

JAERI-M  
89-127

サブチャンネル解析及び CHF 予測に及ぼす  
二相混合係数の影響

1989年9月

岩村 公道・大久保 努・末村 高幸  
平賀富士夫・村尾 良夫

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

JAERI-M 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。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 (株)高野高速印刷

サブチャンネル解析及びCHF予測に及ぼす二相混合係数の影響

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部  
岩村 公道・大久保 努・末村 高幸  
平賀富士夫・村尾 良夫

(1989年8月24日受理)

従来のサブチャンネル解析では、単相流で求めた乱流混合係数を二相流でも使用していた。本研究では、バンドル体系でのCHF予測精度の向上のため、二相流条件下での流体混合促進効果を考慮する。まず、二相流条件下でのサブチャンネル間流体混合に関して文献調査を行なった結果、流体混合量は流動様式に対応していることが明らかとなった。すなわち、混合流量は気泡流領域ではボイド率と共に増加し、スラグ／チャーン流でピークに達し、環状流になれば減少する傾向が認められた。次に、佐田富の実験データに基づいて、ボイド率の関数として混合係数を表現し、この関係をCOBRA-I V-I サブチャンネル解析コードに組み込んだ。本コードを用いて、Rowe and Angle の沸騰二相流サブチャンネル混合実験の解析を行い、エンタルピー分布について比較的よい一致を得た。この二相流混合係数モデルをKf KのCHF相関式と共に、高ボイド率条件下での定常CHF実験解析に適用した結果、従来の単相流混合係数を用いた場合に比較して、CHFの予測値は約5%大きくなつた。すなわち、二相流による流体混合促進効果に伴う安全余裕の程度は、定常時に関する限り、CHF相関式の予測精度の範囲内と評価された。

Effect of Two-Phase Mixing Coefficient on  
Subchannel Analysis and CHF Prediction

Takamichi IWAMURA, Tsutomu OKUBO, Takayuki SUEMURA

Fujio HIRAGA and Yoshio MURAO

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

(Received August 24, 1989)

Turbulent mixing coefficients obtained from single-phase mixing experiments were also used for a two-phase flow condition in previous subchannel analyses. In the present study, the enhancement of flow mixing between subchannels under two-phase flow condition was taken into account so as to improve the predictive capability of critical heat flux (CHF) in a rod bundle. Reviewing available literatures on subchannel flow mixing experiments under two-phase flow conditions, it was revealed that the mixing flow rate is flow regime dependant. That is, the mixing flow rate increases with void fraction in a bubbly flow regime and reaches a peak value in a slug/churn flow regime then decreases in an annular flow regime. An empirical correlation of two-phase mixing coefficient was introduced as a function of void fraction based on Sadatomi's experimental data. The correlation was implemented into the COBRA-IV-I subchannel code. Entalpy distribution of Rowe and Angle's mixing experiments under boiling two-phase flow conditions were reasonably well predicted with this code. Using the two-phase mixing correlation together with a KfK CHF correlation, a steady-state CHF under a high void fraction was predicted to increase by about 5% in comparison to the previous single-phase mixing assumption. Under a steady-state condition, the safety margin due to the two-phase mixing enhancement effect was evaluated to be within a predictive capability of the CHF correlation.

**Keywords:** Mixing Coefficient, Subchannel Analysis, COBRA Code, Two-Phase Flow, Critical Heat Flux, Void Fraction, Thermal-Hydraulic Design, Reactor Safety

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 二相流混合実験の文献調査 .....	2
2.1 Rowe and Angleの不均一断面複合流路による実験 .....	2
2.2 Rowe and Angleの等断面複合流路による実験 .....	3
2.3 Sternier and Laheyの実験 .....	4
2.4 佐田富の実験 .....	5
2.5 Tapucu らの実験 .....	6
3. 二相流条件下における混合係数とボイド率との関係 .....	7
3.1 混合係数のボイド率依存特性の導出 .....	7
3.2 COBRA-IV-I コードの改良 .....	9
3.3 Rowe and Angle の実験データとの比較 .....	9
3.4 ボイド率相関式がサブチャンネル解析に及ぼす影響 .....	10
4. 二相流混合モデルを用いた場合のサブチャンネル解析とCHF予測 .....	11
4.1 サブチャンネル解析への影響 .....	11
4.2 CHF予測への影響 .....	11
5. まとめ .....	12
参考文献 .....	14
付録 二相流混合係数とボイド率との関係を求めるのに用いたデータベース .....	45

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Review of Literatures on Two-Phase Mixing Experiments .....	2
2.1 Rowe and Angle's Experiments (Subchannels with nonuniform cross sections) .....	2
2.2 Rowe and Angle's Experiments (Subchannels with identical cross sections) .....	3
2.3 Sterner and Lahey's Experiments .....	4
2.4 Sadatomi's Experiments .....	5
2.5 Tapucu et al.'s Experiments .....	6
3. Relation between Mixing Coefficient and Void Fraction under Two-Phase Flow Condition .....	7
3.1 Derivation of Mixing Coefficient Correlation as a Function of Void Fraction .....	7
3.2 Improvement of COBRA-IV-I code .....	9
3.3 Comparison with Rowe and Angle's Data .....	9
3.4 Effect of Void Fraction Correlation on Subchannel Analysis .....	10
4. Subchannel Analysis and CHF Prediction Using Present Two-Phase Mixing Correlation .....	11
4.1 Effect on Subchannel Analysis .....	11
4.2 Effect on CHF Prediction .....	11
5. Conclusion .....	12
References .....	14
Appendix Data Base Used for Derivation of Two-Phase Mixing Correlation as a Function of Void Fraction .....	45

## 1. 序 論

バンドル形状での限界熱流束 (CHF) の予測には、局所的な流量およびエンタルピーを求める必要がある。このため、サブチャンネル間の流体混合を考慮したサブチャンネル解析コードが使用される。原研では高転換軽水炉の熱水力学的設計研究<sup>15)</sup>の一環として、COBRA-IV-I コード<sup>12)</sup>をサブチャンネル解析に使用している。本コードでは、サブチャンネル間の流体混合のメカニズムとして、圧力差による横流れ (diversion cross flow) と乱流混合 (turbulent mixing) を考慮し、それぞれ横流れ抵抗係数 ( $C_D$ ) 及び乱流混合係数 ( $\beta$ ) として入力するようになっている。高転換軽水炉を模擬した CHF 実験を対象として既に実施した感度解析の結果、この 2 つのメカニズムのうち、横流れ抵抗係数の影響は無視できるほど小さいが、乱流混合係数は CHF の予測に大きく影響することが明らかとなった。

単相流の乱流混合係数については、CHF 実験と同一形状のテスト部を用いて実験的に求めた結果、高転換軽水炉体系の乱流混合係数は、従来型 PWR の場合に比べてかなり小さくなることが分かった<sup>2)</sup>。しかしながら、CHF が発生する条件下では、サブクール沸騰または飽和沸騰による気泡が存在しており、特に流量低下事故時などの際にはかなり高いボイド率のもとで CHF が発生する可能性がある。このような二相流条件下では、サブチャンネル間の混合が促進され、乱流混合係数は単相流の場合よりも大きくなると考えられる。

ところで、二相流の混合係数に関する実験データはこれまで必ずしも十分でなく、COBRA-IV-I コードによる高転換軽水炉のサブチャンネル解析では、単相流の乱流混合係数を二相流にもそのまま適用せざるを得ないのが実状であった。このことは、サブクール沸騰開始後のサブチャンネル間の混合を実際よりも過小評価するため、ホットチャンネルでの質量速度は小さく、エンタルピーは大きく評価されることになる。その結果、核沸騰離脱 (DNB) による除熱能力の低下に対する余裕度、すなわち DNBR (DNB 発生限界熱流束／炉心局所熱流束) は実際よりも小さくなり、安全評価上は保守的になっている。本研究の目的は、混合係数のボイド率依存性を考慮することにより、従来の混合係数一定の仮定に伴う CHF 評価の安全余裕を定量的に評価することである。

以下では、従来の代表的な二相流混合実験をレビューし、COBRA-IV-I コードで使用可能のように、乱流混合係数とボイド率との関係を求める。さらに、この関係を COBRA-IV-I コードに導入し、サブチャンネル解析及び CHF の評価に及ぼす影響について述べる。

## 2. 二相流混合実験の文献調査

### 2.1 Rowe and Angle の不均一断面複合流路による実験<sup>3)</sup>

#### (1) 実験方法

テスト部形状は Fig. 2.1 に示すように、異なる断面積の 2 個のサブチャンネルを模擬した複合流路である。テスト部形状寸法も Fig. 2.1 に示す。ギャップ幅は 2.13 mm と 0.51 mm の二種類のテスト部を用いた。管壁は直接通電により加熱し、沸騰二相流条件下での実験が可能である。

実験では、所定の入口温度、入口流量のもとで等温状態に達してから出力をゆっくり上昇させて、各サブチャンネルの流量、温度、圧力、差圧等を測定した。なお、乱流混合成分の直接的な測定はなされていない。

#### (2) 実験条件

圧 力 (MPa) : 6.21

質量速度 (kg/s・m<sup>2</sup>) : 1356, 2712, 4069

入口温度 (°C) : 165.6, 265.6

#### (3) 結 果

各サブチャンネルのエンタルピー上昇量と出口質量速度の測定値と、COBRAコードによる計算値の比較を、ギャップ幅 2.13 mm と 0.51 mm の場合について、Fig. 2.2, 2.3 にそれぞれ示す。ここで、乱流混合係数  $\beta$  は実験値と COBRA コードの計算値が一致するように選択した。その結果以下の知見を得た。

- $\beta$  はクオリティと共に増加するが、高クオリティ領域ではクオリティと共に減少する傾向にある。
- 2.13 mm ギャップの場合には、沸騰時の  $\beta$  は非沸騰時の約 2 倍になる。
- 一方、ギャップ幅が 0.51 mm の場合には、沸騰時の  $\beta$  は非沸騰時に比べて顕著な上昇を示さない。

#### (4) コメント

本実験では、出口での流量分布やエンタルピー上昇量のみを測定しており、局所的な混合流量の直接測定はなされていない。二相流条件下での混合係数の増加には言及しているが、乱流混合係数を局所クオリティまたは局所ボイド率の関数として系統的には表示しておらず、この結果はそのままでは COBRA-IV-I コードの入力データとして使用することはできない。しかしながら、本実験では、実炉を模擬したサブチャンネル形状で、高圧下での沸騰二相流条件下におけるデータを取得しており、サブチャネルコード検証用としては、重要なデータベースである。本実験データは、3 章において、混合係数のボイド率依存性を考慮した場合の COBRA-IV-I コードの検証用に使用する。

## 2.2 Rowe and Angle の等断面複合流路による実験<sup>4)</sup>

### (1) 実験方法

テスト部形状はFig. 2.4に示すように、正方配列ロッドバンドルの隣接2サブチャンネルを模擬した複合流路である。テスト部形状寸法は、ロッド径14.3mmで、ギャップ幅は2.16mmと0.51mmの二種類のテスト部を用いた。また、スペーサのある場合とない場合の両方について調べた。加熱長さは1.524mである。管壁は直接通電により加熱し、沸騰二相流条件下での実験が可能である。

乱流混合成分の測定には、以下に示す3種類のトレーサを用いた。

トレーサ	測定対象	測定方法
水素化リシウム	乱流混合の液体成分	分光光度計
重水	乱流混合の気液両成分	赤外線分光光度計
トリチウム	乱流混合の気液両成分	放射能測定

### (2) 実験条件

圧 力 (MPa)	: 2.76, 5.17
質量速度 (kg/s·m <sup>2</sup> )	: 1356, 2712, 4069
入口サブクール度	: 13.9°C
出口クオリティ	: 10 ~ 30%

### (3) 結 果

Fig. 2.5 ~ 2.8に、単位長さ当たりの乱流混合量 ( $W'$ ) と両サブチャンネルの質量流量の総和 ( $m$ ) との比、すなわちミキシングパラメータ ( $W'/m$ ) と、出口クオリティとの関係を示す。

この結果以下の知見が得られた。

- 二相流条件下での流体混合は、一般に単相流の場合よりも大きくなるが、その程度はクオリティ、質量速度、圧力、ギャップ幅などのパラメータに強く依存する。
- 流体混合は10%以下の低クオリティ領域でピークに達し、さらにクオリティが大きくなると、単相流の場合に近づく。このピークの位置は、圧力や質量速度により変化するが、いずれにしてもフロス流から環状流へのフローパターンの遷移に対応している。
- スペーサの存在は、特にピーク前の低クオリティ領域において混合を促進する傾向にあるが、その程度は顕著ではない。高クオリティ領域においては、逆にスペーサ付の方が混合を抑える場合もある。

### (4) コメント

本実験は、比較的高圧下での沸騰二相流を対象とし、実炉を模擬したサブチャンネル形状テスト部を使用しており、他の類似の実験に比べてデータの実炉への適用性が高い。また、乱流混合成分をトレーサ法により測定するなど、実験手法上もユニークな特長を有している。しかしながら、本実験でも、局所クオリティまたは局所ボイド率の測定はなされていないため、乱流混合係数をボイド率の関数として表示することはできない。

## 2.3 Stern and Lahey の実験<sup>5)</sup>

### (1) 実験方法

本実験は、低圧の空気-水二相流を用いている。テスト部の形状はFig. 2.9に示すような正方形配列4本ロッドバンドルで、ロッド径は25.4 mm, ロッドピッチは35 mm, テスト部の長さは914.4 mmとなっている。Fig. 2.9に示すように、テスト部出口から50.8 mmの位置で、中心、側面、及びコーナーの各サブチャンネルの流れがそれぞれ主流から分離され、各サブチャンネルごとに空気と水の流量が測定された。流れの分離に際しては、その位置で等圧条件(isokinetic condition)が成立するよう出口圧力を調節してから測定している。

### (2) 実験条件

圧 力	: 0.14 ~ 0.3 MPa
質量流量	: 450, 900 kg/s·m <sup>2</sup>
出口クオリティ	: 0 ~ 0.54 %
出口ボイド率	: 0 ~ 52.9 % (Zuber-Findlayの相関式 <sup>13)</sup> 使用)

### (3) 実験結果

各サブチャンネルの出口クオリティ及びボイド率と、それとのバンドル平均値との比較を、低流量(450 kg/s·m<sup>2</sup>)と高流量(900 kg/s·m<sup>2</sup>)の場合についてFig. 2.10 ~ 2.13に示す。この結果より、以下の知見が得られた。

- 中心サブチャンネルの出口クオリティ及びボイド率は、バンドル平均値よりも大きい。
- コーナーサブチャンネルの出口クオリティ及びボイド率は、バンドル平均値よりも小さい。
- 側面サブチャンネルの出口クオリティ及びボイド率は、バンドル平均値にはほぼ一致する。
- この傾向はクオリティによらず成立する。

ところで、Laheyらによれば、COBRAコードで乱流混合係数のみをチューニングしても、コーナーサブチャンネルで低クオリティとなる現象を予測することはできない。このため、Laheyらはボイドドリフトモデルを提唱し、このモデルを従来の乱流混合モデルと併用すると、サブチャンネル間の質量速度やエンタルピーの分布を良く予測することができるとしている<sup>6,7)</sup>。

### (4) コメント

本実験は、ロッドバンドル体系で各サブチャンネルの流量分布を測定しており、サブチャンネル解析コードの検証用データとしては有用である。しかしながら、本実験では乱流混合量自体の直接的な測定はなされておらず、またRoweの実験と同様に出口クオリティ(ボイド率)で整理しているので、COBRAコードで使用する乱流混合係数を、クオリティまたはボイド率の関数として与えることはできない。また、提案されたボイドドリフト現象は、発達中の流れでは顕著かもしれない、十分発達した流れでは乱流混合が支配的になると考えられる。

## 2.4 佐田富の実験<sup>8)</sup>

本研究には、非円形单一流路内の気液二相流、複合流路内の単相乱流などの実験も含まれているが、ここでは複合流路における空気－水二相流の実験結果について述べる。

### (1) 実験方法

テスト部形状は、Fig. 2.14に示すように、断面積の異なる2個のサブチャンネルからなる複合流路で、半円形状の流路（I-J流路）及び長方形流路（A-B流路）の2種類を用いた。I-J流路は、直径25mm及び20mmの半円流路をギャップ幅1.1mm長さ3mmの間隙部で接続しており、流路面積比はBWRの中央部／側壁部のサブチャンネル面積比を模擬している。A-B流路は、両サブチャンネルの面積比及びギャップ幅をパラメータとして変化させている。実験装置及び計測項目はFig. 2.15に示す。主な計測項目と測定方法は以下の通りである。

計測項目	測定方法
気液流量配分	各サブチャンネル出口で、等速排出条件を満足するように圧力を調整してからナイフエッジにより流れを分離して、各相の流量を測定。
液相乱流混合量	一方のサブチャンネルに染料を注入し、軸方向の濃度変化からマスバランスにより求める。濃度変化は分光光度計により吸光度を測定して求める。
流路軸方向平均ボイド率	急速開閉弁（I-J流路のみ）
断面ボイド率分布	点電極プローブ
圧力損失	逆U字空気－水マノメータ

### (2) 実験条件

圧 力	1.08 ~ 1.3 atm
見かけの液流速	0.1 ~ 2.0 m/s
見かけの空気流速	0.3 ~ 2.7 m/s
入口温度	10 ~ 26 °C
流路平均ボイド率	0 ~ 0.89 (I-J流路のみ)

### (3) 結 果

代表的なA-B流路とI-J流路の場合について、単位長さ当たりの液相乱流混合量  $W'_{LTP}$  (kg/s·m) と、見かけの空気流速  $j_G$  (m/s)との関係を、見かけの液流速  $j_L$  (m/s)をパラメータとして、Fig. 2.16及び2.17にそれぞれ示す。本実験では流動様式の観察も行なっているので、フローパターンの遷移点も表示してある。

この結果フローパターンと乱流混合量の関係は以下のようになる。

$j_G$ 増加による乱流混合量の傾向	理 由
・気泡流では増加	気泡による攪乱効果。
・環状流では減少	サブチャンネル間隙が液相で満たされる割合が減少する。
・スラグ／チャーン流ではほぼ一定	以上 2 種類の効果が相殺。

また、乱流混合量は、サブチャンネル断面形状や間隙寸法にも依存し、その依存の程度は流動様式によっても異なる。このため、一般的な予測式を得ることは困難である。

#### (4) コメント

本実験では、乱流混合成分と流路軸方向平均ボイド率とを同時に測定しているので、得られた実験データは、COBRAコードで定義されている乱流混合係数を、局所クオリティまたは局所ボイド率の関数として表示するのに使用できる。この関係の導出については、3章で述べる。ただし、本実験は大気圧下の空気－水二相流で実施されており、サブチャンネル形状もロッドバンドルを模擬したものではない。実験結果でも述べたように、乱流混合量は幾何学的形状にも依存するので、本データをそのまま実炉の解析に使用するには問題があり、さらに実際に即した体系での実験データを蓄積することが重要である。

### 2.5 Tapucu らの実験<sup>10)</sup>

#### (1) 実験方法

テスト部形状は、Fig. 2.18 に示すように、ロッドバンドルの 2 つの等断面サブチャンネルを模擬しており、空気－水二相流で実験を行なった。

テスト部寸法	ロッド径	: 8.8 mm
	ギャップ	: 1.7 mm
	水力等価直径	: 7.2 mm
	連結区間の長さ	: 1.32 m

実験方法としては、両サブチャンネルの入口液流量は一様として、一方のサブチャンネルに空気を流入させ、各サブチャンネルのボイド率、気液両相の流量等の軸方向変化を測定した。

測定項目は以下の通りである。

計測項目	測 定 方 法
ボイド率	銀電極間の伝導度を軸方向 10 カ所で測定
液相混合量	一方のサブチャンネル（高ボイド率）に、食塩を注入し、軸方向 10 カ所からサンプリングして濃度を測定
気相混合量	液相混合量とボイド率測定結果から求める。

その他、圧力及びサブチャンネル間の差圧も測定

#### (2) 実験条件

圧 力	大気圧
液 温 度	20 °C

液質量速度  $3000 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$  (論文に記載されているデータ)

空気質量速度  $1.4, 21.8 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$  (論文に記載されているデータ)

### (3) 実験結果

テスト部入口付近では、高ボイドチャンネルから低ボイドチャンネルに液が流入するが、テスト部上半分では、液の一部は再び高ボイドサブチャンネルに再流入する現象が認められた (Fig. 2.19)。ただし、サブチャンネル間の差圧は常に高ボイドチャンネルの方が高かった。

