

オプチカルプローブを用いた 気液二相流動の微視的計測技術の開発

Development of New Instrumentation Technique Using Optical Probe
for Microscopic Measurements of Two-Phase Flow Characteristics

技術本部 上野隆司*¹ 笠原二郎*²
鈴田忠彦*²

空調機等代替冷媒（HFC 流体や HCFC 流体）を取扱う機器においては、流体の主たる流動形態が気液二相流動となっており、機器の性能予測、さらに信頼性確保のためには気液二相流動特性の把握が必要である。HFC や HCFC 流体は表面張力が小さいことからその気泡径は極めて小さく、微視的な計測方法が要求される。本報は、オプチカルプローブを用いた気液二相流動の微視的計測技術の開発を目的として、HFC 及び HCFC 流体を用いた気液二相流の実験を行い、その微視的計測技術の検証を行った結果について報告する。

The flow regimes of HFC or HCFC fluids used in air-conditioners and refrigerators are single phase flow and gas-liquid two-phase flow. Understanding the two-phase flow characteristics of such fluids is necessary in order to estimate the performance and increasing the reliability of such equipment. Microscopic measurements are required to investigate the two-phase flow characteristics of such fluids, because the bubbles are very small due to the low surface tension of the fluids. There are a lot of procedures available for investigating the two-phase flow characteristics. We adopted a method using an optical probe. The reason for this choice was that the optical probe has the capability of catching small bubbles. We also adopted the so-called slice method to calculate the void fraction from the void signals obtained by the probe. There are several papers which discuss the slice level. However, we couldn't find any paper which indicated a slice level which could be used for HFC or HCFC two-phase flows. This paper presents the results of HFC and HCFC two-phase flow tests verifying a new instrumentation technique using an optical probe. It was concluded that the accuracy of the microscopic measurements were 5 % for the void fraction and less than 8.5 % for the interfacial velocity in HFC and HCFC two-phase flows.

1. 緒言

近年、地球環境保全の観点から、HFC や HCFC 流体などの代替冷媒の開発が進められている。空調機等これら代替冷媒を取扱う機器においては、これら流体の主たる流動形態が気体と液体が混在して流れる気液二相流動となっており、このことから、機器の性能予測、さらに信頼性確保のためには、HFC や HCFC 流体の気液二相流動特性を把握しておくことが必要である。ボイド率や気液界面速度は気液二相流動の挙動を特徴付ける重要な物理量である。これまでそれらの計測方法に関して、多くの研究がなされてきている^{(1)~(12)}。しかしながら、それらの計測方法は微視的な計測、すなわち微細な気泡を必ずしも対象とはしていない。HFC や HCFC 流体は表面張力が小さいことからその気泡径は極めて小さく、微視的な計測方法が要求される。本報は、オプチカルプローブを用いた気液二相流動の微視的計測技術の開発を目的として、HFC 及び HCFC 流体を用いた気液二相流の実験を行い、その微視的計測技術の検証を行った結果について報告する。

2. 計測原理と検証実験方法

まず測定原理について述べる。図1にオプチカルプローブの詳細を示す。このプローブは先端部が気相中にあるか、又は液相中なのかを次のように判定する。プローブ先端は光ファイバに接続されている。ファイバ内にレーザを送込み、プローブ先端で反射したレーザの強度で気液を判定する。すなわち、先端が気相中にある方が液相中にある場合よりもレーザをより強く反射するため、その強度は大きい。したがって、レーザの反射強度の変化からプ

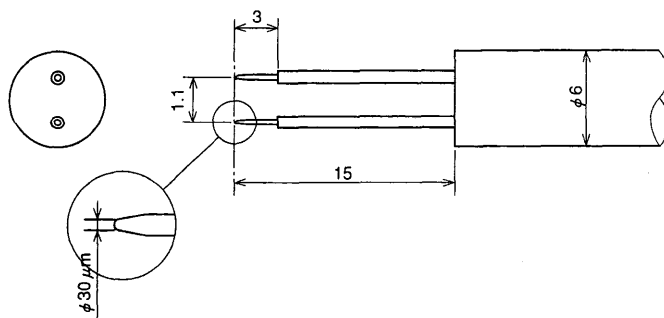


図1 オプチカルプローブ (BOP) の詳細
Detail of BOP tips

ローブは気液の界面を検知することができる。プローブ先端は 30 μm ととがらせてあり、微細な気泡も検出可能となっている。また図1に示すように、プローブはその先端が二つあり、各プローブ間の距離は 1.1 mm である。それぞれのプローブから得られる気液の判定信号の遅れ時間と、プローブ間の距離とから、気液界面速度が求められる。このように、本研究で用いたオプチカルプローブは1対の先端から形成されているので、以下 BOP (Bi-Optical Probe) と称す。

