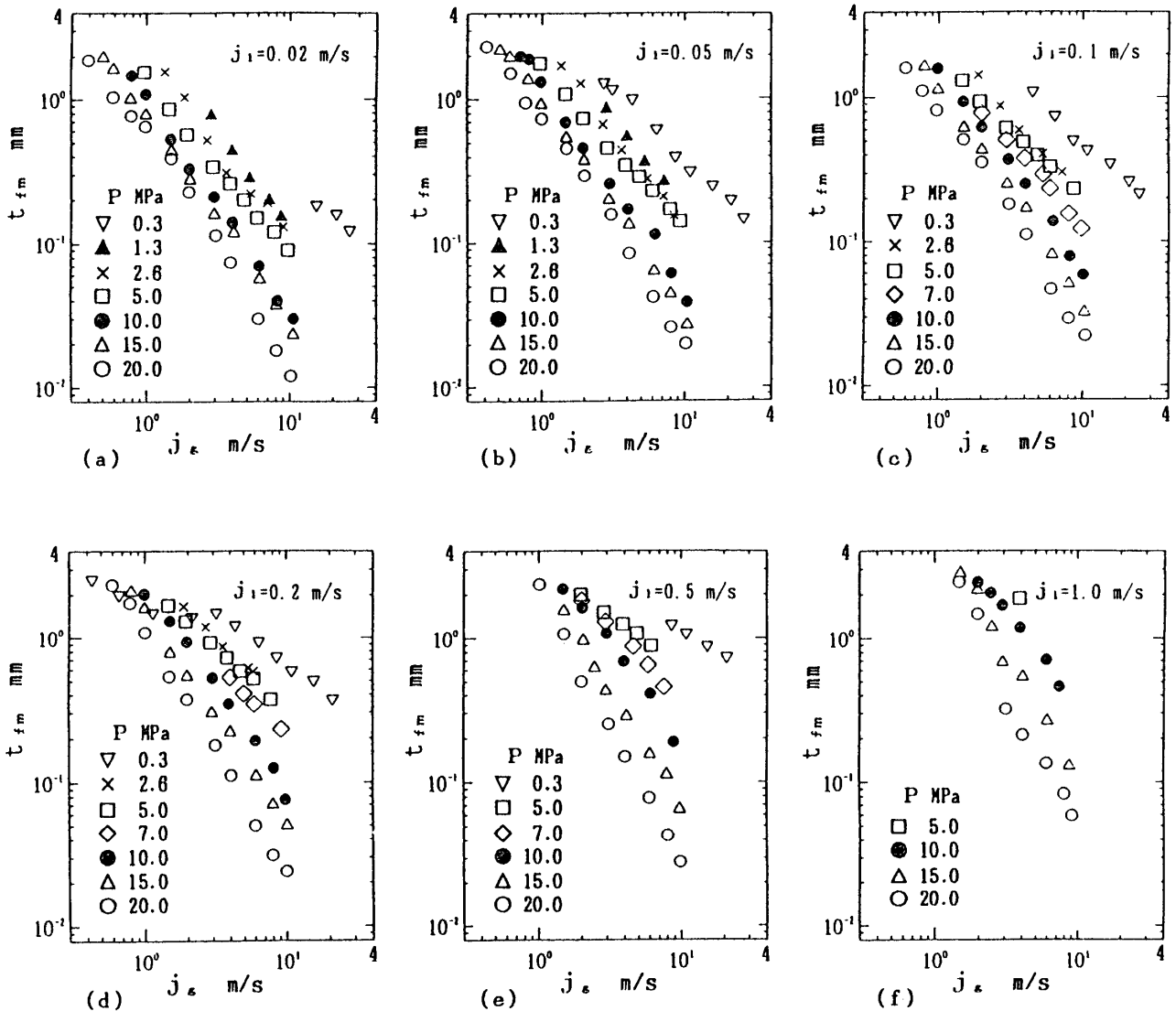


図2. 平均液膜厚さ  $t_{fm}$  対みかけの気体速度  $j_g$  の関係 (パラメータ: 圧力  $P$ )

が判明する。圧力が 10 MPa 以上になると、気相速度が 10 m/s 以下において、 $t_{fm}$  は 0.1 mm を下る液相速度の領域が見られる。20 MPa では  $j_{i1}=1.5$  m/s でもその傾向を示している。このような現象はエントレーメント流量の増加と密接に関連しているのである<sup>(2)</sup>。