COBRA-III-C と COBRA-IV コードを用いて、低ボイドサブチャンネルのボイド率変化を最もよく予測するように乱流混合係数  $\beta$  をチューニングし (Fig. 2.20),  $\beta$  とクオリティの関係を求めた (Fig. 2.21)。しかしながら、このようにボイド率が一致するよう  $\beta$  をフィッティングしても、低ボイドサブチャンネルの液流量の変化を予測することはできなかった (Fig. 2.19)。

### (4) コメント

Tapucu らは、COBRA コードによる計算値がボイド率の実測値に一致するよう、乱流混合係数を選択し、その結果をクオリティの関数として表示しているが、乱流混合量と平均質量速度との関係については言及しておらず、この表示式には物理的根拠はない。また、液単相流での乱流混合係数は求めていないので、同一テスト部の単相流乱流混合係数に対して、二相流になった場合の混合係数の増加率については情報が得られない。

ボイド率  $\alpha$  を EPRI 相関式<sup>14)</sup> (3.4 節参照) で求めて、Fig. 2.21 の  $\beta$  とクオリティ X の関係を、 $\beta$  と  $\alpha$  の関係として表示すると、以下のようになる。

クオリティ X	0.001	0.002	0.004
ボイド率 $\alpha$	0.350	0.487	0.620
乱流混合係数 $\beta$	0.0037	0.0156	0.0280

この実験範囲では、 $\beta$  はボイド率  $\alpha$  に対して単調に増加している。

ところで、Tapucu らの正方形チャンネル (一辺 12.7 mm, ギャップ幅 1.5 mm) を用いた実験<sup>11)</sup> によると、低ボイドサブチャンネルの方がやや圧力が高くなる傾向にあり、上記データと異なる傾向を示している。なお本実験では、流路ごとの入口ボイド率が異なるため、流路入口でサブチャンネル間に圧力差が生じ、横流れ効果が強くなっている。Tapucu らも diversion cross flow と turbulent mixing の効果を区別することは困難と述べているように<sup>11)</sup>、彼らの実験は、二相流の混合係数を直接求めるのには適しない。

## 3. 二相流条件下における混合係数とボイド率との関係

### 3.1 混合係数のボイド率依存特性の導出

以上の文献調査により、COBRA コードで用いる乱流混合係数  $\beta$  を二相流条件下で使用するための表示式を求めるデータベースとしては、実験条件や形状に難点があるものの、佐田富の実験

液質量速度  $3000 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$  (論文に記載されているデータ)

空気質量速度  $1.4, 21.8 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$  (論文に記載されているデータ)

### (3) 実験結果

テスト部入口付近では、高ボイドチャンネルから低ボイドチャンネルに液が流入するが、テスト部上半分では、液の一部は再び高ボイドサブチャンネルに再流入する現象が認められた (Fig. 2.19)。ただし、サブチャンネル間の差圧は常に高ボイドチャンネルの方が高かった。

COBRA-III-C と COBRA-IV コードを用いて、低ボイドサブチャンネルのボイド率変化を最もよく予測するように乱流混合係数  $\beta$  をチューニングし (Fig. 2.20),  $\beta$  とクオリティの関係を求めた (Fig. 2.21)。しかしながら、このようにボイド率が一致するよう  $\beta$  をフィッティングしても、低ボイドサブチャンネルの液流量の変化を予測することはできなかった (Fig. 2.19)。

### (4) コメント

Tapucu らは、COBRA コードによる計算値がボイド率の実測値に一致するよう、乱流混合係数を選択し、その結果をクオリティの関数として表示しているが、乱流混合量と平均質量速度との関係については言及しておらず、この表示式には物理的根拠はない。また、液単相流での乱流混合係数は求めていないので、同一テスト部の単相流乱流混合係数に対して、二相流になった場合の混合係数の増加率については情報が得られない。

ボイド率  $\alpha$  を EPRI 相関式<sup>14)</sup> (3.4 節参照) で求めて、Fig. 2.21 の  $\beta$  とクオリティ X の関係を、 $\beta$  と  $\alpha$  の関係として表示すると、以下のようになる。

クオリティ X	0.001	0.002	0.004
ボイド率 $\alpha$	0.350	0.487	0.620
乱流混合係数 $\beta$	0.0037	0.0156	0.0280

この実験範囲では、 $\beta$  はボイド率  $\alpha$  に対して単調に増加している。

ところで、Tapucu らの正方形チャンネル (一辺 12.7 mm, ギャップ幅 1.5 mm) を用いた実験<sup>15)</sup>によると、低ボイドサブチャンネルの方がやや圧力が高くなる傾向にあり、上記データと異なる傾向を示している。なお本実験では、流路ごとの入口ボイド率が異なるため、流路入口でサブチャンネル間に圧力差が生じ、横流れ効果が強くなっている。Tapucu らも diversion cross flow と turbulent mixing の効果を区別することは困難と述べているように<sup>16)</sup>、彼らの実験は、二相流の混合係数を直接求めるのには適しない。

## 3. 二相流条件下における混合係数とボイド率との関係

### 3.1 混合係数のボイド率依存特性の導出

以上の文献調査により、COBRA コードで用いる乱流混合係数  $\beta$  を二相流条件下で使用するための表示式を求めるデータベースとしては、実験条件や形状に難点があるものの、佐田富の実験

が適切であることが明らかとなった。ただし、この実験では乱流混合は液相のみで生じると仮定していることに留意する必要がある。この点については、世吉口らの実験でも乱流混合が空気流量の分配に及ぼす影響は小さいことが示されている<sup>9)</sup>。

乱流混合係数  $\beta$  は次式で定義される。

$$\beta = W' / (G_{Av} \cdot S) \quad (1)$$

ここで、  $W'$  = 単位長さの乱流混合量 ( $\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}$ )

$G_{Av}$  = 両サブチャンネルの平均質量速度 ( $\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m}^2$ )

$S$  = 流路間隙の幅 (m)

文献(8)の I - J 流路及び A - B 流路の垂直流実験データを用いて、二相流条件下で求めた  $\beta$  と、同一液流速で気相流速が 0 の場合の  $\beta_0$  との比すなわち混合係数の二相増倍率 ( $\beta/\beta_0$ ) を求め、クオリティに関してプロットした結果を Fig. 3.1 に示す。付録に、使用したデータベースと(1)式により求めた  $\beta/\beta_0$  の値を収録する。 $\beta/\beta_0$  は二相流条件下では 1 より大きく、流体混合が促進されることを示している。ただし、促進の程度はクオリティ、形状、質量速度などに依存する。

ところで、二相流条件下での流体混合は流動様式に依存すると考えられるので、  $\beta/\beta_0$  はクオリティよりもボイド率の関数として表示したほうが有用である。本実験では、I - J 流路では流路軸方向平均ボイド率を急速開閉弁を用いて測定しているが、A - B 流路については出口における各相の流量すなわちクオリティの実測値しか得られていない。本実験は十分発達した空気 - 水二相流を用いているので、出口クオリティは流路軸方向平均クオリティに近いと考えられる。そこで、I - J 流路で得られた出口クオリティと流路軸方向平均ボイド率の関係を、各種ボイド率相関式と比較した結果を Fig. 3.2 に示す。この結果より、本実験データは、E P R I 相関式<sup>14)</sup>と最もよく一致し、Ahmad 相関式<sup>16)</sup>との一致も比較的良好なことがわかった。すなわち、ボイド率を実測していない A - B 流路の場合でも、E P R I 相関式を用いると、出口クオリティの測定値から、流路軸方向平均ボイド率を推定することができる。なお、ボイド率相関式が COBRA - I V - I 解析結果に及ぼす影響については、3.4 節で述べる。

Fig. 3.3 に、  $\beta/\beta_0$  とボイド率との関係を示す。ここで、I - J 流路についてはボイド率の実測値を用い、A - B 流路については E P R I 相関式により推定したボイド率を用いた。同図より明らかなように、  $\beta/\beta_0$  はボイド率の増加と共に大きくなり、ボイド率が 0.3 ~ 0.8 の区間ではほぼ横ばいで、さらにボイド率が大きくなると減少している。なお、流動様式の観察結果によると、ボイド率が 0.3 以下では気泡流、0.3 ~ 0.8 ではスラグ/チャーン流、0.8 以上になると環状流となっており、  $\beta/\beta_0$  とボイド率との関係は流動様式の変化にほぼ対応していると思われる。なお、Rowe らも、流体混合量のピークの位置は、流動様式の遷移に対応していると指摘している<sup>4)</sup>。

スラグ/チャーン流の領域では、質量速度が大きくなるにつれて  $\beta/\beta_0$  は減少し、さらに、ギャップ幅が 2 mm の A - B 流路の方が、ギャップ幅が 1.1 mm の I - J 流路の場合よりも、  $\beta/\beta_0$  は小さくなっている。このように、  $\beta/\beta_0$  とボイド率との関係は、流路形状、ギャップ幅、質量速度などに依存するので、  $\beta/\beta_0$  をボイド率の関数として一般的に表示することはできないことが明らかとなった。すなわち、サブチャンネル解析においては、対象とする体系に類似した形状、条件での実験データから得られた  $\beta/\beta_0$  とボイド率との関係を用いる必要がある。

現在原研で検討している扁平二重炉心型高転換軽水炉においては、ロッド間のギャップは1.9～2.2 mmとなっている。これは、佐田富の実験のなかで、ギャップ幅が2 mmのA-B流路を用いた実験に比較的近いと言える。一方、本炉は3ループ型PWRと同一の熱出力を有し、同一仕様の一次系を用いる設計になっているため、運転時の炉心質量速度は約2000 kg/s・m<sup>2</sup>程度となる。ポンプトリップ事故を考慮すれば、質量速度はさらに減少する。

そこで、高転換軽水炉の熱設計に適用するため、スラグ／チャーン流領域ではA-B流路で質量速度が1000～2000 kg/s・m<sup>2</sup>のデータを用い、その他の領域では各流路のデータを総合して、Fig. 3.3より、 $\beta/\beta_0$ とボイド率 $\alpha$ の関係を求める以下のようなになる。

$\alpha$	0.0	0.15	0.3	0.8	1.0
$\beta/\beta_0$	1.0	1.0	4.0	4.0	1.0

この表示方法の妥当性については、3.3節で述べる。

### 3.2 COBRA-IV-I コードの改良

オリジナルのCOBRA-IV-Iコードは、二相流条件下での乱流混合係数をクオリティの関数として入力している。しかしながら、二相流条件下での乱流混合は流動様式に依存するので、クオリティよりもボイド率の関数として定義した方が、圧力条件が異なる場合の解析に使用する上で妥当と考えられる。そこで、乱流混合係数をボイド率の関数として定義できるよう、COBRA-IV-Iコードでサブチャンネル間の流体混合を計算するサブルーチンMIXを変更した。

また、COBRA-IV-Iコードのオリジナル版では、乱流混合係数のクオリティ依存性を入力した場合には、沸騰開始後の単位長さ当たりの乱流混合量W'は次式で計算されるようになっている。ただしこのことは入力マニュアル<sup>12)</sup>には明記されていないので注意を要す。

$$W' = \beta D_{AV} G_{AV} \quad (2)$$

ここで、 $D_{AV}$  = 両サブチャンネルの平均水力等価直径(m)

しかしながら、実際には $\beta$ は(1)式で定義されるので、(2)式の表現は不適切である。そこで、沸騰開始後も(1)式で定義した乱流混合係数 $\beta$ が適用できるよう、(2)の式を以下のように変更した。

$$W' = \beta S G_{AV} \quad (3)$$

ここで、 $S$  = 流路間隙の幅(m)

Table 3.1に、修正後のサブルーチンMIXのリストを示す。

### 3.3 Rowe and Angle の実験データとの比較

3.1節で導出した $\beta/\beta_0$ とボイド率との関係の妥当性を検証するため、Rowe and Angleの不均一断面複合流路による実験のうち、ギャップ幅が2.13 mmで、テスト部出口で沸騰二相流となっている実験データを対象として、前節で修正したCOBRA-IV-Iコードによるサブチャンネル解析を実施した。ここで、単相流の $\beta_0$ としては、原研においてギャップ幅1.9 mmの7本テスト部により0.003の値を得た<sup>2)</sup>ので、この値を使用した。また、参考のため、 $\beta$ =一定

(0.003, 0.012, 0.024) の場合の解析も実施した。採用した実験データと COBRA-IV-I コードによる計算結果を Table 3.2 に示す。Fig. 3.4, 3.5 に、それぞれ、チャンネル 1 (小断面流路) とチャンネル 2 (大断面流路) におけるエンタルピーの上昇量の計算値と実測値の比較を示し、Fig. 3.6 に、各チャンネルの出口質量速度の計算値と実測値の比較を示す。

乱流混合係数のボイド率依存性を考慮したモデルを使用すると、チャンネル 1 のエンタルピー上昇量は実験値とよく一致しているが (Fig. 3.4), チャンネル 2 では乱流混合係数を 0.024 と大きくした方が実験値との一致はよい (Fig. 3.5)。一方、Fig. 3.6 に見られるように、チャンネル 2 の出口質量速度は乱流混合係数によらずほぼ実測値と一致しているが、チャンネル 1 の出口質量速度は乱流混合係数が小さい場合の方が一致がよくなる傾向にある。以上の結果より、COBRA-IV-I コードの流体混合計算手法では、乱流混合係数の選択によって、サブチャンネル間のエンタルピーと質量速度の分布を同時に正確に予測することはできないことがわかる。これと関連して、既に Lahey ら<sup>6,7)</sup> 及び Tapucu ら<sup>10)</sup>も乱流混合係数の最適化のみにより、ロッドバンドル内のクオリティや流量分布を同時に予測することはできないと指摘している。

このように、COBRA-IV-I コードには、サブチャンネル解析機能に限界があるが、乱流混合係数のボイド率依存性を考慮することにより、エンタルピー分布の予測は改善される。

### 3.4 ボイド率相関式がサブチャンネル解析に及ぼす影響

本解析に際しては、サブクールボイドモデルとしては、Levy の式<sup>17)</sup>を用いた。感度解析の結果、Table 3.3 に示すように、サブクールボイドの考慮の有無が、出口エンタルピー及び出口質量速度のサブチャンネル間分布に及ぼす影響は無視できるほど小さいことがわかった。

一方、3.1 節で述べたように、佐田富のボイド率データは E P R I 相関式と最もよく一致することから、バルクボイドモデルとしては E P R I 相関式が妥当と考えられるが、本相関式は COBRA-IV-I コードには内蔵されていない。本コードには、均質流の式と修正 Armand の式が含まれているが、Fig. 3.2 に示すように、均質流の式はデータとの一致が最も悪いので、修正 Armand の式を用いた。バルクボイドモデルの相違がサブチャンネル解析結果に及ぼす影響について、Rowe らの実験データを対象として調べた結果を Table 3.4 に示す。このように、バルクボイドモデルはチャンネル 1 (小断面流路) のエンタルピーや質量速度の計算結果にかなりの影響を及ぼすことがわかる。チャンネル 2 (大断面流路) については、その影響は小さい。

ボイド率相関式に及ぼす圧力の効果を Fig. 3.7 に示す。このように、低圧ではボイド率相関式相互の差が大きいが、圧力が高くなるとこの差は縮小し、特に実炉の運転圧力である 1.6 MPa の高压になると、ボイド率モデルの相違は無視できるほど小さくなる。また、1 ~ 4 MPa の中間圧力範囲では、信頼性が高いと思われる E P R I 相関式は、ボイド率が 0.7 以下では修正 Armand 相関式とほぼ一致しており、この領域における COBRA-IV-I 解析では、修正 Armand 相関式を用いるのが適当と考えられる。

## 4. 二相流混合モデルを用いた場合のサブチャンネル解析とCHF予測

### 4.1 サブチャンネル解析への影響

過渡沸騰試験装置の7本ロッドテスト部B（注1）と同一形状のテスト部を、高転換軽水炉用流動試験装置に組み込んで、単相流における乱流混合係数 $\beta_0$ を求めた結果、 $\beta_0 = 0.003$ を得た<sup>2)</sup>。そこで、本テスト部によるCHF試験RUN 2318（注2）を対象として、 $\beta = 0.003$ （一定）とした場合と、3章で導出した $\beta$ のボイド率依存性を用いた場合について、それぞれCOBRA-IV-Iコードによりサブチャンネル解析を実施した。

(注1)	テスト部B	ロッド本数	7
		ロッド径	9.5 mm
		ピッチ	11.4 mm ( $P/D = 1.2$ )
		発熱長さ	1.0 m

### (注2) RUN 2318の試験条件

圧力	:	3.93 MPa
質量速度	:	1798 kg/s·m <sup>2</sup>
入口サブクール度	:	37 °C
出口平均クオリティ	:	0.132
CHF	:	$1.99 \times 10^6$ W/m <sup>2</sup>

本テスト部のCOBRA-IV-IコードノーディングモデルをFig. 4.1にし、Fig. 4.2～4.4に各代表サブチャンネルの、質量速度、エンタルピー、及びボイド率の計算結果を、バンドル平均値と共にそれぞれ示す。このように、 $\beta$ のボイド率依存性を用いると、沸騰開始後のサブチャンネル間の流体混合が促進され、中心サブチャンネル（ホットチャンネル）の出口（CHF発生位置）における質量速度、エンタルピー、及びボイド率は、 $\beta = \beta_0$ （一定）の場合に比べて、バンドル平均値に近くなる傾向にある。

Fig. 4.4に示すように、本計算では、流路出口における平均ボイド率は約0.7であり、流路全長の60%の領域においてボイド率が0.3以上となっている。すなわち、本実験条件は混合係数のボイド率依存性が極めて大きい場合に相当すると考えられる。

### 4.2 CHF予測への影響

以上の解析により求めた中心サブチャンネルの出口における局所流動条件をCHF相関式に適用して、CHFの予測値と実測値の比(CHFR)を求めて以下の結果を得た。

## - C H F R の計算値 -

C H F 相関式	$\beta = 0.003$ (一定)	$\beta / \beta_0 = f(\alpha)$
K f K <sup>19)</sup>	0.845	0.892
EPRI-B & W <sup>20)</sup>	0.644	0.638
EPRI-Columbia <sup>21)</sup>	1.101	1.898
Katto-annuli <sup>22)</sup>	1.182	1.279

このように、COBRA-IV-I コードにおいて、混合係数をボイド率の関数として与えると、C H F の予測にも有意な影響を及ぼすことがわかった。相関式によって混合係数の影響が異なるのは、各相関式の局所流動条件に対する依存性に差があるためである。

以上のC H F 相関式のうち、K f K 相関式が高転換軽水炉を対象としたC H F 実験値との一致が最も良好であった<sup>23)</sup>。混合係数のボイド率依存性を考慮すると、混合係数が一定の場合に比べて、K f K 相関式によるC H F の予測値は約5%大きくなっている。K f K 相関式自体の予測精度は約20%と評価されているので<sup>23)</sup>、二相流混合係数の影響はこの予測精度の範囲内である。高転換軽水炉の安全評価を目的とするサブチャンネル解析では、混合係数は一定と仮定しており、二相流条件下での混合係数を考慮した場合のC H F 予測値の増加は安全余裕とみなすことができる。なお、前項で述べたように、以上の結果は、二相流混合係数の効果が大きくなるような条件での計算例である。実際の高転換軽水炉の運転条件下ではボイド率が小さいため、二相流混合係数の影響はより小さくなると見なされる。

一方、安全性を維持したまま炉出力をできるだけ上げようすると、ポンプトリップ事故時のD N B R の評価が制限条件の一つとなってくると考えられる。このため、非定常時のC H F 評価の際には、二相流条件下でのサブチャンネル間の流体混合量の増加を考慮に入れて、サブチャンネル解析精度の向上をはかる必要性が生じる可能性もある。

## 5. ま と め

- (1) 二相流条件下でのサブチャンネル間流体混合に関する文献調査を実施した。その結果、流体混合量は流動様式に対応しており、気泡流ではボイド率と共に増加し、スラグ/チャーン流でピークに達し、環状流になれば減少する傾向が認められた。
- (2) 佐田富の実験データに基づいて、二相流条件下の混合係数と単相流混合係数の比 ( $\beta / \beta_0$ ) をボイド率の関数として表示し、この関係をCOBRA-IV-I サブチャンネル解析コードに組み込んだ。
- (3) 本コードを用いて、Rowe and Angle の沸騰二相流サブチャンネル混合実験の解析を行い、エンタルピーパー分布について比較的よい一致を得た。
- (4) 混合係数のボイド率依存性の効果が極めて大きい場合の定常C H F 実験条件に対して、二相流混合モデルをK f K のC H F 相関式と共に適用した結果、従来の単相流混合係数を用いた場合に比較して、C H F の予測値は約5%増大した。
- (5) 以上の結果より、二相流による流体混合促進効果に伴う安全余裕の程度は、定常時のCHF

