

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6098190号
(P6098190)

(45) 発行日 平成29年3月22日(2017.3.22)

(24) 登録日 平成29年3月3日(2017.3.3)

(51) Int.Cl. F 1
G 0 6 F 19/00 (2011.01) G 0 6 F 19/00 1 1 0

請求項の数 5 (全 20 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2013-16206 (P2013-16206) (22) 出願日 平成25年1月30日(2013.1.30) (65) 公開番号 特開2014-146302 (P2014-146302A) (43) 公開日 平成26年8月14日(2014.8.14) 審査請求日 平成27年10月7日(2015.10.7)</p>	<p>(73) 特許権者 000005223 富士通株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 (74) 代理人 100089118 弁理士 酒井 宏明 (72) 発明者 風間 正喜 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内 審査官 宮地 匡人</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 シミュレーションプログラム、シミュレーション方法及びシミュレーション装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

コンピュータに、

液体及び固体を含む連続体を複数の粒子で表した場合における前記複数の粒子のそれぞれのうち、第1の時間における液体の粒子について、第1の時間よりも後の第2の時間における状態を計算させ、

前記第2の時間における状態に基づいて、前記第1の時間における液体の粒子が、前記第2の時間に第1の固体の粒子となったか否かを判定させ、

前記第1の時間における液体の粒子が、前記第2の時間に前記第1の固体の粒子となったと判定された場合、予め各粒子について設定される、各粒子の位置、物理量、状態および固体番号に基づき、前記第1の固体の粒子と、前記第1の固体の粒子から所定範囲内に存在する第2の固体の粒子を含む固体に属する全ての粒子とに同一の固体番号を設定させ

10

、
 剛体の運動方程式を用いて、前記同一の固体番号を設定された粒子のそれぞれの状態を計算させることを特徴とするシミュレーションプログラム。

【請求項2】

前記コンピュータに、

前記第1の固体の粒子と、前記第2の固体の粒子を含む固体に属する全ての粒子とを同一の固体に属する粒子と定義させる場合、前記第1の固体の粒子から所定範囲内に存在する第2の固体の粒子が属する固体が複数存在する場合、前記第1の固体の粒子と、前記第

20

2の固体の粒子が属する複数の固体に属する全ての粒子とを同一の固体に属する粒子と定義させることを特徴とする請求項1記載のシミュレーションプログラム。

【請求項3】

前記シミュレーションプログラムはさらに、

前記コンピュータに、

前記複数の粒子のそれぞれのうち、第3の時間における固体の粒子について、第3の時間よりも後の第4の時間における状態を計算させ、

前記第4の時間における状態に基づいて、前記第3の時間における固体の粒子が、前記第4の時間に第1の液体の粒子となったかを判定させ、

前記第3の時間における固体の粒子が、前記第4の時間に前記第1の液体の粒子となったと判定された場合、前記第3の時間において固体の粒子を含む固体に属する全ての粒子のそれぞれについて、前記第3の時間において固体の粒子を含む固体に属する全ての粒子と、前記第3の時間において固体の粒子を含む固体に属する全ての粒子のそれぞれの所定範囲内に存在する他の粒子とを同一の固体に属する粒子と定義させ、

剛体の運動方程式を用いて、前記同一の固体に属する粒子のそれぞれの状態を計算させることを特徴とする請求項1または2記載のシミュレーションプログラム。

【請求項4】

コンピュータが、

液体及び固体を含む連続体を複数の粒子で表した場合における前記複数の粒子のそれぞれのうち、第1の時間における液体の粒子について、第1の時間よりも後の第2の時間における状態を計算し、

前記第2の時間における状態に基づいて、前記第1の時間における液体の粒子が、前記第2の時間に第1の固体の粒子となったか否かを判定し、

前記第1の時間における液体の粒子が、前記第2の時間に前記第1の固体の粒子となったと判定された場合、予め各粒子について設定される、各粒子の位置、物理量、状態および固体番号に基づき、前記第1の固体の粒子と、前記第1の固体の粒子から所定範囲内に存在する第2の固体の粒子を含む固体に属する全ての粒子とに同一の固体番号を設定し、

剛体の運動方程式を用いて、前記同一の固体番号を設定された粒子のそれぞれの状態を計算することを特徴とするシミュレーション方法。

【請求項5】

液体及び固体を含む連続体を複数の粒子で表した場合における前記複数の粒子のそれぞれのうち、第1の時間における液体の粒子について、第1の時間よりも後の第2の時間における状態を計算するとともに、剛体の運動方程式を用いて、同一の固体番号を設定された粒子のそれぞれの状態を計算する計算部と、

前記第2の時間における状態に基づいて、前記第1の時間における液体の粒子が、前記第2の時間に第1の固体の粒子となったかを判定する判定部と、

前記第1の時間における液体の粒子が、前記第2の時間に前記第1の固体の粒子となったと判定された場合、予め各粒子について設定される、各粒子の位置、物理量、状態および固体番号に基づき、前記第1の固体の粒子と、前記第1の固体の粒子から所定範囲内に存在する第2の固体の粒子を含む固体に属する全ての粒子とに同一の固体番号を設定する定義部と

を有することを特徴とするシミュレーション装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、シミュレーションプログラム、シミュレーション方法及びシミュレーション装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、流体や弾性体等の連続体の運動を解く数値計算の手法として、格子をベースにし

10

20

30

40

50

て微分方程式の近似解を求解する有限差分法や有限要素法、有限体積法などが用いられている。また、近年では、数値計算をC A E (Computer Aided Engineering)等の応用分野で活用するため、連続体の状態を解く数値計算の手法も発展し、流体と構造物とが相互作用する問題が解かれる。しかしながら、格子を用いる数値計算の手法では、自由表面等の界面の存在する問題や、流体と構造物とを連成して解く流体構造連成解析問題などの移動境界が発生する場合には、連続体の取り扱いが複雑になるため、プログラム作成が困難になる場合がある。

【0003】

ここで、格子を用いない数値計算の手法として、粒子法がある。粒子法とは、連続体の運動を有限の数の粒子の運動として解析する手法である。現在提案されている代表的な粒子法としては、S P H (Smoothed Particles Hydrodynamics)法やM P S (Moving Particles Semi-implicit)法といったものがある。粒子法では、移動境界の取り扱いに特別な処置をせずに連続体の運動を解析することができる。そのため、粒子法は、近年、連続体の運動を解く数値計算の手法として広く用いられるようになってきている。

10

【0004】

特に、鑄造・鍛造などの金属加工では、液体金属の中に冷えて固まった金属(固化した金属)が混じる、固化した金属が成長する、及び、固化過程において金属の体積が変化する等の複雑な過程となる。自由表面の扱いの簡単さや並列性能面、固体との連成計算が比較的容易である、などの利点により鑄造・鍛造シミュレーションは粒子法の活躍が期待される分野と考えられる。

20

【0005】

鑄造過程の基本的なシミュレーション技術である、液体が冷えて固まる過程(固化過程)の計算手法として、C l e a r yの方法が知られている。C l e a r yの方法は、粒子法の一つであるS P H法を用いて、各液体粒子の内部エネルギーの時間発展を計算し、温度、密度、粘性係数を内部エネルギーの関数として計算を行う。すなわち、C l e a r yの方法は、内部エネルギーが小さくなり温度が低くなると、液体の粘性係数を大きくして固化を表現し、液体の密度を大きくして固化に伴う体積低下を表現する。

【0006】

C l e a r yの手法は、流体の方程式をS P H法により以下の式(1)~式(4)に示すように離散化する。

30

【数1】

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j (v_i - v_j) \cdot \frac{\partial W(|x_i - x_j|)}{\partial x_i} \quad \dots (1)$$

