

JAERI-Review

2001-012



JP0150375



界面面積輸送モデルに関する基礎研究 (I)
(委託研究)

2001年3月

三島 嘉一郎*・中村 秀夫

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division,
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-
gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

界面面積輸送モデルに関する基礎研究 (I)

(委託研究)

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部

三島 嘉一郎*・中村 秀夫

(2001年2月14日受理)

近年、最適評価解析コードの予測精度向上を目的として、二流体モデルに界面面積輸送モデルを組み込み、気液二相流をより詳細に再現する試みがなされている。国際的な動きとしては、米国原子力規制委員会(NRC)とパーデュー大学が中心となって進めている新しいコード開発、フランス原子力庁(CEA)によるCATHAREコードの高度化に関連したモデル開発等がある。原研では、次世代解析コードとして界面面積輸送モデルを中心とした1次元解析コードの開発、そして新型炉許認可への対応を計画している。

界面面積輸送モデルは、発達中の流れや多次元流れ、過渡的流れ、沸騰流れなど、従来のモデルでは十分な予測精度が得られなかった現象を、流れに沿って忠実に再現できる可能性をもち、これらの流れの予測精度を飛躍的に向上させるものと期待されている。しかし、現時点では未完成で多くの課題を抱えており、その解決には、今後、多くの理論的考察と実験データの蓄積が必要である。本研究は、このような界面面積輸送モデルの開発に寄与するため、多次元性が現れる大口径円管内の気液二相流において界面面積を計測し、その特性の把握とデータベースの構築を目指す。

ここではまず、米国パーデュー大学およびフランスCEAグルノーブル研究所での研究を中心にレビューし、界面面積輸送モデルの概要、界面面積測定法の基礎、電気抵抗式プローブおよび光学的プローブによる計測方法の概要と問題点などについて明らかにした。その結果、モデルの現状として、特定の流動(1次元的な気泡流など)での知見は比較的豊富だが、多次元性の高いスラグ流やチェーン流では実験データも希薄で理論的解明も進んでいないことがわかった。さらに、本研究で目標とする多次元性をもつ大口径管内気液二相流の特性に関する調査を行い、多次元的気液二相流(スラグ流やチェーン流)では界面面積の計測法が未確立であることを明らかにした。これらの結果を今後の研究計画に反映させる予定である。

本研究は、平成11年度委託研究の成果報告としてまとめられたものである。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

* 京都大学 原子炉実験所

Fundamental Study on Interfacial Area Transport Model (I) (Contract Research)

Kaichiro MISHIMA* and Hideo NAKAMURA

Department of Reactor Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 14, 2001)

Recently, improvement in the best-estimate (BE) code predictive capability is attempted by incorporating the interfacial area transport model (IATM) into a one-dimensional two-fluid model to represent gas-liquid two-phase flows in detail with less uncertainty in the flow predictions. Internationally, the nuclear regulatory commission (NRC) and Purdue University in the U.S.A. and CEA in France have promoted the renewal of their BE codes such as TRAC, RELAP5 and CATHARE, by introducing the IATM in cooperative manner. In Japan, JAERI is underway to develop a one-dimensional code based primarily on the IATM against the licensing procedures of next-generation nuclear reactors.

The IATM has a possibility to correctly predict flow transient along flow path for such flows as developing flows, multi-dimensional flows, transitional flows, boiling flows, which are difficult to accurately predict by the two-fluid models employed in the current BE codes. The newly developed code with the IATM would dramatically improve the accuracy in the flow prediction. The model, however, is under development and needs great effort to overcome many difficulties with plenty of theoretical considerations based on much of data bases to be acquired further. This study attempts to measure interfacial area in air-water two-phase flows in a large-diameter tube to understand the characteristic of multi-dimensional flows that usually appear in large-diameter tube flows, and provide data bases, to contribute the development of the IATM.

The results obtained by such institutes as Purdue University and CEA France were reviewed first. Clarified are the current status and problems of the IATM, basics and practical methods to measure the interfacial area using multi-sensor miniature local probes; metal needle electro-resistance probe and fiber-optic probe. It was found that the applicability of the IATM is limited mostly to a one-dimensional bubbly flow, and is far from satisfactory for multi-dimensional flows such as slug and churn flows. We have studied further the flow characteristic of large-diameter two-phase flows with multi-dimensional nature. The interfacial area measurement methods were found to be premature especially for the multi-dimensional flow patterns. The obtained results will be utilized in the experiments under planning.

This work was performed as a contract research in FY1999.

* Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI)

Keywords: Interfacial Area Transport Model, Measurement Methods, Review, Plan,
Contract Research

This is a blank page.

目 次

1. はじめに	1
2. 研究目的及び計画	2
3. 平成11年度研究成果の概要	3
4. 研究内容	4
4.1 序論	4
4.2 界面面積輸送モデルの基礎	5
4.2.1 気泡数密度輸送方程式	6
4.2.2 界面面積輸送方程式	8
4.3 文献調査の結果	11
4.3.1 界面面積輸送モデル	11
4.3.2 界面面積計測法	15
4.3.3 大口径管内気液二相流の特性	22
4.4 実験計画	24
4.4.1 大型実験装置による実験	24
4.4.2 計測法検証のための実験	25
5. まとめ	30
参考文献	31

Contents

1. Introduction.....	1
2. Objectives and Scope.....	2
3. Outline of Results Obtained in FY1999.....	3
4. Research Results.....	4
4.1 Background.....	4
4.2 Basics of Interfacial Area Transport Model.....	5
4.2.1 Bubble Number Density Transport Equation.....	6
4.2.2 Interfacial Area Transport Equation.....	8
4.3 Results of Literature Survey.....	11
4.3.1 Interfacial Area Concentration Transport Models.....	11
4.3.2 Measurement Methods.....	15
4.3.3 Characteristics of Large-diameter Pipe Two-phase Flow.....	22
4.4 Experimental Plan.....	24
4.4.1 Large Scale Facility Experiments.....	24
4.4.2 Experiments for Measurement Method Confirmation.....	25
5. Summary.....	30
References.....	31

1. はじめに

今日、気液二相流は、軽水型動力炉をはじめとして、蓄熱・冷凍・冷蔵システム、電子回路冷却システムや化学工業分野における気泡反応塔など、多種多様な工業装置に利用されており、それらの機器・システムの運転特性や効率、経済性・安全性に深く関わっている。例えば、軽水型動力炉においては、事故時の炉心冷却の支配的要因となり、沸騰水型軽水炉（BWR）においては事故時のみならず通常運転時においてもBWR不安定のように炉心特性に大きく影響を及ぼす原因となっており、また、新型炉においては、受動的安全系の作動に伴う熱流動現象の把握が設計性能を決める重要課題となっている。ランキンサイクルを利用するこのほかの原子力・火力発電システムにおいても、気液二相流は、蒸気発生器やボイラー、蒸気タービンなどの作動特性とエネルギー効率に関与する重要な因子となっている。近年、これらの機器・システムの設計においては、より高い安全性と経済性の両立が要求され、最適化が求められている。このため、これらの機器・システムの設計要求を満たすため、気液二相流のより詳細な知見を得ることが必要となっている。これらの大型装置で遭遇する流れは、大小様々な流路形状の変化や流れの方向の変化があり、また相変化を伴うことが多いため、流れは多次元性を帯び、未発達の流れと特性を持つ。従来の最適評価解析コードなどでは、このような流れの詳細解析は困難であり、改善の必要性が認識されている。

近年、最適評価解析コードの予測精度向上を目的として、二流体モデルに界面面積輸送モデルを組み込み、気液二相流をより詳細に再現する試みがなされている。国際的な動きとしては、米国 NRC と Purdue 大学が中心となって進めている新しいコード開発、フランス CEA による CATHARE コードの高度化に関連したモデル開発などがある。我が国においても、日本原子力研究所では、次世代解析コードとして界面面積輸送モデルを中心とした1次元解析コードの開発、そして新型炉許認可への対応が計画されている。

この界面面積輸送モデルは、発達中の流れや多次元流れ、過渡的流れ、沸騰流れなどの現象を忠実に再現できる可能性をもち、これらの流れの予測精度を飛躍的に向上させるものと期待されている。しかし、これは、現時点では、未完成のモデルであり、多くの課題を抱えている。これらの課題を解決するためには、今後、多くの理論的考察と実験データの蓄積が必要である。そこで、本研究では、界面面積輸送モデルの開発に寄与するために、多次元性が現れる可能性のある大口径円管内の気液二相流において界面面積を計測し、その特性の把握と、データベースの構築を目指すこととした。

本研究の研究組織は以下の通りである。

研究代表者	京都大学原子炉実験所	教授	三島 嘉一郎
研究協力者	京都大学原子炉実験所	助教授	日引 俊
	京都大学原子炉実験所	助手	齊藤 泰司

2. 研究目的及び計画

本研究では、過渡的な多次元気液二相流を最適評価解析コードで十分な予測精度で再現するため、大口径管内の気液二相流を対象とした実験を行い、計測手法の開発、データベースの構築、界面面積輸送モデルの開発を行うことを目的とする。

研究の内容は、京都大学において、多次元構造をもつ気液二相流の界面面積、ボイド率などの流れ方向の特性変化を計測できる二相流計測法及びデータの処理方法を開発し、この方法を用いて日本原子力研究所東海研究所にある大型実験装置（大気圧用大口径垂直管試験装置）において気液二相流実験を行い、過渡的な多次元構造を有する気液二相流の流れ方向の特性変化を測定する。さらに、従来、小口径管内の流動予測に用いられてきたドリフトフラックスモデルとの比較を行うとともに、大口径管に適用可能な界面面積輸送モデルを開発する。

年次計画については、平成 11 年度は、当該研究テーマに関する文献調査を行うとともに、界面面積計測に関する予備実験装置の製作とデータ処理法についての検討を行い、平成 12 年度以降、

- ① ダブルセンサー・プローブあるいはこれに相当する二相流計測法の開発及び検証実験、
 - ② 日本原子力研究所所有の大型実験装置による、上記計測法を用いた気泡流域における気液二相流の流れ方向の特性変化測定、データベースの構築、
 - ③ 従来のドリフトフラックスモデル相関式との比較、検討による大口径管内気液二相流の一次元的特性の把握、
 - ④ 多次元構造をもつ気液二相流の計測法の開発及び検証実験
 - ⑤ 日本原子力研究所所有の大型実験装置における、変形気泡域（スラグ流域など）における流れ方向の特性変化の多次元計測、データベースの構築、
 - ⑥ 多次元構造をもつ気液二相流の界面面積輸送モデルの開発、
- を行う計画である。

3. 平成11年度研究成果の概要

平成11年度は、米国パーデュー大学およびフランス原子力庁グルノーブル研究所で実施された界面面積輸送モデルに関する研究を中心にレビューし、界面面積輸送モデルの概要、界面面積測定法の基礎、電気抵抗式プローブおよび光学的プローブによる計測方法の概要と問題点などについて明らかにした。また、本研究で目標としている多次元性をもつ大口径管内気液二相流の特性研究に関しても調査を行った。これらの調査により、本研究で目標としている、多次元性をもつ大口径管内気液二相流の界面面積計測法に関する問題点が明らかとなり、これらの結果を今後の研究計画に反映させることとした。

主な結果は、以下のとおりである。

- ① 界面面積輸送方程式に基づき気液二相流の流れの詳細な記述が可能であるが、現時点で、このモデルの弱点は、界面面積の生成・消滅項のモデルが完成されていないことである。
- ② このため、界面面積の生成・消滅項を、気泡の合体・分裂過程に基づき機構論的にモデル化しようとする研究が進められており、実験および理論の両面で、気泡流域に関してはかなりの知見が得られつつある。
- ③ スラグ流域およびチャーン流域については、実験データも希薄であり、理論的にも今後の研究に待つところが大きい。
- ④ 界面面積濃度の計測法に関しては、球形気泡とみなされる領域では、いわゆるダブルセンサー・プローブを用いた方法が成功を収めており、気泡流領域のデータベースの構築が進んでいる。
- ⑤ スラグ流、チャーン流域については、理論的にはフォーセンサー（4センサー）・プローブ法が提案されているが、このような流動様式では二次的流れが無視できず、流れが多次元性を表すため、局所の界面面積の計測は簡単ではなく、公開された文献で見える限り、このような流れの界面面積計測法はいまだに完成されていない。
- ⑥ 今後の研究の方向としては、スラグ流、チャーン流の界面面積を対象に進むであろうが、とくに界面面積の計測法に多くの課題が残されている。

4. 研究内容

4.1 序論

近年、工学的応用分野において、気液二相流の詳細記述に二流体モデル（あるいはより一般には多流体モデル）が使われている。二流体モデルの基礎方程式は、気液各相に対して別々に導出された質量、運動量及びエネルギーの保存式と気液界面でのジャンプ条件から構成される。これらの基礎方程式は、各相の巨視的な場を対象にして厳密な時間平均によって得られたものである。各相は互いに独立ではなく相互作用するため、各相の保存式には質量、運動量及びエネルギーの相間相互作用を表す項、そなわち界面輸送項が含まれる。このことは、二流体モデルにより気液界面上における質量、運動量、エネルギー輸送の動的な熱的非平衡状態が正確に記述できることを示唆する。しかしながら、二流体モデルが真にその威力を発揮するためには、これらの界面輸送項が正確にモデル化されていなければならない。気液二相流は、気液界面の存在と、それに起因する界面の不連続性によって特徴づけられるため、とくに、気液二相間の相互作用を記述する界面輸送項は、二流体モデルの根幹とも言える重要な部分である。

現在、この界面輸送項の定式化は、二流体モデルにおいて最も課題を残した部分であるといえる。その原因は二つある。まず、気液界面の挙動とその幾何学的構造の複雑さが、界面輸送に関する基礎方程式系の完結を困難にしていること、次に、不連続性をもつ界面の影響を、他の諸量と同様、諸特性の時間平均量で表さなければならないという解析上の困難さがある。

一般に界面輸送項は、界面面積濃度 a_i と駆動力の積によって次のように表される。

$$(\text{界面輸送項}) \sim a_i \times (\text{駆動力})$$

ここで、界面面積濃度 a_i は単位体積あたりの界面面積として定義され、当然ながら流れ場の内部構造と強く結びついていなければならない。一方、駆動力は、界面間輸送に影響を与える微視的流動機構、すなわち乱流輸送機構や分子拡散輸送機構を正確に反映していなければならない。気液二相流の巨視的場においては、ボイド率は相分布を表し、界面面積濃度は、質量、運動量及びエネルギーの界面輸送項に対する単位体積当たりの有効面積を表す最も重要な幾何学的構造因子であるので、上

式は界面面積濃度及び流動様式により判別される界面構造についての知見が二流体モデルには不可欠であることを示している。界面間の輸送のメカニズムは二相流の構造に大きく依存し、界面構造の幾何学的効果は、巨視的場においてボイド率と界面面積濃度とによりモデル化される。この界面輸送項は流動様式に依存するため、これまでの気液二相流解析では、流動様式依存の構成方程式と流動様式遷移条件とを与えることにより基礎方程式系を閉じている。しかし、このような構成方程式はほとんどが、円管等のような単管内の発達した非加熱系の定常流で得られた1次元のデータをもとに作られたものであり、流路の助走域や多次元流路内の流れ、相変化する流れ、過渡的流れ等に対しては、精度の良い予測が期待できない。

そこで、このような流れの界面輸送項を記述する方法として、流動様式の判別によらずに界面面積輸送方程式を解く、いわゆる界面面積輸送モデルが提案された。界面面積輸送モデルの基礎方程式は、Kocamustafaogullari-Ishii^(1,2)により導出され、この中に現れる界面面積の消滅項と生成項に関する基本的な考え方が示された。このモデルは、気液二相流の入口効果、未発達流れ、多次元効果、気泡の合体・分裂、壁面沸騰核生成などを考慮して流れを詳細に記述することができ、上に述べたような流れに対して、二流体モデルによる予測精度を飛躍的に向上させることが期待されている。しかしながら、現時点では、このモデルは完成されたものではなく、多くの課題を残しており、例えば、気泡流における界面面積濃度の生成・消滅項に関するモデル化とモデル検証のための局所流動特性値に関する実験データの整備などの作業が進行中である。残された課題を解決するには、さらに、通常口径の単管内の流れのみでなく多次元性をもつ流れや過渡的流れ、沸騰二相流などにおける実験データの蓄積が必要である。

そこで、本研究では、気液二相流の多次元性を再現できる界面面積輸送モデルの開発を目標にして、まず、モデルの開発に必要なデータを取得するための計測法の開発・検証を行い、その計測法を用いて、多次元性の現れる可能性のある大口径管内気液二相流の特性に関する実験データを取得し、界面面積やボイド率などの流動特性のデータベースを構築することとした。

4.2 界面面積輸送モデルの基礎

ここでは、復習のために、まず界面面積輸送モデルの基礎について概略を述べる。簡単のために液相を連続相とし、気相を分散相（気泡）とする気液二相流を考える。気泡は二相流中に均一に分散しているものとする。二相流の内部構造に関係した基

本的なパラメーターの一つに気泡数密度がある。界面面積輸送モデルでは、この気泡数密度に対する輸送方程式をもとに界面面積輸送方程式を導出する^(1, 2)。この界面面積輸送方程式の中に、このモデルの中核となる界面面積の生成項と消滅項が現れるが、この項を機構論的に記述するために、気泡の合体や分裂のモデルが必要である。

4.2.1 気泡数密度輸送方程式

界面面積濃度やボイド率に対する界面面積輸送方程式は、Boltzmann 輸送方程式と同様の気泡数密度に対する輸送方程式から導出される。Reyes⁽³⁾は、化学反応がなく、球形の流体粒子が均一に分散している流れに対して、Boltzmann 輸送方程式と相似の粒子数密度のバランス式を考えた。その後、Kocamustafaogullari-Ishii^(1, 2)はこれを一般化して、次のような気泡数密度輸送方程式を導いた。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (f \bar{u}_p) = \sum_{j=1}^4 S_j + S_{ph} \quad (1)$$