## - C H F R の計算値 -

C H F 相関式	$\beta = 0.003$ (一定)	$\beta/\beta_0 = f(\alpha)$
Kf K <sup>19)</sup>	0.845	0.892
EPRI-B & W <sup>20)</sup>	0.644	0.638
EPRI-Columbia <sup>21)</sup>	1.101	1.898
Katto-annuli <sup>22)</sup>	1.182	1.279

このように、COBRA-IV-I コードにおいて、混合係数をボイド率の関数として与えると、C H F の予測にも有意な影響を及ぼすことがわかった。相関式によって混合係数の影響が異なるのは、各相関式の局所流動条件に対する依存性に差があるためである。

以上のC H F 相関式のうち、Kf K相関式が高転換軽水炉を対象としたC H F 実験値との一致が最も良好であった<sup>23)</sup>。混合係数のボイド率依存性を考慮すると、混合係数が一定の場合に比べて、Kf K相関式によるC H F の予測値は約5%大きくなっている。Kf K相関式自体の予測精度は約20%と評価されているので<sup>23)</sup>、二相流混合係数の影響はこの予測精度の範囲内である。高転換軽水炉の安全評価を目的とするサブチャンネル解析では、混合係数は一定と仮定しており、二相流条件下での混合係数を考慮した場合のC H F 予測値の増加は安全余裕とみなすことができる。なお、前項で述べたように、以上の結果は、二相流混合係数の効果が大きくなるような条件での計算例である。実際の高転換軽水炉の運転条件下ではボイド率が小さいため、二相流混合係数の影響はより小さくなると見なされる。

一方、安全性を維持したまま炉出力をできるだけ上げようすると、ポンプトリップ事故時のD N B R の評価が制限条件の一つとなってくると考えられる。このため、非定常時のC H F 評価の際には、二相流条件下でのサブチャンネル間の流体混合量の増加を考慮に入れて、サブチャンネル解析精度の向上をはかる必要性が生じる可能性もある。

## 5. ま と め

- (1) 二相流条件下でのサブチャンネル間流体混合に関する文献調査を実施した。その結果、流体混合量は流動様式に対応しており、気泡流ではボイド率と共に増加し、スラグ／チャーン流でピークに達し、環状流になれば減少する傾向が認められた。
- (2) 佐田富の実験データに基づいて、二相流条件下の混合係数と単相流混合係数の比 ( $\beta/\beta_0$ ) をボイド率の関数として表示し、この関係をCOBRA-IV-I サブチャンネル解析コードに組み込んだ。
- (3) 本コードを用いて、Rowe and Angle の沸騰二相流サブチャンネル混合実験の解析を行い、エンタルピーディストリビューションについて比較的よい一致を得た。
- (4) 混合係数のボイド率依存性の効果が極めて大きい場合の定常C H F 実験条件に対して、二相流混合モデルをKf KのC H F 相関式と共に適用した結果、従来の単相流混合係数を用いた場合に比較して、C H F の予測値は約5%増大した。
- (5) 以上の結果より、二相流による流体混合促進効果に伴う安全余裕の程度は、定常時のCHF

に関する限り、CHF相関式の予測精度の範囲内と評価された。ただし、非定常時に関しては、さらに検討を要す。

なお、本報告で紹介した二相流混合実験では、局所状態量の測定が不足していたり、圧力差による横流れ効果を完全に除去できないなどの問題があった。サブチャンネル解析コードで用いる二相流条件下での混合係数を精度よく求めるには、これらの問題を考慮して、実験装置及び実験手法の改良が必要である。

## 参 考 文 献

- (1) 岩村公道 他： 日本原子力学会昭和63年秋の大会 F 3 7 (1988)
- (2) 大久保努 他： 日本原子力学会1989年秋の大会 C 3 3 (1989)
- (3) Rowe, D.S. and Angle, C.W.,: "Crossflow mixing between parallel flow channels during boiling part II, Measurement of flow and enthalpy in two parallel channels", BNWL-371 Pt2, (1967).
- (4) Rowe, D.S. and Angle, C.W.,: "Crossflow mixing between parallel flow channels during boiling part III, Effect of spacers on mixing between two channels", BNWL-371 Pt3, (1969).
- (5) Sternier, R.W. and Lahey, Jr., R.T.,: "Air/water subchannel measurements of the equilibrium quality and mass-flux distribution in a rod bundle", NUREG/CR-3373, (1983).
- (6) Lahey, Jr., R.T, Shiralkar, B.S. and Radcliffe, D.W.,: "Mass flux and enthalpy distribution in a rod bundle for single- and two-phase flow conditions", J. of Heat Transfer pp.197-209, May (1971).
- (7) Lahey, Jr., R.T, Shiralkar, B.S., Radcliffe, D.W. and Polomic, E.E.,: "Out-of-pile subchannel measurements in a nine-rod bundle for water at 1000 psia", Progress in heat transfer vol.6 pp.345-363, (1972).
- (8) 佐田富道雄, "垂直管群に平行な単相流および気液二相流に関する基礎的研究", 九州大学学位論文
- (9) 世古口言彦 他, :断面積の異なる二つのサブチャンネルにおける気液二相流動に関する研究, 日本機械学会論文集(B編), 50巻, 454号PP 1575 ~ 1584 (1984).
- (10) Tapucu, A., et al.,: "Experimental investigation of mass exchanges between two laterally interconnected two-phase flows", Nucl. Eng. Design, 105 pp.295-312 (1988).
- (11) Tapucu, A., et al.,: "Behaviour of two-phase flow in two laterally interconnected subchannels", International Heat Transfer Conf. Munich, (1982).
- (12) Weeler, C.L. et al.,: "COBRA-IV-I: An interim version of COBRA for thermal-hydraulic analysis of rod bundle nuclear fuel elements and cores", BNWL-1962 (1976).
- (13) Zuber, N. and Findlay, J.A.,: "Average volumetric concentration in two-phase flow systems", J. Heat Transfer, (1965).
- (14) Chexal, B. and Lellouche, G.,: "A full-range drift-flux correlations for vertical flows", EPRI NP-3989-sr (1985).

- (15) 村尾良夫 他 : 日本原子力学会昭和 63 年秋の大会 F 3 6 (1988) .
- (16) Ahmad, S.Y.,: "Axial distribution of bulk temperature and void fraction in a heated channel with inlet subcooling", Trans. ASME, Ser. C, 92-4, (1970).
- (17) Levy, S.,: "Forced convection subcooled boiling - prediction of vapor volumetric fraction", GEAP-5157, (1970).
- (18) Armand, A.A.,: "The resistance during the movement of a two-phase system in horizontal pipes", AERE Trans. 828. Izvestiya vsesojuznogo teplotekhnicheskogo instituta, 1:16-23, (1946).
- (19) Dalle Donne, M. et al.: "Critical Heat flux Correlation for Triangular Arrays of Rod Bundles with Tight Lattices, Including the Spiral Spacer Effect", Nuclear Technology 71, pp.111 (1985).
- (20) Uotinen, V.O. et al.: "Technical Feasibility of a Pressurized Water Reactor Design with a Low-Water-Volume-Fraction Lattice", EPRI-NP-1833, (1981).
- (21) Reddy, D.G. and Fighetti, C.F.: "Parametric Study of CHF Data, Volume 2. A Generalized Subchannel CHF Correlation for PWR and BWR Fuel Assemblies", EPRI-NP-2609, vol. 2, (1983).
- (22) Katto, Y.,: "General Features of CHF of Forced Convection Boiling in Uniformly Heated Rectangular Channels", Int. J. Heat Mass Transfer vol. 24, pp.1413-1419 (1981).
- (23) 岩村公道 他 :" 扁平二重炉心型高転換軽水炉の限界熱流束 (CHF) 特性 ", JAERI - M 89-004 (1989) .

Table 3.1 Modification of subroutine "MIX" in COBRA-IV-I

```

004666 C =====
004667 C      M I X
004668 C =====
004669 C
004670 C =====
004671      SUBROUTINE MIX (J)
004672      IMPLICIT LOGICAL*1 (Y)
004673      COMMON/Y$DBUG/Y$DBB(80)
004674      EQUIVALENCE (Y$DBB(20),Y$DB),(Y$DBB(30),Y$DBAW )
004675      REAL*8 SUBNAM /' MIX '/
004676 *CALL SPEC2
004677 *CALL SPEC3
004678 *CALL SPEC4
004679 *CALL SPEC11
004680      IF (Y$DBAW) WRITE(6,31) SUBNAM
004681      31 FORMAT (' ENTER SUBROUTINE',A8)
004682      NKK=NK
004683      DO 120 K=1,NKK
004684      II=IK(K)
004685      JJ=JK(K)
004686      WP(K)=0.
004687      DAVG=4.* (A(II,J)+A(JJ,J))/(PERIM(II)+PERIM(JJ))
004688      GAVG=(F(II,J)+F(JJ,J))/(A(II,J)+A(JJ,J))
004689      GAVG=ABS(GAVG)
004690 CIWA ** BETA = F(VOID FRACTION) 1989.6.13
004691 CIWA XAVG=0.
004692 CIWA IF (AMAX1(QUAL(II),QUAL(JJ)).GT.0.) XAVG=.5*(QUAL(II)+QUAL(JJ))
004693 CIWA IF (XAVG.GT.0.,AND.NBBC.GE.2) GO TO 100
004694 AAVG=0.
004695 CIWA
004696      IF (AMAX1(ALPHA(II),ALPHA(JJ)).GT.0.)
004697      1      AAVG=.5*(ALPHA(II)+ALPHA(JJ))
004698 CIWAX IF (AMAX1(ALPHA(II),ALPHA(JJ)).GT.0.)
004699 CIWAX1      AAVG=AMAX1(ALPHA(II),ALPHA(JJ))
004700 CIWA ****
004701      IF (AAVG.GT.0.,AND.NBBC.GE.2) GO TO 100
004702      UAVG=0.5*(VISC(II)+VISC(JJ))
004703      IF (NSCBC.GE.1) RE=GAVG*DAVG/UAVG
004704      IF (NSCBC.EQ.0) WP(K)=GAP(K,J)*GAVG*ABETA
004705      IF (NSCBC.EQ.1) WP(K)=GAP(K,J)*GAVG*ABETA*RE**BBETA
004706      IF (NSCBC.EQ.2) WP(K)=DAVG*GAVG*ABETA*RE**BBETA
004707      IF (NSCBC.EQ.3,AND.LENGTH(K).LE.0.) GO TO 130
004708      IF (NSCBC.EQ.3) WP(K)=GAP(K,J)/LENGTH(K)*DAVG*GAVG*ABETA*RE**BBETA
004709      WP(K)=WP(K)*FACTOR(K)
004710      GO TO 110
004711 CIWA ****
004712 C 100 CALL CURVE (XBETA,XAVG,BX,XQUAL,NBBC,IERROR,1)
004713 100 CALL CURVE (XBETA,AAVG,BX,XQUAL,NBBC,IERROR,1)
004714      IF (IERROR.GT.1) GO TO 130
004715 CIWAX WP(K)=GAVG*DAVG*XBETA*FACTOR(K)
004716 WP(K)=GAVG*GAP(K,J)*XBETA*FACTOR(K)
004717 110 CONTINUE
004718 120 CONTINUE
004719      IF (Y$DBAW) WRITE(6,32) SUBNAM
004720      32 FORMAT (' LEAVE SUBROUTINE',A8)
004721      RETURN
004722      130 IERROR=4
004723      RETURN
004724      END

```

Table 3.2 Rowe and Angle's data and COBRA-IV-I analytical results

Rowe and Angle's data<sup>(3)</sup>

Run	79	80	81	85	86	87
Inlet mass velocity (kg/s. m <sup>2</sup> )	2658	2631	2631	4000	4000	3973
Heat flux (10 <sup>6</sup> w/m <sup>2</sup> )	0.568	0.997	1.33	0.770	1.19	1.47
Inlet enthalpy (kJ/kg)	1154	1165	1165	1165	1161	1170
Pressure (MPa)	6.33	6.29	6.28	6.18	6.15	6.12
Enthalpy rise (kJ/kg)						
ch 1	197.7	318.7	460.5	158.2	248.9	344.2
ch 2	144.2	279.1	334.9	123.3	193.1	239.6
Mass velocity (kg/s. m <sup>2</sup> )						
ch 1	1953	1993	1831	2834	2834	2712
ch 2	2997	2915	3010	4461	4475	4488

(note) ch 1 : small subchannel  
 ch 2 : large subchannel  
 gap = 2.13 mm

COBRA-IV-I analytical results

## Void fraction correlations used in the analysis

- Levy subcooled void correlation
- Modified Armand bulk void correlation

(1)  $\beta = f(\alpha)$  : given in Section 3.1

Run	79	80	81	85	86	87
Enthalpy rise (kJ/kg)						
ch 1	188	326	437	171	261	321
ch 2	131	231	309	118	184	228
Mass velocity (kg/s. m <sup>2</sup> )						
ch 1	2163	2155	2138	3209	3237	3233
ch 2	2904	2907	2912	4368	4359	4360

(2)  $\beta = 0.0$ 

Run	79	80	81	85	86	87
Enthalpy rise (kJ/kg)						
ch 1	234	416	563	212	331	411
ch 2	122	214	287	110	170	211
Mass velocity (kg/s. m <sup>2</sup> )						
ch 1	1954	1911	1856	2882	2879	2853
ch 2	2977	2991	3011	4482	4483	4492

(3)  $\beta = 0.003$ 

Run	79	80	81	85	86	87
Enthalpy rise (kJ/kg)						
ch 1	216	382	515	196	305	377
ch 2	125	220	294	113	175	216
Mass velocity (kg/s. m <sup>2</sup> )						
ch 1	2025	1997	1957	2995	3003	2987
ch 2	2952	2962	2976	4443	4440	4446

(4)  $\beta = 0.012$ 

Run	79	80	81	85	86	87
Enthalpy rise (kJ/kg)						
ch 1	183	325	436	167	259	320
ch 2	132	231	310	119	185	228
Mass velocity (kg/s. m <sup>2</sup> )						
ch 1	2615	2155	2139	3220	3239	3234
ch 2	2903	2907	2912	4364	4358	4360

(5)  $\beta = 0.024$ 

Run	79	80	81	85	86	87
Enthalpy rise (kJ/kg)						
ch 1	167	293	392	151	234	289
ch 2	136	239	320	123	191	236
Mass velocity (kg/s. m <sup>2</sup> )						
ch 1	2246	2247	2243	3353	3376	3378
ch 2	2875	2875	2876	4318	4310	4309

Table 3.3 Effect of subcooled void model on subchannel analysis

Rowe and Angle's data Run 80<sup>(3)</sup>

Test conditions : Pressure = 6.29 MPa  
 Inlet mass velocity = 2631 kg/s. m<sup>2</sup>  
 Inlet enthalpy = 1165 kJ/kg  
 Heat flux =  $0.997 \times 10^6$  W/m<sup>2</sup>

ch 1 : small subchannel

ch 2 : large subchannel

gap = 2.13 mm

## Subchannel analysis results at channel exit

Subcooled void model	No subcooled void		Levy model	
Subchannel number	ch 1	ch 2	ch 1	ch 2
Enthalpy (kJ/kg)	2278	2754	2269	2757
Mass velocity (kg/s. m <sup>2</sup> )	1436	1420	1436	1420

COBRA-IV - I Input : Homogeneous bulk void model

$$\beta / \beta_0 = f(\alpha), \quad \beta_0 = 0.003$$

Table 3.4 Effect of bulk void fraction correlations  
on subchannel analysisRowe and Angle's data Run 80<sup>(3)</sup>

Test conditions : Pressure = 6.29 MPa  
 Inlet mass velocity = 2631 kg/s. m<sup>2</sup>  
 Inlet enthalpy = 1165 kJ/kg  
 Heat flux =  $0.997 \times 10^6$  W/m<sup>2</sup>

ch 1 : small subchannel  
 ch 2 : large subchannel  
 gap = 2.13 mm

## Subchannel analysis results at channel exit

Bulk void model	Homogeneous		Modified Armand	
	ch 1	ch 2	ch 1	ch 2
Subchannel number				
Equil. quality	0.246	0.097	0.228	0.098
Void fraction	0.885	0.718	0.762	0.612
Enthalpy (kJ/kg)	1607	1375	1579	1377
Mass velocity (kg/s. m <sup>2</sup> )	1734	3053	1911	2992

COBRA-IV-I Input : Levy subcooled void model

 $\beta = 0.0$

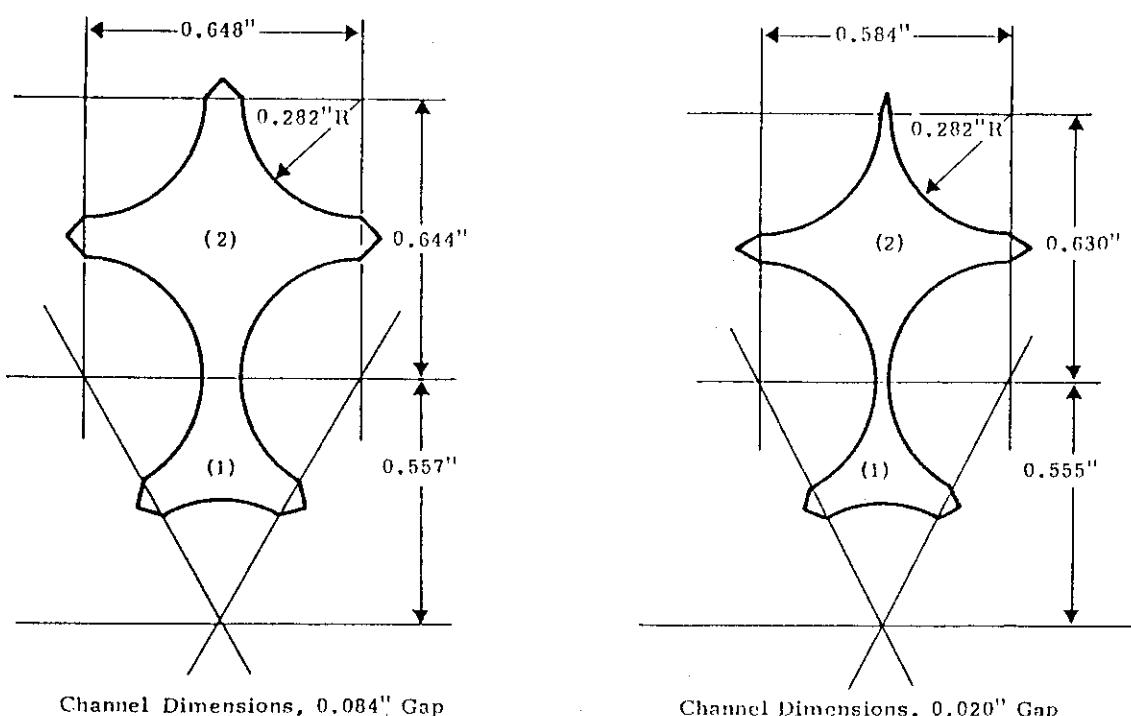
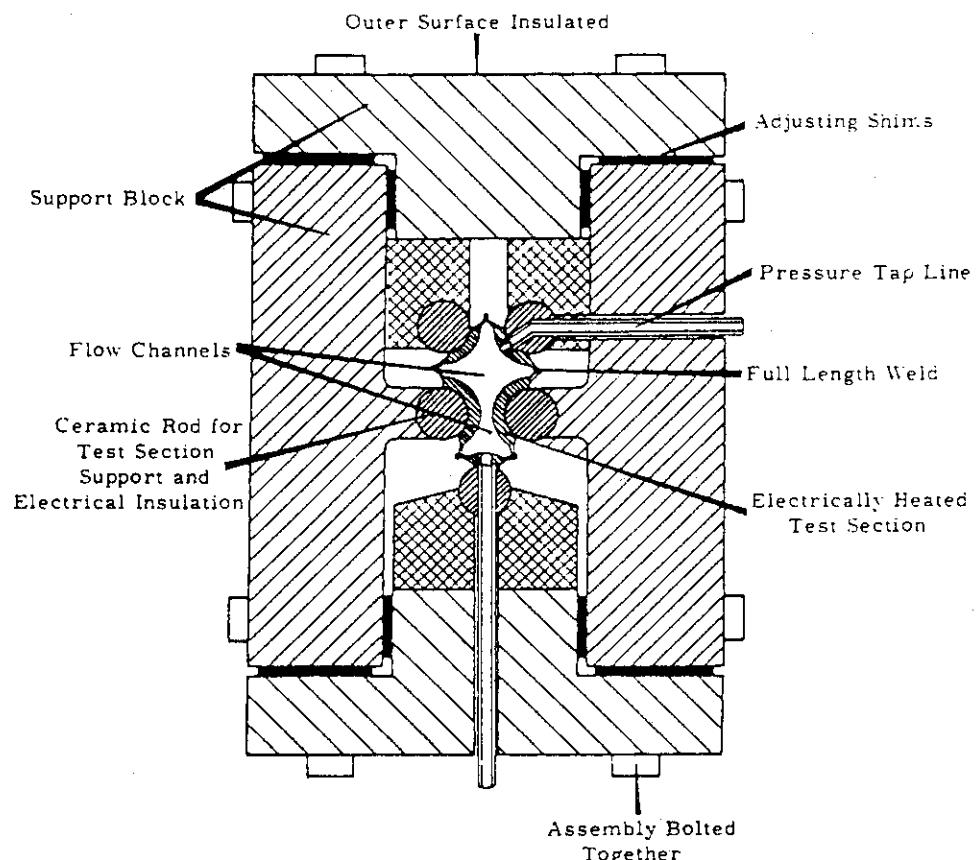


