(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3月19日(19.03.2020)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2020/054086 A1

(51) 国際特許分類:
G16Z 99/00 (2019.01)　*G06F 17/50* (2006.01)

(21) 国際出願番号：　PCT/JP2018/043832

(22) 国際出願日：　2018年11月28日(28.11.2018)

(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 2018-170765　2018年9月12日(12.09.2018)　JP

(71) 出願人：ＡＧＣ株式会社 (**AGC INC.**) [JP/JP]; 〒1008405 東京都千代田区丸の内一丁目５番１号 Tokyo (JP).

(72) 発明者：齊藤　恒洋 (**SAITO, Tsunehiro**); 〒1008405 東京都千代田区丸の内一丁目５番１号ＡＧＣ株式会社内 Tokyo (JP).

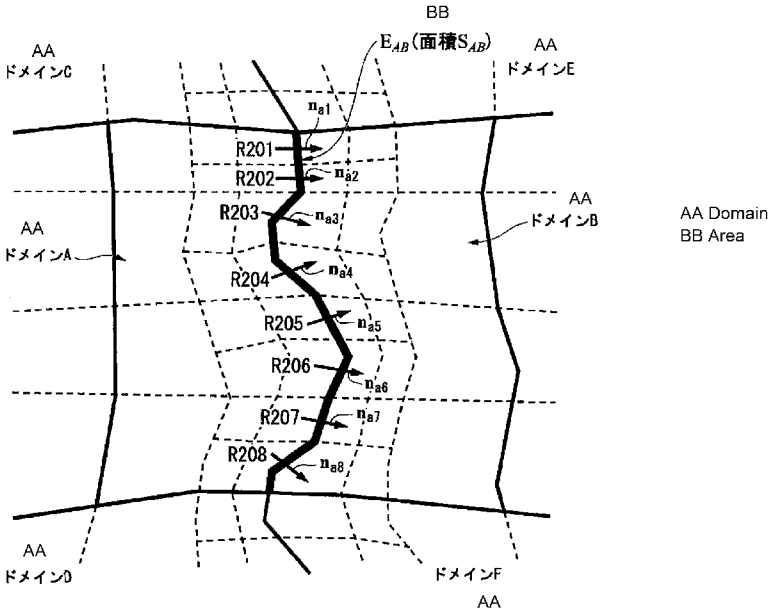
(74) 代理人：伊東 忠重，外 (**ITOH, Tadashige** et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目１番１号 丸の内ＭＹ ＰＬＡＺＡ （明治安田生命ビル） １６階 Tokyo (JP).

(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 METHOD USING MBD PROGRAM, NUMERICAL ANALYSIS DEVICE, NUMERICAL ANALYSIS SYSTEM FOR MDB, NUMERICAL ANALYSIS PROGRAM, AND MBD PROGRAM

(54) 発明の名称： シミュレーション方法、ＭＢＤプログラムによるシミュレーション方法、数値解析装置、ＭＢＤ用数値解析システム、数値解析プログラムおよびＭＢＤプログラム

[図12]



(57) **Abstract:** [Problem] To provide a 3D simulation model that can be implemented by an MBD program. [Solution] According to the present invention, a computer: partitions an analysis region into a plurality of partitioned regions; generates a partitioned region calculation data model that, as quantities that do not require the coordinates of the vertices of the

WO 2020/054086 A1

[続葉有]

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))

partitioned regions and the connectivity of said vertices, includes the volumes of the partitioned regions and partitioned region characteristic quantities that indicate the characteristics of adjacent partitioned regions; aggregates pluralities of partitioned regions to generate a required number of aggregate regions; generates an aggregate region calculation data model that, as quantities that do not require the coordinates of the vertices of the aggregate regions and the connectivity of said vertices, includes the volumes of the aggregate regions and aggregate region characteristic quantities that indicate the characteristics of adjacent aggregate regions; and, on the basis of a physical property value for the analysis region and of the aggregate region calculation data model, calculates a conductance that represents the characteristics of the movement of a physical quantity between aggregate regions and to the outside of the analysis region and a capacitance that represents the characteristics of a cumulation of the physical quantity for the aggregate regions.

(57) 要約:【課題】ＭＢＤプログラムに実装可能な３Ｄシミュレーションモデルを提供する。【解決手段】コンピュータが、解析領域を複数の分割領域に分割し、各分割領域の体積と隣り合う分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを分割領域の頂点の座標及び該頂点の連結情報を必要としない量として有する分割領域での計算用データモデルを生成し、分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成し、各集合領域の体積と隣り合う集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを集合領域の頂点の座標及び該頂点の連結情報を必要としない量として有する集合領域での計算用データモデルを生成し、解析領域での物性値と、集合領域での計算データモデルとに基づいて、集合領域同士及び前記解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、前記集合領域の物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算する。

明　細　書

発明の名称 ：

シミュレーション方法、ＭＢＤプログラムによるシミュレーション方法、数値解析装置、ＭＢＤ用数値解析システム、数値解析プログラムおよびＭＢＤプログラム

技術分野

[0001] 本発明の実施形態は、シミュレーション方法、ＭＢＤプログラムによるシミュレーション方法、数値解析装置、ＭＢＤ用数値解析システム、数値解析プログラムおよびＭＢＤプログラムに関する。

背景技術

[0002] モデルベース開発（Ｍｏｄｅｌ　Ｂａｓｅ　Ｄｅｖｅｌｏｐｍｅｎｔ、以下「ＭＢＤ」という）は、自動車、航空機、電子・電気機器など工業製品の設計開発において、先行開発・性能評価のプロセスを実機によらずバーチャルシミュレーションで行うシミュレーション技術として近年注目されており、特に自動車産業で脚光を浴びている。

[0003] ＭＢＤモデルの構築やシミュレーション計算には、ＭＢＤ専用の機能モデル構築プログラム（以下、「ＭＢＤプログラム」という）が使用される。ＭＢＤプログラムは、大学等で開発されたフリープログラムから、高度な機能を有する市販プログラムまで、様々なプログラムが利用されている。

[0004] 現在、モデルベース開発（ＭＢＤ）の分野での課題は、３Ｄ（３次元）シミュレーションとの融合化技術の開発である。部品レベルから自動車全体レベルまでの階層構造型の機能モデルにより自動車全体の機能・性能の非定常シミュレーションがＭＢＤにより実行されているが、ＭＢＤで使用される１Ｄ（１次元）シミュレーションは３次元的な分布を伴う物理量を解析評価できない。

[0005] 例えば、自動車のキャビン内の気流温度を分布として計算するためのＭＢＤモデルは、これまで、主に二つの方法で行われてきた。一つ目の方法は、

キャビンの空調制御に詳しい技術者の経験から、キャビン内空間をおおまかに領域分割する。その上で、キャビン内の各領域間の熱移動量と流量配分とを、経験と実験結果とに基づいて同定し、熱マネジメントＭＢＤモデルを作成する方法である。この方法は、熟練技術者が行うと、非常に実験に良く合うＭＢＤモデルを作成できる場合がある。しかし、車種が異なる、キャビン形状や空間ボリュームが大きく異なる、乗員数が異なる、などの条件が異なると、その都度、再実験を必要とする。また、熟練技術者の属人的な方法であることも大きな問題である。

[0006] 二つ目の方法は、キャビンの単純形状モデルを作成し、その単純形状のキャビン内に数万～数１０万セルのメッシュを生成させて、熱流体シミュレーション計算を行う方法である。計算時間が比較的短時間のため、ＭＢＤプログラムとの連成計算が可能となる。しかし、キャビン形状を単純化すると、ガラスやボディ面積が実車と大きく異なるため、ガラスを通過する日射量やボディの貫流熱、さらには熱容量なども不正確となり、計算結果の信頼性が大きく損なわれる。また、メッシュ数が少なく熱流体シミュレーション計算が高速化するとしても、分や時間オーダーの計算時間が必要である。従って、ＭＢＤプログラムとの連成計算時間が異常に増大化し、数値計算が困難になる場合がある。

[0007] このように、計算負荷が大きい３Ｄシミュレーションを行わず、３Ｄシミュレーションの機能を等価的な０Ｄあるいは１Ｄシミュレーションに置き換え縮退化させることを、モデル縮退（ＲＯＭ： Ｒｅｄｕｃｅｄ Ｏｒｄｅｒ Ｍｏｄｅｌ）と呼んでいる。

[0008] 従来のモデル縮退は、前述の方法の他に、応答関数法、応答曲面法、統計モデル、ニューラルネットワークなどが使用される。応答関数法は一入力に対する一出力の応答を表す関数、応答曲面法は多入力に対する多出力の応答を表す関数であり、統計モデルはその入力に対する応答を統計的に求める方法である。どのモデルでも、３Ｄシミュレーションを多数回実行し、その計算結果データを基にモデルを決定する点は同じである。モデル縮退としてよ

く使われる応答曲面法では、数１００ケース以上のデータを必要とする場合がある。多数回の３Ｄシミュレーションを実行してそのデータから応答曲面を計算するという、非常に計算時間を要する方法である。また、（入力数／出力数）が多くなると、応答曲面の作成が困難になる、作成された応答曲面の応答挙動が異常になる、などの問題も発生する。近年ＡＩ（ａｒｔｉｆｉｃｉａｌ　ｉｎｔｅｌｌｉｇｅｎｃｅ）技術の発展に伴い、ニューラルネットワークがモデル縮退に使用されるようになった。しかし、ニューラルネットワークを学習させるために非常に多数回の３Ｄシミュレーションを実行する必要がある点では、応答曲面法と同じである。

先行技術文献

特許文献

[0009] 特許文献1：国際公開第２０１０／１５０７５８号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] 本発明は、ＭＢＤプログラムに実装可能な３Ｄシミュレーション方法を提供することを課題とする。また、この３Ｄシミュレーション方法をＭＢＤプログラムに適用し、ＭＢＤプログラムと連成計算させることにより、ＭＢＤプログラムでの計算時間を、大幅に短縮することを課題とする。

課題を解決するための手段

[0011] 出願人は、特許文献１の発明を利用した、以下の態様によれば、前記した課題を解決できることを知得した。

[0012] すなわち、本発明は、下記の態様を有する。

[0013] ＜１＞コンピュータによって物理現象での物理量を数値的に解析するシミュレーション方法であって、

コンピュータが、解析領域を複数の分割領域に分割し、

前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出

された離散化された分割領域での支配方程式に基づき、各前記分割領域の体積と隣り合う前記分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記分割領域での計算用データモデルを生成し、

前記分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成し、

前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された集合領域での支配方程式に基づき、各前記集合領域の体積と隣り合う前記集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記集合領域での計算用データモデルを生成し、

前記解析領域での物性値と、前記集合領域での計算データモデルとに基づいて、前記集合領域同士及び前記解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、前記集合領域ごとの物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算する、ことを特徴とするシミュレーション方法。

[0014] ＜２＞前記＜１＞に記載の方法によって得られた前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを使用し、更に、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算をする、ことを特徴とするＭＢＤプログラムによるシミュレーション方法。

[0015] ＜３＞物理現象での物理量を数値的に解析する数値解析装置であって、

解析領域を複数の分割領域に分割し、前記分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成する演算部と、

前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された分割領域での支配方程式と、前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された集合領

域での支配方程式とを記憶する記憶部とを備え、

前記演算部は、前記記憶部に記憶された前記分割領域での支配方程式に基づき、各前記分割領域の体積と隣り合う前記分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記分割領域での計算用データモデルを生成し、前記記憶部に記憶された前記集合領域での支配方程式に基づき、各前記集合領域の体積と隣り合う前記集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記集合領域での計算用データモデルを生成し、前記解析領域での物性値と、前記集合領域での計算データモデルとに基づいて、前記集合領域同士及び前記解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、前記集合領域の物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算する、ことを特徴とする数値解析装置。

[0016] ＜４＞前記＜３＞の数値解析装置と、

前記数値解析装置で計算される前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させるＭＢＤプログラムを搭載する他の数値解析装置とを含む、ＭＢＤ用数値解析システム。

[0017] ＜５＞前記＜３＞の数値解析装置で計算される前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させるＭＢＤプログラムを搭載する、ＭＢＤ用数値解析システム。

[0018] ＜６＞コンピュータに、

物理現象での物理量を解析する解析領域を複数の分割領域に分割させ、

前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された分割領域での支配方程式に基づき、各前記分割領域の体積と隣り合う前記分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを前記分割領

域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記分割領域での計算用データモデルを生成させ、

前記分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成させ、

前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された集合領域での支配方程式に基づき、各前記集合領域の体積と隣り合う前記集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記集合領域での計算用データモデルを生成させ、

前記解析領域での物性値と、前記集合領域での計算データモデルとに基づいて、前記集合領域同士及び前記解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、前記集合領域の物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算させる、ことを特徴とする数値解析プログラム。

[0019] ＜７＞前記＜６＞の数値解析プログラムと、

前記数値解析プログラムで計算される前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させるＭＢＤプログラムとを含む、ＭＢＤプログラム。

[0020] ＜８＞前記＜６＞の数値解析プログラムで計算される前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させる、ＭＢＤプログラム。

発明の効果

[0021] 本発明によれば、ＭＢＤプログラムに適用可能な３Ｄシミュレーション方法を提供できる。また、本発明によれば、この３Ｄシミュレーション方法をＭＢＤプログラムに適用し、ＭＢＤプログラムと連成計算させることにより、ＭＢＤプログラムでの計算時間を、大幅に短縮することができる。

図面の簡単な説明

[0022] [図1]本実施形態の数値解析手法の計算用データモデルの一例を示す概念図である。

[図2]コントロールポイントを通り、任意の向きの単位法線ベクトルを持つ無限に広い投影面を示す模式図である。

[図3]２次元における三角形のコントロールボリュームを考えた場合において物理量の保存則が満足される条件について説明する模式図である。

[図4]球のコントロールボリュームを考えた場合において物理量の保存則が満足される条件について説明する模式図である。

[図5]本実施形態の数値解析方法における集合領域を生成する処理の一例を示す図である。

[図6]本実施形態の数値解析方法における集合領域を生成する処理の一例を示す図である。

[図7]本実施形態の数値解析方法における集合領域を生成する処理の一例を示す図である。

[図8]本実施形態の数値解析方法における集合領域を生成する処理の一例を示す図である。

[図9]本実施形態の数値解析方法における集合領域を生成する処理の一例を示す図である。

[図10]本実施形態の数値解析方法におけるセルの集合方法の一例を説明するための図である。

[図11]本実施形態の数値解析方法におけるセルの集合方法の一例を説明するための図である。

[図12]本実施形態の数値解析手法における集合領域の境界面特性量の一例を示す概念図である。

[図13]本実施形態の数値解析手法における集合領域の境界面特性量の一例を説明する図である。

[図14]本実施形態の数値解析手法の解析領域の境界における集合領域の境界

面特性量の一例を説明するための図である。

[図15]本実施形態の数値解析手法の解析領域の境界における集合領域の境界面特性量の一例を説明するための図である。

[図16]本実施形態の数値解析装置Ａのハードウェア構成を概略的に示すブロック図である。

[図17]本実施形態の数値解析装置Ａの動作の一例を示すフローチャートである。

[図18]本実施形態の数値解析装置Ａの動作の一例を示すフローチャートである。

[図19]本実施形態の数値解析装置Ｂのハードウェア構成を概略的に示すブロック図である。

[図20]本実施形態の数値解析装置Ｂの動作の一例を示す図である。

[図21]本実施形態の熱流体シミュレーションの一例を示す図である。

[図22]本実施形態の熱流体シミュレーションの一例を示す図である。

[図23]本実施形態の熱流体シミュレーションの集合領域（ドメイン１）の生成結果の一例を示す図である。

[図24]本実施形態の熱流体シミュレーションの集合領域（ドメイン２）の生成結果の一例を示す図である。

[図25]本実施形態の熱流体シミュレーションの集合領域（ドメイン３）の生成結果の一例を示す図である。

[図26]本実施形態の熱流体シミュレーションの集合領域（ドメイン４）の生成結果の一例を示す図である。

[図27]本実施形態の熱流体シミュレーションの集合領域（ドメイン５）の生成結果の一例を示す図である。

[図28]本実施形態の熱流体シミュレーションの集合領域（ドメイン６）の生成結果の一例を示す図である。

[図29]本実施形態の熱流体シミュレーションの集合領域（ドメイン７）の生成結果の一例を示す図である。

[図30]本実施形態の熱流体シミュレーションの集合領域（ドメイン８）の生成結果の一例を示す図である。

[図31]本実施形態の熱流体シミュレーションの結果（空気温度）の一例を示す図である。

[図32]本実施形態の熱流体シミュレーションの結果（空気温度）の一例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0023] 本実施形態のシミュレーション方法、ＭＢＤプログラムによるシミュレーション方法、数値解析装置、ＭＢＤプログラム用数値解析システム、数値解析プログラムおよびＭＢＤプログラム用数値解析プログラムを、図面を参照しつつ説明する。以下で説明する実施形態は一例に過ぎず、本発明が適用される実施形態は、以下の実施形態に限られない。

[0024] なお、実施形態を説明するための全図において、同一の機能を有するものは同一符号を用い、繰り返しの説明は省略する。

[0025] 本実施形態でいう「ＸＸに基づく」とは、「少なくともＸＸに基づく」ことを意味し、ＸＸに加えて別の要素に基づく場合も含む。また、「ＸＸに基づく」とは、ＸＸを直接に用いる場合に限定されず、ＸＸに対して演算や加工が行われたものに基づく場合も含む。「ＸＸ」は、任意の要素（例えば、任意の情報）である。

[0026] 本実施形態でいう「物理現象」とは、シミュレーションで再現可能な現象を意味する。例えば、自動車のキャビンに関するシミュレーションの場合には、窓ガラスを透過する太陽による日射や、車速に応じて窓ガラス外表面から奪われる熱や空調による空気の吹き出しやキャビン内の熱対流、熱輻射等の熱移動の現象が挙げられる。その他、内燃機関での燃焼現象、産業機械の部材での力学現象、電気システムでの電気的現象等も例として挙げられる。

[0027] 本実施形態でいう「物理量」とは、物理現象のシミュレーションでの解析結果となる、温度、熱流束、応力、圧力、電圧、電流、流速、拡散速度、その他の値を意味する。

[0028] 本実施形態でいう「解析領域」とは、物理現象をシミュレーションするために設定した解析モデルの対象領域を意味する。例えば、自動車のキャビンであれば、ボディ、窓ガラス等で囲まれる部分となる。但し、解析領域には、ＭＢＤプログラムで使用するための以下のコンダクタンスとキャパシタンスとを計算するための解析領域以外のＭＢＤプログラムで非定常計算をするための解析対象は、含まない。

[0029] 本実施形態でいう「コンダクタンス」とは、電気回路でのコンダクタンスに限定されず、熱の伝わりにくさを示す熱コンダクタンス、流体の流れにくさを示すコンダクタンス等を意味し、物理量の移動の特性を表す。

[0030] 本実施形態でいう「キャパシタンス」とは、電気回路でのキャパシタンスに限定されず、熱容量を示す熱キャパシタンス、流体の質量や運動量の蓄積量を示すキャパシタンス等を意味し、物理量の蓄積の特性を表す。

[0031] （実施形態）

本発明のシミュレーション方法は、コンピュータによって物理現象での物理量を数値的に解析する方法である。

[0032] シミュレーション方法は、コンピュータが、解析領域を複数の分割領域に分割し、分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された分割領域での支配方程式に基づき、各分割領域の体積と隣り合う分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する分割領域での計算用データモデルを生成する。

[0033] さらに、シミュレーション方法は、分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成し、集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された集合領域での支配方程式に基づき、各集合領域の体積と隣り合う集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Con

nectivity）を必要としない量として有する集合領域での計算用データモデルを生成する。

[0034] さらに、シミュレーション方法は、解析領域での物性値と、集合領域での計算用データモデルとに基づいて、集合領域同士及び解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、集合領域ごとの物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算する。

[0035] 本実施形態で用いられる離散化された支配方程式（以下「離散化支配方程式」という）は、従来のように分割領域の幾何学的形状を規定する量である座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を含んだ形式で表現されるものではなく、分割領域の幾何学的形状を規定する量である座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない。本実施形態では、以下、幾何学的形状を規定する量である座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を単に「幾何学的形状を規定する量」と呼ぶ。

[0036] 本実施形態で用いられる離散化支配方程式は、複数の分割領域を集合させた集合領域の幾何学的形状を規定する量をも必要としない。本実施形態で用いられる離散化支配方程式は、従来の幾何学的形状を規定する量を使用する方程式を重み付き残差積分法に基づいて導出する過程で敢えて途中にて留めることによって得ることができる。

[0037] このような本実施形態で用いられる離散化支配方程式は、分割領域の幾何学的形状を規定する量を必要としない量で表現され、例えば分割領域の体積と境界面特性量の２つのみに依存する形式とすることができる。また、本実施形態で用いられる離散化支配方程式は、集合領域の幾何学的形状を規定する量を必要としない量で表現され、例えば、集合領域の体積と境界面特性量の２つのみに依存する形式とすることができる。

[0038] なお、本実施形態において、便宜上、分割領域と呼んでいるが、この分割領域は、従来の有限要素法や有限体積法などでの分割領域とは異なるもので、本実施形態においては、いわゆるメッシュを必要としない。本実施形態は、メッシュレスによるシミュレーション方法である。

[0039] つまり、従来の有限要素法や有限体積法では、前提として解析対象物を微小領域に分割するため、この微小領域の幾何学的形状を規定する量を用いることを前提にして離散化支配方程式を導出している。しかし、本実施形態で用いられる離散化支配方程式は、従来のこれらの方法と異なる発想に基づいて導出される。

[0040] そして、本実施形態は、この発想に基づいて導出された離散化支配方程式を用いるものであり、従来の有限要素法や有限体積法等の数値解析方法と異なり、幾何学的形状に依存しない。さらに、本実施形態は、従来の問題を解決し、種々の顕著な効果を奏する。また、本実施形態は、これらの効果に加えて、特許文献１に開示も示唆もない、分割領域を集合する集合領域で計算を可能としたことによって、モデル縮退を可能にし、ＭＢＤプログラムへの実装を可能にし、ＭＢＤプログラムでの計算時間を短縮する効果を奏する。

[0041] ここで、分割領域の体積と境界面特性量とが、分割領域の特定の幾何学的形状を規定する量を必要としない量であることについて説明する。なお、幾何学的形状を規定する量を必要としない量とは、VertexとConnectivityとを用いなくとも定義が可能な量をいう。

[0042] 例えば、分割領域の体積について考えると、分割領域の体積がある所定の値となるための分割領域の幾何学的形状は複数存在する。つまり、体積がある所定の値をとる分割領域の幾何学的形状は、立方体である場合や球である場合も考えられる。そして、例えば、分割領域の体積は、全分割領域の総和が解析領域全体の体積と一致するという制約条件の下で、例えば分割領域の体積が隣接分割領域との平均距離の３乗にできるだけ比例するような最適化計算により定義できる。したがって、分割領域の体積は、分割領域の特定の幾何学的形状を規定する量を必要としない量と捉えることができる。

[0043] また、分割領域の境界面特性量としては、例えば境界面の面積や、境界面の法線ベクトル、境界面の周長等が考えられるが、これらの境界面特性量がある所定の値となるための分割領域の幾何学的形状は複数存在する。そして、例えば、境界面特性量は、各分割領域を取り囲む全境界面に対して、法線

ベクトルの面積加重平均ベクトルの長さがゼロとなる制約条件の下で、境界面の法線ベクトルの方向を隣接する２つの分割領域のコントロールポイント（図１参照）を結ぶ線分に近づけ、かつ、分割領域を取り囲む全境界面面積の総和が当該分割領域の体積の２分の３乗にできるだけ比例するような最適化計算により定義することができる。したがって、境界面特性量は、分割領域の特定の幾何学的形状を規定する量を必要としない量と捉えることができる。このような分割領域の境界面特性量が有する特徴は、集合領域の境界面特性量も有する。

[0044] また、集合領域の体積と境界面特性量とが、集合領域の特定の幾何学的形状を規定するVertexとConnectivityとを必要としない量であることについても、分割領域の場合と同様である。

[0045] また、本実施形態において「幾何学的形状を規定する量を必要としない量のみを使用する離散化支配方程式」とは、代入される値がVertexとConnectivityとを必要としない量のみである離散化支配方程式を意味する。

[0046] 図１の概念図を参照して、本実施形態の数値解析手法と従来の数値解析手法とにおけるプリ処理及びソルバ処理を対比しながら、詳細な説明を行う。

[0047] 本実施形態を用いる数値解析手法の場合には、ソルバ処理にて、幾何学的形状を規定する量を必要としない量のみを使用する離散化支配方程式を用いて集合領域における物理量の算出が行われる。このため、離散化支配方程式を解くにあたり、プリ処理にて作成される計算用データモデルにVertexとConnectivityとを含める必要がない。

[0048] そして、本実施形態を用いる場合には、幾何学的形状を規定する量を必要としない量として、集合領域の体積と境界面特性量とが使用される。このため、プリ処理にて作成される計算用データモデルは、VertexとConnectivityとを持たず、集合領域の体積と、境界面特性量と、その他補助データ（例えば、後述する、分割領域の係合情報やコントロールポイント座標等）とを有するものとなる。

[0049] このように本実施形態を用いた場合には、前述のように、幾何学的形状を

規定する量を必要としない量である集合領域の体積と境界面特性量に基づいて各領域における物理量が計算できる。このため、計算用データモデルに、集合領域の幾何学的形状を規定する量を持たせることなく物理量を算出できる。したがって、本実施形態を用いることにより、プリ処理において、少なくとも集合領域の体積と境界面特性量（境界面の面積及び境界面の法線ベクトル）とを有する計算用データモデルを作成すればよくなり、幾何学的形状を規定する量を有する計算用データモデルを作成することなく物理量の計算ができる。

[0050] 幾何学的形状を規定する量を持たない計算用データモデルは、集合領域の幾何学的形状を規定する量を必要としないため、集合領域の幾何学的形状に縛られることなく作成できる。

[0051] このため、３次元形状データの修正作業に対する規制も大幅に緩和される。よって、幾何学的形状を規定する量を持たない計算用データモデルは、幾何学的形状を規定する量を有する計算用データモデルと比較して遥かに容易に作成できる。したがって、本実施形態によれば、計算用データモデルの作成における作業負担を軽減できる。

[0052] また、本実施形態を用いる場合であっても、プリ処理においては、幾何学的形状を規定する量を使用しても構わない。つまり、プリ処理において幾何学的形状を規定する量を用いて分割領域の体積や境界面特性値等を算出してもよい。このような場合であっても、ソルバ処理においては集合領域の体積や境界面特性値があれば物理量を計算できるため、プリ処理において幾何学的形状を規定する量を利用するにしても、集合領域の幾何学的形状に対する制約、例えば分割領域の歪みや捩じれ等に起因する制約がなく、計算用データモデルの作成における作業負担を軽減できる。

[0053] また、本実施形態を用いることによって、プリ処理において、集合領域の幾何学的形状に対する制約がなくなるため、集合領域を任意の形状に変更できる。このため、集合領域の数を増やすことなく、解析領域を実際に解析したい領域に容易にフィッティングでき、計算負荷を増大させることなく解析

精度を向上できる。

[0054] さらに、本実施形態を用いることによって集合領域の分布密度も任意に変更できるため、必要な範囲で計算負荷の増大を許容しながらさらに解析精度を向上できる。

[0055] 本実施形態では、プリ処理において、まず、任意に配置された分割領域の体積、境界面特性量（境界面の面積、境界面の法線ベクトル）及び物理量のやり取りを行う分割領域同士を関連付ける情報を有する分割領域の計算用データモデルを作成する。例えば、この物理量のやり取りを行う分割領域同士を関連付ける情報は、隣り合う分割領域同士の結合情報（link）と、隣り合う分割領域同士の距離からなる。そして、このlinkによって関連付けられる分割領域は、必ずしも空間的に隣接されている必要はなく、空間的に離間していても構わない。このようなlinkは、幾何学的形状を規定する量と関連するものではなく、幾何学的形状を規定する量と比較すると、極めて短時間で作成できる。また、後に詳説するが、本実施形態では、必要に応じて、分割領域の内部に配置されるコントロールポイントの座標を、分割領域の計算用データモデルに持たせる場合もある。次に、本実施形態では、プリ処理において、分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成する。そして、集合領域の体積、境界面特性量（境界面の面積、境界面の法線ベクトル）及び物理量のやり取りを行う集合領域同士を関連付ける情報を有する集合領域の計算用データモデルを作成する。この物理量のやり取りを行う集合領域同士を関連付ける情報、隣り合う集合領域同士の結合情報（link）も、分割領域に対する特徴と同様の特徴を有する。また、後に詳説するが、本実施形態では、必要に応じて、集合領域の内部に配置されるコントロールポイントの座標を、集合領域の計算用データモデルに持たせる場合もある。

