

高速炉ガス巻込み現象を解析できる 高精度気液二相流数値解析コードの開発

Development and Validation of High-precision Numerical Simulation Algorithm
for Evaluation of Gas Entrainment in Fast Reactor

伊藤 啓 大島 宏之 河村 拓己

Kei ITO, Hiroyuki OHSHIMA and Takumi KAWAMURA

次世代原子力システム研究開発部門
FBR 要素技術開発ユニット

FBR Systems Technology Development Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

March 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

高速炉ガス巻込み現象を解析できる高精度気液二相流数値解析コードの開発

日本原子力研究開発機構次世代原子力システム研究開発部門 FBR 要素技術開発ユニット
伊藤 啓、大島 宏之、河村 拓己*

(2010 年 12 月 17 日 受理)

FaCT プロジェクトにおいて設計研究が行われている Na 冷却大型高速炉実用炉では、安定運転の観点から炉容器内自由液面におけるガス巻込み発生を抑制する必要がある、ガス巻込みを評価する手法の研究を進めている。ガス巻込みの評価においては、実規模体系形状模擬試験が確実だが高コストであるため、代替手法として高精度気液二相流数値解析コードの開発を行っている。本研究では、コード開発・検証の一環として、1) ガス巻込み現象の再現性検討、2) 大規模解析への適用性・実行性の検討、3) ガス巻込み量予測精度評価の検討を実施し、以下の知見を得た。

1) ガス巻込み基礎実験を対象とした数値解析

高速炉ガス巻込み現象の再現性を確認するため、ガス巻込み基礎実験を対象とした数値解析を実施した。その結果、実験で観察・計測されたガス巻込み発生メカニズムを、数値解析によって再現することに成功した。

2) 1/1.8 縮尺上部プレナム液面部分モデル水流動試験を対象とした数値解析

実規模ガス巻込み現象の評価に対するコードの適用性を確認するため、1/1.8 縮尺液面部分モデル水流動試験装置を対象とした数値解析を実施し、H/L 周辺におけるくぼみ渦や流れの潜り込みによってガス巻込みが発生する様子を再現することに成功した。

3) ガス巻込み量計測基礎実験を対象とした数値解析

ガス巻込み量の定量評価に対するコードの適用性を検討するため、信州大学との共同研究にて実施しているガス巻込み量計測基礎実験を対象とした数値解析を実施した。その結果、実験で観察された気柱状ガス巻込みを再現することに成功した。

Development and Validation of High-precision Numerical Simulation Algorithm for
Evaluation of Gas Entrainment in Fast Reactor

Kei ITO, Hiroyuki OHSHIMA and Takumi KAWAMURA*

FBR Systems Technology Development Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2010)

Japan Atomic Energy Agency has conducted a conceptional design study of a sodium-cooled fast reactor in the FaCT (Fast Reactor Cycle Technology Development) Project. In the design study, the suppression of gas entrainment (GE) occurrences is considered as a key to achieve stable operations of the fast reactor. Therefore, the GE has been studied widely by experimental or analytical methods. In addition, the authors are developing a high-precision numerical simulation algorithm for gas-liquid two-phase flows to evaluate the GE in the fast reactor more efficiently than high-cost large-scale experiments.

In this study, numerical simulations were performed on 1) the GE behavior in a simple experiment, 2) the mechanisms of GE occurrences in a large-scale test and 3) the entrained flow rate in a basic experiment. From the results of 1) simulation, it was confirmed that the developed simulation algorithm could reproduce the GE induced by vortical flows. Similarly, 2) and 3) simulations showed that the GE in the fast reactor and the entrained flow rate could be evaluated by the numerical simulations.

Keywords: Numerical Simulation, Gas Entrainment, Free Surface Vortex,
Sodium-cooled Fast Reactor

* NESI, Inc

目次

1. 序論-----	1
2. 高精度気液二相流数値解析コードの概要-----	3
2. 1 解析モデル-----	3
2. 2 解析環境-----	3
3. ガス巻き込み基礎実験を対象とした数値解析 -----	5
3. 1 解析体系・解析条件 -----	5
3. 2 解析結果-----	5
3. 2. 1 初期状態の流れ場-----	5
3. 2. 2 ガス巻き込み発生挙動-----	6
3. 3 実験結果との比較 -----	7
4. 実規模ガス巻き込み現象の数値解析-----	9
4. 1 1/1.8 縮尺上部プレナム液面部分モデル水流動試験装置-----	9
4. 2 解析条件-----	9
4. 2. 1 解析メッシュ -----	9
4. 2. 2 境界条件-----	10
4. 3 解析結果-----	10
4. 3. 1 全体流況-----	10
4. 3. 2 ガス巻き込み発生状況-----	10
4. 3. 3 計算速度-----	13
5. ガス巻き込み量計測基礎実験を対象とした数値解析-----	14
5. 1 ガス巻き込み量計測基礎実験装置-----	14
5. 2 解析結果-----	14
5. 2. 1 液位 0.12m における流量パラメータ解析-----	14
5. 2. 2 液位 0.06m におけるガス巻き込み現象再現解析-----	15
5. 3 ガス巻き込み量の評価 -----	15
6. 結論-----	17
参考文献-----	18

Contents

1 . Introduction -----	1
2 . Description of High-precision Numerical Simulation Algorithm -----	3
2 . 1 Numerical Models -----	3
2 . 2 Computational Resources -----	3
3 . Numerical Simulation of Simple Gas Entrainment Experiment -----	5
3 . 1 Simulation Conditions -----	5
3 . 2 Simulation Results -----	5
3 . 2 . 1 Flow Pattern before Gas Entrainment Occurrences -----	5
3 . 2 . 2 Influence of Suction Velocity on Gas Entrainment Behaviors -----	6
3 . 3 Comparison of Simulation Results with Experimental Data -----	7
4 . Numerical Simulation of Gas Entrainment in Large-scale Test -----	9
4 . 1 Water Experiment in 1/1.8-scaled Partial Model of Upper Plenum -----	9
4 . 2 Simulation Conditions -----	9
4 . 2 . 1 Simulation Mesh -----	9
4 . 2 . 2 Boundary Conditions -----	10
4 . 3 Simulation Results -----	10
4 . 3 . 1 Macroscopic Flow Pattern -----	10
4 . 3 . 2 Several Mechanisms of Gas Entrainment Occurrences -----	10
4 . 3 . 3 Consideration on Simulation Time -----	13
5 . Numerical Simulation of Basic Experiment on Entrained Gas Flow Rate -----	14
5 . 1 Experimental Apparatus on Measuring Entrained Gas Flow Rate -----	14
5 . 2 Simulation Results -----	14
5 . 2 . 1 Parameter Study on Inlet Flow Rate -----	14
5 . 2 . 2 Numerical Simulation of Gas Entrainment Behavior -----	15
5 . 3 Evaluation of Entrained Gas Flow Rate -----	15
6 . Conclusion -----	17
References -----	18

表リスト

表 4.1 実規模ガス巻込み現象解析における流速境界の流速条件	20
表 4.2 実規模ガス巻込み現象解析における作動流体の物性値	20
表 5.1 液位 0.12m 条件における流量に対する入口流速及び出口流速の条件	21
表 5.2 液位 0.06m 条件における流量に対する入口流速及び出口流速の条件	21
表 5.3 ガス巻込み量計測基礎実験条件とガス巻込み量計測結果	21

図リスト

図 3.1 ガス巻込み基礎実験装置	22
図 3.2 渦発生器及び吸込み配管の配置	22
図 3.3 解析体系・解析メッシュ	23
図 3.4 構造物の配置	24
図 3.5 境界条件	24
図 3.6 吸込み流速無しの状態における発達した流れ場	25
図 3.7 吸込み流速 0.5m/s における自由液面形状 (upper view)	26
図 3.8 吸込み流速 0.5m/s における自由液面形状 (side view)	27
図 3.9 吸込み流速 0.5m/s における水平方向流速分布 (upper view)	28
図 3.10 吸込み流速 0.5m/s における垂直方向流速分布 (side view)	29
図 3.11 吸込み流速 0.5m/s における自由液面形状と下降流速分布	30
図 3.12 吸込み流速 2.0m/s における自由液面形状 (upper view)	31
図 3.13 吸込み流速 2.0m/s における自由液面形状 (side view)	32
図 3.14 吸込み流速 2.0m/s における水平方向流速分布 (upper view)	33
図 3.15 吸込み流速 2.0m/s における垂直方向流速分布 (side view)	34
図 3.16 吸込み流速 2.0m/s における自由液面形状と下降流速分布	35
図 3.17 吸込み流速 3.0m/s における自由液面形状 (upper view)	36
図 3.18 吸込み流速 3.0m/s における自由液面形状 (side view)	37
図 3.19 吸込み流速 3.0m/s における水平方向流速分布 (upper view)	38
図 3.20 吸込み流速 3.0m/s における垂直方向流速分布 (side view)	39
図 3.21 吸込み流速 3.0m/s における自由液面形状と下降流速分布	40
図 3.22 吸込み流速 4.0m/s における自由液面形状 (upper view)	41
図 3.23 吸込み流速 4.0m/s における自由液面形状 (side view)	42
図 3.24 吸込み流速 4.0m/s における水平方向流速分布 (upper view)	43
図 3.25 吸込み流速 4.0m/s における垂直方向流速分布 (side view)	44
図 3.26 ガスコア形状の比較	45

図 3.27 吸込み配管中央垂直断面における速度ベクトル	46
図 3.28 吸込み配管中央垂直断面における下降流速分布	47
図 4.1 1/1.8 縮尺液面部分モデル水流動試験装置	48
図 4.2 1/1.8 スケール液面部分モデル水流動試験装置の寸法	48
図 4.3 解析メッシュ（液位 0.20m、1,016,672 セル）	49
図 4.4 解析メッシュの領域分割（64 分割）	50
図 4.5 境界条件	51
図 4.6 気液界面の初期位置（液位 0.20m）	51
図 4.7 自由液面形状の時間変化	52
図 4.8 液位 0.18mにおける水平方向流速分布の時間変化	53
図 4.9 液位 0.18mにおける垂直方向流速分布の時間変化	54
図 4.10 ガス巻込みの発生判定	55
図 4.11 ガス巻込みの発生位置（40～100sec）	55
図 4.12 ガス巻込みの発生領域（40～100sec）	56
図 4.13 代表的なガス巻込み発生位置と時間平均流況（55-65sec）	56
図 4.14 領域 1（C/L1-H/L 間）におけるガス巻込み挙動	57
図 4.15 領域 2（C/L1-H/L 間 R/V 近傍）におけるガス巻込み挙動	58
図 4.16 領域 3（H/L-R/V 間）におけるガス巻込み挙動	59
図 4.17 領域 4（H/L 前縁内側）におけるガス巻込み挙動	60
図 4.18 領域 5（H/L 前縁 C/L1-H/L 間）におけるガス巻込み挙動	61
図 5.1 ガス巻込み量計測基礎実験装置	62
図 5.2 ガス巻込み量計測実験装置の渦発生装置の概要	62
図 5.3 液位 0.12m 条件の解析メッシュ（283,388 セル）	63
図 5.4 液位 0.12mにおけるガスコア形状と長さ	64
図 5.5 液位 0.12m、流量 4.0ℓ/min における気泡状ガス巻込みの発生	65
図 5.6 液位 0.06m 条件におけるガスコア成長挙動	66
図 5.7 気柱状ガス巻込み発生時の円筒容器中央断面の物理量分布（液位 0.06m）	67
図 5.8 出口平均流速とガス巻込み流量の関係（実験結果と解析結果の比較）	68
図 5.9 ガス巻込み流量の時間変化	68
図 5.10 吸込み配管出口における各相の流出流速	69
図 5.11 吸込み配管出口における各相の断面積	69

1. 序論

日本原子力研究開発機構（JAEA）は、FBR サイクル実用化研究開発（FaCT : Fast Reactor Cycle Technology Development Project）¹⁾において Na 冷却大型高速炉（JSFR）の設計研究を実施している。本設計研究においては、JSFR の経済性・信頼性・安全性を向上させるために様々な革新技術が導入される予定であり、その 1 つとして原子炉容器のコンパクト化が検討されている。このため、炉容器上部の燃料交換システムを簡素化し、炉心上部機構（UIS）の一部に燃料交換機（FHM）アームが通過するための切り込みを有する構造を採用することで炉容器径の縮小が図られた。ただし、高速増殖原型炉「もんじゅ」の約 7 倍の熱出力となる JSFR において炉容器径を高々 1.4 倍とする設計を指向しているため、炉出力に対し相対的に炉容器のナトリウム・インベントリが小さくなっており、炉容器内冷却材流れが高速化する。高速の冷却材流れによって、炉容器内においてサーマルストライピングやキャビテーションを伴う液中渦が発生し、更には、上部プレナムの Na 自由液面において Ar カバーガスの巻込みを生じる懸念がある。巻込まれたガスが一次冷却系に混入すると、炉心における出力擾乱や中間熱交換器（IHX）における伝熱性能低下を引き起こす可能性があることから、ガス巻込み発生を設計上許容できる値まで抑制する必要があるが、複雑形状を有する上部プレナムにおけるガス巻込み発生を正確に予測することは困難である。既往研究²⁾では、体系形状を忠実に模擬した実規模試験を実施することで局所物理量の測定ならびガス巻込み発生条件の予測を行っているが、大規模試験は非常に高コストであるため、JSFR の設計研究の観点からは実規模試験を代替する手法として数値解析を用いたガス巻込み評価手法の構築が望まれている。

著者らは、自由液面からのガス巻込みを数値解析によって評価できる手法の構築を目的とし、上部プレナム内の複雑体系形状を正確に再現できる非構造格子系において気液界面の大変形や気泡離脱を高精度に取扱うことのできる気液二相流モデルを採用した、非構造格子系高精度気液二相流数値解析コード（NERGAL : NumERical Gas Entrainment AnaLysis）の開発・整備を行っている³⁾。本研究では、NERGAL コードの検証と適用性評価を目的として、以下の数値解析を実施する。

1) ガス巻込み基礎実験⁴⁾を対象とした数値解析

NERGAL コードによる高速炉ガス巻込み現象の再現性評価を目的として、高速炉ガス巻込み現象をモデル化した基礎実験を対象とした数値解析を実施し、実験データとの比較・検討を行う。

2) 実規模ガス巻込み現象の数値解析

実規模ガス巻込み現象に対する NERGAL コードの適用性を確認するため、炉上部構造の 1/4 セクターをモデル化した 1/1.8 縮尺液面部分モデル水流動試験装置⁵⁻⁷⁾を対象とした数値

解析を実施する。

3) ガス巻き込み量計測基礎実験⁸⁾を対象とした数値解析

ガス巻き込み量の定量評価に対する NERGAL コードの適用性を検討するため、信州大学との共同研究にて実施しているガス巻き込み量計測基礎実験を対象とした数値解析を実施し、ガス巻き込み量予測精度を確認する。

2. 高精度気液二相流数値解析コードの概要

2. 1 解析モデル

NERGAL コードは、基礎方程式である積分型 Navier -Stokes (N-S) 方程式を、コロケート型変数配置の非構造格子系において有限体積法に基づいて離散化している。その際、N-S 方程式の移流項には 2 次精度風上差分法、拡散項には 2 次精度中心差分法、時間項には 1 次精度 Euler 陽解法を適用し、圧力-速度カップリング法には SMAC 法⁸⁾を用いている。また、流体率（各セルにおいて液相が占める体積割合）の輸送（界面の追跡）には、構造格子系における高精度 VOF (Volume-of-fluid) 法の 1 つである PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation) 法⁹⁾を用いている。PLIC 法は各セルにおける界面（2 次元では直線、3 次元では平面）の勾配を考慮した流体率輸送を行う手法であり、著者らは非構造格子系に PLIC 法を拡張することで高精度な流体率輸送計算を実現している¹⁰⁾。本手法では、まず流体率分布から各セルにおける界面法線ベクトルを計算し、次に任意形状のセルにおいて界面の位置を再構築し、その後各相の体積保存性を完全に満たすように改良を行った Multi-Dimension 法によって界面位置を考慮しながら流体率の輸送を行う。また、非構造格子系のコロケート型変数配置に基づく気液二相流の数値解析においては、従来の定式化では圧力と表面張力の釣合いが適切に計算されず気液界面近傍において偽流速（非物理的挙動）を生じるため、圧力計算式の改良を行うことで非物理的挙動を抑制する手法を開発した¹¹⁾。気液界面近傍での運動量輸送についても、物理的に適切な定式化を行って従来手法が導く非物理的挙動の抑制に成功している。

JSFR を対象とした大規模数値解析(数百万セル～)を現実的な解析時間で実行するため、NERGAL コードの高速化として行列解法の改良と並列化を実施した。行列解法の改良においては、商用行列解法 SMS-AMG¹²⁾、反復解法ライブラリ Lis¹³⁾、並列有限要素法解析システム GeoFEM¹⁴⁾について比較・検討を実施し、NERGAL コードとの親和性や整備性、計算性能などを総合的に判断した結果、シングル PE 計算においては SMS-AMG を、並列計算においては GeoFEM の行列解法 (ILU-BiCGSTAB 法) を導入した。NERGAL コードの並列化は MPI (Message Passing Interface) を用いて実施し、64PE を用いた評価においても高い並列化効率 (0.6) を得ている。これらの高速化によって、将来的に JSFR 解析が実行可能であるという見通しを得ている。

2. 2 解析環境

本研究における数値解析は、JAEA 大洗研究開発センター設置の富士通 UNIX サーバ PRIMEPOWER HPC2500 (HPC2500)および Dell Precision PWS690 (CPU : Intel Xeon CPU X5365) を用いて実施した。HPC2500 は 1 ノード 128CPU、512GB メモリで構成される SMP (対照型マルチプロセッサ : Symmetric Multi-Processor) マシンであり、1 ノードあたりの全プロセッサがメモリバスを経由してメモリに接続されており、(1 ノードの) 全てのプロセ

ッサでメモリを共有し、これらを高速光インターコネクトで接続した 3 ノードによって構成される並列計算機システムである。4 章では HPC2500 を用いた並列計算を実施し、3 章および 5 章では Dell Precision PWS690 (行列解法: SMS-AMG) を用いた数値解析を実施する。

3. ガス巻込み基礎実験を対象とした数値解析

3. 1 解析体系・解析条件

東京大学にて実施されたガス巻込み基礎実験は、ガス巻込みの局所的なパラメータを調べることを目的とし、各種計測や数値解析との比較・評価がし易いような体系において実施された。図 3.1 に実験体系、図 3.2 に渦発生器（角柱）及び吸込み配管の配置をそれぞれ示す。実験装置は、作動流体（水）が循環する矩形の回流水槽と、その流路中に設置された吸込み管および渦発生器（角柱）から成り、角柱後流の吸込み管において一定量の水を吸引することでガス巻込み発生を促している。即ち、渦発生器によって生じる後流渦（くぼみ渦）が吸込み配管における吸込みによる下降流と干渉することによってガス巻込みが生じる。実験ではガス巻込みの発生メカニズムを評価するため、一連の挙動が詳細な多次元計測装置によって測定されている。

図 3.3 および 3.4 に、解析体系・解析メッシュおよび渦発生器や吸込み配管など構造物の配置を示す。図 3.3(a)は解析体系全体外観の解析メッシュ、図 3.3(b)は渦発生器及び吸込み配管など主要な構造物上の解析メッシュを示している。渦発生器や吸込み配管などの構造物から出口までの距離が短い場合、後流渦が十分に減衰することなく出口圧力境界に到達し逆流を生じるため計算が不安定化する。そこで、本研究では装置の試験領域全体（整流板間、800mm）をモデル化し、構造物の後流渦が出口境界までに十分減衰するようにした。また、解析メッシュ分割においては、解析領域全体、特に構造物後方から出口に向けて比較的粗い格子を適用することによってセル数を抑制するとともに、吸込み配管近傍には約 1.0mm、渦発生器近傍には 2.0～3.0mm 程度のサイズの詳細セルを配置することにより、ガス巻込み現象再現性の向上を図った。総セル数は 514,920 である。

作動流体の物性値は、気相を室温の空気（密度： 1.225kg/m^3 、粘性係数： $1.7894 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）、液相を室温の水（密度： 998.2kg/m^3 、粘性係数： $1.003 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）であり、両者間の表面張力は 0.0735N/m である。時間刻みは $5.0 \times 10^{-4}\text{sec}$ 程度とし、まず、吸込み流速を与えない状態で十分に発達した流れ場を形成し、その状態（0.0sec）から吸込み流速を与えてガス巻込み挙動の観察を行う。液位は試験条件と同様に 0.15m である。図 3.5 に境界条件を示す。液相入口は流速一定境界（0.1m/s）とし、液相出口は静水圧分布の圧力境界、体系上端は固定圧力境界（0.0Pa）とする。その他、吸込み配管や渦発生器、底面、壁面などの構造物表面には Non-Slip 条件を課す。

3. 2 解析結果

3. 2. 1 初期状態の流れ場

図 3.6 に、吸込み流れが無い状態で形成された流れ場における、自由液面形状、自由液面下 0.01m の水平断面における水平方向流速分布、体系中央垂直断面における垂直方向流速分布、自由液面下 0.01m の水平断面における速度勾配ベクトルの第二不変量分布を示す。ここで、自由液面は流体率 0.5 の等値面として表示している。自由液面は渦発生器の周流方向後方で変動して

おり、くぼみの浅い渦の放出や波立ちが生じ、渦発生器から遠ざかるに連れてもとの平らな液面形状へと落ち着いている。水平方向流速分布より、渦発生器の左右から渦が放出され下流へ流れていることが分かる。この際、渦発生器の左右の流路幅が異なることや後方の水中に吸込み配管があるため、左右非対称な渦流れとなっている。渦は下流へ流されながら減衰し、出口近傍ではほとんど渦が見られなくなっている。速度勾配第二不変量は、ガス巻き込み発生評価¹⁷⁾において渦検出の判定に用いられており、値が負になる領域が渦領域を表す。解析結果の速度第二不変量は解析領域全体では概ねゼロよりも大きい、渦発生器や吸込み配管の近傍に負の点が散在しており、自由液面や流速分布と併せてみると、渦がある位置と一致している。速度第二不変量の分布についても渦発生器周辺では比較的変動が大きいものの、下流へ流れて行くに従って減衰している。

3. 2. 2 ガス巻き込み発生挙動

ガス巻き込みを誘起する吸込み流速の影響を評価するため、試験条件(4.0m/s)および 0.5, 2.0, 3.0m/s の吸込み流速を設定して数値解析を行い、くぼみ渦挙動及びガス巻き込み発生挙動を調査する。

吸込み流速 0.5m/s

吸込み流速 0.5m/s における自由液面形状を図 3.7(Upper view)及び 3.8(Side view)、液面下 0.01mの水平断面における水平方向流速分布を図 3.9、体系中央垂直断面における垂直方向流速分布を図 3.10、体系中央垂直断面を図 3.11 にそれぞれ示す。各図では吸込みを開始してから 1.4sec から 2.4sec までを 0.2sec 間隔で表示している。角柱後方より放出された渦が吸込み配管の直上付近にあり、自由液面にわずかなくぼみが生じている。このくぼみ渦は浅く(数 mm 程度)、吸込み配管を通り過ぎるとすぐに減衰して消滅する。垂直方向流速分布から、吸込み流速(負の垂直方向流速)は配管入口近傍にのみ分布し、自由液面やくぼみ渦にほとんど影響を与えていないことが分かる。このことは、図 3.11 に示す自由液面(青)と吸込み配管の垂直方向流速の等値面(橙: -1.0m/s、赤: -2.0m/s)からも明らかである。

吸込み流速 2.0m/s

吸込み流速 2.0m/s における自由液面形状(Upper view および Side view)、液面下 0.01mの水平断面における水平方向流速分布、体系中央垂直断面における垂直方向流速分布、自由液面と吸込み配管の垂直方向流速の等値面、を図 3.12~3.16 に示す。角柱後方で放出された渦は吸込み配管の直上付近にあり、自由液面形状を見ると吸込み流速 0.5m/s と比較して明確なくぼみが表れている。くぼみ渦の深さは 10~20mm 程度であり、吸込み配管近傍を成長しながら通過し、吸込み配管から離れると減衰して消滅する。垂直方向流速分布から、渦の成長中はその渦中心では下降流速成分が支配的だが、減衰が始まると液面が押し上げられるため上昇流に転じる。また、吸込み流速は配管入口から自由液面付近まで分布し、くぼみ渦が成長するとき吸込み流速が渦まで繋がっており、吸込み流速がくぼみ渦と干渉することで渦が成長していることが分かる。即ち、吸込み

流速 0.5m/s の場合と比較して吸込み流速が増加したことにより、くぼみ渦を吸込み配管へ引き込む作用が強くなったため吸込み流れとくぼみ渦の干渉が生じている。

吸込み流速 3.0m/s

吸込み流速 3.0m/s における自由液面形状 (Upper view および Side view)、液面下 0.01m の水平断面における水平方向流速分布、体系中央垂直断面における垂直方向流速分布、自由液面と吸込み配管の垂直方向流速の等値面、を図 3.17~3.21 に示す。この場合も、角柱後方で放出された渦は吸込み配管の直上付近に存在し、それに伴って自由液面がくぼんでいる。このくぼみ渦の深さは 30mm 程度であり、吸込み配管近傍を成長しながら通過し、その後減衰して消滅する傾向は同じであるが、吸込み流速 2.0m/s の場合よりもくぼみ渦が成長するため、吸込み配管入口近傍までガスコアが伸長される。各流速分布から、渦の成長中は渦中心では水平方向の旋回流速と下降流速成分が発達し、減衰時には旋回流速は減少し、窪んだ液面を押し上げるため上昇流速が生じている。吸込み流速は配管入口から自由液面付近まで分布しており、くぼみ渦と干渉することでその成長を促している。

吸込み流速 4.0m/s

吸込み流速 0.5~3.0m/s の数値解析を行った結果、NERGAL コードによってくぼみ渦の成長挙動を再現できることが確認されたため、試験条件と同じ吸込み流速 4.0m/s における数値解析を実施し、ガス巻き込み発生挙動の評価を行う。解析結果の自由液面形状 (Upper view および Side view)、液面下 0.01m の水平断面における水平方向流速分布、体系中央垂直断面における垂直方向流速分布、を図 3.22~3.25 に示す。角柱後方に発生したくぼみ渦は吸込み配管を横切る方向に移動し、吸込み配管の直上付近において吸込み口に向かって急激に成長し、それに伴ってガスコアが吸込み口に到達してガス巻き込みが発生する。その後、くぼみ渦が吸込み配管近傍の領域を通過するとガスコアが短くなり、くぼみ渦は減衰しながら消滅していく。水平方向流速分布より、渦と吸込み配管入口近傍に比較的速い流速が生じ、ガス巻き込みが生じた後の渦減衰時に渦の近くに低流速域が生じていることが分かる。また、渦及び吸込み配管近傍で吸込み流れが顕著であり、自由液面近傍では渦中心が最も吸込み流速が大きくなっている。本解析結果から、くぼみ渦の発生からガス巻き込みに至る過程とその後の減衰、消滅までの一連の挙動を NERGAL コードで再現できることを確認した。

3. 3 実験結果との比較

ガス巻き込み基礎実験と数値解析 (吸込み流速 4.0m/s) の比較として、図 3.26 にガスコア形状を、図 3.27 に吸込み配管近傍の垂直断面における速度ベクトル、図 3.28 に吸込み配管近傍の渦中心を含む垂直断面における下降流速分布を示す。図 3.27 および 3.28 の基礎実験の図中において吸込み配管入口が黒くマスクされているのは、入口近傍の流速が非常に大きく計測誤差が大きいためである。図 3.26 において、基礎実験、数値解析ともに、くぼみ

渦のガスコアが吸込み配管の後方に発生しており、ガスコア形状も良く似ている。図 3.27 において、基礎実験では、液面がくぼみ始めてから吸込み配管直上付近でガスコアが成長して吸込み配管に向かって伸びていく様子が観察されている。数値解析結果でも同様に、液面がくぼんでから、吸込み配管直上付近においてガスコアが成長しており、ガスコアの成長過程が両者で良く一致している。また、ガスコア形状に関しても、吸込み口に向かって伸びていくに従い急激にガスコア径が小さくなっていく様子が数値解析によって再現されている。図 3.28 において、基礎実験におけるガス巻き込み発生時には吸込み配管入口近傍の比較的大きな下降流速成分がガスコア先端に向かって成長し、ガスコアが下降流速と干渉して吸込み配管入口に向かって引き込まれて発達するという挙動が確認されている。数値解析結果においてもこの挙動が再現されており、これらの比較結果から、NERGAL コードを用いた数値解析によって、基礎実験におけるガス巻き込み発生メカニズムを再現できることが分かった。

4. 実規模ガス巻込み現象の数値解析

4. 1 1/1.8 縮尺上部プレナム液面部分モデル水流動試験装置

JSFR では、UIS 切込み部周辺の D/P 間隙部から上昇した流れが吸込み配管 (H/L) 周辺の D/P 間隙部より下降する際、自由液面から巻込まれた気泡を D/P 下へ連行し、1 次冷却系統に気泡が混入することが懸念されている。1/1.8 スケール上部プレナム液面部分モデル水流動試験装置は、JSFR におけるガス巻込み現象発生機構を調査するため上部プレナムを実規模で模擬した装置であり、D/P より上方、H/L を中心とし、2 本のコールドレグ配管 (C/L) を含めた 1/4 (90°) セクター領域がモデル化されている。本試験装置では、UIS 切り込み側から配管群 (H/L 及び C/L) へ向かう横流れ、D/P の間の間隙部での吸込み流れを模擬することにより、自由液面におけるガス巻込みの発生から D/P 下部への気泡連行までの一連の挙動が再現可能となっている。図 4.1 に 1/1.8 縮尺上部プレナム液面部分モデル水流動試験装置の概観、図 4.2 に試験装置の寸法を示す。

