

垂直上昇プラグ流の気液両スラグの 流動特性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*

Effect of Pressure on Flow Characteristics of Gas and Liquid
Slugs in Vertical Upwards Gas-liquid Two-Phase Plug Flow

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

Abstract

System pressure in gas-liquid two-phase plug flow causes a significant change in gas-liquid interfacial structures. The purpose of this study is to investigate the pressure effects on the liquid and gas slug in the plug flow regime. The mean amplitude of the liquid slug, and mean length of the gas and liquid slug were measured by using wall conductance probes to investigate the characteristics of plug flow. The system pressure in the closed circulation loop was changed from 0.3 to 20 MPa and the fluid (air-water) temperature was kept constant. New correlations to predict the mean length and mean amplitude of the gas and liquid slug are presented.

Key Words: Pressure effect, Liquid slug, Gas slug, Slug length, Slug amplitude

1. 緒 言

気液二相流のプラグ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⁽¹⁾。この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について前報^{(2)・(3)}で報告した。本報で再び取り上げる流動パラメータは液体スラグの平均長さ、平均通過ひん度、気体スラグの平均長さである。これらを推算するための過去の相関式と本実験データとの比較検討を行うほか、新しい相関式を提示する。

液体塊の平均速度および時間平均の液体ホールドアップ⁽⁴⁾、気体スラグ周りの液膜の平均ホールドアップ^{(2)・(3)}および液体スラグの消失条件^{(2)・(5)}に対する系内圧力の影響はそれぞれ既報^{(2)・(5)}において詳述した。これらの因子は相互に関連し、プラグ流を特徴づけ、伝熱機構と密接な関係にあると考えられる。

2. 主な記号

D : 供試管内径	m
g : 重力の加速度	m/s ²
j : みかけの速度	m/s
j_{g*} : 無次元気体速度 = $j_g / (gD)^{1/2}$	
j_{l*} : 無次元液体速度 = $j_l / (gD)^{1/2}$	
L : 長さ	m
n : 通過ひん度	Hz
P : 圧力	MPa
θ : 温度	°C
ρ : 密度	kg/m ³
$\Delta\rho$: 気液の密度差 = $\rho_l - \rho_g$	kg/m ³

添 字

cal : 計算値	exp : 実験値
g : 気相	gs : 気体スラグ
l : 液相	ls : 液体スラグ
— : 平均	

* 宇部工業高等専門学校制御情報工学科

3. 実験装置および方法

実験装置および供試管は既報^{(2)・(4)}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、内径 19.2 mm、全長 10.4 m 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。気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) 視察部において流動の目視および写真撮影を行った。(2) 点電極プローブによる半径方向ボイド率分布の測定^{(6)・(8)}、このデータから管断面平均ボイド率、平均液膜厚さ、最大波高を求めた。(3) 圧力損失および管内静圧の測定、このデータから壁面せん断応力および静圧差の振動幅^{(2)・(3)}を求めた。(4) 可変電流法 (管軸方向にリング状のセンサ 6 組と円周方向 3 mm のセンサ 3 組を備えている) を用いて液体体積率の時系列信号 (η -信号) の測定⁽⁴⁾、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ひん度、気体スラグの平均長さおよび液体塊の平均速度等を求めた。

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

液体スラグの通過ひん度、長さおよび気体スラグの長さは、液体ホールドアップの時系列信号⁽⁴⁾をコンピュータの画面上に拡大表示させ、目視によって測定した^{(2)・(3)}。これらの測定値を以下に示し検討する。

4. 1 液体スラグの平均長さ

図2は液体スラグの平均長さ \bar{L}_{l_s} とみかけの気体速度 j_g の関係を示したものである。同図(a)~(d)は系内圧力がそれぞれ 5、10、15 および 20 MPa の場合である。前報^{(2)・(3)}に指摘されているように、 \bar{L}_{l_s} の j_g に対する変化の傾向は、 j_g が小さい領域において、多少の変化があるもののある一定範囲の値を示す。 j_g が増加すると、 \bar{L}_{l_s} は一旦増加し極大値を形成したのち急激に減少し、液体スラグは消失する経過をたどる。この傾向は図2の全ての圧力に共通している。

図3は \bar{L}_{l_s} に対する圧力の影響を見たもので、同図

(a)はみかけの液体流量 $j_{l_1}=0.1$ m/s、(b)は $j_{l_1}=0.5$ m/s一定の基に圧力をパラメータにとっている。図から明かなように、系内圧力は \bar{L}_{l_s} のほぼ一定領域 (領域 I^{(2)・(3)}) には系統的な影響を及ぼさない (図中の↓印は領域 I と II の境界を示す)。領域 II^{(2)・(3)}において \bar{L}_{l_s} は極大値を形成するが、その点の j_g または液体スラグ消失点の j_g には圧力による系統的な影響を及ぼす。そのような傾向は他の j_{l_1} においても同様である。

