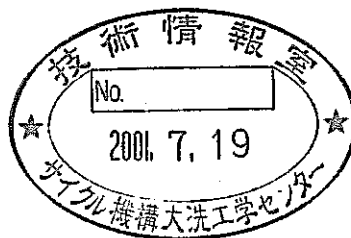


高速炉配管合流部における サーマルストライピング条件の解析的検討 (V)

—アーチ渦発生に関する流動条件の検討—

(研 究 報 告)



2001年4月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9
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)
2001

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 (V)

— アーチ渦発生に関する流動条件の検討 —

(研究報告)

村上 諭*、村松 壽晴**

要 旨

配管合流部における乱流混合特性の定量化を目的とした基礎実験が広島大学において実施された。サイクル機構では、この基礎実験の解析を直接シミュレーションコード DINUS-3 により実施し、以下の結果を得た。

- (1) 実験で観測された 3 種類の流動パターン、付着流、偏向流および衝突流を数値解析で的確に再現することが可能であることを確認した。
- (2) 偏向流となる流動条件での数値解析により、低周波ゆらぎを伴うアーチ渦を再現できることを確認した。
- (3) アーチ渦の通過周波数は Re 数に依存し、流速比を固定した条件で Re 数を大きくするとアーチ渦の通過周波数が高くなることが明らかとなった。

* : カストマシステム株式会社

** : 大洗工学センター要素技術開発部流体計算工学研究グループ

Numerical Investigation on Thermal Striping Conditions for a Tee Junction of LMFBR Coolant Pipes (V)

- Investigations on Flow Conditions for Arched-Vortex generation -

Satoshi Murakami^{*}, Toshiharu Muramatsu^{**}

Abstract

A fundamental experiment, the aim of which is to quantify turbulent mixing characteristics, was carried out at Hiroshima University in the framework of a cooperative study with Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC). Turbulent mixing analyses for the fundamental experiment were carried out using a direct numerical simulation code DINUS - 3 at JNC.

From the analyses, the following results have been obtained:

- (1) It was confirmed that the numerical analysis is applicable to the evaluation of the three flow patterns observed in the experiment: an adhesion flow, a deflection flow and an impinging flow.
- (2) In the deflection flow analysis, arched-vortex characteristics with lower frequency fluctuations agreed well with the experimental results.
- (3) Frequency of arched-vortex transportation depended on the Reynolds number. The frequency of arched-vortex was increased with increasing the Reynolds number under the condition of the constant velocity ratio between coolant pipes.

* : Customer System Co. Ltd.

** : Thermal-Hydraulics Research Group, Advanced Technology Division, OEC, JNC.

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 (V)

— アーチ渦発生に関する流動条件の検討 —

目 次

第1章 緒 言	1
第2章 配管合流部の基礎実験	3
2.1 基礎実験の概要	3
2.2 実験結果	3
第3章 配管合流部の数値解析	7
3.1 解析ケース	7
3.2 数値計算条件および解析コード	7
3.3 解析結果	7
第4章 考 察	9
4.1 アーチ渦の再現性に関する検討	9
4.2 アーチ渦のレイノルズ数 (Re) 依存性に関する検討	9
4.3 流動パターンの流速比依存性に関する検討	10
第5章 結 言	11
参考文献	12

図リスト

図 1.1	サーマルストライピングに対する解析的評価システムの構成	13
図 1.2	DINUS-3 コードにより評価された主配管内壁近傍における瞬時ナトリウム温度分布	14
図 1.3	配管切り出し後の合流部下流側観察写真 (仏国・フェニックス炉)	15
図 3.1	解析体系	16
図 3.2	メッシュ図	17
図 3.3	瞬時渦度空間分布および流線の時間推移 ($j=31$; ケース 1: $Re=600$, $\beta=1.0$)	19
図 3.4	瞬時渦度空間分布の時間推移 ($j=31$; ケース 1: $Re=600$, $\beta=1.0$)	20
図 3.5	瞬時渦度空間分布および流線の時間推移 ($j=31$; ケース 2: $Re=600$, $\beta=0.2$)	21
図 3.6	瞬時渦度空間分布および流線の時間推移 ($j=31$; ケース 3: $Re=600$, $\beta=2.5$)	22
図 3.7	瞬時渦度空間分布および流線の時間推移 ($j=31$; ケース 4: $Re=1050$, $\beta=1.0$)	23
図 3.8	瞬時渦度空間分布の時間推移 ($j=31$; ケース 4: $Re=1050$, $\beta=1.0$)	24
図 4.1	瞬時 cross flow velocity 等値面の時間推移 (ケース 1: $Re=600$, $\beta=1.0$)	25
図 4.2	瞬時渦度 ω_j 等値線図 ($j=31$; ケース 1: $Re=600$, $\beta=1.0$)	26
図 4.3	瞬時渦度 ω_k 等値線図 ($k=30$; ケース 1: $Re=600$, $\beta=1.0$)	27
図 4.4	アーチ渦の渦間距離の比較	28
図 4.5	渦間距離の実験値との比較	29
図 4.6	アーチ渦の通過周期に関する比較	30
図 4.7	渦の通過周波数の実験値との比較	31
図 4.8	流動パターンの実験との比較	32

第1章 緒 言

高速炉プラントにおいて温度が異なる冷却材が混合する配管合流部では、流れが混合して冷却材中に温度ゆらぎが生じるため、熱応力による配管構造材の高サイクル疲労破損に注意する必要がある。この現象は、定常不規則的に変動する乱流挙動に支配されるとともに、流れと構造の熱応力が複雑に関連し合うことから、従来は対象部位毎の模型実験による評価が必要不可欠であった。

図 1.1 は、サーマルストライピングの評価を模型実験に替えて数値解析的に評価できるようにするために開発した解析コード群のシステム構成⁽¹⁾を示したもので、差分法による乱流現象の直接シミュレーションコード DINUS-3⁽²⁾と境界要素法による構造物の熱的応答評価コード BEMSET⁽³⁾を中心として、その熱的連成現象を評価するものである。DINUS-3 コードは、不規則に変動する熱流動現象を乱流モデルなど一切の工学モデルを用いずに直接的に評価すると同時に構造物表面での温度ゆらぎ不規則挙動を規定するもので、高速炉で用いる液体金属ナトリウムの熱流動現象はもちろんのこと、水や空気を流体とした場合の模擬性もこれまでの実験検証で十分に確認されている直接シミュレーションコードである。一方 BEMSET コードは、DINUS-3 コードで評価された構造物表面での温度ゆらぎ挙動に基づいて、構造物内部の温度ゆらぎ挙動を評価する境界要素法コードである。

ここで開発した解析評価システムにより、フランス高速原型炉「フェニックス」の二次主冷却系配管合流部に生じた熱疲労事象を題材とした国際ベンチマークに参加した。この熱疲労事象は、340 °C の低温ナトリウムが流れる内径 494 mm の主配管中に内径 68 mm の枝管からの 430 °C の高温ナトリウムが合流・混合し、この下流側に位置する主配管周方向溶接部に貫通き裂が生じたものである。図 1.2 は、DINUS-3 コードと BEMSET コードによる熱的連成解析結果⁽⁴⁾の一例で、枝管から流出した高温ナトリウムの流れが、主配管壁に沿って左右に振動しながら下流側に押し流されている様子を観察することができる。これは、枝管からの高温ナトリウムの流れが、主配管内の流れに対して障害物の役割を果たしたことから生じた一種の後流渦(約 8 Hz 周期)に相当するものである。さらに、枝管から流出した高温ナトリウムの両側面から、概ね左右対称に下流側に広がる高温領域も確認することができる。これは枝管からの高温ナトリウム流が、主配管内の流れによって間欠的に剥離する熱流動挙動(約 0.1 Hz 周期)に起因したものであることが確認されている。なお、フェニックス炉での貫通き裂は、図 1.3 に見られるように、間欠的剥離挙動領域と主配管周方向溶接線とが交差する周方向 2ヶ所で発生していたことが配管切り出し後の目視検査で確認された。同位置における 0.1 Hz 近傍の比較的ゆっくりとした温度ゆらぎは、その他の領域での高周波変動に比べて構造物の熱的な追従性が高くなる結果、より大きな熱応力が発生したこと、また目視検査による損傷位置と一致したことにより、サーマルストライピングに対する同評価システムの妥当性が定量的に確認された。

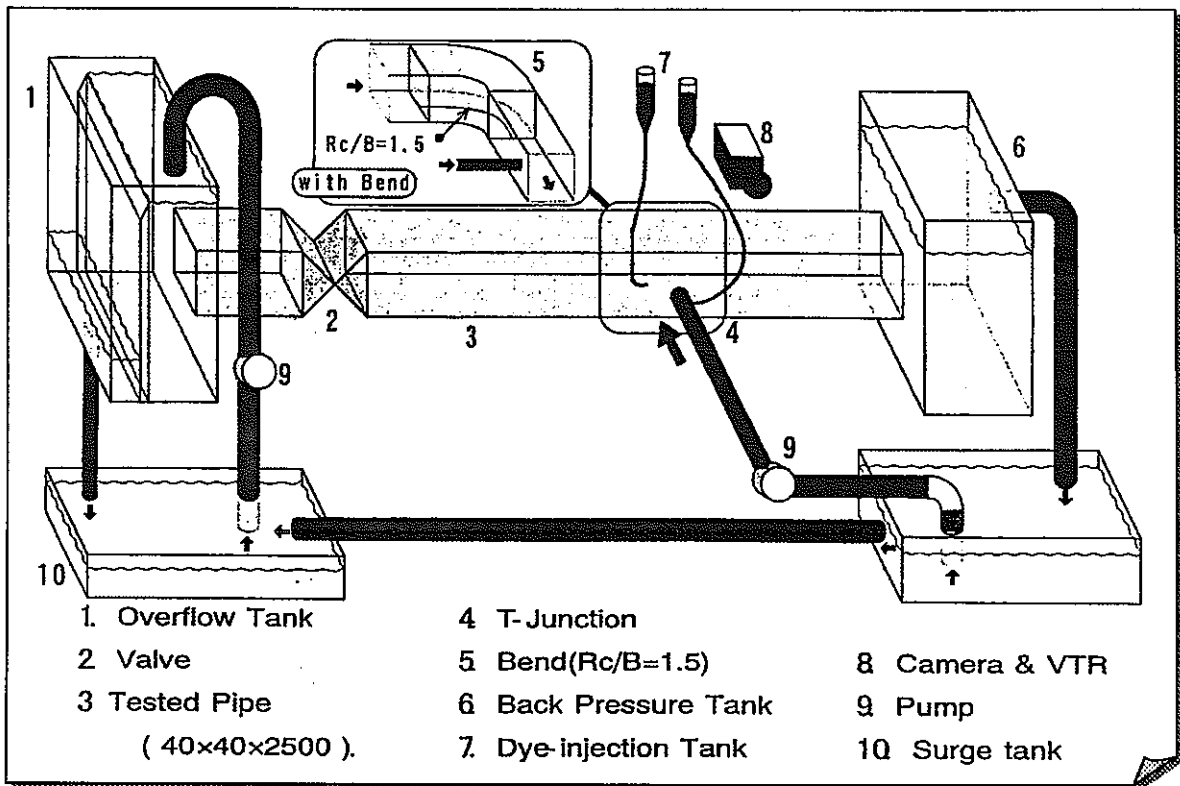
以上の知見と課題を受け、構造物の熱的追従性が支配的となる比較的ゆっくりとした温度ゆらぎ挙動を発生させる乱流混合メカニズム (間欠的剥離挙動) を定量的に把握することを目的として、平成 11 年から 3 ケ年の予定で大学との共同研究を実施中である。この共同研究は、配管合流部における (a) 口径比、(b) 流速比、(c) レイノルズ数を実験上のパラメータとし、同位置での乱流混合メカニズムを定量化しようとするものである。これまでの実験結果によれば、配管合流部での流体混合パターンは、(a) 衝突流、(b) 偏向流および (c) 付着流の 3 種類に分類され、この内特定の流速比条件の下で低周波振動を伴う乱流混合現象 (アーチ渦) の存在が確認されている。

本報では、実験により確認された配管合流部におけるアーチ渦の特性について数値解析的に検討を加えるとともに、同位置での流体混合パターンの模擬性についても言及する。

第2章 配管合流部の基礎実験

2.1 基礎実験の概要

配管合流部における乱流混合特性の定量化を目的とした基礎実験⁽⁹⁾が広島大学において実施された。実験装置の概略をスケッチとして本文中に示す。テストセクションは40 mm × 40 mm の正方形配管に枝管を取り付けたものであり、枝管には口径 B = 9 mm [口径比 α (主配管径/枝管径) = 4.4] の円管が用いられた。この実験におけるパラメータとして主流のレイノルズ数 Re および流速比 β (主配管の断面平均流速 / 枝管の断面平均流速) を変化させて、合流直後の乱流混合挙動の可視化が行われた。



スケッチ 1 実験装置の概略

2.2 実験結果

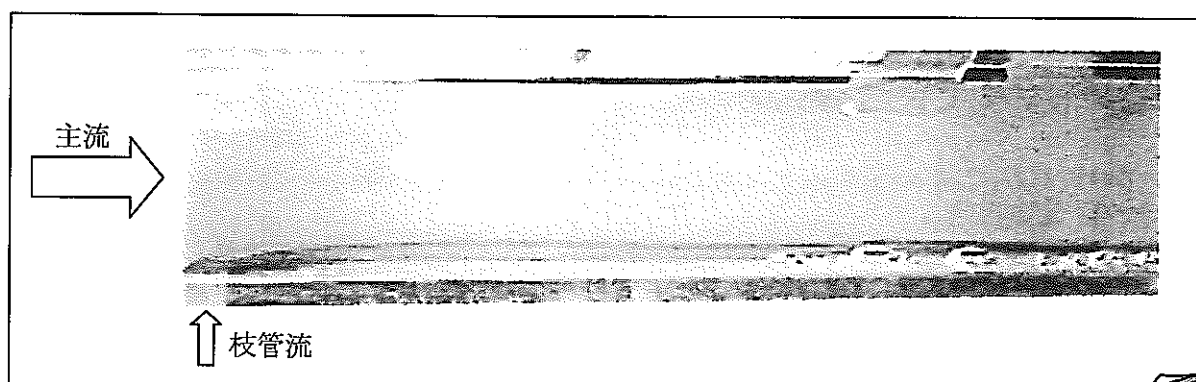
(1) 混合パターンの分類

可視化実験の結果、主配管流れに枝管より流れが流入する場合の特徴的な混合パターンとして、3種類に分類できることが分かった。以下にそれら3種類の可視化写真を示す。

(a) 付着流 ($Re = 572$, $V_m = 0.0144$ [m/s], $V_b = 0.0067$ [m/s])

