

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2019年9月26日(26.09.2019)



(10) 国際公開番号

WO 2019/181541 A1

(51) 国際特許分類:
G16Z 99/00 (2019.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2019/009133

(22) 国際出願日: 2019年3月7日(07.03.2019)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2018-050919 2018年3月19日(19.03.2018) JP

(71) 出願人: 住友重機械工業株式会社
(**SUMITOMO HEAVY INDUSTRIES, LTD.**) [JP/
JP]; 〒1416025 東京都品川区大崎二丁目
1番1号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 石原 定典 (**ISHIHARA, Sadanori**);
〒2378555 神奈川県横須賀市夏島町19
番地 住友重機械工業株式会社 横須賀
製造所内 Kanagawa (JP).

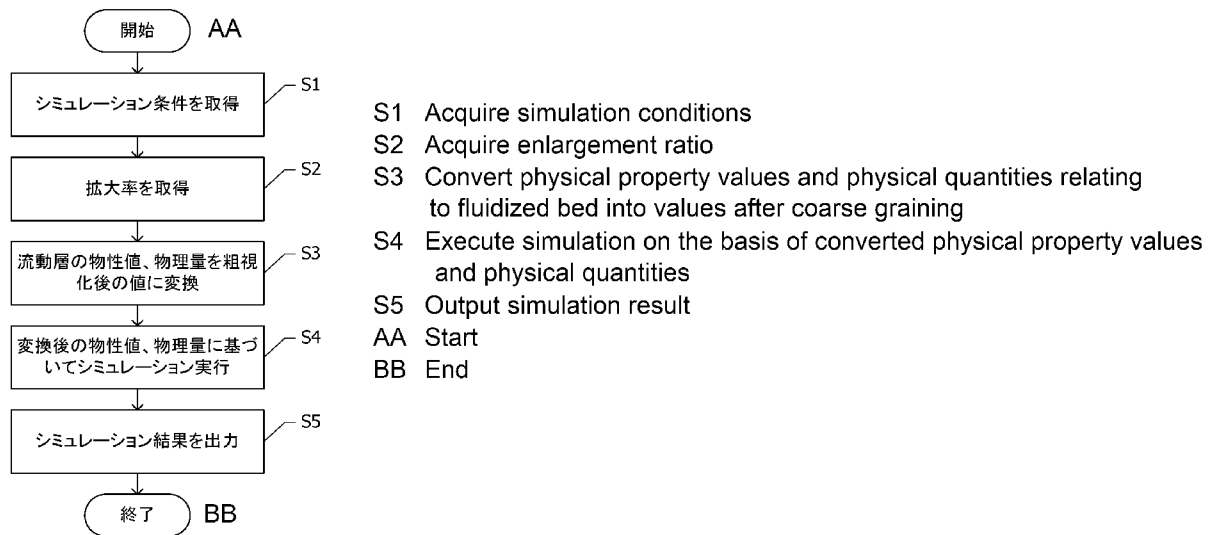
(74) 代理人: 来山 幹雄 (**KITAYAMA, Mikio**);
〒1010054 東京都千代田区神田錦町3丁目
6番地 共同ビル801号室 欧和特許事
務所 東京事務所 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,

(54) **Title:** SIMULATION METHOD, SIMULATION DEVICE, AND PROGRAM

(54) 発明の名称: シミュレーション方法、シミュレーション装置、及びプログラム

Fig.4



(57) **Abstract:** Coarse graining is performed by virtually enlarging particles contained in a fluidized bed to be simulated, thereby reducing the number of particles, said fluidized bed containing a fluid and a plurality of the particles floating in the fluid. Physical property values relating to the particles and the fluid, and physical quantities defined for the particles and the fluid are converted under conditions whereby a dimensionless quantity relating to the flow of the fluidized bed and a dimensionless quantity relating to heat transport do not vary before and after the coarse graining. The behavior of the fluidized bed is simulated using the converted physical property values and physical quantities. This makes it possible to suppress an increase in calculation load even if the number of particles increases.

MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(57) 要約: 流体、及び流体中に浮遊する複数の粒子を含むシミュレーション対象の流動層に含まれる粒子を仮想的に拡大し、個数を減らす粗視化を行う。粗視化の前後で、流動層の流れに関する無次元量及び熱輸送に関する無次元量が変化しない条件の下で、粒子及び流体の物性値、粒子及び流体に定義される物理量を変換する。変換後の物性値及び物理量を用いて流動層の挙動をシミュレーションする。これにより、粒子数が増えても計算負荷の増大を抑制することが可能になる。

明 細 書

発明の名称：

シミュレーション方法、シミュレーション装置、及びプログラム

技術分野

[0001] 本発明は、シミュレーション方法、シミュレーション装置、及びプログラムに関する。

背景技術

[0002] 粒子の挙動を解析する離散要素法（DEM）と流体の流れ場を解析する数値流体力学（CFD）とを連成させることで、固体粒子を流体中に浮遊させた状態の流動層の挙動を解析する手法が公知である（非特許文献1、2）。非特許文献1には、粒子数が増えたときの計算時間の増大を抑制するシミュレーション方法が提案されている。具体的には、粒子を拡大して粒子数を減らす処理（粗視化）を行い、粗視化の前後で支配方程式が同じになるように物性値や物理量を変換し、粗視化後の流動層についてシミュレーションを実行する。非特許文献2には、流動層内の熱輸送を評価する手法が提案されている。

先行技術文献

非特許文献

[0003] 非特許文献1：鷲野 公彰、許 志宏、川口 寿裕、辻 裕、「流動層のDEM計算における相似則モデル」、粉体工学会誌 第44巻第3号、2007年、第198頁～第205頁

非特許文献2：A.V. Patil, E.A.J.F. Peters, J.A.M. Kuipers, "Comparison of CFD-DEM heat transfer simulations with infrared/visual measurements", Chemical Engineering Journal 277 (2015) 388-401

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 非特許文献1には、熱輸送に関するパラメータについて何ら述べられてい

ない。すなわち、非特許文献1に記載された方法は、冷間状態（温度変化せず、通常は室温状態）での流動層の挙動のシミュレーションに適用できるが、熱輸送が生じ得る熱間状態の流動層のシミュレーションに適用することはできない。熱間状態の流動層のシミュレーションに非特許文献2に記載の方法を適用すると、粒子数の増大に伴って計算負荷が大きくなってしまう。