領域 I における \bar{L}_{l_s} の値は大胆ではあるが次のように表せよう。

$$\bar{L}_{l_s} = 0.2 \sim 0.3 \quad (=0.25) \quad (1)$$

領域 II における \bar{L}_{l_s} の極大値は式(1)の2倍程度になり得る。

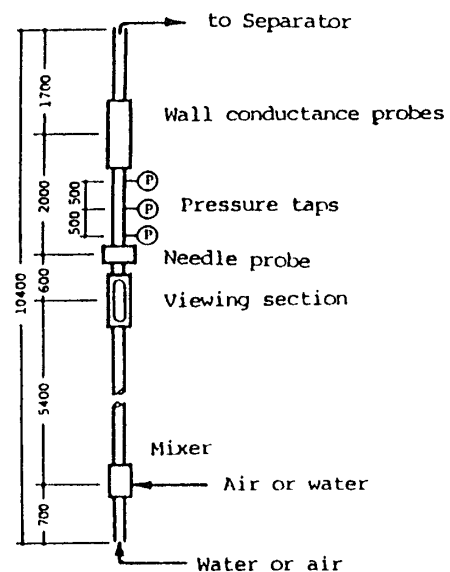


図1 供試管の概要と寸法 (mm)

表1 実験条件

P MPa	j_{l_1} m/s	j_g m/s	ρ_g/ρ_l ---	θ ℃	D mm
0.30	0.0197~1.00	0.070~28.0	0.00341	28~32	19.2
1.30	0.0198~0.050	1.26 ~ 8.66	0.0144	27~29	
2.50	0.0198~0.203	0.751~ 9.03	0.0288	28~32	
5.0	0.0103~1.50	0.080~ 9.50	0.0586	28~32	
10.0	0.0103~1.51	0.080~10.0	0.114	28~32	
15.0	0.0104~1.51	0.080~10.0	0.170	28~32	
20.0	0.0104~1.51	0.080~10.0	0.225	28~32	

4. 2 気体スラグの平均長さとおと過ひん度

図4は気体スラグの平均長さ \bar{L}_{g1} とおと過ひん度 \bar{n}_{g1} 対 j_g の関係を示したものである。同図(a)~(e)は系内圧力がそれぞれ0.3, 5, 10, 15および20 MPaの場合である。ここで、気体スラグと液体スラグは交互に流動するから平均過ひん度 \bar{n}_{g1} は気液両スラグに適用される。図4から、前報^{(2)・(3)}に指摘されているように、 \bar{L}_{g1} の j_g に対する変化の傾向は右上がりの曲線に、 \bar{n}_{g1} は右下がりの曲線になる。 j_1 が増加すると \bar{L}_{g1} 曲線は j_g の大きい方へほぼ平行移動して現れるが、 \bar{n}_{g1} 曲線は全体的に増加する。この傾向は図4の全ての圧力に共通している。 \bar{L}_{g1} と j_g の関係に対する圧力の影響は、前報^{(2)・(3)}に詳述されているので参照されたい。

5. 気体スラグの平均長さに関する過去の相関式と実験データの比較

気体スラグの長さを推算する相関式には Street and Tek⁽⁹⁾、赤川と坂口⁽¹⁰⁾のものがある。

Streetらの式は気体スラグの平均長さ \bar{L}_{g1} をみかけの気液の速度の関数で表示し、次のようである。

$$\bar{L}_{g1} = 0.29 j_g / (j_1 + 0.12)$$

図5は上式と実験データの比較を示したものである。同図(a)~(f)は系内圧力0.3~20 MPaに対応する。P=0.3 MPaの低圧では全領域に亘り、両者は一致しているが、5 MPa以上になると、一致する領域は j_g の小さい領域に限定され、 j_g および j_1 の増加と共に両者の差異は大きくなる。この傾向は圧力の上昇と共に拡大している。

赤川らの式と実験データの比較も、図5と同様な傾向を示し、系内圧力の影響は整理できない。

6. 新相関式の提案

6. 1 気体スラグの平均長さ

図4に見られるように、気体スラグの平均長さ \bar{L}_{g1} は、みかけの気体速度 j_g が比較的小さい領域ではほぼ直線的に j_g の増加と共に微増し、その後急激に増加する。そして、液体スラグの消失点に至り、 \bar{L}_{g1} は無限大となって供試管内を気体コアが貫通する。この傾向は、本実験範囲内の全ての圧力で共通している。このような \bar{L}_{g1} の一般的特性に着目し、増加傾向の異なる次の二

