

JAERI-M

9825

NSRR強制対流実験におけるボイド
挙動の測定 (1)

(炉外モックアップ実験)

1981年12月

藤城 俊夫・広瀬 誠*・丹沢 貞光

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

NSRR強制対流実験におけるボイド挙動の測定(1)

(炉外モックアップ実験)

日本原子力研究所安全工学部反応度安全研究室

藤城 俊夫・広瀬 誠*・丹沢 貞光

(1981年11月10日受理)

NSRR強制対流実験およびループ実験において、過渡的なボイド発生挙動の測定を行う事を予定しているが、本報はそのための炉外の予備実験の結果をまとめたものである。実験装置としては、大気圧カプセルを用いて行う強制対流実験用のものと同一のモックアップ装置を使用し、これの試験部流路の出口部に二相流測定用に開発した振動板型密度計およびドラッグディスク型流量計を取付けて実験を行った。試験燃料部でのボイド発生は、ダミー燃料に開けた小孔から空気を吹出すことによって模擬をし、定常条件の下で、冷却材流量と空気流量とをパラメータとして上記の密度計および流量計の応答を調べた。この結果、密度計はボイド検出には十分安定に動作するが、ボイド率の定量的な測定のためにはもう少し改良が必要である事、一方、流量計は冷却材流量が少い時に不安定になる欠点はあるが、冷却材流量が或る程度大きくなれば良好な測定結果を与える事がわかり、現設計のセンサーに多少の改良を加える事により、十分に実用になる事が確認できた。

* 三井造船株式会社

Measurement of Void Behavior in NSRR Forced Convection Tests (1)
(Ex-reactor Mockup Test Results)

Toshio FUJISHIRO, Makoto HIROSE^{*}
and Sadamitsu TANZAWA

Division of Reactor Safety,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 10, 1981)

Measurement of transient void generation behavior is being planned in the NSRR forced convection tests and in the loop tests.

This report describes the ex-reactor test results of the void measurement conducted as the preliminary ones for the planned in pile measurement.

The tests were performed with a mock-up test rig fabricated in the same size as those to be used in the forced convection tests in the ambient pressure capsule. A newly designed vibrating-vane type densimeter and a drag-disc type flow meter were used for the two phase flow measurement at the test channel exit.

The generation of voids at the test section was simulated by injecting air voids through tiny holes on the cladding of the dummy fuel rod, and the response of the densimeter and the flow meter was obtained as the functions of flow rates of inlet coolant and injected air under steady state condition.

The results were, firstly, the densimeter needs minor modification for the quantitative measurement, although it is usable for the void detection, and secondly, the drag-disc flow meter gives fairly good results, although the indication becomes unstable under low coolant flow conditions.

It was concluded that the tested sensors are well applicable in the future inpile measurement with minor modifications.

Keywords : Twophase Flow, Void Ratio, Void Measurement, NSRR, Nuclear Safety, Fuel Behavior, Forced Convection

* Mitsui Engineering and Shipbuilding Co.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験方法	2
2.1 実験装置	2
2.2 実験手順	3
3. 実験結果	8
3.1 校正実験	8
3.1.1 冷却材入口, 出口流量計	8
3.1.2 空気流量計	8
3.1.3 振動板型密度計	9
3.2 二相流実験	10
3.2.1 入口および出口流量計による測定結果	10
3.2.2 振動板型密度計による測定結果	10
4. 考 察	16
4.1 流動様式と流量計の指示	16
4.2 ボイド率の評価	17
4.2.1 ボイド率の計算式	17
4.2.2 計算結果および他の実験者との比較	20
4.3 炉内実験におけるボイド挙動の測定について	23
5. おわりに	36
謝 辞	36
参考文献	37

Contents

1. Introduction	1
2. Test Methods	2
2.1 Test Rig	2
2.2 Test Procedures	3
3. Test Results	8
3.1 Calibration Tests	8
3.1.1 Inlet and Outlet Coolant Flow meters	8
3.1.2 Air Flow meter	8
3.1.3 Vibrating-vane Type Densimeter	9
3.2 Two-phase Flow Tests	10
3.2.1 Results of Inlet and Outlet Coolant Flow Measurements	10
3.2.2 Results of the Densimeter Measurement	10
4. Discussion	16
4.1 Flow Patterns and the Indication of the Flow meters	16
4.2 Estimation of Void Ratio	17
4.2.1 Equations for the Void Ratio Estimation	17
4.2.2 Calculational Results and the Comparison with Other Authors' Test Results	20
4.3 Discussion on the Void Measurement in Inpile Tests	23
5. Summary	36
Acknowledgement	36
References	37

1. はじめに

原子炉の反応度事故時の燃料の挙動を調べる目的で、NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) プロジェクトでは 1975 年 10 月以来、現在までに約 400 回の実験を実施してきた。^{1)~9)}

NSRR 実験は、実燃料をパルス照射し燃料に核反応によってパルス状の出力上昇を生じさせ、反応度事故時の急激な出力上昇を模擬して燃料の破損挙動や破損後の影響を調べる実験である。これまで、PWR 型の燃料を標準試験燃料として燃料挙動のベースデータを収集し、さらに各種の燃料設計条件の影響や冷却条件の影響を調べるためのパラメータ実験および欠陥燃料の破損挙動を調べる実験等を行ってきた。

以上の各種の実験の中の 1 つに、冷却条件の影響を調べる目的で大気圧カプセル内で冷却材を強制流動させつゝ試験を行う強制対流実験という実験がある¹⁰⁾。これは、1 本の燃料を流路管に収め、これに小型の循環ポンプを接続して冷却水を循環させた状態でパルス照射を行う実験であり、これまで約 20 回の実験が実施され、現在も継続して行われている。この実験の結果、従来あまり重視されていなかった冷却材の流動の条件が、実際には燃料の温度挙動に大きな影響を与え、したがって燃料の破損挙動にも影響することが分ってきた。

この強制対流実験においては、当然の事ながら、冷却材の流動挙動の把握は重要であるが、燃料が急加熱を受けて過渡沸騰を生じた時の二相流状態の流動挙動の把握は必ずしも容易ではない。また、過渡二相流の評価は計算コードによる解析でも困難な課題の 1 つである。さらに、被覆管が高温になりジルコニウム・水反応が急速に進行した場合には一時的にかなりの量の水素ガスが発生する事が予想され、二相流挙動はより複雑になってくる。そこで、より直接的に燃料流路にボイド測定器を取付け、燃料流路内の二相流動やボイド発生挙動の実測を試みる事となった。

ボイド測定器としては、原子炉内の強放射線下で耐えられること、パルス照射によって誘起される擬似信号の発生が少いこと、内径 12 cm の実験カプセル内に収納できるような小型のものであること、将来の高温高圧ループ実験にも使用できるように改良、開発ができる構造のものであること等の諸条件を満す必要があり、選択の範囲は極めて限られてくる。内外の資料を検討し、これまでの NSRR 実験における経験や計測器の入手可能性を勘案した結果、最初の試みとして、強制対流実験で入口流量計として使用してきたドラッグディスク型流量計を流路管出口にも取付け、これで二相流の平均モーメントを測定し、同時に、振動板型密度計を連結して出口の平均ボイド率を測定するという構成を採用した。

本報告は、大気圧カプセルを用いた炉内実験に先立って、炉内実験のモックアップ装置を用いて行った炉外予備実験の結果およびその考察をまとめたものである。本予備実験の結果、ドラッグディスク型流量計による流路入口および出口の流量測定により、かなり良好に二相流挙動が把握できること、また、振動板型密度計によっては相対的なボイド率変化は測定できるが、ボイド率の絶対値を評価するにはセンサーの改良がさらに必要であること等が明らかになった。

2. 実験方法

2.1 実験装置

Fig. 2.1 に大気圧カプセルを用いた炉内実験装置の構成を示す。装置は基本的にはこれまで実施されてきた強制対流実験¹⁰⁾と同じである。小型の水中ポンプによってカプセル内の冷却水を下部プレナムに送り、ここで流れを反転させて、上向流として燃料棒と流路管の間の環状流路を流れ燃料棒を冷却する構造となっている。実験条件も強制対流実験と同じく室温、大気圧の条件で内径 16mm の流路管に PWR 型の燃料棒を入れた試験部構成で最高 1.8 m/s までの初期流速（単相）を実現することができる。二相流の測定は、図に示したように、燃料流路の出口に流量計および密度計を直結した形で行う。

以上の炉内実験装置のモックアップとして製作した装置を Fig. 2.2 に示す。流路の構成は Fig. 2.1 に示した炉内実験装置と全く同じであり、流量計および密度計も炉内実験用のものと同一規格のものを使用した。試験燃料としては、実際の試験燃料と同一寸法に作製した模擬燃料を使用し、燃料棒表面でのボイド発生を模擬するために燃料棒の発熱部（ペレットスタック部）の下端に相当する位置に直径約 1mm の小孔を 4 個明け、ここから四方に空気を吹込んだ。計測は、流路管出口の流量、密度の他、冷却水の入口流量および空気吹込量を共にドラッグディスク型の流量計で測定し、これを速応答型の多ペンレコーダに記録した。なお、この炉外試験においては炉内実験用のカプセルと同一寸法のアクリル製の透明カプセルを用いたので、流れの様子を目視で観察することができる。

炉内実験で使用する予定の試験燃料の構造を Fig. 2.3 に、循環ポンプの構造および冷却材入口流量測定用ドラッグディスクの構造を Fig. 2.4 および Fig. 2.5 に示す¹¹⁾。循環ポンプは直流モーターで駆動する遠心ポンプ形式の水中ポンプであり家庭用として市販されているものである。Fig. 2.8 に示すようなポンプ特性（実測）をもっているため、ポンプ電源電圧を調節することにより容易に流量を調整することができる。また、流量計は直径約 4mm の小円板に働く力をカンチレバーでトルクチューブに導き、トルクチューブの変形量を歪ゲージにより電気信号に変換する仕組みのものである。小形で応答性が良く、また、構造が簡単であるので将来の高温高圧ループ用に改良する上で有利である。また、電気信号への変換を特性のそろった 4 ゲージ法で行っているため、歪ゲージ単体にはパルス照射による誘起起電力が生じても互いに打ち消し合い、擬似信号の発生が低く抑えられる点も特長になっている。Fig. 2.6 に流路管出口の二相流状態を測定するための流量／密度計の構造を示す¹¹⁾。これはドラッグディスク型の流量計と振動板型の密度計とを組合せ一体構造としたものであり、上流で密度を下流で流量を測定する。流量計は入口流量測定用のものと同一のものである。一方、密度計は流路の中央に流れに対し平行に置いた振動板を振動させ、振動板に接する流体の密度の違いによって生じる振動周波数の変化を検出し、この変化量から平均密度を測定するという原理のセンサーである。振動板は片方の管壁で支持する片持梁となっており、振動板中央の両面に鉄心を取付け、対向位置

に取付けたコイルにより一方から励振し他方で検出する。以上の検出器を取付け、透明カプセル内に組込んだ炉外実験装置の外観写真を Fig. 2.7 に示す。

2.2 実験手順

実験は、各センサーを実験装置に組込んだ状態で単相流条件でセンサー自身の較正を行い、次に、流路に空気吹込みを行う二相流実験に移った。

センサーの較正試験としては、入口、出口流量計に対しては流路から吐出される冷却水を別容器に受けこれを計量する方法で絶対較正を行い、空気流量計も流量計からの吐出空気を水中で容器に受け計量する方法で較正を行った。また、密度計については、静止水中および空気中の指示から密度 1.0 および密度 0.を確認し、さらに、流動水中での指示の変化から密度計指示への冷却水流動の影響を調べた。

二相流実験は、空気吹込量 0 の時に冷却材流量を設定値に合せ、以後はポンプ駆動電圧を一定に保ったまま、空気吹込み量をステップ状に上昇、さらに下降させ、各ステップで状態が定常に達した所で計測を行った。したがって、本実験の結果は定常条件でのデータを与えることになるので、炉内実験における結果が早い過渡変化を示す場合には、本実験結果を適用する際に注意が必要となろう。

