

# 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)

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  
(2nd Report, Effects of System Pressure on Characteristics of Waves)

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 for the characteristics of huge wave and disturbance wave on the liquid film in vertical gas-liquid annular flow. It was found that the wave mean frequency shows similar value under the region of system pressure  $P \geq 0.5$  MPa and shows smaller value than that of high pressure conditions under the region of  $P \leq 2.6$  MPa. 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, Disturbance wave, Wave velocity, Wave interval, Wave frequency

## 1. 緒言

気液環状二相流領域における液膜特性に及ぼす実験系内圧力の影響は第1報<sup>(1)</sup>にて報告したが、液膜の流動特性に及ぼす系内圧力の影響は非常に大きいことが判明した。

本報では、液膜上を液膜と共に流動する波(団塊波および擾乱波)の流動特性に及ぼす圧力の影響を取り上げる。具体的には、波の平均速度、速度の標準偏差、波の平均間隔および波の平均通過頻度等であり、大幅な圧力変化に対する測定結果を報告する。

波の平均速度に対する圧力の影響は複雑である。このことは、液滴流量比が圧力の上昇と共に急速に増加し<sup>(2)</sup>、平均液膜厚さおよび最大波高が急減すること<sup>(1)</sup>と

密接に関連しているからであろう。また、波速度の標準偏差には、圧力の影響が明確に現れ、全ての液相速度に対して標準偏差は圧力の上昇と共に小さくなっている。さらに、波の平均間隔は最大波高に対してほぼ一定値を示し、液相速度の影響は現れていない。

## 2. 使用した主な記号

E : 液滴流量比	--
j : みかけの速度	m/s
L : 長さ	m
N : 通過頻度	Hz
P : 圧力	MPa
$t_c$ : 最大波高	mm
$t_{fm}$ : 平均液膜厚さ	mm
u : 速度	m/s
$\eta$ : ホールドアップ	--

\* 宇部工業高等専門学校制御情報工学科

$\sigma$ : 標準偏差	m/s
添字	
g : 気体	l : 液体
w : 波	$\bar{\cdot}$ , m : 平均

### 3. 実験装置および方法

使用した実験装置および供試管は第1報<sup>(1)</sup>と同一である。本報の実験データは可変動電流装置<sup>(3)</sup>の出力、つまりホールドアップ信号の解析から得られたものである。その際、2種類のプローブのうちリング状センサからの $\eta$ -信号を解析に用いた。

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

可変動電流装置に内蔵されているリング状のセンサ6組からの出力、つまり液膜と連続する液体のホールドアップの時系列信号( $\eta$ -信号)<sup>(3)</sup>を基礎データとして用いた。これらの信号の解析から、波の速度、波の間隔および波の通過頻度等が求められる。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上の波(団塊波と擾乱波)の特性に関する測定結果を以下に示し検討する。

#### 4.1 波の平均速度

リップルを除く団塊波および擾乱波の平均速度 $\bar{u}_w$ を各圧力ごと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。同図(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。続報にて報告するように、系内圧力が昇圧されてくると、 $j_g$ の増加と共に $j_l$ の小さい方から、 $\eta$ -信号上に大きな波形が消失し、対応が付かなくなる。擾乱波が消失するためである。そのため、図1中に見られるように、実験点が $j_g$ の増加と共に $j_l$ の小さい方からプロットされなくなる。これは、以下の全ての図において同様である。

図2は $\bar{u}_w$ に対する圧力の影響を示したものである。同図(a)~(h)は $j_l=0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7$ 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。

$\bar{u}_w$ の一般的特性として、 $j_g$ の増加と共に上昇し、また、みかけの液体速度 $j_l$ 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、 $\bar{u}_w$ の値に対する圧力の影響は複雑である。つまり、 $j_l \leq 0.2$  m/sの領域では、低圧の $\bar{u}_w$ がやや小さく現れ、 $P \geq 5.0$  MPaの $\bar{u}_w$ はほぼ同一の値となっている。しかし、 $j_l \geq 0.3$  m/sの領域では、 $j_g$ の大きい領域において $\bar{u}_w$ は圧力の上昇と共に小さくなっている。このことは、液滴流量比 $E$ が圧力の上昇と共に急速に増加し<sup>(2)</sup>、平均液膜厚さ $t_{lm}$ および最大波高 $t_e$ <sup>(4)</sup>が急減すること<sup>(1)</sup>と密接に関連している。

