

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7102741号
(P7102741)

(45)発行日 令和4年7月20日(2022.7.20)

(24)登録日 令和4年7月11日(2022.7.11)

(51)国際特許分類 F I
G 0 6 F 30/23 (2020.01) G 0 6 F 30/23
G 0 6 F 30/28 (2020.01) G 0 6 F 30/28

請求項の数 6 (全21頁)

(21)出願番号	特願2018-4352(P2018-4352)	(73)特許権者	000003609 株式会社豊田中央研究所 愛知県長久手市横道4 1 番地の 1
(22)出願日	平成30年1月15日(2018.1.15)	(74)代理人	100079049 弁理士 中島 淳
(65)公開番号	特開2019-125102(P2019-125102 A)	(74)代理人	100084995 弁理士 加藤 和詳
(43)公開日	令和1年7月25日(2019.7.25)	(72)発明者	佐藤 範和 愛知県長久手市横道4 1 番地の 1 株式 会社豊田中央研究所内
審査請求日	令和2年10月8日(2020.10.8)	(72)発明者	稲垣 昌英 愛知県長久手市横道4 1 番地の 1 株式 会社豊田中央研究所内
		(72)発明者	牧野 総一郎 愛知県長久手市横道4 1 番地の 1 株式 最終頁に続く

(54)【発明の名称】 流体解析装置、流体解析方法、及び流体解析プログラム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

物体と、前記物体の周囲に流れ、かつ粘度が空間的に変化する流体と、を含む空間を前記物体と前記流体との境界に一致せず、かつ直交する複数の格子線により複数の要素で分割した数値計算対象モデルを定義するモデル定義部と、
前記モデル定義部で定義された数値計算対象モデルを用いて予め定めた方向に連続する前記境界を含む複数の要素各々における情報に基づいて、前記境界の予め定めた方向の流体の流れに関する前記流体の速度勾配を示す第 1 の物理量を、前記複数の格子線によりなる格子の中心点又は重心点から前記境界までの距離を用いて演算する第 1 演算部と、
前記第 1 演算部で演算された前記第 1 の物理量に基づいて、前記境界の前記予め定めた方向と交差する方向の流体の流れに関する前記流体の速度勾配を示す第 2 の物理量を、前記第 1 の物理量と前記境界で成立する予め定めた速度勾配に関する関係式とを用いて演算する第 2 演算部と、
前記第 1 演算部で演算された前記第 1 の物理量、及び前記第 2 演算部で演算された前記第 2 の物理量に基づいて、前記境界を含む予め定めた注目領域を流れる前記流体の挙動を導出する導出部と、
を備えた流体解析装置。

【請求項 2】

前記第 1 演算部は、前記第 1 の物理量を、
(I 、 J) を複数の格子線により分割される要素の前記予め定めた方向の位置及び前記

予め定めた方向と交差する方向の位置とし、予め定めた方向を x 方向とし、 b を (I, J) の位置の要素における中心点又は重心点を通る前記予め定めた方向の直線と前記境界との交点であることを示す情報とし、前記 x 方向の流体の速度勾配を $(u_i / x)_b$ とし、流速の x 成分を u とし、 x を要素の x 方向の幅とし、 x を格子の中心点又は重心点から前記境界までの幅を x で正規化した情報とすると、

【数 1】

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial x}\right)_b = \frac{-\epsilon_x^2 u_i|_{I+1,J} + (\epsilon_x + 1)^2 u_i|_{I,J} - (2\epsilon_x + 1)u_i|_b}{\epsilon_x(\epsilon_x + 1)\Delta x}$$

10

で表される式を用いて演算する

請求項 1 に記載の流体解析装置。

【請求項 3】

前記第 2 演算部は、前記第 2 の物理量を、

予め定めた方向と交差する方向を y 方向と z 方向とし、前記 y 方向と前記 z 方向の流体の速度勾配を $(u / y)_b$ と $(u / z)_b$ とし、前記境界における接線方向の単位ベクトルを s と t 、前記物体が運動する際の回転角速度ベクトルを とするとき、

【数 2】

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_b \\ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_y & s_z \\ t_y & t_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \omega_y s_z - \omega_z s_y - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_b s_x \\ \omega_y t_z - \omega_z t_y - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_b t_x \end{bmatrix}$$

20

で表される式を用いて演算する

請求項 2 に記載の流体解析装置。

【請求項 4】

前記予め定めた方向と交差する方向は、相互に直交し、かつ各々前記予め定めた方向と直交する 2 方向である

30

請求項 3 に記載の流体解析装置。

【請求項 5】

コンピュータが、

物体と、前記物体の周囲に流れ、かつ粘度が空間的に変化する流体と、を含む空間を前記物体と前記流体との境界に非適合で、かつ直交する複数の格子線により複数の要素で分割して定義された数値計算対象モデルを用いて予め定めた方向に連続する前記境界を含む複数の要素各々における情報に基づいて、前記境界の予め定めた方向の流体の流れに関する前記流体の速度勾配を示す第 1 の物理量を、前記複数の格子線によりなる格子の中心点又は重心点から前記境界までの距離を用いて演算し、

演算された前記第 1 の物理量に基づいて、前記境界の前記予め定めた方向と交差する方向の流体の流れに関する前記流体の速度勾配を示す第 2 の物理量を、前記第 1 の物理量と前記境界で成立する予め定めた速度勾配に関する関係式とを用いて演算し、

40

演算された前記第 1 の物理量、及び演算された前記第 2 の物理量に基づいて、前記境界を含む予め定めた注目領域を流れる前記流体の挙動を導出する流体解析方法。

【請求項 6】

コンピュータを、請求項 1 から請求項 4 の何れか 1 項に記載された流体解析装置として機能させるための流体解析プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

50

【 0 0 0 1 】

本発明は、流体解析装置、流体解析方法、及び流体解析プログラムに関する。

【 背景技術 】

【 0 0 0 2 】

従来よりコンピュータによって流体の流れを数値解析する数値流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics) を用いた技術が知られている。例えば、固体モデルと、有限要素でモデル化した流体モデルとを用いて、流体の流れを解析するにあたって、流体モデルのせん断応力を求める技術が提案されている (例えば、特許文献1参照)。この技術では、直交格子法の一例である *Immersed boundary (IB)* 法に基づき、ナビエ・ストークス (*Navier-Stokes*) の式により流体モデルの運動を表している。そして、固体モデルと流体モデルとの境界に作用する流体モデルのせん断応力を求めている。この境界上のせん断応力を算出する際には、流体領域の要素の重心点の情報を用いて、境界上の点から流体領域へ延ばした垂線上の点に速度を補間し、その値を用いて境界内側 (物体内部) の計算格子に仮想的な速度を外挿し、その値を参照して流れ場を計算する。

10

【 0 0 0 3 】

また、自動車や鉄道車両などの対象物に対する遮蔽板の流体力学的な影響を解析するため、計算格子中で物体が占める固体体積率を用いて流体と境界の速度差が0となるような仮想流体力を求め、求めた仮想流体力を用いて物体形状を表現する技術が提案されている (例えば、特許文献2参照)。この技術では、境界近傍の計算格子では速度を補間して求めている。

20

【 0 0 0 4 】

さらに流体と剛体の連成シミュレーションを簡易的に行う技術が提案されている (例えば、特許文献3参照)。この技術では、剛体の形状データをもとに計算格子に含まれる固体体積率を計算し、計算された固体体積率の値に基づいて剛体領域の計算格子に剛体運動の速度を付加し、流れ場を計算する。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 5 】

