

垂直上昇気液環状ミスト流における平均 液滴速度の測定結果（圧力の影響）

中里見 正夫*¹、清水 英男*¹、角野 康秀*¹、森 幸治*²

Experimental Data on Mean Droplet Velocity in Vertical Upward
Gas-Liquid Annular Mist Flow (Effects of System Pressure)

Masao NAKAZATOMI, Hideo SHIMIZU, Yasuhide KAKUNO and Koji MORI

Velocities of entrained droplets were experimentally determined for vertical upward gas-liquid annular mist flow. The velocities were measured using a set of optical sensors. In this study, system pressure in the closed-loop system was changed substantially from 5 to 15 MPa at constant fluid temperature. It was clarified that mean velocities of entrained droplets draw near gas velocities under high pressure conditions.

Key Words: Multiphase Flow, Thermal Engineering, Droplet Velocity, Pipe Flow, Air-Water, Vertical Upward Flow, Pressure Effect, Gas Density

1. 緒言

気液環状ミスト流領域におけるエントレメント流量の占める液体体積率は、この領域における摩擦圧力損失の算定に必要な値である。そのために、液滴の液体体積率は正確に予測する必要がある。特に、実験系内圧力が上昇すると、エントレメント流量は急増するので、正確に予測することは重要な事項と云えよう。例えば、エントレメント流量は、実験系内圧力が10 MPa 程度ないしそれ以上に上昇すると、気体速度が10 m/s 程度において供給液量の 90% ないしそれ以上にも達している⁽¹⁾。高圧領域においては、このエントレメント流量がどの程度の液体体積率になるのかはまだ明らか

にされていない現状である。

本報では、この点に着目し、エントレメント液滴速度の測定を試みた。その方法は、新たに確立した光学的方法であり、じょう乱波領域にみられる液滴群の濃淡を測定することによって液滴群の平均速度を算出するものである。測定領域はじょう乱波領域の一部に限定したが、測定された液滴群の平均速度を以下に提示する。

なお、本データの検討結果は、日本機械学会論文集に投稿中である。

2. 使用した主な記号

D	: 供試管内径	mm, m
E_D	: 光センサ（下流側）の出力電圧	mV
E_U	: 光センサ（上流側）の出力電圧	mV
F	: 供試管の断面積	m ²
j	: みかけの速度	m/s

* 1 宇部工業高等専門学校 制御情報工学科

* 2 大阪大学工学部 機械物理工学科

l_p	: 光センサの間隔	mm
N	: 度数	%
\bar{N}_e	: 通過頻度	1/s
P	: 圧力	MPa
q_e	: 液滴流束	$m^3/m^2 s$
\bar{q}_e	: 液滴の平均流束	$m^3/m^2 s$
r	: 管中心から管壁方向への距離	mm, m
s_e	: 液滴のスリップ比 ($= \bar{u}_g / \bar{u}_e$)
t	: 温度	°C
\bar{u}_c	: 相互相関法によって求めた波速度	m/s
u_e	: 液滴群の速度	m/s
\bar{u}_e	: 液滴群の平均速度	m/s
\bar{u}_g	: 気体の平均速度 ($= j_g / \bar{\alpha}_t$)	m/s
$\bar{\alpha}_f$: 液膜のみを考慮した平均ボイド率
$\bar{\alpha}_t$: 平均ボイド率 ($= 1 - \bar{\eta}_t$)
η_e	: 液滴の平均液体体積率
η_f	: 液膜の平均液体体積率
η_t	: 液体体積率の合計 ($= \bar{\eta}_f + \bar{\eta}_e$)
μ	: 粘性係数	kg/m^2
ν	: 運動粘性係数	m^2/s
ρ	: 密度	kg/m^3
σ	: 表面張力	N/m

添 字

e	: 液滴	f	: 液膜
g	: 気体	l	: 液体

3. 実験装置および方法

実験装置の全体については、既報⁽¹⁾、⁽²⁾において詳述したものと同一であるため、供試管部のみについて図1に示す。図1は供試管部の概要と長さの寸法を示したもので、全長 10.4 m、内径 19.2 mm のステンレス鋼管（一部は透明アクリル管）を用い、垂直に設置されている。気水混合部 M および混合方法は既報⁽¹⁾と同一である。