図3は $\bar{u}_w$ に対する標準偏差 $\sigma_{uw}$ を各圧力ごとに $j_g$ に対して示したものである。同図(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。

図4は $\sigma_{uw}$ に対する圧力の影響を示したものである。同図(a)~(h)は $j_l=0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7$ 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。

環状流領域の $\sigma_{uw}$ の一般的特性として、全ての圧力に対して $j_g$ の増加と共に減少し、さらに $j_g$ の増加と共に一定値を示す傾向にある。また、 $j_l$ の増加と共に $j_g$ の全領域にわたり大きな値となっている。図4から、圧力の影響が明確に現れ、全ての $j_l$ に対して $\sigma_{uw}$ は圧力の上昇と共に小さくなっている。

#### 4.2 波の平均間隔

団塊波および擾乱波の平均間隔 $\bar{L}_w$ をみかけの気体速度 $j_g$ に対して示したものが図5である。同図(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。

図5から、 $\bar{L}_w$ の一般的な特性として全ての圧力に対し $j_g$ の増加と共に上昇傾向をとり、ピークを形成しさらに減少傾向を示している。ピークを形成する $j_g$ は圧力の上昇と共に小さい方へ移行している。これは流動形態の遷移と密接に関連している。また、 $\bar{L}_w$ は圧力の上昇と共に $j_g$ の大小に関わらず全体的に減少傾向にある。 $j_l$ に対する顕著な傾向は現れていない。

図6は $\bar{L}_w$ を最大波高 $t_e$ に対して示したものである。同図(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。同図から、 $\bar{L}_w$ は $t_e$ に対してほぼ一定値を示し、 $j_l$ の影響は現れていない。

