

JAERI - M
85-071

JRR-3改造炉熱水力設計のための
標準型燃料要素内流動特性実験

1985年6月

神永 雅紀・井川 博雅・大河原 正美
数土 幸夫

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、お申しこしてください。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）で複写による実費頒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, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

JRR-3 改造炉熱水力設計のための標準型燃料要素内流動特性実験

日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部

神永 雅紀・井川 博雅

大河原正美・数土 幸夫

(1985年5月16日受理)

熱出力 20 MW の JRR-3 改造炉の炉心熱水力設計における燃料板表面温度の評価には安全を考慮してホット・チャンネル・ファクタを用いている。本報は、このホット・チャンネル・ファクタの工学的因子である標準型燃料要素内のサブチャンネル間流速分布因子及び流路断面積誤差因子を実験的に評価し、その妥当性を検討するため JRR-3 改造炉の標準型燃料要素を模擬した燃料要素内の流動特性について、JRR-3 燃料要素単体流動試験装置を用いて調べた結果について述べたものである。実験結果より、サブチャンネル間流速分布因子として 1.08、また流路断面積誤差因子として 1.17 を得た。これらの実験により得られた値は、JRR-3 改造炉の炉心熱水力設計に用いられている。

JAERI-M 85-071

Experimental study on characteristics of the hydraulic
behavior in the standard fuel element for the
thermal-hydraulic design of the upgraded JRR-3

Masanori KAMINAGA, Hiromasa IKAWA, Masami OHGAWARA
and Yukio SUDO

Department of Research Reactor Operation
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 16, 1985)

In core thermal-hydraulic design of the JRR-3 which is to be renewed at 20 MW, so-called hot channel factors are used for the evaluation of the surface temperature of fuel plates at the hottest spot.

Of the hot channel factors, velocity-deviation factor for a sub-channel of the standard fuel element which has a nominal water gap and flow area-deviation factor for a subchannel of the standard fuel element whose water gap is within a tolerance of manufacturing were investigated experimentally by use of the JRR-3 hydraulic test rig which is composed of a simulated standard fuel element and a recirculation loop for water.

This report describes the test results and the discussions, showing the validity of the velocity-deviation factor and flow area-deviation factor which should be adopted for the evaluation of surface temperature of fuel element.

As the results, 1.08 was proposed for velocity-deviation factor, and 1.17 for the flow area-deviation factor.

These factors based on the results are used in the core thermal-hydraulic design of the upgraded JRR-3.

Keywords; Research Reactor, JRR-3, Hydraulic Test, Velocity-deviation
Factor, Flow Area-deviation Factor, Subchannel, Thermal-hydraulic
Design, Hot Channel Factors

目 次

1. 序	1
2. 燃料要素単体流動試験装置	1
2.1 実験装置の概要	1
2.2 主要機器の寸法諸元	2
2.3 計測項目・計測装置及び計測位置	4
2.4 実験方法	5
2.5 実験パラメータ及びその範囲	6
3. 流速の算出方法及び流速に関する予備的検討	14
3.1 ヨーメーターによる差圧から流速への変換方法	14
3.2 流速の算出方法	15
3.3 流量計による流量と流速分布から求めた流量の関係	17
3.4 テストセクション部流動損失評価	17
3.5 模擬標準型燃料要素のサブチャンネルギャップが基準値からずれた際の 流速の評価	19
3.5.1 サブチャンネルギャップの実測値	19
3.5.2 サブチャンネルギャップが基準値からずれた際の流速の評価	19
4. 実験結果とその検討	34
4.1 各サブチャンネルの流速分布測定結果	34
4.2 サブチャンネル間の流速分布及びサブチャンネル間流速分布因子, 流路断面積誤差因子の検討	34
4.3 実験データの再現性及び誤差評価	36
5. 結 言	52
謝 辞	52
参考文献	52
Appendix A	53
Appendix B	58

Contents

1. Introduction	1
2. JRR-3 Hydraulic Test Rig for Simulated Fuel Element	1
2.1 Schematic of test rig	1
2.2 Dimensions of major components	2
2.3 Instrumentation	4
2.4 Test method	5
2.5 Major test parameters and the range of theirs	6
3. Calculation Method of Flow Velocity and Preliminary Discussions of Velocity	14
3.1 Conversion from differential pressure to flow velocity	14
3.2 Calculation method of flow velocity	15
3.3 Comparison between measured flow rate and calculated flow rate	17
3.4 Pressure loss in the test section	17
3.5 Calculated velocity as a function of subchannel gap	19
3.5.1 Measured results of subchannel gap in simulated standard fuel element	19
3.5.2 Calculated velocity as a function of subchannel gap ...	19
4. Test Results and Discussions	34
4.1 Measured results of velocity distribution in each subchannel	34
4.2 Velocity distribution in simulated standard fuel element and discussion of velocity-deviation factor within standard fuel element and flow area-devication factor	34
4.3 Reproducibility and evaluation of error	36
5. Concluding Remarks	52
Acknowledgments	52
References	52
Appendix A	53
Appendix B	58

List of Tables

- Table 3.2.1 C_i of Each Flow Rate
- Table 3.4.1 Loss Coefficient and Velocity at Each Section
- Table 3.5.1 Measured Subchannel Gap of Simulated Standard Fuel Element
- Table 4.1.1(a),(b) Average Velocity in Subchannel
- Table 4.2.1 Maximum and Minimum Ratio of The Ratio to Average Velocity of Velocity in Subchannel
- Table 4.3.1(a)~(c) Reproducibility of Velocity in Subchannel

List of Figures

- Fig. 2.1.1 Flow Sheet of JRR-3 Simulated Fuel Element Test Loop
- Fig. 2.1.2 JRR-3 Hydraulic Test Rig of Simulated Fuel Element
- Fig. 2.1.3 Simulated JRR-3 Standard Fuel Element
- Fig. 2.3.1 Location of Pressure Gauge and Test Section
- Fig. 2.3.2 Arrow Head Type Three Holes Yaw Meter
- Fig. 2.3.3 Location of Yaw Meter
- Fig. 2.3.4 Measuring Points of Fuel Element in Fuel Plates Exit
- Fig. 3.1.1 Calibration Curve of Yaw Meter
- Fig. 3.2.1 Illustration of Velocity V_{ij} , V_{ijk} and Cross Sectional-area in Subchannel A_{ij}
- Fig. 3.2.2 Illustration of Calculation Method C_{ij}
- Fig. 3.2.3(a)~(f) Velocity Distribution along the direction of Water Gap in Subchannel
- Fig. 3.3.1 Comparison between Measured Flow Rate Q and Calculated Flow Rate Q'
- Fig. 3.4.1 Calculation Model for Test Section
- Fig. 3.4.2 Loss of Water Head as a function of Flow Rate
- Fig. 3.5.2 Normalized Calculated Flow Velocities as a function of Normalized Subchannel Gap
- Fig. 4.1.1(a)~(u) Velocity Distribution in Subchannel
- Fig. 4.2.1 Velocity Distribution of Simulated Standard Fuel Element
- Fig. 4.2.2 Comparison between Measured Velocities in Subchannel and Calculated Velocities
- Fig. 4.2.3 Comparison of The Measured Normalized Flow Velocities with The Predicted ones in Subchannel as a function of Normalized Subchannel Gap

1. 序

JRR-3 改造炉は、定常状態において標準型燃料要素内の流速が約 6.2 m/s、炉心全流量が約 2,400 m³/h の下向流で熱出力約 20 MW を冷却するオープンプール型の研究炉である。炉心熱水力設計においては、標準型燃料要素内の燃料板の表面温度分布を正確に評価することが重要である。しかしながら、一般に燃料板の表面温度を正確に評価するのは困難であるため、JRR-3 改造炉熱水力設計においては想定した最も厳しい状態を燃料板表面温度にホット・チャンネル・ファクタを乗じて表わし、そこにおいても熱的に余裕があるように設計している。

ホット・チャンネル・ファクタは、大別して核的因子と工学的因子とからなる。

本報は、JRR-3 改造炉炉心熱水力設計に用いたホット・チャンネル・ファクタの工学的因子のうち、その一つである標準型燃料要素内のサブチャンネル内の流速分布因子、更に流路断面積誤差因子について、JRR-3 改造炉の標準型燃料要素を模擬した燃料要素内の流動特性を JRR-3 燃料要素単体流動実験装置を用いて調べることにより実験的に評価し、その妥当性を検討した結果について述べたものである。第 2 章では燃料要素単体流動試験装置の概要を、第 3 章は流速の算出方法及び流速に関して予備的に行なった検討を、第 4 章は燃料要素単体流動実験装置を用いて測定した模擬標準型燃料要素内の流速分布の結果及びサブチャンネル間流速分布因子、流路断面積誤差因子の検討である。第 5 章は結言である。

2. 燃料要素単体流動試験装置

2.1 実験装置の概要

本実験で使用した試験装置は、JRR-3 モックアップ試験室内に設置された燃料要素単体流動試験装置である。主な構成要素としては、JRR-3 改造炉で使用する標準型燃料要素を模擬した模擬標準型燃料要素を含むテストセクション、このテストセクション部に水を循環させるための水循環系統、テストセクション部を JRR-3 改造炉の炉心と同等な圧力にするためのヘッドタンク、配管系全体に給水する系統及び排水のためのドレン系統、ポンプの起動等を行なう制御系、及び流速データ計測系がある。

図 2.1.1 に実験装置のフローシート、図 2.1.2 にヘッドタンク、及びポンプの起動等を行なう制御系を除く実験装置概要を示す。また、図 2.1.3 には実験に用いた模擬標準型燃料要素を示す。

以下に、本実験装置の特徴を記す。

- (1) テストセクション部は、流路幅 66.6 mm、流路ギャップ 2.20 mm、燃料板長さ 770 mm、燃料板枚数 20 枚で構成される模擬標準型燃料要素、炉心を模擬したタンク、流速を測定するための計測部、計測部に取り付けられたトラバース装置付ヨーメーター(ピトー管)、及び下部プレナムから成る。またタンク内には標準型要素を収めるための内筒があり、模擬標準型燃料要素は、

1. 序

JRR-3 改造炉は、定常状態において標準型燃料要素内の流速が約 6.2 m/s、炉心全流量が約 2,400 m³/h の下向流で熱出力約 20 MW を冷却するオープンプール型の研究炉である。炉心熱水力設計においては、標準型燃料要素内の燃料板の表面温度分布を正確に評価することが重要である。しかしながら、一般に燃料板の表面温度を正確に評価するのは困難であるため、JRR-3 改造炉熱水力設計においては想定した最も厳しい状態を燃料板表面温度にホット・チャンネル・ファクタを乗じて表わし、そこにおいても熱的に余裕があるように設計している。

ホット・チャンネル・ファクタは、大別して核的因子と工学的因子とからなる。

本報は、JRR-3 改造炉炉心熱水力設計に用いたホット・チャンネル・ファクタの工学的因子のうち、その一つである標準型燃料要素内のサブチャンネル内の流速分布因子、更に流路断面積誤差因子について、JRR-3 改造炉の標準型燃料要素を模擬した燃料要素内の流動特性を JRR-3 燃料要素単体流動実験装置を用いて調べることにより実験的に評価し、その妥当性を検討した結果について述べたものである。第 2 章では燃料要素単体流動試験装置の概要を、第 3 章は流速の算出方法及び流速に関して予備的に行なった検討を、第 4 章は燃料要素単体流動実験装置を用いて測定した模擬標準型燃料要素内の流速分布の結果及びサブチャンネル間流速分布因子、流路断面積誤差因子の検討である。第 5 章は結言である。

2. 燃料要素単体流動試験装置

2.1 実験装置の概要

本実験で使用した試験装置は、JRR-3 モックアップ試験室内に設置された燃料要素単体流動試験装置である。主な構成要素としては、JRR-3 改造炉で使用する標準型燃料要素を模擬した模擬標準型燃料要素を含むテストセクション、このテストセクション部に水を循環させるための水循環系統、テストセクション部を JRR-3 改造炉の炉心と同等な圧力にするためのヘッドタンク、配管系全体に給水する系統及び排水のためのドレン系統、ポンプの起動等を行なう制御系、及び流速データ計測系がある。

図 2.1.1 に実験装置のフローシート、図 2.1.2 にヘッドタンク、及びポンプの起動等を行なう制御系を除く実験装置概要を示す。また、図 2.1.3 には実験に用いた模擬標準型燃料要素を示す。

以下に、本実験装置の特徴を記す。

- (1) テストセクション部は、流路幅 66.6 mm、流路ギャップ 2.20 mm、燃料板長さ 770 mm、燃料板枚数 20 枚で構成される模擬標準型燃料要素、炉心を模擬したタンク、流速を測定するための計測部、計測部に取り付けられたトラバース装置付ヨーメーター(ピトー管)、及び下部プレナムから成る。またタンク内には標準型要素を収めるための内筒があり、模擬標準型燃料要素は、

さらにアクリル製内筒を介してその中に収まる。

- (2) トラバース装置付3孔アローヘッド型ヨーメーターにより、燃料板出口において任意の点の流速を測定することが可能である。
- (3) JRR-3 改造炉と同じ下向流である。
- (4) 循環水は、JRR-3 改造炉の一次冷却材と同じ純水を用いている。
- (5) 循環ポンプは模擬標準型燃料要素内の流速が JRR-3 改造炉通常運転時の標準型燃料要素内の流速である約 6.2 m/s を十分出すことができる容量を持つ。
- (6) 流量は、V-1, V-2 のゲートバルブによって調節し、任意に設定することができる。
- (7) テストセクション上部での圧力は、JRR-3 改造炉の炉心入口の約 1.5 kg/cm² abs とほぼ同じ圧力条件となるように約 1.7 kg/cm² abs としている。
- (8) テストセクション上部及び下部には圧力計が取り付けられており、テストセクション部の流動損失を求めることができる。
- (9) 計測部にはアクリル製の窓があり、ヨーメーターの位置などを目視にて確認でできる。
- (10) 循環水の水温は約 20 °C である。

2.2 主要機器の寸法諸元

以下に主要機器の構造、寸法諸元を示す。

(1) 模擬標準型燃料要素

これは、JRR-3 標準型燃料要素を模擬したものである。

- 数量：1 体
- 材質：SUS 304, ただしノズル部はアルミニウム合金
- 寸法：長さ 1153.5 mm, 外径 77.04 mm[□]

燃料板	長さ	770 mm
	枚数	20 枚
流路幅		66.6 mm
	ギャップ	2.20 mm

(2) タンク

これは、JRR-3 改造炉の炉心タンクを模擬したものである。

- 数量：1 体
- 材質：SUS 304
- 寸法：高さ 1,800 mm

外径	958 mm ^φ ,	内径	950 mm ^φ
----	-----------------------	----	---------------------
- 形状：円筒状タンク, 中には燃料要素を収めるための内筒がある。

(3) ヘッドタンク

これは、タンク内の圧を、JRR-3 改造炉炉心と同等な圧を加えるためのものである。

- 数量：1 体
- 材質：SUS 304

- 寸法：高さ 2,800 mm
外 径 318.5 mm^φ， 内 径 312.5 mm^φ
- 形 状：円筒状タンク

(4) 計測部

これは、流速の計測部である。

- 数 量：1 体
- 材 質：SUS 304
- 寸 法：高 さ 302 mm
外 径 136 mm[□]， 内 径 119 mm[□]
窓取付部 75 mm[□]， アクリル製の窓が付く。

計測部には、トラバース装置付3孔アローヘッド型ヨーメーターが付く。

(5) 内 筒

これは、タンク内にある内筒が、他の燃料要素も収められるように、大きめにできているため標準型燃料要素に合せるためのものである。

- 数 量：1 体
- 材 質：アクリル
- 寸 法：長 さ 906.5 mm
外 径 118 mm[□]， 内 径 78 mm[□]

タンク内に SUS 製の内筒があり、そこにこの内筒を挿入し、その中に模擬標準型燃料要素が収まる。

(6) 流量計

これは、テストセクション部を流れる流量を測定するためのものである。

- 数 量：1 台
- 材 質：本体 SCS 14
ブラッフボディ（計測部）SUS 316
- 寸 法：口径 80 mm^φ
- 形 式：歪ゲージ式デルタ型流量計

(7) 循環ポンプ

これは、テストセクション部に、水を循環させるためのものである。

- 数 量：1 台
- 形 式：横型片吸込渦巻形キャンドモーターポンプ
- 容 量：1,500 ℓ/min
- 揚 程：27 m
- モータ：3相，50 Hz，200 V，15 kw，2 極

(8) 流量調節弁

これは、テスト・セクション部を流れる、水の流量を調節するためのものである。

- 数 量：2 台
- 口 径：100 A, 10K

- 材 質：SUS 304
- 形 式：ゲートバルブ

(9) 循環系配管

これは、テストセクション部に水を循環させるための配管である。

- 材 質：SUS 304
- 口 径：100 A, 80 A

2.3 計測項目、計測装置、及び計測位置

本実験における計測項目は、テストセクション部を流れる循環水の流量、テストセクション上部及び下部での圧力、及び模歪標準型燃料要素の燃料板出口における流速である。

(1) 流 量

流量は、水循環系配管のタンク入口近くに取り付けた歪ゲージ式デジタル型流量計にて測定した。流量計の出力はアナログ信号となっており流量指示計においてこれを受信して流量を示す。

(2) 圧 力

圧力は、テストセクション上部と下部のプレナム部において圧力計（測定レンジ 0~2 kg/cm²、-76 cmHg~2 kg/cm²）により測定し、テスト部での流動損失を求めた。圧力測定位置を図 2.3.1 に示す。テストセクション部の全流動損失 ΔP の算出は次式による。

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + (z_1 - z_2) \quad (2.3.1)$$

ここで、

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} + (z_1 - z_2) = \frac{P'_1 - P'_2}{\rho}, \quad v_1 = 0$$

より

$$\Delta P = \frac{P'_1 - P'_2}{\rho} - \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.3.2)$$

ここに、

ΔP ：	全流動損失水頭	[m]
P_1 ：	圧力計 ① 取出位置での圧力	[kg/m ²]
v_1 ：	“ 流速	[m/s]
z_1 ：	“ 位置水頭	[m]
P_2 ：	圧力計 ② 取出位置での圧力	[kg/m ²]
v_2 ：	“ 流速	[m/s]
z_2 ：	“ 位置水頭	[m]
P'_1 ：	圧力計 ① の実測値	[kg/m ²]
P'_2 ：	圧力計 ② の実測値	[kg/m ²]
ρ ：	流体の密度	[kg/m ³]
g ：	重力加速度	[m/s ²]

(3) 流速

流速は、テストセクションの計測部に取り付けたトラバース装置付3孔アローヘッド型ヨーメーターにより測定した。ヨーメーターからの3つの圧力のうち、中央の圧力は差圧変換器の高圧側に、右側と左側の圧力は切換え弁を用いて差圧変換器の低圧側に接続してある。

流速は、中央と左側の差圧、及び中央と右側の差圧から求める。図2.3.2に3孔アローヘッド型ヨーメーターを示す。流速の測定位置は、図2.3.3に示すように模擬標準型燃料要素の燃料板間の各流路（以下、燃料板間の各流路をサブチャンネルと呼ぶ）の出口から、垂直方向に約1mm離れた位置の燃料要素の軸方向に直角な、各サブチャンネル出口断面である。このような測定方法においては、ヨーメーターを各サブチャンネルの出口にできるだけ接近して取り付ける必要がある。その理由は、各サブチャンネルから流出する水の流れが、噴流となって流速分布を変えてしまうばかりでなく、噴流域では流出した水の流れに流出方向の不安定が生じているためサブチャンネル内の流速分布を正確に測定する事が困難になるためである。

このような点から言えば、燃料板間にヨーメーターを挿入する事が望ましいが、本実験で用いた模擬標準型燃料要素の燃料板間隔（以下サブチャンネルギャップと呼ぶ）は僅か2.20mm程度しかないため、ヨーメーターを燃料板間に挿入するとヨーメーターの太さがサブチャンネルの大部分を占めてしまい、そのための影響が大きくなり正しい測定が不可能となるため、以上のような測定位置を採用した。図2.3.4に模擬標準型燃料要素の出口断面での計測位置を示す。各計測点は、それぞれ(i,j)で表わす。

ヨーメーターは、トラバース装置により1/100mmの精度で移動できる。また、図2.3.4のような計測点で測定するため燃料板群の下部に取り付けてあるコム(Comb)を取りはずして測定を行なった。

2.4 実験方法

本実験での実験手順を、(1)実験準備、(2)実験、(3)実験後処理の3段階に分けて以下に示す。なお、記号等は図2.1.1のフローシートに記述してある。

(1) 実験準備

① モックアップ建家2階既設純水配管よりV4、V5バルブを開けヘッドタンクに取付けてある P_5 微差圧計で2,000mmHgになるまで純水を給水する。またV9バルブでタンク内の空気抜きをする。

同様にV13、V14バルブで配管内空気を抜く。

開バルブ：V1、V2、V3、V8

閉バルブ：V6、V7、V10、V11

動バルブ：V4、V5、V9、V12、V13、V14

② ヨーメーターとの差圧変換器間の導圧管内の空気、及び差圧変換器内の空気を抜く。

③ 差圧変換器を校正する。

(2) 実験

① ヘッド・タンクの P_5 微差圧計が2,000mmであることを確認する。

- ② ①, ②の圧力計の指示値を記録する。
- ③ V3バルブ開, V2バルブ閉, V1バルブ1/8開にしてポンプを起動する。V1バルブを徐々に開けて流量を調節し, 目標とする流量に設定する。ただし, 少流量の時は, V1バルブを1/8開にしてV2バルブにて流量の調節を行なう(ここで言う少流量とは, V1バルブ1/8開で流れる流量よりも少ない流量である。)この時③連成計で 0kg/cm^2 以下になるようにする。 0kg/cm^2 以上になると, キャビテーションをおこす。

開バルブ: V3, V8

閉バルブ: V4, V5, V6, V7, V9, V10, V11, V12, V13, V14

動バルブ: V1, V2

- ④ ①, ②の圧力計で, 設定流量に達した後の圧力計の指示値を記録する。
- ⑤ 流量指示計の指示値を記録する。
- ⑥ ヨーメーターをトラバース装置を用いて, 測定しようとする計測点に移動し, 差圧を測定する。差圧変換器によって電圧に変換された差圧は, デジタルボルトメーターで読み取り記録する。差圧の記録は, ヨーメーターを計測点に移動した後, デジタルボルトメーターの指示値が安定するまで待ってから行なう。
- ⑦ ⑥について, 各計測点において測定をくりかえす。
- ⑧ 測定中に時々流量指示計及び①, ②圧力計の指示値を確認する。

(3) 実験後処理

- ① V2バルブを閉じ, V1バルブを1/8開にしてからポンプを停止する。
- ② 計測生データを, 整理に適合した単位に換算する。

2.5 実験パラメータ及びその範囲

実験パラメータは流量である。本実験では, JRR-3改造炉の標準型燃料要素内の定常流速である約 6.2m/s を本実験装置で得るための流量 $1,150\text{ℓ/min}$ (100%)を基準として, $1,170\text{ℓ/min}$ (102%), 950ℓ/min (83%), 380ℓ/min (33%)の4ケースについて流速分布を測定した。

