

自由液面からのガス巻き込みに関する数値解析(Ⅰ)

－ 円筒容器内での自由表面渦の解析 －

(研究報告)

2002年11月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

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)

2002

自由液面からのガス巻き込みに関する数値解析(I)

—円筒容器内での自由表面渦の解析—

(研究報告)

伊藤 啓^{*1}, 塚 公明^{*1}, 山口 彰^{*1}

要旨

実用化戦略調査研究で検討されているナトリウム冷却大型炉では、炉容器上部プレナム内の冷却材流速が比較的大きく、自由表面からのガス巻き込みを防止することが重要となっている。

従来の研究より、原子炉容器内で発生するガス巻き込みの要因は、液面の乱れ、潜り込み及び窪み渦に大別できることが分かっている。このうち、窪み渦によるガス巻き込みは、渦中心部近くの下降流の存在により発生し、実験、解析により、ナトリウム冷却大型炉概念での設計基準を明確化しておくことが重要である。

本報では、窪み渦によるガス巻き込み評価手法確立の一環として、電力中央研究所にておこなわれた自由表面渦試験を対象とし、自由表面形状を考慮した3次元流動解析をおこなった。

その結果、窪み渦速度分布の解析精度は解析メッシュ幅に大きく依存し、渦スケール(周方向最大流速が生じる半径)の1/10程度の大きさのメッシュを用いることによって、渦スケール程度の解析精度を得ることが可能となった。窪み渦解析における表面張力の効果を調査するために、表面張力係数をパラメータとした解析をおこない、表面張力係数を大きくすることで、液面の窪み量が減少することを確認した。また、渦中心近傍の領域では、数値拡散の影響が大きいため、高次精度差分を用いて解析をおこなう必要があることが明らかになった。

*1 大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究 Gr

Numerical-simulation for gas entrainment from free surface (I)

-Calculation of free surface vortex in the cylinder-

Kei Ito^{*1}, Takaaki Sakai^{*1}, Akira Yamaguchi^{*1}

Abstract

Design study is made on a large-scale sodium-cooled fast breeder reactor in the feasibility studies of the next generation reactors. In this design, coolant velocity in the upper plenum of reactor vessel is higher than conventional designs. Therefore special attention should be paid to gas entrainment behavior at the free surface. Gas entrainment due to a free surface vortex is particularly important, because it has downward velocity near the vortex center. The velocity is large enough to carry a gas bubble to the primary circuit, which connects to the core region.

In this research, a free surface vortex test, conducted in Central Research Institute of Electric Power Industry, was numerically simulated, for the purpose of establishing an evaluation method of gas entrainment. VOF (Volume of Fluid) model of PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation) type and CSF (Continuum Surface Force) model for surface tension are used to consider the free surface dynamics.

As a result, it is noted that calculation accuracy of the vortex greatly depends on the mesh size in the analysis model. Required accuracy was obtained when the mesh size is 1/10 of the vortex scale length (i.e., radius where the tangential velocity reaches the maximum). Effect of surface tension was also investigated. It was cleared that higher surface tension coefficient tend to decrease the gas core dent of the vortex. In addition, 1st upwind scheme and 2nd upwind scheme was compared. It is concluded that the effect of numerical diffusivity is significant near the vortex center.

*1 Thermal-Hydraulic Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

目次

1. 概要	1
2. 解析体系・解析手法	2
2.1 解析体系	2
2.2 解析コード・解析モデル	2
2.3 解析メッシュ	3
2.4 解析条件	3
3. 解析結果	10
3.1 解析ケース	10
3.2 標準メッシュ体系における解析結果	10
3.3 詳細メッシュ体系における解析結果	10
3.4 渦度分布	11
4. 考察	28
4.1 定常状態について	28
4.2 標準メッシュ体系における解析と実験の比較	28
4.3 詳細メッシュ体系における解析と実験の比較	28
4.4 メッシュの細かさと解像度の関係	29
4.5 表面張力係数について	29
4.6 ガスコア長さを基準とした相似位置での比較	29
4.7 差分精度が解析結果に与える影響	30
5. 結言	39
参考文献	40
謝辞	41

表リスト

表 2.1	試験条件	5
表 3.1	解析ケース	10

図リスト

図 2.1	解析体系	6
図 2.2	解析メッシュ(side view)	7
図 2.3	解析メッシュ(bottom view)	7
図 2.4	解析メッシュ(標準メッシュ, overhead view)	8
図 2.5	解析メッシュ(詳細メッシュ, overhead view)	9
図 2.6	解析メッシュ(詳細メッシュ, 拡大図)	9
図 3.1	液面近傍 VOF 関数分布(標準メッシュ)	12
図 3.2	液面形状(標準メッシュ, bird's eye view)	13
図 3.3	液面形状(標準メッシュ, side view)	13
図 3.4	周方向速度分布(標準メッシュ)	14
図 3.5	軸方向速度分布(標準メッシュ)	14
図 3.6	液面近傍 VOF 関数分布(標準メッシュ, 表面張力考慮)	15
図 3.7	液面形状(標準メッシュ, 表面張力考慮, bird's eye view)	16
図 3.8	液面形状(標準メッシュ, 表面張力考慮, side view)	16
図 3.9	周方向速度分布(標準メッシュ, 表面張力考慮)	17
図 3.10	軸方向速度分布(標準メッシュ, 表面張力考慮)	17
図 3.11	液面近傍 VOF 関数分布(詳細メッシュ)	18
図 3.12	液面形状(詳細メッシュ, bird's eye view)	19
図 3.13	液面形状(詳細メッシュ, side view)	19
図 3.14	周方向速度分布(詳細メッシュ)	20
図 3.15	軸方向速度分布(詳細メッシュ)	20
図 3.16	液面近傍 VOF 関数分布(詳細メッシュ, 表面張力 0.1 倍)	21
図 3.17	液面形状(詳細メッシュ, 表面張力 0.1 倍, bird's eye view)	22
図 3.18	液面形状(詳細メッシュ, 表面張力 0.1 倍, side view)	22
図 3.19	周方向速度分布(詳細メッシュ, 表面張力 0.1 倍)	23
図 3.20	軸方向速度分布(詳細メッシュ, 表面張力 0.1 倍)	23
図 3.21	液面近傍 VOF 関数分布(詳細メッシュ, 表面張力 10 倍)	24

図 3.22	液面形状(詳細メッシュ, 表面張力 10 倍, bird's eye view)	25
図 3.23	液面形状(詳細メッシュ, 表面張力 10 倍, side view)	25
図 3.24	周方向速度分布(詳細メッシュ, 表面張力 10 倍)	26
図 3.25	軸方向速度分布(詳細メッシュ, 表面張力 10 倍)	26
図 3.26	軸方向渦度分布	27
図 4.1	速度の時間変化	31
図 4.2	周方向・軸方向流速分布(標準メッシュ)	32
図 4.3	周方向・軸方向流速分布(標準メッシュ, 表面張力考慮)	32
図 4.4	周方向・軸方向流速分布(詳細メッシュ)	33
図 4.5	表面張力の違いによる比較	33
図 4.6	液面形状	34
図 4.7	軸方向流速分布	35
図 4.8	軸方向流速分布(液面近傍拡大図)	35
図 4.9	ガスコア長さを基準とした相似位置での速度分布	36
図 4.10	液面近傍 VOF 関数分布(詳細メッシュ, 1 次精度差分)	37
図 4.11	周方向速度分布(詳細メッシュ, 1 次精度差分)	37
図 4.12	差分精度の違いによる解析結果の比較	38

1. 概要

実用化戦略調査研究で検討されているナトリウム冷却大型炉では、物量を削減して経済性を向上させる観点からコンパクト化設計となっており、原子炉容器上部プレナム内では冷却材流速の高速化が起こり、自由表面からのガス巻き込みに十分な注意を払う必要がある^{[1], [2]}。したがって、炉上部プレナム内の流動適正化のためにディッププレート(D.P.)の設計研究をはじめ、様々な研究が行われている^[3]。

現在までの実験結果より、高速増殖炉内で発生するガス巻き込みは、液面の乱れ、潜り込み及び窪み渦の3種類の形態に大別できている^[4]。このうち、液面の乱れ及び潜り込みによるガス巻き込みは、D.P.などにより液面の流速を低下させることで対処可能である。しかし、窪み渦によるガス巻き込みは、渦中心部近くの下流流速の存在により、巻き込まれたガスがD.P.隙間部から下の領域に吸い込まれる可能性が高いと考えられ、実験、解析による評価が特に重要である。

本研究は、窪み渦の自由表面変動を考慮した3次元流動解析手法を確立するために、電力中央研究所にて行われた自由表面渦試験の解析をおこなうものである^[5]。試験体系は、円筒状容器の接線方向から水が一様流入し、下面の流出口から流出する体系であり、円筒容器の中心辺りに窪み渦が形成される。解析は、汎用流体解析コードFLUENTを用いておこなった。自由液面の解析には流体率の輸送方程式を解く、VOF法を用いた。その際、界面勾配を考慮した流体率輸送法であるPLICを採用した^[6]。表面張力項には、CSFモデルを用いた。解析メッシュとして、2種類のメッシュを使用することで、メッシュ幅と渦解像度の関係を調査した。また、表面張力係数をパラメータとした解析をおこなうことで、表面張力項の効果について評価した。さらに、1次精度風上差分による結果と2次精度風上差分による結果を比較することで、数値拡散の影響を調査した。

2. 解析体系・解析手法

2.1 解析体系

解析体系は、図 2.1 に示すような自由渦試験体系である。解析対象の流体は水である。側方の流入口より一様速度で流入した水は、円筒容器内で渦を形成する。下方の流出口より流出することで、液面高さは常に一定に保たれる。

2.2 解析コード・解析モデル

解析には、汎用流体解析コード FLUENT を用いた。以下にその詳細について記す。

①圧力方程式(ポアソン方程式)の解法

圧力方程式の解法には、PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operation) アルゴリズムを用いる^[7]。

PISO は、陰的圧力帰着手法の一種で、離散化した運動量保存式と圧力帰着連続式(ポアソン方程式)とに予測子・修正子法を交互に適用して各時間ステップの解を求めていく。この方法は、繰り返し法やブロック法に頼らずに、各時間ステップにおいて数回のステップで質量と運動量のバランスを保ちながら時間について精度の高い解を得ることができ、このことが、多くの他の方法と比較して、確かな利点となっている。

②運動量保存式の解法

運動量保存式の解法には、完全陰解法を用いる。移流項は 2 次精度風上差分を用いて離散化する。

③自由液面解析手法

自由液面の解析には、VOF 法を用いた。VOF 法は、流体の占有率(volume of fluid:流体率と呼ばれる)に着目し、その輸送方程式を Navier-Stokes 方程式と連成して解く解法である。

VOF 法では、複雑な界面や気泡を輸送した場合、特別な工夫を施さない限り、例えば円形または球形の気泡は四角形または直方体状へ変形してしまう。これは、VOF 法が気液二相流輸送について局所移動体積(セル間の流体輸送量)を完全に保存する Donor-Acceptor 法という高精度な離散化手法を用いながら、界面勾配の輸送を無視したことに起因している。本研究では、詳細な界面形状を捕らえるために、界面勾配を考慮した流体率輸送法である、PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation) を用いる。

④表面張力モデル

本件では、表面張力モデルとして、CSF(Continuum Surface Force)モデルを用いる。以下、モデルについて示す。

気液界面領域に完全流体を仮定(粘性応力を無視)し、表面張力係数が界面に沿って変化しないとした場合、界面での圧力条件は以下のように記述できる。

$$P_l - P_g = \sigma\chi$$

P_l : 液相の圧力

P_g : 気相の圧力

σ : 表面張力係数

χ : 界面曲率

上式は、一般に Laplace の式と呼ばれている。

界面上の位置 \vec{x}_s での表面力ベクトル \vec{F}_s は、

$$\begin{aligned}\vec{F}_s(\vec{x}_s) &= -\sigma\vec{\chi} \\ \vec{\chi} &\equiv -(\nabla_s \cdot \vec{n})\end{aligned}$$

$\vec{\chi}$: 界面曲率ベクトル

∇_s : 界面の接線方向に沿った微分

\vec{n} : 界面上の位置 \vec{x}_s における単位法線ベクトル

と表される。

CSF モデルは、界面での表面力を遷移層(界面近傍の極めて薄い層)にかかる体積力としてモデル化する手法である。界面近傍の位置 \vec{x} における表面張力効果は、以下の式のように体積力 \vec{F}_v として表され、運動量保存式の体積力の項に組み込まれる。

$$\vec{F}_v(\vec{x}) = \frac{\sigma\chi(\vec{x})\nabla f_k(\vec{x})\rho(\vec{x})}{\bar{\rho}}$$

f_k : VOF 関数

ρ : 密度 ($\bar{\rho}$ は液相と気相の密度の平均値)

2.3 解析メッシュ

解析メッシュを図 2.2～図 2.4 に示す。解析メッシュは全て 6 面体で構成される非構造メッシュである。中心付近におけるメッシュの径方向長さは約 0.0055[m]である。また、中心部のメッシュを細かくし(中心付近におけるメッシュの径方向長さは約 0.00095[m])、解像度を高めたメッシュ(詳細メッシュ)について、図 2.5、図 2.6 に示す。高さ方向のメッシュ長さは全て 0.01[m]である。

2.4 解析条件

試験条件を表 2.1 に示す。解析における条件は、試験条件に一致させている。流入口において一様速度を与え、流出口における境界条件は、流入量と流出量が等しくなるような圧力条件を与えた。また、円筒容器の上部境界も圧力条件とし、液面の変動に伴って、上部からの気体の流出入が自動的に起こるようにした。

表 2.1 試験条件

使用流体	水	
試験体系の寸法	容器径 D	0.40 m
	入口幅 t	0.04 m
	出口径 d	0.05 m
	液面高さ h	0.50 m
入口流速 V_{in}	0.04167 m/s (流量 50 l/min)	
出口平均流速 W_{out}	0.4244 m/s (流量 50 l/min)	

