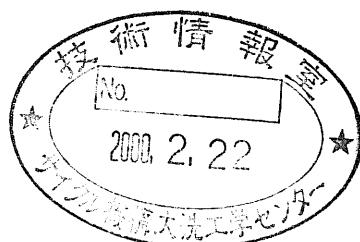


分冊

インターラッパフロー自然循環水流動可視化実験  
一ボタン型ラッパ管パッド形状における試験および解析結果一  
(研究報告)

1999年4月



核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
1999

インターラッパーフロー自然循環水流動可視化実験  
—ボタン型ラッパー管パッド形状における試験および解析結果—  
(研究報告書)

安田 明洋<sup>\*</sup>, 宮越 博幸<sup>\*</sup>, 林 謙二<sup>\*\*</sup>,  
西村 元彦<sup>\*</sup>, 上出 英樹<sup>\*</sup>, 菅田 公一<sup>\*\*\*</sup>

要 旨

高速炉の自然循環崩壊熱除去時において、上部プレナムに浸漬された崩壊熱除去用の炉内冷却器(Direct Heat Exchanger,以下DHX)から流出する低温のナトリウムが炉心燃料集合体ラッパー管の間に形成されたギャップ部に流入し、燃料集合体をラッパー管の外側から冷却する現象 {インターラッパーフロー (IWF) | が注目されている。これまでに7体の集合体により炉心を部分的に模擬したナトリウム試験体によりその温度場の特性を中心に明らかにしてきた。本研究では、炉心全体でのIWFの流動特性に着目し、径方向反射体を含めて炉心を模擬した水流動試験装置TRIF (Test Rig for Inter-wrapper Flow) を用いて可視化を中心とする試験を実施した。試験体の模擬ラッパー管は、透明アクリル、透明ガラスヒーター等の部材で構成されており、六角断面のラッパー管に挟まれた複雑な流路をもつIWFに対して、流況可視化による流速計測技術の適用が可能となっている。

IWFに対して大きな影響を及ぼすと考えられるラッパー管同士のクリアランスを確保するためのパッド形状は、本報では「常陽」やPHENIXで採用されているボタン型とした体系を対象として、温度分布測定、流況可視化を行った。また、上部プレナムと炉心槽とをつなぐ流路などを設け、炉心周りの形状をパラメータとした。本実験により、IWFのフローパターンを明らかにすると共に、流れの可視化画像処理による速度分布の定量化を行った。また、ボタン型スペーサーパッドの体系ではパッド部を通り抜ける流れが支配的となり、炉心槽内の温度分布に対して、炉心周辺の幾何形状パラメータの変更による顕著な影響はないことが明らかとなった。

IWFに関する解析手法の検証として流体の体積占有率と障害物 (ここではラッパー管) から受ける流動抵抗を用いて複雑な流れを模擬するポーラスボディモデルを用いた多次元熱流動解析の適用性を評価した。解析は、実験のフローパターンを再現すると共に、温度分布についても予測可能であることが確認できた。

\* 大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 原子炉工学グループ

\*\* 現所属 大洗工学センター 開発調整室

\*\*\* 原子炉工学グループ客員研究員、慶應義塾大学 理工学部

## Flow Visualization on A Natural Circulation Inter-wrapper Flow

— Experimental and Numerical Results under A Geometric Condition of Button Type Spacer Pads —

A. YASUDA\*, H. MIYAKOSHI\*, K. HAYASHI\*\*,  
M. NISHIMURA\*, H. KAMIDE\* and K. HISHIDA\*\*\*

### Abstract

Investigations on the inter-wrapper flow (IWF) in a liquid metal cooled fast breeder reactor core have been carried out. The IWF is a natural circulation flow between wrapper tubes in the core barrel where cold fluid is coming from a direct heat exchanger (DHX) in the upper plenum. It was shown by the sodium experiment using 7-subassembly core model that the IWF can cool the subassemblies. To clarify thermal-hydraulic characteristics of the IWF in the core, the water experiment was performed using the flow visualization technique. The test rig for IWF (TRIF) has the core simulating the fuel subassemblies and radial reflectors. The subassemblies are constructed featuring transparent heater to enable both Joule heating and flow visualization. The transparent heater was made of glass with thin conductor film coating of tin oxide, and the glass heater was embedded on the wall of modeled wrapper tube made of acrylic plexiglass.

In the present experiment, influences of peripheral geometric parameters such as flow holes of core formers on the thermal-hydraulic field were investigated with the button type spacer pads of the wrapper tube. Through the water tests, flow patterns of the IWF were revealed and velocity fields were quantitatively measured with a particle image velocimetry (PIV). Also, no substantial influence of peripheral geometry was found on the temperature field of the IWF, as far as the button type spacer pad was applied.

Numerical simulation was applied to the experimental analysis of IWF by using multi-dimensional code with porous body model. The numerical results reproduced the flow patterns within TRIF and agreed well to experimental temperature distributions, showing capability of predicting IWF with porous body model.

- 
- \* Reactor Engineering Group, Sodium and Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute.
  - \*\* Research and Development Coordination Section, O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute.
  - \*\*\* Department of System Design Engineering, Keio University

## 目 次

	頁
1. 緒 言 .....	1
2. 試験装置 .....	2
2.1 試験容器 .....	2
2.2 模擬ラッパー管 .....	2
2.3 冷却系 .....	3
2.4 計測系 .....	3
3. 試験方法 .....	4
3.1 温度分布測定試験 .....	4
3.2 流況可視化試験 .....	4
4. 試験結果 .....	7
4.1 温度分布測定試験 .....	7
4.2 流況可視化試験 .....	9
5. 実験解析 .....	12
5.1 解析対象 .....	12
5.2 解析モデル .....	12
5.3 境界条件 .....	15
5.4 数値解析手法 .....	16
5.5 解析ケース .....	16
5.6 解析結果 .....	16
6. 結 言 .....	18
謝 辞 .....	19
参考文献 .....	20

表リスト  
List of Tables

Table 3.1 Experimental parameters .....	21
Table 5.1 Computational cases .....	22

図リスト  
List of Figures

Fig. 2.1 Flow diagram of TRIF .....	23
Fig. 2.2 Schematic of test vessel .....	24
Fig. 2.3 Geometric parameters .....	25
Fig. 2.4 Schematic of wrapper tube model .....	26
Fig. 2.5 Data acquisition system .....	27
Fig. 2.6 Thermocouple positions at wrapper tubes (L1 and L2 cross sections) .....	28
Fig. 2.7 Thermocouple positions at wrapper tubes (L3 and L4 cross sections) .....	29
Fig. 2.8 Thermocouple positions at DHX .....	30
Fig. 3.1 Data acquisition system for PIV .....	31
Fig. 3.2 Velocity measurement area .....	32
Fig. 3.3 Procedure for measurement of velocity field .....	33
Fig. 3.4 Principle of pattern matching .....	34
Fig. 4.1 Measured temperature profiles in horizontal direction (Case5, 1 and 8) .....	35
Fig. 4.2 Measured temperature profiles in horizontal direction (Case6, 2 and 9) .....	36
Fig. 4.3 Measured temperature profiles in horizontal direction (Case7, 3 and 10) .....	37
Fig. 4.4 Measured temperature profiles in horizontal direction (Case4) .....	38
Fig. 4.5 Measured temperature profiles in vertical direction (Case5, 1 and 8) .....	39
Fig. 4.6 Measured temperature profiles in vertical direction (Case6, 2 and 9) .....	40

<b>Fig. 4.7 Measured temperature profiles in vertical direction (Case7, 3 and 10) .....</b>	<b>41</b>
<b>Fig. 4.8 Measured temperature profiles in vertical direction (Case4) .....</b>	<b>42</b>
<b>Fig. 4.9 Temperature fluctuation intensity profiles in horizontal direction (Case7, 3 and 10)...</b>	<b>43</b>
<b>Fig. 4.10 Temperature fluctuation intensity profiles in vertical direction (Case7, 3 and 10)...</b>	<b>44</b>
<b>Fig. 4.11 Temperature fluctuation trends (Case7) .....</b>	<b>45</b>
<b>Fig. 4.12 Flow pattern (Reference case) .....</b>	<b>46</b>
<b>Fig. 4.13 Photographs of flow pattern .....</b>	<b>47</b>
<b>Fig. 4.14 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along staggered traverse (Case7 (a)) .....</b>	<b>48</b>
<b>Fig. 4.15 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along staggered traverse (Case7 (b) and (c)) ...</b>	<b>49</b>
<b>Fig. 4.16 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along in-line traverse (Case7 (a)) ...</b>	<b>50</b>
<b>Fig. 4.17 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along in-line traverse (Case7 (b) and (c)) ...</b>	<b>51</b>
<b>Fig. 4.18 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along staggered traverse (Case5 (a)) ...</b>	<b>52</b>
<b>Fig. 4.19 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along staggered traverse (Case5 (b) and (c)) ...</b>	<b>53</b>
<b>Fig. 4.20 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along in-line traverse (Case5 (a)) ...</b>	<b>54</b>
<b>Fig. 4.21 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along in-line traverse (Case5 (b) and (c)) ...</b>	<b>55</b>
<b>Fig. 5.1 Mesh arrangement in vertical direction .....</b>	<b>56</b>
<b>Fig. 5.2 Mesh arrangement in horizontal section -1 .....</b>	<b>57</b>
<b>Fig. 5.3 Mesh arrangement in horizontal section -2 .....</b>	<b>58</b>
<b>Fig. 5.4 Mesh arrangement in horizontal section -3 .....</b>	<b>59</b>
<b>Fig. 5.5 Mesh arrangement in horizontal section -4 .....</b>	<b>60</b>
<b>Fig. 5.6 Temperature profiles in horizontal direction .....</b>	<b>61</b>
<b>Fig. 5.7 Temperature profiles in vertical direction .....</b>	<b>62</b>
<b>Fig. 5.8 Predicted velocity vector field for case 3 .....</b>	<b>63</b>

## 1. 緒 言

高速増殖炉の固有の安全性を評価するにあたり、自然循環時の崩壊熱除去特性は極めて重要な意味を持つ。崩壊熱除去用の冷却システムとして炉容器上部プレナム内に冷却器(DHX: Direct Heat Exchanger)を有する直接炉心補助冷却システム(DRACS: Direct Reactor Auxiliary Cooling System)を採用した場合、自然循環時の一次主冷却系流量は定格の2%未満になることが予測されており、浮力と慣性力が影響しあう複雑な熱流動現象が原子炉容器内で発生する。代表的な現象としては、DHXからの低温ナトリウムが炉心槽の集合体間ギャップに入り込むインターラッパーフロー(IWF)現象、低温ナトリウムが集合体の頂部から内部に潜り込む集合体内潜り込み現象が挙げられる。IWFにはラッパー管外面から集合体の崩壊熱を除去する冷却効果が期待される一方で、上部非発熱部の温度低下により自然循環ヘッドが減少し、炉心流量が低下することにより炉心部最高温度の低下には寄与しない可能性も指摘されている。

核燃料サイクル開発機構(以下 当機構)では、PLANDTL-DHX 試験装置により炉心部熱流動現象に関するナトリウム試験を実施し[1]～[10]、集合体内出力、集合体内流量等が IWF に及ぼす影響を把握し、IWF による炉心冷却効果を確認した。また、当該試験で取得した知見により、各熱流動現象の解析評価手法の開発を進めてきた。しかし、PLANDTL-DHX 試験装置の模擬炉心は 7 体の集合体から構成されていることから、実機体系に近い炉心形状での IWF の空間依存性が確認できない。また、作動流体がナトリウムであるために、現状の計測技術では温度データの測定のみが行われており、炉心槽内の流況把握及びスペーサーパッド形状等の幾何形状の変更が困難である。

このような状況を踏まえて、当機構では、水を作動流体とするインターラッパーフロー水流動試験装置(TRIF: Test Rig for Inter-wrapper Flow)を製作した。TRIF の試験体は、実機炉心槽部を 30° セクタでモデル化したものであり、集合体及び集合体間ギャップの水平断面における寸法を実寸大で模擬した六角形状ラッパー管群で構成される。集合体列は燃料集合体 6 列及び遮蔽体 2 列の計 8 列で模擬されており、実機体系に近い形状で IWF の空間依存性を確認することができる。また、炉心槽内の流況を可視化するために、試験体を透明部材で構成しており、PIV(粒子画像流速測定法)、LDV(レーザードップラー流速計)等の計測技術の適用により、ナトリウム試験では困難であった炉心槽内の流況の定量化が可能となる。また、炉心構造物の変更による幾何形状パラメータの設定が可能であり、スペーサーパッド形状等が IWF に及ぼす影響を把握することができる。これらにより IWF の特性を把握とともに、解析手法の評価と適正化に資するデータを取得する。

本報では、ボタン型スペーサーパッド体系における温度分布測定、流況可視化の結果及び多次元熱流動解析コード CASCADE により実施した実験解析の報告をまとめた。

## 2. 試験装置

Fig.2.1 に示すように、TRIF は試験容器、模擬ラッパー管、冷却系及び計測系で構成される。

### 2.1 試験容器

Fig.2.2 に示すように、試験容器は  $30^\circ$  セクタで炉心を模擬するための容器であり、上部試験容器、下部試験容器から構成される。

下部試験容器は、6列の燃料集合体及び2列の遮蔽体を模擬したラッパー管群を組み込む水槽である。流況を可視化するために容器側面及び背面には強化ガラス製の観察窓を 11箇所に設けている。容器底板には模擬ラッパー管を組み込むための設置口を設けており、当該設置口より熱電対、ヒータへの電源ケーブルを取り出す。また、容器底板の設置口外周部には、集合体間ギャップ幅 (6mm) を保持するための位置決めピンを設けた。

Fig.2.3 に示すように、下部試験容器の外周側には、炉心拘束機構（コアフォーマ）、中間プレナム等の模擬炉内構造物を配置している。上下 2段の炉心拘束機構には上部プレナムから炉心槽への流路を確保するための貫通孔（コアフォーマ孔）を設けた。また、中間プレナムには水平レダンとコアバレル下部を連絡する連通管（IWF 専用流路）を設けており、上部プレナムから炉心槽下層部への流路となる。コアフォーマ孔及び IWF 専用流路は閉止栓の着脱による流路の開閉が可能であり、炉心周辺の構造が IWF に及ぼす影響を把握するための幾何形状パラメータとなる。

上部試験容器は上部プレナムを模擬したものであり、主要材質は透明塩化ビニールである。

上部試験容器には、DHX を模擬したパネル型熱交換器 4基が装荷される。炉心上部機構（UIS）は試験容器上面に透明塩化ビニール板を設置することにより模擬しており、当該塩化ビニール板を通して流況可視化観察に必要なレーザライトシートを照射する。

### 2.2 模擬ラッパー管

IWF の特性を特に流動場に着目して把握するという観点から、集合体の内部は模擬せず、模擬ラッパー管の外面に組み込んだ透明ヒータから一様な熱流束を与えることで集合体発熱を模擬し、可視化を可能とした。

Fig.2.4 に示すように、模擬ラッパー管は対面間距離が 150mm、高さが 1500mm となる多角柱であり、流況を可視化するために、模擬ラッパー管の主要材質はアクリルとした。 $30^\circ$  セクタ容器内のラッパー管群は、6面ラッパー管（HEX）、5面ラッパー管（PEN）、4面ラッパー管（SQU）及び壁面ラッパー管（WALL）で構成される。このうち、HEX1～HEX8、PEN1～PEN6、SQU1～SQU3 及び WALL1～WALL5 のラッパー管の外面には、集合体発熱を模擬するためにヒータを組み込んだ。

ヒータには、流況を可視化するために、バイレックスガラスに酸化錫を塗布した透明ガラスヒータを使用した。絶縁を確保するために、酸化錫皮膜で形成した発熱面はラッパー管の壁面内に埋め込んでおり、水と接触しないようにシリコン系コーティング材によるシールを施した。透明ガラスヒータの寸法は幅 65mm、高さ 300mm 及び厚さ 5mm であり、抵抗は約  $80\Omega$  である。ヒータを 20mm の間隔をおいて 3 枚直列に接続し、発熱長を 940mm としたものを模擬ラッパー管の高さ 292mm~1232mm の部分に組み込んだ。ヒータ発熱量は印加電圧により決定されるもので、最大熱流束は約  $2500W/m^2$  であり、ヒータ発熱量は 6 台のサイリスタで制御する。本試験では全ての集合体で熱流束は一様とした。

集合体のスペーサーパッドは炉心槽内の自然循環経路の形成と密接な関係があると推察されることから、Fig.2.4 に示すように実験炉「常陽」で採用されているボタン型パッド、原型炉「もんじゅ」で採用されている鉢巻き型パッドの形状を模擬できる構造とした。本試験装置のスペーサーパッドはアクリル製であり、模擬ラッパー管の非発熱部の上方に 2 段で設置される。

模擬ラッパー管には温度分布測定用熱電対を設置しており、熱電対の測温部はラッパー管外表面と同一面とした。なお、PEN03-E の発熱部中央にはヒータ発熱面の温度を直接測定する警報用熱電対を設置した。

### 2.3 冷却系

冷却系は DHX、チラーユニット、ポンプ及びターピン流量計で構成しており、原子炉容器内に熱交換器を浸漬して崩壊熱除去を行う DRACS を模擬した。上部試験容器内に装荷される DHX は SUS304 製のパネル型熱交換器を 4 枚並列に配置したもので、DHX 表面温度及び DHX 直下部流体温度を計測する熱電対を取り付けた。二次側（パネル内側）冷却水は冷水タンクから循環ポンプにより供給し、各パネル型熱交換器への流量は流量調整弁で個別に設定した。また、冷水タンクにはチラーユニットから冷水を供給する。

### 2.4 計測系

Fig.2.5 に示すように、温度、DHX 冷却水流量及びヒータ出力のデータは全点同時取込型データロガーによりデジタル化してパソコンに保存する。収録間隔、収録時間は任意の設定が可能であり、最小間隔は 1.8 ms、96ch の測定で最大収録点数は 1ch あたり約 5500 点である。

温度測定はラッパー管外表面の流体温度、DHX 表面温度、DHX 直下部流体温度及び DHX 二次側冷却水温度を外径 0.5mm の C C (T 型) 非接地型熱電対で計測する。Fig.2.6 及び Fig.2.7 に模擬ラッパー管の熱電対配置を、Fig.2.8 に DHX の熱電対配置を示す。

熱電対信号は温度補償型アンプで増幅し、AD 変換器でデジタル化しているが、アンプと組み合わせた精度の支配因子はアンプの温度補償素子の精度  $0.3^\circ\text{C}$  である。また、熱電対は基準

温度 100°C に対して検査実績で誤差が 0.4°C 程度であった。

流況可視化試験での流速は粒子画像流速測定法 (P I V : Particle Image Velocimetry ) を適用した。計測方法は「3. 試験方法」で詳述する。

### 3. 試験方法

#### 3.1 溫度分布測定試験

温度分布測定試験では、スペーサーパッドをボタン型パッドとした模擬ラッパー管で構成する炉心体系において、模擬炉内構造物の幾何形状（コアフォーマ孔の有無、IWF 専用流路の有無）に対する IWF の特性を把握する試験を実施した。また、集合体出力レベルに応じた除熱効果を確認するために、ヒータ表面熱流束は幾何形状パラメータの各ケースに対して 1350 W/m<sup>2</sup>、1500W/m<sup>2</sup>及び 2000W/m<sup>2</sup>に設定した。D H X の冷却水流量は、実験解析を実施するにあたり D H X 表面に単純な温度境界を与えることを考えて、D H X 表面の温度分布を小さくするために設備上の最大流量の 80 l/min(20 l/min×4 基) とした。Table3.1 に試験ケースを示す。

試験ケース 5～7 は、コアフォーマ孔及び IWF 専用流路を閉止した基準となるケースであり、ヒータ表面熱流束をパラメータとしたものである。

試験ケース 1～3 は、基準ケースからコアフォーマ孔を開にしており、コアフォーマ孔の効果を把握する試験ケースである。なお、試験ケース 4 は D H X の冷却水流量を試験ケース 3 の 50%で実施したケースである。

試験ケース 8～10 は、基準ケースから IWF 専用流路を開にしており、IWF 専用流路の効果を把握する試験ケースである。

試験手順は、ヒータ表面熱流束を徐々に設定値まで上昇させた後、冷却系の循環ポンプを起動し、流量調節弁にて 4 基の D H X 流量を設定値に調整して、チラーユニットを起動した。模擬ラッパー管に設置されている熱電対のトレンドデータにより定常状態の到達を確認した後、データを収録した。データサンプリング周期は、各試験ケースに対して 0.1sec、2sec 及び 60sec で実施しており、各々の収録時間は 5min、1hour 及び 24hour とした。

#### 3.2 流況可視化試験

スペーサーパッド形状をボタン型パッドとしてコアフォーマ孔及び IWF 専用流路を閉止した体系で、ヒータ表面熱流束を 1350、2000W/m<sup>2</sup>に設定した 2 ケースについて P I V による流速の計測を実施した。また、全体の定性的な流況を把握するために、デジタルビデオカメラにより全体流況を撮影した。

##### 3.2.1 流況可視化方法

Fig.3.1 に示すように、ダブルパルス Nd-YAG レーザーによるレーザーライトシートを試験容器上面の透明塩化ビニール板から集合体間ギャップに入射し、流体に注入した粒子トレーサーを発光させることで流況を可視化した。粒子トレーサーにはエクスパンセル PU80(091) を使用しており、粒子径  $5\sim30\mu\text{m}$  である。注入量は収録画像の粒子密度により加減したが、 $1\text{g}/\text{m}^3$ を目安とした。

なお、デジタルビデオカメラによる撮影では、高出力のため光ファイバーが使用できない Nd-YAG レーザーに替えて、Ar レーザーによるレーザーライトシートを移動の容易なファイバー光学系で照射することにより、照射範囲を拡張した。

### 3.2.2 画像収録方法

Fig.3.1 に示すように、試験容器側面の観察窓から可視化流況を CCD カメラで撮影した。CCD カメラは 60Hz で画像を撮影しており、1/60sec 毎にカメラより出力される同期信号 (V-SYNC 信号) をタイミングコントローラに入力し、タイミングコントローラにて設定した間隔でダブルパルス Nd-YAG レーザを発光させることにより、CCD カメラとレーザライトシートを同期させた。したがって、1/30sec の間隔で奇数フレームと偶数フレーム各 1 枚からなる 1 組の画像を得ることができる。PIV ではこの 1 組 2 枚の画像を元に流速ベクトルを求めることができる。本試験では、集合体間ギャップでの流体の流動場の時間変化が少ないと考えられることから、奇数フレームと偶数フレームにおけるレーザパルスの照射間隔を 15msec とした。

収録画面のサイズは、幅 80mm 及び高さ 60mm とした。ただし、収録箇所によって構成部材の重なりの違い、すなわち屈折率により若干の差異が生じた。

収録画像は、ピットマップ形式のファイルで画像収録ソフトによりパーソナルコンピュータに保存される。収録枚数は画像取込用のフレームグラバーボードに搭載した最大メモリー量から 60 組 120 枚 (2 秒間に相当) とした。

Fig.3.2 に示すように測定対象とした集合体間ギャップは、SQU2-PEN2、HEX1-PEN3、HEX2-PEN4、HEX4-PEN5、HEX3-HEX4 及び SQU2-HEX2 である。また、それぞれの集合体間ギャップを高さ 292~912mm (中段及び下段ヒータ) 及び 1110~1550mm (上段ヒータ上方からラッパー管上端) の範囲で計測した。

### 3.2.3 画像処理方法

Fig.3.3 に示すように、収録画像はノイズ除去プログラムにて画像上の粒子以外のデータを除去し、PIV 相互相関処理プログラムにて相関処理計算を行い、速度場を定量化した。

#### 3.2.3.1 ノイズ除去[11]

収録画像には試験体構造物（ボタンパッド、ケーブル、熱電対等）、試験体構造物に起因するハレーション、ラッパー管壁に付着したトレーサ等が撮影されている。これらのノイズは、相関処理実行時の障害となることから、当機構で開発したノイズ除去プログラム「NABE」（収録画像内の各ピクセルの輝度値の時間変化特性がノイズのあるピクセルとノイズのないピクセルで大きく異なることを利用する）により粒子以外のデータを除去した。

なお、レーザー光源の特性により、連続する画像の奇数フレームと偶数フレームで照明強度が異なるため、奇数フレームと偶数フレームとを分けて処理した。また、照明強度が時間的に変化する影響を抑えるために、処理フレーム数を 10 フレーム毎にグループ化してノイズ除去を実施した。

### 3.2.3.2 相関処理

速度ベクトルは、一定間隔で収録した画像の空間濃度パターンの移動から算出した。すなわち、奇数フレーム内の任意の領域の輝度分布パターンと類似する輝度分布パターンを偶数フレームにおいて探索する方法（パターン相関法）である。パターン相関法の原理[12]を下記に示す（Fig.3.4 参照）。

①奇数フレームの対象領域（本処理では  $20 \times 20$  ピクセル）の輝度平均  $L1_{ave}$  を求める。

$$L1_{ave} = \frac{\sum_{k=1}^n L1(k)}{N}$$

②偶数フレームの候補領域の輝度平均  $L2_{ave}$  を求める。

$$L2_{ave} = \frac{\sum_{k=1}^n L2(k)}{N}$$

③奇数フレームの対象領域と偶数フレームの候補領域の相互相関係数  $Corr(i)$  を求める。

$$Corr(i) = \frac{\sum_{k=1}^n \{(L1(k) - L1_{ave}) \cdot (L2(k) - L2_{ave})\}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n \{(L1(k) - L1_{ave})^2 \cdot (L2(k) - L2_{ave})^2\}}}$$

④偶数フレームの候補領域を 1 ピクセル移動させた領域を次の候補領域とする。

⑤上記②～④の処理を偶数フレームの全領域について繰り返し、相互相関係数  $Corr(i)$  が最大となる候補領域を奇数フレームの対象領域の偶数フレームの移動位置とする。

⑥奇数フレームの全領域について、①～⑤の処理をする。

上記処理を榎原らが開発した相互相関処理[13]に基づくプログラムにて実施した。相関処理結果はベクトルデータでファイルに保存されており、レーザー照射間隔及び収録フレームサイズから流速ベクトルを計算した。

### 3.2.3.3 計測精度

PIVにおける計測誤差は、レーザー照射間隔、画像座標及び移動量計算等の過程で発生するが、移動量計算に伴う誤差が支配因子となる。すなわち、奇数フレームと偶数フレーム間の粒子の移動距離をある程度確保する必要があり、ピクセル単位の移動量評価では、移動量が10ピクセルであると $1/10$ の精度となる。そこで、相互相関処理プログラムでは、最大相関係数が得られるピクセルの周囲の相関係数から実際の最大相関係数を持つ位置を計算する方法（サブピクセル法）により、より正確な移動量を求めている。サブピクセル法による精密度を0.2pixel[13]とすると、計測精度は以下の式で与えられる。

$$S_{mes} = S_{pix}/d_{pix}$$

$S_{mea}$	: 計測精度
$S_{pix}$	: サブピクセル精度 (0.2)
$d_{pix}$	: 移動ピクセル数

## 4. 試験結果

### 4.1 温度分布測定試験

Fig.4.1～4.8に各試験ケースの3方向(PEN2～PEN8、HEX1～HEX12、PEN1～HEX13)のトラバースラインにおける水平温度分布及び垂直温度分布を示す。温度は24時間(60secサンプリング)収録データの平均値である。なお、Table3.1に示すようにサイリスタの制御特性及びガラスヒータの発熱特性により、ヒータ表面熱流束は目標値よりわずかに高くなった。また、ケース5以降の試験ではHEX1の熱電対取付面のヒータ発熱不良が発生しており、ケースが進むにつれて発熱量が徐々に低下するとともに、この面と系列回路で電源を共有しているヒータの出力が変化した。

DHX二次側入口と出口の温度差及び二次側流量から計算されるDHX除熱量とヒータ出力によるヒートバランスは試験室温度により若干の差異を生じるが、全ケースにおいてヒータ出力の90%程度をDHXにおいて除熱している。

#### 4.1.1 空間温度分布

基準ケースのうちヒータ出力が最高となる試験ケース7の空間温度分布について記述する。

Fig.4.3(a)に示すように発熱部下端のL1の温度(約18～19°C)は低く、径方向の温度差は少なく平坦な温度分布となっている。後述する流況可視化試験において、集合体間ギャップ低

層部では試験体の外周側から内周側の中心部まで DHX から低温流体が流入していることが確認されている。すなわち、IWF が試験体の中心部まで達しており、発熱部下端では低温の平坦な温度分布となる。また、全般的に発熱部下端の温度がラッパー管列の内周側で低くなるのは、セクター構造であるため内周側になるほど相対的に壁面積が増大し、放熱量が大きくなる影響と考えられる。

上段ヒータと中段ヒータの間に位置する L2 (Fig2.7 参照) の温度はラッパー管列の内周側になるほど高くなり、他の高さ位置に比べて高温となる。炉心中心部となる PEN1 の発熱部中央で、発熱部下端との温度差は最大（約 19.5°C）となり、最高温度（37.7°C）が計測される。なお、Fig.4.3(a)のスタガード方向の炉心中心部から約 300mm の位置における温度が低くなっている原因は、HEX1 の熱電対取付面のヒータ発熱不良によるものである。また、発熱部上端より 37.5mm 上方となる L3 の温度分布はラッパー管列の内周側になるほど高くなるが、上昇幅は発熱部中央の L2 に比較して小さい。この点については解析結果との比較と併せて後述する。