図5と図6から、 $\bar{L}_w$ のおおよその値はそれぞれの圧

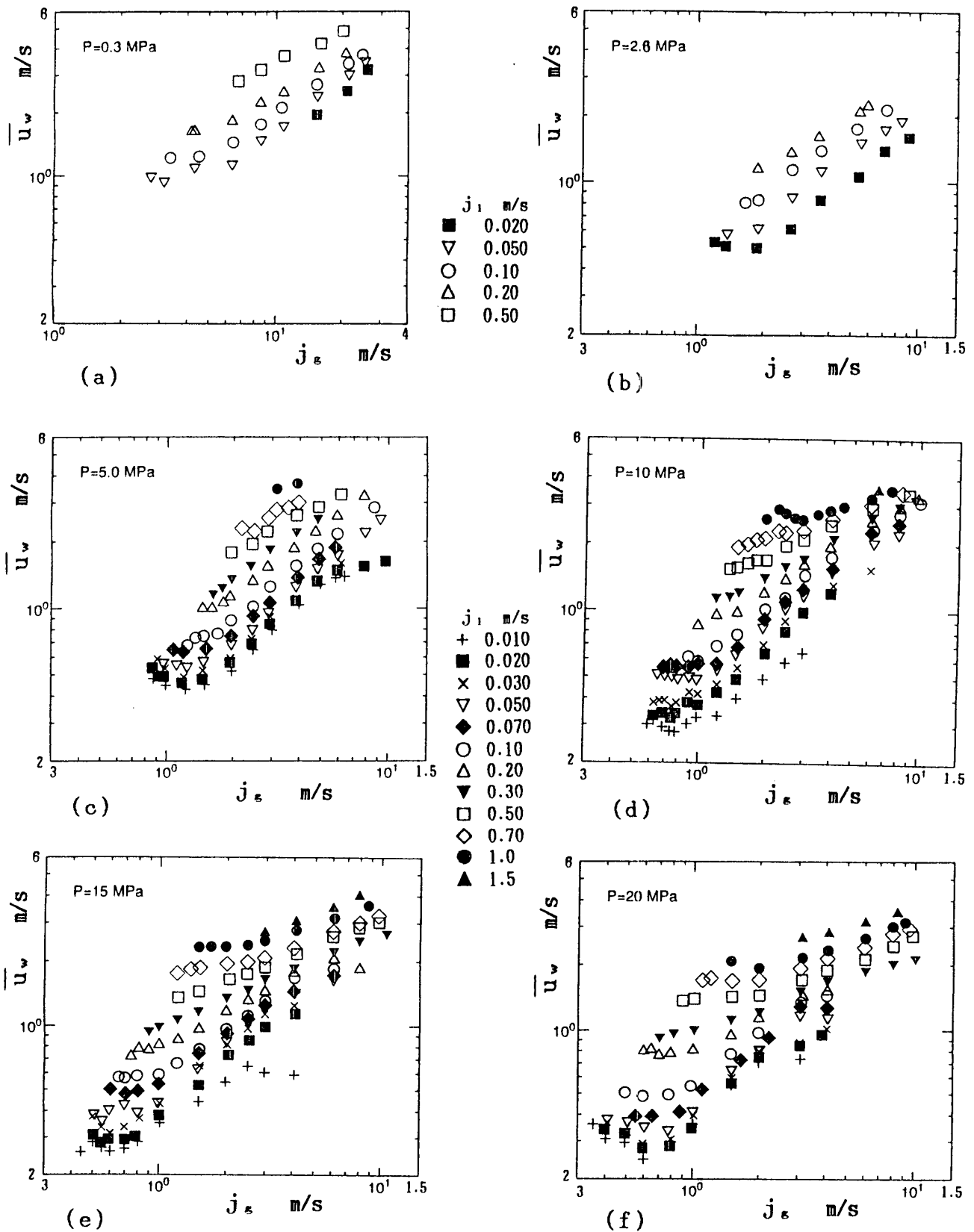


図1. 波の平均速度 (パラメータ:  $j_l$ )

