くぼみ渦によるガス巻込み現象に対する数値解析手法の適用性

伊藤 啓^{1,2,*}, 功刀 資彰¹, 大島 宏之²

Study on Applicability of Numerical Simulation to Evaluation of Gas Entrainment due to Free Surface Vortex

Kei ITO^{1,2,*}, Tomoaki Kunugi¹ and Hiroyuki OHSHIMA²

¹Department of Nuclear Engineering, Kyoto University, Yoshida, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

²Advanced Nuclear System Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency, 4002 Narita, O-arai-machi, Higashi-ibaraki-gun, Ibaraki 311-1393, Japan

(Received December 3, 2007 and accepted in revised form February 26, 2008)

An onset condition of gas entrainment (GE) due to free surface vortex has been studied to establish a design of sodium-cooled fast reactor with a higher coolant velocity than conventional designs. Numerous investigations have been conducted experimentally and theoretically; however, the universal onset condition of the GE has not been determined yet due to the nonlinear characteristics of the GE. Recently, we have been studying numerical simulation methods as a promising method to evaluate GE, instead of the reliable but costly real-scale tests. In this paper, the applicability of the numerical simulation methods to the evaluation of the GE is discussed. For that purpose, a quasi-steady vortex in a cylindrical tank and a wake vortex (unsteady vortex) in a rectangular channel were numerically simulated using the volume-of-fluid type two-phase flow calculation method. The simulated velocity distributions and free surface shapes of the quasi-steady vortex showed good (not perfect, however) agreements with experimental results when a fine mesh subdivision and a high-order discretization scheme were employed. The unsteady behavior of the wake vortex was also simulated with high accuracy. Although the onset condition of the GE was slightly underestimated in the simulation results, the applicability of the numerical simulation methods to the GE evaluation was confirmed.

KEYWORDS: *sodium-cooled fast reactor, upper plenum, gas entrainment, free surface vortex, gas core, numerical simulation, volume-of-fluid (VOF), mesh subdivision, quasi-steady vortex, wake vortex*

I. 緒 言

原子炉システム内における気液二相流現象の研究は、BWR 炉心内における流動様式および伝熱特性に関して、特に盛んに行われている。しかし、気液二相流現象は BWR 炉心内に限らず他の原子炉システム内の様々な場面において発生しており、それらの現象についても研究が実施されている。例えば、日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)がエネルギー資源の有効利用および二酸化炭素排出量と放射性廃棄物の削減による環境保護の観点から研究開発を進めている高速増殖炉(FBR)において、上部プレナム部自由液面からのカバーガス巻込みの発生が懸念

されている。

FBR サイクル技術が第3期科学技術基本計画の国家基幹技術に選定されたことを受け、原子力機構では2006年度に終了した実用化戦略調査研究 Phase-II¹⁾に引き続き、2007年度より Fast Reactor Cycle Technology Development (FaCT) プロジェクトを開始しており、その第1ステップとして、ナトリウム(Na)冷却 FBR 実用炉の設計研究を進め、2010年までに設計成立性を見通しを得ることを目標としている。Na 冷却 FBR 実用炉は、安全性を確保しつつ従来の軽水炉技術に対抗できる経済性を有することが望ましいことから、様々な革新技術を取り入れ、近年の Na 冷却 FBR の設計²⁾と比較してシステムを大幅に簡素化し、炉心出力に比して原子炉容器をコンパクト化した設計を指向している。その結果、原子炉容器上部プレナム内の Na 流速が大幅に増加し、熱流動的には従来にない厳しい条件となっている。特に、現在の FBR 実用炉設計

¹ 京都大学大学院工学研究科 原子核工学専攻

² ㈱日本原子力研究開発機構 次世代原子炉システム研究開発部門

* Corresponding author, E-mail: ito.kei@jaea.go.jp

は、温度変化による Na 熱膨張分の体積吸収および炉容器上部デッキの低温維持のために、上部プレナム部に不活性ガスであるアルゴン (Ar) を満たしたカバーガス領域を有しており、カバーガス領域と Na 領域の境界には自由液面が存在しているため、自由液面からのカバーガス巻き込みの発生が懸念されている。巻き込まれたガスが 1 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ため、ガス巻き込みの発生を設計上許容できる値まで十分に抑制する必要がある。そのため、自由液面の下方に水平板 (ディッププレート; D/P) を設置し、炉心から流出した高速の Na 流れが直接自由液面に到達してガス巻き込み現象を誘起することのない設計となっている。しかし、炉上部プレナム領域にはホットレグ (H/L) 配管やコールドレグ (C/L) 配管等の各種構造物が挿入されているため、構造物間の干渉を防止する観点から D/P と構造物の間には隙間が存在しており、隙間部において局所的に上昇流 (噴き出し流れ) や下降流 (吸い込み流れ) が発生している。吸い込み流れにカバーガスが混入すると、D/P を通過して 1 次系にガスが混入する可能性があるため、局所的な吸い込み流れによって誘起されるガス巻き込みの発生に関して検討する必要がある。

FBR 実証炉研究の一環として行われた IHX 容器内のガス巻き込み現象に関する研究^{3,4)}より、FBR システムにおけるガス巻き込みの形態は、1) 潜り込み、2) 砕波、3) くぼみ渦の 3 種類のタイプに分類されることが明らかにされている。3 種類のガス巻き込みの中で潜り込みおよび砕波によるガス巻き込みは、D/P の設置によって自由液面近傍の水平方向流速を抑制すれば発生を防止できることがわかっているが、くぼみ渦によるガス巻き込みの発生条件や防止法については設計で満たすべき普遍的条件が明確になっていない。また、ガス巻き込み現象に関しては FBR 研究以外の分野においても多くの研究が実施されており、水槽とそれに設置した吸い込み管、もしくは主配管 (大口径配管) と枝配管 (小口径配管) などを用いた多くの実験の結果⁵⁾から、以下の Froude 数 (Fr) を用いた式によってガス巻き込み発生条件を整理できることが知られている⁶⁾。

$$\frac{H_{GE}}{d} = b_1 Fr^{b_2}, \quad (1)$$

ここで、Froude 数は以下の式で定義される。

$$Fr = \frac{v_d}{\sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_l} g d}} \quad (2)$$

(1) 式は Bernoulli の定理を用いた理論解としても求めることができ⁷⁾研究者の間で広く認知されているが、くぼみ渦によるガス巻き込みを対象とした実験では、ガス巻き込み発生条件を (1) 式で整理できないものが存在することがわかっている⁸⁾。これは、Froude 数に加えて Reynolds 数や Weber 数の影響が顕在化するためであるが、一般的にこれらすべての無次元数をスケールモデル試験 (縮尺試験) に