Fig. 2.1 Test sections of Rowe and Angle's experiment (unsymmetrical cross section)

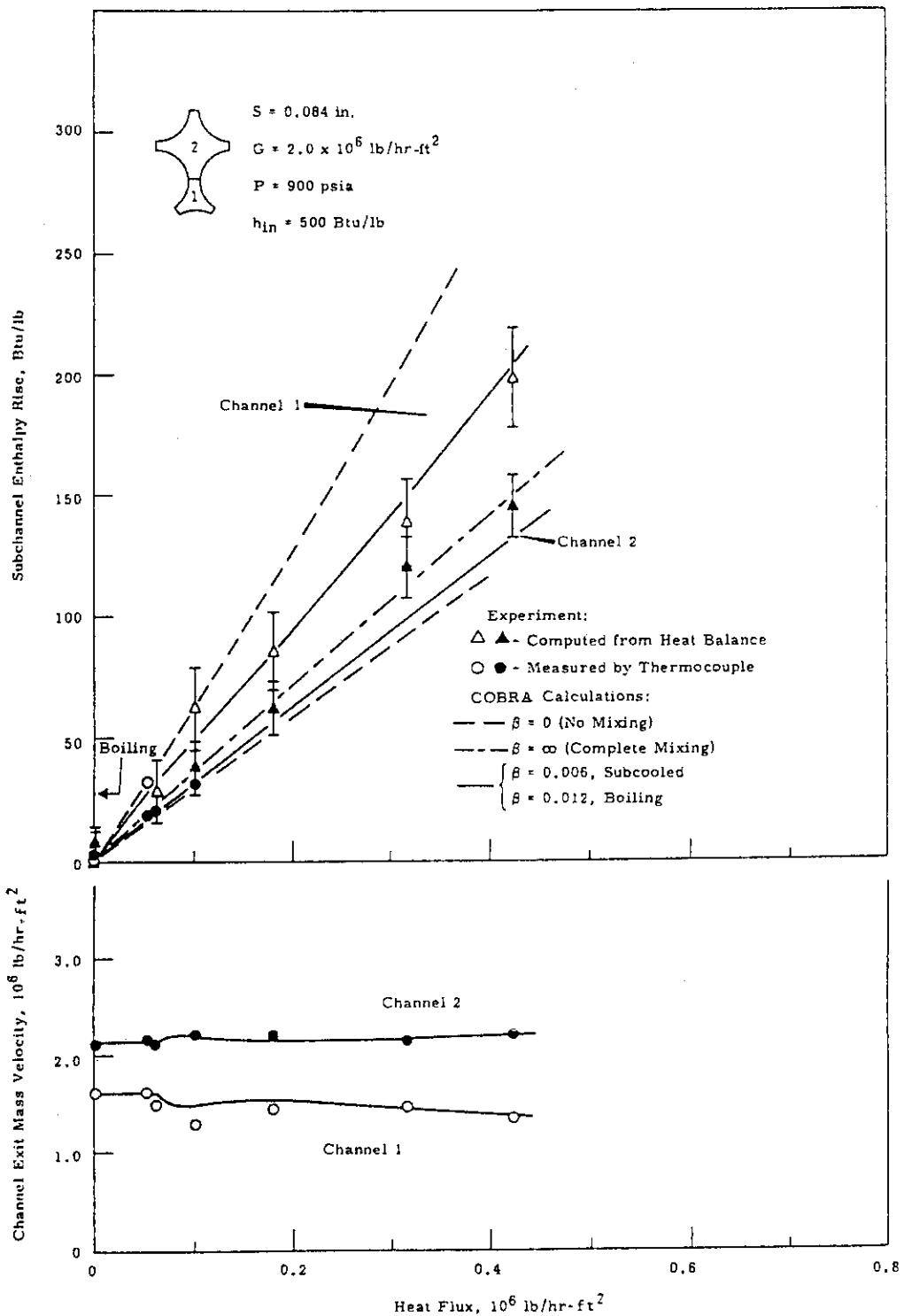


Fig. 2.2 Subchannel enthalpy rise and exit mass velocity  
-test results and comparison with COBRA calculations-  
(gap : 2.13 mm/0.084 in.)

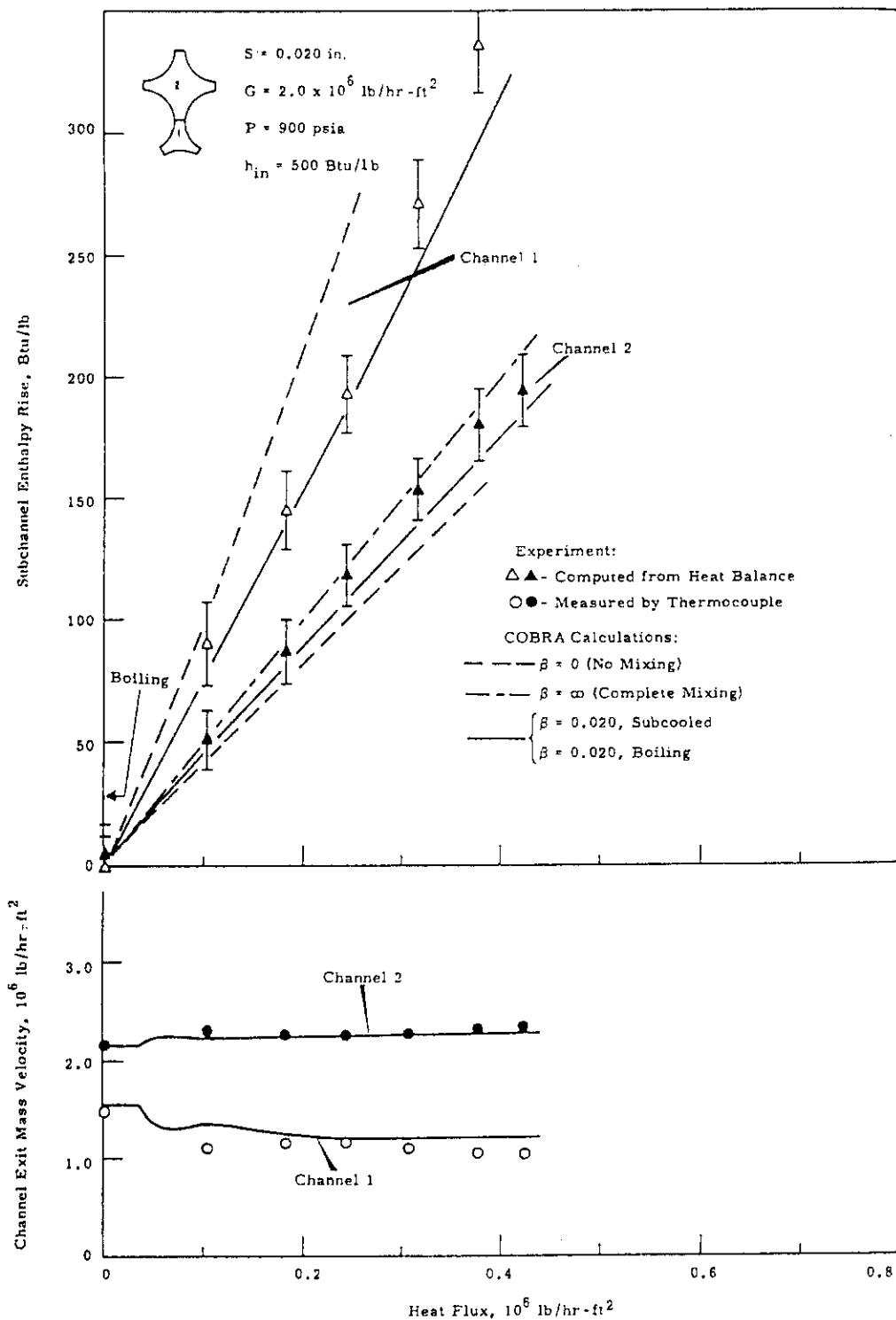


Fig. 2.3 Subchannel enthalpy rise and exit mass velocity  
-test results and comparison with COBRA calculations-  
(gap : 0.508 mm/0.020 in.)

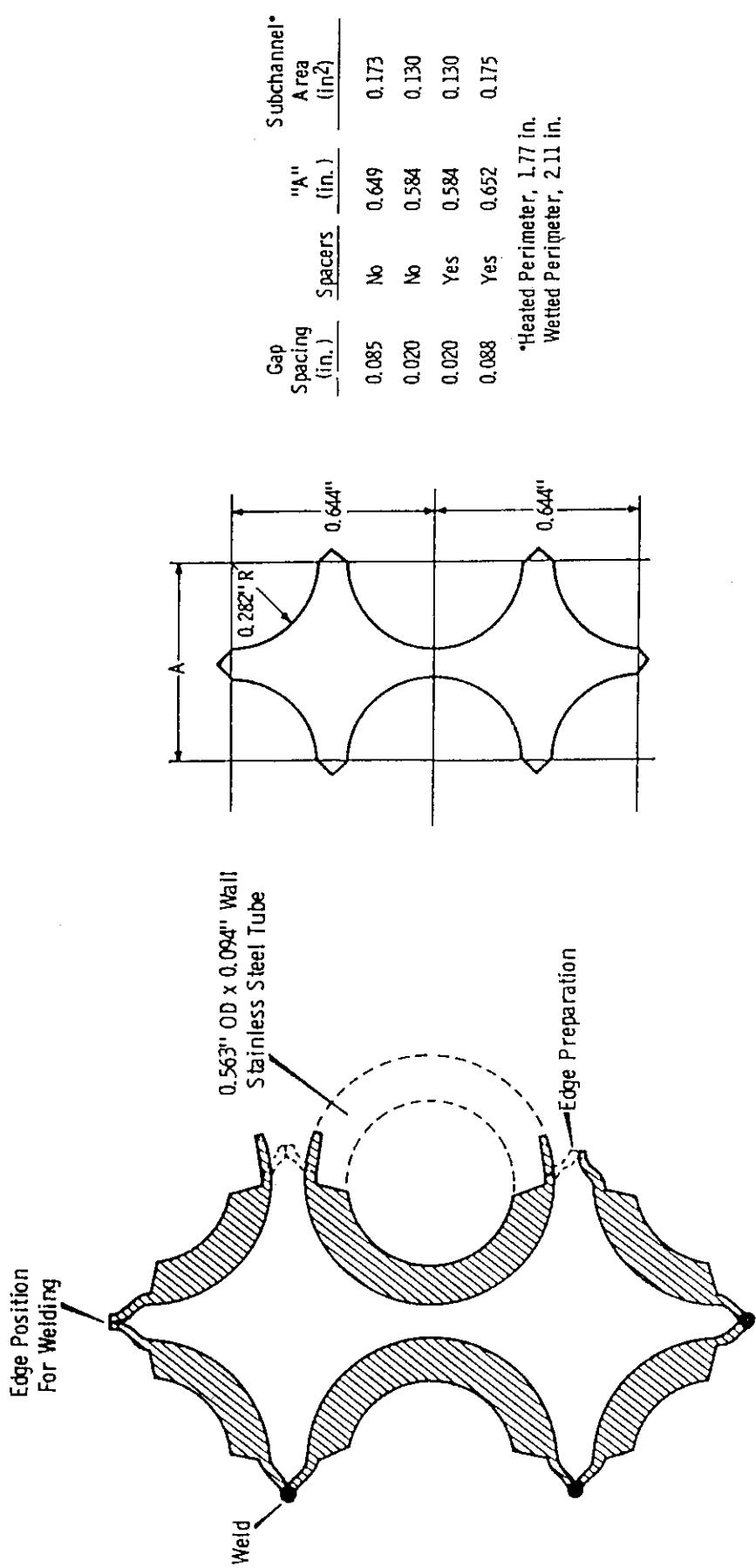


Fig. 2.4 Test sections of Rowe and Angle's experiment  
(symmetrical cross section)

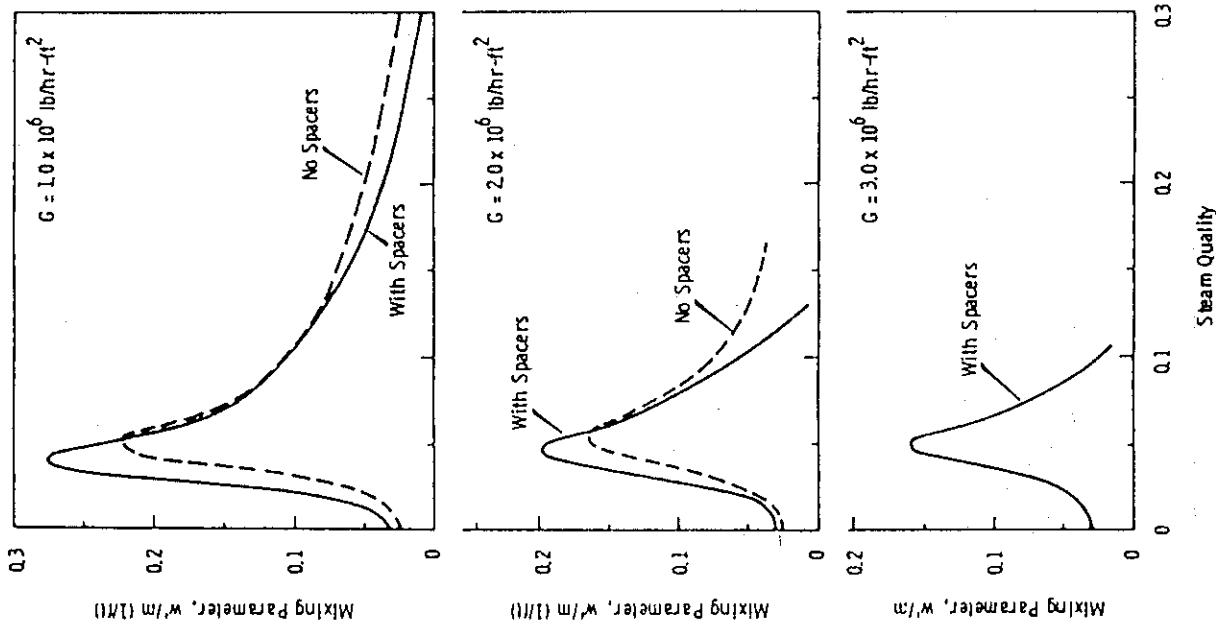


Fig. 2.5 Mixing parameter vs. quality  
 -  $P = 5.17 \text{ Mpa}/750 \text{ psia}$  -  
 - Gap = 2.16 mm/0.085 in-

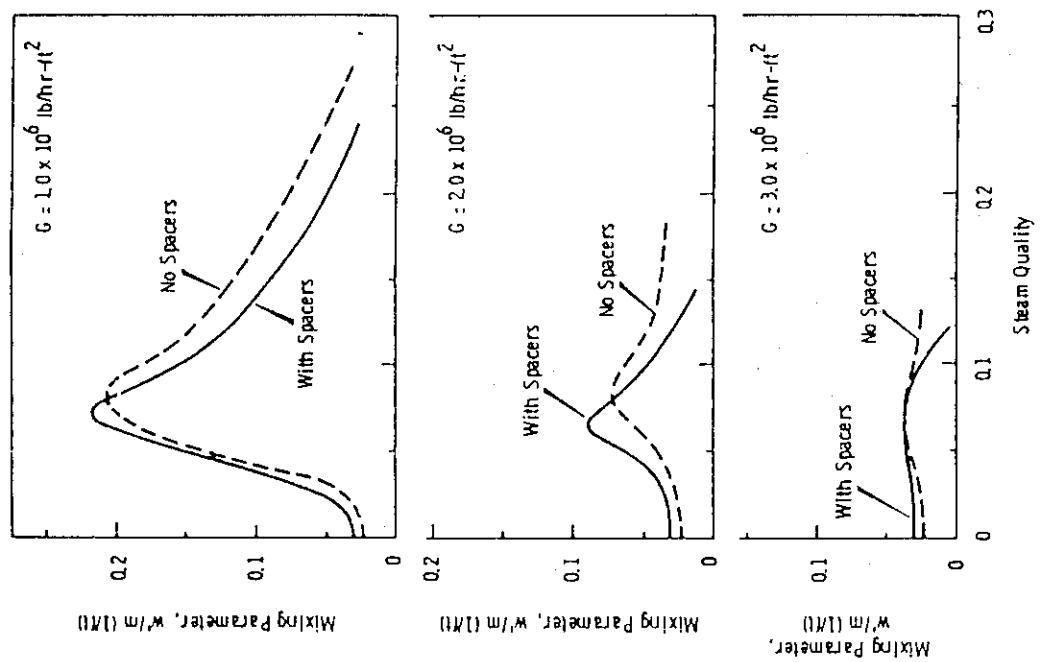


Fig. 2.6 Mixing parameter vs. quality  
 -  $P = 2.76 \text{ Mpa}/400 \text{ psia}$  -  
 - Gap = 2.16 mm/0.085 in-