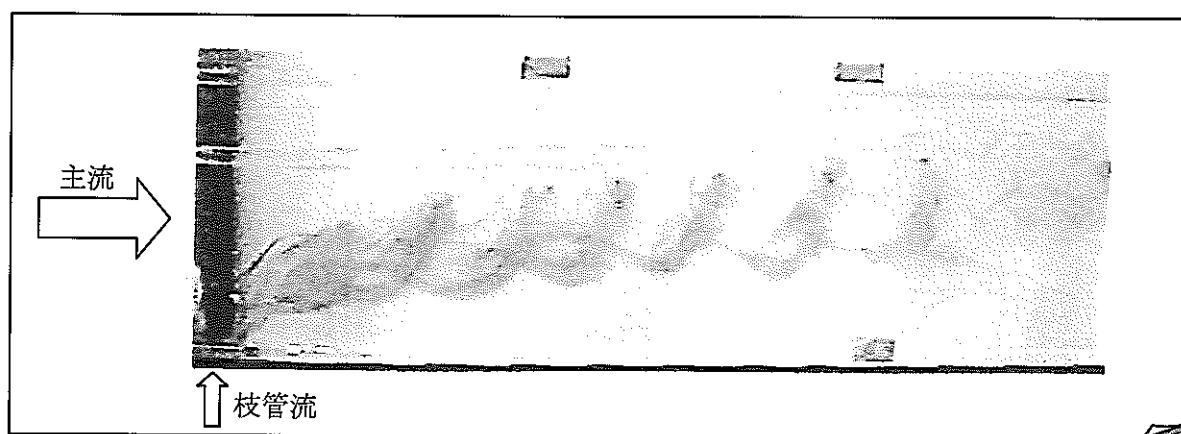
枝管からの流れは合流後壁面に沿って流れ、主配管流れと枝管の流れが層状に分離す

るパターン (スケッチ 2)。



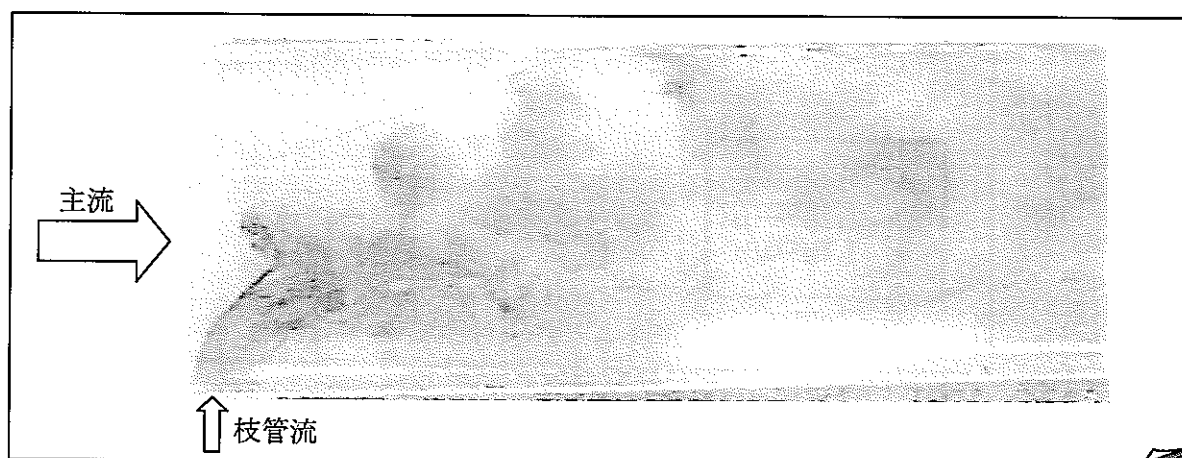
スケッチ 2 付着流 ($Re = 572$, $V_m = 0.0144$ [m/s], $V_b = 0.0067$ [m/s]) の可視化写真

(b) 偏向流 ($Re = 1065$, $V_m = 0.0269$ [m/s], $V_b = 0.0336$ [m/s])
合流直後にアーチ状の渦列を形成するパターン (スケッチ 3)。



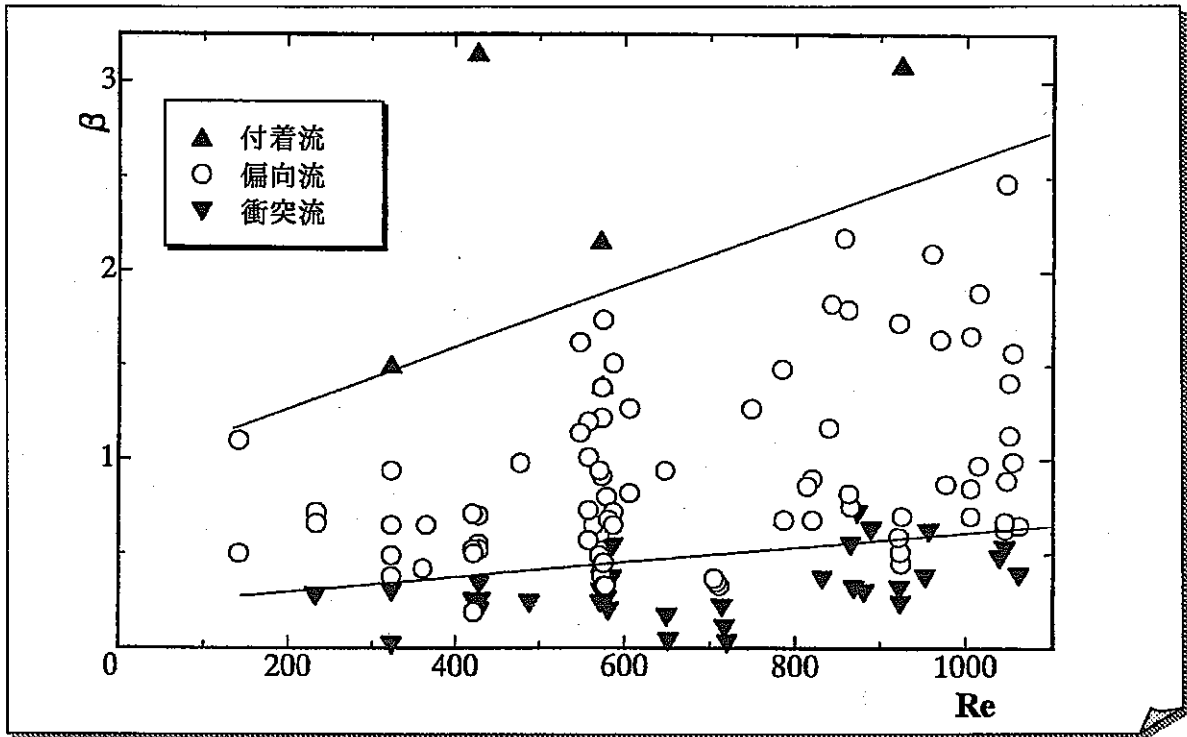
スケッチ 3 偏向流 ($Re = 1065$, $V_m = 0.0269$ [m/s], $V_b = 0.0336$ [m/s]) の可視化写真

(c) 衝突流 ($Re = 957$, $V_m = 0.0242$ [m/s], $V_b = 0.0562$ [m/s])
枝管より出た流れが枝管と反対側の壁面に衝突した後壁面に沿って流れ、衝突部前方に渦を形成するパターン (スケッチ 4)。



スケッチ 4 衝突流 ($Re = 957$, $V_m = 0.0242$ [m/s], $V_b = 0.0562$ [m/s]) の可視化写真

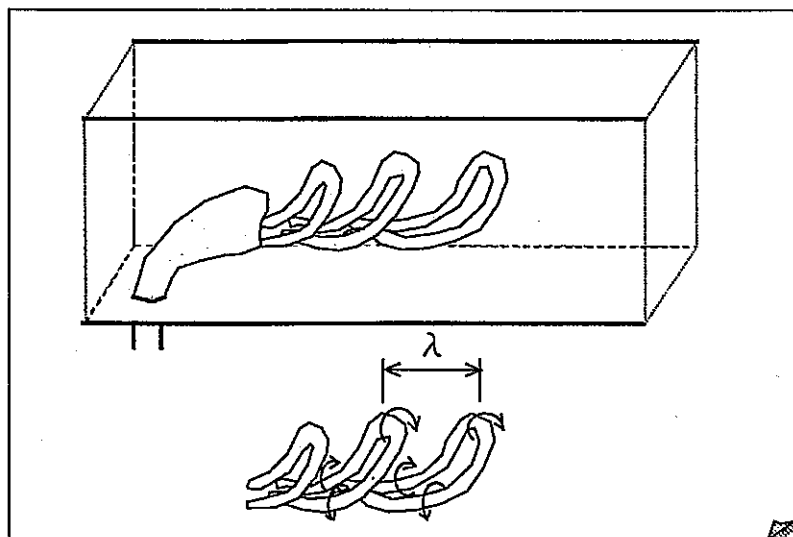
これらの混合パターンの形成条件は流速比およびレイノルズ数に支配され、流速比が大きくなるに従って混合パターンは (c) → (b) → (a) へと遷移する（流動パターンをスケッチ 5 に示す）。



スケッチ 5 流動パターンマップ

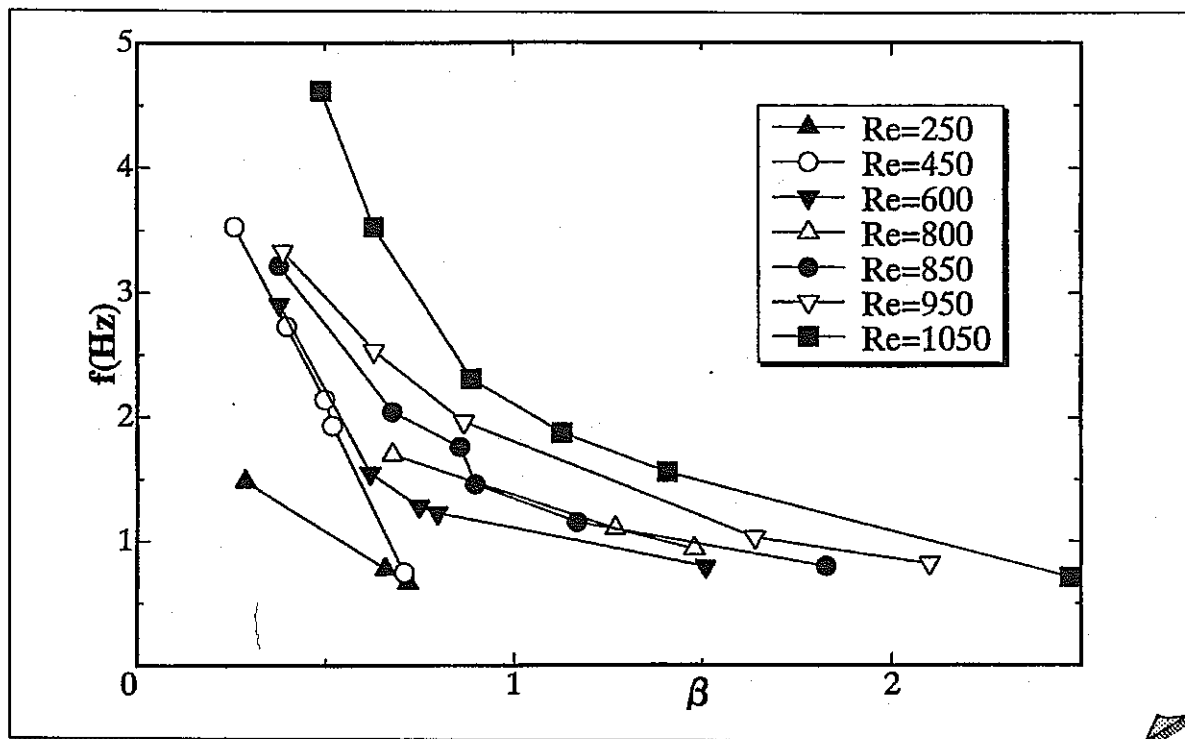
(2) アーチ渦列の特性

アーチ渦列の特性を定量的に把握するため、アーチ渦の渦間距離（下図スケッチの λ ）と流速比の関係およびアーチ渦の通過周波数と流速比の関係について整理した。

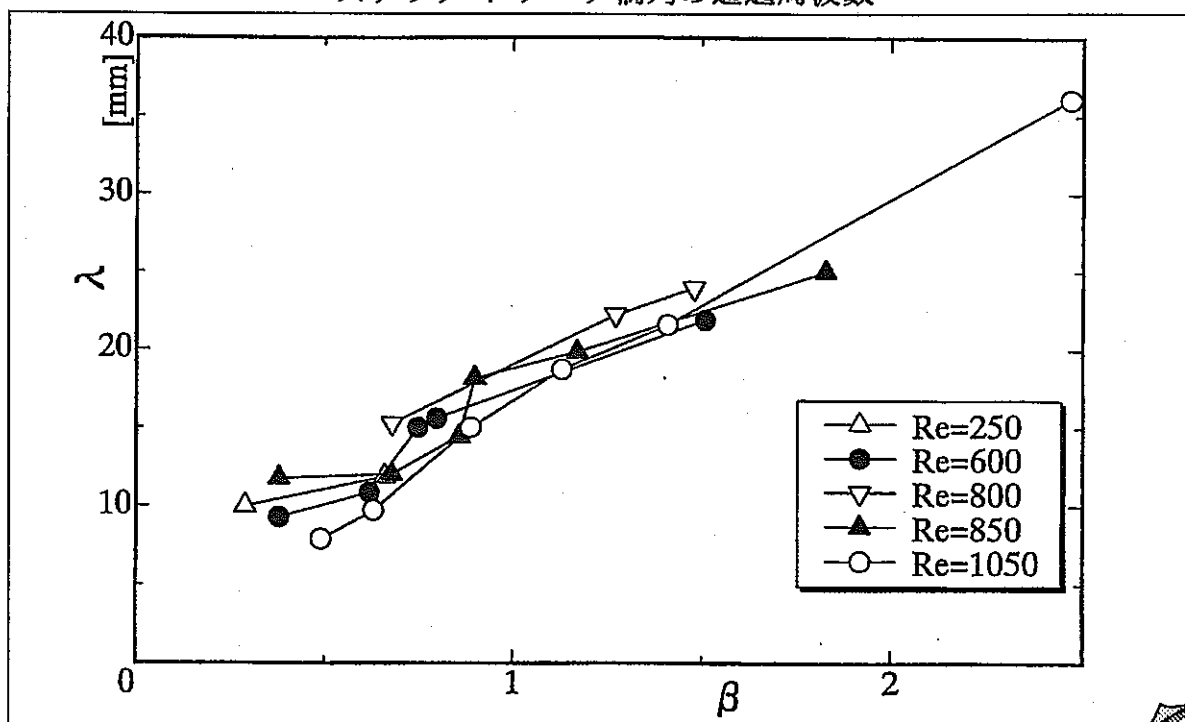


スケッチ 6 アーチ渦列の渦間距離の規定

アーチ渦の通過周波数と流速比の関係（スケッチ 7）では、流速比が大きくなるほど通過周波数は低くなり、レイノルズ数の増加に伴い通過周波数が高くなる事が分かる。また、アーチ渦列の渦間の距離と流速比の関係（スケッチ 8）では、流速比を大きくすることにより渦間の距離は大きくなるが、レイノルズ数を増加させても流速比が同じであれば渦間の距離は大きく変化しないことが分かる。