ここで、 f は \bar{x} 、 v 、 t の関数であり、気泡数密度分布関数を表す。これは、位置 \bar{x} における幅 $d\bar{x}$ の領域において、体積が v から $v+dv$ までの気泡の、時間 t における気泡数密度を意味する。また、 \bar{u}_p は粒子速度を、 S_{ph} は相変化による気泡の生成・消滅率を表す。すなわち、 S_{ph} は、単位体積の均質な混合流体内で、ある大きさの気泡が沸騰により生成され、あるいは（サブクール核沸騰においては）凝縮により消滅する時間的割合である。 S_{ph} の評価方法については、Kocamustafaogullari-Ishii^(1, 2)によって詳細な研究がなされている。ここで、壁面における核沸騰による気泡の生成は S_{ph} には含まれておらず、境界条件によって与えられる。干渉項 $\sum S_j$ は、気泡の分裂・合体による気泡数密度分布関数 f の変化率を表す。 S_1 と S_2 は、それぞれ、気泡の分裂により混合流体の単位体積あたりに体積 v の気泡が生成あるいは消滅する割合を表す。 S_3 と S_4 は、それぞれ、気泡の合体により混合流体の単位体積あたりに体積 v の気泡が生成あるいは消滅する割合を表す。気泡の合体分裂による生成・消滅項の考え方を Fig. 1 に示す。すなわち、合体の過程にはランダム衝突や笠状気泡の後流での気泡同伴があり、分裂の過程には乱流による衝撃、笠状気泡の剪断、界面の不安定などがある。そして、体積 v の気泡に着目すると分裂して生じる場合と消滅する場合、また、合体して生じる場合と消滅する場合とがある。これらの項は以下のような式で与えられる。

$$S_1(\bar{x}, v, t) = \int_v^{v_{\max}} \beta(v', v) n(v') g(v') f(\bar{x}, v', t) dv' \quad (2)$$

$$S_2(\bar{x}, v, t) = -g(v) f(\bar{x}, v, t) \quad (3)$$

$$S_3(\bar{x}, v, t) = \int_{v_{\min}}^{v/2} \lambda(v-v', v') h(v-v', v') f(\bar{x}, v-v', t) f(\bar{x}, v', t) dv' \quad (4)$$

$$S_4(\bar{x}, v, t) = -\int_{v_{\min}}^{v_{\max}-v} \lambda(v, v') h(v, v') f(\bar{x}, v, t) f(\bar{x}, v', t) dv' \quad (5)$$

ここで、 $g(v')$ は体積 v' を持つ気泡が分裂する頻度、 $\beta(v', v)$ は体積 v' を持つ気泡の分裂によって生成される気泡のうち体積 v をもつ気泡の割合、 $n(v')$ は分裂によって生成される気泡総数、 $\lambda(v-v', v')$ は体積 $v-v'$ と v' の気泡が衝突、合体して体積 v の気泡が生成される確率、 $h(v, v')$ は体積 v と v' を持った気泡の衝突頻度である。

式(1)は体積が v から $v+dv$ までの気泡に対する方程式であるが、すべての気泡径にわたり積分した気泡数密度輸送方程式を導いておくと便利である。これは次のように、最小気泡から最大気泡まで式(1)を積分することによって実現できる。

$$\int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \frac{\partial f}{\partial t} dv + \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \nabla \cdot (f \bar{u}_p) dv = \sum_{j=1}^4 \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} S_j dv + \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} S_{ph} dv \quad (6)$$

積分において Leibnitz の法則を用いると、この気泡数密度輸送方程式は次のように拡張することができる。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (N \bar{u}_{pm}) = \sum_{j=1}^4 \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} S_j dv + \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} S_{ph} dv \quad (7)$$

ただし

$$\int_{v_{\min}}^{v_{\max}} f(\bar{x}, v, t) dv = N(\bar{x}, t) \quad (8)$$

ここで、 $N(\bar{x}, t)$ は単位混合体積当たりのすべての気泡数、 \bar{u}_{pm} は気泡数の重みをつけた局所の気泡平均速度であり、次のように定義される。

$$\bar{u}_{pm}(\bar{x}, t) \equiv \frac{\int_{v_{min}}^{v_{max}} f(\bar{x}, v, t) \bar{u}_p(\bar{x}, v, t) dv}{\int_{v_{min}}^{v_{max}} f(\bar{x}, v, t) dv} \quad (9)$$

4.2.2 界面面積輸送方程式

体積 v の気泡に対する界面面積輸送方程式は、体積 v の気泡の平均界面面積 $A_i(v)$ を用いて気泡数密度輸送方程式を変形することにより得られ、次のように表すことができる。

$$\frac{\partial A_i(v)}{\partial t} + \nabla \cdot (f A_i(v) \bar{u}_p) = \sum_{j=1}^4 A_i(v) S_j + A_i(v) S_{ph} \quad (10)$$

式(10)の界面面積輸送方程式は、体積 v の気泡の挙動を表すものであるが、さらに、この式から、すべての気泡径にわたり平均した界面面積輸送方程式を導いておくことと便利である。すなわち、式(10)を v_{min} から v_{max} まで積分することによって次式が得られる。

$$\begin{aligned} \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{\partial A_i(v)}{\partial t} dv + \int_{v_{min}}^{v_{max}} \nabla \cdot (f A_i(v) \bar{u}_p) dv \\ = \sum_{j=1}^4 \int_{v_{min}}^{v_{max}} A_i(v) S_j dv + \int_{v_{min}}^{v_{max}} A_i(v) S_{ph} dv \end{aligned} \quad (11)$$

ここで再び Leibnitz の法則を用いると、平均化された界面面積輸送方程式は次のように表すことができる。

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla \cdot (a_i \bar{u}_i) = \sum_{j=1}^4 \Phi_j + \Phi_{ph} \quad (12)$$

ここで、 $a_i(\bar{x}, t)$ は v_{\min} から v_{\max} のすべての気泡にわたり平均した界面面積濃度であり、 $\bar{u}_i(\bar{x}, t)$ は界面速度である。これらの変数は次のように定義される。

$$a_i(\bar{x}, t) \equiv \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} f(\bar{x}, v, t) A_i(v) dv \quad (13)$$

$$\bar{u}_i(\bar{x}, t) \equiv \frac{\int_{v_{\min}}^{v_{\max}} f(\bar{x}, v, t) A_i(v) \bar{u}_p(\bar{x}, v, t) dv}{\int_{v_{\min}}^{v_{\max}} f(\bar{x}, v, t) A_i(v) dv} \quad (14)$$

また、 Φ_j は次のように定義される。

$$\Phi_j = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} A_i(v) S_j(\bar{x}, v, t) dv, \quad j=1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

これは分裂または合体過程による界面面積の変化率を示している。式(2)～(5)による S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 の定義により、それぞれの Φ_j は次のように表すことができる。

$$\Phi_1(\bar{x}, v, t) \equiv \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} A_i(v) \int_v^{v_{\max}} \beta(v', v) n(v') g(v') f(\bar{x}, v', t) dv' dv \quad (16)$$

$$\Phi_2(\bar{x}, v, t) \equiv - \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} A_i(v) g(v) f(\bar{x}, v, t) dv \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Phi_3(\bar{x}, v, t) \equiv & \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} A_i(v) \int_{v_{\min}}^{v/2} \lambda(v-v', v') \\ & \times h(v-v', v') f(\bar{x}, v-v', t) f(\bar{x}, v', t) dv' dv \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Phi_4(\bar{x}, v, t) \equiv & - \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} A_i(v) \int_{v_{\min}}^{v_{\max}-v} \lambda(v, v') \\ & \times h(v, v') f(\bar{x}, v, t) f(\bar{x}, v', t) dv' dv \end{aligned} \quad (19)$$

上式から、 Φ_1 と Φ_2 が、それぞれ、気泡の分裂に伴う界面面積濃度の増加率または減少率を表していることは明らかである。これに対して Φ_3 と Φ_4 は、気泡の合体に伴う増加率または減少率を表している。同じように Φ_{ph} は、次のように定義される。

$$\Phi_{\text{ph}} = \int_{v_{\text{min}}}^{v_{\text{max}}} A_i(v) S_{\text{ph}} dv \quad (20)$$

これは蒸発や凝縮に伴う界面面積濃度の変化率を表している。

気泡数密度の変化が流れに沿って顕著に現れるとき、流れ方向の圧力の低下による気泡の膨張は、界面面積濃度の生成項として考える必要がある。この項は次のように導出することができる。そのためには、式(8)における気泡数密度を界面面積濃度に置き換えるために次のような幾何学的な関係式を用いる。

$$N = \frac{\alpha}{v_b} = \left(\frac{a_i^3}{\alpha^2} \right) \psi \quad (21)$$

ここで、 α 、 ψ および v_b は、それぞれボイド率、気泡の形状に依存する係数および平均気泡体積を表す。球形気泡の場合は、 $\psi=1/36\pi$ となる。式(11)を式(8)に代入することにより次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla \cdot (a_i \bar{u}_{\text{pm}}) = \\ \frac{1}{3\psi} \left(\frac{\alpha}{a_i} \right)^2 \left[\sum_{j=1}^4 \int_{v_{\text{min}}}^{v_{\text{max}}} S_j dv + \int_{v_{\text{min}}}^v S_{\text{ph}} dv \right] + \left(\frac{2a_i}{3\alpha} \right) \left[\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}_{\text{pm}} \alpha) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

右辺第二項は平均気泡体積の変化量を示している。相変化がなければ、この項は、次のような方程式と関係づけられる。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}_{\text{pm}} \alpha) = -\frac{1}{\rho_g} \left[\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + (\bar{u}_{\text{pm}} \cdot \nabla) \rho_g \right] \quad (23)$$

式(23)を式(22)に代入すれば、相変化がない場合の界面面積輸送方程式は次のように簡単な式になる。

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}_{\text{pm}} a_i) = \frac{1}{3\psi} \left(\frac{\alpha}{a_i} \right)^2 \sum_{j=1}^4 \int_{v_{\text{min}}}^{v_{\text{max}}} S_j dv - \left(\frac{2a_i}{3\alpha} \right) \frac{1}{\rho_g} \frac{D\rho_g}{Dt} \quad (24)$$

4.3 文献調査の結果

4.3.1 界面面積輸送モデル

二流体モデルは気液両相内および気液界面での保存則を定式化したものであり、気液両相の相互作用を最も厳密に扱える二相流モデルである。現在、二流体モデルは原子力プラントの安全解析コードに導入され、さらに詳細な解析を可能とするように改良が行われている。しかしながら、二流体モデルの有効な利用には界面面積濃度の正確な定式化が不可欠であり、過去 10 年以上にわたり精力的に研究がなされてきた。界面面積輸送方程式の開発には、次のような 5 つの目標を達成することが必要である。

- ① 界面面積濃度測定技術の確立
- ② 広範囲な流動条件でのデータベース作成
- ③ 界面面積輸送方程式の定式化
- ④ 界面面積輸送方程式内の生成項と消滅項の開発
- ⑤ 解析コードへの導入

界面面積輸送方程式の提案以前は、界面面積濃度は構成方程式の形で与えられていた。それには、界面の幾何学的な形状から導出する方法と界面面積濃度と圧力損失との間の相関を仮定して導出する方法とがある。これらの仮定は流動様式によって大きく左右されるので、導入された構成方程式も流動様式遷移条件と併用する必要がある。また、もともとの導出過程より、管路内流れのような一次元定常流れのみに適応が可能である。

界面面積濃度に最も寄与するのは微細な気泡や液滴であり、これは全流動様式にわたって当てはまる。つまり、このような分散気泡の挙動を正確に把握することが界面面積輸送方程式には重要であり、気泡自体の流れを表せるような輸送方程式を導入することが分散気泡に支配される界面面積濃度の変化を定式化するには望ましい。

気泡粒子の動きを輸送方程式によって解析した例として、Kocamustafaogullari-Ishii⁽¹⁾の研究がある。これは、サブクール沸騰流を気泡核生成速度と凝縮による気泡消滅速度を考慮に入れた気泡数密度輸送方程式を用いて解析したものである。気泡数密度輸送方程式は、化学工学分野において攪拌容器内等の分散相の流れの解析に広く利用されてきた。界面面積濃度が気泡数密度と密接な関係にあることは明らかであ

り、従って、界面面積輸送方程式は気泡数密度輸送方程式をもとに導出が可能である。Kocamustafaogullari-Ishii⁽²⁾は、この気泡数密度輸送方程式に基づいて気泡径分布を考慮にいたした上で、気液二相流に対する一般的な界面面積輸送方程式を導いた。気泡の合体・分裂を考慮した気泡数密度輸送方程式は、繰り返しになるが、先に示した式(8)で表される。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (N \bar{v}_{pm}) = \sum_{j=1}^4 \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} S_j dv + \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} S_{ph} dv \quad (8)$$

ここで、 N および \bar{v}_{pm} は、いずれも \bar{x} と t の関数であり、それぞれ、単位体積内の全気泡径にわたる気泡数密度および気泡数密度で重みをつけた平均気泡速度を表す。右辺第一項は、気泡の合体・分裂の動的挙動に起因する生成項及び消滅項、第二項は相変化に起因する気泡数密度の生成項及び消滅項である。この輸送方程式はそれぞれの体積が v から $v+dv$ の分散気泡の気泡数密度輸送方程式を全気泡体積で積分して得られたものであり生成項と消滅項は積分形で表現されている。 S_1 および S_2 は、それぞれ気泡の分裂による体積 v の気泡数密度の増加率および減少率を表し、 S_3 および S_4 は、それぞれ気泡の合体による体積 v の気泡数密度の増加率および減少率を表す。Kocamustafaogullari-Ishii⁽²⁾は、上記の気泡数密度輸送方程式と同様に、任意の気泡径の気泡に対する界面面積輸送方程式を、体積 v の気泡の平均界面面積と気泡数密度分布関数の積より求め、それを全ての気泡体積にわたり積分して次の界面面積輸送方程式を得た（前出の式(12)）。

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla \cdot (a_i \bar{u}_i) = \sum_{j=1}^4 \Phi_j + \Phi_{ph} \quad (12)$$

ここで、 a_i および \bar{u}_i は \bar{x} と t の関数であり、それぞれ平均界面面積濃度および界面速度を表す。また Φ_j および Φ_{ph} は、それぞれ気泡の合体・分裂による界面面積濃度の変化率および相変化による界面面積濃度の変化率である。すなわち Φ_j 、 Φ_{ph} は分散気泡の動的挙動と相変化に起因する界面面積の生成項と消滅項である。さらにIshiiら⁽⁴⁾によれば、界面面積輸送方程式を垂直上昇流に適用する際には、圧力勾配による気泡膨張に起因する界面面積の生成項が無視できず、基礎方程式は以下のように修正される（前出の式(22)）。

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla \cdot (a_i \bar{u}_{pm}) = \frac{1}{3\psi} \left(\frac{\alpha}{a_i} \right)^2 \left[\sum_{j=1}^4 \int_{v_{min}}^{v_{max}} S_j dv + \int_{v_{min}}^v S_{ph} dv \right] + \left(\frac{2a_i}{3\alpha} \right) \left[\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}_{pm} \alpha) \right] \quad (22)$$

Ψ は気泡の形状による係数であり、球形気泡の場合 $1/36\pi$ である。右辺第 2 項は気泡の平均体積の変化による影響を表している。断熱系の場合、上式は気相側の連続の式を用いて次式のように表される（前出の式(24)）。

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}_{pm} a_i) = \frac{1}{3\psi} \left(\frac{\alpha}{a_i} \right)^2 \sum_{j=1}^4 \int_{v_{min}}^{v_{max}} S_j dv - \left(\frac{2a_i}{3\alpha} \right) \frac{1}{\rho_g} \frac{D\rho_g}{Dt} \quad (24)$$

近年、Wu ら⁽⁵⁾ は気泡を 2 つのグループに分け、各グループに対して気泡数密度輸送方程式を立てて界面面積輸送現象を解析する手法を提案した。1 グループとは、球形気泡グループ、2 グループとは笠状気泡・スラグ気泡グループである。この 2 つのグループは当然、気泡の合体と分裂、膨張と収縮によって、互いのグループ間で気泡の交換が起こるので、2 つの気泡数密度輸送方程式には内部の相互作用を表す項の他、2 つのグループ間の相互作用を表す項が付け加わる。断熱系におけるこれらの相互作用、すなわち気泡の動的挙動には以下の 5 つが考えられている。

- ① 乱流誘起のランダム衝突による気泡合体
- ② 後流エントレイメントによる気泡合体
- ③ 乱流渦衝突による気泡分裂
- ④ 笠状気泡スカート部からのせん断による気泡分裂
- ⑤ 比較的大きな気泡の界面不安定性による気泡分裂

この 2 つのグループを考慮した界面面積輸送方程式を開発する第一段階として、1 グループのみ存在する系を対象にして生成項と消滅項の定式化を行う。すなわち、笠状気泡やスラグ気泡が存在しない、ボイド率の比較的低い気泡流を対象とする。Wu ら⁽⁵⁾ は、断熱垂直上昇流における低ボイド率気泡流の一次元界面面積輸送方程式の生成項と消滅項に関する予備的なモデルを提案し、既存の計測データと比較した。これらの生成項および消滅項における気泡合体・分裂は正確に定式化されているものの、気相の密度変化を無視して対象とする流れの解析を行っており、後に、垂直

上昇流においては流れ方向の圧力変化による気泡膨張の影響が無視できないことが指摘されている。彼らの実験データより、生成・消滅項の定式化^(6, 7, 8)に用いられた実験係数は、気相が非圧縮性であるという仮定のもとに求められているので、再検討が必要である。また、彼ら自身も指摘しているように、彼らのモデルでは気泡の合体確率を一定としており、実際の現象を忠実に再現するには、より詳細な数式的表現が必要である。Hibiki-Ishii⁽⁹⁾は気泡の合体確率を気泡接触時間と気泡合体に要する時間との比より求め、気泡合体に要する時間は2つの気泡間に形成される液膜の薄膜化過程から求め、気泡合体の生成項を改良した。さらに、彼らは、流れの中で気泡同士の衝突や気泡と乱流渦との衝突に関与しない体積があることを考慮し、生成項と消滅項のモデルを提案した。

