

垂直上昇気液環状ミスト流領域のボイド率に及ぼすエントレメント液滴による液体体積率の影響

中里見 正夫*¹、清水 英男*¹、角野 康秀*¹、森 幸治*²

Effects of Liquid Holdup by Entrained Droplets on Void Fraction in Vertical Upwards Gas-Liquid Annular Mist Flow

Masao NAKAZATOMI*¹, Hideo SHIMIZU*¹, Yasuhide KAKUNO*¹ and Koji MORI*²

Abstract

The purpose of this study is to clear the effects of entrained droplets on void fraction in vertical upwards gas-liquid annular mist flow region. The entrained droplet holdups were calculated by using experimental data. It was found that the behavior of cross-sectional liquid holdups by entrained droplets are divided into low and high pressure conditions. Also, the effects of liquid flow rate on the entrained droplet holdups were large under high pressure conditions. The entrained droplet holdups in gas core is able to 0.3 by flow conditions. In this study, system pressure in the closed-loop system was changed substantially from 0.3 to 20 MPa at constant fluid temperature in vertical upward flow.

Key Words: Multiphase Flow, Thermal Engineering, Pipe Flow, Entrained Droplet Holdup, Vertical Upward Flow, Pressure Effects

1. 緒言

前報⁽¹⁾において、エントレメント液滴群の平均速度が測定され、これを用いてエントレメントの液体体積率が明らかにされた。

本報の目的は、エントレメントの液体体積率を用いて環状ミスト流領域の管断面平均ボイド率を補正し、さらに系内圧力の影響を明らかにすることにある。

垂直上昇気液二相流の全流動領域における管断面平均ボイド率に及ぼす系内圧力の影響は既報^{(2)~(4)}において明らかにされているが、その中で、環状ミスト流領域の値にはエントレメント流量による液体体積率が考慮されていない。本報においてこれを考慮し、

検討した結果から低圧領域（圧力 $P \leq 5.0$ MPa）では、エントレメント流量による液体体積率は無視できる程度であるが、圧力が 7.0 MPa以上では、圧力の増加と共に顕著に増加し、圧力の影響はきわめて大きいことが判明した。

垂直上昇気液環状二相流のエントレメント液滴流量に及ぼす系内圧力の影響は既報^{(5)・(6)}において実験的に明らかにされている。それらによると、液滴流量は圧力の増加とともに顕著に増加し、圧力の影響は大きい。

なお、液体流量の小さい領域では、広範囲にわたる圧力条件下で液滴の発生しないまたは無視できる領域が存在する⁽⁷⁾ので、その領域ではエントレメント流量による液体体積率は無視できる程度である。

本報において、環状ミスト流領域（団塊波流および環状流）の断面平均ボイド率がエントレメント流量による液体体積率を用いて補正され、気ほう流から環

(1998年9月24日受理)

*1 宇部工業高等専門学校 制御情報工学科

*2 大阪電気通信大学 工学科

状流に至る全流動領域の平均ボイド率が示される。

2. 使用した主な記号

a, b : 式(5)中の指数	
C : 式(5)中の定数	
E : 液滴流量比 ($=Q_e/Q_i$)	
Fr_R : フルード数 ($=j_g/(gD)^{1/2}$)	
g : 重力の加速度	m/s ²
j_g : みかけの気体速度	m/s
j_l : みかけの液体速度	m/s
m : 密度比の自然対数 ($=\ln(n)$)	
N : 密度比 ($=100\rho_g/\rho_l$)	
n : 密度比 ($=\rho_l/\rho_g$)	
P : 圧力	MPa
Q : 流量	m ³ /s
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)
u_e : 液滴群の平均速度	m/s
We_l : ウエーバ数 ($=\rho_l j_l^2 D / \sigma_l g$)	
$\bar{\alpha}$: 断面平均ボイド率	
$\bar{\alpha}_{AM}$: 環状ミスト流領域の断面平均ボイド率 ($=\bar{\alpha} - \bar{\eta}_e$)	
$\bar{\eta}_e$: 液滴の平均液体体積率	
$\bar{\eta}_i$: 液膜の平均液体体積率	
$\bar{\eta}_t$: 液体体積率の合計 ($=\bar{\eta}_i + \bar{\eta}_e$)	
ρ : 密度	kg/m ³

