高精度気液二相流数値解析における非構造解適合格子法の開発*

(第1報, 2次元非構造解適合格子法の開発と検証)

伊藤 啓^{*1,*2}, 功刀 資彰^{*1}, 大島 宏之^{*2}

Development of Unstructured Adaptive Mesh Algorithm for High-Precision Gas-Liquid Two-Phase Flow Simulation (1st Report, Formulation and Verification of Two-Dimensional Unstructured Adaptive Mesh Algorithm)

Kei ITO^{*3}, Tomoaki KUNUGI and Hiroyuki OHSHIMA^{*3} Department of Nuclear Engineering, Kyoto University,
Yoshida, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8501 Japan

A high-precision simulation method for gas-liquid two-phase flows on unstructured meshes has been developed as a part of numerical studies on a gas entrainment phenomenon in the sodium-cooled fast reactor (JSFR). In this study, a two-dimensional unstructured adaptive mesh algorithm is developed because an adaptive mesh technique is necessary to simulate the local gas entrainment phenomenon accurately in large size JSFR. In a proposed two-dimensional adaptive mesh algorithm, each cell is isotropically subdivided to reduce distortions of the mesh. In addition, a connection cell is formed to eliminate the edge incompatibility between a refined and a non-refined cells. When forming connection cells, patterns of each connection cell is determined by subdivision conditions of neighboring cells. After checking the developed two-dimensional unstructured adaptive mesh manipulations (subdivision and merging of cells and construction of connection cells), the present adaptive mesh algorithm is verified by solving well-known driven cavity problem. As the result, the present unstructured adaptive mesh algorithm succeeds in reproducing vortical flow field in the cavity using relatively small cell number.

Key Words: Numerical Simulation, Gas-Liquid Two-Phase Flow, Free Surface Flow, Volume-of-Fluid, Unstructured Adaptive Mesh, Gas Entrainment

1. 緒 言

近年, 自由界面を有する気液二相流の数値解析手法に関して非常に多くの研究が実施されており, 多くの数値解析手法が提案されている。特に, 最近では界面追跡法による気液二相流現象の数値解析研究が盛んであり, VOF (Volume-of-fluid) 法⁽¹⁾ や Level Set 法⁽²⁾, Front Tracking 法⁽³⁾, CIP (Cubic Interpolated Propagation) 法⁽⁴⁾, Phase Field 法⁽⁵⁾ といった手法を用いた気液界面変形挙動の解析が実施されている。これらの解析手法は非常に有用であるが, 気液界面挙動を正確に再現するためには界面近傍に詳細な格子セル分割を施す必要があるため, 最近の計算機能力の向上を勘案しても解析負荷は大きい。

著者らは, 高速増殖炉の設計効率化を目的として, 炉心上部の自由液面におけるガス巻込み現象(気液界

面が変形し, 気泡が液体中に巻込まれる現象)を再現できる数値解析手法の研究を行っている。その一環として, 著者らは高精度VOF法の1つであるPLIC (Piecewise Linear Interface Calculation)法⁽⁶⁾の定式化に基づいて, 体系形状模擬性に優れる非構造格子系における高精度気液二相流数値解析手法の構築(任意形状の格子セル上における解析手法の定式化)を行い⁽⁷⁾, また, 気液界面近傍における非物理的な挙動の発生を抑制するため, 運動量輸送計算及び圧力-速度のカップリング計算において物理的に適切な定式化を導いている⁽⁸⁾。しかし, 評価対象のガス巻込み現象は局所的に発生する非定常渦流れ場によって誘起されるため, 原子炉のような大規模体系において局所的な渦流れ場を再現できる手法の構築が必須である。同時に, ガス巻込み許容量の検討を行う観点から巻込まれたガスの定量評価を目指しているため, 液面から巻込まれた個々の気泡を追跡できるだけの格子解像度が必要となる。これらの点から, ガス巻込み現象を再現するためには, 渦流れ場や巻込まれた気泡に対して詳細格子を適用することが必要不可欠である。しかし, 原子炉内における非定常渦流れの発生位置を正確に予測

* 原稿受付 2009年4月7日。

*¹ 正員, 京都大学大学院工学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)。*² 正員, (独)日本原子力研究開発機構(〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002)。