[0056] そして、本実施形態では、プリ処理から、分割領域の体積、境界面特性量及びlink並びにコントロールポイントの座標等を有する分割領域の計算用データモデルと、境界条件や初期条件等とをソルバ処理に受け渡す。ソルバ処

理では、受け渡されたその計算用データモデルに含まれる分割領域の体積、境界面特性量等を使用して離散化支配方程式を解くことによって物理量の算出を行う。

[0057] また、本実施形態では、プリ処理から、集合領域の体積、境界面特性量及びlink並びにコントロールポイントの座標等を有する計算用データモデルと、境界条件や初期条件等とをソルバ処理に受け渡す。ソルバ処理では、受け渡されたその計算用データモデルに含まれる集合領域の体積、境界面特性量等を使用して離散化支配方程式を解くことによって物理量の算出を行う。

[0058] そして、本実施形態では、ソルバ処理において、幾何学的形状を規定する量を使用しないで物理量を計算している点が従来の有限体積法と大きく異なり、この点が本実施形態の大きな特徴である。このような特徴は、ソルバ処理にて、幾何学的形状を規定する量を必要としない量のみを使用する離散化支配方程式を用いることによって得られる。

[0059] この結果、本実施形態では、ソルバ処理に幾何学的形状を規定する量を受け渡す必要がなくなり、プリ処理において、幾何学的形状を規定する量を持たない計算用データモデルを作成すればよい。したがって、従来の有限体積法と比較して本実施形態では、遥かに容易に計算用データモデルを作成でき、計算用データモデルの作成における作業負担を軽減できる。

[0060] 本実施形態の数値解析手法（以下、本数値解析手法と称する）の原理である重み付き残差積分法に基づいて導出された離散化支配方程式と、集合領域の体積と境界面特性量とによって物理量を算出可能となる原理について詳細に説明する。なお、以下の説明において、［］にて挟まれた文字は、図面において太字で記されたベクトルを示す。

[0061] まず、本実施形態を用いた数値解析手法における数値解析の処理の流れを簡単に説明する。

[0062] 前述したように、本実施形態を用いた数値解析手法は、解析領域を複数の分割領域に分割する処理（以下「複数の分割領域に分割する処理」という）を有する。さらに、本数値解析手法は、分割領域の頂点の座標（Vertex）及

び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法に基づいて導出された離散化された分割領域での支配方程式に基づき、各分割領域の体積と隣り合う分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する分割領域での計算用データモデルを生成する処理（以下「分割領域での計算用データモデルを生成する処理」という）を有する。

[0063] さらに、本数値解析手法は、分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成する処理（以下「集合領域を生成する処理」という）を有する。さらに、本数値解析手法は、集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法に基づいて導出された離散化された集合領域での支配方程式に基づき、各集合領域の体積と隣り合う集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する集合領域での計算用データモデルを生成する処理（以下「集合領域での計算用データモデルを生成する処理」という）を有する。さらに、本数値解析手法は、解析領域での物性値と、集合領域での計算データモデルとに基づいて、集合領域同士の物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、集合領域の物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算する処理（以下「計算する処理」という）を有する。

[0064] （複数の分割領域に分割する処理）

複数の分割領域に分割する処理について説明する。複数の分割領域に分割する処理では、解析領域を、幾何学的形状を規定する量を使用しないセルで細かく分割する。

[0065] （分割領域での計算用データモデルを生成する処理）

分割領域での計算用データモデルを生成する処理について説明する。なお、この分割領域での計算用データモデルを生成する処理は、特許文献１で開

示されている処理と同様である。

[0066] 図１において、セルR_1，R_2，R_3・・・は、解析領域を分割して得られる分割領域であり、各々が体積V_a，V_b，V_c・・・を有している。また、境界面Ｅは、セルR_1とセルR_2との間において物理量の交換が行われる面であり、本実施形態における境界面に相当する。また、面積S_{ab}は、境界面Ｅの面積を示し、本実施形態における境界面特性量の１つである。また、$[n]_{ab}$は、境界面Ｅの法線ベクトルを示し、本実施形態における境界面特性量の１つである。

[0067] また、コントロールポイントａ，ｂ，ｃ・・・は、各セルＲ１，Ｒ２，Ｒ３の内部に配置されており、図１においては各セルR_1，R_2，R_3・・・の重心位置に配置されている。ただし、コントロールポイントａ，ｂ，ｃ・・・は、必ずしも各セルR_1，R_2，R_3・・・の重心位置に配置される必要はない。また、αは、コントロールポイントａからコントロールポイントｂまでの距離を１とした場合におけるコントロールポイントａから境界面Ｅまでの距離を示し、境界面Ｅがコントロールポイントａとコントロールポイントｂとを結ぶ線分のどの内分点に存在するかを示す比率である。なお、コントロールポイントａからコントロールポイントｂまでの距離は、隣り合う分割領域同士の距離の一例である。

[0068] なお、境界面は、セルR_1とセルR_2との間のみに限らず、隣り合う全てのセル間に存在する。そして、境界面の法線ベクトル及び境界面の面積も、境界面ごとに与えられる。

[0069] そして、実際の分割領域での計算用データモデルは、各コントロールポイントａ，ｂ，ｃ・・・の配置データと、各コントロールポイントａ，ｂ，ｃ・・・が存在するセルR_1，R_2，R_3・・・の体積V_a，V_b，V_c・・・を示す体積データと、各境界面の面積を示す面積データと、各境界面の法線ベクトル（以下「法線ベクトル」という。）を示す法線ベクトルデータとを有するデータ群として構築されている。

[0070] 本数値解析手法の分割領域での計算用データモデルは、セルR_1，R_2，R_3

・・・の体積V_a，V_b，V_c・・・と、隣り合うセルR_1，R_2，R_3・・・同士の境界面の特性を示す境界面特性量である境界面の面積と、隣り合うセルR_1，R_2，R_3・・・同士の境界面の特性を示す境界面特性量である境界面の法線ベクトルとを有して定義されている。

[0071] なお、各セルR_1，R_2，R_3・・・は、コントロールポイントａ，ｂ，ｃ・・・を有している。このため、セルR_1，R_2，R_3・・・の体積V_a，V_b，V_c・・・は、コントロールポイントａ，ｂ，ｃ・・・が仮想的に占める空間（コントロールボリューム）の体積として捉えることができる。

[0072] また、本数値解析手法の計算用データモデルは、必要に応じて、境界面が挟まれたコントロールポイント同士を結ぶ線分のどの内分点に存在するかの比率αを示す比率データを有する。

[0073] 以下では、前述の分割領域での計算用データモデルを用いて解析領域の各セルにおける温度を求める物理量計算例について説明する。なお、ここでは、各コントロールポイントにおける温度を各セルにおける温度として求める。

[0074] まず、本物理量計算において本数値解析手法は、熱移動の解析の場合、下式（１）で示す熱伝導方程式と、下式（２）で示す熱の移流拡散方程式とを用いる。

[0075] [数1]

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \cdot C_P \cdot T\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}\right] \qquad (1)$$

[0076]

[数2]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot C_P \cdot T) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[u_j \cdot (\rho \cdot C_P \cdot T)\right] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho \cdot C_P \cdot \alpha^* \frac{\partial T}{\partial x_j}\right] \quad (2)$$

なお、式（１），（２）において、ｔは時間を示し、ｘ$_i$（ｉ＝１，２，３）はカーテシアン系における座標を示し、ρは熱が移動する物質の密度を示し、Ｃｐは熱が移動する物質の比熱を示し、ｕ$_i$（ｉ＝１，２，３）は熱が移動する物質の流速成分を示し、λは熱が移動する物質の熱伝導率を示し、添字ｉ（ｉ＝１，２，３），ｊ（ｊ＝１，２，３）はカーテシアン座標系における各方向成分を示している。また、添字ｊに関しては総和規約に従うものとする。

[0077] ここで、α^*は、式（３）で定義される乱流拡散を考慮した温度拡散率であり、α_tは乱流拡散係数である。

[0078] [数3]

$$\alpha^* = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_P} + \alpha_t \quad (3)$$

そして、式（１），（２）を、重み付き残差積分法に基づいて、コントロールボリュームの体積に対して積分して示すと、式（１）が下式（４）のように示され、式（２）が下式（５）のように示される。

[0079]

[数4]

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot C_P \cdot T)\right] dV = \int_S \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\right] dS \qquad (4)$$

[0080] [数5]

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot C_P \cdot T)\right] dV + \int_S \left[u_n (\rho \cdot C_P \cdot T)\right] dS = \int_S \left[\rho \cdot C_P \cdot \alpha^* \frac{\partial T}{\partial n}\right] dS \qquad (5)$$

なお、式（４），（５）において、Ｖがコントロールボリュームの体積を示し、∫ＶｄＶが体積Ｖに関する積分を示し、Ｓがコントロールボリュームの面積を示し、∫ＳｄＳが面積Ｓに関する積分を示し、［ｎ］がＳの法線ベクトルを示し、n_i（ｉ＝１，２，３）が法線ベクトル［ｎ］の成分を示し、∂／∂ｎが法線方向微分を示している。また、u_nは法線方向流速を示す。

[0081] ここで、説明を簡単化するために、熱が移動する物質の密度ρと比熱Ｃｐと熱伝導率λを定数とする。さらに、熱が移動する物質の乱流拡散を考慮した温度拡散率α*も定数とする。ただし、以下の定数化は、熱が移動する物質の物性値やα*が、時間、空間、温度等によって変化する場合に対して拡張できる。

[0082] そして、図１のコントロールポイントａについて、境界面Ｅの面積S_{ab}について離散化し、代数方程式による近似式に変換すると、式（４）が下式（６）、式（５）が下式（７）のように示される。

[0083] [数6]

$$V_a \cdot \left[\rho \cdot C_P \frac{\partial T_a}{\partial t} \right] = \sum_{b=1}^{m} \left[S_{ab} \cdot \lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{ab} \right] \qquad (6)$$

[0084] [数7]

$$V_a \cdot \left[\rho \cdot C_P \frac{\partial T_a}{\partial t} \right] + \sum_{b=1}^{m} \left[S_{ab} \cdot u_{nab} \cdot \rho \cdot C_P \cdot T_{ab} = \sum_{b=1}^{m} \left[S_{ab} \cdot \rho \cdot C_P \cdot \alpha^* \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{ab} \right] \right. \qquad (7)$$

ここで、添字ａｂが付く、u_{nab}，T_{ab}，$(\partial T / \partial n)_{ab}$は、コントロールポイントａとコントロールポイントｂとの間の境界面Ｅ上における物理量であることを示す。u_{nab}はコントロールポイントａとコントロールポイントｂとの間の境界面Ｅ上における法線方向流速である。また、ｍは、コントロールポイントａと結合関係（境界面を挟む関係）にある全てのコントロールポイントの数である。

[0085] そして、式（６），（７）をV_a（コントロールポイントａのコントロールボリュームの体積）で割ると、式（６）が下式（８）のように示され、式（７）が下式（９）のように示される。

[0086]

[数8]

$$\rho \cdot C_P \cdot \frac{\partial T_a}{\partial t} = \sum_{b=1}^{m} \left[\frac{S_{ab}}{V_a} \cdot \lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{ab} \right] \quad (8)$$

[0087] [数9]

$$\rho \cdot C_P \cdot \frac{\partial T_a}{\partial t} + \sum_{b=1}^{m} \left[\frac{S_{ab}}{V_a} \cdot u_{nab} \cdot \rho \cdot C_P \cdot T_{ab} \right] = \sum_{b=1}^{m} \left[\frac{S_{ab}}{V_a} \cdot \rho \cdot C_P \cdot \alpha^* \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{ab} \right] \quad (9)$$

ここで、下式（１０）とする。

[0088] [数10]

$$\phi_{ab} \equiv \frac{S_{ab}}{V_a} \quad (10)$$

すると、式（８）が下式（１１）のように示され、式（９）が下式（１２）のように示される。

[0089]

[数11]

$$\rho \cdot C_P \cdot \frac{\partial T_a}{\partial t} = \sum_{b=1}^{m} \left[\phi_{ab} \cdot \lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{ab} \right] \quad (11)$$

[0090] [数12]

$$\rho \cdot C_P \cdot \frac{\partial T_a}{\partial t} + \sum_{b=1}^{m} \left[\phi_{ab} \cdot u_{nab} \cdot \rho \cdot C_P \cdot T_{ab} \right] = \sum_{b=1}^{m} \left[\phi_{ab} \cdot \rho \cdot C_P \cdot \alpha^* \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{ab} \right] \quad (12)$$

式（１１），（１２）において、u_{nab}，T_{ab}，$(\partial T / \partial n)_{ab}$は、コントロールポイントａとコントロールポイントｂ上の物理量の重み付け平均（移流項については、風上性を考慮した重み付け平均）により近似的に求められ、コントロールポイントａ，ｂ間の距離及び向きと、その間に存在する境界面Ｅとの位置関係（上記比率α）と、境界面Ｅの法線ベクトルの向きに依存して決定される。ただし、u_{nab}，T_{ab}，$(\partial T / \partial n)_{ab}$は、境界面Ｅの幾何学的形状を規定する量には無関係な量である。

[0091] また、式（１０）で定義されるϕ_{ab}も（面積／体積）という量であり、コントロールボリュームの幾何学的形状を規定する量には無関係な量である。

[0092] つまり、このような式（１１），（１２）は、セル形状を規定するVertexとConnectivityとを必要としない量のみを使用して物理量が算出可能な、重み付き残差積分法に基づく演算式である。

[0093] このため、物理量計算（ソルバ処理）に先立って前述の計算用データモデルを作成し、物理量計算において当該計算用データモデルと、式（１１），（１２）の離散化支配方程式とを用いることによって、物理量計算においてコントロールボリュームの幾何学的形状を全く使用せずに、温度の計算を行うことができる。

[0094] このように、物理量計算において幾何学的形状を規定する量を全く使用せずに温度の計算が行えることから、計算用データモデルに幾何学的形状を規定する量を持たせる必要がなくなる。よって、計算用データモデルの作成にあたり、セルの幾何学的形状に縛られる必要がなくなるため、セルの形状を任意に設定することができる。このため、本数値解析手法によれば、前述のように３次元形状データの修正作業に対する規制を大幅に緩和することができる。

[0095] なお、実際に式（１１），（１２）を解くにあたり、T_{ab}等の境界面Ｅ上の物理量は、通常、線形補間によって補間される。例えば、コントロールポイントａの物理量をϕ_a、コントロールポイントｂの物理用をϕ_bとすると、境界面Ｅ上の物理量ϕ_{ab}は、下式（１３）によって求めることができる。

[0096] [数13]

$$\psi_{ab} = \frac{1}{2}(\psi_a + \psi_b) \qquad (13)$$

また、物理量ϕ_{ab}は、境界面が挟まれたコントロールポイント同士を結ぶ線分のどの内分点に存在するかの比率αを用いることによって、下式（１４）によって求めることもできる。

[0097]

[数14]

$$\psi_{ab} = (1-\alpha)\cdot\psi_a + \alpha\cdot\psi_b \qquad (14)$$

したがって、計算用データモデルが比率αを示す比率データを有している場合には、式（１４）を用いて境界面Ｅ上の物理量をコントロールポイントａとコントロールポイントｂとからの離間する距離に応じた重み付け平均を用いて算出することができる。

[0098] また、連続体モデルの方程式（熱の移流拡散方程式等）には、式（１）に示すように、１階の偏導関数（偏微分）が含まれる。

[0099] ここで、連続体モデルの方程式の微係数を部分積分、ガウスの発散定理、あるいは一般化されたグリーンの定理を利用して、体積分を面積分に変換し、微分の次数を下げる。これによって１次微分は０次微分（スカラー量またはベクトル量）とすることができる。

[0100] 例えば一般化されたグリーンの定理では、物理量をφとすると、下式（１５）という関係が成り立つ。

[0101] [数15]

$$\int_V \frac{\partial \psi}{\partial x_i} dV = \int_S \psi\, n_i dS \qquad (15)$$

なお、式（１５）において、ｎ$_{i}$（ｉ＝１，２，３）は、表面Ｓ上の単位法線ベクトル［ｎ］のｉ方向の成分である。

[0102] 連続体モデルの方程式の１次微分項は、体積分から面積分の変換により、境界面上ではスカラー量またはベクトル量として取り扱われる。そして、これらの値は、前述の線形補間等によって、各コントロールポイント上の物理量から補間できる。

[0103] また、連続体モデルの方程式によっては、２階の偏導関数が含まれる場合もある。

[0104] 式（１５）の被積分関数をさらに１階微分した式は下式（１６）となり、連続体モデルの方程式の２次微分項は、体積分から面積分の変換により境界面Ｅ上では下式（１７）となる。

[0105] [数16]

$$\int_V \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_i \partial x_j} dV = \int_S \frac{\partial \psi}{\partial x_j} n_i \, dS = \int_S \frac{\partial \psi}{\partial n} n_i \, n_j dS \qquad (16)$$

[0106] [数17]

$$\int_{S_{ab}} \frac{\partial \psi}{\partial n_{ab}} \cdot n_{iab} \cdot n_{jab} dS \qquad (17)$$

なお、式（１６）において∂／∂ｎは法線方向微分を示し、式（１７）に

おいて∂／∂ｎ$_{ab}$は、［ｎ］ａｂ方向微分を示す。

[0107] つまり、連続体モデルの方程式の２次微分項は、体積分から面積分の変換により、物理量φの法線方向微分（Ｓ$_{ab}$の法線［ｎ］$_{ab}$方向への微分）に、［ｎ］の成分ｎ$_{iab}$、ｎ$_{jab}$を乗じた形となる。

[0108] ここで式（１７）中の∂φ／∂ｎ$_{ab}$は、下式（１８）と近似される。

[0109] [数18]

$$\frac{\partial \psi}{\partial n_{ab}} = \frac{\psi_b - \psi_a}{r_{ab} \cdot n_{ab}} \qquad (18)$$

なお、コントロールポイントａとコントロールポイントｂとのコントロールポイント間ベクトル［ｒ］$_{ab}$は、コントロールポイントａの位置ベクトル［ｒ］$_{a}$とコントロールポイントｂの位置ベクトル［ｒ］$_{b}$から下式（１９）のように定義される。

[0110] [数19]

$$r_{ab} \equiv r_b - r_a \qquad (19)$$

したがって、境界面Ｅの面積がＳ$_{ab}$であるため、式（１７）は下式（２０）となり、これを利用して式（１６）を計算できる。

[0111] [数20]

$$\int_{S_{ab}} \frac{\partial \psi}{\partial n_{ab}} \cdot n_{iab} \cdot n_{jab} dS = S_{ab} \cdot \frac{\psi_b - \psi_a}{r_{ab} \cdot n_{ab}} \cdot n_{iab} \cdot n_{jab} \qquad (20)$$

なお、式（１７）の導出にあたり、次のことがわかる。

[0112] すべての線形偏微分方程式は、定数と、１次、２次、その他の偏導関数に係数を乗じた項の線形和で表わされる。式（１６）から式（１９）において、物理量φをφの１次偏導関数に置き換えると、より高次の偏導関数の体積分を、式（１５）のように低次の偏導関数の面積分により求めることができる。この手順を、低次の偏微分から順次繰り返すと、線形偏微分方程式を構成するすべての項の偏導関数は、コントロールポイントの物理量φと、式（１３）又は式（１４）で計算される境界面上のφであるφ$_{ab}$と、式（１９）で定義されるコントロールポイント間ベクトルから求められるコントロールポイント間距離と、式（６）に示される境界面Ｅの面積Ｓ$_{ab}$、式（１７）に示される法線ベクトルの成分ｎ$_{iab}$とｎ$_{jab}$から、すべて求めることができる。

[0113] 本数値解析手法において物理量計算にあたり幾何学的形状を規定する量を必要としないことは前述した。このため、計算用データモデルの作成（プリ処理）にあたり、コントロールボリュームの体積と、境界面の面積及び法線ベクトルとを、幾何学的形状を規定する量を使用しないで求めれば、式（１１）と式（１２）との離散化支配方程式を用いて、コントロールボリュームの幾何学的形状であるセルの幾何学的形状を全く使用せずに、温度の計算を行うことができる。

[0114] ただし、本数値解析手法においては、必ずしも、コントロールボリューム

の体積と、境界面の面積及び法線ベクトルとを、コントロールボリュームの具体的な幾何学的形状を使用しないで求める必要はない。このように、ソルバ処理において幾何学的形状を規定する量を利用しないので、コントロールボリュームの具体的な幾何学的形状、具体的にはVertexとConnectivityとを利用するとしても、従来の有限要素法、有限体積法のような分割領域に関わる制約である分割領域の歪みや捩じれに対する制約がないため、前述のように容易に計算用データモデルの作成ができる。

[0115] 本実施形態は、物理量計算にあたり、物理量保存則が満足される。これについては、次に説明する。但し、物理量保存則が満足される理由は、特許文献１に記載した理由と同様である。

[0116] まず、本実施形態の物理量計算にあたり、物理量の保存則が満足されるためには、コントロールポイントが示すコントロールボリューム領域についての離散化支配方程式は、全てのコントロールポイントについて足し加えると、計算対象である解析領域の全領域に関する保存則を満足する方程式にならなくてはならない。

[0117] 続いて、コントロールポイントの全数をＮとし、式（６）、式（７）を全てのコントロールポイントについて足し加えると、式（２１）、式（２２）が得られる。

[0118] [数21]

$$\sum_{a=1}^{N}\left[V_a\cdot\left[\rho\cdot C_P\cdot\frac{\partial T_a}{\partial t}\right]-\sum_{b=1}^{m}\left[S_{ab}\cdot\lambda\cdot\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{ab}\right]\right]=0 \qquad (21)$$

[0119]

[数22]

$$\sum_{a=1}^{N}\left[V_a\cdot\left[\rho\cdot C_P\cdot\frac{\partial T_a}{\partial t}\right]+\sum_{b=1}^{m}\left[S_{ab}\cdot u_{nab}\cdot\rho\cdot C_P\cdot T_{ab}\right]-\sum_{b=1}^{m}\left[S_{ab}\cdot\rho\cdot C_P\cdot\alpha^{*}\cdot\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{ab}\right]\right]=0 \qquad (22)$$

式（２１）、式（２２）において、各コントロールポイント間の境界面の面積は、コントロールポイントａ側から見てもコントロールポイントｂ側から見ても等しいとすると、各コントロールポイント間の移動熱量は、コントロールポイントａ側とコントロールポイントｂ側で正負が逆で絶対値が等しくなるので差し引きゼロとなりキャンセルされる。つまり、式（２１）、式（２２）は、計算する全領域に対して、流入する熱量の積算値と流出する熱量の積算値との差が、全領域での熱容量の単位時間変化に等しいことを示す。したがって、式（２１）、式（２２）は、解析領域全体における熱エネルギ保存の式となる。

[0120] よって、式（２１）、式（２２）が、計算する全領域についての熱エネルギ保存則を満足するためには、２つのコントロールポイント間の境界面の面積が一致するという条件及び法線ベクトルが一方のコントロールポイント側から見た場合と他方のコントロールポイント側から見た場合とで絶対値が一致し正負が逆であるという条件が必要である。

[0121] また、熱エネルギ保存則を満足するためには、下式（２３）に示される全コントロールポイントのコントロールボリュームの占める体積が解析領域の全体積V_{total}と一致するという条件が必要である。

[0122]

[数23]

$$V_{total} = \sum_{a=1}^{N} V_a \qquad (23)$$

なお、ここでは、熱エネルギ保存則に対して説明を行ったが、保存則は、連続体の質量や運動量に対しても成立しなければならない。これらの物理量に対しても、全コントロールポイントに対して足し加えることによって、保存側が満足されるためには、全コントロールポイントのコントロールボリュームの占める体積が解析領域の全体積と一致するという条件と、２つのコントロールポイント間の境界面の面積が一致する条件及び法線ベクトルが一方のコントロールポイント側から見た場合と他方のコントロールポイント側から見た場合とで絶対値が一致する（正負逆符号）という条件とが必要であることが分かる。

[0123] また、保存則を満たすためには、図２に示すように、コントロールポイントａの占めるコントロールボリュームを考えた場合に、コントロールポイントａを通り、任意の向きの単位法線ベクトル［ｎ］ｐを持つ無限に広い投影面Ｐを考えたときに下式（２４）が成り立つという条件が必要である。

[0124]

[数24]

$$\sum_{i=1}^{m}\left[\left(\boldsymbol{n}_i\cdot\boldsymbol{n}_p\right)\cdot S_i\right]=0 \qquad (24)$$

なお、図２及び式（２４）において、Ｓ$_i$が境界面Ｅ$_i$の面積、［ｎ］$_i$が境界面Ｅ$_i$の単位法線ベクトル、ｍがコントロールボリュームの面の総数を示す。

[0125] 式（２４）は、コントロールボリュームを構成する多面体が、閉包空間を構成することを示す。この式（２４）は、コントロールボリュームを構成する多面体の一部が凹んでいる場合であっても成立する。

[0126] なお、図３に示すように、２次元における三角形についても式（２４）が成り立つ。また、多面体の１つの面を微小面ｄＳとし、ｍを∞とする極限を取ると、下式（２５）となり、図４に示すような閉包曲面体についても成り立つことが分かる。

[0127] [数25]

$$\int_S \boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{n}_P dS = 0 \qquad (25)$$

式（２４）が成り立つという条件は、ガウスの発散定理や、式（１５）に

示す一般化されたグリーンの定理が成り立つために必要な条件である。

[0128] そして、一般化されたグリーンの定理は、連続体の離散化のための基本となる定理である。したがって、グリーンの定理にしたがって体積分を面積分に変形させ離散化させる場合において、保存則を満足させるためには式（２４）が成り立つという条件は必須となる。

[0129] このように、前述の計算用データモデル及び物理量計算を用いて数値解析を行う際に、物理量の保存則が満足されるためには、以下の３つの条件が必要となる。

[0130] （ａ）全コントロールポイントのコントロールボリュームの体積（全分割領域の体積）の総和が解析領域の体積と一致する。

[0131] （ｂ）２つのコントロールポイント間の境界面の面積が一致する及び法線ベクトルが一方のコントロールポイント側（境界面を挟む一方の分割領域）から見た場合と他方のコントロールポイント側（境界面を挟む他方の分割領域）から見た場合とで絶対値が一致する（正負逆符号）。

[0132] （ｃ）コントロールポイントを通り（分割領域を通り）、任意の向きの単位法線ベクトル［ｎ］ｐを持つ無限に広い投影面Ｐを考えたときに式（２４）が成り立つ。

[0133] つまり、保存則を満足させる場合には、これらの条件を満足するように計算用データモデルを作成する必要がある。ただし、前述のように本数値解析手法においては、計算用データモデルの作成にあたり、セル形状を任意に変形することができることから、容易に上記３つの条件を満足するように計算用データモデルを作成できる。

[0134] なお、前述の説明においては、熱伝導方程式及び熱の移流拡散方程式から重み付き残差積分法に基づいて導出した離散化支配方程式を用いる物理量の計算例について説明したが、本数値解析手法において用いられる離散化支配方程式はこれに限られるものではない。

[0135] つまり、種々の方程式（質量保存の方程式、運動量保存の方程式、エネルギ保存の方程式、移流拡散方程式、及び波動方程式等）から重み付き残差積

分法に基づいて導出されると共に、幾何学的形状を規定する量を必要としない量のみを使用して物理量を算出可能な離散化支配方程式であれば本数値解析手法に用いることができる。

[0136] そして、このような離散化支配方程式の特性によって、従来の有限要素法や有限体積法のようにいわゆるメッシュを必要としない、メッシュレスでの計算が可能となる。また、たとえ、プリ処理において、セルの幾何学的形状を規定する量を利用するとしても、従来の有限要素法、有限体積法、ボクセル法のようなメッシュに対する制約がないため、計算用データモデルの作成に伴う作業負荷を軽減できる。

[0137] 本実施形態では、質量保存の方程式、運動量保存の方程式、エネルギ保存の方程式、移流拡散方程式、及び波動方程式から、重み付き残差積分法に基づいて、幾何学的形状を規定する量を必要としない量のみを使用する離散化支配方程式が導出可能である。本数値解析手法において他の支配方程式を用いることができる。これについては、特許文献１に記載した理由と同様であるため、説明を省略する。

[0138] （集合領域を生成する処理）

集合領域を生成する処理について説明する。集合領域を生成する処理では、セルの集合和により集合領域を作成する。以下、集合領域は、ドメインと呼ぶこともある。ドメインが作成されることによって、解析領域はドメイン分割された状態となる。

[0139] 図５で、集合領域を生成する処理では、解析領域内に自動生成されたコントロールボリューム（セル）を集合させ、新たに設定されたコントロールボリュームを、ドメインと定義する。ドメインは、コントロールボリュームであり、セルの集合和である。

