

# 冷却材温度ゆらぎ現象の 解析的評価手法の開発 (VII)

温度ゆらぎ低減化方策の解析的検討

1994年7月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (VII)

～温度ゆらぎ低減化方策の解析的検討～

村松 壽晴\*

### 要 旨

炉心構成要素毎の熱流力特性（集合体発熱量、集合体流量）の違いから、炉心燃料集合体間あるいは炉心燃料集合体－制御棒集合体間などで冷却材に温度差が生じ、それらが混合する過程で不規則な温度ゆらぎ挙動が原子炉の炉心出口近傍に発生する。この温度ゆらぎを伴った冷却材が、炉心上部機構各部（整流筒、制御棒上部案内管、集合体出口温度計装ウエルなど）の表面近傍を通過する際に、冷却材中の不規則な温度ゆらぎが構造材中に伝播すると、その材料は高サイクル熱疲労を受ける（サーマルストライピング）。特に、冷却材として液体金属ナトリウムを使用する高速増殖炉では、高い熱伝導率を持つ液体金属ナトリウムの性質から大きな熱疲労の発生が懸念されている。高速原型炉「もんじゅ」では、炉心出口近傍に位置する各種構造物をサーマルストライピングによる熱疲労から適切に保護するため、高温・高サイクル疲労強度に優れた ALLOY 718 を使用している。この保護部材は、基本的に最大温度ゆらぎ振幅が 30℃ を上回る全ての範囲に適用されている。

本報では、熱疲労の発生原因である温度ゆらぎ振幅の低減化方策を、高速原型炉「もんじゅ」の炉心上部機構領域を対象として解析的に検討を行い、上部支持板の設置高さや燃料集合体－制御棒集合体間での流量比を調節することにより、ALLOY 718 を適用すべき空間（最大温度ゆらぎ振幅 > 30℃）を 1/10 以下とすることが可能であることを確認した。

---

\*：大洗工学センター安全工学部原子炉工学室

## Development of Analytical Model for Temperature Fluctuation in Coolant (VII)

~ Investigation for Reduction Measures for Coolant Temperature Fluctuations using Numerical Method ~

Toshiharu MURAMATSU\*

### Abstract

Thermal stripping phenomena are characterized by random temperature fluctuations and observed in the region immediately above the core exit of Liquid Metal Fast Breeder Reactors (LMFBRs) due to the interactions of cold sodium flowing out of a control rod (C/R) assembly and hot sodium flowing out of adjacent fuel assemblies (F/As). Therefore the in-vessel components located in the core outlet region, such as upper core structure (UCS), flow guide tube, C/R guide tube, etc., must be protected against the random thermal processes which might induce high-cycle fatigue. In this regard the material to protect these components against the fatigue.

ted ALLOY 718 as a coating

In this study, reduction measures of coolant temperature fluctuations have been investigated using a multi-dimensional thermohydraulic analysis code AQUA with the Algebraic Stress turbulence Model (ASM). From the analysis, it was confirmed that the area to be protect in-vessel components against the thermal fatigue can be decreased to 1/10 of the total area of ALLOY 718 adopted in the MONJU reactor by the tuning of the support plate height and the flow rate ratio between F/A and C/R assemblies.

---

\* : Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC, PNC

## 目 次

第1章 緒 言 .....	1
第2章 炉心上部機構の構造 .....	2
第3章 温度ゆらぎ強度の空間分布の解析 .....	3
3.1 解析条件 .....	3
3.2 解析結果 .....	4
第4章 考 察 .....	7
4.1 上部支持板高さの効果 .....	7
4.2 制御棒集合体流量の効果 .....	8
4.3 温度ゆらぎ低減化方策 .....	8
第5章 結 言 .....	9
参考文献 .....	10
謝 辞 .....	11

## List of Figures

- Fig. 2. 1 Cut-View of the MONJU Reactor
- Fig. 2. 2 Structure of the MONJU Upper Core Structure
- Fig. 3. 1 Mesh Arrangement for the AQUA Calculations
- Fig. 3. 2 Comparison of Velocity Fields for Vertical Planes (Cases -1 ~ -5)
- Fig. 3. 3 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Plane (Cases -1 ~ -5)
- Fig. 3. 4 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (Cases -1 ~ -5)
- Fig. 3. 5 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Plane (Cases-3, -7 and -8)
- Fig. 3. 6 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (Cases-3, -7 and -8)
- Fig. 3. 7 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Plane (Cases-1 and -6)
- Fig. 3. 8 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (Cases-1 and -6)
- Fig. 3. 9 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Plane (Cases-5 and -9)
- Fig. 3. 10 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (Cases-5 and -9)
- Fig. 4. 1 Comparison of Axial Distributions of Temperature Fluctuation Along the Flow Guide Tube (Cases -1 ~ -5)
- Fig. 4. 2 Comparison of Axial Distributions of Temperature Fluctuation Along the Flow Guide Tube (Cases 3, 7 and 8)
- Fig. 4. 3 Relationship of Maximum Temperature Fluctuation Between Flow Rate Ratio and Height of the Support Plate
- Fig. 4.4 Comparison of the Area above 30 °C for Temperature Fluctuation Range

## 第1章 緒言

炉心構成要素毎の熱流力特性（集合体発熱量、集合体流量）の違いから、炉心燃料集合体間あるいは炉心燃料集合体 - 制御棒集合体間などで冷却材に温度差が生じ、それらが混合する過程で不規則な温度ゆらぎ挙動が原子炉の炉心出口近傍に発生する。この温度ゆらぎを伴った冷却材が、炉心上部機構各部（整流筒、制御棒上部案内管、集合体出口温度計装ウエルなど）の表面近傍を通過する際に、冷却材中の不規則な温度ゆらぎが構造材中に伝播すると、その材料は高サイクル熱疲労を受ける（サーマルストライピング）。特に、冷却材として液体金属ナトリウムを使用する高速増殖炉では、高い熱伝導率を持つ液体金属ナトリウムの性質から大きな熱疲労の発生が懸念されている。

高速原型炉「もんじゅ」では、水およびナトリウムを作動流体としたモックアップ実験によってサーマルストライピング条件を評価し、この結果に基づいて以下に示す対策が行われた。

- (1) 構造強度部材は SUS 304 とし、サーマルストライピングによる熱応力が構造強度部材に影響しないよう熱遮蔽板を設ける。
- (2) サーマルストライピングによる熱応力が大きい部位については、高温・高サイクル疲労強度に優れた ALLOY 718 の熱遮蔽板により保護する。
- (3) 構造強度部材以外の一部部品（整流筒）については、構造の複雑化を防止する観点より、ALLOY 718 を用いて直接製作する。
- (4) サーマルストライピング対策部材である ALLOY 718 は、SUS 304 設計疲労曲線（600℃条件）による許容ひずみ範囲の評価結果に基づき、温度ゆらぎ幅  $\Delta T$  が 30℃ を上回る全ての領域に適用する。

しかしながら、サーマルストライピング対策部材である ALLOY 718 の単価は、SUS 304 のそれに比べて約 10 倍と高価であるため、現在の実証炉設計においては、発生する温度ゆらぎを低減し、使用すべき ALLOY 718 の物量を削減することが求められている。

本報では、温度ゆらぎ低減化方策を、高速原型炉「もんじゅ」の炉心上部領域を対象として解析的に検討する。なお、ここで使用する解析手段は、サーマルストライピング現象を解析的に評価できるようにするためにこれまで開発・検証を進めてきた汎用多次元コード AQUA<sup>1), 2)</sup> である。

## 第2章 炉心上部機構構造

Fig. 2. 1 に、高速原型炉「もんじゅ」の原子炉容器垂直断面図を示す。また、Fig. 2. 2 に、炉心上部機構領域(整流筒下端～熱遮蔽板下面)の垂直断面構造を示す。

炉心上部機構下端領域に位置する整流筒 (Flow Straightener)、支持管板 (Support Plate) および制御棒上部案内管 (CR Upper Guide Tube) は、炉心燃料集合体ハンドリングヘッドより流出する高温ナトリウムと制御棒下部案内管より流出する低温ナトリウムとの混合により発生する温度ゆらぎ場に位置するため、定常的な高サイクル熱疲労を受ける。このため、整流筒については高温・高サイクル疲労強度に優れた ALLOY 718 により直接製作され、また支持管板および制御棒上部案内管についてはこれらの母材である SUS 304 を ALLOY 718 により保護する構造となっている。なお、サーマルストライピング対策部材である ALLOY 718 を適用する範囲は、プラント寿命 30 年、プラント稼働率 80 %、温度ゆらぎ優勢周波数 2.0 Hz、許容歪み範囲  $\epsilon_f < 0.09 \%$  などの評価条件を使用し、温度ゆらぎ幅が 30 °C を越える全ての領域がその対象とされた。具体的には、整流筒、制御棒上部案内管、支持管板および計装ウェルがこれにあたる。なお、ALLOY 718 の肉厚は、温度ゆらぎ減衰率の評価結果に基づき、4 mm に決定されている。



## 第3章 温度ゆらぎ強度の空間分布の解析

## 3.1 解析条件

解析体系は、Fig. 2.2 中に示した7本集合体体系である。同体系は、制御棒集合体1体を中心位置に含む7本集合体のハンドリングヘッド(制御棒集合体については、下部案内管上部領域)およびこれらの上部に位置する炉心上部機構の熱遮蔽板下部までを模擬したものである。なお、解析パラメータは、(1)支持管板高さ  $H_s$  および(2)制御棒集合体流量  $Q_c$  (流量比  $\beta$ : 燃料集合体1体の流量に対する制御棒集合体流量の割合,  $= Q_c / Q_F$ ) の2つである。Fig. 3.1 に、基本条件 CASE-3 ( $H_s = 0.375$  m,  $Q_c = 8.18$  kg/s,  $\beta = 0.383$ , 内側炉心第1列燃料集合体 - 微調整棒条件) に対するメッシュ分割図を示す。また、以下に、解析条件を列記する。

		$Q_c$ ( $\beta$ )			最大温度差
		4.09 (kg/s)	8.18 (kg/s)	16.36 (kg/s)	
$H_s$	0.060 (m)	CASE-6 (0.192)	CASE-1 (0.383)		152.0 °C
	0.200 (m)		CASE-2 (0.383)		
	0.375 (m)	CASE-7 (0.192)	CASE-3 (0.383)	CASE-8 (0.766)	
	0.540 (m)		CASE-4 (0.383)		
	0.700 (m)	CASE-9 (0.192)	CASE-5 (0.383)		

以下に計算条件を示す。

座 標 系 :  $r$ - $\theta$ - $z$  3次元円筒座標系 1/4 セクター

メッシュ分割 :  $20^i \times 24^j \times 62^k$  (1辺約1 cm程度の計算セルであるが、今回と同様な体系下での解析で、実験結果を良好に再現できることを確認している<sup>1)</sup>)

時間積分法 : 修正 ICE 法、定常計算

対流項差分法 : 運動量式 ..... QUICK 法

エネルギー式 ..... QUICK-FRAM 法

乱流量式 ..... 1次風上差分法

乱流モデル : 代数応力モデル

入口境界条件 : 燃料集合体ハンドリングヘッド内には砲弾型上部中性子遮蔽体が存在するため、冷却材はこの遮蔽体とラップ管との間隙

を縫うように流れる。このため、燃料東部で形成された流速分布は、この形状によって乱される。したがって、ここでの解析では、文献 1) で計算された流速分布を境界条件とした。

### 3.2 解析結果

[ Cases - 1, - 2, - 3, - 4 and - 5 ]

Case - 1 ~ Case - 5 の解析結果の内、垂直断面 (J = 1 ~ 17) における流速分布の比較を Fig. 3. 2 に示す。各ケースについて共通な流動特性は、次の通りである。すなわち、燃料集合体ハンドリングヘッドから高温冷却材が垂直に流出する周方向断面 (J = 1 ~ 5 および J = 12 ~ 17) では、その吹き上げが優勢であることから、各燃料集合体に対応する整流筒内に高温冷却材の大半が流入する。一方、燃料集合体ハンドリングヘッドが存在しない周方向断面 (J = 6 ~ 11) では、整流筒内に流入できない高温冷却材の余剰分が支持板管に設けられたフローホールを通過してその上部領域に至る。また、制御棒集合体からの低温冷却材は、慣性力によって一旦上部案内管内に流入するものの、燃料集合体からの高温冷却材の吹き出しに起因したジェット効果によって、上部案内管下端から吸い出される。

垂直断面 (J = 1 ~ 17) での平均温度分布を Fig. 3. 3. に比較する。図中における平均温度は、(3. 1) 式を用いて規格化を行い、これを青色から赤色までのレンジで線形表示したものである。

$$T_N(\%) = \frac{T - T_C}{\Delta T} \times 100 \quad (3. 1)$$

ここで、 $T_C$  は制御棒集合体出口冷却材温度 (408 °C)、 $\Delta T$  は燃料集合体と制御棒集合体間での最大冷却材温度差 (152 °C) である。結果より分かる通り、支持管板の設置位置を高くしてゆくに従い、支持管板より下側において低温冷却材の占める領域が広がる。これは、燃料集合体から流出した高温冷却材の大半が整流筒内に流入する (支持管板の設置高さに依らず同一傾向) ため、支持管板より下側の領域は制御棒集合体からの低温冷却材に支配されるようになることに起因する。

垂直断面 (J = 1 ~ 17) における温度ゆらぎ振幅の空間分布を Fig. 3. 4 に比較する。同図に示した温度ゆらぎ振幅は、(3. 2) 式により規格化を施し、得られた値を青色 (0.0 %) から赤色 (23.3 %) までのレンジで線形表示したものである。なお、温度ゆらぎ振幅の規格化に当たっては、温度ゆらぎ挙動が平均温度の回りで統計的に一様に変動しているものと仮定した。

$$\overline{\theta'_N} (\%) = \frac{\sqrt{\theta'^2}}{\Delta T} \times 100 \quad (3.2)$$

ここで、 $\overline{\theta'^2}$  は AQUA コードにより計算された温度ゆらぎ強度の平均値である。結果では、支持管板の設置位置を高くしてゆくに従って、高振幅領域が広がる傾向を示している。しかしながら、その振幅値は、支持管板を低く設置した場合の方が大きなものとなっている。詳細については、次章で検討する。

#### [ Cases - 3, - 7 and - 8 ]

ここでの比較は、支持管板の設置高さを 375 mm に固定し、制御棒集合体流量を増減させた場合のものである。Fig. 3. 5 に平均温度の空間分布の比較を、また Fig. 3. 6 に温度ゆらぎ振幅の空間分布の比較を示す。なお、両図中の結果ともに (3. 1) 式および (3. 2) 式による規格化を施した。まず、平均温度分布の比較では、制御棒集合体流量を増加させてゆくに従い、支持管板より下側の領域は制御棒集合体からの低温冷却材に支配されるようになる。このため、制御棒集合体流量を増加させた場合、支持管板より下側の領域で大きな平均温度勾配が生じる箇所は整流筒先端部に限定される。ただし、整流筒について見れば、この内外での大きな平均温度勾配にさらされるため、クリープ疲労損傷に対する懸念が生じる。温度ゆらぎ振幅の空間分布の比較では、平均温度分布の傾向に対応して、制御棒集合体流量を増加させることにより、その値が小さなものとなっていることが分かる。

#### [ Cases - 1 and - 6 ]

ここでの比較は、支持管板の設置高さを 60 mm に固定し、制御棒集合体流量を増減させた場合のものである。Fig. 3. 7 に平均温度の空間分布の比較を、また Fig. 3. 8 に温度ゆらぎ振幅の空間分布の比較を示す。平均温度分布の比較では、制御棒集合体流量を減少させた場合 (Case - 6) の方が、当然のことながら低温流体の占める空間領域が狭まる。これに対応して、温度ゆらぎ振幅が大きくなる空間領域は、制御棒集合体流量を減少させた場合の方が限定されたものとなる。

#### [ Cases - 5 and - 9 ]

ここでの比較は、支持管板の設置高さを 700 mm に固定し、制御棒集合体流量を増減させた場合のものである。Fig. 3. 9 に平均温度の空間分布の比較を、また Fig. 3. 10 に温度ゆらぎ振幅の空間分布の比較を示す。結果より分かる通り、制御棒集合体流量を増減させた場合、支持管板より下側の領域での平均温度分布は有意な変化を示すものの、温度ゆら

ぎ振幅の空間分布およびその値は大きく変化していない。これは、制御棒集合体から流出した低温冷却材が概ね自由噴流に近い形で垂直方向に上昇するため、高温冷却材との相互干渉によって発生する温度ゆらぎが、この噴流外縁近傍に限定されることによると解釈できる。

## 第4章 考察

### 4.1 上部支持板高さの効果

Fig. 4.1 に、整流筒外壁位置 ( $I = 9, J = 1$ ) における温度ゆらぎ振幅の軸方向分布を Case - 1 ~ Case - 5 について比較する。図中の横軸は、(3.2) 式により規格化を行った温度ゆらぎ振幅であり、縦軸は集合体上端 (ハンドリングヘッド面) からの軸方向距離である。また、図中に示した 1 から 5 までの数字は、ケース番号に対応する。Case - 1 での結果を除き共通に言えることは、約 18 cm の軸方向位置に温度ゆらぎ振幅の変極点が現れることである。この共通傾向は、以下に示す自由噴流モデルにより解釈が可能である。すなわち、制御棒集合体から流出する低温冷却材の流れは、この中心軸位置に制御棒延長軸が存在するものの、2次元自由噴流挙動で見られるポテンシャルコアが生じる。このポテンシャルコアの軸方向距離は噴流孔径のみによって決定されると共に、ポテンシャルコア内の熱流動挙動は噴流外部からの熱流力的影響を受けない。つまり、ポテンシャルコア内の流体とその外部の流体との熱流力的相互作用は、このポテンシャルコアが消滅した時点を経て顕著となる。なお、ポテンシャルコアの軸方向長さは、2次元自由噴流条件において約  $12b$  ( $b$ : 噴流孔半径) となることが理論的に明かにされている。ここで、噴流孔径として  $11.5 \text{ mm} (= (80.0 - 34.0) / 4.0, 80.0$ : ハンドリングヘッド直径、 $34$ : 制御棒延長軸直径) を仮定すると、ポテンシャルコアの軸方向長さは  $138 \text{ mm}$  となる。つまり、このポテンシャルコアが消滅した軸方向位置を基点として冷却材の相互作用が顕著となる熱流動挙動を考えると、上記変極点の存在は現象論的に解釈できる。なお、Case - 3 ~ Case - 5 の結果では、この変極点位置よりも更に下流側にもう一つの変極点が現れるが、これは垂直に上昇する冷却材が上部支持板に衝突して半径方向に流れの向きが変わることに起因する。

各条件間での比較では、整流筒外壁上に現れる温度ゆらぎ振幅は、上部支持板をより上流側 (低位置) に設置した場合に大きくなるものの、温度ゆらぎの高振幅領域は下部領域のみに限定されることが分かる。これは、上部支持板を低位置に設置した場合、集合体から流出した冷却材の流れが上部支持板によって妨げられることに起因して剪断応力による乱流運動エネルギーの生成量が大きく評価されるためである。逆に、上部支持板を上方に設置した場合には、集合体からの冷却材は概ね垂直方向に一様に流れることから、剪断応力による乱流運動エネルギーの生成は大きなものとはならない。なお、乱流運動エネルギーの値は、レイノルズ応力および乱流熱流束を經由して温度ゆらぎ強度の値に影響を与える。以上より、熱疲労の原因となる温度ゆらぎ振幅を限定する観点からは、材料強度の許容範囲内で可能な限り上部支持板を下方設置することが望ましいと言える。

## 4.2 制御棒集合体流量の効果

整流筒外壁位置 ( $I = 9, J = 1$ ) における温度ゆらぎ振幅の軸方向分布を Cases - 3, - 7 および - 8 (上部支持板の設置高さを 375 mm に固定した条件で、制御棒集合体流量を増減) について Fig. 4. 2 に比較する。結果より分かる通り、温度ゆらぎ振幅は、制御棒集合体流量を減少させるに従って、概ね分布形状を保持したまま低下する。特に、軸方向位置約 18 cm までの分布形状は、前節で述べた噴流挙動に起因して相似なものとなっている。これより、熱疲労の原因となる温度ゆらぎ振幅の影響を緩和させる観点からは、制御棒集合体流量を減少させた方が望ましいと言える。

## 4.3 温度ゆらぎ低減化方策

流量比 (燃料集合体 1 体の流量に対する制御棒集合体流量の割合) と上部支持板の設置位置の増減による体系内における平均温度ゆらぎ振幅の最大値の変化を、Fig. 4. 3 に示す。なお、図中に示した数値は、(3. 2) 式により規格化を施したパーセント表示値である。結果より分かる通り、流量比を減少 (制御棒集合体流量の減少) させ、且つ上部支持板を下方に設置した Case - 6 条件 (流量比 = 0.192, 上部支持板設置高さ = 60 mm) の場合、体系内での平均温度ゆらぎ振幅最大値が最も低下する。この場合の平均振幅最大値は最大平均温度差 (152 °C) の約 9 % (約 14 °C に相当) であり、もんじゅ条件である Case - 3 (流量比 = 0.383, 上部支持板設置高さ = 375 mm) での値 (約 21 °C) の約 67 % に対応する。

もんじゅにおいて、サーマルストライピング対策部材として ALLOY 718 が用いられた箇所は、基本的に温度ゆらぎ振幅 (最大値) が 30 °C を上回る全ての範囲である。具体的には、整流筒、制御棒上部案内管、上部支持板、支持管板フローホール、計装ウエルなどである。AQUA コードにより計算された平均温度ゆらぎ振幅を、最大温度ゆらぎ振幅に換算 (平均温度ゆらぎ振幅の約 3 倍) し、最大温度ゆらぎ振幅が 30 °C を上回る領域を表示したものが Fig. 4. 4 である。同図中では、Cases - 1, - 6 and - 3 (もんじゅ相当条件) の 3 条件での結果を比較している。比較結果より明かなように、もんじゅ相当条件に対応する Case - 3 の結果では、最大温度ゆらぎ振幅が 30 °C を上回る領域が支持管板フローホールを通過してその上部領域にまで到達しているのに対し、平均温度ゆらぎ振幅最大値が最も低下する Case - 6 条件ではその領域が制御棒上部案内管下端領域に限定される。ここで、最大温度ゆらぎ振幅が 30 °C を上回る領域の体積を比較すると、Case - 6 の場合のそれは Case - 3 での場合の約 10 % 程度となる。

以上より、熱疲労の原因となる温度ゆらぎ振幅の影響範囲を低減させる観点からは、上部支持板を下方に設置してその影響範囲を限定すると共に、制御棒集合体流量を減少させて低温流体の占める空間領域を狭めることが極めて有効であると言える。

## 第5章 結 言

高速原型炉「もんじゅ」では、炉心出口近傍に位置する各種構造物をサーマルストライピングによる熱疲労から適切に保護するため、高温・高サイクル疲労強度に優れたALLOY 718を使用している。この保護部材は、基本的に最大温度ゆらぎ振幅が30℃を上回る全ての範囲に適用されている。

本報では、熱疲労の発生原因である温度ゆらぎ振幅の低減化方策を、高速原型炉「もんじゅ」の炉心上部機構領域を対象として解析的に検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 熱疲労の原因となる温度ゆらぎ振幅の影響範囲を狭める観点からは、上部支持板を可能な限り下方に設置することが望ましい。
- (2) 熱疲労の原因となる温度ゆらぎ振幅の影響を緩和させる観点からは、制御棒集合体流量を減少させることが望ましい。
- (3) 上部支持板の設置高さや燃料集合体 - 制御棒集合体間での流量比を調節することにより、ALLOY 718を適用すべき空間(最大温度ゆらぎ振幅 > 30℃)を大幅に縮小可能である。

## 参 考 文 献

- 1) 村松 壽晴、二ノ方 壽、冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (I)、温度ゆらぎ強度評価手法の開発、PNC N9410 90-029 (1990)
- 2) 村松 壽晴、二ノ方 壽、冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発 (II)、温度ゆらぎ強度評価手法の検証と実機体系予備解析、PNC ZN9410 91-119 (1991)



## 謝 辞

AQUA コードによる温度ゆらぎ解析は、CSK 株式会社の松本 英一 氏によるものである。また、解析結果のカラー図形表示は、CSK 株式会社の浜田 隆弘 氏によるものである。ここに、両氏の協力に謝意を表する。

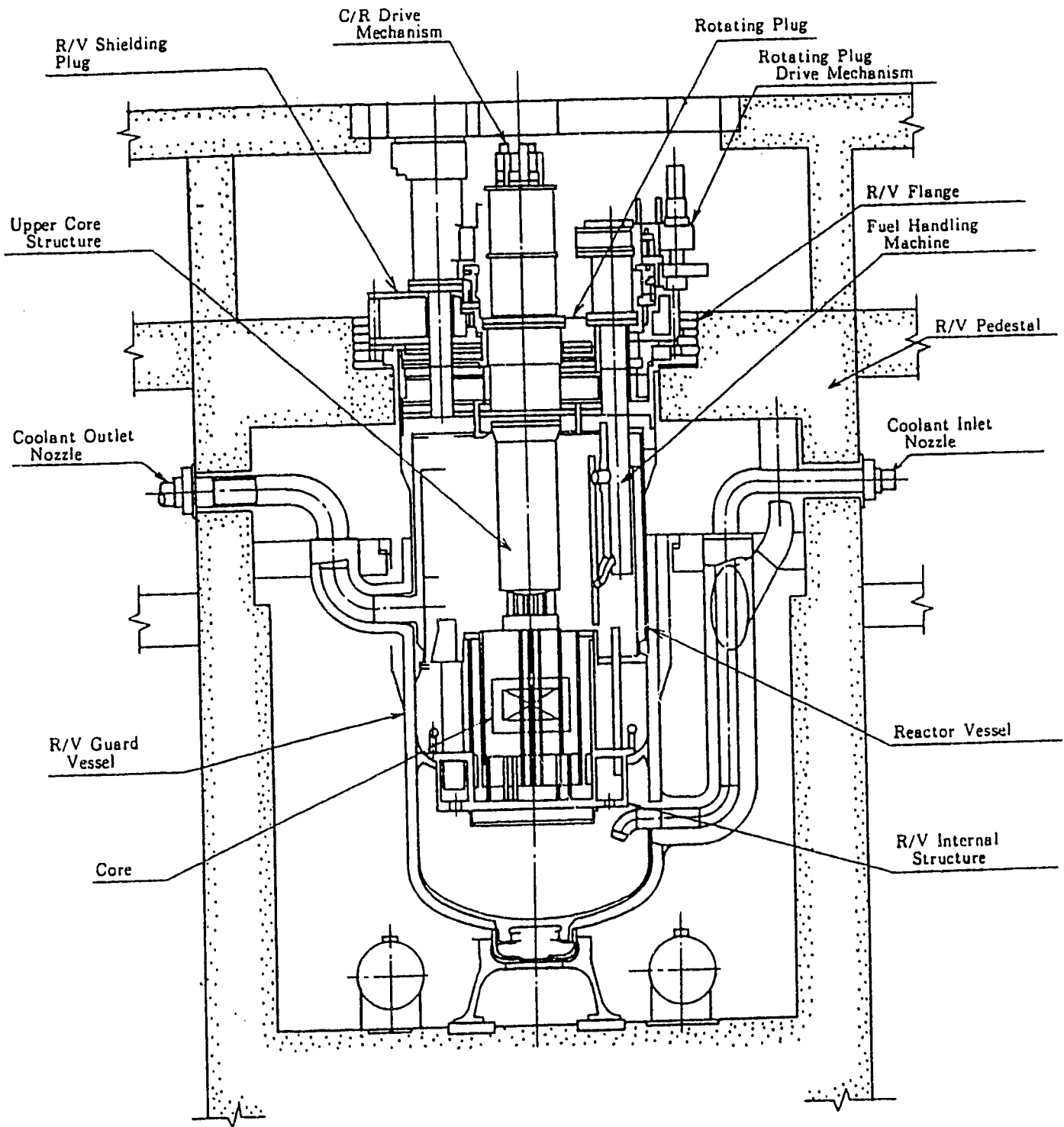
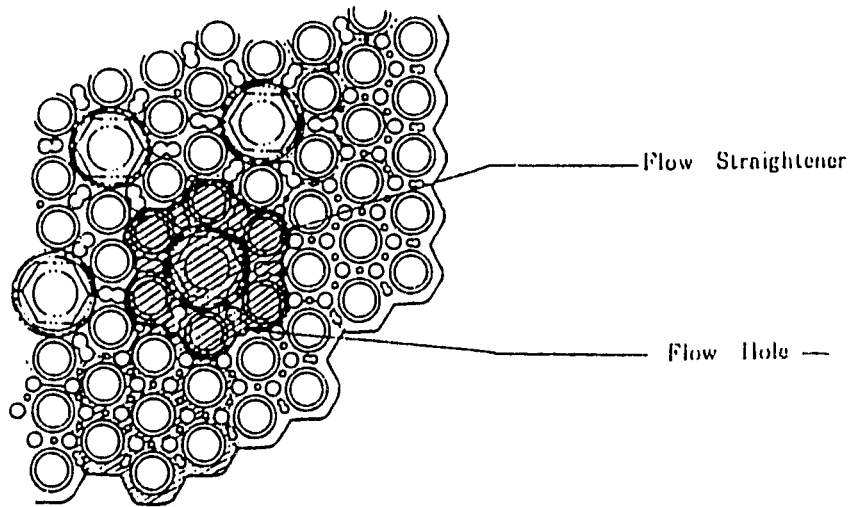
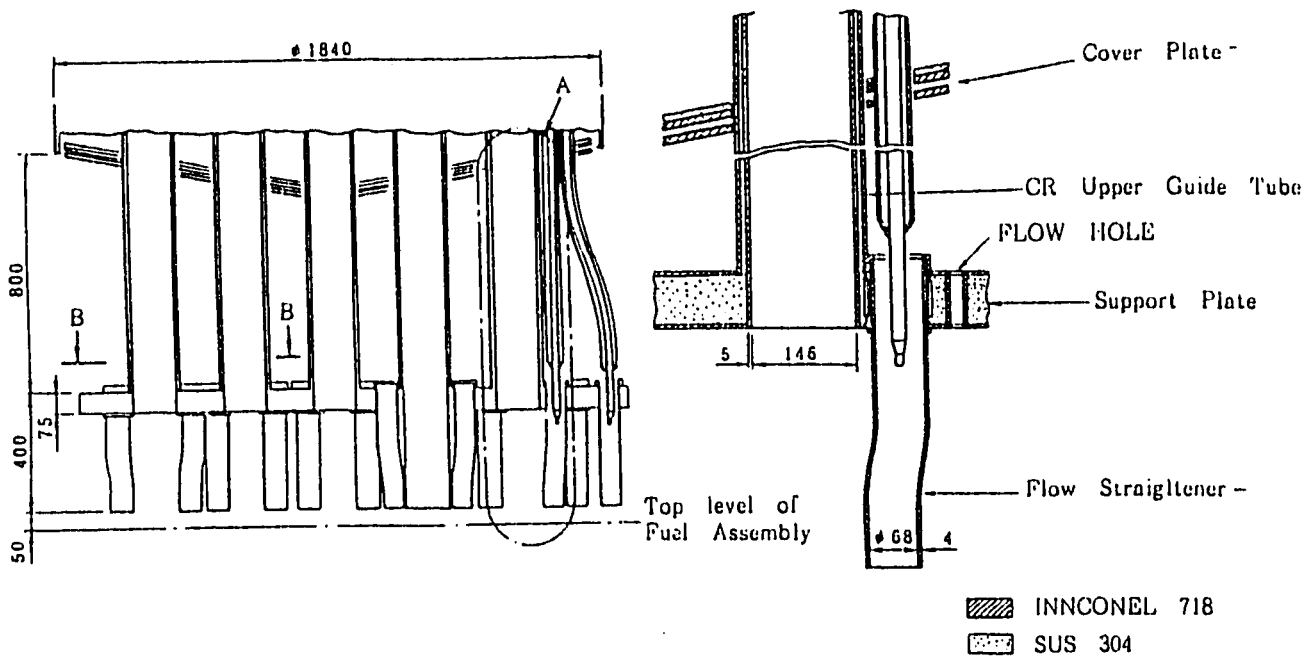
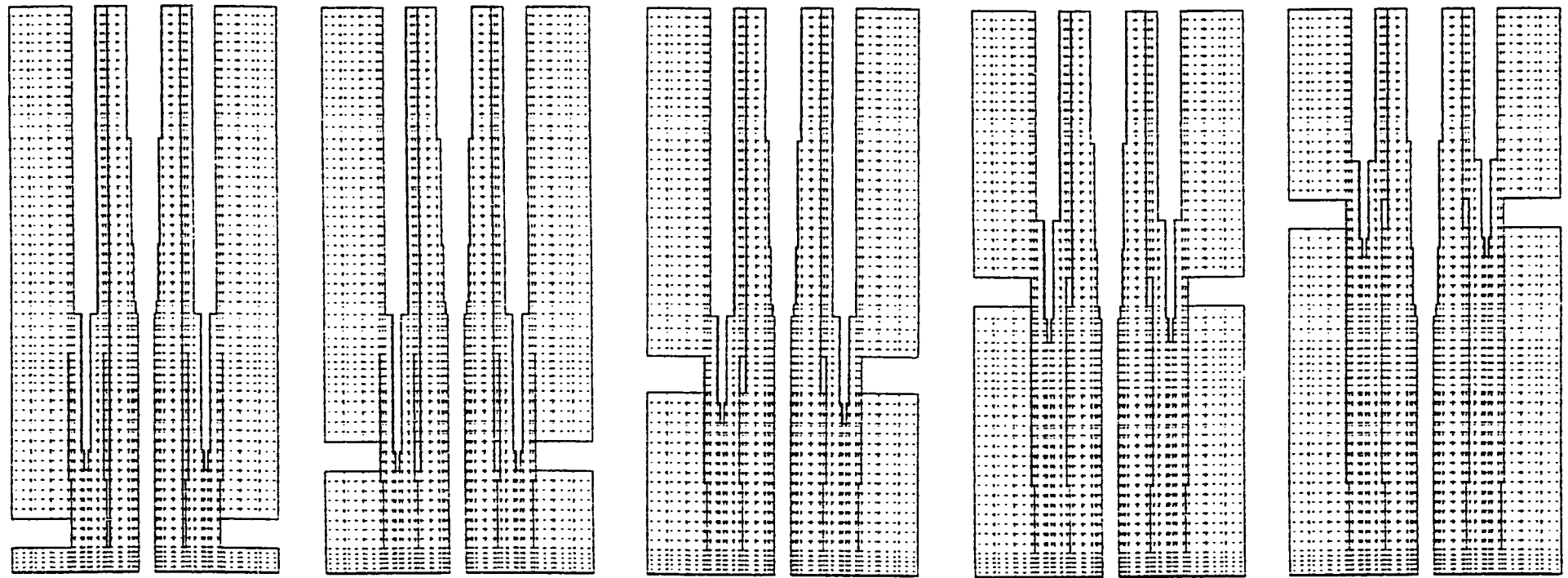


Fig. 2.1 Cut-View of the MONJU Reactor



View from B

Fig. 2.2 Structure of the MONJU Upper Core Structure



J = 1, 17

[Case - 1]

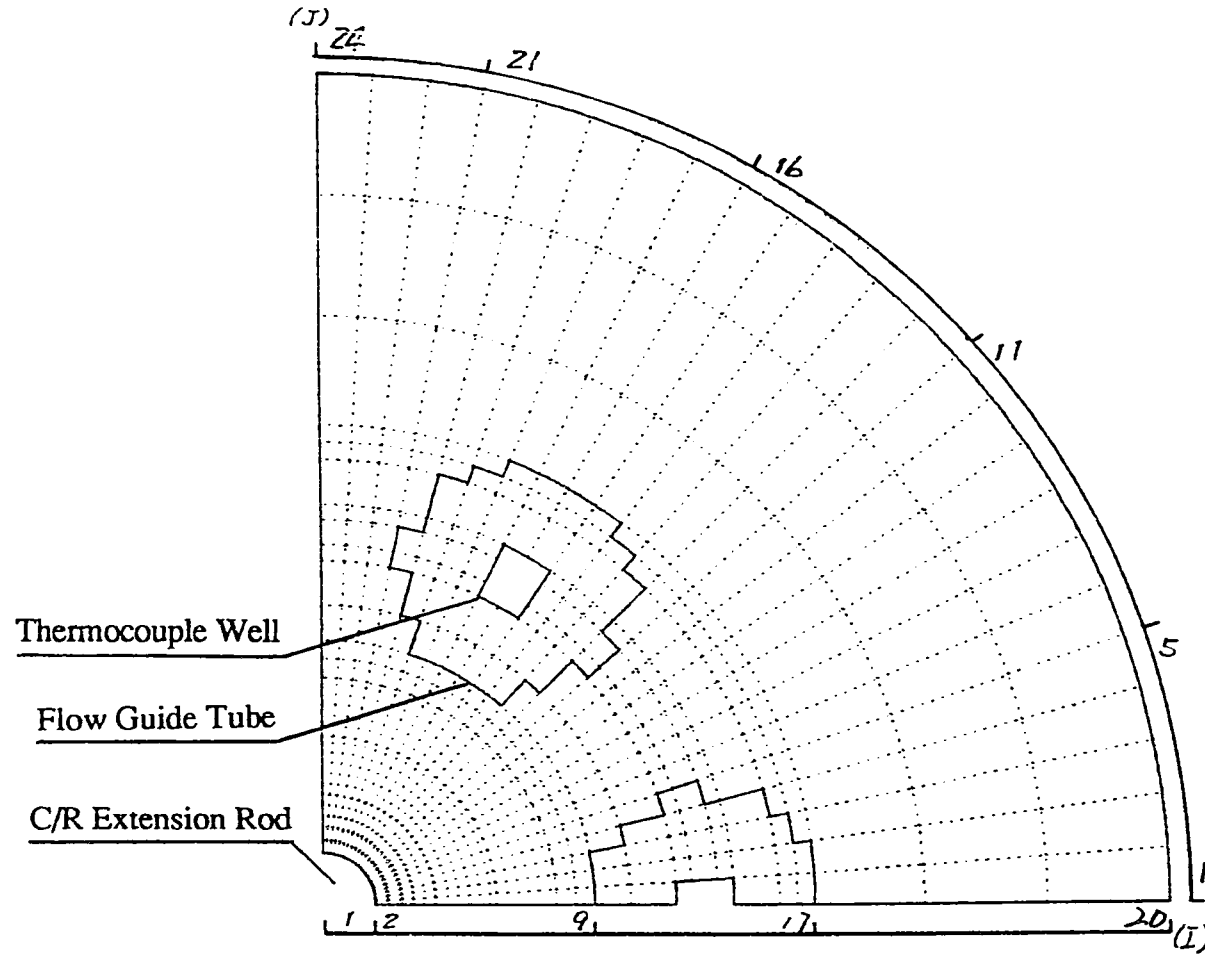
[Case - 2]

[Case - 3]

[Case - 4]

