

# 垂直上昇気液環状二相流の実験的研究 (第3報、流動形態に及ぼす系内圧力の影響)

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  
(3rd Report, Effects of System Pressure on Flow Regimes)

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

## Abstract

The purpose of this study is to investigate the pressure effects on the flow regime transitions in vertical gas-liquid annular flow. The following flow conditions were tested to examine the effects of system pressure; the flow conditions on the disappearance of the disturbance waves; the flow conditions on the non entrainment region. The disappearance of the disturbance waves were decided by using the signals of time-varying cross-sectional mean liquid holdup which were measured by using nine sets including two kinds of wall conductance probes. New correlations to predict the two above-mentioned flow conditions are presented. System pressure in the closed circulation loop was changed from 0.3 to 20 MPa.

**Key Words:** Annular flow, Pressure effect, Flow regime, Disturbance wave, Non entrainment region

## 1. 緒言

垂直上昇気液二相流の流動形態の遷移境界に及ぼす実験系内圧力の影響に関しては前報<sup>(1)</sup>において報告した。

本報では、液体スラグ消失後の団塊波流の一部と環状流領域を調査対象とする。この領域における流動形態の遷移として、擾乱波が消失しリップル流へ移行する遷移境界およびエントレメント流量が零または無視可能な領域の境界を取り上げる。これらの遷移境界に及ぼす系内圧力の影響を系統的に調査した。

気液環状二相流の液体輸送は、基底液膜、液膜上の波およびエントレメント(液滴)の三者によって輸送される<sup>(2)</sup>。本報で取り上げる遷移境界は液体の輸送形態に大きな変化を生じることになるので重要であろう。

上記二つの領域の遷移境界に及ぼす実験系内圧力の影響が明らかにされ、その境界を推算するための相関式が提案される。

## 2. 主な記号

D: 供試管内径	mm, m
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 = $j_g (\rho_g / \Delta \rho \cdot g \cdot D)^{1/2}$	
$j_l^*$ : 無次元液体速度 = $j_l (\rho_l / \Delta \rho \cdot g \cdot D)^{1/2}$	
L: 長さ	m
$l_D$ : センサ間の距離	mm
n: 通過ひん度	Hz
P: 圧力	MPa
$t_c$ : 最大波高	mm
$t_{FB}$ : 基底液膜厚さ	mm

\* 宇部工業高等専門学校制御情報工学科

$t_m$ : 平均液膜厚さ	mm
$u$ : 速度	m/s
$\eta$ : ホールドアップ	--
$\rho$ : 密度	kg/m <sup>3</sup>
$\Delta\rho$ : 気液の密度差 = $\rho_l - \rho_g$	kg/m <sup>3</sup>

添字

$g$ : 気相	$l$ : 液相
$w$ : 波	$\bar{\quad}$ : 平均

### 3. 実験装置および方法

実験装置および供試管は第1報<sup>(3)</sup>、第2報<sup>(4)</sup>と同一のものである。

本報の解析には、主として可変動電流装置の出力、つまりホールドアップ信号が用いられる。可変動電流装置は、リング状のセンサ(厚さ1mm, 間隔5mm)6組と周方向に長さ3mmのセンサ(厚さ0.3mm, 間隔4mm)3組の2種類のセンサ、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>(5)</sup>を行った。

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

環状流領域における流動形態の遷移を決定するために、全ての測定量を検討したが、その中で可変動電流装置による液膜の時系列信号( $\eta$ -信号)、点電極プローブによる液膜のデータおよびエントレメント等速吸引プローブによる液滴のデータが有効であった。

#### 4.1 擾乱波流からリップル流への遷移境界

発達した環状流領域において系内圧力が昇圧されてくると、気相速度の増加と共に擾乱波は消失し、リップル流へ移行する境界が現れる。大気圧近傍の低圧では、擾乱波は白濁し周期的にしかもリップルより早い速度で移動するので、外部からの視察によって比較的容易に識別が可能である。系内圧力が昇圧されてくると、白濁は失せ視察による判別は困難になる。

大気圧近傍下の擾乱波の特徴は、波高と速度の点でリップルと極端に異なっている<sup>(2)・(6)</sup>が、実験系が昇圧されてくるとそのような差異は小さくなっていく<sup>(4)</sup>。そこで、擾乱波が消失する条件を次のような手順を用いて決定することにした。