[0140] 図６に示される複数のドメインのうち、任意のドメインをドメインＡとする。ドメインＡ内に存在するセルの総数をNV_Aとした場合、ドメインＡの体積V_Aは式（２６）で表され、ドメインＡのコントロールポイントの座標ベクトル$[r]_A$は式（２７）で表される。以下の式（２６）、式（２７）により

、セルの集合和を計算し、ドメインを設定する。

[0141] [数26]

$$V_A = \sum_{a=1}^{NV_A} V_a \qquad (26)$$

[0142] [数27]

$$V_A \cdot \mathbf{r}_A = \sum_{a=1}^{NV_A} \left[V_a \cdot \mathbf{r}_a \right] \qquad (27)$$

式（２６）、（２７）において、Ａ，Ｂ，・・・は、ドメインを表す添え字である。

[0143] ここで、ドメインを設定した後に、設定したドメインを集合させることによって、新たにドメインを設定するようにしてもよい。

[0144] 図７に示されるように、複数のドメインの集合和が設定される。図７に示される例では、細い線によってドメインが示されている。

[0145] 図８に示されるように、ドメインを複数集合させることによって、新たにドメインが設定される。新たに設定されたドメインは、太線によって示されている。

[0146] 新たに設定されたドメインも、コントロールボリュームであり、ドメイン

の集合和である。新たに設定されたドメインについても、式（２６）、式（２７）により、新たに設定されたドメインの体積と、新たに設定されたドメインのコントロールポイントの座標ベクトルが計算される。図９に示されるように、コントロールポイントが示される。そして、新たに設定されたドメインは、ドメインと同様に取り扱われる。

[0147] セルの集合和によって作成されたドメインをドメイン１とし、ドメイン１の集合和によって作成されたドメインをドメイン２とし、ドメイン２の集合和によって作成されたドメインをドメイン３とする。解析領域に自動生成されたコントロールボリューム（セル）に基づいて、ドメイン１、ドメイン２、ドメイン３、・・・、最終ドメインと階層構造型にドメインを設定できる。

[0148] ＭＢＤは、基本的に非定常解析であり、計算回数が非常に多いため、１回の計算での高速性が要求される。ＭＢＤで要求される計算精度に合わせて、コントロールボリューム（セル）から、ドメイン１、ドメイン２、ドメイン３、・・・、最終ドメインと階層構造型にドメインを設定できる。ここで、ドメイン１から、ドメイン２やドメイン３を経ることなく、最終ドメインを設定してもよい。コントロールボリューム（セル）から、ドメイン１、ドメイン２、ドメイン３、・・・、最終ドメインと階層構造型にドメインを設定した場合や、ドメイン１から、ドメイン２を経ることなく、最終ドメインを設定した場合に、最初の解析領域の境界形状のセル分割精度が失われない。

[0149] 従来の有限体積法や有限要素法では、初期の分割メッシュを集合させると、集合させたドメインの境界形状は複雑な多面となるため、計算を実行できない。具体的には、現状では、有限体積法では二十面体が限度であり、有限要素法では６面体を超える多面体の要素内補間関数を定義できない。そのため、従来の方法においては、初期の分割メッシュを集合するという思想自体が存在しない。このことから、本実施形態は、分割領域から集合領域を形成することの動機づけも示唆もないところから着想され、従来の方法では不可能で、それを可能にすることによって、後述する顕著な効果を奏する。

[0150] 自動生成されたコントロールボリューム（セル）では、セル間でのマスバランス（質量保存）や運動量保存、エネルギ保存などの物理量の保存則を満足させながら数値解析ができる。従って、コントロールボリューム（セル）から、ドメイン１、ドメイン２、ドメイン３、・・・、最終ドメインと階層構造型に設定されたドメインでも、ドメイン１から、ドメイン２やドメイン３を経ることなく、最終ドメインと階層構造型に設定された場合でも、ドメイン間での物理量の保存則は満足される。

[0151] 解析領域内に自動生成されたコントロールボリューム（セル）を集合させることによって、新たにドメインを設定するための、コントロールボリューム（セル）の集合方法について説明する。

[0152] 図１０に示されるように、解析領域を直交格子状の領域に粗く分割し、その直交格子内にコントロールポイントの座標が含まれるセルを集合させる。

[0153] 図１１に示されるように、解析領域内に、ドメインのコントロールポイントを設定する。ドメインのコントロールポイントから、予め指定された半径の球体内にコントロールポイントの座標が含まれるセルを集合させる。半径を徐々に拡大し、解析領域内のセルを全て、ドメインのいずれかに集合させる。

[0154] また、ボクセル法で、解析領域を包含する領域にボクセルを生成し、そのボクセルをドメインとしてもよい。この場合、ボクセル内にコントロールポイントの座標が含まれるセルを集合させる。

[0155] ここでは、セルの集合方法として、三例について説明したが、この例に限られない。例えば、ここに示した例以外の集合方法が使用されてもよい。

[0156] 解析領域内に自動生成されたコントロールボリューム（セル）を、コントロールボリューム（セル）の集合方法にしたがって集合させることによって新たにドメインを設定した場合には、最初の解析領域の境界形状のセル分割精度が失われない。このため、解析領域内に自動生成されたコントロールボリューム（セル）を、コントロールボリューム（セル）の集合方法にしたがって集合させることによって新たに設定されたドメイン間で、物理量の保存

則を満足させながら数値解析ができる。

[0157] （集合領域での計算用データモデルを生成する処理）

集合領域での計算用データモデルを生成する処理について説明する。

[0158] 図１２は、発明の数値解析手法の集合領域における境界面特性量の一例を示す概念図である。図１２は解析領域を分割する複数の分割領域と、複数の集合領域とを表す。図１２において、実線で囲まれたドメインＡ及びドメインＢは、集合領域である。図１２において、破線で囲まれた図形は分割領域である。例えば、セルＲ２０１～セルＲ２０８は、分割領域である。ドメインＡは、セルＲ２０１～セルＲ２０８を含む複数の分割領域を集合して得られる集合領域である。境界面$Ｅ_{ＡＢ}$は、ドメインＡとドメインＢとの間において物理量の交換が行われる面であり、集合領域での計算用データモデルにおける境界面に相当する。また、面積$Ｓ_{ＡＢ}$は、境界面$Ｅ_{ＡＢ}$の面積を示し、本実施形態における集合領域の境界面特性量の１つである。

[0159] $[ｎ]_{ａ1}$～$[ｎ]_{ａ8}$の各々は、境界面$Ｅ_{ＡＢ}$で互いに接するセル同士の境界面の特性を示す量である法線ベクトルである。

[0160] 図１３のドメインＡ及びドメインＢは、図１２のドメインＡ及びドメインＢである。コントロールポイント$Ａ_{ｃ}$及びコントロールポイント$Ｂ_{ｃ}$は、それぞれドメインＡ及びドメインＢの内部に配置されている。

[0161] ドメインＢに属し境界面$Ｅ_{ＡＢ}$に接するセルｂの境界面の総数を$ＮＳ_{ＡＢ}$とすると、ドメインＡとドメインＢとの間の境界面の面積$Ｓ_{ＡＢ}$と、ドメインＡとドメインＢとの間の境界面の法線ベクトル$[ｎ]_{ＡＢ}$は、式（２８）、式（２９）で計算される。ここで、Ｓａｂは、ドメインＢに属し境界面$Ｅ_{ＡＢ}$に接するセルｂの境界面の面積である。

[0162]

[数28]

$$S_{AB} = \sum_{b=1}^{NS_{AB}} S_{ab} \qquad (28)$$

[0163] [数29]

$$S_{AB} \cdot \mathbf{n}_{AB} = \sum_{b=1}^{NS_{AB}} \left[S_{ab} \cdot \mathbf{n}_{ab} \right] \qquad (29)$$

図１４に示される例では、ドメインＡが解析領域のうちの外部空間との境界に接している場合を示す。この場合、図１５に示されるように、ドメインＢが解析領域の外部に存在すると仮定して、ドメインＢに接するセルａの境界面の集合和を計算することによって、式（２８）、式（２９）と同様に、ドメインＡとドメインＢとの間の境界面の面積S_{AB}と、ドメインＡとドメインＢとの間の境界面の法線ベクトル［ｎ］$_{AB}$とを導出できる。

[0164] （計算する処理）

計算する処理について説明する。前述した数値解析手法では、解析領域内に自動生成されたコントロールボリューム（セル）を集合させることによって、ドメインを生成した。

[0165] さらに、数値解析手法では、セルａとセルｂとの間の境界面S_{ab}における境界面特性量（境界面の面積S_{ab}、境界面の法線ベクトル［ｎ］$_{ab}$）を用い

て、ドメインＡとドメインＢとの間の境界面$Ｓ_{ＡＢ}$に関して、集合和を計算することによって、ドメインＡとドメインＢとの間の境界面$Ｓ_{ＡＢ}$における境界面特性量（境界面の面積$Ｓ_{ＡＢ}$、境界面の法線ベクトル$［ｎ］_{ＡＢ}$）を求めた。つまり、幾何学的形状を規定する量を使用しないセルによる連続体の数値解析手法を、ドメインに対しても全く同じ計算手法として適用した。

[0166] さらに、解析領域内に自動生成されたコントロールボリューム（セル）に基づいて、ドメイン１、ドメイン２、ドメイン３、・・・、最終ドメインと階層構造型にドメインを設定することができる。したがって、連続体の数値解析手法を、ドメイン１、ドメイン２、ドメイン３、・・・、最終ドメインと階層構造型に設定されたドメイン全てに対して適用できる。

[0167] コントロールボリューム（セル）から一度に最終ドメインを設定したときも、コントロールボリューム（セル）からドメイン１、ドメイン２、ドメイン３、・・・、最終ドメインと階層構造型にドメインを設定したときも、最初の解析領域の境界形状のセル分割精度は失われない。これは、熱流体解析のように伝熱面積を重要視する数値解析では、非常に大きなメリットである。

[0168] 解析領域内に自動的に生成されたコントロールボリューム（セル）の分割数が、数１０個～数１０００個のオーダー以下の粗さの場合、その粗い分割数のセルを用いた数値解析は、解析結果に誤差を多く含むおそれがある。

[0169] 一方、数１０００万個～数億個以上のオーダーのセル分割による数値解析は、非常に高精度であるが、スーパーコンピュータを用いて行う計算レベルであり、大型のメモリ容量と、ＨＤＤ容量との計算資源が必要であり、長大な計算時間、解析結果処理のための多大な計算コストの増大を招く。

[0170] しかし、数１０００万個～数億セル以上のオーダーのセル分割に関しては、セルの自動生成だけなら、比較的低容量のメモリを備えるコンピュータで、短時間で実行できる。

[0171] そこで、数１０００万個～数億個以上のオーダーのセル分割を、解析領域内で行い、そのセル分割に基づいて、ドメイン１、ドメイン２、ドメイン３

、・・・、最終ドメインと階層構造型にドメイン分割を行うこともできる。ドメイン分割数が、数千～数万個のオーダーであれば、比較的低容量のメモリを備えるコンピュータで短時間に数値解析を実行できる。

[0172] この場合、セルを集合させたドメインの境界形状は非常に複雑な多面となるが、幾何学的形状を規定する量を使用しないセルによる連続体の数値解析手法を用いることによって、解析領域の境界形状のセル分割精度を維持した状態で、連続体の数値解析を、比較的低メモリのコンピュータで、解析結果に含まれる誤差を問題とならない程度に抑制しながら、短時間に実行できる。

[0173] 以下、連続体の数値解析をＭＢＤへ適用した場合について、詳細に説明する。

[0174] ＭＢＤは、基本的に非定常解析であり、計算の高速性が要求される。スーパーコンピュータを用いて行う計算レベルの数値解析と、ＭＢＤプログラムによる非定常解析とを連成させて解析することは困難である。

[0175] しかし、ドメイン分割数が、数千～数万個のオーダーであれば、比較的低容量のメモリを備えるコンピュータで、短時間で、数値解析を実行できる。このため、解析領域の境界形状のセル分割の細かさ、計算精度を維持した状態の数値解析の結果に基づいて、ＭＢＤプログラムによる非定常解析を短時間に実行できる。

[0176] さらに、前述したように、自動生成されたコントロールボリューム（セル）では、セル間での物理量の保存則を満足させながら数値解析を行う。このため、コントロールボリューム（セル）から、ドメイン１、ドメイン２、ドメイン３、・・・、最終ドメインと階層構造型に設定されたドメインでも、ドメイン間での物理量の保存則は満足されている。比較的粗い、数千～数万個のオーダーのドメイン分割でも、非常に細かいセル分割と同じオーダーで物理量の保存則を満足させながら数値解析ができる。

[0177] ＭＢＤプログラム、例えば、シーメンス社の１Ｄ（１次元）マルチドメインシミュレーションのための統合プラットフォームとして、ＬＭＳ Ｉｍａ

ｇｉｎｅ．Ｌａｂ　Ａｍｅｓｉｍ（商品名）やマスワークス社のＳｉｍｕｌｉｎｋ（商品名）に、計算モデルを実装する場合は、ＭＢＤプログラムの仕様、計算性能、ＣＰＵやメモリ等の計算環境にも依存するが、ドメイン分割数は、数個～数１０個～数１００個のオーダーとするのが好ましい。

[0178] 解析領域内の高い計算精度の細かなセル分割に基づいて、最終ドメインを形成するが、ＭＢＤプログラムに実装する計算モデルでのドメイン分割数が数個～数１０個～数１００個のオーダーの場合、最初のセル分割の細かく大きなセル分割数と、ＭＢＤプログラムに実装する計算モデルでのドメイン分割数との間に大きな差が生じる。

[0179] ドメイン分割数が数個～数１０個～数１００個のオーダーであるため、ドメインのコントロールポイントで計算される物理量は、初期の詳細なセル分割による計算結果と比較すると、平均化された量として計算される。しかし、非常に細かいセル分割と同じオーダーで物理量の保存則を満足させながら数値解析を行うことができ、一定程度の高精度を維持し、且つ計算時間を短縮できる。

[0180] （熱伝導解析）

拡散場の数値解析の一例として熱伝導解析を説明する。

[0181] 熱伝導解析の基礎方程式は、式（３０）、または、式（３１）、式（３２）によって示される。

[0182] [数30]

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \cdot C_P \cdot T\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}\right] \qquad (30)$$

[0183]

[数31]

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha\frac{\partial T}{\partial x_j}\right] \qquad (31)$$

[0184] [数32]

$$\alpha=\frac{\lambda}{\rho\cdot C_P} \qquad (32)$$

式（３０）、または、式（３１）、式（３２）において、Ｔは温度、λは熱伝導率、αは温度拡散率、ρは密度、Ｃ$_p$は比熱を表す。それ以外の変数、添え字、偏微分係数、に関しては、前述した通りである。温度拡散率αは、式（３２）で定義され、式(３０)を、αを用いて記述すると、式(３１)が得られる。

[0185] 前述した基礎方程式を、コントロールボリューム（セル）で積分すると、式(３３)が得られる。式(３３)を、図１に示すセルａと、セルａを囲むｍ個のセルｂに対して離散化を行うと、式(３４)が得られる。

[0186]

[数33]

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot C_P \cdot T)\right] dV = \int_S \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\right] dS \qquad (33)$$

[0187] [数34]

$$V_a \cdot \left[\rho \cdot C_P \frac{\partial T_a}{\partial t}\right] = \sum_{b=1}^{m} \left[S_{ab} \cdot \lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{ab}\right] \qquad (34)$$

式（３０）－式（３４）、および以降の式において、セルに関するＶ$_a$、Ｓ$_{ab}$等の表記法、ドメインに関するＶ$_A$、Ｓ$_{AB}$等の表記法は、前述した通りである。

[0188] 式（３４）の右辺の温度の法線方向微分（∂Ｔ／∂ｎ）$_{ab}$は、以下のように計算される。

[0189]

[数35]

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{ab} = \frac{T_b - T_a}{\mathbf{r}_{ab}\cdot\mathbf{n}_{ab}} = \frac{T_b - T_a}{(\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a)\cdot\mathbf{n}_{ab}} \qquad (35)$$

[0190] [数36]

$$\mathbf{r}_{ab} \equiv \mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a \qquad (36)$$

従って、式（３４)は、以下のように表される。

[0191] [数37]

$$V_a \cdot \left[\rho \cdot C_P \frac{\partial T_a}{\partial t}\right] = \sum_{b=1}^{m}\left[S_{ab}\cdot\lambda\cdot\frac{T_b - T_a}{\mathbf{r}_{ab}\cdot\mathbf{n}_{ab}}\right] \qquad (37)$$

ドメインに関しては、図１３に示すドメインＡと、ドメインＡを囲むＭ個のドメインＢに対して離散化を行うと、式（３８）が得られる。

[0192] [数38]

$$V_A \cdot \left[\rho \cdot C_P \frac{\partial T_A}{\partial t} \right] = \sum_{B=1}^{M} \left[S_{AB} \cdot \lambda \cdot \frac{T_B - T_A}{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{n}_{AB}} \right] \qquad (38)$$

一方、ドメインにおける離散化方程式は、式（３７）をドメイン内で加算し集合和を計算することによって得ることができる。ドメインＡ内に含まれるコントロールボリューム（セル）の数をNV_Aとすると、式（３９）が得られる。

[0193] [数39]

$$\sum_{a=1}^{NV_A} \left[V_a \cdot \rho \cdot C_P \frac{\partial T_a}{\partial t} \right] = \sum_{a=1}^{NV_A} \left[\sum_{b=1}^{m} \left\{ S_{ab} \cdot \lambda \cdot \frac{T_b - T_a}{\mathbf{r}_{ab} \cdot \mathbf{n}_{ab}} \right\} \right] \qquad (39)$$

式（３９）の右辺における、（$T_b - T_a$）／（$[r]_{ab} \cdot [n]_{ab}$）の項は、図１において、セルａの離散化式とセルｂの離散化式とでは、面S_{ab}において絶対値が等しく正負が逆であるため、ドメインＡ内の集合和を計算する際に互いに打ち消しあう。このため、式（３９）の右辺は、式（４０）のようにドメインＡの境界積分となる。

[0194]

[数40]

$$\sum_{a=1}^{NV_A}\left[\sum_{b=1}^{m}\left\{S_{ab}\cdot\lambda\cdot\frac{T_b-T_a}{\mathbf{r}_{ab}\cdot\mathbf{n}_{ab}}\right\}\right]=\sum_{B=1}^{M}\left[\sum_{b=1}^{NS_{AB}}\left\{S_{ab}\cdot\lambda\cdot\frac{T_b-T_a}{\mathbf{r}_{ab}\cdot\mathbf{n}_{ab}}\right\}\right] \quad (40)$$

式（４０）において、NS_{AB}は、ドメインＡの境界S_{AB}に接するコントロールボリューム（セル）の境界の数である。

[0195] ドメインとコントロールボリューム（セル）との間の変数の関係をまとめると、式（４１）－式（４５）が得られる。

[0196] [数41]

$$V_A=\sum_{a=1}^{NV_A}V_a \quad (41)$$

[0197] [数42]

$$V_A\cdot T_A=\sum_{a=1}^{NV_A}\left[V_a\cdot T_a\right] \quad (42)$$

[0198] [数43]

$$V_A \cdot \mathbf{r}_A = \sum_{a=1}^{NV_A} \left[V_a \cdot \mathbf{r}_a \right] \qquad (43)$$

[0199] [数44]

$$S_{AB} = \sum_{b=1}^{NS_{AB}} S_{ab} \qquad (44)$$

[0200] [数45]

$$S_{AB} \cdot \mathbf{n}_{AB} = \sum_{b=1}^{NS_{AB}} \left[S_{ab} \cdot \mathbf{n}_{ab} \right] \qquad (45)$$

式（４１）－式（４５）と、式（４６）の近似が成り立つ場合、式（３９）と式（４０）とは、式（３８）と一致する。この場合、セル間で保存される移動熱量の積算値は、セルの集合和であるドメイン間でも保存される。

[0201] [数46]

$$S_{AB}\cdot\lambda\cdot\frac{T_B-T_A}{\mathbf{r}_{AB}\cdot\mathbf{n}_{AB}}\cong\sum_{b=1}^{NS_{AB}}\left\{S_{ab}\cdot\lambda\cdot\frac{T_b-T_a}{\mathbf{r}_{ab}\cdot\mathbf{n}_{ab}}\right\}\qquad(46)$$

ドメインＡとドメインＢとの間の境界面S_{AB}における温度の法線方向勾配と、ドメインＡとドメインＢの中心間の温度の法線方向勾配がほぼ等しい場合、式（４６）の近似が成り立つ。

[0202] ドメインに含まれるセル数が少なく、ドメイン間温度勾配とセル間温度勾配が近い値を示すときは、式（４６）の近似が成り立ち、式（３８）を用いて、移動熱量を高い精度で保存しながら熱伝導解析を行うことができる。

[0203] ここで、ドメインＡとドメインＢの間の境界面S_{AB}における補正係数を$\xi_{\lambda AB}$とし、以下の式（４７）を定義する。式（４７）によれば、物性値と、分割領域での計算データモデルによる物理現象の解析結果である物理量とに基づく補正係数を導出できる。

[0204] [数47]

$$\xi_{\lambda_{AB}}\equiv\frac{\sum_{b=1}^{NS_{AB}}\left\{S_{ab}\cdot\lambda\cdot\frac{T_b-T_a}{\mathbf{r}_{ab}\cdot\mathbf{n}_{ab}}\right\}}{S_{AB}\cdot\lambda\cdot\frac{T_B-T_A}{\mathbf{r}_{AB}\cdot\mathbf{n}_{AB}}}\qquad(47)$$

ドメインＡとドメインＢの間の境界面S_{AB}における温度の法線方向勾配と、ドメインＡとドメインＢの中心間の温度の法線方向勾配が等しいとき、補正係数は、$\xi_{\lambda AB}=1$となる。

[0205] 式（４７）の補正係数を用いると、ドメインにおける離散化方程式である式（３８）は、以下の式（４８）のように表される。式（４８）によれば、物性値と、分割領域での計算データモデルによる物理現象の解析結果である物理量とに基づく補正係数と、集合領域での離散化方程式を補正係数で補正した補正離散化方程式に基づく集合領域での計算データモデルと、に基づいて、コンダクタンスが計算される。

[0206] [数48]

$$\left(\rho\cdot C_P\cdot V_A\right)\frac{\partial T_A}{\partial t}=\sum_{B=1}^{M}\left[\xi_{\lambda_{AB}}\cdot S_{AB}\cdot\lambda\cdot\frac{T_B-T_A}{\mathbf{r}_{AB}\cdot\mathbf{n}_{AB}}\right] \qquad (48)$$

式（４８）をＭＢＤの電気回路形式で表すために、以下のように、熱抵抗R_{AB}と、その逆数である熱コンダクタンスC_{AB}を定義する。

[0207] [数49]

$$C_{AB}\equiv\frac{1}{R_{AB}}\equiv\xi_{\lambda_{AB}}\cdot S_{AB}\cdot\lambda\cdot\frac{1}{\mathbf{r}_{AB}\cdot\mathbf{n}_{AB}} \qquad (49)$$

式（４９）を式（４８）に代入すると、以下の式（５０）のように、ＭＢＤ

の電気回路形式で表された微分方程式（熱回路網方程式）が得られる。

[0208] [数50]

$$(\rho \cdot C_P \cdot V_A)\frac{\partial T_A}{\partial t} = \sum_{B=1}^{M}\left[C_{AB} \cdot (T_B - T_A)\right] = \sum_{B=1}^{M}\left[\frac{T_B - T_A}{R_{AB}}\right] \quad (50)$$

ＭＢＤの電気回路形式で表された微分方程式（熱回路網方程式）（５０）において、集合領域Ａの熱キャパシタンス（熱容量）は、式（５０）左辺の時間微分項の係数として、（$\rho \cdot C_p \cdot V_A$）と表される。

[0209] 式（５０）は、熱抵抗を電気抵抗、温度Ｔを電圧、熱容量（$\rho \cdot C_p \cdot V_A$）を電気容量（キャパシタンス）に置き換えれば、キルヒホッフの法則を満足させながら非定常計算される電気回路の計算（熱回路網計算）と同じである。

[0210] 熱伝導解析によれば、解析領域での物性値と、集合領域での計算データモデルとに基づいて、集合領域同士及び解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、集合領域ごとの物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算できる。

[0211] 従って、後述するＭＢＤプログラムへの熱コンダクタンスと熱キャパシタンスの実装方法により、熱コンダクタンスと熱キャパシタンスをＭＢＤプログラムに組み込み、あるいは、熱コンダクタンスと熱キャパシタンスを組み込んだ熱回路網モデルをＭＢＤプログラムから呼び出される実行モジュールとすることにより、熱コンダクタンスと熱キャパシタンスを組み込んだ熱回路網モデルを連成させたＭＢＤプログラムによって、非定常数値計算を実行することができる。

[0212] 以上のように、分割領域のコントロールボリューム（セル）によって、一度、解析結果を得れば、それ以降の非定常計算は、セルよりも少ない数のドメインで解析をすればよい。

[0213] （熱の移流拡散解析）

移流拡散場の数値解析の一例として、熱の移流拡散解析について説明する。熱伝導解析の場合と同様に、ＭＢＤプログラムとの連成を目的に、粗く分割されたドメインの計算精度（保存則の計算精度）の改良方法を説明する。

[0214] 熱の移流拡散解析の基礎方程式を、式（５１）に示す。ここで、変数、添え字、偏微分係数、に関しては、前述の通りである。ただし、α^*は、式（５２）で定義される乱流拡散を考慮した温度拡散率であり、α_tは乱流拡散係数である。

[0215] [数51]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot C_P \cdot T)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[u_j \cdot (\rho \cdot C_P \cdot T)\right]=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho \cdot C_P \cdot \alpha^* \frac{\partial T}{\partial x_j}\right] \qquad (51)$$

[0216] [数52]

$$\alpha^* = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_P}+\alpha_t \qquad (52)$$

基礎方程式を、コントロールボリューム（セル）で積分すると、式（５３

）が得られる。

[0217] [数53]

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot C_P \cdot T)\right] dV + \int_S [u_n \cdot (\rho \cdot C_P \cdot T)]\, dS = \int_S \left[\rho \cdot C_P \cdot \alpha^* \frac{\partial T}{\partial n}\right] dS \quad (53)$$

式（５３）の左辺第１項と右辺に関しては、熱伝導解析で説明した通りである。

[0218] ここでは、式（５３）の左辺第２項（移流項）の取り扱いを説明する。説明を簡易にするために、左辺第２項（移流項）から物性値を除いた、式（５４）の項を対象とする。

[0219] [数54]

$$\int_S [u_n \cdot T]\, dS \quad (54)$$

前述したように、保存則が満足されていれば、ドメイン内に含まれるセルの加算による集合和については、ドメイン内部は打ち消しあうため、以下の式（５５）のようにドメインの境界積分となる。

[0220]

[数55]

$$\sum_{a=1}^{NV_A}\left[\sum_{b=1}^{m}\left\{S_{ab}\cdot u_{nab}\cdot T_{ab}\right\}\right]=\sum_{B=1}^{M}\left[\sum_{b=1}^{NS_{AB}}\left\{S_{ab}\cdot u_{nab}\cdot T_{ab}\right\}\right] \qquad (55)$$

ここで、u_{nab}はセルａとセルｂの間の境界面S_{ab}における法線方向流速であり、予め解析領域をセル分割し、熱流体計算を実行し、セル間の境界面の全てについて法線方向流速を求めておく。

[0221] T_{ab}はセルａとセルｂのコントロールポイントの温度から補間によって計算された境界面S_{AB}上の温度である。風上性を考慮する場合は、セルａとセルｂの温度から補間する際に、風上スキームを考慮して、境界面S_{AB}上の温度を計算する。

[0222] 前述したように、ドメイン内に含まれるセル数が非常に多い場合は、ドメインＡとドメインＢとの間の境界面S_{AB}における補正係数を、以下のように定義する。

[0223] ドメイン境界面S_{AB}上の法線方向流速u_{nAB}は、式（５６）から求められる。これを用いて、式（５７）により、補正係数ξ_{UAB}を求める。

[0224] [数56]

$$S_{AB}\cdot u_{nAB}=\sum_{b=1}^{NS_{AB}}\left\{S_{ab}\cdot u_{nab}\right\} \qquad (56)$$

[0225] [数57]

$$\xi_{U_{AB}} \equiv \frac{\sum_{b=1}^{NS_{AB}} \{S_{ab} \cdot u_{nab} \cdot T_{ab}\}}{S_{AB} \cdot u_{nAB} \cdot T_{AB}} \qquad (57)$$

