



## ガス巻込み評価手法の高度化に関する研究

Study on Improvement of Gas Entrainment Evaluation Method

伊藤 啓 大島 宏之 徐 永澤 今井 康友

Kei ITO, Hiroyuki OHSHIMA, Yongze XU and Yasutomo IMAI

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

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

## ガス巻き込み評価手法の高度化に関する研究

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、徐 永澤\*、今井 康友\*

(2010年12月17日 受理)

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 プロジェクト）においてナトリウム冷却高速炉の設計研究を進めている。実用炉の設計概念においては、経済性向上のために出力に比してコンパクトな炉容器を指向しているため、炉容器内の流速が相対的に速くなり、自由液面におけるカバーガス巻き込みの発生が懸念されている。ガス巻き込みによって気泡が1次冷却系統内に混入すると、炉心出力の擾乱、IHX における除熱性能劣化など高速炉の安定運転に影響を及ぼす可能性があるため、ガス巻き込みの抑制は設計成立上重要である。

そこで、JAEA では、数値解析を利用したナトリウム冷却炉におけるガス巻き込み発生評価手法の構築を進めている。本研究では、作動流体物性値によるガスコア長さの過大評価を抑制するため、表面張力の効果を考慮した表面張力モデル及び乱流粘性の効果を考慮した乱流粘性モデルを開発し、水及びナトリウムにおけるガス巻き込み試験を対象としてモデルの検証を行った。

## Study on Improvement of Gas Entrainment Evaluation Method

Kei ITO, Hiroyuki OHSHIMA, Yongze XU\* and Yasutomo IMAI\*

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 the FaCT (Fast Reactor Cycle Technology Development) project to study a conceptual design of a large-scale sodium-cooled fast reactor. The plant system concept is intended to reduce a vessel diameter to enhance an economical competitiveness. Therefore, the coolant in the vessel has relatively higher velocity than conventional designs and may cause cover gas entrainment (GE) in an upper plenum region. The authors have studied a evaluation method of GE in fast reactors and the 1st proposal (prototype) of “Design Guideline for Gas Entrainment Prevention Using CFD Method” was published in 2006. However, some physical mechanisms are neglected for simplification in the prototype evaluation method.

In this study, the prototype evaluation method was improved by introducing the surface tension and turbulent effects. For the surface tension modeling, the mechanical balance between gravitational, centrifugal and surface tension forces was considered as the basic equation. In addition, the turbulent viscosity model was developed based on the considerations on unsteady vortex behaviors. The improved GE evaluation method was validated by analyzing the gas core lengths observed in simple experiments. Results showed that the analytical gas core lengths calculated by the improved GE evaluation method were shorter in comparison to the prototype GE evaluation method, and gave better agreement with the experimental data.

Keywords: Gas Entrainment, Free Surface Vortex, Sodium-cooled Fast Reactor, Surface Tension, Turbulent Viscosity

---

\* NDD Corporation

## 目次

1. 序論	1
2. 従来のガス巻き込み評価手法	2
3. 表面張力モデル	6
3.1 表面張力モデルの構築	6
3.2 表面張力モデルの検証	10
4. 乱流粘性モデル	13
4.1 乱流粘性モデルの構築	13
4.2 乱流粘性モデルの検証	13
5. ガス巻き込み試験を対象とした評価	15
5.1 解析手法の概要	15
5.2 準定常渦試験を対象とした評価	16
5.3 JAEA 基礎渦試験を対象とした評価	16
6. 結論	20
参考文献	21

## Contents

1.	Introduction-----	1
2.	Prototype GE Evaluation Method-----	2
3.	Surface Tension Model-----	6
3.1	Formulation of Surface Tension Model-----	6
3.2	Verification of Surface Tension Model-----	10
4.	Turbulent Viscosity Model-----	13
4.1	Formulation of Turbulent Viscosity Model-----	13
4.2	Verification of Turbulent Viscosity Model-----	13
5.	Evaluation of GE Experiments-----	15
5.1	Description of CFD Method-----	15
5.2	Evaluation of Quasi-steady Vortex-----	16
5.3	Evaluation of JAEA Basic GE Test-----	16
6.	Conclusion-----	20
	References-----	21

表リスト

表 3.1 筑波大実験における水物性値.....	23
表 3.2 界面活性剤濃度と表面張力係数の関係.....	23
表 5.1 JAEA 基礎渦試験の数値解析条件.....	24
表 5.2 JAEA 基礎渦試験の数値解析手法概要.....	25

図リスト

図 3.1 筑波大における自由表面実験体系.....	26
図 3.2 筑波大実験を対象としたガスコア長さの評価結果 (表面張力モデルの検証) .....	27
図 3.3 筑波大実験における界面活性剤の影響評価 (特性半径 Fitting 前) .....	28
図 3.4 筑波大実験における界面活性剤の影響評価 (特性半径 Fitting 後) .....	28
図 3.5 ナトリウム物性におけるガスコア長さの評価結果.....	29
図 4.1 横流れが作用する場合のガスコア長さ評価結果.....	29
図 5.1 電力中央研究所試験におけるガスコア長さの評価結果 (表面張力モデル比較) .....	30
図 5.2 電力中央研究所試験におけるガスコア長さの評価結果 (乱流粘性モデル $\alpha = 0$ 、 $\beta = 10^{-3}$ ) .....	30
図 5.3 電力中央研究所試験におけるガスコア長さの評価結果 (乱流粘性モデル： $\alpha = 0$ 、 $\beta = 10^{-4}$ ) .....	31
図 5.4 電力中央研究所試験におけるガスコア長さの評価結果 (乱流粘性モデル： $\alpha = 0$ 、 $\beta = 10^{-5}$ ) .....	31
図 5.5 電力中央研究所試験の評価におけるガスコア長さの最大値 (乱流粘性モデルの検証) .....	32
図 5.6 電力中央研究所試験の評価結果 (乱流粘性係数の比較) .....	32
図 5.7 JAEA 基礎渦試験体系概略図.....	33
図 5.8 JAEA 基礎渦試験体系俯瞰図.....	33
図 5.9 水試験体系の解析メッシュ.....	34
図 5.10 Na 試験体系の解析メッシュ.....	34
図 5.11 JAEA 基礎渦試験のガス巻き込み発生判定マップ.....	35
図 5.12 Case-Wa1 の瞬時流況図.....	36
図 5.13 Case-Wa2 の瞬時流況図.....	37

図 5.14 Case-Wa3 の瞬時流況図 .....	38
図 5.15 Case-Wa1 の渦発生位置 .....	39
図 5.16 Case-Wa2 の渦発生位置 .....	39
図 5.17 Case-Wa3 の渦発生位置 .....	39
図 5.18 渦の循環 (Case-Wa3) .....	40
図 5.19 下降流速勾配 (Case-Wa3) .....	40
図 5.20 Case-Wa1 の試験結果 .....	41
図 5.21 Case-Wa3 の試験結果 .....	41
図 5.22 Case-Na1 の瞬時流況図 .....	42
図 5.23 Case-Na2 の瞬時流況図 .....	43
図 5.24 Case-Na3 の瞬時流況図 .....	44
図 5.25 Case-Na1 の渦発生位置 .....	45
図 5.26 Case-Na2 の渦発生位置 .....	45
図 5.27 Case-Na3 の渦発生位置 .....	45
図 5.28 渦の循環 (Case-Na3) .....	46
図 5.29 下降流速勾配 (Case-Na3) .....	46
図 5.30 Case-Wa1 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較) .....	47
図 5.31 Case-Wa2 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較) .....	47
図 5.32 Case-Wa3 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較) .....	48
図 5.33 Case-Na1 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較) .....	48
図 5.34 Case-Na2 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較) .....	49
図 5.35 Case-Na3 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較) .....	49
図 5.36 最大ガスコア長さの評価結果 (表面張力モデル比較) .....	50
図 5.37 Case-Wa1 のガスコア長さ評価結果 (乱流粘性モデル : $\alpha = 10^{-2}$ 、 $\beta = 10^{-5}$ ) .....	50
図 5.38 Case-Wa1 のガスコア長さ評価結果 (乱流粘性モデル : $\alpha = 10^{-3}$ 、 $\beta = 10^{-5}$ ) .....	51
図 5.39 Case-Wa1 のガスコア長さ評価結果 (乱流粘性モデル : $\alpha = 10^{-4}$ 、 $\beta = 10^{-5}$ ) .....	51
図 5.40 Case-Wa1 における渦の移動速度 .....	52
図 5.41 Case-Wa1 における乱流粘性係数 .....	52
図 5.42 Case-Na1 のガスコア長さ評価結果 (乱流粘性モデル : $\alpha = 10^{-2}$ 、 $\beta = 10^{-5}$ ) .....	53
図 5.43 Case-Na1 のガスコア長さ評価結果 (乱流粘性モデル : $\alpha = 10^{-3}$ 、 $\beta = 10^{-5}$ ) .....	53
図 5.44 Case-Na1 のガスコア長さ評価結果	

(乱流粘性モデル： $\alpha=10^{-4}$ 、 $\beta=10^{-5}$ ) .....	54
図 5.45 Case-Na1 における渦の移動速度 .....	54
図 5.46 Case-Na1 における乱流粘性係数 .....	55
図 5.47 最大ガスコア長さの評価結果（乱流粘性モデル比較） .....	55
図 5.48 Case-Wa2 のガスコア長さ評価結果 (乱流粘性モデル： $\alpha=10^{-3}$ 、 $\beta=10^{-5}$ ) .....	56
図 5.49 Case-Wa3 のガスコア長さ評価結果 (乱流粘性モデル： $\alpha=10^{-3}$ 、 $\beta=10^{-5}$ ) .....	56
図 5.50 Case-Na2 のガスコア長さ評価結果 (乱流粘性モデル： $\alpha=10^{-3}$ 、 $\beta=10^{-5}$ ) .....	57
図 5.51 Case-Na3 のガスコア長さ評価結果 (乱流粘性モデル： $\alpha=10^{-3}$ 、 $\beta=10^{-5}$ ) .....	57
図 5.52 最大ガスコア長さの評価結果 (乱流粘性モデル比較) .....	58

This is a blank page.

## 1 序論

日本原子力研究開発機構（JAEA）では、ナトリウム冷却高速炉の実用化に向けて、原子炉容器内自由界面におけるガス巻き込み現象を評価する手法の開発を行っている<sup>1,2)</sup>。この評価手法は、流動数値解析によって得られた流速データから自由表面渦を検出し、個々の渦について局所物理量からガス巻き込み評価に必要なパラメータ（渦の循環・下降流速勾配等）を算出することにより、ガス巻き込み発生の有無を判定する。しかし、従来のガス巻き込み評価手法では作動流体の表面張力が考慮されていないため、ガスコア長さを過大評価する可能性がある。また、同様に層流渦（伸長渦）モデルに基づく評価を行っているため、自由液面のくぼみ（ガスコア長さ）は分子粘性の逆数となり、分子粘性の小さなナトリウム流れにおいて過大評価されることが明らかになっている。従って、本研究では、ガス巻き込み評価手法の精度向上を目的として、表面張力モデル<sup>3)</sup>及び乱流粘性モデルを構築する。また、モデルの検証としてガス巻き込み試験を対象とした評価を行い、構築したモデルがガスコア長さ評価結果に与える影響を調査した。

## 2 従来のガス巻き込み評価手法

従来のガス巻き込み評価手法においては、Burgers 渦モデル<sup>4)</sup>に基づいてガスコア長さの算出を行う。Burgers 渦モデルは、以下の軸対称定常 Navier-Stokes 方程式 ( $r$ - $\theta$ - $z$  方向) から導かれる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0, \quad (2.1)$$

$$u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right), \quad (2.2)$$

$$u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{u_r u_\theta}{r} = \nu \left( \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right), \quad (2.3)$$

$$u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right), \quad (2.4)$$

ここで、 $u_r$ 、 $u_\theta$ と $u_z$ はそれぞれ径方向流速、周方向流速、軸方向流速を表す。 $u_z = a(z - h_\infty)$ 、( $a$ は下降流速勾配、 $z$ は鉛直上向き)とすると、微分方程式 (2.1) - (2.4) の厳密解として以下のようなBurgers渦モデルの式が得られる。

$$u_r = -\frac{1}{2} ar, \quad (2.5)$$

$$u_\theta = \frac{\Gamma_\infty}{2\pi r} \left[ 1 - \exp \left\{ -\left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right\} \right], \quad (2.6)$$

$$u_z = a(z - h_\infty), \quad (2.7)$$

ただし、 $\Gamma_\infty$ は自由渦領域 (渦中心から十分に離れた領域) における循環値、 $h_\infty$ は渦が無い場合の (平らな液面の) 液位である。また、 $r_0$ は特性半径であり、以下の式 (2.8) より計算される。

$$r_0 = 2\sqrt{v/a} \quad (2.8)$$

式 (2.2) 及び (2.4) に式 (2.5) - (2.7) を代入し、対流項の影響が小さいものと仮定して式 (2.9) によって無次元化すると、式 (2.10) - (2.11) が得られる。

$$R = -\frac{r}{r_0}, \quad Z = \frac{z}{r_0}, \quad P = -\frac{P}{\rho(\Gamma_\infty/2\pi r_0)^2}, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial R} = \frac{1}{R^3} \{1 - \exp(-R^2)\}^2 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = -\frac{1}{Fr^2} \quad (2.11)$$

Froude 数  $Fr$  は、以下の式 (2.12) で定義される。

$$Fr \equiv \frac{\Gamma_\infty/2\pi r_0}{gr_0} \quad (2.12)$$

自由液面では圧力が一定であるため、式 (2.4) より以下に式 (2.13) が得られる。

$$P = P_a - \frac{Z - H(R)}{Fr^2}, \quad (2.13)$$

ここで、 $H(R)$  は  $r_0$  で無次元した液位である。さらに式 (2.2) に式 (2.13) 代入すると、以下の式が得られる。

$$\frac{1}{Fr^2} \frac{dH}{dR} = \frac{1}{R^3} \{1 - \exp(-R^2)\}^2, \quad (2.14)$$

式 (2.14) を解くことで液位分布が求められる。なお、式 (2.14) は有次元では以下の式 (2.14)' と記述されるため、遠心力と重力の釣合いを表していることが明らかである。

$$g \frac{dh}{dr} = \frac{u_\theta^2}{r}, \quad (2.14)'$$

式 (2.14) の両辺を積分すると、

$$\begin{aligned}
 H(R) &= H_\infty - Fr^2 \int_R^\infty \frac{1}{R^3} \{1 - \exp(-R^2)\}^2 dR \\
 &= H_\infty - Fr^2 \int_t^\infty \frac{1}{2t^2} \{1 - \exp(-t)\}^2 dt \\
 &= H_\infty + Fr^2 \left[ \frac{\{1 - \exp(-t)\}^2}{2t} \right]_{R^2}^\infty \\
 &\quad - Fr^2 \int_t^\infty \frac{\exp(-t) - \exp(-2t)}{t} dt \\
 &= H_\infty - Fr^2 \frac{\{1 - \exp(-R^2)\}^2}{2R^2} \\
 &\quad + Fr^2 [Ei(-R^2) - Ei(-2R^2)].
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

が得られる。ここで、 $H_\infty = h_\infty / r_0$  である。また、 $Ei(x)$  は指数積分関数 (Exponential Integral) であり、 $R < 0$  もしくは  $|R| \ll 1$  においては式 (2.16) と近似できる。

$$Ei(R) \approx \log R - i\pi + \gamma + R + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{R^n}{n \times n!} \tag{2.16}$$

ここで、 $\gamma$  は Euler 定数である。式 (2.16) を用いて  $H(0)$  を求めると、式 (2.17) となる。

$$\begin{aligned}
 H(0) &= H_\infty + Fr^2 \left[ -\log 2 + R^2 - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-R^2)^n}{n \times n!} \right]_{R=0} \\
 &= H_\infty - Fr^2 \log 2.
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

従って、ガスコア長さ  $L_{gc}$  は式 (2.18) と求まる。

$$L_{gc} = r_0 (H_\infty - H(0)) = \frac{\log 2}{g} \left( \frac{\Gamma_\infty}{2\pi r_0} \right)^2 \tag{2.18}$$

Burgers 渦モデルより導かれた式 (2.18) では、流体の粘性の影響は考慮されているが、それ以外の物性 (表面張力等) は考慮されていない。そのため、従来のガス巻込み評価手

法では、表面張力の影響を無視することによってガスコア長さを過大評価している。また、**Burgers** 渦モデルは定常渦流れのモデルであるため、ガス巻き込み発生に対する流れの乱れ(乱流粘性)の影響は考慮されていない。

### 3 表面張力モデル

#### 3.1 表面張力モデルの構築

ガスコア長さの計算において表面張力を考慮するため、式 (2.14) 'ではなく、以下の式 (3.1) によって液位分布を記述する<sup>5,6)</sup>。

$$g \frac{dh}{dr} = \frac{u_{\theta}^2}{r} - \frac{\sigma}{\rho} \frac{d\kappa}{dr}, \quad (3.1)$$

ここで、 $\sigma$  は表面張力係数である。また、 $\kappa$  は曲率であり、以下の式 (3.2) より計算される。

$$\kappa = \frac{h'}{r \{1+(h')^2\}^{1/2}} + \frac{h''}{\{1+(h')^2\}^{3/2}}, \quad (3.2)$$

ここで、 $h' = dh/dr$ ,  $h'' = d^2h/dr^2$  である。式 (3.1) は、遠心力と重力および表面張力の釣り合い式となっている。式 (3.1) に (2.6) 及び (3.2) を代入して無次元すると、以下の式 (3.3) が得られる。

$$\frac{1}{Fr^2} \frac{dH}{dR} = \frac{1}{R^3} \{1 - \exp(-R^2)\}^2 - \frac{1}{We^2} \frac{d}{dR} \left[ \frac{H'}{R \{1+(H')^2\}^{1/2}} + \frac{H''}{\{1+(H')^2\}^{3/2}} \right], \quad (3.3)$$

ここで、 $H' = dH/dR$ ,  $H'' = d^2H/dR^2$  である。また、Weber 数  $We$  は、以下の式 (3.4) で定義される。

$$We \equiv \frac{\Gamma_{\infty}}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{r_0 \sigma}} \quad (3.4)$$

式 (3.3) を積分することで、以下の式 (3.5) が得られる。

$$\begin{aligned}
 H(R) = & H_{\infty} - Fr^2 \frac{\{1 - \exp(-R^2)\}^2}{2R^2} \\
 & + Fr^2 [Ei(-R^2) - Ei(-2R^2)] \\
 & + \frac{Fr^2}{We^2} \left[ \frac{H'}{R\{1+(H')^2\}^{1/2}} + \frac{H''}{\{1+(H')^2\}^{3/2}} \right].
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

ここで、式 (3.5) の右辺の各項を式 (3.6) - (3.8) のように定義する。

$$f_1(R) = \{1 - \exp(-R^2)\}^2, \tag{3.6}$$

$$f_2(R) = [Ei(-R^2) - Ei(-2R^2)], \tag{3.7}$$

$$f_3(R) = \left[ \frac{H'}{R\{1+(H')^2\}^{1/2}} + \frac{H''}{\{1+(H')^2\}^{3/2}} \right], \tag{3.8}$$

$R=0$  の近傍での液面形状を 2 次関数で以下のように近似する。

$$H(R) = c_0 + c_1R + c_2R^2, \tag{3.9}$$

ここで、 $c_0$ ,  $c_1$  と  $c_2$  は定数である。また、 $R=0$  において  $H'=0$  であるため、 $c_1=0$  となる。式 (3.9) を式 (3.8) に適用すると、

$$f_3(R) = 2c_2 \left[ \frac{1}{(1+4c_2^2R^2)^{1/2}} + \frac{1}{(1+4c_2^2R^2)^{3/2}} \right]. \tag{3.10}$$

となるため、

$$f_3'(R) = \frac{df_3(R)}{dR} = -c_2 \left[ \frac{8c_2^2R}{(1+4c_2^2R^2)^{3/2}} + \frac{24c_2^2R}{(1+4c_2^2R^2)^{5/2}} \right], \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
 f_3''(R) &= \frac{d^2 f_3(R)}{dR^2} \\
 &= -c_2 \left[ \frac{8c_2^2}{(1+4c_2^2 R^2)^{3/2}} + \frac{24c_2^2 - 96c_2^4 R^2}{(1+4c_2^2 R^2)^{5/2}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{480c_2^4 R^2}{(1+4c_2^2 R^2)^{7/2}} \right].
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

が得られる。式 (3.10) - (3.12) を用いると、 $R=0$  の近傍において式 (3.5) の右辺第 4 項は、

$$\begin{aligned}
 &\frac{Fr^2}{We^2} \left[ \frac{H'}{R \{1+(H')^2\}^{1/2}} + \frac{H''}{\{1+(H')^2\}^{3/2}} \right] \\
 &= \frac{Fr^2}{We^2} \left\{ f_3(0) + f_3'(0)R + \frac{1}{2!} f_3''(0)R^2 \right\} \\
 &= 4 \frac{Fr^2}{We^2} c_2 - 16 \frac{Fr^2}{We^2} c_2^3 R^2.
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

となる。式 (3.6) より、

$$f_1'(R) = \frac{df_1(R)}{dR} = 4R \exp(-R^2) \{1 - \exp(-R^2)\}, \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
 f_1''(R) &= \frac{d^2 f_1(R)}{dR^2} \\
 &= (4 - 8R^2) \exp(-R^2) \{1 - \exp(-R^2)\} \\
 &\quad + 8R^2 \exp(-2R^2),
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
 f_1'''(R) &= \frac{d^3 f_1(R)}{dR^3} \\
 &= (-24R + 16R^3) \exp(-R^2) \{1 - \exp(-R^2)\} \\
 &\quad + (24R - 48R^3) \exp(-2R^2),
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
 f_1^{(iv)}(R) &= \frac{d^4 f_1(R)}{dR^4} \\
 &= (-24 + 96R^2 - 32R^4) \exp(-R^2) \{1 - \exp(-R^2)\} \\
 &\quad + (24 - 240R^2 + 192R^4) \exp(-2R^2).
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