液体スラグ消失後の団塊波流の一部と環状流領域の平均液膜厚さ  $t_{fm}$  は、既報<sup>(7)</sup>に提示したボイド率の相関式から推算可能である。平均液膜厚さで表示すると、次のようである。

$$t_{fm} = R \cdot Z \cdot j_{i1}^{*a} \cdot \exp(j_{i1}^{*b} + j_{i1}^{*c}) / R^* \quad (1)$$

$$\text{ここに、} j_{i1}^* = j_{i1} \cdot (\rho_g^2 / \sigma \cdot g \cdot \Delta \rho)^{1/4}$$

$$j_{i1}^* = j_{i1} \cdot (\rho_l^2 / \sigma \cdot g \cdot \Delta \rho)^{1/4}$$

$$Z = 12.0 \cdot m_{i1}^{0.07} \cdot (1/m_{i1})^{5.3}$$

$$a = -0.42 \cdot j_{i1}^{*0.03} \cdot \exp((1/m_{i1})^{1.2})$$

$$b = -0.03 \cdot \exp(1/m_{i1})$$

$$c = 0.42 \cdot m_{i1}^{1.8}$$

$$R^* = R \cdot (g / \nu_l^2)^{1/3}$$

$$m_{i1} = \Delta \rho / \rho_g, \quad m_{i1} = \Delta \rho / \rho_l$$

図3は、上式の算出値  $t_{fm,cal}$  と実験値  $t_{fm,exp}$  の比較である。同図中(b)と(e) (圧力  $P=0.3$  および 5.0 MPa) において、算出値が大きめおよび小さいまになっている