式（５７）の補正係数を用いて、式（５３）を基にドメイン内加算による集合和を計算すると、以下のようなドメイン分割に対する離散化方程式が得られる。

[0226] [数58]

$$(\rho \cdot C_P \cdot V_A)\frac{\partial T_A}{\partial t} + \sum_{B=1}^{M}\left[\xi_{U_{AB}} \cdot S_{AB} \cdot u_{nAB} \cdot (\rho \cdot C_P \cdot T_{AB})\right] = \sum_{B=1}^{M}\left[\xi_{\alpha_{AB}} \cdot S_{AB} \cdot (\rho \cdot C_P \cdot \alpha^*) \cdot \frac{T_B - T_A}{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{n}_{AB}}\right] \qquad (58)$$

式（５８）の右辺の補正係数$\xi_{\alpha AB}$は、前述した熱伝導解析の補正係数の式（４７）を使用し、熱伝導率λを温度拡散率α^*に置き換えることで求められる。補正係数$\xi_{\alpha AB}$は、物性値と、分割領域での計算データモデルによる物理現象の解析結果である物理量とに基づく補正係数である。

[0227] 式（５８）をＭＢＤプログラムの電気回路形式で表すために、以下のように、熱抵抗とその逆数である熱コンダクタンスを定義する。

[0228]

[数59]

$$C_{\alpha_{AB}} \equiv \frac{1}{R_{\alpha_{AB}}} \equiv \xi_{\alpha_{AB}} \cdot S_{AB} \cdot \left(\rho \cdot C_P \cdot \alpha^*\right) \cdot \frac{1}{\mathbf{r}_{AB} \cdot \mathbf{n}_{AB}} \qquad (59)$$

[0229] [数60]

$$C_{U_{AB}} \equiv \frac{1}{R_{U_{AB}}} \equiv \xi_{U_{AB}} \cdot S_{AB} \cdot u_{nAB} \cdot \left(\rho \cdot C_P\right) \qquad (60)$$

式（５９）と、式（６０）とを、式（５８）に代入すると、以下のように、ＭＢＤの電気回路形式で表された微分方程式（熱回路網方程式）が得られる。

[0230] 移流項（左辺第２項）は、法線方向流速u_{nAB}の正負によって変化する。１次風上スキームの場合、正のとき$T_{AB}=T_A$、負のとき$T_{AB}=T_B$である。

[0231]

[数61]

$$(\rho \cdot C_P \cdot V_A)\frac{\partial T_A}{\partial t} + \sum_{B=1}^{M}\left[C_{U_{AB}} \cdot T_{AB}\right] = \sum_{B=1}^{M}\left[C_{\alpha_{AB}} \cdot (T_B - T_A)\right] \qquad (61)$$

7　ＭＢＤの電気回路形式で表された微分方程式（熱回路網方程式）（６１）において、集合領域Ａの熱キャパシタンス（熱容量）は、式（６１）の左辺第１項の時間微分項の係数として、（$\rho \cdot C_p \cdot V_A$）と表される。

[0232]　式（６１）は、熱伝導解析と同様に、ＭＢＤプログラムの電気回路形式で表された微分方程式（熱回路網方程式）として表すことができる。熱抵抗を電気抵抗、温度Ｔを電圧、熱容量（$\rho \cdot C_p \cdot V_A$）を電気容量（キャパシタンス）に置き換えれば、キルヒホッフの法則を満足させながら非定常計算される電気回路の計算（熱回路網計算）と同じである。従って、後述するＭＢＤプログラムへの熱コンダクタンスと熱キャパシタンスの実装方法により、熱コンダクタンスと熱キャパシタンスをＭＢＤプログラムに組み込み、あるいは、熱コンダクタンスと熱キャパシタンスを組み込んだ熱回路網モデルをＭＢＤプログラムから呼び出される実行モジュールとすることにより、熱コンダクタンスと熱キャパシタンスを組み込んだ熱回路網モデルを連成させたＭＢＤプログラムによって非定常数値計算を実行することができる。

[0233]　以上のように、熱の拡散場、熱の移流拡散場を、ＭＢＤプログラムに実装するための電気回路モデルとして表すことができることを説明した。従って、移流と拡散場で表される連続体モデル（熱、流体、物質拡散、等）は全て、後述するＭＢＤプログラムへの実装方法により、コンダクタンスとキャパシタンスをＭＢＤプログラムに組み込み、あるいは、コンダクタンスとキャパシタンスを組み込んだ電気回路モデルを連成させたＭＢＤプログラムによ

って非定常数値計算を実行することができる。

[0234] なお、拡散場の説明の式（４７）で表される補正係数を、$\xi_{\lambda AB}=1$とすると、式（４９）で表されるドメイン間の熱コンダクタンスC_{AB}は、ドメイン間の境界面特性量（境界面の面積、法線ベクトル）、ドメインのコントロールポイント間の距離、物性値、から計算される。補正係数を求めるために、計算領域のセル分割から、熱伝導解析を実行する必要は無い。

[0235] 同様に、温度場の移流拡散解析も同じである。式（５７）、式（５８）の補正係数を１とすると、ドメイン間の熱コンダクタンスである式（５９）、式（６０）は、ドメイン間の境界面特性量（境界面の面積、法線ベクトル）、ドメインのコントロールポイント間の距離、物性値、から計算される。補正係数を求めるために、計算領域のセル分割から、熱流体解析を実行する必要は無い。

[0236] 補正係数を１とすると、補正係数を求めるために解析領域のセル分割を用いた数値シミュレーション計算を実行する必要が無く、この計算時間を削減できる。解析領域の境界形状のセル分割精度は、粗いドメイン分割でも維持されるので、解析領域の境界からの入出熱量を求める際に、境界の伝熱面積を高精度に維持したＭＢＤプログラムを実行することができる。

[0237] 次に、熱コンダクタンスと熱キャパシタンスの汎用ＭＢＤプログラムへの実装方法について説明する。熱コンダクタンスと熱キャパシタンスの汎用ＭＢＤプログラムへの実装とは、式（４９）、式（５０）、式（５９）、式（６０）、式（６１）から計算される熱コンダクタンスおよび熱キャパシタンスを使用し、熱伝導解析の場合は式（５０）、熱の移流拡散解析の場合は式（６１）を基礎方程式とした熱回路網モデルを作成し、熱回路網モデルを、モデル記述言語を用いて汎用ＭＢＤプログラムにライブラリとして組み込む、あるいは熱回路網モデルを、プログラミング言語を用いて記述しコンパイルし実行モジュールとして汎用ＭＢＤプログラムから呼び出す、などの方法により、熱回路網モデルを汎用ＭＢＤプログラムと連成させることをいう。

[0238] ここで、熱伝導解析の場合は式（５０）、熱の移流拡散解析の場合は式（

６１）を基礎方程式とした熱回路網モデルは、次の手順で作成される。式（５０）、式（６１）の基礎方程式は、ドメインＡからドメインＢに移動する熱エネルギとドメインＡに蓄積される熱エネルギの非定常変化を表す基礎方程式である。前述の通り、熱抵抗を電気抵抗、温度Ｔを電圧、熱容量（$\rho \cdot C_p \cdot V_A$）を電気容量（キャパシタンス）に置き換えれば、非定常計算される電気回路の計算（熱回路網計算）として、式（５０）と、式（６１）との非定常数値シミュレーション計算を実行することができる。前述の通り、解析領域は複数の集合領域、すなわちドメインに分割されている。これらのドメイン１つ１つに対して熱キャパシタンスを計算する。次に、１つのドメインから熱エネルギが移動する複数の他のドメインとの間の熱コンダクタンスを計算する。この手順を解析領域内のすべてのドメインに対して行うと、解析領域内のドメイン間をネットワーク状に結合した熱回路網モデルが作成される。各ドメインには熱キャパシタンスが設定され、ドメインとドメインの間には熱コンダクタンスが設定された熱回路網モデルが構築される。次に、熱キャパシタンスを電気容量、熱コンダクタンスの逆数である熱抵抗を電気抵抗に置き換えると、上記熱回路網モデルと等価な電気回路モデルが作成される。この電気回路モデルを、モデル記述言語、あるいはプログラミング言語を用いて記述する。モデル記述言語、あるいはプログラミング言語を用いて記述された電気回路モデルは、汎用ＭＢＤプログラムにライブラリとして組み込む、あるいはコンパイルされた実行モジュールとして汎用ＭＢＤプログラムから呼び出す、などの方法により、汎用ＭＢＤプログラムと連成させる。

[0239] モデル記述言語としては、ＶＨＤＬ－ＡＭＳ（Ｖｅｒｙ－Ｈｉｇｈ Ｓｐｅｅｄ ＩＣ Ｈａｒｄｗａｒｅ Ｄｅｓｃｒｉｐｔｉｏｎ Ｌａｎｇｕａｇｅ－Ａｎａｌｏｇ Ｍｉｘｅｄ Ｓｉｇｎａｌｓ）と呼ばれる汎用的なモデル記述言語がある。さらに、汎用ＭＢＤプログラムそれぞれに固有のモデル記述言語があり、それを用いる。

[0240] 式（５０）と、式（６１）とを、モデル記述言語でプログラムコード化す

る。電気抵抗や電気容量（キャパシタンス）のモデルの記述方法はパターン化されており、ドメイン分割とドメイン間のネットワーク結合に従って、式（５０）と、式（６１）とに対して、ドメイン数とドメイン間のネットワーク結合の数だけモデル記述言語でプログラムコードを自動生成させることができる。これをライブラリとしてＭＢＤプログラムへ受け渡すことにより、ＭＢＤプログラムと連成させて非定常数値シミュレーション計算を実行することができる。

[0241] 同様に、Ｆｏｒｔｒａｎ、Ｃ＋＋などの数値計算に用いられる通常のプログラミング言語により、式（５０）と、式（６１）とを、通常のプログラミング言語でプログラムコード化する。電気抵抗や電気容量（キャパシタンス）のモデルのプログラミング言語による記述はパターン化することができるので、ドメイン分割とドメイン間のネットワーク結合に従って、式（５０）と、式（６１）とに対して、ドメイン数とドメイン間のネットワーク結合の数だけプログラミング言語でプログラムコードを自動生成させることができる。これをコンパイラーによりコンパイルし実行モジュールを生成しＭＢＤプログラムから呼び出すことにより、ＭＢＤプログラムと連成させた非定常数値シミュレーション計算を実行することができる。

[0242] （数値解析装置、数値解析プログラム）

以下、本実施形態に係る数値解析装置と、本実施形態に係る数値解析プログラムとについて説明する。以下の実施形態においては、自動車のキャビン空間の熱の移流拡散現象を数値解析によって求める場合について説明する。

[0243] 図１６に示すように、本実施形態の数値解析装置Ａは、パーソナルコンピュータやワークステーション等のコンピュータによって構成されるものであり、ＣＰＵ１、記憶装置２、ＤＶＤ（Ｄｉｇｉｔａｌ Ｖｅｒｓａｔｉｌｅ Ｄｉｓｃ）ドライブ３、入力装置４、出力装置５、及び通信装置６を備えている。数値解析装置Ａは、社内ＬＡＮ等のネットワークＮを介して、ＣＡＤ装置Ｃと、数値解析装置Ｂと接続される。

[0244] ＣＰＵ１は、記憶装置２、ＤＶＤドライブ３、入力装置４、出力装置５、

及び通信装置６と電気的に接続されており、これらの各種装置から入力される信号を処理すると共に、処理結果を出力する。

[0245] 記憶装置２は、メモリ等の内部記憶装置及びハードディスクドライブ等の外部記憶装置によって構成されており、ＣＰＵ１から入力される情報を記憶すると共にＣＰＵ１から入力される指令に基づいて記憶した情報を出力する。

[0246] そして、本実施形態において記憶装置２は、プログラム記憶部２ａとデータ記憶部２ｂとを備えている。

[0247] プログラム記憶部２ａは、数値解析プログラムＰを記憶している。この数値解析プログラムＰは、所定のＯＳにおいて実行されるアプリケーションプログラムであり、コンピュータから構成される本実施形態の数値解析装置Ａを、数値解析を行うように機能させる。そして、数値解析プログラムＰは、本実施形態の数値解析装置Ａを、例えば演算部１ｏｐとして機能させる。

[0248] そして、図１６に示すように、数値解析プログラムＰは、プリ処理プログラムＰ１と、ソルバ処理プログラムＰ２と、ポスト処理プログラムＰ３とを有している。

[0249] プリ処理プログラムＰ１は、ソルバ処理を実行するための前処理（プリ処理）を本実施形態の数値解析装置Ａに実行させるものであり、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させることによって、計算用データモデルを作成させる。また、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａに、ソルバ処理を実行するにあたり必要となる条件の設定を実行させ、さらには上記計算用データモデルや設定された条件を纏めたソルバ入力データファイルＦの作成を実行させる。

[0250] そして、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させる場合に、まず本実施形態の数値解析装置Ａに対して、自動車のキャビン空間を含む３次元形状データを取得させ、この取得させた３次元形状データに含まれる自動車のキャビン空間を示す解析領域の作成を実行させる。

[0251] なお、後に詳説するが、本実施形態においては、ソルバ処理において、前述の本数値解析手法にて説明した幾何学的形状を規定する量を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法に基づいて導出された離散化支配方程式を用いる。このため、計算用データモデルの作成にあたり、保存則を満たす条件の下、分割領域の形状及び解析領域の形状を任意に変更できる。よって、３次元形状データに含まれる自動車のキャビン空間の修正あるいは変更作業は簡易的なもので充分となる。そこで、本実施形態においてプリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａに対して、取得させた３次元形状データに含まれる自動車のキャビン空間に存在する穴や隙間に、微小な閉曲面を覆いかぶせるラッピング処理によって修繕する処理を実行させる。

[0252] その後、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａに対して、複数の分割領域に分割する処理で説明したように分割領域を形成し、ラッピング処理等により修繕されたキャビン空間の全領域を含む解析領域の作成を実行させる。続いて、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａに対して作成された分割領域のうちキャビン空間から食み出した領域をカットすることによって、キャビン空間を示す解析領域の作成を実行させる。ここでも、ソルバ処理において前述の離散化支配方程式を用いることから、解析領域のうちキャビン空間から食み出した領域を容易にカットすることができる。

[0253] これにより、ボクセル法のように、外部空間との境界が階段状になることがなく、また、ボクセル法のカットセル法のような外部空間の境界付近の解析領域の形成に対して、経験や試行錯誤を要する非常に膨大な手作業を伴う特別な修正または処理を必要としない。そのため、本実施形態では、ボクセル法で問題となる外部空間との境界の処理に関わる問題がない。

[0254] なお、本実施形態においては、後述のようにキャビン空間とカットした領域との隙間に新たな任意形状の分割領域を充填することによって、直交格子形状のみによらない分割領域で解析領域が構成されるようにし、さらには解

析領域に分割領域を重なることなく充填させている。

[0255] また、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させる場合に、本実施形態の数値解析装置Ａに対して、作成させたキャビン空間を示す解析領域に含まれる分割領域の各々の内部に対して１つのコントロールポイントを仮想的に配置する処理を実行させ、コントロールポイントの配置情報、及び各分割領域が占める体積データを記憶させる。

[0256] また、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させる場合に、本実施形態の数値解析装置Ａに対して、上記分割領域同士の境界面である境界面の面積及び法線ベクトルの算出を実行させ、これらの境界面の面積及び法線ベクトルを記憶させる。

[0257] また、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させる場合に、各分割領域のコントロールポイントの結合情報（link）を作成させ、このlinkを記憶させる。

[0258] そして、プリ処理プログラムＰ１は、分割領域での計算用データモデルを生成する処理で説明したように、本実施形態の数値解析装置Ａに対して、上記各分割領域の体積と、境界面の面積及び法線ベクトルと、各分割領域のコントロールポイントの配置情報と、各分割領域のコントロールポイントの結合情報（link）とを纏めさせて計算用データモデルを作成させる。配置情報が示す配置は、例えば座標を用いて示されてもよい。

[0259] また、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させる場合に、本実施形態の数値解析装置Ａに対して、集合領域を生成する処理で説明したように、作成させたキャビン空間を示す解析領域に含まれる分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成させる。

[0260] また、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させる場合に、本実施形態の数値解析装置Ａに対して、生成させた集合領域の各々の内部に対して１つのコントロールポイントを仮想

的に配置する処理を実行させ、各集合領域のコントロールポイントの配置情報、及び各集合領域の体積データを記憶させる。

[0261] また、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させる場合に、本実施形態の数値解析装置Ａに対して、上記集合領域同士の境界面である境界面の面積及び法線ベクトルの算出を実行させ、これらの境界面の面積及び法線ベクトルを記憶させる。

[0262] また、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させる場合に、集合領域のコントロールポイントの結合情報（link）を作成させ、このlinkを記憶させる。

[0263] そして、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａに対して、集合領域での計算用データモデルを生成する処理で説明したように、上記各集合領域の体積と、上記集合領域同士の境界面である境界面の面積及び法線ベクトルと、各集合領域のコントロールポイントの配置情報と、各集合領域のコントロールポイントの結合情報（link）とを纏めさせて計算用データモデルを作成させる。配置情報が示す配置は、例えば座標を用いて示されてもよい。

[0264] また、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａに、前述のソルバ処理を実行するにあたり必要となる条件の設定を行わせる場合には、物性値の設定、境界条件の設定、初期条件の設定、計算条件の設定を行わせる。

[0265] ここで、物性値とは、キャビン空間における空気の密度、粘性係数、熱伝導率等である。

[0266] 境界条件とは、コントロールポイント間の物理量の交換の法則を規定するものであり、本実施形態においては前述した式（１１）で示される熱伝導方程式に基づく離散化支配方程式、及び式（１２）で示される熱の移流拡散方程式に基づく離散化支配方程式である。

[0267] また、境界条件には、キャビン空間と外部空間との境界面に臨む分割領域を示す情報が含まれる。

[0268] 初期条件とは、ソルバ処理を実行する際の最初の物理量を示すものであり、各分割領域の物理量の初期値である。

[0269] 計算条件とは、ソルバ処理における計算の条件であり、例えば反復回数や収束基準である。

[0270] また、プリ処理プログラムＰ１は、本実施形態の数値解析装置Ａに、ＧＵＩ（Graphical User Interface）を形成させる。より詳細には、プリ処理プログラムＰ１は、出力装置５が備えるディスプレイ５ａに対してグラフィックを表示させると共に、入力装置４が備えるキーボード４ａやマウス４ｂによって操作が可能な状態とさせる。

[0271] ソルバ処理プログラムＰ２は、本実施形態の数値解析装置Ａにソルバ処理を実行させるものであり、本実施形態の数値解析装置Ａを物理量計算装置として機能させる。

[0272] ここで、集合領域同士の物理量移動の特性を表すコンダクタンスと、集合領域の物理量の蓄積量の特性を表すキャパシタンスを計算させる際の、補正係数を１とするか１としない（ソルバ処理により補正係数を導出）か、その選択を、前述のＧＵＩおよびキーボードやマウス操作により数値解析装置Ａの作業者に入力させる。

[0273] そして、補正係数を１としない場合、初期計算として、ソルバ処理プログラムＰ２は、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させる場合に、計算用データモデルが有する分割領域のコントロールボリュームの体積と分割領域の境界面の面積及び法線ベクトルとを含むソルバ入力データファイルＦを用いて、解析領域における物理量を計算させる（初期計算）。この解析領域における物理量の初期計算結果と、分割領域での物性値と分割領域での計算用データモデルとに基づいて、補正係数を計算する。

[0274] そして、ソルバ処理プログラムＰ２は、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させる場合に、計算する処理で説明したように、前述の補正係数と、解析領域での物性値と、集合領域での計算データモデルとに基づいて、集合領域同士の物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、集

合領域の物理量の蓄積量の特性を表すキャパシタンスを計算させる。

[0275] 補正係数を１とする場合は、ソルバ処理プログラムＰ２は、初期計算を実行せず、本実施形態の数値解析装置Ａを演算部１ｏｐとして機能させる場合に、計算する処理で説明したように、補正係数を１とし、解析領域での物性値と、集合領域での計算データモデルとに基づいて、集合領域同士の物理量移動の特性を表すコンダクタンスと、集合領域の物理量の蓄積量の特性を表すキャパシタンスを計算させる。

[0276] 次に、ソルバ処理では、熱コンダクタンスと熱キャパシタンスの汎用ＭＢＤプログラムへの実装方法で説明したように、前述のコンダクタンスとキャパシタンスとを用いて、解析領域内の全ての集合領域のコントロールポイント間をネットワーク状に結合したキャビン熱回路網モデルを作成し、モデル記述言語あるいはプログラミング言語で記述されたキャビン熱回路網モデルデータ（計算結果データ）としてデータ記憶部２ｂに記憶させる。

[0277] ポスト処理プログラムＰ３は、本実施形態の数値解析装置Ａに対して、計算結果の可視化処理、抽出処理等を実行させる。

[0278] ここで、可視化処理とは、例えば、前述の初期計算を実行した場合、初期計算結果データを用いて、断面コンタ表示、ベクトル表示、等値面表示、アニメーション表示を出力装置５に出力させる処理である。また、抽出処理とは、前述の初期計算を実行した場合、初期計算結果データを用いて、作業者が指定する領域の定量値を抽出して数値やグラフとして出力装置５に出力させる、あるいは作業者が指定する領域の定量値を抽出してファイル化したものの出力を実行させる処理である。

[0279] また、ポスト処理プログラムＰ３は、本実施形態の数値解析装置Ａに対して、ソルバ処理により計算されたコンダクタンスとキャパシタンスおよびキャビン熱回路網モデルデータに関する自動レポート作成、計算結果の表示等を実行させる。

[0280] データ記憶部２ｂは、計算用データモデルＭ、境界条件を示す境界条件データＤ１、計算条件を示す計算条件データＤ２、物性値を示す物性値データ

Ｄ３、及び初期条件を示す初期条件データＤ４を有するソルバ入力データファイルＦと、３次元形状データＤ５と、計算結果データＤ６等を記憶する。また、データ記憶部２ｂは、ＣＰＵ１の処理過程において生成される中間データを一時的に記憶する。

[0281] ＤＶＤドライブ３は、ＤＶＤメディアＸを取り込み可能に構成されており、ＣＰＵ１から入力される指令に基づいて、ＤＶＤメディアＸに記憶されるデータを出力する。そして、本実施形態においては、ＤＶＤメディアＸに数値解析プログラムＰが記憶されており、ＤＶＤドライブ３は、ＣＰＵ１から入力される指令に基づいて、ＤＶＤメディアＸに記憶される数値解析プログラムＰを出力する。

[0282] 入力装置４は、本実施形態の数値解析装置Ａと作業者とのマンマシンインターフェイスであり、ポインティングデバイスであるキーボード４ａやマウス４ｂを備えている。

[0283] 出力装置５は、ＣＰＵ１から入力される信号を可視化して出力するものであり、ディスプレイ５ａ及びプリンタ５ｂを備えている。

[0284] 通信装置６は、本実施形態の数値解析装置ＡとＣＡＤ装置Ｃ等の外部装置との間においてデータの受け渡しを行うものであり、社内ＬＡＮ（Local Area Network）等のネットワークＮに対して電気的に接続されている。ここでは、通信装置６は、ＣＰＵ１が抽出したキャビン熱回路網モデルデータを取得し、取得したキャビン熱回路網モデルデータを、後述する数値解析装置Ｂへ送信する。また、ＵＳＢフラッシュドライブ(USB flash drive)などの補助記憶装置にキャビン熱回路網モデルデータを記憶させ、補助記憶装置から数値解析装置Ｂへ、記憶させたキャビン熱回路網モデルデータを出力させてもよい。

[0285] 次に、このように構成された本実施形態の数値解析装置Ａを用いた数値解析方法（本実施形態のシミュレーション方法）について、図１７と、図１８のフローチャートを参照して説明する。

[0286] 本実施形態の数値解析方法を行うより前に、ＣＰＵ１は、ＤＶＤドライブ

３に取り込まれたＤＶＤメディアＸに記憶された数値解析プログラムＰをＤＶＤメディアＸから取り出し、記憶装置２のプログラム記憶部２ａに記憶させる。

[0287] そして、ＣＰＵ１は、入力装置４から数値解析の開始を指示する信号が入力されると、記憶装置２に記憶された数値解析プログラムＰに基づいて数値解析を実行する。より詳細には、ＣＰＵ１は、プログラム記憶部２ａに記憶されたプリ処理プログラムＰ１に基づいてプリ処理を実行し、プログラム記憶部２ａに記憶されたソルバ処理プログラムＰ２に基づいてソルバ処理を実行し、プログラム記憶部２２ａに記憶されたポスト処理プログラムＰ３に基づいてポスト処理を実行する。なお、このようにＣＰＵ１がプリ処理プログラムＰ１に基づくプリ処理を実行することによって、本実施形態の数値解析装置Ａが演算部１ｏｐとして機能される。また、ＣＰＵ１がソルバ処理プログラムＰ２に基づくソルバ処理を実行することによって、本実施形態の数値解析装置Ａが演算部１ｏｐとして機能される。

[0288] 図１７は、本実施形態の数値解析装置Ａの動作の一例を示すフローチャートである。図１７は、数値解析装置Ａが、計算用データモデルを作成する処理を示す。

[0289] （ステップＳ１）

プリ処理が開始されると、ＣＰＵ１は、通信装置６に、ネットワークＮを介してＣＡＤ装置Ｃから自動車のキャビン空間を含む３次元形状データＤ５を取得させる。ＣＰＵ１は、取得した３次元形状データＤ５を記憶装置２のデータ記憶部２ｂに記憶させる。

[0290] 続いて、ＣＰＵ１は、取得した３次元形状データＤ５の分析を行い、データ記憶部２ｂに記憶された３次元形状データＤ５に含まれる、曲面の重なり、交差した曲面、曲面間の隙間、微小穴等を検出する。

[0291] 続いて、ＣＰＵ１は、取得した３次元形状データＤ５の修正あるいは変更処理を実行する。より詳細には、ＣＰＵ１は、３次元形状データＤ５に含まれるキャビン空間Ｋを微小な閉曲面によってラッピング等の処理を実行する

ことによって、曲面の重なり、交差した曲面、曲面間の隙間、微小穴等の存在が排除されたキャビン空間の３次元形状データＤ５とする。

[0292] なお、ＣＰＵ１は、当該修正あるいは変更処理において、ＧＵＩを形成し、ＧＵＩから指令（例えば修繕する領域を示す指令）が入力された場合には、当該指令を反映させた修正あるいは変更処理を実行する。

[0293] ＣＰＵ１は、修正あるいは変更された３次元形状データＤ５から、キャビン空間の全領域を含むと共に分割領域に分割された解析領域の作成を実行する。なお、ここでは、時間の短縮のために、解析領域が直交格子の分割領域で分割するようにしているが、解析領域を構成する分割領域は、必ずしも直交格子である必要はなく、任意の形状とすることができる。

[0294] 次に、ＣＰＵ１は、キャビン空間から食み出した分割領域を削除することで、解析領域をキャビン空間に食み出すことなく収容する。この結果、解析領域の境界面とキャビン空間の境界面との間に隙間が形成される。

[0295] 次に、ＣＰＵ１は、解析領域の一部となる新たな分割領域を隙間に充填する。

[0296] 本実施形態の数値解析方法では、前述したように、幾何学的形状を規定する量を持たない分割領域での計算用データモデルを作成するため、分割領域の幾何学的形状に制約を課すことなく計算用データモデルを作成できる。つまり、計算用データモデルを作成するにあたり、解析領域を構成する分割領域は、任意の形状を取ることができる。したがって、ＣＰＵ１は、新たな分割領域を隙間に充填するにあたり、分割領域の形状を任意に設定できる。このため、極めて容易に隙間を分割領域で充填でき、例えば、ＧＵＩにより作業者が作業しなくとも、自動で分割領域を形成することも充分に可能である。仮に、従来の有限体積法において隙間を分割領域で充填する場合には、前述のように、分割領域の幾何学的形状に対する制約の下、許容外の歪みや捩れが生じないように分割領域を配置する必要がある。この作業は、作業者の手作業となり、結果、作業者に膨大な負担を強いることとなると共に、解析作業時間の長期化を招くこととなる。

[0297] 次にＣＰＵ１は、キャビン空間を示す解析領域に含まれる各分割領域内に１つのコントロールポイントを仮想的に配置する。ここでは、ＣＰＵ１は、分割領域に対して１つのコントロールポイントを仮想的に配置する。そして、ＣＰＵ１は、コントロールポイントの配置情報、各コントロールポイントが占めるコントロールボリュームの体積（コントロールポイントが配置される分割領域の体積）を算出し、記憶装置２のデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させる。

[0298] また、ＣＰＵ１は、分割領域同士の境界面である境界面の面積及び法線ベクトルを算出し、これらの境界面の面積及び法線ベクトルを記憶装置２のデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させる。

[0299] また、ＣＰＵ１は、linkを作成し、このlinkを記憶装置２のデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させる。