添字

c : 液滴	f : 液膜	g : 気体
l : 液体	- : 平均	

3. 実験装置および実験データ

供試管は、全長 10.4 m、内径 19.2 mm のステンレス鋼管を用い、垂直に設置されている。

実験装置の全体および供試管については既報⁽⁶⁾において詳述しているので参照されたい(本報では省略する)。

なお、実験条件は次のようである。系内圧力は大気圧近傍 $P = 0.30$ MPa から最高圧力 $P = 20.0$ MPa、温度 $t = 30 \pm 3$ °C である。気体および液体のみかけの速度の下限および上限は圧力によって異なる。詳細は表 1 に示す通りである。

本報において採用した実験データはこれまでに取得されていて、既に公表されているもの⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾を用いた。

4. 検討および考察

広範囲にわたる圧力条件の下で測定された液滴流量⁽⁶⁾および液滴群の平均速度⁽¹⁾を用い、液滴の液体体積率を算出して、以下に検討を行う。

4. 1 エントレメント液滴の断面平均液体体積率の算出

前提として、前報⁽¹⁾において測定されたエントレメント液滴群の平均速度を液滴の平均速度 \bar{u}_e とし、また管断面内で液滴流束 q_e は一樣(\bar{q}_e)と仮定する。

環状ミスト流領域の液滴の液体体積率を考慮した管断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}_{AM}$ 、管断面平均液体体積率 $\bar{\eta}_t$ および液滴の平均液体体積率 $\bar{\eta}_e$ はそれぞれ次のように表される。

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

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

$$\bar{\eta}_e = \bar{q}_e / \bar{u}_e \quad (3)$$

ここに、 $\bar{\eta}_i$ は液膜の管断面平均液体体積率、 \bar{q}_e は液滴の平均流束、 \bar{u}_e は液滴の平均速度である。 \bar{u}_e には測定値または次式⁽¹⁾を用いる。

$$\bar{u}_e = 0.43 \cdot Fr_R \cdot We_l^{0.02} \cdot (\rho_g / \rho_l)^{0.02} \quad (4)$$

\bar{q}_e には測定値(既報⁽⁶⁾)を用いるか、あるいは次式(既報⁽⁶⁾)を用いて算出する。

圧力 $P = 0.12 \sim 5.0$ MPa の領域:

$$E (=Q_e/Q_i) = \tanh(10^{-4} \cdot C \cdot We_l^a \cdot Fr_R^{1.5} / n^b) \quad (5)$$

ここに、

$$C = N^{1.75} + 10 \{N / (N^{1.75} + 0.8)\}^{1/2}$$

$$a = (0.68m - 1) / m^2$$

$$b = 2.5 \exp(-m)$$

圧力 $P = 7.0 \sim 20.0$ MPa の領域:

$$E = \exp\{-0.35m / (We_l^{0.14m} \cdot Fr_R^{1.5} / N^2 + 0.2)\} \quad (6)$$

$\bar{\eta}_i$ には測定値(既報⁽²⁾⁻⁽⁴⁾)を用いると、 $\bar{\eta}_e$ 、 $\bar{\eta}_t$ および $\bar{\alpha}_{AM}$ が順次得られる。