【数2】

$$\frac{dv_i}{dt} = g - \sum_j m_j \left[\left(\frac{\rho_j + \rho_i}{\rho_j \rho_i} \right) - \frac{\xi}{\rho_j \rho_i (\mu_i + \mu_j)} \frac{v_{ij} \cdot x_{ij}}{|x_{ij}|^2 + \eta^2} \right] \frac{\partial W(|x_i - x_j|)}{\partial x_i} \quad \dots (2)$$

40

【数3】

$$p_i = P_0 \left[\left(\frac{\rho_i}{\rho_{s,i}} \right)^\gamma - 1 \right] \quad \dots (3)$$

【数 4】

$$\frac{dU_i}{dt} = \sum_j \frac{4m_j}{\rho_j \rho_i} \frac{k_i k_j}{(k_i + k_j)} \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|^2 + \eta^2} \cdot \frac{\partial W(|x_i - x_j|)}{\partial x_i} \quad \dots (4)$$

【0007】

式(1)は質量保存則、式(2)は運動量保存則、式(3)は状態方程式、式(4)はエネルギー保存則を表す。ここで、 x_i 、 v_i 、 ρ_i 、 m_i 、 p_i 、 U_i は、それぞれ、粒子*i*の位置ベクトル、粒子*i*の速度ベクトル、粒子*i*の密度、粒子*i*の質量、粒子*i*の圧力、粒子*i*の内部エネルギーである。 x_{ij} 、 v_{ij} は、それぞれ、粒子*i*と*j*の相対位置ベクトル、相対速度ベクトルであり、 $x_{ij} = x_i - x_j$ 、 $v_{ij} = v_i - v_j$ である。 μ_i 、 ν_i は、それぞれ、粒子*i*の熱伝導率、粒子*i*の粘性係数である。また、 $P_0 = \rho_0 c^2$ であり、 c は音速である。 $\rho_{s,i}$ は、粒子*i*の基準密度で、 $\rho_i = \rho_{s,i}$ のとき圧力が0となる値である。

10

【0008】

また、 W は、カーネル関数であり、例えば、 W として、以下の式(5)が示すスプライン関数を用いられる。

【数 5】

$$W(r, h) = \begin{cases} \left(1 - 1.5\left(\frac{r}{h}\right)^2 + 0.75\left(\frac{r}{h}\right)^3\right) / \beta & 0 \leq \frac{r}{h} \leq 1, \\ 0.25\left(2 - \frac{r}{h}\right)^3 / \beta & 1 \leq \frac{r}{h} \leq 2, \\ 0 & 2 \leq \frac{r}{h}. \end{cases} \quad \dots (5)$$

20

【0009】

h は、粒子間の影響半径であり、例えば、 h として、初期状態の平均粒子の間隔の2倍から3倍程度の値が用いられる。 β は、カーネル関数の全空間積分量が1になるように調整された値であり、2次元の場合は、 $0.7 h^2$ と定められ、3次元の場合は、 h^3 と定められる。

30

【0010】

Clearyの手法は、内部エネルギーが低下し、温度が融点以下に下がった際に粘性係数 μ_i が大きくなることにより、式(2)の第三項の粒子同士の相対速度を打ち消す効果が大きくなり、変形しにくくなることで固化を表現する。また、Clearyの手法は、基準密度 $\rho_{s,i}$ を大きくすることで圧力を低下し、式(2)の第二項の効果により周りの粒子を集めることで、固化に伴う収縮を表現する。

【0011】

式(1)～式(4)を一般的な常微分方程式の数値解法である、オイラー法やリープフロッグ法などで、時間発展を計算することで、シミュレーションが可能となる。

40

【0012】

Clearyの手法では、固化過程における粘性係数の値が増大するため、計算上の時間刻みが非常に小さくなる。そのため、計算が終了する時刻までの計算回数が多くなる。それゆえ、Clearyの手法では、多大な計算時間がかかる。

【0013】

ここで、流体と剛体とが相互作用する問題の計算手法の一例として、液体の部分については液体の運動を解くための方程式を用い、固体の部分については剛体の運動方程式を用いて解く手法がある。かかる手法では、固体の部分に剛体の運動方程式を用いて解くため、Clearyの手法よりも計算時間が短くて済む。

50

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0014】

【非特許文献1】Paul W. Cleary, "Extension of SPH to predict feeding freezing and defect creation in low pressure die casting", Applied Mathematical Modelling, 34(2010), pp. 3189-3201.

【非特許文献2】Koshizuka, S., Nobe A. and Oka Y. "Numerical Analysis of Breaking Waves Using the Moving Particle Semi-implicit Method", Int. J. Numer. Meth. Fluids, 26, 751-769(1998)

【発明の概要】

10

【発明が解決しようとする課題】

【0015】

しかしながら、固体の部分を剛体の運動方程式を用いて解く手法では、液体から固体が新たに生成される状況では、計算結果の精度が良好ではないという問題がある。液体の金属を型に流し込んで冷却する場合を例に挙げて説明する。この場合、液体の金属は、冷却の状況に応じて、複数の部分において固化が始まり、固化された複数の部分のそれぞれの固化された体積が時間に伴って大きくなる。そして、液体の金属は、全体が固化される。図14は、従来の手法の問題点の一例を説明するための図である。図14の例は、冷却によって固化された金属の固体の部分90の粒子90aと、金属の固体の部分91の粒子91aと、金属の液体の部分92の粒子92aとが型に存在する場合を示す。この場合に、冷却によって、固体の部分90の固化された体積が大きくなり、液体の部分92が固化されて、固化された部分92と固体の部分90とが同一の固体となっても、上述した手法は、別々の固体として扱う。すなわち、上述した手法は、固化された部分92の運動と固体の部分90の運動とを別々に剛体の運動方程式を用いて解く。そのため、上述した手法では、本来1つの固体であるにも関わらず、複数の固体のそれぞれについて運動を解くので、計算結果の精度が良好ではない。

20

【0016】

1つの側面では、液体の部分については液体の運動を解くための方程式を用い、固体の部分については剛体の運動方程式を用いて解く手法を用いる場合においても、精度良く計算を行うことを目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0017】

本願の開示するシミュレーションプログラムは、1つの態様において、コンピュータに、次の処理を実行させる。すなわち、シミュレーションプログラムは、コンピュータに、液体及び固体を含む連続体を複数の粒子で表した場合における複数の粒子のそれぞれのうち、第1の時間における液体の粒子について、第1の時間よりも後の第2の時間における状態を計算させる。シミュレーションプログラムは、コンピュータに、第2の時間における状態に基づいて、第1の時間における液体の粒子が、第2の時間に第1の固体の粒子となったか否かを判定させる。シミュレーションプログラムは、コンピュータに、第1の時間における液体の粒子が、第2の時間に第1の固体の粒子となったと判定された場合、次の処理を実行させる。すなわち、シミュレーションプログラムは、コンピュータに、第1の固体の粒子と、第1の固体の粒子から所定範囲内に存在する第2の固体の粒子を含む固体に属する全ての粒子とを同一の固体に属する粒子と定義させる。シミュレーションプログラムは、コンピュータに、剛体の運動方程式を用いて、同一の固体に属する粒子のそれぞれの状態を計算させる。

40

【発明の効果】

【0018】

液体の部分については液体の運動を解くための方程式を用い、固体の部分については剛体の運動方程式を用いて解く手法を用いる場合においても、精度良く計算を行うことができる。

50

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】図1は、実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図である。