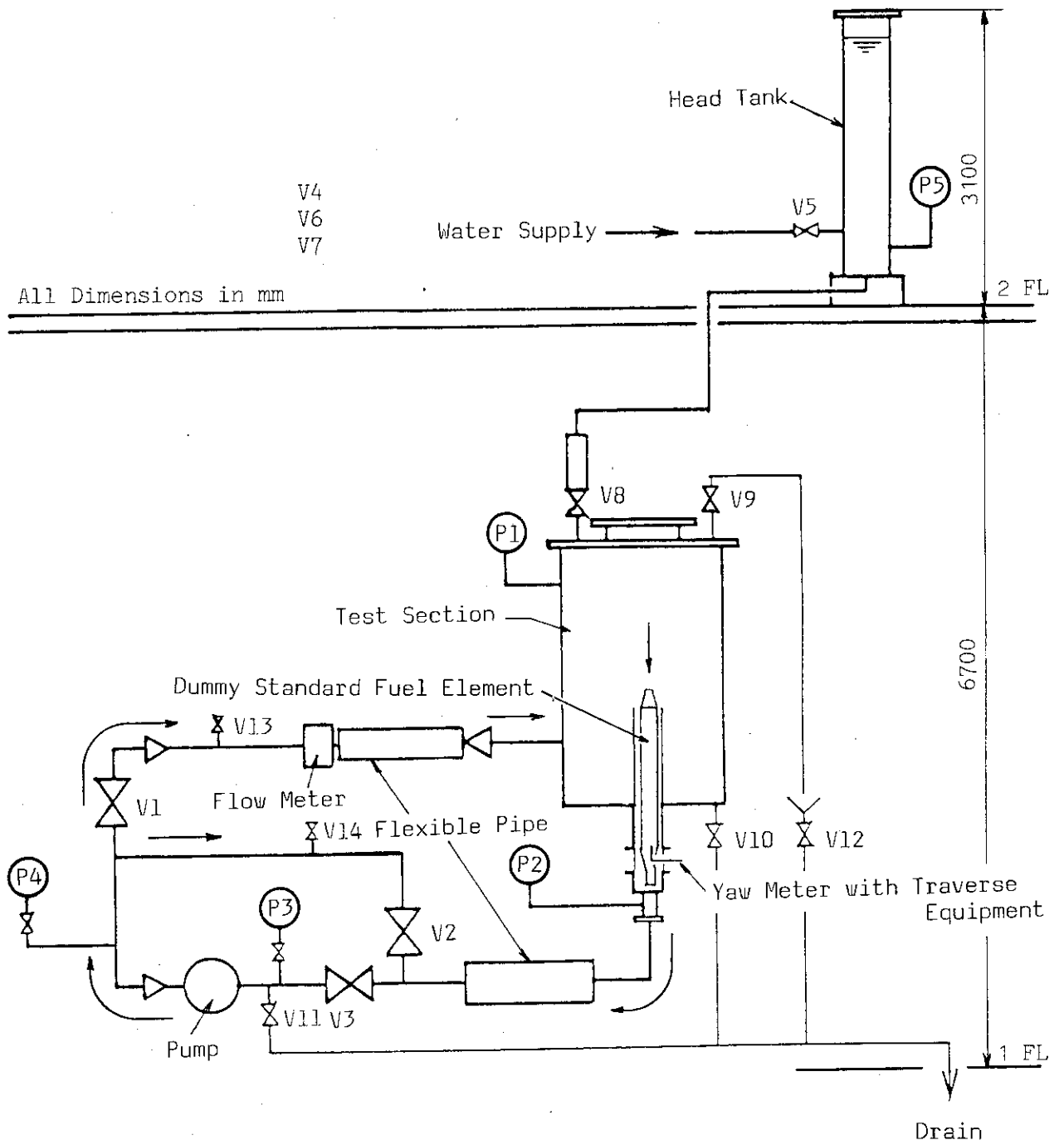


Fig. 2.1.1 Flow Sheet of JRR-3 Simulated Fuel Element Test Loop

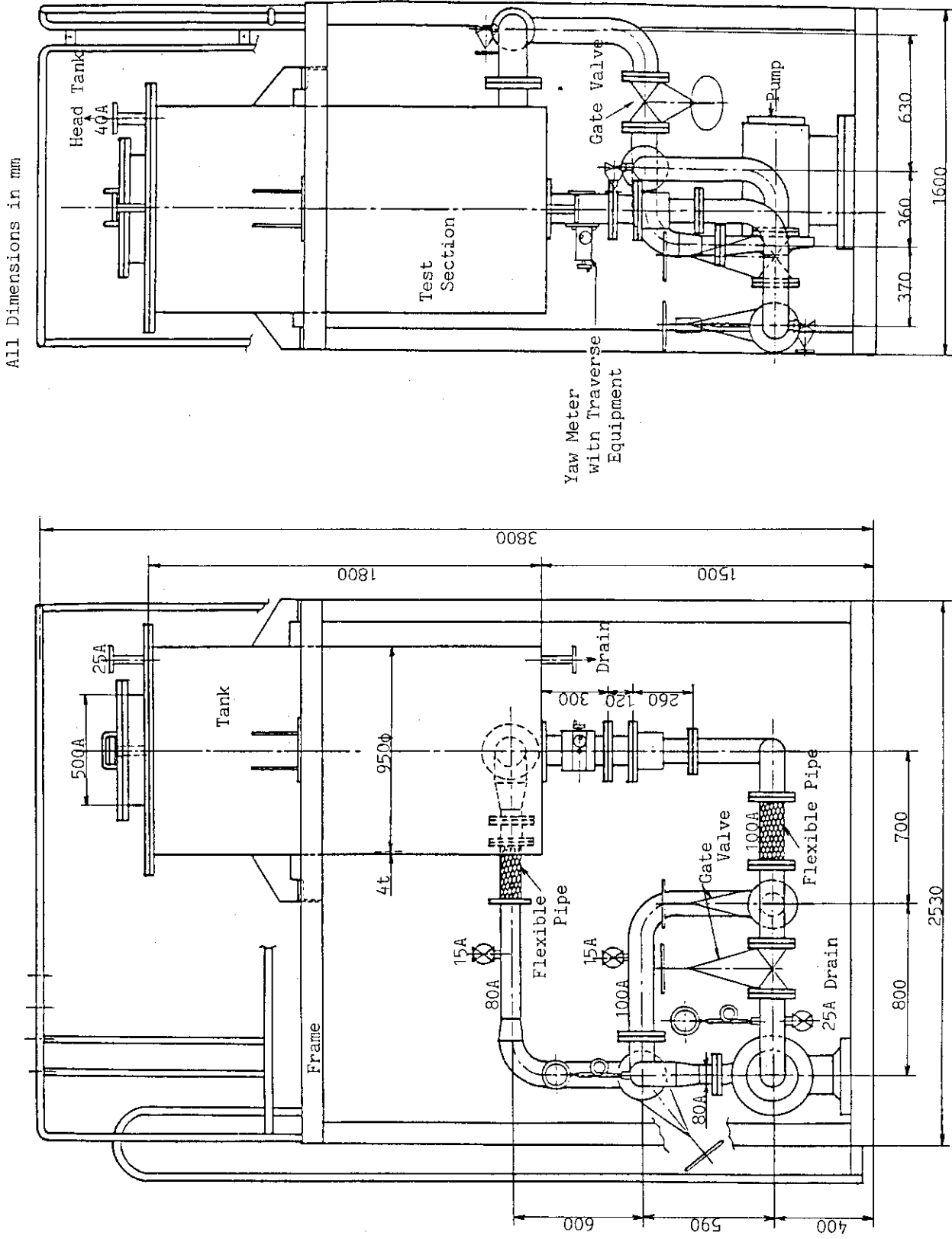
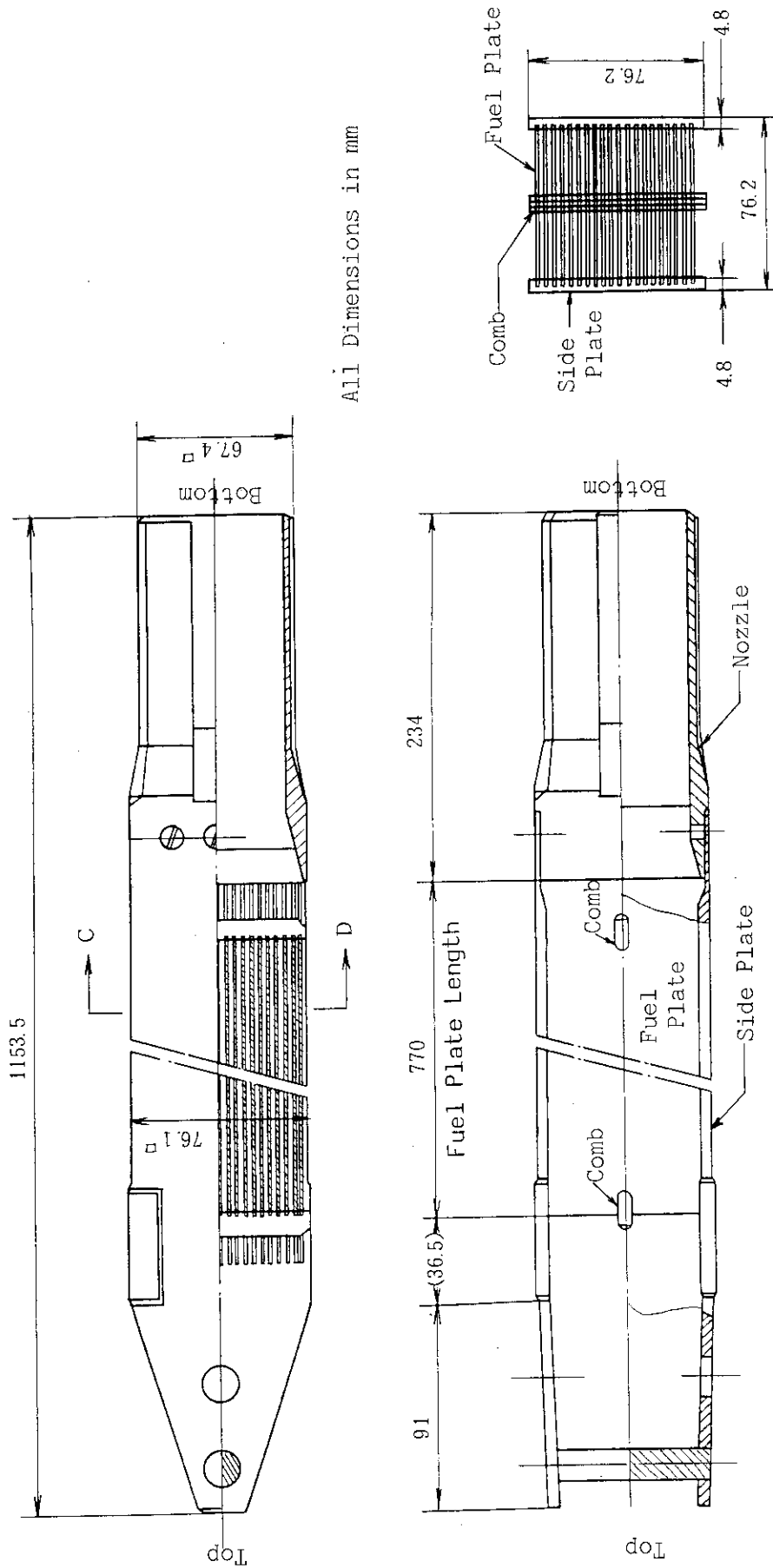


Fig. 2.1.1.2 JRR-3 Hydraulic Test Rig of Simulated Fuel Element



All Dimensions in mm

C-D, Cross Section of Fuel Element

Fig. 2.1.1.3 Simulated JRR-3 Standard Fuel Element

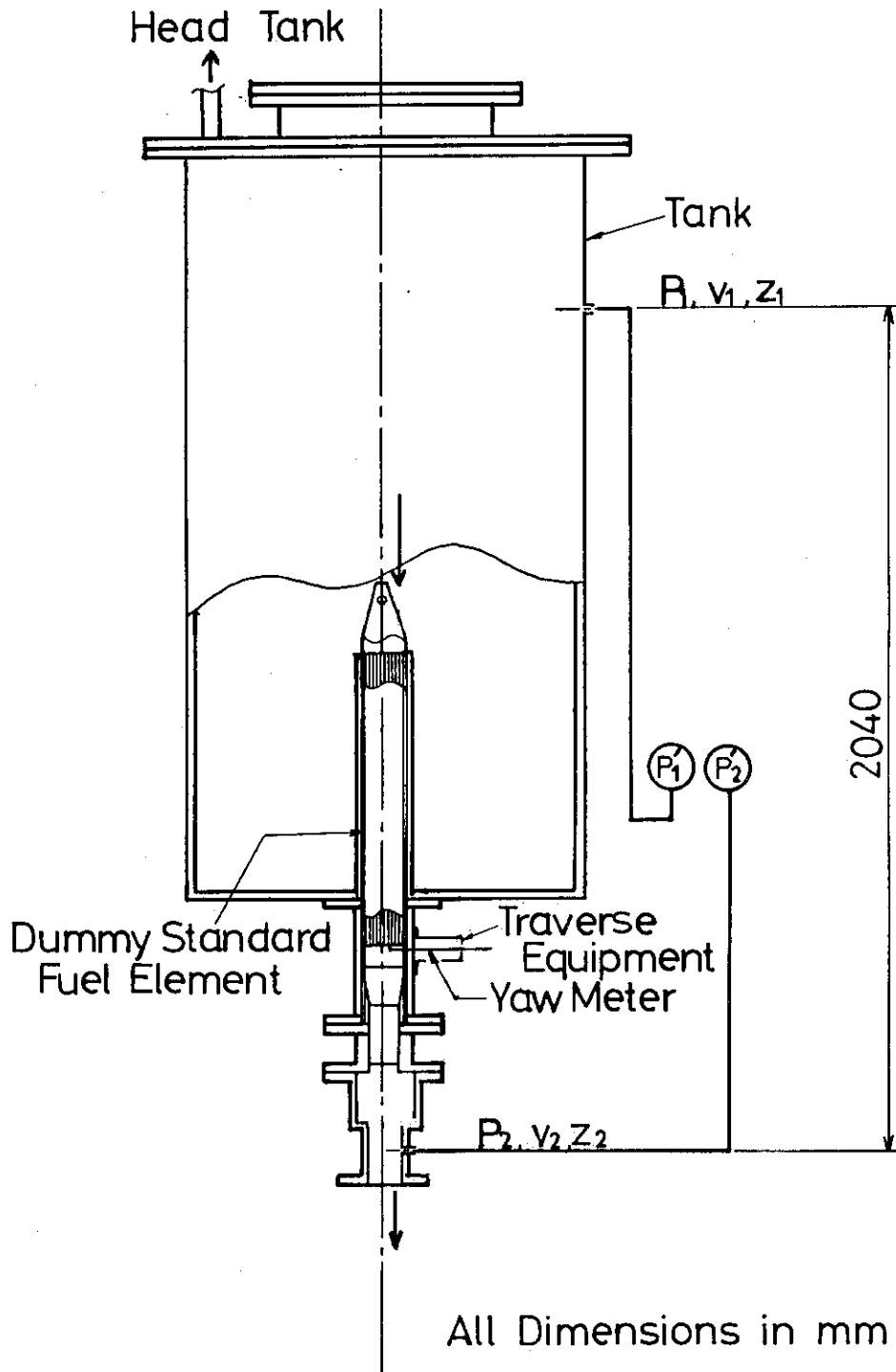


Fig. 2.3.1 Location of Pressure Gauge and Test Section

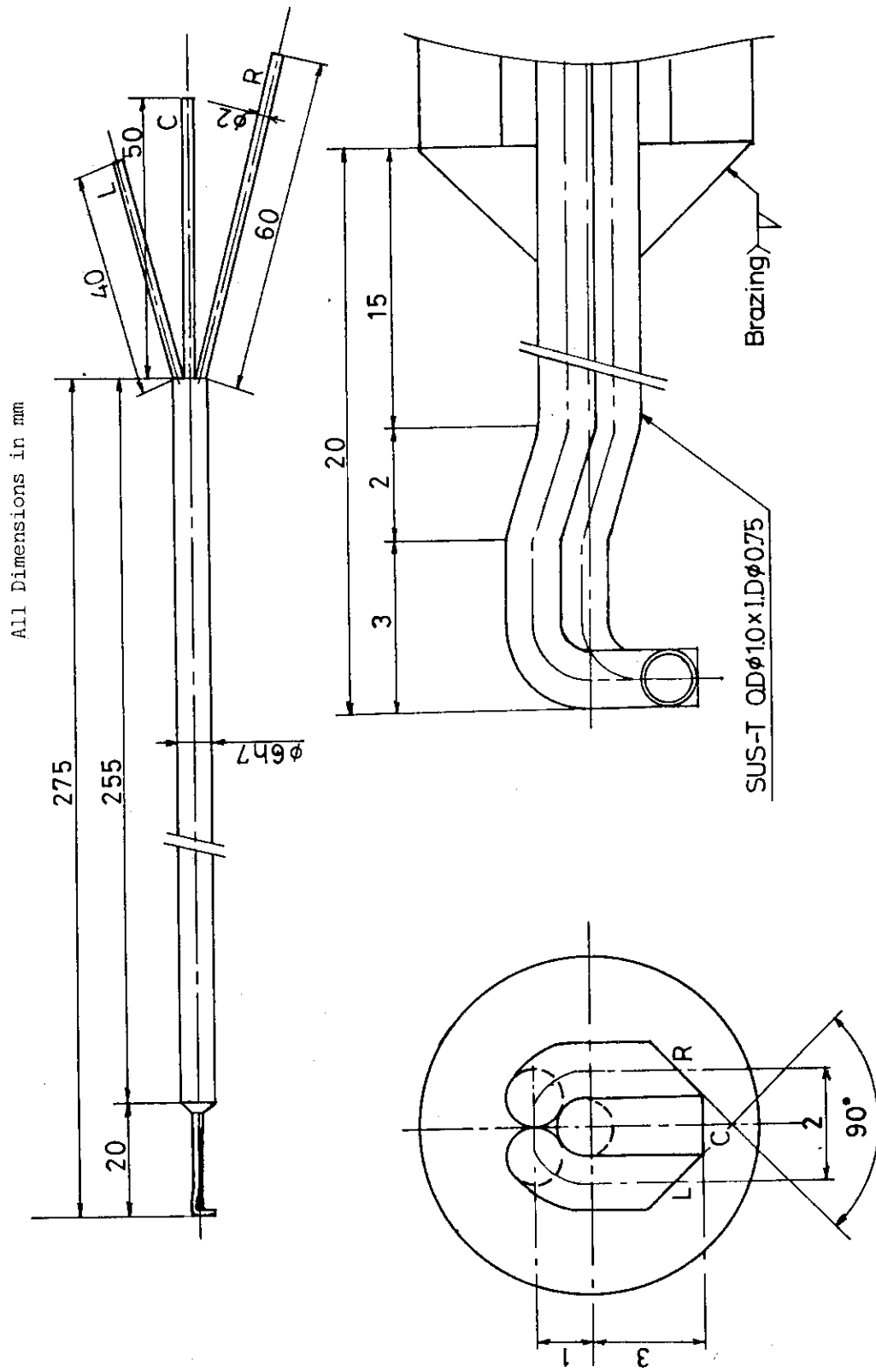


Fig. 2.3.2 Arrow Head Type Three Holes Yaw Meter

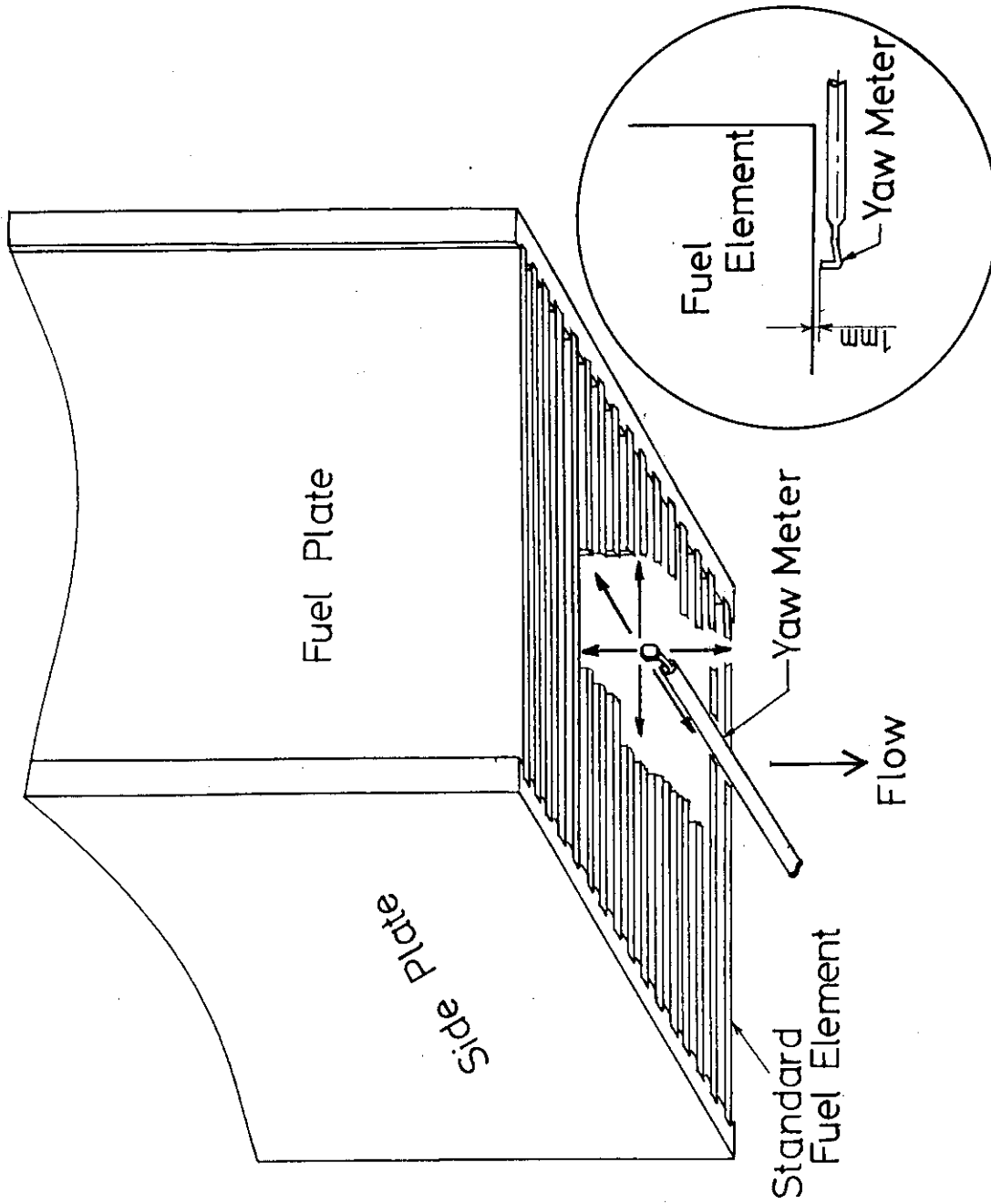


Fig. 2.3.3 Location of Yaw Meter

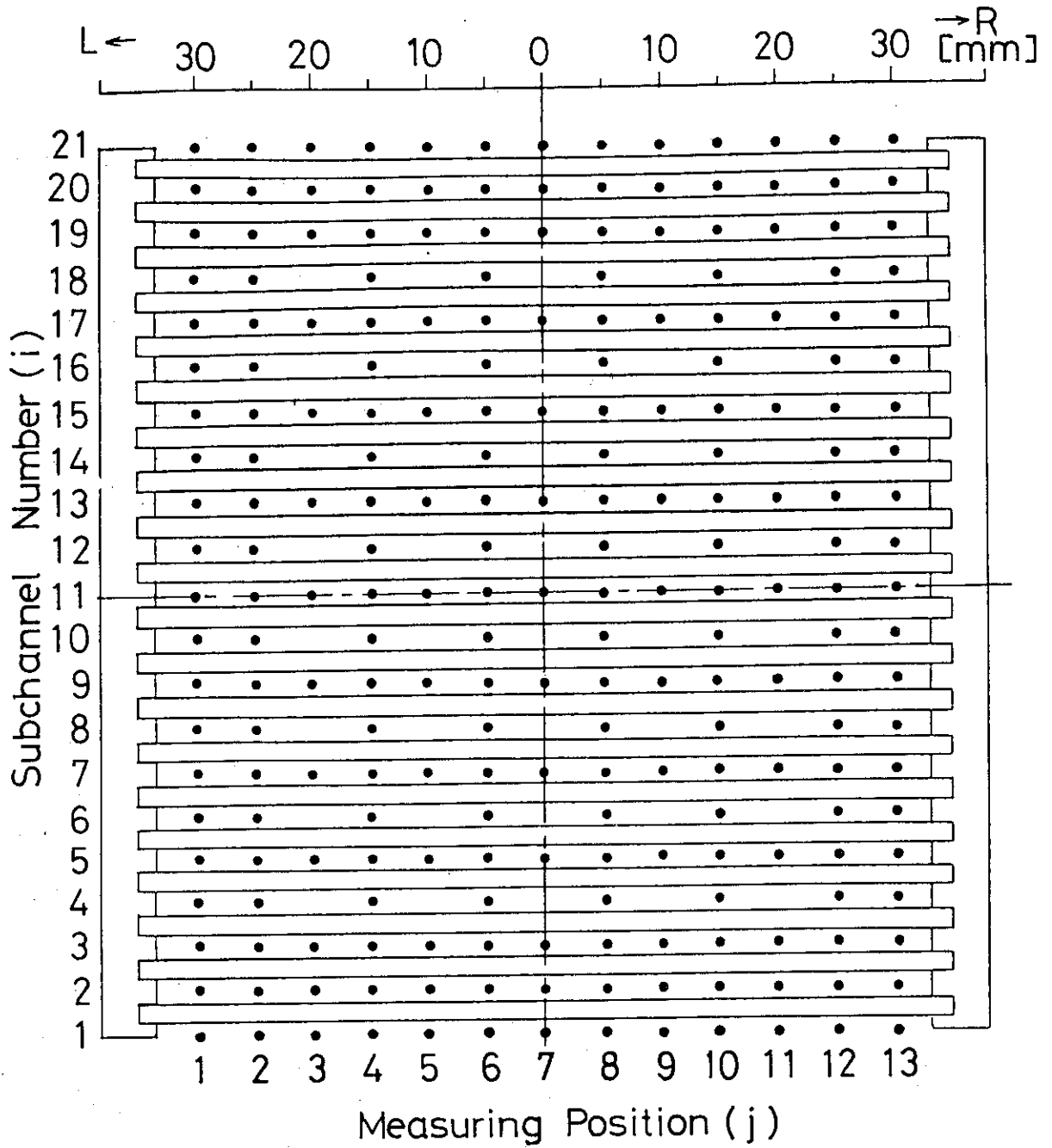


Fig. 2.3.4 Measuring Points of Fuel Element in Fuel Plates Exit

3. 流速の算出方法及び流速に関する予備的検討

3.1 ヨーメーターによる差圧から流速への変換方法

ヨーメーターの3つの圧力孔を、次の通り定義する。ヨーメーター（図2.3.2参照）を正面より見て、右孔をR、そこでの圧力を P_R 、中心孔をC、そこでの圧力を P_C 、及び左孔をL、そこでの圧力を P_L とする。実験に際しては、これらの値を、 P_C-P_R 、 P_C-P_L の差圧として測定した。差圧は、差圧変換器に入力し、その値は電圧として出力される。差圧変換器は0～3,300 mmAqまで測定可能であり、それを1～5 Vの電圧としてリニアに出力する。電圧は、デジタルボルトメーターにより読みとる。電圧を差圧に変換するのは、次式による。

$$\left. \begin{aligned} P_C - P_R &= 825 \cdot (V - 1) \\ P_C - P_L &= 825 \cdot (V - 1) \end{aligned} \right\} \quad (3.1.1)$$

ここに、 $P_C - P_R$ ： P_C と P_R の差圧 [mmAq]

$P_C - P_L$ ： P_C と P_L の差圧 [mmAq]

V : 電圧 [V]

測定した差圧により流速を求めるには、予め一定流速の動圧を測定に使用する3孔式アローヘッド型ヨーメーターで測定し、ヨーメーターの角度による圧力補正係数及び流速補正係数を求めておく。角度によるヨーメーターの圧力補正係数及び流速補正係数は、ヨーメーターを一定角度にふり、ヨーメーターの各々の孔の圧力を測定し較正済 JIS ピート管により測定した基準動圧と比較することによって求められる。

補正係数は、次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} D_R &= \frac{P_C - P_R}{\rho v^2 / 2g} \\ D_L &= \frac{P_C - P_L}{\rho v^2 / 2g} \end{aligned} \right\} \quad (3.1.2)$$

ここに、 $\rho v^2 / 2g$ ：基準動圧 [kg/m²]

ρ : 流体密度 [kg/m³]

v : 基準流速 [m/s]

g : 重力加速度 [m/s²]

とおくと、測定圧力に対して圧力補正係数は、次のようになる。

$$C_\alpha = \frac{D_R - D_L}{D_R + D_L} \quad (3.1.3)$$

ここに、 C_α ：圧力補正係数 [-]

また、流速補正係数は次のようになる。

$$C_{\alpha v} = \frac{1}{D_R + D_L} \quad (3.1.4)$$

ここに、 C_{av} : 流速補正係数

図 3.1.1 に基準動圧を測定することにより得られた C_α 、 C_{av} を示す。(較正線図)
測定に際しては、次の値が必要となる。

$$\frac{(P_c - P_R) - (P_c - P_L)}{(P_c - P_R) + (P_c - P_L)} = C_\alpha \quad (3.1.5)$$

これらの求めた値を用い、図 3.1.1 の較正線図より流速を求める。流速を求めるには、較正線図の流向補正係数グラフ C_α 上に、測定により求めた C_α をのせ、グラフの横軸から流向 α を求める。次に流向 α から縦軸と平行な線と流速補正係数グラフ C_{av} との交点より流速補正係数 C_{av} を求め、以下の式を用い流速を求める。

$$\begin{aligned} \rho v^2 / 2g &= C_{av} \cdot \{(P_c - P_R) + (P_c - P_L)\} \\ v &= \sqrt{\frac{2g \cdot (\rho v^2 / 2g)}{\rho}} \\ &= \sqrt{\frac{2g \cdot C_{av} \cdot \{(P_c - P_R) + (P_c - P_L)\}}{\rho}} \end{aligned} \quad (3.1.6)$$

ここに、 v : 流速 [m/s]

本実験における各測定点 (i, j) (図 2.3.4 参照) は、サブチャンネルのギャップ方向の中央であることから、そこでの流速はギャップ方向での最大流速となる。これは、予備実験で確認済である。そこで、次に述べる方法により各測定点、各サブチャンネル、及び全体の平均流速を求めた。

3.2 流速の算出方法

図 2.3.4 に示した各測定点 (i, j) での流速は、前述のように各測定点を含むギャップ方向での最大流速であり、これを v_{ijmax} で表わす。本実験では、各測定点 (i, j) を含むギャップ方向での平均流速を図 3.2.1 に示すように v_{ij} で表わし、 v_{ij} を各測定点の流速とした。 v_{ij} は、 v_{ijmax} に係数 C_{ij} をかけることにより求める。係数 C_{ij} は、図 3.2.1 の左下の拡大図に示したように各サブチャンネルのギャップ方向の k 点における流速 v_{ijk} を各流量ごとに測定し、それぞれギャップ方向に積分し、それをギャップ (流路幅) で割ることにより平均流速 \bar{v}_{ijk} を求め、 \bar{v}_{ijk} と v_{ijkmax} から $C_{ij} = \bar{v}_{ijk} / v_{ijkmax}$ として求められる。ただし、今回の測定においては、各サブチャンネルのギャップ方向の速度分布は、1 サブチャンネルに着目した場合、予備実験によりどの位置でもほとんど相似であることが確かめられたため、 $j=8$ (サブチャンネルの燃料板に平行方向での中央) でのみ測定した。よって $C_i = C_{ij}$ とおき、サブチャンネル番号 i においては C_i を用いる。ギャップ方向の流速分布の測定結果を図 3.2.3 (a)~(f) に示す。また、表 3.2.1 には、図 3.2.3 (a)~(f) に示した流速分布から求めた各流量での係数 C_i を示す。ただし、1,150 ℓ / min の C_i は、1,170 ℓ / min の値を用いる。これは、予備実験においてギャップ方向の流速分布を測定した結果、ほとんど同一な流速分布を示したためである。以上から i 番目のサブチャンネルの j 番目の平均流速 v_{ij} の算出は次式による。

$$v_{ij} = C_i \times v_{ijmax} \quad (i = 1 \sim 21, j = 1 \sim 13) \quad (3.2.1)$$

ここに、 v_{ij} : 測定点での平均流速 [m/s]

C_i : 係数

v_{ijmax} : 測定点での流速 (測定値) [m/s]

ただし、図 2.3.4 の測定点マップからわかるように、流路番号 (サブチャンネル番号) $i=4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18$ において、 $j=3, 5, 7, 9, 11$ での流速の測定は行なわなかった。

次に、各サブチャンネルでの平均流速を v_i は図 3.2.1 に示すように各サブチャンネルの断面積を、測定点 (i, j) に対応するように分割し A_{ij} で表わすことにより、次式で表わすことができる。

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^{13} A_{ij} \cdot v_{ij}}{\sum_{j=1}^{13} A_{ij}} \quad (3.2.2)$$

ここに、 v_i : サブチャンネル i の平均流速 [m/s]

v_{ij} : 測定点での平均流速 [m/s]

A_{ij} : 測定点を含む断面積 [m²]