環状ミスト流のじょう乱波領域における液滴はじょう乱波の波頭から主に発生するので、時間と共に液滴群の流動に濃淡がみられる。この点に着目し、液滴群の濃淡の移動速度つまり液滴群の平均速度を測定する。

液滴群の移動速度の測定には供試管の視察部（図1 D V: 透明アクリル管で構成）に光センサを設置する方法を採用した。図2はその詳細を示したものである。同図において、光源 SL から光を取り込むスリット式窓部 S

Wは高さ 10 mm、幅 20 mmで、これ以外は黒色シートで被覆した。供試管を通過した光は集光レンズ Lを用い光センサ S に集光している。

この測定部のすぐ上流側にポラス管を用いた液膜吸引部 LFR が設置されていて、測定時には液膜が除外される。つまり、測定部の上流側から流入する環状ミスト流は先ず LFR において液膜が吸引除去され、ガスコアに混入した液滴群のみが測定部に流入する。

しかしながら、液膜の除去を行った場合でも、液滴が管内壁に付着するために、薄い液膜が形成される。その影響として、液滴群の濃度変動による透過光の濃淡以外に、付着した液膜に起因する透過光の濃淡も光センサによって検出される。そこで、液滴群測定部において、高速度ビデオを用いた管内の観察を行い、光センサの出力信号との対比を行った。その結果、光センサの信号に対する液膜による影響は小さいことが確認されたため、光センサによる液滴群速度の測定は可能であると判断した。

実験条件は、圧力 $P=5.0\sim 15.0$ MPa、流体温度 $t=28\pm 3^\circ\text{C}$ であり、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

4.1 液滴群速度の測定結果 一對の光センサ（間隔 $l_p=62.5$ mm）から得られた 0.5 秒間の出力信号の一例を図3に示す。流動条件は、みかけの水速度 $j_l=0.20$ m/s、みかけの空気速度 $j_g=3.0$ m/s 一定のもとに圧力が $P=5.0$ および 10.0 MPa である。図中の Eu および Ed はそれぞれ上流側および下流側における光センサの出力電圧であり、同図の信号波形の凸凹部は液滴群の濃淡部に相当する。同図中の○印は液体塊存在領域分割法⁽³⁾を応用して求めた液滴群の速度 u_e である。 u_e が測定されている度数は、 j_g の小さい領域（圧力によって異なる）では、じょう乱波の通過個数にほぼ一致している。

測定時間は 30 秒間とし、その間に測定された速度の度数分布 N を図4に示す。圧力の上昇と共に同程度の速度の値が増加する傾向を示している。

系内圧力が上昇すると、じょう乱波領域は j_g の小さいほうへ縮小しリップル領域が拡大する⁽⁴⁾ ので、本測定方法では測定領域に限界が予想された。図5は P

=10MPa の例であるが、測定可能領域はじょう乱波領域内に限定されている（●印）。なお、じょう乱波領域からリップル領域への遷移領域内において既に測定不可能になっている（○印）。液滴群の流動に明確な濃淡が消失しているためである。

表1は測定された液滴群の平均速度 \bar{u}_e を示したものである。同表の（その1～その4）はそれぞれ圧力 $P=5.0, 7.0, 10.0$ および 15.0 MPaである。表1には各圧力ごとに流体の物性値を表示した。さらに、同表中には参考のために既報の値、液膜のみを考慮した平均ボイド率 $\bar{\alpha}_f$ ⁽⁵⁾、相互相関法によって求めた波速度 \bar{u}_c ⁽²⁾および液滴の平均流束 \bar{q}_e ⁽¹⁾を提示した。