[0005] 本発明の目的は、熱輸送が生じ得る流動層のシミュレーションにおいて、粒子数が増えても計算負荷の増大を抑制することが可能なシミュレーション方法、シミュレーション装置、及びプログラムを提供することである。

課題を解決するための手段

[0006] 本発明の一観点によると、

流体、及び前記流体中の複数の粒子を含むシミュレーション対象の流動層に含まれる前記粒子を仮想的に拡大し、個数を減らす粗視化を行い、

粗視化の前後で、流動層の流れに関する無次元量及び熱輸送に関する無次元量に変化しない条件の下で、前記粒子及び前記流体の物性値、前記粒子及び前記流体に定義される物理量を変換して、

変換後の前記物性値及び前記物理量を用いて流動層の挙動をシミュレーションするシミュレーション方法が提供される。

[0007] 本発明の他の観点によると、

流体、及び前記流体中の複数の粒子を含むシミュレーション対象の流動層の前記流体及び前記粒子の物性値、前記流体及び前記粒子に定義される物理量の初期条件を取得するシミュレーション条件取得部と、

前記粒子を拡大する拡大率を取得する拡大率取得部と、

前記粒子を拡大しても流動層の流れに関する無次元量及び熱輸送に関する無次元量に変化しない条件の下で、前記シミュレーション条件取得部で取得された前記物理量の初期条件及び前記物性値を変換して、変換後の前記物性値及び前記物理量を用いて流動層の挙動をシミュレーションする演算部とを有するシミュレーション装置が適用される。

[0008] 本発明のさらに他の観点によると、

流体、及び前記流体中の複数の粒子を含むシミュレーション対象の流動層の前記流体及び前記粒子の物性値、前記流体及び前記粒子に定義される物理量の初期条件を取得する機能と、

前記粒子を拡大する拡大率を取得する機能と、

前記粒子を拡大しても流動層の流れに関する無次元量及び熱輸送に関する無次元量に変化しない条件の下で、取得された前記物理量の初期条件及び前記物性値を変換して、変換後の前記物性値及び前記物理量を用いて流動層の挙動をシミュレーションする機能と

をコンピュータに実現させるためのプログラムが提供される。

発明の効果

[0009] 粒子を粗視化して個数を減らすことにより、計算負荷を軽減させることができる。粗視化後の流動層の流れ及び熱輸送に関してシミュレーションを行った結果は、粗視化前の流動層の流れ及び熱輸送の状況を反映したものになる。このため、粗視化前の流動層の挙動を予測することができる。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]図1 Aは、シミュレーション対象の流動層の一例を示す模式図であり、図1 Bは、シミュレーション対象の粗視化後の流動層の一例を示す模式図である。

[図2]図2は、粒子及びガスの物性値、粒子及びガスに関して定義される種々の物理量について、本明細書で用いる記号及び粗視化の係数の一覧を示す図表である。

[図3]図3は、本実施例によるシミュレーション装置のブロック図である。

[図4]図4は、本実施例によるシミュレーション方法のフローチャートである。

[図5]図5は、実際に行ったシミュレーションのシミュレーション領域を示す斜視図である。

[図6]図6は、粗視化した流動層のシミュレーションにより求めた粗視化粒子の位置及び温度を、時系列で示す図である。

[図7]図7 A及び図7 Bは、シミュレーション結果から求めた粒子の平均温度の時間変化を示すグラフである。

[図8]図8は、他の実施例によるシミュレーション方法で適用される変換則を示す図表である。

発明を実施するための形態

[0011] 図1 A～図7 Bを参照して、実施例によるシミュレーション方法及び装置について説明する。

図1 Aは、シミュレーション対象の流動層の一例を示す模式図である。シミュレーション対象の領域10内に複数の粒子11を配置し、下方から上方に向かって領域10内にガス12を導入することにより形成される流動層の挙動をシミュレーションする。粒子11の直径を D_{p1} で表す。本実施例では、粒子11の各々を拡大して、その個数を減らす（以下、粗視化という。）ことにより、計算負荷を軽減させる。

[0012] 図1 Bは、シミュレーション対象の粗視化後の流動層の一例を示す模式図である。粒子11を拡大して仮想的な粒子21を得る。仮想的な粒子21は、シミュレーション対象の領域20内に配置される。粗視化後の領域20の寸法は、粗視化前の領域10の領域の寸法と同一である。仮想的な粒子21の直径を D_{p2} で表す。拡大率 K を、粗視化前の粒子11の直径に対する粗視化後の仮想的な粒子21の直径の比と定義する。拡大率 K は以下の式で定義される。

[数1]

$$D_{p2}=K \cdot D_{p1} \cdots (1)$$

[0013] 粗視化後の粒子21が配置された領域20内に下方から上方に向かってガス22を導入することにより形成される粗視化後の流動層について、数値流体力学（CFD）と離散要素法（DEM）とを連成させた解析を行う。粗視化後の仮想的な流動層と、粗視化前の実際の流動層とが相似則を満たすように、粗視化に際し、粒子11及びガス12の物性値及び種々の物理量を変換

する。

[0014] 次に、図2を参照して、粒子11及びガス12の物性値及び種々の物理量の変換則について説明する。

[0015] 図2は、粒子及びガスの物性値、粒子及びガスに関して定義される種々の物理量について、本明細書で用いる記号及び粗視化の係数の一覧を示す図表である。粗視化前の実際の物性値及び物理量に粗視化の係数を乗ずることにより、粗視化後の流動層に関する物性値及び物理量が得られる。本明細書において、例えば式(1)に示したように、粗視化前の物性値及び物理量を表す記号には、下付きの添え字「1」を付し、粗視化後の物性値及び物理量を表す記号には、下付きの添え字「2」を付す。

[0016] 流動層の流れに関する無次元量として、粒子レイノルズ数 Re_p 、アルキメデス数 Ar_p 、及びフルード数 Fr が挙げられる。これらの無次元量は以下の式で定義される。

[数2]

$$Re_p = \frac{|V - U| \rho_f \epsilon D_p}{\mu}$$

$$Ar_p = \frac{D_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu^2}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g D_p}} \dots (2)$$

ここで、 g は重力加速度である。太字の V 及び U は、ベクトルであることを意味する。ボイド率 ϵ は、充填された粒子の全質量を M 、粒子が充填された領域の見かけの体積を V_A として、以下の式で定義される。

