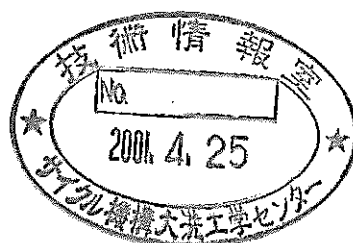


配管合流部の混合現象に関する研究

— 可視化試験結果と予測解析 —

(研究報告書)

2000年11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。

〒319-1184 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 319-1184, Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

配管合流部の混合現象に関する研究

— 可視化試験結果と予測解析 —
(研究報告書)

五十嵐実*、田中正暁*、林 謙二*、
飛田 昭*、上出英樹*

要 旨

温度の異なる流体が混合することによって発生する温度変動により、構造材内部に熱疲労が発生する現象（サーマルストライピング現象）を評価することは重要な課題である。核燃料サイクル開発機構では、設計に適用できる評価ルールを構築するために実験及び解析ツールの整備を実施している。T字管体系の配管合流部におけるサーマルストライピング現象に関しては、合流部での混合現象及び実機プラントで観測されている長周期温度変動の原因を解明するために、長周期温度変動水流動試験（WATLON:Water Experiment of Fluid Mixing in T-pipe with Long Cycle Fluctuation）を実施している。

本研究では、染料注入法による可視化試験を実施し、配管合流部での温度変動に影響を及ぼす枝管噴流の挙動を調べた。試験は主配管/枝配管の流速及び温度をパラメータとして実施し、流入条件の違いによる噴流形態の変化を観測した。その結果、流入条件の違いにより噴流形態を(1)衝突噴流(2)偏向噴流(3)再付着噴流(4)壁面噴流に分類できることがわかった。また、各噴流形態は各配管流体の運動量比により整理できることを明らかにした。

T字管内の混合現象に対する解析手法の適用性を把握するために、多次元熱流動解析コードによる解析を実施した。乱流モデルに $k-\epsilon$ モデルを用いた定常解析により、噴流形態の予測が可能であるかを検討した。その結果、 $k-\epsilon$ モデルを用いた解析で定性的に可視化試験における噴流挙動が模擬できていることから、本解析手法により噴流形態の予測が可能であることがわかった。

*大洗工学センター 要素技術開発部 原子炉工学 Gr.

**Study on Mixing Phenomena in T-pipe Junction
- Visualization Test Results and Prediction Analysis -**

Minoru IGRASHI*, Masaaki TANAKA*, Kenji HAYASHI*,
Akira TOBITA* and Hideki KAMIDE*

Abstract

Temperature fluctuation due to mixing between hot and cold fluids gives thermal fatigue to the structure (thermal striping phenomena). Research of this phenomenon is significant for the safety of a fast reactor which uses liquid metal as the coolant. In Japan Nuclear Cycle Development Institute, experiments and the improvement of the analyses have been carried out to understand this phenomena and also to construct the evaluation rule which can be applied to the design.

The Water Experiment of Fluid Mixing in T-pipe with Long Cycle Fluctuation (WATLON), aiming at examining thermal striping phenomena in the T-pipe junction, is performed to investigate the key factor of mixing phenomena and reasons of long cycle fluctuation observed in a plant.

In this study, a visualization test using dye injection method was carried out and the behavior of the jet from a branch pipe jet, which affected the temperature fluctuation in mixing region, was examined. Experimental parameters were flow velocity and temperature of main/branch pipe. Behavior of the jet from a branch pipe changed according to the inflow condition. The experimental results showed that the jet form could be classified into (1)impinging jet (2)deflecting jet (3)re-attachment jet (4) wall jet according to the inflow condition. It was confirmed that each jet form could be predicted by momentum ratio of each piping fluid.

The analysis using the multi-dimensional thermal-hydraulic analysis code, CASCADE, was performed to understand applicability of the analytical method in T-pipe junction. The objective of this analysis is to confirm that the steady-state analysis using the $k-\epsilon$ model for turbulent model is able to predict the jet form. The results showed that the jet behavior observed in the visualization test could be qualitatively simulated by the analysis using the $k-\epsilon$ model.

*O-arai Engineering Center, Advanced Technology Division, Reactor Engineering Group

目 次

1. 序論	1
2. 試験装置	2
2.1 試験装置概要	2
2.1.1 テスト部概要	2
2.1.2 ループ構成	2
2.1.3 配管レイアウト	2
2.2 試験項目	3
3. 可視化試験	19
3.1 配管レイアウト	19
3.2 試験条件	19
3.3 試験方法	19
3.3.1 LDVによる配管内流速分布の測定	19
3.3.2 染料注入法による枝配管噴流の挙動	20
3.4 計算結果	20
3.4.1 配管内流速分布	20
3.4.2 枝配管噴流挙動の可視化	21
4. 予測解析	36
4.1 解析条件	36
4.1.1 解析コード	36
4.1.2 解析体系	36
4.1.3 解析ケース	36
4.1.4 解析モデル	37
4.2 解析結果	38
4.2.1 助走区間解析	38
4.2.2 円筒座標系と直交座標系の比較	38
4.2.3 噴流の形態	39
5. 考察	64
6. 結論	72
謝辞	73
参考文献	74

図・表 目 次

2 章	
表 1 ループ仕様	6
図 2-1 主配管上流側整流バッファ構造図	7
図 2-2 枝配管上流側整流バッファ構造図	8
図 2-3 テスト部下流側整流バッファ構造図	9
図 2-4 可視化試験用試験体概略図	10
図 2-5 熱電対計測用試験体概略図	11
図 2-6 熱電対ツリー構造図	12
図 2-7 ループ構成概略図	13
図 2-8 配管レイアウト 1 構成図	14
図 2-9 配管レイアウト 2 構成図	15
図 2-10 配管レイアウト 3 構成図	16
図 2-11 配管レイアウト 4 構成図	17
図 2-12 配管レイアウト 5 構成図	18
3 章	
表 2 計装点リスト	24
表 3 可視化試験条件一覧	25
表 4 LDV 測定条件一覧	27
図 3-1 LDV による流速分布測定位置	28
図 3-2 染料注入法による撮影位置	28
図 3-3 可視化試験配管レイアウト図 (レイアウト 1)	29
図 3-4 主配管断面平均流速分布 (Test-A1 ; Point-A)	30
図 3-5 主配管断面平均流速分布 (Test-B1 ; Point-B)	31
図 3-6 衝突噴流 (Collision jet) :Region-A(Test-15)	32
図 3-7 変更噴流 (Leaning jet) :Region-B(Test-14)	32
図 3-8 再付着噴流 (Re-attachment jet) :Region-C(Test-17)	33
図 3-9 壁面噴流 (Wall jet) :Region-D(Test-21)	33
図 3-10 枝管噴流の Re 数依存性	34
図 3-11 非等温条件と等温条件との比較	34
図 3-12 枝配管噴流の流動形態	35
4 章	
表 4-1 CASCADE コードの概要	42
図 4-1 メッシュ分割	43
図 4-2 助走区間出口流速の比較 (主配管)	44
図 4-3 直交座標系と円筒座標系の比較 (CASE1)	45
図 4-4 直交座標系と円筒座標系の比較 (CASE3)	46
図 4-5 各座標系における鉛直方向流速の比較	47
図 4-6 CASE1 解析結果 ($V_m/V_b=0.25$)	48
図 4-7 CASE1 速度ベクトル ($V_m/V_b=0.25$)	50
図 4-8 CASE6 解析結果 ($V_m/V_b=0.2$)	51
図 4-9 CASE10 解析結果 ($V_m/V_b=0.25$)	52
図 4-10 CASE2 解析結果 ($V_m/V_b=0.5$)	53
図 4-11 CASE3 解析結果 ($V_m/V_b=1$)	55

図 4-12 CASE7 解析結果 ($V_m/V_b=1.5$)	57
図 4-13 CASE11 解析結果 ($V_m/V_b=1.25$)	58
図 4-14 CASE5 解析結果 ($V_m/V_b=5$)	59
図 4-15 CASE4 解析結果 ($V_m/V_b=2$)	61
図 4-16 CASE8 解析結果 ($V_m/V_b=2$)	62
図 4-17 CASE9 解析結果 ($V_m/V_b=2.5$)	63
5 章	
図 5-1 可視化試験と解析結果の比較	66
図 5-2 噴流形態のマップ	68
図 5-3 実験式との比較 (Shandorov)	69
図 5-4 実験式との比較 (Kamotani)	70
図 5-5 解析結果と相関式の比較	71

第1章 序論

高温と低温の流体が交じり合う場所では時間的な温度変動が発生し、その温度変動が構造材に伝わることにより構造材内部に高サイクル熱疲労が発生する（サーマルストライピング現象）。サーマルストライピング現象は、冷却材に液体金属を使用する高速炉においては水に比べて流体の熱伝導率が高く構造材に温度変動が伝わり易いことから極めて重要な現象である。「もんじゅ」及び「常陽」における温度差の大きな冷却材が合流する部分では熱疲労に耐性のあるインコネルを用いる、混合温度差の低減等の対策がとられているが、サーマルストライピング現象の発生が予測される箇所の設計に対して、現状では一般に公開された明確な基準が設定されていない。

核燃料サイクル開発機構ではサーマルストライピング現象の評価基準を作成するために、水及びナトリウムを作動流体とする各種実験（WAJECO^{[1][2][3]}、PLAJEST^[4]、TIFSS^{[6][6]}、TTS^[4]等）及び解析ツールの整備を実施している^[4]。現状の解析レベルにおいて流体混合による温度変動の発生から構造材における亀裂の進展まで予測が可能となっており、さらに設計基準化へのアプローチ方法も提案されている^[4]。しかし、「PHENIX」の配管合流部において数秒～数十秒オーダの長周期温度変動が計測されており、この発生原因が突き止められていない。また、従来の設計ではモックアップ試験等から求めた流体中の温度変動の最大振幅から構造材中の応力振幅を推定している。この場合、特定部位の構造材肉厚方向の温度変動による損傷は考慮しているが、構造材にホット/コールドスポット等の温度分布が存在した場合に生じる、当該個所の周囲からの拘束による応力の発生は考慮していない。さらに、この原因となるホット/コールドスポットの生成条件等も明らかになっていない。

本研究では、T字配管における冷却材温度変動ならびに長周期温度変動及びホット/コールドスポットの挙動に関する支配パラメータの抽出と感度評価を行い、現象の解明と評価手法の整備・検証に必要な実験データベースを構築することを目的とし、長周期温度変動水流動試験（WATLON : Water Experiment of Fluid Mixing in I-pipe with Long Cycle Fluctuation）を実施している。これらにより、比較的単純な体系である T 字管合流部における、サーマルストライピング現象の評価基準の策定に資する。

今回は、試験装置の概要及び可視化試験の結果とともに、乱流モデルに $k-\epsilon$ モデルを用いた解析による噴流形態の予測性に関して報告する。

第2章 試験装置

2. 1 試験装置概要

試験装置は、水を作動流体とした呼び径 150A (内径 150mm) の主配管、エルボ、その下流部で合流する呼び径 50A (内径 50mm) の枝配管、可視化用および熱電対測定用テスト部、テスト部上流側と下流側にある整流バッファ、熱電対ツリーとその駆動機構から形成される。テスト部上流 (主配管側および枝配管側) の整流バッファは、流れの方向を上流の配管系から 90° 変化させるとともに、内部に4枚の整流板 (パンチングメタル) を設け、さらに、バッファから配管への接続部に四分円状のノズルを設けることにより縮流 (バッファ内径は配管直径の約3倍) して整流する。図 2-1 に主配管側の整流バッファの構造図を示し、図 2-2 に枝配管側の整流バッファの構造図を示す。また、テスト部下流側にも整流バッファが設置されており (図 2-3 参照)、主流の軸方向流れは径方向に一様に流出して出口配管へ向かう。 90° エルボ等の構造に比べ、テスト部下流側の影響が混合部に及びにくい構造となっている。

2. 1. 1 テスト部概要

テスト部は主配管と枝配管とが合流する混合部から、その下流にある整流バッファ入口までの約 1[m] である。また、テスト部は外部から可視化による観察・計測を可能とするため透明アクリル製となっている。

図 2-4 に可視化用試験体の概略図を示す。可視化用試験体は、主配管 (内径 150mm) と枝配管 (内径 50mm) が直角 (T 字状) に接続する混合部と、その上流側の案内管 (内径 150mm) から構成される。T 字状の接合部の枝配管は主配管に直角に取り付けられており、主配管内面の曲面と同一形状となるように加工されている。ただし、枝配管出口では面取り加工等は施されていない。混合部と案内管とはフランジ接合となっており、中心軸を一致させ配管内面に段差が出来ないようにはめ込み式のフランジ構造となっている。試験体は透明アクリル樹脂で出来ており、混合部では配管の曲率の影響を軽減し可視化が可能のようにウォータージャケットが設置されている。また、案内管には、感温液晶シートに対する温度校正用熱電対が設置されており、配管中心温度を測定する。ただし、通常は配管内面まで引き上げられており流れ場を乱すことはない。可視化用試験体では、染料注入による流況可視化試験、レーザドップラ流速計 (Laser Doppler Velocimetry; LDV) および粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry; PIV) による流速分布測定試験、感温液晶シートによる管壁近傍温度分布測定試験等を行う。

図 2-5 に熱電対計測用試験体の概略図を示す。使用する熱電対は非接地 K 型、シース径 $\phi 0.25\text{mm}$ である。可視化試験用の試験体と同一の形状で透明アクリル樹脂で出来ており、配管内の流れの様子を観察できるようになっているが、ウォータージャケットは設置されていない。主配管には、配管内面での壁面温度を測定出来るように、枝配管中心軸から主配管直径 ($D=150\text{mm}$) の 1 倍 (1D) の位置から、2 倍 (2D)、3 倍 (3D)、4 倍 (4D)、5 倍 (5D) の位置に、配管の周方向に熱電対 (シース径 0.25mm) が設置されている。1D (熱電対番号 TW1-1~12) および 2D (熱電対番号 TW2-1~12) の距離には、周方向に 30° ずつ 12 点の熱電対が設置されており、3D (熱電対番号 TW3-1~4) から 5D (熱電対番号 TW5-1~4) の距離には周方向に 90° ずつ 4 点の熱電対が配管内壁と熱電対先端は同一面となるように設置されている。また、混合部中心から 1.5D

の位置に枝配管取り付け側（180度方向）と反対側（0度方向）に静圧タップが取り付けられており、混合部で生じる不安定な流れに伴う圧力変動を測定することができる。

熱電対による温度分布測定試験では、試験体に設置された熱電対の他に、熱電対ツリーを用いた測定を同時に行う（図 2-6 参照）。熱電対ツリーは、配管内の径方向の温度分布を計測できるように、熱電対が配管中央から管壁方向に 5mm ピッチで 15 本と配管内壁から 0.5mm、3mm の位置に櫛状に取り付けられている。熱電対ツリーの主軸は、下流側整流バッファ端面の軸受を貫通し、回転用ステッピングモータに接続されている。熱電対ツリー回転用ステッピングモータは、汎用のパーソナルコンピュータにより制御が可能となっており、1パルスあたり 0.001° 単位で角度設定が可能である。また、回転角度は $\pm 180^\circ$ であり配管全周に渡って計測することができる。また、熱電対ツリーは周方向に回転させるだけでなく流れ方向（軸方向）に移動する事が可能で、主配管内の流体温度空間分布を計測することが出来る。

2. 1. 2 ループ構成

図 2-7 にループ構成の概略図を示す。また、ループの仕様について表 1 に示す。ループは貯水槽（容量 30m^3 ）、主配管用駆動ポンプ（最大吐出量 $240\text{m}^3/\text{h}$ ）、枝配管用駆動ポンプ（最大吐出量 $18\text{m}^3/\text{h}$ ）、各配管用流量調整弁、冷却系ライン等からなる。貯水槽には、流体温度を設定できるように 5 本の加熱ヒータ（総出力 200kW ）が設置されており、貯水槽内の水温を制御することが出来る。長周期温度変動試験では、主配管側を高温流体（アクリルの制限温度から 50°C 以下）、枝配管を低温流体（冷却器の性能から 25°C 程度）が流れ、T 字状に接続された試験体において混合する。主配管側の温度はテスト部入口温度を参照してダンプタンク内の温度を制御する。枝配管側はポンプとテスト部入口との間に熱交換機（ 500kW ）を設置して、ダンプタンクからの高温の流体を冷却することによりテスト部入口温度が所定の温度となるように冷却系との交換熱量を制御する。

2. 1. 3 配管レイアウト

長周期温度変動の要因としては、2 方向からの流体が混合する時に噴流の界面で生じる不安定性や渦離れ等、流れの構造により生じる場合、プラント制御中に生じる流量、温度、圧力変動等の流動条件の変動により生じる場合、混合部上流のエルボ等の存在による流速分布の変化や 2 次流れの発生等の配管構成による上流からの影響により生じる場合が考えられる。PHENIX 2 次系配管で生じたサーマルストライピングでは、比較的 low 周波数（ 1Hz 程度）の温度変動が、合流部上流側のエルボにより生じた 2 次流れの影響で生じることが解析結果から指摘されている⁷⁾。そこで、テスト部上流側のレイアウトを変えて実験を行い、長周期温度変動への支配因子を調べる。また、枝配管は主配管に対して鉛直方向と水平方向の 2 つの配置が各レイアウトに対して可能である。

<レイアウト 1>

図 2-8 にレイアウト 1 の構成図を示す。二次流れのない状態（混合部上流側にエルボなどが存在しない場合）における、直角に交わる 2 方向からの流れが合流する T 字合流部での枝配管噴流の挙動と温度ゆらぎの基本特性を把握する。

<レイアウト2>

図 2-9 にレイアウト2の構成図を示す。主配管内流れは、上流側整流バッファで整流され、90°エルボを2つ通過して二次流れを形成してテスト部に流入する。二次流れが枝配管噴流の挙動および温度ゆらぎに与える影響について把握する。

<レイアウト3>

図 2-10 にレイアウト3の構成図を示す。主配管内流れは、上流側整流バッファで整流され、90°エルボにより二次流れが発生するが、混合部より上流側に20D（主配管直径の20倍）の助走区間をとり、二次流れを減衰させた場合の枝配管噴流の挙動および温度ゆらぎへの影響を把握する。また、上流側整流バッファとテスト部の間の配管を組み替えることにより助走区間の長さをパラメータとする。

<レイアウト4>

図 2-11 にレイアウト4の構成図を示す。<レイアウト2>と同様にテスト部上流側に90°エルボを2つ配置し、助走区間を20Dとする。助走区間を<レイアウト2>よりも長くすることにより、二次流れが減衰した場合の温度ゆらぎへの影響を把握する。

<レイアウト5>

図 2-12 にレイアウト5の構成図を示す。90°エルボを2つ逆位相で、互いに二次流れを打ち消す方向に設置し、20Dの助走区間による二次流れの減衰の程度と、枝配管噴流の挙動および温度ゆらぎへの影響を把握する。

2. 2 試験項目

1) 配管内流速分布の測定

レーザドップラ流速計 (Laser Doppler Velocimetry; LDV) を用いて、主配管および枝配管内の軸方向流速成分について、混合直前の径方向分布を測定する。枝配管噴流の挙動および温度揺らぎは混合直前の流速分布や二次流れ等によって影響を受けることが指摘されており、流速分布と速度変動の特性を計測することは重要である。

2) 染料注入法による枝配管噴流の挙動

主として流速比を試験パラメータとし、枝配管側の流れに染料としてウラニン（フルオレセインナトリウム、 $C_{20}H_{10}Na_2O_5=376.28$ ）水溶液を混入して、混合部から下流にかけての枝配管噴流の挙動について調べる。また、主配管側および枝配管側流体の各温度をパラメータとし、浮力の影響についても調べる。本試験体系と類似の体型（T字配管合流部）で行われた高橋らの実験[10]（主流 Re 数 16000）では、枝配管噴流の挙動をもとに混合部下流での流れの領域を、成層分離流、偏向噴流、壁面噴流の3領域に分けることが提案されている。そこで、主配管／枝配管流量比を変化させて実験を行い流動形態を分類し、流動形態と主配管壁面での温度変動強度との関係について調べる。

3) 液晶シートによるホット／コールドスポットの把握

主配管内壁に感温液晶シートを貼り付け、壁面温度の変化を可視化する。流速比および温度差を試験パラメータとする。試験項目2)で作成した流動形態マップを基に、主配管壁面での温度変動が主配管構造材にとって最も影響を及ぼすと考えられる流動形態

を明らかにし、枝配管下流域でのホット/コールドスポットの発生位置および挙動について長周期温度変動を含めて調べる。

4) 混合部での流速場の定量評価試験

粒子画像計測法 (Particle Image Velocimetry; PIV) および LDV を用いて主配管内の流速分布を測定し、時間平均流速分布および流速変動強度分布等について調べる。

5) 混合部温度分布測定試験

熱電対計測用試験体を用いて、混合部から下流にかけての温度分布を測定する。温度分布は、熱電対ツリーによる主配管内の冷却材温度分布および主配管内面の壁面温度である。

以上の1) から5) の試験項目を図 2-8 から図 2-12 に示す各レイアウトに対して実施し、二次流れの強さと枝配管側噴流挙動の変化、および温度変動分布の変化について調べる。本報告では、レイアウト1について項目1) および2) の試験を実施した結果を示す。

表1 ループ仕様

	主配管	枝配管
配管内径[mm]	150	50
最大流量[m ³ /h]	240	18
断面平均最大流速[m/s]	3.5	2.4
Re 数 (25℃)	$<63.2 \times 10^4$	$<14.2 \times 10^4$
最高使用温度[℃]*	50	
最高使用圧力[MPa]	0.3	
ヒータ出力[kW]	200 (5×40[kW])	
冷却器容量[kW]	500	

*設計最高温度は 60[℃]