4. 2 環状ミスト流領域におけるエントレメントの液体体積率を算出し管断面平均ボイド率の補正

既報⁽²⁾⁻⁽⁴⁾中の環状ミスト流領域の断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}$ は、液滴の平均液体体積率 $\bar{\eta}_e$ を考慮していない値($=1 - \bar{\eta}_i$)である。そこで、上述のように得られた $\bar{\eta}_e$ を用いて補正を行う。環状ミスト流領域の断面平均ボイド率を $\bar{\alpha}_{AM}$ とすると、次式のようになる。

$$\bar{\alpha}_{AM} = \bar{\alpha} - \bar{\eta}_e \quad (7)$$

環状ミスト流領域には式(7)を用いて、全流動領域

にわたり断面平均ボイド率を示す。

図1は $\bar{\alpha}$ および $\bar{\alpha}_{AM}$ 対みかけの気体速度 j_g の関係で、パラメータは j_l である。同図(a)~(e) は系内圧力がそれぞれ $P = 0.30, 5.0, 10.0, 15.0$ および 20.0 MPa である。液滴の液体体積率を算出し、断面平均ボイド率を求め直した領域は同図中に表示している。他の流動領域の実験点は既報^{(2)~(4)} に示した断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}$ と同一である。

図1において、液滴の液体体積率 $\bar{\eta}$ を用い平均ボイド率 $\bar{\alpha}$ を修正した j_g の最初の点に■印を伏し、それより j_g の大きい領域が $\bar{\alpha}_{AM}$ である。■印を伏した点は既報⁽⁸⁾のCGC、つまりCentral Gas Coreの出現し始める点であるが、後述のように j_l の小さい場合には、環状流領域でも液滴の発生しない領域が存在するので、その領域では■印とCGCとは一致しない。したがって、図1は j_g のどの値から $\bar{\eta}$ を考慮しなくてはならないかを示している。

図1において、 $\bar{\alpha}_{AM}$ の領域に着目し、既報の断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}$ (FIG. 7:本報では省略する)⁽³⁾における環状ミスト流領域の値 ($\bar{\eta}$ を考慮していない場合)と比較すると、次のことが指摘される。① $j_l \leq 0.10$ m/s の領域では、広範囲の圧力変化にもかかわらず液滴の液体体積率 $\bar{\eta}$ の値は小さいので、 $\bar{\alpha}_{AM}$ への影響は殆どない。② 圧力 $P \leq 5.0$ MPa の領域では、 $j_l > 0.10$ m/s においても $\bar{\eta}$ の影響はほとんどない。③ 圧力 $P \geq 7.0$ MPa かつ $j_l \geq 0.20$ m/s の領域においては $\bar{\eta}$ の影響は無視できなくなり、圧力の上昇および液体流量の増加に伴って $\bar{\eta}$ は増大し、断面平均ボイド率はかなり小さくなる。

図2は液滴の液体体積率を考慮した断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}_{AM}$ と液滴の液体体積率を無視したボイド率 $\bar{\alpha}$ ^{(2)~(4)}との比較である。なお、同図中には気ほう流から環状ミスト流まで全流動領域の値をプロットしているが、補正された領域は環状ミスト流の領域である。図2(a)~(f)は系内圧力がそれぞれ $P = 0.30, 5.0, 7.0, 10.0, 15.0$ および 20.0 MPa である。

図2から明らかなように、圧力 $P \leq 5.0$ MPa の領域では、両者の差異は全液体流量にわたり無視出来る程度である。圧力 $P \geq 7.0$ MPa の領域において、特にみかけの液体速度 $j_l \geq 0.50$ m/s の領域で両者の差異は大きく、圧力の上昇と共にその差異は増加している。したがって、高圧領域で、かつ液体流量の大きい領域では液滴の液体体積率を無視できないことが明かである。なお、液体流量の小さい領域では、全圧力にわたり液滴の発生しないまたは無視できる領域が存在する⁽⁷⁾ので、環状流領域においても両者の値はほぼ等し

くなっている。

4.3 液滴流量の液体体積率を考慮した場合の管断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}_{AM}$ に及ぼす系内圧力の影響