しかしながら、これらの界面面積輸送方程式の生成項と消滅項の定式化は基本的には同じである。いずれも、気泡の合体・分裂の原因となる現象の起こる頻度とその現象が気泡の合体・分裂を誘起させる確率の積で表され、これに気泡流に関してボイド率が最大のとくとボイド率がきわめて低いときの流動状況に対する補正が加えられている。

界面面積輸送方程式の生成項と消滅項の開発には、ボイド率、界面面積濃度、界面速度、気泡直径、液相速度、乱流強度などの局所流動特性値の精密なデータが不可欠であるが、現在のところ限られた数のデータセットのみが入手可能である。計測法については、次節で述べることとし、ここでは、これまで実施された実験により得られた知見について述べることとする。近年、Hibiki-Ishii^(6, 7)らは内径 50.8mm の空気-水垂直上昇気泡流の局所流動特性値データをダブルセンサー・プローブ法とホットフィルム流速計を用いて取得し、これらの量の流路断面平均値から、流れ方向の界面面積濃度変化に対する体積流束の影響を明らかにした。また気泡の合体と分裂の機構が乱流強度の影響を強く受けることから、液相体積流束 j_f の合体または分裂に対する影響についても考察し、非常に低い j_f では気泡の合体と分裂の割合は平衡状態にあるが、 j_f を徐々に増加させると合体の影響が分裂の影響をしのぐようになること、また、 j_f をさらに増加させると界面面積輸送の支配的現象は気泡の合体から分裂に移行することなどを明らかにした。Hibiki-Ishii^(8, 10)は、さらに、内径 25.4 mm の垂直円管垂直上昇流についても同様の計測を行い、ここでも 50.8 mm 管と同様の特性を得ている。低い液相流速では気泡合体の影響はボイド率の増加と共に徐々に増加する。この流動領域では、ボイド率の増加によって気泡同士の相互作用が強まるが、液相乱流強度が弱いために気泡の分裂まで至らないと考えられる。一方、高液相流速域ではボイド率の増加により気泡の分裂が促進される。これはボイド率の増加によって気泡と乱流渦の距離が縮まるだけでなく、全体積流束の増加

により乱流強度も大きくなることを表している。内径 25.4mm 管内流動特性値を計測した上記文献のデータより、同程度の気相体積流束の条件で液相体積流束の影響をみると、気泡の合体から分裂への支配的気泡挙動の変化が見られた。しかしながら、非常に小さい気相体積流束では依然として気泡合体が主要な気泡挙動という結果であった。低い気相体積流束では、流入する気泡径が小さいので気泡は分裂に対して安定となり、相対的に気泡合体が支配的になるとも考えられる。しかしながら、Sauter 平均直径は管内全域にわたって減少しており、実際には気泡分裂が生じていることが分かる。

以上述べたように、気泡形状がほぼ球形気泡と見なせる気泡流域の界面面積輸送方程式に関しては、ダブルセンサー・プローブを用いた計測データが蓄積されつつあり、気泡の合体・分裂に基づく生成・消滅項のモデル化に関し、かなりの知見が得られている。しかしながら、スラグ流やチェーン流では、気泡が著しく変形し、局所的に二次流れが生じ多次元性が現れることから、ダブルセンサー・プローブでは計測が困難である。このためにフォーセンサー・プローブが開発され、若干のデータが得られている。さらに、二次流れがある場合に対してはフォーセンサー・プローブをダブルに二方向に使う方法が試みられているようであるが、公開されたデータは見あたらない。このような二次流れを伴うスラグ流やチェーン流における界面面積濃度については、今後、さらなる研究の進展が望まれる。

4.3.2 界面面積計測法

(1) 界面面積計測原理

前に述べたように、界面面積輸送方程式の生成・消滅項の開発には、ボイド率、界面面積濃度、界面速度、気泡直径、液相速度、乱流強度などの局所流動特性値の精密なデータが必要であり、そのためには、それぞれの物理量の計測法の開発が不可欠である。とくに、界面面積の計測については、化学工学の分野では、古くから化学反応（吸収）を利用した計測法がよく利用されていた^(11,12)。しかし、この方法は相変化を伴う流れには適用できない。また、光の減衰を利用したものや写真撮影した画像から直接求める方法^(13,14,15)などがあるが、その場合、試験部を透明な材質で製作する必要がある。また、これらの方法は、局所界面面積濃度を計測できないという欠点がある。

そこで、Kataoka ら^(16,17)は、発達した定常二相流に対する局所・瞬時の界面面積濃度の方程式のエルゴート性を仮定した理論的考察により、多センサー・プローブを用

いて計測した界面速度から局所界面積濃度の時間平均値が得られることを示した。すなわち時間平均した局所界面面積濃度 \bar{a}_i^t は、

$$\bar{a}_i^t = \frac{1}{\tau} \overline{\left(\frac{1}{|\bar{v}_i| \cos \phi} \right)} \quad (25)$$

により表される。ここで、 τ は界面間の平均時間間隔、 ϕ は j 番目の界面の法線ベクトル \bar{n}_j と界面速度ベクトル \bar{v}_j とが張る角度である。 τ は、プローブを通過する気泡の頻度を N_i とすれば、 $\tau = 1/2N_i$ である。ファクター 2 は 1 つの気泡が通過すれば、2 つの界面がプローブを通過することを反映している。従って、プローブを通過する気泡の頻度 N_i と界面における $|\bar{v}_i| \cos \phi$ が分かれば、プローブ位置での時間平均した界面積濃度が求められる。ここで、それぞれの界面 j において $1/|\bar{v}_j|$ と $1/\cos \phi_j$ との間で統計的に相関がないものと仮定すれば、式(25)は次式のようにになる。

$$\bar{a}_i^t = 2N_i \overline{\frac{1}{|\bar{v}_i|}} \cdot \overline{\frac{1}{\cos \phi}} \quad (26)$$

ただし、

$$\overline{\frac{1}{|\bar{v}_i|}} = \frac{\sum_j \frac{1}{|\bar{v}_j|}}{\left(\sum_j \right)} \quad (27)$$

$$\overline{\frac{1}{\cos \phi}} = \frac{\sum_j \frac{1}{\cos \phi_j}}{\left(\sum_j \right)} \quad (28)$$

$1/|\bar{v}_j|$ と $1/\cos \phi_j$ との間で統計的に相関がないということは、すなわち気泡の入射角 ϕ_j 、あるいは速度ベクトル \bar{v}_j のいずれかがランダムであることを意味するが、実際上、多くの場合、気泡の入射角はランダムであると考えられる。ここで、さらに具体的な式の形を得るために、プローブが流れの方向 (z 方向) に向けて置かれている場

合を考える。x、y、z 方向の単位ベクトルをそれぞれ \vec{n}_x 、 \vec{n}_y 、 \vec{n}_z とし、j 番目の界面の速度ベクトル \vec{v}_{ij} と界面の法線ベクトル \vec{n}_j を、それぞれのベクトルと z 座標と y 座標との間の角度 (α_j , β_j) および (μ_j , ν_j) で表せば、式(28)は次式のようにになる。

$$\frac{1}{\cos \phi} = \iiint \frac{P(\alpha, \beta, \mu, \nu) d\alpha d\beta d\mu d\nu}{\{\cos \alpha \cos \mu + \sin \alpha \sin \mu \cos(\beta - \nu)\}} \quad (29)$$

ここで、 $P(\alpha, \beta, \mu, \nu)$ は、 α 、 β 、 μ 、 ν の確率密度関数である。界面面積を計算するには、この $P(\alpha, \beta, \mu, \nu)$ の具体的な形を知る必要がある。そのため、気泡形状は球形であり、プローブはこの界面をくまなく等しい確率で通過するものと仮定する。さらに、界面速度 \vec{v}_{ij} の x 方向および y 方向成分はランダムであると仮定する。このような条件は、気泡流においてはほぼ成り立つと考えられる。このような仮定の下では、 β と ν は 0 から 2π の間の任意の値を等しい確率でもつことができ、それぞれ互いに独立である。これらの仮定に基づき計算を進めると、次式を得る。

$$\bar{a}_i^1(x_0, y_0, z_0) = 4N_t \frac{\sum_j |v_{szj}|}{\left(\sum_j \right)} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{\int_0^{\pi/2} g(\alpha) \sin \alpha \ln \left(\frac{1 + \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) d\alpha}{\int_0^{\pi/2} g(\alpha) \cos \alpha d\alpha} \right]} \quad (30)$$

ここで、 v_{szj} はプローブを通過する j 番目の界面の速度の z 方向成分、 α は界面の法線ベクトルと流れの主流方向 (z 方向) との間の角度、 $g(\alpha)$ は α の確率密度関数である。ここで、角度 α は最大値 α_0 をもち、最大値の範囲で α の分布は完全にランダムだとすると、 $g(\alpha)$ は次式で与えられる。

$$g(\alpha) = \frac{1}{\alpha_0} \quad 0 \leq \alpha < \alpha_0$$

$$= 0 \quad \alpha_0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \quad (31)$$

これより、界面積濃度は次式で表される。

$$\bar{a}_i^t(x_0, y_0, z_0) = \frac{4N_t \left\{ \sum_j \frac{1}{|v_{szj}|} / \left(\sum_j \right) \right\}}{\left[1 - \cot \frac{\alpha_0}{2} \ln \left(\cos \frac{\alpha_0}{2} \right) - \tan \frac{\alpha_0}{2} \ln \left(\sin \frac{\alpha_0}{2} \right) \right]} \quad (32)$$

この式より、 α_0 の値が分かれば N_t と v_{szj} の測定値より界面積濃度が計算できる。この α_0 の値は界面速度の測定結果より推測でき、次式で与えられる⁽¹⁶⁾。

$$\frac{\sin 2\alpha_0}{2\alpha_0} = \frac{1 - \left(\sigma_z^2 / \overline{|v_{iz}|^2} \right)}{1 + 3 \left(\sigma_z^2 / \overline{|v_{iz}|^2} \right)} \quad (33)$$

従って、z方向の界面速度の平均値 $\overline{|v_{iz}|}$ と揺らぎ σ_z が分かれば α_0 の値が求まる。

(2) 電気抵抗式プローブによる計測

以上の結果に基づき、これまでに電気抵抗式のダブルセンサー・プローブを用いて、米国 Purdue 大学及び Wisconsin 大学を中心に、我が国では京都大学で、断熱気泡流⁽¹⁸⁻²⁰⁾とサブクール沸騰流⁽²¹⁾の界面積濃度など気液二相流の詳細構造の計測がなされている。電気抵抗式のダブルセンサー・プローブによる局所界面面積測定の基本原理解や信号処理の考え方などについては、Revankar-Ishii⁽¹⁹⁾が議論している。Fig. 2に彼らの示したダブルセンサー・プローブによる計測系の概念を、また、Fig. 3にプローブのデザインと信号処理の概念を示す。彼らは、この方法を用いて、内径 50.8 mm の垂直円管内の二相流の径方向ボイド率分布、気泡速度、気泡コード長さ及び界面積濃度、気泡乱流の測定を行った。Fig. 4に界面積濃度の径方向分布の測定結果の例を示す。また、断面平均ボイド率と界面面積濃度について、ダブルセンサー・プローブ法による結果と写真法による結果とを比較して、Fig. 5に示すような結果を得ている。Hogsett-Ishii⁽²²⁾は、同じく内径 50.8 mm の円管で、ダブルセンサー・プローブを用いて垂直円管内気泡流の局所パラメータ(ボイド率、界面積濃度、界面速度、Sauter 平均径)の径方向分布を測定し、また、ホットフィルム・アネモメータを用いて局所液流速および乱流強度を測定した。さらに Hibiki ら⁽⁶⁾は、同様に内径 50.8 mm

と 25.4 mm の円管の界面積濃度、界面速度、液相速度及び乱流強度の測定を行っている。彼らは、界面面積濃度の式として Kataoka らの式(32)の代わりに、改良された次式を使用している。

$$\bar{a}_i^t(x_0, y_0, z_0) = 2N_i \frac{\sum_j \frac{1}{|v_{szj}|}}{\left(\sum_j \right)} I(\alpha_0) \quad (34)$$

$$I(\alpha_0) = \frac{2}{\int_0^{\alpha_0} g(\alpha) \cos \alpha d\alpha} \quad (35)$$

$$g(\alpha_0) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha_0^3} (\alpha - \alpha_0)^2 & 0 \leq \alpha < \alpha_0 \\ = 0 & \alpha_0 < \alpha \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (36)$$

式(35)で与えられる確率密度関数と測定データおよび Kataoka らの式(31)との比較を Fig. 6 に示す。

ダブルセンサー・プローブでは、「気泡は球形であり、界面はランダムにプローブ先端を通過する」という前提がある。また、実際には、プローブは1点ではなく、有限の間隔をもっている。このために、気泡の動きによっては、2つの電極の片方のみにしか掛からない気泡もあると考えられる。そこで、Wu-Ishii⁽²³⁾は、ダブルセンサー・プローブによる局所界面積濃度測定に及ぼす気泡の横方向運動とプローブ間隔の影響について感度評価を行った。彼らは、平均測定量を、欠測気泡、測定気泡及び両者を総合した界面積濃度に結びつける3種類の校正因子を定義し、これらの因子を数値計算により求めた。その結果、実用上、両者を総合した校正因子を用いるのが最良であるが、測定メカニズムの理解には他の2つの因子が役立つことを示した。プローブ間隔が平均気泡径の36-86%のとき、総合校正因子は気泡速度の揺らぎのみにより決まり、プローブ間隔にはほとんど依存しない。気泡の横方向運動を考慮した場合と考慮しない場合とを比較すると、空気-水気泡流で観測された気泡速度の揺らぎの範囲では、局所界面積濃度は、前者のほうが約7%大きいという結果であった。また、測定位置での欠測気泡の界面積濃度の寄与は、測定に掛かった気泡の平均値よりも大きいことが示されている。ダブルセンサー・プローブによる界面積濃度測定法の実験的検証としては、Wu ら⁽²⁴⁾が、断面の幅 200 mm、厚さ 10 mm

の扁平な矩形流路で、画像処理法による結果との比較を行い、Fig. 7に示すように、10% 以内の誤差で一致することを報告している。このほかに、ダブルセンサー・プローブを用いた水平流の界面積濃度の計測についても Kocamustafaogullari ら⁽²⁵⁾の研究がある。

本来 Kataoka ら^(16,17)による界面積濃度測定の基本原理は一般に成り立つのであるが、以上に述べたダブルセンサー・プローブによる測定のもとになった式は、気泡が球形に近い場合を前提としている。笠状気泡やスラグ流などのように気泡の変形が無視できない場合には、ダブルセンサー・プローブでは計測誤差が大きくなり、フォーセンサー (4-センサー)・プローブを用いる必要がある。これについては、Tan-Ishii⁽²⁶⁾、Revankar-Ishii⁽²⁷⁾の研究がある。Revankar らは、電気抵抗式 4-センサー・プローブ法による局所界面積濃度の測定の理論的基礎を議論し、プローブ及び信号処理法を開発した。彼らの開発したプローブ及び信号処理の概念を Fig. 8 に示す。そして、同方法を用いて内径 50.8 mm の垂直円管内笠状気泡流の界面速度、局所界面積濃度およびボイド率を測定し、ボイド率の測定結果を、差圧法により測定した体積平均ボイド率と比較し、また、笠状気泡を高速度ビデオで撮影してその形状から計算した界面積濃度分布と 4-センサー・プローブによる測定結果とを比較して、Fig. 9 のように良好な一致が得られることを示した。このように、4-センサー・プローブを用いた界面面積の計測の例もいくつか見られるが、未だデータは少なく、系統的な知見が得られているとは言い難い。とくに、気泡の変形の大きいスラグ流やチェーン流に対しては、公開されたデータは皆無と断言している状況である。今後の研究の進展が待たれるところである。

(3) 光学的プローブによる計測

信号の取り出し方や取り扱いは電気抵抗式プローブと異なるが、同じ測定原理で、光学的プローブを用いても界面積濃度の測定が可能である。この方法による界面積濃度など気液二相流の詳細構造の研究は、フランス Grenoble の研究グループが中心となって進めている⁽²⁸⁻³³⁾。Mendes de Moura⁽²⁸⁾は、ダブルセンサー・光学的プローブを用いて、内径 80 mm の円管内気液二相流のボイド率分布、気泡通過頻度、界面速度、界面積濃度及び Sauter 平均気泡径の測定を行った。界面積濃度の測定においては、電気抵抗式ダブルセンサー・プローブのところでも述べたと同様に、球形気泡が、ランダムに等方的にプローブを通過するという仮定のもとに、界面速度から界面積濃度を計算している。Fig. 10 に彼らにより得られた界面積濃度の半径方向分布を示す。彼らは、光学的プローブにより測定した気相速度から気相見かけ速度を計算し、

これと入口流量から計算した値とを比較して、Fig. 11 に示す結果を得た。これより、気相流量の低い気泡流領域では、誤差は 10% 以内であったが、高流量では、誤差が 40% まで増加することが分かった。これは、高流量では流動様式はチェーン流であり、この流動様式では、光学的プローブによる界面速度の測定値は実際よりも高い値になることを示唆している。