【 文献 】 特開 2014 - 102574 号公報

30

特開 2016 - 164706 号公報

特開 2004 - 21883 号公報

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 6 】

しかしながら、特許文献1の技術では、境界の内側の計算格子に流速を補間し、境界に隣接した計算格子でも境界から離れた計算格子と同じように式を離散化するが、補間操作に三次元の高次式を用いなければならず、外挿アルゴリズムが複雑になり、計算負荷が増大する。また、せん断応力の算出に流れ場の情報を用いた境界上の速度勾配を用いるが、得られる速度勾配は法線方向の勾配のみであり、境界上の三次元方向の速度勾配を求めることは困難である。特許文献2の技術は、計算格子中で物体が占める固体体積率を用いて仮想流体力を算出するため、実際の境界近傍における流れ場を扱うものではなく、境界近傍の流れ場の計算精度は低下する。特許文献3の技術も、固体体積率から剛体領域の計算格子を判定し、その計算格子に剛体運動から求まる速度を付加するため、実際の境界近傍における流れ場を扱うものではなく、境界近傍の流れ場の計算精度は低下する。従って、計算負荷を抑制しつつ簡単な構成で、高精度に流体の流れを解析する流体解析装置を提供することには改善の余地がある。

40

【 0 0 0 7 】

本発明は、上記事実を考慮してなされたもので、計算負荷を抑制しつつ簡単な構成で、高精度に流体の流れを解析することができる流体解析装置、流体解析方法、及び流体解析プ

50

プログラムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

上記目的を達成するために、本発明の流体解析装置は、
 物体と、前記物体の周囲に流れ、かつ粘度が空間的に変化する流体と、を含む空間を前記
 物体と前記流体との境界に一致せず、かつ直交する複数の格子線により複数の要素で分割
 した数値計算対象モデルを定義するモデル定義部と、
 前記モデル定義部で定義された数値計算対象モデルを用いて予め定めた方向に連続する前
 記境界を含む複数の要素各々における情報に基づいて、前記境界の予め定めた方向の流体
 の流れに関する前記流体の速度勾配を示す第1の物理量を、前記複数の格子線によりな
 る格子の中心点又は重心点から前記境界までの距離を用いて演算する第1演算部と、
 前記第1演算部で演算された前記第1の物理量に基づいて、前記境界の前記予め定めた方
 向と交差する方向の流体の流れに関する前記流体の速度勾配を示す第2の物理量を、前
 記第1の物理量と前記境界で成立する予め定めた速度勾配に関する関係式とを用いて演算
 する第2演算部と、
 前記第1演算部で演算された前記第1の物理量、及び前記第2演算部で演算された前記第
 2の物理量に基づいて、前記境界を含む予め定めた注目領域を流れる前記流体の挙動を導
 出する導出部と、
 を備えている。

10

【0009】

本発明の流体解析装置によれば、第1演算部は、空間を複数の要素で分割して定義された
 数値計算対象モデルを用いて予め定めた方向に連続する物体と流体との境界を含む複数の
 要素各々における情報に基づいて、境界の予め定めた方向の流体の流れに関する第1の
 物理量を演算する。第2演算部は、第1演算部で演算された第1の物理量に基づいて、境
 界の予め定めた方向と交差する方向の流体の流れに関する第2の物理量を演算する。導
 出部は、第1の物理量、及び第2の物理量に基づいて、境界を含む予め定めた注目領域を
 流れる流体の挙動を導出する。このように、境界の予め定めた方向の流体の流れに関係す
 る第1の物理量に基づき交差する方向の流体の流れに関する第2の物理量を演算するの
 で、計算負荷を抑制しつつ簡単な構成で、高精度に流体の流れを解析することができる。

20

【0010】

前記第1の物理量及び第2の物理量は、流体の速度勾配である。流体の挙動を正しく捉え
 るためには、境界の近傍においても流体の運動方程式に基づいて、流体の速度を特定する
 ことが好ましい。そのためには、境界近傍の流体の速度を求める際に、境界上における流
 体の速度勾配を用いることが好ましい。

30

【0011】

前記数値計算対象モデルは、直交する複数の格子線により複数の要素で分割されて定義さ
 れる。数値計算対象モデルは数値計算による解析を容易に行うことができ、かつ物体及び
 流体の領域を的確に表現することが好ましい。そこで、数値計算対象モデルを、直交する
 複数の格子線により複数の要素で分割して定義することで、各領域を容易に扱うことが
 できる。

40

なお、前記第1演算部は、前記第1の物理量を、
(I、 J) を複数の格子線により分割される要素の前記予め定めた方向の位置及び前記
予め定めた方向と交差する方向の位置とし、予め定めた方向を x 方向とし、 b を (I、 J
) の位置の要素における中心点又は重心点を通る前記予め定めた方向の直線と前記境界と
の交点であることを示す情報とし、前記 x 方向の流体の速度勾配を (u_i / x)_b と
し、流速の x 成分を u とし、 x を要素の x 方向の幅とし、 x_c を格子の中心点又は重心点
から前記境界までの幅を x_c で正規化した情報とすると、

【数24】

50

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial x}\right)_b = \frac{-\epsilon_x^2 u_i|_{I+1,J} + (\epsilon_x + 1)^2 u_i|_{I,J} - (2\epsilon_x + 1)u_i|_b}{\epsilon_x(\epsilon_x + 1)\Delta x}$$

で表される式を用いて演算することができる。

また、前記第2演算部は、前記第2の物理量を、

予め定めた方向と交差する方向をy方向とz方向とし、前記y方向と前記z方向の流体の速度勾配を $\left(\frac{u}{y}\right)_b$ と $\left(\frac{u}{z}\right)_b$ とし、前記境界における接線方向の単位ベクトルをsとt、前記物体が運動する際の回転角速度ベクトルを ω とするとき、

【数25】

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_b \\ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_y & s_z \\ t_y & t_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \omega_y s_z - \omega_z s_y - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_b s_x \\ \omega_y t_z - \omega_z t_y - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_b t_x \end{bmatrix}$$

で表される式を用いて演算することができる。

【0012】

前記予め定めた方向と交差する方向は、相互に直交し、かつ各々前記予め定めた方向と直交する2方向である。

流体の流れを把握するには流体の流れに関する3次元方向の速度成分を特定することが好ましい。そこで、予め定めた方向の速度勾配に加えて、相互に直交し、かつ各々前記予め定めた方向と直交する2方向の速度勾配を利用することにより、流体の流れの3次元方向の速度成分を的確に把握することができる。

【0013】

本発明の流体解析方法は、コンピュータが、

物体と、前記物体の周囲に流れ、かつ粘度が空間的に変化する流体と、を含む空間を前記物体と前記流体との境界に非適合で、かつ直交する複数の格子線により複数の要素で分割して定義された数値計算対象モデルを用いて予め定めた方向に連続する前記境界を含む複数の要素各々における情報に基づいて、前記境界の予め定めた方向の流体の流れに関する前記流体の速度勾配を示す第1の物理量を、前記複数の格子線によりなる格子の中心点又は重心点から前記境界までの距離を用いて演算し、

演算された前記第1の物理量に基づいて、前記境界の前記予め定めた方向と交差する方向の流体の流れに関する前記流体の速度勾配を示す第2の物理量を、前記第1の物理量と前記境界で成立する予め定めた速度勾配に関する関係式とを用いて演算し、演算された前記第1の物理量、及び演算された前記第2の物理量に基づいて、前記境界を含む予め定めた注目領域を流れる前記流体の挙動を導出する。