[数3]

$$\epsilon = 1 - \frac{M}{\rho_p V_A} \dots (3)$$

[0017] 粗視化の前後で、流動層の流れに関する無次元量である粒子レイノルズ数

Re_p 、アルキメデス数 A_{rp} 、及びフルード数 Fr が変化しないという条件を設定する。さらに、ボイド率 ε が変化しないという条件、及びガス粘性係数 μ が変化しないという条件の下で、粗視化前後の物性値及び物理量の変換則を求めると、以下の変換則が得られる。

[数4]

$$\rho_{f2} = \frac{1}{K\sqrt{K}} \rho_{f1}$$

$$\rho_{p2} = \frac{1}{K\sqrt{K}} \rho_{p1}$$

$$V_2 = \sqrt{K} V_1$$

$$U_2 = \sqrt{K} U_1$$

$$V_{mf2} = \sqrt{K} V_{mf1} \cdots (4)$$

[0018] ガス密度 ρ_{f2} の変換則から、ガス圧力 p について、以下の変換則が得られる。

[数5]

$$p_2 = \frac{1}{K\sqrt{K}} p_1 \cdots (5)$$

[0019] 粗視化の前後で粒子が充填された領域の見かけの体積 V_A が変化せず、粒子の個数が粗視化によって $1/K^3$ に減少すると仮定すると、以下の変換則が得られる。

[数6]

$$m_{p2} = (K\sqrt{K}) m_{p1} \cdots (6)$$

[0020] 粒子質量流量 $\dot{m}_p$ ドットは、流路面積を A として以下の式で定義される。

[数7]

$$\dot{m}_p = \rho_p U A \cdots (7)$$

この式から、以下の変換則が導出される。

[数8]

$$\dot{m}_{p2} = \frac{1}{K} \dot{m}_{p1} \cdots (8)$$

[0021] さらに、熱輸送に関する無次元量についても、粗視化の前後で変化しないという条件を付す。熱輸送に関する無次元量として、プラントル数 Pr 、粒子ヌセルト数 Nu_p 、ビオ数 Bi が挙げられる。プラントル数 Pr 、粒子ヌセルト数 Nu_p 、ビオ数 Bi は以下の式で定義される。

[数9]

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{\mu c_{p,f}}{k_f} \\ Nu_p &= \frac{h D_p}{k_f} \\ Bi &= \frac{h L_p}{k_p} \cdots (9) \end{aligned}$$

ここで、 L_p は粒子の特徴長さであり、 $L_p = D_p / 6$ で定義することができる。

[0022] 物性値の温度依存性を簡単化するために、粗視化の前後で粒子温度 T_p 及びガス温度 T が変化しないと仮定する。さらに、粒子熱伝達係数 h も、粗視化の前後で変化しないと仮定する。この仮定の下で、以下の変換則が得られる。

[数10]

$$\begin{aligned} k_{p2} &= K \cdot k_{p1} \\ k_{f2} &= K \cdot k_{f1} \\ c_{p,f2} &= K \cdot c_{p,f1} \cdots (10) \end{aligned}$$

[0023] 上述の仮定のみでは、粒子比熱 c の変換則が定まらない。本実施例では、

粒子比熱 c の変換則を決定するために、粗視化の前後で粒子全体の顕熱 $Q_{p, all}$ が変化しないという仮定を導入する。粒子全体の顕熱 $Q_{p, all}$ は、粒子の個数を N_p 、流動層に導入するガス温度 T に対する粒子の初期温度の差を ΔT_p として、以下の式で定義される。

[数11]

$$Q_{p,all}=N_p m_p c \Delta T_p \cdots (11)$$

[0024] 粒子の個数 N_p は、粗視化によって約 $1/K^3$ に減少するため、粒子全体の顕熱 $Q_{p, all}$ が粗視化の前後で不変と仮定すると、以下の変換則が得られる。

[数12]

$$c_2=(K\sqrt{K})c_1 \cdots (12)$$

[0025] 粒子表面の伝熱量 Q ドットは、以下の式で定義される。

[数13]

$$\dot{Q}=hA_s(T-T_p) \cdots (13)$$

この定義から、伝熱量 Q ドットについて以下の変換則が得られる。

[数14]

$$\dot{Q}_2=K^2 \dot{Q}_1 \cdots (14)$$

粒子表面の熱流束 q ドットについては、以下の変換則が得られる。

[数15]

$$\dot{q}_2=\dot{q}_1 \cdots (15)$$

[0026] 図3は、本実施例によるシミュレーション装置のブロック図である。本実施例によるシミュレーション装置は、処理装置30、入力装置38、及び出力装置39を含む。処理装置30は、シミュレーション条件取得部31、拡大率取得部32、演算部33、及び出力制御部34を含む。

[0027] 図3に示す各ブロックは、ハードウェア的には、コンピュータの中央処理ユニット（CPU）をはじめとする素子や機械装置で実現することができ、ソフトウェア的にはコンピュータプログラム等によって実現することができる。図3では、ハードウェア及びソフトウェアの連携によって実現される機能ブロックが示されている。従って、これらの機能ブロックは、ハードウェア及びソフトウェアの組み合わせによって、種々の態様で実現することが可能である。

[0028] 処理装置30は入力装置38及び出力装置39と接続される。入力装置38は、処理装置30で実行される処理に関係するユーザからのコマンド及びデータの入力を受ける。入力装置38として、例えばユーザが操作を行うことにより入力を行うキーボードやマウス、インターネット等のネットワークを介して入力を行う通信装置、CD、DVD等の記録媒体から入力を行う読取装置等を用いることができる。

[0029] シミュレーション条件取得部31は、入力装置38を介してシミュレーション条件を取得する。シミュレーション条件には、シミュレーションに必要な種々の情報が含まれる。例えば、シミュレーション対象の粒子及びガスの物性値、粒子及びガスに関する物理量の初期条件、境界条件等が含まれる。拡大率取得部32は、入力装置38を介して拡大率K（図2）を取得する。

[0030] 演算部33は、シミュレーション条件及び拡大率Kに基づいて、粗視化前の物性値及び物理量に粗視化の係数（図2）を乗じることにより、粒子及びガスの粗視化後の物性値及び物理量の初期条件を算出する。粗視化後の物性値及び物理量の初期条件に基づき、CFDとDEMとを連成させた流動層のシミュレーションを行う。