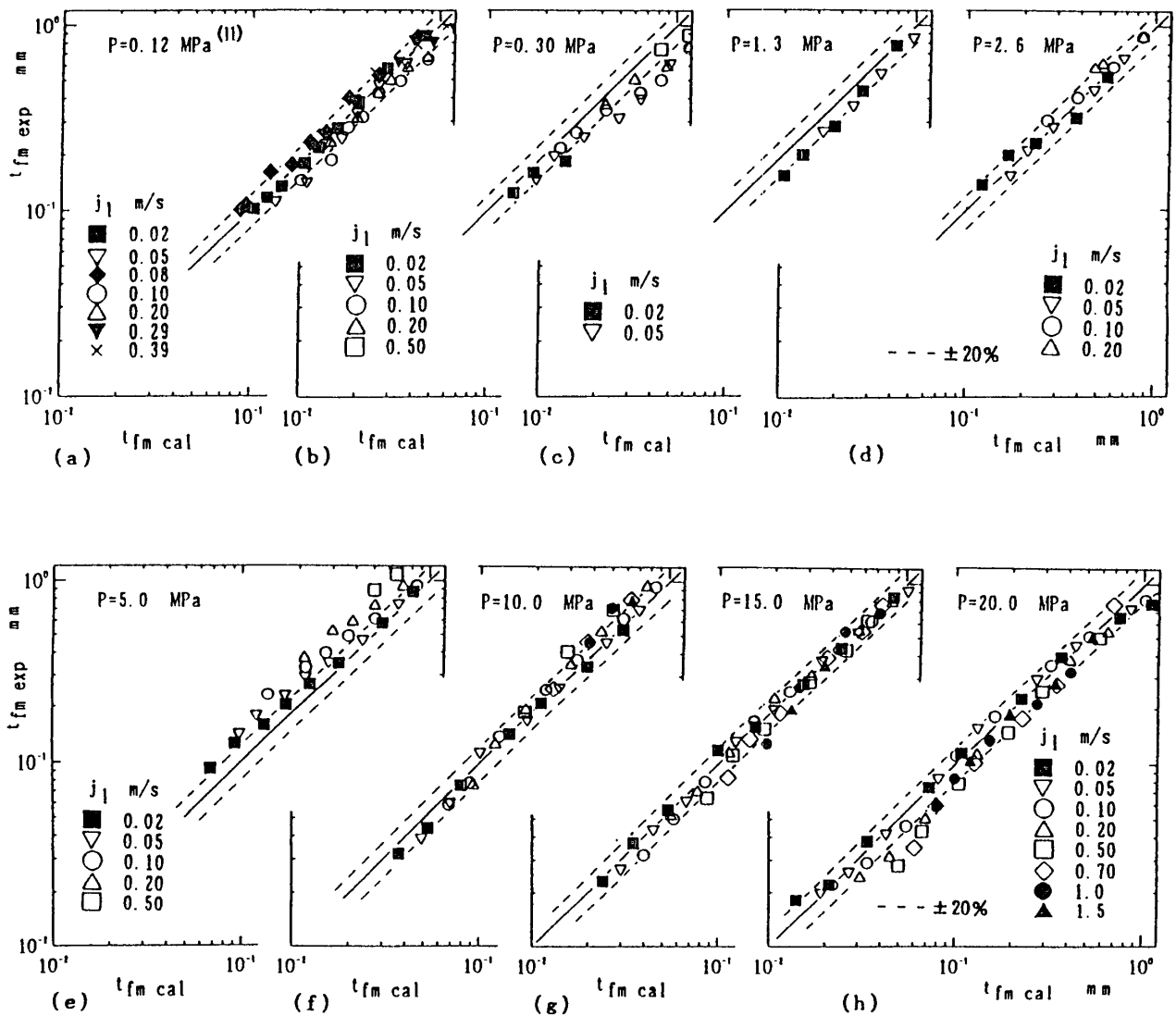


図3. 平均液膜厚さに対する式(1)の算出結果と実験データの比較

ほか、他の圧力では $\pm 20\%$ 程度の一致を示している。このように、大幅な圧力変化に対して単一の式で表示することができた。

#### 4.2 基底液膜厚さ

本報における基底液膜厚さ  $t_{fB}$  は、点電極プローブを管半径方向へ移動し測定したホールドアップ曲線上において  $\eta=0.45$  ( $\alpha=0.55$ ) となる点の管壁からの距離  $y$  と定義した。

図4は基底液膜厚さ  $t_{fB}$  をみかけの気体速度  $j_g$  に対

して示したものである。図4(a)~(f)は圧力  $P=0.3, 2.6, 5, 10, 15$  および  $20$  MPa にそれぞれ対応し、パラメータにみかけの液体速度  $j_l$  をとっている。

$t_{fB}$  は  $j_g$  の増加と共にほぼ直線的に減少している。 $j_l$  が増加すると  $t_{fB}$  も増大するが、高圧になるほどその増加割合は小さい。特に、 $20$  MPa では  $j_l$  の影響は小さくなっている。

図5は  $t_{fB}$  に及ぼす圧力の影響を見たものである。図5(a)~(f)は  $j_l=0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5$  および