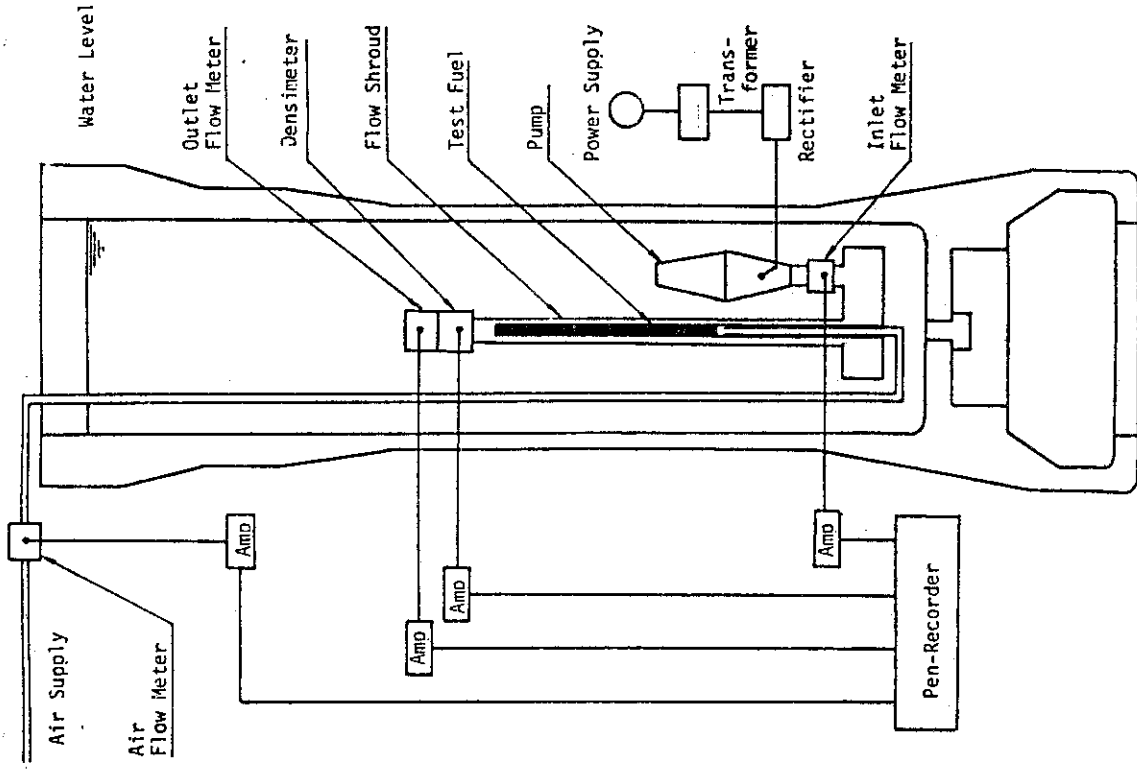


Fig.2.2 Ex-reactor testing rig for two-phase flow measurement

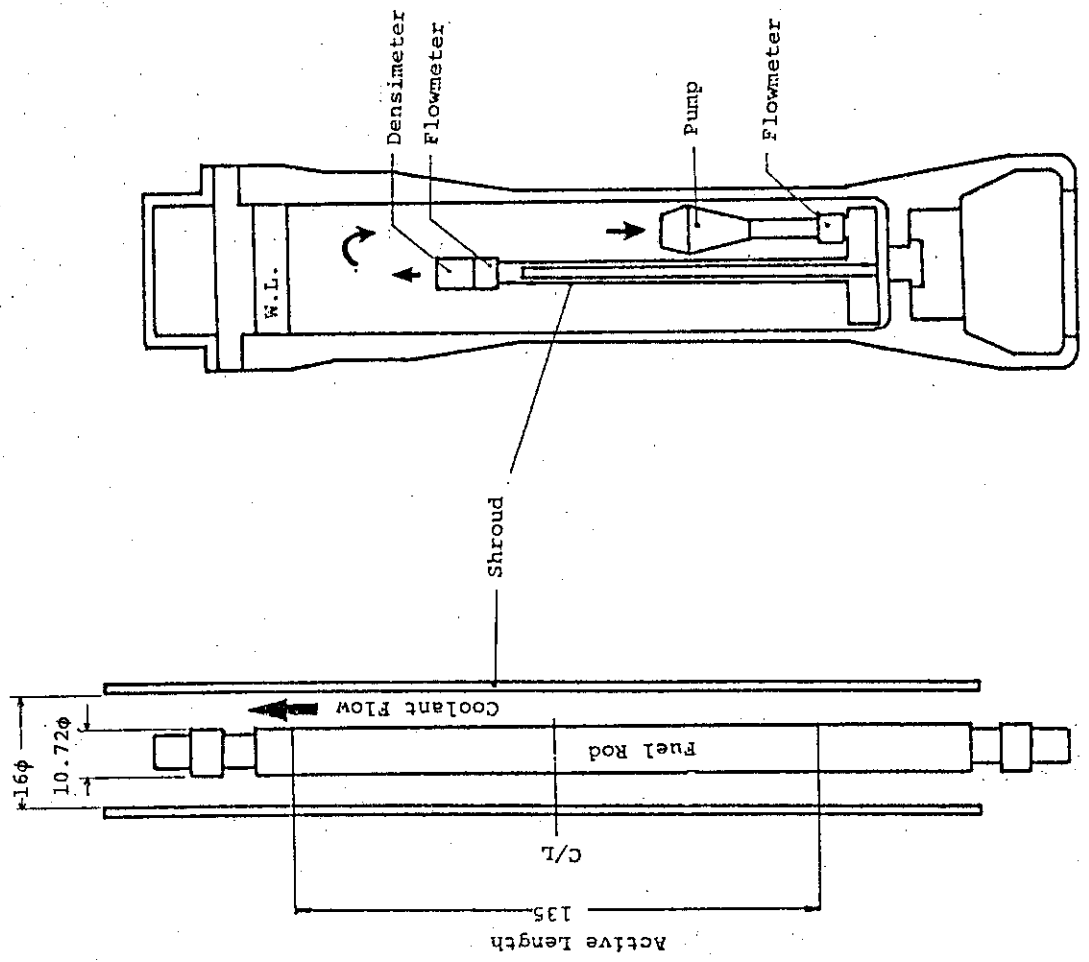


Fig.2.1 Outline of inpile two-phase flow measurement Test

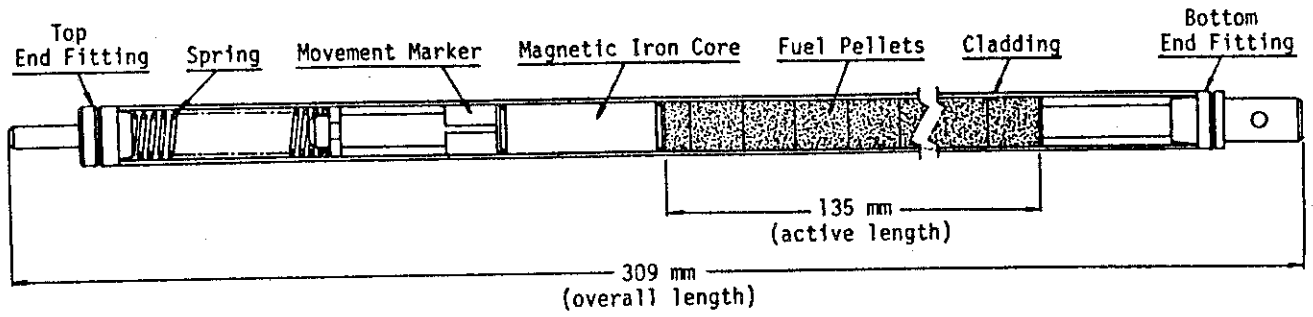


Fig.2.3 NSRR MC-type standard test fuel

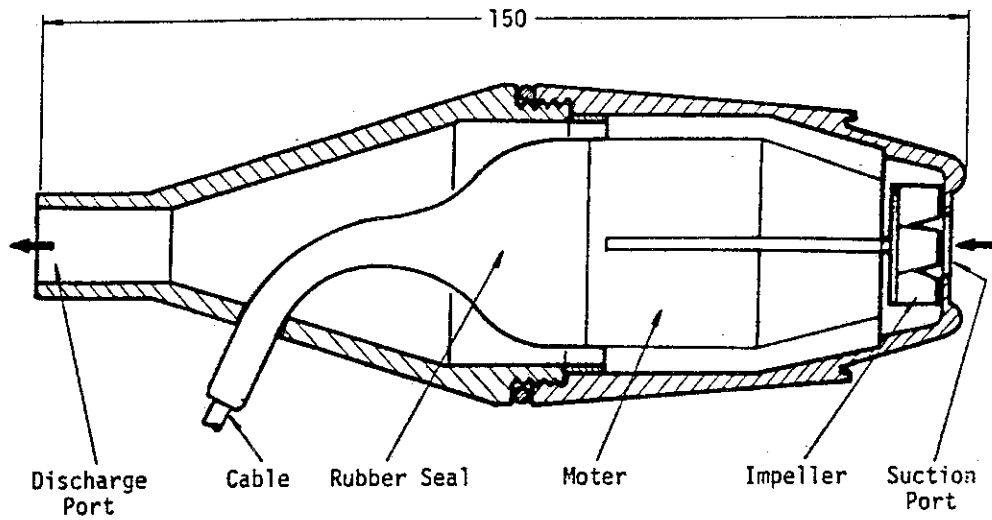


Fig.2.4 Mini submerged pump

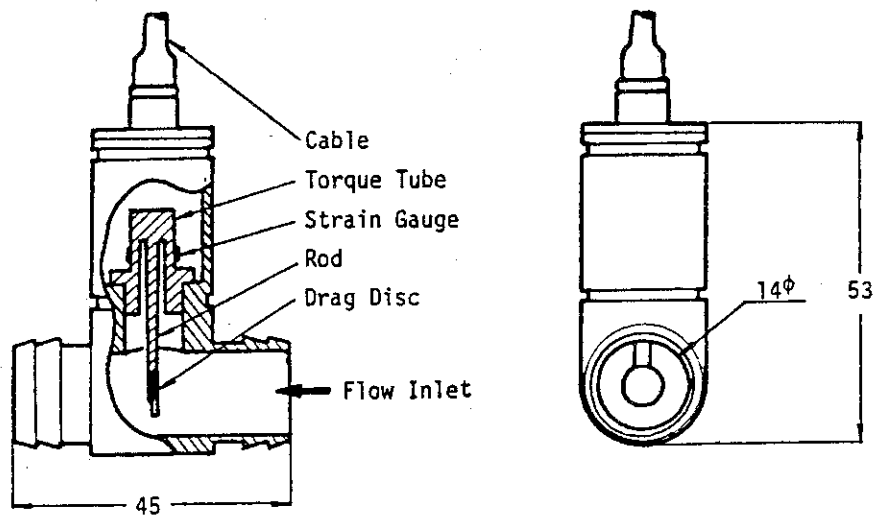


Fig.2.5 Drag-disc type flow meter

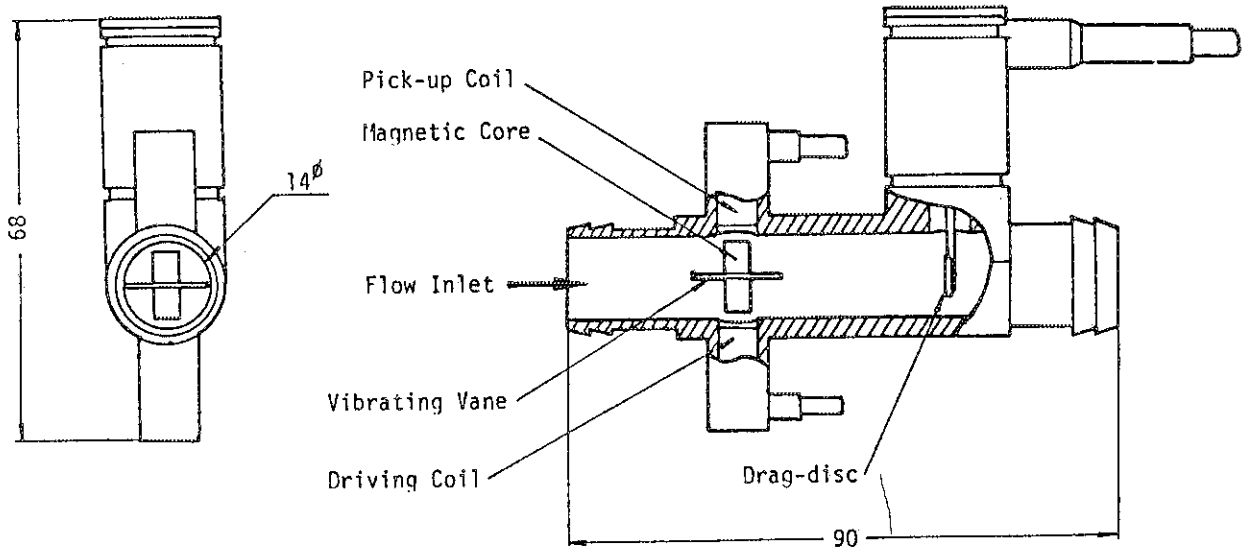


Fig.2.6 Drag-disc flow meter / densimeter assembly

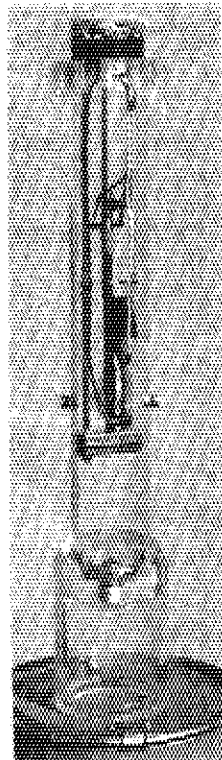


Fig.2.7 Photograph of ex-reactor two-phase flow test rig

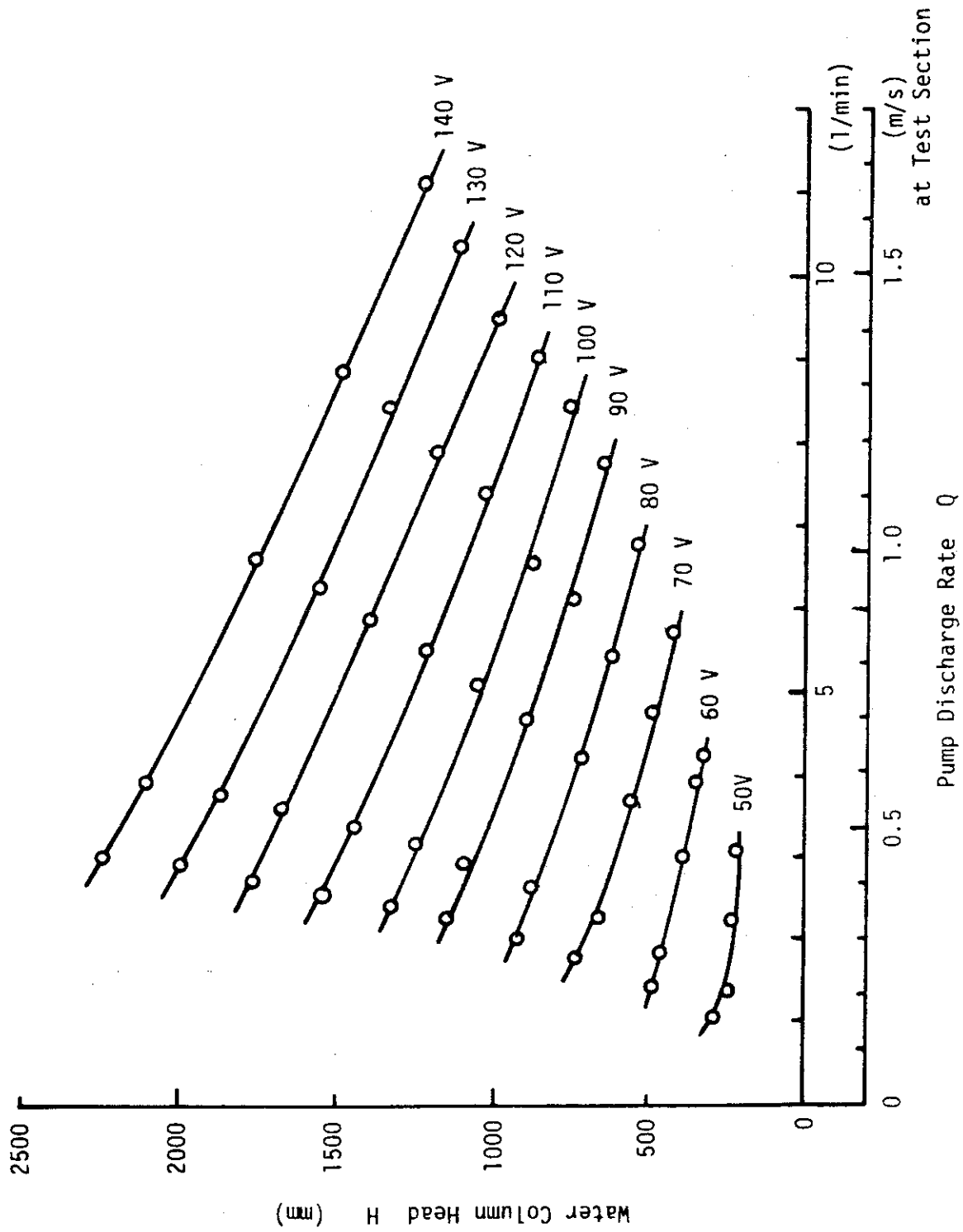


Fig.2.8 Mini submerge pump Q-H characteristic measurement as a function of power source voltage

3. 実験結果

3.1 較正実験

3.1.1 冷却材入口，出口流量計

Fig. 3.1は工場での検定結果によってゲインを設定し，強制制対流実験装置に組込んだ状態での実流較正をした結果で，横軸に真の流量，縦軸に流量計の読みをプロットしたものである。このように，装置に組んだ場合には助走距離が必ずしも十分にはとれないので，流量計単独での較正結果と異なってくるが，直線性は良好であるのでアンプゲインの調整あるいは読みの補正のいずれかにより十分良好なデータを得ることができる。

3.1.2 空気流量計

空気流量の測定にはドラッグディスク型の流量計を使用した。空気は圧縮性が大きいので次のように流量計の出力は圧力の影響を受ける。すなわち，流量計単独の較正は流量計出口の流動抵抗が少ない条件で行われるので，流量計の出力は次式のように大気圧条件の物性値に対応したものとなっている。

$$E_0 \propto \sqrt{D_0} = \sqrt{C \rho_0 u_0^2} \quad \dots\dots (1)$$

ただし

- E_0 : 大気圧 (P_0) での流量計出力
- D_0 : ドラッグディスクに働くドラッグ力 (kgf)
- C : 定数
- ρ_0 : 大気圧 (P_0) での空気密度 (kg/m^3)
- u_0 : 大気圧 (P_0) での空気流速 (m/s)

ところが，実際の使用条件では流量計の出口側の流動抵抗および流量計部での絞りによって，空気流量の増加に伴って流量計部での空気圧力が増大し，流量計出力は次のようなものとなる。

$$E \propto \sqrt{D} = \sqrt{C \rho u^2} \quad \dots\dots (2)$$

ただし

- E : 圧力 P での流量計出力
- D : " ドラッグ力 (kgf)
- C : 定数
- ρ : 圧力 P での空気密度 (kg/m^3)
- u : " 空気流量 (m/s)

計測すべき流量，即ち試験部に吹込まれ大気圧条件下に開放されてからの容積流量を Q (m^3/s) とすれば，連続の条件およびボイルの法則より

$$Q\rho_0 = A\rho_0 u_0 = A\rho u \quad \dots\dots (3)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{P}{P_0} \quad \dots\dots (4)$$

ただし

A : 流路断面積 (m²)

さらに、流量計部での圧力上昇はほぼ流量Qの二乗に比例するので

$$P - P_0 \doteq aQ^2 \quad \dots\dots (5)$$

と表すことができる。

(1), (2)式より

$$\frac{E}{E_0} = \sqrt{\frac{\rho u^2}{\rho_0 u_0^2}} \quad \dots\dots (6)$$

これに(3), (4)式を代入して

$$\frac{E}{E_0} = \sqrt{\frac{P_0}{P}} \quad \dots\dots (7)$$

さらに、(5)式を代入して

$$\frac{E}{E_0} \doteq \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{aQ^2}{P_0}}} \doteq 1 - \frac{aQ^2}{2P_0} \quad \dots\dots (8)$$

となり、流量Qが大きくなると、流量計の指示は較正值よりも小さくなる傾向を示すことが分る。

Fig. 3.2は試験部への吹込み口を大気圧開放とした場合、及び模擬燃料に取付けて、被覆管の小孔より水中に吹出した場合の空気をメスシリンダーに水中置換して絶対較正をした結果である。横軸にとった真の流量は大気圧条件下での空気流量であり、一方、縦軸は流量計の読みであり、流量が大きくなると45°の直線から下方にずれる傾向を示す。この較正結果は、正に(8)式に示した一般的な傾向と一致しており、Fig. 3.2の較正曲線あるいは(8)式により補正を行うことにより、25ℓ/min以上の流量の大きい範囲でも十分精度良く計測できる事が確認できた。