[0300] そして、ＣＰＵ１は、データ記憶部２ｂに記憶された、コントロールポイントの配置情報と、各コントロールポイントが占めるコントロールボリュームの体積と、境界面の面積及び法線ベクトルと、linkとをデータベース化することによって計算用データモデルＭを作成し、作成した計算用データモデルＭを記憶装置２のデータ記憶部２ｂ内に記憶させる。

[0301] なお、キャビン空間を含む解析領域を分割領域にて分割し、さらにキャビン空間から食み出した分割領域を削除し、さらにその結果生じた解析領域とキャビン空間との隙間に新たな分割領域を充填することによって最終的な解析領域が作成される。このため、キャビン空間の全領域が重ならない分割領域によって充填された状態とされる。

[0302] したがって、計算用データモデルは、前述した保存則を満足するための３つの条件（ａ）～（ｃ）を満たすものとされている。

[0303] また、本実施形態では、先に分割領域を形成し、その後コントロールポイントを配置し、各コントロールポイントに対して、自らが配置された分割領域の体積を割り当てる構成を採用している。

[0304] しかしながら、本実施形態においては、先にコントロールポイントを解析

領域に配置し、各コントロールポイントに対して後から体積を割り当てることもできる。

[0305] 具体的には、例えば、異なるコントロールポイントにぶつかるまでの半径や、結合関係にある（linkで関連付けられた）コントロールポイントまでの距離に基づいて、各コントロールポイントに対して重み付けを行う。

[0306] また、当該計算用データモデルの作成において、ＣＰＵ１は、ＧＵＩを形成し、ＧＵＩから指令（例えば分割領域の密度を示す指令や分割領域の形状を示す指令）が入力された場合には、当該指令を反映させた処理を実行する。したがって、作業者は、ＧＵＩを操作することによって、コントロールポイントの配置や分割領域の形状を任意に調節することができる。

[0307] ただし、ＣＰＵ１は、数値解析プログラムに記憶された保存則を満足するための３つの条件に照らし合わせ、ＧＵＩから入力される指令が、当該条件から外れる場合には、その旨をディスプレイ５ａに表示させる。

[0308] （ステップＳ２）

次に、ＣＰＵ１は、分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成する。

[0309] 本実施形態の数値解析方法では、前述したように、幾何学的形状を規定する量を持たない集合領域での計算用データモデルを作成するため、集合領域の幾何学的形状に制約を課すことなく計算用データモデル作成することができる。つまり、計算用データモデルを作成するにあたり、集合領域は、任意の形状を取ることができる。

[0310] （ステップＳ３）

数値解析装置ＡのＣＰＵ１は、前述した集合領域を生成する処理にしたがって、要求されるセル分割の細かさや、計算精度に基づいて、ステップＳ２で生成したドメインを複数集合させることによって、新たにドメインを生成するか否かを判定する。ステップＳ３で、生成すると判定した場合、ステップＳ２へ移行する。

[0311] （ステップＳ４）

ステップＳ３で、生成しないと判定した場合、数値解析装置ＡのＣＰＵ１は、キャビン空間を示す解析領域に含まれる各集合領域内に１つのコントロールポイントを仮想的に配置する。ここでは、ＣＰＵ１は、集合領域に対して１つのコントロールポイントを仮想的に配置する。そして、ＣＰＵ１は、コントロールポイントの配置情報、各コントロールポイントが占めるコントロールボリュームの体積（コントロールポイントが配置される集合領域の体積）を算出し、記憶装置２のデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させる。

[0312] また、ＣＰＵ１は、集合領域同士の境界面である境界面の面積及び法線ベクトルを算出し、これらの境界面の面積及び法線ベクトルを記憶装置２のデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させる。

[0313] また、ＣＰＵ１は、linkを作成し、このlinkを記憶装置２のデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させる。

[0314] そして、ＣＰＵ１は、データ記憶部２ｂに記憶された、コントロールポイントの配置情報と、各コントロールポイントが占めるコントロールボリュームの体積と、境界面の面積及び法線ベクトルと、linkとをデータベース化することによって計算用データモデルＭを作成し、作成した計算用データモデルＭを記憶装置２のデータ記憶部２ｂ内に記憶させる。

[0315] 集合領域での計算用データモデルは、前述した保存則を満足するための３つの条件（ａ）～（ｃ）を満たすものとされている。

[0316] 図１８は、本実施形態の数値解析装置Ａの動作の一例を示すフローチャートである。図１８は、数値解析装置Ａが、キャビン熱回路網を作成する処理を示す。

[0317] （ステップＳ１１）

数値解析装置ＡのＣＰＵ１は、前述の計算用データモデルＭを、記憶装置２のデータ記憶部２ｂから呼び出し、図１８のフローチャートに従って計算処理を実行する。

[0318] （ステップＳ１２）

補正係数を１とするか否か、その判定を、ＧＵＩから入力された数値解析

装置Aの作業者による指令により判定する。

[0319] （ステップＳ１３）

補正係数を１としないと判定した場合について説明する。

[0320] ＣＰＵ１は、境界条件データの設定を行う。具体的には、ＣＰＵ１は、ＧＵＩを用いて、ディスプレイ５ａ上に境界条件の入力画面を表示し、キーボード４ａあるいはマウス４ｂから入力される境界条件を示す信号を境界条件データＤ１としてデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させることで境界条件データの設定を行う。なお、ここで言う境界条件とは、キャビン空間の物理現象を支配する離散化支配方程式や、キャビン空間と外部空間との境界面に臨むコントロールポイントの特定情報、及びキャビン空間と外部空間との間における熱の伝熱条件等を示す。境界条件データが予め用意されたデフォルトデータでよい場合は、境界条件の入力画面でのＧＵＩによる入力を行う必要は無く、デフォルトデータが自動的に境界条件データとして設定される。

[0321] なお、これらの離散化支配方程式は、例えば、数値解析プログラムＰに予め記憶された複数の離散化支配方程式をディスプレイ５ａ上に表示された複数の離散化支配方程式から作業者がキーボード４ａやマウス４ｂを用いることによって選択される。

[0322] ＣＰＵ１は、初期条件データの設定を行う。具体的には、ＣＰＵ１は、ＧＵＩを用いて、ディスプレイ５ａ上に初期条件の入力画面を表示し、キーボード４ａあるいはマウス４ｂから入力される初期条件を示す信号を初期条件データＤ４としてデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させることで初期条件データの設定を行う。初期条件データが予め用意されたデフォルトデータでよい場合は、初期条件の入力画面でのＧＵＩによる入力を行う必要は無く、デフォルトデータが自動的に初期条件データとして設定される。

[0323] ＣＰＵ１は、計算条件データの設定を行う。具体的には、ＣＰＵ１は、ＧＵＩを用いて、ディスプレイ５ａ上に計算条件の入力画面を表示し、キーボード４ａあるいはマウス４ｂから入力される計算条件を示す信号を計算条件データＤ２としてデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させることで計算条件デ

ータの設定を行う。なお、ここで言う計算条件とは、ソルバ処理における計算の条件であり、例えば、反復回数や収束基準を示す。計算条件データが予め用意されたデフォルトデータでよい場合は、計算条件の入力画面でのＧＵＩによる入力を行う必要は無く、デフォルトデータが自動的に計算条件データとして設定される。

[0324] ＣＰＵ１は、物性値データの設定を行う。具体的には、ＣＰＵ１は、ＧＵＩを用いて、ディスプレイ５ａ上に物性値の入力画面を表示し、キーボード４ａあるいはマウス４ｂから入力される物性値を示す信号を物性値データＤ３としてデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させることで物性値の設定を行う。なお、ここで言う物性値とは、キャビン空間における流体である空気の特性値であり、空気の密度、粘性係数、熱伝導率等である。物性値データが予め用意されたデフォルトデータでよい場合は、物性値の入力画面でのＧＵＩによる入力を行う必要は無く、デフォルトデータが自動的に物性値データとして設定される。

[0325] ＣＰＵ１は、ソルバ入力データファイルＦの作成を行う。

[0326] 具体的には、ＣＰＵ１は、計算用データモデルＭと、物性値データＤ３と、境界条件データＤ１と、初期条件データＤ４と、計算条件データＤ２とをソルバ入力データファイルＦに格納することによってソルバ入力データファイルＦを作成する。なお、このソルバ入力データファイルＦは、データ記憶部２ｂに記憶される。

[0327] 続いて、ＣＰＵ１は、ソルバ入力データの整合性を判定する。なお、ソルバ入力データとは、ソルバ入力データファイルＦに格納されたデータを示し、計算用データモデルＭ、境界条件データＤ１、計算条件データＤ２、物性値データＤ３及び初期条件データＤ４である。

[0328] 具体的には、ＣＰＵ１は、ソルバ処理において物理量計算を実行可能なソルバ入力データがソルバ入力データファイルＦに全て格納されているかを分析することによってソルバ入力データの整合性の判定を行う。

[0329] そして、ＣＰＵ１は、ソルバ入力データが不整合であると判定した場合に

は、ディスプレイ５ａにエラーを表示させ、さらには不整合である部分のデータを入力するための画面を表示させる。その後、ＣＰＵ１は、ＧＵＩから入力される信号に基づいてソルバ入力データの調整を行う。

[0330] 一方、ＣＰＵ１は、ソルバ入力データの整合性があると判定した場合には、初期計算処理を実行する。

[0331] 具体的には、ＣＰＵ１は、境界条件データＤ１と、物性値データＤ３と、計算用データモデルＭに記憶された部分領域の離散化支配方程式から離散化係数行列を作成し、さらにマトリクス計算用のデータテーブルの作成を行うことによって初期計算処理を行う。

[0332] （ステップＳ１４）

ＣＰＵ１は、分割領域での初期計算結果とドメイン間の境界面特性量などから、補正係数を導出する。

[0333] （ステップＳ１５）

ＣＰＵ１は、前述した計算する処理にしたがって、ＭＢＤでの熱回路網方程式の集合領域の熱コンダクタンスを、境界条件データＤ１と、物性値データＤ３と、計算用データモデルＭに記憶された集合領域の離散化支配方程式とから、前述の補正係数を利用して、算出する。

[0334] ＣＰＵ１は、前述した計算する処理にしたがって、ＭＢＤでの熱回路網方程式の集合領域の熱キャパシタンス（熱容量）を、境界条件データＤ１と、物性値データＤ３と、計算用データモデルＭに記憶された集合領域の離散化支配方程式とから、初期計算結果を利用せずに、算出する。

[0335] （ステップＳ１６）

補正係数を１とすると判定した場合について説明する。

[0336] ＣＰＵ１は、境界条件データの設定を行う。具体的には、ＣＰＵ１は、ＧＵＩを用いて、ディスプレイ５ａ上に境界条件の入力画面を表示し、キーボード４ａあるいはマウス４ｂから入力される境界条件を示す信号を境界条件データＤ１としてデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させることで境界条件データの設定を行う。なお、ここで言う境界条件とは、キャビン空間の物理現

象を支配する離散化支配方程式や、キャビン空間と外部空間との境界面に臨むコントロールポイントの特定情報、及びキャビン空間と外部空間との間における熱の伝熱条件等を示す。境界条件データが予め用意されたデフォルトデータでよい場合は、境界条件の入力画面でのＧＵＩによる入力を行う必要は無く、デフォルトデータが自動的に境界条件データとして設定される。

[0337] なお、これらの離散化支配方程式は、例えば、数値解析プログラムＰに予め記憶された複数の離散化支配方程式をディスプレイ５ａ上に表示された複数の離散化支配方程式から作業者がキーボード４ａやマウス４ｂを用いることによって選択される。

[0338] ＣＰＵ１は、物性値データの設定を行う。具体的には、ＣＰＵ１は、ＧＵＩを用いて、ディスプレイ５ａ上に物性値の入力画面を表示し、キーボード４ａあるいはマウス４ｂから入力される物性値を示す信号を物性値データＤ３としてデータ記憶部２ｂに一時的に記憶させることで物性値の設定を行う。なお、ここで言う物性値とは、キャビン空間における流体である空気の特性値であり、空気の密度、粘性係数、熱伝導率等である。物性値データが予め用意されたデフォルトデータでよい場合は、物性値の入力画面でのＧＵＩによる入力を行う必要は無く、デフォルトデータが自動的に物性値データとして設定される。

[0339] ＣＰＵ１は、ソルバ入力データファイルＦの作成を行う。具体的には、ＣＰＵ１は、計算用データモデルＭと、物性値データＤ３と、境界条件データＤ１とをソルバ入力データファイルＦに格納することによってソルバ入力データファイルＦを作成する。なお、このソルバ入力データファイルＦは、データ記憶部２ｂに記憶される。

[0340] 続いて、ＣＰＵ１は、ソルバ入力データの整合性を判定する。なお、ソルバ入力データとは、ソルバ入力データファイルＦに格納されたデータを示し、計算用データモデルＭ、境界条件データＤ１、物性値データＤ３である。

[0341] 具体的には、ＣＰＵ１は、ソルバ処理において、ＭＢＤ熱回路網方程式の熱キャパシタンス（熱容量）や熱コンダクタンスの計算を実行可能なソルバ

入力データがソルバ入力データファイルＦに全て格納されているかを分析することによってソルバ入力データの整合性の判定を行う。

[0342] そして、ＣＰＵ１は、ソルバ入力データが不整合であると判定した場合には、ディスプレイ５ａにエラーを表示させ、さらには不整合である部分のデータを入力するための画面を表示させる。その後、ＣＰＵ１は、ＧＵＩから入力される信号に基づいてソルバ入力データの調整を行う。

[0343] 一方、ＣＰＵ１は、ソルバ入力データの整合性があると判定した場合には、ＭＢＤ熱回路網方程式の集合領域の熱キャパシタンス（熱容量）や集合領域の熱コンダクタンスの計算処理を実行する。

[0344] 具体的には、ＣＰＵ１は、境界条件データＤ１と、物性値データＤ３と、計算用データモデルＭに記憶された集合領域の離散化支配方程式とから、ＭＢＤ熱回路網方程式の集合領域の熱キャパシタンス（熱容量）と、集合領域の熱コンダクタンスとを算出する。（ステップＳ１７）

続いて、ＣＰＵ１は、前述した熱コンダクタンスと熱キャパシタンスの汎用ＭＢＤプログラムへの実装方法で説明したように、ＭＢＤ熱回路網方程式の集合領域の熱キャパシタンス（熱容量）と集合領域の熱コンダクタンスとを用いて、解析領域内の全ての集合領域のコントロールポイント間をネットワーク状に結合したキャビン熱回路網モデルを作成し、モデル記述言語あるいはプログラミング言語で記述されたキャビン熱回路網モデルデータ（計算結果データ）としてデータ記憶部２ｂに記憶させる。

[0345] 図１９に示すように、本実施形態の数値解析装置Ｂは、パーソナルコンピュータやワークステーション等のコンピュータによって構成されるものであり、ＣＰＵ１ａ、記憶装置２ａ、ＤＶＤドライブ３、入力装置４、出力装置５、及び通信装置６を備えている。

[0346] ＣＰＵ１ａは、記憶装置２ａ、ＤＶＤドライブ３、入力装置４、出力装置５、及び通信装置６と電気的に接続されており、これらの各種装置から入力される信号を処理すると共に、処理結果を出力する。

[0347] 記憶装置２ａは、メモリ等の内部記憶装置及びハードディスクドライブ等

の外部記憶装置によって構成されており、ＣＰＵ１ａから入力される情報を記憶すると共にＣＰＵ１ａから入力される指令に基づいて記憶した情報を出力する。

[0348] そして、本実施形態において記憶装置２ａは、プログラム記憶部２cとデータ記憶部２dとを備えている。

[0349] プログラム記憶部２cは、ＭＢＤプログラムＳを記憶している。このＭＢＤプログラムＳは、所定のＯＳにおいて実行されるアプリケーションプログラムであり、コンピュータから構成される本実施形態の数値解析装置Ｂを、数値解析を行うように機能させる。そして、ＭＢＤプログラムＳは、本実施形態の数値解析装置Ｂを、例えば演算部１ａｏｐとして機能させる。

[0350] ＭＢＤプログラムＳは、本実施形態の数値解析装置Ｂを演算部１ａｏｐとして機能させる場合に、数値解析装置Ａが送信したキャビン熱回路網モデルデータを使用して、ＭＢＤプログラムＳは、解析領域を含む解析対象での物理量の非定常数値計算を行う。また、ＭＢＤプログラムＳは、本実施形態の数値解析装置Ｂを演算部１ａｏｐとして機能させる場合に、補助記憶装置が出力したキャビン熱回路網モデルを使用して、解析領域を含む解析対象で物理量の非定常数値計算を行ってもよい。

[0351] ＭＢＤプログラムＳは、本実施形態の数値解析装置Ｂに対して、非定常数値計算の計算結果の可視化処理、抽出処理を実行させる。

[0352] ここで、可視化処理とは、例えば、計算された物理量のグラフ表示、一覧表表示、アニメーション表示を出力装置５に出力させる処理である。また、抽出処理とは、作業者が指定する物理量の定量値を抽出して数値やグラフや一覧表として出力装置５に出力させる、あるいは作業者が指定する物理量の定量値を抽出してファイル化したものの出力を実行させる処理である。

[0353] また、ＭＢＤプログラムＳは、本実施形態の数値解析装置Ｂに対して、自動レポート作成、計算残差の表示及び分析を実行させる。

[0354] データ記憶部２ｄは、ＭＢＤモデルライブラリファイルＬと、計算結果データＤ７等を記憶する。また、データ記憶部２ｂは、ＣＰＵ１ａの処理過程

において生成される中間データを一時的に記憶する。

[0355] さらに、データ記憶部２ｄは、ＭＢＤモデルライブラリファイルＬとして、通信装置６により数値解析装置Ａから送信されたキャビン熱回路網モデルＬ１を記憶する。あるいは、補助記憶装置にキャビン熱回路網モデルデータを記憶させ、補助記憶装置から数値解析装置Ｂへ、記憶させたキャビン熱回路網モデルデータを出力させて、データ記憶部２ｄに記憶させてもよい。

[0356] また、本実施形態の数値解析装置Ｂは、データ記憶部２ｄに、ＭＢＤモデルライブラリファイルＬとして、ＭＢＤプログラムＳにデフォルトで付帯されているボディ蓄熱・伝熱モデルＬ２、車外環境（日射・外気）モデルＬ３、空調モデルＬ４、エンジンモデルＬ５、制御系モデルＬ６、その他熱系モデルＬ７等を記憶する。なお、ＭＢＤモデルライブラリファイルＬは、作業者が解析目的に合わせてＭＢＤモデル内部のパラメータ等を変更しカスタマイズすることも可能である。また、別の作業者が作成したＭＢＤモデルライブラリファイルを記憶させることも可能である。

[0357] ＤＶＤドライブ３は、ＤＶＤメディアＸを取り込み可能に構成されており、ＣＰＵ１aから入力される指令に基づいて、ＤＶＤメディアＸに記憶されるデータを出力する。そして、本実施形態においては、ＤＶＤメディアＸにＭＢＤプログラムＳが記憶されており、ＤＶＤドライブ３は、ＣＰＵ１aから入力される指令に基づいて、ＤＶＤメディアＸに記憶されるＭＢＤプログラムＳを出力する。

[0358] 通信装置６は、本実施形態の数値解析装置ＢとＣＡＤ装置Ｃと数値解析装置Ａ等の外部装置との間においてデータの受け渡しを行うものであり、社内ＬＡＮ等のネットワークＮに対して電気的に接続されている。ここでは、通信装置６は、数値解析装置Ａが送信するキャビン熱回路網モデルデータを受信し、受信したキャビン熱回路網モデルデータを、ＣＰＵ１ａへ出力する。

[0359] 図２０は、本実施形態の数値解析装置Ｂの動作の一例を示す図である。図２０に示される例では、数値解析装置Ｂは、解析領域を自動車のキャビンとし、通信装置６により数値解析装置Ａから受信したキャビン熱回路網モデル

Ｌ１と、空調モデルＬ４と、エンジンモデルＬ５と、自動車車体蓄熱・伝熱モデルＬ２と、日射・外気等車外環境モデルＬ３と、その他熱系モデルＬ７とのうち、一つ以上のモデルを連成計算させることによって、自動車のキャビン内の空気の熱流体などの物理量の非定常数値計算を行う。ただし、空調モデルＬ４、エンジンモデルＬ５、その他熱系モデルＬ７は、制御系モデルＬ６によって制御される。

[0360] ここでは、一例として、数値解析装置Ｂが、キャビン内の空気の熱流体シミュレーションを行う場合について説明する。

[0361] 図２１は、本実施形態の熱流体シミュレーションの一例を示す図である。熱流体シミュレーションでは、解析領域の一例は自動車のキャビンであり、境界条件の一例は夏季で、冷房空調条件である。具体的には、車外参照温度は３５度、車外熱伝達率は４０Ｗ／ｍ^{2}Ｋ、乗車人員数は４名、空調吹出風速は５ｍ／ｓ、空調吹出温度は８℃である。また、境界条件に、エンジンルームの温度と、トランクルームの温度と、床下フロアーの温度と、ダッシュボードの内側の温度と、天井の温度との少なくとも一つが含まれる場合もある。

[0362] 数値解析装置Ａは、解析領域（自動車のキャビン）を、前述したように、頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としないセルに分割する。本実施形態では、数値解析装置Ａは、解析領域（自動車のキャビン）を、約４５０万個のセルに分割する場合について説明する。

[0363] 解析領域（自動車のキャビン）を、約４５０万個のセルに分割した結果を、図２２に示す。数値解析装置Ａは、解析領域（自動車のキャビン）に対して約４５０万個のセルを自動生成し、このセルを用いて、３Ｄ熱流体シミュレーションを行う。これは、前述したステップＳ１３で説明した補正係数を１としない場合に実行する初期計算に該当する。この３Ｄ熱流体シミュレーションの結果は、熱コンダクタンスを求める際の補正係数の計算に使用される。

[0364] 本実施形態では、数値解析装置Ａは、解析領域（自動車のキャビン）に対

して約４５０万個のセルを自動生成する。数値解析装置Ａは、前述したセルから集合領域を生成する処理によって、セルから、８個の集合領域（ドメイン）を生成する。８個の集合領域の各々を生成した結果を、図２３～図３０に示す。図２３～図３０の各々において、ＤＣＰは集合領域（ドメイン）のコントロールポイントであり、ＣＣＰはセルのコントロールポイントの一つである。図２３～図３０は、順番にドメイン１からドメイン８までを示す。また、図２３～図３０には、図示されていないが、数値解析装置Ａは、各集合領域について、外表面を取得する。数値解析装置Ａは、取得した外表面と、その外表面に接している部材との間の境界条件を取得する。境界条件は、外表面が接する部材の材料によって異なる場合がある。

[0365] 表１と表２と図３１と図３２は、本実施形態の数値計算の結果の一例を示す。表１と表２には、数値解析装置Ａで数値計算された８個の集合領域（ドメイン）の熱キャパシタンスと、８個の集合領域（ドメイン）の間で計算された熱コンダクタンスを示す。表１に示される例では補正係数を１としない場合を示し、表２に示される例では補正係数を１とする場合を示す。補正係数を１としない場合には、前述した約４５０万個のセルを用いて行った３Ｄ熱流体シミュレーションの結果を前述のステップＳ１３で説明した補正係数を１としない場合に実行する初期計算として使用した。

[0366]

[表1]

		Heat Conductance(W/K)							
	Heat Capacitance(J/K)	domain1	domain2	domain3	domain4	domain5	domain6	domain7	domain8
domain1	232.522339		303.144043	75.510178	8.994596	46.902405	31.335381	0	0
domain2	339.31131	303.144043		30.199022	316.425995	27.338243	539.833801	0	0
domain3	247.317749	75.510178	30.199022		88.792122	0	0	106.180595	9.024489
domain4	351.003174	8.994596	316.425995	88.792122		0	0	12.061638	104.680679
domain5	231.165604	46.902405	27.338243	0	0		283.592194	77.572823	6.163713
domain6	344.072357	31.335381	539.833801	0	0	283.592194		34.402424	328.088531
domain7	247.348282	0	0	106.180595	12.061638	77.572823	34.402424		122.069153
domain8	351.017853	0	0	9.024489	104.680679	6.163713	328.088531	122.069153	

表1（補正係数を1としない場合）

[0367] [表2]

		Heat Conductance(W/K)							
	Heat Capacitance(J/K)	domain1	domain2	domain3	domain4	domain5	domain6	domain7	domain8
domain1	232.522339		226.88826	62.768387	7.363295	46.938976	22.56254	0	0
domain2	339.31131	226.88826		21.685827	227.722839	20.102888	379.715302	0	0
domain3	247.317749	62.768387	21.685827		63.602962	0	0	69.133202	8.912815
domain4	351.003174	7.363295	227.722839	63.602962		0	0	7.999777	99.992706
domain5	231.165604	46.938976	20.102888	0	0		199.765991	53.303791	7.329874
domain6	344.072357	22.56254	379.715302	0	0	199.765991		23.19902	251.985153
domain7	247.348282	0	0	69.133202	7.999777	53.303791	23.19902		105.522942
domain8	351.017853	0	0	8.912815	99.992706	7.329874	251.985153	105.522942	

表2(補正係数を1とする場合)

表１と表２に示される熱コンダクタンスと熱キャパシタンスとの値は、前述した熱コンダクタンスと熱キャパシタンスの汎用ＭＢＤプログラムへの実装方法で説明したように、解析領域内の全ての集合領域のコントロールポイント間をネットワーク状に結合したキャビン熱回路網モデルを数値解析装置Aで作成し、モデル記述言語あるいはプログラミング言語で記述されたキャビン熱回路網モデルデータとして、数値解析装置Ａから数値解析装置Ｂへ送信される。数値解析装置Ｂは、ＭＢＤプログラムを実行することによって、数値解析装置Ａが送信したキャビン熱回路網モデルデータを受信し、データ記憶部２ｄに記憶されているＭＢＤモデルライブラリファイルＬの中の空調モデルと、エンジンモデル、自動車車体蓄熱・伝熱モデル、日射・外気等車外環境モデル、及びその他熱系モデルのうち一つ以上のモデルとを結合させ連成計算させることにより、ＭＢＤプログラムに実装し、自動車キャビン内熱流体解析を実行することができる。

[0368] 例えば、ＭＢＤプログラムに、自動車用空調機器のＭＢＤモデルが構築されていたと仮定した場合、前述した熱回路網方程式を熱回路網モデルとしてＭＢＤプログラムに実装することにより、自動車用空調機器のＭＢＤモデルと、自動車のキャビン内の空気の温度分布を表す熱回路網モデルとを連成させた非定常シミュレーションを実行することができる。

[0369] 例えば、夏季日中時に屋根のない駐車場に駐車された自動車のキャビン内空気は３０℃以上に高温化するが、エンジンスタートしてから何秒後かにキャビン内空気温度が、目的とする冷房空調の制御温度まで下がる。その際、ドライバー、アシスタント、後部座席での空気温度は何度まで下がるのか、その３次元的な空気温度分布も含めて非定常シミュレーション解析を行うことができる。なお、本実施形態では、８個の集合領域（ドメイン）のコントロールポイントで、自動車のキャビン内の空気の温度分布を表した。より詳細に空気温度分布を解析する場合は、集合領域（ドメイン）の数を増やすことが必要である。

[0370] 前述した解析領域（自動車のキャビン）に対して約４５０万個のセルを自

動生成し、このセルを用いて行った３Ｄ熱流体シミュレーション（図２２）は、定常状態の計算結果を得るまでに、インテル社製ＣＰＵ　Ｘｅｏｎ（２．６ＧＨｚ）を搭載したＰＣを用いて、約３０時間の計算時間を要した。これに対し、８つのドメインでの３Ｄ熱流体シミュレーションは、同じＰＣで、１秒以下で計算結果を得ることができた。

[0371] ＭＢＤプログラムに実装される自動車用空調機器などのＭＢＤモデルの非定常シミュレーション計算は、１ステップ当たり数秒で計算されるが、３Ｄ熱流体シミュレーションと連成させると、３Ｄ熱流体シミュレーションの計算時間が律速となり非常に膨大な計算時間を要する非定常シミュレーションとなる。これに対して、本実施形態では、８個の集合領域（ドメイン）のコントロールポイントで自動車のキャビン内の空気の温度分布を表す熱回路網モデルと連成させた場合、非定常シミュレーションの１ステップの計算時間は数秒から大きく増加せず、実用的な計算時間で非定常シミュレーションを実行することができる。空気温度の分布をより詳細に解析する場合は集合領域（ドメイン）の数を増やすことになるが、仮に、数１００個程度まで増やした場合でも、非定常シミュレーションの１ステップの計算時間は数秒から大きく増加せず、実用的な計算時間で非定常シミュレーションを実行することができる。