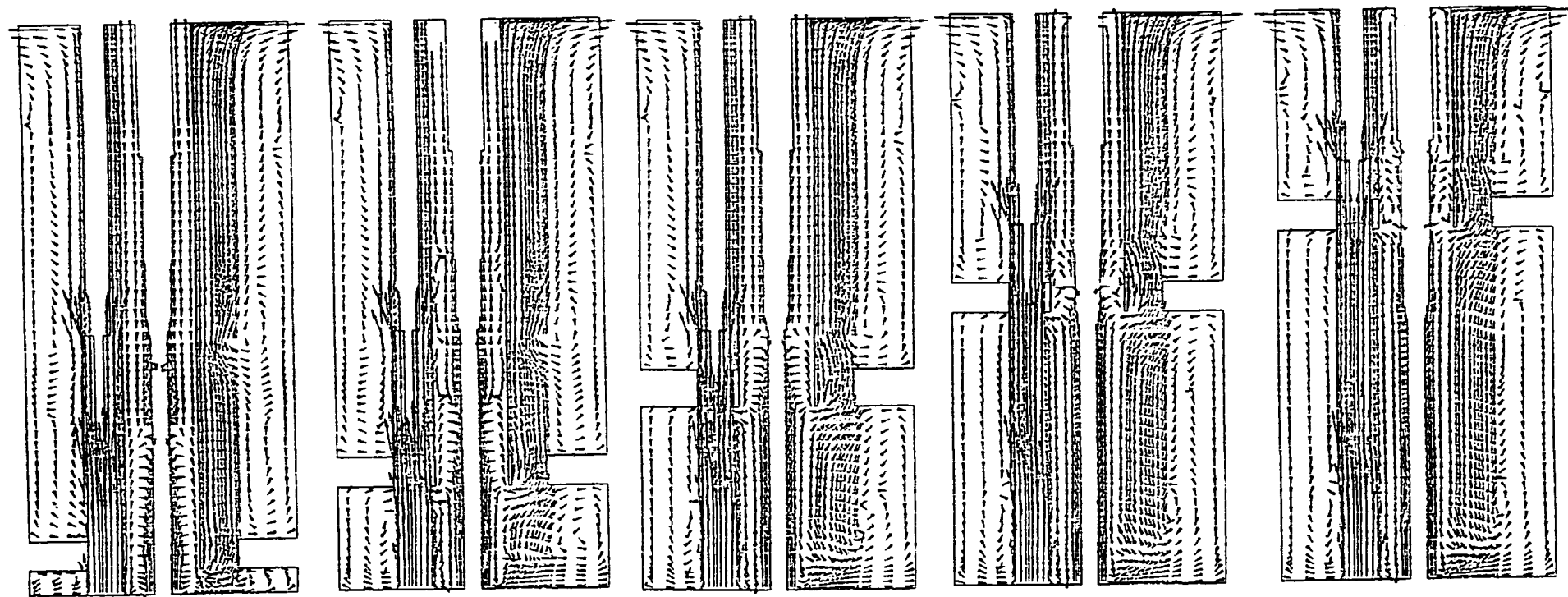
[Case - 5]

Fig. 3.1 Mesh Arrangement for the AQUA Calculations (1/2)



K = 21 of the Case - 3

Fig. 3.1 Continued (2/2)



$J = 1, 9$   
[Case - 1]

[Case - 2]

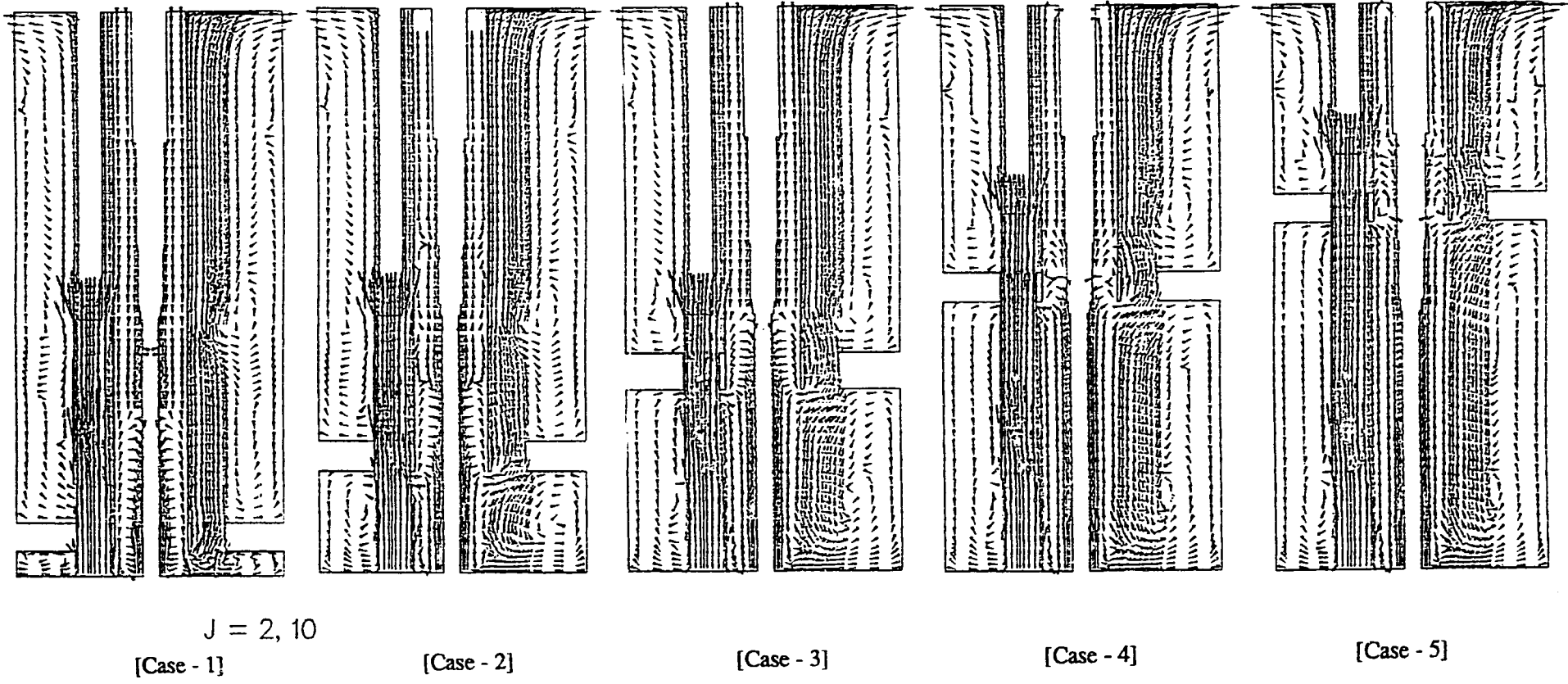
[Case - 3]

[Case - 4]

[Case - 5]

————— 10.00 M/S

Fig. 3.2 Comparison of Velocity Vector Fields for Vertical Planes (1/9)



————— 10.00 M/S

Fig. 3.2 Comparison of Velocity Vector Fields for Vertical Planes (2/9)

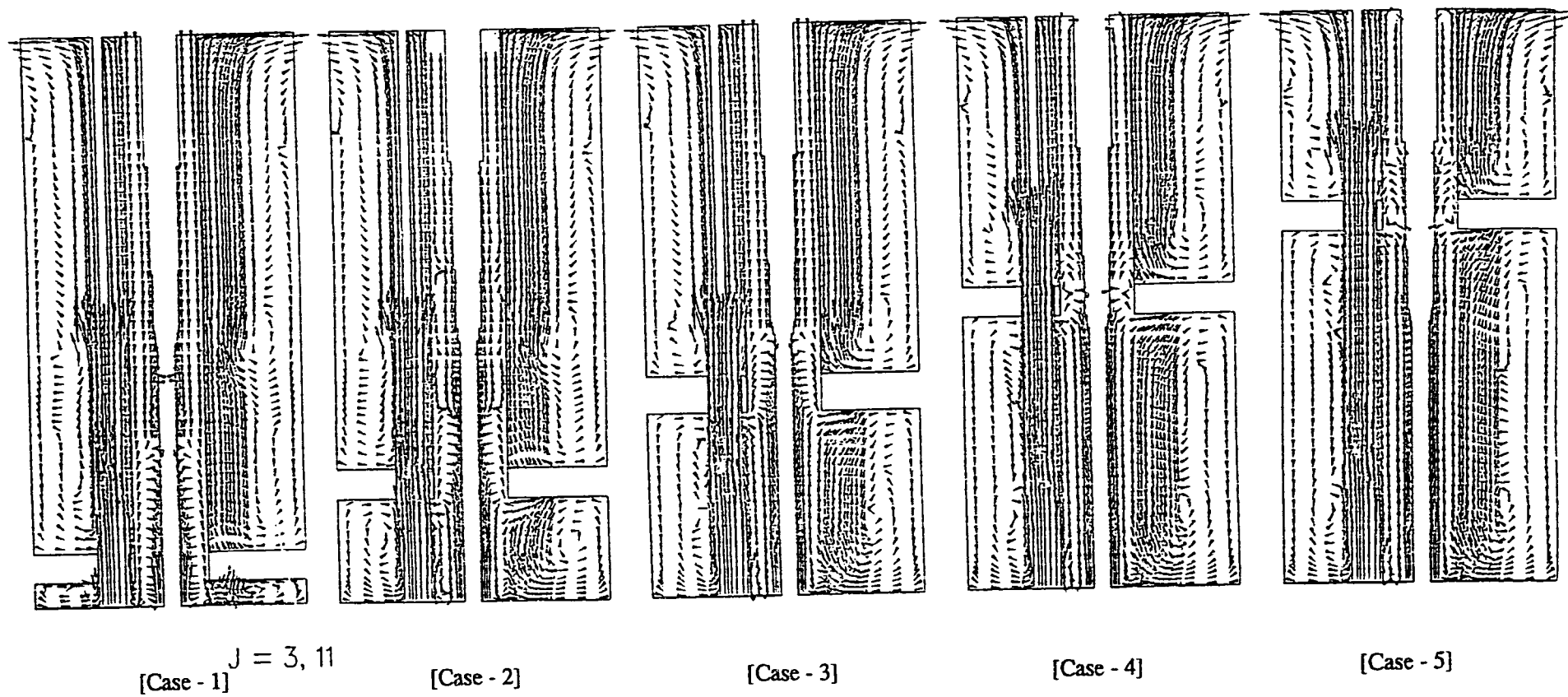


Fig. 3.2 Comparison of Velocity Vector Fields for Vertical Planes (3/9)



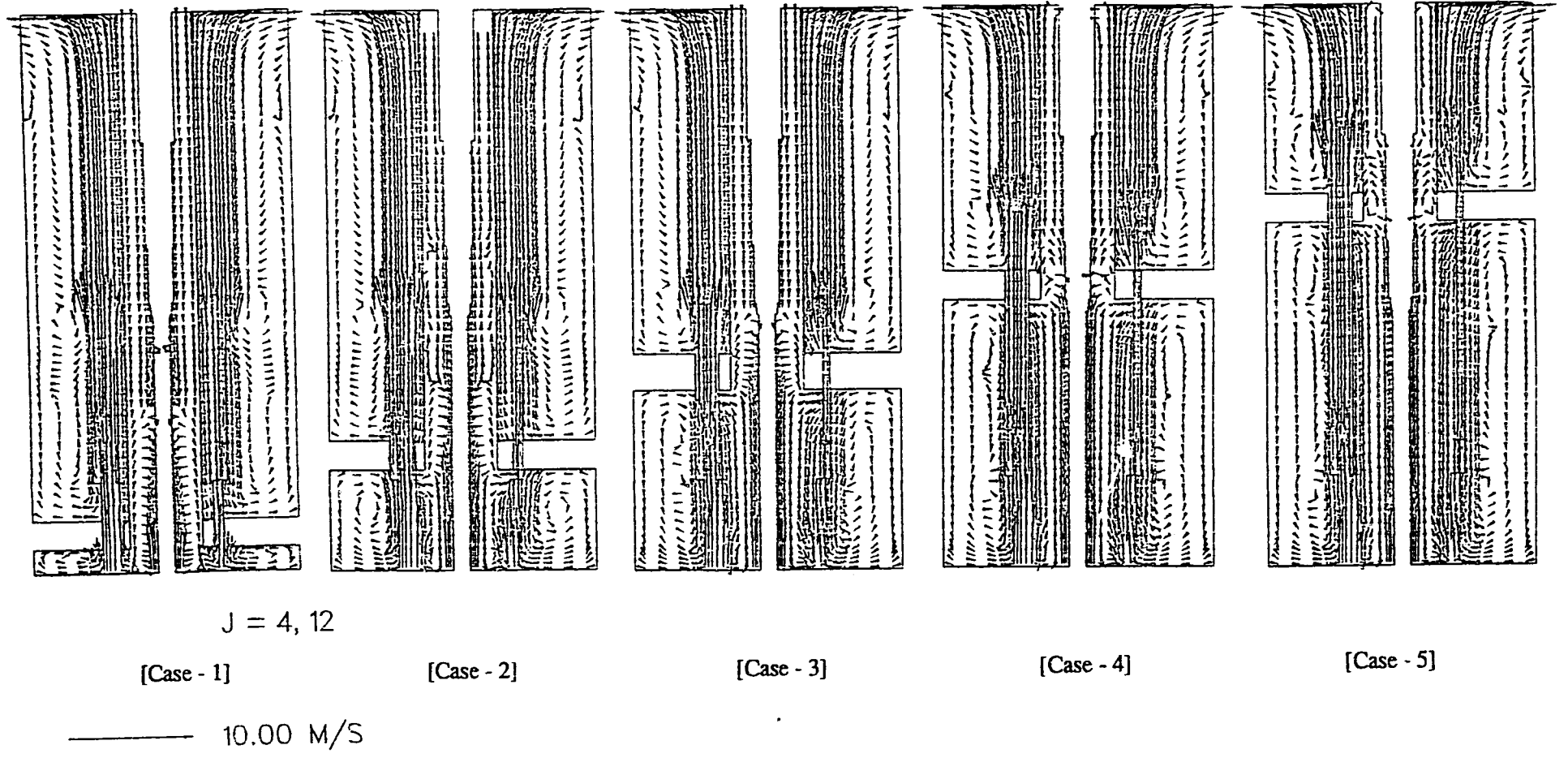


Fig. 3.2 Comparison of Velocity Vector Fields for Vertical Planes (4/9)

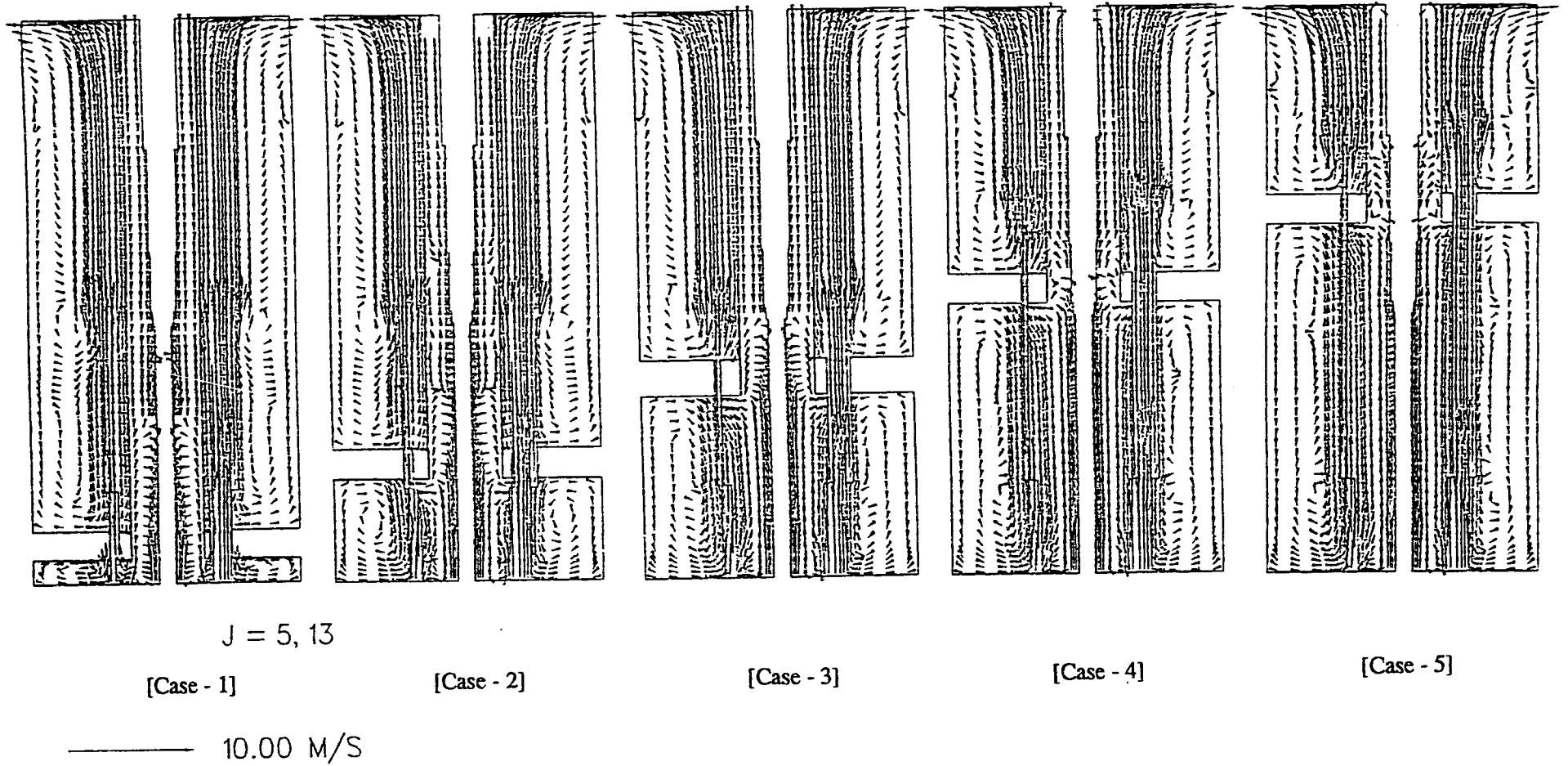


Fig. 3.2 Comparison of Velocity Vector Fields for Vertical Planes (5/9)

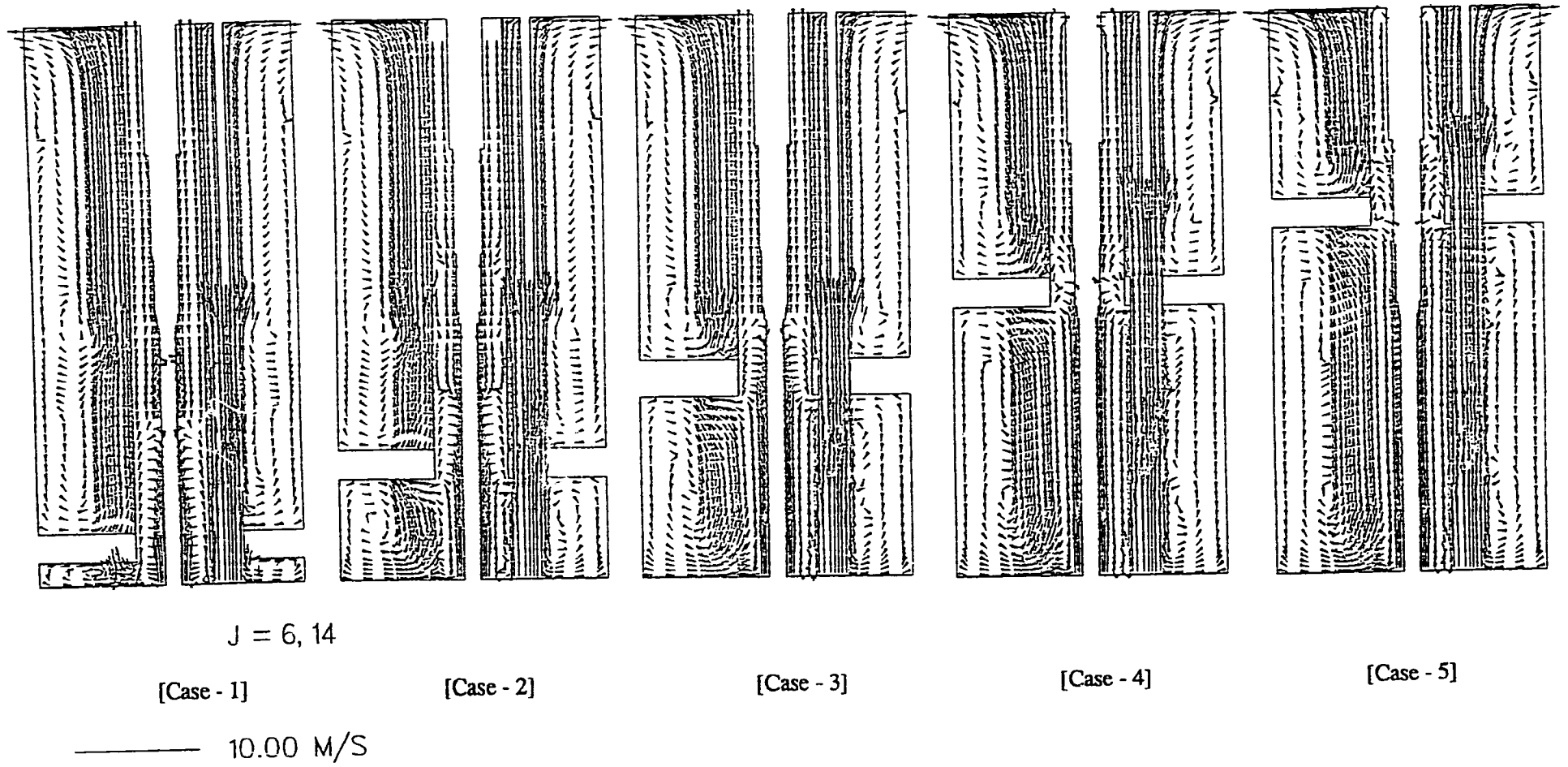


Fig. 3.2 Comparison of Velocity Vector Fields for Vertical Planes (6/9)

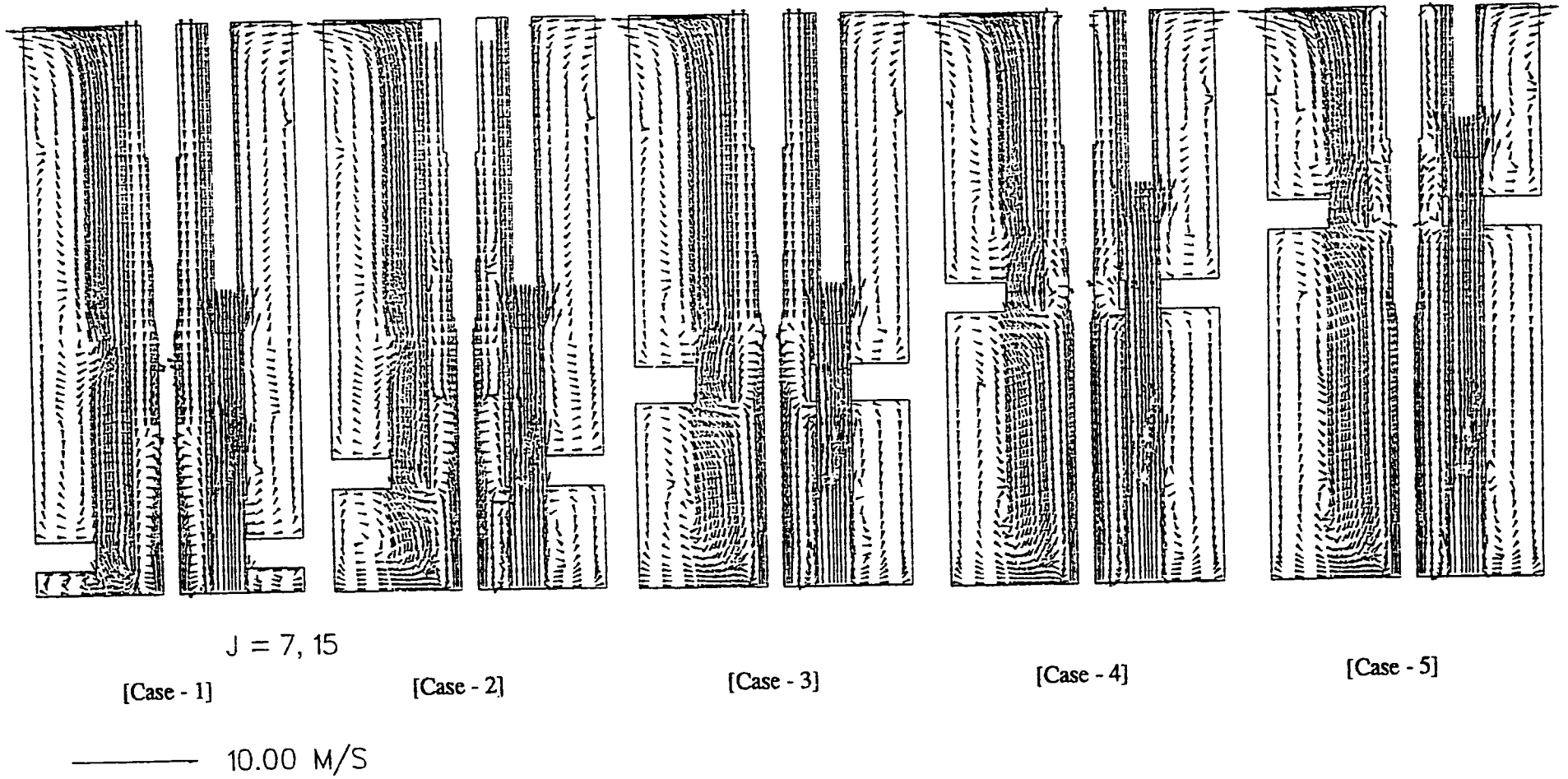


Fig. 3.2 Comparison of Velocity Vector Fields for Vertical Planes (7/9)

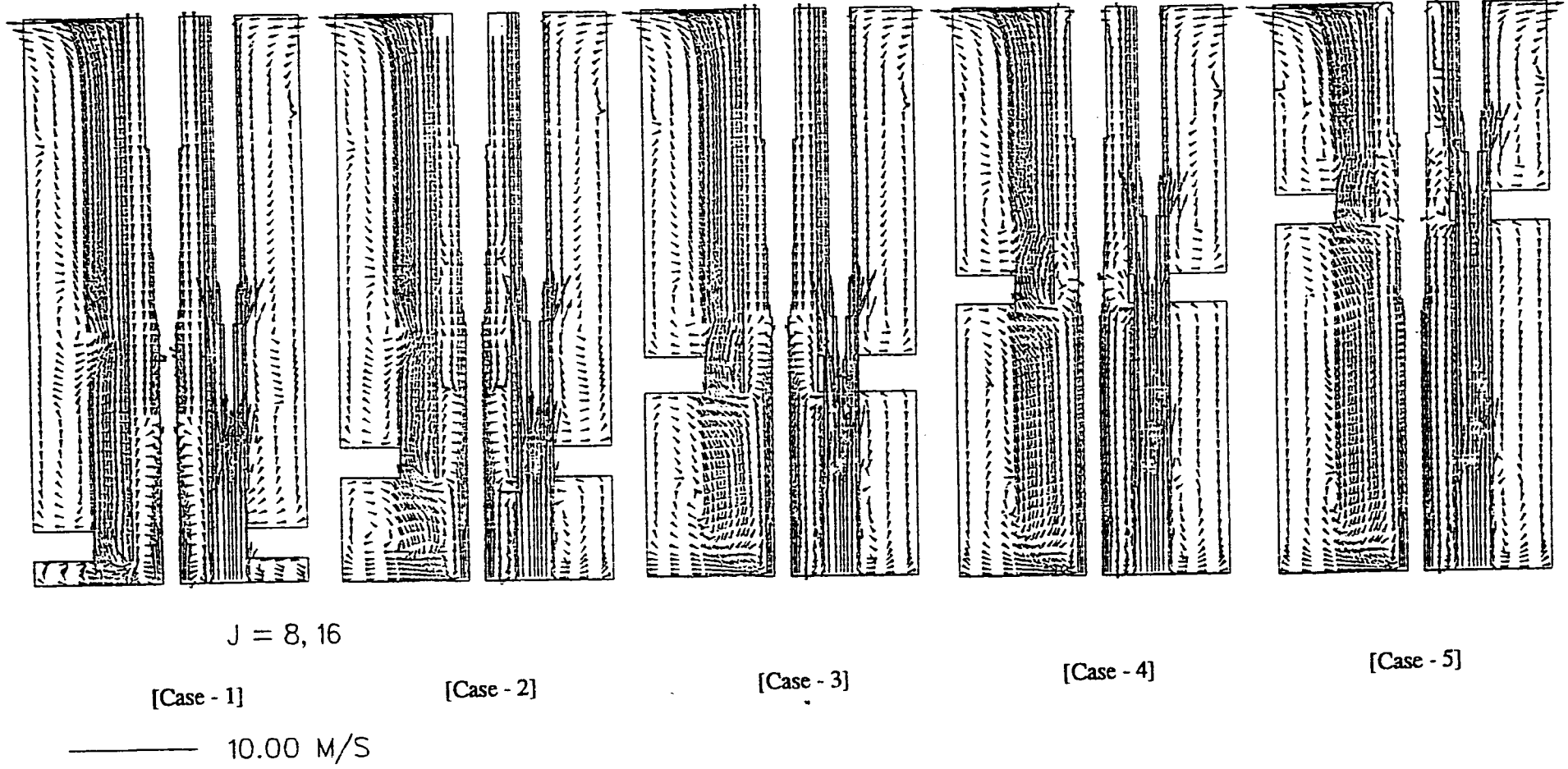


Fig. 3.2 Comparison of Velocity Vector Fields for Vertical Planes (8/9)

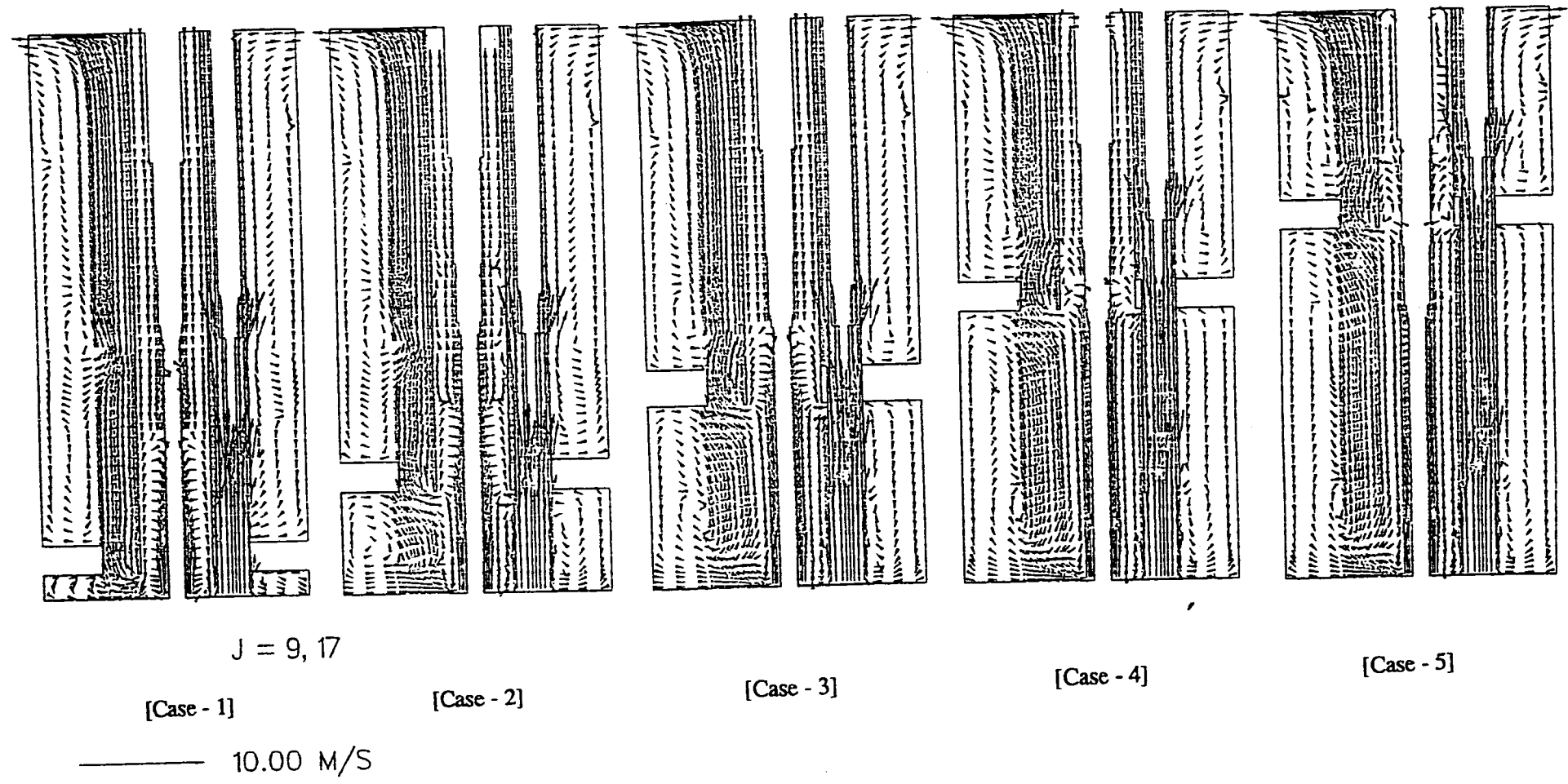


Fig. 3.2 Comparison of Velocity Vector Fields for Vertical Planes (E/9)

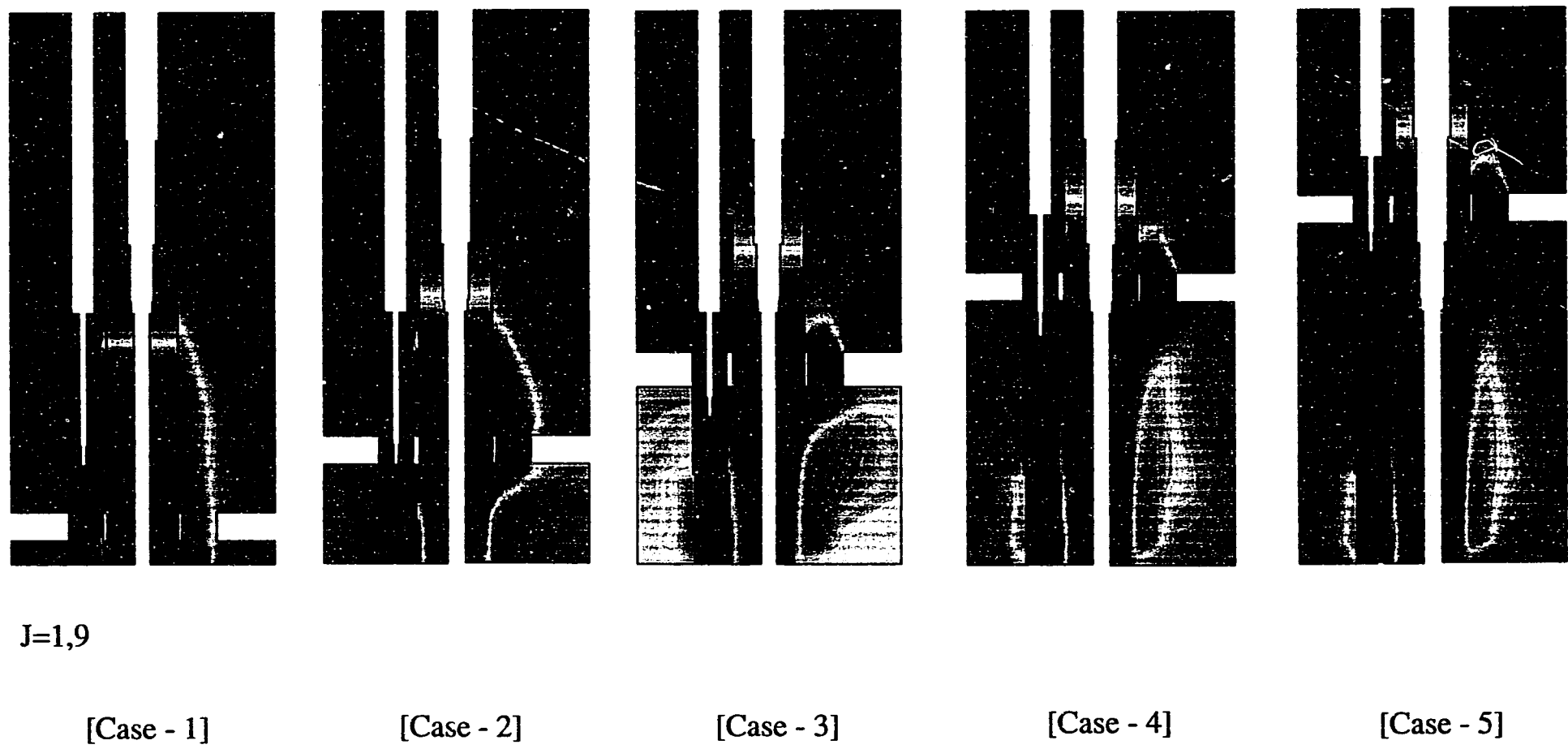


Fig. 3.3 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (1/9)



J=2,10

[Case - 1]

[Case - 2]

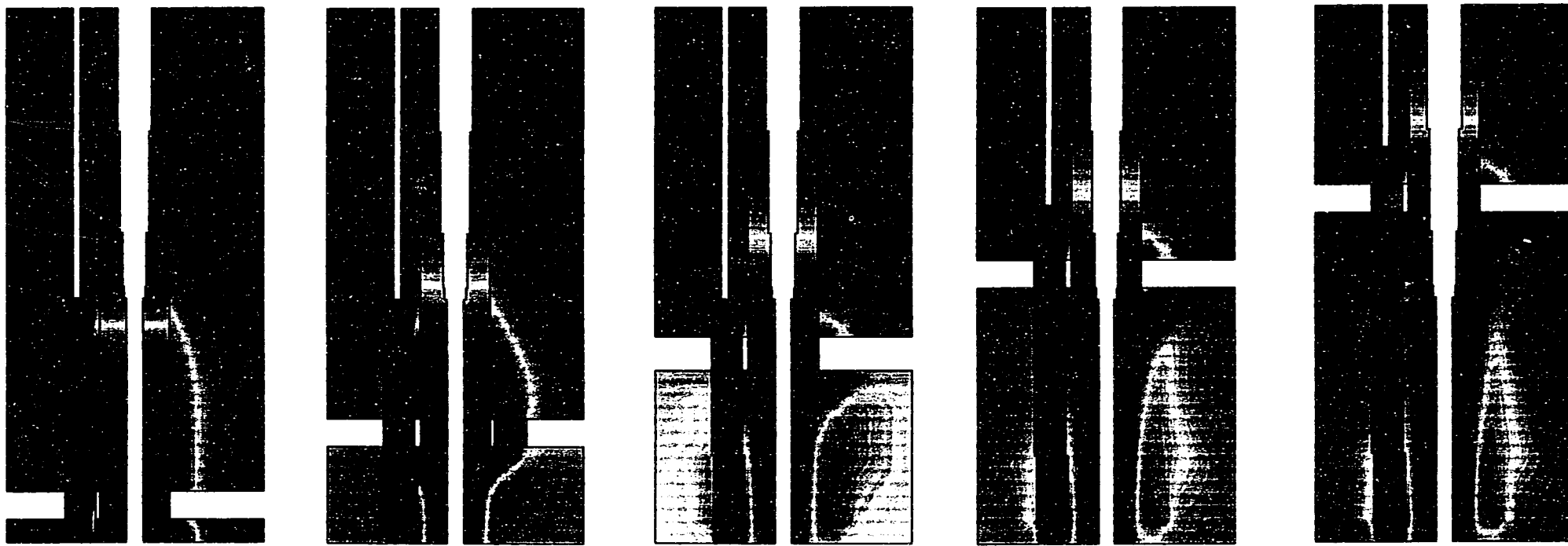
[Case - 3]

[Case - 4]

[Case - 5]

Fig. 3.3 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (2/9)





J = 3,11

[Case - 1]