スケッチ 7 アーチ渦列の通過周波数



スケッチ 8 アーチ渦列の渦間距離

第3章 配管合流部の数値解析

3.1 解析ケース

解析ケースは、アーチ渦の再現性について検討することを目的として流速比をパラメータとしたケース（ケース1～3）と、アーチ渦の特性を検討することを目的としてレイノルズ数をパラメータとしたケース（ケース1,4）の計4ケースを設定した。

ケース名称	レイノルズ数 Re	流速比 β	混合パターン
ケース1	600	1.0	偏向流
ケース2	600	0.2	衝突流
ケース3	600	2.5	付着流
ケース4	1050	1.0	偏向流

3.2 数値計算条件および解析コード

使用するコードは直接シミュレーションコード DINUS-3 である。解析対象範囲は、図 3.1 に示すように主流方向長さが 9.8 cm、主配管の入口境界から 1B 下流側に枝管入口を設定した。入口流速分布は、軸方向に関して 1/7 乗則に従う分布を与えた。

図 3.2 にメッシュ図を示す。

主要な数値計算条件は下表の通りである。

項目		内容
座標系		$x-y-z$ 直交座標系
メッシュ分割		$71^i \times 60^j \times 70^k$
メッシュ幅	i 方向	0.5 mm ~ 3.0 mm
	j 方向	0.5 mm ~ 1.0 mm
	k 方向	0.5 mm ~ 1.0 mm
速度境界条件	入口	主配管：軸方向に関して 1/7 乗則に従う流速分布 枝管：一様流入
	出口	運動量保存
	壁	床面 (k=1) は滑り無し。その他は滑り有り。

3.3 解析結果

(1) ケース1 (Re 数 = 600, $\beta = 1.0$)

図 3.3 および 3.4 に瞬時渦度空間分布および流線の時間推移を示す。なお、図 3.3 は主流に接するせん断渦層の挙動に注目し、図 3.4 は噴流の下流側に位置するせん断渦層の挙動に注目したため、両者の間で渦度の表示レンジを変更してある。始めに瞬時渦度分布より、枝管から流出する噴流の両側において回転の向きが互いに異なるせん断渦層が形成されている様子が分かる。これらの渦層は下流側に向かうに従って発

達し、その下流側先端部において周期的に渦層が分離・放出されている様子が観察できる。また流線より、主流に対して垂直に流入した枝管からの流体が次第に主流方向に向きを変え、主流に沿って下流に流れてゆく様子が分かる。下流領域において流線が上下方向に振動する挙動は、噴流の両側に位置する連行領域（せん断渦層）が時間的に変動したためであると考えられる。

(2) ケース 2 (Re 数 = 600, $\beta = 0.2$)

図 3.5 に瞬時渦度空間分布および流線の時間推移を示す。瞬時渦度分布より、ケース 1 の場合と同様に枝管から流出する噴流の両側において回転の向きが互いに異なるせん断渦層が形成されている様子が分かる。これらの渦層は天井面に向かうに従って発達し、その途中から周期的に渦層が分離・放出されている様子が観察できる。また流線より、枝管から流出した流体が天井面まで達した後、天井面に沿って下流側に流れてゆく様子が分かる。

(3) ケース 3 (Re 数 = 600, $\beta = 2.5$)

図 3.6 に瞬時渦度空間分布および流線の時間推移を示す。瞬時渦度分布より、これまでのケースと同様に枝管から流出する噴流の両側において回転の向きが互いに異なるせん断渦層が形成されている様子が分かる。ただし、主流に接するせん断渦層（青色領域）に関しては、これまでの 2 ケースと傾向が異なり、枝管出口直上部の狭い領域にのみ分布するだけで、下流側に向かうに従って発達する様子は観察されない。一方流線は、これまでの 2 ケースと同様に枝管から流出した流体が主流の流れに沿って下流側に流れる。なお、この流線は時間的に変化しないことから、枝管から流出した流体は安定な流れ場を形成していることが分かる。

(4) ケース 4 (Re 数 = 1050, $\beta = 1.0$)

図 3.7 および 3.8 に瞬時渦度空間分布および流線の時間推移を示す。なお、図 3.7 は主流に接するせん断渦層の挙動に注目し、図 3.8 は噴流の下流側に位置するせん断渦層の挙動に注目したため、両者の間で渦度の表示レンジを変更してある。始めに瞬時渦度分布より、上記 3 ケースと同様に枝管から流出する噴流の両側において回転の向きが互いに異なるせん断渦層が形成されている様子が分かる。これらの渦層は下流側に向かうに従って発達し、その下流側先端部において周期的に渦層が分離・放出されている様子が観察できる。また流線より、主流に対して垂直に枝管から流入した流体が次第に主流方向に向きを変え、主流に沿って下流に流れてゆく様子が分かる。なお下流側における流線の振動は、噴流の両側に位置する連行領域が時間的に振動したことによるものと考えられる。以上の流れ場の特徴から、ケース 4 の挙動はケース 1 のものと類似した傾向を示していると判断できる。

第 4 章 考 察

4.1 アーチ渦の再現性に関する検討

瞬時 cross flow velocity の等値面の時間推移 (ケース 1) を図 4.1 に示す。ここで cross flow velocity は、流速ベクトルの 3 成分のうち主流に直交する流速 2 成分 v, w の合成値として定義した値である。この図より、赤丸で示された領域においてアーチ状の渦が確認できる。この渦は時間の経過に伴って下流側へ移動するとともに、噴流の先端部より新たなアーチ状の渦が連続的に発生し、流れ場全体に周期的な渦列を形成している。

可視化実験によれば、アーチ渦は縦渦が支配的な領域と横渦が支配的な領域 (第 2 章のスケッチ 6) で構成されていることが明らかとなっており、ここでは図 4.1 で可視化されたアーチ状の渦を縦渦領域と横渦領域に着目して検討する。図 4.2 に瞬時の渦度 ω_j 等値線を示す (同図に表示されている緑色領域は cross flow velocity 等値面である)。この図より、cross flow velocity 等値面によって規定されるアーチ渦の縦渦領域と渦度のピーク位置が一致していることが分かる。また、同図で示された縦渦領域の回転の向きは実験結果 (第 2 章のスケッチ 6) と一致していることが分かる。一方、アーチ渦の横渦領域に関しては、図 4.3 の渦度 ω_k 等値線図で示されるように、互いに回転の向きが異なる対称渦となっており、この回転の向きも実験結果と一致していることが分かる。

以上に示したアーチ渦の形状, 周期性, 回転の向きにつき、解析結果は実験結果によるアーチ渦の特徴を良く捉えていることから、解析によりアーチ渦を再現可能であることが結論づけられる。

4.2 アーチ渦のレイノルズ数 (Re) 依存性に関する検討

アーチ渦列の渦間距離の比較を図 4.4 に示す。この図より、両ケース間で渦間距離に若干の違いが生じているが、これは図 4.5 に示した渦間距離に関する実験結果のばらつき範囲内に収まっており、概ね一致していると判断できる。

一方、同図に示した渦間距離に関する実験結果と解析結果との比較では、解析結果の方が実験結果よりも系統的に長めに評価していることが分かる。現段階では、この系統的差異の発生原因は不明であるが、渦間距離の規定方法、すなわちアーチ渦の観察定義点 (枝管端からの下流側位置)、平均化時間などについて、今後より詳細に検討してゆく必要がある。

一方、渦間距離と Re 数の関係について言えば、各流速比 β における渦間距離は Re の変化の下で同程度のばらつきを示し、Re 数に関する依存性は小さいと解釈することができる。

アーチ渦の通過周期の比較を図 4.6 に示す。この図より、Re 数の大きいケース 4 のアーチ渦の通過周期が短くなっていることが分かる。アーチ渦の通過周波数に関する実験との比較（図 4.7）では、解析結果の値はどちらのケースも実験結果より小さ目に評価しているが、この差異の原因については、渦間距離を長めに見積もったことに起因していると考えられる。一方、Re 数と通過周波数の関係については、実験結果・解析結果の両者とも Re 数（主流流速）の増加に伴って通過周波数が高くなっており、アーチ渦の通過周波数の Re 数依存性が確認された。

4.3 流動パターンの流速比依存性に関する検討

流動パターンマップを図 4.8 に示す。この図より、解析で評価された 3 種類の流動パターンが全て実験で規定された流動パターンの分類の範囲内に収まっていることが分かる。これより、流動パターンの分類は数値解析により実施可能である見通し得た。

第 5 章 結 言

配管合流部における乱流混合基礎実験の解析を直接シミュレーションコード DINUS - 3 により実施し、アーチ渦発生に関する流動条件の検討を行った。得られた結果は次の通りである。

- (1) 実験で観測された 3 種類の流動パターン、付着流、偏向流および衝突流を、数値解析によりの確に模擬可能であることを確認した。
- (2) 偏向流となる流動条件（流速比 $\beta = 1.0$, $Re = 600, 1050$ ）での数値解析により、アーチ渦を再現できることを確認した。
- (3) アーチ渦が発生する流動条件において、流速比を固定した条件で Re 数を大きくするとアーチ渦の通過周波数が高くなることが明らかとなった。一方、流速比が同じであれば Re 数が変化してもアーチ渦の渦間距離は実験結果でのばらつきの範囲内に収まることを確認した。

参考文献

- (1) T. Muramatsu, Numerical Analysis of Nonstationary Thermal Response Characteristics for a Fluid - Structure Interaction System, Journal of Pressure Technology, Vol. 121, pp. 276-282 (1999).
- (2) T. Muramatsu, Frequency Evaluation of Temperature Fluctuations Related to Thermal Striping Phenomena Using the DINUS-3 Code, Proc. ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 253, pp. 111-121 (1993).
- (3) T. Muramatsu, Thermal Response Evaluation of Austenitic Stainless Steels Due to Random Sodium Temperature Fluctuations Using DINUS-3 and BEMSET Codes, Proc. ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 337, pp. 215-223 (1996).
- (4) T. Muramatsu, Evaluation of Thermal Striping Phenomena at a Tee Junction of LMFR Piping Systems with Numerical Methods (I), Thermohydraulic Calculations, Proc. 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15), Vol. IV, pp. 217-224 (1999).
- (5) 技術展開部技術協力課編、先行基礎工学研究に関する平成 11 年度研究概要報告、サイクル機構公開資料、JNC TN1400 2000 - 003 (2000).