(1) 多チャンネルの $\eta$ -信号上に対応の付く大形の波を擾乱波とし、これが消失する流動条件に着目した。

(2) さらに、(1)の流動条件において他の流動パラメータに何らかの変化が生じているかを確認した。

多チャンネルの $\eta$ -信号の一例として、可変動電流装置(ホールドアップ $\eta$ の測定部)に設置されたリング状センサ6組からの、液膜および液膜と連続している液体のホールドアップ波形を図1に示す。同図中のチャンネル番号は、(1)が上流側、(6)が下流側である。図1(a)~(c)の流動条件は、圧力20MPa、みかけの液体速度 $j_l=0.50$  m/s一定のもとに、みかけの気体速度がそれぞれ $j_g=3.1, 4.0$  および  $6.0$  m/sである。管軸方向へのセンサ間の距離は50, 50, 30, 20, 10 mm, 合計160 mmである。同図(a)~(c)の平均ホールドアップ $\bar{\eta}$ はそれぞれ0.0406, 0.0296, 0.0157であり、非常に小さいので、図のたて軸は10倍に拡大している。

同図から明らかなように、みかけの気体速度 $j_g=3.0$  m/s(図(a))および $j_g=4.0$  m/s(図(b))では、6組の波形の全てに容易に対応のつく大型の波形が多数存在する。これらの波形は9組の全センサ(全長約230mm)にも対応が確認され、かつ最大波高 $t_e$ が2.7および1.5 mmと大きく、これらは擾乱波であろう。最大波高 $t_e$ とは、ボイド率 $\alpha=99.99\%$ 、波の通過頻度が5~8 Hzにおける管壁からの距離と定義した<sup>(7)</sup>。

図(c)の $j_g=6.0$  m/sでは、6組のセンサの全ての $\eta$ 波形に対応のつく大型の波は既に存在しない。 $t_e$ は0.7 mmと急減している。擾乱波は消失していると認められる。

次に、2種類のセンサ6チャンネルを取り上げる。図2は可変動電流装置(ホールドアップ $\eta$ の測定部)に設置されたリング状センサの中から下流側3組((4)~(6))と3mmセンサ3組((1)~(3))からの出力波形である。図2(a)~(c)の流動条件は、圧力20MPa、みかけの液体速度 $j_l=0.1$  m/s一定のもとに、みかけの気体速度がそれぞれ $j_g=4.0, 6.0$  および  $8.2$  m/sである。管軸方向へのセンサ間の距離 $L_s$ は20, 10, 55, 7, 7 mmの合計99mmである。図2(a)~(c)の平均ホールドアップ $\bar{\eta}$ はそれぞれ0.0222, 0.0092, 0.0058(平均液膜厚さ0.111, 0.046, 0.029 mm)であり、非常に小さいので、図のたて軸は20倍に拡大している。そのために、波形が小さくなるとノイズが支配的になる場合がある。

同図から、明らかなように、みかけの気体速度 $j_g=4.0$  m/s(図(a))では6組の波形の全てに容易に対応のつく大型の波形が多数存在する。これらの波形は9組の

全センサ (全長約 230 mm) にも対応が確認され、かつ最大波高  $t_c$  が 1 mm をやや超えるので、これらは擾乱波と認められる。図(b)の  $j_g=6.0$  m/sでは、6組のセンサの全ての  $\eta$  波形に対応のつく大型の波は既に存在しない。3 mm センサの出力に現れている波形は全てリップルである。擾乱波は消失していると認められる。図(c)  $j_g=8.2$  m/s では、6チャンネルともノイズのみが拡大されている。

図3は圧力 15 MPa の例で、その他の流動条件は図2と同様である。図3(a)~(c)の平均ホールドアップ  $\bar{\eta}$  はそれぞれ 0.0337, 0.0160, 0.0101 (平均液膜厚さ 0.169, 0.080, 0.050 mm) であり、 $t_c$  は 1.8, 0.70, 0.36 mm である。たて軸の拡大率は図(a)と(c)が 20倍、図(b)が 30倍である。図3から、擾乱波の消失は図(b)の  $j_g=6.1$  m/s 前後と見られる。

図4は、流動パラメータ (最大波高  $t_c$ 、平均液膜厚さ  $t_{fm}$ 、基底液膜厚さ  $t_{fb}$ 、平均液体塊速度  $\bar{u}_w$  および波の最大通過頻度  $n_{max}$ ) と  $j_g$  の関係を示したものである。同図から、 $n_{max}$  は  $j_g$  の増加と共に増加したのち、極大値を形成するか、または飽和する傾向を示す。他のパラメータは単調に減少するか増加している。