【図2】図2は、実施例に係るシミュレーション装置の機能構成の一例を示す図である。

【図3】図3は、金属モデルデータが示す金属モデルの一例を説明するための図である。

【図4】図4は、金属モデルデータが示す金属モデルの一例を説明するための図である。

【図5】図5は、実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図である。

【図6】図6は、実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図である。 10

【図7】図7は、実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図である。

【図8】図8は、実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図である。

【図9】図9は、実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図である。

【図10】図10は、実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図である。

【図11】図11は、実施例に係るシミュレーション処理の手順を示すフローチャートである。 20

【図12】図12は、実施例に係る固体番号定義処理の手順を示すフローチャートである。

【図13】図13は、シミュレーションプログラムを実行するコンピュータを示す図である。

【図14】図14は、従来の手法の問題点の一例を説明するための図である。

【発明を実施するための形態】

【0020】

以下に、本願の開示するシミュレーションプログラム、シミュレーション方法及びシミュレーション装置の実施例を図面に基づいて詳細に説明する。なお、実施例は開示の技術を限定するものではない。 30

【0021】

[シミュレーション装置の構成]

実施例に係るシミュレーション装置について説明する。本実施例に係るシミュレーション装置は、金属の液体を型に流しこんで冷却させるシナリオを用いて、金属の液体及び固体を含む連続体の各粒子の状態を粒子法によりタイプステップ t_t 毎に計算する。図1は、実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図である。図1に示すように、シミュレーション装置は、金属の液体20を型21に流しこんで冷却させて、金属の液体20、及び、金属の液体20が固化した金属の固体21が混ざった場合の各粒子の状態を粒子法により計算する。 40

【0022】

図2は、実施例に係るシミュレーション装置の機能構成の一例を示す図である。図2に示すように、シミュレーション装置10は、入力部11と、表示部12と、記憶部13と、制御部14とを有する。

【0023】

入力部11は、制御部14に情報を入力する。例えば、入力部11は、ユーザから後述のシミュレーション処理を実行する指示であるシミュレーション実行指示を受け付けて、受け付けたシミュレーション実行指示を制御部14に入力する。また、入力部11は、ユーザから、初期状態における各粒子の初期値を受け付けて、受け付けた各粒子の初期値を制御部14に入力する。ここで、初期状態における各粒子の初期値には、各粒子の位置、 50

密度、速度、内部エネルギー、状態、固体番号が含まれる。ここで、粒子の状態には、内部エネルギーが所定値より高く、温度が融点より高い場合には、粒子が液体であるため、液体であることを示す情報が設定される。また、粒子の状態には、内部エネルギーが所定値以下であり、温度が凝固点より低い場合には、粒子が固体であるため、固体であることを示す情報が設定される。また、固体番号には、粒子が属する固体の識別番号が設定される。入力部 11 のデバイスの一例としては、キーボードやマウスなどが挙げられる。

【0024】

表示部 12 は、各種の情報を表示する。例えば、表示部 12 は、後述の表示制御部 14 e の制御によりシミュレーション結果を表示する。表示部 12 のデバイスの一例としては、液晶ディスプレイなどが挙げられる。

10

【0025】

記憶部 13 は、制御部 14 で実行される各種プログラムを記憶する。また、記憶部 13 は、金属モデルデータ 13 a を記憶する。金属モデルデータ 13 a は、金属の液体及び固体を含む連続体を複数の粒子として表した金属のモデルを示す。図 3 及び図 4 は、金属モデルデータが示す金属モデルの一例を説明するための図である。図 3 の例は、型 21 に流し込まれた金属の液体 20 の一部が固化されて、金属の液体 20 と金属の固体 21 とが混ざっている場合を示す。図 3 に示す部分 23 の金属のモデルの詳細について説明する。図 4 は、図 3 に示す部分 23 の金属のモデルの詳細を示す図である。図 4 の例に示すように、金属の液体 20 及び金属の固体 22 のモデルには、複数の粒子 25 が含まれる。本実施例では、各粒子 25 の位置、密度、速度、内部エネルギー、状態、固体番号がタイムステップ t_{ts} 毎に計算される。

20

【0026】

図 1 に戻り、記憶部 13 は、例えば、フラッシュメモリなどの半導体メモリ素子、または、ハードディスク、光ディスクなどの記憶装置である。なお、記憶部 13 は、上記の種類の記憶装置に限定されるものではなく、RAM (Random Access Memory)、ROM (Read Only Memory) であってもよい。

【0027】

制御部 14 は、各種の処理手順を規定したプログラムや制御データを格納するための内部メモリを有し、これらによって種々の処理を実行する。図 2 に示すように、制御部 14 は、計算部 14 a と、更新部 14 b と、判定部 14 c と、定義部 14 d と、表示制御部 14 e とを有する。

30

【0028】

計算部 14 a は、各種の情報を計算する。例えば、計算部 14 a は、タイムステップ t_{ts} 毎に、状態が液体の粒子である液体粒子に対して、流体の運動方程式を用いた時間発展の計算を行うことにより、液体粒子の位置、速度、密度、内部エネルギーを計算する。例えば、計算部 14 a は、タイムステップ $(t_{ts} - 1)$ の場合における全ての液体粒子に対して、上記の式 (1) ~ 式 (4) を用いて、タイムステップ t_{ts} での位置、速度、密度、内部エネルギーを計算する。

【0029】

また、計算部 14 a は、タイムステップ t_{ts} 毎に、状態が固体の粒子である固体粒子が属する固体に対して、剛体の運動方程式を用いた時間発展の計算を行うことにより、固体粒子の位置、速度、密度、内部エネルギーを計算する。例えば、計算部 14 a は、タイムステップ $(t_{ts} - 1)$ の場合における固体粒子に対して、タイムステップ t_{ts} での固体粒子の重心の並進運動と重心周りの回転運動とを計算する。これにより、計算部 14 a は、タイムステップ t_{ts} での固体粒子が属する固体の時間発展を計算する。すなわち、計算部 14 a は、固体毎に、各固体に属する固体粒子にかかる力から、タイムステップ t_{ts} での固体の重心の並進運動と重心周りの回転運動とを計算する。そして、計算部 14 a は、計算された固体の重心の並進運動と重心周りの回転運動とから、剛体の運動方程式を用いて、タイムステップ t_{ts} での各固体に属する固体粒子の位置、速度、密度を計算する。また、計算部 14 a は、上記の式 (4) を用いて、タイムステップ t_{ts} での固

40

50

体粒子の内部エネルギーを計算する。

【 0 0 3 0 】

計算部 1 4 a の一態様について説明する。例えば、計算部 1 4 a は、入力部 1 1 からシミュレーション実行指示が入力された場合には、まず、タイムステップ t_{t_s} の値を 0 に設定する。そして、計算部 1 4 a は、入力部 1 1 から各粒子の初期値が入力されたか否かを判定する。初期値が入力された場合には、計算部 1 4 a は、タイムステップ t_{t_s} の値を 1 だけインクリメントする。また、計算部 1 4 a は、タイムステップ t_{t_s} の値がシミュレーションの最後のタイムステップ N_L 以下であると表示制御部 1 4 e により判定された場合にも、タイムステップ t_{t_s} の値を 1 だけインクリメントする。

【 0 0 3 1 】

続いて、計算部 1 4 a は、タイムステップ ($t_{t_s} - 1$) の場合における全ての液体粒子に対して、上記の式 (1) ~ 式 (4) を用いて、タイムステップ t_{t_s} での位置、速度、密度、内部エネルギーを計算する。

【 0 0 3 2 】

また、計算部 1 4 a は、タイムステップ ($t_{t_s} - 1$) の場合における固体粒子が属する全ての固体に対して、剛体の運動方程式を用いた時間発展の計算を行うことにより、次の処理を行う。すなわち、計算部 1 4 a は、タイムステップ ($t_{t_s} - 1$) の場合における全ての固体粒子のタイムステップ t_{t_s} での位置、速度、密度、内部エネルギーを計算する。