ただし、 $i=4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18$ の各サブチャンネルでは、前述のように $j=3, 5, 7, 9, 11$ で流速を測定していないため、上式において $\sum_{j=1}^{13} A_{ij} \cdot v_{ij}$ の部分が次式のようになる。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{13} A_{ij} \cdot v_{ij} &\Rightarrow A_{i1} \cdot v_{i1} + (A_{i2} + \frac{A_{i3}}{2}) \cdot v_{i2} + (\frac{A_{i3}}{2} + A_{i4} + \frac{A_{i5}}{2}) \cdot v_{i4} \\ &+ (\frac{A_{i5}}{2} + A_{i6} + \frac{A_{i7}}{2}) \cdot v_{i6} + (\frac{A_{i7}}{2} + A_{i8} + \frac{A_{i9}}{2}) \cdot v_{i8} \\ &+ (\frac{A_{i9}}{2} + A_{i10} + \frac{A_{i11}}{2}) \cdot v_{i10} + (\frac{A_{i11}}{2} + A_{i12}) \cdot v_{i12} + A_{i13} \cdot v_{i13} \end{aligned}$$

ここで、 $A_{i2} = A_{i3} = \dots = A_{i12}$ より

$$\begin{aligned} &= A_{i1} \cdot v_{i1} + \frac{3}{2} A_{i2} \cdot v_{i2} + 2A_{i4} \cdot v_{i4} + 2A_{i6} \cdot v_{i6} \\ &+ 2A_{i8} \cdot v_{i8} + 2A_{i10} \cdot v_{i10} + \frac{3}{2} A_{i12} \cdot v_{i12} + A_{i13} \cdot v_{i13} \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

以上から、模擬標準型燃料要素内の平均流速を V とおくと、 V は全流量を全サブチャンネルの断面積で割ることにより求められる。流量計による流量を Q [m³/s] とすると、次式で表わせる。

$$V = \frac{Q}{\sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{13} A_{ij}} \quad (3.2.4)$$

ここに、 Q : 流量 [m³/s]

$\sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{13} A_{ij}$: 全サブチャンネルの流路断面積 [m²]

また、流速分布により求めた全流量を Q' [m³/s] とすると、 V は次式で表わせる。

$$V = \frac{Q'}{\sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{13} A_{ij}} \approx \frac{\sum_{i=1}^{21} v_i}{21} \quad (3.2.5)$$

ここに、 $Q' = \sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{13} A_{ij} \cdot v_{ij}$ [m³/s]

v_i : 各サブチャンネルの平均流速 [m/s]

上記の二式を検討した結果、標準型燃料要素内の平均流速 V の算出には、流量 Q' を用いる式を使う。次節にその検討結果を示す。

3.3 流量計による流量と流速分布から求めた流量の関係

図 3.3.1 に、流量計による流量 Q に対する流速分布から求めた流量 Q' を示す。流速分布から求めた流量 Q' の算出方法は 3.2 で述べたとおりである。

図 3.3.1 を見ると、流量計による流量 Q と流速分布から求めた流量 Q' は、流量計による流量の精度が流量計・流量指示計の精度及び読み取りの誤差を考慮すると $\pm 2.6\%$ 以内であるので、よく一致していると言える。このことから、模擬標準燃料要素内の平均流速 V を算出する場合に、これらふたつの流量 Q 及び Q' のどちらを用いても問題がないと言える。そこで、本実験では、各サブチャンネルの流速分布をもとに、そのサブチャンネルでの流量を算出し、そこでの平均流速を求めるという手法を用いているため、燃料要素内の全流量も、各サブチャンネルの流量の和である流量 Q' を用いることにする。

3.4 テストセクション部流動損失評価

標準型燃料要素において、そのサブチャンネルのギャップが基準値からずれた際に、そこでの流速がどの程度変化するかを調べるために、本節では模擬標準型燃料要素を含むテストセクション部分での流動損失評価を行ない、実験値と比較検討した。

流動損失評価に際し、図 3.4.1 に示した流路形状に対し流路形状の特徴を考慮して流路を分割し、図に示したように番号を付した。

流路形状の特徴を、

- i) 流路面積一定の流路部 (直流路部)
- ii) 流路の拡大部
- iii) 流路の縮少部

に大別して、流路を分割する。

分割した領域に対し、次の流動損失係数 K_i ($i=1, 2, 3, \dots$) を定義する。

$$\Delta P_i = K_i \frac{v_i^2}{2g} \quad (\text{水頭 m}) \quad (3.4.1)$$

ここに、 i : 領域番号

ΔP_i : 流動損失水頭 [m]

v_i : 領域 i における流速 [m/s]

g : 重力加速度 [m/s²]

である。

流速 v_i は、流路面積が一定である場合は領域 i における流速であり、流路の拡大・縮少部ではその前後の流速の大なる流速をとる。流動損失係数 K_i は、直流路部では次式により求める。

$$K_i = \lambda_i \frac{l_i}{De_i} \quad (3.4.2)$$

ここに、 λ_i : 表面摩擦損失係数

l_i : 流路長 [m]

De_i : 等価水力直径 [m]

である。表面摩擦損失係数 λ については、炉心流動実験の燃料板表面摩擦損失係数測定⁽³⁾により、Colebrook の式で $\epsilon/d = 0.0004$ とした時の値を用いるのが適当であることが確かめられているので、これを用いることにする。

Colebrook の式、

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/d}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (3.4.3)$$

ここに、 λ : 表面摩擦損失係数

ϵ/d : 管壁の粗度 ($\epsilon/d = 0.0004$ を用いる)

Re : レイノルズ数

ここで、レイノルズ数算出に当っては、20℃での動粘性係数を用いる。また、流動損失は領域4の燃料板間の平均流速 $V = 6.37, 6.25, 5.16, 2.06$ m/s の4ケースについて求め、各領域での流速は、領域4での流速を基準にした値を用いる。

計算結果のうち、各領域での流速 v_i と流動損失係数 K_i を表3.4.1に示す。

次に前述の4ケースについて、表3.4.1に示した各領域の流速 v_i と流動損失係数 K_i を用いてテストセクション部の流動損失を求める。

CASE 1 : $V = 6.37$ m/s の場合

$$\begin{aligned} \Delta P = & \left\{ (0.56 + 0.00904) \times \left(\frac{3.76}{6.37} \right)^2 + (0.50 + 4.537 + 0.17) \right. \\ & + 0.00545 \times \left(\frac{3.76}{6.37} \right)^2 + (0.0773 + 0.70) \times \left(\frac{5.96}{6.37} \right)^2 + 0.0130 \times \left(\frac{0.98}{6.37} \right)^2 \\ & \left. + (0.26 + 0.00997) \times \left(\frac{2.12}{6.37} \right)^2 \right\} \times \frac{6.37^2}{2 \times 9.8} \\ = & 12.67 \text{ m 水頭} \end{aligned}$$

CASE 2 : $V = 6.25$ m/s の場合

$$\begin{aligned} \Delta P = & \left\{ (0.56 + 0.00904) \times \left(\frac{3.69}{6.25} \right)^2 + (0.5 + 4.555 + 0.17) \right. \\ & + 0.00545 \times \left(\frac{3.69}{6.25} \right)^2 + (0.0778 + 0.70) \times \left(\frac{5.85}{6.25} \right)^2 + 0.0130 \times \left(\frac{0.96}{6.25} \right)^2 \\ & \left. + (0.26 + 0.0100) \times \left(\frac{2.08}{6.25} \right)^2 \right\} \times \frac{6.25^2}{2 \times 9.8} \\ = & 12.23 \text{ m 水頭} \end{aligned}$$

CASE 3 : $V = 5.16$ m/s の場合

$$\Delta P = \left\{ (0.56 + 0.00919) \times \left(\frac{3.04}{5.16} \right)^2 + (0.5 + 4.736 + 0.17) \right.$$

$$\begin{aligned}
& + 0.00554 \times \left(\frac{3.04}{5.16}\right)^2 + (0.0788 + 0.70) \times \left(\frac{4.83}{5.16}\right)^2 + 0.0133 \times \left(\frac{0.79}{5.16}\right)^2 \\
& + (0.26 + 0.0102) \times \left(\frac{1.72}{5.16}\right)^2 \Big\} \times \frac{5.16^2}{2 \times 9.8} \\
& = 8.58 \text{ m 水頭}
\end{aligned}$$

CASE 4: V=2.06 m/s の場合

$$\begin{aligned}
\Delta P & = \left\{ (0.56 + 0.0103) \times \left(\frac{1.21}{2.06}\right)^2 + (0.5 + 5.874 + 0.17) \right. \\
& + 0.00622 \times \left(\frac{1.21}{2.06}\right)^2 + (0.0871 + 0.70) \times \left(\frac{1.93}{2.06}\right)^2 + 0.0153 \times \left(\frac{0.32}{2.06}\right)^2 \\
& \left. + (0.26 + 0.0115) \times \left(\frac{0.69}{2.06}\right)^2 \right\} \times \frac{2.06^2}{2 \times 9.8} \\
& = 1.62 \text{ m 水頭}
\end{aligned}$$

以上4ケースの流速での計算結果及び実測値を図3.4.2に示す。

図3.4.2からわかるように実測値と計算値はよい一致を示している。これは、計算において流路を直流路部、縮少部、拡大部に分けて考えた時の流動損失係数の選定方法が適切であったことを示している。また、流速に対する流動損失は、図に示すように流速が増すに従って2次関数的に増加する。

3.5 模擬標準型燃料要素のサブチャンネルギャップが基準値からずれた際の流速の評価

本節では、測定に用いた模擬標準型燃料要素のサブチャンネルギャップを測定し、先に求めた圧力損失をもとに、各ギャップでの流速を求めサブチャンネルギャップが基準値からずれた場合の流速を評価した。

3.5.1 サブチャンネルギャップの実測値

実験に用いた模擬標準燃料要素のサブチャンネルギャップの測定値を表3.5.1に示す。

ギャップの測定にはすきまゲージを用い、各サブチャンネルを中央及び左右の3カ所において長手方向に測定しその平均値とした。なお、サブチャンネル1及び21は最外側燃料板とテスト部のアクリル製内筒の壁面とのギャップであり、模擬標準型燃料要素をテスト部から取り出した状態では測定不可能なため測定していない。本実験ではJRR-3改造炉用標準型燃料要素のサブチャンネルギャップの寸法及び公差が 2.28 ± 0.2 mmであることを考慮して、模擬標準型燃料要素の寸法及び公差は 2.20 ± 0.2 mmとした。そのためサブチャンネル番号2及び19は公差外である。

3.5.2 サブチャンネルギャップが基準値からずれた際の流速の評価

本実験で用いた模擬標準型燃料要素のサブチャンネルギャップの基準値（設計値）は2.20 mmである。本節では、実際のギャップがその値からずれた場合のサブチャンネルの流速を、燃料板入口における各サブチャンネルの圧力はすべて等しいということ、同様に燃料板出口における各

サブチャンネルの圧力はすべて等しいということから以下に示す考え方により求めた。

まず、サブチャンネルギャップ 2.20 mm, 流速 $V=6.37, 6.25, 5.16, 2.06$ m/s の4ケースについてサブチャンネルでの圧力損失を求める。次に、サブチャンネルギャップが基準値と異なるサブチャンネルにおいても、前述の理由により圧力損失は同じであるということから、サブチャンネルギャップ 0.50 ~ 3.30 mm, レイノルズ数 $Re \geq 2,300$ の範囲で流速を求めた。ここで述べたサブチャンネルギャップが基準値からずれた際の流速とは、同一標準型燃料要素内のサブチャンネルにおいて、ギャップが基準値であるものと基準値からずれているものを比較したもので、ギャップの基準値が異なる標準型燃料要素と比較するものではない。

サブチャンネルでの流動損失係数 K についての定義は 3.4 と同様であり、サブチャンネルギャップが基準値の流動損失 ΔP_{sub} を求める際の K の値には 3.4 の結果を用いる。 ΔP_{sub} は、次式により求める。

$$\Delta P_{sub} = (K_3 + K_4 + K_5) \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3.5.1)$$

ここに、 ΔP_{sub} : サブチャンネルギャップが基準値である時の流動損失水頭 [m]

K_3 : 縮小部の流動損失係数

K_4 : サブチャンネルでの流動損失係数

K_5 : 拡大部の流動損失係数

V : サブチャンネルでの流速 [m/s]

g : 重力加速度 [m/s²]

サブチャンネルギャップが基準値と異なる場合の流速の算出方法を以下に示す。

- i) 流速を求めようとするギャップでのサブチャンネルの等価水力直径 De を求める。
- ii) サブチャンネルの表面摩擦損失係数 λ を適当な値に仮定する。
- iii) 仮定した λ により、サブチャンネルでの流動損失係数 K_4 を求める。
- iv) サブチャンネルギャップ基準値での流動損失 ΔP_{sub} より、流速 V' を求める。 V' を求める式を以下に示す。

$$\Delta P = (K_3 + K'_4 + K_5) \cdot \frac{V'^2}{2g}, \quad \Delta P = \Delta P_{sub} \text{ より,}$$

$$V' = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta P_{sub}}{K_3 + K'_4 + K_5}} \quad (3.5.2)$$

ここに、 ΔP : サブチャンネルギャップが基準値と異なる場合の流動損失水頭 [m]

K'_4 : サブチャンネルギャップが基準値と異なる場合のサブチャンネルでの流動損失係数

V' : サブチャンネルギャップが基準値と異なる場合の流速 [m/s]

- v) V' よりレイノルズ数 Re を算出し、このレイノルズ数を用い Colebrook の式 ($\epsilon/d=0.0004$ を用いる) により λ を求め ii) で仮定した λ と比較し、その差の絶対値が 0.0001 以下であれば、その時の流速 V' を求めるべき流速とし、それ以外の場合は、Colebrook の式により求めた λ を用い iii) に戻って計算を繰り返す。(レイノルズ数算出の際には 20 °C での動粘性係数を用

いる。)

結果を図 3.5.1 に示す。同一標準型燃料要素内でサブチャンネルのギャップが基準値からずれた際のサブチャンネル内の流速は、この図に示すような傾向になると考えられる。また、この図からわかるように、計算結果から本実験で用いた模擬標準型燃料要素のサブチャンネルギャップの公差の下限値で、総平均流速に対するサブチャンネル内の流速の比は約 0.948 となる。

以上から、本実験で用いた模擬標準型燃料要素について流路断面積誤差因子 F_{CA} の計算値を求めてみる。流路断面積誤差因子 F_{CA} は、次式で表わせる。

$$F_{CA} = \frac{1}{W_{\min}/W} = \left(\frac{V}{V_{\min}} \right) \cdot \left(\frac{A}{A_{\min}} \right) \quad (3.5.3)$$

ここに、 V : サブチャンネルギャップが基準値であるサブチャンネルでの流速
(平均流速)

A : サブチャンネルギャップが基準値でのサブチャンネルの流路断面積

V_{\min} : サブチャンネルギャップが公差の下限値であるサブチャンネルでの流速

A_{\min} : サブチャンネルギャップが公差の下限でのサブチャンネルの流路断面積

式 (3.5.3) を用い計算結果から流路断面積誤差因子は

$$F_{CA} = \left(\frac{1}{0.948} \right) \cdot \left(\frac{2.20}{2.00} \right) = 1.16$$

となる。

同様な考え方から、JRR-3 改造炉用標準型燃料要素 (寸法及び公差 2.28 ± 0.2 mm) では、流路断面積誤差因子 $F_{CA} = 1.17^{(2)}$ となる。

Table 3.2.1 C_i of Each Flow Rate in Subchannel

Subchannel Number	Flow Rate (Velocity)		
	1170 (6.37 m/s)	950 (5.16 m/s)	380 (2.06 m/s)
1	0.937	0.928	0.910
2	0.852	0.907	0.918
3	0.915	0.880	0.933
4	0.879	0.897	0.903
5	0.891	0.898	0.928
6	0.893	0.904	0.928
7	0.889	0.880	0.916
8	0.864	0.877	0.916
9	0.921	0.923	0.906
10	0.887	0.867	0.906
11	0.860	0.885	0.916
12	0.860	0.878	0.926
13	0.855	0.883	0.922
14	0.939	0.937	0.919
15	0.922	0.888	0.901
16	0.930	0.923	0.907
17	0.910	0.886	0.935
18	0.885	0.878	0.928
19	0.925	0.900	0.906
20	0.930	0.927	0.921
21	0.935	0.934	0.927

Table 3.4.1 Loss Coefficient and Velocity at Each Section

Section Number	Average Velocity (at Section 4)				
	6.37 m/s	6.25 m/s	5.16 m/s	2.06 m/s	
1	K ₁	0.56	0.56	0.56	0.56
	V ₁	3.76 m/s	3.69 m/s	3.04 m/s	1.21 m/s
2	K ₂	9.04x10 ⁻³	9.04x10 ⁻³	9.19x10 ⁻³	0.0103
	V ₂	3.76 m/s	3.69 m/s	3.04 m/s	1.21 m/s
3	K ₃	0.50	0.50	0.50	0.50
	V ₃	6.37 m/s	6.25 m/s	5.16 m/s	2.06 m/s
4	K ₄	4.537	4.555	4.736	5.874
	V ₄	6.37 m/s	6.25 m/s	5.16 m/s	2.06 m/s
5	K ₅	0.17	0.17	0.17	0.17
	V ₅	6.37 m/s	6.25 m/s	5.16 m/s	2.06 m/s
6	K ₆	5.45x10 ⁻³	5.45x10 ⁻³	5.54x10 ⁻³	6.22x10 ⁻³
	V ₆	3.76 m/s	3.69 m/s	3.04 m/s	1.21 m/s
7,8	K _{7,8}	0.0773	0.0778	0.0788	0.0871
	V _{7,8}	5.96 m/s	5.85 m/s	4.83 m/s	1.93 m/s
9	K ₉	0.70	0.70	0.70	0.70
	V ₉	5.96 m/s	5.85 m/s	4.83 m/s	1.93 m/s
10	K ₁₀	0.0130	0.0130	0.0133	0.0153
	V ₁₀	0.98 m/s	0.96 m/s	0.79 m/s	0.32 m/s
11	K ₁₁	0.26	0.26	0.26	0.26
	V ₁₁	2.12 m/s	2.08 m/s	1.72 m/s	0.69 m/s
12	K ₁₂	9.97x10 ⁻³	0.0100	0.0102	0.0115
	V ₁₂	2.12 m/s	2.08 m/s	1.72 m/s	0.69 m/s

Table 3.5.1 Measured Subchannel Gap of Simulated Standard Fuel Element

Subchannel Number	Gap (mm)	Subchannel Number	Gap (mm)
1	----	12	2.15
2	1.65*	13	2.20
3	2.15	14	2.25
4	2.08	15	2.00
5	2.10	16	2.10
6	2.37	17	2.08
7	2.18	18	2.00
8	2.10	19	1.90*
9	2.20	20	2.10
10	2.10	21	----
11	2.20		

* Out of Tolerance

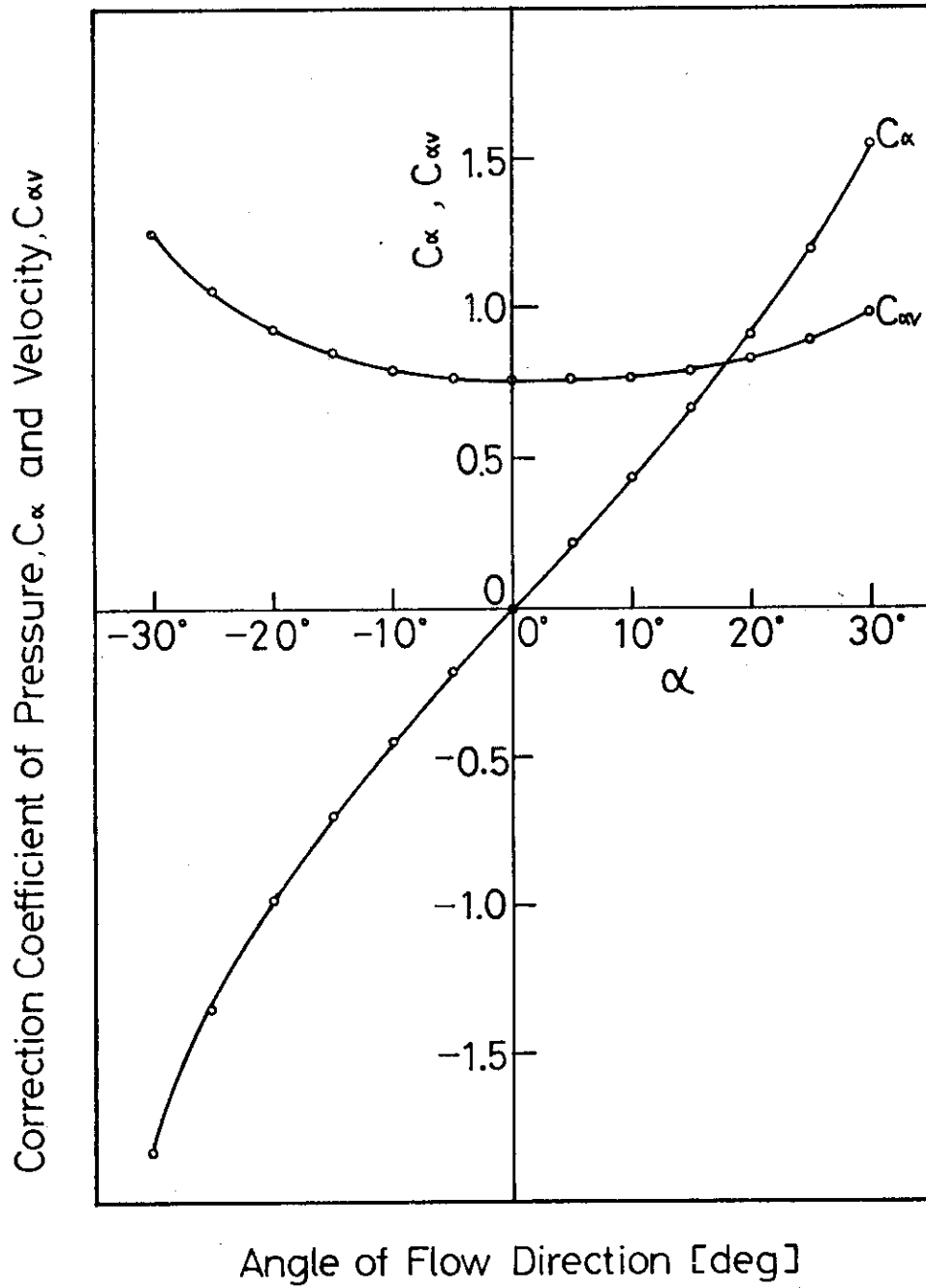
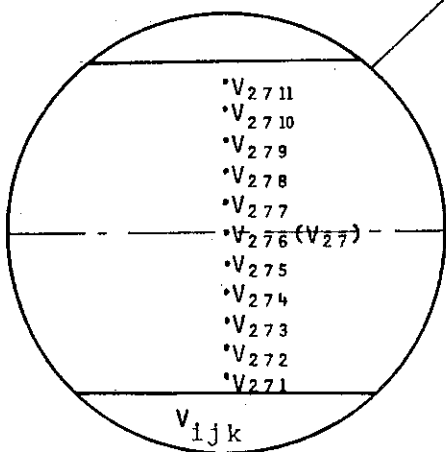
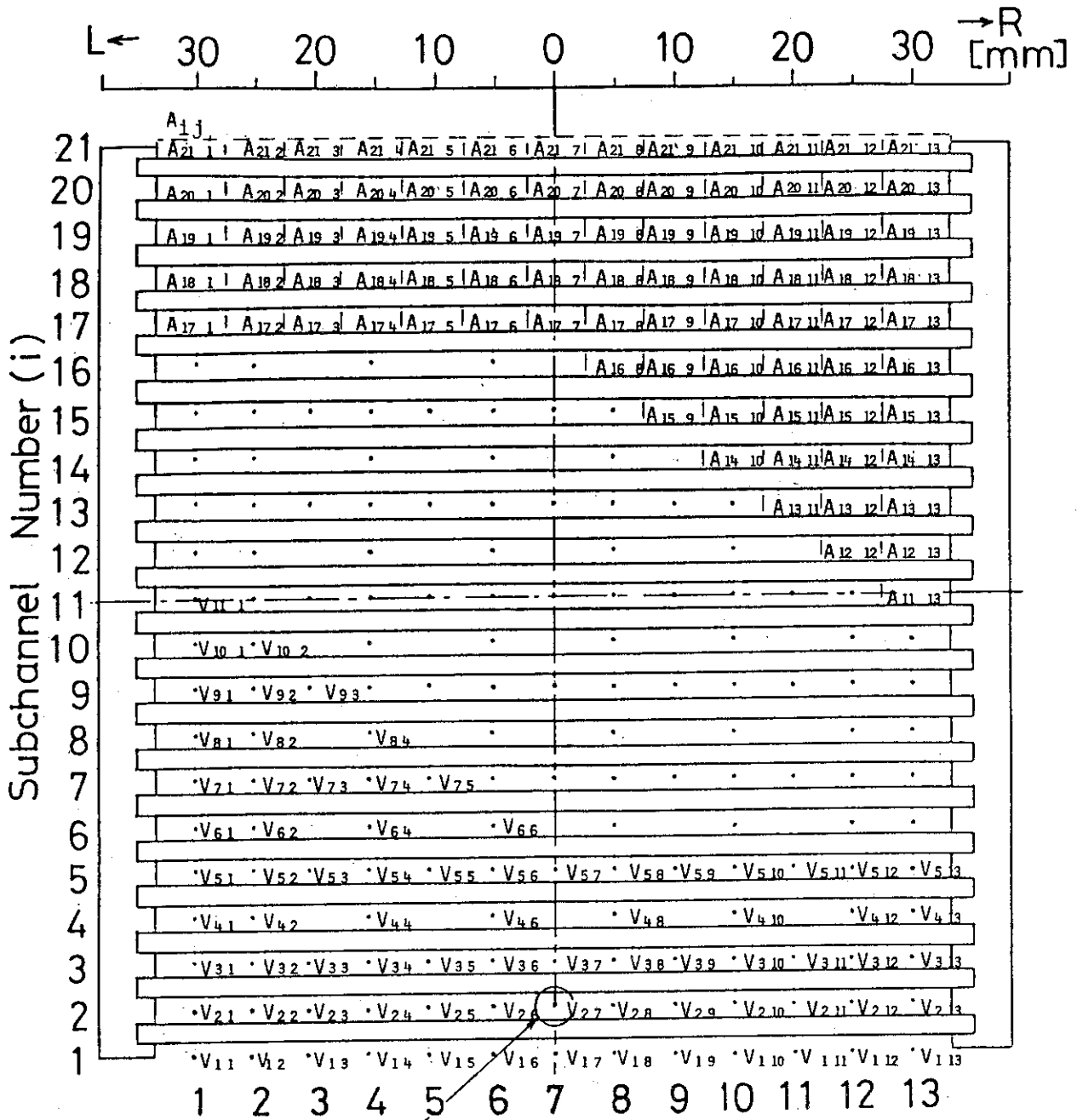


Fig. 3.1.1 Calibration Curve of Yaw Meter



Enlarged View

Fig. 3.2.1 Illustration of Velocity V_{ij} , V_{ijk} and Cross Sectional-area in Subchannel A_{ij}