[0372] したがって、本実施形態の数値解析装置Ａ、数値解析方法及び数値解析プログラムの利用者が、自動車用空調機器のＭＢＤモデルと、自動車のキャビン内の空気の温度分布を表す熱回路網モデルとを連成させた非定常シミュレーションの結果に応じて、解析領域である自動車のキャビンの形状を変更して再度、当該解析領域の前記形状を変更した３次元形状データから前記非定常シミュレーションまでを繰り返す場合にも、実用的な計算時間で非定常シミュレーションを実行することができる。

[0373] 即ち、利用者は、非定常シミュレーションにより得られた計算結果データを評価することにより、解析対象である３次元形状データにより所望の結果が得られたと判断する場合には、シミュレーションを終了してよい。また利

用者は、非定常シミュレーションにより得られた計算結果データを評価することにより、解析対象である３次元形状データにより所望の結果が得られていないと判断する場合には、３次元形状データを修正してから再度シミュレーションを実行してよい。

上記の動作において、シミュレーションが所望の結果を示す場合、その解析対象であった３次元形状データが表現する物理的実体(閉鎖された空間を構成する自動車キャビン、コックピット、住宅、若しくは電気機器や産業機器の内部等、又はガラスや鉄鋼等の製造装置等)の設計が満足できるものと判断し、当該物理的実体を製造・生産してよい。またシミュレーションが所望の結果を示さない場合、その解析対象で、あった３次元形状データが表現する物理的実体の設計が満足できないものと判断し、当該物理的実体の設計を変更し、この設計変更後の３次元形状データに基づいて再度シミュレーションを実行することになる。

[0374] 図３１と図３２は、数値解析装置Ａで数値計算された表１と表２に示す熱キャパシタンスと熱コンダクタンスの数値を用いて作成されたキャビン熱回路網モデルを、数値解析装置Ｂに送信し、数値解析装置Ｂの空調モデルと結合し連成計算させてＭＢＤプログラムで数値計算したキャビン内の空気の熱流体シミュレーション結果である。車外参照温度は３５℃、車外熱伝達率は４０Ｗ／ｍ^{2}Ｋ、乗車人員数は４名、空調吹出風速は５ｍ／ｓ、空調吹出温度は８℃一定の条件の下で、キャビン内空気温度３５℃を初期温度として非定常熱流体シミュレーションを実行し、キャビン内空気温度が冷房空調により下がり、空気温度が一定で時間変化のない定常状態に達した状態の、８個の集合領域（ドメイン）の空気温度の数値を表示している。図３１が補正係数を１としない場合、図３２が補正係数を１とする場合の結果である。

[0375] 図３１の結果と図３２の結果とを比較することによって、計算精度を比較する。

[0376] 図３１と図３２において、空気温度の数値の下の括弧内には、同一境界条件の下で行った約４５０万個のセルを用いて数値計算された３Ｄ熱流体シミ

ュレーションの定常解析の結果を記載した。集合領域（ドメイン）での空気温度の計算結果は、補正係数を１としない場合のシミュレーション結果（図３１）の方が、同一境界条件の下で行った約４５０万個のセルを用いて数値計算された３Ｄ熱流体シミュレーションの定常解析結果に、よく一致していることが分かる。これにより補正係数を使用すると計算精度が向上することが分かる。しかし、補正係数を使用する場合は、セルでの１回の３Ｄ熱流体シミュレーション結果が必要であり、その分、全体の解析時間は増加する。本実施形態では、８個の集合領域（ドメイン）の実施例を示したが、集合領域（ドメイン）の数を、仮に数１００個に増やした場合は、補正係数を１としても比較的よい精度で空気温度分布を解析することができる。解析する目的や必要とされる精度に応じて、補正係数の使用、集合領域（ドメイン）の数を選択することによって、空気温度の分布の精度を向上できる。

[0377] 以上のような本実施形態の数値解析装置Ａ、数値解析装置Ｂ、数値解析方法及び数値解析プログラムによれば、プリ処理にてコントロールボリュームの体積と境界面の面積及び法線ベクトルとを有する計算用データモデルＭが作成され、ソルバ処理にて計算用データモデルＭに含まれるコントロールボリュームの体積と、境界面の面積と、法線ベクトルと、ドメイン間のリンクと、ドメインのコントロールポイント間の距離とを用いて、集合領域同士の物理量の移動の特性を表すキャパシタンスと集合領域の物理量の蓄積の特性を表すコンダクタンスが計算される。

[0378] また、本実施形態の数値解析装置Ａ、数値解析装置Ｂ、数値解析方法及び数値解析プログラムによれば、解析を分割領域ではなく、集合領域で行うため、計算時間が短縮できる。特に、補正係数を１とした場合には、分割領域の程度によって解析精度が低下する場合もあるが、補正係数がゼロでない場合に対して、更に、計算時間が短くなる。 本実施形態の数値解析装置Ａ、数値解析方法及び数値解析プログラムは、自動車ボディの形状、エアコンなどのHeating Ventilation and Air Conditioning (HVAC) での消費エネルギ、ガラス、人の存在、外部日射エネルギ、湿度、車速等をシミュレーション

モデルに反映させて、集合領域同士のエネルギ移動の特性と集合領域のエネルギ蓄積量を表す物理量の算出が可能である。ここで、物理量には、熱キャパシタンス（熱容量）、熱コンダクタンスが含まれる。

[0379] また、本実施形態の数値解析装置Ａ、数値解析方法及び数値解析プログラムは、上記以外の自動車への適用として、エンジンの熱解析、排気ガスの熱解析、エンジンルームの温熱解析、自動車の燃費の解析などが挙げられる。

[0380] また、本実施形態の数値解析装置Ａ、数値解析方法及び数値解析プログラムは、自動車以外の分野への適用として、航空機、船舶、宇宙船、宇宙ステーションのキャビン、コックピット等の内部空間の温熱解析と音解析、住宅、ビル、アトリウム等の内部空間の温熱解析と音解析、電気機器、産業機器の内部の温熱解析と音解析、ガラス、鉄鋼、その他の製造設備の装置自体及び周辺の温熱解析と音解析が挙げられる。

[0381] 以上、添付図面を参照しながら本発明の好適な実施形態について説明したが、本発明は、上記実施形態に限定されないことは言うまでもない。前述した実施形態において示した各構成部材の諸形状や組み合わせ等は一例であって、本発明の主旨から逸脱しない範囲において設計要求等に基づき種々変更可能である。

[0382] 上記実施形態においては、熱伝導方程式及び熱の移流拡散方程式から導出した離散化支配方程式を用いて空気の温度を数値解析によって求める構成について説明した。

[0383] しかしながら、本発明はこれに限定されるものではなく、質量保存の方程式、運動量保存の方程式、角運動量保存の方程式、エネルギ保存の方程式、移流拡散方程式及び波動方程式の少なくともいずれかから導出した離散化支配方程式を用いて物理量を数値解析によって求めることが可能である。

[0384] また、上記実施形態においては、本発明の境界面特性量として、境界面の面積と境界面の法線ベクトルとを用いる構成について説明した。

[0385] しかしながら、本発明はこれに限定されるものではなく、境界面特性量として他の量（例えば境界面の周長）を用いることもできる。

[0386] また、上記実施形態においては、保存則を満足するために前述の３つの条件を満たすように計算用データモデルを作成する構成について説明した。

[0387] しかしながら、本発明はこれに限定されるものではなく、保存則を満足させる必要がない場合には、計算用データモデルを必ずしも前述の３つの条件を満たすように作成する必要はない。

[0388] また、上記実施形態においては、分割領域の体積を、当該分割領域の内部に配置されるコントロールポイントが占めるコントロールボリュームの体積として捉えた構成について説明した。

[0389] しかしながら、本発明はこれに限定されるものではなく、分割領域の内部に対してコントロールポイントを配置する必要は必ずしもない。分割領域を形成する境界形状に凹面が存在する場合は、コントロールポイントが分割領域の外部となる場合がある。このような場合でも、コントロールボリュームの体積を分割領域の体積に置き換えることによって、数値解析を行うことができる。

[0390] また、上記実施形態においては、数値解析プログラムＰがＤＶＤメディアＸに記憶されて搬送可能な構成について説明した。

[0391] しかしながら、本発明はこれに限定されるものではなく、数値解析プログラムＰを他のリムーバブルメディアに記憶させて搬送可能とする構成を採用することもできる。

[0392] また、プリ処理プログラムＰ１とソルバ処理プログラムＰ２とを別々のリムーバブルメディアに記憶させて搬送可能とすることもできる。また、数値解析プログラムＰは、ネットワークを介して伝達することも可能である。

[0393] 上記実施形態において、数値解析装置Ａと、数値解析装置Ｂとはコンピュータの一例であり、数値解析装置Ａは数値解析装置の一例であり、数値解析装置Ｂは他の数値解析装置の一例である。

[0394] 上述した実施の形態に関し、さらに以下の付記を開示する。

（付記１）

コンピュータによって物理現象での物理量を数値的に解析するシミュレー

ション方法であって、

コンピュータが、外部装置から解析領域の３次元形状データを取得して前記解析領域を複数の分割領域に分割し、

前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された分割領域での支配方程式に基づき、各前記分割領域の体積と隣り合う前記分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記分割領域での計算用データモデルを生成し、

前記分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成し、

前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された集合領域での支配方程式に基づき、各前記集合領域の体積と隣り合う前記集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記集合領域での計算用データモデルを生成し、

前記解析領域での物性値と、前記集合領域での計算データモデルとに基づいて、前記集合領域同士及び前記解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、前記集合領域ごとの物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算し、前記コンダクタンスおよび前記キャパシタンスを前記コンピュータの記憶部に格納することにより、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を可能とし、

当該シミュレーション方法の利用者が、前記非定常計算の結果に応じて前記解析領域の前記形状を変更して再度、前記解析領域の前記形状を変更後の３次元形状データから前記非定常計算までを繰り返すシミュレーション方法。

（付記２）

コンピュータによって物理現象での物理量を数値的に解析するシミュレーション方法であって、

コンピュータが、外部装置から解析領域の３次元形状データを取得して前記解析領域を複数の分割領域に分割し、

前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された分割領域での支配方程式に基づき、各前記分割領域の体積と隣り合う前記分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記分割領域での計算用データモデルを生成し、

前記分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成し、

前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された集合領域での支配方程式に基づき、各前記集合領域の体積と隣り合う前記集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記集合領域での計算用データモデルを生成し、

前記解析領域での物性値と、前記集合領域での計算データモデルとに基づいて、前記集合領域同士及び前記解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、前記集合領域ごとの物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算し、前記コンダクタンスおよび前記キャパシタンスを前記コンピュータの記憶部に格納することにより、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を可能とする、シミュレーション方法。

（付記３）

全分割領域の体積の総和が解析領域の体積と一致するという条件と、

前記分割領域同士の境界面の面積が一致するという条件及び法線ベクトルが当該境界面を挟む一方の分割領域から見た場合と他方の分割領域から見た

場合とで絶対値が一致するという条件と、

前記分割領域を通る無限に広い投影面Ｐの任意の向きの単位法線ベクトルが［ｎ］$_{p}$、境界面の面積がS_i、境界面の単位法線ベクトルが［ｎ］$_{i}$、分割領域の面の総数がｍ、前記［］で囲まれた文字がベクトルを示す太字であるときに下式（１）が成り立つという条件と、

[0395] [数1]

$$\sum_{i=1}^{m}\left[\left(\boldsymbol{n}_i \cdot \boldsymbol{n}_p\right)\cdot S_i\right]=0 \qquad (1)$$

が満足されるように前記分割領域を形成する、付記１又は２に記載の方法。

（付記４）

前記集合領域特性量は、隣り合う前記集合領域同士の境界面の特性を示す境界面特性量と、隣り合う前記集合領域同士の結合情報と、隣り合う前記集合領域同士の距離とからなり、

前記分割領域特性量は、隣り合う前記分割領域同士の境界面の特性を示す境界面特性量と、隣り合う前記分割領域同士の結合情報と、隣り合う前記分割領域同士の距離とからなる、

付記１乃至３のいずれか一項に記載の方法。

（付記５）

前記隣り合う前記集合領域同士の境界面の特性を示す前記境界面特性量は、前記隣り合う前記集合領域同士の境界面の面積と前記境界面の法線ベクトルとであり、

前記隣り合う前記分割領域同士の境界面の特性を示す境界面特性量は、前記隣り合う前記分割領域同士の境界面の面積と前記境界面との法線ベクトル

である、

付記４に記載の方法。

（付記６）

前記物性値と、前記分割領域での計算データモデルによる物理現象の解析結果である物理量とに基づき前記集合領域での計算用の補正係数を導出し、

前記物性値と、前記集合領域での計算データモデルを前記集合領域での支配方程式を前記補正係数で補正した補正支配方程式に基づく、前記集合領域での補正計算データモデルとによる物理現象の解析結果である物理量とに基づいて、前記コンダクタンスと前記キャパシタンスを計算する、

付記１乃至５のいずれか一項に記載の方法。

（付記７）

前記分割領域での支配方程式及び前記集合領域での支配方程式は、質量保存の方程式、運動量保存の方程式、エネルギ保存の方程式、移流拡散方程式、及び波動方程式から予め導出されて記憶されている、付記１乃至６のいずれか一項に記載の方法。

（付記８）

付記１乃至７のいずれか一項に記載の方法によって得られた前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを使用し、更に、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算をする、ことを特徴とするＭＢＤプログラムによるシミュレーション方法。

（付記９）

物理現象での物理量を数値的に解析する数値解析装置であって、

外部装置との間においてデータの受け渡しを行う通信装置と、

前記通信装置を介して前記外部装置から解析領域の３次元形状データを取得し、前記解析領域を複数の分割領域に分割し、前記分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成する演算部と、

前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出

された離散化された分割領域での支配方程式と、前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された集合領域での支配方程式とを記憶する記憶部とを備え、

前記演算部は、前記記憶部に記憶された前記分割領域での支配方程式に基づき、各前記分割領域の体積と隣り合う前記分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記分割領域での計算用データモデルを生成し、前記記憶部に記憶された前記集合領域での支配方程式に基づき、各前記集合領域の体積と隣り合う前記集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記集合領域での計算用データモデルを生成し、前記解析領域での物性値と、前記集合領域での計算データモデルとに基づいて、前記集合領域同士及び前記解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、前記集合領域の物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算し、前記コンダクタンスおよび前記キャパシタンスを前記記憶部に格納することにより、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を可能とする、数値解析装置。

（付記１０）

付記９の数値解析装置と、

前記数値解析装置で計算され前記記憶部に格納された前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させるＭＢＤプログラムを搭載する他の数値解析装置とを含む、ＭＢＤ用数値解析システム。

（付記１１）

付記９の数値解析装置で計算され前記記憶部に格納された前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させるＭＢＤ

プログラムを搭載する、ＭＢＤ用数値解析システム。

（付記１２）

コンピュータに、外部装置から

物理現象での物理量を解析する解析領域の３次元形状データを取得させて前記解析領域を複数の分割領域に分割させ、

前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された分割領域での支配方程式に基づき、各前記分割領域の体積と隣り合う前記分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記分割領域での計算用データモデルを生成させ、

前記分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成させ、

前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された集合領域での支配方程式に基づき、各前記集合領域の体積と隣り合う前記集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記集合領域での計算用データモデルを生成させ、

前記解析領域での物性値と、前記集合領域での計算データモデルとに基づいて、前記集合領域同士及び前記解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、前記集合領域の物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算させ、前記コンダクタンスおよび前記キャパシタンスを記憶部に格納することにより、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を可能とする、数値解析プログラム。

（付記１３）

付記１２の数値解析プログラムと、

前記数値解析プログラムで計算され前記記憶部に格納された前記コンダク

タンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させるＭＢＤプログラムとを含む、ＭＢＤプログラム。

（付記１４）

付記１２の数値解析プログラムで計算され前記記憶部に格納された前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させる、ＭＢＤプログラム。

符号の説明

[0396] Ａ…数値解析装置（物理量計算装置）、Ｂ…数値解析装置（物理量計算装置）、Ｐ…数値解析プログラム、Ｐ１…プリ処理プログラム、Ｐ２…ソルバ処理プログラム（物理量計算プログラム）、Ｐ３…ポスト処理プログラム、Ｍ…計算用データモデル、１、１ａ…ＣＰＵ、２、２ａ…記憶装置、２ａ、２ｃ…プログラム記憶部、２ｂ、２ｄ…データ記憶部、３…ＤＶＤドライブ、４…入力装置、４ａ…キーボード、４ｂ…マウス、５…出力装置、５ａ…ディスプレイ、５ｂ…プリンタ、Ｓ…ＭＢＤプログラム

請求の範囲

[請求項1] コンピュータによって物理現象での物理量を数値的に解析するシミュレーション方法であって、

コンピュータが、解析領域を複数の分割領域に分割し、

前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された分割領域での支配方程式に基づき、各前記分割領域の体積と隣り合う前記分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記分割領域での計算用データモデルを生成し、

前記分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成し、

前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された集合領域での支配方程式に基づき、各前記集合領域の体積と隣り合う前記集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記集合領域での計算用データモデルを生成し、

前記解析領域での物性値と、前記集合領域での計算データモデルとに基づいて、前記集合領域同士及び前記解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、前記集合領域ごとの物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算する、ことを特徴とするシミュレーション方法。

[請求項2] 全分割領域の体積の総和が解析領域の体積と一致するという条件と、

前記分割領域同士の境界面の面積が一致するという条件及び法線ベ

クトルが当該境界面を挟む一方の分割領域から見た場合と他方の分割領域から見た場合とで絶対値が一致するという条件と、

前記分割領域を通る無限に広い投影面Ｐの任意の向きの単位法線ベクトルが［ｎ］$_{p}$、境界面の面積がS_i、境界面の単位法線ベクトルが［ｎ］$_{i}$、分割領域の面の総数がｍ、前記［］で囲まれた文字がベクトルを示す太字であるときに下式（１）が成り立つという条件と、

[数1]

$$\sum_{i=1}^{m}\left[\left(\boldsymbol{n}_i\cdot\boldsymbol{n}_p\right)\cdot S_i\right]=0 \qquad (1)$$

が満足されるように前記分割領域を形成する、請求項１に記載の方法。

[請求項3] 前記集合領域特性量は、隣り合う前記集合領域同士の境界面の特性を示す境界面特性量と、隣り合う前記集合領域同士の結合情報と、隣り合う前記集合領域同士の距離とからなり、

前記分割領域特性量は、隣り合う前記分割領域同士の境界面の特性を示す境界面特性量と、隣り合う前記分割領域同士の結合情報と、隣り合う前記分割領域同士の距離とからなる、

請求項１又は２に記載の方法。

[請求項4] 前記隣り合う前記集合領域同士の境界面の特性を示す前記境界面特性量は、前記隣り合う前記集合領域同士の境界面の面積と前記境界面の法線ベクトルとであり、

前記隣り合う前記分割領域同士の境界面の特性を示す境界面特性量は、前記隣り合う前記分割領域同士の境界面の面積と前記境界面との法線ベクトルである、

請求項３に記載の方法。

[請求項5] 前記物性値と、前記分割領域での計算データモデルによる物理現象の解析結果である物理量とに基づき前記集合領域での計算用の補正係数を導出し、

前記物性値と、前記集合領域での計算データモデルを前記集合領域での支配方程式を前記補正係数で補正した補正支配方程式に基づく、前記集合領域での補正計算データモデルとによる物理現象の解析結果である物理量とに基づいて、前記コンダクタンスと前記キャパシタンスを計算する、

請求項１乃至４のいずれか一項に記載の方法。

[請求項6] 前記分割領域での支配方程式及び前記集合領域での支配方程式は、質量保存の方程式、運動量保存の方程式、エネルギ保存の方程式、移流拡散方程式、及び波動方程式から予め導出されて記憶されている、請求項１乃至５のいずれか一項に記載の方法。

[請求項7] 請求項１乃至６のいずれか一項に記載の方法によって得られた前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを使用し、更に、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算をする、ことを特徴とするＭＢＤプログラムによるシミュレーション方法。

[請求項8] 物理現象での物理量を数値的に解析する数値解析装置であって、

解析領域を複数の分割領域に分割し、前記分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成する演算部と、

前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された分割領域での支配方程式と、前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された集合領域での支配方程式とを記憶する記憶部とを備え、

前記演算部は、前記記憶部に記憶された前記分割領域での支配方程式に基づき、各前記分割領域の体積と隣り合う前記分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記分割領域での計算用データモデルを生成し、前記記憶部に記憶された前記集合領域での支配方程式に基づき、各前記集合領域の体積と隣り合う前記集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記集合領域での計算用データモデルを生成し、前記解析領域での物性値と、前記集合領域での計算データモデルとに基づいて、前記集合領域同士及び前記解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、前記集合領域の物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算する、ことを特徴とする数値解析装置。

[請求項9] 請求項８の数値解析装置と、

前記数値解析装置で計算される前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させるＭＢＤプログラムを搭載する他の数値解析装置とを含む、ＭＢＤ用数値解析システム。

[請求項10] 請求項８の数値解析装置で計算される前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させるＭＢＤプログラムを搭載する、ＭＢＤ用数値解析システム。

[請求項11] コンピュータに、

物理現象での物理量を解析する解析領域を複数の分割領域に分割させ、

前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Conn

ectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された分割領域での支配方程式に基づき、各前記分割領域の体積と隣り合う前記分割領域同士の特性を示す分割領域特性量とを前記分割領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記分割領域での計算用データモデルを生成させ、

前記分割領域を複数集合させることによって、要求される数の集合領域を生成させ、

前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量のみを使用すると共に重み付き残差積分法によって導出された離散化された集合領域での支配方程式に基づき、各前記集合領域の体積と隣り合う前記集合領域同士の特性を示す集合領域特性量とを前記集合領域の頂点の座標（Vertex）及び該頂点の連結情報（Connectivity）を必要としない量として有する前記集合領域での計算用データモデルを生成させ、

前記解析領域での物性値と、前記集合領域での計算データモデルとに基づいて、前記集合領域同士及び前記解析領域外への物理量の移動の特性を表すコンダクタンスと、前記集合領域の物理量の蓄積の特性を表すキャパシタンスとを計算させる、ことを特徴とする数値解析プログラム。

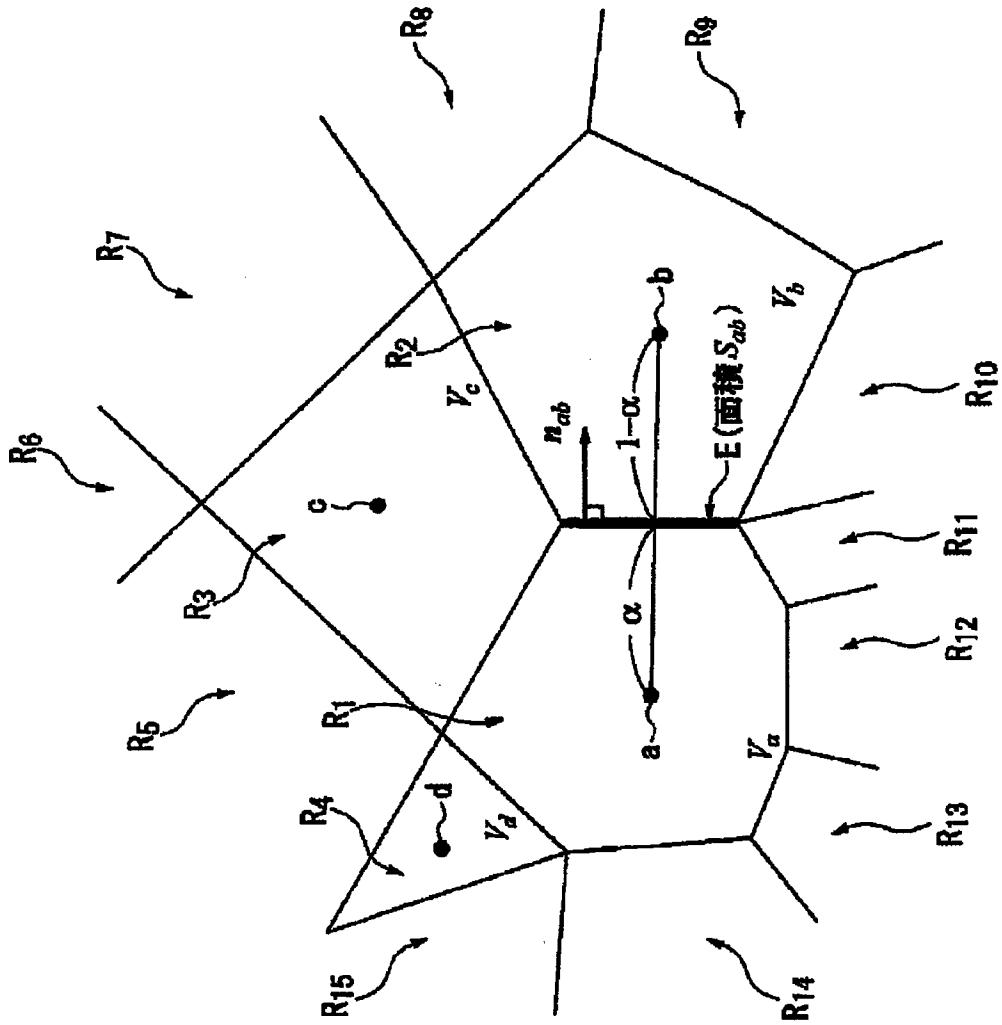
[請求項12] 請求項１１の数値解析プログラムと、

前記数値解析プログラムで計算される前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させるＭＢＤプログラムとを含む、ＭＢＤプログラム。

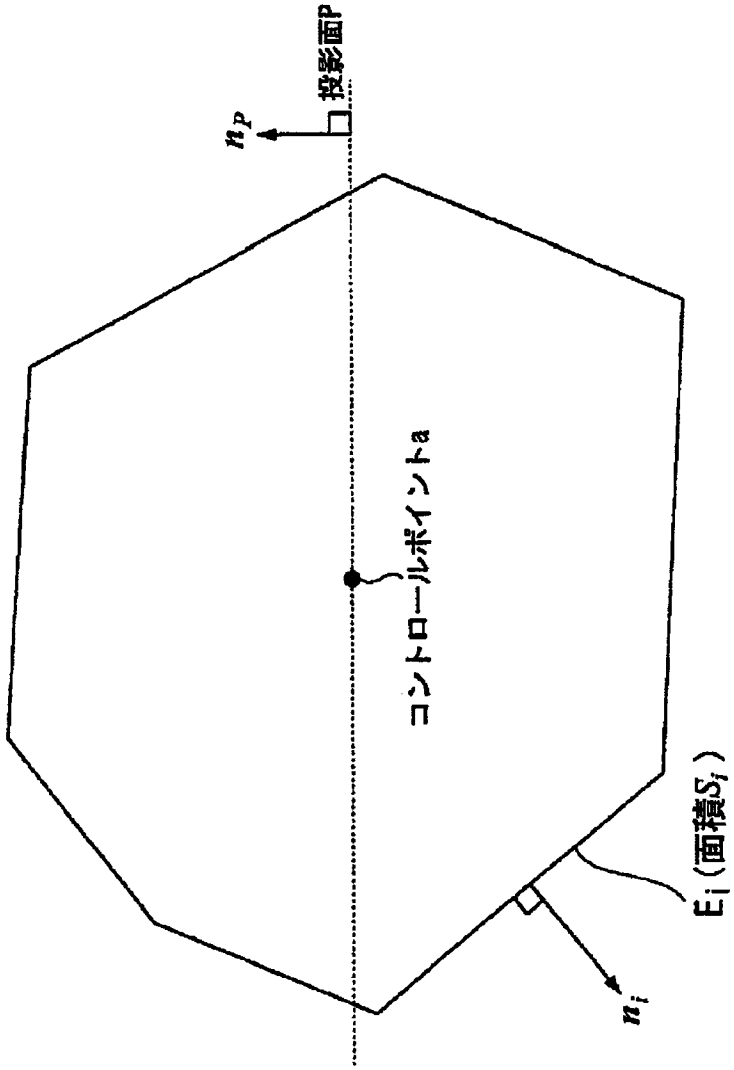
[請求項13] 請求項１１の数値解析プログラムで計算される前記コンダクタンスと前記キャパシタンスとを入力データとして使用し、前記解析領域を含む他の解析領域で物理量の非定常計算を、コンピュータに実行させ

