

(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
2020年9月3日(03.09.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/174536 A1

(51) 国際特許分類:
G06F 17/50 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2019/007071

(22) 国際出願日: 2019年2月25日(25.02.2019)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(71) 出願人: 国立大学法人九州大学 (**KYUSHU UNIVERSITY, NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION**) [JP/JP]; 〒8190395 福岡県福岡市西区元岡744 Fukuoka (JP).

(72) 発明者: 深川 宏樹 (**FUKAGAWA Hiroki**); 〒8190395 福岡県福岡市西区元岡744 国立大学法人九州大学内 Fukuoka (JP).

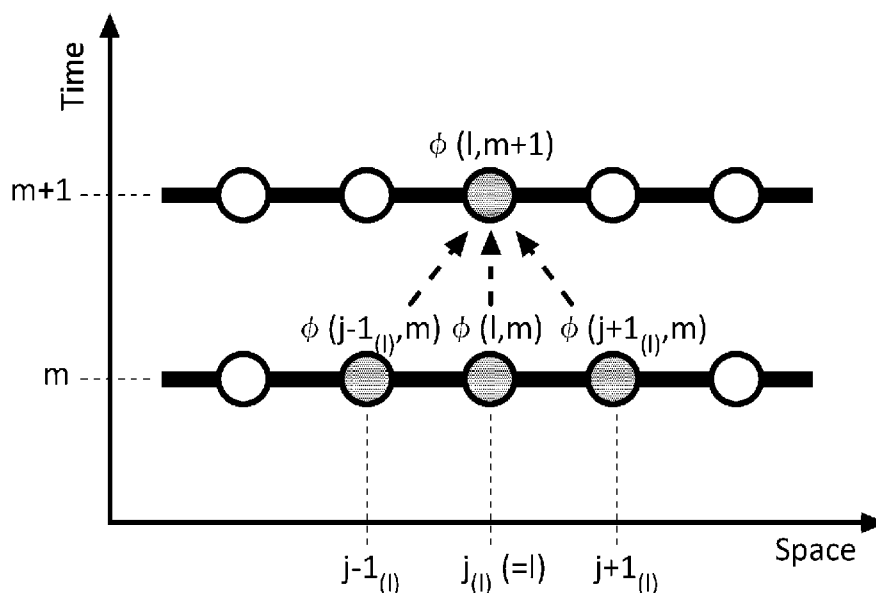
(74) 代理人: 野口 明生 (**NOGUCHI Akio**); 〒2100024 神奈川県川崎市川崎区日進町3-4 **unico A303** Kanagawa (JP).

(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, 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,

(54) **Title:** NUMERICAL VALUE CALCULATION METHOD AND NUMERICAL VALUE CALCULATION PROGRAM

(54) 発明の名称: 数値計算方法および数値計算プログラム



(57) **Abstract:** This numerical value calculation method and numerical value calculation program includes: a process for calculating, using a governing equation for a fluid, the physical quantity of the fluid at a second time from the physical quantity of the fluid at a first time only; a process for calculating, using a governing equation for a structure, the physical quantity of the structure at the second time from the physical quantity of the structure at the first time only; and a process for associating the pressure of the fluid and the stress in the structure at the first time only with each other, and calculating, using a governing equation for a boundary between the fluid and the structure, the position of the boundary at the second time.

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).

規則4. 17に規定する申立て：

- 一 不利にならない開示又は新規性喪失の例外に関する申立て（規則4. 17(v)）

添付公開書類：

- 一 国際調査報告（条約第21条(3)）

(57) 要約：本発明の数値計算方法および数値計算プログラムは、第1時刻のみにおける流体の物理量から第2時刻における流体の物理量を流体の支配方程式を用いて計算する処理と、第1時刻のみにおける構造体の物理量から第2時刻における構造体の物理量を構造体の支配方程式を用いて計算する処理と、第1時刻のみにおける流体の圧力と構造体の応力を対応させて、第2時刻における流体と構造体との境界面の位置を境界面の支配方程式を用いて計算する処理とを含む。

明 細 書

発明の名称：数値計算方法および数値計算プログラム

技術分野

[0001] 本発明は、数値計算方法および数値計算プログラムに関する。

背景技術

[0002] 現在の製品設計ではCAD (Computer-Aided Design) が一般的に用いられている。さらに、製品設計で作成されるCADデータを研究・開発工程におけるエンジニアリングにも用いる、いわゆるCAE (Computer-Aided engineering) も実用化されてきた。CADデータを用いてシミュレーションを行うことで製品性能の事前検証ができれば研究・開発工程を高速化できるからである。

[0003] 工業製品の検証では流体構造連成解析が必要とされる。流体構造連成解析とは、流体の流動と構造体の変形の相互作用を考慮した解析であり、例えば軸受の事前検証では、潤滑油の流れで生じる力で軸受が変形する様子を解析する必要がある。この相互作用に関し、従来の流体構造連成解析では、流体と構造体で別個に方程式を解き、境界面を修正して解を収束させる反復法が用いられてきた（例えば特許文献1参照）。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2006-72566号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] しかしながら、反復法を用いた流体構造連成解析で解を収束させるためには、流体と構造体の方程式を反復して計算する必要がある。一方、現在のコンピュータの主流は、複数の演算器（コア）と階層構造のメモリを採用しており、メモリバンド幅が演算性能に比べて低い（Byte/Flopが低い）。このような構成のコンピュータの演算性能を引き出すにはレジスタやキ

キャッシュメモリを有効に使い、メモリにおけるデータ通信量を抑えることができる参照の局所性が高い計算方法を用いる必要がある。この観点からは、反復法を用いた流体構造連成解析は、別個に解いた方程式の解における誤差を比較する必要がある、現在の主流となっている計算機のアーキテクチャに適するものではない。

[0006] 本発明は、上記に鑑みてなされたものであり、その目的は、参照の局所性が高い流体構造連成解析の数値計算方法および数値計算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

[0007] 上記課題を解決するために、本発明の一態様にかかる数値計算方法は、複数の演算器と前記演算器が演算に用いるデータを記憶するための階層型の記憶装置とを有するコンピュータを用いて、前記階層型の記憶装置に記憶されている第1時刻における流体および構造体の物理量から微小時間後の第2時刻における前記流体および前記構造体の物理量を連成解析する数値計算方法であって、前記第1時刻のみにおける流体の物理量から前記第2時刻における前記流体の物理量を流体の支配方程式を用いて計算する処理と、前記第1時刻のみにおける構造体の物理量から前記第2時刻における前記構造体の物理量を構造体の支配方程式を用いて計算する処理と、前記第1時刻のみにおける流体の圧力と構造体の応力を対応させて、前記第2時刻における流体と構造体との境界面の位置を境界面の支配方程式を用いて計算する処理と、を含むことを特徴とする。

[0008] また、本発明の一態様にかかる数値計算プログラムは、複数の演算器と前記演算器が演算に用いるデータを記憶するための階層型の記憶装置とを有するコンピュータに対して、前記階層型の記憶装置に記憶されている第1時刻における流体および構造体の物理量から微小時間後の第2時刻における前記流体および前記構造体の物理量を連成解析する数値計算を指令する数値計算プログラムであって、前記第1時刻のみにおける流体の物理量から前記第2時刻における前記流体の物理量を流体の支配方程式を用いて計算する処理と

、前記第 1 時刻のみにおける構造体の物理量から前記第 2 時刻における前記構造体の物理量を構造体の支配方程式を用いて計算する処理と、前記第 1 時刻のみにおける流体の圧力と構造体の応力を対応させて、前記第 2 時刻における流体と構造体との境界面の位置を境界面の支配方程式を用いて計算する処理と、を含むことを特徴とする。

発明の効果

[0009] 本発明によれば、参照の局所性が高い流体構造連成解析の数値計算方法および数値計算プログラムを提供することができる。

図面の簡単な説明

- [0010] [図1]図 1 は、共有メモリ型の階層構造の概念を示す図である。
[図2]図 2 は、分散メモリ型の階層構造の概念を示す図である。
[図3]図 3 は、参照の局所性が高い陽解法の概念を示す図である。
[図4]図 4 は、実施例に用いる流体軸受の模式図である。
[図5]図 5 は、自然座標系から空間座標系への座標変換を示す模式図である。
[図6]図 6 は、圧度分布の計算結果を示すグラフである。
[図7]図 7 は、密度分布の計算結果を示すグラフである。
[図8]図 8 は、圧力分布の計算結果の比較を示すグラフである。
[図9]図 9 は、計算結果の比較を示すグラフである。
[図10]図 10 は、並列性能の検証結果を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0011] 以下、図面を参照しながら、本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムを詳細に説明する。ただし、以下の説明で参照される図面は模式的なものであり、寸法またはその比率が実際のものとは異なる場合がある。

[0012] [装置構成]

図 1 は、共有メモリ型の階層構造の概念を示す図であり、図 2 は、分散メモリ型の階層構造の概念を示す図である。本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムは、複数の演算器とこれらが演算に用いる

データを記憶するための階層型の記憶装置とを有するコンピュータにおいて好適に実施される。そこで、図1および図2を参照しながら、複数の演算器と階層構造の記憶装置を備えるコンピュータにおける計算処理について説明する。なお、複数の演算器を備えるコンピュータは並列計算機や並列コンピュータとも呼ばれ、この並列計算機上の計算処理は並列処理や並列コンピューティングとも呼ばれる。