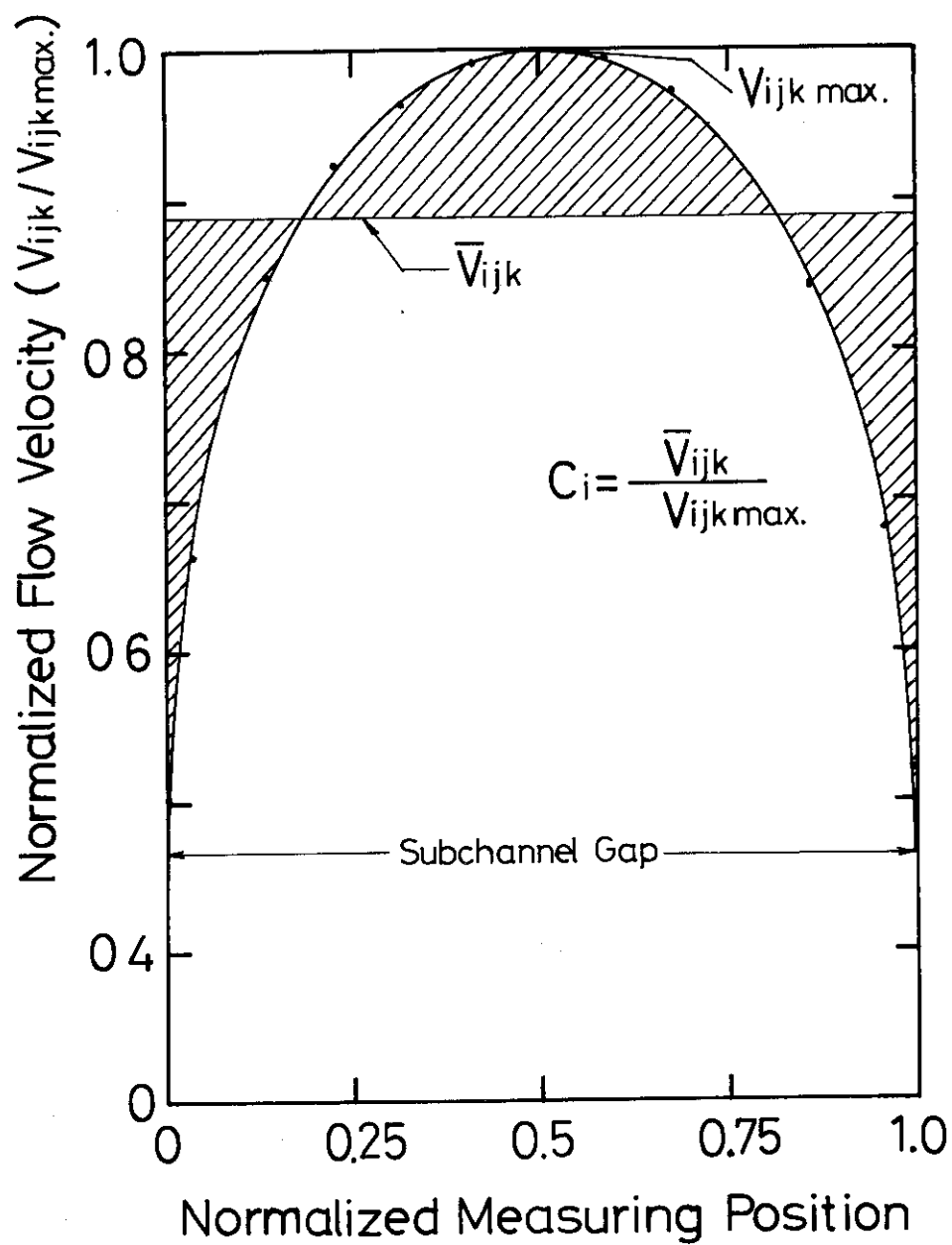


Fig 3.2.2 Illustration of Calculation Method of C_i

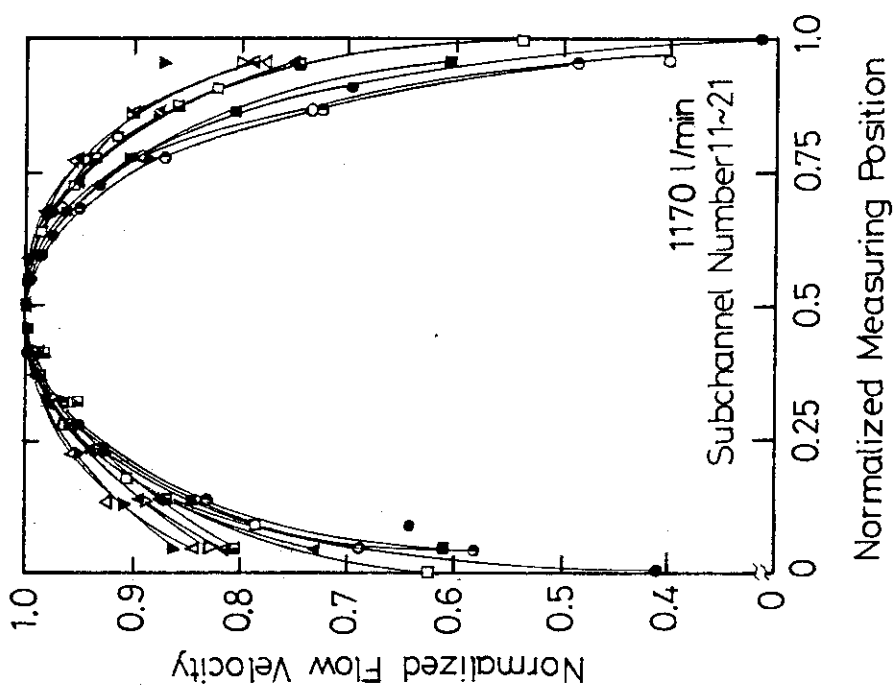


Fig. 3.2.3(b) Velocity Distribution in Subchannel (Traversed Subchannel Gap)

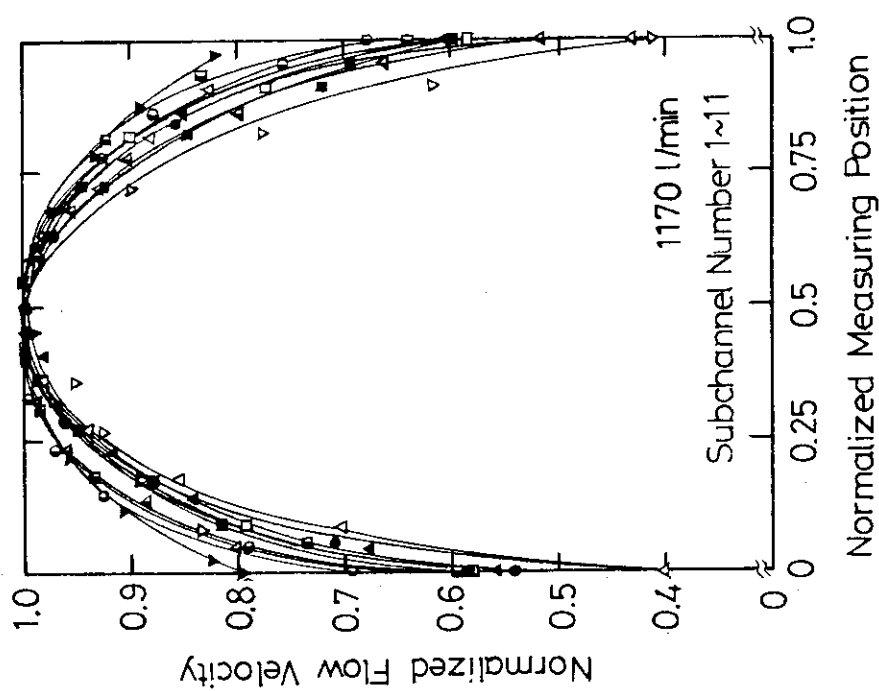


Fig. 3.2.3(a) Velocity Distribution in Subchannel (Traversed Subchannel Gap)

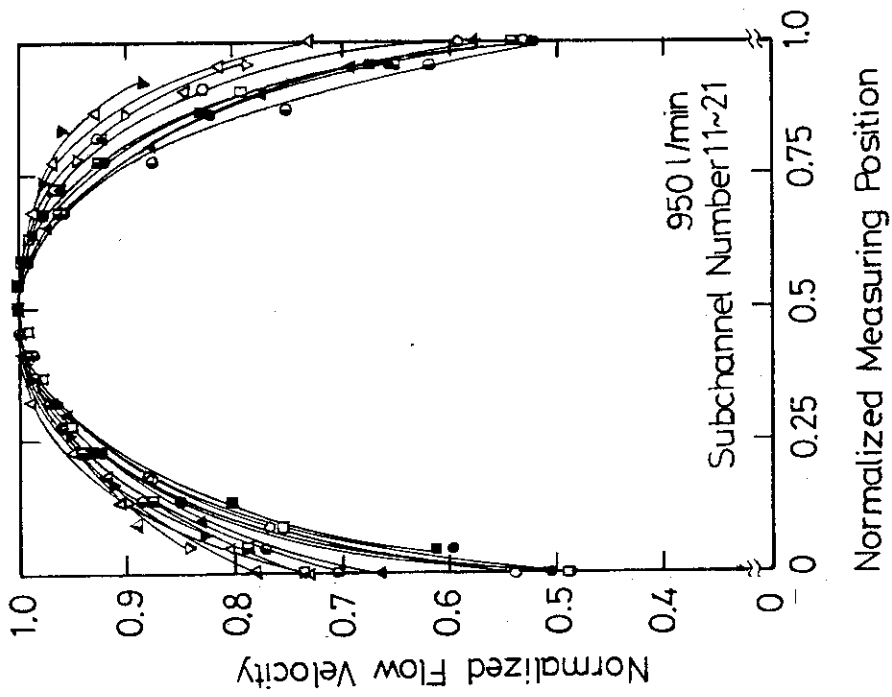


Fig. 3.2.3(d) Velocity Distribution
in Subchannel
(Traversed Subchannel Gap)

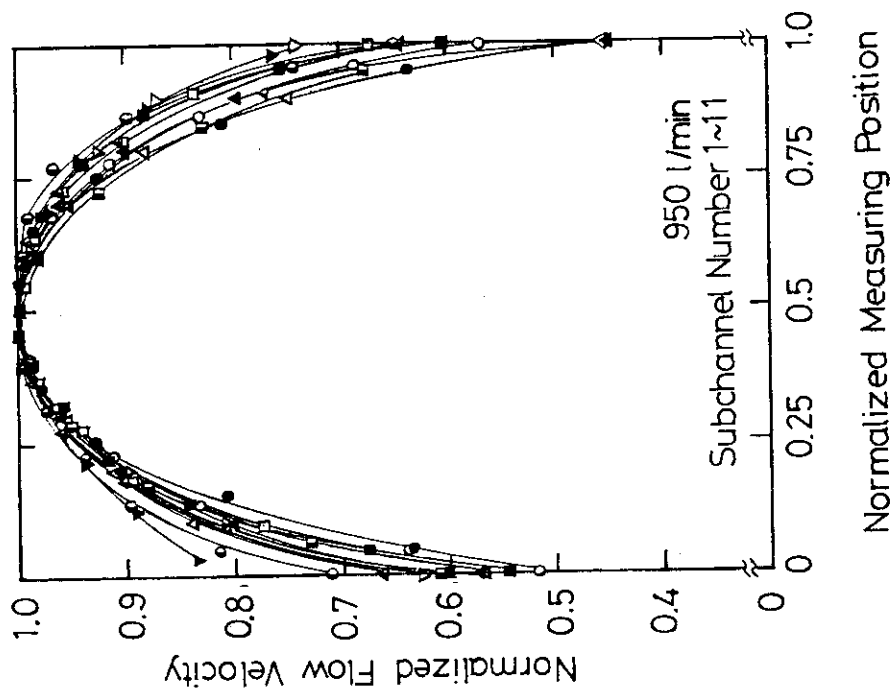


Fig. 3.2.3(c) Velocity Distribution
in Subchannel
(Traversed Subchannel Gap)

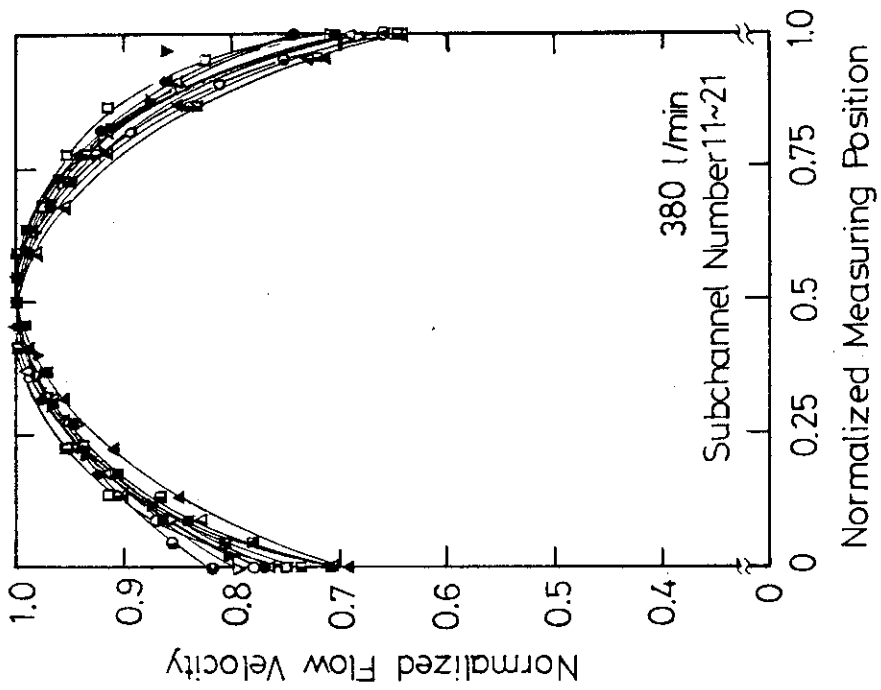


Fig. 3.2.3(f) Velocity Distribution in Subchannel (Traversed Subchannel Gap)

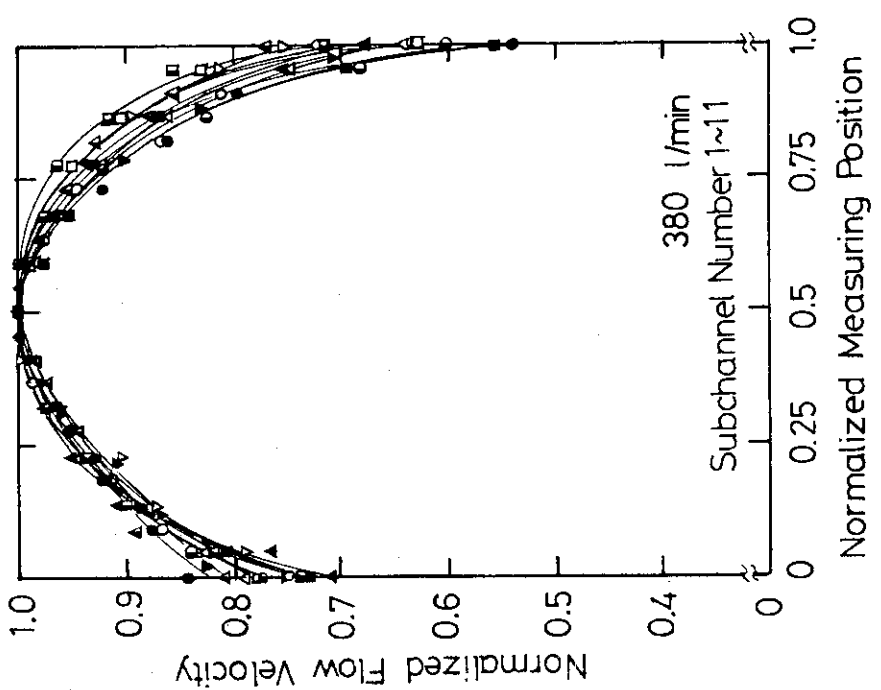


Fig. 3.2.3(e) Velocity Distribution in Subchannel (Traversed Subchannel Gap)

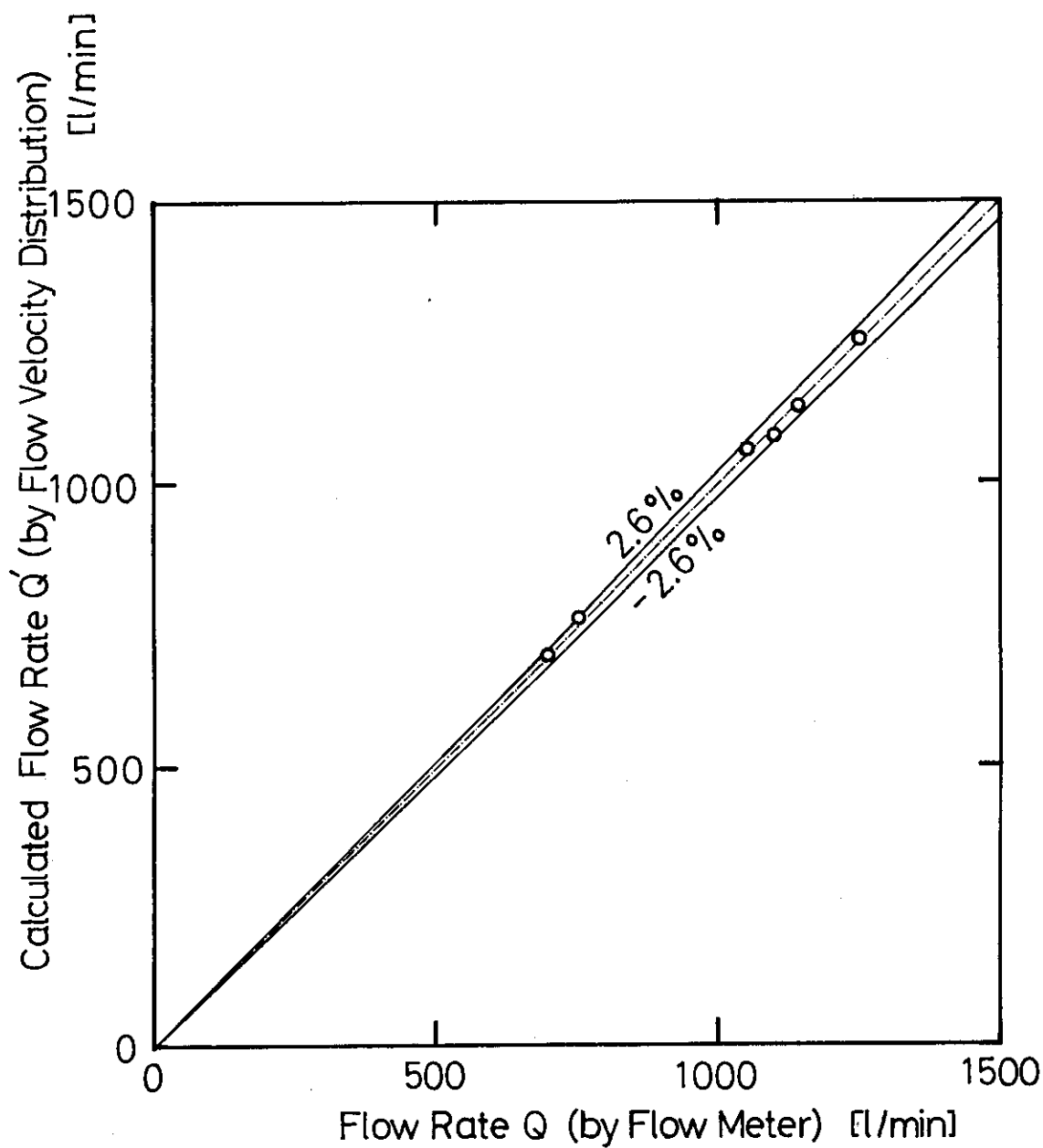


Fig. 3.3.1 Comparison between Measured Flow Rate Q and Calculated Flow Rate Q'

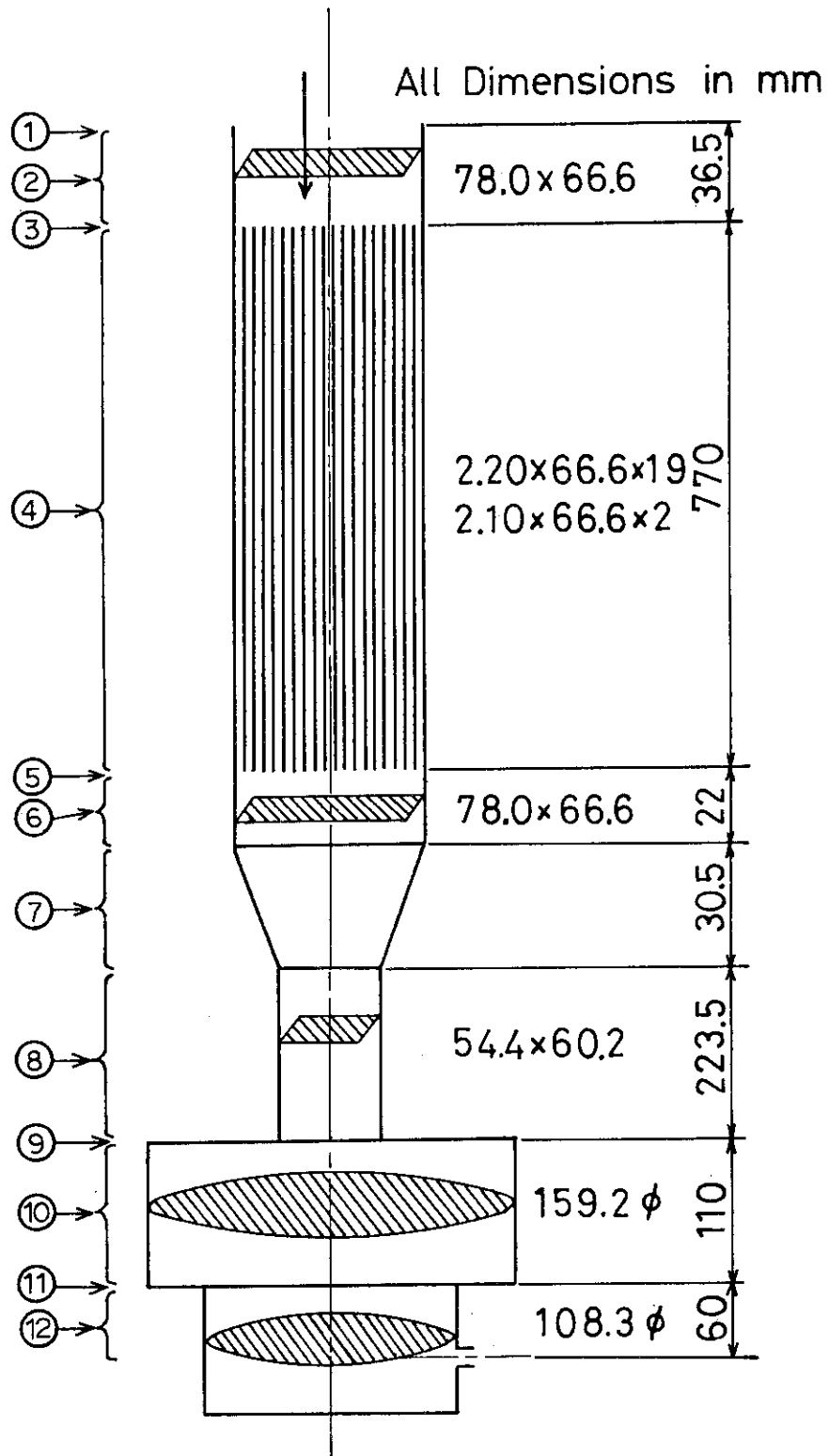


Fig. 3.4.1 Calculation Model for Test Section

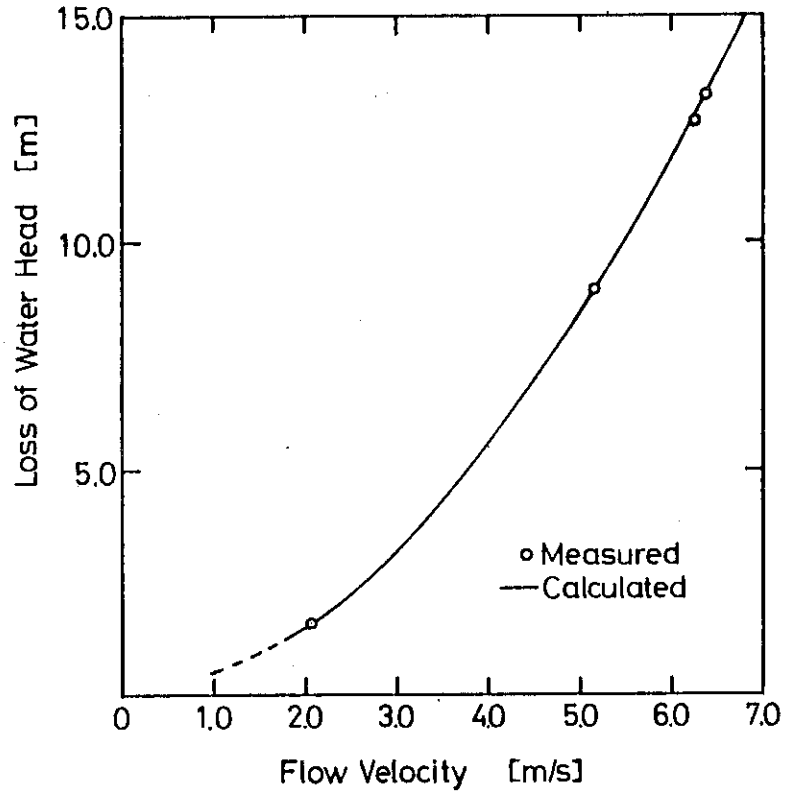


Fig. 3.4.2 Loss of Water Head as a function of Flow Velocity

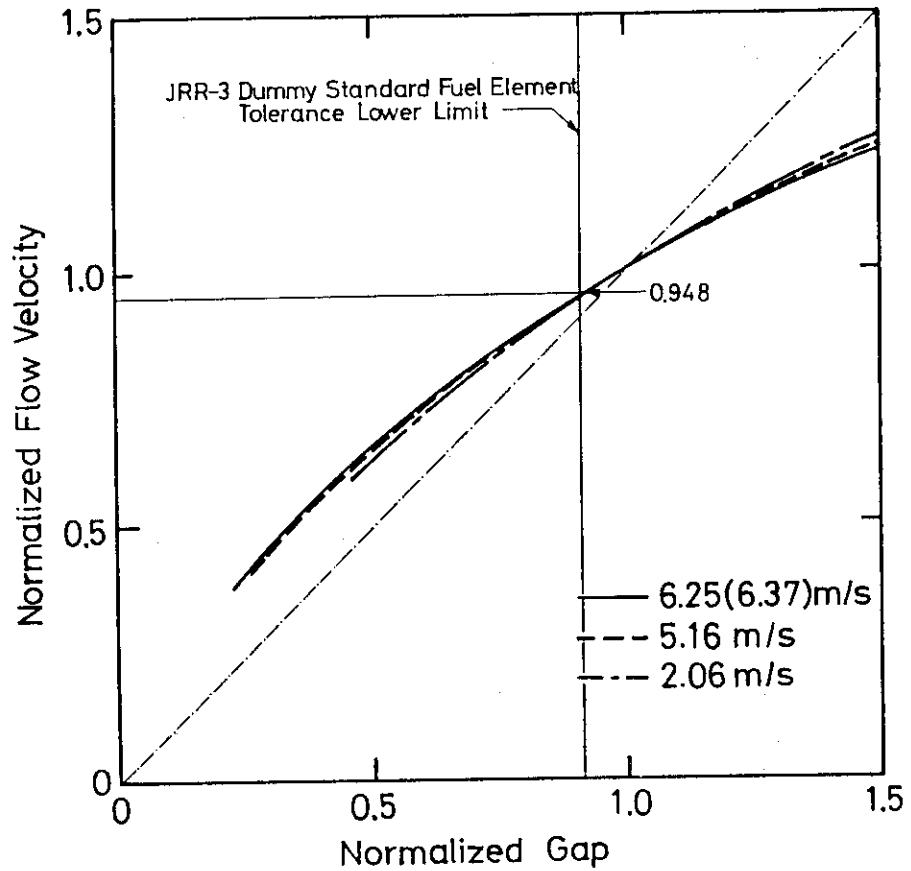


Fig. 3.5.1 Normalized Calculated Flow Velocities as a function of Normalized Subchannel Gap

4. 実験結果とその検討

4.1 各サブチャンネルの流速分布測定結果

模擬標準型燃料要素内の流量が $1,150 \text{ l/min}$ の時を 100 % 流量とし、これを基準にして、102 %、83 % 及び 33 % の時、即ち $1,170 \text{ l/min}$ 、 950 l/min 、 380 l/min の 4 ケースについて各サブチャンネルでの流速分布測定結果を図 4.1.1 (a)~(u) に示す。図中縦軸は各サブチャンネルの平均流速を 1.0 とした時の流速を示し、横軸はサブチャンネルの幅方向の中央を 0 として、左右各々の端までの距離 (33.3 mm) を 1.0 とした時の流速の測定位置を示す。また、表 4.1.1 (a), (b) には上記 4 ケースの流量における模擬標準型燃料要素内の総平均流速、各サブチャンネルの平均流速及び総平均流速に対する各サブチャンネルの平均流速の比を示す。サブチャンネル番号 1 及び 21 は最外側燃料板とテスト部アクリル内筒とのギャップであり、燃料要素内のサブチャンネルではない。サブチャンネル番号 2 ~ 20 が模擬標準型燃料要素内のサブチャンネルである。

図 4.1.1 (a)~(u) から、サブチャンネル内の流速分布は、模擬標準型要素内の流量を $1,170 \sim 380 \text{ l/min}$ まで変えても各サブチャンネルともほとんど同一な速度分布を示していることがわかる。また流速のばらつきも非常に小さい。ただしサブチャンネル番号 1 及び 21 では、流速の平均値に比べその最低値が、他のサブチャンネルに比べ低い値を示している。

これは前述のように、サブチャンネル番号 1 及び 21 は模擬標準型燃料要素の最外側燃料板とテスト部のアクリル製内筒とのギャップであり、本実験では参考のため流速を測定したが、標準型燃料要素内の流速分布の評価からは除外して考えるべきものである。標準型燃料要素の最外側チャンネルでの流速については、炉心流動実験⁽³⁾で評価を行っている。