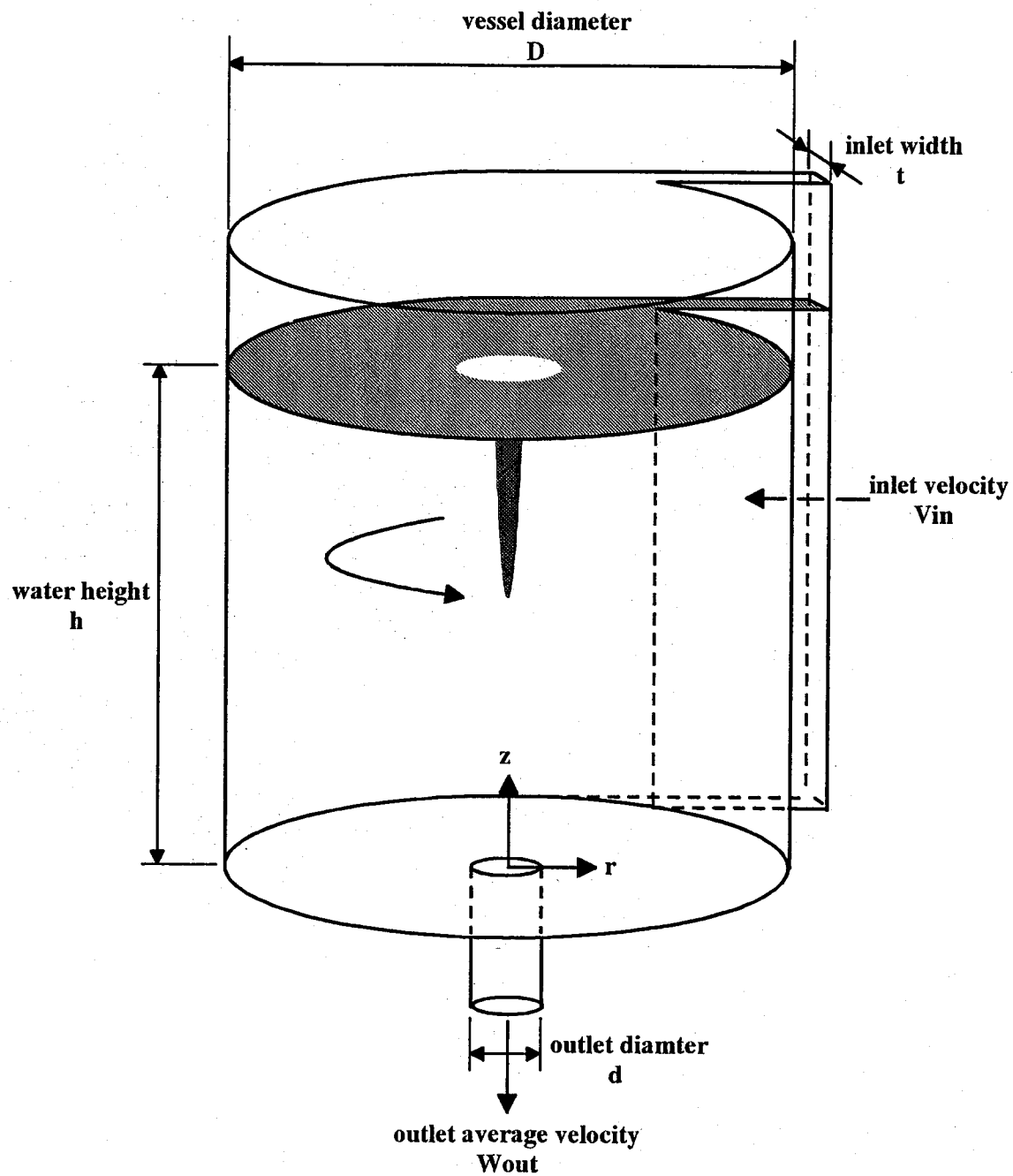


图 2.1 解析体系

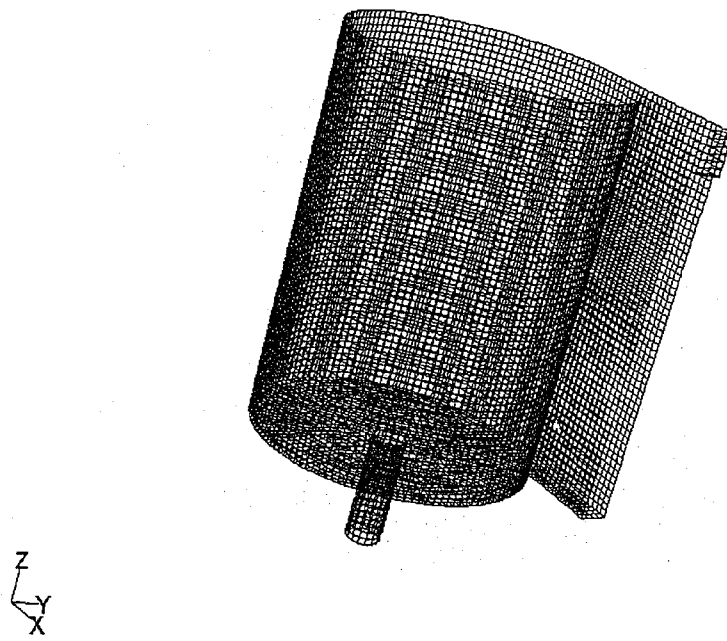


図 2.2 解析メッシュ(side view)

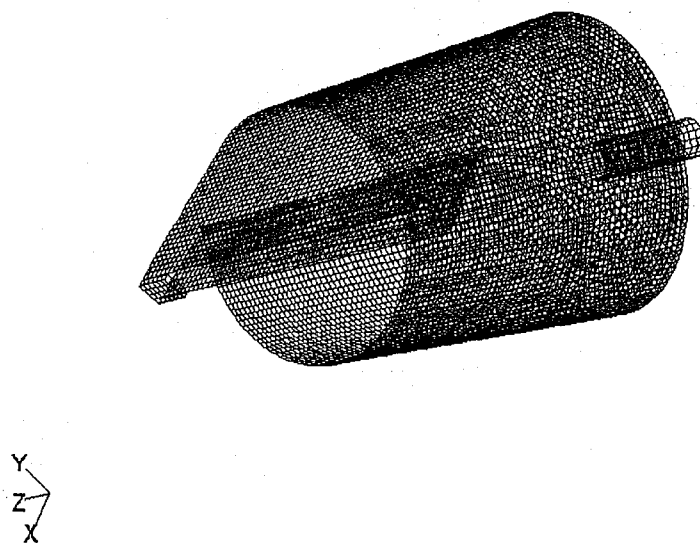


図 2.3 解析メッシュ(bottom view)

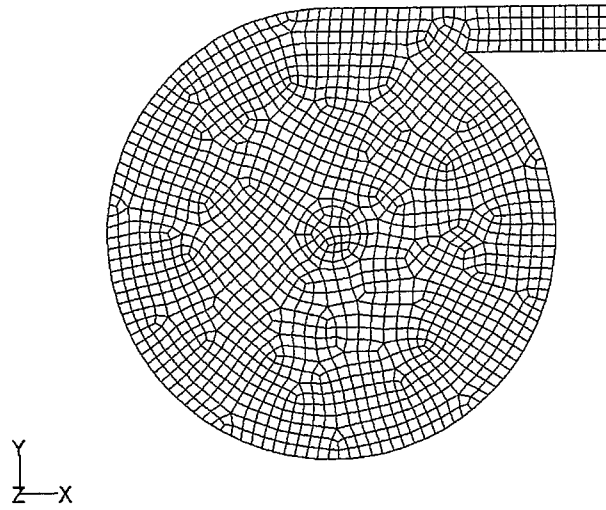


図 2.4 解析メッシュ(標準メッシュ, overhead view)

79832 セルの 6 面体メッシュ

(最大体積 $\cdots 1.515633 \times 10^{-6} \text{m}^3$, 最小体積 $\cdots 2.957325 \times 10^{-7} \text{m}^3$,
中心付近のメッシュの径方向長さ \cdots 約 0.0055m)

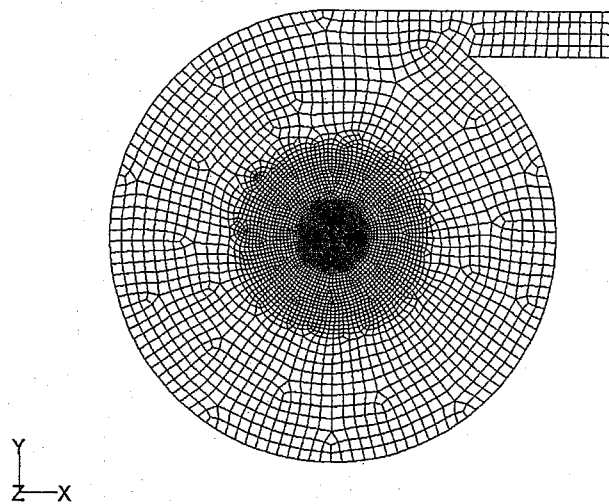


図 2.5 解析メッシュ(詳細メッシュ, overhead view)

274184 セルの 6 面体メッシュ

(最大体積 $\cdots 1.5058383 \times 10^{-6} \text{m}^3$, 最小体積 $\cdots 9.062767 \times 10^{-9} \text{m}^3$,

中心付近におけるメッシュの径方向長さ \cdots 約 0.00095m)

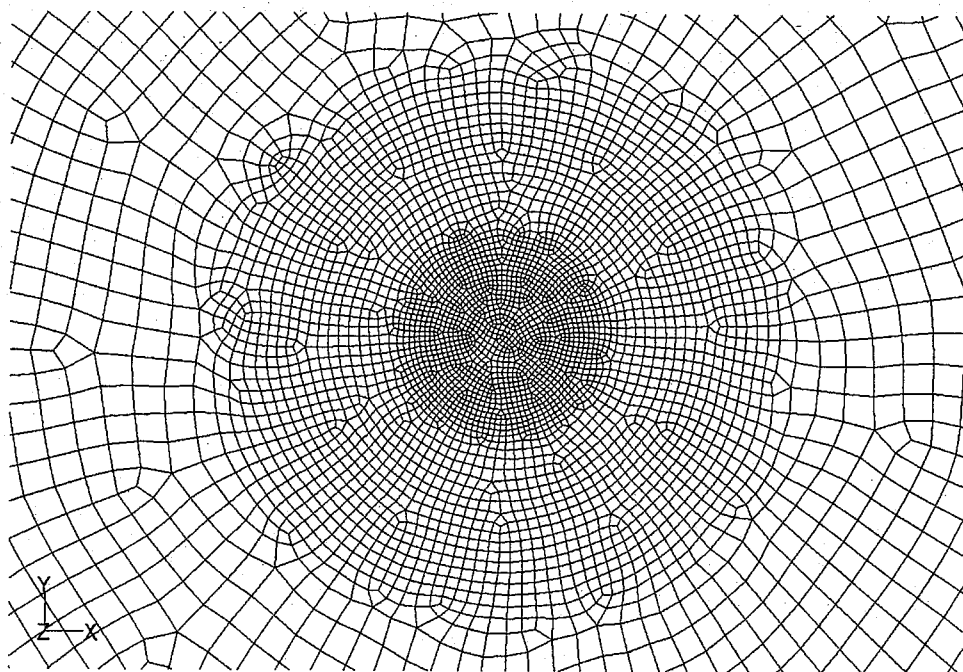


図 2.6 解析メッシュ(詳細メッシュ, 拡大図)

3. 解析結果

3.1 解析ケース

解析ケースを表 3.1 に示す。標準メッシュ体系において、表面張力を考慮した場合と考慮しない場合の解析をおこない、両者を比較した。表面張力係数は、水・空気間の値を用いた。また、詳細メッシュ体系において、表面張力係数をパラメータとした解析を行い、表面張力項の効果を調査した。

表 3.1 解析ケース

ケース 1	標準メッシュ体系 における解析	表面張力を考慮しない
ケース 2		水・空気間の表面張力を考慮
ケース 3	詳細メッシュ体系 における解析	標準の表面張力係数(水・空気)
ケース 4		表面張力係数 0.1 倍
ケース 5		表面張力係数 10 倍

3.2 標準メッシュ体系における解析結果

標準メッシュ体系(中心部のメッシュを細かくしていない体系)における、液面近傍 VOF 関数分布を図 3.1 に示す。また、液面を VOF 関数の値が 0.5 の位置と定めた場合における、液面形状を図 3.2, 図 3.3 に示す。z=0.15[m]の断面における周方向(θ 方向)速度分布を図 3.4 に、軸方向(z方向)速度分布を図 3.5 に示す。図 3.1, 図 3.2 より、液面はほとんど窪んでいないように見えるが、図 3.3 より渦の中心付近においてわずかに窪んでいるのが分かる(0.003[m]程度)。図 3.4 より、周方向流速は、渦中心の辺りで入口流速(0.4167m/S)の 5 倍程度の流速となっている。周方向流速は、渦中心においては低い値となり、中心よりわずかに外側の領域で最大となる。図 3.5 より、渦中心付近において軸方向の下降流速が現れている。下降流速は、渦中心付近以外の領域ではほぼ 0 である。

表面張力を考慮したケースにおける、液面近傍 VOF 関数分布を図 3.6 に示す。また、液面を VOF 関数の値が 0.5 の位置と定めた場合における、液面形状を図 3.7, 図 3.8 に示す。z=0.15[m]の断面における周方向速度分布を図 3.9 に、軸方向速度分布を図 3.10 に示す。図 3.6, 図 3.7, 図 3.8 より、表面張力を考慮しない場合と比較して、液面の窪みに対して目視によって差を見出すのは困難である。また、図 3.9, 図 3.10 より、周方向流速、軸方向流速分布も、表面張力を考慮したことによる差はほとんど見られない。