多チャンネルの  $\eta$ -信号上において擾乱波が消失する条件 (DDW) を、図4上に照合してみると (DDW ↑印)、次のことが判明する。

- (1) 波の最大通過頻度  $n_{max}$  曲線上では、極大値または飽和する直前の  $j_g$  に一致する。
- (2) 平均液膜厚さ  $t_{fm}$  曲線上では、 $t_{fm}=0.08$  mm の  $j_g$  に一致する。
- (3) 最大波高  $t_c$  曲線上では、 $t_c=0.5\sim 0.7$  mm の  $j_g$  に一致する。
- (4) 基底液膜厚さ  $t_{fb}$  曲線上では、 $t_{fb}=0.05$  程度の  $j_g$  に一致する。

このような関係は他の圧力においても同様である。

図5は、このようにして、実験的にリップル流への遷移境界を決定した結果である。擾乱波流からリップル流への遷移境界は圧力の上昇と共に  $j_g$  の小さい方へ移行する。擾乱波の消失する点における液滴流量比は、圧力の上昇と共に増大し、また、 $j_l$  の増加と共に大きな値となる。

遷移境界を推算する相関式として、次式を提示する。

$$j_g^* = C \cdot \exp(j_l^{**}) \quad (1)$$

ここに、 $C = 4.93 (\rho_g/\Delta\rho)^{0.1} \cdot (\rho_l/\Delta\rho)^{-1.6}$   
 $a = 0.3 (\rho_g/\Delta\rho)^{0.1} \cdot (\rho_l/\Delta\rho)^{-0.2}$

図6は、式(1)と実験データの比較である。両者の一致の程度は良好である。圧力 0.3 MPa の場合、実験装置の関係で擾乱波が消失する条件が得られなかったが、式(1)を外挿して適用すると、 $j_l=0.1$  m/s の場合  $j_g=45$  m/sが得られる。

#### 4. 2 液滴流量が零または無視できる領域

等速吸引プローブを用いて管断面内の液滴流量を測定した結果<sup>(8)</sup>、次のことが判明した。

垂直上昇気液環状二相流領域内でみかけの水流量  $j_l$  の値が小さい場合に、液滴流量が零または無視できる程度の微量な領域 (以下には NER と略記する) の存在が実験を行った全圧力において確認された。

図7は実験で得られたこの領域に対して、圧力をパラメータにとり示したものである。NER は圧力が上昇すると、 $j_g$  の小さい方へ、また  $j_l$  の小さい方へ領域を縮小しながら移行している。

NER の領域を算定するために、 $j_l$  の上限値 ( $j_{lmax}$ ) と  $j_g$  の上限 ( $j_{gmax}$ ) および下限値 ( $j_{gmin}$ ) によって囲まれる領域で表示すると次のようになる。

$$j_{lmax} = 0.0183 \cdot (\rho_l/\rho_g)^{0.205} \quad (2)$$

$$j_{gmax} = 2.4 \cdot \ln \{ (\rho_l/\rho_g) - 2.3 \} \quad (3)$$

$$j_{gmin} = 0.836 \cdot \ln \{ (\rho_l/\rho_g) - 0.75 \} \quad (4)$$

図8は実験値と上式(2)~(4)の比較を示したものである。同図(a)は式(2)と、図(b)は式(3)および(4)と実験データとの比較である。

式(1)~(4)の適用範囲は実験範囲内である。

## 5. 結 言

系内圧力を 0.3 から 20 MPaまで大幅に変化させ、垂直上昇気液環状二相流の流動形態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) 擾乱波流からリップル流への遷移境界に及ぼす圧力の影響が実験的に明らかになった。圧力の上昇と共にこの境界は気相速度の小さい方へ移行する。

(2) リップル流への遷移境界を推算するための相関式を提案した。

(3) エントレメント流量が零または無視できる程度の微量な領域に及ぼす圧力の影響が明らかになった。この領域は圧力の上昇と共に気相速度の小さい方へ、また液相速度の小さい方へ領域を縮小しながら移行する。

(4) エントレメント流量が零または無視できる程度の領域を推算するための相関式が提示された。

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。

## 文 献

- (1)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.
- (2)世古口, 西川, 中里見, 西, 金氏, 気液環状二相流の液膜に関する研究, 機論, 39-317(1973), 313-323.
- (3)中里見, 清水, 落合, 角野, 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), 宇部高専, 研究報告, 投稿中.
- (4)中里見, 清水, 落合, 角野, 垂直上昇気液環状二相流の実験的研究(第2報, 液膜上の波の特性に及ぼす圧力の影響), 宇部高専, 研究報告, 投稿中.
- (5)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.
- (6)Nedderman, R. M. and Shearer, C. J., The Motion and Frequency of Large Disturbance Waves in Annular Two-Phase Flow of Air-Water Mixtures, Chem. Eng. Sci., 18(1963), 661-670.