4.2 サブチャンネル間の流速分布及びサブチャンネル間流速分布因子、流路断面積誤差因子の検討

図 4.2.1 に模擬標準型燃料要素内の流量が $1,170$ 、 $1,150$ 、 950 、 380 l/min の場合の、模擬標準型燃料要素内の総平均流速に対する各サブチャンネル内の平均流速の比を示す。

図 4.2.1 からサブチャンネル間の流速分布も、サブチャンネル内の流速分布と同様に模擬標準型燃料要素内の流量が $1,170 \sim 380 \text{ l/min}$ の範囲で変わっても、ほとんど同じ流速分布を示していることがわかる。各流量時の模擬標準型燃料要素内の総平均流速は、表 4.1.1 に示すように $1,170 \text{ l/min}$ の時 6.37 m/s 、 $1,150 \text{ l/min}$ の時 6.25 m/s 、 950 l/min の時 5.16 m/s 及び 380 l/min の時 2.06 m/s となっている。また、模擬標準型燃料要素内のサブチャンネル間の流速分布は、模擬標準型燃料要素を流れる流量が少なくなるに従って総平均流速に対する各サブチャンネル内の平均流速の比のバラツキが小さくなる傾向にある。

表 4.2.1 に各流量時の模擬標準型燃料要素内の総平均流速に対する、各サブチャンネル内の平均流速の比の最大値及び最小値を示す。これらの比のうち最も小さいものは、 $1,170 \text{ l/min}$ 及び

1,150 ℓ/min 時の 0.926 であることがわかった。なお、これらのデータは、本実験で用いた模擬標準型燃料要素のサブチャンネルギャップ 2.00 mm ~ 2.37 mm の範囲内において、サブチャンネルギャップの違いによる流路断面積の誤差も含んでいる。

図 4.2.2 にサブチャンネルギャップと実測した流速の関係、及び 3.5.2 で求めたサブチャンネルギャップと理論的な流速の関係の計算値を示す。この図から、流速分布のバラツキの原因の一つとしてサブチャンネルギャップの違い、つまり流路断面積の違いが考えられる。また、サブチャンネルギャップが基準値からずれた場合の流速は、ほぼ計算値と同様な傾向を示すことがわかった。

以上の結果より、サブチャンネル間流速分布因子 $F_{C(\text{micro})}$ を決定する。サブチャンネル間流速分布因子 $F_{C(\text{micro})}$ とは、標準型燃料要素が理想的にできた場合、つまり各サブチャンネルのギャップが基準寸法にできた場合においても、何らかの原因で生ずる流速のバラツキを示す数値であり、標準型燃料要素内の平均流速に対するサブチャンネルの流速の比のうちの最小値の逆数である。そこで図 4.2.2 に示すように、サブチャンネルギャップの基準値 1.0 において、本実験データのバラツキを考慮して $F_{C(\text{micro})} = 1/0.926 = 1.08$ をとれば、JRR-3 改造炉の熱水力設計において燃料板の表面温度を評価する際に、充分苛酷であることがわかる。よって、JRR-3 改造炉用標準型燃料要素のサブチャンネル間流速分布因子 $F_{C(\text{micro})}$ は 1.08 とする。

次に、サブチャンネルギャップの違いによる流路断面積の誤差の影響について、本実験で用いた模擬標準型燃料要素のサブチャンネルギャップが公差をはずれているもののデータも含めて考えてみる。流路断面積の誤差の影響は、流路断面積誤差因子 F_{CA} を用いて表わす。流路断面積誤差因子 F_{CA} とは、サブチャンネルの流路断面積が、サブチャンネルの寸法公差内において最小になった場合における、サブチャンネル内の平均流量に対する最小流路断面積のサブチャンネルでの流量の比の逆数である。

図 4.2.3 にサブチャンネルギャップと流速の関係を実験値と予測値（図 3.5.2 参照）の比較で示す。この図をみると、流速の計算値に対して、実験データは -6 % 以内にすべて収まっている。しかし、実験データは、流路断面積の誤差による流速のバラツキとチャンネル間流速分布のバラツキを含んでおり、流路断面積の誤差による影響のみを議論するために、チャンネル間流速分布因子 $F_{C(\text{micro})}$ を用いチャンネル間の流速分布による影響を取り除き流路断面積誤差因子 F_{CA} を決定する。

一方、図 4.2.3 に示した -6 % の誤差は、同図中に示すサブチャンネル間流速分布因子 $F_{C(\text{micro})} = 1.08$ に対応する -7.4 % 以内であることがわかる。従って、この -6 % の誤差は各サブチャンネルギャップにおけるサブチャンネル間流速分布因子に相当していると考えられる。

また、同図から本実験で用いた模擬標準型燃料要素のサブチャンネルギャップの公差の下限値と -6 % のラインとの交点をとれば、模擬標準型燃料要素内の総平均流速に対するサブチャンネル内の平均流速の最小値 V/V_{min} は、0.891 となることがわかる。

以上より流路断面積誤差因子 F_{CA} を求める。流路断面積誤差因子 F_{CA} は式 (3.5.3) で示したように次式で表わされる。

$$F_{CA} = \left(\frac{V}{V_{\text{min}}} \right) \cdot \left(\frac{A}{A_{\text{min}}} \right)$$

この式を用い、先に述べた様にチャンネル間流速分布の影響を除くため、チャンネル間流速分布因子 $F_{C(\text{micro})}$ を用いて流路断面積誤差因子 F_{CA} を求める。

先に求めたサブチャンネル間流速分布因子 $F_{C(\text{micro})}=1.08$ を用いると、

$$F_{CA} = \left(\frac{V}{V_{\min}} \right) \cdot \left(\frac{1}{F_{C(\text{micro})}} \right) \cdot \left(\frac{A}{A_{\min}} \right) \\ = \frac{1}{0.891} \cdot \frac{1}{1.08} \cdot \frac{2.20}{2.00} = 1.14$$

となる。

また、図 4.2.3 に示した -6 % の誤差をチャンネル間の流速分布によるバラツキと考えればサブチャンネル間流速分布因子 $F_{C(\text{micro})}$ は 1.06 となる。これを用いて流路断面積誤差因子 F_{CA} を求めると、

$$F_{CA} = \frac{1}{0.891} \cdot \frac{1}{1.06} \cdot \frac{2.00}{2.00} = 1.16$$

となる。

そこで、本実験で用いた模擬標準型燃料要素の流路断面積誤差因子 F_{CA} としては、3.5.2 で求めた計算値 1.16 をとっておけば充分妥当であることがわかる。

以上の結果より、JRR-3 改造炉用標準型燃料要素の流路断面積誤差因子 F_{CA} としても 3.5.2 に示した計算値 1.17⁽²⁾ を用いれば充分妥当である。よって、JRR-3 改造炉用標準型燃料要素の流路断面積誤差因子 F_{CA} は 1.17 とする。

4.3 実験データの再現性及び誤差評価

(1) データの再現性

データの再現性を調べるために流量 1,170 ℓ/min(102 %), 950 ℓ/min(83 %), 380 ℓ/min(33 %) の 3 ケースについて、計測位置 (i, 7) $i=1 \sim 21$ (計測位置については図 2.3.4 参照) の 21 点について流速を再び測定した。その結果を表 4.3.1 (a)~(c) に示す。この表からわかるように、ほとんどのデータは 0.5 % 以内の違いであった。1 番大きな差異で 1.6 % の違いであり、これより再現性は充分ある。

(2) 誤差評価

測定データの誤差は、計測系における 2 つの系統から生ずる。

i) 流量計の系統からの誤差

ii) ヨーメーター (ピトー管) 測定系からの誤差

以下に、それぞれの系統からの誤差を評価する。

(1) 流量計系統

流量計は、歪ゲージ式デルタ型流量計である。誤差は、その精度より表わす量の ± 1.0 % 以内である。誤差は、表わす量の ± 1 % 以内であるため、どの流量においても同じになる。よって流量 380 ℓ/min(33 %) の場合で求めると、

$$\sqrt{\frac{380 \pm 3.8}{380}} = 1.005 \sim 0.995$$

となり、約 0.5 % 程度であり誤差としては小さい。

流量指示計の誤差は、その精度より表わす量の ± 1.5 % 以内である。同様に、流量 $380 \ell/\text{min}$ (33 %) の場合で求めると、

$$\sqrt{\frac{380 \pm 5.7}{380}} = 1.007 \sim 0.992$$

となり、約 0.8 % 程度であり誤差として小さい。指示計自体の読取り誤差については、指示計はリニア目盛で $0 \sim 1,500$ を 50 きざみで表示されているので、目盛の読みには ± 10 % 程度の誤差を含んでいるとすると誤差は、

$$\sqrt{\frac{380 \pm 10}{380}} = 1.013 \sim 0.987$$

となり、約 1.3 % である。これから 33 % 流量の時ににおいても $0.5 + 0.8 + 1.3 = 2.6$ % となり低流量でも充分精度が良いことがわかる。

(2) ヨーメーター (ピート管) 測定系

ヨーメーター測定系は、ヨーメーター、導圧管、差圧変換器、デジタルボルトメーターから成っており、ここで検討する誤差原因は導圧管への気泡の混入、差圧変換器の誤差、デジタルボルトメーターの誤差、及び読み取り誤差である。

導圧管内への気泡の混入については、実験前に排除しており、さらに確認して測定しているので空気の混入は皆無と考えるよい。

差圧変換器の誤差は、その精度より 0.2 % 以内である。流量 $380 \ell/\text{min}$ (33 %) での差圧変換器の出力は約 1.20 V (約 165 mmAq) であるので誤差は、

$$\sqrt{\frac{1.20 \pm 2.4 \times 10^{-3}}{1.20}} = 1.001 \sim 0.999$$

となり、約 0.1 % となり非常に小さい。

同様にデジタルボルトメーターの誤差も同様に極めて小さいため、これを読み取り誤差に含めて考えることにする。読み取り誤差は ± 0.01 V 程度であるので、その誤差は流量 $380 \ell/\text{min}$ (33 %) の場合で、

$$\sqrt{\frac{1.20 \pm 0.01}{1.20}} = 1.004 \sim 0.996$$

となり、約 0.4 % である。以上より 33 % 流量の時ににおいても $0.1 + 0.4 = 0.5$ % であり、低流量でも充分精度がよい。

Table 4.1.1(a) Average Velocity in Subchannel

Subchannel Number	Flow Rate			
	1170 l/min (102 %)	1150 l/min (100 %)	950 l/min (83 %)	380 l/min (33 %)
	Average Velocity			
	6.37 m/s	6.25 m/s	5.16 m/s	2.06 m/s
1	5.94 m/s 0.932	5.96 m/s 0.954	4.99 m/s 0.967	1.87 m/s 0.908
2	— m/s —	— m/s —	— m/s —	— m/s —
3	6.12 m/s 0.974	6.01 m/s 0.962	4.79 m/s 0.928	1.98 m/s 0.961
4	6.32 m/s 0.991	6.18 m/s 0.989	5.24 m/s 1.016	2.08 m/s 1.010
5	6.01 m/s 0.943	5.91 m/s 0.946	4.94 m/s 0.957	1.99 m/s 0.966
6	6.34 m/s 0.994	6.20 m/s 0.992	5.20 m/s 1.008	2.09 m/s 1.015
7	6.18 m/s 0.969	6.05 m/s 0.968	4.97 m/s 0.963	2.02 m/s 0.981
8	5.90 m/s 0.926	5.79 m/s 0.926	4.86 m/s 0.942	1.97 m/s 0.956
9	7.22 m/s 1.133	7.07 m/s 1.131	5.90 m/s 1.143	2.27 m/s 1.102
10	5.98 m/s 0.938	5.92 m/s 0.947	4.79 m/s 0.928	1.95 m/s 0.947
11	6.09 m/s 0.956	6.05 m/s 0.968	5.19 m/s 1.006	2.11 m/s 1.024

Upper row : Average Velocity in Subchannel

Lower row : Average Velocity in Subchannel/Average Velocity

Table 4.1.1(b) Average Velocity in Subchannel

Subchannel Number	Flow Rate			
	1170 l/min (102 %)	1150 l/min (100 %)	950 l/min (83 %)	380 l/min (33 %)
	Average Velocity			
	6.37 m/s	6.25 m/s	5.16 m/s	2.06 m/s
12	5.96 m/s 0.936	5.83 m/s 0.933	5.00 m/s 0.969	2.02 m/s 0.981
13	6.27 m/s 0.983	6.14 m/s 0.982	5.25 m/s 1.017	2.12 m/s 1.029
14	7.26 m/s 1.139	7.09 m/s 1.134	5.92 m/s 1.147	2.29 m/s 1.112
15	6.37 m/s 1.000	6.22 m/s 0.995	4.96 m/s 0.961	1.91 m/s 0.927
16	6.87 m/s 1.078	6.71 m/s 1.074	5.57 m/s 1.079	2.17 m/s 1.053
17	6.48 m/s 1.017	6.38 m/s 1.021	5.19 m/s 1.006	2.14 m/s 1.039
18	6.53 m/s 1.025	6.37 m/s 1.019	5.31 m/s 1.029	2.12 m/s 1.029
19	— m/s —	— m/s —	— m/s —	— m/s —
20	6.36 m/s 0.997	6.23 m/s 0.997	5.28 m/s 1.023	2.09 m/s 1.015
21	7.19 m/s 1.128	6.98 m/s 1.117	5.87 m/s 1.138	2.23 m/s 1.083

Upper row : Average Velocity in Subchannel

Lower row : Average Velocity in Subchannel/Average Velocity

Table 4.2.1 Maximum and Minimum Ratio of The Ratio to Average Velocity of Velocity in Subchannel

Flow Rate (l/min)	The ratio to Average Velocity	
	max.	min.
1170 (102 %)	1.139	0.926
1150 (100 %)	1.134	0.926
950 (83 %)	1.147	0.928
380 (33 %)	1.112	0.927

Table 4.3.1(a) Reproducibility of Velocity in Subchannel

Subchannel Number	Experiment Number		Average Velocity	Subchannel Number	Experiment Number		Average Velocity
	1	2			1	2	
1	6.47 0.995	6.53 1.005	6.50	12	6.00 0.995	6.05 1.003	6.03
2	— —	— —	—	13	6.42 1.002	6.39 0.997	6.41
3	6.33 1.002	6.30 0.997	6.32	14	7.38 1.004	7.31 0.995	7.35
4	6.39 0.997	6.42 1.002	6.41	15	6.23 1.002	6.21 0.998	6.22
5	5.50 1.000	5.50 1.000	5.50	16	6.99 1.001	6.97 0.999	6.98
6	6.60 1.006	6.52 0.994	6.56	17	6.52 1.005	6.45 0.994	6.49
7	6.19 0.998	6.20 1.000	6.20	18	6.66 1.002	6.64 0.998	6.65
8	5.90 1.000	5.89 0.998	5.90	19	— —	— —	—
9	7.38 1.001	7.36 0.999	7.37	20	6.53 1.008	6.42 0.991	6.48
10	6.00 1.003	5.95 0.995	5.98	21	7.72 1.007	7.62 0.993	7.67
11	6.27 1.003	6.22 0.995	6.25				

Upper row : Velocity (m/s)
 Lower row : Velocity/Average Velocity
 Flow Rate : 1170 (l/min)

Table 4.3.1(b) Reproducibility of Velocity in Subchannel

Subchannel Number	Experiment Number		Average Velocity	Subchannel Number	Experiment Number		Average Velocity
	1	2			1	2	
1	5.24 0.996	5.28 1.004	5.26	12	5.00 0.994	5.06 1.006	5.03
2	— —	— —	—	13	5.40 0.996	5.43 1.002	5.42
3	4.93 0.992	5.00 1.006	4.97	14	6.02 0.997	6.05 1.002	6.04
4	5.33 1.002	5.31 0.998	5.32	15	4.88 1.000	4.87 0.998	4.88
5	4.92 0.996	4.96 1.004	4.94	16	5.64 0.993	5.71 1.005	5.68
6	5.39 1.004	5.35 0.996	5.37	17	5.21 0.996	5.25 1.004	5.23
7	5.00 0.998	5.02 1.002	5.01	18	5.43 0.993	5.50 1.005	5.47
8	4.87 1.000	4.87 1.000	4.87	19	— —	— —	—
9	5.99 0.998	6.01 1.002	6.00	20	5.36 0.996	5.39 1.002	5.38
10	4.74 0.998	4.75 1.000	4.75	21	6.20 0.995	6.25 1.003	6.23
11	5.23 0.998	5.25 1.002	5.24				

Upper row : Velocity (m/s)
 Lower row : Velocity/Average Velocity
 Flow Rate : 950 (l/min)

Table 4.3.1(c) Reproducibility of Velocity in Subchannel

Subchannel Number	Experiment Number		Average Velocity	Subchannel Number	Experiment Number		Average Velocity
	1	2			1	2	
1	2.05	2.05	2.04	12	2.03	2.06	2.05
	1.005	0.995			0.990	1.005	
2	—	—	—	13	2.15	2.19	2.17
	—	—			0.991	1.009	
3	1.99	2.02	2.01	14	2.34	2.33	2.34
	0.990	1.005			1.000	0.996	
4	2.10	2.10	2.10	15	1.90	1.85	1.88
	1.000	1.000			1.011	0.984	
5	2.00	1.98	1.99	16	2.23	2.23	2.23
	1.005	0.995			1.000	1.000	
6	2.16	2.16	2.16	17	2.18	2.18	2.18
	1.000	1.000			1.000	1.000	
7	2.01	2.03	2.02	18	2.18	2.19	2.19
	0.995	1.005			0.995	1.000	
8	1.98	1.98	1.98	19	—	—	—
	1.000	1.000			—	—	
9	2.29	2.31	2.30	20	2.16	2.15	2.16
	0.996	1.004			1.000	0.995	
10	1.96	1.96	1.96	21	2.33	2.39	2.36
	1.000	1.000			0.987	1.013	
11	2.13	2.15	2.14				
	0.995	1.005					

Upper row : Velocity (m/s)
 Lower row : Velocity/Average Velocity
 Flow Rate : 380 (l/min)

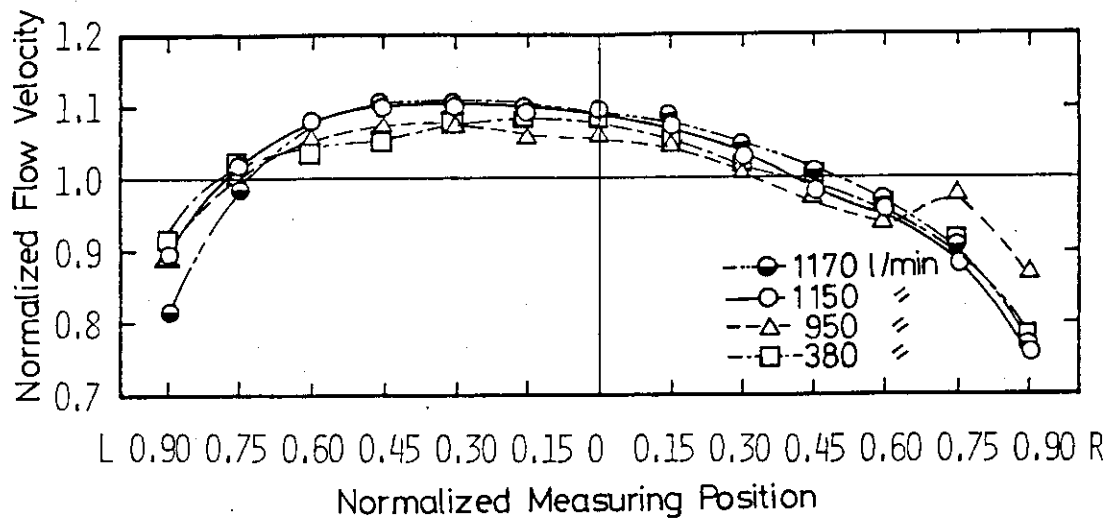


Fig. 4.1.1(a) Velocity Distribution in Subchannel 1

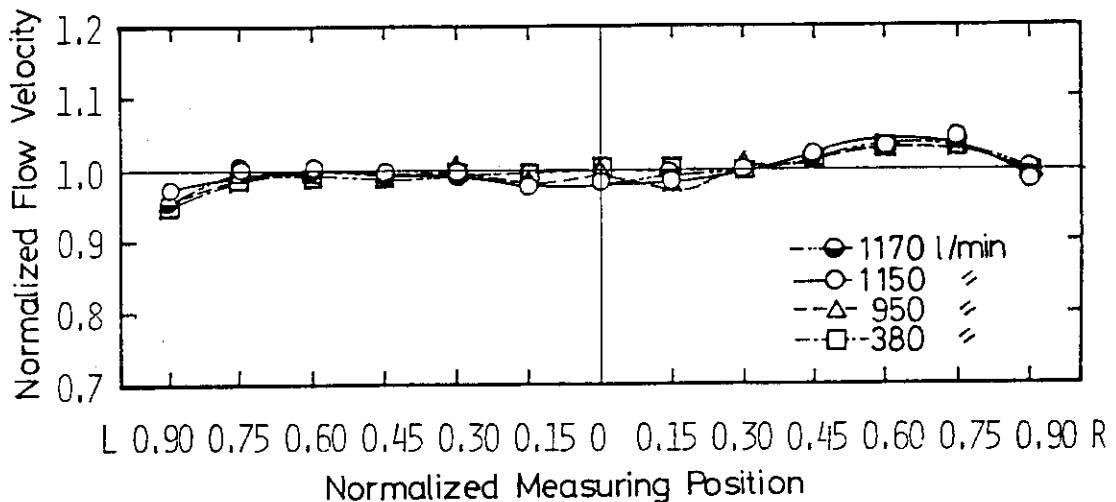


Fig. 4.1.1(b) Velocity Distribution in Subchannel 2

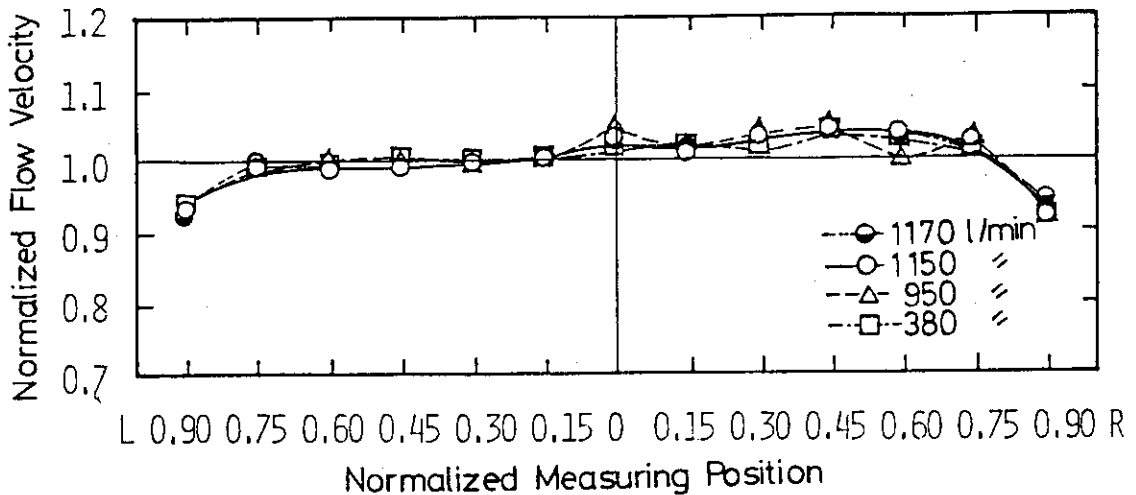
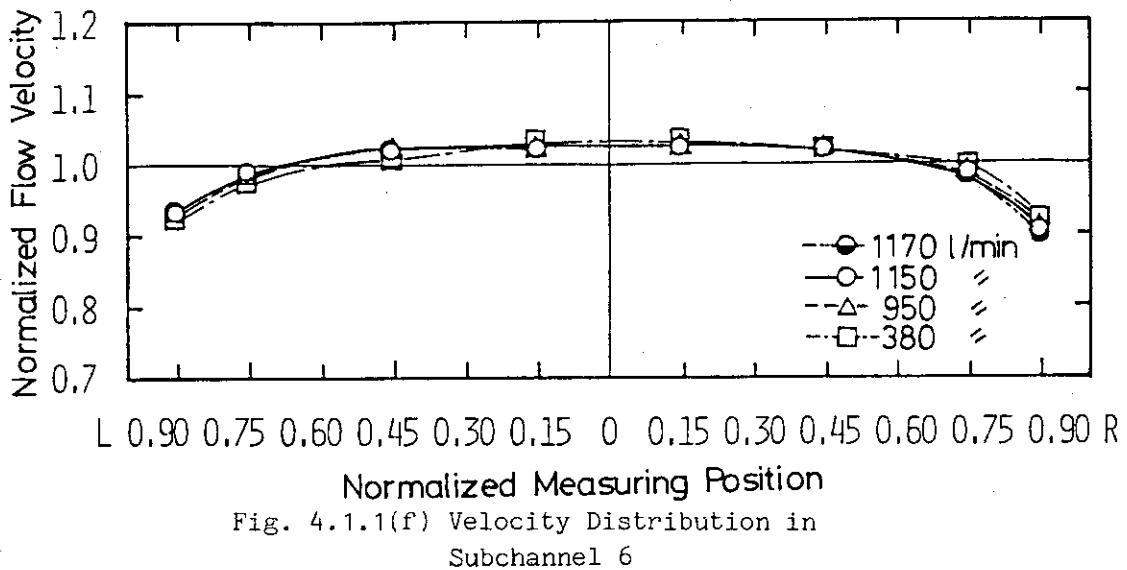
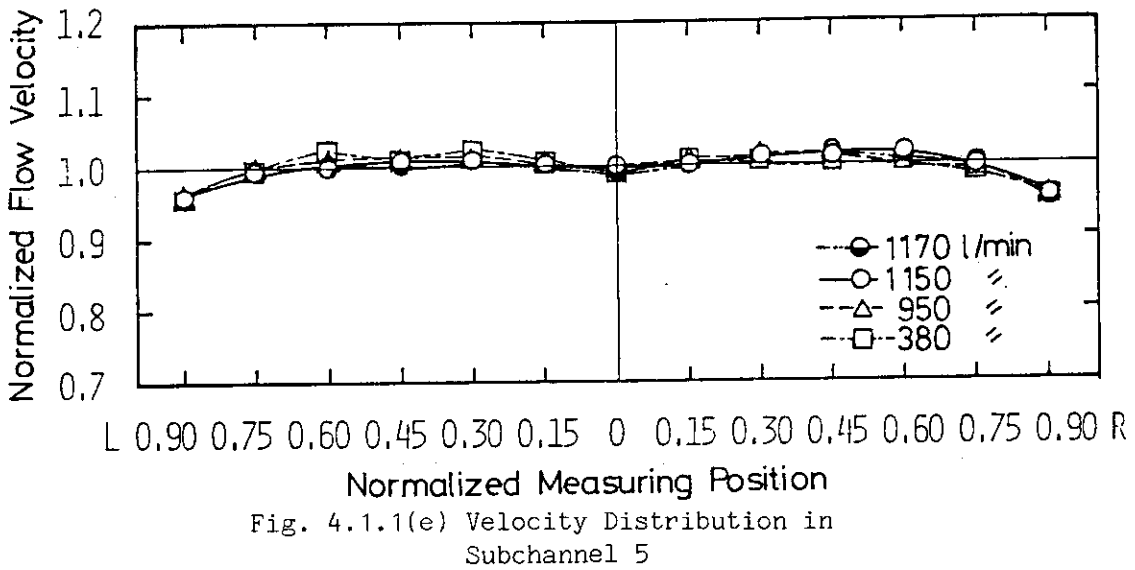
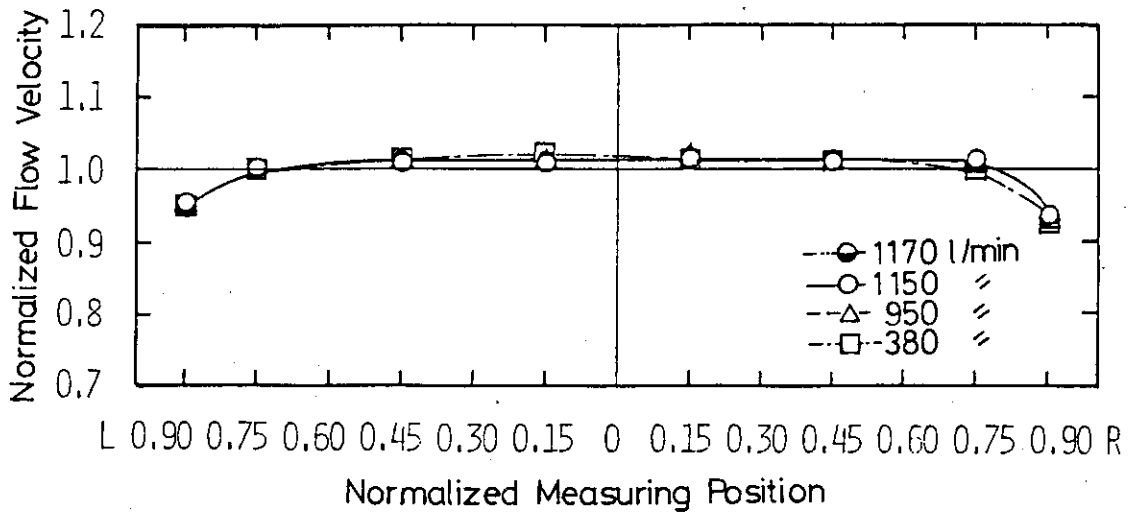