【0014】

本発明の流体解析プログラムは、コンピュータを、請求項1～請求項4の何れか1項に記載された流体解析装置として機能させる。

【発明の効果】

【0015】

以上説明したように本発明によれば、計算負荷を抑制しつつ簡単な構成で、高精度に流体の流れを解析することができる、という効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】実施形態に係る流体解析装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図2】直交格子を用いて物体領域と流体領域との境界を含む領域を分割した一例を示す

10

20

30

40

50

イメージ図である。

【図 3】剛体運動する二次元物体の一例を示すイメージ図である。

【図 4】二方向に境界を持つ場合の一例を示すイメージ図である。

【図 5】比較例の外挿法の説明図である。

【図 6】実施形態に係るコンピュータによる流体解析装置により流体解析方法を実行するための処理の流れの一例を示すフローチャートである。

【図 7】実施形態に係る流体解析装置で流体の流れを検証する第 1 の検証で検証対象とした流体が流れる物体の概略構造の一例を示すイメージ図である。

【図 8】第 1 の検証の検証結果を示すイメージ図である。

【図 9】比較法を含めた第 1 の検証の検証結果を示すイメージ図である。

10

【図 10】実施形態に係る流体解析装置で流体の流れを検証する第 2 の検証で検証対象とした流体が流れる物体の概略構造の一例を示すイメージ図である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、図面を参照して本発明に係る実施形態を説明する。

本実施形態は、剛体の移動によって作用する流体の流れを解析する場合の一例を説明する。

【0018】

図 1 に、本実施形態に係る流体解析装置 10 を、コンピュータにより実現する構成の一例を示す。

図 1 に示すように、流体解析装置 10 として動作するコンピュータは、CPU (Central Processing Unit) 12A、RAM (Random Access Memory) 12B、および ROM (Read Only Memory) 12C を備えた装置本体 12 を含んで構成されている。ROM 12C は、剛体の移動によって作用する流体の挙動をシミュレーションする各種機能を実現するための流体解析プログラム 12P を含んでいる。装置本体 12 は、入出力インターフェース (I/O) 12D を備えており、CPU 12A、RAM 12B、ROM 12C、及び I/O 12D は各々コマンド及びデータを授受可能なようにバス 12E を介して接続されている。また、I/O 12D には、キーボード及びマウス等の数値入力、文字入力及びコマンド入力を可能とする入力部 12F、画像表示を可能とする表示部 12G、外部装置と通信する通信部 12H、及び各種データを記憶する記憶部 12M が接続されている。

20

【0019】

装置本体 12 は、流体解析プログラム 12P が ROM 12C から読み出されて RAM 12B に展開され、RAM 12B に展開された流体解析プログラム 12P が CPU 12A によって実行されることで、流体解析装置 10 として動作する。なお、流体解析プログラム 12P は、流体の流れを解析する各種機能を実現するためのプロセスを含む (詳細は後述)。

30

【0020】

本実施形態では、粘性係数が空間的に変化する非ニュートン流体を、本実施形態に係る流体の一例として説明する。

【0021】

まず、本実施形態に係る流体解析装置 10 により流体の流れを数値解析することを可能とするために、流れ場を離散化して物体と流体との境界における速度勾配を導出する方法について説明する。

40

【0022】

流体の流れを解析する場合、流れ場の基礎方程式等を用いて流体の挙動を表現することが行われている。次に示す (1) 式及び (2) 式に本実施形態で用いる流れ場の基礎方程式の一例を示す。(1) 式は非圧縮性流体の連続の式を示し、(2) 式はナビエ・ストークスの式を示す。

【0023】

【数 1】

50

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad \dots (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad \dots (2)$$

【 0 0 2 4 】

ただし、(1)式中及び(2)式中の記号は次を示している。 u_i は流速、 p は圧力、 ρ は密度を示す。 τ_{ij} は粘性応力テンソルを示す。この粘性応力テンソル τ_{ij} は、粘度とひずみ速度テンソル D_{ij} を用いて次に示す(3)式で表すことができる。

【 0 0 2 5 】

【数2】

$$\tau_{ij} = 2\eta D_{ij} = \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots (3)$$

【 0 0 2 6 】

以下の説明では、上記の(3)式の右辺第1項、及び右辺第2項の各々の発散を取ったものを、それぞれ粘性項第1項、及び粘性項第2項と称する。

【 0 0 2 7 】

本実施形態では、境界に適合しない計算格子を用いて流体の流れを計算する解析手法を対象に説明する。本実施形態では、直交格子を用いて流体の流れを解析する。直交格子を用いて流体の流れを解析する技術の一例には、文献1(佐藤他、直交格子法における物体境界近傍の直接離散化法(速度場と圧力場の整合性を考慮した高精度化)、日本機械学会論文集B編 79(2013)605-621)に示す技術が挙げられる。

【 0 0 2 8 】

また、本実施形態では、空間離散化にコロケーション格子法を用いる。そして、境界に隣接した計算格子について基礎式を離散化する。以下の説明では、本実施形態に関連する粘性項に関する離散化について説明する。

【 0 0 2 9 】

図2に、直交格子を用いて物体領域2と流体領域3とを離散化した物体領域2と流体領域3との境界4を含む注目領域1を示す。図2に示す注目領域1は、X軸とY軸を通る二次元平面における物体領域2と流体領域3との一部の領域を示している。

【 0 0 3 0 】

図2に示すように、注目領域1は、物体領域2と流体領域3との境界4に適合しない計算格子を用いて複数の要素で定義される。物体領域2と流体領域3とを、直交格子を用いて分割、すなわち、直交する格子線5により分割した複数(図2の例では縦横に3×3の9個)の計算格子6で定義した場合を示している。計算格子6の各々には、流体の流れを解析する場合において、流体の速度、圧力又は温度等を計算する計算点7が定義される。計算点7は計算格子6内の何れの位置に定義してもよいが、計算格子6を代表する代表点として機能するので、計算格子6の中心点又は重心点を設定することが好ましい。本実施形態では、計算点7を計算格子6の中心点とした場合を説明する。

【 0 0 3 1 】

なお、以下の説明では、複数の計算格子6の各々を区別して説明する場合には、位置を示す識別符号を付した計算格子(I, J)と表記して説明する。

【 0 0 3 2 】

また、以下の説明では、図2に示すように、x方向に境界を持つ二次元の計算格子6を対象に、粘性項の離散化について説明する。すなわち、特定の計算格子6である計算格子(

10

20

30

40

50

(I , J) は、隣り合う計算格子 6 のうち x 方向の計算格子 (I - 1 , J) のみに境界 4 を持ち、y 方向には境界 4 を持たない。

【 0 0 3 3 】

ところで、粘度が空間的に一定であると仮定した場合、粘性項第 1 項のみを扱えばよいが、本実施形態では、粘度の空間分布を考慮して、粘性項第 2 項も含めて離散化を行う。図 2 の計算格子 (I , J) における粘性項第 1 項の離散化式は、次の (4) 式で表すことができる。

【 0 0 3 4 】

【数 3】

$$\left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\eta \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right]_{I,J} = \frac{1}{(\epsilon_x + 0.5)\Delta x} \left[\eta_{I+\frac{1}{2},J} \left(\frac{\delta u_i}{\delta x} \right)_{I+\frac{1}{2},J} - \eta_b \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right)_b \right] \dots (4)$$

$$+ \frac{1}{\Delta y} \left[\eta_{I,J+\frac{1}{2}} \left(\frac{\delta u_i}{\delta y} \right)_{I,J+\frac{1}{2}} - \eta_{I,J-\frac{1}{2}} \left(\frac{\delta u_i}{\delta y} \right)_{I,J-\frac{1}{2}} \right]$$