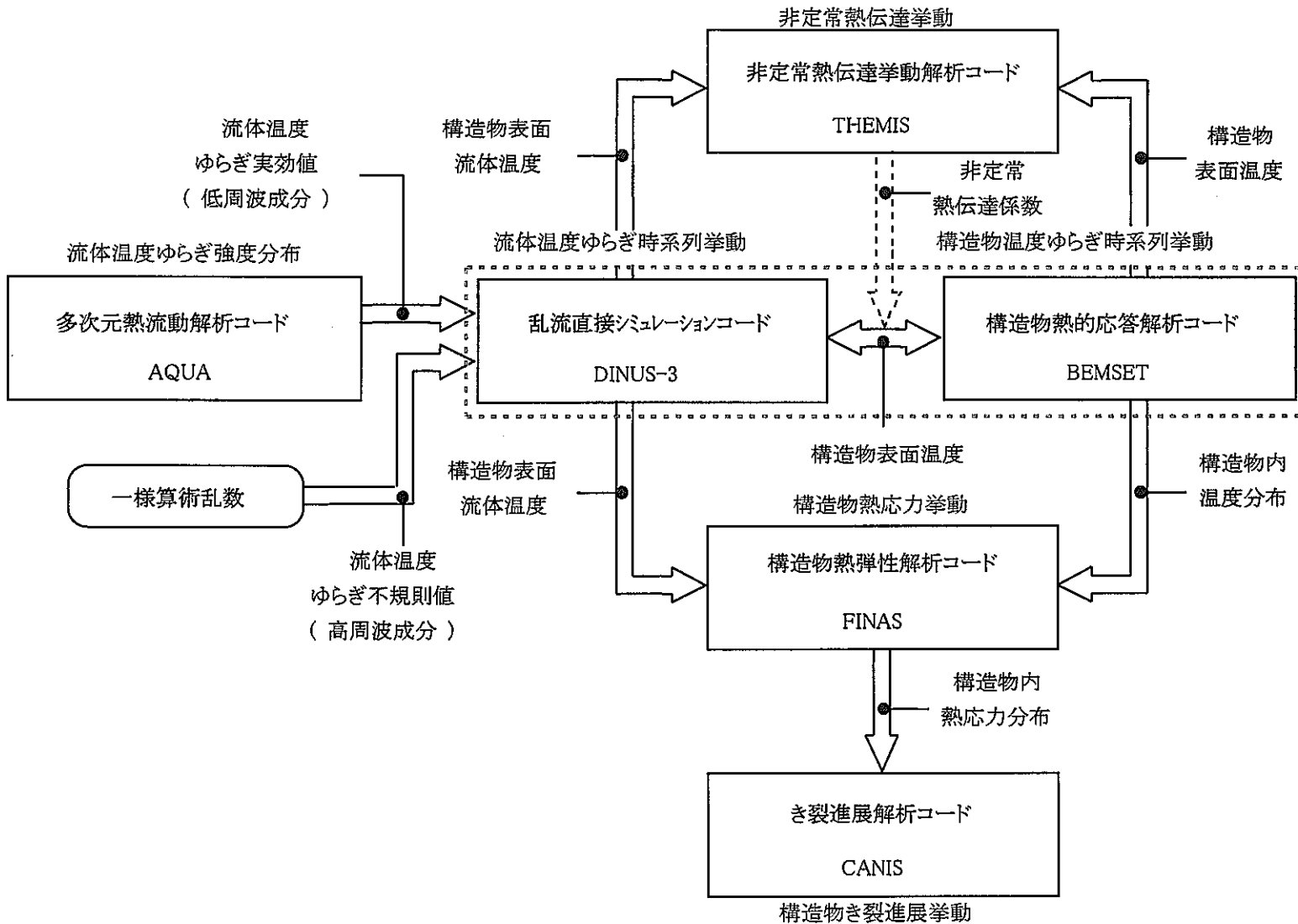


図 1.1 サーマルストライピングに対する解析的評価システムの構成

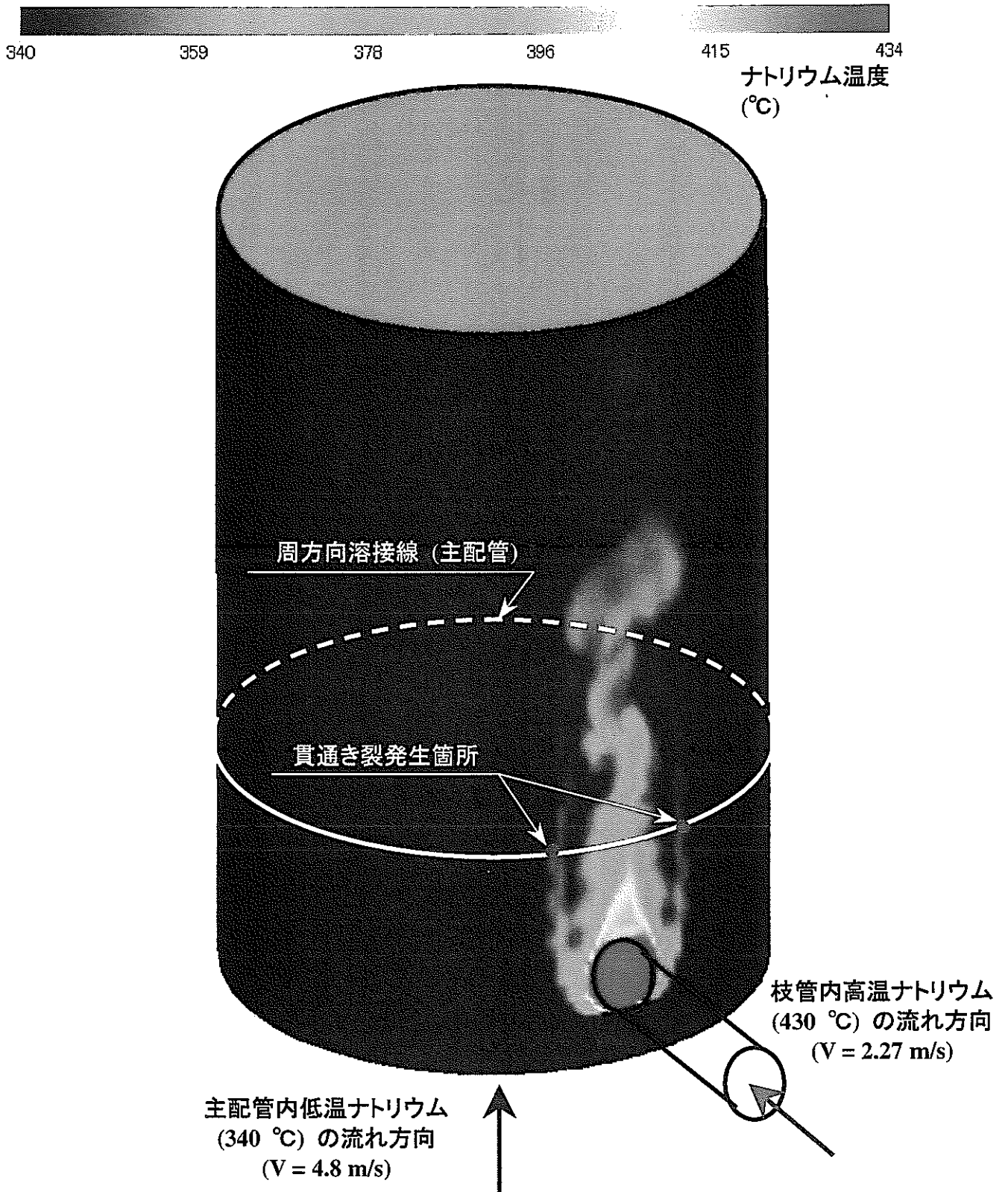


図 1.2 DINUS-3 コードにより評価された主配管内壁近傍 (表面より 0.1 mm) における瞬時ナトリウム温度分布 (仏国・フェニックス炉 2 次主冷却系配管合流部)

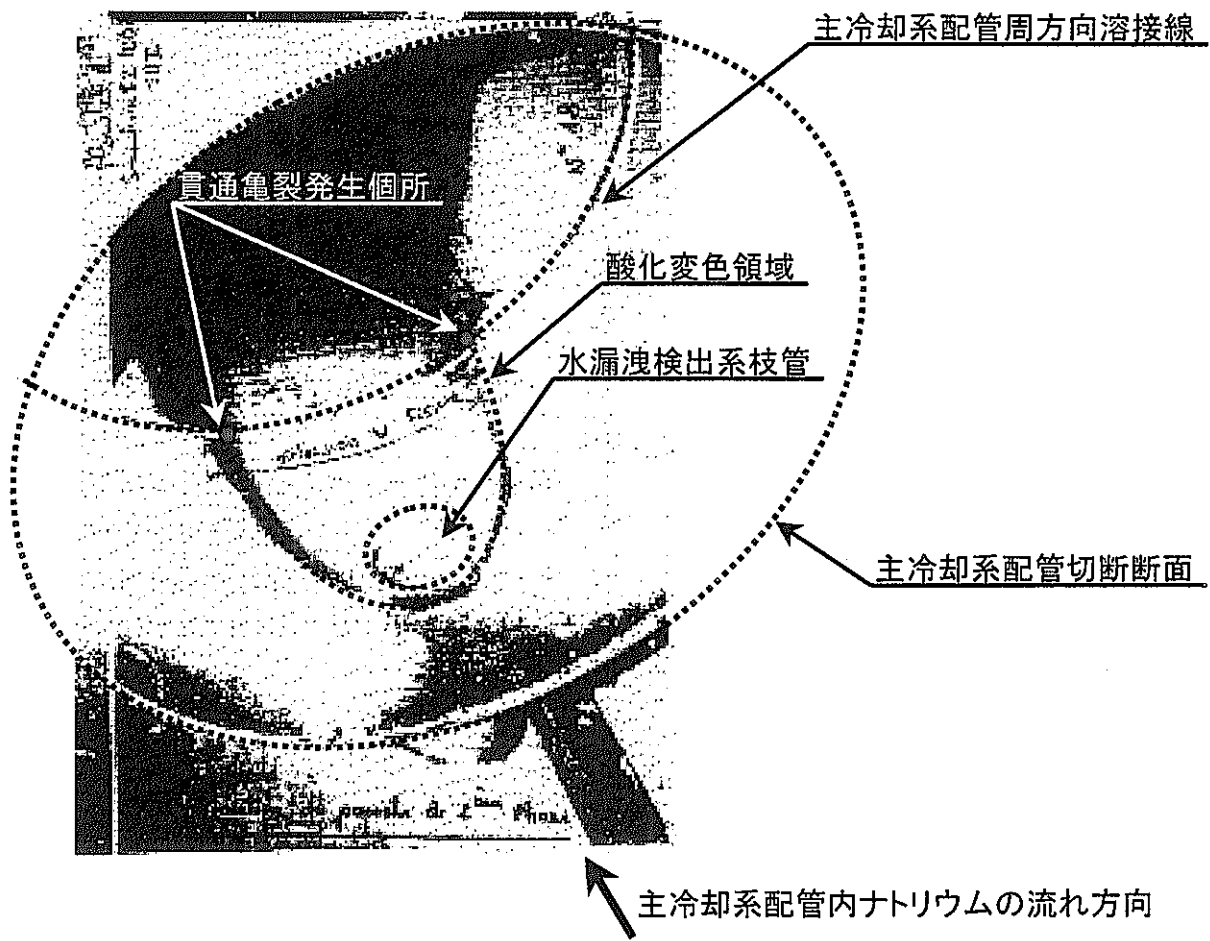


図 1.3 配管切り出し後の合流部下流側観察写真（仏国・フェニックス炉）

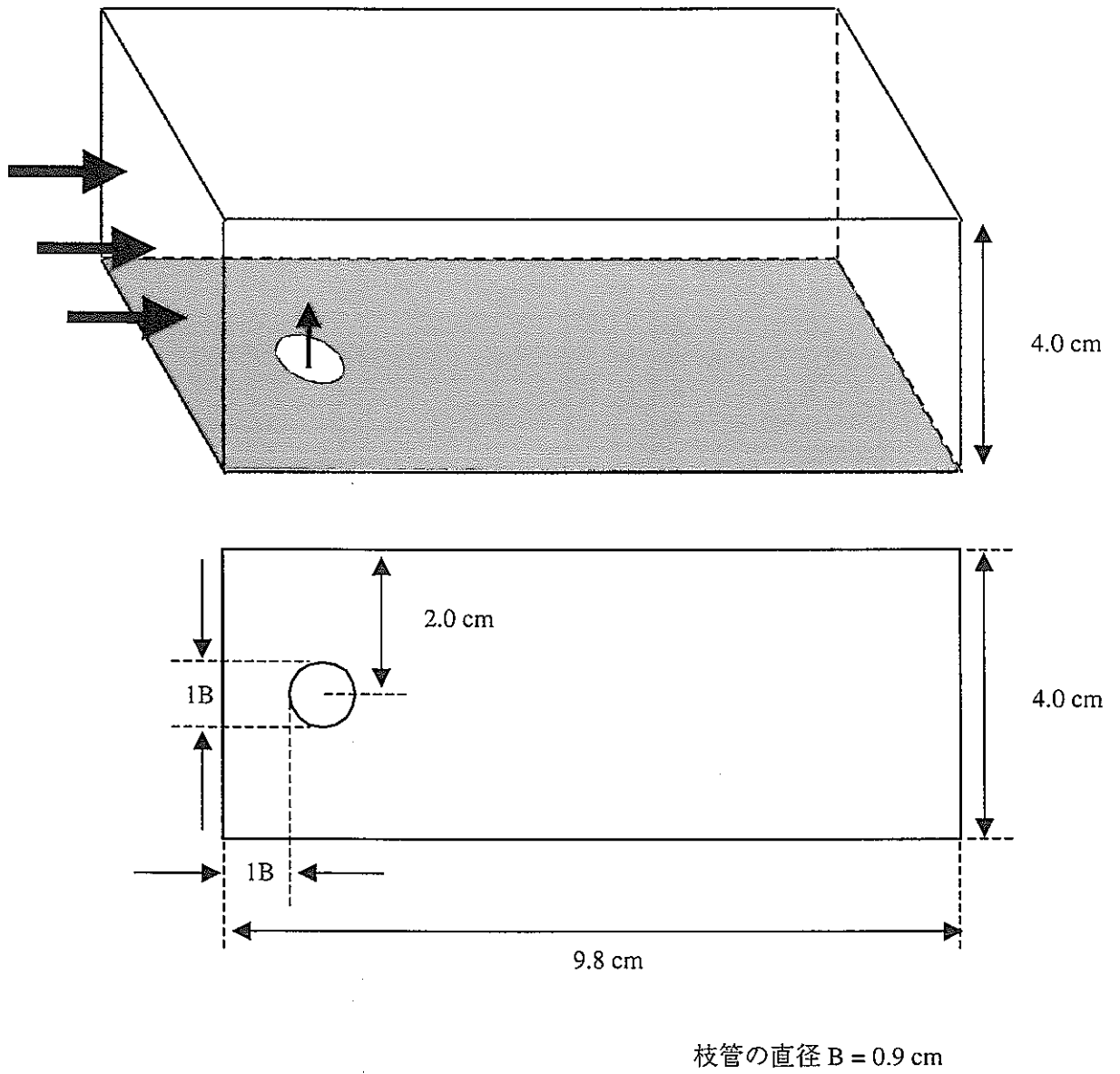


図 3.1 解析体系

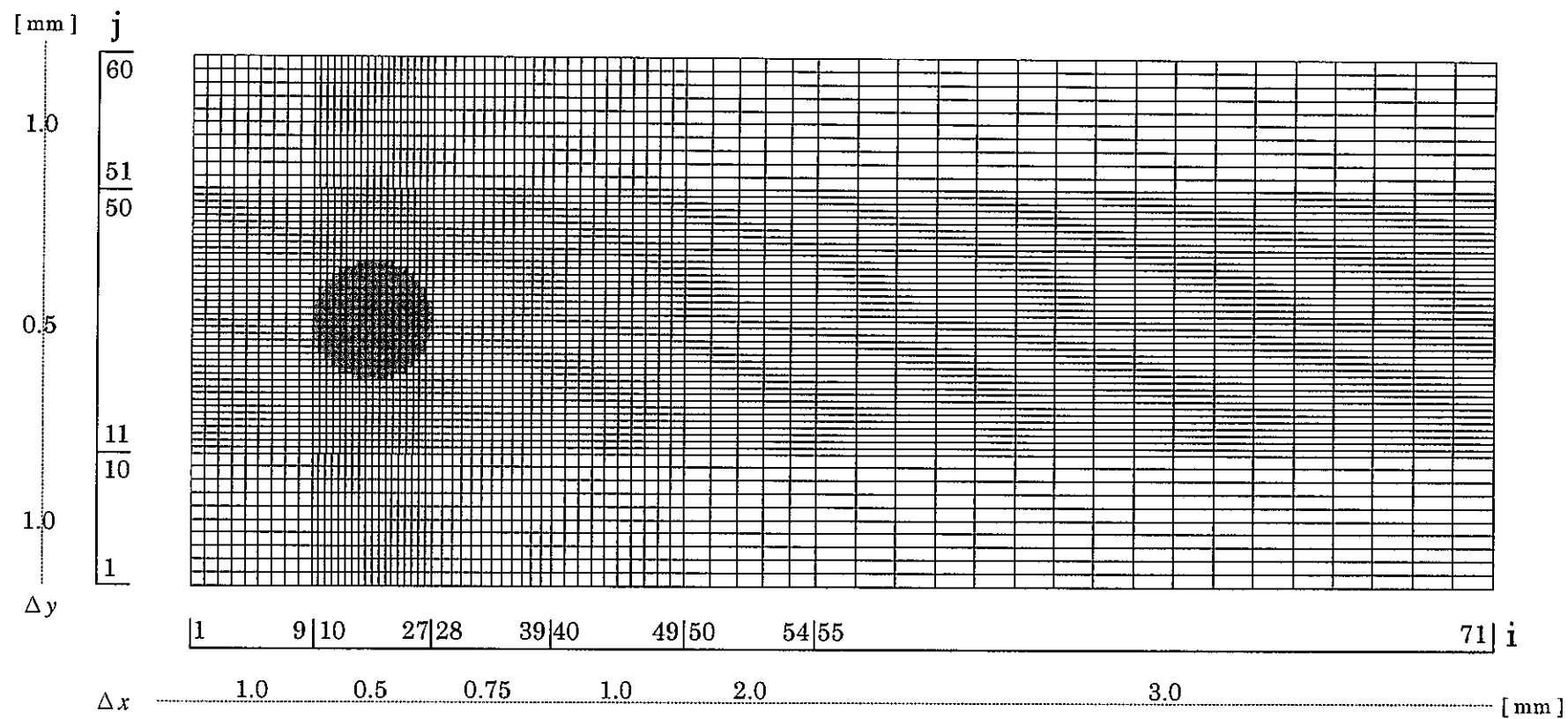


図 3.2 [1/2] メッシュ図 (x - y 断面)