3.1.3 振動板型密度計

振動板型密度計は静止流体中で較正されているので、流動水中で較正の手始めに、まず、単相流中での出力をチェックした。その結果、流体の密度は変化しないにもかかわらず、流体の流量に応じて出力が変化することが判明した。Fig. 3.3は密度計出力を水の流量に対してプロットしたもので、流量がある程度に上になると、出力は流量に比例して下降する特性を持っていることがわかる。この理由はあまり良くは分っていないが、振動子の後流に生ずる渦流の影響とも言われている。振動子の寸法や形状を変えたり、駆動磁界を強くすることなどにより、

この流量による出力変動を抑制するための改良が現在、進行中であるが、本実験ではFig. 3.3の関係にもとづき、スパンの補正を行った。

3.2 二相流実験

二相流実験においては、単相流での燃料流路部での流速が 0m/s 、 0.5m/s 、 1.0m/s 、 1.5m/s 、 1.8m/s および 2.0m/s となるように初期流量を設定し、この場合に空気吹込量を最大 50ℓ/min まで変えて、入口、出口流量計および密度計の出力を記録した。

実験はRun 1, Run 2の2回行った。Run 1では空気吹込量を0から最大 10ℓ/min まで小さざみに変化させて、比較的空気吹込量の小さい範囲でのデータを収集し、Run 2では、空気吹込量を変えるステップをより大きくし、空気流量最大 50ℓ/min までのデータを収集した。

3.2.1 入口および出口流量計による測定結果

Fig. 3.4およびFig. 3.5は入口および出口流量計の指示を空気吹込量に対してプロットしたものである。ただし、入口流量計の指示はそのまま実際の流量とみなすことができるが、出口流量計の指示は空気・水二相流の平均的なモーメント・フラックスの平方根に比例した値となっており、流速そのものではない。

これらのプロットから、燃料流路部の流れに関して、いくつかの特徴を知ることができる。まず、初期流速が 0m/s すなわち、ポンプを停止させておいた場合には、空気を吹き込むことによって水の循環が誘起され、空気吹込量が 10ℓ/min 付近で最大流量約 2ℓ/min 、流速にして約 0.3m/s を示す。しかし、さらに空気吹込量を増してゆくとFig. 3.5にみられるように循環流量は徐々に低下する傾向を示した。空気は流路内に水平に吹出されるので、循環の駆動力は殆んど浮力だけであるとみなすことができる。したがって、以上の傾向は、空気流量が少いときには、空気吹込は循環を促進するが空気流量が大きくなると流路内での流動抵抗が増加し、この結果循環流量が低下傾向を示したものと解釈することができる。同様の傾向は、初期流速 0.5m/s の場合にも見られるが、循環流量が最大になる点は空気流量の大きい方に移動する。さらに初期流速が大きくなると、浮力による循環流量の増大は不明瞭になり、空気吹込量の増加に伴い入口流量は単調に減少する。これは、浮力の増加よりも流動抵抗の増加の方が大きくなるためであると考えられるが、より定量的には次章で考察する。

一方、出口流量計の指示は、空気吹込みにより水が加速されるため、入口流量計の指示をつねに上まわることになる。ただし、初期流量が 0m/s および 0.5m/s の場合には、出口流量計の指示は空気流量の増加に伴って必ずしも単調には増加していない。これは、おそらくフローパターンの変化が生じ、これによって液相の加速あるいは流量計の応答特性が変わったためであろうと推定される。このフローパターンの変化についても次章において検討する。

3.2.2 振動板型密度計による測定結果

Run 1およびRun 2で計測された振動板型密度計による流路出口での密度測定結果を空気流量に対してプロットするとFig. 3.6およびFig. 3.7に示すようになる。ただし、3.1.3で述べ

たように、密度計の出力は流量の影響を受けるので、較正試験の結果 (Fig. 3.3) にもとづいて入口流量を基準にした計測スパンの補正を行った。

これらのデータのプロットから、空気流量の増加に伴って流路出口での平均密度は単調に低下すること、および空気流量に対する密度低下の勾配は空気流量が小さい程大きいことがわかり、傾向的には妥当な結果となっている。また、一般に、同一空気流量に対し初期流量と増加すると平均密度は上昇するが、この傾向はあまり顕著には現れていない。したがって、上述の密度計の流量感度の補正が必ずしも十分ではないことが予想され、次章で、出入口流量計による計測結果と合せて検討を行う。

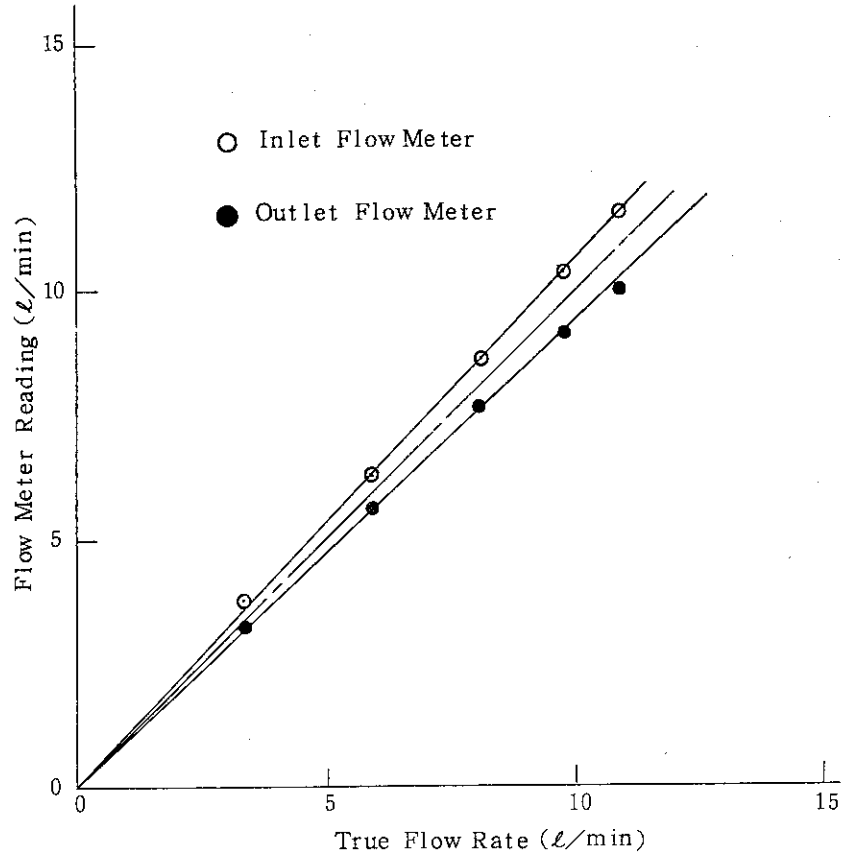


Fig. 3.1 Calibration test results of the inlet and outlet coolant flow meter

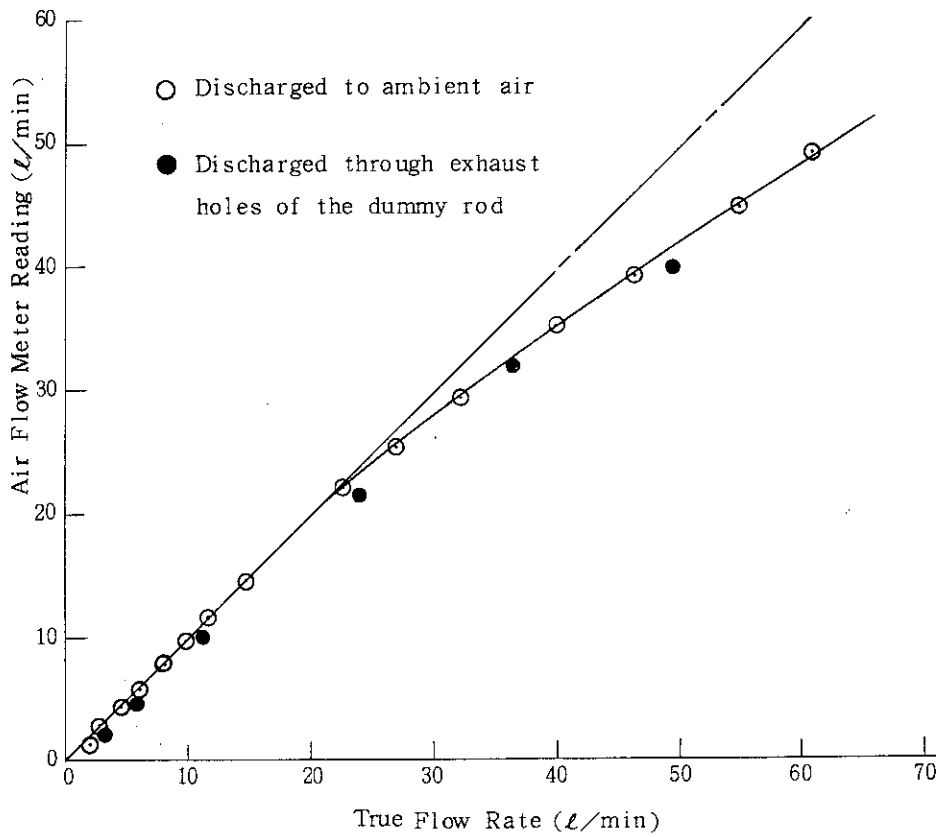


Fig. 3.2 Calibration test results of the air flow meter

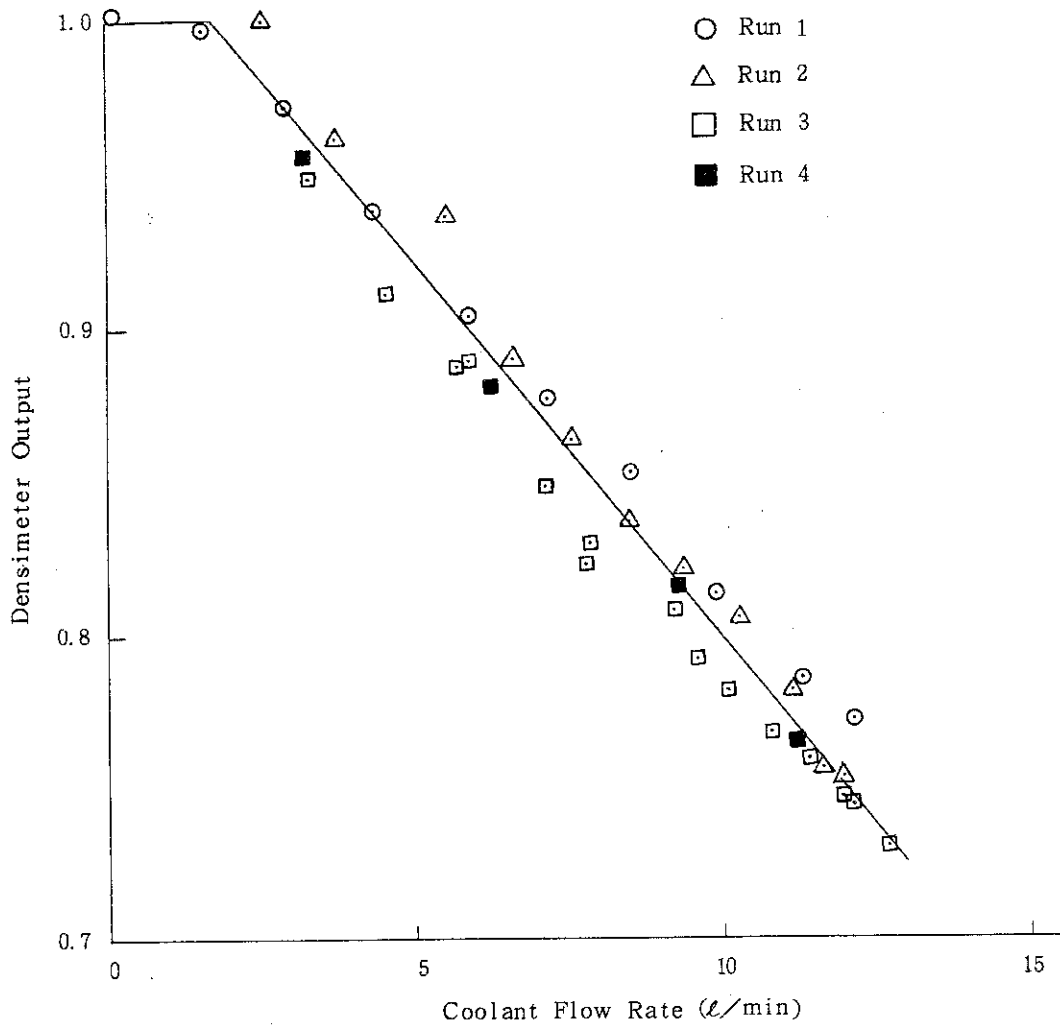


Fig. 3.3 Flow rate sensitivity of vibrating vane type densimeter

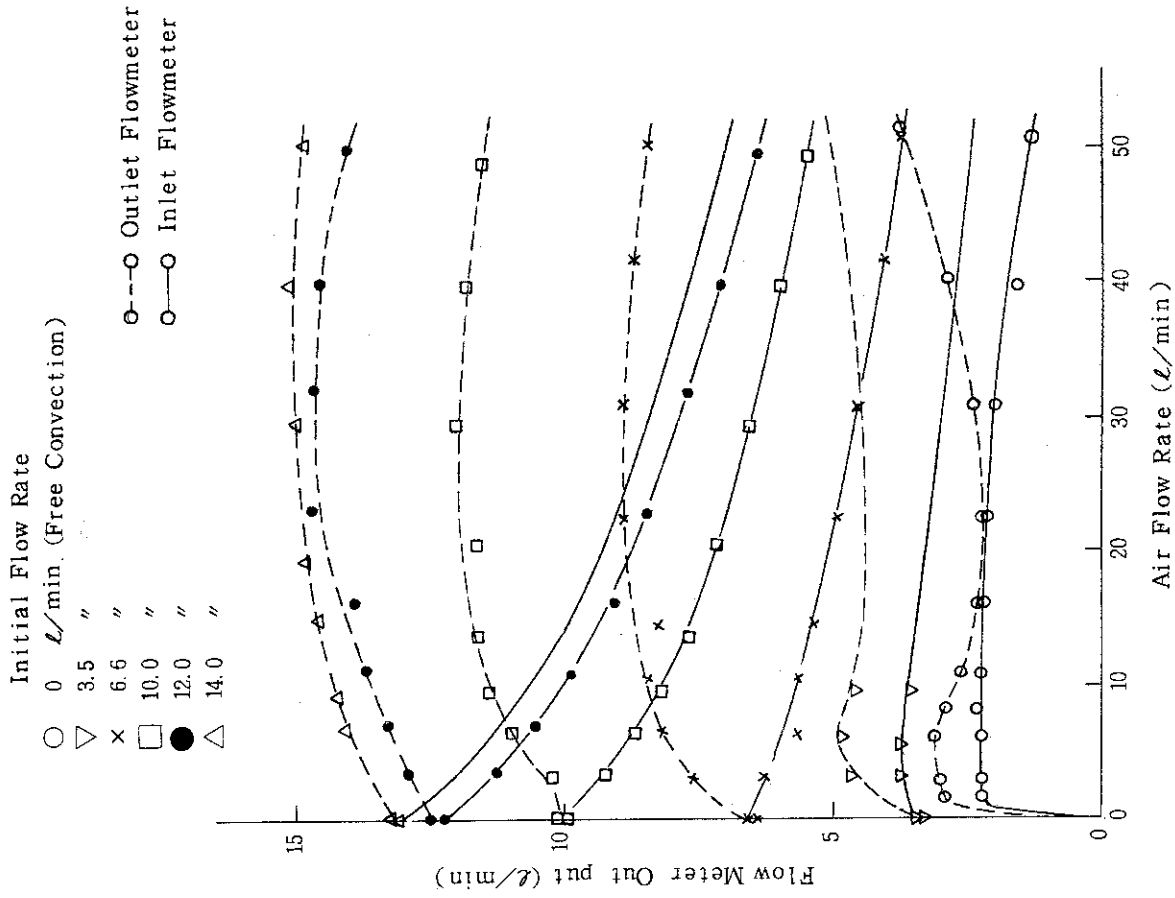


Fig. 3.5 Output of inlet and outlet flow meters plotted as a function of air flow rate (Run 2)