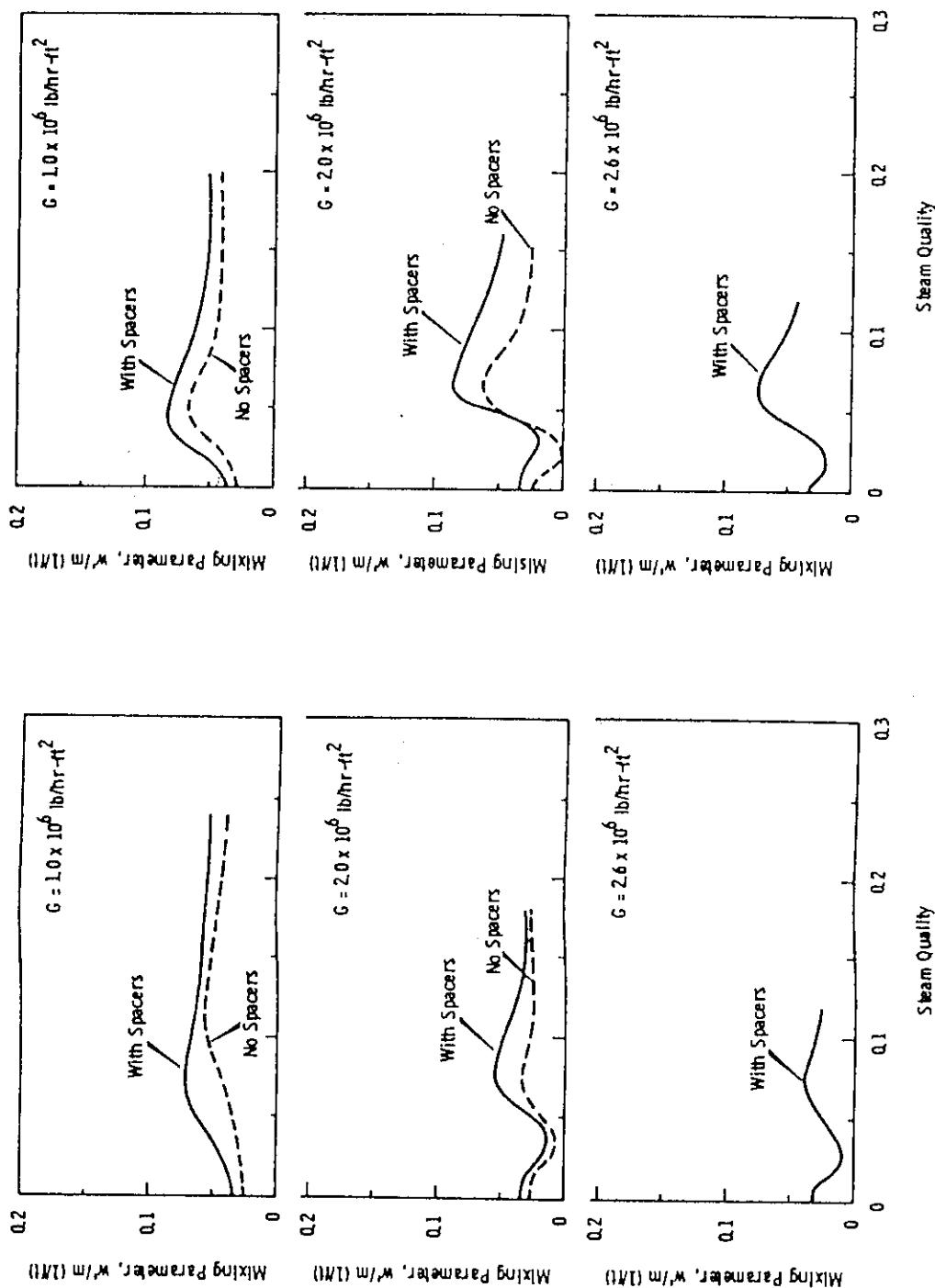
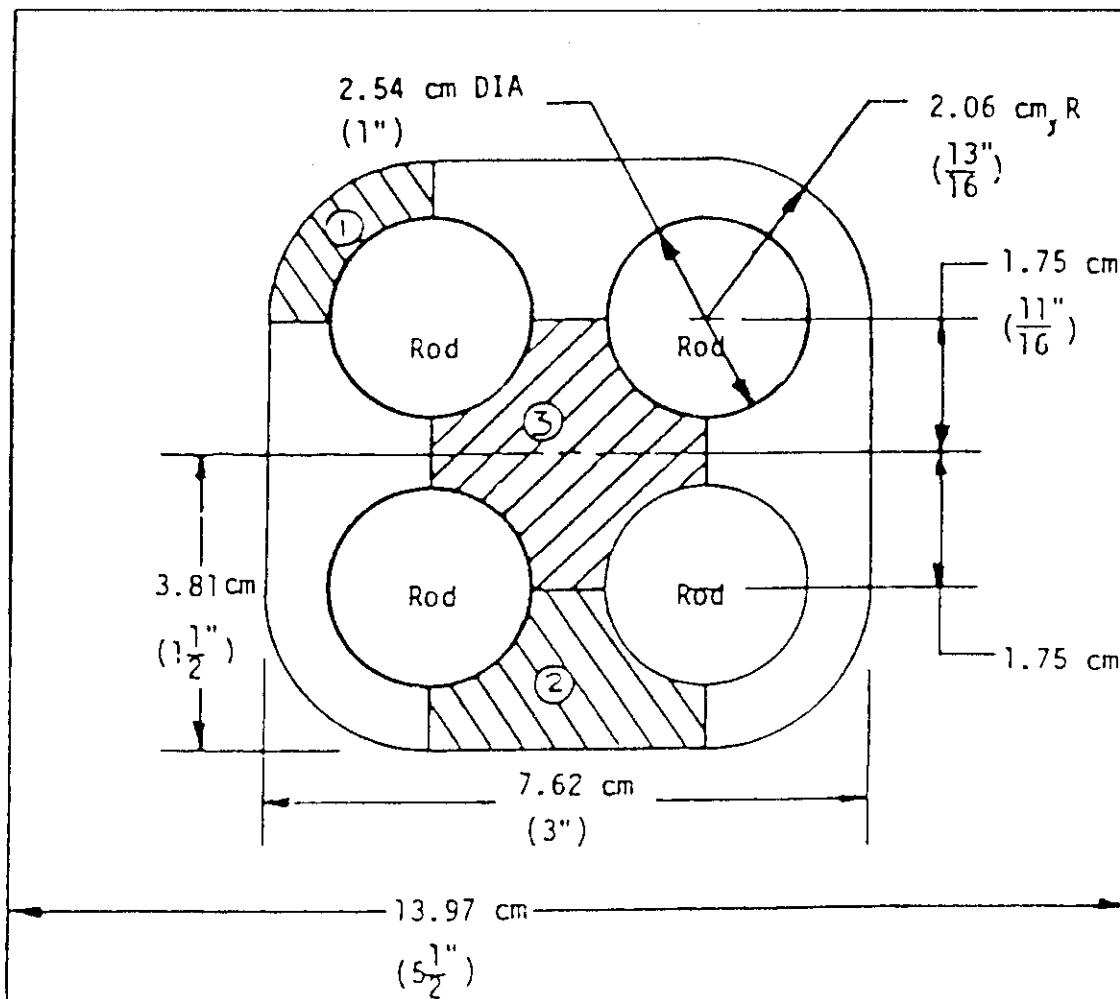


Fig. 2.7 Mixing parameter vs. quality  
 $- P = 5.17 \text{ MPa}/750 \text{ psia}$   
 $- \text{Gap} = 0.508 \text{ mm}/0.020 \text{ in}$

Fig. 2.8 Mixing parameter vs. quality  
 $- P = 2.76 \text{ MPa}/400 \text{ psia}$   
 $- \text{Gap} = 0.508 \text{ mm}/0.020 \text{ in}$



Drawing to Scale

Hatched Regions Show Sampled Subchannels

1 - Corner

2 - Side

3 - Center

Flow Area - ( $A_{x-s}$ )

$$A_1 = 2.08 \text{ cm}^2 (0.322 \text{ in}^2)$$

$$A_2 = 4.68 \text{ cm}^2 (0.725 \text{ in}^2)$$

$$A_3 = 7.13 \text{ cm}^2 (1.105 \text{ in}^2)$$

$$A_{\text{tot}} = 34.14 \text{ cm}^2 (5.292 \text{ in}^2)$$

Hydraulic Diameter -  $D_H$ 

$$D_{H1} = 1.59 \text{ cm (0.625 in)}$$

$$D_{H2} = 2.50 \text{ cm (0.984 in)}$$

$$D_{H3} = 3.57 \text{ cm (1.407 in)}$$

$$\bar{D}_H = 2.32 \text{ cm (0.914 in)}$$

Fig. 2.9 Test section of Sterner and Lahey's experiment

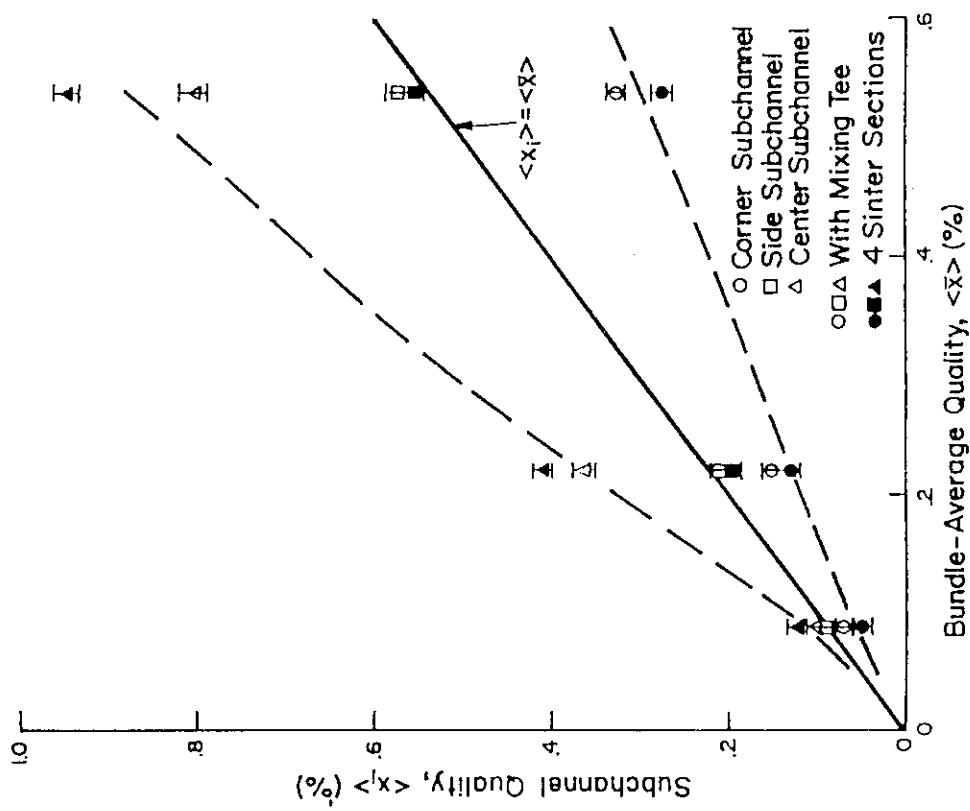


Fig. 2.10 Subchannel quality vs. bundle-average quality  
-  $G = 450 \text{ kg/s.m}^2$  -  
-  $G = 900 \text{ kg/s.m}^2$  -

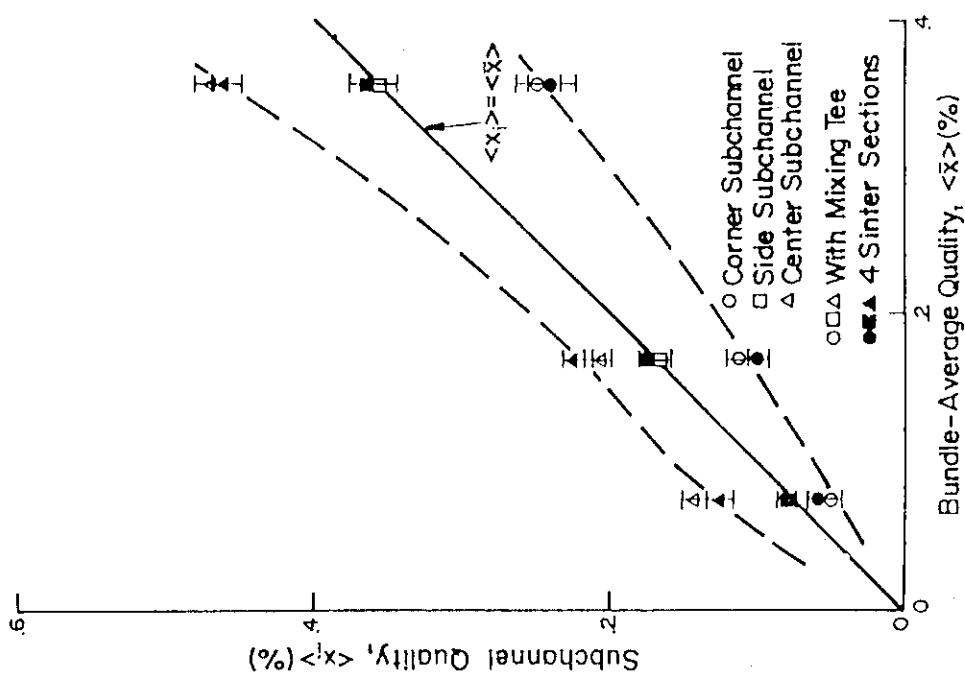


Fig. 2.11 Subchannel quality vs. bundle-average quality  
-  $G = 900 \text{ kg/s.m}^2$  -

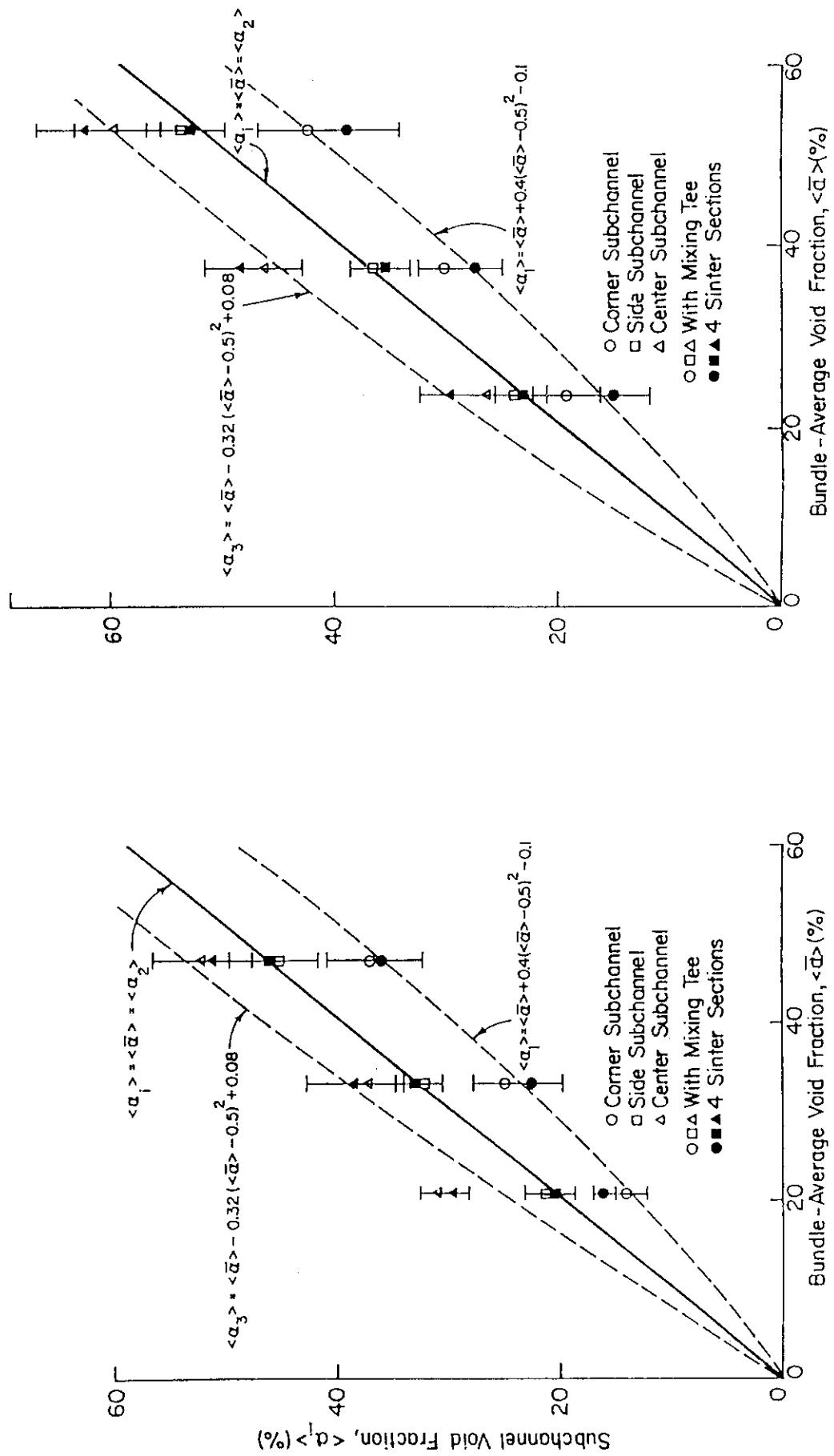


Fig. 2.12 Subchannel void fraction vs. bundle-average void fraction  
-  $G = 450 \text{ kg/s.m}^2$  -

Fig. 2.13 Subchannel void fraction vs. bundle-average void fraction  
-  $G = 900 \text{ kg/s.m}^2$  -

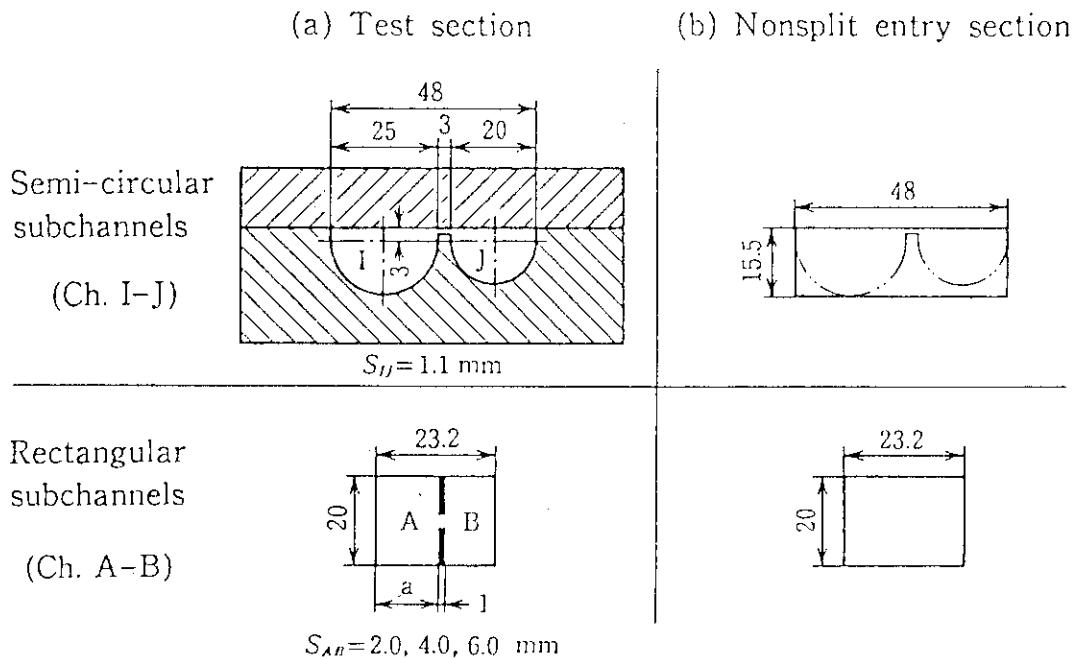


Fig. 2.14 Test section of Sadatomi's experiment

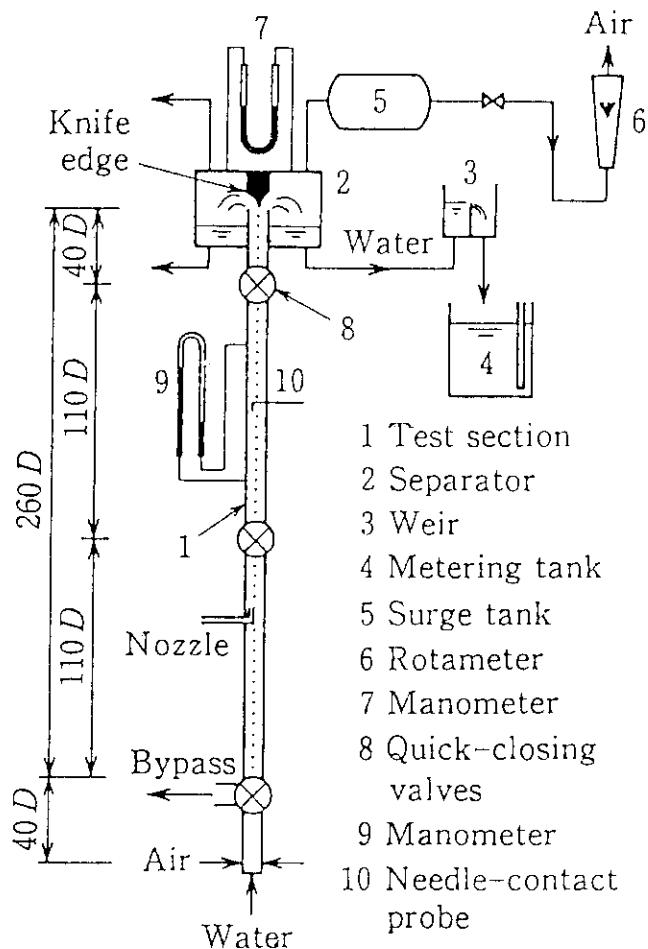


Fig. 2.15 Instrumentation of Sadatomi's experiment

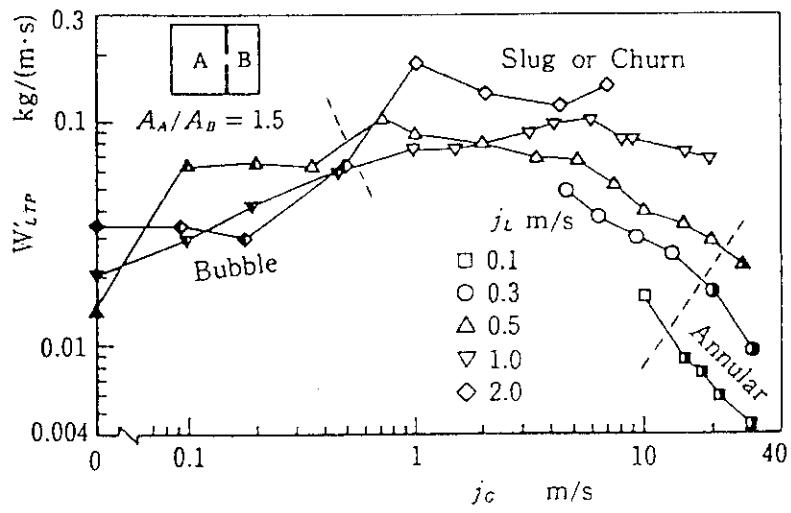
(a) Ch. A-B,  $S_{AB} = 2 \text{ mm}$ 

Fig. 2.16 Turbulent mixing rate of liquid phase vs. superficial gas velocity  
(Channel A-B, gap = 2 mm)