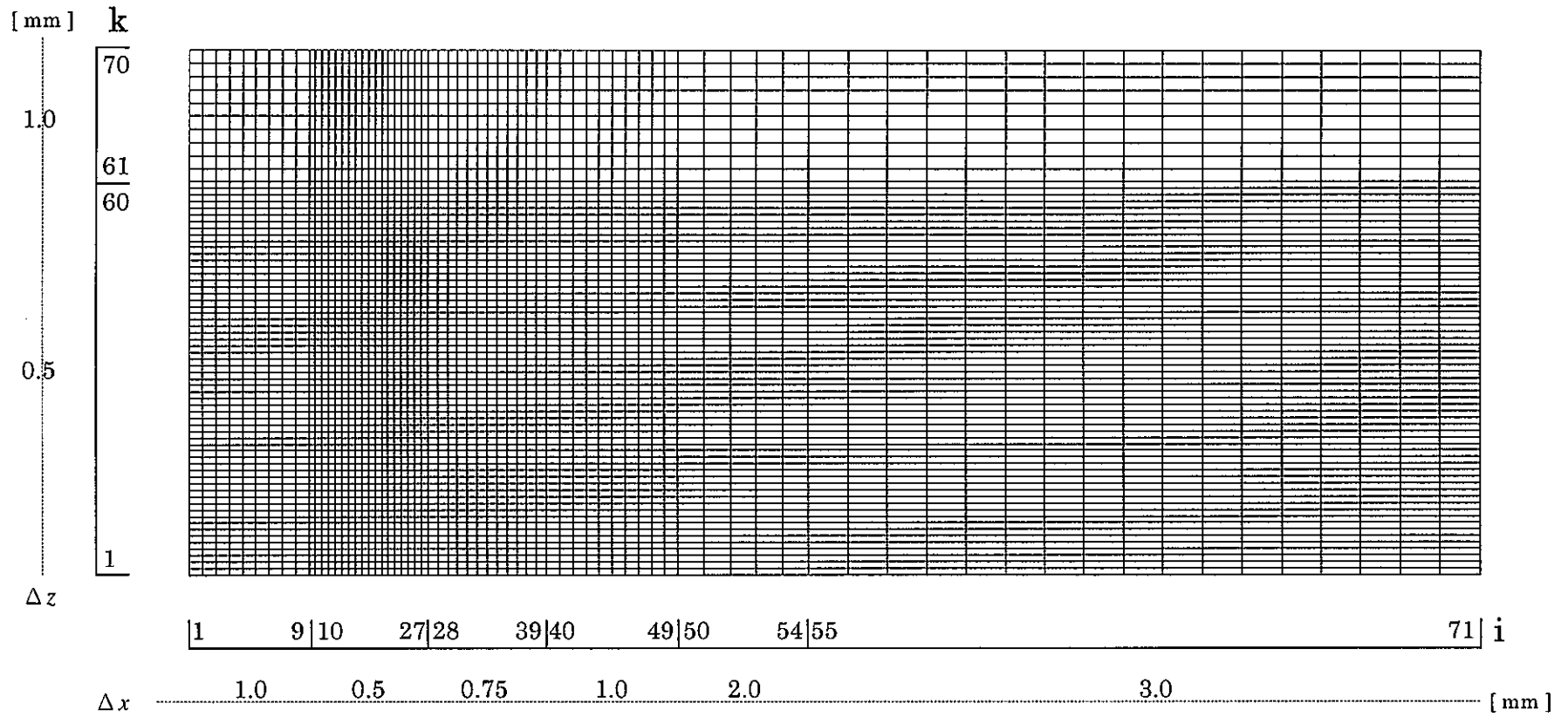


図 3.2 [2/2] メッシュ図 ($x-z$ 断面)

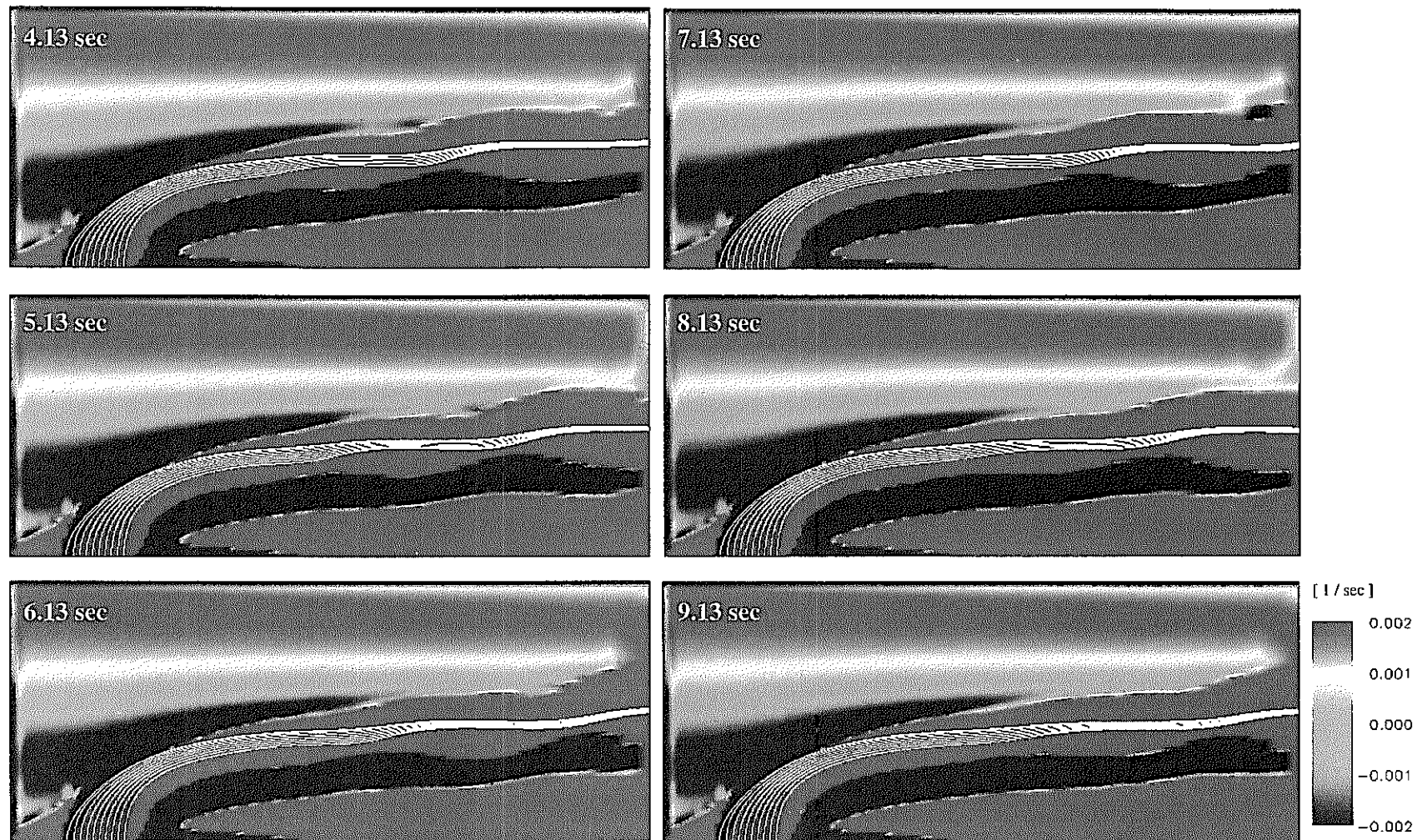


図 3.3 瞬時渦度空間分布および流線の時間推移 ($j = 31$; ケース 1: $Re=600$, $\beta = 1.0$)

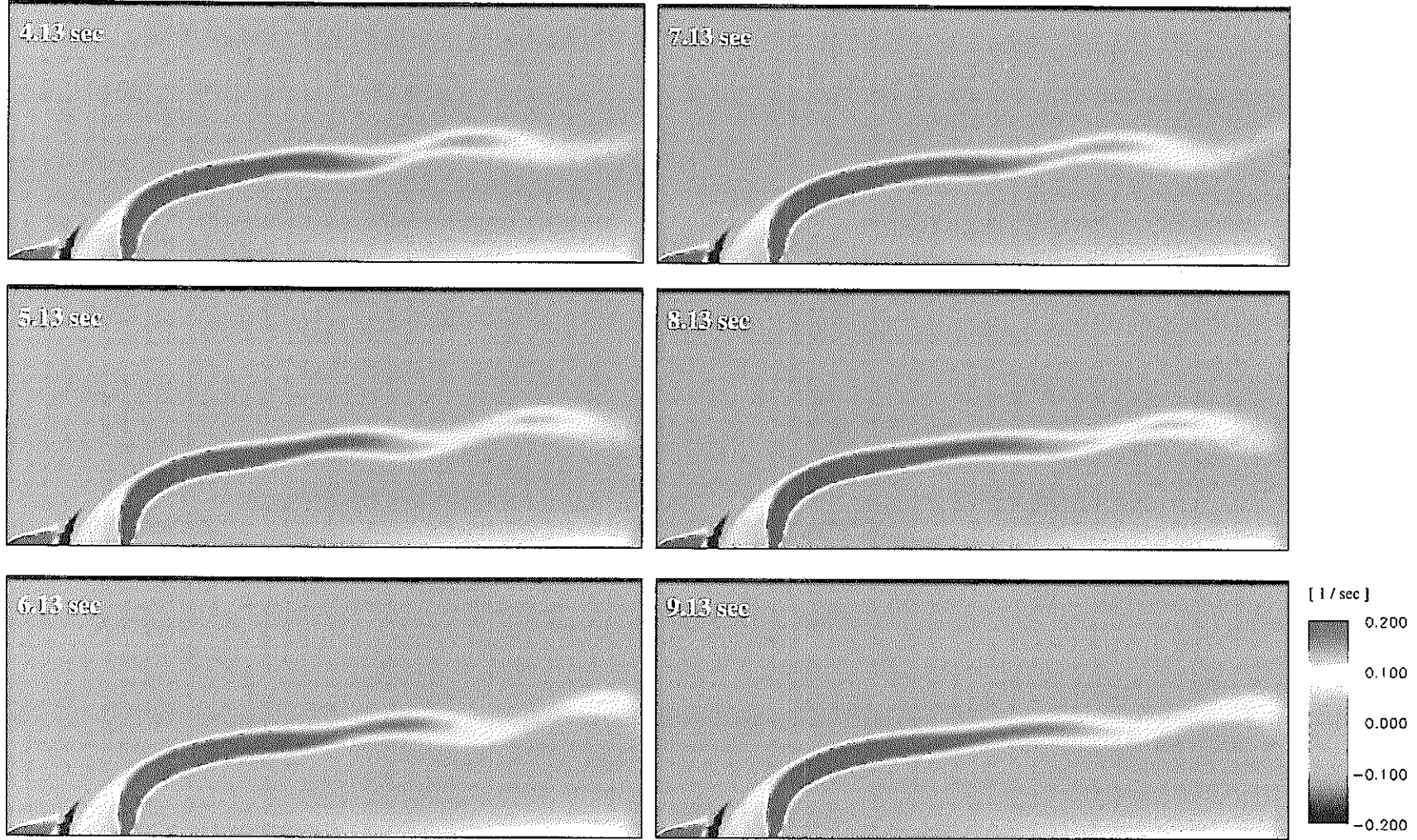


図 3.4 瞬時渦度空間分布の時間推移 ($j = 31$; ケース 1: $Re=600$, $\beta = 1.0$)

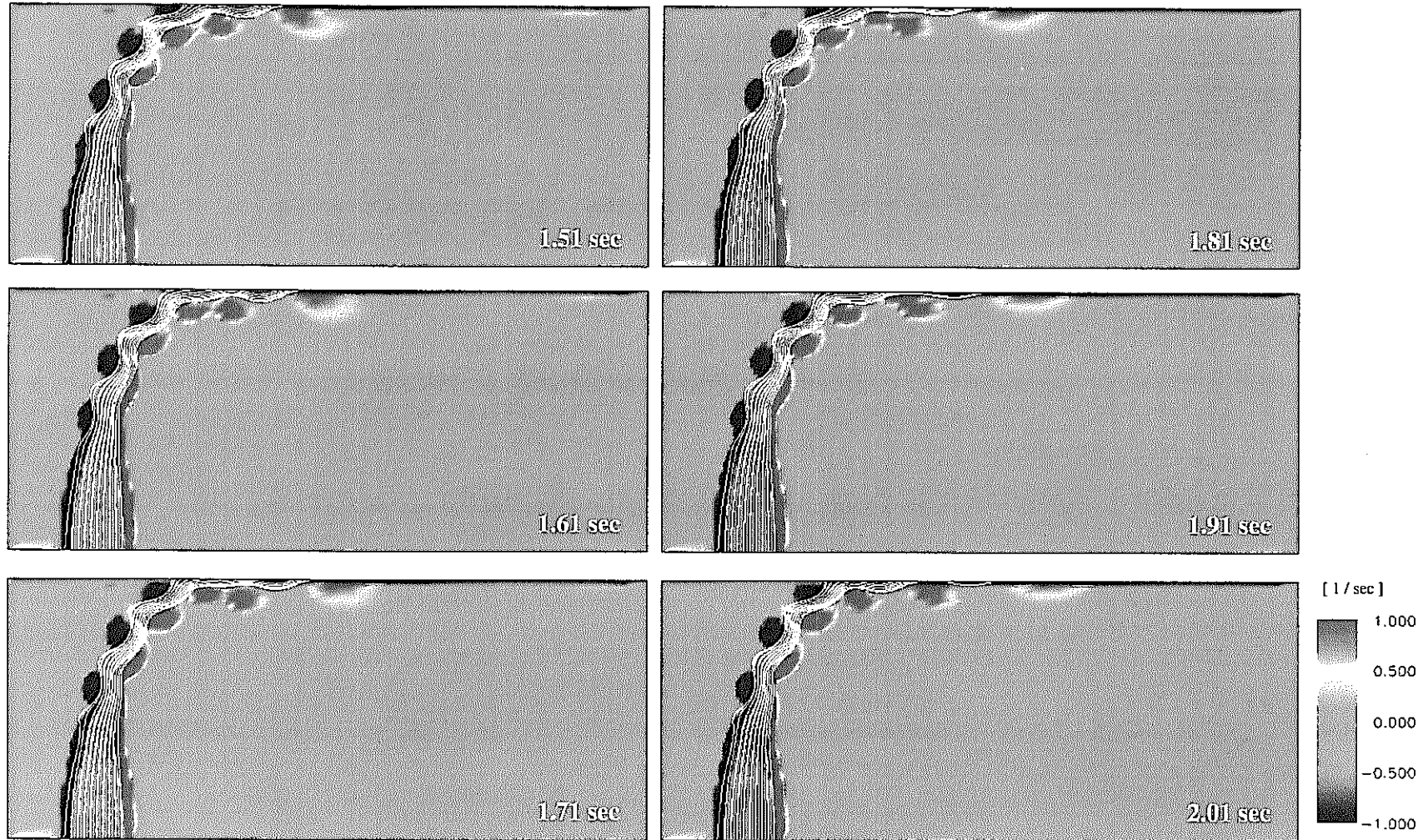


図 3.5 瞬時渦度空間分布および流線の時間推移 ($j=31$; ケース 2: $Re=600$, $\beta=0.2$)