上部スペーサーパッドの直下に位置する L4 の温度は L3 との温度差は少なく、L3 と同様の傾向を示す。また、遮蔽体列にあたる炉心中心部から 1,000mm の位置における L4 の温度（約 18~20°C）は、DHX 直下部の流体温度（約 17.5~18.5°C）との温度差が少なくなっている。流況可視化試験において、DHX 周辺の低温流体が遮蔽体領域の集合体間ギャップに流入していることが確認されている。

#### 4.1.2 幾何形状パラメータの影響

試験ケース 3 ではコアフォーマ孔を開としており、上部プレナムから炉心槽への流路を積極的に設けている。試験ケース 3 と試験ケース 7 を比較すると、Fig.4.3(a)と(b)に示すように、試験ケース 3 では発熱集合体の最外列にあたる炉心中心部から 800mm 前後の位置における L3 及び L4 の温度が若干低くなる。発熱集合体の最外列における温度低下は炉心槽に侵入する経路が拡張された効果と考えられるが、模擬炉心部の温度低下に対する効果は認められない。

試験ケース 10 では IWF 専用流路が開となっており、上部プレナムから試験体下層部への流路を設けている。試験ケース 7 と試験ケース 10 を比較すると、Fig.4.3(a)と(c)に示すように炉心中心部の温度は試験ケース 10 の方が高温となる。これは、上述したように HEX1 の熱電対取付面の発熱状態がケースが進むにつれて徐々に低下し、この面と系列回路で電源を共有しているヒータの出力が変化し、ラッパー管列の内周側での発熱分布が変化したためと考えられる。この点を除き、ケース 7 とケース 10 では温度分布の差は観察されない。

スペーサーパッド形状にボタン型パッドを採用した場合、集合体間ギャップにおける流動抵抗は小さくなり、流況可視化試験においても確認されてるように低温流体が炉心に侵入する流路が確保される。したがって、本試験におけるコアフォーマ孔及び IWF 専用流路の効果が

低くなっていると考えられる。

#### 4.1.3 ヒータ熱流束の影響

試験ケース 5 ( $q''=1430\text{W/m}^2$ ) と試験ケース 7 ( $q''=2090\text{W/m}^2$ ) の比較からヒータ表面熱流束の影響を考察する。

試験ケース 5 ではヒータ出力 6670W の 91.5% にあたる 6100W を DHX で除熱している。また、試験ケース 7 では、ヒータ出力 9730W の 91.0% にあたる 8860W を DHX で除熱しており、熱流束の増加に応じて IWF による除熱量が増加する。Fig.4.5(a) と Fig.4.7(a) に示すように、熱流束の増加により集合体間ギャップでの温度上昇幅が大きくなり、また、流況可視化試験では集合体間ギャップを上昇する流速は大きくなることが確認されている。すなわち、集合体間ギャップにおける流体の流量及び温度上昇幅の増大により除熱量が大きくなる。

#### 4.1.4 DHX 流量の影響

Fig.4.4 に示すように、試験ケース 4 は試験ケース 3 の 50% の DHX 流量にて試験を実施しているが、DHX 2 次側入口と出口の温度差が約 2 倍となり、安定して除熱している。ラッパー管列での温度上昇幅は約 1.5~2.0°C であり、DHX 表面温度の平均温度上昇幅（約 1.8°C）と同程度に上昇する。

#### 4.1.5 温度変動強度

Fig.4.9 及び 10 に試験ケース 3、7 及び 10 における 1 時間の測定から得られた温度変動強度の空間分布を示す。L1 における温度変動強度は小さく、時間的な温度変動が少ないとから、流況は安定していると推察される。L2、L3 及び L4 の炉心中心部から 700~1,000mm の位置における温度変動強度が大きくなる傾向にある。当該箇所は、上部プレナムから集合体間ギャップに低温流体が浸入する箇所であり、模擬ラッパー管発熱部からの高温流体と混合するために温度変動が大きくなっていると考えられる。

Fig.4.11 にケース 7 における HEX04、HEX6 及び HEX09 のインライン方向の 1 時間の温度データを示す。HEX09 は非発熱、HEX6 は発熱集合体であり、この部分で温度変動が激しくなる。

### 4.2 流況可視化試験

#### 4.2.1 全体流況

Fig.4.12 に基準ケースにおけるデジタルビデオで撮影した試験体内の全体の流況のスケッチを示す。

模擬ラッパー管上端～U I S下面間の模擬ラッパー管直上付近では、炉心中央部に向かう径方向流れと集合体間ギャップより流出して上昇する流れが共存 (Fig4.13(a)参照)しており、流況に時間的な変動が観察される。集合体間ギャップから流出して上昇する流れは、U I S直下面において径方向に流れを反転してU I S下面に沿って外周側に流れる。

U I S直下面の流れは上部プレナム部に到達して、上部プレナム内を上昇する。上部プレナム内の上昇速度はU I S側面付近では速く、上部プレナムの上方に到達してDHXに向かって流れしていく。また、この上昇流はU I S側面を離れるにつれて遅くなり、DHX付近では中間プレナムの水平レダンに向かって下降する流れとなっている (Fig4.13(b)参照)。なお、上部プレナム内では周方向に流れが均一ではなく、DHX側面直近において下降する速度が速くなる。

中間プレナムの水平レダン上部ではDHXからの下降流が炉心中央部に向かう径方向流れとなる。水平レダン上部からの径方向流れは遮蔽体間ギャップに流入していく流れと炉心中央部に向かう径方向流れに分岐する。遮蔽体間ギャップに流入した流れはコアフォーマの下部へと流出するが、再び遮蔽体間ギャップに流入し、炉心中央部に向かう径方向流れとなる。

集合体間ギャップの低層の非発熱部では、炉心中央部に向かって径方向に流れている。発熱部では軸方向に上昇しながら、径方向に炉心中心部へと流れる。発熱部中央で流速は速くなり、ラッパー管列の内周側ほど流速は大きくなる傾向にある。模擬ラッパー管上部の非発熱部では、上下2段のボタンパッドを巻いて流れ、模擬ラッパー管上方に流出する (Fig4.13(c)参照)。

#### 4.2.2 PIV計測による集合体間ギャップの流況

Fig.4.14～4.17に試験ケース7の集合体間ギャップにおける流速ベクトル図を示す。なお、ベクトルが抜けている箇所は、障害物（ヒータ電源ケーブル等）等の要因で計測できなかった箇所である。

Fig4.17に示すように、炉心支持板から高さ約380mm(下段ヒータ; (c))の流速はP1で約12mm/s及びP4で約0.5mm/sである。IWFは径方向に炉心中心側へ流れつつ軸方向に上昇して流れしており、模擬ラッパー管列の内周側では軸方向への上昇成分が大きくなり、流速が速くなる傾向にある。軸方向に高さが上昇するにつれて流速が速くなり、高さ約880mm(中段ヒータ;(b))の平均流速は、P1で約31mm/s及びP4で約25mm/sである。ただし、流速ベクトル図からわかるように、P1の高さ約880mmでは同一高さ断面で流速勾配がある。

Fig4.16に示すように高さ約1140mm(上段ヒータ)での流速はP1で約31mm/s及びP4で約30mm/sであり、下段ヒータから上段ヒータの軸方向に流速が大きくなることが確認される。模擬ラッパー管の上部非発熱部では、上下2段のスペーサーパッドを迂回して軸方向に上昇して流れしており、高さ1385mm(上下2段のスペーサーパッド中間部)ではP1で約

33mm/s 及び P4 で約 32mm/s である。模擬ラッパー管直上では、上部プレナムからの径方向流れと集合体間ギャップからの上昇流が合流している状況がベクトル線図より確認される。

Fig.4.18~4.21 に試験ケース 5 の集合体間ギャップにおける流速のベクトル線図を示す。

ヒータ熱流束が減少することにより全体的に流速が減少しているのが確認できる。

#### 4.2.3 炉心モデル域熱収支の確認

温度分布試験及び流況可視化試験により、温度及び流速が測定されたことから、炉心モデル域の流体のエンタルピ上昇、すなわち IWF による除熱量の概算値を求める。これにより、温度及び流速の測定が妥当な精度を有することの傍証とする。ヒータ発熱部のエンタルピ上昇は次式で計算される。

$$\Delta H = \sum_i \rho \cdot c_p \cdot A_i \cdot v_i \cdot (T_{L3,i} - T_{L1,ave})$$

$A_i$  : 集合体間ギャップ面積

$v_i$  : 高さ約 1140mm (上段ヒータ) での流速の軸方向成分

$T_{L3,i}$  : L3 (発熱部上端より 37.5mm 上方) における流体の温度

$T_{L1,ave}$  : L1 (発熱部下端) における流体の平均温度

ただし、一部の集合体間ギャップについて温度及び流速の測定がなされていないので、未測定集合体間ギャップは近傍の測定値と同一の温度分布及び流速であるとみなした。また、最外列の発熱集合体 (HEX6, HEX7, HEX8, PEN6) に関する集合体間ギャップでは、4.1.5 項で述べたように、低温流体が上部プレナムから集合体間ギャップに浸入し、発熱部からの高温流体と混合し、直交流により内周側の集合体ギャップに流れ込んでいる。よって、最外列発熱集合体からの入熱は、それよりも内側の集合体間ギャップのエンタルピ上昇に含まれるものと判断し、最外列は上式の総和から省いた。ケース 7 における上式で計算されるエンタルピー上昇は 9300W であり、ヒータ発熱量の 9730W とほぼ一致することから、温度測定及び PIV による流速測定の結果は妥当なものであると考えられる。

## 5. 実験解析

実機における自然循環時のインターラッパーフローを模擬する上で、インターラッパーギャップ部のモデル化は重要な要素である。そこで本章では、TRIFを対象として、1/4集合体メッシュ分割法とポーラスボディモデルを適用した実験解析を行い、モデル化の適用性を調べることとする。解析には炉心槽内多次元熱流動解析コードCASCADE[14]を使用した。

### 5.1 解析対象

Fig. 2.1～2.4に示す水流動試験体をデカルト座標系のメッシュにてモデル化する。

### 5.2 解析モデル

解析モデルをFig.5.1～Fig.5.5に示す。解析メッシュは、 $x \times y \times z$ 方向に対し、 $30 \times 19 \times 74$ 、総計42,180の計算メッシュを適用した。ただし、本メッシュ数には外壁を模擬するための個体メッシュも含まれる。

#### 5.2.1 圧力損失モデル

##### (1) 集合体部

###### ① $x$ 方向圧損モデル

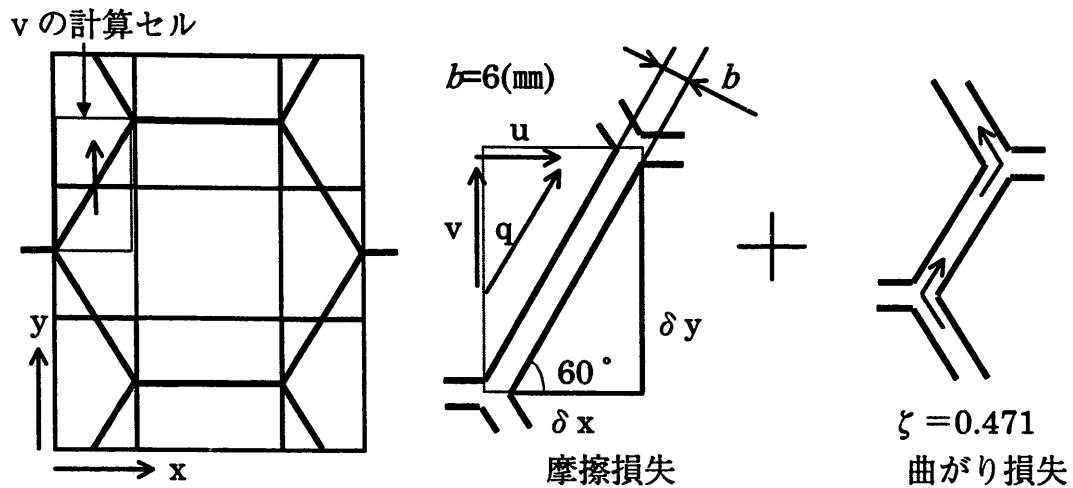
最外周集合体と当該集合体ーコアバレル間アニュラス部（コアフォーマーを含む部分）の境界部には急拡大の圧力損失係数を与えた。すなわち

$$\zeta = 1.0$$

インターラッパーギャップ部における直交流成分の圧力損失については、多次元解析により自動的に計算される圧力損失と既往実験で調べられている圧力損失特性が一致するため、特に圧力損失相関式は適用しないこととした。 $x$ 方向は流れが分岐と合流を繰り返すいわゆるスタガード方向に該当する。本解析で用いた1/4集合体メッシュ分割法では、スタガード方向については、 $x$ 方向速度成分が計算されるセルは、分岐部にて $x$ 方向速度成分は0となる代わりに $y$ 方向速度成分に流れの向きが変換され、継いで $y$ 方向に分岐した流れは $y$ 方向下流側のセルが合流セルとなり、合流セルでは $y$ 方向速度成分は再び $x$ 方向に変換される過程を繰り返す。その結果、多次元解析では圧力損失が自己発生的に計算される。

###### ② $y$ 方向圧損モデル

$y$ 方向は流れが分岐・合流をせずに通過するいわゆるインライン方向に該当する。本解析で用いた1/4集合体メッシュ分割法では、インライン方向の $y$ 方向速度成分は一定となるため、ラッパー管角部における曲がりや、壁面の摩擦損失による圧力損失を相関式により模擬する必要がある。よって $y$ 方向の圧力損失は以下のように模擬した。



$$\Delta P_y = \lambda \frac{L \rho}{d_e^2} q^2 + \zeta \frac{\rho}{2} q^2 \quad (1)$$

ここで

$$\lambda = \frac{96}{R_e} \quad (1.a)$$

$$R_e = \frac{V d_e}{\nu} \quad (1.b)$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (1.c)$$

$\therefore \gamma_y = b / (\Delta x \cdot \sin 60^\circ)$  としているため、連続の式より

$$q = v / \sin 60^\circ \quad (1.d)$$

$$d_e = 2b \quad (1.e)$$

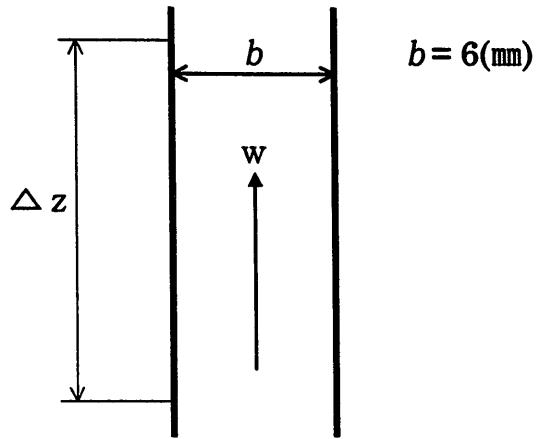
$$L = \delta y / \sin 60^\circ \quad (1.f)$$

よって

$$\zeta_e = 0.7$$

$$\Delta P = \lambda \frac{\delta y / \sin 60^\circ}{d_e} \frac{\rho}{2} v^2 / (\sin 60^\circ)^2 + \frac{\zeta_e}{(\sin 60^\circ)^2} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (2)$$

## ③ z 方向圧損モデル



$z$ 方向の圧力損失は平行平板の摩擦損失に対する次式で計算した。

$$\Delta P = \lambda \frac{\Delta z \rho}{d_e 2} w^2 \quad (3)$$

ここで

層流 ( $Re < 1200$ ) に対し

$$\lambda = \frac{96}{R_e} \quad (3.a)$$

$$R_e = \frac{|V| d_e}{\nu} \quad (3.b)$$

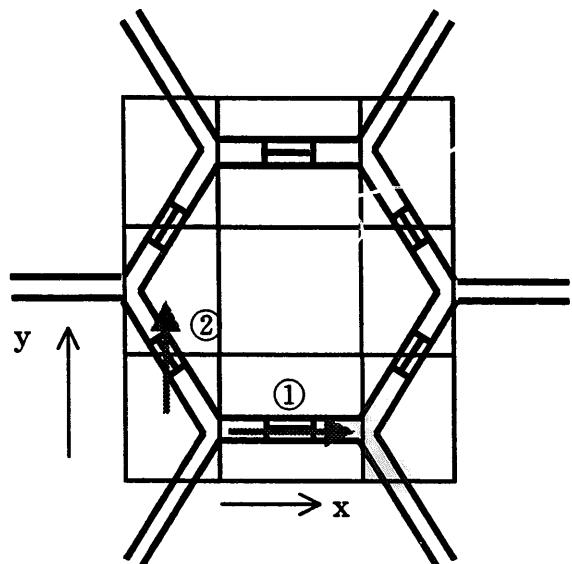
$$d_e = 2b \quad (3.c)$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (3.d)$$

乱流 ( $1200 < Re$ ) に対し

$$\lambda = 0.3164 R_e^{-0.25} \quad (3.e)$$

## (2) ボタン型集合体パッド部



ボタン型パッド付設部の軸方向メッシュ幅はパッド幅と同じにしたため、パッドが接触しているギャップは流体が通過できないものとした。よって、 $x$  および  $y$  方向速度成分に対してそれぞれパス①および②は無いものとした。 $z$  方向速度成分に対しては、縮流および拡大による形状圧力損失係数の和  $\zeta = 1.5$  を与えた。

## (3) 炉心拘束機構部（コアフォーマー）

炉心拘束機構と集合体パッド間ギャップ部及び、フローホール部に対し、縮流と急拡大による  $z$  方向の圧力損失  $\zeta = 1.5$  を考慮した。フローホール位置は、Fig.5.3を参照されたい。

## 5.3 境界条件

## (1) 流体セル

水（初期値：20°C）

## (2) 発熱セルの設定

ヒータ付模擬ラッパー管設置個所及び試験体のヒータ設置個所は、Fig.2.3・Fig.2.4を参照されたい。

本解析では、定常計算を実施し、構造材の熱容量を無視するとともに、ヒーターの発熱は、流体エネルギー式の発熱項にて模擬した。すなわち

$$q_t \cdot l_h \cdot \Delta z = q'' \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (4)$$

なので

$$q'' = \frac{q_t \cdot l_h \cdot \Delta z}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \quad (4.a)$$

ここで

$q_t$  : 試験体のヒータ表面熱流束 ( $W/m^2$ )

$l_h$  : 試験体のヒータ幅 (m)

$q''$  : 計算入力の発熱率 ( $\text{W}/\text{m}^3$ )

$\Delta x$  : セルの径方向長さ (m)

$\Delta y$  : セルの周方向長さ (m)

$\Delta z$  : セルの軸方向長さ (m)

である。

### (3) DHXのモデル化

DHXはFig. 5.1・Fig.5.5に示すセルに指定した。試験体においては、DHXは二等辺三角形状の試験体平面図の頂角二等分線と平行に配置されているが、本モデルではx軸と平行な配置とした。これは、本メッシュ体系はインターラッパーフローの模擬に主眼を置いて分割しているため、DHXを試験体と同じ配置にするためには、水平断面内において階段状に模擬することになり、その結果プレナム（上部容器）内の流れを阻害する可能性を避けるための処置である。

DHXは表面温度一定の鉛直平板として模擬した。DHX外面熱伝達率は、代表長さを伝熱面の長さ1.1mとし、代表温度差は上部容器上部の水温とDHX表面との温度差5°C程度を考慮して見積もった。これら代表長さおよび代表温度差から求まるレイリー数は $4 \times 10^{10}$ 程度であり、この条件での鉛直平板自然体流における平均ヌセルト数[15]を求めた。加えて、DHX肉厚部の熱通過率およびDHX二次側の熱伝達率（Dittus-Boelterの式）を考慮し、総括熱伝達率として $300\text{W}/(\text{m}^2\text{°C})$ を入力にて指定した。また、DHXの二次側出入り口平均温度を温度一定境界条件として与えた。

### 5.4 数値解析手法

以下に使用した数値解析手法を示す。

座 標 系	: デカルト座標
離散化手法	: 有限差分法
時間積分法	: 1次精度オイラー陰解法
対流項差分法	: 1次精度斜め風上法
離散項差分法	: 2次精度中心差分法
数値計算アルゴリズム	: SIMPLEST-ANL法

なお本解析は定常計算として解析を行った。

### 5.5 解析ケース

表5.1に解析ケースおよびケース名の説明を示す。本検証では、試験を実施した3種類の形状パラメータについて、ヒータ表面熱流束が $2000\text{W}/\text{m}^2$ のケースを解析対象とした。

## 5.6 解析結果

### 5.6.1 溫度分布

Fig. 5.6および5.7に実験と解析の温度分布の比較を示す。全般として、解析結果は実験の温度分布を再現しており、ボタン型パッドを採用した場合は、炉心槽周辺のフロー・ホール等幾何形状パラメータの温度分布に及ぼす影響は顕著でないことがわかる。発熱部下端においては解析が実験よりも2~3°C程度高めの温度を呈しているが、これは解析においてDHX表面の熱伝達率および伝熱面積を低めに見積もったことに起因している。また、実験に見られる中心集合体近傍の発熱中央における温度上昇が解析においては殆ど再現されていない。この原因として以下のことが考えられる。実験においては加熱途中の発熱中央では温度境界層の存在により、インターラッパー・ギャップ横方向に大きな温度勾配がついており、熱電対は壁面から1mm以内の位置の温度を測定していることから、高温部の流体温度を示している可能性が高い。一方、解析は混合平均温度を計算・表示しているので、実験との差異が大きくなっていることが考えられる。また、発熱部上端よりも上部においては、直交流成分や加熱の終了に伴い、流体の混合および温度境界層の解消が進んだ結果、実験の熱電対は混合平均温度に近い値を示し、解析との一致も良好になったと考えられる。

解析結果の鉛直方向温度分布 (Fig. 5.7)において、集合体列外周に近い発熱ギャップP5およびP7の高さ600mmおよび900mmの温度が1°C程度局所的に低下している原因是、当該部位がヒータの継ぎ目であり発熱が無いことに加え、低温水の直交流成分との混合によるものである。また、Case 10においてスタガード方向の四角のプロットが解析に比べて低くなっているのは、実験装置のヒータ不良により発熱が低下しているためと考えられる。

### 5.6.2 流速分布

本解析では、実験と同様に幾何形状パラメータによる顕著な流況の変化は見られなかった。ここでは、Fig. 5.8に解析結果の速度ベクトル図の代表例としてCase 3の結果を示す。低温流体は、水平に進行して炉心部からのプリューム（上昇対流）に連行される流れと、コアフォーマーの部分から炉心槽へと潜り込む流れに分岐している。炉心槽への下降流は、水平方向へ転回しインターラッパー・ギャップ部を直交して流れた後、加熱部において上昇流へと転じる。上昇流は上部に行く程加速し、鉛直方向速度成分の最大値は0.04m/s程度である。この値はPIVによる測定値とほぼ一致する。インターラッパー・ギャップ部を抜けて、炉心出口-UIS間ギャップに流出する高温流体はプリュームとなって上昇するとともに、上部プレナムから連行される水平方向の流れと合流する。継いで、UIS下面および側面に沿って流れ上部プレナムの自由液面へと到達する。以上の解析結果による流況は、実験結果 (Fig. 4.14および4.15) を良く再現している。

## 6. 結 言

インターラッパーフローによる崩壊熱除去を安全評価に取り入れることによって、安全裕度が増すと期待されることから、自然循環時のIWF現象について径方向に広がりをもった炉心内の熱流動場の把握を目的として、試験装置TRIF (Test Rig for Inter-wrapper Flow) を用いた水流動可視化実験を実施した。TRIFの模擬ラッパー管は、透明なアクリルで構成され、その外面のヒータもガラス表面に導体の酸化錫薄膜を形成した透明なものであり、加熱しながら透明性による可視化ができる様に工夫したものである。実験においては、模擬燃料集合体の表面に設置された熱電対により炉心槽内の温度分布を測定すると共に、作動流体に微少粒子を混入することにより流れの可視化と画像処理による速度場の定量化を実施した。また、実験解析を行い、ポーラスボディーモデルを用いた多次元熱流動解析のIWFへの適用性を評価した。その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 今回の一連の試験においてはボタン型のスペーサーパッドを採用し、コアフォーマー孔の有無、およびIWF専用流路の有無による炉心周辺の幾何形状パラメータの影響を調べた。その結果、ボタン型スペーサーパッドの体系ではパッド部を通り抜ける流れが支配的となり、炉心槽内の温度分布に対して、炉心周辺の幾何形状パラメータの変更による顕著な影響はないことが明らかとなった。
- (2) 従来、単純な形状に対して研究・開発が進められてきた、流れの可視化と粒子画像流速測定法を、複雑形状かつ大型のTRIF試験体に適用した。当該体系では、試験体内のリード線や装置に付着したゴミが、画像のノイズとして計測誤差の要因となっていたが、ノイズ除去手法を開発・適用することにより、IWFの流速分布を定量化することができた。
- (3) ポーラスボディーモデルを用いた多次元解析により、TRIF試験体における温度および流速分布を再現でき、本解析手法のIWFへの適用性を確認した。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、常陽産業（株）の伊藤真美氏には多大なるご尽力を頂きました。また、解析の実施、および結果の整理には、原子力システム（株）の中根茂氏に多いなるご協力・ご助力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 林謙二、上出英樹、他：高速炉における自然循環崩壊熱除去に関する研究(VI) 、日本原子力学会「94年春の大会」予稿集、H28 (1994)
- [2] 林謙二、小松崎清美、他：Na 体系での集合体内潜り込み現象初生条件、日本原子力学会「95年秋の大会」予稿集、E54 (1995)
- [3] 上出英樹、林謙二、他：高速炉の自然循環時におけるインターラッパーフロー現象の評価、日本原子力学会「95年秋の大会」予稿集、E55 (1995)
- [4] 桃井一光、林謙二、他：インターラッパーフロー現象に関するナトリウム過渡試験、日本原子力学会「96年春の大会」予稿集、C20 (1996)
- [5] 桃井一光、林謙二、他：Na 過渡試験による自然循環時の炉心部熱流動に関する研究、日本原子力学会「97年春の大会」予稿集、F2 (1997)
- [6] 木村暢之、西村元彦、他：高速炉の自然循環崩壊熱除去時の炉内熱流動現象に関する研究、日本原子力学会「98年秋の大会」予稿集、G34 (1997)
- [7] 上出英樹、林謙二、他：高速炉の自然循環特性に関する研究、日本原子力学会「98年春の年会」予稿集、H45 (1998)
- [8] H. Kamide, et al., "Investigation of Inter-wrapper Flow in Fast Reactors During Natural Circulation Decay Heat Removal -Seven-subassembly Sodium Experiments-," Proc. Int. Mtg. on Advanced Reactors Safety (ARS '97), Orlando, Florida, June 1-5, p.1141 (1997)
- [9] H. Kamide, K. Hayashi, et al., "Experimental Study of Core Thermohydraulics in Fast Reactors during Transition from Forced to Natural Circulation - Influence of Inter-Wrapper Flow," Proc. 8th Int. Top. Mtg. on Nuclear Reactor Thermo-Hydraulics (NURETH-8), Kyoto, Japan, Sep. 30-Oct. 4, Vol.2 p.922 (1997)
- [10] H. Kamide, N. Kimura, et al., "Experimental Study on Inter-wrapper flow during Natural Circulation in Fast Reactors - Influence on Natural Circulation Flow and Core Temperatures-," Proc. 6th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-6), San Diego, California, May 10-14, ICONE-6197 (1998). (1998)
- [11] 木村暢之、三宅康洋 「可視化画像による流速測定技術の開発－ノイズ処理手法を用いた計測精度の向上－」 JNC TN9400 99-078 (1999)
- [12] 笠木伸英、木村龍治他、「流体実験ハンドブック」朝倉書店 (1997)
- [13] 柳原潤、菱田公一他 「画像処理による流動場の速度・温度同時計測法」 Thermal Science & Engineering Vol.2 No.4(1994)
- [14] 西村 元彦、「低レイノルズ数型応力・熱流束方程式乱流モデルの開発－ DNS データベースに基づく乱流運動エネルギー消散率の壁面境界条件設定方法の提案－」、JNC TN9410 98-027(1999)
- [15] 伝熱工学資料、日本機械学会、p.68, (1986)

Table 3.1 Experimental parameters

Case number	Case name	Spacer pad	Geometry parameters		Heat flux [W/m <sup>2</sup> ]	Flow rate of DHX [Q/min]
			Flow holes	Bypass line		
1	BT-CF-NP-1.35	Button type	○	×	1480* (1350)**	20×4
2	BT-CF-NP-1.5	Button type	○	×	1600 (1500)	20×4
3	BT-CF-NP-2.0	Button type	○	×	2130 (2000)	20×4
4	BT-CF-NP-2.0d	Button type	○	×	2130 (2000)	10×4
5	BT-NC-NP-1.35	Button type	×	×	1430 (1350)	20×4
6	BT-NC-NP-1.5	Button type	×	×	1580 (1500)	20×4
7	BT-NC-NP-2.0	Button type	×	×	2090 (2000)	20×4
8	BT-NC-PI-1.35	Button type	×	○	1410 (1350)	20×4
9	BT-NC-PI-1.5	Button type	×	○	1540 (1500)	20×4
10	BT-NC-PI-2.0	Button type	×	○	2040 (2000)	20×4

\* Measured data

\*\* Planned value

Table 5.1 Computational cases

Case Num.	Case name	Geometric parameters			Heat flux (w/m <sup>2</sup> )	Temperature of DHX secondary side (°C)		
		Spacer	Flow holes	Bypass line		Inlet	Outlet	Mean
3	BT-CF-NP-2.0	Button type	Yes	No	2132	12.36	14.02	13.19
7	BT-NC-NP-2.0		No		2093	12.44	14.05	13.25
10	BT-NC-PI-2.0		Yes	Yes	2042	12.55	14.15	13.35