【 0 0 3 5 】

ただし、(4) 式中の記号は次を示している。 / x i は 2 次精度中心差分であることを示し、下付き添え字 b は、計算格子 (I , J) の計算点 7 を通る x 軸方向の直線と境界 4 との交点 (図 2 に三角形記号で示す位置、以下、境界点 8 という) における値であることを示す。

【 0 0 3 6 】

境界点 8 における x 方向の速度勾配 (u i / x) b は、次の (5) 式に示す片側 3 点差分式 (空間 2 次精度) によって求めることができる。

【 0 0 3 7 】

【数 4】

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right)_b = \frac{-\epsilon_x^2 u_i|_{I+1,J} + (\epsilon_x + 1)^2 u_i|_{I,J} - (2\epsilon_x + 1) u_i|_b}{\epsilon_x (\epsilon_x + 1) \Delta x} \dots (5)$$

【 0 0 3 8 】

次に、粘性項第 2 項を離散化する。離散化された粘性項第 2 項は、次の (6) 式で表すことができる。なお、流速 u i の x 成分が u であり、y 成分が v である。

【 0 0 3 9 】

【数 5】

$$\left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\eta \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]_{I,J} = \frac{1}{(\epsilon_x + 0.5)\Delta x} \left[\eta_{I+\frac{1}{2},J} \left(\frac{\delta u}{\delta x_i} \right)_{I+\frac{1}{2},J} - \eta_b \left(\frac{\partial u}{\partial x_i} \right)_b \right] \dots (6)$$

$$+ \frac{1}{\Delta y} \left[\eta_{I,J+\frac{1}{2}} \left(\frac{\delta v}{\delta x_i} \right)_{I,J+\frac{1}{2}} - \eta_{I,J-\frac{1}{2}} \left(\frac{\delta v}{\delta x_i} \right)_{I,J-\frac{1}{2}} \right]$$

【 0 0 4 0 】

上記の (6) 式の右辺第 1 項には、境界点 8 における x 方向の速度勾配 (u / x) b 、及び y 方向の速度勾配 (u / y) b が含まれる。従って、粘性項第 2 項を離散化するには、粘性項第 1 項の離散化式 ((4) 式) に現れた速度勾配 (u / x) b の他に、x 方向と異なる方向の速度勾配、すなわち速度勾配 (u / y) b が必要になる。ところが、y 方向の速度勾配は、境界点 8 から y 方向に延ばした直線上に計算点 7 が存在し

10

20

30

40

50

ないため、速度勾配 ($\nabla \mathbf{u} / \mathbf{x}$) の計算に用いた式 ((5) 式) と同じように求めることができない。

そこで、本実施形態では、境界点 8 における y 方向の速度勾配を、境界 4 上における速度勾配の関係式と、計算された x 方向の速度勾配とを用いて導出する。以下に、境界を持つ特定方向の速度勾配と異なる方向の速度勾配、すなわち、x 方向と異なる方向の速度勾配の導出について説明する。

【 0 0 4 1 】

ここでは、説明を簡単にするため、剛体運動する物体について速度勾配を導出する場合を説明する。剛体運動する物体では、物体表面上の境界点では、次の (7) 式及び (8) 式の関係が成り立つ。

【 0 0 4 2 】

【数 6】

$$\nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{s} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{s} \quad \dots(7)$$

$$\nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{t} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{t} \quad \dots(8)$$

【 0 0 4 3 】

ただし、(7) 式中及び (8) 式中の記号は次を示している。 $\nabla \mathbf{u}$ は速度勾配テンソル、 \mathbf{s} 、 \mathbf{t} は境界点 8 での接線方向 (二方向) の単位ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}$ は剛体運動の回転角速度ベクトルを示す。

【 0 0 4 4 】

ここで、(7) 式について図 3 を参照して説明する。

図 3 に、剛体運動する二次元物体の一例を示す。

【 0 0 4 5 】

図 3 に示すように、物体表面上の点 P とその近傍点 Q における速度ベクトル \mathbf{u}_P 、 \mathbf{u}_Q はそれぞれ次の (7 A) 式、及び (7 B) 式で表すことができる。

【 0 0 4 6 】

【数 7】

$$\mathbf{u}_P = \mathbf{u}_G + \boldsymbol{\omega}_G \times \mathbf{r}_P \quad \dots(7A)$$

$$\mathbf{u}_Q = \mathbf{u}_G + \boldsymbol{\omega}_G \times \mathbf{r}_Q = \mathbf{u}_G + \boldsymbol{\omega}_G \times (\mathbf{r}_P + h\mathbf{s}) \quad \dots(7B)$$

【 0 0 4 7 】

\mathbf{u}_G と $\boldsymbol{\omega}_G$ は剛体運動の速度ベクトルと角速度ベクトルであり、 \mathbf{r}_P と \mathbf{r}_Q は剛体の回転中心点 G から点 P、Q への位置ベクトルである。 \mathbf{s} は P Q 間の単位ベクトル (物体表面上の接線方向の単位ベクトル) であり、 h は P Q 間の距離である。(7 A) 式及び (7 B) 式により、P Q 間の速度勾配、すなわち剛体運動する物体表面上の \mathbf{s} 方向の速度勾配は、次に示す (7 C) 式で表すことができる。

【 0 0 4 8 】

【数 8】

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial s} = \frac{\mathbf{u}_Q - \mathbf{u}_P}{h} = \boldsymbol{\omega}_G \times \mathbf{s} \quad \dots(7C)$$

【 0 0 4 9 】

また、(7 C) 式はさらに、次に示す (7 D) 式で表すことができる。

【 0 0 5 0 】

【数 9】

$$\nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{s} = \boldsymbol{\omega}_G \times \mathbf{s} \quad \dots(7D)$$

10

20

30

40

50

【 0 0 5 1 】

なお、(8) 式についても同様のため、説明を省略する。

【 0 0 5 2 】

ここで、流速 u の成分について考えると上記の (7) 式、及び (8) 式はそれぞれ、(9) 式及び (10) 式で表すことができる。

【 0 0 5 3 】

【数 1 0】

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_b s_x + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_b s_y + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_b s_z = \omega_y s_z - \omega_z s_y \quad \dots(9)$$

10

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_b t_x + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_b t_y + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_b t_z = \omega_y t_z - \omega_z t_y \quad \dots(10)$$

【 0 0 5 4 】

ただし、(9) 式中及び (10) 式中の記号 s_x 、 s_y 、 s_z と、 t_x 、 t_y 、 t_z とは、それぞれ s と t の成分を示す。(9) 式及び (10) 式の x 方向の速度勾配 (u / x) $_b$ は (5) 式の外挿式によって既知と考えると、それ以外の成分である速度勾配 (u / y) $_b$ 、及び速度勾配 (u / z) $_b$ は、(9) 式、及び (10) 式の連立方程式から、次に示す (11) 式で表すことができる。

20

【 0 0 5 5 】

【数 1 1】

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_b \\ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_y & s_z \\ t_y & t_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \omega_y s_z - \omega_z s_y - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_b s_x \\ \omega_y t_z - \omega_z t_y - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_b t_x \end{bmatrix} \quad \dots(11)$$