液滴は管断面内に分布を有する領域も存在するが、ここでは一様な分布と見なす。

$$q_e(r) \rightarrow \bar{q}_e$$

液滴の液体体積率も考慮した管断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}_t$ 、気体の平均速度 \bar{u}_g 、液滴の平均流束 \bar{q}_e および気体と液滴のスリップ比 s_e はそれぞれ次のように表される。

$$\bar{\alpha}_t = 1 - \bar{\eta}_t \quad (1)$$

$$\bar{\eta}_t = \bar{\eta}_f + \bar{\eta}_e \quad (2)$$

$$\bar{u}_g = j_g / \bar{\alpha}_t \quad (3)$$

$$\bar{q}_e = \bar{\eta}_e \cdot \bar{u}_e \quad (4)$$

$$s_e = \bar{u}_g / \bar{u}_e \quad (5)$$

上式中の $\bar{\eta}_f$ ⁽⁵⁾、 \bar{q}_e ⁽¹⁾は既に測定されているので、 \bar{u}_e が測定されると式(4)から $\bar{\eta}_e$ 、式(2)から $\bar{\eta}_t$ 、式(1)から $\bar{\alpha}_t$ 、式(3)から \bar{u}_g および式(5)から s_e と順次求められる。

以上の手順で求められた気体速度 \bar{u}_g および平均液滴速度 \bar{u}_e と液膜上の波速度 \bar{u}_c ⁽²⁾との関係を示したものが図6である。同図から、 \bar{u}_e と \bar{u}_c の關係に注目すると、気液の合計速度($j_g + j_l$)の増加と共に両者の差は拡大している。

5. 結 言

高圧領域下における垂直上昇気液環状ミスト流のエントレーメント液滴群の速度の測定を試みた。その結果を要約すると次のようである。

(1) 液滴群の通過速度の測定方法が確立された。ただし、測定可能な領域はじょう乱波領域内に限定される。

(2) 圧力 5～15 MPaにおける液滴の平均速度が得られたので、ここに報告した。

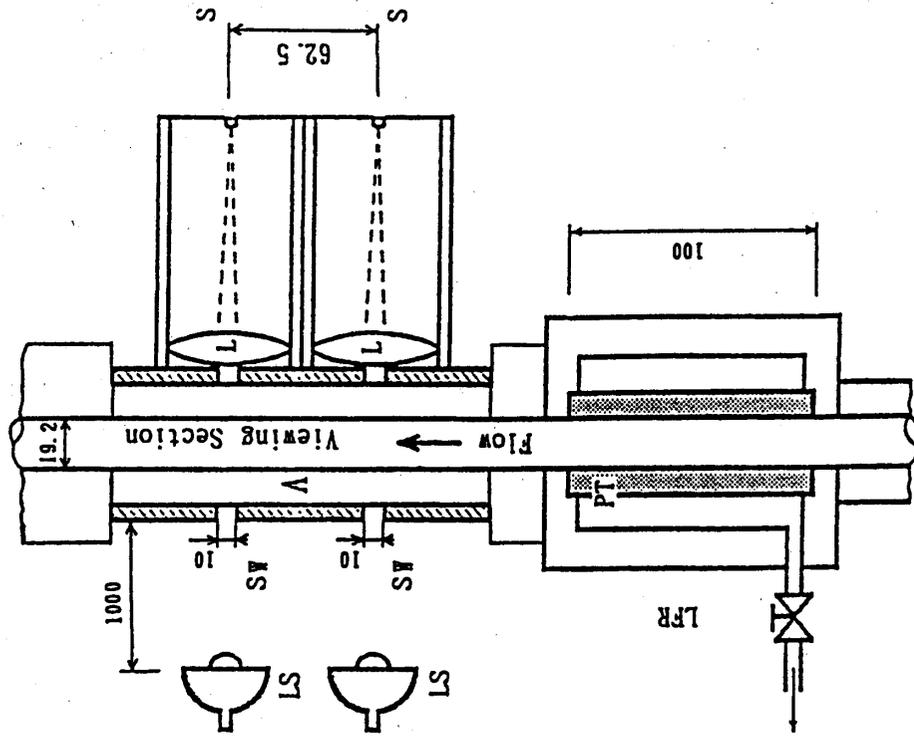
(3) ガスコアの平均速度、エントレーメント液滴の平均速度および液膜上の波の平均速度の三者の關係が明確になり、気体速度の上昇と共に液滴の平均速度と波の平均速度の差が大きくなっている。

本実験を行うに当たり、測定部の製作および実験の遂行に協力された池邊 昭子（元宇部高専学生、現リコーテクノネット）、金子 恵美（元宇部高専学生、現ミルボン）の両君に感謝する。