[0031] 出力制御部34は、シミュレーション結果を出力装置39に出力する。例えば、粒子の位置及び温度の変動、ガスの温度分布の変動を、出力装置39の表示画面に図形で表示する。

[0032] 図4は、本実施例によるシミュレーション方法のフローチャートである。まず、シミュレーション条件取得部31（図3）がシミュレーション条件を

取得し（ステップS 1）、拡大率取得部3 2（図3）が拡大率K（図2）を取得する（ステップS 2）。

[0033] その後、演算部3 3（図3）は、シミュレーション条件として入力された物性値及び物理量の初期値を、粗視化後の値に変換する（ステップS 3）。さらに、変換後の物性値及び物理量に基づいてシミュレーションを実行する（ステップS 4）。シミュレーションが終了すると、出力制御部3 4（図3）がシミュレーション結果を出力する（ステップS 5）。

[0034] 次に、図5～図7 Bを参照して、本実施例によるシミュレーション方法を用いて実際にシミュレーションを行った結果について説明する。このシミュレーションの対象は、非特許文献2に記載されているものと同一である。

[0035] 図5は、シミュレーション領域4 0を示す斜視図である。シミュレーション領域4 0は、幅8 c m、厚さ1. 5 c m、高さ2 5 c mの直方体である。シミュレーション領域4 0内に、直径1 m mの複数のガラス粒子を充填し、シミュレーション領域4 0の底面からシミュレーション領域4 0内にガスを導入する。粒子密度 ρ_p を2 5 0 0 k g / m³とした。粒子比熱 c を8 4 0 J / k g / Kとし、ガス定圧比熱 $c_{p, f}$ を1 0 1 0 J / k g / Kとし、ガス粘性係数 μ を2. 0 × 1 0⁻⁵ P a · sとした。シミュレーション領域4 0内に充填する粒子の質量の合計を7 5 gとした。粒子の初期温度よりも低温のガスをシミュレーション領域4 0内に導入した。ガスの流速を1. 2 0 m / sとした場合（流速が遅い場合）と、1. 5 4 m / sとした場合（流速が速い場合）とについてシミュレーションを行った。

[0036] 拡大率Kを2にして粗視化した流動層と、元の流動層との2つについてシミュレーションを行った。

[0037] 図6は、粗視化した流動層のシミュレーションにより求めた粗視化粒子の位置及び温度を、時系列で示す図である。図6の左から1番目、2番目、3番目、及び4番目の図は、それぞれ冷却開始時点、冷却開始からの経過時間が t 、 $2t$ 、及び $3t$ の流動層の状態を示す。各粒子の濃さは粒子の温度を表しており、温度が高いほど濃く表されている。ガスの流入によって粒子が

流動し、時間の経過とともに粒子の温度が低下していることがわかる。

[0038] 図 7 A 及び図 7 B は、シミュレーション結果から求めた粒子の平均温度の時間変化を示すグラフである。横軸は冷却開始からの経過時間を任意単位で表し、縦軸は粒子の平均温度を、初期温度を基準とした相対値で表す。図 7 A は、ガス流速が遅い場合を示し、図 7 B は、ガス流速が速い場合を示している。グラフ中の破線は粗視化前の流動層のシミュレーション結果を示し、実線は粗視化後の流動層のシミュレーション結果を示している。参考のために、非特許文献 2 に示された実験結果による粒子の温度変化を丸記号で示している。

[0039] 図 7 A 及び図 7 B に示したシミュレーション結果から、本実施例による方法で粗視化してシミュレーションを行っても、シミュレーション結果は実験結果とよく一致していることが確認できる。ガスの流速を速くすると、粒子の温度低下が速くなることも確認できる。このように、本実施例による粗視化の手法は、温度変化を伴う流動層の挙動のシミュレーションに適用することが可能である。

[0040] 粗視化を行うことにより、シミュレーションに要する計算時間は、粗視化前の流動層のシミュレーションと比べて約 $1/3$ になった。このように、粗視化により計算負荷を低減させることができる。

[0041] 次に、図 8 を参照して他の実施例による物性値及び物理量の変換則について説明する。

図 8 は、本実施例によるシミュレーション方法で適用される変換則を示す図表である。以下、図 2 に示した変換則と比較しながら説明する。

[0042] 流動層の流れに関する無次元量、及び熱輸送に関する無次元量を、粗視化の前後で変化させない点は、図 2 に示した実施例の場合と同様である。粒子温度 T_p 、ガス温度 T 、粒子熱伝達係数 h が、粗視化の前後で変化しない点についても、図 2 に示した実施例の場合と同様である。

[0043] 図 2 に示した実施例では、粗視化の前後でガス粘性係数 μ が変化しないと仮定したが、本実施例では、粗視化の前後で粒子密度 ρ_p 及びガス密度 ρ_f が

変化しないと仮定する。この仮定の下で、粒子全体の顕熱 $Q_{p, all}$ が粗視化の前後で変化しないと仮定すると、粒子比熱 c も、粗視化の前後で変化しない。さらに、ガス圧力 p も、粗視化の前後で変化しない。

[0044] 図8に示した実施例では、粒子質量 m_p 、ガス粘性係数 μ 、粒子比熱 c 、ガス定圧比熱 $c_{p, f}$ 、粒子質量流量 m_p ドットの変換則が、図2に示した変換則と異なっている。図8に示した変換則を用いて粒子及びガスの物性値と物理量を変換してシミュレーションを行ってもよい。

[0045] 上述の各実施例は例示であり、異なる実施例で示した構成の部分的な置換または組み合わせが可能であることは言うまでもない。複数の実施例の同様の構成による同様の作用効果については実施例ごとには逐次言及しない。さらに、本発明は上述の実施例に制限されるものではない。例えば、種々の変更、改良、組み合わせ等が可能なことは当業者に自明であろう。

符号の説明

- [0046] 10 シミュレーション対象領域
- 11 粒子
 - 12 流体
 - 20 粗視化後のシミュレーション対象領域
 - 21 粗視化後の粒子
 - 22 粗視化後の流体
 - 30 処理装置
 - 31 シミュレーション条件取得部
 - 32 拡大率取得部
 - 33 演算部
 - 34 出力制御部
 - 38 入力装置
 - 39 出力装置
 - 40 シミュレーション領域