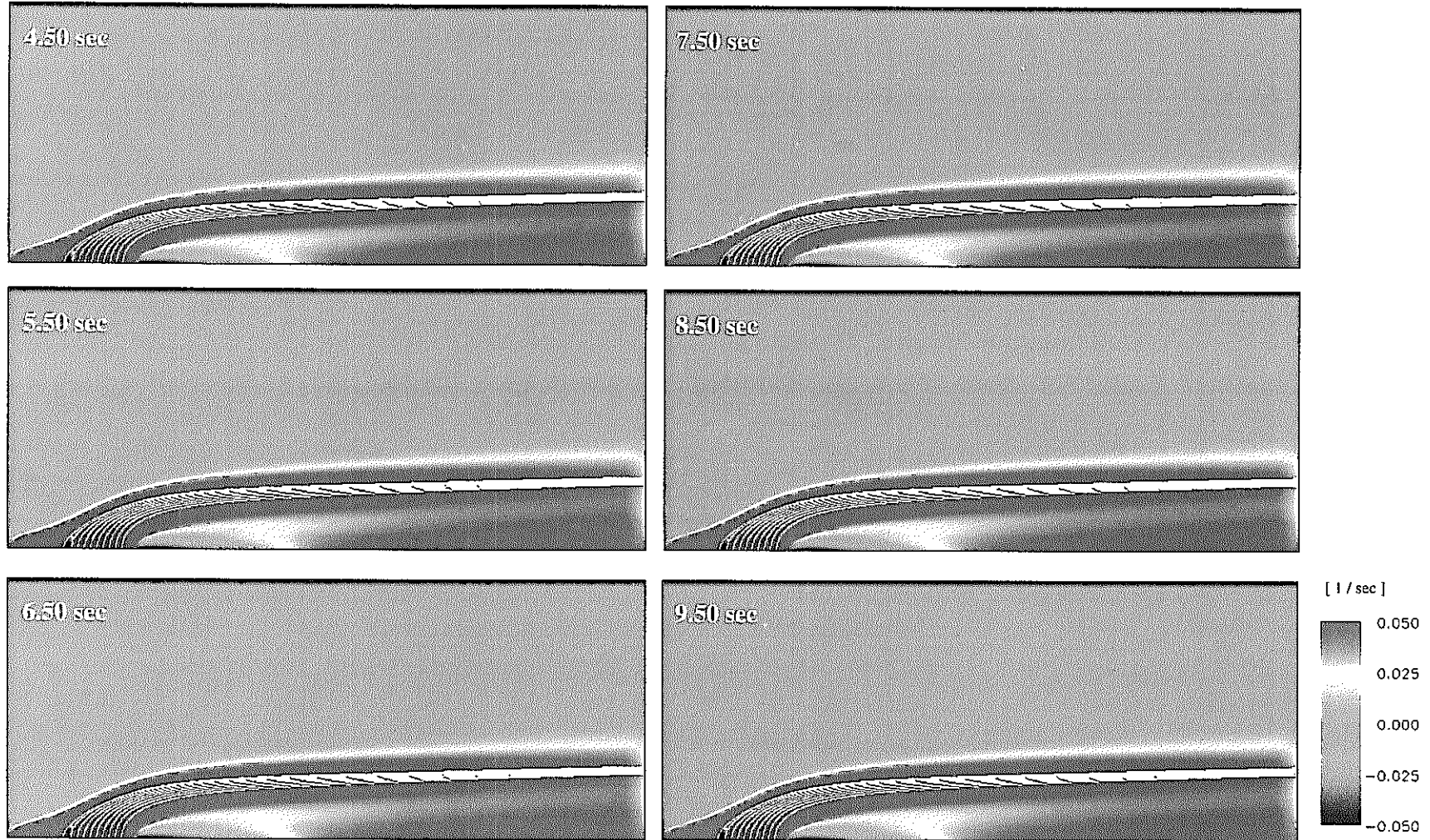


図 3.6 瞬時渦度空間分布および流線の時間推移 ($j = 31$; ケース 3: $Re=600$, $\beta = 2.5$)

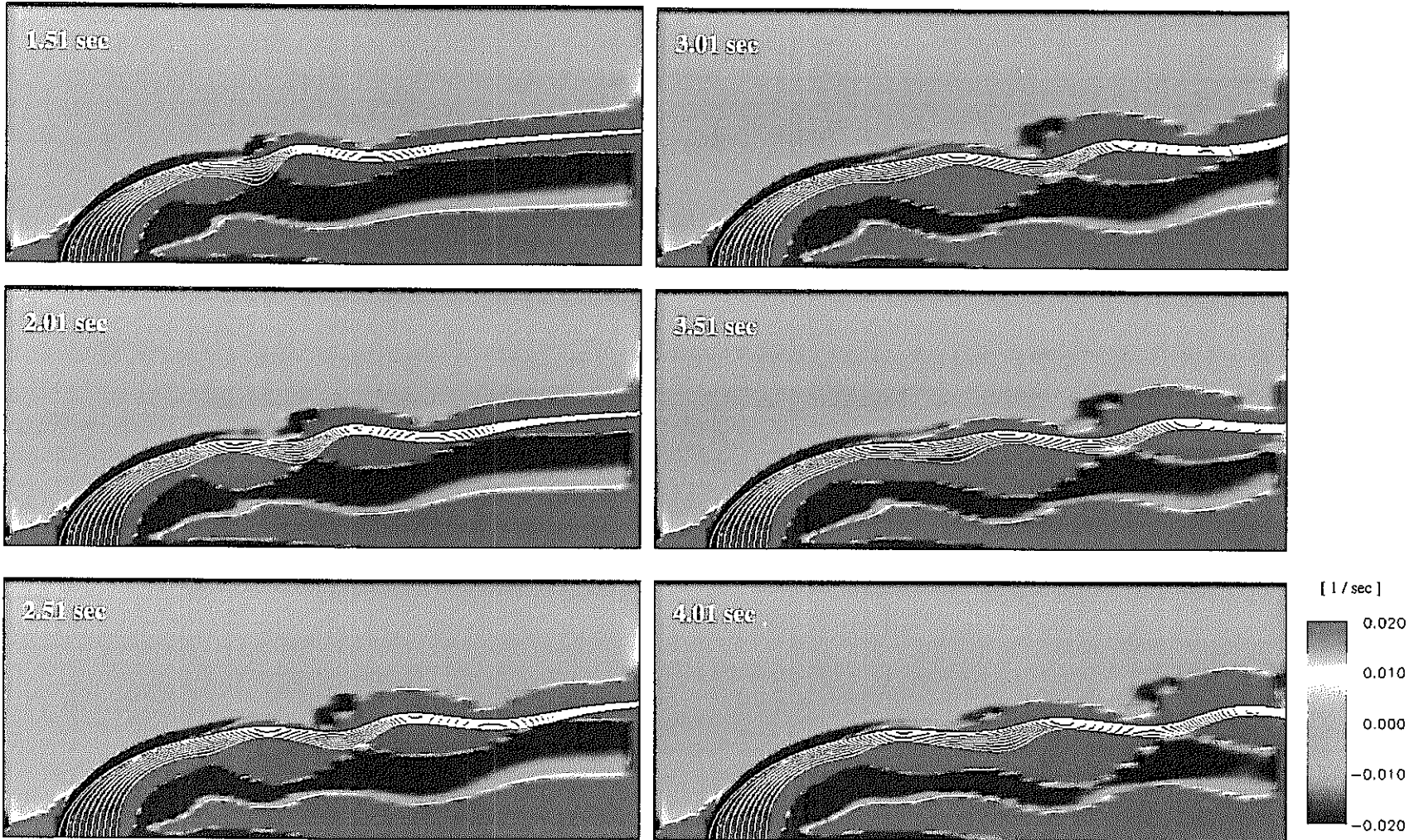


図 3.7 瞬時渦度空間分布および流線の時間推移 ($j=31$; ケース 4: $Re=1050$, $\beta=1.0$)

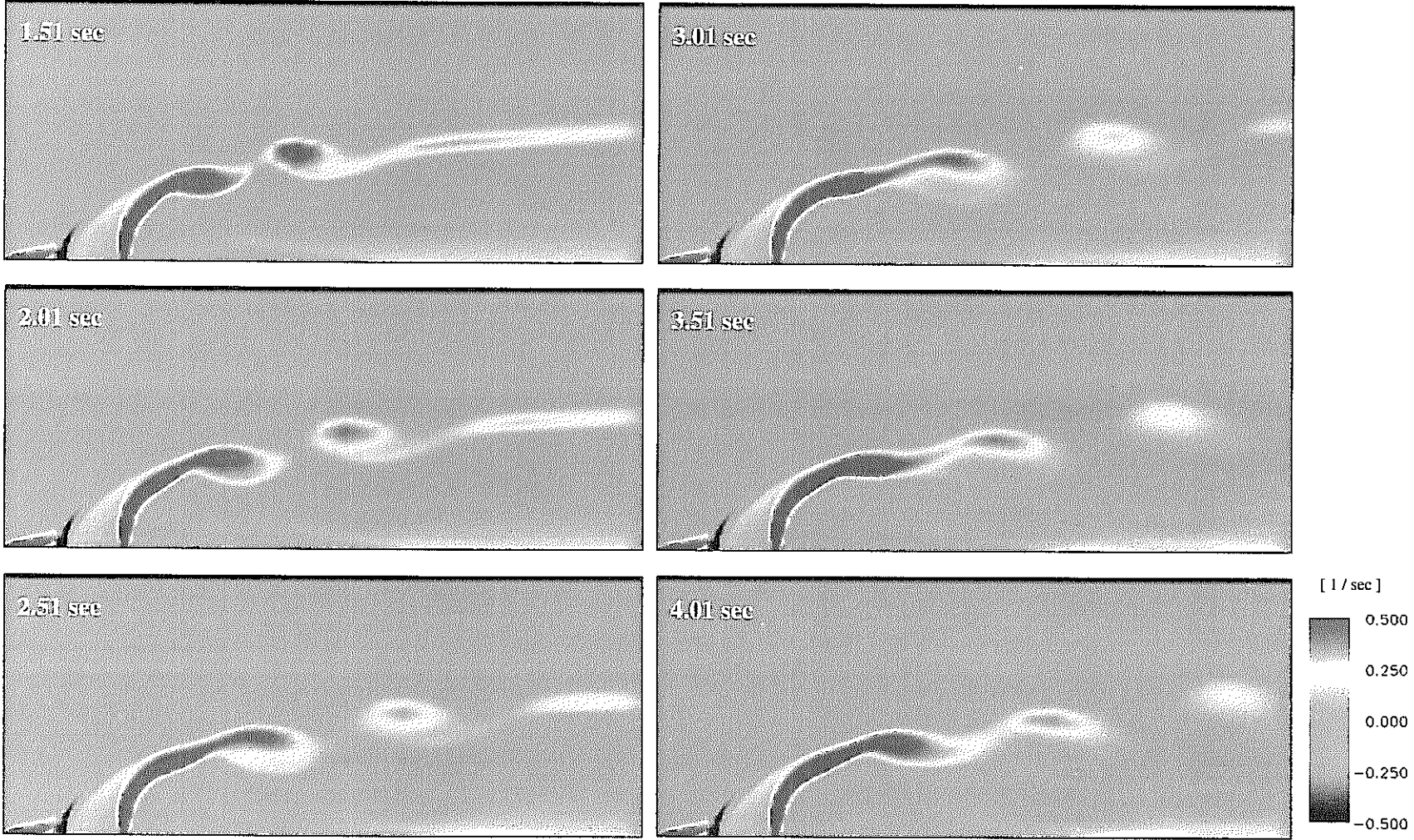


図 3.8 瞬時渦度空間分布の時間推移 ($j = 31$; ケース 4: $Re=1050$, $\beta = 1.0$)