Case name descriptions ( 4 items (X1-X2-X3-X4) )

— X1 —

BT : button type spacer pad

— X2 —

CF : Core former with the flow holes

NC : Core former without the flow holes

— X3 —

PI : IWF bypass line is opened

NP : IWF bypass line is closed

— X4 —

2.0 : Heat flux of 2000 W/m<sup>2</sup> and DHX flow rate of 80 l/min

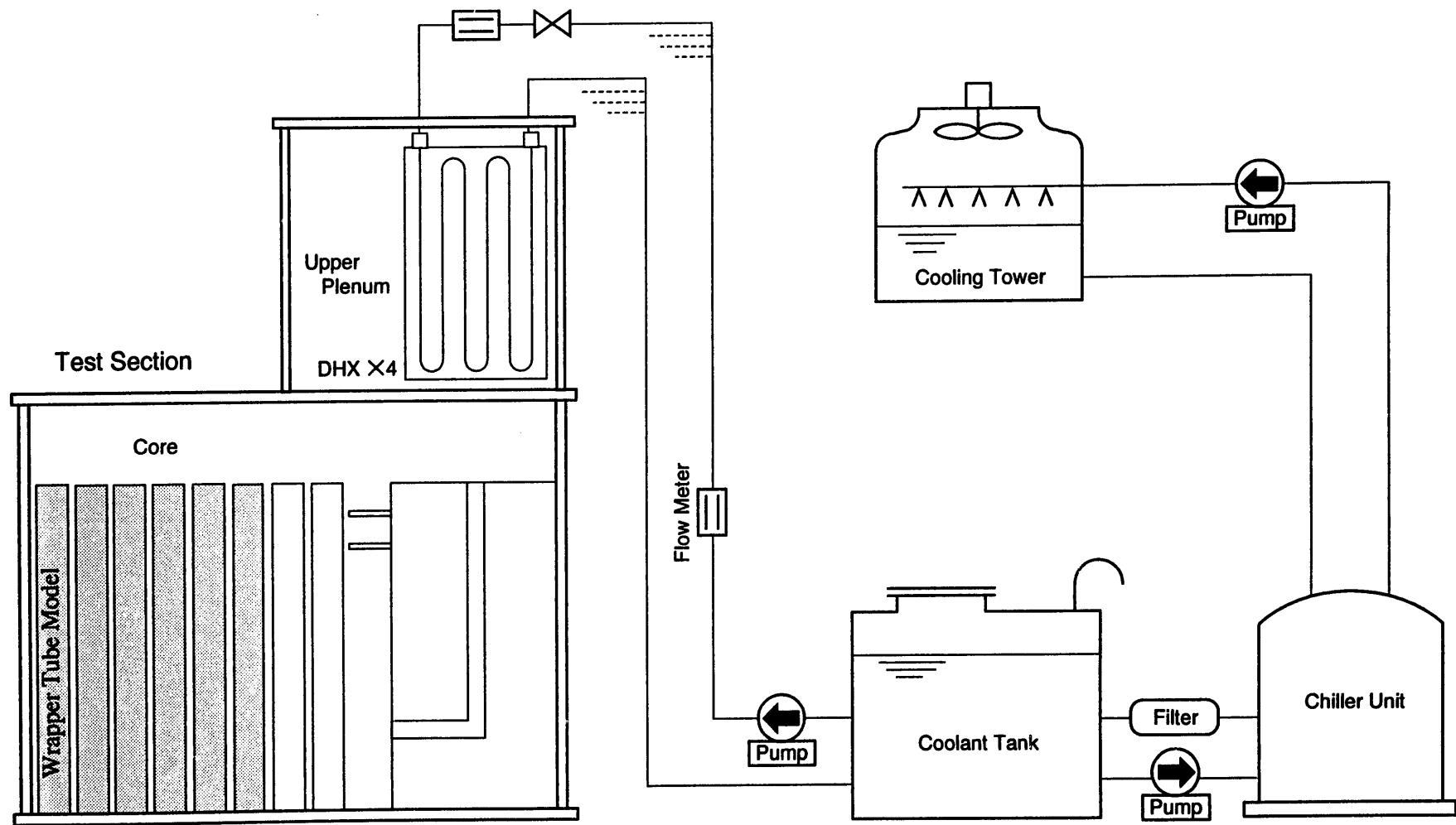


Fig.2.1 Flow diagram of TRIF

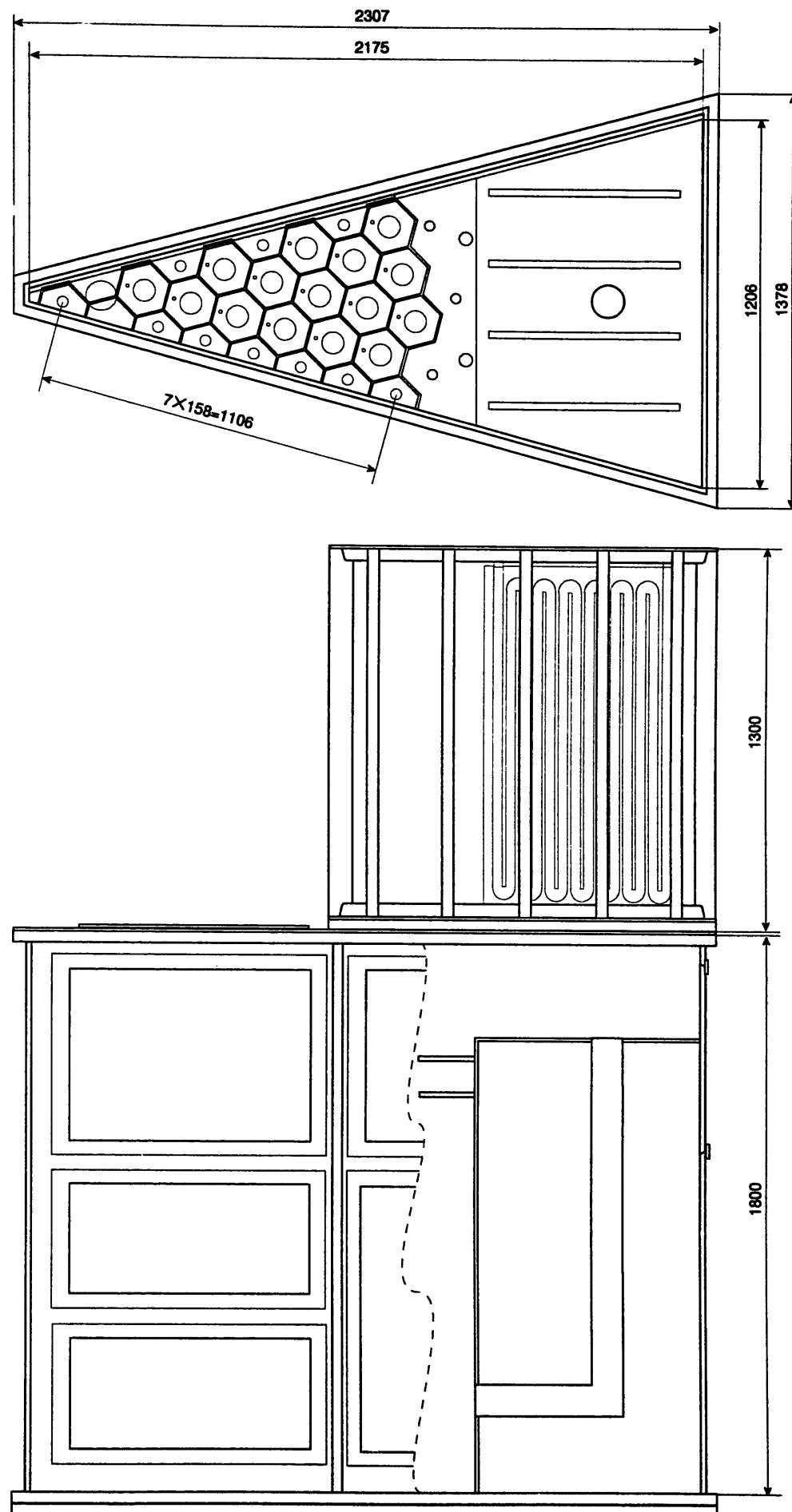
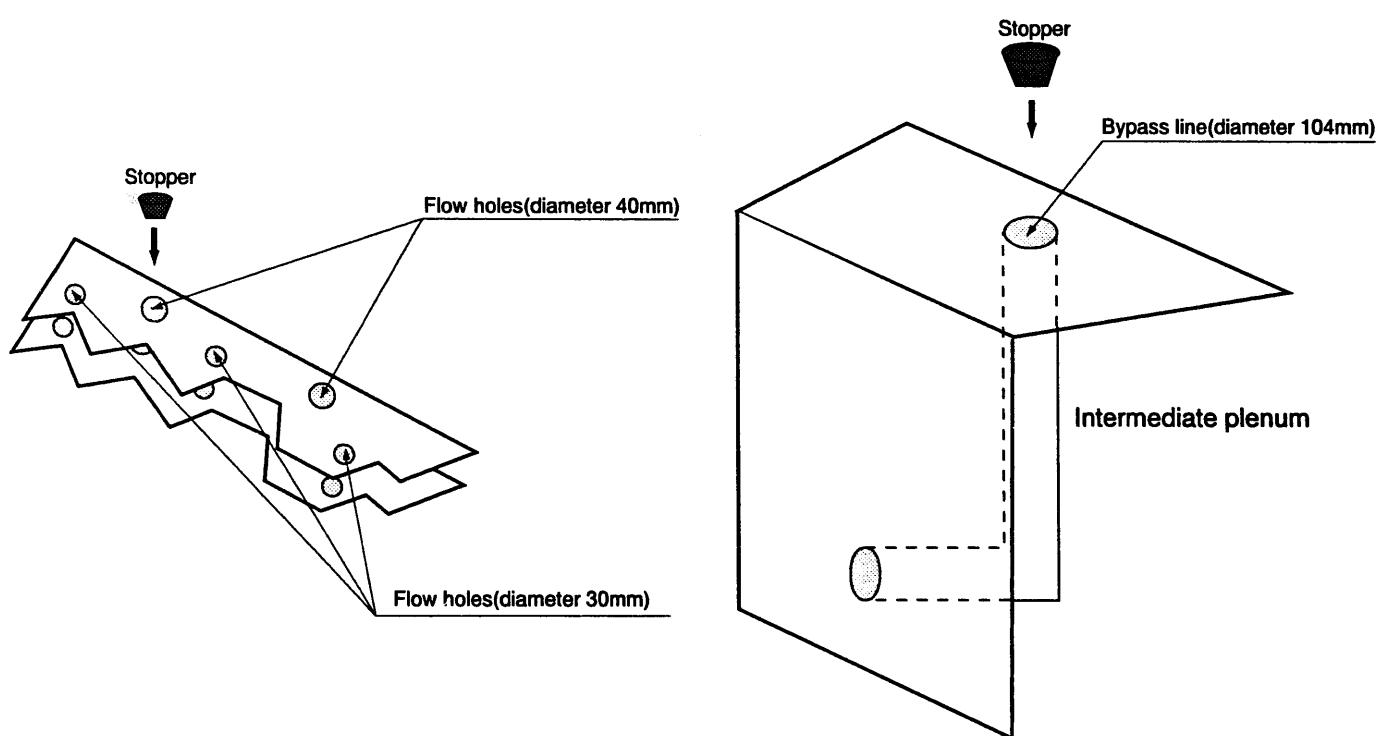
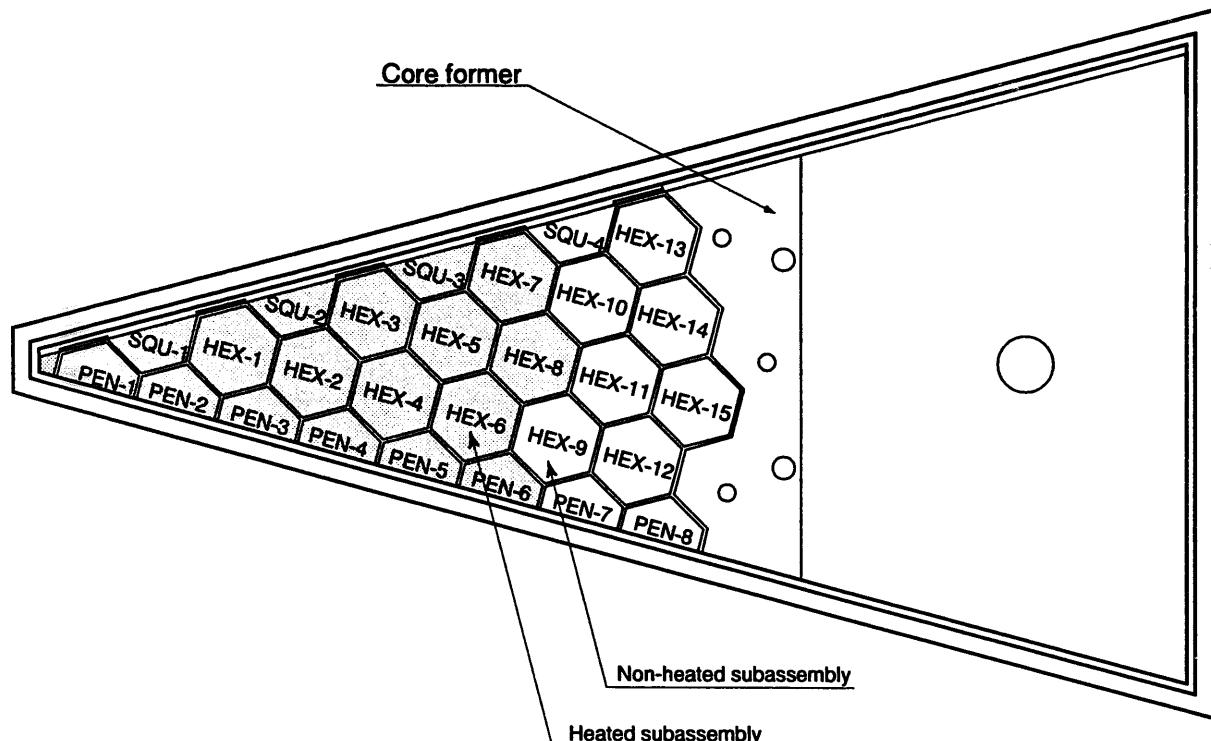


Fig.2.2 Schematic of test vessel



Core former (2stages) with flow holes

Intermediate plenum with bypass line

Fig.2.3 Geometric parameters

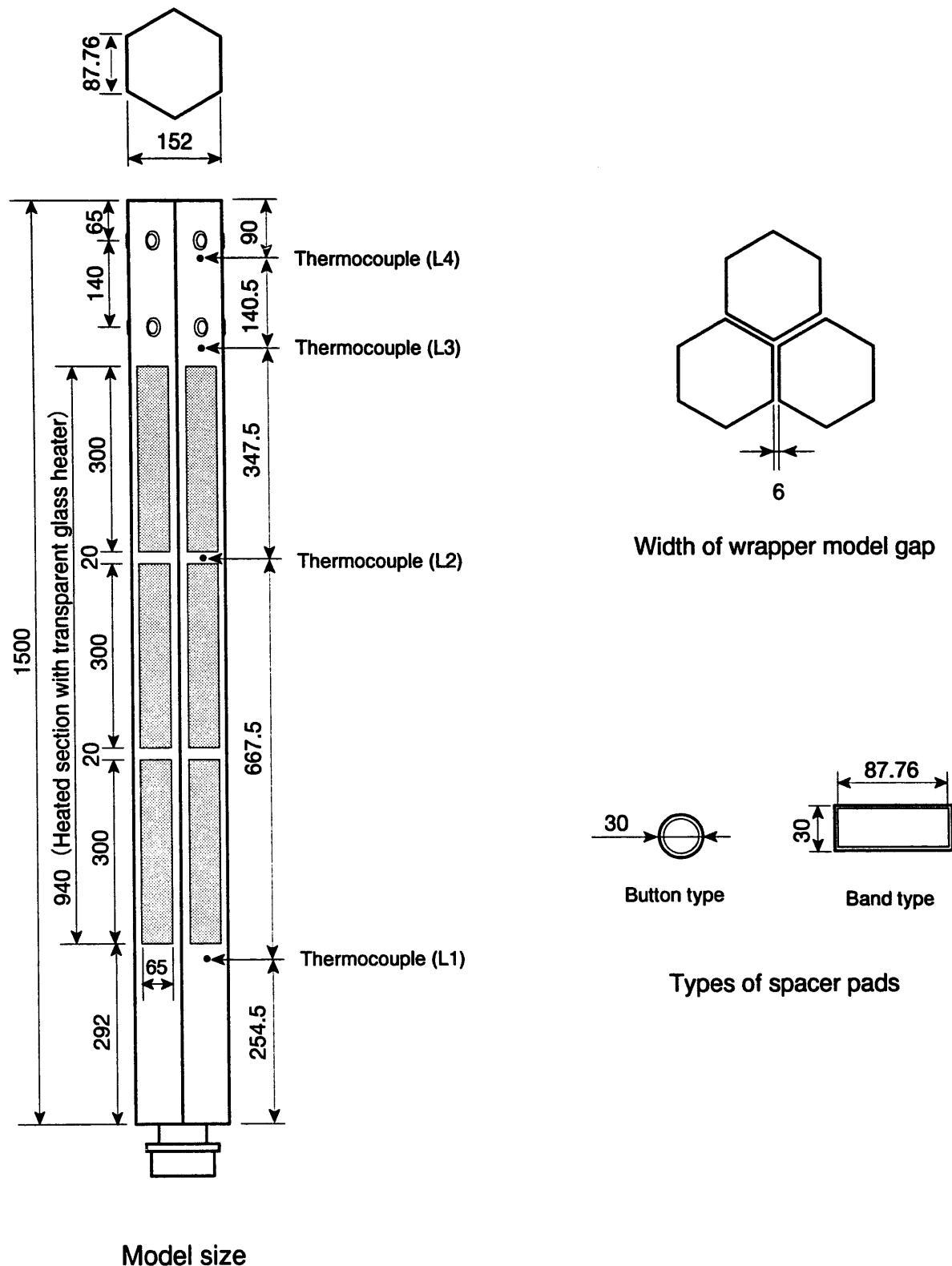


Fig.2.4 Schematic of wrapper tube model

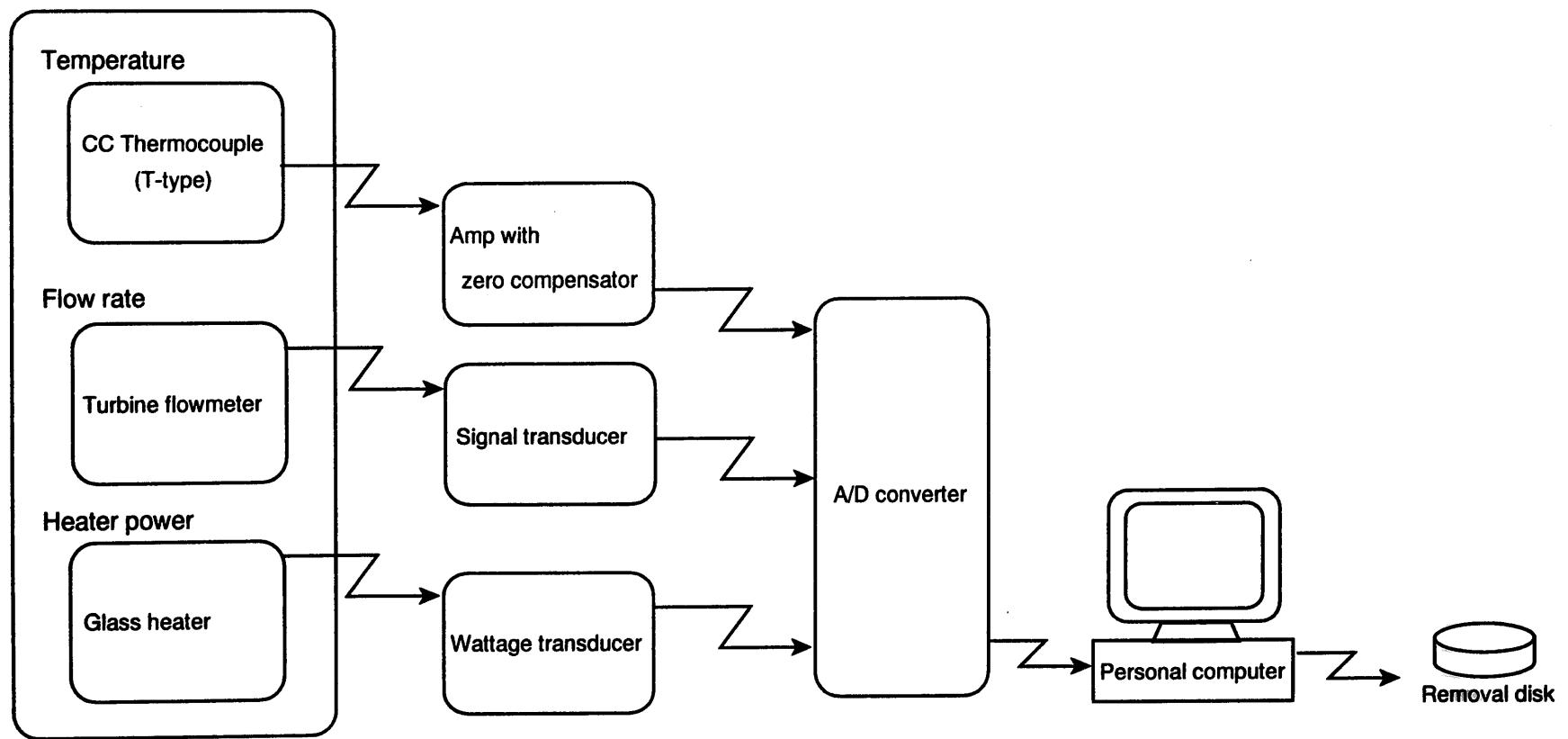


Fig.2.5 Data acquisition system

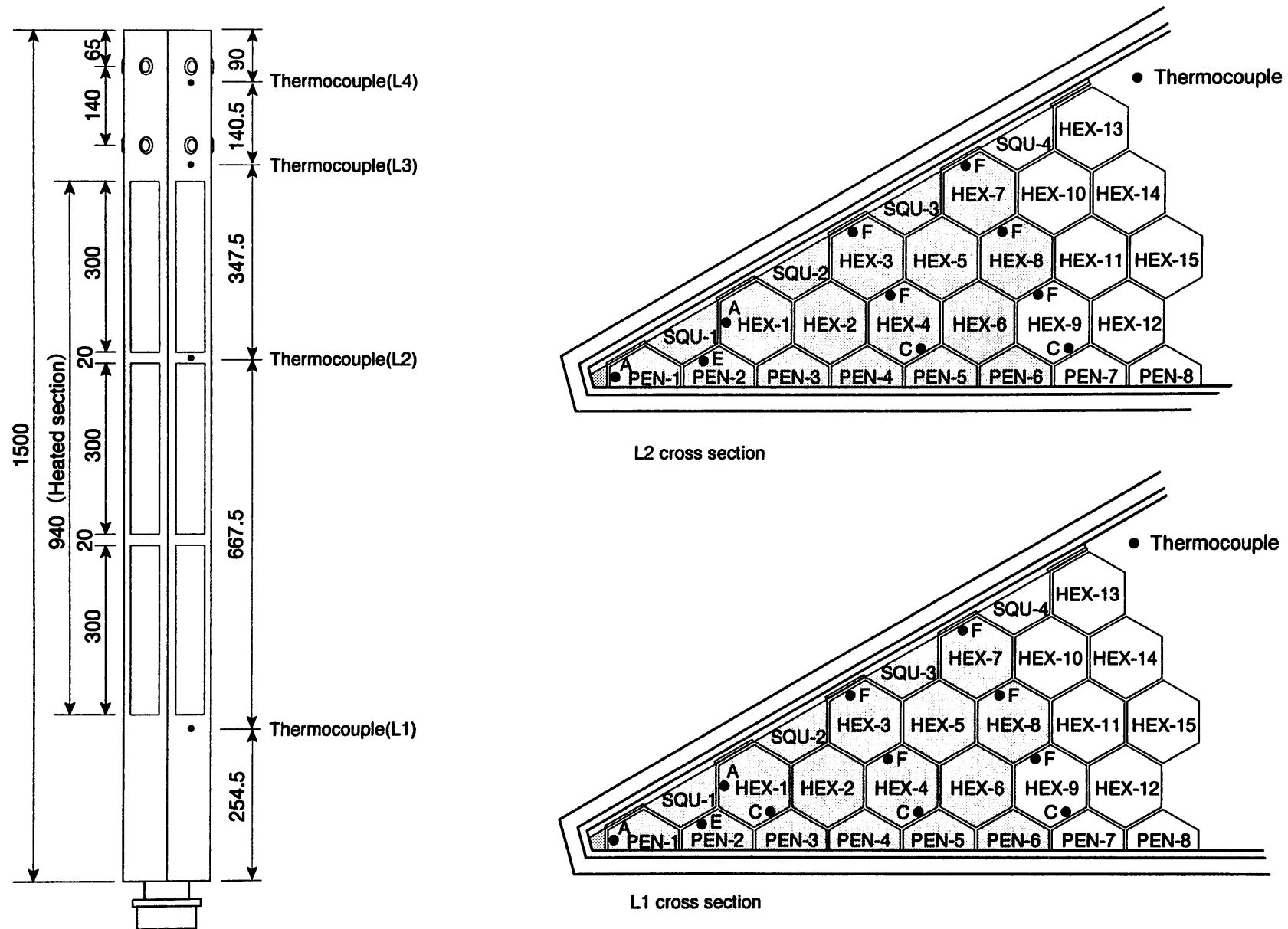


Fig.2.6 Thermocouple positions at wrapper tubes (L1 and L2 cross sections)

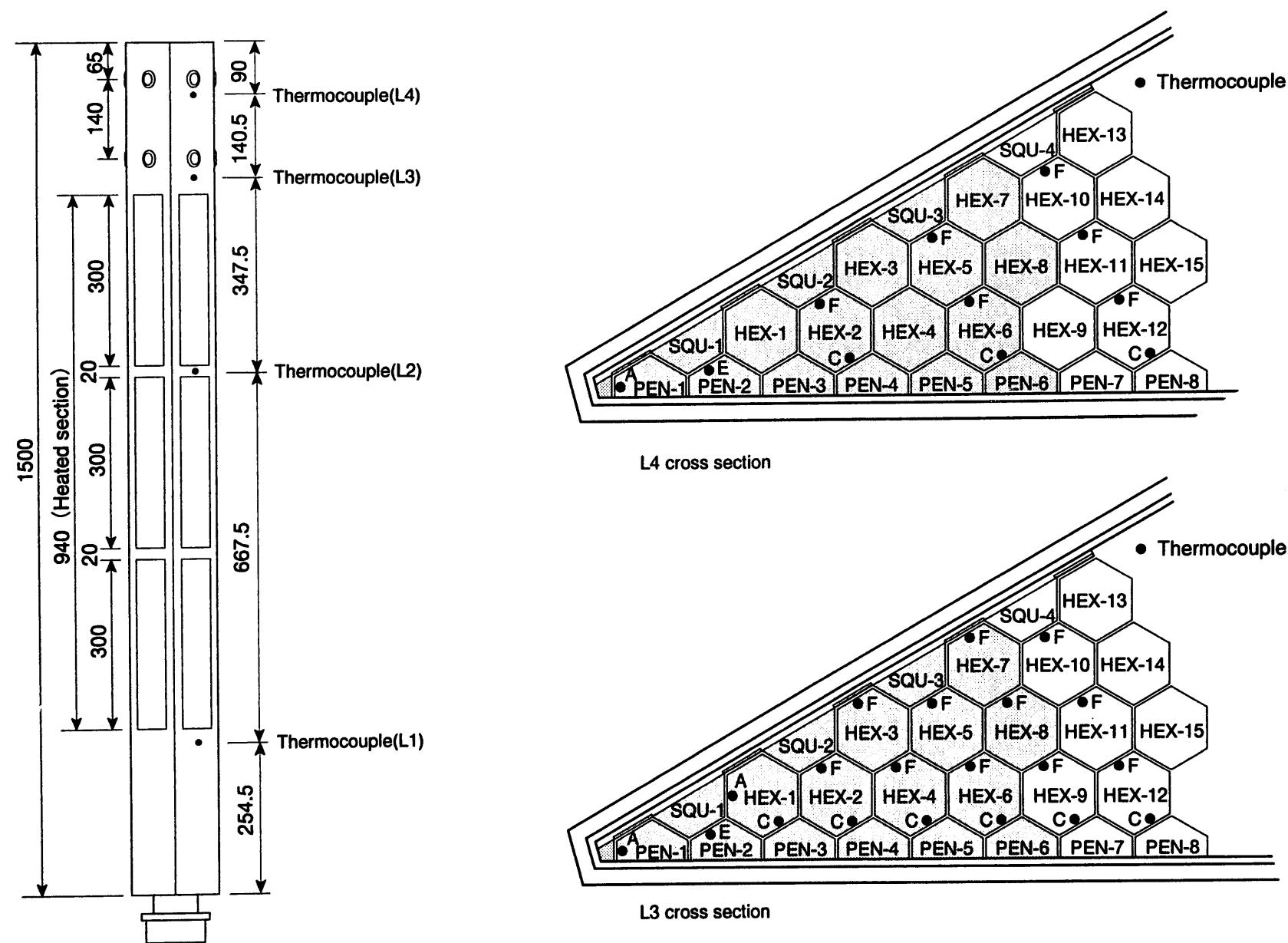
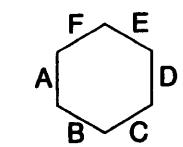
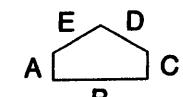