文 献

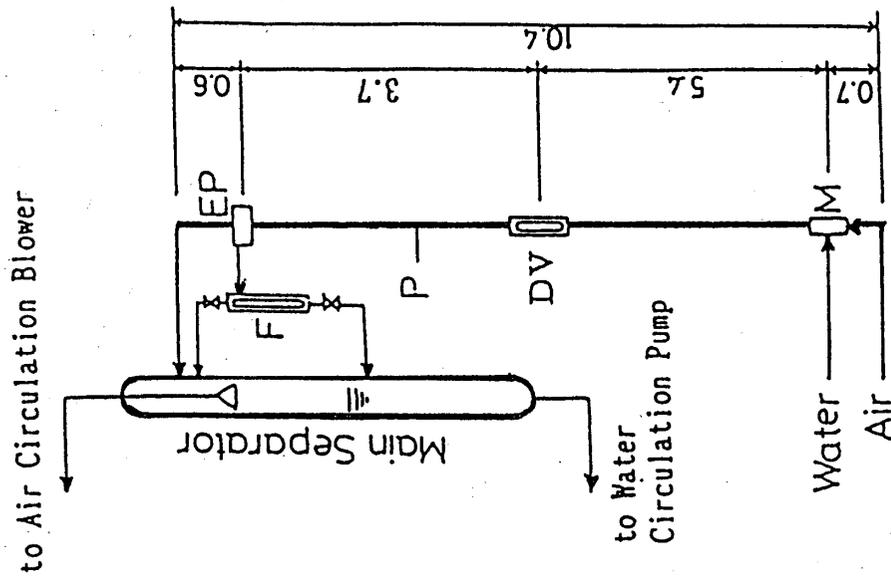
- (1) 中里見、世古口、 垂直上昇気液二相流における液滴流量に及ぼす圧力の影響（第1報、系内圧力 0.3 から 20 MPaに対する測定結果）、機論、62-597、B(1996)、1869-1876.
- (2) 世古口、中里見、武石、清水、森、三宅、 垂直上昇気液二相流の液体塊速度に及ぼす圧力の影響、機論、57-537、B(1991)、1823-1830.
- (3) Sekoguchi, K., Takeishi, M., Hironaga, K. and Nishiura, T., Velocity Measurements with Electrical Double-Sensing Devices in Two-Phase Flow, *IUTAM Symp., Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flow*, (1984), 455-477, Springer, Berlin.
- (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3報、流動形態に及ぼす系内圧力の影響）、宇部高専研究報告、42号(1996)、55-61.
- (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) 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.

（平成9年9月24日受理）



A: Acrylic Resin Tube L: Lens
 LFR: Liquid Film Removal Section
 LS: Light Source PT: Porous Tube
 S: Optical Sensor SW: Slit Type Window

図2. 液滴群の速度の測定装置



DV: Measuring of Droplets Velocity
 EP: Entrainment Probe F: Flow Meter
 M: Mixer P: Pressure Tap

図1. 供試管の概要と長さ (m)