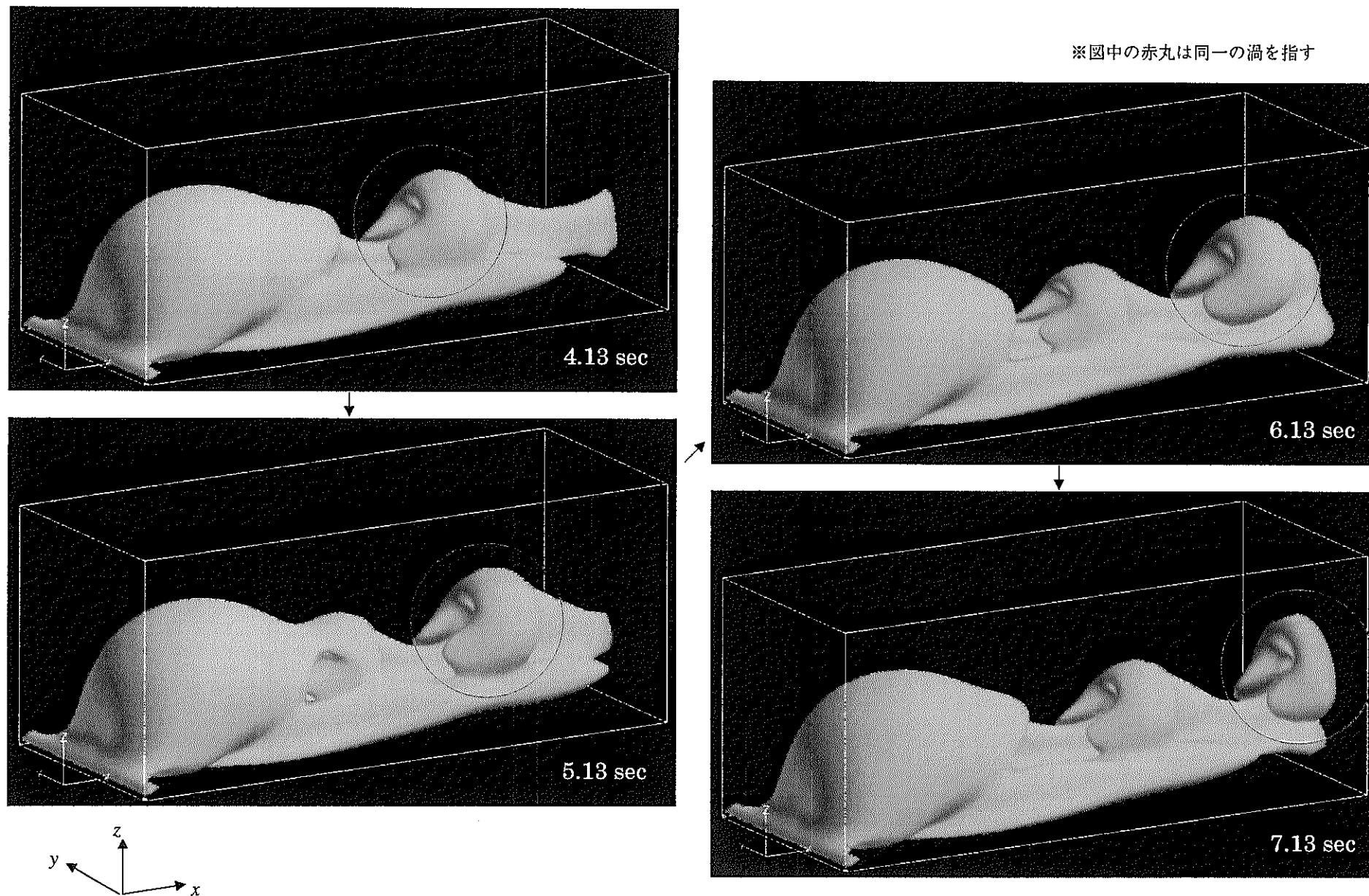
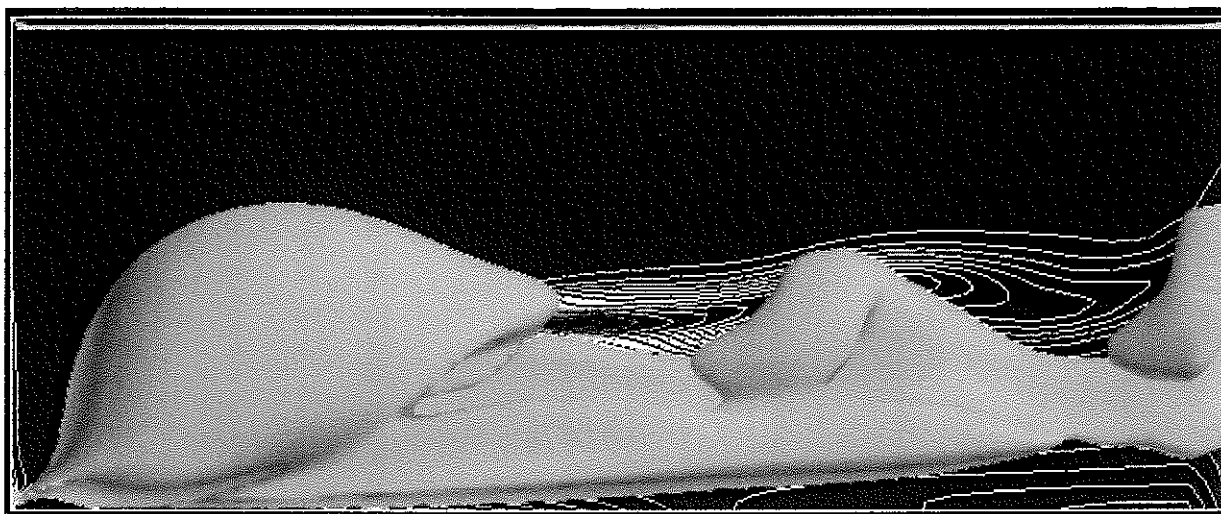
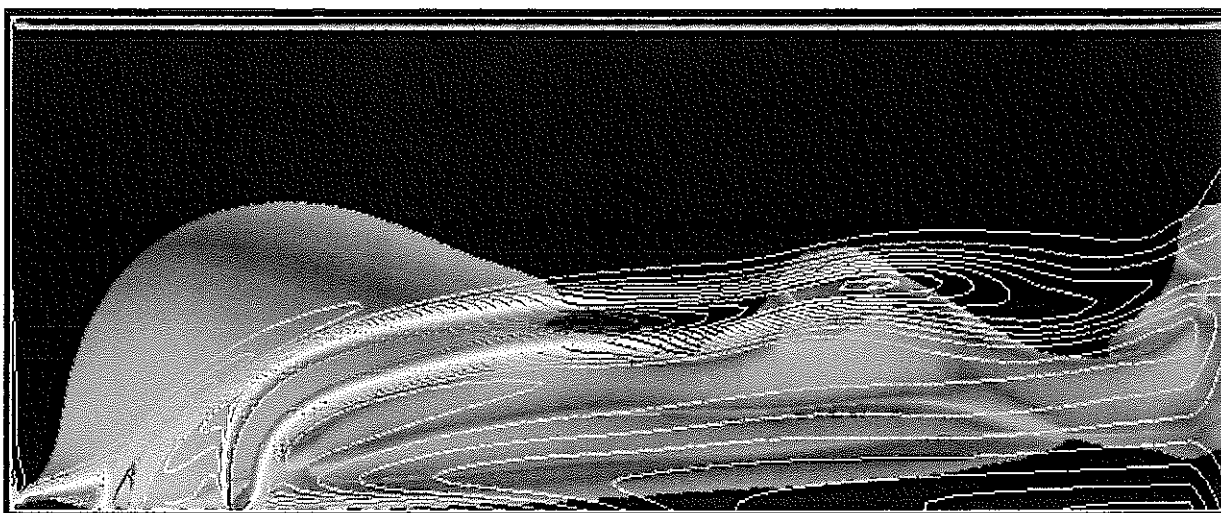


図 4.1 瞬時 cross flow velocity 等値面の時間推移 (ケース 1 : $Re=600$, $\beta=1.0$)



※ 図中の緑色で表示された等値面は cross flow velocity である。



※ この図は、上図に基づいて $j=31$ より手前の領域 ($j = 1 \sim 30$) における等値面を非表示して、渦度を見易くしたもの。

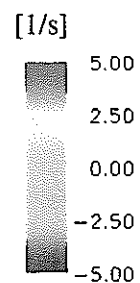
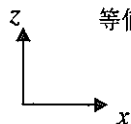
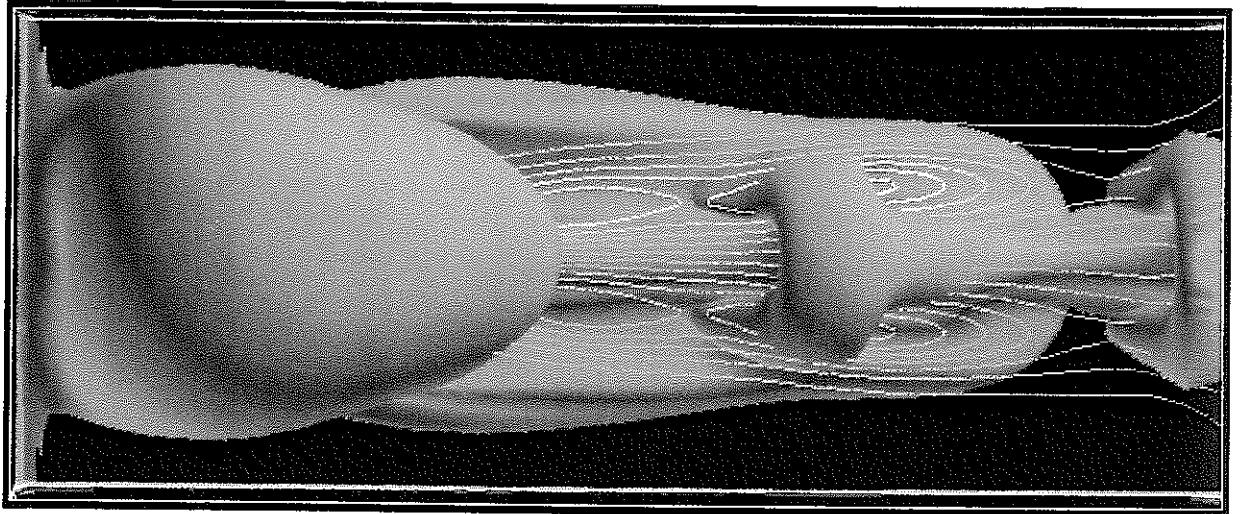
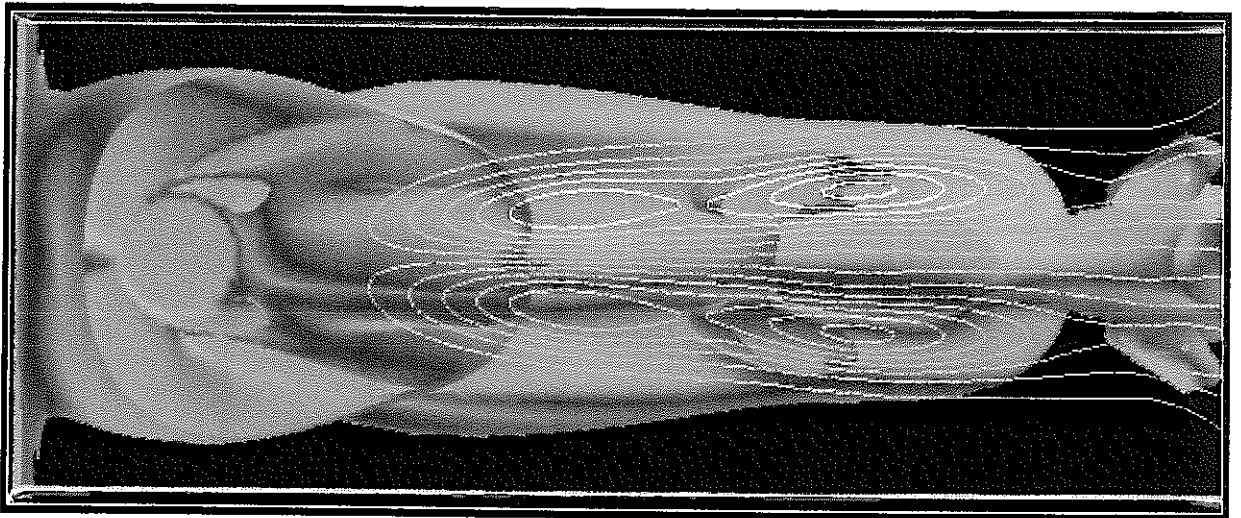


図 4.2 瞬時渦度 ω_j 等値線図 ($j = 31$; ケース 1: Re 数 = 600, $\beta = 1.0$)



※ 図中の緑色で表示された等値面は cross flow velocity である。



※ この図は、上図に基づいて $k = 31 \sim 60$ における等値面を非表示して、渦度を見易くしたもの。

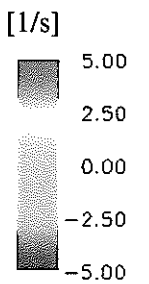
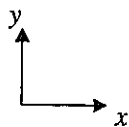


図 4.3 瞬時渦度 ω_k 等値線図 ($k = 30$; ケース 1: Re 数 = 600, $\beta = 1.0$)

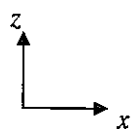
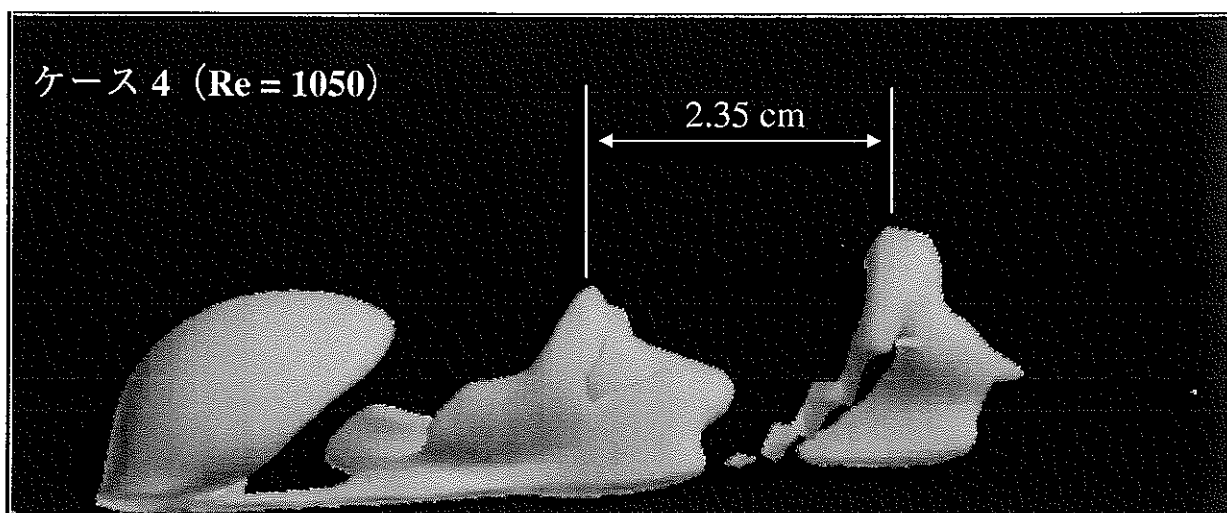
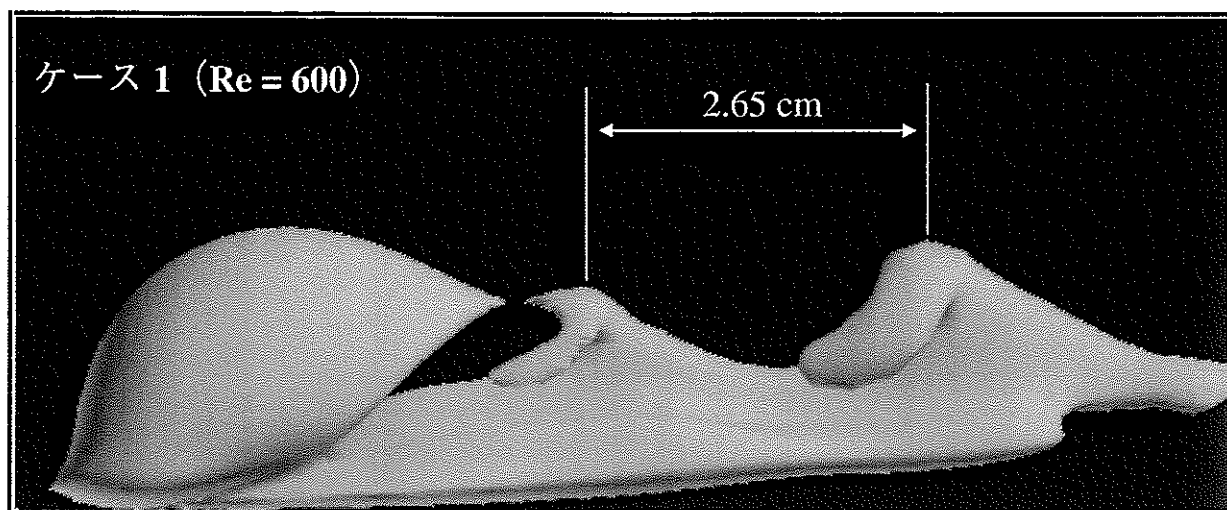