る、ＭＢＤプログラム。

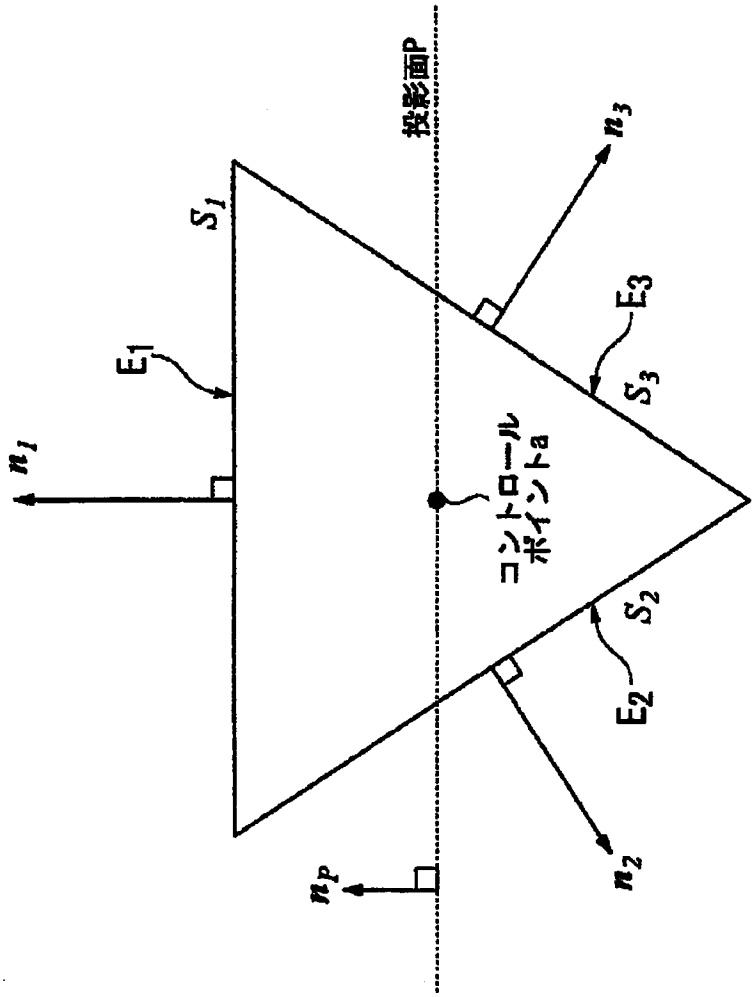
[図1]


R8
R9
R7
R2
R10
R6
R3
R11
R5
R1
R12
R4
R13
R15
R14
a
b
c
d
E(面積S_{ab})
n_{ab}
1−α
α
V_a
V_b
V_c
V_d

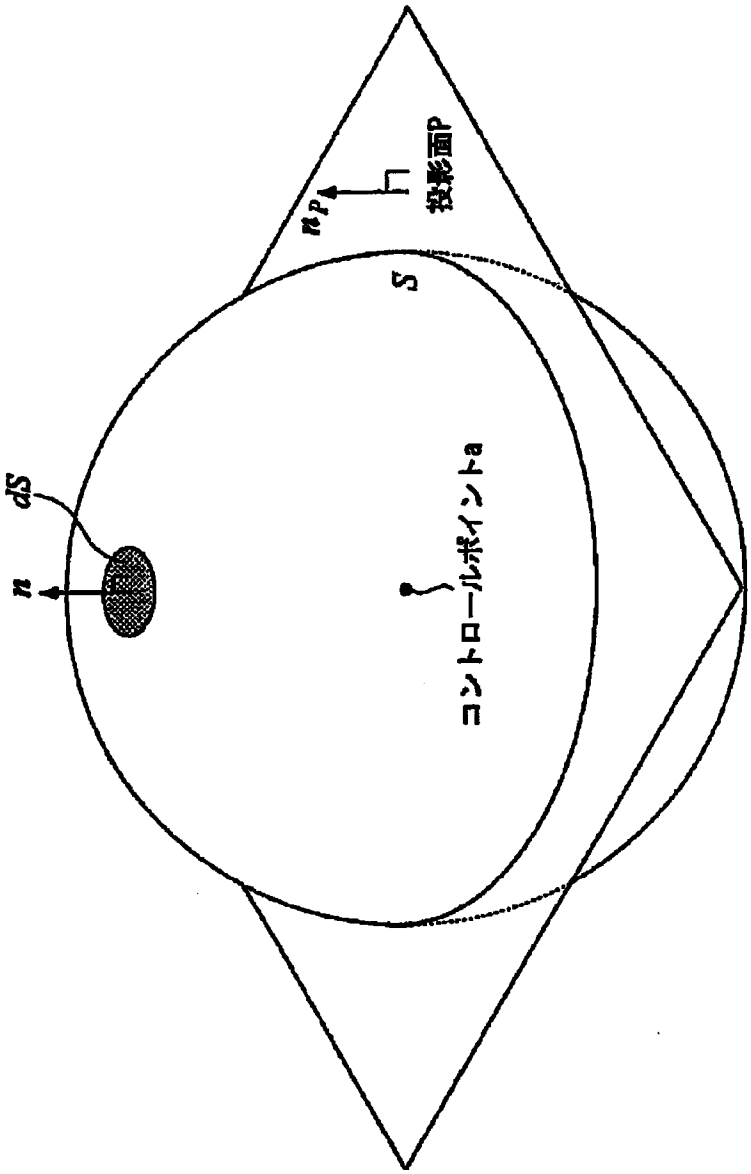
[図2]



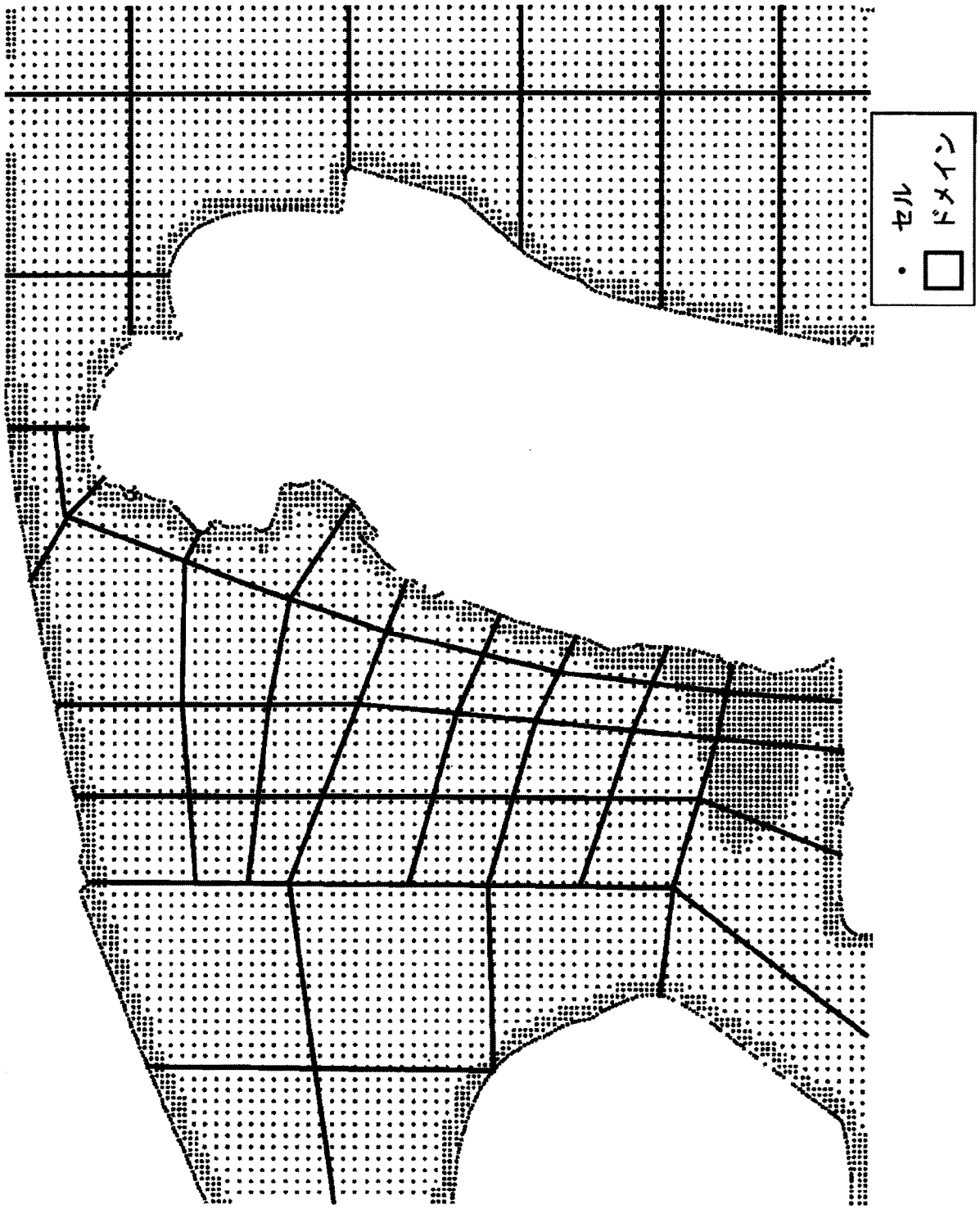
[図3]



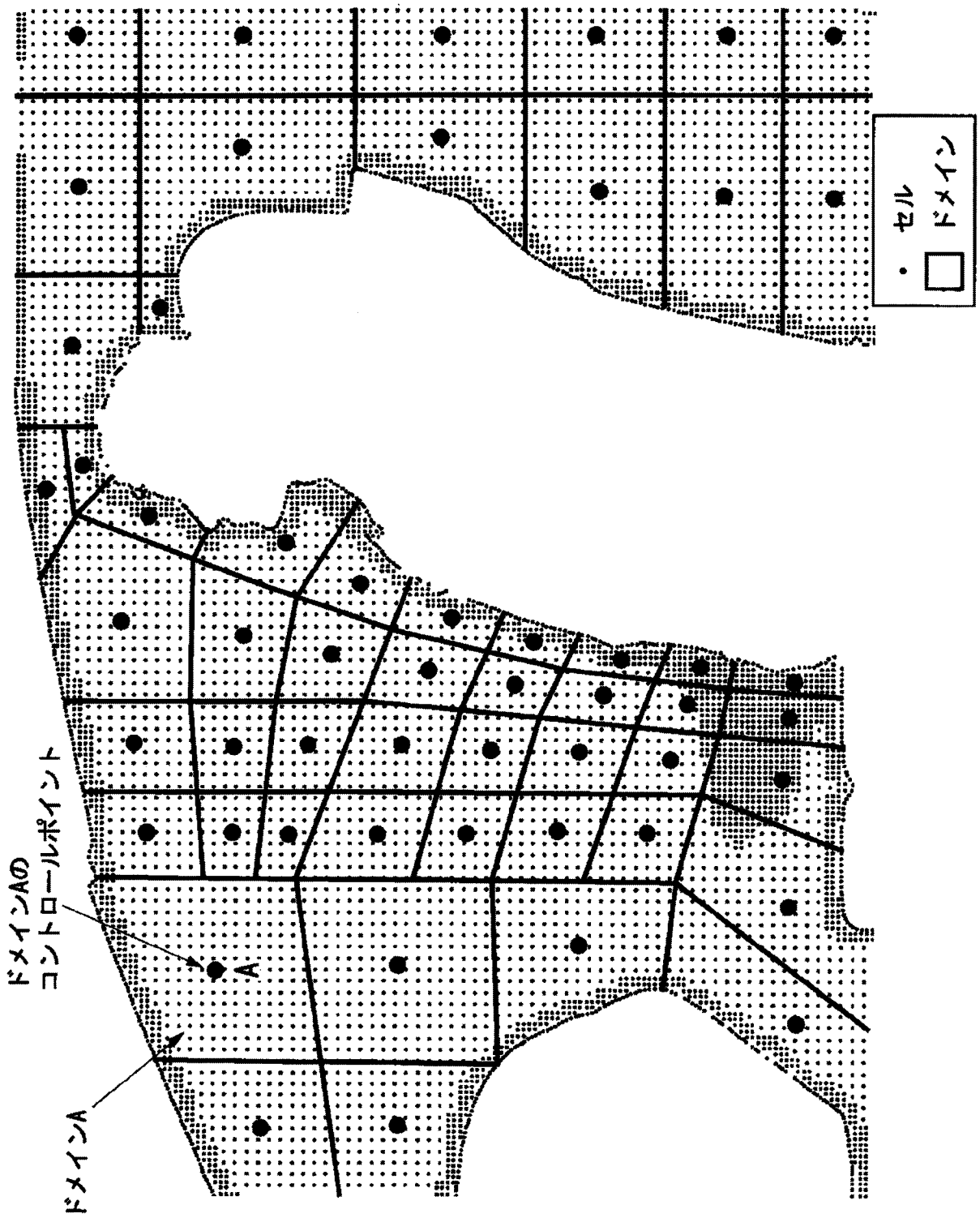
[図4]



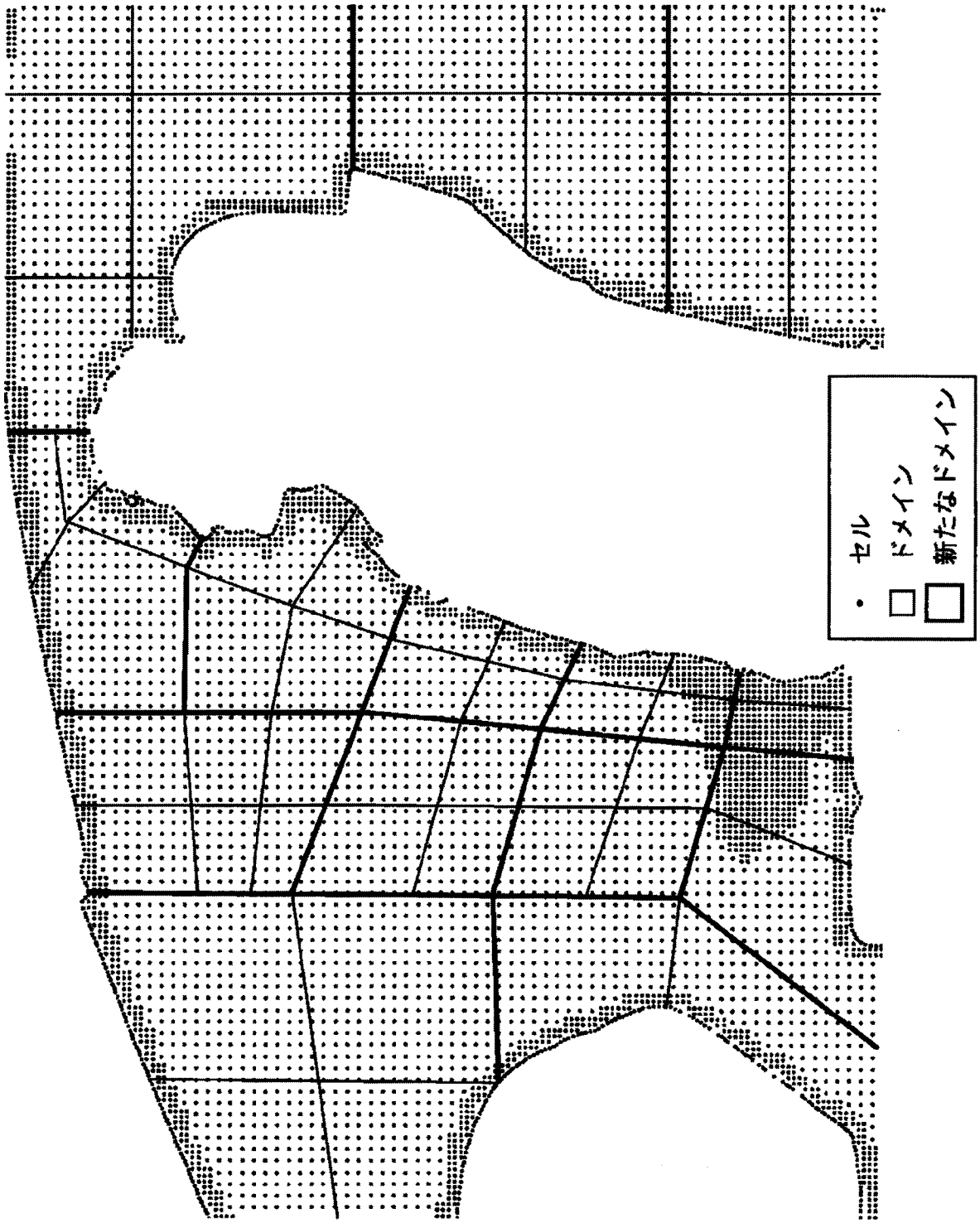
[図5]



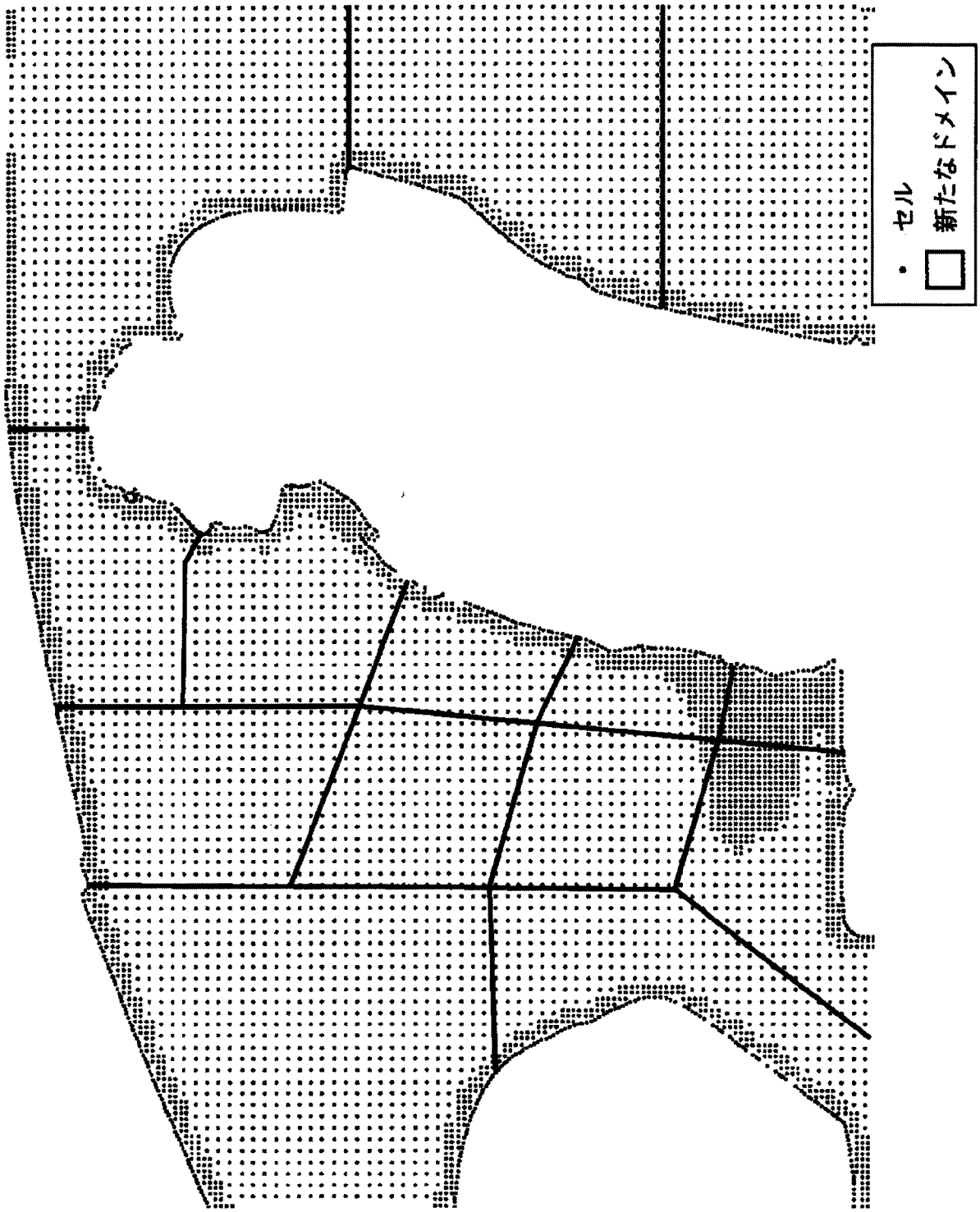
[図6]



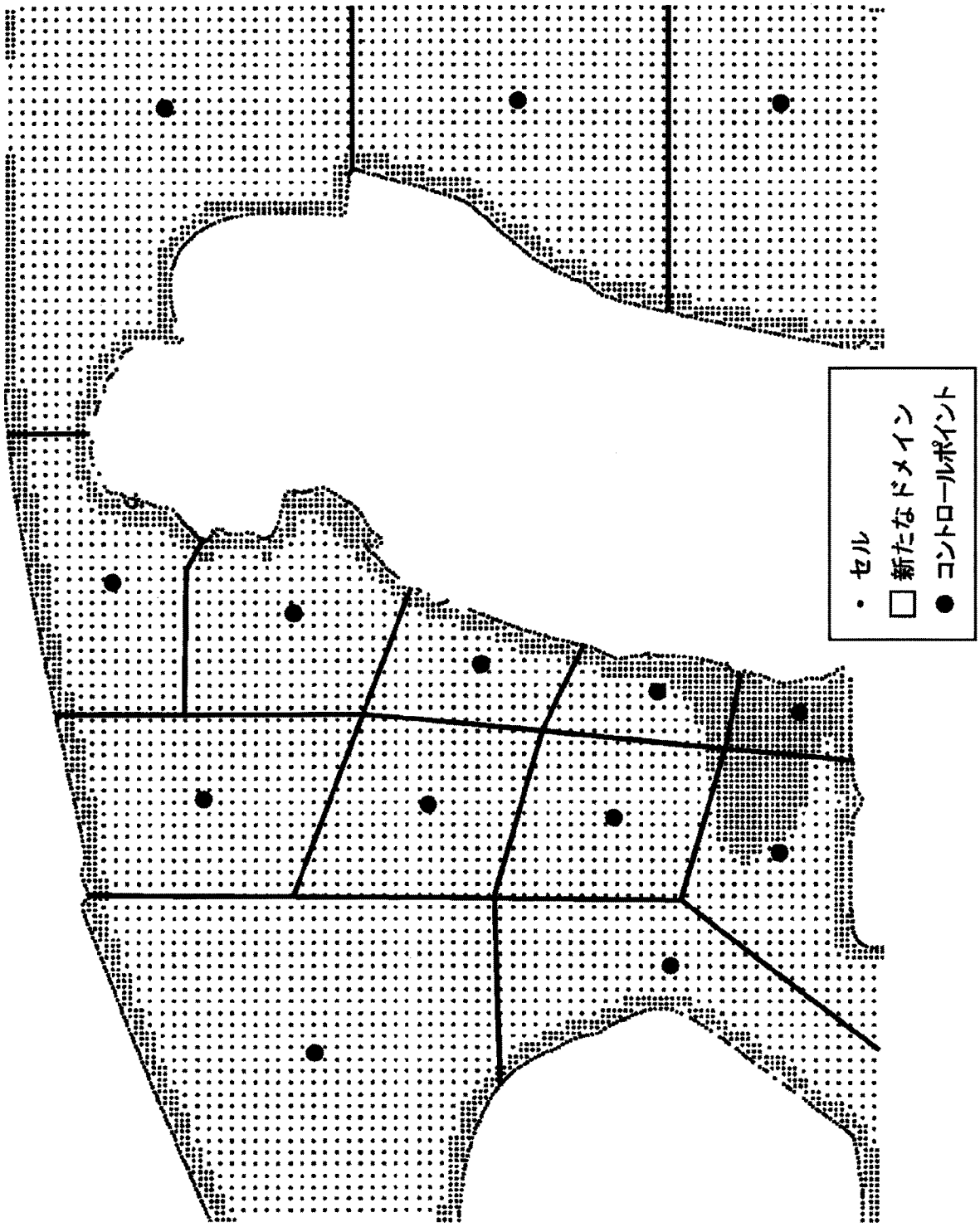
[図7]



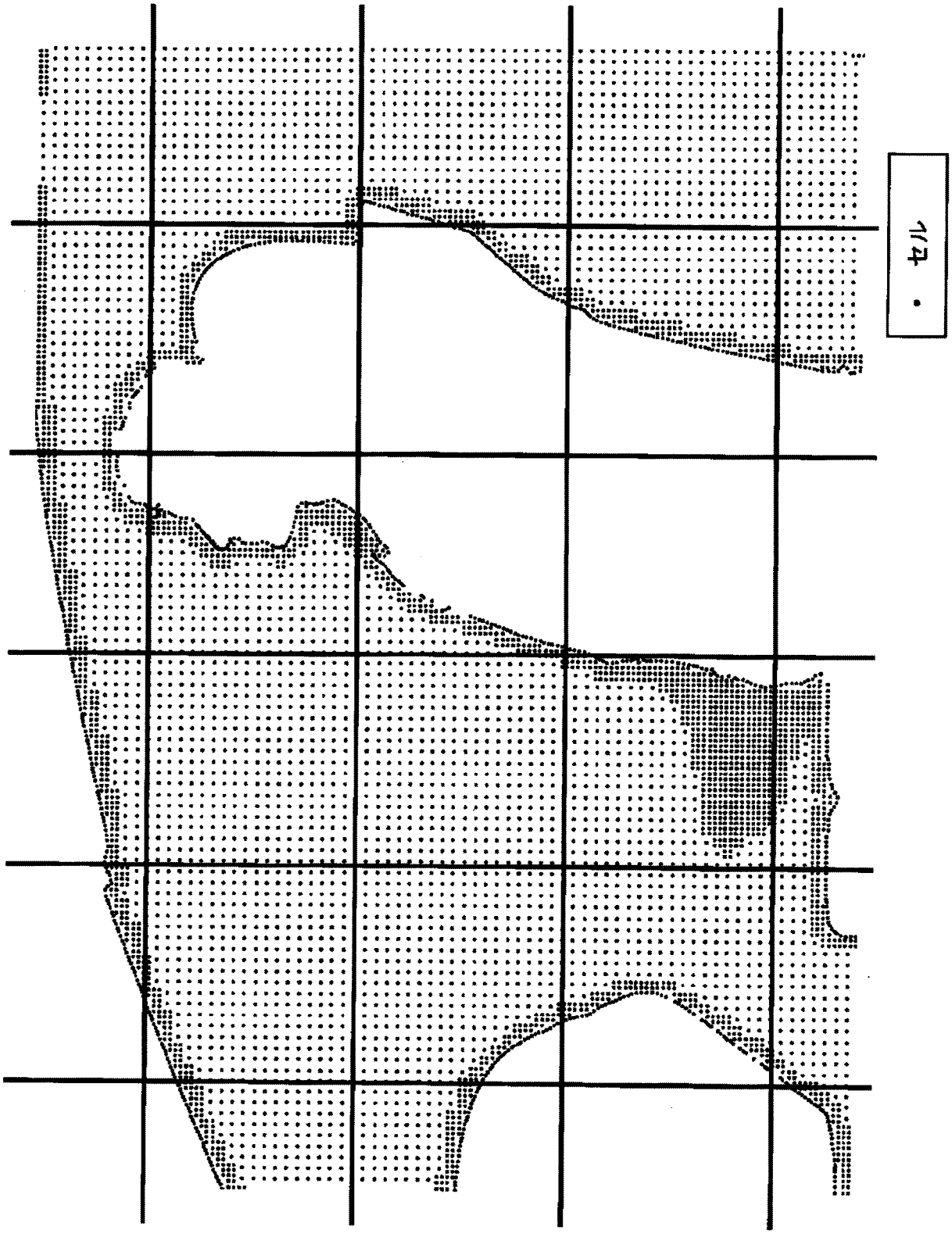
[図8]