- (7)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.
- (8)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 20 MPa に対する測定結果), 機論, 投稿中.  
(平成7年9月25日受理)

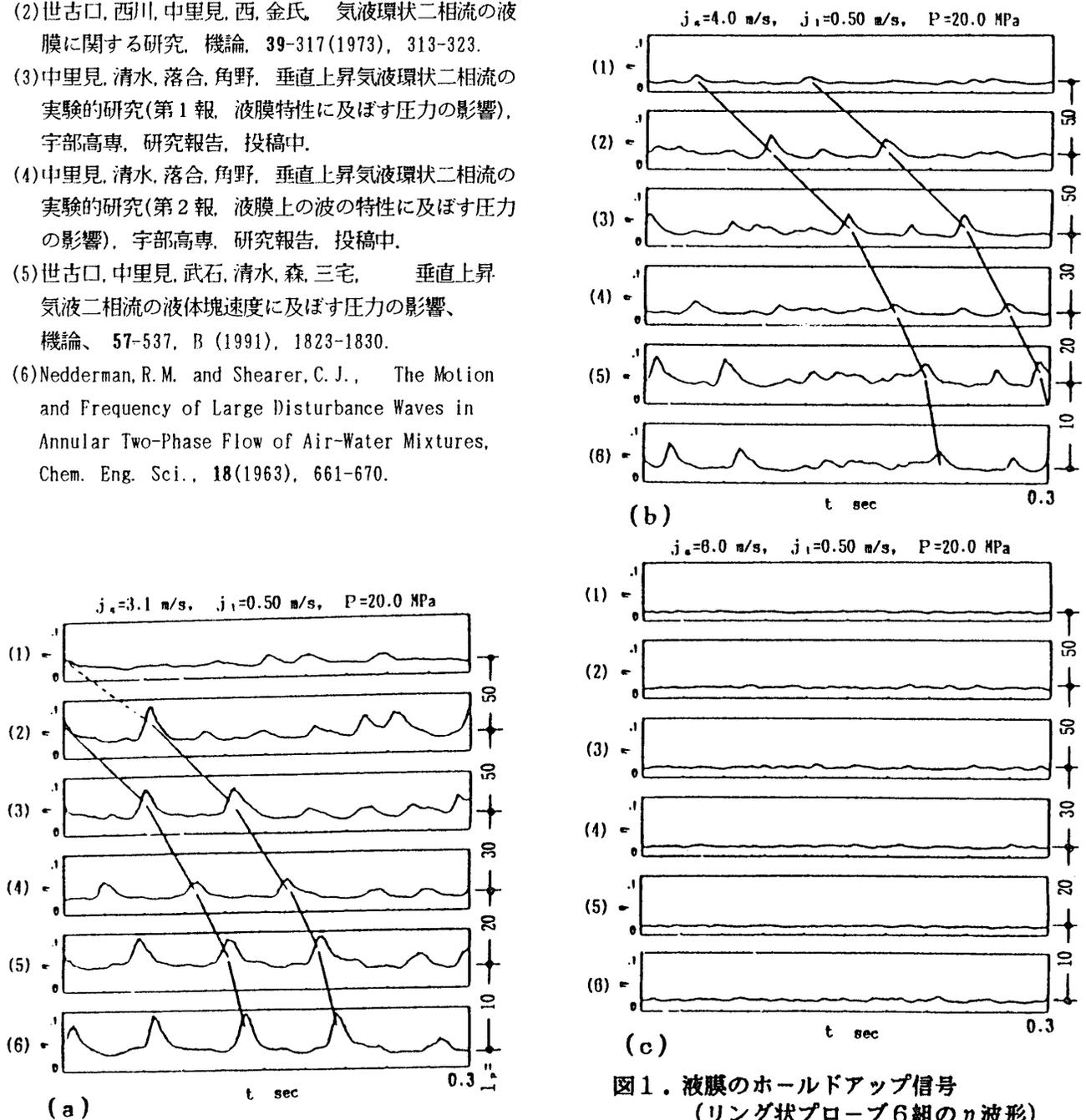


図1. 液膜のホールドアップ信号  
(リング状プローブ6組の $\eta$ 波形)