図3は、 $\bar{\alpha}$ および $\bar{\alpha}_{AM}$ 対 j_g の関係におよぼす圧力の影響を示したものである。同図(a)~(d)はそれぞれ、みかけの液体速度 $j_l = 0.100, 0.505, 1.00$ および 1.50 m/sの場合である。

図3において、 $\bar{\alpha}$ は j_g の増加に比例して増大し、液体スラグが消失する領域において極大、極小値または変曲点を形成^{(2)~(3)}し、それ以降環状ミスト流領域へと連結している。

図3において $\bar{\alpha}_{AM}$ 境界を示す■印は図1と同様である。既報^{(2)~(3)}中の $\bar{\alpha}$ 対 j_g の関係に及ぼす圧力の影響の線図(本報では省略する)では、環状ミスト流領域における $\bar{\alpha}$ は圧力の影響を強く受け、圧力の増加と共に j_g の増加に対して急激に大きくなっている。その理由は液膜のみに着目しているからである。液膜から離脱した液滴の液体体積率 $\bar{\eta}$ を考慮したものが図3中の $\bar{\alpha}_{AM}$ 値である。同図から、環状ミスト流領域における $\bar{\alpha}_{AM}$ 対 j_g の関係に及ぼす圧力の影響は減少しているが、他の流動様式(気ほう流、プラグ流)の領域に比して大きく明確に現れている。

5. 結言

実験系内圧力を 0.3 から最大 20 MPaまで変化させ垂直上昇気液環状ミスト流のエントレーメント液滴による液体体積率の大きさがどの程度になるか算定し検討した。その結果、次の事項が指摘できよう。

(1) 圧力 $P \leq 5.0$ MPa における環状ミスト流領域では、本実験範囲の全液体流量にわたり液滴による液体体積率の値は小さく無視出来る程度である。ボイド率に及ぼす影響はほとんどない。

(2) 圧力 $P \geq 7.0$ MPa の領域において、特にみかけの液体速度 $j_l \geq 0.50$ m/s の領域では、液滴による液体体積率の値は大きくなり圧力の上昇と共に増加している。したがって、高圧領域で、かつ液体流量の大きい領域では液滴の液体体積率を無視できないことが明かになった。

(3) 環状流領域といえども液体流量の小さい領域(みかけの液体速度 $j_l \leq 0.10$ m/sの領域)では、広範囲の圧力変化にもかかわらず液滴のないまたは無視できる領域が存在するので、液滴の液体体積率の値は小さく、圧力に対するボイド率への影響は殆どない。