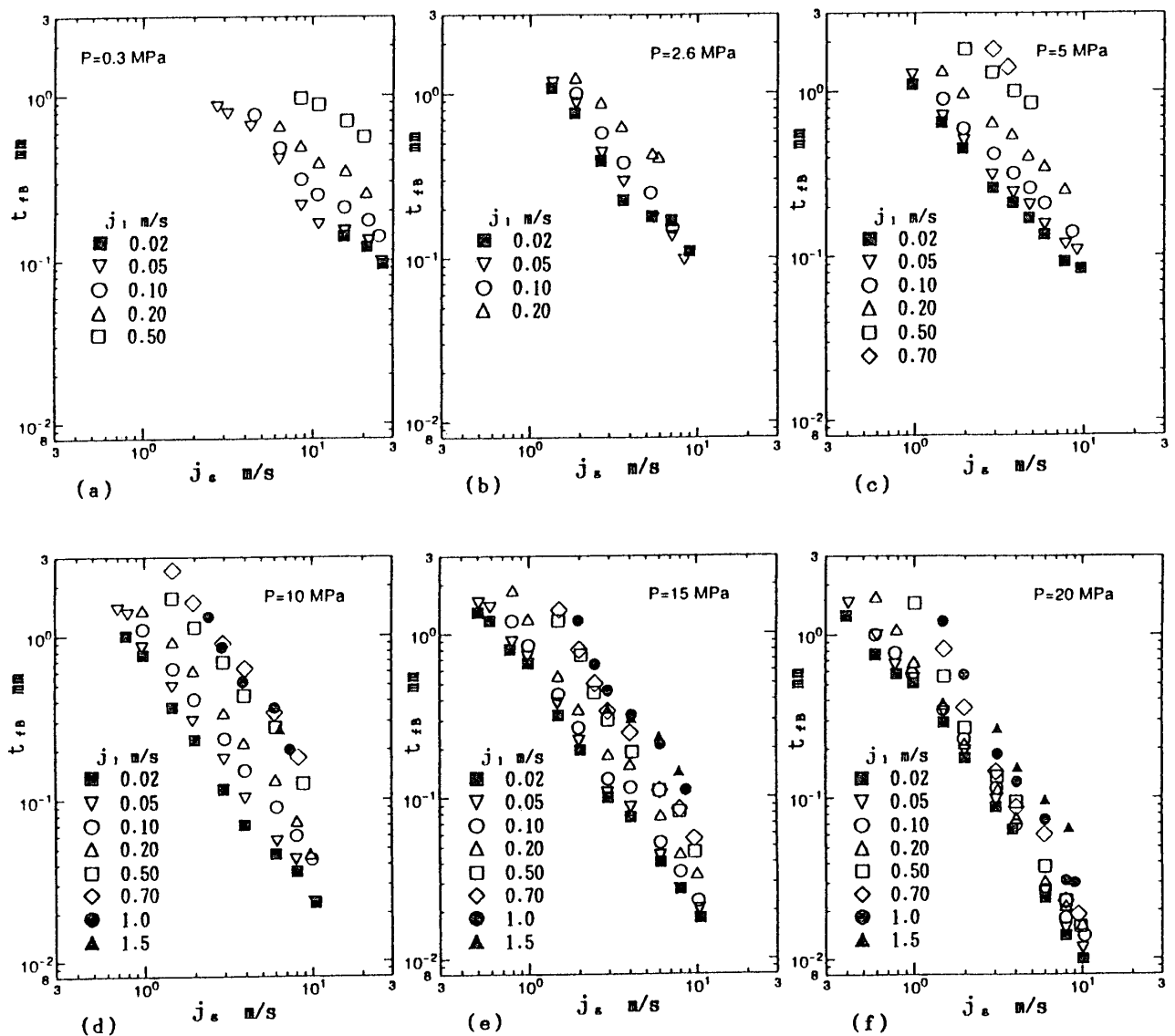


図4. 基底液膜厚さ  $t_{fB}$  対みかけの気体速度  $j_g$  の関係 (パラメータ: みかけの液体速度  $j_l$ )

1.0 m/s にそれぞれ対応し、パラメータに圧力Pをとっている。  $t_{FB}$  に対する圧力の影響は  $j_g$  が大になるほど、また  $j_l$  が増加するほど大きくなっていることが判明する。

図4および図5から、 $t_{FB}$  対  $j_g$  の関係に及ぼす  $j_l$  およびPの影響は図1および図2の  $t_{im}$  の場合に非常に良く類似している。 $t_{im}$  と  $t_{FB}$  の比をとって平均してみると、次のような関係が得られた。

$$t_{FB} = 0.65 t_{im} \quad (2)$$

式(2)のような単純な関係が成立することは、 $t_{FB}$  対

$j_g$  曲線と  $t_{im}$  対  $j_g$  曲線とが全領域にわたり、ほぼ平行線を保持しているからである。

### 4.3 最大波高

最大波高  $t_e$  はボイド率  $\alpha = 99.99\%$ 、波頭の通過頻度  $n_w = 5 \sim 8$  Hz における管壁からの距離  $y$  と定義した<sup>(6)</sup>。

図6は最大波高  $t_e$  をみかけの気体速度  $j_g$  に対して示したものである。図6(a)~(f)は圧力  $P = 0.3, 2.6, 5, 10, 15$  および  $20$  MPa にそれぞれ対応し、パラメータにみかけの液体速度  $j_l$  をとっている。 $t_e$  は  $j_g$  の増

