

配管合流部の混合現象に関する研究
－DNSによる実験解析と現象の解明－
(研究報告書)

2003年2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)

2003

配管合流部の混合現象に関する研究
－ DNSによる実験解析と現象の解明－
(研究報告書)

五十嵐実*、川島滋代**、中根茂**、
田中正暁*、木村暢之*、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、構造材内部に高サイクル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、原子力のみならず一般プラントにおいても重要な課題である。核燃料サイクル開発機構では、本現象の解明とともに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コード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、評価ルールを具体化するために、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、直接シミュレーション（DNS）コードによる解析を実施し、熱電対ツリーによる詳細な温度分布測定及び粒子画像流速測定法（PIV）による詳細な速度分布測定結果との比較からコードの適用性を評価するとともに、温度変動に影響を及ぼすと考えられる渦構造の解明を試みた。

DNSによる解析は、試験（壁面噴流と衝突噴流の2ケース）で得られた時間平均温度場及び速度場をほぼ再現できることがわかった。また、解析結果は、温度測定試験における壁面噴流条件で得られた温度変動強度の高い位置に発生する温度変動の卓越周波数も精度良く再現できた。

DNSによる解析結果から、壁面噴流条件における温度変動強度の高い位置に発生する温度変動は、枝配管から出た噴流の後流域に生成されるカルマン渦によるものであることがわかった。また、この枝配管後流域に生成される渦は3次元的な挙動を示していることが確認された。

本報告書の内容には、原子力システム（株）が核燃料サイクル開発機構（機構担当部課室：要素技術開発部 新技術開発試験グループ）との契約により実施した業務成果に関するものを含み、核燃料サイクル機構が取りまとめたものである。

*大洗工学センター 要素技術開発部 新技術開発試験グループ

**原子力システム株式会社

**Study on Mixing Phenomena in T-pipe Junction
- Experimental analysis using DNS and investigation of mixing process-**

Minoru IGRASHI*, Shigeyo KAWASHIMA**, Shigeru NAKANE**,
Masaaki TANAKA*, Nobuyuki KIMURA* and Hideki KAMIDE*

Abstract

In the place where hot and cold fluids are mixed, a time and spatial temperature fluctuation occurs. When this temperature fluctuation amplitude is large, it causes high cycle thermal fatigue in surrounding structure (thermal striping phenomena). Mixing area of high and low temperature fluid exists not only in an atomic power plant but also in a general plant, then, it is significant to investigate this phenomena and also to establish an evaluation rule. In Japan Nuclear Cycle Development Institute, several experiments and the improvement of the analysis methods have been carried out to understand thermal striping phenomena and also to construct an evaluation rule, which can be applied to design. Water Experiment on Fluid Mixing in T-pipe with Long Cycle Fluctuation (WATLON), aiming at examining thermal striping phenomena in a mixing tee, is performed to investigate key factors of mixing phenomena.

In this study, in order to investigate the fluid mixing phenomena, temperature and flow velocity distribution were measured by movable thermocouple tree and particle image velocimetry (PIV). And the analysis using a in-house direct numerical simulation (DNS) code, DINUS-3 was performed to understand applicability of the analytical method in mixing tee.

The temperature and velocity fields obtained from the DINUS-3 were in good agreement with the experimental results. And the prominent frequency of temperature fluctuation was also in good agreement. The DINUS-3 calculation simulated vortex structure in the wake region behind the branch pipe jet. The results of analysis showed that a Karman vortex generated in the wake region behind the branch pipe jet influenced the temperature fluctuation behavior in the mixing tee. And the analytical results revealed that the vortex generated in the wake region behind the branch pipe jet showed the 3-dimensional behavior.

*O-arai Engineering Center, Advanced Technology Division, New Technology development Group

**Nuclear Energy System Incorporation

目 次

第1章 序論	1
第2章 T字管合流部試験	3
2.1 試験装置及びループ構成	3
2.2 試験条件	3
2.3 温度分布測定試験	4
2.4 速度分布測定試験	4
第3章 DNSによる解析	12
3.1 解析体系	12
3.2 境界条件	12
3.3 解析条件及び手順	12
第4章 DNSによる解析と試験結果の比較	16
4.1 壁面噴流	15
4.2 衝突噴流	19
第5章 考察	45
5.1 解析結果と実験結果の差異について	45
5.2 枝配管噴流後流域の渦構造について	46
第6章 結論	70
謝辞	71
参考文献	72

図・表 目 次

2章

表 2-1 ループ仕様	6
表 2-2 試験条件	6
図 2-1 試験装置概略図	7
図 2-2 ループ構成図	8
図 2-3 温度分布測定試験計測ポイント	9
図 2-4 PIV システム構成図	10
図 2-5 PIV 計測概念図	11

3章

表 3-1 DINUS-3 Code の概要	14
図 3-1 メッシュ分割図	15

4章

図 4-1 実験及び解析における座標系	21
図 4-2 時間平均温度・温度変動強度の比較 (Case1 : 鉛直方向断面)	22
図 4-3 時間平均温度・温度変動強度の比較 (Case1 : 周方向、径方向断面)	23
図 4-4 時間平均速度・速度変動強度の比較 (Case1 : 鉛直方向断面)	24
図 4-5 時間平均速度ベクトル及び流線の比較 (Case1 : 水平方向断面)	25
図 4-6-(1) 軸方向速度変動強度の比較 (Case1 : 水平方向断面)	26
図 4-6-(2) 水平方向速度変動強度の比較 (Case1 : 水平方向断面)	27
図 4-7 時間平均温度分布の比較 ($r'=5\text{mm}$: Case1)	28
図 4-8 時間平均温度分布の比較 ($r'=10\text{mm}$: Case1)	29
図 4-9 温度変動強度分布の比較 ($r'=5\text{mm}$: Case1)	30
図 4-10 温度変動強度分布の比較 ($r'=10\text{mm}$: Case1)	31
図 4-11-(1)軸方向流速成分(V_z)の時間平均値・変動強度の比較($Z=0.36D_m$:Case1)	32
図 4-11-(2)水平方向流速成分(V_x)の時間平均値・変動強度の比較($Z=0.36D_m$:Case1)	33
図 4-12-(1)軸方向流速成分(V_z)の時間平均値・変動強度の比較($Z=0.5D_m$: Case1)	34
図 4-12-(2)水平方向流速成分(V_x)の時間平均値・変動強度の比較($Z=0.5D_m$: Case1)	35
図 4-13-(1)軸方向流速成分(V_z)の時間平均値・変動強度の比較($Z=1.0D_m$: Case1)	36
図 4-13-(2)水平方向流速成分(V_x)の時間平均値・変動強度の比較($Z=1.0D_m$: Case1)	37
図 4-14 時間平均温度・温度変動強度の比較 (Case2 : 鉛直方向断面)	38
図 4-15 時間平均温度・温度変動強度の比較 (Case2 : 周方向、径方向断面)	39
図 4-16 時間平均速度・速度変動強度の比較 (Case2 : 鉛直方向断面)	40
図 4-17 時間平均温度分布の比較 ($r'=5\text{mm}$: Case2)	41
図 4-18 時間平均温度分布の比較 ($r'=10\text{mm}$: Case2)	42
図 4-19 温度変動強度分布の比較 ($r'=5\text{mm}$: Case2)	43
図 4-20 温度変動強度分布の比較 ($r'=10\text{mm}$: Case2)	44

5章

図 5-1 主配管入口近傍における速度変動強度	49
図 5-2 鉛直方向断面時間平均温度分布の比較 (Case1)	50
図 5-3 鉛直方向断面温度変動強度分布の比較 (Case1)	51

図 5-4-(1) 鉛直方向断面軸方向流速成分(Vz)の時間平均値の比較 (Case1)	52
図 5-4-(2) 鉛直方向断面軸方向流速成分(Vz)の変動強度の比較 (Case1)	53
図 5-5-(1) 鉛直方向断面鉛直方向流速成分(Vy)の時間平均値の比較 (Case1)	54
図 5-5-(2) 鉛直方向断面鉛直方向流速成分(Vy)の変動強度の比較 (Case1)	55
図 5-6 鉛直方向断面時間平均温度分布の比較 (Case2)	56
図 5-7 鉛直方向断面温度変動強度分布の比較 (Case2)	57
図 5-8-(1) 鉛直方向断面軸方向流速成分(Vz)の時間平均値の比較 (Case2)	58
図 5-8-(2) 鉛直方向断面軸方向流速成分(Vz)の変動強度の比較 (Case2)	59
図 5-9-(1) 鉛直方向断面垂直方向流速成分(Vy)の時間平均値の比較 (Case2)	60
図 5-9-(2) 鉛直方向断面垂直方向流速成分(Vy)の変動強度の比較 (Case2)	61
図 5-10 実験と解析における温度変動 PSD の比較	62
図 5-11 温度変動の時系列データ ($Z=1D_m$ $\theta=\pm 30^\circ$ $r'=5mm$)	63
図 5-12 瞬時速度ベクトルの時系列 (水平方向断面 $Y=-65mm$)	64
図 5-13 解析における速度変動の PSD	65
図 5-14 瞬時速度ベクトルの時系列 (垂直方向断面)	66
図 5-15 可視化試験におけるアーチ渦	67
図 5-16 アーチ渦生成周期と温度変動卓越周波数の比較	68
図 5-17 解析における渦度分布	69

第1章 序論

高温と低温の流体が混合する場所では、温度揺らぎが発生する。この流体中における温度揺らぎが構造材へ伝播されることによって、構造材中に温度変動による高サイクル熱疲労が発生する。この現象を総じてサーマルストライピング現象と言う。冷却材として熱伝導率の高いナトリウムを使う高速炉にとっては、流体中の温度揺らぎが構造材に伝わりやすいために、本現象の解明は重要課題となっている。ナトリウム冷却高速原型炉「もんじゅ」では炉心出口部の高低温流体合流部には、サーマルストライピングを回避するためにインコネルの薄い板をライナーとして用いる等の対策が施されているが、現象の解明にはまだ至っていない。高低温水の合流部は原子力に限らず一般のプラントにも数多く存在するが、現状のプラント設計ではメーカ独自の基準によって設計がなされている。

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）では、このサーマルストライピング現象の解明及び評価基準策定のために、種々の実験（WAJECO^{[1][2][3]}、PLAJEST^[4]、TIFFSS^{[5][6]}、TTS^[7]等）及び解析コードの開発^[7]を実施している。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可能となっている^[8]。構造材における熱荷重の評価手法としては、構造材の周波数応答特性を考慮した周波数応答関数^[9]が示されている。

また、高速炉を対象としたサーマルストライピングの研究会として、日本機械学会にて「熱荷重による構造物破損評価手法に関する研究会」が発足し、サイクル機構より評価基準の枠組みを提案してきた^{[7], [10]}。軽水炉でも近年になり数件のサーマルストライピングによる破損事例が報告されており、原子炉の経年変化における重要課題となっている。そこで、「熱荷重による構造物破損評価手法に関する研究会」の分科会として「軽水炉 WG」が設けられ、高低温水合流部温度揺らぎ^[11]と閉塞分岐管の熱成層^[12]に関して評価基準に向けた検討を行っている。さらに、2002 年には水を内包する配管を対象とする「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針基準策定委員会」が発足し、指針の策定が精力的に進められている。

本研究では、サーマルストライピング評価基準の具体的な検討のために、高低温流体の合流部として代表的な形状である T 字配管合流部を対象部位とした、長周期温度変動水試験（WATLON : Water Experiment of Fluid Mixing in T-pipe with Long Cycle Fluctuation）を実施している。第 1 報^[13]にて、可視化試験から、枝配管から主配管に流れ込む噴流形態を(1)壁面噴流、(2)再付着噴流、(3)偏向噴流、(4)衝突噴流の 4 種類に分類できることを示した。さらに、各配管（主配管及び枝配管）内流れの運動量比により、浮力が卓越しない範囲で温度差に

よらず各噴流形態を一つのマップで整理できることを示した。前報^[14]では各噴流形態での壁面近傍における温度変動挙動を把握するために、熱電対ツリーを使用した配管内詳細温度分布計測を実施した。その結果、各噴流形態における温度変動強度の特性を把握することができた。また、衝突噴流を除く3つの噴流形態では、温度変動強度の高い位置では卓越周波数が存在し、この卓越周波数はSt数にして0.2程度であった。これは、円柱後流のカルマン渦の卓越周波数と一致しており、ここで観測された卓越周波数をもつ温度変動は、枝配管からの噴流を柔な構造物としたカルマン渦的な流れに起因していることが示唆された。

本報では、サイクル機構にて開発した直接シミュレーション(DNS)コードDINUS-3^[15]による解析を壁面噴流と衝突噴流の各条件で実施した。実験では、前報での測定結果から測定位置をさらに詳細化し計測時間を長くした温度測定ならびに粒子画像流速測定法(PIV)を用いた混合部の流速分布測定を行った。これらの実験データに基づいて解析結果と比較し解析手法の妥当性を確認した。さらに、解析で得られた温度・速度のデータより温度変動の要因となる枝配管後流部における3次元的な渦構造の推定を実施した。

第2章 T字管合流部試験

2. 1 試験装置及びループ構成

試験装置の概念を図2-1に示す。試験装置は内径150mm (D_m) の水平に置かれた主配管、内径50mm (D_b) の枝配管からなるテスト部及びテスト部上流側と下流側にある整流バッファから構成されている。枝配管は主配管下面に垂直かつT字状に接合されており、枝配管の先端は主配管内面の円筒曲面と鋭角に接合し、面取り加工等は施されていない。主配管、枝配管ともテスト部の手前には助走区間 ($18D_m$ 、 $10D_b$) を設けている。テスト部と助走区間の配管とは、中心軸を一致させ配管内面に段差が出来ないようにめ込み式のフランジ構造となっている。テスト部は透明アクリル樹脂で出来ており、配管内の流れの様子が観察できる。また、配管の曲面による屈折を低減させるために、テスト部の外側にはウォータージャケットが設置されている。

図2-2にループ構成の概略を示す。また、ループの仕様について表2-1に示す。ループは貯水槽(容量30m³)、主配管用ポンプ(最大吐出量240m³/h)、枝配管用ポンプ(最大吐出量18m³/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。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)、枝配管側を低温流体(冷却器の性能から25°C程度)が流れ、T字状に接続されたテスト部において合流する。主配管側の温度はテスト部入口温度を参考して貯水槽内のヒータにて制御する。枝配管側はポンプとテスト部入口との間に熱交換機(除熱量500kW)を設置して、貯水槽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制御している。

2. 2 試験条件

試験条件は、前報にて分類した4種類のフローパターンから壁面近傍での温度変動強度が高くなることが示された壁面噴流条件(枝配管流量が主配管流量に比べ小さく、枝配管から出た噴流が主配管壁面に沿って流れる)及び衝突噴流条件(枝配管流量が主配管流量に比べ大きく、枝配管噴流が主配管上面に衝突する)とした。試験条件を表2-2に示す。温度条件は、温度分布測定試験では主配管48°C、枝配管33°C($\Delta T=15°C$)とし、流速分布測定試験では等温条件とした。いずれも定常状態で試験を行った。

2. 3 温度分布測定試験

テスト部における詳細な流体内温度分布を測定するために、図 2-1 に示す熱電対ツリーを使用した。熱電対ツリーは、主配管内の径方向の温度分布を計測できるよう、熱電対が配管中心軸から管壁方向に 5mm ステップで 15 本と配管内壁から 1mm、3mm の位置に計 17 本が櫛状に取り付けられている。熱電対は全て非接地 K 型、シース径 $\phi 0.25\text{mm}$ のものを使用した。熱電対の時定数は約 30ms である。また、熱電対ツリーは、その支持部が流れを乱さないように刃状の板とし、そこから上流に向かって長さ 50mm、直径 1mm のステンレスチューブを通して熱電対の先端 5mm が水中に出る構造となっている。熱電対ツリーは ±180° 回転させることができ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、主配管内における 3 次元の流体温度分布を計測することが出来る。

試験における熱電対ツリーの計測ポイントを図 2-3 に示す。主配管軸方向は枝配管中心軸を原点 ($Z=0$) として、 $Z=0D_m$ の位置から、 $Z=0.23D_m$ 、 $0.36D_m$ 、 $0.5D_m$ 、 $0.75D_m$ 、 $1D_m$ 、 $1.5D_m$ 、 $2D_m$ 、 $2.5D_m$ の位置にて測定を実施した。また、周方向位置は、壁面噴流条件では主配管下面（枝配管側） $\theta=0^\circ$ 、 10° 、 15° から 50° までは 5° ピッチ、 60° から 180° までは 30° ピッチとした。衝突噴流条件では、 $\theta=0^\circ$ から 80° までは 20° ピッチ、 90° から 180° までは 10° ピッチとした。

試験では、サンプリング周波数 100Hz (0.01s 周期) で 480 秒間の計測を実施した。

2. 4 流速分布測定試験

テスト部における流速分布を測定するために、非接触で瞬時の 2 次元流速空間分布が測定できる PIV (粒子画像流速測定法) を適用した。PIV のシステム構成を図 2-4 に示す。本システムは、ダブルパルス YAG レーザー、CCD カメラ、パソコン用コンピューター及びタイミングコントローラから構成される。計測は 2 台の YAG レーザーをタイミングコントローラにて時間差 (0.8ms) をもって射出し、可視化された画像を CCD カメラにて撮影した。撮影された 2 枚の画像から相互相関処理にて移動距離を決定し、流速を求めた。1 回の撮影における画像サイズは $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ (1008×1018 ピクセル) とした。相互相関処理では、 22×22 ピクセルの参照領域を計測画像内で移動させて相関画像を求める。そのため、空間分解能としては約 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ となる。また、本システムではサブピクセル法^{[16] [17]}を採用し、0.2 ピクセルまでの精度があるので、本実験でのレーザー射出間隔が 0.8ms であることから、計測誤差としては約 0.04m/s

となる。時間平均流速ベクトルは 15Hz サンプリング、256 組（約 17s）の画像にて作成した。トレーサ粒子としてはエクスパンセル（粒子径約 $30\mu\text{m}$ ）を使用した。円管内の計測であることから壁面等によるハレーションなどが発生するためノイズ処理^[18]を施した。

PIV による計測は主配管鉛直方向断面及び水平方向断面で実施した。鉛直方向断面の計測は、上面より主配管の鉛直方向に YAG レーザーを照射し、主配管側面より CCD カメラにて撮影した。水平方向断面の計測は、側面より YAG レーザーを水平に照射し、主配管上面より CCD カメラにて撮影した。計測イメージを図 2-5 に示す。水平断面は主配管中心軸から下方に 35mm、50mm 及び 65mm の位置とした。主配管軸方向には $1.5D_{\text{m}}$ 程度までを 2 回に分けて撮影した。

表 2-1 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°C)	$<63.2 \times 10^4$	$<14.2 \times 10^4$
最高使用温度[°C]*	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[°C]

表 2-2 試験条件

	噴流形態	主配管流速 V _m (m/s)	枝配管流速 V _b (m/s)	流速比 V _m /V _b	運動量比 M _m /M _b
Case1	壁面噴流	1.46	1.0	1.46	8.1
Case2	衝突噴流	0.23	1.0	0.23	0.2

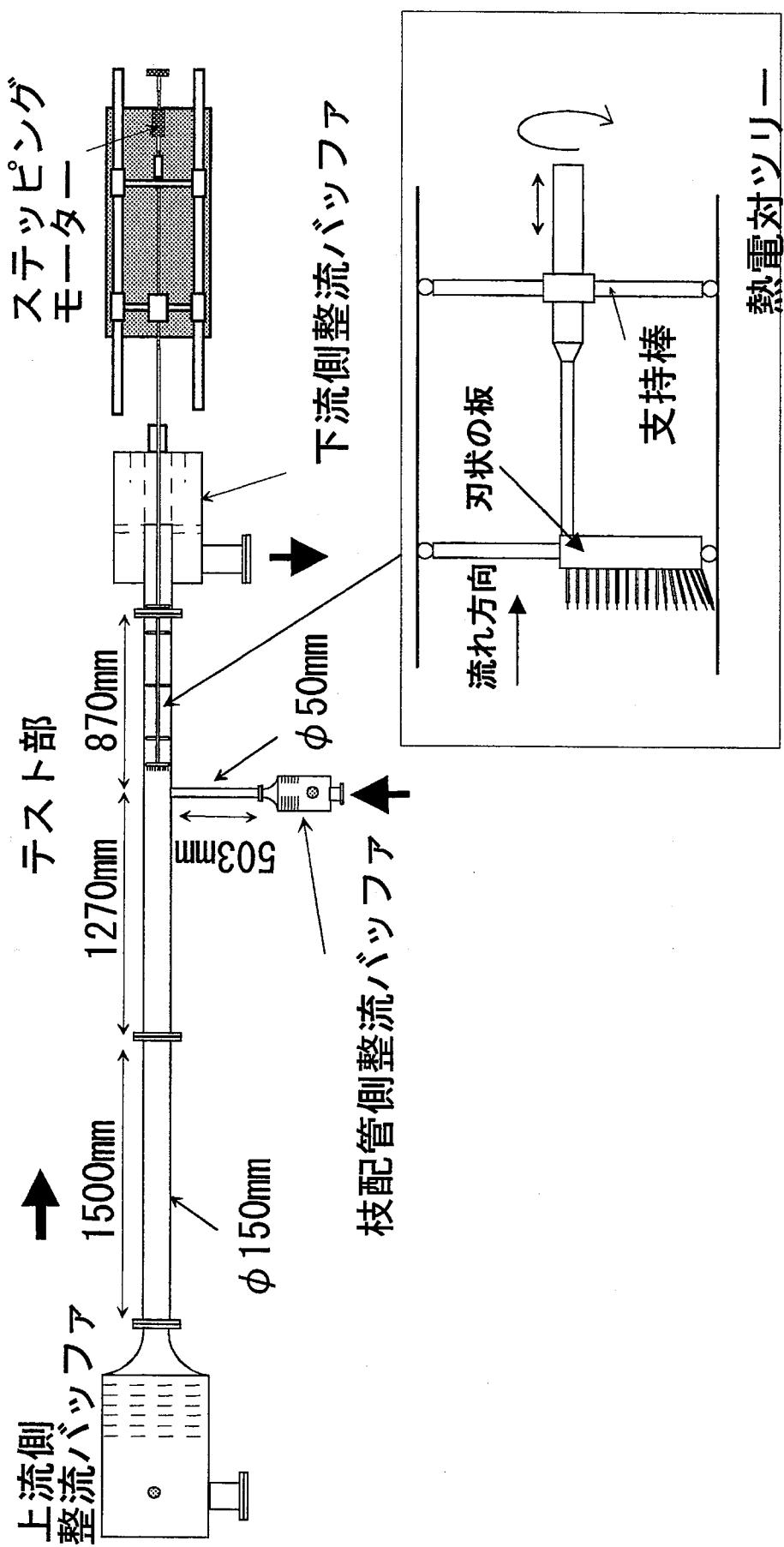
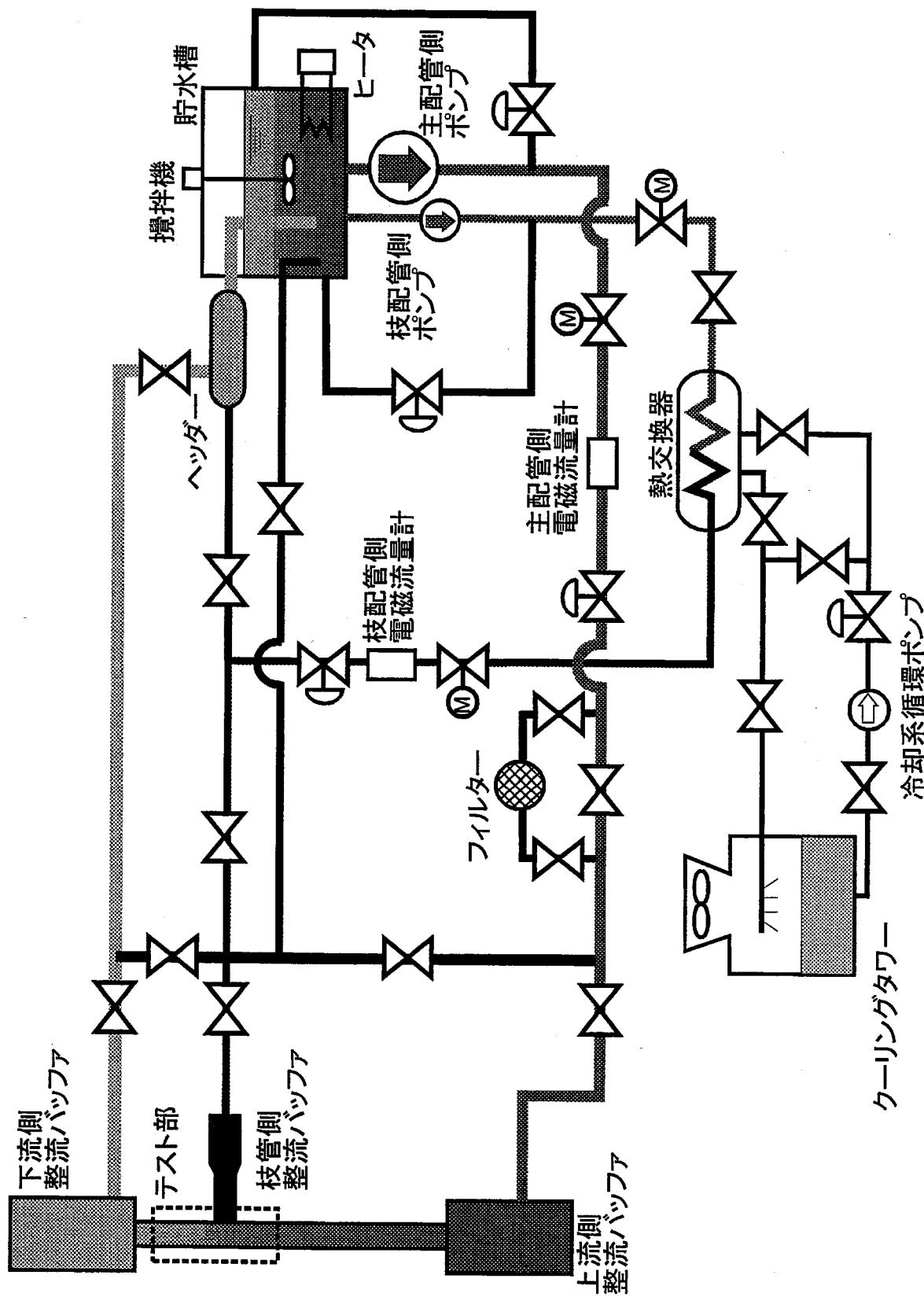