[0013] 図1に示される概念図には、複数の演算器 $10_1 \sim 10_n$ とこれらが演算に用いるデータを記憶するための階層型の記憶装置11とを備える並列計算機100が記載されている。階層型の記憶装置11とは、各演算器 $10_1 \sim 10_n$ と主記憶装置12との間に階層化された記憶装置を配したものである。図1に示される例では、演算器 $10_1 \sim 10_n$ から順に、レジスタ $13_1 \sim 13_n$ 、L1キャッシュメモリ $14_1 \sim 14_n$ 、L2キャッシュメモリ $15_1 \sim 15_m$ 、主記憶装置12の構成を有している。なお、図1に示される構成は、一つの例であり、階層型の記憶装置11の構成はこれに限定されるものではなく、階層の程度としても、L2キャッシュメモリ $15_1 \sim 15_m$ と主記憶装置12との間にL3キャッシュメモリを備えるなどの変形例がある。

[0014] これらの記憶装置の処理速度は、主記憶装置12、L2キャッシュメモリ $15_1 \sim 15_m$ 、L1キャッシュメモリ $14_1 \sim 14_n$ 、レジスタ $13_1 \sim 13_n$ の順で高速であり、メモリのデータ転送能力であるメモリバンド幅は、演算器 $10_1 \sim 10_n$ の演算性能に比べて低い（Byte/Flopが低い）。このような特性から、参照の局所性を高めることが演算性能を発揮させるために重要となる。

[0015] なお、参照の局所性が高い状態とは、一度参照されたデータが再度参照されることや当該データに近いアドレスのデータが参照される可能性が高いという状態である。言い換えると、演算器 $10_1 \sim 10_n$ がレジスタ $13_1 \sim 13_n$ またはL1キャッシュメモリ $14_1 \sim 14_n$ もしくはL2キャッシュメモリ $15_1 \sim 15_m$ など上位の記憶装置に記憶されているデータを用いて計算を行うことができる状態である。

[0016] 逆に言えば、演算器 $10_1 \sim 10_n$ が主記憶装置 12 に記憶されているデータを用いなければならない状況を少なくする戦略が必要である。例えば、そのような状況は、演算器 10_1 が計算した結果を用いて演算器 10_n が計算をしなければならないときに起きる。また、演算器 10_1 が計算した結果を用いて演算器 10_n が計算をしなければならない場合には、演算器 10_1 の計算が終わらなければ演算器 10_n の計算を開始することができず、待ち時間が発生してしまうという問題も発生してしまう。

[0017] 図2は、分散メモリ型の階層構造の概念を示す図であり、大型計算機システムなどで採用されている。図2に示される並列計算機200では、各ノード $16_1 \sim 16_n$ が複数の演算器とこれらが演算に用いるデータを記憶するための階層型の記憶装置とを備えており、さらに、各ノード $16_1 \sim 16_n$ における主記憶装置 $12_1 \sim 12_n$ がネットワーク17を介して互いに共有されている。ここで、主記憶装置 $12_1 \sim 12_n$ の共有とは、主記憶装置 $12_1 \sim 12_n$ に単一のアドレスを付与することで、各ノード $16_1 \sim 16_n$ の演算器が、主記憶装置 $12_1 \sim 12_n$ に記憶されているデータを相互に参照することができることをいう。

[0018] 上記のような構成のコンピュータでも、参照の局所性を高めることが演算性能を発揮させるために重要となる。特に、あるノード $16_1 \sim 16_m$ の演算器が、他のノード $16_1 \sim 16_m$ の主記憶装置 $12_1 \sim 12_n$ に記憶されているデータを参照するような状況を可能な限り少なくすることが重要である。

[0019] 上記観点から、反復法を用いた流体構造連成解析は、現在の主流となっている計算機のアーキテクチャに適するものではない。反復法を用いた流体構造連成解析は、別個に解いた方程式の解における誤差を比較する必要があり、参照の局所性が低いからである。そこで、本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムは、陽解法を用いた流体構造連成解析を行う。以下、陽解法に関する説明を行う。

[0020] [陽解法]

陽解法とは、第1時刻 t における状態量のみから微小時間後の第2時刻 $t + \Delta t$

における位置 x の状態量を計算する方法である。一方、陰解法は、第2時刻 $t+\Delta t$ における位置 x の状態量を計算するために、第2時刻 $t+\Delta t$ における他の位置 x_i の状態量も用いる方法である。端的には、陰解法は、第2時刻 $t+\Delta t$ における位置 x の状態量を計算するために、第2時刻 $t+\Delta t$ における他の位置 x_i の状態量も含んだ連立方程式を解く必要があり、陽解法では、このような連立方程式を解く必要がない。

[0021] このように、陽解法では、連立方程式を解く必要がないので、時間ステップ当たりの計算量およびメモリ転送量が少ない。さらに、第2時刻 $t+\Delta t$ における位置 x の状態量を計算するために、第1時刻 t における位置 x の近傍のみの状態量から計算するようにすれば、より一層、参照の局所性が高まる。そこで、以下で参照の局所性が高い陽解法を適用し得る条件について説明する。

[0022] 結論としては、ある領域の場 $\phi(n, t)$ の時間発展が、以下の式(1)に示すように、場 $\phi(n, t)$ と当該場の空間に関する一階微分 $\phi'(n, t)$ と二階微分 $\phi''(n, t)$ の関数 f で表現することができればよい。なお、位置を $n=(n^1, n^2, n^3)$ とし、時刻を t としている。

[0023] [数1]

$$\frac{\partial \phi(n, t)}{\partial t} = f(\phi(n, t), \phi'(n, t), \phi''(n, t)) \quad (1)$$

[0024] 上記式(1)のように表現される場 $\phi(n, t)$ を時刻および位置に関して離散化する。時刻 t の離散化は、自然数 m を用いて $t(m+1)=t(m)+\Delta t$ とする。位置 n の離散化は、自然数 l から位置 $n=(n^1, n^2, n^3)$ への関数 $n(l)$ とする。そして、自然数 l に対応した位置 $n(l)$ の周辺の点を自然数の組 (l, j) から自然数への関数 $k(l, j)$ を用いて $n(k(l, j))$ と表す。

[0025] すると、離散化された場の一階微分 $\phi'(n(l), t(m))$ と二階微分 $\phi''(n(l), t(m))$ は、位置 $n(l)$ の周辺の点における場 $\phi(n(k(l, j)), t(m))$ の関数で近似できる。したがって、 $f(\phi(n, t), \phi'(n, t), \phi''(n, t))$ を離散化したものは、 $F(\phi(n(k(l, j))), t(m))$ と近似できる。

[0026] 結果、上記式(1)は、以下のように離散化される。

[0027]

[数2]

$$\phi(n(l), t(m+1)) = \phi(n(l), t(m)) + F(\phi(n(k(l, j))), t(m)) \Delta t \quad (2)$$

[0028] また、上記式（2）における位置 $n(l)$ と時間 $t(m)$ を離散化に用いたインデックス (l, m) で同一すれば、以下のように表現される。なお、 $j_{(l)}$ は、これはインデックス l の位置 $n(l)$ の周辺の点に割り振られたインデックスである。

[0029] [数3]

$$\phi(l, m+1) = \phi(l, m) + F(\phi(j_{(l)}, m)) \Delta t \quad (3)$$

[0030] 上記式（3）から解るように、 $\phi(l, m+1)$ が $\phi(l, m)$ と $\phi(j_{(l)}, m)$ で定まる。ここで重要なことは、式（3）の右辺には、 $m+1$ が含まれないことである。このことは、第1時刻 $t(m)$ における状態量のみから微小時間後の第2時刻 $t(m+1)$ における位置 $n(l)$ の状態量を計算することができることを意味している。

[0031] また、式（3）の右辺には、 $j_{(l)}$ が含まれているが、これはインデックス l の位置 $n(l)$ の周辺の点に割り振られたインデックスとしたのだから、 $\phi(j_{(l)}, m)$ は、第1時刻 $t(m)$ における位置 $n(l)$ の周辺の点の場合 ϕ の値である。図3は、参照の局所性が高い陽解法概念を示す図である。なお、図3では、位置および時間をインデックスで同一視して表記している。上記式（3）に示される方程式は、図3に示されるように、時刻 $m+1$ における位置 l の $\phi(l, m+1)$ を求める際に、時刻 m における位置 l の $\phi(l, m)$ とその近傍の位置 $j-1_{(l)}, j+1_{(l)}$ 等における $\phi(j_{(l)}, m)$ を用いるだけでよいことを意味している。インデックス l は、 ϕ の値をメモリに記憶する際のアドレスの近さに対応するので、 $\phi(l, m+1)$ の計算に際し、 $\phi(l, m)$ と $\phi(j_{(l)}, m)$ という参照の局所性が高いデータを用いていることになる。

[0032] 以上の議論から解るように、上記式（1）のように表現できる場合、参照の局所性が高い陽解法を用いることができる。したがって、陽解法を用いた流体構造連成解析を行うためには、流体の支配方程式、構造体の支配方程式、および流体と構造体の境界面の支配方程式を上記式（1）のように表現することが次の目標となる。

[0033] [流体の支配方程式]

流体の支配方程式には、連続の式とナビエ・ストークス方程式を用いる。連続の式は、下記式（４）のように表現され、ナビエ・ストークス方程式は下記式（５）のように表現される。

[0034] [数4]

$$\frac{\partial}{\partial t}(*\rho) = -L_{u^{\#}}(*\rho) \quad (4)$$

[数5]

$$\frac{\partial}{\partial t}u = -L_{u^{\#}}u + \frac{1}{2}dg(u^{\#}, u^{\#}) - \frac{1}{\rho}(dP - \eta\Delta u) \quad (5)$$