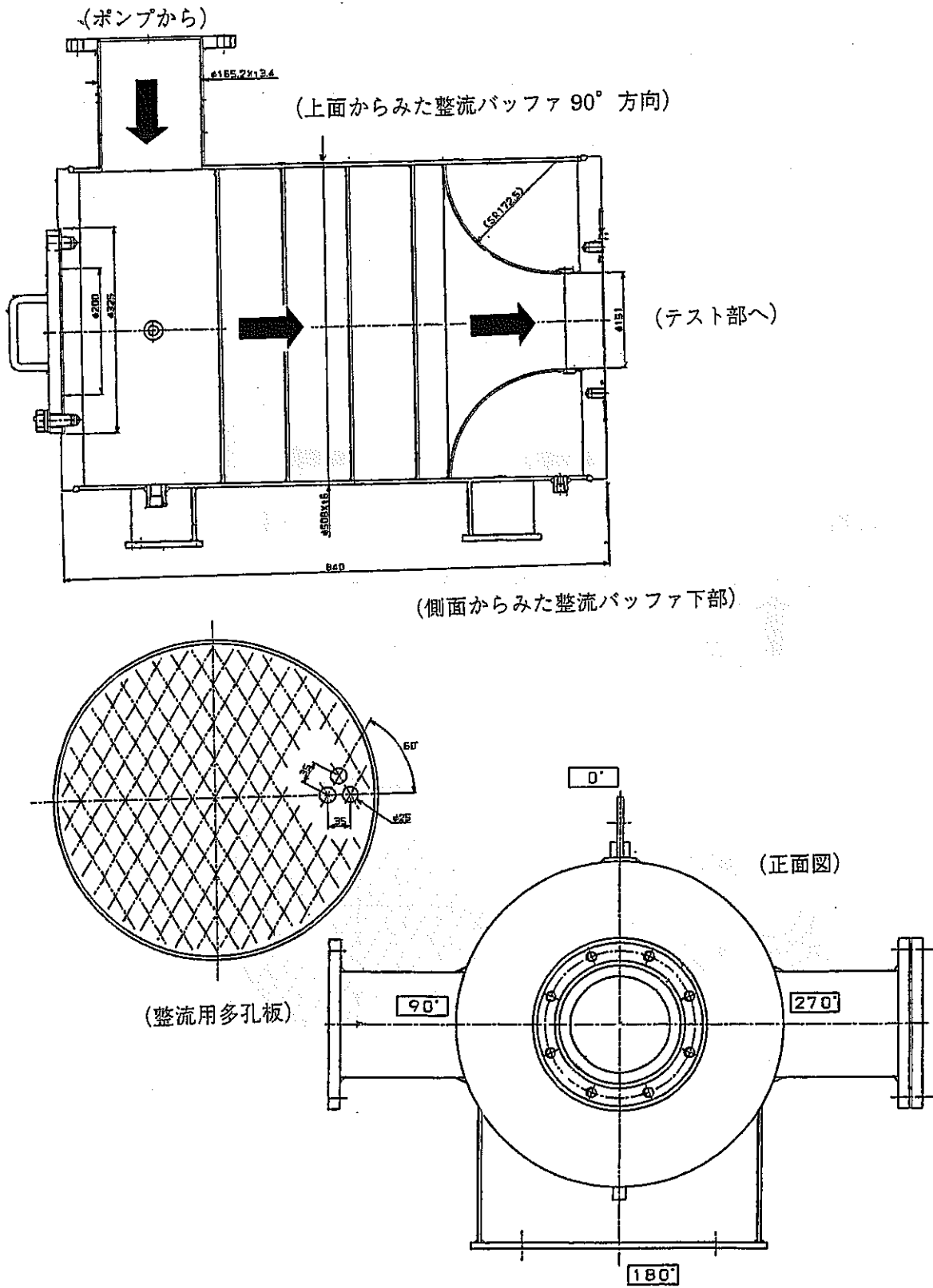


図 2-1 主配管上流側整流バッファ構造図

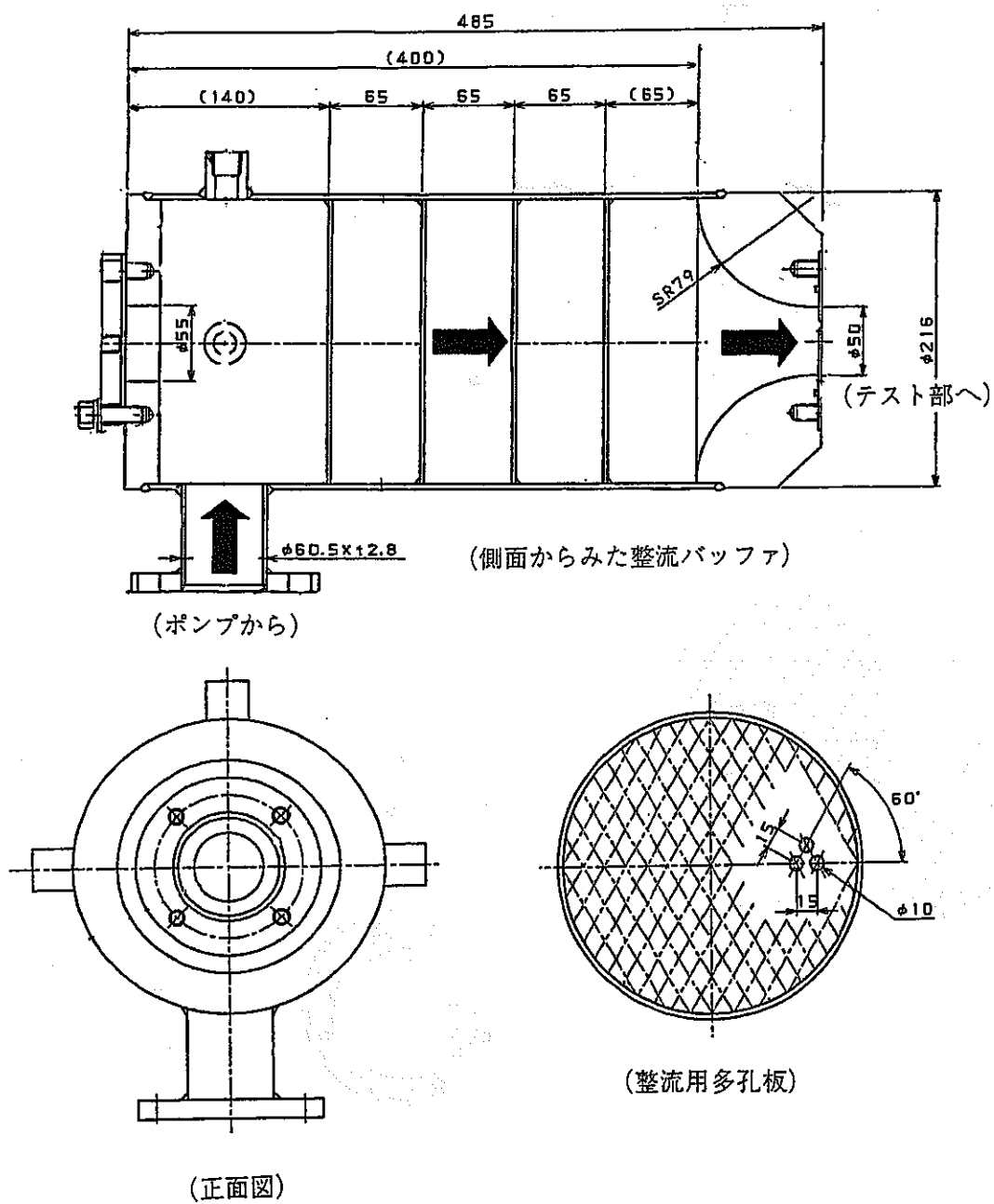


図 2-2 枝配管上流側整流バッファ構造図

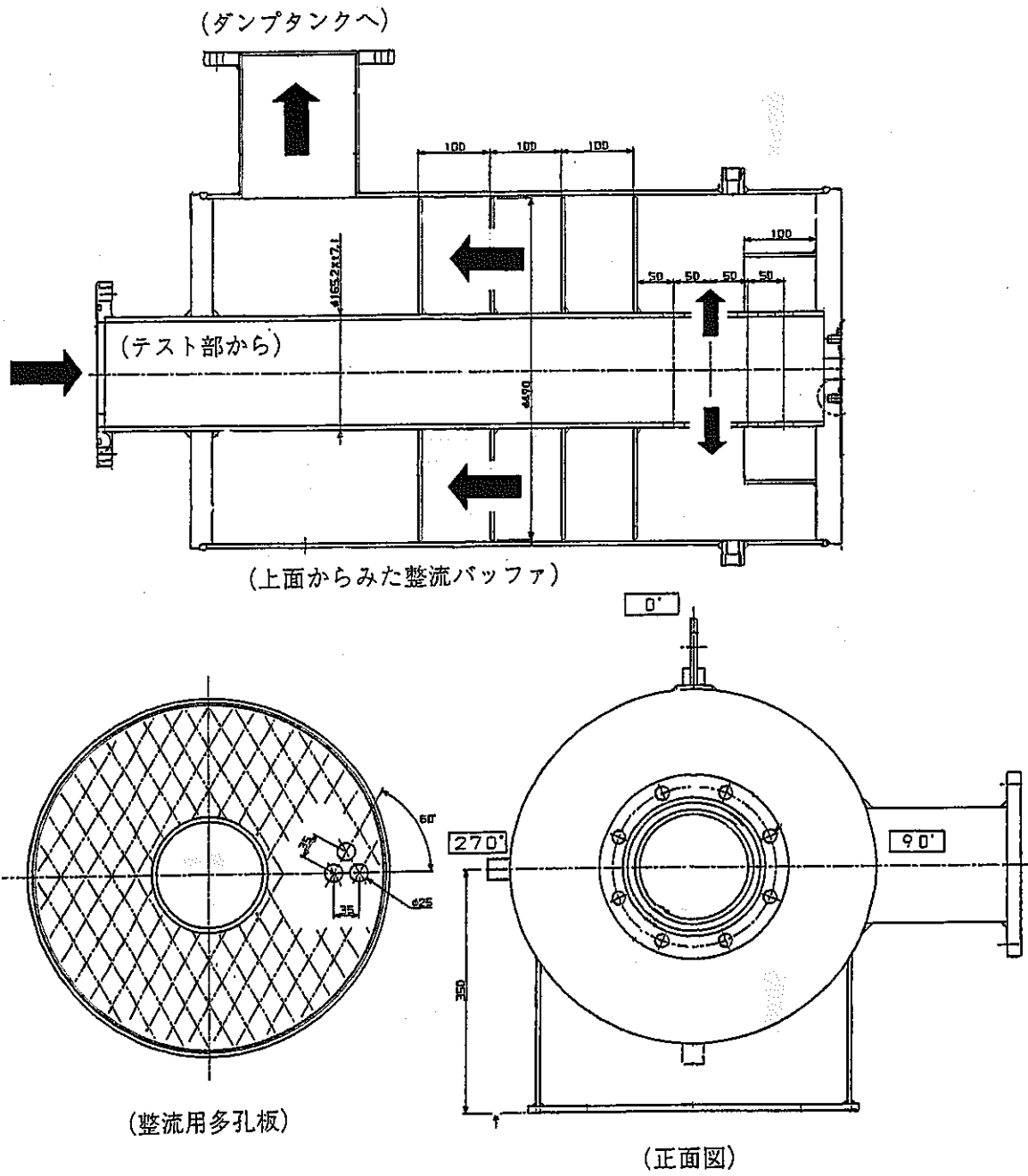


図 2-3 テスト部下流側整流バッファ構造図

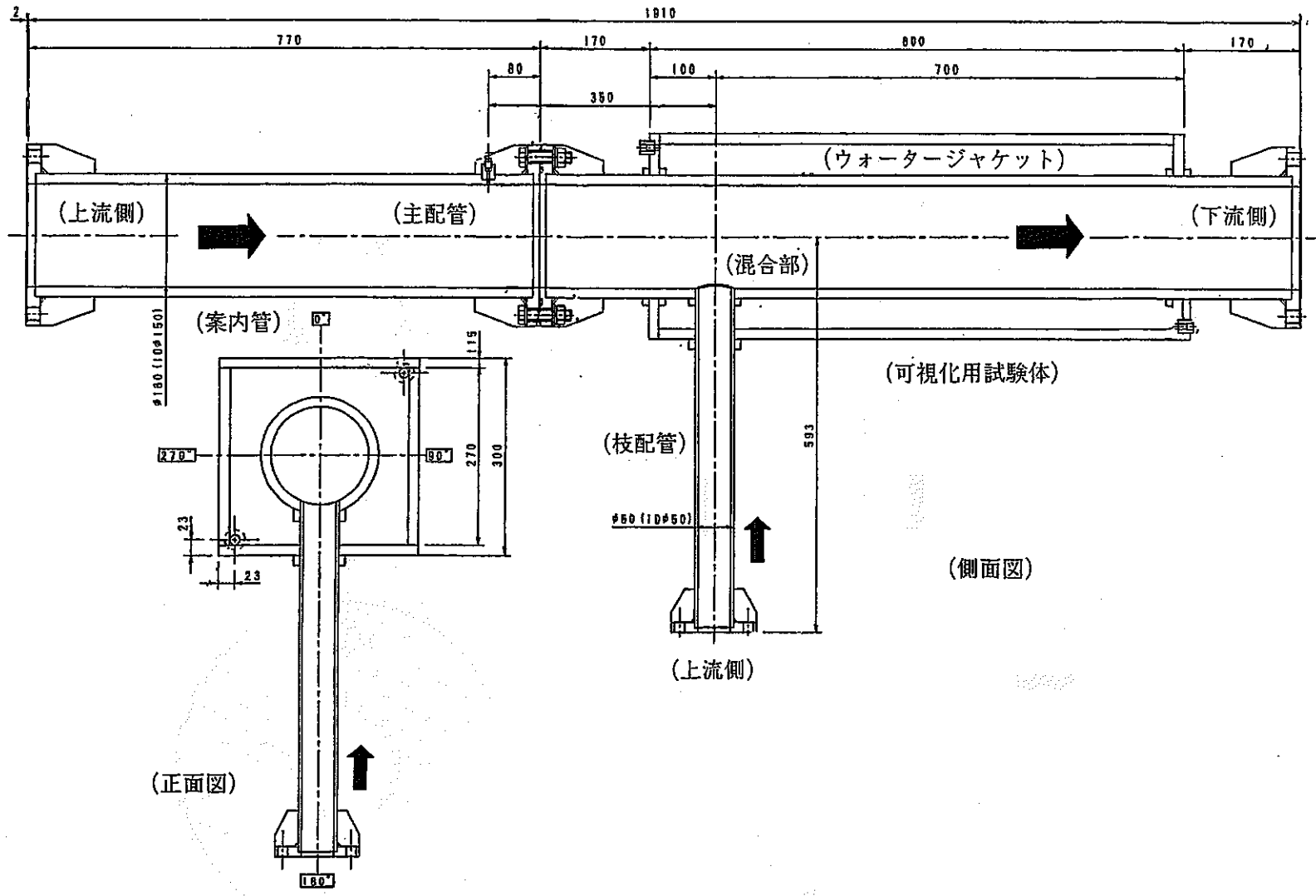


図 2-4 可視化試験用試験体概略図

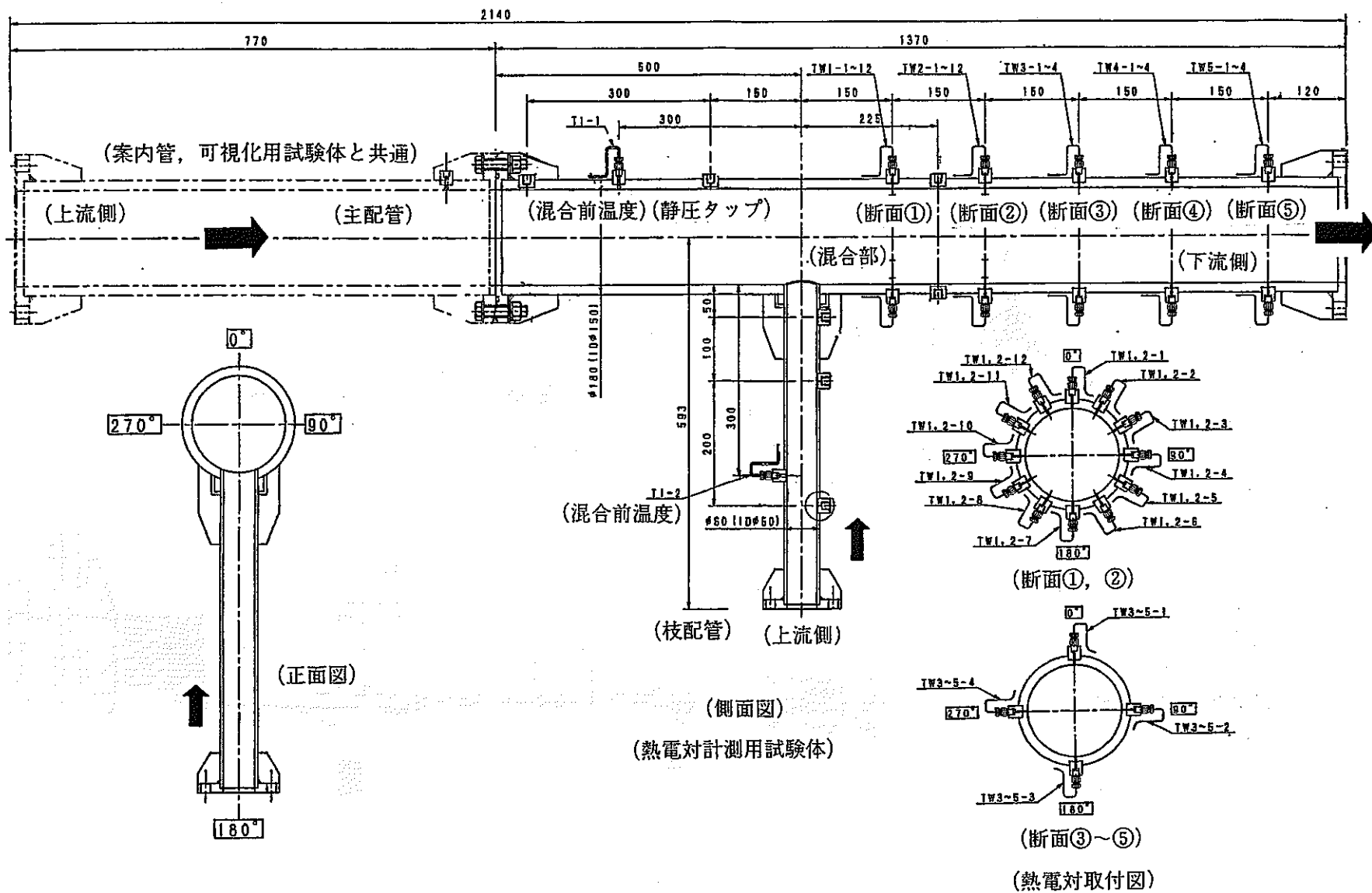
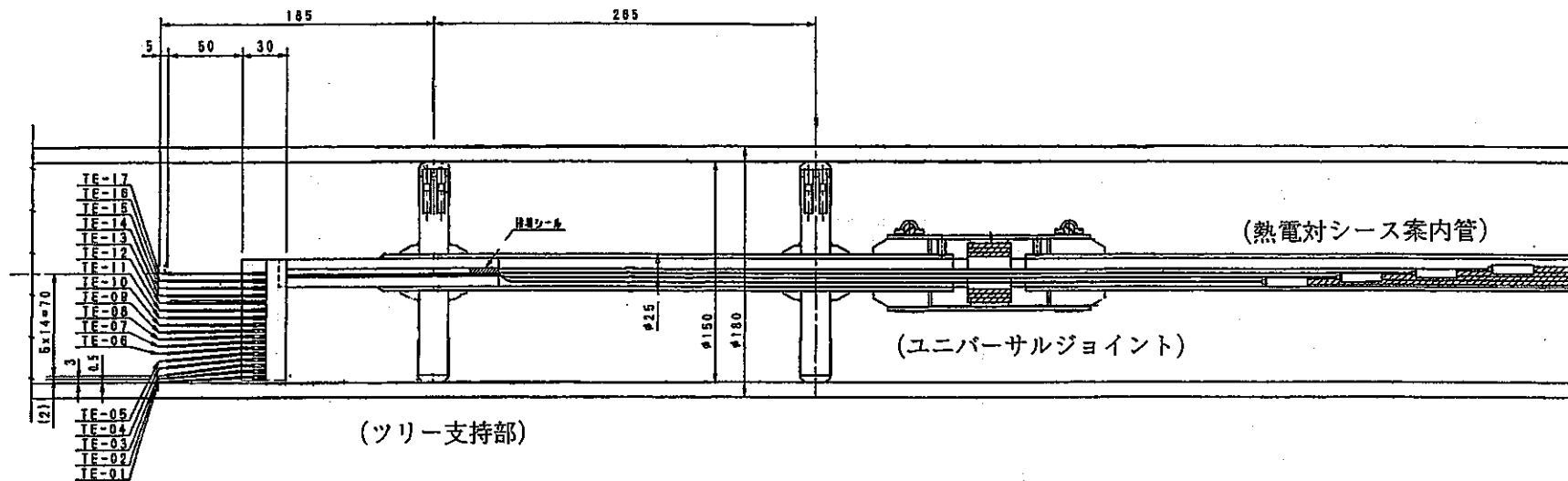
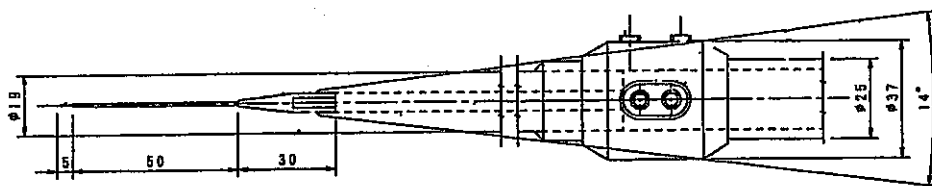


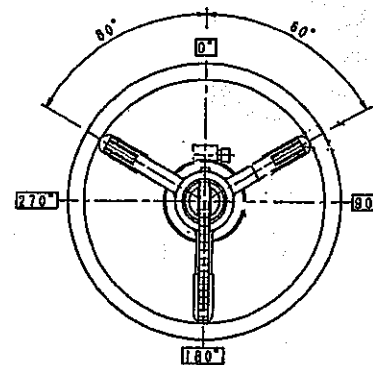
図 2-5 熱電対計測用試験体概略図



(側面図)



(熱電対ツリー先端部)



(正面図)

図 2-6 熱電対ツリー構造図

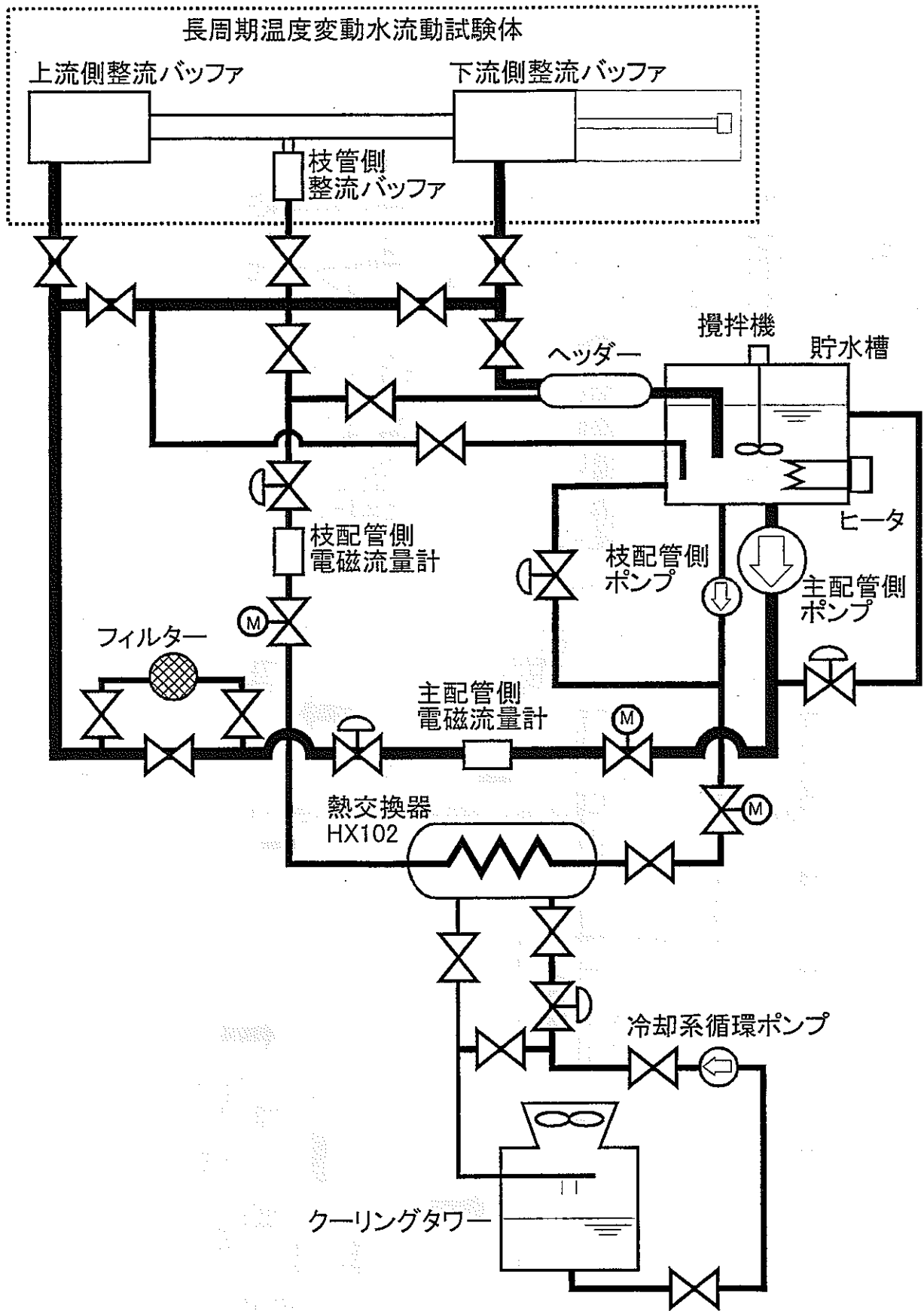


図 2-7 ループ構成概略図

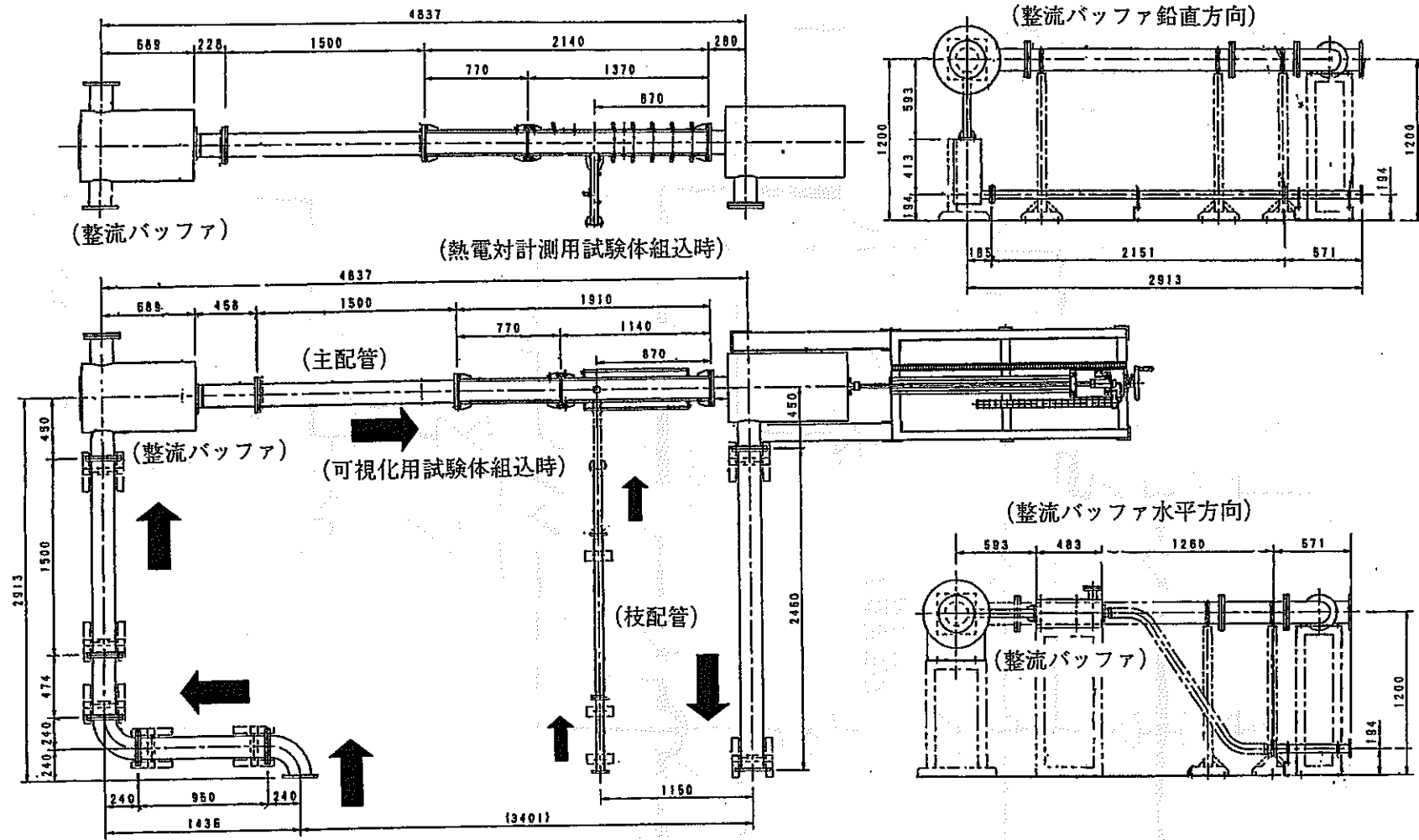


図 2-8 配管レイアウト 1 構成図

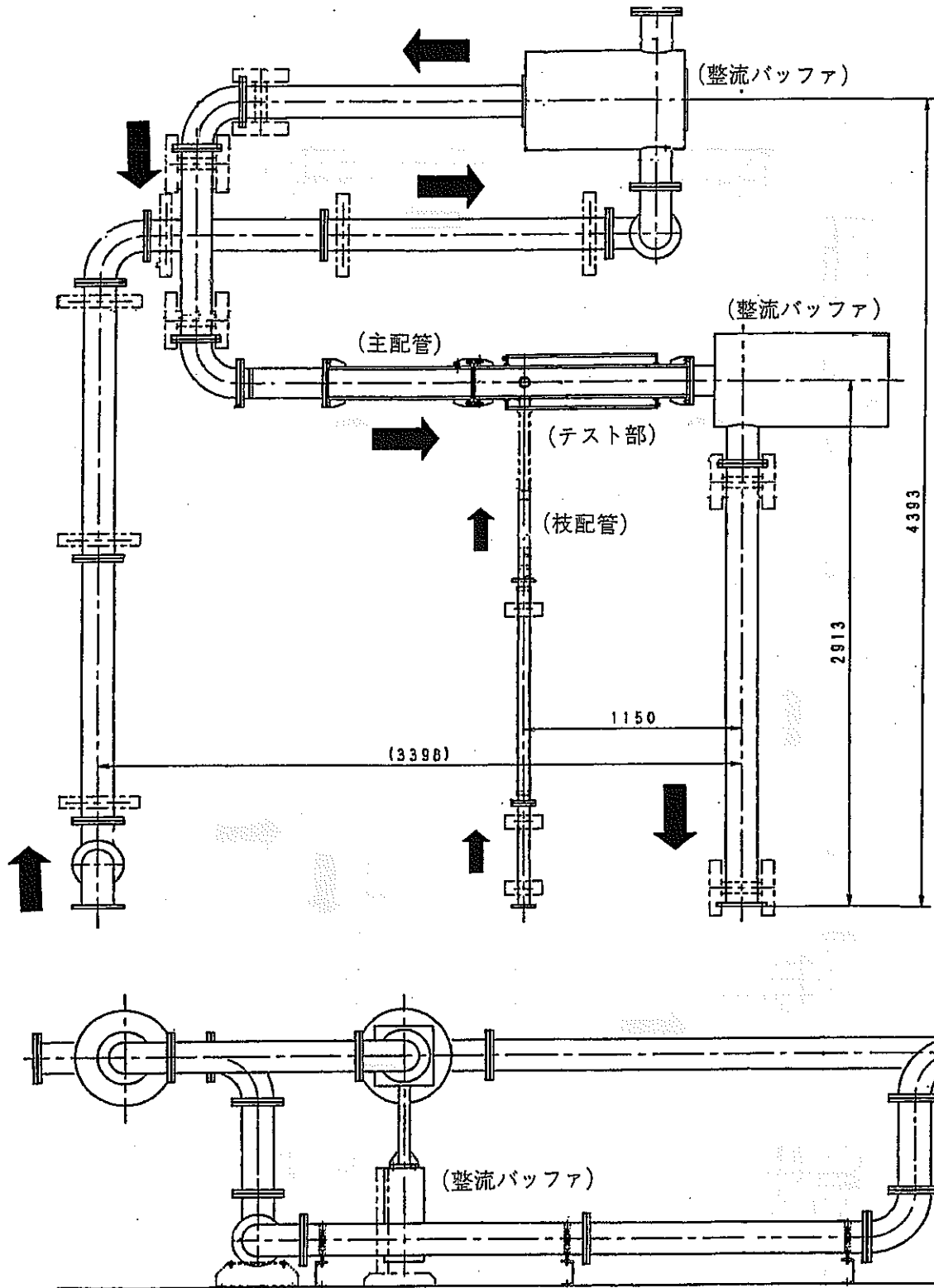


図 2-9 配管レイアウト 2 構成図

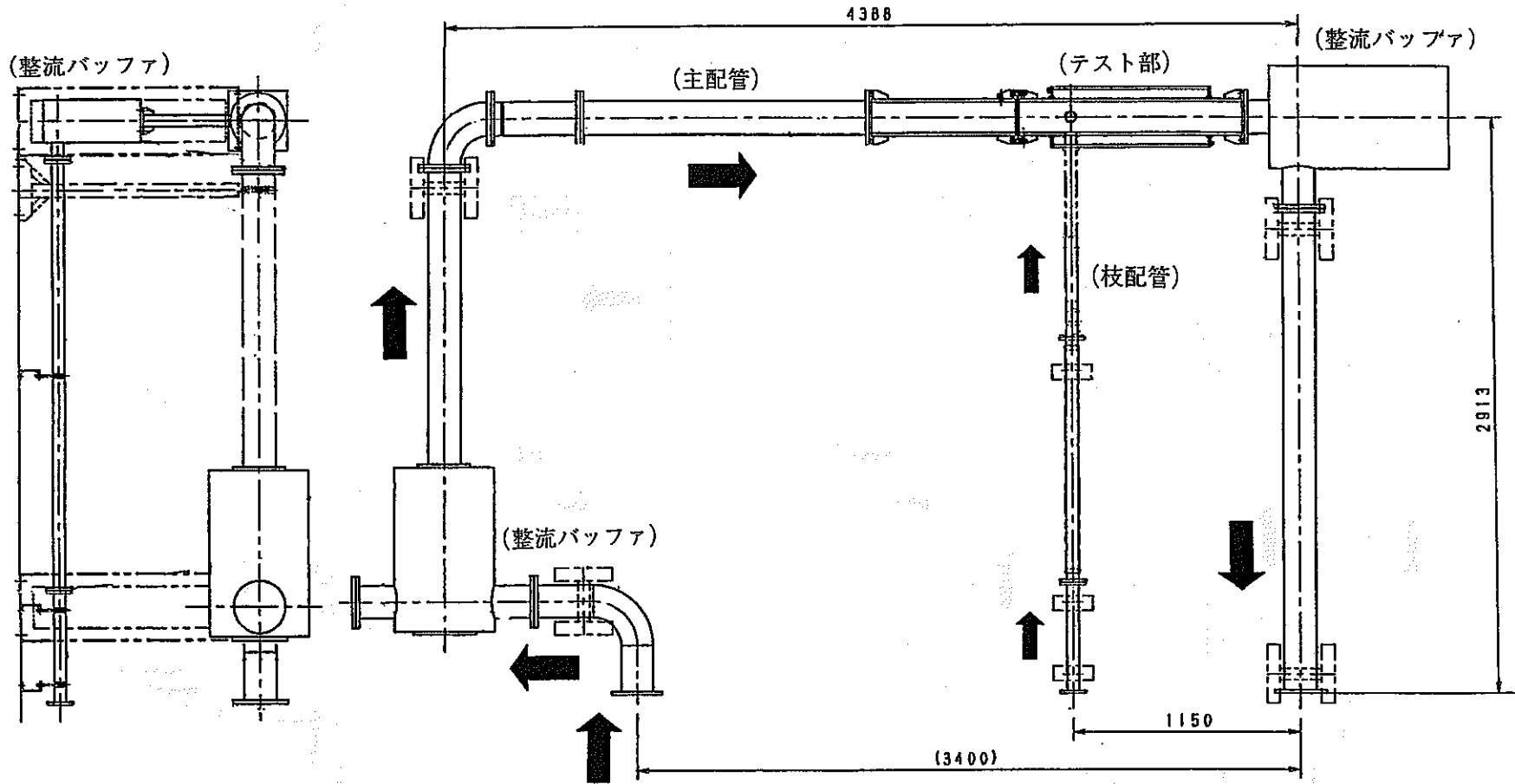


図 2-10 配管レイアウト 3 構成図

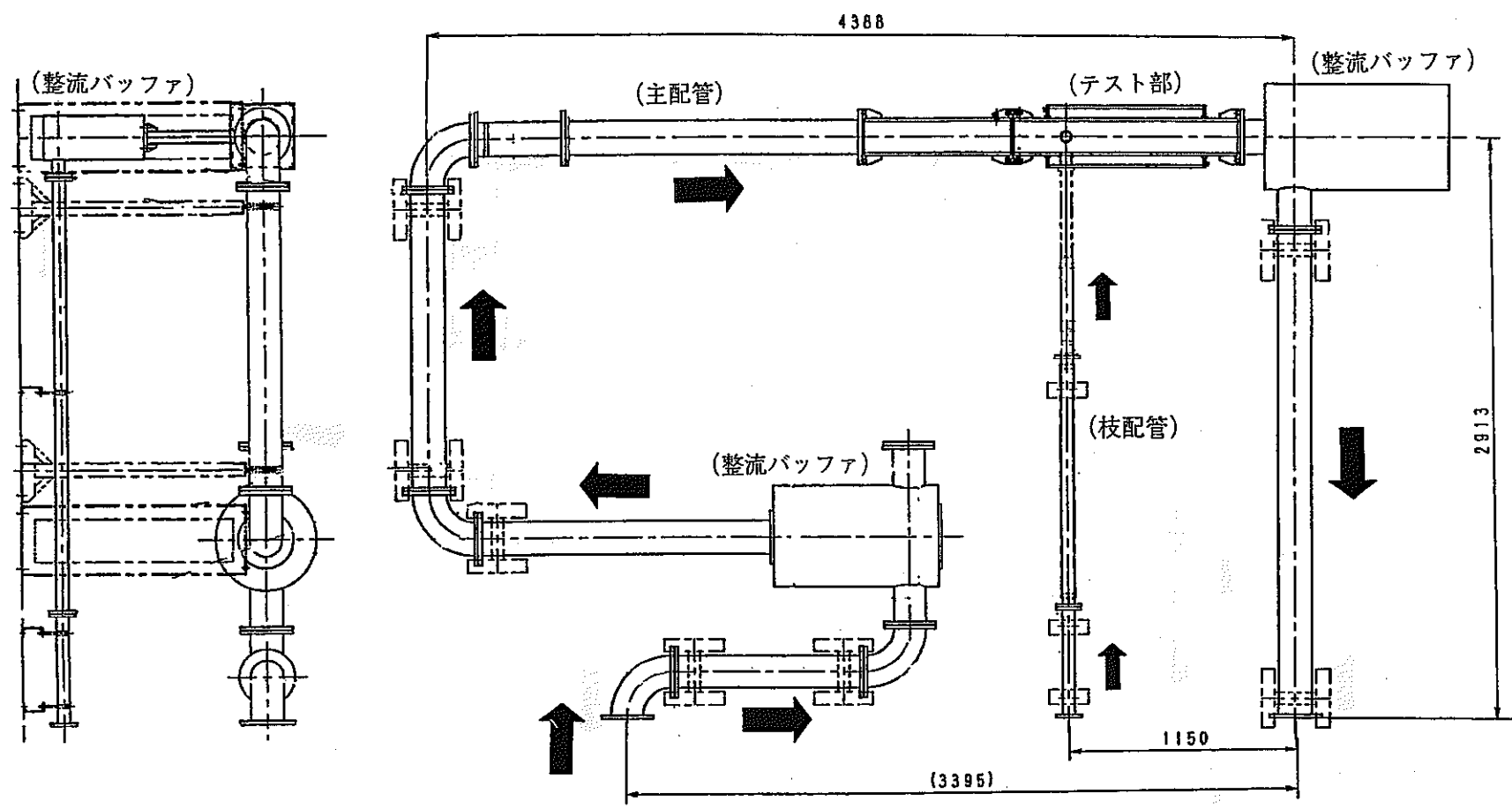


図 2-11 配管レイアウト 4 構成図

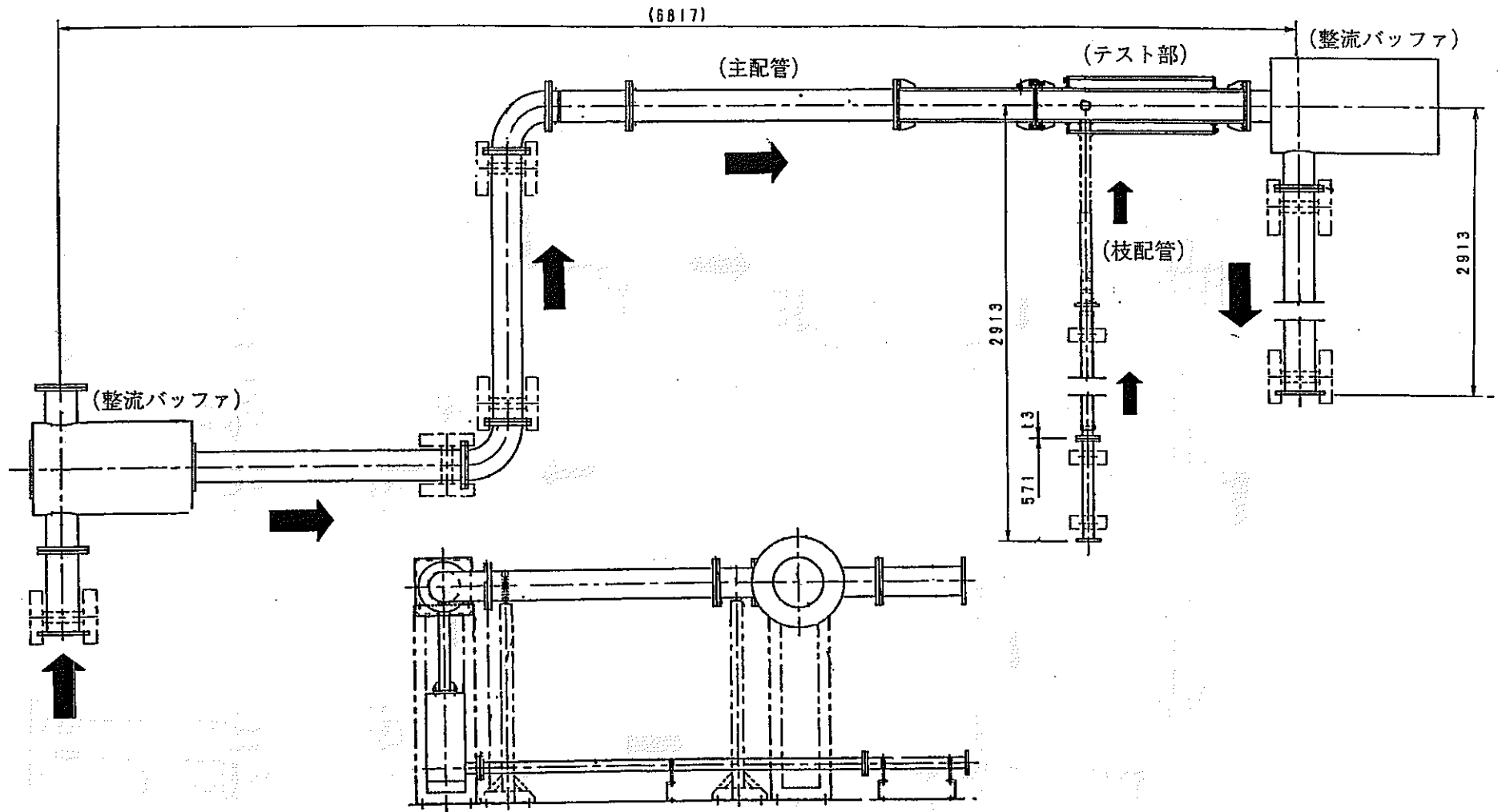


図 2-12 配管レイアウト 5 構成図

第3章 可視化試験

T字配管合流部での構造健全性に影響する合流部下流での冷却材の温度揺らぎは、枝配管から主配管へ流出する噴流の挙動（流動形態）に大きく影響されると考えられる。枝配管噴流の挙動を調べることにより、構造健全性に影響を及ぼすと考えられるホット/コールドスポットの発生部位とその程度についての情報を収集し、T字配管合流部での構造健全性評価に反映する。ここでは、主配管と枝配管との断面平均流速比および温度差を試験パラメータとし、染料注入法により枝配管噴流の挙動について調べた。