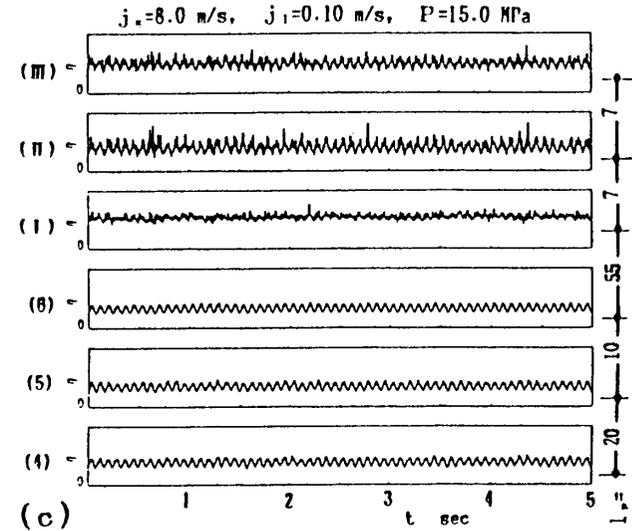
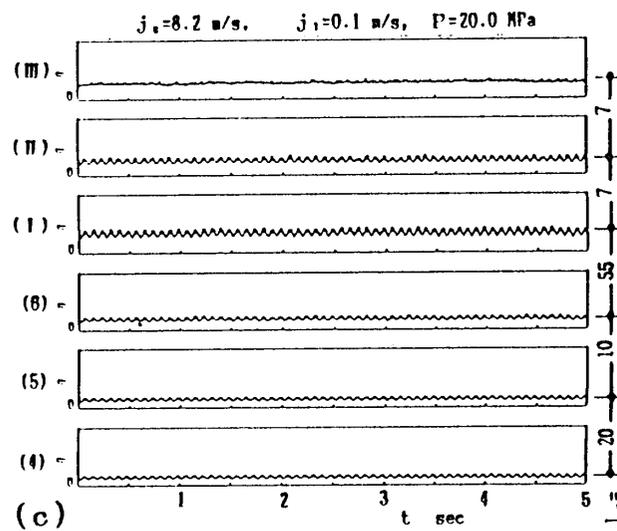
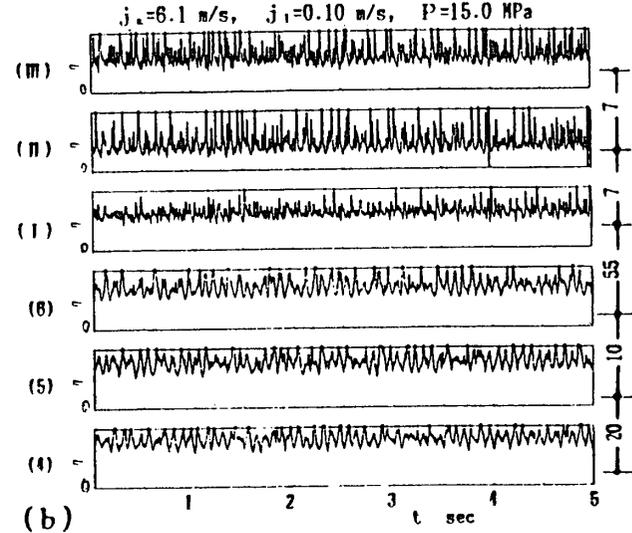
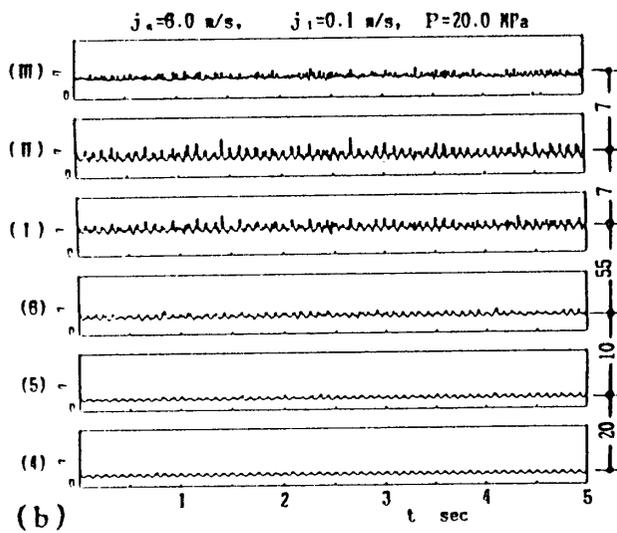
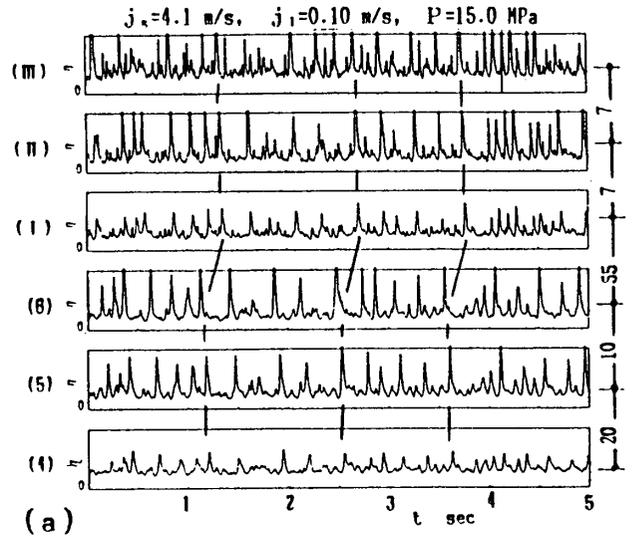
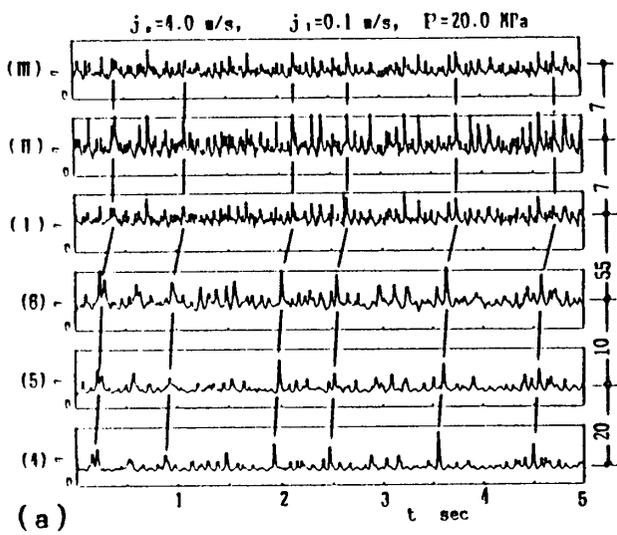