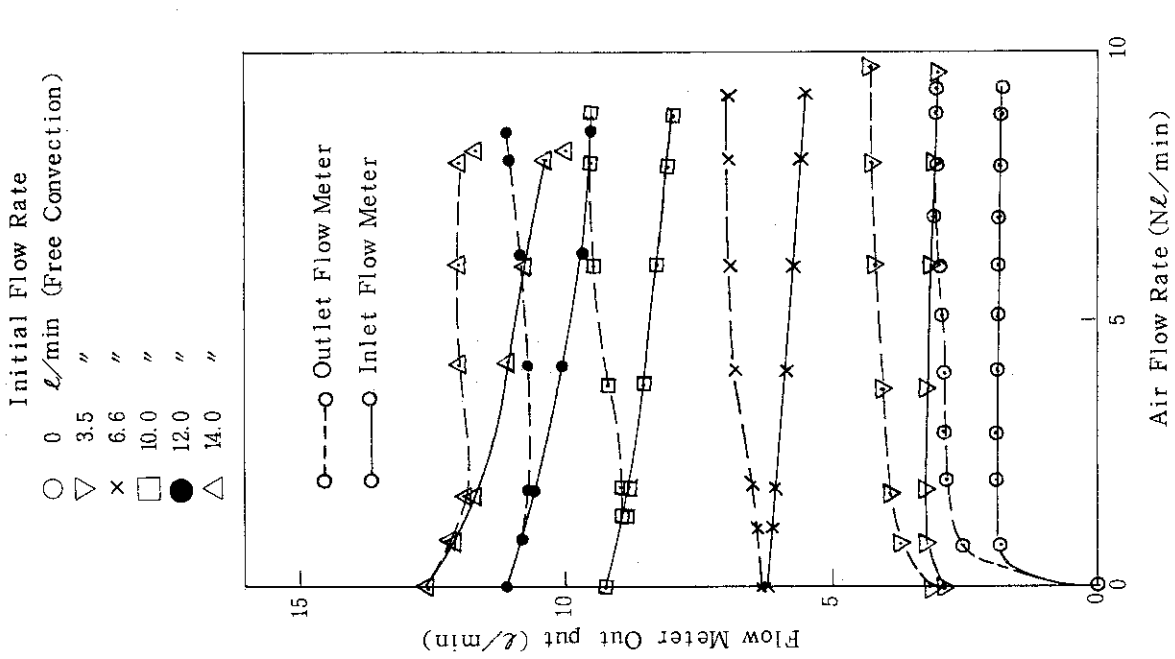


Fig. 3.4 Output of inlet and outlet flow meters plotted as a function of air flow rate (Run 1)

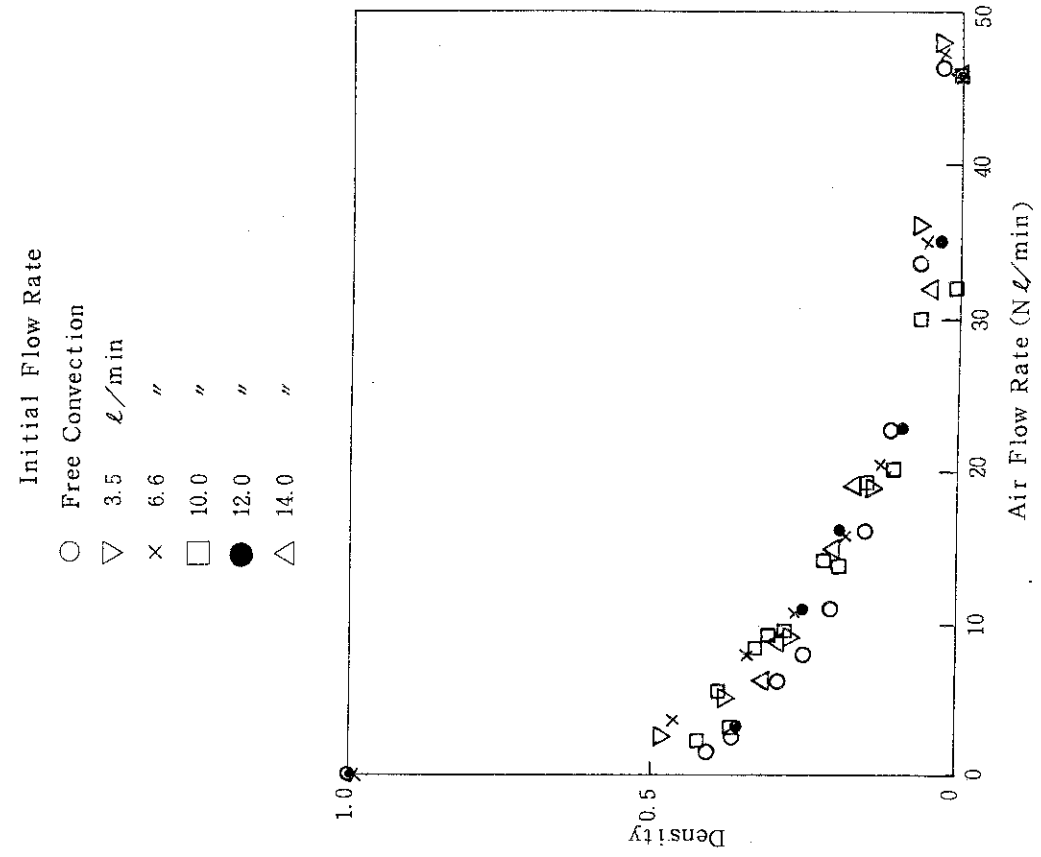


Fig. 3.6 Density measured by densimeter plotted as a function of air flow rate (Run 1)

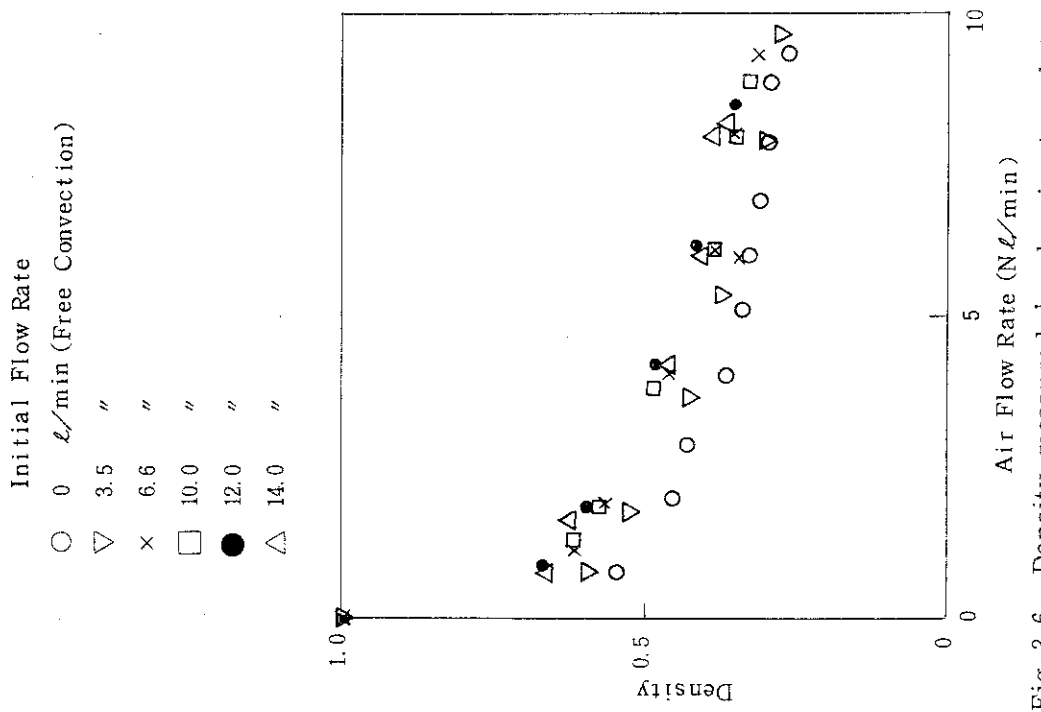


Fig. 3.7 Density measured by densimeter plotted as a function of air flow rate (Run 2)

4. 考 察

4.1 流動様式と流量計の指示

本実験で使用したドラッグディスク型の流量計は、流路の中心付近に置いた小円板に働く流体による力を検出する形式のものであるので、二相流計測に使用する上では、二相流の流動様式に十分留意する必要がある。一般に单相流の計測に用いる場合には、流体の密度が同一断面積で同様、かつ既知であり、ドラッグ力も連続的に作用するので良好な計測が期待できる。ただし、单相流でも、大きな渦や流動振動があったり、ベンドの直後など極端な流速分布の偏りがあると不安定になったり、誤差を生じるおそれはある。ところが、二相流の場合には流動そのものが、振動的な要素と流動分布の通りをもっているものなので、これら誤差を生む要素の性質を最初から把握しておかなければならない。

気液二相流の流動様式は、流れの形態上の差異から、通常4～6通りの流動様式に区分される。本実験条件の場合のような垂直上向流に対しては、普通、Fig. 4.1に示すように4つに大別される。気泡流 (Bubbly Flow) は微少な気泡が流体とほぼ均質に混合して流れる場合で、このときには单相流に対する取扱いを外挿することができる。ところが、スラグ流 (Slug Flow) あるいはフロス流 (Froth Flow) になると気液が交互に通過するので、センサーがこの時間平均値を与えるような十分に良好な応答をする範囲内では、平均流量の測定に利用することができるが、検出部のダンピングが悪かったり、気液の通過周期が検出部の固有周期に近くなったりすると、出力は振動的になり大きな誤差を生ずる可能性があり、さらに、環状流 (Annular Flow) になると、ドラッグディスクが置かれた流路中心部と流路の周辺部とに気液が分離して流れるようになるので平均流量の測定には使用できなくなると思われる。

流動様式は、流路の形状・寸法および流れ方向 (水平、垂直等) が与えられれば、気相および液相の流量の関係によってほぼ決まった形となるため、種々のいわゆるマップ (Flow-pattern map) が提案されている。ただし、流動様式の判定は視察によるため、個人差がかなり入るので著者により大きな差があるが、ここでは本実験の条件に近い条件に対し作成された世古¹²⁾口らのマップを使用し、流動様式と流量計の指示の関係を検討することとする。Fig. 4.2 は世古口らの実験にもとづくマップである。これは室温・大気圧条件下の空気・水素の垂直上向二相流に対するもので、縦軸、横軸の W_{e0} 、 W_{g0} はそれぞれ液相および気相が単独で流路を流れたとした時の仮想的な流速である。実験条件が本実験の場合とほぼ同一であり、流路径もほぼ同じ範囲であるので、直接適用することができる数少ないマップのうちの1つである。

本実験では、流路管に炉内実験で用いるものと同じのジルカロイ管を使用したため、燃料部での流動状態から計測部での流動様式を推定する。Fig. 4.3-a, Fig. 4.3-b はそれぞれ空気流量が 1.0 l/min および 8.0 l/min の場合の出口部の写真である。これから、空気流量が小さい場合 (1.0 l/min) には水の流量を上げるに伴ってスラグ流 (a-1, a-2) から気泡流 (a-3, a-4) へと変化してゆき、また、空気流量を増し 8.0 l/min とした場合には、水

流量の増加に従ってフロス流 (b-1 ~ b-3) から気泡流 (b-4) へと変化することがわかる。

Fig. 4.4 は、Fig. 4.2 に示したマップを本実験の範囲に対して書き直しこの中に Fig. 4.3 に示した写真からの判断による流動様式を書き込んだものである。この比較から、本実験の結果はマップの $d = 16\text{mm}$ に対する領域分けにほぼ一致する。本実験の流路管の内径が 16mm 、流量計の内径が 14mm であることを考えれば、この一致はいわば当然の結果であるとも言えるが、これによって Fig. 4.2 のマップが本実験条件に適用できることが確認された事になる。

そこで、流動様式と流量計の指示との関係を知るために $d = 16\text{mm}$ の場合のマップと Fig. 3.5 に示した流量計の測定結果とを重ねてみると Fig. 4.5 のようになる。この図から、水の流量が少い場合には流量計の指示と流動様式と間には比較的はっきりした関係のあることがわかる。即ち、水流量が 2 l/min および 3 l/min の場合、出口流量計の指示はスラグ流領域では空気流量の増加と共に増大するが、フロス流領域に入ると逆に減少し始める。この現象の明確な解釈はまだ出来ていないが、おそらく、スラグ流状態では気・液両相がプラグ状になって交互に通過するため、流量計の指示は平均流量を表わすが、フロス流になると、気液界面の乱れが流量計の指示を不安定にし、かつドラッグディスクが占める流路の中央部分に気泡が集まり中央部分のモーメントフラックスが低下するためであろうと考えられる。このほか、流量計の上流に置いた振動板型密度計による影響、あるいは、ドラッグディスクの応答特性や固有振動数との関連なども考えられるが、まだ明らかではない。このような現象は水流量が 5 l/min 以上になるとあまり明瞭には現れなくなる。水流量 7 l/min の場合では、スラグ流領域で、空気流量増加に対する出口流量計の指示の増加が著しいのに対し、フロス流領域ではあまり大きな増加を示さないといった程度の差しか現れなくなる。さらに水流量が大きい場合には、気泡流とフロス流の境界があるが、この境界前後での指示の差は、少くとも Fig. 4.5 のような計測量そのもののプロットでは判然としない。

4.2 ボイド率の評価

流路出口におけるボイド率は、密度計により直接測定できるが、同時に入口および出口の流量計の指示からも評価できる。そこで、この二つの方法で評価されたボイド率を比較し、さらに、従来良く使用されているボイド率評価式による計算結果と比較検討することによって、密度計および出口流量計によるボイド率測定精度の評価をし問題点を摘出する。

4.2.1 ボイド率の計算式

密度計および出・入口流量計からの出力からボイド率を求めるための計算式を Fig. 4.6 に示すスリップモデルに基づく二相流の基礎式から導出する。式で使用する変数または定数を次の記号で表わす。

$$\begin{aligned} Q_L &= \text{液体容積流量} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \\ Q_G &= \text{気体容積流量} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \\ A &= \text{管路断面積} \quad (\text{m}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{\ell i} &= \text{入口液体流路断面積} \quad (\text{m}^2) \\
A_{\ell e} &= \text{出口液体流路断面積} \quad (\text{m}^2) \\
A_{g i} &= \text{入口気体流路断面積} \quad (\text{m}^2) \\
A_{g e} &= \text{出口気体流路断面積} \quad (\text{m}^2) \\
u_{\ell i} &= \text{入口液体流速} \quad (\text{m/s}) \\
u_{\ell e} &= \text{出口液体流速} \quad (\text{m/s}) \\
u_{g i} &= \text{入口気体流速} \quad (\text{m/s}) \\
u_{g e} &= \text{出口気体流速} \quad (\text{m/s}) \\
\gamma_{\ell} &= \text{液体の比重量} \quad (\text{kg/m}^3) \\
\gamma_g &= \text{気体の比重量} \quad (\text{kg/m}^3) \\
g &= \text{重力の加速度} \quad (\text{m/s}^2)
\end{aligned}$$

まず、容積流量および断面積の関係は連続の条件から次のようになる。

$$Q_{\ell} = A_{\ell i} u_{\ell i} = A_{\ell e} u_{\ell e} \quad \dots\dots (4.1)$$

$$Q_g = A_{g i} u_{g i} = A_{g e} u_{g e} \quad \dots\dots (4.2)$$

$$A = A_{\ell i} = A_{\ell e} + A_{g e} \quad \dots\dots (4.3)$$

また、二相流の乾き度 (クオリティー) X , 気体容積流量割合 β および出口での気液速度比 (スリップ比) S は次のように定義される。

$$X \equiv \frac{\gamma_g Q_g}{\gamma_g Q_g + \gamma_{\ell} Q_{\ell}} \quad \dots\dots (4.4)$$

$$\beta \equiv \frac{Q_g}{Q_g + Q_{\ell}} \quad \dots\dots (4.5)$$

$$S \equiv \frac{u_{g e}}{u_{\ell e}} \quad \dots\dots (4.6)$$

以上の関係を用いると流路出口でのボイド率 α は次のように与えられる。

$$\begin{aligned}
\alpha &\equiv \frac{A_{g e}}{A} \\
&= \frac{Q_g}{Q_g + Q_{\ell} S} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma_g}{\gamma_{\ell}} \left(\frac{1}{X} - 1 \right) S} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) S}
\end{aligned} \quad \dots\dots (4.7)$$

また、質量の釣合条件式は、 α を用いて次のように表わすことができる。

$$\gamma_g A_{\ell i} u_{\ell i} + \gamma_g A_{g i} u_{g i} = \{ \gamma_{\ell} u_{\ell e} (1 - \alpha) + \gamma_g u_{g e} \alpha \} A \quad \dots\dots (4.8)$$

さて、密度計で測られる二相流の平均比重量 γ_m (kg/m^3) は

$$\gamma_m = \frac{\gamma_\ell A_{\ell e} + \gamma_g A_{g e}}{A_{\ell e} + A_{g e}} = \frac{\gamma_\ell Q_\ell S + \gamma_g Q_g}{Q_\ell S + Q_g} \quad \dots (4.9)$$