3. 1 配管レイアウト

本試験では、配管合流部における枝配管噴流挙動の基本的な特性を把握するため、配管レイアウトはエルボ等による2次流れの影響を排除したくレイアウト1>とし、枝配管内の流れは鉛直上向きとする（図 2-8 参照）。作動流体（水）は上流側整流バッファで整流され、直管で構成される助走区間（20D）を経て試験体へ流入する。

3. 2 試験条件

配管合流部における試験パラメータとしては、主配管側と枝配管側との（1）流体温度差、（2）断面平均流速比、（3）配管内径比が挙げられる。しかし、本試験では内径比が（主配管側内径 150[mm]）／（枝配管側内径 50[mm]）=3に固定されているため、（1）流体温度差および（2）断面平均流速比を試験パラメータとした。表2に流量およびテスト部入口での流体温度等を計測するための計装点リストを示し、表3に試験条件の一覧を示す。本試験体がアクリル樹脂製であることから、試験体保護の観点により高温側（主配管側）が約50℃に制限される。低温側（枝配管）は冷却系の空気冷却器にて制御するため、最大温度差として約25℃程度が限界となる（図 2-7 参照）。枝配管流量を一定（配管内断面平均流速 0.5[m/s]）とし、温度差 0℃の等温条件とした場合と温度差 15℃（主配管 40℃、枝配管 25℃）とした場合について比較し、浮力ならびに粘性の影響について調べた。

3. 3 試験方法

3. 3. 1 LDVによる配管内流速分布の測定

合流部下流の枝配管噴流の挙動は、混合前の主配管および枝配管内の流速分布が影響すると考えられるため、可視化試験前にLDVを用いて配管内流速分布の測定を行った。可視化試験時の代表的な流量条件（配管断面平均流速）について、主配管および枝配管内の流速分布を測定した。測定時には、合流の影響を排除するため測定対象とする配管側にのみに通水して測定した場合と、主配管および枝配管の双方に流体を流して混合が生じている状態で、合流する直前の配管内流速分布を調べた。LDVシステムは、Arレーザを光源としGreen（波長 514.5nm）とBlue（波長 488nm）の2色ビームを用いた

2次元計測が可能である。しかし、本試験では、円管内の流速分布を測るためビームの屈折などの影響を考慮して、配管中心軸を通り流れ方向に垂直なトラバースライン上で1次元（軸方向の流速）計測を行った。図 3-1 に LDV 測定位置について示す。

3. 3. 2 染料注入法による枝配管噴流の挙動

図 3-2 に可視化試験で用いたカメラ等の設置位置を示す。Ar レーザビーム（出力約 1[W]）をシート状に広げたものを光源として流れの断面を撮影した。デジタルビデオカメラ（SONY DCR-VX1000）を用い、シャッタースピード 1/250[s] に固定して撮影した。主流側／枝配管側流速および温度を設定し定常状態を保持する。染料としてトレーサタンク内に貯蔵してあるウラニン粉末（フルオレセインナトリウム、 $C_{20}H_{10}Na_2O_5=376.28$ ）を枝配管側バッファに注入して可視化を行った。試験実施中は、図 3-3 に示すようにテスト部を暗幕で囲い、外部からの入射光を遮断した。また、プロセス量として表 2 に示す計装点について、サンプリング間隔 0.1[s]（10[Hz]）で 2 分間収録した。格子を書いたシートを主配管軸断面に設置して水を張り、カメラ撮影画像と実位置との比較を行い、配管内の撮影可能な領域について確認した。

本試験では、枝配管噴流の流動形態に着目する。高橋らの研究[10]では、壁面噴流、偏向噴流、衝突噴流に分類できることが提案されている。そこで、本試験体系での枝配管噴流の挙動について各流動形態に分類するとともに、噴流の壁面への付着位置と流動条件との関係、温度差との関係について調べる。

3. 4 試験結果

3. 4. 1 配管内流速分布

図 3-4 及び図 3-5 に LDV による流速分布測定結果の一例を示す。試験結果は、算術平均値 X から標準偏差 σ の 2 倍の範囲内のデータ ($-2\sigma < X < +2\sigma$) を有効データとし、平均処理した時間平均（算術平均）値を示している。図中に示す Data-rate は、有効データ数をデータ収録時間で割ったもので平均サンプリング周波数に相当する。Success-rate は有効データ数を全測定データ数で割ったもので、値が 1 に近いほど測定データの信頼性は高い。

$$\langle \text{Data-rate} \rangle = (\text{有効データ数}) / (\text{データ収録時間})$$

$$\langle \text{Success-rate} \rangle = (\text{有効データ数}) / (\text{全測定データ数})$$

図 3-4 は主配管内流速分布であり、断面平均流速 $U=1.0[\text{m/s}]$ ($Re=15.9 \times 10^4$) の場合である。流速分布は発達した乱流の流速分布である 1/7 乗則とは一致せず、断面内で平坦な分布となっている。図中の誤差棒は各点での標準偏差を示しており、有効データの標準偏差は平均値の約 10% 以下であった。Data-rate が 400 程度、Success-rate は 1 に近い値を示している。中心軸 ($r/R=0$) からレーザプローブに近い正方向 ($r/R>0$) では Data-rate が高い値（約 400）となっているが、中心軸に対しレーザプローブの反対側では低い値となっている。中心部 ($r/R < \pm 0.5$) では流速分布の対称性が見られるが、

壁面近傍 ($|r/R| > 0.5$) では対称性が崩れている。 $r/R = -1.0$ 近傍の点では、Success-rate は 1 に近い値を示しているが、流速値はゼロとなっており、これは測定時の信号波形から判断してノイズを信号処理したと考えられる。

図 3-5 は枝配管内流速分布であり、断面平均流速 $W = 1.0$ [m/s] ($Re = 5.4 \times 10^4$) の場合である。レーザプローブから遠い領域 ($r/R > 0$) での標準偏差の値は、レーザプローブに近い領域での値に比べて大きく、Data-rate は低下していることが分かる。流速分布としては、管壁付近での流速が中心部に比べて増加しているが、ほぼ平坦な分布と考えられる。管壁近傍 ($|r/R| > 0.8$) では、測定時の信号波形から測定不可能と判断した。

流量条件から求められる断面平均流速で無次元化した流速分布は、表 4 に示す流量条件の範囲では変化がなかった。また、中心軸に対し、レーザプローブの反対側で Data-rate が低下し、流速分布の対称性が崩れるという傾向も共通していた。測定時にオシロスコープで受光信号を観察した結果、プローブから遠い領域ではノイズが大きく、粒子の散乱光であるドップラ信号の振幅は弱くなっていた。この原因として、アクリル管内面でのレーザビームの反射 (ノイズの増加) や、肉厚アクリル配管を使用しているためレーザ光強度が減衰し S/N 比が低下したこと等が考えられる。また、測定で用いた LDV システムが粒子の後方散乱光を受光するタイプであることも原因として考えられる。

本試験範囲 ($U = 0.2 \sim 3.0$ [m/s]、 $W = 0.5 \sim 2.0$ [m/s]) では流量条件による違いはなく、1/7 乗則のような発達した乱流での速度分布とはなっていないが、混合直前の流速分布は主配管および枝配管共にほぼ平坦な流速分布となっていることが分かった。

3. 4. 2 枝配管噴流挙動の可視化

主配管に流入する枝配管噴流の挙動は、主配管および枝配管の断面平均流速比 (流量比)、流速分布 (二次流れ)、温度差および内径比等に関係すると考えられる。枝配管噴流挙動の基本的な特性を調べるため、まず、主配管内と枝配管内との流体温度差を零 (等温条件) とし、二次流れの生じない体系で、断面平均流速をパラメータとした試験を実施した。

高橋らは空気を作動流体とする試験により、混合部下流での枝配管噴流の挙動を成層分離流、偏向噴流、壁面噴流の 3 つの流動形態に分類している¹⁰。ここで、成層分離流とは枝配管が接続する側の主配管壁面に沿って噴流が付着して流れる状態、偏向噴流とは枝配管噴流が主配管中心部を主に流れる状態、壁面噴流は枝配管とは正反対の壁面に衝突しこれに沿って流れる状態をいう。高橋らの実験では枝配管が主配管から見て鉛直方向上側 (重力の方向に流れる) に取付られており、本試験体系では枝配管の位置を鉛直方向下側 (重力に逆らって主配管に流入する) としている。本試験体系では可視化試験の結果から流れの状態を直感的にイメージし易いように、枝配管噴流が主配管中心を通り反対側の壁面に衝突して下流に流れていく状態を衝突噴流 Region-A (高橋らの分類では壁面噴流)、枝配管噴流が主配管中心部を主に流れる状態を偏向噴流 Region-B、枝配管側の主配管壁面に沿って流れる状態を壁面噴流 Region-D (高橋らの分類では成層分離流) とした。その典型的な流れの状態を図 3-6 から図 3-9 に示す。ただし、目視観察による分類では、衝突噴流 (図 3-6) と偏向噴流 (図 3-7) との境界は比較的判断し易いが、他の流動形態の境界は明確でなく、判断には主観的要素が大きく影響する。特に、偏向噴流 (図 3-7) と壁面噴流 (図 3-9) との境界は極めて不明確である。注意深く観察した結果、偏向噴流 (図 3-7) と壁面噴流 (図 3-9) との間に、もう一つの流動形態

が存在することが分かった（図 3-8 参照）。偏向噴流は枝配管噴流の中心部がほぼ主配管の中心部を通り、その噴流中心部と枝配管側の主配管壁面との間に循環渦が形成される。主配管流量の増加に従い、枝配管噴流が壁面に近づき循環渦領域が小さくなって、壁面噴流へと変化する。このとき枝配管噴流の下流に生じる循環渦の下流端で、枝配管噴流が壁面に付着して流れる状態、すなわち、偏向噴流と壁面噴流との遷移状態が存在していることが分かり、この流動形態を新たに再付着噴流（図 3-8）と分類した。この状態では、枝配管噴流の付着点近傍での挙動が不安定となり、主配管壁面の温度変動に大きく影響すると考えられる。そこで、可視化試験結果について、衝突噴流（Region-A, 図 3-6）、偏向噴流（Region-B, 図 3-7）、再付着噴流（Region-C, 図 3-8）、壁面噴流（Region-D, 図 3-9）の 4 つの流動形態について分類した。

図 3-10 に等温条件での可視化試験結果を示す。横軸は主配管側の Re 数 (Re_{main})、縦軸は枝配管側の Re 数 (Re_{branch}) である。この結果から、主配管側および枝配管側の Re 数により枝配管噴流の流動形態を分類することができる。

$$Re_{main} = \frac{\rho_{main} D_{main} \cdot U}{\mu_{main}}, \quad Re_{branch} = \frac{\rho_{branch} D_{branch} \cdot W}{\mu_{branch}}$$

図 3-11 に主配管側流体温度を 40[°C]、枝配管側流体温度を 25[°C]に設定し、温度差を 15°Cとして行った試験結果を、等温条件での結果と比較して示す。横軸は主配管側断面平均流速 U と枝配管側断面平均流速 W との比 (U/W) である。縦軸は主配管側流体温度 T_{main} と枝配管側流体温度 T_{branch} の差 dT である。非等温条件と等温条件とでは、流動形態の遷移に大きな変化は見られない。目視観察では非等温条件の方が、主配管側流速の増加に伴う流動形態の遷移が、等温条件に比べて若干遅れる（遷移時の U/W の値が大きくなる）傾向がある。

図 3-12 に運動量で整理した流動形態の遷移図を示す。横軸は主配管側の運動量 M_{main}^* 、縦軸は枝配管側の運動量 M_{branch} である。次の式により、主配管側運動量 M_{main}^* および枝配管側運動量 M_{branch} を求めた。

$$M_R = \frac{M_{main}^*}{M_{branch}} = \frac{\rho_{main} U^2 \cdot (D_{main} \times D_{branch})}{\rho_{branch} W^2 \cdot S_{branch}}$$

$$S_{branch} = \pi \cdot \left(\frac{D_{branch}}{2} \right)^2$$

ここで、 M_R は主配管と枝配管の運動量比、 S_{branch} は枝配管断面積である。主配管側運動量を求める際には、主配管流れが枝配管噴流に作用する面積を考慮して、主配管断面積ではなく主配管の直径 D_{main} と枝配管の直径 D_{branch} の積を用いた。この面積の決め方については、本試験では配管口径が一定であることから暫定的な定義である。

Re 数による整理では、主配管側流体温度が約 25 度から 40 度に上昇した場合、粘性が低下し主配管側 Re 数が増加することから、非等温条件と等温条件の結果で噴流の流動形態の境界に差異を生じる。図 3-11 に示す流速比 (U/W) をパラメータとした整理および目視観察から、温度差による影響は小さいが多少なりとも影響を無視することはできないことが分かった。そこで、流動形態、つまり、枝配管噴流の中心軸の傾きを決定しているのは、主配管流れと枝配管噴流の衝突による力（運動量）のバランスであると考えた。粘性の効果をいれた Re 数ではなく、温度差（密度比）、流速比および口径

比（断面積）の影響を加味できる主配管と枝配管の運動量で整理した。一方、粘性の効果は、主配管流れと枝配管噴流の界面でせん断により生じる擾乱の大きさに影響し、やがて、混合部下流での渦の大きさおよび温度ゆらぎの程度に関係すると考えられる。

図 3-12 から示すように主配管および枝配管の運動量により整理すると、温度差の有無に関わらず統一して、4つの流動形態に分類できることが分かった。

以下に図 3-12 から求めた各流動形態の運動量比 M_R の範囲について示す。

(衝突噴流)

$$M_R < 0.35$$

(偏向噴流)

$$0.35 < M_R < 1.35$$

(再付着噴流)

$$1.35 < M_R < 4.0$$

(壁面噴流)

$$M_R > 4.0$$

$$M_R = \frac{M_{main}^*}{M_{branch}} = \frac{\rho_{main} U^2 \cdot (D_{main} \times D_{branch})}{\rho_{branch} W^2 \cdot S_{branch}}$$

表2 計装点リスト

DL2300 No.5(Master)				
1ch	1ch	EMF101	主配管流量	
2ch	2ch	EMF104	枝配管流量	
3ch	3ch	TE102	主配管流量計前温度	
4ch	4ch	TE104	枝配管流量計前温度	
5ch	5ch	DP-1	差圧計1 (混合部配管上下差圧)	* 1
6ch	6ch	DP-2	差圧計2 (主配管)	* 1
7ch	7ch	DP-3	差圧計3 (枝配管)	* 1
8ch	8ch	PE-401	主配管入口圧力	
9ch	9ch	PE-402	枝配管入口圧力	
10ch	10ch	TE6-1	混合前流体温度 (主配管)	
11ch	11ch	TE7-1	混合前流体温度 (枝配管)	* 2
12ch	12ch	TE8-1	主配管整流バッファ内温度	
13ch	13ch	TE9-1	枝配管整流バッファ内温度	
14ch	14ch	TE-401	主配管入口温度	
15ch	15ch	TE-402	枝配管入口温度	
16ch	16ch	TE-403	出口配管温度	

* 1 圧力については可視化試験では収録しない。

* 2 可視化用試験体では混合前流体温度 (枝配管) を計測できない。

表 3-1 可視化試験条件一覧 (1/4)
(等温条件, 枝配管流速: 1.0[m/s])

Test No.	Flow Region	主配管			枝配管		
		断面平均流速 U	Re 数	温度 [°C]	断面平均流速 W	Re 数	温度 [°C]
1	1.01	1.00	16.15	23.34	1.00	5.37	23.48
2	0.47	0.47	7.66	23.43	1.00	5.40	23.56
3	0.16	0.16	2.63	23.89	1.00	5.45	24.05
4	0.11	0.11	1.73	23.98	0.99	5.45	24.13
5	0.31	0.31	5.10	24.05	1.00	5.46	24.20
6	0.64	0.64	10.45	24.13	0.99	5.46	24.28
7	0.56	0.56	9.14	24.22	0.99	5.47	24.36
8	0.25	0.24	4.03	24.39	1.00	5.50	24.51
9	0.52	0.51	8.46	24.46	0.99	5.49	24.60
10	1.00	1.00	16.62	24.53	1.00	5.56	24.65
11	2.01	2.01	33.35	24.63	1.00	5.55	24.73
41	1.12	1.10	19.54	27.64	0.98	5.83	27.79

表 3-2 可視化試験条件一覧 (2/4)
(等温条件, 枝配管流速: 0.5[m/s])

Test No.	Flow Region	主配管			枝配管		
		断面平均流速 U	Re 数	温度 [°C]	断面平均流速 W	Re 数	温度 [°C]
12	1.99	1.01	16.66	24.32	0.51	2.80	24.38
13	0.93	0.47	7.79	24.40	0.51	2.80	24.45
14	0.47	0.24	3.93	24.52	0.51	2.79	24.58
15	0.20	0.10	1.71	24.59	0.51	2.80	24.65
16	0.32	0.16	2.73	24.95	0.51	2.83	25.02
17	0.62	0.32	5.28	25.00	0.51	2.84	25.10
18	0.56	0.29	4.78	25.07	0.51	2.85	25.15
19	0.25	0.13	2.18	25.15	0.51	2.86	25.22
20	0.11	0.05	0.90	25.19	0.51	2.86	25.31
21	3.99	2.01	34.00	25.50	0.50	2.85	25.60
22	6.09	3.01	51.19	25.72	0.49	2.80	25.75
42	1.09	0.56	9.89	27.83	0.51	3.02	27.91

表 3-3 可視化試験条件一覧 (3/4)
(等温条件, 枝配管流速: 2.0[m/s])

Test No.	Flow Region	主配管			枝配管		
		断面平均流速 U	Re 数	温度 [°C]	断面平均流速 W	Re 数	温度 [°C]
23	0.03	0.05	0.88	26.43	2.00	11.56	26.54
24	0.03	0.05	0.87	25.90	2.00	11.45	26.10
25	0.05	0.11	1.85	25.82	2.00	11.41	25.99
26	0.16	0.33	5.54	25.74	2.00	11.39	25.92
27	0.25	0.50	8.56	25.69	2.00	11.39	25.85
28	0.28	0.56	9.63	26.54	2.00	11.59	26.71
29	0.31	0.63	10.87	26.63	2.00	11.61	26.82
30	0.40	0.80	14.04	27.35	2.00	11.84	27.53
31	0.50	1.01	17.28	26.11	2.00	11.48	26.25
32	0.50	1.01	17.30	26.15	2.00	11.49	26.28
33	0.53	1.05	18.35	26.77	1.99	11.61	26.95
34	0.55	1.10	19.18	26.90	1.99	11.62	26.96
35	0.59	1.17	20.54	27.02	1.99	11.69	27.24
36	0.64	1.27	22.29	27.12	1.99	11.72	27.32
37	1.01	2.00	35.26	27.24	1.99	11.73	27.43
38	1.06	2.12	37.03	26.85	1.99	11.65	27.05
39	1.49	3.00	51.43	26.00	2.01	11.52	26.14
40	1.50	3.00	51.30	25.88	2.01	11.45	25.96

表 3-4 可視化試験条件一覧 (4/4)
(非等温条件: 温度差 15 度, 枝配管流速: 1.0[m/s])

Test No.	Flow Region	主配管			枝配管		
		断面平均流速 U	Re 数	温度 [°C]	断面平均流速 W	Re 数	温度 [°C]
43	0.10	0.10	2.31	39.44	1.01	5.61	24.88
44	0.24	0.24	5.31	39.49	1.01	5.60	24.89
45	0.32	0.32	7.11	39.52	1.01	5.62	24.96
46	0.47	0.47	10.56	39.39	1.01	5.61	24.93
47	0.54	0.55	12.23	39.35	1.01	5.63	24.94
48	0.63	0.64	14.26	39.46	1.01	5.64	25.10
49	0.99	1.00	22.42	39.59	1.01	5.65	25.19
50	1.08	1.10	24.68	39.56	1.02	5.70	25.06
51	1.97	1.99	44.47	39.38	1.01	5.66	25.06

表4 LDV測定条件一覧

Test No. (File No.)	測定個所	流体温度 [°C]	断面平均流速 [m/s] (Re 数)	
			主配管	枝配管
A1 (CSB1)	A	22.5	1.0 (15.9×10^4)	—
A2 (CSB2)		23.0	0.2 (3.2×10^4)	—
A3 (CSB3)		22.7	3.0 (47.5×10^4)	—
B1 (CS04)	B	23.7	—	1.0 (5.4×10^4)
B2 (CS05)		23.8	—	2.0 (10.9×10^4)
B3 (CS06)		24.18	—	0.5 (2.8×10^4)
A4 (CS08)	A	24.0(主) 24.6(枝)	1.0 (16.5×10^4)	1.0 (5.6×10^4)
B4 (CS09)	B	24.1(主) 24.6(枝)	1.0 (16.5×10^4)	1.0 (5.6×10^4)
C (CS10)	C	24.4	1.0 (16.5×10^4)	—

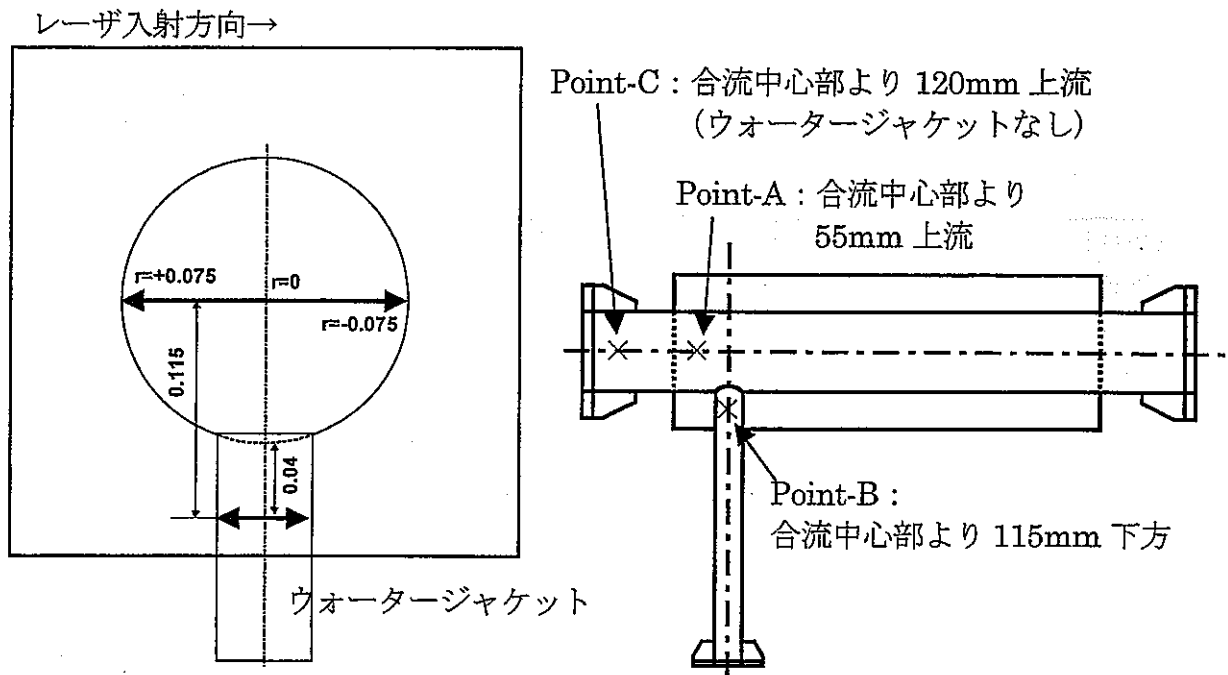


図 3-1 LDV による流速分布測定位置
 主配管内流れ方向：→ (図中左から右)
 枝配管内流れ方向：↑ (図中下から上)