E-mail: ito.kei@jaea.go.jp

することは困難であるため、本論文では、自動的に局所的な詳細格子分割を行うことができる解適合格子法に注目し、非構造格子系における解適合格子法の開発及び検証を実施する。

流体解析における非構造解適合格子法は、特に航空・宇宙の分野において盛んに研究が行われており、多くの計算手法が提案されている。特に、Bi-section法(3角形の格子セルを、ある頂点とその頂点を含まない辺の中点を結ぶ線で2つの3角形に分割する手法)による局所的な格子の再分割を行う手法⁽⁹⁾やDelaunay Triangulation(任意形状の領域に対して新たなノード点を付加した場合に、歪の少ない3角形格子を生成するアルゴリズム)を利用した手法⁽¹⁰⁾は、格子分割による格子セルの歪みを抑制しながら局所的に高解像度の格子を配置することができるため、航空分野の解析においては非常に有用である。また、局所的な格子詳細化を行った後でスミージング(Swapping)や修正を行う手法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾は、計算負荷が大きくなるものの、高品質な格子分割を保証するため高精度解析を行う上で効果的な手法である。その他、必要な領域に高解像度の格子分割を施す手法としては、非構造移動格子法⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾の研究も行われている。しかし、これらの手法は3角形(3次元では4面体)の格子セルを計算対象としているため、著者らの非構造格子系において採用している任意形状の格子セル(2次元では3角形及び4角形、3次元では4面体、5面体及び6面体)に対して適用することはできない。また、著者らが開発を行っている界面追跡法を用いた高精度気液二相流数値解析手法においては、気液界面の体積保存性を満足するため、各格子セル内における界面位置を直線(3次元解析においては平面)で近似し、気液各相が占める領域を幾何学的に決定することを行っているため、格子分割(及びスミージング)前後における気液各相の体積を保存するためには、格子配置の変更に伴って、元の格子上における気液相分布を変更後の格子上にマッピング(写像)する必要がある。この計算アルゴリズムは構造格子上においても煩雑なものとなるが、任意形状の格子セルを用いた非構造格子上においては非常に複雑なものとなり、特に3次元非構造格子上においては計算アルゴリズム構築が不可能な程に複雑化する。

以上の検討から、本研究における2次元非構造解適合格子法の開発では、各格子セルに対してIsotropic分割⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、即ち、3角形セル及び4角形セルを、各格子セル境界(以後、Edgeと呼ぶ)の中点を結ぶ直線によって4分割する分割法を適用する。これは、4角形(3次元の場合は5面体や6面体)に対してより一般的

な分割法⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾を採用した場合、多くの場合分けが必要になるとともに分割後の格子セルが大きく歪むためである。一方、Isotropic分割は初期格子セルの歪みを増幅させることは無いが、Bi-section法を用いた分割等と異なり、一般的に分割後の格子境界におけるEdge整合性(格子セル境界のCompatibility)が満たされない⁽¹⁹⁾。Edge整合性が満たされない格子セルが存在する場合、それらの格子セルに対しては特別な流動計算アルゴリズムを適用する必要があるため、解析アルゴリズムが複雑化する。構造格子系ではEdge不整合は避けられないが、非構造格子系における特長(自由な格子分割が可能)を活用してEdge不整合を避けるため、本研究では特殊な分割を行う格子セル(接続セルと呼ぶ)を導入し、格子境界におけるEdge整合性を満足する格子分割・結合手法を構築する。構築した解析手法は、渦流れ場の解析を実施することで検証し、2次元非構造解適合格子によって効率良く(少ない格子セル数で)渦流れ場を再現できることを確認する。

2. 2次元非構造解適合格子法の開発

2・1 2次元非構造解適合格子法の概要 2次元非構造解適合格子法において使用できる格子セルの形状は、3角形及び4角形とした。一般的に、3角形と4角形の両格子セルを用いることによって、任意形状の複雑体系における流れ場の解析を問題無く行うことができる。また、2次元非構造解適合格子法においては、2次元構造格子系の解適合格子法において一般的であるHanging VertexやHanging Edge(隣接格子セル整合しないVertexやEdge、図1参照)を用いず、非構造格子の利点である自由な格子分割を活用し、全ての格子セル境界のEdgeが隣接格子セル境界のEdgeと整合する(格子セル境界のCompatibilityを満たす)手法を構築する。これによって、2次元非構造解適合格子法においても、従来の計算アルゴリズム(解適合格子を用いない場合の計算アルゴリズム)を変更することなく解析を行うことが可能となる。図1に2次元構造格子系における解適合格子法と本研究で開発する2次元非構造解適合格子法の概念を示す。ただし、標準セル(Normal Cell)は詳細化されていない格子セルを表し、後述するように、接続セル(Connection Cell)は詳細化セル(Refined Cell)と非詳細化セルを結ぶために特殊な分割を施す格子セルを表す。2次元非構造解適合格子法において、接続セルを導入したことにより、Hanging VertexやHanging Edgeが存在せずEdge整合性を満足する格子分割が実現できている(接続セ