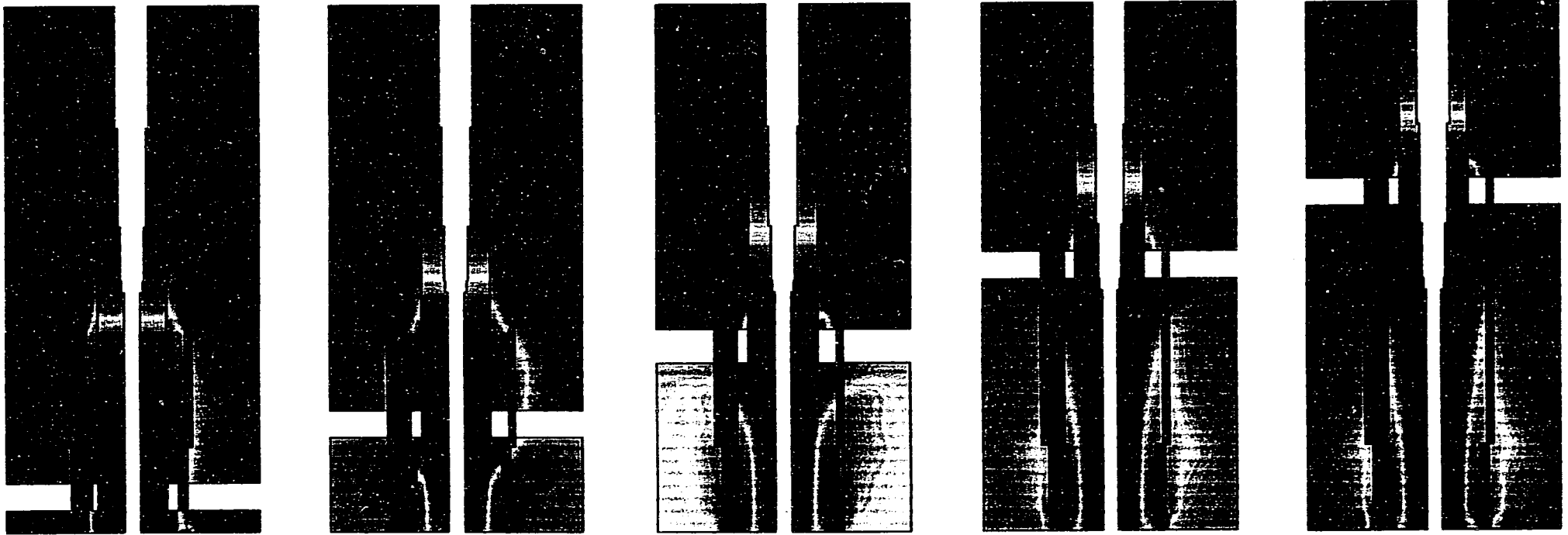
[Case - 2]

[Case - 3]

[Case - 4]

[Case - 5]

Fig. 3.3 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (3/9)



J = 4,12

[Case - 1]

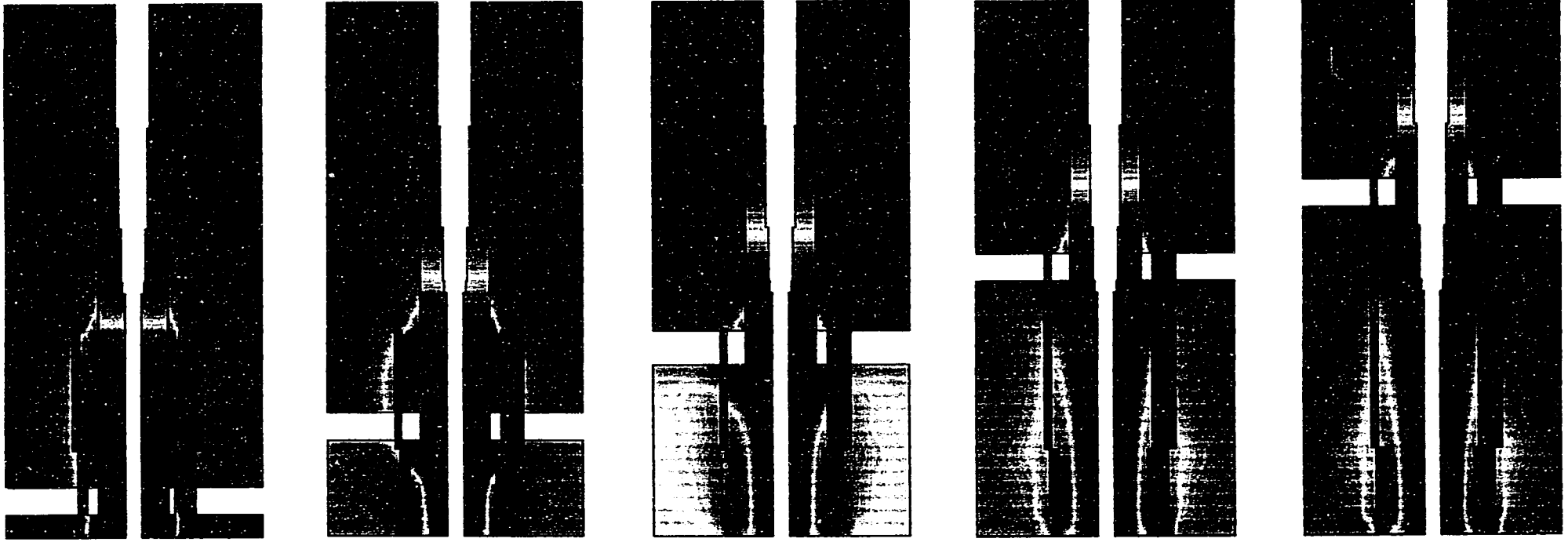
[Case - 2]

[Case - 3]

[Case - 4]

[Case - 5]

Fig. 3.3 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (4/9)



J = 5,13

[Case - 1]

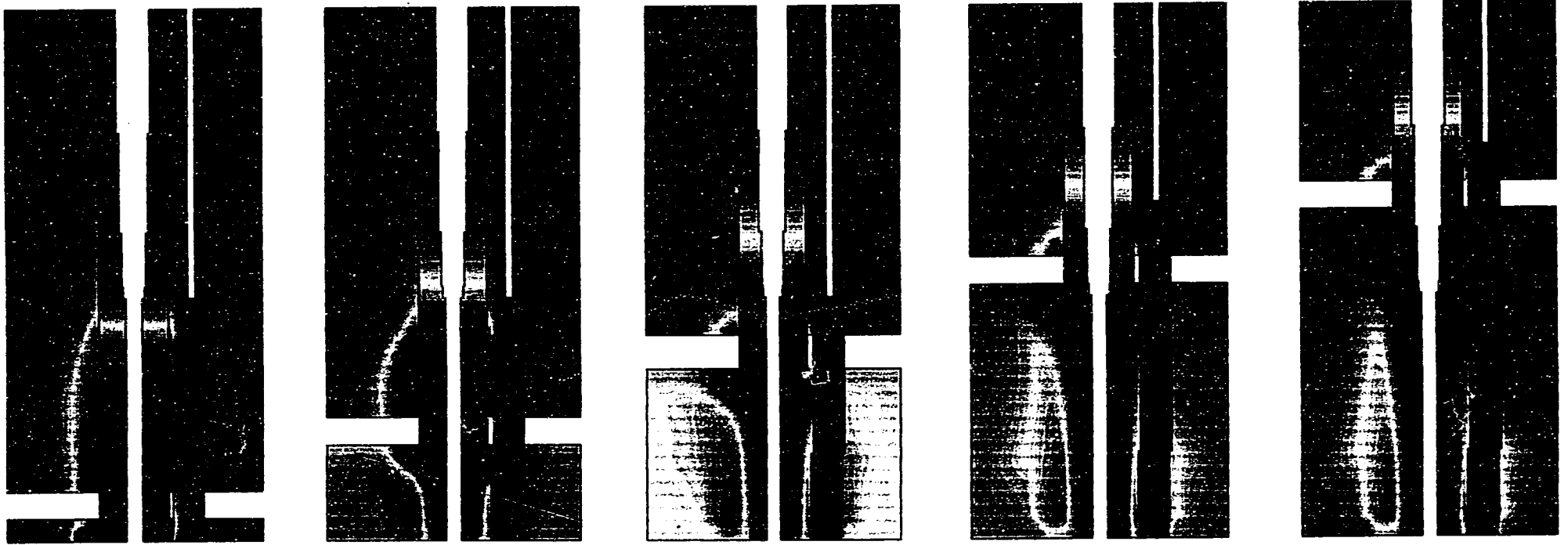
[Case - 2]

[Case - 3]

[Case - 4]

[Case - 5]

Fig. 3.3 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (5/9)



J = 6,14

[Case - 1]

[Case - 1]

[Case - 1]

[Case - 1]

[Case - 1]

Fig. 3.3 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (6/9)



$J = 7,15$

[Case - 1]

[Case - 2]

[Case - 3]

[Case - 4]

[Case - 5]

Fig. 3.3 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (7/9)



$J = 8,16$

[Case - 1]

[Case - 2]

[Case - 3]

[Case - 4]

[Case - 5]

Fig. 3.3 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (8/9)



J = 9,17

[Case - 1]

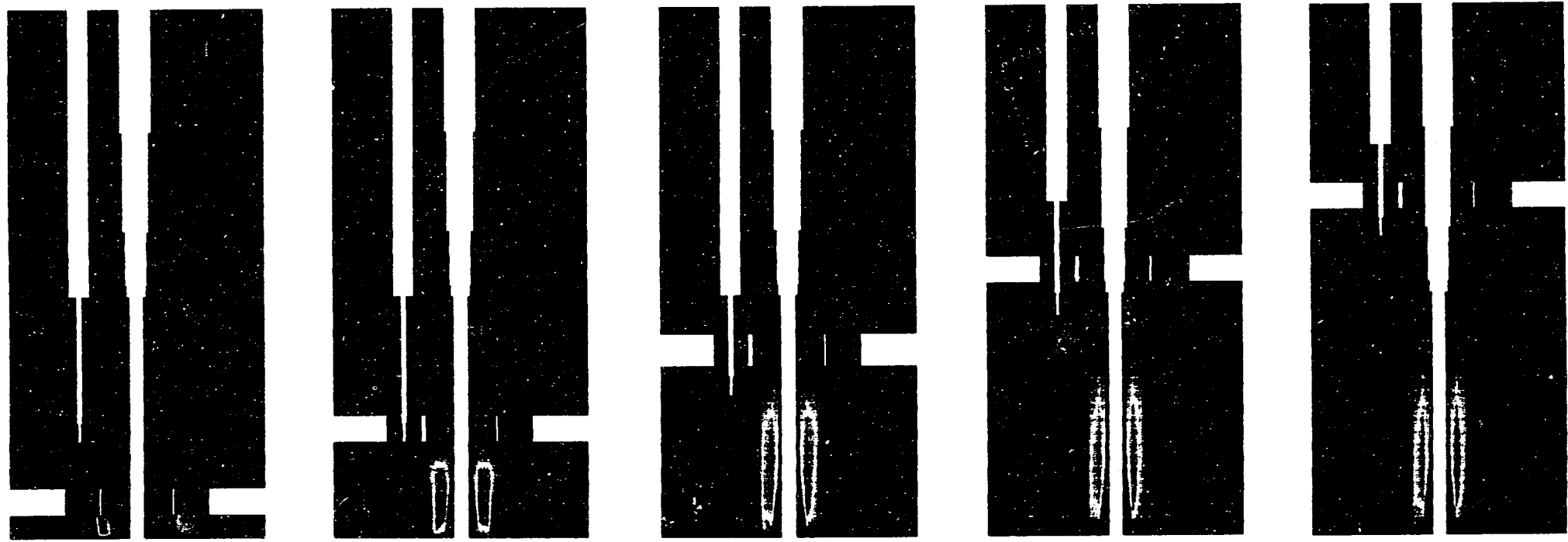
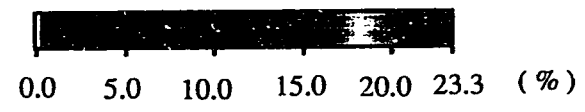
[Case - 2]

[Case - 3]

[Case - 4]

[Case - 5]

Fig. 3.3 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (9/9)



J = 1,9

[ Case - 1 ]

[ Case - 2 ]

[ Case - 3 ]

[ Case - 4 ]

[ Case - 5 ]

Fig. 3.4 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (1/9)



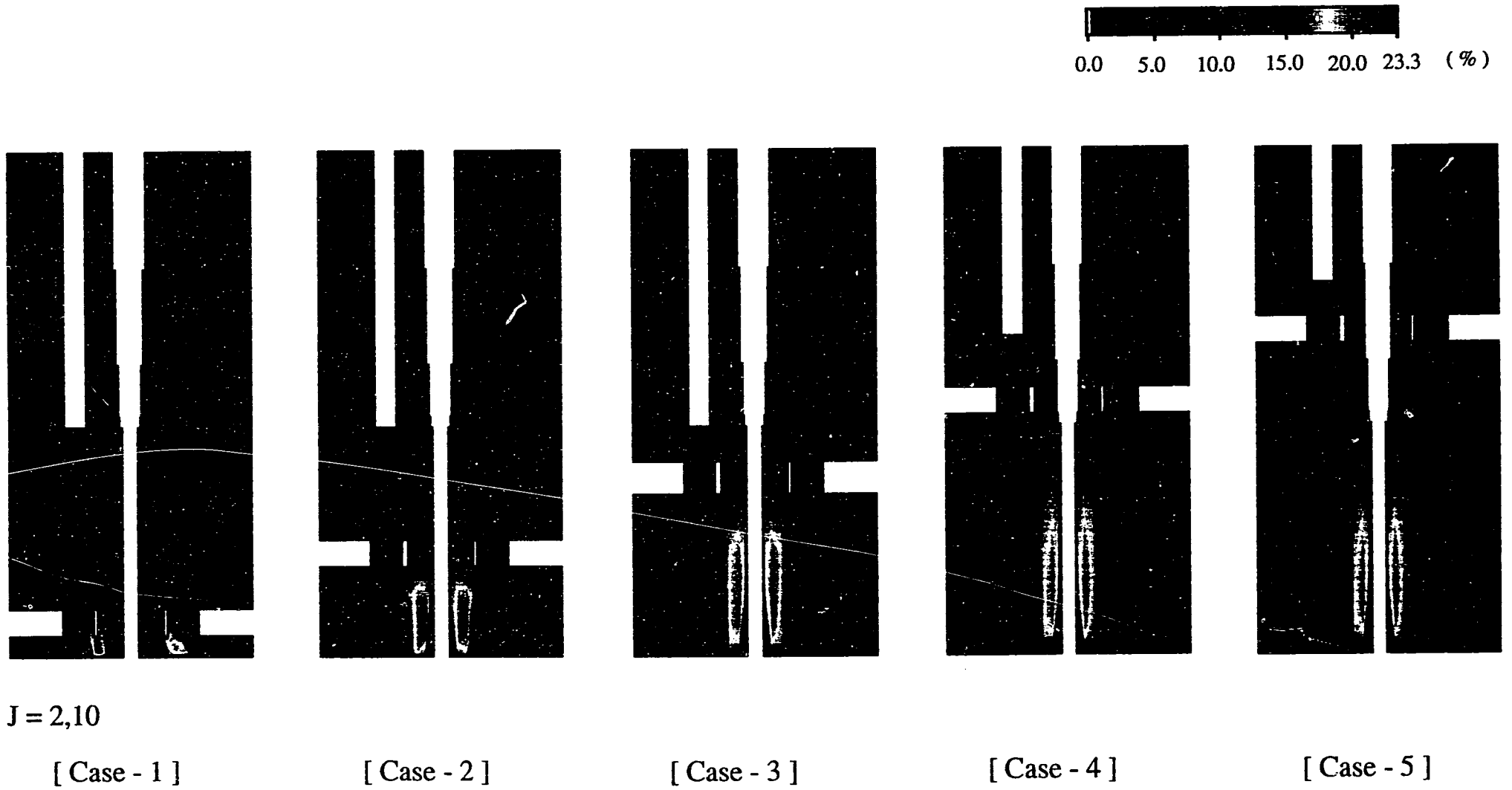


Fig. 3.4 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (2/9)

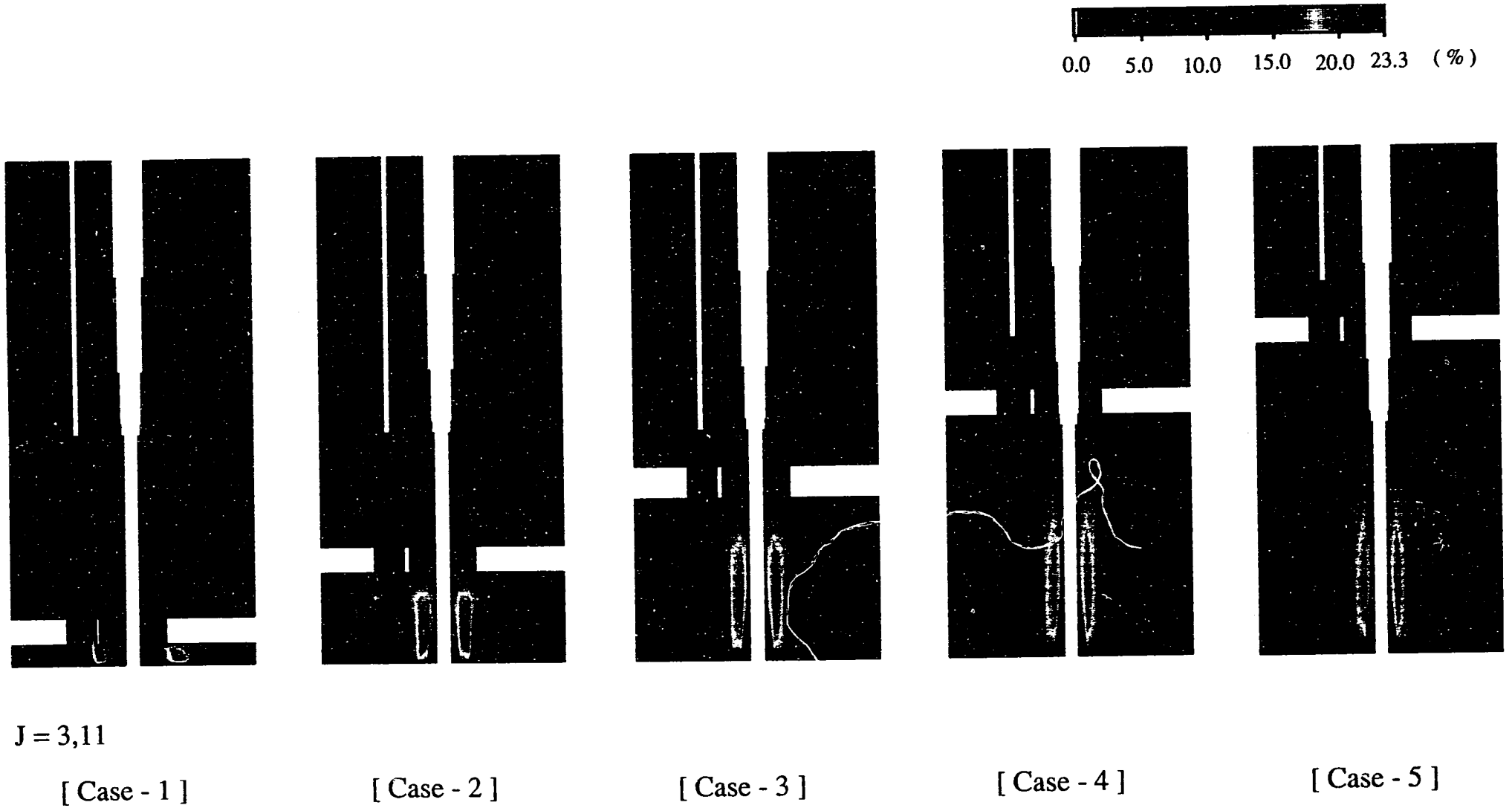


Fig. 3.4 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (3/9)

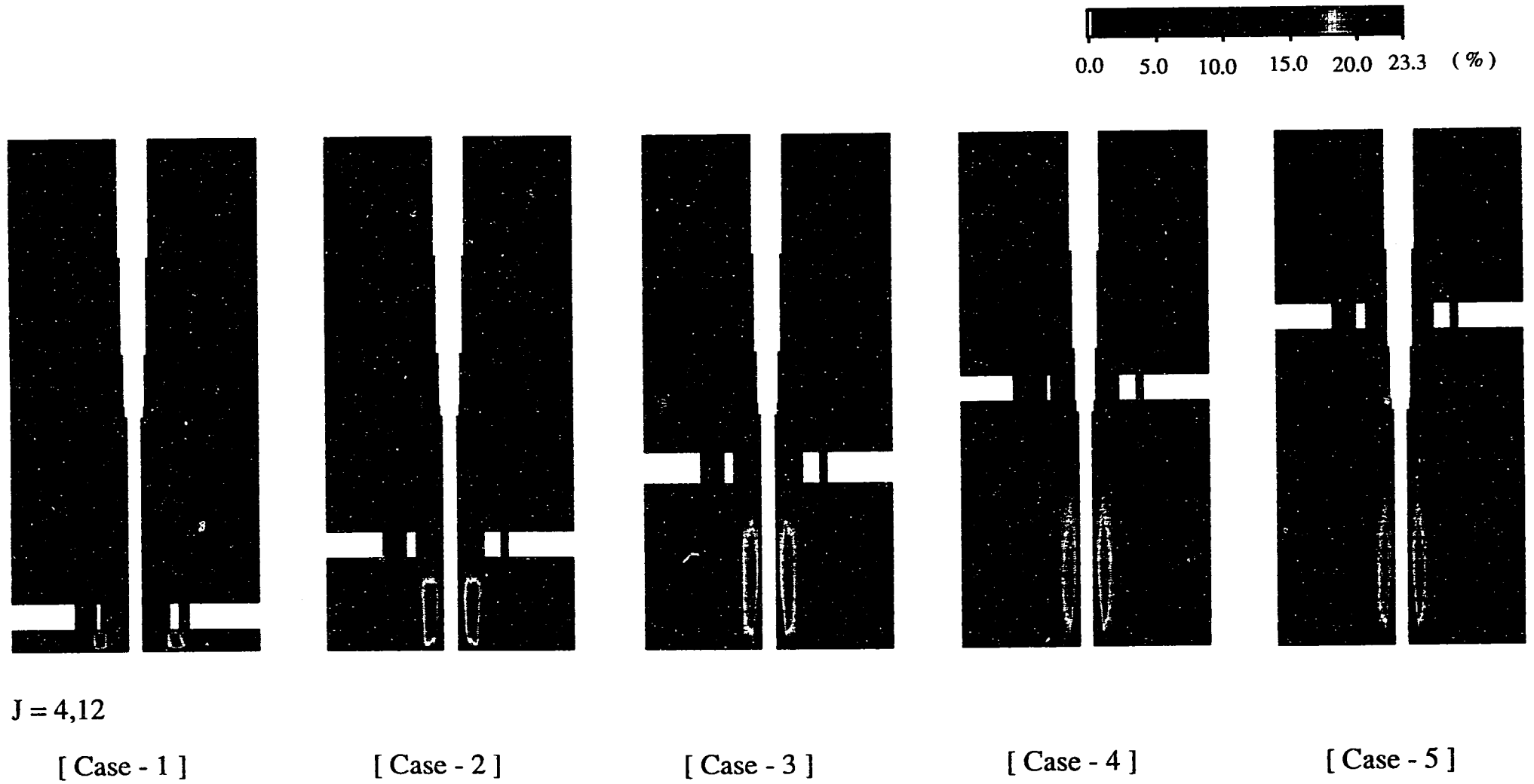


Fig. 3.4 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 4/9 )

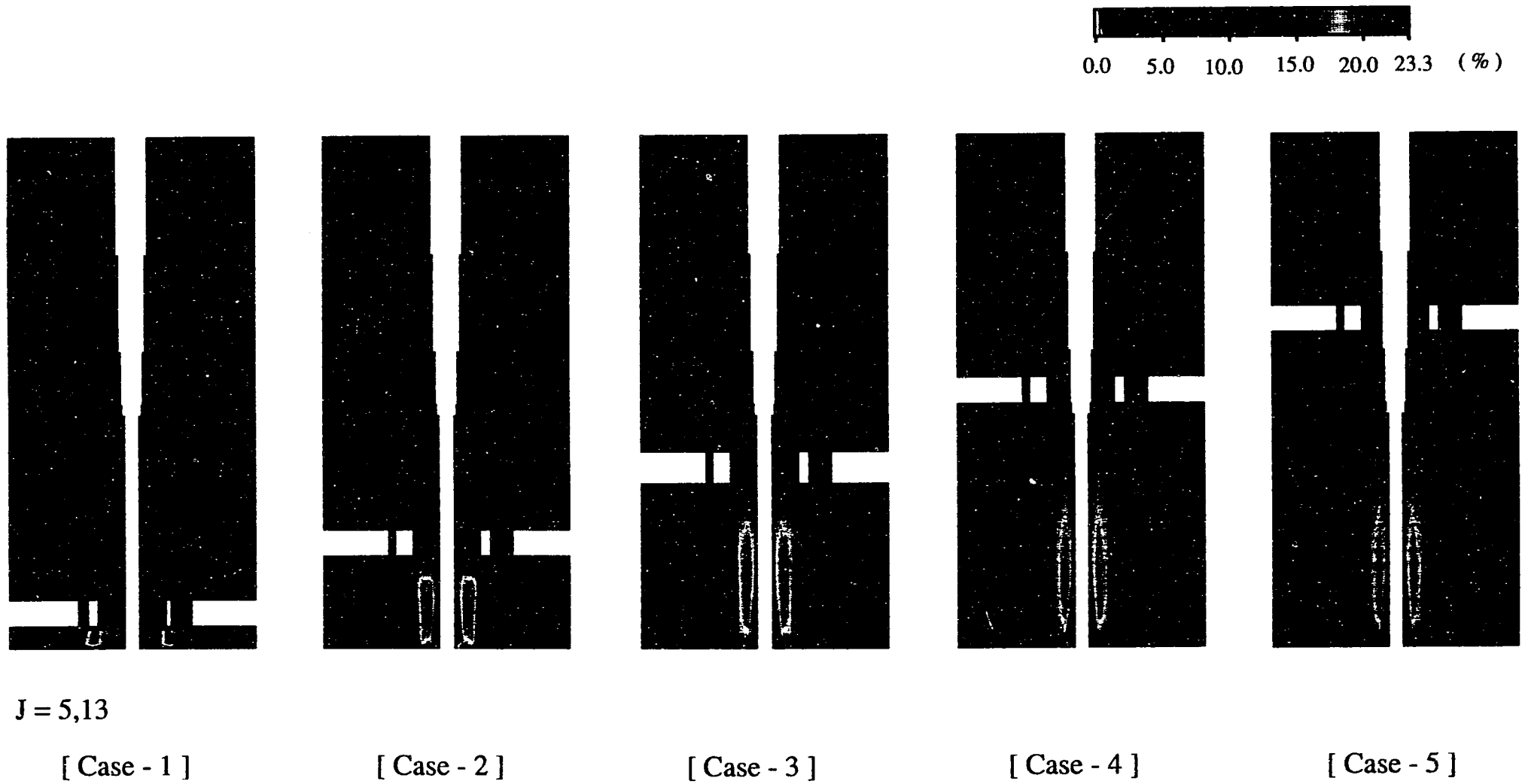


Fig. 3.4 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 5/9 )

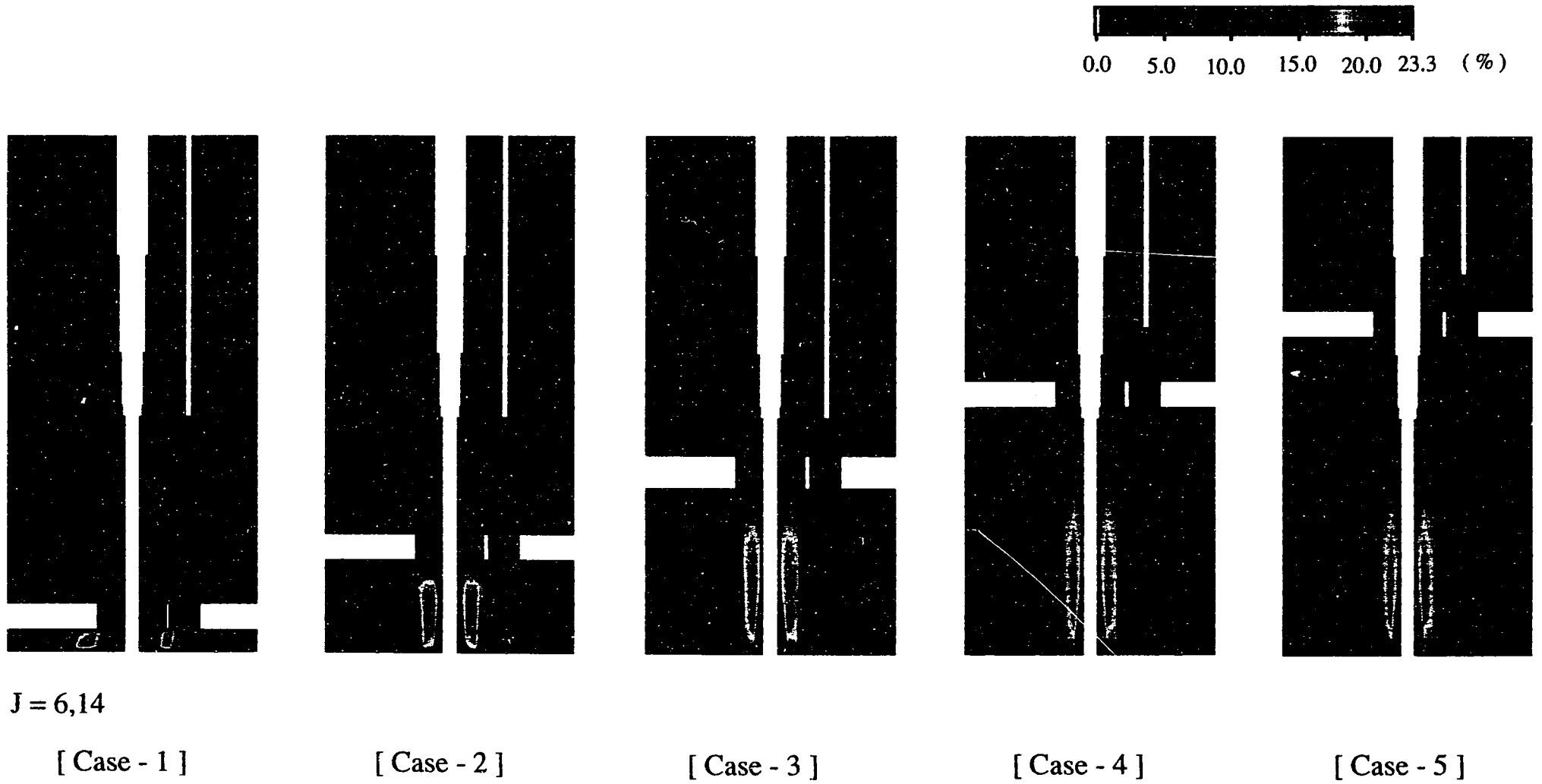


Fig. 3.4 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 6/9 )

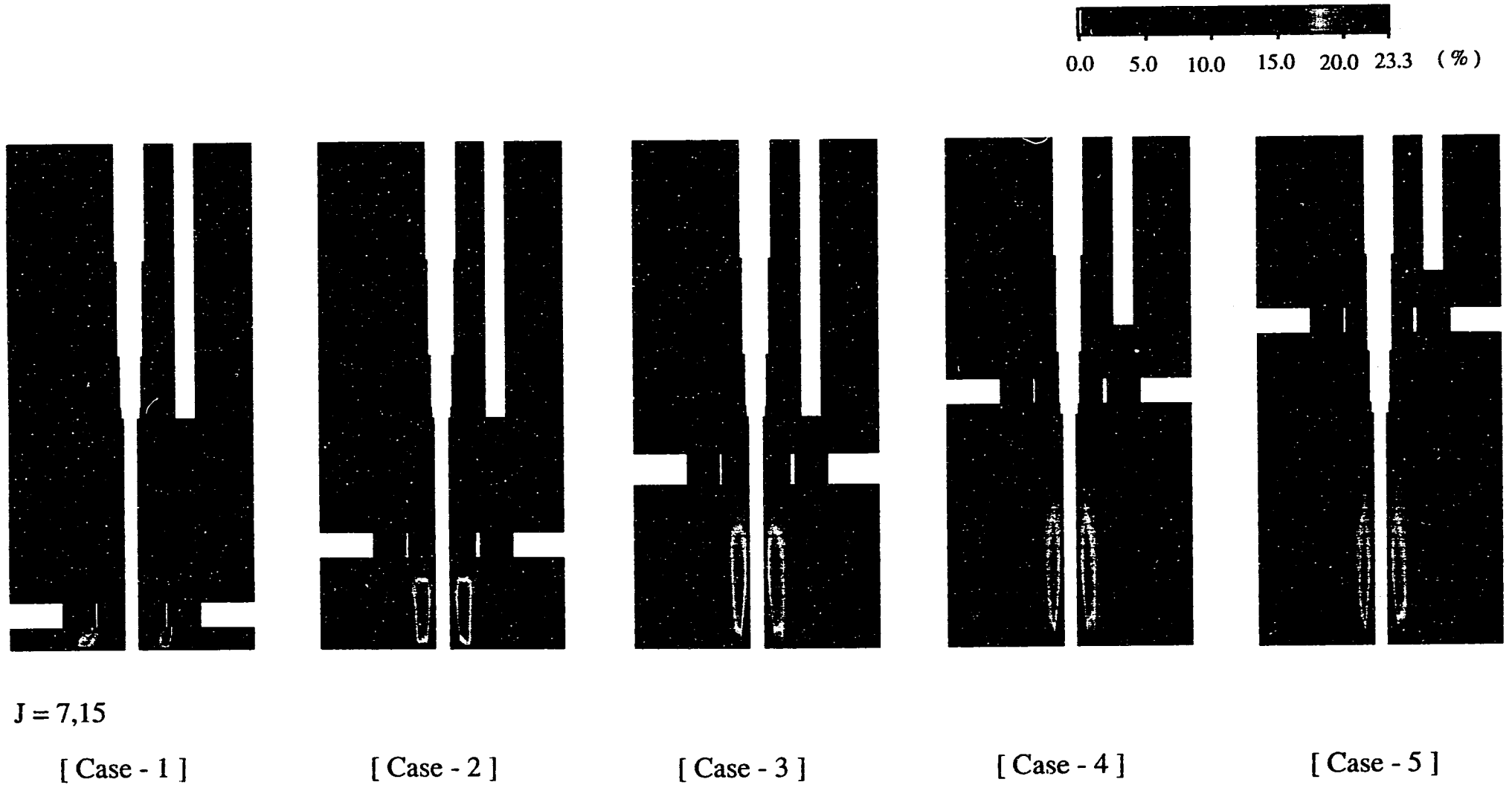


Fig. 3.4 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 7/9 )

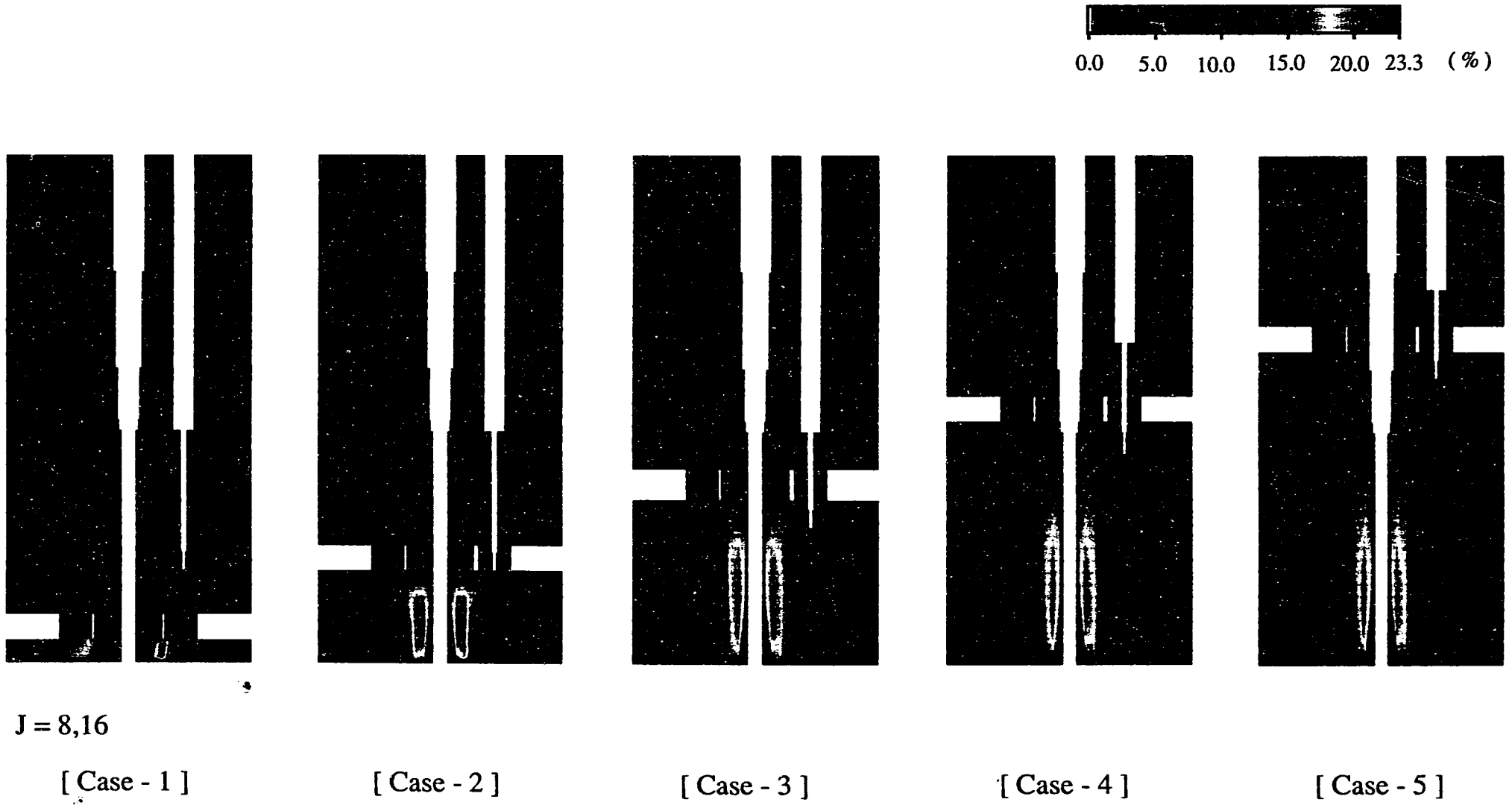


Fig. 3.4 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 8/9 )