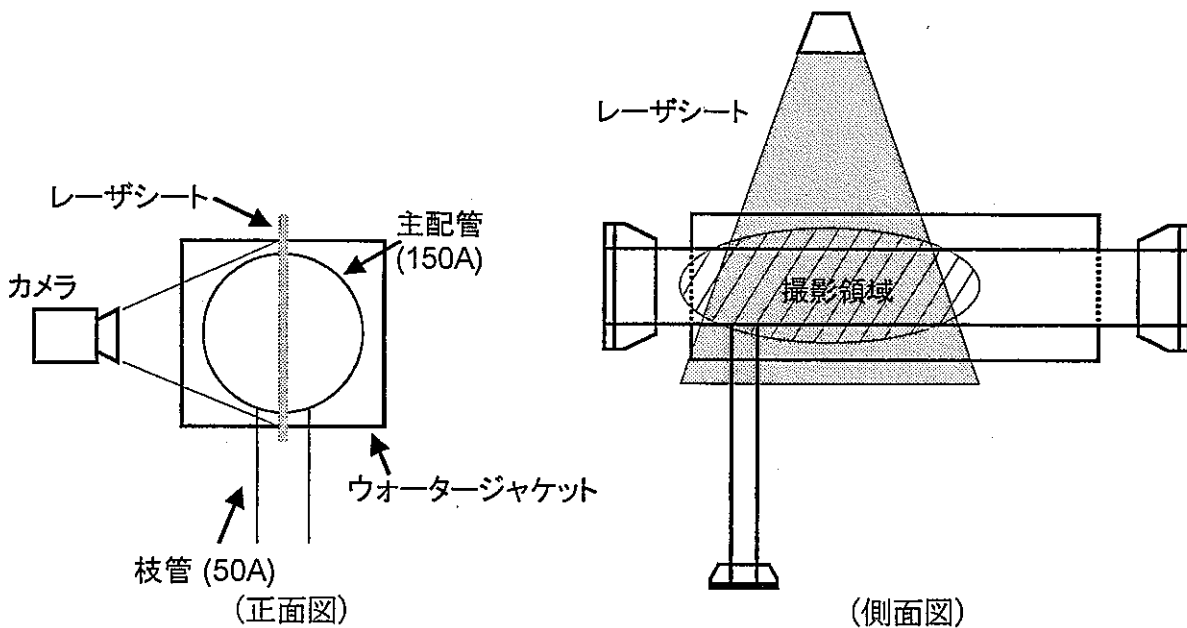


図 3-2 染料注入法による撮影位置

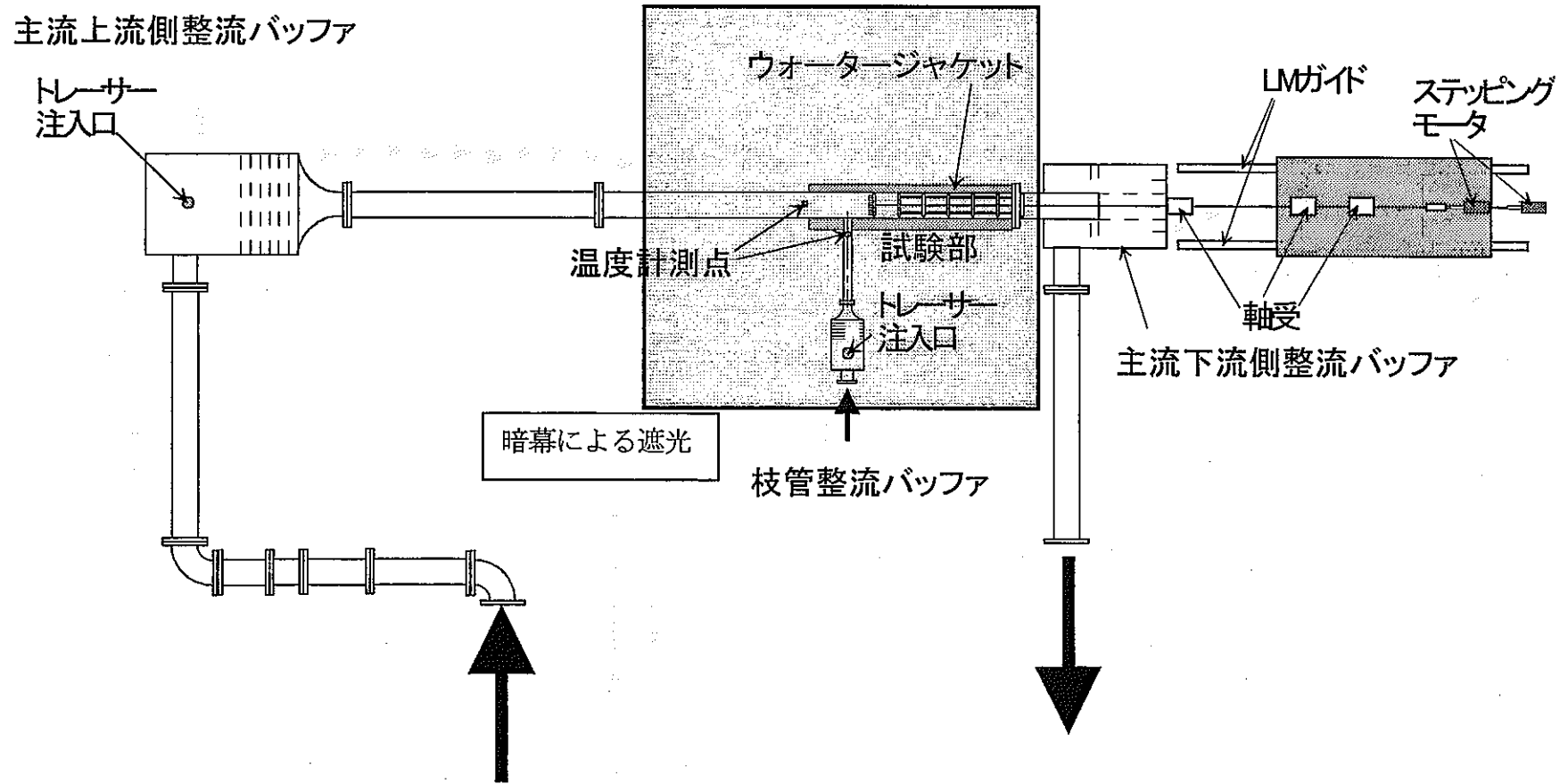
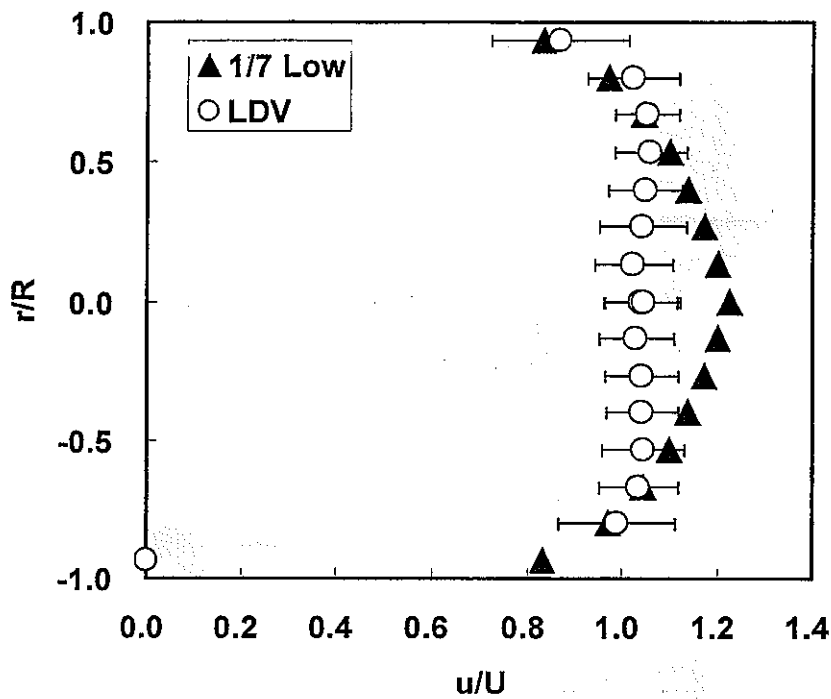
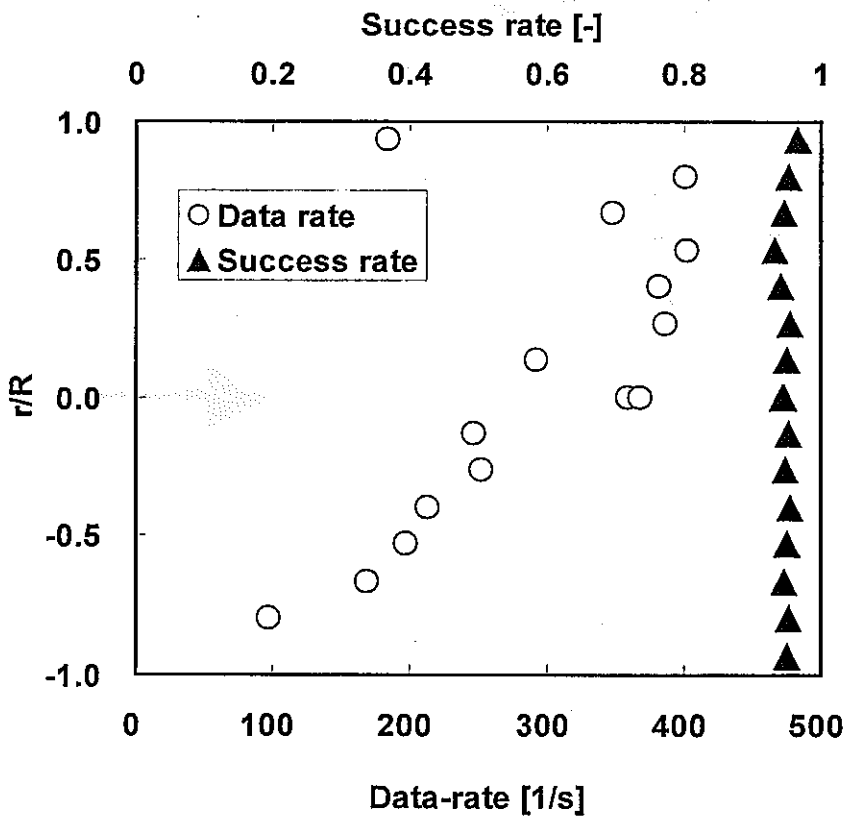


図 3-3 可視化試験配管レイアウト図
<レイアウト1>

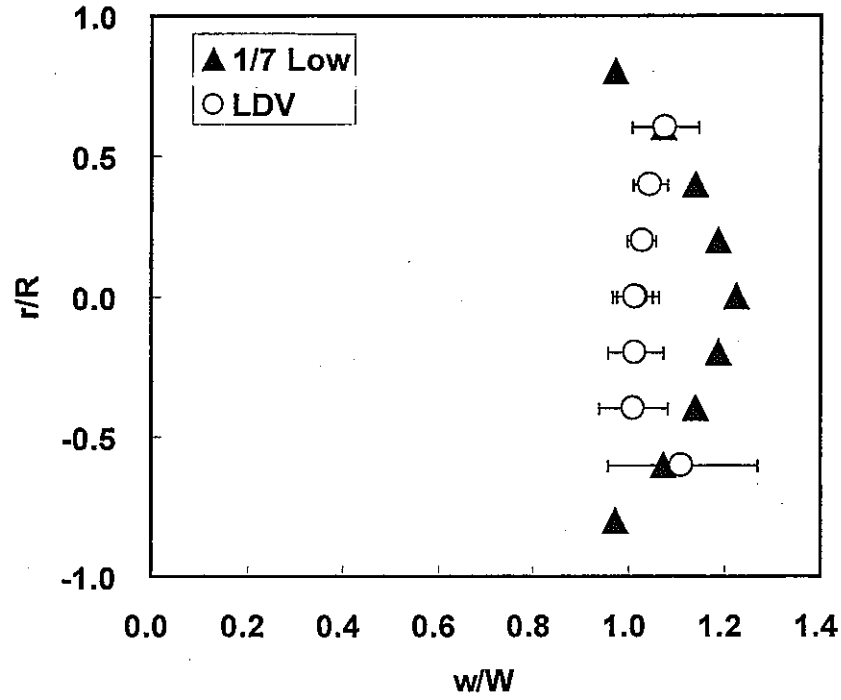


(1) 配管内流速分布

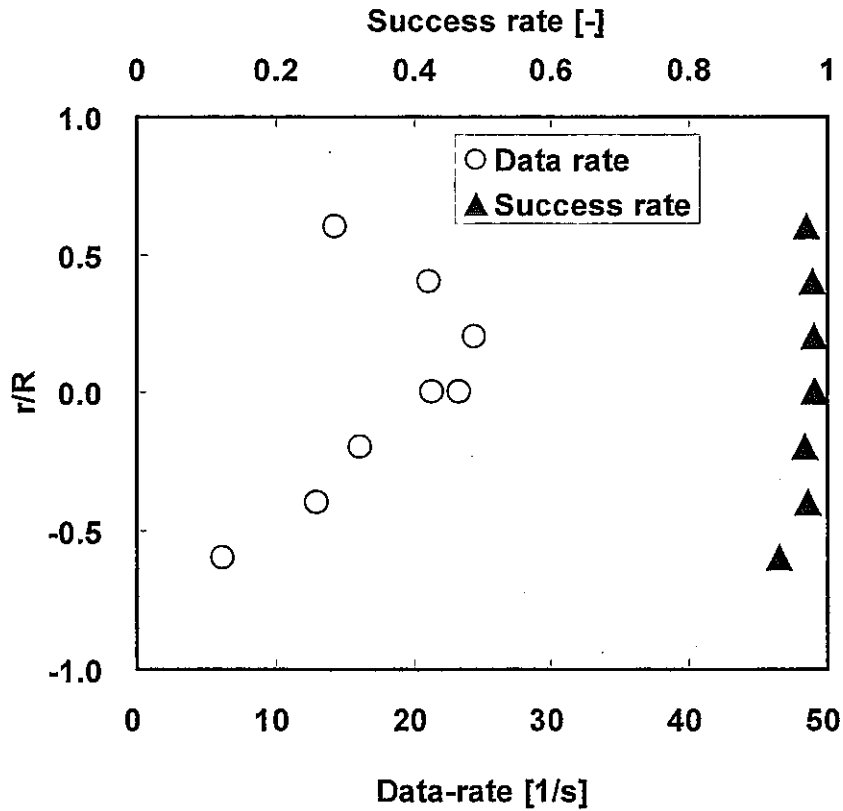


(2) データ収録状況

図 3-4 主配管断面平均流速分布 (Test-A1; Point-A)
 配管径 : 150[mm]、断面平均流速 : $U=1.0$ [m/s]、収録データ数 : 5000 点



(1) 配管内流速分布



(2) データ収録状況

図 3-5 枝配管断面平均流速分布 (Test-B1; Point-B)
 配管径 : 50[mm]、断面平均流速 : $W=1.0$ [m/s]、収録データ数 : 3000 点

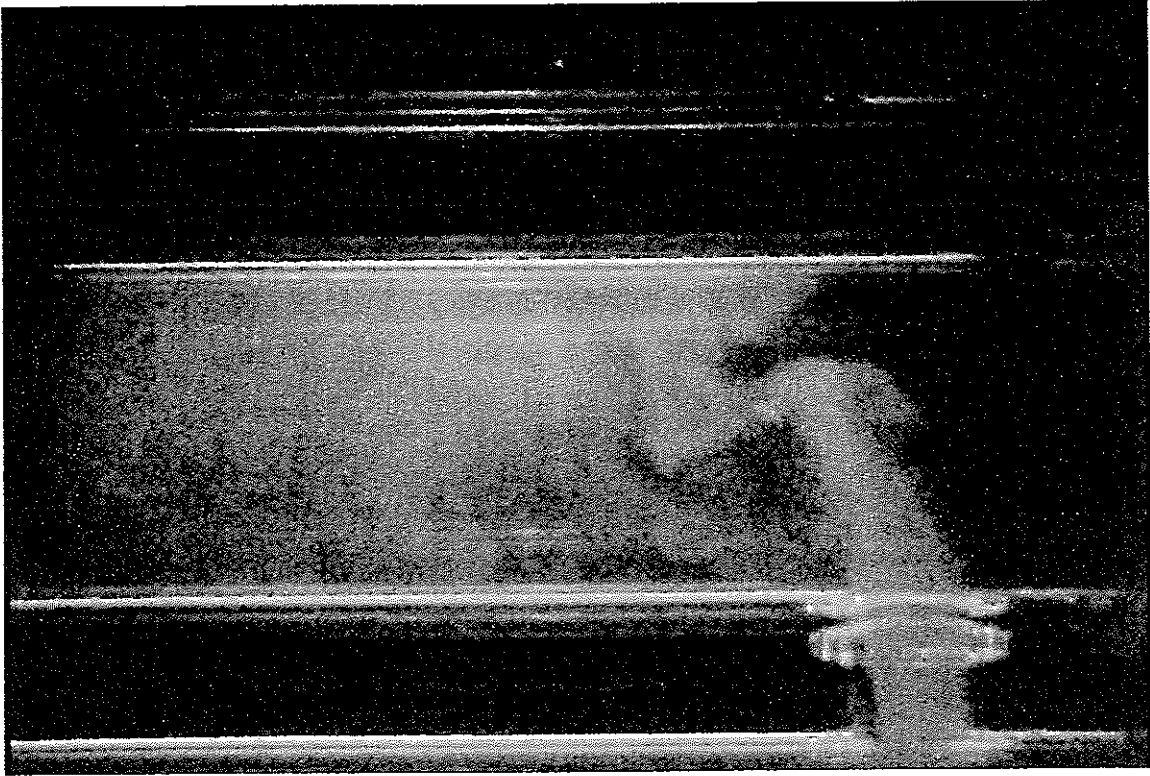


图3-6 衝突噴流 (Impinging jet) : Region-A (Test15)

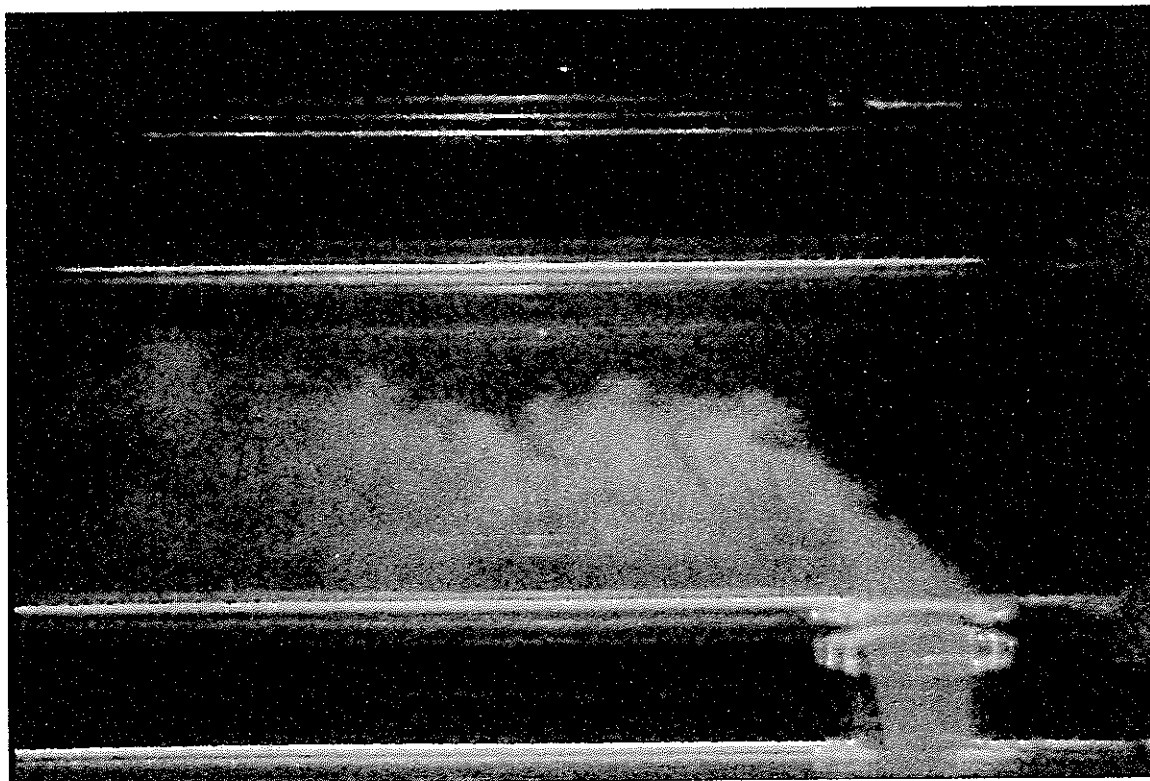


图 3-7 偏向噴流 (Deflecting jet) : Region-B (Test14)

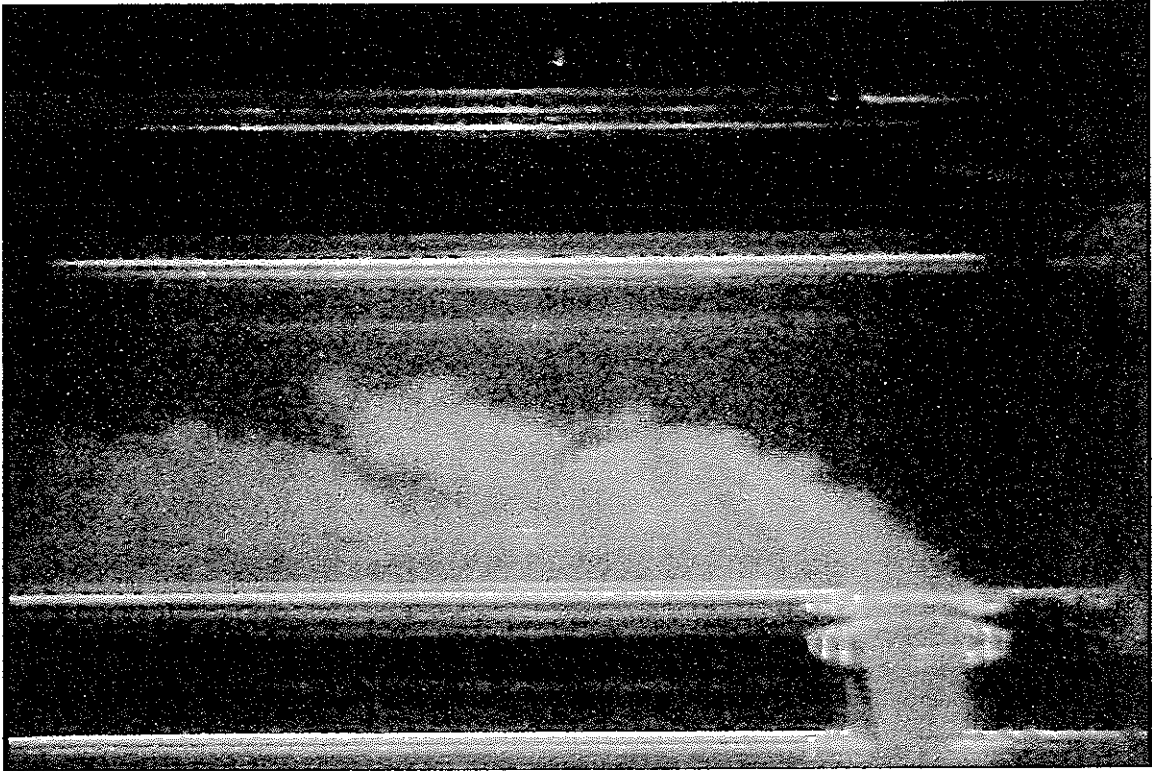


図 3-8 再付着噴流 (Re-attachment jet) : Region-C (Test17)

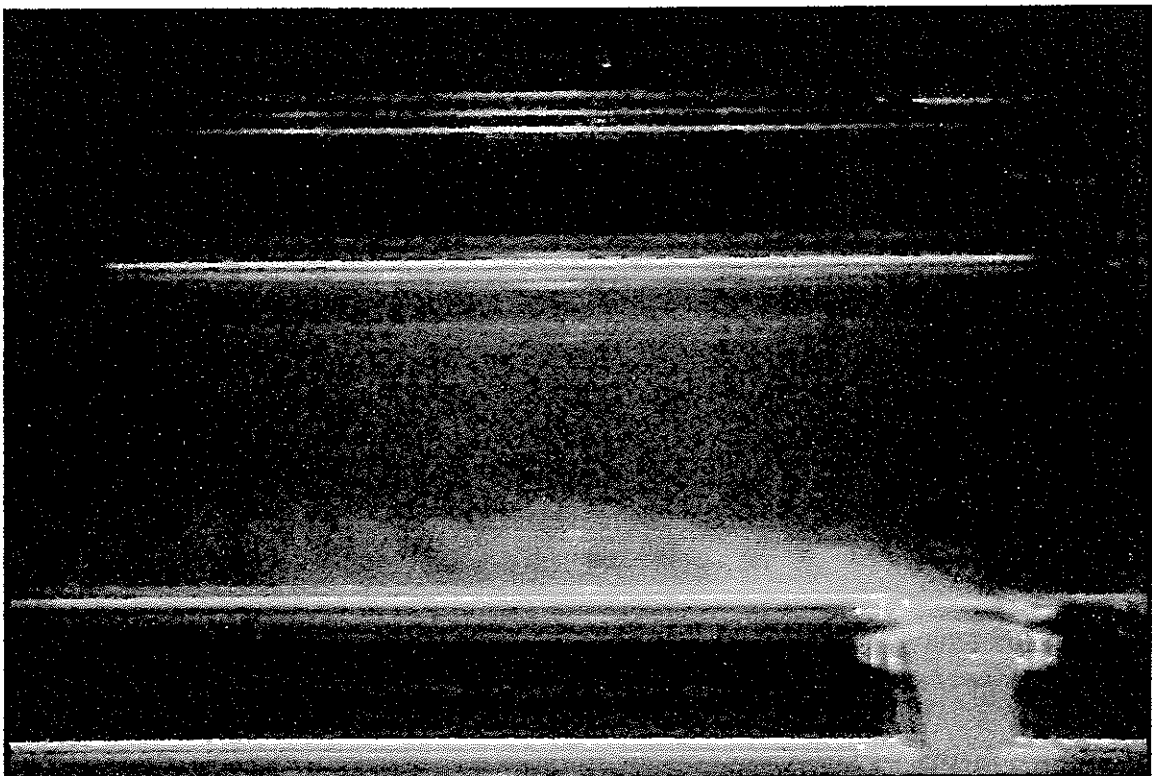


図 3-9 壁面噴流 (Wall jet) : Region-D (Test21)

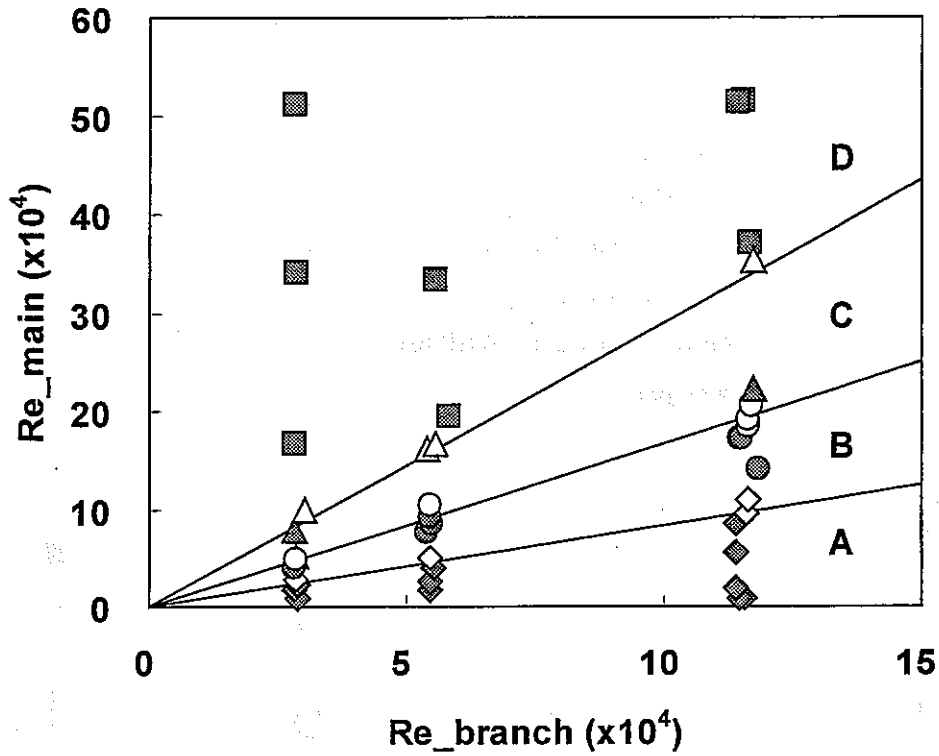


図 3-10 枝配管噴流の Re 数依存性

Region-A:衝突噴流 (Impinging jet)、Region-B:偏向噴流 (Deflecting jet)、Region-C:再付着噴流 (Re-attachment jet)、Region-D: 壁面噴流 (Wall jet)

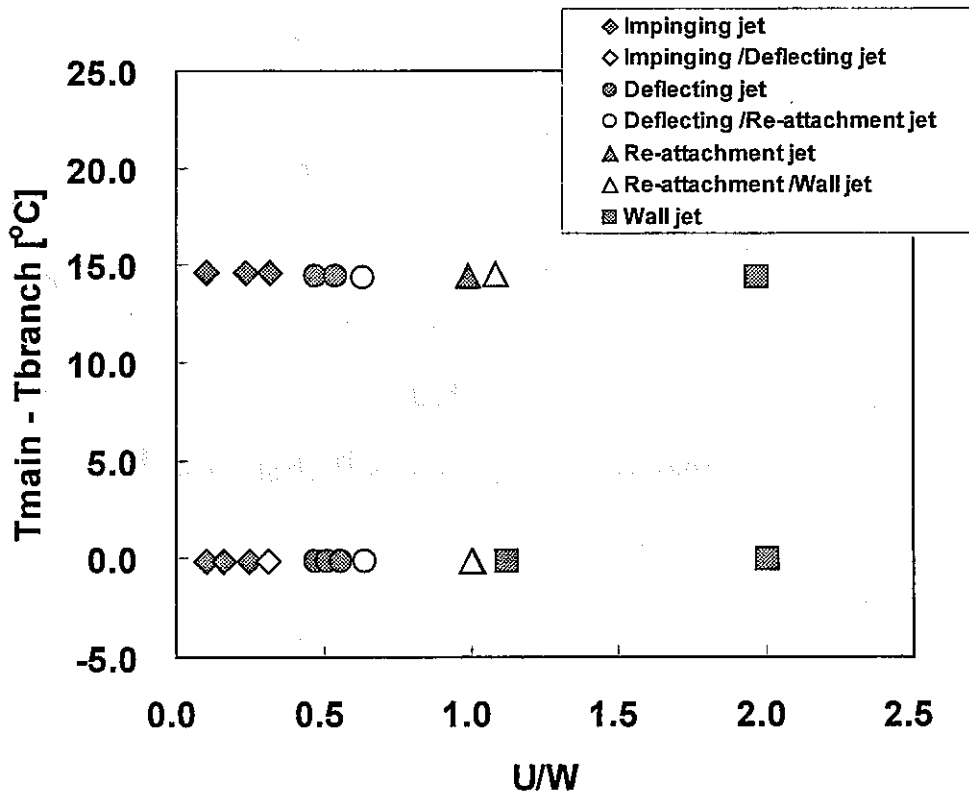


図 3-11 非等温条件と等温条件との比較

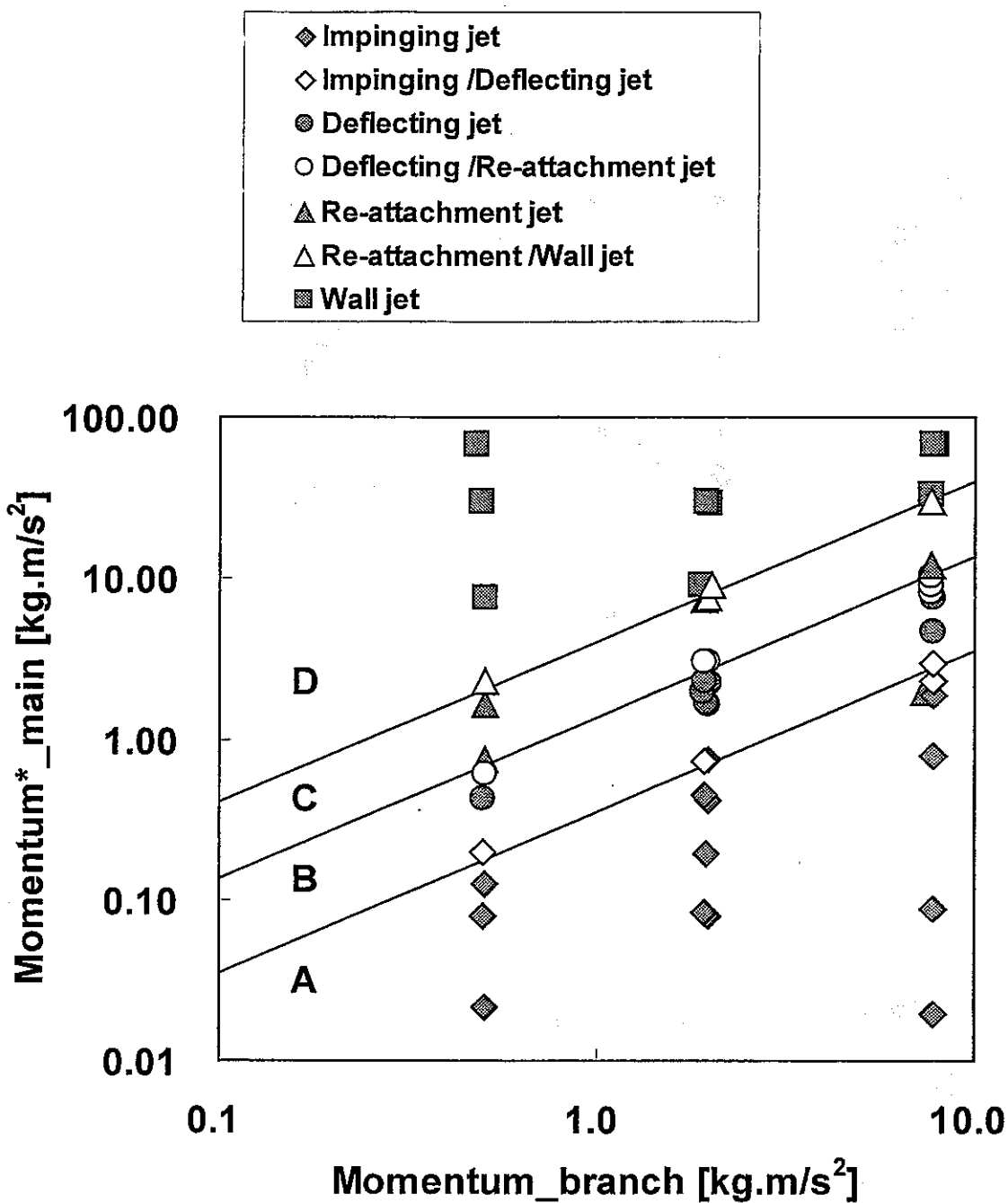


図 3-12 枝配管噴流の流動形態

Region-A:衝突噴流 (Impinging jet) 、Region-B:偏向噴流 (Deflecting jet) 、Region-C:再付着噴流 (Re-attachment jet) 、Region-D: 壁面噴流 (Wall jet)

第4章 予測解析

本解析では、試験の着目点である主配管及び枝配管の流入条件の違いによる合流部での流れの形態の変化及びホット/コールドスポットの生成条件を、乱流モデルに $k-\varepsilon$ モデルを用いた定常解析により予測するとともに、解析モデルの違い（円筒座標系、直交座標系）による解析結果への影響を評価した。

4. 1 解析条件

4. 1. 1 解析コード

本解析には炉心槽内多次元熱流動解析コード CASCADE[®]を使用した。CASCADE の概要を表 4-1 に示す。

4. 1. 2 解析体系

サーマルストラIPPINGの試験で重要となる流体と壁面との相互作用の評価を考慮すると、配管壁面が滑らかに模擬できる円筒座標系が適切と考えられる。しかし、円筒座標系では枝配管からの流れが中心軸上（円筒座標系における特異点）を横切る流れとなることから、この点での流れの連続性が妨げられる可能性がある。一方、直交座標系においても配管壁面を階段状に近似せざるをえないことから、壁面に沿う周方向の流れが減衰され過小評価されることが考えられる。そこで、それぞれの解析体系における計算結果の特徴を把握し T 字合流管の体系への適用性を検討するため、円筒座標系及び直交座標系における解析を実施し比較を行った。

解析対象領域は、配管合流部から試験部出口までとした。主配管及び枝配管における配管合流部手前までの助走区間は別途解析を実施し、得られた結果を配管合流部解析の入口境界条件とした。

メッシュ分割数は、円筒座標系では径方向 22 メッシュ、周方向 122 メッシュ、配管軸方向 101 メッシュの計 271084 メッシュ、直交座標系では水平方向 52 メッシュ、垂直方向 52 メッシュ、配管軸方向 101 メッシュの計 273104 メッシュ（含む仮想メッシュ）とした。円筒座標系及び直交座標系でのメッシュ分割を図 4-1 に示す。