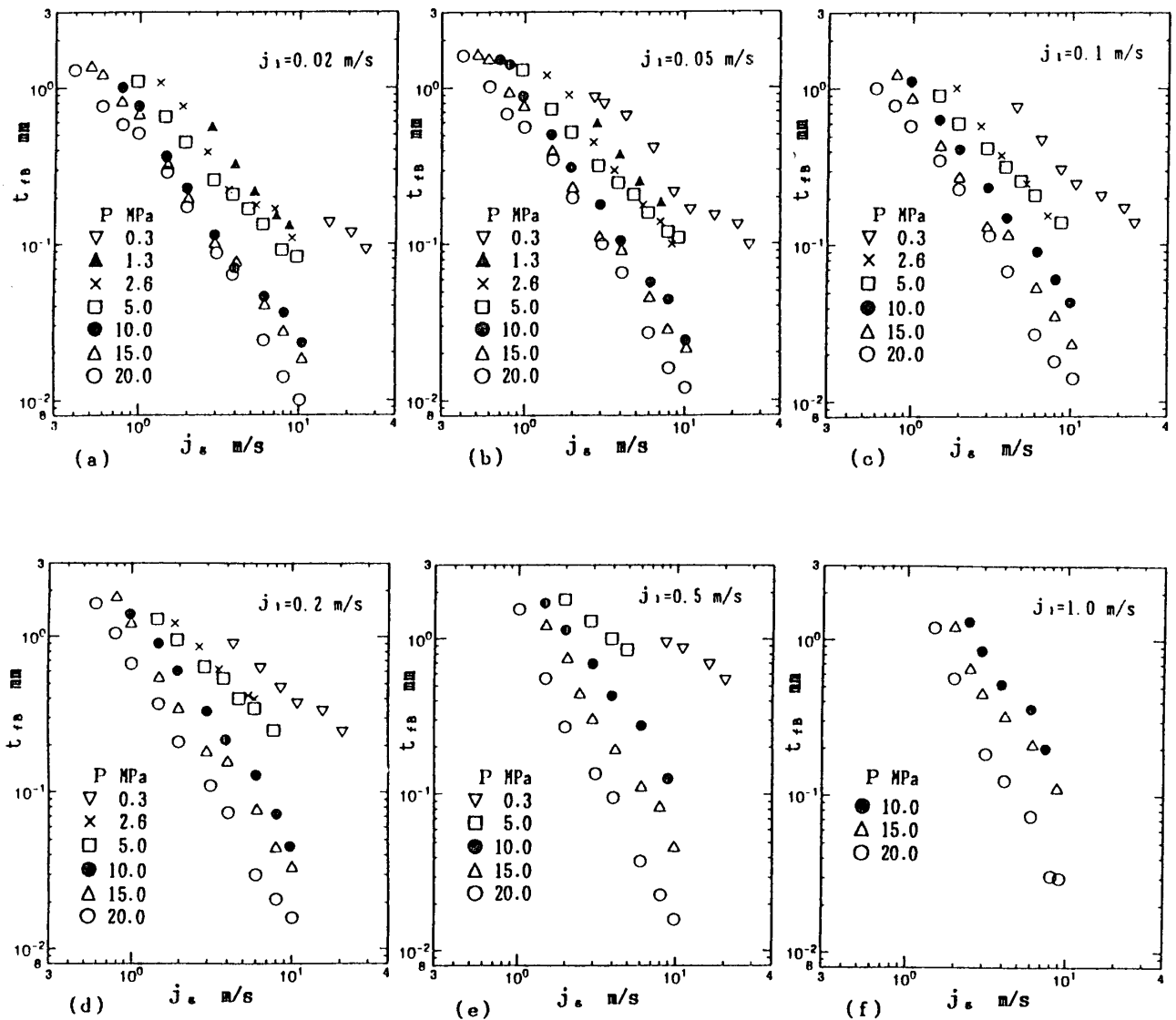


図5. 基底液膜厚さ  $t_{FB}$  対みかけの気体速度  $j_g$  の関係 (パラメータ: 圧力P)

加と共に  $t_{rm}$  および  $t_{rn}$  とほぼ同様に減少する。  $P \leq 5$  MPa の領域では、  $j_1$  が余程小さい場合以外は  $t_c \geq 1$  mm であるが、  $P \geq 10$  MPa になると  $j_1$  の値に関わらず  $t_c \leq 1$  mm の領域が拡大している。  $t_c$  が 1 mm 以下の領域では、  $j_*$  の増加と共に 急激な減少過程をたど

る。液滴流量の急増<sup>(2)</sup>と一致する。

図7は  $t_c$  に及ぼす圧力の影響を示したものである。図7(a)~(f)は  $j_1=0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5$  および  $1.0$  m/s にそれぞれ対応し、パラメータに圧力  $P$  をとっている。  $t_c$  に及ぼす  $P$  の影響は大きいことが解る。