となるため、 $R=0$  の近傍において式 (3.5) の右辺第 2 項は、

$$\begin{aligned}
 & -Fr^2 \frac{\{1 - \exp(-R^2)\}^2}{2R^2} \\
 &= -Fr^2 \frac{1}{2R^2} \left( f_1(0) + f_1'(0)R + \frac{1}{2!} f_1''(0)R^2 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{3!} f_1'''(0)R^3 + \frac{1}{4!} f_1^{(iv)}(0)R^4 \right) \\
 &= -\frac{1}{2} Fr^2 R^2.
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

となる。さらに、式 (2.16) を (3.7) に適用して  $R^2$  の項までを取ると、

$$f_2(R) = -\log 2 + R^2, \tag{3.19}$$

となるため、 $R=0$  の近傍において式 (3.5) の右辺第 3 項は

$$Fr^2 [Ei(-R^2) - Ei(-2R^2)] = Fr^2 (-\log 2 + R^2). \tag{3.20}$$

となる。式 (3.9)、(3.13)、(3.18) 及び (3.20) を式 (3.5) に代入すると、

$$\begin{aligned}
 c_0 + c_2 R^2 &= H_\infty - \frac{1}{2} Fr^2 R^2 - Fr^2 \log 2 + Fr^2 R^2 \\
 &\quad + 4 \frac{Fr^2}{We^2} c_2 - 16 \frac{Fr^2}{We^2} c_2^3 R^2,
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

が得られるため、以下の関係式が導かれる。

$$c_0 = H_\infty - Fr^2 \log 2 + 4 \frac{Fr^2}{We^2} c_2, \quad (3.22)$$

$$c_2 = \frac{1}{2} Fr^2 - 16 \frac{Fr^2}{We^2} c_2^3. \quad (3.23)$$

式 (3.23) より、 $c_2$ は3次方程式の解として、以下の通り与えられる（解の判別式から、実数解は1つしか存在しないことが確かめられる）。

$$c_2 = \sqrt[3]{\frac{q}{2} + \sqrt{D}} + \sqrt[3]{\frac{q}{2} - \sqrt{D}}, \quad (3.24)$$

ただし、

$$q = \frac{We^2}{32}, \quad D = \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{s}{3}\right)^3, \quad s = \frac{We^2}{16Fr^2}. \quad (3.25)$$

である。このとき、ガスコア長さ  $L_{gc}$  は、

$$L_{gc} = r_0 (H_\infty - H(0)) = \frac{\log 2}{g} \left(\frac{\Gamma_\infty}{2\pi r_0}\right)^2 - \frac{4\sigma c_2}{\rho g r_0}. \quad (3.26)$$

と求まる。式 (2.18) と比較すると、右辺第2項が表面張力の効果を現していることが分かる。

### 3.2 表面張力モデルの検証

表面張力モデルの検証として、筑波大学にて行われた自由表面渦実験<sup>7)</sup>の評価を行った。実験体系を図 3.1 に示す。円筒容器側方のスリット状の流入部より一様速度で流入した水が円筒容器内に渦を形成し、その渦が円筒容器底面に設置した流出ノズルによって誘起される吸い込み流れと相互作用することによって発達し、渦中心の圧力が低下することで自由液面にくぼみ（ガスコア）を生じる。流入量と等しい量の水が容器底面に設置された流出ノズルより流出することで液面高さは常に一定に保たれる。円筒容器の径 ( $D$ ) は 0.20m、流出ノズル径 ( $d$ ) は 0.0125m、流入スリット幅 ( $t$ ) は 0.02m、容器底面からの液位 ( $h_0$ ) は 0.25m である。実験は、流量を 4.0~7.5l/min、水の温度を 20、25、30、40℃と変化させて実施された。また、界面活性剤を加えて表面張力係数を変化させた場合のガスコア長さも

計測されている。式 (2.18) 及び (3.26) から明らかなように、ガスコア長さを求めるためには、自由渦領域における循環 と特性半径  $r_0$  が必要となる。これらの値は、円筒容器内の自由表面渦に関する電力中央研究所の試験<sup>8)</sup>において得られた、以下の関係式によって計算した。

$$\Gamma_{\infty} = \beta \left( 2\pi u_{in} \frac{D}{2} \right) = 0.342 N^{0.121} \Gamma_{in}, \quad (3.27)$$

$$1.121 r_0 = 48.7 N^{-0.851} \frac{d}{2}. \quad (3.28)$$

ただし、式 (3.28) は  $d/D=1/16$  の試験結果から得られた式である。また、 $N$  は径方向 Reynolds 数であり、以下のように定義される。

$$N = \frac{Q}{h_0 \nu}. \quad (3.29)$$

ただし、 $Q$  は流量である。ただし、式 (3.28) を得る上で物性値 (粘性) の影響は考慮されていないため、式 (3.28) は流量の影響のみ (液位  $h_0$  は一定のため) を表す式となっている。従って、本研究では、式 (3.28) 中の径方向 Reynolds 数  $N$  は電力中央研究所の試験条件 (室温の物性値) に基づいて評価した上で、式 (3.28) で求められた特性半径 ( $r_0'$  とする) をそのまま評価に用いるのではなく、 $r_0'$  から下降流速勾配  $a$  を計算し、式 (2.8) を用いて (物性値の影響を考慮した) 特性半径  $r_0$  を求めた。即ち、

$$1.121 r_0' = 48.7 \left( \frac{Q}{h_0 \nu_r} \right)^{-0.851} \frac{d}{2}, \quad (3.28)'$$

$$a = \frac{4\nu_r}{(r_0')^2}, \quad (3.30)$$

$$r_0 = 2\sqrt{\nu/a}, \quad (2.8)$$

となる。ただし、 $\nu_r$  は室温の動粘性係数である。

図 3.2 に、水温を変化させた際の、(a) 表面張力の効果を考慮しない場合と (b) 表面張力の効果を考慮した場合のガスコア長さ評価結果を示す。ただし、評価に用いた物性値は表 3.1 の通りである。表面張力を考慮しない従来手法による評価結果では、全ての温度にお

いて評価結果が試験結果を大きく上回っている。一方、表面張力を考慮することによってガスコア長の評価結果が小さくなり、水温 20°Cにおいて流量が大きい場合（6.0l/min 以上）では未だ評価結果が実験結果を上回っているものの、25°Cにおいて評価結果は実験結果を良く再現しており、30、40°Cにおいても（実験結果が少ないものの）両者の差は小さい。図 3.3 に、水に界面活性剤を加えて表面張力係数を変化させた場合の評価結果を示す。ただし、界面活性剤濃度と表面張力係数の関係は表 3.2 の通りであり、その他の物性値（密度、粘性係数）は界面活性剤の添加によってほとんど変化しない。本結果では、基本となる結果（界面活性剤を添加しない場合の評価結果）が実験結果を過大評価しているため、評価結果における界面活性剤の影響を述べることは困難である。そのため、界面活性剤を添加しない場合における評価結果が実験結果に近づくように、式 (3.28) における係数 (48.7 及び-0.851) を変化させて（結果的に式 (2.8) で求める特性半径を Fitting して）評価を行った。図 3.4 に、Fitting した特性半径に基づくガスコア長さ評価結果を示す。なお、この際の特性半径の式は以下の通りである。

$$1.121r_0 = 6.9 \times 10^4 N^{-2.0} \frac{d}{2} \quad (3.28)''$$

実験結果において、界面活性剤濃度 0ppm と 10ppm の結果間の差に比べて 10ppm と 100ppm の結果間の差は小さいが、評価結果においても同様の傾向が再現されている。

以上の結果から、3.1 節で構築した表面張力モデルを用いることによって表面張力の影響を正しく評価できることが確認されたため、ナトリウム物性における評価を行った。本評価は、筑波大学の実験条件において作動流体として 250°Cのナトリウムを用いたと仮定して行った。図 3.5 にガスコア長さの評価結果を示す。ナトリウムは粘性係数が水より小さいため、表面張力の効果を考慮しない場合、全ての流量範囲で水よりもガスコア長が大きくなった。しかし、表面張力効果を考慮することでガスコア長が小さくなり、特に流量が小さい条件（5.0l/min 以下）では水と同等以下のガスコア長となった。これは、ナトリウムは水より表面張力係数が大きいため、流量が小さい条件（表面張力の効果が支配的な条件）においてナトリウムのガスコア長さが水よりも小さくなったものである。

## 4 乱流粘性モデル

### 4.1 乱流粘性モデルの構築

乱れを伴う渦を精度良く評価することを目的として、自由表面渦に作用する乱流粘性効果を考慮したモデルを構築する。乱流粘性 $\nu_t$ は、層流渦に対する攪乱成分として表出するものと仮定し、以下の式でモデル化する。

$$\nu_t = \alpha l_r^2 (\nabla v)_{vortex} + \beta |\Gamma_\infty| \quad (4.1)$$

ここで、 $l_r$ は渦半径（第二不変量が0となる領域の半径と定義）、 $\alpha$ および $\beta$ は定数である。 $(\nabla v)_{vortex}$ は渦に作用する擾乱速度成分の勾配であり、以下の式で計算する。

$$(\nabla v)_{vortex} = \frac{v_{trans}}{l_r} \quad (4.2)$$

ただし、 $v_{trans}$ は渦移動速度（渦に作用する並進方向流速）である。(4.1)式の第1項は渦の並進移動に伴う攪乱成分を表し、第2項は回転流速（循環）の増加に伴う攪乱成分を表す。

(4.1)式から計算される乱流粘性係数 $\nu_t$ を伸長渦理論における動粘性係数 $\nu$ （分子粘性）に加えることにより、乱れの影響を考慮した自由表面渦のガスコア長さが以下の式で計算される。

$$L'_{gc} = \frac{\nu}{\nu + \nu_t} L_{gc} \quad (4.3)$$

ここで、 $L_{gc}$ は式(2.18)より計算されるガスコア長さであり、 $L'_{gc}$ は乱流粘性の影響を考慮した場合のガスコア長さである。さらに表面張力の影響を考慮すると、ガスコア長さは以下の式で計算される。

$$L_{gc}'' = \frac{\nu}{\nu + \nu_t} \cdot \frac{\log 2}{g} \left( \frac{\Gamma_\infty}{2\pi r_0} \right)^2 - \frac{4\sigma c_2}{\rho g r_0} \quad (4.4)$$

### 4.2 乱流粘性モデルの検証

乱流粘性モデルの検証として、日立製作所にて行われた自由表面渦試験<sup>9)</sup>を対象とした評価を行った。試験体系は筑波大学における実験と同様に円筒容器であるが、作動流体（水）

はベーンによって回転成分を与えられた後、径方向から一様に流入する。円筒容器系は0.30m、液位は0.67mである。試験では、円筒容器中央に形成されるガスコアに対して横流れを作用させ、横流れ流速と  $u_{dis}$  とガスコア長さの関係を調査している。本研究では、横流れ流速が渦移動速度 ( $v_{trans}$ ) に相当するものとし、横流れが無い場合 ( $u_{dis}=0.0\text{m/s}$ ) のガスコア長さを基準として、横流れを 0.14、0.27、0.41m/s と変化させた場合の評価を行った。その際、循環による乱れ成分の係数 (式 (4.1) の  $\beta$ ) は、Odgaard による類似研究 (循環に比例する乱流粘性を導入することにより、円筒容器内ガスコア長さに関して実験結果と一致する評価結果を導いた研究)<sup>10)</sup>を参照して、 $\beta=10^{-5}$  とした。

図 4.1 に、横流れに対するガスコア長さの変化を評価した結果を示す。渦移動速度による乱れ成分の係数式 (4.1) の  $\alpha$  をパラメータとして評価を行った結果、 $\alpha=10^{-3}$  とした場合に試験結果を良く再現した。このため、構築した乱流粘性モデルは、乱れを伴う渦 (非定常渦など) の評価に有効であることが分かった。

## 5 ガス巻き込み試験を対象とした評価

表面張力モデルおよび乱流粘性モデルの効果を確認するため、電力中央研究所にて行われた自由表面渦試験<sup>8)</sup>とJAEAにて行われた水およびナトリウム物性における基礎ガス巻き込み試験<sup>11)</sup>を対象として、自由液面渦挙動の評価を行った。

### 5.1 解析手法の概要

ガス巻き込み評価手法では、流動数値解析によって得られた流速データから自由表面渦を検出し、個々の渦について局所物理量からガス巻き込み評価に必要なパラメータ（渦の循環・下降流速勾配等）を算出することにより、ガス巻き込み発生の有無を判定する。本研究におけるガス巻き込み試験の流動数値解析には、メッシュジェネレーターとしてGambit2.3.16を、CFDソルバーとしてFLUENT6.2.16を使用した。数値解析におけるFLUENTの計算オプションは以下の通りである。

数値解法：SIMPLEC<sup>12)</sup>

離散化スキーム

圧力補間法：PRESTO スキーム

運動量保存式：二次精度差分

SIMPLEC法のベースとなっているSIMPLE法<sup>13)</sup>は、まず運動量保存式から流速の予測値を求め、流速の予測値が連続の式を満たすように流速と圧力を補正する方法である。SIMPLEC法では、SIMPLE法に比べ反復計算の収束性が改善されている。圧力補間法として選択したPRESTOスキームは、高速回転流及び曲率の大きい領域内流れに適した補間法である。自由表面渦を解析するためには高次精度差分が必須であるため<sup>14)</sup>、運動量保存式の非定常項には二次精度差分を、対流項には二次精度風上差分を、粘性項には二次精度中心差分を適用した。本解析において乱流モデルは使用せず、層流モデルによる数値予測を実施した。また、自由液面はFree-Slip条件で模擬し、壁面は流速を0とするNon-Slip条件とした<sup>1)</sup>。

解析結果のポスト処理には、StreamViewerおよびFIELDVIEW for Windows 12を使用した。JAEAにおいて開発されたStreamViewerは、流動解析によって得られた流速場から渦パラメータを算出するツールである。

数値解析における作動流体の物性値を以下に示す。

水

温度 : 20°C  
 密度 : 998.2kg/m<sup>3</sup>  
 動粘性係数 : 1.00×10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/s  
 表面張力係数 : 0.0742N/m

ナトリウム

温度 : 250°C

密度 : 891.7kg/m<sup>3</sup>  
 動粘性係数 : 4.37×10<sup>-7</sup>m<sup>2</sup>/s  
 表面張力係数 : 0.182N/m

## 5.2 準定常渦試験を対象とした評価

電力中央研究所にて行われた試験の体系形状は筑波大学において行われた実験体系と同様であるが、円筒容器の径 ( $D$ ) は0.40m、流出ノズル径 ( $d$ ) は0.05m、流入スリット幅 ( $t$ ) は0.04m、容器底面からの液位 ( $h_0$ ) は0.50mである。本研究では、流入流速が0.04167m/sの条件で評価を行った。本条件における試験では、発生した渦のガスコア長さが0.112mであると報告されている。

### 表面張力モデルの効果確認

図 5.1 に表面張力の効果を考慮したガスコア長さの評価結果を示す。表面張力モデルによってガスコア長がわずかに小さくなっているが、電力中央研究所の試験では比較的循環が大きいいため、式 (3.26) 右辺第 2 項 (表面張力効果の項) の影響は小さい。

### 乱流粘性モデルの効果確認

電力中央研究所試験では体系中心近傍に比較的安定な渦が形成されるため、渦の並進移動による攪乱効果は小さいと考えられる。従って、ここでは式 (4.1) における  $\alpha$  の影響を除去して ( $\alpha=0$ )、 $\beta$  の影響のみを評価する。その際、 $\beta=10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$  の 3 条件で評価を実施した。

図 5.2~5.4 に各条件で評価されたガスコア長さの時間推移を、図 5.5 にその最大値を示す。また、図 5.6 に乱流粘性係数を示す。ガスコア長さの評価では、 $\beta$  値の増大に伴い、渦動粘性係数が増大するためガスコア長さが抑制される結果となる。ガスコア長さの最大値に関して試験結果と比較すると、 $\beta=10^{-3}$ 、 $10^{-4}$  の条件ではともに過小評価となり、保守側評価の観点から  $\beta=10^{-5}$  のオーダーが適正值であると考えられる。乱流粘性係数に関しては、 $\beta=10^{-5}$  の条件で平均的に  $\nu_t=6.0\times 10^{-7}$ m<sup>2</sup>/s 程度の値が算出されており、水の分子動粘性係数と同程度のオーダーとなる。

以上の結果および 3.2 節における検証結果から、式 (4.1) における  $\beta$  の値として  $10^{-5}$  が適切であると考えられる。

## 5.3 JAEA 基礎渦試験を対象とした評価

JAEA では、自由表面渦によるガス巻き込みに関する物性値の影響を調査するため、同一の基礎的な体系 (JAEA 基礎渦試験体系) において、水流動試験 (GERATO-M 試験) とナトリウム流動試験 (GERATO-S 試験) を実施している<sup>15)</sup>。図 5.7 に、JAEA 基礎渦試験体系の概略を示す。JAEA 基礎渦試験体系は、流路長 0.7m、流路幅 0.1m、高さ (液位) 0.2m の体

系である。体系は仕切り板（主流に平行な垂直板）によって、体系中心における主流方向長さ 0.3m の領域を除いて 2 分割されている。作動流体（水およびナトリウム）は、2 分割された流路の片方（図 5.7(a)の下側流路）の流入口から流入し、体系中央底面に取り付けられたノズル（吸込み管）および流入口と対面する位置にある流出口から流出する。一方、もう一方の流路（図 5.7(a)の上側流路）には、流体の流入出口は存在しない。図 5.8 に、JAEA 基礎渦試験体系の俯瞰図を示す。ただし、図中の観測窓（直径 0.1m、幅 0.01m）はナトリウム試験体系のみに存在する。

図5.9および5.10に水試験体系およびナトリウム試験体系の解析メッシュを示す。解析メッシュは、全て1辺5.0mm程度の六面体セルから構成されている。表5.1にJAEA基礎渦試験の数値解析条件を示す。図5.11に、JAEA基礎渦試験のガス巻き込み発生判定マップを示す。本研究では、Case-Wa1 (Na1)、Case-Wa2 (Na2) およびCase-Wa3 (Na3) の条件下において、水およびナトリウムに関して同一の流量条件を与えた場合の比較・評価を実施する。表5.2に数値解析の概要を示す。流動数値解析の手順としては、まず80秒間の数値解析を実行して十分に発達した流況を形成した後、40秒間の過渡解析を実施して、0.1秒間隔で取得した非定常流動データを評価対象とした。

図5.12～5.14に、水試験解析の結果から得られた水平3断面の瞬時流速分布を示す。これらの流況図では、液面下10mm、30mmおよび60mmの断面を表示しており、体系中央付近の領域を拡大している。また、流れが十分に発達してから40秒間の解析において、代表的な渦の発生している瞬時の流速分布を示している。図5.15～5.17に、40秒間の解析における渦発生位置を示す。渦は、吸込みノズル近傍もしくはその下流において多く形成されている。図5.18および5.19に、Case-Wa3における渦の循環および下降流速勾配の時間変化を示す。ここで、循環は反時計回りの渦では正の値、時計回りの渦では負の値となる。また、ある時刻において複数の渦が検出された場合には、ガスコア長さが最大となる渦を選択して表示している。図5.20および5.21に、試験で計測（PIV計測）されたCase-Wa1およびCase-Wa3の流速分布を示す。Case-Wa1の試験結果において、流入した水は吸込みノズルの真上よりやや下流の位置までほぼ直進し、同位置で小規模な時計回りの渦を形成している。一方、数値解析結果においても同様の流況が確認されている。Case-Wa3の試験で計測した流速分布とに着目すると、流入した水は吸込みノズルの真上の位置までほぼ直進し、同位置で時計回りの渦を形成している。また、流路中央から流出口までの領域では流速が相対的に小さくなっている。数値解析でも試験と同様の流況が得られており、これらの結果から、数値解析によってJAEA基礎渦試験の流況を概ね正しく再現できていると考えられる。

図 5.22～5.24 に、ナトリウム解析結果から得られた水平 3 断面の流速分布を示す。また、図 5.25～5.27 に、40 秒間の解析における渦発生位置を示す。Case-Wa1～Case-Wa3 と Case-Na1～Case-Na3 を比較すると、渦発生位置や全体的な流動パターンに顕著な差異は現れず、水解析結果とナトリウム解析結果は概ね一致している。すなわち、物性値の違いは流況及び渦発生挙動に大きな影響を与えない。図 5.28 および 5.29 に、Case-Na3 における渦の循環お

よび下降流速勾配の時間変化を示す。これらの結果を Case-Wa3 と比較すると、渦の循環および下降流速勾配に関して水解析結果およびナトリウム解析結果で同程度の値となっていることが分かる。

#### 表面張力モデルの効果確認

表面張力モデルの効果を確認するため、表面張力モデルを用いない場合（従来のガス巻き込み評価手法）と表面張力モデルを用いた場合について、ガスコア長さの比較を行う。図 5.30～5.35 に、Case-Wa1～Case-Wa3 および Case-Na1～Case-Na3 におけるガスコア長さの時間変化を示す。図 5.36 に、最大ガスコア長さの評価結果を示す。表面張力の効果を考慮した結果、各ケースにおいてガスコア長さの評価が 5%～20% 程度減少している。