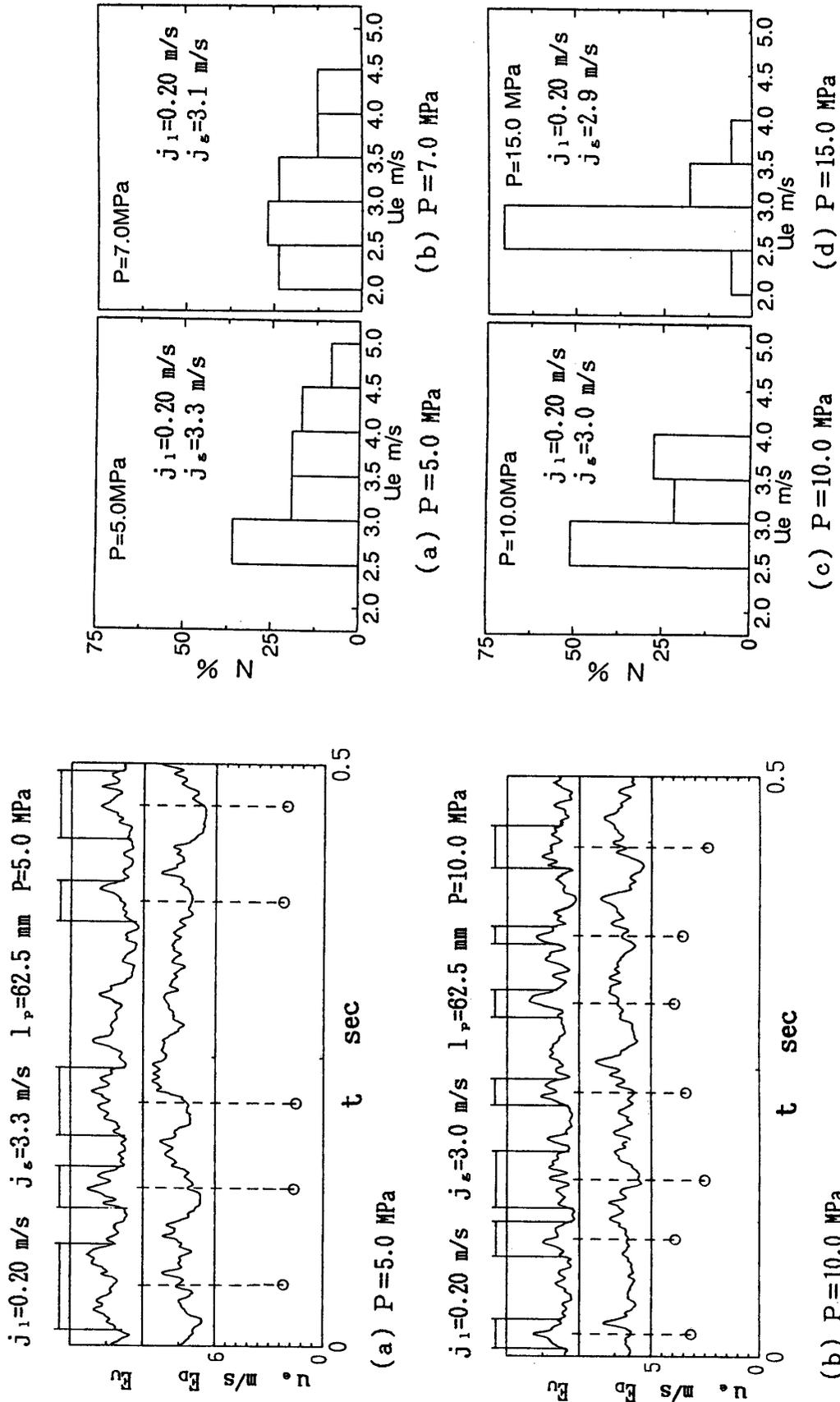
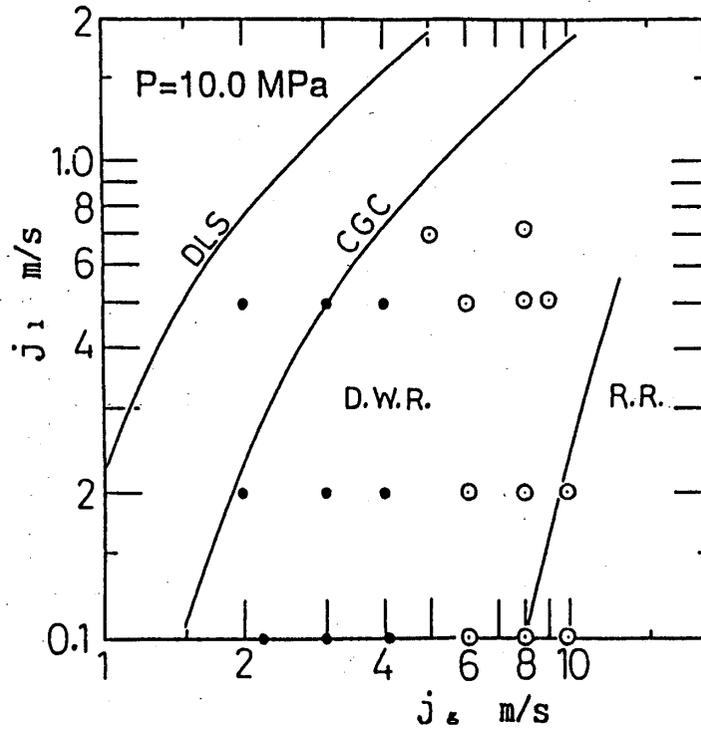