4. 1. 3 解析ケース

主配管及び枝配管の流入流速は、試験条件と同様にパラメータとした。各ケースにおける解析条件を以下に示す。尚、全ケースとも主配管の流入温度を 50℃、枝配管の流入温度を 25℃とした。

	流速比(V_m/V_b)	主配管		枝配管	
		流速(m/s)	Re	流速(m/s)	Re
CASE1	0.25	0.125	3.51×10^4	0.5	2.77×10^4
CASE2	0.5	0.25	6.76×10^4	0.5	2.77×10^4
CASE3	1	0.5	1.35×10^5	0.5	2.77×10^4

CASE4	2	1.0	2.70×10^5	0.5	2.77×10^4
CASE5	5	2.5	6.76×10^5	0.5	2.77×10^4
CASE6	0.2	0.2	5.41×10^4	1.0	5.55×10^4
CASE7	1.5	1.5	4.05×10^5	1.0	5.55×10^4
CASE8	2	2.0	5.41×10^5	1.0	5.55×10^4
CASE9	2.5	2.5	6.76×10^5	1.0	5.55×10^4
CASE10	0.25	0.5	1.35×10^5	2.0	1.11×10^5
CASE11	1.25	2.5	6.76×10^5	2.0	1.11×10^5

4. 1. 4 解析モデル

(1) 伝熱モデル

試験部は可視化のためにアクリル製で断熱材も施工されていないが、本試験条件では配管外表面からの放熱は小さいことから、配管部に伝熱構造体は設けず流体メッシュの最外層の外側を断熱条件とした。また、構造材への熱移行挙動を評価するためには伝熱構造体により配管部分を模擬することが必要となるが、本解析では最外層の流体温度分布にてホット/コールドスポット（配管壁に局部的に高温/低温の領域が形成されること）を評価することとした。

(2) 乱流モデル

CASCADE で用意されている乱流モデルは $k-\varepsilon$ モデル、低レイノルズ数型 RSM⁹⁾ モデルの 2 種類である。低レイノルズ数型 RSM を使用する場合には、 y^+ （壁からの無次元距離） <5 の範囲に第 1 格子点を置く必要がある。仮に主流の流速を 0.5m/s とすると、 $y^+ < 5$ となる点は 0.1mm 以下となる。今回の解析体系で壁面近傍を 0.1mm 以下のメッシュ幅とするとメッシュ数が膨大となり現実的な時間内での収束が困難と考えられる。そこで今回は乱流モデルとしては壁関数+ $k-\varepsilon$ モデルを使用することとした。 $k-\varepsilon$ モデルでは $30 < y^+ < 200$ の範囲に第 1 格子点を置く必要がある。主流の流速を 0.5m/s とすると、 $0.7\text{mm} < y < 4.8\text{mm}$ の範囲に第一格子点があれば良いことになるので、今回のメッシュ分割（壁近傍 3mm）は妥当と言える。

(3) 境界条件

円筒座標系では枝配管における助走区間解析の結果を、曲率を有する主配管壁面に設定しなければならない。そのため、径方向のみに流速を与えてしまうと枝配管からの噴流は主配管中心に向かってしまう。そこで、枝配管からの流量は保存し噴流の向きだけを鉛直方向にするため、枝配管流入流速に周方向成分を与えた。また、主配管壁面と枝配管助走区間の出口のメッシュ構造は一致していないので、助走区間解析における出口流速を配管中心軸からの距離の関数として主配管壁面上の枝配管入口メッシュ中心位置での流速を算出して設定した。

助走区間解析における流入流速及び乱流量は一様分布として与えた。入口境界条件に使用した乱流量の定義を以下に示す。

$$k = 0.005U_m^2$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} \cdot k^{1.5}}{0.09 \cdot R}$$

U_m : 流入流速 C_μ : 経験定数 (=0.09) R : 配管半径

4. 2 解析結果

4. 2. 1 助走区間解析

助走区間解析は試験装置と同様にバッファータンク出口から合流部手前の $20D$ (D : 主配管直径) の助走区間を対象とした。枝配管に関してもバッファータンク出口から合流地点までの $10.2d$ (d : 枝配管直径) の助走区間を解析領域とした。また、試験装置において配管合流部手前までで十分発達した流れが得られているかを確認するために、助走区間の距離を $40D$ まで伸ばした解析も別途実施し比較を行った。

主配管における助走区間解析の速度分布と LDV (レーザドップラー流速計) による試験部入口流速測定結果の比較を図 4-2 に示す。解析における流速分布は、本試験条件の $X/D=20$ においても $X/D=60$ とほぼ同様の分布が得られており、十分発達した流れになっていると考えられる。しかし、LDV の結果は解析結果と比べフラットな流速分布となっている。この差違の原因としては、バッファータンクと助走区間入口の間に設置されたディフューザの影響 ($\phi 600\text{mm}$ から $\phi 150\text{mm}$ へ 275mm の距離で絞っている) が考えられる。すなわち、急激に流路を絞ったために助走区間入口で流速分布が平坦にならず、流速分布が発達するのに時間がかかったと考えられる。尚、配管合流部解析の境界条件としては、本解析で得られた流速分布及び乱流量を使用した。

4. 2. 2 円筒座標系と直交座標系の比較

円筒座標系と直交座標系による解析結果の相違を把握するため、各噴流形態 (後述) の代表ケースによる比較を行った。CASE1 ($V_m/V_b=0.25$) 及び CASE3 ($V_m/V_b=1.0$) における円筒座標系と直交座標系の各断面温度分布の比較を図 4-3 及び図 4-4 に示す。CASE1 では下流側に進むにつれて配管対向面に衝突した枝配管からの低温噴流の流れに大きな差が見られた。円筒座標系では枝配管から流入した噴流が対向面に衝突した後、配管壁面に沿って配管下面まで戻ってきているのがわかる。一方、直交座標系では円筒座標系に比べて周方向流れに対する抵抗が大きくなり速度の減衰が大きくなることから、枝配管からの噴流は対向面に衝突した後は配管下面まで到達していない。CASE3 の結果は、 $Z=4D$ で若干円筒座標系の方が温度の混合が進んでいるように見えるが、両座標系で大きな差はなかった。

$Z=1/6D$ における $x-y(r-\theta)$ 断面内の鉛直方向流速成分の比較を図 4-5 に示す。CASE1 は枝配管からの噴流が中心軸を横切る流れとなっている。中心軸から 10mm 鉛直方向に進んだ位置での円筒座標系における流速分布は中心が窪んだ分布となっている。この影響で枝配管噴流軸の鉛直方向流速成分が小さくなり、直交座標系より早く主流方向に偏向したと考えられる。そのために、中心軸から 35mm 鉛直方向に進んだ位置における鉛直方向流速成分が直交座標系と比べ 3 割程度小さくなっている。CASE3 では、枝配管からの噴流が中心軸近傍で偏向するので中心軸を

通過する鉛直方向流速はかなり小さい。この場合も中心軸から 10mm 鉛直方向に進んだ位置での円筒座標系における流速分布は中心で窪んだ分布となっている。しかし、中心軸から 35mm 鉛直方向に進んだ位置では直交座標系と同程度の流速分布に回復していることがわかる。

以上の結果から各座標系に適した解析対象は以下の通り整理できる。

(1)直交座標系

- ・ 中心軸を横切る噴流の噴流軸を予測する場合

(2)円筒座標系

- ・ 壁面に沿う周方向流れが顕著な場合
- ・ 壁面近傍の挙動に着目する場合

また、今回の解析ではなかったが枝配管の流速が遅いケースでは、枝配管流入口近傍で剥離するような流れになることも考えられる。この場合、枝配管の助走区間も含めた体系で解析しなければならない。CASCADE ではマルチグリッドに対応していないため、円筒座標系で枝配管を付けた解析は不可能である。また、主配管の上流側にエルボー等を設置する場合も、境界適合座標系等を使用しないかぎり円筒座標系で模擬することは不可能となる。

本報告では、代表ケースに関しては壁面近傍の変動場も含めて検討するために円筒座標系の結果を使用し、その他のケースは噴流形態の把握に着目するために直交座標系の結果を使用した。

4. 2. 3 噴流の形態

3章で示した可視化試験の結果から噴流形態は以下の4通りに大別できることがわかっている。

- (1) 衝突噴流
- (2) 偏向噴流
- (3) 再付着噴流
- (4) 壁面噴流

直交座標系での解析結果における温度分布から、各解析ケースにおける流れ場を上記噴流形態に分類すると以下の通りになった。

	流速比 (V_m/V_b)	主配管 流速(m/s)	枝配管 流速(m/s)	Re 比 (Re_m/Re_b)	運動量比* (M_m/M_b)	噴流形態	解析体系
CASE1	0.25	0.125	0.5	1.27	0.26	衝突噴流(1)	円筒座標系
CASE2	0.5	0.25	0.5	2.44	0.95	偏向噴流(2)	円筒座標系
CASE3	1	0.5	0.5	4.87	3.79	再付着噴流(3)	円筒座標系
CASE4	2	1.0	0.5	9.75	15.1	壁面噴流(4)	直交座標系
CASE5	5	2.5	0.5	24.4	94.6	壁面噴流(4)	円筒座標系
CASE6	0.2	0.2	1.0	0.98	0.15	衝突噴流(1)	直交座標系
CASE7	1.5	1.5	1.0	7.31	8.52	再付着噴流(3)	直交座標系
CASE8	2	2.0	1.0	9.75	15.1	壁面噴流(4)	直交座標系
CASE9	2.5	2.5	1.0	12.2	23.7	壁面噴流(4)	直交座標系
CASE10	0.25	0.5	2.0	1.22	0.24	衝突噴流(1)	直交座標系
CASE11	1.25	2.5	2.0	6.09	5.91	再付着噴流(3)	直交座標系

$$*Mm=\rho_m V_m^2 D d \quad Mb=\rho_b V_b^2 d^2 \pi/4 \quad \rho:\text{密度} \quad D:\text{主配管径} \quad d:\text{枝配管径}$$

(1) 衝突噴流

本解析で噴流形態が衝突噴流となったケースは CASE1、CASE6 及び CASE10 である。垂直断面の温度分布を見ると、枝配管からの噴流は主配管対向面まで到達した後主流方向に曲げられていることがわかる。代表ケースとして CASE1 の温度、流速の絶対値及び乱流エネルギーの分布を図 4-6 に示す。流速の絶対値及び乱流エネルギーの定義は以下の通りである。

$$\text{流速の絶対値} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

$$\text{無次元乱流エネルギー} = \frac{\sqrt{k}}{V_b}$$

u:主配管径方向流速 v:主配管周方向流速 w:主配管軸方向流速 k:乱流エネルギー
 V_b :枝管流速

図における各ラベルの上限値は、そのケースでの最大値を示している。

衝突噴流のケースでは、主配管対向面に衝突した枝配管噴流は配管壁上面を軸方向に沿って流れている。また、z 軸に垂直な断面における温度分布を見ると、枝配管噴流は主配管壁面に沿う周方向流れを形成し、配管下面まで戻って来ているのがわかる。主配管からの高温流体は、枝配管からの低温流体により主配管の下側に押しやられ、その後断面中心に残る分布となっている。枝配管噴流が主配管上面に衝突した部分には、下流側約 2D の距離まで若干温度が低い部分が存在している（図 4-6 最外周上面温度分布における水色の部分）。この部分の周りの乱流エネルギーも高くなっていることから、配管壁への温度変動の影響が懸念される。流速の分布を見ると、枝配管噴流のポテンシャルコアは主配管対向面まで到達しているが、その後主流と混合され下流側ではほぼ均一流速で流れていることがわかる。枝配管流入部後流の鉛直断面速度ベクトルを図 4-7 に示す。ベクトルの色は流速の絶対値を示す。枝配管に衝突した噴流の影響で、押しやられた流体が主配管下面からの上昇流となっている様子が見られる。図 4-6(2/2)に示す乱流エネルギーは、枝配管噴流の外縁部と主配管対向面に衝突した部分で高くなっている。次に CASE6 及び CASE10 の解析結果を図 4-8 及び図 4-9 に示す。CASE6 は主配管と枝配管の流速比が 1:5 となっているケースで、枝配管からの噴流が対向面に衝突して上流側にも流れ込んでいる。この流れにより、枝配管噴流が対向面に衝突する手前に循環流が発生している。

(2) 偏向噴流、再付着噴流

本解析で噴流形態が偏向噴流となったケースは CASE2、再付着噴流となったケースは CASE3、CASE7 及び CASE11 である。各代表ケースとして CASE2 及び CASE3 の温度、流速の絶対値及び乱流エネルギーの分布を図 4-10 及び図 4-11 に示す。流速の絶対値及び乱流エネルギーの定義は(1)と同様である。偏向噴流となっている CASE2 では、偏向した枝配管からの噴流が下流側で主配管上面に向かっ

ている。一方、再付着噴流となっている CASE3 では、枝配管からの噴流が中心軸近傍で主流方向に曲げられ下流側で主配管下面に近づいている。図 4-10 に示す偏向噴流のケース(CASE2)における z 軸に垂直な断面 $Z=4D$ の温度分布を見ると、枝配管からの噴流は円形状に拡がりながら配管壁面上方に向かっていることがわかる。本解析体系では、配管合流部から $4D$ 下流側でも枝配管からの低温流体は主配管上面に付着していない。また、枝配管噴流が下流側で付着したとしても主配管からの高温流体と混合が進んだ後なのでコールドスポットは形成されないと考えられる。図 4-11 に示す再付着噴流のケース(CASE3)では、枝配管噴流の後流における主配管下面部に低温領域が形成されている。乱流エネルギーの分布を見ると、偏向噴流に比べて下流側まで乱流エネルギーが高くなっている場所が存在している。このことから、再付着噴流では枝配管からの噴流が再付着する領域で構造材に影響を与える可能性が考えられる。

各ケースの速度分布を見ると、枝配管噴流の後流部では低流速部が形成されており、この部分では乱流エネルギーも高くなっている。偏向噴流では衝突噴流と同様に枝配管噴流のポテンシャルコアは配管上面近傍まで残っており、下流側では主配管の流れと混合してほぼ均一な流速分布となっている。

CASE7 及び CASE11 の結果を図 4-12 及び図 4-13 に示す。各ケースにおける運動量比は、CASE3<CASE11<CASE7 の順番になっている。各ケースにおける鉛直断面の温度分布を見ると、運動量比が大きくなるに従って枝配管からの噴流が主配管下面に近づいているのがわかる。乱流エネルギーの最大値も若干ではあるが、運動量比に比例して大きくなっている。

(3) 壁面噴流

本解析で噴流形態が壁面噴流となるケースは CASE4、CASE5、CASE8 及び CASE9 である。代表ケースとして CASE5 の温度、流速の絶対値及び乱流エネルギーの分布を図 4-14 に示す。鉛直断面における温度分布をみると、枝配管噴流が主流からの流れに遮られ主配管下面に沿って流れているのがわかる。乱流エネルギー分布を見ると、主配管下面に乱流エネルギーの高い場所が広範囲にわたって存在していることがわかる。この値は他の噴流形態よりもかなり高くなっている。他の壁面噴流のケースについても乱流エネルギー分布は同様の結果になっている。壁面噴流では枝配管からの噴流軸が主配管下面近傍にあるため、主流と枝配管噴流とのせん断による変動が配管下面まで及んだと思われる。

CASE4、CASE8 及び CASE9 の結果を図 4-15 から図 4-17 に示す。CASE5 の運動量比は CASE4、CASE8 及び CASE9 の運動量比より 4 倍程度になっている。そのため、鉛直断面の温度分布を見ると CASE5 以外のケースでは枝管からの噴流は主配管内に比較的深く侵入し、合流後に主配管の高温流体と混合されているのがわかる。このようなケースを明確に再付着噴流と区別するのは困難であるが、本解析では枝配管からの低温流体が下流まで残らずに主配管の高温流体と混合されている特徴が CASE5 と同様なことから、壁面噴流に分類した。

表 4-1 CASCADE コードの概要

<p>1. 基本解析モデル</p> <p>基礎式 : $(u, v, w, p(\rho), h, c, k, \varepsilon, h'h', u_i'u_j', u_i'h')$</p> <p>次元 : r-$\theta$-z 3次元円筒座標系 x-y-z 3次元デカルト座標系</p> <p>その他 : ポーラスモデル 流動抵抗モデル 伝熱モデル 乱流モデル (k-ε、低 Re 数型 RSM)</p>
<p>2. 数値計算法</p> <p>計算アルゴリズム : SIMPLER、SIMPLEST - ANL</p> <p>線形化法 : 逐次代入法</p> <p>マトリクス解法 : MICCG 法 (圧力) P - SOR (その他の方定式)</p>
<p>3. 差分法</p> <p>対流項 : 1次精度 Skew Upwind 法</p> <p>拡散項 : 2次精度 中心差分法</p> <p>時間積分法 : オイラー陰解法</p>

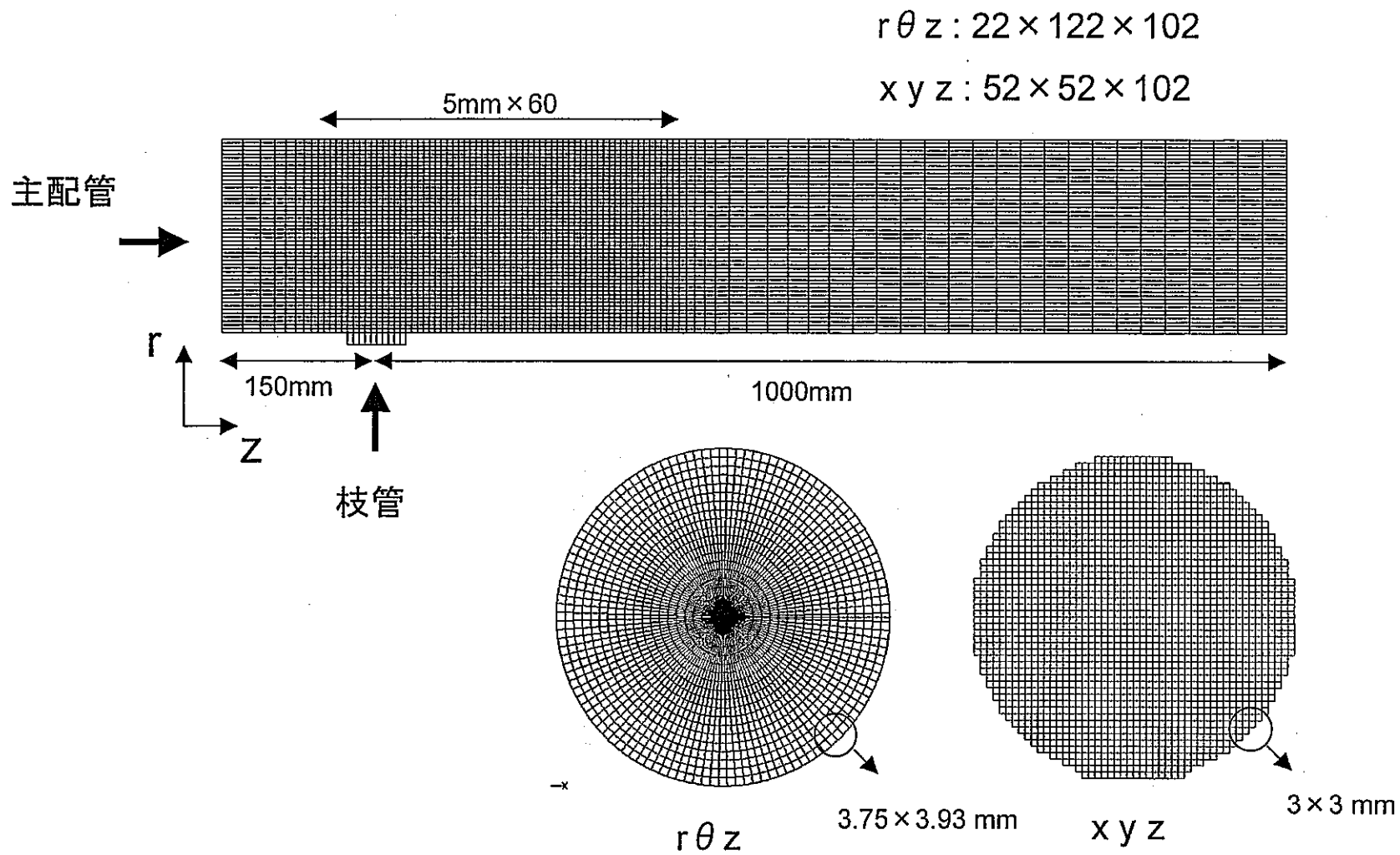


図4-1 メッシュ分割

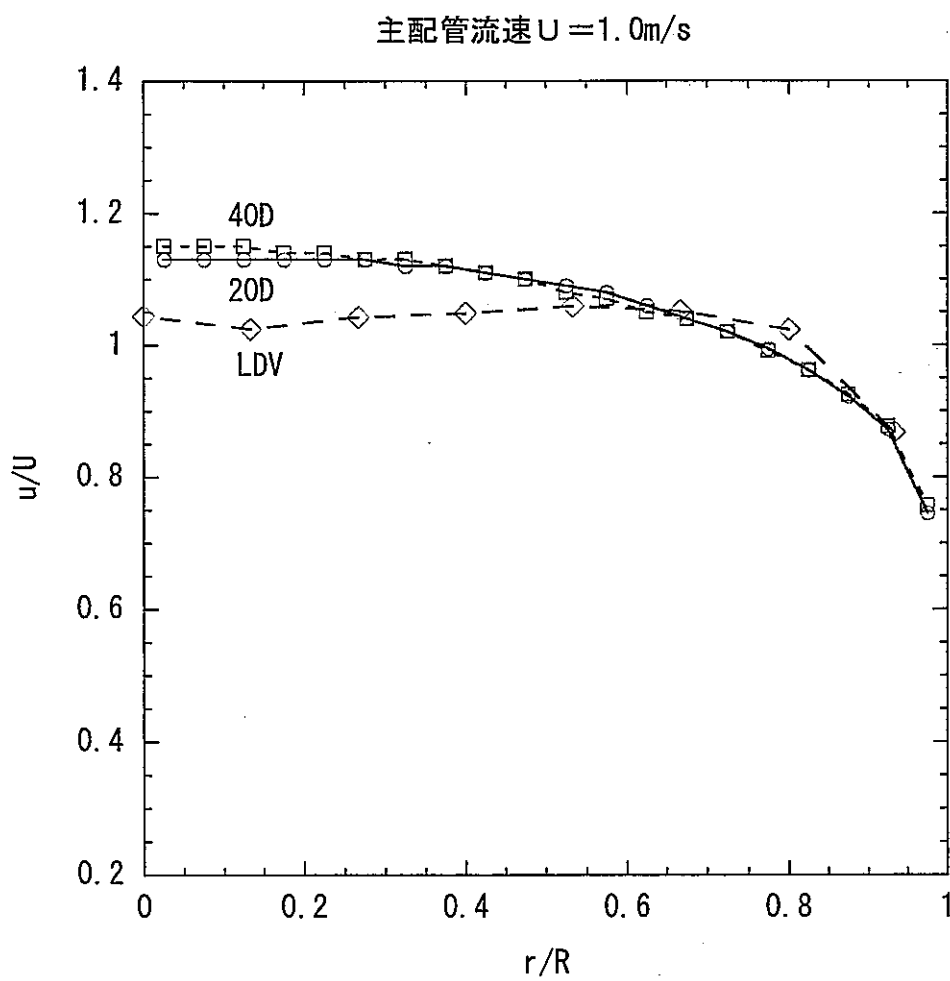


図4-2 助走区間出口流速の比較 (主配管)

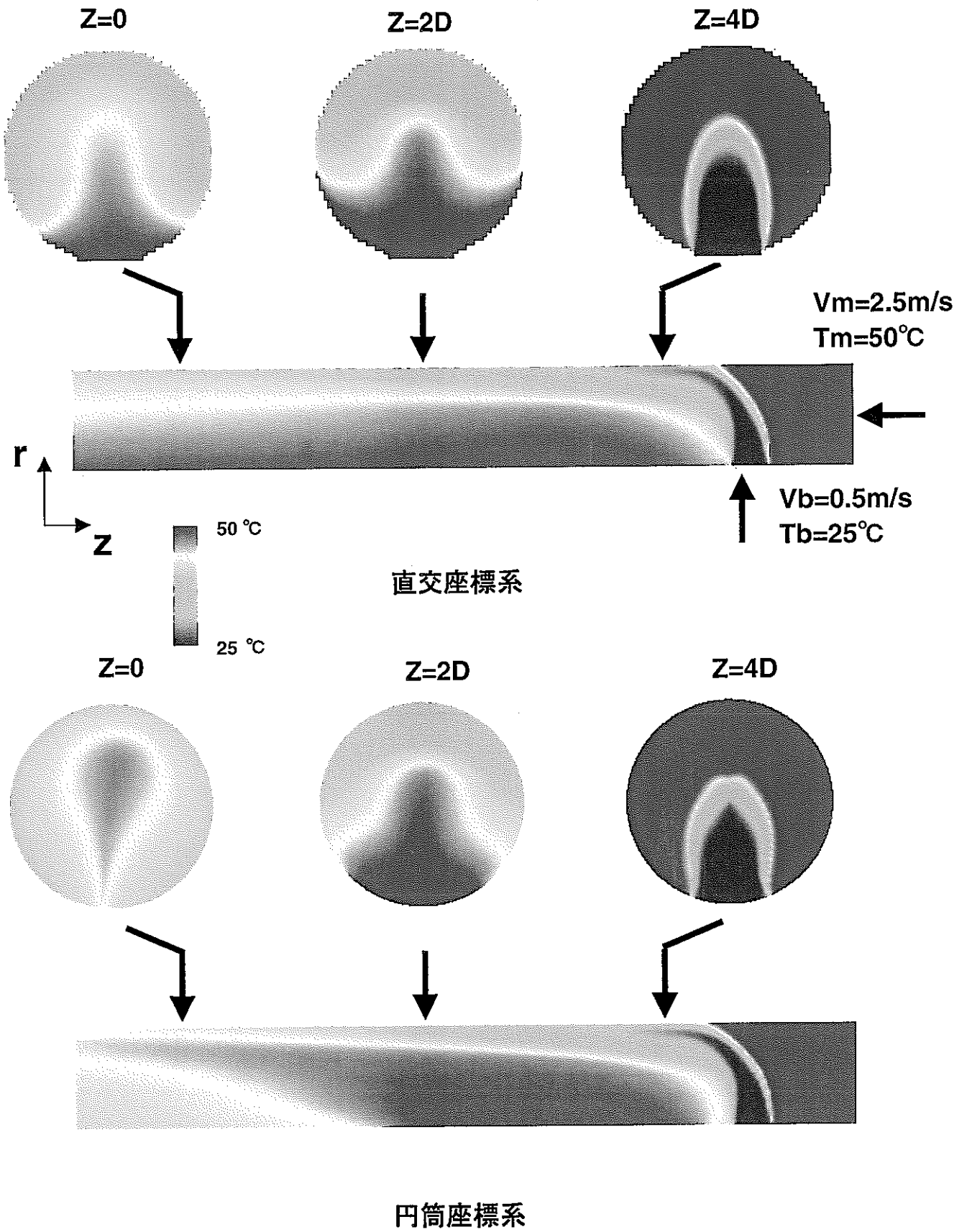


図4-3 直交座標系と円筒座標系の比較 (CASE1)

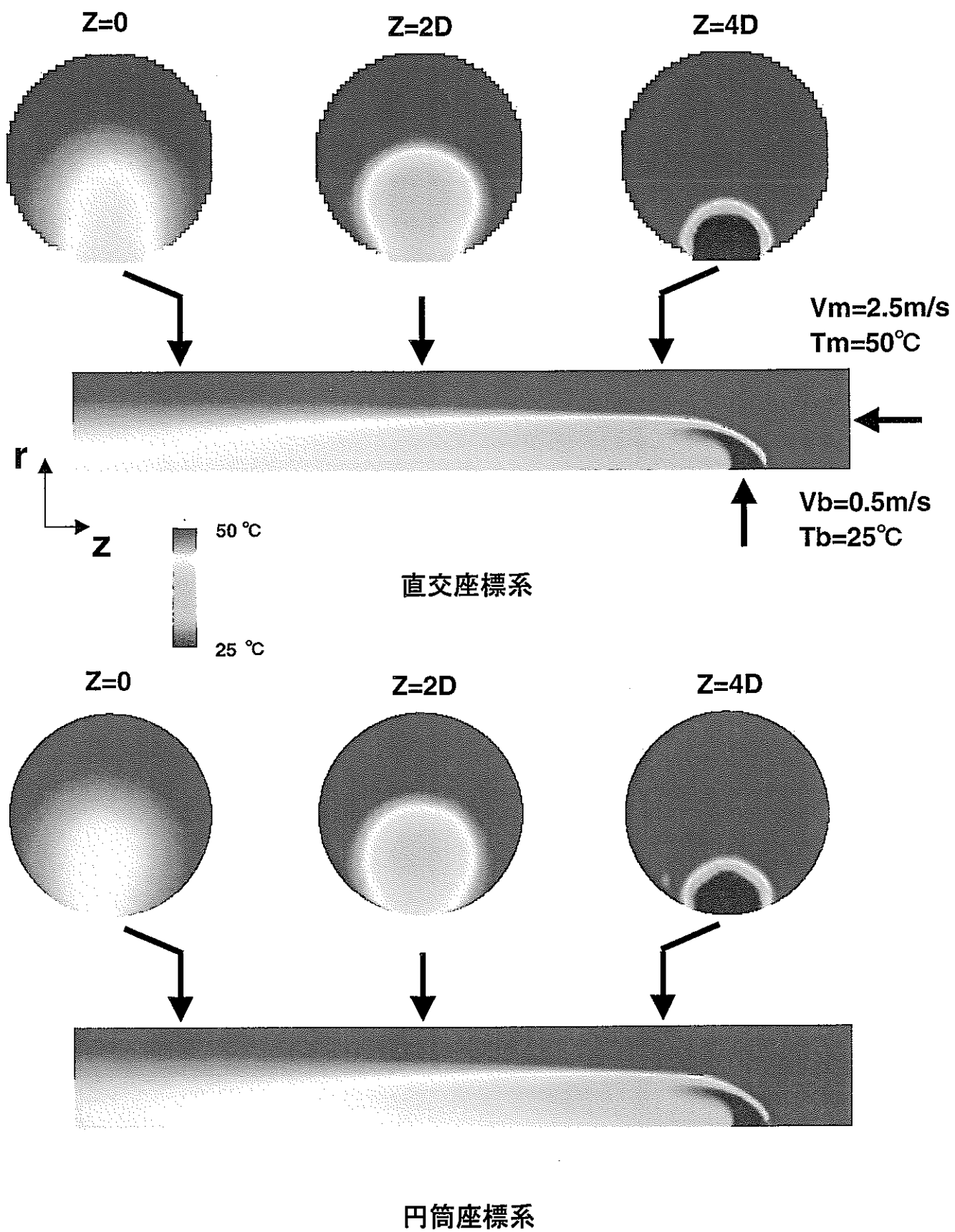


図4-4 直交座標系と円筒座標系の比較 (CASE3)