図 4.4 アーチ渦の渦間距離の比較

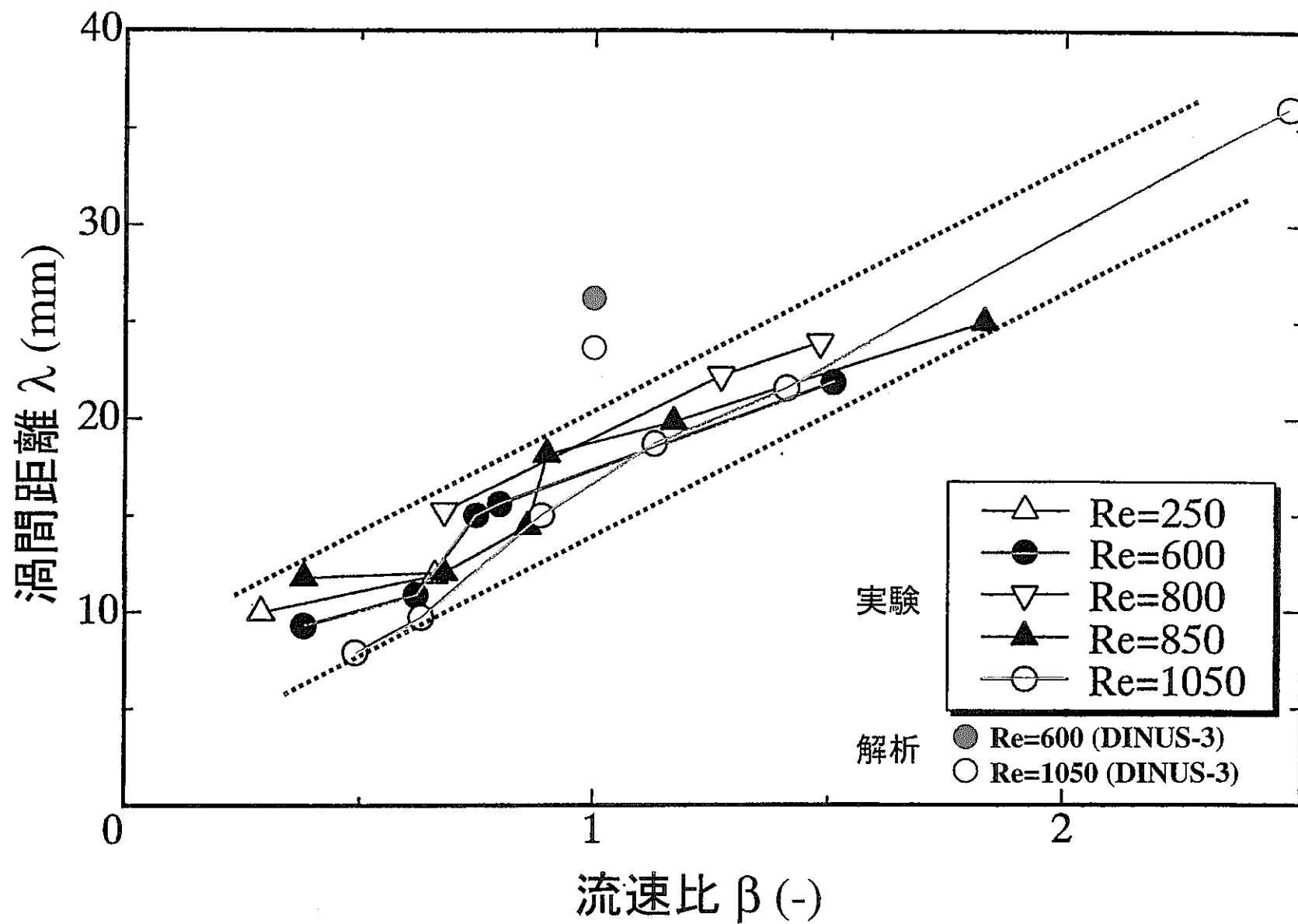


図 4.5 渦間距離の実験値との比較

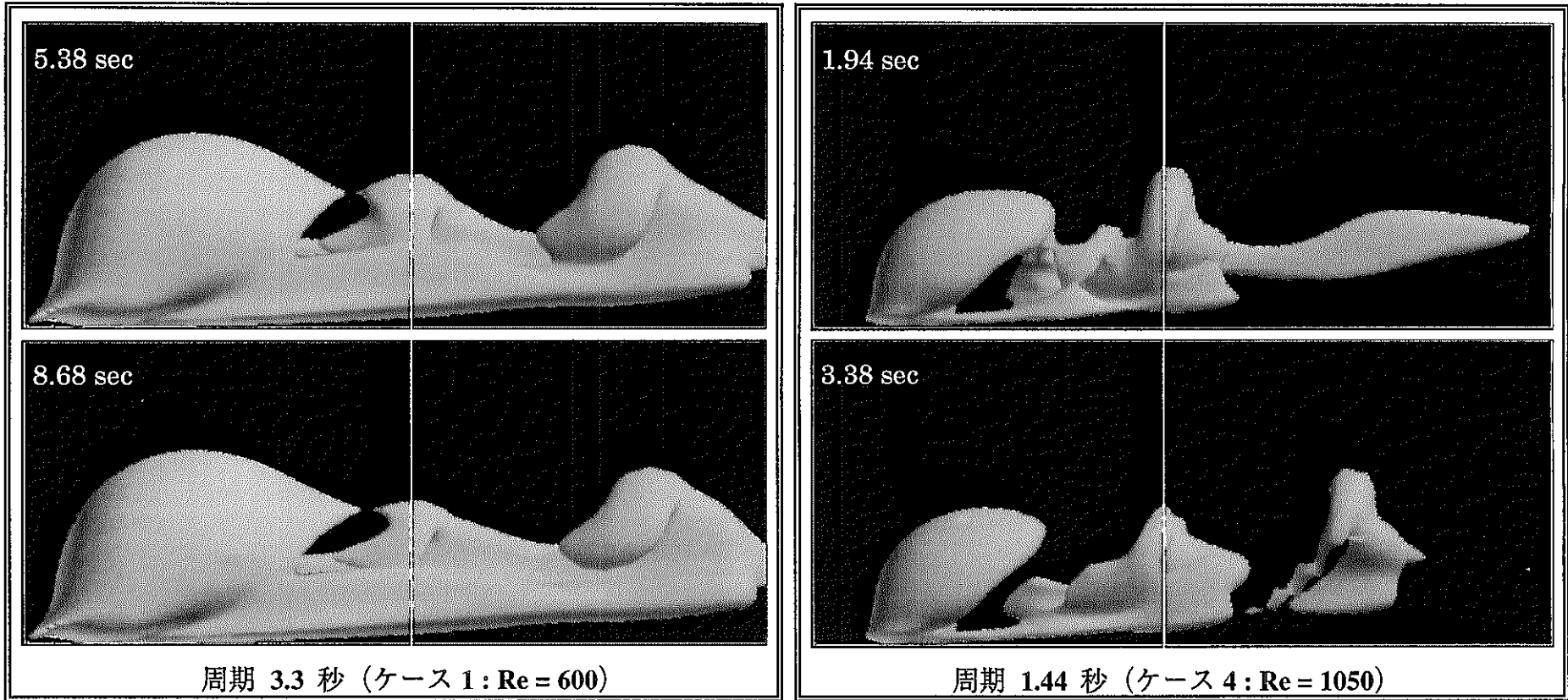


図 4.6 アーチ渦の通過周期に関する比較

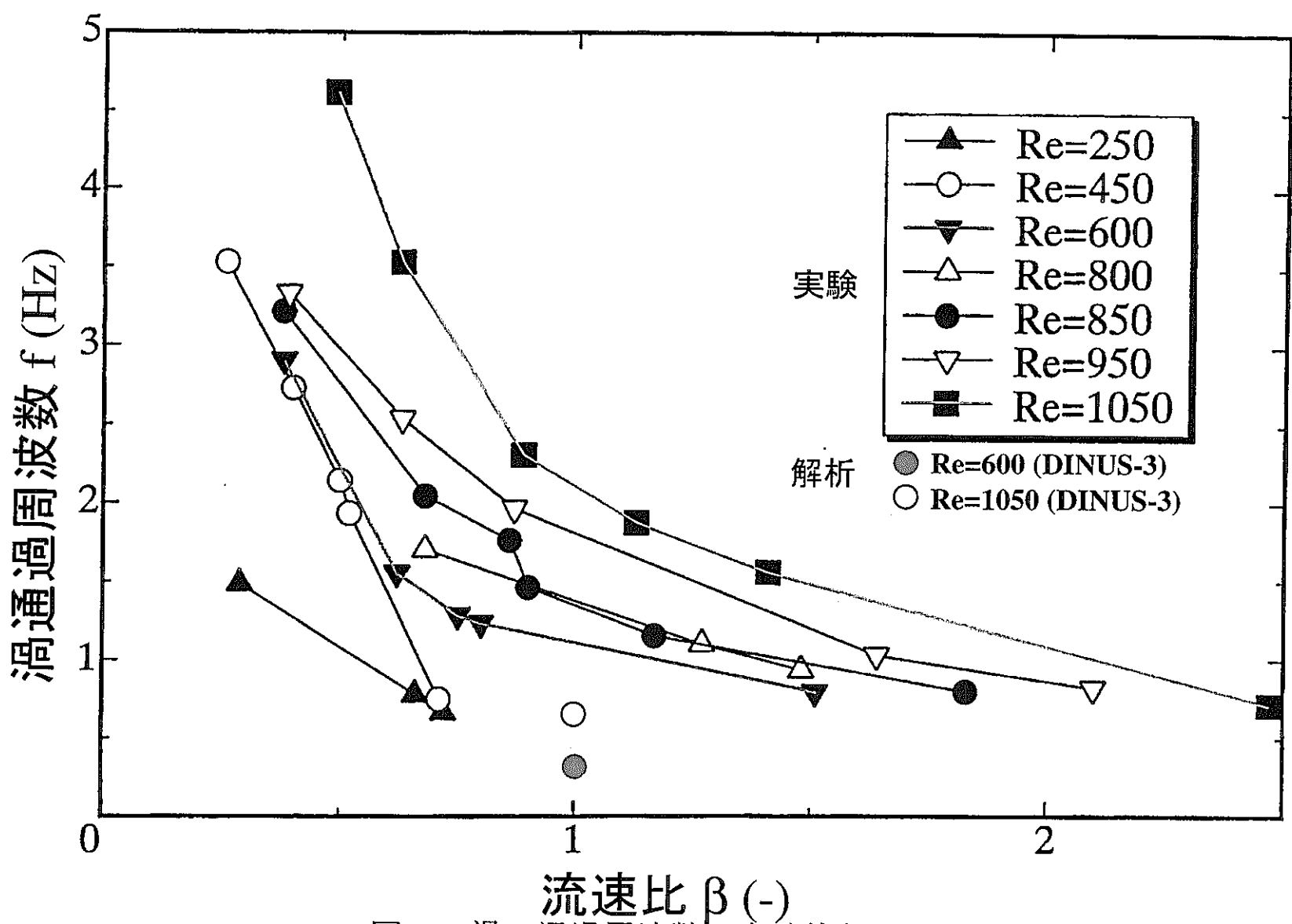


図 4.7 渦の通過周波数の実験値との比較

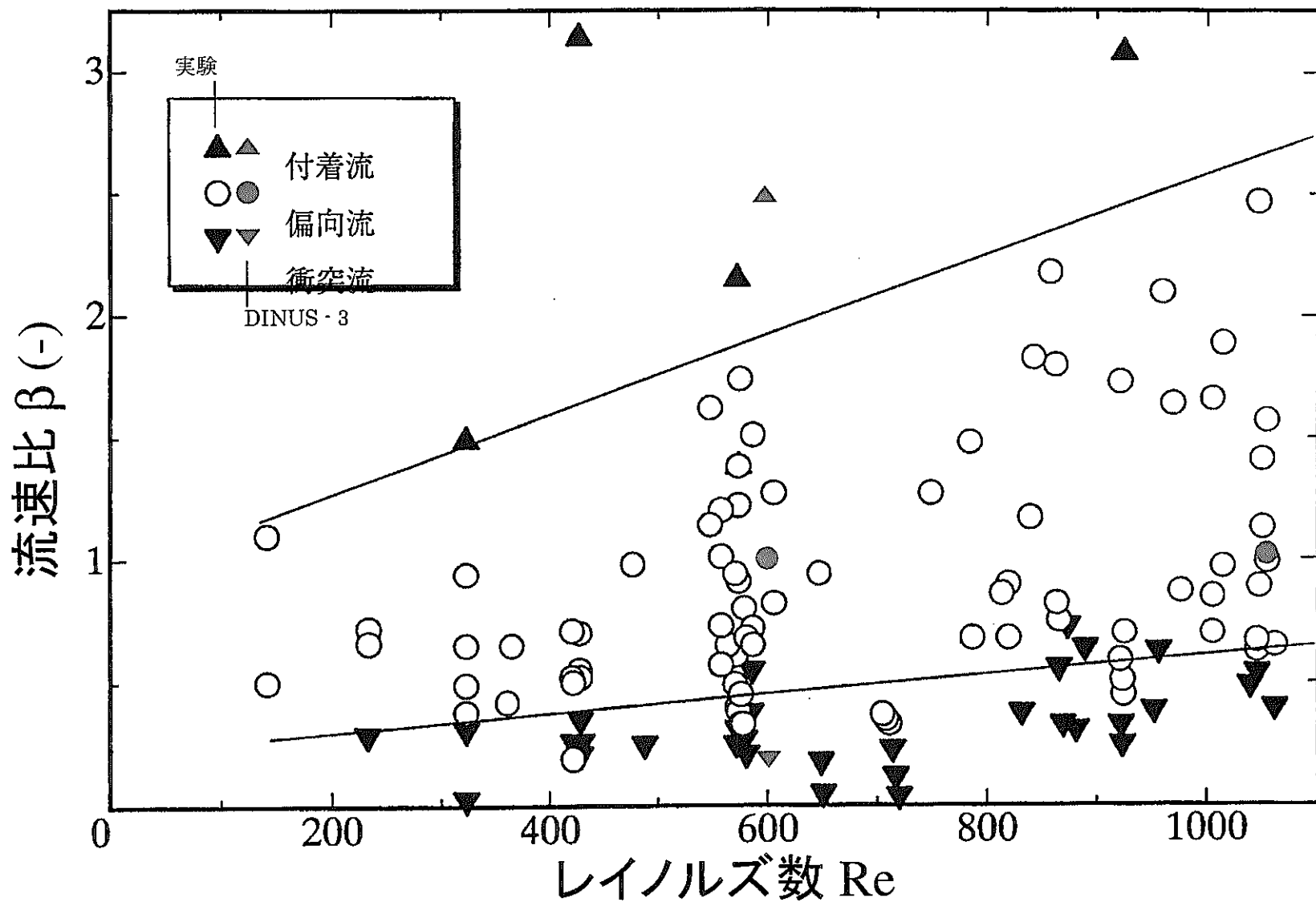


図 4.8 流動パターンの実験との比較