次に検証実験方法について述べる。図2に、用いた実験装置の概要を示す。供試体は垂直管と水平管とから成っており、蒸気発生器上部及び側部にそれぞれフランジ接続されている。垂直管と水平管のどちらかの供試管で実験を行い、使用しない供試管は蒸気発生器上部又は側部のフランジを閉じた。

垂直管は内径 25 mm のステンレス製円管で、一対のボール弁が

*¹ 高砂研究所原子力研究推進室 工博

*² 高砂研究所燃焼・伝熱研究室

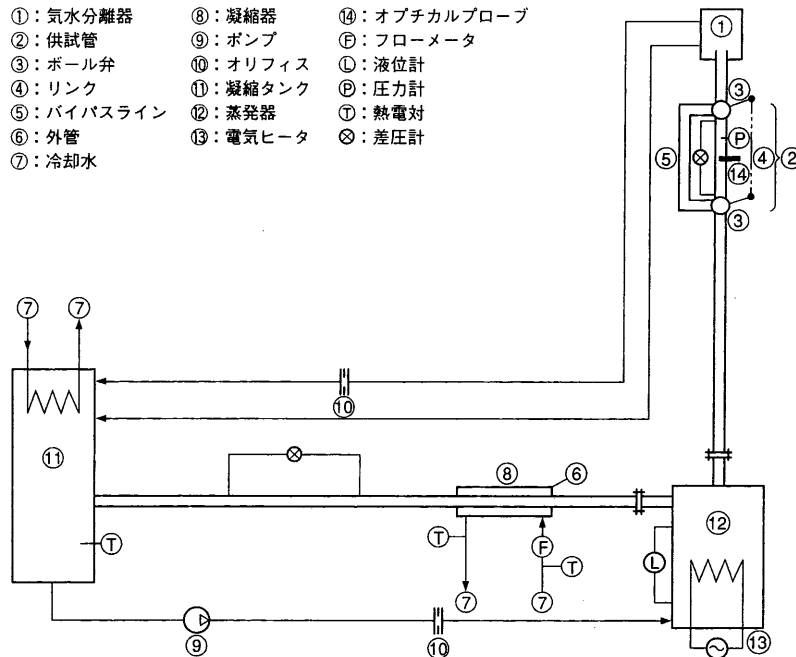


図2 実験装置
Schematic diagram of experimental loop

設置されており、それらはリンクによって同時にしゃ断して主流をバイパス部に流せるようになっている。実験は蒸気発生器で所定の気液の流量を設定して供試部に二相流を流入させ、まずボール弁しゃ断前に供試部の差圧及び光ファイバプローブでのボイド信号を得た。その後ボール弁をしゃ断し、二つの弁間に封込まれた液の液位から体積平均ボイド率を求めた。差圧及び体積平均ボイド率から二相流状態での圧力損失を算定し、別途測定した液単相流の圧力損失とから二相増倍係数 ϕ_l を求めた。また、光ファイバプローブを半径方向にトラバースして局所ボイド率の分布及び局所の気液界面速度 V_i の分布を得、それらを断面で積分して断面平均ボイド率 $\langle \alpha \rangle$ 及び断面平均ガス流速 $\langle \alpha V_i \rangle$ を求めた。供試流体は R 123 である。

一方、水平管は内径 8.4 mm の銅製円管を用いた。水平管の実験の場合、蒸気発生器で液をすべて蒸気化し、蒸気単相流を水平管に流入させた。蒸気は供試部上流側の二重管部で一部蒸気を凝縮させることによって、所定の気液の流量を設定した。二重管部の環状流路には冷却水を流しており、管内の蒸気を凝縮させることができる。供試部では二相流の圧力損失を測定し、別途測定した液単相流の圧力損失とから二相増倍係数 ϕ_l を求めた。供試流体は R 22 及び R 407 C を用いた。以上の実験条件を表 1 に示す。