3.3 詳細メッシュ体系における解析結果

詳細メッシュ体系における、液面近傍 VOF 関数分布を図 3.11 に示す。また、液面を VOF 関数の値が 0.5 の位置と定めた場合における、液面形状を図 3.12, 図 3.13 に示す。z

$z=0.15$ [m]の断面における周方向(θ 方向)速度分布を図 3.14 に、軸方向(z 方向)速度分布を図 3.15 に示す。図 3.11, 図 3.12, 図 3.13 より、標準メッシュ体系の場合と比較すると、明らかに液面が大きく窪んでおり、メッシュを細かくしたことによって渦の解像度が大きく向上したことが分かる。また、図 3.14 より、周方向流速について、渦の中心付近において入口流速の 10 倍強となっており、標準メッシュ体系の場合と比較して倍程度に大きく上昇している。また、最大流速となる位置が、より渦中心に近くなっており、この点からも、詳細メッシュによって渦中心付近の渦構造がより正確に捕らえられていることが分かる。図 3.15 より、軸方向流速についても、標準メッシュ体系の場合と比較すると、倍程度の値となる。

表面張力係数を 0.1 倍にしたケースにおける、液面近傍 VOF 関数分布を図 3.16 に示す。また、液面を VOF 関数の値が 0.5 の位置と定めた場合における、液面形状を図 3.17, 図 3.18 に示す。 $z=0.15$ [m]の断面における周方向速度分布を図 3.19 に、軸方向速度分布を図 3.20 に示す。図 3.16, 図 3.17, 図 3.18 より、標準の表面張力係数を用いた場合のガスコア長さと比較すると、表面張力を 0.1 倍にした影響はほとんど見られない。図 3.19 より、周方向流速は標準の表面張力係数を用いた場合とほとんど違いは見られないが、図 3.20 より、軸方向流速が大きくなっている。

表面張力係数を 10 倍にしたケースにおける、液面近傍 VOF 関数分布を図 3.21 に示す。また、液面を VOF 関数の値が 0.5 の位置と定めた場合における、液面形状を図 3.22, 図 3.23 に示す。 $z=0.15$ [m]の断面における周方向速度分布を図 3.24 に、軸方向速度分布を図 3.25 に示す。図 3.21, 図 3.22, 図 3.23 より、標準の表面張力係数を用いた場合と比較すると、表面張力を 10 倍にしたことにより、ガスコア長さが大きく減少している。図 3.24 より、周方向流速は標準の表面張力係数を用いた場合と大きな違いは見られない。図 3.25 より、軸方向流速について、流速ベクトル分布の広がりが小さくなっている。

3.4 渦度分布

図 3.26 に詳細メッシュ体系における解析結果(標準の表面張力係数)の軸方向渦度分布を示す。ガスコアから流出口まで、わずかに曲がった形の渦糸が伸びている。水平断面の渦度分布において、渦度の高い領域は渦中心に集中している。

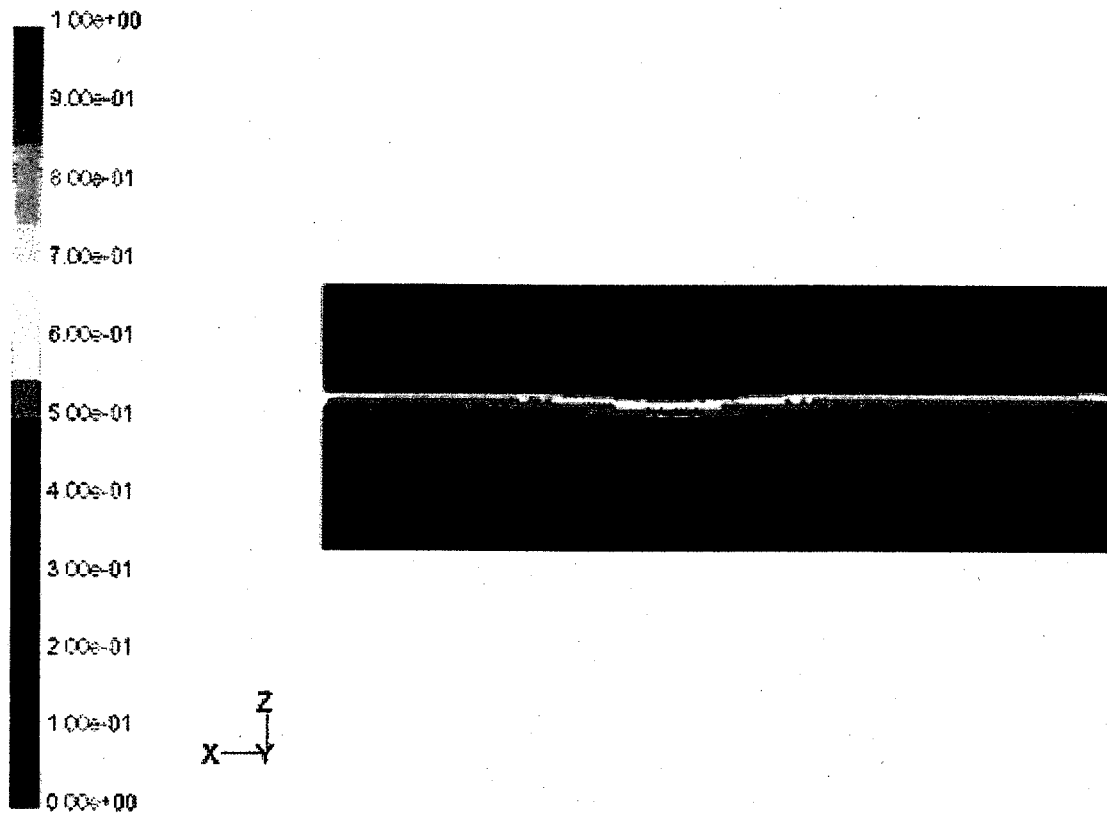


図 3.1 液面近傍 VOF 関数分布(標準メッシュ)

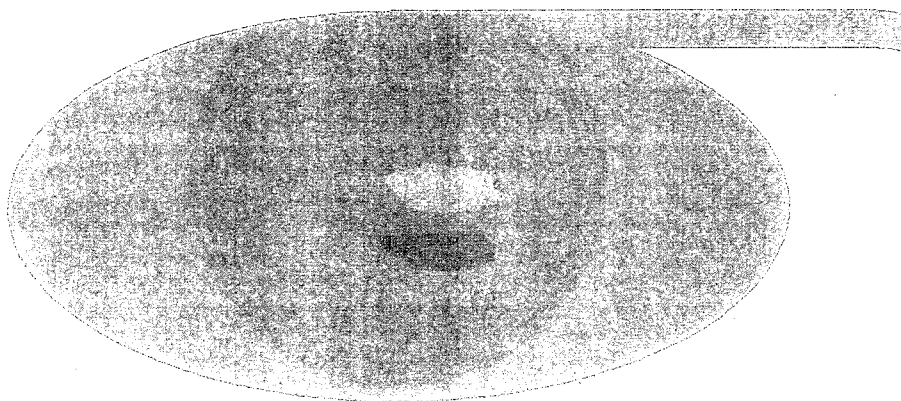


図 3.2 液面形状(標準メッシュ, bird's eye view)



図 3.3 液面形状(標準メッシュ, side view)

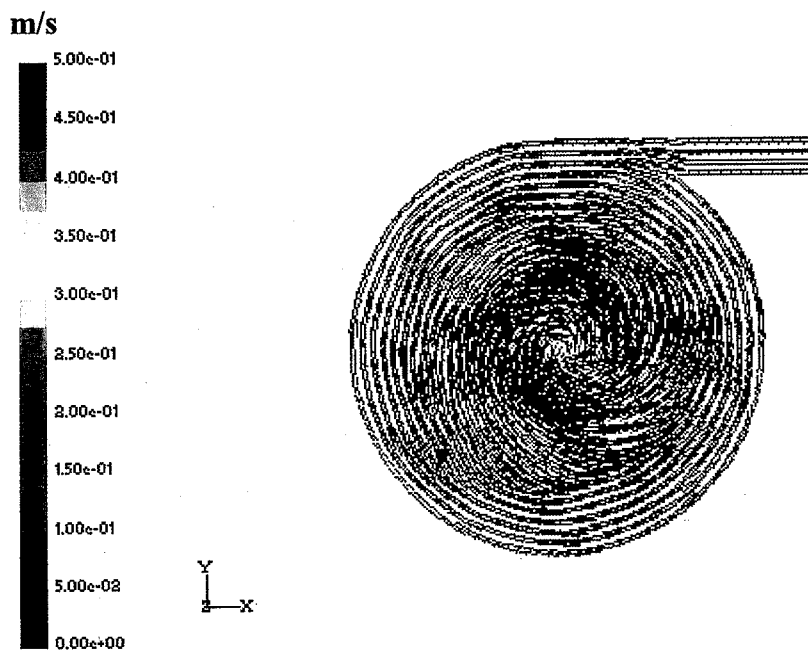


図 3.4 周方向速度分布(標準メッシュ)

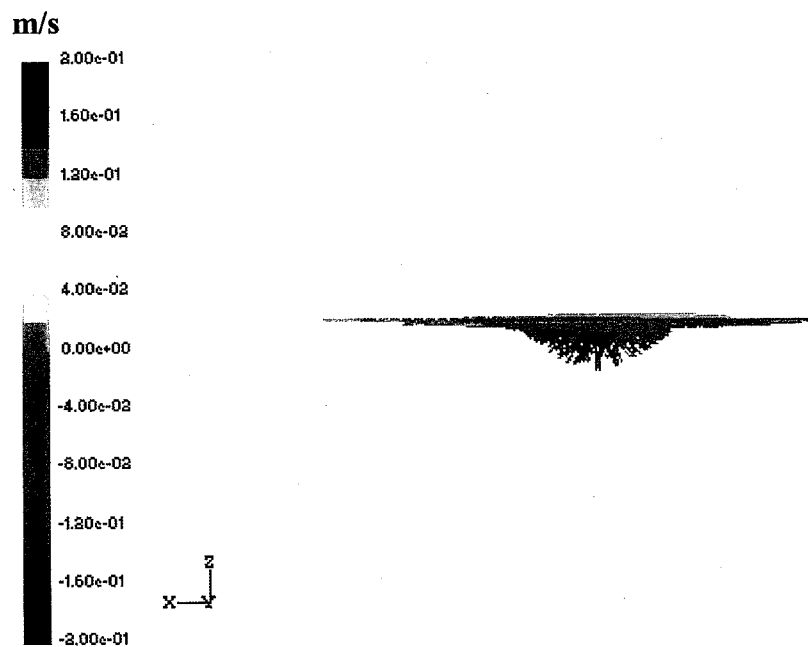


図 3.5 軸方向速度分布(標準メッシュ)

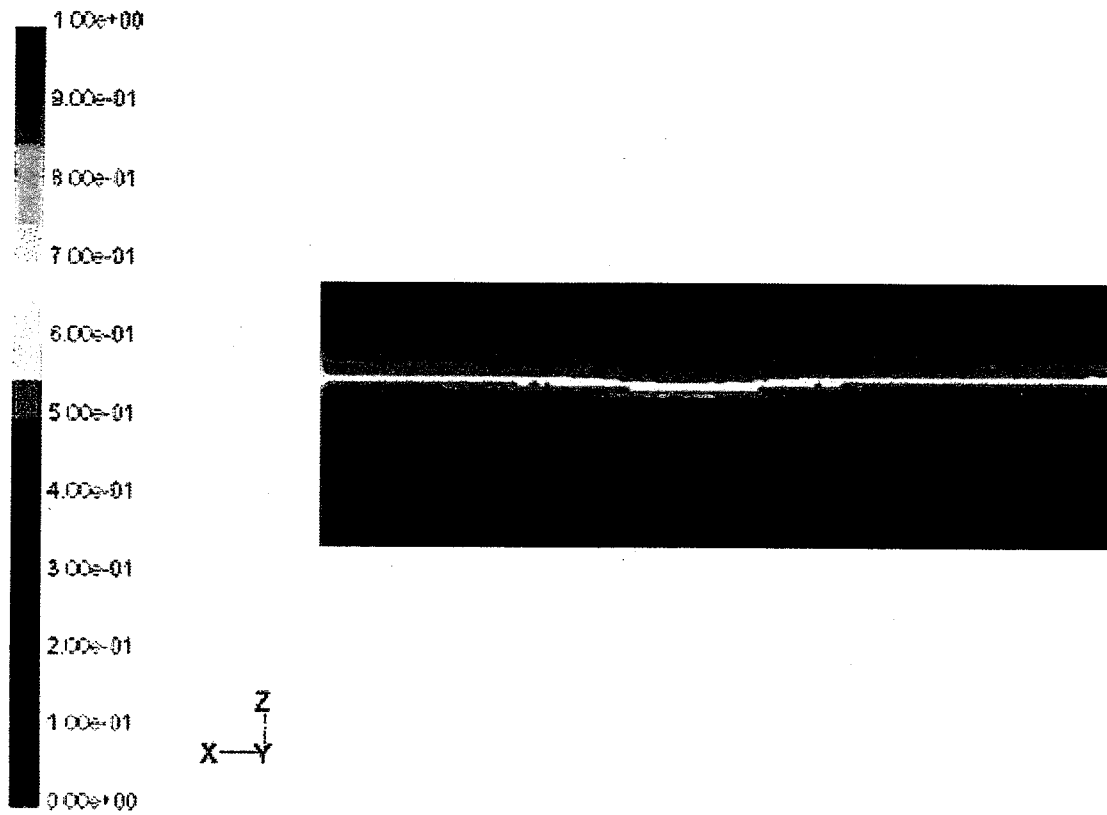


図 3.6 液面近傍 VOF 関数分布(標準メッシュ, 表面張力考慮)