[0035] ここで、 ρ は流体内の質量密度であり、 $*\rho$ は、その双対ホッジであり、要素内の総質量を表す。速度場 $u^{\#}$ に関するLie微分を $L_{u^{\#}}$ と書く。計量テンソルを $g(,)$ とし、 $u:=g(u^{\#},)$ と定める。圧力 P は質量密度 ρ の関数とする。なお、 Δ はホッジラプラシアンとし、すなわち $\Delta=d*d*-*d*d$ である。

[0036] 上記式（４）（５）と式（１）を比較すると解るように、式（４）（５）は、局所性が高い陽解法を適用し得る式（１）の形を有している。したがって、式（４）（５）に陽解法を適用し、 $*\rho$ と u の時間発展を計算することができる。本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムは、第１時刻 t における流体の物理量 $*\rho$ および u から微小時間後の第２時刻 $t+\Delta t$ における流体の物理量 $*\rho$ および u を上記（４）（５）を用いて計算する。

[0037] [構造体の支配方程式]

構造体の時間発展を記述するためには、構造体の変形に伴う体積素片の位置を追跡する。このとき、初期時刻における体積素片の位置を示す座標値を用いて各体積素片をラベル付けすることができる。このように構造体の体積素片に固定された座標 (t, n^1, n^2, n^3) をラグランジュ座標もしくは自然座標という。一方、空間に固定された通常の空間座標 (t, x^1, x^2, x^3) はオイラー座標といわれる。ラグランジュ座標の各座標を時刻ごとにオイラー座標に変換する関数 $X^i(t, n)$ は、構造体の時間発展を一意に定める。

[0038] ラグランジュ座標における計量を $g=g_{ij}dn^i \times dn^j$ とすると、構造体の歪みの時

間変化はラグランジュ座標における計量テンソル g_{ij} の時間変化を用いて下記式（６）で表すことができる。なお、構造体の応力テンソル k^i_j は、 $e^i_j := g^{ik}e_{kj}$ の関数となる。

[0039] [数6]

$$\frac{\partial}{\partial t} e_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} g_{ij} \quad (6)$$

[0040] オイラー座標におけるMusical isomorphismをオイラー座標における計量 $\delta_{ij}dx^i \times dx^j$ を用いて行う。すなわち、 $X_i := \delta_{ij}X^j$ である。

[0041] 構造体の支配方程式では、ナビエ・ストークス方程式に対応する速度場として下記式（７）を用いる。

[0042] [数7]

$$u_i(t,n)dx^i := \delta_{ij} \frac{\partial x^j(t,n)}{\partial t} dx^i \quad (7)$$

[0043] この速度場に関する構造体の支配方程式は、下記式（８）のように表現される。ただし、下式における s は変位ベクトル $s_i = \delta_{ij}(X^j - n^j)$ である。

[0044] [数8]

$$\frac{\partial u(t,n)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}(dP - \mu \Delta s) \quad (8)$$

[0045] ここで、上記式（８）における圧力 P は、構造体の歪み e を用いて以下のよう計算できる。

[0046] [数9]

$$P = -\lambda \operatorname{tr}(e) \quad (9)$$

[0047] ここで、ラメ定数 λ と μ は、ヤング率 E とポアソン比 ν を用いて、それぞれ以下のように表すことができる。

[0048] [数10]

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (10)$$

[0049] なお、上記式（７）を座標表示した場合は下記式（１１）のように表現される。

[0050]

[数11]

$$\frac{\partial u_i(t,n)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \kappa_i^j}{\partial x^j} \quad (11)$$

[数12]

$$\kappa_i^j = \frac{E}{1+\nu} \left(e_j^i + \frac{\nu}{1-2} \delta_j^i e_k^k \right) \quad (12)$$

[0051] 上記式(8)(11)と式(1)を比較すると解るように、式(8)(11)は、局所性が高い陽解法を適用し得る式(1)の形を有している。したがって、式(8)(11)に陽解法を適用し、速度場 u の時間発展を計算することができる。本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムは、第1時刻 t における構造体の物理量 u から微小時間後の第2時刻 $t+\Delta t$ における構造体の物理量 u を上記式(8)(11)を用いて計算する。

[0052] [境界面の支配方程式]

流体と構造体の境界面では、境界面の位置の速度場 u が下記式(13)に従うとする。

[0053] [数13]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} dP \quad (13)$$

[0054] ただし、流体側の P は、流体の密度の関数としての流体の圧力を用い、構造体側の P は、先述の式(9)で表される歪み e の関数としての圧力を用いる。

[0055] 上記式(13)と式(1)を比較すると解るように、式(13)は、局所性が高い陽解法を適用し得る式の形(1)を有している。したがって、式(13)に陽解法を適用し、境界面の位置の速度場 u の時間発展を計算することができる。本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムは、第1時刻 t における流体の圧力と構造体の応力を対応させて、微小時間後の第2時刻 $t+\Delta t$ における流体と構造体との境界面の位置を境界面の位置を、上記式(13)を用いて計算する。

[0056] 以上説明したように、本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムが用いる、流体の支配方程式、構造体の支配方程式、および

境界面の支配方程式は、局所性が高い陽解法を適用し得る式（１）の形を有している。したがって、複数の演算器と演算器が演算に用いるデータを記憶するための階層型の記憶装置とを有するコンピュータを用いて、階層型の記憶装置に記憶されている第１時刻における流体および構造体の物理量から微小時間後の第２時刻における流体および構造体の物理量を連成解析する際に、図３に示したような局所性が高い陽解法を適用し得る。

[0057] また、本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムでは、流体の支配方程式、構造体の支配方程式、および境界面の支配方程式の全てが式（１）の形を有しているので、これらを時刻および位置で離散化した方程式は、式（３）の形をしている。したがって、並列計算機における演算器にとっては、流体の支配方程式と構造体の支配方程式と境界面の支配方程式とを区別することなく均等に処理することができる。例えば、MPIを使って並列計算する場合には、解析モデルを等分に領域分割することで、ロードバランスをよくできる。

[0058] 〔流体軸受の流体構造連成解析における実施例〕

以下、上記説明した数値計算方法を用いた流体軸受の流体構造連成解析の実施例について説明する。

[0059] 図４は、実施例に用いる流体軸受の模式図である。図４に示されるように、流体軸受２０は、中心に軸２１を配し、軸２１の外側に軸受２２を配し、軸２１と軸受２２との隙間に潤滑油２３を充填した構成を有する。当該構成を有することにより流体軸受２０は、潤滑油２３の流動によって軸２１と軸受２２との関係が自在に回転可能となっている。

[0060] 本実施例に用いる流体軸受２０の具体的な寸法は、軸２１の半径が３０mmであり、軸受２２の厚さが３０mmであり、軸方向の長さが１０mmであり、軸２１と軸受２２との隙間が３０μmである。また、軸２１と軸受２２との軸心の偏心量は、１．５μmであり、軸２１と軸受２２との隙間と偏心量との比である偏心率は０．９５である。なお、図４では、各構成の配置が見やすいように軸２１と軸受２２との隙間における潤滑油２３の膜厚を実際

の比率よりも大きく表示してある。

[0061] 軸 2 1 および軸受 2 2 における構造格子の個数は、円周方向に 1 0 0 個であり、軸方向に 5 個であり、径方向に 5 個である。潤滑油 2 3 における構造行使の個数は、径方向に 1 層であることその他、軸 2 1 および軸受 2 2 の場合と同じである。なお、計算精度を向上させるために、圧力変化が激しい隙間の最狭部では構造格子の大きさを小さくしている。

[0062] 潤滑油 2 3 の特性は、大気圧下での密度 ρ が $1\,000\text{ kg/m}^3$ であり、粘度 η が $10\text{ mPa}\cdot\text{s}$ である。軸 2 1 の回転数は $1\,000\text{ rpm}$ であり、軸 2 1 と潤滑油 2 3 との境界面の移動速度 u は 3.14 m/s である。

[0063] 次に、上記のように設定された軸 2 1 と軸受 2 2 と潤滑油 2 3 の構造格子を、図 5 に示すように座標変換する。図 5 は、自然座標系から空間座標系への座標変換を示す模式図である。

[0064] 図 5 のように自然座標系 (n^1, n^2, n^3) から空間座標系 (x^1, x^2, x^3) への座標変換を考えると、各格子の自然座標 n から空間座標 x への写像は、形状関数 $N_\alpha(n)$ を用いて $x^i(n) = x^i_\alpha N_\alpha(n)$ で与えられる。ここで x^i_α は、節点番号 α の節点の空間座標における i 成分の値である。

[0065] 6 面体の 2 次要素では節点が 2 0 個ある。表 1 は要素の中心点を原点にした場合の節点番号と自然座標との対応を表している。

[0066]

[表1]

節点番号	n^1	n^2	n^3
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	1	1	-1
4	-1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	1	1	1
8	-1	1	1
9	0	-1	-1
10	1	0	-1
11	0	1	-1
12	-1	0	-1
13	0	-1	1
14	1	0	1
15	0	1	1
16	-1	0	1
17	-1	-1	0
18	1	-1	0
19	1	1	0
20	-1	1	0

[0067]

[表2]