表 1 の R 407 C は HFC 32, HFC 134 a 及び HFC 125 がそれぞれ 23, 52 及び 25 wt % の割合で混合した非共沸混合冷媒である。

BOP の検証は、ボイド率に関しては、二相の圧損を考慮した差圧から求めたボイド率を真値とし、それと BOP から得られる断面平均ボイド率 $\langle \alpha \rangle$ と比較することによって行った。一方気液界面速度に関しては、見掛けのガス流速 j_g を真値とし、それと $\langle \alpha V_i \rangle$ とを比較することによって求めた。

3. 結果及び考察

3.1 流動観察結果及び気泡径分布

HFC 及び HCFC 流体の基本的な流れの構造を把握するため、流動観察を行った。

供試体は垂直管を用い、図 1 の差圧測定部にガラス管を装着し、

表 1 実験条件
Experimental conditions

供試管	垂直管	水平管
供試流体	R 123	R 22, R 407 C
P (MPa)	0.4, 0.77	0.18
j_g (m/s)	0.5~5.0	0.5~16.0
j_l (m/s)	0.1~1.0	0.01~0.3

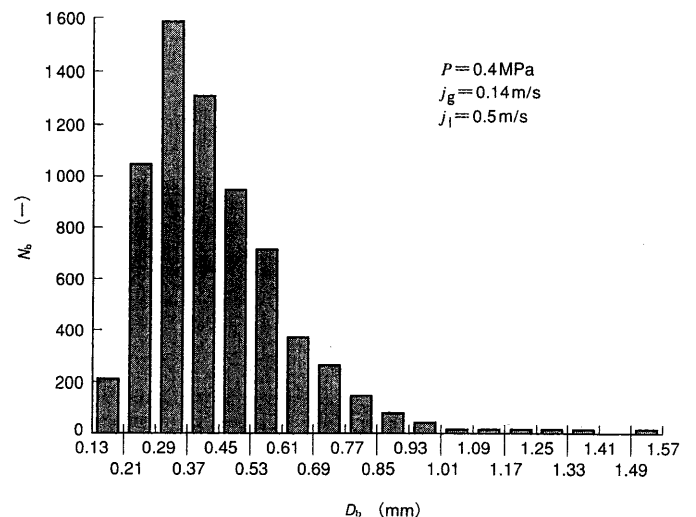


図3 気泡径の分布
Distribution of bubble diameter

内部の流動を観察するとともにビデオ撮影を行った。供試流体は R 123 を用いた。

R 123 の流動は、大気圧下の空気・水二相流で観察される砲弾型の気体スラグは見られなかった。空気・水二相流で観察される気体スラグは管断面を大きく占めるが、R 123 での気体スラグは管断面の一部を占める大きさであり、気体スラグというよりもむしろ大気泡と呼んだ方が適切である。

撮影したビデオ画像を画像解析によって気泡の輪郭を明確化し、気泡径 D_b とその個数 N_b の関係を表す気泡径分布図 3 を得た。

径 1 mm 以下の気泡がほとんどであり、約 0.3 mm 気泡が最も多いことが分かる。この気泡径についても、大気圧下の空気・水二相流で観察される気泡径が数 mm であるのに比べかなり小さい。以上、R 123 の空気・水二相流と異なる流れの構造は、表面張力が常温水の約 1/10 と小さいことに主として起因するものと考えられ、R 123 の二相流はより均質流的な流れとなっている。

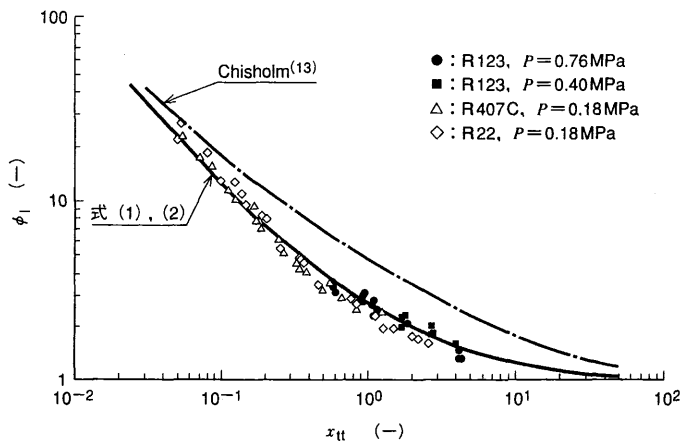


図4 二相増倍係数
Pressure drop multiplier for two-phase flow

3.2 圧力損失

二相増倍係数 ϕ_1 と Lockhart-Martinelli パラメータ x_{tt} との関係を図4に示す。図4に示す実線は、次式で示す実験式である。

$$\phi_1^2 = 1 + \frac{5.3}{x_{tt}} + \frac{1}{x_{tt}^2} \quad (1)$$

$$x_{tt} = \left(\frac{j_l \rho_l}{j_g \rho_g} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (2)$$