Fig.2.7 Thermocouple positions at wrapper tubes (L3 and L4 cross sections)



Name of side

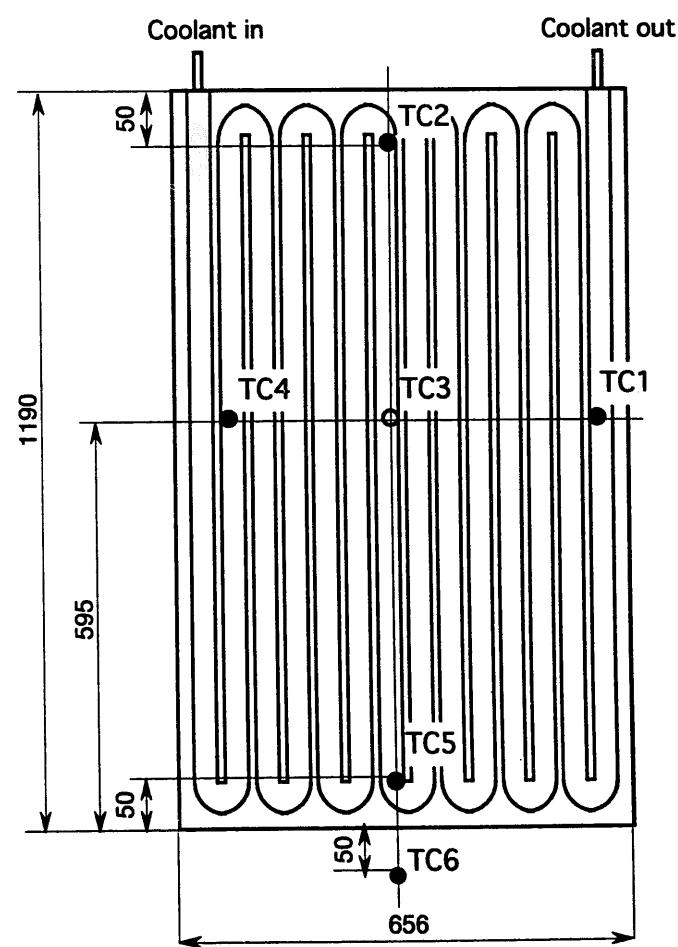
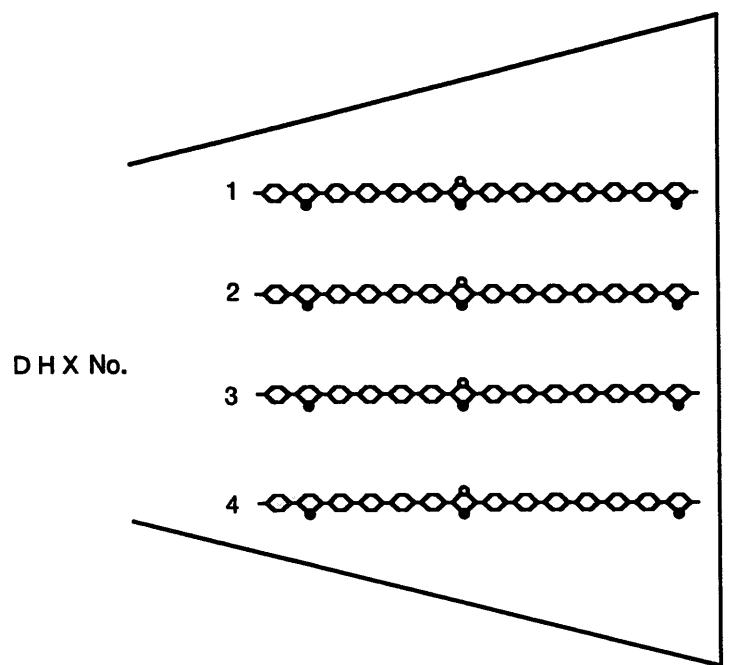


Fig.2.8 Thermocouple positions at DHX

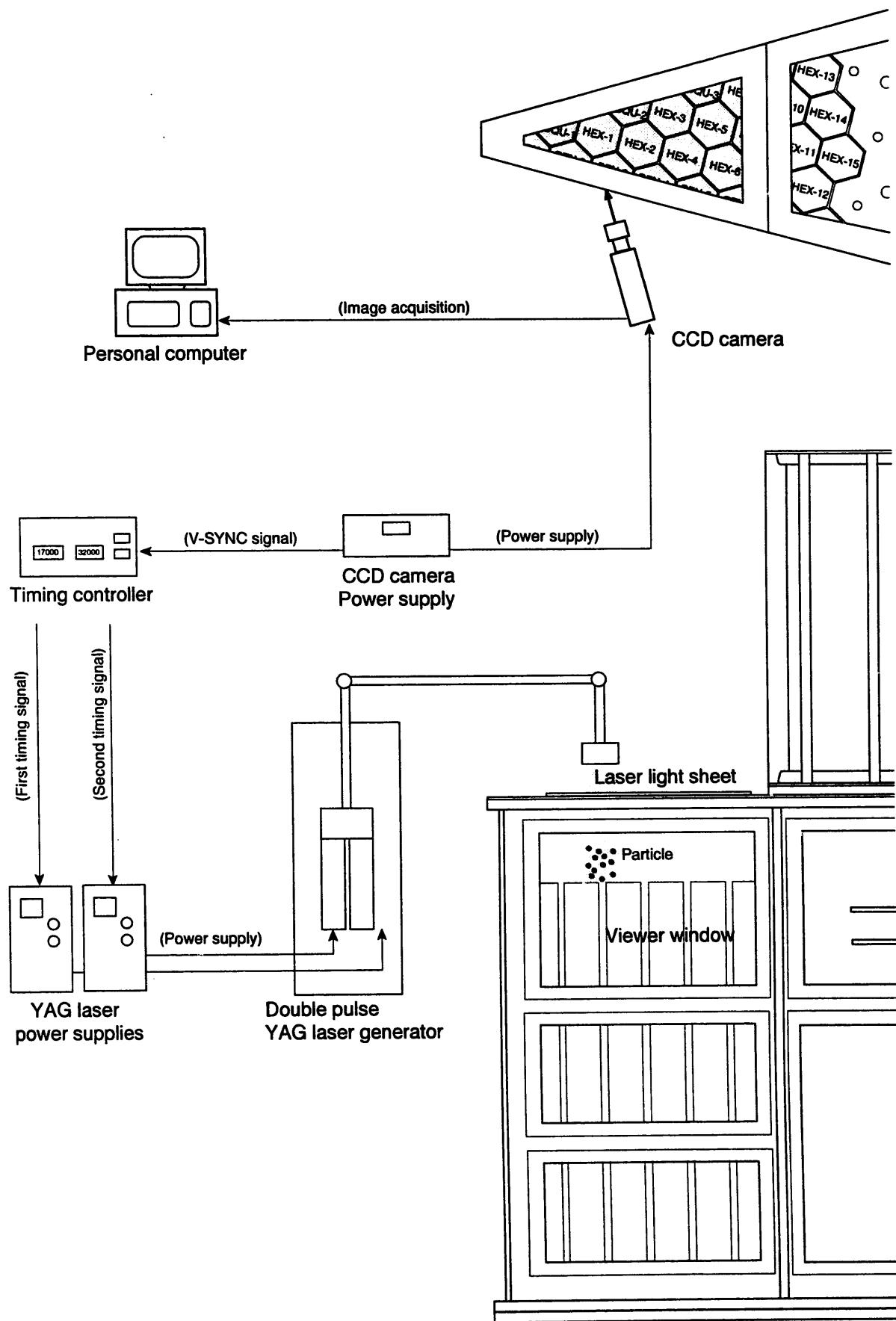


Fig.3.1 Data acquisition system for PIV

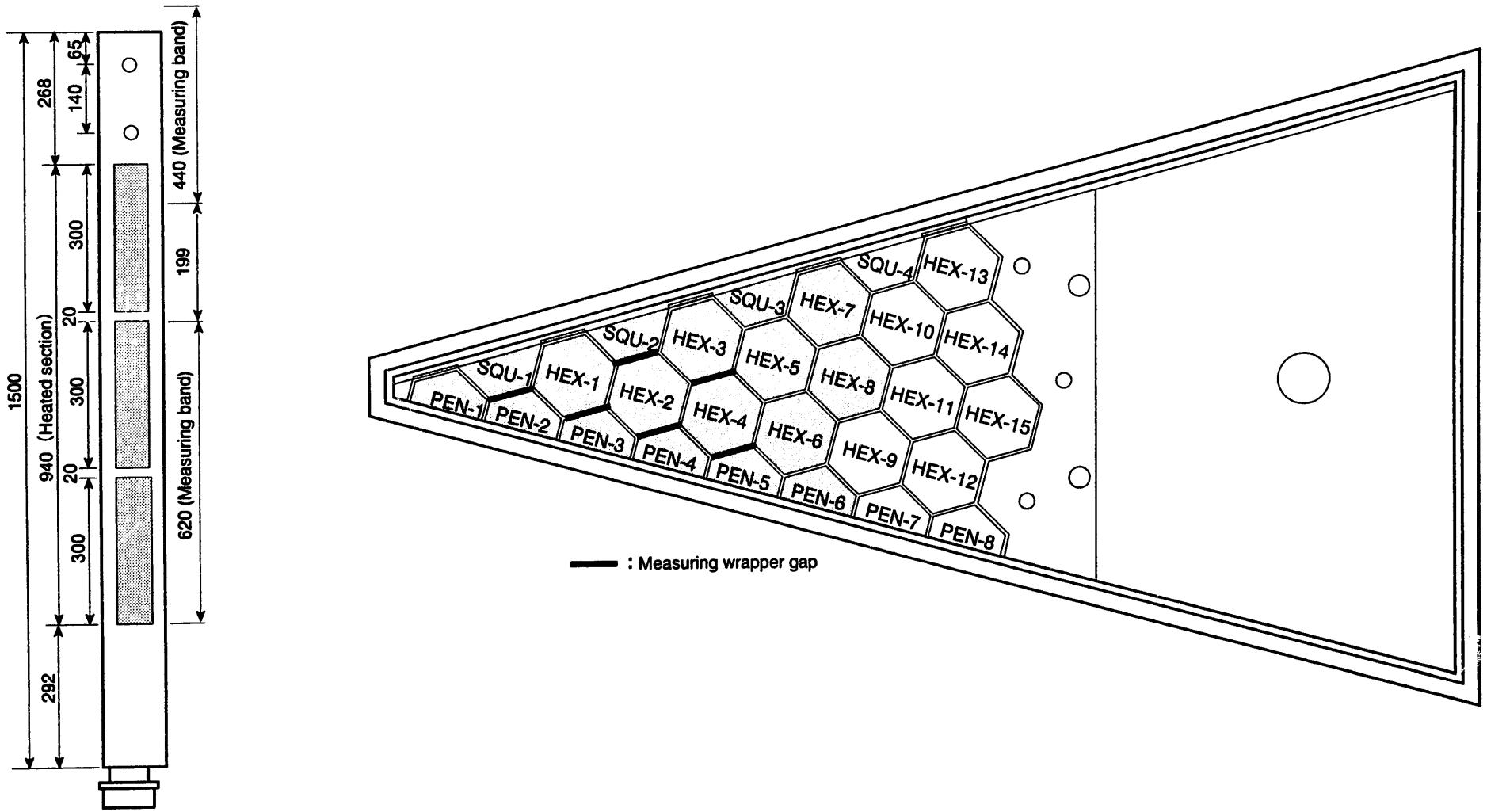
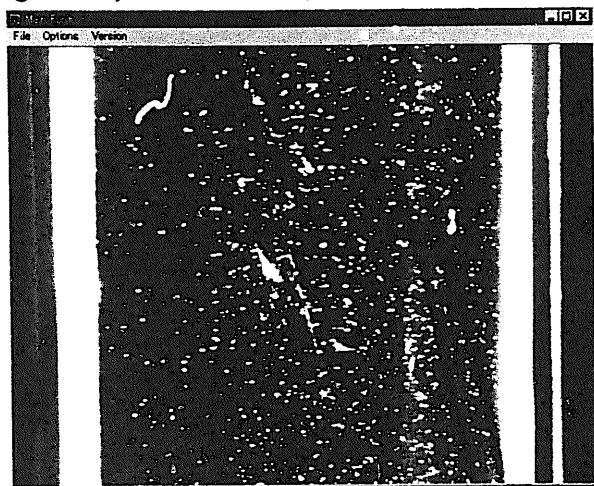


Fig.3.2 Velocity Measurement area

**Image Acquisition (Image :Inter-wrapper flow at heated section)**



Digital image of flow field visualized with tracer particles and laser light sheet in a fixed time interval

**Noise Reduction**



Particle image acquired with  
Noise Reduction Program

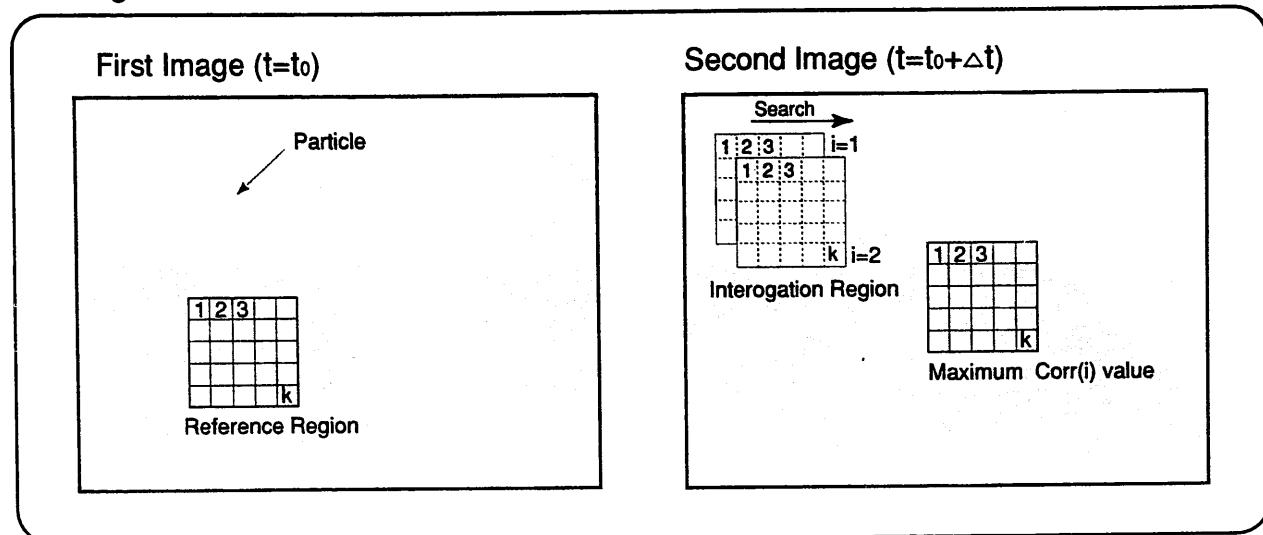
**Vector Draw**



Calculated particle movement  
distances based on cross-correlation  
method

**Fig.3.3 Procedure for measurement of velocity field**

## Image Pairs



## Calculation of Cross-correlation Function

$$\text{Cross-correlation Function: } \text{Corr}(i) = \frac{\sum_{k=1}^n \{(L1(k) - L1_{ave}) \cdot (L2(k) - L2_{ave})\}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n \{(L1(k) - L1_{ave})^2 \cdot (L2(k) - L2_{ave})^2\}}}$$

(  $L1_{ave}, L2_{ave}$ : Space Average Luminosity )



## Velocity Vector Draw

The vector is such determined that Reference Region moved to the region with maximum Corr(i) value

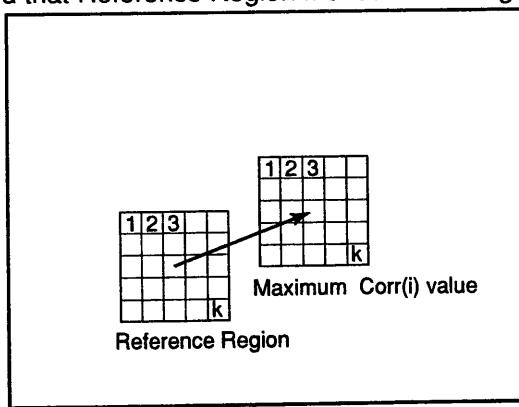


Fig.3.4 Principle of pattern matching

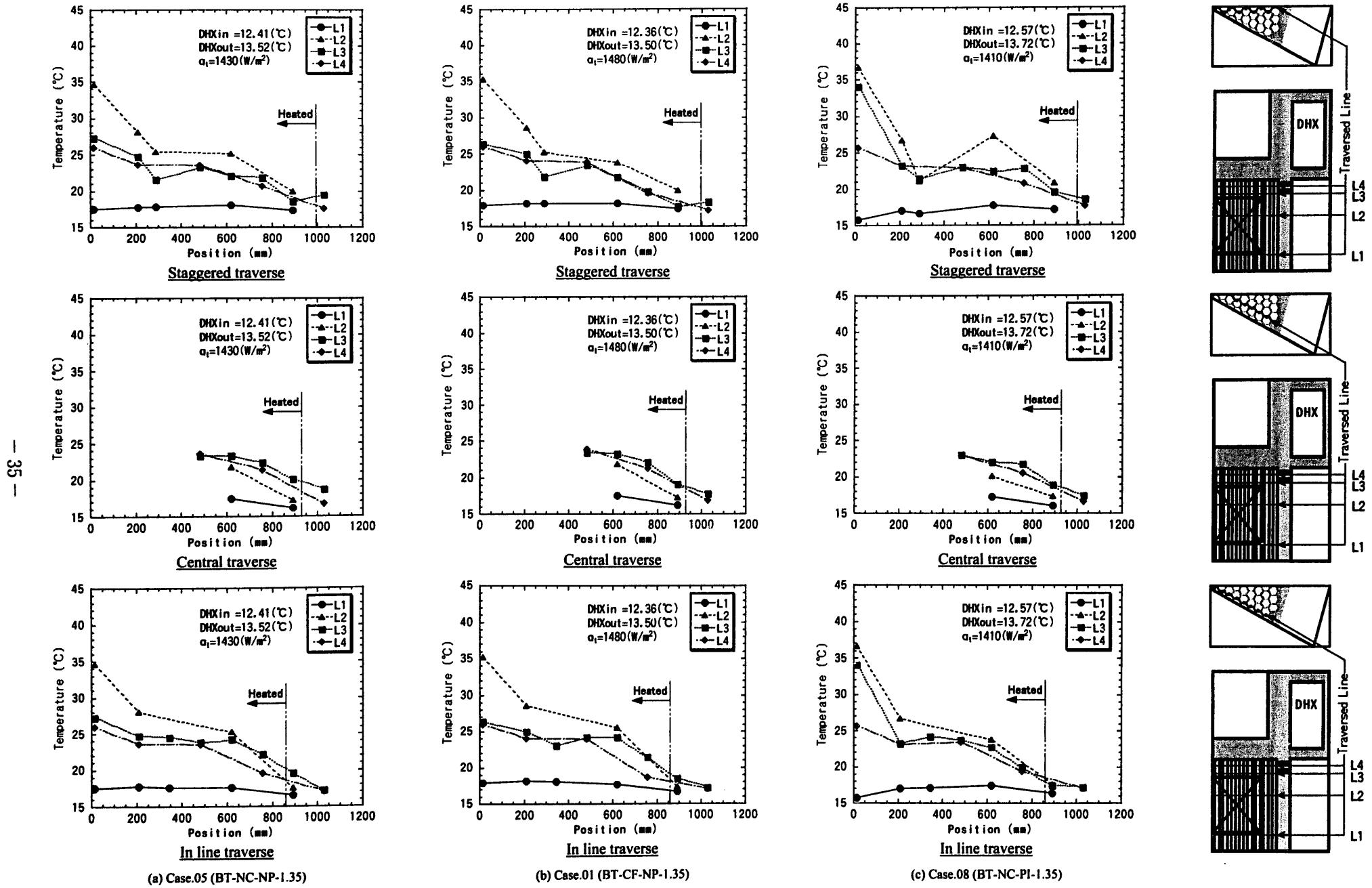
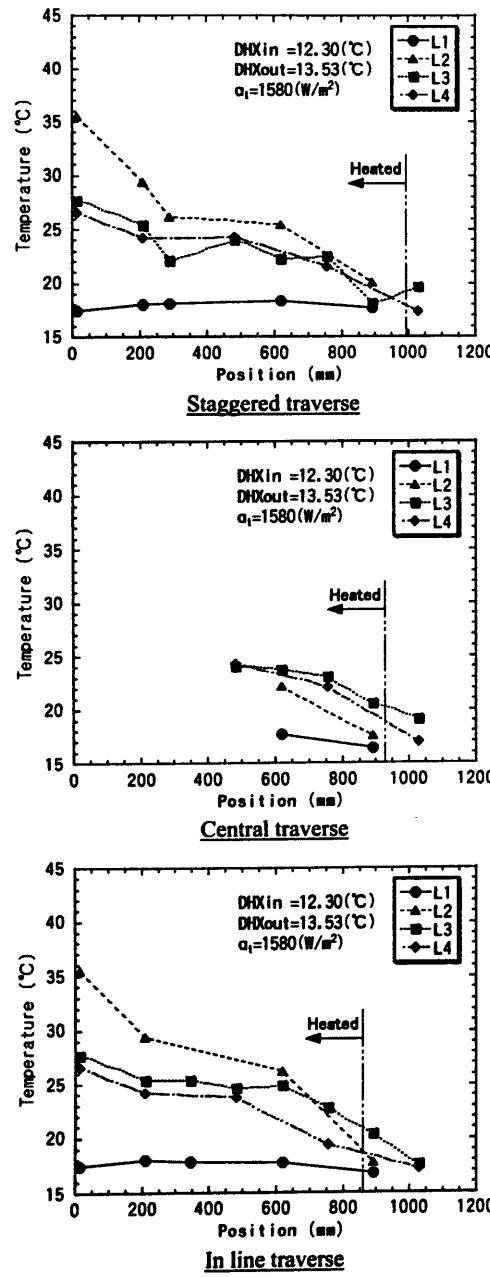
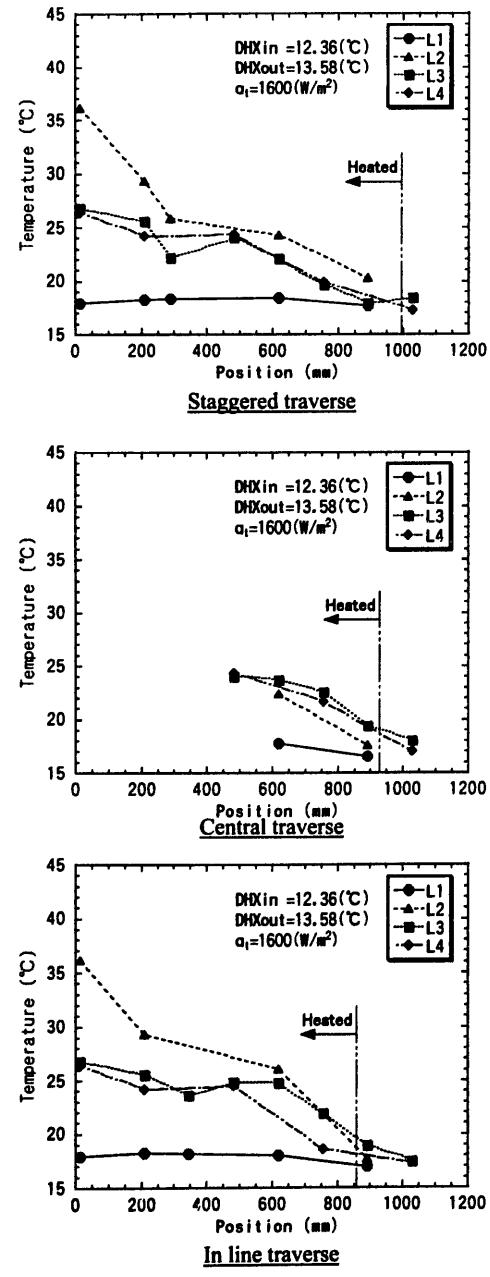


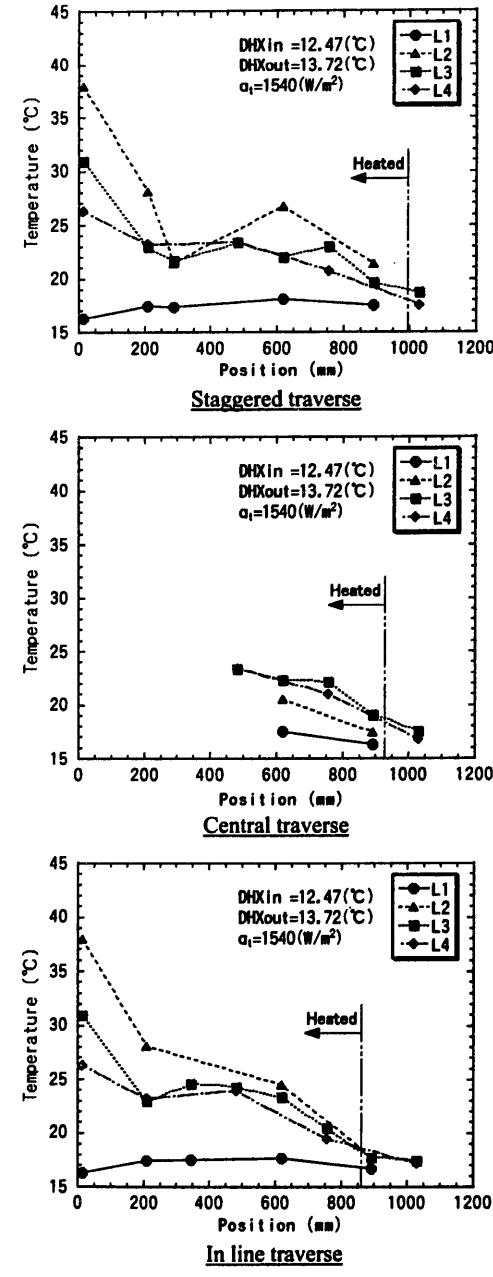
Fig.4.1 Measured temperature profiles in horizontal direction (Case5,1and8)



(a) Case.06 (BT-NC-NP-1.5)



(b) Case.02 (BT-CF-NP-1.5)



(c) Case.09 (BT-NC-PI-1.5)

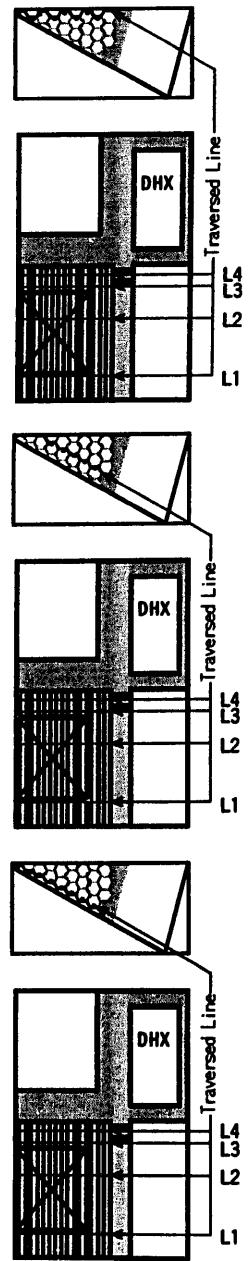


Fig.4.2 Measured temperature profiles in horizontal direction (Case6,2and9)