終わりに、高圧用の測定部の製作を担当された、当

時、宇部工業高等専門学校・実習工場の技官諸氏特に久富好雄技官に感謝の意を表す。

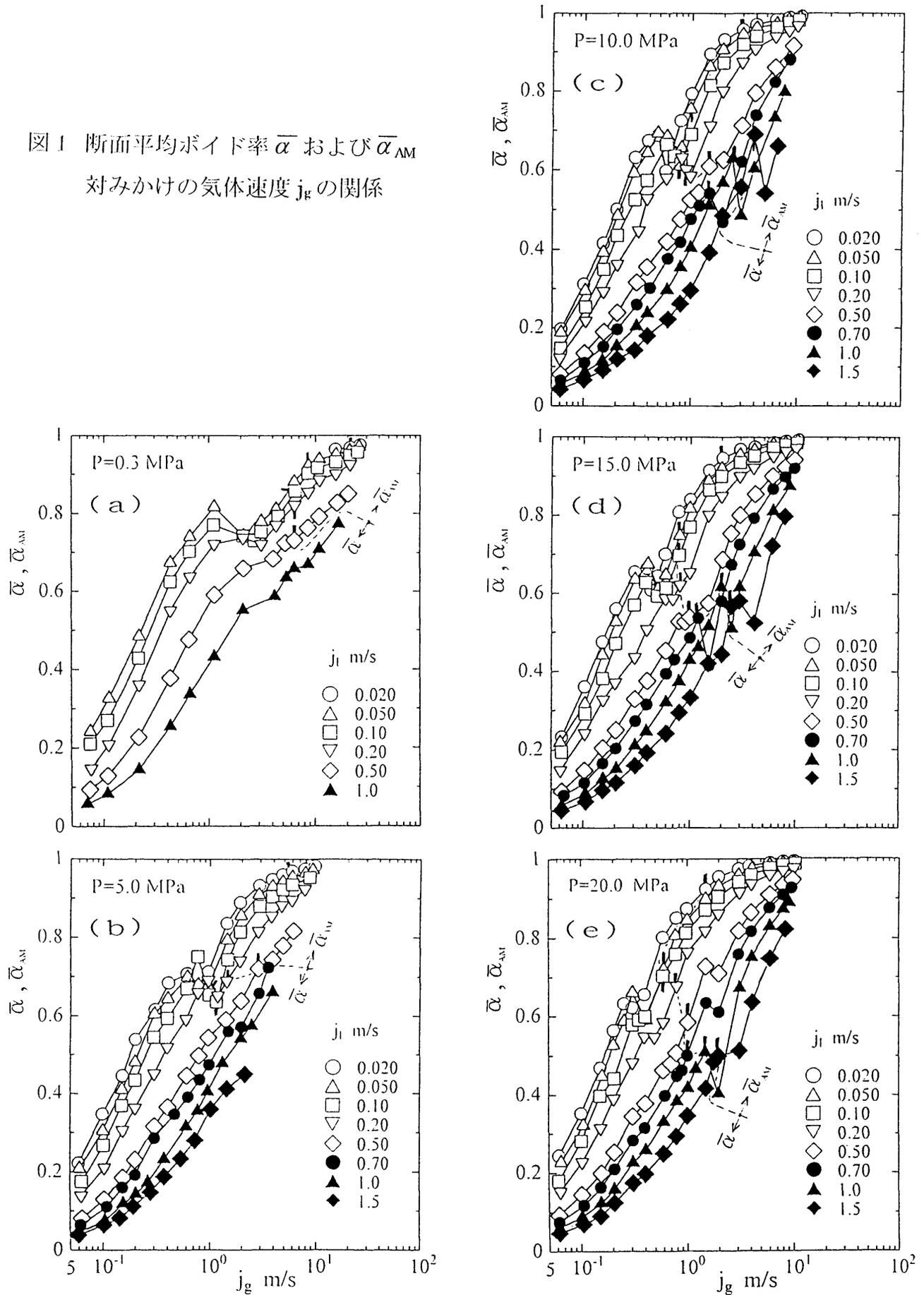
文 献

- (1) 中里見, 清水, 角野, 森, 垂直上昇気液環状ミスト流における液滴群の平均速度に及ぼす圧力の影響、機論B, 64-621, (1998), 1447-1453.
- (2) 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B, 58-551, (1992), 2190-2197.
- (3) 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. REPORTS OF THE OSAKA UNIV., 43-2157, (1993), 267-275.
- (4) 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. REPORTS OF THE OSAKA UNIV., 43-2158, (1993), 277-286.
- (5) 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B, 62-597, (1996), 1869-1876.
- (6) 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B, 62-597, (1996), 1877-1883.
- (7) 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.
- (8) 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B, 59-568, (1993), 3883-3890.

表 1 実験条件

P MPa	j_l m/s	J_g m/s	ρ_g/ρ_l —	θ °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 断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}$ および $\bar{\alpha}_{AM}$ 対みかけの気体速度 j_g の関係