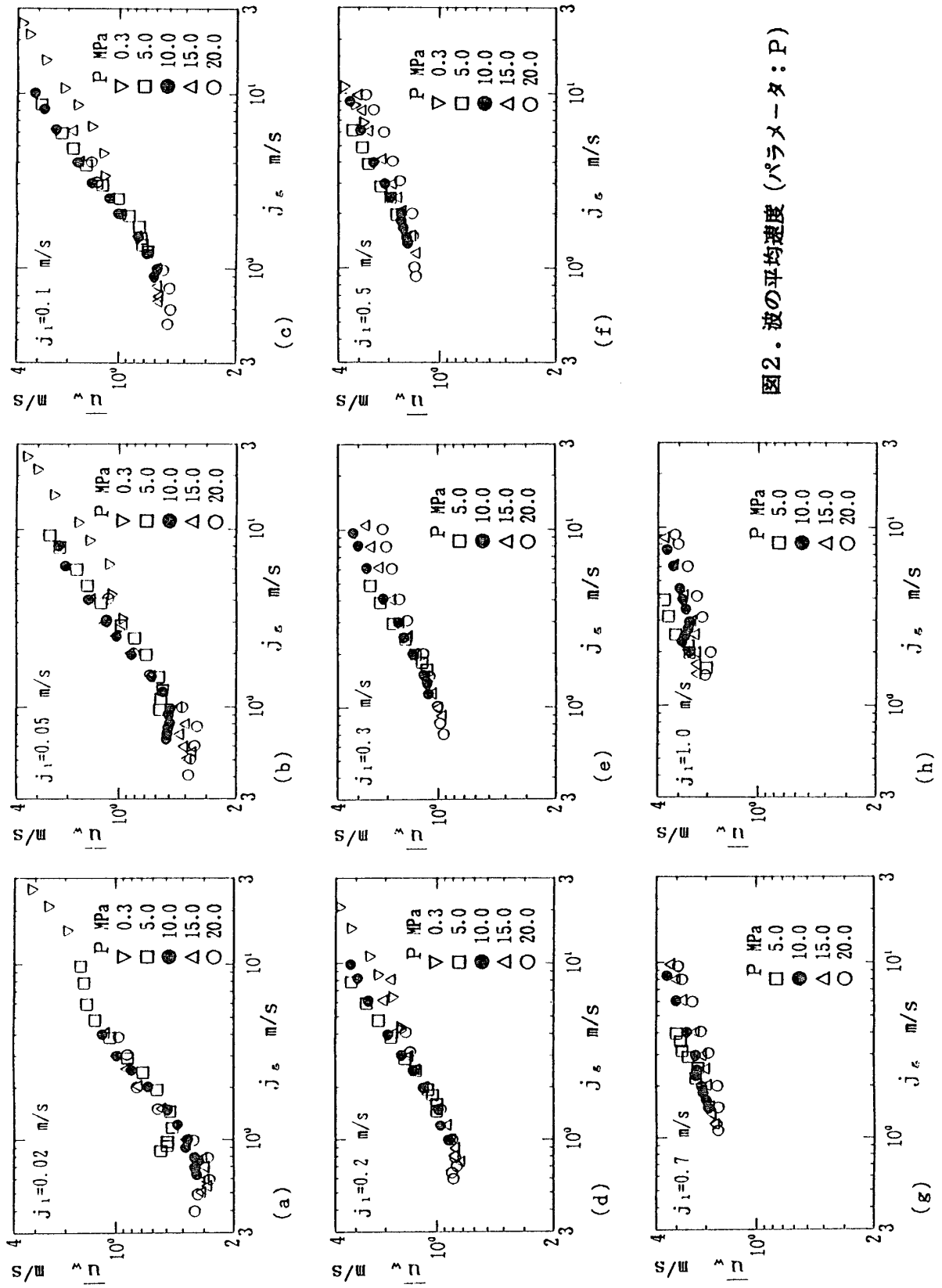


図2. 波の平均速度 (パラメータ: P)

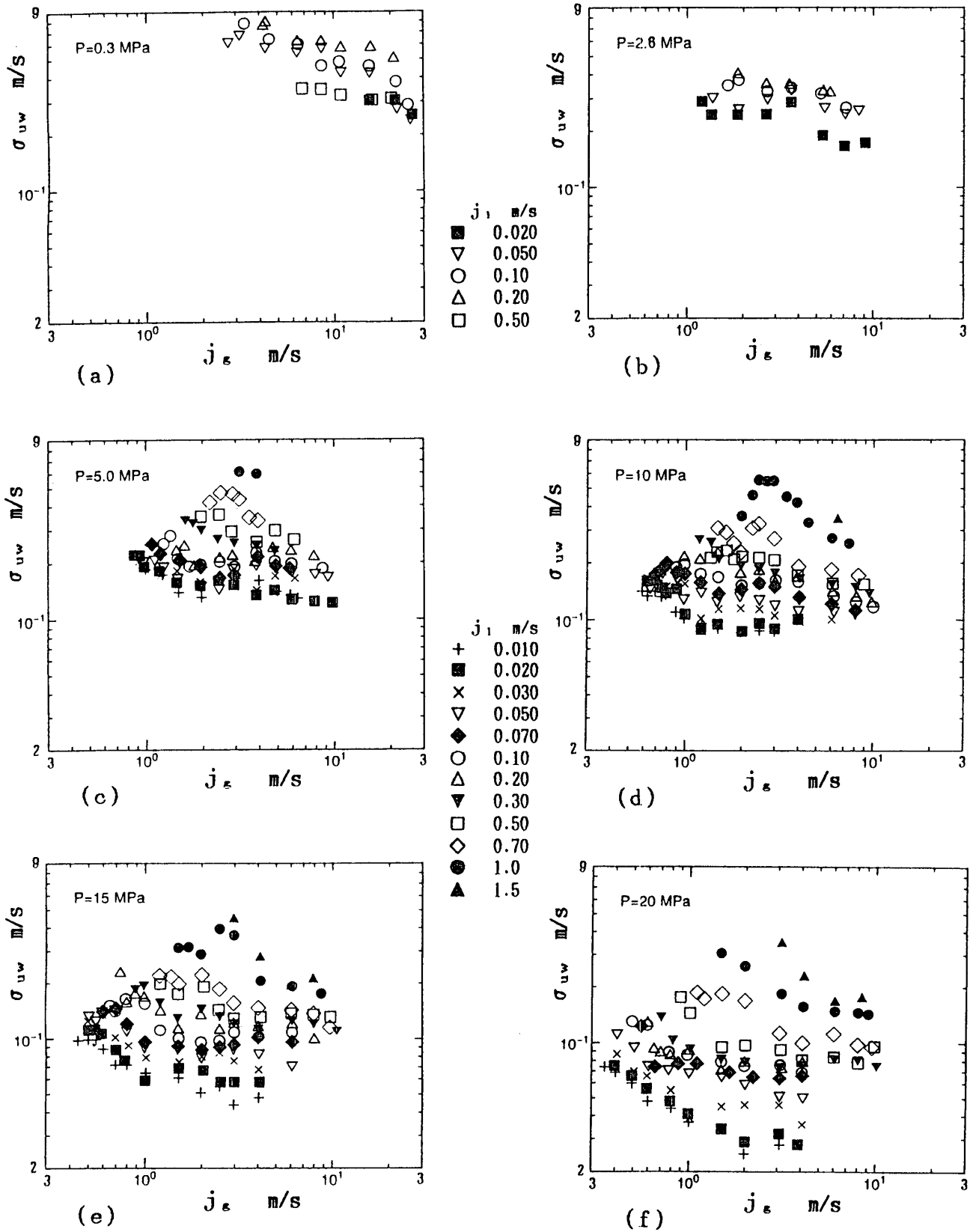


図3. 波速度に対する標準偏差 (パラメータ:  $j_1$ )