おいて実機条件と等しくするのは不可能である。したがって、くぼみ渦によるガス巻き込みの発生条件を、潜り込みや砕波によるガス巻き込みの発生条件と同様にスケールモデル試験から導くことは非常に困難であり、発生条件を正確に評価するためには従来とは異なるアプローチが必要であると考えられる。

原子力機構では、従来のガス巻き込み評価手法 (スケールモデル水試験からスケール則を導出するとともに物性値の影響を勘案することで FBR 実機のガス巻き込み発生条件を予測する手法) に代わり、くぼみ渦発生領域の局所物理量 (局所流速等) を用いてガス巻き込みの発生を予測する手法の検討を実施している。局所物理量は局所体系形状 (寸法) に大きく依存するため、現在検討中の設計概念に対しては、体系形状を忠実に模擬した実規模試験⁹⁾を実施することで局所物理量の測定ならびにガス巻き込み発生条件の予測を行っている。しかし、今後検討されるすべての設計概念に対して実規模試験を実施するのは時間的・費用的制約のために現実的ではないため、昨今の数値解析技術・計算機能力の飛躍的向上を背景に、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き込み評価手法の開発が望まれている。しかし、くぼみ渦によるガス巻き込み現象は熱流体運動特有の非線形現象および気液界面の複雑変形現象として出現するため、現象を正確に模擬するためには渦流れ場を正確に再現できる解析メッシュ分割や気液界面の大変形や気液界面からの気泡の離脱等を高精度に取り扱うことのできる気液二相流モデルが必須であり、筆者らの知る限りくぼみ渦によるガス巻き込み現象を詳細に解析した例は皆無であり、現状の数値解析手法をくぼみ渦によるガス巻き込み現象に対して適用できるのかどうかは明確になっていない。そのため、FBR 実用炉におけるガス巻き込み現象を対象とした解析を実施するためには、実験室レベルでのくぼみ渦によるガス巻き込み現象を対象とした数値解析を実施することによって数値解析手法の適用性について検討し、適切な数値解析手法に関する指針を得る必要がある。

本報は、ガス巻き込み現象に対する数値解析手法 (離散化手法、高精度気液二相流数値解析モデル、解析メッシュ分割) の適用性 (くぼみ渦流れ場の再現性) について検討を行うため、汎用流体解析コード FLUENT を用いて数値解析を実施した。まず、くぼみ渦によるガス巻き込みに関する準定常実験を対象として解析メッシュ分割や離散化手法を変化させた解析を行い、渦流れ場の流速分布について実験結果と比較することで解析手法の適用性について検討を行った。また、高精度気液二相流数値解析モデルを用いて自由液面の変形挙動を解析した結果を実験結果の自由液面形状と比較することにより、自由液面変形挙動の再現性について調査した。続いて、準定常渦解析で得られた知見をもとに物体の後流に発達する渦流れを対象とした非定常解析を実施し、非定常渦発達挙動 (流速分布および自由液面形状) およびガス巻き込み発生条件に関して実験と解析の比較を行

った。また、実験では得ることが困難な渦中心線に垂直な断面内の渦流速分布を求めることで、吸い込みと渦の相互作用に関する考察を行った。

II. 解析体系・解析手法

1. 解析体系

円筒容器内に準定常的に存在する準定常渦および物体後流に発生する後流渦を対象とした数値解析を実施した。

準定常渦実験体系¹⁰⁾を Fig. 1 に示す。実験流体は液相側が室温の水(密度 998 kg/m^3 , 粘性係数 $1.00 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$), 気相側が室温の空気(密度 1.23 kg/m^3 , 粘性係数 $1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)であり、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高さに保たれる。円筒容器の径(D)は 0.40 m , 流出ノズル径(d)は 0.05 m , 流入スリット幅(t)は 0.04 m であり、本研究では、流入流速(V_{in})が 0.42 m/s , 容器底面からの液位(h)が 0.50 m のケースを対象に解析を行った。なお、この条件の下では実験においてガス巻き込みは観測されていない。

後流渦実験体系¹¹⁾を Fig. 2 に示す。実験流体は準定常渦実験と同じ物性の水と空気である。本実験は、FBR 実用炉内で生じるくぼみ渦に近い渦の挙動を調査することを目的としており、非定常な渦流れを対象としている。実験体系は、矩形流路内に角柱および吸い込み管を設置したものであり、流入部から一様流入した水が角柱に衝突することで角柱後流に渦を発生させ、発生した後流渦が角柱後流

Fig. 1 Experimental apparatus of Quasi-steady vortex

の吸い込み流れと干渉することによって成長して液面にガスコアが形成される。ガスコアの先端が吸い込み口まで到達するか、もしくはガスコア先端から離脱した気泡が吸い込み管内に吸い込まれることによってガス巻き込みが発生する。矩形流路の幅は 0.20 m , 角柱の一辺の長さは 0.05 m , 吸い込み管の高さは矩形流路底面から 0.10 m , 吸い込み管の断面形状は、内側が一辺 0.01 m の正方形, 外側が一辺 0.02 m の正方形となっている。角柱と吸い込み管の位置関係を Fig. 3 に示す。角柱は流路の中心からずらして配置(吸い込み管は流路中心に配置)しており、角柱後縁から吸い込み管中心までの距離は 0.05 m である。数値解析は、試験においてガス巻き込みが確認されたケースとして流入流速 0.10 m/s , 吸い込み流速 4.0 m/s , 液位 0.15 m の条件で実施した。また、ガス巻き込み発生条件を調査するため、吸い込み流速を変化させたケースとして吸い込み流速 0.0 m/s , 6.0 m/s および 10.0 m/s (流入流速および液位については変化なし)の各条件においても解析を行った。

2. 解析メッシュ

準定常渦解析に用いたメッシュを Figs. 4~6 に示す。本研究では、解析メッシュ解像度がくぼみ渦流れ場の解析精度に与える影響を調査するため、くぼみ渦が形成される円筒容器中心近傍において解像度の異なる3種類の解析

Fig. 2 Experimental apparatus of wake vortex (unsteady vortex)

Fig. 3 Equipment configuration around suction tube

Fig. 4 Simulation mesh for quasi-steady vortex (Case 1 mesh)

Fig. 5 Simulation mesh for quasi-steady vortex (Case 2 mesh)