図2-1 試験装置概略図



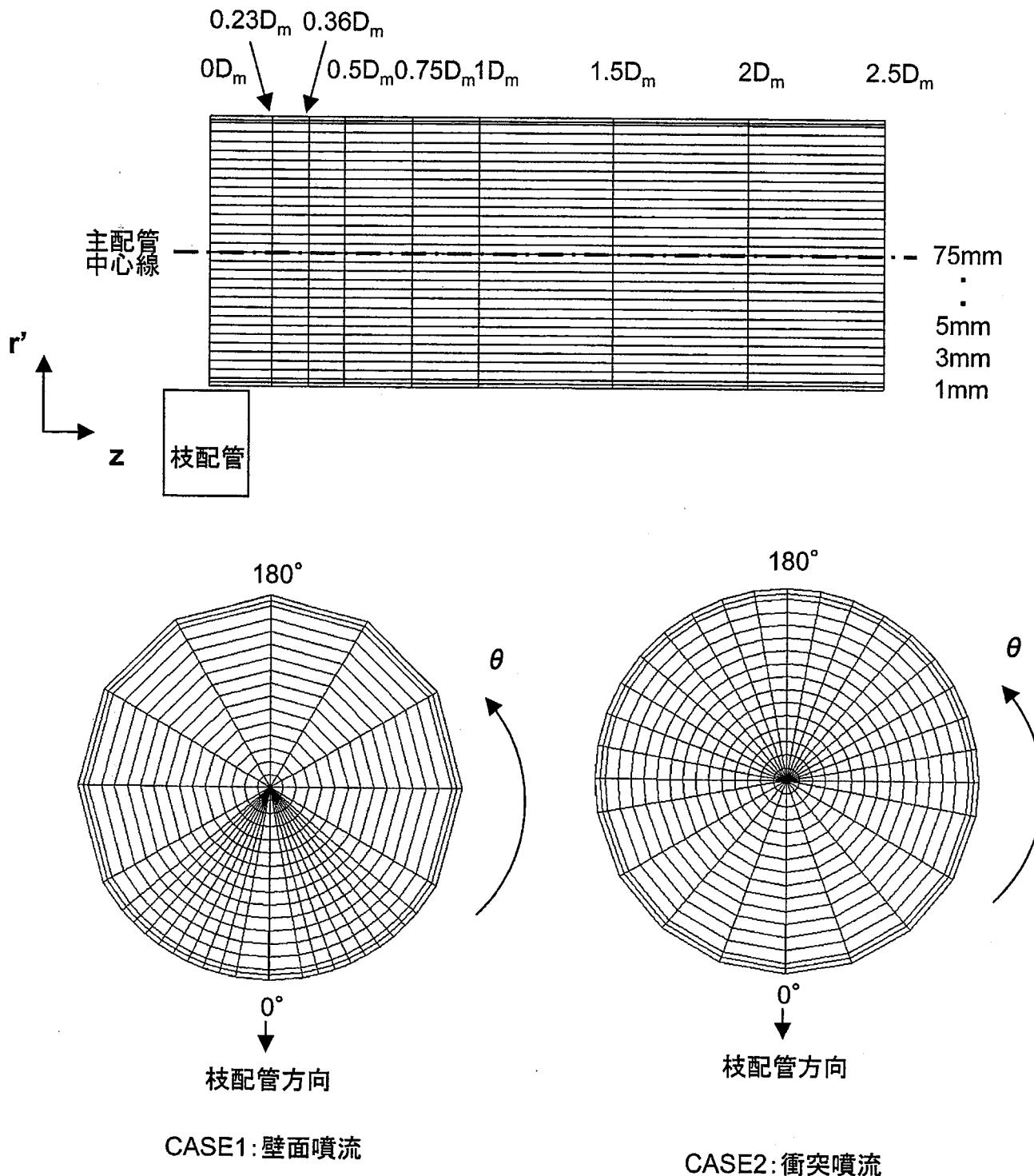


図2-3 温度分布測定試験計測ポイント

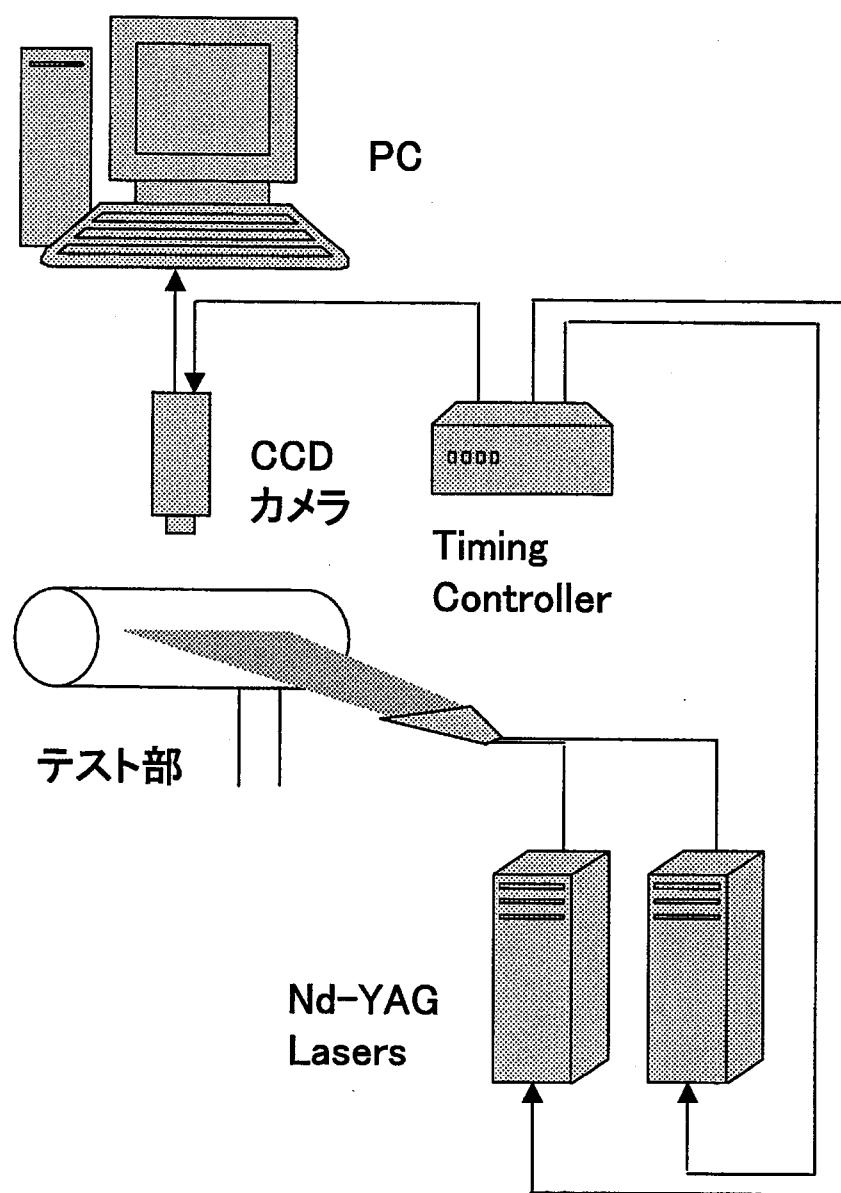


図2-4 PIVシステム構成図

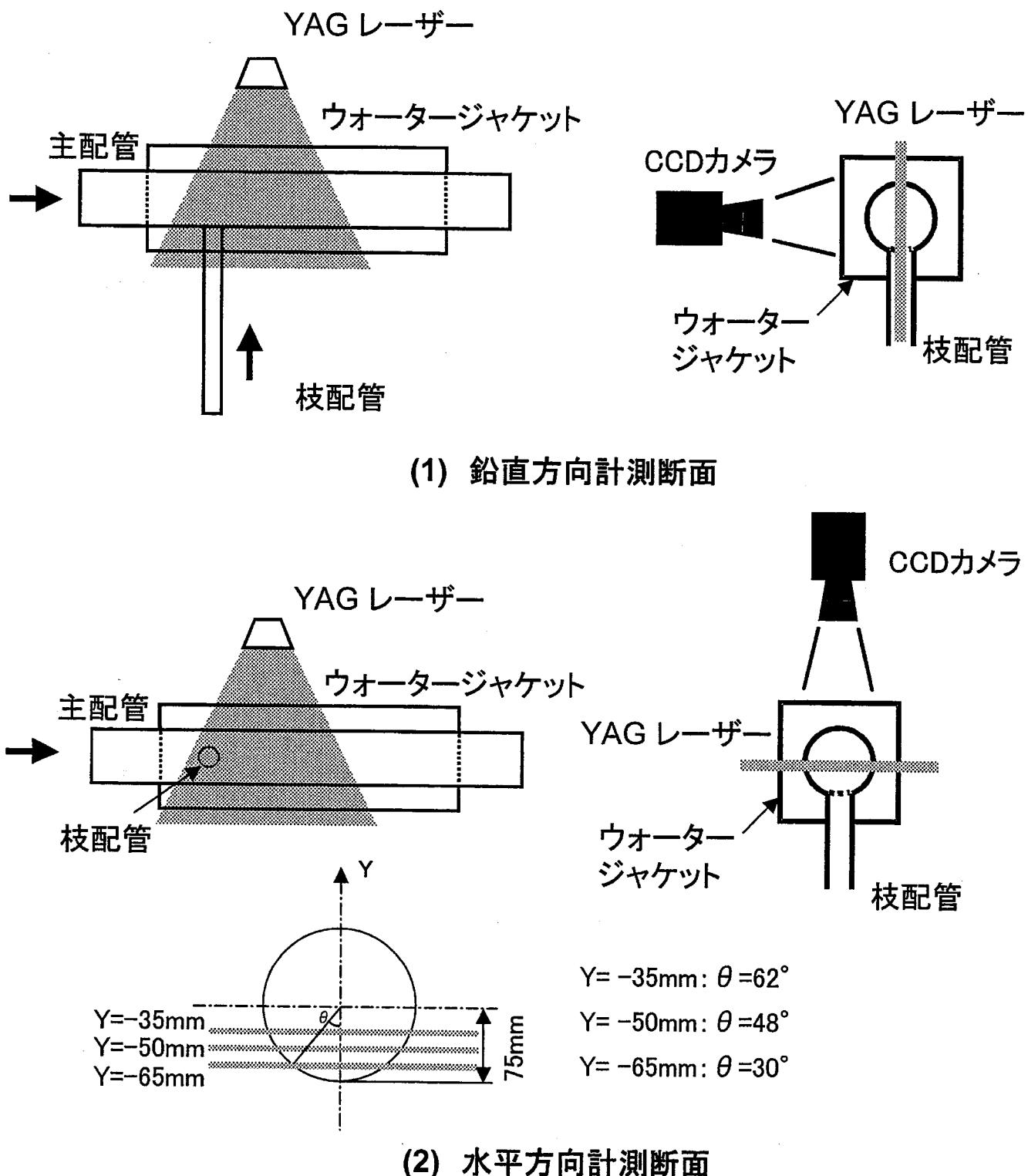


図2-5 PIV計測概念図

第3章 DNSによる解析

本T字管合流部試験を対象に、サイクル機構で開発した有限差分法に基づく準直接シミュレーション(DNS)コードDINUS-3による多次元熱流動解析を実施した。DINUS-3コードの概要を表3-1に示す。

3. 1 解析体系

配管内における壁面近傍での挙動に着目した解析であれば、本来は円筒座標系あるいは境界適合座標系等を使用するのが妥当である。しかし、円筒座標系を使用した場合には、枝配管からの流入部を模擬することが困難であること、枝配管を模擬しなかった場合、枝配管内に主配管の流れが逆流した時に計算が不安定になることが考えられる。また、中心軸を横切る流れの解析精度も課題となる。一方でDINUS-3では取り扱える座表系が円筒と直交座標系に限定されている。そこで、本解析では直交座標系を使用した。図3-1に解析に使用したメッシュ分割を示す。メッシュ数は水平方向(X)50メッシュ、垂直方向(Y)60メッシュ、主配管軸方向(Z)131メッシュの計393000メッシュとした。代表的なメッシュサイズは配管合流部付近で3mm角とした。本解析では、合流部手前に主配管側で150mm、枝配管側で50mmの助走区間を設けた。

3. 2 境界条件

直交座標系を用いて円筒を模擬するため壁面は階段状になっており、壁面に沿う周方向の流れに関しては抵抗が大きくなっている。壁面をノンスリップ条件とすると、周方向の抵抗がさらに大きくなり壁面付近の周方向の流れが制限され、枝配管からの低温噴流の広がりを模擬できなくなることも考えられる。そこで、本解析では壁面をフリースリップ条件とした。DINUS-3コードでは、ノンスリップ/フリースリップの指定は面単位で行うようになっており、壁面に沿った水平方向と垂直方向のみフリースリップ、主配管軸方向をノンスリップとする設定はできないため、壁面境界はすべてフリースリップ条件とした。

入口境界は、空間的に一様、時間的に一定な温度および速度境界条件とした。

3. 3 解析条件及び手順

本解析における計算手順を以下に示す。

① 等温条件の流れ場を定常計算として1次風上差分法にて解く

計算時間ステップ幅 : 0.1(ms)

シミュレーション時間 : 壁面噴流 0.5(s)、衝突噴流 0.5(s)

② 热輸送を考慮した流れ場を1次風上差分法にて解く

計算時間ステップ幅 : 0.2(ms)

シミュレーション時間 : 壁面噴流 3.5(s)、衝突噴流 6.5(s)

③ 高次差分(3次風上)に切り換え、流れ場を解く

計算時間ステップ幅 : 0.2(ms)

シミュレーション時間 : 壁面噴流 5.0(s)、衝突噴流 8.0(s)

④ 高次差分による過渡計算を実行

計算時間ステップ幅 : 0.2(ms)

シミュレーション時間 : 壁面噴流 3.0(s)、衝突噴流 6.0(s)

⑤ 初期時間を0.0(s)とし、高次差分による過渡計算を実行

時間間隔0.01(s)で3000点の時系列データを保存する。

計算時間ステップ幅 : 0.2(ms)

シミュレーション時間 : 壁面噴流 30.0(s)、衝突噴流 30.0(s)

外部反復回数上限 : (①～③) 1回、(④, ⑤) 10回

外部反復収束条件 : 従属変数の相対変動が 5.0×10^{-5} 以下

表 3・1 DINUS-3 Code の概要

<p>1. 基本解析モデル 基礎式 : Navier – Stokes 方程式 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>2. 数値計算法 数値解法 : 有限差分法 計算アルゴリズム : Leap-Frog 法 マトリクス解法 : ICCG 法</p>
<p>3. 差分法 対流項 : 3 次精度 風上差分法 拡散項 : 2 次精度 中心差分法 時間積分法 : 2 次精度 オイラー陰解法</p>

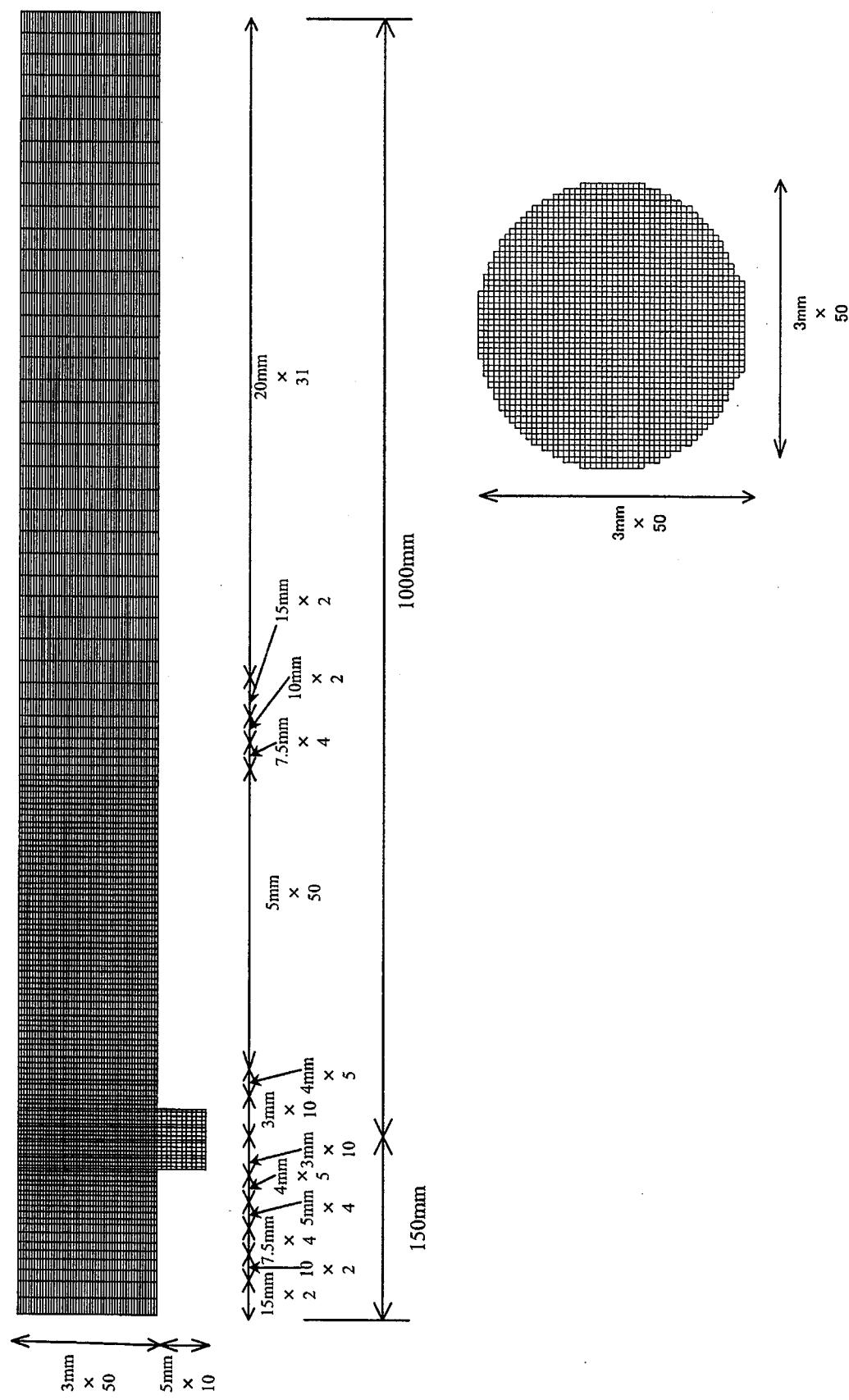


図3-1 メッシュ分割図

第4章 DNSによる解析と試験結果の比較

まず、解析と実験の比較における座標系を図4-1に示す。各軸の原点は主配管と枝配管の中心軸が交わる点とした。尚、熱電対ツリーにおける計測位置及び比較の為に円筒座標系に変換した解析結果での径方向位置(r')は主配管壁面を原点とした。

4. 1 壁面噴流

図4-2に壁面噴流条件(Case1)における、主配管、枝配管の中心軸を通る鉛直面での、時間平均温度・温度変動強度の実験結果と解析結果の比較を示す。また、図4-3に時間平均温度・温度変動強度の $r'=5\text{mm}$ における周方向展開図及び $Z=0.5D_m$ 、 $1D_m$ における軸方向に垂直な断面図(径方向断面)を示す。解析での周方向展開図は、直交座標系の解析結果を円筒座標の $r'=5\text{mm}$ に展開して求めた値になっている。時間平均温度及び温度変動強度は、主/枝配管の温度差にて規格化している。定義を以下に示す。

$$T^* = \frac{T - T_b}{T_m - T_b} \quad (1)$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - T_{ave})^2}{N}} \quad (2)$$

$$T_{rms}^* = \frac{T_{rms}}{T_m - T_b} \quad (3)$$

ここで、 T_m : 主配管温度、 T_b : 枝配管温度、 T_{ave} : 時間平均温度、 N : 計測点数(試験では $N=48000$ 点(480s)、解析では $N=3000$ 点(30s))を示す。

実験結果から、Case1の壁面噴流条件では、枝配管からの低温流体は主配管中心軸までは到達せず、主配管下面に沿って流れていることがわかる。また、温度変動強度は、この枝配管から出た噴流と主配管流が混合する境界部で高くなっている。周方向展開図を見ると、鉛直方向断面と同様に枝配管噴流と主配管の流れが混じり合う枝配管噴流の側面部(枝配管に相当する円の両端位置から下流に伸びる線上)で、温度変動強度が高くなっていることがわかる。径方向断面図からもその傾向がわかる。解析結果は、実験での時間平均温度場

を良好に模擬できている。温度変動強度も実験と同様に枝配管噴流と主配管流が混合する境界部で高くなっている。しかし、解析結果における温度変動強度は、枝配管からの低温流体が主配管に合流した直後ではそれほど高くなつておらず、それより下流側に進んだ点で高くなつており、実験結果と差異が生じている。

図 4-4 に主配管、枝配管の中心軸を通る鉛直断面での、時間平均速度・速度変動強度の実験結果と解析結果の比較を示す。また、図 4-5 に時間平均速度・流線の水平断面図 ($Y=-35\text{mm}$ 、 -50mm 、 -65mm) を示す。図 4-6 には、速度変動強度の水平断面図 ($Y=-35\text{mm}$ 、 -50mm 、 -65mm) を示す。時間平均速度及び速度変動強度は、主配管の流入流速にて規格化している。尚、速度変動強度は各成分に分けて示している。定義は以下に示す。

$$V^* = \frac{V}{V_m} \quad (4)$$

$$V_{D_{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{Di} - V_{D_{ave}})^2}{N}} \quad (5)$$

$$V_{D_{rms}}^* = \frac{V_{D_{rms}}}{V_m} \quad (6)$$

ここで、 V ：流速、 V_m ：主配管流速、 V_{ave} ：時間平均流速、 D ：流速方向 x (水平方向) y (鉛直方向) z (軸方向)、 N ：計測点数(試験では $N=256$ 点(約 17s)、解析では $N=3000$ 点(30s))を示す。

実験結果における鉛直断面での速度ベクトルを見ると、枝配管噴流の背後に鉛直方向の逆流が形成されていることがわかる。速度変動強度もこの逆流領域で高い値を示している。また、主配管の流速はこの逆流域の上部が最も速くなっている。水平断面の実験結果から、 $Y=-65\text{mm}$ における速度分布及び流線を見ると、枝配管噴流の背後に水平方向の逆流が生じており、この逆流は左右対称な 2 つの渦を形成していることがわかる。主配管の流れは、この逆流域を避けるように流れている。 $Y=-50\text{mm}$ における速度分布を見ると、この逆流領域がまだ存在しているが、 $Y=-35\text{mm}$ ではこの逆流領域は消失している。速度変動強度の結果を見ると、 $Y=-65\text{mm}$ での速度変動強度の軸方向成分で速度変動強度が高くなる位置は、逆流領域に形成される 2 つの渦の外側であることがわかる。これは、温度変動強度の高くなる位置と一致している。解析結果は、実験での時間平均速度

分布を良好に模擬していることがわかる。しかし、鉛直断面での速度変動強度を見ると、解析では枝配管噴流が主配管流と衝突する上流側面でほとんど速度の変動が生じておらず、実験で見られた速度変動を再現できていない。水平断面における比較においても、解析結果は $Y=-65\text{mm}$ 、 -50mm の逆流領域に形成される2つの渦を良好に再現していることがわかる。また、 $Y=-35\text{mm}$ における逆流域の消失及び枝配管からの噴流を避ける様に流れる主流の様子も模擬できている。

図4-7及び図4-8に $r'=5\text{mm}$ 、 10mm における時間平均温度の周方向分布を各軸方向位置で比較したものを示す。 $r'=5\text{mm}$ での時間平均温度の比較を見ると、各断面で解析と実験ではほぼ同様な分布を示している。しかし、 $Z=0.23D_{\text{m}}$ から $0.75D_{\text{m}}$ では $\theta=25^\circ$ 近傍に高温のピークが見られる。図4-3における軸方向に垂直な断面での $Z=0.5D_{\text{m}}$ の時間平均温度コンターを見ると、枝配管からの低温噴流が壁面に到達していないのがわかる。これは、壁面を階段状のメッシュで模擬したことにより、枝配管からの低温噴流が主配管の周方向には拡がらず、壁面近傍では主配管流が階段メッシュにガイドされる形で流れているためと考えられる。枝配管からの噴流は壁面から1メッシュ程度離れた位置から周方向に拡がっている。この影響により、 $r'=5\text{mm}$ における $\theta=25^\circ$ 近傍では枝配管からの噴流がえぐれた形状になっており、主配管からの高温流体によるピークがグラフに現れている。 $r'=10\text{mm}$ での時間平均温度の比較を見ると、解析結果では $Z=0.23D_{\text{m}}$ から $Z=0.75D_{\text{m}}$ での $\theta=-25^\circ$ から $+25^\circ$ 近傍では実験結果より高い温度分布となっている。図4-3における軸方向に垂直な断面での $Z=0.5D_{\text{m}}$ の時間平均温度コンターからも、解析結果では主配管流との境界近傍に枝配管からの噴流の低温部が集まっているが、実験結果では枝配管からの低温流体は主配管流との境界部に向かって緩やかな温度勾配を形成していることがわかる。図4-9及び図4-10に $r'=5\text{mm}$ 、 10mm における温度変動強度の周方向分布を各軸方向位置で比較したものを示す。 $r'=5\text{mm}$ での温度変動強度の比較を見ると、 $Z=0D_{\text{m}}$ から $Z=0.5D_{\text{m}}$ までで解析と実験で差異が生じている。実験では解析よりも上流側で温度変動強度の高い位置が存在している。 $r'=10\text{mm}$ でも同様の傾向を示している。

図4-11から図4-13に、 $Z=0.36D_{\text{m}}$ 、 $Z=0.5D_{\text{m}}$ 及び $Z=1D_{\text{m}}$ における各水平断面での時間平均速度・速度変動強度の比較を示す。それぞれの値は、軸方向成分 (V_z) と軸方向に垂直な水平方向成分 (V_x) にわけて示している。 $Z=0.36D_{\text{m}}$ の結果を見ると、時間平均速度は $Y=-65\text{mm}$ 以外は解析と実験でほぼ同様の分布を示している。 $Y=-65\text{mm}$ における壁近傍 ($X=\pm 45\text{mm}$) では、解析結果の方が実験より速い流速値を示している。これは、主配管壁面を階段状メッシュで模擬したことにより、主配管流がガイドされて速い流れを形成したことによると考えられる。速度変動強度に関しては、温度変動強度と同様に実験と解析で差異が見られる。主配管中心軸に近づく ($Y=-65\text{mm} \rightarrow -35\text{mm}$) につれて差が大きくなっている。

$Z=0.5D_m$ の軸方向成分の結果を見ると、時間平均速度は $Z=0.36D_m$ と同様に $Y=-65\text{mm}$ の壁近傍で差異が見られるが、その他の位置は解析と実験でほぼ同様の分布を示している。速度変動強度の軸方向成分は $Y=-65\text{mm}$ 、 -50mm では差異が生じているが、 $Y=-35\text{mm}$ では良好な一致が見られた。また、速度変動強度の水平方向成分は各水平断面で良好な一致を示した。 $Z=1D_m$ の結果を見ると、時間平均速度及び速度変動強度の各断面で良好な一致が見られた。この結果は、温度変動強度の結果と同様であり、 $Z=1D_m$ 以降の変動状況は解析で良好に模擬できていることがわかる。

4. 2 衝突噴流

図 4-14 に衝突噴流条件における、主配管、枝配管の中心軸を通る鉛直面での、時間平均温度・温度変動強度の実験結果と解析結果の比較を示す。また、図 4-15 に時間平均温度・温度変動強度の $r'=5\text{mm}$ における周方向展開図及び $Z=0.5D_m$ 、 $1D_m$ における軸方向に垂直な断面図を示す。実験結果から、衝突噴流条件では、枝配管からの低温流体は主配管上面まで到達していることがわかる。温度変動強度は、壁面噴流条件と同様に、枝配管噴流と主配管流が混合する境界部で高くなっている。周方向展開図を見ると、温度変動強度が最も高くなる位置は、枝配管噴流が主配管上面に衝突する地点近傍である。時間平均温度の軸方向に垂直な断面図を見ると ($Z=0.5D_m \rightarrow Z=1D_m$)、枝配管からの低温噴流が主配管上面に衝突した後、主配管壁面に沿うように主配管下面に向かって流れているのがわかる。解析結果は、実験での時間平均温度及び温度変動強度をほぼ模擬できている。軸方向に垂直な断面での温度センターを比較すると、枝配管からの噴流が主配管上面に衝突し、主配管壁面を周方向に沿うように下面に向かって流れる流況を、解析では若干壁面近傍で周方向流れが抑制されているが、ほぼ実験結果を再現できている。

図 4-16 に主配管、枝配管の中心軸を通る鉛直面での、時間平均速度・速度変動強度の解析結果と実験結果の比較を示す。実験結果における鉛直断面での流速ベクトルを見ると、壁面噴流条件と同様に枝配管噴流の後流域に逆流域が形成されていることがわかる。速度変動強度を見ると、軸方向成分は枝配管からの噴流の後縁から主配管上面で高い値を示している。速度変動強度の鉛直方向成分は枝配管からの噴流の出口近傍から枝配管噴流の前縁及び後縁の境界部で高くなっている。解析結果は、実験結果の時間平均流速分布を良好に再現している。また、速度変動強度に関しても良好に再現している。壁面噴流条件では枝配管からの噴流の前縁では速度変動強度がほとんどなかったが、衝突噴流のケースでは、実験と同様な速度変動強度分布を再現している。

図 4-17 及び図 4-18 に $r'=5\text{mm}$ 、 10mm における時間平均温度の周方向分布を各

軸方向位置で比較したものを示す。時間平均温度に関しては、解析と実験ではほぼ同様の分布を示している。

図 4-19 及び図 4-20 に $r'=5\text{mm}$ 、 10mm における温度変動強度の周方向分布を各軸方向位置で比較したものを示す。 $r'=5\text{mm}$ 、 10mm とも各断面で解析結果より実験結果の方が高い値を示している。しかし、解析で得られた温度変動強度の分布は実験の傾向を良好に再現している。

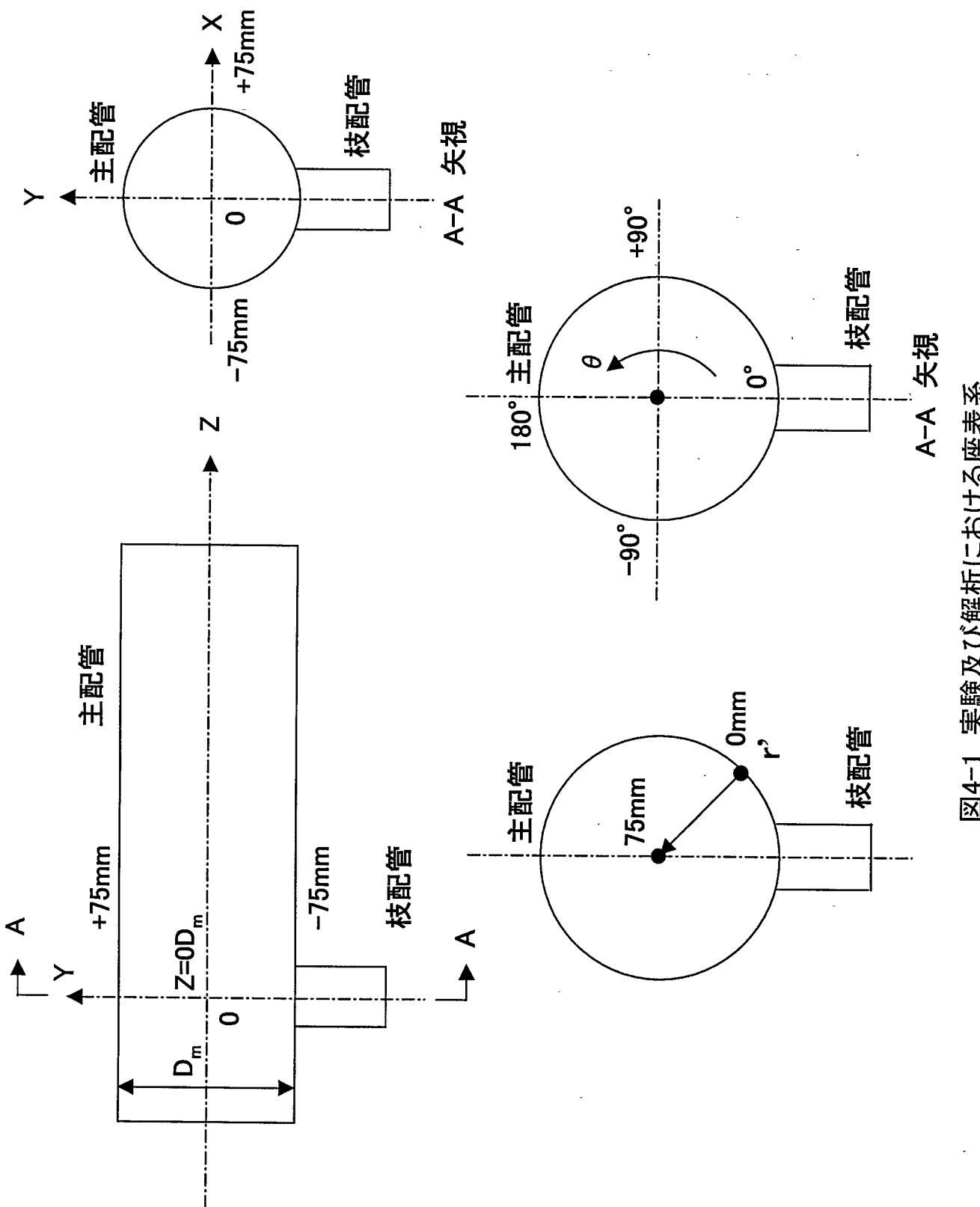
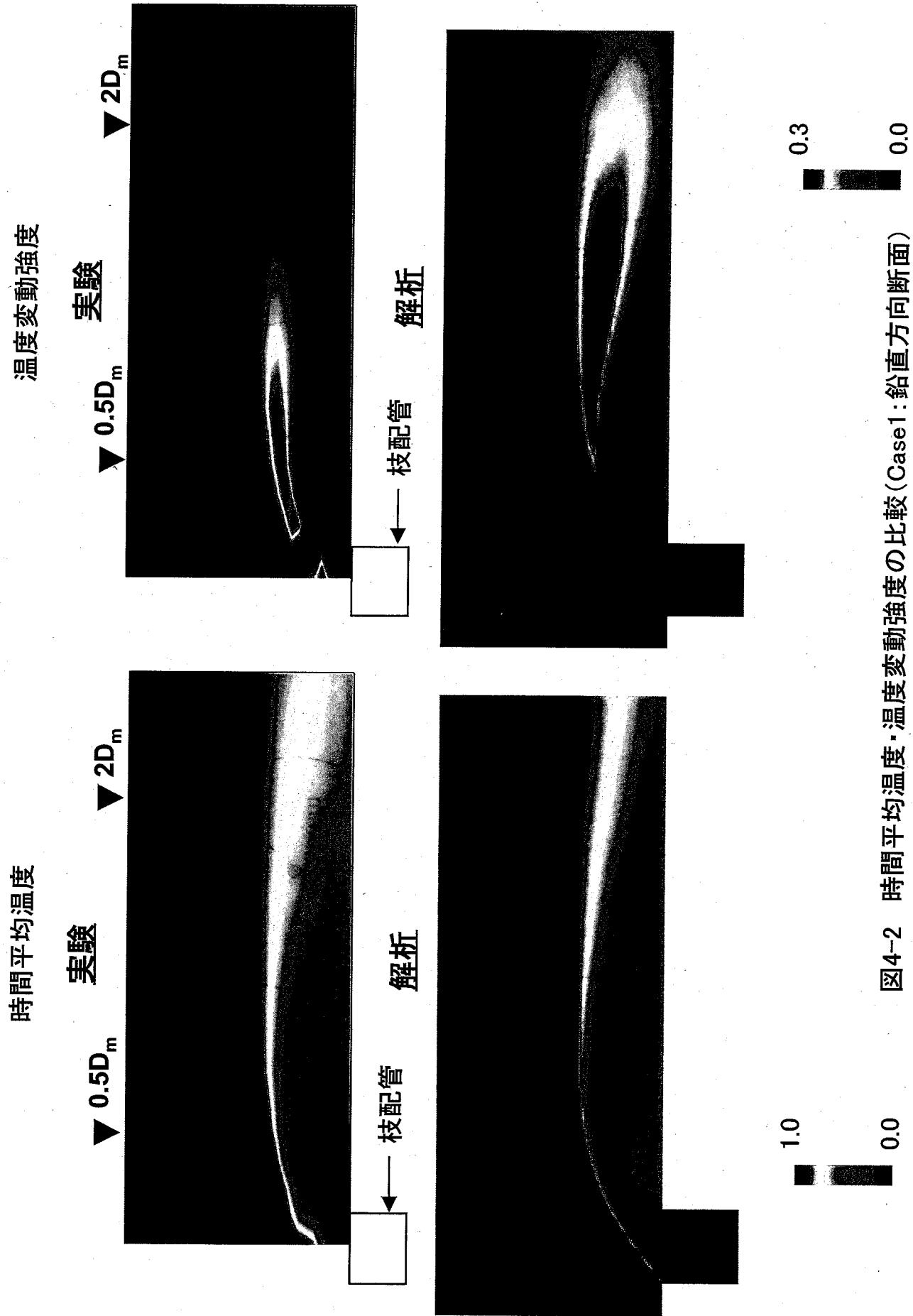