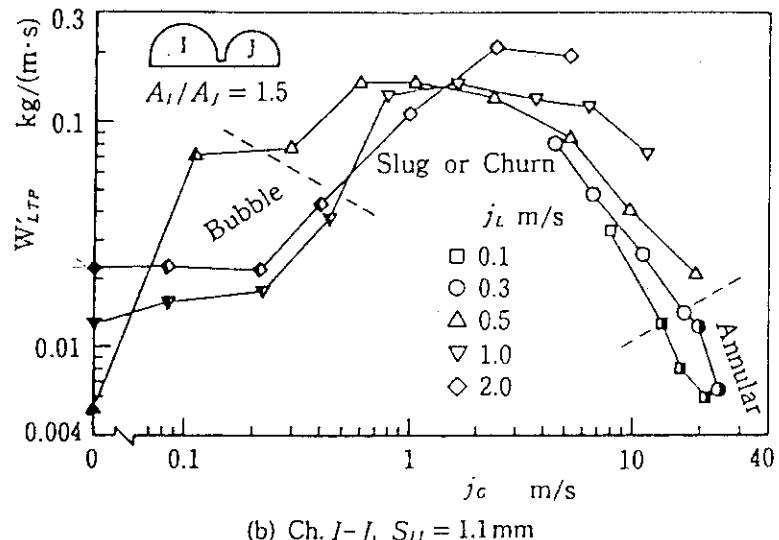
(b) Ch. I-J,  $S_{IJ} = 1.1 \text{ mm}$ 

Fig. 2.17 Turbulent mixing rate of liquid phase vs. superficial gas velocity  
(Channel I-J, gap = 1.1 mm)

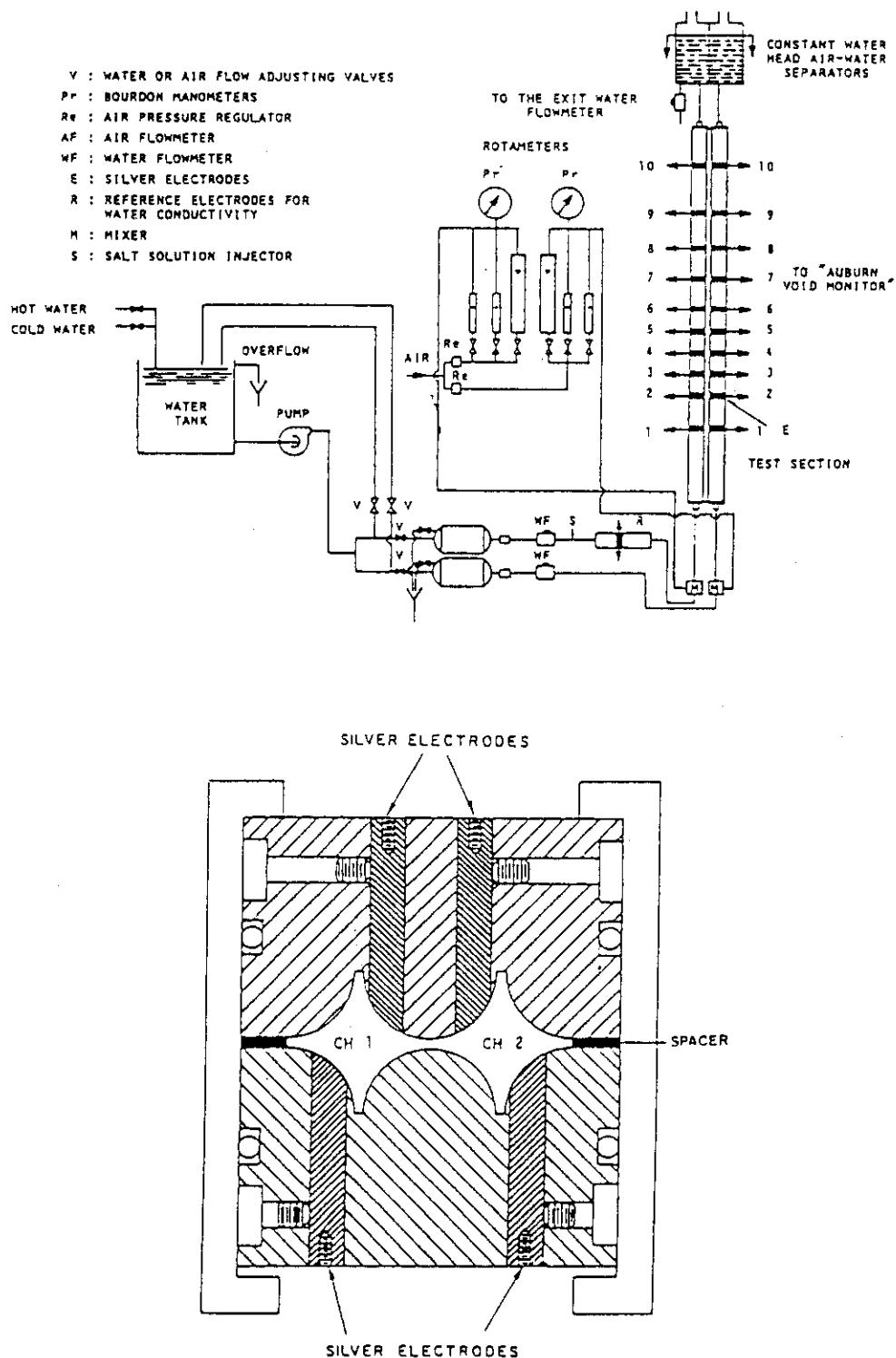


Fig. 2.18 Test section of Tapucu et al.'s experiment

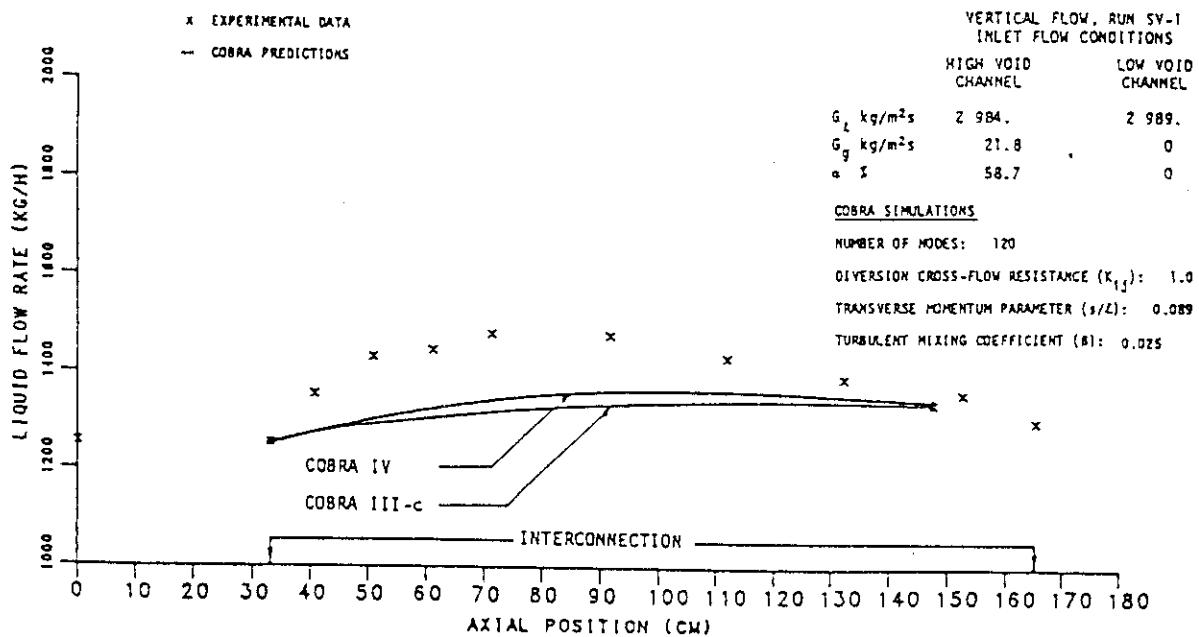


Fig. 2.19 Liquid mass flow rate in low void channel  
- comparison with COBRA predictions -