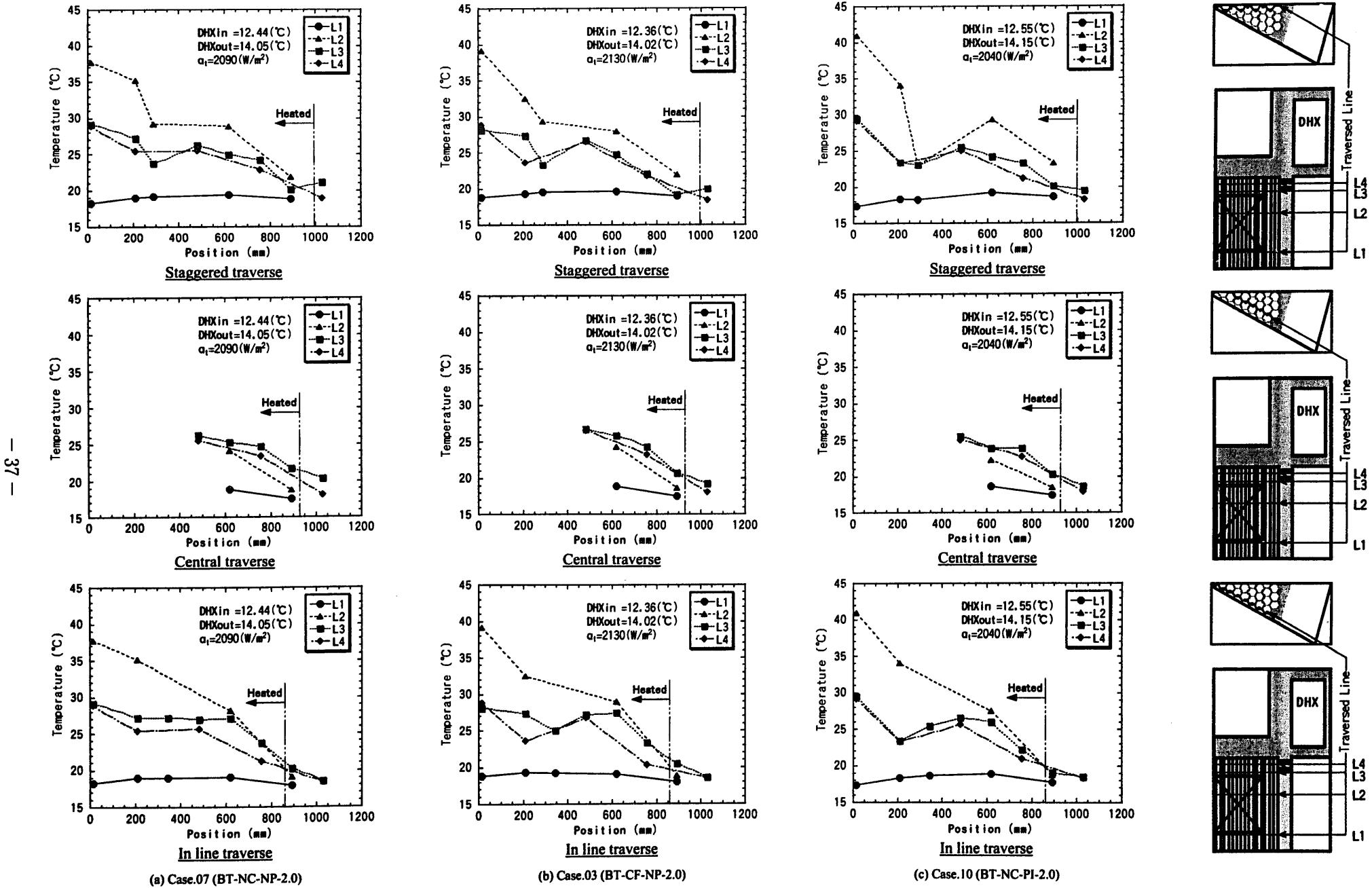
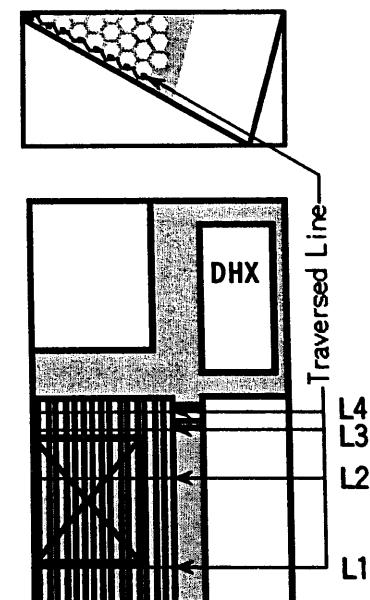
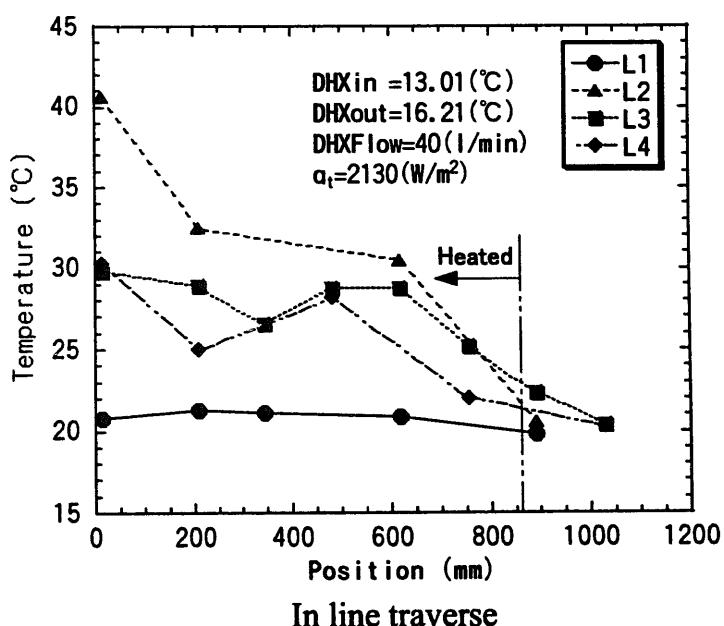
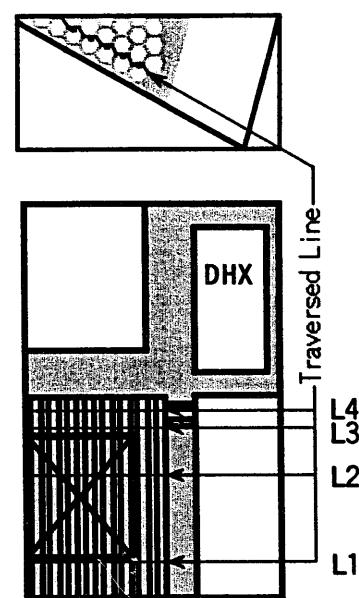
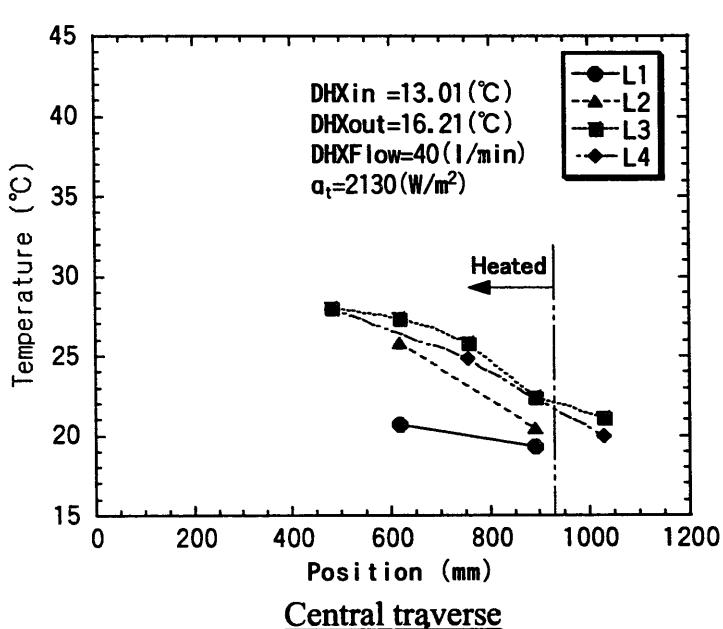
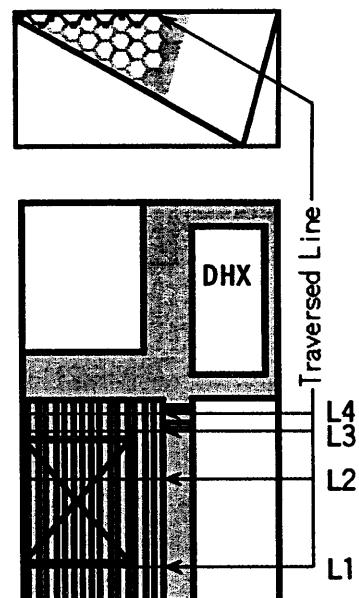
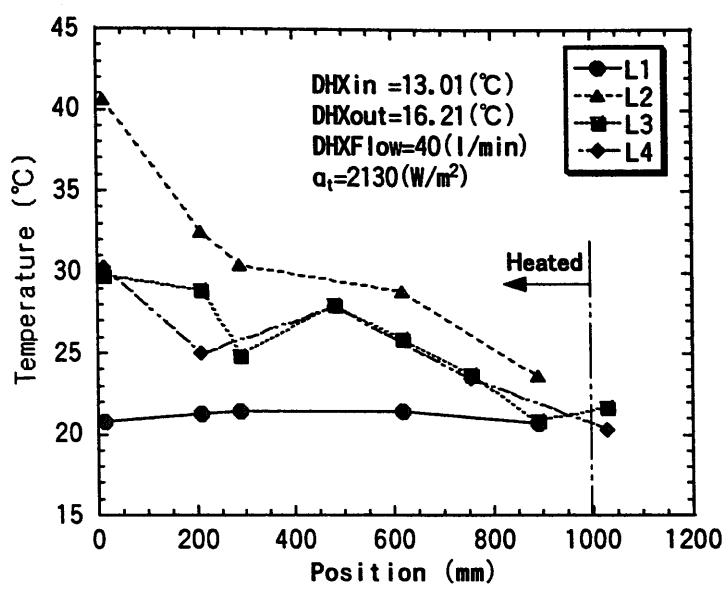


Fig.4.3 Measured temperature profiles in horizontal direction (Case7,3and10)



Case.04 (BT-NC-NP-2.0d)

Fig.4.4 Measured temperature profiles in horizontal direction (Case4)

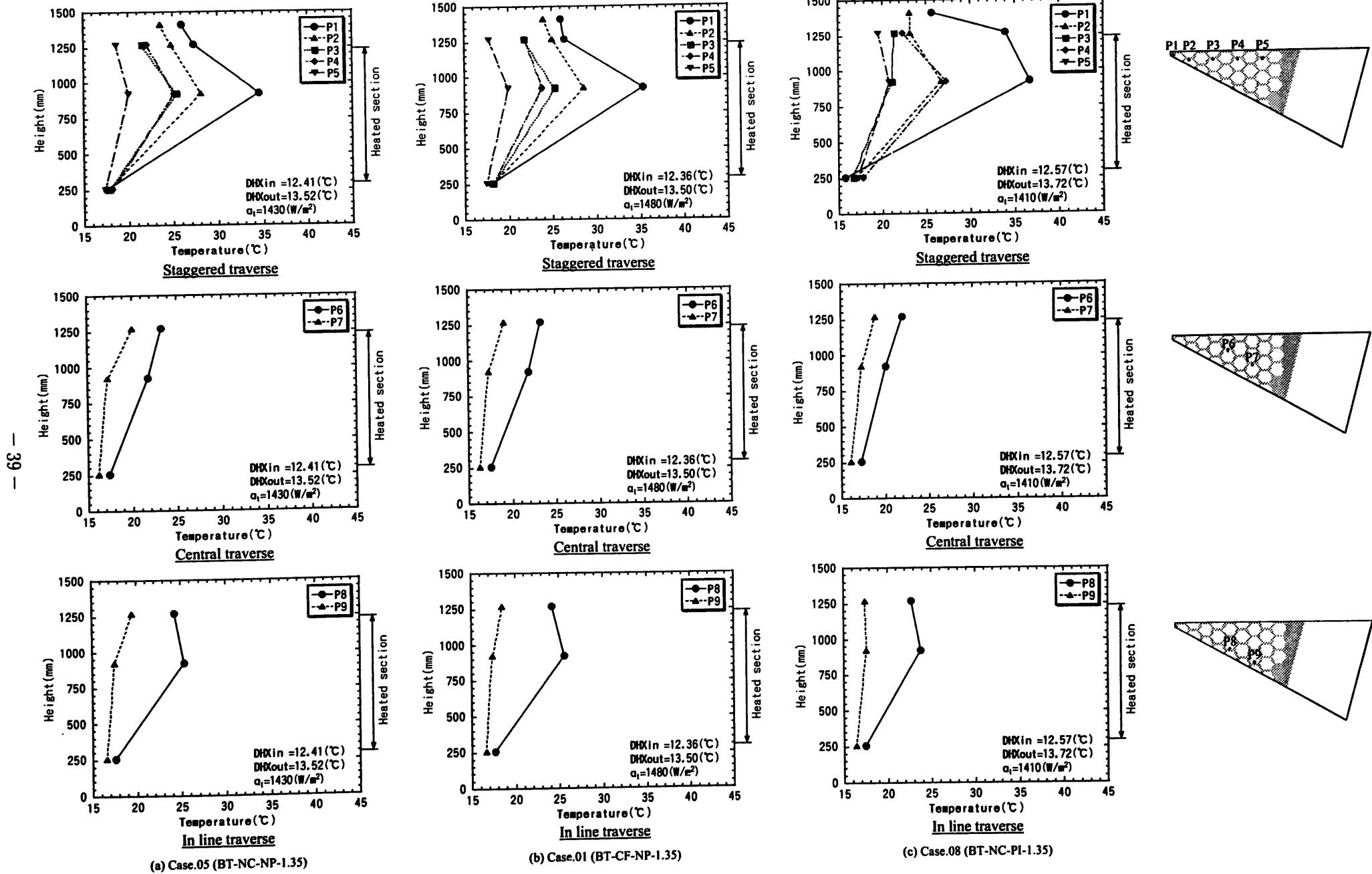


Fig.4.5 Measured temperature profiles in vertical direction(Case5,1and8)

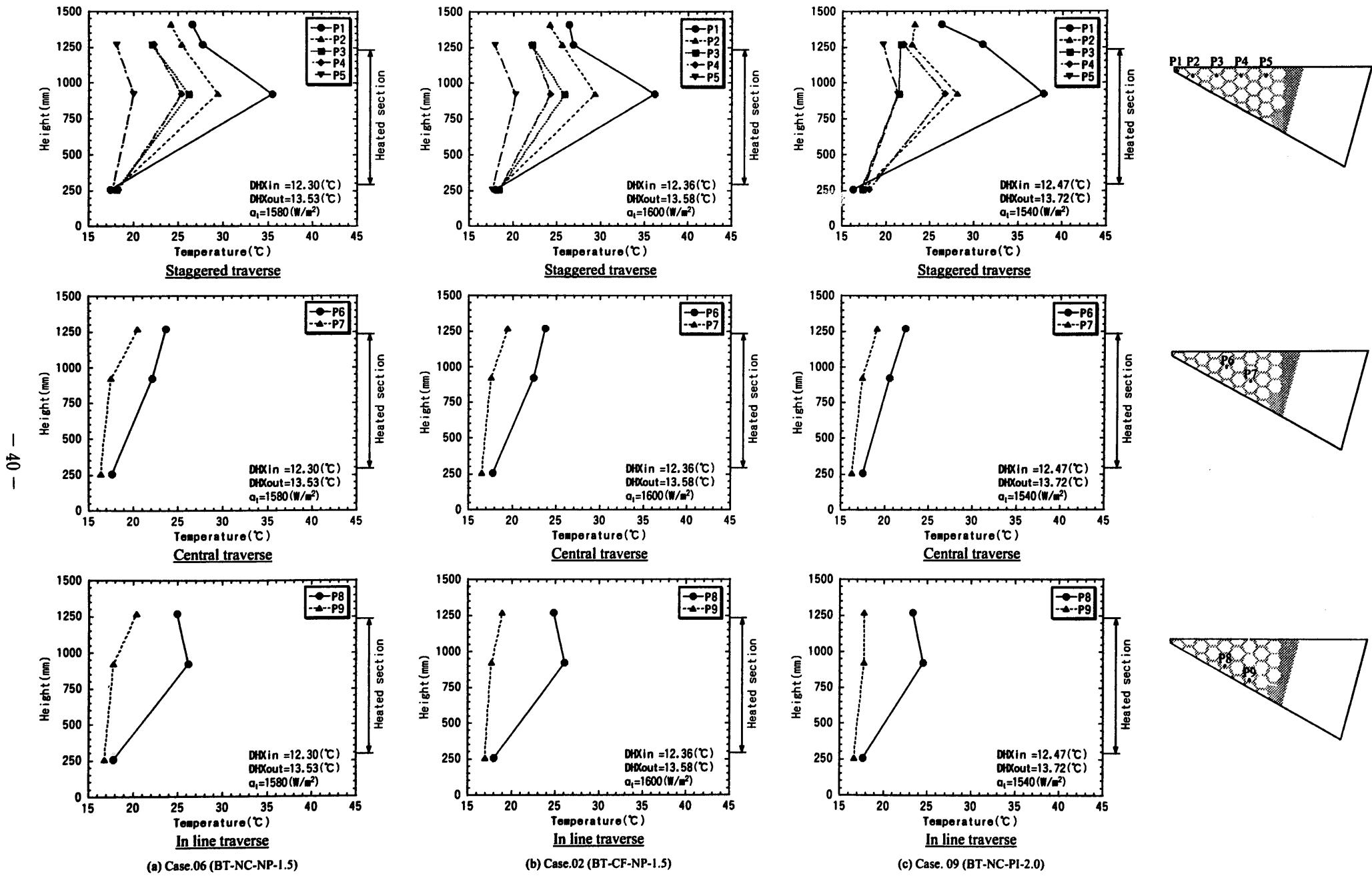


Fig.4.6 Measured temperature profiles in vertical direction(Case6,2and9)

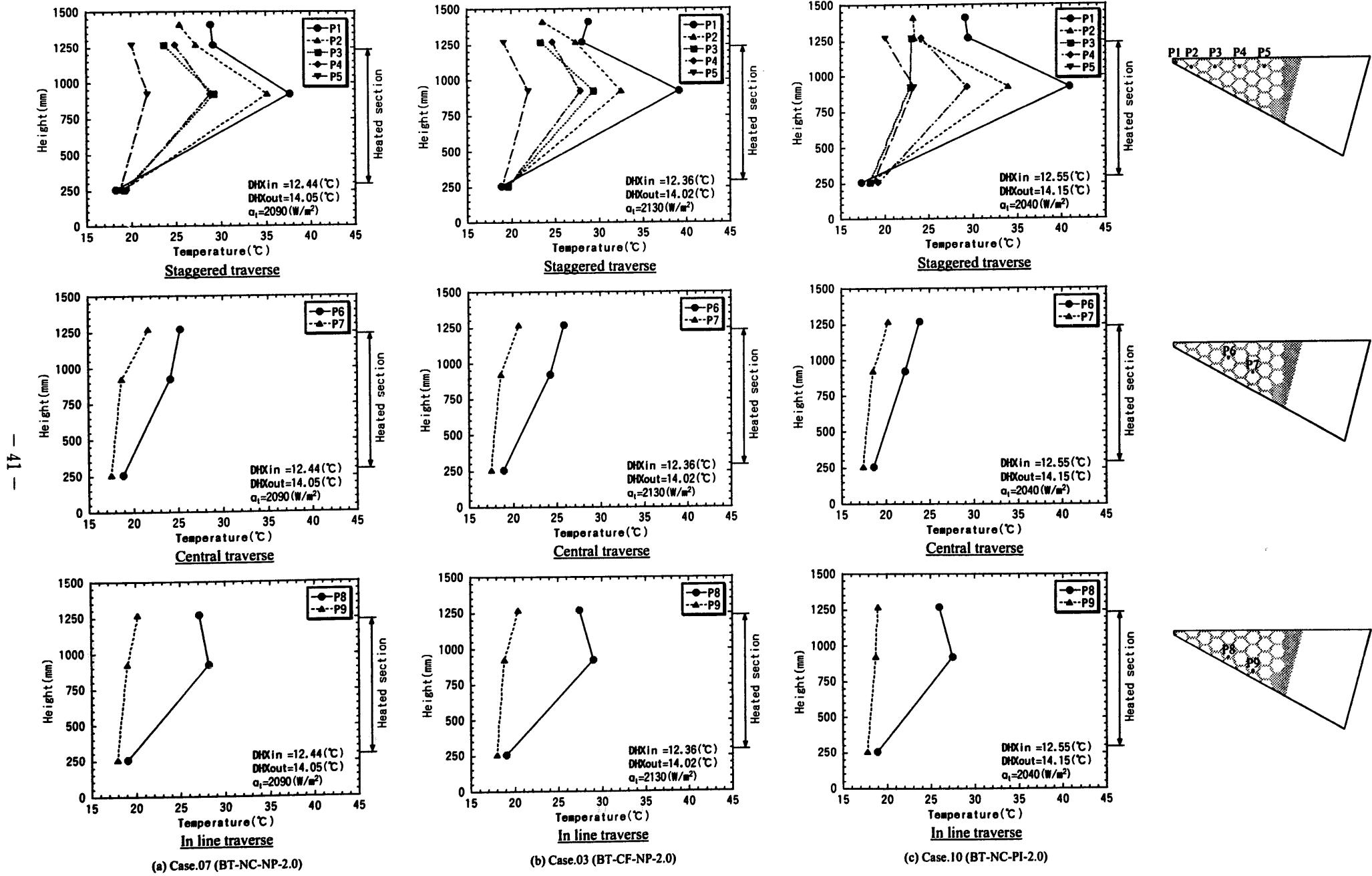
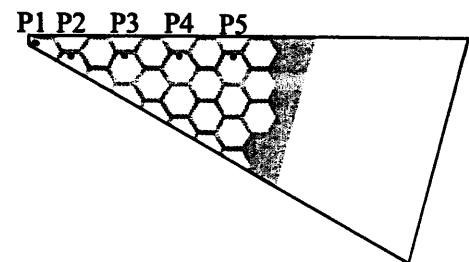
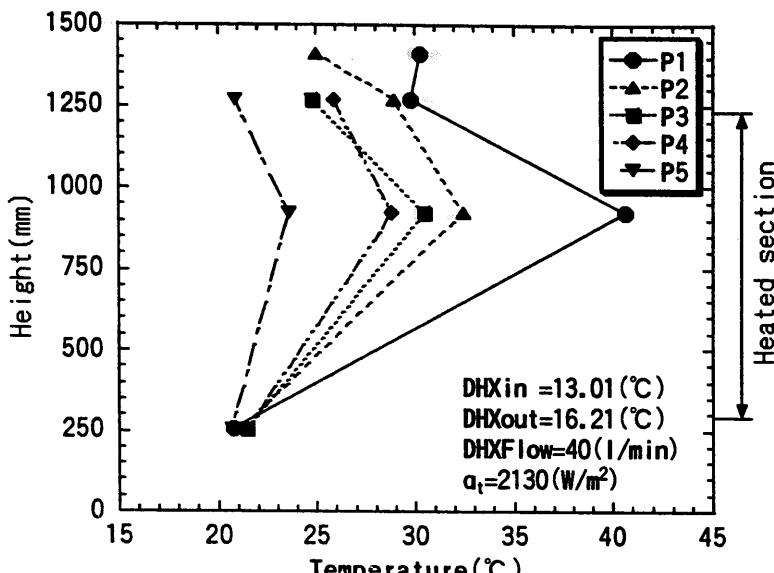
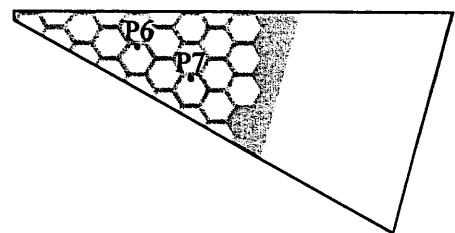
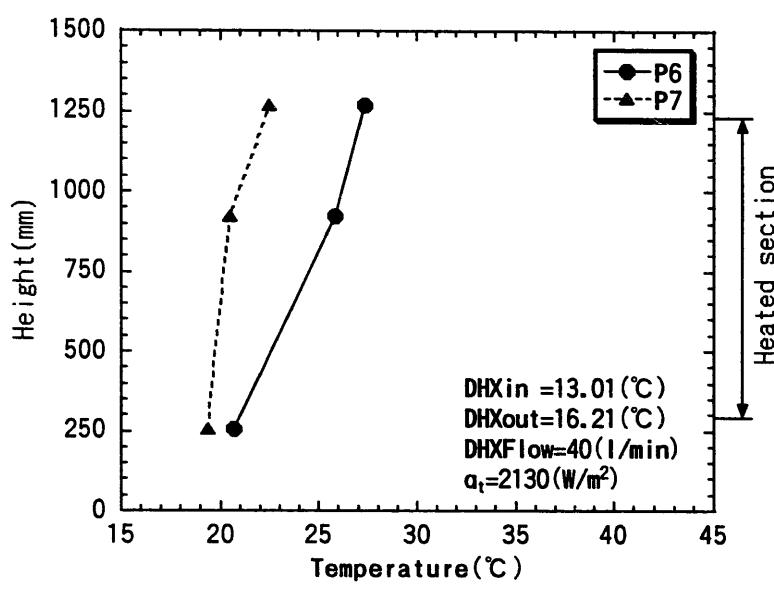
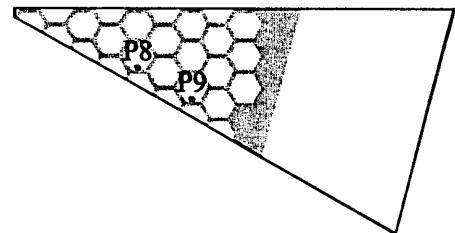
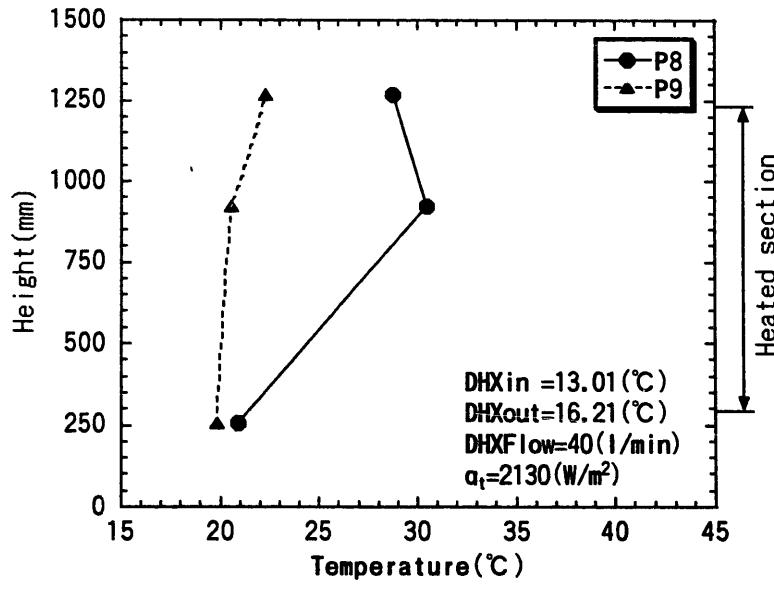


Fig.4.7 Measured temperature profiles in vertical direction(Case7,3and10)

Staggered traverseCentral traverse

Case.04 (BT-NC-NP-2.0d)

Fig.4.8 Measured temperature profiles in vertical direction (Case4)

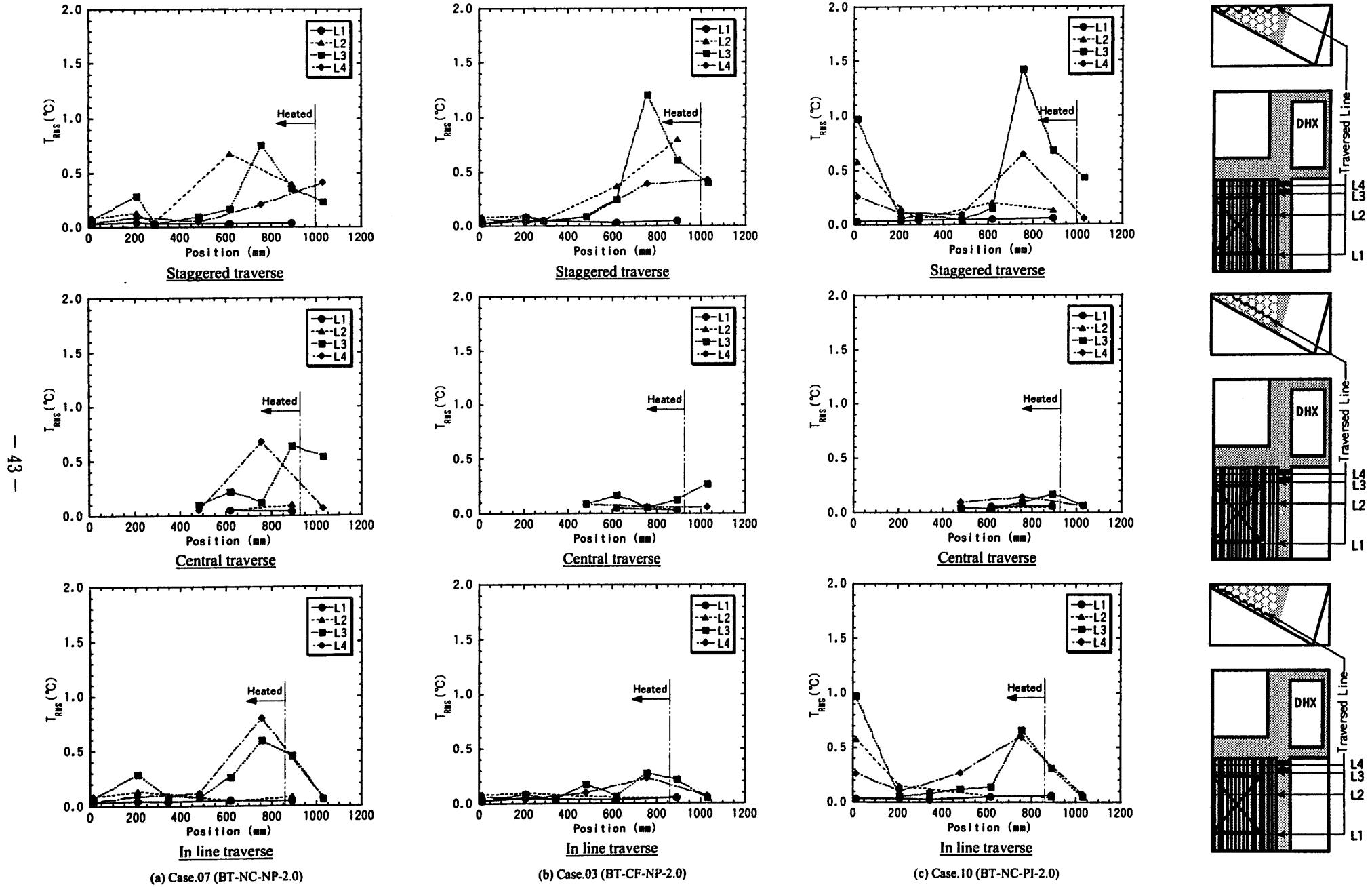


Fig.4.9 Temperature fluctuation intensity profiles in horizontal direction (Case7,3and10)