図4-1 実験及び解析における座標系



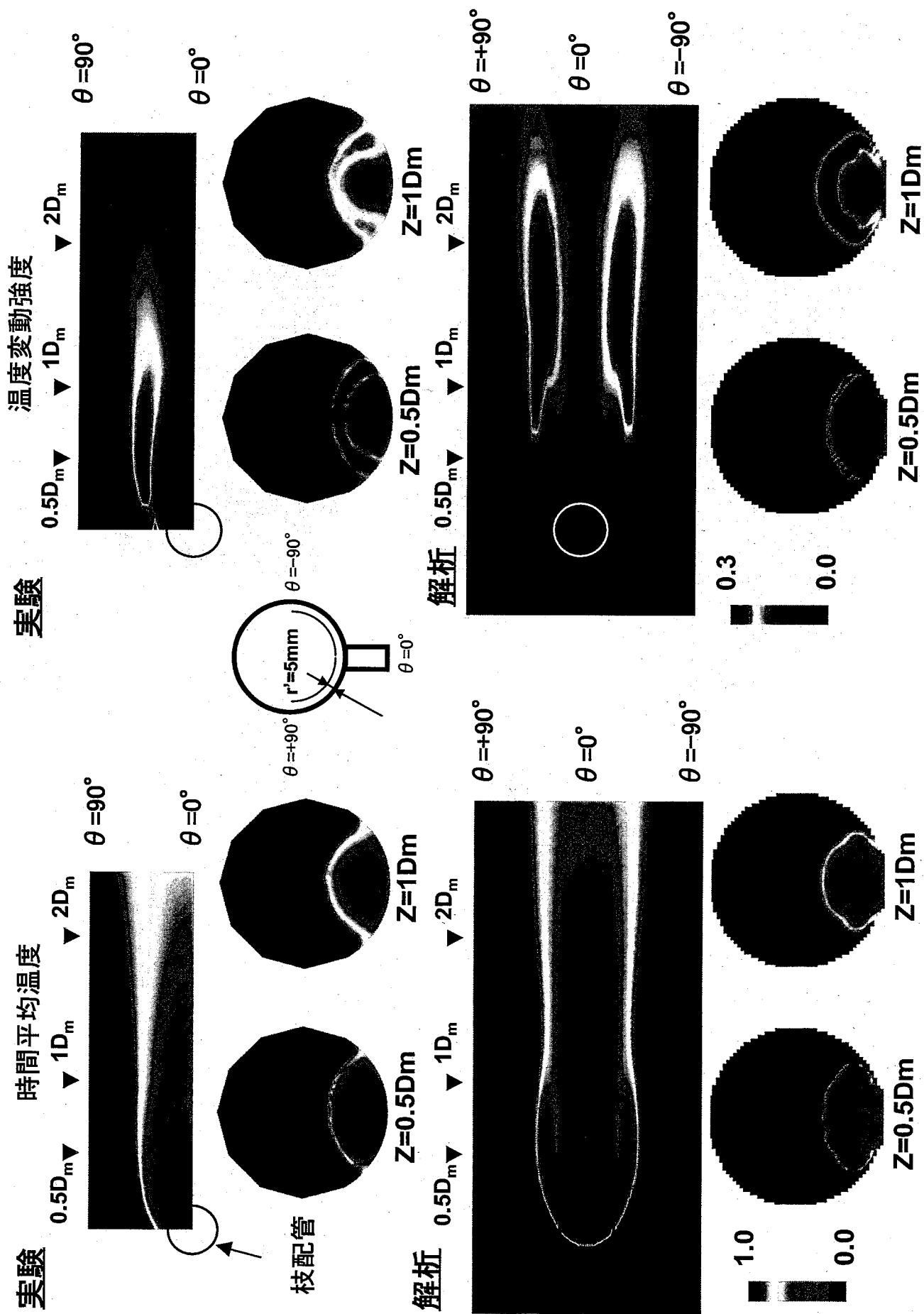


図4-3 時間平均温度・温度変動強度の比較(Case1:周方向、径方向断面)

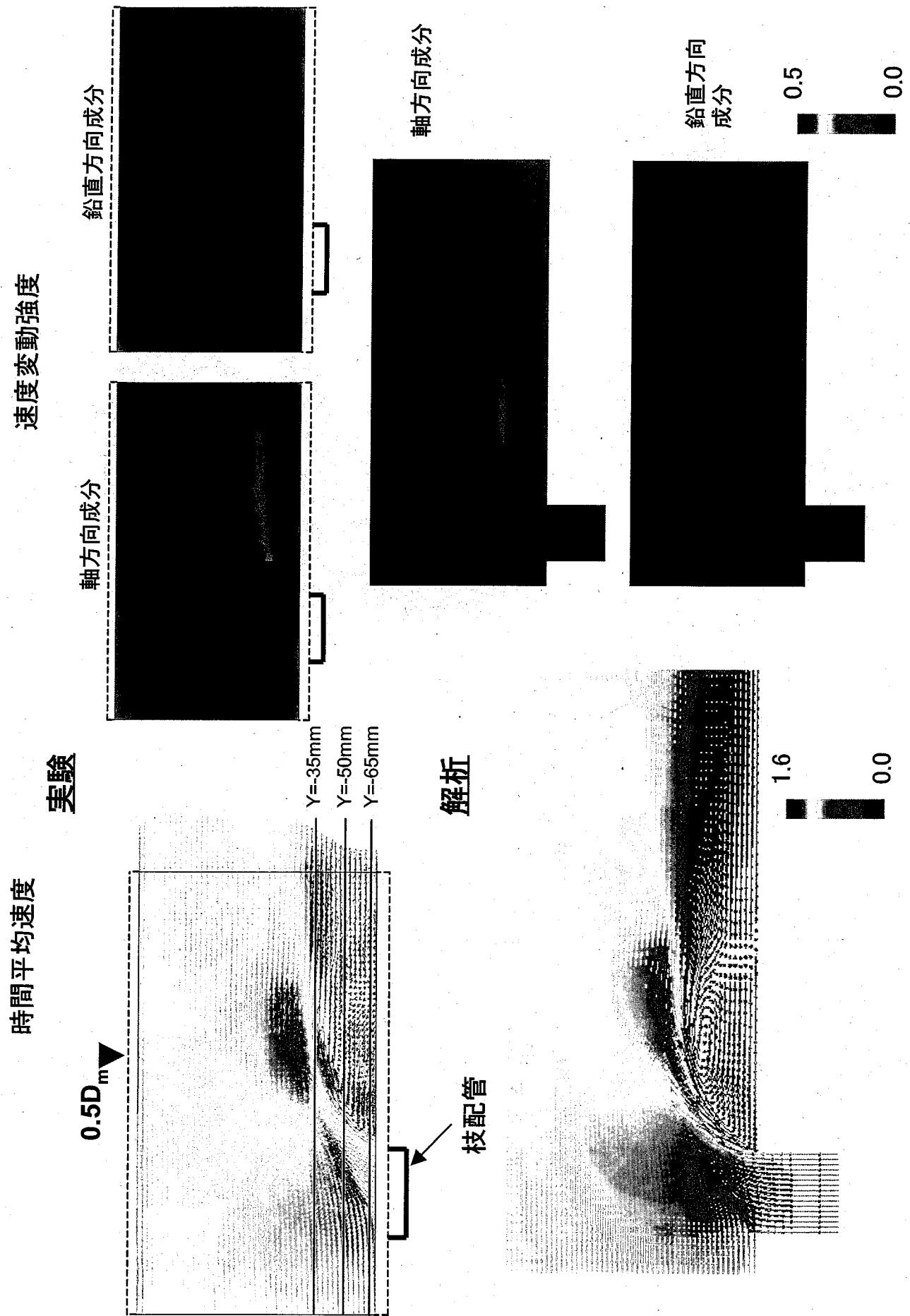


図4-4 時間平均速度・速度変動強度の比較(Case1:鉛直方向断面)

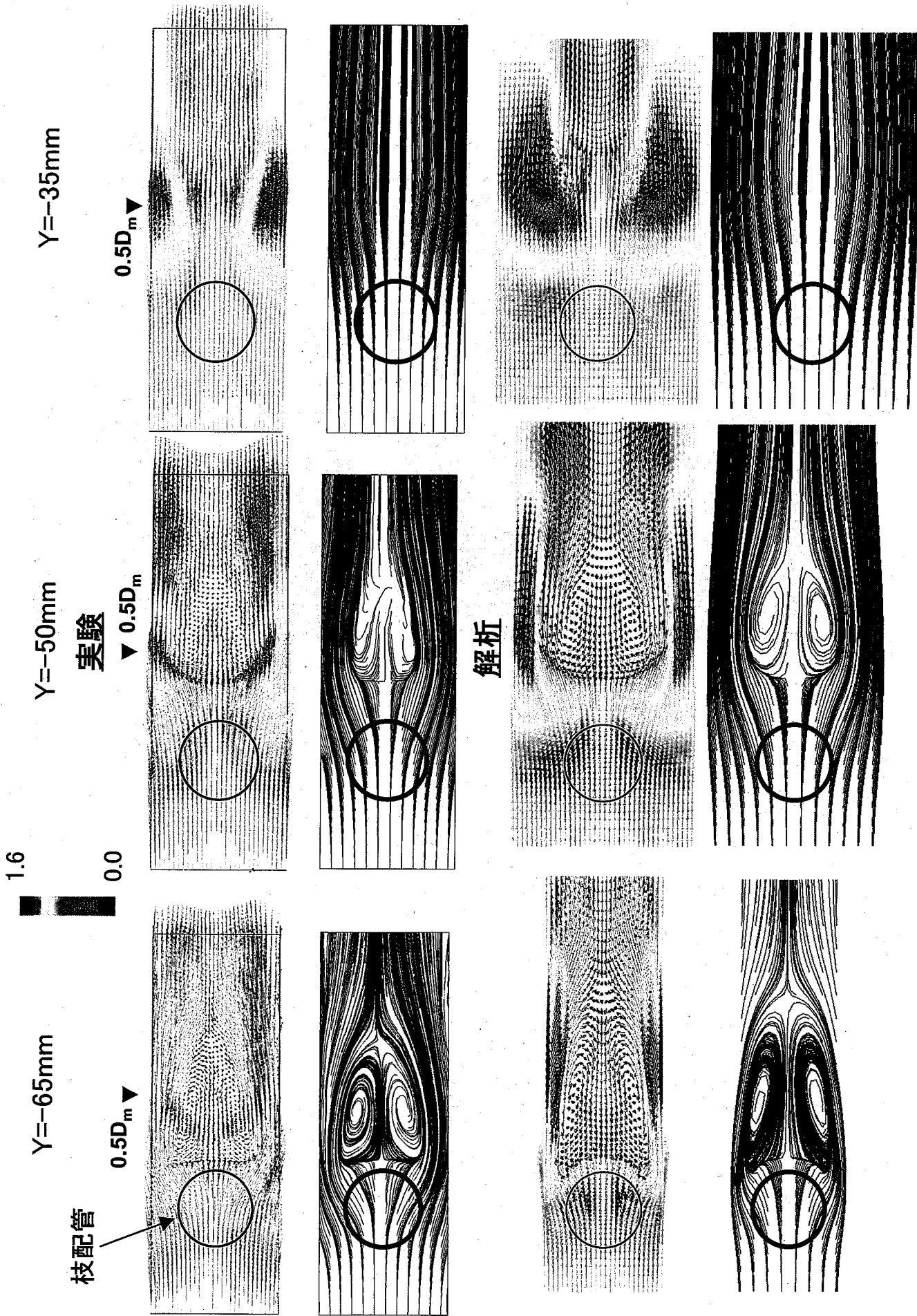


図4-5 時間平均速度ベクトル及び流線の比較(Case1:水平方向断面)

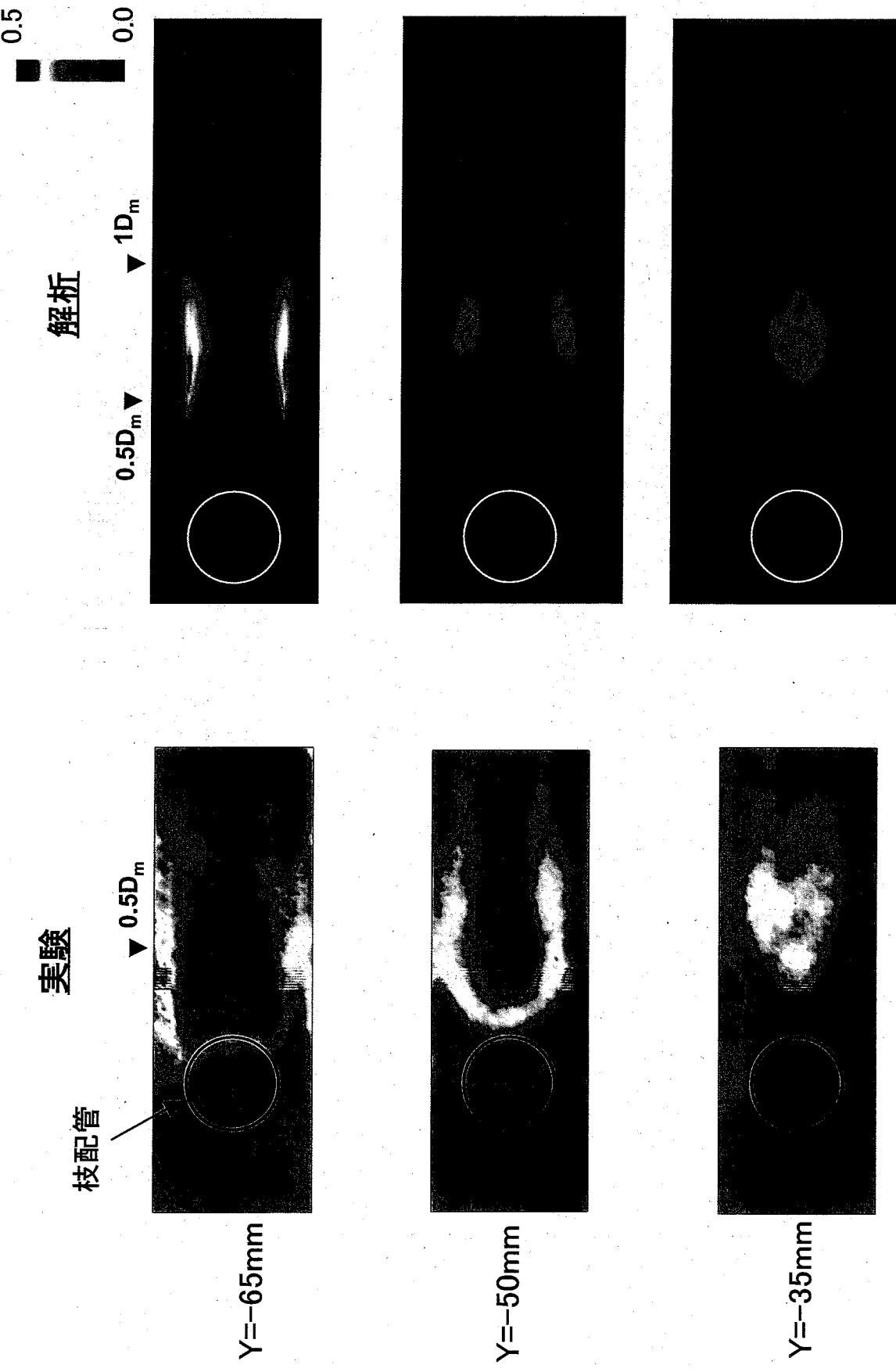


図4-6-(1) 軸方向速度変動強度の比較(Case1: 水平方向断面)

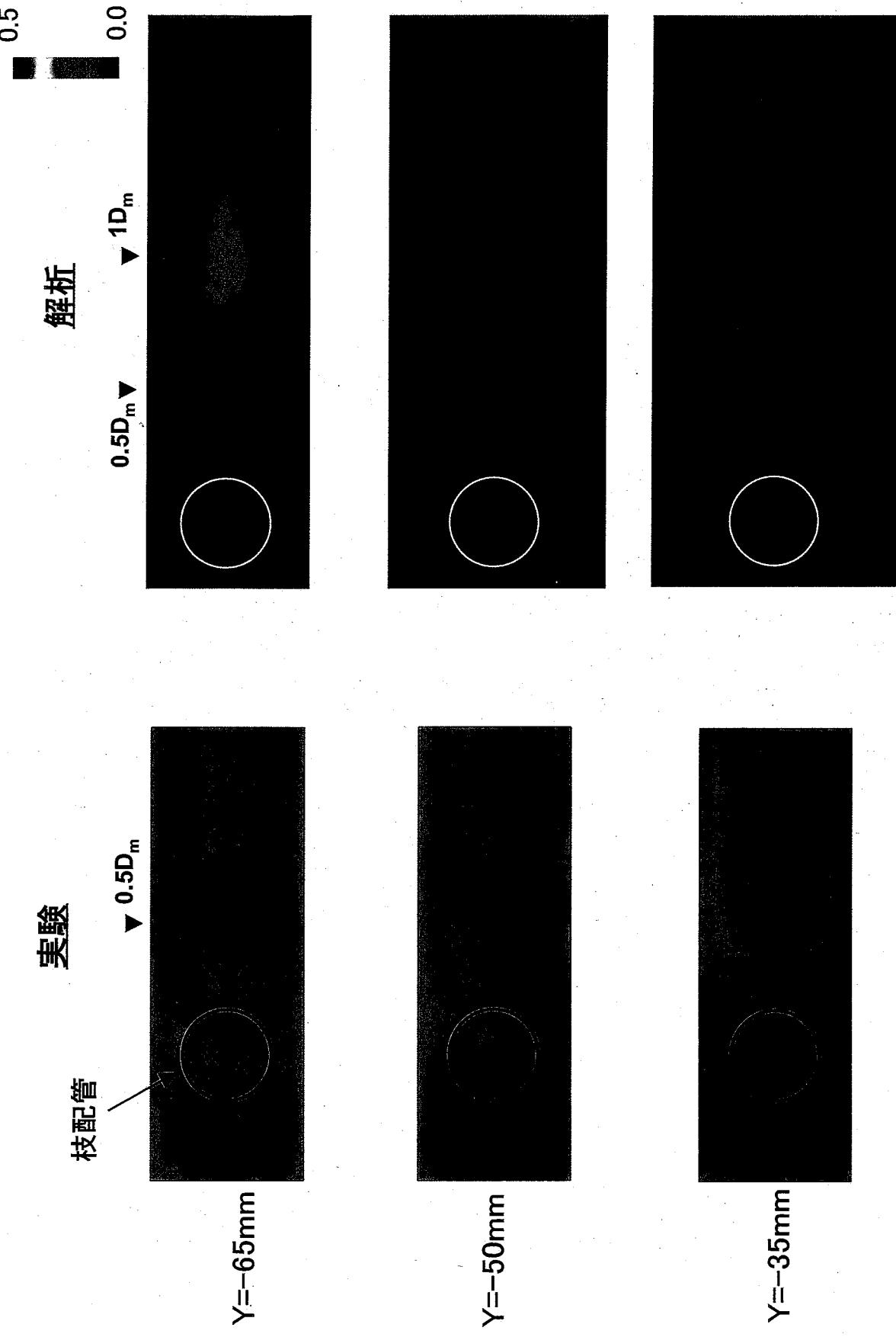


図4-6-(2) 水平方向速度変動強度の比較(Case1: 水平方向断面)

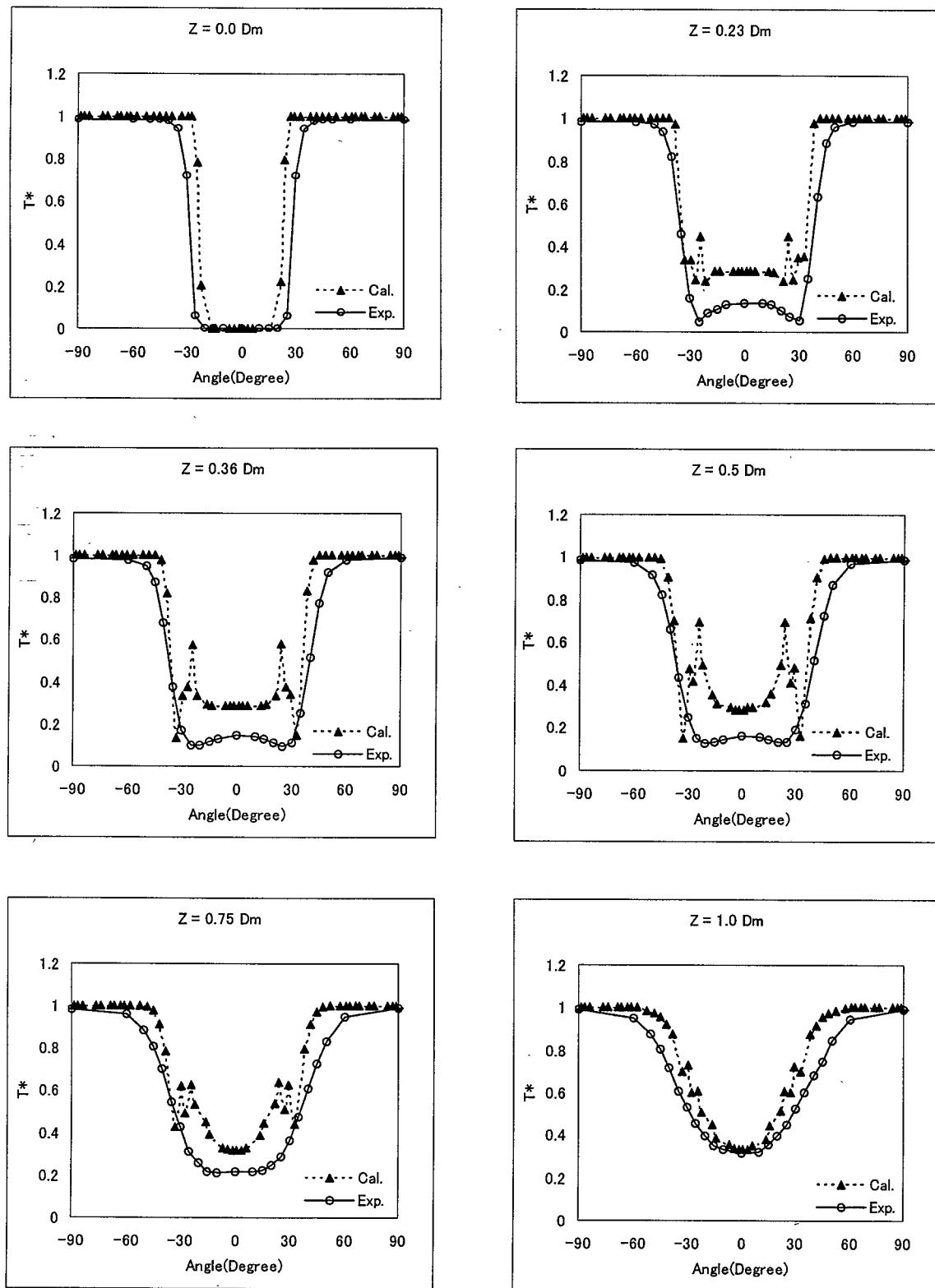


図4-7 時間平均温度分布の比較($r' = 5\text{mm}$: Case1)

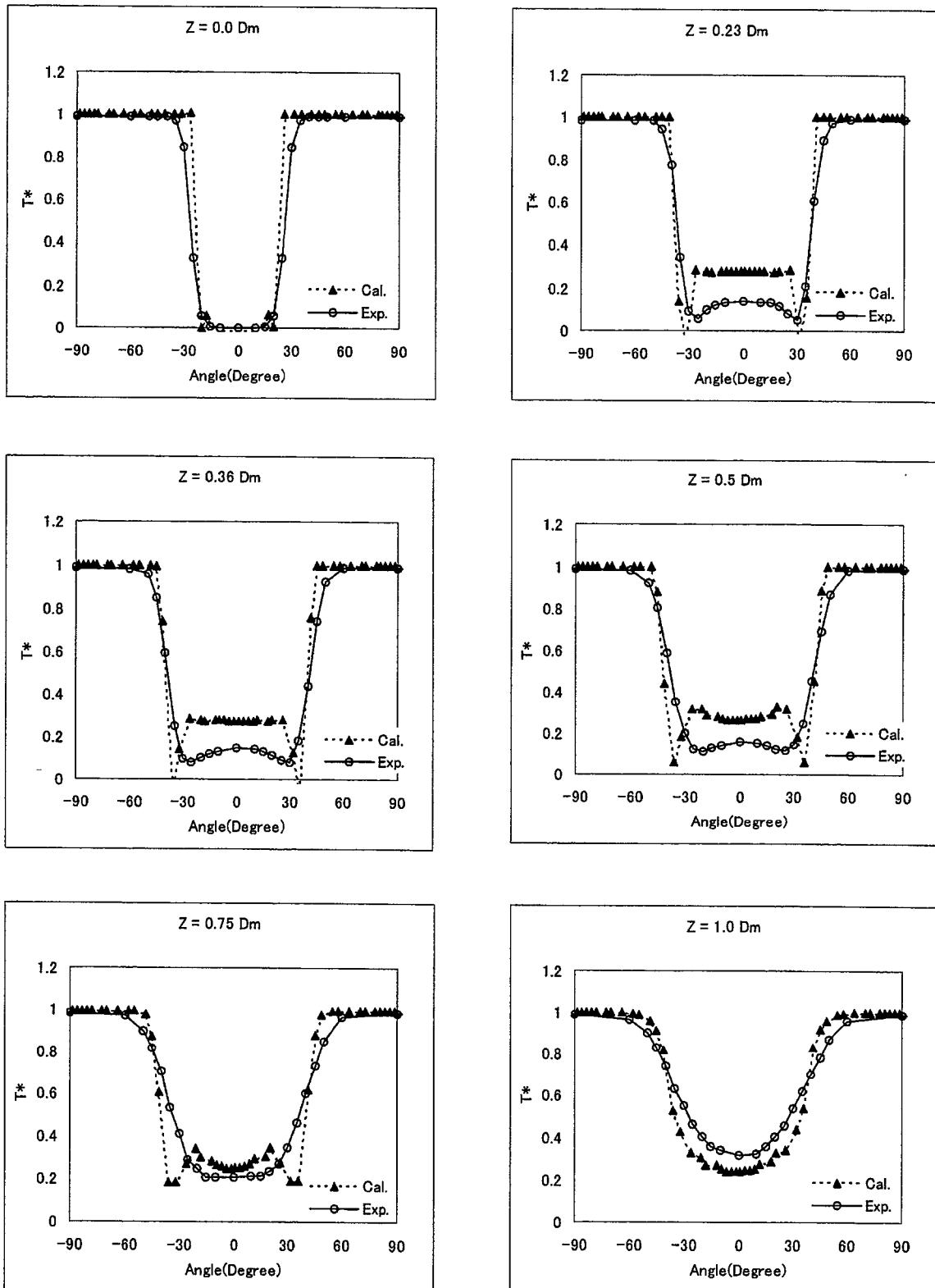


図4-8 時間平均温度分布の比較($r' = 10\text{mm}$: Case1)