4. 2 解析条件

4. 2. 1 解析メッシュ

図 4.3 に解析メッシュを示す。本研究では、水平流路入口から H/L を中心とした 1/4 セクターの試験領域（水平出口流路まで）をモデル化している。試験において定格条件の液位 (0.805m) ではガス巻込みが発生しないことを確認しているため、本研究では低液位 (0.2 m) 条件において数値解析を実施した。また、気相領域の高さは、1/4 セクターの試験領域が 0.2m、水平流路入口及び水平流路出口を 0.1m とした。気相領域の高さが 2 段階となっているのは、試験装置において大気開放部分に相当する試験領域の上端面に配置する圧力境界を液相の出入口境界から遠ざけ、自由液面の変動に伴う気相領域の速度場及び圧力場の影響を緩和して計算の安定化を図るためである。解析メッシュサイズは、渦が発生する配管周りの領域（水平方向）および液面近傍（垂直方向）において約 8mm、その他の領域において 20～30mm 程度となっており、全セル数は 1,016,672 である。

図 4.4 に領域分割した解析メッシュを示す。本研究で用いた領域分割ツールは、文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクト¹⁴⁾において開発された HEC ミドルウェアの領域分割ユーティリティの 1 つである METIS¹⁵⁾である。METIS は複雑形状でも良好な領域分割が可能なことから、世界中で広く利用されているオープンソースのフリーウェア（ミネソタ大学にて開発）であり、グラフ理論によって、各部分領域を構成するエッジ（2 次元要素ならば辺、3 次元要素ならば面）の数が最小となるように要素を均等数に領域分割するというツールである。領域分割数 (64) は、領域分割に伴う Over-lap セル数が各部分領域セル数の 2 割以下となるように定めた。

4. 2. 2 境界条件

図 4.5 に境界条件を示す。また、流速境界の流速値（境界面の法線方向、体系への流入を正とする）を表 4.1 に示す。流出流入を伴う境界において、液相の入口出口及びギャップ間隙の境界には一様な流速条件（液相、固定流速）を課し、液相入口境界流速は実機流速（定格条件）の約 8 倍、ギャップ境界流速は実機流速の約 4 倍を与えた。また、試験領域の体系上端面には、圧力条件（気相、0.0Pa）を課した。この他、ギャップ間隙部側壁面は境界流速が D/P 上部まで到達するように Free-slip、他の構造物表面は Non-slip とした。また、出口境界では、体系内の流入流出量から出口での流出量を算定し、流速に換算して固定流速条件を課している。表 4.2 に作動流体の物性を示す。初期状態は図 4.6 に示すように液相を 0.2m で水平に満たした状態とし、この状態（0.0sec）から 100sec までの数値解析を実施する。

4. 3 解析結果

4. 3. 1 全体流況

十分に流れが発達した状態（40sec）以降、5 秒ごとの計算結果について、図 4.7 に自由液面形状、図 4.8 に D/P から高さ 0.18m（初期液位に対して液面下 0.02m）の水平断面における水平方向流速分布、図 4.9 に D/P から高さ 0.18m の水平断面における垂直方向流速分布をそれぞれ示す。自由液面形状は全体的に平坦であるが、配管にて主流が衝突する面で液面の盛り上がりがある。流況を見ると、入口方向から流入した流れが C/L1 と衝突して C/L1-R/V 間と C/L1 内側の流れに分岐し、C/L1 と H/L 後方に渦を形成していることが分かる。また、C/L2 に衝突した主流は出口方向と R/V 方向に分岐し、R/V 方向に向かった流れは R/V と衝突し、C/L2 を出口方向へ回り込む流れと H/L と R/V 間の方向へ向かう流れに分岐している。垂直方向流速では各配管において、主流が衝突する面で上昇流、その外側に下降流が形成されている。C/L1 では比較的緩い流速が配管正面の広い面に衝突するため、上昇流は比較的広範囲で生じ、自由液面の盛り上がりが他の配管と比較して顕著であるのもこのためと考えられる。一方、H/L では主流の一部が狭い面に斜めに衝突しているため液面の盛り上がりは少ない。また、C/L2 は H/L に比べて主流が正面から比較的広い面に衝突しており、大きな上昇流が生じている。各配管の上昇流外側に見られる下降流は、配管下部への潜り込みであり、H/L では顕著な下降流が見られているが、C/L1 と C/L2 では認められない。H/L 周りでは D/P 間隙からの吸込みが大きいいため、衝突した流れの一部は配管下方へも流れるが、C/L1 と C/L2 の衝突面側に位置する D/P 間隙の吸込みが小さいため、衝突した流れが配管を回り込むためであると考えられる。

4. 3. 2 ガス巻込み発生状況

試験においては、目視によって気泡が液中へ離脱した場合をガス巻込み発生と判定している。本研究でもこの方針に則ることとし、図 4.10 に示すように流体率 0.5~0.85 の等値面

を複数表示して視認性を高めた上で、気泡が液中へと巻込まれた時点をガス巻込み発生と判定した。図 4.11 に 40～100sec の 60 秒間におけるガス巻込み発生位置を示す。ガス巻込みは主に H/L 周りで発生しており、特に主流が H/L に衝突する面に発生位置が集中していた。観察した 60 秒間では 15 回のガス巻込みを確認した。

観察されたガス巻込みは発生場所によって発生メカニズムが異なっているため、図 4.12 に示すように発生メカニズムによって領域を分類した。また、各領域で発生したガス巻込みの発生メカニズムを検討するため、それぞれの領域における代表的なガス巻込みを抽出した。抽出した代表的なガス巻込みの発生位置を図 4.13 に 55-65sec の間で時間平均した流況とともに示す。

領域 1 におけるガス巻込み

図 4.14 に C/L1 から見下ろす視点で自由液面と 3 次元流速ベクトルを示す。ベクトルの色は垂直方向流速の大きさを表す。領域 1 におけるガス巻込みは、C/L1 の内側側面で発生した波が C/L1 後方へ回りこむ際に H/L へ向かう主流によって引っ張られて発生している。C/L1 側面の波は液面上昇をさせる上向きの流れと液面を下降させくぼみを作る下向きの流れを持っており、発達しながら C/L1 後方に回り込む際に下降成分が H/L 方向に伸び、ガス巻込みが発生している。このとき、水平方向流速の大きな領域が H/L 方向へと移動しており、波前方のくぼみの一部を主流が液面下へ引き込むことでくぼみの一部が気泡として巻込まれる。流体率 0.85 の等値面による見かけの気泡径は 0.01m 程度である。

領域 2 におけるガス巻込み

図 4.15 に R/V 側から見た自由液面形状を示す。領域 2 におけるガス巻込みは、C/L1-R/V 間を抜けてきた流れが R/V に沿って R/V-H/L 間方向へ流れ、流れの一部が C/L1 後方の C/L1-H/L 間の開けた領域で H/L から C/L1 への流れと対向したせん断流を形成することで生じる。即ち、せん断流の境界に液面変形を伴う渦が発生し、その渦が発達することで気泡が液面下へ巻込まれる。このとき、流体率 0.85 の等値面による見かけの気泡径は 0.018m 程度である。

領域 3 におけるガス巻込み

図 4.16 に、流体率 0.85 の等値面、高さ 0.18m の水平断面流速分布（2 次元ベクトル）、渦発生位置の垂直断面における垂直方向流速分布（カラーコンター、- 0.1m/s 以下の領域のみを表示）をそれぞれ示す。領域 3 におけるガス巻込みは、H/L-R/V 間の後方（C/L2 側）で生じており、他のガス巻込みと異なり巻込まれた気泡が水平方向においてほぼ一定位置に留まるのが特徴である。C/L1 で分岐し R/V に沿った流れは H/L-R/V 間を通過するものの C/L2 まで伸びることなく、H/L 後方で減衰して R/V 側の H/L 側面に渦を形成する。また、C/L2 に衝突した主流は出口方向と R/V 方向へ分岐し、R/V 方向への流れは R/V と衝突する

と R/V-C/L2 間を出口方向へ抜けようとする流れと、H/L 方向へ向かう流れとなり、H/L 方向へ向かった流れが、H/L-R/V 間を抜けてくる流れを押し留め、H/L-R/V における渦の形成を助長している。この H/L-R/V 間の H/L 側面に形成された渦の発達に伴い渦発生位置の液面近傍に下降流速が生じ、液面のくぼみ深さが増すとガス巻き込みが発生している。流体率 0.85 の等値面による見かけの気泡径は 0.014m 程度である。

領域 4 におけるガス巻き込み

図 4.17 に、流体率 0.85 の等値面と主流が H/L に衝突する面近傍に始点を設定した流線を示す。領域 4 におけるガス巻き込みは、主流が衝突する H/L の面から時計回り方向へ移動した C/L1 と向い合う側面で生じている。H/L に衝突した主流は液面近傍の流れが壁面を這い上がることで液面の盛り上がり、H/L よりもやや手前では H/L 下方へ潜り込む流れによって液面の沈み込みが生じている。この傾向は強度や位置に多少の揺らぎはあるものの H/L と主流が衝突する面で定常的に形成されている。衝突した流れは H/L を回り込む流れとなるが、その際、H/L 壁面での上昇流とその手前で潜り込む下降流によって、H/L の液面下には縦渦が形成される。図 4.17 において、縦渦は垂直方向流速分布（カラーコンター）で H/L の C/L1 側面の上昇（赤）と下降（青）が隣り合っている領域で発生しており、自由液面と合わせて見ると下降流れ領域で自由液面のくぼみが生じている。ガス巻き込みはこの縦渦によって発生しており、気泡は液中を R/V 方向へ移動する。流体率 0.85 による見かけの気泡径は 0.01m 程度である。

領域 5 におけるガス巻き込み

図 4.18 に、流体率 0.85 の等値面、水平方向流速分布（2次元ベクトル）、垂直方向流速分布（カラーコンター）を示す。領域 5 におけるガス巻き込みは、領域 4 におけるガス巻き込みと同様に主流が H/L に衝突する面の近傍で発生しているが、発生メカニズムは異なる。領域 5 におけるガス巻き込みは、H/L 下方へ潜り込む下降流の強度が増すことで生じている。液面近傍の垂直方向流速分布を比較すると、領域 4 においては下降流領域が H/L を回り込むように横に広がっていたのに対し、領域 5 においては幅が狭く主流方向に厚みを増した領域が形成されている。これは C/L1 内側部分から周期的に放出される渦によって C/L1 の内側領域を通過する主流の流路幅が一時的に狭くなって流速が増加するため、主流が比較的高流速で H/L に衝突するためである。領域 5 におけるガス巻き込みは C/L1 内側部分からの渦放出前後に発生しており、主流が H/L 衝突面からやや離れた場所で潜り込む際に液面のくぼみ深さが増加し、くぼみの一部が千切れてガス巻き込みに至っている。流体率 0.85 の等値面による見かけの気泡径は 0.01m 程度である。

ガス巻き込み現象の特徴

数値解析で観察されたガス巻き込みはほぼ全て H/L 近傍の領域で発生したが、巻き込み形態

には各発生領域における局所的な流れ場の影響により異なる特徴が見られた。ガス巻き込み評価の観点からは、一次冷却系への流入が懸念される液中下方へと引き込まれるガス巻き込み（領域 2、3、5）と、比較的液面近傍で留まるガス巻き込み（領域 1、4）に分けて整理できる。

液中下方へと引き込まれるガス巻き込みでは比較的大きな下降流速の発達が見られ、特に領域 3 および 5 では D/P 間隙における吸込み流れの影響を強く受けていた。このことから、液面近傍の下降流速が液面下の深いところまで発達して D/P 間隙の吸込み流れと結合すると、下降流速がさらに発達してガス巻き込みを誘起する可能性のあることが分かった。液面近傍で下降流速が発達する局所的な流れとしては、配管の後流渦や潜り込み流れが確認できており、これらの流れが吸込み流れを有する D/P 間隙近傍で発生した場合、ガス巻き込みの発生と冷却系統への侵入が懸念される。

一方、液面近傍に留まるガス巻き込みは、液面近傍の表層の流れによって引き起こされており、液面のくぼみを助長する下降流速分布は液面下の浅い領域での分布のみで、気泡が液中に一時的に巻き込まれるものの短時間で離脱していることから、ガス巻き込みが発生しても冷却系統への侵入はないと思われる。

4. 3. 3 計算速度

本研究では、1,016,672 セルの大規模解析における実時間 101.5 秒の計算に 1851 時間 40 分 46 秒（6666046 秒）の計算時間を要した（システムメンテナンスなどにより計算機システムの停止などハードウェア関係の停止時間は含まないが、1 ジョブの実行時間制限を超えた際のリスタートに要する時間や過渡データ出力のための時間を含む）。即ち、約 100 万セルの約 100 秒間の非定常解析に概ね 2.5 ヶ月の計算時間を要したことになる。解析規模が比較的大きいにも関わらず、非定常計算において自由液面の挙動を追跡してガス巻き込み発生を含む解析結果を得ることができたことから、並列化等による高速化は十分な性能を達成しており、流れ場やくぼみ渦などの諸現象に対する格子解像度をより高くした大規模な解析規模に対しても並列数（領域分割数）を増加させることで対応可能であると思われる。また、HPC2500 より高性能な計算機システムが JAEA にて 2010 年 4 月より運用されていることから、今後、NERGAL コードを JSFR のガス巻き込み評価に適用することも可能になると考える。

5. ガス巻き込み量計測基礎実験を対象とした数値解析

5. 1 ガス巻き込み量計測基礎実験装置

図 5.1 にガス巻き込み量計測基礎実験装置、図 5.2 にガス巻き込み量計測基礎実験装置の渦発生装置の概要をそれぞれ示す。本実験装置では、渦発生装置の円筒容器 (Cylindrical container) に法線方向に接続されたスリット (Inflow slit) からの流入と、容器底部の中央に接続された吸込み配管からの流出によって円筒容器内にくぼみ渦を発生させ、ガス巻き込み挙動の観察及び巻き込み量の計測を行う。ガス巻き込み量の計測としては、気泡量測定装置にて気泡を高速度カメラにより計測することで瞬時のガス巻き込み量を、また、気液分離装置に蓄積する気体量の時間変化から時間平均のガス巻き込み量を計測する。

図 5.3 に解析メッシュを示す。本研究では、試験装置の円筒容器及び流入スリット、吸込み配管をモデル化する。メッシュサイズは、円筒中心部付近の水平方向では吸込み配管直径 (8mm) を 20 分割した程度 ($\approx 0.4\text{mm}$) とし、鉛直方向はくぼみ渦や吸込み配管部分がある円筒容器中心の底面付近で格子寸法のアスペクトが概ね 1 となるように、容器底面及び気液界面近傍を 0.4mm 程度とし、他の領域については $0.4\sim 10.0\text{mm}$ とする。

試験装置上端が開放されているため、解析体系上端は圧力固定 (0.0Pa) とし、流入スリット前半部分上端は Free-slip 条件、その他壁面に相当する部分は Non-Slip 条件を課す。流入スリット入口及び吸込み配管出口は試験条件の流量から換算した流速一定境界とする。流量に対する流入流速、流出流速は表 5.1 (液位 0.12m) および表 5.2 (液位 0.06m) の通りである。作動流体は気相が空気 ($\rho_{\text{air}}: 1.225\text{kg/m}^3$ 、 $\mu_{\text{air}}: 1.7894 \times 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{s}$)、液相が水 ($\rho_{\text{water}}: 998.2\text{kg/m}^3$ 、 $\mu_{\text{water}}: 1.003 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$) であり、表面張力は 0.0735N/m とする。時間刻みは 0.1msec 程度 (解析の安定性を見ながら適宜調節) とする。

5. 2 解析結果

5. 2. 1 液位 0.12m における流量パラメータ解析

円筒容器底面からの液位 0.12m において、流量をパラメータとした数値解析を実施し、ガスコア形状やガス巻き込み形態への影響について調査する。図 5.4 に数値解析による流量毎のガスコア形状と長さを示す。ここで、自由液面は流体率 0.5 の等値面としている。ガスコアは流量増加に伴って長くなっており、流量 5.0l/min で 5.7cm まで成長している。流量 3.0 および 5.0l/min の条件におけるガスコア形状について実験結果と比較すると、両条件とも液面近傍の形状や太さなどガスコアの根元では良く一致しているものの、ガスコア長さは実験よりも短い。また、実験では、流量 3.0l/min においてガスコア先端の千切れによる気泡状のガス巻き込み、流量 4.0l/min 以上において気柱状のガス巻き込みが観察されている。解析結果では気柱状のガス巻き込みは確認できないが、流量 4.0l/min の条件における流体率 1.0 の等値面 (図 5.5) から分かる通り、気泡状のガス巻き込みは生じている。

5. 2. 2 液位 0.06mにおけるガス巻込み現象再現解析

低液位条件（0.06m）において、気柱状および気泡状ガス巻込み現象の再現性について調査する。

図 5.6 に、ガスコアが成長してガス巻込みに至る挙動を示す（流体率 0.5 の等値面を表示）。ただし、液面がくぼみ始める時刻を 0.0sec としている。ガスコアは約 1.8sec において吸込み配管入口付近まで到達し、先端がニードル状となる。その後、時間が経過するとガスコア先端が千切れて吸込み配管内に気泡として吸込まれ、ガス巻込みが発生する。更に時間が経過すると巻込まれる気泡が大きくなることで気泡状のガス巻込み量が増大し、次第にガスコアが吸込み配管出口にまで達する気柱状のガス巻込みとなる。

図 5.7 にガス巻込み時（2.7sec）の円筒容器中央断面における物理量分布（流体率、水平方向流速、垂直方向流速、圧力）を示す。流体率分布の図中には、液面の状態をわかりやすくするため流体率 0.5 の等値面によるガスコア形状を透過表示している。水平方向流速や垂直方向流速のピークは吸込み配管入口近傍に存在し、気柱状のガス巻込み発生によって吸込み配管中央部分を気相が占めているため、配管内の圧力がほぼ一様になっている。詳細に観察すると、配管内では管壁近傍に膜状に分布する液相の流速が大きく、管中央の気相は比較的低流速となっている。

5. 3 ガス巻込み量の評価

数値解析では、吸込み配管出口における物理量に基づき、ガス巻込み量とガス巻込み流量を以下の式により評価する。

$$V_{ge} = \sum_{i=1}^n S_i \cdot v_i \cdot \Delta t \cdot (1.0 - f_i) \quad (5.1)$$

$$R_{ge} = V_{ge} / \Delta t \quad (5.2)$$

ただし、 V_{ge} は 1 時間ステップあたりのガス巻込み量（ m^3 ）、 R_{ge} はガス巻込み流量（ m^3/s ）である。添字 i は吸込み配管出口における各セル境界（総数 n ）を表し、 S_i は出口に各セル境界の面積（ m^2 ）、 v_i は各セル境界からの流出流速（ m^2/s ）、 f_i は各セル境界における流体率を表す。また、 Δt は時間刻み（s）である。時刻 $t (= m\Delta t)$ までのガス巻込み総量（ V_{sum} ）とその間の時間平均ガス巻込み流量（ R_{ave} ）は以下の式により評価する。

$$V_{sum} = \sum_{m=1}^m V_{ge} \quad (5.3)$$

$$R_{ave} = V_{sum} / t \quad (5.4)$$

ガス巻込み流量の計測は約 1.2 秒間行った。図 5.8 に時間平均ガス巻込み流量について、実験結果（表 5.3）と計算結果を流入流量から出口面積を用いて換算した出口流速との関係を示す。数値解析によるガス巻込み流量は実験結果の外挿値と比較して 1.4 倍程大きい値となっている。図 5.9 にガス巻込み流量の時間推移、図 5.10 に吸込み配管出口において面積平均した各相の流出流速の時間変化、図 5.11 に吸込み配管出口における各相の断面積の時間変化をそれぞれ示す。各物理量は周期的で小さな振幅の変動と非周期的で大きな振幅の変動を伴って時間変化している。ガス巻込み量の時間変化は 0.3 秒までと 0.6 秒あたりで大きな振動が生じているが、あとは概ね一定で推移している。流出流速でも大きな振動の傾向はガス巻込み流量と同様の傾向を示し、気相流速の変動において顕著である。気相と液相の流速は気相流速の方が小さく約 0.8m/s、液相は約 1.4m/s となっている。吸込み配管出口における各相の断面積もガス巻込み量と同様に大きな振動が見られるが、時間経過と共に一定の面積に落ち着く傾向が見られる。

6. 結論

自由液面からのガス巻込みを評価できる数値解析手法の構築を目的として実施している高精度気液二相流数値解析コード開発の一環として、1) ガス巻込み現象の再現性検討、2) 大規模解析への適用性・実行性の検討、3) ガス巻込み量予測精度評価の検討を実施し、以下の知見を得た。

1) ガス巻込み基礎実験を対象とした数値解析

高速炉ガス巻込み現象の再現性を確認するため、ガス巻込み基礎実験を対象とした数値解析を実施した。その結果、実験で観察・計測されたガス巻込み発生メカニズムを、数値解析によって再現することに成功した。

2) 1/1.8 縮尺上部プレナム液面部分モデル水流動試験を対象とした数値解析

実規模ガス巻込み現象の評価に対するコードの適用性を確認するため、1/1.8 縮尺液面部分モデル水流動試験装置を対象とした数値解析を実施し、H/L 周辺におけるくぼみ渦や流れの潜り込みによってガス巻込みが発生する様子を再現することに成功した。

3) ガス巻込み量計測基礎実験を対象とした数値解析

ガス巻込み量の定量評価に対するコードの適用性を検討するため、信州大学との共同研究にて実施しているガス巻込み量計測基礎実験を対象とした数値解析を実施した。その結果、実験で観察された気柱状ガス巻込みを再現することに成功した。

参考文献

- 1) T. Nagata, “Early Commercialization of Fast Reactor Cycle in Japan”, *The 16th Pacific Basin Nuclear Conference*, Aomori, Japan, Oct. 14-17 (2008).
- 2) Y. Eguchi, K. Yamamoto, T. Funada, N. Tanaka, S. Moriya, K. Tanimoto, K. Ogura, T. Suzuki and I. Maekawa, “Gas Entrainment in the IHX of Top-Entry Loop-Type LMFBR”, *Nuclear Engineering and Design*, **146**, pp.373-381 (1994).
- 3) K. Ito, T. Kunugi, H. Ohshima, T. Kawamura, “Formulations and Validations of a High-precision Volume-of-fluid Algorithm on Non-orthogonal Meshes for Numerical Simulations of Gas Entrainment Phenomena”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **46**, pp. 366–373 (2009).
- 4) K. Okamoto, K. Takeyama, M. Iida, “Dynamic PIV Measurement for the Transient Behavior of a Free-Surface Vortex”, *Proceedings of 4th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety*, (2004).
- 5) 木村暢之, 江連俊樹, 飛田昭, 伊藤真美, 上出英樹, “1/1.8 縮尺部分モデルによる原子炉容器内ガス巻込み特性の評価ーガス巻込み発生マップによる支配因子の把握と発生メカニズムの解明ー”, JAEA-Research 2006-005 (2006).
- 6) 江連俊樹, 木村暢之, 飛田昭, 宮越博幸, 上出英樹, “1/1.8 縮尺部分モデルによる原子炉容器内ガス巻込み特性の評価ー原子炉起動時を対象とした低液位ガス巻込み特性の評価ー”, JAEA-Research 2009-021 (2009).
- 7) N. Kimura, T. Ezure, A. Tobita, H. Kamide, “Experimental Study on Gas Entrainment at Free Surface in Reactor Vessel of a Compact Sodium-Cooled Fast Reactor”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **45**, pp. 1053–1062 (2008).
- 8) 鈴木浩之, 小泉安郎, 岡寄翔太郎, 伊藤啓, 大島宏之, “渦によるガス巻込み現象の観察と巻込み気泡量の定量評価”, 日本原子力学会 2009 年秋の大会 (2009).
- 9) A. A. Amsden, F. H. Harlow, “The SMAC Method: a Numerical Technique for Calculating Incompressible Fluid Flows”, *Technical Report*, Los Alamos National Laboratory LA-4370 (1970).
- 10) D. L. Youngs, “Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion”, *Numerical Methods for Fluid Dynamics* (edited by K. W. Morton, M. J. Baines), American Press, New York, pp. 273-486 (1982).
- 11) K. Ito, Y. Yamamoto, T. Kunugi, “Development of Numerical Method for Simulation of Gas Entrainment Phenomena”, *Proceedings of the Twelfth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics* (2007).
- 12) K. Ito, T. Kunugi, “Appropriate Formulations for Velocity and Pressure Calculations at Gas-liquid Interface with Collocated Variable Arrangement”, *Journal of Fluid Science and Technology*, **4**, pp. 711-721 (2009).

- 13) 株式会社 VINAS, http://www.vinas.com/jp/seihin/sms/SMS_AMG_index.html
- 14) SSI プロジェクト, “反復解法ライブラリ Lis”, <http://www.ssisc.org/lis/>
- 15) 高度情報科学技術研究機構, “GeoFEM”, <http://geofem.tokyo.riken.or.jp/>
- 16) 革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発, “領域分割ユーティリティユーザーマニュアル”, RSS2108-PJ7-ユーザーマニュアル-001 x
- 17) METIS, <http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/views/metis/>
- 18) K. Ito, H. Ohshima, T. Sakai, T. Kunugi, “CFD-basis Evaluation of Interfacial Flows”, *Computational Fluid Dynamics* (edited by H. W. Oh), In-Tech, pp.133-156 (2010).

表 4.1 実規模ガス巻込み現象解析における流速境界の流速条件

境界名	境界面積 (m ²)	境界流速 (m/s)	流量 (m ³ /s)
Water inlet	0.300000	0.305580	0.091674
D/P gap1	0.017588	0.181400	0.003190
D/P gap2	0.016830	-0.127700	-0.002149
D/P gap3	0.015798	-0.387300	-0.006119
C/L1 gap1	0.019458	0.056600	0.001101
C/L1 gap2	0.019458	-0.152100	-0.002960
H/L gap1	0.012861	-0.211600	-0.002721
H/L gap2	0.012861	-0.565110	-0.007268
H/L gap3	0.012861	-0.586300	-0.007540
H/L gap4	0.012861	-0.272400	-0.003503
C/L2 gap1	0.019458	-0.364300	-0.007089
C/L2 gap2	0.019458	0.006700	0.000130
R/V gap1	0.066089	0.065400	0.004322
R/V gap2	0.066065	-0.143700	-0.009494
R/V gap3	0.066089	-0.086200	-0.005697
Water outlet	0.300000	0.152930	0.045879

※正が流入方向、負が流出方向

表 4.2 実規模ガス巻込み現象解析における作動流体の物性値

	空気	水
密度 (kg/m ³)	1.225	998.2
粘性係数 (Pa・s)	1.7894×10 ⁻⁵	1.003×10 ⁻³
表面張力 (N/m)	0.0735	

表 5.1 液位 0.12m 条件における流量に対する入口流速及び出口流速の条件

flow rate (ℓ/min)	Inlet Velocity (m/s)	Outlet Velocity (m/s)
2.0	0.0277778	0.663146
3.0	0.0416667	0.994718
4.0	0.0555556	1.326291
5.0	0.0694444	1.657864

表 5.2 液位 0.06m 条件における流量に対する入口流速及び出口流速の条件

flow rate (ℓ/min)	Inlet Velocity (m/s)	Outlet Velocity (m/s)
3.5	0.0972222	1.160500

表 5.3 ガス巻込み量計測基礎実験条件とガス巻込み量計測結果

Case	液位	流量		流出流速	流入流速	ガス巻込み量
	m	ℓ/min	m ³ /s	m/s	m/s	m ³ /s
1	0.06	3.0	5.00E-05	0.99463	0.08333	8.91774E-06
2	0.06	2.9	4.83E-05	0.96147	0.08056	7.70332E-06
3	0.06	2.8	4.67E-05	0.92832	0.07778	6.72802E-06
4	0.06	2.7	4.50E-05	0.89517	0.07500	5.05465E-06
5	0.06	2.6	4.33E-05	0.86201	0.07222	4.03128E-06
6	0.06	2.5	4.17E-05	0.82886	0.06944	3.13874E-06
7	0.06	2.4	4.00E-05	0.79570	0.06667	1.51309E-06
8	0.06	2.3	3.83E-05	0.76255	0.06389	4.82484E-07