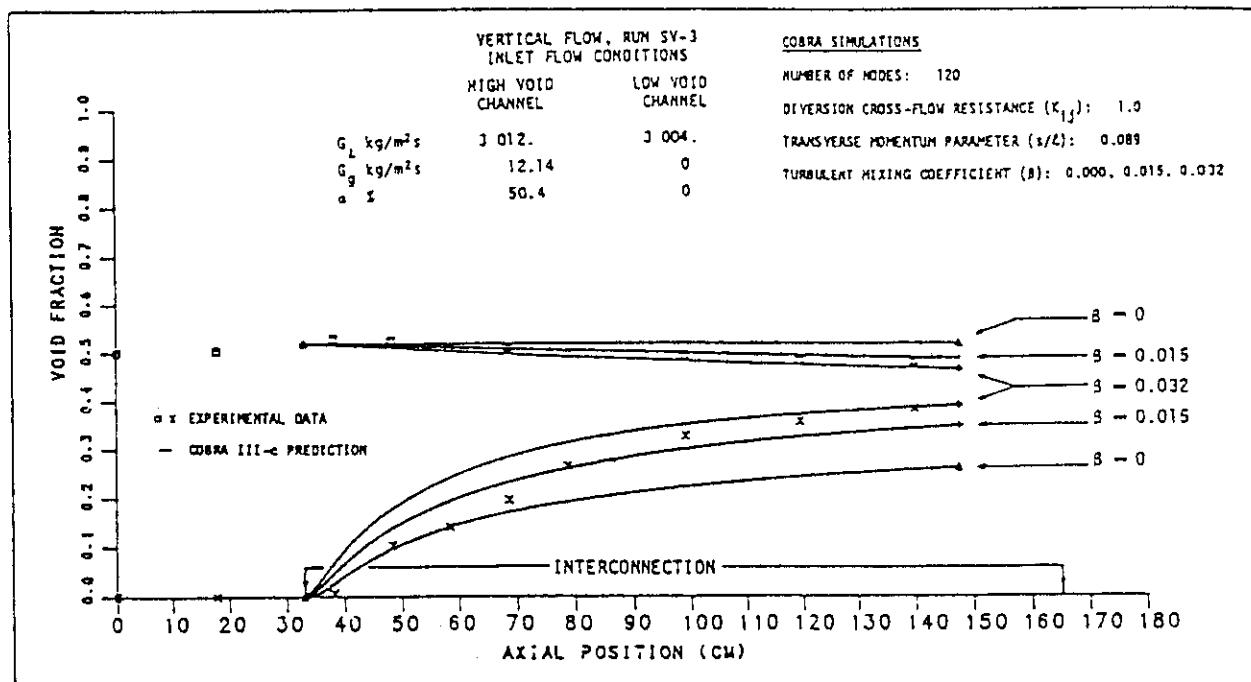


Fig. 2.20 Measured and predicted void fraction

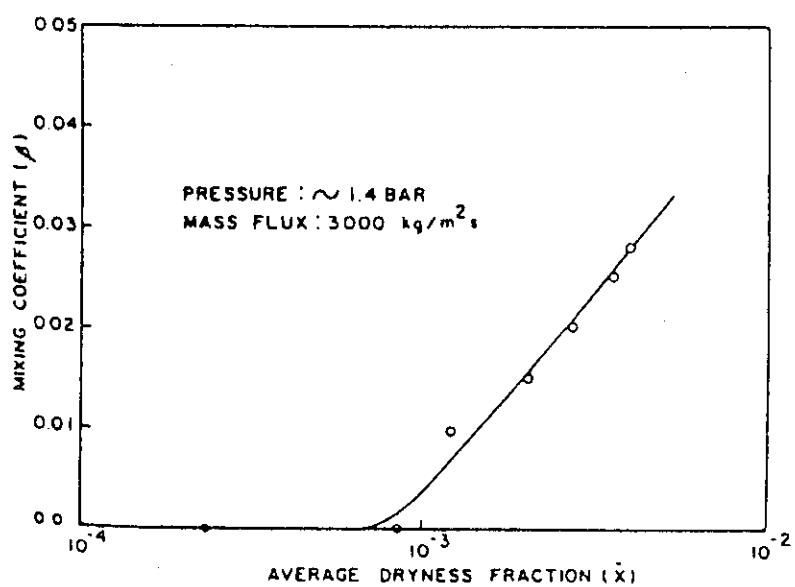


Fig. 2.21 Mixing coefficient as a function of dryness fraction

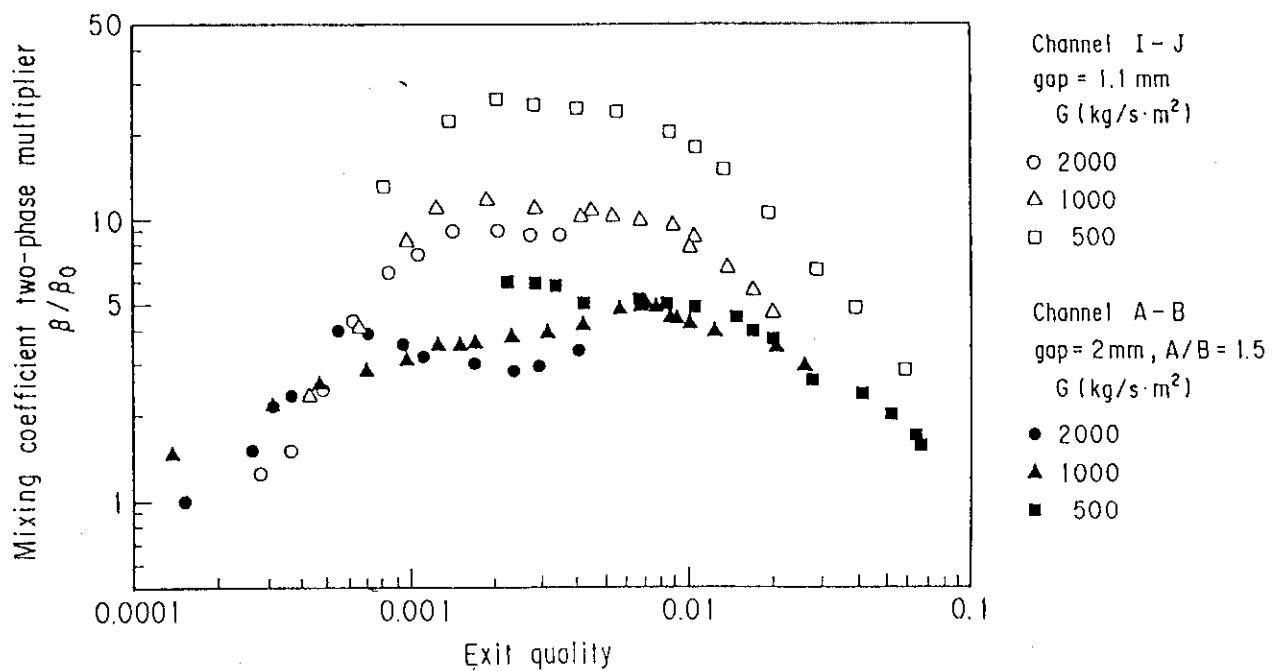
Sadatomi's data<sup>(8)</sup>

Fig. 3.1 Mixing coefficient Two-phase multiplier vs exit quality

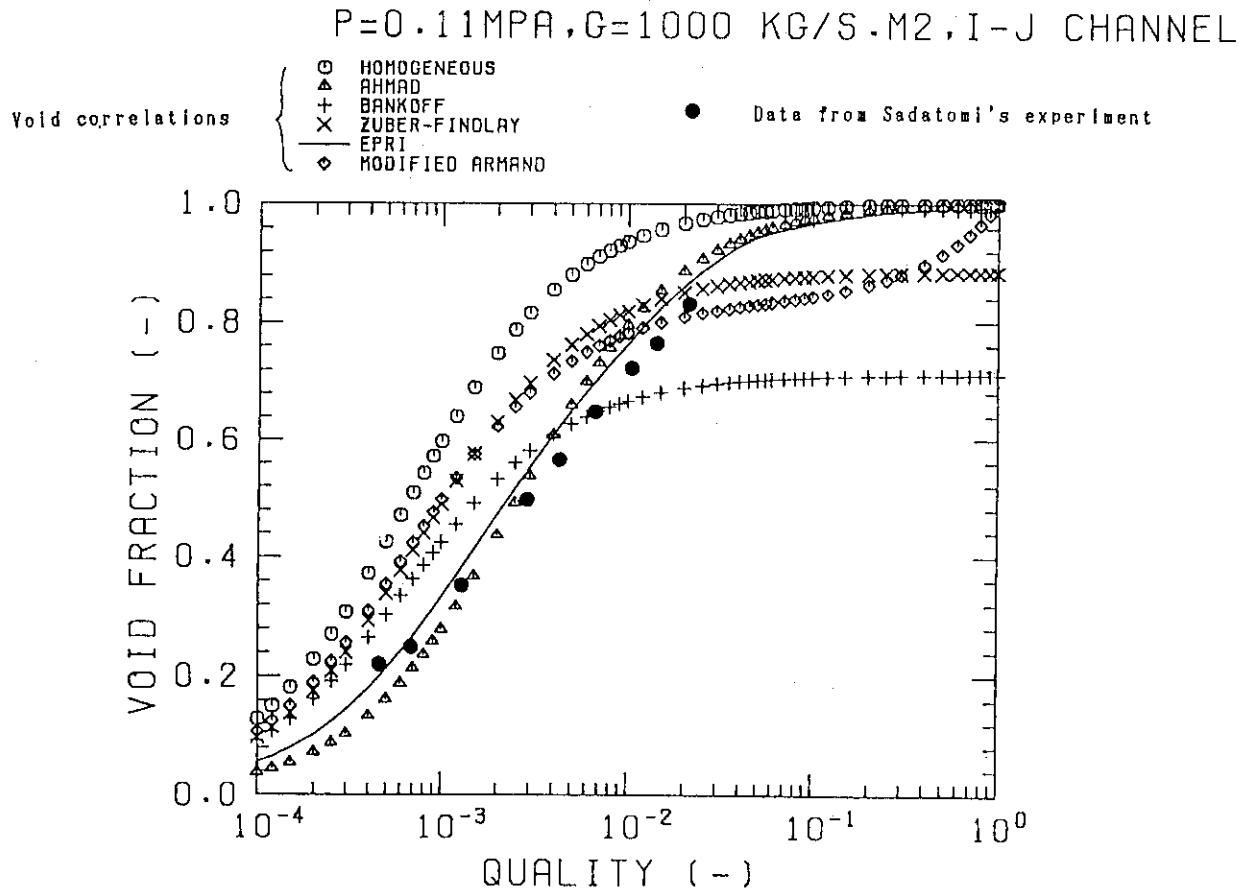


Fig. 3.2 Comparison of measured void fraction with correlations

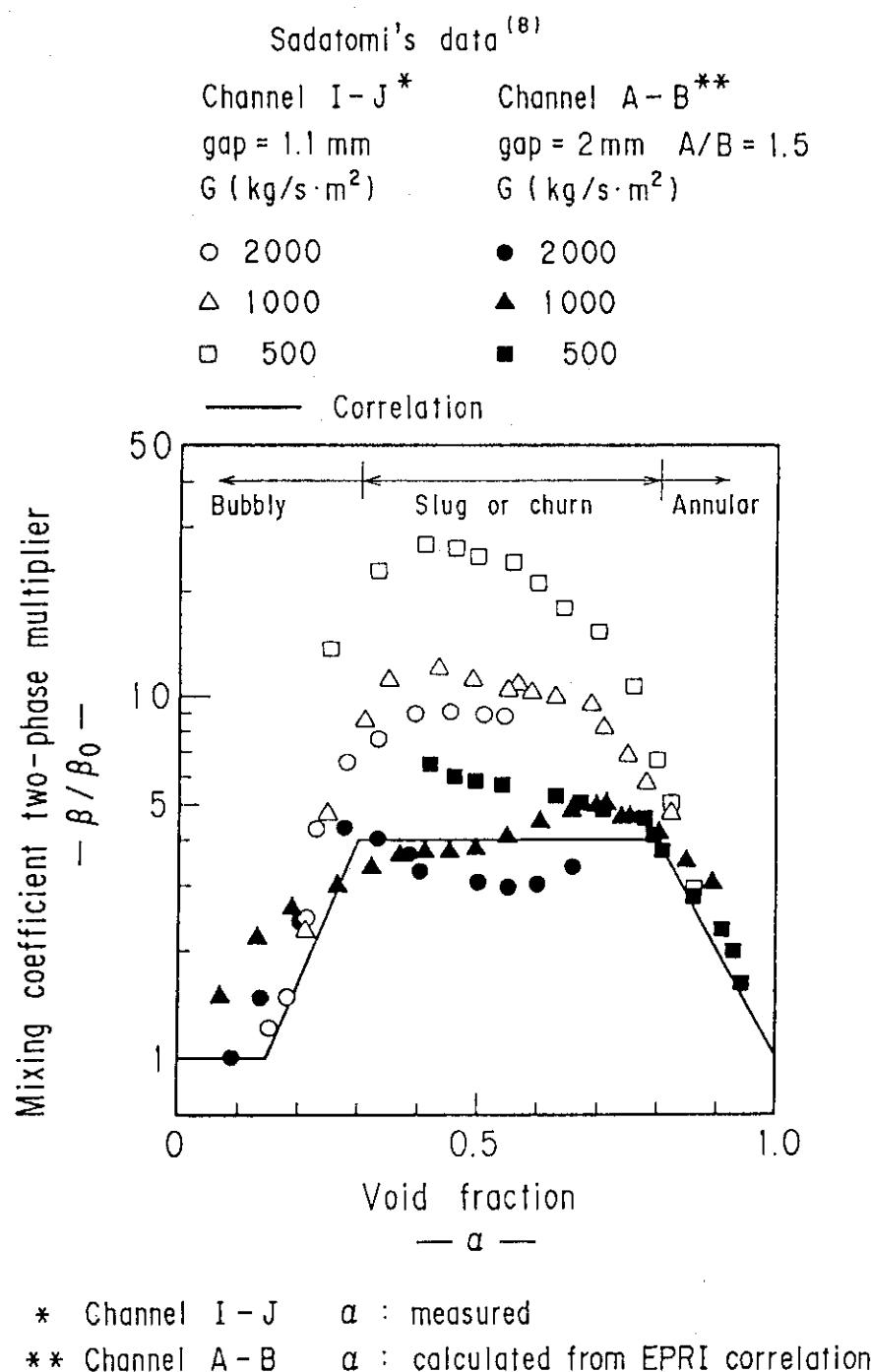


Fig. 3.3 Mixing coefficient Two-phase multiplier vs void fraction

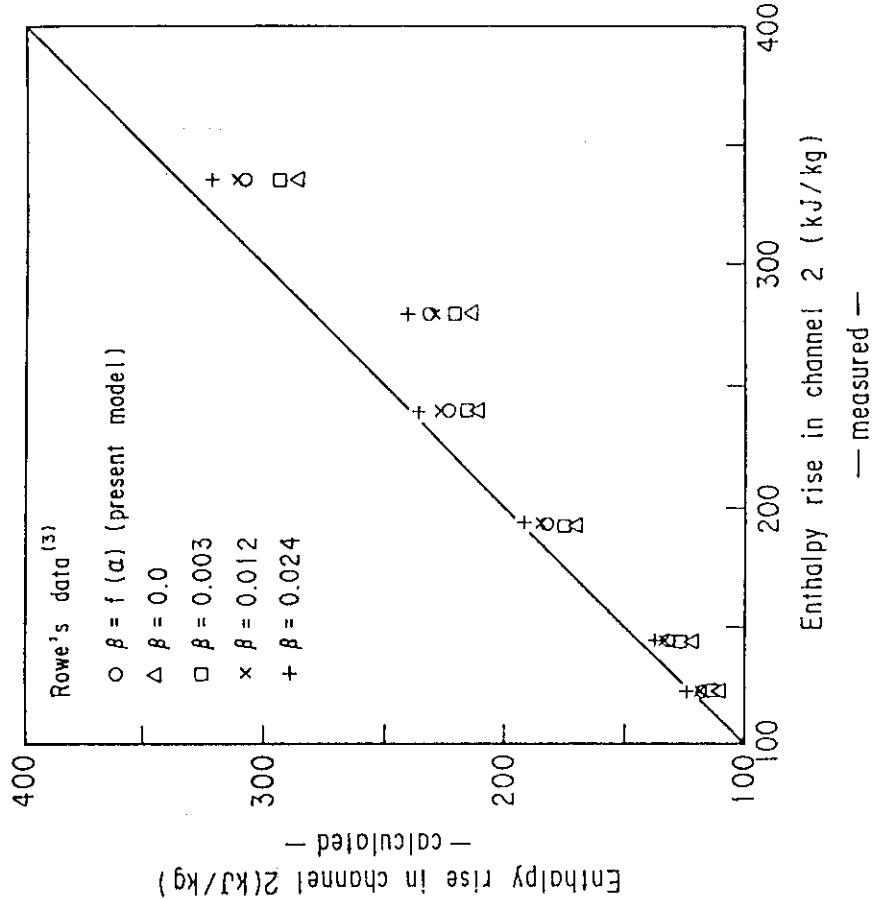


Fig. 3.4 Predicted and measured enthalpy rise  
(channel 1)

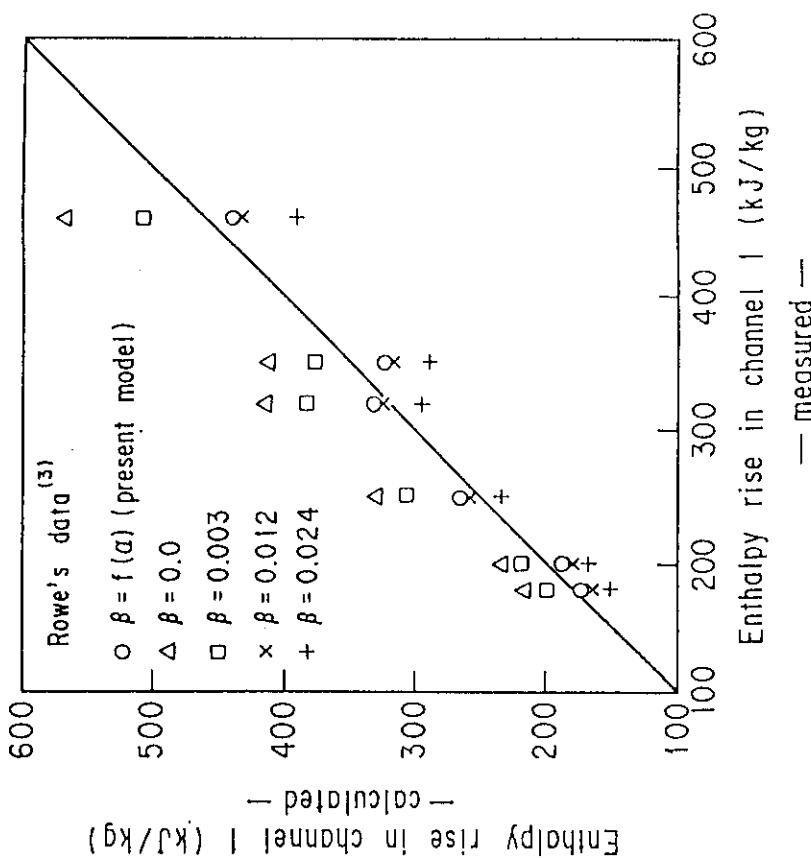


Fig. 3.5 Predicted and measured enthalpy rise  
(channel 2)

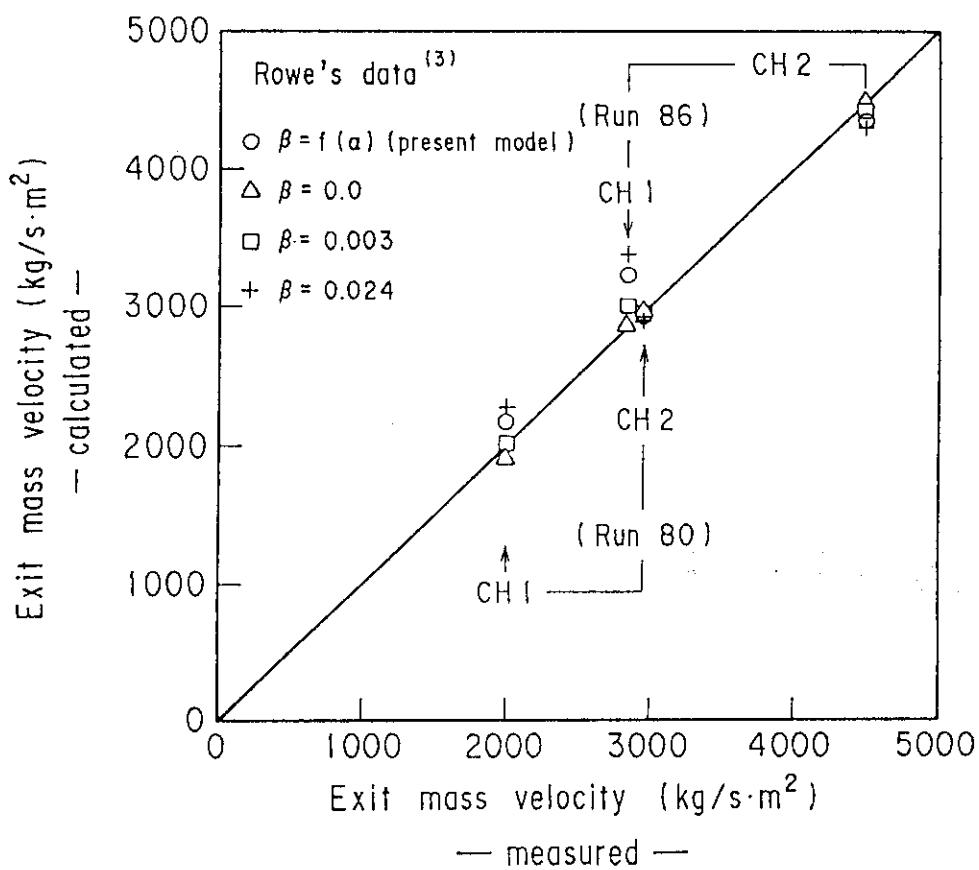


Fig. 3.6 Predicted and measured exit mass velocity

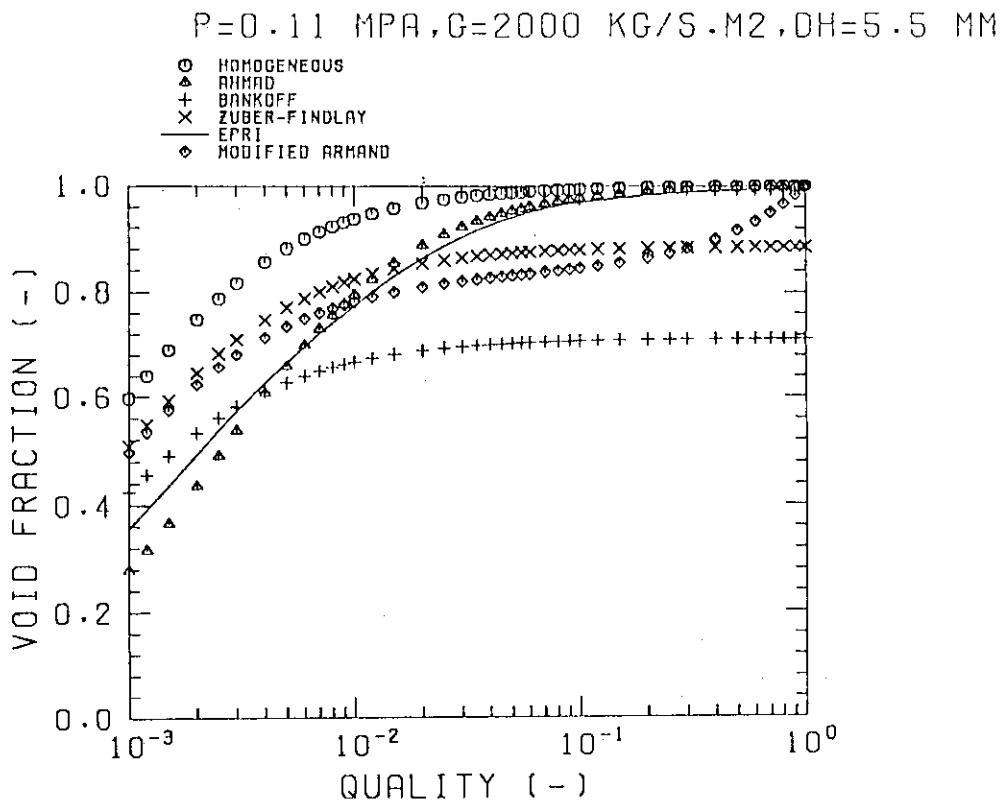


Fig. 3.7(a) Comparison of void fraction correlations  
( $P=0.11 \text{ MPa}$ )

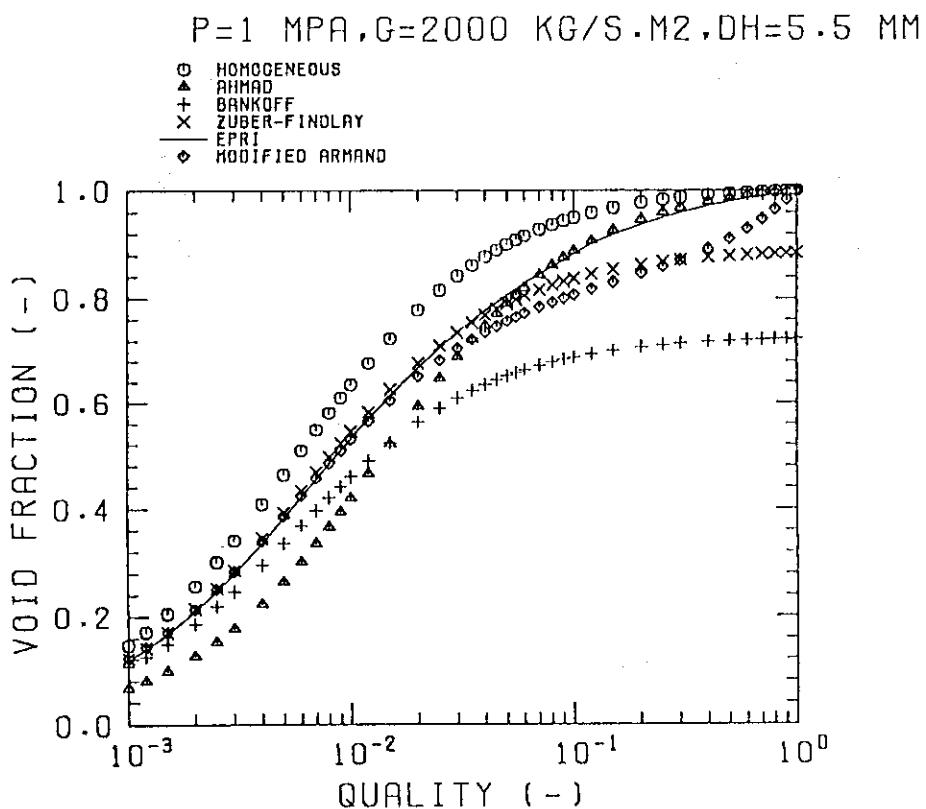


Fig. 3.7(b) Comparison of void fraction correlations  
( $P=1 \text{ MPa}$ )

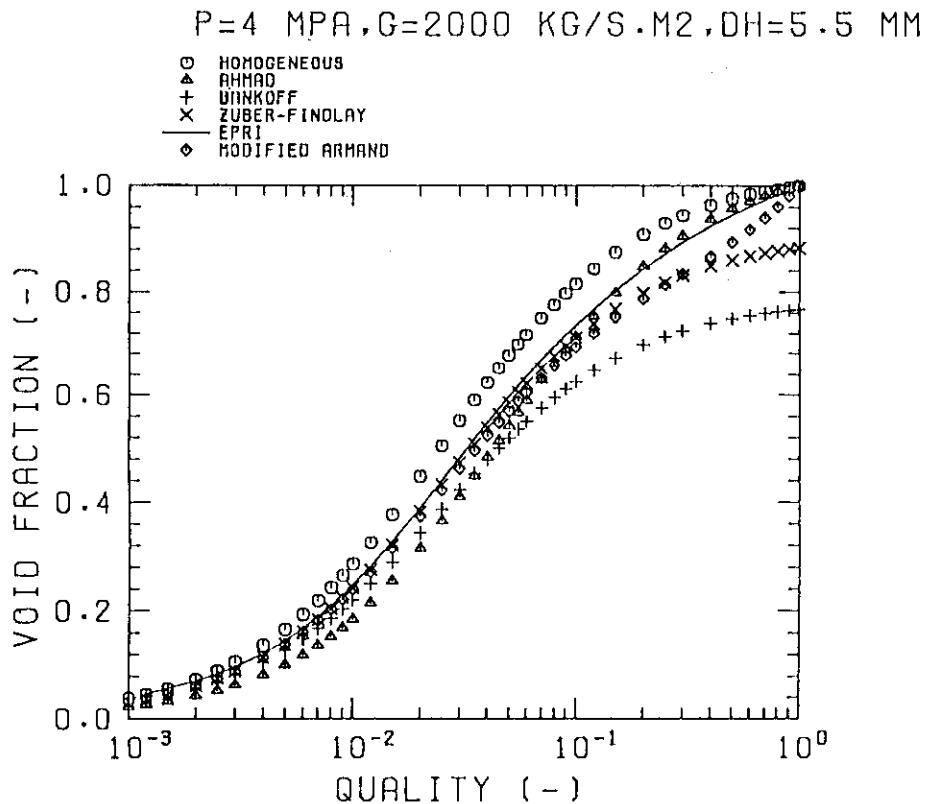


Fig. 3.7(c) Comparison of void fraction correlations  
( $P=4 \text{ MPa}$ )

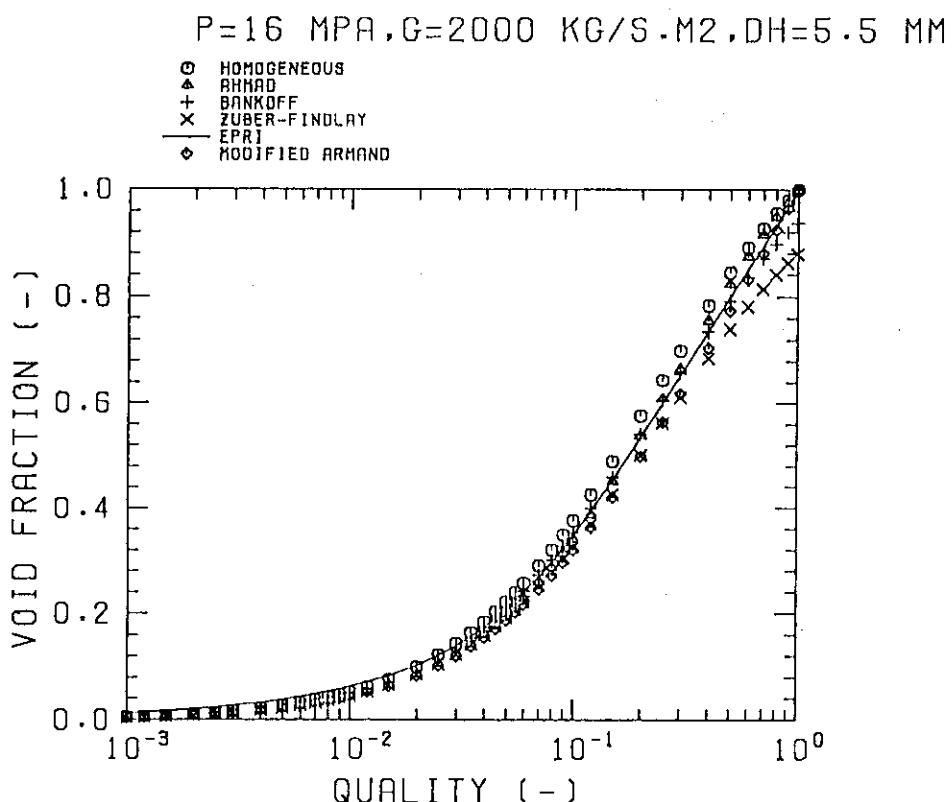
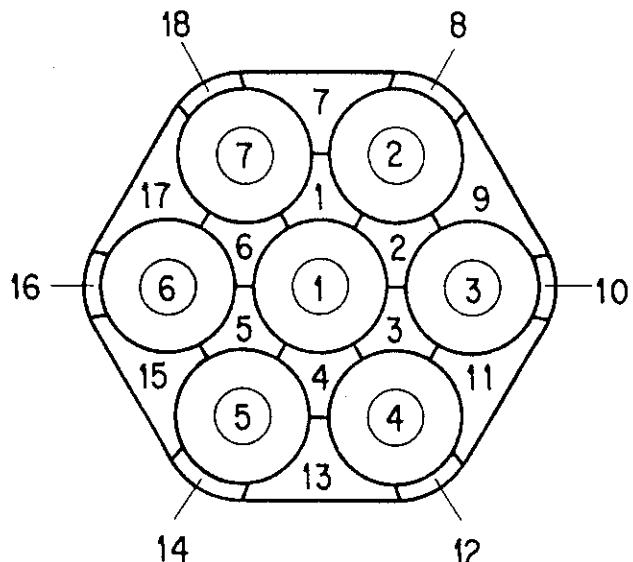


Fig. 3.7(d) Comparison of void fraction correlations  
( $P=16 \text{ MPa}$ )