メッシュを用いて数値解析を実施した。解析メッシュ分割に用いたメッシュセルの形状はすべて六面体であり、実験体系の形状を忠実に模擬するために非構造メッシュを用いたメッシュ分割を行った。**Figure 4**は水平面内において比較的一様な解析メッシュ分割を行ったメッシュであり、これをCase 1メッシュと呼ぶ。Case 1メッシュの総メッシュセル数は79,832である。流入部付近の水平方向メッシュサイズは $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 、円筒容器中心近傍の水平方向メッシュサイズは $5.5\text{ mm} \times 5.5\text{ mm}$ 程度であり、垂直方向のメッシュサイズはすべて 10 mm である。**Figure 5**はCase 1メッシュと比較して円筒容器中心近傍に詳細なメッシュ分割を施した解析メッシュであり、Case 2メッシュと呼ぶ。Case 2メッシュの総メッシュセル数は356,036であり、流入部付近の水平方向メッシュサイズはCase 1メッシュと同様に $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 、円筒容器中心近傍の水平方向メッシュサイズは $1.2\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ 程度である。垂直方向のメッシュサイズは、自由液面が存在する液位 0.50 m 近傍高さにおいて 3.3 mm であり、その他の領域では 10 mm である。**Figure 6**はCase 2メッシュよりもさらに円筒容器中心近傍に詳細なメッシュ分割を行った解析メッシュであり、Case 3メッシュと呼ぶ。Case 3メッシュの総メッシュセル数は1,219,808であり、Case 1メッシュの約15倍、Case 2メッシュの約3.5倍のメシ

Fig. 6 Simulation mesh for quasi-steady vortex (Case 3 mesh)

セル数となっている。流入部付近の水平方向メッシュサイズはCase 1メッシュ(およびCase 2メッシュ)と同様に $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 、円筒容器中心近傍の水平方向メッシュサイズは $0.7\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$ 程度と、円筒容器中心近傍領域に対して非常に詳細なメッシュセルが配置されている。垂直方向のメッシュサイズは、自由液面が存在する液位 0.50 m 近傍高さにおいて 2.0 mm であり、その他の領域ではCase 1メッシュ(およびCase 2メッシュの液面近傍以外の領域)と同様に 10 mm である。Case 2メッシュおよびCase 3メッシュの自由液面近傍高さにおける垂直方向メッシュサイズは、円筒容器中心近傍領域における解析メッシュセルのアスペクト比(メッシュセルの縦横比)がCase 1メッシュの値(約2:1)に近い値(2:1~3:1)になるように決定した。これは、解析精度の調査を行う上で、解析メッシュセルのアスペクト比の影響を除外し、水平方向の解析メッシュサイズの影響のみを比較するためである。

後流渦解析に用いたメッシュを**Fig. 7**に示す。準定常渦解析と同様にすべてのメッシュセルは六面体で構成されており、総メッシュセル数は765,996である。本体系はすべて矩形の物体によって形成されているため、構造メッシュを用いたメッシュ分割も可能であるが、後述する準定常渦解析の結果に基づき、後流渦が発達する吸い込み管近傍の領域に対して詳細なメッシュ(水平方向メッシュサイズ $1.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$)を配置するために非構造メッシュを用いたメッシュ分割を行った。流入部近傍の水平方向メッシュサイズは $5.0\text{ mm} \times 5.0\text{ mm}$ であり、後流渦の形成挙動を精度よく捕えるために角柱近傍の水平方向メッシュサイズは $2.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ とした。垂直方向のメッシュサイズは、液面近傍領域(初期液面位置の上方 10 mm から下方 20 mm の領域)では液面の変形挙動を詳細に捕えるために 1.0 mm 、吸い込み口より下の領域では 5.0 mm 、両者の間の領域では 2.5 mm とした。また、気相領域においても 2.5 mm の垂直方向メッシュサイズとした。

3. 解析手法

数値解析は、汎用熱流体解析コード FLUENT¹²⁾を用い

Fig. 7 Simulation mesh for wake vortex (unsteady vortex)

て実施した。用いた基礎式は、積分型の運動量保存式 (Navier-Stokes 方程式) と圧力 Poisson 方程式, 流体率輸送方程式である。それぞれの式を以下に示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \bar{u} dV + \int_{\Sigma} (\rho \bar{u} \bar{u}) d\bar{A} = - \int_{\Sigma} p d\bar{A} + \int_{\Sigma} \mu (\nabla \bar{u}) d\bar{A} + \int_{\Omega} S dV \quad (3)$$

$$\int_{\Sigma} \frac{\nabla \delta p}{\rho} \cdot d\bar{A} = \frac{1}{\delta t} \int_{\Sigma} \bar{u} \cdot d\bar{A} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} f dV + \int_{\Sigma} f \bar{u} \cdot d\bar{A} = 0 \quad (5)$$

ただし、 Ω は各コントロールボリューム (解析上は各解析メッシュセル) を表し、 Σ は各コントロールボリュームの境界を表す。また、流体率は各コントロールボリューム内における液相の割合を示す関数であり、0 以上 1 以下 (コントロールボリューム内が液相で満たされていれば流体率は 1, 気相で満たされていれば 0, 気液界面が存在するメッシュセルでは $0 < f < 1$) の値をもつ。FLUENT では、それぞれの式は有限体積法を用いて離散化される。(3) 式の運動量保存式の左辺第 1 項の非定常項には 1 次精度 Euler 陰解法を適用し、右辺第 2 項の拡散項は 2 次精度中心差分を適用した。(3) 式の左辺第 2 項の移流項については、離散化精度が渦流れの再現性に与える影響を調査するため、準定常渦解析において 1 次精度風上差分および 2 次精度風上差分を適用し、両者の解析結果を比較・検討した。また、(4) 式の圧力 Poisson 方程式による速度の修正に対しては、PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operation) 法¹³⁾を適用した。PISO は陰的圧力掃着手法の一種であり、離散化した運動量保存式と圧力 Poisson 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手法である。なお、本研究におけるすべての数値解析は、乱流モデルを適用せずに実施した。これは、既存の研究¹⁴⁾において、一般的な乱流モデル (例えば標準 $k-\epsilon$ モデル) はくぼみ渦流れ場を過度に減衰させることが指摘されており、くぼみ渦に対しては乱流モデルを適用しない方がよい結果を導くことが示唆されているため

である。ただし、最近活発に研究開発が行われている LES (Large Eddy Simulation) に関しては、くぼみ渦に対して適用性を有しているモデルもある¹⁵⁾ため、将来的には LES を適用することも検討する必要があると考える。