$N^1(n) = l(n^1, n^2, n^3)$
$N^2(n) = l(-n^1, n^2, n^3)$
$N^3(n) = l(-n^1, -n^2, n^3)$
$N^4(n) = l(n^1, -n^2, n^3)$
$N^5(n) = l(n^1, n^2, -n^3)$
$N^6(n) = l(-n^1, n^2, -n^3)$
$N^7(n) = l(-n^1, -n^2, -n^3)$
$N^8(n) = l(n^1, -n^2, -n^3)$
$N^9(n) = m(n^1, n^2, n^3)$
$N^{10}(n) = m(n^2, n^3, -n^1)$
$N^{11}(n) = m(n^1, -n^2, n^3)$
$N^{12}(n) = m(n^2, n^3, n^1)$
$N^{13}(n) = m(n^1, n^2, -n^3)$
$N^{14}(n) = m(n^2, -n^3, -n^1)$
$N^{15}(n) = m(n^1, -n^2, -n^3)$
$N^{16}(n) = m(n^2, -n^3, n^1)$
$N^{17}(n) = m(n^3, n^1, n^2)$
$N^{18}(n) = m(n^3, -n^1, n^2)$
$N^{19}(n) = m(n^3, -n^1, -n^2)$
$N^{20}(n) = m(n^3, n^1, -n^2)$

[0068] ただし、上記表 2 に記載の関数 $l(r)$, $m(r)$ は以下で与えられる。

[0069]

[数14]

$$l(r) = -\frac{1}{8}(1-r^1)(1-r^2)(1-r^3)(2+r^1+r^2+r^3) \quad (14)$$

[数15]

$$m(r) = \frac{1}{4}(1-r^2)(1-r^3)(1-r^1r^1) \quad (15)$$

[0070] 構造格子の各要素の形状の情報は、自然座標上の計量テンソル g に集約される。この計量テンソルの成分を g_{ij} とすると、体積要素は以下のように計算できる。

[0071] [数16]

$$\sqrt{g} := \sqrt{\det g_{ij}} \quad (16)$$

[0072] 一方、計量テンソル g_{ij} は、空間座標上の計量テンソル δ_{kl} から以下のように計算できる。なお、空間座標がカルテシアン座標の場合には δ_{kl} がクロネッカーデルタになる。

[0073] [数17]

$$g_{ij} = \delta_{kl} \frac{\partial x^k}{\partial n^i} \frac{\partial x^l}{\partial n^j} \quad (17)$$

[0074] 上記計量テンソル g_{ij} を用いて、流体の支配方程式（式（４）（５））を表現すると以下ようになる。

[0075] [数18]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\sqrt{g}\rho) = -\frac{\partial}{\partial n^i}(\sqrt{g}\rho u^i) \quad (18)$$

[数19]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(u_i) &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial n^i} (g_{jk} u^j u^k) + u^j \left(\frac{\partial u_j}{\partial n^i} - \frac{\partial u_i}{\partial n^j} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial n^i} - \eta \Delta u_i \right) \\ \text{where } \Delta u_i &= \frac{\partial}{\partial n^i} \left[\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial n^j} (\sqrt{g} u^j) \right] - g^{mj} \frac{\partial}{\partial n^m} \left(\frac{\partial u_j}{\partial n^i} - \frac{\partial u_i}{\partial n^j} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

[0076] [第1の検証]

以上のような設定の下、本発明の実施形態にかかる数値計算方法の検証を行う。第1の検証では、軸21および軸受22が剛体であると仮定し、潤滑油23の圧力分布と密度分布の計算を行う。

[0077] 時間刻みを0.1 μs とし、自然座標系での空間刻みを2.0として、流

体の支配方程式（式（４）（５）すなわち式（１８）（１９））を離散化して陽解法を適用して潤滑油２３の圧力分布と密度分布の計算を行った。図６は、圧度分布の計算結果を示すグラフであり、図７は、密度分布の計算結果を示すグラフである。

[0078] 図６および図７のいずれも、潤滑油２３の軸方向中央部の値を記載している。また、横軸の θ は、周方向の角度であり、隙間が最も狭くなる位置を０とし、最も広くなる位置を $\pm\pi$ としている。なお、潤滑油２３は、 θ の正方向に流れているとして、周方向の境界条件を周期的境界条件としている。

[0079] 図６および図７に示されるグラフから解るように、大気圧下では 1000 kg/m^3 であった質量密度が低圧領域では 300 kg/m^3 まで下がっている。これは、低圧領域では気泡が発生し、平均質量密度が大きく下がっていることを示している。

[0080] この計算結果の精度を検証するために、本発明の実施形態にかかる数値計算方法の計算結果とレイノルズ方程式をガウス＝ザイデル法の計算結果とを比較する。レイノルズ方程式とは、質量保存の式とナビエ・ストークス方程式から導出される式であり、次式で与えられる。

[0081] [数20]

$$\left[\sum_{i=1,2} \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial P}{\partial x^i} \right) \right] - u_m \frac{\partial(\rho h)}{\partial x^i} = 0 \quad (20)$$

[0082] ここで h は潤滑油２３の膜厚であり、 u_m は潤滑油２３を挟む境界面の移動速度の平均値である。潤滑油２３内の圧力 P の分布は ρ 、 h 、 u_m の分布から計算できる。ガウス＝ザイデル法では、式（２０）の質量密度 ρ を定数として圧力 P を計算する。そして、計算された圧力 P から質量密度 ρ を計算する。その後、計算された質量密度 ρ を式（２０）に再代入して圧力 P を再計算する。この操作を解が収束するまで繰り返す。

[0083] キャビテーションを含めるには圧力 P が負圧になるとゼロに置き換える操作をする。この方法ではキャビテーションが発生する箇所連続の式が満たされないため、一般には正しい圧力分布が得られない。しかし、 $\theta = \pm\pi$ で $P = 0$ となる境界条件下では、正しい圧力分布を得ることができることが知

られている。

[0084] このように圧力分布を計算した結果と本発明の実施形態にかかる数値計算方法で圧力分布を計算した結果とを比較する。図8は、圧力分布の計算結果の比較を示すグラフである。図8に示されるグラフから解るように、レイノルズ方程式にガウス＝ザイデル法を用いて計算した圧力分布（－印）とナビエ・ストークス方程式に本発明の実施形態にかかる数値計算方法を用いて計算した圧力分布（＋印）は一致している。

[0085] 〔第2の検証〕

次に、軸受22が弾性体であるとし、潤滑油23の圧力分布の計算を行う。上記第1の検証の結果でも解るように、流体軸受では、軸の回転時に潤滑油23の膜厚の狭小部では圧力が高くなる。結果、弾性体である軸受22も変形を受ける。しかも、軸受22の変形は潤滑油23の膜厚にも影響を与えるので、膜厚の狭小部における潤滑油23の圧力にも影響を与える。ここでは、軸受22が剛体であると仮定した場合と弾性体であるとした場合の計算結果を比較する。

[0086] 図9は、計算結果の比較を示すグラフである。図9に示されるグラフには、軸受22が剛体であると仮定した場合の圧力分布が＋印で記載され、軸受22が弾性体であるとした場合の圧力分布が－印で記載されている。また、図9に示されるグラフには、軸受22の変形量が●印で併記されている。

[0087] 図9から解るように、軸受22が弾性体であるとした場合、潤滑油23の高圧領域では、軸受22が押し広げられるので、軸受22が剛体であると仮定した計算結果よりも潤滑油23の圧力が低くなっている。このことは、本発明の実施形態にかかる数値計算方法が流体と構造体の相互作用を正しく反映させて連成解析を行っていることを示している。

[0088] 〔並列計算機における性能検証〕

次に、本発明の実施形態にかかる数値計算方法を並列計算機に対する指令として実施した場合、すなわち本発明の実施形態にかかる数値計算プログラムの性能を検証する。

[0089] 既述したように、現在主流のコンピュータは、複数の演算器と階層構造のメモリを採用しており、メモリバンド幅が演算性能に比べて低い。このような構成のコンピュータの演算性能を引き出すにはレジスタやキャッシュメモリを有効に使い、メモリにおけるデータ通信量を抑えることができる参照の局所性が高い計算方法を用いる必要がある。

[0090] 本発明の実施形態にかかる数値計算プログラムは、複数の演算器と階層構造のメモリを採用している並列計算機に対して第1時刻における流体および構造体の物理量から微小時間後の第2時刻における流体および構造体の物理量を連成解析する数値計算の指令であって、第1時刻における流体および構造体の物理量のみから第2時刻における流体および構造体の物理量を計算する陽解法を利用している。したがって、他の演算器が第2時刻における流体および構造体の物理量を計算し終わることを待たずに複数の演算器の各々が第2時刻における流体および構造体の物理量を計算することができる。つまり、いわゆる待ち時間が発生しない。

[0091] また、本発明の実施形態にかかる数値計算プログラムは、用いる支配方程式の各々は、場の時間微分を、前記場および前記場の一階空間微分ならびに二階空間微分で表現したものであるもので、これらを時刻および位置で離散化した場合、先述の式(3)のような形で表現されるので、第1時刻における流体および構造体の物理量のみから第2時刻における流体および構造体の物理量を計算することができるのみならず、離散化した一致のインデックスがメモリのアドレスに対応するので、参照の局所性が高い。つまり、階層構造のメモリにおいて、レジスタやキャッシュを有効に活用することができる。

[0092] さらに、本発明の実施形態にかかる数値計算プログラムは、離散化した支配方程式がすべて先述の式(3)のような形で表現されるので、並列度が高い。すなわち、離散化した支配方程式を複数の演算器に割り当てて並列処理することで、演算器の処理能力を余すことなく活用することができる。

[0093] 本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムの並列性能の検証では、上記特性が確認される。検証に用いた並列計算機は、九州

大学情報基盤研究開発センターのP I M E R G Y C X 4 0 0であり、先述の図2に示される分散メモリ型の並列計算機である。

[0094] このような分散メモリ型の並列計算機を用いて、本発明の実施形態にかかる数値計算プログラムで処理を行う数値計算問題を固定して、処理に用いる演算器の個数を増やしながら処理能力の測定を行う、いわゆる強スケーリングでの並列性能を測定する。図10は、並列性能の検証結果を示すグラフである。