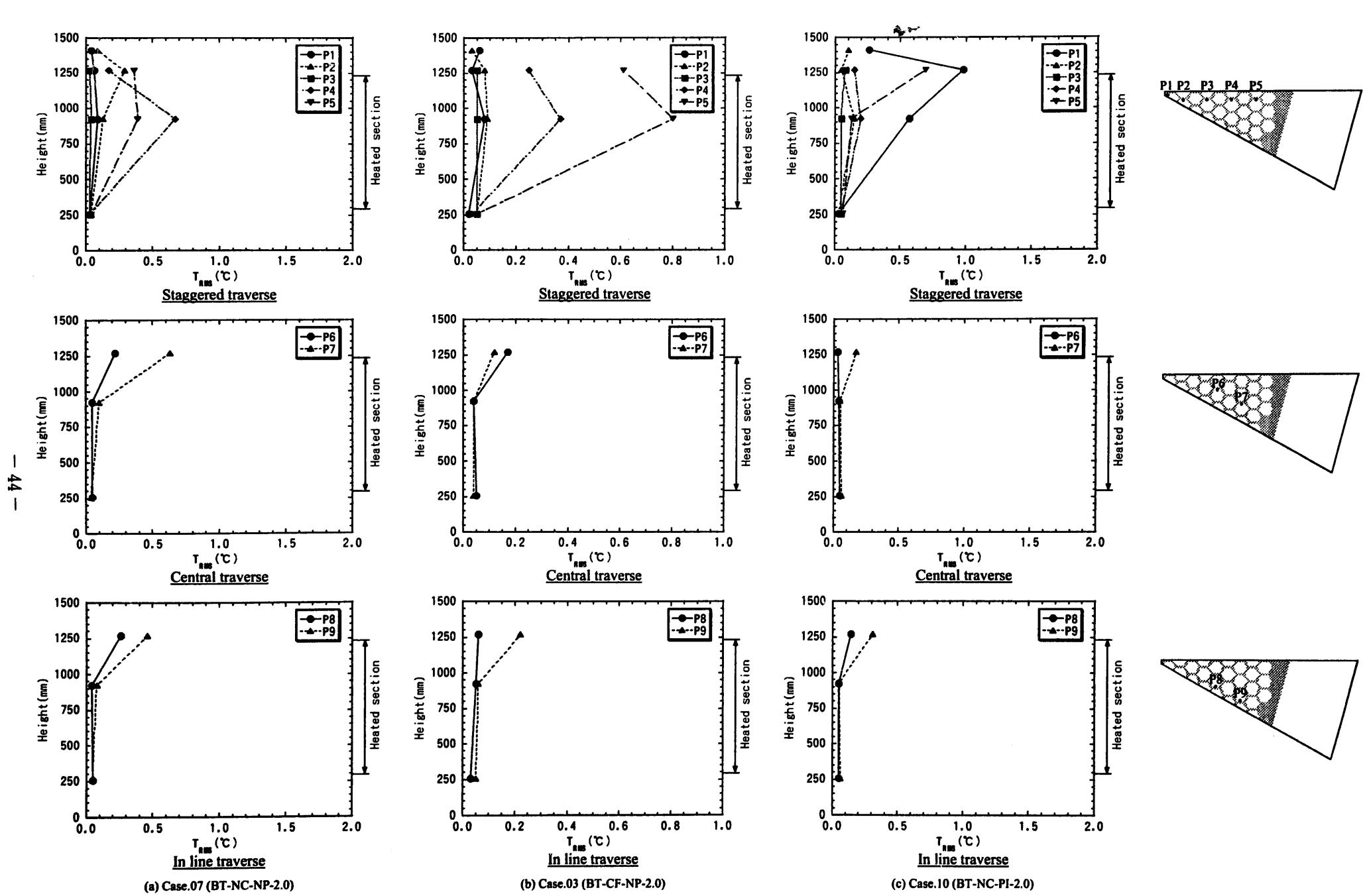


Fig.4.10 Temperature fluctuation intensity profiles in vertical direction (Case7,3and10)

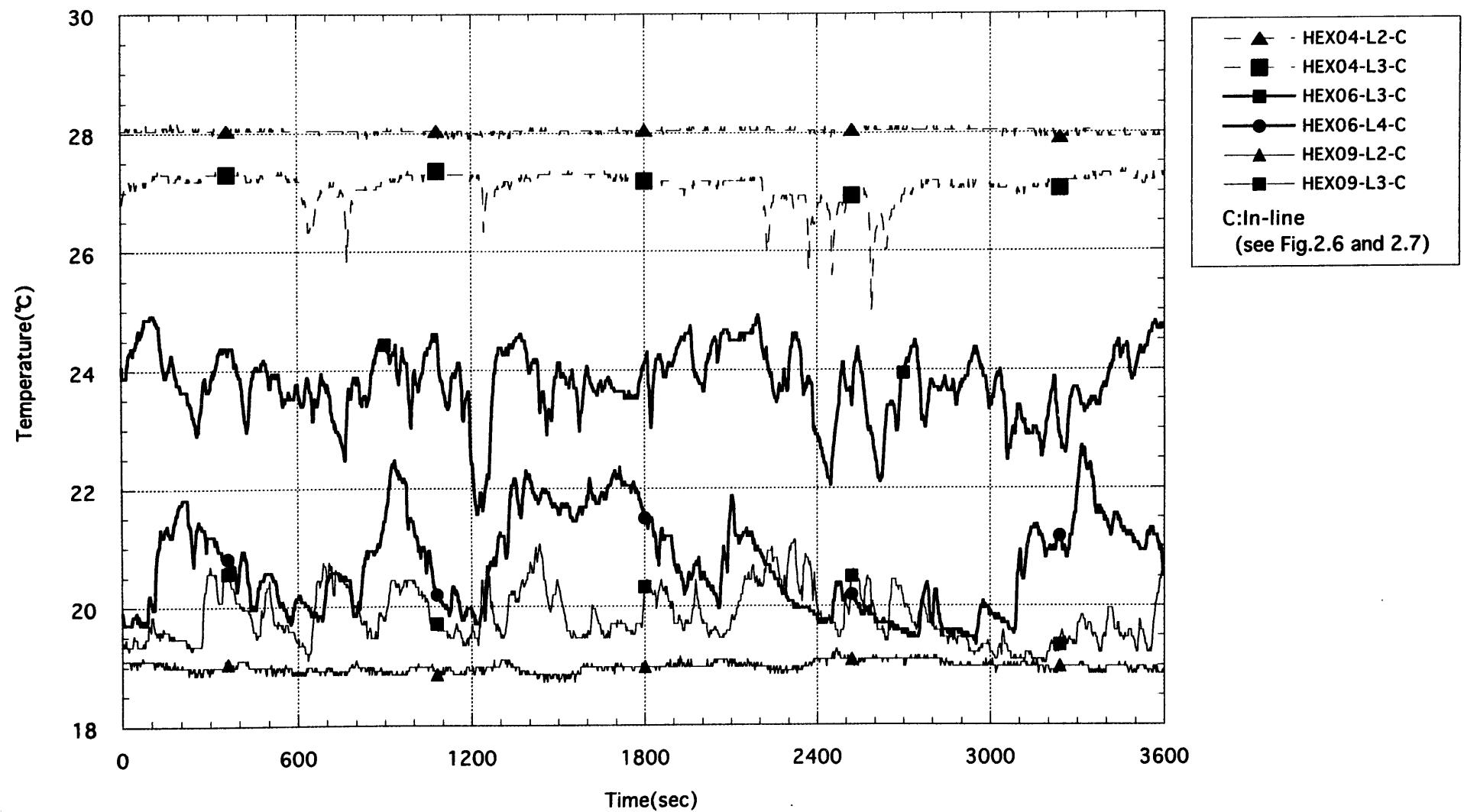


Fig.4.11 Temperature fluctuation trends (Case7)

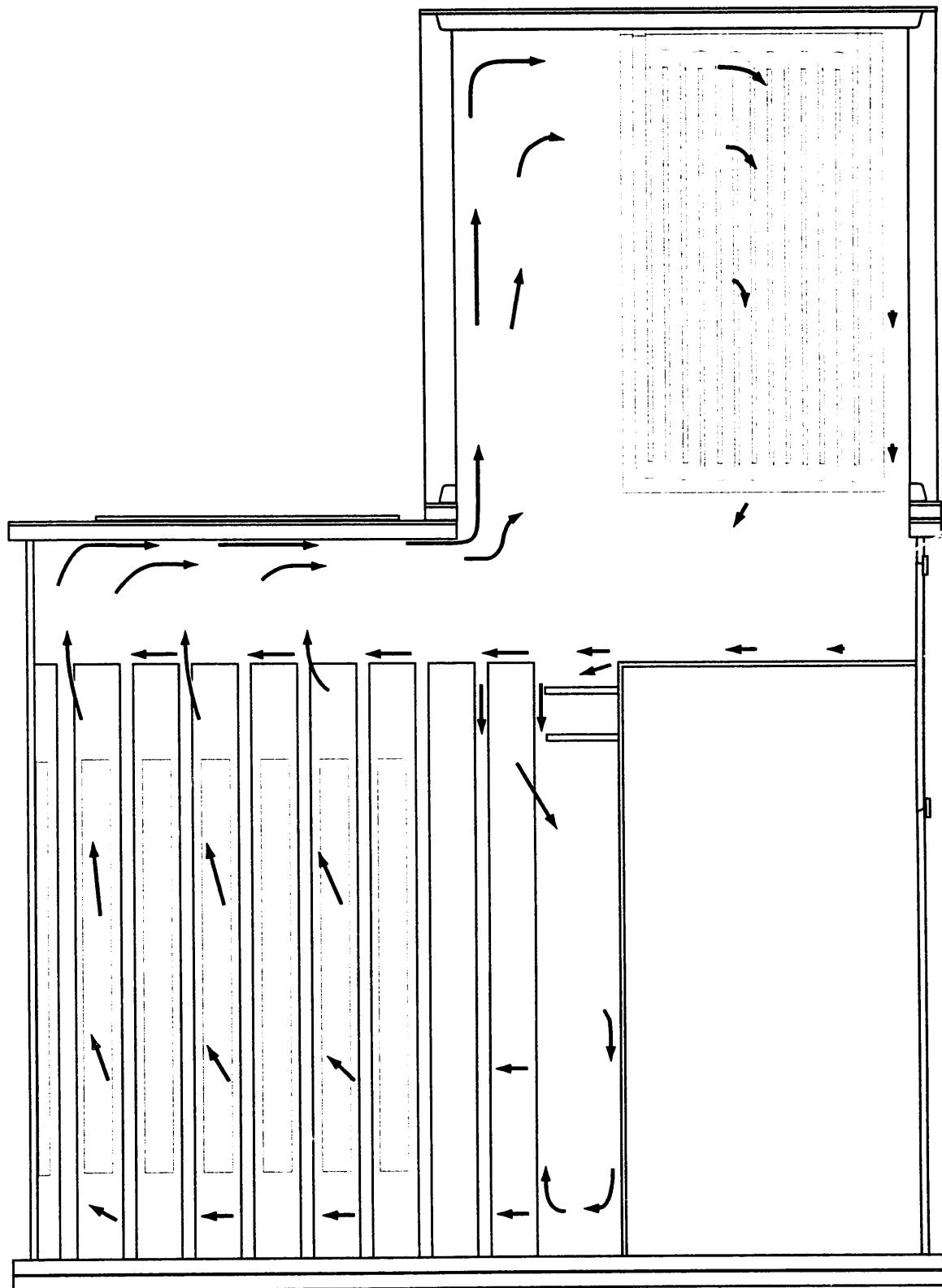
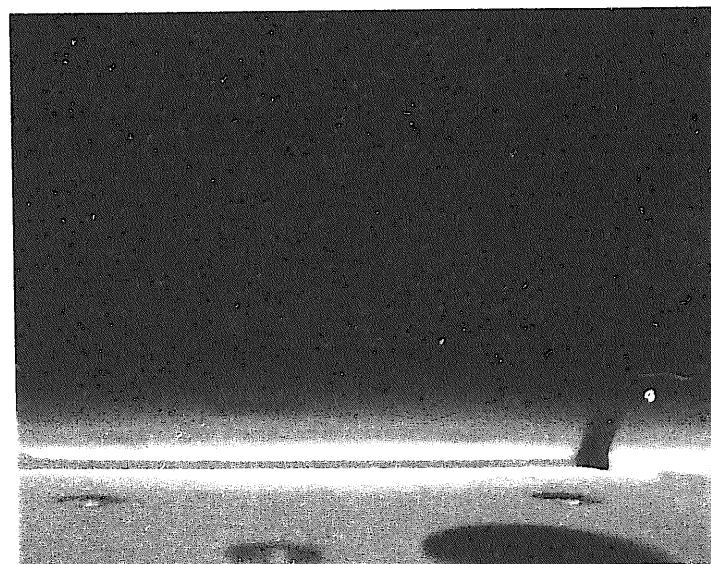
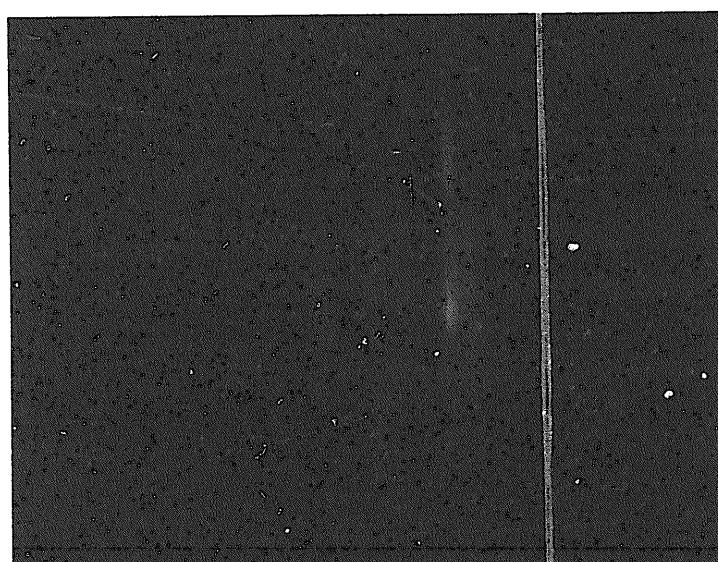


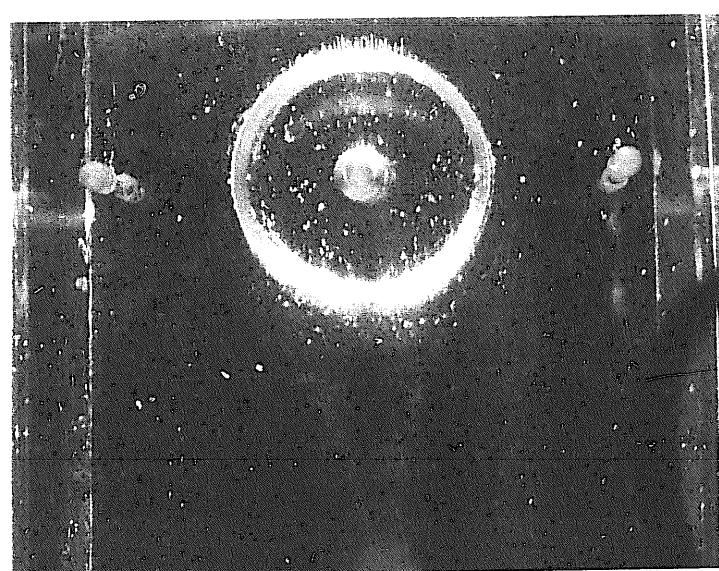
Fig.4.12 Flow pattern (case7)



(a) Above heated subassembly



(b) DHX

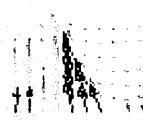


(c) Spacer pad

Fig.4.13 Photographs of flow patterns

- 84 -

(a)



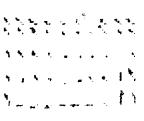
P1



P2



P3



P4

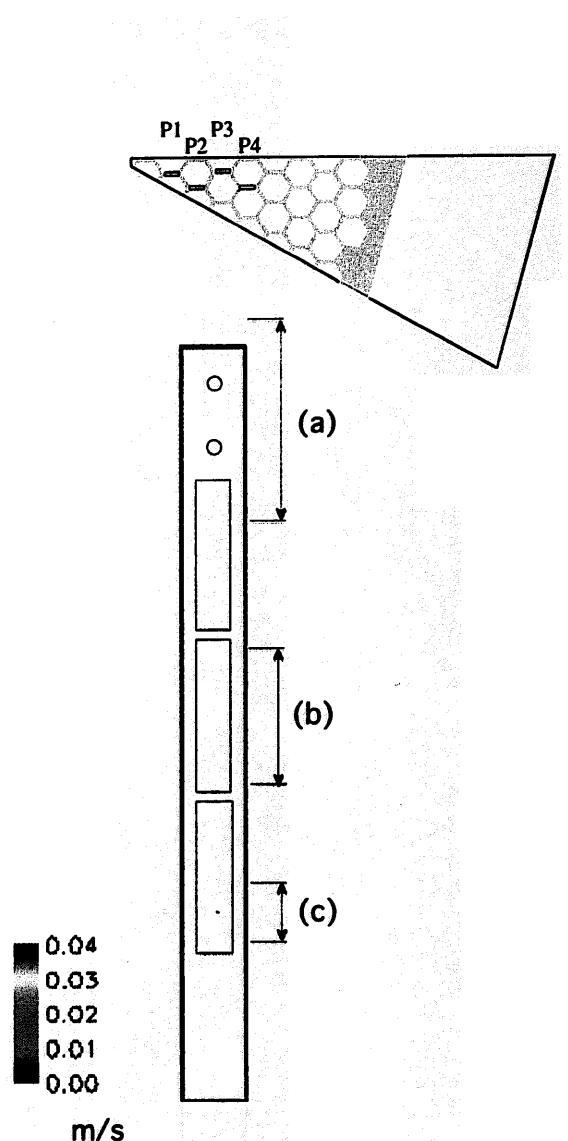
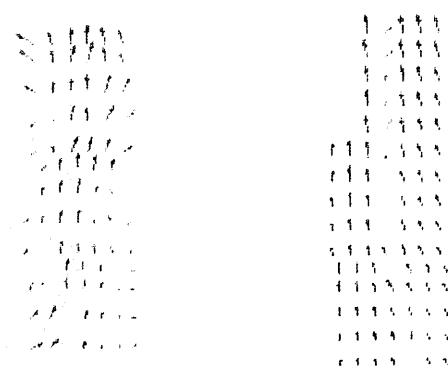


Fig.4.14 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along staggered traverse (Case7 (a) )

(b)



(c)



P1

P2

P3

P4

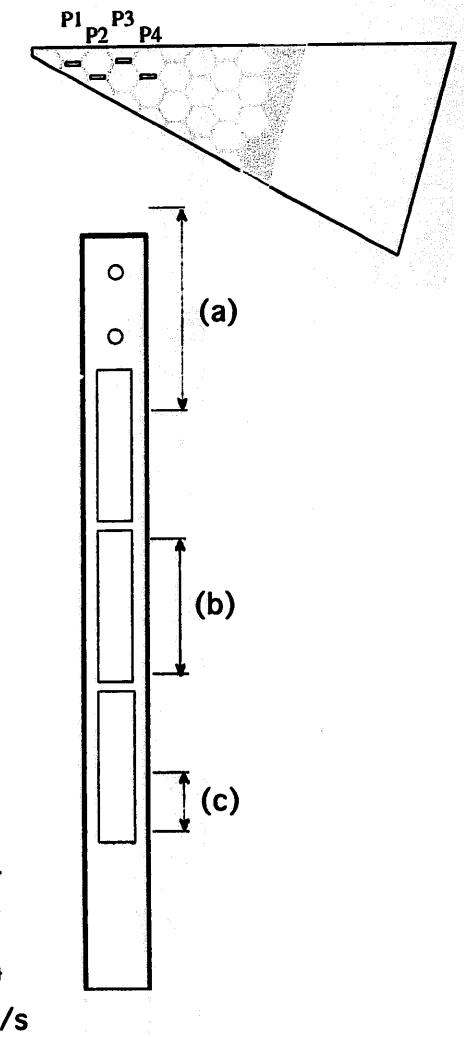


Fig.4.15 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along staggered traverse (Case7 (b) and (c))

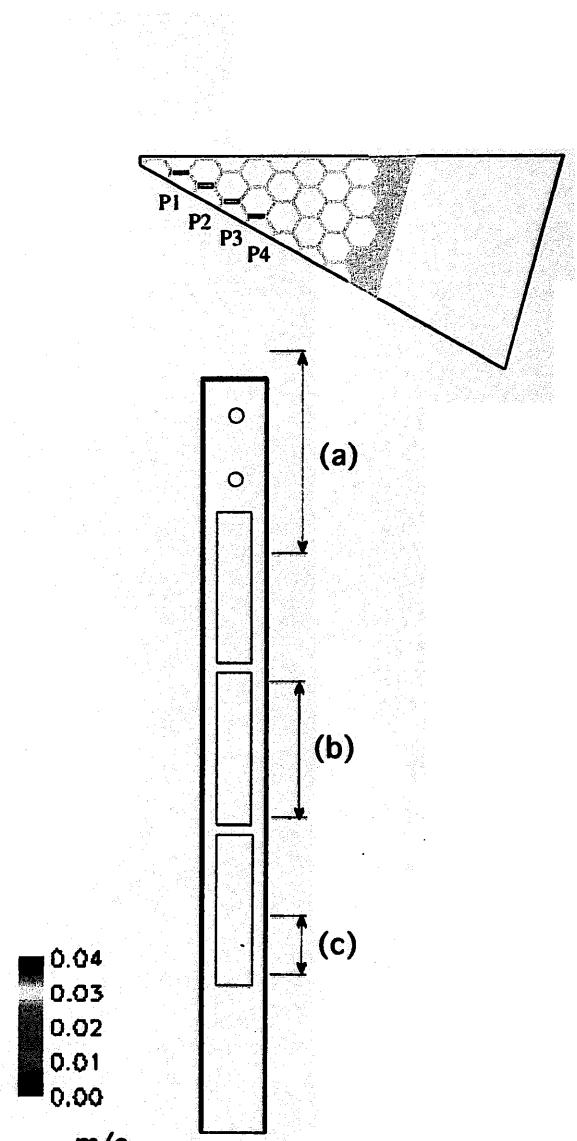
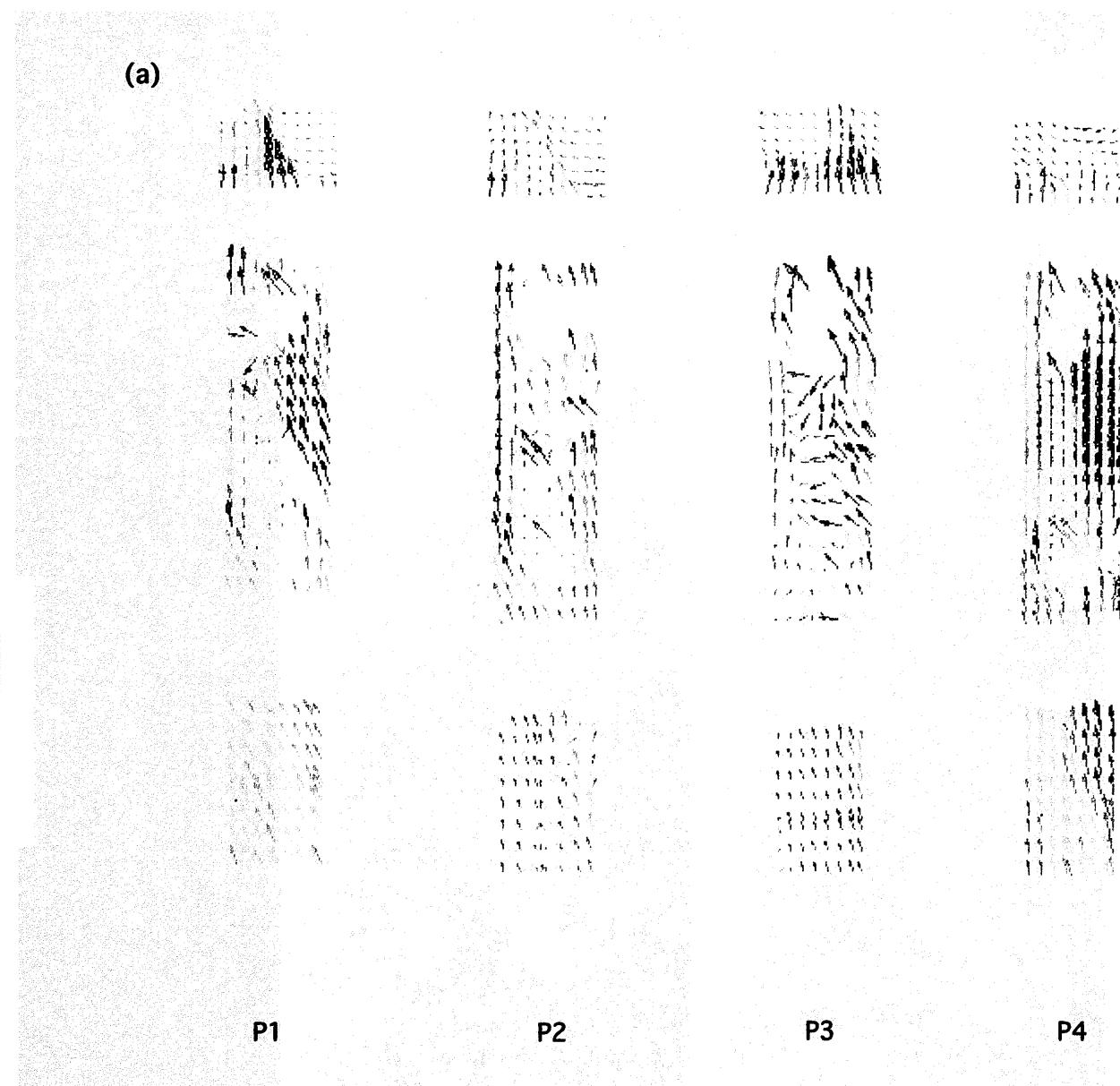
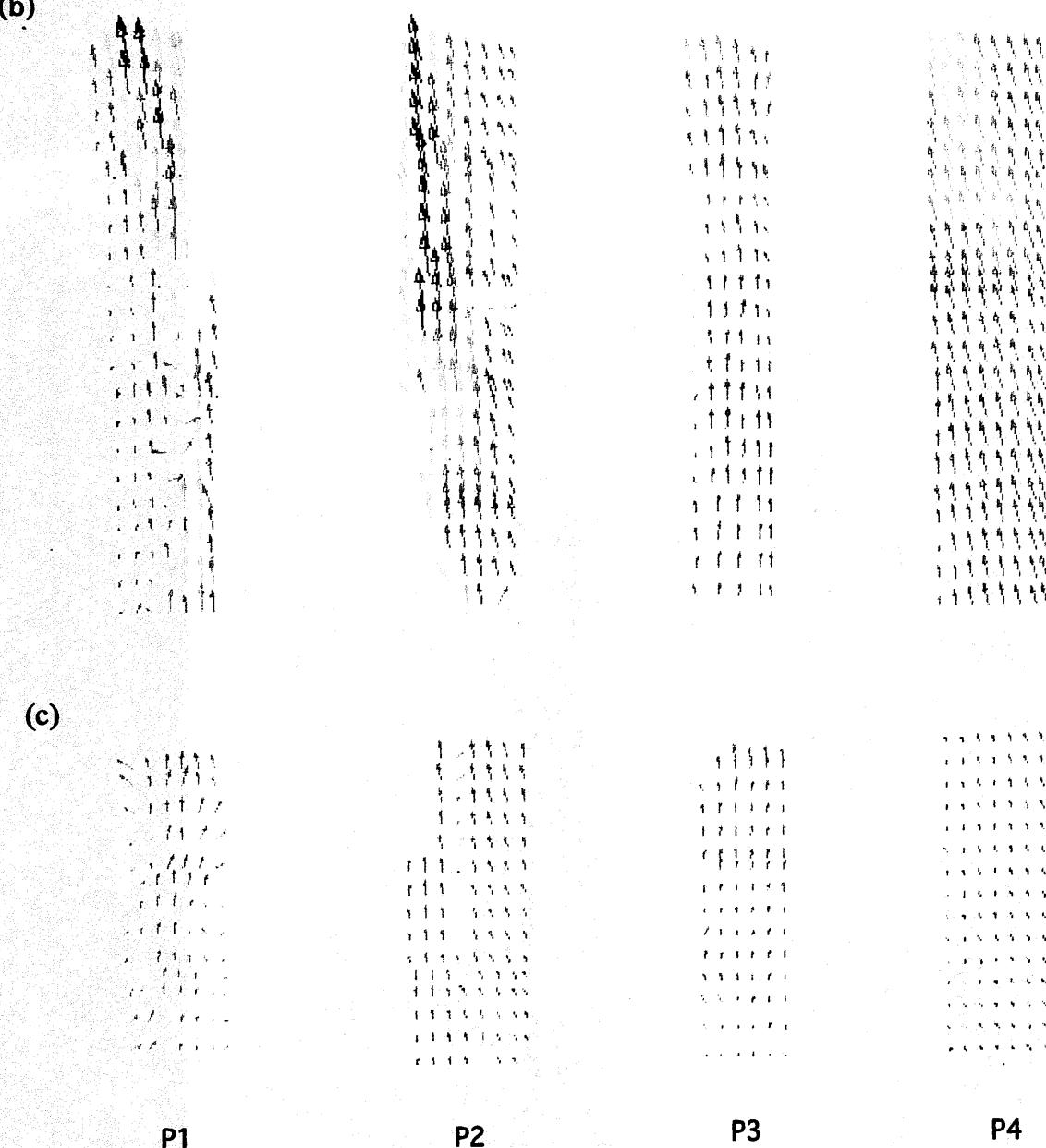
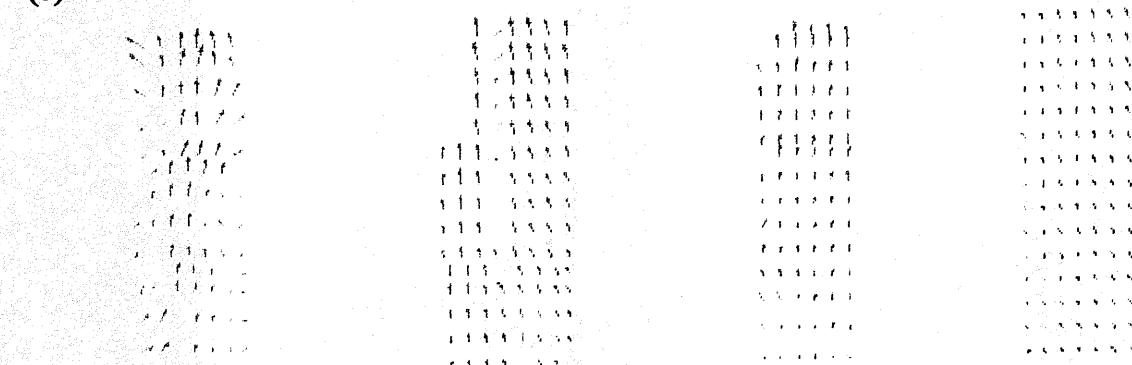