くぼみ渦の挙動を調査する上で気液界面の変形挙動を正しく計算することが重要であるため、(5) 式で表される VOF (volume-of-fluid) 法¹⁶⁾を適用して気液二相流数値解析を行った。VOF 法は、各コントロールボリューム内で流体率を定義して気液界面位置を決定し、流体率を輸送することにより時々刻々と変化する気液界面形状を捕える手法である。オリジナルの VOF 法では、複雑な界面や気泡を輸送した場合に特別な工夫を施さない限り計算の進行に伴って非物理的な界面形状が現れる (例えば円形または球形の気泡は四角形または直方体形状へ変形してしまう) ことが知られている。これは、オリジナルの VOF 法が流体率輸送計算の際に気液界面の勾配を考慮していないことに起因する。本研究では、非物理的な挙動を回避し解析精度を向上させるために、各解析コントロールボリューム内での気液界面の勾配を考慮しながら流体率の輸送計算を行う PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation)¹⁷⁾を適用して高精度計算を実施した。(3) 式の右辺第 3 項のソース項では、重力および表面張力の影響が考慮される。表面張力の計算は、VOF 法を用いた気液二相流解析において一般的に用いられる CSF (Continuum Surface Tension) モデル¹⁸⁾を用いて行った。以下、CSF モデルの概略を示す。気液界面領域に完全流体を仮定 (粘性応力を無視) し、表面張力係数が気液界面に沿って変化しないとした場合、気液界面での圧力条件は以下のように記述できる。

$$p_l - p_g = \sigma \chi \quad (6)$$

上式は、一般に Laplace の式と呼ばれている。ここで、気液界面上の位置 $\bar{x}_s$ での表面力ベクトル $\bar{F}_s$ は以下のように定式化される。

$$\bar{F}_s(\bar{x}_s) = -\sigma \bar{\chi} \quad (7)$$

$$\bar{\chi} \equiv -(\nabla_s \cdot \bar{n})$$

と表される。CSF モデルは (7) 式で表される気液界面での表面力を遷移層 (気液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り、気液界面近傍の位置 $\vec{x}$ における表面張力効果は以下の(8)式のように体積力 $\vec{F}_V$ として表され、運動量保存式のソース項に組み込まれる。

$$\vec{F}_V(\vec{x}) = \frac{\sigma \chi(\vec{x}) \nabla f(\vec{x}) \rho(\vec{x})}{\bar{\rho}} \quad (8)$$

4. 境界条件

準定常渦解析の境界条件として、流入部に一樣速度条件 (0.4167 m/s)、上部開放面および流出ノズル下端に一樣圧力条件、円筒容器底面や流出ノズル部を含むすべての壁面には Non-Slip 条件を与えた。ただし、解析を実施中は常に液位を測定し、液位が一定 (0.50 m) になるように適宜流出ノズル下端の圧力値を変化させながら解析を行った。

後流渦解析の境界条件として、流入部に一樣速度条件 (0.10 m/s)、流出部に圧力条件、吸い込み部に一樣速度条件 (0.0 m/s, 4.0 m/s, 6.0 m/s, 10.0 m/s)、角柱および吸い込み管の表面を含むすべての壁面に Non-Slip 条件を与えた。ただし、流出部の圧力条件として静水圧分布を与えた。気相領域に対しては、流入部に液相と同様に一樣速度条件 (0.10 m/s) を与えた。これは、流入部における気液速度差の存在に起因して計算が不安定になるのを防止するた

めである。また、流出部に一樣圧力条件 (気相領域の垂直方向厚さが小さいため、気相の重さによる圧力勾配は無視)、上部の解放部にも一樣圧力条件を与え、壁面上においては液相と同様に Non-Slip 条件を課した。

III. 解析結果

1. 準定常渦解析結果

(1) くぼみ渦の成長挙動

円筒容器内において、初期状態 (体系内の速度が 0 の状態) からくぼみ渦が成長していく挙動を **Fig. 8** (a)–(d) に示す。ただし、これらの解析結果は最も詳細な解析メッシュ (Case 3 メッシュ) を用いて得られたものである。くぼみ渦は、(a) 円筒容器と比較して径が小さいため渦流れが発達しやすい流出ノズル内で最初に発達し、(b) 流出ノズルから自由液面に向かって発達した。その後、(c) 液面近傍の渦流れの発達に伴って液面にくぼみが生じ、(d) 渦がさらに発達するとガスコアが下方に向かって伸びていった。z=0.35 (円筒容器底面から 0.35 m 上方の水平面) における水平面内流速分布の図より、渦中心は渦の成長に伴って体系中心近傍を旋回運動しており、また、最終的に準定常状態に達した後でも円筒容器の中心とは一致しないことがわかった。これは、流入部が円筒容器側面の一箇所にのみ存

Fig. 8 Transient behaviors of quasi-steady vortex growth

在しているために円筒容器内での流れ場が円筒容器中心に対して軸対称にならないためである。

(2) 水平方向メッシュサイズの比較解析

成長過程を経て定常状態に達したくぼみ渦の解析結果および実験結果の $z=0.15$ (円筒容器底面から 0.15 m 上方の水平面) における水平面内の周方向・軸方向流速分布の比較を Fig. 9 に示す。横軸は渦中心からの距離を表し、軸方向流速は鉛直方向下向き (液面から流出ノズルに向かう方向) を負とした。また、III-1 節の解析結果はすべて、運動量保存式の移流項に対して 2 次精度風上差分による離散化を適用して得たものである。

周方向流速に関して、解析結果および実験結果は以下の式で記述される Burgers 渦¹⁹⁾ (伸長渦) と類似の速度分布となった。

$$v(r) = \frac{\Gamma_\infty}{r} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 \right\} \right]$$

$$r_1 = 2 \sqrt{\frac{\nu}{\alpha}} \quad (9)$$

実験結果と解析結果の周方向流速分布は、渦中心から離れた領域ではよく一致したが、実験結果では渦中心近傍で 0.84 m/s 程度の極大値が得られたのに対し、解析結果では Case 1 メッシュで 0.15 m/s 程度、Case 2 メッシュで 0.58 m/s 程度、Case 3 メッシュで 0.69 m/s 程度の極大値となった。また、周方向流速が極大値となる位置に関して、実験結果は渦中心から 6.0 mm 程度の位置であるのに対し、解析結果では Case 1 メッシュでは渦中心から 33 mm 程度、Case 2 メッシュでは渦中心から 11 mm 程度、Case 3 メッシュでは渦中心から 7.5 mm 位置と程度の位置となった。ここで、(9) 式の Burgers 渦の周方向流速分布は、渦中心から離れた領域では循環 Γ_∞ に反比例する流速分布となり、また、特性半径 r_1 が小さい程周方向流速の極大値が大きくなり周方向流速が極大値となる位置が渦中心に近くなる性質を有することを考慮すると、実験結