[0095] 図10に示されるグラフから解るように、本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムでは、演算器の個数に比例して処理能力が理想的に増加している。なお、本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムでは、23616並列を用いた場合に1600億自由度の計算をすることができる。

[0096] したがって、本発明の実施形態にかかる数値計算プログラムは、図2に示されるような分散メモリ型の並列計算機に対する指令として好適であり、本発明の実施形態にかかる数値計算方法は、図2に示されるような分散メモリ型の並列計算機における処理として好適である。

[0097] さらに、本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムのG P G P U (G e n e r a l - p u r p o s e c o m p u t i n g o n g r a p h i c s p r o c e s s i n g u n i t s) への適合性を検証する。

[0098] G P G P Uとは、G P Uは画像処理のための演算装置であるが、これを画像処理以外の目的にも応用する技術である。G P Uは、単体では計算処理を行うことはできないが、別途のC P Uからの指令によって数値計算をすることも可能である。このとき、G P Uは、実質的に図1に示されるような共有メモリ型の並列計算機として機能する。しかも、G P Uは、C P Uよりも演算器の個数が多く、メモリバンド幅も大きい。そこで、G P G P Uが並列計算機の代替として活用されることも多い。

[0099] 本検証で使用するG P UはN V I D I A T E S L A P 1 0 0 f o r

NVLink-Optimized Serversであり、Byte/Flopは $0.138 (B/F) = 0.732 (TByte/s) / 5.3 (TFlop/s)$ である。したがって、疎行列・ベクトル積 (SpMV) が $10 (B/F)$ であることを考慮すると、GPU一枚あたりのSpMVの計算速度は、高々 $73.2 (GFlop/s) = 0.732 (TByte) / 10 (Byte/Flop)$ にしかない。

[0100] 一方、本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムを適用したGP GPUでは、計量テンソル g のGPU一枚あたりの計算速度は $337 (GFlop/s)$ である。このことは、以下のことを意味する。

[0101] 先述したように、本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムでは、連立方程式を解く必要がない。一方、比較的計算負荷が高い計量テンソル g の計算をする必要がある。連立方程式を共役勾配法（反復法）で解くと、SpMVが全体の計算における殆どを占める。SpMVは、上述したように、 B/F 値が高く、GPUの演算性能を活かせない。したがって、本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムを適用したGP GPUは、連立方程式を解く必要がある従来の処理よりもGPUの性能を有効活用することができ、計算速度が向上している。

[0102] 以上のように、本発明の実施形態にかかる数値計算プログラムは、図1に示されるような共有メモリ型の並列計算機に対する指令として好適であり、本発明の実施形態にかかる数値計算方法は、図1に示されるような共有メモリ型の並列計算機における処理として好適である。また、図2に示されるような分散メモリ型の並列計算機における各ノードが共有メモリ型の並列計算機として構成されている、共有分散メモリ型の並列計算機に対しても、本発明の実施形態にかかる数値計算方法および数値計算プログラムが有効であることは言うまでもない。

[0103] 以上、図面を参照しながら本発明を実施形態に基づいて説明してきたが、本発明は上記の実施形態によって限定されるものではない。上記説明した数値計算方法は、適切に数値計算プログラムとして実装することができ、逆に上

記説明した数値計算プログラムの実行は、数値計算方法の実施とみなし得る。また、上記説明した数値計算プログラムは、コンピュータが読み取り可能な媒体に記録された状態で生産等の実施を行うことができる。

符号の説明

- [0104] 1 0 0, 2 0 0 並列計算機
 1 0₁ ~ 1 0_n 演算器
 1 1 階層型の記憶装置
 1 2 主記憶装置
 1 3₁ ~ 1 3_n レジスタ
 1 4₁ ~ 1 4_n L 1 キャッシュメモリ
 1 5₁ ~ 1 5_m L 2 キャッシュメモリ
 1 6₁ ~ 1 6_n ノード
 1 7 ネットワーク
 2 0 流体軸受
 2 1 軸
 2 2 軸受
 2 3 潤滑油

請求の範囲

- [請求項1] 複数の演算器と前記演算器が演算に用いるデータを記憶するための階層型の記憶装置とを有するコンピュータを用いて、前記階層型の記憶装置に記憶されている第1時刻における流体および構造体の物理量から微小時間後の第2時刻における前記流体および前記構造体の物理量を連成解析する数値計算方法であって、
- 前記第1時刻のみにおける流体の物理量から前記第2時刻における前記流体の物理量を流体の支配方程式を用いて計算する処理と、
- 前記第1時刻のみにおける構造体の物理量から前記第2時刻における前記構造体の物理量を構造体の支配方程式を用いて計算する処理と、
- 、
- 前記第1時刻のみにおける流体の圧力と構造体の応力を対応させて、前記第2時刻における流体と構造体との境界面の位置を境界面の支配方程式を用いて計算する処理と、
- を含むことを特徴とする数値計算方法。
- [請求項2] 前記流体の支配方程式は、ナビエ・ストークス方程式および連続の方程式であることを特徴とする請求項1に記載の数値計算方法。
- [請求項3] 前記構造体の支配方程式は、応力と歪の関係を表す構成方程式であることを特徴とする請求項1または請求項2に記載の数値計算方法。
- [請求項4] 前記境界面の支配方程式は、速度場の時間微分と前記流体の圧力および前記構造体の応力の釣り合いとの関係を表す方程式であることを特徴とする請求項1から請求項3のいずれか1項に記載の数値計算方法。
- [請求項5] 複数の演算器と前記演算器が演算に用いるデータを記憶するための階層型の記憶装置とを有するコンピュータに対して、前記階層型の記憶装置に記憶されている第1時刻における流体および構造体の物理量から微小時間後の第2時刻における前記流体および前記構造体の物理量を連成解析する数値計算を指令する数値計算プログラムであって、

前記第 1 時刻のみにおける流体の物理量から前記第 2 時刻における前記流体の物理量を流体の支配方程式を用いて計算する処理と、

前記第 1 時刻のみにおける構造体の物理量から前記第 2 時刻における前記構造体の物理量を構造体の支配方程式を用いて計算する処理と、

前記第 1 時刻のみにおける流体の圧力と構造体の応力を対応させて、前記第 2 時刻における流体と構造体との境界面の位置を境界面の支配方程式を用いて計算する処理と、

を含むことを特徴とする数値計算プログラム。

[請求項6] 前記支配方程式の全てが、場の時間微分を、前記場および前記場の一階空間微分ならびに二階空間微分で表現したものであり、前記支配方程式の全てを時刻および位置で離散化した方程式を用いて処理をすることを特徴とする請求項 5 に記載の数値計算プログラム。

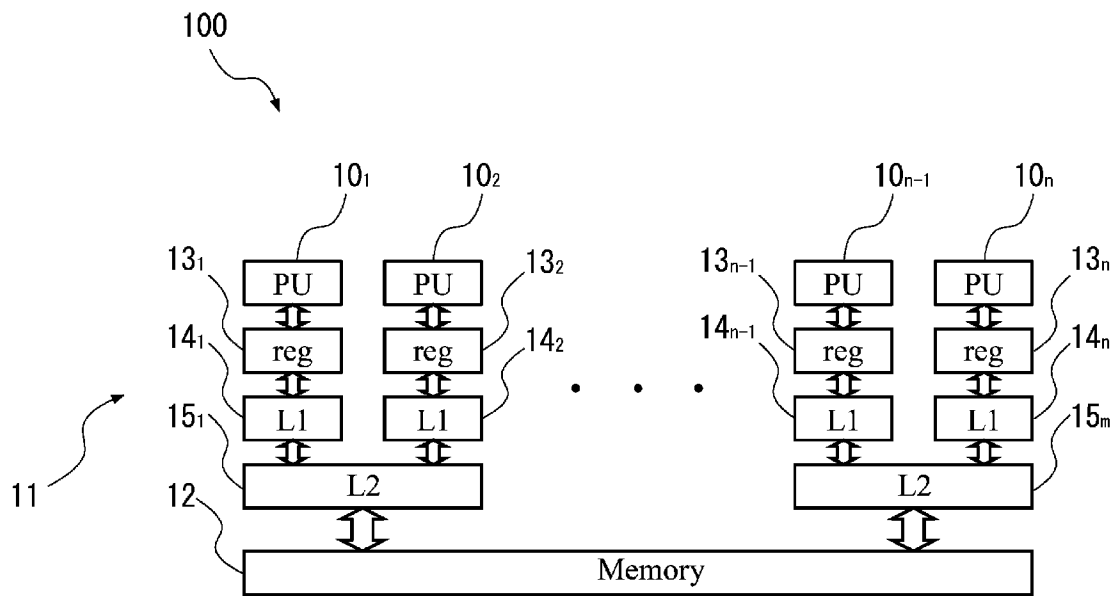
[請求項7] 前記離散化した方程式を前記複数の演算器に割り当てて並列処理することを特徴とする請求項 6 に記載の数値計算プログラム。

[請求項8] 前記離散化した方程式は、適切な関数 F を用いて下記式の形で表現されることを特徴とする請求項 7 に記載の数値計算プログラム。ただし、 m は時刻の離散化のインデックスであり、 l は位置の離散化のインデックスであり、 $j_{(l)}$ はインデックス l の位置の周辺の点に割り振られたインデックスとしたときに、 $\phi(l, m)$ は、インデックス l の位置におけるインデックス m の時刻の場を表す。