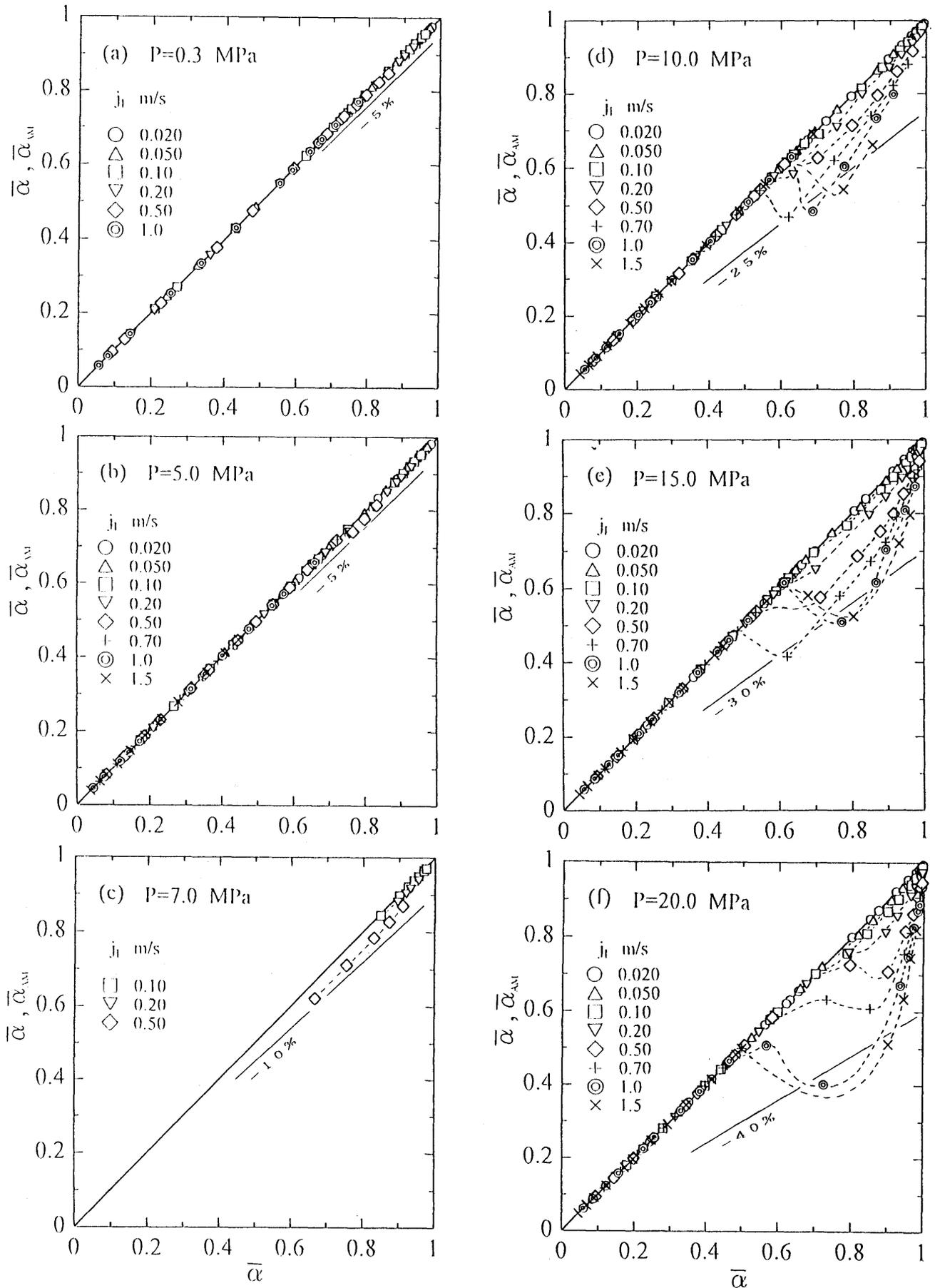


図2 液滴の液体体積率を考慮した断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}_{AM}$ と無視した平均ボイド率 $\bar{\alpha}$ との比較