果と解析結果において循環 Γ_∞ はよい一致を示しているが、特性半径が解析結果において実験結果よりも大きく評価されたため、渦中心近傍で両者が一致しなかったと考えられる。特性半径 r_1 は動粘性係数 ν の平方根に比例するが、物理的な粘性に加えて解析では離散化誤差に起因する数値的な粘性が存在するため、この数値的な粘性によって見掛け上の動粘性係数が増加することによって特性半径が大きくなり評価され、結果として解析結果は渦中心近傍で渦流速分布を過小評価したと予想される。本研究で用いた解析コードでは、数値的な粘性は主に運動量保存式の移流項の離散化によって生じるため、III-1-(3) 項において移流項の離散化精度に関する検討を実施し、数値的な粘性と渦流速分布の再現性について明らかにする。

軸方向流速分布に関して、周方向流速と同様に渦中心から離れた領域においては実験結果と解析結果がよく一致しているが、渦中心において実験で計測された流速値がほぼ 0.0 m/s であるのに対して、解析結果の渦中心における流速値は Case 1 メッシュで -0.11 m/s 程度、Case 2 メッシュで -0.39 m/s 程度、Case 3 メッシュで -0.14 m/s 程度となっており、渦中心で軸方向流速がほぼ 0.0 m/s になるという現象を再現することはできなかった。また、実験結果では軸方向の流速値に対して渦中心から 6.0 mm 程度の位置において極小値が存在しているのに対し、Case 1 メッシュおよび Case 2 メッシュの解析結果は渦中心の遠方から渦中心まで単調減少する軸方向流速分布となっており、実験結果の軸方向流速分布の傾向を再現できなかった。同様の不一致は、LES を用いた解析 (単相流解析コードによる解析であり、自由液面の変形は考慮していない) においても発生しており¹⁵⁾、その原因として、自由液面形状の変化を考慮していないことによってガスコアの後流が模擬できていないことが述べられている。本研究では自由液面の変形を考慮しているが、後述するように Case 1 メッシュや Case 2 メッシュでは実験結果と解析結果のガスコア長さには大きな差があり、そのためにガスコアの後流が正しく模擬できず、単相流解析と同様に渦中心近傍において軸方向流速が極小値を取る流速分布になったと考えられる。一方、Case 3 メッシュの解析結果は、渦中心での流速値は異なるものの渦中心から 0.51 mm 程度の位置において極小値をもつ軸方向流速分布となっており、実験結果に近い軸方向流速分布を与えた。このことは、Case 3 メッシュを用いた解析においては、Case 1 メッシュや Case 2 メッシュにおける解析と比較してガスコアの後流が正しく捕えられていることを示唆している。

解析結果と実験結果の自由液面形状の比較を Fig. 10 に示す。ガスコア長さは試験結果が 0.11 m 程度となっているのに対し、解析結果は Case 1 メッシュで 0.0052 mm 程度、Case 2 メッシュで 0.041 m 程度、Case 3 メッシュで 0.069 m 程度となった。ただし、ガスコア長さの違いはあるものの解析結果のガスコア形状は実験結果のガスコア形

Fig. 9 Circumferential and axial velocity distributions (comparison of mesh size)

Fig. 10 Free surface (gas core) shapes (comparison of mesh size)

状と同様の形状となっており、また、Case 3 メッシュの解析結果は液面下 0.050 m 程度まで実験結果とよく一致した。

以上の結果より、本研究で実施した数値解析は実験で得られたくぼみ渦の渦流速分布を完全に再現するまでには至らなかったが、詳細な解析メッシュ分割を適用することによって実験結果の周方向流速分布形状(Burgers 渦流速分布)や渦の循環の値に関して実験とよく一致する結果を与えており、くぼみ渦流れ場を数値解析によって精度よく捕えられることが明らかになった。また、渦中心近傍の水平方向メッシュ分割を詳細化するにしたがって渦流速分布の再現性が大きく向上していることから、くぼみ渦の解析において渦中心近傍の水平方向メッシュサイズが解析精度に与える影響は非常に大きく、くぼみ渦を精度よく解析するためには渦中心近傍の領域において十分に小さい(準定常渦解析で形成された液面がくぼんでいる部分が数十 mm サイズの渦に対しては 1.0 mm 以下程度)水平方向メッシュサイズが必要であることがわかった。自由液面形状に関して、本研究で用いた気液界面の数値モデル(VOF + PLIC 法および CSF モデル)は、ガスコア長さに関しては実験結果よりも短い値を評価したが、物理的な矛盾を生じることなく実験結果と類似のガスコア形状を導いた。このことから、VOF + PLIC 法および CSF モデルによってくぼみ渦の特徴的な液面形状を再現できることが明らかになった。また、ガスコア形状(ガスコア長さ)に関しても渦中心近傍の水平方向メッシュサイズの詳細化に伴って解析精度が向上する結果が得られた。

(3) 運動量保存式の移流項離散化精度の比較解析

くぼみ渦の解析において数値的な粘性が解析精度に与える影響を調査するために、運動方程式の移流項の離散化精度を変化させた解析を実施した。Figure 9 と同様に $z = 0.15$ (底面から 0.15 m 上方の水平面)における水平面内の周方向・軸方向流速分布の比較を行った結果を Fig. 11 に示す。横軸は渦中心からの距離を表し、軸方向流速は垂直

Fig. 11 Circumferential and axial velocity distributions (comparison of discretization accuracy)

方向下向き(液面から流出ノズルに向かう方向)を負とした。解析は Case 2 メッシュを用いて実施しており、1 次精度差分と 2 次精度風上差分によって離散化を行った結果を比較した。運動方程式の移流項を対象としたのは、準定常渦を対象とした解析では最終的にはほぼ定常状態に達するため、非定常項の離散化による数値的粘性は十分に小さくなり、数値的な粘性は主に運動方程式の移流項によって生成されるためである。