【 0 0 5 6 】

同様に、流速 u と直交する方向の流速 v 、 w の速度勾配の y 、 z 成分についてもそれぞれ (12) 式及び (13) 式で表すことができる。

30

【 0 0 5 7 】

【数 1 2】

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_b \\ \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_y & s_z \\ t_y & t_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \omega_z s_x - \omega_x s_z - \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_b s_x \\ \omega_z t_x - \omega_x t_z - \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_b t_x \end{bmatrix} \quad \dots(12)$$

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_b \\ \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_y & s_z \\ t_y & t_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \omega_x s_y - \omega_y s_x - \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_b s_x \\ \omega_x t_y - \omega_y t_x - \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_b t_x \end{bmatrix} \quad \dots(13)$$

40

【 0 0 5 8 】

以上説明したように、境界点 8 について、 x 方向の速度勾配は、(5) 式を用いて導出でき、 y 方向及び z 方向の速度勾配は、(11) 式 ~ (13) 式を用いて導出できる。

【 0 0 5 9 】

なお、図 2 に示す例で、二次元 ($x - y$) 平面内の運動 (回転角速度) の場合は、(1

50

2) 式及び(13)式は、次の(14)式及び(15)式に示すように簡略化して表すことができる。

【数13】

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_b = -\omega - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_b \frac{s_x}{s_y} \quad \dots(14)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_b = \omega \frac{s_x}{s_y} - \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_b \frac{s_x}{s_y} \quad \dots(15)$$

10

【0060】

また、物体が静止している場合、又は物体運動が並進運動のみの場合には、回転角速度がゼロベクトルであり、(9)式及び(10)式の右辺は0となる。

【0061】

上記では、説明の便宜上、図2に示すx方向に速度勾配を持つ場合を説明したが、y、z方向に境界を持つ計算格子6の場合にも同様に離散化可能であることは勿論である。

【0062】

また、上記では、x方向のみに速度勾配を持つ場合(図2)を説明したが、複数の方向に境界を持つ場合についても、各方向に関して上記と同様の方法を独立に適用することができる。例えば、図4に示すように、x方向、及びy方向の二方向に境界4を持つ場合、x、yの各方向に関して上記と同様に適用することができる。

20

【0063】

本実施形態は境界4上の境界点8(図2の三角形記号の位置)において、差分参照点(流体計算点)が存在する方向の速度勾配(図2の場合は $(u/x)_b$)については流体計算点の情報を使った差分式から求め、その他の方向の速度勾配(図2の場合はy方向の速度勾配 $(u/y)_b$)については境界上で成り立つべき速度勾配の関係式を利用して求める。従って、y方向の速度勾配 $(u/y)_b$ は、x方向の速度勾配 $(u/x)_b$ と同じ空間精度が保証される。

【0064】

なお、上記の(9)式及び(10)式では「差分参照点が存在する方向の速度勾配 $(u/x)_b$ 」を2次精度の差分式((5)式)で求めたが、空間精度を変えることも可能である。例えば、1次精度の場合は(5)式の代わりに次の(5A)式を用いる。

30

【0065】

【数14】

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial x}\right)_b = \frac{u_i|_{IJ} - u_i|_b}{\epsilon_x \Delta x} \quad \dots(5A)$$

【0066】

本技術で得られた速度勾配は、流体の非ニュートン性を有する計算対象、粘度に温度依存性がある計算対象、LES(Large Eddy Simulation)など乱流モデルを使う計算対象など、粘性係数が空間的に分布する計算に広く利用可能である。また物体表面上での摩擦応力の算出時にも利用できる。

40

【0067】

ところで、境界点で速度勾配 $(u/y)_b$ を算出する一般的な方法として、境界近傍の流体領域の計算点で各座標軸方向の速度勾配を求めておき、それを境界点に外挿する方法(外挿法)が挙げられる。

ここで、外挿法により境界点における速度勾配を算出する方法を、比較例として説明する。例えば、図2に示す速度勾配 $(u/y)_b$ に関して空間2次精度の外挿式を適用した場合は、(16)式で表すことができる。

50

【 0 0 6 8 】

【 数 1 5 】

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_b &= \frac{\epsilon_x(\epsilon_x + 1)}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{I+2,J} - \epsilon_x(\epsilon_x + 2) \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{I+1,J} \\ &\quad + \frac{(\epsilon_x + 1)(\epsilon_x + 2)}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{I,J} \end{aligned} \quad \dots(16)$$

10

【 0 0 6 9 】

上記の(16)式の右辺の速度勾配は、次に示す(17)式から(19)式を用いて算出することができる。

【 0 0 7 0 】

【 数 1 6 】

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{I,J} = \frac{u_{I,J+1} - u_{I,J-1}}{2\Delta y} \quad \dots(17)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{I+1,J} = \frac{u_{I+1,J+1} - u_{I+1,J-1}}{2\Delta y} \quad \dots(18)$$

20

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{I+2,J} = \frac{u_{I+2,J+1} - u_{I+2,J-1}}{2\Delta y} \quad \dots(19)$$

【 0 0 7 1 】

図5に、比較例の外挿法を適用する場合の物体領域2と流体領域3との境界4を含む注目領域1を示す。

【 0 0 7 2 】

図5に示すように、比較例の外挿法を適用した場合、本実施形態に係る速度勾配を導出する方法に比べて、多い個数の計算点を要する。すなわち、上記の(17)式から(19)式に示すように、比較例の外挿法では、速度勾配 $(u/y)_b$ の算出に図5に黒丸記号で示す合計7個の計算点の情報が必要となる。一方、本実施形態に係る速度勾配を導出する方法では、(5)式の差分式と解析的な関係式だけで速度勾配 $(u/y)_b$ を導出することができるため、図5にX記号で示す合計3個の計算点の情報のみで良い。また、本実施形態では、(5)式を用いた場合に、2次外挿法と同じ空間2次精度が得られる。すなわち、本実施形態に係る速度勾配を導出する方法は外挿法に比べて少ない計算点の情報で同等の精度を得ることができる。さらに、補間操作を最小限にすることによって計算の安定性も大幅に向上し、2次外挿法に比べて大きな時間刻みで安定に計算ができ、計算時間の短縮も達成される。

30

40

【 0 0 7 3 】

次に、上記説明した速度勾配を導出する方法を基にして、流体解析装置10において実行される、剛体の移動によって作用する流体の挙動のシミュレーション、すなわち、剛体の移動によって作用する流体の流れを解析する流体解析方法を説明する。コンピュータで実現した流体解析装置10のROM12Cには、本実施形態に係る流体解析方法を実行するための処理の流れ(プロセス)が流体解析プログラム12Pとして記憶されている。

【 0 0 7 4 】

図6には、本実施形態に係る流体解析方法を実行するための処理の流れの一例が示されている。装置本体12では、流体解析プログラム12PがROM12Cから読み出されてR

50

A M 1 2 Bに展開され、R A M 1 2 Bに展開された流体解析プログラム 1 2 PをC P U 1 2 Aが実行する。

【 0 0 7 5 】

まず、ステップ S 1 0 0では、計算格子 6、計算条件、及び初期値を示す情報の取得処理が実行される。

【 0 0 7 6 】

計算格子 6を示す情報は、物体領域 2と流体領域 3とを分割する直交格子、すなわち、直交する格子線 5の間隔が定義された情報である。この計算格子 6に関する情報は、R O M 1 2 C又は記憶部 1 2 Mに記憶される。また、計算条件を示す情報は、本実施形態で流体の流れを数値解析する場合の条件である。計算条件の一例には、物体モデルの流体モデルに対する位置情報、及び物体モデルの動きを定義する角速度等の情報、及び流体モデルの計算条件の一例には、流体モデルの境界条件、速度場計算の収束条件、及び反復回数等の予め定めた情報が含まれる。計算条件は、R O M 1 2 C又は記憶部 1 2 Mに記憶される。また、初期値を示す情報は、本実施形態で流体の流れを数値解析する場合の最初の各種状態を示す情報である。初期値の一例には、物体モデルの解析当初の動きを定義する角速度等の情報、及び、流体の当初の速度、圧力及び温度等の情報が挙げられる。