Fig. 4.1.1(c) Velocity Distribution in Subchannel 3



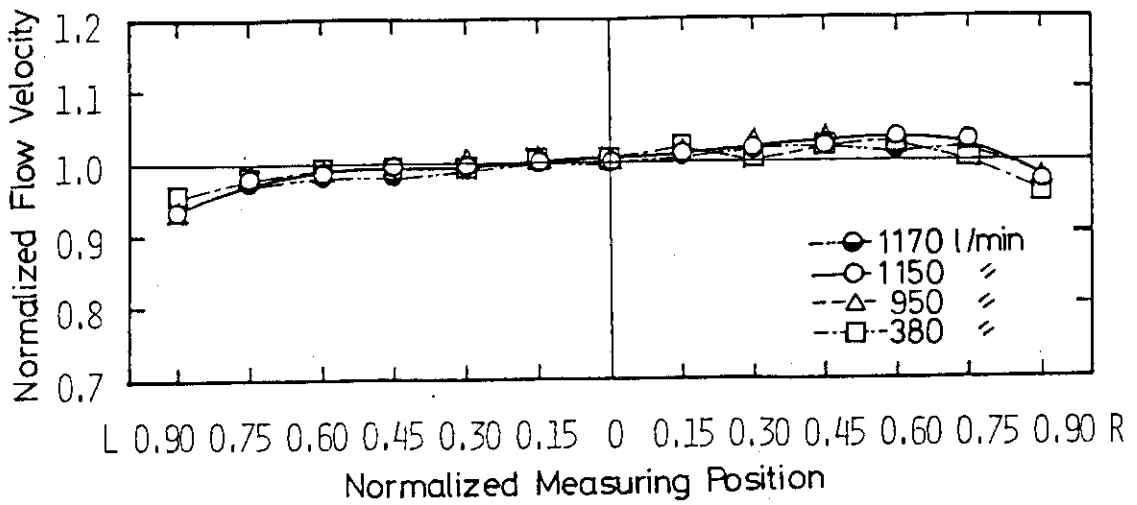


Fig. 4.1.1(g) Velocity Distribution in Subchannel 7

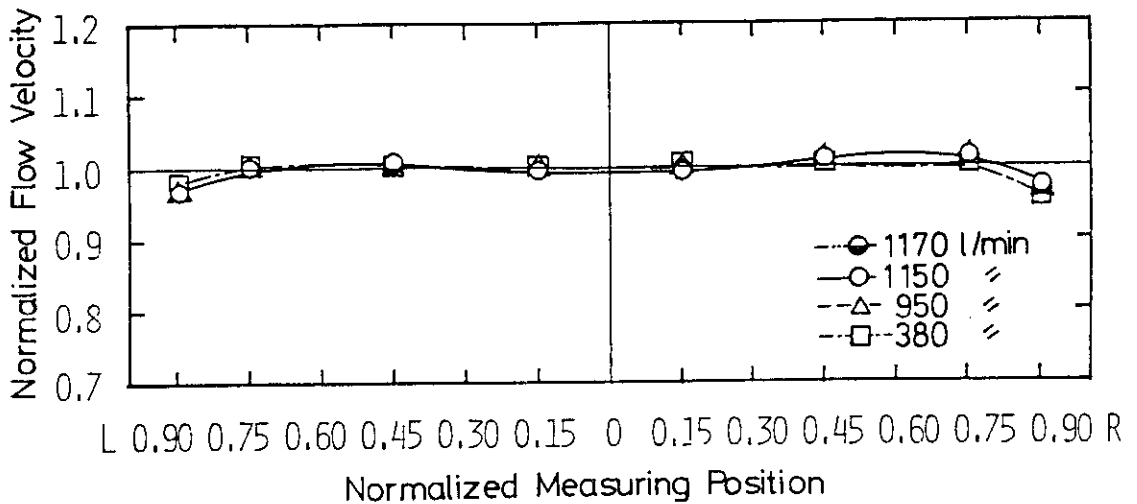


Fig. 4.1.1(h) Velocity Distribution in Subchannel 8

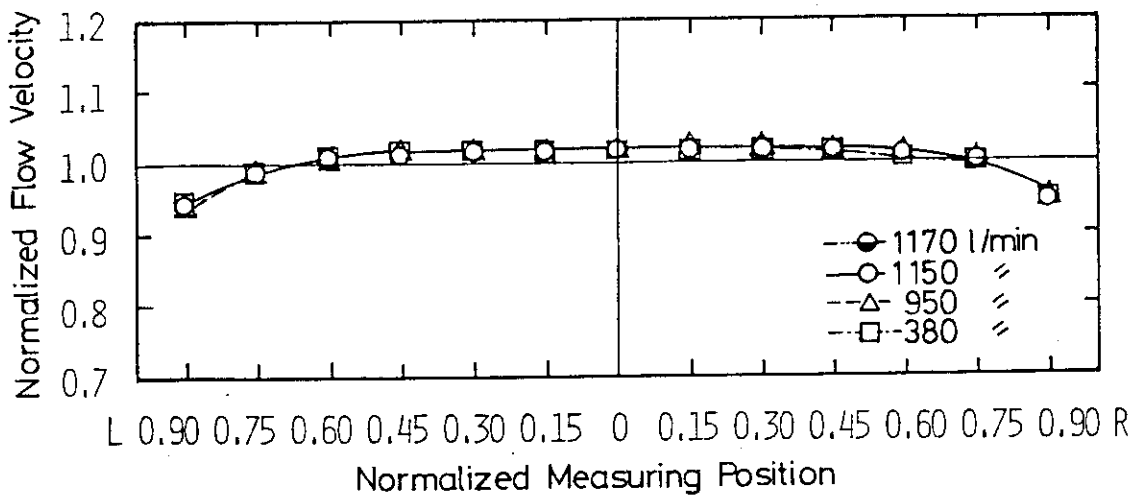


Fig. 4.1.1(i) Velocity Distribution in Subchannel 9

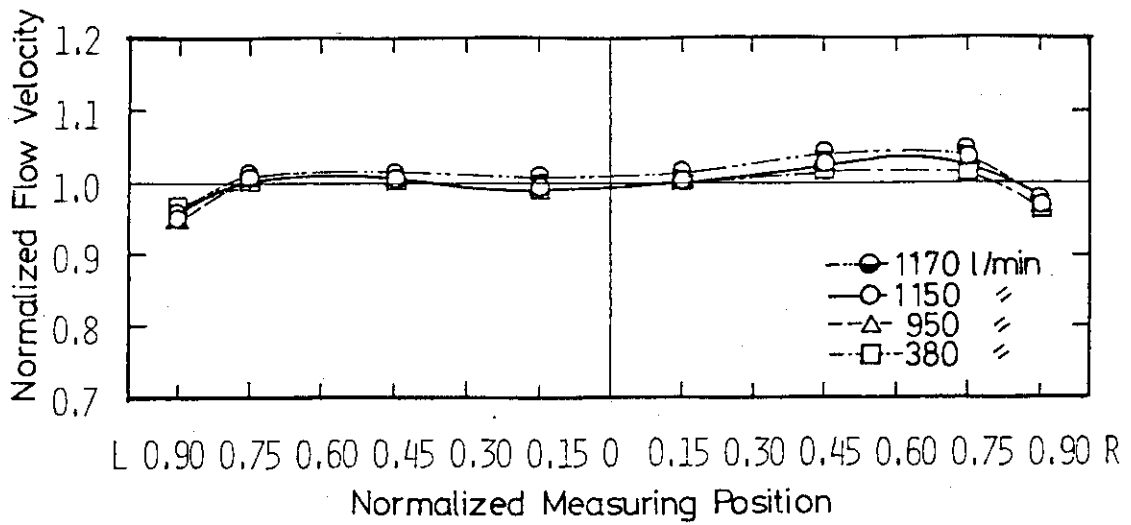


Fig. 4.1.1(j) Velocity Distribution in Subchannel 10

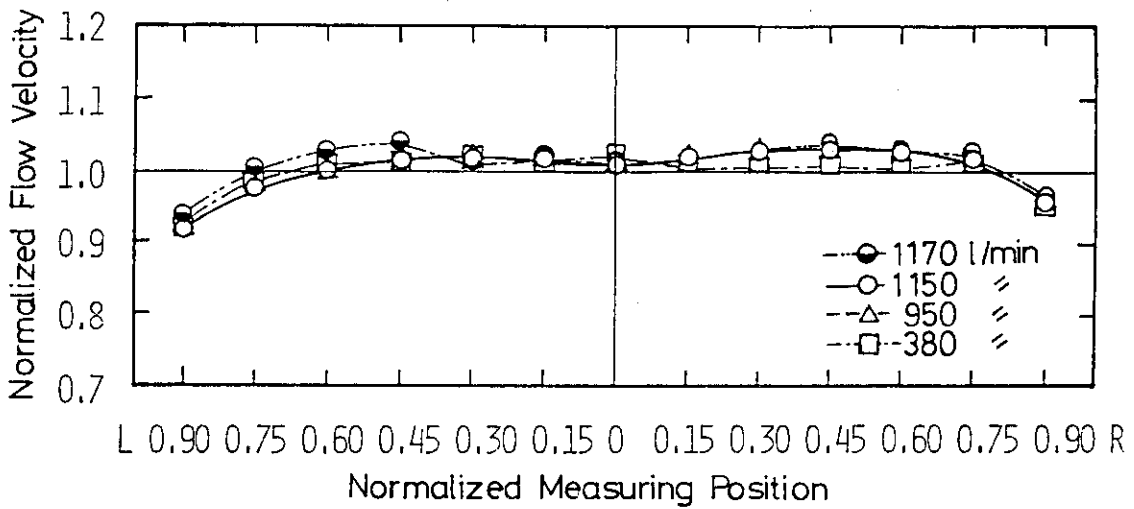


Fig. 4.1.1(k) Velocity Distribution in Subchannel 11

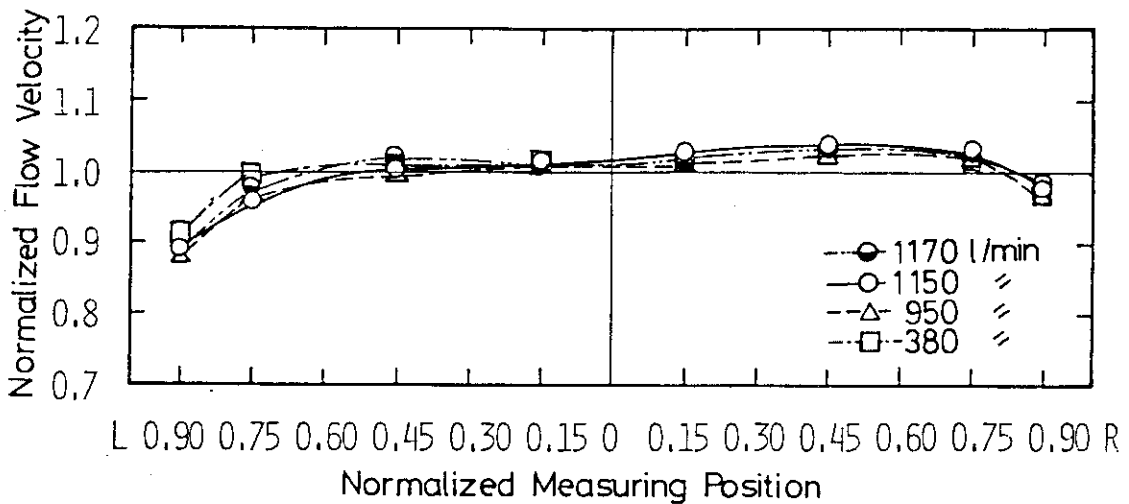


Fig. 4.1.1(l) Velocity Distribution in Subchannel 12

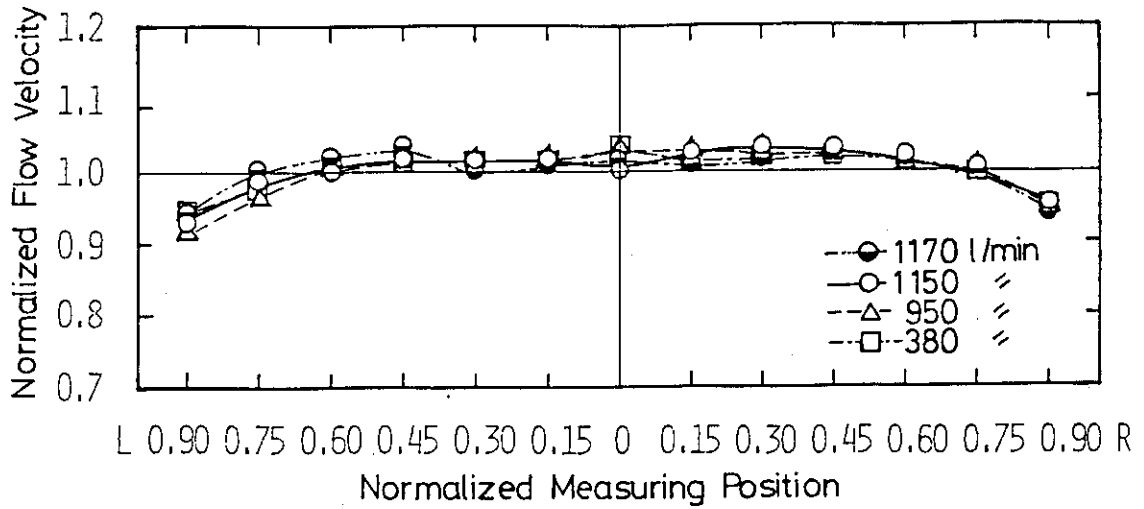


Fig. 4.1.1(m) Velocity Distribution in Subchannel 13

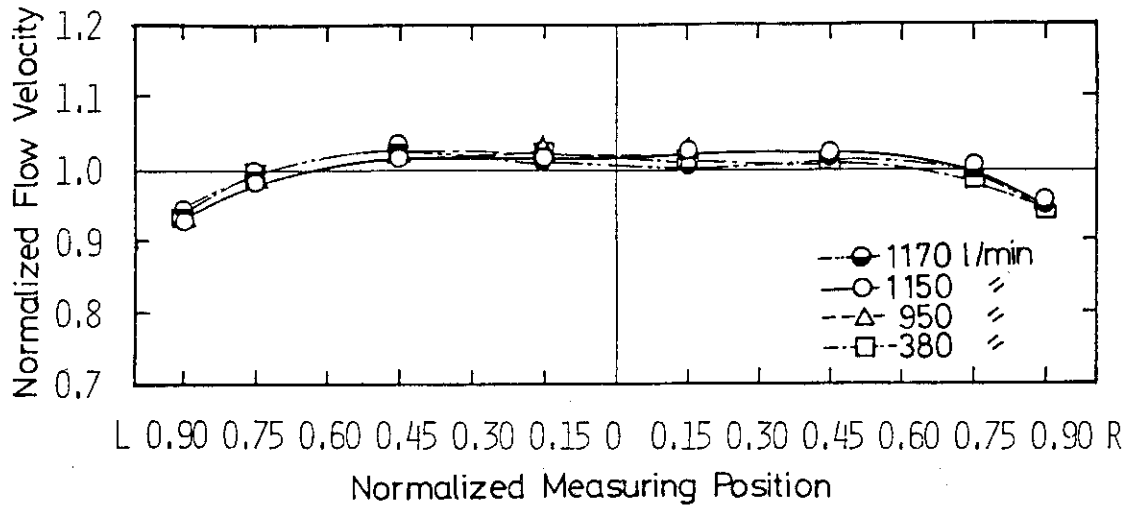


Fig. 4.1.1(n) Velocity Distribution in Subchannel 14

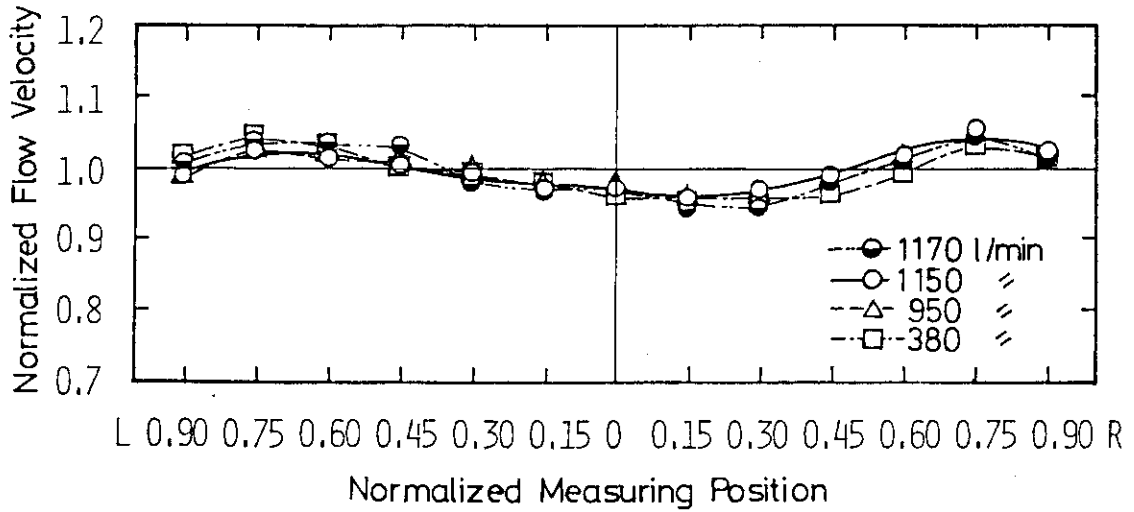


Fig. 4.1.1(o) Velocity Distribution in Subchannel 15

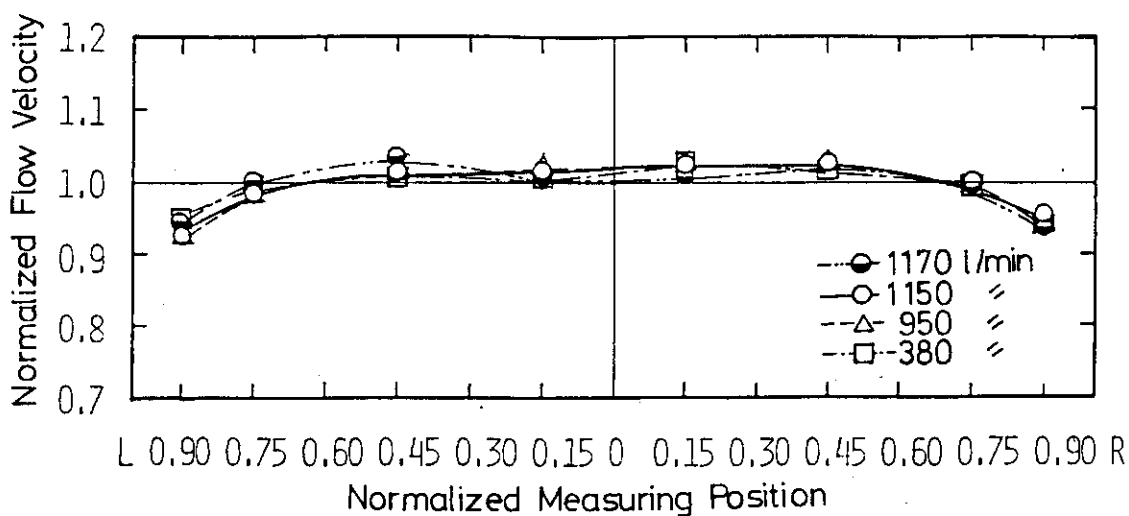


Fig. 4.1.1(p) Velocity Distribution in Subchannel 16

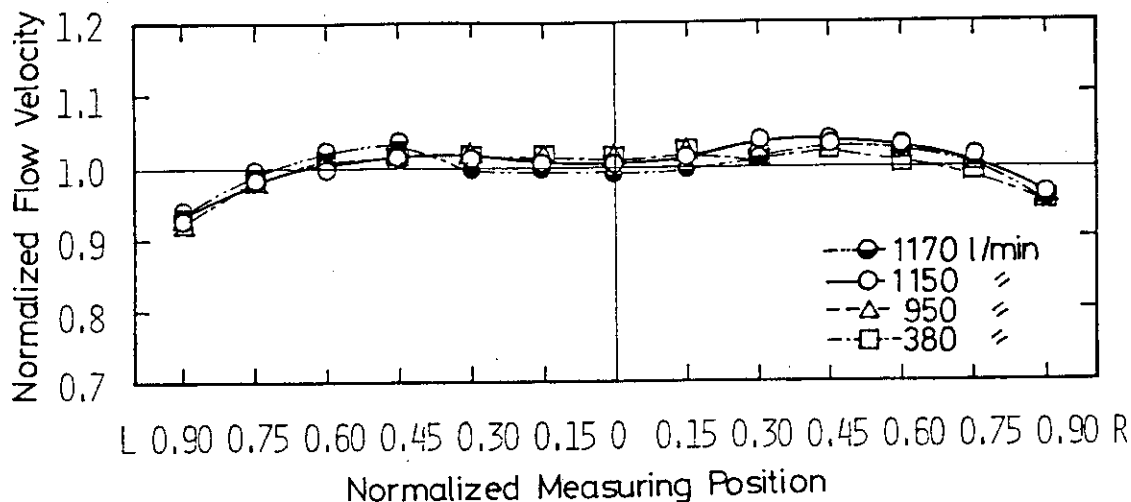


Fig. 4.1.1(q) Velocity Distribution in Subchannel 17

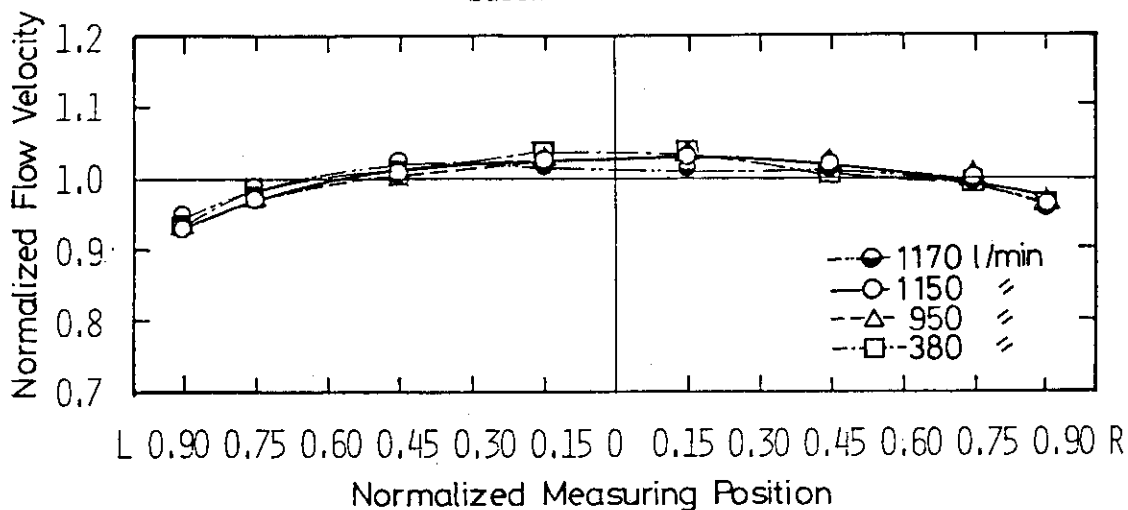


Fig. 4.1.1(r) Velocity Distribution in Subchannel 18

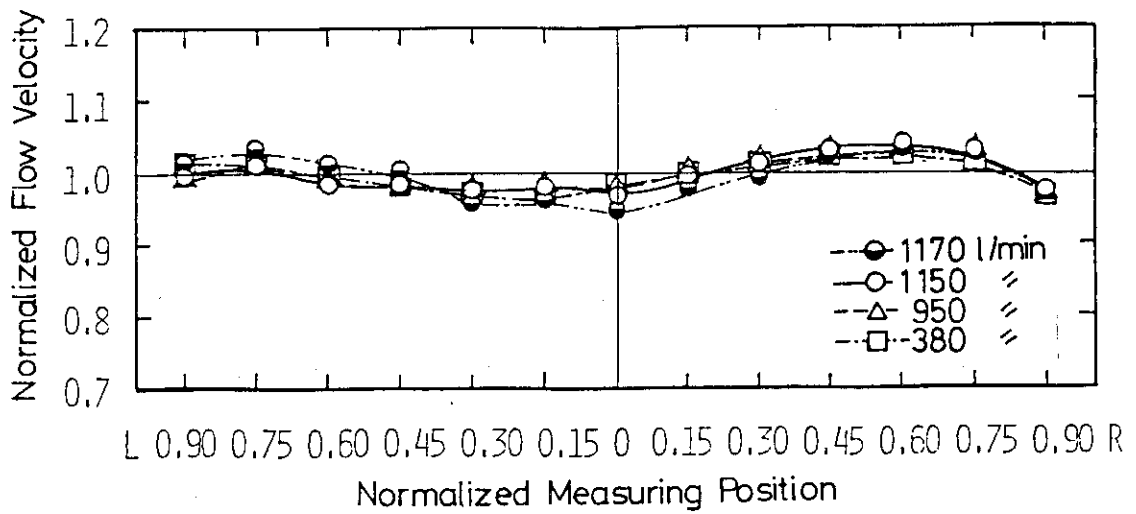


Fig. 4.1.1(s) Velocity Distribution in Subchannel 19

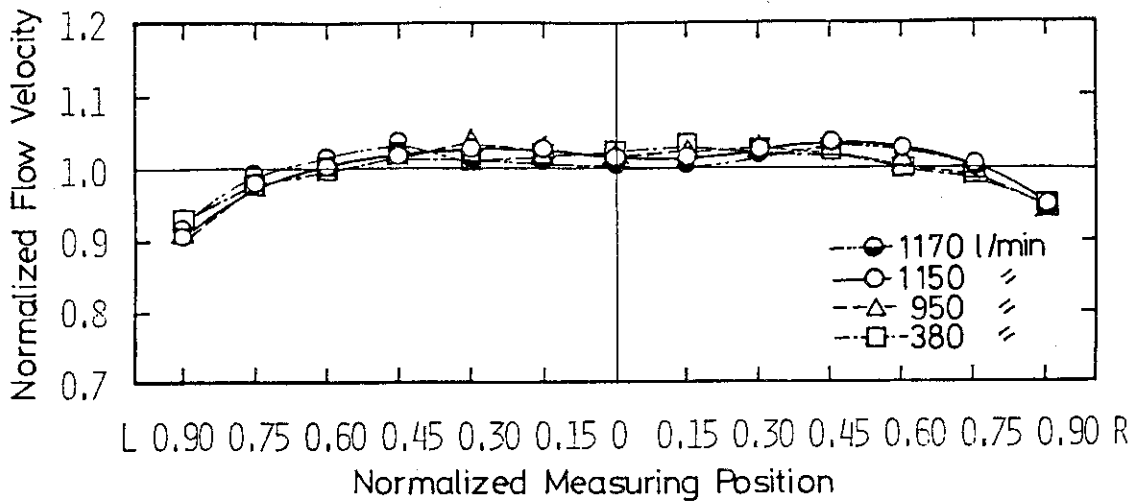


Fig. 4.1.1(t) Velocity Distribution in Subchannel 20

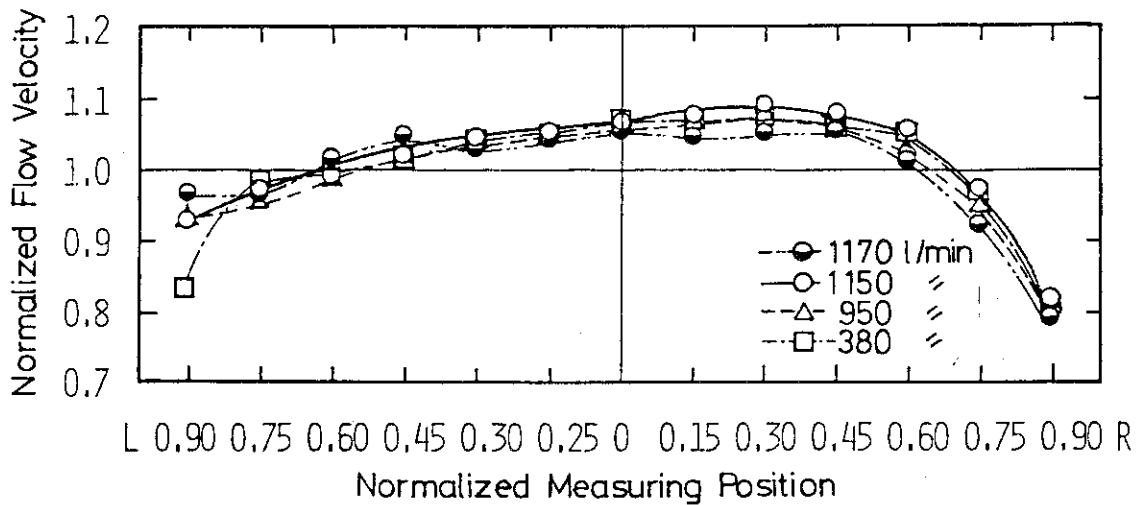


Fig. 4.1.1(u) Velocity Distribution in Subchannel 21

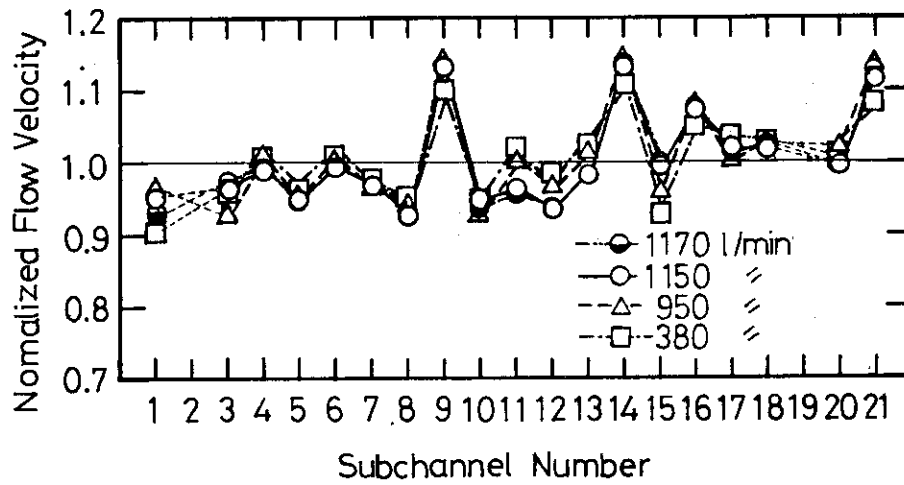


Fig. 4.2.1 Velocity Distribution of Simulated Standard Fuel Element

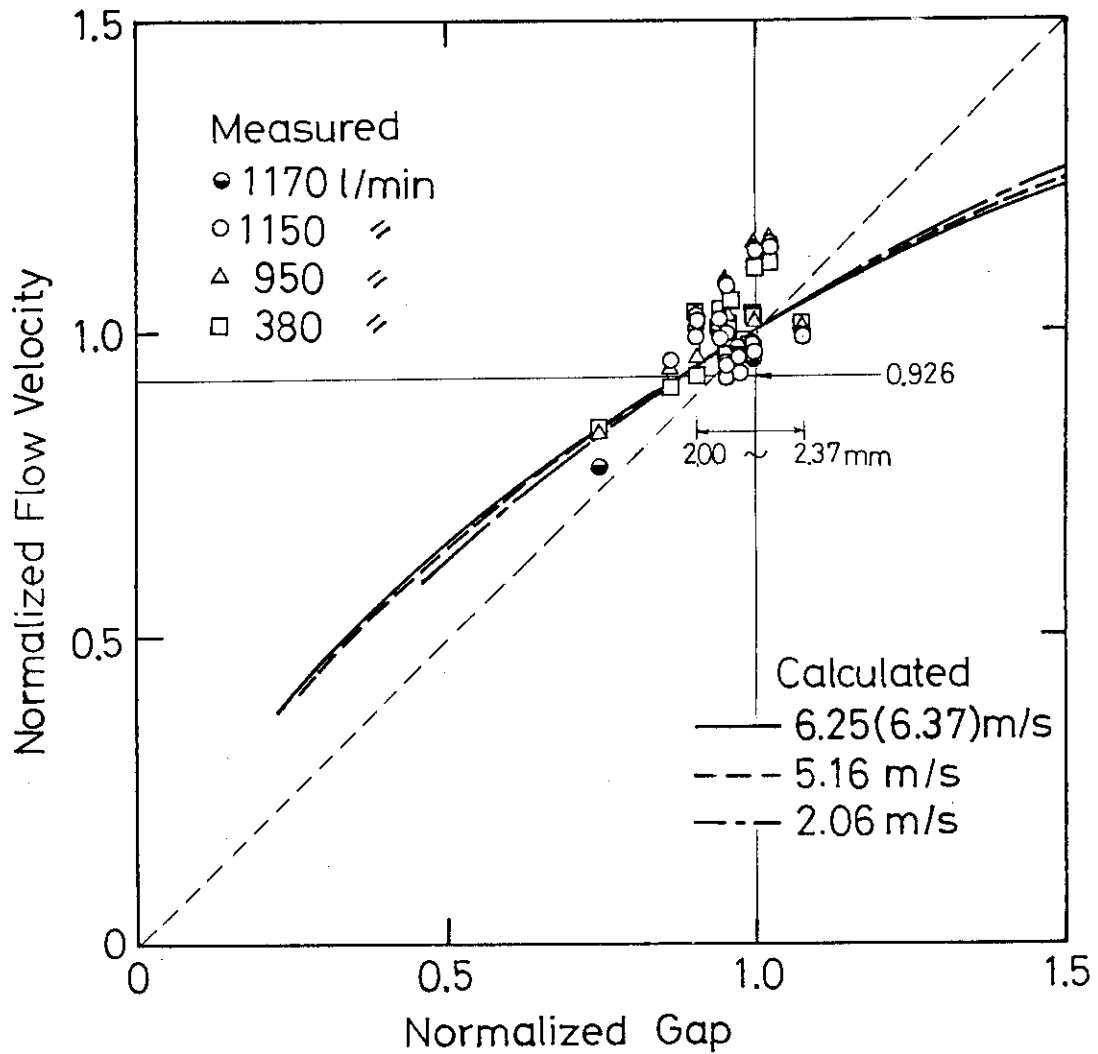


Fig. 4.2.2 Comparison between Measured Velocity in Subchannel and Calculated Velocity

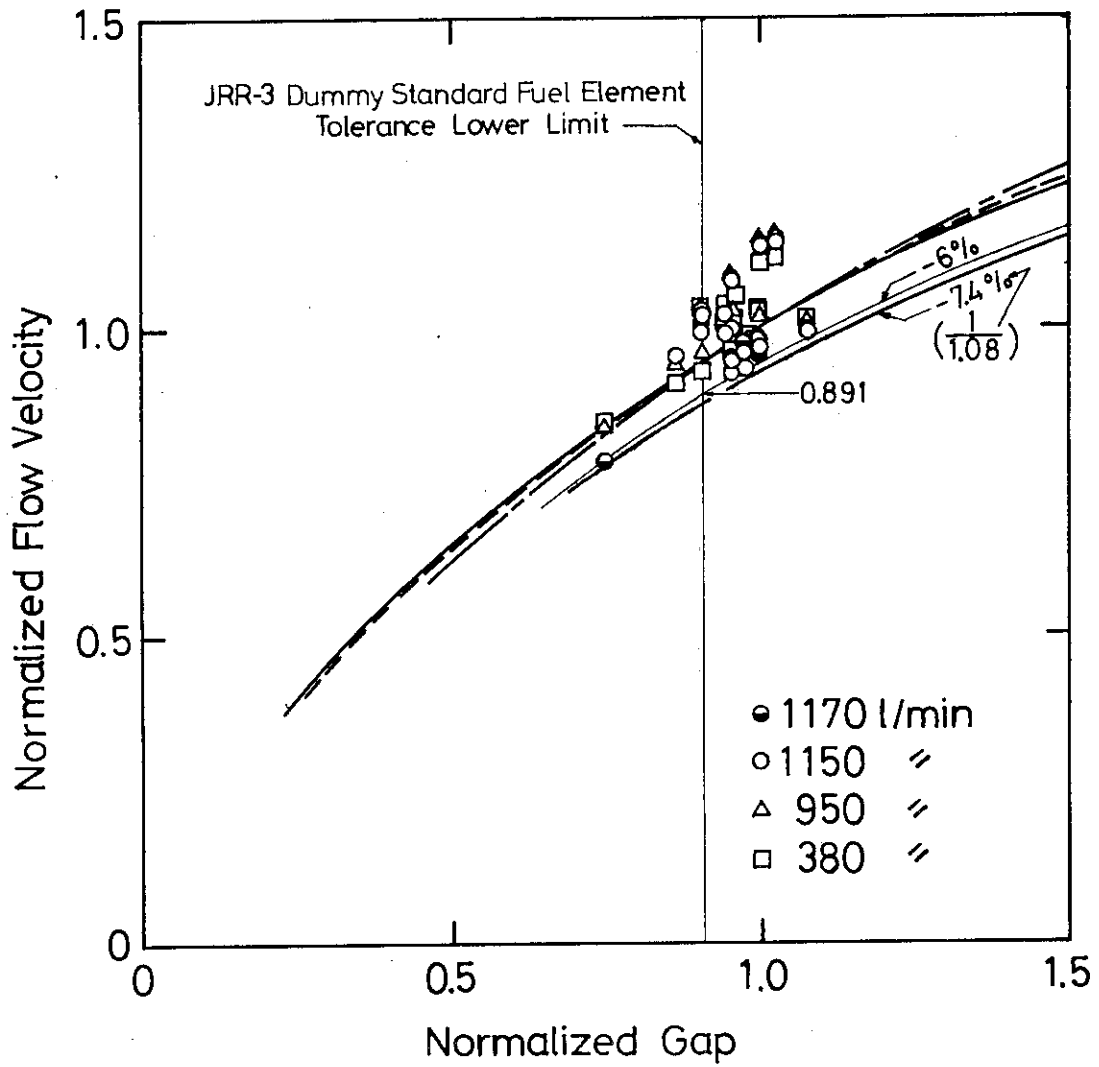


Fig. 4.2.3 Comparison of The Measured Normalized Flow Velocities with The predicted ones in Subchannel as a function of Normalized Subchannel Gap

5. 結 言

JRR-3 燃料要素単体流動試験装置を用いて模擬標準型燃料要素内の各サブチャンネルの流速を測定することによって、JRR-3 改造炉炉心熱水力設計で燃料板表面温度を評価する際に重要な、ホット・チャンネル・ファクタの一つであるサブチャンネル間流速分布因子 $F_{c(\text{micro})}$ 及び流路断面積誤差因子 F_{CA} を決定した。

チャンネル間流速分布因子 $F_{c(\text{micro})}$ として 1.08 及び流路断面積誤差因子 F_{CA} として 1.17 を得た。また、これらのホット・チャンネル・ファクタは、燃料板表面温度の評価に用いるのに十分妥当なものであることも確認された。

ここで、サブチャンネル間流速分布因子は、本実験データのバラツキを考慮して、実験データの最も厳しい値から決定した。一方、実験に用いた模擬標準型燃料要素が JRR-3 改造炉用標準型燃料要素と比べてサブチャンネルギャップが僅かに異なるため流路断面積誤差因子は、実験結果から得られた値と模擬標準型燃料要素に関して計算により求めた値とを比較し計算により求めた値の妥当性を確認した上で、JRR-3 改造炉の標準型燃料要素については計算値を採用した。

これらの結果により得られたサブチャンネル間流速分布因子及び流路断面積誤差因子は、JRR-3 改造炉炉心熱水力設計及び解析に用いられている。

謝 辞

本研究遂行に当り、前研究炉管理部佐藤一男次長及び研究炉開発室鶴田晴通安全性特性解析グループリーダーには終始激励を戴いた。また、大西信秋主任研究員及び安藤弘栄課長代理から適切かつ懇切な御指導・御助言を戴いた。

JRR-3 改造炉用標準型燃料要素については、原子炉技術グループ高柳政二氏に貴重な資料及び意見を戴いた。また、実験に当っては研究炉管理部 JRR-2 管理課佐藤猛氏に貴重な資料及び意見を戴いた。実験データの整理に当っては、日本鋼管(株)原子力部宮田佳一氏に御協力を戴いた。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 日本機械学会編, 機械工学便覧, 改訂第 6 版, 第 8 編「水力学および流体力学」, 1977 年
- (2) 数土幸夫・安藤弘栄・井川博雅・篠津和夫・大西信秋: JRR-3 改造炉の熱水力設計の基本的考え方, JAERI-M 84-079, 1984 年 5 月
- (3) 数土幸夫・井川博雅・篠津和夫・安藤弘栄: JRR-3 改造炉用炉心流動実験及び炉心流動特性評価, JAERI-M 84-119, 1984 年 6 月

5. 結 言

JRR-3 燃料要素単体流動試験装置を用いて模擬標準型燃料要素内の各サブチャンネルの流速を測定することによって、JRR-3 改造炉炉心熱水力設計で燃料板表面温度を評価する際に重要な、ホット・チャンネル・ファクタの一つであるサブチャンネル間流速分布因子 $F_{c(\text{micro})}$ 及び流路断面積誤差因子 F_{CA} を決定した。

チャンネル間流速分布因子 $F_{c(\text{micro})}$ として 1.08 及び流路断面積誤差因子 F_{CA} として 1.17 を得た。また、これらのホット・チャンネル・ファクタは、燃料板表面温度の評価に用いるのに十分妥当なものであることも確認された。

ここで、サブチャンネル間流速分布因子は、本実験データのバラツキを考慮して、実験データの最も厳しい値から決定した。一方、実験に用いた模擬標準型燃料要素が JRR-3 改造炉用標準型燃料要素と比べてサブチャンネルギャップが僅かに異なるため流路断面積誤差因子は、実験結果から得られた値と模擬標準型燃料要素に関して計算により求めた値とを比較し計算により求めた値の妥当性を確認した上で、JRR-3 改造炉の標準型燃料要素については計算値を採用した。

これらの結果により得られたサブチャンネル間流速分布因子及び流路断面積誤差因子は、JRR-3 改造炉炉心熱水力設計及び解析に用いられている。

謝 辞

本研究遂行に当り、前研究炉管理部佐藤一男次長及び研究炉開発室鶴田晴通安全性特性解析グループリーダーには終始激励を戴いた。また、大西信秋主任研究員及び安藤弘栄課長代理から適切かつ懇切な御指導・御助言を戴いた。

JRR-3 改造炉用標準型燃料要素については、原子炉技術グループ高柳政二氏に貴重な資料及び意見を戴いた。また、実験に当っては研究炉管理部 JRR-2 管理課佐藤猛氏に貴重な資料及び意見を戴いた。実験データの整理に当っては、日本鋼管(株)原子力部宮田佳一氏に御協力を戴いた。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 日本機械学会編，機械工学便覧，改訂第 6 版，第 8 編「水力学および流体力学」，1977 年
- (2) 数土幸夫・安藤弘栄・井川博雅・篠津和夫・大西信秋：JRR-3 改造炉の熱水力設計の基本的考え方，JAERI-M 84-079，1984 年 5 月
- (3) 数土幸夫・井川博雅・篠津和夫・安藤弘栄：JRR-3 改造炉用炉心流動実験及び炉心流動特性評価，JAERI-M 84-119，1984 年 6 月

5. 結 言

JRR-3 燃料要素単体流動試験装置を用いて模擬標準型燃料要素内の各サブチャンネルの流速を測定することによって、JRR-3 改造炉炉心熱水力設計で燃料板表面温度を評価する際に重要な、ホット・チャンネル・ファクタの一つであるサブチャンネル間流速分布因子 $F_{C(\text{micro})}$ 及び流路断面積誤差因子 F_{CA} を決定した。

チャンネル間流速分布因子 $F_{C(\text{micro})}$ として 1.08 及び流路断面積誤差因子 F_{CA} として 1.17 を得た。また、これらのホット・チャンネル・ファクタは、燃料板表面温度の評価に用いるのに十分妥当なものであることも確認された。

ここで、サブチャンネル間流速分布因子は、本実験データのバラツキを考慮して、実験データの最も厳しい値から決定した。一方、実験に用いた模擬標準型燃料要素が JRR-3 改造炉用標準型燃料要素と比べてサブチャンネルギャップが僅かに異なるため流路断面積誤差因子は、実験結果から得られた値と模擬標準型燃料要素に関して計算により求めた値とを比較し計算により求めた値の妥当性を確認した上で、JRR-3 改造炉の標準型燃料要素については計算値を採用した。

これらの結果により得られたサブチャンネル間流速分布因子及び流路断面積誤差因子は、JRR-3 改造炉炉心熱水力設計及び解析に用いられている。

謝 辞

本研究遂行に当り、前研究炉管理部佐藤一男次長及び研究炉開発室鶴田晴通安全性特性解析グループリーダーには終始激励を戴いた。また、大西信秋主任研究員及び安藤弘栄課長代理から適切かつ懇切な御指導・御助言を戴いた。

JRR-3 改造炉用標準型燃料要素については、原子炉技術グループ高柳政二氏に貴重な資料及び意見を戴いた。また、実験に当っては研究炉管理部 JRR-2 管理課佐藤猛氏に貴重な資料及び意見を戴いた。実験データの整理に当っては、日本鋼管(株)原子力部宮田佳一氏に御協力を戴いた。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 日本機械学会編，機械工学便覧，改訂第 6 版，第 8 編「水力学および流体力学」，1977 年
- (2) 数土幸夫・安藤弘栄・井川博雅・篠津和夫・大西信秋：JRR-3 改造炉の熱水力設計の基本的考え方，JAERI-M 84-079，1984 年 5 月
- (3) 数土幸夫・井川博雅・篠津和夫・安藤弘栄：JRR-3 改造炉用炉心流動実験及び炉心流動特性評価，JAERI-M 84-119，1984 年 6 月

Appendix A

本文中 3.4 における流動損失計算の計算式を示す。

CASE 1, $V=6.37$ m/s の場合

- a. 領域 1 (縮小部) : $K_1=0.56$
- b. 領域 2 (直流路部) : $S_2=5.195 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
 $S_4=3.064 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
 $v_2=6.37 \times (S_4/S_2)=3.76 \text{ m/s}$
 $De_2=0.07185 \text{ m}$
 $Re_2=\frac{v_2 \cdot De_2}{\nu}=\frac{3.76 \times 0.07185}{1.00 \times 10^{-6}}=2.70 \times 10^5$
 $\therefore \lambda_2=0.0178$
 $K_2=\lambda_2 \frac{l_2}{De_2}=0.0178 \times \frac{0.0365}{0.07185}=9.04 \times 10^{-3}$
- c. 領域 3 (縮小部) : $K_3=0.50$
- d. 領域 4 (直流路部) : $v_4=6.37 \text{ m/s}$
 $De_4=4.26 \times 10^{-3} \text{ m}$
 $Re_4=\frac{v_4 \cdot De_4}{\nu}=\frac{6.37 \times 4.26 \times 10^{-3}}{1.00 \times 10^{-6}}=2.71 \times 10^4$
 $\therefore \lambda_4=0.0251$
 $K_4=\lambda_4 \frac{l_4}{De_4}=0.0251 \times \frac{0.77}{4.26 \times 10^{-3}}=4.537$
- e. 領域 5 (拡大部) : $S_4/S_6=0.590$
 $\therefore K_5=\{1-(S_4/S_6)\}^2=0.17$