光学的プローブを用いた計測法の特長については、Cartellier らのグループが詳細な検討を行っている。Cartellier⁽²⁹⁾は、単一センサー・光学的プローブを用いて気相速度を測定する方法について検討した。この方法によれば、潜伏長さ (latency length)、すなわちプローブの有効感度長 L が既知であるとすれば、プローブからの信号が液相から気相に変化する時間 T_L から界面速度が計測できるというものである。このときのプローブ先端における界面の移動の様子は Fig. 12 のようであるが、これが L に影響する。また、プローブ先端の形状も重要であるが、Cartellier は、Fig. 13 に示すようなプローブ先端の形状を工夫することにより L をコントロールでき、しかも、Fig. 13 の 3 C タイプ (円錐+円筒+円錐型) のプローブを用いれば、これに対応する立ち上がり時間と速度の相関が界面への入射角度などのような制御できないパラメータの影響が小さくなることを明らかにしている。それぞれのタイプにより得られる信号の例を Fig. 14 に示す。彼らは、このような信号を実時間で処理する法についても議論している。この方法により測定したボイド率の相対誤差は 10% 以下、気泡流に対する気相見かけ速度の誤差は $\pm 10\%$ 以内との評価である。しかし、この誤差は、流れに大気泡がある場合には増大する。このほか、Cartellier ら^(30,31)は、2 C および 3 C タイプの単一センサー・光学的プローブの詳細な特性の調査とプローブ先端形状の最適化研究を行った。また、Barrau ら⁽³²⁾は、新しい実時間信号処理法を提案し、これにより、単一センサー・光学的プローブとダブルセンサー・光学的プローブの性能比較を行った。その結果、気泡流の気相速度計測においては、単一センサーのほうがダブルセンサーよりも性能がよいが、テイラー気泡を含むような流れでは、ダブルセンサーのほうが良いとしている。

Garnier ら⁽³³⁾は、ダブルセンサー・光学的プローブを内径 19.2 mm の円管内 R12 沸騰二相流に使用し、流動様式の検知と気相速度測定を行ったが、16 MPa、340 °C の高温高圧の条件下では、従来の光ファイバーは短時間のうちに使えなくなると報告している。このために、サファイア管と高温用光ファイバーを組み合わせた新しいプローブを開発中である。

4.3.3 大口径管内気液二相流の特性

大口径管内気液二相流の特性についての研究は、あまり多くは見られない。Hiraoら⁽³⁴⁾は、内径 102.3 mm および 19.7 mm の 2 種類の円管内の垂直上昇流及び対向流について、ボイド率を測定し、Table 1 に示すような通常口径の管と大口径管とを含めたドリフト速度及び分布パラメータの相関式を得た。また、Kataoka-Ishii⁽³⁵⁾は、大口径管またはプール体系におけるボイド率予測への適用を目的に、ドリフト速度と分布パラメータの相関式の開発を行った。その結果をまとめると以下のようなになる。

① 低粘度 ($N_{\mu} \leq 2.25 \times 10^{-3}$) の場合

$$\begin{aligned} V_{\text{gj}}^+ &= 0.030 \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0.157} N_{\mu}^{-0.562} \quad D_H^* \geq 30 \text{ のとき} \\ &= 0.0019 D_H^{*0.809} \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0.157} N_{\mu}^{-0.562} \quad D_H^* \leq 30 \text{ のとき} \end{aligned} \quad (37)$$

② 高粘度 ($N_{\mu} \geq 2.25 \times 10^{-3}$) の場合

$$V_{\text{gj}}^+ = 0.92 \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0.157} \quad D_H^* \geq 30 \text{ のとき} \quad (38)$$

ここで、

$$V_{\text{gj}}^+ = \frac{V_{\text{gj}}}{\left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{\frac{1}{4}}}, \quad D_H^* = \frac{D_H}{\sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}}}, \quad N_{\mu} = \frac{\mu_f}{\left(\rho_f \sigma \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

また、分布パラメータ C_0 は、

$$\begin{aligned} C_0 &= 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}} \quad (\text{円管}) \\ &= 1.35 - 0.35 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}} \quad (\text{矩形管}) \end{aligned} \quad (39)$$

で表される。この式は、内径 1~61 mm、圧力 0.1~2.5 MPa、流体は空気-水、蒸気-水および空気-グリセリンのデータをもとにしている。

以上の研究は、いずれもドリフトフラックスモデルに基づくものであるが、先に述べたように、大口径管では局所的に二次流れが生じ、多次元性が現れる可能性がある。上記の大口径管に対する Kataoka-Ishii の式も、1次元ドリフトフラックス相関式に二次流れの影響が含まれたものと見なすことができる。このような特徴を持つ大口径管内気液二相流の詳細構造に関する研究は、今のところ Ohnuki-Akimoto⁽³⁶⁾ の相分布計測が見られるのみである。彼らは、内径 200 mm の $L/D = 61.5$ における垂直上昇気液二相流の流動特性測定を行った。ボイド率分布と気泡径の測定は光学的プローブにより、気泡速度とその揺らぎは電気抵抗式ダブルセンサー・プローブにより、また、液相速度とその揺らぎはホットフィルム・アネモメータを用いて測定した。実験結果より、 $L/D < 20$ の領域は圧力勾配より判断して助走域の特性を示しており、大気泡は観察されなかったが、 $L/D > 20$ の領域では気泡は合体して大気泡が観察された。この領域では、通常口径の管では流動様式はスラグ流であるが、大口径管ではスラグ流ではなくチャーン流であった。このことは、Kataoka-Ishii など、他の研究者の結果とも一致している。このような気泡の挙動の変化に対応して、相分布も、壁近傍にピークを持つ分布から中央ピークの分布への変化が観察された。Fig. 15 は、Ohnuki-Akimoto の径方向ボイド率分布の測定結果と通常口径 (25 mm) の円管に対する Leung ら⁽³⁷⁾の結果との比較である。横軸の管中央からの距離は、比較のために管の内半径で無次元化している。この図で、いずれの実験も、大きい気泡が形成される流動様式への遷移境界付近でのデータである。大口径管では、流れに沿って気泡は合体し大きくなるが、流れはチャーン・気泡流であり、入口付近と下流とであまりボイド率の分布形状は変化していない。一方、Leung らの結果では、流れに沿って気泡流からスラグ流へ変化するに伴い、壁ピークから中央ピークへと分布形状が変化している。このような壁ピークの分布は、大口径管では、平均ボイド率が小さく、気泡の合体が起こらないような条件でのみ観察された。Ohnuki-Akimoto の観察した流動様式を Fig. 16 に示す。このように、1次元流の近似がほぼ成り立つ小口径管と異なり大口径管では、大きさも形状も様々な気泡が混在し、局所的に二次流れが関与する流動様式が特徴的であり、先に述べたダブルセンサー・プローブなどの計測法のもとになった前提条件が満たされない可能性が大きい。このような流れの詳細構造計測においては、2方向あるいは3方向 4-センサー・プローブなどのような、より複雑な計測法を用いる必要性が生じる事が予想される。

4.4 実験計画

本研究では、流れに多次元性が現れる可能性のある大口径管内気液二相流の局所流動特性データの取得を目標とする。その目的を果たすためには、ダブルセンサー・プローブに相当する光学的プローブのみでなく、多方向・多センサー・プローブによる計測法の開発が必要になることが予想される。しかしながら、文献調査からも明らかなように、多センサー・プローブを用いた気液二相流の局所流動特性計測については、公開された文献も少なく、プローブ製法から信号処理法まで、多くの課題が残されており、相当な挑戦を要すると考えられる。これらの課題を解決して目的を果たすためには、ダブルセンサー・プローブに相当する光学的プローブの計測法の確立から始まって多センサー・プローブに至るまで、段階を追って実験を行い最終目標に迫る必要がある。

そこで、本実験計画としては、次の手順で進めることとした。

- ① ダブルセンサー・プローブに相当する光学的プローブの製作並びにこれによる信号処理法及び界面積濃度計測法の開発と検証実験、
- ② 日本原子力研究所所有の大型実験装置（大口径管内垂直上昇空気-水二相流実験装置）による、ダブルセンサー・プローブ（または相当）を用いた気泡流領域における局所流動特性の測定実験、
- ③ 多センサー・プローブによる気液二相流詳細構造計測法の開発と検証実験、
- ④ 日本原子力研究所所有の大型実験装置による、多センサー・プローブを用いた変形気泡（チェーン流）領域における局所流動特性の測定実験

平成 11 年度の実験計画は、大型実験装置を用いた実験の予備実験と光学的プローブによる計測法の確認試験とからなる。以下にそれぞれの概要を述べる。

4.4.1 大型実験装置による実験

この実験は、Ohnuki-Akimoto⁽³⁷⁾が使用した日本原子力研究所東海研究所にある大口径管気液二相流実験装置を使用して実施する計画である。この実験装置の概略を Fig. 17 に、また試験部の概略を Fig. 18 に示す。平成 11 年度は、先ず、この装置の試験運転を行い、本実験に備えて装置の状況を調査した。その結果、入口圧力計の増設など、いくつかの改良点が見いだされたため、この結果を踏まえて、実験装置の改良を行った。

4.4.2 計測法検証のための実験

この実験は、光学的プローブによるボイド率、界面積濃度などの気液二相流詳細構造計測法の開発・検証を目的としたものであり、京都大学原子炉実験所熱特性実験室に設置されている気液二相流実験ループを使って較正実験を行い、信号処理法を含めた計測法の開発、確認並びにボイド率及び界面積濃度測定の実験を行う計画である。平成 11 年度は、文献調査結果を参考にして、装置の設計・製作を行った。ここでは、実験装置の概略と実験手順、測定器の較正などについて述べる。

(1) 実験装置

光学的プローブによる計測法確認実験用に、空気-水二相流実験ループを使用する。実験ループの概略を Fig. 19 に示す。作動流体は空気と水であり、水には、不純物除去フィルターと一定の水質を保つためイオン交換樹脂を通した水を用いる。水質は実験前後に電気導電率計によって確認し、データ取得時にばらつきがないようにする。これは主に、界面面積濃度に大きな影響を与える表面張力が不純物によって大きく左右されるためである。

実験ループは、水供給タンク、遠心ポンプ、フィルター、気水混合器、試験部、気水分離器及び配管、弁類より構成され、これにエアコンプレッサー、圧力計等が接続される。イオン交換水は、熱交換器付水供給タンクから遠心ポンプによって試験部へと送られる。試験部下部に設置されている気水混合器内で、エアコンプレッサーによって送られた空気と混合され、気液二相流となって試験部を上昇する。試験部上方に取り付けられた気水分離器によって、空気と水に分けられる。空気はそこで大気に開放され、水は気水分離器から水供給タンクへと循環する。

(2) 試験部

試験部は可視化観察及び流動様式の撮影のため、透明アクリル製である。小口径円管（内径 10 mm）と矩形管（流路断面 10 mm×200 mm）の 2 種類の試験部を製作する。試験部概略を Fig. 20 及び Fig. 21 に示す。小口径円管は主に単一気泡に対するプローブからの信号の応答を調べることを目的とし、矩形管は横方向運動がある場合の気泡とプローブ信号との関連を調べることで、および界面積濃度のプローブ法による測定結果を、例えば、画像処理法により求めた結果と比較し、計測法の較正を行うことを目的としている。試験部の全長は 2000 mm であり、流れ方向の圧力損失

を測定するために圧力タップ及び光学的プローブ取り付けタップが設けられている。これらの圧力タップ及びプローブ取り付けタップにより誘起される乱れをできるだけ小さくし、さらに画像処理の大きな障害にならないように、圧力タップ孔は 0.3 mm 程度の小孔とし、プローブ取り付けタップは、接水面と流路壁とを面一にする。試験部の上下両端はフランジで固定し、中央部では四方に硬質ゴムを施す。これは遠心ポンプ等の振動が原因となって試験部が振動し、その振動が原因で不自然な気泡の合体や分裂が起こることを防ぐためである。

試験部下部には、フランジを介して気水混合器が接続される。この内部で気液両相が均一に混合されて試験部に供給される。気水混合器は空気ノズルと水の流入口を兼ねる気水混合器カバーによって構成される。気水混合用空気ノズルの先端は外径 0.8 mm、内径 0.6 mm のステンレス製ニードル管により構成する。空気ノズル内部は空洞となっており、ノズル底面で空気供給ラインと連結される。ニードル管先端部では水流が集中衝突するようにし、気泡がニードル先端から剪断を受け、水流に同伴され、試験部内に導かれる。

(3) 計装類

- 電磁流量計

日本フローセル製(10DE4312AKD3)。矩形波励磁方式であり、最大流量 1.2 m³/h、出力信号は 4-20 mA である。精度は流速 0.5~0.7 m/s で±0.8%RD、流速 0.7 m/s 以上では±0.6%RD である。

- 差圧発信器

豊田工機製(DD200SA)。測定範囲は-500 kPa~500 kPa であり、圧力と出電力の関係は 500 kPa で 59.38mV、-500 kPa で-59.77mV である。

- 直流増幅器

豊田工機製(AA6010)。入力レベルは 0~0.5 V であり、安定性においては利得が±0.01%/°C以下、零点±1 μV/°C以下である。

- フロート式空気流量計

フィッシャー・ローズマウント・ジャパン製(2-1355AV、6-1355AV、1359AV)。測定範囲はそれぞれ、0.01~0.1 m³/h、0.1~1 m³/h、1~10 m³/h である。

- 高速ユニバーサルレコーダ

横河電機製(OR1400)。測定範囲は、 ± 50 mV、 ± 100 mV、 ± 200 mV、 ± 500 mV、 ± 1 V、 ± 2 V、 ± 5 V、 ± 10 V、 ± 20 V、 ± 50 V であり、最大サンプリング速度は 100 kS/s である。

- 高速度モーションコーダアナライザ

KODAK 製(SR-500)。デジタルイメージを DRAM に書き込み記録し、解像度と最大フレームレイトは 512×240 ピクセル時に 500 fps である。

- 光ファイバ光源

日本ピーアイ製(PICL-NEX-150)。点灯方式は高周波点灯方式であり、照明安定度は $\pm 3.0\%$ である。

- 面発光ライトガイド

日本ピーアイ製(PLG-B60X-1000-6R)。発光面 60 mm \times 60 mm である。

(4) 測定方法

本実験では、装置のプロセスデータとして、試験部入口付近で各相の温度、流量および圧力を測定し、試験部では、試験部差圧、ボイド率、界面速度、気泡径、液相速度などの計測を行う。また、二相流画像を高速度カメラで撮影する。

- 温度測定

温度に関しては、気相温度と液相温度を測定した。気相温度は、気相流量計の出口部に設置された熱電対により、また液相温度は試験部入口手前に設置された熱電対により測定した。どちらの熱電対も流路内に挿入してあるシース径 1.0 mm の K 型シース熱電対を使用した。温度測定誤差は ± 0.3 K 以内である。

- 流量測定

流量に関しては、気相流量及び液相流量を測定した。気相流量は、流量に応じて 3 種類の測定範囲のフロート式流量計($0.01 \sim 0.1$ m³/h、 $0.1 \sim 1$ m³/h、 $1 \sim 10$ m³/h) を用いた。液相流量は電磁流量計を用いて測定した。ただし測定範囲が導電率 20 μ s 以上

であるため、その範囲以上に水の導電率を設定する必要があったため、今回の実験では 150 μ s 前後まで水の導電率を高めて測定した。電磁流量計はメスシリンダーを用いて校正した。メスシリンダーで測定した 10 リットルの容器に電磁流量計を通した水を入れ、満タンになったときの時間をストップウォッチで測定する。その時間から実際の流量を計算し、その値と電磁流量計のデータを比較した。このようにして得られた測定誤差は 3%以内であった。

- 差圧測定

流れ方向の差圧は、試験部の圧力タップから導かれた差圧測定ラインに接続される差圧発信器によって測定する。差圧発信器は、液マノメーターによって校正を行った。水を用いた液マノメーターは全長 2 m であり、差圧は 0.02 MPa 程度の低圧力範囲内の校正しかできないが、差圧発信器の適性を調べるには十分である。実験ループを作動させ、二か所の圧力タップから、一方は差圧発信器によって、他方はマノメーターによって差圧を測定し両者を比較し、誤差は $\pm 1\%$ であった。

- 二相流画像撮影

二相流研究における流動様式判別、また重要なパラメーターであるボイド率、界面面積濃度、気泡数密度等の測定のために二相流画像をモーションコーダアナライザーでデジタル録画する。CCD カメラで取り込まれたデジタル画像は一時的にモーションコーダアナライザー内の DRAM に書き込まれた後、PC に SCSI-2 ケーブルを介して転送される。このモーションコーダアナライザーは、 512×240 ピクセルのフルスケール画像を 500 fps のサンプルレートで最大 546 フレーム(2.184 sec) の記録が可能であり、シャッタースピードは $1/20,000$ である。また気泡の輪郭を強調し、より鮮明な画像を得るために、撮影部を試験部背後から照明を当てる。照明にはファイバー光源と面発光ライトガイドとからなる光ファイバー照明システムを採用する。この照明システムは、照射面の温度上昇を最小限にするためにフィルターによる赤外線反射及び吸収を行っており、ランプのダイクロイックミラーと光ファイバーの熱を吸収する性質により熱の除去を行う。

- 光プローブ

試験部におけるボイド率、界面速度などの計測には光学的プローブを用いる。光

学的プローブの例（日本カノマックス社製ボイドプローブ MODEL 0729-01 型）を Fig. 22 に示す。この図に示したプローブはダブルセンサーであり、石英素線、ステンレス管被覆であるが、寸法が大きいので内径 10 mm の円管試験部には使用できない。このため、より小型でしかも剛性のある光学的プローブを製作する必要がある。

光学的プローブからの信号は、日本カノマックス社製光ファイバー二相流計測システム 7933 を用いて処理する。この測定システムは、光学的プローブからの信号を処理し、気泡通過頻度、ボイド率および気泡通過時間を計測する機能を備えている。しかしながら、界面積濃度の計測には、その目的にあった信号処理法及び界面面積を計測するためのアルゴリズムを開発する必要がある。

5. まとめ

平成 11 年度は、米国パーデュー大学およびフランス原子力庁グルノーブル研究所で実施された界面面積輸送モデルに関する研究を中心にレビューし、界面面積輸送モデルの概要、界面面積測定法の基礎、電気抵抗式プローブおよび光学的プローブによる計測方法の概要と問題点などについて明らかにした。また、本研究で目標としている多次元性をもつ大口径管内気液二相流の特性研究に関しても調査を行った。これらの調査により、本研究で目標としている、多次元性をもつ大口径管内気液二相流の界面面積計測法に関する問題点が明らかとなり、これらの結果を今後の研究計画に反映させることとした。