10

【 0 0 7 7 】

また、ステップ S 1 0 0では、物体を示す物体モデル、及び流体を示す流体モデルも取得する。

【 0 0 7 8 】

物体モデルは、物体として例えば、剛体（非流体物）の構造を定義したモデルである。なお、物体モデルは、数値解析法により取り扱い可能な有限個の要素でモデル化することで定義してもよい。また、物体モデルには、座標値及び材料特性（例えば、粘度、密度、及び材質等）などの数値データが定義される。これらの数値は、R O M 1 2 C又は記憶部 1 2 Mに記憶される。

20

【 0 0 7 9 】

流体モデルは、物体の外側で流体が流れる空間の構造を定義したモデルである。なお、流体モデルは、数値解析法により取り扱い可能な有限個の要素でモデル化することで定義してもよい。また、流体モデルには、座標値及び材料特性（例えば、粘度、密度、及び材質）などの数値データが定義される。これらの数値は、R O M 1 2 C又は記憶部 1 2 Mに記憶される。

30

【 0 0 8 0 】

さらに、ステップ S 1 0 0では、取得した情報を用いて物体と流体とを含む解析対象の全領域を定義する処理を実行する。すなわち、物体モデルによる物体領域 2、流体モデルによる流体領域 3、及び物体領域 2と流体領域 3との境界 4を含む全領域について、直交格子を用いて分割、すなわち、直交する格子線 5により分割した複数の計算格子 6で定義する処理が実行される。なお、計算格子 6の各々には、計算点 7の位置も定義される。従って、ステップ S 1 0 0は、物体と、物体の周囲に流れる流体とを含む空間を複数の要素で分割した数値計算対象モデルを定義するモデル定義部として動作する機能を有する。

【 0 0 8 1 】

次に、ステップ S 1 0 2では、境界の移動に関する処理を実行する。このステップ S 1 0 2の処理は、物体が時々刻々と位置が移動する場合に伴って移動する境界 4の位置を定義する処理である。従って、物体の位置が固定の場合は、ステップ S 1 0 2は省略される。また、本処理ルーチンの実行当初は、ステップ S 1 0 2では、初期値を用いればよい。

40

【 0 0 8 2 】

次のステップ S 1 0 4では、境界 4と計算格子 6の計算点 7との交点である境界点 8の抽出処理を実行する。このステップ S 1 0 4では、境界 4を含む計算格子 6の各々について境界点 8を抽出する演算が行われる。

【 0 0 8 3 】

次のステップ S 1 0 6では、ステップ S 1 0 4で抽出された境界点 8の各々における境界

50

面上の接線方向の単位ベクトルを算出する処理を実行する。すなわち、上記の(7)式、及び(8)式を用いて、境界点8の各々における境界面上の接線方向の単位ベクトルを各々演算する。

【0084】

次のステップS108では、境界点8の各々における一方向の速度勾配を計算する処理を実行する。すなわち、例えば、上記の(5)式を用いた片側3点差分式(空間2次精度)によって、境界点8におけるu成分のx方向の速度勾配(u_i / x)_bと、v成分のx方向の速度勾配(v_i / x)_bと、w成分のx方向の速度勾配(w_i / x)_bと、を各々演算する。

【0085】

次のステップS110では、境界点8の各々における残存方向の速度勾配を計算する処理を実行する。すなわち、上記の(11)式から(13)式を用いて、u成分の速度勾配(u / y)_b、及び速度勾配(u / z)_bと、v成分の速度勾配(v / y)_b、及び速度勾配(v / z)_bと、w成分の速度勾配(w / y)_b、及び速度勾配(w / z)_bと、を各々演算する。

【0086】

次のステップS112では、流体の速度場、及び圧力場を計算する処理を実行する。すなわち、ステップS108で求めた境界点8の各々における一方向の速度勾配、及びステップS110で求めたその他の方向の速度勾配を用いて、上記の(1)式から(3)式によって、流体の速度場、及び圧力場を演算する。

【0087】

次のステップS114では、終了判断処理を実行し、肯定判断の場合はステップS116へ処理を移行し、否定判断の場合は、ステップS102へ処理を戻す。ステップS114の終了は、速度場計算の収束条件、ステップS102からステップ112の処理の反復回数、及び計算開始からの経過時間等の予め定めた情報に基づいて判断される。

【0088】

次のステップS116では、ステップS112の計算結果を出力する処理を実行する。ステップS116では、ステップS112で求めた流体の速度場、及び圧力場の計算結果をそのまま出力してもよく、ステップS112で求めた流体の速度場、及び圧力場の計算結果に基づいて流体の流れの速度、及び圧力等の物理量を演算し、演算結果を出力してもよい。

【0089】

このように、本実施形態によれば、剛体の移動によって作用する流体の速度勾配を求めて流体の挙動をシミュレーションすることができる。すなわち、外挿法に比べて少ない計算点の情報で高精度に流体の流れを解析することができる。

【0090】

ここで、本実施形態に係る流体解析装置10における流体の流れの解析を検証する。第1の検証では、粘性係数が空間的に変化する非ニュートン流体を対象として、同軸二重円筒間に流れる流体における流体の流れの精度検証を行う。

【0091】

図7に、第1の検証で検証対象とした流体が流れる物体(剛体)の概略構造の一例を示す。

【0092】

図7に示すように、検証対象の領域20は、内径 $r_i = KR$ 、外径 $r_o = R$ の流路22を備えた物体領域と、その流路22を流れる流体領域とを含む。詳細には、流路22の外周側の半径をRとしたとき、x方向に $0.2R$ 、y方向及びz方向にそれぞれ $2.4R$ とし、y-z面内の計算領域の中央に内径 $r_i = KR$ 、外径 $r_o = R$ の同軸二重円筒間流路が形成された流路22からなる領域を検証対象の領域20とする。

【0093】

なお、内径と外径の半径比Kは 0.6 とする。壁面はすべりなし条件とし、流路22内の流れは周方向に付加した平均圧力勾配 dp/d によって駆動される。検証対象の領域2

10

20

30

40

50

0 の x 方向の両端面には周期条件を課す。非ニュートンモデルは、次の (20) 式で表される Ostwald-de Waele モデル (べき乗則モデル) を用いる。

【0094】

【数17】

$$\eta = \eta_0 (2D_{ij} D_{ij})^{\frac{n-1}{2}} \quad \dots (20)$$

【0095】

粘度 η は、 $n = 1$ (ニュートン流体) の場合を除き、流れ場の速度勾配に依存して空間的に変化する。

【0096】

第1の検証における検証対象である同軸二重円筒間の流路22を流れる流体の挙動(流れ)には、解析解が存在する。解析解は、次に示す(21)式により求めることができる。

【0097】

【数18】

$$u_{\theta}^* = \begin{cases} \left[\frac{r}{R} \int_K^{\frac{r}{R}} \left[\left(\frac{\lambda^2}{\xi^2} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{\xi} \right] d\xi \right] & K \leq \frac{r}{R} \leq \lambda \\ \left[\frac{r}{R} \int_{\frac{r}{R}}^1 \left[\left(1 - \frac{\lambda^2}{\xi^2} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{\xi} \right] d\xi \right] & \lambda \leq \frac{r}{R} \leq 1 \end{cases} \quad \dots (21)$$