(a) Adaptive mesh refinement on structured meshes

(b) Unstructured adaptive mesh

Fig.1 Comparison between adaptive mesh refinement and unstructured adaptive mesh

ルの分割パターンについては後述する)。

2・2 格子分割レベルの設定 各格子セルの分割状態を設定するため、各格子セルにおいて格子分割レベルを定義する。まず、初期の格子セルの分割レベルを0と定義し、分割する毎に分割レベルが1上がる(結合する毎に分割レベルが1下がる)ものとして、各格子セルの分割レベルが0~最大分割レベル(通常は3~7程度に設定)の範囲を超えないように分割・結合を行う。即ち、最大分割レベルのセルを分割することはない、また、レベル0のセル(初期の格子セル)を結合することはない。以下では、分割前の格子セルを親セル(Parent Cell)と呼び、分割後の格子セルを子セル(Child Cell)と呼ぶ。尚、接続セルの子セルの分割レベルは親セル(元の接続セル)と同じに設定する(接続セルにおける分割によって分割レベルは上がらない)。これは、詳細化セルと接続セルを判別するための指標となる。

2・3 各格子セルの分割・結合判定 ある格子セルを分割・結合するかどうかの判定は、格子セルにおける第二不変量の値(渦領域に詳細な格子を配置する際に有効)、または格子セルにおける速度や速度勾配の絶対値、等に基づいて行う。この際、分割(結合)基準値については、各解析において適切な値を定める必要がある。ある格子セルにおいて計算された判定値が、現在の分割レベルにおける分割基準値を上回った場合、その格子セルは分割(詳細化)される。また、ある親セルを分割して得られる全ての子セルにおいて判定値が結合基準値を下回った場合、これらの子セルは

(a) Refinement to level 2

(b) Refinement of adjacent cell

(c) Coarsening to level 0 by cell

(d) Re-refinement to level 1

Fig.2 Special cases for refinement and coarsening

結合されて親セルとなる。ただし、格子サイズの急変による解析精度低下を防止する観点と、接続セルを用いてEdgeを整合させる手法は隣接格子セルとの分割レベル差が2以上になると適用できないという点から、隣接格子セル間の分割レベル差は最大でも1とする。即ち、ある格子セルを分割した際に、分割後の格子セルがその格子セルよりも分割レベルが2(手法上、3以上のレベル差が生じることはない)低い格子セルと隣接している場合、隣接している格子セルに対して(たとえ、この格子セルが分割判定基準を満たしていても)分割を行う。同様に、結合によって親セルに戻った格子セルがその格子セルよりも分割レベルが2高い格子セルと隣接している場合、この結合は認め

られず親セルは再び子セルに分割される。図2にこれらの特殊ケースの概念図を示す。ただし、図2中の数字は各格子セルの分割レベルを表す。図2(a)は、灰色で示した格子セルが詳細化され、分割レベルが1から2に上がった状態を示している。この状態では、隣接格子セル間の分割レベル差が2となっているため、図2(b)に示す通り、分割レベル0の格子セル(灰色の格子セル)を強制的に(分割判定を満たしていなくても)詳細化し、隣接格子セル間の分割レベル差を1にする。同様に、図2(c)では、灰色の格子セルを結合すると隣接格子セル間の分割レベル差が2となるため、この結合操作は取り消され、図2(d)のような(結合前の)格子が採用される。尚、図2(b)および図2(d)は、接続セルを形成した後の(Edge整合性を満たす)最終的な格子分割を表す。