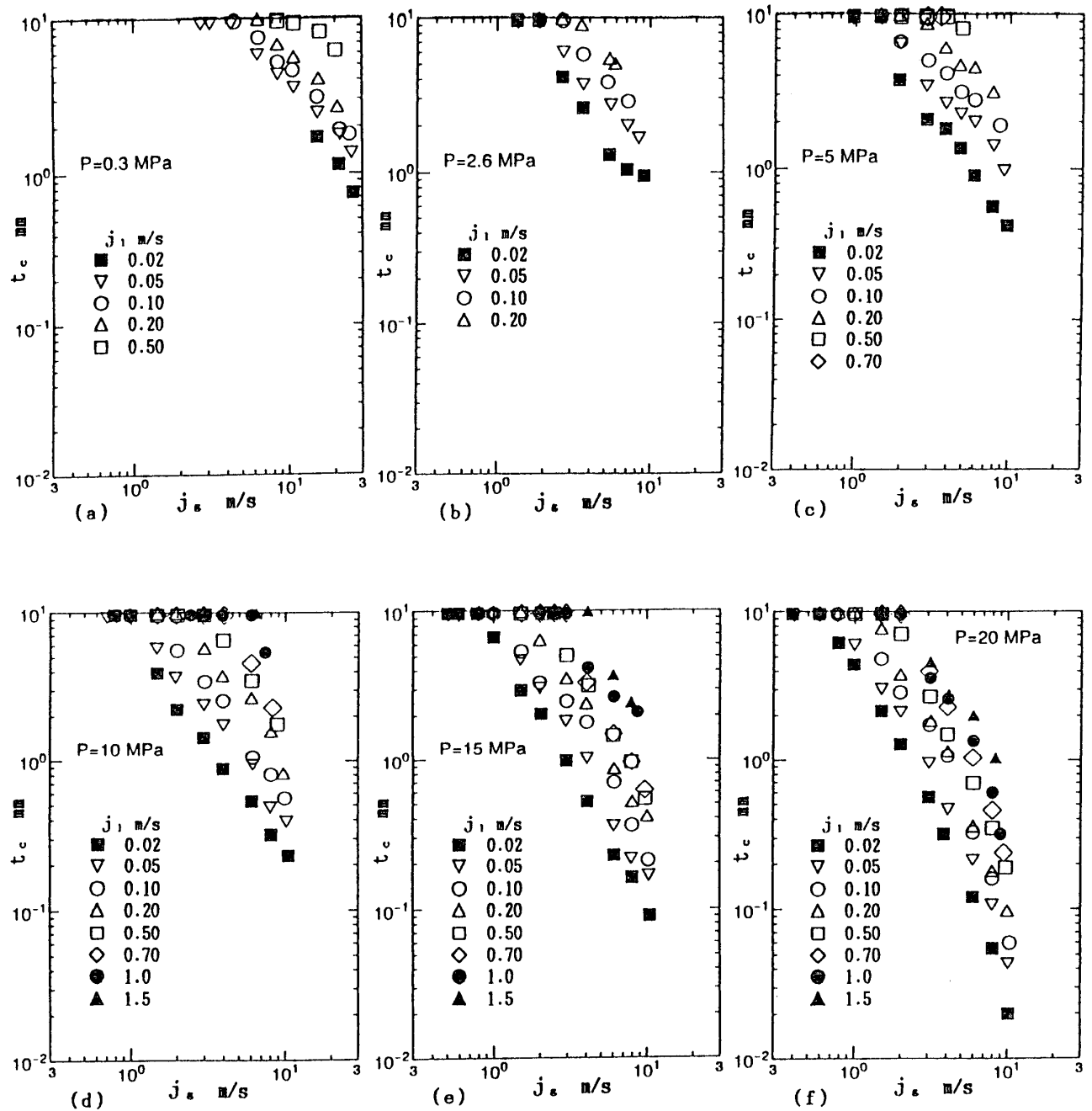


図6. 最大波高  $t_c$  対みかけの気体速度  $j_g$  の関係  
(パラメータ: みかけの液体速度  $j_1$ ) (管半径  $R=9.6$  mm)



図6および図7から、 $t_c \geq 1\text{ mm}$  と  $t_c \leq 1\text{ mm}$  とで  $j_g$  の増加に対する  $t_c$  の減少傾向の異なることが解る。 $t_c \geq 1\text{ mm}$  の領域では、 $t_c$  対  $j_g$  の関係における  $j_g$  および  $P$  の影響は、平均液膜厚さおよび基底液膜厚さの場合に類似し非常に大きいことが判明する。 $t_c \leq 1\text{ mm}$  の領域、特に圧力 20 MPa では気相速度が 10 m/s 程度にな