主な結果は、以下のとおりである。

- ① 界面面積輸送方程式に基づき気液二相流の流れの詳細な記述が可能であるが、現時点で、このモデルの弱点は、界面面積の生成・消滅項のモデルが完成されていないことである。
- ② このため、界面面積の生成・消滅項を、気泡の合体・分裂過程に基づき機構論的にモデル化しようとする研究が進められており、実験および理論の両面で、気泡流域に関してはかなりの知見が得られつつある。
- ③ スラグ流域およびチャーン流域については、実験データも希薄であり、理論的にも今後の研究に待つところが大きい。
- ④ 界面面積濃度の計測法に関しては、球形気泡とみなされる領域では、いわゆるダブルセンサー・プローブを用いた方法が成功を収めており、気泡流領域のデータベースの構築が進んでいる。
- ⑤ スラグ流、チャーン流域については、理論的にはフォーセンサー（4-センサー）・プローブ法が提案されているが、このような流動様式では二次的流れが無視できず、流れが多次元性を表すため、局所の界面面積の計測は簡単ではなく、公開された文献で見ると、このような流れの界面面積計測法はいまだに完成されていない。
- ⑥ 今後の研究の方向としては、スラグ流、チャーン流の界面面積を対象に進むであろうが、とくに界面面積の計測法に多くの課題が残されている。

参考文献

- (1) Kocamustafaogullari, G. and Ishii, M., "Interfacial area and nucleation site density in boiling system," *Int. J. Heat Mass Transfer* 26 (1983) 1377-1387.
- (2) Kocamustafaogullari, G. and Ishii, M., "Foundation of the interfacial area transport equation and its closure relations," *Int. J. Heat Mass Transfer* 38 (1995) 481-493.
- (3) Reyes, J.N., "Statistically derived conservation equations for fluid particle flows," *Proc. ANS Winter Meeting, San Francisco, USA, 1989.*
- (4) Ishii, M., Wu, Q., Revankar, S.T., Hibiki, T., Leung, W.H., Hogsett, S., and Kashap, A., "Interfacial area transport in bubbly flow," *Proc. 15th Symposium on Energy Engineering Science, Argonne, IL., USA, May 14-16, 1997.*
- (5) Wu, Q., Kim, S., Ishii, M., and Beus, S.G., "One-group interfacial area transport in vertical bubbly flow," *Int. J. Heat Mass Transf.* 41 (1998) 1103-1112.
- (6) Hibiki, T., Hogsett, S., Ishii, M., "Local measurement of interfacial area, interfacial velocity and liquid turbulence in two-phase flow," *Nucl. Eng. Design* 184 (1998) 287-304.
- (7) Hibiki, T., Ishii, M. and Xiao, Z., "Local flow measurement of vertical upward air-water flow in a round tube," *Proc. 3rd Int. Conf. on Multiphase Flow, Lyon, France, June 8-12, 1998.*
- (8) Hibiki, T. and Ishii, M., "Experimental Study on interfacial area transport in bubbly two-phase flows," *Int. J. Heat Mass Transf.* 42 (1999) 3019-3035.
- (9) Hibiki, T. and Ishii, M., "Interfacial Area Measurement and Interfacial Area Transport Equation in Bubbly Two-Phase Flow," *Proc. Japan-UK Mini-Seminar, Kumatori, Osaka, Japan, October 8-9, 1998.*
- (10) Hibiki, T. and Ishii, M., "Axial development of liquid turbulence and interfacial area in bubbly two-phase flows," *Proc. 5th ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, San Diego, USA, March 14-19, 1999.*
- (11) Watson, A.P., Cormack, D.E., and Charles, M.E., "A preliminary study of interfacial areas in vertical cocurrent two-phase upflow," *Can. J. Chem. Eng.* 57 (1979) 16.
- (12) Shilimkan, R.V. and Stepanek, J.B., "Interfacial area in cocurrent gas-liquid upward flow in tubes of various size," *Chem. Eng. Sci.* 32 (1977) 149.
- (13) Calderbank, P.H., "Physical rate processes in industrial fermentation, Part I and Part II," *Trans. Inst. Chem. Eng.* 36 (1958) 443, and 37 (1959) 173.
- (14) Mishima, K., Fujine, S., Yoneda, K., Yonebayashi, K., Kanda, K. and Nishihara, H., "A study of air-water flow in a narrow rectangular duct using an image processing technique," *Proc. Japan-US Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, Ohtsu, Japan, July 15-20, 1998.*
- (15) Zeitoun, O., Shoukri, M. and Chatoorgoon, V., "Measurement of interfacial area concentration in subcooled liquid-vapor flow," *Nucl. Eng. Design* 152 (1994) 243-255.
- (16) Kataoka, I., Ishii, M. and Serizawa, A., "Local formulation of interfacial area concentration and its measurements in two-phase flow," ANL-84-68, NUREG/CR-4029, Argonne National Laboratory, 1984.
- (17) Kataoka, I., Ishii, M. and Serizawa, A., "Local formulation and measurements of interfacial area concentration in two-phase flow" *Int. J. Multiphase Flow* 12 (1986) 505-529.
- (18) Kataoka, I. and Serizawa, A., "Interfacial area concentration in bubbly flow," *Nucl. Eng. Design* 120 (1990) 163-180.
- (19) Revankar, S.T. and Ishii, M., "Local interfacial area measurement in bubbly flow," *Int. J. Heat Mass Transf.* 35 (1992) 913-925.
- (20) Kocamustafaogullari, G., Huang, W.D., and Razi, J., "Measurement of modeling of

- average void fraction, bubble size and interfacial area," Nucl. Eng. Design 148 (1994) 437-453.
- (21) Yun, B.J., "Measurement of two-phase flow parameters in the subcooled boiling," PhD Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea (1996).
- (22) Hogsett, S. and Ishii, M., "Local two-phase flow measurements using sensor techniques," Nucl. Eng. Design 175 (1997) 15-24.
- (23) Wu, Q. and Ishii, M., "Sensitivity study on double-sensor conductivity probe for the measurement of interfacial area concentration in bubbly flow," Int. J. Multiphase Flow 25 (1999) 155-173.
- (24) Wu, Q., McCreary, D., Ishii, M., and Beus, S.G., "Measurements of interfacial area concentration in two-phase bubbly flow," Trans. ANS (199X) 437.
- (25) Kocamustafaogullari, G. and Huang, W.D., "Internal structure and interfacial velocity development for bubbly two-phase flow," Nucl. Eng. Design 151 (1994) 79-101.
- (26) Tan, M.J. and Ishii, M., "A method for measurements of local specific interfacial area," Int. J. Multiphase flow 16 (1990) 353-358.
- (27) Revankar, S.T. and Ishii, M., "Theory and measurement of local interfacial area using a four sensor probe in two-phase flow," Int. J. Heat Mass Transfer 36 (1993) 2997-3007.
- (28) Mendes de Moura, L.F., "Local measurements in two-phase flows using a double optical probe techniques," OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurements Techniques, Santa Barbara, USA, March 17-20, 1997.
- (29) Cartellier, A., "Measurement of gas phase characteristics using monofiber optical probes and real time signal processing," *ibid.* 1997.
- (30) Cartellier, A. and Barrau, E., "Monofiber optical probes for gas detection and gas velocity measurements: conical probes," Int. J. Multiphase Flow 24 (1998) 1265-1294.
- (31) Cartellier, A. and Barrau, E., "Monofiber optical probes for gas detection and gas velocity measurements: optimised sensing tips," *ibid.* (1998) 1295-1315.
- (32) Barrau, E., Riviere, N., Poupot, C. and Cartellier, A., "Single and double optical probes in air-water two-phase flows: real time signal processing and sensor performance," Int. J. Multiphase Flow 25 (1999) 229-256.
- (33) Garnier, J., "Measurement of local flow pattern in boiling R12 simulating PWR conditions with multiple optical probes," OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurements Techniques, Santa Barbara, USA, March 17-20, 1997.
- (34) Hirao, Y., Kawanishi, K., and Tsuge, A., "Experimental study on drift flux correlation formulas for two-phase flow in large diameter tubes," 2nd Int. Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, Tokyo, Japan, April, 1986.
- (35) Kataoka, I. and Ishii, M., "Drift flux model for large diameter pipe and new correlation for pool void fraction," Int. J. Heat Mass Transfer 30 (1987) 1927-1939.
- (36) Ohnuki, A. and Akimoto, H., "Experimental study on transition of flow pattern and phase distribution in upward air-water two-phase flow along a large vertical pipe," Int. J. Multiphase Flow 26 (2000) 367-386.
- (37) Leung, W.H., Eberle, C.S., Wu, Q., Ueno, T., and Ishii, M., "Quantitative characterizations of phasic structure developments by local measurement methods in two-phase flow," Proc. 2nd Int. Conf. on Multiphase Flow, '95-Kyoto, 1995.

Table 1. Hirao らによるドリフトフラックス相関式

Average Velocity of Mixture J (m/s)	Pressure p (ata)	Tube Dia. D (m)	Drift Velocity V_{gj}
$J \leq 0.24$	$P \leq 180$	$(D \leq 0.61)$ *2	$\sqrt{2} \left\{ \frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right\}^{1/4}$ *1
$J \geq 0.24$	$P \leq 15$	$D \leq 0.05$	$\sqrt{2} \left\{ \frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right\}^{1/4}$ *1
		$0.05 \leq D$	$0.52 \left\{ \frac{g \cdot D \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right\}^{1/2}$
	$15 \leq P \leq 180$	$D \leq 0.02$	same as $P \leq 15$ ata V_{gj}^*
		$0.02 \leq D \leq 0.24$	$V_{gj}^* + \left[0.048 \left\{ \frac{0.24g(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g} \right\}^{1/2} - \sqrt{2} \left\{ \frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right\}^{1/4} \right]$ $\times 0.406 \left\{ \left(\frac{D}{0.02} \right)^{1/2} - 1 \right\}$
		$0.24 \leq D \leq 0.46$	$0.048 \left\{ \frac{g \cdot D \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g} \right\}^{1/2}$

Average Velocity of Mixture J (m/s)	Distribution Parameter C_o
$J \leq -3.5$	$1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$ *3
$-3.5 \leq J \leq -2.5$	$0.9 + 0.1 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$ $- 0.3 \left(1 - \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \right) (2.5 + J)$
$-2.5 \leq J < 0$	$0.9 + 0.1 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$
$0 \leq J$	$1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$ *3

*1 Zuber's Eq.

*2 The range of the tube diameter in the experiments employed by Zuber for drift flux model evaluation is shown in (). Zuber indicated there was no effect of insidediameter of test tube on driftr flux parameters for churn flow.

*3 Ishii's Eq.

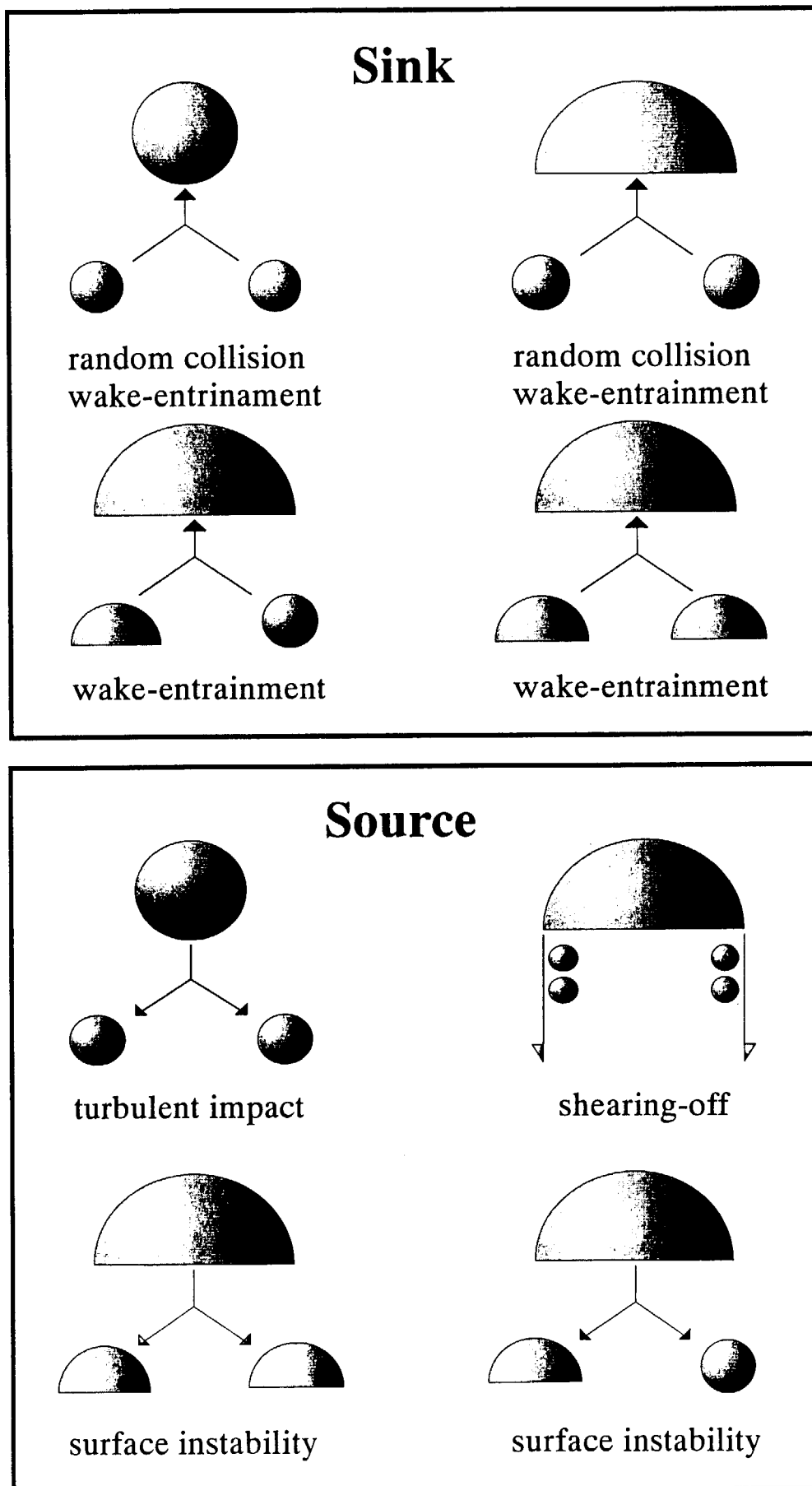
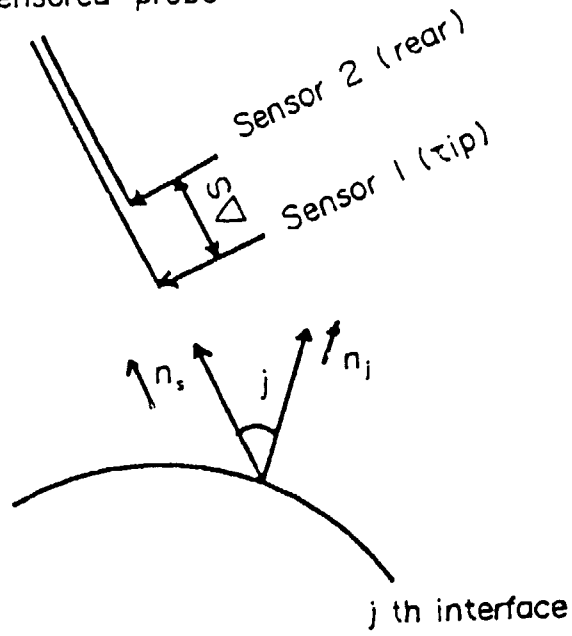
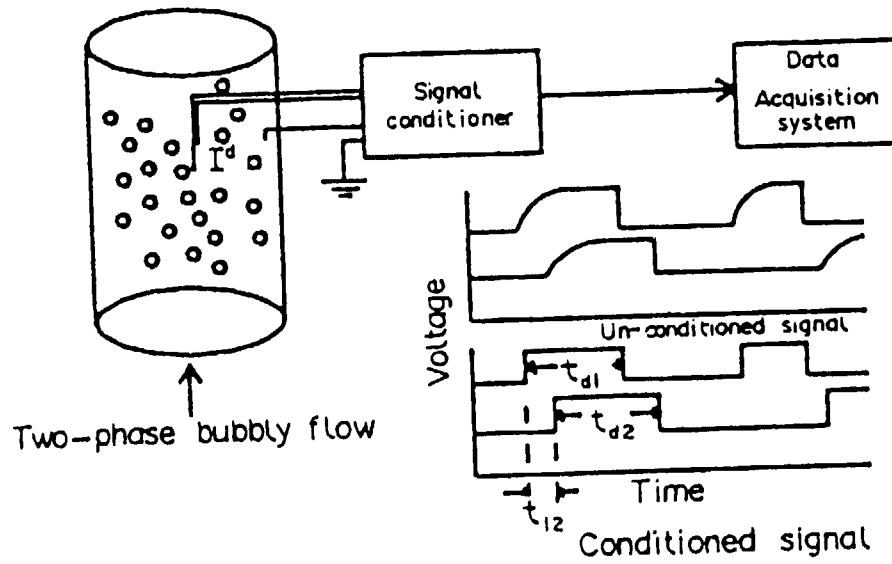


Fig.1 気泡の合体・分裂過程による界面面積の生成・消滅

Double sensed probe



(a)



(b)