図 4 . 液滴群速度の度数分布

図 3 . 液滴群の濃淡信号波形



CGC: Central Gas Core⁽⁶⁾ DLS: Disappearance of Liquid Slug⁽⁶⁾
 D.W.R.: Disturbance Wave Region⁽⁴⁾ R.R.: Ripple Region⁽⁴⁾

図5. 液滴群の速度が得られた領域 (●) と得られなかった領域 (○)
 (P = 10.0 MPa)

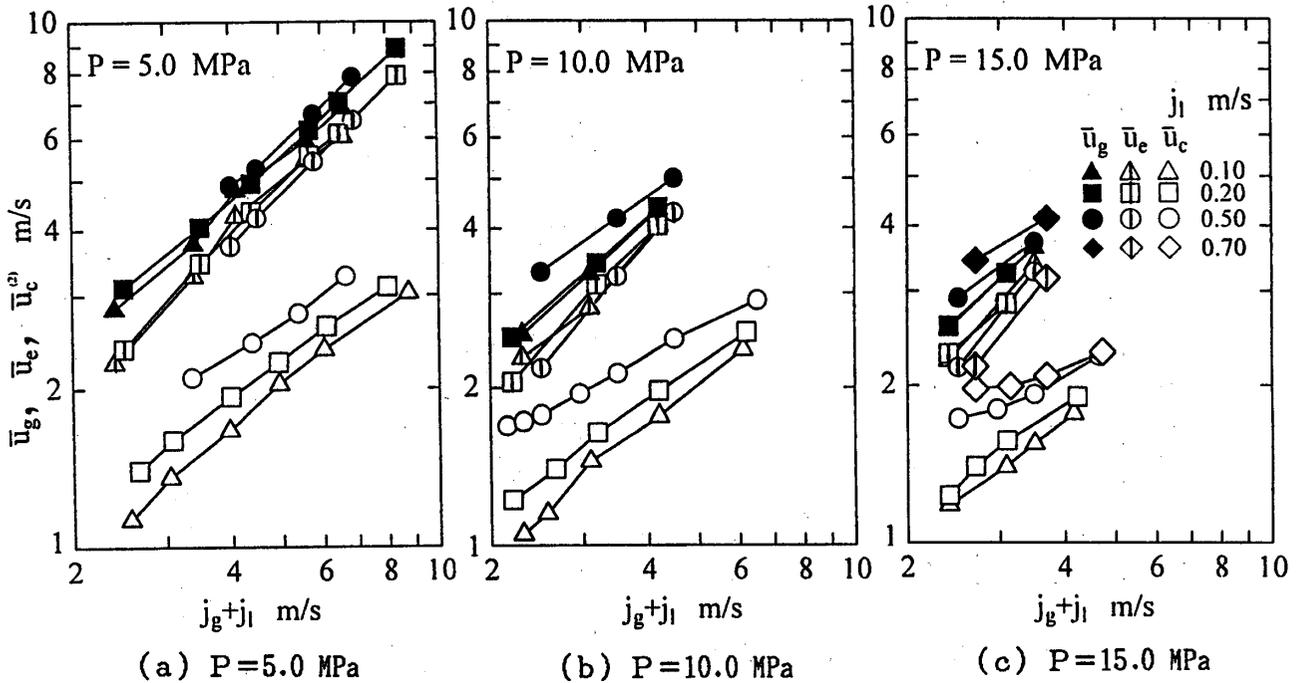


図6. 気体の平均速度 \bar{u}_g 、液滴群の平均速度 \bar{u}_e および液膜上の波速度 \bar{u}_c との関係

表 1. 測定データ (その 1)

$P=50.0 \text{ atg}$, $D=0.0192 \text{ m}$, $F=0.0002895 \text{ m}^2$, $\mu_g=0.1959 \times 10^{-5} \text{ kgs/m}^2$, $\mu_l=0.8703 \times 10^{-4} \text{ kgs/m}^2$,
 $\nu_g=0.3279 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu_l=0.8546 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho_l=998.0 \text{ kg/m}^3$, $\sigma=72.4 \text{ N/m}$