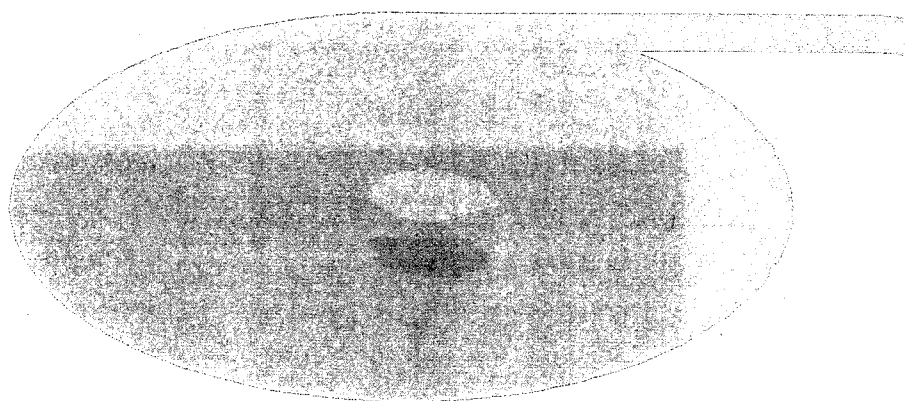


図 3.7 液面形状(標準メッシュ, 表面張力考慮, bird's eye view)

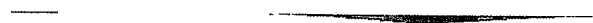


図 3.8 液面形状(標準メッシュ, 表面張力考慮, side view)

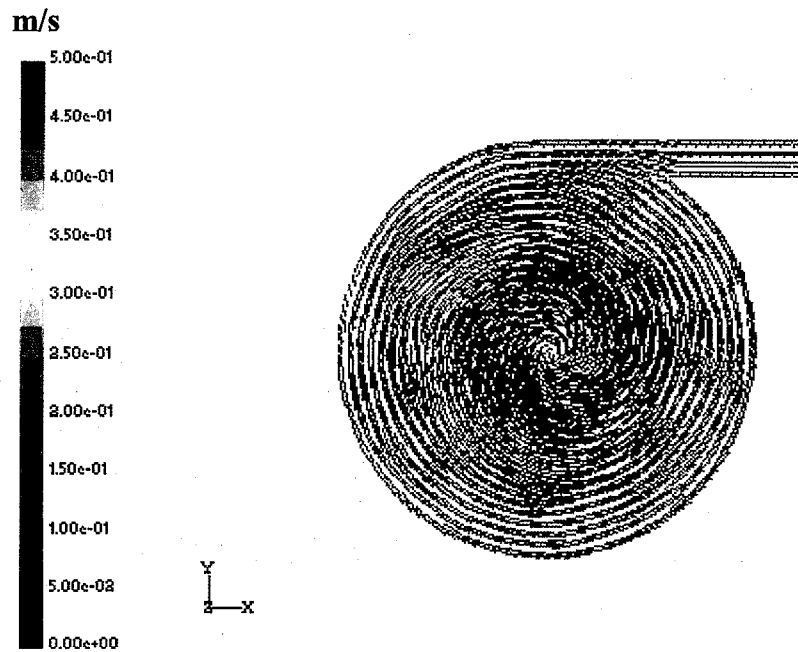


図 3.9 周方向速度分布(標準メッシュ, 表面張力考慮)

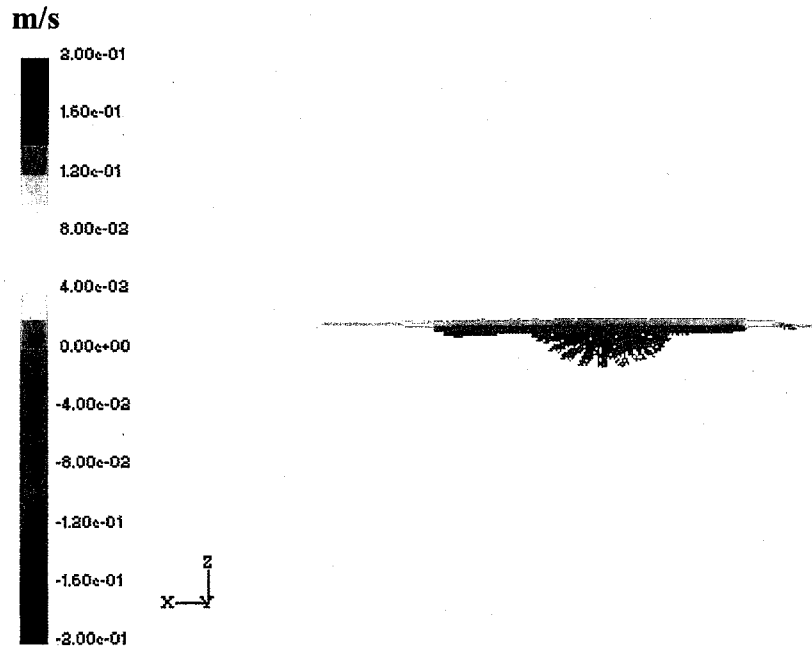


図 3.10 軸方向速度分布(標準メッシュ, 表面張力考慮)

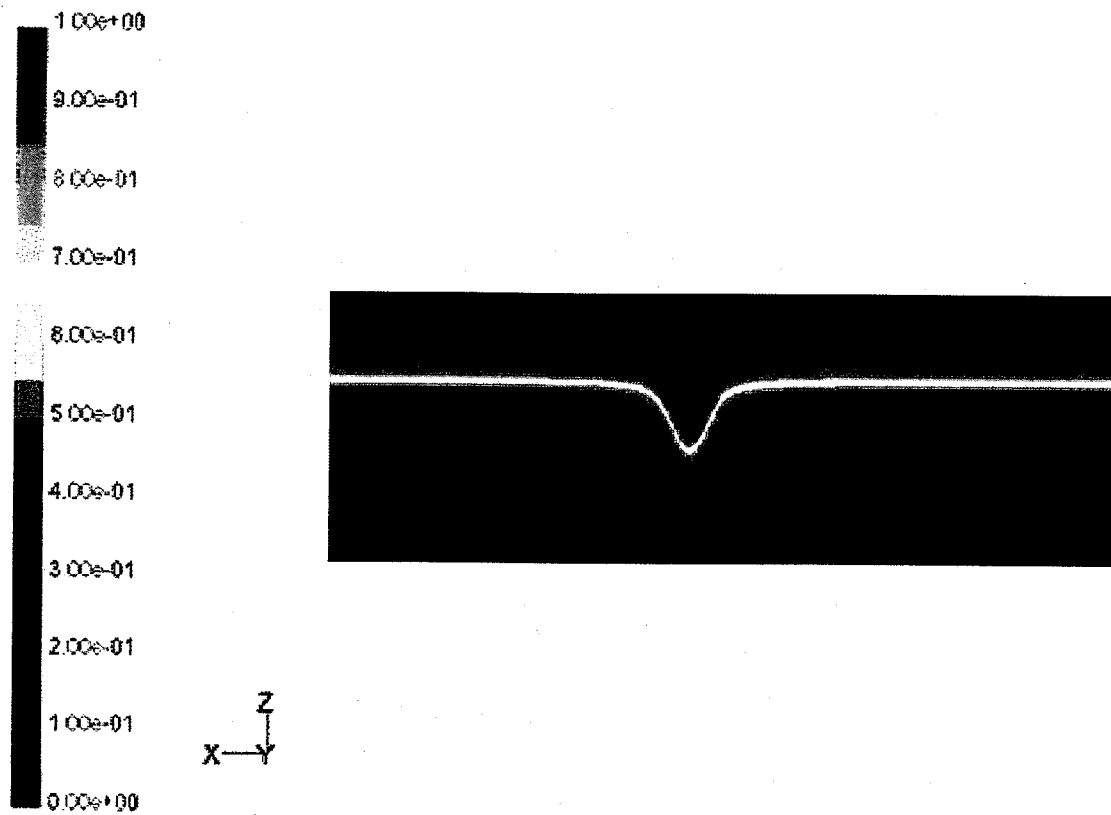


図 3.11 液面近傍 VOF 関数分布(詳細メッシュ)

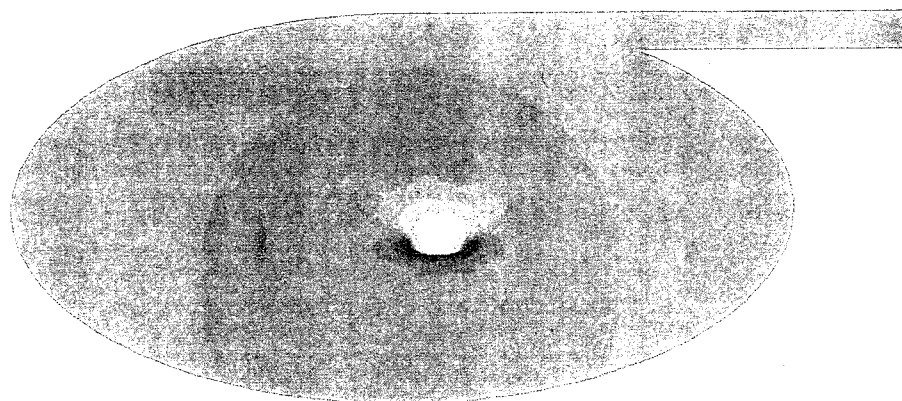


図 3.12 液面形状(詳細メッシュ, bird's eye view)



図 3.13 液面形状(詳細メッシュ, side view)

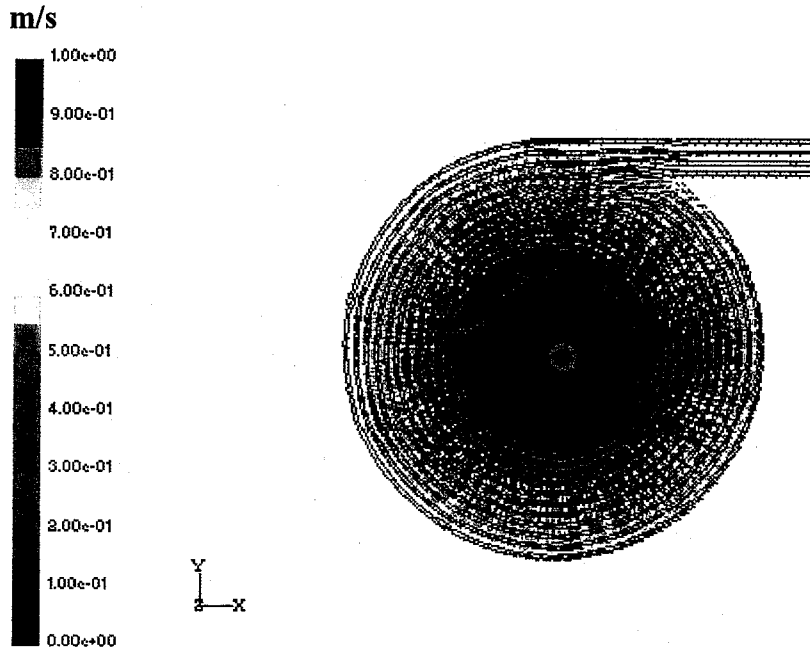


図 3.14 周方向速度分布(詳細メッシュ)

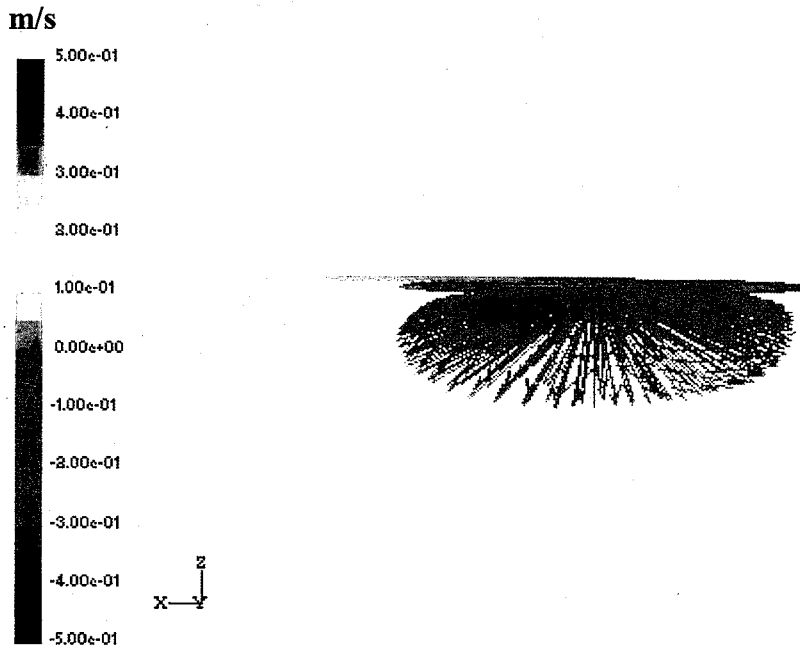


図 3.15 軸方向速度分布(詳細メッシュ)