【 0 0 3 3 】

更新部 1 4 b は、各種の情報を更新する。更新部 1 4 b の一態様について説明する。例えば、更新部 1 4 b は、タイムステップ ($t_{t_s} - 1$) の場合における全ての液体粒子の位置、速度、密度、内部エネルギーのそれぞれを、計算したタイムステップ t_{t_s} での位置、速度、密度、内部エネルギーのそれぞれに更新する。

【 0 0 3 4 】

また、更新部 1 4 b は、タイムステップ ($t_{t_s} - 1$) の場合における全ての固体粒子の位置、速度、密度、内部エネルギーのそれぞれを、計算したタイムステップ t_{t_s} での位置、速度、密度、内部エネルギーのそれぞれに更新する。

【 0 0 3 5 】

そして、更新部 1 4 b は、全ての粒子に対して、計算した内部エネルギーに基づいて、状態を更新する。例えば、更新部 1 4 b は、計算した内部エネルギーが所定値より高い場合には、液体であることを示す情報を粒子の状態に設定し、状態を更新する。また、更新部 1 4 b は、内部エネルギーが所定値以下である場合には、固体であることを示す情報を粒子の状態に設定し、状態を更新する。

【 0 0 3 6 】

続いて、更新部 1 4 b は、全ての粒子の更新結果 (位置、速度、密度、内部エネルギー、状態) をタイムステップ t_{t_s} と対応付けて記憶部 1 3 の所定領域に格納する。

【 0 0 3 7 】

続いて、判定部 1 4 c は、各種の判定を行う。判定部 1 4 c の一態様について説明する。例えば、判定部 1 4 c は、タイムステップ t_{t_s} における全ての粒子の更新前後の状態に基づいて、新たに固化した固体粒子 (状態が液体から固体に変化した粒子) があるか否かを判定する。

【 0 0 3 8 】

新たに固化した固体粒子がある場合には、判定部 1 4 c は、新たに固化した固体粒子を特定する。そして、判定部 1 4 c は、特定した固体粒子の固体番号を未定義の状態にする。

【 0 0 3 9 】

そして、判定部 1 4 c は、タイムステップ t_{t_s} における全ての粒子の更新前後の状態に基づいて、新たに溶融した液体粒子 (状態が固体から液体に変化した粒子) があるか否かを判定する。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 0 】

新たに溶融した液体粒子がある場合には、判定部 1 4 c は、新たに溶融した液体粒子を特定する。そして、判定部 1 4 c は、特定した液体粒子がタイムステップ ($t_{t_s} - 1$) において固体粒子であったときに属していた固体に属する全ての固体粒子の固体番号を未定義の状態にする。

【 0 0 4 1 】

そして、判定部 1 4 c は、タイムステップ t_{t_s} における全ての粒子の更新前後の状態に基づいて、再度、新たに固化した固体粒子があるか否かを判定するとともに、新たに溶融した液体粒子があるか否かを判定する。

【 0 0 4 2 】

定義部 1 4 d は、各種の情報を定義する。定義部 1 4 d の一態様について説明する。例えば、定義部 1 4 d は、判定部 1 4 c により、新たに固化した固体粒子があると判定された場合、又は、新たに溶融した液体粒子があると判定された場合に、次の処理を行う。すなわち、定義部 1 4 d は、固体番号が未定義の固体粒子のうち、未選択の固体粒子があるか否かを判定する。

【 0 0 4 3 】

未選択の固体粒子がある場合には、定義部 1 4 d は、固体番号が未定義の未選択の固体粒子を 1 つ選択する。続いて、定義部 1 4 d は、選択した固体粒子を中心とする半径 h の球内に、固体に属する固体粒子があるか否かを判定する。なお、固体に属する固体粒子を判定する方法の一例としては、球内に存在する固体粒子の中に、固体粒子の固体番号に固体の識別番号が設定されているか否かを判定する方法がある。かかる方法では、識別番号が設定されている場合には、固体に属すると判定され、識別番号が設定されていない場合には、固体に属しないと判定される。また、半径 h の値としては、任意の値を採用できるが、例えば、粒子法における粒子の影響半径を採用することができる。

【 0 0 4 4 】

図 5 ~ 図 7 は、実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図である。図 5 の例は、固体番号が未定義の固体粒子 3 0 が定義部 1 4 d により選択された場合を示す。また、図 5 の例は、固体粒子 3 0 と、固体 3 1 に属する固体粒子 3 1 a のうち固体粒子 3 0 と最も近い位置に存在する固体粒子 3 1 a との距離が r_1 であることを示す。また、図 5 の例は、固体粒子 3 0 と、固体 3 2 に属する固体粒子 3 2 a のうち固体粒子 3 0 と最も近い位置に存在する固体粒子 3 2 a との距離が r_2 であることを示す。また、図 5 の例は、 r_1 と r_2 が、共に、半径 h よりも長い場合を示す。図 5 の例の場合では、定義部 1 4 d は、選択した固体粒子 3 0 を中心とする半径 h の球内に、固体に属する固体粒子がないと判定する。

【 0 0 4 5 】

図 6 の例は、固体番号が未定義の固体粒子 3 5 が定義部 1 4 d により選択された場合を示す。また、図 6 の例は、固体粒子 3 5 と、固体 3 6 に属する固体粒子 3 6 a のうち固体粒子 3 5 と最も近い位置に存在する固体粒子 3 6 a との距離が r_3 であることを示す。また、図 6 の例は、固体粒子 3 5 と、固体 3 7 に属する固体粒子 3 7 a のうち固体粒子 3 5 と最も近い位置に存在する固体粒子 3 7 a との距離が r_4 であることを示す。また、図 6 の例は、 r_3 が、半径 h 以下であり、 r_4 が、半径 h よりも長い場合を示す。図 6 の例の場合では、定義部 1 4 d は、選択した固体粒子 3 5 を中心とする半径 h の球内に、固体 3 6 に属する固体粒子 3 6 a があると判定する。

【 0 0 4 6 】

図 7 の例は、固体番号が未定義の固体粒子 4 0 が定義部 1 4 d により選択された場合を示す。また、図 7 の例は、固体粒子 4 0 と、固体 4 1 に属する固体粒子 4 1 a のうち固体粒子 4 0 と最も近い位置に存在する固体粒子 4 1 a との距離が r_5 であることを示す。また、図 7 の例は、固体粒子 4 0 と、固体 4 2 に属する固体粒子 4 2 a のうち固体粒子 4 0 と最も近い位置に存在する固体粒子 4 2 a との距離が r_6 であることを示す。また、図 7 の例は、 r_5 及び r_6 が、共に、半径 h 以下である場合を示す。図 7 の例の場合では、定

10

20

30

40

50

義部 1 4 d は、選択した固体粒子 4 0 を中心とする半径 h の球内に、複数の固体 4 1 及び固体 4 2 のそれぞれに属する固体粒子 4 1 a 及び固体粒子 4 2 a のそれぞれがあると判定する。

【 0 0 4 7 】

固体粒子がある場合には、定義部 1 4 d は、あると判定された固体粒子が、複数の固体のそれぞれに属するか否かを判定する。例えば、図 6 の例の場合では、定義部 1 4 d は、あると判定された固体粒子が、複数の固体のそれぞれに属しないと判定する。また、図 7 の例の場合では、定義部 1 4 d は、あると判定された固体粒子が、複数の固体のそれぞれに属すると判定する。

【 0 0 4 8 】

定義部 1 4 d は、あると判定された固体粒子が、複数の固体のそれぞれに属さない場合には、球内の固体粒子の固体番号の値を、選択した固体粒子の固体番号に設定する。例えば、図 6 の例の場合では、定義部 1 4 d は、球内の固体粒子の固体番号の値「36」を、選択した固体粒子 3 5 の固体番号に設定する。これにより、1 つの固体に属する粒子が 1 つの固体に属するように定義される。