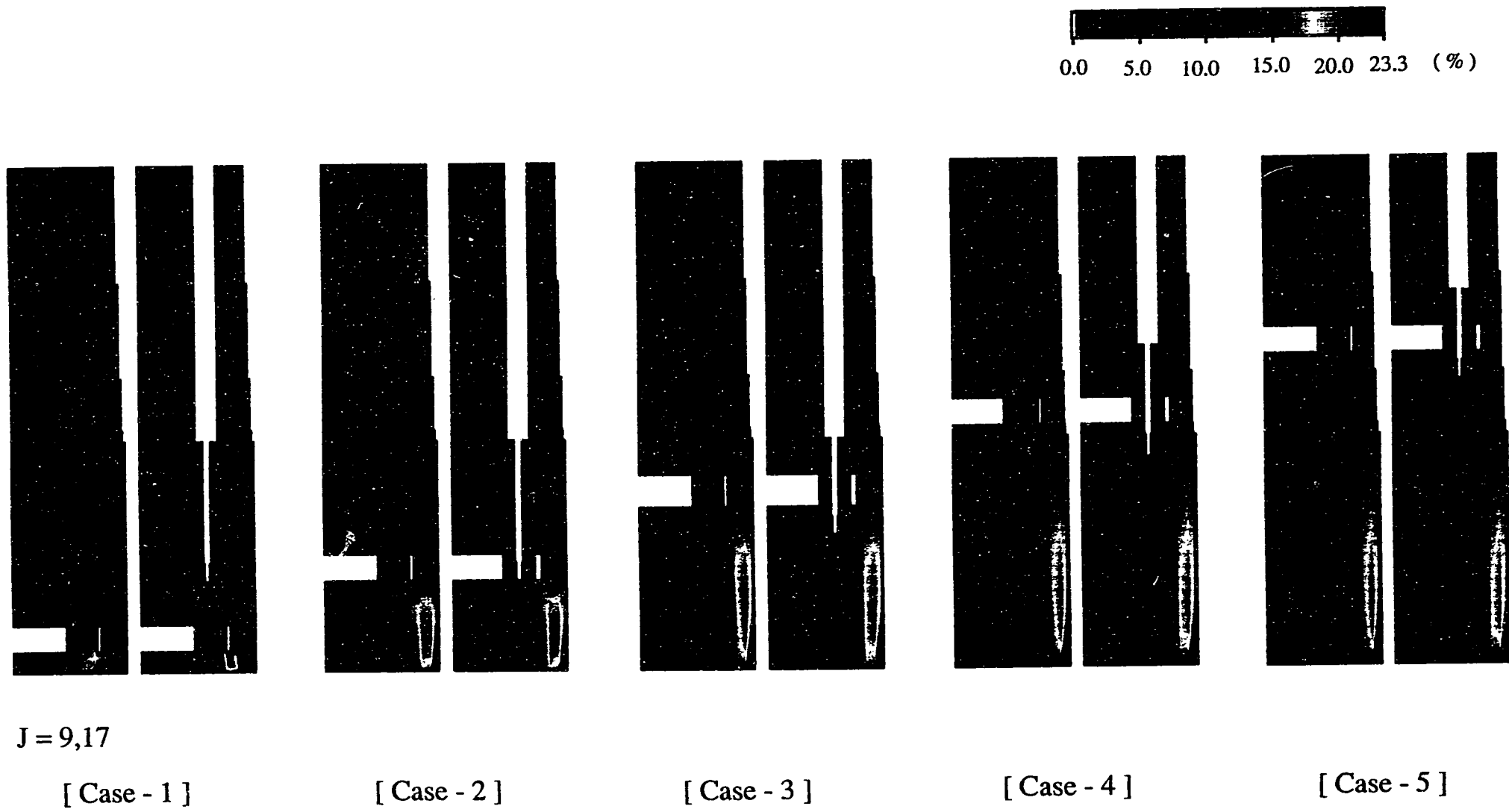
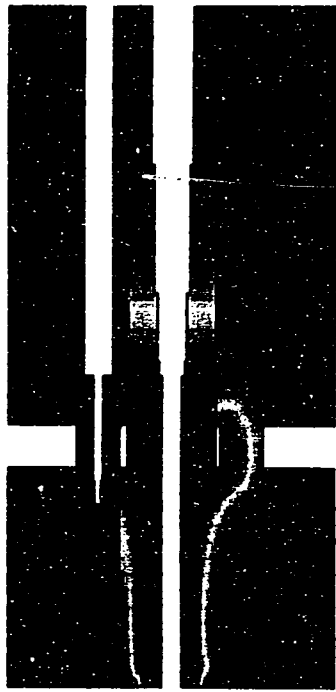


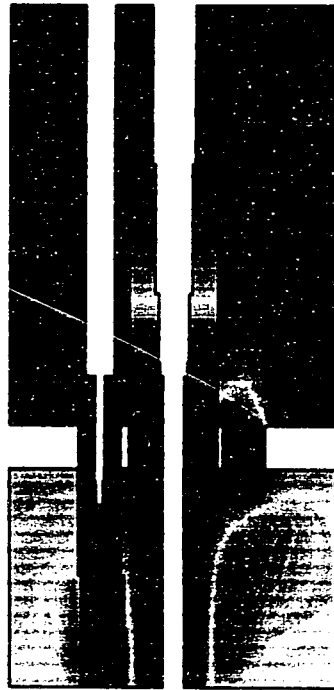
Fig. 3.4 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (9/9)



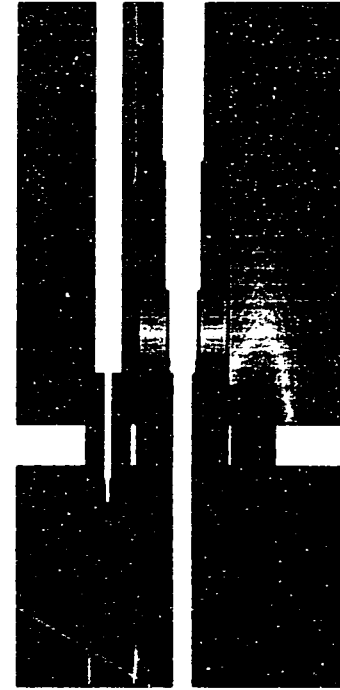


J = 1,9

[Case - 7]

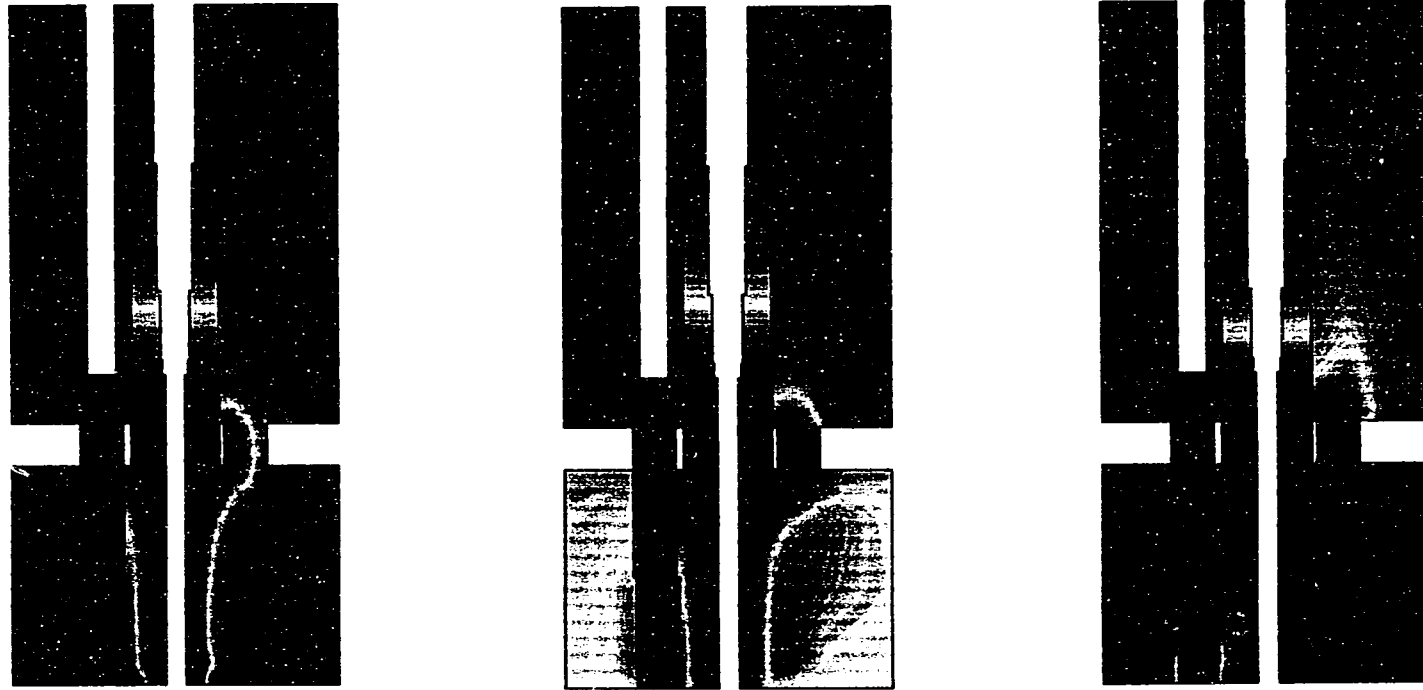


[Case - 3]



[Case - 8]

Fig. 3.5 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (1/9)



$J = 2,10$

[Case - 7]

[Case - 3]

[Case - 8]

Fig. 3.5 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (2/9)

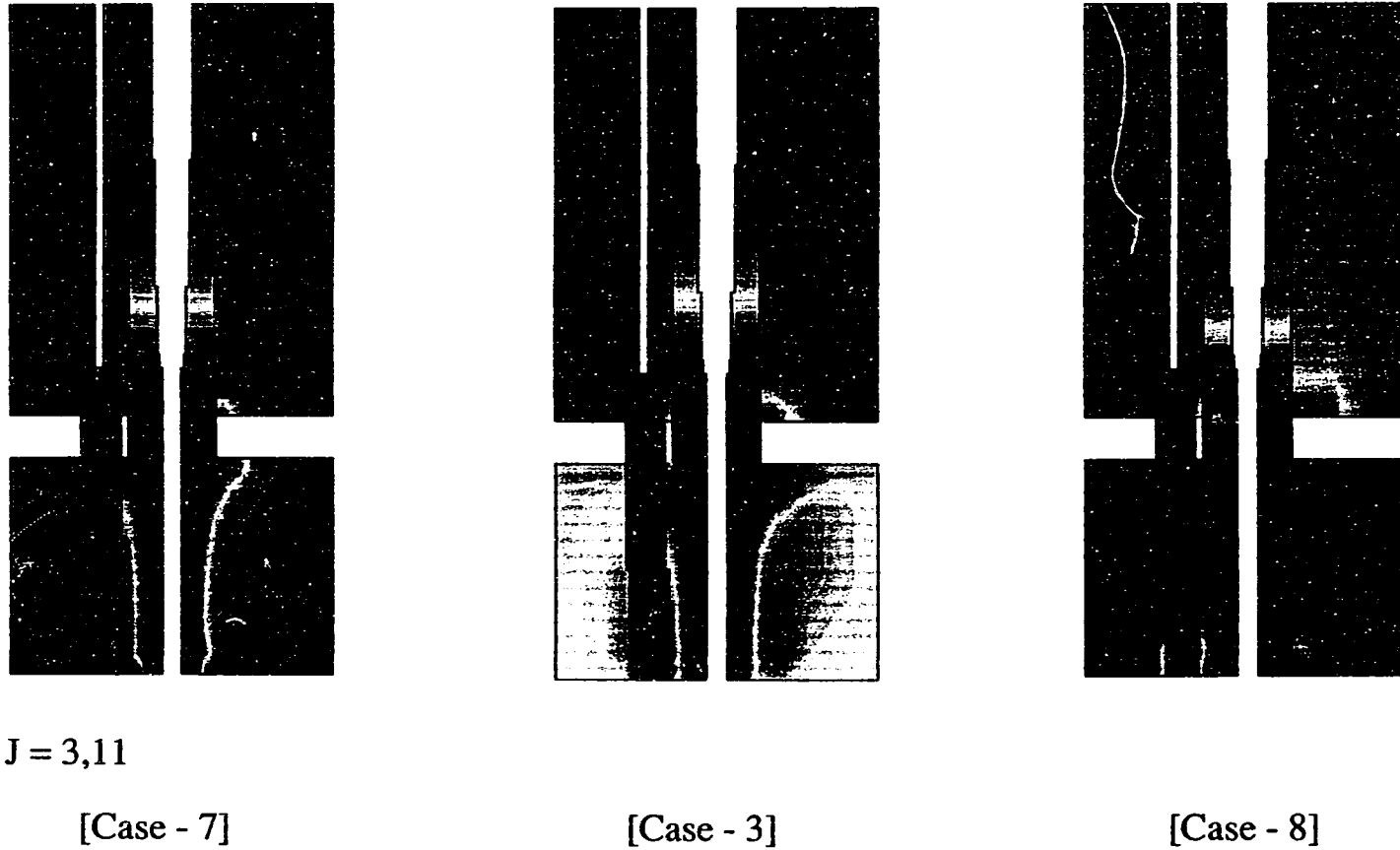
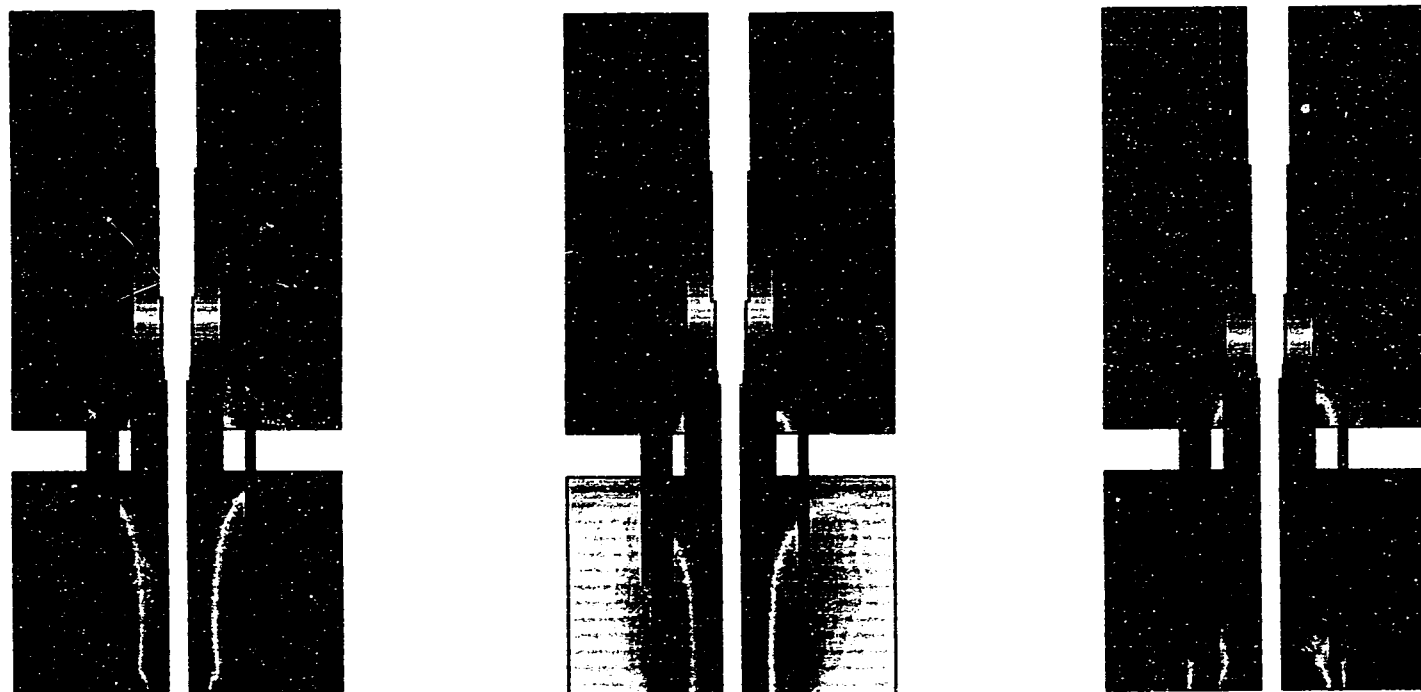


Fig. 3.5 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (3/9)



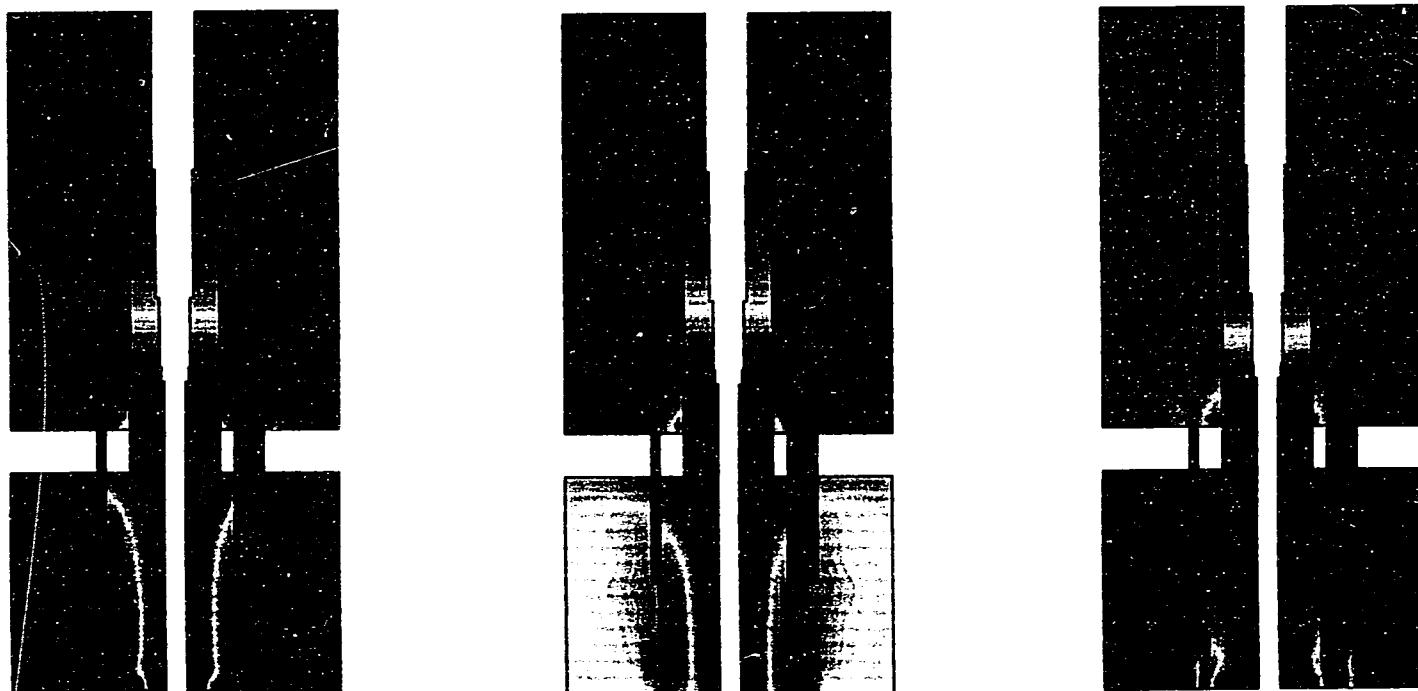
J = 4,12

[Case - 7]

[Case - 3]

[Case - 8]

Fig. 3.5 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (4/9)



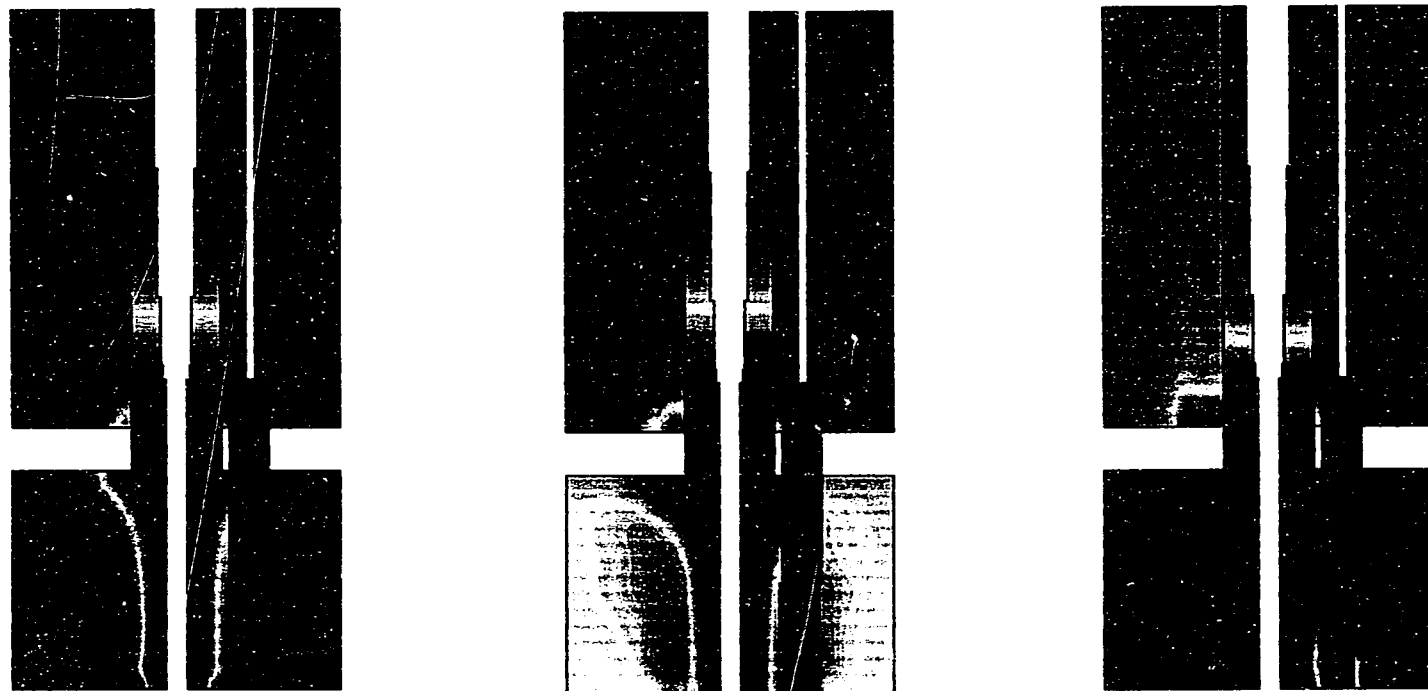
J = 5,13

[Case - 7]

[Case - 3]

[Case - 8]

Fig. 3.5 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (5/9)



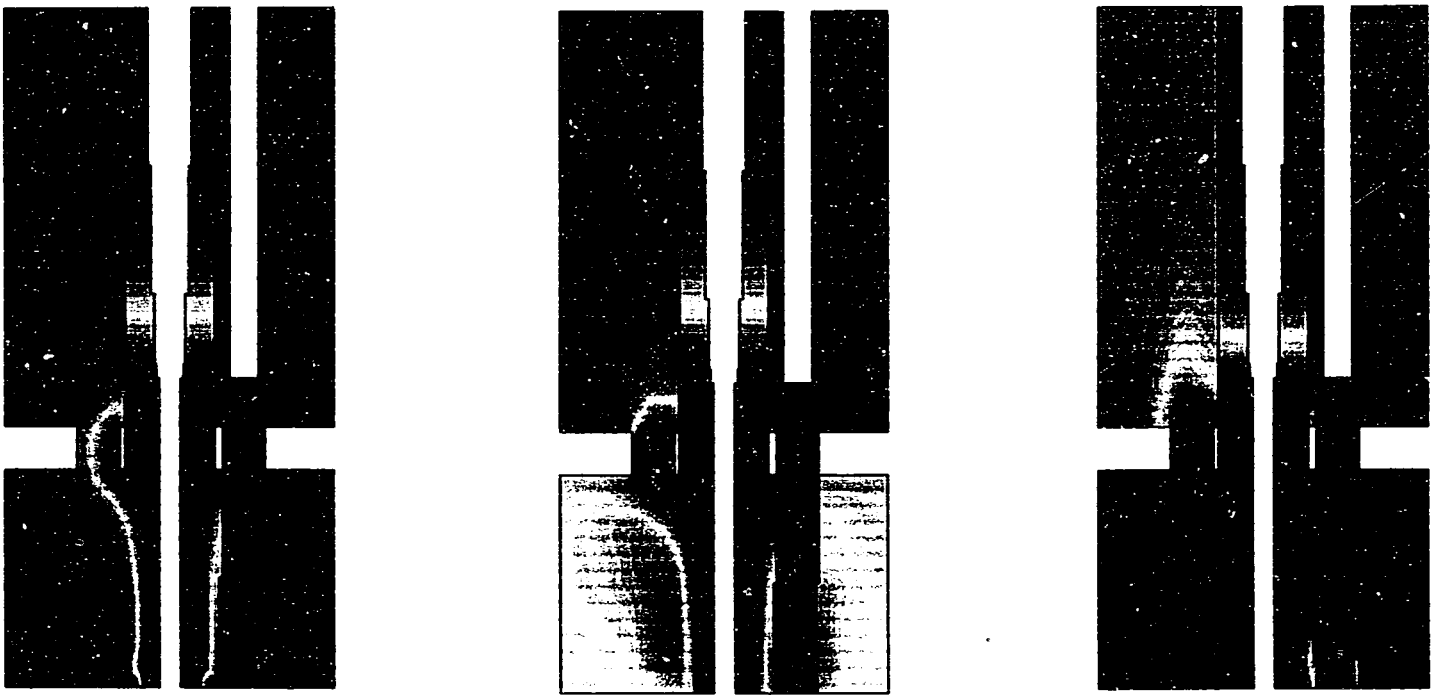
J = 6,14

[Case - 7]

[Case - 3]

[Case - 8]

Fig. 3.5 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (6/9)



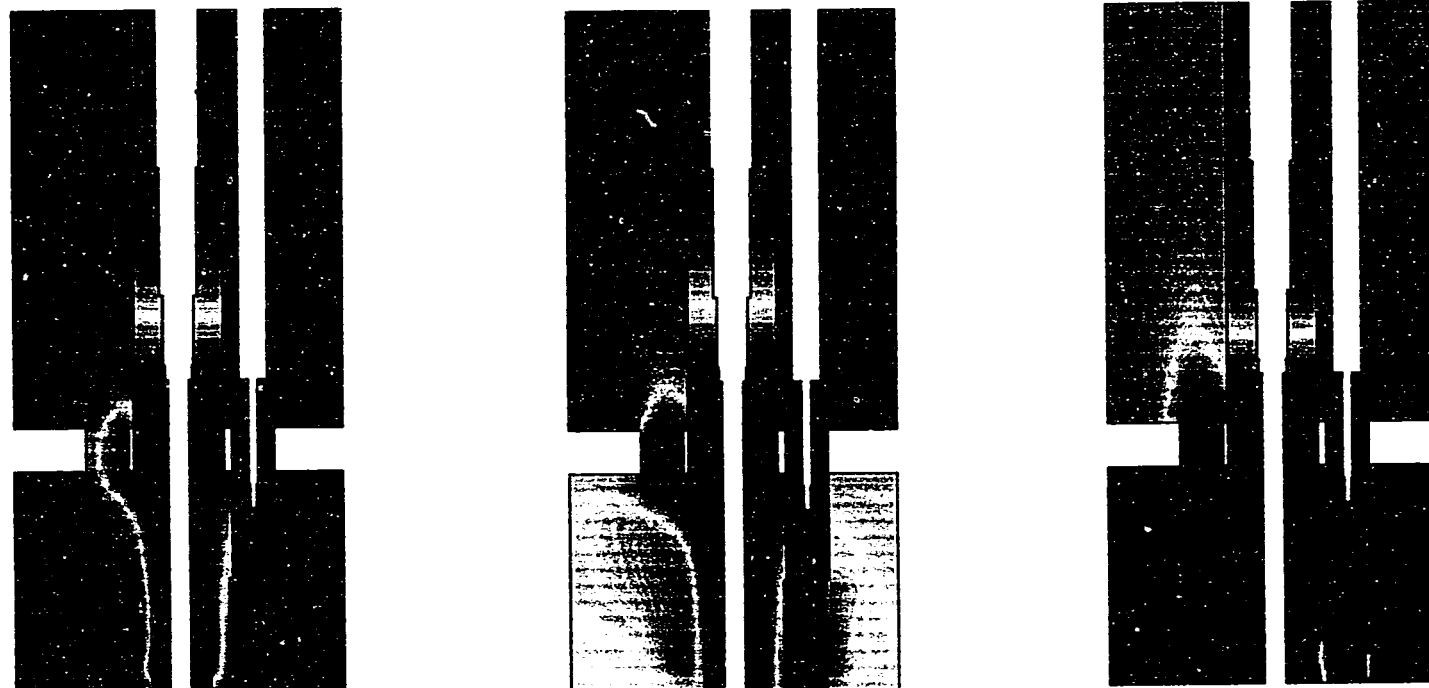
J = 7,15

[Case - 7]

[Case - 3]

[Case - 8]

Fig. 3.5 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (7/9)



J = 8,16

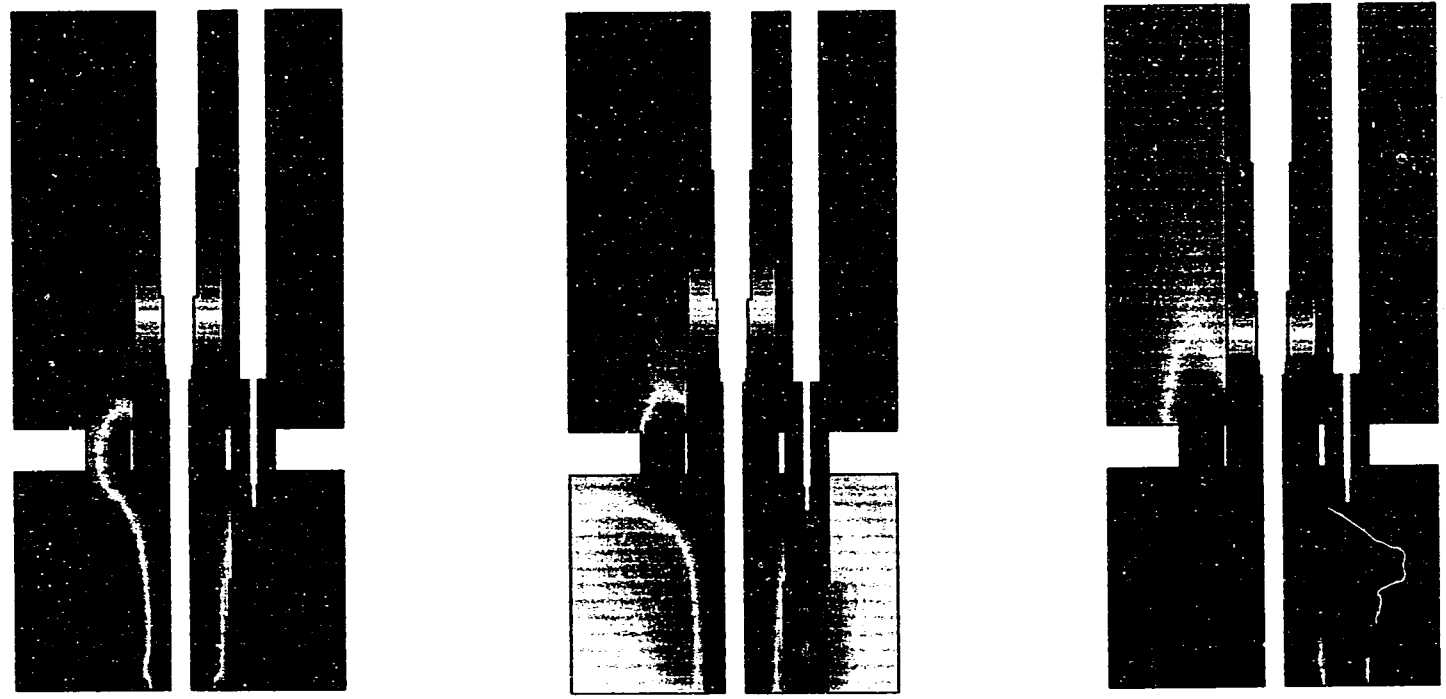
[Case - 7]

[Case - 3]

[Case - 8]

Fig. 3.5 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (8/9)





J = 9,17

[Case - 7]

[Case - 3]

[Case - 8]

Fig. 3.5 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (9/9)

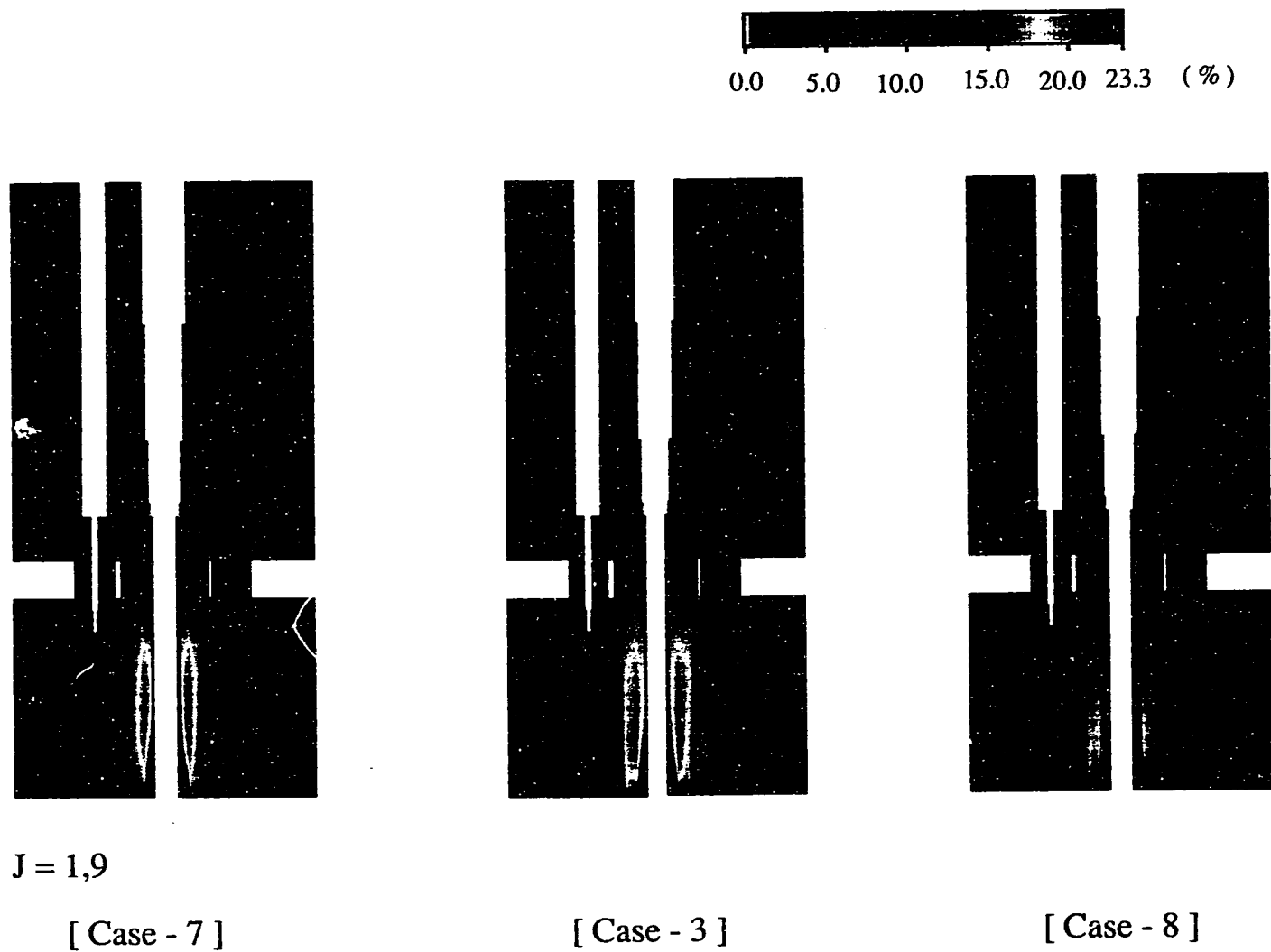


Fig. 3.6 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 1/9 )

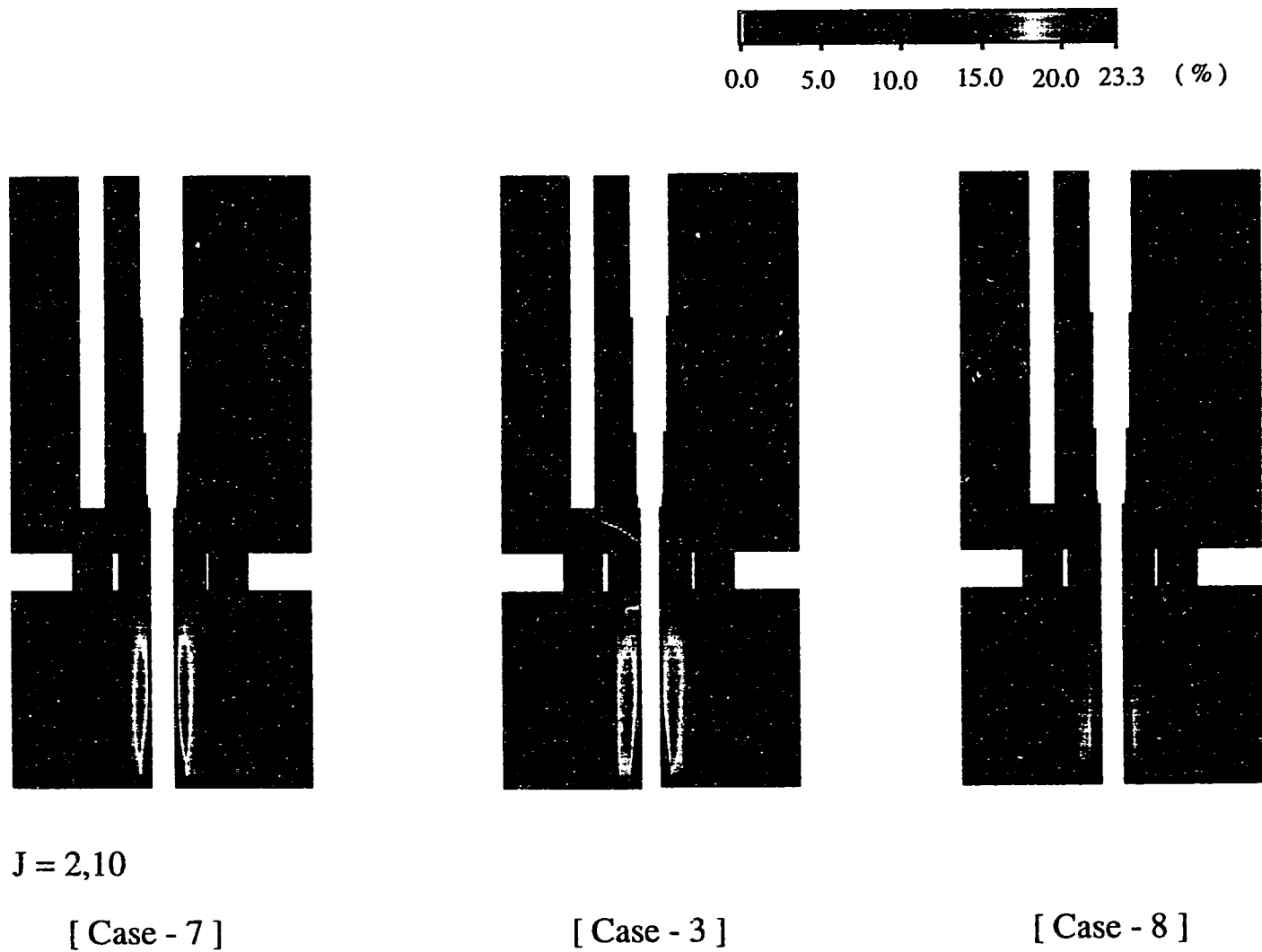


Fig. 3.6 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (2/9)