※ガス巻込み量は数値解析で使用了た密度によつて体積を補正

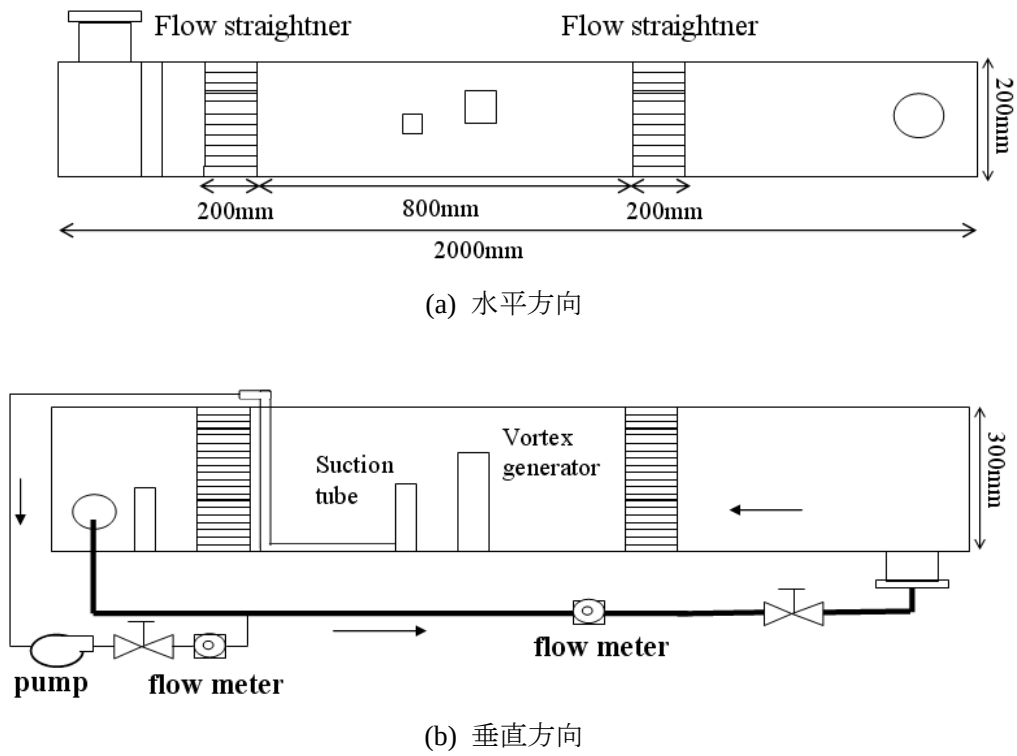


図 3.1 ガス巻き込み基礎実験装置

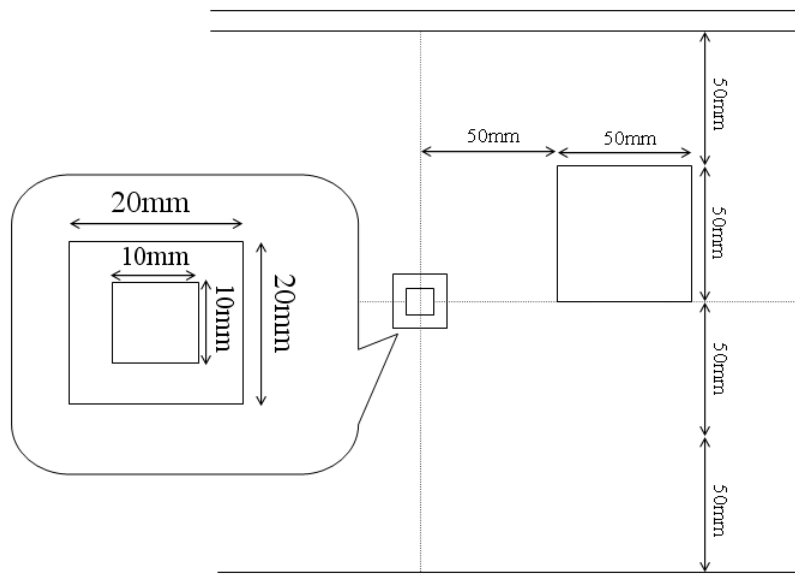
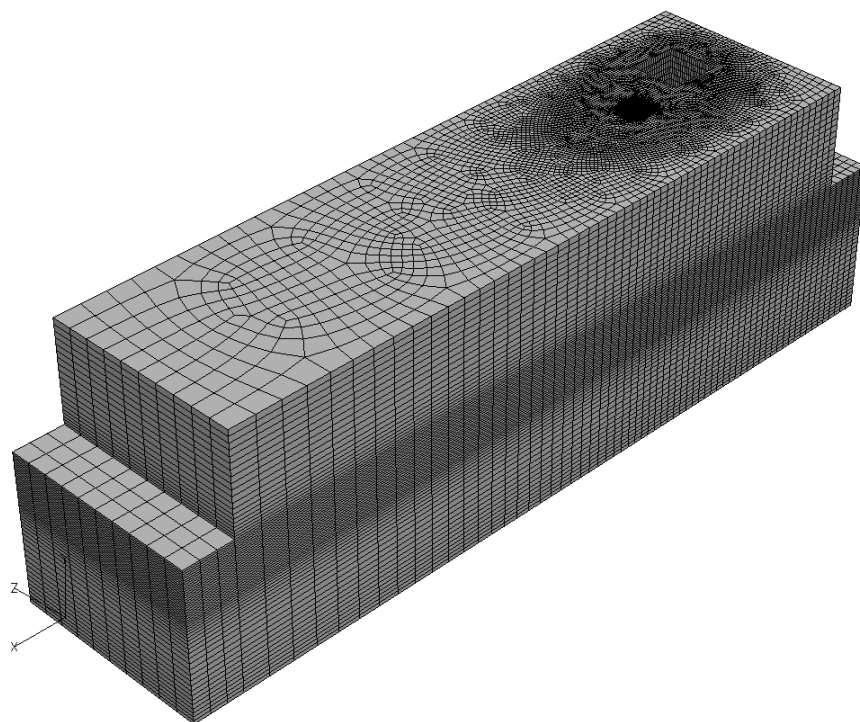
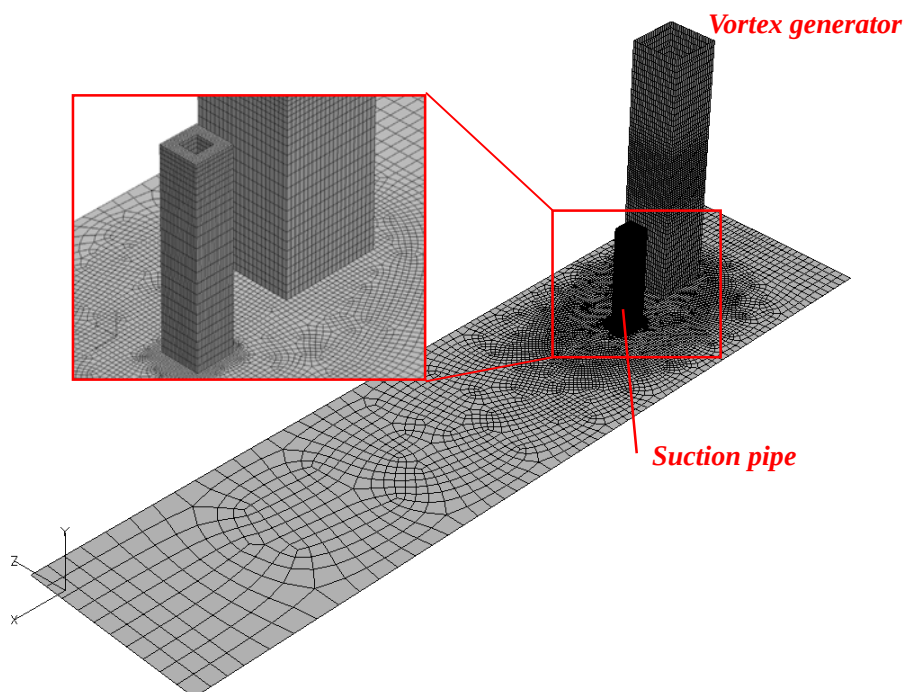


図 3.2 渦発生器及び吸込み配管の配置



(a) 体系全体



(b) 主要構造物(渦発生器, 吸込み配管)

図 3.3 解析体系・解析メッシュ

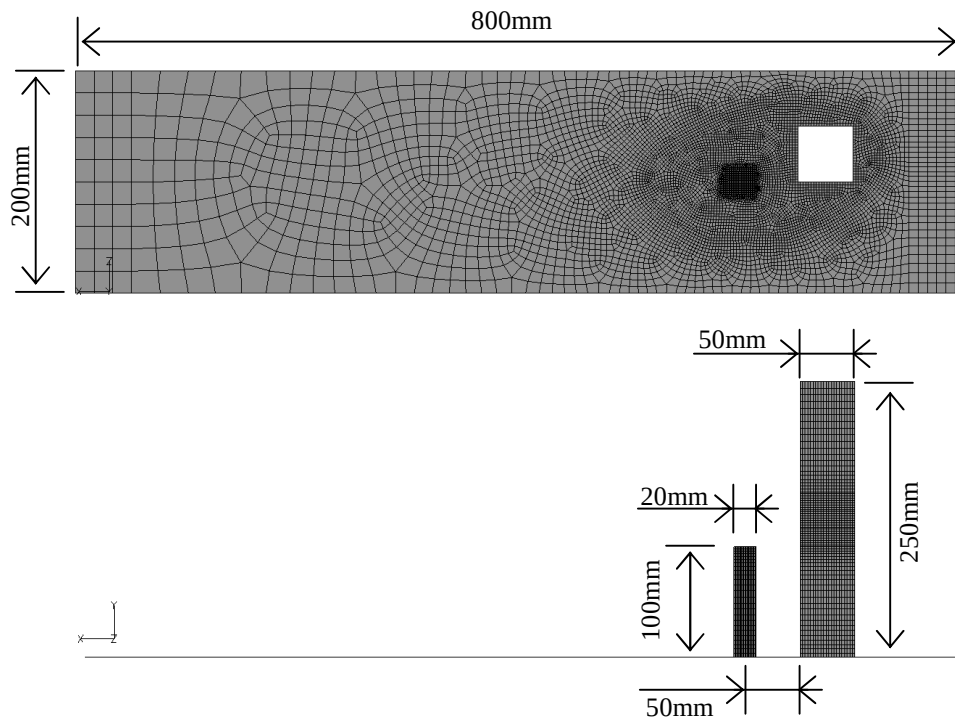


図 3.4 構造物の配置

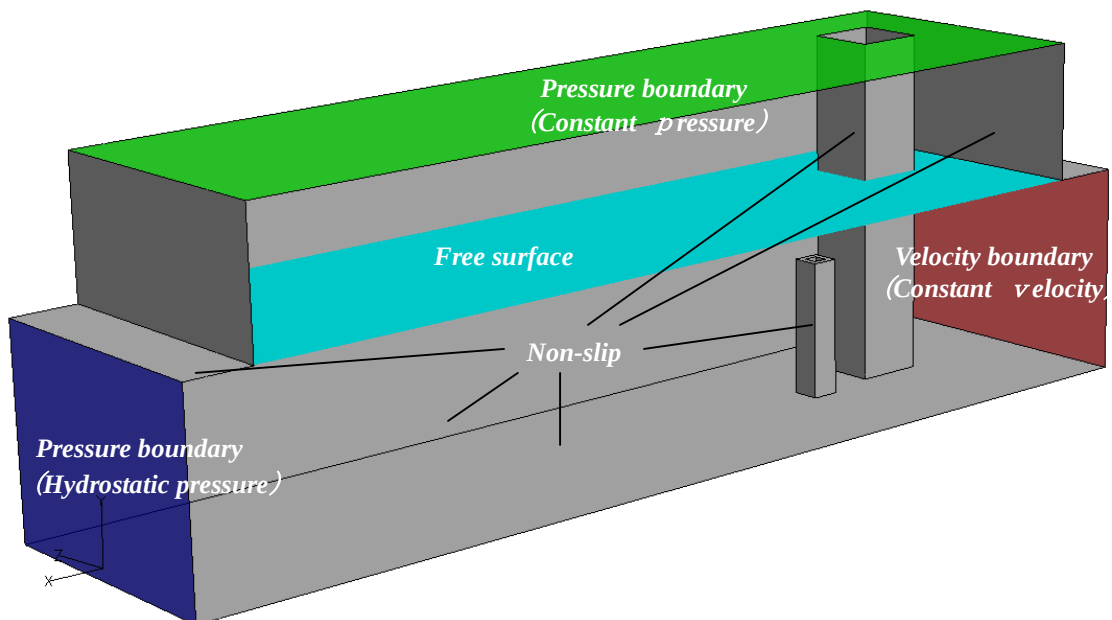
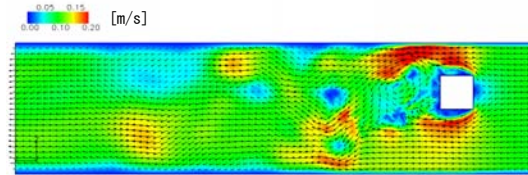


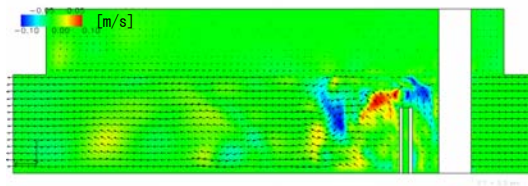
図 3.5 境界条件



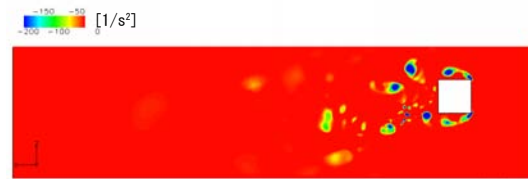
(a) 自由液面形状 (upper view、流体率 0.5 の等値面)



(b) 液面下 0.01m の水平断面における水平方向流速分布



(c) 体系中央の垂直断面における垂直方向流速分布



(d) 液面下 0.01m の水平断面における速度勾配第二不変量分布

図 3.6 吸込み流速無しの状態における発達した流れ場

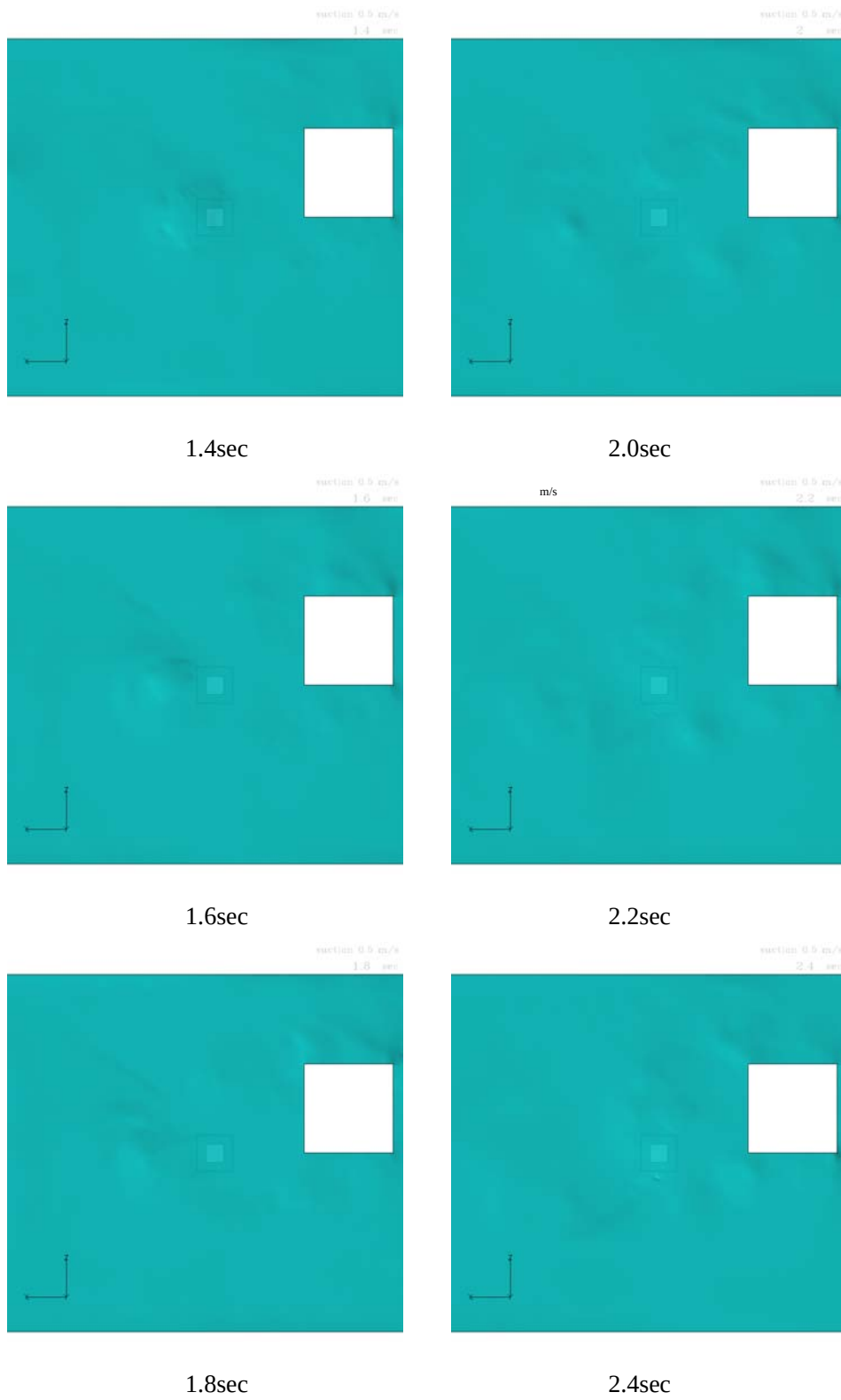


図 3.7 吸込み流速 0.5m/s における自由液面形状 (upper view)

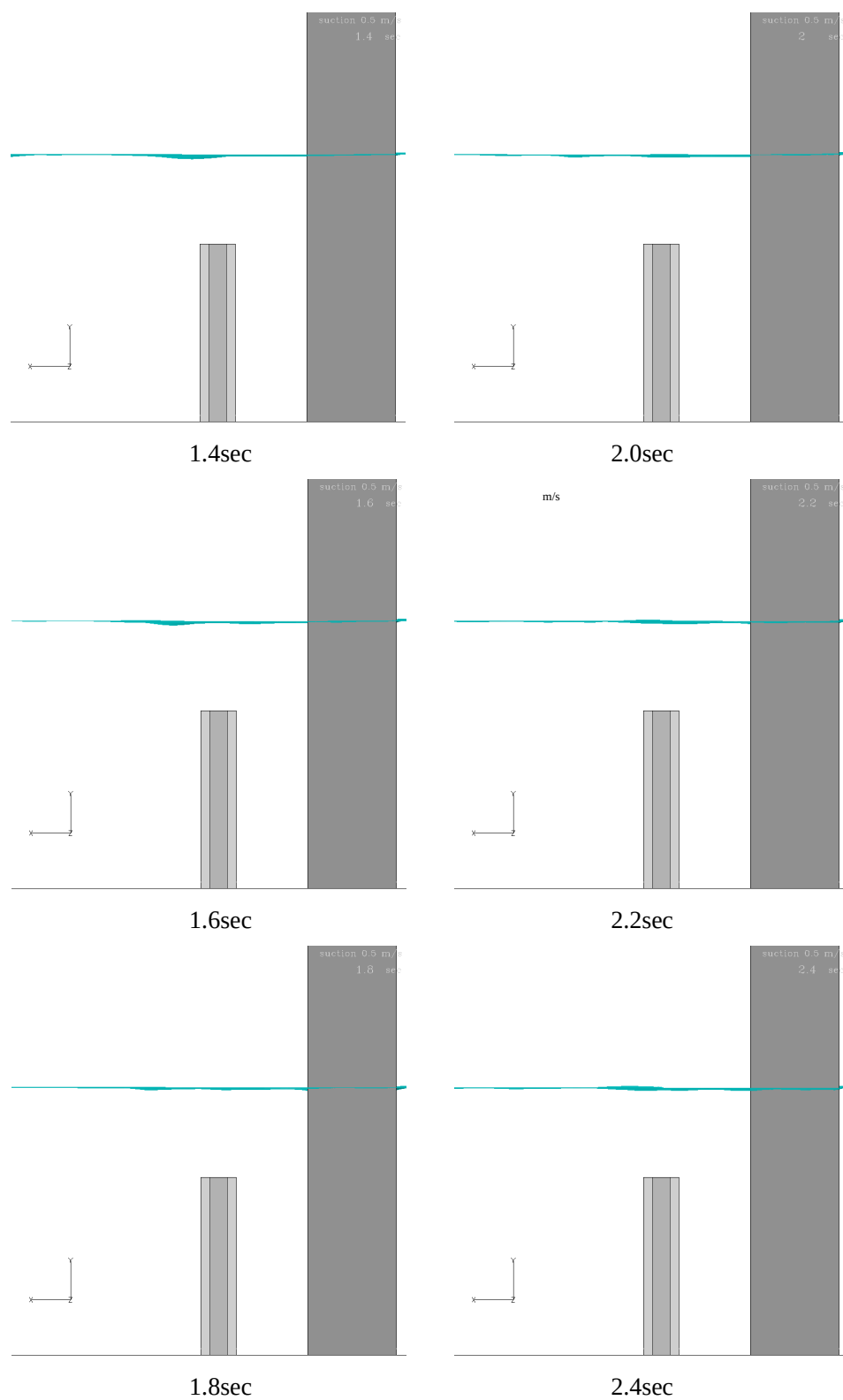


図 3.8 吸込み流速 0.5m/s における自由液面形状 (side view)

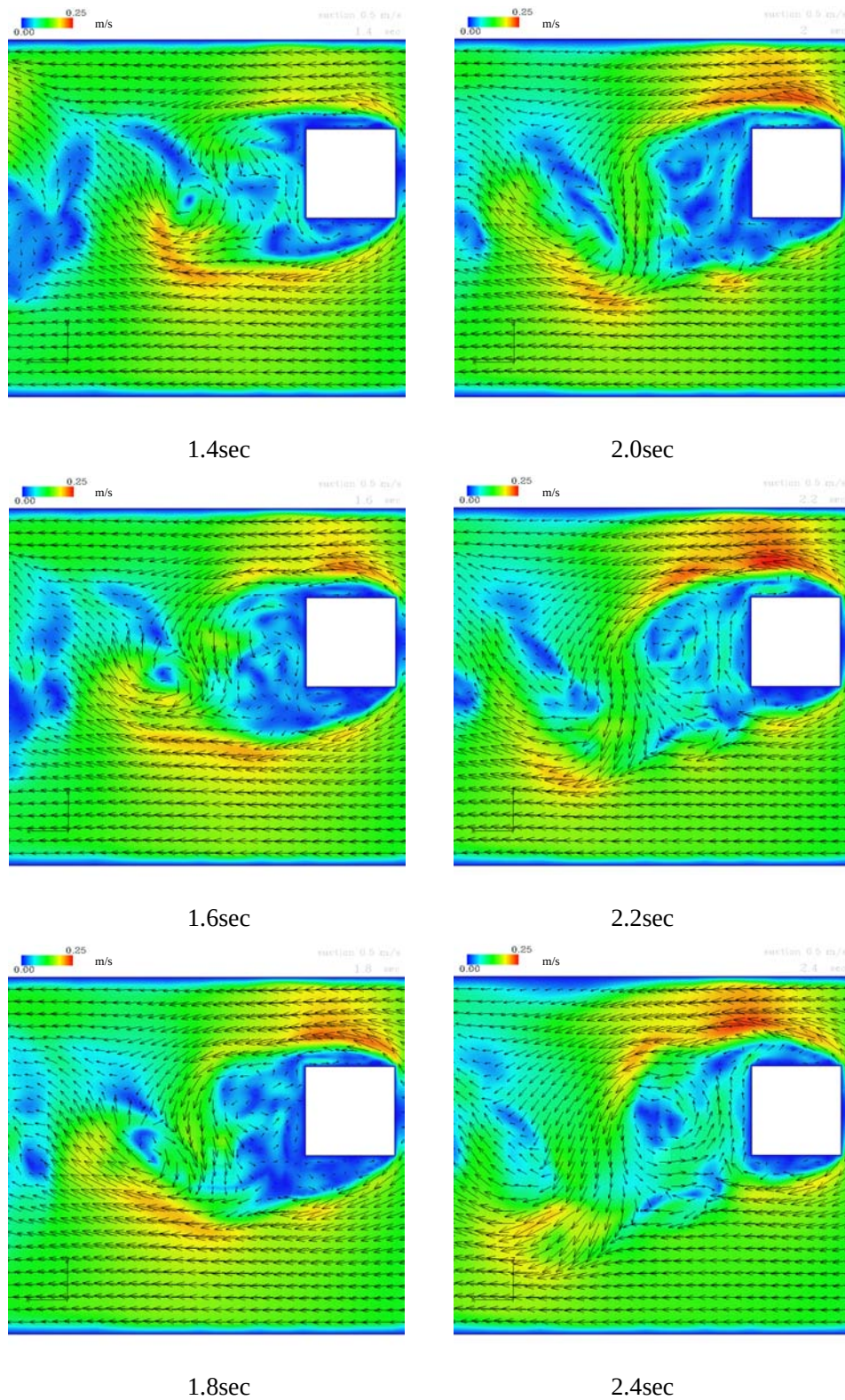


図 3.9 吸込み流速 0.5m/s における水平方向流速分布 (upper view)

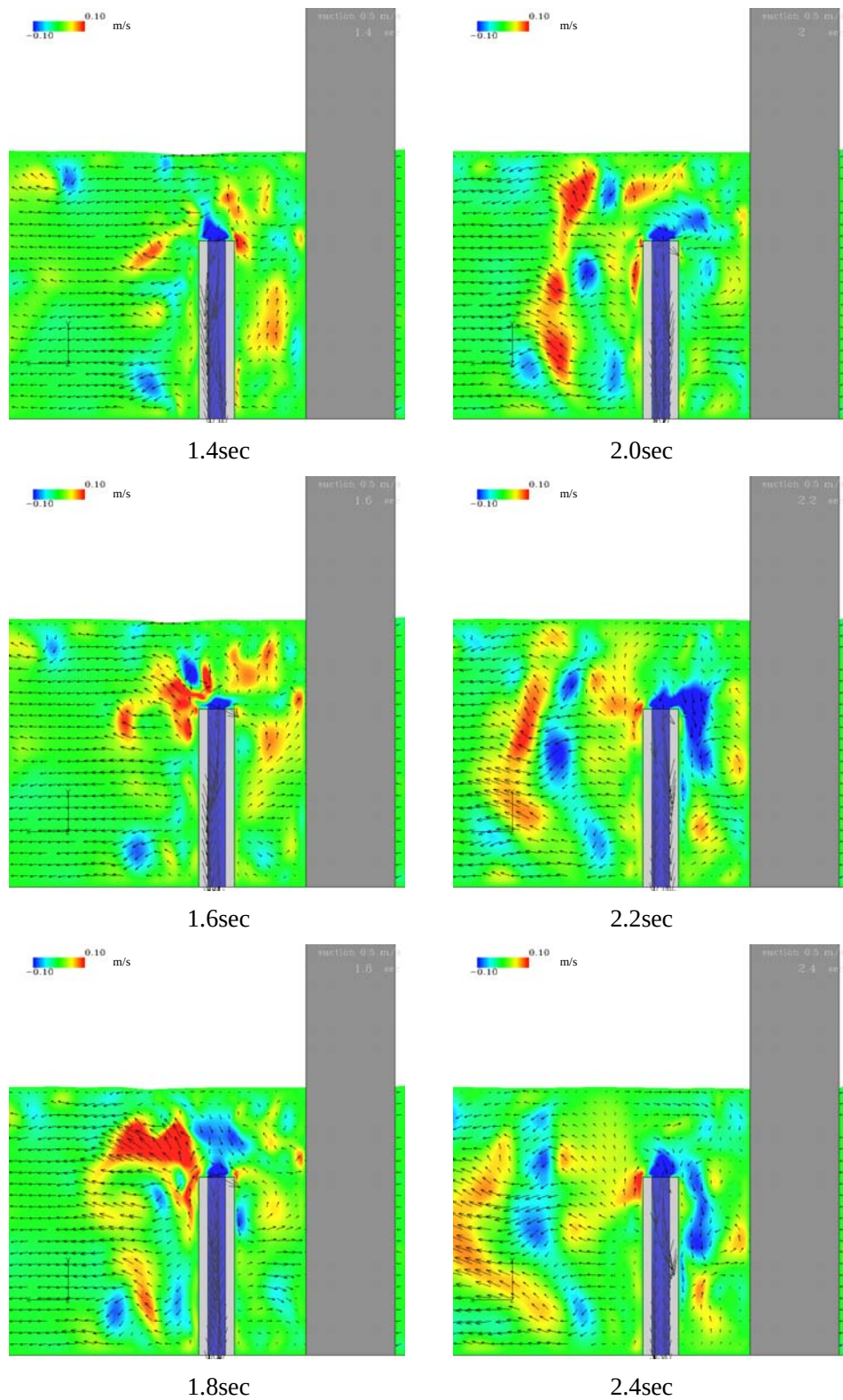


図 3.10 吸込み流速 0.5m/s における垂直方向流速分布 (side view)

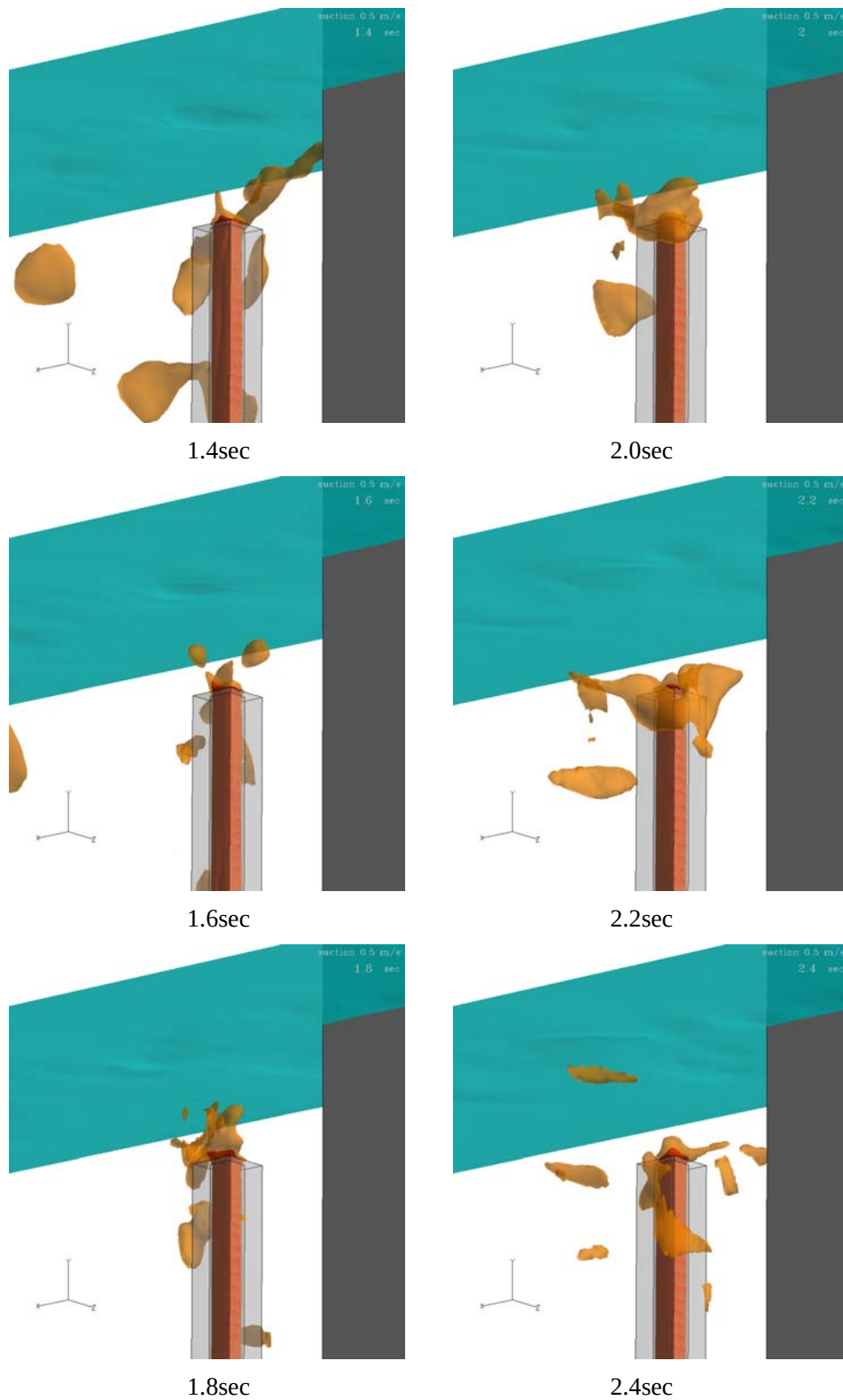


図 3.11 吸込み流速 0.5m/s における自由液面形状と下降流速分布
(青：自由液面，赤：垂直方向流速 - 2.0m/s，橙：垂直方向流速 - 1.0m/s)