#### 乱流粘性モデルの効果確認

4.2 節で設定した係数  $\alpha$  の適正值 ( $\alpha=10^{-3}$ ) の妥当性を評価するため、 $\alpha=10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$  の 3 条件で Case-Wa1 および Case-Na1 の評価を実施した ( $\beta=10^{-5}$  は固定)。Case-Wa1 について、図 5.37～5.39 にそれぞれの  $\alpha$  に対するガスコア長さを示す。また、図 5.40 および 5.41 に、渦の移動速度および乱流粘性係数を示す。Case-Na1 についても同様に、図 5.42～5.44 にそれぞれの  $\alpha$  に対するガスコア長さを、図 5.45 および 5.46 に渦の移動速度および乱流粘性係数を示す。また、図 5.47 に Casae-Wa1 と Case-Na1 のガスコア長さの最大値を示す。Casae-Wa1 と Case-Na1 を比較すると、作動流体の流入流出境界条件は同一であり、物性が異なるのみである。この場合、既に述べた通り、渦発生挙動、渦の循環および下降流速勾配等の渦パラメータに顕著な違いは現れない。従って、乱流粘性を考慮しない従来のガス巻き込み評価手法 ( $\alpha=\beta=0$ ) では、分子粘性  $\nu$  がガスコア長さの評価値に強い影響を与え、分子粘性の小さいナトリウム条件では、分子粘性の大きい水条件に比べてガスコア長さが 2 倍以上となっている。一方、乱流粘性モデルを用いた場合、 $\alpha$  値の増大に伴ってガスコア長さが減少している。この際、乱流粘性係数は作動流体の物性値には依存したいため、流況が概ね一致する Casae-Wa1 と Case-Na1 では、同一の  $\alpha$  値に対して同程度の乱流粘性係数が算出されている。乱流粘性係数が増加すると、ガスコア長さの評価式 (4.3) 式において分子粘性よりも乱流粘性の影響が強くなるため、 $\alpha$  値の増大に伴ってナトリウム条件と水条件のガスコア長さの差が小さくなる結果が得られている。5.11 に示す通り、Case-Wa1 および Case-Na1 はガス巻き込み発生/未発生のボーダー上にあるため、液位 (0.10m) を考慮すると  $\alpha=10^{-3}$  が適正值であると考えられる。 $\alpha=10^{-3}$  の条件で算出される乱流粘性係数は  $\nu_t=10^{-6}\sim 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$  となっており、作動流体の分子粘性と同程度のとなっている。

$\alpha=10^{-3}$ 、 $\beta=10^{-5}$  と設定して、Case-Wa2、Case-Wa3、Case-Na2 および Case-Na3 の評価を実施した。図 5.48～5.51 に、各ケースにおけるガスコア長さの時間変化を示す。また、図 5.52 にガスコア長さの最大値を示す。従来のガス巻き込み評価手法ではナトリウムにおけるガスコア長さが水流れにおけるガスコア長さの 2.2～3 倍程度となっているが、乱流粘性モデル

を用いることによって両者の差が大幅に縮小した。この結果は、水とナトリウムでほぼ同じガス巻き発生条件が計測された試験結果と定性的に一致する。

## 6 結論

高速炉ガス巻込み現象評価手法構築の一環として、表面張力モデルと乱流粘性モデルを開発した。また、開発したモデルを用いて、水およびナトリウム物性のガス巻込み試験を対象とした評価を実施し、ガスコア長さ評価に与える影響を確認した。本研究によって得られた知見は、以下の通りである。

- ① 表面張力効果を考慮した力学的釣合い式に基づき、表面張力が作用する場合のガスコア長さ評価式を導出し、ガス巻込み評価手法に組込んだ。
- ② 表面張力モデルの導入により、物性値の温度変化や表面張力係数の変化によるガスコア長さの変化挙動が精度良く評価できるようになった。
- ③ 分子粘性の効果によってナトリウム物性におけるガスコア長さが過大評価されることを明らかにし、非定常流れ場中の渦流れに関する考察から、乱流粘性モデルを構築した。
- ④ 乱流粘性モデルを適用することにより、ナトリウム物性におけるガスコア長さの過大評価が抑制され、水物性と同程度の値となった。
- ⑤ 表面張力モデルと乱流粘性モデルを用いることにより、水およびナトリウム物性におけるガス巻込み発生傾向に関して、試験結果と一致する傾向が得られた。

参考文献

- 1) T. Sakai, Y. Eguchi, H. Monji, K. Ito, H. Ohshima, “Proposal of Design Criteria for Gas Entrainment from Vortex Dimples Based on a Computational Fluid Dynamics Method”, *Heat Transfer Engineering*, **29**, pp. 731-739 (2008).
- 2) 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).
- 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”, *J. Nucl. Sci. Tech.*, **46**, pp. 366-373 (2009).
- 4) J. M. Burgers, “A mathematical model illustrating the theory of turbulence”, *Advance in applied mechanics* (edited by Mises, R. and Karman, T.) , Academic Press INC., New York (1948).
- 5) A. Andersen, T. Bohr, B. Stenum, J. J. Rasmussen, B. Lautrup, “Anatomy of a bathtub vortex”, *Physical Review Letters*, **91** (2003).
- 6) A. Andersen, T. Bohr, B. Stenum, J. J. Rasmussen, B. Lautrup, “The bathtub vortex in a rotating container”, *J. Fluid Mech.*, **556**, pp. 121-146 (2003).
- 7) H. Monji, T. Shinozaki, H. Kamide, T. Sakai, “Effect of experimental conditions on gas core length and downward velocity or free surface vortex in cylindrical vessel”, *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, **132**, p. 012901 (2010).
- 8) S. Moriya, “Estimation of Hydraulic Characteristics of Free Surface Vortices on the Basis of Extension Cortex Theory and Fine Model Test Measurements”, CRIEPI Abiko Research Laboratory Report, U97072 (1998) [in Japanese].
- 9) T. Hiranuma, K. Yamamoto, K. Iwashige, M. Takakuwa, H. Tokoi, “Experimental Study of Liquid Properties' Effect on Gas Entrainment Phenomena Induced by Vortices”, *Eighth Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics*, Kyoto, Japan, Sep. 30- Oct. 4 (1997).
- 10) A. J. Odgaard, “Free-Surface Air Core Vortex”, *Journal of Hydraulic Engineering*, **112**, pp. 610-620 (1986).
- 11) T. Ezure, N. Kimura, K. Hayashi, H. Kamide, “Transient Behavior of Gas Entrainment Caused by Surface Vortex”, *Heat Transfer Engineering*, **29**, pp. 659-666 (2008).
- 12) W. Z. Shen, J. A. Michelsen, N. N. Sorensen, J. N. Sorensen, “An Improved SIMPLEC Method on Collocated Grids for Steady and Unsteady Flow Computations”, *Numerical Heat Transfer*, pp. 1040-7790 (2003).
- 13) S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York (1980).
- 14) H. Ohshima, T. Sakai, H. Kamide, N. Kimura, T. Ezure, A. Uchibori, K. Ito, T. Kunugi, K. Okamoto, N. Tanaka, Y. Tsuji, H. Monji, Y. Eguchi, M. Nishimura, “Description of "Design

Criteria for Gas Entrainment Prevention Using CFD Method" (Cooperative Research)", *JAEA-Research* 2008-049 (2008).

- 15) N. Kinura, T. Ezure, H. Miyakoshi, H. Kamide, T. Fukuda, "Experimental Study on Gas Entrainment due to Non-stationary Vortex in a Sodium Cooled Fast Reactor -Comparison of Onset Conditions Between Sodium and Water-", *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power* (in press).

表 3.1 筑波大実験における水物性値

温度 ℃	密度 kg*m <sup>-3</sup>	粘性係数 Pa*s	表面張力係数 Pa*m
20	998	1.01 x 10 <sup>-3</sup>	0.0742
25	997	8.92 x 10 <sup>-4</sup>	0.0734
30	996	8.04 x 10 <sup>-4</sup>	0.0723
40	992	6.59 x 10 <sup>-4</sup>	0.0709

表 3.2 界面活性剤濃度と表面張力係数の関係

界面活性剤濃度 ppm	表面張力係数 Pa*m
0	0.0698
10	0.0525
100	0.0421

表 5.1 JAEA 基礎渦試験の数値解析条件

ケース名	流路幅 mm	液位 mm	全流量 m <sup>3</sup> /h	吸込み流量 m <sup>3</sup> /h	流入流速 (平均値) m/s	流出流速 (平均値) m/s	吸込み流速 (平均値) m/s	作動流体
Case-Wa1	100	200	3.630	3.630	0.101	0.000	0.514	水 (20°C)
Case-Wa2	100	200	7.200	3.600	0.200	0.100	0.509	水 (20°C)
Case-Wa3	100	200	7.200	7.200	0.200	0.000	1.019	水 (20°C)
Case-Na1	100	200	3.630	3.630	0.101	0.000	0.514	ナトリウム (250°C)
Case-Na2	100	200	7.200	3.600	0.200	0.100	0.509	ナトリウム (250°C)
Case-Na3	100	200	7.200	7.200	0.200	0.000	1.019	ナトリウム (250°C)

表 5.2 JAEA 基礎渦試験の数値解析手法概要

解析コード	FLUENT6.2.16	
時間ステップ	0.05s	
計算時間	計算開始後 80 秒の時点から 40 秒間	
メッシュサイズ	0.005m	
メッシュ数	水試験体系	89,090
	Na 試験体系	91,370
境界条件	壁面	Non-slip
	液面	Free-slip
	流入口	計測 PIV データを付与
	流出口	速度一定 (一様分布)
	吸込みノズル下端面	圧力一定 (一様分布)

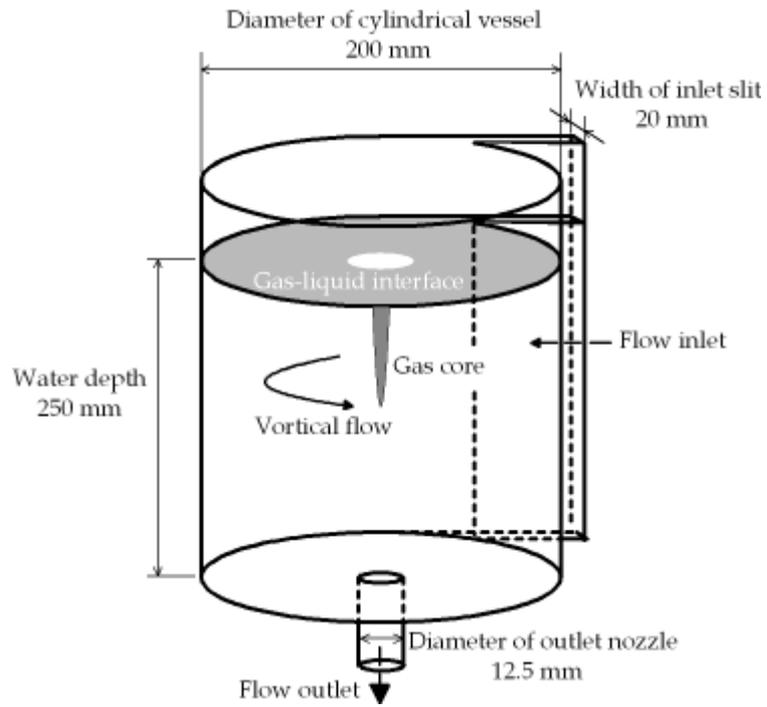
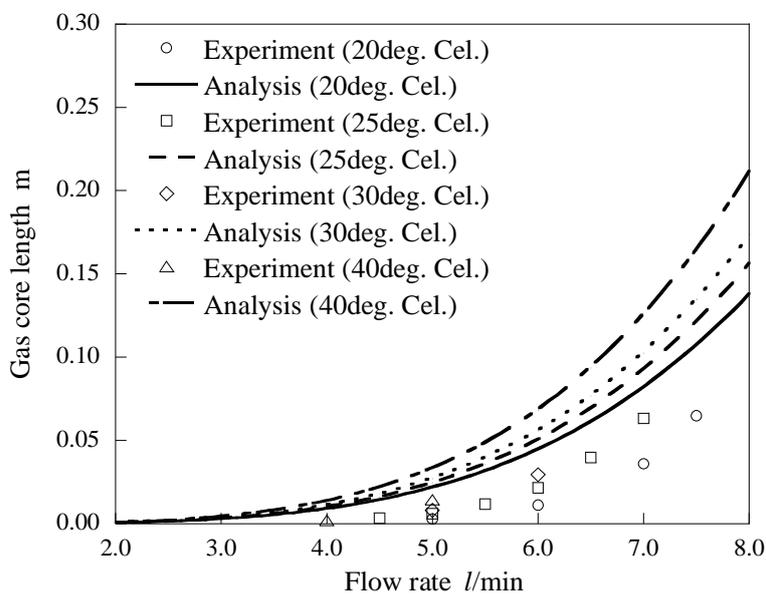
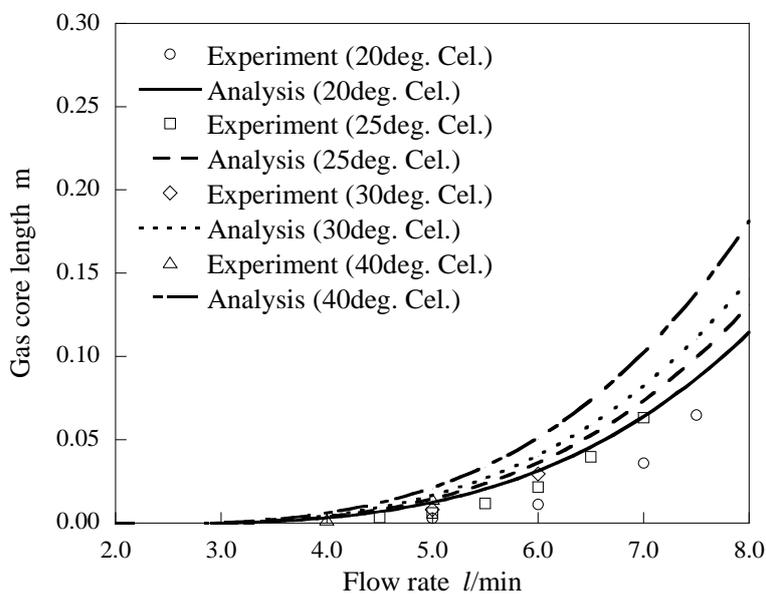


図 3.1 筑波大における自由表面実験体系



(a) 表面張力の効果を考慮しない場合



(b) 表面張力の効果を考慮した場合

図 3.2 筑波大実験を対象としたガスコア長さの評価結果  
(表面張力モデルの検証)

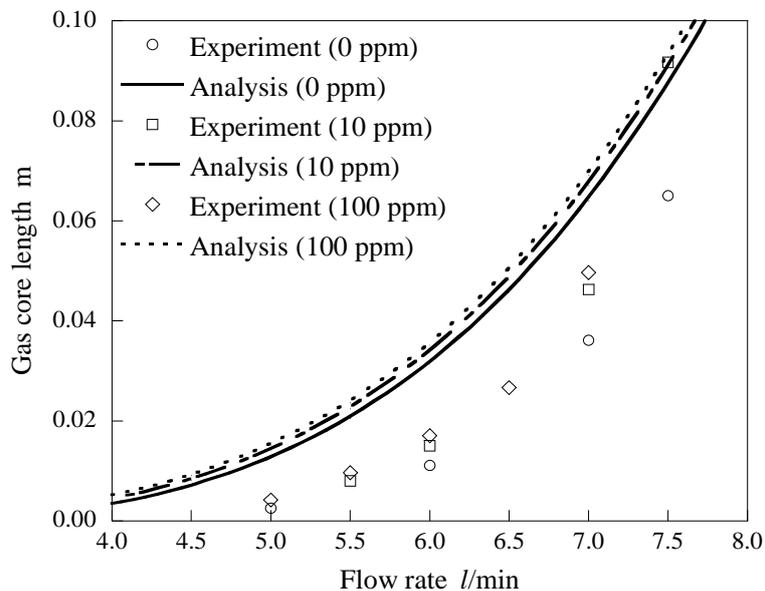


図 3.3 筑波大実験における界面活性剤の影響評価  
(特性半径 Fitting 前)

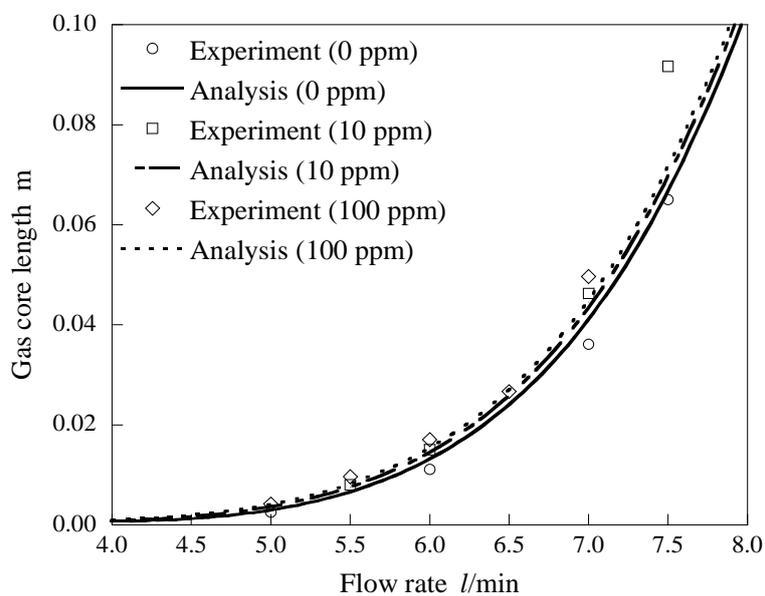


図 3.4 筑波大実験における界面活性剤の影響評価  
(特性半径 Fitting 後)

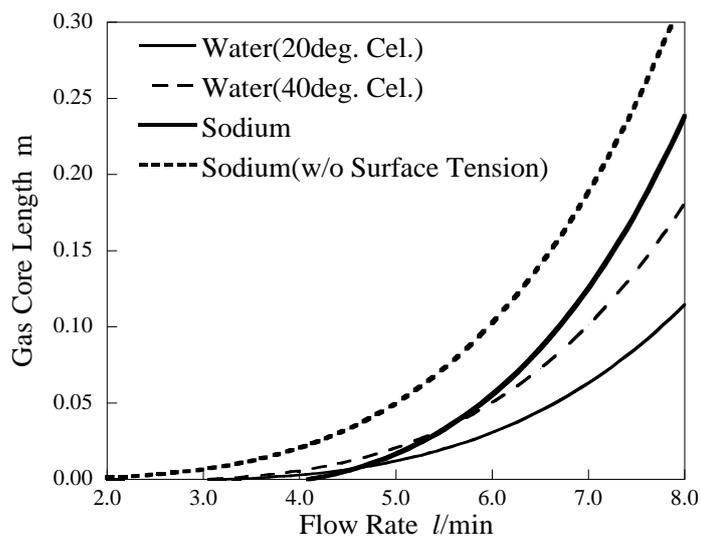


図 3.5 ナトリウム物性におけるガスコア長さの評価結果

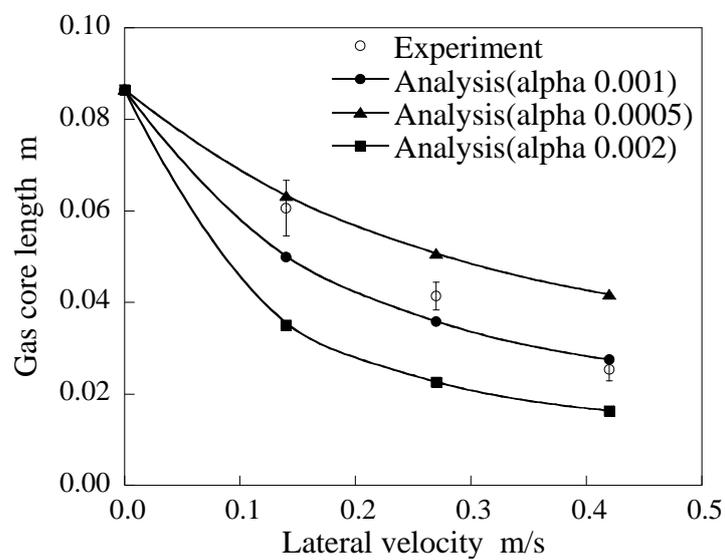


図 4.1 横流れが作用する場合のガスコア長さ評価結果

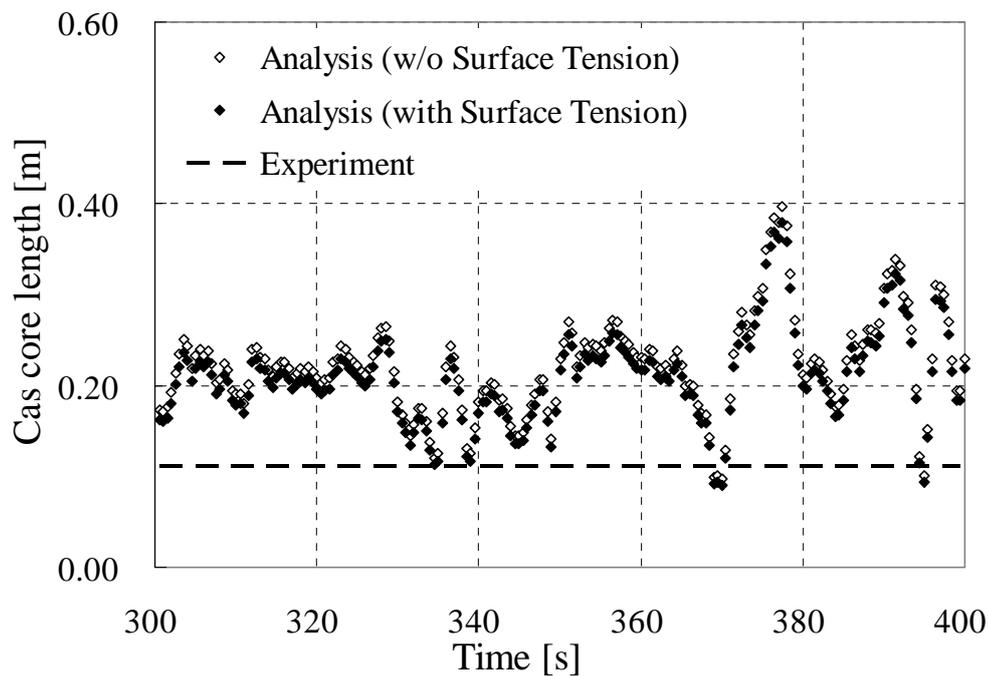


図 5.1 電力中央研究所試験におけるガスコア長さの評価結果  
(表面張力モデル比較)