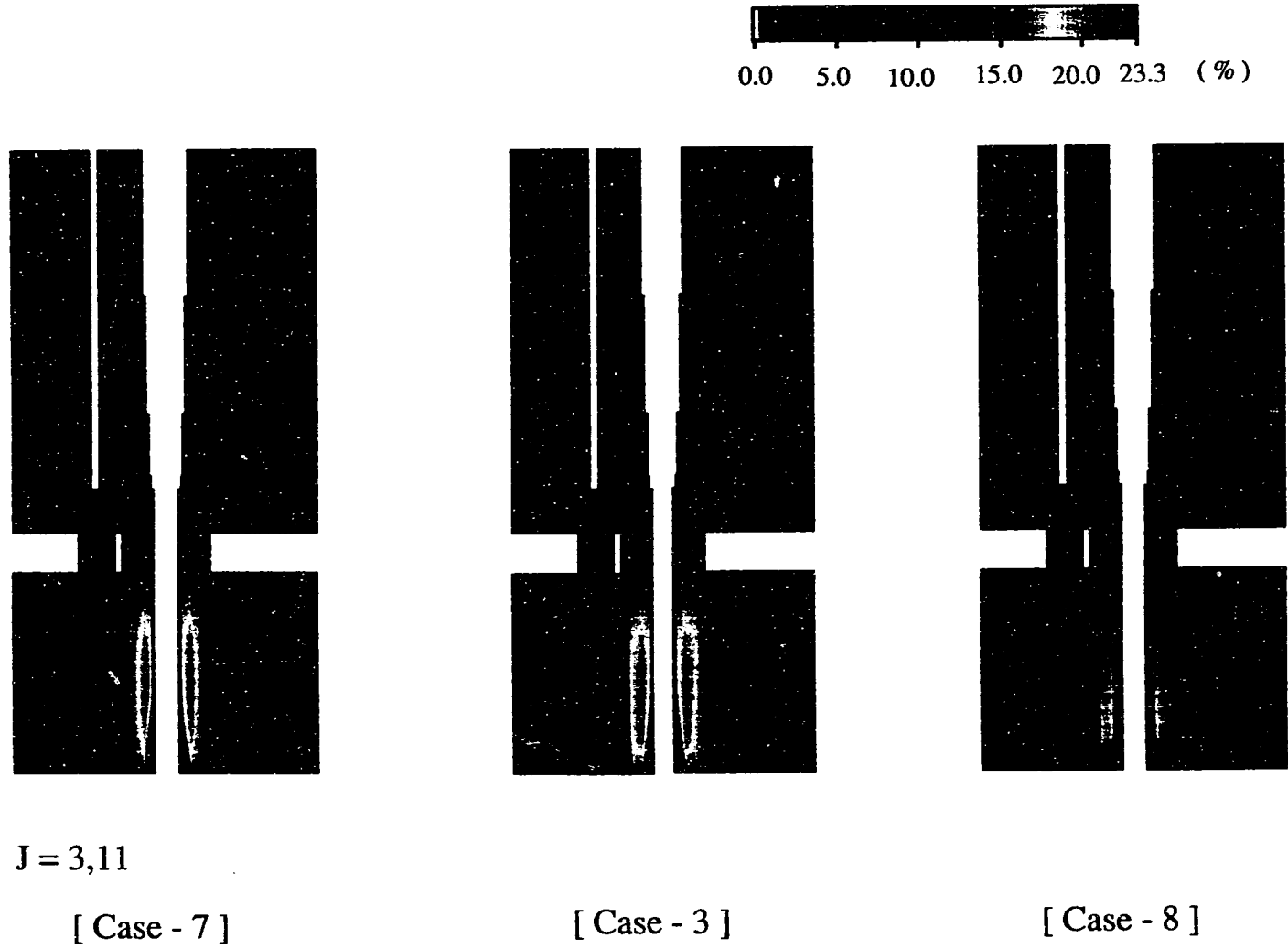


Fig. 3.6 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (3/9)

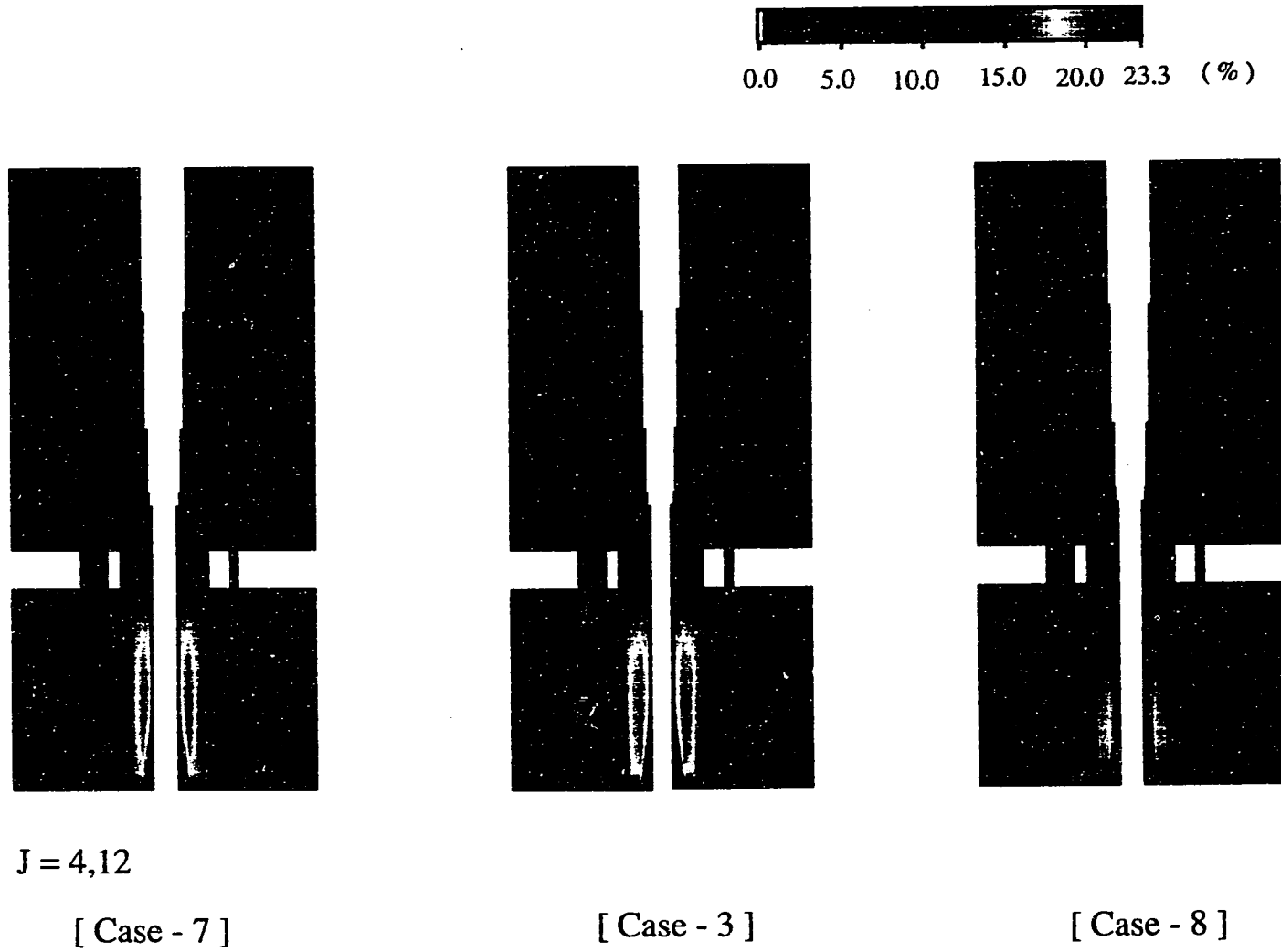


Fig. 3.6 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (4/9)

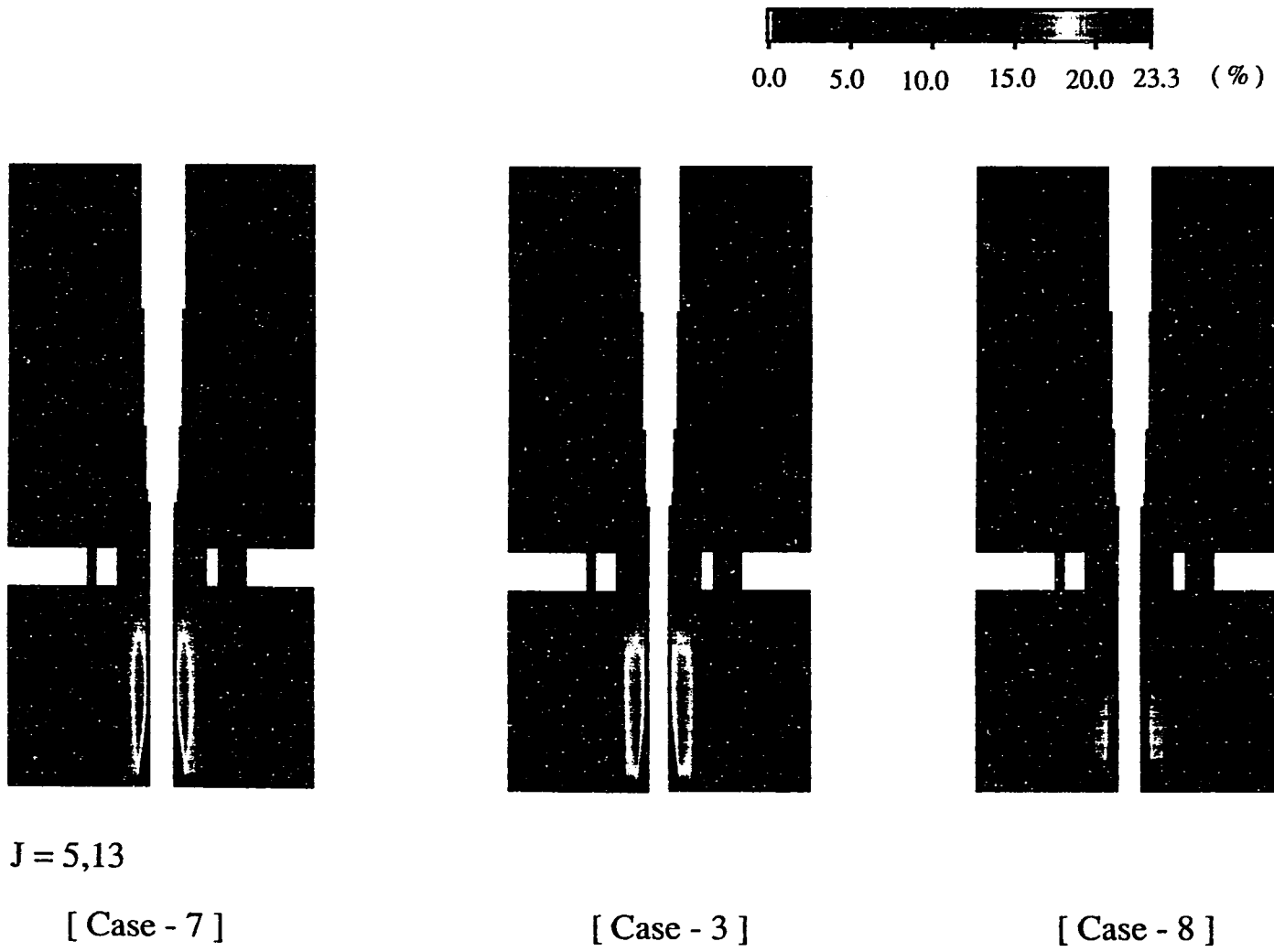


Fig. 3.6 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (5/9)

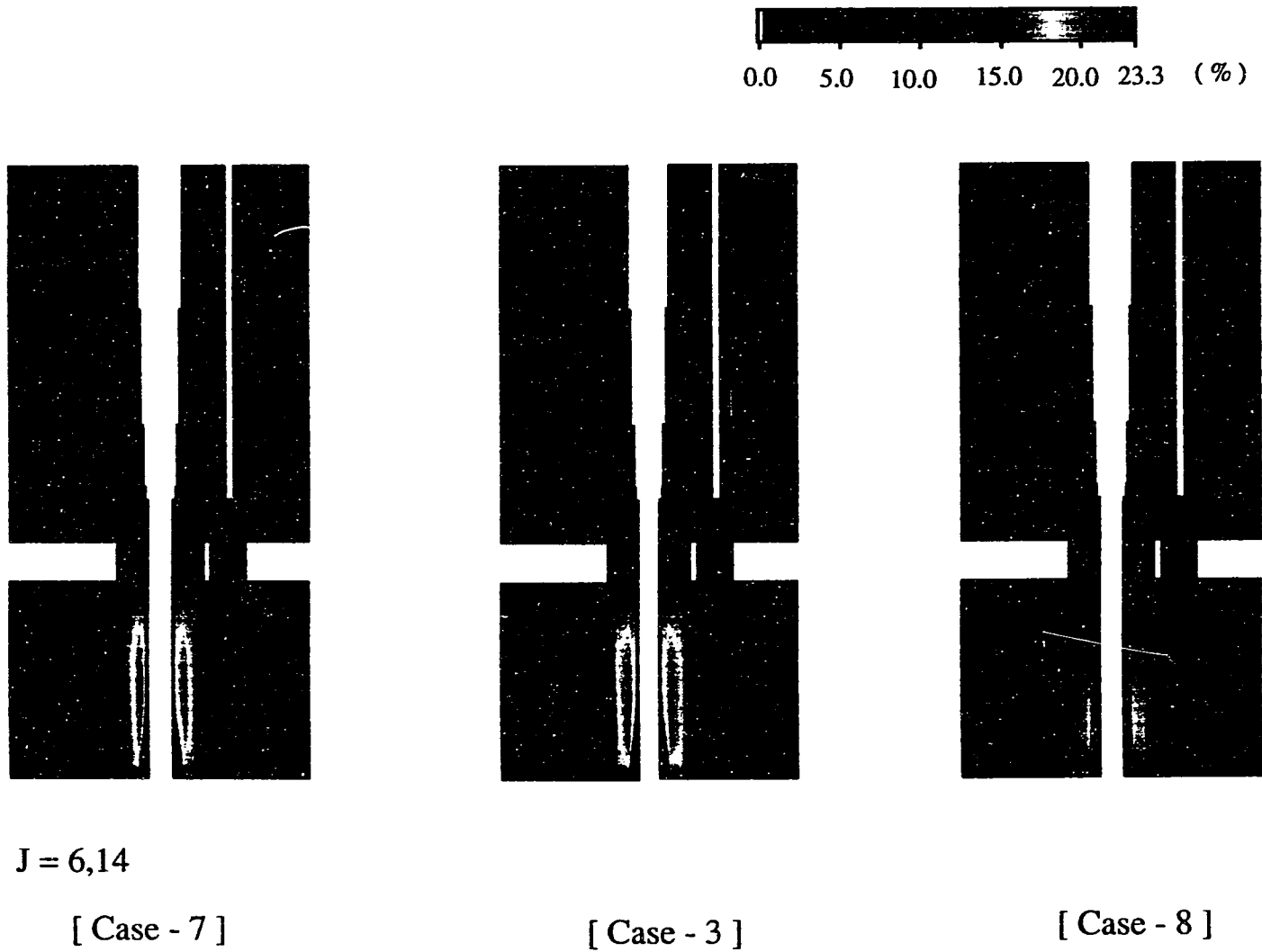
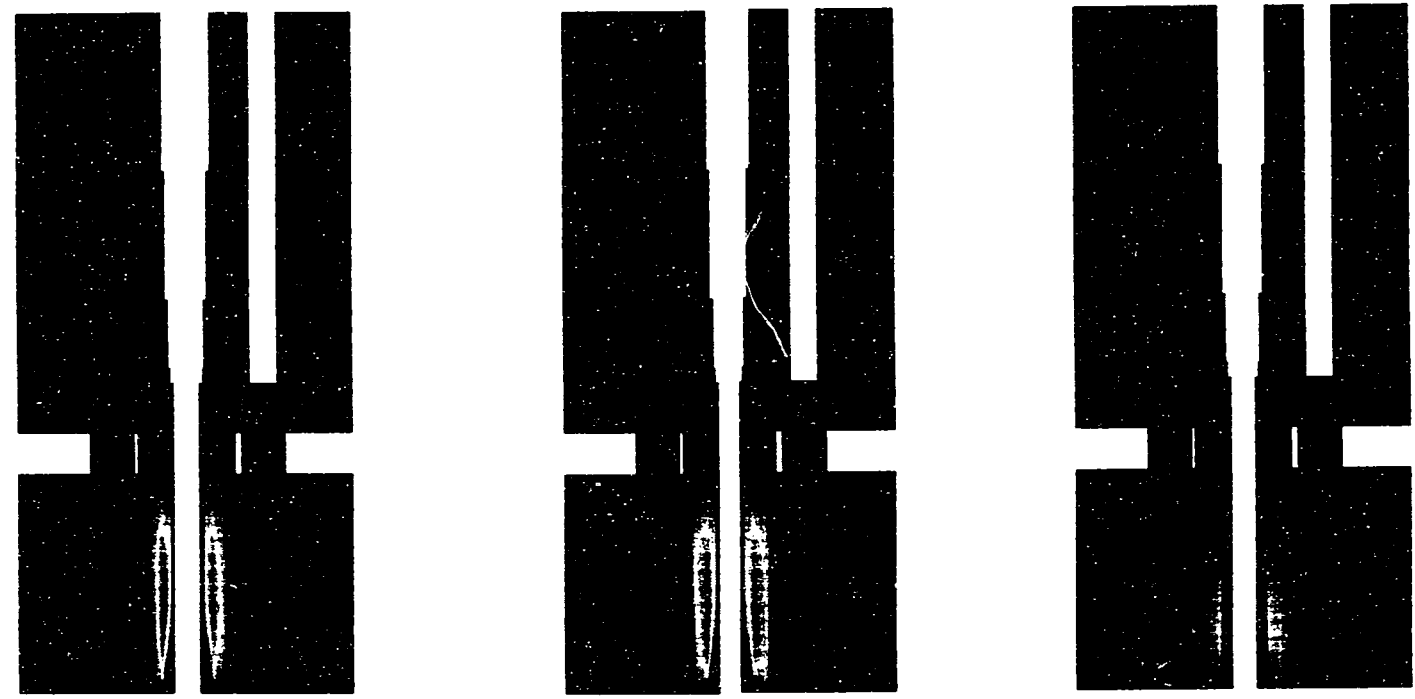
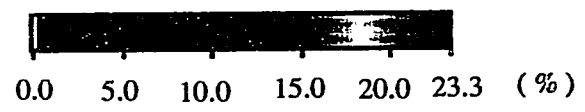


Fig. 3.6 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (6/9)



J = 7,15

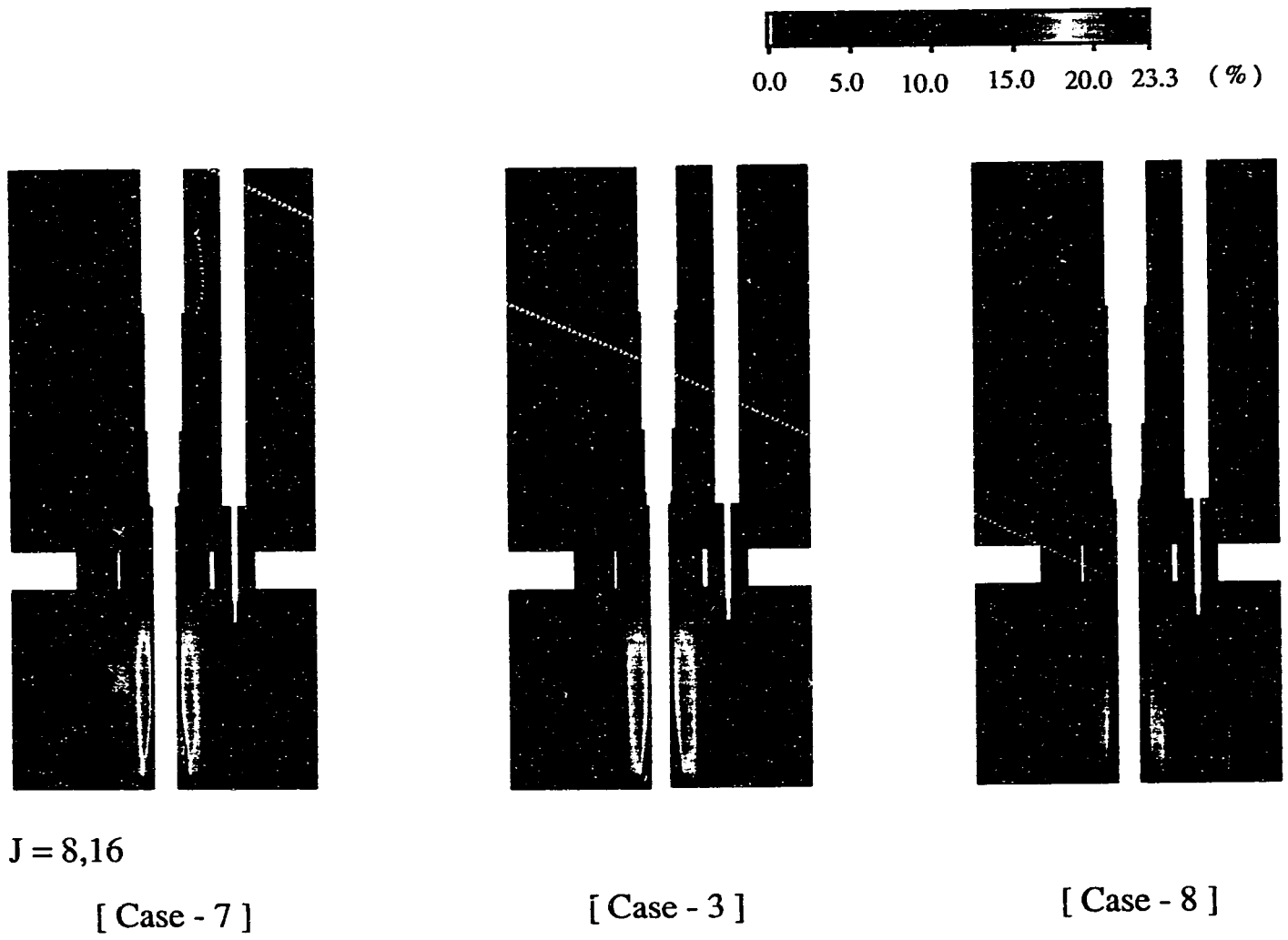
[ Case - 7 ]

[ Case - 3 ]

[ Case - 8 ]

Fig. 3.6 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (7/9)





J = 8,16

[ Case - 7 ]

[ Case - 3 ]

[ Case - 8 ]

Fig. 3.6 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 8/9 )

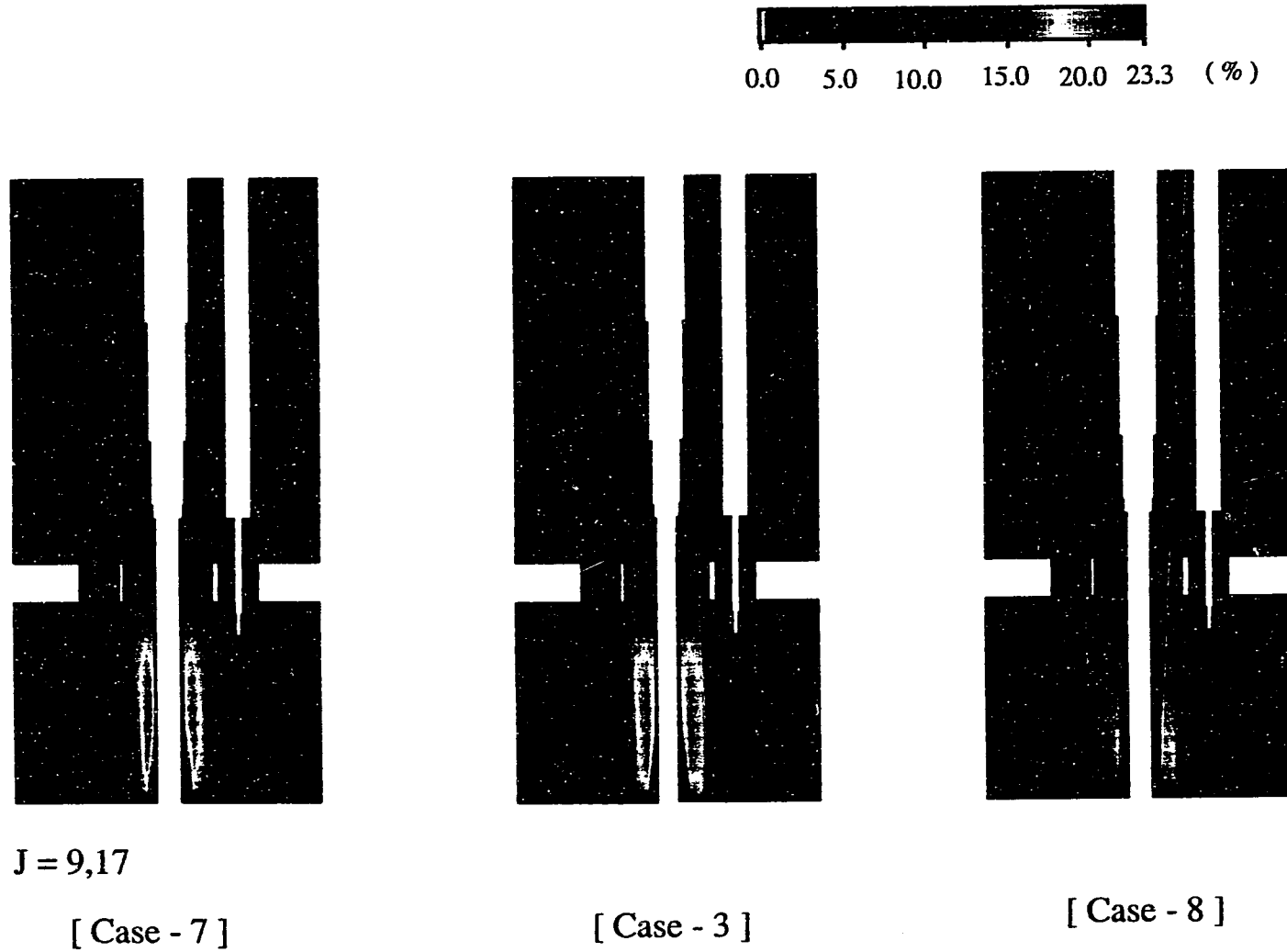


Fig. 3.6 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (9/9)

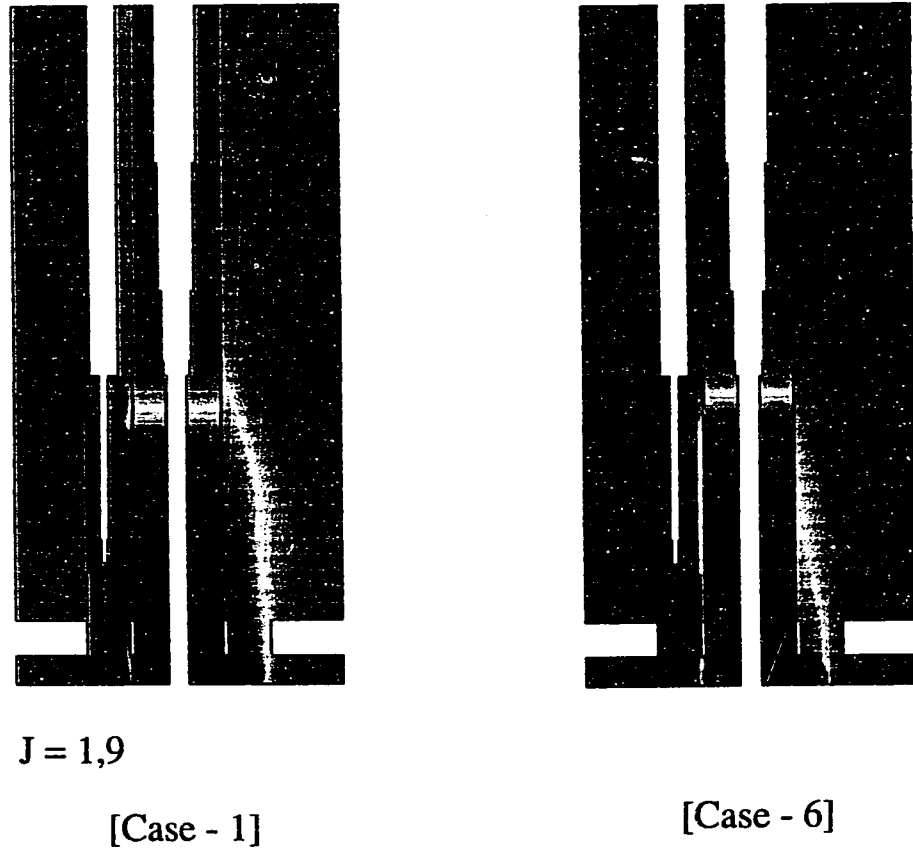
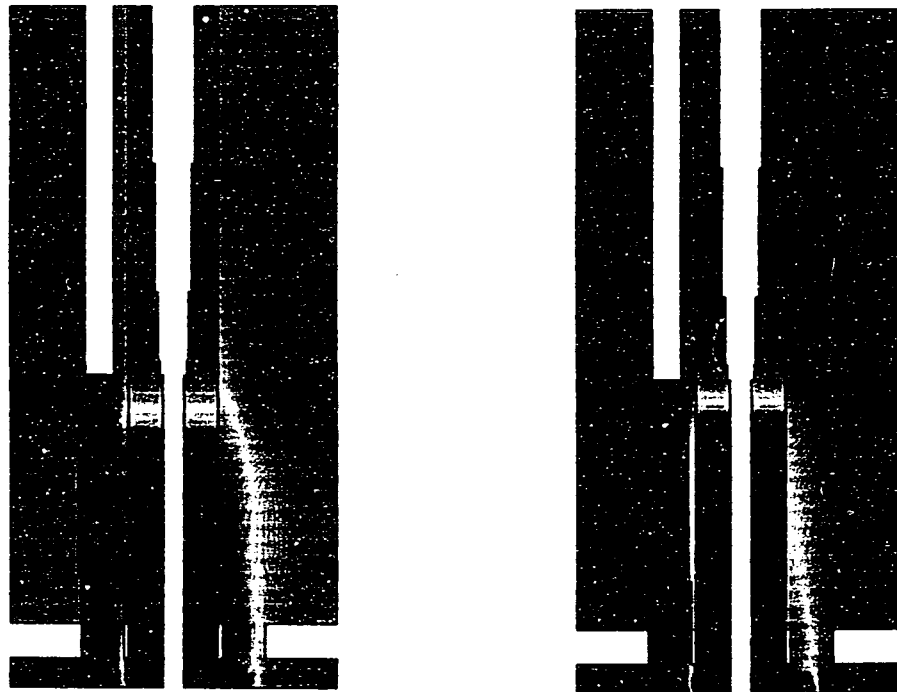


Fig. 3.7 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (1/9)

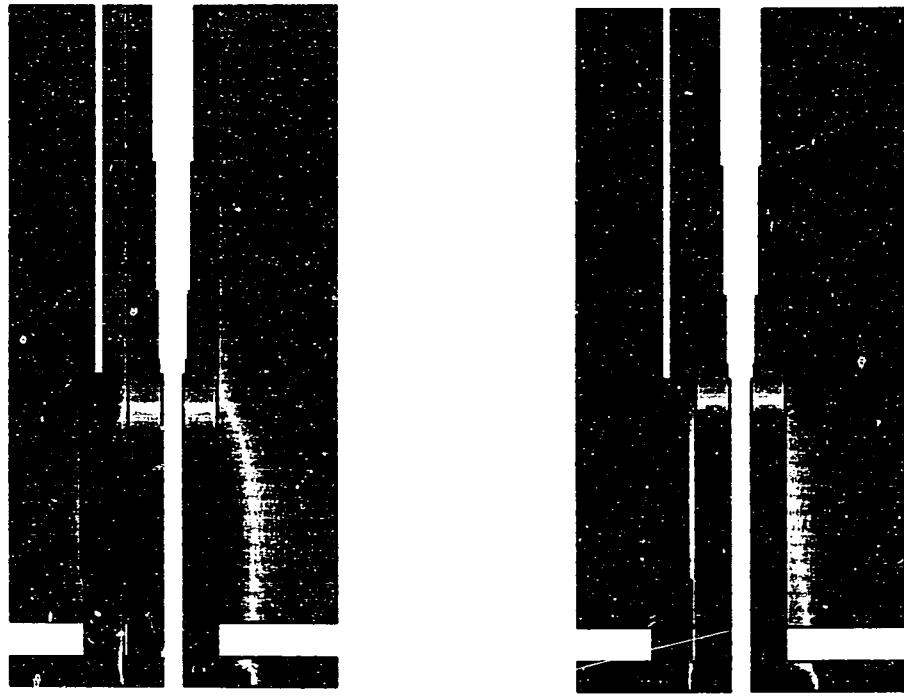


J = 2,10

[Case - 1]

[Case - 6]

Fig. 3.7 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (2/9)

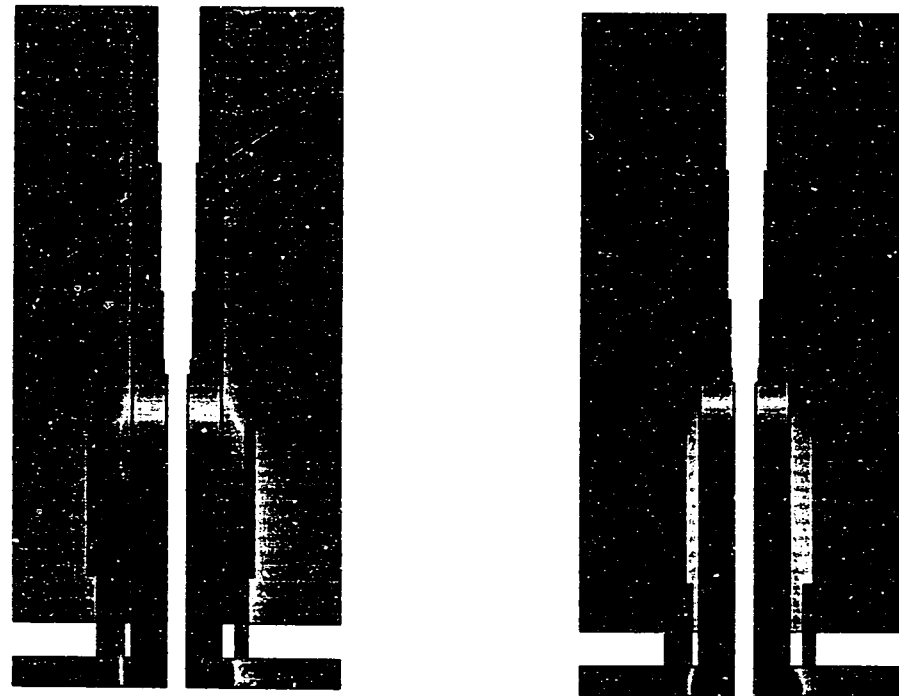


J = 3,11

[Case - 1]

[Case - 6]

Fig. 3.7 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (3/9)

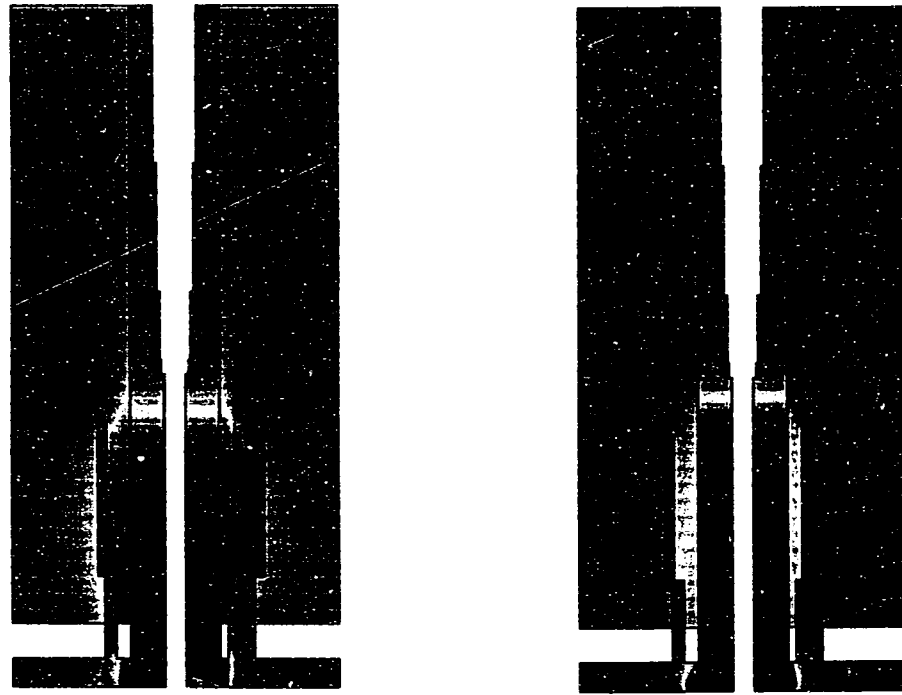


J = 4,12

[Case - 1]

[Case - 6]

Fig. 3.7 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (4/9)



J = 5,13

[Case - 1]

[Case - 6]

Fig. 3.7 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (5/9)

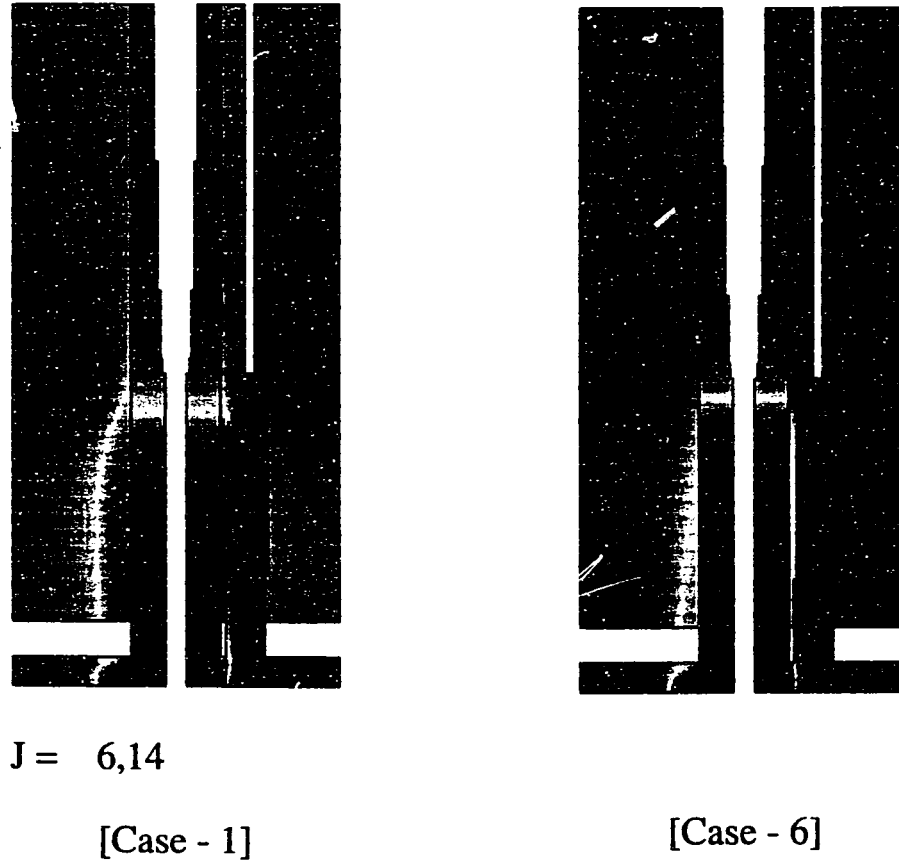


Fig. 3.7 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (6/9)



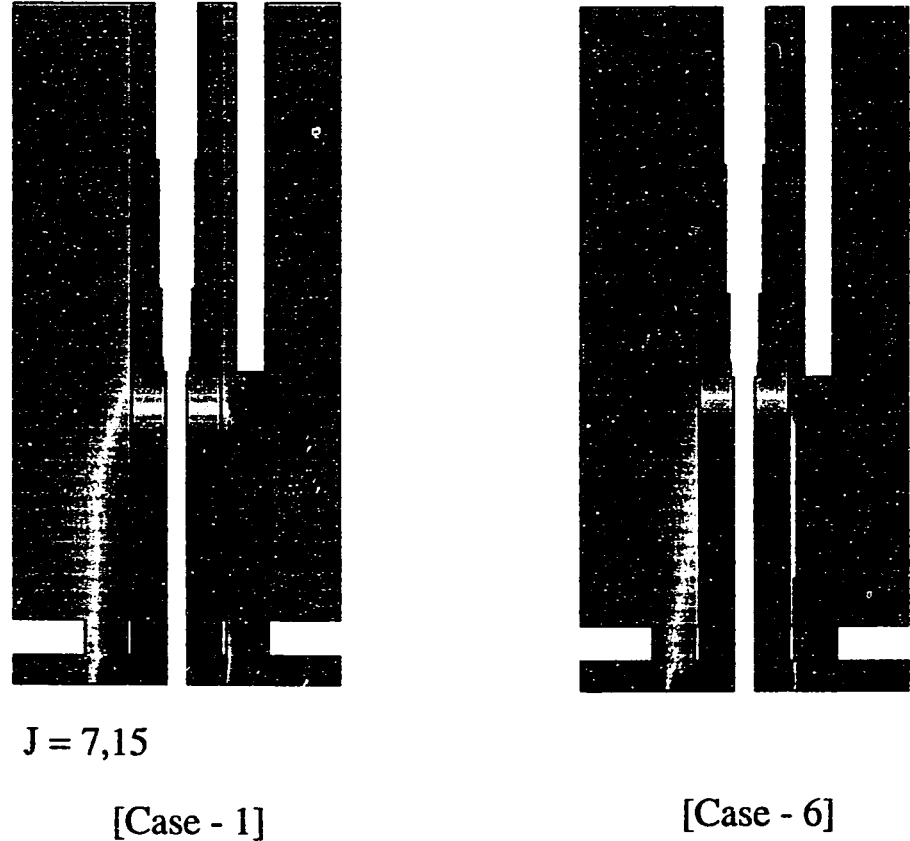


Fig. 3.7 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (7/9)