であるから、ボイド率 α は(4.10)式より求めることができ、さらに Q_ℓ , Q_g , が既知であれば、式(4.7), (4.9)より導出した(4.11)式からスリップ比 S を求めることができる。

$$\alpha = \frac{\gamma_\ell - \gamma_m}{\gamma_\ell - \gamma_g} \doteq 1 - \frac{\gamma_m}{\gamma_\ell} \quad \dots (4.10)$$

$$S = \frac{\gamma_m - \gamma_g}{\gamma_\ell - \gamma_m} \cdot \frac{Q_g}{Q_\ell} \quad \dots (4.11)$$

一方、ドラッグディスク型流量計については、单相流の場合面積 A_d (m^2)のディスクに作用する力 W (kg)と流速 u (m/s)の関係は流体の比重量を γ (kg/m^3)として次式で与えられる。

$$W = C_d \cdot A_d \frac{\gamma u^2}{2g} \quad (kg) \quad \dots (4.12)$$

ここで C_d は抗力係数であり、ディスクが円板のときレイノルズ数 $Re = 10^3 \sim 10^7$ の範囲ではほぼ1である¹²⁾。 W をドラッグディスクを支持するトルクチューブで検出し、(4.12)式を逆算することにより流速 u , 容積流量 $Q = u \cdot A$ を求めるのが、この流量計の原理である。そこでこの流量計をボイド率 α , 液体, 気体の流速がそれぞれ u_ℓ , u_g (m/s)の均質な気液二相流が通過した場合にはドラッグディスクに働く力 W は

$$W = C_d \cdot A_d \cdot \frac{\gamma_\ell u_\ell^2 (1 - \alpha) + \gamma_g u_g^2 \alpha}{2g} \quad \dots (4.13)$$

となる。この実験で用いられた出口流量計はもともと水の单相流用のものであり密度1の水に対して較正されている。したがって、二相流が通過した時の出力信号, すなわち, みかけの流速 u_m (m/s)は抗力係数 C_d が変化しないとして

$$\begin{aligned} \gamma_\ell u_m^2 &= \gamma_\ell u_\ell^2 (1 - \alpha) + \gamma_g u_g^2 \alpha \\ &= \{ \gamma_\ell (1 - \alpha) + \gamma_g S^2 \alpha \} u_\ell^2 \end{aligned} \quad \dots (4.14)$$

なる関係で与えられることになる。式(4.7), (4.8), (4.14)を連立させれば次の α に関する2次方程式が得られる。

$$\gamma_\ell Q_m^2 \alpha^2 + (\gamma_\ell Q_\ell^2 - \gamma_g Q_g^2 - \gamma_g Q_m^2) \alpha + \gamma_g Q_g^2 = 0 \quad \dots (4.15)$$

ここで, Q_m は見かけの二相流量計測値であり, $Q_m = Au_m$ (m^3/s)である。これを解けば α が求まるが, $\gamma_g Q_g^2$ は他項に比して小さいので省略することができ,

$$\alpha = 1 - \left(\frac{Q_\ell}{Q_m} \right)^2 \quad \dots (4.16)$$

$$r_m = r_l - \alpha (r_l - r_g) \quad \dots (4.17)$$

なる関係が得られる。そこで、これら2式より出口流量計の計測値から、出口部のボイド率と平均密度を求めることができ、さらに空気流量 Q_g が与えられれば、次式によりスリップ比 S を求めることができる。

$$S = \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \frac{Q_g}{Q_l} \quad \dots (4.18)$$

4.2.2 計算結果および他の実験者との比較

上述の計算式(4.10)および(4.11)を用い、密度計の測定値から計算したボイド率 α およびスリップ比 S の結果を空気流量に対してプロットすると Fig. 4.6 および Fig. 4.7 のようになる。ボイド率については、空気流量が増加するに伴って単調に増大し、これは定性的には通常予想される二相流挙動に一致するが、同一空気流量で水の流量を増した場合に通常はボイド率が低下する傾向を持つのにに対し、本プロットにはこの傾向が殆んど見られない点はやゝ異常である。また、スリップ比については、空気・水の上向流の場合、通常スリップ比が1以上の値をとり、空気流量の増加に対し単調に増大するが、このプロットでは自由対流条件以外は大部分のデータが1以下の値をとり、かつ、空気流量 10~20 ℓ/min で極大値を持つような傾向となっており、測定結果が実際の現象を正しく反映していない事を物語る。

次に、式(4.16)および(4.18)を用い、入口および出口流量計の出口から計算したボイド率およびスリップ比を、同じく空気流量に対してプロットすると Fig. 4.9 および Fig. 4.10 のようになる。ボイド率については、空気流量が約 10 ℓ/min 以下の場合には、空気流量の増大と共に増大し、かつ、水流量の増大と共に減少し、定性的に通常予想される二相流挙動に良く一致する。しかし、空気流量が 10 ℓ/min 以上で、初期水流量が 0 および 3 ℓ/min の場合には、空気流量の増加に伴ってボイド率が一度低下し再び上昇するという異常な挙動を示す。このような異常な測定結果が出る条件は、前節のフローパターンに関する検討の所で述べた、フローパターンがスラグ流からフロス流へと変化するのに対応して、出口流量計の指示が一度低下する現象が見れる条件に一致しており、このような条件下では、ドラッグディスク式流量計は正確な測定値を与えていないものと考えられる。一方、スリップ比のプロットについても初期の水流量が小さい場合には異常な値となっており、特に Run 2 ではスリップ比が極端に大きな値となっている。

以上の結果から、密度計はあまり正確な計測値を与えない事、および出入口流量計からの評価は、水流量が 3 ℓ/min 以下では問題があるが、これ以上の水流量の場合に対しては比較的良好な結果を与えそうである事がわかる。そこで、より定量的に評価するために、垂直上昇流に対する実験結果に基づいて作成された井上・青木らの式¹³⁾を参照値として比較を行ってみる。

井上・青木らはスリップ比 S を次式で表わしている。

$$S = 1 + 0.025 \left(\frac{r_l}{r_g} \right)^{0.46} \left(\frac{w_{go}}{w_{lo}} \right)^{0.75} \quad \dots (4.19)$$

ただし w_{go} , w_{lo} は気相および液相がそれぞれ単独で流路を満して流れたとした時の仮想的な流速であり、その比は容積流量の比に等しくなり

$$\frac{w_{go}}{w_{lo}} = \frac{Q_g}{Q_l} \quad \dots\dots (4.20)$$

となる。したがって (4.19) 式は

$$S = 1 + 0.025 \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right)^{0.46} \left(\frac{Q_g}{Q_l} \right)^{0.75} \quad \dots\dots (4.21)$$

となり、各実験点に対応した Q_g と Q_l の組合せに対してスリップ比 S が求められる。 S が分れば、ボイド率 α は (4.7) 式により求めることができる。

Fig. 4.10 は、初期水流量が $3 \ell/\text{min}$, $6 \ell/\text{min}$ および $12 \ell/\text{min}$ の場合に対して、実験点に対応する Q_g と Q_l の組合せから (4.21) 式および (4.7) 式を用いて計算したスリップ比およびボイド率の値を空気流量に対してプロットし、これと、既に Fig. 4.7 および Fig. 4.9 に示した測定結果とを比較して示したものである。この比較から、上述の定性的な結論はさらに明確になり、井上・青木の式を基準として、次のような事がわかってくる。すなわち、密度計出力から得られた値については、垂直上昇流については1以上でなければならないスリップ比が1以下の極端に小さい、値となっており、またボイド率は約50%も高い値を示している。測定値は大きな誤差を含んでいること。一方、流量計出力からの評価は初期流量が $3 \ell/\text{min}$ のときは井上・青木の式の関係からのずれは大きい、それ以上の初期流量の場合には良好な一致がみられ、特にボイド率については10%以内の差で一致しており、十分に実用になる結果であることがわかる。

そこで、より一般的に測定結果の評価を行うため、測定結果を容積流量比とボイド率との関係の形に整理をし、これを上述の井上・青木の式その他、Nicklinらの式および Bankoff の式との比較を行ってみる。

(1) 井上・青木の式

空気・水二相流実験結果から得られた、上述の (4.19) 式から、気体容積流量割合 β とボイド率 α の関係として次式が導かれる。

$$\alpha = \frac{1}{1 + 0.025 (\gamma_l / \gamma_g)^{0.46} \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)^{0.25} + \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)} \quad \dots\dots (4.22)$$

(2) Nicklin らの式¹⁴⁾

スラグ流状態の気相の上昇速度 u_g として次式を与えている。

$$u_g = 1.2 \left(\frac{Q_l + Q_g}{A} \right) + 0.35 (gD)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots (4.23)$$

ただし D は管径 (m)

これに

$$u_g = \frac{Q_g}{A\alpha} \quad \dots\dots (4.24)$$

の関係を代入すると

$$\alpha = \frac{Q_g}{1.2(Q_\ell + Q_g) + 0.35(gD)^{\frac{1}{2}}A} \quad \dots\dots (4.25)$$

気液の流量が大きい時にはこの式の分母の第2項は第1項に対して無視できるので、(4.25)式は

$$\alpha = \frac{Q_g}{1.2(Q_\ell + Q_g)} \doteq 0.834\beta \quad \dots\dots (4.26)$$

となり、 α が β と比例関係にあるという簡単な式で表わされる。

(3) Bankoffの式¹⁵⁾

気相と液相が別々に一様速度で流れるという分離流モデル(スリップモデル)に対し、管路内の速度分布とボイド率分布を考慮して導出された算出方法である。このモデルによれば、局所的には気液間に相対速度がなくても、全体的には相対速度があるのと同様になり、平均ボイド率 α は気体容積流量割合 β の値と異なってくる。このため、ボイド率 α を

$$\alpha = K\beta \quad \dots\dots (4.27)$$

で表わし、flow parameter と呼ばれる特性値Kを、速度分布形とボイド分布形から定める形になっている。Bankoffによれば、 $K \doteq 0.6 \sim 0.9$ 程度であって、圧力が160 ataの場合に $K = 0.89$ が多くの実験値と一致するとされているが、Kの値は他の研究者によって一般化がされており、その1つとして、Kの値を圧力のみ関数として次式で表わすことが提案されている¹⁶⁾。

$$K = 0.71 + 0.00143P \quad \dots\dots (4.28)$$

(P : ata)

ここでは(4.28)式より、 $P = 1 \text{ ata}$ に対する $K = 0.711$ を用いる。

Fig. 4.11 および Fig. 4.12は、それぞれ密度計出力から得られた測定値および流量計出力から得られた測定値を α と β の関係としてプロットし、これらを上述の3つの式による計算結果と比べてみたものである。

まず、密度計出力からのデータについては、いずれの計算式からの結果とも一致せず、さらに、大部分のデータが $S = 1.0$ の直線の上方になっており、現象的にも垂直上昇流では考えられない結果となっている。したがって密度計については、ボイドの検出だけであれば有用ではあるが、定量的なデータを得るには今後改良が必要である。一方、流量計出力からのデータはFig. 4.12に示されるように $Q_\ell \geq 6 \text{ l/min}$ の場合についてはいずれの計算式の結果とも良い一致を示し、とりわけ Nicklinの式は非常に良好な一致を示している。4.1で述べたように本実験の場合の二相流の流動様式は大部分がスラグ流あるいはフロスの範

囲にあり、スラグ流モデルに基いた Nicklin の式との一致が最も良いことは妥当な結果だと言することができる。したがって、ドラッグディスク型流量計による二相流の計測は、水の流量が小さい場合の計測に対しては改良が必要であるが、水流量が或る程度以上であれば十分に実用になることが確認された。

4.3 炉内実験におけるボイド挙動の測定について

これまで述べてきた炉外実験の結果にもとづいて、炉内実験においてどのようにボイド挙動を評価すべきかを検討する。

ただし本実験のように、流路の入口および出口に取付けたセンサーで測定する場合には、流路内で発生したボイドの積分値の情報に限られるので、ここで対象とするボイド挙動はあくまで、流路内の平均的なボイド発生挙動となる。さらに、冷却材がサブクール状態である場合には、流路内での蒸気泡の凝縮を考慮しなければならず、計測値は凝縮による減少分を差引いたものとなる。特に NSRR 実験では大部分の実験が大サブクール条件で行われており、この場合には、蒸気は流路内で殆んど凝縮してしまい、流路出口に到達するのは非凝縮性気体、すなわち、ジルコニウム・水反応で生じた水素気泡だけと考えられる。

以上の条件を考慮した上で、ボイド挙動評価のために求めるべき量は、流路出口でのボイド率 α 、スリップ比 S および気体容積流量 Q_g である。このうち、いずれか 2 つの量が分れば他は求めることができるので、実際には、このうちの 2 つの量を決定すれば良い。

まず、ボイド率 α については、密度計が正確な平均密度を与えるならば、(4.10)式により直ちにボイド率を得ることができる。しかし、現状ではこの方法が使えないので、入口および出口流量計の指示から、(4.16)式を用いて評価する方法によらなければならない。この方法では、初期流量が小さい範囲では多少問題は残るが、この点を除けば比較的良好な結果が期待できる。

次に、スリップ比 S あるいは容積流量 Q_g であるが、これらは、出入口のセンサー出力からだけでは評価できない。そこで、Fig. 3.4 あるいは Fig. 3.5 に示す空気流量と入口流量の低下の関係を用いて評価する事を考える。すなわち、インパイル実験においても、同様の特性を持つ循環流路およびポンプの組合せで行い、かつ、ポンプを定電圧駆動とする条件で実験を行えば、流路内でのボイド発生量と入口流量との関係は、Fig. 3.4 あるいは Fig. 3.5 に示す実線からあまり変わらない軌路をたどるはずであるので、インパイル実験において初期流量からの流量低下分から気体発生量を逆算すれば良い。図に示されるように、入口流量の変化は空気流量の増加によって単調に減少し、かつ、この特性は空気流量の増減に対してヒステリシス特性は持たず、良好な測定結果が期待できる。また、Fig. 3.7 に示した密度計の出力と気体容積流量の関係を用いるのも、1つの別法として考えられる。すなわち、現設計の密度計は気体容積流量に対し単調減少の関係を示し、かつ、液体の容積流量にあまり依存しない特性を持っているので、これを逆に利用すれば、密度計を気体流量計のように用いて Q_g を求めることが可能である。この方法では Q_g の大きい場合にかなりの誤差が生じることは避けられないが、参考データとしては十分用いることができるであろう。

以上のようにして、 α および Q_g を評価すれば、スリップ比 S も求まり、流路内での平均的なボイド発生挙動を知ることができる。また、実験後のカプセルのプレナム部のガス分析により水素ガス生成量を評価すれば、発生ボイドのうちの水素ガスの寄与分を評価することも可能であろう。以上の知見から、過渡的なボイド発生が被覆材表面での伝達挙動や冷却材の流動挙動に及ぼす影響がより明確になるものと期待される。