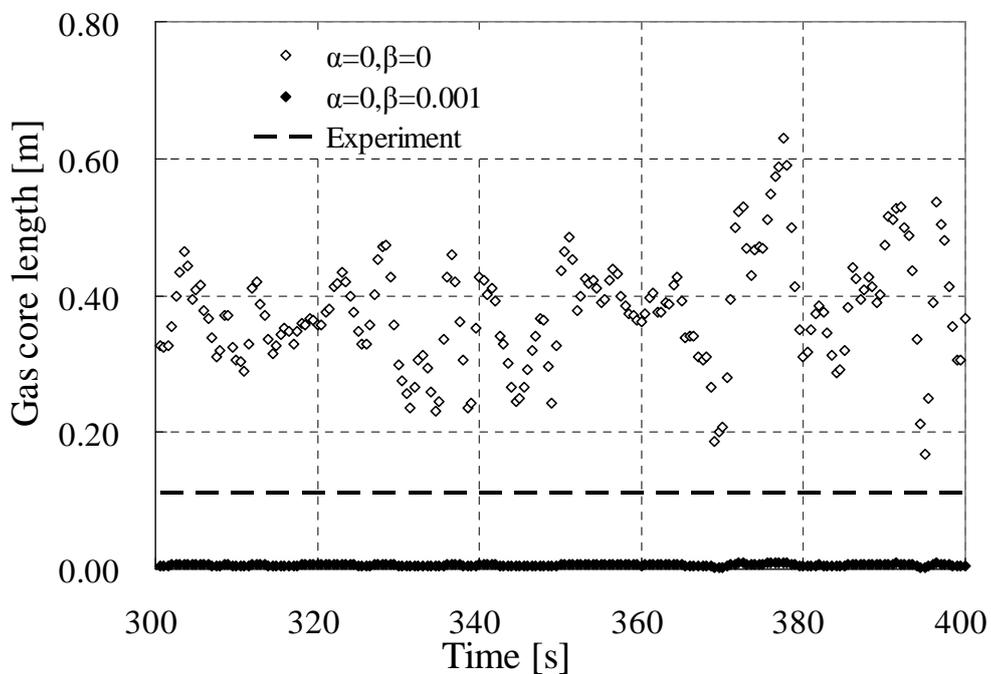


図 5.2 電力中央研究所試験におけるガスコア長さの評価結果  
(乱流粘性モデル  $\alpha = 0, \beta = 10^{-3}$ )

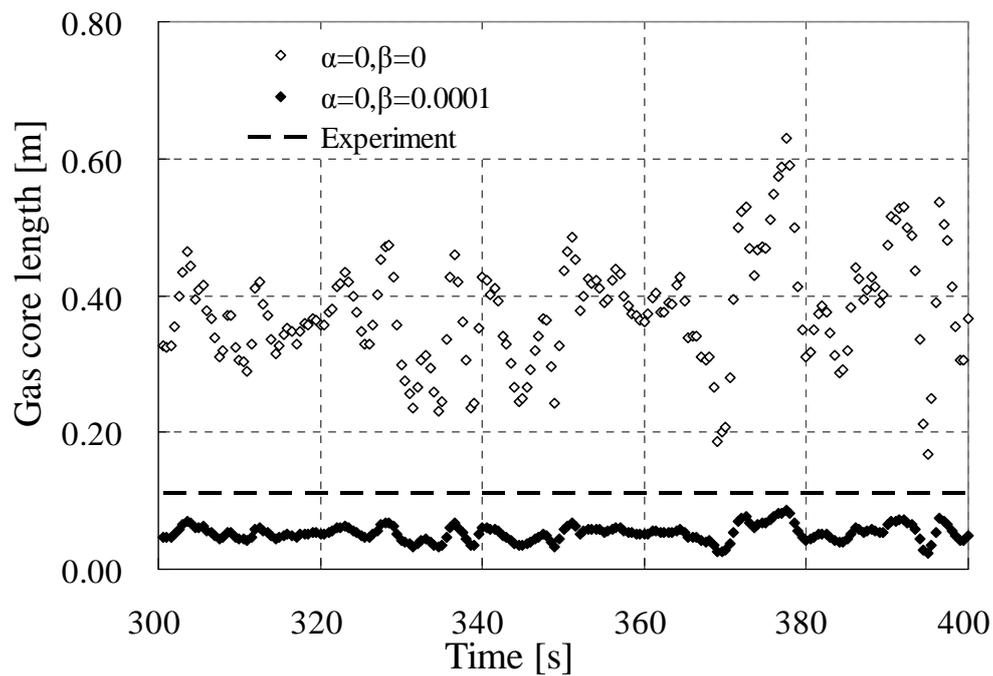


図 5.3 電力中央研究所試験におけるガスコア長さの評価結果  
(乱流粘性モデル :  $\alpha = 0$ 、 $\beta = 10^{-4}$ )

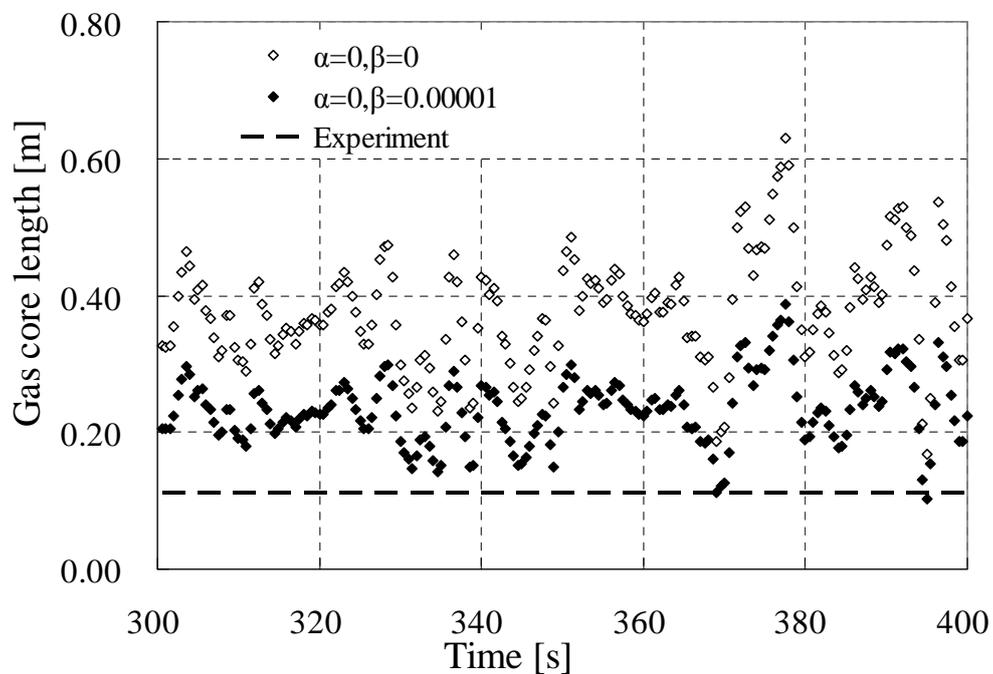


図 5.4 電力中央研究所試験におけるガスコア長さの評価結果  
(乱流粘性モデル :  $\alpha = 0$ 、 $\beta = 10^{-5}$ )

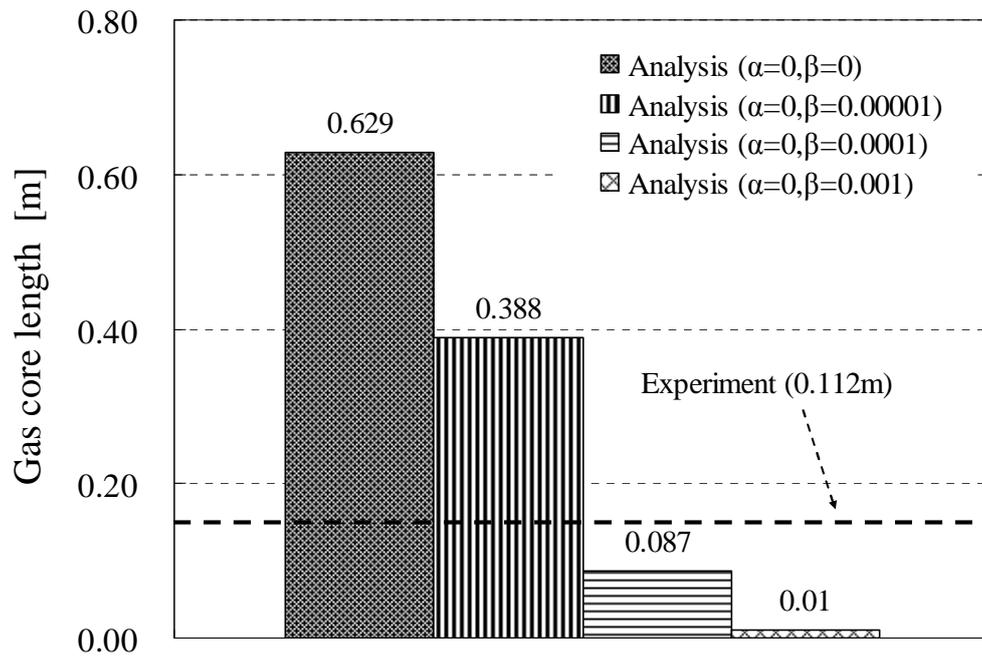


図 5.5 電力中央研究所試験の評価におけるガスコア長さの最大値  
(乱流粘性モデルの検証)

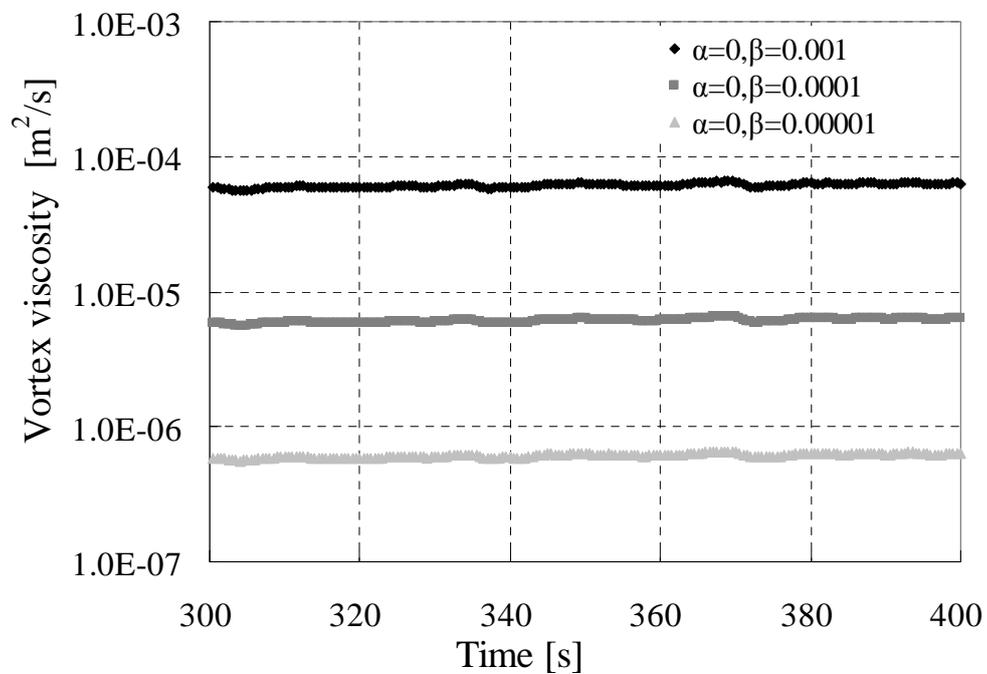
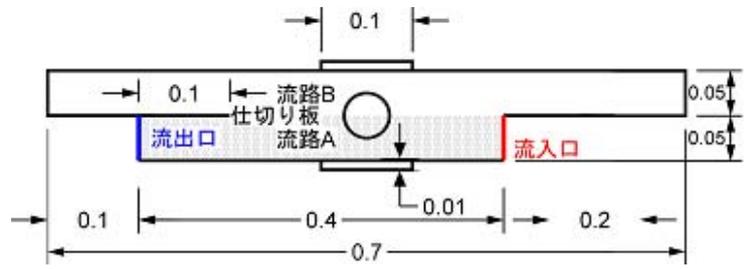
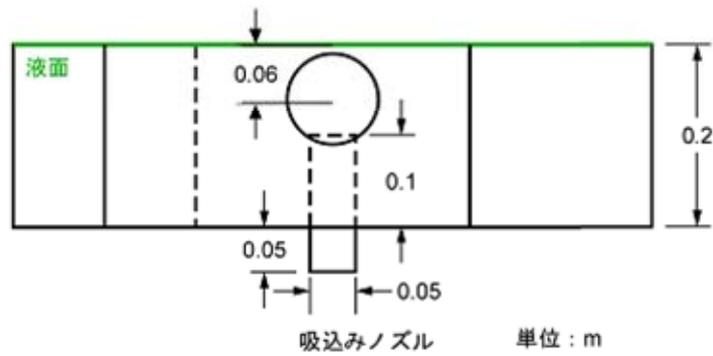


図 5.6 電力中央研究所試験の評価結果 (乱流粘性係数の比較)



(a) 上面図



(b) 側面図

図 5.7 JAEA 基礎渦試験体系概略図

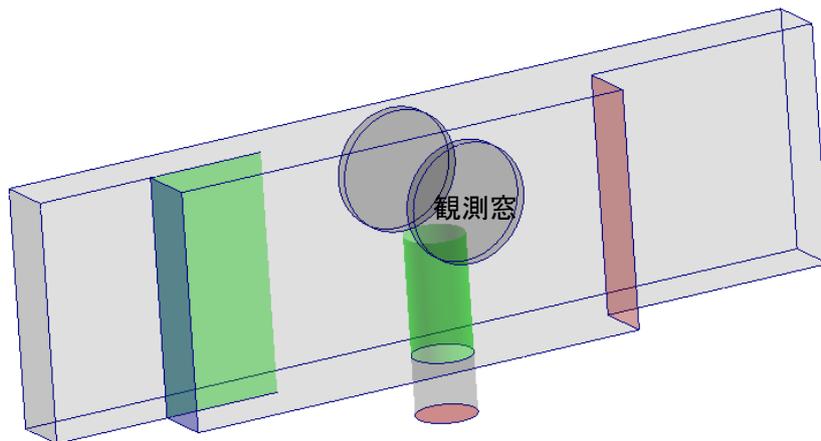


図 5.8 JAEA 基礎渦試験体系俯瞰図

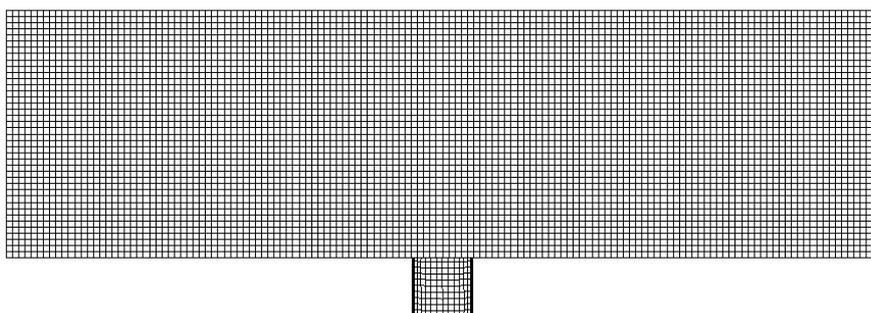
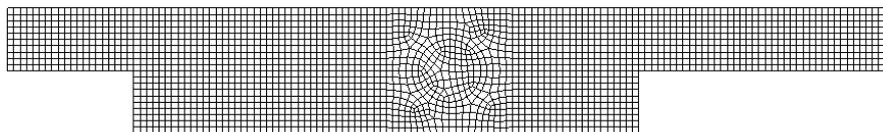


図 5.9 水試験体系の解析メッシュ (セル数 : 89,090)

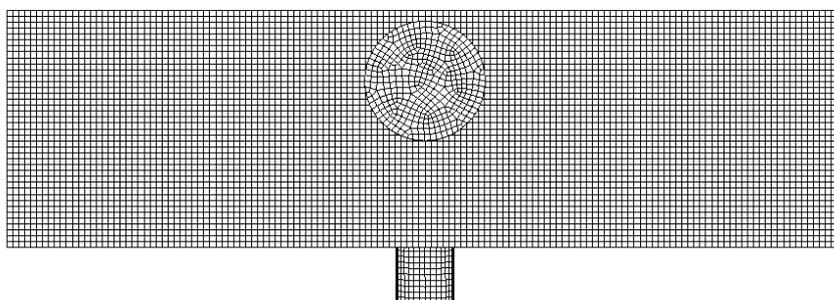
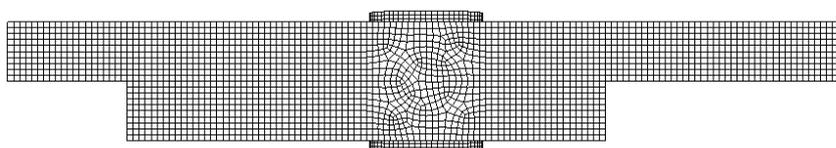


図 5.10 Na 試験体系の解析メッシュ (セル数 : 91,370)

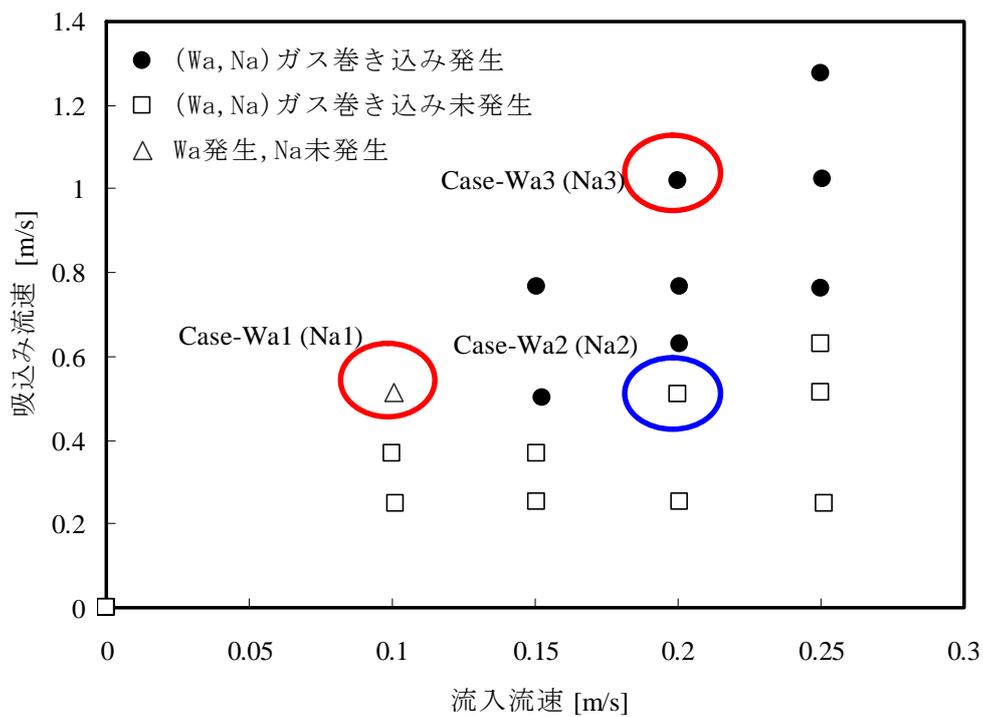


図 5.11 JAEA 基礎渦試験のガス巻き込み発生判定マップ

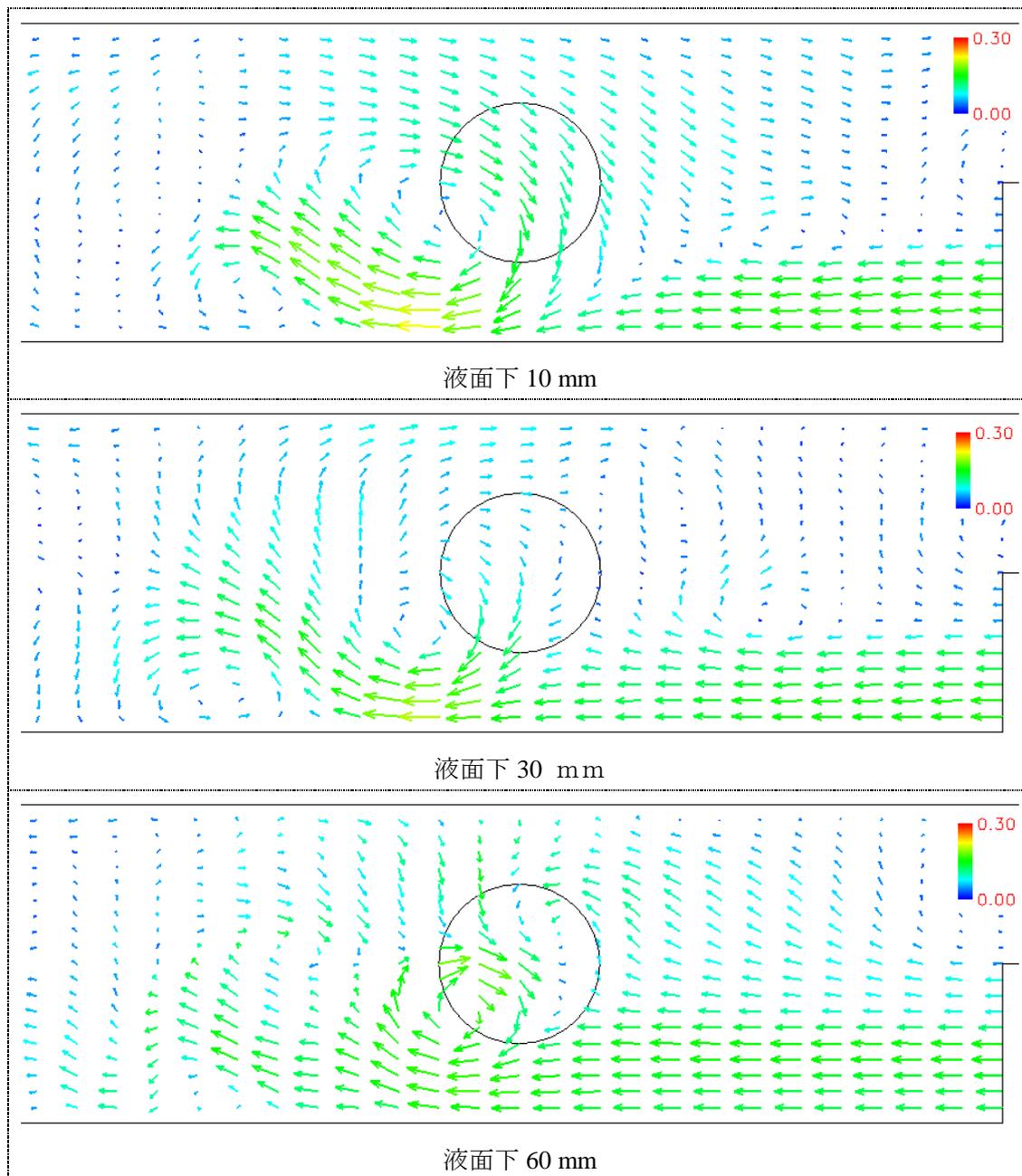


図 5.12 Case-Wa1 の瞬時流況図

( $t = 83.0\text{s}$ )