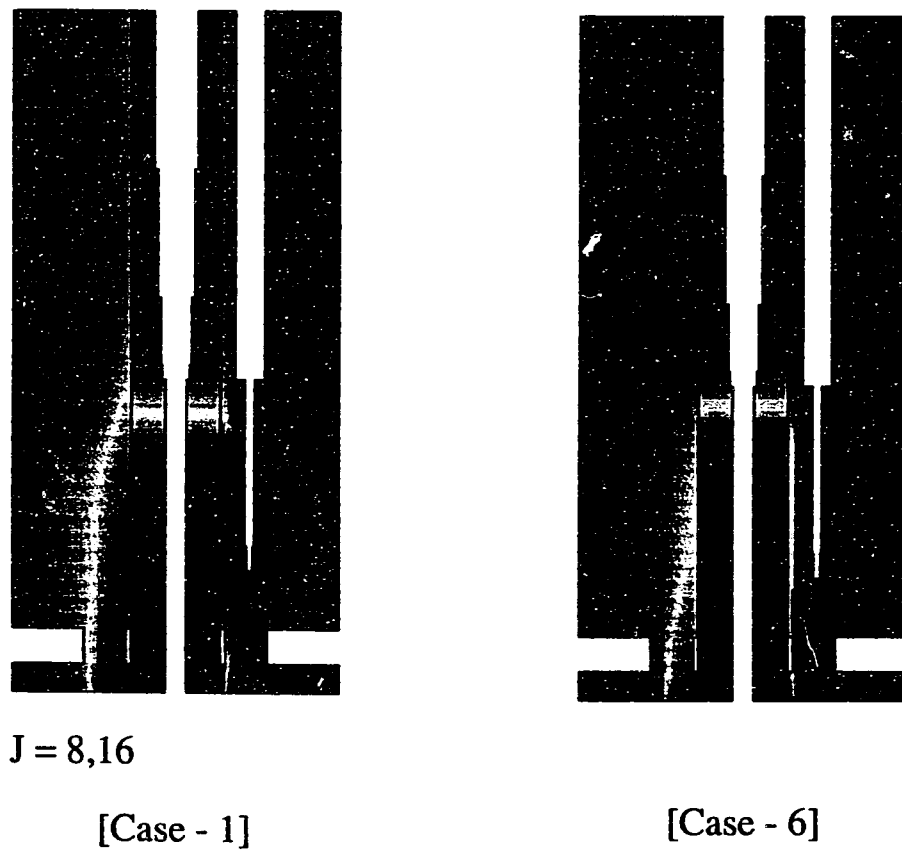


Fig. 3.7 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (8/9)

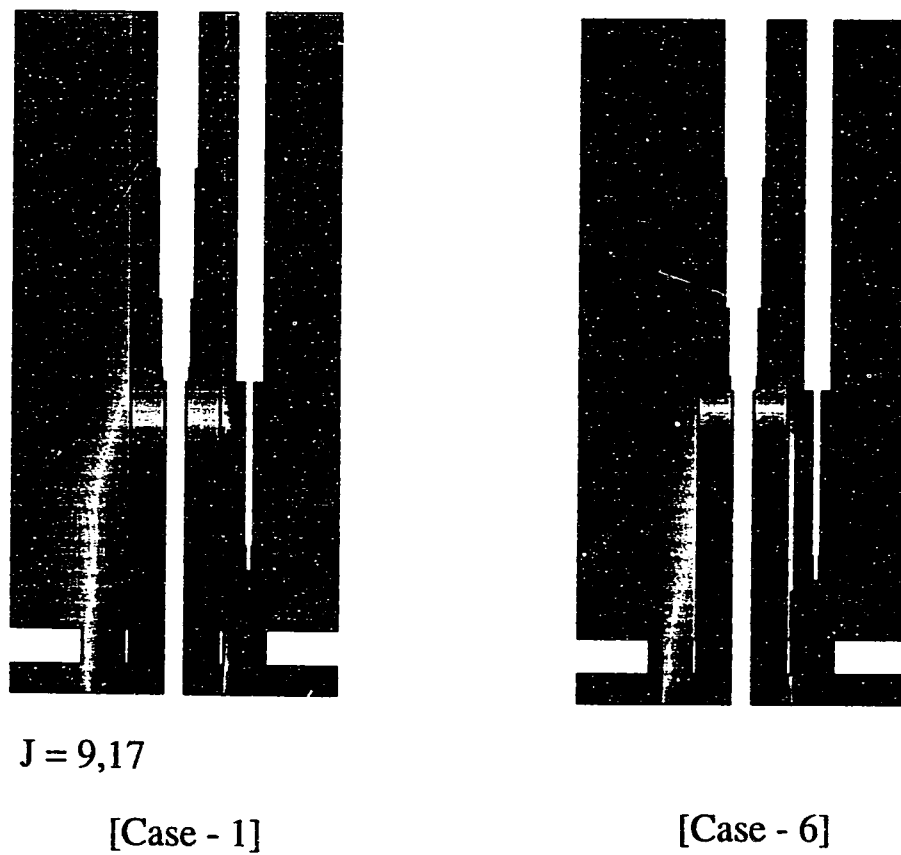


Fig. 3.7 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (9/9)

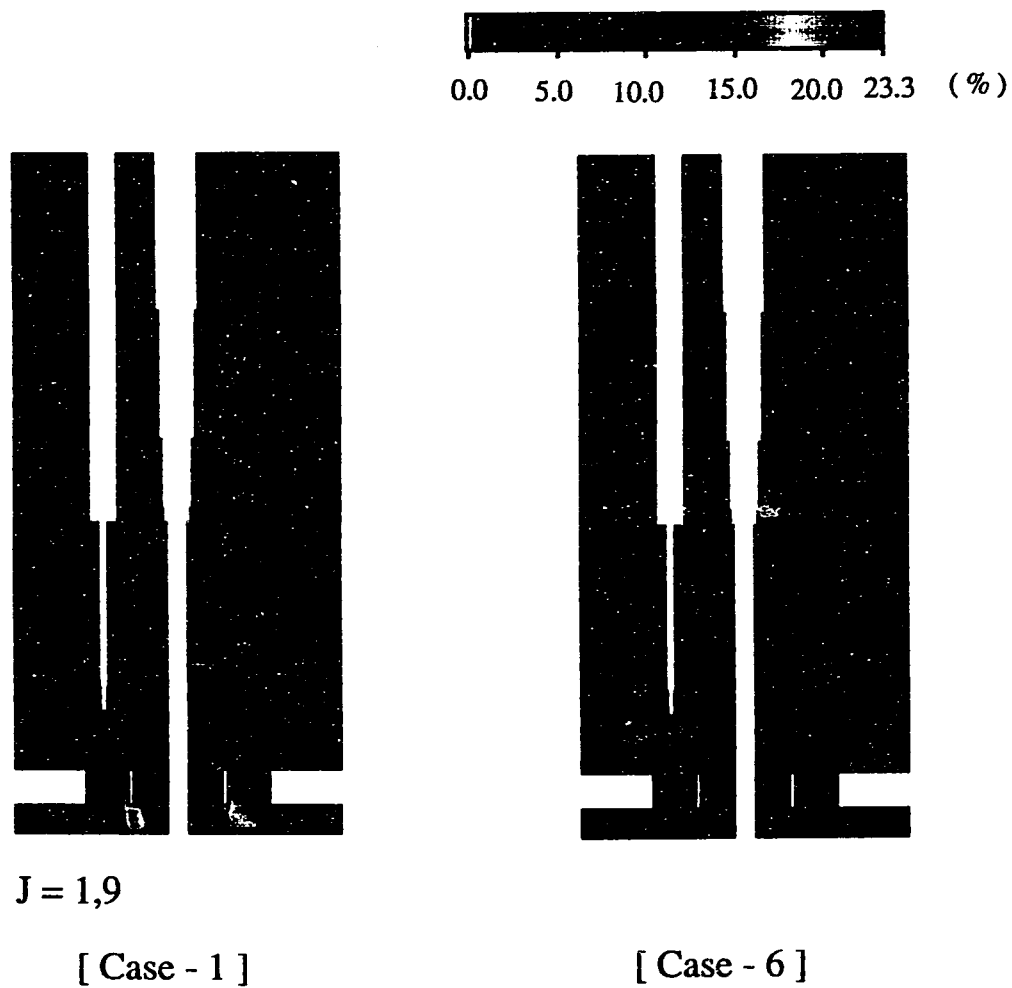


Fig. 3.8 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (1/9)

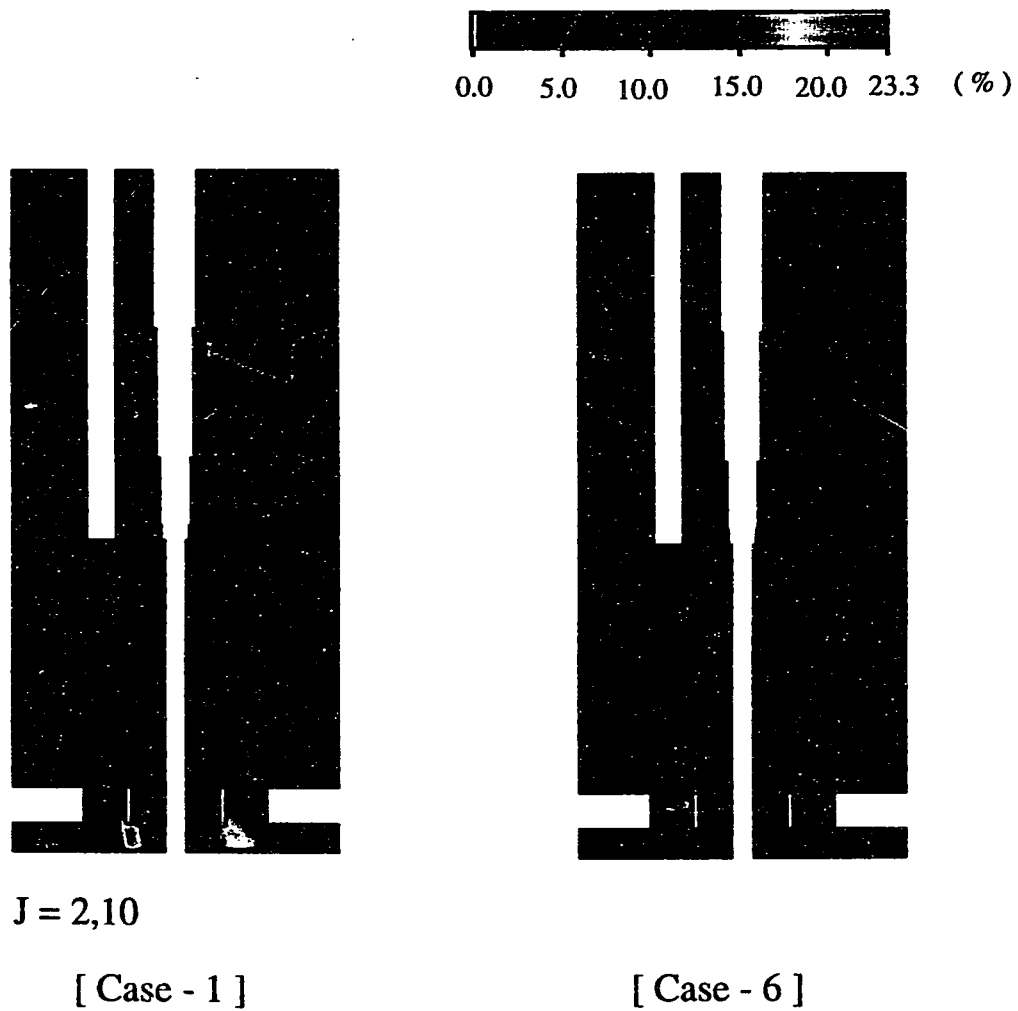


Fig. 3.8 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 2/9 )

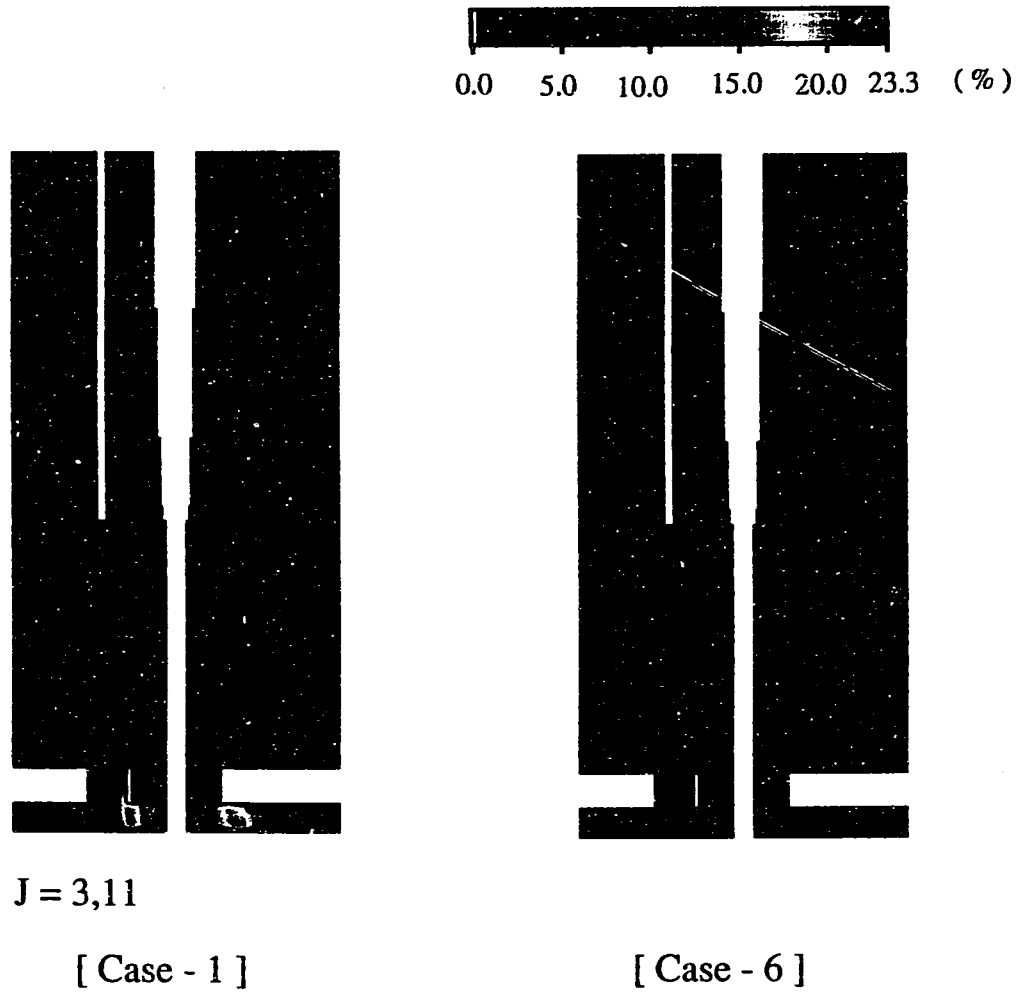


Fig. 3.8 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (3/9)

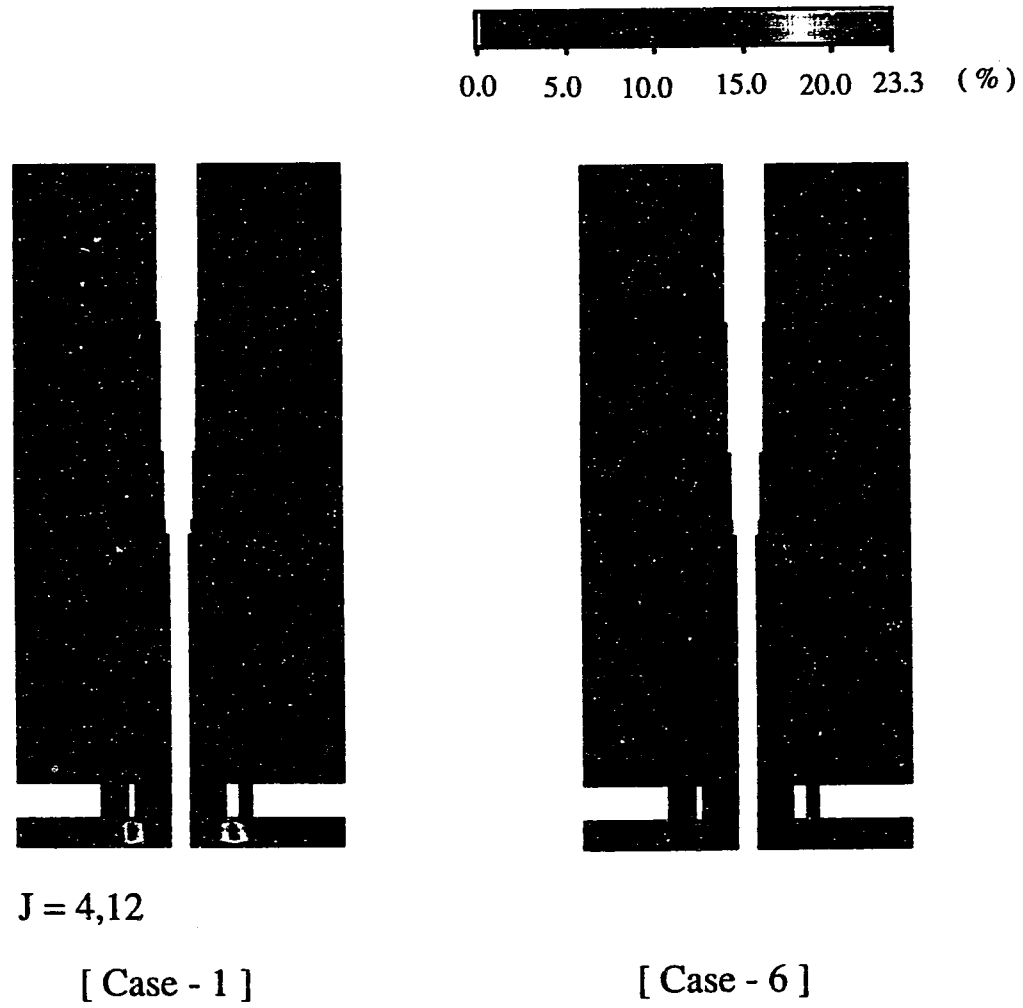


Fig. 3.8 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (4/9)

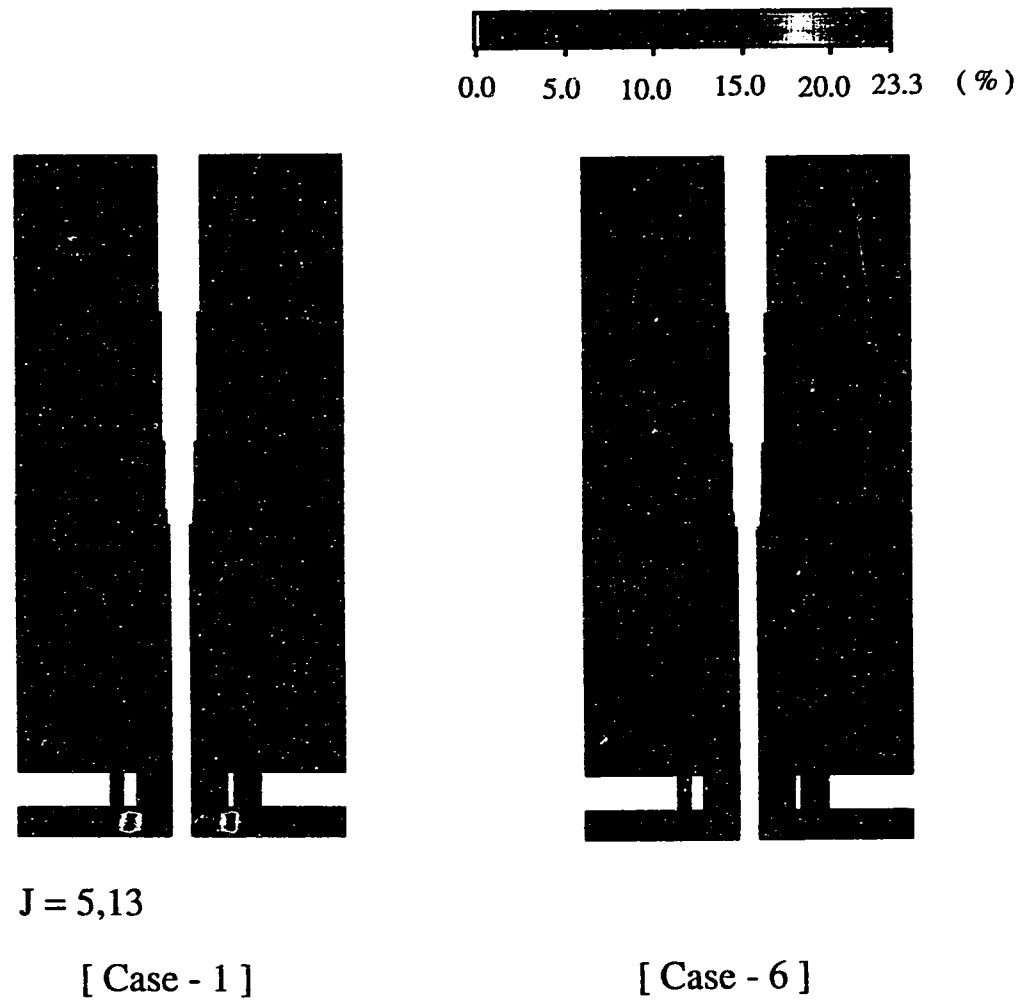


Fig. 3.8 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (5/9)



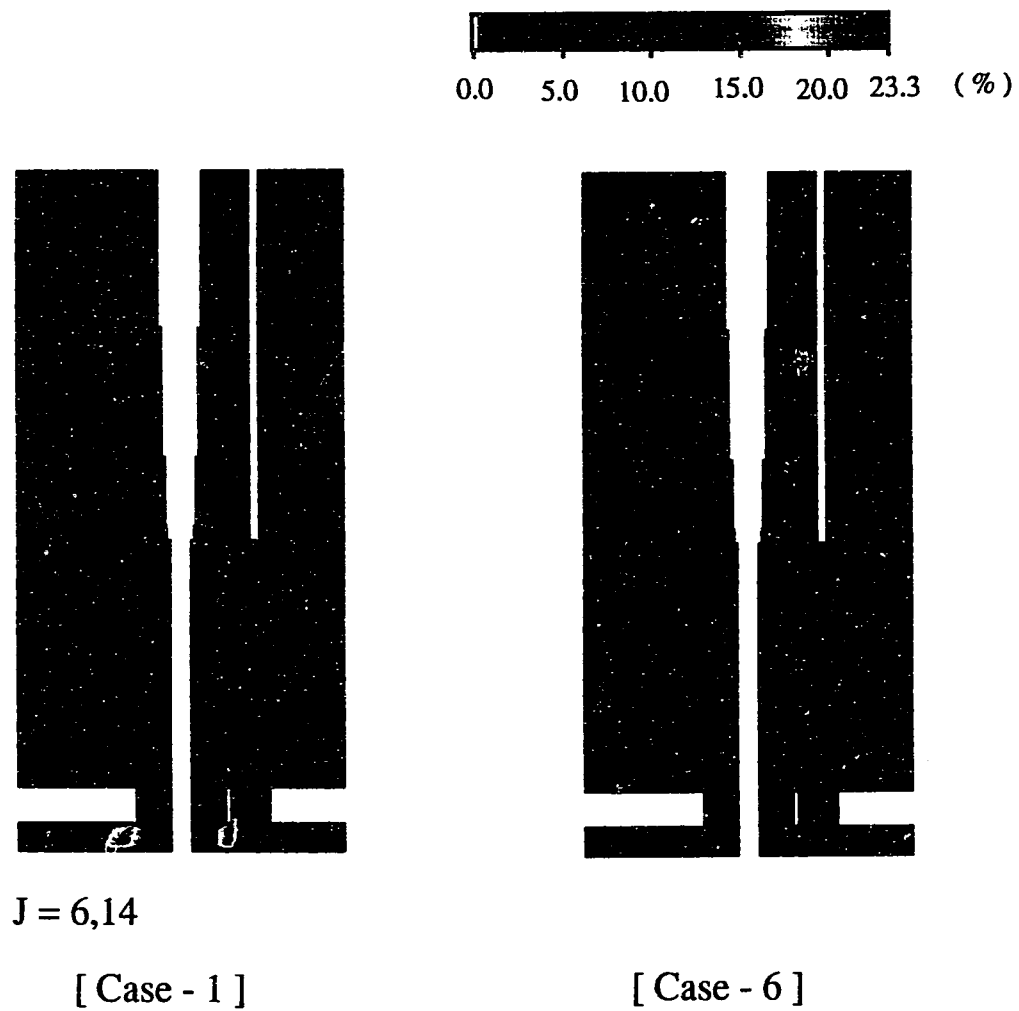


Fig. 3.8 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (6/9)

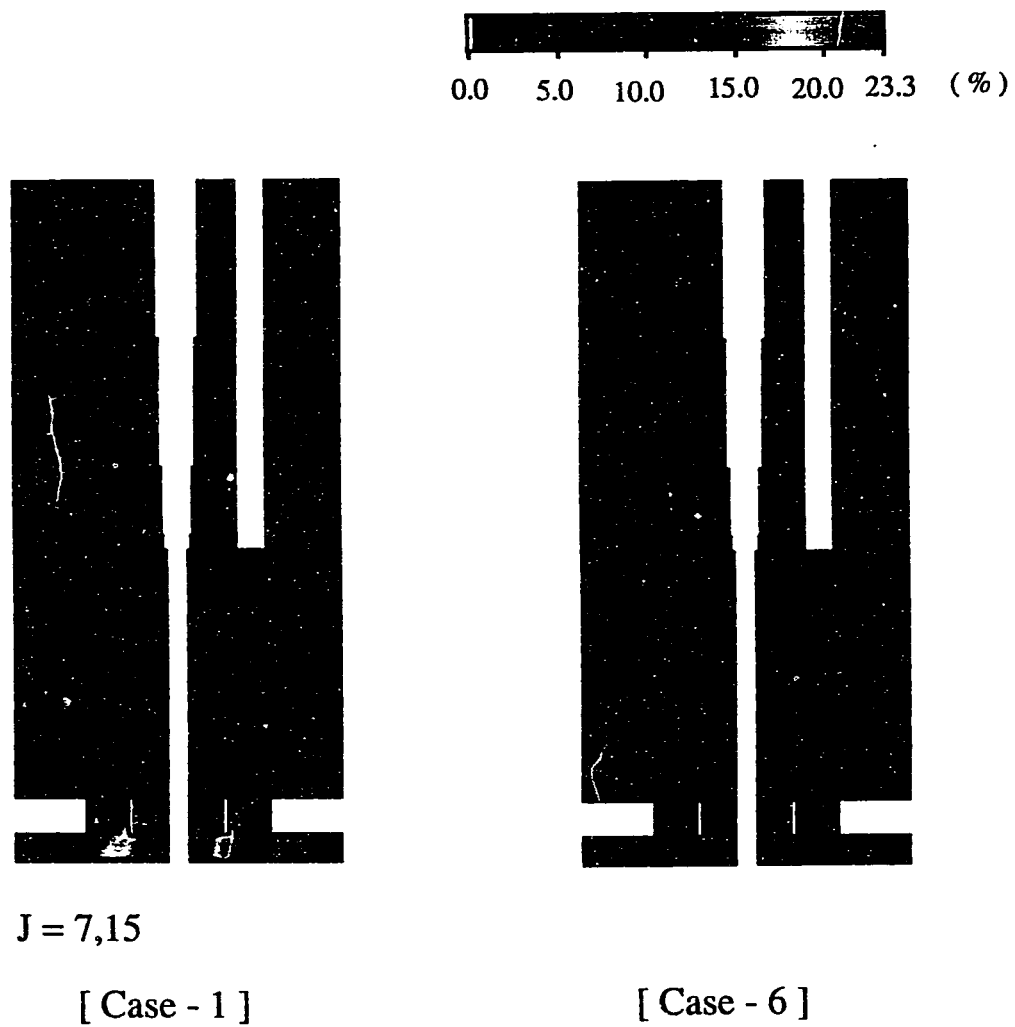


Fig. 3.8 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (7/9)

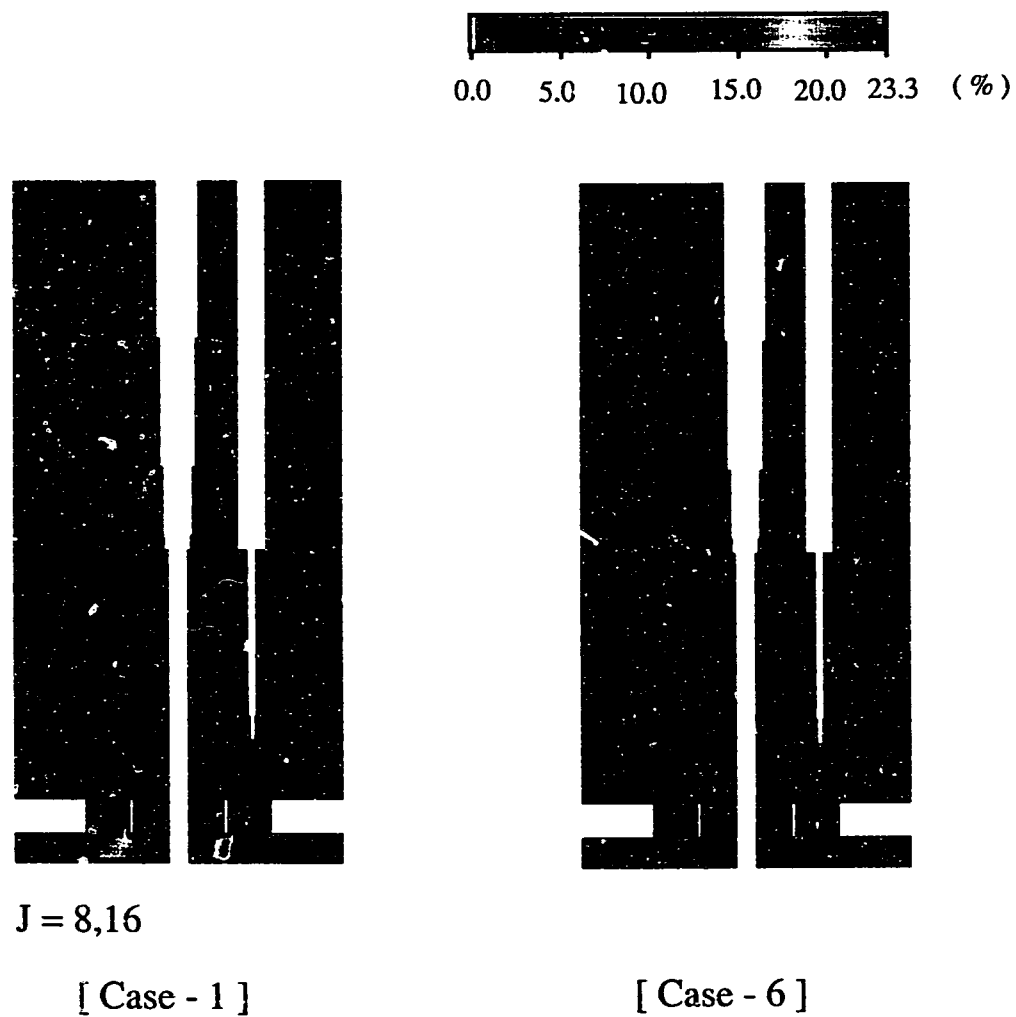


Fig. 3.8 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 8/9 )

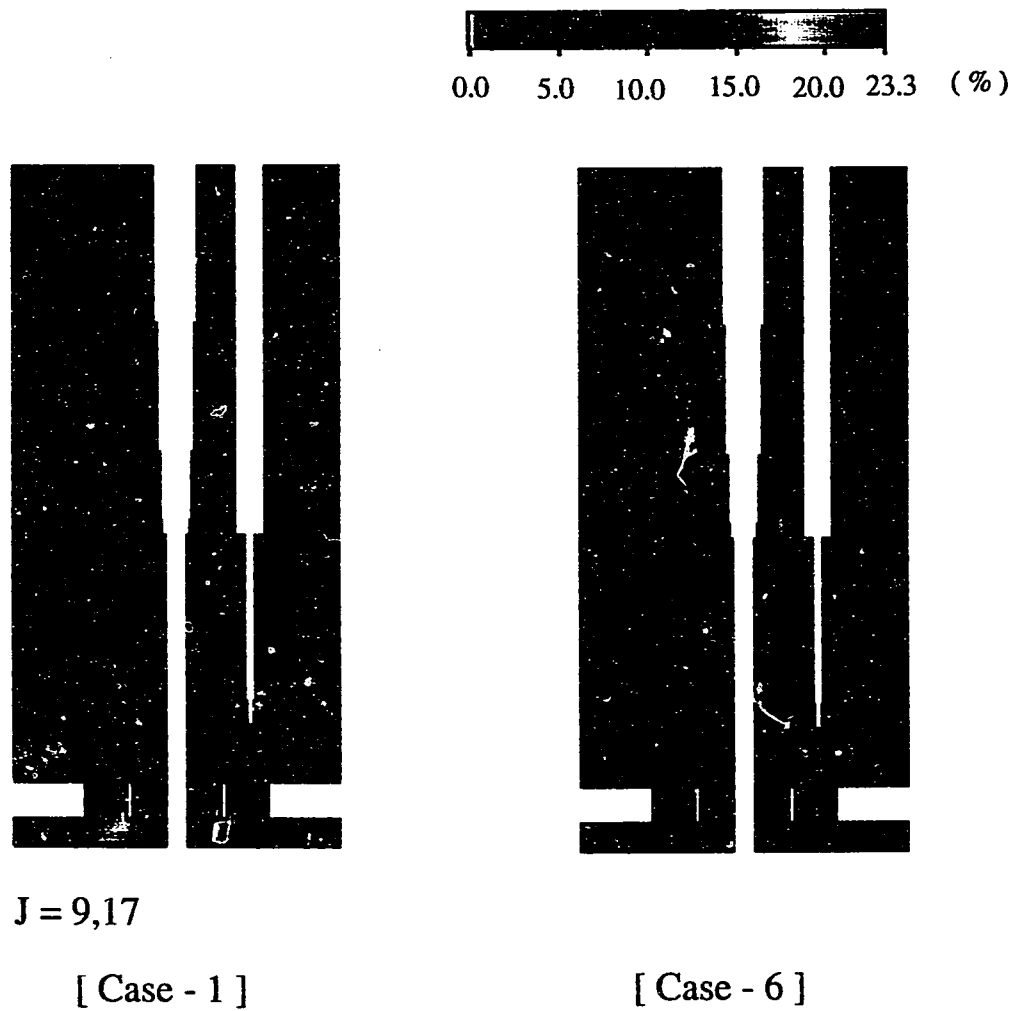
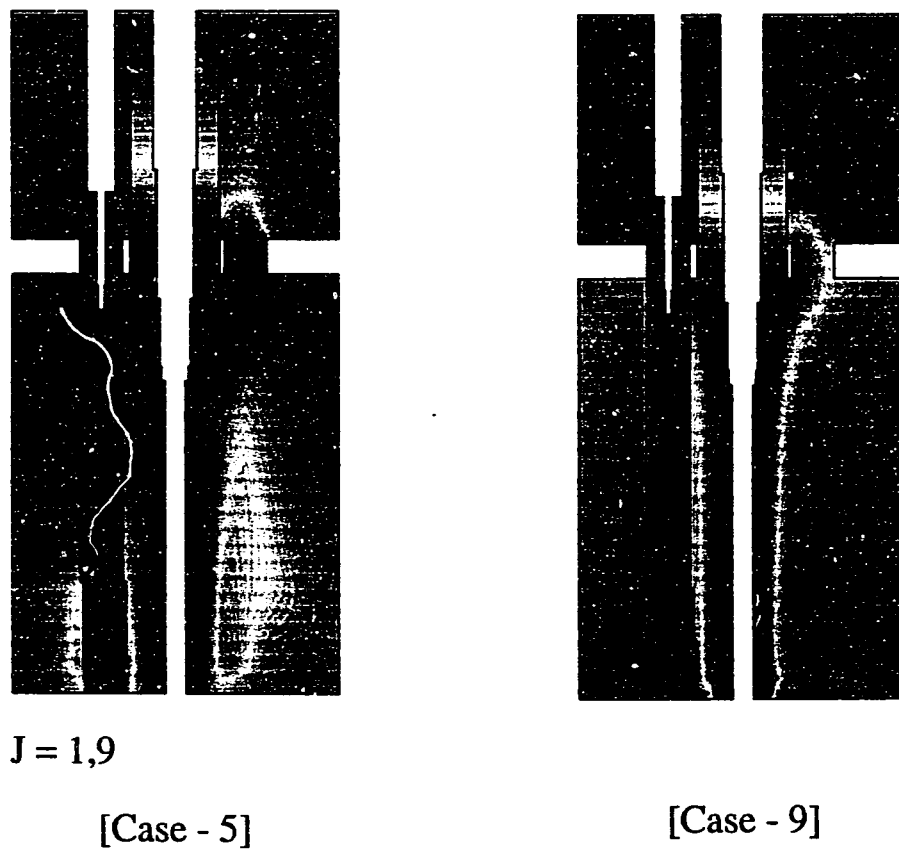


Fig. 3.8 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (9/9)

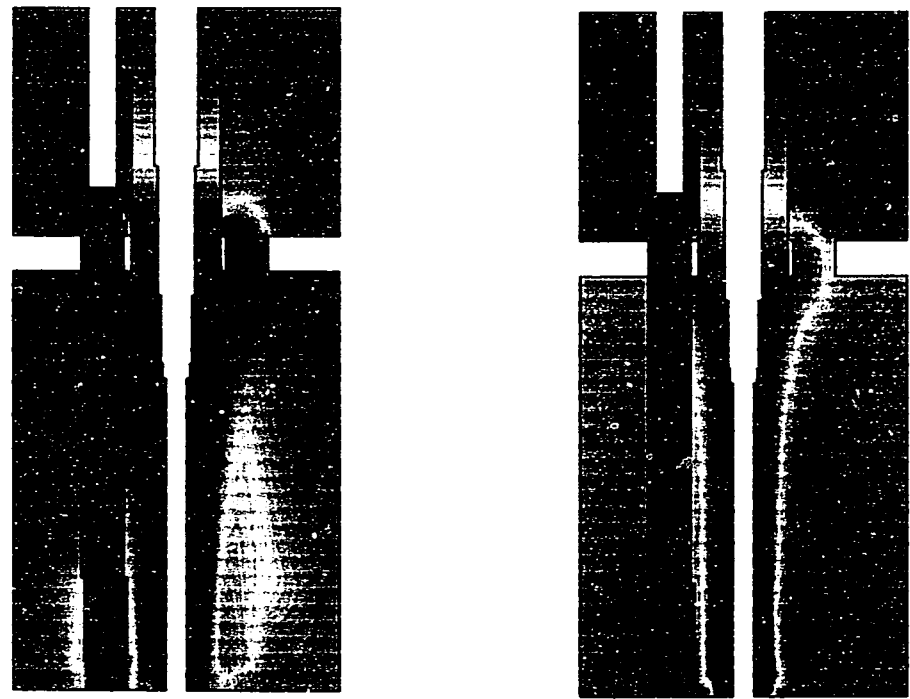


$J = 1,9$

[Case - 5]