周方向流速分布に関して、2 次精度風上差分による移流項の離散化を行った解析結果は渦中心近傍で明確な極大値を示しているのに対し、1 次精度風上差分の結果は明確な極大値をもたず、また渦中心近傍の領域において 2 次精度風上差分の結果よりもかなり小さな流速値を与えた。この解析結果は、1 次精度風上差分による離散化が 2 次精度風上差分による離散化よりも大きな数値的粘性を生成していたことを示しており、数値的粘性の効果が大きい場合にはくぼみ渦の特徴的な周方向流速分布(渦中心近傍で極大値を有する流速分布)を再現できないことがわかった。ただし、渦中心から離れた領域では 1 次精度風上差分と 2 次精度風上差分の結果はどちらも実験結果とよく一致しており、数値的粘性がくぼみ渦の解析精度に与える影響は渦中心近傍に限られること、そのため、くぼみ渦の循環値に関しては数値的粘性の効果が大きい場合でも正確な値を得られることが明らかになった。

軸方向流速分布に関して、周方向流速分布と同様に 1 次精度風上差分と 2 次精度風上差分による離散化の違いは渦中心近傍の領域に限られており、渦中心から離れた領域では解析結果は実験結果とよく一致した。軸方向流速分布形状は 1 次精度風上差分による解析結果の方が 2 次精度風上差分の結果よりも実験結果とよく一致しているが、2 次精度風上差分の結果が渦中心から約 10 mm の範囲外において実験結果と一致しているのに対し、1 次精度風上差分の結果は渦中心から約 60 mm の範囲外においてのみ実験と一致しているため、2 次精度風上差分を用いた離散

Fig. 12 Free surface (gas core) shapes (comparison of discretization accuracy)

化の方が渦中心のより近傍まで正確な流速分布を与えることがわかった。

1次精度風上差分と2次精度風上差分による離散化を用いた解析結果の自由液面形状を Fig. 12 に示す。1次精度風上差分のガスコア長さは1.6 mm 程度となっており、2次精度風上差分よりも大きな数値的粘性の影響によって、2次精度風上差分の結果よりも大幅に短いガスコア長さとなった。この結果から、数値的粘性は自由液面形状(ガスコア長さ)にも大きな影響を与え、正確な自由液面挙動の評価を含む高精度解析を行うためにはできる限り数値的粘性の小さい解析手法(高次精度離散化手法)を用いる必要があることが明らかになった。

2. 後流渦解析結果

準定常渦の数値解析結果より、くぼみ渦に対する数値解析手法の適用性が示されたため、後流渦(非定常くぼみ渦)を対象とした解析を行った。ただし、準定常渦解析における検討結果より、渦が発達する吸い込み管近傍の領域に対して詳細な水平方向メッシュ分割を施し、また、数値的粘性の影響を抑えるために2次精度風上差分を用いて運動量保存式の移流項を離散化した。

(1) 後流渦発達挙動解析結果

後流渦発達挙動の解析結果を Fig. 13(a)–(f) に示す。流入部から一様に流入した流れが角柱を過ぎることにより、(a)角柱後流に渦が放出され、(b)放出された渦の渦糸(渦中心線)の一端が吸い込み口に吸い込まれることによって渦が伸長され渦の強度が増加した。その後、(c)渦は後流に移流されながら成長を続けて自由液面にガスコアが形成され、(d)形成されたガスコアは渦中心線に沿って吸い込み口に向かって成長して先端が尖った形状となった。渦がさらに後流に輸送され自由液面における渦の位置が吸い込み管位置から離れていくと、(e)渦と吸い込みの干渉が弱まって渦強度が減衰してガスコア長さが減少した。最終的に、(f)渦と吸い込みの干渉が完全に消滅して渦は減

衰しながら流出部から流出した。数値解析によって得られた以上の後流渦発達挙動は実験において観察された渦発達挙動と定性的に一致しており、吸い込みとの干渉による渦成長挙動を数値解析によって捕えることが可能であり、FBR 実用炉において発生する非定常くぼみ渦の挙動に対しても本研究で用いている数値解析手法を適用できることがわかった。

(2) 後流渦の流速分布および自由液面形状

後流渦が吸い込み流れとの干渉によって十分に発達した時点における、実験結果と解析結果の渦近傍領域における流速分布の比較を Fig. 14 に示す。ただし、実験結果の速度ベクトルはPIV (Particle Image Velocimetry) 測定によって得られたものである。白色のガイドで示したように解析結果は実験結果とよく似た流れ場を示しており、少なくとも後流渦周囲の流れ場(渦中心のごく近傍を除く領域の流れ場)に対しては後流渦の計算が正確に行われていることを確認した。Figure 15 に、後流渦発達時における実験結果と解析結果の自由液面形状(ガスコア形状)の比較を示す。両者とも吸い込み口より下流の液面から吸い込み口に向かって伸びていくガスコアが形成されており、ガスコア形状についてもよく似た形状(液面部が太く先端がかなり細く絞られた形状)となった。これらの結果から、本研究で用いた数値解析手法によって、後流渦の大域的な発達挙動(III-2-(1)項に記載)に加え、後流渦近傍の非定常的・局所的な流速分布や圧力分布がおおむね再現されていることを確認した。

準定常渦の場合と同様に、十分に成長した時点における後流渦の渦中心線の一端はガスコア先端に接続し、もう一端は吸い込み口に接続している。しかし、Fig. 15 に示したように後流渦のガスコアは吸い込み口の真上で発達する訳ではないため、ガスコア先端と吸い込み口の間に存在する渦中心線は大きく湾曲した曲線形状となる。このため、渦中心線と直交する任意の平面内における渦流速分布(準定常渦の場合において Fig. 9 のように求められた流速分布)を求めるためには、渦中心線近傍の3次元詳細流速分布が必要となる。現状では実験的に3次元詳細流速分布を得ることは技術的に非常に困難であるため、筆者らの知る限り後流渦の詳細な渦流速分布を実験的に明らかにした例は皆無である。しかし、後流渦の渦中心線に沿った渦流速分布を明らかにすることは、準定常渦と後流渦の違いを明らかにし、FBR 実用炉内の現象に近い後流渦によるガス巻込みのメカニズムを検討する上で重要であると考えられる。そこで、本研究では、前段に記したように実験結果の再現性が確認された数値解析の結果を用いて、後流渦の渦中心線に沿った渦流速分布の調査を行った。Figure 16 に、ガスコア形状およびガスコア先端と吸い込み口の間に存在する渦中心線の形状を示す。ガスコアが吸い込み口の下流に位置しているため、渦中心線は大きく湾曲している。図中には渦流速分布の調査を行った面(渦中心線に垂