【0098】

ただし、(21)式中の記号 u^* は無次元化された周方向流速である。

【0099】

上記の(21)式は以下のようにして導出できる。

層流域の同軸二重円筒間流れに関するナビエ・ストークス方程式は、円筒座標系では、次に示す(21a)式で表すことができる。

【0100】

【数19】

$$0 = -\frac{1}{r} \frac{d\bar{p}}{d\theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) \quad \dots (21a)$$

【0101】

粘性応力 $\tau_{r\theta}$ は、べき乗則モデルを用いた場合には、次に示す(21b)式で表すことができる。

【0102】

【数20】

$$\tau_{r\theta} = \eta_0 |\gamma_{r\theta}|^{n-1} \gamma_{r\theta} \quad \dots (21b)$$

【0103】

ただし、(21b)式中の記号 $\gamma_{r\theta}$ はせん断速度であり、周方向流速 u_{θ} との間に次の(21c)式に示す関係が成り立つ。

【0104】

【数21】

$$\gamma_{r\theta} = r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_{\theta}}{r} \right) \quad \dots (21c)$$

10

20

30

40

50

【 0 1 0 5 】

上記の (2 1 a) 式から (2 1 c) 式を解くことにより、無次元化された周方向流速 u^* の解析解は (2 1) 式に示すように導出できる。この解析解を導出する技術の一例には、文献 2 (N. Prasanth, U.V. Shenoy, " Poiseuille flow of a power-law fluid between coaxial cylinders ", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 46 (1992), p p. 1189-1194.) に記載された技術がある。

【 0 1 0 6 】

上記 (2 1) 式における無次元化された周方向流速 u^* と、有次元の流速 u との間は、次の (2 2) 式に示す関係を有する。

【 0 1 0 7 】

【 数 2 2 】

$$u_{\theta}^* = \frac{u_{\theta}}{R} \left[\frac{1}{2\eta_0} \left(-\frac{d\bar{p}}{d\theta} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad \dots(22)$$

【 0 1 0 8 】

ただし、(2 1) 式中の記号 ξ はせん断応力が 0 となる位置の半径距離である。なお、 $r/R = \xi$ での流速分布の連続性は、次に示す (2 3) 式の関係から求めることができる。

【 0 1 0 9 】

【 数 2 3 】

$$\int_K^{\lambda} \left[\left(\frac{\lambda^2}{\xi^2} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{\xi} \right] d\xi - \int_{\lambda}^1 \left[\left(1 - \frac{\lambda^2}{\xi^2} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{\xi} \right] d\xi = 0 \quad \dots(23)$$

【 0 1 1 0 】

図 8 に、流体解析装置 1 0 を用いて第 1 の検証を行った検証結果を示す。図 8 では、格子間隔 $0.02R$ の条件について、各べき指数 n での周方向流速 u の半径方向の分布を打点 (図 8 に示す黒丸) で示している。また、上記の (2 1) 式により求めた解析解の分布を実線で示している。

【 0 1 1 1 】

図 8 に示すように、流体解析装置 1 0 を用いて非ニュートン流体の流れの解析する流体解析方法である本手法により予測された速度分布は、半径方向の何れの位置 (何れの n) についても解析解と適合している。

【 0 1 1 2 】

図 9 に、流体解析装置 1 0 を用いて第 1 の検証を行った検証結果と、外挿により流体の流れの解析する比較法の検証結果とを示す。図 9 では、 $n = 0.5$ 、格子間隔 $0.08R$ (低格子解像度) の条件について、周方向流速 u の半径方向の分布が示されている。

【 0 1 1 3 】

図 9 に示す検証結果で用いた外挿により流体の流れの解析する比較法は、一般的な解析方法の一例として、線形補間に基づく *Immersed boundary (IB)* 法による流体の流れの解析する方法を比較法として用いている。この比較法の技術の一例には、特許文献 1 の技術、及び文献 3 (R. Mittal et al., A versatile sharp interface immersed boundary method for incompressible flows with complex boundaries, J. Comput. Phys. 227 (2008) 4827-4825.) に記載された技術がある。文献 3 の技術では、境界上の流速と周囲の流体計算点の流速を用いて境界の内側 (物体内部) の計算格子に仮想的な流速を外挿し、境界に隣接する計算格子ではそれらを用いることで境界から離れた計算格子と同様に流体の基礎式を離散化して計算している。

【 0 1 1 4 】

図 9 に示すように、比較法では、流速分布が解析解から乖離するのに対し、本手法では解

10

20

30

40

50

析解に適合した結果が得られている。

【 0 1 1 5 】

次に、本実施形態に係る流体解析装置 1 0 における流体の流れの解析を検証した第 2 の検証について説明する。

第 2 の検証では、流体の流れとして、剛体運動する物体周りの流れ場を対象に検証を行った。

【 0 1 1 6 】

図 1 0 に、第 2 の検証で検証対象とした流体が流れる物体（剛体）の概略構造の一例を示す。

【 0 1 1 7 】

図 1 0 に示すように、検証対象の領域 3 0 は、筒内 3 2 を同じ方向に一定回転する剛体を含む物体領域と、その筒内 3 2 を流れる流体領域とを含む。詳細には、筒内 3 2 で剛体運動する物体は、同じ方向に一定回転するスクリュ（図 1 0 に斜線で示した領域の物体）であり、スクリュの回転によって周囲の流体が流動する。流体は溶融した樹脂相当の粘度特性とし、Cross モデルで樹脂の非ニュートン性を考慮した。計算格子は直交等間隔であり、約 0 . 0 6 mm とした。スクリュの長径は約 1 5 mm、回転数は 2 0 0 r p m であり、このときの長径端部での最大周速は約 0 . 1 5 7 m / s である。

【 0 1 1 8 】

第 2 の検証では、流体解析装置 1 0 を用いて非ニュートン流体の流れの解析する流体解析方法である本手法による解析において、安定に計算できる計算時間刻みの上限値は、外挿による比較法を用いて解析した場合の約 7 倍の結果となり、計算時間が大幅に短縮された。

【 0 1 1 9 】

本実施形態に係る流体解析装置 1 0 は、開示の技術の流体解析装置の一例である。また、図 6 に示すステップ S 1 0 0 処理は、モデル定義部で実行される機能の一例である。また、ステップ S 1 0 8 の処理は、第 1 演算部で実行される機能の一例であり、ステップ S 1 1 0 の処理は、第 2 演算部で実行される機能の一例であり、ステップ S 1 1 2 の処理は、導出部で実行される機能の一例である。

【 0 1 2 0 】

なお、本実施形態に係る流体解析装置 1 0 に含まれる装置本体 1 2 は、構成する各構成要素を、上記で説明した各機能を有する電子回路等のハードウェアにより構築してもよく、構成する各構成要素の少なくとも一部を、コンピュータにより当該機能を実現するように構築してもよい。

【 0 1 2 1 】

また、本発明を実施の形態を用いて説明したが、本発明の技術的範囲は上記実施の形態に記載の範囲には限定されない。発明の要旨を逸脱しない範囲で上記実施の形態に多様な変更または改良を加えることができ、当該変更または改良を加えた形態も本発明の技術的範囲に含まれる。また、本明細書に記載された全ての文献、特許出願及び技術規格は、個々の文献、特許出願及び技術規格が参照により取り込まれることが具体的かつ個々に記された場合と同程度に、本明細書中に参照により取り込まれる。