請求の範囲

- [請求項1] 流体、及び前記流体中の複数の粒子を含むシミュレーション対象の流動層に含まれる前記粒子を仮想的に拡大し、個数を減らす粗視化を行い、
- 粗視化の前後で、流動層の流れに関する無次元量及び熱輸送に関する無次元量が変化しない条件の下で、前記粒子及び前記流体の物性値、前記粒子及び前記流体に定義される物理量を変換して、
- 変換後の前記物性値及び前記物理量を用いて流動層の挙動をシミュレーションするシミュレーション方法。
- [請求項2] 粗視化の前後で変化しない流れに関する無次元量は、粒子レイノルズ数、アルキメデス数、及びフルード数である請求項1に記載のシミュレーション方法。
- [請求項3] 粗視化の前後で変化しない熱輸送に関する無次元量は、プラントル数、粒子ヌセルト数、及びビオ数である請求項1または2に記載のシミュレーション方法。
- [請求項4] 粗視化の前後において、前記流体の温度及び前記粒子の温度を不変とする条件の下で前記物性値及び前記物理量を変換する請求項1または2に記載のシミュレーション方法。
- [請求項5] 粗視化の前後において、前記粒子と前記流体との間の熱伝達係数を不変とする条件の下で前記物性値及び前記物理量を変換する請求項1または2に記載のシミュレーション方法。
- [請求項6] 粗視化の前後において、全体の前記粒子の顕熱を不変とする条件の下で前記物性値及び前記物理量を変換する請求項1または2に記載のシミュレーション方法。
- [請求項7] 流体、及び前記流体中の複数の粒子を含むシミュレーション対象の流動層の前記流体及び前記粒子の物性値、前記流体及び前記粒子に定義される物理量の初期条件を取得するシミュレーション条件取得部と、

前記粒子を拡大する拡大率を取得する拡大率取得部と、

前記粒子を拡大しても流動層の流れに関する無次元量及び熱輸送に関する無次元量が変わらない条件の下で、前記シミュレーション条件取得部で取得された前記物理量の初期条件及び前記物性値を変換して、変換後の前記物性値及び前記物理量を用いて流動層の挙動をシミュレーションする演算部と
を有するシミュレーション装置。

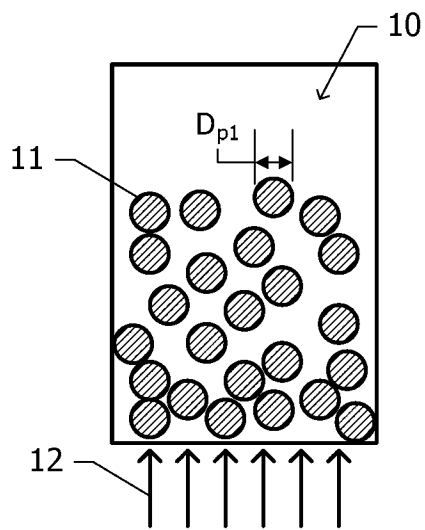
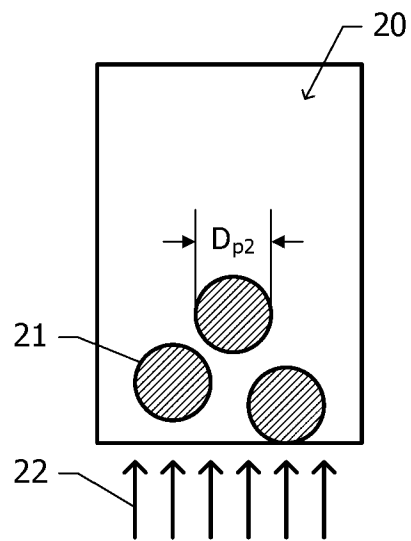
[請求項8]

流体、及び前記流体中の複数の粒子を含むシミュレーション対象の流動層の前記流体及び前記粒子の物性値、前記流体及び前記粒子に定義される物理量の初期条件を取得する機能と、

前記粒子を拡大する拡大率を取得する機能と、

前記粒子を拡大しても流動層の流れに関する無次元量及び熱輸送に関する無次元量が変わらない条件の下で、取得された前記物理量の初期条件及び前記物性値を変換して、変換後の前記物性値及び前記物理量を用いて流動層の挙動をシミュレーションする機能と
をコンピュータに実現させるためのプログラム。

[図1]

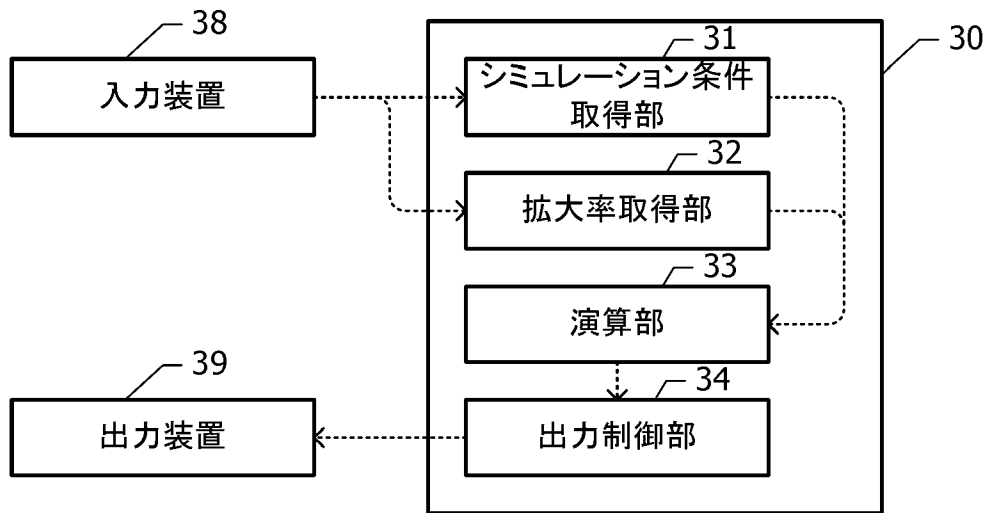
Fig.1A**Fig.1B**

[図2]