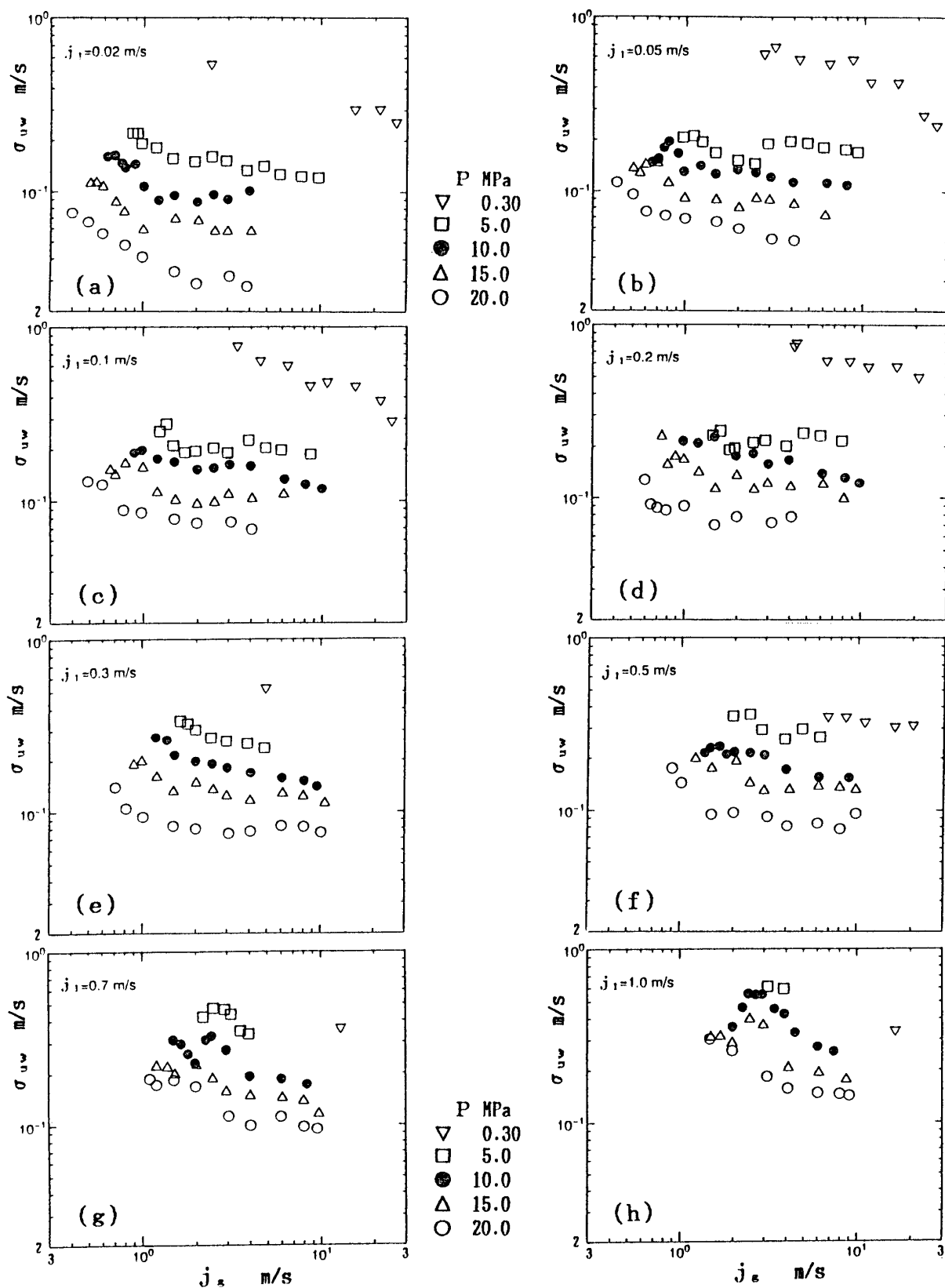


図4．波速度に対する標準偏差 (パラメータ：P)