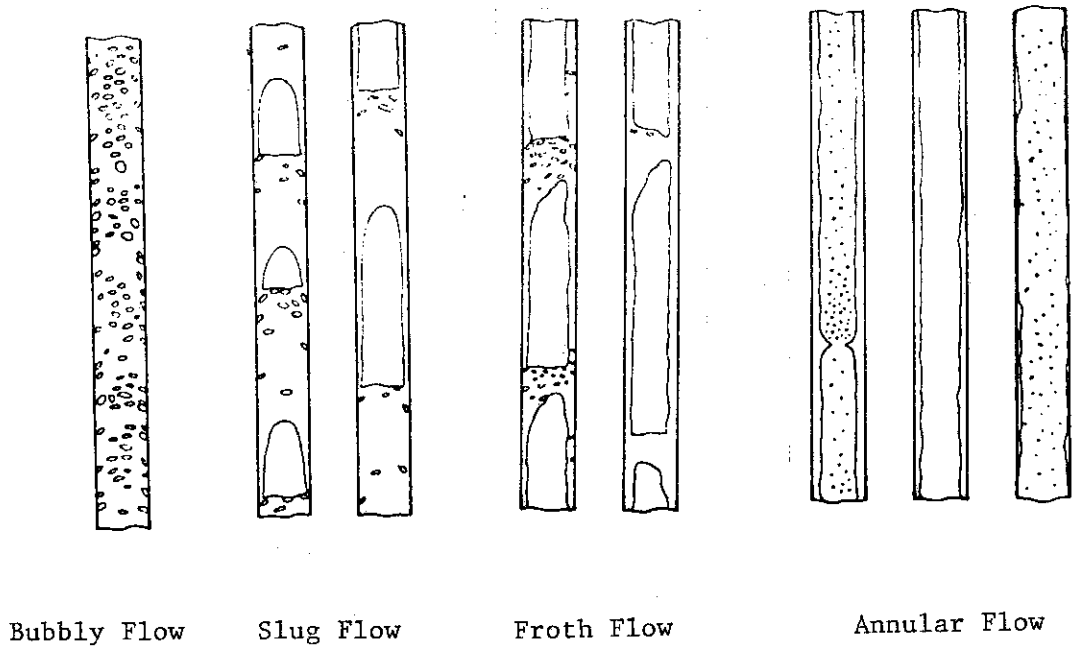


Fig.4.1 Illustration of flow patterns

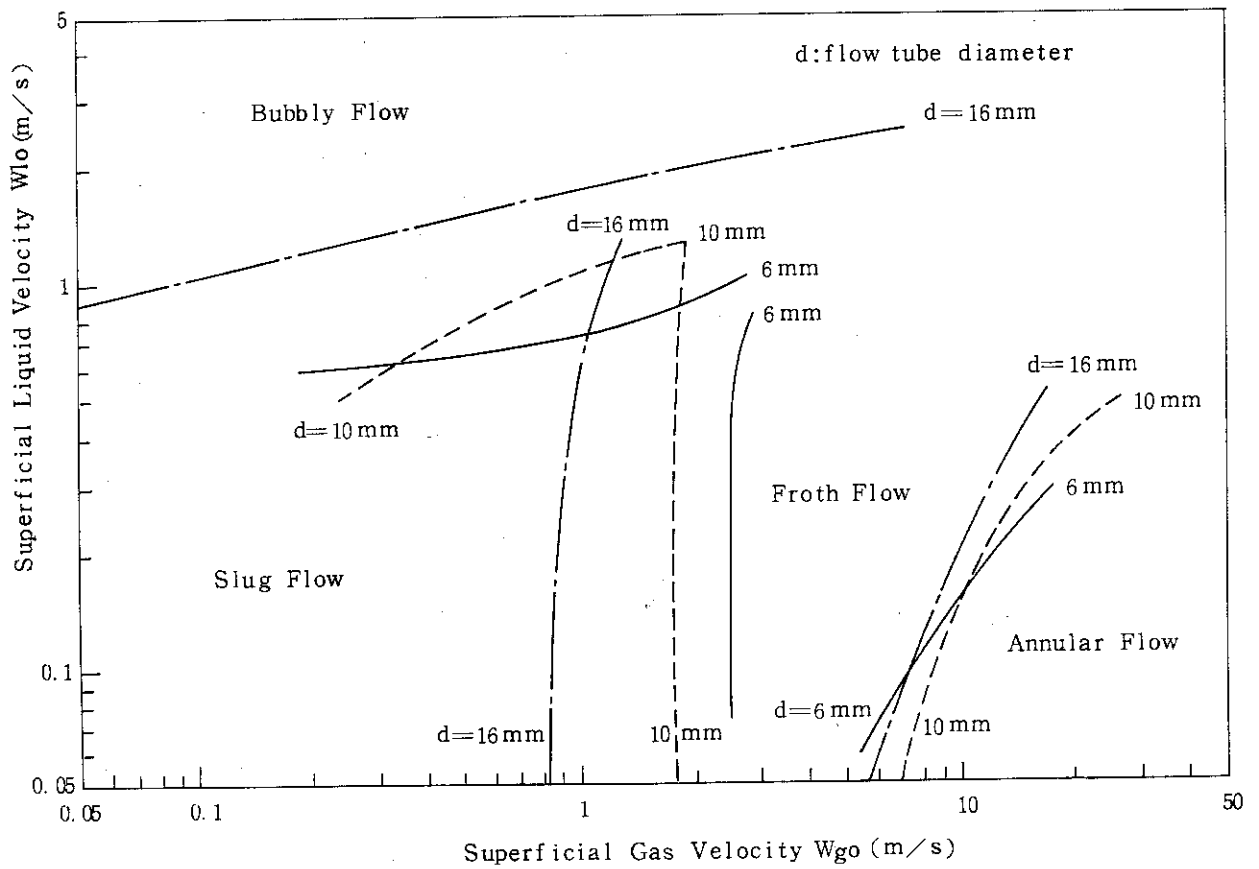


Fig. 4.2 Flow-pattern map for vertical air-water two phase flow (Ref. 12)

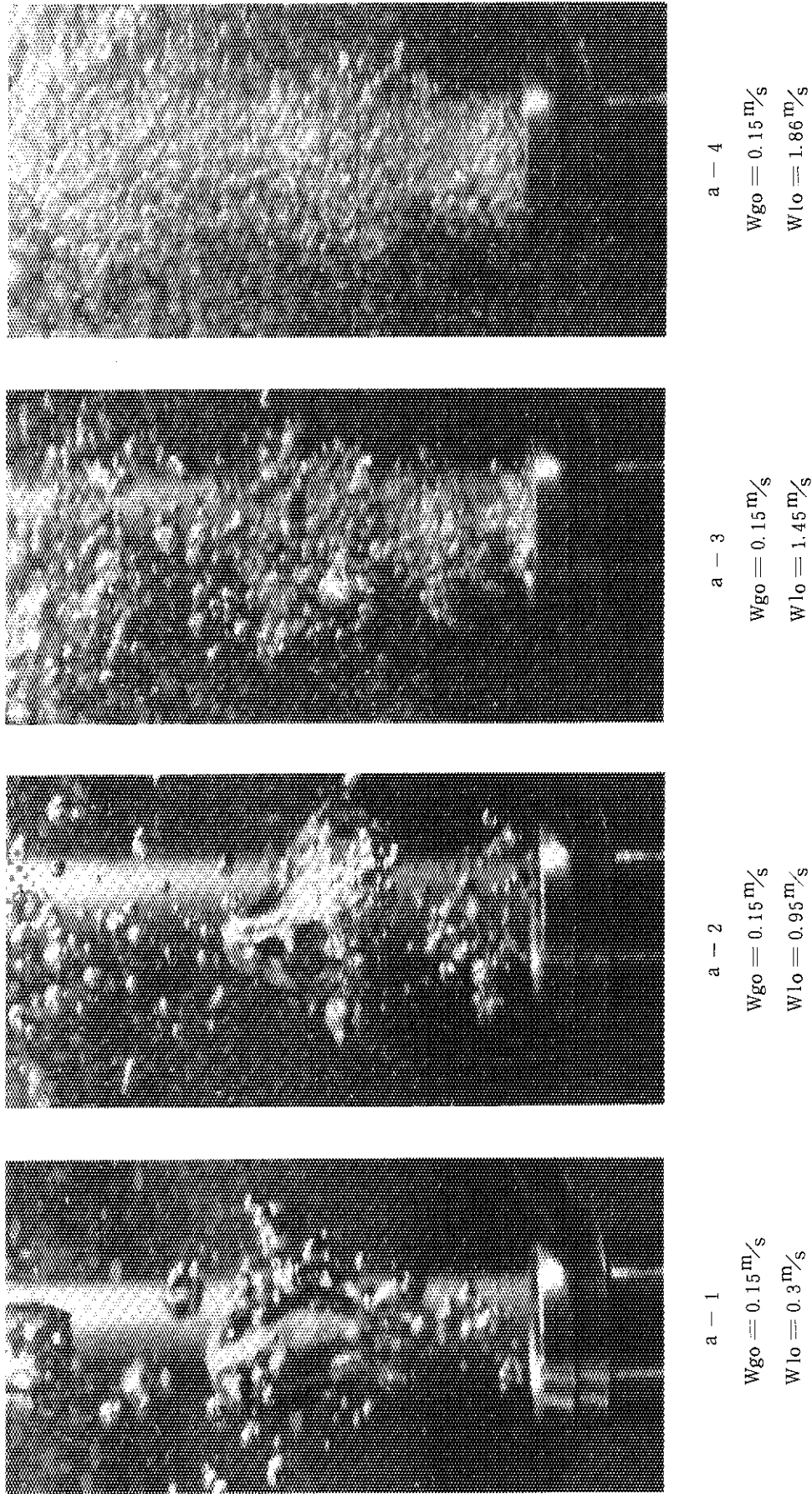
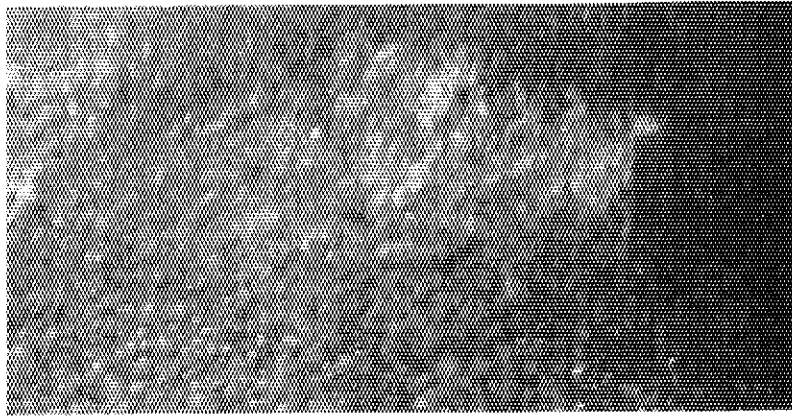
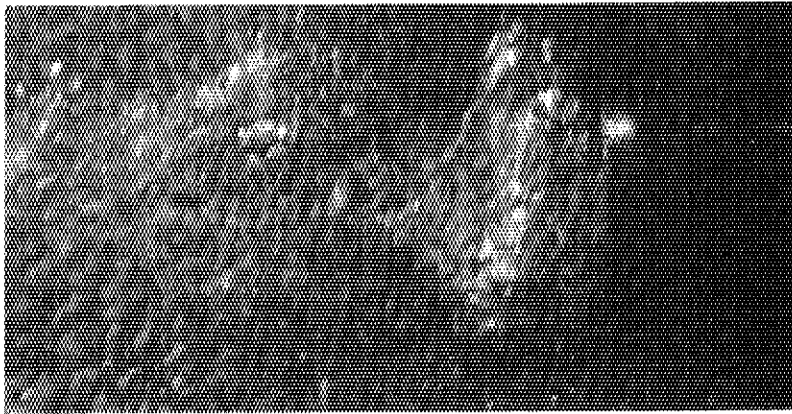


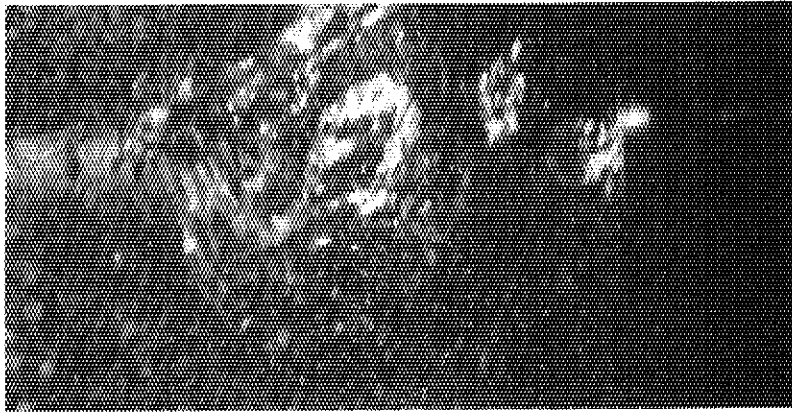
Fig.4.3-a Flow pattern observed at channel exit for the air flow rate of 1.0 l/min



b - 4
 $W_{go} = 1.2 \text{ m/s}$
 $W_{lo} = 1.6 \text{ m/s}$



b - 3
 $W_{go} = 1.2 \text{ m/s}$
 $W_{lo} = 1.3 \text{ m/s}$



b - 2
 $W_{go} = 1.2 \text{ m/s}$
 $W_{lo} = 0.9 \text{ m/s}$



b - 1
 $W_{go} = 1.2 \text{ m/s}$
 $W_{lo} = 0.3 \text{ m/s}$

Fig.4.3-b Flow pattern observed at channel exit for the air flow rate of 8.0 λ/min

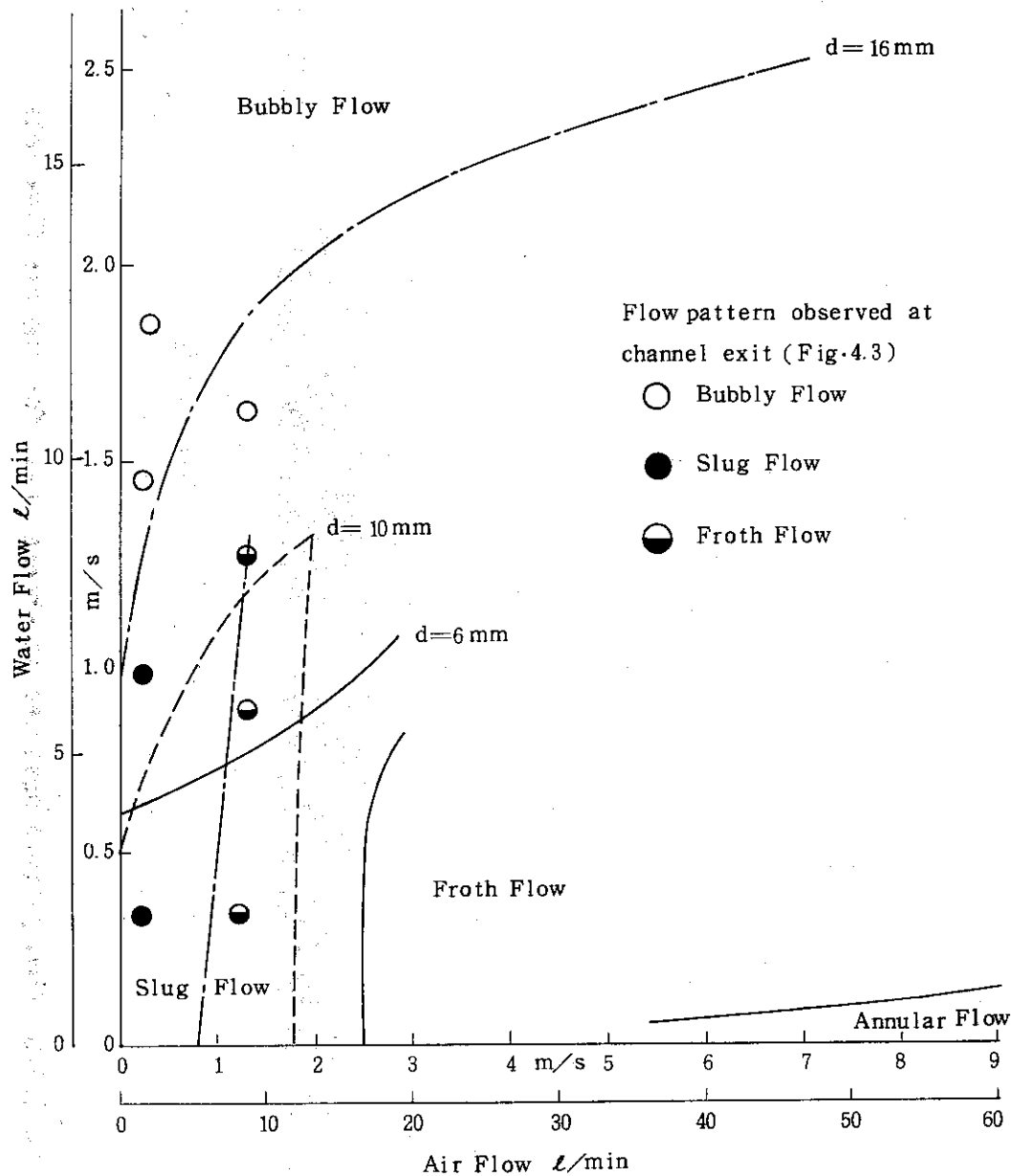


Fig. 4.4 Plotting of flow patterns observed at channel exit on the flow pattern map