つの領域に分け、それぞれ直線で近似し加算する手法を採用した。

j_g が比較的小さい領域:

$$\bar{L}_{g1} = f(j_1^*, j_g^*) \quad (2)$$

j_g が大きい領域:

$$\bar{L}_{g2} = f(j_1^*, j_g^*, \rho_g/\rho_l, \Delta\rho/\rho_g) \quad (3)$$

気体スラグの平均長さは式(2)、(3)を加算する。

$$\bar{L}_{g1} = \bar{L}_{g1} + \bar{L}_{g2} \quad (4)$$

実験データを基に上式を表現すると、次のようになる。

$$\bar{L}_{g1} = C_1 \cdot j_1^{*-0.4} \cdot j_g^* \quad (5)$$

$$\bar{L}_{g2} = C_2 \cdot \{ (\rho_g/\rho_l)^{-0.15} \cdot j_g^{*6.0} \} \cdot \{ (\Delta\rho/\rho_g)^{-3.0} \cdot (0.08 + j_1^*)^{-2.2} \} \quad (6)$$

式(5)、(6)を用いて、気体スラグの平均長さは次式のようになる。

$$\bar{L}_{g1} = (0.24 \cdot j_1^{*-0.4} \cdot j_g^*) + 3.75 \{ \{ (\rho_g/\rho_l)^{-0.15} \cdot j_g^{*6.0} \} \cdot \{ (\Delta\rho/\rho_g)^{-3.0} \cdot (0.08 + j_1^*)^{-2.2} \} \} \quad (7)$$

図6は式(7)と実験データの比較を示したもので、同図(a)~(f)は系内圧力0.3~20 MPaに対応する。両者はほぼ±20%以内で一致している。

6. 2 気液スラグの平均過ひん度

前報^{(2)・(3)}において、系内圧力の大幅な変化にも関わらずスラグの過ひん度 \bar{n}_{g1} がほぼ一定値を示す領域Iと急激に減少して零に至る領域IIとの存在が明確にされた。そして、領域Iにおける液体スラグの過ひん度の目安を与える次式が示された。

$$\bar{n}_{g1} = 0.5 \{ (e^{1.56 j_1^*} - 0.4) + (4.2 j_1^{*0.424}) \} \quad (8)$$

本報では、領域IおよびIIの全領域に適用される相関式を提示する。図4の \bar{n}_{g1} を両対数表示すると図7のようになる。

\bar{n}_{g1} は、みかけの気体速度 j_g が比較的小さい領域Iではほぼ一定値を示し(式(8))、 j_g の増加と共に急激に減少する。そして、液体スラグの消失点に至る。図7の横軸上の各点は液体スラグの消失点を示す。上記のような \bar{n}_{g1} の一般的特性に着目し、傾向の異なる領域IIを直線で近似し、式(8)から減じる手法を採用する。

j_g が比較的小さく、 \bar{n}_{g1} がほぼ一定値を示す領域: 式(8)を無次元速度で書き換えると、

$$\bar{n}_{g1} = 0.5 \{ (e^{0.574 j_1^*} - 0.4) + (2.95 j_1^{*0.424}) \} \quad (9)$$

j_g が大きい領域IIに対して:

$$\bar{n}_{g2} = f(j_1^*, j_g^*, \rho_g/\Delta\rho, \rho_l/\Delta\rho) \quad (10)$$

スラグの平均過ひん度 \bar{n}_{g1} は式(9)から式(10)

)を減じ、次のようになる。

$$\bar{n}_{gs} = \bar{n}_{gs1} - \bar{n}_{gs2} \quad (11)$$

実験データを基に式(10)を表示すると、次のようになる。

$$\bar{n}_{gs2} = (0.15 + j_{1*})^{-1.3} \cdot j_{g*}^{4.0} \cdot (\rho_g / \Delta \rho)^{1.7} \cdot (\rho_l / \Delta \rho)^{2.0} \quad (12)$$

式(9)、(12)を用いて、スラグの平均通過ひん度 \bar{n}_{gs} は次式のようになる。

$$\bar{n}_{gs} = 0.5 \{ (e^{0.674 j_{1*}} - 0.4) + (2.95 j_{1*}^{0.424}) \} - \{ (0.15 + j_{1*})^{-1.3} \cdot j_{g*}^{4.0} \cdot (\rho_g / \Delta \rho)^{1.7} \cdot (\rho_l / \Delta \rho)^{2.0} \} \quad (13)$$