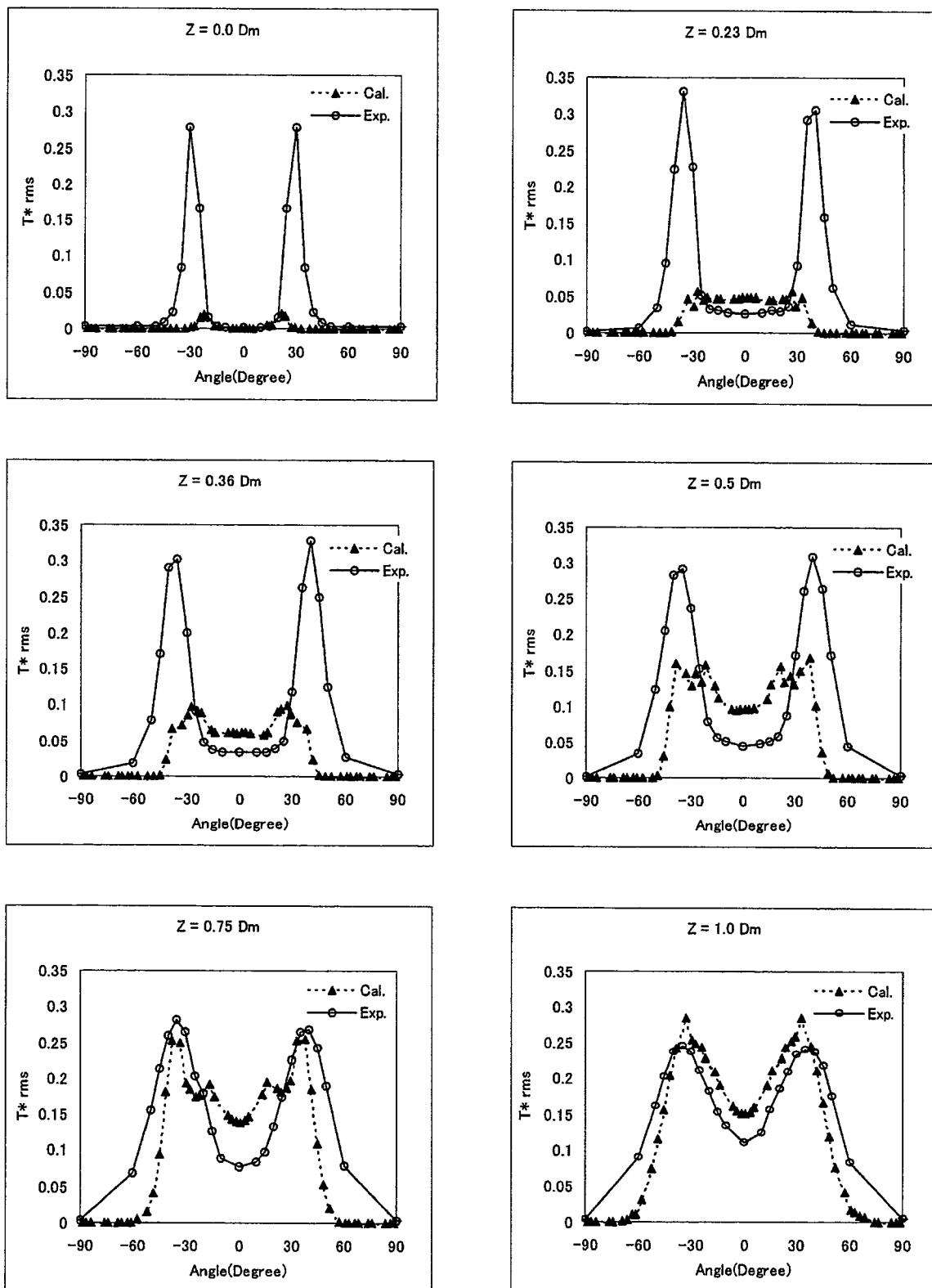


図4-9 温度変動強度分布の比較($r' = 5\text{mm}$: Case1)

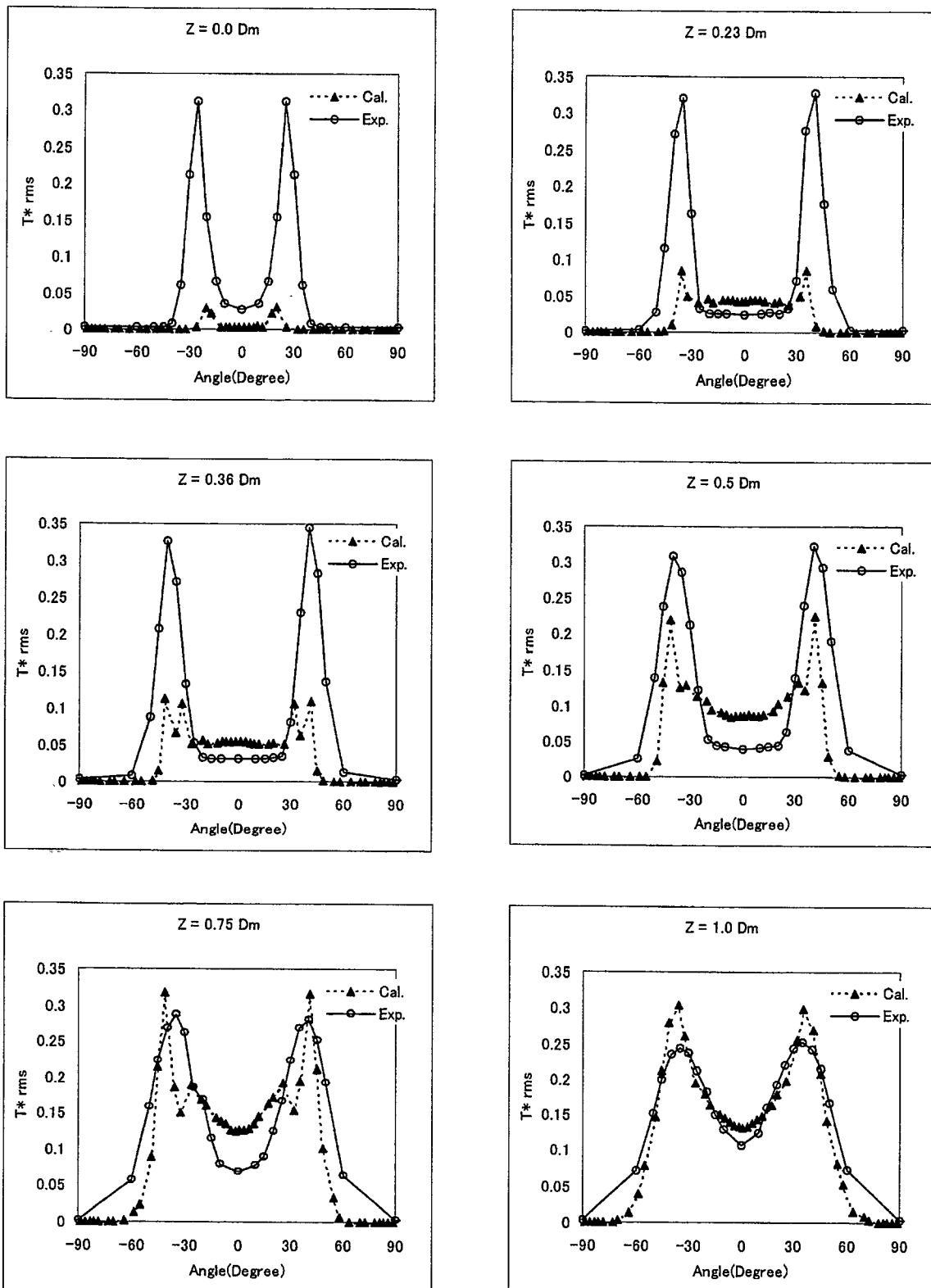


図4-10 溫度変動強度分布の比較($r' = 10\text{mm}$: Case1)

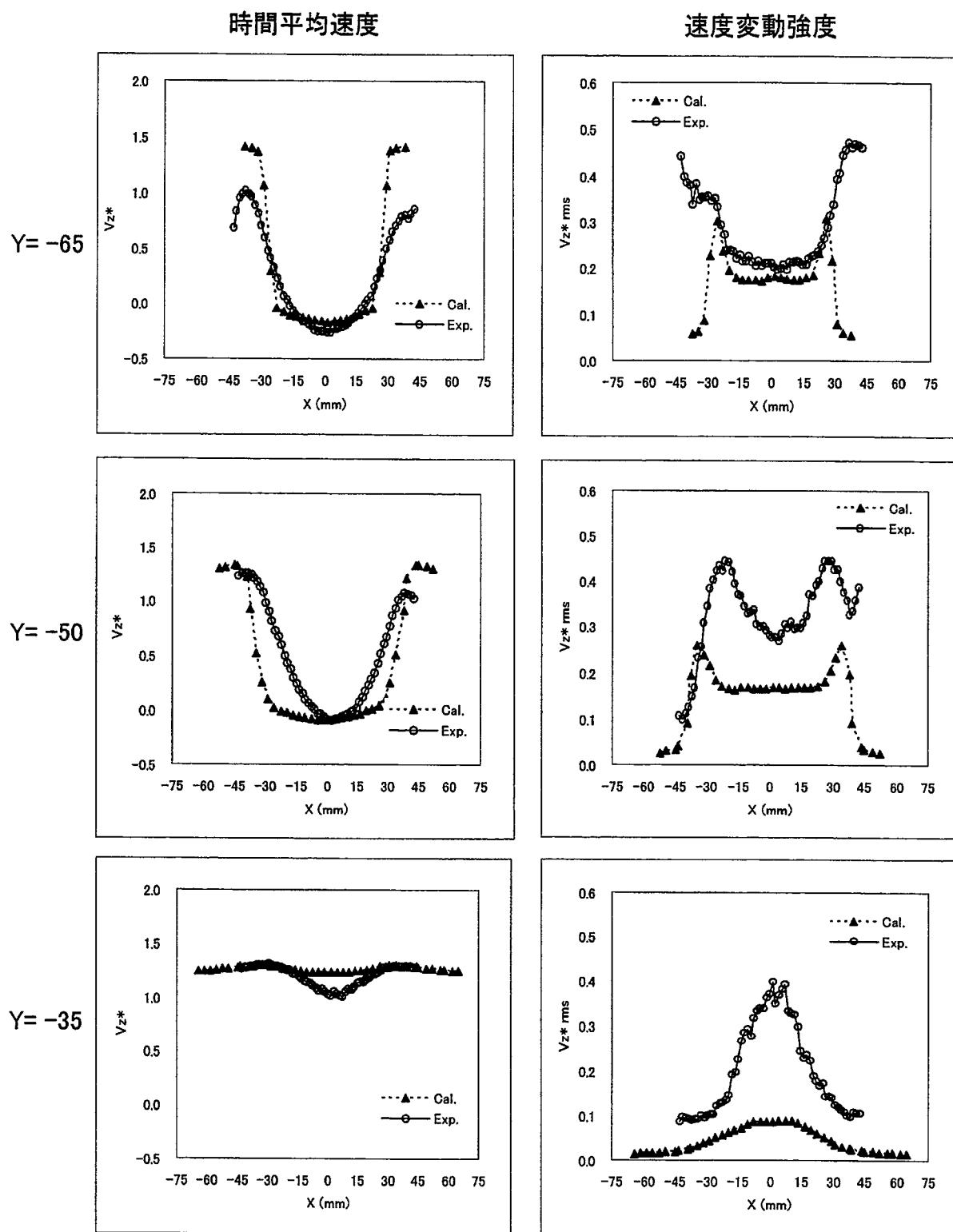


図4-11-(1) 軸方向流速成分(V_z)の時間平均値・変動強度の比較
($Z = 0.36 D_m$: Case1)

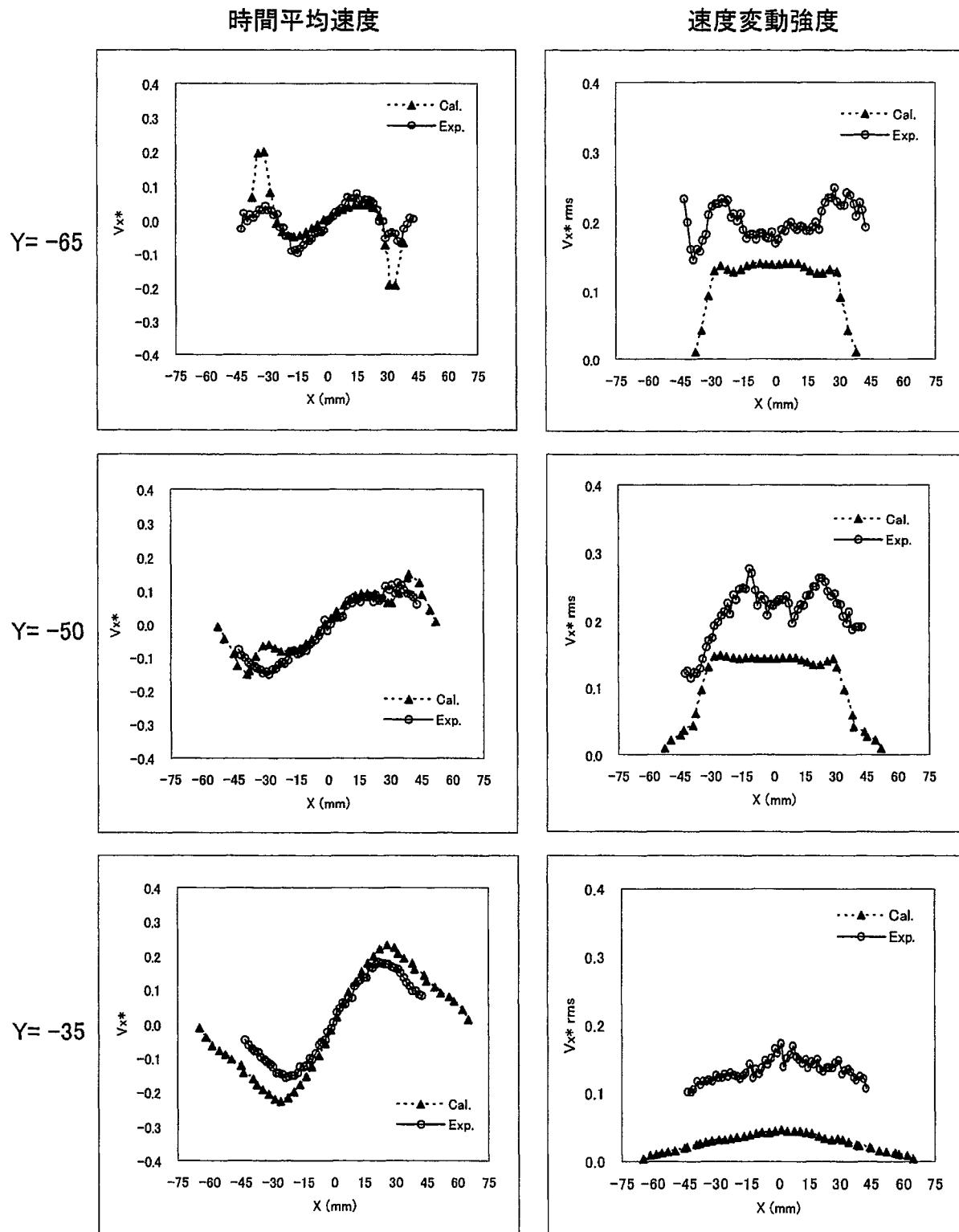


図4-11-(2) 水平方向流速成分(V_x)の時間平均値・変動強度の比較
($Z = 0.36 D_m$: Case1)

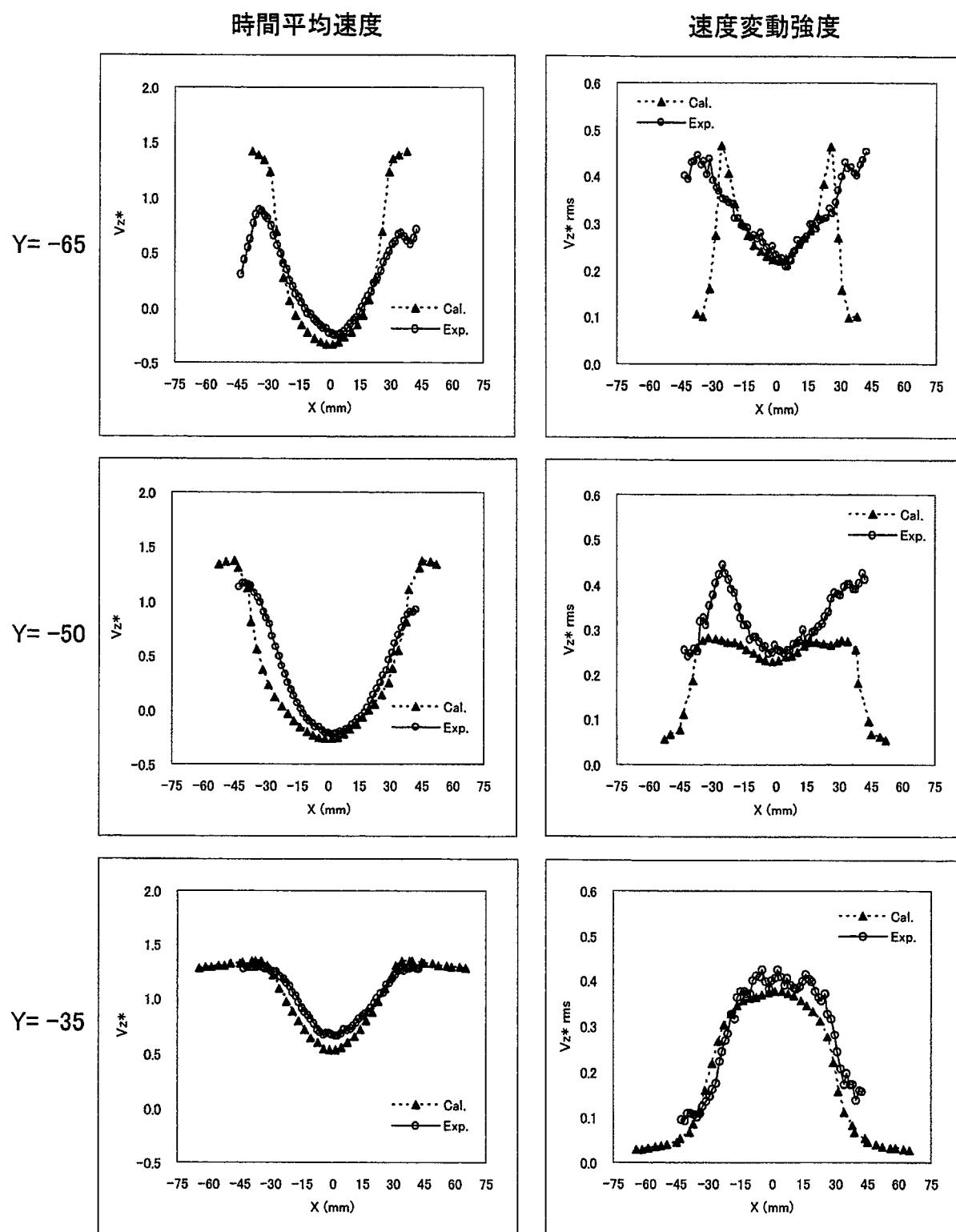


図4-12-(1) 軸方向流速成分(V_z)の時間平均値・変動強度の比較
($Z = 0.5$ Dm : Case1)

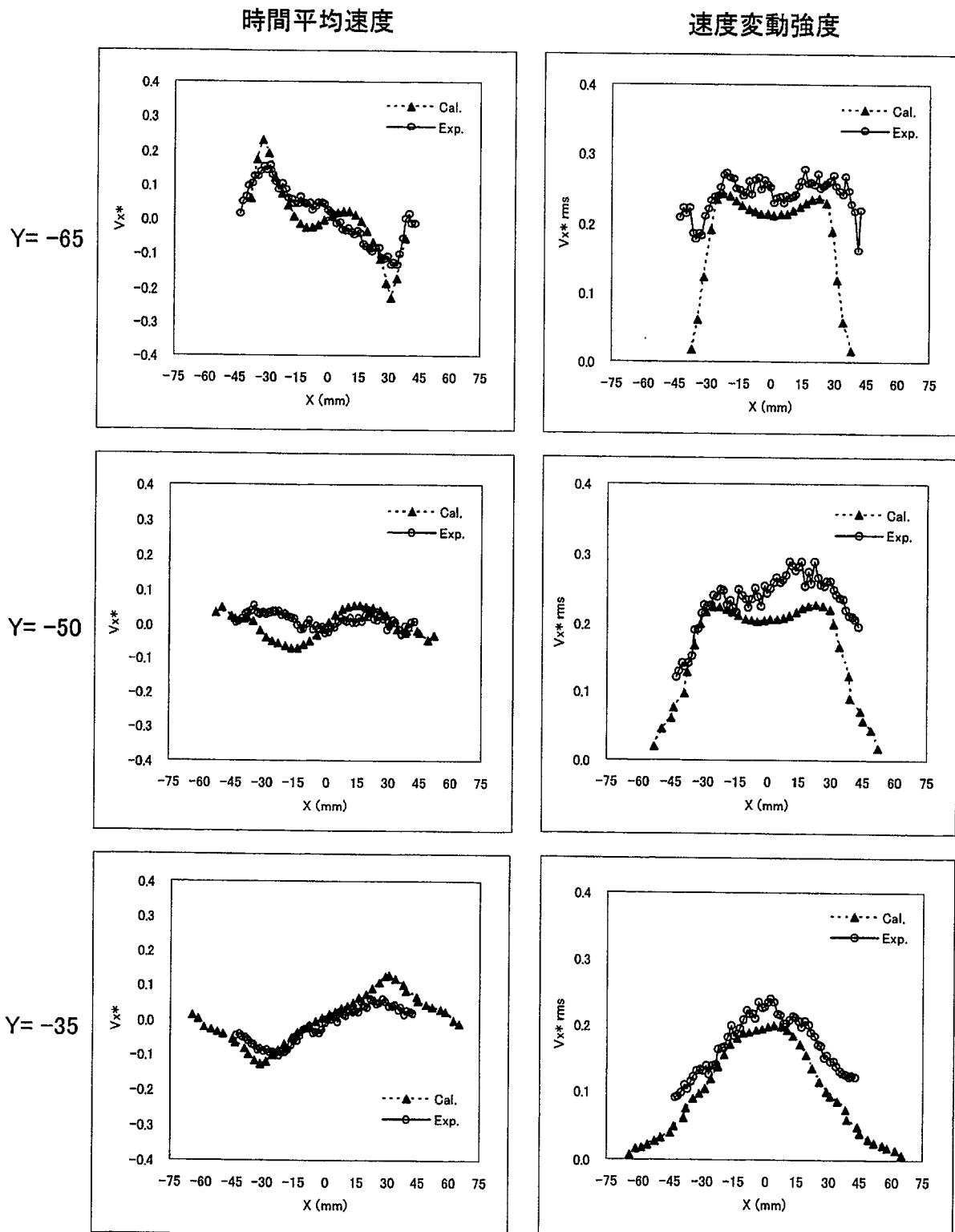


図4-12-(2) 水平方向流速成分(V_x)の時間平均値・変動強度の比較
($Z = 0.5 D_m$: Case1)

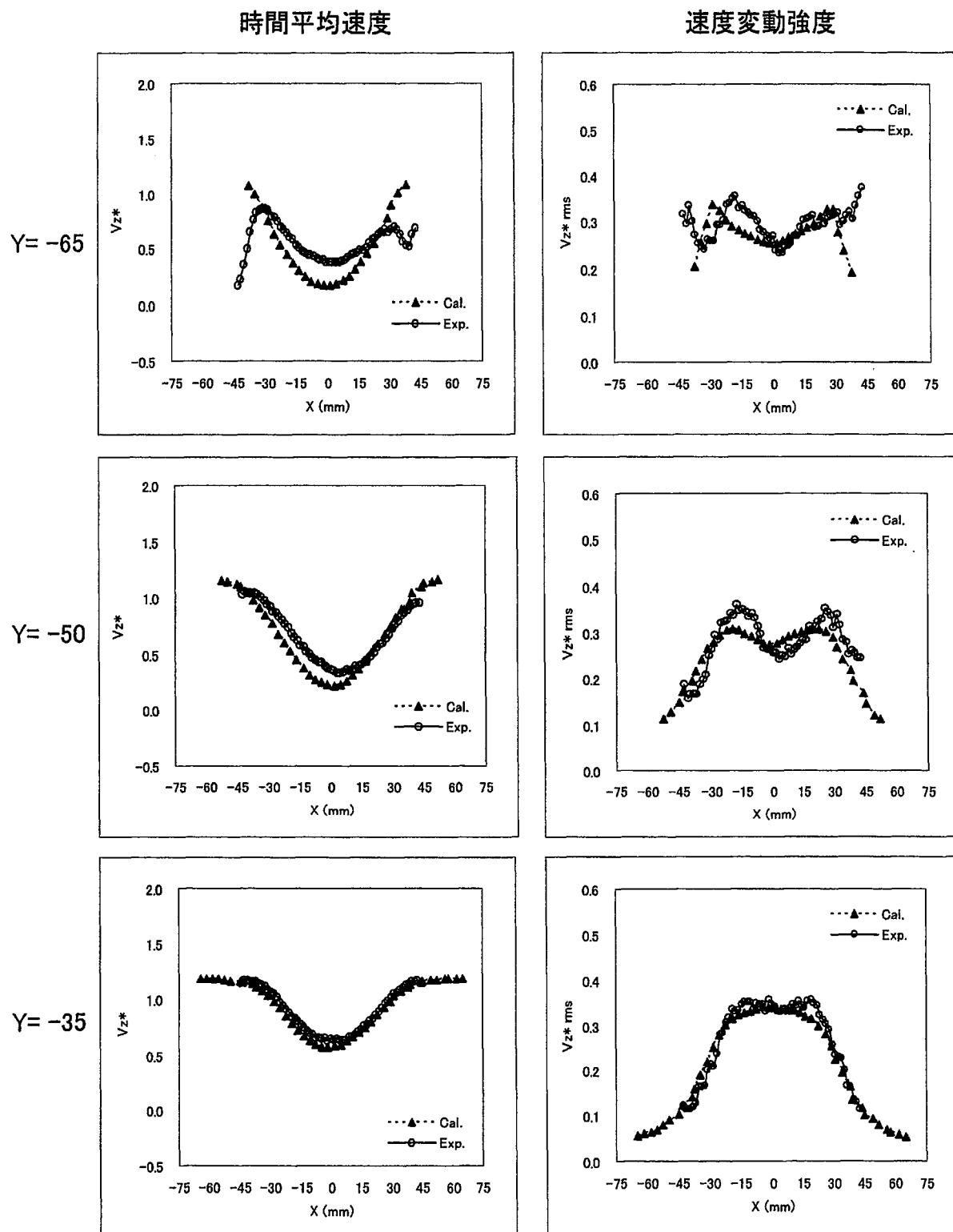


図4-13-(1) 軸方向流速成分(V_z)の時間平均値・変動強度の比較
($Z = 1.0$ Dm : Case1)

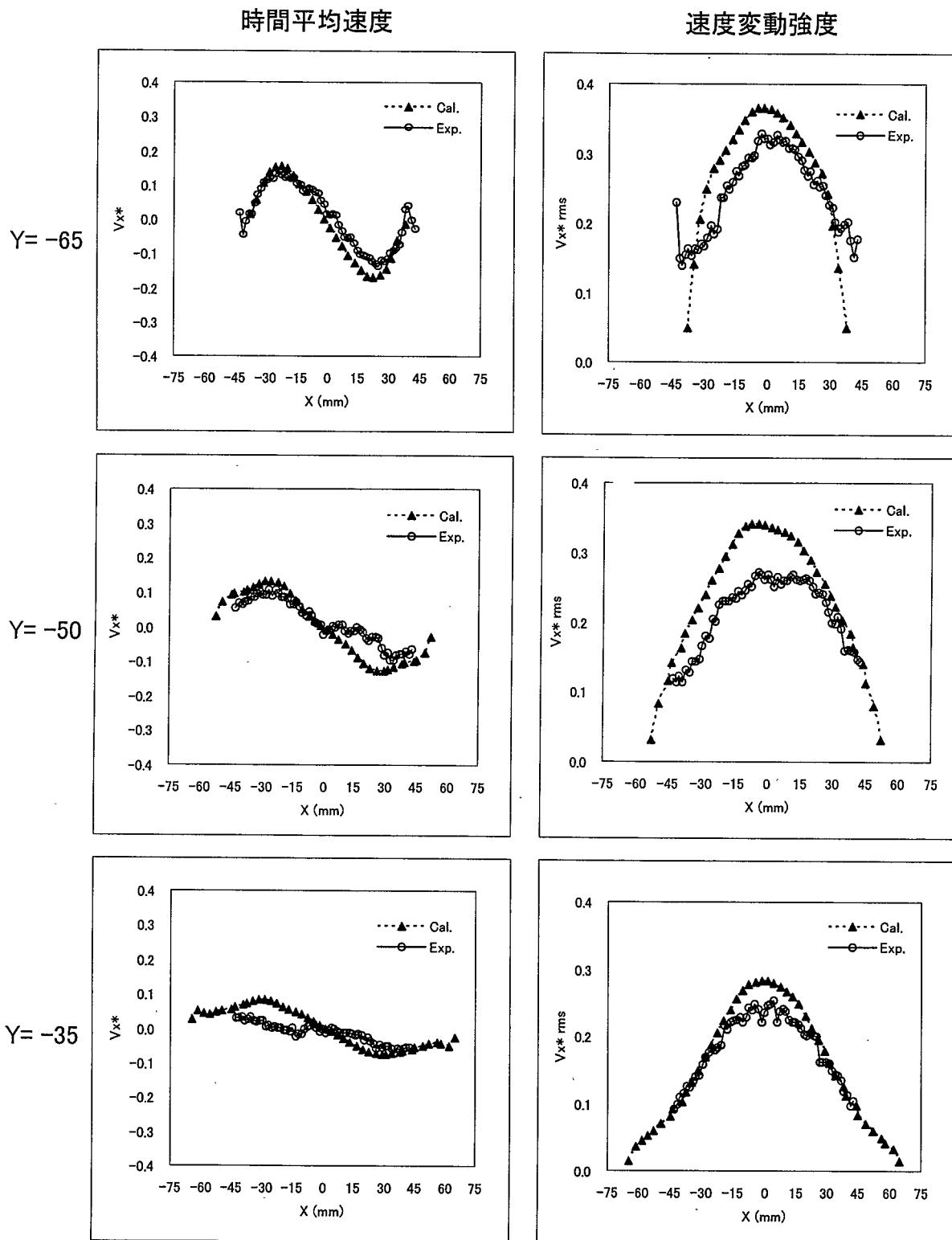


図4-13-(2) 水平方向流速成分(V_x)の時間平均値・変動強度の比較
($Z = 1.0$ Dm : Case1)