ると、 $t_c$  も 0.1 mm を下る領域が現れている。

最大波高が管半径よりも小さくなり始める点 CGC<sup>(4)</sup> から 1 mm までの領域に対して、 $t_{rim}$  と  $t_c$  の比を取ってみると次のようになる。

$$t_c = 8.5 t_{rim} \quad (3)$$

定数は圧力によって多少異なり、以下のようである。

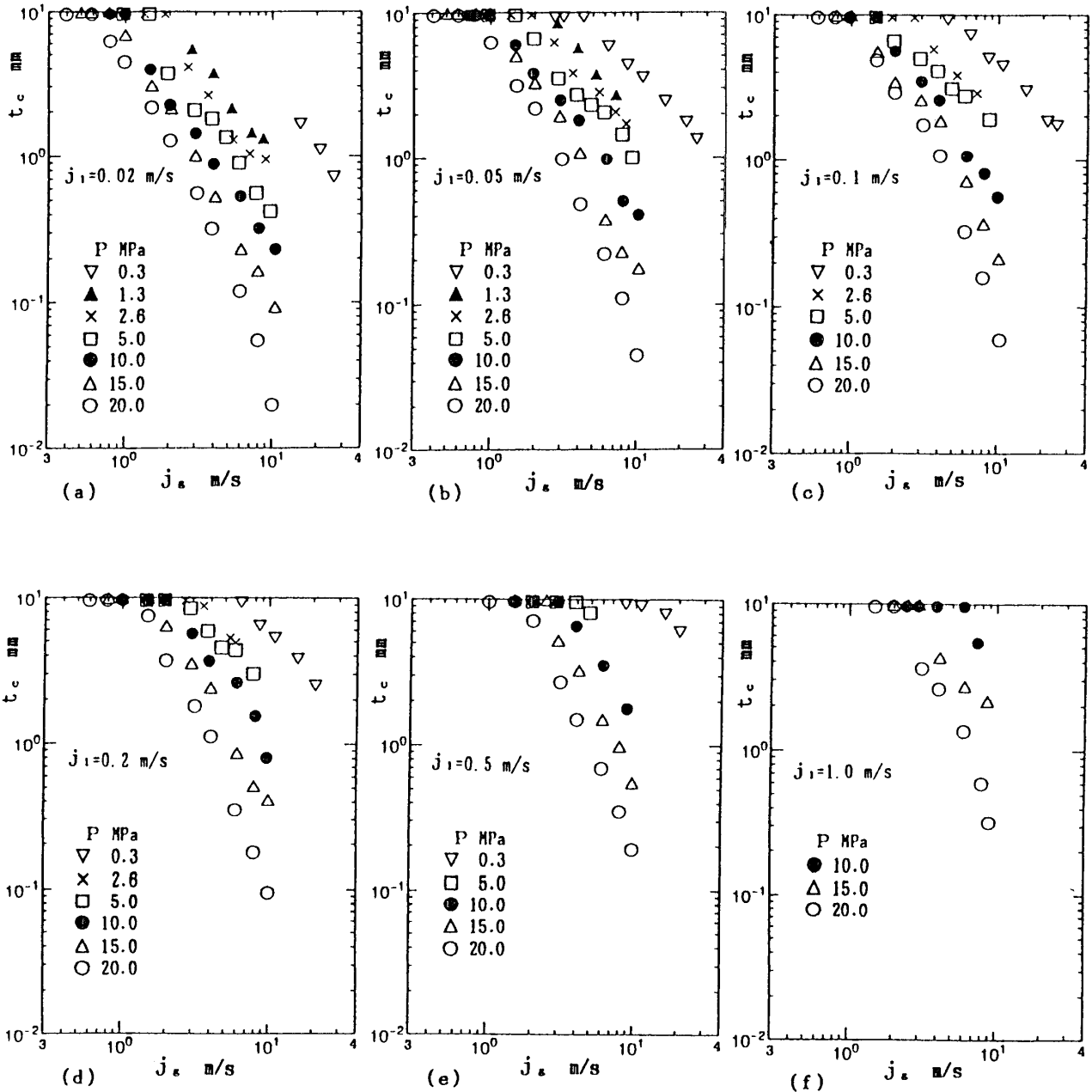


図7. 最大波高  $t_c$  対みかけの気体速度  $j_g$  の関係 (パラメータ: 圧力  $P$ ) (管半径  $R = 9.6\text{ mm}$ )