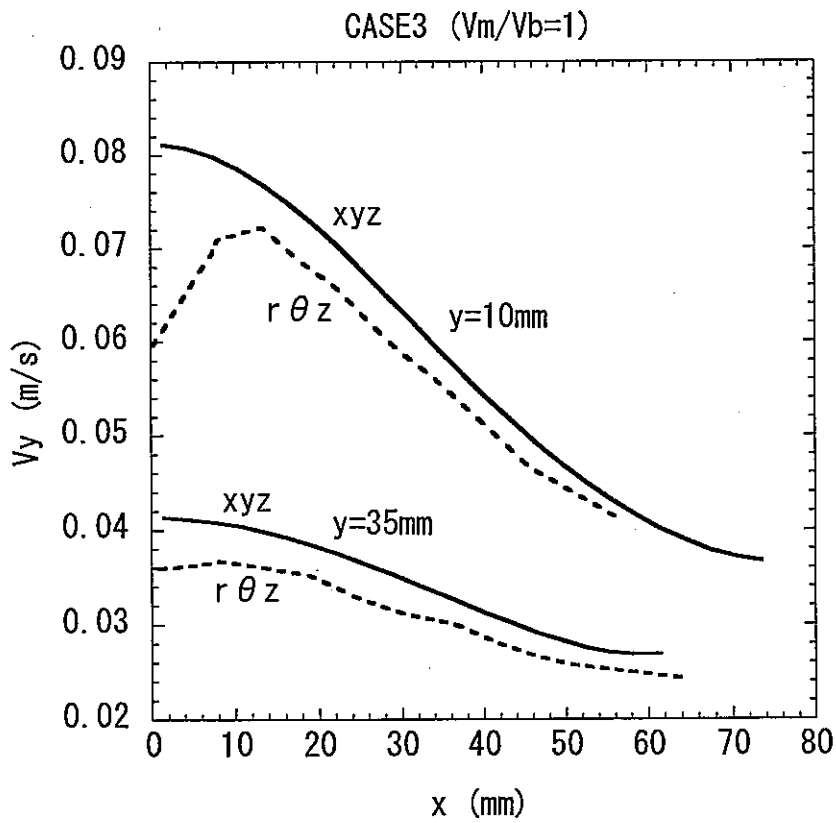
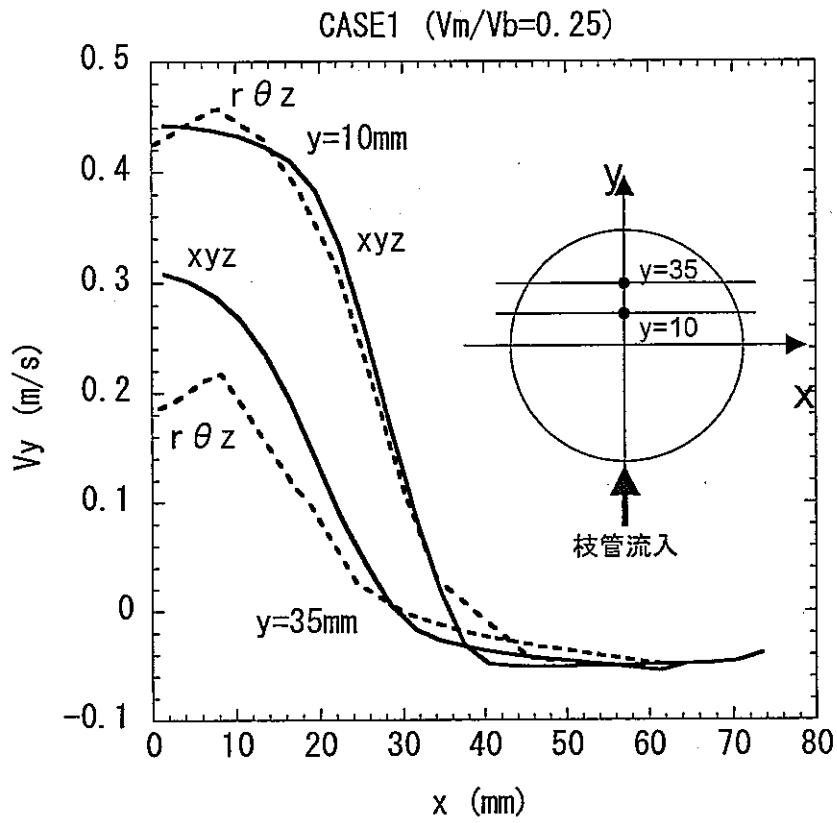


図4-5 各座標系における鉛直方向流速の比較

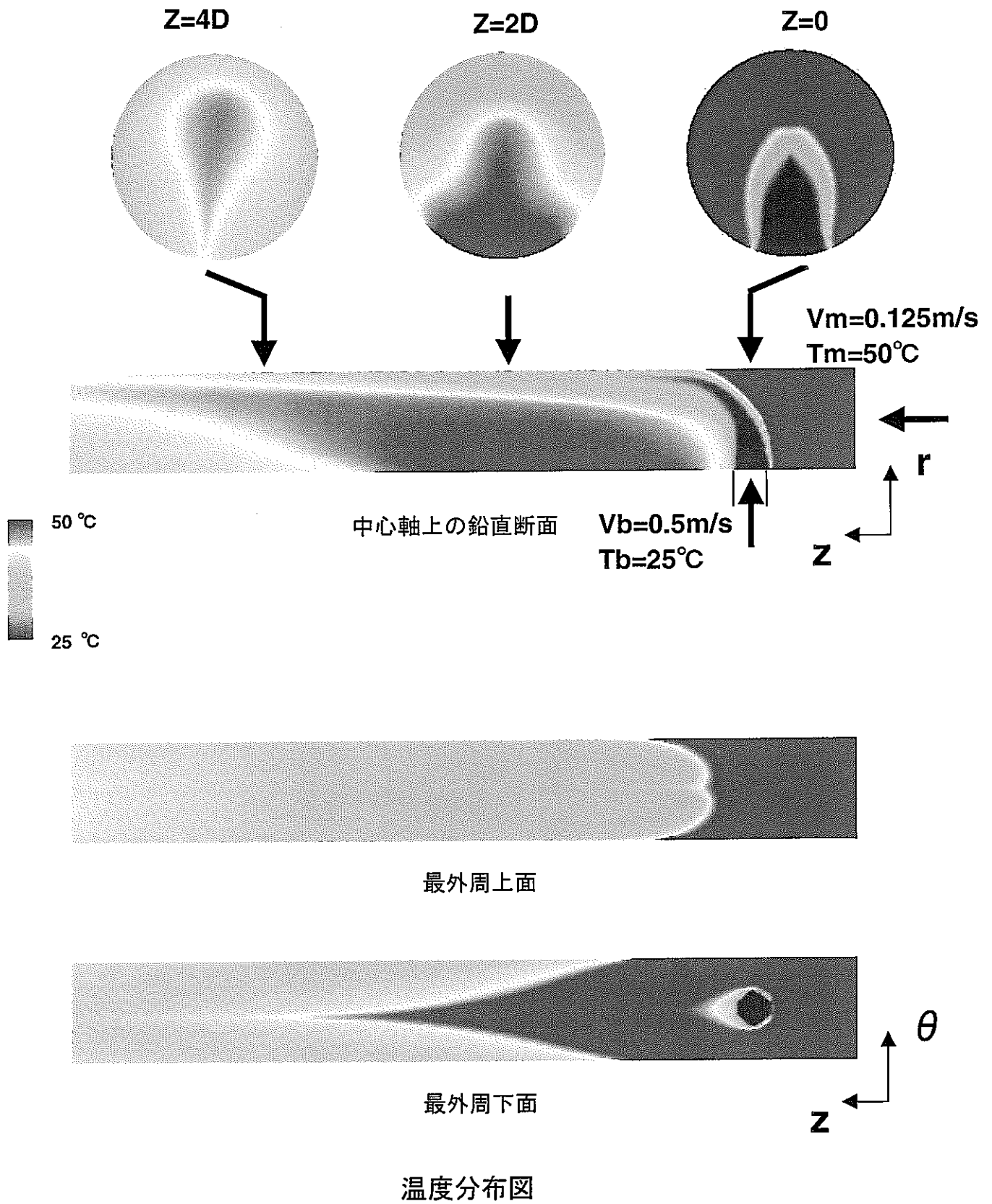


図4-6(1/2) CASE1解析結果 ($V_m/V_b=0.25$)

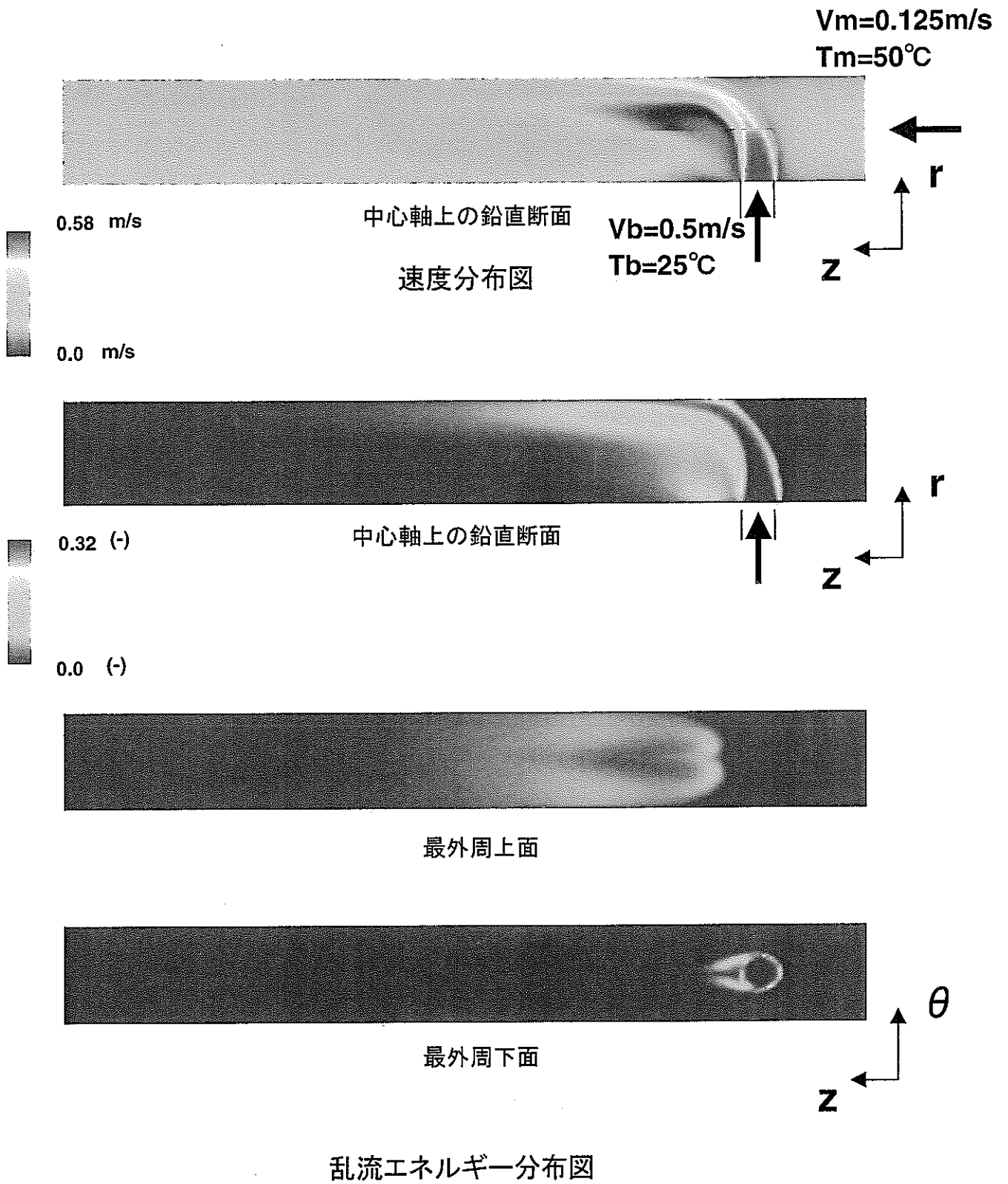
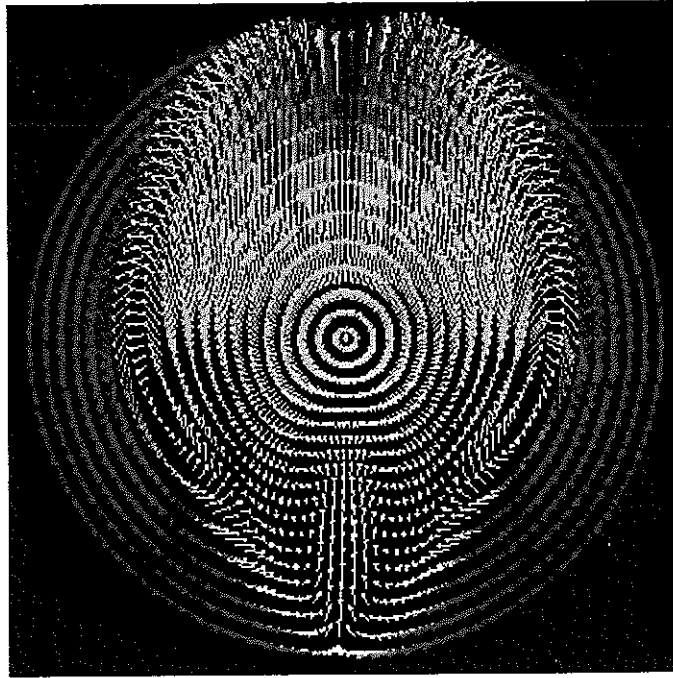
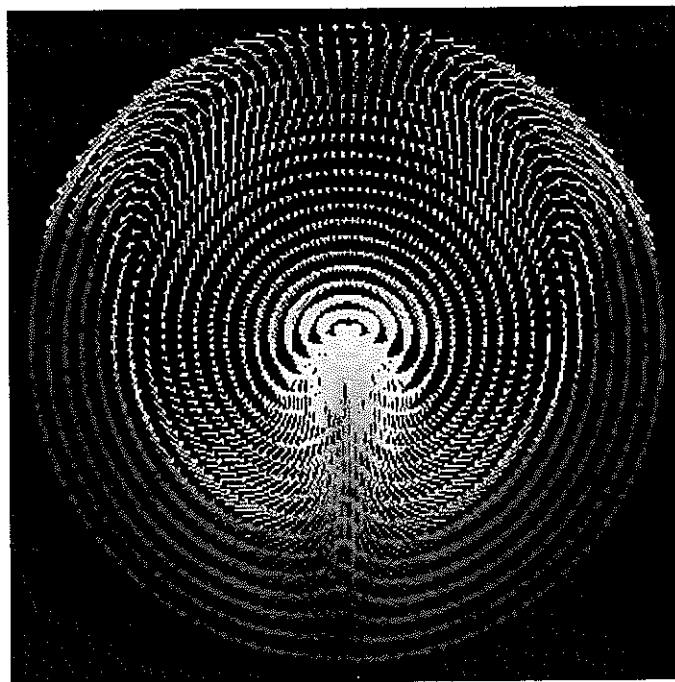


図4-6(2/2) CASE1解析結果 ($V_m/V_b=0.25$)



$Z=1/3D$



$Z=2/3D$

図4-7 CASE1速度ベクトル ($V_m/V_b=0.25$)

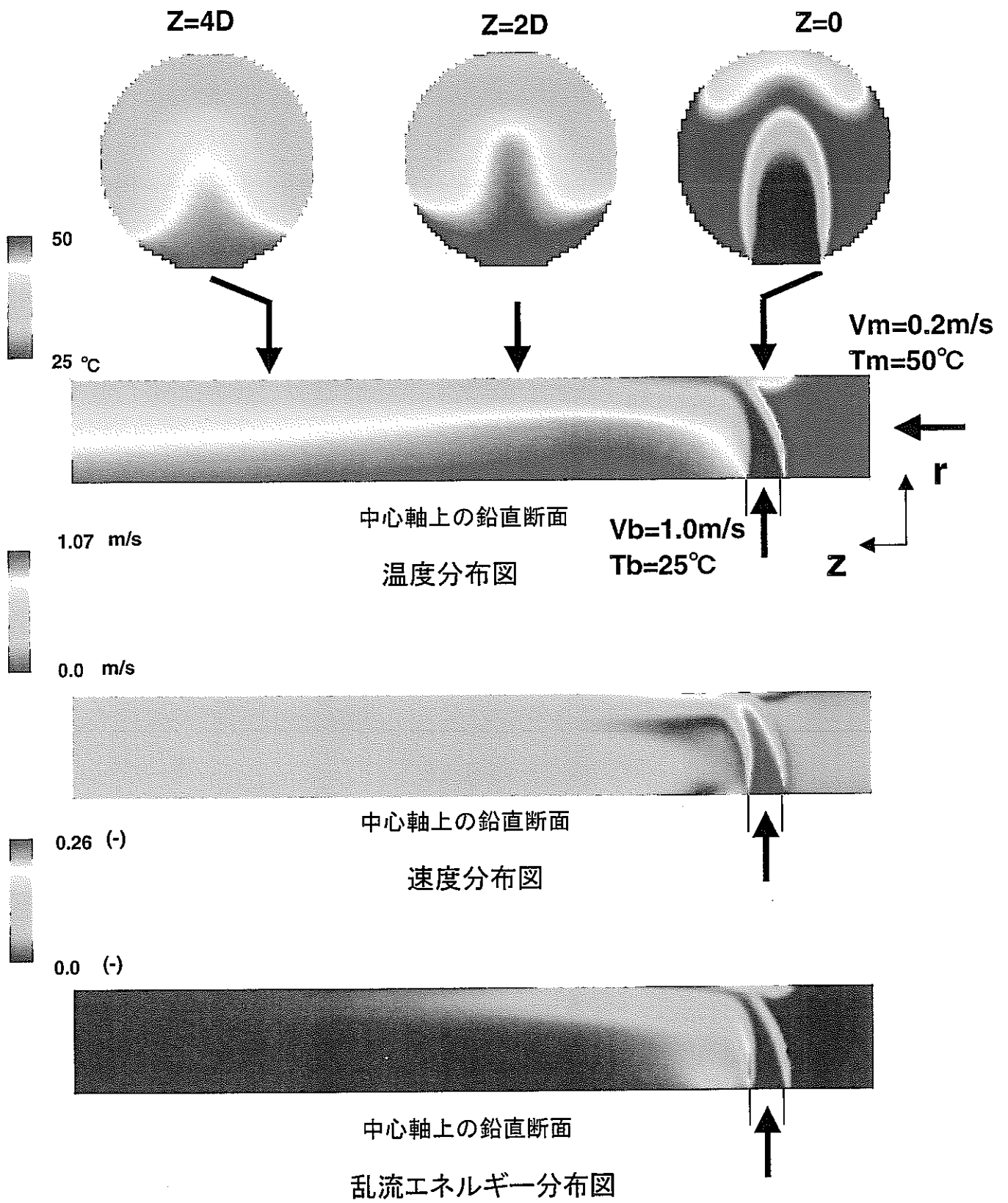


図4-8 CASE6解析結果 ($V_m/V_b=0.2$)

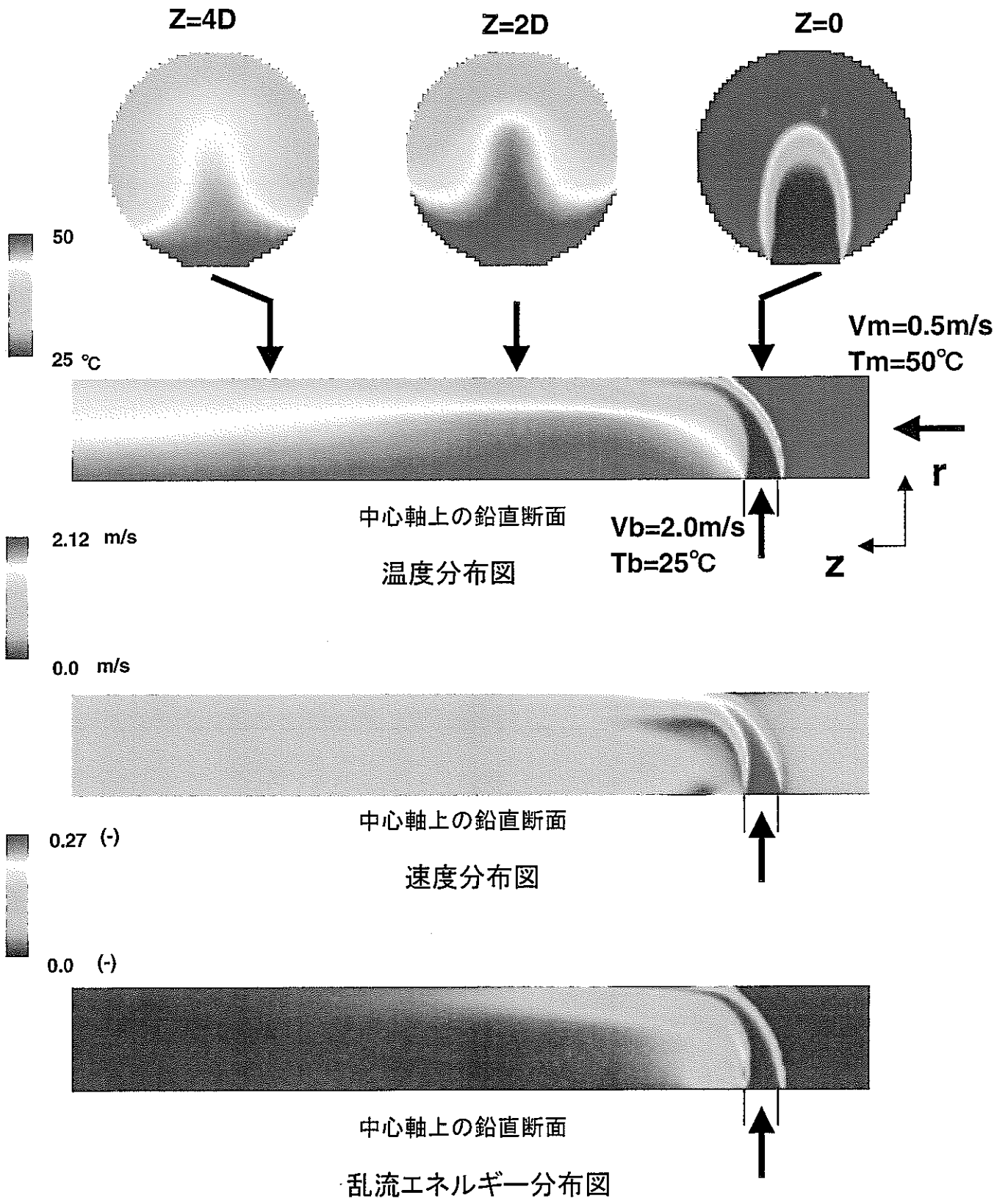
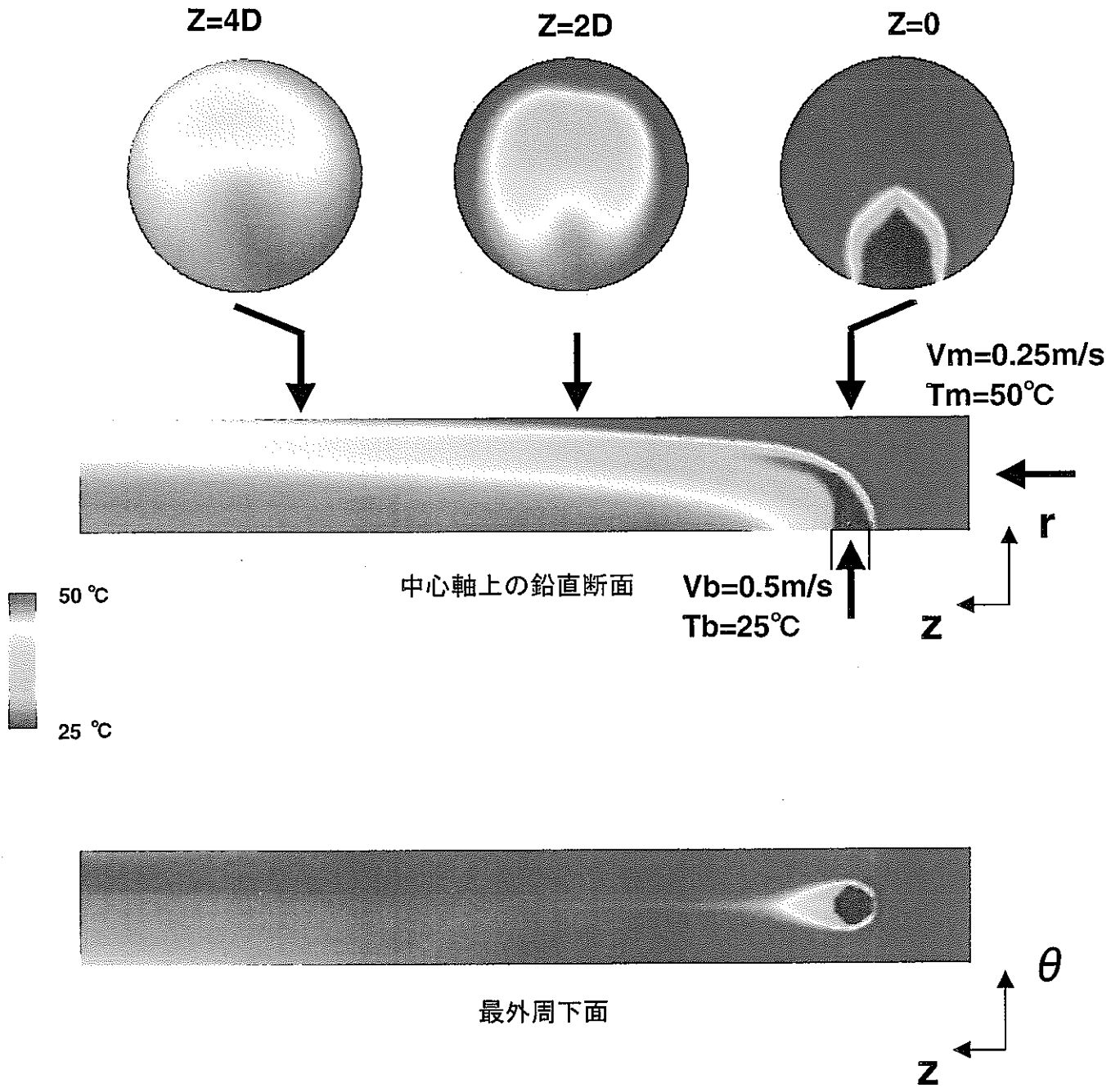


図4-9 CASE10解析結果 ($V_m/V_b=0.25$)



温度分布図

図4-10(1/2) CASE2解析結果 (Vm/Vb=0.5)

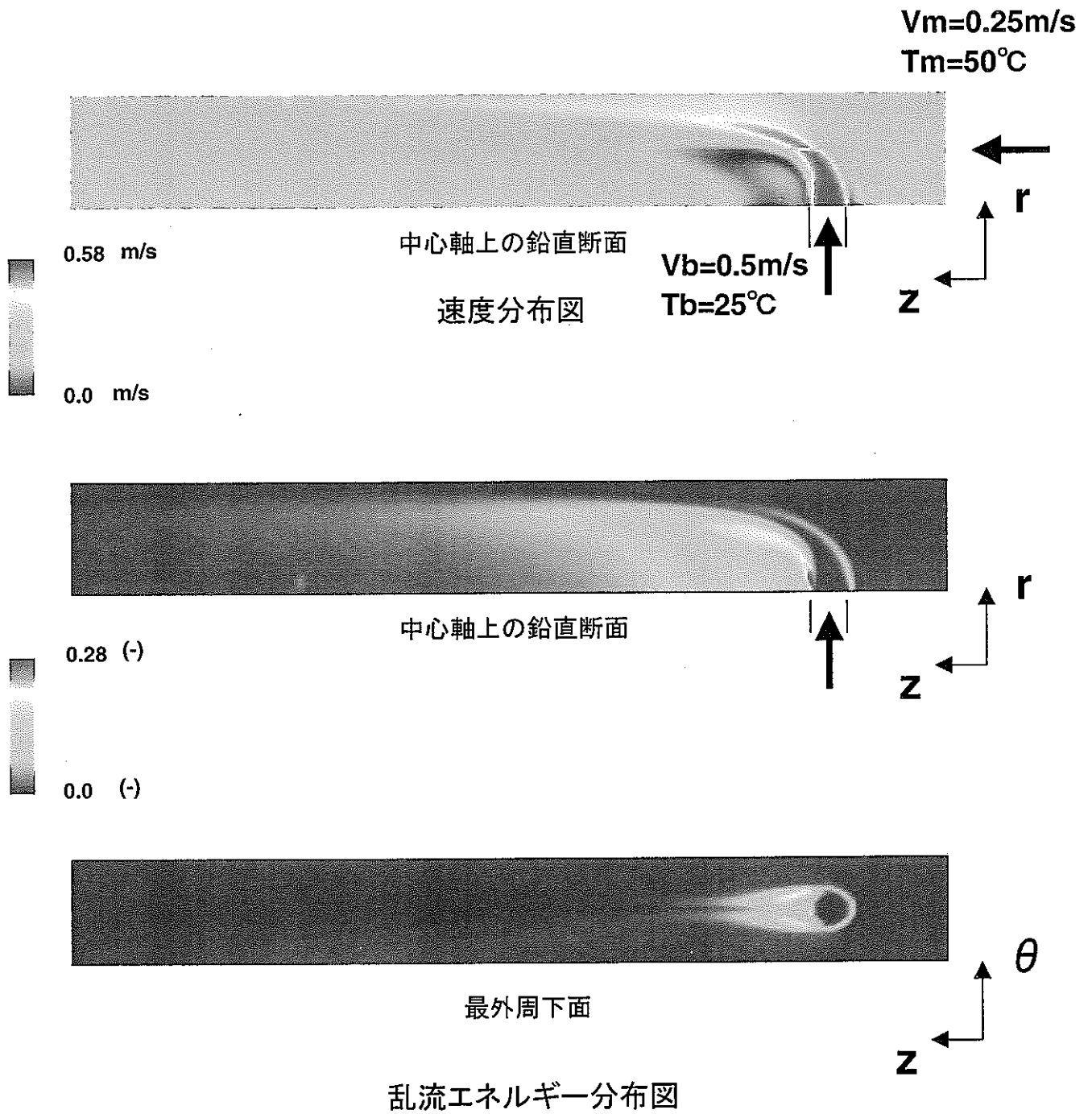
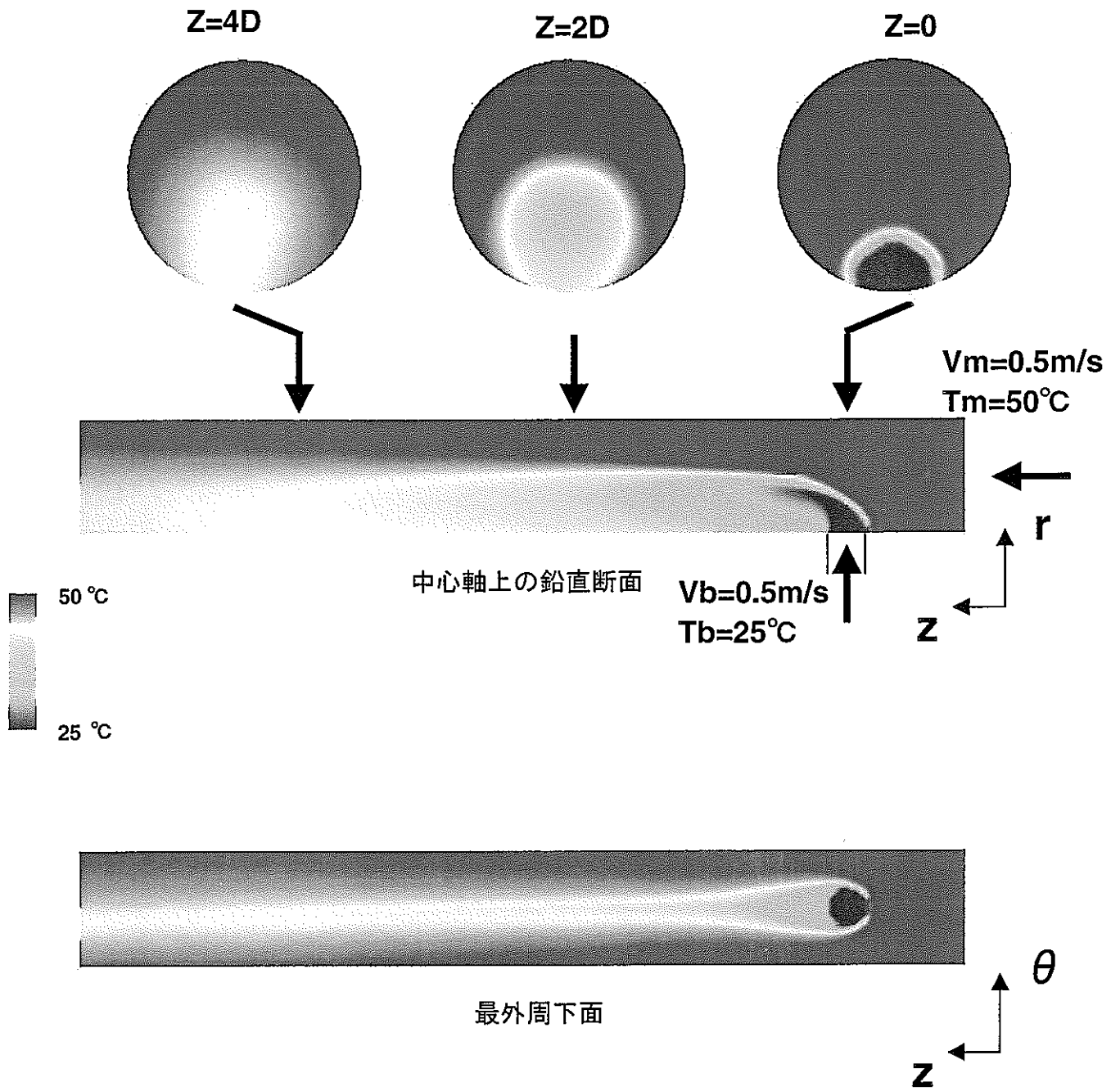