ここで、 j_g , j_l は気液の見掛けの流速、 μ_g , μ_l は気液の粘性係数、 ρ_g , ρ_l は気液の密度である。

図4に大気圧下の空気・水二相流に対し適用される Chisholm⁽¹³⁾ の式による算定値を示している。

本データはその算定値より低い ϕ_1 となっている。 ϕ_1 が低くて1に近づくほど、均質流的な流れとなっていることを意味することから、R123の二相流は大気圧下の空気・水二相流に比べてより均質流的な流れとなっているといえる。このことは前述した観察結果の内容と矛盾がない。

3.3 ボイド率

垂直管で R123 を用いた試験結果について述べる。

図5に断面平均ボイド率 $\langle \alpha \rangle$ と差圧から求めたボイド率 $\langle \alpha \rangle_h$ との関係を示す。差圧の測定値は液頭に摩擦圧力損失が加算されているので、 $\langle \alpha \rangle_h$ は式(1), (2)による二相増倍係数を用いて摩擦圧力損失を求め、差圧の測定値から差し引いて算定した。

一方、 $\langle \alpha \rangle$ は、前述したように、光ファイバプローブを半径方向にトラバースして局所ボイド率の分布を得、それらを管断面で積分して求めた。

ここで、光ファイバプローブのボイド信号から局所ボイド率を求める方法は、世古口ら⁽¹⁾⁽²⁾によって提案されたスライスレベル（以下、 S_c と称す）を、ボイド信号の液レベルとガスレベルの間に設定する方法を用いた。

世古口らは、大気圧下の空気・水二相流の気泡流を対象にし、点電極プローブでボイド率計測を行っている。点電極プローブで得られたボイド信号で、 $S_c = 40\%$ として求めた局所ボイド率を管断面にわたって積分して求めた平均ボイド率と同時しや断弁を用いて得たボイド率とが良好一致であったことを示している。

図5は S_c をパラメータとして $\langle \alpha \rangle$ を求めた結果をプロットしている。 $\langle \alpha \rangle$ と $\langle \alpha \rangle_h$ との一致の良好性の観点で図5を見ると、 $\langle \alpha \rangle$ の増加とともに S_c が大きいほどそれらの一致が良いことが分かる。

すなわち、 $\langle \alpha \rangle$ が40%から60%の範囲では $S_c = 5\%$, 60%

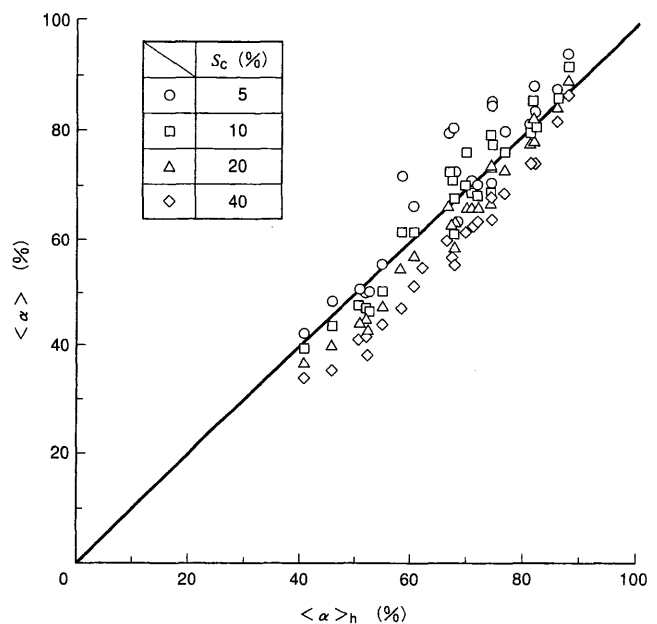


図5 スライスレベルのボイド率に与える影響
Effect of slice level on void fraction

から80%の $\langle \alpha \rangle$ 範囲では $S_c = 10\%$ 、さらに $\langle \alpha \rangle$ が80%以上では S_c が20%又は40%の場合が最も一致が良い。このように、最適な S_c はボイド率の関数となる。