[Case - 9]

Fig. 3.9 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (1/9)

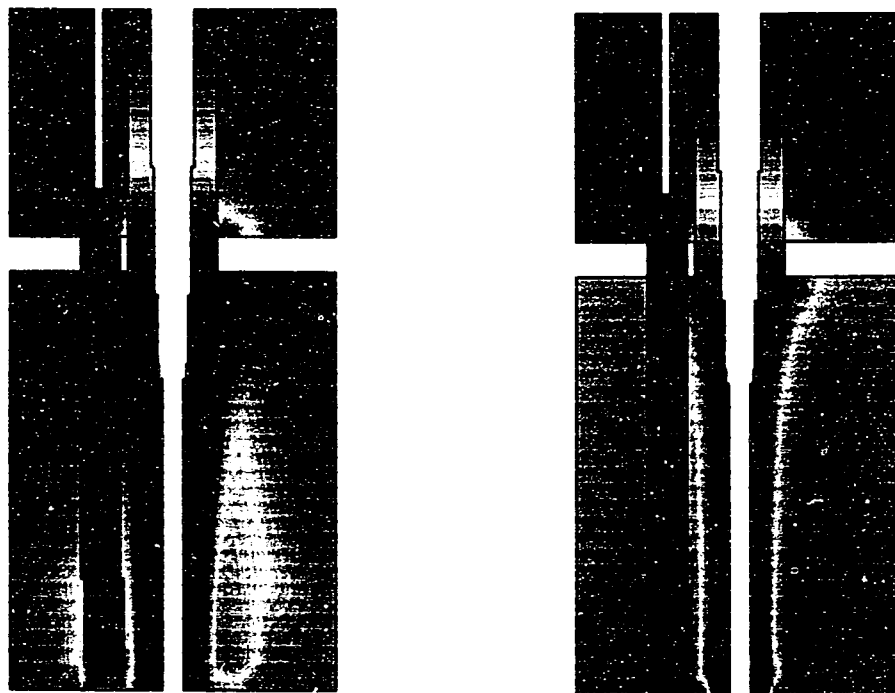


J = 2,10

[Case - 5]

[Case - 9]

Fig. 3.9 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (2/9)

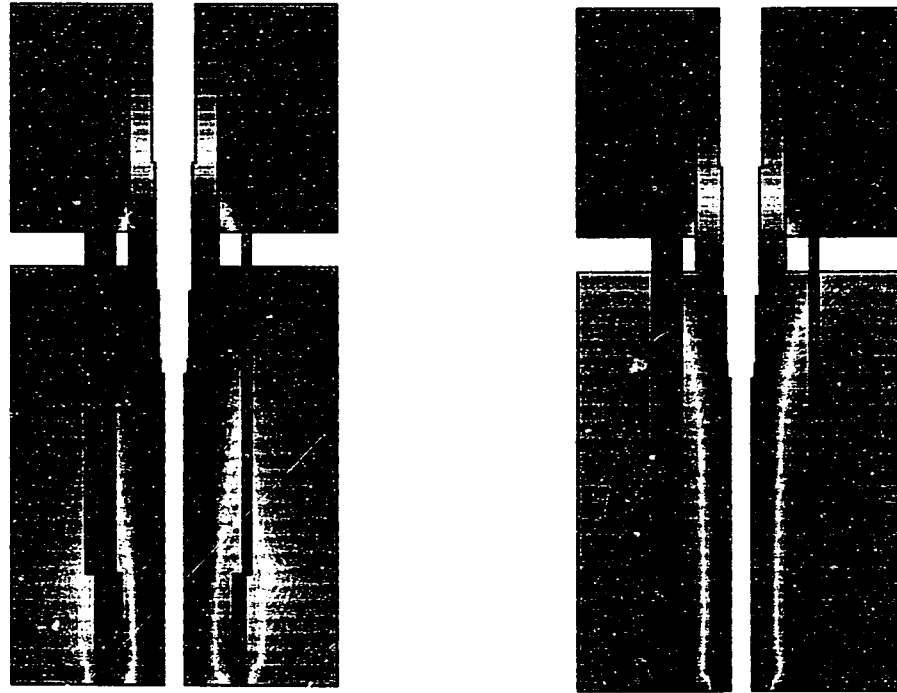


J = 3,11

[Case - 5]

[Case - 9]

Fig. 3.9 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (3/9)



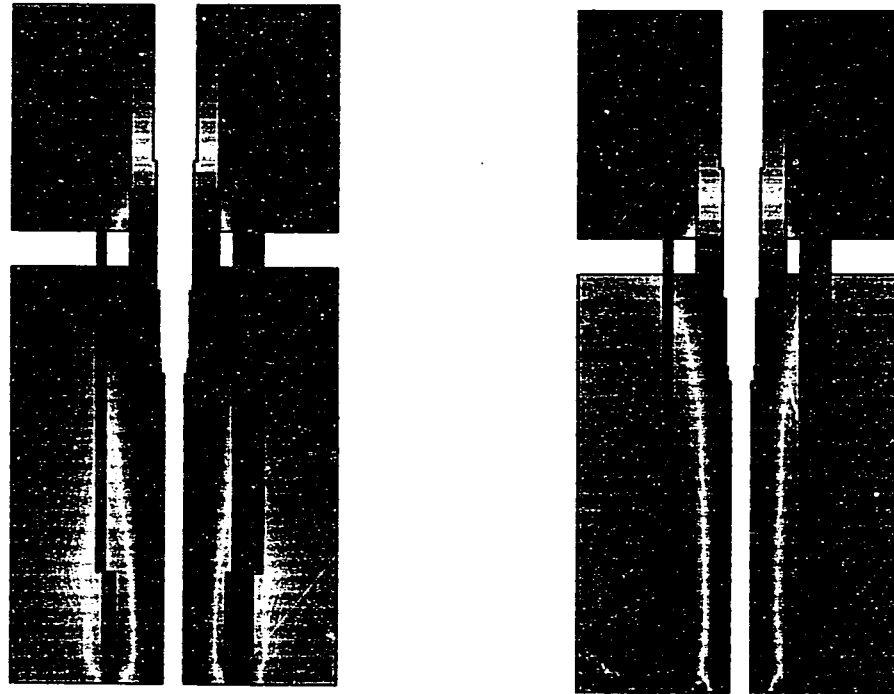
J = 4,12

[Case - 5]

[Case - 9]

Fig. 3.9 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (4/9)





J = 5,13

[Case - 5]

[Case - 9]

Fig. 3.9 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (5/9)

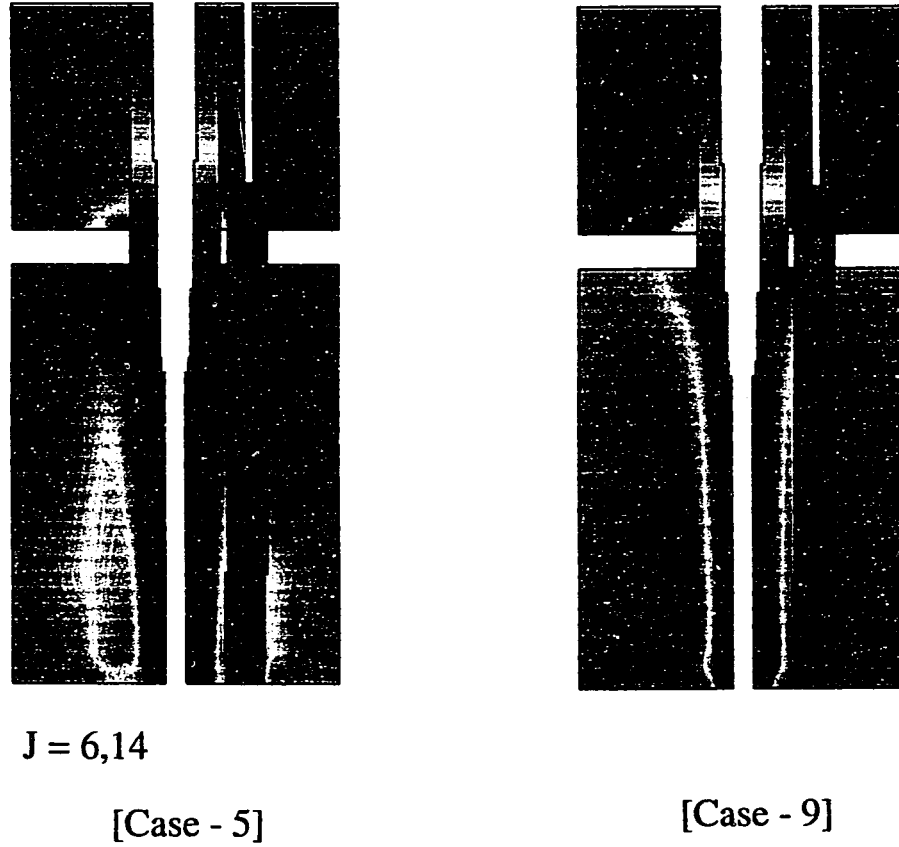
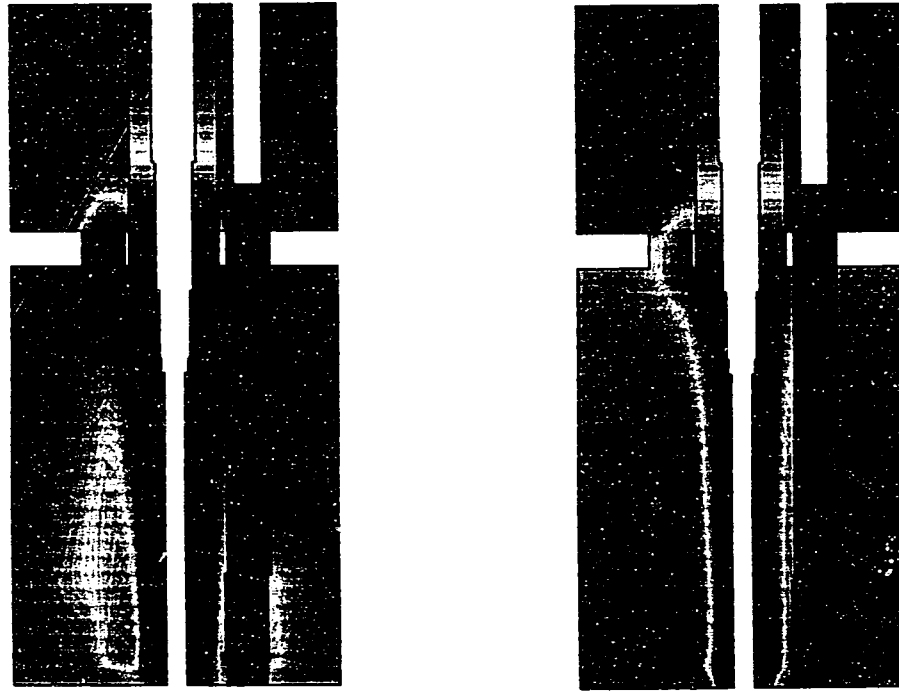


Fig. 3.9 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (6/9)

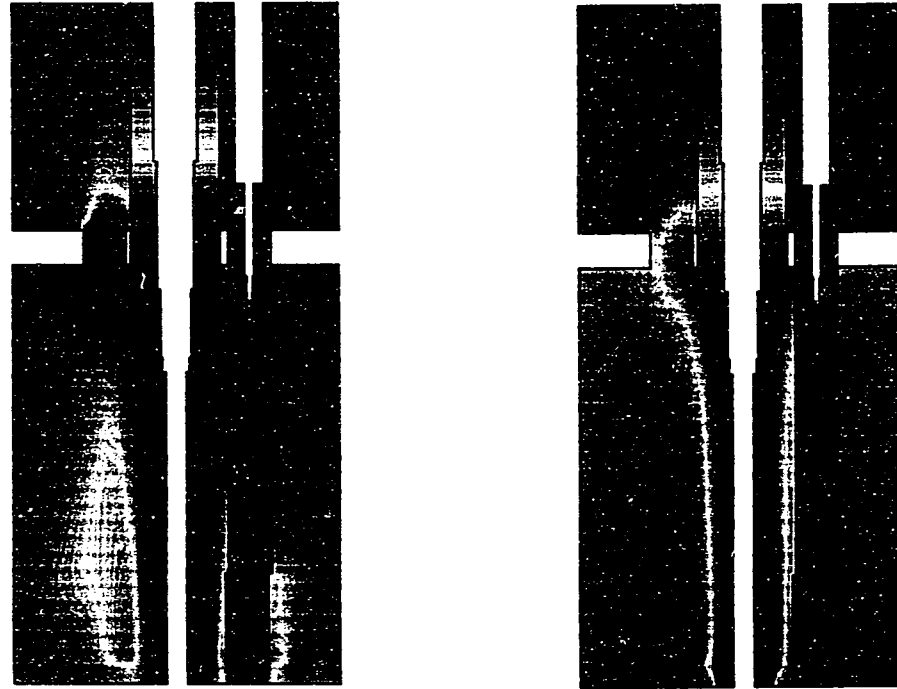


J = 7,15

[Case - 5]

[Case - 9]

Fig. 3.9 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (7/9)



J = 8,16

[Case - 5]

[Case - 9]

Fig. 3.9 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (8/9)

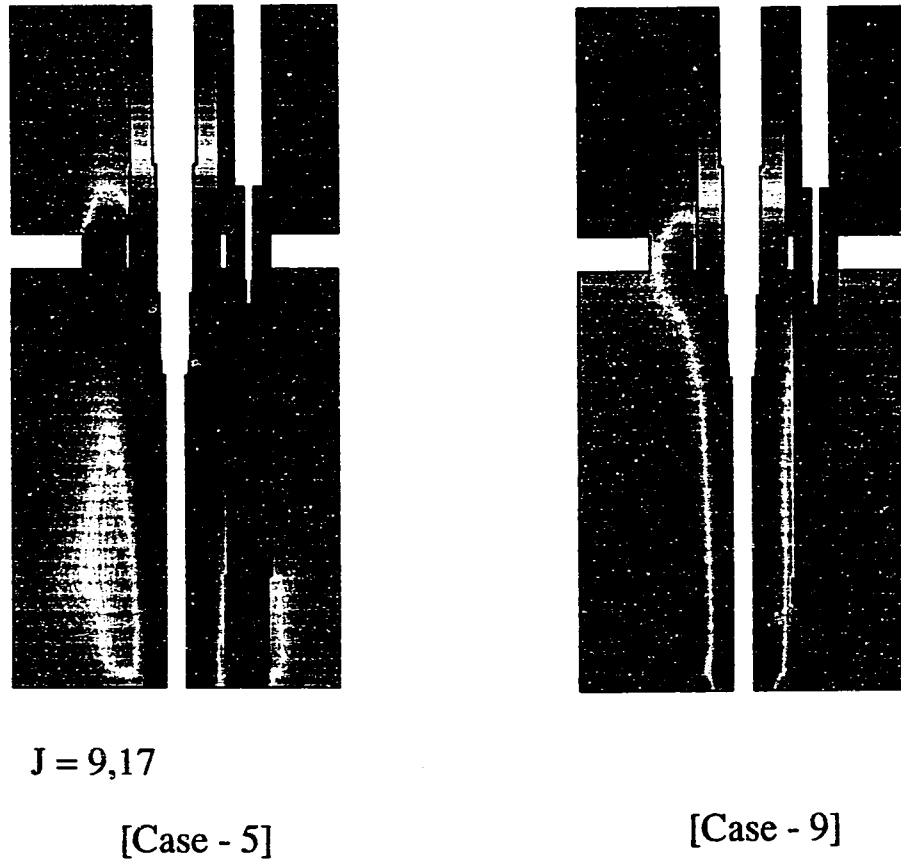


Fig. 3.9 Comparison of Mean Temperature Fields for Vertical Planes (9/9)

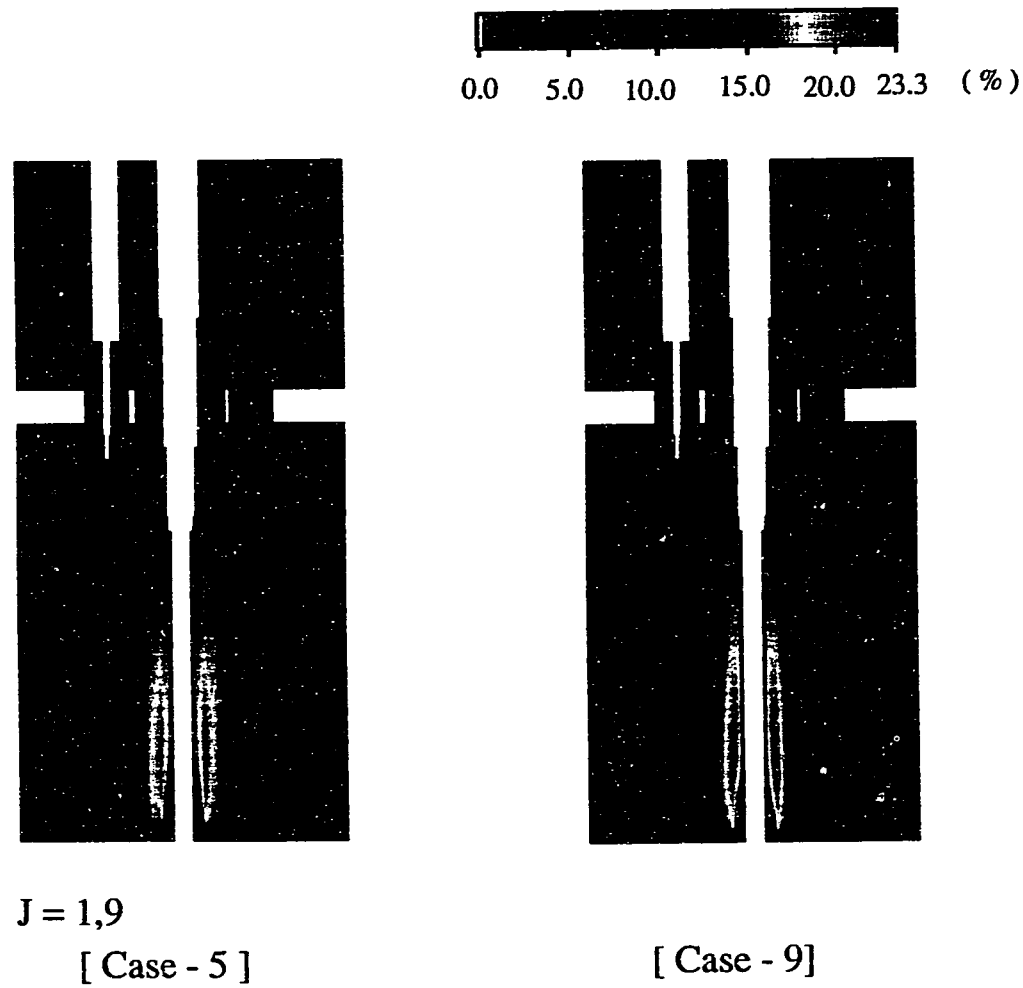
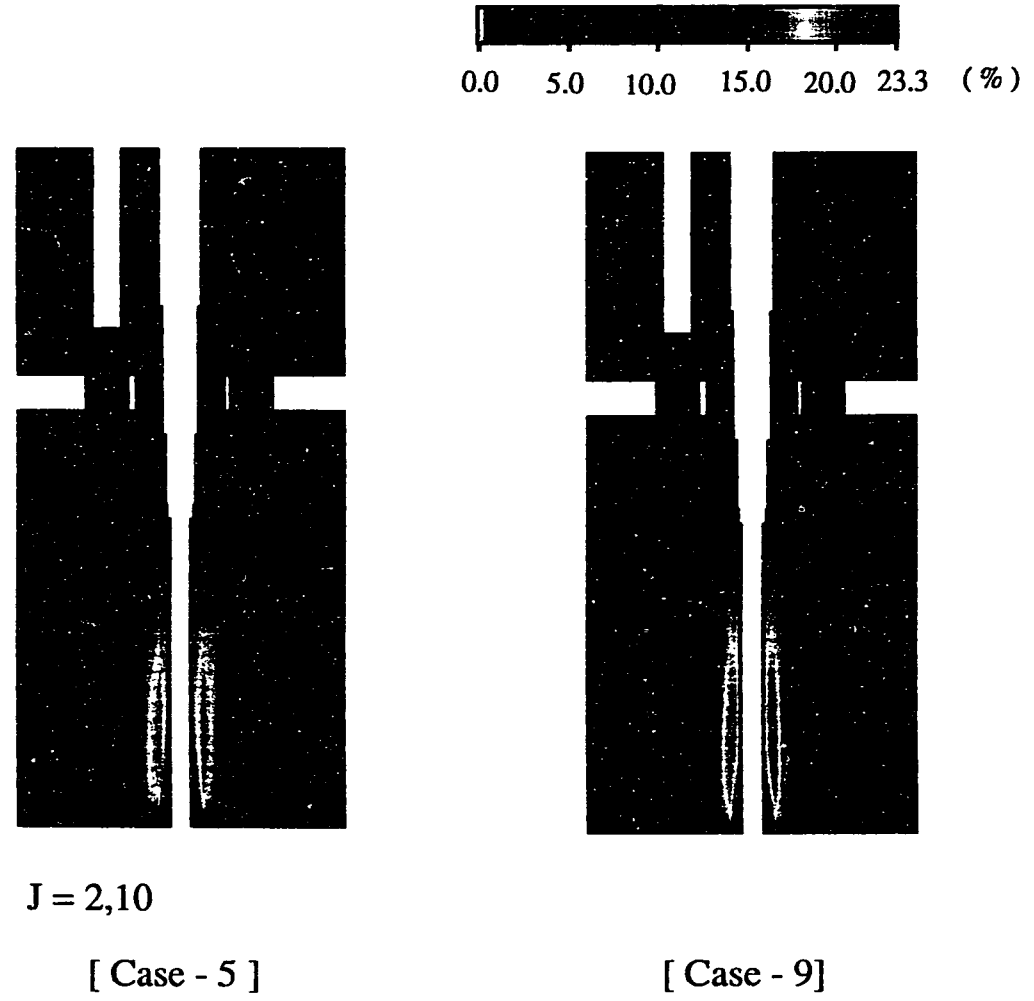


Fig. 3.10 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 1/9 )



J = 2,10

[ Case - 5 ]

[ Case - 9 ]

Fig. 3.10 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 2/9 )

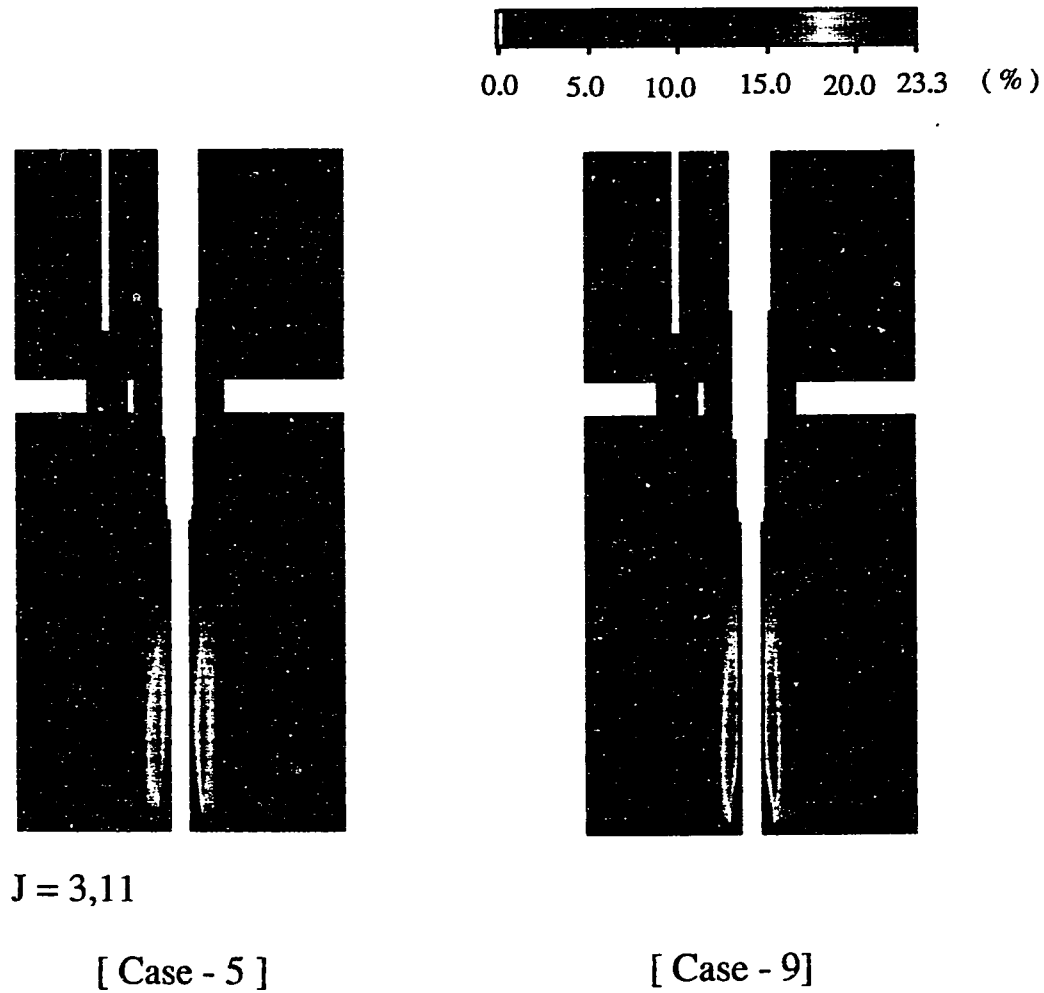


Fig. 3.10 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (3/9)



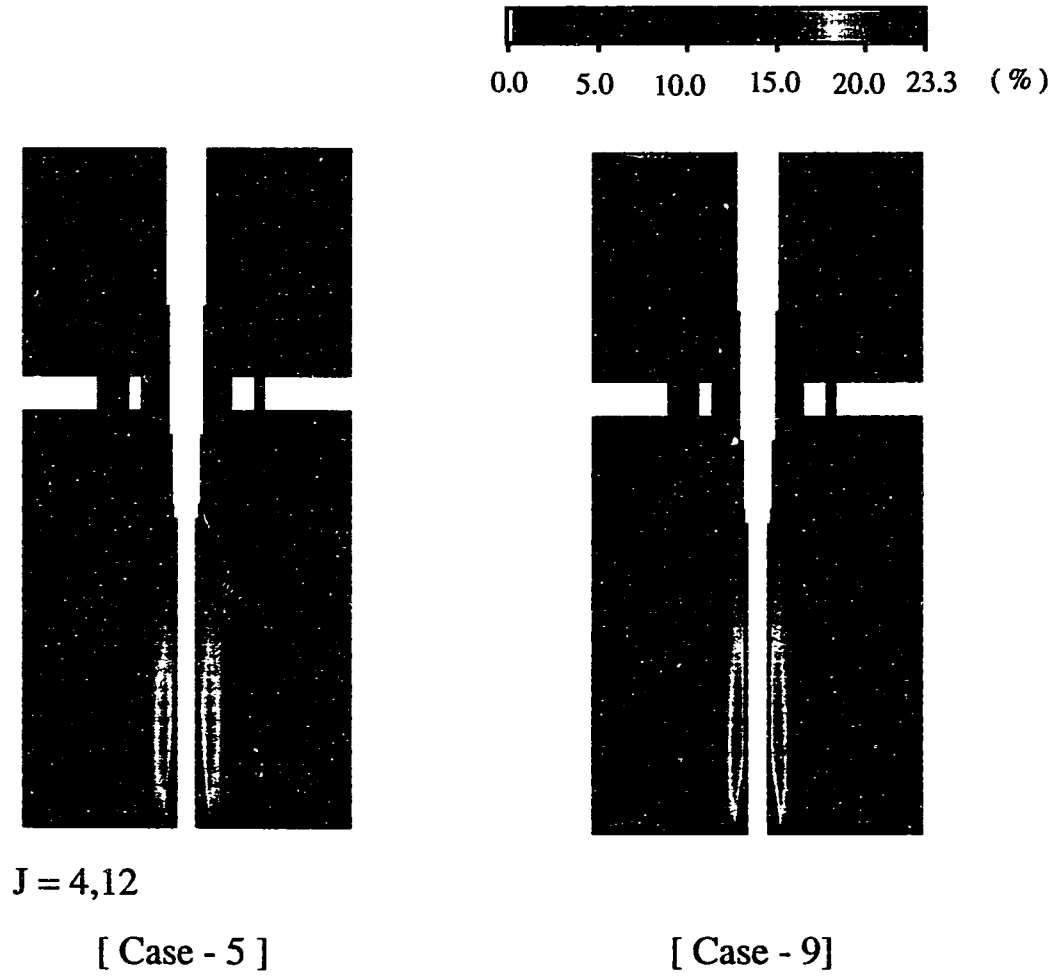


Fig. 3.10 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (4/9)

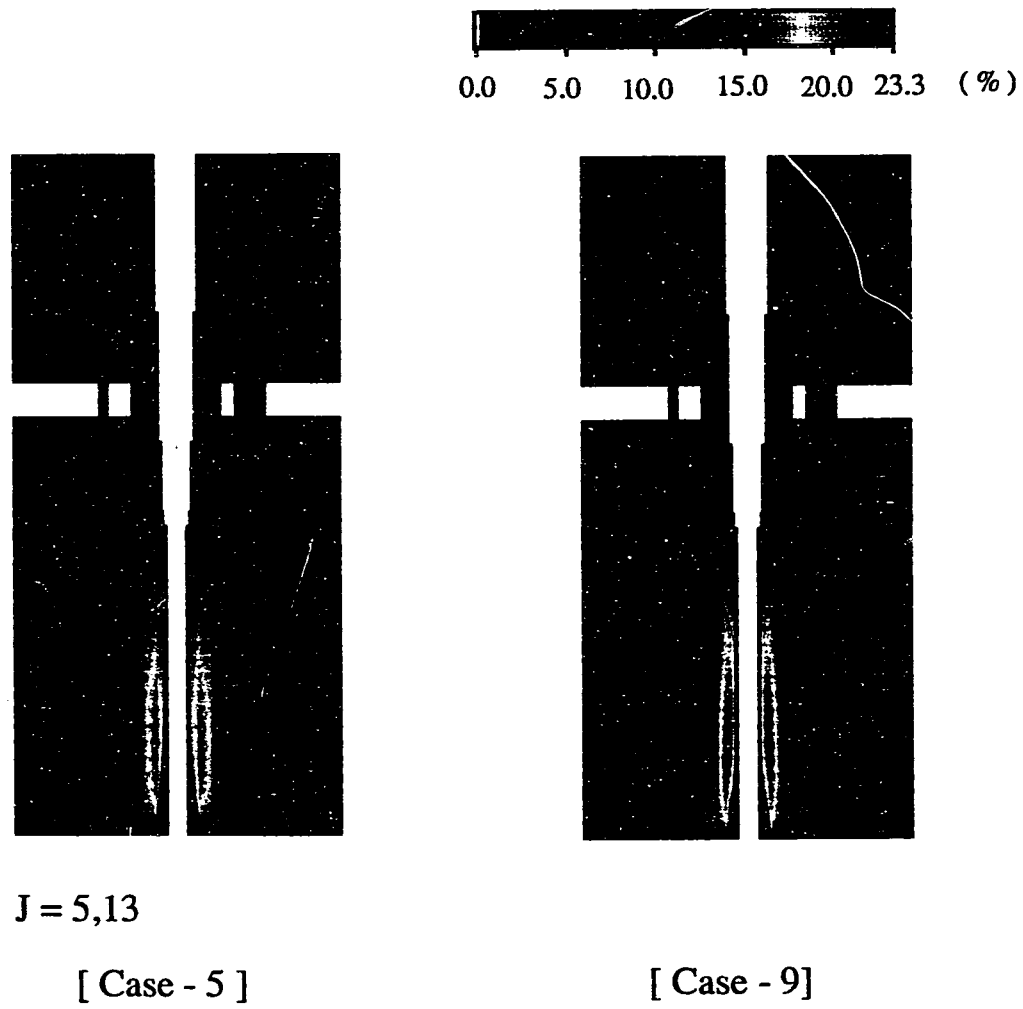
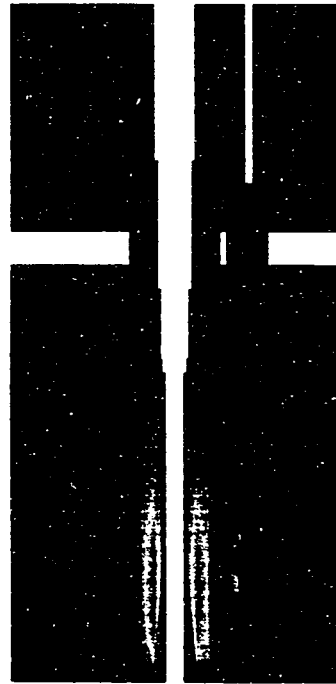
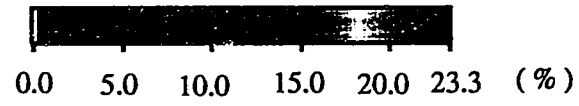
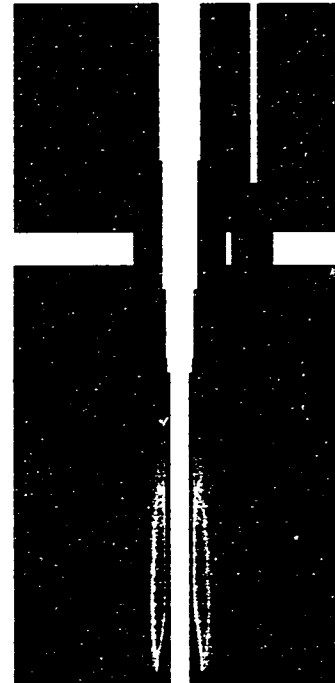


Fig. 3.10 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 5/9 )



J = 6,14

[ Case - 5 ]



[ Case - 9 ]

Fig. 3.10 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes ( 6/9 )

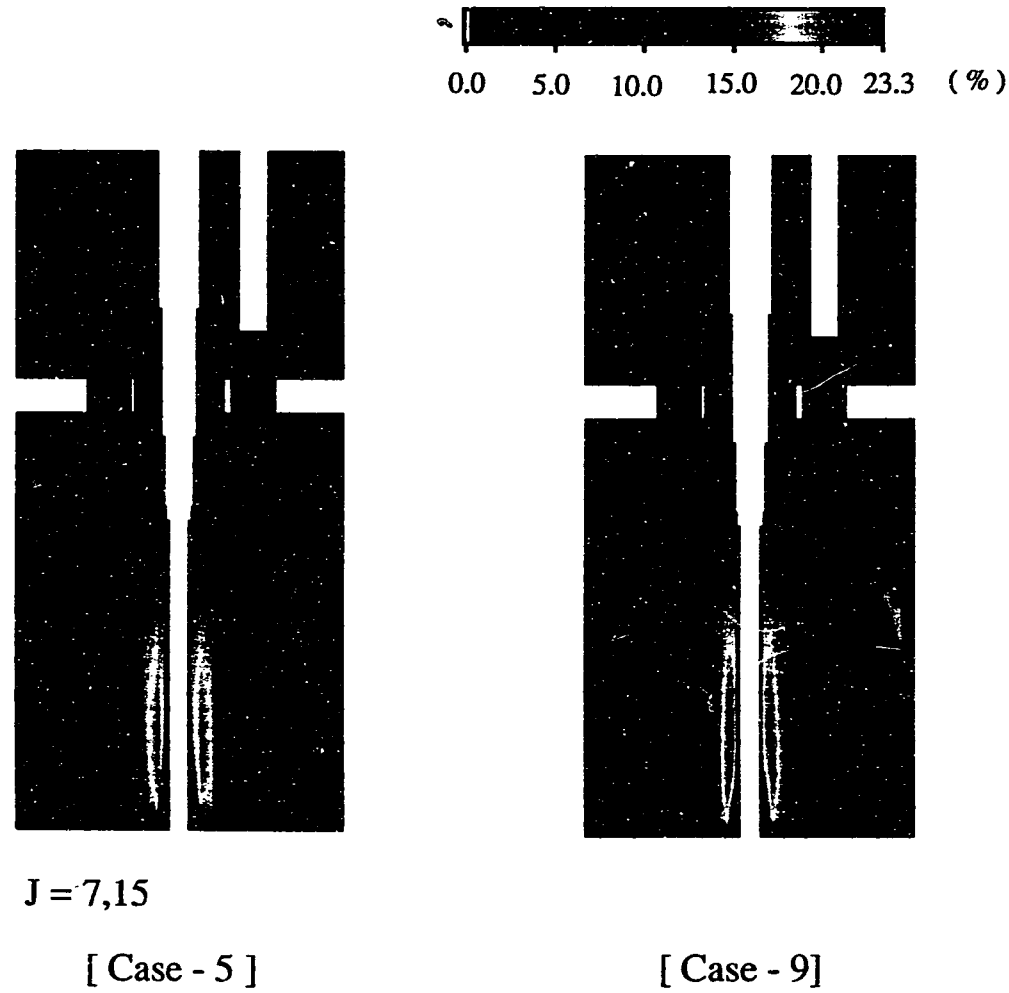
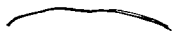


Fig. 3.10 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (7/9)



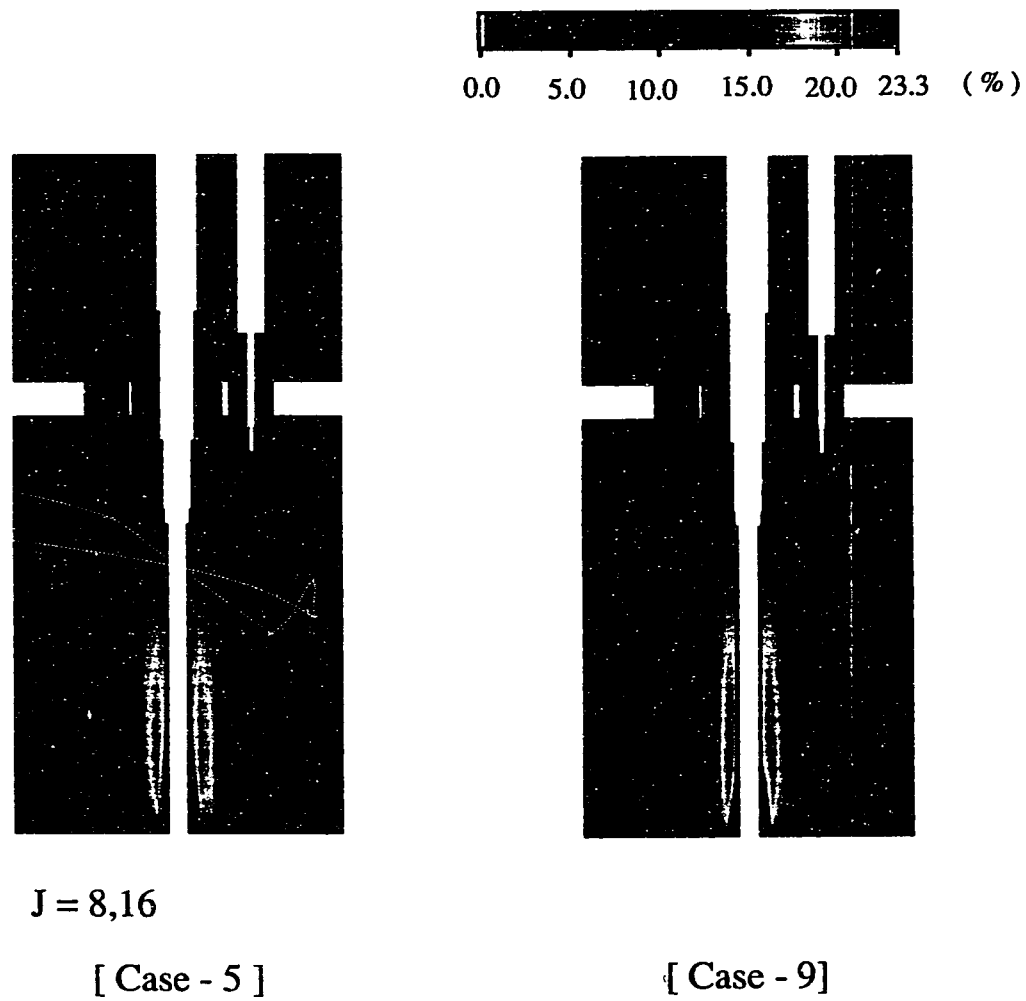


Fig. 3.i0 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (8/9)