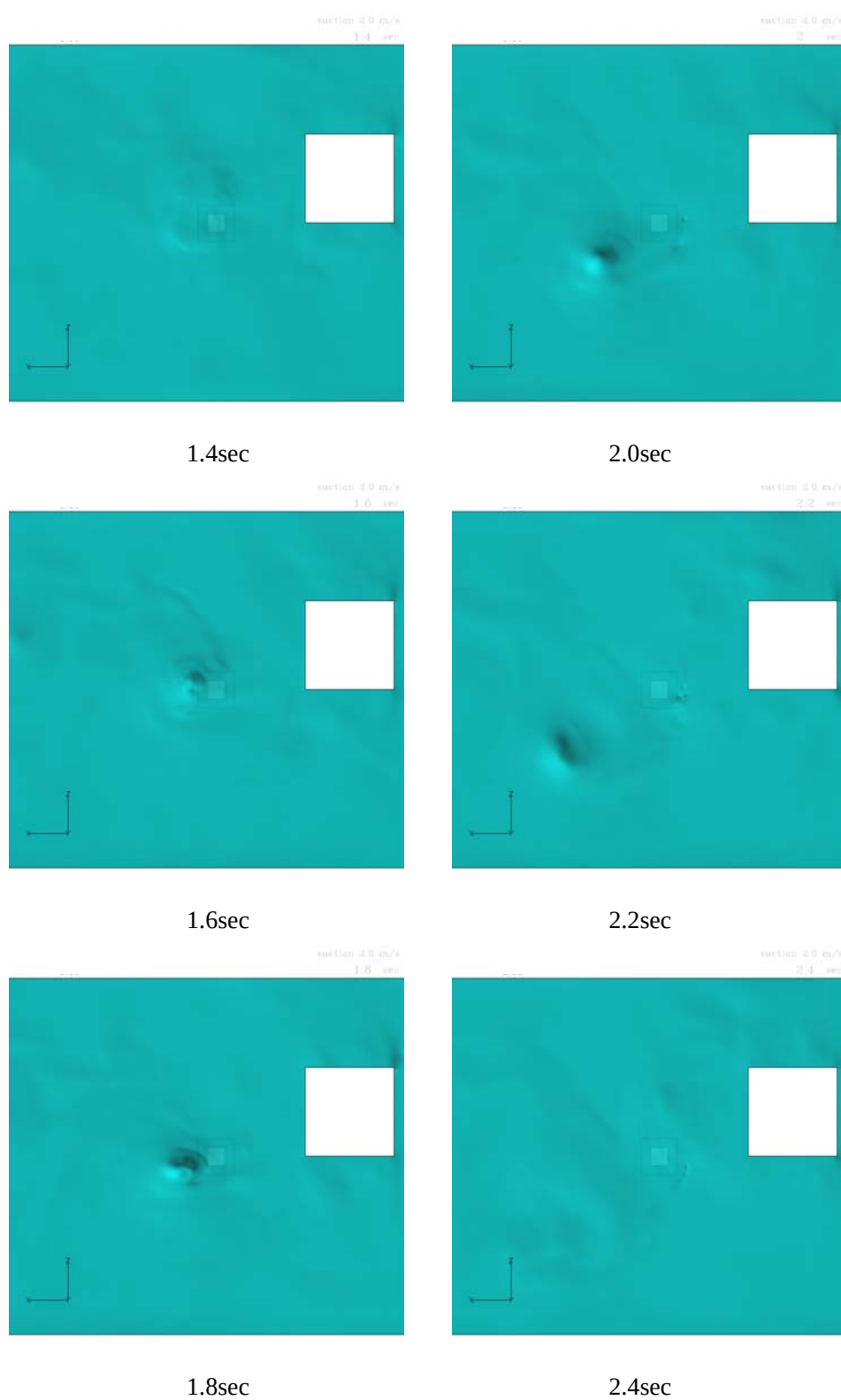


図 3.12 吸込み流速 2.0m/s における自由液面形状 (upper view)

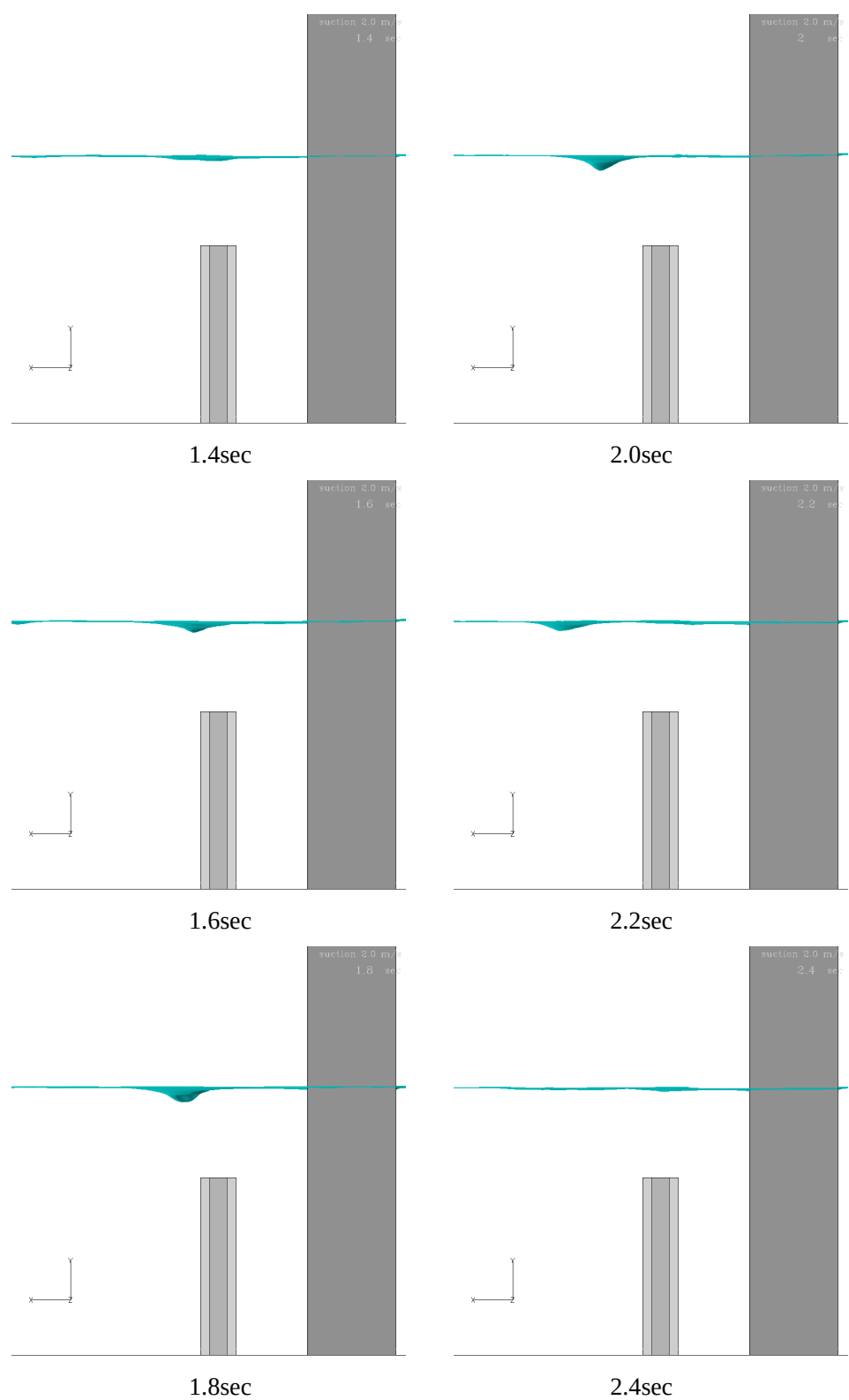


図 3.13 吸込み流速 2.0m/s における自由液面形状 (side view)

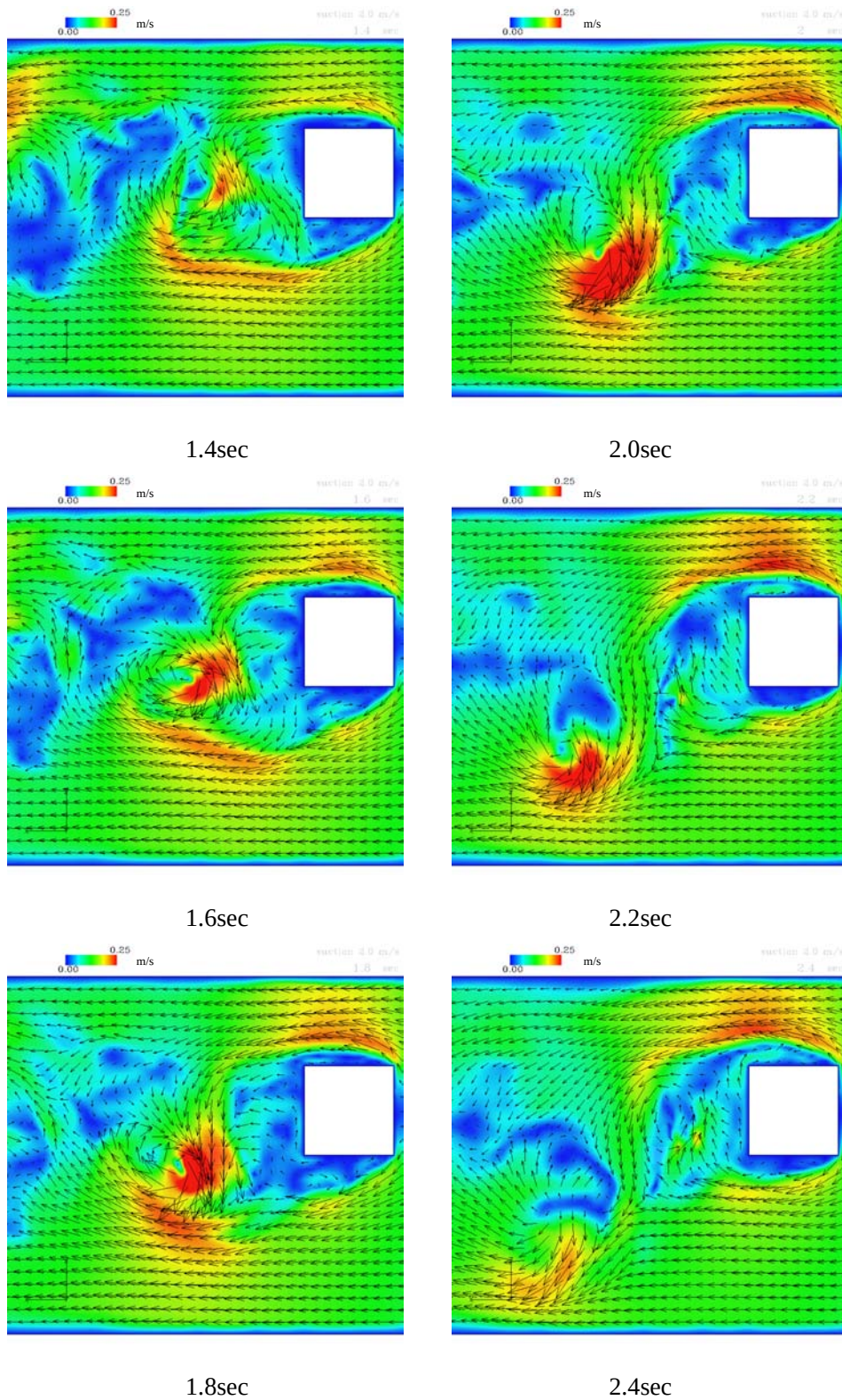


図 3.14 吸込み流速 2.0m/s における水平方向流速分布 (upper view)

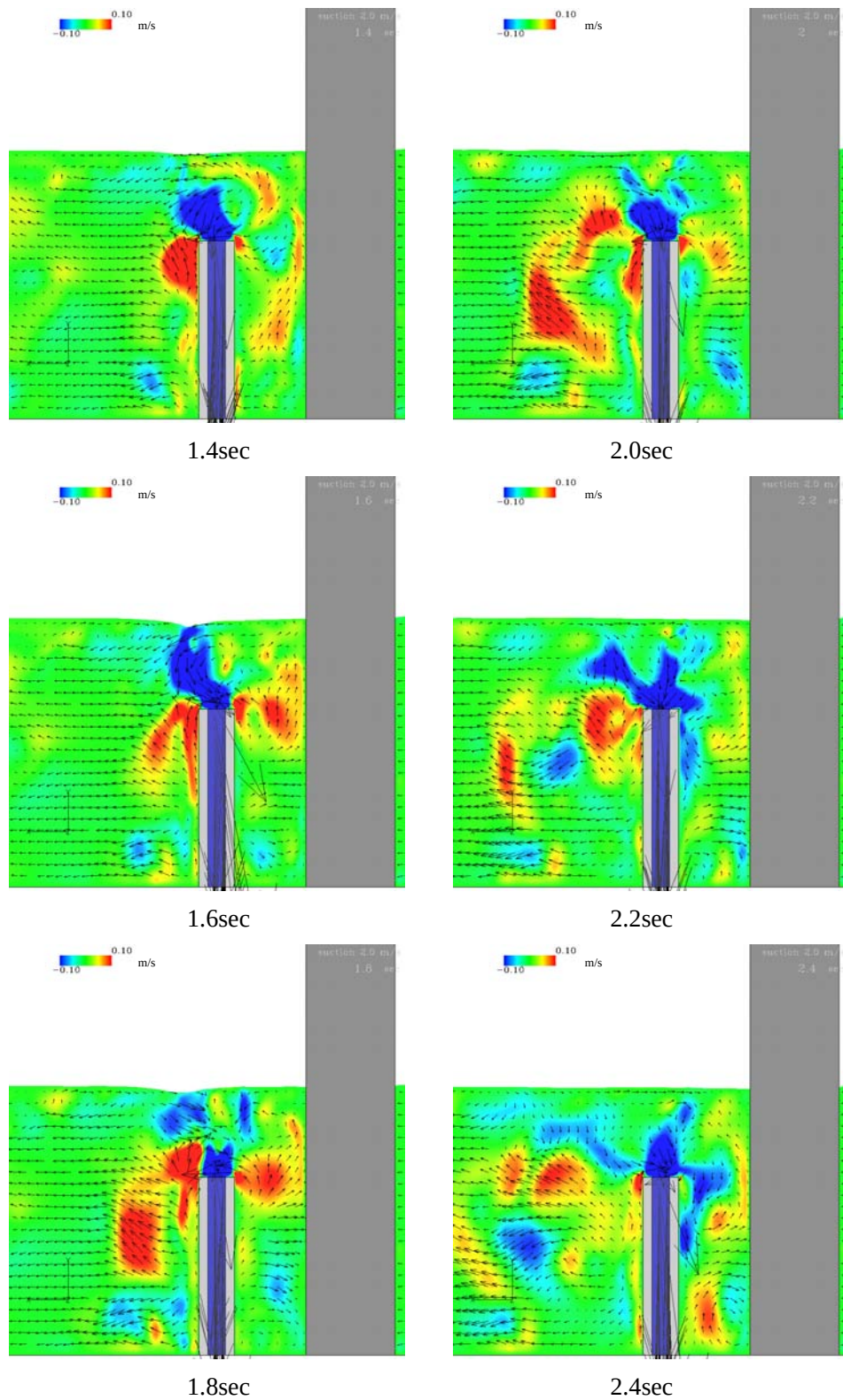


図 3.15 吸込み流速 2.0m/s における垂直方向流速分布 (side view)

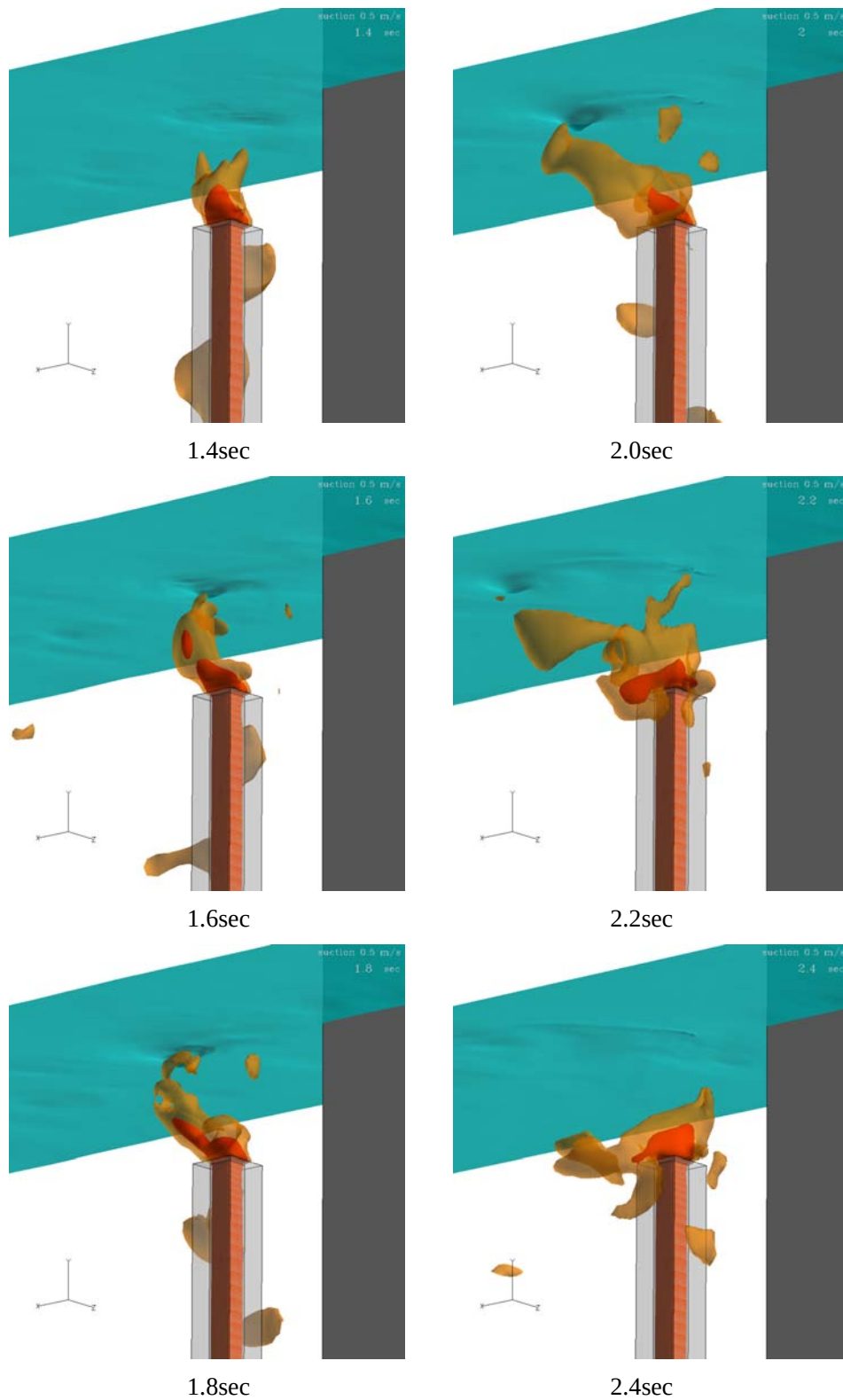


図 3.16 吸込み流速 2.0m/s における自由液面形状と下降流速分布
(青：自由液面，赤：垂直方向流速 - 2.0m/s，橙：垂直方向流速 - 1.0m/s)

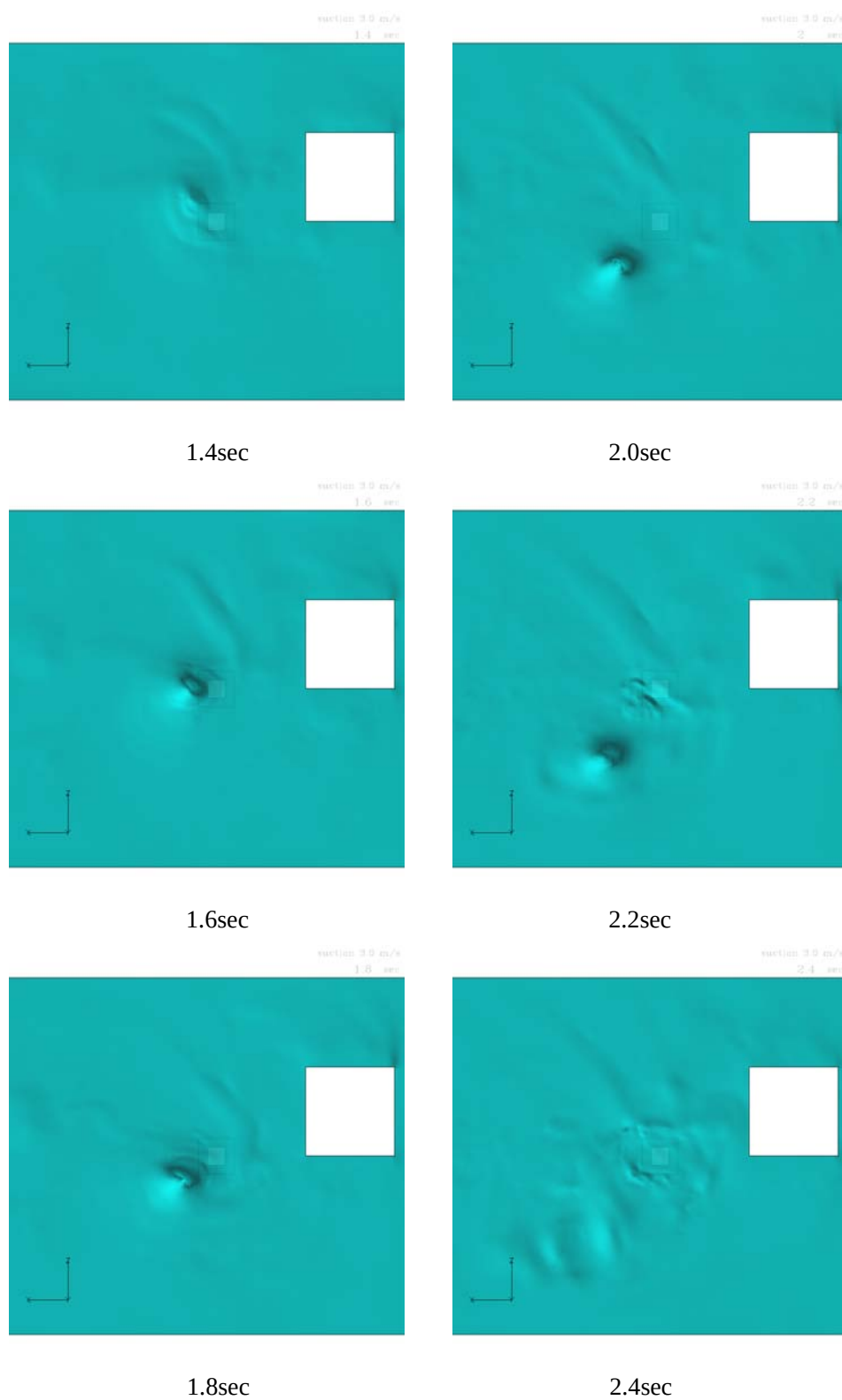


図 3.17 吸込み流速 3.0m/s における自由液面形状 (upper view)

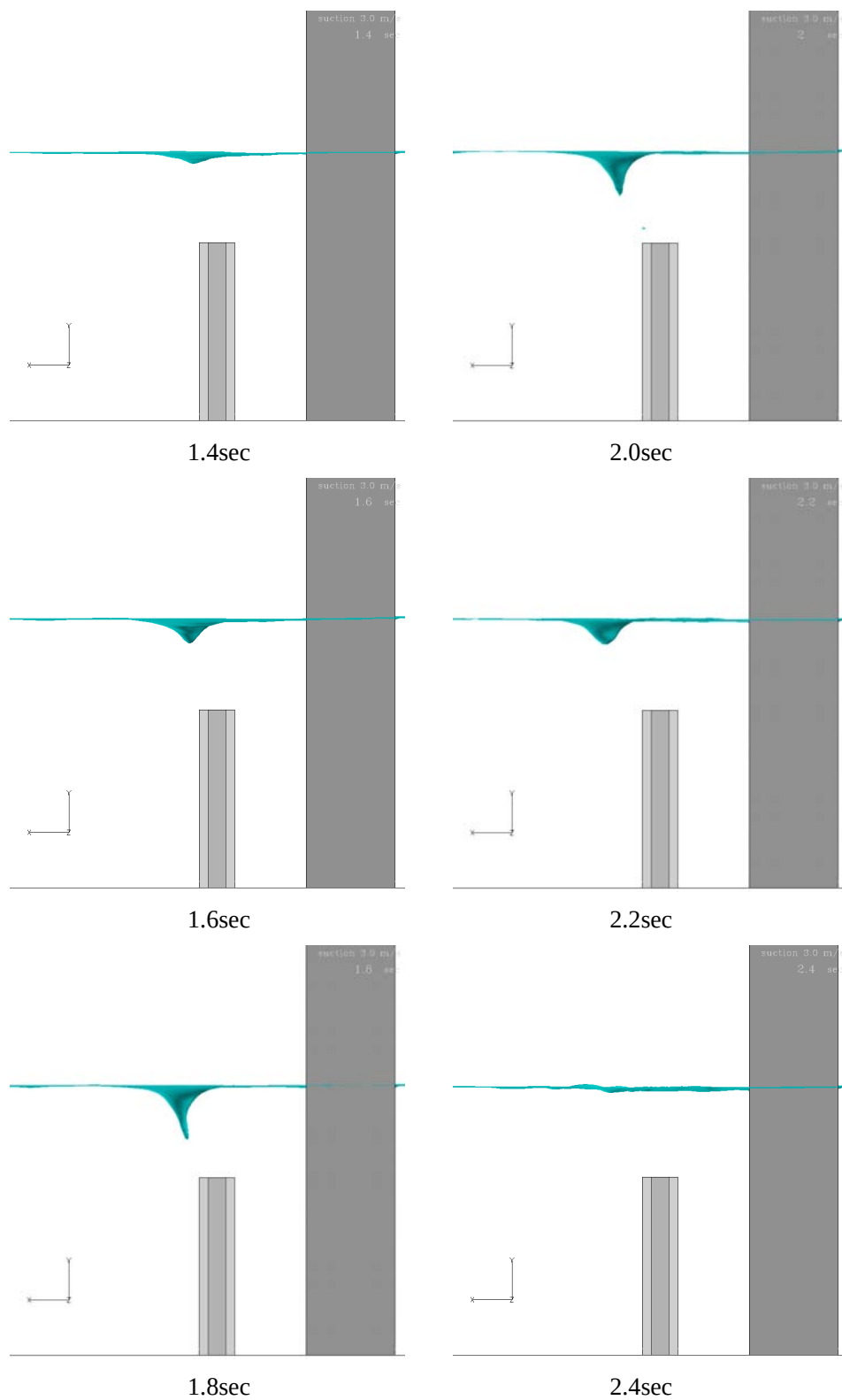


図 3.18 吸込み流速 3.0m/s における自由液面形状 (side view)