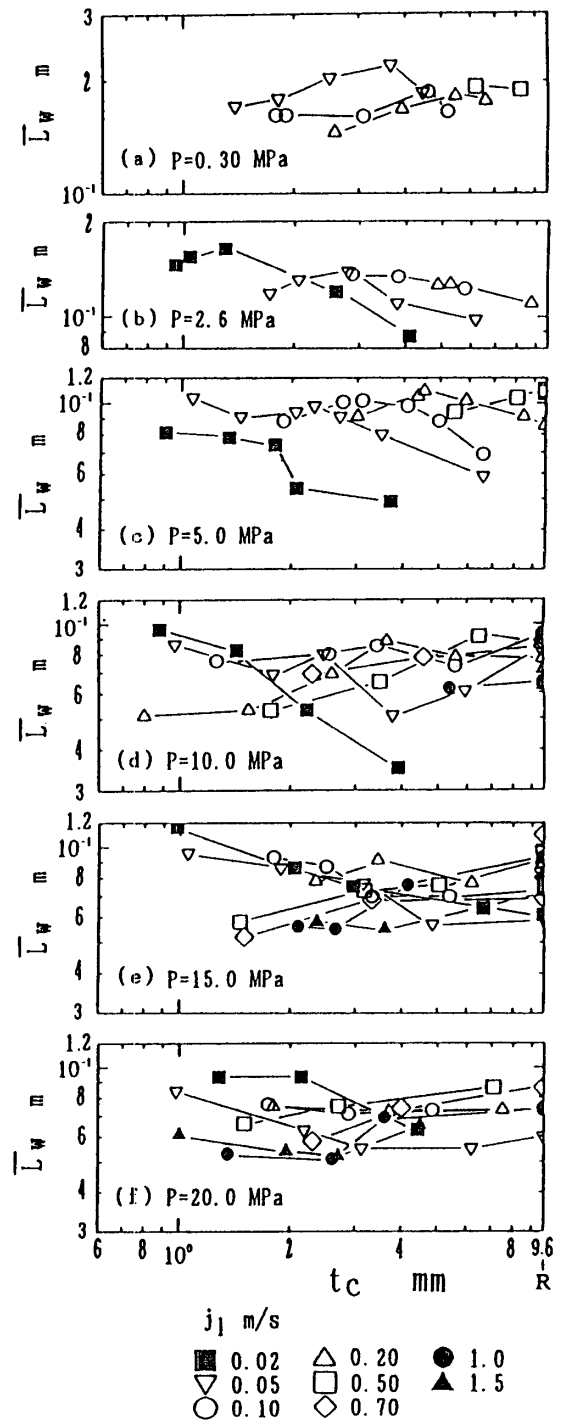
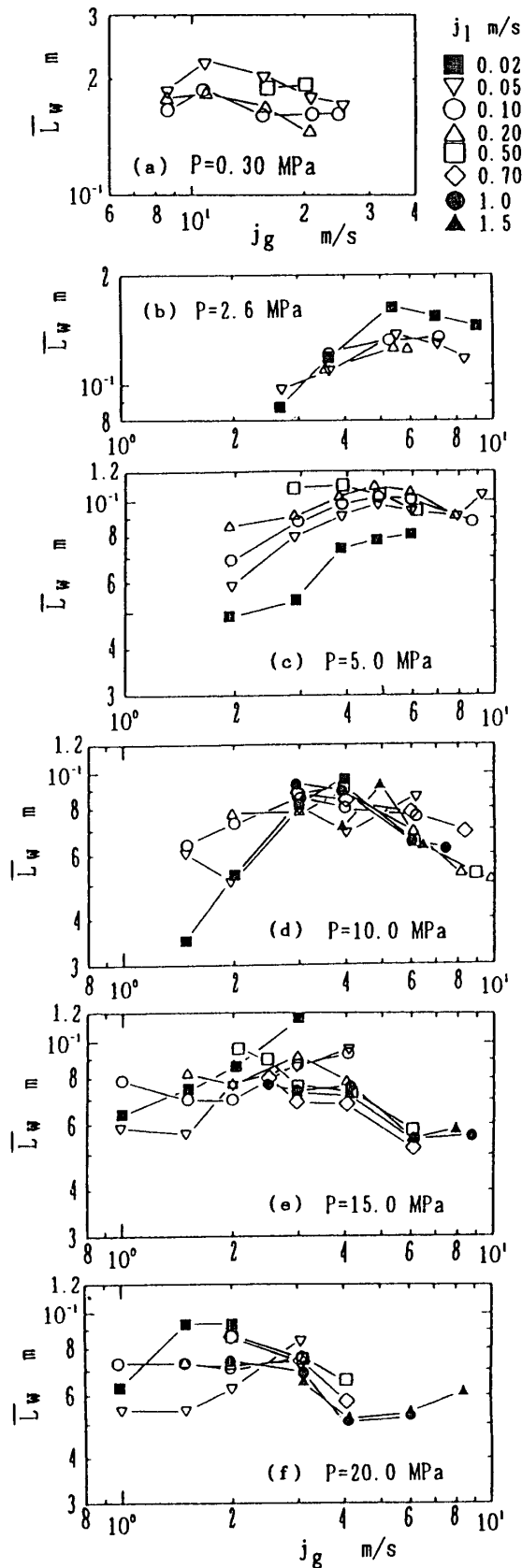