$\langle \alpha \rangle$ が40%から60%の範囲では $S_c = 5\%$ が最適となっているが、この値は世古口らが大气圧下の空気・水二相流の気泡流で得た最適値 $S_c = 40\%$ に比べて低い値となっている。この理由としては、R123での気泡径が空気・水二相流での気泡径に比べてかなり小さいことが主たる理由と考えられる。また高ボイド率領域で最適な S_c が大きくなる理由は、連続相がガス相となるために S_c を大きく設定しないと小さな液滴がカウントされないことに起因するものと考えられる。

したがって、ボイド率計測をより高精度にしていくためには、最適な S_c についてのボイド率の関数を求める必要がある。その関数を以下に示す。

$$S_c = 5 \quad 0 \leq \alpha < 60\% \quad (3)$$

$$S_c = 10^{(aa+b)} \quad 60 \leq \alpha < 85\% \quad (4)$$

$$a = 0.0301 \quad (5)$$

$$b = -1.468 \quad (6)$$

$$S_c = 40 \quad 85 \leq \alpha \leq 100\% \quad (7)$$

図6はこれらの式を用いて S_c を計算し $\langle \alpha \rangle$ を求めたもので、 $\langle \alpha \rangle_h$ との一致性は標準偏差で5%と良好である。

3.4 気液界面速度

局所の気液界面速度と式(3)~(7)による S_c を用いて計算した局所のボイド率の積の断面平均ガス流速 $\langle \alpha V_i \rangle$ を、見掛けのガス流速 j_g と比較したものを図7に示す。それらの一致は良好で、特に4.5 m/s以下で良い。4.5 m/s以上では流動様式が環状流又はフロス流から環状流の遷移域にあり、BOPは液滴又は液塊の界面を検出している可能性がある。

したがって、4.5 m/s以上の領域で $\langle \alpha V_i \rangle$ が j_g よりも小さい理由は、BOPが液滴又は液塊を検出しており、それらの速度が局所のガス速度よりも小さいことに起因するものと考えられる。

$\langle \alpha V_i \rangle$ の j_g との一致性は標準偏差で8.5%で、これにはボイド率の誤差も含んでいることから、 V_i の誤差は8.5%以下となる。

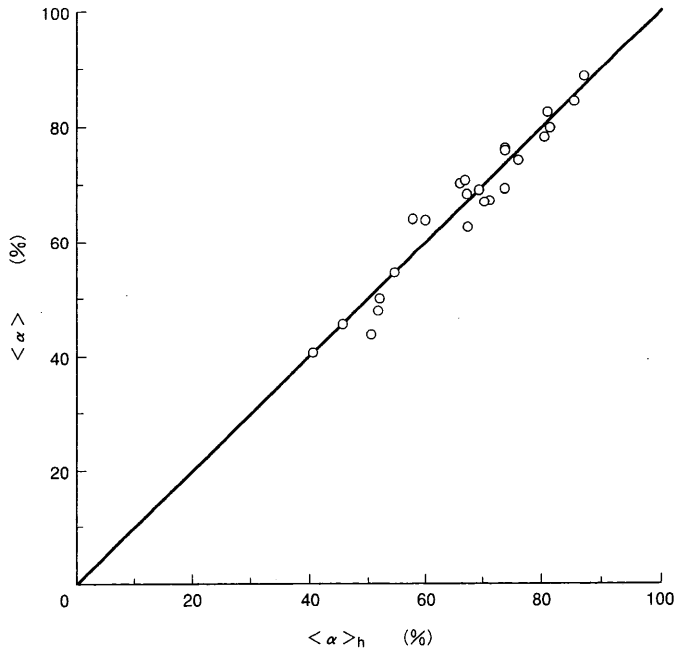


図6 $\langle \alpha \rangle$ と $\langle \alpha \rangle_h$ の関係
Relation between $\langle \alpha \rangle$ and $\langle \alpha \rangle_h$