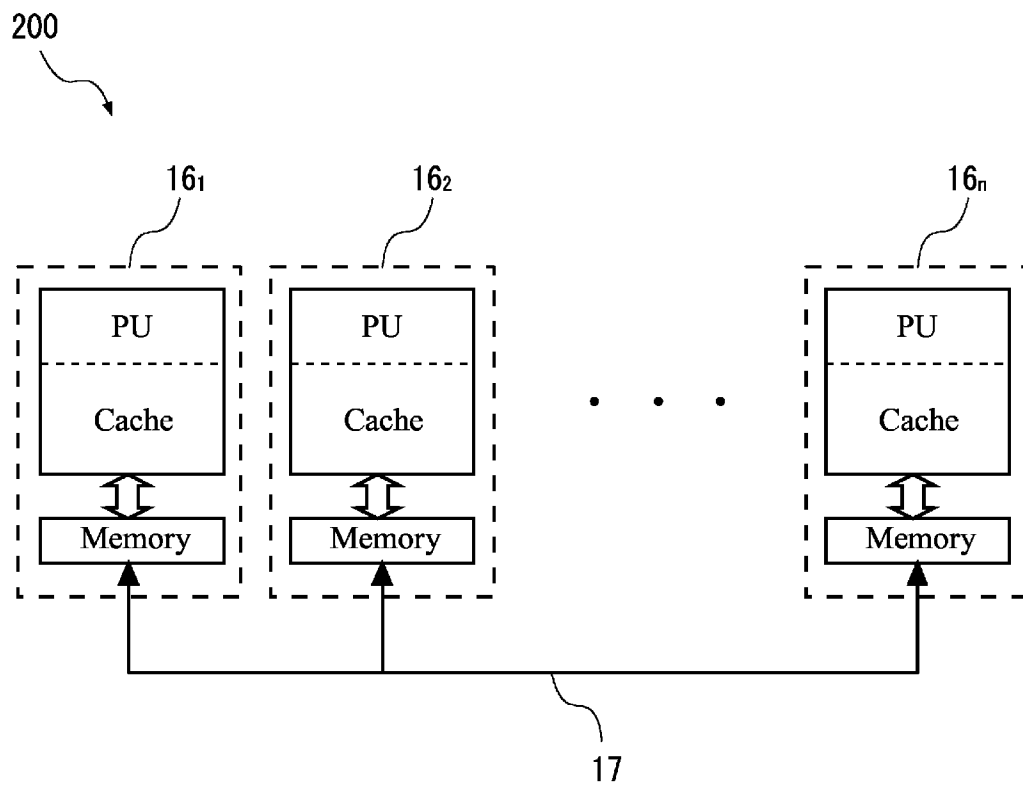
[数1]

$$\phi(l, m + 1) = \phi(l, m) + F(\phi(j_{(l)}, m)) \Delta t$$

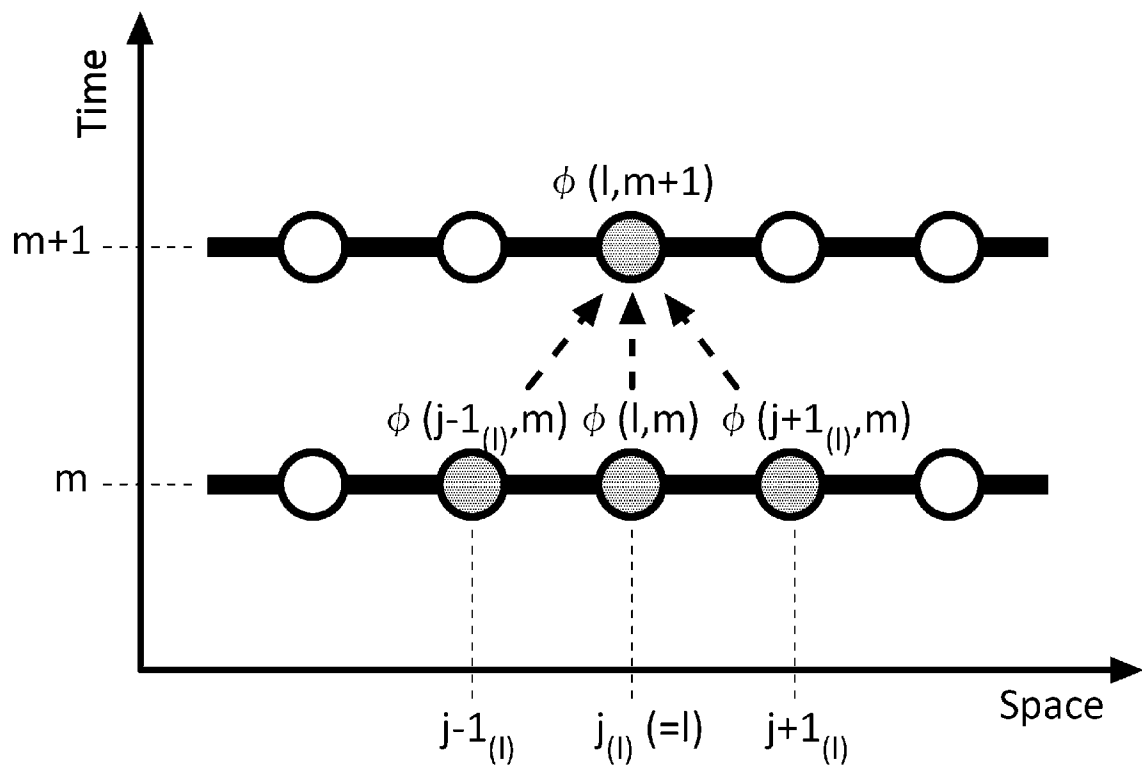
[図1]



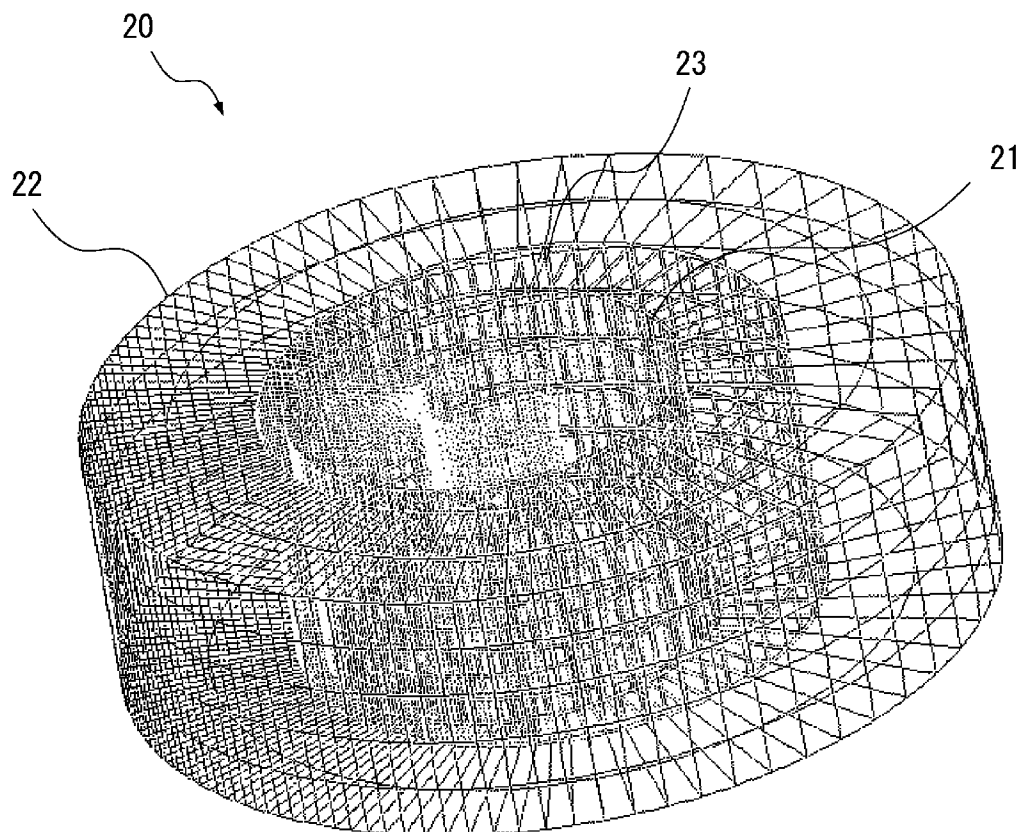
[図2]



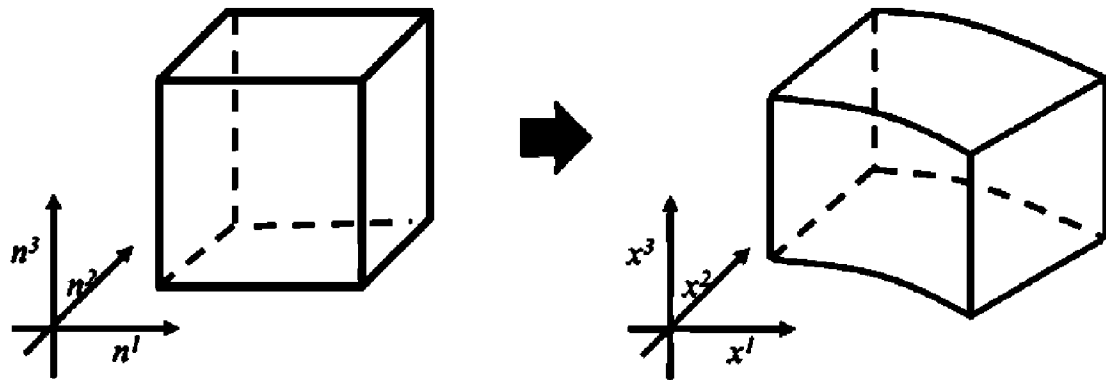
[図3]