Fig. 13 Transient behaviors of wake vortex growth and dissipation

直な面)を示した。渦流速分布の調査は3つの面で行い、それぞれの面の中心位置(渦中心線との交点)の底面からの高さは0.11, 0.12および0.13 mとした。ただし、吸い込み口位置は底面から0.10 m、初期液面は底面から0.15 mに位置している。また、渦流速の角度依存性を確認するため、Fig. 17に示すように、主流方向を0 degとし、反時計回りに90, 180, 270 degの方向を取り、これらの4方向に対して流速ベクトルをプロットした。Figure 18(a)–(c)に、それぞれの高さ位置における各方向の流速分布を示す。ほぼ軸対称の流れ場となった準定常渦解析の場合と異なり、後流渦解析では流れ場が軸対称にはならないため周方向流速に角度依存性が現れた。また、準定常渦解析結果は鉛直方向にほとんど差がない流れ場となったが、後流渦解析結果では渦中心線が大きく湾曲しているために鉛直方

向に渦の流速分布が大きく変化する傾向を有していた。Figure 19(a)–(c)に、それぞれ底面からの高さ0.11, 0.12および0.13 mにおける周方向流速分布を示す。横軸は、渦中心を原点とし、それぞれの角度の方向に取った渦中心からの距離である。それぞれの図中において0 degの周方向流速を基準として考えると、90 degの周方向流速は0 degと同等かやや大きい値となり、180 degの周方向流速は0 degよりもかなり大きい値、270 degの周方向流速は0 degよりも小さい値となった。この傾向は、それぞれの角度の方向と主流の方向、吸い込み管との位置関係によって生じており、主流方向と直交するために主流の影響を受け難い0 degの周方向流速に対して、90 degの周方向流速は主流と同じ向きであるために強められ、270 degの周方向流速は主流と逆向きのために弱められる傾向にあると

Fig. 14 Flow patterns around grown vortices

Fig. 15 Free surface (gas core) shapes for grown vortices

Fig. 16 Gas core and vortex core (from gas core tip to suction mouth)

Fig. 17 Directions for velocity measurements on each plane

考えられる。また、180 deg の周方向流速が大きいのは、後流渦が吸い込み管の下流に位置しているために 180 deg の方向(渦中心からみて上流方向)は 0 deg の方向と比較して吸い込み口により近くなり、吸い込み流速による渦強度の増加が顕著に現れたためであると考えられる。鉛直方向の渦流速分布の違いについて検討するため、Fig. 19(a)–(c)を比較した。底面からの高さ 0.13 m の場合、準定常渦の周方向流速分布(Burgers 渦の周方向流速分布)に近い周

方向流速分布が得られており、渦中心から急峻に立ち上がった流速が 0.005 m 程度の位置に極大値を有し、中心から離れるにつれて急激に減少していく分布形状となった。一方、底面からの高さが 0.11 m の場合、渦中心からの急峻な流速の立ち上がりは同様であるが、明確な極大値を示さず渦中心から 0.005~0.015 m 程度の比較的広い領域において大きな流速値を有する分布形状となった。この結果は、後流渦においては渦中心に沿った渦流速分布が鉛直方

Fig. 18 Velocity distributions around vortex cores on each plane

向に一様でないことを明確に示している。また、それぞれの面内における運動量を考えた場合、底面からの高さが 0.11 m の方が大きな周方向流速を有する領域が広いために面内の運動量が大きくなっており、吸い込み口に近い領域では吸い込み流速との相互作用による運動量の増加(渦の周方向運動量の増加)が大きくなっていると考えられる。後流渦の渦流速分布に関するこれらの結果は、今後、非定常ガス巻き込み現象に関する評価を行う上で、評価モデルの検討・構築に対する有用なデータとなることが期待される。

(3) ガス巻き込み発生挙動の比較

Figure 20 に、吸い込み流速を変化させた場合のガス巻き込み挙動の変化を示す。吸い込み流速 0.0 m/s の場合、実験・解析ともにガス巻き込みは発生せず、吸い込み流速 4.0

Fig. 19 Circumferential velocity distributions on each plane

m/s においては、実験ではガス巻き込みが発生するが解析ではガス巻き込みは観測されなかった。解析において吸い込み流速を 6.0 m/s に増加させたケースではガス巻き込みが発生し、また、解析において吸い込み流速を 10.0 m/s まで増加させた場合、ガスコアが大きく伸長されて吸い込み口に到達し、6~7 秒間程度ガスコアと吸い込み口が接続したまま多量のガスが巻き込まれる現象が観察された。これら

Fig. 20 Occurrence of gas entrainment for each suction velocity condition

の結果から、数値解析によって実験で生じたガス巻き発生挙動を完全に再現するためには本件で用いた解析手法の解析精度は十分ではなく、解析結果は実験結果をやや非保守側に評価(ガス巻き込み現象の発生を過小評価)することがわかった。ただし、吸い込み流速を増加させた場合にはガス巻き込み現象の発生が解析的に捕えられたため、本件で用いた数値解析手法によってガス巻き込み現象の解析を行うことは十分に可能であり、現状の数値解析技術を用いた場合でもガス巻き込み現象の定性的な挙動調査を実施できることが明らかになった。また、数値解析手法に工夫を加えて高精度化することによって、ガス巻き込み現象を解析的に再現することが可能になると考える。

IV. 結 言

くぼみ渦によるガス巻き込み現象に対する現状の数値解析手法の適用性について検討するため、円筒容器内準定常渦および物体後流渦を対象とした気液二相流数値解析を実施した。解析は、非構造格子系における有限体積法に基づく解析コードを用いて実施し、気液界面挙動の解析にはPLIC法によって高精度化したVOF法を用いた。

準定常渦解析において解析メッシュ分割や離散化手法を変化させて解析を行い、渦流れ場の流速分布について実験結果と比較した結果、本研究で用いた解析手法は実験で得られたくぼみ渦の渦流速分布を完全に再現するまでには至らなかったが、適切な解析メッシュ分割や離散化手法を適用することでくぼみ渦流れ場を精度よく解析できることが明らかになった。また、くぼみ渦の解析において渦中心近傍の水平方向メッシュサイズが解析精度に与える影響は非常に大きく、くぼみ渦を精度よく解析するためには渦中心近傍の領域において十分に詳細な水平方向メッシュ分割を