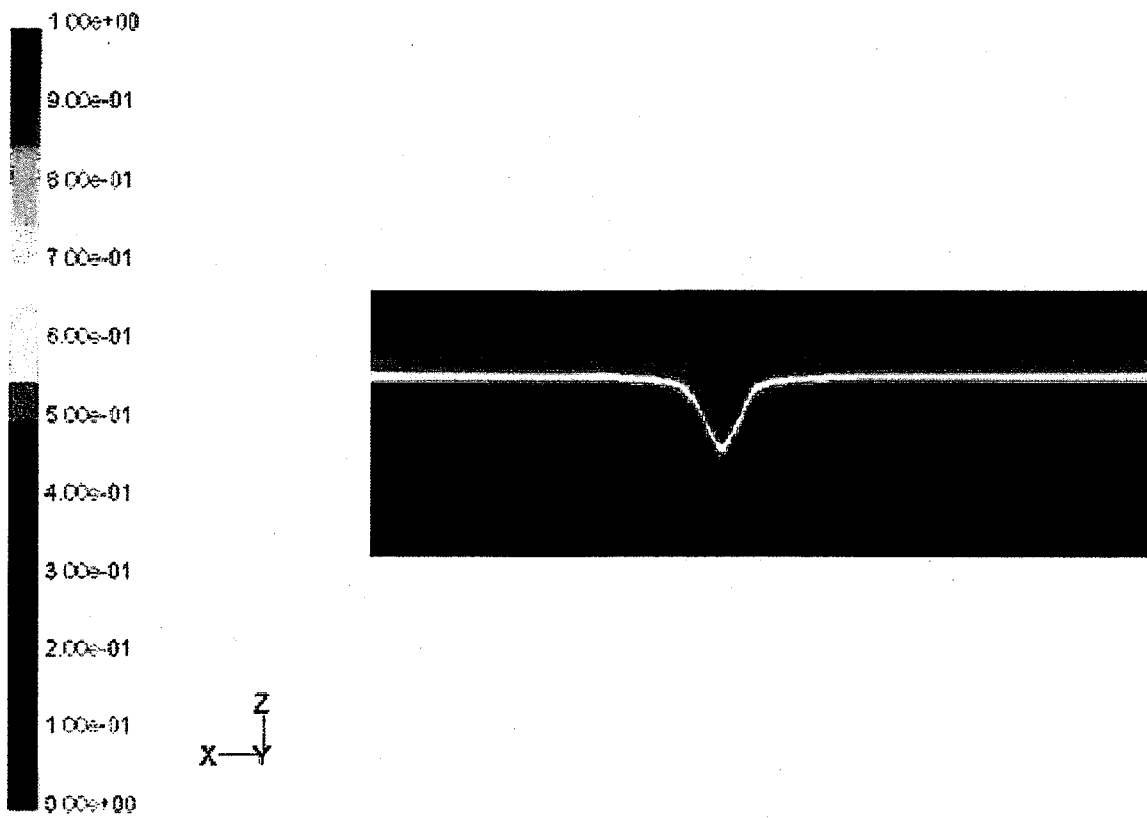


図 3.16 液面近傍 VOF 関数分布(詳細メッシュ, 表面張力 0.1 倍)

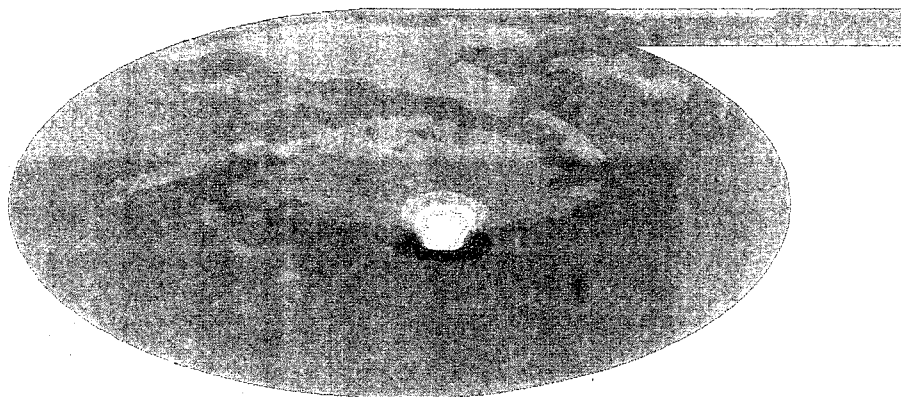


図 3.17 液面形状(詳細メッシュ, 表面張力 0.1 倍, bird's eye view)



図 3.18 液面形状(詳細メッシュ, 表面張力 0.1 倍, side view)

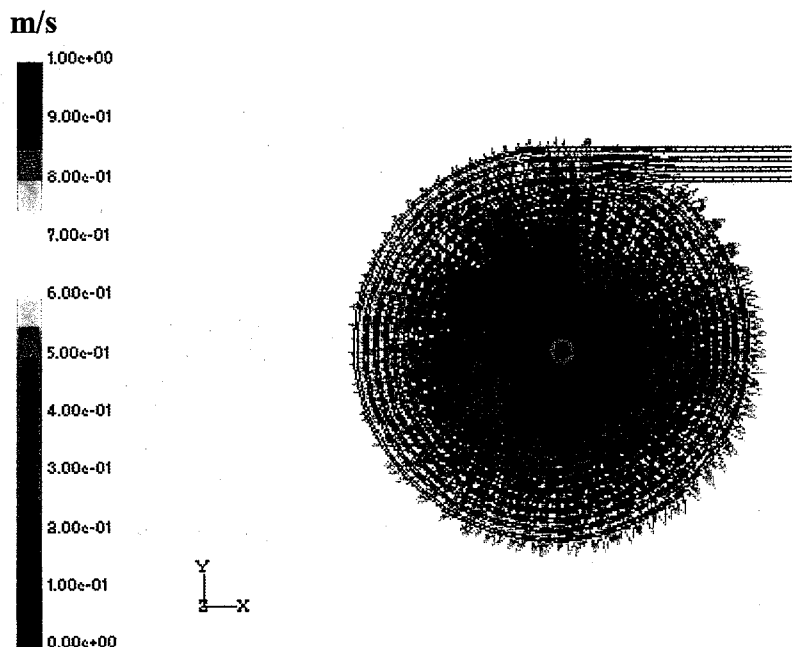


図 3.19 周方向速度分布(詳細メッシュ, 表面張力 0.1 倍)

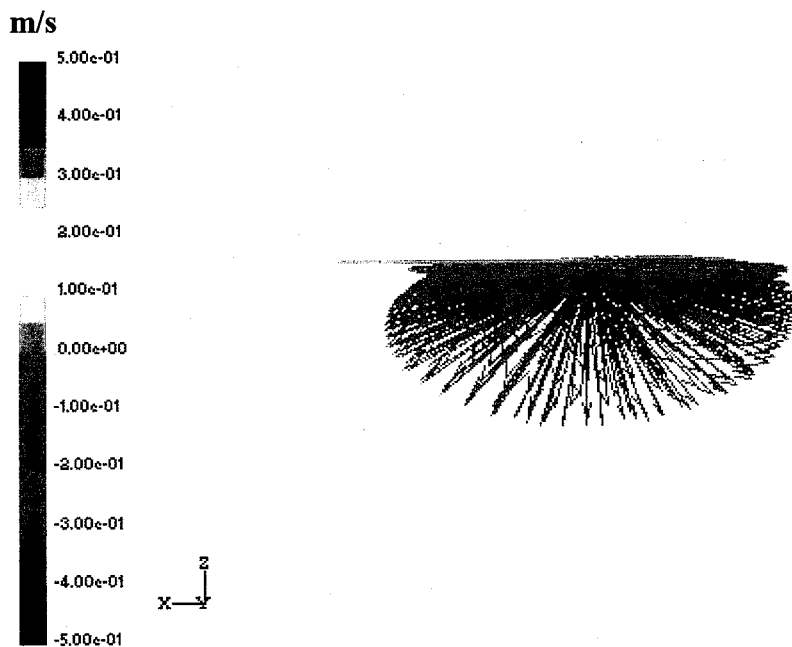


図 3.20 軸方向速度分布(詳細メッシュ, 表面張力 0.1 倍)

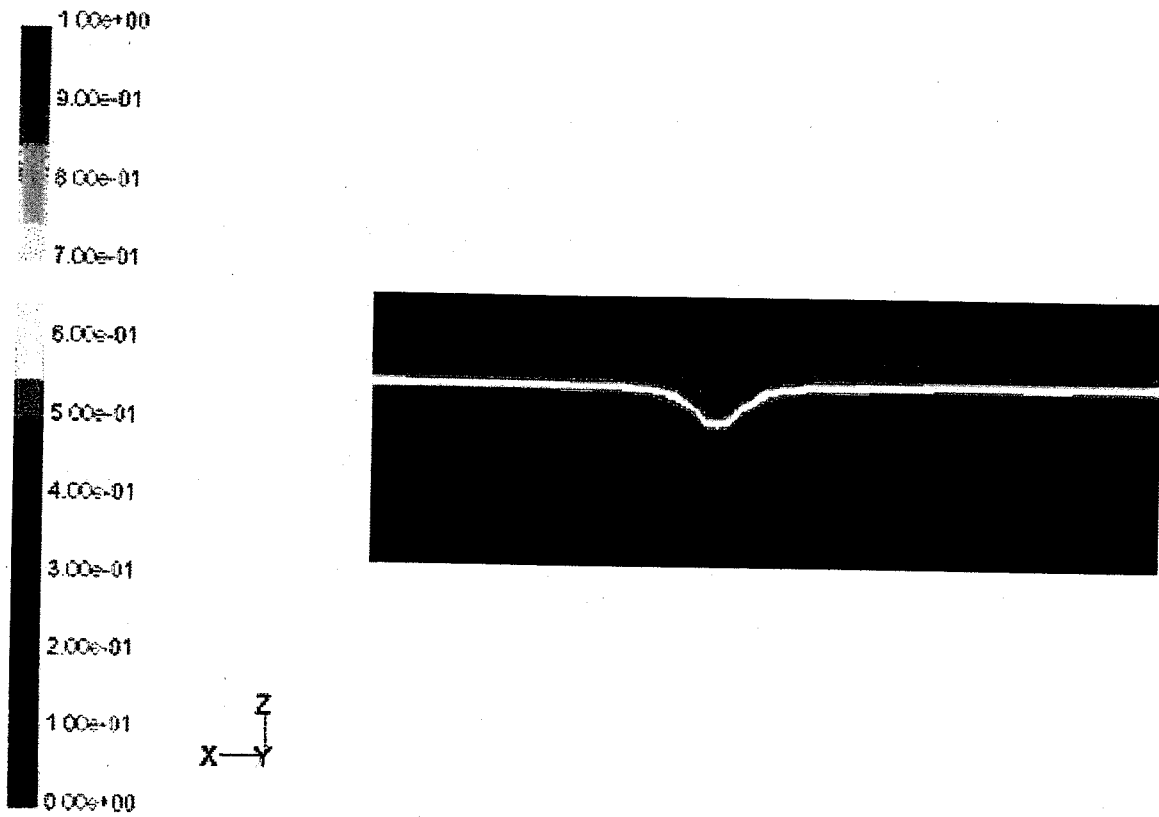


図 3.21 液面近傍 VOF 関数分布(詳細メッシュ, 表面張力 10 倍)

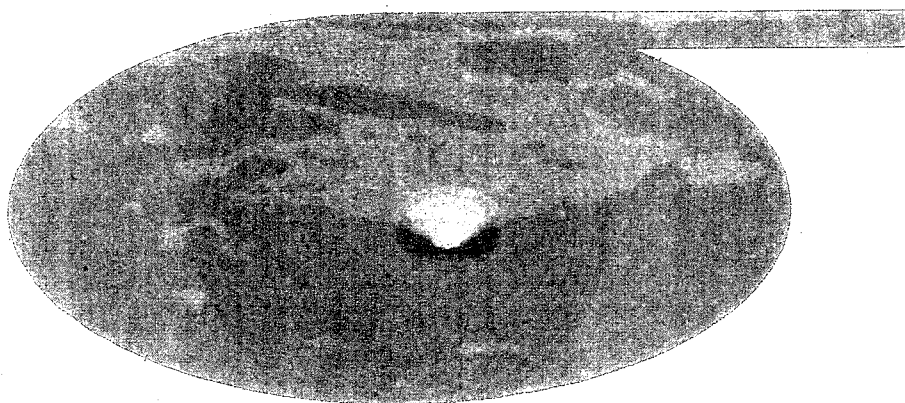


図 3.22 液面形状(詳細メッシュ, 表面張力 10 倍, bird's eye view)



図 3.23 液面形状(詳細メッシュ, 表面張力 10 倍, side view)

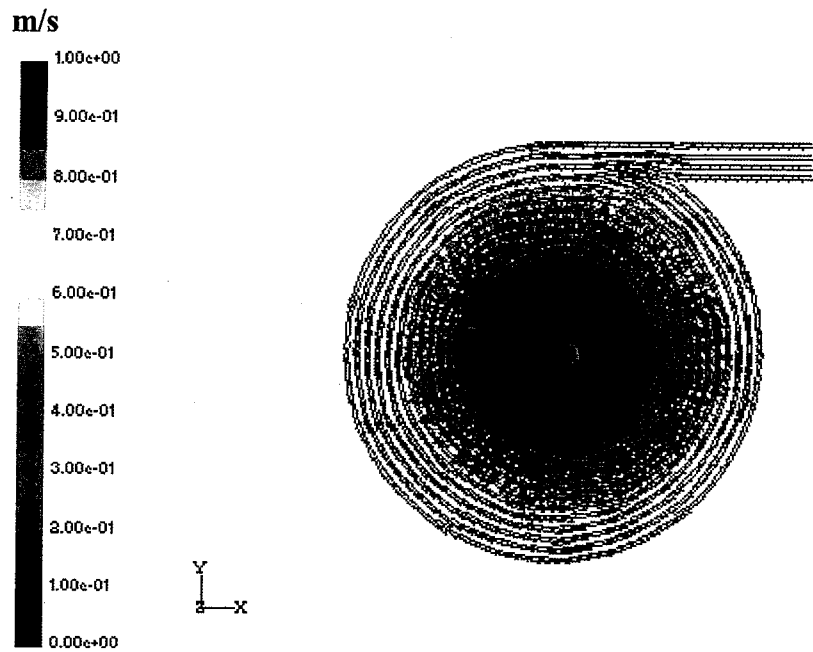


図 3.24 周方向速度分布(詳細メッシュ, 表面張力 10 倍)