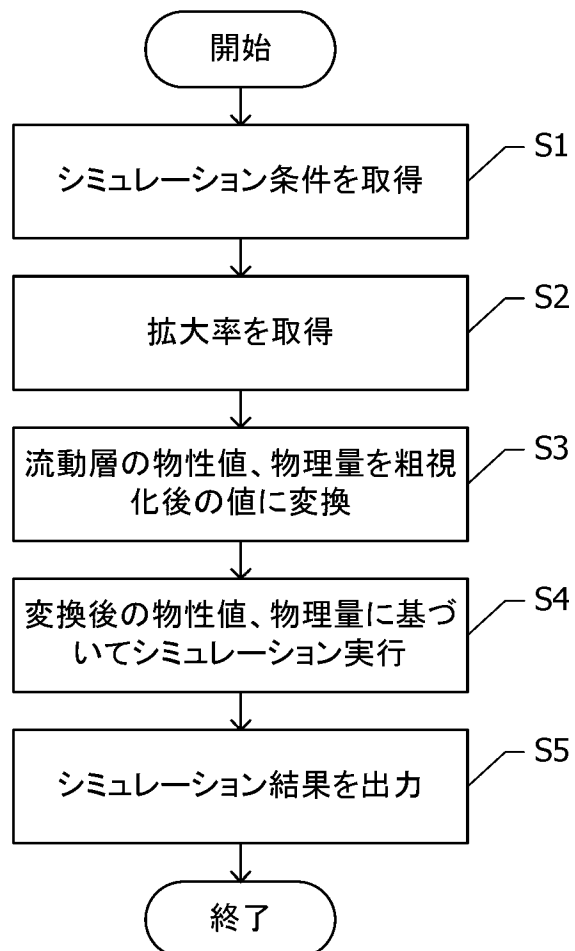
Fig.2

分類	定義	記号	粗視化の係数
粗視化条件	粒子直径 [m]	D_p	K
物性値	粒子密度 [kg/m^3]	ρ_p	$1/K\sqrt{K}$
	ガス密度 [kg/m^3]	ρ_f	$1/K\sqrt{K}$
	粒子質量 [kg]	m_p	$K\sqrt{K}$
	ガス粘性係数 [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	μ	1
	粒子熱伝導率 [W/m/K]	k_p	K
	粒子比熱 [J/kg/K]	c	$K\sqrt{K}$
	ガス熱伝導率 [W/m/K]	k_f	K
	ガス定圧比熱 [J/kg/K]	$c_{p,f}$	K
流れ、熱に関する 物理量	粒子速度 [m/s]	U	$\sqrt{K}$
	ガス流速 [m/s]	V	$\sqrt{K}$
	最小流動化速度 [m/s]	V_{mf}	$\sqrt{K}$
	粒子質量流量 [kg/s]	$\dot{m}_p$	$1/K$
	ガス圧力 [Pa]	p	$1/K\sqrt{K}$
	ボイド率 [-]	ε	1
	粒子温度 [K]	T_p	1
	ガス温度 [K]	T	1
	粒子の表面積 [m^2]	A_s	K^2
	粒子熱伝達係数 [$\text{W/m}^2/\text{K}$]	h	1
	粒子表面の伝熱量 [W]	$\dot{Q}$	K^2
	粒子表面の熱流束 [W/m^2]	$\dot{q}$	1
	粒子全体の顕熱 [J]	$Q_{p,all}$	1
無次元量	粒子レイノルズ数 [-]	Re_p	1
	アルキメデス数 [-]	Ar_p	1
	フルード数 [-]	Fr	1
	プラントル数 [-]	Pr	1
	粒子ヌセルト数 [-]	Nu_p	1
	ビオ数 [-]	Bi	1

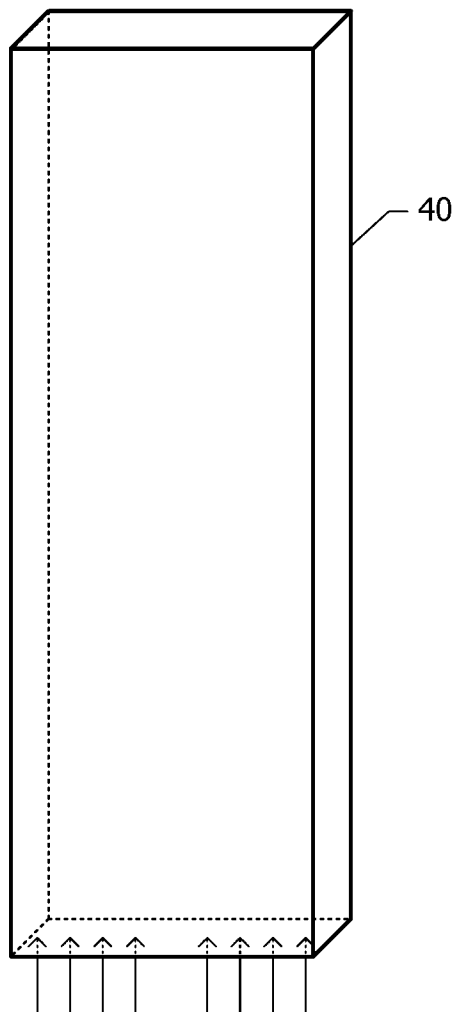
[図3]

Fig.3

[図4]