必要とすることがわかった。同様に、運動方程式の移流項の離散化精度に関して、低精度の離散化を用いた場合には渦中心近傍の渦流速分布の再現性が著しく低下するため、数値的粘性の少ない高精度離散化手法を用いることの必要性が明らかになった。ただし、渦中心から離れた領域では数値的粘性の効果は小さいため、くぼみ渦の循環値に関しては低精度離散化手法を用いた場合でも正確な値を得られることが明らかになった。

準定常渦解析で得られた知見に基づき物体の後流に発達する渦流れを対象とした非定常解析を実施し、非定常渦発達挙動(流速分布および自由液面形状)およびガス巻き込み発生条件に関して実験と解析の比較を行った結果、本研究で用いた数値解析手法によって後流渦の大域的な発達挙動および後流渦近傍の非定常的・局所的な流速分布や圧力分布が再現されることを確認した。また、ガス巻き込み発生条件に関して、解析は実験結果のガス巻き込み発生条件を過小評価するが、吸い込み流速が増大した場合のガス巻き込み発生を捕えることは可能であり、本研究で用いた数値解析手法がガス巻き込み現象評価に対して適用可能であることが確認された。実験では得ることが困難な渦中心線に垂直な断面内の渦流速分布を求めた結果、後流渦の渦中心線に沿った渦流速の分布は、吸い込み管や主流との相互作用のために渦中心からの角度によって変化するとともに鉛直方向にも変化することがわかった。本知見は、非定常ガス巻き込み現象を評価するための評価モデル構築に用いることができると考える。

本研究に際して準定常渦試験に関する測定結果をご提供頂いた財電力中央研究所 地球工学研究所スタッフ・上席研究員 守屋祥一氏、ならびに後流渦実験に関する測定結

果をご提供頂いた東京大学大学院 新領域創成科学研究科
教授 岡本孝司先生の両氏に感謝の意を表します。

〔記号〕

b_1, b_2	: 定数
d	: 配管径(m)
f	: 流体率
F_r	: Froude 数
$\bar{F}$	: 表面張力(Pa)
g	: 重力加速度(m/s ²)
H_{GE}	: ガス巻き込み発生液位(m)
$\bar{n}$	: 界面ベクトル
p	: 圧力(Pa)
r	: 渦中心からの距離(m)
r_1	: 渦の特性半径(m)
$\bar{S}$	: 外力(N/m ³)
t	: 時間(s)
v	: 渦の周方向流速(m/s)
v_d	: 枝管流速(m/s)
$\bar{u}$	: 流速ベクトル(m/s)
$\bar{x}$	: 位置ベクトル(m)
α	: 下降流速勾配(1/s)
Γ_x	: 循環(m ² /s)
ν	: 動粘性係数(m ² /s)
μ	: 粘性係数(Pa*s)
ρ	: 密度(kg/m ³)
$\bar{\rho}$	: 液相と気相の平均密度(kg/m ³)
$\Delta\rho$	: 液相と気相の密度差(kg/m ³)
σ	: 表面張力係数(Pa*m)
χ	: 界面曲率(1/m)
$\bar{\chi}$	: 界面曲率ベクトル(1/m)

添え字

l	: 液相
g	: 気相
S	: 界面位置
V	: 界面が存在するメッシュセルの位置
Ω	: 積分領域
Σ	: 積分領域の境界面

— 参考文献 —

- 1) 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, 日本原子力発電(株) 研究開発室, “高速増殖サイクルの実用化戦略調査研究—フェーズII最終報告書—,” JAEA-Evaluation 2006-002, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) (2006).
- 2) M. Ueta *et al.*, “The Development of Demonstration Fast Breeder Reactor (DFBR),” *Proc. ICONF-3*, 771 (1995).
- 3) Y. Eguchi, N. Tanaka *et al.*, “Gas entrainment in the IHX vessel of top entry-type LMFBR,” *Nucl. Eng. Des.*, **146**, 373 (1994).
- 4) 山本一彦, 江口 譲, 他, “トップエントリー方式ループ型炉の中間熱交換器ガス巻き込み試験,” 日本機械学会論文集(B編), **59**[565], 2721 (1993).
- 5) M. R. Maier, “Onsets of liquid and gas entrainment during discharge from a stratified air-water region through two horizontal side branches with centerlines falling in an inclined plane,” M. Sc. Thesis, University of Manitoba (1998).
- 6) N. Zuber, *Problems in Modeling of Small Break LOCA*, Nuclear Regulatory Commission Report, NUREG-0724 (1980).
- 7) A. Craya, “Theoretical research on the flow of nonhomogeneous fluids,” *La Houille Blanche*, **4**, 22, (1949).
- 8) L. L. Daggett, G. H. Keulegan, “Similitude in free-surface vortex formations,” *J. Hydraul. Div., Proc. ASCE*, **100**[HY8] (1974).
- 9) N. Kimura, K. Hayashi *et al.*, “Experimental study on gas entrainment at free surface in reactor vessel for a compact sodium cooled fast reactor,” *Proc. Forth Japan-Korea Symp. on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS4)*, Sapporo, Japan (2004).
- 10) 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, 電力中央研究所研究報告 U97072 (1998).
- 11) K. Okamoto, K. Takeyama, M. Iida, “Dynamic PIV measurement for the transient behavior of a free-surface vortex,” *Proc. Forth Japan-Korea Symp. on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS4)*, Sapporo, Japan (2004).
- 12) ANSYS Japan K. K., <http://ansys.jp/>
- 13) R. I. Issa, “Solution of implicitly discretized fluid flow equations by operator splitting,” *J. Comp. Phys.*, **62**, 40 (1986).
- 14) N. Tanaka, T. Kunugi *et al.*, “On numerical methods for steady vortex dipole formulation without gas entrainment,” *Proc. Forth Japan-Korea Symp. on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS4)*, Sapporo, Japan (2004).
- 15) 江口 譲, 大島弘之, 他, “マルチスケール LES 解析コード MISTRAL による旋回渦解析,” 日本原子力学会和文論文誌, **6**[3], 298 (2007).
- 16) C. W. Hirt, D. B. Nichols, “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries,” *J. Comp. Phys.*, **39**, 201 (1981).
- 17) D. L. Young, *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, eds. by K. W. Morton and M. J. Baine, Academic Press, 273 (1982).
- 18) J. U. Brackbill, D. B. Kothe, C. Zemach, “A continuum method for modeling surface tension,” *J. Comp. Phys.*, **100**, 335 (1992).
- 19) J. M. Burgers, *A Mathematical Model Illustrating the Theory of Turbulence*, *Advances in Applied Mechanics*, eds. by R. Mises, T. Karman, Academic Press INC., New York (1948).