2・4 格子セル分割法 Mavriplis⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾は、(単相流解析ではあるが)非構造解適合格子に関して多彩な格子セル分割パターンを記述している。本研究では、その中から Isotropic 分割と呼ばれる分割法を採用する。即ち、図3(a)に示す通り、3角形の格子セルに関しては、各 Edge 中点を新たな頂点とし、それらを結ぶ線分によって元の格子セルを4分割する。4角形の格子セルに関しては、各 Edge 中点と格子セル中心を新たな頂点とし、それらを結ぶ線分によって元の格子セルを4分割する [図3(b)]。Isotropic 分割を採用するのは、それ以外の分割指針を用いた場合に分割後の格子セル形状が大きく歪んでしまうことがあり、繰返し分割を行った場合に数値解析の精度が低下することを防止するためである。

2・5 接続セルの分割パターン 接続セルは、詳

Fig. 3 Cell subdivision method

細化セルと非詳細化セルの間に存在し、両者間で Edge の整合性を満足するように分割される。接続セルの形状が3角形の場合、3パターンの分割が考えられる。即ち、接続セルの各 Edge に関して、それぞれの Edge が分割されているか否か(それぞれの Edge を挟んで隣接する格子セルが詳細化セルか否か)によって、図4に示すような3通りに分割が行われる。ただし、各図中央の二重線で囲った格子セルが接続セル (Connection Cell) である。図4(a)および図4(b)は、接続セルに隣接する3つの格子セルのうち、それぞれ1つおよび2つが詳細化されている場合の接続セルを示したものである。また、図4(c)は、3つの隣接格子セル全てが詳細化されている場合の接続セルであり、この場合、接続セルは Isotropic 分割に等しい。一方、接続セルの形状が4角形の場合、図5に示す通り5パターンの分割が考えられる。3角形格子セルの場合と同様に、接続セルに隣接する5つの格子セルのうち、1つおよび3つが詳細化されている場合の接続セルを、それぞれ図5(a)および図5(d)に示す(各図中央の二重線で囲った格子セル)。また、2つの隣接格子セルが詳細化されている場合、詳細化されている隣接格子セルの位置関係により、図5(b)および図5(c)に示すような2種類の接続セルが形成される。隣接セル5つ全てが詳細化されている場合、図5(e)に示す通り、接続セルは Isotropic 分割に等しい。

2・6 格子分割・結合計算手順 格子の分割・結合(及び接続セル作成)は、解析コード内において以下

Fig. 4 Subdivision patterns for triangular connection cell

Fig. 5 Subdivision patterns for quadrilateral connection cell

の手順で実施される。

(1) 全ての接続セルを消去(子セルを結合して親セルに還元)し, Edge 整合性を満たさない(ただし, 隣接格子セル間での分割レベル差は1以下である)格子を再生(前回の格子操作において, 接続セルを形成する前の状態の格子), (2)アクティブな(子セルを持たない)格子セルに対して, 2・3節の条件によって格子分割・結合のフラグを付与, (3)ある(アクティブでない)親セルが持つ子セルが全て結合フラグを有する場合, それらの子セルを結合して親セルに還元(ただし, 結合後に隣接格子セルとの分割レベル差が2になる場合は結合を行わない), (4)分割フラグを有する全てのセルに対して格子分割計算を実施(この際, 隣接格子セルとの分割レベル差が2になる場合は隣接格子セルに対しても格子分割計算を実施), (5)格子セル境界において Edge 整合性を満たしていない格子セルにおいて, 2・5節の規則に従って接続セルを形成し, 全ての Edge が整合性を満足する格子を作成する。

3. 2次元非構造解適合格子法の検証

3・1 格子分割・結合手法の確認 2次元非構造

Fig. 6 Initial mesh subdivision (Applying refinement condition to grid cells in red square from first to fifth time step)

解適合格子法における格子分割・結合(及び接続セル作成)が正しく行われることを確認し, 格子セル境界における Edge 整合性を満たす格子分割・結合手法の構築が可能であることを確認するため, 3×3の領域を1×1の正方形格子で分割した格子系(図6)において格子分割・結合計算の検証を実施した。ただし, 本検証解析においては格子操作のみを行い, 速度・圧力等の物理量の計算は行わない。解析は10タイムステップ行い, 5ステップまでは, 初期格子配置(図6)における中心の格子内(図6中の太線で囲まれた灰色の領域)に存在する格子に対して分割(詳細化)条件を与え, 他の格子には何も条件を与えない。その後, 6ステップ以降では全ての格子セルに結合条件を与えた。