図7は式(13)と実験データの比較を示したもので、図中の実線、破線が式(13)である。同図(a)~(f)は系内圧力0.3~20 MPaに対応する。両者の一致の度合いは、圧力 $P=0.3$ MPaの領域IとIIの境界領域では良好とは言えないが、 $P \leq 5$ MPaでは j_g の全領域で良好である。

7. 結 言

系内圧力を0.3から20 MPaまで大幅に変化させ、垂直上昇プラグ流の流動パラメータに及ぼす圧力の影響を調査し、過去の相関式と比較検討した。その結果を要約すると次のようである。

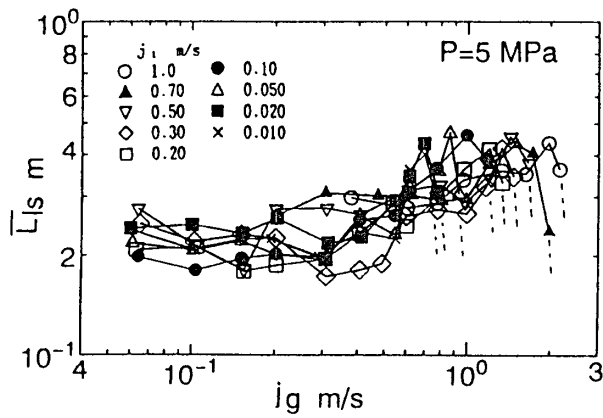
- (1) 液体スラグの平均長さ \bar{L}_l は、みかけの気体速度 j_g の増加と共に0.2~0.3 m(平均0.25 m)程度のほぼ一定範囲の値を示す領域がある。この領域は、液体速度および系内圧力の系統的な影響をほとんど受けない。さらに j_g が増加すると、 \bar{L}_l は0.4~0.5 m程度の極大値を形成したのち急減する。
- (2) 気体スラグの平均長さに関するこれまでに公表された相関式は何れも高圧下のデータを再現できない。
- (3) 大幅な圧力範囲に適用可能な気体スラグの平均長さを与える新しい相関式を提案した。
- (4) 大幅な圧力範囲に適用可能なスラグの平均通過ひん度を与える新しい相関式を提案した。

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。なお、本実験装置の主要部は文部省特別設備費によって建設したことを銘記し謝意を表す。

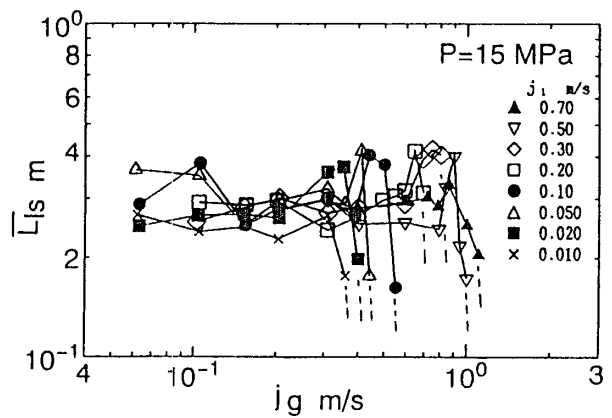
文 献

- (1) 日本機械学会編、気液二相流技術ハンドブック、コロナ社、(1989)、238。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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。
- (5) 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。
- (6) 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。
- (7) 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。
- (8) 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。
- (9) Street, J.R. and Tek, M.R., Dynamics of Bullet Shaped Bubbles Encountered in Vertical Gas Liquid Slug Flow, AIChE. J., 11-4(1965), 644-650。
- (10) 赤川, 坂口, 気液二相流のボイド率変動特性に関する研究(第3報、ピストン流各部の速度), 機論, 31-224(1965), 601。

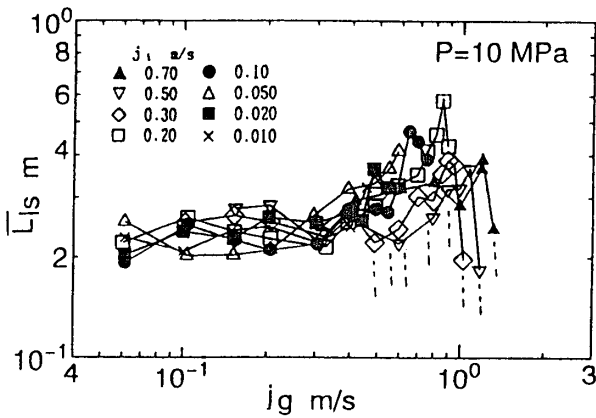
(平成7年9月25日受理)