P atg	t °C	$j_l \text{ m/s}$	$j_g \text{ m/s}$	$\rho_g \text{ kg/m}^3$	$\bar{\alpha}_r \text{ --}^{(5)}$	$\bar{u}_c \text{ m/s}^{(2)}$	$\bar{q}_e \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}^{(1)}$	$\bar{N}_e \text{ 1/s}$	$\bar{u}_e \text{ m/s}$
51.6	27.5	0.10	2.30	57.55	0.8197	1.13	0.0159	13.0	2.24
51.2	27.5	0.10	3.30	57.11	0.8804	1.55	0.0105	16.0	3.26
51.8	26.5	0.10	4.30	57.78	0.9038	1.85	0.0098	18.0	4.25
51.8	30.0	0.10	5.50	58.64	0.9278	2.21	0.0102	21.0	5.44
51.8	30.5	0.10	6.40	58.73	0.9348	2.50	0.0105	23.0	6.05
50.1	28.0	0.20	2.30	57.11	0.7543	1.40	0.0297	15.0	2.38
51.5	28.0	0.20	3.30	58.31	0.8221	1.75	0.0264	18.0	3.45
51.2	25.0	0.20	4.20	57.77	0.8594	2.04	0.0264	20.0	4.34
51.6	30.0	0.20	5.50	58.31	0.8900	2.43	0.0303	23.5	5.57
51.7	30.0	0.20	6.30	58.52	0.8985	2.85	0.0310	27.0	6.13
51.2	30.0	0.20	8.20	58.83	0.9267	3.30	0.0398	35.0	7.90
50.0	28.0	0.50	3.50	57.11	0.7414	2.25	0.0908	22.0	3.72
50.8	25.0	0.50	4.00	57.55	0.7796	2.44	0.0829	24.0	4.22
50.8	29.0	0.50	5.30	57.55	0.8126	3.00	0.0953	28.0	5.42
50.0	29.0	0.50	6.40	57.11	0.8298	3.35	0.0978	33.0	6.50

表 1. 測定データ (その2)

$P=70.0 \text{ atg}$, $D=0.0192 \text{ m}$, $F=0.0002895 \text{ m}^2$, $\mu_g=0.1926 \times 10^{-5} \text{ kgs/m}^2$, $\mu_l=0.8700 \times 10^{-4} \text{ kgs/m}^2$,
 $v_g=0.2360 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $v_l=0.8536 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho_l=999.5 \text{ kg/m}^3$, $\sigma=72.4 \text{ N/m}$

P atg	t °C	$j_1 \text{ m/s}$	$j_g \text{ m/s}$	$\rho_g \text{ kg/m}^3$	$\bar{\alpha}_f \dots^{(6)}$	$\bar{u}_c \text{ m/s}^{(2)}$	$\bar{q}_e \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}^{(1)}$	$\bar{N}_e \text{ 1/s}$	$\bar{u}_e \text{ m/s}$
71.0	30.0	0.10	2.10	80.9	0.8492	--	0.0100	12.0	2.10
71.0	30.0	0.10	3.10	81.2	0.9010	--	0.0128	16.0	3.00
70.0	30.0	0.10	4.20	79.2	0.9258	--	0.0169	19.0	3.90
70.0	29.5	0.10	5.00	79.2	0.9359	--	0.0225	20.0	4.80
71.0	30.0	0.20	2.10	80.3	0.810	--	0.0207	13.0	2.20
70.0	30.0	0.20	3.10	79.6	0.8650	--	0.0311	18.0	3.08
71.0	30.0	0.20	4.00	80.9	0.8961	--	0.0466	21.0	3.85
70.0	29.0	0.20	5.00	79.2	0.9196	--	0.0639	24.0	4.80
70.0	29.0	0.20	6.20	79.4	0.9320	--	0.0777	20.0	6.30
70.0	30.0	0.50	3.10	80.1	0.760	--	0.1450	21.0	3.39
70.0	30.0	0.50	4.00	79.8	0.810	--	0.190	26.0	4.37
70.0	28.0	0.50	5.30	80.3	0.860	--	0.2487	30.0	5.40
70.0	28.0	0.50	6.00	80.4	0.8750	--	0.2798	28.0	6.35
70.0	27.0	0.50	7.60	79.7	0.9102	--	0.3178	9.0	7.90
70.0	26.5	0.70	5.30	80.0	0.800	--	0.6220	37.0	5.80
70.0	26.5	0.70	6.20	79.6	0.8350	--	0.7250	34.0	6.60