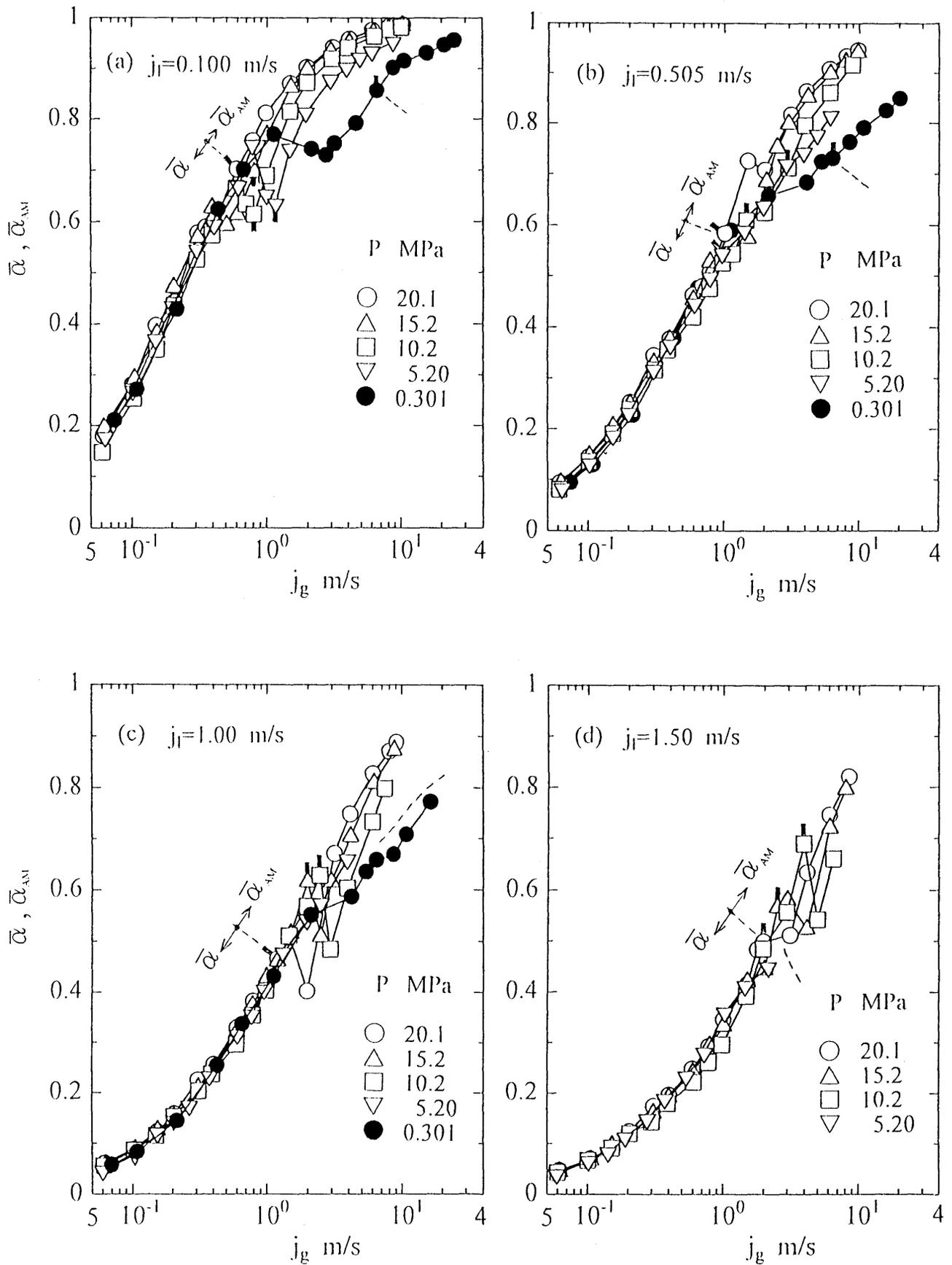


図3 断面平均ボイド率 $\bar{\alpha}$ および $\bar{\alpha}_{AM}$ 対 j_g の関係に及ぼす圧力の影響