図7に解析結果を示す。5ステップまでは詳細化領域(図6中の太線で囲まれた灰色の領域)において格子の分割(Isotropic 分割)が行われており, 詳細化領域に接続する格子セルでは Edge の整合性を満足するために必要な接続セルが正しく形成されている。また, この際, 隣接格子セル間の分割レベル差が1以下となるように必要に応じて周囲格子セルにおいても Isotropic 分割が実施されている。6ステップ以降では格子の結合が行われるが, その際においても格子セル間の Edge 整合性を満足するように, 格子の結合を行った後で接続セルが正しく形成されている。また, この場合においても隣接格子セル間での分割レベル差が1以下となるよう, 結合すべき格子セルが適切に決定されている。本結果より, 2章で説明を行った格子分割・結合手法によって, 格子間の Edge 整合性を満足しながら格子分割・結合を行えることを確認した。

3・2 2次元 Driven Cavity 問題の解析 実際の流れ場の解析による検証並びに(渦によるガス巻込み現象解析への適用性確認を念頭に置いた)渦流れ場解析精度確認を行うために, 2次元 Driven Cavity 問題の解析を実施した。解析における基礎方程式は, 積分型の Navier-Stokes 方程式および連続の式であり,

Fig. 7 Simulation results of mesh manipulation (Refinement and coarsening)

Navier-Stokes 方程式の非定常項, 対流項および拡散項は, それぞれ, 1 次精度 Euler 陽解法, 2 次精度風上差分, 2 次精度中心差分 (Deferred-correction 法⁽²⁰⁾) を用いて離散化した。解析体系及び解析条件を図 8 に示す。解析体系は 1×1 の正方形形状であり, 上部の壁面が右方向に速度 1 で移動している。作動流体の物性は, 密度 ρ が 1.0, 粘性係数 μ が 1.0×10^{-3} であり, 以下の式で定義される。Reynolds 数が 1000 の条件を対象として解析を実施した。

$$Re = UL/\nu \dots \dots \dots (1)$$

ただし, U は上部壁面の移動速度 ($=1.0$), L は正方形の 1 辺の長さ ($=1.0$), ν は動粘性係数である。

渦流れ場の再現性を評価するため, 図 9 に示すよう

Fig. 8 Simulation conditions of two-dimensional driven cavity problem

Fig. 9 Velocity distribution of vortical flow in square cavity

Table 1 Simulation errors of driven cavity problem

	Mesh	Error
Structured	8 x 8 (64 Cells)	6.45×10^{-2}
	20 x 20 (400 Cells)	6.18×10^{-2}
	40 x 40 (1,600 Cells)	2.44×10^{-2}
	60 x 60 (3,600 Cells)	1.85×10^{-2}
Unstructured	Initial Mesh	7.04×10^{-2}
	Adaptive Mesh (2,931 Cells)	1.35×10^{-2}

Fig. 10 Initial mesh subdivision

に、体系中心を通る垂直線上の水平方向(x 方向)流速と体系中心を通る水平線上の垂直方向(y 方向)流速をプロットして比較を行った。また、水平線上の y 方向流速について、各プロット点に対して解析結果とGhiaらのDNS(Direct Numerical Simulation)結果⁽²¹⁾(256×256 の等間隔構造格子を使用)との差分を求め、それらの平均値を計算することで誤差を評価した(表1)。即ち、プロット点の数を N 、各プロット点の x 座標における解析結果及びDNS結果の y 方向流速をそれぞれ v_{sim}^n 及び v_{DNS}^n ($n=1, N$)とすると、解析結果の誤差を以下の式で定義した。

$$error = \frac{\sum_{n=1}^N |v_{sim}^n - v_{DNS}^n|}{N} \dots \dots \dots (2)$$

表1中には、比較のために、 8×8 、 20×20 、 40×40 、 60×60 の等間隔直交格子(構造格子)を用いた解析結果の誤差も示した。

図10に初期の格子分割を示す。初期の格子セル数は71(全て4角形セル)であり、かなり粗い格子分割となっている。また、低品質の解析格子においても、非構造解適合格子法を用いることで渦流れ場を再現できることを示すため、あえて大きく歪んだ格子分割を採用した。初期格子分割を用いて解析を行った(定常解を求めた)結果を、図9中のInitial Meshのプロットで示す。本解析結果とDNS結果との一致性は低く、実際、表1に示す通り、初期格子における解析結果は、