【 0 0 4 9 】

一方、定義部 1 4 d は、あると判定された固体粒子が、複数の固体のそれぞれに属する場合には、球内の複数の固体粒子のうち、選択した固体粒子に最も近い位置に存在する固体粒子の固体番号の値を、選択した固体粒子の固体番号に設定する。例えば、図 7 の例の場合では、定義部 1 4 d は、球内の複数の固体粒子 4 1 a、4 2 a のうち、選択した固体粒子 4 0 に最も近い位置に存在する固体粒子 4 1 a の固体番号の値「41」を、選択した固体粒子 4 0 の固体番号に設定する。これにより、1 つの固体に属する粒子が 1 つの固体に属するように定義される。

【 0 0 5 0 】

そして、定義部 1 4 d は、球内の複数の固体粒子のうち、選択した固体番号に設定された固体番号の値以外の値が固体番号に設定された固体粒子を特定する。例えば、図 7 の例の場合では、定義部 1 4 d は、球内の複数の固体粒子 4 1 a、4 2 a のうち、選択した固体番号に設定された固体番号の値「41」以外の値「42」が固体番号に設定された固体粒子 4 2 a を特定する。

【 0 0 5 1 】

続いて、定義部 1 4 d は、特定した固体粒子が属する固体に属する全ての固体粒子の固体番号の値を、選択した固体粒子の固体番号に設定された値に更新する。例えば、図 7 の例の場合では、定義部 1 4 d は、特定した固体粒子 4 2 a が属する固体 4 2 に属する全ての固体粒子 4 2 a (3 つの固体粒子 4 2 a) の固体番号の値を、選択した固体粒子 4 0 の固体番号に設定された値「41」に更新する。これにより、選択した固体粒子を介して複数の固体のそれぞれに属する固体粒子が 1 つの固体に属するように定義される。

【 0 0 5 2 】

また、選択した固体粒子を中心とする半径 h の球内に、固体に属する固体粒子がない場合には、定義部 1 4 d は、選択した固体粒子の固体番号に、他の固体粒子の固体番号の値と重複しない値を設定する。例えば、図 5 の例の場合では、定義部 1 4 d は、選択した固体粒子 3 0 の固体番号に、他の固体粒子の固体番号の値と重複しない値「50」を設定する。

【 0 0 5 3 】

そして、定義部 1 4 d は、固体番号が未定義の固体粒子のうち未選択の固体粒子があるか否かを判定する上述した処理以降の処理を再び行う。これにより、定義部 1 4 d は、固体番号が未定義の全ての固体粒子の固体番号を設定することができる。そして、定義部 1 4 d は、固体番号が未定義の固体粒子のうち未選択の固体粒子がない場合には、タイムステップ t_{t_s} に対応付けて、全ての粒子の固体番号を記憶部 1 3 に格納する。

【 0 0 5 4 】

図 8 ~ 図 1 0 は、実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明する

10

20

30

40

50

ための図である。図 8 に示すように、定義部 14 d は、上述した処理によって、半径 h 内に存在する粒子 60 を辿っていくことで、同一の個体に属する粒子 60 を認識することができる。図 9 は、ある粒子 60 の半径 h 内に存在する粒子を連結させたときの粒子間の接続関係を示すリンクリストを示す。

【 0 0 5 5 】

図 10 の例は、タイムステップ t_{t_s} において新たに溶融した液体粒子 70 がタイムステップ ($t_{t_s} - 1$) において固体粒子であったときに属していた固体に属する全ての固体粒子 71 の固体番号が、未定義の状態にされ、新たに固体番号が定義された場合を示す。図 10 の例では、固体粒子 71 のそれぞれの固体番号に対して、固体 81 の固体番号「81」または固体 82 の固体番号「82」が定義された場合を示す。ここで、図 10 の例では、固体 81 の粒子 71 と、固体 82 の粒子 71 との最短の距離が $r (> h)$ であるため、粒子 71 は、1 つの固体ではなく、2 つの固体の何れかに属するように定義された場合を示す。

10

【 0 0 5 6 】

表示制御部 14 e は、各種の情報の表示を制御する。表示制御部 14 e の一態様について説明する。例えば、表示制御部 14 e は、タイムステップ t_{t_s} に対応付けて、全ての粒子の固体番号が定義部 14 d により記憶部 13 に格納された場合に、タイムステップ t_{t_s} の値が、シミュレーションの最後のタイムステップ N_L 以下であるか否かを判定する。タイムステップ t_{t_s} の値が、シミュレーションの最後のタイムステップ N_L 以下でない場合には、表示制御部 14 e は、次の処理を行う。すなわち、表示制御部 14 e は、記憶部 13 に格納されたタイムステップごとの全ての粒子の位置、速度、密度、内部エネルギー、状態、固体番号を全てのタイムステップについて取得する。そして、表示制御部 14 e は、シミュレーション結果（全てのタイムステップにおける全ての粒子の位置、速度、密度、内部エネルギー、状態、固体番号）を表示するように表示部 12 の表示を制御する。

20

【 0 0 5 7 】

制御部 14 は、A S I C (Application Specific Integrated Circuit) や F P G A (Field Programmable Gate Array) などのハードワイヤードロジックである。または、制御部 14 は、C P U (Central Processing Unit) や M P U (Micro Processing Unit) などにプログラムを実行させることにより実現される。

30

【 0 0 5 8 】

[処理の流れ]

次に、本実施例に係るシミュレーション装置 10 の処理の流れを説明する。図 11 は、実施例に係るシミュレーション処理の手順を示すフローチャートである。このシミュレーション処理の実行タイミングとしては様々なタイミングが考えられる。例えば、シミュレーション処理は、シミュレーション処理を実行するシミュレーション実行指示が入力部 11 から入力された場合に、制御部 14 により実行される。

【 0 0 5 9 】

図 11 に示すように、計算部 14 a は、タイムステップ t_{t_s} の値を 0 に設定する (S 101)。そして、計算部 14 a は、入力部 11 から各粒子の初期値が入力されたか否かを判定する (S 102)。初期値が入力されていない場合 (S 102 ; No) には、計算部 14 a は、再び、S 102 での判定を行う。一方、初期値が入力された場合 (S 102 ; Yes) には、計算部 14 a は、タイムステップ t_{t_s} の値を 1 だけインクリメントする (S 103)。

40

【 0 0 6 0 】

続いて、計算部 14 a は、タイムステップ ($t_{t_s} - 1$) の場合における全ての液体粒子に対して、上記の式 (1) ~ 式 (4) を用いて、タイムステップ t_{t_s} での位置、速度、密度、内部エネルギーを計算する (S 104)。続いて、更新部 14 b は、タイムステップ ($t_{t_s} - 1$) の場合における全ての液体粒子の位置、速度、密度、内部エネルギーのそれぞれを、計算したタイムステップ t_{t_s} での位置、速度、密度、内部エネルギーの

50

それぞれに更新する (S 1 0 5)。

【 0 0 6 1 】

そして、計算部 1 4 a は、タイムステップ ($t_{t_s} - 1$) の場合における固体粒子が属する全ての固体に対して、剛体の運動方程式を用いた時間発展の計算を行うことにより、次の処理を行う。すなわち、計算部 1 4 a は、タイムステップ ($t_{t_s} - 1$) の場合における全ての固体粒子のタイムステップ t_{t_s} での位置、速度、密度、内部エネルギーを計算する (S 1 0 6)。