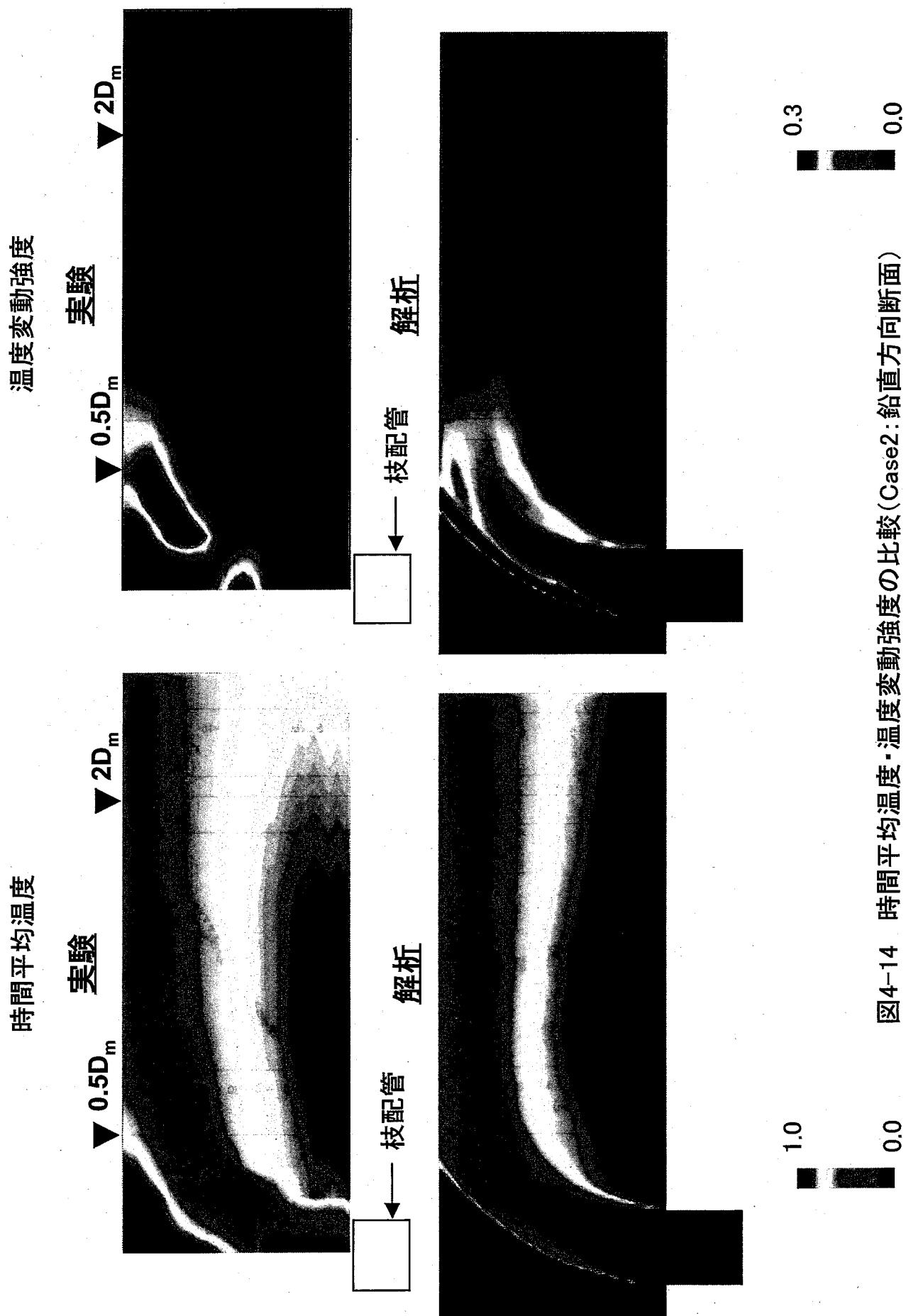


図4-14 時間平均温度・温度変動強度の比較(Case2:鉛直方向断面)

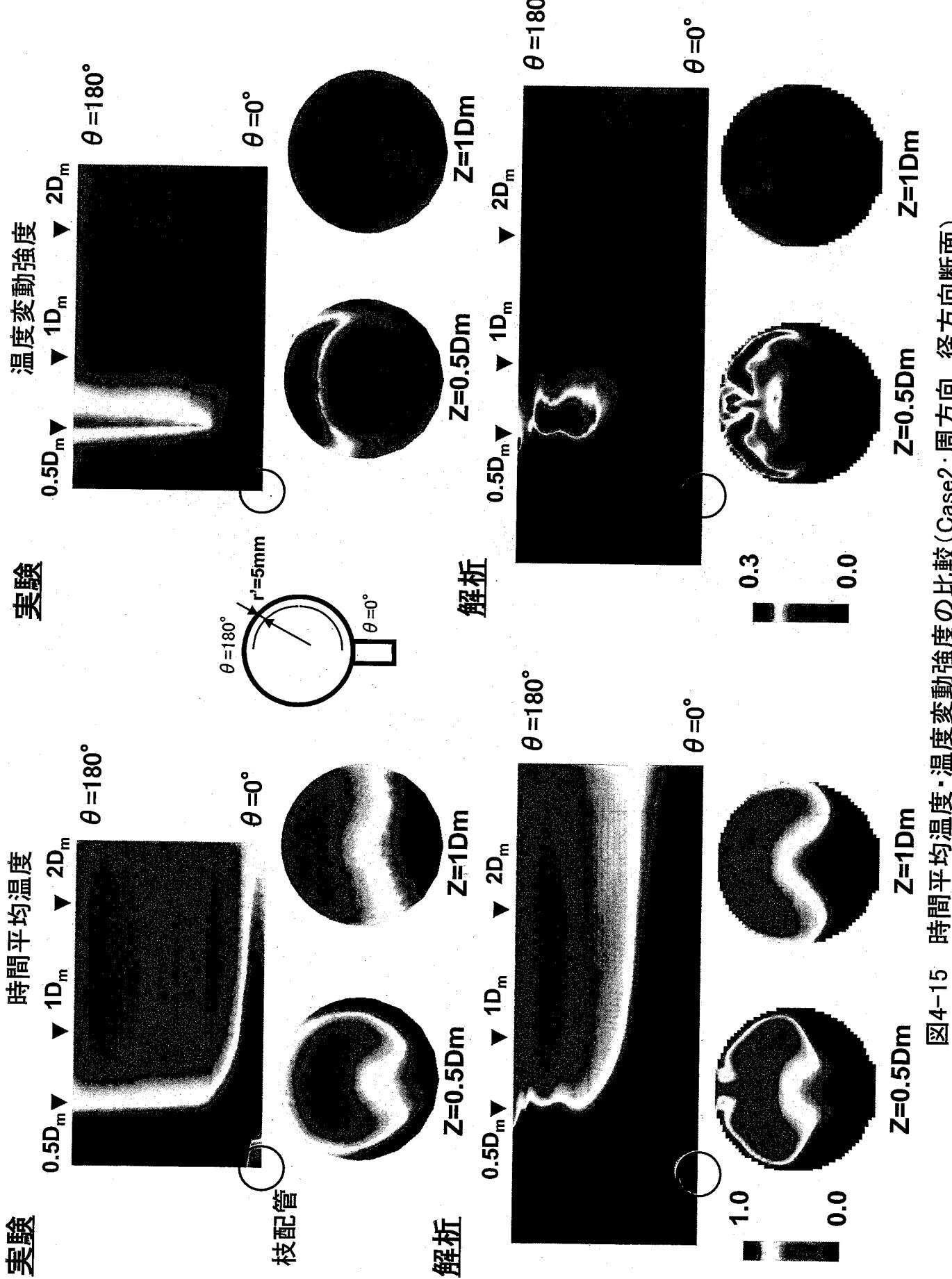


図4-15 時間平均温度・温度変動強度の比較(Case2:周方向、径方向断面)

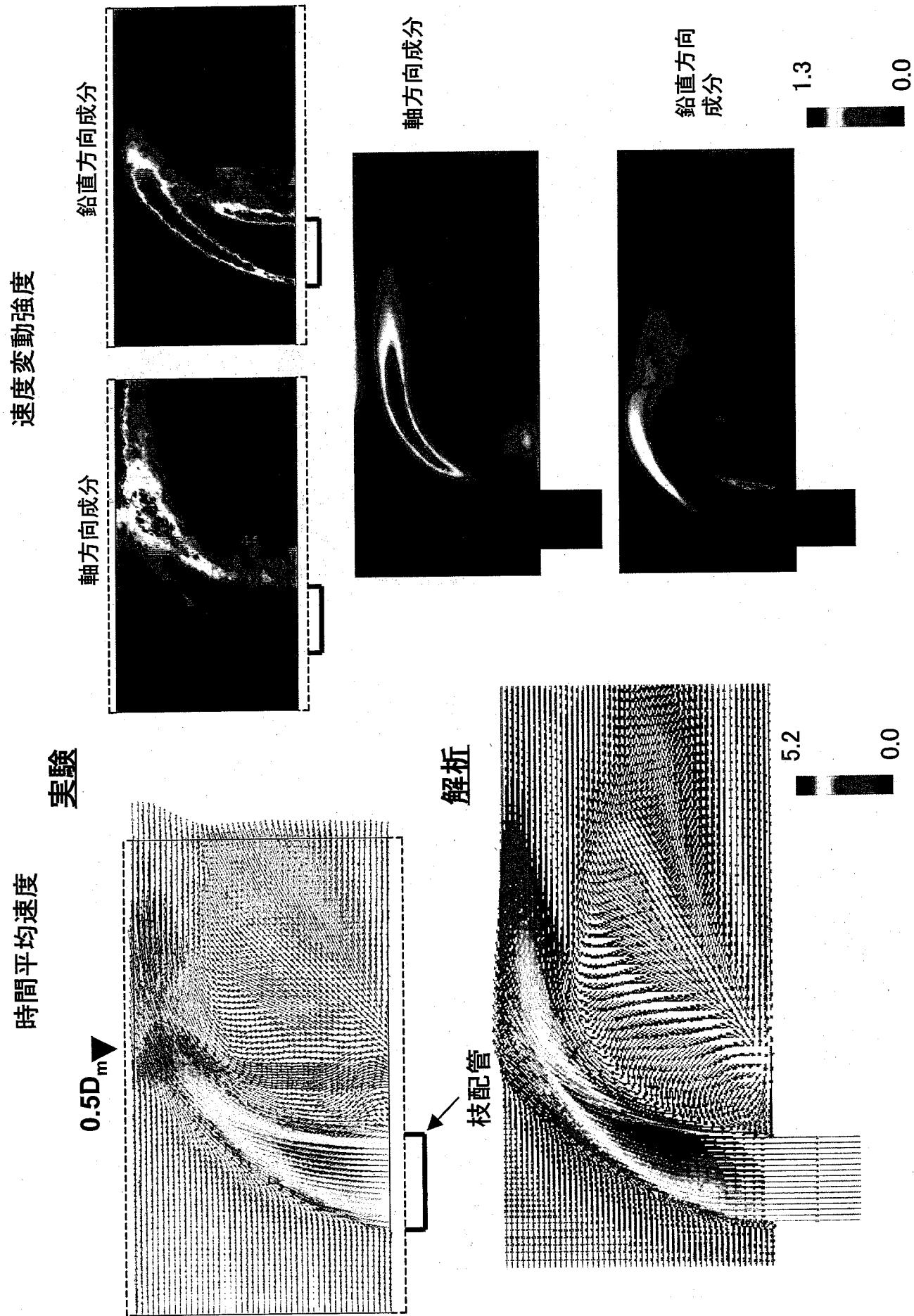


図4-16 時間平均速度・速度変動強度の比較(Case2: 鉛直方向断面)

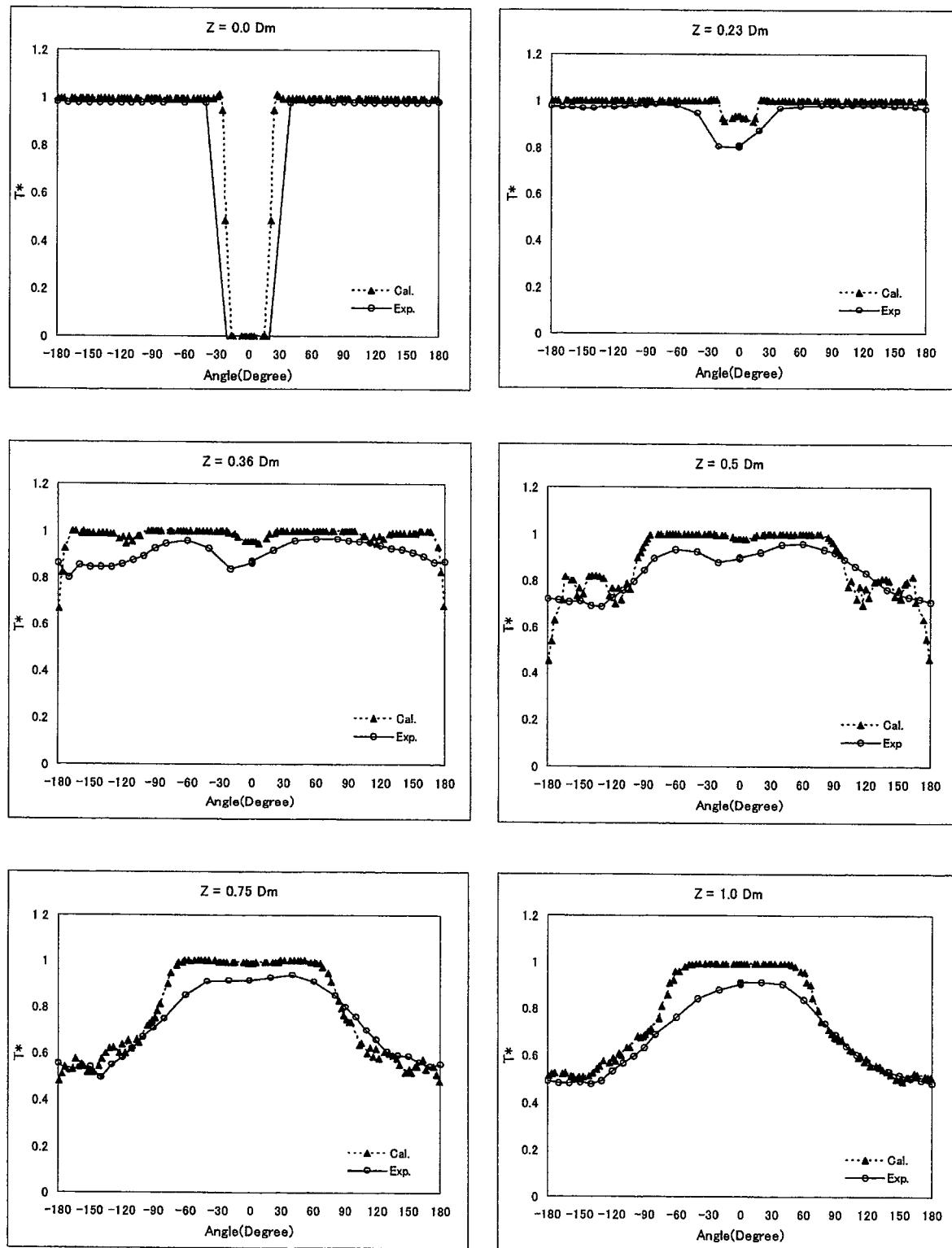


図4-17 時間平均温度分布の比較($r' = 5\text{mm}$: Case2)

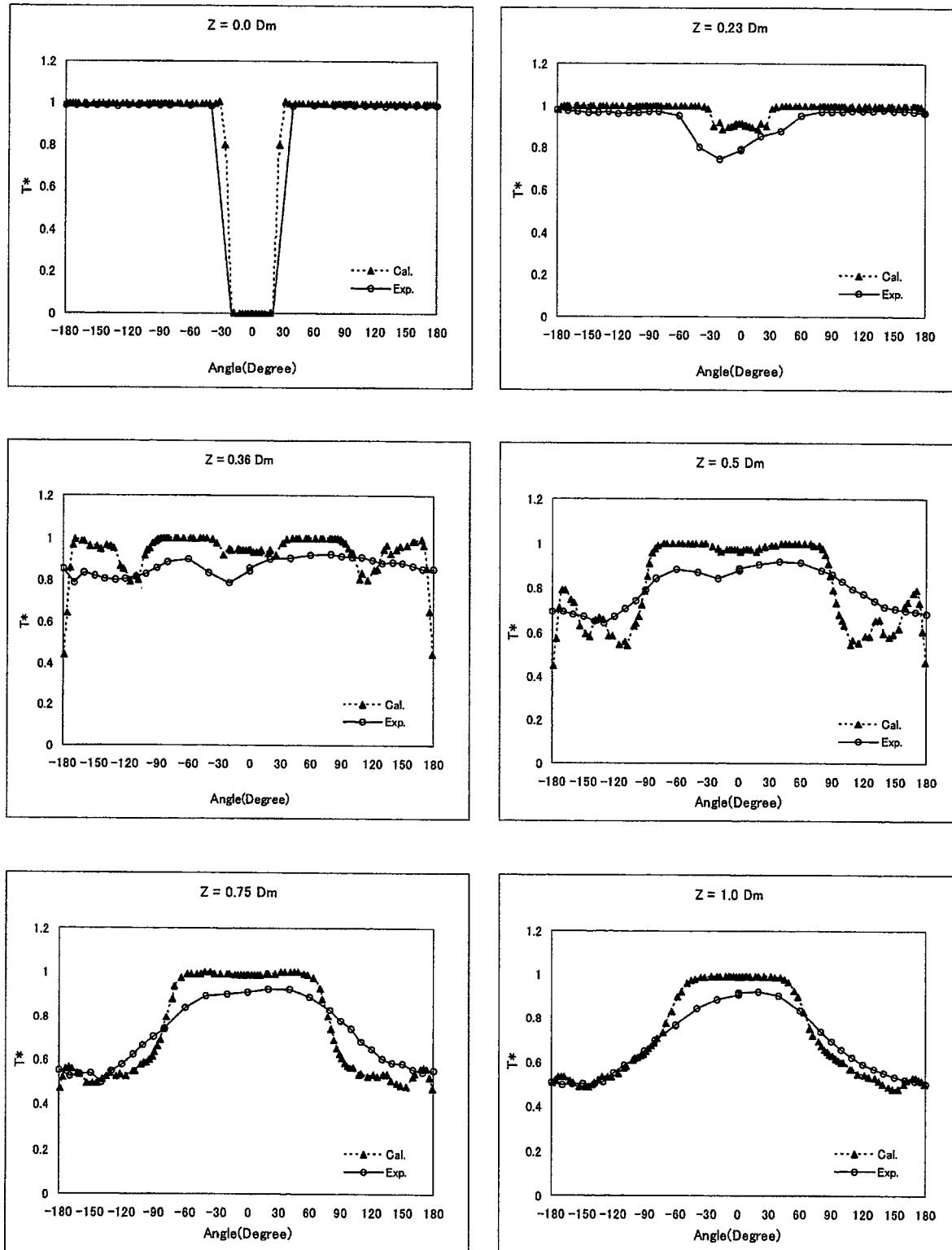


図4-18 時間平均温度分布の比較($r' = 10\text{mm}$: Case2)

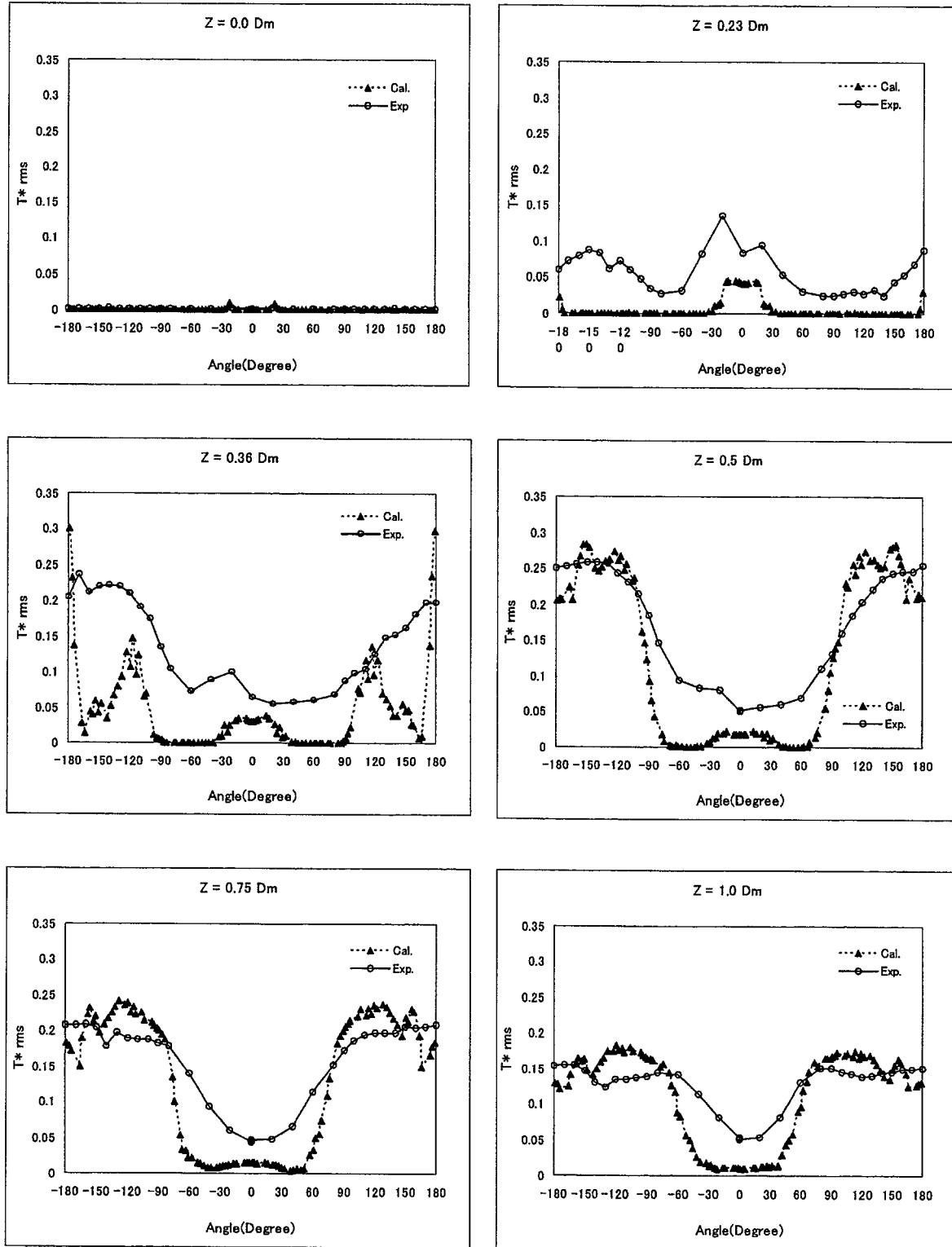


図4-19 温度変動強度分布の比較($r' = 5\text{mm}$: Case2)

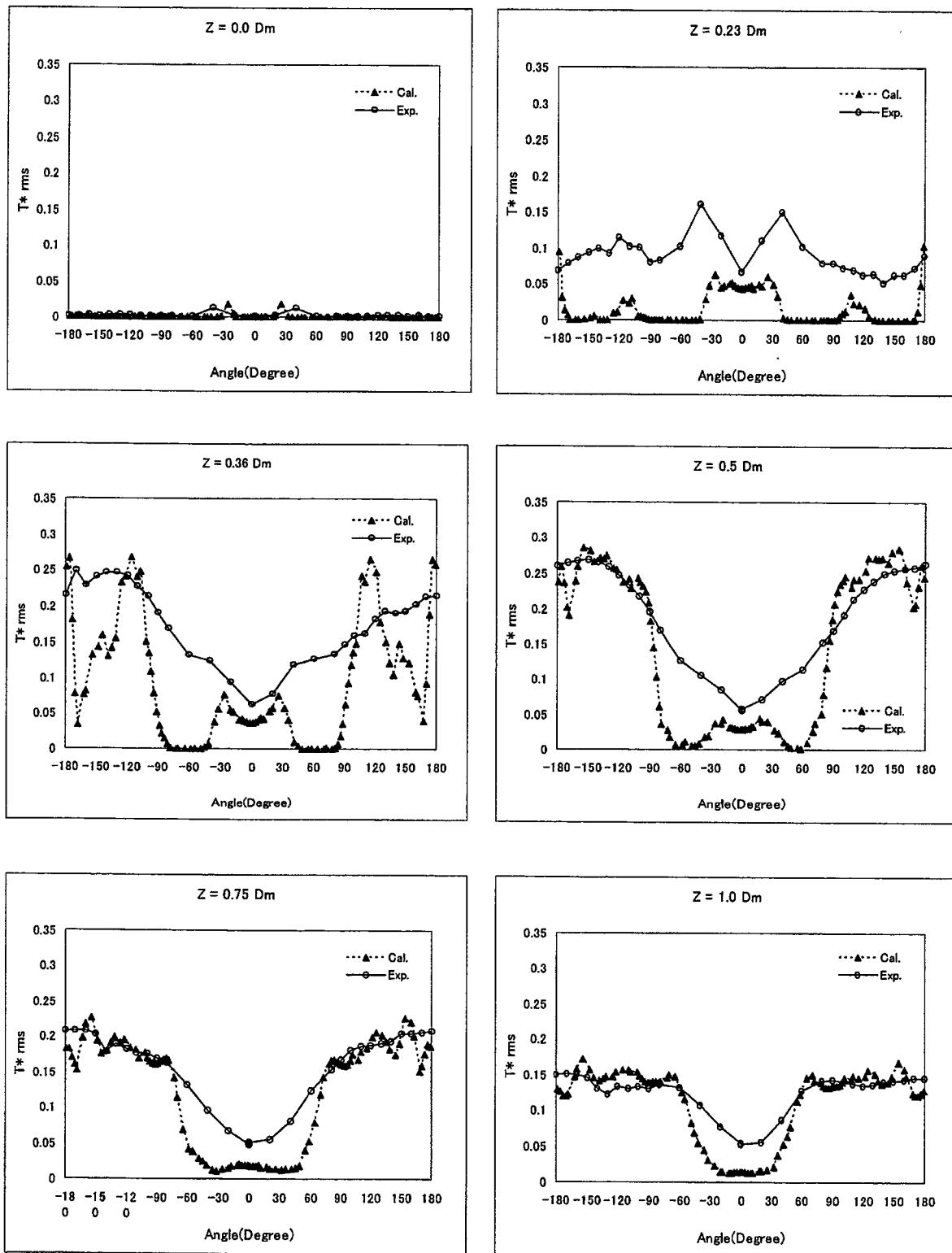


図4-20 温度変動強度分布の比較($r' = 10\text{mm}$: Case2)

第5章 考察

5. 1 解析結果と実験結果の差異について

前章の壁面噴流条件及び衝突噴流条件における解析結果と実験結果の比較に関する考察を以下に述べる。壁面噴流条件の結果では、温度及び速度変動強度の分布は解析と実験で同じ傾向を示したが、変動強度が高くなる位置は解析の方が実験に比べて下流側にシフトする結果となった。一方、衝突噴流条件の結果は壁面噴流条件の結果に比べると解析と実験で比較的良い一致を見せている。

この差異に関して考えられる原因の一つに、テスト部入口における速度変動の影響が考えられる。そこで、テスト部入口近傍における速度変動状況を確認するため、 $Z=-50\text{mm}$ における壁面噴流条件 ($V_m=1.46\text{m/s}$) 及び衝突噴流条件 ($V_m=0.2\text{m/s}$) での PIV による速度変動強度分布を図 5-1 に示す。この図からもわかるように、どちらのケースにおいても入口近傍での乱れは主流流速に対して 10%程度であった。後述する混合領域における乱れの大きさは鉛直方向及び軸方向で最大 30%から 40%となっていることから、入口での乱れが合流部での変動強度へ与える影響は小さいと考えられる。

壁面噴流条件では、枝配管からの噴流が主配管壁面に沿って流れることから、主配管の壁面を階段状メッシュで模擬したことも差異の原因の一つと考えられる。そこで、変動強度が高くなる位置が壁面の影響を受けない、主配管鉛直断面（主配管下面から上面への中心線）における比較を実施した。結果を図 5-2 及び図 5-3 に示す。グラフの $Y=-75\text{mm}$ が主配管下面、 $Y=+75\text{mm}$ が主配管上面である。時間平均温度分布の比較を見ると、枝配管からの低温流体が流れている部分では、 $Z=0D_m$ から $Z=0.5D_m$ までは、解析結果の方が高い温度分布を示している。これは、図 4-3 における軸方向に垂直な断面での $Z=0.5D_m$ の時間平均温度センターからもわかる様に、実験での枝配管噴流は比較的等温であるが、解析では主配管流との境界部近傍に低温流体が集まる結果となっていることによる。温度変動強度のグラフを見ると、 $Z=0D_m$ から $Z=0.36D_m$ で実験では 0.3 程度の温度変動強度があるのに対し、解析では大きな温度変動強度は現れていない。この傾向は、4 章で比較した壁面近傍での傾向と同様である。図 5-4 及び図 5-5 に同位置における各軸方向の時間平均速度及び速度変動強度を示す。時間平均速度は軸方向及び垂直方向とも実験と解析で良好な一致を示している。しかし、速度変動強度は温度変動強度と同様に $Z=0.5D_m$ までは実験の方が解析より高い値を示している。図 5-6 及び図 5-7 に衝突噴流条件での時間平均温度及び温度変動強度分布の比較結果を示す。衝突噴流の条件では、時間平均温度及び温度変動強度でほぼ同様の分布が得られている。図 5-8 及び図 5-9 に同じ位置での時