1 ~ 18      Channel number

① ~ ⑦      Rod number



Subchannel model of 7-rod bundle

Fig. 4.1 Subchannel noding model of 7-rod bundle  
for COBRA analysis

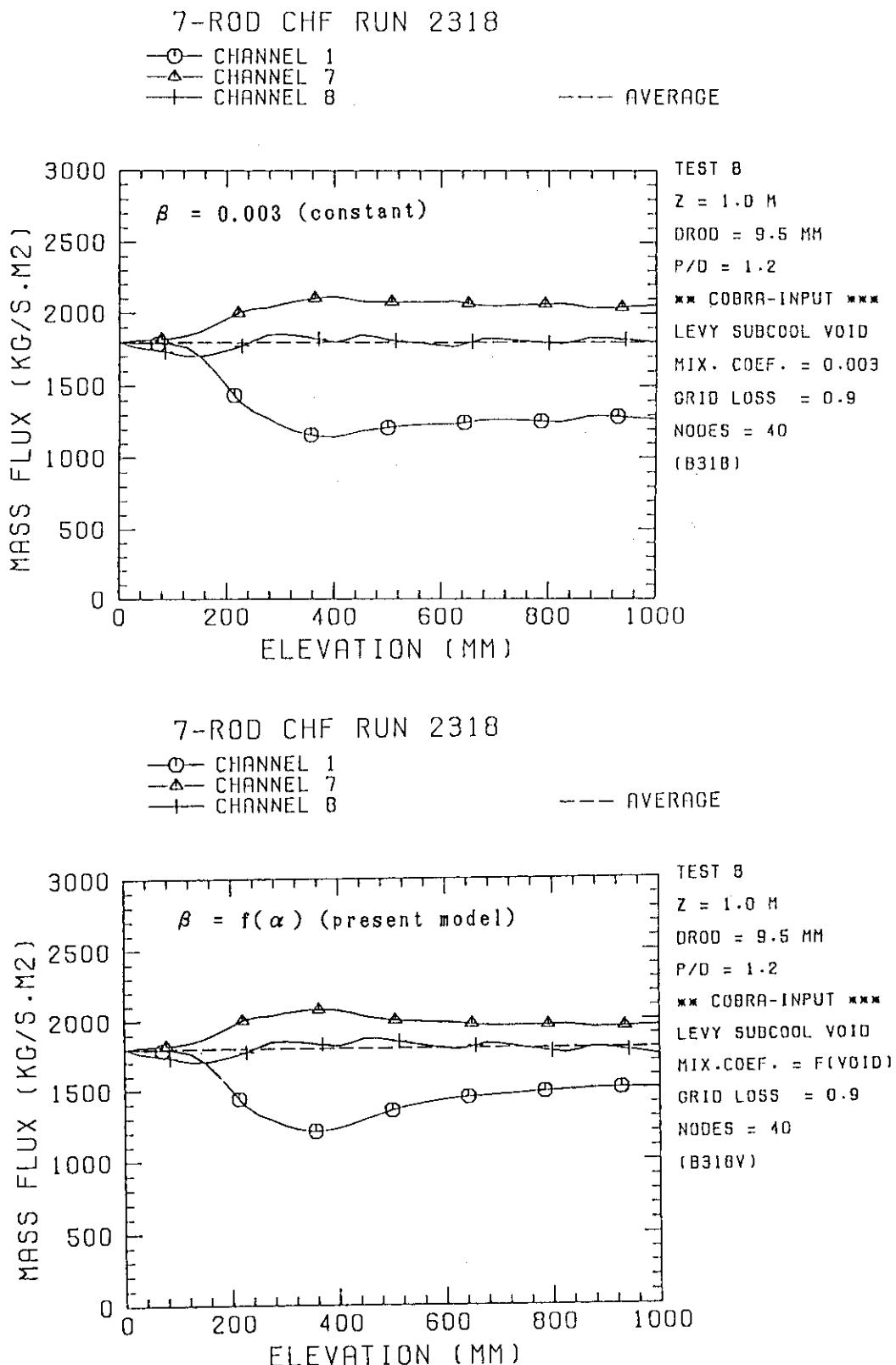


Fig. 4.2 Effect of mixing coefficient model on mass velocity

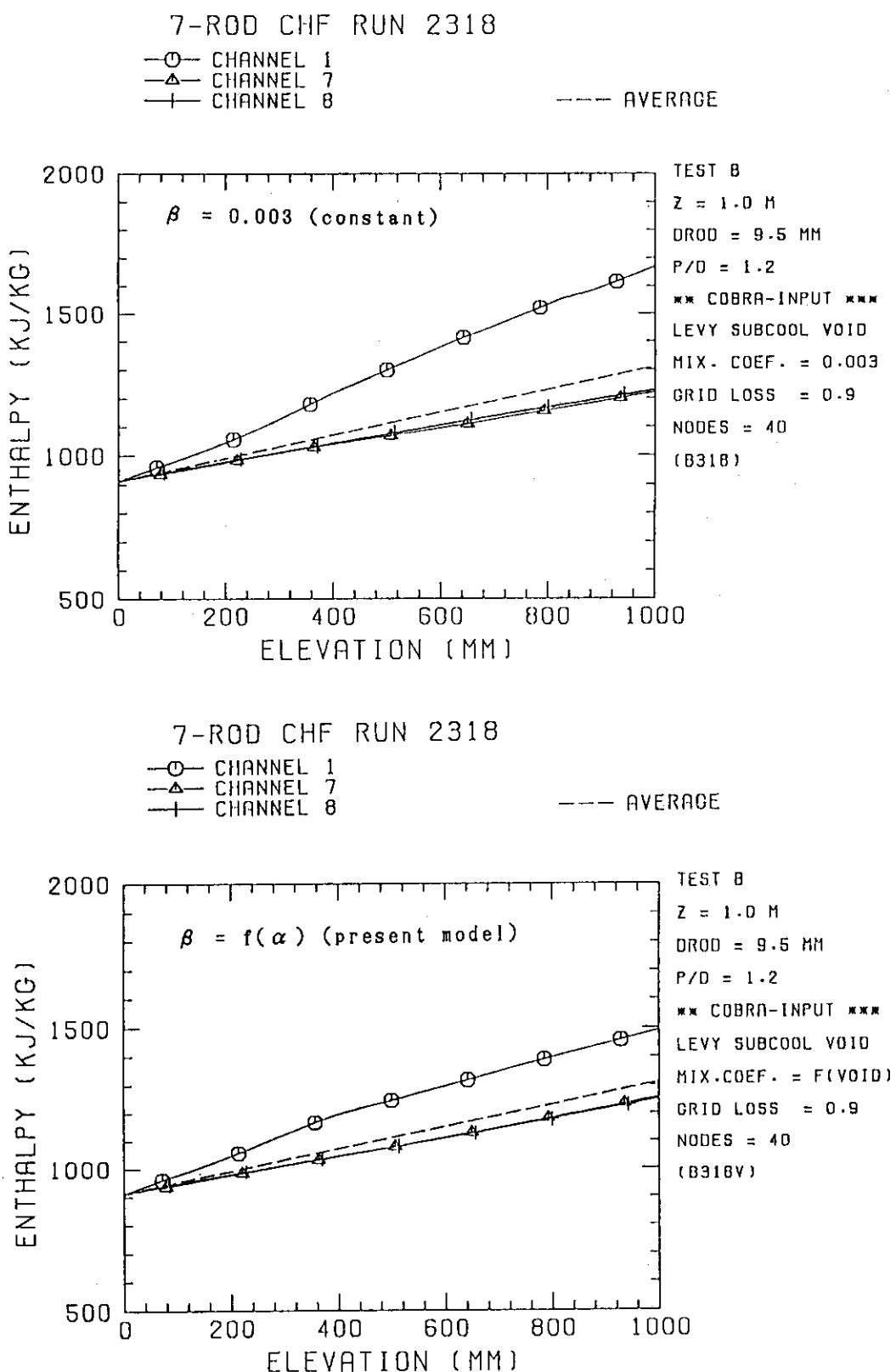


Fig. 4.3 Effect of mixing coefficient model on enthalpy

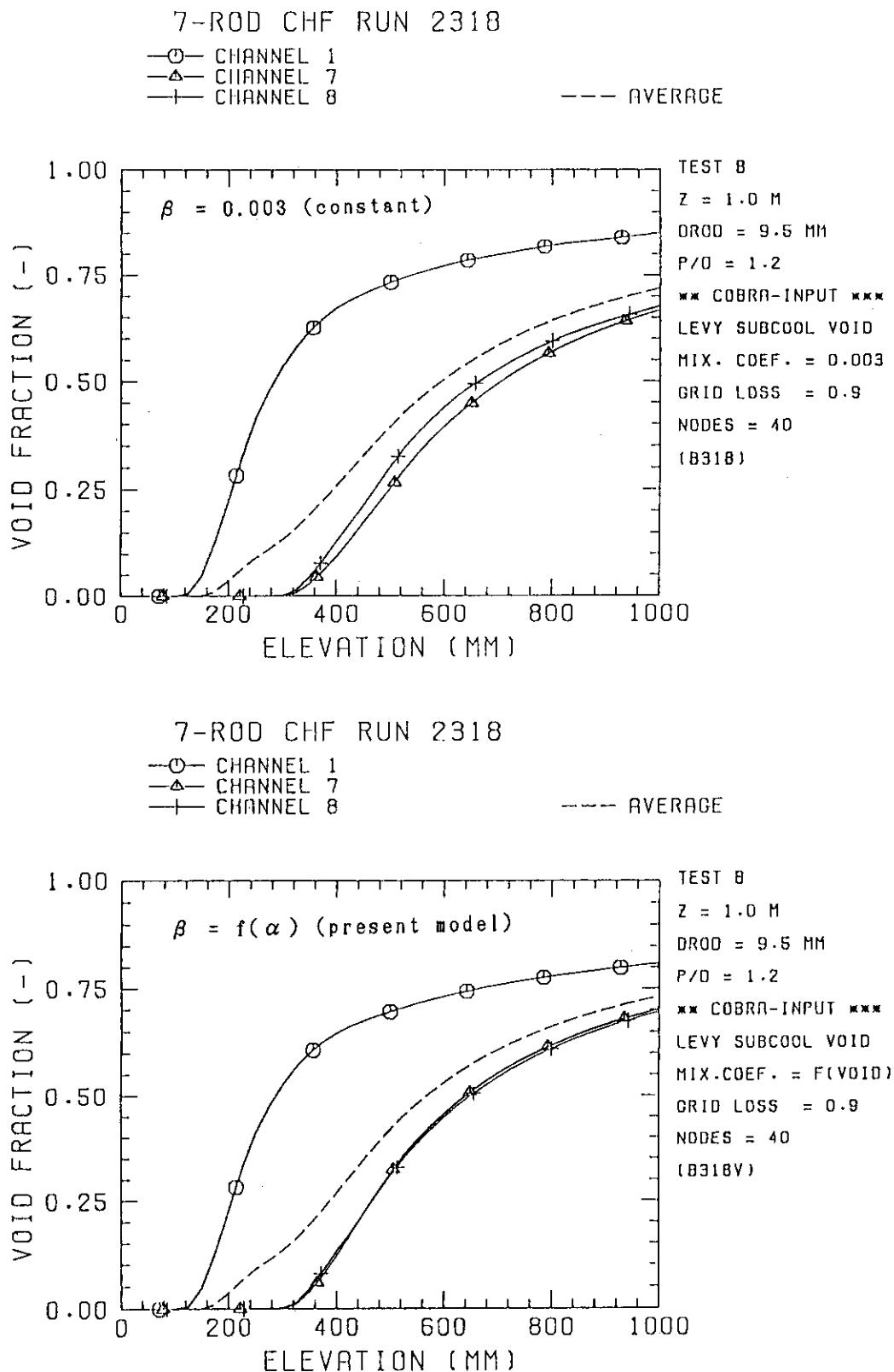


Fig. 4.4 Effect of mixing coefficient model on void fraction

付録 二相流混合係数とボイド率との関係を  
求めるのに用いたデータベース

Table A-1 Sadatomi's data<sup>(8)</sup> used in present  
mixing model (section 3.1)

$J_l$  = Superficial liquid velocity (m/s)

$J_g$  = Superficial gas velocity (m/s)

$T_l$  = Liquid temperature (°C)

$P$  = System pressure (atm)

$w_{LTP}$  = Liquid phase turbulent mixing rate (kg/s.m)

$\alpha$  = Measured void fraction (Channel I-J)

$\alpha'$  = Calculated void fraction using EPRI correlation (Channel A-B)

$X$  = Exit quality

$\beta$  = Two-phase mixing coefficient

$\beta_s$  = Single-phase mixing coefficient

(1) Channel I-J, Vertical  
(Geometry : Fig. 2.14)

$J_1$ (m/s)	$J_0$ (m/s)	$T_1$ (°C)	P (atm)	$W_{LTP}$ (kg/s.m)	$\alpha$ (-)	x (-)	$\beta_a$ (-)	$\beta / \beta_a$ (-)
0.5	0.29	20.8	1.12	0.076	0.252	0.00081	0.01	13.8
0.5	0.5	20.7	1.11	0.129	0.328	0.00139	〃	23.5
0.49	0.72	20.7	1.1	0.15	0.408	0.00204	〃	27.8
0.49	1.02	20.9	1.09	0.146	0.47	0.00284	〃	26.5
0.5	1.43	20.9	1.12	0.14	0.499	0.00397	〃	25.4
0.5	2	20.9	1.11	0.133	0.555	0.00554	〃	24.1
0.5	3.18	20.6	1.12	0.114	0.599	0.00878	〃	20.6
0.5	3.93	20.6	1.14	0.1	0.638	0.00108	〃	18.0
0.51	5.1	20.7	1.14	0.088	0.704	0.00137	〃	15.5
0.5	7.18	20.6	1.15	0.06	0.76	0.00196	〃	10.7
0.49	10.8	25.4	1.13	0.037	0.807	0.00285	〃	6.69
0.5	14.5	25.2	1.08	0.028	0.822	0.00388	〃	4.90
0.51	22.3	23.7	1.22	0.0175	0.867	0.00574	〃	2.95
1.01	0.35	21.8	1.17	0.032	0.211	0.00044	0.0109	2.43
1	0.48	21.8	1.18	0.051	0.245	0.00067	〃	4.27
1.01	0.71	21.8	1.17	0.103	0.313	0.00098	〃	8.52
1.01	0.9	21.5	1.16	0.134	0.35	0.00124	〃	11.1
1.01	1.36	21.5	1.17	0.145	0.433	0.00187	〃	11.9
1.01	2.05	21.5	1.16	0.133	0.489	0.00282	〃	11.0
1	2.99	21.5	1.17	0.123	0.546	0.00411	〃	10.3
1	3.25	26.6	1.15	0.13	0.561	0.00447	〃	10.8
1.01	3.9	22.4	1.17	0.125	0.587	0.00536	〃	10.3
1	3.96	19.8	1.17	0.124	0.586	0.00545	〃	10.3
1	4.97	19.8	1.17	0.12	0.63	0.00684	〃	10.0
1.01	4.99	26.3	1.17	0.121	0.633	0.00687	〃	9.91
1	6.52	25.8	1.2	0.118	0.694	0.00897	〃	9.36
1.01	7.35	21.5	1.2	0.099	0.71	0.00101	〃	8.11
0.99	7.56	25.6	1.23	0.104	0.712	0.00104	〃	8.68
1.01	9.91	19.8	1.25	0.083	0.748	0.00136	〃	6.77
1	10.1	25.5	1.22	0.082	0.75	0.00139	〃	6.76
1	12.3	24.2	1.25	0.069	0.78	0.00169	〃	5.67
1.01	14.9	19.7	1.302	0.058	0.82	0.00201	〃	4.70
1.99	0.41	21.8	1.222	0.0268	0.154	0.00029	0.01	1.23
2.04	0.54	21.8	1.22	0.0335	0.182	0.00037	〃	1.50
2	0.69	21.8	1.221	0.056	0.21	0.00048	〃	2.55
2.01	0.88	21.8	1.221	0.095	0.234	0.00061	〃	4.31
2.01	1.2	21.8	1.225	0.143	0.28	0.00083	〃	6.48
2.03	1.56	21.9	1.235	0.168	0.334	0.00108	〃	7.53
2.02	2.05	21.9	1.241	0.199	0.39	0.00142	〃	8.97
1.97	2.94	19.2	1.269	0.195	0.45	0.00204	〃	9.00
1.96	3.87	21.7	1.281	0.192	0.51	0.00274	〃	8.90
1.99	4.82	21.7	1.302	0.195	0.54	0.00336	〃	8.89

## (2) Channel A-B

A/B = 1.5 SAB = 2mm (Geometry : Fig. 2.14)

$J_1$ (m/s)	$J_0$ (m/s)	$T_1$ (°C)	P (atm)	$W_{LTP}$ (kg/s.m)	$\alpha$ (-)	x (-)	$\beta_0$ (-)	$\beta / \beta_0$ (-)
0.5	1.01	24.2	1.08	0.086	0.42	0.00234	0.014	6.14
0.5	1.2	24.2	1.1	0.084	0.46	0.00281	"	6.00
0.51	1.51	24.9	1.07	0.082	0.49	0.00334	"	5.86
0.51	1.94	24.2	1.08	0.08	0.54	0.00420	"	5.71
0.5	2.41	17.2	1.11	0.074	0.63	0.00670	"	5.29
0.48	2.98	22.7	1.06	0.071	0.67	0.00828	"	5.07
0.51	3.88	24	1.09	0.068	0.71	0.0108	"	4.86
0.49	5.52	24	1.11	0.064	0.78	0.0153	"	4.57
0.51	6.27	24	1.13	0.058	0.79	0.0174	"	4.14
0.5	7.1	23.9	1.13	0.0535	0.81	0.0197	"	3.82
0.5	10.2	13.9	1.15	0.039	0.86	0.0275	"	2.78
0.49	15.5	10.2	1.1	0.034	0.91	0.0414	"	2.43
0.5	19.6	12.6	1.18	0.029	0.925	0.0517	"	2.07
0.5	24	14.8	1.2	0.024	0.94	0.0626	"	1.71
0.51	27.3	13.5	1.23	0.022	0.94	0.0633	"	1.57
1	0.1	16.1	1.11	0.03	0.07	0.00014	0.010	1.50
0.99	0.23	18.2	1.1	0.046	0.13	0.00032	"	2.30
1	0.34	20.7	1.12	0.053	0.19	0.00047	"	2.65
1	0.5	18.2	1.11	0.06	0.26	0.00070	"	3.00
1.01	0.7	21.1	1.11	0.068	0.32	0.00097	"	3.37
1	0.91	17.2	1.1	0.072	0.37	0.00127	"	3.60
1.01	1.12	24.3	1.06	0.074	0.41	0.00154	"	3.67
1.01	1.25	24.7	1.09	0.074	0.45	0.00172	"	3.67
1.01	1.65	24.4	1.1	0.076	0.50	0.00227	"	3.76
1	2.22	23	1.1	0.081	0.55	0.00308	"	4.05
1	2.98	24.5	1.11	0.087	0.61	0.00413	"	4.34
0.98	3.96	24.3	1.12	0.096	0.66	0.00560	"	4.88
0.99	4.82	12.1	1.15	0.099	0.69	0.00673	"	4.97
0.98	4.91	24.4	1.15	0.099	0.70	0.00693	"	5.03
0.99	5.42	12.1	1.16	0.1	0.72	0.00756	"	5.02
0.99	6.23	10.2	1.11	0.098	0.74	0.00869	"	4.66
1	6.59	14.2	1.17	0.095	0.75	0.00910	"	4.72
1	7.32	24	1.18	0.089	0.76	0.0101	"	4.41
0.99	9.01	15.3	1.21	0.0816	0.80	0.0125	"	4.08
1	15	14.4	1.22	0.723	0.86	0.0205	"	3.55
1.02	19.6	13.8	1.28	0.0663	0.89	0.0261	"	3.17
1.98	0.27	21.9	1.16	0.0401	0.09	0.00016	0.010	1.0
2	0.47	23.6	1.15	0.062	0.14	0.00027	"	1.55
1.98	0.65	23.8	1.1	0.098	0.20	0.00038	"	2.45
1.99	0.96	23.7	1.17	0.171	0.28	0.00056	"	4.28
1.98	1.24	20.8	1.15	0.165	0.33	0.00072	"	4.13
2	1.61	21.2	1.15	0.148	0.38	0.00093	"	3.7
1.97	2.02	21.2	1.16	0.132	0.40	0.00117	"	3.3
1.98	2.98	20.7	1.18	0.125	0.50	0.00173	"	3.13
1.98	3.91	21	1.2	0.118	0.55	0.00227	"	2.95
2.01	4.94	21	1.23	0.12	0.59	0.00287	"	3.0
1.96	6.9	14.2	1.28	0.14	0.68	0.0040	"	3.5