【 0 0 6 2 】

続いて、更新部 1 4 b は、タイムステップ ($t_{t_s} - 1$) の場合における全ての固体粒子の位置、速度、密度、内部エネルギーのそれぞれを、計算したタイムステップ t_{t_s} での位置、速度、密度、内部エネルギーのそれぞれに更新する (S 1 0 7)。

10

【 0 0 6 3 】

そして、更新部 1 4 b は、全ての粒子に対して、計算した内部エネルギーに基づいて、状態を更新する (S 1 0 8)。続いて、更新部 1 4 b は、全ての粒子の更新結果 (位置、速度、密度、内部エネルギー、状態) をタイムステップ t_{t_s} と対応付けて記憶部 1 3 の所定領域に格納する (S 1 0 9)。

【 0 0 6 4 】

判定部 1 4 c は、タイムステップ t_{t_s} における全ての粒子の更新前後の状態に基づいて、新たに固化した固体粒子があるか否かを判定する (S 1 1 0)。新たに固化した固体粒子がない場合 (S 1 1 0 ; N o) には、後述する S 1 1 3 へ進む。

20

【 0 0 6 5 】

一方、新たに固化した固体粒子がある場合 (S 1 1 0 ; Y e s) には、判定部 1 4 c は、新たに固化した固体粒子を特定する (S 1 1 1)。そして、判定部 1 4 c は、特定した固体粒子の固体番号を未定義の状態にする (S 1 1 2)。

【 0 0 6 6 】

そして、判定部 1 4 c は、タイムステップ t_{t_s} における全ての粒子の更新前後の状態に基づいて、新たに溶融した液体粒子があるか否かを判定する (S 1 1 3)。新たに溶融した液体粒子がない場合 (S 1 1 3 ; N o) には、後述する S 1 1 6 へ進む。一方、新たに溶融した液体粒子がある場合 (S 1 1 3 ; Y e s) には、判定部 1 4 c は、新たに溶融した液体粒子を特定する (S 1 1 4)。そして、判定部 1 4 c は、特定した液体粒子がタイムステップ ($t_{t_s} - 1$) において固体粒子であったときに属していた固体に属する全ての固体粒子の固体番号を未定義の状態にする (S 1 1 5)。

30

【 0 0 6 7 】

そして、判定部 1 4 c は、タイムステップ t_{t_s} における全ての粒子の更新前後の状態に基づいて、再度、新たに固化した固体粒子があるか否かを判定するとともに、新たに溶融した液体粒子があるか否かを判定する (S 1 1 6)。

【 0 0 6 8 】

新たに固化した固体粒子がなく、かつ、新たに溶融した液体粒子がない場合 (S 1 1 6 ; N o) には、S 1 1 9 へ進む。一方、新たに固化した固体粒子がある場合、又は、新たに溶融した液体粒子がある場合 (S 1 1 6 ; Y e s) に、次の処理を行う。すなわち、定義部 1 4 d は、固体番号定義処理を実行する (S 1 1 7)。そして、定義部 1 4 d は、タイムステップ t_{t_s} に対応付けて、全ての粒子の固体番号を記憶部 1 3 に格納する (S 1 1 8)。

40

【 0 0 6 9 】

そして、表示制御部 1 4 e は、タイムステップ t_{t_s} の値が、シミュレーションの最後のタイムステップ N_L 以下であるか否かを判定する (S 1 1 9)。タイムステップ t_{t_s} の値が、シミュレーションの最後のタイムステップ N_L 以下である場合 (S 1 1 9 ; Y e s) には、S 1 0 3 に戻る。一方、タイムステップ t_{t_s} の値が、シミュレーションの最後のタイムステップ N_L 以下でない場合 (S 1 1 9 ; N o) には、表示制御部 1 4 e は、次の処理を行う。すなわち、表示制御部 1 4 e は、記憶部 1 3 に格納されたタイムステッ

50

プゴとの全ての粒子の位置、速度、密度、内部エネルギー、状態、固体番号を全てのタイムステップについて取得する。そして、表示制御部 14 e は、シミュレーション結果（全てのタイムステップにおける全ての粒子の位置、速度、密度、内部エネルギー、状態、固体番号）を表示するように表示部 12 の表示を制御し（S 120）、処理を終了する。

【0070】

図 12 は、実施例に係る固体番号定義処理の手順を示すフローチャートである。図 12 に示すように、定義部 14 d は、固体番号が未定義の固体粒子のうち、未選択の固体粒子があるか否かを判定する（S 201）。

【0071】

未選択の固体粒子がある場合（S 201；Yes）には、定義部 14 d は、固体番号が未定義の未選択の固体粒子を 1 つ選択する（S 202）。続いて、定義部 14 d は、選択した固体粒子を中心とする半径 h の球内に、固体に属する固体粒子があるか否かを判定する（S 203）。

10

【0072】

固体粒子がある場合（S 203；Yes）には、定義部 14 d は、あると判定された固体粒子が、複数の固体のそれぞれに属するか否かを判定する（S 204）。

【0073】

あると判定された固体粒子が、複数の固体のそれぞれに属さない場合（S 204；No）には、定義部 14 d は、球内の固体粒子の固体番号の値を、選択した固体粒子の固体番号に設定し（S 205）、S 201 に戻る。

20

【0074】

一方、あると判定された固体粒子が、複数の固体のそれぞれに属する場合（S 204；Yes）には、定義部 14 d は、次の処理を行う。すなわち、定義部 14 d は、球内の複数の固体粒子のうち、選択した固体粒子に最も近い位置に存在する固体粒子の固体番号の値を、選択した固体粒子の固体番号に設定する（S 206）。

【0075】

そして、定義部 14 d は、球内の複数の固体粒子のうち、選択した固体番号に設定された固体番号の値以外の値が固体番号に設定された固体粒子を特定する（S 207）。続いて、定義部 14 d は、特定した固体粒子が属する固体に属する全ての固体粒子の固体番号の値を、選択した固体粒子の固体番号に設定された値に更新し（S 208）、S 201 に戻る。

30

【0076】

また、選択した固体粒子を中心とする半径 h の球内に、固体に属する固体粒子がない場合（S 203；No）には、定義部 14 d は、選択した固体粒子の固体番号に、他の固体粒子の固体番号の値と重複しない値を設定し（S 209）、S 201 に戻る。

【0077】

固体番号が未定義の固体粒子のうち未選択の固体粒子がない場合（S 201；No）には、定義部 14 d は、処理結果を内部メモリに格納し、リターンする。

【0078】

上述してきたように、本実施例に係るシミュレーション装置 10 は、液体及び固体の状態となる金属を複数の粒子として表した場合の複数の粒子のそれぞれのうち、タイムステップ（ $t_{ts} - 1$ ）における液体の粒子について、次の処理を行う。すなわち、シミュレーション装置 10 は、タイムステップ（ $t_{ts} - 1$ ）よりも後のタイムステップ t_{ts} における状態を計算する。そして、シミュレーション装置 10 は、計算した状態に基づいて、タイムステップ（ $t_{ts} - 1$ ）における液体の粒子が、タイムステップ t_{ts} に固体の粒子となったか否かを判定する。続いて、シミュレーション装置 10 は、タイムステップ（ $t_{ts} - 1$ ）における液体の粒子がタイムステップ t_{ts} に固体の粒子となったと判定した場合には、次の処理を行う。すなわち、シミュレーション装置 10 は、かかる固体の粒子と、かかる固体の粒子から球内に存在する他の固体の粒子が属する固体に属する全ての粒子とを同一の固体に属する粒子と定義する。その後、シミュレーション装置 10 は、