間平均速度及び速度変動強度を示す。各成分とも解析と実験で良好な一致を示している。この結果から、主配管壁面の階段状メッシュが、壁面噴流条件での解析と実験における差異の主原因ではないと考えられる。

4章における壁面噴流の結果（図4-1及び図4-3）を見ると、枝配管からの噴流と主配管流が衝突する面での温度及び速度変動が解析で捉えられていないことがわかる。一方、衝突噴流のケース（図4-14及び図4-16）では枝配管噴流の変動が解析で再現されている。この差異は、解析における枝配管の助走区間の影響も原因の一つと考えられる。実験では、約 $10D_b$ の助走区間が設定されているが、解析では $1D_b$ となっている。合流部における枝配管噴流の振動は、枝配管内の流況にも影響を及ぼしていると考えられる。すなわち、枝配管内部から流速分布の揺らぎが発生している可能性があり、その場合、助走区間が $1D_b$ ある解析では、助走区間が短く枝配管内での揺らぎを十分に再現できていないことになる。このことによって、合流部での枝配管噴流の揺らぎが模擬することができなかったと考えられる。衝突噴流条件では、枝配管流速が主配管流速に比べて約5倍速い条件となっていることから、枝配管噴流が剛体に近くなり影響が少なかったと考えられる。助走区間の影響としては、枝配管内での流速分布の違いも考えられる。実験では枝配管内で速度分布が形成されるが、解析ではほぼ一様流となっていることから、主配管流との衝突におけるせん断力が実験と解析で異なっていたと考えられる。すなわち、実験では枝配管内で壁近傍の流速が遅くなることにより、枝配管噴流と主配管流が衝突する面での速度差が大きくなることになる。しかし、解析では一様流で主配管流と衝突するため、速度差が小さくなり（ $V_m=1.46\text{m/s}$ 、 $V_b=1\text{m/s}$ ）乱れが抑えられたと考えられる。衝突噴流では、主配管の流速が枝配管流速に比べ小さい（ $V_m=0.23\text{m/s}$ 、 $V_b=1\text{m/s}$ ）ために、速度差におけるせん断の影響が考慮できていた為に、変動を再現することができたと推定される。この結果から、本解析体系における上流側の条件設定は重要と考えられ、今後の検討していく予定である。

5. 2 枝配管噴流後流域の渦構造について

前報^[14]にて、壁面噴流条件における温度分布測定試験の結果から、温度変動強度の高い位置での温度変動には卓越周波数が存在していることを示した。また、この卓越周波数は枝配管口径及び主配管流速を代表値として計算したSt数が約0.2となった。円柱構造物の後流に生成されるカルマン渦の生成周期は、円柱の直径と主流流速を代表値としたSt数で表すと約0.2となる。このことから、ここでの温度変動は枝配管噴流を柔な構造物として、その後流域に生成されるカルマン渦的なものによることが示唆された。この卓越周波数が確認され

た $Z=1D_m$ 、 $\theta=30^\circ$ 、 $r'=5\text{mm}$ における実験と解析の温度変動のパワースペクトル密度 (PSD) の比較を図 5-10 に示す。PSD は、全データ（実験：480s、48000 点、解析：30s、3000 点）に対して window を設定し（実験：20.48s、2048 点、解析：5.12s、512 点）、この window を移動（実験：1s ステップ、解析：0.1s ステップ）させて取り出したそれぞれのデータに対して高速フーリエ変換 (FFT) を施した後に平均化処理を行った。解析結果においても、実験結果と同様に 6Hz 近傍に卓越周波数が存在していることがわかる。PSD の低周波成分では、解析結果の方が実験結果に比べ低い値となっている。これは、解析におけるシミュレーション時間が実験に比べ短い（実験：480s、解析：30s）ことが原因と考えられる。一方、PSD の高周波成分では、解析結果の方が実験結果に比べ高い値となっている。これは、解析結果が実験における熱電対の時間遅れを考慮していないことが原因の一つと考えられる。

図 5-11 に枝配管中心軸を中心とした左右対称位置 ($Z=1D_m$ 、 $\theta=\pm 30^\circ$ 、 $r'=5\text{mm}$) での解析結果における温度変動の時系列データを示す。図は 10Hz 以上の高周波成分をバンドパスフィルターによりカットして示している。この図から、多くの時間帯で $\theta=\pm 30^\circ$ で逆位相の温度変動が得られていることがわかる。すなわち、卓越周波数を有する温度変動は枝配管噴流の後流域でカルマン渦の様に交互に発生していると考えられる。

そこで、この卓越周波数を有する温度変動が、枝配管噴流を柔な構造物としたカルマン渦によるものかを確認するために、混合部における瞬時速度ベクトル（水平断面： $Y=-65\text{mm}$ ）を時系列で示したもの図 5-12 に示す。ここでのベクトル図は、ベクトルの長さは速度を表し、色は温度を表している。図より、枝配管噴流の後流域にできる 2 つの渦はカルマン渦的に交互に生成されていることがわかる。また、主配管壁面近傍では、この渦の挙動により主流の高温流体と枝配管からの低温流体が入れ替わっていることがわかる。この渦の周期を把握するために、逆流域における軸方向速度変動の PSD を求めた。結果を図 5-13 に示す。測定ポイントは図中の矢印部である ($Z=0.75D_m$ 、 $r'=65\text{mm}$)。このポイントでの速度変動は、温度変動強度の高い位置に見られた温度変動の卓越周波数成分と同様に 6Hz 近傍に卓越周波数が存在している。すなわち、温度変動の卓越周波数は枝配管噴流の後流域に生成される渦に起因していることが裏付けられた。

図 5-14 に混合部における瞬時速度ベクトル（鉛直断面）の時系列を示す。このベクトル図から、枝配管噴流の後流域に形成される逆流の 3 次元的構造がわかる。枝配管噴流主流の下端 ($Y=-35\text{mm} \sim -50\text{mm}$ の間) から低温流体が主配管下面に向かって巻き込まれ、主配管下面 ($Y=-65\text{mm}$) で逆流となっている。この主配管下面での逆流が水平断面（図 5-12）で見られた渦を生成していると考えら

れる。

広島大学で実施された矩形流路における T 字体系合流試験^[19]では、壁面噴流条件（[19]の文献では偏向噴流条件に相当するとされている）において混合領域にアーチ渦の生成が確認されている（枝配管噴流を囲む様に生成される馬蹄状の渦）。また、この試験を対象とした DINUS-3 による解析でも、同様のアーチ渦が再現されている^[20]。T 字管体系での混合における渦構造を把握するため、本試験体系にて、枝配管から気泡を注入し高速度ビデオ（1000 フレーム/s）で可視化試験を実施した結果、同様のアーチ渦が確認された（図 5-15）。

このアーチ渦の生成周波数は以下の式で表せることが文献[19]に示されている。

$$S_t = 1.06(\alpha^{0.353} \cdot \beta \cdot Re^{0.2})^{-0.353} \quad (7)$$

ここで、St：ストローハル数、 α ：口径比 (D_m/D_b)、 β ：流速比 (V_m/V_b) である。前報^[14]にて各配管の流入流速をパラメータとした試験で得られた、温度変動強度の高い位置に見られる温度変動の卓越周波数を式(7)と比較した結果を図 5-16 に示す。この図から、矩形流路で見られたアーチ渦と、温度変動強度の高い位置での温度変動には関連性があると考えられる。

図 5-17 に各センター図の法線方向を回転軸とした時間平均渦度分布を示す。水平断面の渦度分布を見ると、枝配管の後流域に回転方向が逆となる一対の渦度が存在している。 $Y=-50\text{mm}$ 及び $Y=-35\text{mm}$ に見られる内側にある 2 つの渦の外側にある渦は、逆流域を避けるように流れる主流によって生成されたものである。垂直断面の渦度を見ると、やはり枝配管後流域に形成される渦が確認できる。軸方向に垂直な断面における軸方向の左右対称な渦度は、枝配管噴流の側部に生成される縦渦である。この縦渦が垂直断面に見られる枝配管の吹き上げにより生成される渦と合成してアーチ渦が形成されると考えられる。

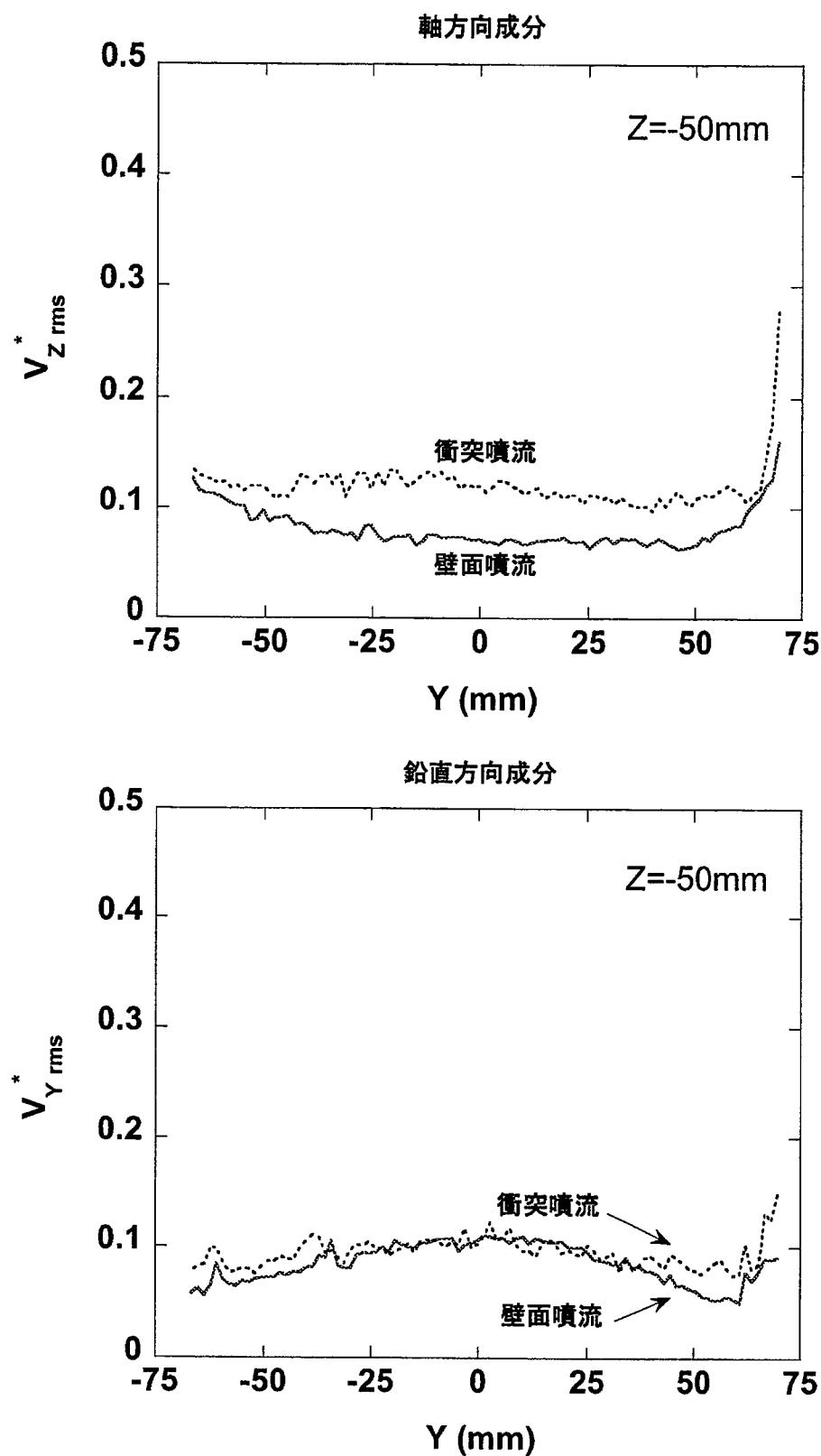


図5-1 主配管入口近傍における速度変動強度

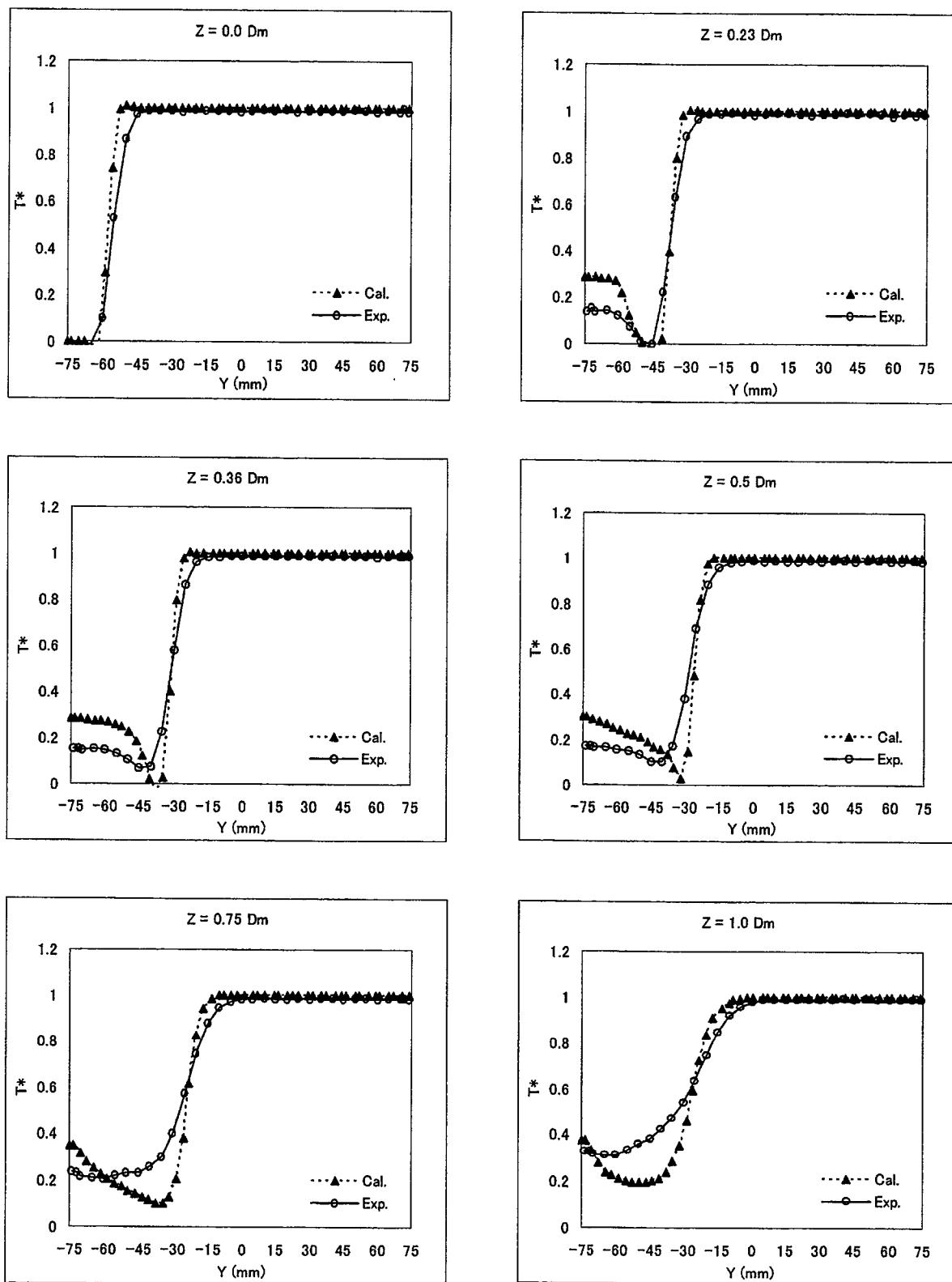


図5-2 鉛直方向断面時間平均温度分布の比較(Case1)

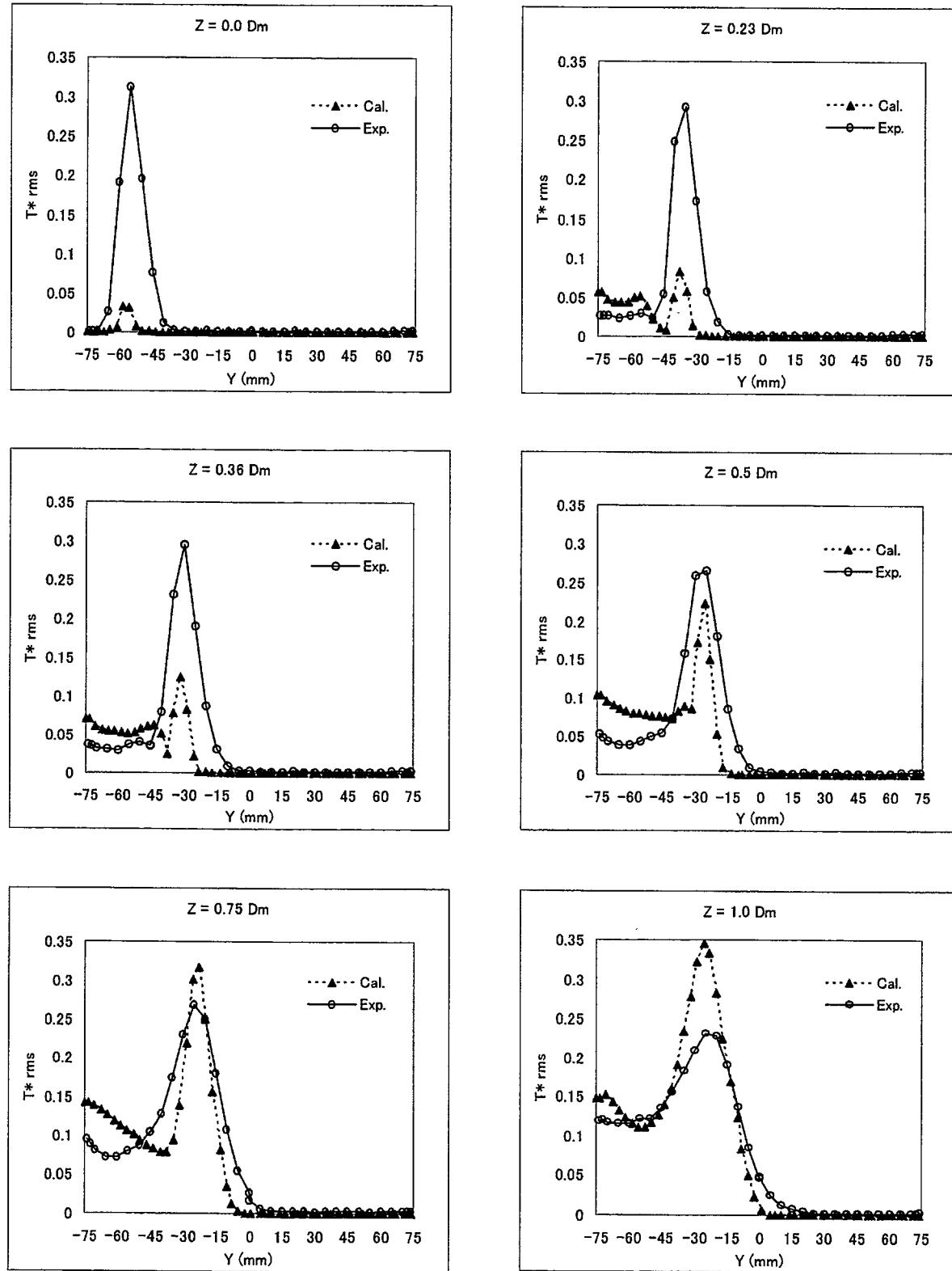


図5-3 鉛直方向断面温度変動強度分布の比較(Case1)

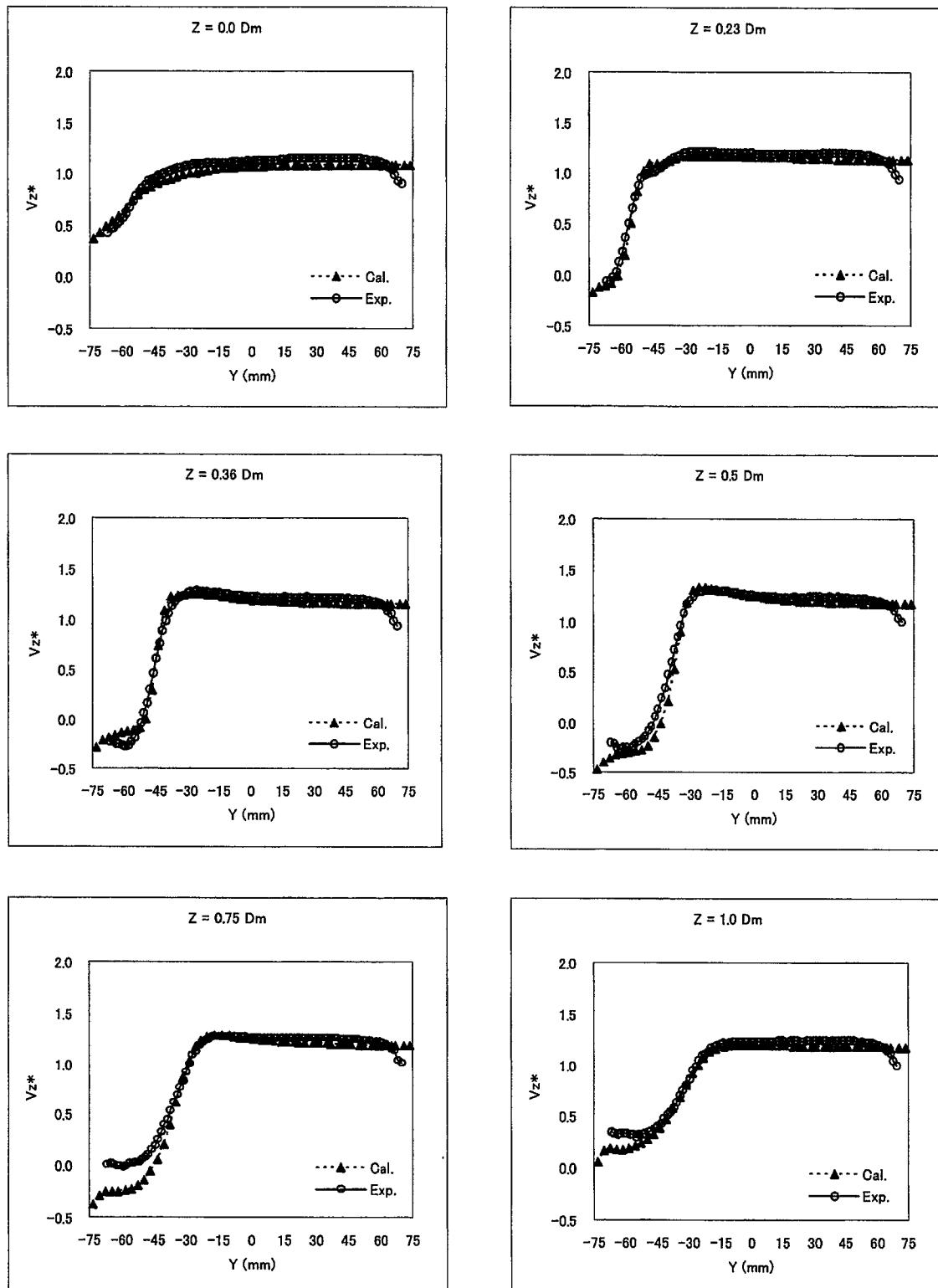


図5-4-(1) 軸方向流速成分(V_z)の時間平均値の比較

($\theta = 0^\circ - 180^\circ$: Case1)

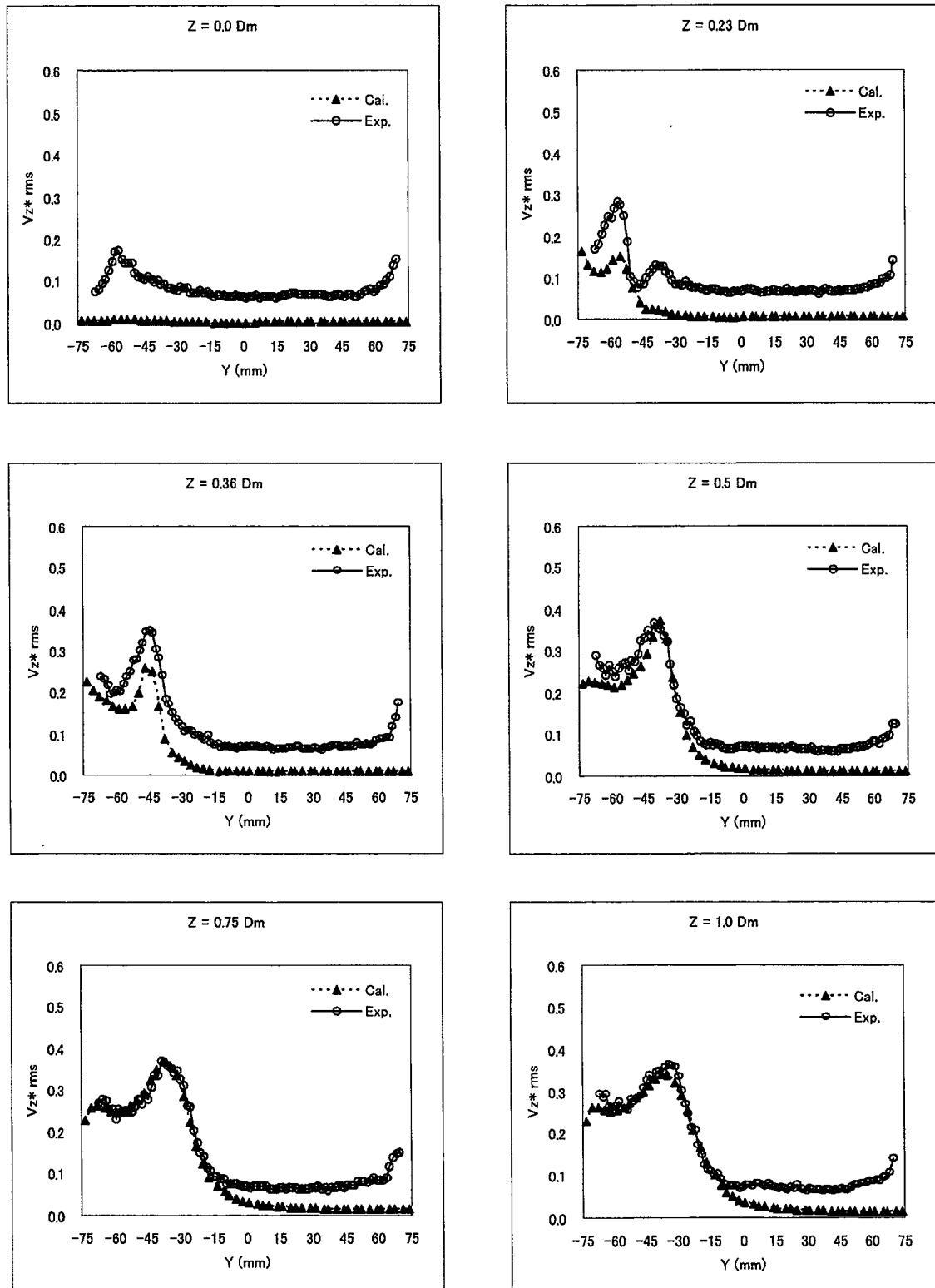


図5-4-(2) 軸方向流速成分(V_z)の変動強度の比較
($\theta = 0^\circ - 180^\circ$: Case1)

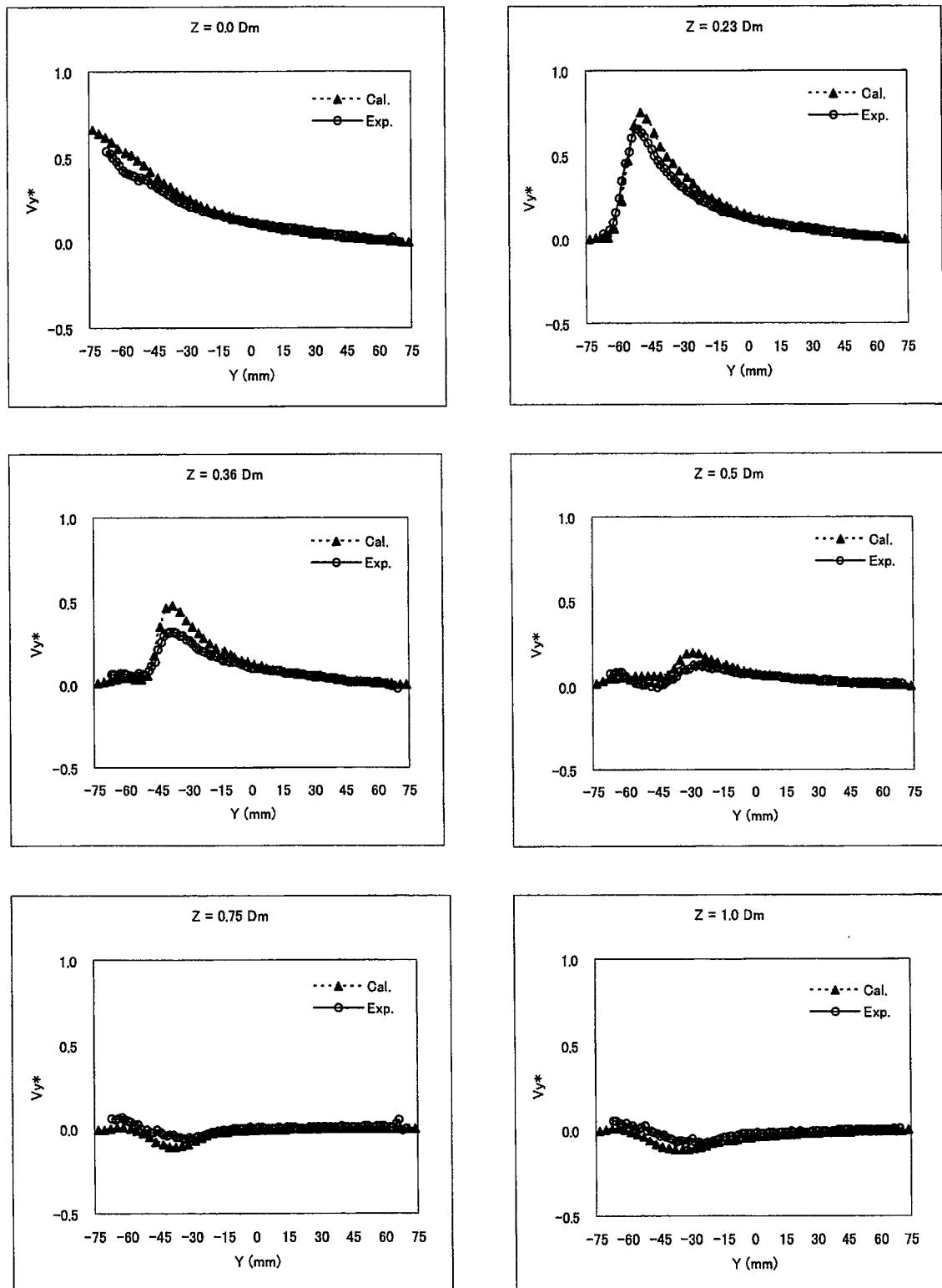


図5-5-(1) 垂直方向流速成分(V_y)の時間平均値の比較
($\theta = 0^\circ - 180^\circ$: Case1)