図6. 波の平均間隔 $\bar{L}_w$  対最大波高 $t_c$  の関係 (パラメータ:  $j_1$ )

← 図5. 波の平均間隔 $\bar{L}_w$  対 $j_g$  の関係 (パラメータ:  $j_1$ )

力  $P = 0.3, 2.6, 5, 10, 15$  および  $20$  MPa に対し、 $\bar{L}_w = 0.2, 0.13, 0.1, 0.08, 0.08$  および  $0.07$  m 程度である。

4.3 波の平均通過頻度

波の平均通過頻度  $\bar{N}_w$  を各圧力ごとにみかけの気体速度  $j_g$  に対して示したものが図7である。同図(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。同図から、 $\bar{N}_w$  は  $j_g$  の増加と共に上昇し、みかけの液体速度  $j_l$  の増加と共に上昇する傾向を示している。

図8は  $\bar{N}_w$  に対する圧力の影響を示したものである。

同図(a)~(c)は  $j_l = 0.1, 0.2$  および  $0.5$  m/s である。図8から、圧力  $P \geq 5.0$  MPa に対する  $\bar{N}_w$  はほぼ同程度の値を示し、 $P \leq 2.6$  MPa の低圧領域では明らかに小さい値となっている。

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液膜上の波の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) 波の平均速度に対する圧力の影響は複雑である。