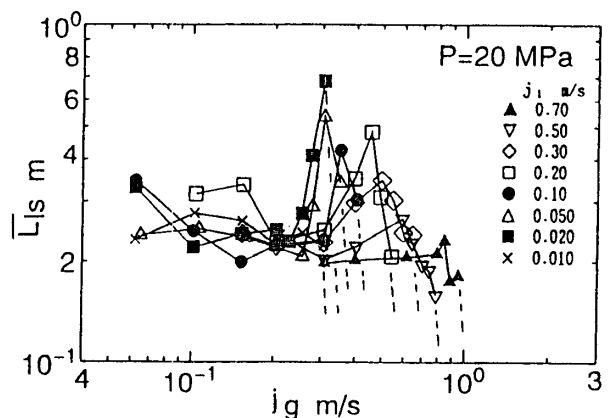
(a) P=5 MPa



(c) P=15 MPa

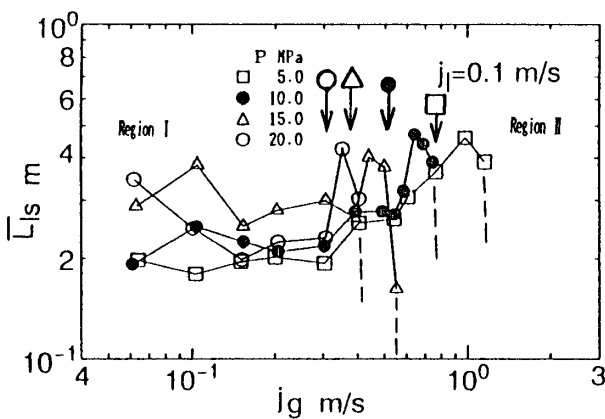


(b) P=10 MPa

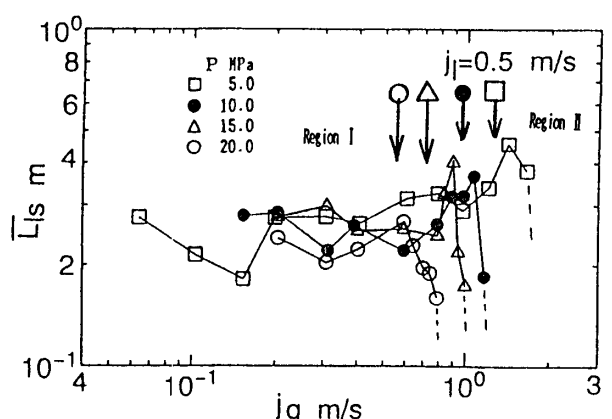


(d) P=20 MPa

図2. 液体スラグの平均長さ \bar{L}_{1s} .