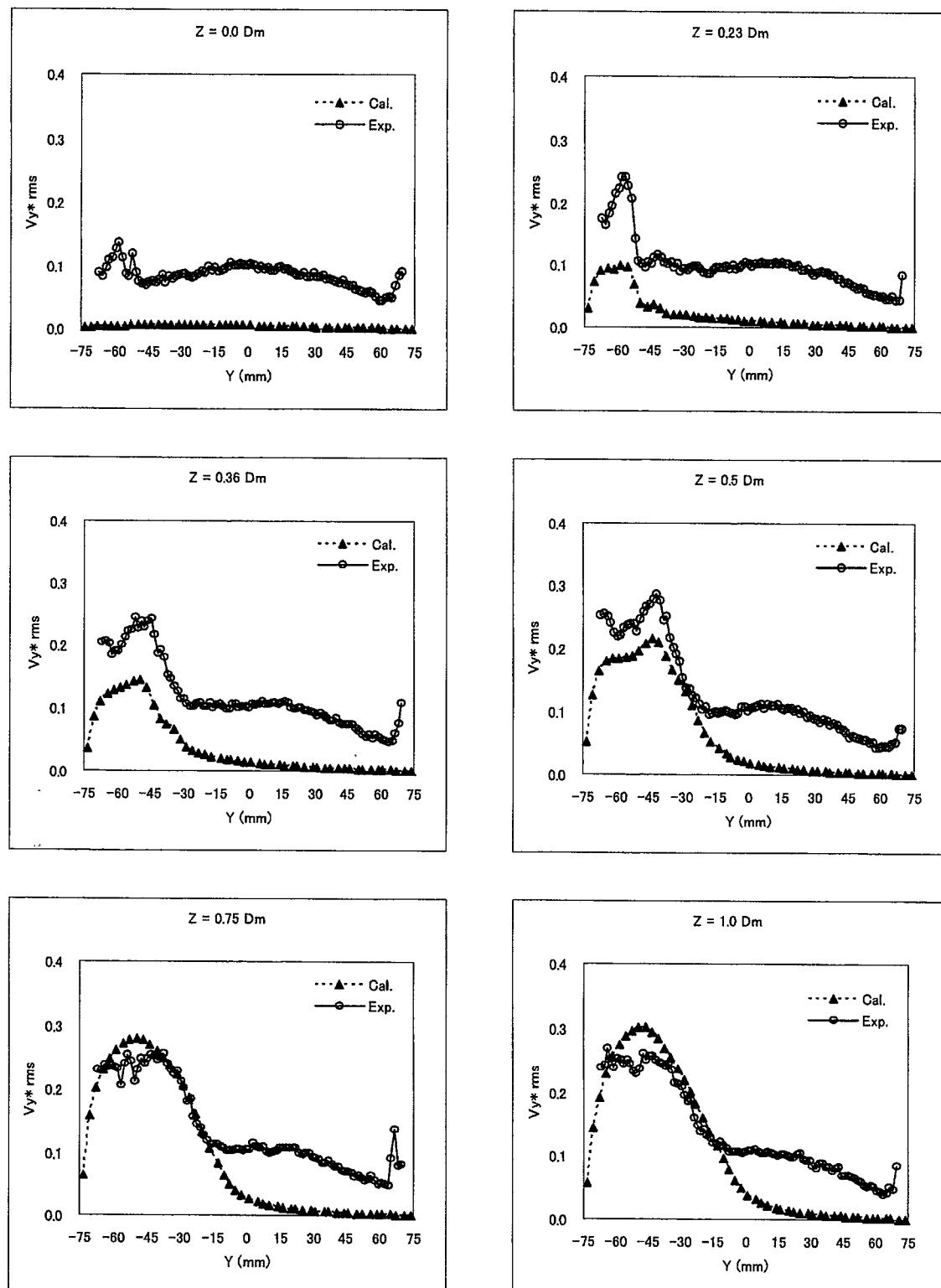


図5-5-(2) 垂直方向流速成分(V_y)の変動強度の比較
($\theta = 0^\circ - 180^\circ$: Case1)

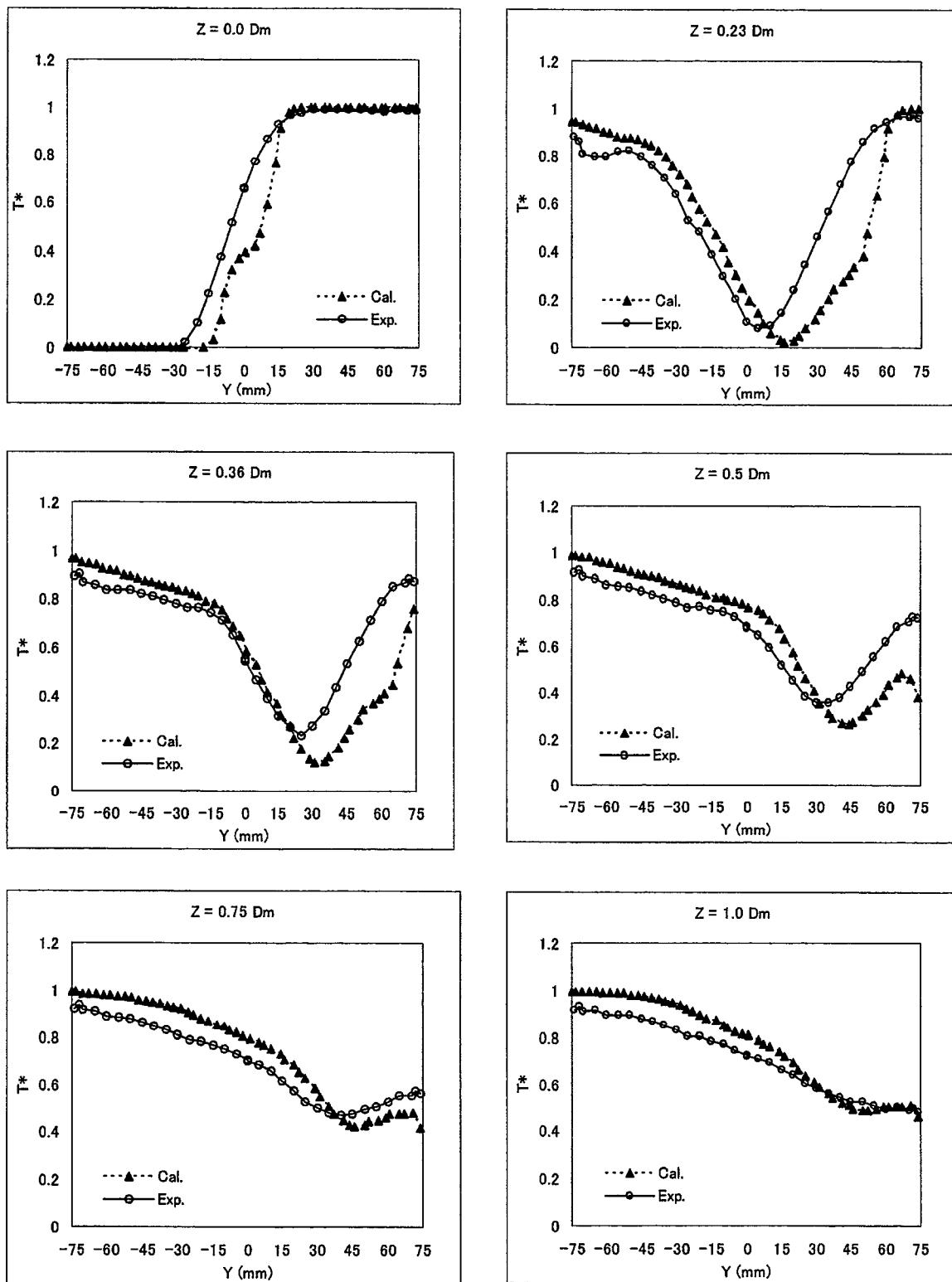


図5-6 鉛直方向断面時間平均温度分布の比較(Case2)

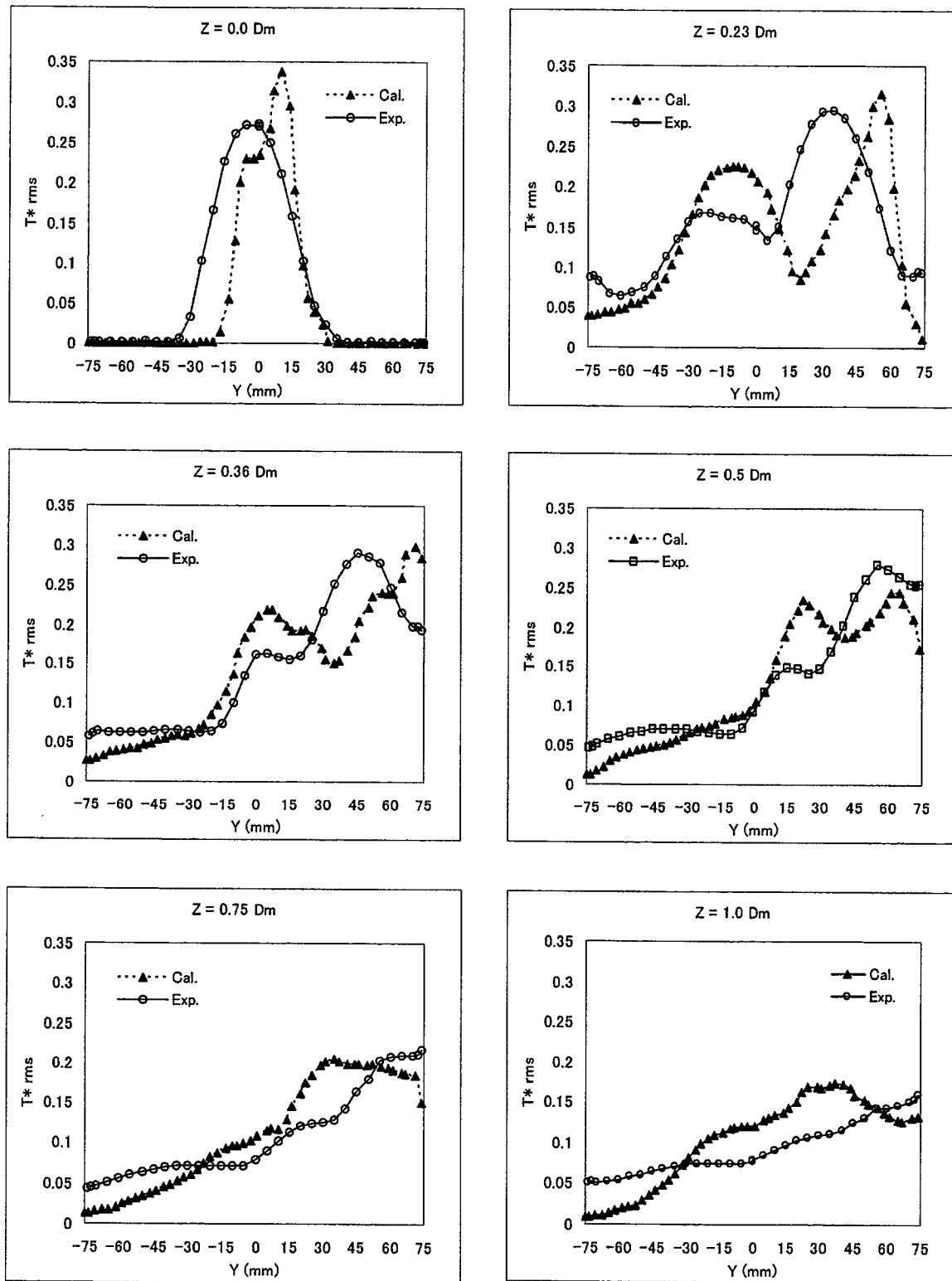


図5-7 鉛直方向断面温度変動強度分布の比較(Case2)

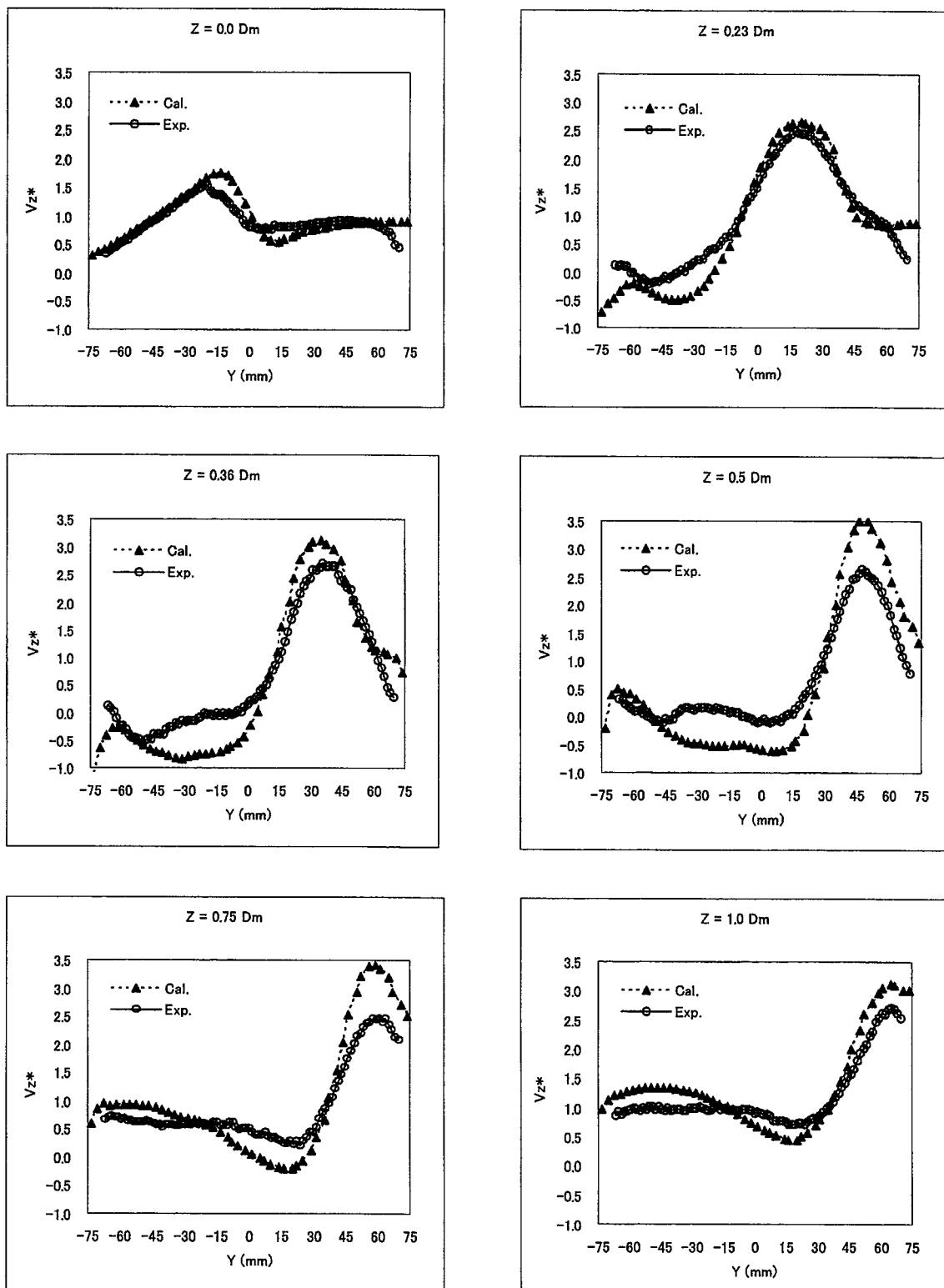


図5-8-(1) 軸方向流速成分(V_z)の時間平均値の比較
($\theta = 0^\circ - 180^\circ$: Case2)

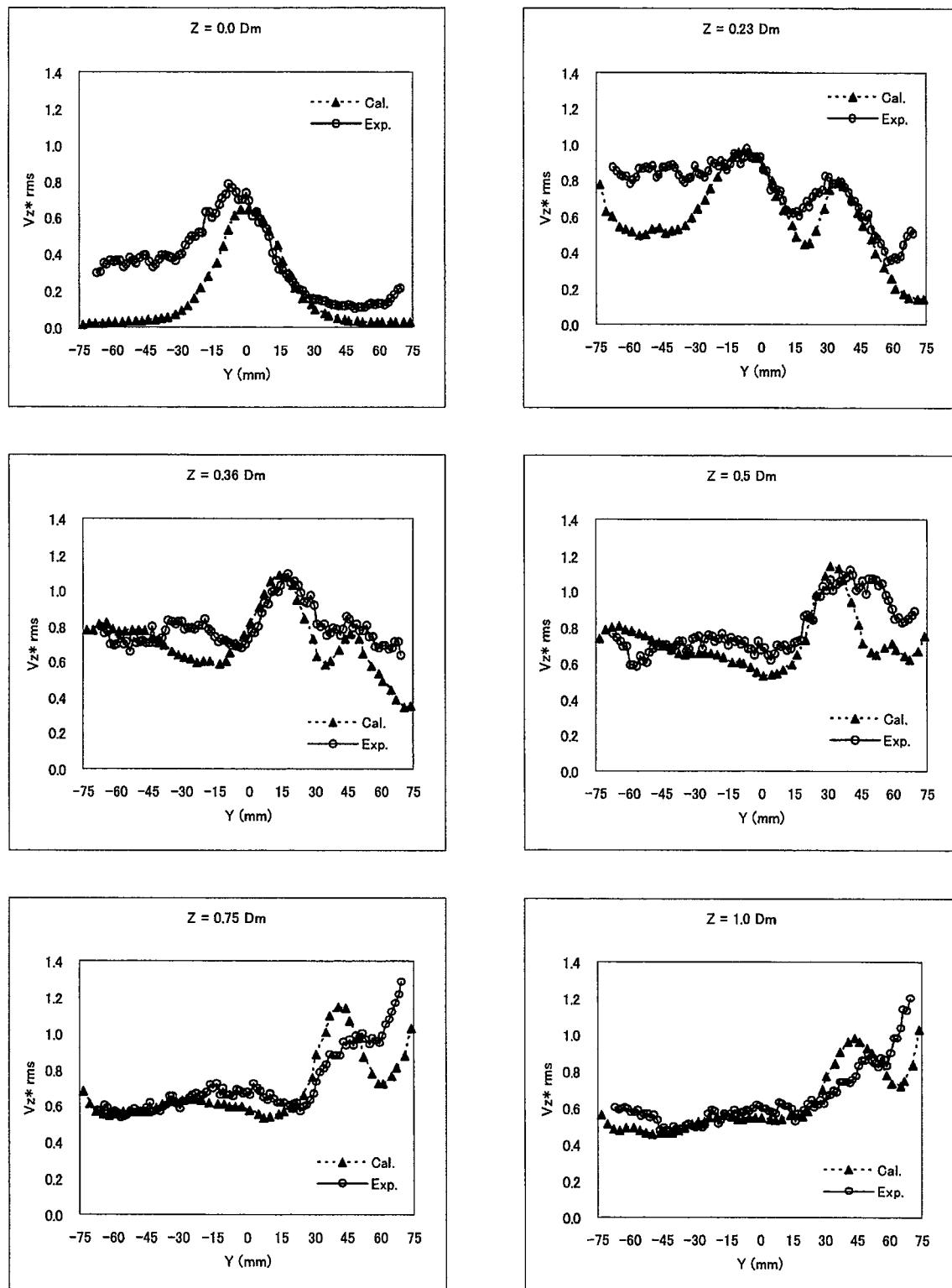


図5-8-(2) 軸方向流速成分(V_z)の変動強度の比較
($\theta = 0^\circ - 180^\circ$: Case2)

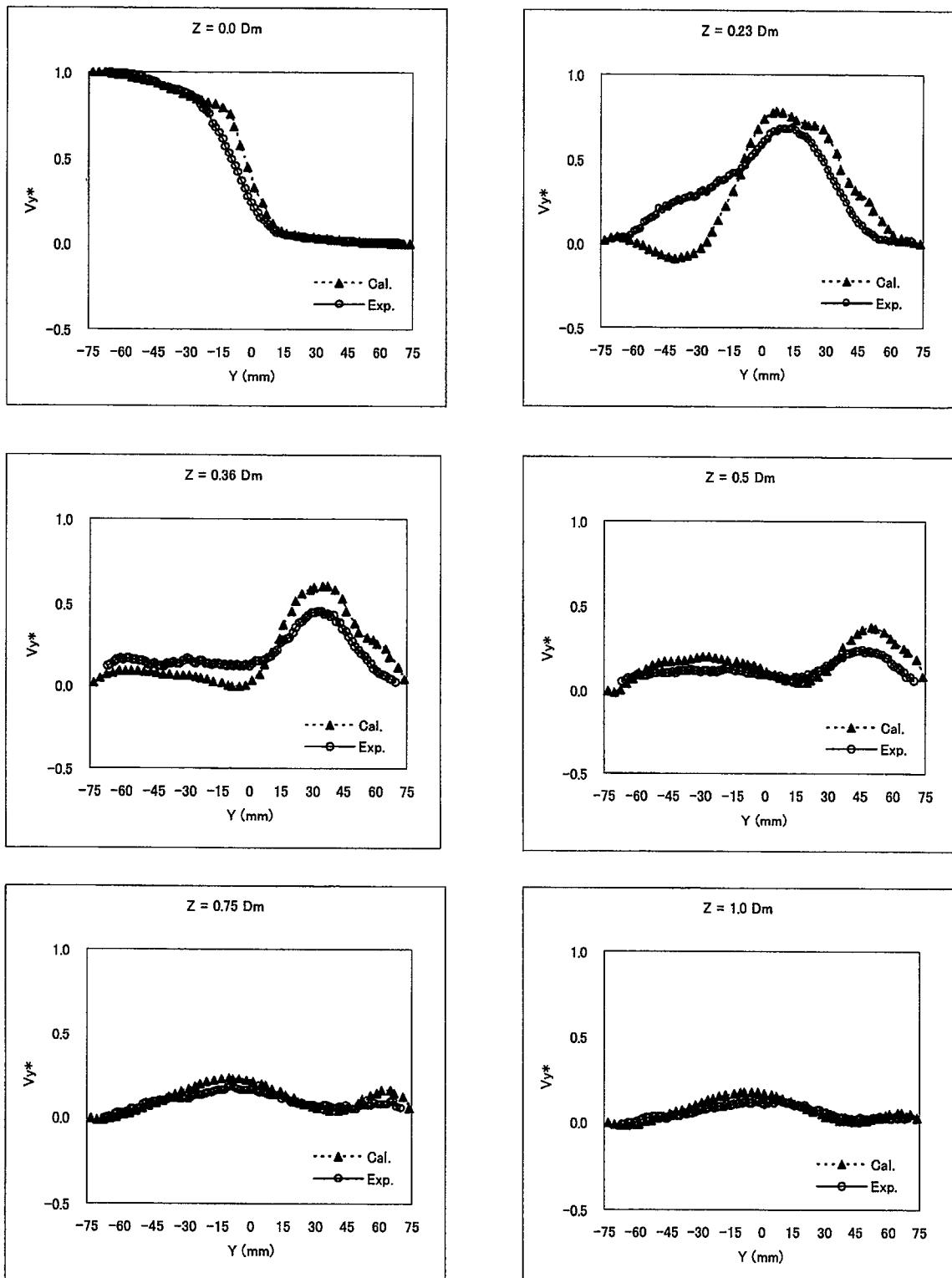


図5-9-(1) 垂直方向流速成分(V_y)の時間平均値の比較
($\theta = 0^\circ - 180^\circ$: Case2)

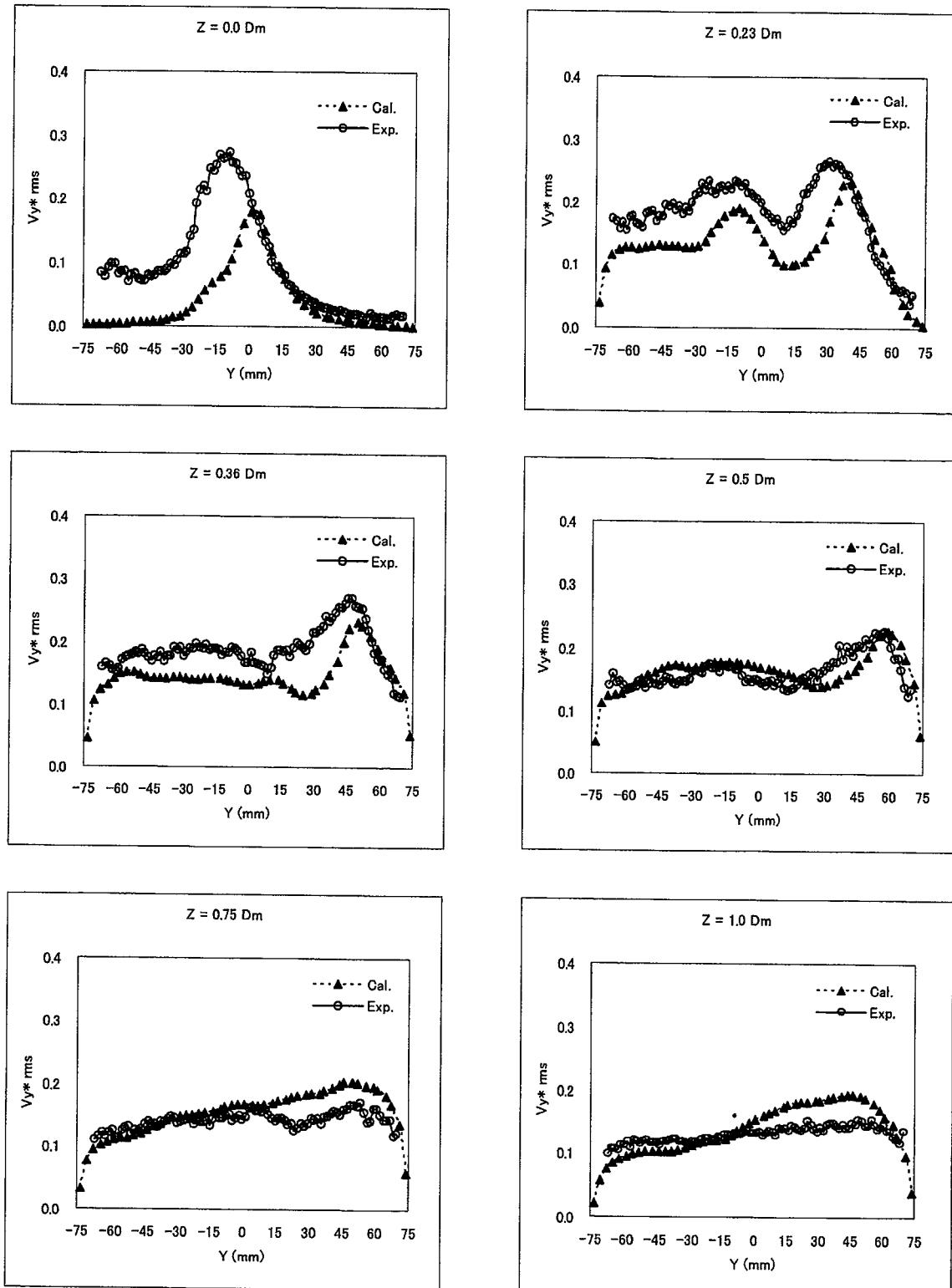


図5-9-(2) 垂直方向流速成分(V_y)の変動強度の比較
($\theta = 0^\circ - 180^\circ$: Case2)