- f. 領域 6 (直流路部) : $S_6=5.195 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
 $v_6=6.37 \times (S_4/S_6)=3.76 \text{ m/s}$
 $De_6=0.07185 \text{ m}$
 $Re_6=\frac{v_6 \cdot De_6}{\nu}=\frac{3.76 \times 0.07185}{1.00 \times 10^{-6}}=2.70 \times 10^5$
 $\therefore \lambda_6=0.0178$
 $K_6=\lambda_6 \frac{l_6}{De_6}=0.0178 \times \frac{0.022}{0.07185}=5.45 \times 10^{-3}$
- g. 領域 7,8 (直流路部で近似) : $S_8=3.275 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
 $v_8=6.37 \times (S_4/S_8)=5.96 \text{ m/s}$
 $De_8=0.05716 \text{ m}$
 $Re_8=\frac{v_8 \cdot De_8}{\nu}=\frac{5.96 \times 0.05716}{1.00 \times 10^{-6}}=3.41 \times 10^5$

$$\therefore \lambda_8 = 0.0174$$

$$K_{7,8} = \lambda_8 \frac{l_{7,8}}{De_8} = 0.0174 \times \frac{0.245}{0.05716} = 0.0773$$

h. 領域 9 (拡大部) : $S_8/S_{10} = 0.165$

$$\therefore K_9 = \{1 - (S_8/S_{10})\}^2 = 0.70$$

i. 領域 10 (直流路部) : $S_{10} = 0.019906 \text{ m}^2$

$$v_{10} = 6.37 \times (S_4/S_{10}) = 0.98 \text{ m/s}$$

$$De_{10} = 0.1592 \text{ m}$$

$$Re_{10} = \frac{v_{10} \cdot De_{10}}{\nu} = \frac{0.98 \times 0.1592}{1.00 \times 10^{-6}} = 1.56 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_{10} = 0.0188$$

$$K_{10} = \lambda_{10} \frac{l_{10}}{De_{10}} = 0.0188 \times \frac{0.110}{0.1592} = 0.0130$$

j. 領域 11 (縮小部) : $S_{12}/S_{10} = 0.463$

$$\therefore Cc = 0.663$$

$$K_{11} = \{(1/Cc) - 1\}^2 = 0.26$$

k. 領域 12 (直流路部) : $S_{12} = 9.212 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

$$v_{12} = 6.37 \times (S_4/S_{12}) = 2.12 \text{ m/s}$$

$$De_{12} = 0.1083$$

$$Re_{12} = \frac{v_{12} \cdot De_{12}}{\nu} = \frac{2.12 \times 0.1083}{1.00 \times 10^{-6}} = 2.29 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_{12} = 0.0180$$

$$K_{12} = \lambda_{12} \frac{l_{12}}{De_{12}} = 0.0180 \times \frac{0.060}{0.1083} = 9.97 \times 10^{-3}$$

CASE 2, $V = 6.25 \text{ m/s}$ の場合

a. 領域 1 (縮小部) : $K_1 = 0.56$

b. 領域 2 (直流路部) : $v_2 = 6.25 \times (S_4/S_2) = 3.69 \text{ m/s}$

$$Re_2 = \frac{v_2 \cdot De_2}{\nu} = \frac{3.69 \times 0.07185}{1.00 \times 10^{-6}} = 2.65 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.0178$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{l_2}{De_2} = 0.0178 \times \frac{0.0365}{0.07185} = 9.04 \times 10^{-3}$$

c. 領域 3 (縮小部) : $K_3 = 0.50$

d. 領域 4 (直流路部) : $v_4 = 6.25 \text{ m/s}$

$$Re_4 = \frac{v_4 \cdot De_4}{\nu} = \frac{6.25 \times 4.26 \times 10^{-3}}{1.00 \times 10^{-6}} = 2.66 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.0252$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{l_4}{De_4} = 0.0252 \times \frac{0.77}{4.26 \times 10^{-3}} = 4.555$$

e. 領域 5 (拡大部) : $K_5 = 0.17$

f. 領域 6 (直流路部) : $v_6 = 6.25 \times (S_4/S_6) = 3.69 \text{ m/s}$

$$Re_6 = \frac{v_6 \cdot De_6}{\nu} = \frac{3.69 \times 0.07185}{1.00 \times 10^{-6}} = 2.65 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_6 = 0.0178$$

$$K_6 = \lambda_6 \frac{l_6}{De_6} = 0.0178 \times \frac{0.022}{0.07185} = 5.45 \times 10^{-3}$$

g. 領域 7, 8 (直流路部で近似) : $v_8 = 6.25 \times (S_4/S_8) = 5.85 \text{ m/s}$

$$Re_8 = \frac{v_8 \cdot De_8}{\nu} = \frac{5.85 \times 0.05716}{1.00 \times 10^{-6}} = 3.34 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_8 = 0.0175$$

$$K_{7,8} = \lambda_8 \frac{l_{7,8}}{De_8} = 0.0175 \times \frac{0.254}{0.05716} = 0.0778$$

h. 領域 9 (拡大部) : $K_9 = 0.70$

i. 領域 10 (直流路部) : $v_{10} = 6.25 \times (S_4/S_{10}) = 0.96 \text{ m/s}$

$$Re_{10} = \frac{v_{10} \cdot De_{10}}{\nu} = \frac{0.96 \times 0.1592}{1.00 \times 10^{-6}} = 1.53 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_{10} = 0.0188$$

$$K_{10} = \lambda_{10} \frac{l_{10}}{De_{10}} = 0.0188 \times \frac{0.110}{0.1592} = 0.0130$$

j. 領域 11 (縮小部) : $K_{11} = 0.26$

k. 領域 12 (直流路部) : $v_{12} = 6.25 \times (S_4/S_{12}) = 2.08 \text{ m/s}$

$$Re_{12} = \frac{v_{12} \cdot De_{12}}{\nu} = \frac{2.08 \times 0.1083}{1.00 \times 10^{-6}} = 2.25 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_{12} = 0.0181$$

$$K_{12} = \lambda_{12} \frac{l_{12}}{De_{12}} = 0.0181 \times \frac{0.060}{0.1083} = 0.0100$$

CASE 3, $V=5.16 \text{ m/s}$ の場合

a. 領域 1 (縮小部) : $K_1 = 0.56$

b. 領域 2 (直流路部) : $v_2 = 5.16 \times (S_4/S_2) = 3.04 \text{ m/s}$

$$Re_2 = \frac{v_2 \cdot De_2}{\nu} = \frac{3.04 \times 0.07185}{1.00 \times 10^{-6}} = 2.18 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.0181$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{l_2}{De_2} = 0.0181 \times \frac{0.0365}{0.07185} = 9.19 \times 10^{-3}$$

c. 領域 3 (縮小部) : $K_3=0.50$

d. 領域 4 (直流路部) : $v_4=5.16 \text{ m/s}$

$$\text{Re}_4 = \frac{v_4 \cdot \text{De}_4}{\nu} = \frac{5.16 \times 4.26 \times 10^{-3}}{1.00 \times 10^{-4}} = 2.20 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.0262$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{l_4}{\text{De}_4} = 0.0262 \times \frac{0.77}{4.26 \times 10^{-3}} = 4.736$$

e. 領域 5 (拡大部) : $K_5=0.17$

f. 領域 6 (直流路部) : $v_6=5.16 \times (S_4/S_6)=3.04 \text{ m/s}$

$$\text{Re}_6 = \frac{v_6 \cdot \text{De}_6}{\nu} = \frac{3.04 \times 0.07185}{1.00 \times 10^{-6}} = 2.18 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_6 = 0.0181$$

$$K_6 = \lambda_6 \frac{l_6}{\text{De}_6} = 0.0181 \times \frac{0.022}{0.07185} = 5.54 \times 10^{-3}$$

g. 領域 7,8 (直流路部で近似) : $v_8=5.16 \times (S_4/S_8)=4.83 \text{ m/s}$

$$\text{Re}_8 = \frac{v_8 \cdot \text{De}_8}{\nu} = \frac{4.83 \times 0.05716}{1.00 \times 10^{-6}} = 2.76 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_8 = 0.0177$$

$$K_{7,8} = \lambda_8 \frac{l_{7,8}}{\text{De}_8} = 0.0177 \times \frac{0.254}{0.05716} = 0.0788$$

h. 領域 9 (拡大部) : $K_9=0.70$

i. 領域 10 (直流路部) : $v_{10}=5.16 \times (S_4/S_{10})=0.79 \text{ m/s}$

$$\text{Re}_{10} = \frac{v_{10} \cdot \text{De}_{10}}{\nu} = \frac{0.79 \times 0.1592}{1.26 \times 10^{-5}}$$

$$\therefore \lambda_{10} = 0.0193$$

$$K_{10} = \lambda_{10} \frac{l_{10}}{\text{De}_{10}} = 0.0193 \times \frac{0.110}{0.1592} = 0.0133$$

j. 領域 11 (縮小部) : $K_{11}=0.26$

k. 領域 12 (直流路部) : $v_{12}=5.16(S_4/S_{12})=1.72 \text{ m/s}$

$$\text{Re}_{12} = \frac{v_{12} \cdot \text{De}_{12}}{\nu} = \frac{1.72 \times 0.1083}{1.00 \times 10^{-6}} = 1.86 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_{12} = 0.0184$$

$$K_{12} = \lambda_{12} \frac{l_{12}}{\text{De}_{12}} = 0.0184 \times \frac{0.060}{0.1083} = 0.0102$$