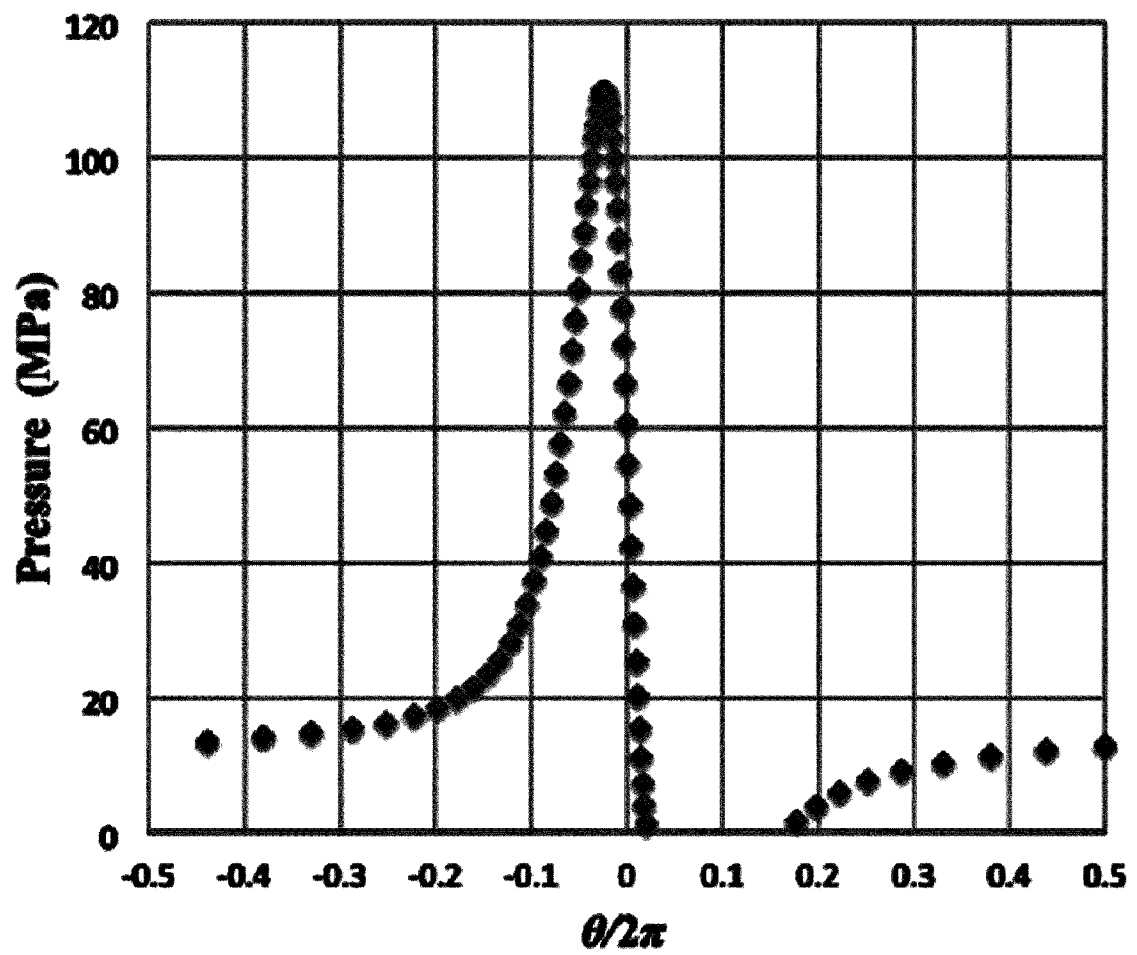
[図4]



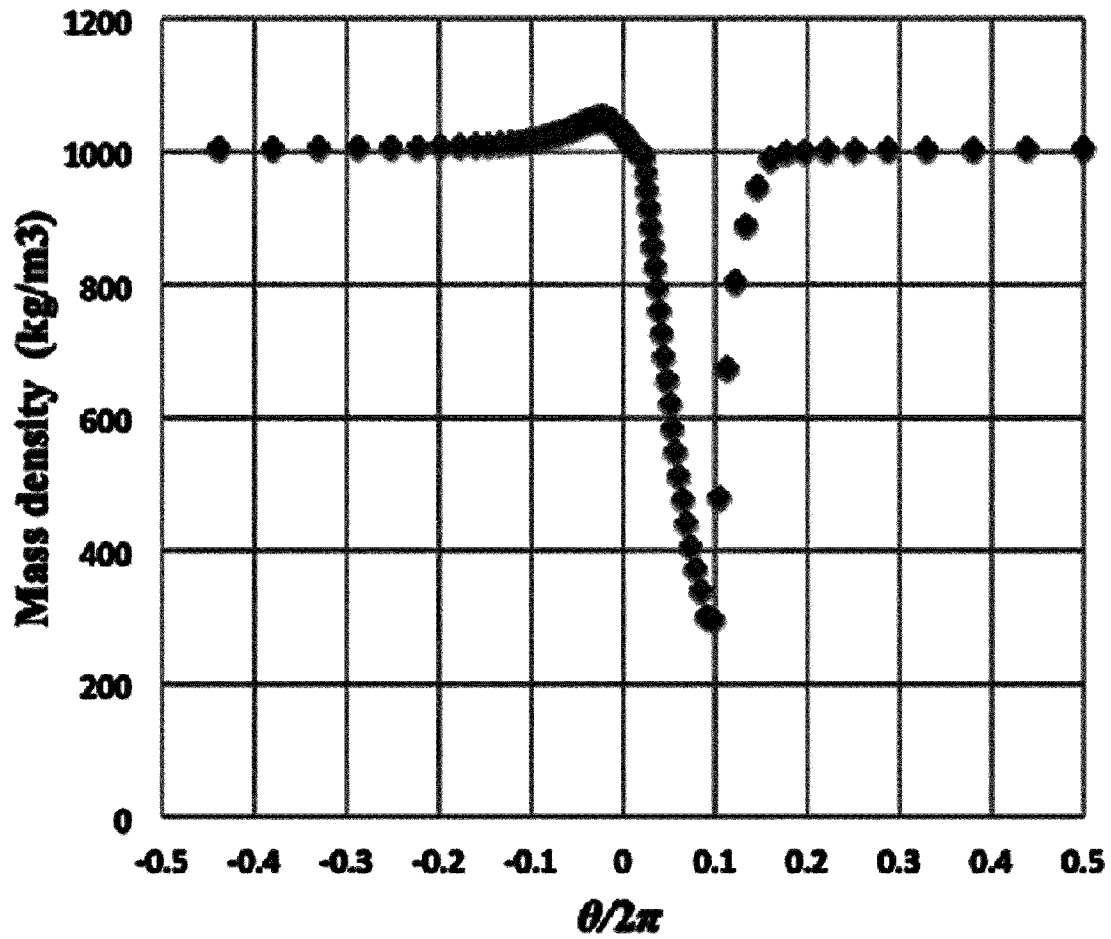
[図5]



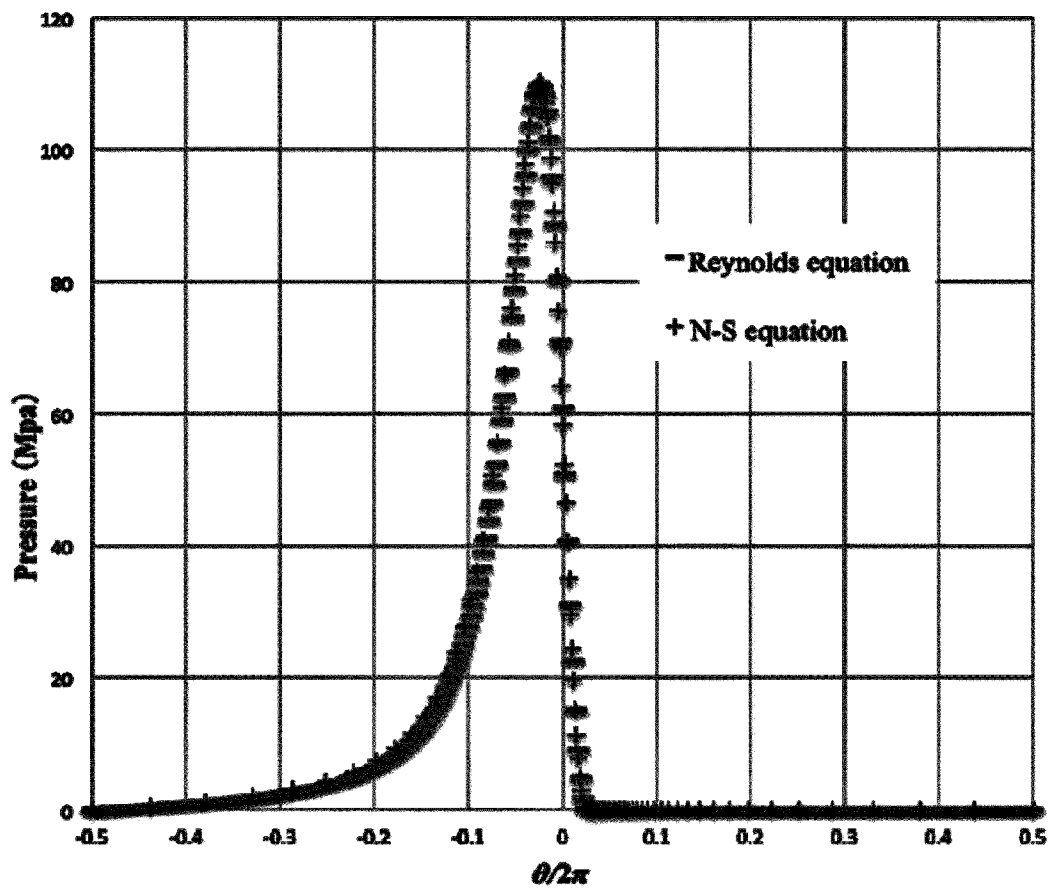
[図6]