Fig.4.16 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along in-line traverse (Case7 (a) )

(b)



(c)

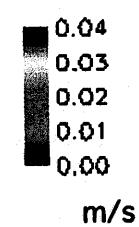


P4

P1

P2

P3



m/s

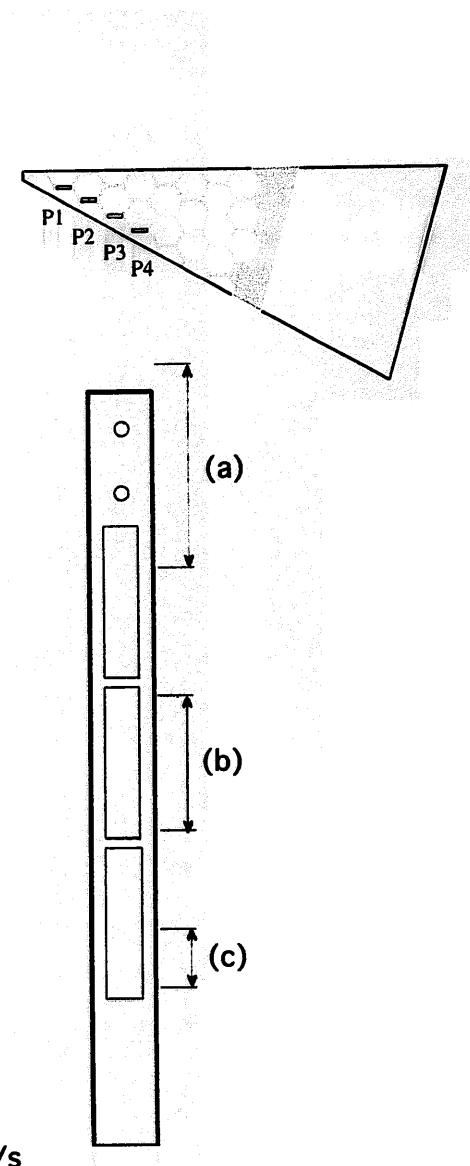


Fig.4.17 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along in-line traverse (Case7 (b) and (c) )

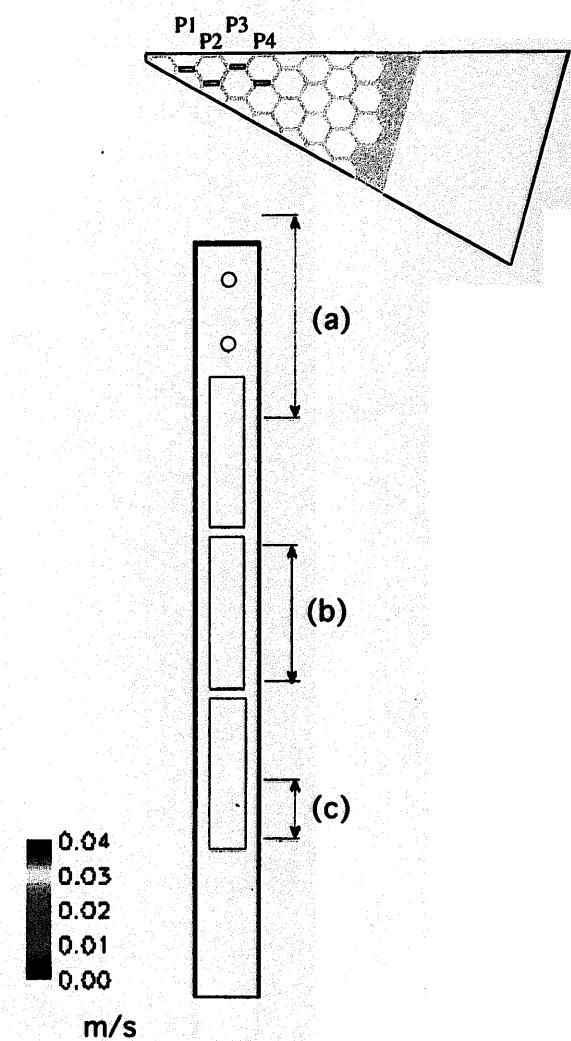
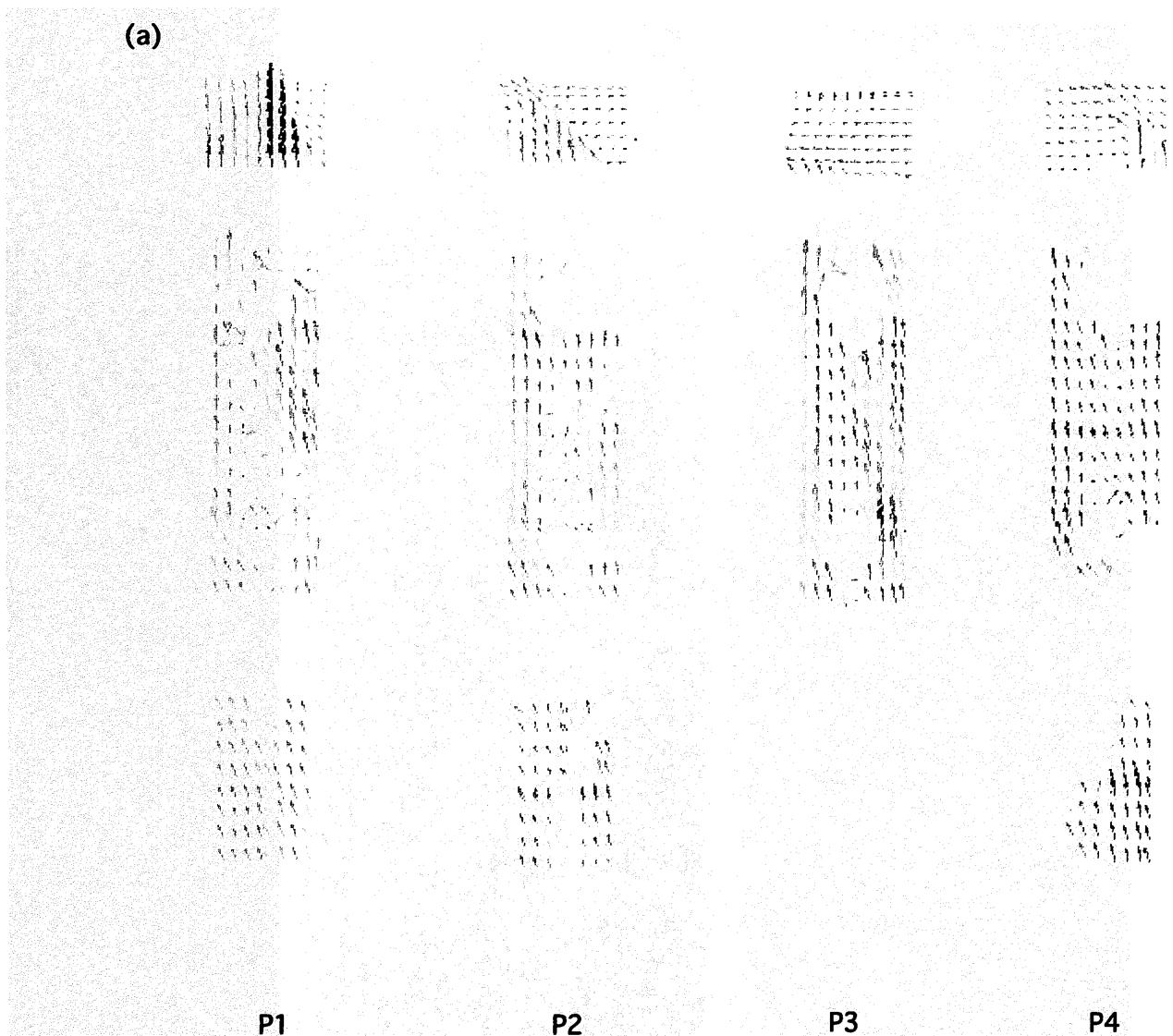
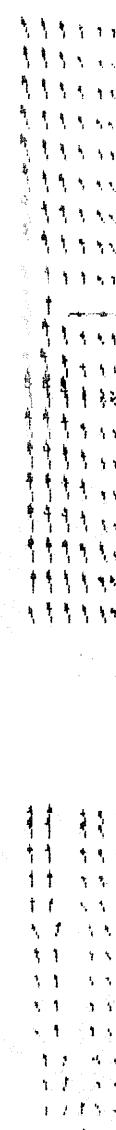


Fig.4.18 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along staggered traverse (Case5 (a))

(b)



P2



P3

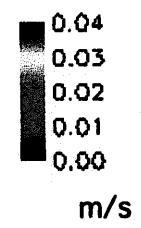


P4



— 153 —

(c)



m/s

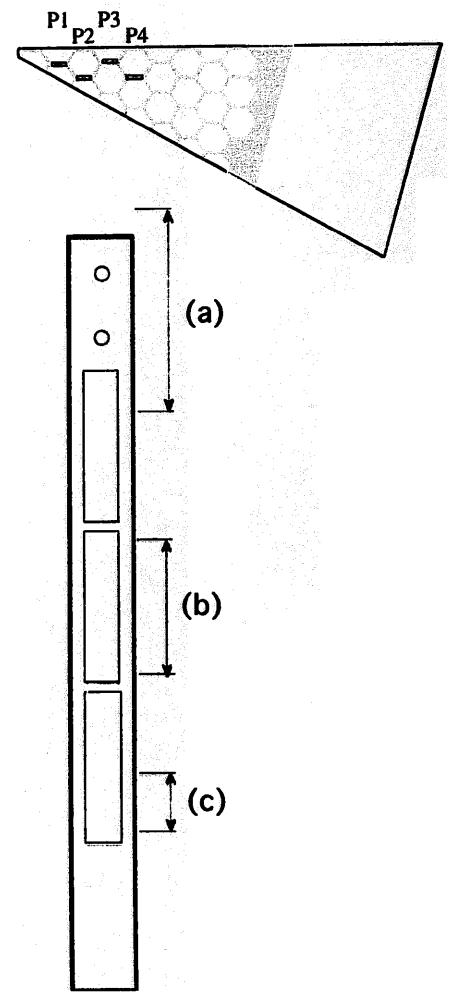
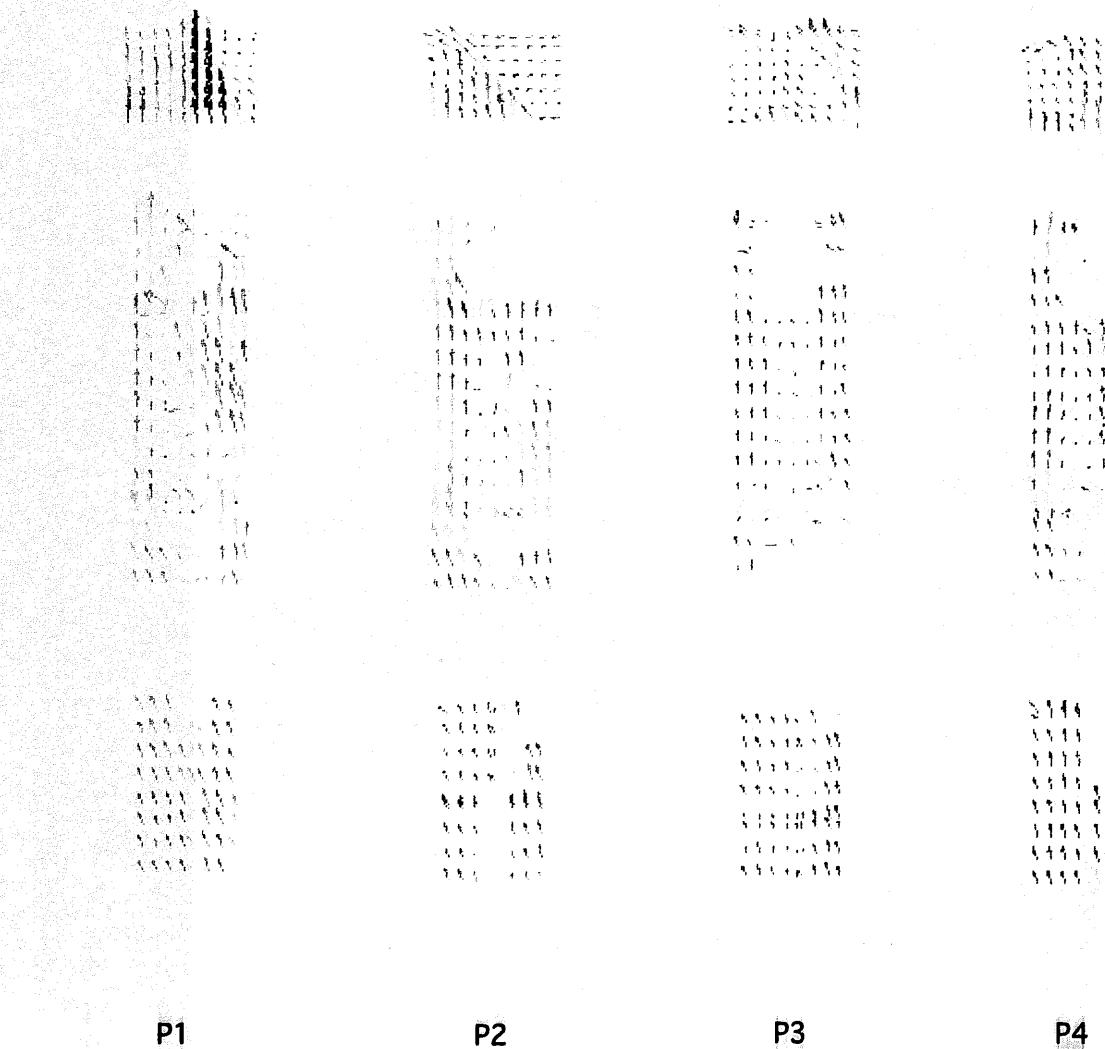
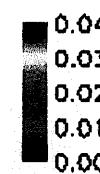


Fig.4.19 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along staggered traverse (Case5 (b) and (c) )

(a)



m/s



(a)

(b)

(c)

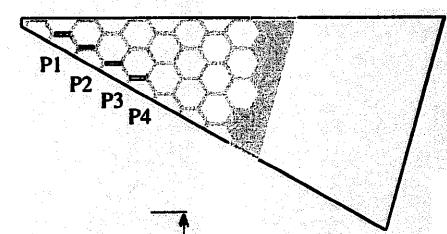


Fig.4.20 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along in-line traverse (Case5 (a))

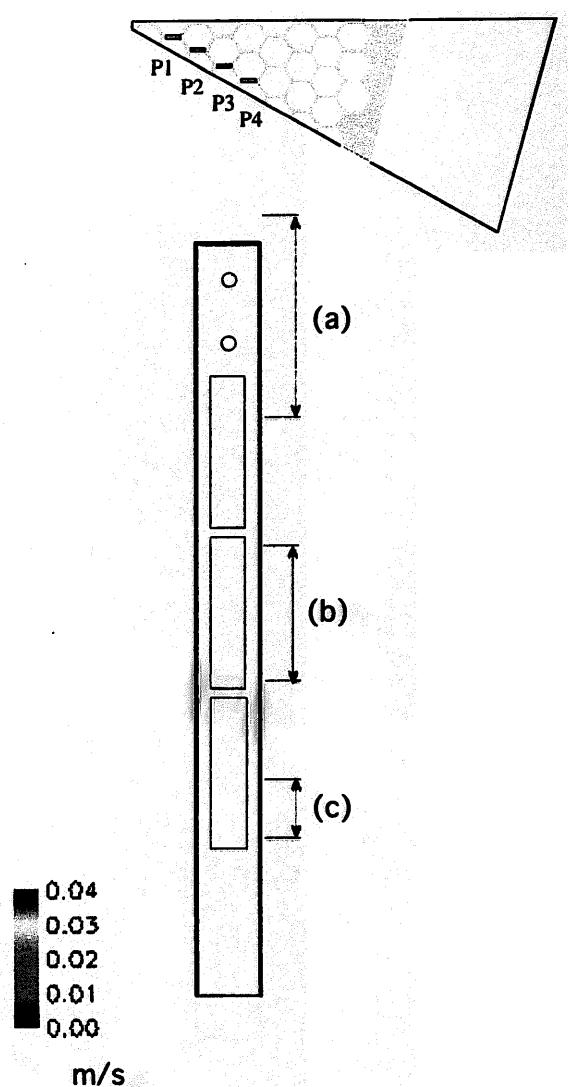
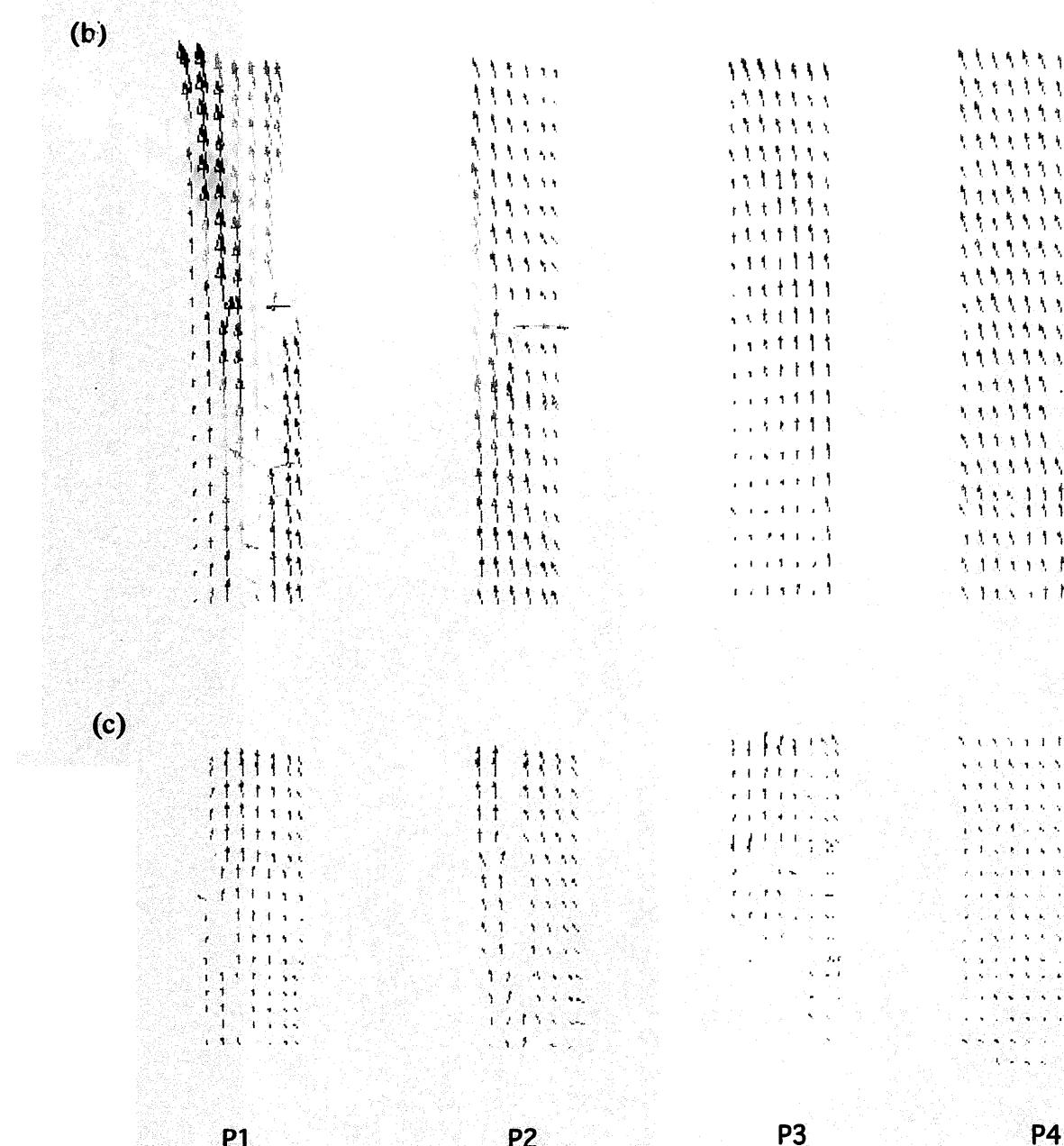


Fig. 4.21 Velocity vector fields in inter-wrapper gaps along in-line traverse (Case5 (b) and (c) )