流入流速 0.101m/s

流出流速 0m/s

吸込み流速 0.514m/s

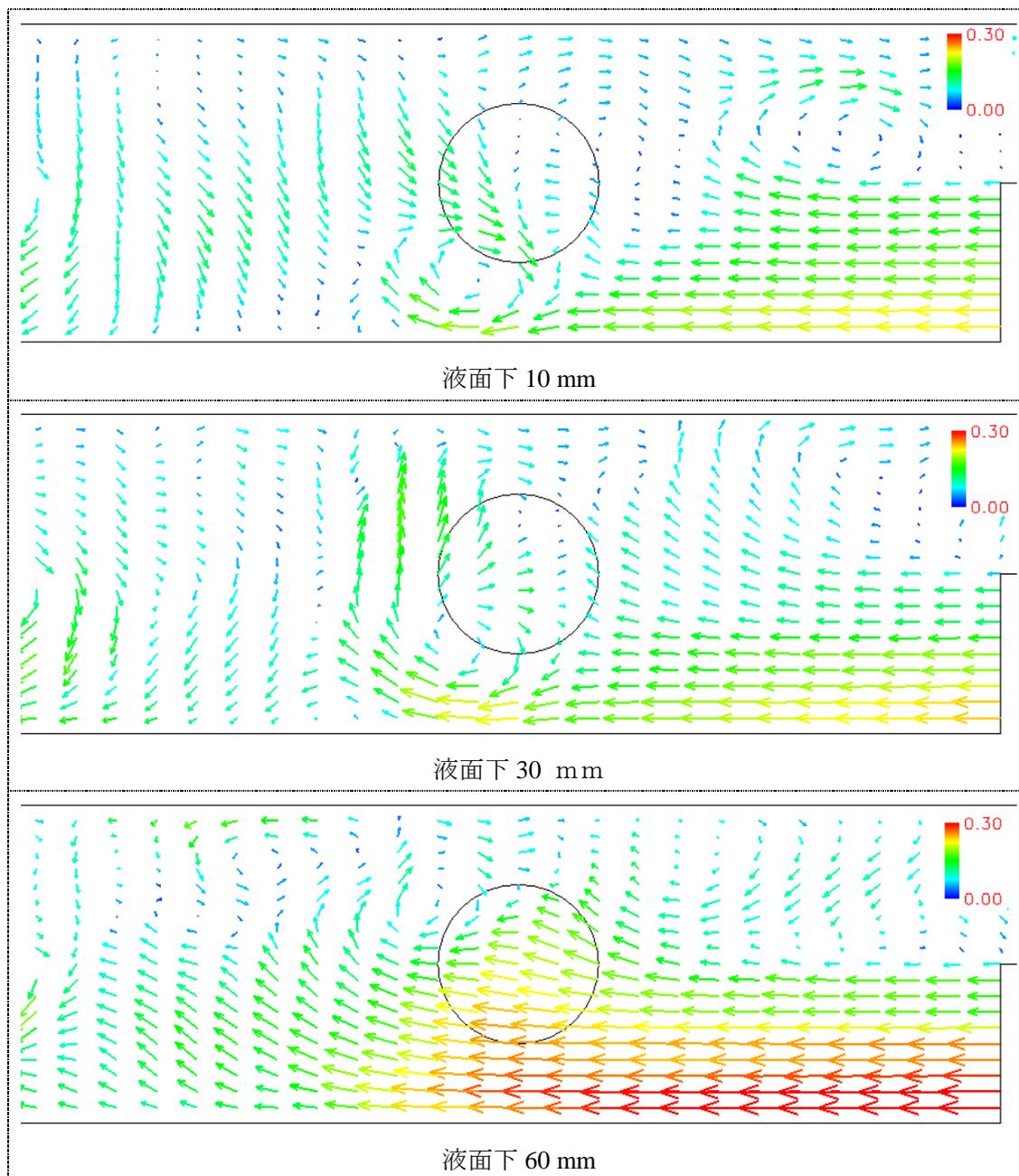


図 5.13 Case-Wa2 の瞬時流況図

( $t=91.6s$ )

流入流速 0.200m/s  
 流出流速 0.100m/s  
 吸込み流速 0.509m/s

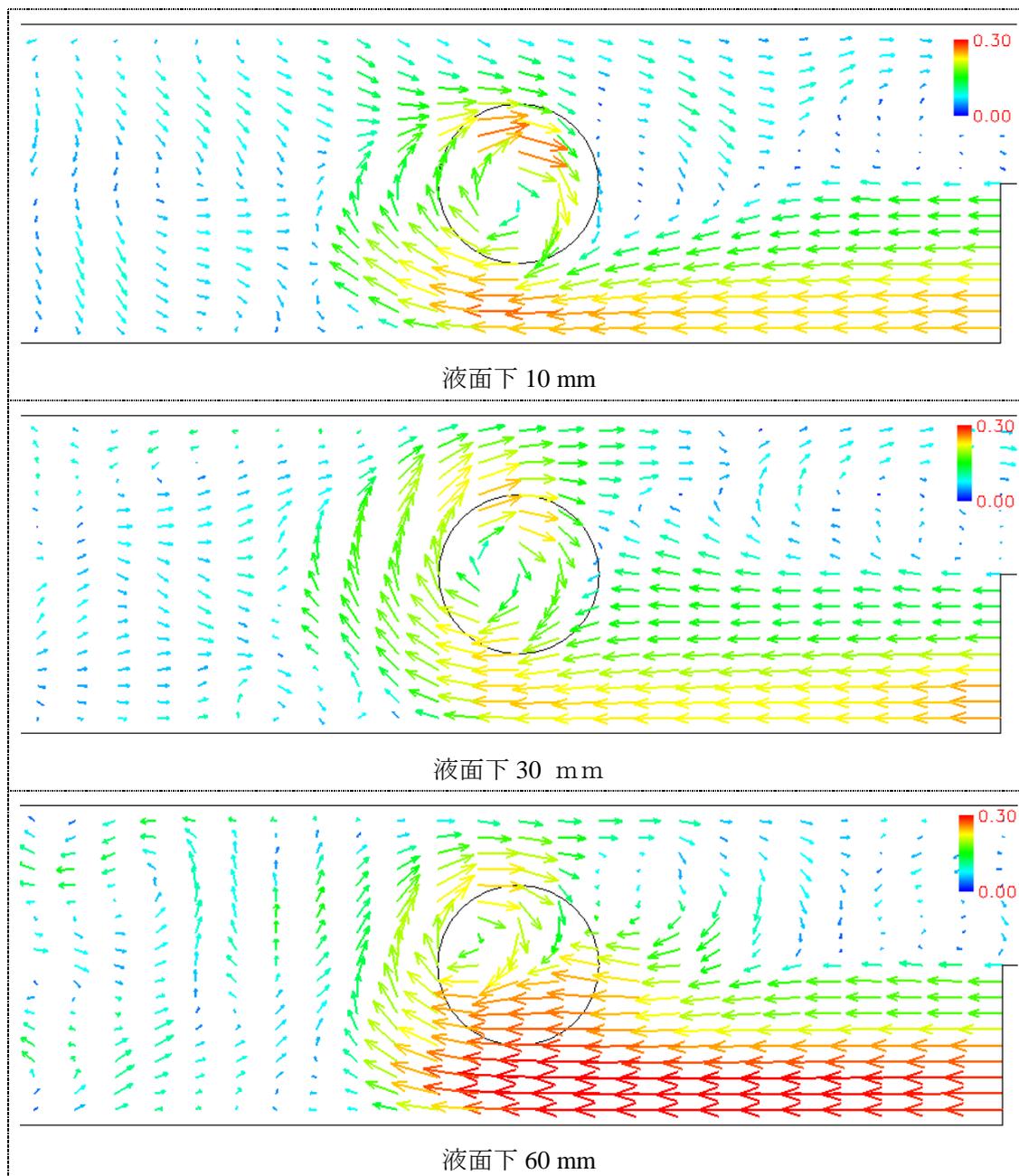


図 5.14 Case-Wa3 の瞬時流況図

( $t = 119.5s$ )

流入流速 0.20m/s  
 流出流速 0m/s  
 吸込み流速 1.019m/s

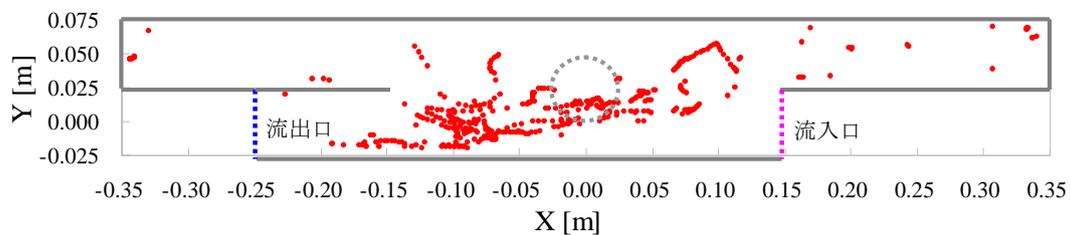


図 5.15 Case-Wa1 の渦発生位置

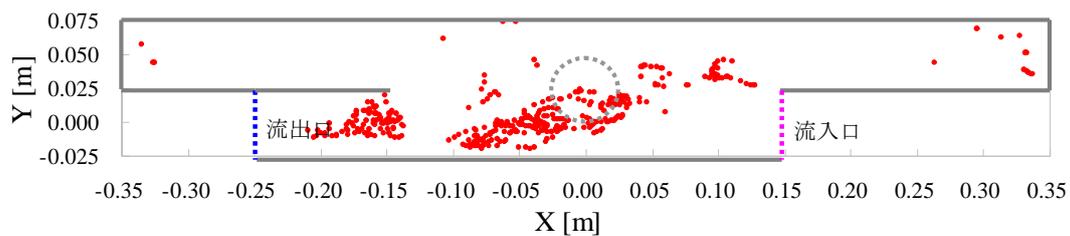


図 5.16 Case-Wa2 の渦発生位置

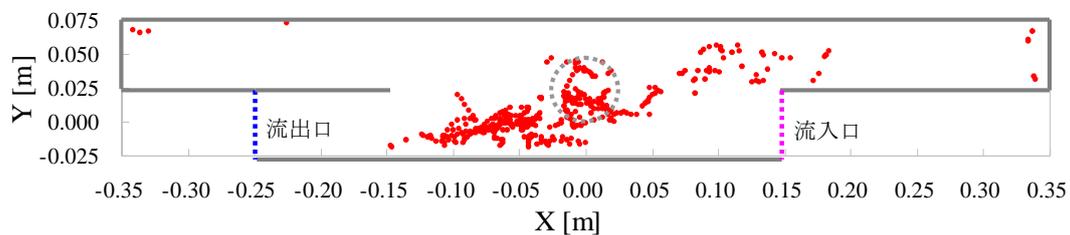


図 5.17 Case-Wa3 の渦発生位置

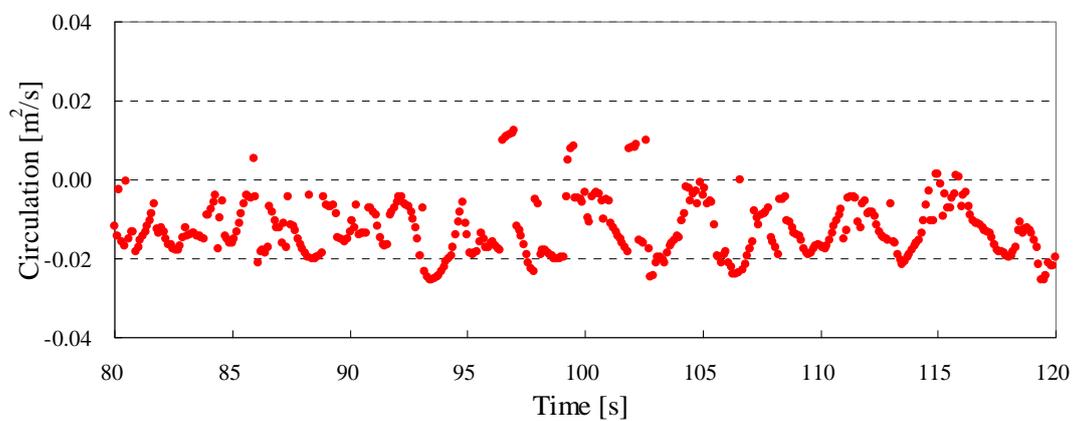


図 5.18 渦の循環 (Case-Wa3)

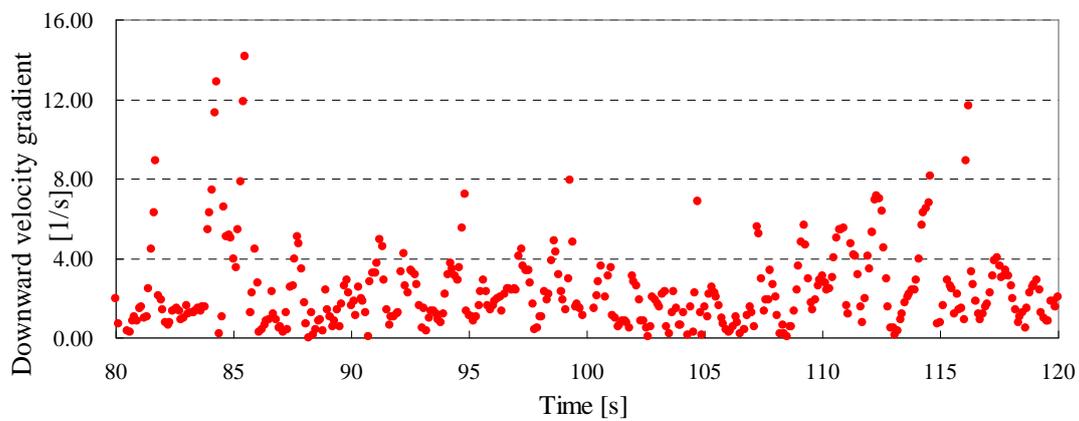
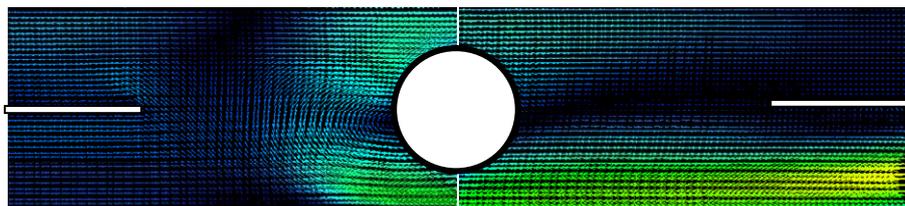
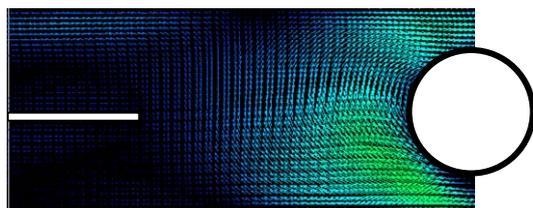


図 5.19 下降流速勾配 (Case-Wa3)

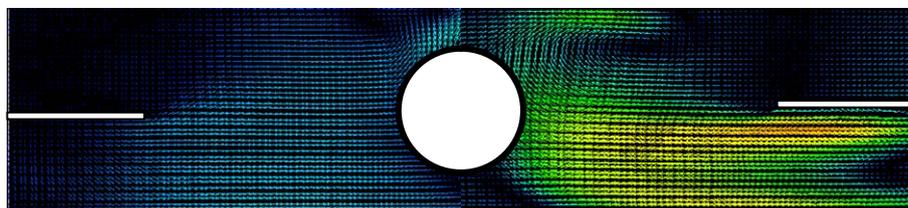


液面下10mm

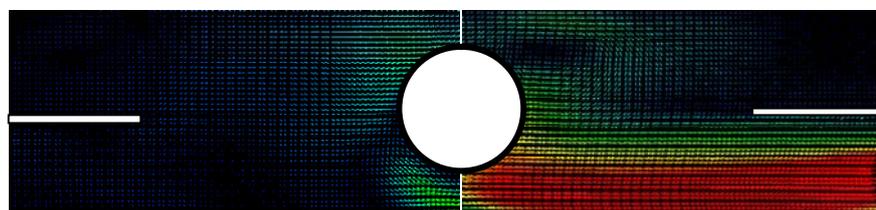


液面下 60mm

図 5.20 Case-Wa1 の試験結果



液面下 10mm



液面下60mm

図 5.21 Case-Wa3 の試験結果

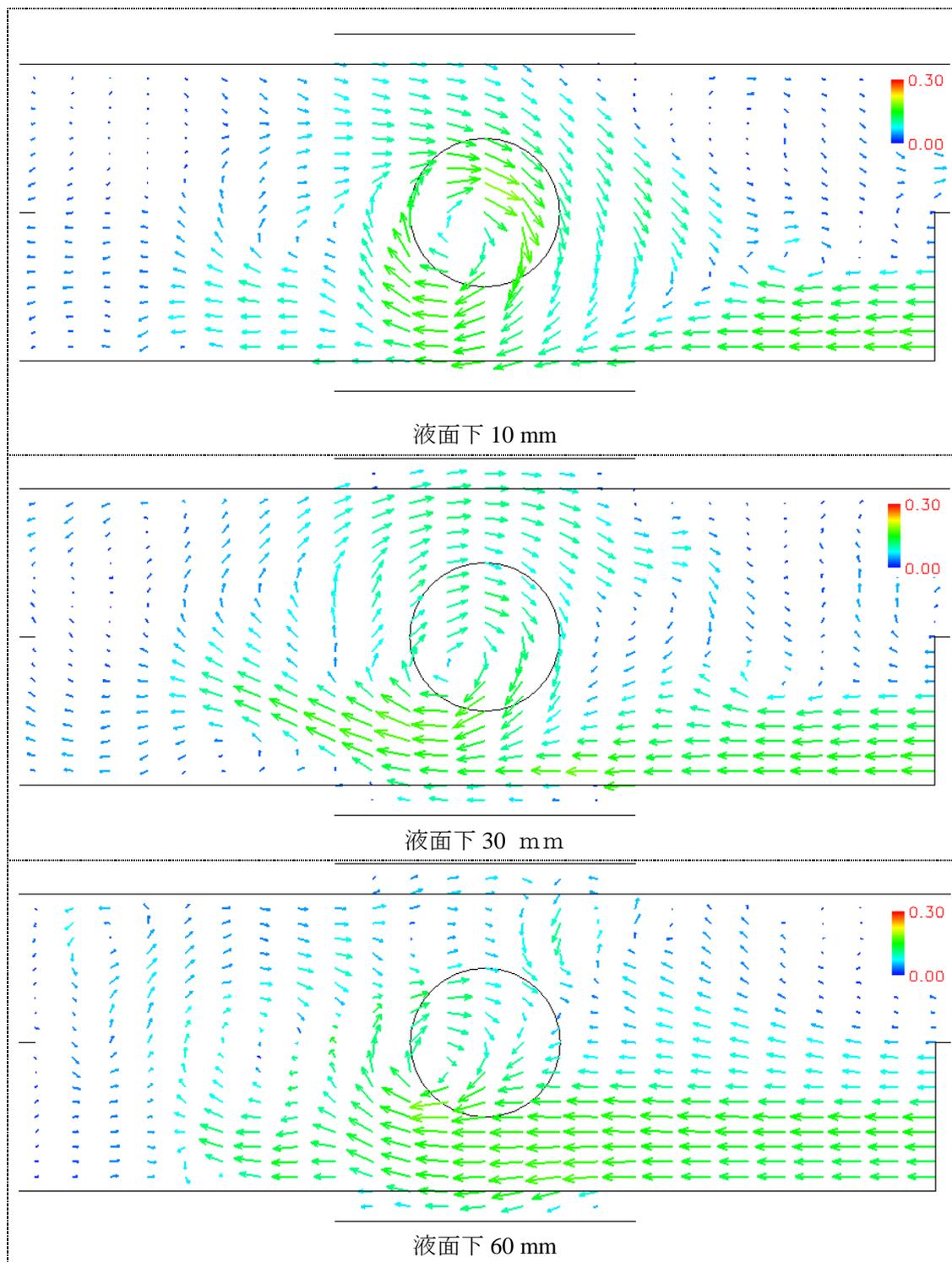


図 5.22 Case-Na1 の瞬時流況図 ( $t=112.0s$ )