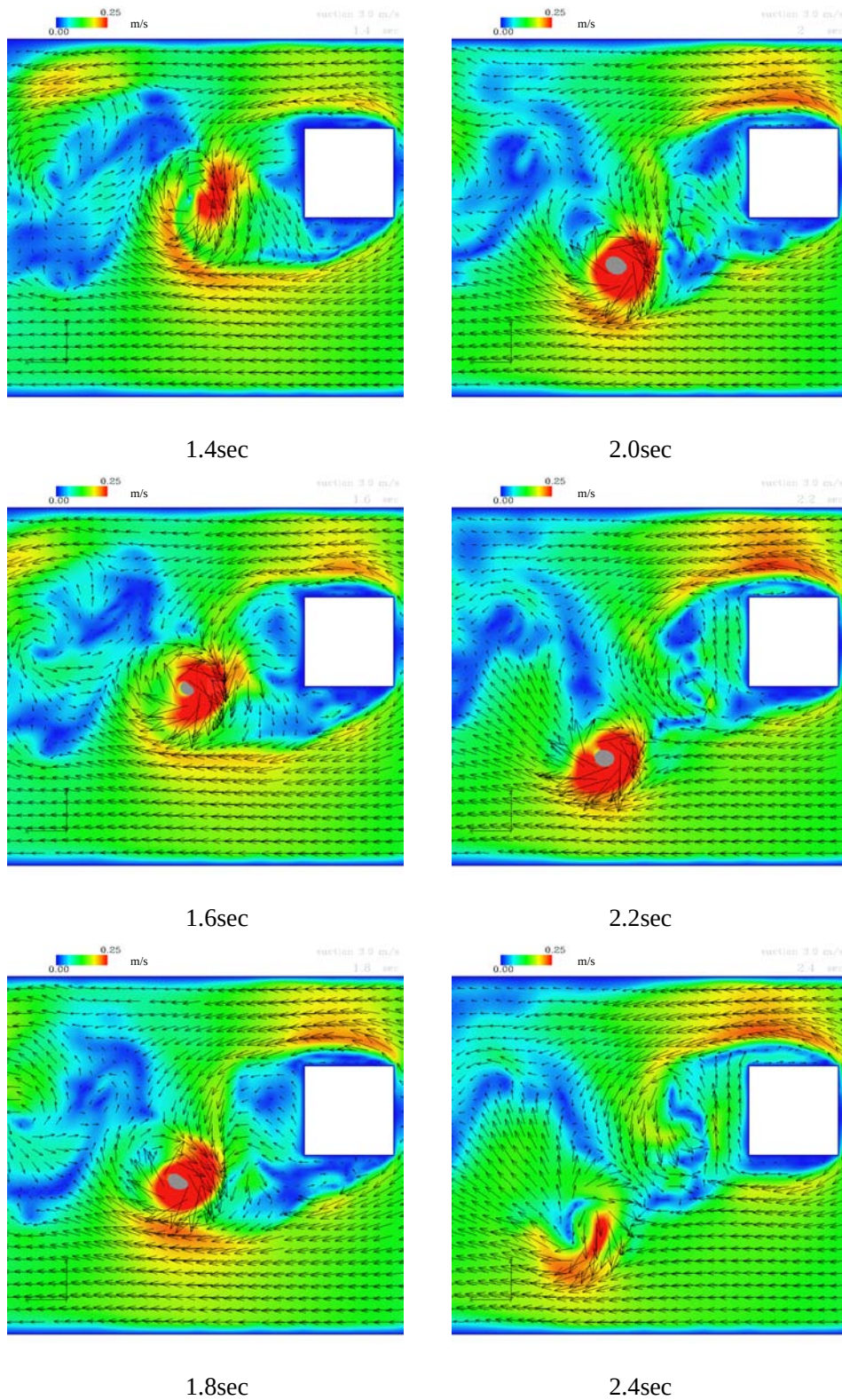


図 3.19 吸込み流速 3.0m/s における水平方向流速分布 (upper view)

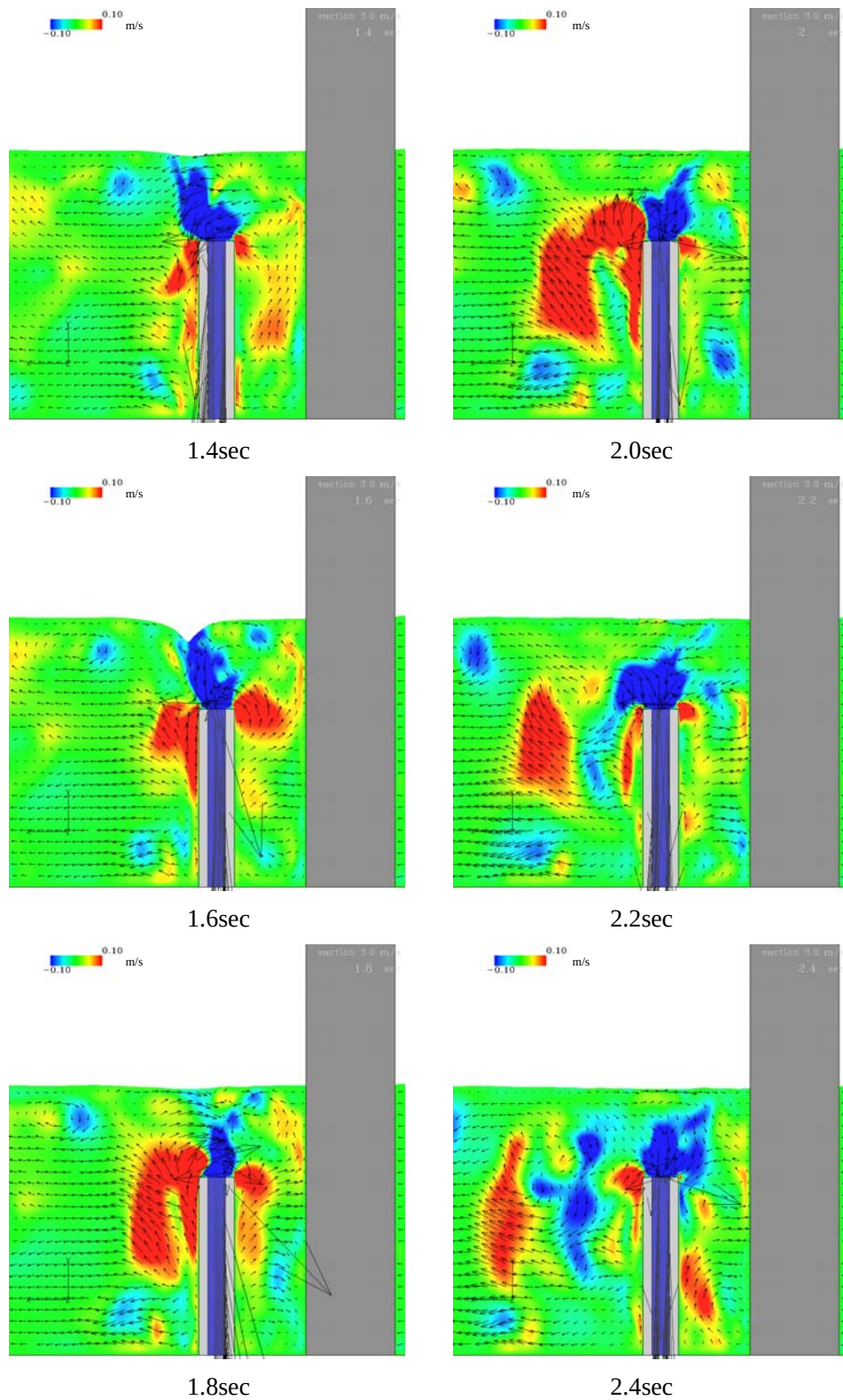


図 3.20 吸込み流速 3.0m/s における垂直方向流速分布 (side view)

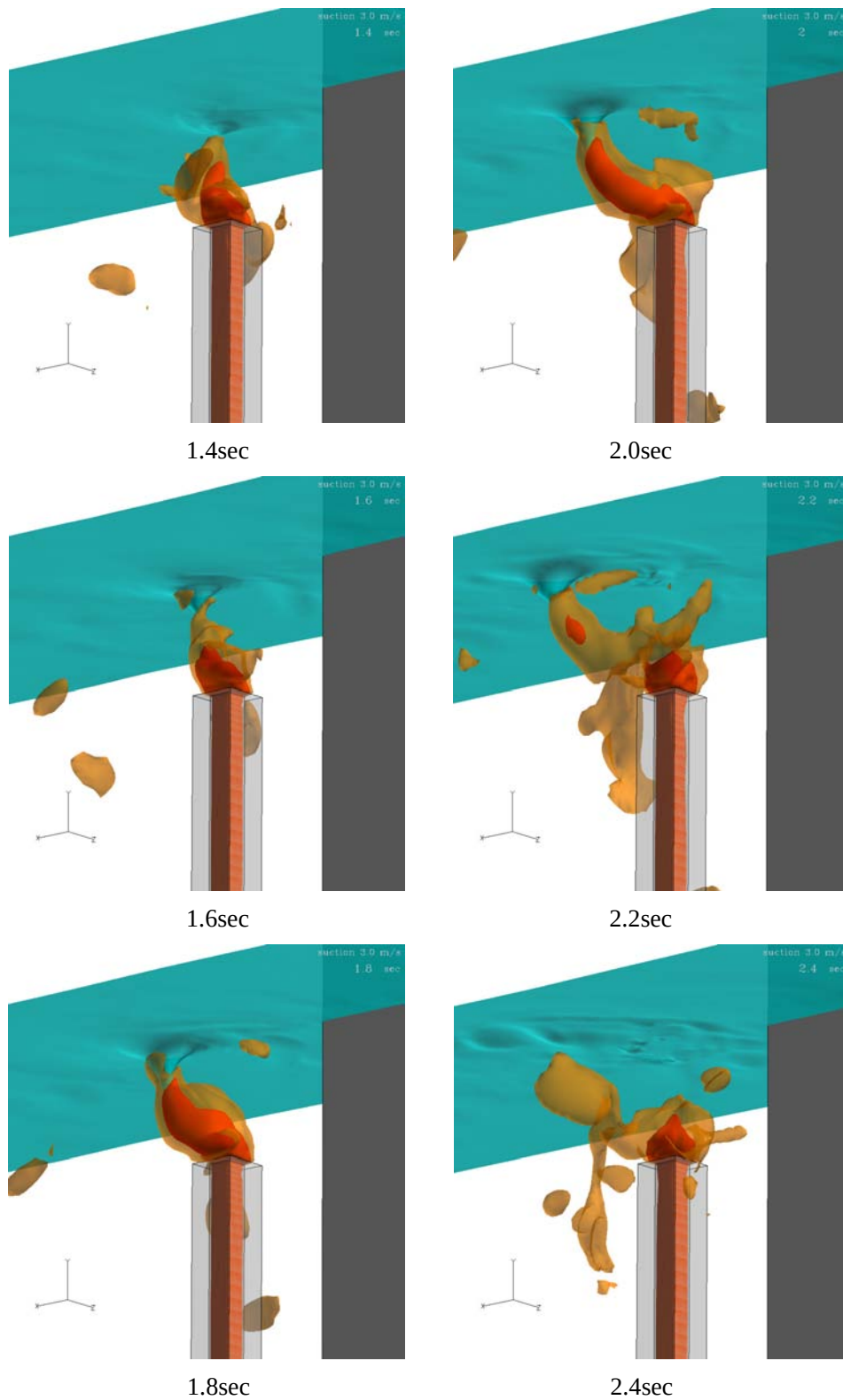


図 3.21 吸込み流速 3.0m/s における自由液面形状と下降流速分布
(青：自由液面，赤：垂直方向流速 - 2.0m/s，橙：垂直方向流速 - 1.0m/s)

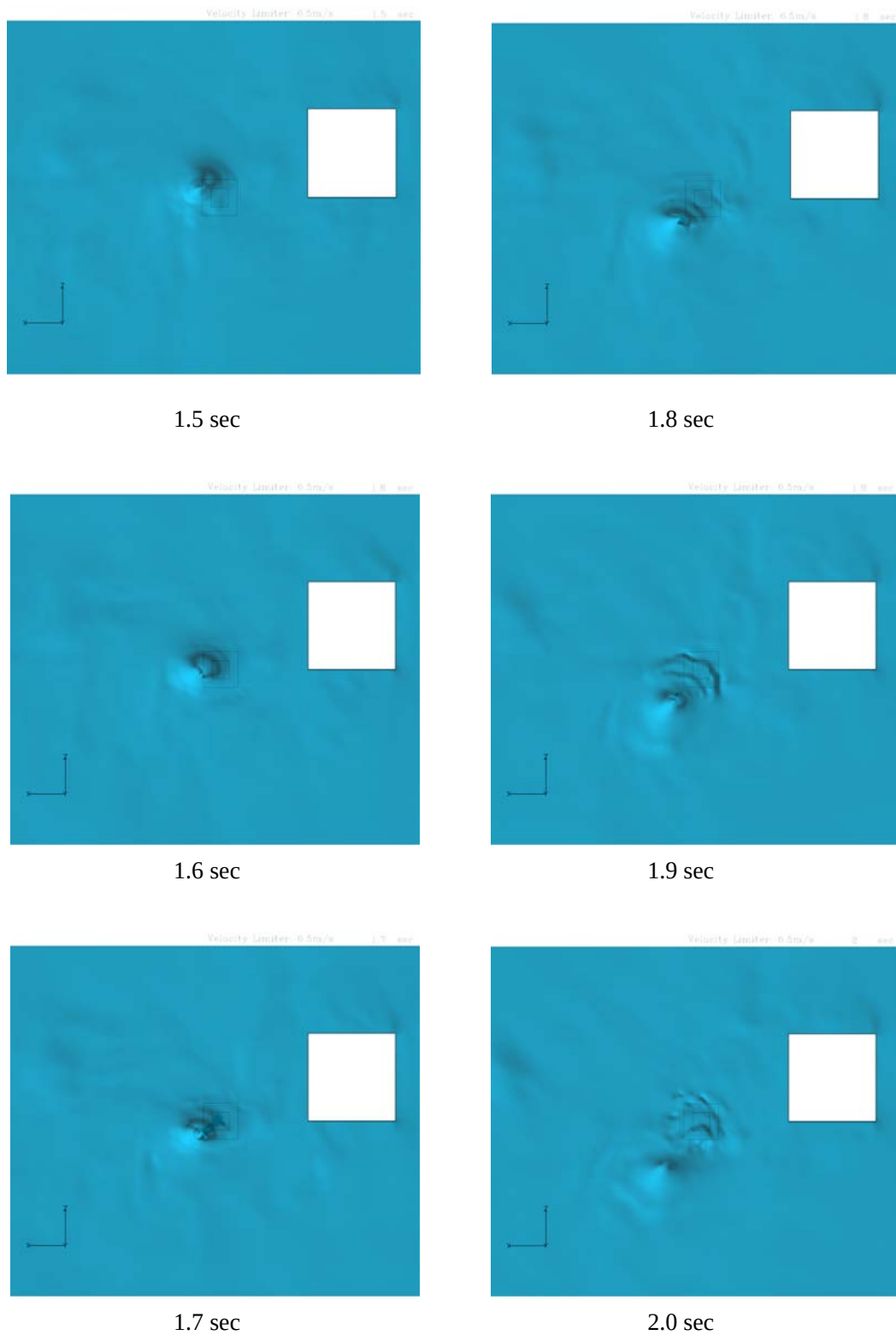


図 3.22 吸込み流速 4.0m/s における自由液面形状 (upper view)

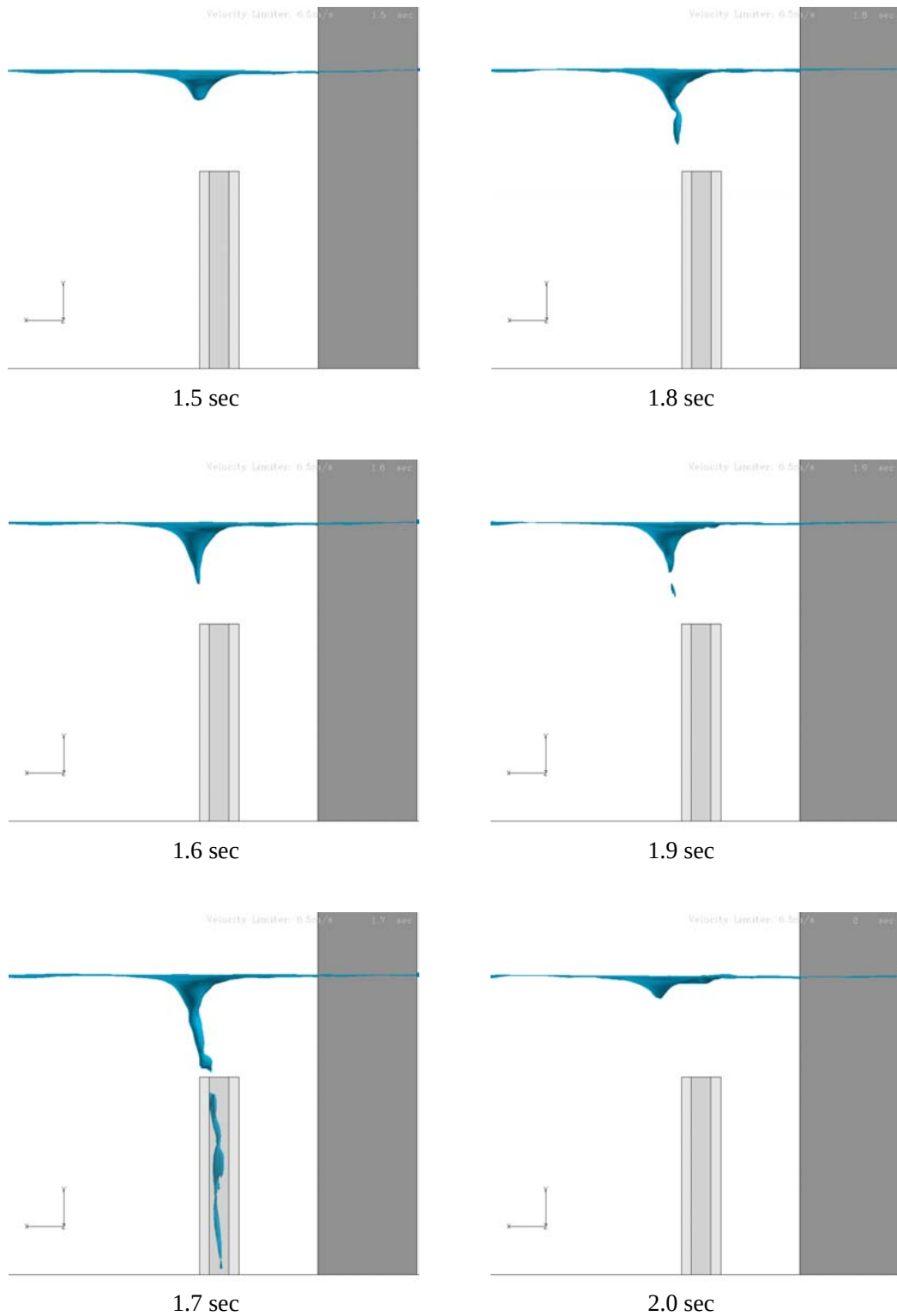


図 3.23 吸込み流速 4.0m/s における自由液面形状 (side view)

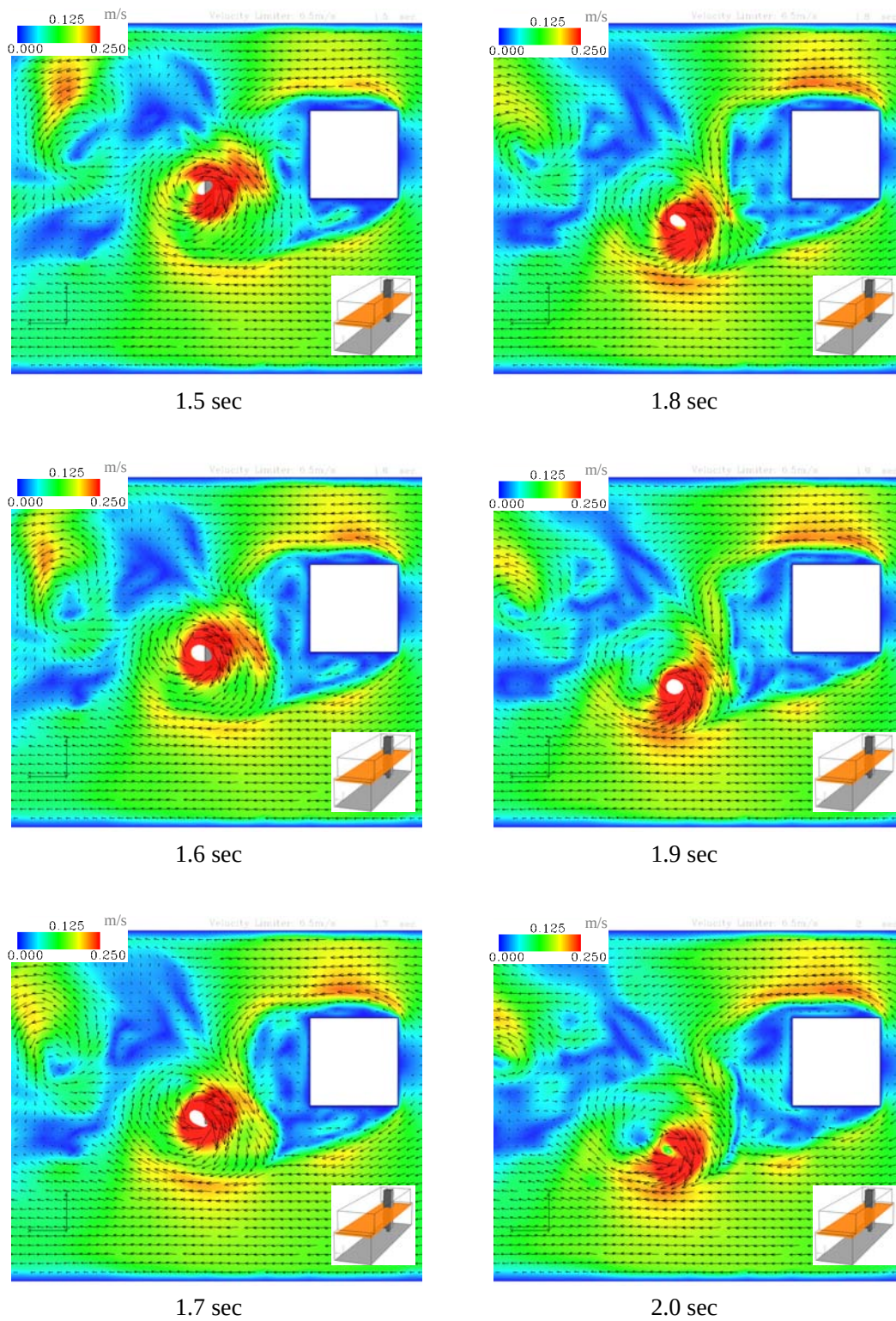


図 3.24 吸込み流速 4.0m/s における水平方向流速分布 (upper view)

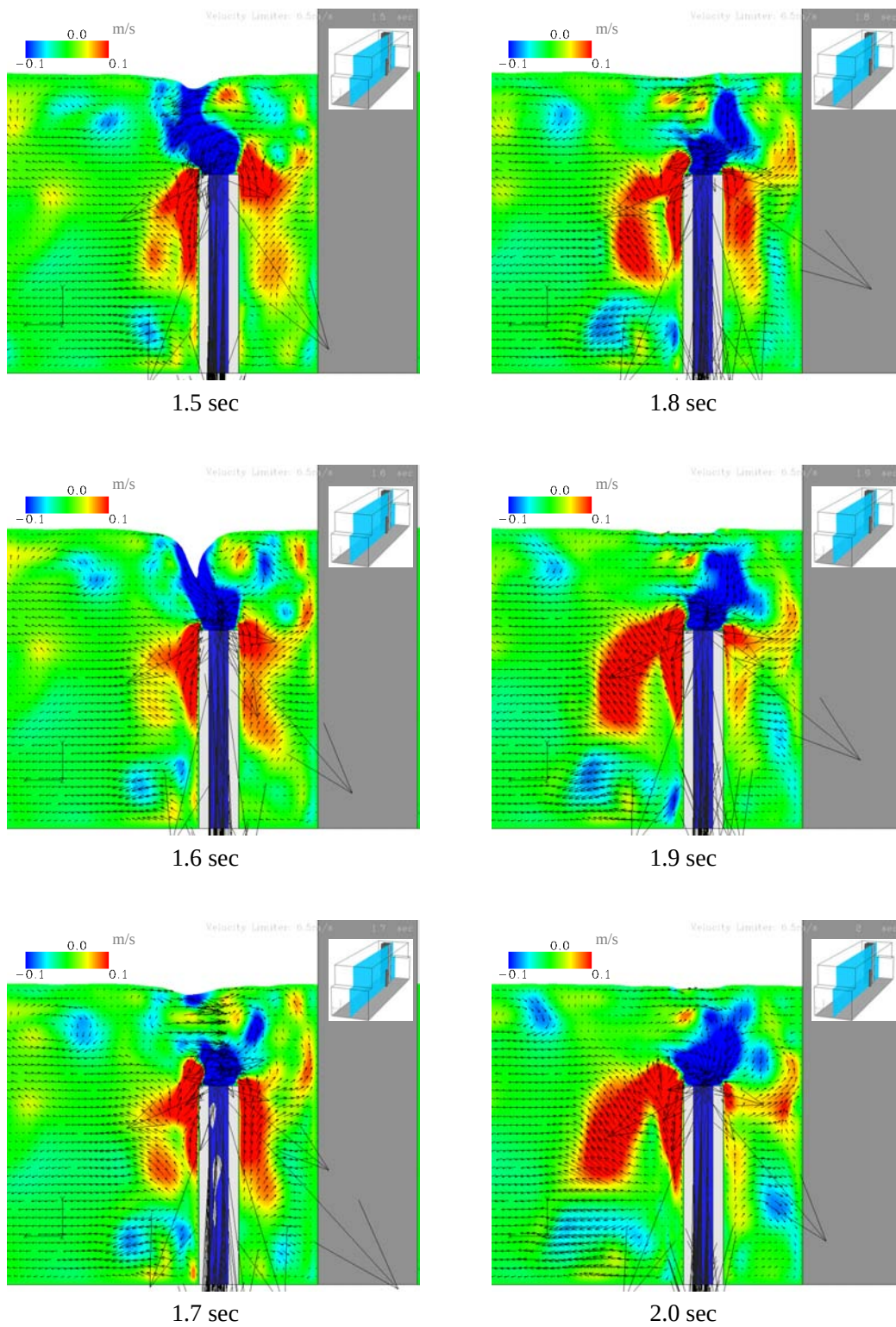


図 3.25 吸込み流速 4.0m/s における垂直方向流速分布 (side view)

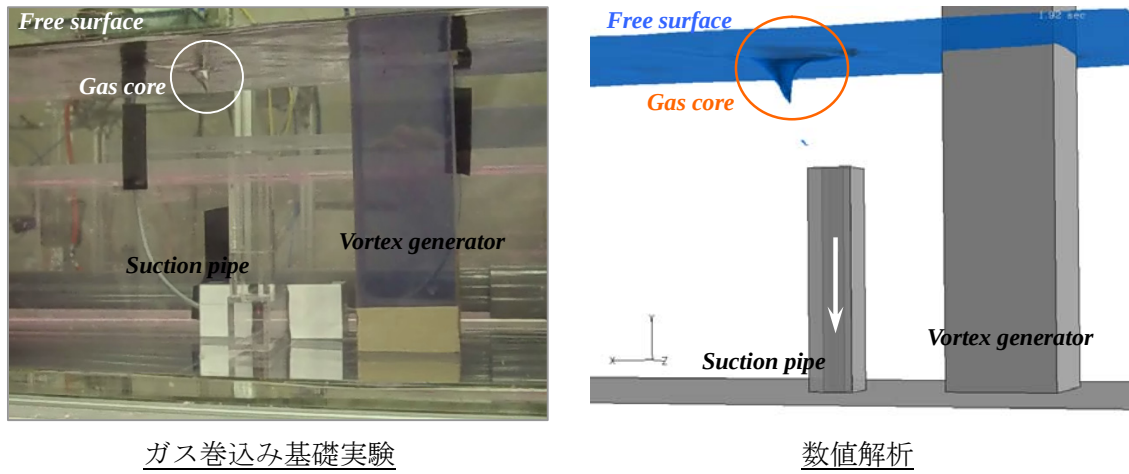


図 3.26 ガスコア形状の比較

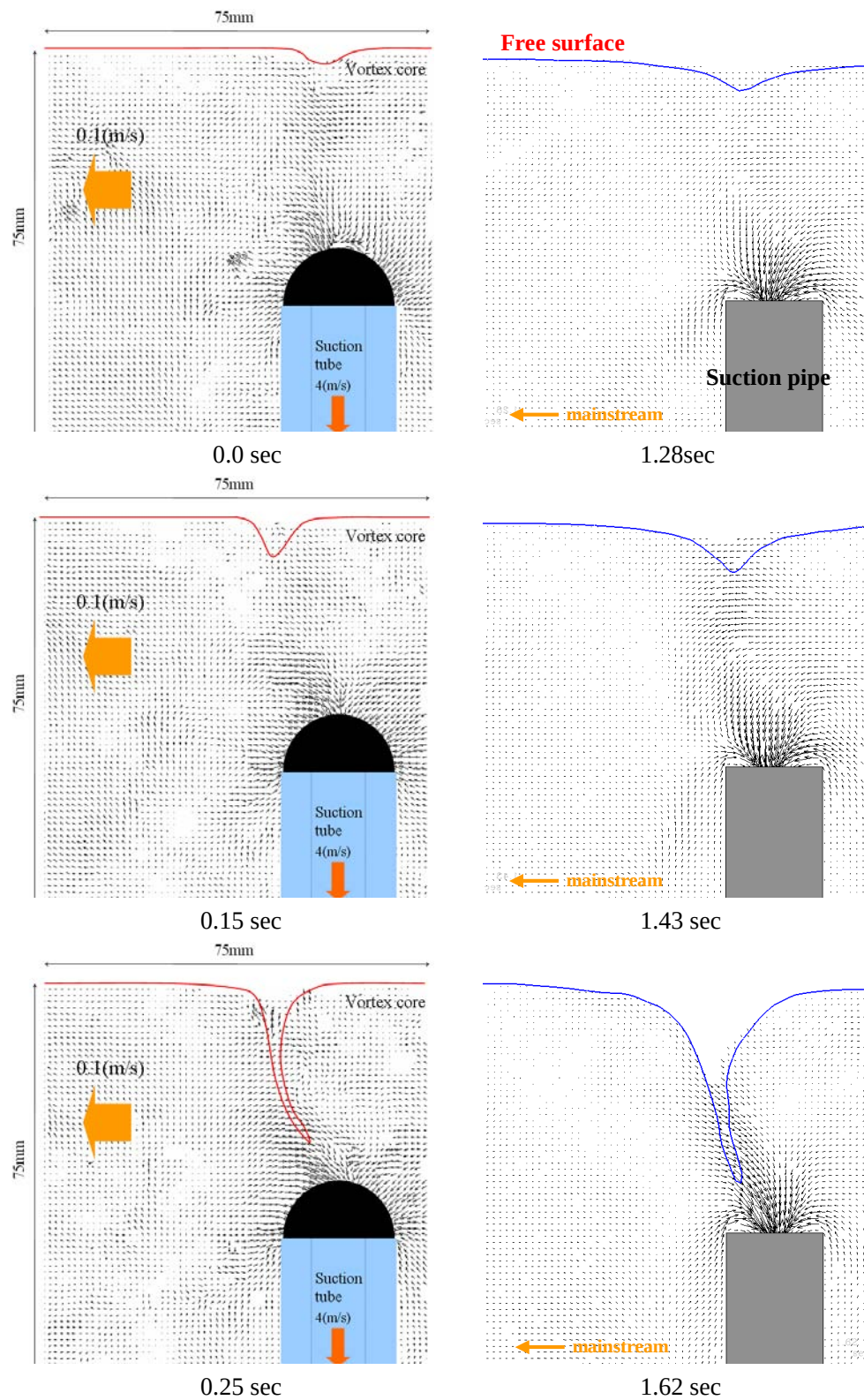


図 3.27 吸込み配管中央垂直断面における速度ベクトル
(左：ガス巻き込み基礎実験、右：数値解析)