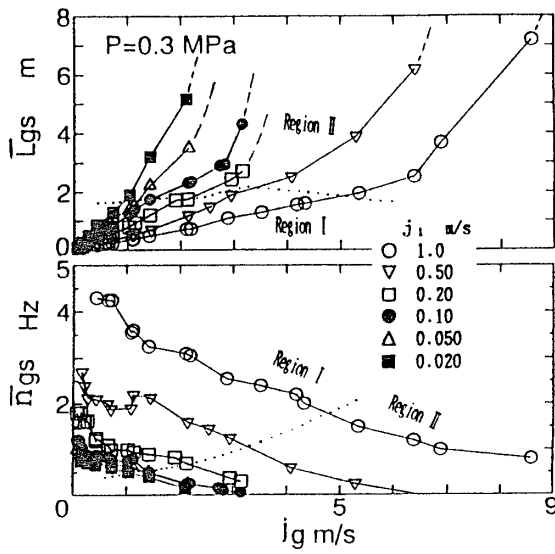


(a) $j_1=0.1$ m/s

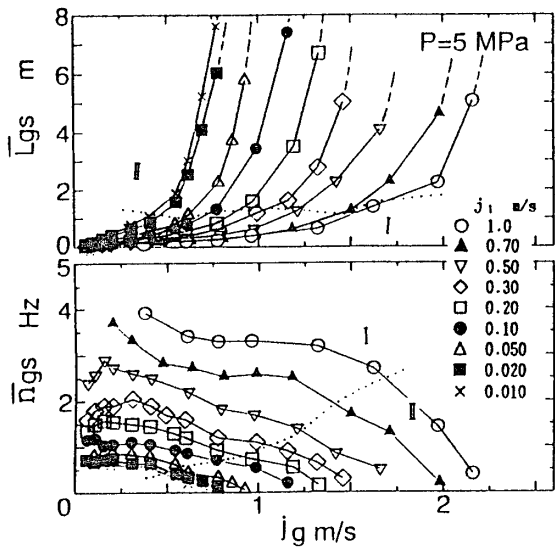


(b) $j_1=0.5$ m/s

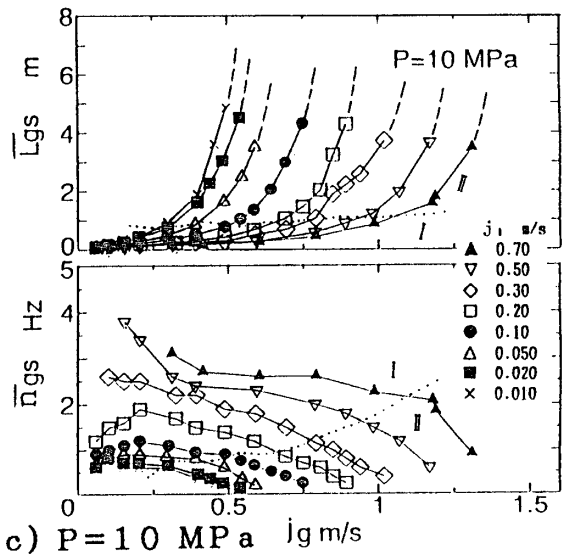
図3. 液体スラグの平均長さ \bar{L}_{1s} に及ぼす圧力の影響