流入流速 1.101m/s  
 流出流速 0.000m/s  
 吸込み流速 0.514m/s

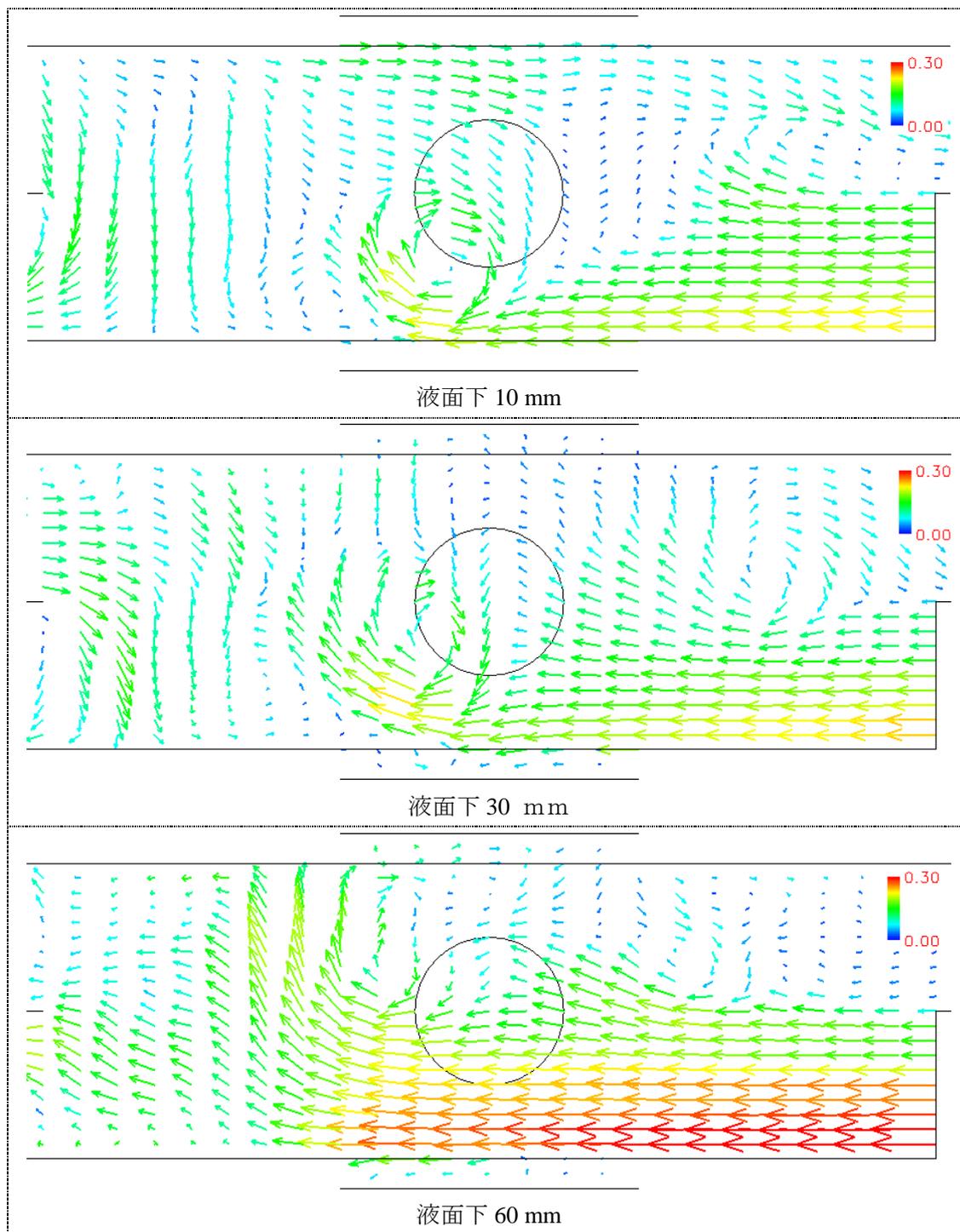


図 5.23 Case-Na2 の瞬時流況図 ( $t=88.4s$ )

流入流速 0.200m/s  
 流出流速 0.100m/s  
 吸込み流速 0.509m/s

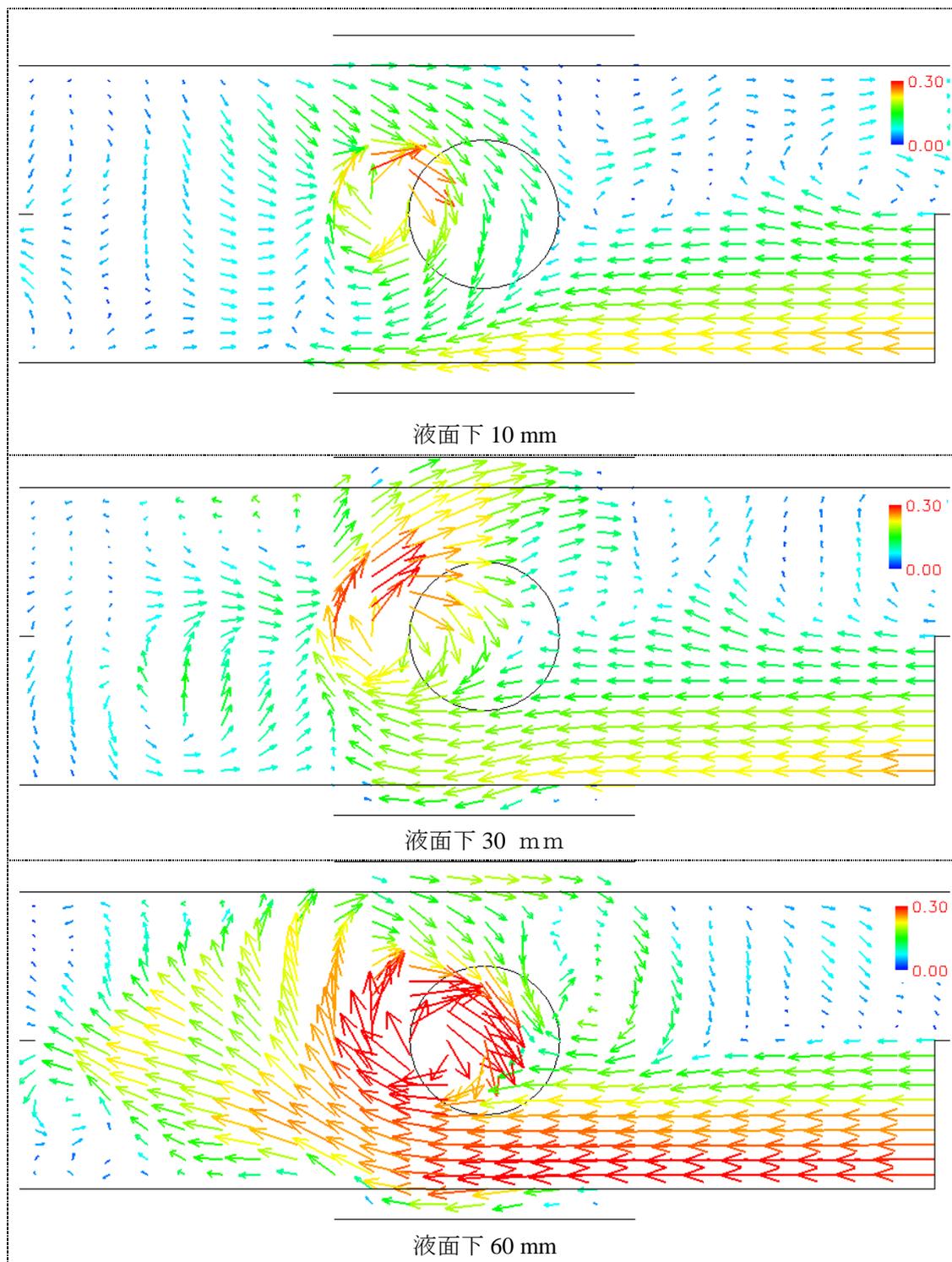


図 5.24 Case-Na3 の瞬時流況図 ( $t=105.7s$ )

流入流速 0.200m/s  
 流出流速 0.000m/s  
 吸込み流速 1.019m/s

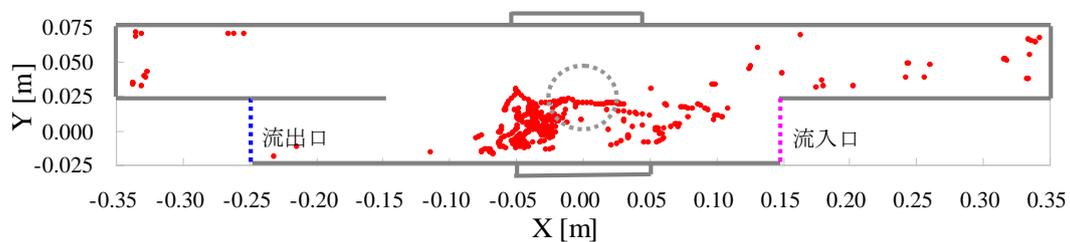


図 5.25 Case-Na1 の渦発生位置

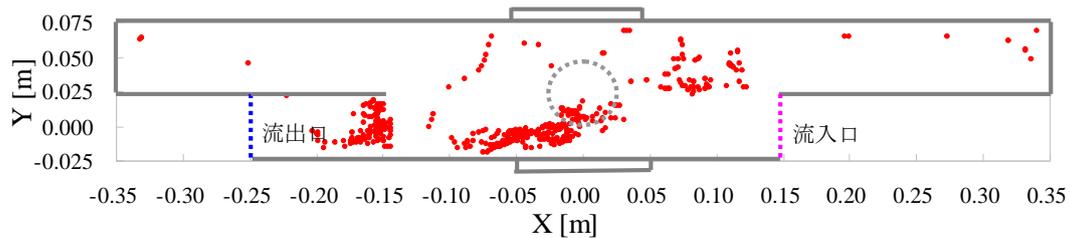


図 5.26 Case-Na2 の渦発生位置

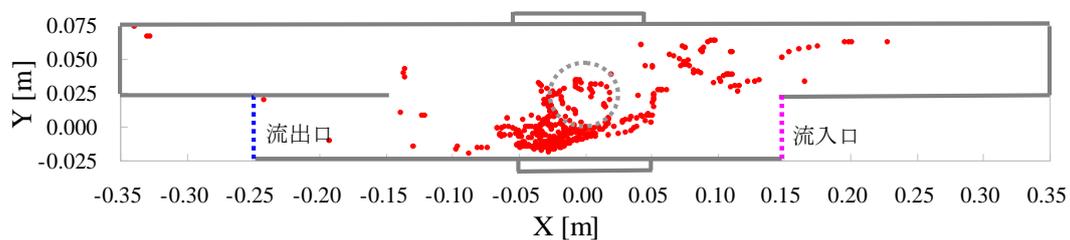


図 5.27 Case-Na3 の渦発生位置

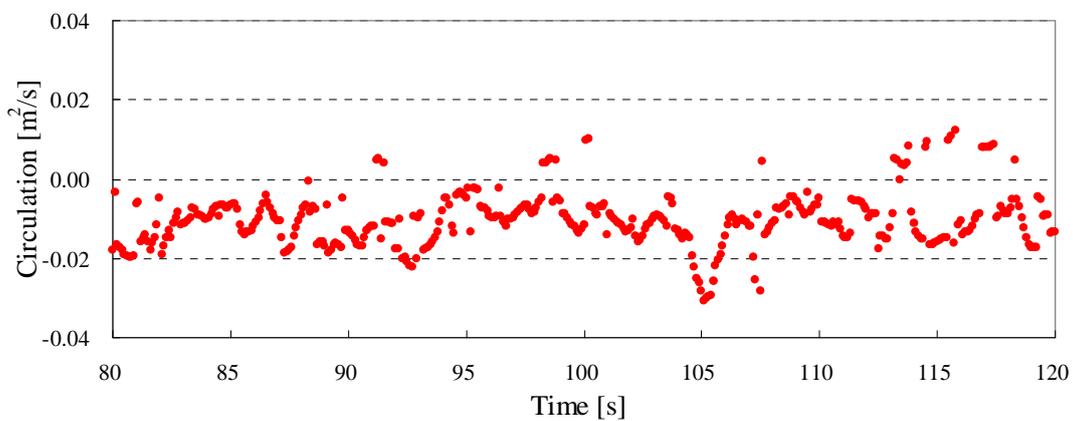


図 5.28 渦の循環 (Case-Na3)

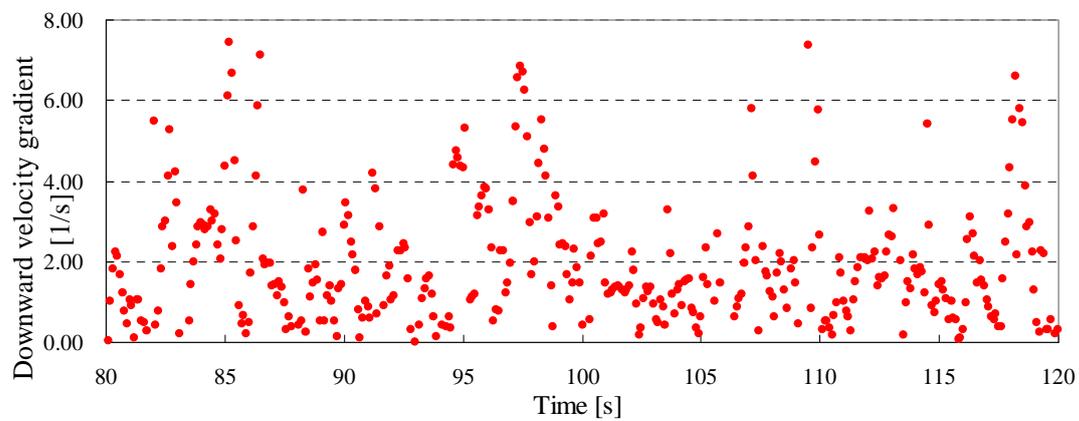


図 5.29 下降流速勾配 (Case-Na3)

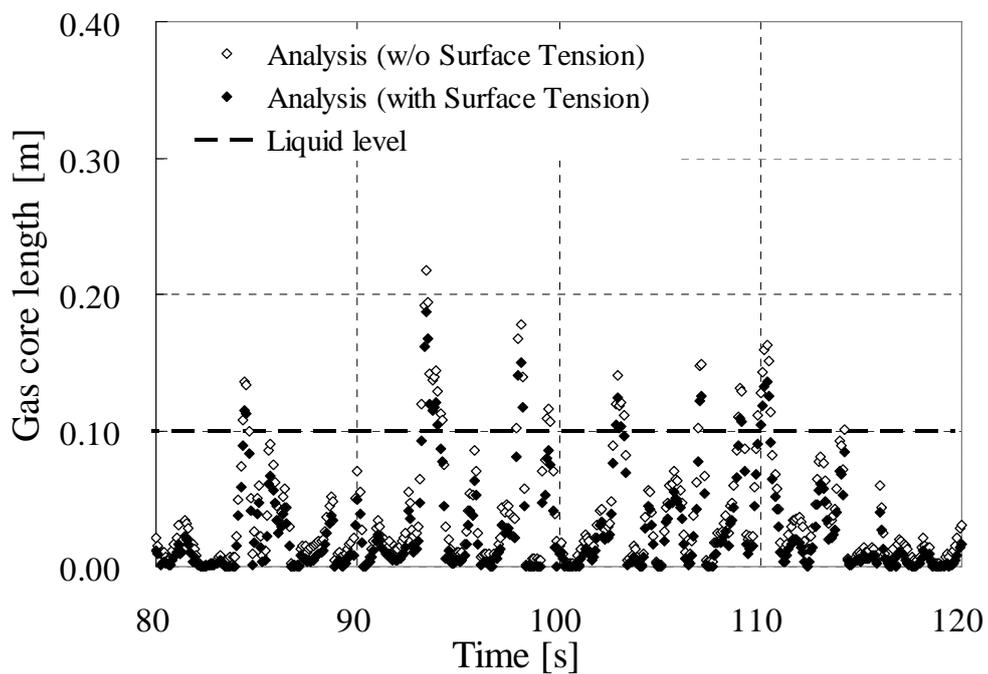


図 5.30 Case-Wa1 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較)

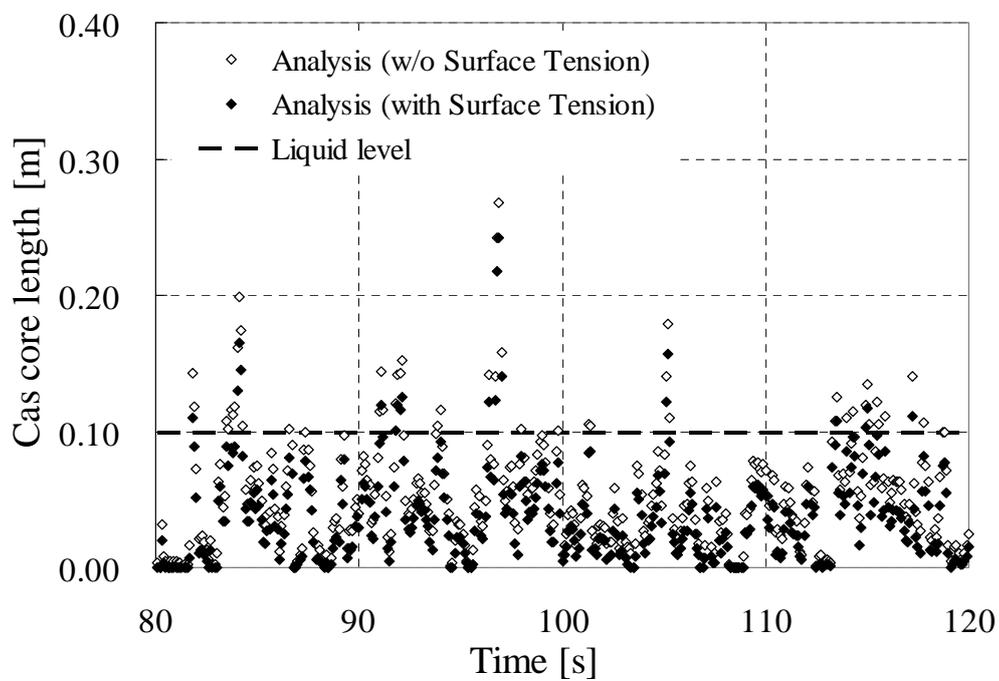


図 5.31 Case-Wa2 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較)

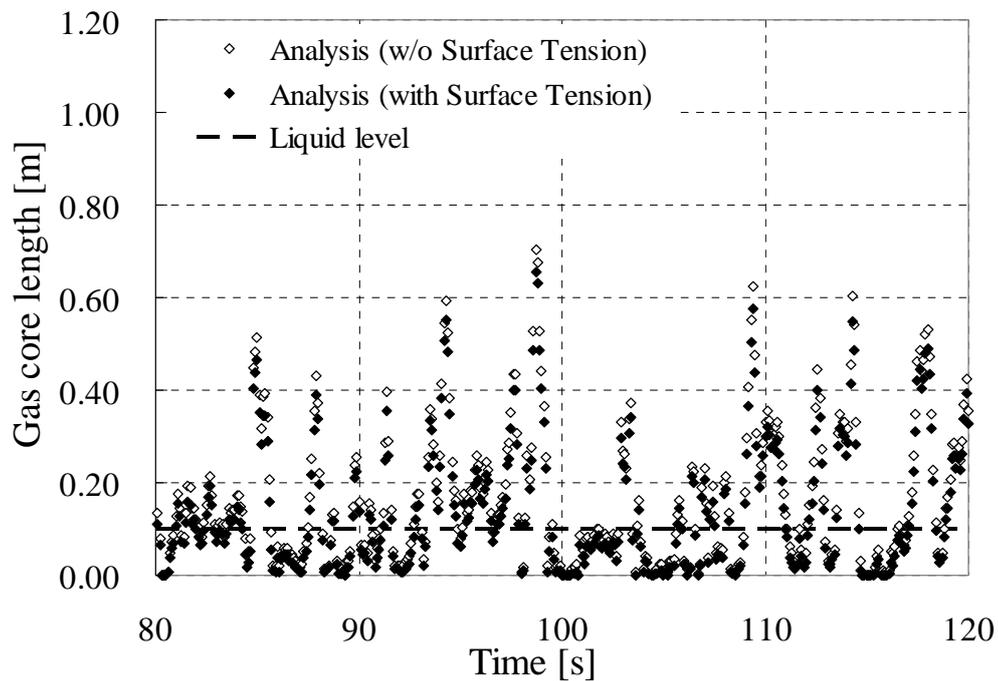


図 5.32 Case-Wa3 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較)

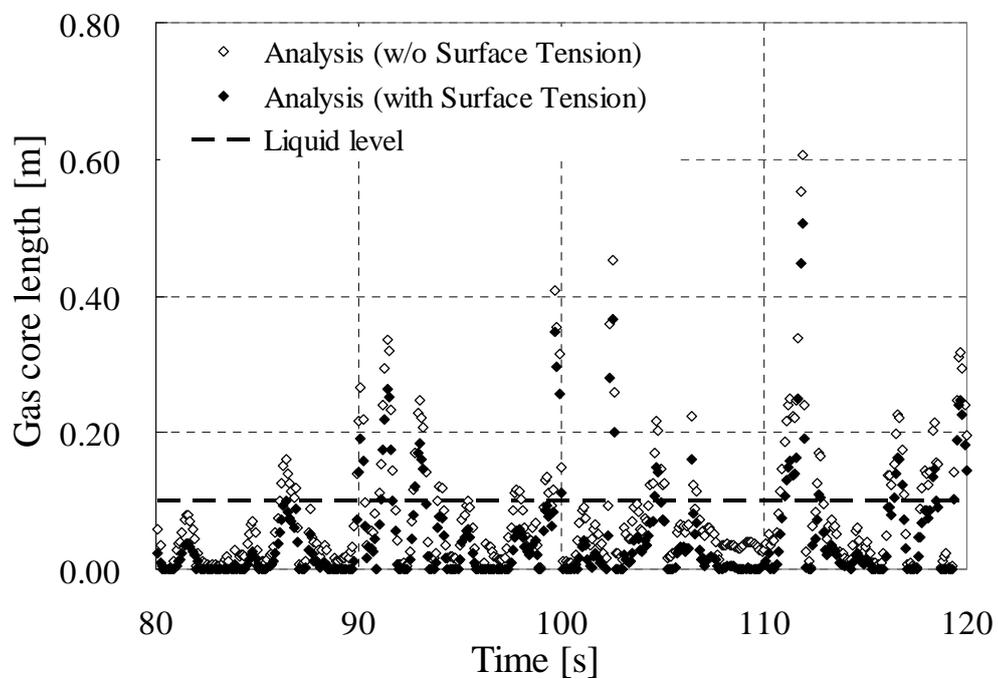


図 5.33 Case-Na1 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較)