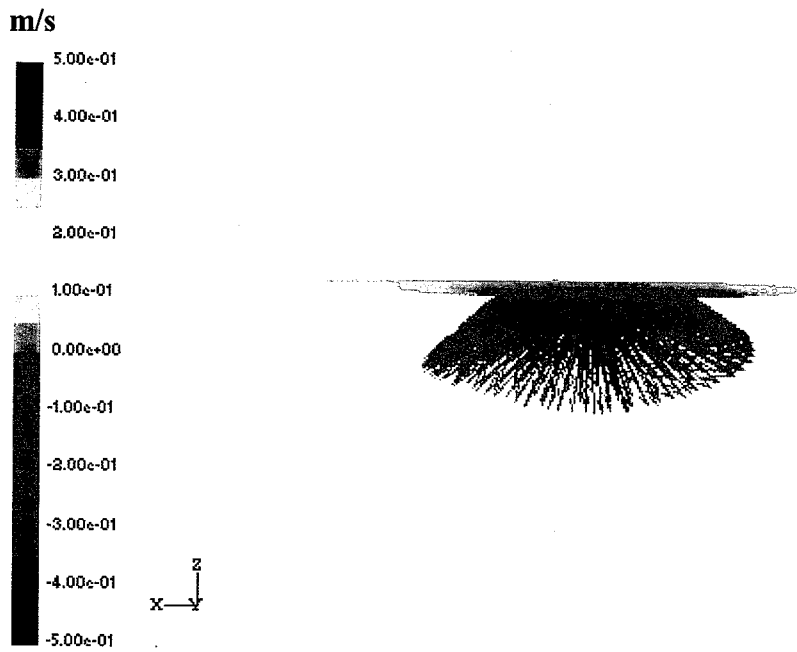


図 3.25 軸方向速度分布(詳細メッシュ, 表面張力 10 倍)

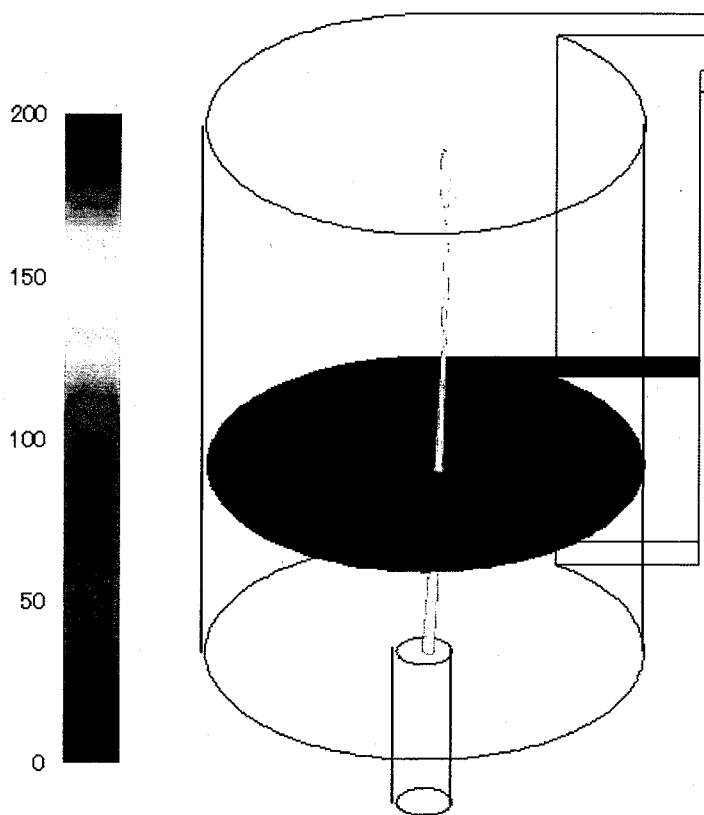


图 3.26 轴方向温度分布

4. 考察

4.1 定常状態について

本件において、界面形状を精度良く求めるために、VOFの解法としてPLICを用いた。このモデルを用いた場合、解析は非定常でおこなう必要がある。そのため、定常状態の判定を、速度の時間変化によっておこなった。図4.1に、 $x=y=0.0$ [m]における速度分布を示す。中心近傍領域は、速度の発達が最も遅いので、この点の速度が一定状態になった時点で定常と見なした。なお、高さ方向位置として $z=0.15$ [m]を選定した。この位置の速度は、液面と流出口の両方から十分に離れており、細かい変動の影響を受けにくいと考えられる。図より、200[s]程度で定常状態が達成されている。よって、本解析では、200[s]以上計算を行い、十分に定常状態になった解を採用した。

4.2 標準メッシュ体系における解析と実験の比較

標準メッシュ体系における解析の $z=0.15$ [m]断面における周方向流速分布、軸方向流速分布の実験値との比較を図4.2に示す。縦軸は流速、横軸は渦中心からの距離である。グラフより、 $r=0.04$ [m]より外側の領域では、解析は周方向流速、軸方向流速をかなり良い精度で再現できている。しかし、実験においては、渦中心付近で周方向流速が大きく増大し、 $r=0.01$ [m]辺りにおいて極大値となるが、解析では $r=0.035$ [m]辺りで極大値となり、流速の増大も再現できていない。また、実験では軸方向流速は、渦中心において0となるが、解析では、渦中心において最大値となっており、その点でも実験と解析に差が見られる。

標準メッシュ体系において表面張力を考慮した場合における解析の $z=0.15$ [m]断面における周方向流速分布、軸方向流速分布の実験結果との比較を図4.3に示す。このケースにおいて、解析結果は、周方向流速、軸方向流速を $r=0.04$ [m]より外側の領域で正しく再現している。また、実験における渦中心流速と渦中心において0となる軸方向流速を再現できていない。これらは、表面張力を考慮しない場合と同じ傾向であり、両者は流速分布もほとんど一致している。この結果より、渦中心付近の位置におけるメッシュが粗い場合、表面張力項はほとんど意味をなさないことが分かる。これは、メッシュが粗い場合、液面はほとんど窪まないため、表面張力項の効果が顕著に現れないためである。

4.3 詳細メッシュ体系における解析と実験の比較

詳細メッシュ体系における解析の $z=0.15$ [m]断面における周方向流速分布、軸方向流速分布の実験結果との比較を図4.4に示す。周方向流速について、解析は $r=0.01$ [m]辺りにおいて極大値となる分布となっており、この傾向は実験と一致する。標準メッシュ体系と比較すると、周方向流速が上昇し、 $r=0.015$ [m]程度まで実験結果と完全に一致している。これらより、メッシュを細かくしたことによって渦の解像度が大幅に向上し、より正確に渦の特徴を捕らえられていることが分かる。また、軸方向流速について、解析と実験は

$r=0.01$ [m]程度まで一致している。これより内側の領域では、実験値は渦中心に向かって流速が上昇して中心で 0 になるのに対し、解析では渦中心に向かって流速が減少し、中心において -0.30 [m/s]程度の値となっている。

4.4 メッシュの細かさと解像度の関係

標準メッシュ体系においては、渦中心付近におけるメッシュの一辺の長さは 5.5 [mm]程度であり、詳細メッシュ体系においては、 1.0 [mm]程度である。一方、標準メッシュ体系において解析は実験結果を 40 [mm]程度の範囲まで正確に再現でき、詳細メッシュ体系においては、 15 [mm]程度の範囲まで正確に再現できる。下降流速においては、 0.01 [m]程度の範囲まで正確に再現できる。

渦のスケールを周方向流速の最大値が生じる半径と定めると、本研究において対象としている渦のスケールは 10 [mm]程度である。以上の結果より、自由液面渦の解析において、流速分布を渦スケール程度の範囲で正確に評価するためには、渦スケールの $1/10$ 程度の大きさのメッシュを用いる必要があることが分かる。

ただし、渦中心近傍における速度は渦スケールの範囲内で急激に変化しており、それを再現するためには、渦スケールの $1/2\sim 1/5$ 程度の範囲まで正確な速度分布を求める必要がある。よって、渦の自由液面形状や速度分布を正確に求めるためには、渦スケールの $1/20\sim 1/50$ 程度のメッシュが必要になると思われる。

4.5 表面張力係数について

詳細メッシュを用いた解析における、表面張力係数の違いによる解析結果の比較を図 4.5 にしめす。表面張力係数として、標準の値、 0.1 倍した値、 10 倍した値の 3 種類の値を用いて解析をおこない、結果を比較した。周方向流速について、標準の表面張力係数のケースと 0.1 倍したケースでは、差は全く見られない。 10 倍したケースについて、わずかに流速の極大値が減少しているが、ほとんど差は無い。軸方向流速について、標準の表面張力係数のケースと 0.1 倍したケースは $r=0.005$ [m]より外側の領域では一致するが、渦中心における最低流速が、 0.1 倍したケースにおいて 0.1 [m/s]程度低くなっている。 10 倍したケースにおいて、他の 2 ケースと比較して実験と解析の乖離が大きくなっている。

詳細メッシュを用いた解析結果と実験結果の、自由液面形状の比較を図 4.6 に示す。縦軸は液面からの距離、横軸は液面上の距離である。標準の表面張力を用いた場合、ガスコア長さは 0.034 [m]程度であるが、係数 0.1 倍のケースではガスコア長さは 0.037 [m]程度になり、 10 倍のケースでは 0.020 [m]程度となる。3 種のケースで流速分布には大きな差は無いため、表面張力が大きくなることによりガスコア長さが減少することが分かった。実験では 0.11 [m]程度のガスコア長さとなる結果が得られており、実験結果の完全な再現のためには、より細かいメッシュが必要であると思われる。

4.6 ガスコア長さを基準とした相似位置での比較

$z=0.15[\text{m}]$ の位置の軸方向流速分布において、実験では渦中心に流速の小さな領域が存在するが、解析ではそれを再現できていない。しかし、図 4.7、図 4.8 に示すように、解析においてもガスコア最下端直下の領域で流速の小さな領域が存在している。このような流速の小さな領域の存在は、ガスコア最下端からの距離に依存していると思われる。したがって、ガスコア長さを基準とした相似位置において、実験と解析の流速を比較した。

図 4.9 は、ガスコア長さを基準とした相似位置における、周方向流速と軸方向流速の実験と解析の比較である。実験においてガスコア長さは $0.112[\text{m}]$ であり、液面から $0.35[\text{m}]$ の位置において流速を測定している。解析におけるガスコア長さは $0.034[\text{m}]$ であるため、液面から $0.10[\text{m}]$ の位置における流速をプロットした。解析の軸方向流速分布において、渦中心近傍領域に低流速領域が存在している。それによって、軸方向流速の極小値が $r=0.015[\text{m}]$ 程度の位置に存在している。ただし、解析では $r=0.0[\text{m}]$ において軸方向流速が 0 にならないなど、実験と一致しない面もある。

4.7 差分精度が解析結果に与える影響

本件においては、2.2 項に示したように、運動量保存式の移流項の解法には 2 次精度風上差分を用いた。これは、数値拡散を少なくし、渦中心近傍領域の速度分布をなるべく高い解像度で得ようとしたためである。しかし、一般的に、計算効率や計算の安定性は 1 次精度風上差分を用いた方が向上するので、2 次精度風上差分と同等の解像度が得られるのなら、1 次精度風上差分を用いた方が良い。1 次精度風上差分を用いた場合に解がどの程度鈍るのかを確認するために、2 次精度風上差分との比較をおこなった。

解析は詳細メッシュ体系で行い、表面張力項を考慮しないケースにおいて比較をおこなった。1 次精度風上差分を用いた場合の解析結果を図 4.10、図 4.11 に示す。図 4.10 の液面近傍 VOF 関数分布より、自由液面がほとんど窪んでいない。また、図 4.11 の周方向速度分布より、2 次精度風上差分を用いた場合と比較すると、流速がかなり小さくなっている。図 4.12 は、 $z=0.15[\text{m}]$ における周方向流速、軸方向流速の比較である。このグラフより、1 次精度風上差分を用いた場合において、 $r=0.05[\text{m}]$ より外側の領域では、2 次精度風上差分の結果と差が無いが、 $r=0.05[\text{m}]$ より内側の渦中心近傍領域では、周方向流速、軸方向流速共に、流速分布を再現できていない。また、図 4.2 の標準メッシュ体系における解析結果と比較しても、1 次精度風上差分を用いた解析結果の方が鈍った結果となっている。

渦中心近傍の領域では、渦スケール程度の範囲内で速度が急激に変化するため、速度勾配が非常に大きくなる。1 次精度風上差分を用いた場合、打ち切り誤差は速度勾配に比例するため、渦中心近傍の領域において数値拡散が解析結果に与える影響が大きい。よって、自由表面渦の解析をおこなう場合においては、運動量保存式の移流項の解法にはなるべく高次の差分を用いた方が良い結果が得られる。