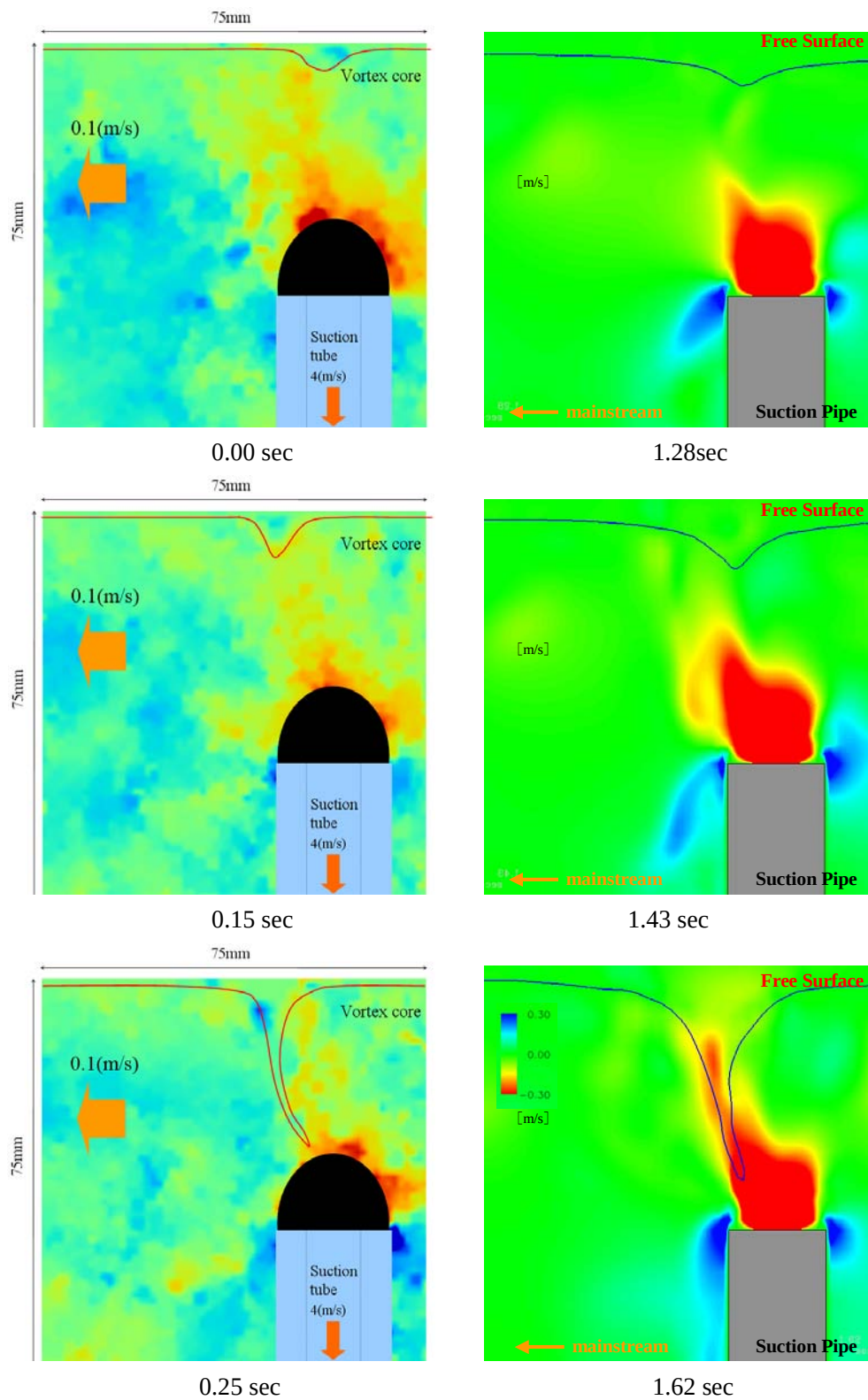


図 3.28 吸込み配管中央垂直断面における下降流速分布
(左：ガス巻き込み基礎実験、右：数値解析)

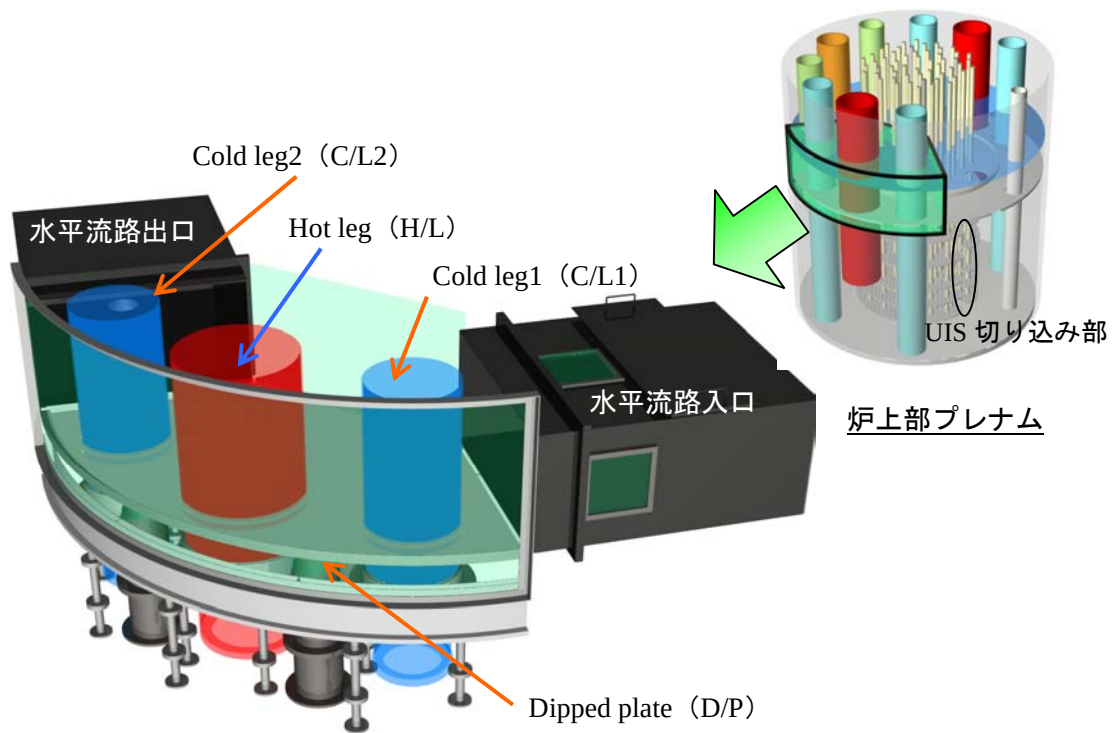


図 4.1 1/1.8 縮尺液面部分モデル水流動試験装置

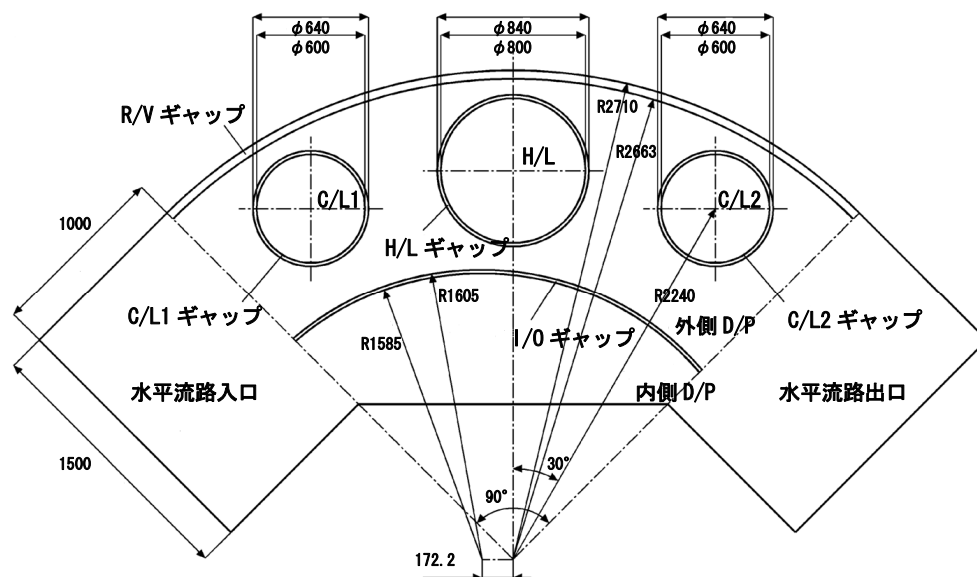
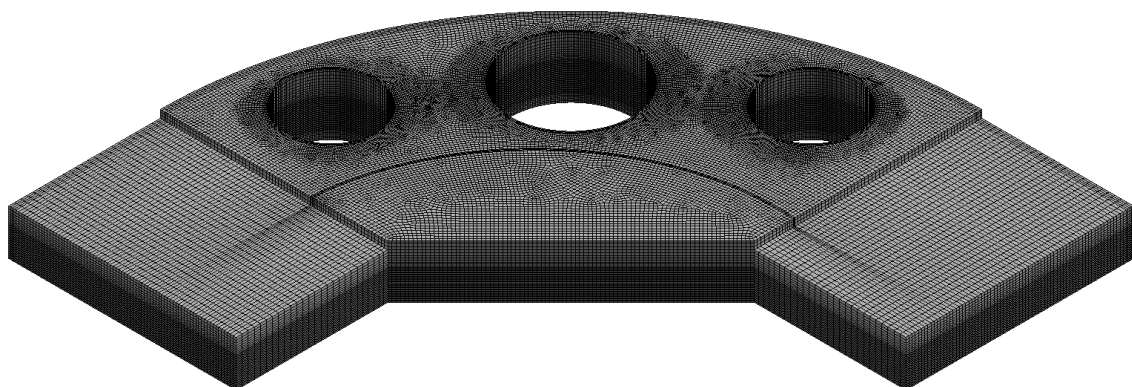
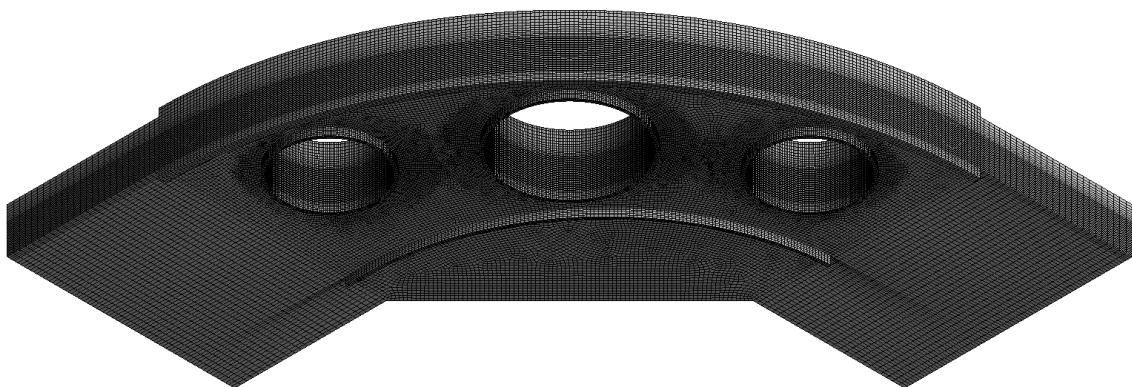


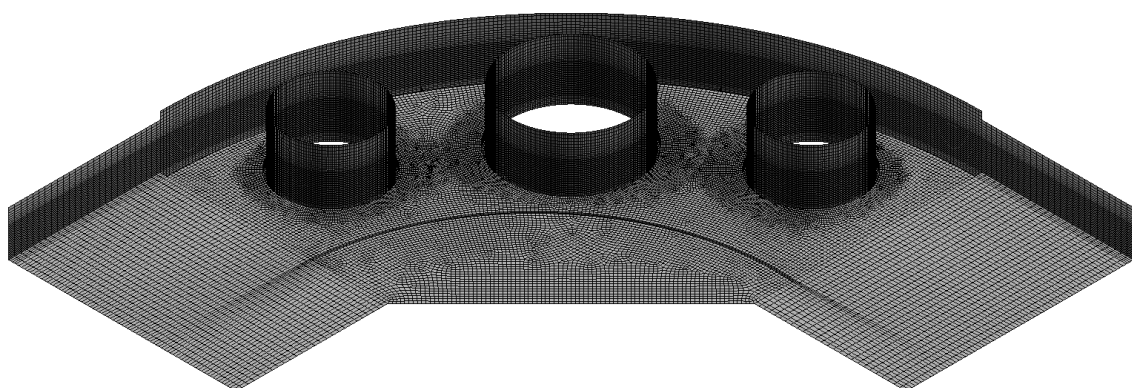
図 4.2 1/1.8 スケール液面部分モデル水流動試験装置の寸法



(a) 外部上方

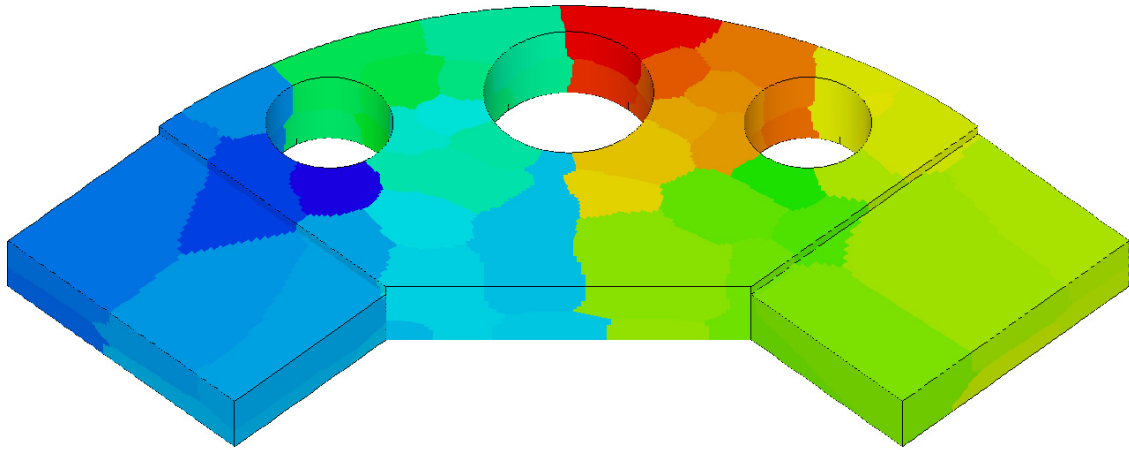


(b) 外部下方

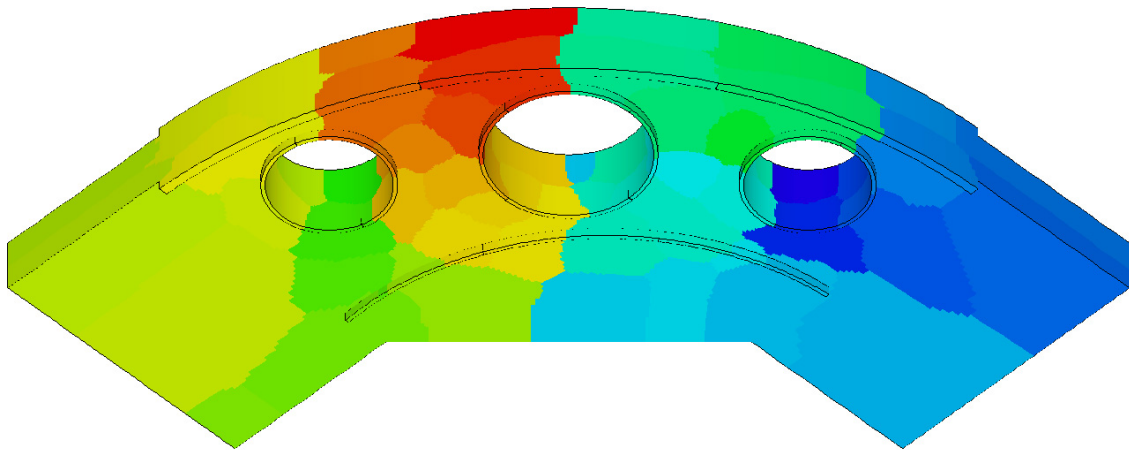


(c) 内部形状

図 4.3 解析メッシュ（液位 0.20m、1,016,672 セル）



(a) 外部上方



(b) 外部下方

図 4.4 解析メッシュの領域分割 (64 分割)