図4-10(2/2) CASE2解析結果 ($V_m/V_b = 0.5$)



温度分布図

図4-11(1/2) CASE3解析結果 ($V_m/V_b=1$)

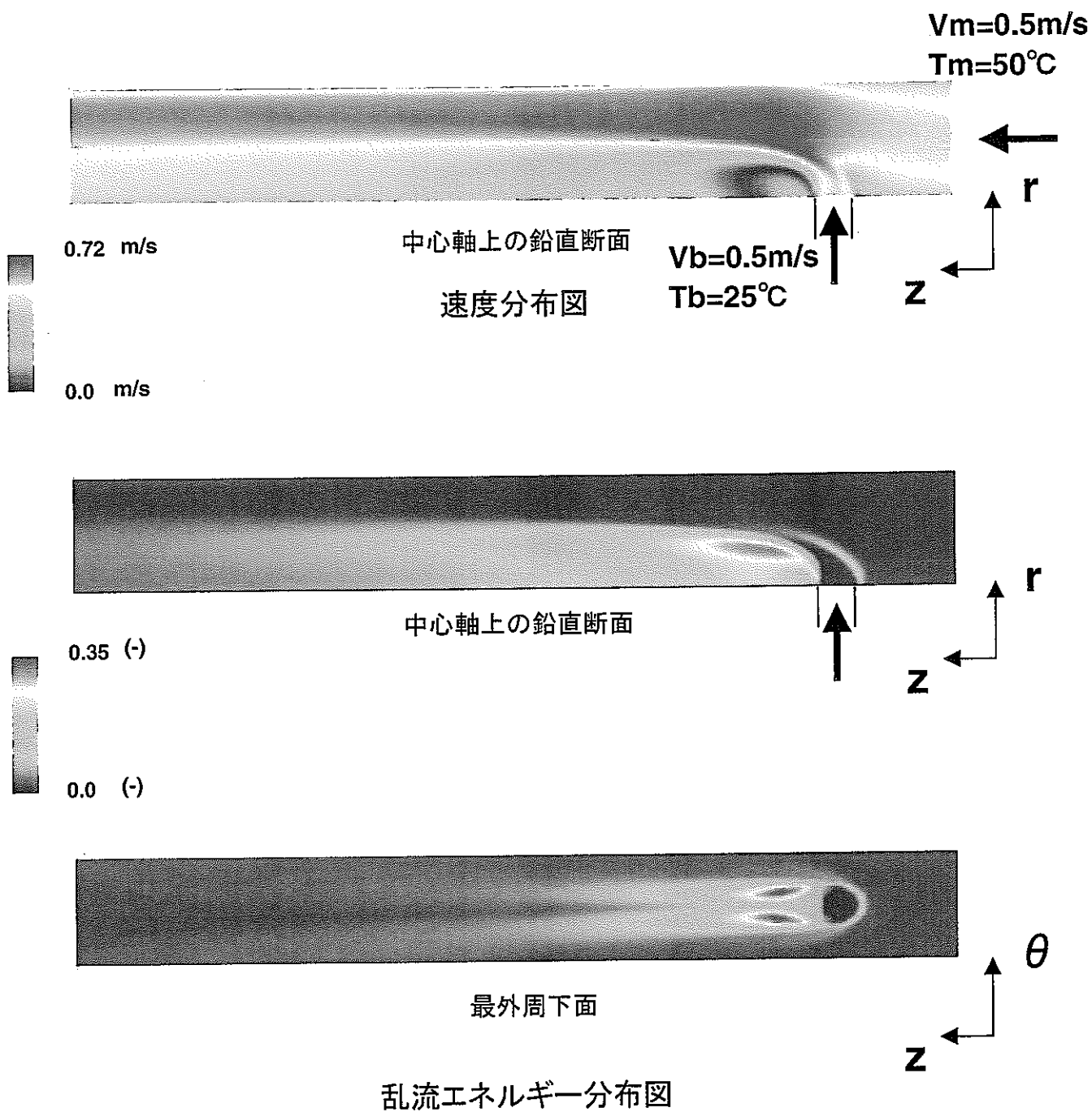


図4-11(2/2) CASE3解析結果 ($V_m/V_b=1$)

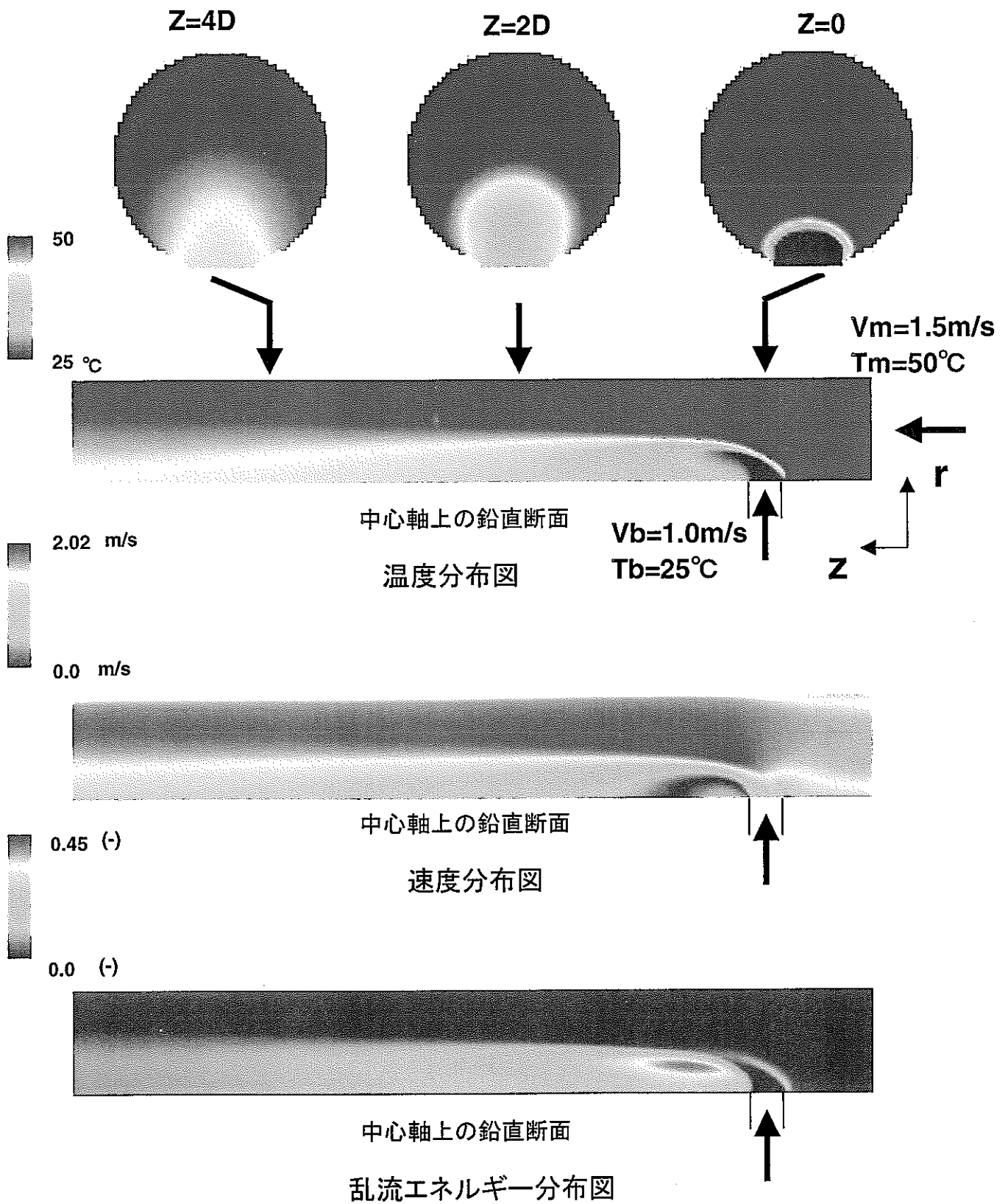


図4-12 CASE7解析結果 ($V_m/V_b=1.5$)

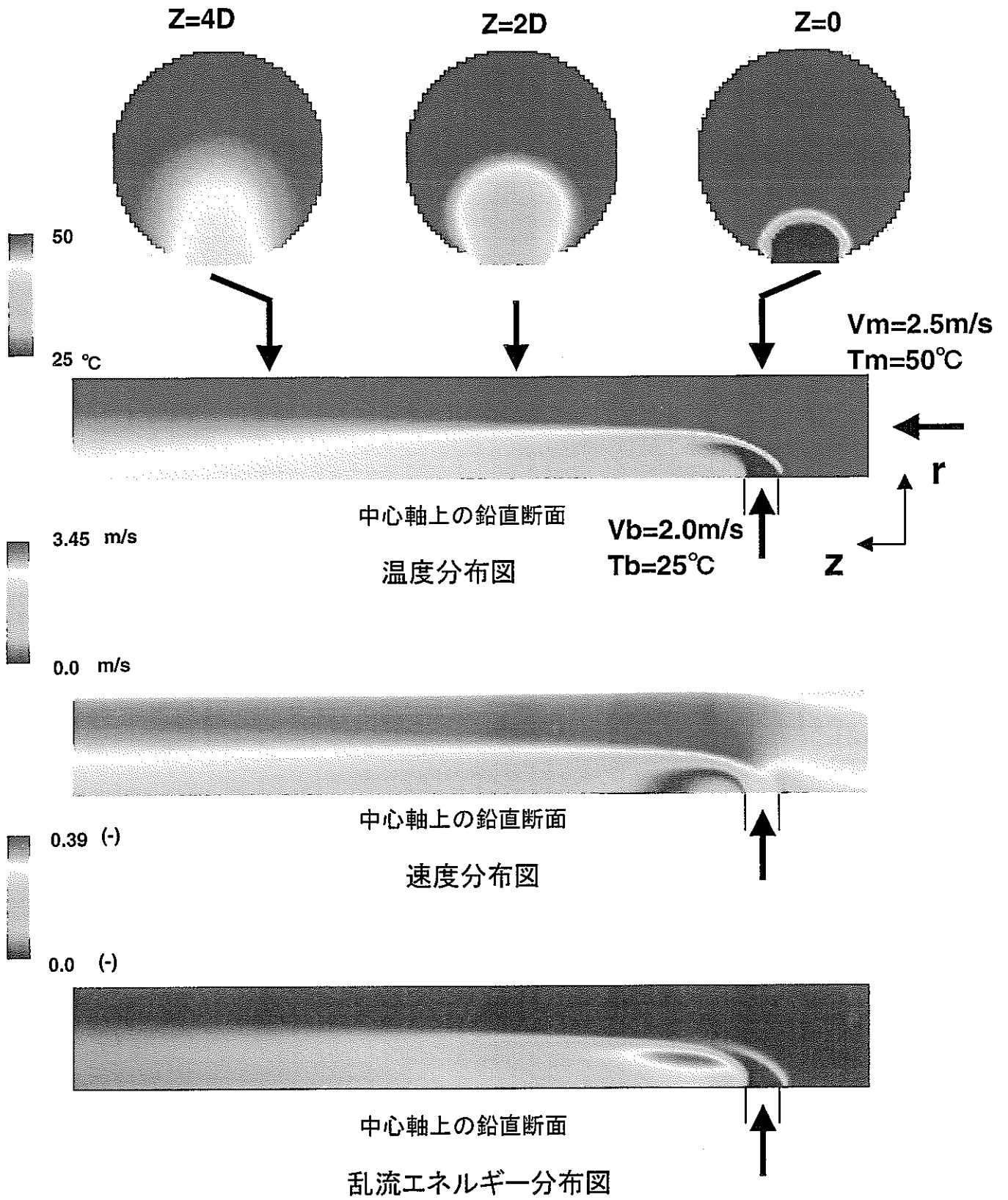
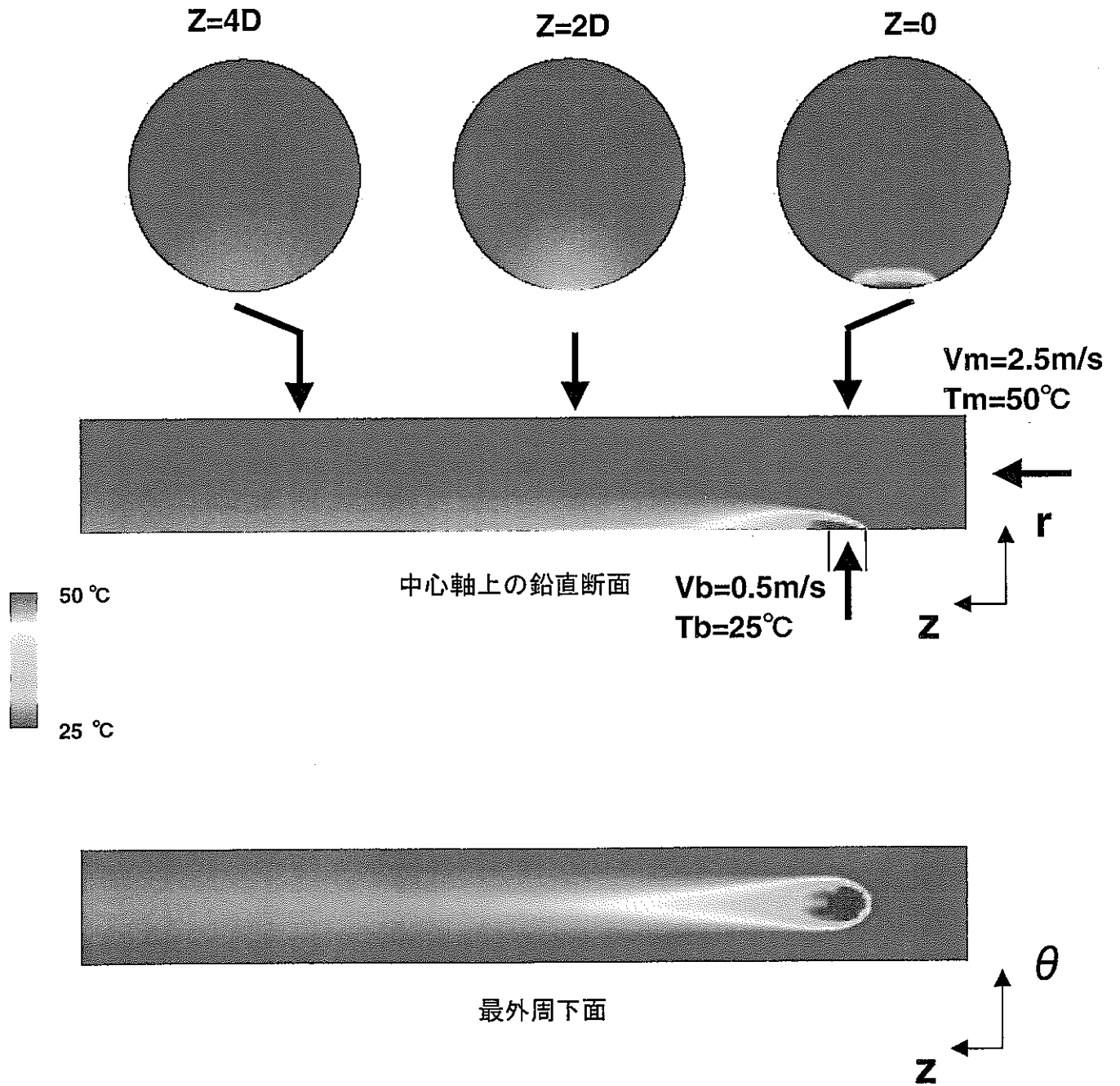


図4-13 CASE11解析結果 ($V_m/V_b=1.25$)



温度分布図

図4-14(1/2) CASE5解析結果 ($V_m/V_b=5$)

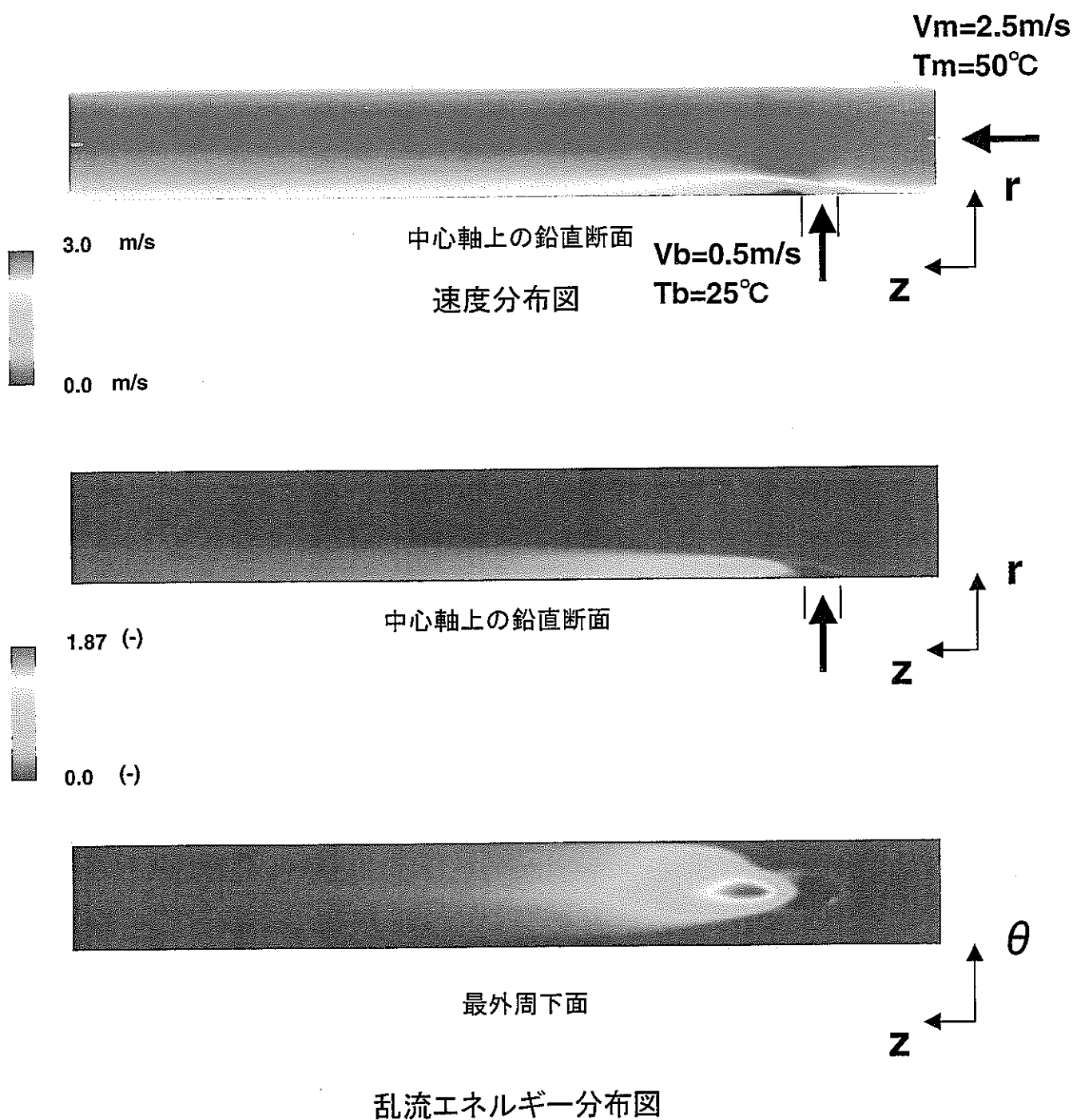


図4-14(2/2) CASE5解析結果 (Vm/Vb=5)

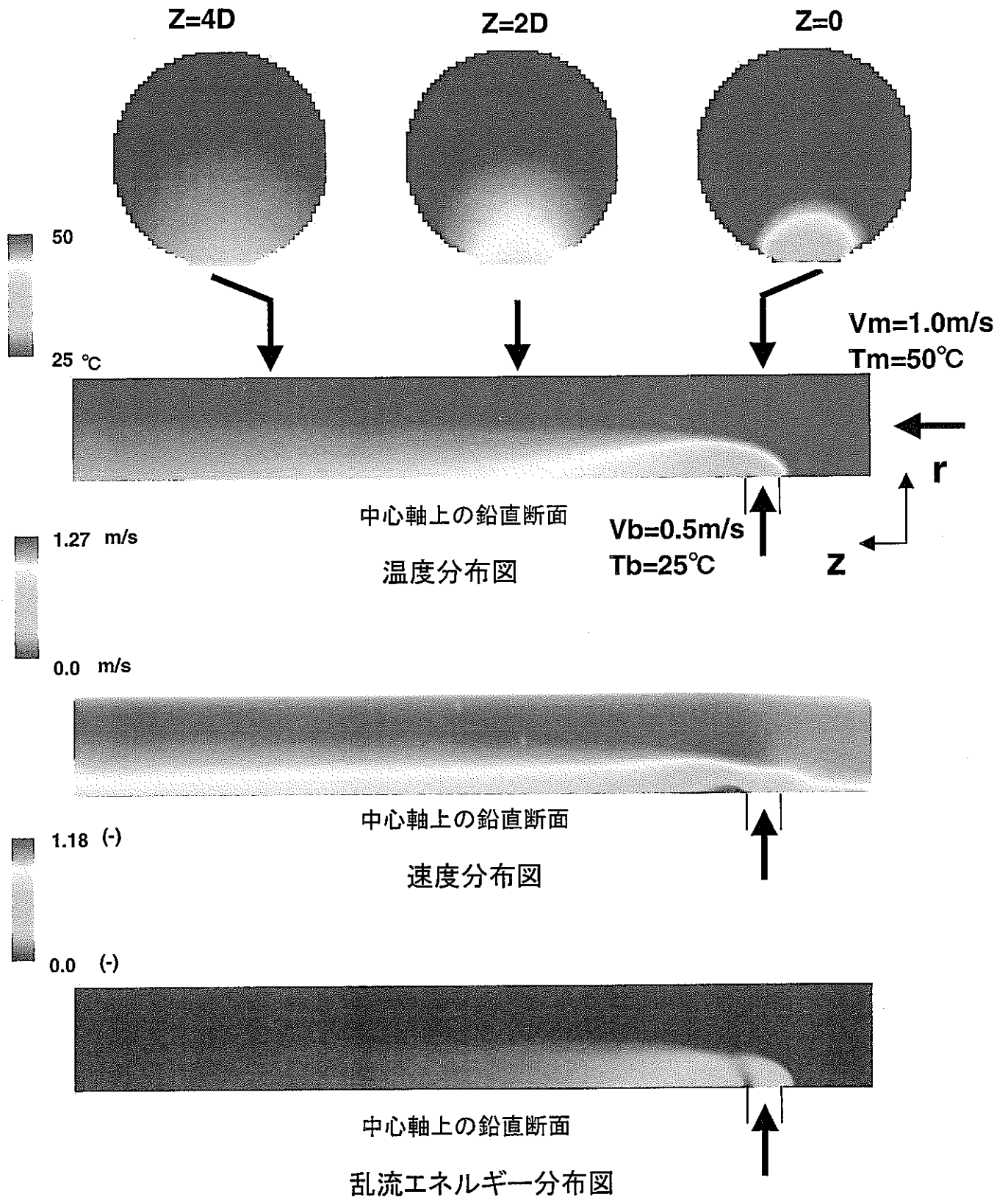


図4-15 CASE4解析結果 ($V_m/V_b=2$)

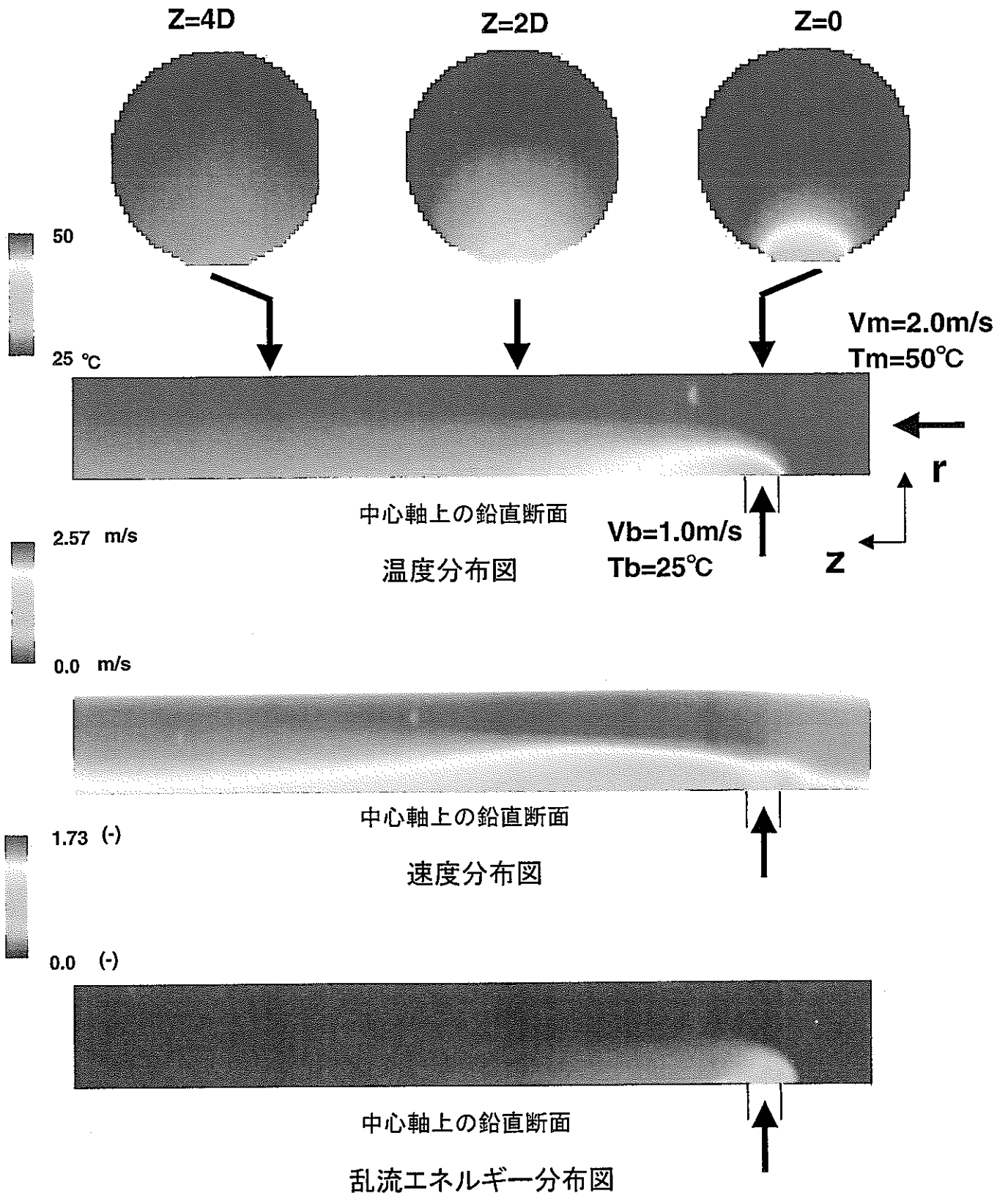


図4-16 CASE8解析結果 ($V_m/V_b=2$)

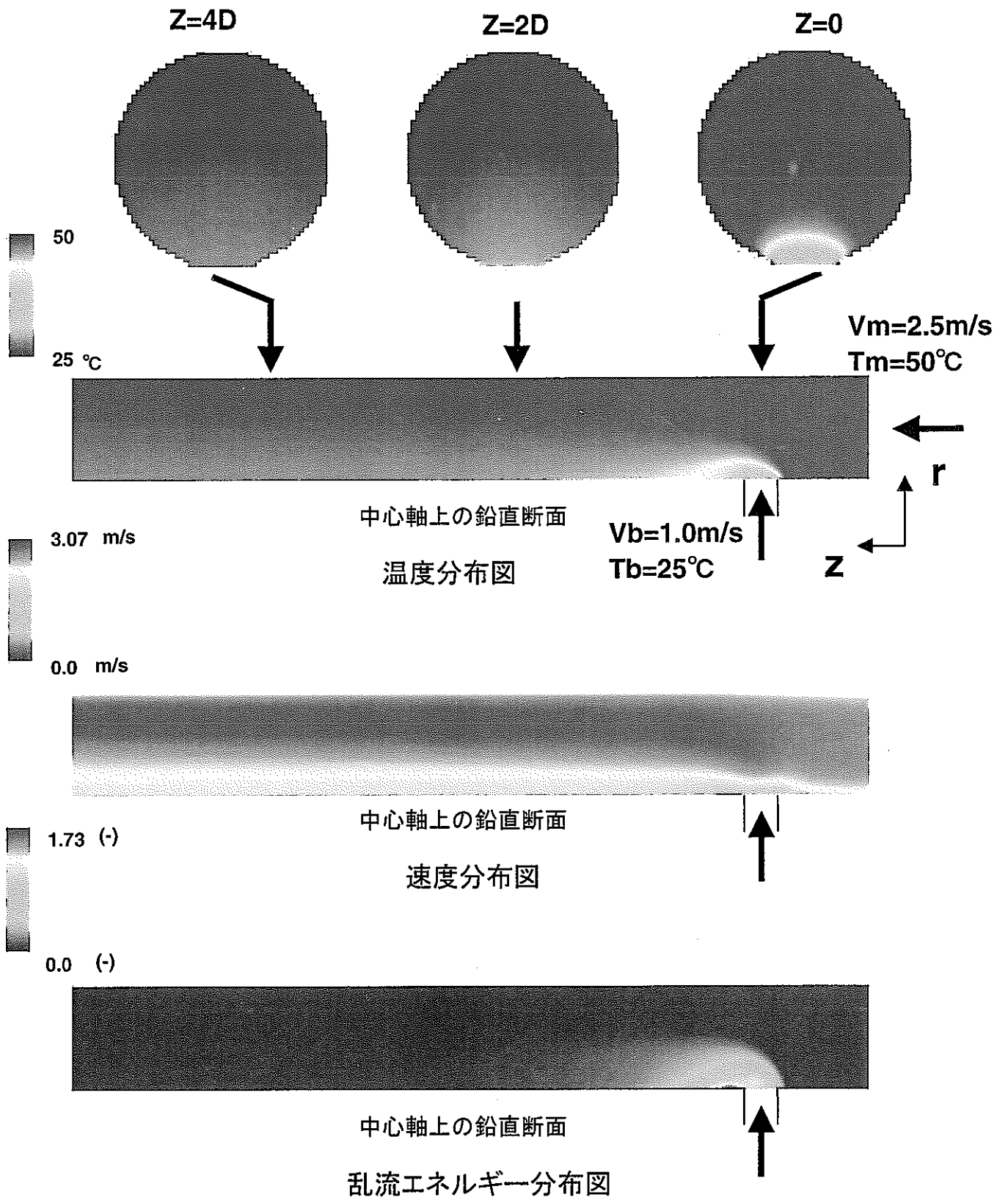


図4-17 CASE9解析結果 ($V_m/V_b=2.5$)