Fig.2 (a) ダブルセンサー・プローブと j 番目の界面との関係
 (b) ダブルセンサー・プローブによる二相流計測模式図

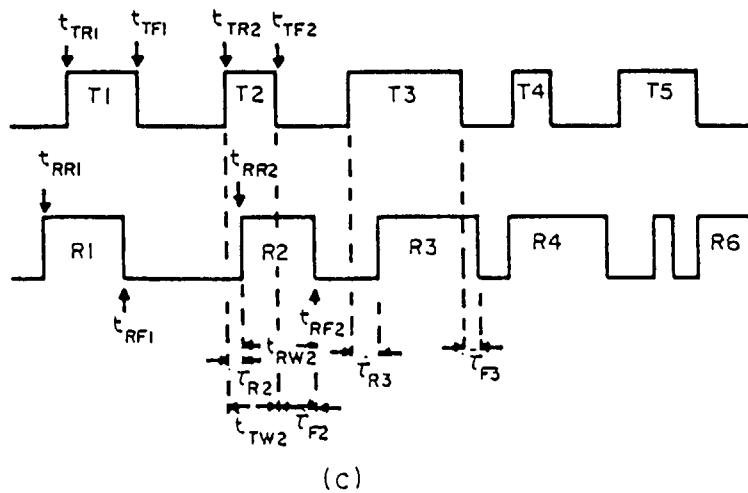
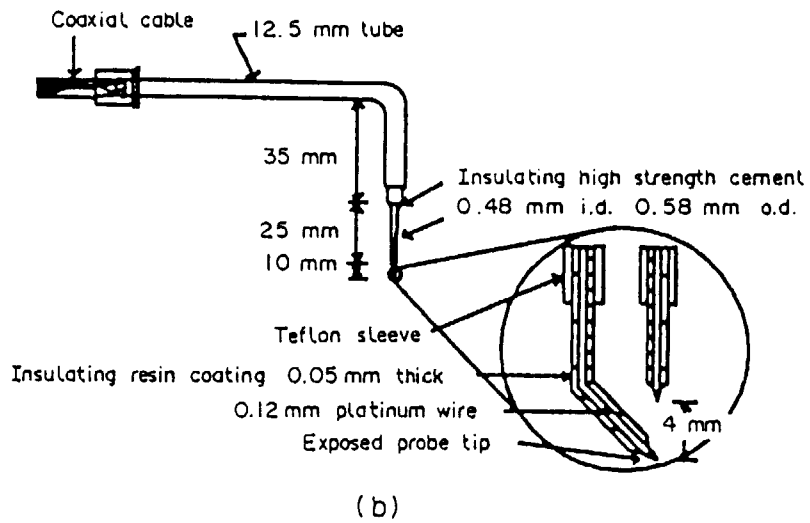
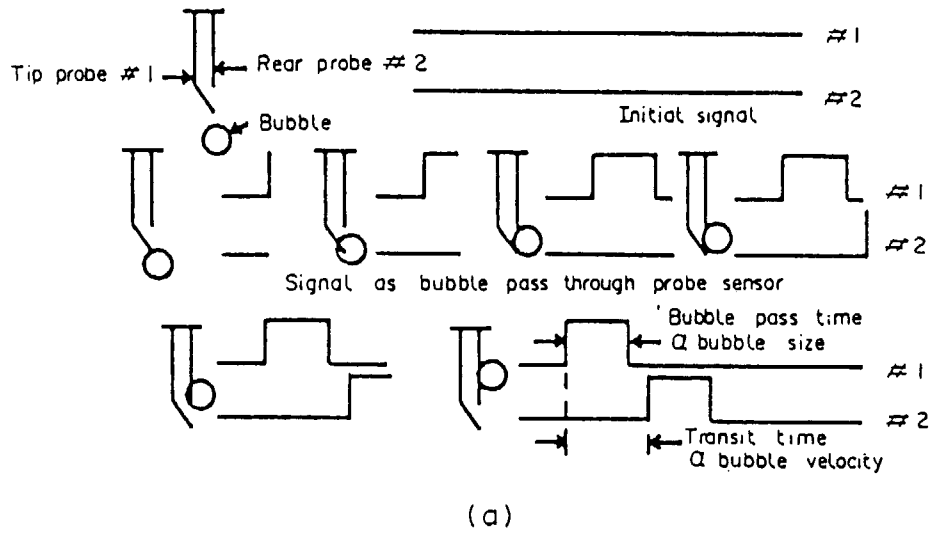


Fig.3 (a) 単一気泡のダブルセンサー・プローブ通過時の信号
 (b) ダブルセンサー・プローブのデザインの例
 (c) ダブルセンサー・プローブの先端と後方の信号の識別

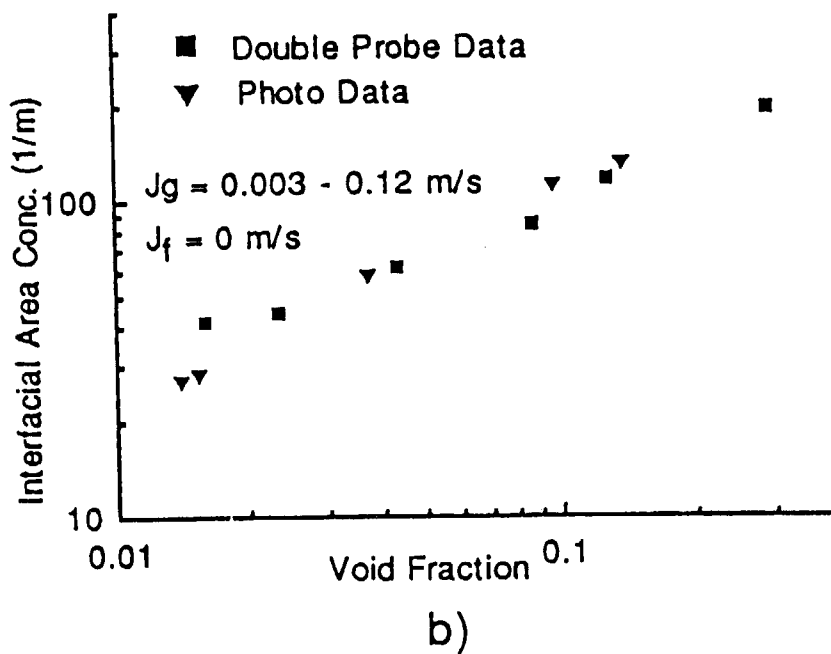
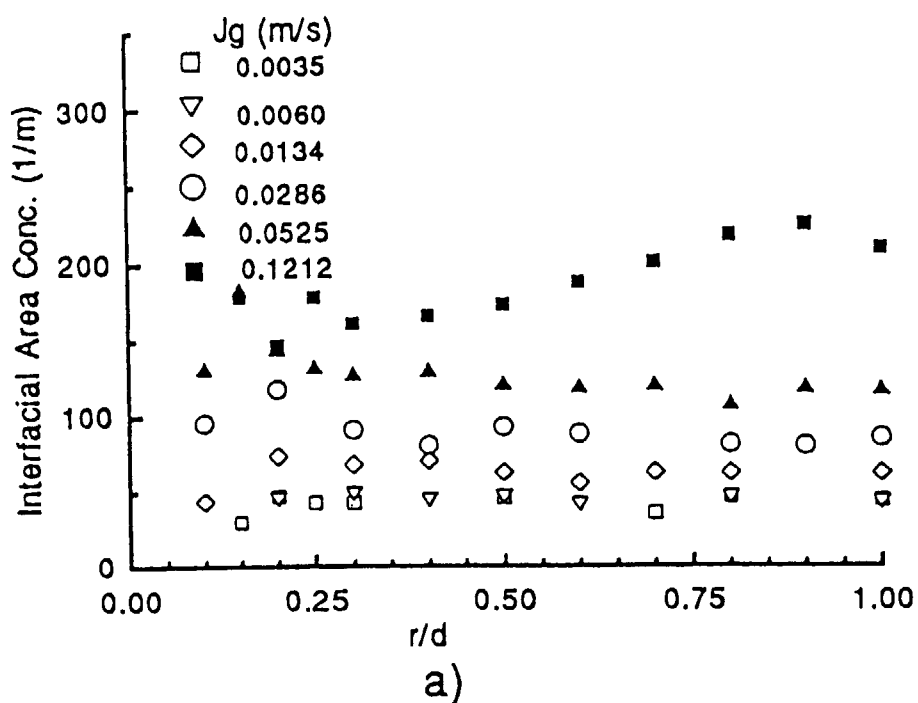


Fig.4 (a) 気泡コラム内界面積濃度の径方向分布と気相見かけ流速との関係
 (b) 平均界面積濃度とボイド率の関係：写真法との比較

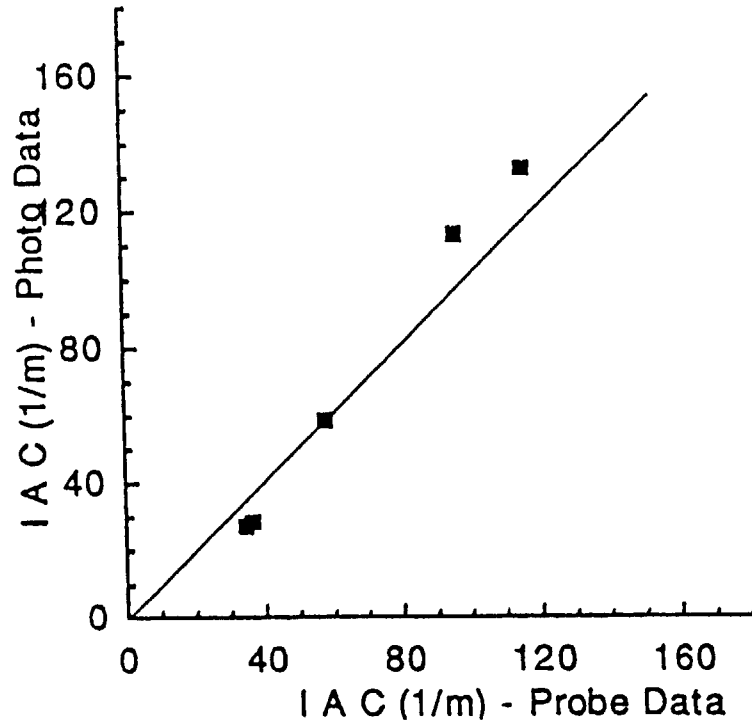


Fig.5 写真法とダブルセンサー・プローブ法による平均界面積濃度の比較

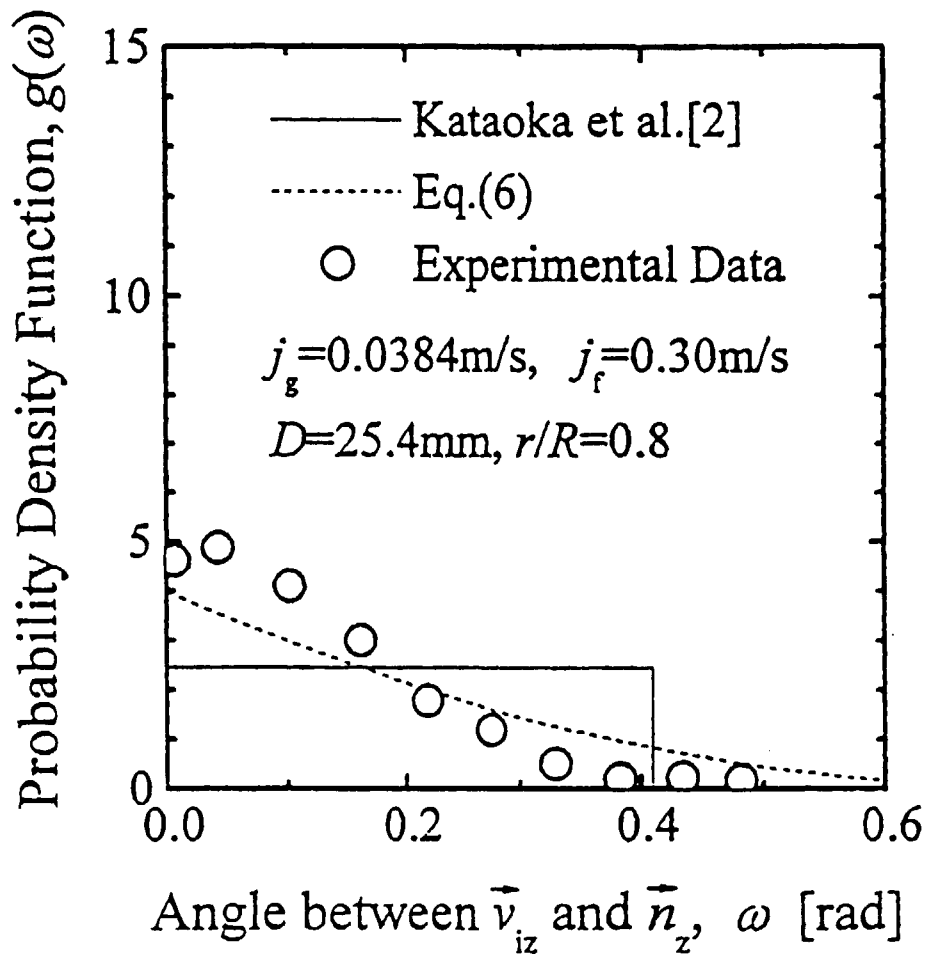


Fig.6 計算で仮定した確率密度関数と測定値との比較

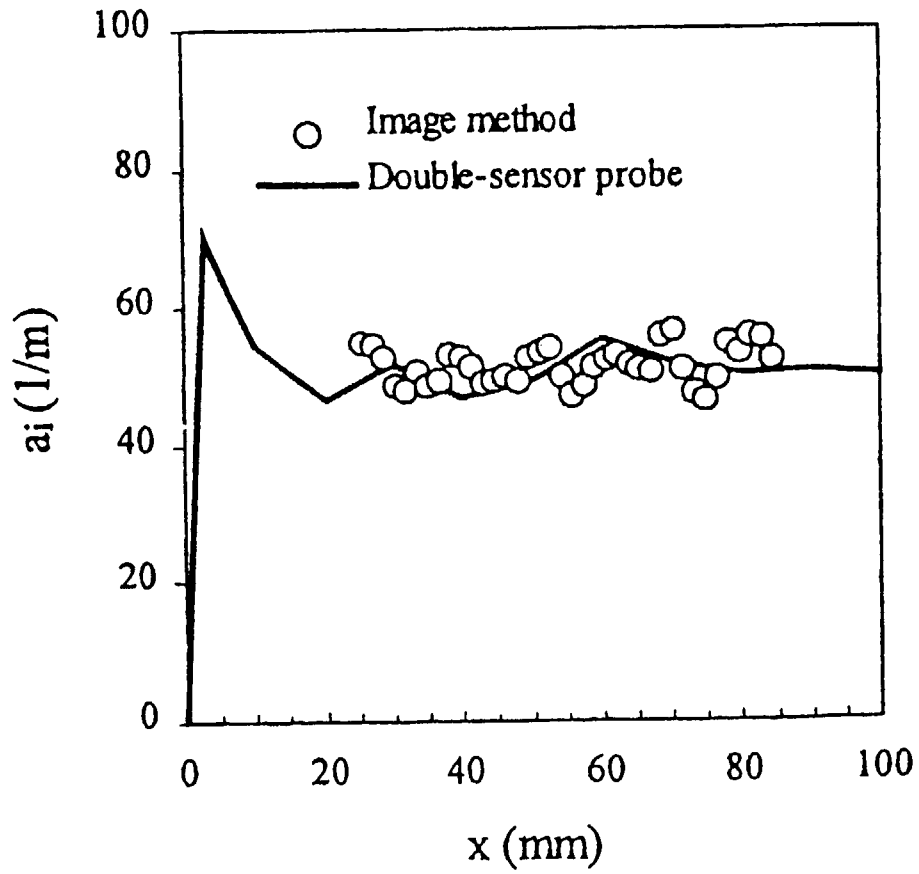
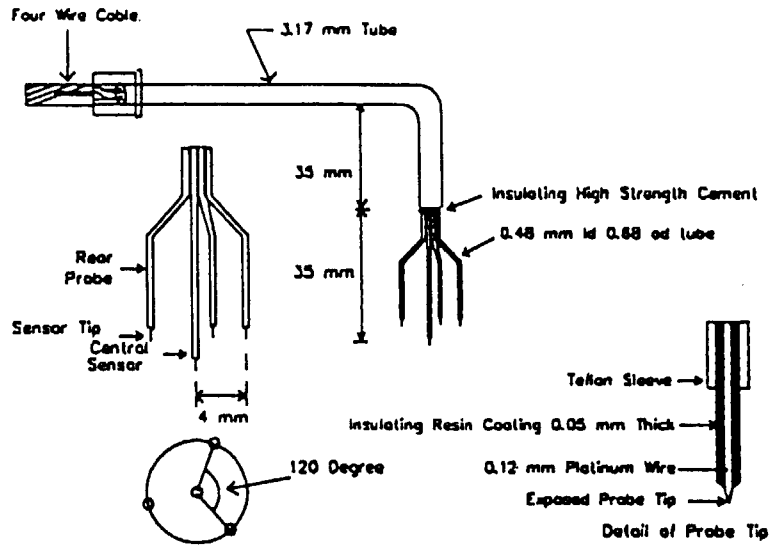
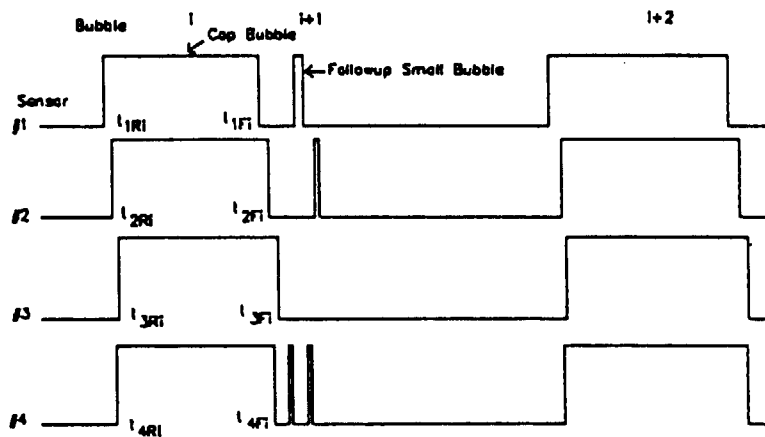


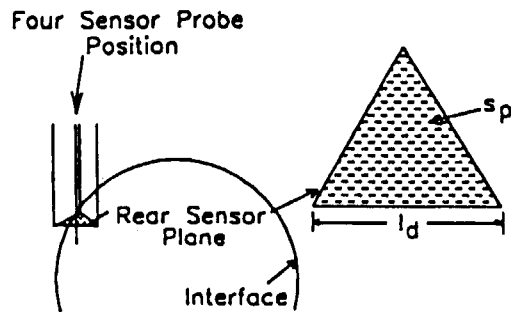
Fig.7 ダブルセンサー・プローブ法と画像処理法による界面積濃度の比較



(a)