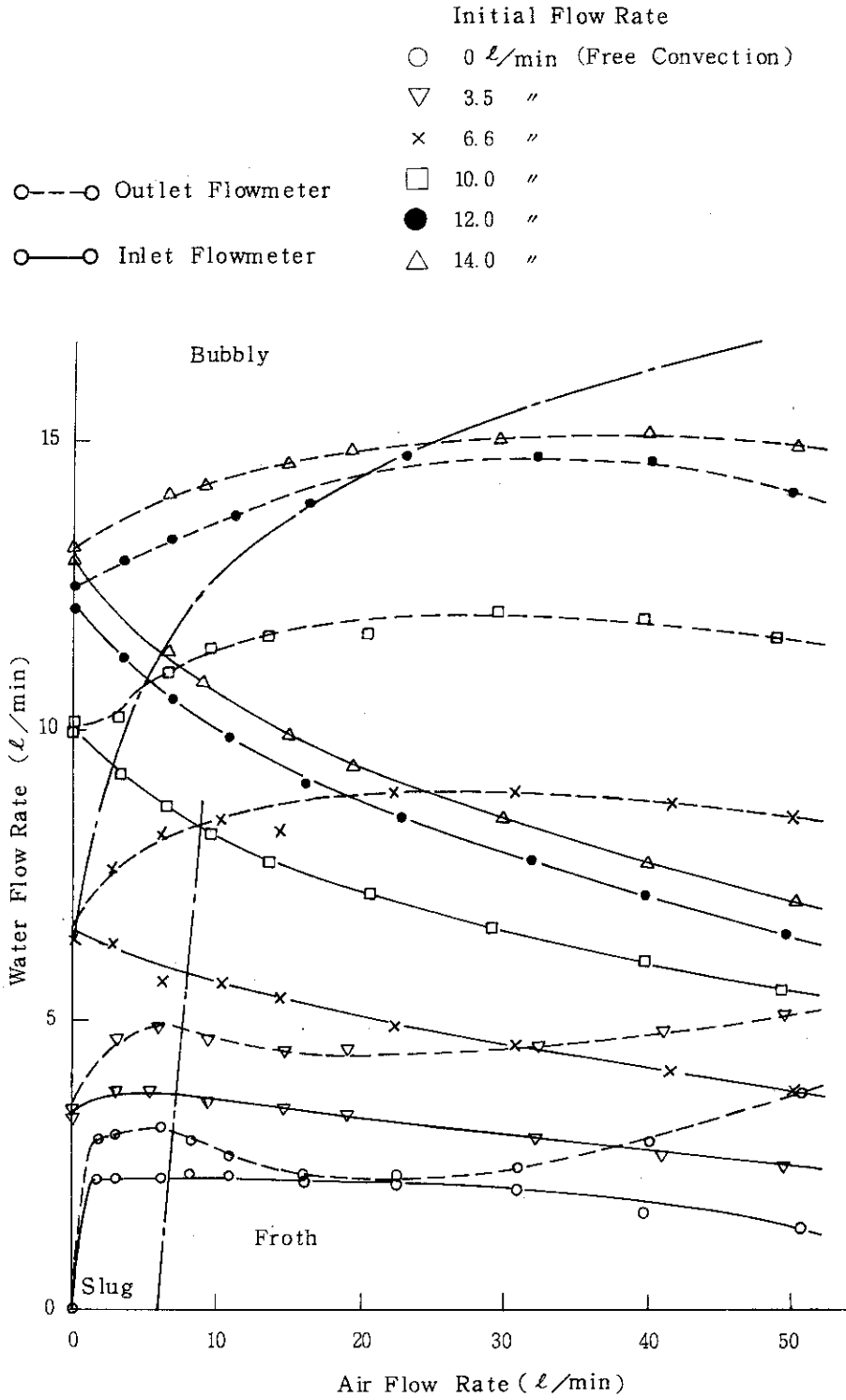


Fig. 4.5 Comparison of flow-pattern and the flow meter out put

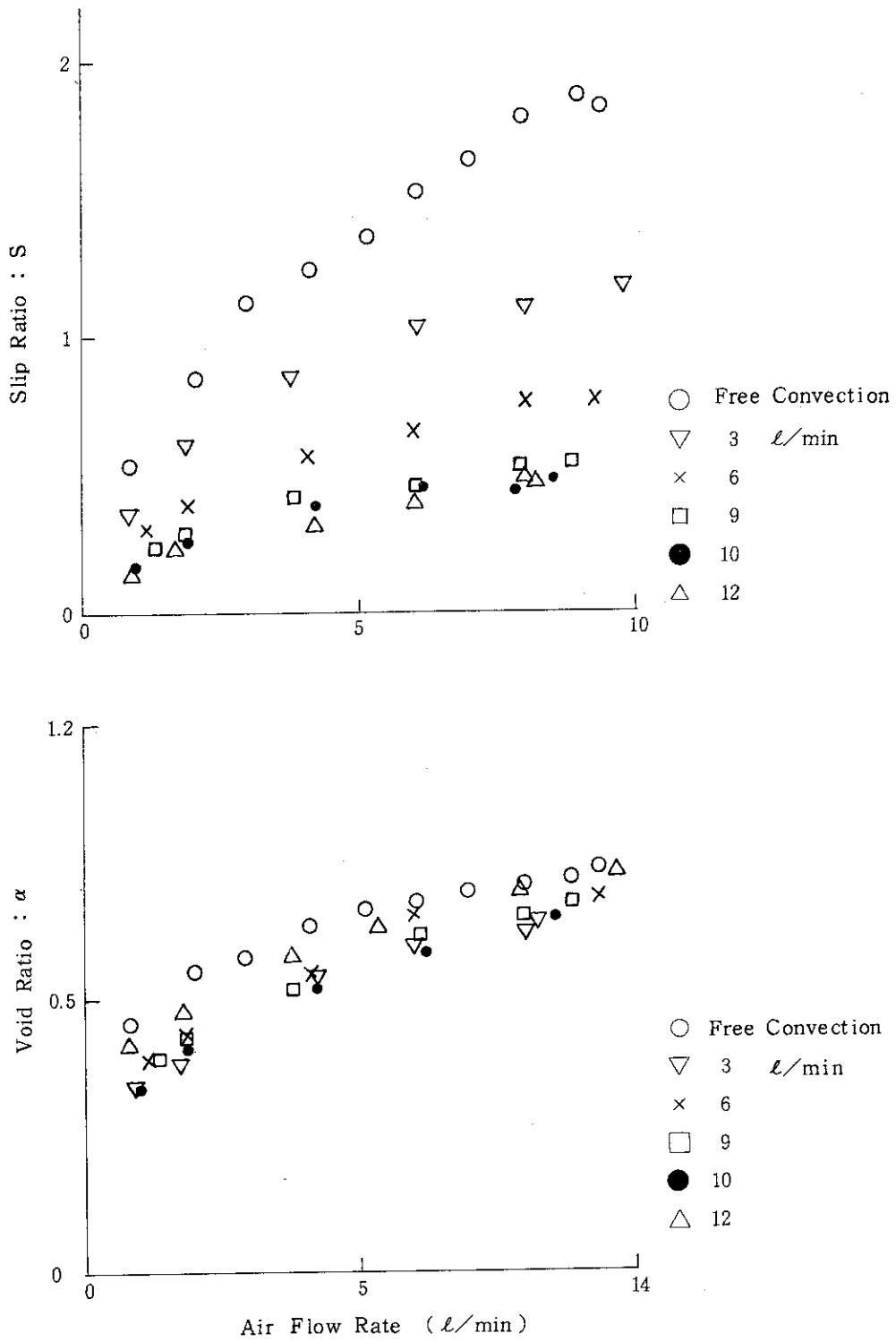


Fig. 4.6 Void ratio α and slip ratio S obtained by densimeter plotted as a function of air flow rate (Run 1)

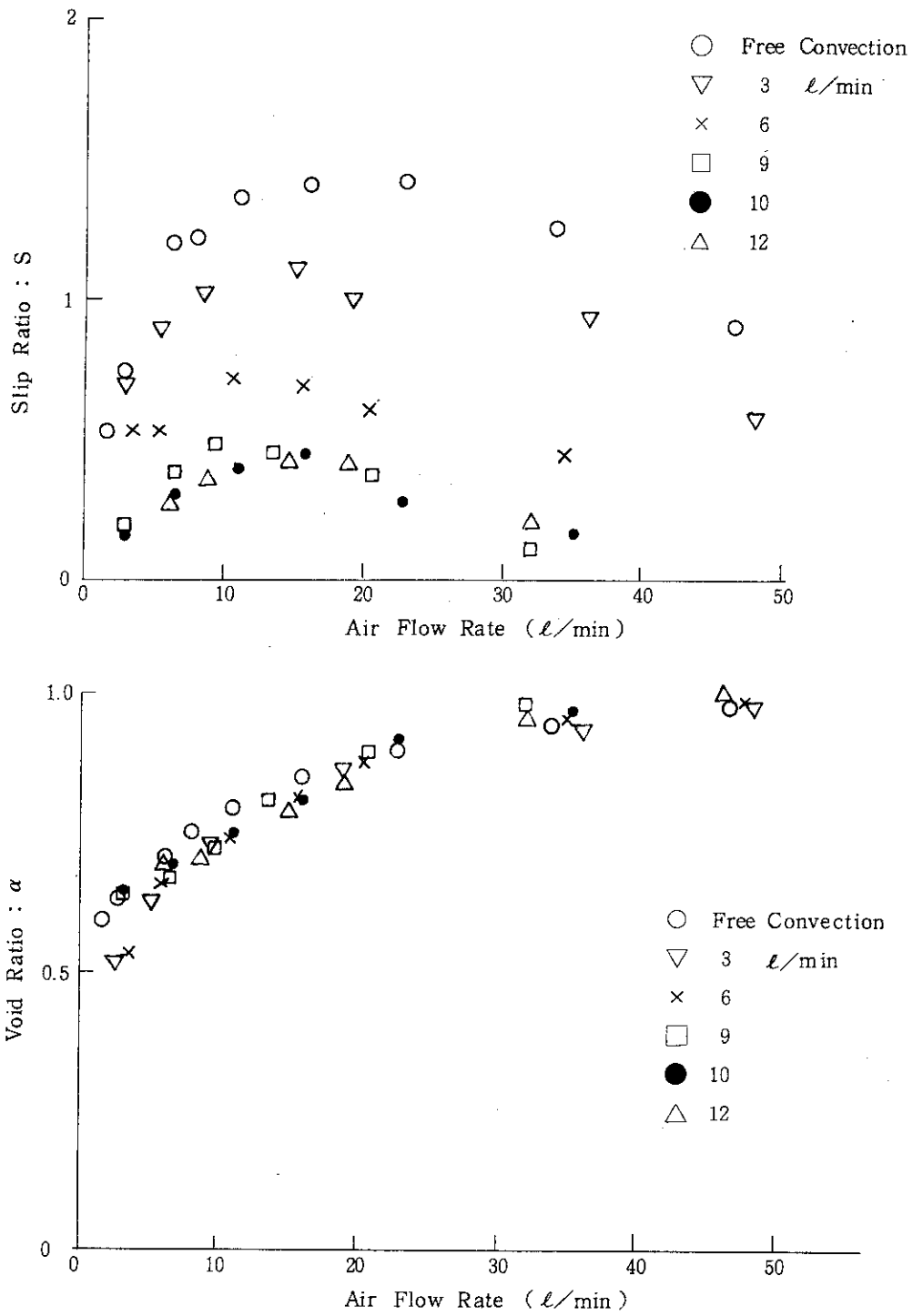


Fig. 4.7 Void ratio α and slip ratio S obtained by densimeter out put plotted as a function of air flow rate (Run 2)

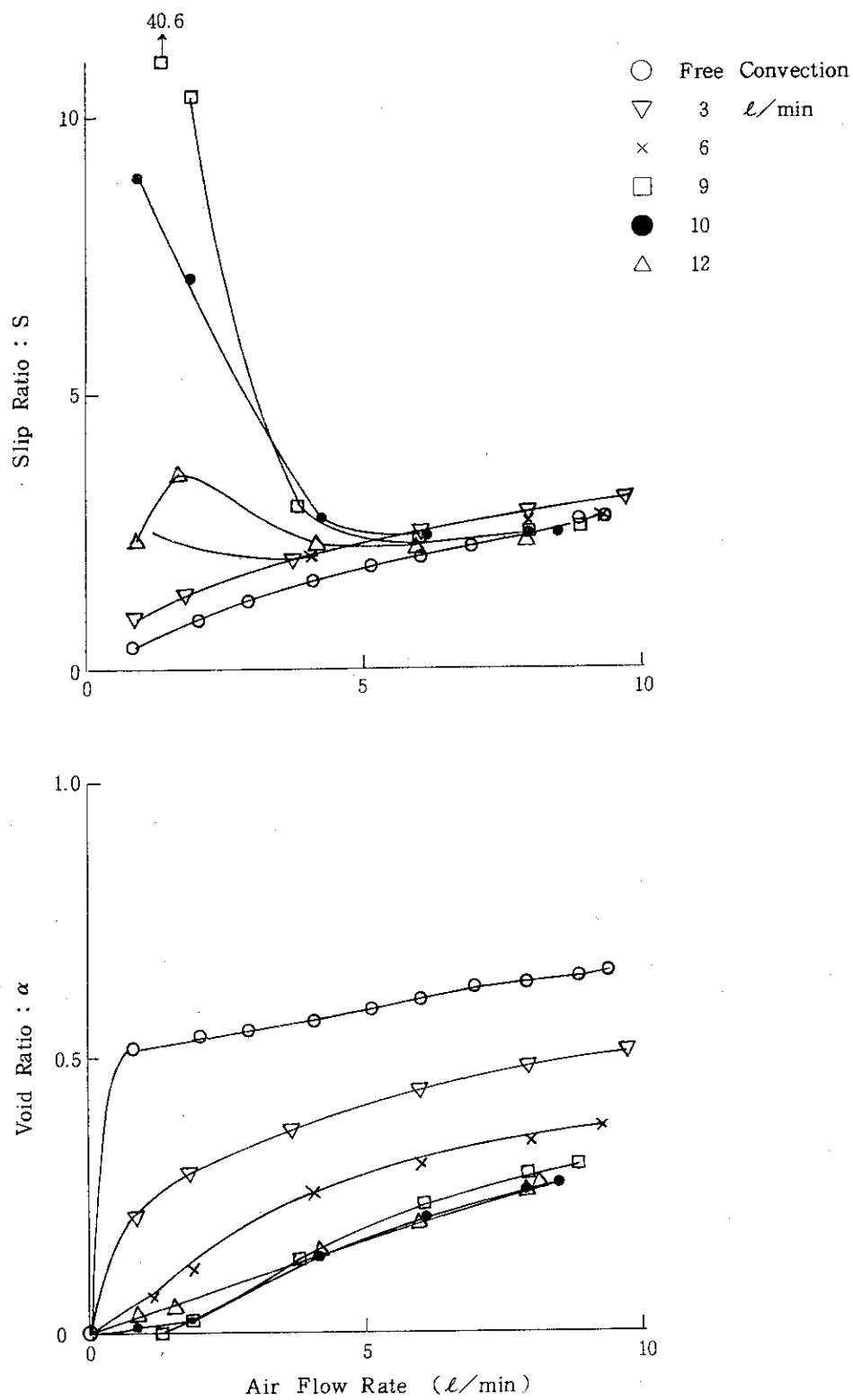


Fig.4.8 Void ratio and slip ratio calculated from the output of drag-disc flow meters plotted as a function of air flow rate (Run 1)