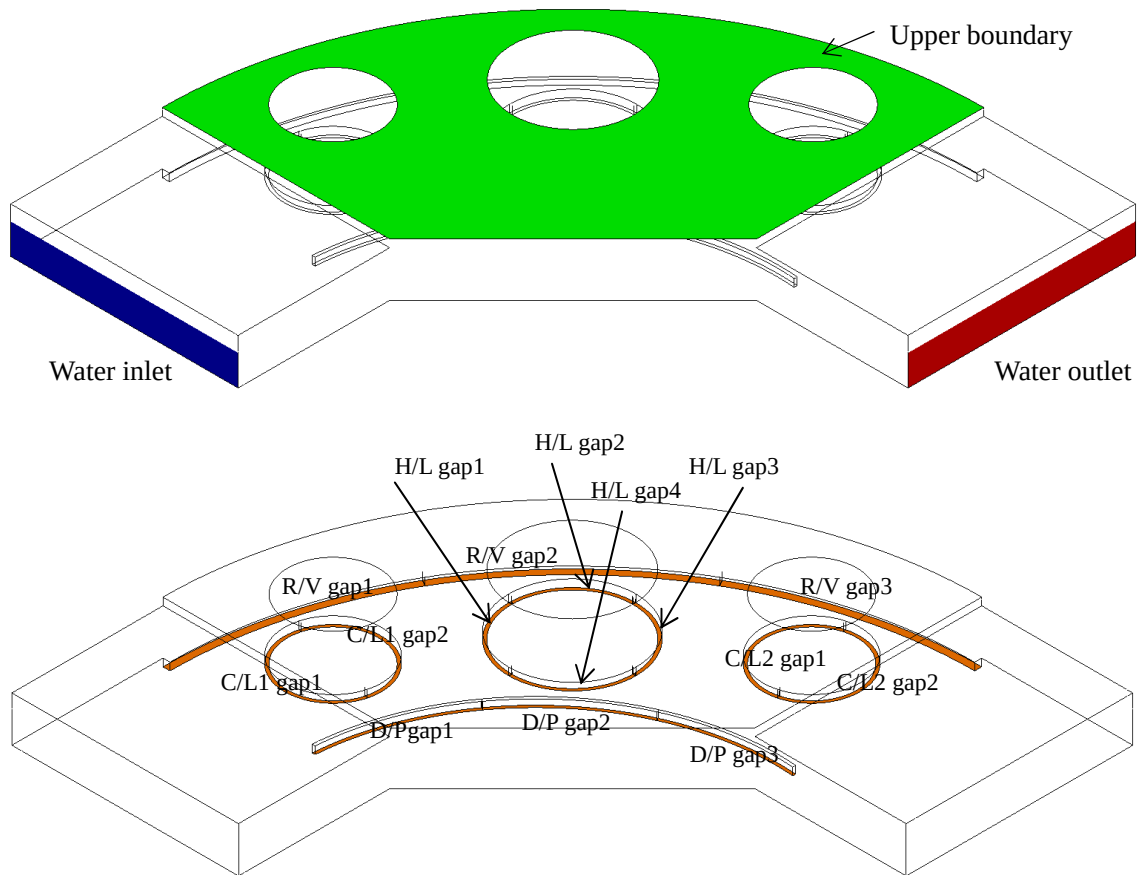


図 4.5 境界条件

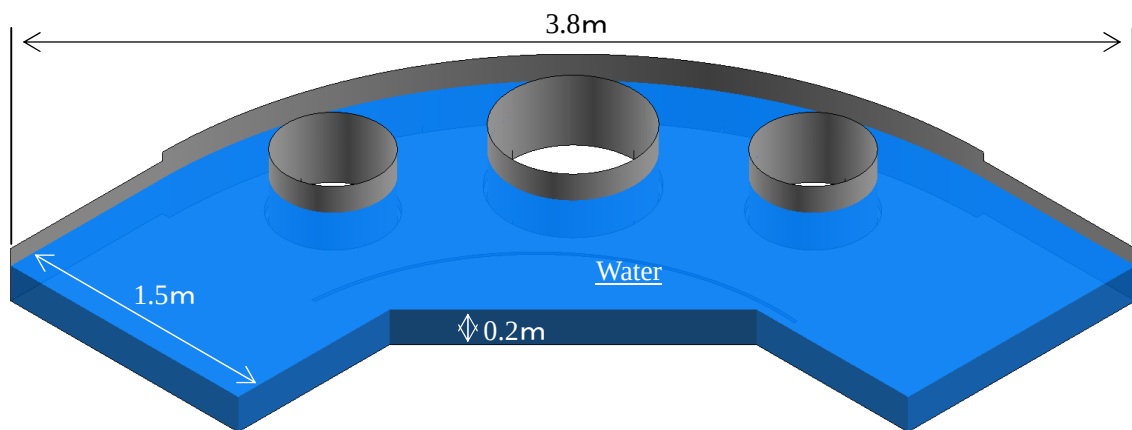


図 4.6 気液界面の初期位置（液位 0.20m）

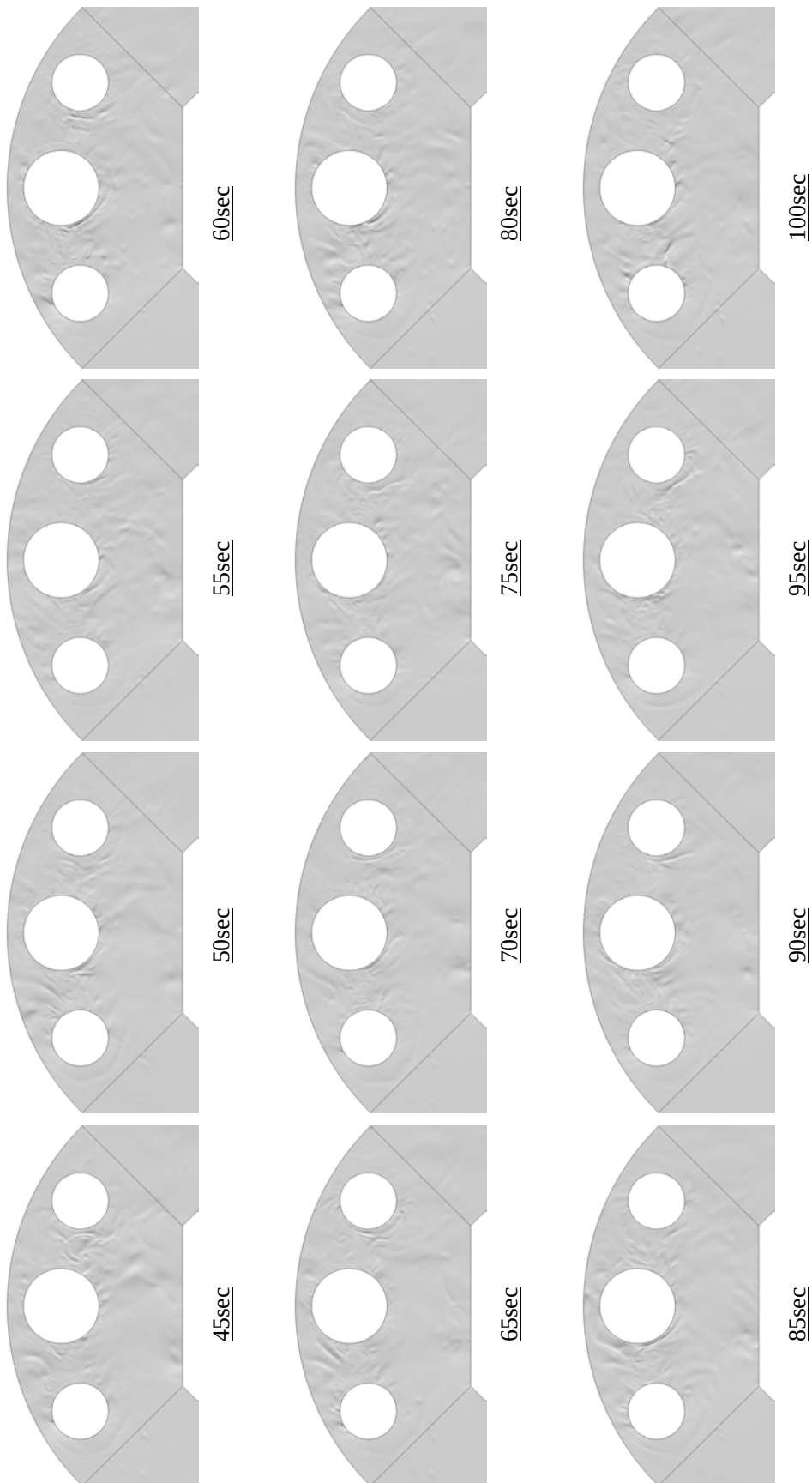


図 4.7 自由液面形状の時間変化

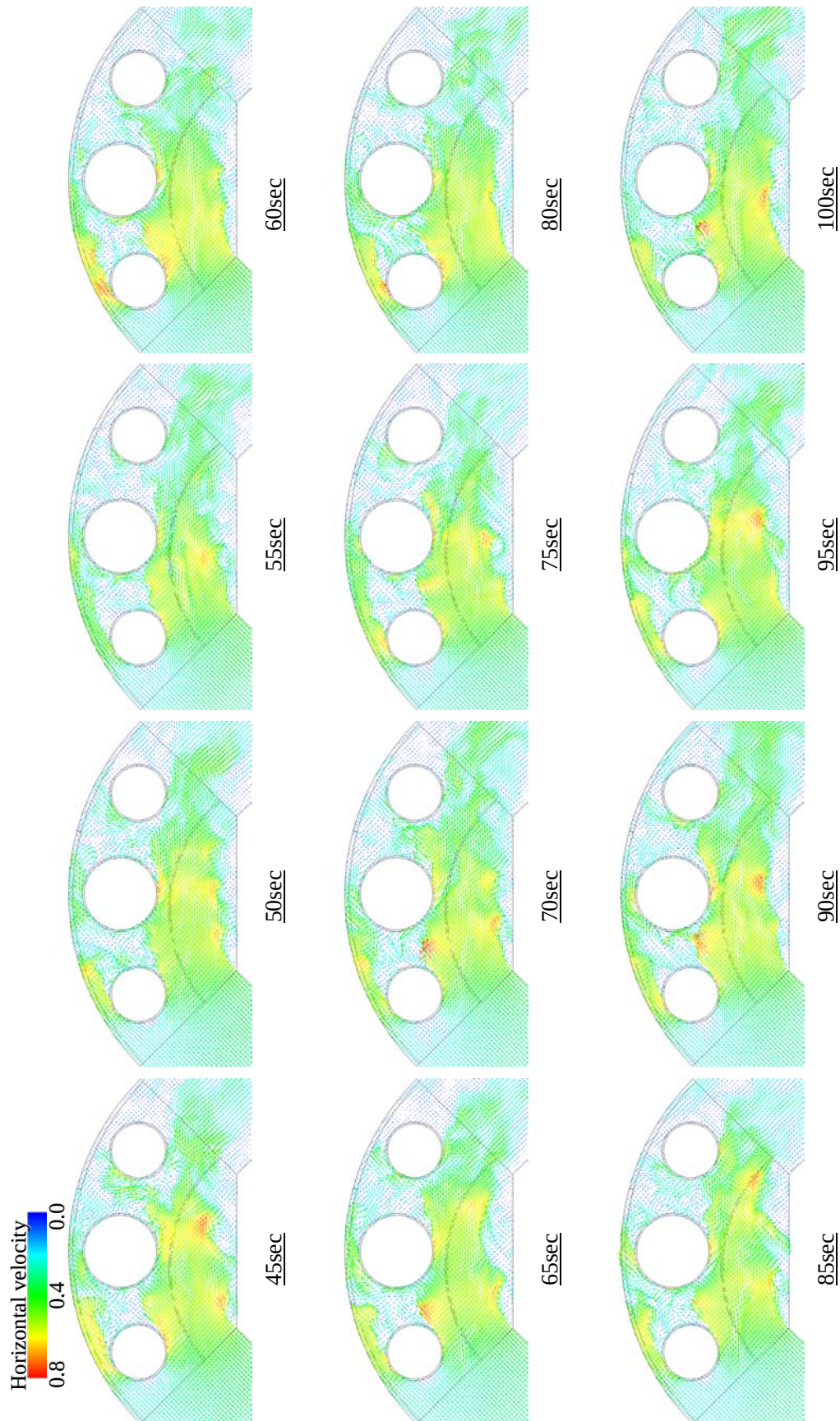


図 4.8 液位 0.18m における水平方向流速分布の時間変化

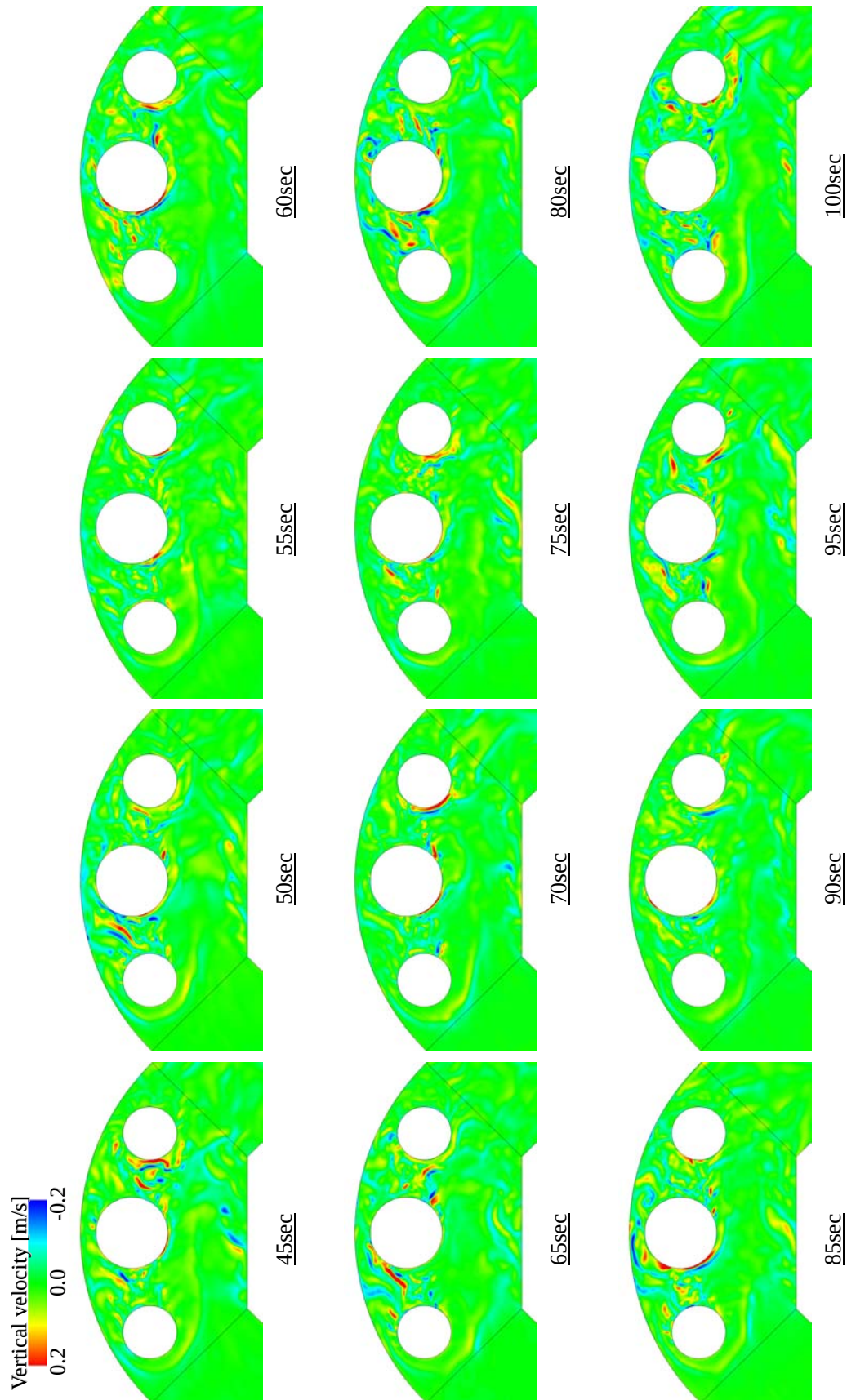


図 4.9 液位 0.18m における垂直方向流速分布の時間変化

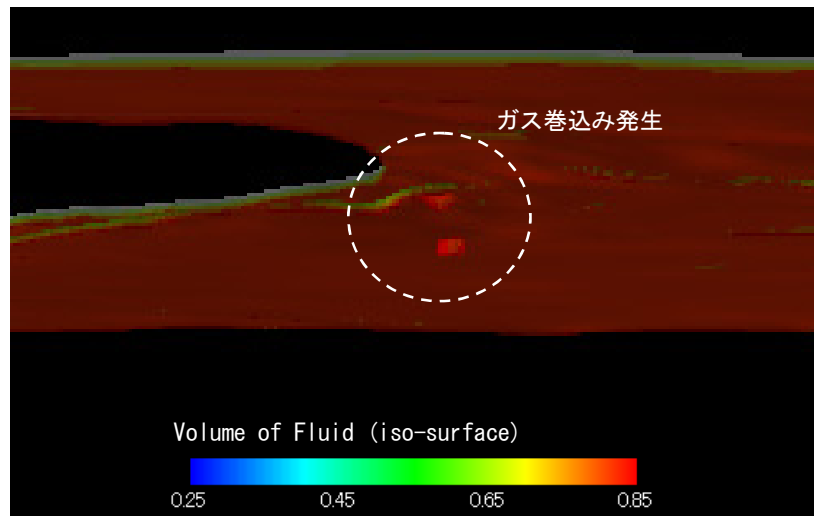


図 4.10 ガス巻き込みの発生判定

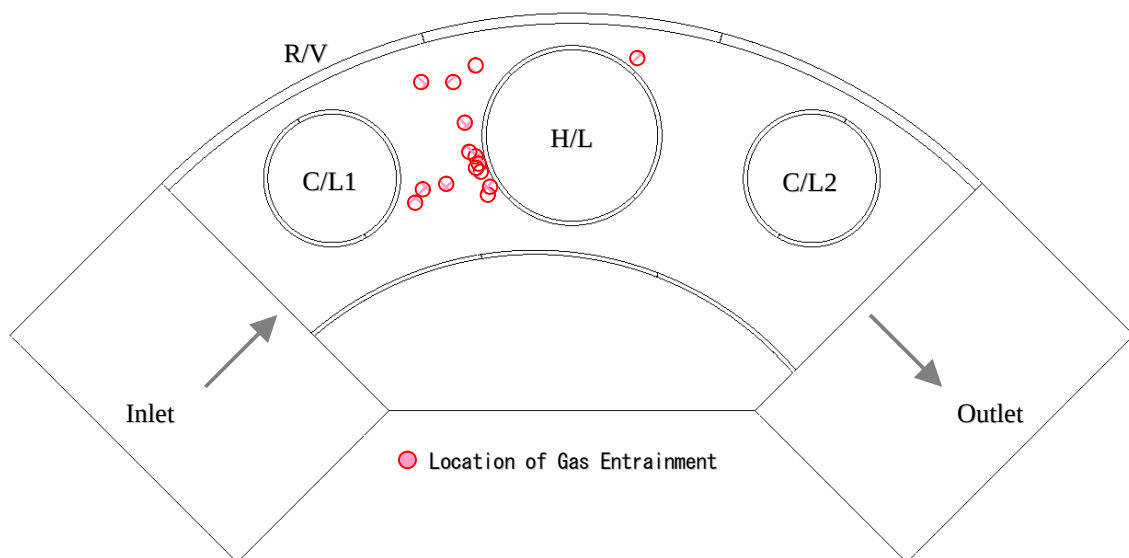


図 4.11 ガス巻き込みの発生位置 (40～100sec)

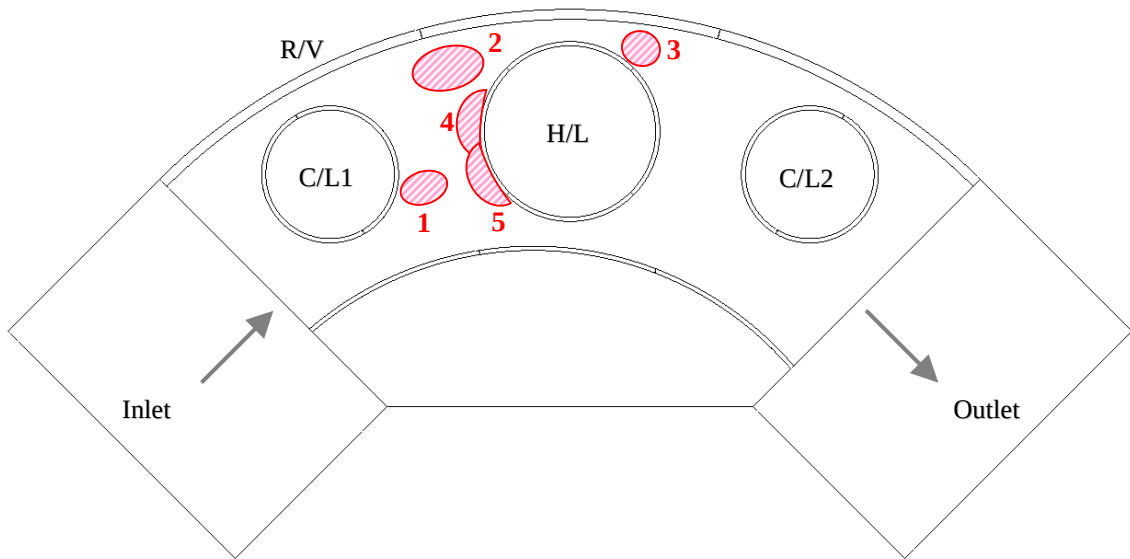


図 4.12 ガス巻込みの発生領域 (40~100sec)

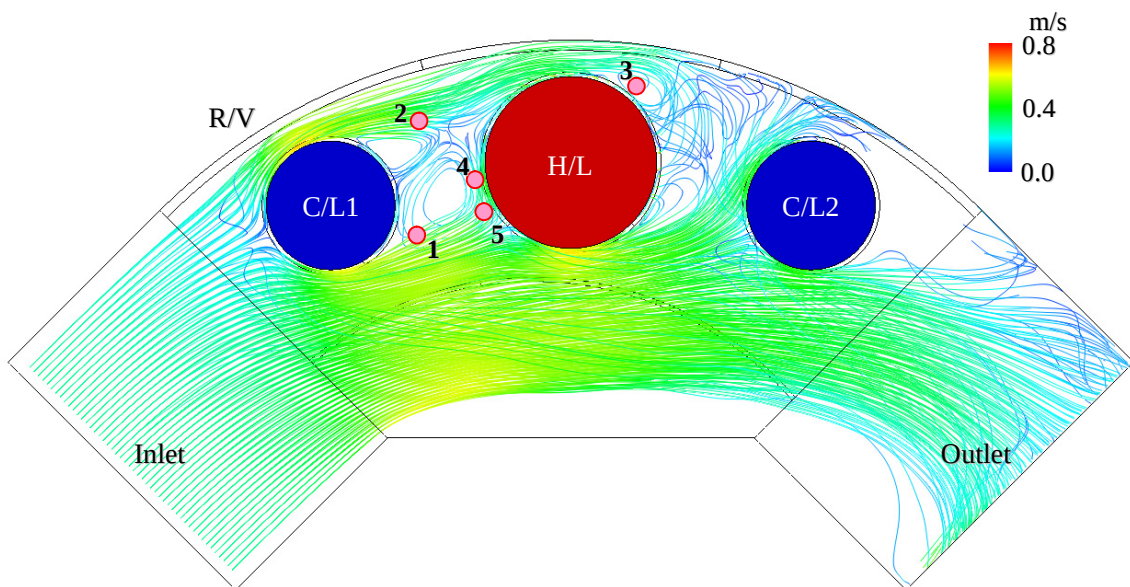


図 4.13 代表的なガス巻込み発生位置と時間平均流況 (55-65sec)