表 1. 測定データ (その 3)

$P=100.0$ atg, $D=0.0192$ m, $F=0.0002895$ m², $\mu_g=0.2087 \times 10^{-5}$ kgs/m², $\mu_l=0.8704 \times 10^{-4}$ kgs/m²,
 $\nu_g=0.1751 \times 10^{-6}$ m²/s, $\nu_l=0.8521 \times 10^{-6}$ m²/s, $\rho_l=1001.0$ kg/m³, $\sigma=72.4$ N/m

P atg	t °C	j _l m/s	j _g m/s	ρ_g kg/m ³	$\bar{\alpha}_f$ --(6)	\bar{u}_c m/s(2)	\bar{q}_e m ³ /m ² s(1)	\bar{N}_e 1/s	\bar{u}_e m/s
100.5	30.0	0.10	2.20	113.0	0.8785	1.02	0.0136	11.0	2.28
101.0	29.0	0.10	3.00	113.5	0.9267	1.45	0.0237	14.0	2.82
101.5	30.0	0.10	4.10	112.4	0.9501	1.77	0.0356	6.0	4.05
102.4	28.0	0.10	6.00	113.4	0.9725	2.36	0.0522	--	--
100.8	29.0	0.20	2.00	113.1	0.8226	1.22	0.0428	12.0	2.05
101.2	28.0	0.20	3.00	112.1	0.8971	1.65	0.0696	19.0	3.12
103.2	28.0	0.20	4.00	115.5	0.9315	1.97	0.0911	8.0	4.05
103.7	28.0	0.20	6.00	116.0	0.9615	2.54	0.1298	--	--
102.0	30.0	0.50	2.00	114.3	0.7004	1.78	0.2073	16.0	2.18
102.0	28.0	0.50	3.00	113.2	0.7954	2.13	0.2546	22.0	3.23
102.6	26.5	0.50	4.00	115.7	0.8651	2.47	0.2864	5.0	4.30
103.2	26.0	0.50	6.00	116.8	0.9190	2.91	0.3682	--	--

表 1. 測定データ (その 4)

$P=150.0$ atg, $D=0.0192$ m, $F=0.0002895$ m², $\mu_g=0.2257 \times 10^{-5}$ kgs/m², $\mu_l=0.8698 \times 10^{-4}$ kgs/m²,
 $v_g=0.1280 \times 10^{-6}$ m²/s, $v_l=0.8497 \times 10^{-6}$ m²/s, $\rho_l=1003.2$ kg/m³, $\sigma=72.4$ N/m

P atg	t °C	j_l m/s	j_g m/s	ρ_g kg/m ³	α_f --(6)	\bar{u}_c m/s(2)	\bar{q}_c m ³ /m ² s(1)	\bar{N}_c 1/s	\bar{u}_e m/s
150.0	29.0	0.10	2.30	168.0	0.9152	1.13	0.0339	14.0	2.23
150.5	28.0	0.10	3.40	169.0	0.9504	1.60	0.0495	4.0	3.37
150.6	28.0	0.10	4.06	169.0	0.9840	1.77	0.06072	--	--
151.6	31.0	0.20	2.20	170.0	0.8938	1.30	0.0936	16.0	2.29
151.6	31.0	0.20	2.90	170.0	0.9390	1.57	0.1228	3.0	2.84
154.5	30.5	0.20	4.02	172.5	0.9548	1.90	0.1410	--	--
149.5	30.5	0.50	2.00	167.0	0.8152	1.73	0.2784	18.0	2.16
151.5	30.5	0.50	3.00	170.5	0.9157	2.08	0.3648	3.0	3.26
150.5	30.0	0.50	4.10	168.5	0.9347	2.18	0.3972	--	--
151.0	30.0	0.70	2.00	169.0	0.7672	1.97	0.3997	22.0	2.17
151.8	30.0	0.70	3.00	170.0	0.8938	2.08	0.5354	3.0	3.17
151.0	30.0	0.70	4.05	170.0	0.9237	2.32	0.5710	--	--