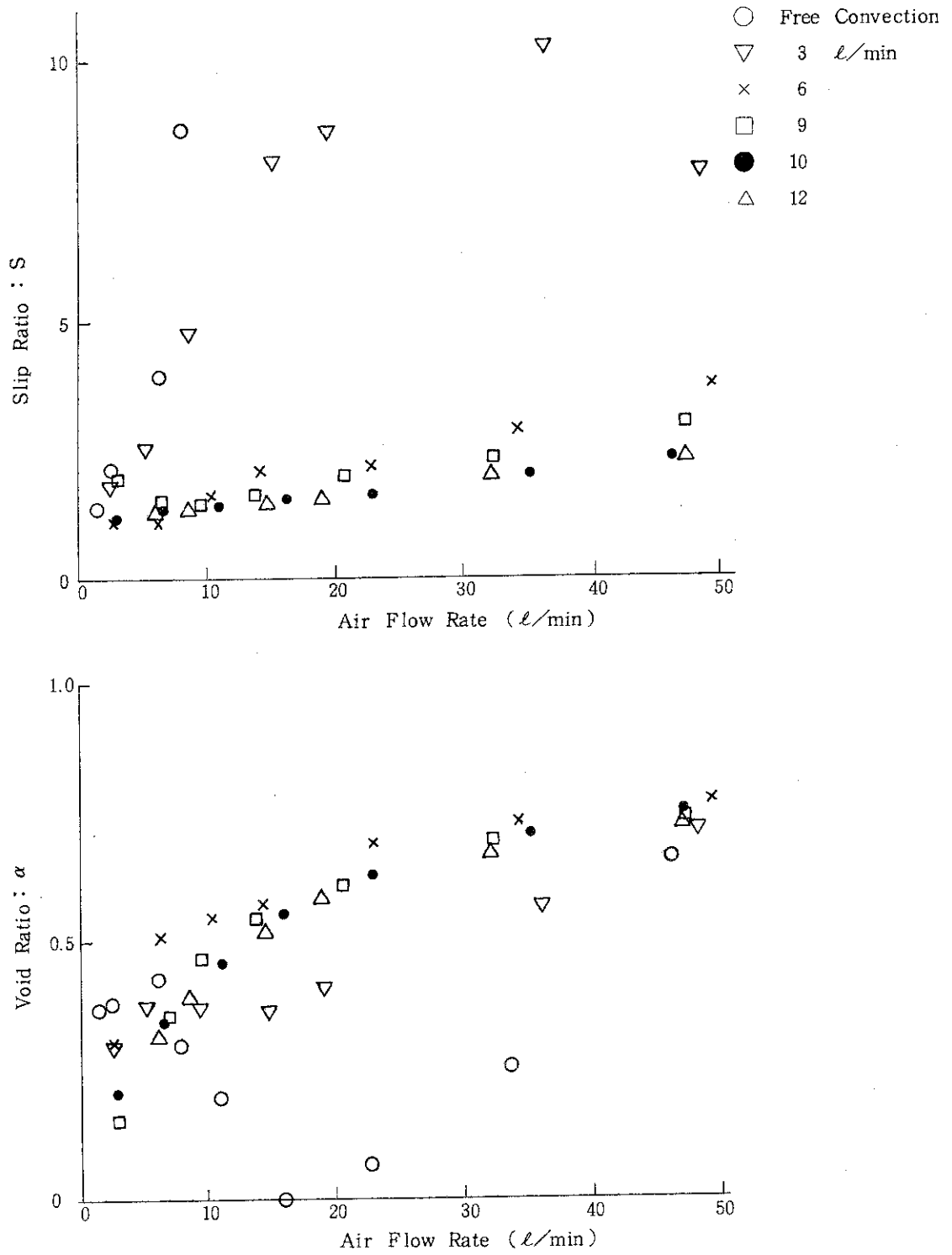


Fig. 4.9 Void ratio and slip ratio calculated from the output of drag-disc type flow meters plotted as a function of air flow rate (Run 2)

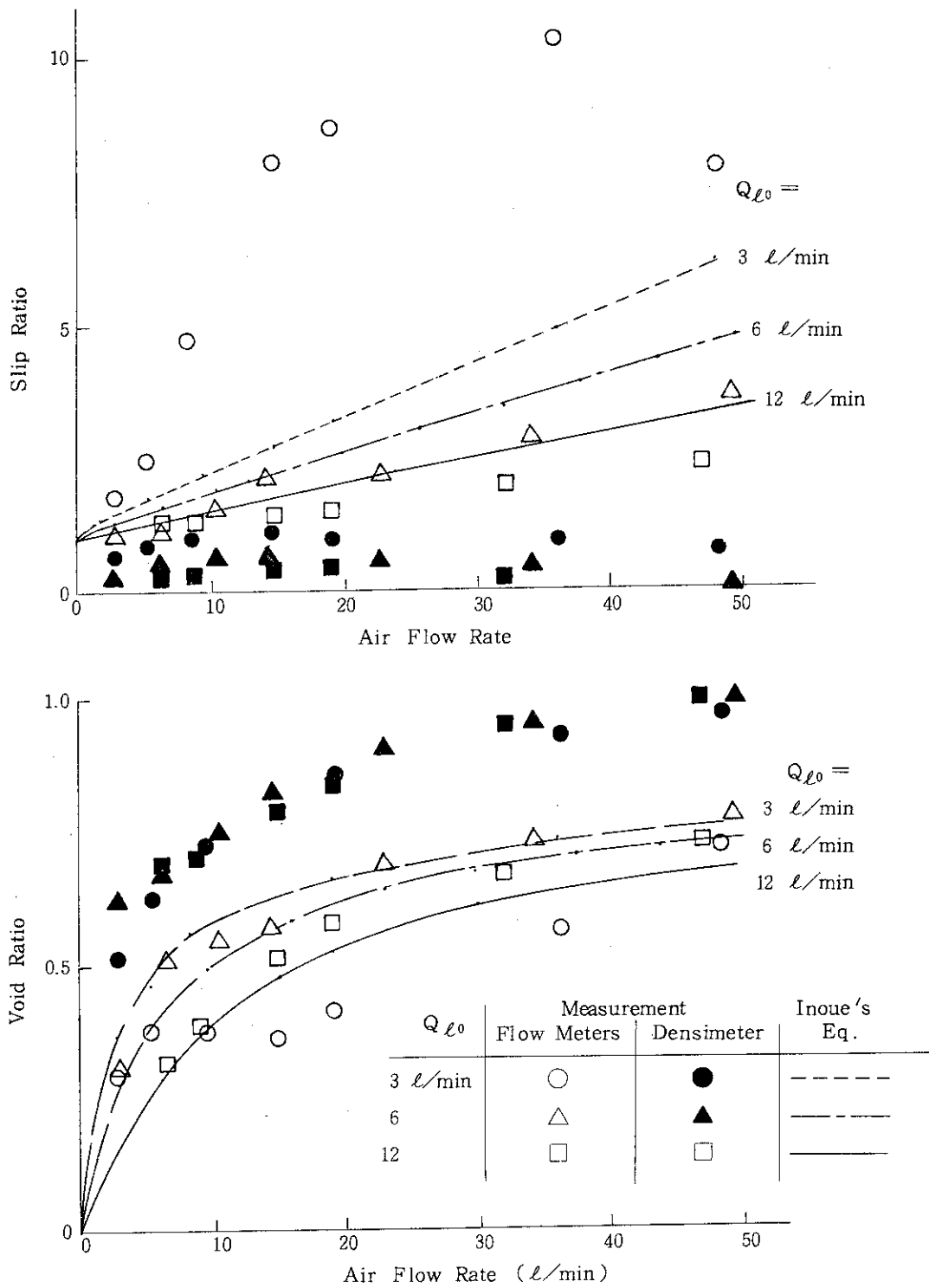


Fig. 4.10 Comparison of slip ratio among measurements by flow meters, those by the densimeter and calculation by Inoue's Eq.

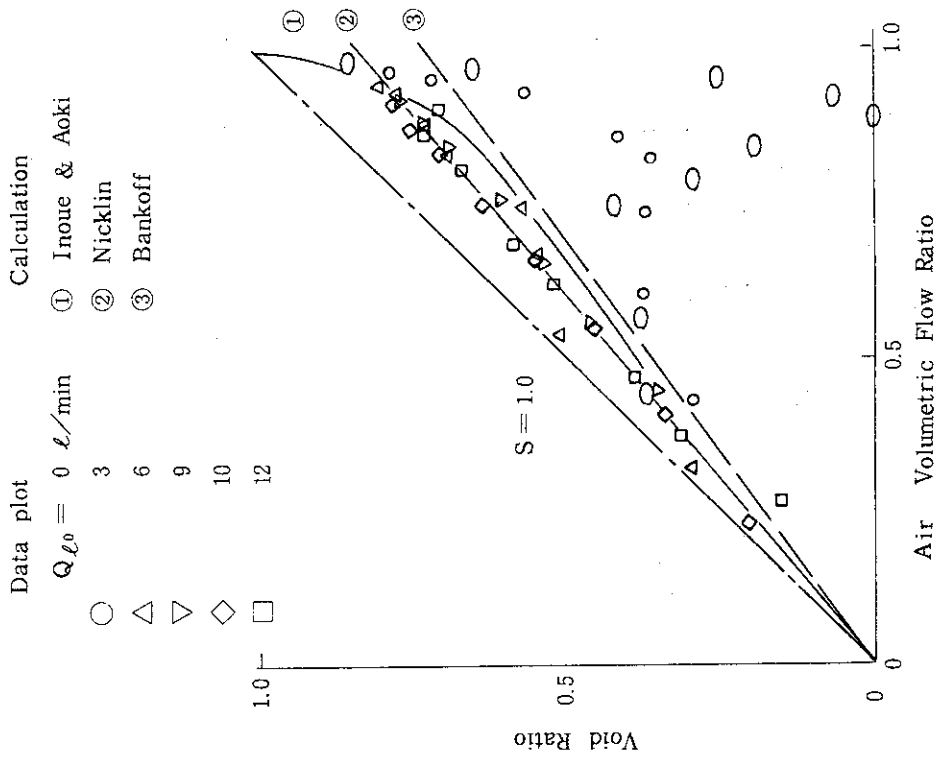


Fig. 4.12 Void ratio vs. air volumetric flow ratio obtained from drag-disc flow meters' out put

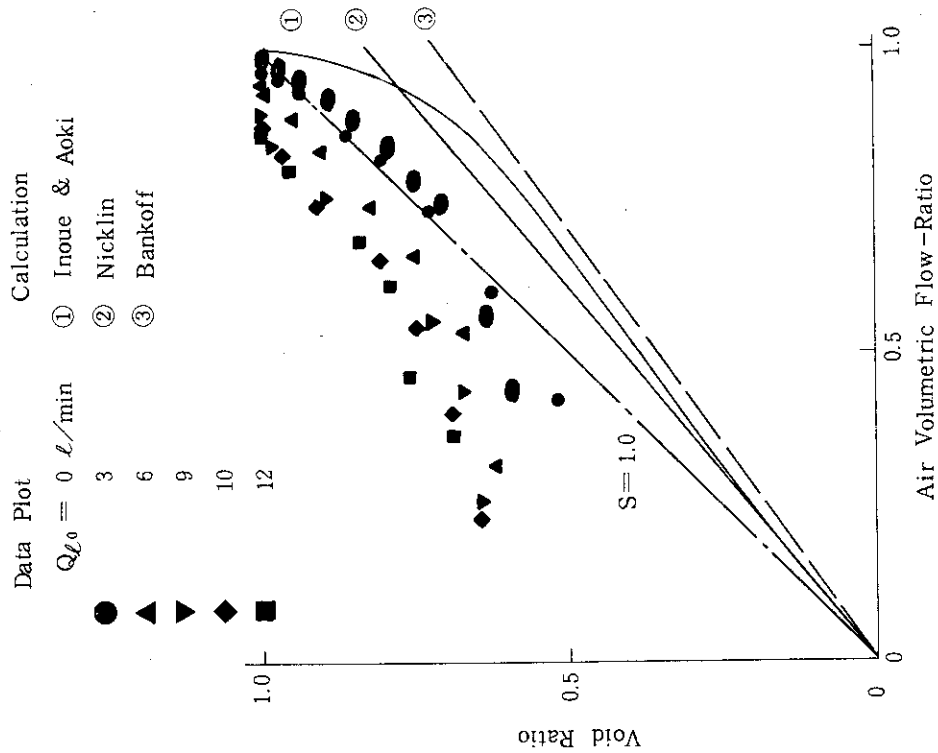


Fig. 4.11 Void ratio vs. air volumetric flow ratio obtained from densimeter out put

5. お わ り に

大気圧カプセルを用いて行う強制対流実験を模擬した炉外モックアップ装置を用い、試験燃料部でのボイド発生を模擬した水・空気二相流計測実験を行った。二相流計測に用いた計測器は、これまで強制対流実験において冷却材入口流量測定に使用してきた单相流用のドラッグディスク流量計と、新たに設計した振動板型の密度計とであるが、いずれも二相流測定では使用経験が無いため、これらの計測器がはたして使用できるかどうかをインパイル実験に先立って確認する事が本実験の目的であった。

本炉外実験で得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) 流路の入口および出口のドラッグディスク型流量計の指示からのボイド率を算定する方法は水の流量が $3\ell/\text{min}$ 以上の場合には十分に実用になり、少くとも、定常条件下ではかなりの測定精度が期待できることがわかった。
- (2) ドラッグディスク型流量計は、水の流量が少なくなった場合には二相流の平均的な運動量に対応した指示をしなくなるので、この点については今後改良を要する。
- (3) 振動板型密度計は指示は安定していたが定量的にはあまり良好な結果が得られなかった。これは、密度計の出力が冷却水流速に影響を受け、かつ、測定点での流速が不明なためこの影響の補正がうまくゆかないことによると思われる。したがって、今後、流速の影響をなくすような改良が必要である。

以上の経験を生かして、今後、ドラッグディスク型流量計については上流に整流格子等を付加して低流量域での特性の改善を図り、また、密度計については振動子の形状等を工夫して流量影響を除去するような改良を施し、以上の改良の結果をみてインパイル実験を実施する予定である。

謝 辞

本実験の実施に当っては、反応度安全研究室小林晋昇氏に御助力いただいた。また、本実験で使用した流量計や密度計の設計、製作においては、製作メーカーのST研究所塩田健氏に御協力を頂いた。以上の諸氏に感謝をいたします。

5. おわりに

大気圧カプセルを用いて行う強制対流実験を模擬した炉外モックアップ装置を用い、試験燃料部でのボイド発生を模擬した水・空気二相流計測実験を行った。二相流計測に用いた計測器は、これまで強制対流実験において冷却材入口流量測定に使用してきた単相流用のドラッグディスク流量計と、新たに設計した振動板型の密度計とであるが、いずれも二相流測定では使用経験が無いため、これらの計測器がはたして使用できるかどうかをインパイル実験に先立って確認する事が本実験の目的であった。

本炉外実験で得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) 流路の入口および出口のドラッグディスク型流量計の指示からのボイド率を算定する方法は水の流量が $3\ell/\text{min}$ 以上の場合は十分に実用になり、少くとも、定常条件下ではかなりの測定精度が期待できることがわかった。
- (2) ドラッグディスク型流量計は、水の流量が少なくなった場合には二相流の平均的な運動量に対応した指示をしなくなるので、この点については今後改良を要する。
- (3) 振動板型密度計は指示は安定していたが定量的にはあまり良好な結果が得られなかった。これは、密度計の出力が冷却水流速に影響を受け、かつ、測定点での流速が不明なためこの影響の補正がうまくゆかないことによると思われる。したがって、今後、流速の影響をなくすような改良が必要である。

以上の経験を生かして、今後、ドラッグディスク型流量計については上流に整流格子等を付加して低流量域での特性の改善を図り、また、密度計については振動子の形状等を工夫して流量影響を除去するような改良を施し、以上の改良の結果をみてインパイル実験を実施する予定である。

謝 辞

本実験の実施に当っては、反応度安全研究室小林晋昇氏に御助力いただいた。また、本実験で使用した流量計や密度計の設計、製作においては、製作メーカーのST研究所塩田健氏に御協力を頂いた。以上の諸氏に感謝をいたします。

参 考 文 献

- 1) 石川, 富井監修: “NSRR実験プログレスレポート・1 (1975年10月~1976年3月),”
JAERI-M 6635 (1976)
- 2) 石川, 富井監修: “NSRR実験プログレスレポート・2 (1976年4月~1976年6月),”
JAERI-M 6790 (1976)
- 3) 反応度安全研究室・NSRR管理室: “NSRR実験プログレスレポート・3
(1976年7月~1976年12月), JAERI-M 7051 (1977)
- 4) 反応度安全研究室・NSRR管理室: “NSRR実験プログレスレポート・4
(1977年1月~1977年6月), JAERI-M 7304 (1977)
- 5) 反応度安全研究室・NSRR管理室: “NSRR実験プログレスレポート・5
(1977年7月~1977年12月), JAERI-M 7554 (1978)
- 6) 反応度安全研究室・NSRR管理室: “NSRR実験プログレスレポート・6
(1978年1月~1978年6月), JAERI-M 7977 (1978)
- 7) 反応度安全研究室・NSRR管理室: “NSRR実験プログレスレポート・7
(1978年7月~1978年12月), JAERI-M 8259 (1979)
- 8) 反応度安全研究室・NSRR管理室: “NSRR実験プログレスレポート・8
(1979年1月~1979年6月), JAERI-M 8779 (1980)
- 9) 反応度安全研究室・NSRR管理室: “NSRR実験プログレスレポート・9
(1979年7月~1979年12月), JAERI-M 9011 (1980)
- 10) 藤城俊夫, 他: “反応度事故条件下の燃料挙動に及ぼす冷却材の流動の影響(1),”
JAERI-M 9104 (1980)
- 11) 塩田健: “原子炉の安全性に関する計測,” 計測技術, Vol.7, No.12 (1979)
- 12) 世古口言彦: “気液二相流,” 伝熱工学の進展1, 養賢堂 (1973)
- 13) 井上晃, 青木成文: “管内二相流の圧力損失に関する基礎的研究,” 日本機械学会論文集,
Vol.36, No.288, (1970), 1366.
- 14) D.G. Nicklin et al.: Trans. Inst. Chem. Engrs., 40 (1962), 61.
- 15) S.G. Bankoff: Trans. ASME, Ser. C, 82-4 (1960)
- 16) N. Zuber: Trans. ASME, Ser. C, 82-3, (1960), 255.