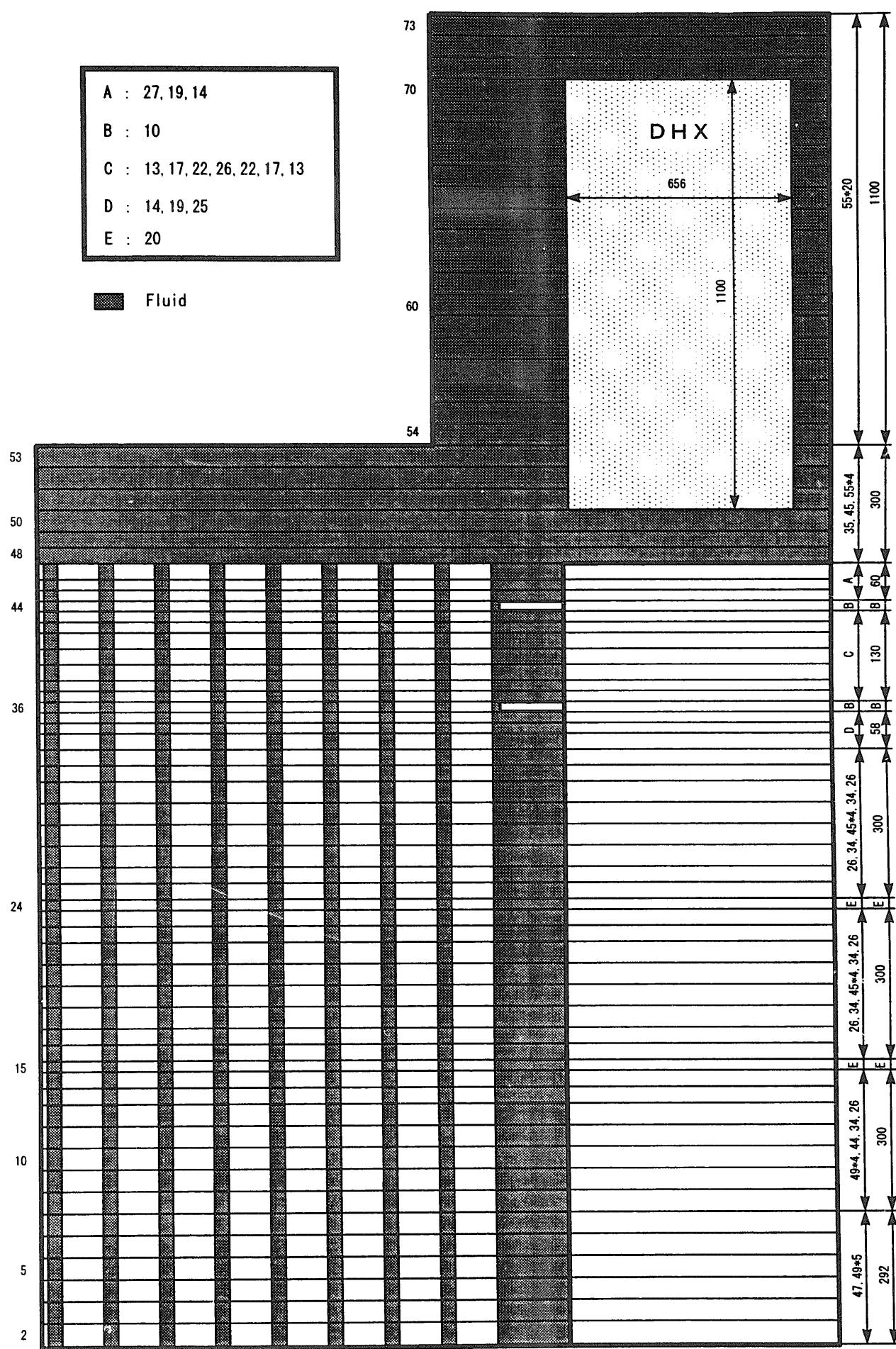


Fig. 5.1 Mesh arrangement in vertical direction

A : 27.135  
 B : 87.757  
 C : 49.075

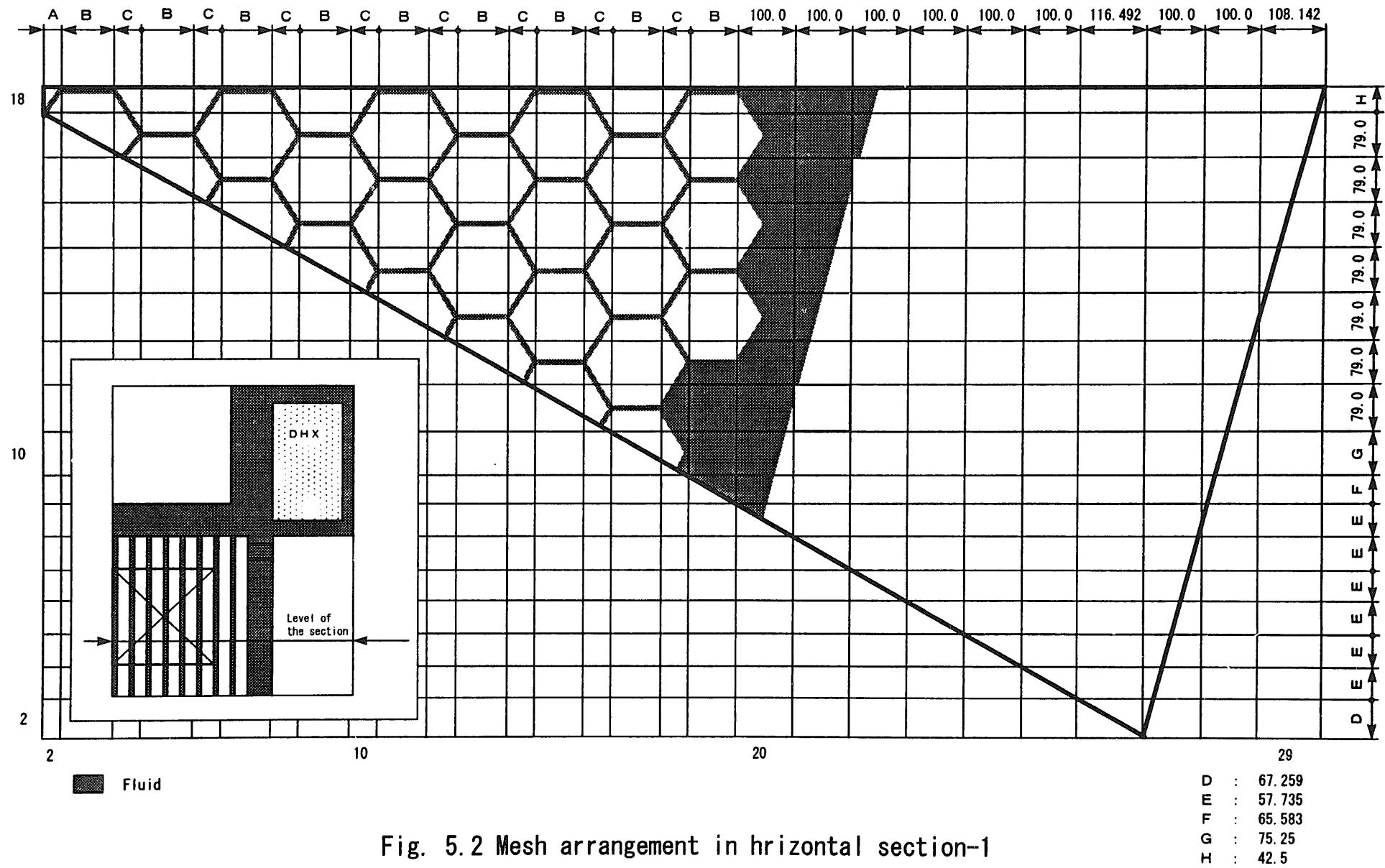


Fig. 5.2 Mesh arrangement in horizontal section-1

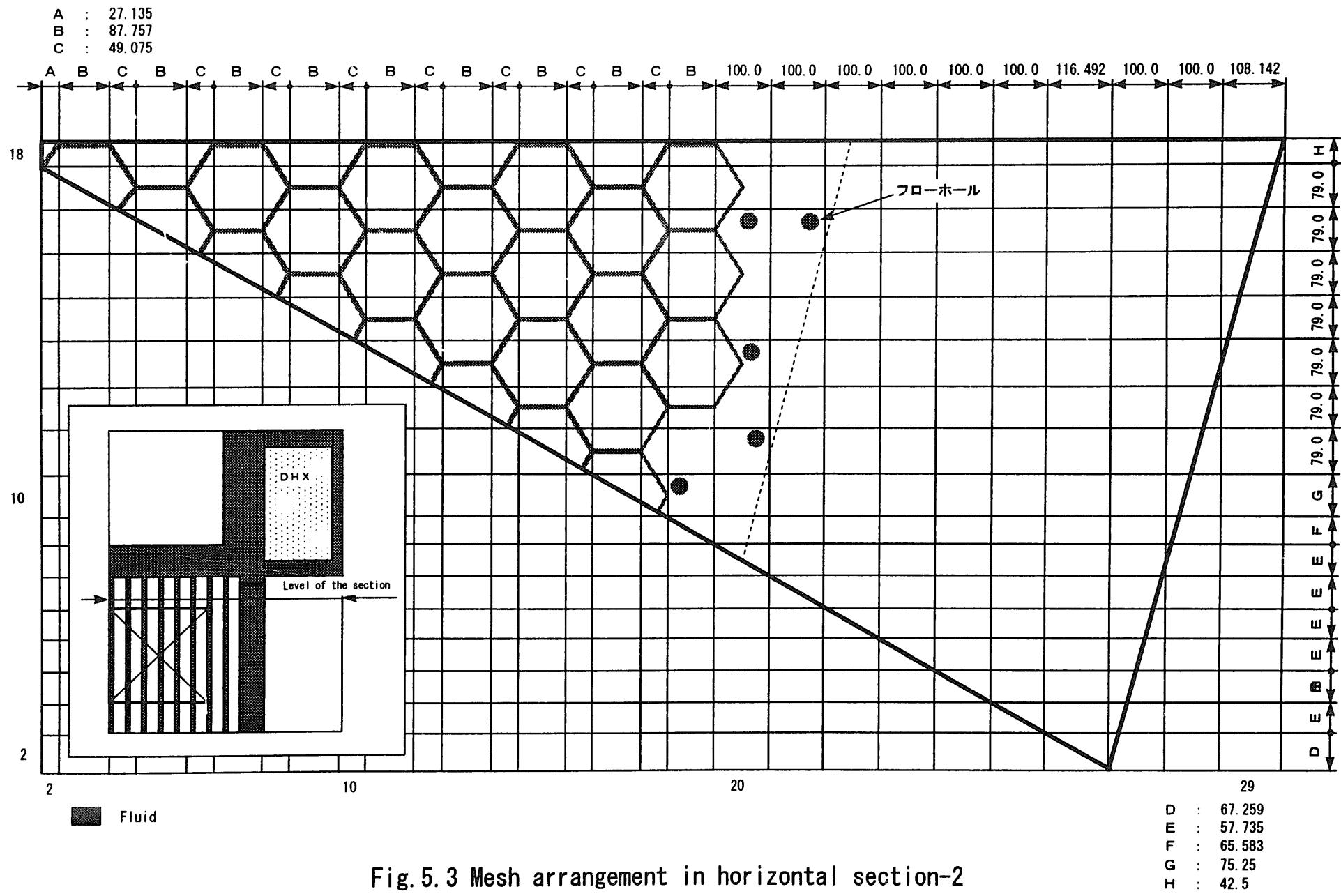


Fig. 5.3 Mesh arrangement in horizontal section-2

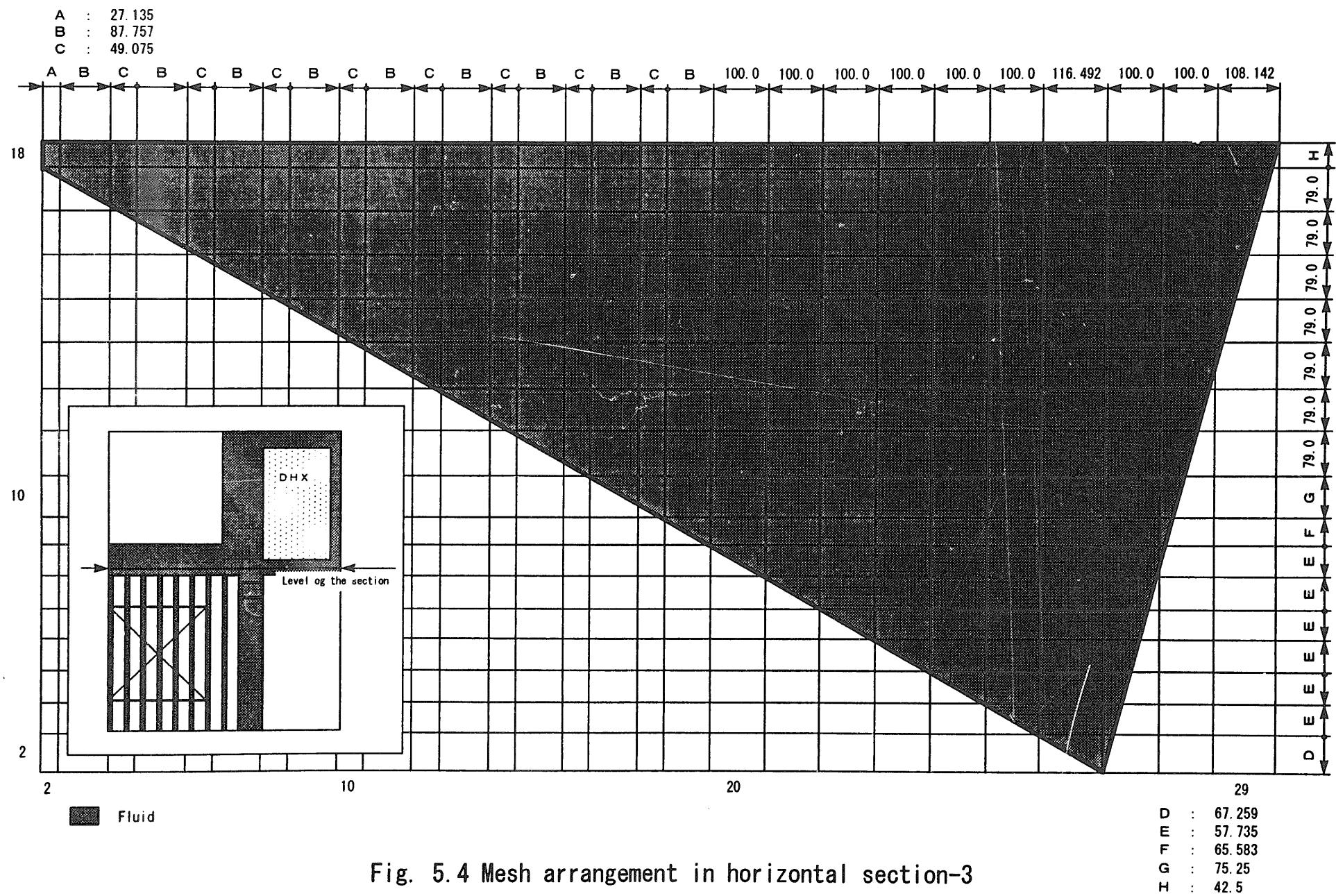


Fig. 5.4 Mesh arrangement in horizontal section-3

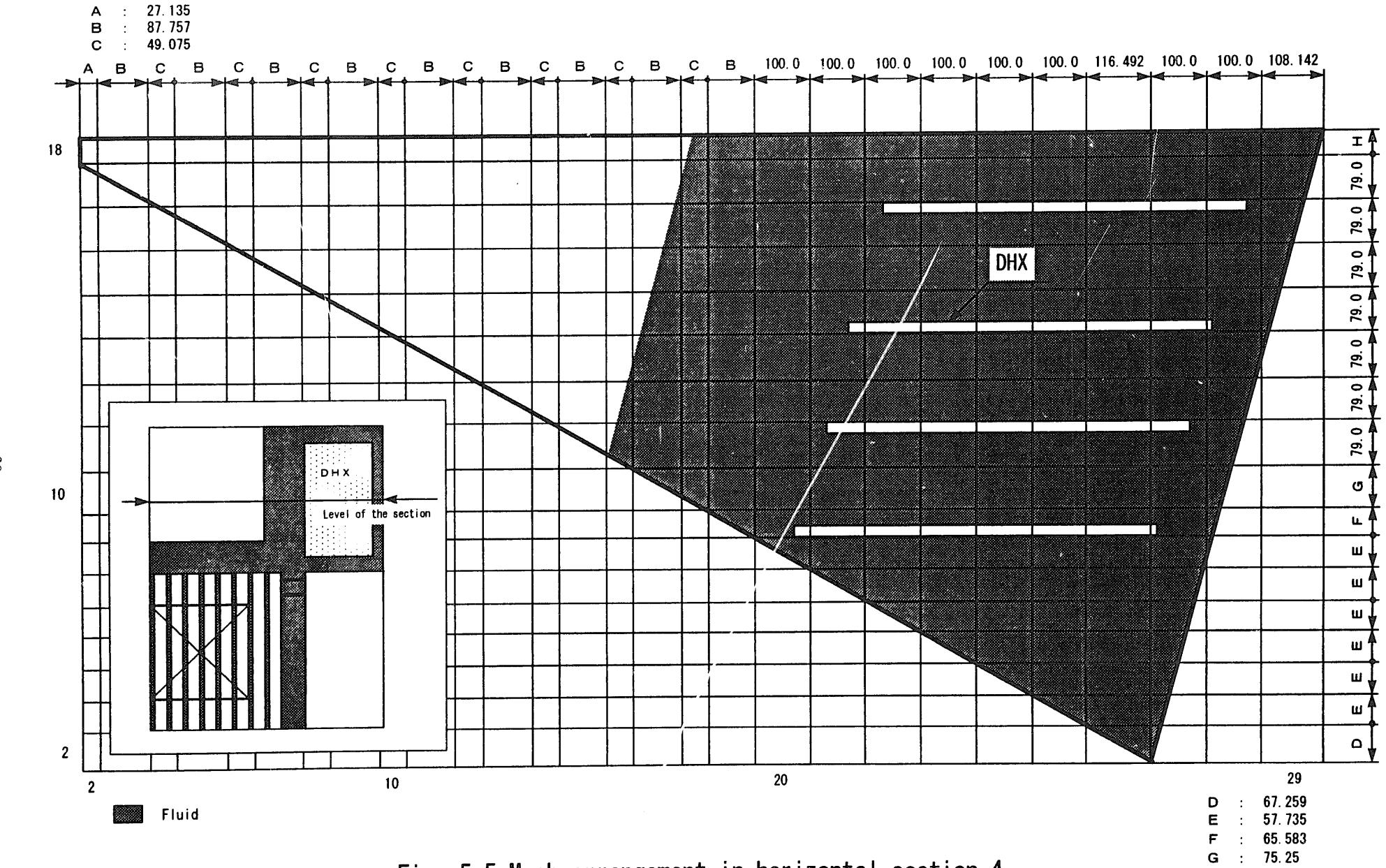


Fig. 5.5 Mesh arrangement in horizontal section-4

— 19 —

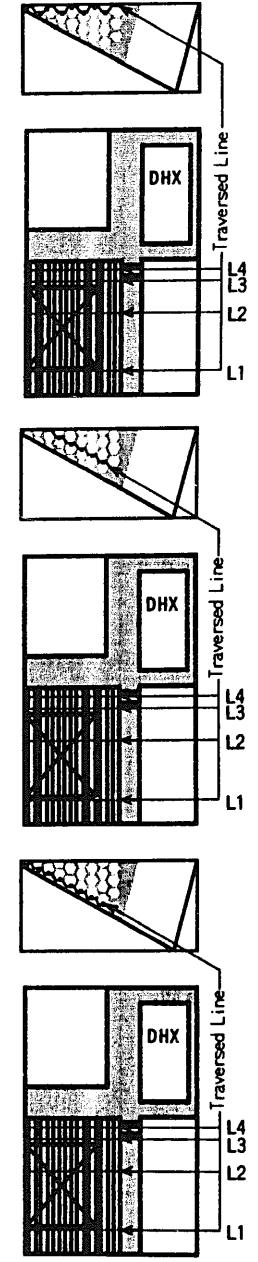
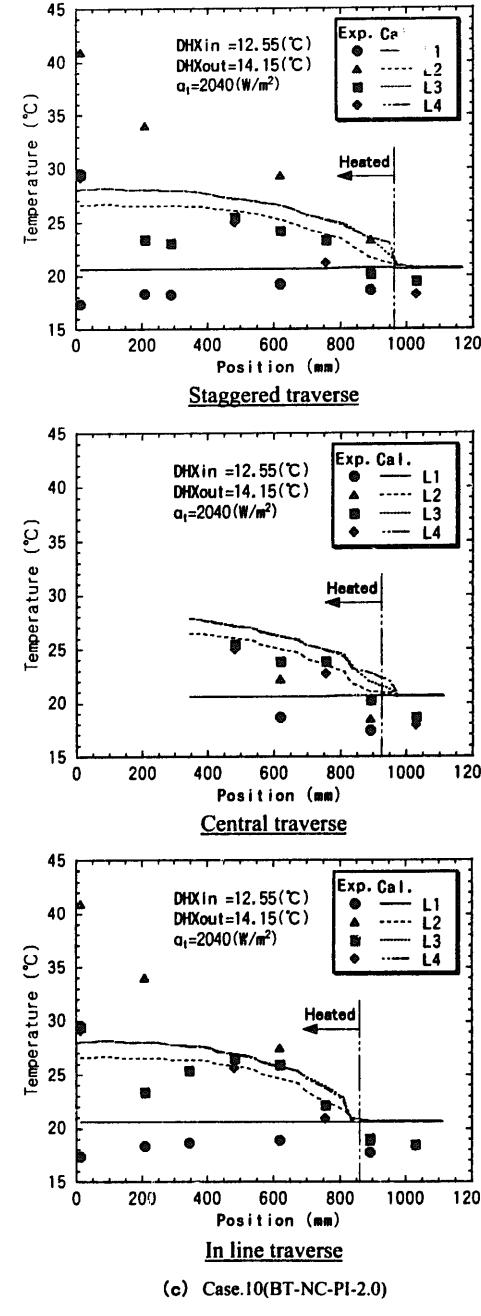
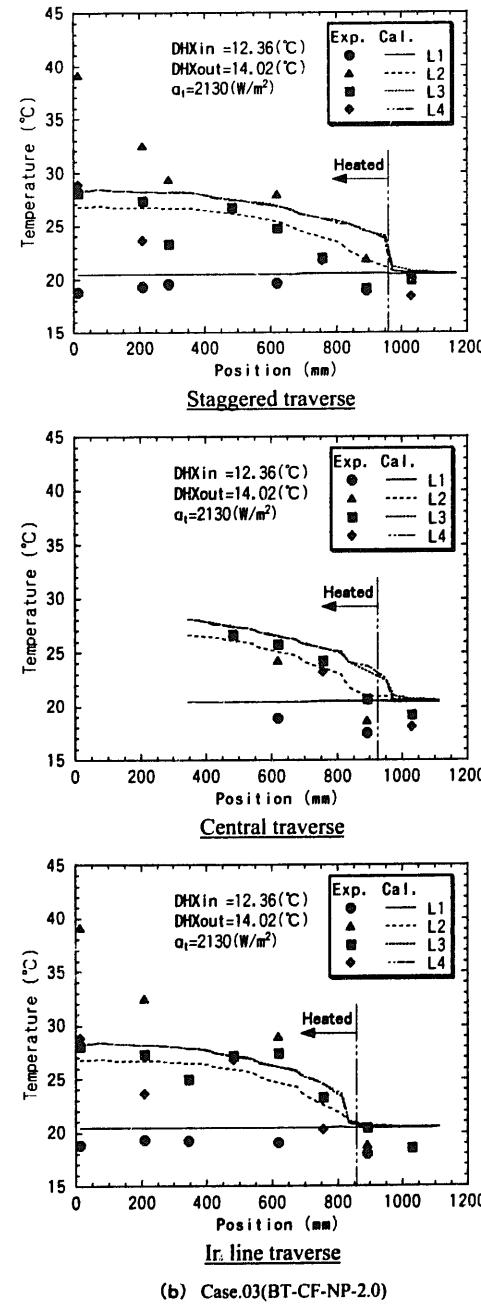
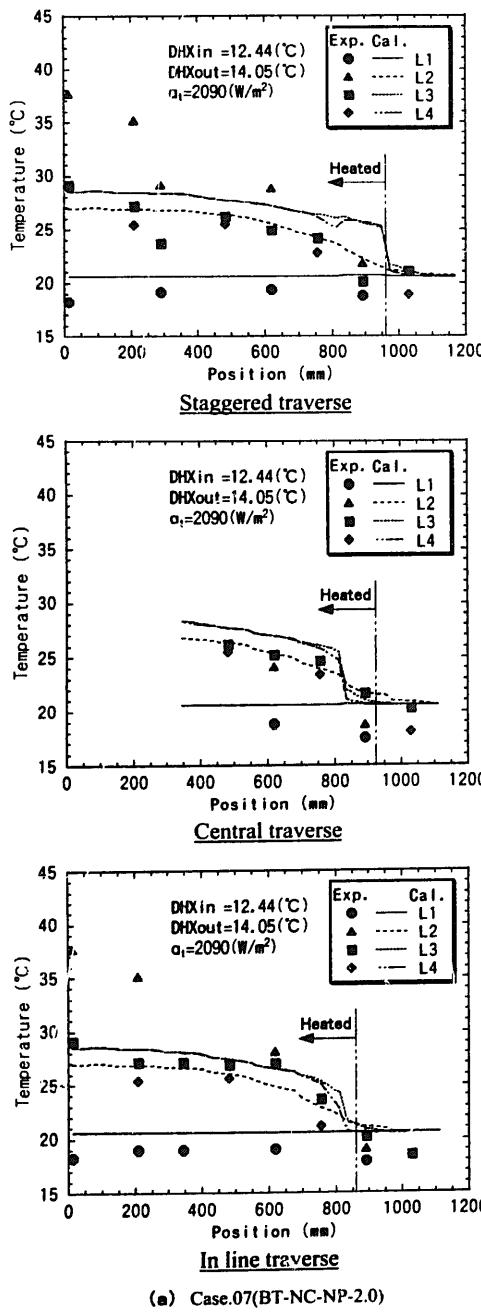
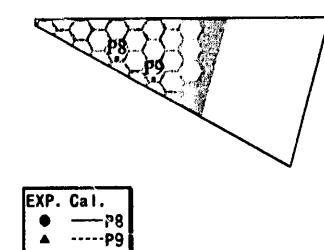
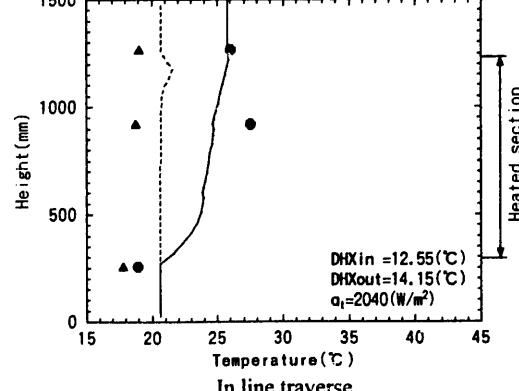
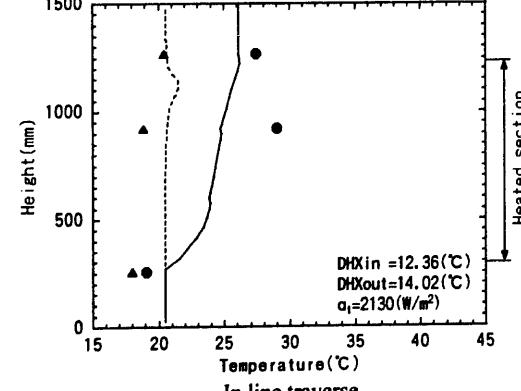
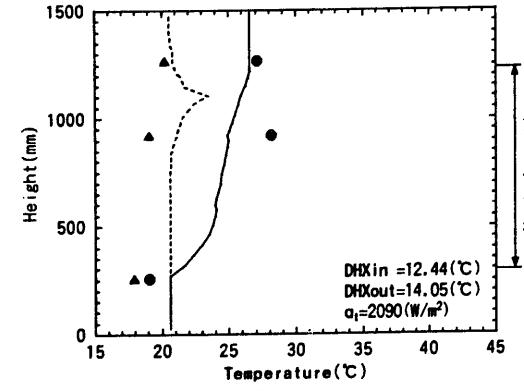
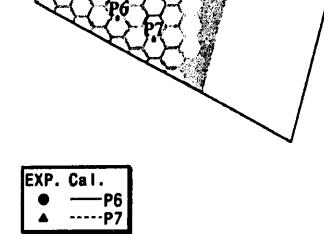
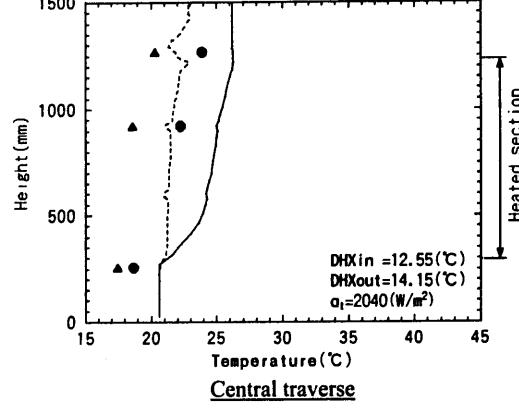
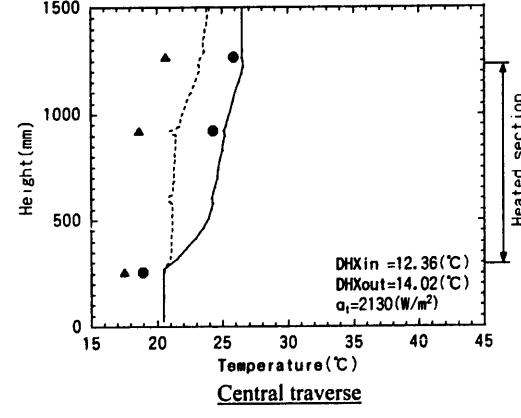
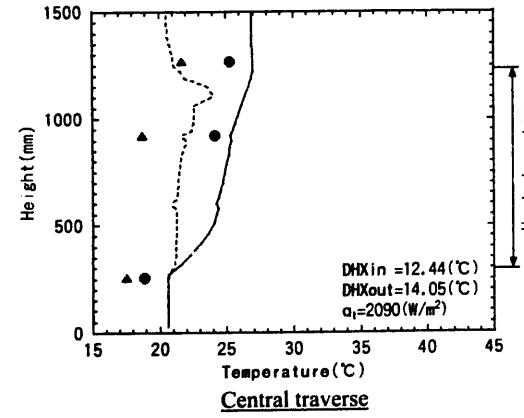
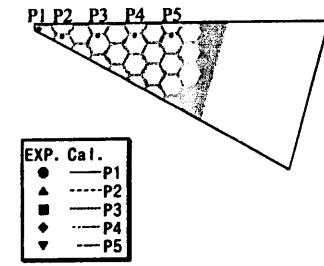
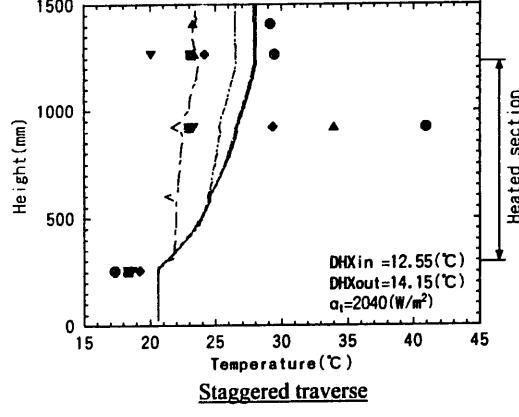
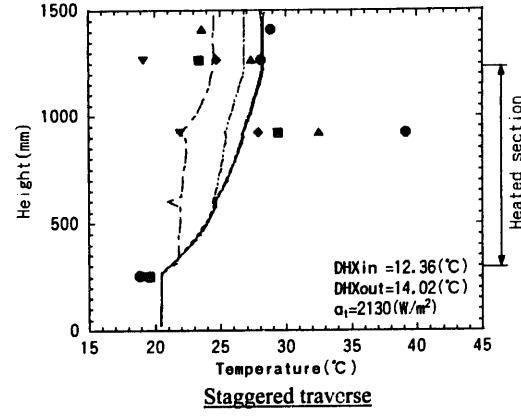
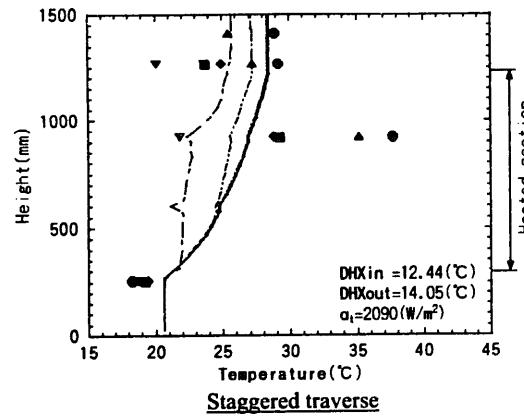


Fig.5.6 Temperature profiles in horizontal direction



(a) Case.07 (BT-NC-NP-2.0)

(b) Case.03 (BT-CF-NP-2.0)

(c) Case.10 (BT-NC-PI-2.0)

Fig.5.7 Temperature profiles in vertical direction

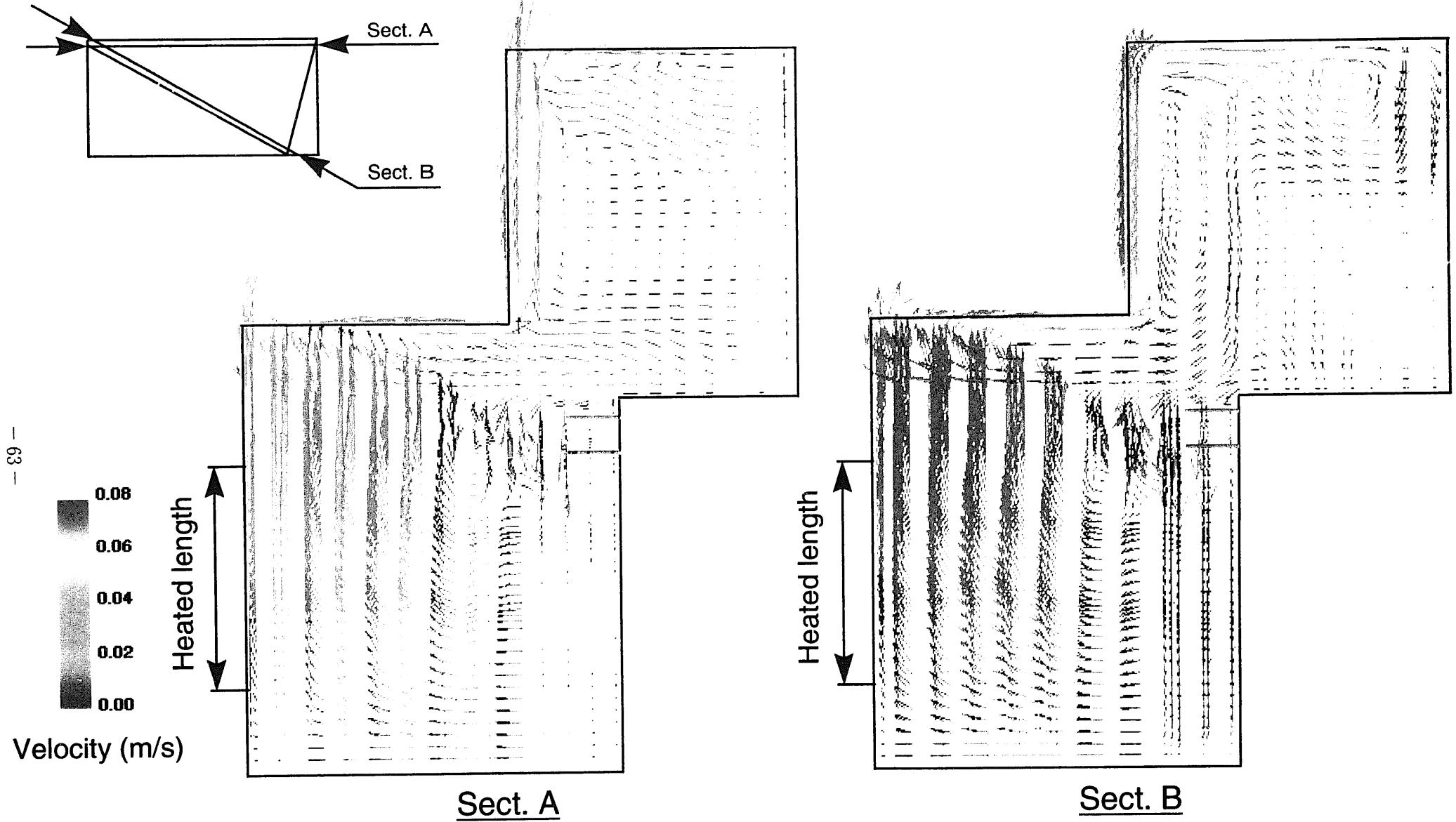


Fig. 5.8 Predicted velocity vector field for case 3