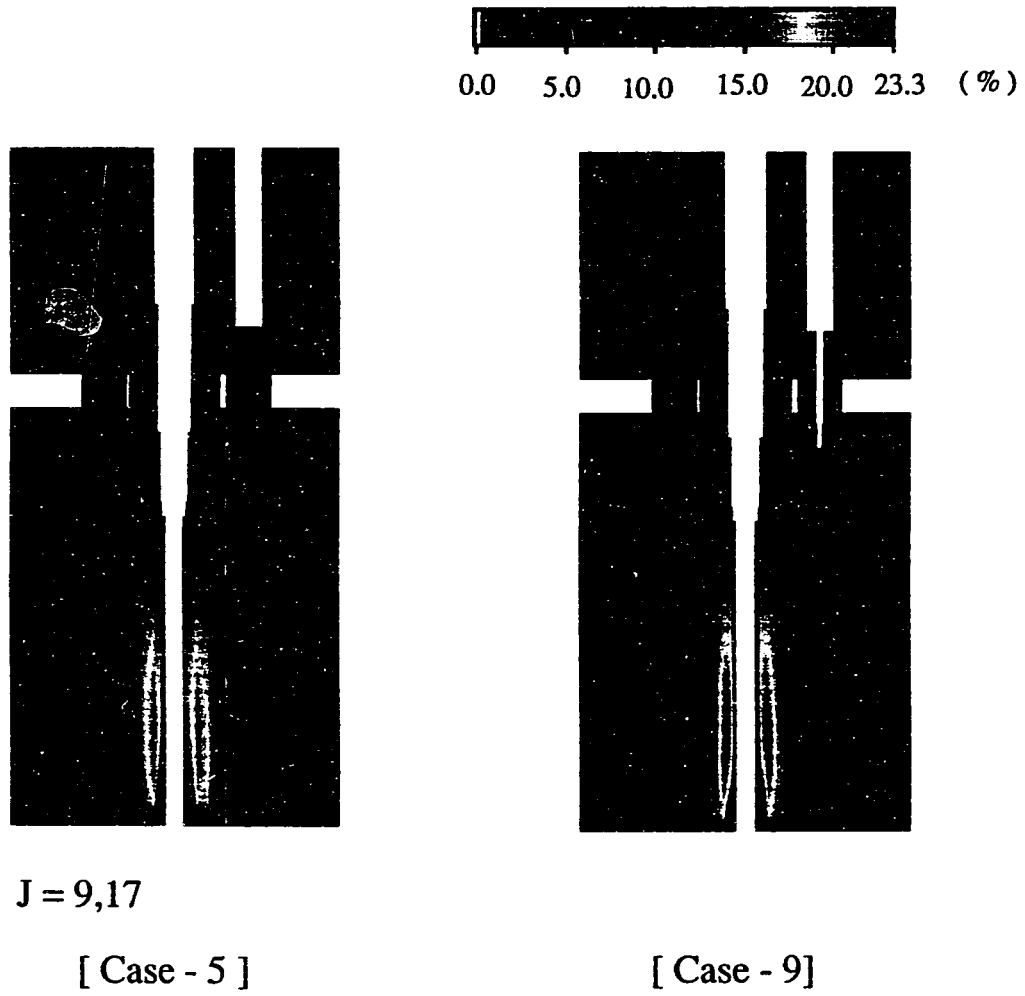


Fig. 3.10 Comparison of Temperature Fluctuation Fields for Vertical Planes (9/9)

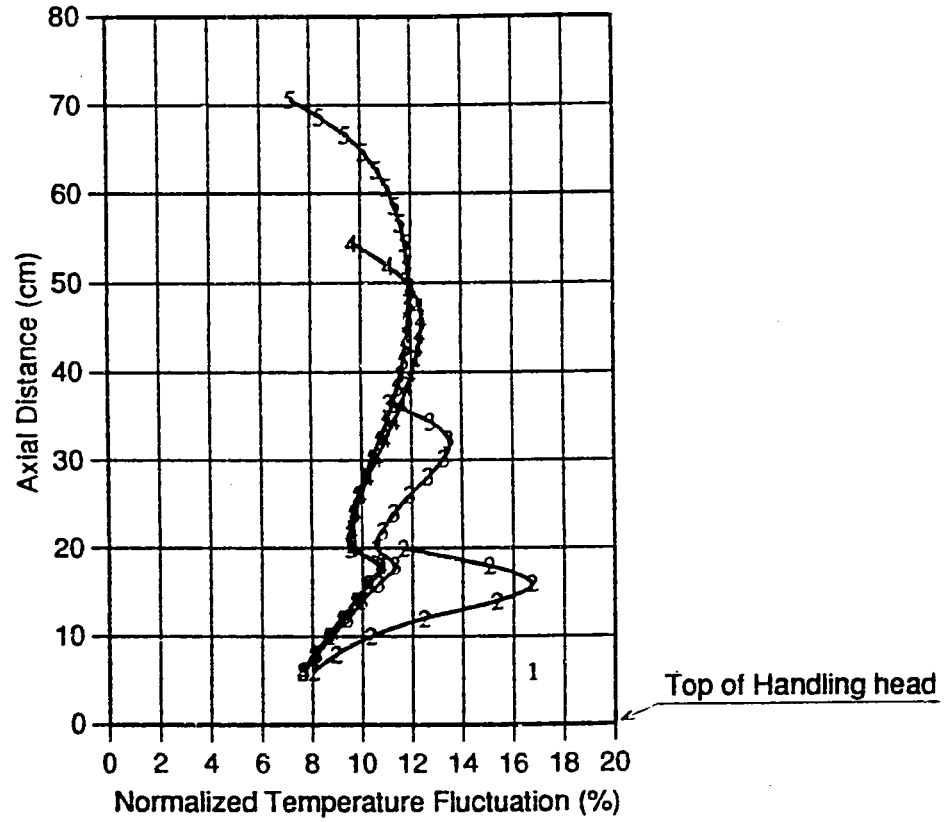


Fig. 4.1 Comparison of Axial Distributions of Temperature Fluctuation Along the Flow Guide Tube  
(Cases -1 ~ -5)

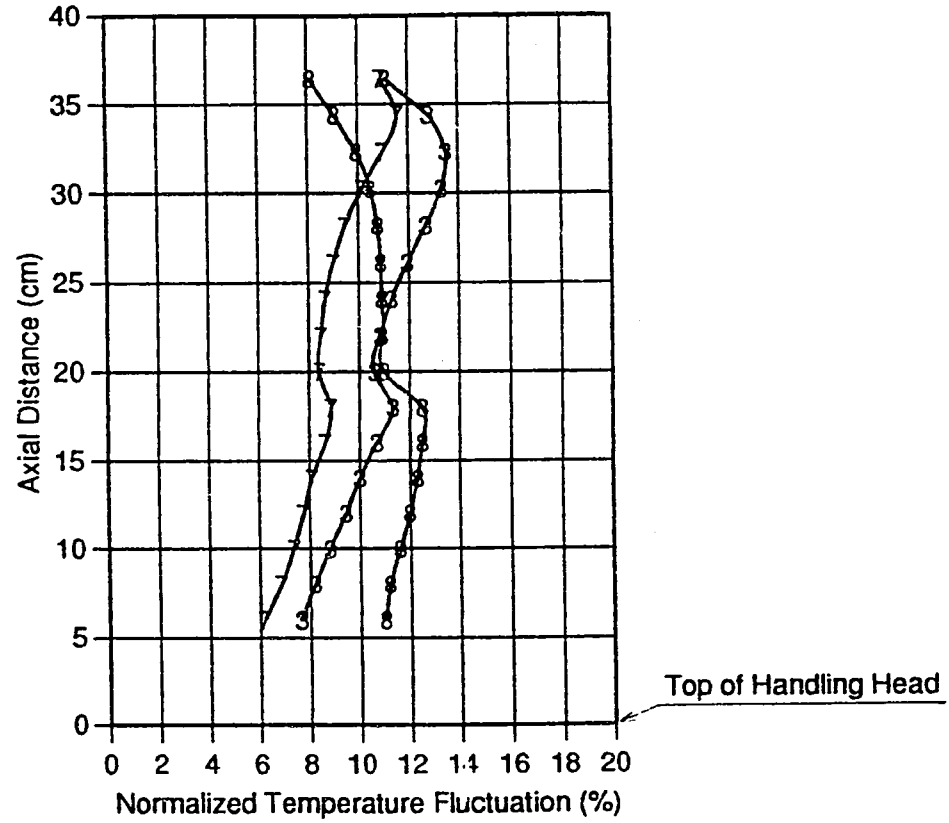


Fig. 4. 2 Comparison of Axial Distributions of Temperature Fluctuation Along the Flow Guide Tube  
(Cases 3, 7 and 8)



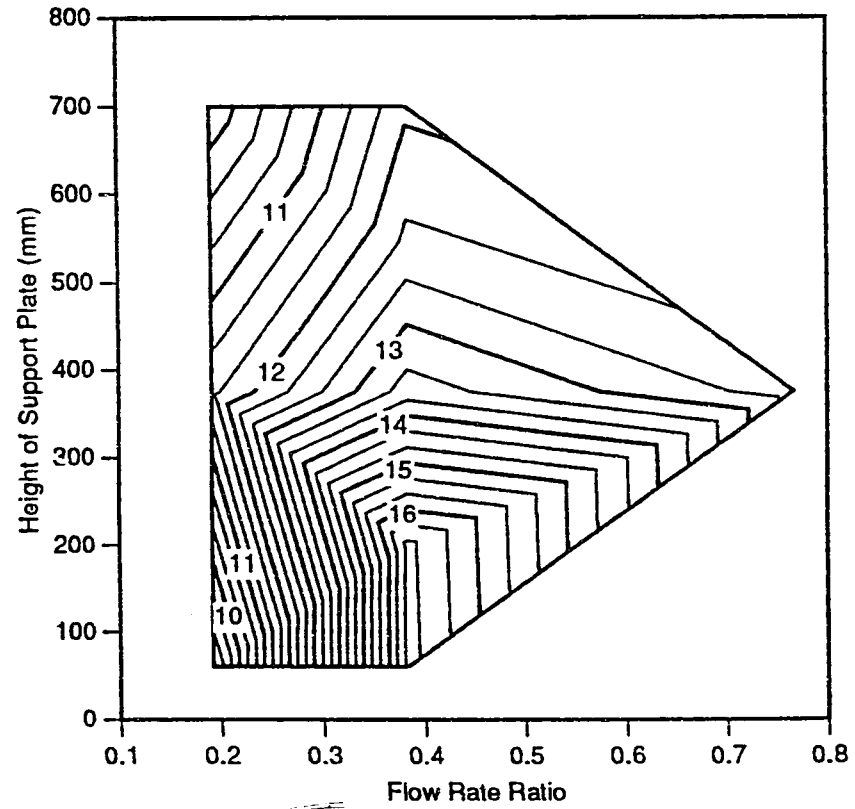
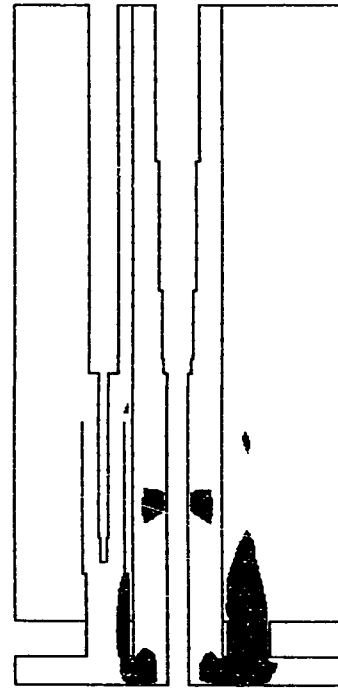
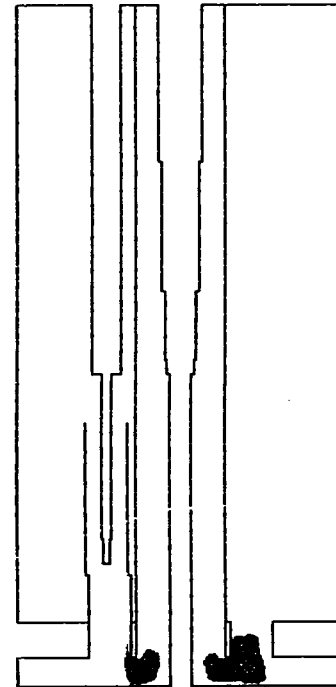


Fig. 4.3 Relationship of Maximum Temperature Fluctuation Between Flow Rate Ratio and Height of the Support Plate

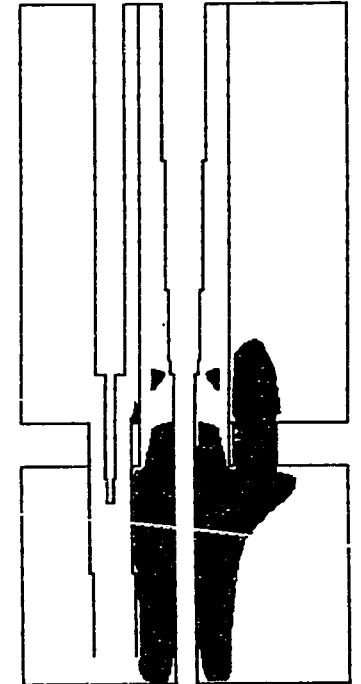


J = 1,9

[ Case - 1 ]

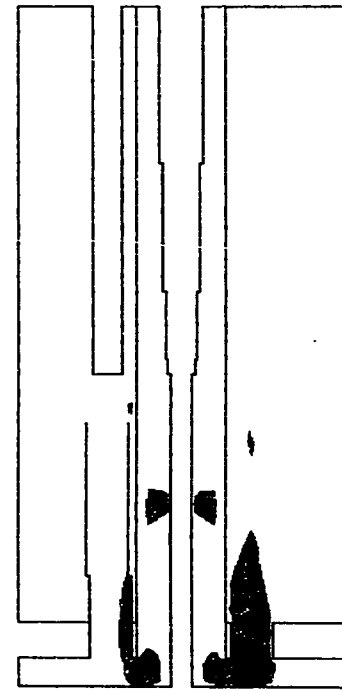


[ Case - 6 ]



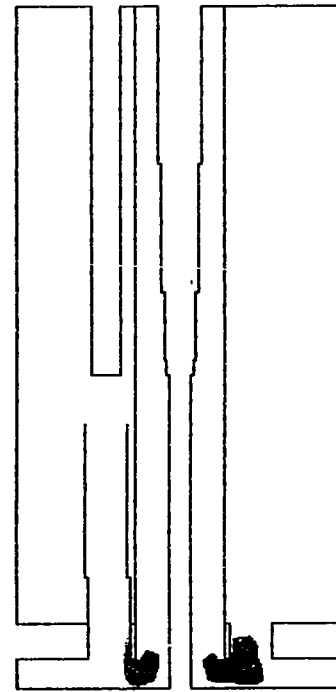
[ Case - 3 ]

Fig. 4.4 Comparison of the Area Above 30 °C for Temperature Fluctuation Range ( 1/9 )

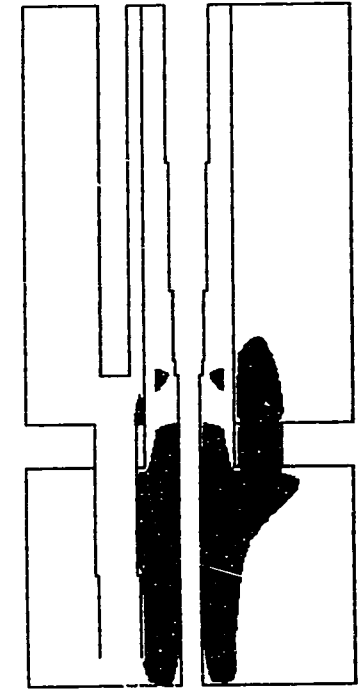


J = 2,10

[ Case - 1 ]

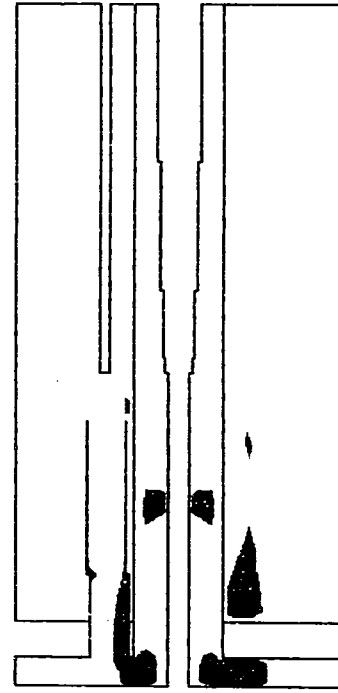


[ Case - 6 ]



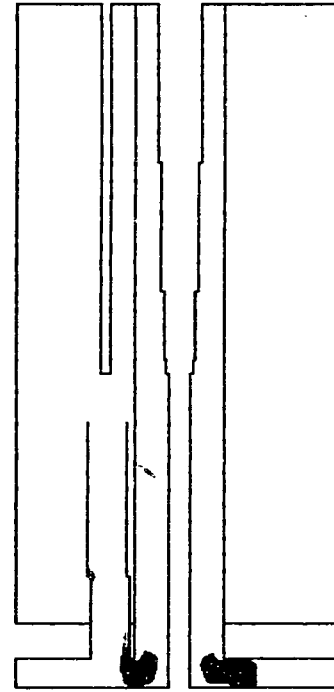
[ Case - 3 ]

Fig. 4.4 Comparison of the Area Above 30 °C for Temperature Fluctuation Range (2/9)

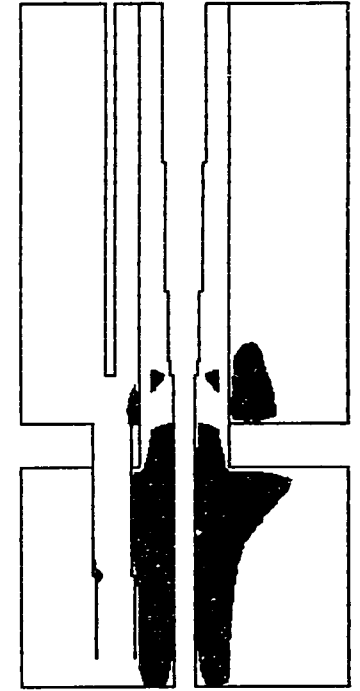


J = 3,11

[ Case - 1 ]

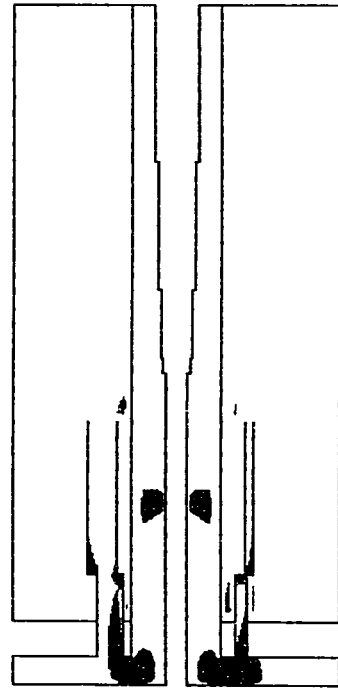


[ Case - 6 ]



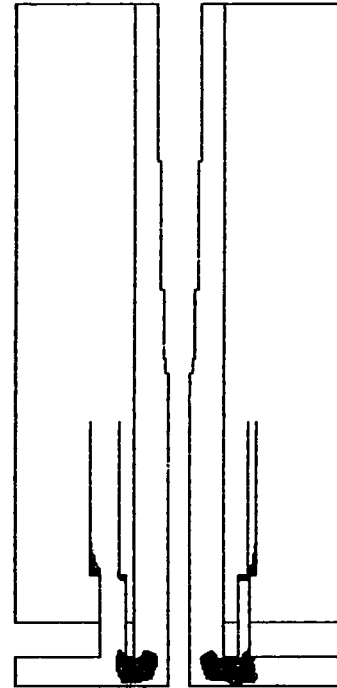
[ Case - 3 ]

Fig. 4.4 Comparison of the Area Above 30 °C for Temperature Fluctuation Range (3/9)

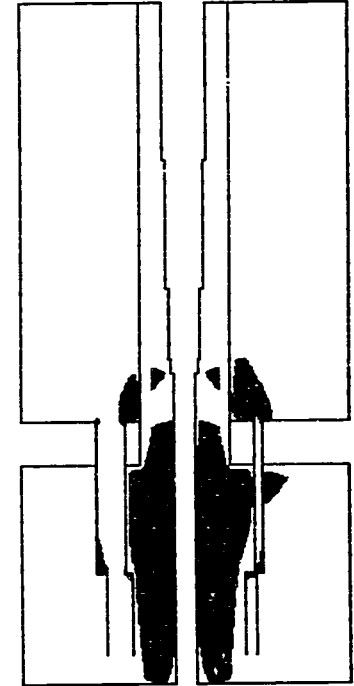


J = 4,12

[ Case - 1 ]



[ Case - 6 ]



[ Case - 3 ]

Fig. 4.4 Comparison of the Area Above 30 °C for Temperature Fluctuation Range (4/9)

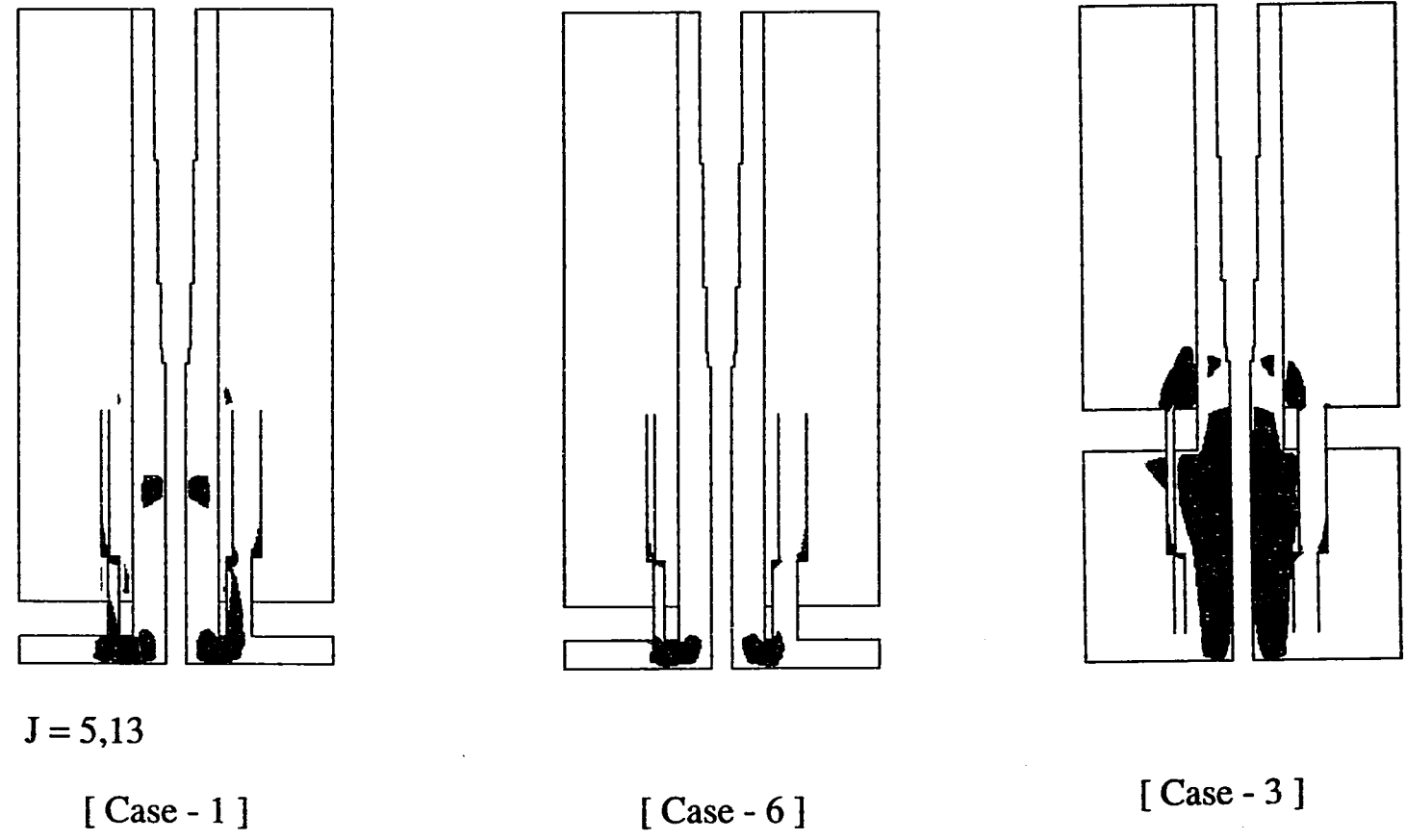


Fig. 4.4 Comparison of the Area Above 30 °C for Temperature Fluctuation Range (5/9)

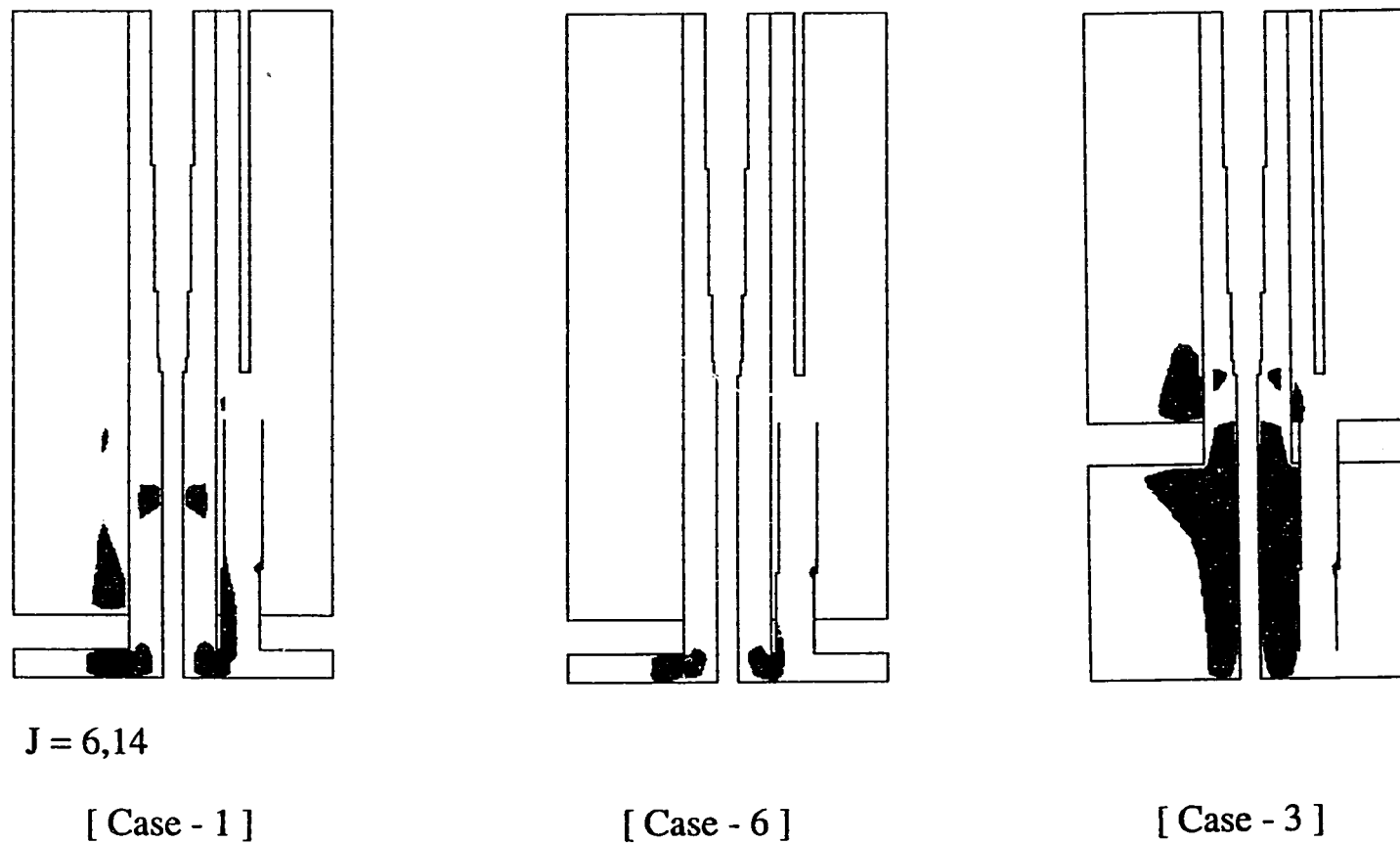


Fig. 4.4 Comparison of the Area Above 30 °C for Temperature Fluctuation Range ( 6/9 )

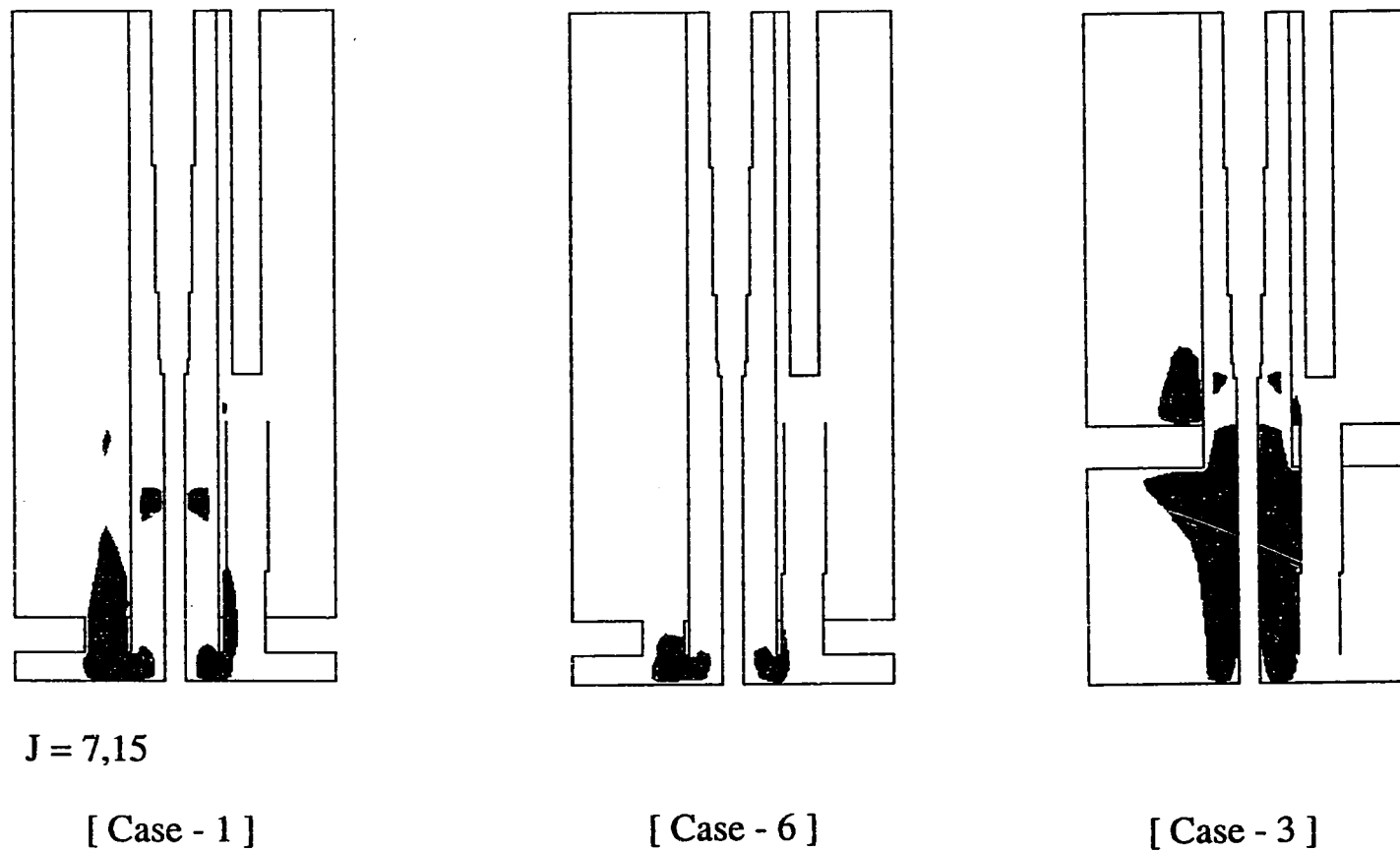
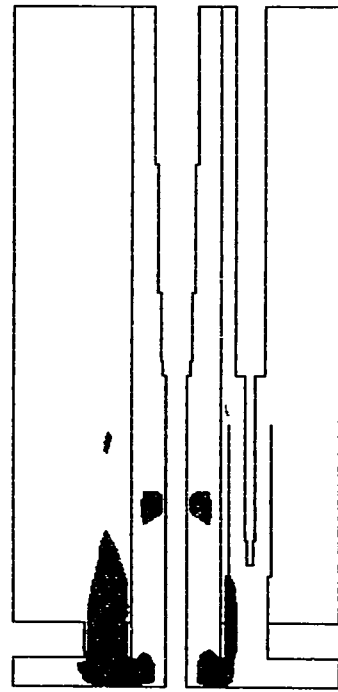


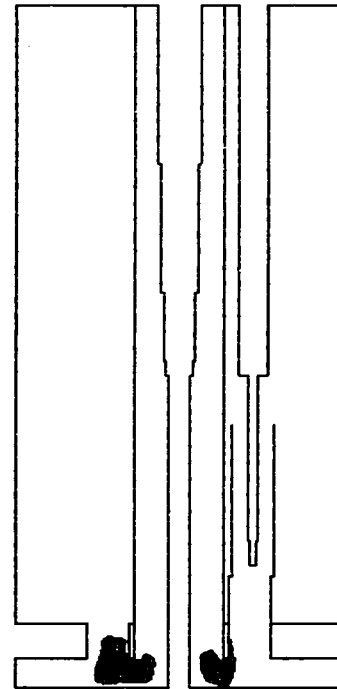
Fig. 4.4 Comparison of the Area Above 30 °C for Temperature Fluctuation Range (7/9)



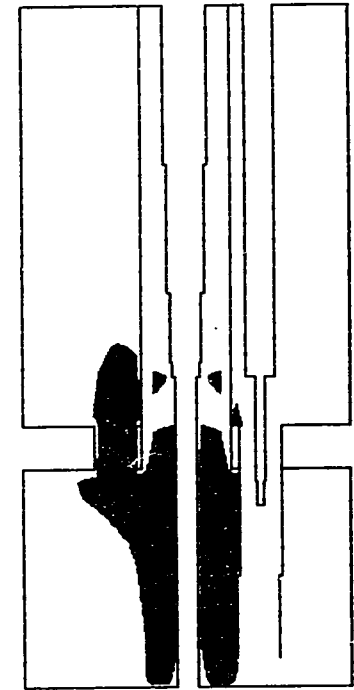


J = 8,16

[ Case - 1 ]



[ Case - 6 ]



[ Case - 3 ]

Fig. 4.4 Comparison of the Area Above 30 °C for Temperature Fluctuation Range ( 8/9 )

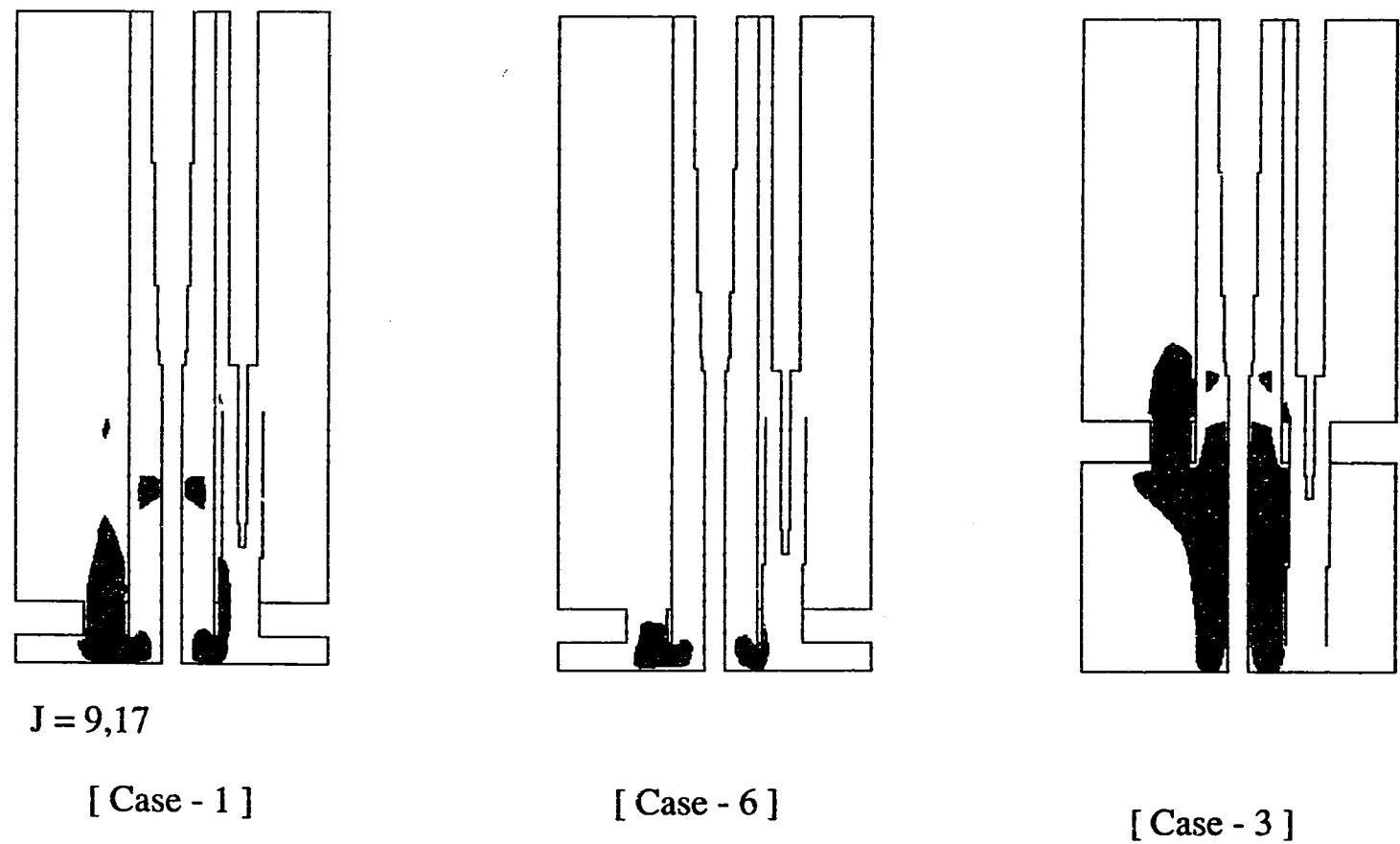


Fig. 4.4 Comparison of the Area Above 30 °C for Temperature Fluctuation Range (9/9)