図2. 液膜のホールドアップ信号、 $P=20$  MPa  
(4)~(6):リング状プローブ、I~III:3 mm プローブ

図3. 液膜のホールドアップ信号、 $P=15$  MPa  
(4)~(6):リング状プローブ、I~III:3 mm プローブ

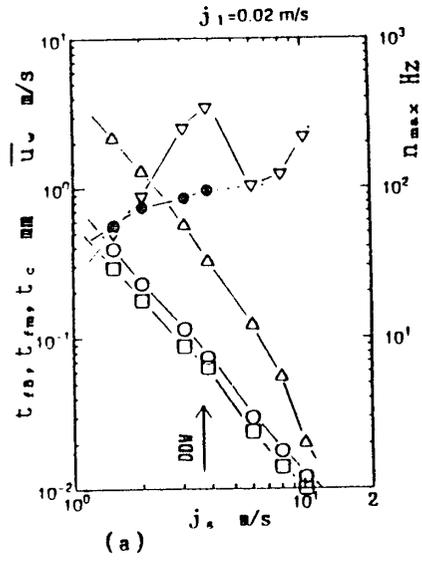
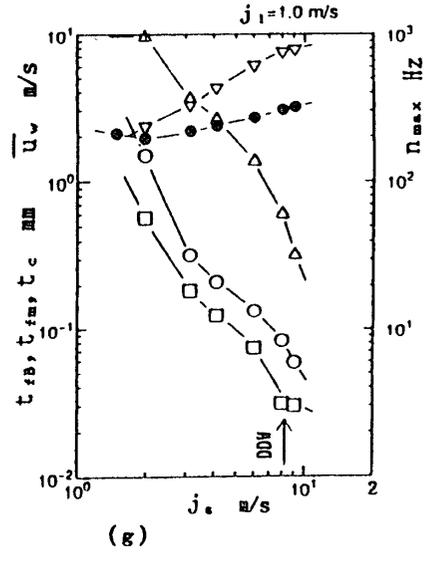
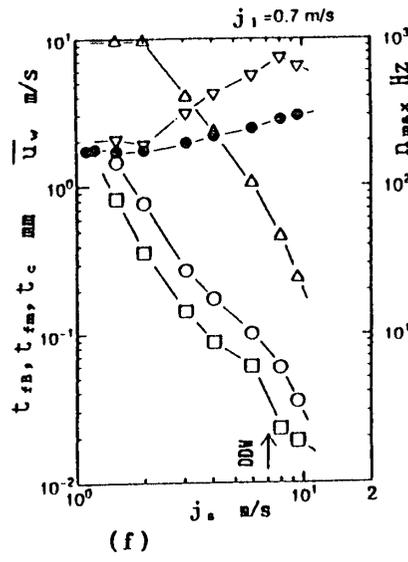