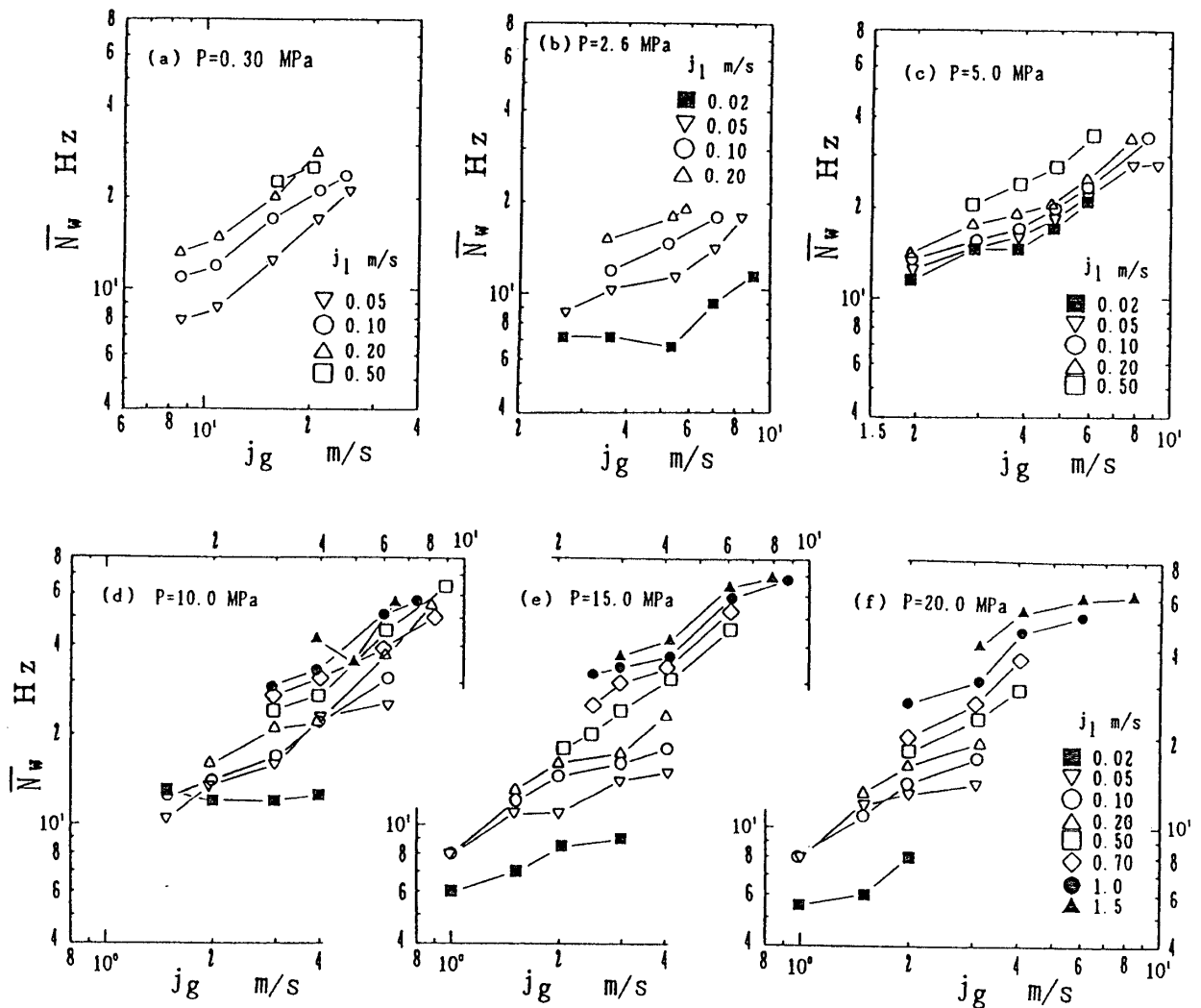


図7. 波の平均通過頻度  $\bar{N}_w$  対  $j_g$  の関係 (パラメータ:  $j_l$ )



このことは、液滴流量比が圧力の上昇と共に急速に増加し、平均液膜厚さおよび最大波高が急減することと密接に関連しているからである。

(2) 波速度の標準偏差には、圧力の影響が明確に現れ、全ての液相速度に対して標準偏差は圧力の上昇と共に小さくなっている。

(3) 波の平均間隔は一般的な特性として全ての圧力に対し気相速度の増加と共に上昇傾向をとり、ピークを形成しさらに減少傾向を示している。ピークを形成する気相速度は圧力の上昇と共に減少する。

(4) 波の平均間隔は最大波高に対してほぼ一定値を示し、液相速度の影響は現れていない。

(5) 波の平均通過頻度は気相速度の増加と共に上昇し、液相速度の増加と共に上昇する傾向を示している。

(6) 波の平均通過頻度は、圧力  $P \geq 5.0$  MPa の領域ではほぼ同程度の値を示し、 $P \leq 2.6$  MPa の低圧領域では高圧領域に比して小さい値となっている。

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) 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。
- (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20 MPaに対する測定結果)、機論、投稿中。
- (3) 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。

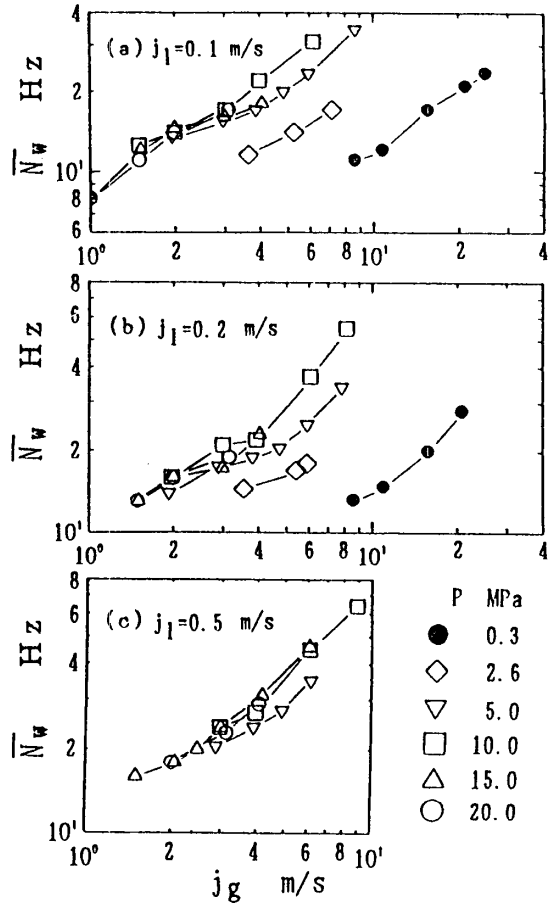


図8. 波の平均通過頻度  $\overline{N_w}$  対  $j_g$  の関係 (パラメータ: P)

- (4) 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。

(平成7年9月25日受理)