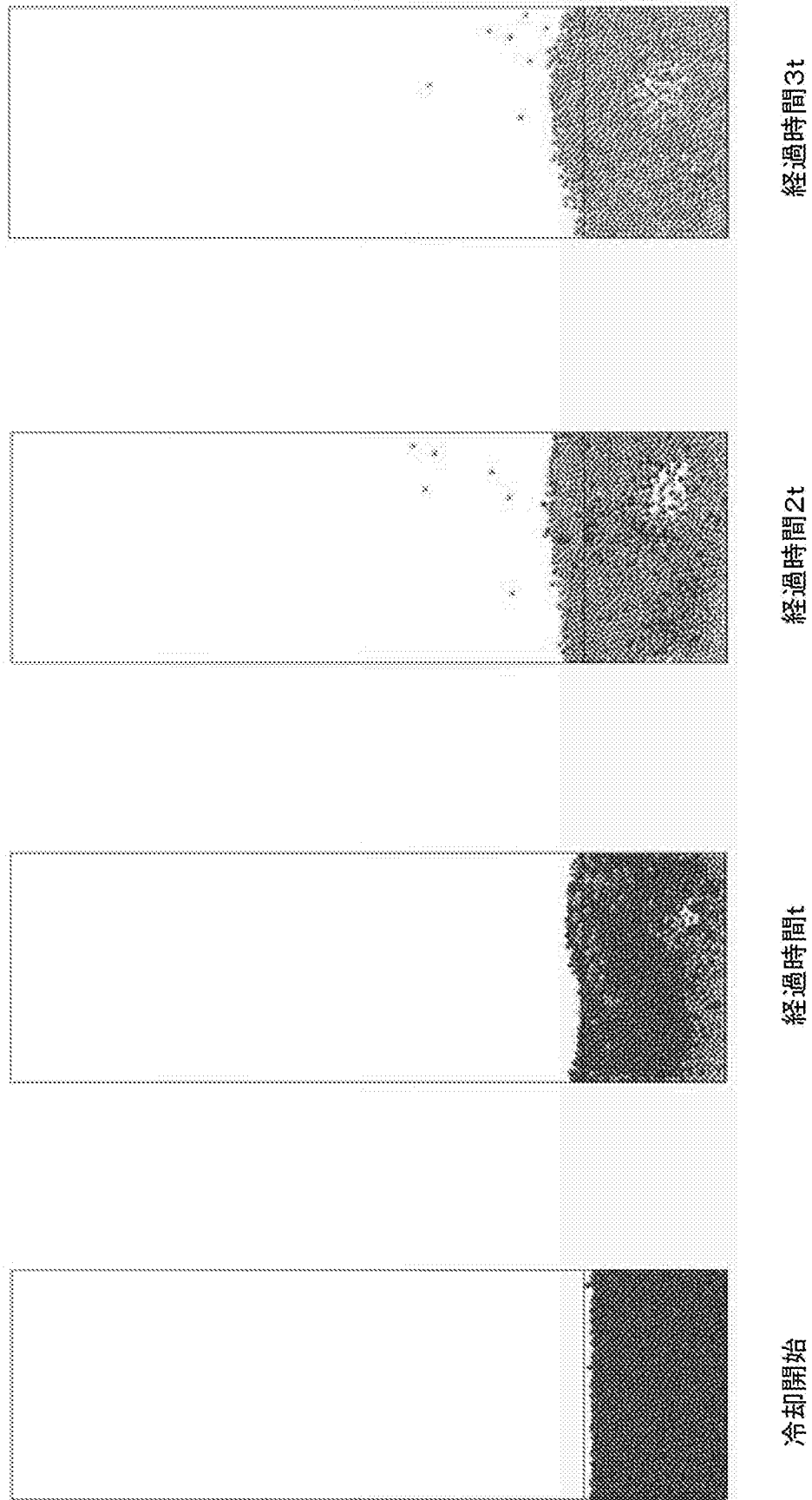
Fig.4

[図5]

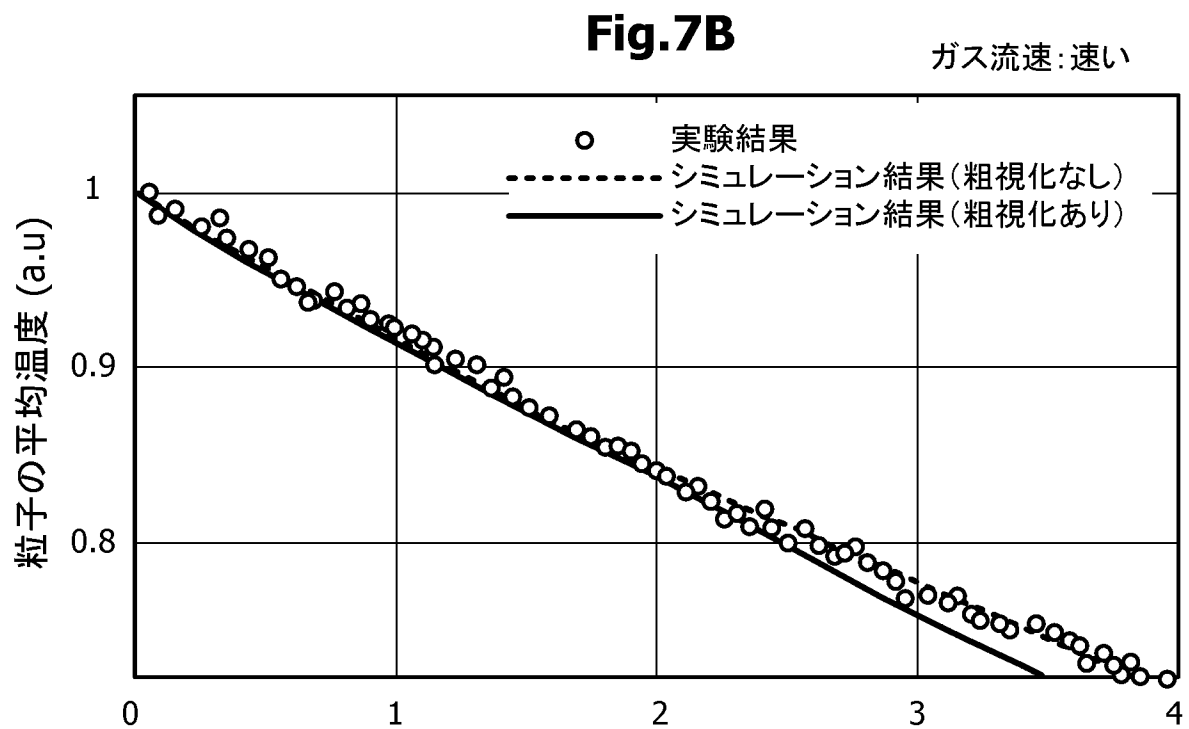
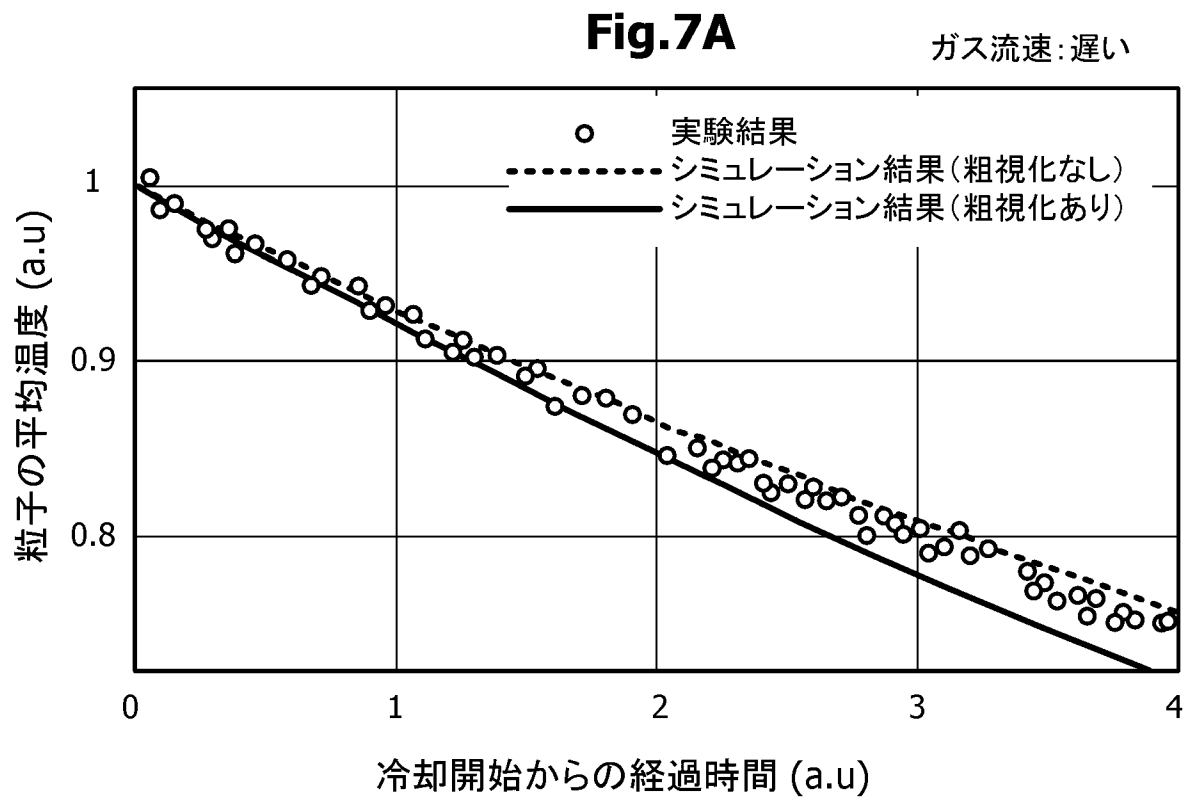
Fig.5