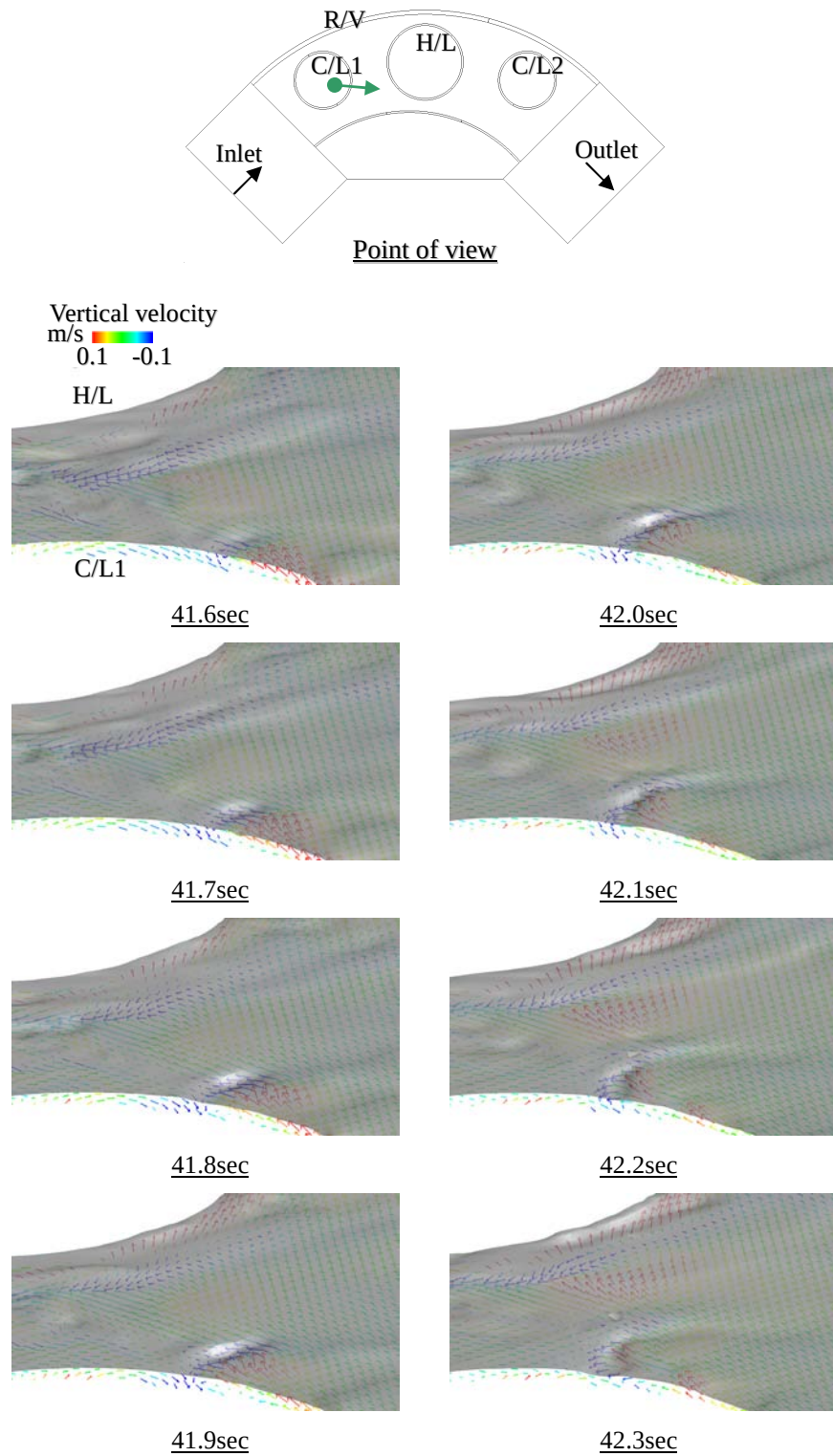


図 4.14 領域 1 (C/L1-H/L 間) におけるガス巻込み挙動

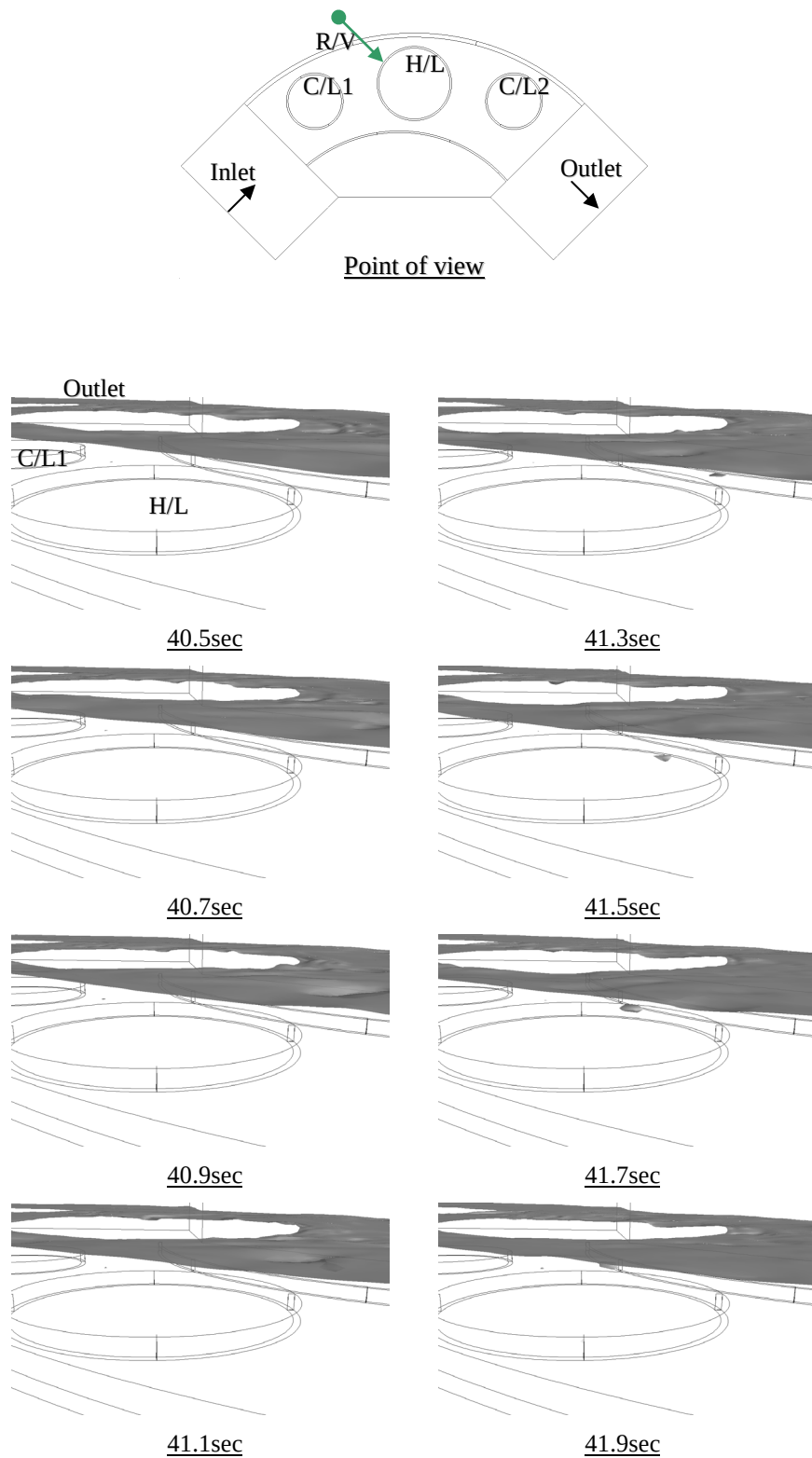


図 4.15 領域 2 (C/L1-H/L 間 R/V 近傍) におけるガス巻き込み挙動

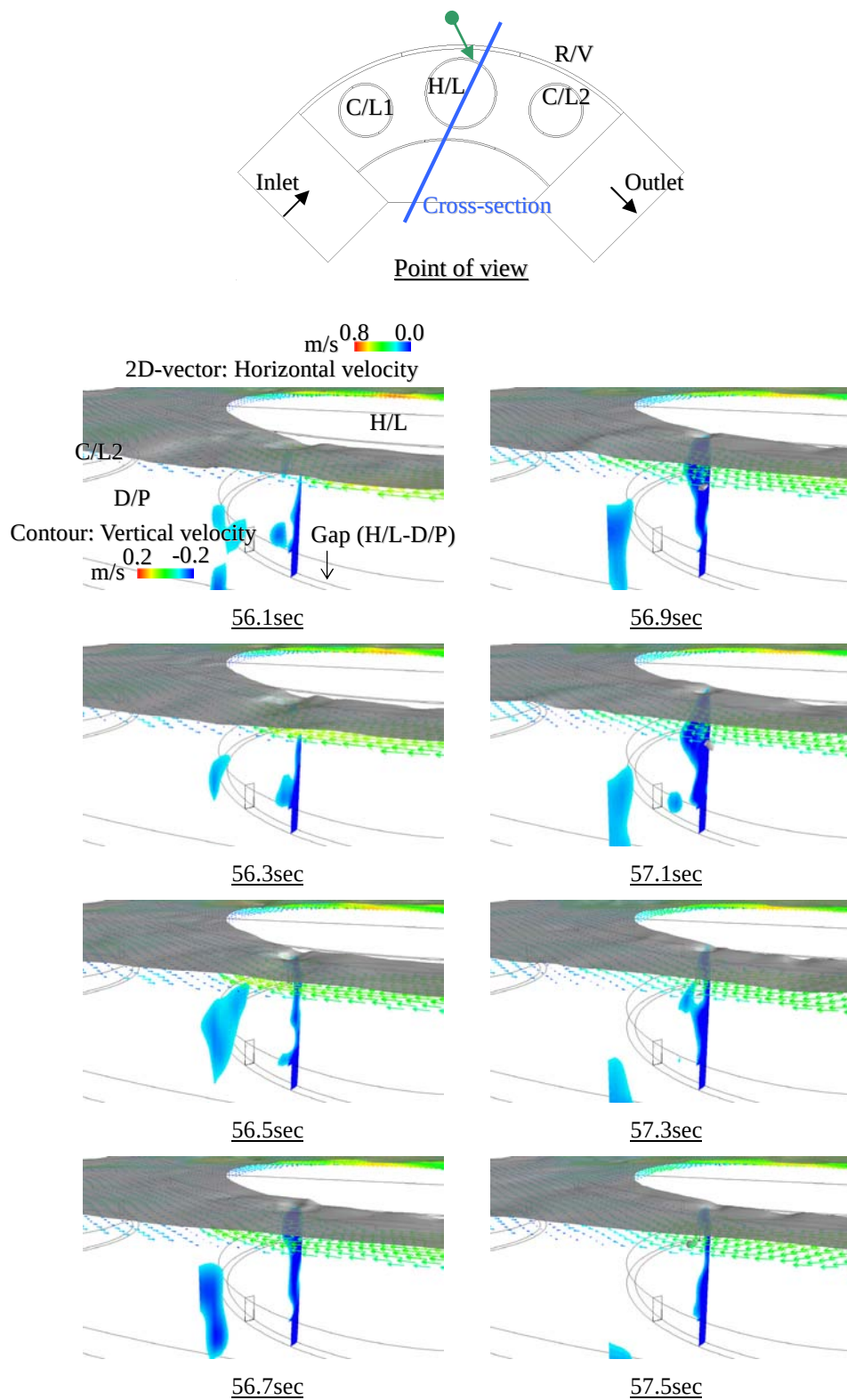


図 4.16 領域 3 (H/L-R/V 間) におけるガス巻込み挙動

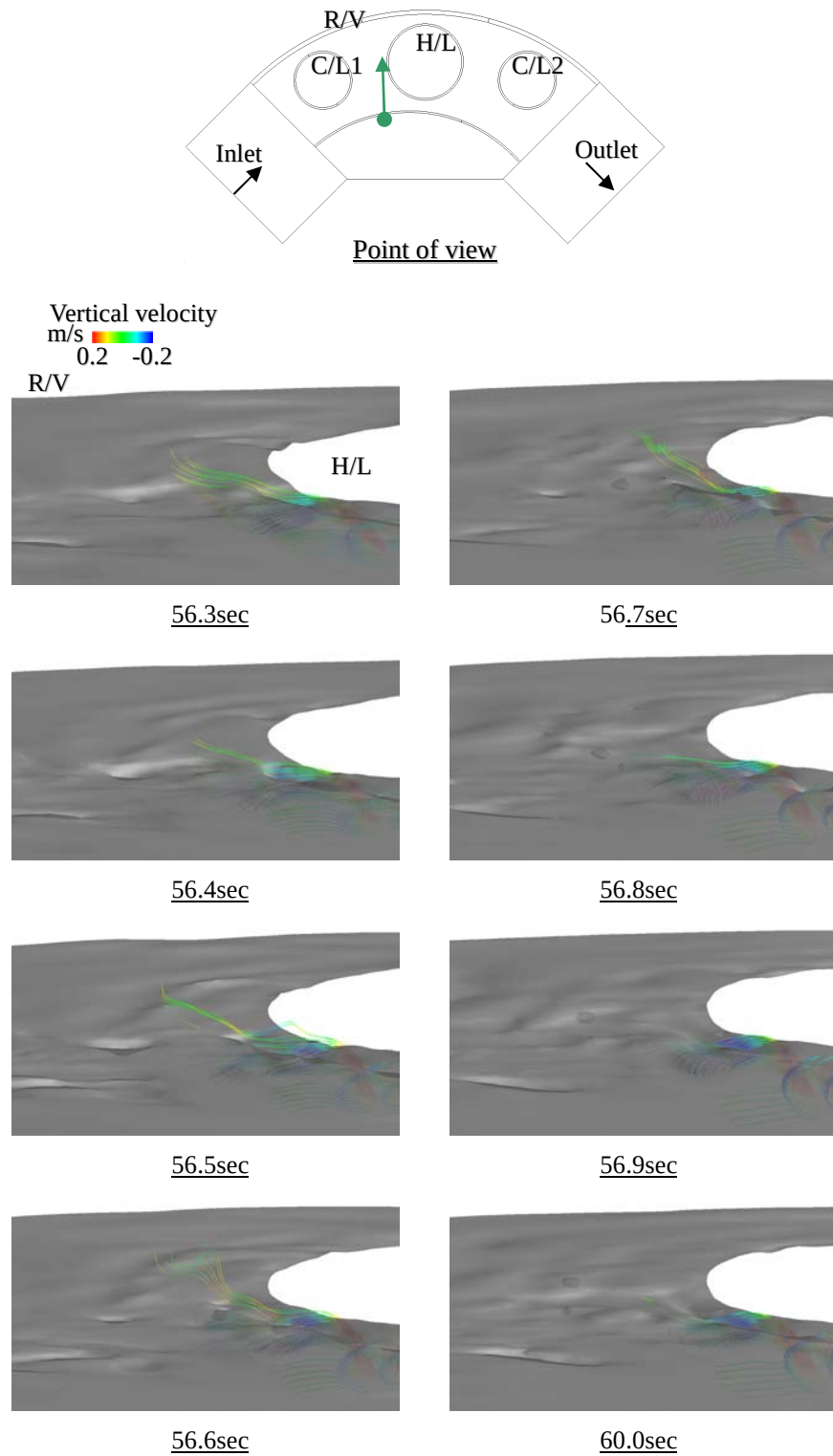


図 4.17 領域 4 (H/L 前縁内側) におけるガス巻き込み挙動

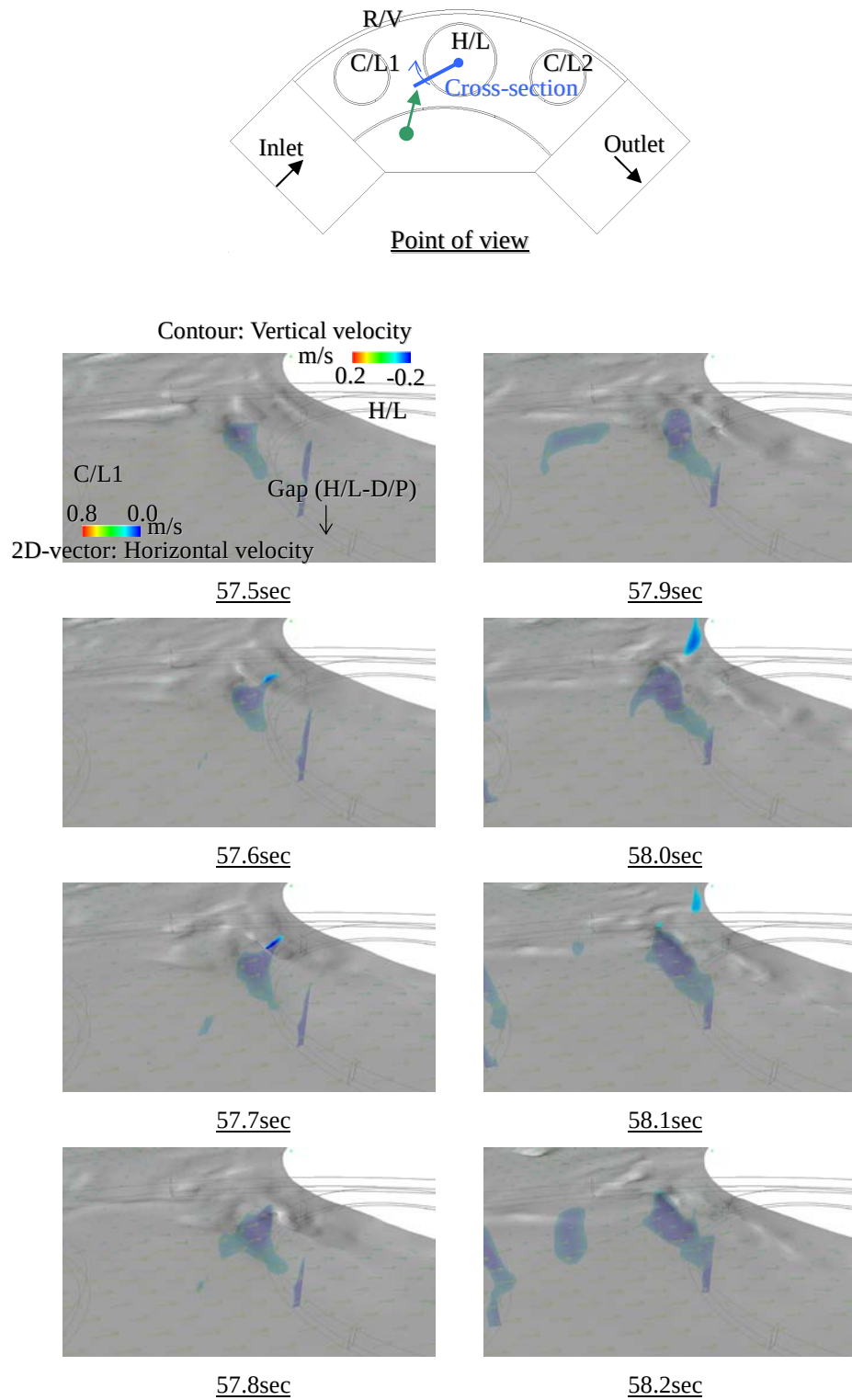


図 4.18 領域 5 (H/L 前縁 C/L1-H/L 間) におけるガス巻き込み挙動

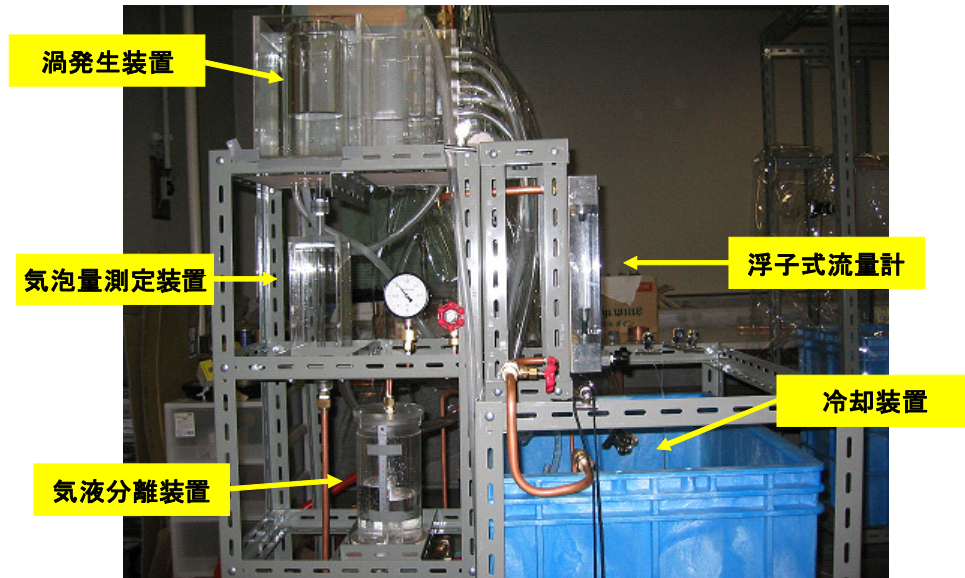


図 5.1 ガス巻き込み量計測基礎実験装置

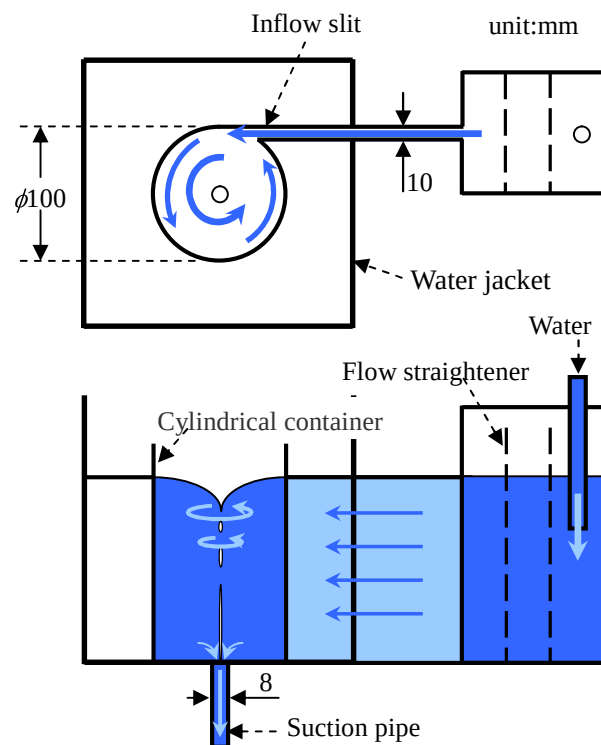


図 5.2 ガス巻き込み量計測実験装置の渦発生装置の概要

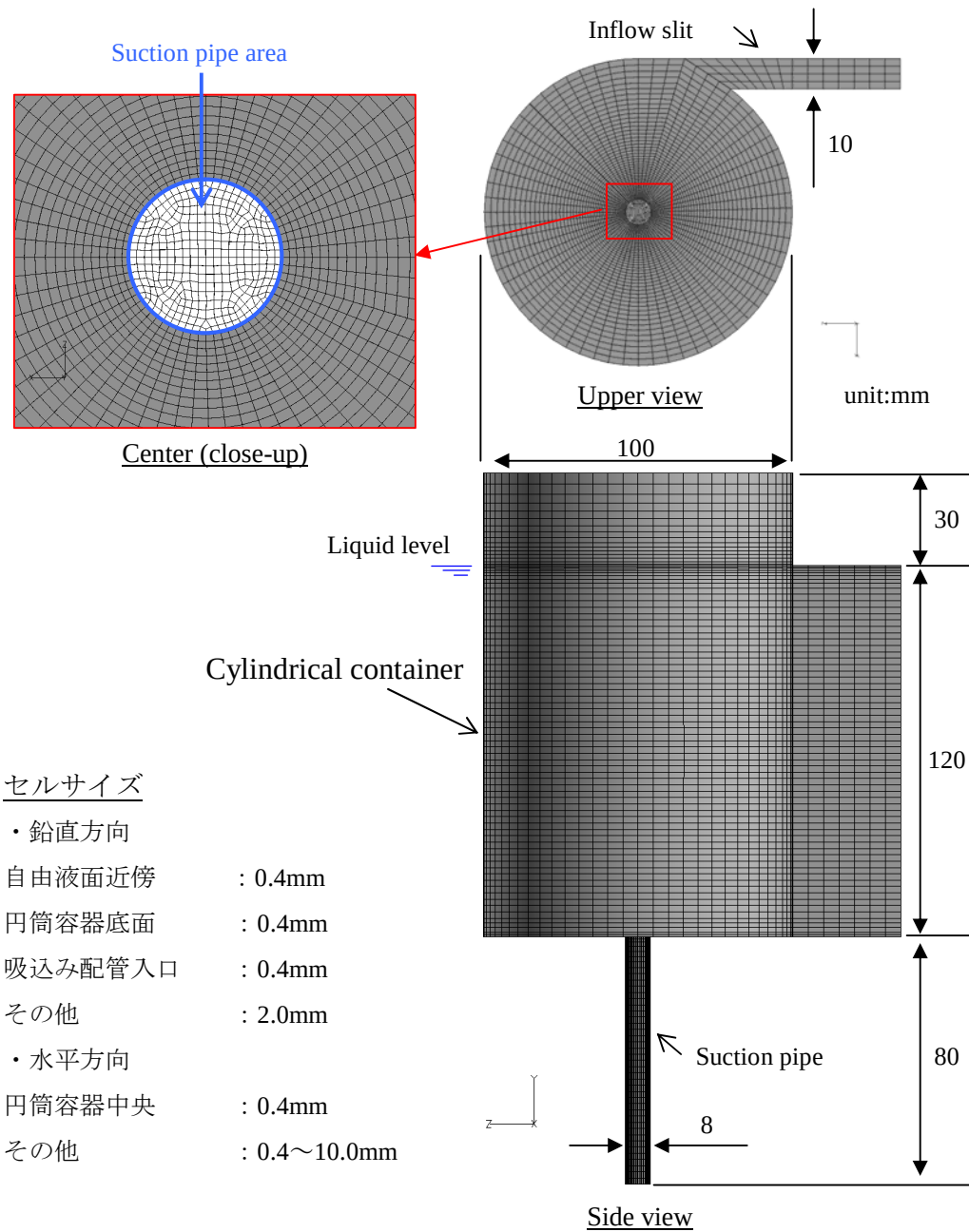


図 5.3 液位 0.12m 条件の解析メッシュ (283,388 セル)

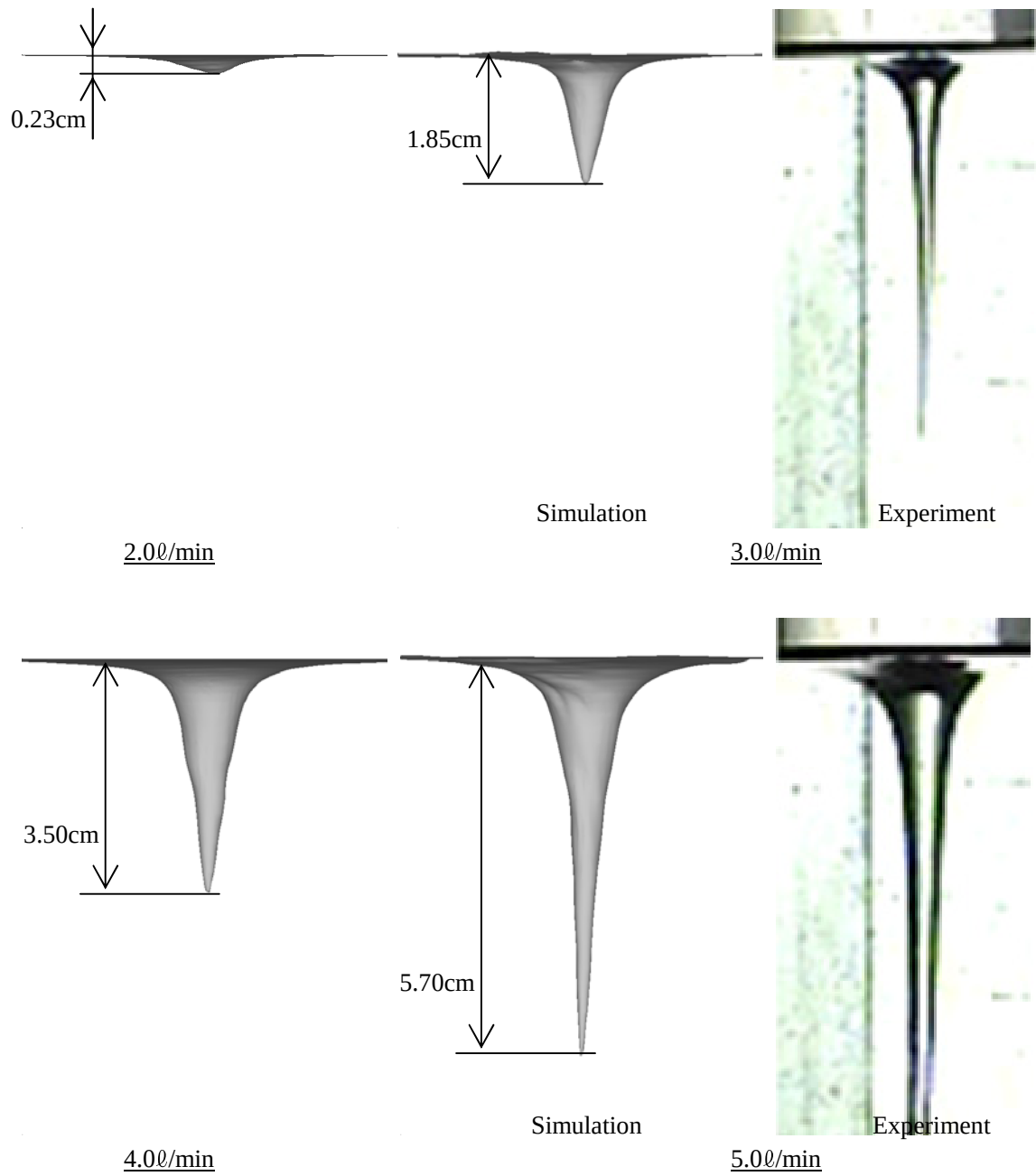


図 5.4 液位 0.12mにおけるガスコア形状と長さ

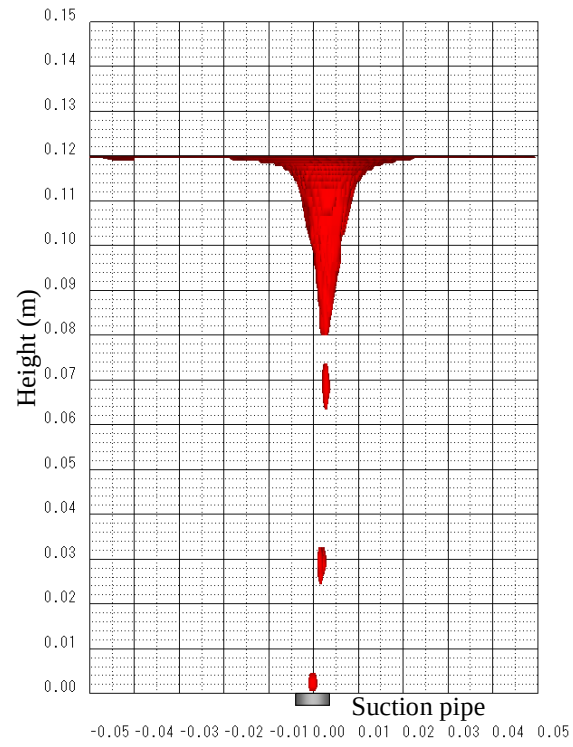


図 5.5 液位 0.12m、流量 4.0ℓ/min における気泡状ガス巻込みの発生
(流体率 1.0 の等値面)

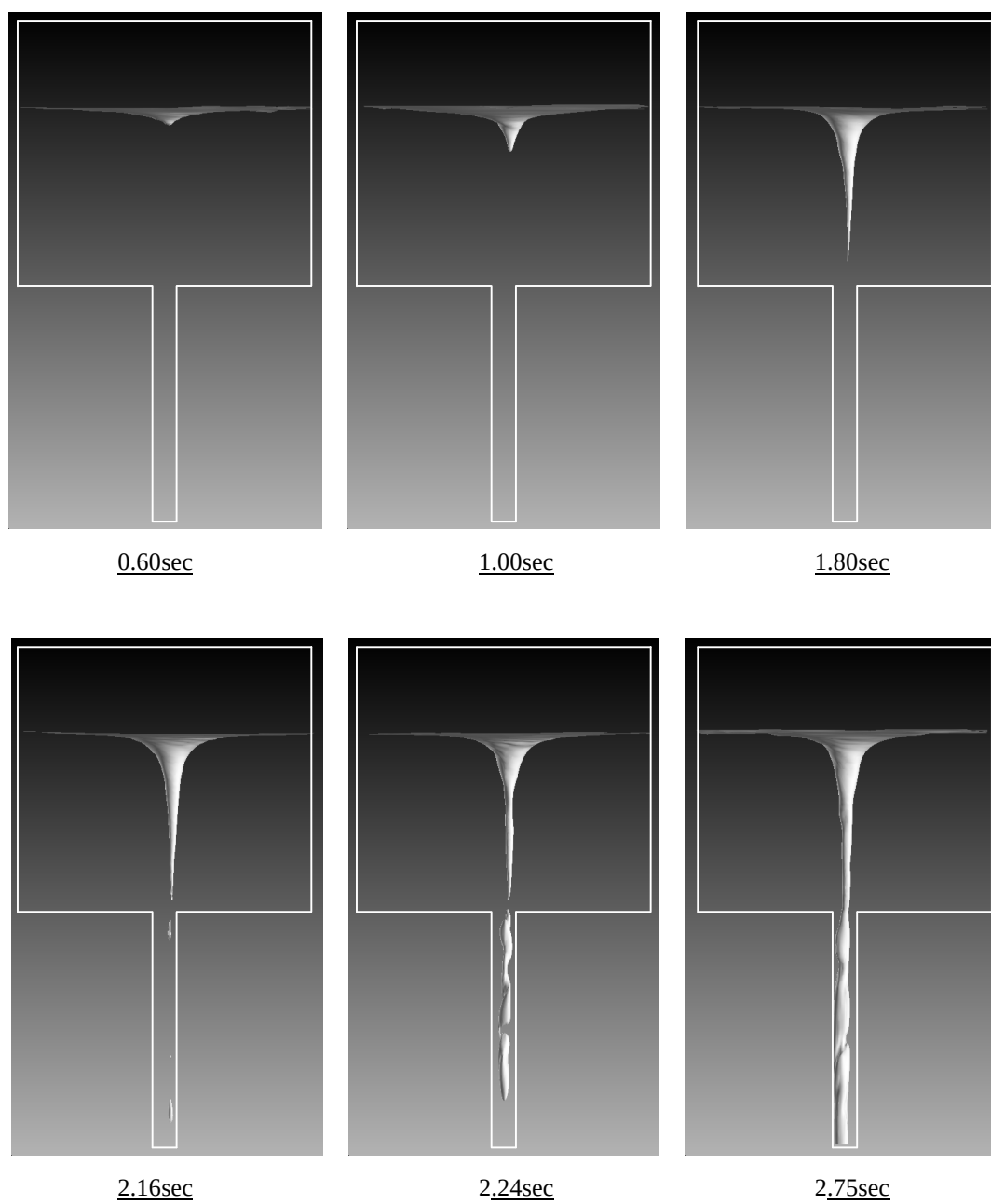


図 5.6 液位 0.06m 条件におけるガスコア成長挙動

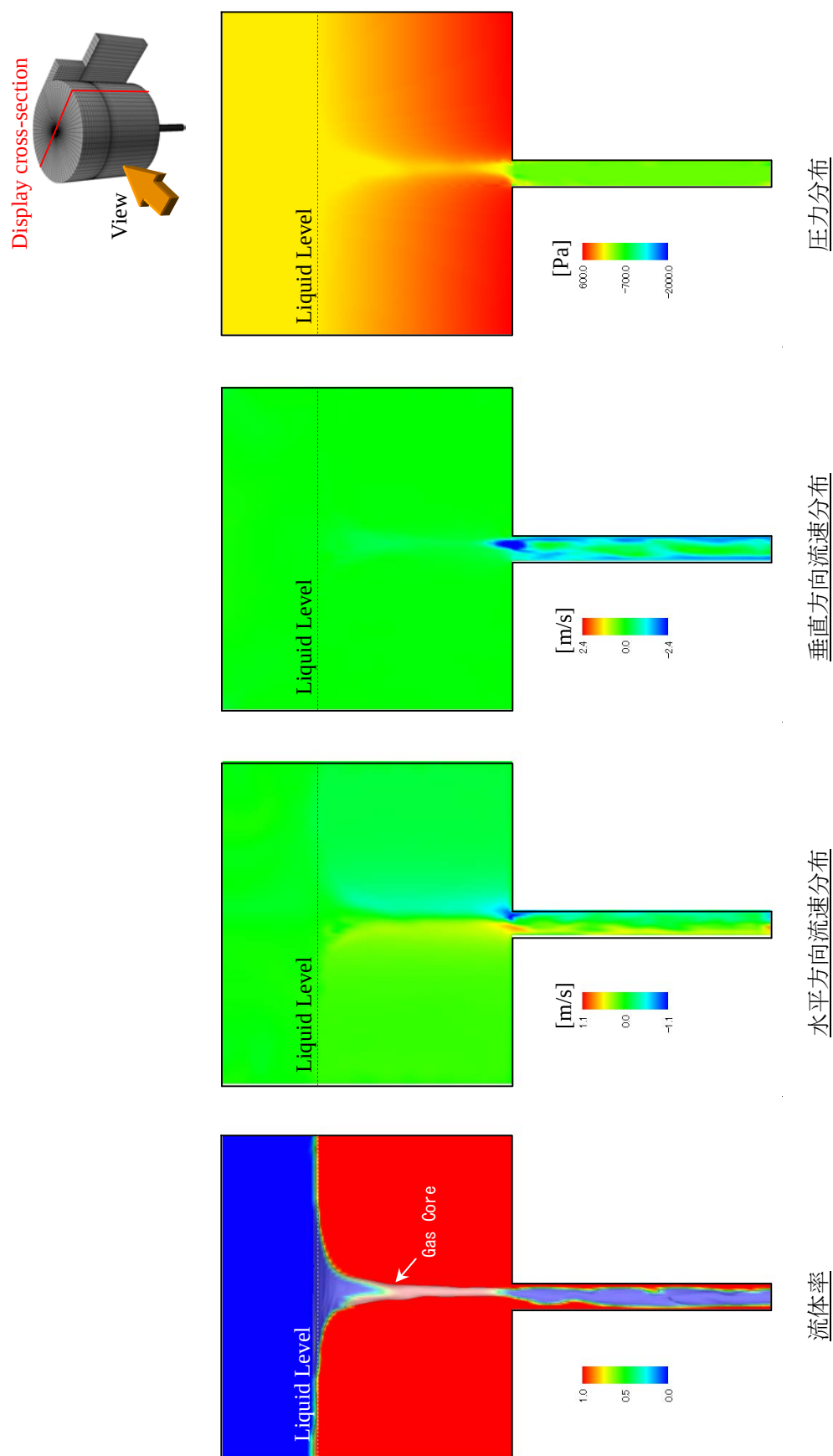


図 5.7 気柱状ガス巻込み発生時の円筒容器中央断面の物理量分布（液位 0.06m）

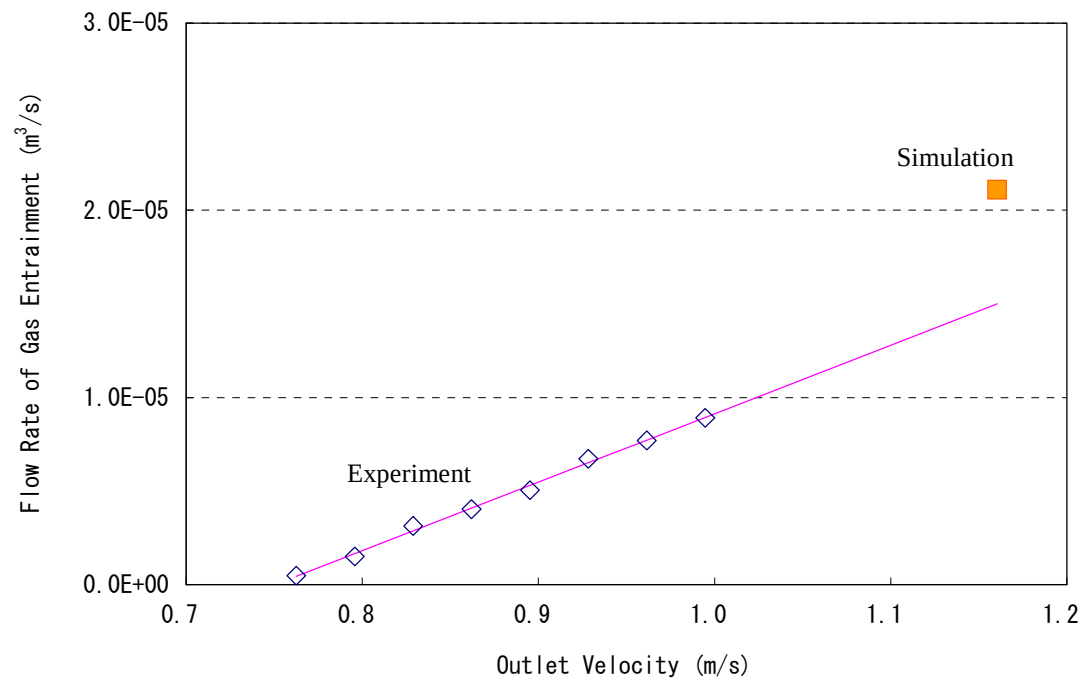


図 5.8 出口平均流速とガス巻込み流量の関係（実験結果と解析結果の比較）

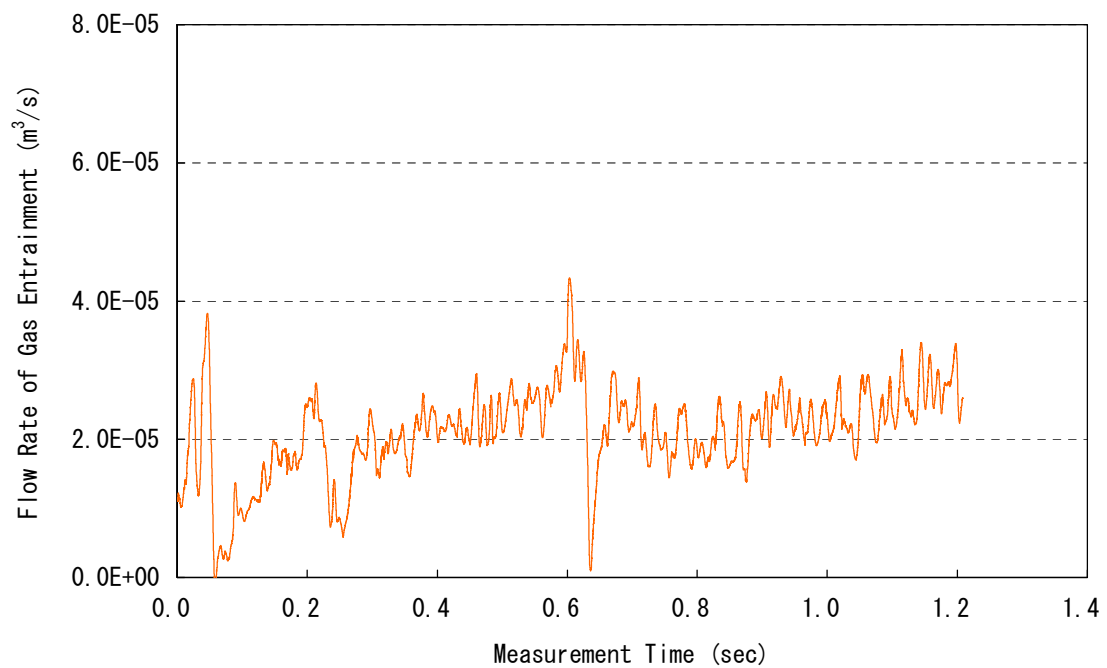


図 5.9 ガス巻込み流量の時間変化

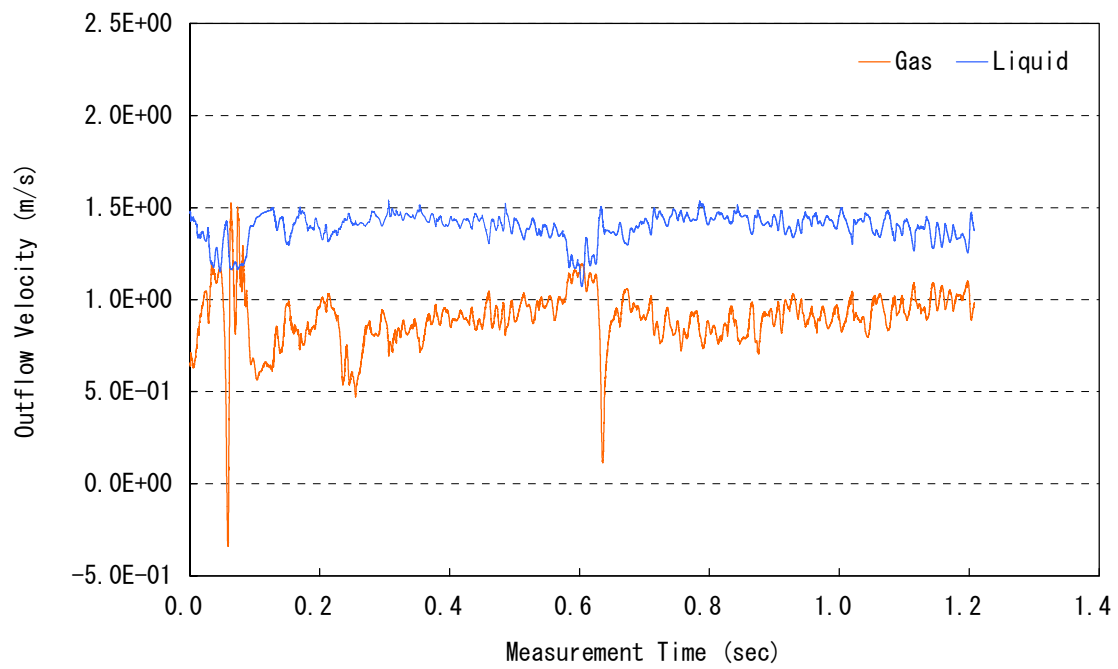


図 5.10 吸込み配管出口における各相の流出流速

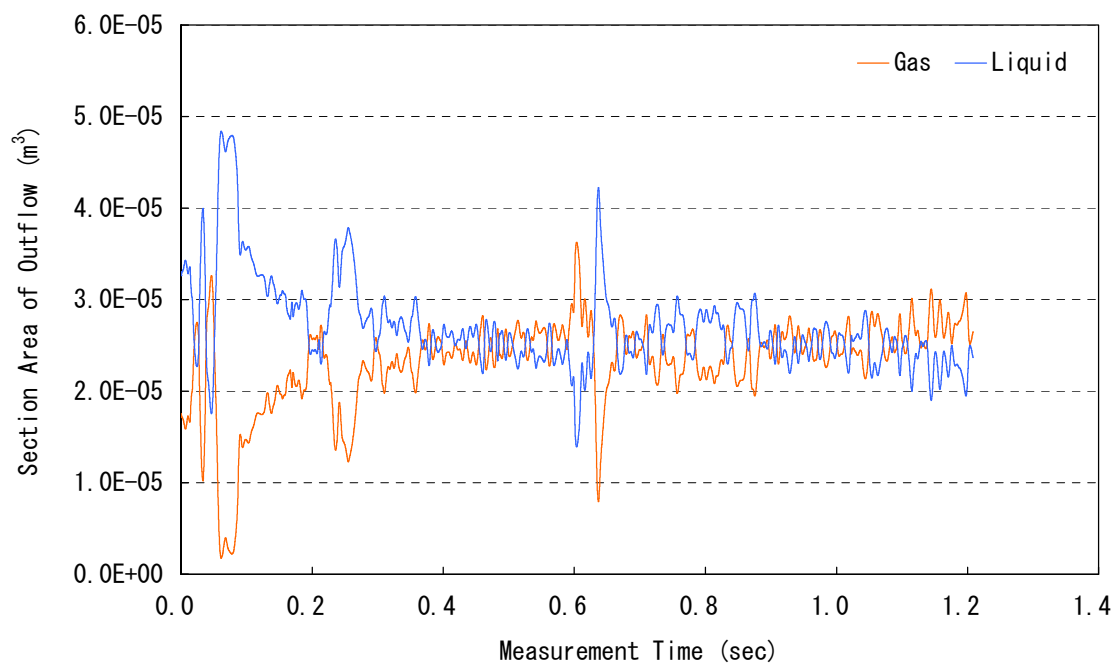


図 5.11 吸込み配管出口における各相の断面積

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質モル	mol	
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速さ, 速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量, ビエネルギー当分, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

- (a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報を付たえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。
(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガール	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

- (c) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≐ 」は対応関係を示すものである。

表 10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