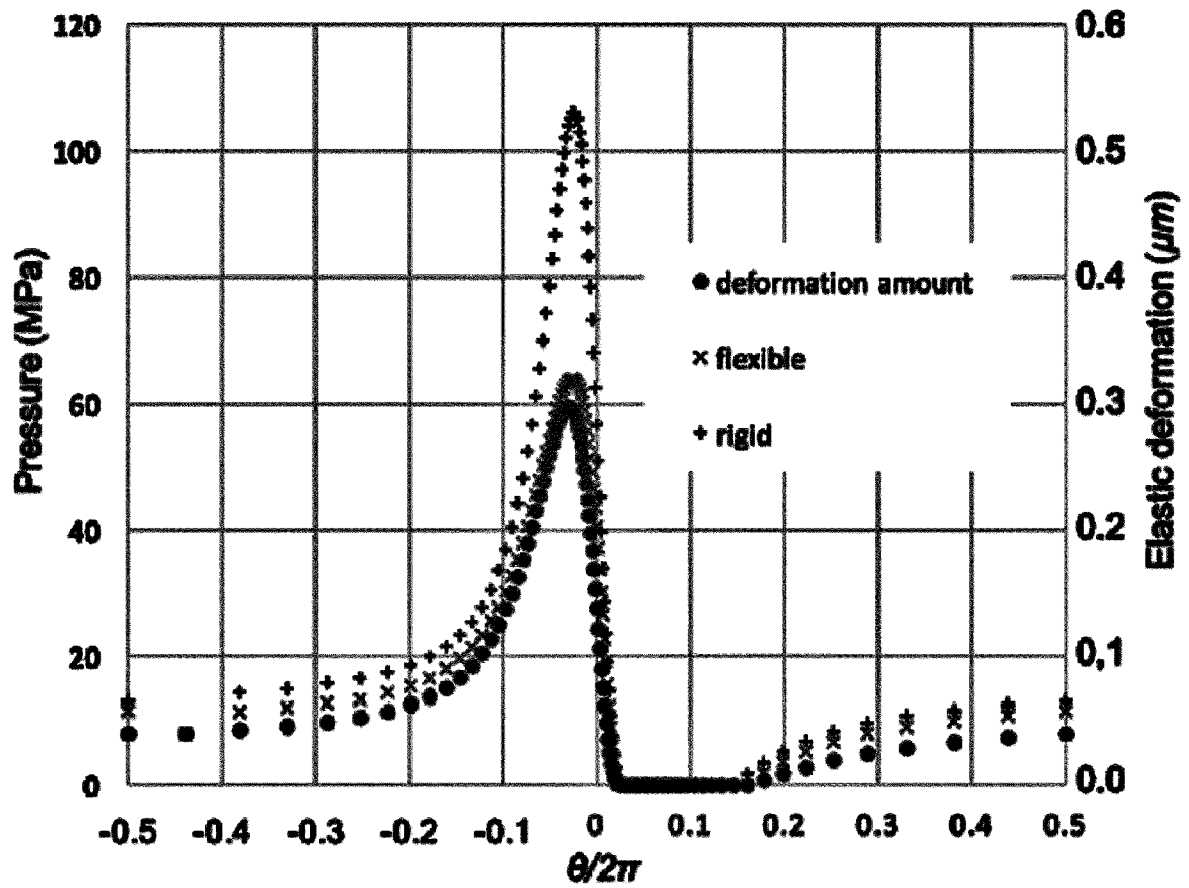
[図7]



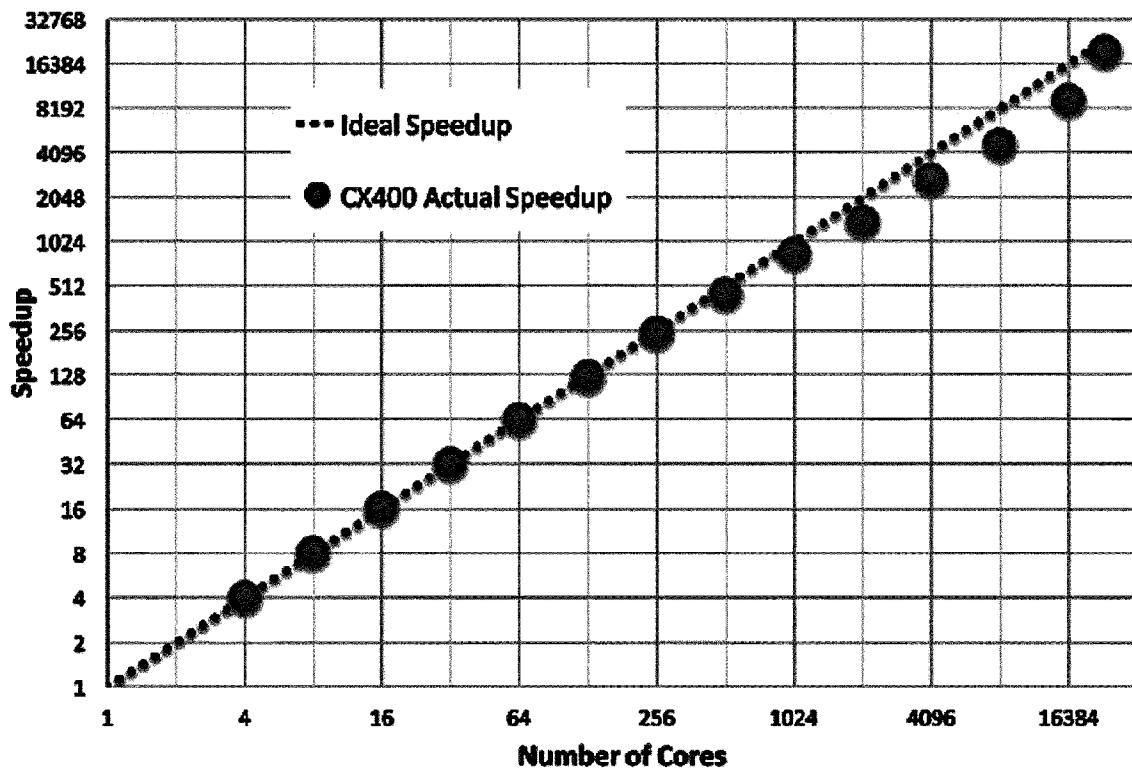
[図8]



[図9]



[図10]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/007071

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. G06F17/50 (2006.01) 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. G06F17/50, 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)

Google Scholar

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	八木和行, 革新的燃烧技術 [online], 19 February 2019	1, 5
Y	[retrieved: 10 May 2019], Internet: <URL: https://www.jst.go.jp/sip/dl/k01/sympoend/04s_13.pdf >, non-official translation (YAGI, Kazuyuki. Innovative Combustion Technology.)	2-4, 6-8
Y	JP 2005-339492 A (CANON KABUSHIKI KAISHA) 08	2-4, 6-8
A	December 2005, paragraphs [0005], [0030] & US 2005/0288875 A1, paragraphs [0007], [0071]	1, 5



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
13.05.2019

Date of mailing of the international search report
21.05.2019

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/JP2019/007071

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	深川宏樹, 陽解法を用いた軸受の流体構造連成解析 [online], July 2018 [retrieved: 10 May 2019], Internet: <URL: https://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/sympo/10th/Intro/EX17320_Poster.pdf >, non-official translation (FUKAGAWA, Hiroki. Fluid Structure Coupling Analysis of Bearings Using Explicit Methods.)	4, 6-8 1-3, 5
X	深川宏樹, 陽解法を用いた軸受の流体構造連成解析, スーパーコンピューティングニュース[online], August 2018, vol. 20, no. Special Issue 2, pp. 4-9, ISSN: 1344-9567 [retrieved: 10 May 2019], Internet: <URL: https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/public/VOL20/special2/02.201808SP-1_3.pdf >, non-official translation (FUKAGAWA, Hiroki. Fluid Structure Coupling Analysis of Bearings Using Explicit Methods. Super Computing News.)	1-8

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G06F17/50(2006.01)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. G06F17/50, 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）

Google Scholar

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
X Y	八木和行, 革新的燃焼技術 [online], 2019.02.19, [検索日 2019.05.10], インターネット: <URL: https://www.jst.go.jp/sip/dl/k01/sympoend/04s_13.pdf >	1, 5 2-4, 6-8
Y A	JP 2005-339492 A (キヤノン株式会社) 2005.12.08, [0005], [0030] & US 2005/0288875 A1, [0007], [0071]	2-4, 6-8 1, 5

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

13.05.2019

国際調査報告の発送日

21.05.2019

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）

松浦 功

5H

9181

電話番号 03-3581-1101 内線 3531

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
Y A	深川宏樹, 陽解法を用いた軸受の流体構造連成解析 [online], 2018.07, [検索日 2019.05.10], インターネット: <URL: https://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/sympo/10th/Intro/EX17320_Poster.pdf >	4, 6-8 1-3, 5
X	深川宏樹, 陽解法を用いた軸受の流体構造連成解析, スーパーコンピューティングニュース [online], 2018.08, Vol.20, No. Special Issue 2, pp. 4-9, ISSN: 1344-9567, [検索日 2019.05.10], インターネット: <URL: https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/public/VOL20/special2/02.201808SP-1_3.pdf >	1-8