P MPa	定数	P MPa	定数
0.3	8.7	10.0	8.7
5.0	7.6	15.0	9.2
7.0	7.8	20.0	9.0

式(3)の適用下限を取りあえず1mmとしたが、擾乱波の消失点とするのが適当であろう。擾乱波の消失については続報にて報告する予定である。

## 5. 結 言

系内圧力を0.3から20MPaまで大幅に変化させ、垂直上昇気液環状二相流の液膜特性に及ぼす圧力の影響を調査した。その結果を要約すると次のようである。

(1) 系内圧力が10MPa程度になると、気相速度が10ないしそれ以下であっても平均液膜厚さは0.1mmを下る領域が出現する。

(2) 環状流領域の平均液膜厚さを推算するための相関式は大気圧近傍から20MPaまでの広範囲に適用可能である。

(3) 基底液膜厚さと平均液膜厚さの間には一定の比率が得られた。

(4) 最大波高は、系内圧力が昇圧されると気相速度の上昇と共に急激にその値を小さくする。20MPaでは気相速度10m/s程度で0.1mmを下る領域が存在する。

(5) 最大波高は、1mm以上と1mm以下の領域とで気相速度の増加に対する減少割合が相違する。

終わりに、高圧用の測定部の製作を担当された宇部工業高等専門学校・総合技術教育センターの文部技官諸氏、特に谷口稔氏および久富好雄氏に感謝の意を表す。

## 参考文献

- (1) 日本機械学会、気液二相流技術ハンドブック、コロナ社、(1989)、203.
- (2) 中里見, 世古口, 垂直上昇気液環状二相流における液滴流量に及ぼす圧力の影響, (第1報、系内圧力0.3

- から20MPaに対する測定結果)、機論、投稿中。
- (3) 中里見, 世古口, 垂直上昇気液環状二相流における液滴流量に及ぼす圧力の影響, (第2報、液滴流量に関する各種相関式の広い圧力範囲の実験データによる評価と新相関式の提案)、機論、投稿中。
  - (4) 中里見, 清水, 落合, 世古口, 垂直上昇気液二相流の流動形態の遷移に及ぼす系内圧力の影響, 機論, 59-568, B (1993), 3883-3890.
  - (5) 中里見, 世古口, 清水, 落合, 垂直上昇気液二相流のボイド率に及ぼす圧力の影響, 機論, 58-551, B (1992), 2190-2197.
  - (6) Nakazatomi, M., Sekoguchi, K., Shimizu, H. and Ochiai, T., Effect of Pressure on Void Fraction in Vertical Upward Gas-Liquid Two-Phase Flow. I - Experimental Results for System Pressure from 0.3 to 20 MPa -, Tech. Rep. of OSAKA Univ., 43-2157(1993), 267-275.
  - (7) Nakazatomi, M., Shimizu, H., Ochiai, T., Kakuno, Y. and Sekoguchi, K., Effect of Pressure on Void Fraction in Vertical Upward Gas-Liquid Two-Phase Flow. II - An Assessment of Published Correlations of Void Fraction through High Pressure Experimental Data and a Proposal of a New Correlation -, Tech. Rep. of OSAKA Univ., 43-2158(1993), 277-286.
  - (8) 世古口, 中里見, 清水, 三宅, 垂直上昇プラグ流の流動パラメータに関する実験的研究(圧力の影響), 機論, 57-535, B (1991), 1128-1134.
  - (9) Nakazatomi, M., Shimizu, H., Ochiai, T. and Kakuno, Y., Effect of Pressure on Flow Parameters in Vertical Upwards Gas-Liquid Two-Phase Plug Flow, Res. Rep. of Ube Tech. Coll., 41(1995), 41-50.
  - (10) 世古口, 中里見, 武石, 清水, 森, 三宅, 垂直上昇気液二相流の液体塊速度に及ぼす圧力の影響, 機論, 57-537, B (1991), 1823-1830.
  - (11) 世古口, 西川, 中里見, 西, 金氏, 気液二相流の液膜に関する研究, 機論, 39-317(1973), 313.

(平成7年9月25日受理)