40

50

同一の固体に対して剛体の運動方程式を用いて同一の固体に属する粒子のそれぞれの状態を計算する。それゆえ、本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、新たに液体から固体となった粒子を中心とする半径 h の球内に存在する他の固体の粒子が属する固体に属する全ての粒子とを同一の固体に属する粒子と定義して、次の処理を行う。すなわち、本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、同一の固体に対して剛体の運動方程式を用いて同一の固体に属する粒子のそれぞれの状態を計算する。よって、本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、粒子を中心とする半径 h の球内に存在するような、同一の個体に属する粒子を同一の個体として定義して、粒子のそれぞれの状態を計算する。したがって、本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、液体の部分については液体の運動を解くための方程式を用い、固体の部分については剛体の運動方程式を用いて解く手法を用いる場合においても、精度良く計算を行うことができる。

10

【0079】

また、本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、固体の粒子については、剛体の運動方程式を用いて時間発展を計算するため、固体の粒子の粘性係数を増大させて時間発展を計算する場合よりも、粘性係数の増大を抑制することができる。そのため、本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、計算上の時間刻みを小さくせずにする。それゆえ、本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、計算が終了する時刻までの計算回数が多くなることを抑制することができる。したがって本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、計算時間が多くなることを抑制することができる。

【0080】

20

また、シミュレーション装置10によれば、新たに固化された固体の粒子から所定範囲内に存在する他の固体の粒子が属する固体が複数である場合には、新たに固化された固体の粒子と、複数の固体に属する全ての粒子とを同一の固体に属する粒子と定義する。したがって、新たに固化された固体粒子を介して複数の固体のそれぞれに属する全ての固体粒子が1つの固体に属するように定義することができる。

【0081】

また、シミュレーション装置10は、複数の粒子のそれぞれのうち、タイムステップ($t_{ts} - 1$)における固体の粒子について、タイムステップ($t_{ts} - 1$)よりも後のタイムステップ t_{ts} における状態を計算する。そして、シミュレーション装置10は、タイムステップ t_{ts} における状態に基づいて、タイムステップ($t_{ts} - 1$)における固体の粒子が、タイムステップ t_{ts} に液体の粒子となったか否かを判定する。続いて、シミュレーション装置10は、タイムステップ($t_{ts} - 1$)における固体の粒子がタイムステップ t_{ts} に液体の粒子となったと判定した場合には、次の処理を行う。すなわち、シミュレーション装置10は、タイムステップ($t_{ts} - 1$)における固体の粒子が属した固体に属する全ての粒子のそれぞれについて、粒子と、粒子を中心とする半径 h の球内に存在する他の粒子とを同一の固体に属する粒子と定義する。そして、シミュレーション装置10は、同一の固体に対して剛体の運動方程式を用いて同一の固体に属する粒子のそれぞれの状態を計算する。よって、本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、新たに溶融した粒子が属した固体に属する粒子を中心とする半径 h の球内に存在するような、同一の個体に属する粒子を同一の個体として定義して、粒子のそれぞれの状態を計算することができる。したがって、本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、新たに粒子が溶融した場合には、新たに溶融した粒子が属した固体に属する固体の粒子について、属する固体の定義が行われる。そのため、本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、新たに溶融した粒子が属した固体に属した固体の粒子が属する固体の定義の精度が良好なものとなる。それゆえ、本実施例に係るシミュレーション装置10によれば、精度良く粒子のそれぞれの状態を計算することができる。

30

40

【0082】

さて、これまで開示の装置に関する実施例について説明したが、本発明は上述した実施例以外にも、種々の異なる形態にて実施されてよい。例えば、実施例などにおいて説明した各処理のうち、自動的に行われるものとして説明した処理の全部または一部を手動的に

50

行うこともできる。

【0083】

また、各種の負荷や使用状況などに応じて、実施例などにおいて説明した各処理の各ステップでの処理を任意に細かくわけたり、あるいはまとめたりすることができる。また、ステップを省略することもできる。

【0084】

また、各種の負荷や使用状況などに応じて、実施例などにおいて説明した各処理の各ステップでの処理の順番を変更できる。

【0085】

また、図示した装置の各構成要素は機能概念的なものであり、必ずしも物理的に図示の如く構成されていることを要しない。すなわち、装置の分散・統合の具体的状態は図示のものに限られず、その全部または一部を、各種の負荷や使用状況などに応じて、任意の単位で機能的または物理的に分散・統合して構成することができる。

10

【0086】

[シミュレーションプログラム]

また、上記のシミュレーション装置10のシミュレーション処理は、あらかじめ用意されたプログラムをパーソナルコンピュータやワークステーションなどのコンピュータシステムで実行することによって実現することもできる。そこで、以下では、図13を用いて、上記のシミュレーション装置10と同様の機能を有するシミュレーションプログラムを実行するコンピュータの一例を説明する。

20

【0087】

図13は、シミュレーションプログラムを実行するコンピュータを示す図である。図13に示すように、コンピュータ300は、CPU(Central Processing Unit)310、ROM(Read Only Memory)320、HDD(Hard Disk Drive)330、RAM(Random Access Memory)340を有する。これら300~340の各部分は、バス350を介して接続される。

【0088】

HDD330には、上記の実施例で示す計算部14a、更新部14b、判定部14c、定義部14d、表示制御部14eと同様の機能を発揮するシミュレーションプログラム330aが予め記憶される。なお、シミュレーションプログラム330aについては、適宜分離しても良い。

30

【0089】

そして、CPU310が、シミュレーションプログラム330aをHDD330から読み出して実行する。

【0090】

そして、HDD330には、図2の例に示す記憶部13に記憶された金属モデルデータが設けられる。

【0091】

そして、CPU310は、HDD330からデータを読み出してRAM340に格納する。さらに、CPU310は、RAM340に格納された各種のデータを用いて、シミュレーションプログラム330aを実行する。なお、RAM340に格納される各データは、常に全てのデータがRAM340に格納されなくともよく、全てのデータのうち処理に用いられるデータのみがRAM340に格納されれば良い。

40

【0092】

なお、上記したシミュレーションプログラム330aについては、必ずしも最初からHDD330に記憶させなくともよい。

【0093】

例えば、コンピュータ300に挿入されるフレキシブルディスク(FD)、CD-ROM、DVDディスク、光磁気ディスク、ICカードなどの「可搬用の物理媒体」にプログラムを記憶させておく。そして、コンピュータ300がこれらからプログラムを読み出し

50

て実行するようにしてもよい。

【0094】

さらには、公衆回線、インターネット、LAN、WANなどを介してコンピュータ300に接続される「他のコンピュータ(またはサーバ)」などにプログラムを記憶させておく。そして、コンピュータ300がこれらからプログラムを読み出して実行するようにしてもよい。

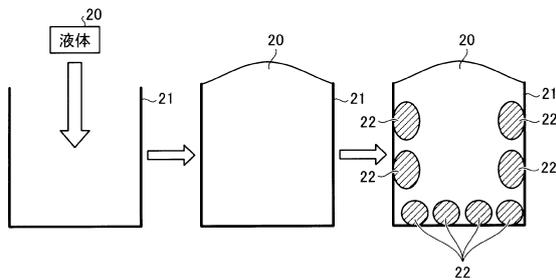
【符号の説明】

【0095】

- 10 シミュレーション装置
- 13 記憶部
- 13a 金属モデルデータ
- 14 制御部
- 14a 計算部
- 14b 更新部
- 14c 判定部
- 14d 定義部
- 14e 表示制御部