(a) Mesh subdivision at steady state

(b) Velocity distribution at steady state

Fig. 11 Simulation result on two-dimensional unstructured adaptive mesh

より少ない格子セル数($8 \times 8 = 64$)の構造格子における結果よりも解析誤差が大きい。このため、初期格子分割における歪みが渦流れ場の再現性を低下させていることは明らかである。

非構造解適合格子法を用いて解析を行う際、各格子セルにおける速度勾配の大きさ及び速度の大きさを格子分割の指標として用いた。即ち、速度勾配もしくは速度が大きいく程、格子セルが詳細化される計算アルゴリズムとした。尚、初期格子セルからの最大分割回数(最大分割レベル)は3である。非構造解適合格子法を用いた解析結果(定常状態における格子分割と速度ベクトル分布)を、図11に示す。正方形Cavity内に形成される渦に対して、速度勾配や速度が大きくなる箇所(上部の移動壁面近傍や右側壁面近傍の高流速領域など)に細かい格子が形成されており、渦流速場を高精度に捕らえることができています。一方、渦中心近傍や体系下側の角部など、速度勾配や速度が小さい領域は粗い格子分割となっており、両者間でEdge整合性を満足するように接続セルが形成されている。非構造

解適合格子法を用いた場合の x 方向及び y 方向流速分布を、図9の Adaptive のプロットで示す。解析結果はDNS解析結果と良く一致しており、非構造解適合格子法を用いることで局所的に高解像度の格子分割を行い、Driven Cavity 内の渦流速分布を再現することに成功している。また、表1に示す通り、非構造解適合格子法を用いた場合(最終的な定常状態における格子セル数は2931)の解析誤差は、より多くの格子セル数を有する 60×60 の構造格子(3600格子セル)における解析誤差よりも小さい。このことは、初期格子において歪んだ格子分割が行われていたとしても、適切な局所格子詳細化を行うことにより、少ない格子セル数で渦流れ場を再現できることを示している。また、非構造解適合格子法を用いた解析において、1タイムステップの解析時間に対して非構造解適合格子計算(格子分割・結合、接続セル作成、物理量再配分)に必要とする時間が占める割合は、 $1/6 \sim 1/5$ 程度であった。このため、速度場の計算時間(主として、BiCG-Stab法による圧力 Poisson 方程式の求解に要する時間)に対して非構造解適合格子計算時間は小さいが、一般的に解適合計算を毎タイムステップ行うことは無いため、例えば十ステップに一度行うとすると、全体の解析時間に占める非構造解適合格子計算の時間は、 $1/60 \sim 1/50$ となり、非構造解適合格子法を用いることによる解析時間の増加はわずかであることが分かる。

4. 結 言

ガス巻込み現象の解析を目的とした非構造格子系における高精度気液二相流数値解析手法構築の一環として、2次元非構造解適合格子法の開発と検証を行った。

2次元非構造解適合格子法の開発においては、非構造格子の利点である自由な格子分割を活用し、詳細化セルと非詳細化セルとの間に接続セルを作成することで、全ての格子セルにおいて Edge 整合性を満足する格子分割・結合手法を構築した。本手法は、構造格子系における解適合格子が持つ Hanging Node や Hanging Edge を持たないため、オリジナルの(解適合を用いない)解析アルゴリズムをそのまま用いて流体計算を行うことが可能である。本研究で開発した解適合格子法は、3次元体系へも拡張可能である。ただし、3次元体系において Edge 整合性(Face 整合性)を満たすためには、初期の格子分割に条件が課せられる(例えば、ある方向において格子分割の Topology が変化しないなどの条件が必要となる)。

検証問題によって格子分割・結合(及び接続セル作成)が正しく行われることを確認した後、2次元

Driven Cavity 問題の解析を行うことで渦流れ場への適用性を確認した。その結果、初期格子として粗くて歪んだ格子分割を採用したにも関わらず、2次元非構造解適合格子法を用いた解析によって、より多くの格子セル数を有する等間隔直交格子における解析結果以上にDNS結果と一致する結果が得られた。したがって、本研究で開発した格子分割・結合手法によって渦流れ場を再現できることが示された。