(b)



(c)

Fig.8 (a) 4-センサー・プローブのデザイン例
 (b) 笠状気泡流における典型的な4-センサー・プローブからの出力
 (c) 後方センサー平面の投影と欠測界面に対するプローブ位置

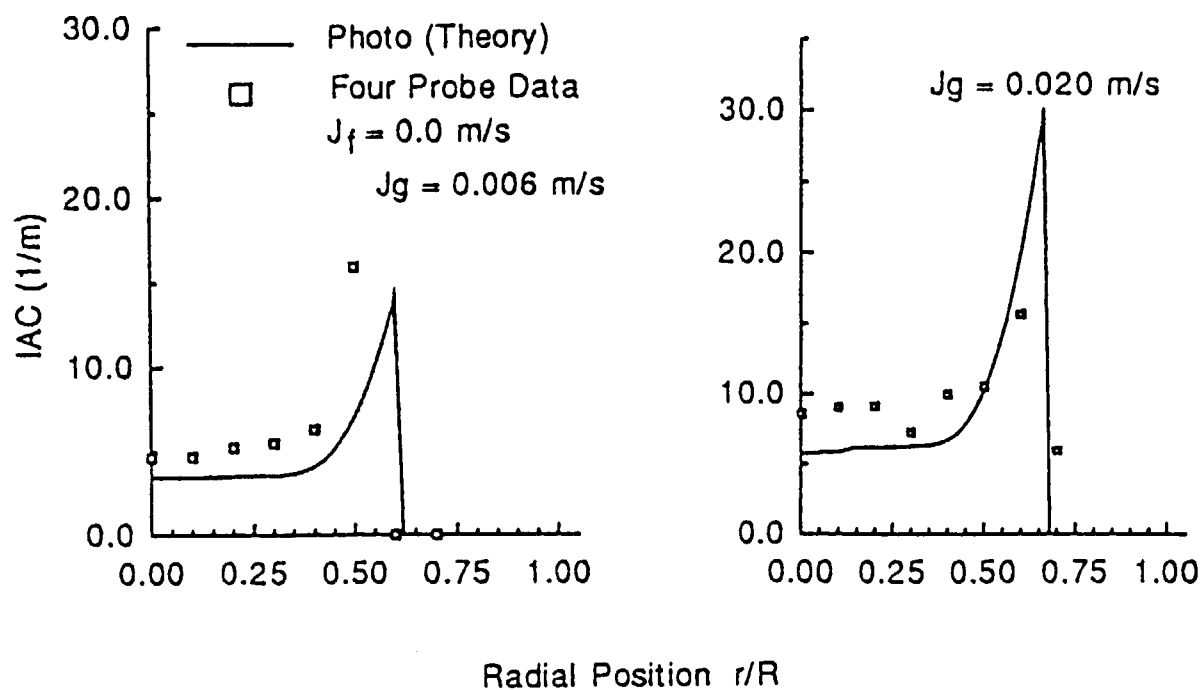


Fig.9 笠状気泡の界面積濃度の計算値と4-センサー・プローブによる測定値との比較

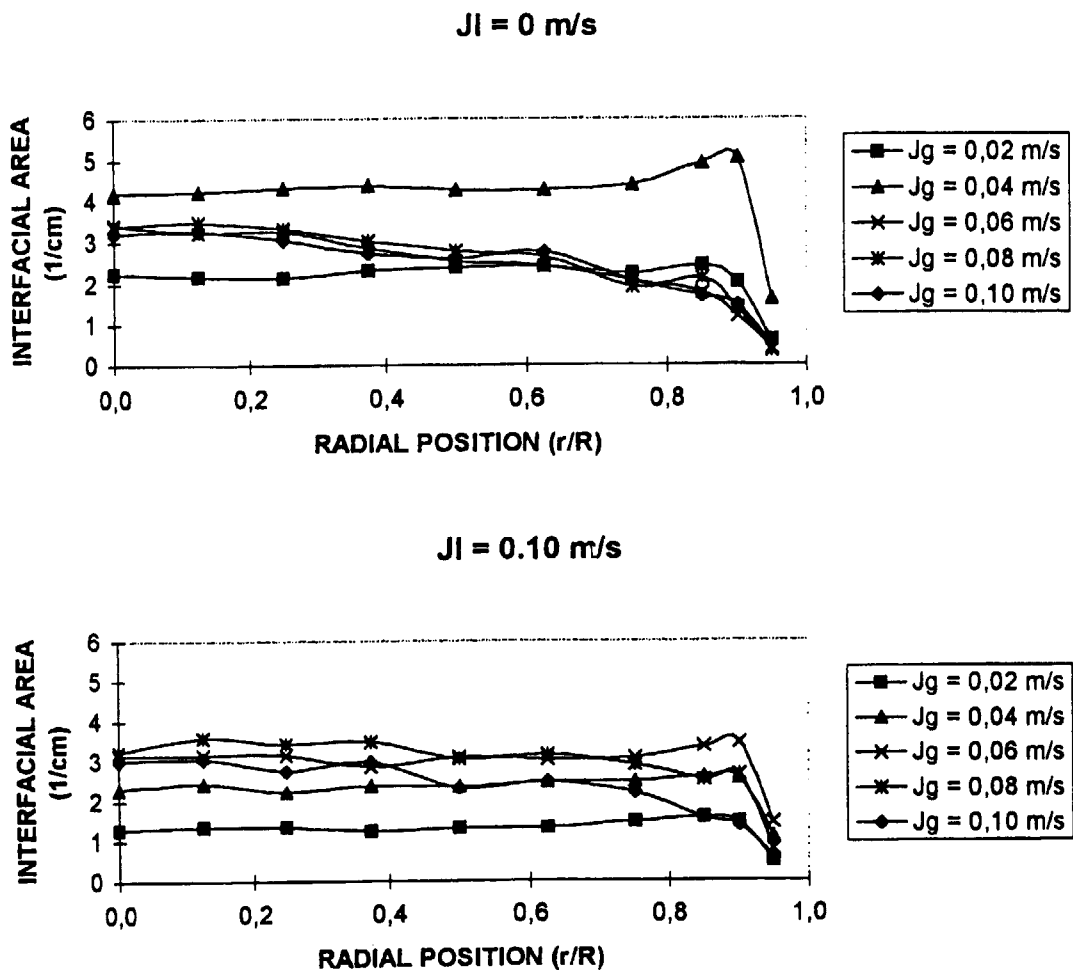


Fig.10 光学的プローブ法による界面積濃度の径方向分布計測例

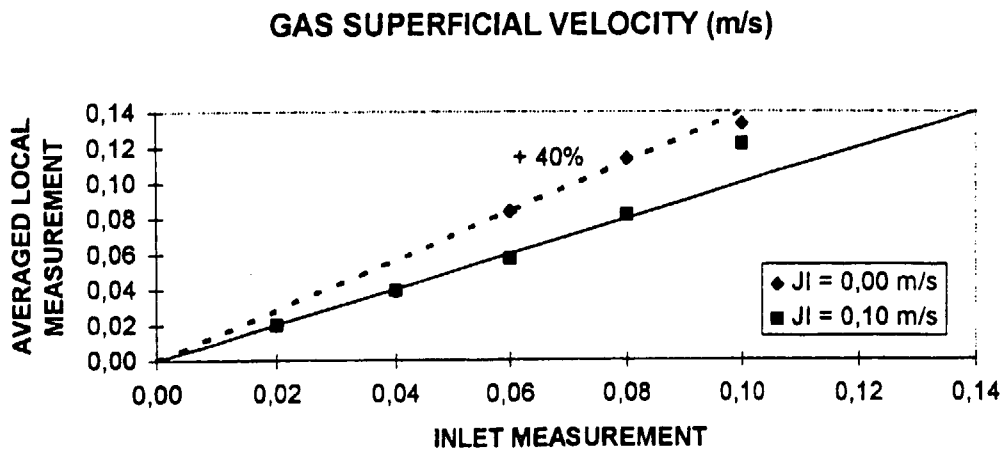


Fig.11 入口条件から求めた気相みかけ平均速度と光学的プローブ法による測定値値の比較

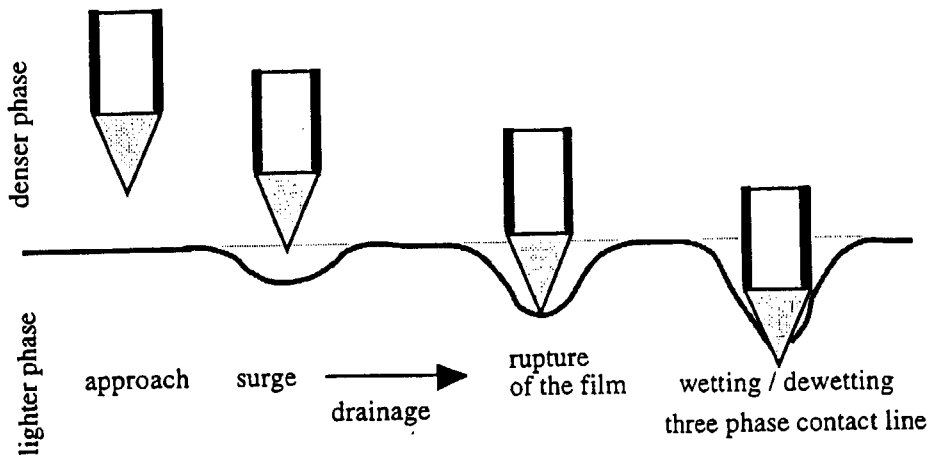


Fig.12 光学的プローブの先端と界面との相互作用

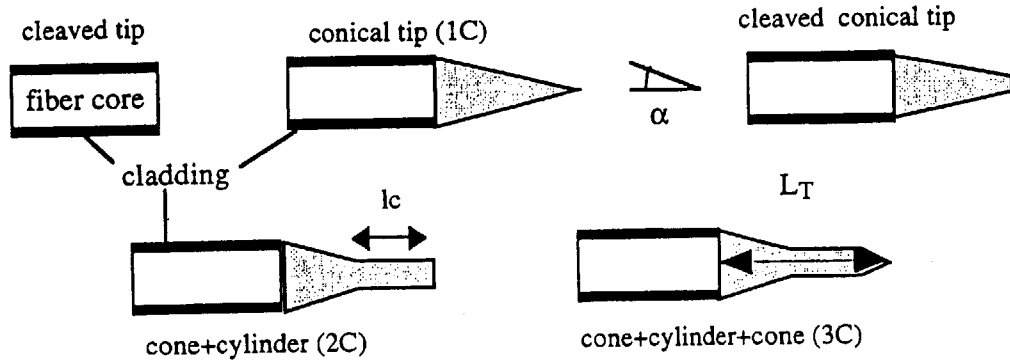


Fig.13 光学的プローブ先端の形状

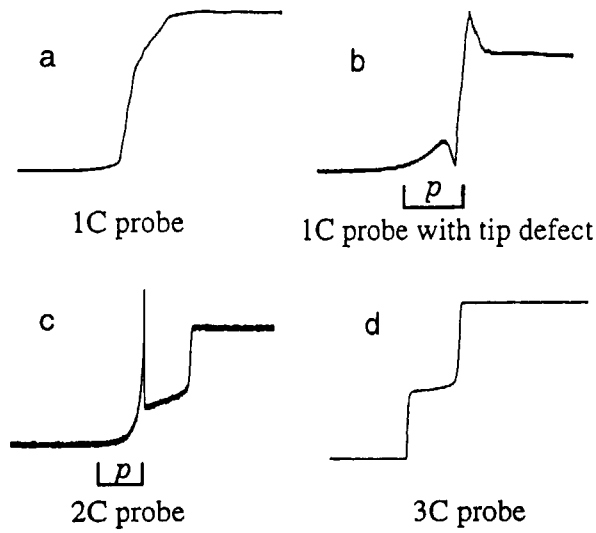


Fig.14 各種プローブ先端形状に対する水から空気への変化に対応する信号

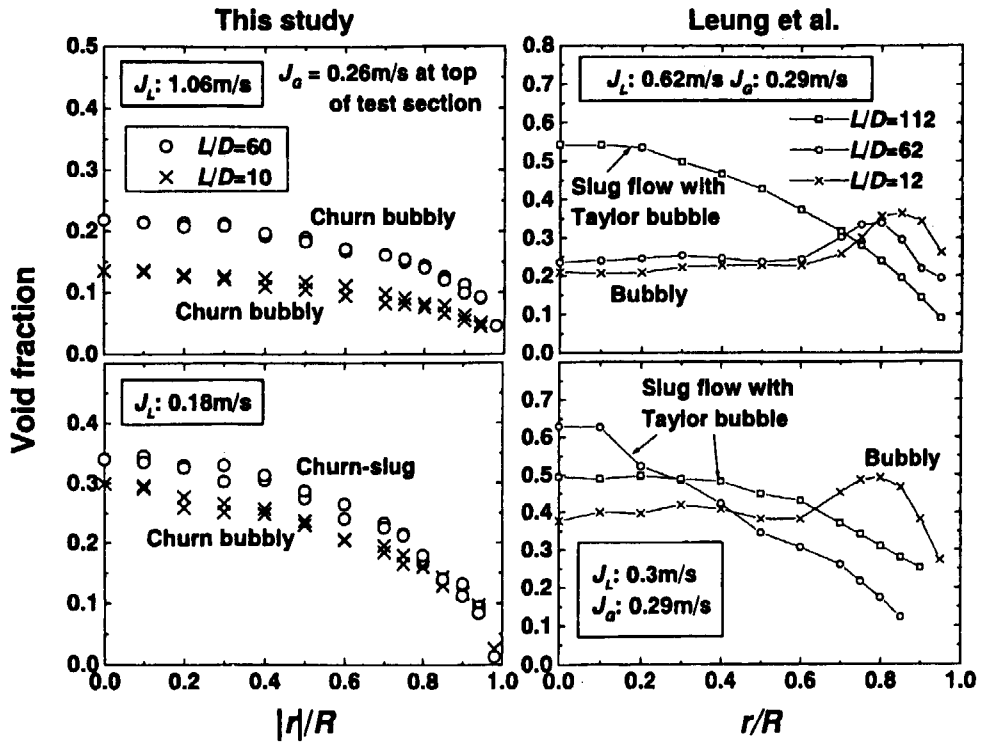


Fig.15 大口径管と小口径管の流れ方向の相分布の変化の比較

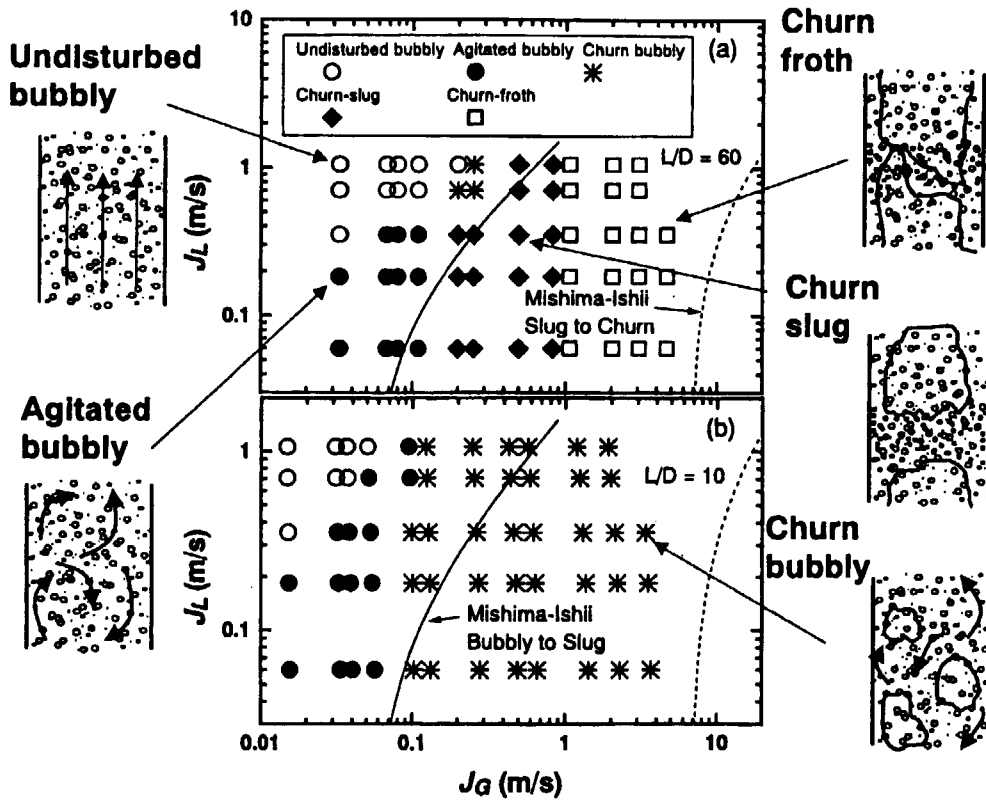


Fig.16 大口径管の流動様式：(a) 試験部下流($L/D=60$)、(b) 試験部入口($L/D=10$)