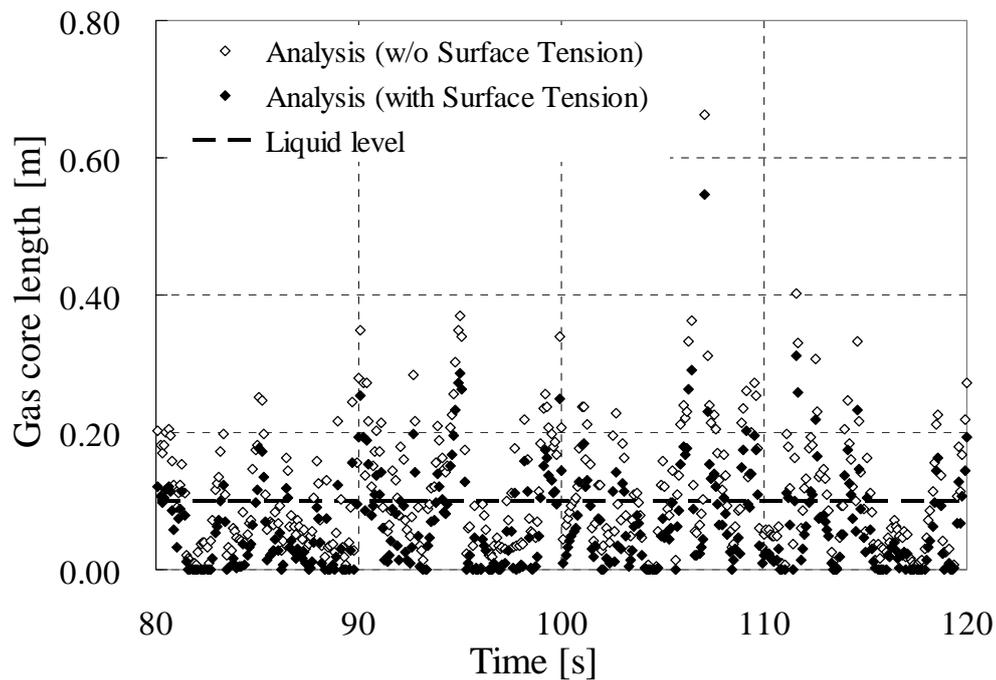


図 5.34 Case-Na2 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較)

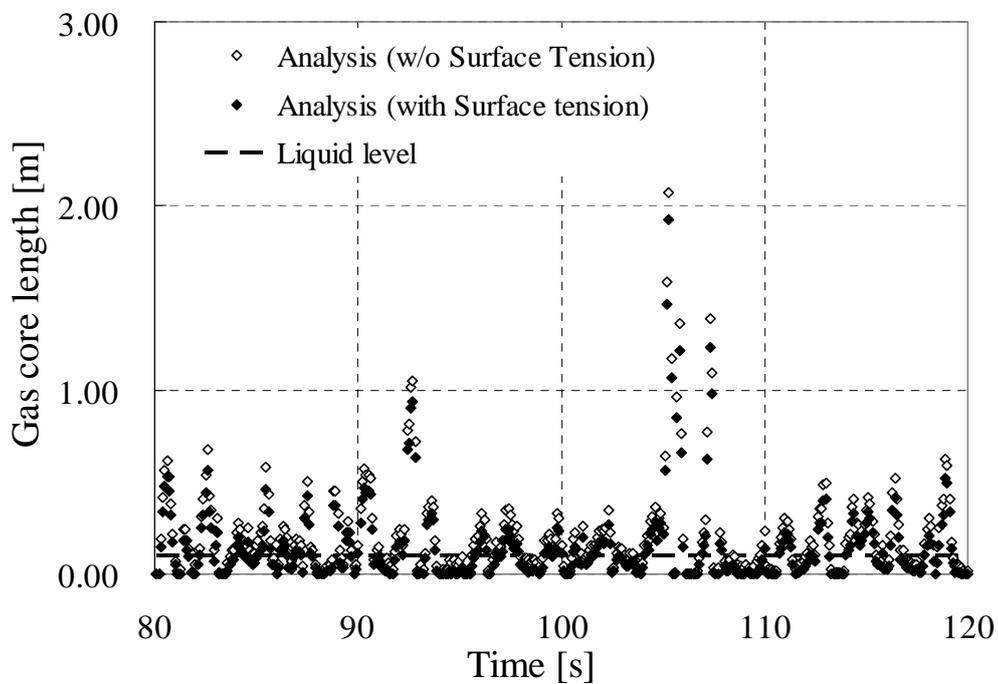


図 5.35 Case-Na3 のガスコア長さ評価結果 (表面張力モデル比較)

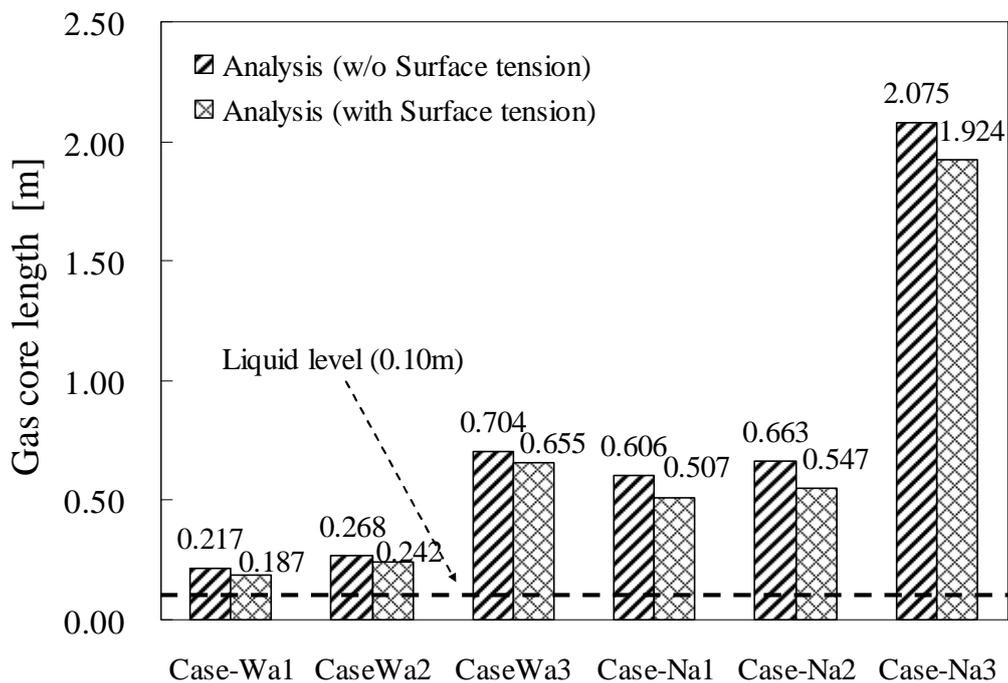


図 5.36 最大ガスコア長さの評価結果（表面張力モデル比較）

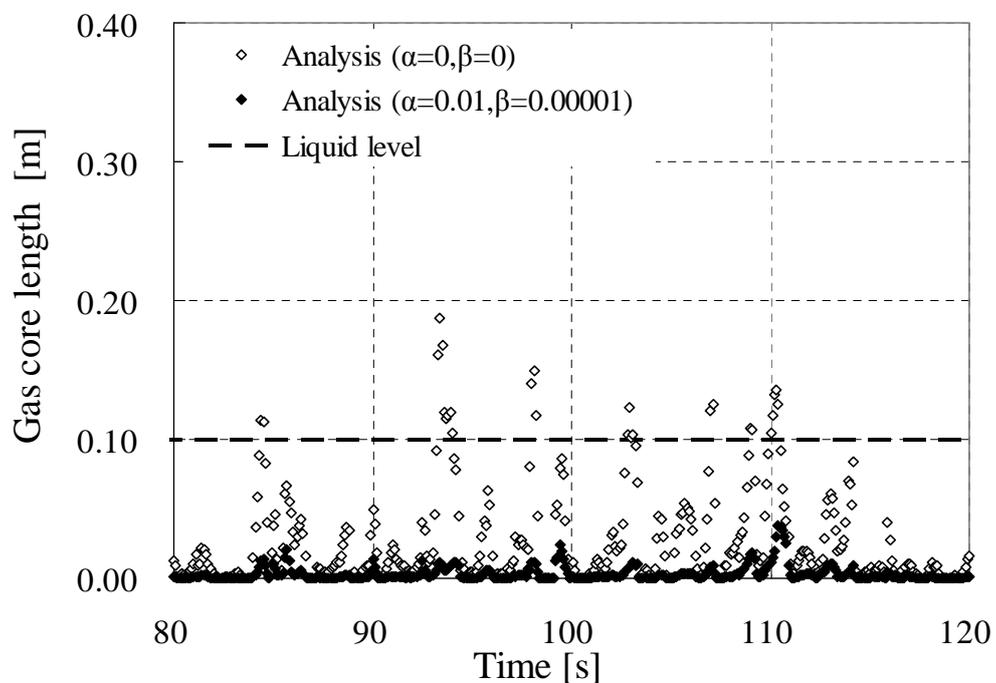


図 5.37 Case-Wa1 のガスコア長さ評価結果  
 (乱流粘性モデル： $\alpha=10^{-2}$ 、 $\beta=10^{-5}$ )

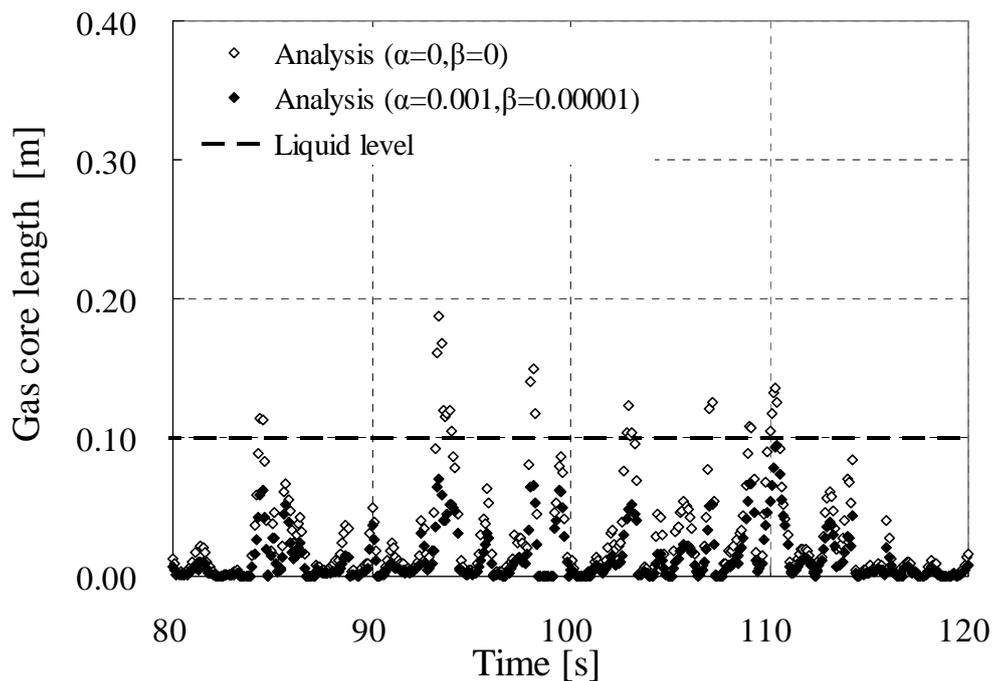


図 5.38 Case-Wa1 のガスコア長さ評価結果  
(乱流粘性モデル :  $\alpha=10^{-3}$ 、 $\beta=10^{-5}$ )

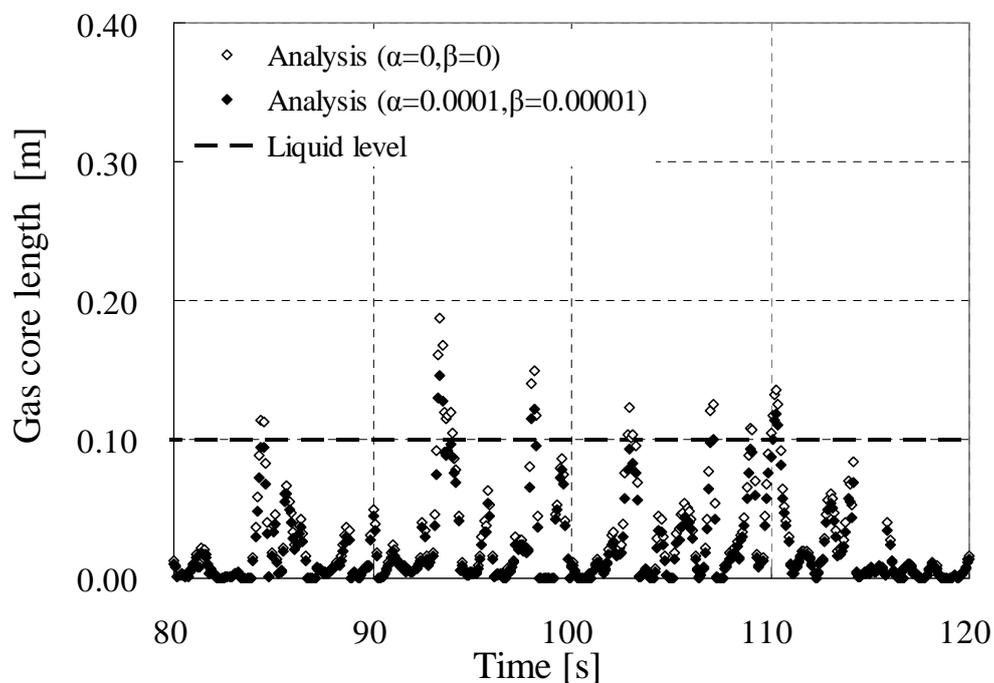


図 5.39 Case-Wa1 のガスコア長さ評価結果  
(乱流粘性モデル :  $\alpha=10^{-4}$ 、 $\beta=10^{-5}$ )

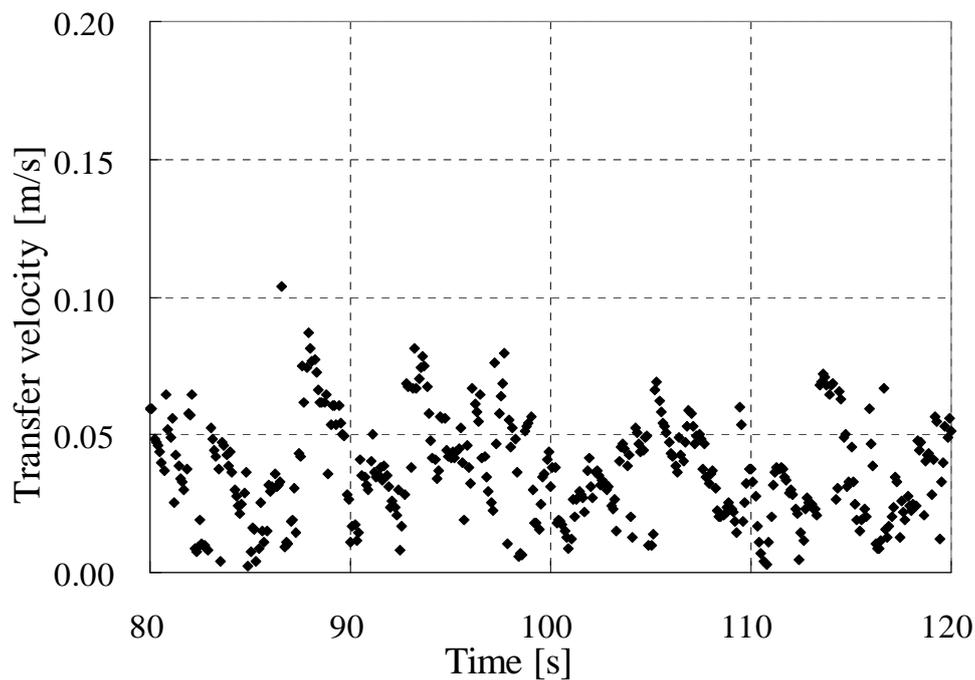


図 5.40 Case-Wa1 における渦の移動速度

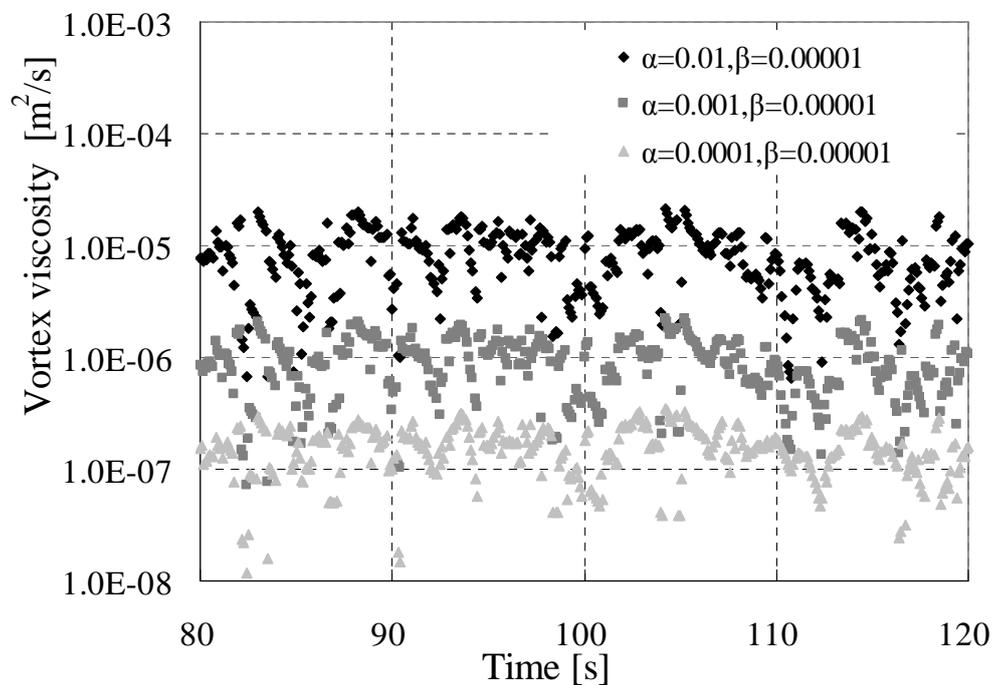


図 5.41 Case-Wa1 における乱流粘性係数

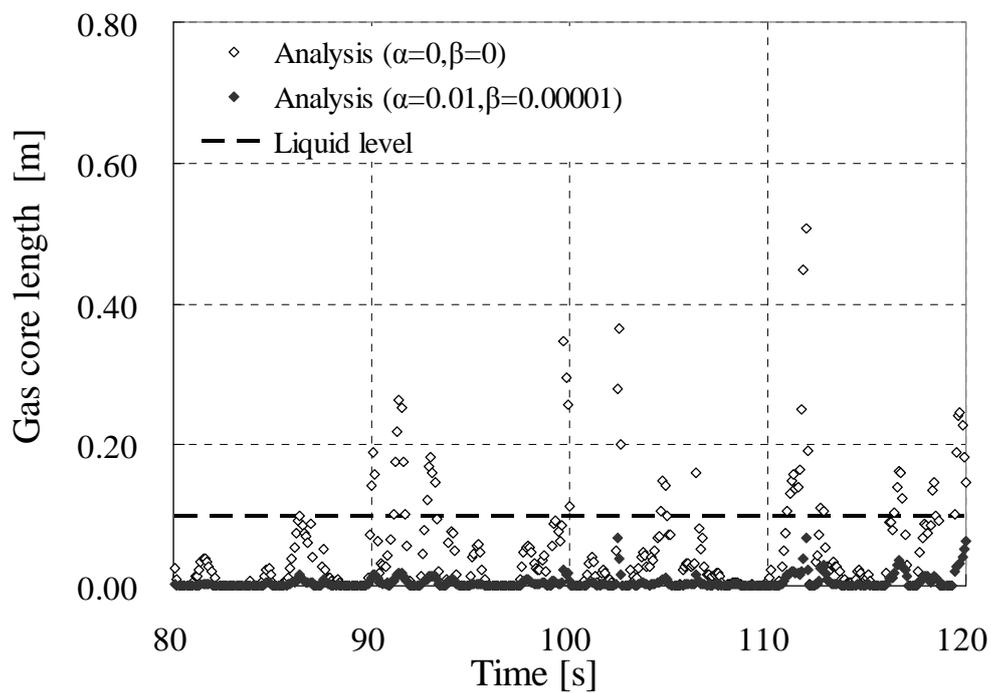


図 5.42 Case-Na1 のガスコア長さ評価結果  
(乱流粘性モデル :  $\alpha = 10^{-2}$ 、 $\beta = 10^{-5}$ )

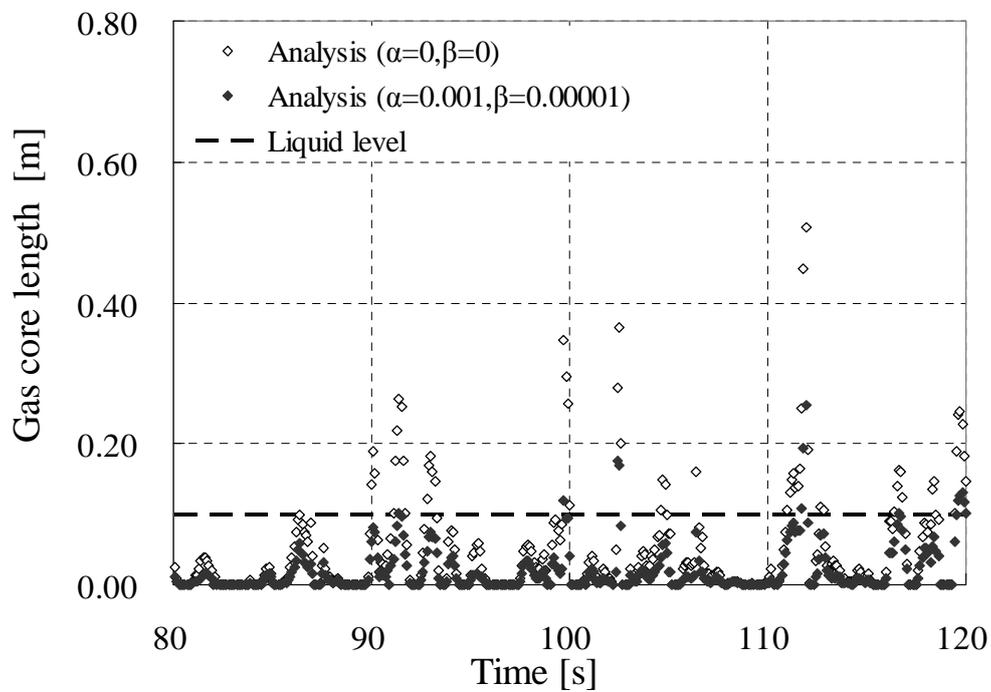


図 5.43 Case-Na1 のガスコア長さ評価結果  
(乱流粘性モデル :  $\alpha = 10^{-3}$ 、 $\beta = 10^{-5}$ )