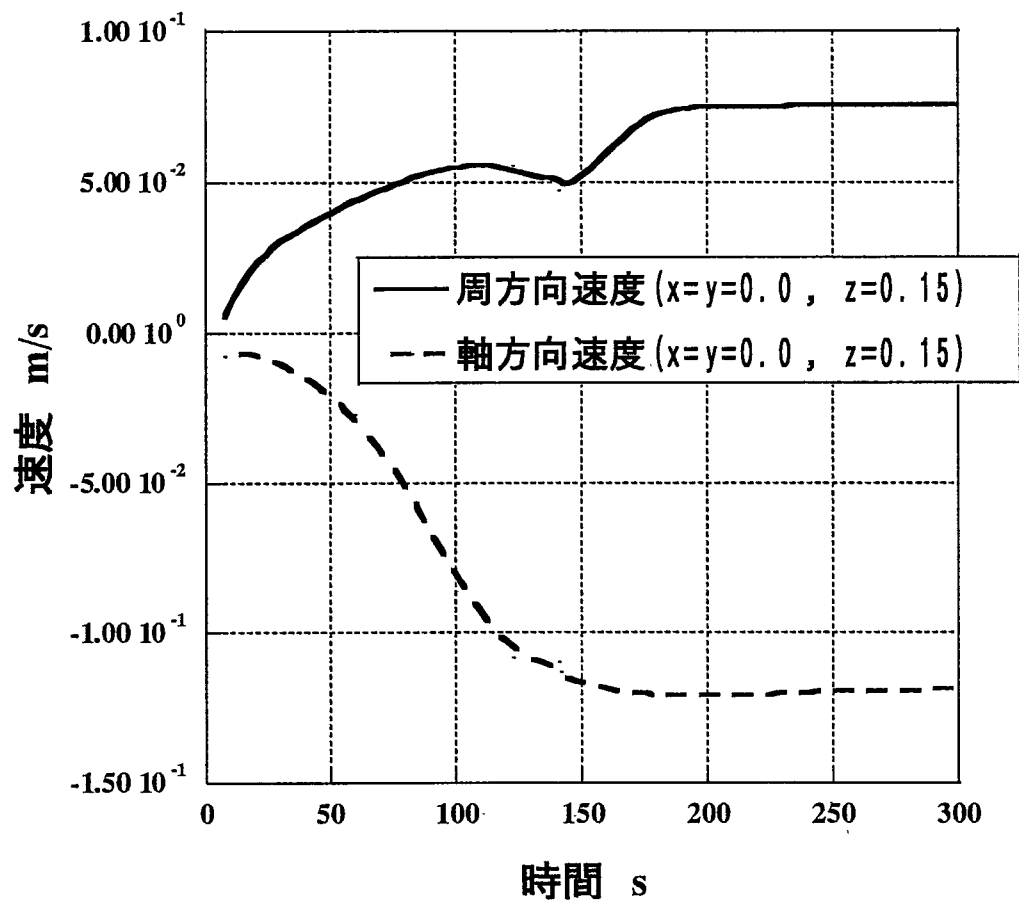


図 4.1 速度の時間変化

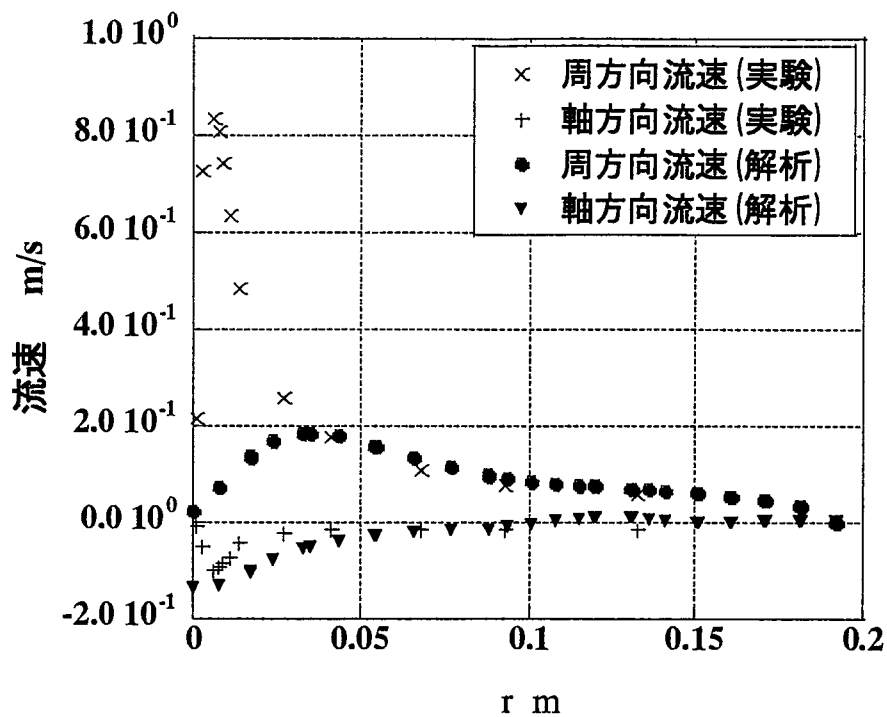


図 4.2 周方向・軸方向流速分布(標準メッシュ)

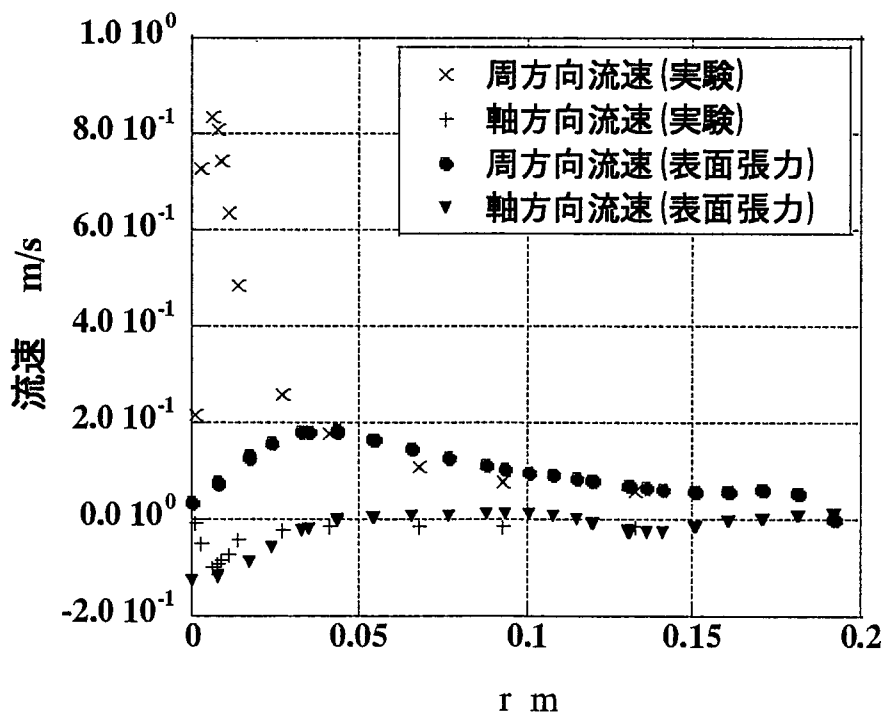


図 4.3 周方向・軸方向流速分布(標準メッシュ, 表面張力考慮)

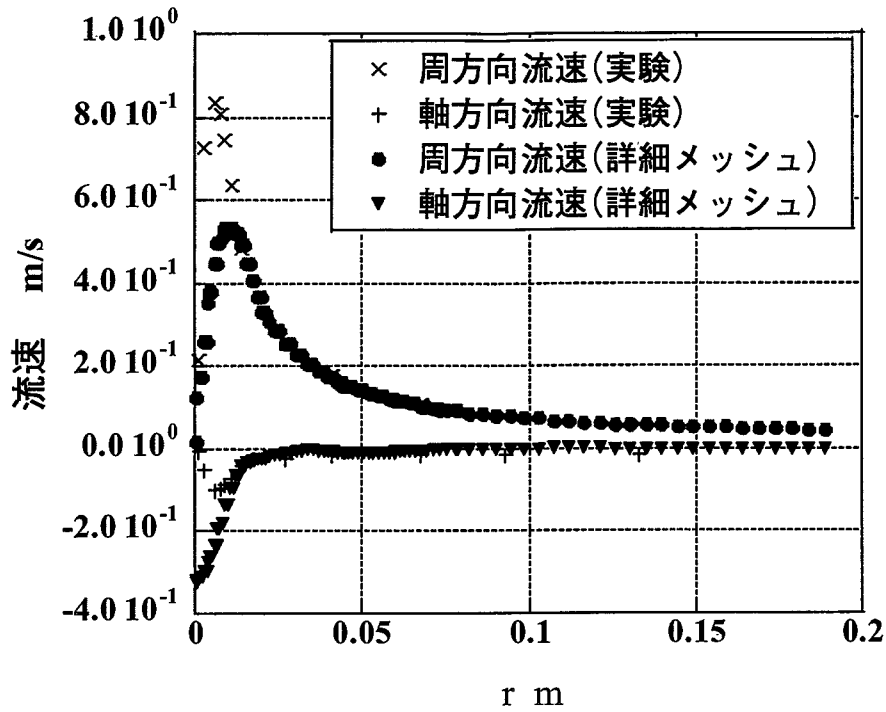


図 4.4 周方向・軸方向流速分布(詳細メッシュ)

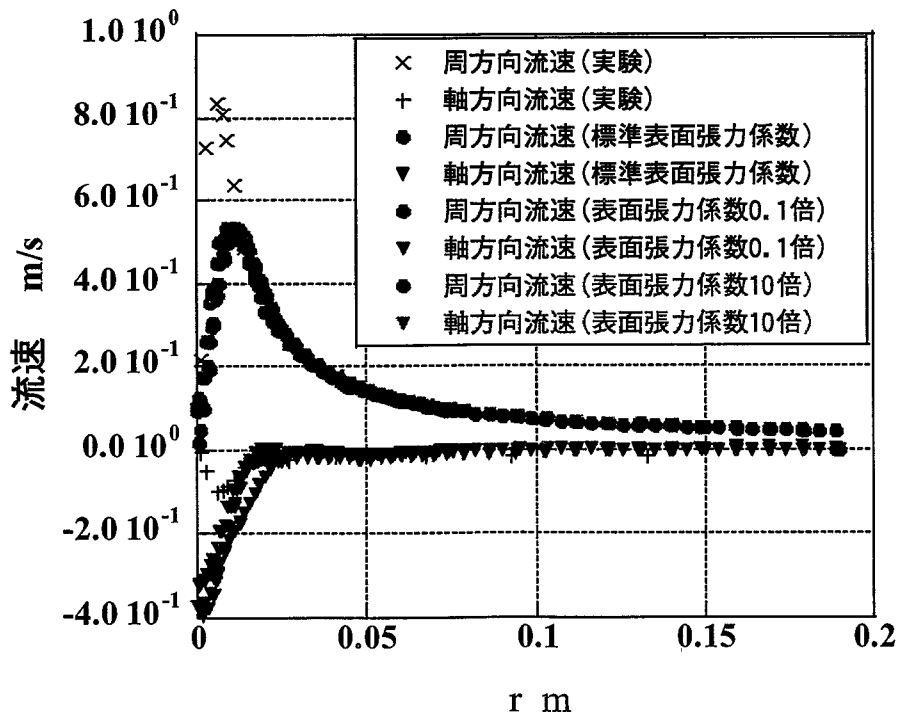


図 4.5 表面張力の違いによる比較

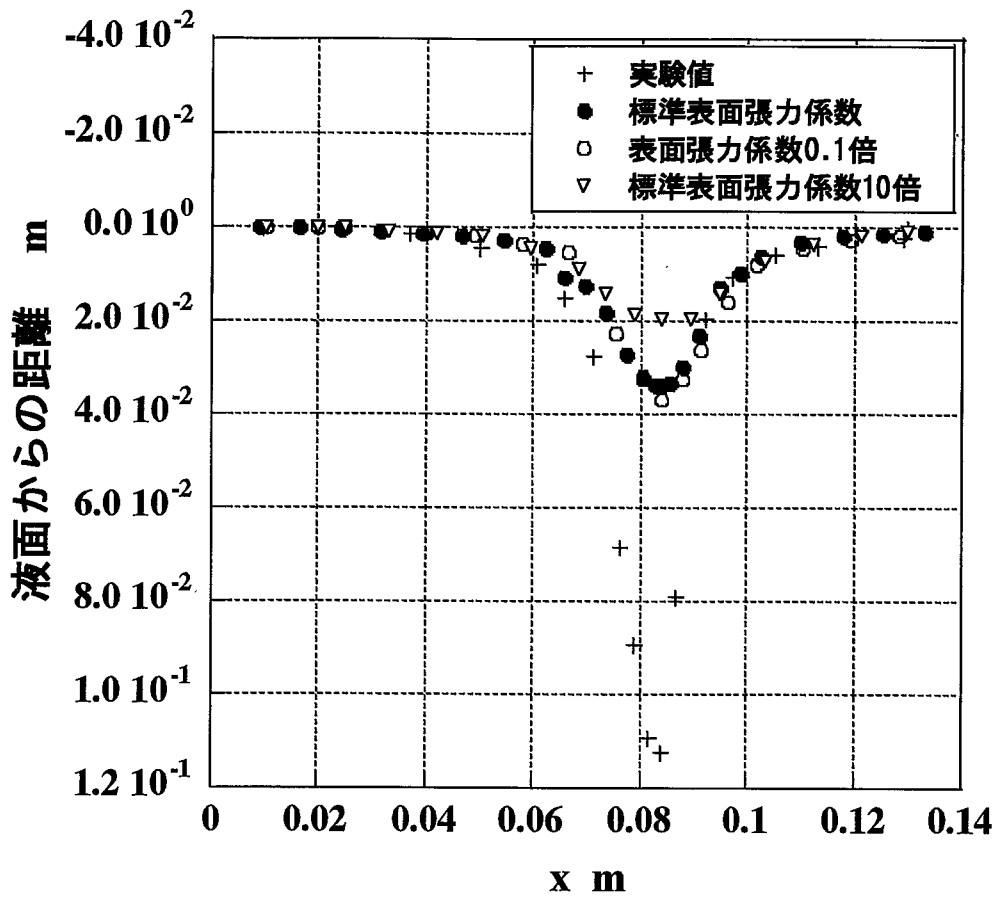


図 4.6 液面形状

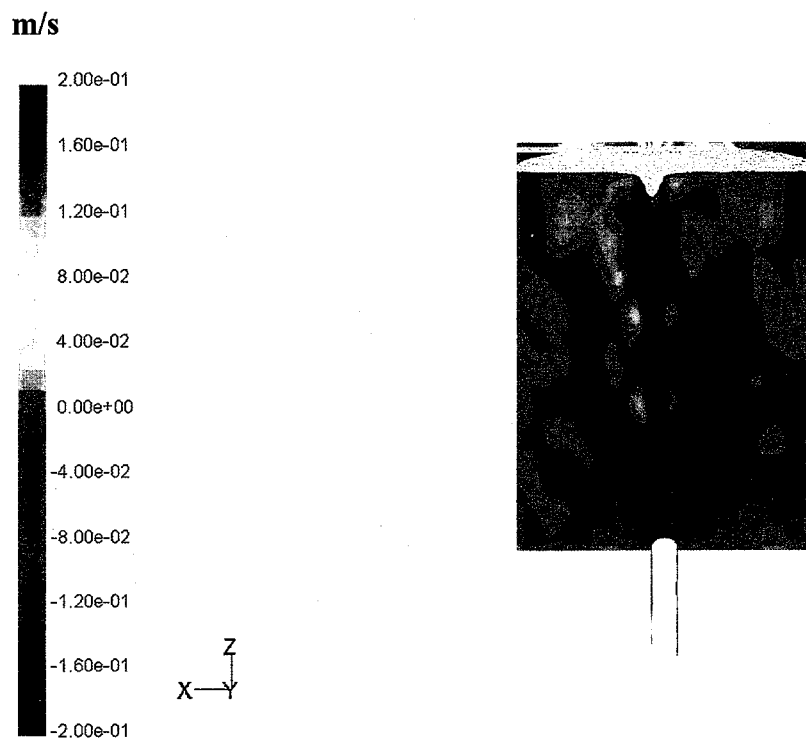


图 4.7 轴方向流速分布



图 4.8 轴方向流速分布(液面近傍放大图)