第2報では、2次元非構造解適合格子法の高精度気液二相流解析への適用と検証を実施する。

文 献

- (1) Hirt, W. and Nichols, D. B., Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 90 (1990), pp. 176-199.
- (2) Osher, S. and Sethian, J. A., Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations, *Journal of Computational Physics*, Vol. 79 (1988), pp. 12-49.
- (3) Trygvasson, G., Burner, B., Esmaeeli, A., Juric, D., Al-Rawahi, N., Tauber, W., Han, J., Nas, S. and Jan, Y.-J. I., Computations of Multi-Fluid Flows, *Physica D*, Vol. 60 (1985), pp. 422-435.
- (4) Yabe, T. and Xiao, F., Simulation Technique for Dynamical Evaluation Processes, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 115 (1995), pp. 45-53.
- (5) Anderson, D. M., McFadden, G. B., Wheeler, A. A., Diffuse-Interface Methods in Fluid Mechanics, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30 (1998), pp. 139-165.
- (6) Youngs, D. L., Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion, *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, (1982), pp. 273-486, Americal Press, New York.
- (7) Ito, K., Yamamoto, Y. and Kunugi, T., Development of Numerical Method for Simulation of Gas Entrainment Phenomena, *Proceedings of the 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, Sep. 30-Oct. 5, Pittsburg, PA, (2007).
- (8) Ito, K. and Kunugi, T., Examination of Appropriate Formulations for Velocity and Pressure Calculations Methods at Interfacial Region on Collocated Physical Variables' Distribution, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 74, No. 743 (2008), pp. 1512-1521.
- (9) Takahashi, K. and Tanahashi, T., Numerical Analysis of Unsteady Shock Waves Using Unstructured Adaptive Mesh Refinement (Development of Scheme for Sonic Flows with Shape Flexibility and Efficiency of Computer Memory), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 67, No. 664 (2001), pp. 2946-2954.
- (10) Vassberg, J. C., A Fast, Umplicit Unstructured-Mesh Euler Method, *AIAA 10th Applied Aerodynamics Conference*, June 22-24, Palo Alto, CA, (1992).
- (11) Silva, L. F. F., Azevedo, J. L. F. and Korzenowski, H., Unstructured Adaptive Grid Flow Simulations of Inert and Reactive Gas Mixtures, *Journal of Computational Physics*, Vol. 160 (2000), pp. 522-540.
- (12) Nakahashi, K., Ito, Y. and Togashi, F., Some Chal-

- lenges of Realistic Flow Simulations by Unstructured Grid CFD, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 43 (2003), pp. 769-783.
- (13) Yamakawa, M. and Matsuno, K., An Iterative Finite-Volume Method on an Unstructured Moving Grid (3rd Report, Unstructured Adaptive Mesh Refinement Method for Unsteady Problem), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 71, No. 712 (2005), pp. 2837-2842.
- (14) Murayama, M., Ito, Y., Nakahashi, K., Matsushima, K. and Iwamiya, T., Viscous Flow Computations of Aircraft with Changing Control Surface Deflection Using Unstructured Dynamic Meshes, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 52 (2006), pp. 925-940.
- (15) Mavriplis, D. J., Unstructured Grid Technique, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 29 (1997), pp. 473-514.
- (16) Mavriplis, D. J., Adaptive Meshing Techniques for Viscous Flow Calculations on Mixed Element Unstructured Meshes, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 34 (2000), pp. 93-111.
- (17) Biswas, R. and Strawn, R. C., Tetrahedral and Hexahedral Mesh Adaptation for CFD Problems, *Applied Numerical Mathematics*, Vol. 26 (1998), pp. 135-151.
- (18) Kallinderis, Y. and Kavouklis, C., A Dynamic Adaptation Scheme for General 3-D Hybrid Meshes, *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 194 (2005), pp. 5019-5050.
- (19) Holmes, D. G. and Connell, S. D., Solution of the 2D Navier-Stokes Equations on Unstructured Adaptive Grids, *AIAA*, Vol. 89, No. 1932-CP, (1989), pp. 25-39.
- (20) Muzafefija, P. A., Adaptive Finite Volume Method for Flow Predictions Using Unstructured Meshes and Multigrid Approach, PhD Thesis, Univ. of London, (1994).
- (21) Ghia, U., Ghia, K. N. and Shin, C. T., High-Re Solutions for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Method, *Journal of Computational Physics*, Vol. 48 (1982), pp. 387-411.