[図6]

Fig.6



[図7]



[図8]

Fig.8

分類	定義	記号	粗視化の係数
粗視化条件	粒子直径 [m]	D_p	K
物性値	粒子密度 [kg/m ³]	ρ_p	1
	ガス密度 [kg/m ³]	ρ_f	1
	粒子質量 [kg]	m_p	K^3
	ガス粘性係数 [Pa·s]	μ	$K\sqrt{K}$
	粒子熱伝導率 [W/m/K]	k_p	K
	粒子比熱 [J/kg/K]	c	1
	ガス熱伝導率 [W/m/K]	k_f	K
	ガス定圧比熱 [J/kg/K]	$c_{p,f}$	$1/\sqrt{K}$
流れ、熱に関する 物理量	粒子速度 [m/s]	U	$\sqrt{K}$
	ガス流速 [m/s]	V	$\sqrt{K}$
	最小流動化速度 [m/s]	V_{mf}	$\sqrt{K}$
	粒子質量流量 [kg/s]	$\dot{m}_p$	$\sqrt{K}$
	ガス圧力 [Pa]	p	1
	ボイド率 [-]	ε	1
	粒子温度 [K]	T_p	1
	ガス温度 [K]	T	1
	粒子の表面積 [m ²]	A_s	K^2
	粒子熱伝達係数 [W/m ² /K]	h	1
	粒子表面の伝熱量 [W]	$\dot{Q}$	K^2
	粒子表面の熱流束 [W/m ²]	$\dot{q}$	1
	粒子全体の顕熱 [J]	$Q_{p,all}$	1
無次元量	粒子レイノルズ数 [-]	Re_p	1
	アルキメデス数 [-]	Ar_p	1
	フルード数 [-]	Fr	1
	プラントル数 [-]	Pr	1
	粒子ヌセルト数 [-]	Nu_p	1
	ビオ数 [-]	Bi	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/009133

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. G16Z99/00 (2019.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl. G16Z99/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2019

Registered utility model specifications of Japan 1996-2019

Published registered utility model applications of Japan 1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus (JDreamIII), JST7580 (JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2010-108183 A (IHI CORP.) 13 May 2010, entire text, all drawings (Family: none)	1-8
A	鷲野公彰, 流動層の DEM 計算における相似則モデル, 粉体工学会誌, 16 March 2007, vol. 44, no. 3, pp. 198-205 (WASHINO, Kimiaki et al. Similarity Model for DEM Simulation of Fluidized Bed. Journal of the Society of Powder Technology, Japan.)	1-8
A	劉志宏, 相似則による DEM 流動層解析の高速化, IHI 技報, 01 June 2014, vol. 54, no. 2, pp. 61-65 (LIU, Zhihong et al. Acceleration of DEM Simulation of Fluidized Bed by Similarity Laws. Journal of IHI Technologies.)	1-8



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

25.03.2019

Date of mailing of the international search report

02.04.2019

Name and mailing address of the ISA/

Japan Patent Office

3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,

Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/009133

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	山井三亀夫, スケール則に基づく DEM シミュレーション, 粉体工学会誌, 10 February 2018, vol. 55, no. 2, pp. 95-103 (YAMANOI, Mikio, NAKATA, Yoichi. DEM Simulation Based on Scaling Rule. Journal of the Society of Powder Technology, Japan.)	1-8

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G16Z99/00 (2019.01) i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G16Z99/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JSTPlus (JDreamIII), JST7580 (JDreamIII)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2010-108183 A (株式会社 I H I) 2010.05.13, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-8
A	鷺野 公彰, 流動層の DEM 計算における相似則モデル, 粉体工学会 誌, 2007.03.16, Vol.44 No.3, pp.198-205	1-8
A	劉 志宏, 相似則による DEM 流動層解析の高速化, IHI 技報, 2014.06.01, Vol.54 No.2, pp.61-65	1-8

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

25.03.2019

国際調査報告の発送日

02.04.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

宮地 匡人

5 L

3796

電話番号 03-3581-1101 内線 3562

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	山井 三亀夫, スケール則に基づく DEM シミュレーション, 粉体工学会誌, 2018.02.10, Vol.55 No.2, pp.95-103	1-8