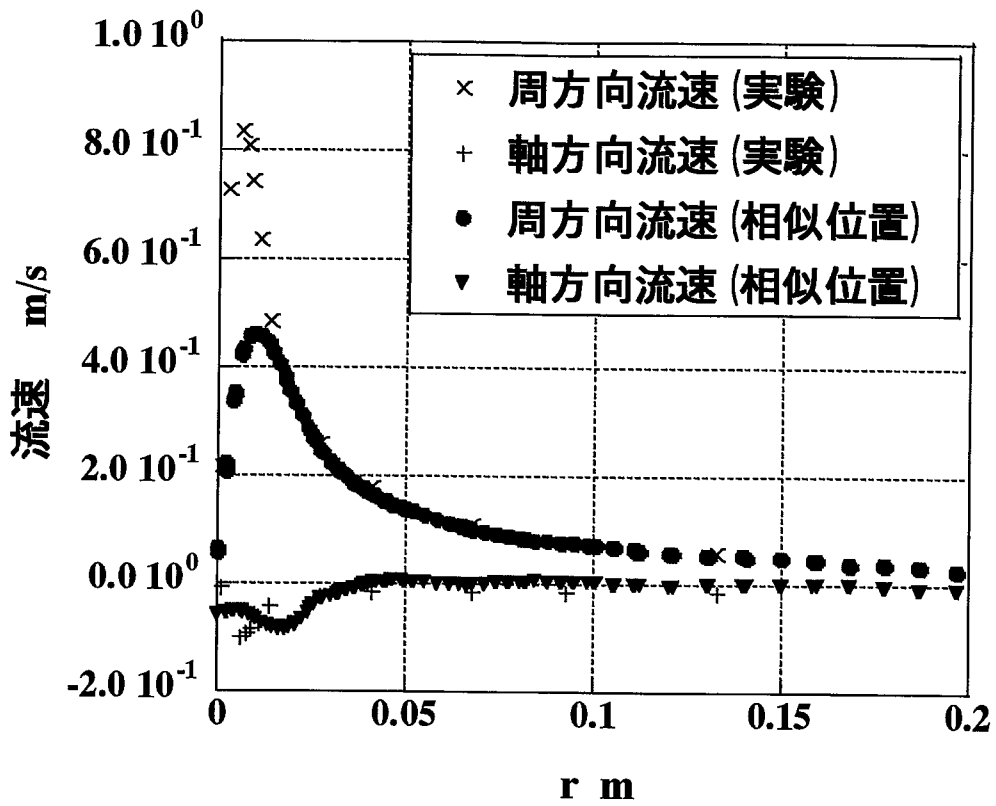


図 4.9 ガスコア長さを基準とした相似位置での速度分布

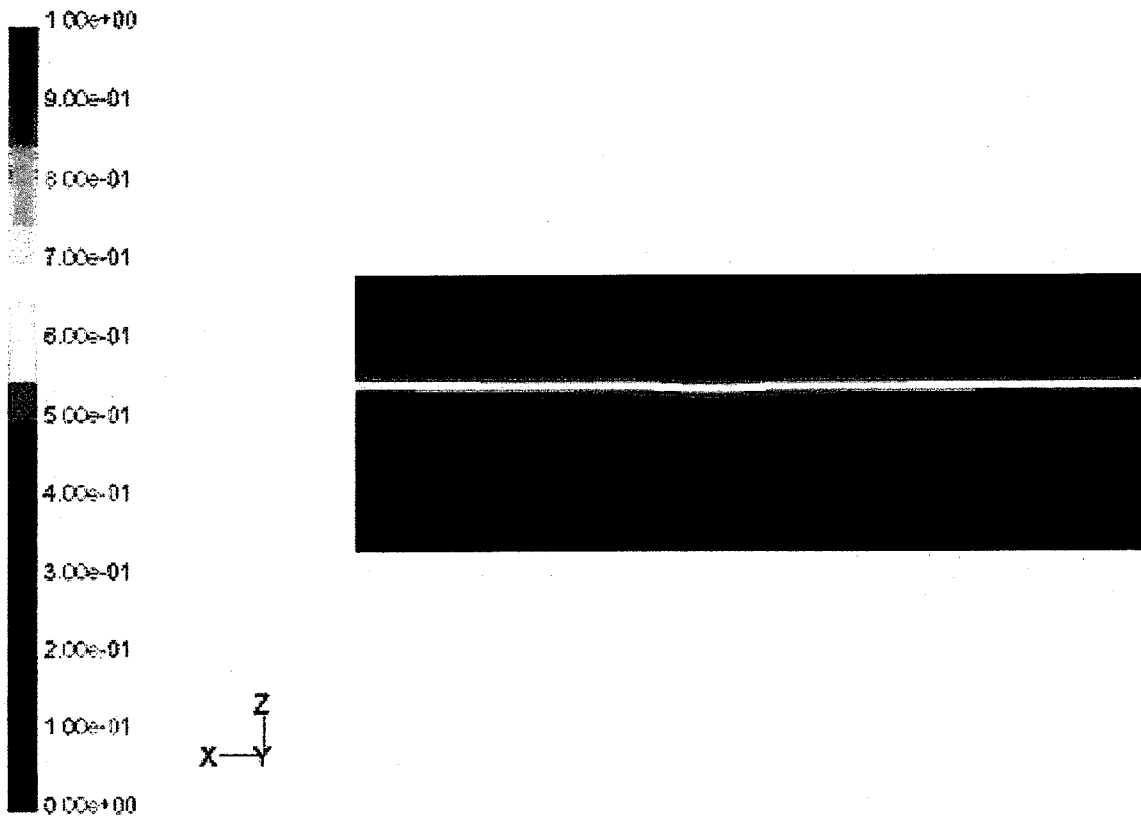


図 4.10 液面近傍 VOF 関数分布(詳細メッシュ, 1次精度差分)

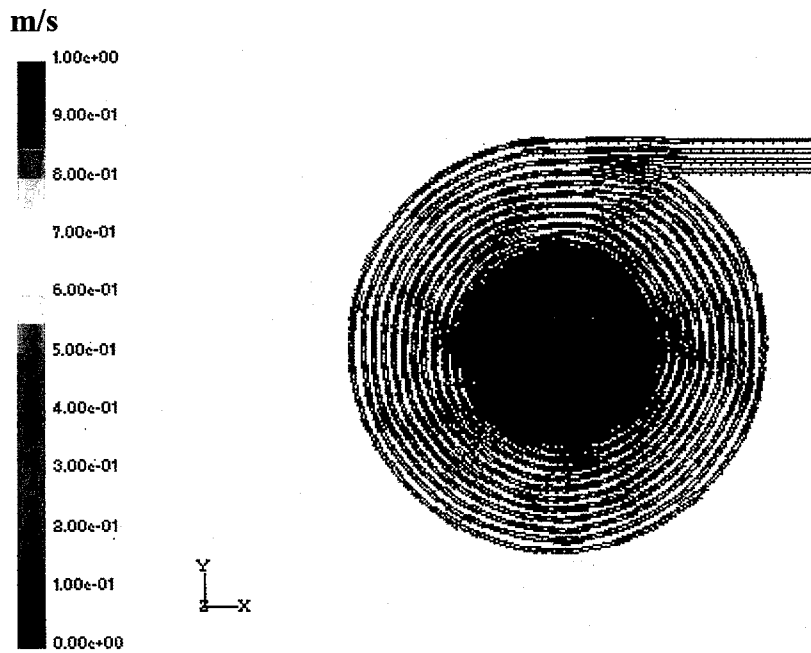


図 4.11 周方向速度分布(詳細メッシュ, 1次精度差分)

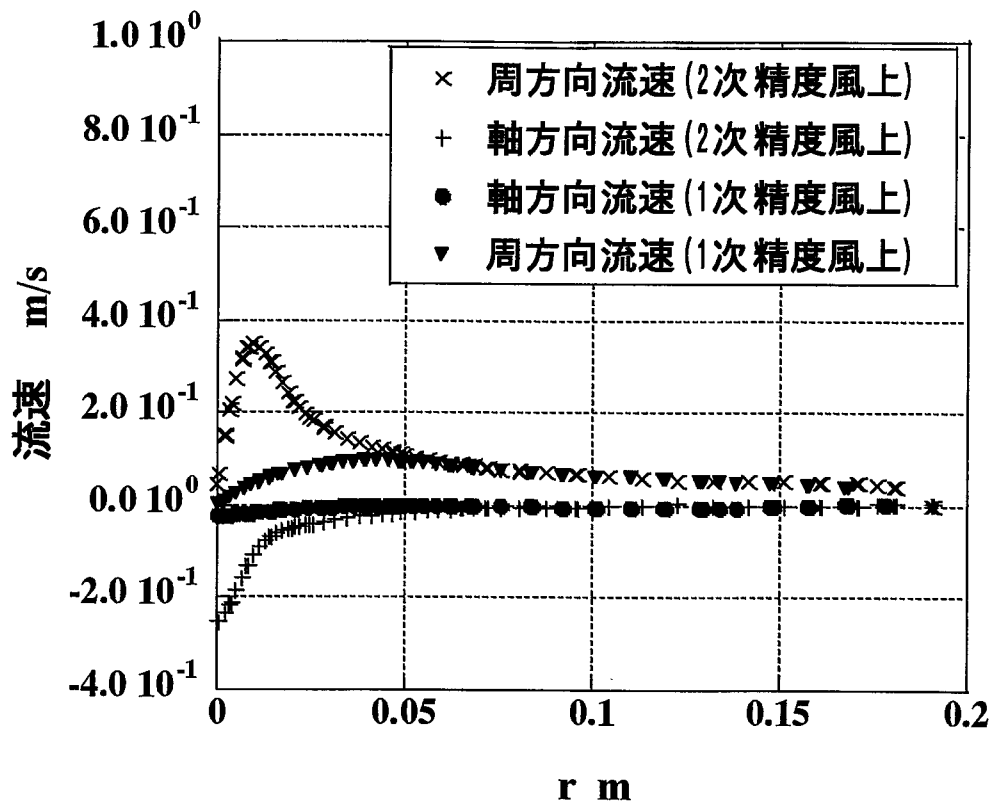


図 4.12 差分精度の違いによる解析結果の比較

5. 結論

電力中央研究所の実験体系(自由表面渦試験体系)を対象とした解析を行い、以下の知見を得た。

1. 渦スケール(周方向最大流速が生じる半径)の 1/2 程度の大きさのメッシュを用いておこなった解析では、渦スケールの 4 倍程度の解像度しか得られず、渦スケールの 1/10 程度の大きさのメッシュを用いることによって、渦スケール程度の解像度を得ることが可能になる。
2. 渦スケールの 1/2 程度の大きさのメッシュを用いた解析では、自由液面に窪みが 0.003[m]程度しか表れないため、表面張力項の有無による差は見られなかった。
3. 渦スケールの 1/10 程度の大きさのメッシュを用いた解析では、表面張力係数を変化させても周方向流速分布に差は表れなかったが、係数を 10 倍にした場合、ガスコア長さが 60[%]程度に減少した。
4. ガスコア長さを基準とした相似位置で実験と解析を比較することにより、解析においても、ガスコア直下の領域で流速の小さくなる領域が存在していることを確認した。
5. 渦中心近傍の領域では、数値拡散の影響が大きいので、高次精度の差分を用いた解析をおこなう必要があることを確認した。

参考文献

- [1] 村松 壽晴, 山口 彰 : 多様な作動流体を用いた場合に顕在化する重要熱流動課題の抽出, JNC TN9400 2000-056 (2000)
- [2] 村松 壽晴, 須田 一則, 村上 諭, 山口 彰 : 多様な作動流体を用いた場合の重要熱流動課題の特性比較, JNC TN9400 2000-109 (2000)
- [3] 村松 壽晴, 村上 諭, 山口 彰 : ナトリウム冷却高速炉の原子炉容器内熱流動の研究 (I)～炉上部プレナム内流動適正化に関する解析的検討～, JNC TN9400 2001-117 (2001)
- [4] 江口 謙, 他 8 名 : トップエントリ方式ループ型炉の中間熱交換器ガス巻き込み試験, 日本機械学会, 第 3 回動力・エネルギー技術シンポジウム (1992 年 11 月)
- [5] 守屋 祥一 : 伸長渦理論と詳細可視化・計測に基づく自由表面渦の流動特性評価, 電力中央研究所報告書 U97072
- [6] 秋山 守, 有富 正憲, 監修 : 新しい気液二相流数値解析ー多次元流動解析ー, コロナ社
- [7] FLUENT ASIA PACIFIC CO.,LTD : FLUENT マニュアル

謝辞

本研究を実施するにあたり，流体グループの山口彰グループリーダー，大島宏之研究主幹，村松壽晴主研及び高田孝副主研より，研究の各段階においてご指導を賜りました。ここに，感謝の意を表します。