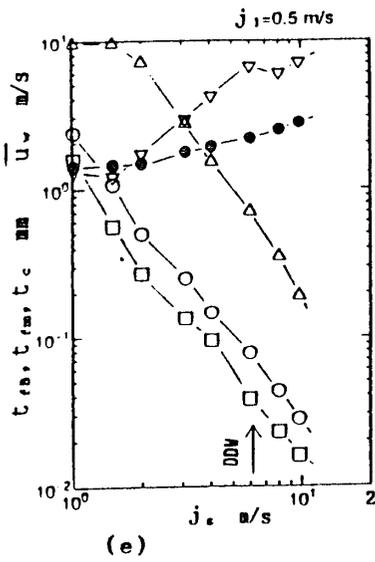
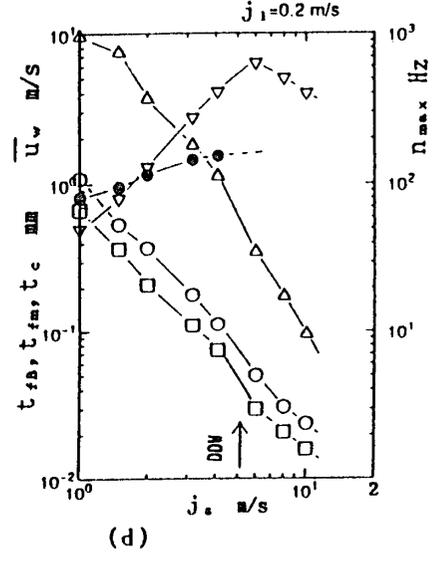
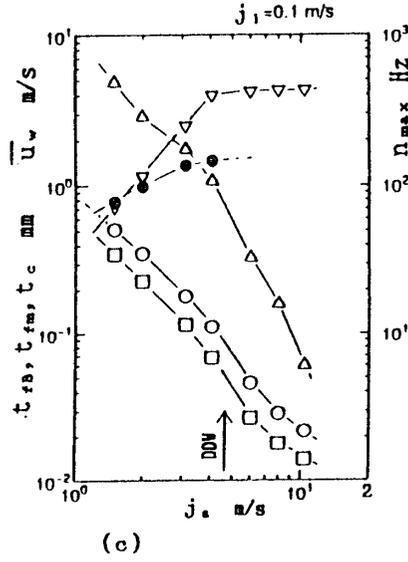
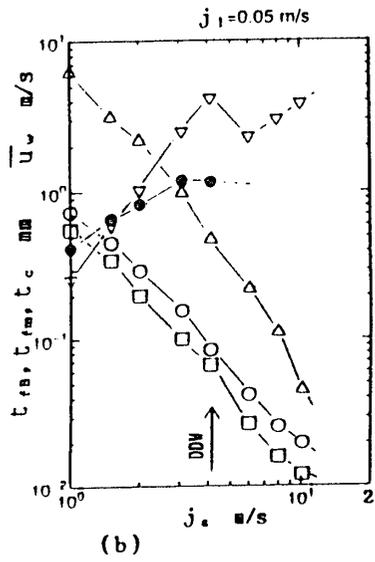


図4. 流動パラメータ相互の関係  
P=20 MPa の例



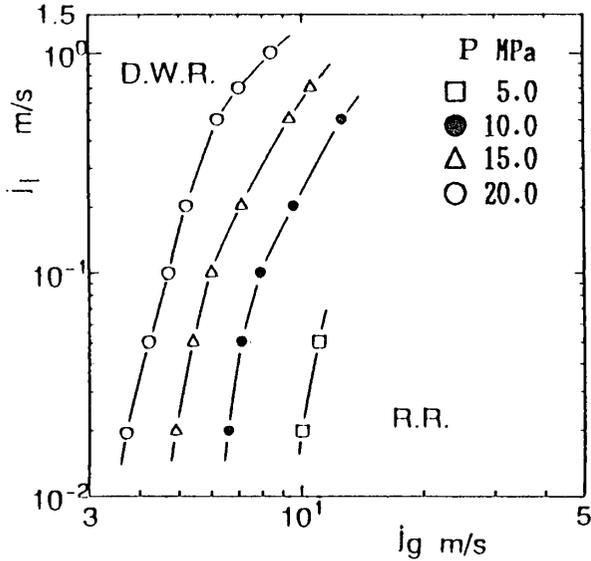


図5. 擾乱波流からリップル流への遷移境界 (測定値)