【 符号の説明 】

【 0 1 2 2 】

1 0 流体解析装置
 1 2 装置本体
 1 2 A C P U
 1 2 B R A M
 1 2 C R O M
 1 2 P 流体解析プログラム

10

20

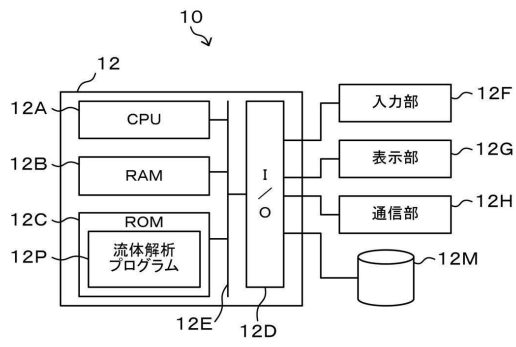
30

40

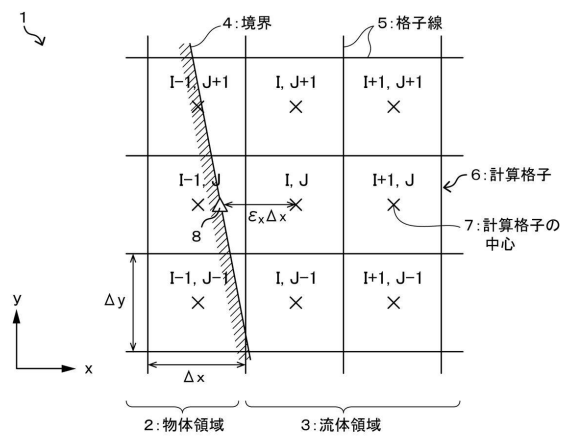
50

【図面】

【図1】

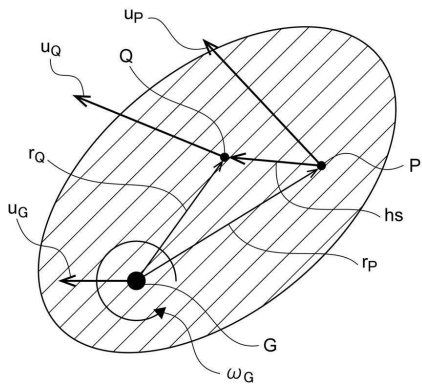


【図2】

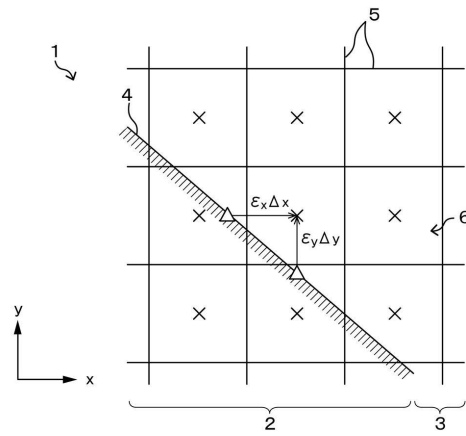


10

【図3】



【図4】



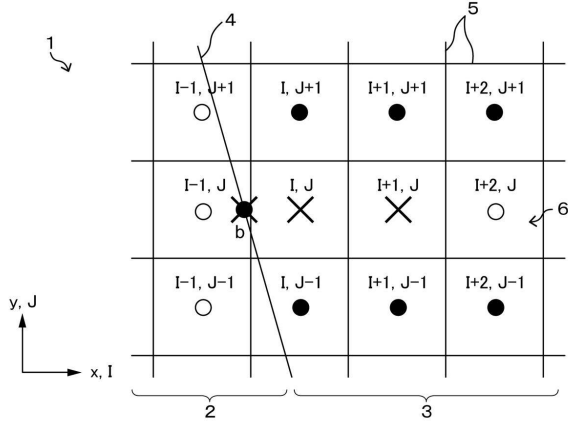
20

30

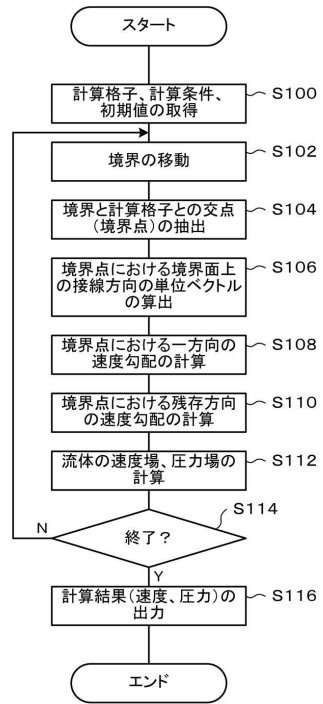
40

50

【図5】



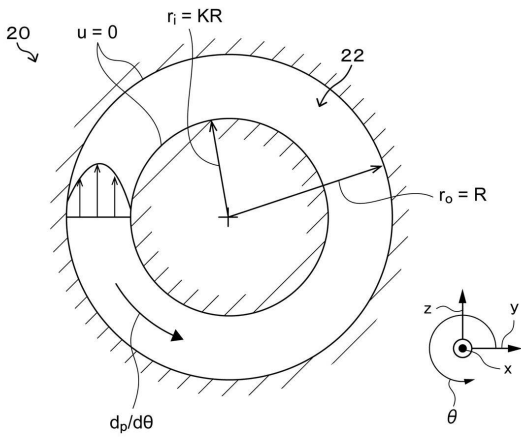
【図6】



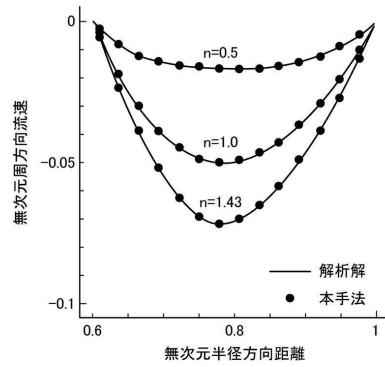
10

20

【図7】



【図8】

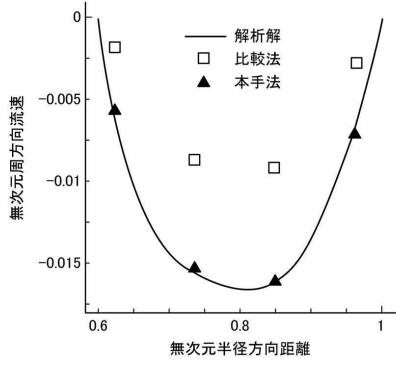


30

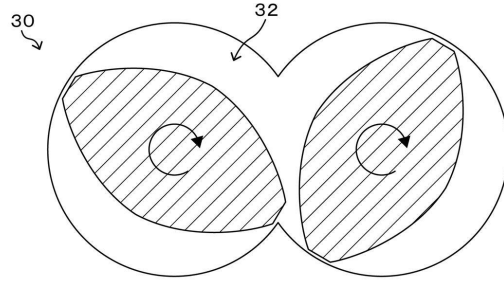
40

50

【 図 9 】



【 図 10 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

会社豊田中央研究所内

(72)発明者 笹山 俊貴

愛知県長久手市横道4-1番地の1 株式会社豊田中央研究所内

審査官 松浦 功

(56)参考文献 特開2004-012248(JP,A)

特開2014-102574(JP,A)

米国特許出願公開第2013/0013277(US,A1)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

G06F 30/00 - 30/28