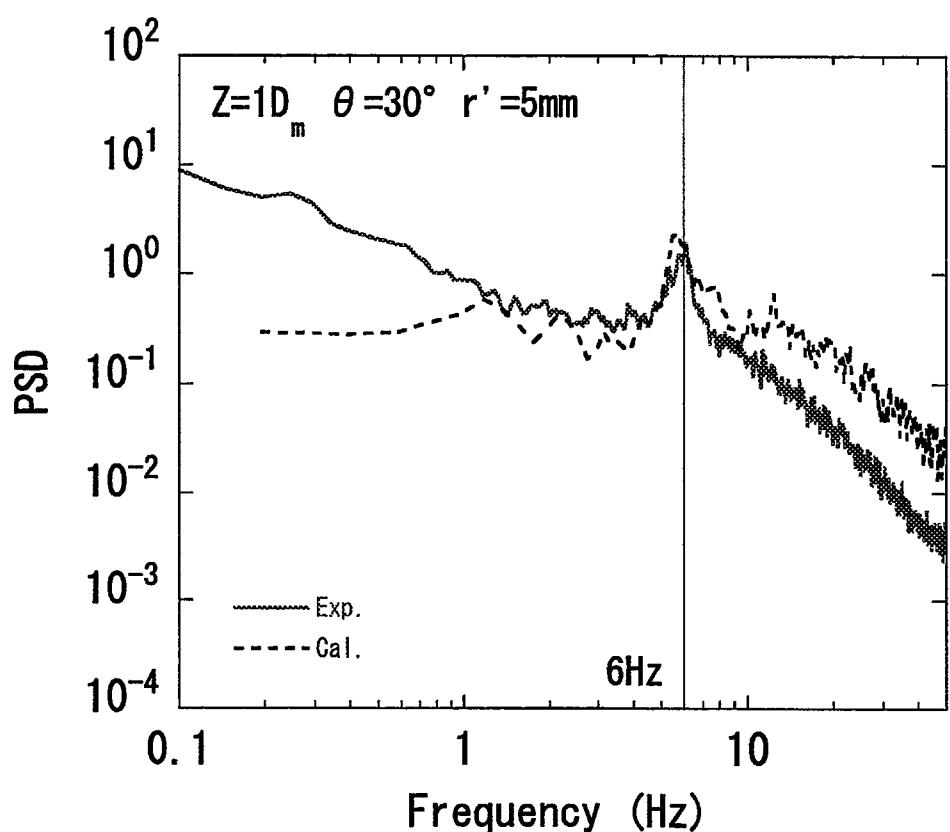


図5-10 実験と解析における温度変動PSDの比較

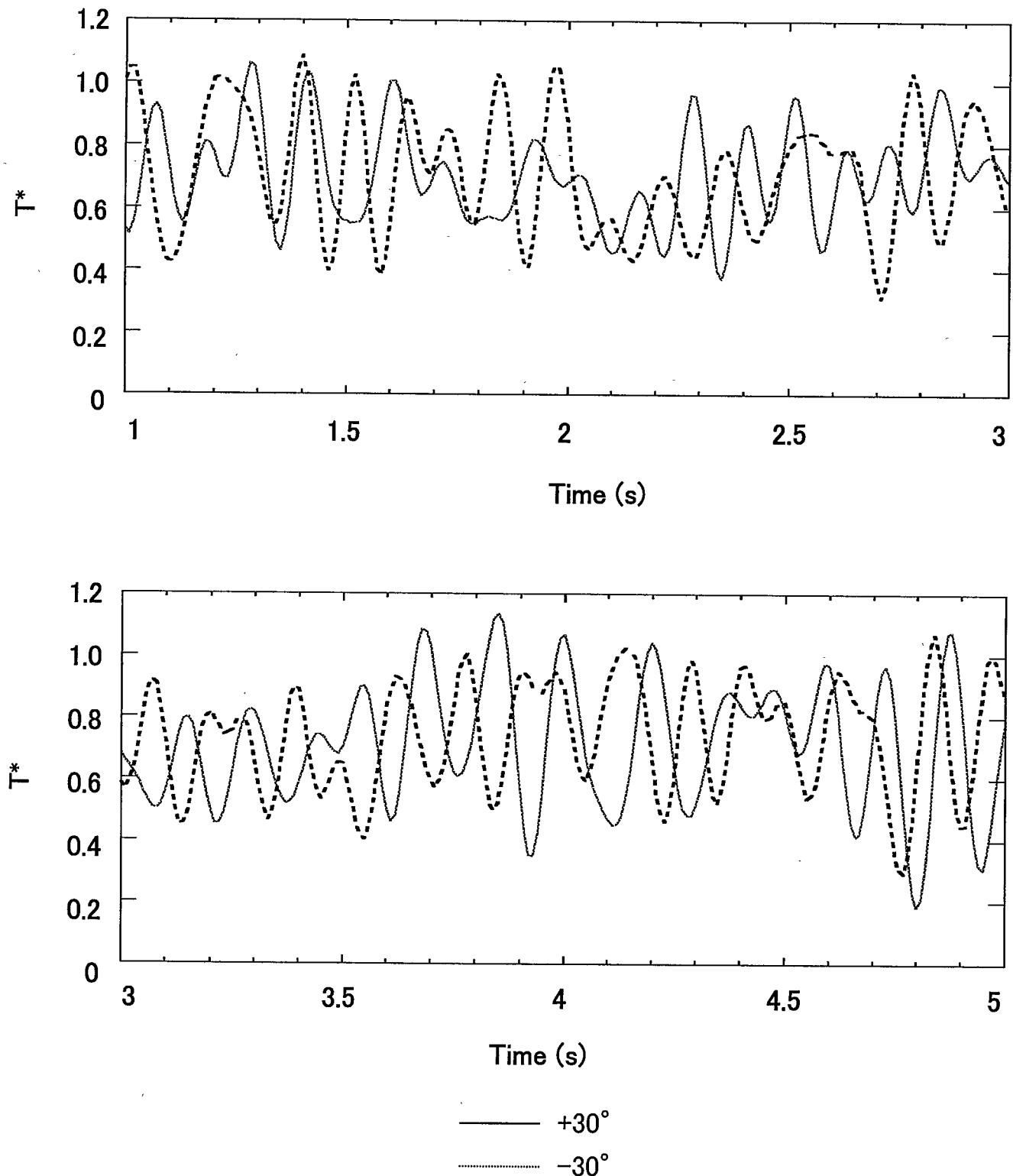
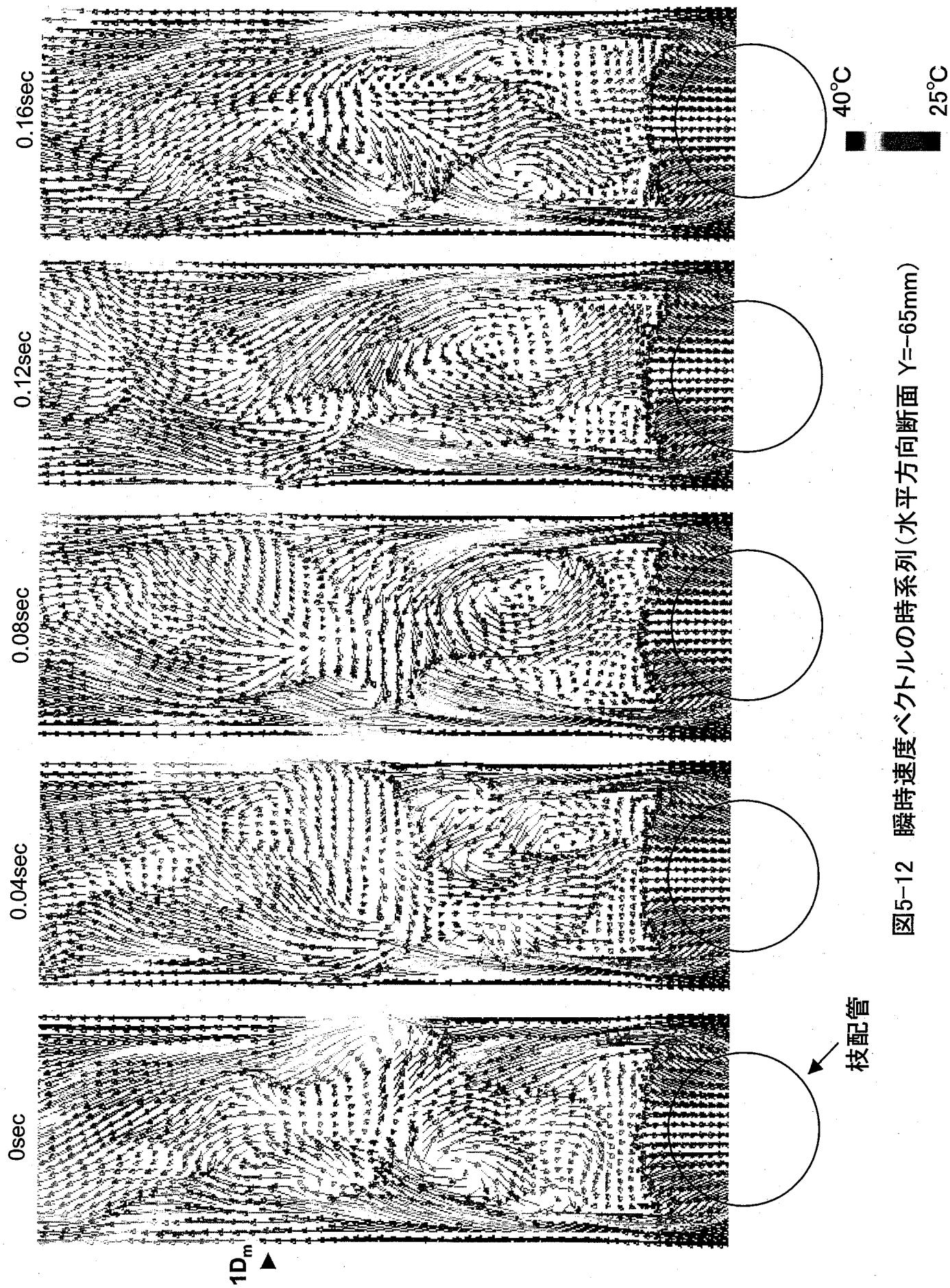


図5-11 溫度変動の時系列データ ($Z=1Dm$ $\theta=\pm 30^\circ$ $r=5mm$)



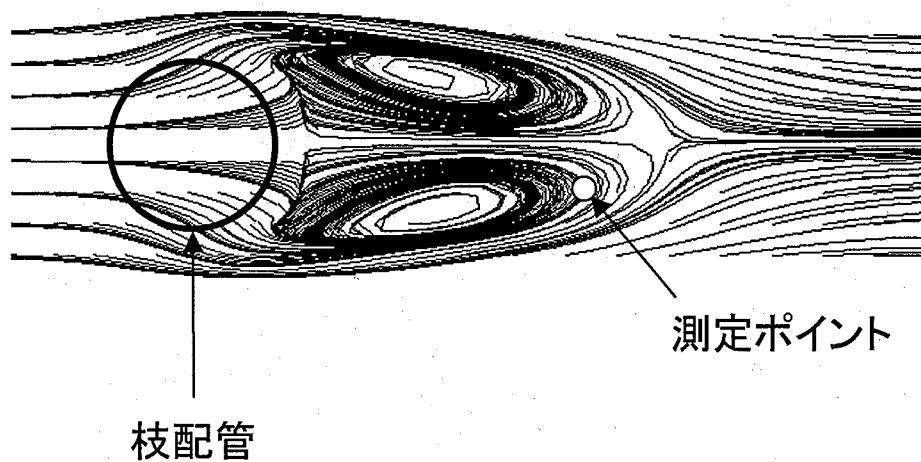
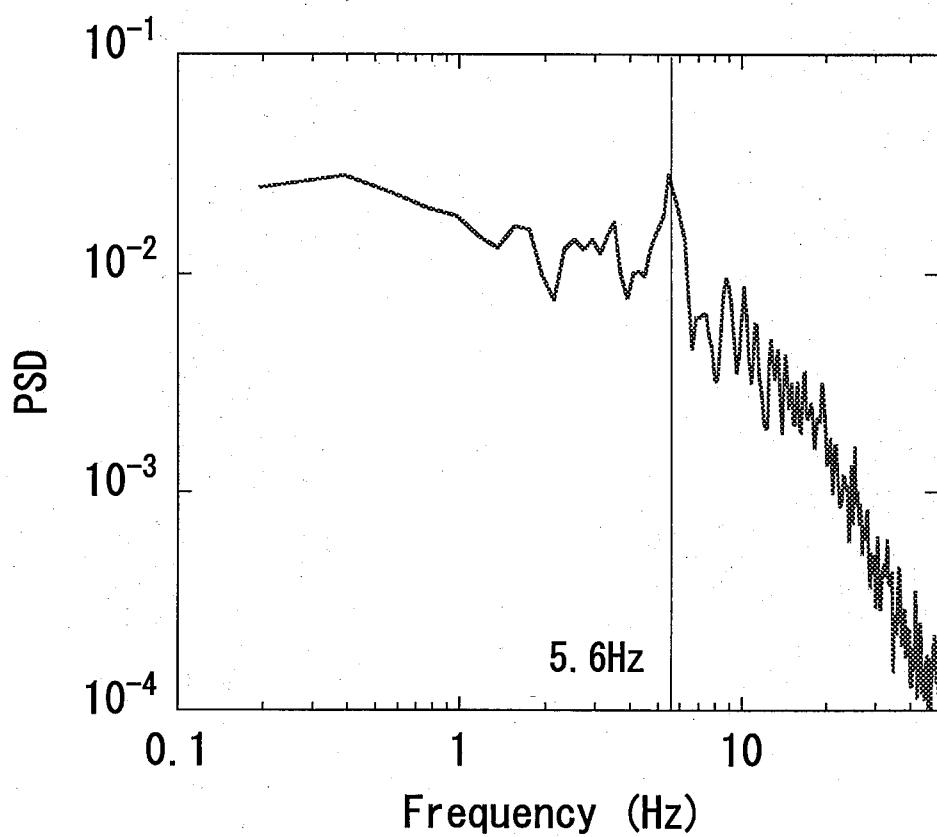


図5-13 解析における速度変動のPSD

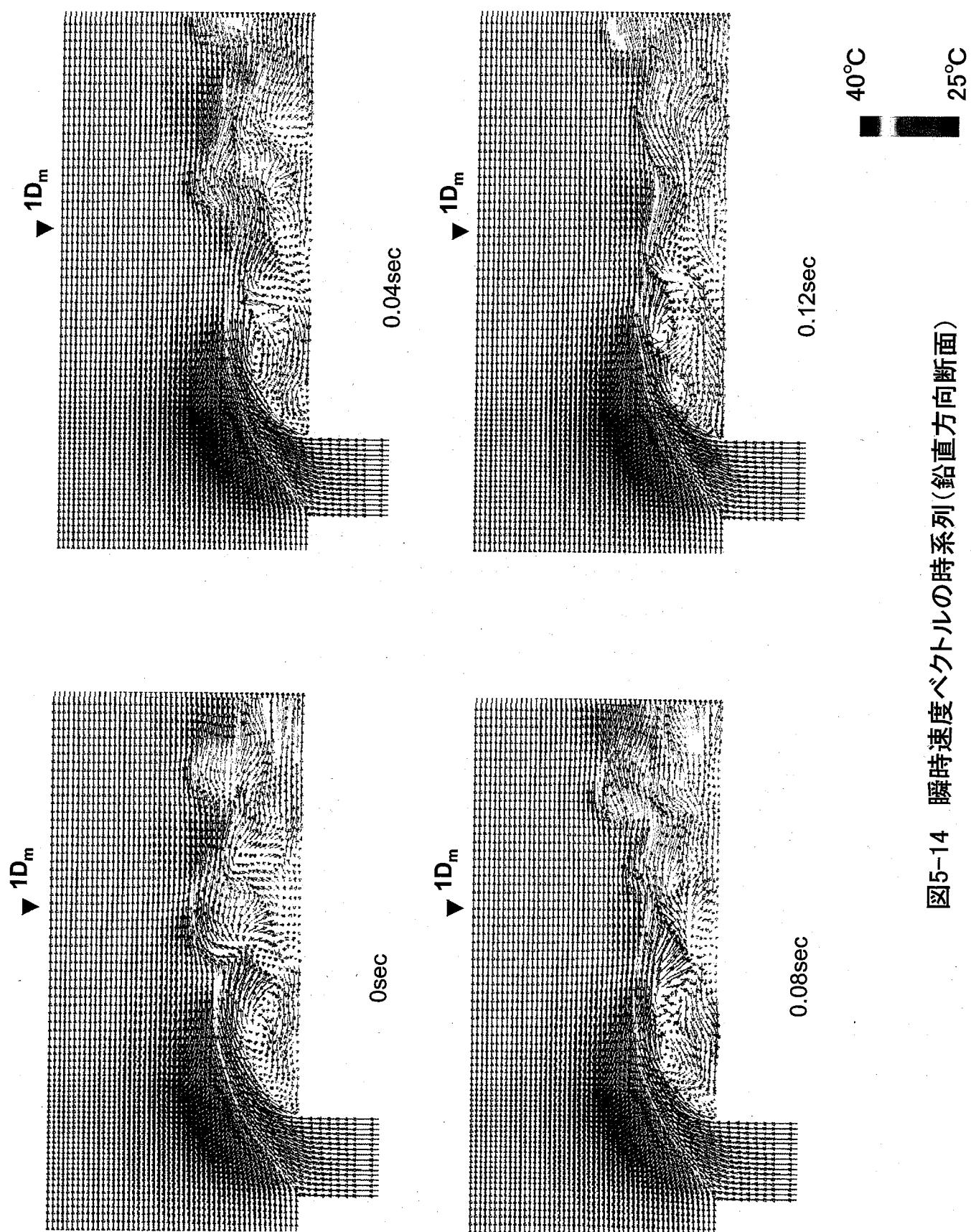


図5-14 瞬時速度ベクトルの時系列(鉛直方向断面)

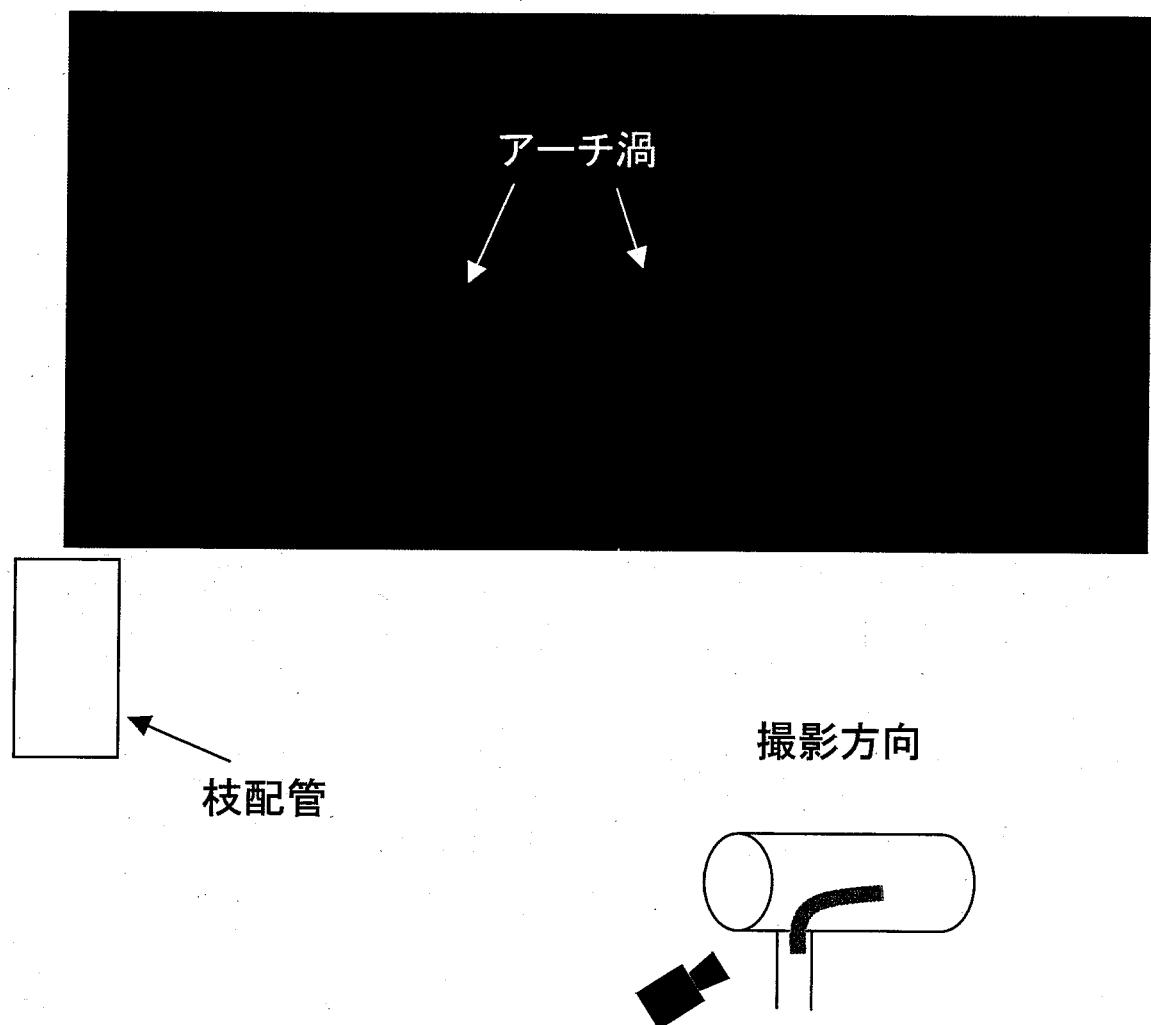


図5-15 可視化試験によるアーチ渦

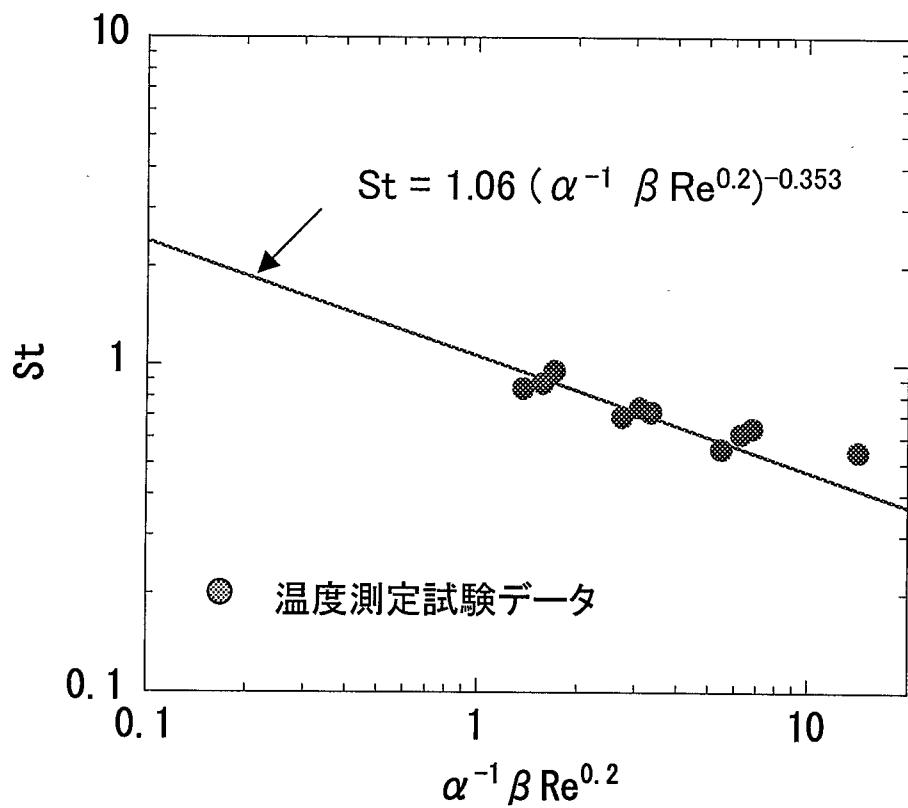


図5-16 アーチ渦生成周期と温度変動卓越周波数の比較

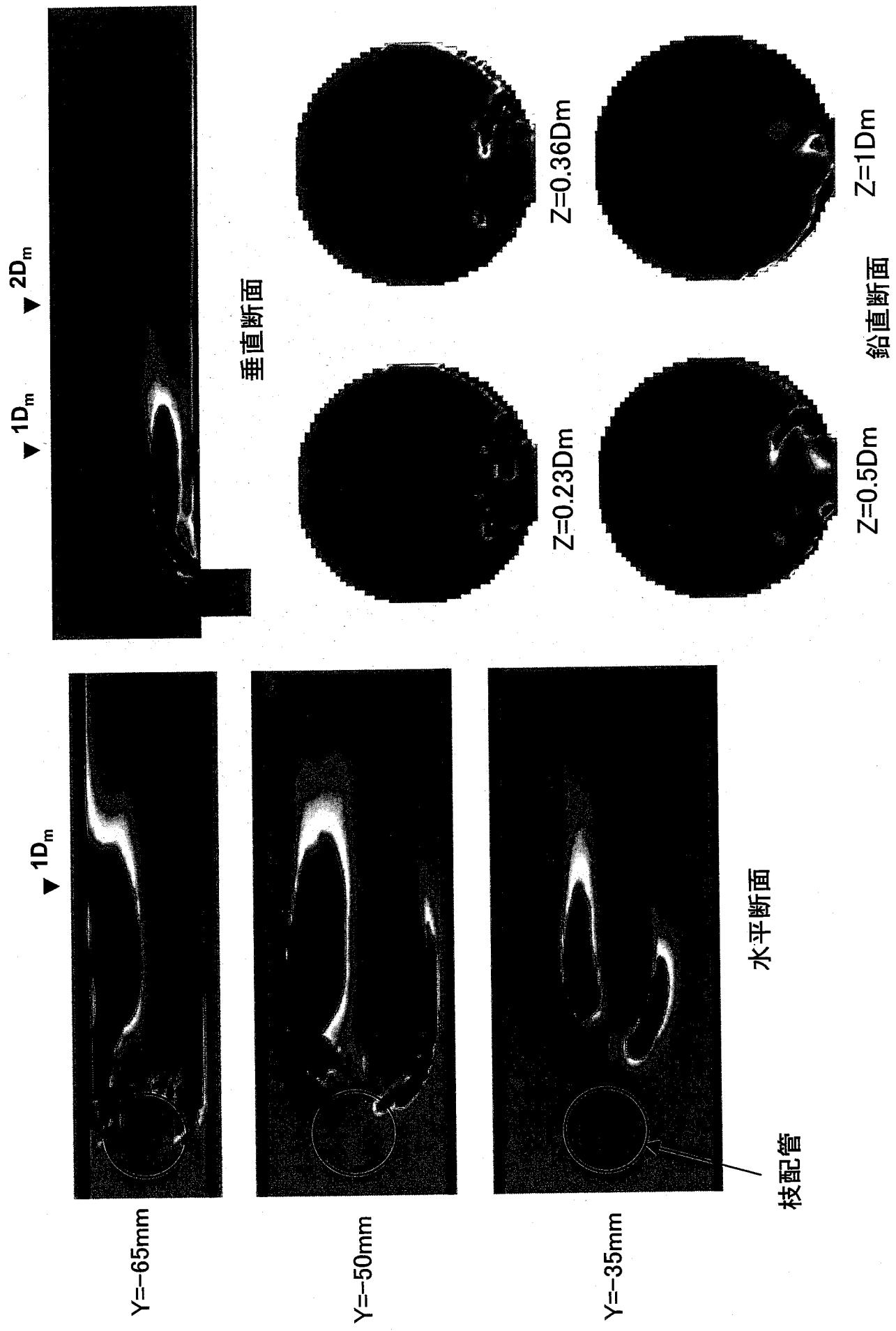


図5-17 解析における渦度分布

第6章 結論

T字管合流部を対象とした DINUS-3 による解析を実施し、熱電対ツリーによる温度分布測定試験及び PIV による速度分布測定試験の結果との比較により、コードの適用性を確認した。また、DINUS-3 による解析結果から、枝配管噴流の後流域に生成される 3 次元的な渦構造の推定を実施した。以下に結果を示す。

- (1) 解析結果は実験における時間平均温度場及び速度場を良好に模擬できることがわかった。また、温度変動の要因となる枝配管噴流の後流域に生成される渦も再現できた。さらに、実験において温度変動強度の高い位置に存在した温度変動の卓越周波数に関しても解析にて良好に再現できた。しかし、壁面噴流条件で、枝配管噴流と主配管流が合流することにより発生する温度変動強度及び速度変動強度が高くなる位置は、実験に比べ解析結果は下流側にシフトする結果となった。一方、衝突噴流条件では温度変動強度及び速度変動強度分布も良好に再現できた。
- (2) DINUS-3 による解析結果から、枝配管噴流の後流域に形成される 2 つの渦が時間的に変動することにより、壁面近傍に卓越周波数を有する温度変動が生成されることがわかった。また、この枝配管後流域に生成される渦は 3 次元的な構造を示していることが確認された。このカルマン渦は、矩形流路の実験で見られたアーチ渦（馬蹄渦）と関連性があることがわかった。

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、本研究に対して多くの助言及びコメントを頂いた川崎重工業（株）の西村元彦氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 木村暢之、A. Tokuhiro、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] 木村暢之、A. Tokuhiro、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.
- [3] 木村暢之、長澤一嘉、五十嵐実、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－壁面近傍での混合現象の変化－、JNC TN9400 2001-030、2000.
- [4] 木村暢之、宮越博幸、三宅康洋、五十嵐実、上出英樹、サーマルストライピングに関する実験研究－平行三噴流 Na 試験－、JNC TN9400 2001-063、2001.
- [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、笠原直人、菊池政之、西村元彦、上出英樹、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.
- [8] 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.
- [9] 笠原直人、上出英樹、五十嵐実、細貝広視、高正英樹、周波数特性に着目した流体温度ゆらぎによる熱疲労損傷の評価法、日本機械学会、M&M2002 材料力学部門講演会、講演論文集 p415-416、2002.
- [10] 上出英樹、木村暢之、噴流間混合における温度変動特性に関する研究、日本機械学会 2001 年度年次大会講演資料集 (VII) F07-2-(4)、2001.
- [11] 川村慎一、配管合流部での高低温水混合による荷重評価、日本機械学会 2001 年度年次大会講演資料集 (VII) F07-2-(2)、2001.
- [12] 守屋祥一、閉塞分岐管の熱成層による熱荷重評価、日本機械学会 2001 年度年次大会講演資料集 (VII) F07-2-(3)、2001.
- [13] 五十嵐実、田中正暁、林謙二、飛田昭、上出英樹、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－、JNC TN9400 2001-024、2001.

- [14] 五十嵐実、田中正暁、林謙二、飛田昭、上出英樹、配管合流部の混合現象に関する研究 一流体内温度測定試験結果一、JNC TN9400 2002-026、2002.
- [15] T. Muramatsu, Frequency evaluation of temperature fluctuation related to thermal striping phenomena using a Direct Numerical Simulation Code DINUS-3, ASM PVP-C, Vol.253, pp.111-121, 1993.
- [16] 榊原潤、菱田公一、前田昌信、二次元衝突噴流よどみ域における渦構造と熱伝達 －DPIV と LIF による速度・温度場の同時計測一、日本機械学会論文集(B 偏) 60-573、1994.
- [17] 榊原潤、菱田公一、前田昌信、画像処理による流動場の速度・温度同時計測法、Thermal Science&Eng., 2-4, p1-9, 1994.
- [18] 木村暢之、三宅康洋、西村元彦、上出英樹、菱田公一、可視化画像による流速測定技術の開発 一ノイズ処理手法を用いた計測精度の向上一、JNC TN9400 99-078、1999.
- [19] 須藤浩三、檜原秀樹、村松壽晴、配管系における複雑乱流場の流動特性に関する研究、JNC TY9400 2002-001、2002.
- [20] 村上諭、村松壽晴、高速炉配管合流部におけるサーマルストライピング条件の解析的検討(VI) 一非等温場におけるアーチ渦構造の数値解析的検討一、JNC TN9400 2002-011、2002.