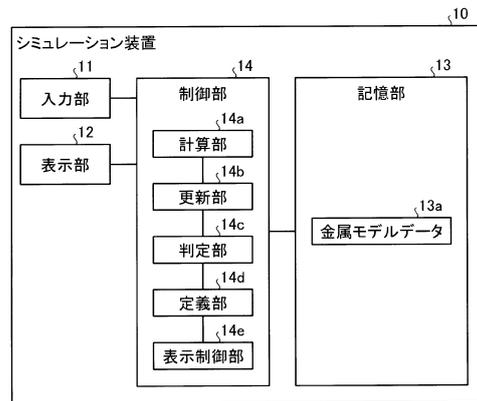
【図1】

実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図



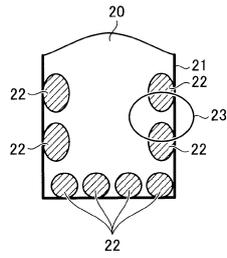
【図2】

実施例に係るシミュレーション装置の機能構成の一例を示す図



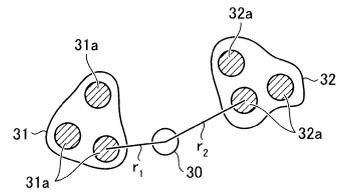
【 図 3 】

金属モデルデータが示す金属モデルの一例を説明するための図



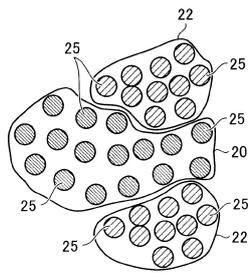
【 図 5 】

実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図



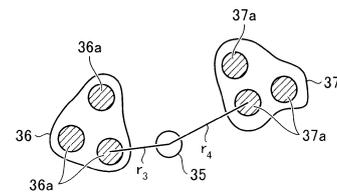
【 図 4 】

金属モデルデータが示す金属モデルの一例を説明するための図



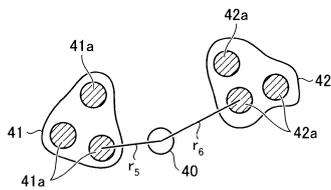
【 図 6 】

実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図



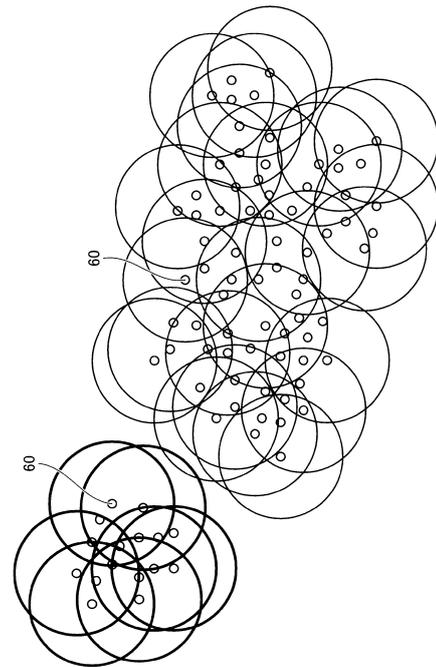
【 図 7 】

実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図



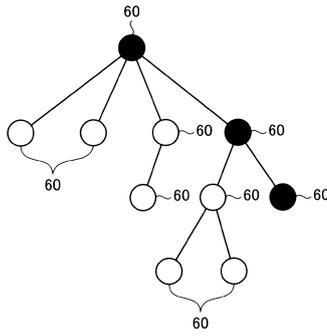
【 図 8 】

実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図



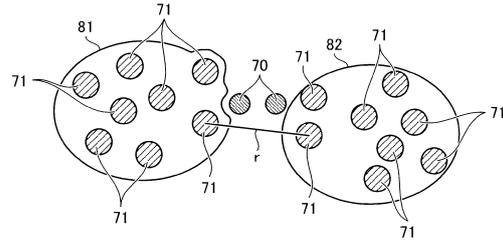
【図9】

実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図



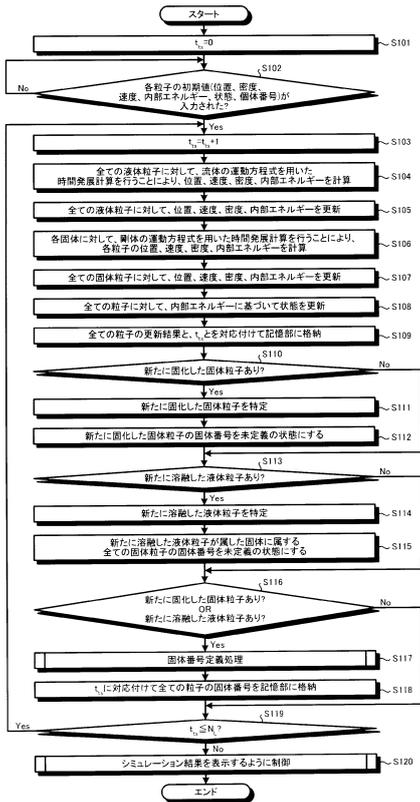
【図10】

実施例に係るシミュレーション装置が実行する処理の一例を説明するための図



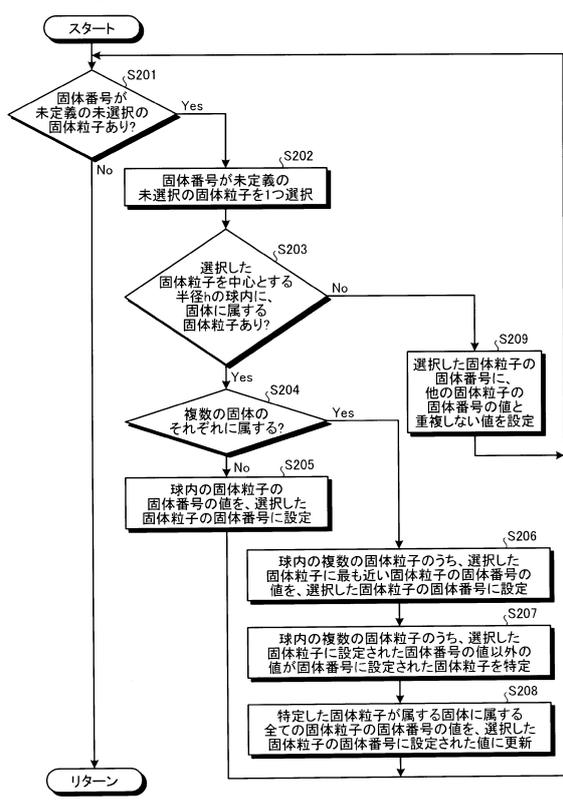
【図11】

実施例に係るシミュレーション処理の手順を示すフローチャート



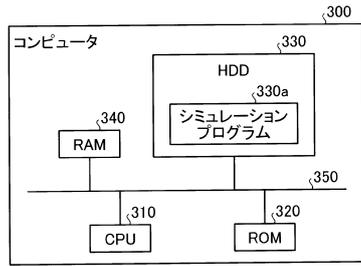
【図12】

実施例に係る固体番号定義処理の手順を示すフローチャート



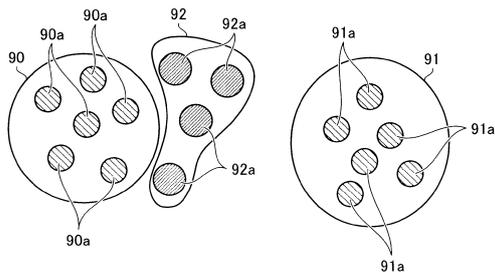
【図13】

シミュレーションプログラムを実行するコンピュータを示す図



【図14】

従来の手法の問題点の一例を説明するための図



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2009-074972(JP,A)

平田 直哉, 粒子法による伝熱・凝固解析手法の検討, 鑄造工学, 2008年 2月25日, Vol.80 No.2, pp.81-87

MONAGHAN Joseph J., Solidification using smoothed particle hydrodynamics, Journal of Computational Physics, 2005年 7月 1日, Vol.206 No.2, pp.684-705

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G06F 19/00

JSTPlus(JDreamIII)