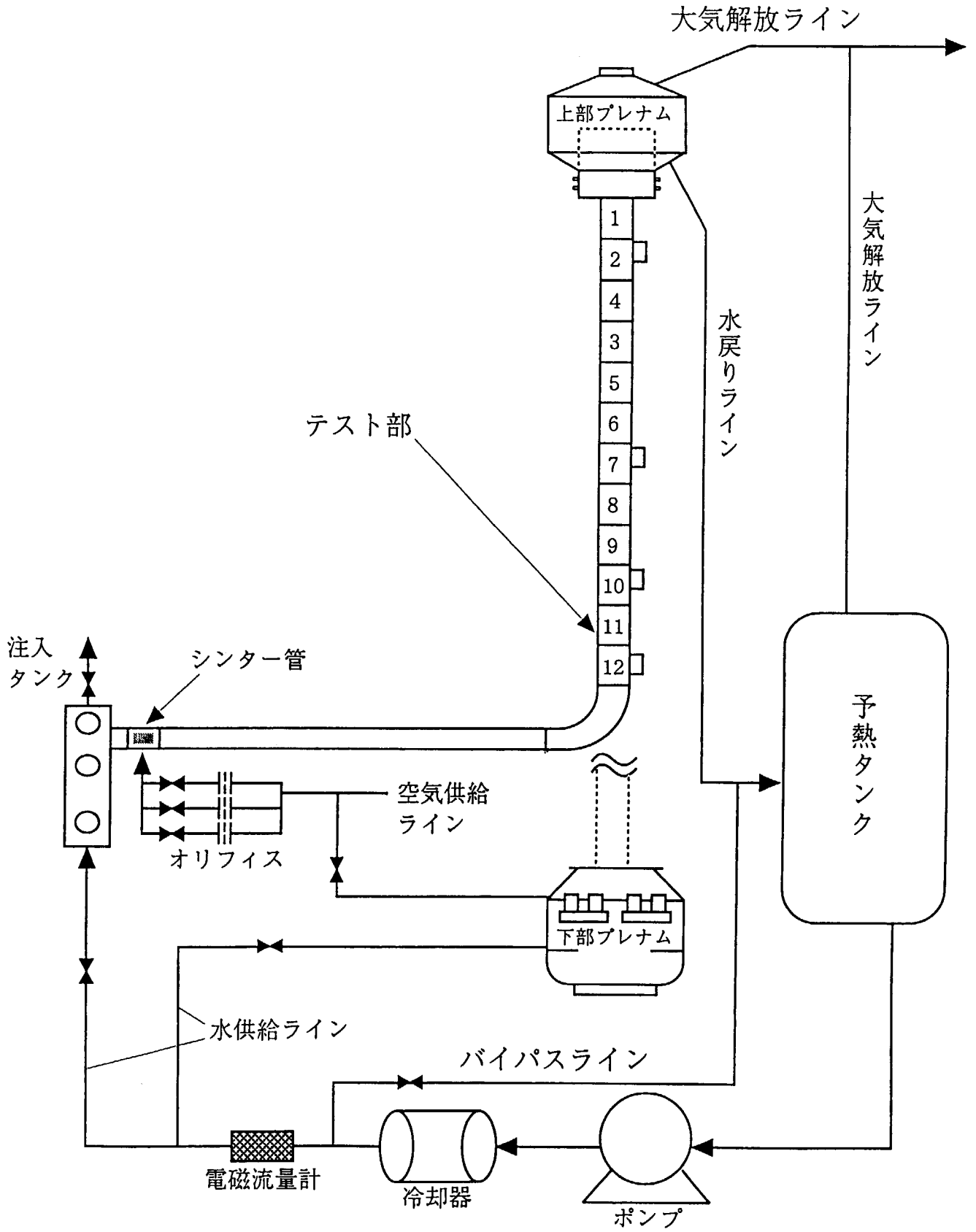


Fig.17 大口径管内気液二相流実験装置の概略

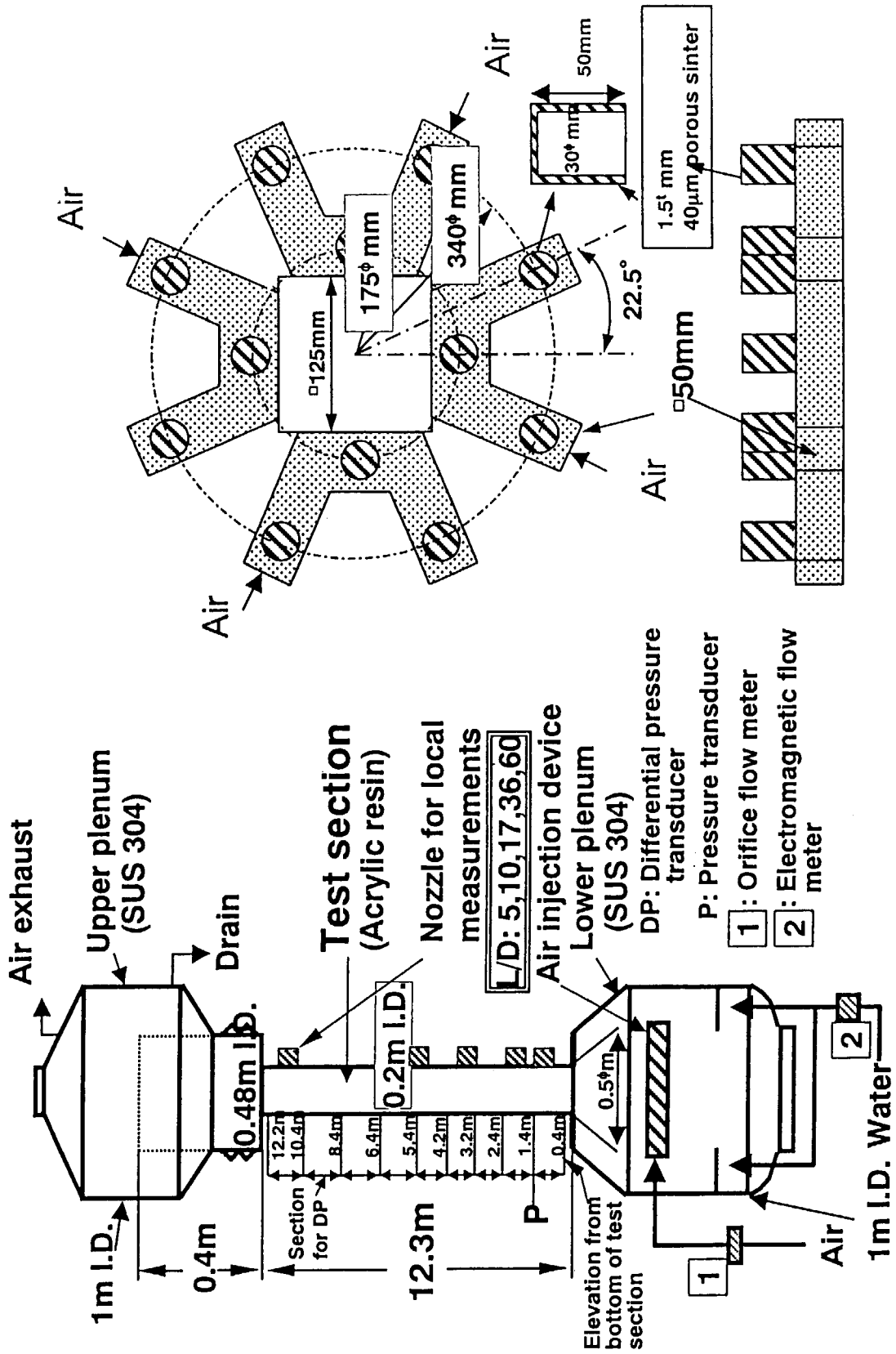


Fig.18 大口径管試験部の概略

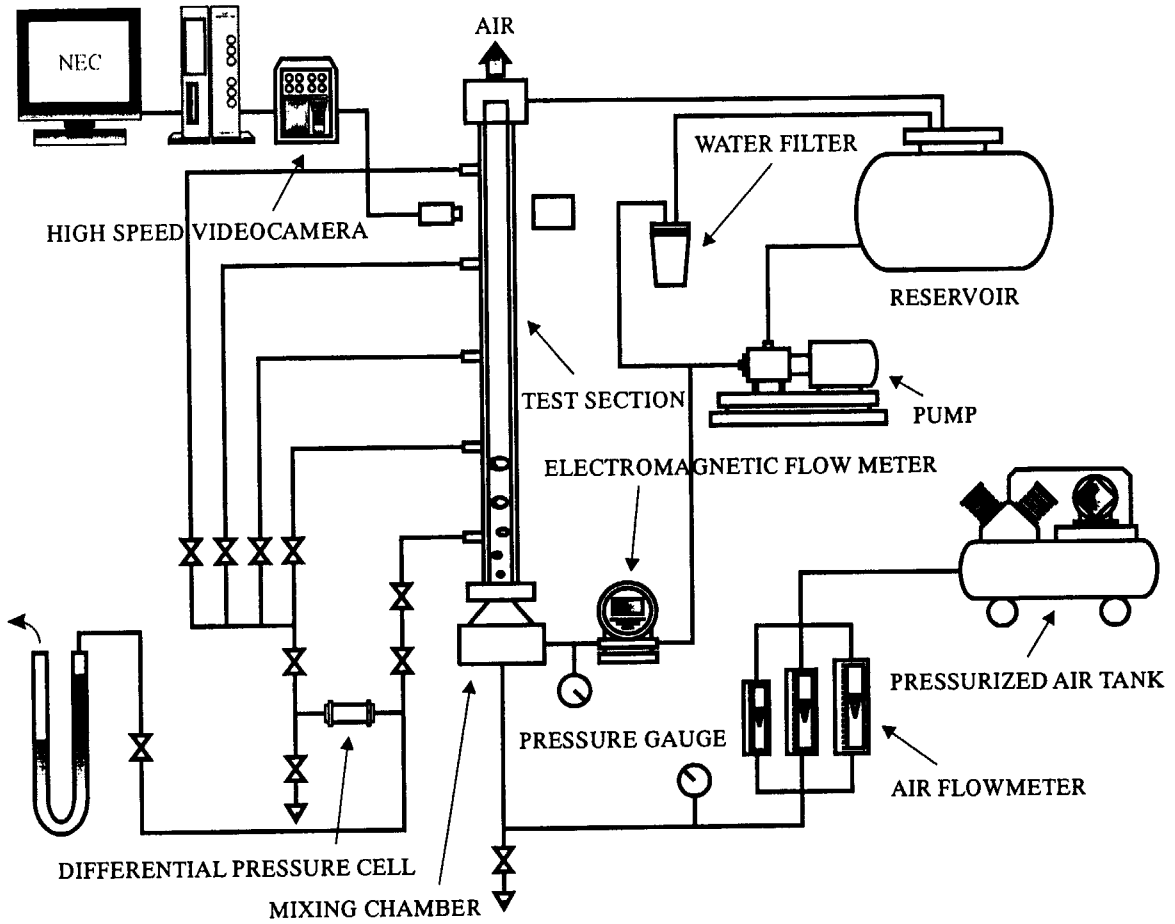


Fig.19 計測法確認実験装置の概略

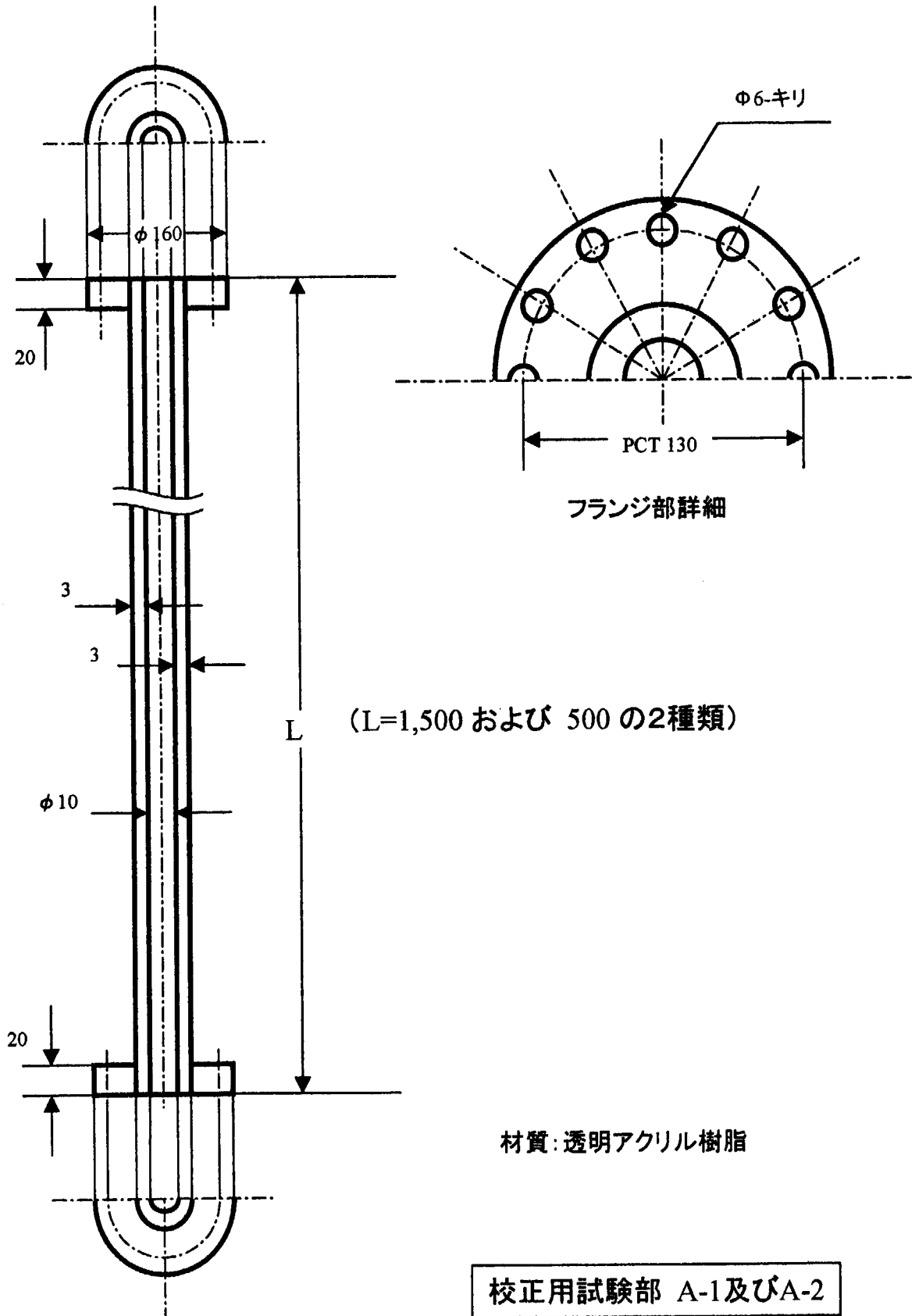


Fig.20 計測法確認用小口径円管試験部

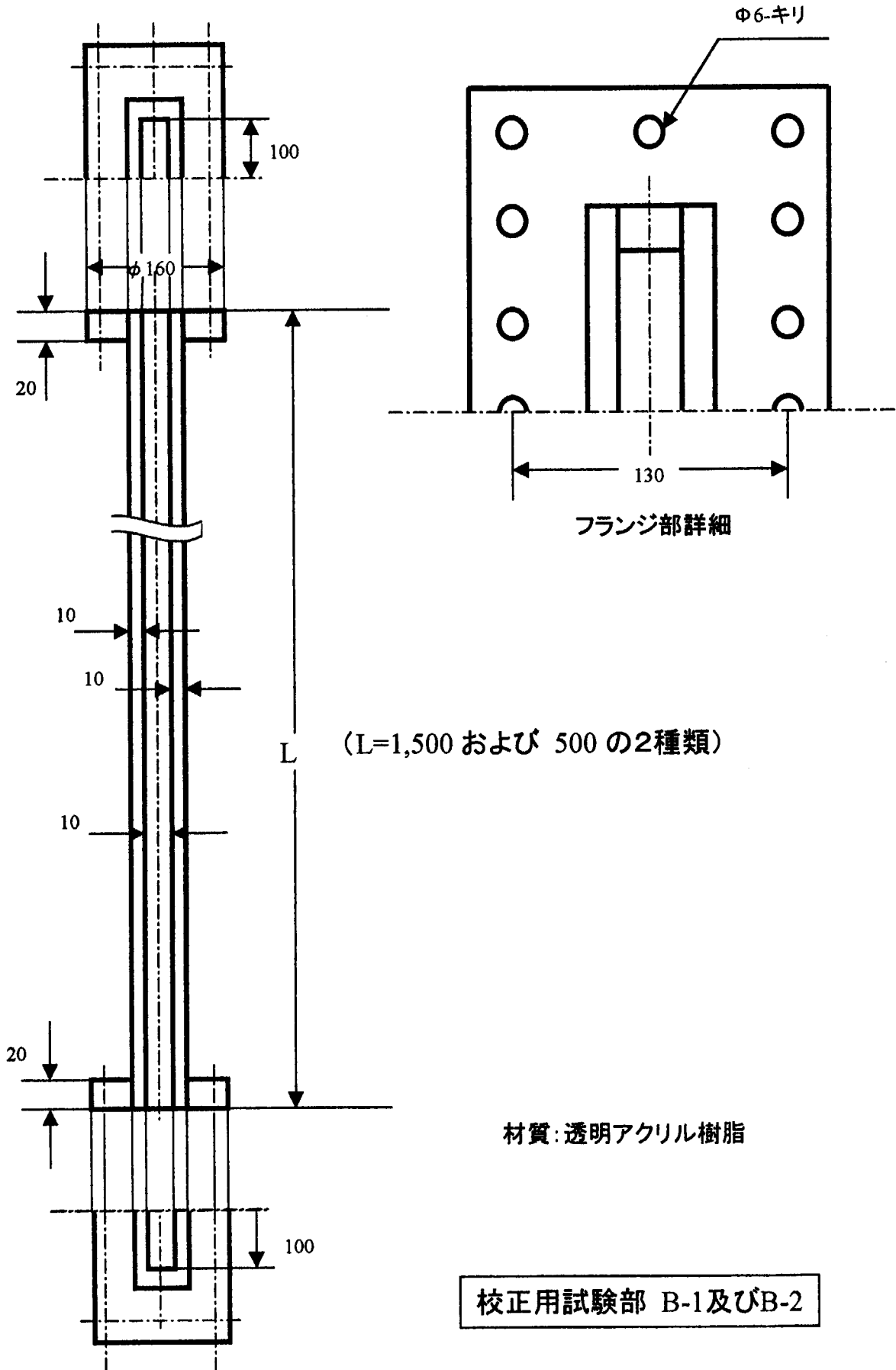


Fig.21 計測法確認用矩形管試験部

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
上率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

- 1 cal = 4.18605 J (計量法)
 = 4.184 J (熱化学)
 = 4.1855 J (15 °C)
 = 4.1868 J (国際蒸気表)
- 仕事率 1 PS (仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