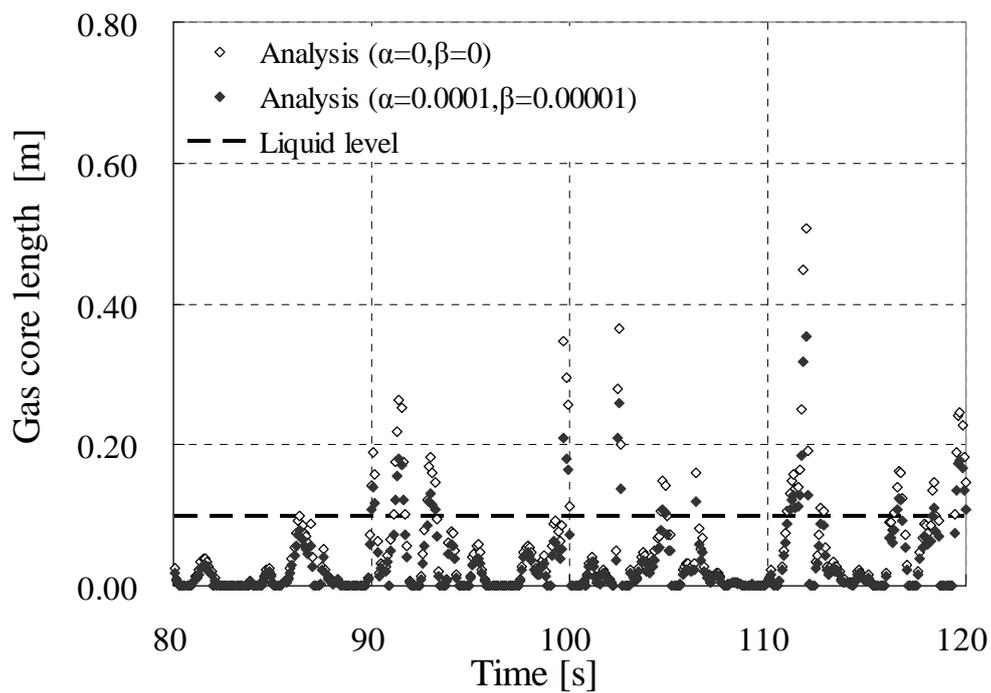


図 5.44 Case-Na1 のガスコア長さ評価結果  
(乱流粘性モデル :  $\alpha=10^{-4}$ 、 $\beta=10^{-5}$ )

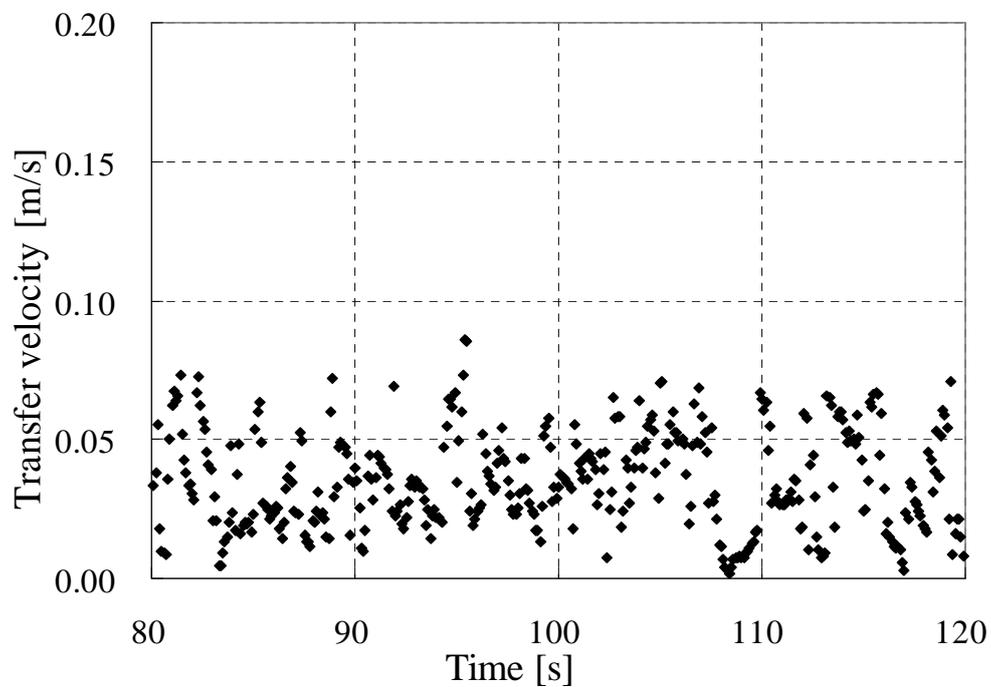


図 5.45 Case-Na1 における渦の移動速度

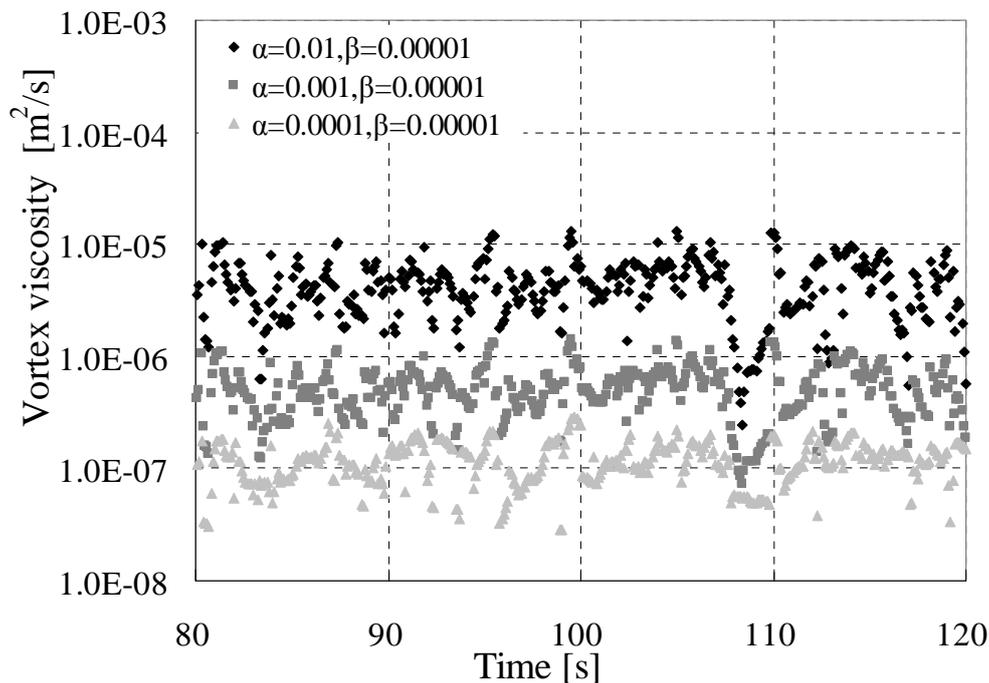


図 5.46 Case-Na1 における乱流粘性係数

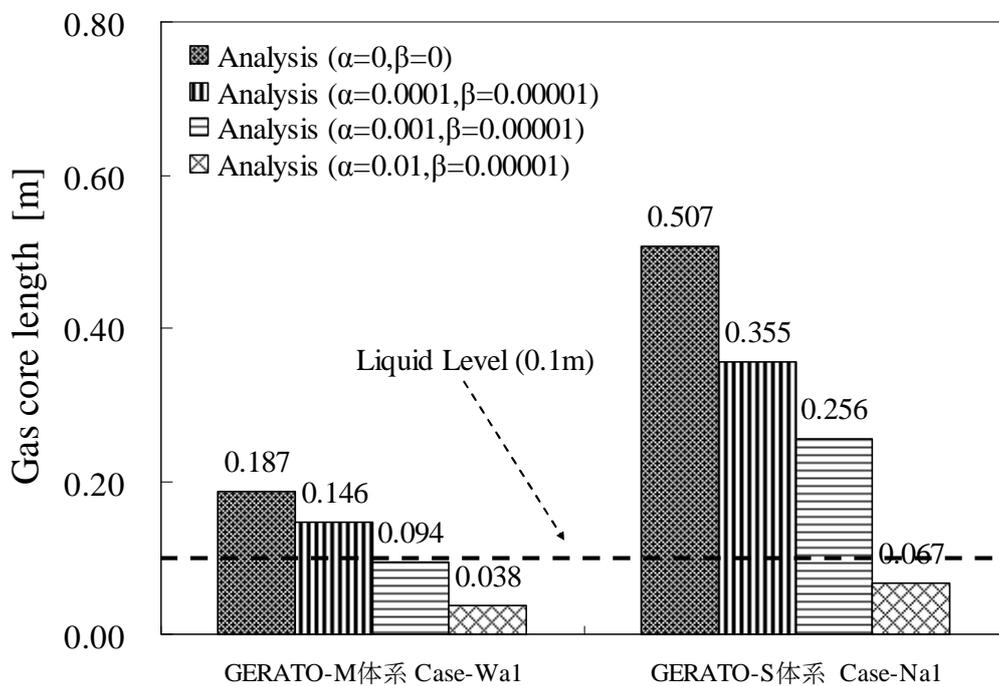


図 5.47 最大ガスコア長さの評価結果 (乱流粘性モデル比較)

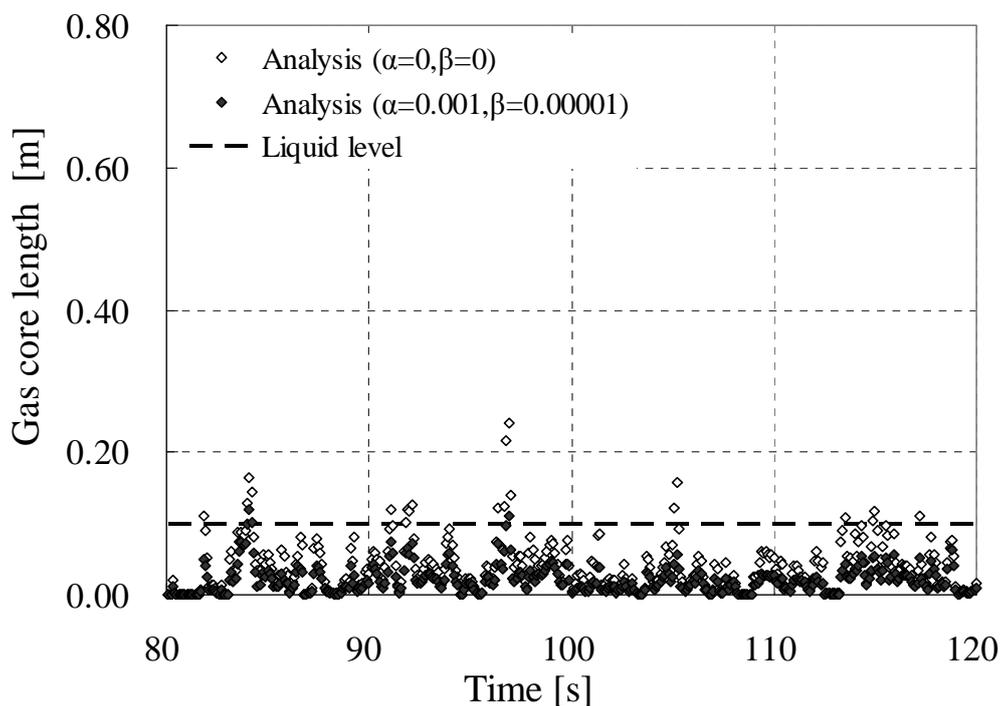


図 5.48 Case-Wa2 のガスコア長さ評価結果  
(乱流粘性モデル :  $\alpha=10^{-3}$ 、 $\beta=10^{-5}$ )

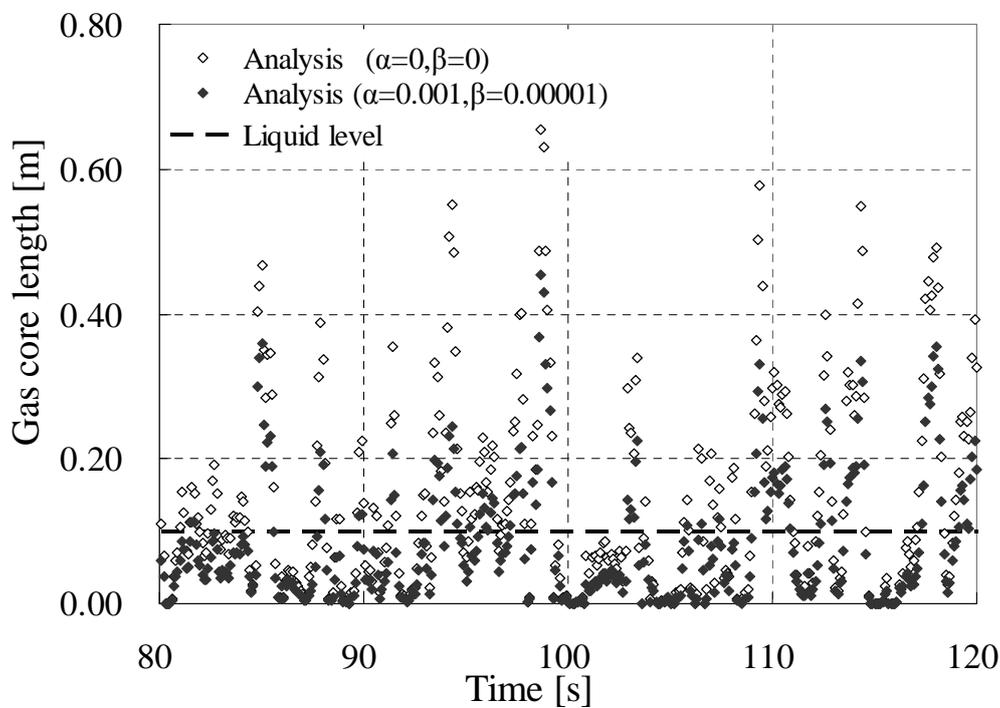


図 5.49 Case-Wa3 のガスコア長さ評価結果  
(乱流粘性モデル :  $\alpha=10^{-3}$ 、 $\beta=10^{-5}$ )

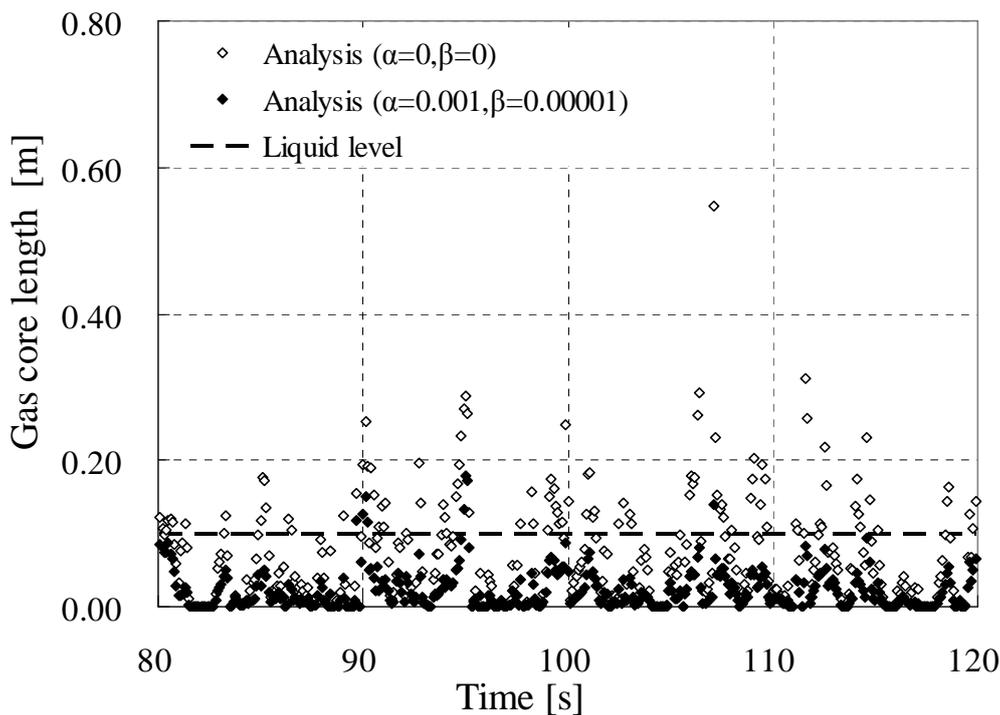


図 5.50 Case-Na2 のガスコア長さ評価結果  
 (乱流粘性モデル :  $\alpha=10^{-3}$ 、 $\beta=10^{-5}$ )

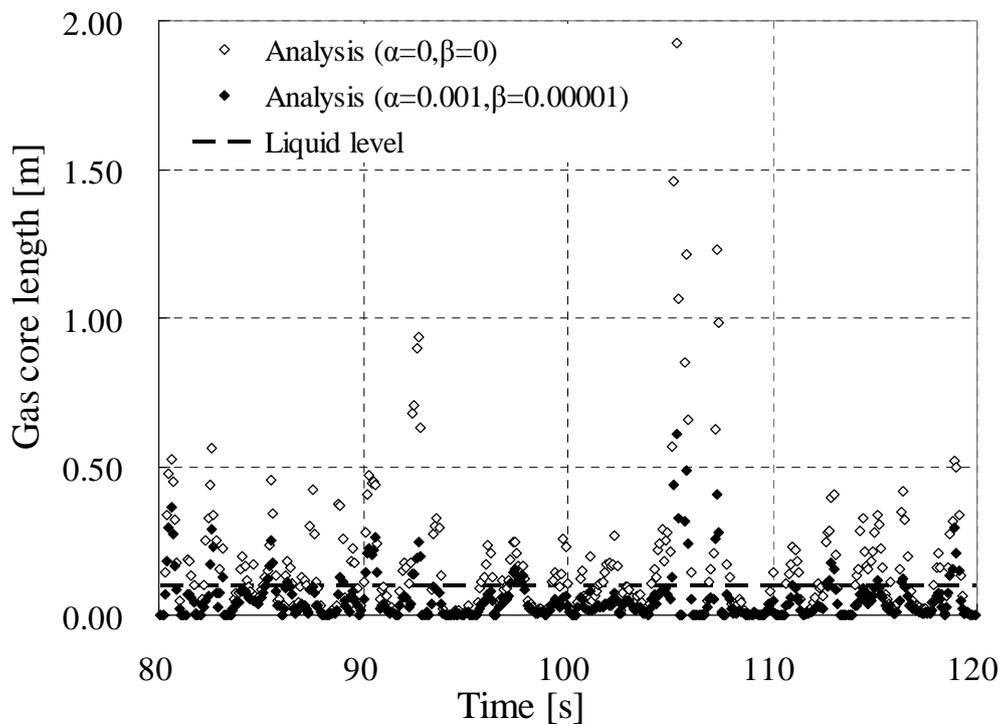


図 5.51 Case-Na3 のガスコア長さ評価結果  
 (乱流粘性モデル :  $\alpha=10^{-3}$ 、 $\beta=10^{-5}$ )

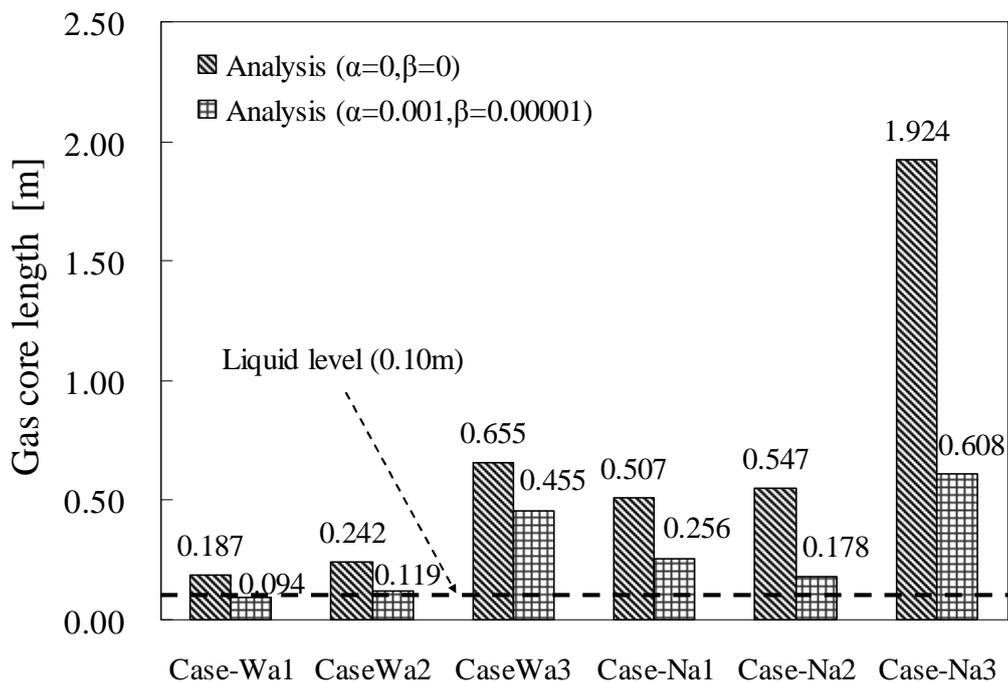


図 5.52 最大ガスコア長さの評価結果 (乱流粘性モデル比較)

# 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
物質的量	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 <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> cd
放射線種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> 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つ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、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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎平方メートル	J/m <sup>2</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	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	
		名称	SI単位による値
分	min	1 min=60s	
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	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>	
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> 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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
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 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
ファ	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガラ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(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 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> 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	1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