第5章 考察

可視化試験結果と解析結果を各噴流形態における代表ケースで比較したものを図 5-1 に示す。可視化試験では、枝配管からの噴流は主流のせん断力によって主流との境界面に大きな渦を形成している。この渦は乱流変動によるものではなく、流動不安定に伴う渦と考えられる。解析では、乱流モデルに等方性の乱れを想定している $k-\varepsilon$ モデルを使用していることから、可視化試験で見られるような大きな渦が再現できていない。しかし、各流速条件によるフローパターンは定性的に一致しており、時間平均的な流れの形態を予測する上では $k-\varepsilon$ モデルで十分に模擬できていることがわかる。

本解析結果を可視化試験と同様に各運動量比によって分類したものを図 5-2 に示す。衝突噴流と偏向噴流、偏向噴流と再付着噴流の境界は解析結果でも同様の結果となった。しかし、再付着噴流と壁面噴流の境界は解析結果では運動量比（主配管/枝配管）が大きくなる方にシフトする結果となった。この点については今後可視化試験の追試等で確認していく予定である。

$k-\varepsilon$ モデルを用いた本解析により、実験で得られた運動量比に基づく噴流形態のマップが、再付着噴流と壁面噴流の境界に課題を残すものの、再現できる見通しが得られた。

横風を受ける軸対称噴流における噴流軸の実験式として推奨されている Shandorov^[10]の式を以下に示す。

$$\frac{y}{d} = \alpha^{0.79} \left(\frac{z}{d} \right)^{0.39}$$

y : 径方向位置 z : 軸方向位置 α : 流速比 (V_b/V_m) d : 噴流ノズル外径

噴流軸の実験式と本解析における温度分布での低温噴流の分布から求めた噴流中心線との比較を図 5-3 に示す。本解析結果の噴流中心線は、Shandorov の式より主流方向に偏向されていることがわかる。実験式における噴流軸は、各断面の最大速度の点を結ぶ曲線と定義されている。一般に最大速度を結んだ噴流軸は噴流の中心線より外側境界に近いことがわかっている^[11]。また、Shandorov の実験が広い空間で行われたのに対して、本解析は配管内へ噴流が流れ込むため対向面の影響がでたためと考えられる。

噴流対向面に壁がある場合の噴流軸の実験式として Kamotani^[12]等が示したものがある。Kamotani は噴流に温度差がある場合にも適用できるように流速比の代わりに密度を含んだ運動量束比を用いた。

$$\frac{y}{d} = 2.0J^{0.28} (z/d)^{0.5} (1 - e^{-0.7H/d})$$

J : 運動量束比 (M_b/M_m) H : 対向面までの距離

* $M_b = \rho_m V_m^2$ $M_m = \rho_b V_b^2$ ρ : 密度

噴流軸の比較を図 5-4 に示す。ここで、 H/d としては主配管/枝配管の口径比 (D/d) とした。Shandorov の式と比較すると Kamotani の式の方が偏向割合は小さくなっている。これは、Kamotani の式が二次元噴流による実験であったことと、実験の範囲が $8 < J < 72$ 、 $12 < H/D < 44$ となっており本解析ケースは範囲外となっていたことが原因と考えられる。そこで、本解析ケースに合わせて Kamotani の式における係数を調整した結果を図 5-5 に示す。式を以下に示す。

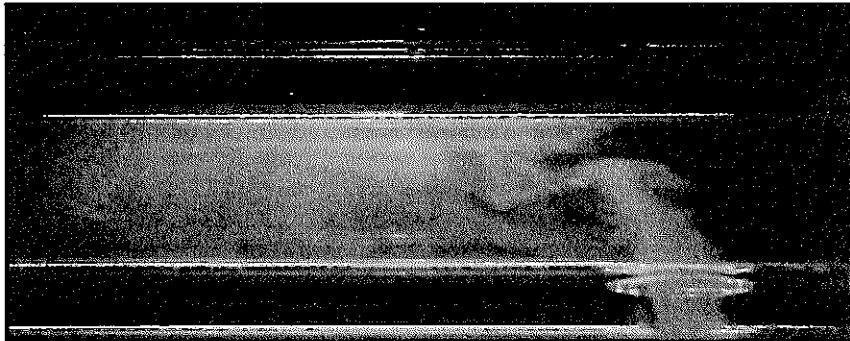
$$\frac{y}{d} = 2.5J^{0.4}(x/d)^{0.27}(1 - e^{-0.7H/d})$$

* ここで $J = (\rho_b V_b^2 d^2 \pi / 4) / \rho_m V_m^2 D d$ とした。

図より、本式を用いて衝突噴流における温度変動の大きい領域として枝配管噴流と主配管壁面との衝突位置を推定できると考えられる。今後、本配管体系での実験データとの整合を図っていく予定である。

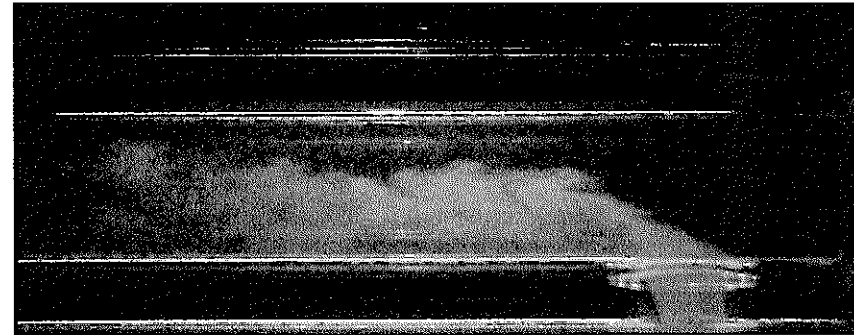
(1) 衝突噴流

可視化試験結果 ($V_m=0.1\text{m/s}$ 、 $V_b=0.51\text{m/s}$)

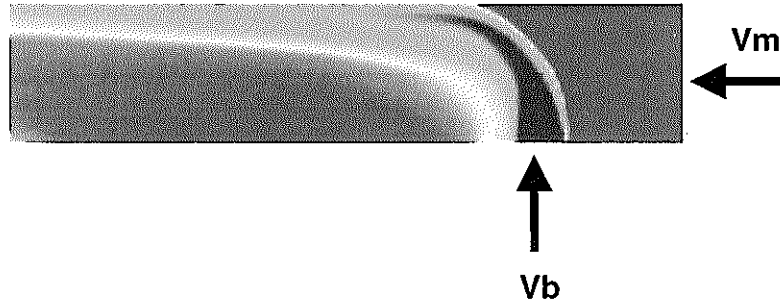


(2) 偏向噴流

可視化試験結果 ($V_m=0.24\text{m/s}$ 、 $V_b=0.51\text{m/s}$)



解析結果 ($V_m=0.125\text{m/s}$ 、 $V_b=0.5\text{m/s}$)



解析結果 ($V_m=0.25\text{m/s}$ 、 $V_b=0.5\text{m/s}$)

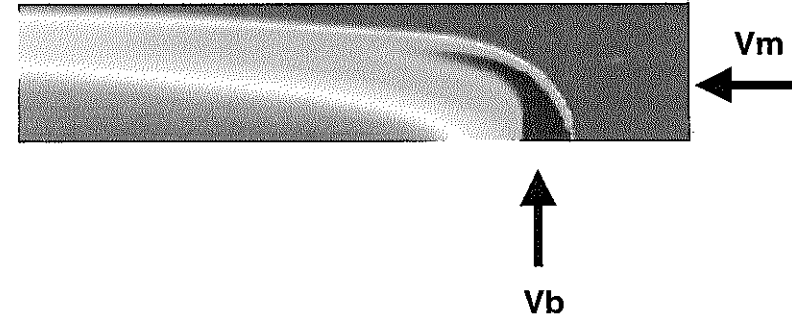
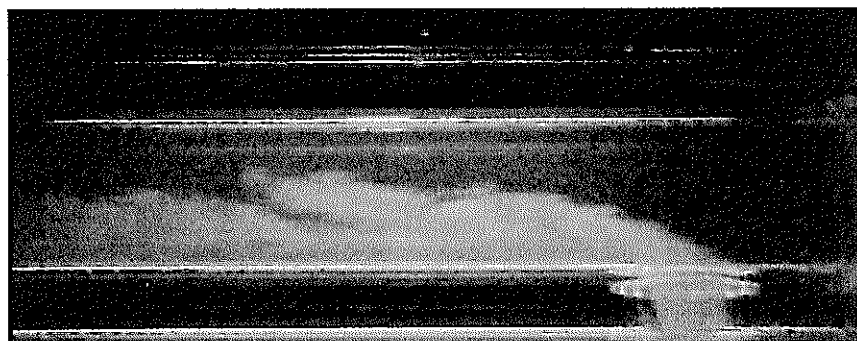


図5-1(1/2) 可視化試験と解析結果の比較

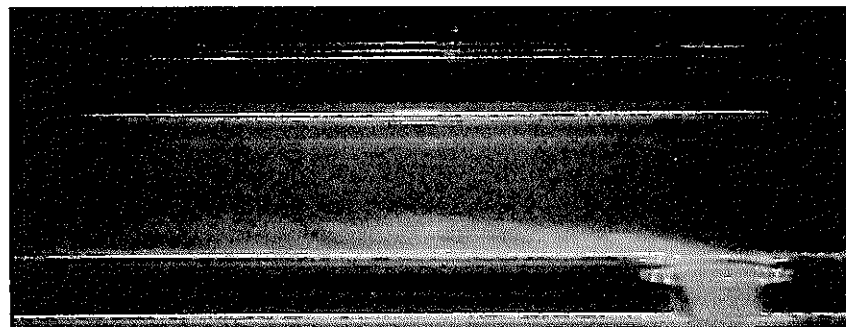
(3) 再付着噴流

可視化試験結果 ($V_m=0.32\text{m/s}$ 、 $V_b=0.51\text{m/s}$)

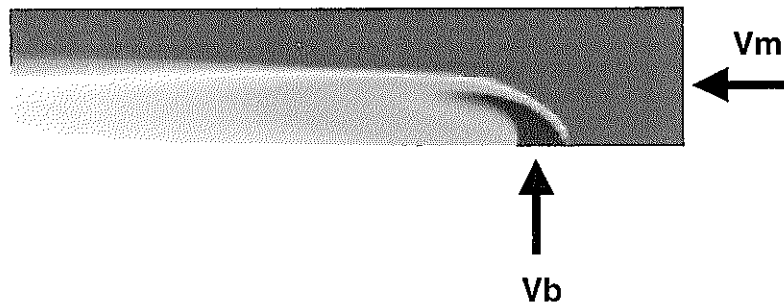


(4) 壁面噴流

可視化試験結果 ($V_m=2.01\text{m/s}$ 、 $V_b=0.5\text{m/s}$)



解析結果 ($V_m=0.5\text{m/s}$ 、 $V_b=0.5\text{m/s}$)



解析結果 ($V_m=2.5\text{m/s}$ 、 $V_b=0.5\text{m/s}$)

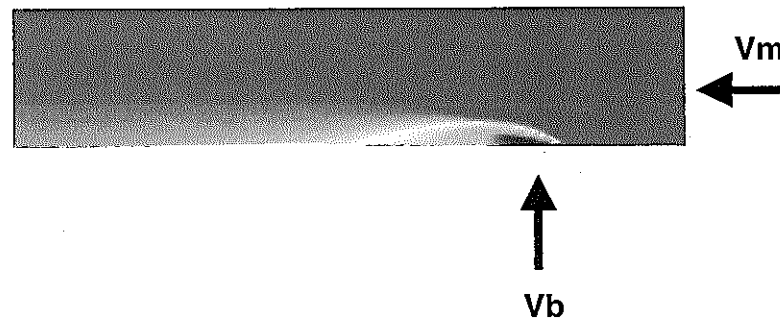


図5-1(2/2) 可視化試験と解析結果の比較

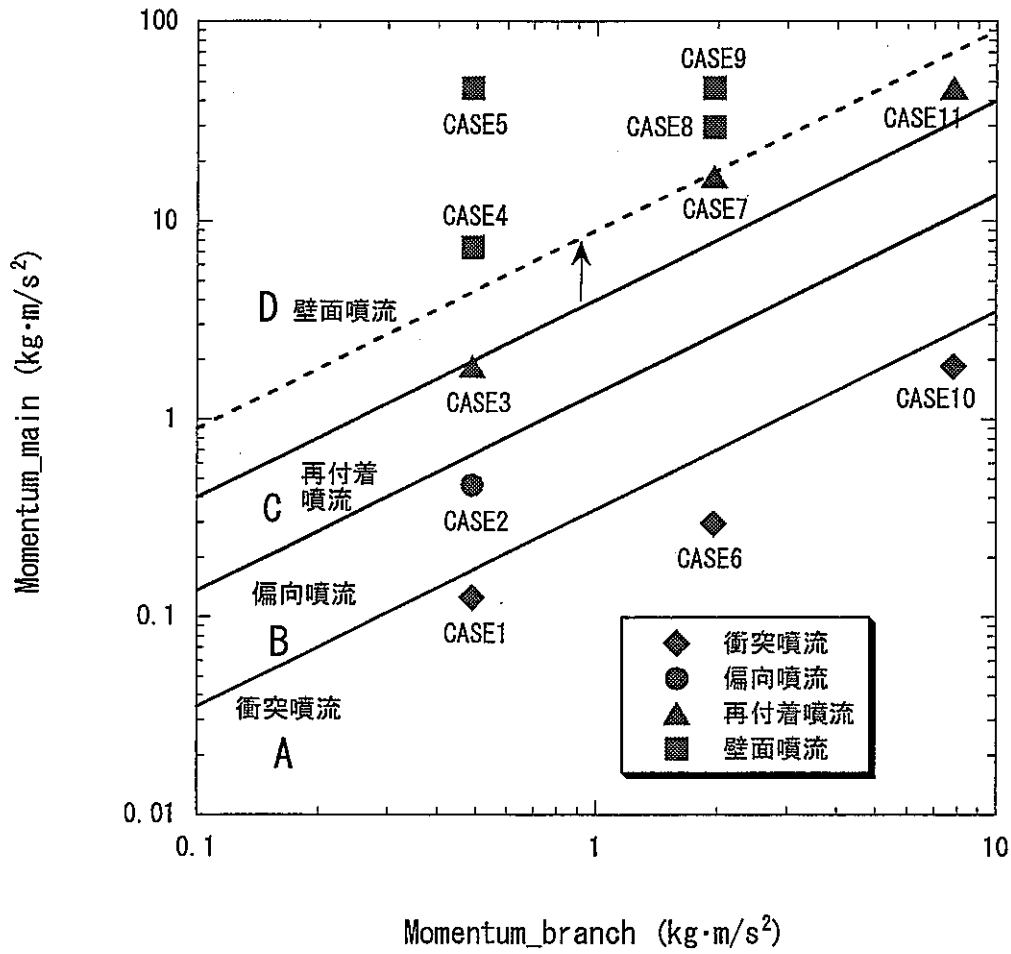


図5-2 噴流形態のマップ

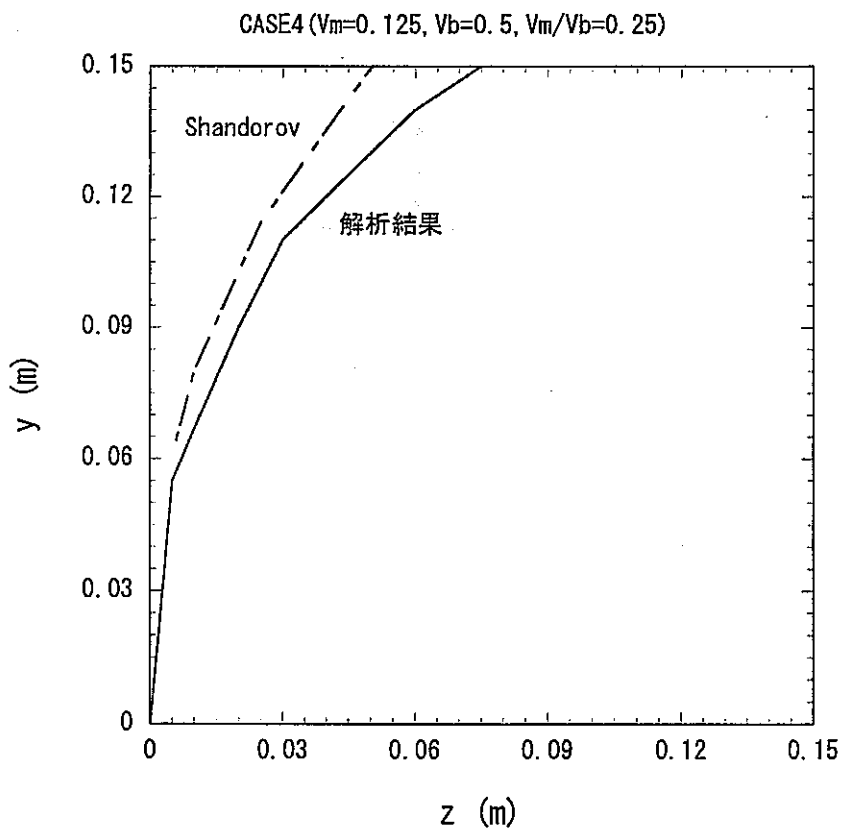
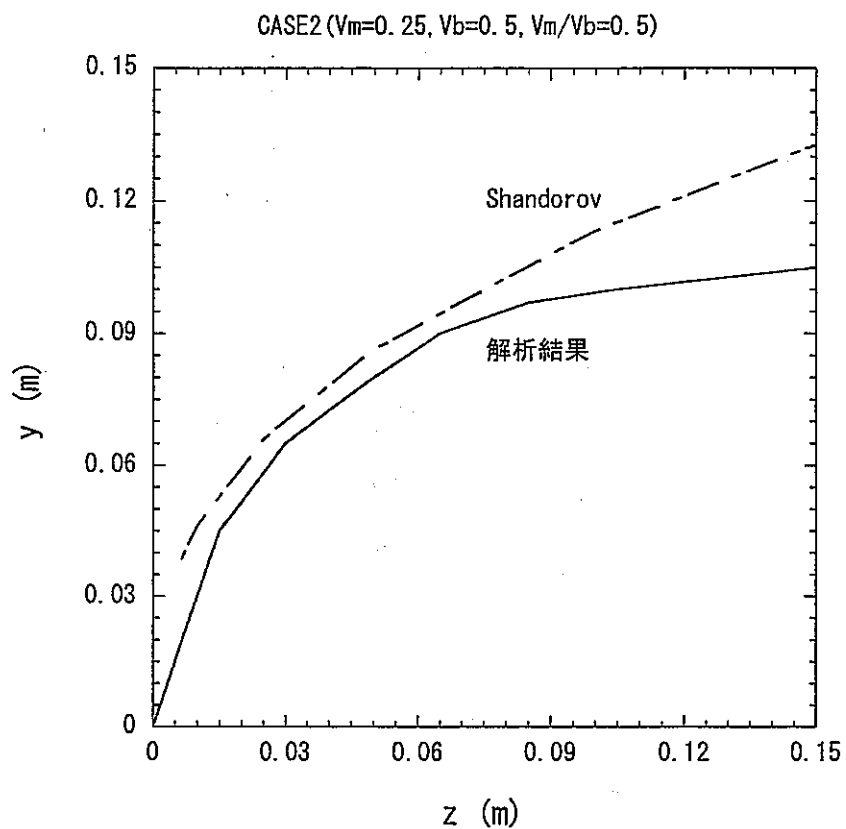


図5-3 実験式との比較 (Shandorov)

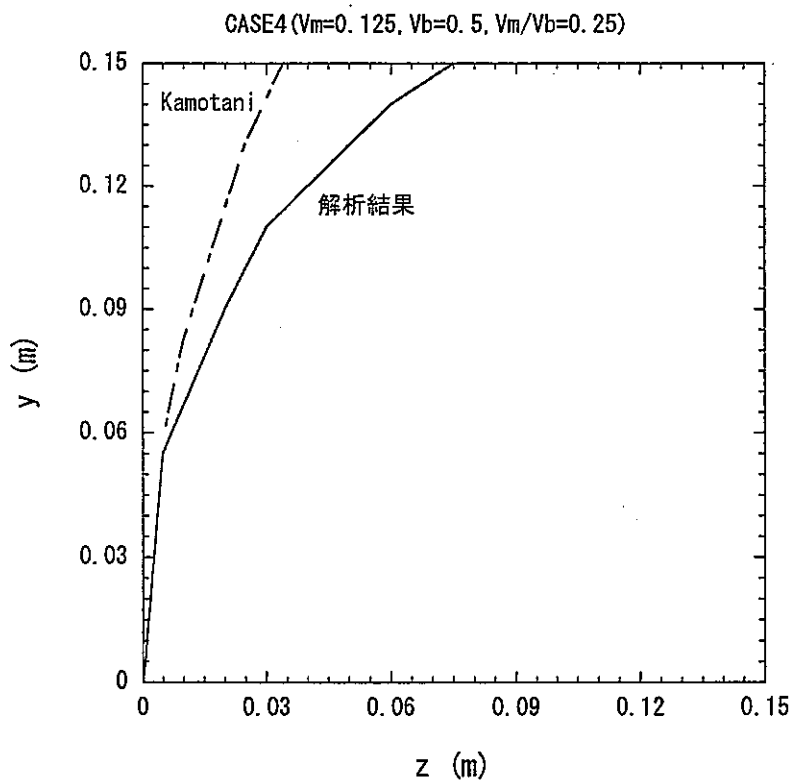
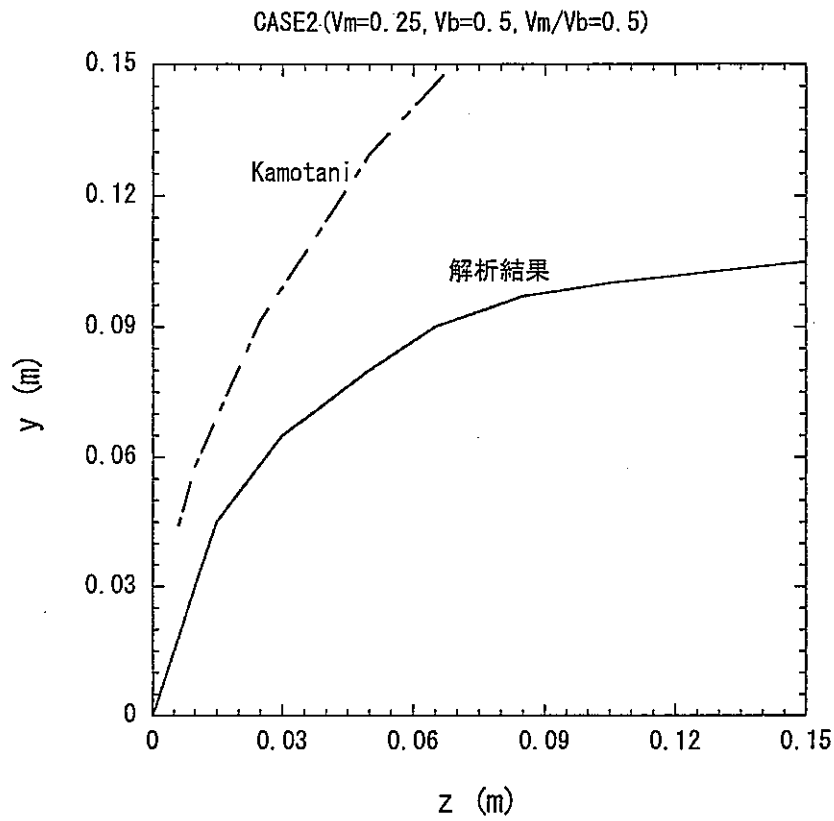


図5-4 実験式との比較 (Kamotani)

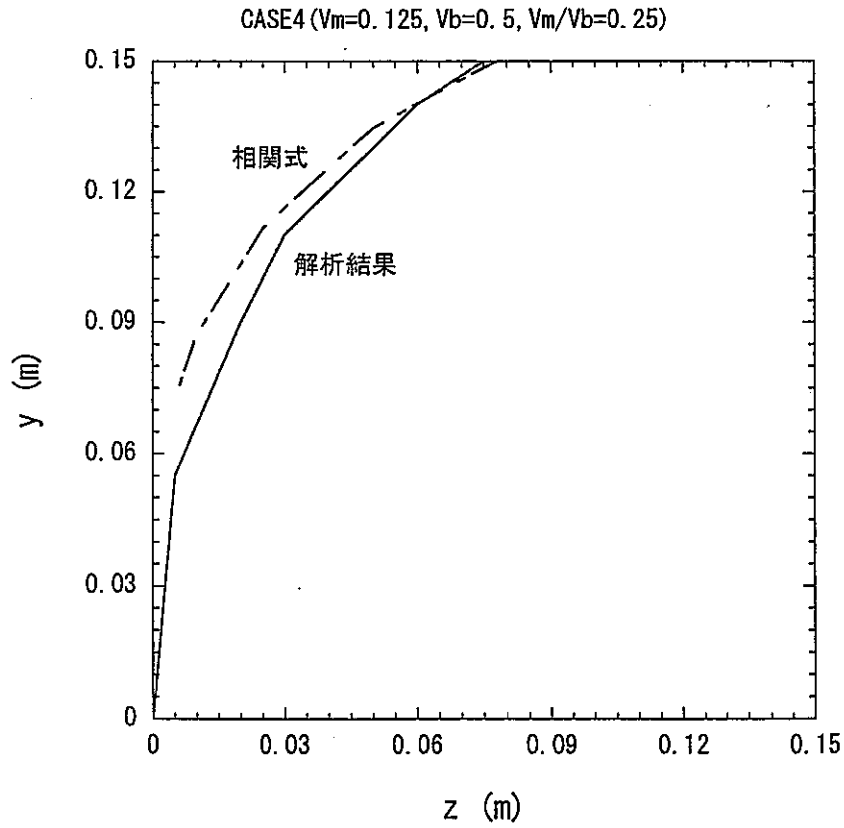
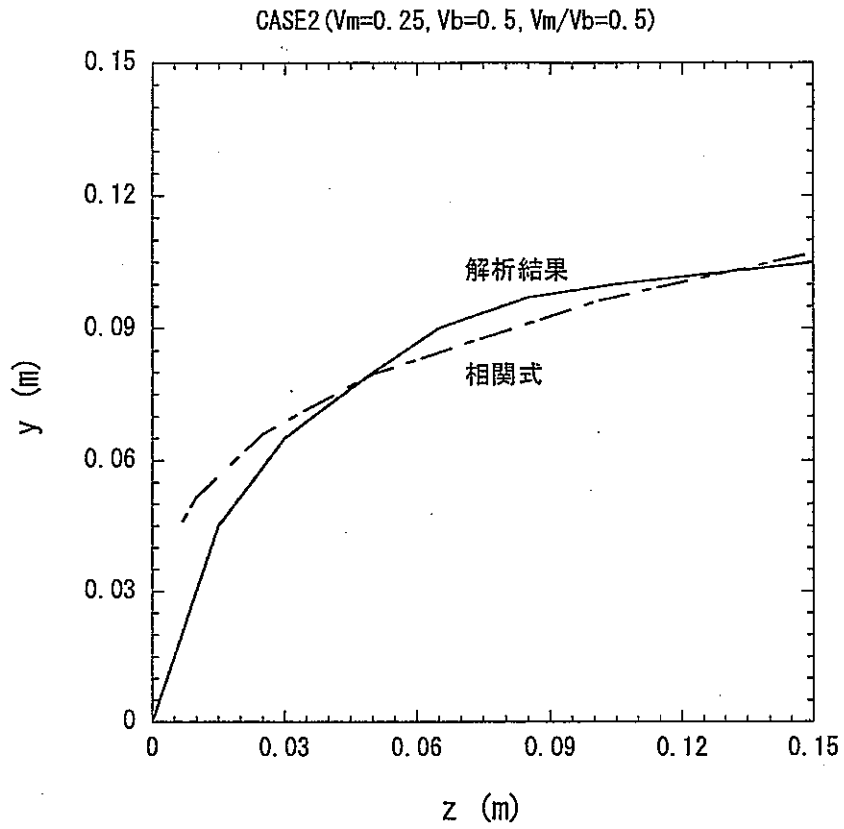


図5-5 解析結果と相関式の比較

第6章 結論

T字配管における冷却材温度変動ならびに構造健全性に影響を及ぼす可能性がある長周期温度変動及びホット/コールドスポットの挙動に関する支配パラメータの抽出と感度評価を行い、現象の解明と評価手法の整備・検証に必要な実験データベースを構築するために、長周期温度変動水試験装置 (WATLON) を製作した

本試験装置にて染料注入法による可視化試験を実施した。以下に結果を示す。

1)可視化試験の結果、噴流形態を以下の4種類に分類できることがわかった。

(a)衝突噴流

枝配管噴流が主配管対向面に衝突して下流側に流れていく状態。

(b)偏向噴流

枝配管噴流が主配管中心部を主に流れる状態。

(c)再付着噴流

枝配管噴流が主配管中心部を流れるが、枝配管と主配管壁面との間の循環渦の影響で再び主配管壁面に付着する状態。

(d)壁面噴流

枝配管側の主配管壁面に沿って流れる状態。

上記噴流形態の中で、(c)再付着噴流の付着点近傍での挙動が不安定となり主配管壁面の温度変動に大きく影響すると考えられる。

2)各噴流形態は運動量比により整理できることがわかった。

乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデルを用いた有限差分法に基づく多次元解析を実施し、各配管流入条件の違いによる噴流形態の予測を行った。以下に結果を示す。

1)円筒座標系と直交座標系の比較から、各座標系に適した解析対象は以下の通りに整理できる。

(a)直交座標系

- ・中心軸を横切る噴流の噴流軸を予測する場合

(b)円筒座標系

- ・壁面に沿う周方向流れが顕著な場合
- ・壁面近傍の挙動に着目する場合

2)可視化試験で得られた運動量比に基づく噴流形態のマップが、再付着噴流と壁面噴流の境界に課題を残すものの、 $k-\epsilon$ モデルを用いた解析にて再現できる見通しが得られた。

3)枝配管からの噴流軸の平均的な位置を推定するための相関式を提案した。

4)壁面噴流が配管壁近傍の乱流エネルギーの値からみて、サーマルストライピングの評価上重要と考えられる。

謝辞

本研究にあたり、試験の実施に多大な協力をしていただきました常陽産業（株）伊藤真美氏、小沼英良氏および関根正氏に感謝いたします。また、試験データの整理を行っていただきました原子力システム（株）の川島滋代氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 木村暢之、A. Tokuhiko、宮越博幸、平行三噴流のサーマルストライピング現象に関する実験研究 - 噴流の吐出速度差と吐出温度差が対流混合に及ぼす影響 -、PNC TN9410 96-296、1996.
- [2] A. Tokuhiko and N. Kimura, An experimental investigation on thermal striping. Mixing phenomena of a vertical non-buoyant jet with two adjacent buoyant jets as measured by ultrasound Doppler velocimetry, Nucl. Eng. Design, 188, pp.49-73, 1999
- [3] 木村暢之、A. Tokuhiko、上出英樹、サーマルストライピング現象における流体混合に関する実験研究 - 平行三噴流間の混合過程と吐出速度の影響 -、JNC TN9400 2000-027、2000.
- [4] 村松壽晴、笠原直人他、サーマルストライピングに関する研究の現状と今後の研究開発、JNC TN9400 2000-010、2000.
- [5] 村松壽晴、冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発(XI)、PNC TN9410 97-039、1997.
- [6] 村松壽晴、大高雅彦、冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発(XIII)、JNC TN9400 99-007、1999.
- [7] 村松壽晴、国際原子力機関主催 国際原子力機関主催「実炉データを用いた熱構造力学・熱流動解析コードの検証」研究プログラム(I)、PNC TN9410 97-058、1997.
- [8] 高橋志郎他、T 字形合流配管内の温度差を有する二流体による流体温度変動特性、日本原子力学会「2000 年春の年会」予稿集、E25、2000.
- [9] 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、PNC TN9410 98-027、1998.
- [10] Shandorov, G. S., Flow from a channel into Stationary and Moving Media, Zh. Tekhn. Fiz., 37:1, 1957
- [11] Patrick, M.A., Experimental investigation of the mixing and penetration of a round turbulent jet injected perpendicularly into a transverse stream, Trans. Inst. Chem. Eng., 45:T16-31, 1967.
- [12] Kamotani, Y., and Greber, I., Experiments on Confined Turbulent Jets in Cross Flow, NASA Report, NASA CR-2392, March 1974.