CASE 4. $V=2.06 \text{ m/s}$ の場合

a. 領域 1 (縮小部) : $K_1=0.56$

b. 領域 2 (直流路部) : $v_2=2.06 \times (S_4/S_2)=1.21 \text{ m/s}$

$$\text{Re}_2 = \frac{v_2 \cdot \text{De}_2}{\nu} = \frac{1.21 \times 0.07185}{1.00 \times 10^{-6}} = 8.69 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_2 = 0.0203$$

$$K_2 = \lambda_2 \frac{l_2}{\text{De}_2} = 0.0203 \times \frac{0.0365}{0.07185} = 0.0103$$

c. 領域 3 (縮小部)

$$: K_3 = 0.50$$

d. 領域 4 (直流路部)

$$: v_4 = 2.06 \text{ m/s}$$

$$\text{Re}_4 = \frac{v_4 \cdot \text{De}_4}{\nu} = \frac{2.06 \times 4.26 \times 10^{-3}}{1.00 \times 10^{-6}} = 8.78 \times 10^3$$

$$\therefore \lambda_4 = 0.0325$$

$$K_4 = \lambda_4 \frac{l_4}{\text{De}_4} = 0.0325 \times \frac{0.77}{4.26 \times 10^{-3}} = 5.874$$

e. 領域 5 (拡大部)

$$: K_5 = 0.17$$

f. 領域 6 (直流路部)

$$: v_6 = 2.06 \times (S_4/S_6) = 1.21 \text{ m/s}$$

$$\text{Re}_6 = \frac{v_6 \cdot \text{De}_6}{\nu} = \frac{1.21 \times 0.07185}{1.00 \times 10^{-6}} = 8.69 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_6 = 0.0203$$

$$K_6 = \lambda_6 \frac{l_6}{\text{De}_6} = 0.0203 \times \frac{0.022}{0.07185} = 6.22 \times 10^{-3}$$

g. 領域 7, 8 (直流路部で近似) : $v_8 = 2.06 \times (S_4/S_8) = 1.93 \text{ m/s}$

$$\text{Re}_8 = \frac{v_8 \cdot \text{De}_8}{\nu} = \frac{1.93 \times 0.05716}{1.00 \times 10^{-6}} = 1.10 \times 10^5$$

$$\therefore \lambda_8 = 0.0196$$

$$K_{7,8} = \lambda_8 \frac{l_{7,8}}{\text{De}_8} = 0.196 \times \frac{0.254}{0.05716} = 0.871$$

h. 領域 9 (拡大部)

$$: K_9 = 0.70$$

i. 領域 10 (直流路部)

$$: v_{10} = 2.06 \times (S_4/S_{10}) = 0.32 \text{ m/s}$$

$$\text{Re}_{10} = \frac{v_{10} \cdot \text{De}_{10}}{\nu} = \frac{0.32 \times 0.1592}{1.00 \times 10^{-6}} = 5.09 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_{10} = 0.0222$$

$$K_{10} = \lambda_{10} \frac{l_{10}}{\text{De}_{10}} = 0.0222 \times \frac{0.110}{0.1592} = 0.0153$$

j. 領域 11 (縮小部)

$$: K_{11} = 0.26$$

k. 領域 12 (直流路部)

$$: v_{12} = 2.06 \times (S_4/S_{12}) = 0.69 \text{ m/s}$$

$$\text{Re}_{12} = \frac{v_{12} \cdot \text{De}_{12}}{\nu} = \frac{0.69 \times 0.1083}{1.00 \times 10^{-6}} = 7.47 \times 10^4$$

$$\therefore \lambda_{12} = 0.0208$$

$$K_{12} = \lambda_{12} \frac{l_{12}}{\text{De}_{12}} = 0.0208 \times \frac{0.060}{0.1083} = 0.0115$$

Appendix B

本文中 3.5.2 における Subchannel Gap が基準値からずれた際の流速の計算例を示す。

```

1000 REM -----
1010 REM
1020 REM          Velocity
1030 REM
1040 REM
1050 REM -----
1060 READ A0,B0,V, RAM
1070 DATA 2.20,66.6,6.25,0.0260
1080 DE=4*A0*1E-3*B0*1E-3/(2*(A0+B0)*1E-3)
1090 PRINT "De=";DE
1100 RE=V*DE/1.00E-6
1110 GOSUB 1490
1120 K3=0.5
1130 K5=0.17
1140 K=RAM*0.77/DE
1150 DPSUB=(K3+K+K5)*V^2/(2*9.8)
1160 REM -----
1170 DIM A1(283),DE1(283),K4(283),V1(283),RAM1(283),RE1(283),DP(283),Z(283)
1180 DIM DP3(283),DP4(283),DP5(283)
1190 A1(1)=0.50
1200 V2=V*A1(1)/A0
1210 DE1(1)=4*A1(1)*1E-3*B0*1E-3/(2*(A1(1)+B0)*1E-3)
1220 RE=V2*DE1(1)/1.00E-6
1230 GOSUB 1490
1240 REM -----
1250 RAM1(1)=RAM
1260 FOR I=1 TO 282
1270 DE1(I)=4*A1(I)*1E-3*B0*1E-3/(2*(A1(I)+B0)*1E-3)
1280 PRINT "De=";DE1(I)
1290 K4(I)=RAM1(I)*0.77/DE1(I)
1300 V1(I)=SQR(2*9.8*DPSUB/(K3+K4(I)+K5))
1310 IF A1(I)=A0 THEN V1(I)=V
1320 RE1(I)=V1(I)*DE1(I)/1.00E-6
1330 GOSUB 1460
1340 IF ABS(RAM1(I)-RAM)<=0.0001 THEN GOTO 1370 ELSE GOTO 1350
1350 RAM1(I)=RAM
1360 GOTO 1290
1370 A1(I+1)=A1(I)+0.01
1380 RAM1(I+1)=RAM1(I)
1390 DP(I)=(K3+K4(I)+K5)*V1(I)^2/(2*9.8)
1400 DP3(I)=K3*V1(I)^2/(2*9.8)
1410 DP4(I)=K4(I)*V1(I)^2/(2*9.8)
1420 DP5(I)=K5*V1(I)^2/(2*9.8)
1430 Z(I)=V1(I)/V
1440 NEXT I
1450 GOTO 1740
1460 REM ----- COLEBROOK'S FUNCTION SUBROUTINE -----
1470 RAM=RAM1(I)
1480 RE=RE1(I)
1490 K=0
1500 A=1/SQR(RAM)
1510 B=-2*(LOG((0.0004/3.71)+(2.51/(RE*SQR(RAM)))))/LOG(10))
1520 C=A-B
1530 IF C>0 THEN DRAM=0.00001 ELSE DRAM=-0.00001
1540 IF ABS(C)<=0.001 THEN GOTO 1590
1550 RAM=RAM+DRAM
1560 K=K+1
1570 IF K>=1000 THEN GOTO 1720
1580 GOTO 1500
1720 RETURN

```

```

1730 REM -----
1740 OPEN #1:$LP,SHARED
1751 OUTPUT #1:"V=";V;"(m/s)"
1752 OUTPUT #1:"Δ P sub=";DPSUB;"(m)"
1753 OUTPUT #1
1754 OUTPUT #1
1755 OUTPUT #1:"  Gap          De          V'          V'/V          λ          Re"
1756 OUTPUT #1:"  (mm)          (m)          (m/s)         (-)          (-)          (-)"
1757 OUTPUT #1:"-----"
1760 FOR I=1 TO 282
1770 OUTPUT #1 USING 1771:A1(I),DE1(I),V1(I),Z(I),RAM1(I),RE1(I)
1771 IMAGE : " ";9.Z9;" "; " ";Z.ZZ9EEEE;" "; " ";Z.Z9;" "; " ";9.ZZ9;" "
;" ";9.ZZZZ9;" "; " ";ZZZZZ.9
1780 NEXT I
1860 CLOSE #1
1870 END

```

$V = 6.25$ (m/s)
 $\Delta P_{sub} = 10.393$ (m)

Gap (mm)	De (m)	V' (m/s)	V'/V (-)	λ (-)	Re (-)
0.50	9.925E-04	2.33	0.372	0.04745	2313.6
0.51	1.012E-03	2.36	0.377	0.04709	2391.3
0.52	1.031E-03	2.39	0.383	0.04661	2473.4
0.53	1.051E-03	2.43	0.389	0.04614	2556.8
0.54	1.071E-03	2.46	0.394	0.04568	2641.3
0.55	1.090E-03	2.49	0.399	0.04523	2727.1
0.56	1.110E-03	2.53	0.405	0.04480	2813.8
0.57	1.130E-03	2.56	0.410	0.04438	2901.7
0.58	1.149E-03	2.60	0.416	0.04398	2990.4
0.59	1.169E-03	2.63	0.421	0.04359	3080.1
0.60	1.189E-03	2.66	0.426	0.04321	3171.0
0.61	1.208E-03	2.69	0.431	0.04284	3262.9
0.62	1.228E-03	2.73	0.437	0.04248	3355.9
0.63	1.248E-03	2.76	0.442	0.04214	3449.4
0.64	1.267E-03	2.79	0.447	0.04180	3544.4
0.65	1.287E-03	2.82	0.452	0.04148	3639.8
0.66	1.307E-03	2.85	0.457	0.04116	3736.6
0.67	1.326E-03	2.89	0.462	0.04085	3834.3
0.68	1.346E-03	2.92	0.467	0.04055	3932.9
0.69	1.365E-03	2.95	0.472	0.04026	4032.2
0.70	1.385E-03	2.98	0.477	0.03997	4132.9
0.71	1.405E-03	3.01	0.482	0.03969	4234.4
0.72	1.424E-03	3.04	0.487	0.03942	4336.6
0.73	1.444E-03	3.07	0.491	0.03916	4439.6
0.74	1.463E-03	3.10	0.496	0.03890	4543.8
0.75	1.483E-03	3.13	0.501	0.03865	4648.7
0.76	1.502E-03	3.16	0.506	0.03841	4754.2
0.77	1.522E-03	3.19	0.510	0.03817	4860.9
0.78	1.541E-03	3.22	0.515	0.03793	4968.9
0.79	1.561E-03	3.25	0.520	0.03770	5077.4
0.80	1.581E-03	3.28	0.524	0.03748	5186.4
0.81	1.600E-03	3.30	0.529	0.03726	5296.7
0.82	1.620E-03	3.33	0.534	0.03705	5407.4
0.83	1.639E-03	3.36	0.538	0.03684	5519.2
0.84	1.659E-03	3.39	0.543	0.03664	5631.5
0.85	1.678E-03	3.42	0.547	0.03644	5744.9
0.86	1.698E-03	3.45	0.552	0.03624	5859.4
0.87	1.717E-03	3.47	0.556	0.03605	5974.3
0.88	1.737E-03	3.50	0.560	0.03586	6090.3
0.89	1.756E-03	3.53	0.565	0.03568	6206.6
0.90	1.776E-03	3.56	0.569	0.03550	6324.0
0.91	1.795E-03	3.58	0.574	0.03532	6442.4
0.92	1.814E-03	3.61	0.578	0.03515	6561.1
0.93	1.834E-03	3.64	0.582	0.03498	6680.8
0.94	1.853E-03	3.66	0.587	0.03481	6801.6
0.95	1.873E-03	3.69	0.591	0.03464	6923.4
0.96	1.892E-03	3.72	0.595	0.03448	7045.4
0.97	1.912E-03	3.74	0.599	0.03433	7167.4
0.98	1.931E-03	3.77	0.603	0.03417	7291.4
0.99	1.950E-03	3.80	0.608	0.03402	7415.4

Gap (mm)	De (m)	V' (m/s)	V'/V (-)	λ (-)	Re (-)
1.00	1.970E-03	3.82	0.612	0.03387	7540.4
1.01	1.989E-03	3.85	0.616	0.03372	7666.5
1.02	2.009E-03	3.87	0.620	0.03358	7792.4
1.03	2.028E-03	3.90	0.624	0.03344	7919.4
1.04	2.048E-03	3.92	0.628	0.03330	8047.3
1.05	2.067E-03	3.95	0.632	0.03316	8176.2
1.06	2.086E-03	3.97	0.636	0.03303	8304.9
1.07	2.106E-03	4.00	0.640	0.03290	8434.5
1.08	2.125E-03	4.02	0.644	0.03277	8565.1
1.09	2.144E-03	4.05	0.648	0.03264	8696.6
1.10	2.164E-03	4.07	0.652	0.03251	8829.1
1.11	2.183E-03	4.10	0.656	0.03239	8961.2
1.12	2.202E-03	4.12	0.660	0.03227	9094.3
1.13	2.222E-03	4.15	0.664	0.03215	9228.2
1.14	2.241E-03	4.17	0.668	0.03203	9363.1
1.15	2.260E-03	4.20	0.672	0.03191	9498.9
1.16	2.280E-03	4.22	0.676	0.03180	9634.2
1.17	2.299E-03	4.24	0.679	0.03168	9771.8
1.18	2.318E-03	4.27	0.683	0.03157	9908.9
1.19	2.338E-03	4.29	0.687	0.03146	10046.8
1.20	2.357E-03	4.31	0.690	0.03146	10168.9
1.21	2.376E-03	4.34	0.694	0.03126	10322.3
1.21	2.396E-03	4.36	0.698	0.03115	10462.8
1.22	2.415E-03	4.39	0.702	0.03104	10604.3
1.23	2.434E-03	4.40	0.705	0.03104	10728.8
1.24	2.453E-03	4.43	0.709	0.03085	10884.9
1.25	2.473E-03	4.45	0.713	0.03074	11028.9
1.26	2.492E-03	4.47	0.716	0.03074	11155.2
1.27	2.511E-03	4.50	0.720	0.03056	11312.8
1.28	2.530E-03	4.52	0.724	0.03045	11459.4
1.29	2.550E-03	4.54	0.726	0.03045	11587.4
1.30	2.569E-03	4.57	0.731	0.03028	11746.3
1.31	2.588E-03	4.58	0.733	0.03028	11875.4
1.32	2.607E-03	4.61	0.738	0.03010	12038.2
1.33	2.627E-03	4.63	0.741	0.03010	12168.4
1.34	2.646E-03	4.66	0.745	0.02992	12333.3
1.35	2.665E-03	4.67	0.748	0.02992	12464.6
1.36	2.684E-03	4.70	0.752	0.02975	12629.6
1.37	2.703E-03	4.71	0.755	0.02975	12762.0
1.38	2.723E-03	4.74	0.759	0.02958	12929.0
1.39	2.742E-03	4.76	0.762	0.02958	13062.4
1.40	2.761E-03	4.79	0.766	0.02942	13229.4
1.41	2.780E-03	4.80	0.768	0.02942	13364.0
1.42	2.799E-03	4.83	0.773	0.02926	13532.9
1.43	2.819E-03	4.84	0.775	0.02926	13668.5
1.44	2.838E-03	4.87	0.780	0.02910	13839.4
1.45	2.857E-03	4.89	0.782	0.02910	13976.0
1.46	2.876E-03	4.91	0.786	0.02895	14146.6
1.47	2.895E-03	4.93	0.789	0.02895	14284.3
1.48	2.914E-03	4.95	0.793	0.02880	14456.8
1.49	2.933E-03	4.97	0.795	0.02880	14595.5

Gap (mm)	De (m)	V' (m/s)	V'/V (-)	λ (-)	Re (-)
1.50	2.953E-03	5.00	0.800	0.02866	14767.5
1.51	2.972E-03	5.01	0.802	0.02866	14907.2
1.52	2.991E-03	5.04	0.806	0.02852	15081.0
1.53	3.010E-03	5.05	0.809	0.02852	15221.7
1.54	3.029E-03	5.08	0.813	0.02838	15397.3
1.55	3.048E-03	5.09	0.815	0.02838	15539.0
1.56	3.067E-03	5.12	0.819	0.02825	15713.9
1.57	3.086E-03	5.13	0.821	0.02825	15856.5
1.58	3.105E-03	5.16	0.825	0.02812	16033.2
1.59	3.124E-03	5.17	0.828	0.02812	16176.8
1.60	3.143E-03	5.20	0.832	0.02799	16355.2
1.61	3.163E-03	5.21	0.834	0.02799	16499.7
1.62	3.182E-03	5.24	0.838	0.02786	16679.8
1.63	3.201E-03	5.25	0.840	0.02786	16825.3
1.64	3.220E-03	5.28	0.844	0.02774	17004.4
1.65	3.239E-03	5.29	0.847	0.02774	17150.8
1.66	3.258E-03	5.31	0.851	0.02762	17331.6
1.67	3.277E-03	5.33	0.853	0.02762	17478.9
1.68	3.296E-03	5.35	0.857	0.02750	17661.3
1.69	3.315E-03	5.37	0.859	0.02750	17809.5
1.70	3.334E-03	5.39	0.863	0.02738	17993.6
1.71	3.353E-03	5.41	0.865	0.02738	18142.7
1.72	3.372E-03	5.43	0.869	0.02727	18325.5
1.73	3.391E-03	5.44	0.871	0.02727	18475.5
1.74	3.410E-03	5.47	0.875	0.02717	18659.7
1.75	3.429E-03	5.48	0.877	0.02717	18810.6
1.76	3.448E-03	5.50	0.881	0.02706	18996.5
1.77	3.467E-03	5.52	0.883	0.02706	19148.2
1.78	3.486E-03	5.54	0.887	0.02695	19335.7
1.79	3.505E-03	5.55	0.889	0.02695	19488.3
1.80	3.524E-03	5.57	0.891	0.02695	19641.2
1.81	3.543E-03	5.60	0.896	0.02680	19844.0
1.82	3.562E-03	5.61	0.898	0.02680	19997.9
1.83	3.581E-03	5.62	0.900	0.02680	20152.1
1.84	3.599E-03	5.65	0.904	0.02665	20357.6
1.85	3.618E-03	5.66	0.906	0.02665	20512.7
1.86	3.637E-03	5.68	0.909	0.02665	20668.1
1.87	3.656E-03	5.70	0.913	0.02650	20876.4
1.88	3.675E-03	5.72	0.915	0.02650	21032.7
1.89	3.694E-03	5.73	0.917	0.02650	21189.4
1.90	3.713E-03	5.76	0.921	0.02636	21396.7
1.91	3.732E-03	5.77	0.923	0.02636	21554.3
1.92	3.751E-03	5.78	0.926	0.02636	21712.1
1.93	3.770E-03	5.81	0.930	0.02622	21922.1
1.94	3.789E-03	5.82	0.932	0.02622	22080.8
1.95	3.807E-03	5.84	0.934	0.02622	22239.8
1.96	3.826E-03	5.86	0.938	0.02608	22452.4
1.97	3.845E-03	5.87	0.940	0.02608	22612.3
1.98	3.864E-03	5.89	0.942	0.02608	22772.5
1.99	3.883E-03	5.91	0.946	0.02595	22983.7

Gap (mm)	De (m)	V' (m/s)	V' / V (-)	λ (-)	Re (-)
2.00	3.902E-03	5.93	0.948	0.02595	23144.8
2.01	3.921E-03	5.94	0.951	0.02595	23306.1
2.02	3.939E-03	5.96	0.955	0.02582	23519.8
2.03	3.958E-03	5.98	0.957	0.02582	23682.0
2.04	3.977E-03	5.99	0.959	0.02582	23844.4
2.05	3.996E-03	6.01	0.963	0.02570	24056.5
2.06	4.015E-03	6.03	0.965	0.02570	24219.8
2.07	4.034E-03	6.04	0.967	0.02570	24383.3
2.08	4.052E-03	6.06	0.971	0.02558	24597.7
2.09	4.071E-03	6.08	0.973	0.02558	24762.1
2.10	4.090E-03	6.09	0.975	0.02558	24926.7
2.11	4.109E-03	6.11	0.979	0.02546	25143.4
2.12	4.127E-03	6.13	0.980	0.02546	25308.9
2.13	4.146E-03	6.14	0.982	0.02546	25474.6
2.14	4.165E-03	6.16	0.986	0.02534	25693.6
2.15	4.184E-03	6.18	0.988	0.02534	25860.2
2.16	4.203E-03	6.19	0.990	0.02534	26026.9
2.17	4.221E-03	6.21	0.994	0.02523	26243.8
2.18	4.240E-03	6.22	0.996	0.02523	26411.3
2.19	4.259E-03	6.24	0.998	0.02523	26579.2
2.20	4.278E-03	6.25	1.000	0.02512	26798.2
2.21	4.296E-03	6.27	1.004	0.02512	26966.8
2.22	4.315E-03	6.28	1.006	0.02512	27135.6
2.23	4.334E-03	6.31	1.009	0.02501	27356.8
2.24	4.352E-03	6.32	1.011	0.02501	27526.4
2.25	4.371E-03	6.33	1.013	0.02501	27696.3
2.26	4.390E-03	6.34	1.015	0.02501	27866.4
2.27	4.409E-03	6.37	1.019	0.02487	28105.0
2.28	4.427E-03	6.38	1.021	0.02487	28275.9
2.29	4.446E-03	6.39	1.023	0.02487	28447.1
2.30	4.465E-03	6.40	1.025	0.02487	28618.5
2.31	4.483E-03	6.43	1.029	0.02474	28855.4
2.32	4.502E-03	6.44	1.031	0.02474	29027.6
2.33	4.521E-03	6.45	1.033	0.02474	29200.0
2.34	4.539E-03	6.47	1.035	0.02474	29372.7
2.35	4.558E-03	6.49	1.039	0.02461	29612.7
2.36	4.577E-03	6.50	1.041	0.02461	29786.2
2.37	4.595E-03	6.51	1.043	0.02461	29959.9
2.38	4.614E-03	6.53	1.044	0.02461	30133.8
2.39	4.633E-03	6.55	1.049	0.02448	30377.0
2.40	4.651E-03	6.56	1.050	0.02448	30551.7
2.41	4.670E-03	6.57	1.052	0.02448	30726.7
2.42	4.688E-03	6.59	1.054	0.02448	30901.8
2.43	4.707E-03	6.61	1.058	0.02436	31142.7
2.44	4.726E-03	6.62	1.060	0.02436	31318.6
2.45	4.744E-03	6.63	1.062	0.02436	31494.7
2.46	4.763E-03	6.64	1.063	0.02436	31671.1
2.47	4.781E-03	6.67	1.067	0.02424	31914.9
2.48	4.800E-03	6.68	1.069	0.02424	32092.0
2.49	4.819E-03	6.69	1.071	0.02424	32269.3

Gap (mm)	De (m)	V' (m/s)	V'/V (-)	λ (-)	Re (-)
2.50	4.837E-03	6.70	1.073	0.02424	32446.9
2.51	4.856E-03	6.73	1.077	0.02412	32693.6
2.52	4.874E-03	6.74	1.078	0.02412	32871.9
2.53	4.893E-03	6.75	1.080	0.02412	33050.4
2.54	4.911E-03	6.76	1.082	0.02412	33229.1
2.55	4.930E-03	6.78	1.086	0.02401	33472.9
2.56	4.949E-03	6.79	1.087	0.02401	33652.3
2.57	4.967E-03	6.81	1.089	0.02401	33832.0
2.58	4.986E-03	6.82	1.091	0.02401	34011.8
2.59	5.004E-03	6.84	1.095	0.02390	34258.3
2.60	5.023E-03	6.85	1.096	0.02390	34438.9
2.61	5.041E-03	6.86	1.098	0.02390	34619.6
2.62	5.060E-03	6.87	1.100	0.02390	34800.6
2.63	5.078E-03	6.90	1.104	0.02379	35049.8
2.64	5.097E-03	6.91	1.105	0.02379	35231.5
2.65	5.115E-03	6.92	1.107	0.02379	35413.3
2.66	5.134E-03	6.93	1.109	0.02379	35595.4
2.67	5.152E-03	6.94	1.110	0.02379	35777.6
2.68	5.171E-03	6.97	1.115	0.02366	36042.9
2.69	5.189E-03	6.98	1.116	0.02366	36225.9
2.70	5.208E-03	6.99	1.118	0.02366	36409.1
2.71	5.226E-03	7.00	1.120	0.02366	36592.5
2.72	5.245E-03	7.01	1.121	0.02366	36776.0
2.73	5.263E-03	7.03	1.125	0.02354	37038.5
2.74	5.281E-03	7.04	1.127	0.02354	37222.8
2.75	5.300E-03	7.05	1.129	0.02354	37407.3
2.76	5.318E-03	7.06	1.130	0.02354	37591.9
2.77	5.337E-03	7.07	1.132	0.02354	37776.7
2.78	5.355E-03	7.10	1.136	0.02341	38049.5
2.79	5.374E-03	7.11	1.138	0.02341	38235.1
2.80	5.392E-03	7.12	1.139	0.02341	38420.9
2.81	5.410E-03	7.13	1.141	0.02341	38606.8
2.82	5.429E-03	7.14	1.143	0.02341	38792.9
2.83	5.447E-03	7.16	1.147	0.02330	39055.6
2.84	5.466E-03	7.17	1.148	0.02330	39242.3
2.85	5.484E-03	7.18	1.150	0.02330	39429.3
2.86	5.502E-03	7.19	1.151	0.02330	39616.4
2.87	5.521E-03	7.20	1.153	0.02330	39803.7
2.88	5.539E-03	7.23	1.157	0.02318	40076.8
2.89	5.557E-03	7.24	1.159	0.02318	40264.8
2.90	5.576E-03	7.25	1.160	0.02318	40453.0
2.91	5.594E-03	7.26	1.162	0.02318	40641.4
2.92	5.613E-03	7.27	1.163	0.02318	40829.9
2.93	5.631E-03	7.29	1.167	0.02307	41099.1
2.94	5.649E-03	7.30	1.169	0.02307	41288.3
2.95	5.668E-03	7.31	1.170	0.02307	41477.7
2.96	5.686E-03	7.32	1.172	0.02307	41667.2
2.97	5.704E-03	7.33	1.173	0.02307	41856.9
2.98	5.723E-03	7.36	1.177	0.02296	42129.4
2.99	5.741E-03	7.37	1.179	0.02296	42319.7

Gap (mm)	De (m)	V' (m/s)	V'/V (-)	λ (-)	Re (-)
3.00	5.759E-03	7.38	1.180	0.02296	42510.2
3.01	5.777E-03	7.39	1.182	0.02296	42700.9
3.02	5.796E-03	7.39	1.183	0.02296	42891.7
3.03	5.814E-03	7.40	1.185	0.02296	43082.7
3.04	5.832E-03	7.43	1.189	0.02284	43366.8
3.05	5.851E-03	7.44	1.191	0.02284	43558.4
3.06	5.869E-03	7.45	1.192	0.02284	43750.2
3.07	5.887E-03	7.46	1.194	0.02284	43942.2
3.08	5.905E-03	7.47	1.195	0.02284	44134.3
3.09	5.924E-03	7.48	1.197	0.02284	44326.6
3.10	5.942E-03	7.50	1.201	0.02272	44614.7
3.11	5.960E-03	7.51	1.202	0.02272	44807.7
3.12	5.979E-03	7.52	1.204	0.02272	45000.8
3.13	5.997E-03	7.53	1.205	0.02272	45194.1
3.14	6.015E-03	7.54	1.207	0.02272	45387.5
3.15	6.033E-03	7.55	1.208	0.02272	45581.1
3.16	6.051E-03	7.57	1.212	0.02261	45865.0
3.17	6.070E-03	7.58	1.214	0.02261	46059.2
3.18	6.088E-03	7.59	1.215	0.02261	46253.5
3.19	6.106E-03	7.60	1.216	0.02261	46448.0
3.20	6.124E-03	7.61	1.218	0.02261	46642.7
3.21	6.142E-03	7.62	1.219	0.02261	46837.5
3.22	6.161E-03	7.65	1.224	0.02249	47133.6
3.23	6.179E-03	7.65	1.225	0.02249	47329.0
3.24	6.197E-03	7.66	1.226	0.02249	47524.6
3.25	6.215E-03	7.67	1.228	0.02249	47720.3
3.26	6.233E-03	7.68	1.229	0.02249	47916.2
3.27	6.252E-03	7.69	1.231	0.02249	48112.2
3.28	6.270E-03	7.70	1.232	0.02249	48308.4
3.29	6.288E-03	7.72	1.236	0.02237	48609.1
3.30	6.306E-03	7.73	1.238	0.02237	48805.9