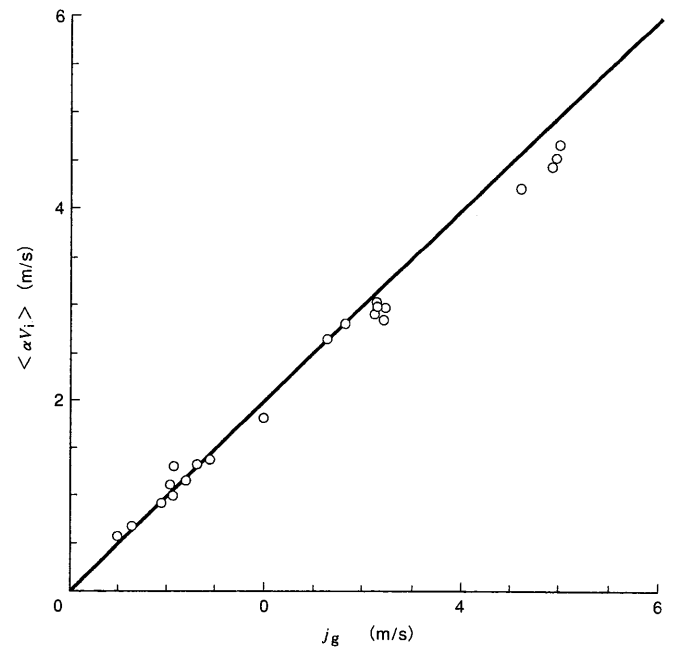


図7 $\langle \alpha V_i \rangle$ と j_g の関係
Relation between $\langle \alpha V_i \rangle$ and j_g

4. 結 言

光学プローブを用いた気液二相流動の微視的計測技術の開発を目的として、HFC 及び HCFC 流体を用いた気液二相流の実験を行い、次の結果を得た。

- (1) HFC 及び HCFC 流体の二相流は、径 1 mm 以下の気泡がほとんどであり約 0.3 mm の気泡が最も多い流れである。この流れの二相流動特性を調べるためには、極めて微視的な計測技術が要求される。
- (2) 光学プローブをこの流れに適用し、スライスレベル S_c

がボイド率の関数となっていることを見いだした。そこで S_c をボイド率の関数として最適化を行った結果、ボイド率は標準偏差誤差で 5%，気液界面速度は 8.5% 以下という、極めて高精度で計測できることに成功した。本計測技術は各種熱交換器の性能向上への道具として用いることができる。

- (3) 本計測技術の開発の中で、HFC 及び HCFC 流体の二相増倍係数の新実験式(1)，(2)及び最適な S_c の実験式(3)～(7)を得ることができ、これらも HFC 流体等を扱う機器の設計に役立つものとする。

参 考 文 献

- (1) Sekoguchi, K., Trans. Japan Soc. Mech. Engrs., Vol.40 No. 336 (1974) pp.2 295-2 301
- (2) Sekoguchi, K., Proc. Of Japan Soc. Mech. Engrs., No. 814-6 (1981)
- (3) JSME Data Book, Flow Measurements (1985)
- (4) Morala, E. C., Chang, J. S., Multi-phase Transport Phenomena, Hemisphere Press N. Y. (1988)
- (5) Hori, K. et al., Proc. Of the 2nd. ASME/JSME Nuclear Engineering, Book No. 10343 a (1993) pp.69-76
- (6) Hori, K. et al., Proc. Of The 4th. International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety (1994) pp.43-D-1 ~43-D-6
- (7) Kagawa, T. et al., ANS/ASMW/NRC International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, NUREG/CP-0014 Vol.2 (1980) pp.874-889
- (8) Narabayashi, T. et al., Proc. of I. U. T. A. M. Symposium on Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flows, (1983)
- (9) Muller, U. et al., Proc. Of Japan Soc. Mech. Engrs., Vol. 84 No.748 (1981)
- (10) Emrich, B. et al., Proc. of The 2nd. International Conference on Multiphase Flow '95-Kyoto (1995) pp.P 1-85~P 1-89
- (11) Petrak, D., Proc. of The 2nd. International Conference on Multiphase Flow '95-Kyoto (1995) pp.IN 1-9~IN 1-13.
- (12) Borner, T. et al., Proc. Of Japanese J. Multiphase Flow, Vol.1 No.2 (1987)
- (13) Chisholm, D., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 10 (1967)