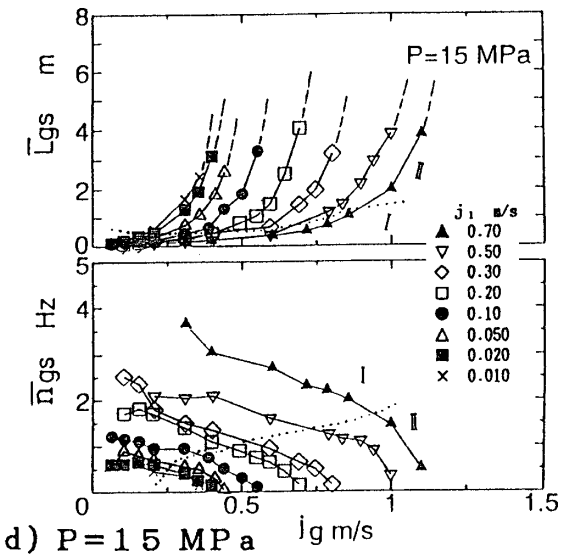
(a) P=0.3 MPa



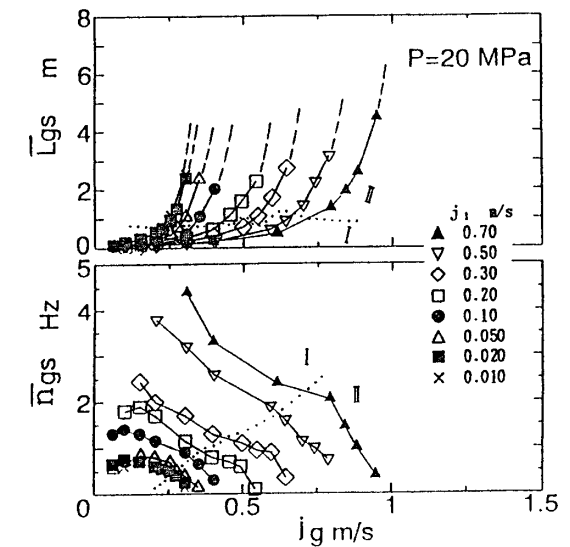
(b) P=5 MPa



(c) P=10 MPa



(d) P=15 MPa



(e) P=20 MPa

図4. 気体スラグの平均長さ \bar{L}_{gs} と通過ひん度 \bar{n}_{gs}