D.W.R.: 擾乱波領域  
R.R.: リップル流領域

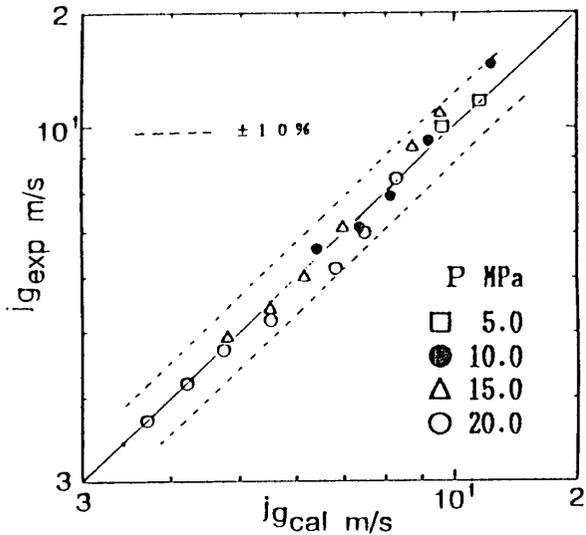


図6. 式(1)による擾乱波流とリップル流への遷移境界と測定値の比較

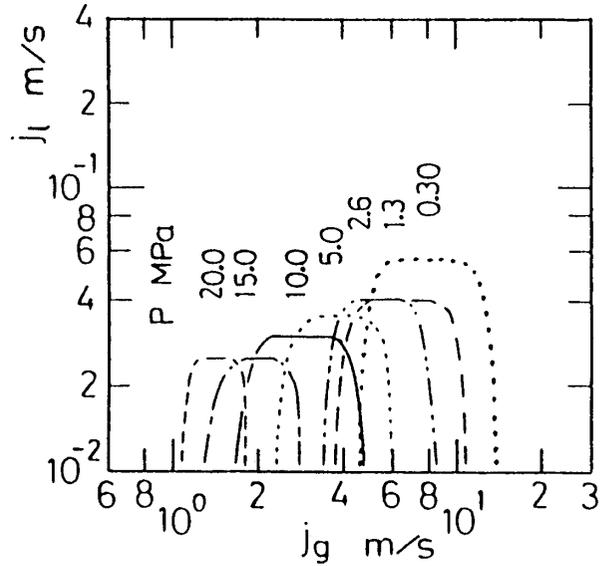


図7. 液滴流量が零または無視できる領域 (測定値)

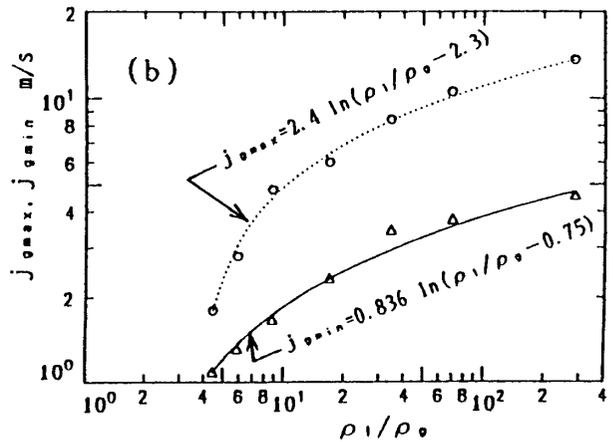
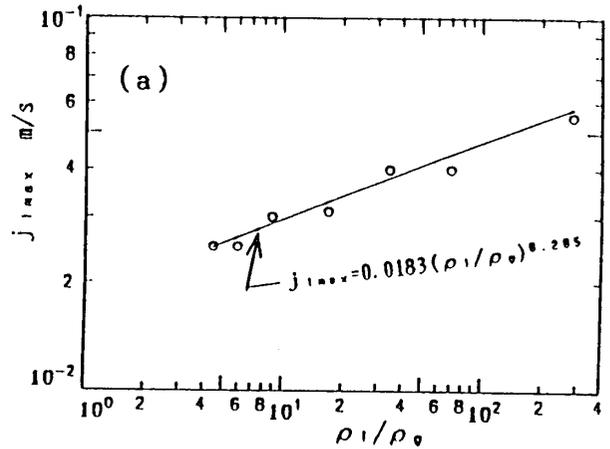


図8. 式(2)~(4)による液滴流量が零または無視できる領域と測定値の比較