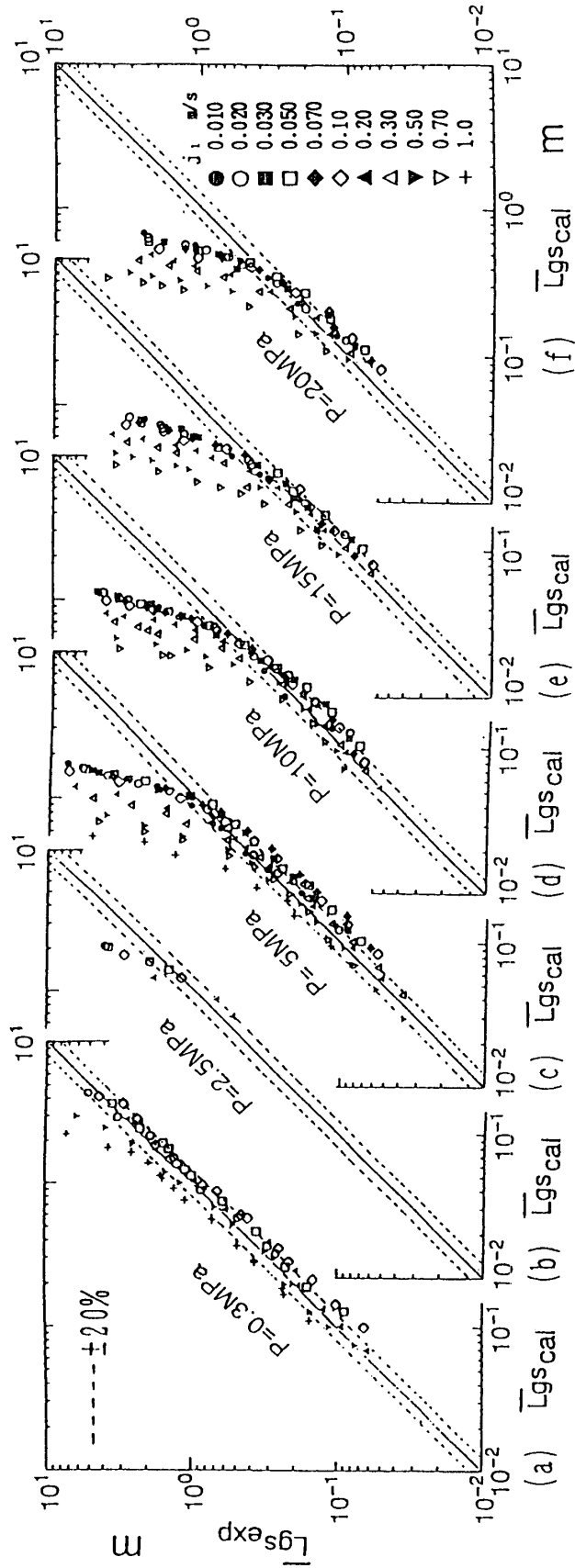


図5. 気体スラグの平均長さ \bar{L}_{sg} に関する Street and Tek⁽⁹⁾の相関式と実験データとの比較

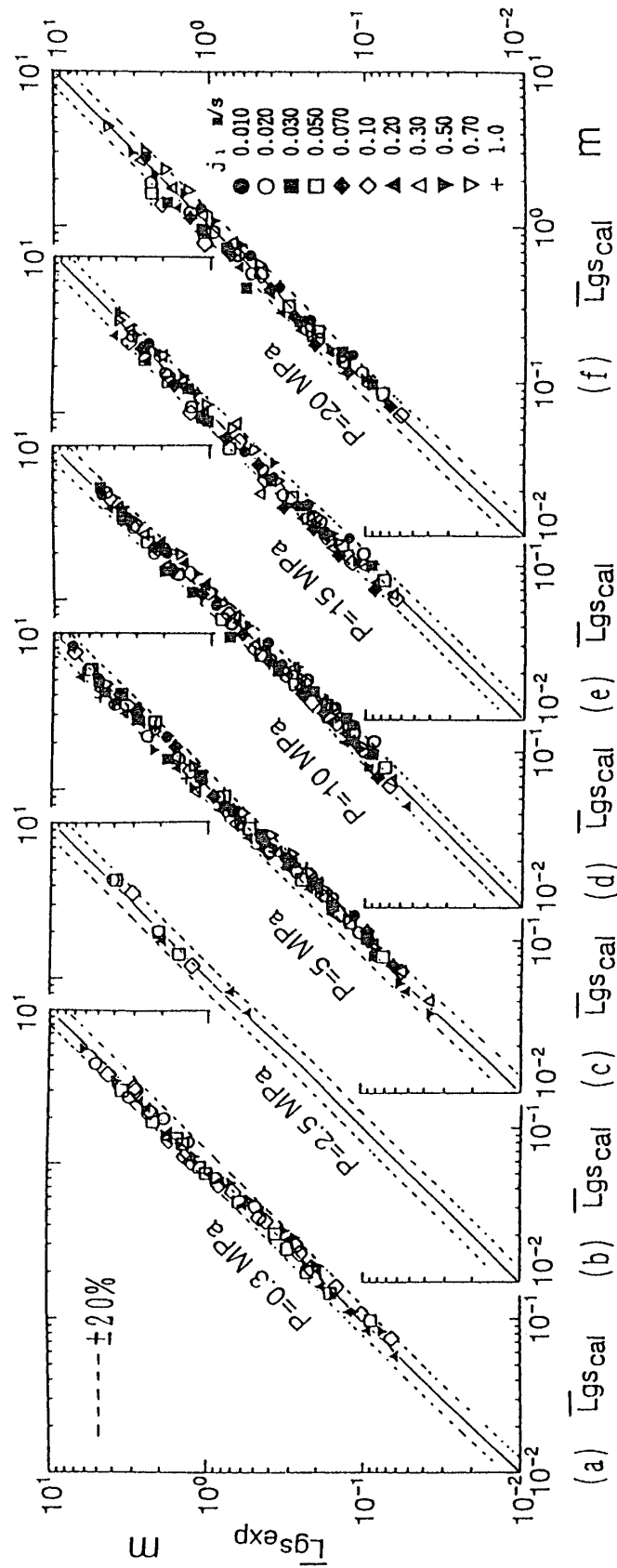


図6. 式(7)と実験データの比較

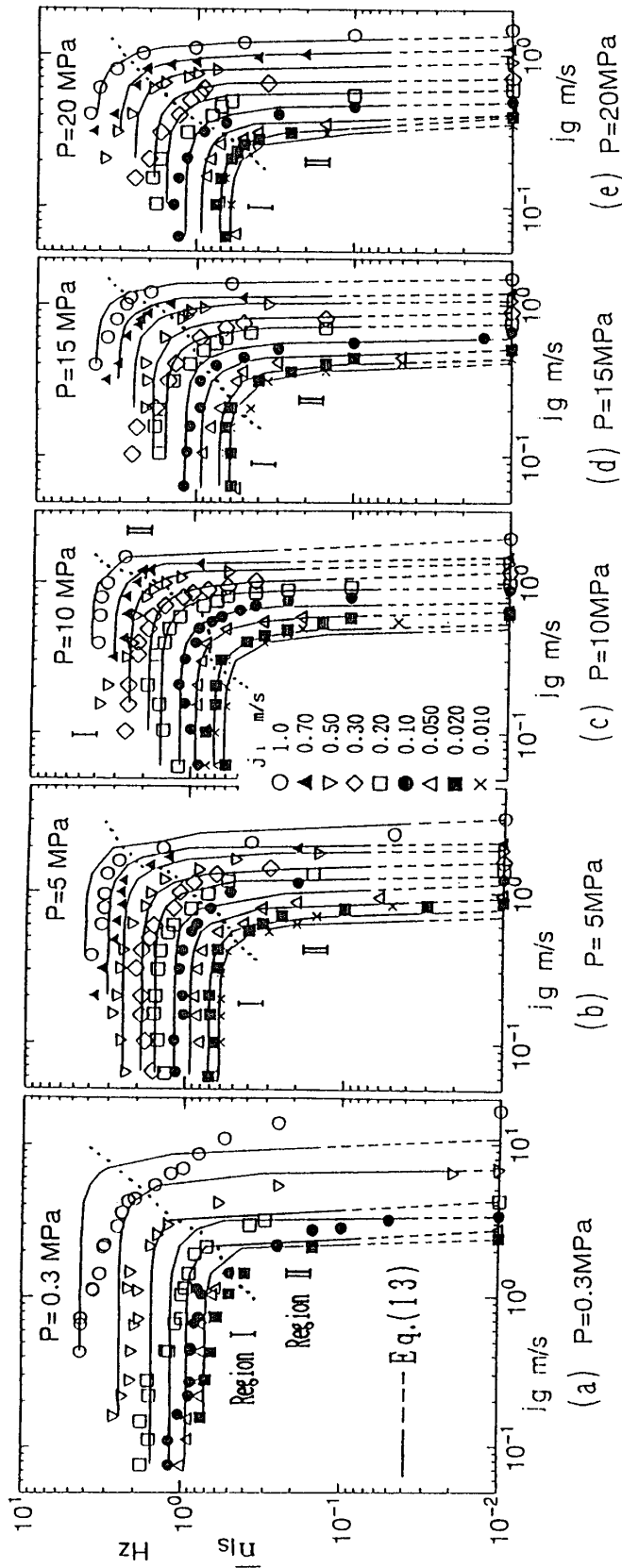


図7. 式 (13) と実験データの比較