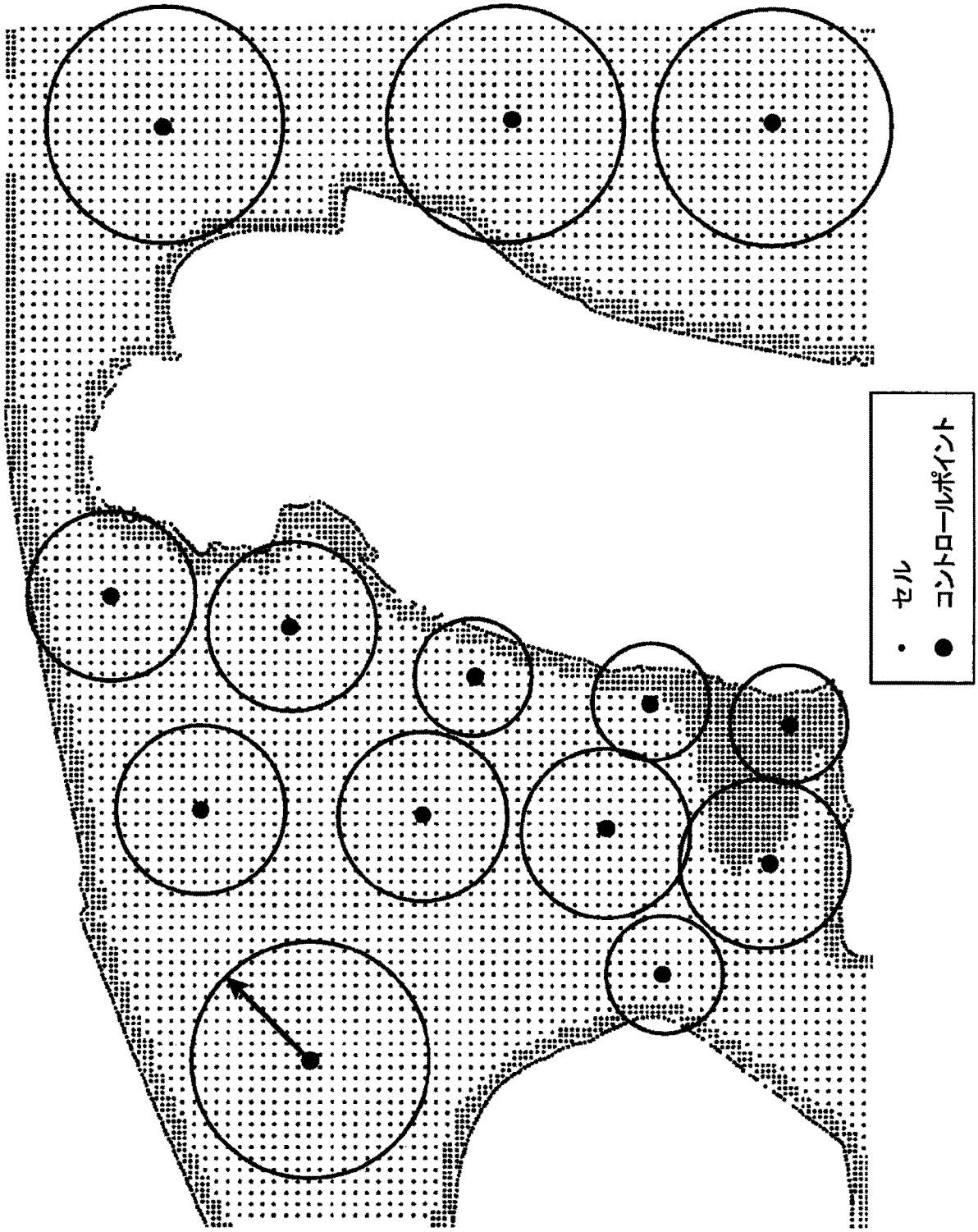
[図9]



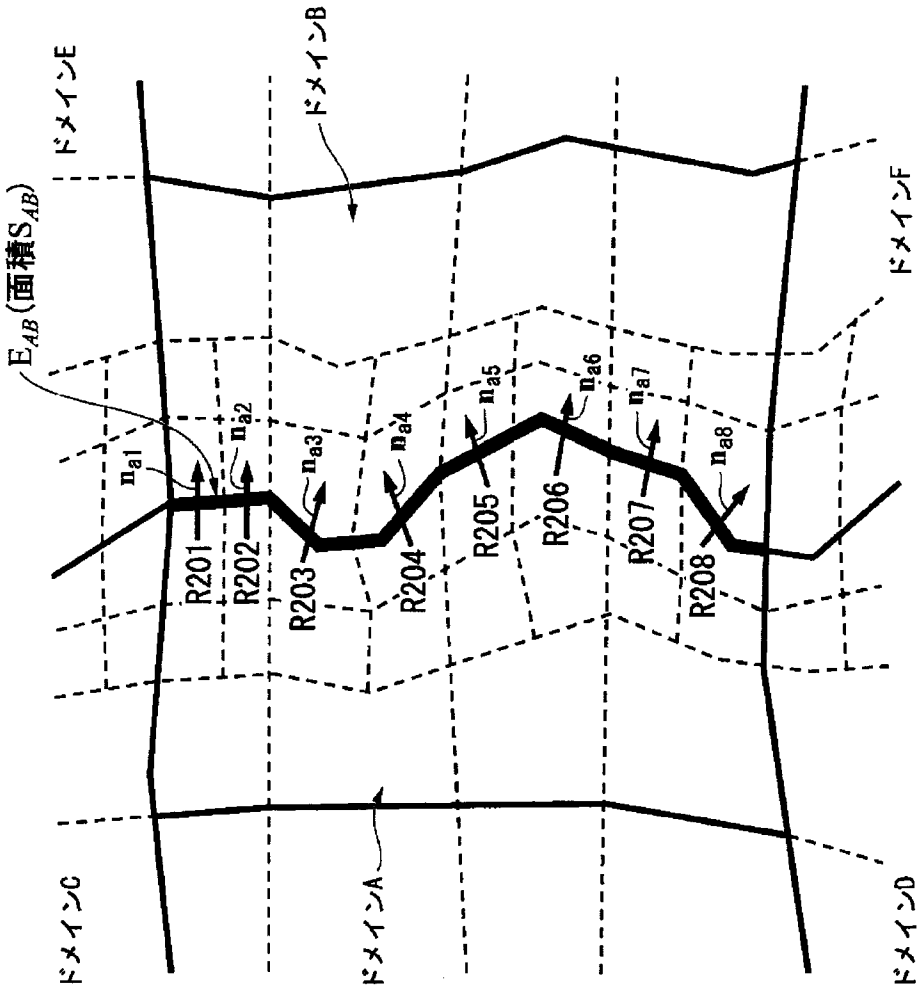
[図10]



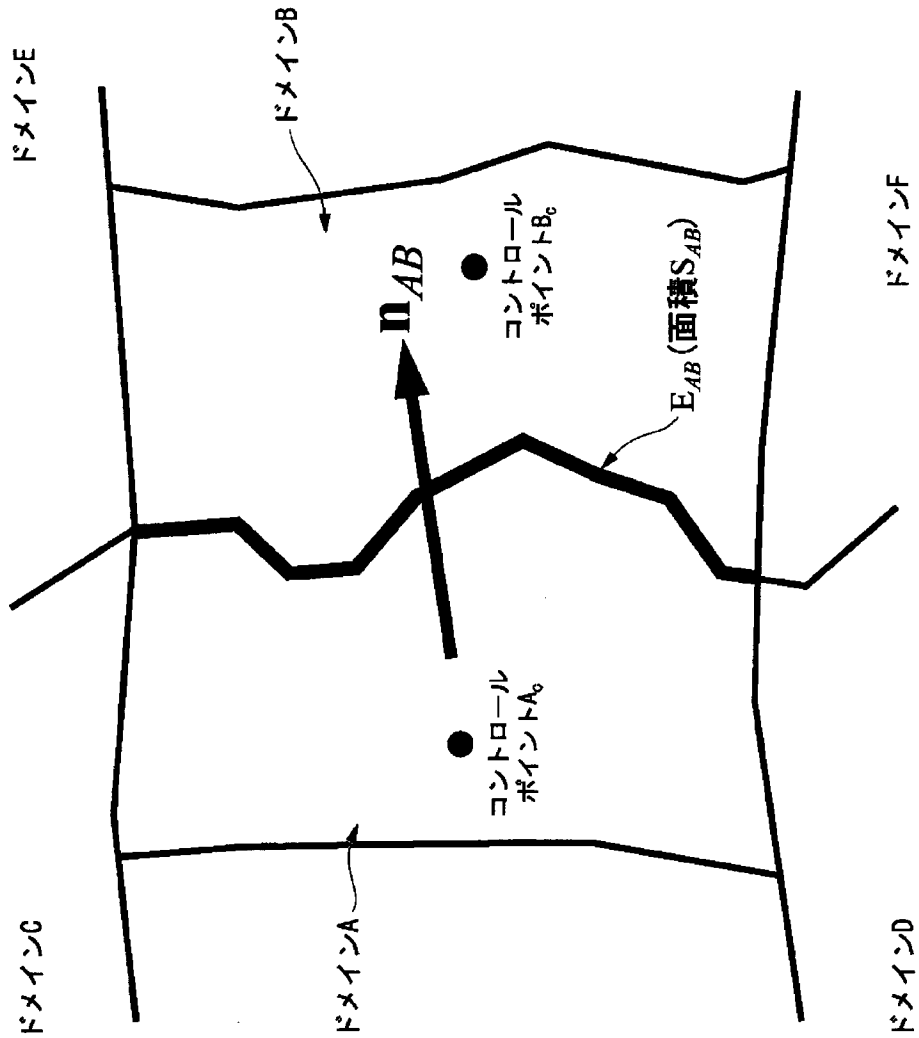
[図11]



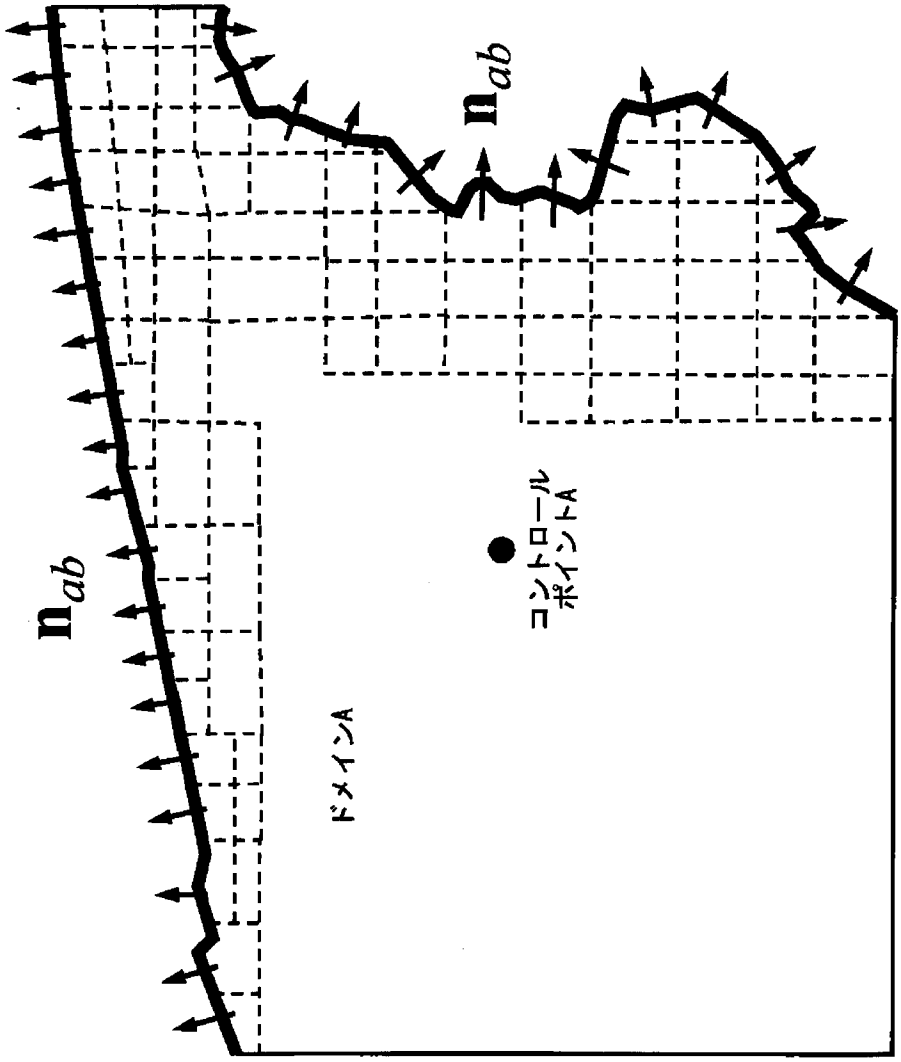
[図12]


ドメインE
ドメインB
ドメインF
E_{AB}(面積S_{AB})
n_{a1}
n_{a2}
n_{a3}
n_{a4}
n_{a5}
n_{a6}
n_{a7}
n_{a8}
R201
R202
R203
R204
R205
R206
R207
R208
ドメインC
ドメインA
ドメインD

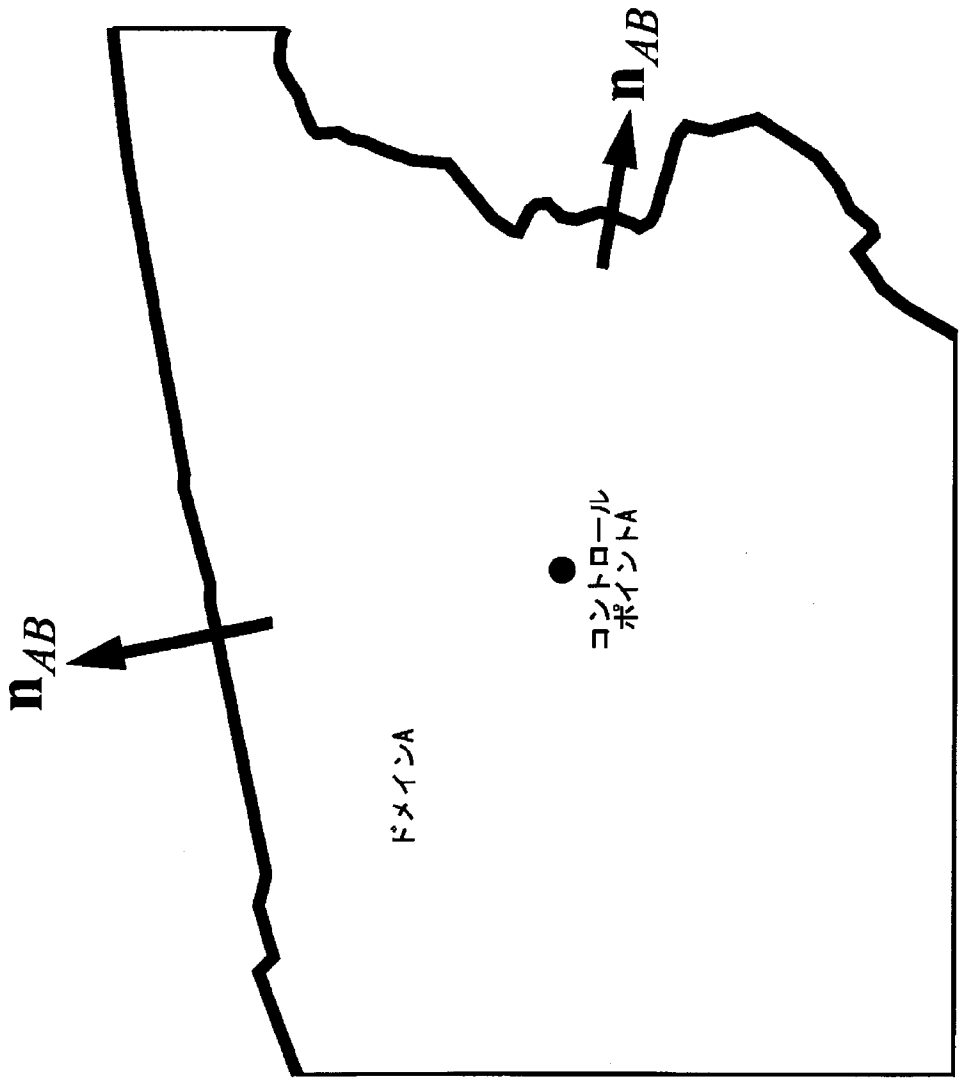
[図13]


ドメインE
ドメインB
ドメインF
$\mathbf{n}_{AB}$
コントロール
ポイントB_c
E_{AB}(面積S_{AB})
コントロール
ポイントA_c
ドメインC
ドメインA
ドメインD

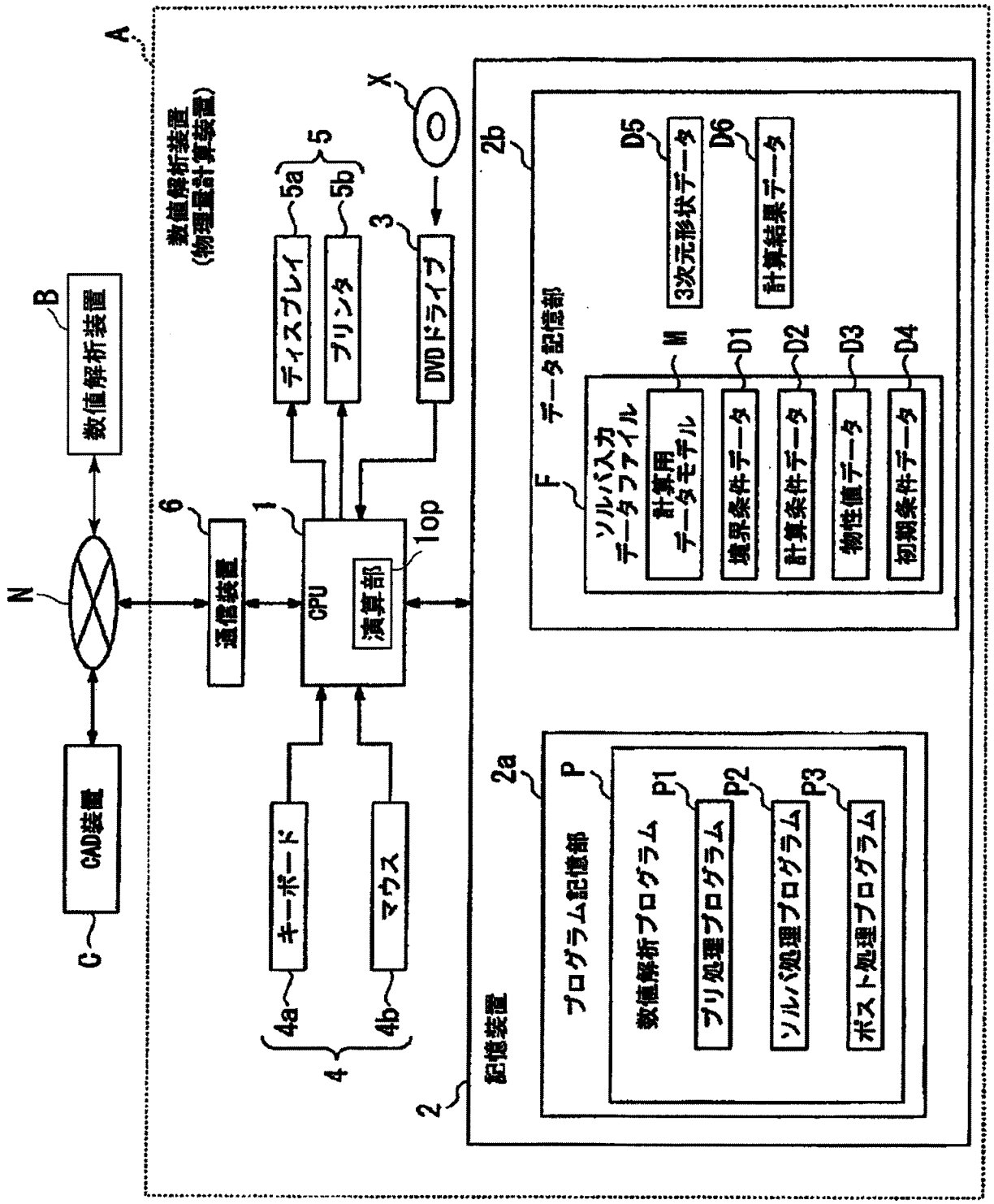
[図14]



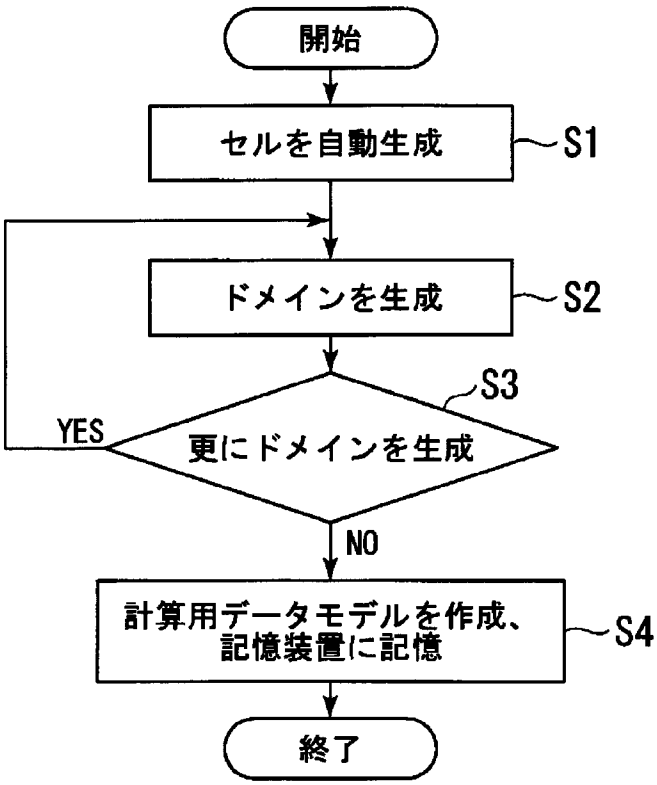
[図15]



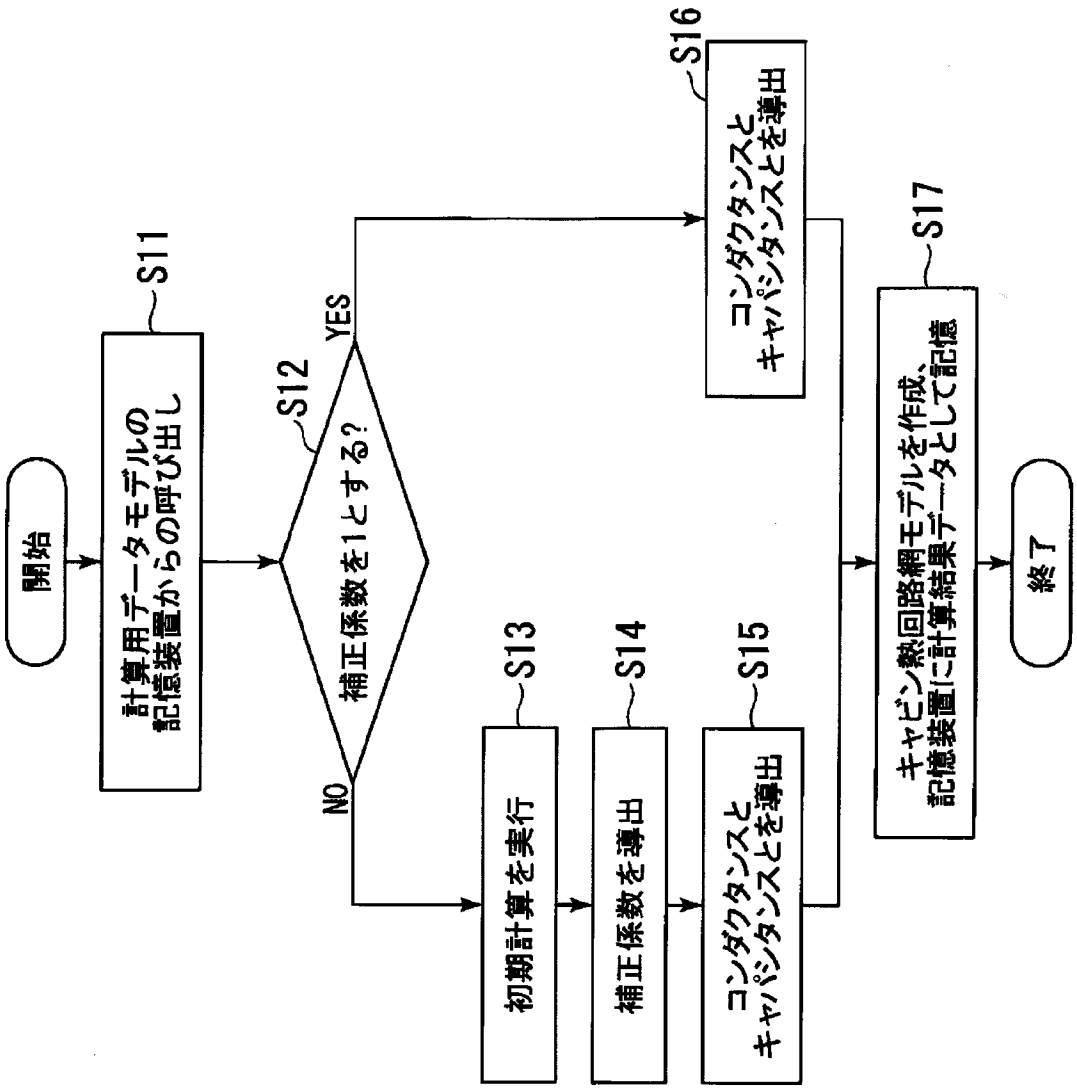
[図16]


A
数値解析装置
(物理量計算装置)
B
数値解析装置
CAD装置
C
N
通信装置
6
1
CPU
演算部
1op
ディスプレイ
5a
プリンタ
5b
5
DVDドライブ
3
X
キーボード
4a
マウス
4b
4
2
記憶装置
2a
プログラム記憶部
P
数値解析プログラム
P1
プリ処理プログラム
P2
ソルバ処理プログラム
P3
ポスト処理プログラム
2b
データ記憶部
F
ソルバ入力
データファイル
M
計算用
データモデル
D1
境界条件データ
D2
計算条件データ
D3
物性値データ
D4
初期条件データ
D5
3次元形状データ
D6
計算結果データ

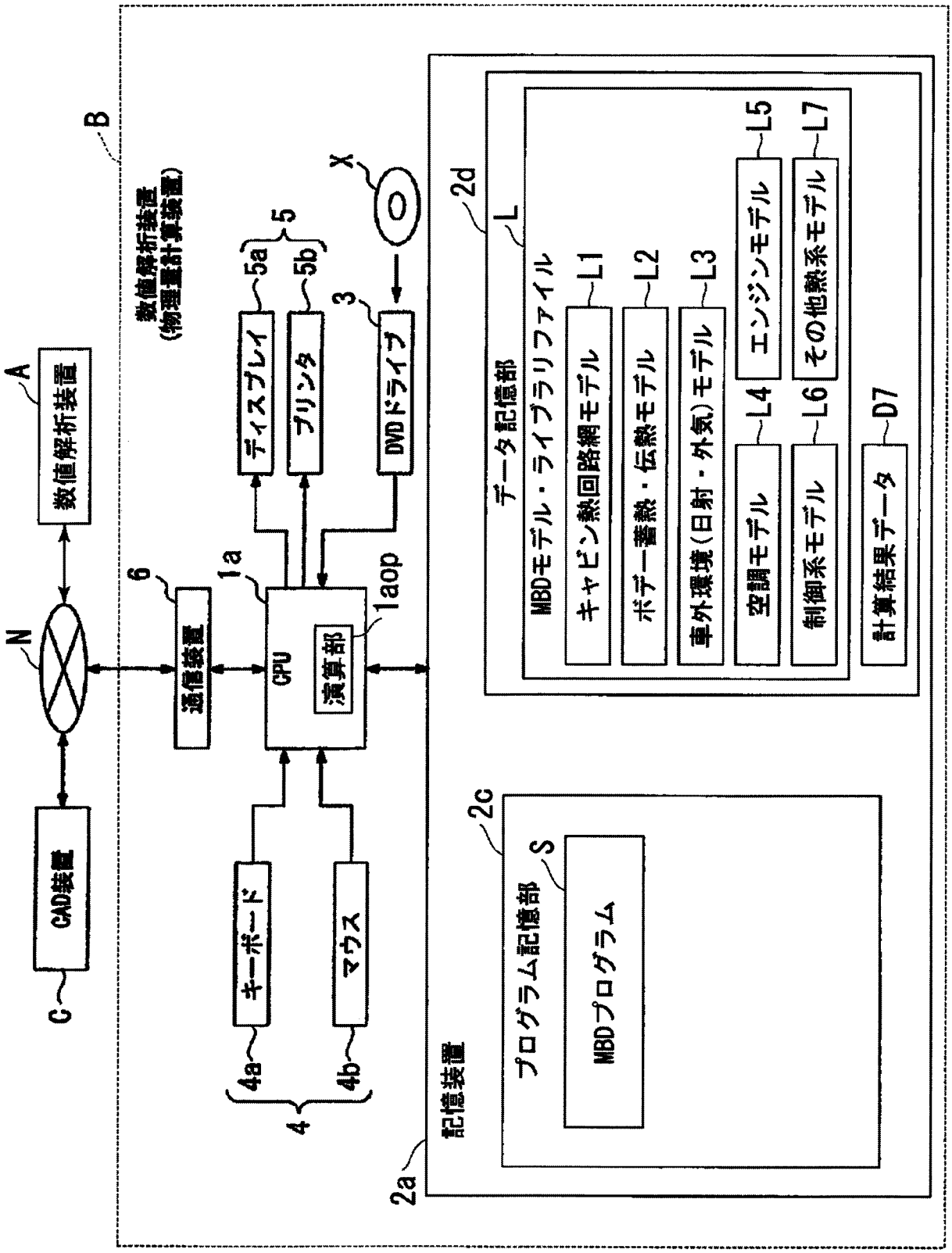
[図17]


開始
セルを自動生成
S1
ドメインを生成
S2
S3
YES
更にドメインを生成
NO
計算用データモデルを作成、
記憶装置に記憶
S4
終了

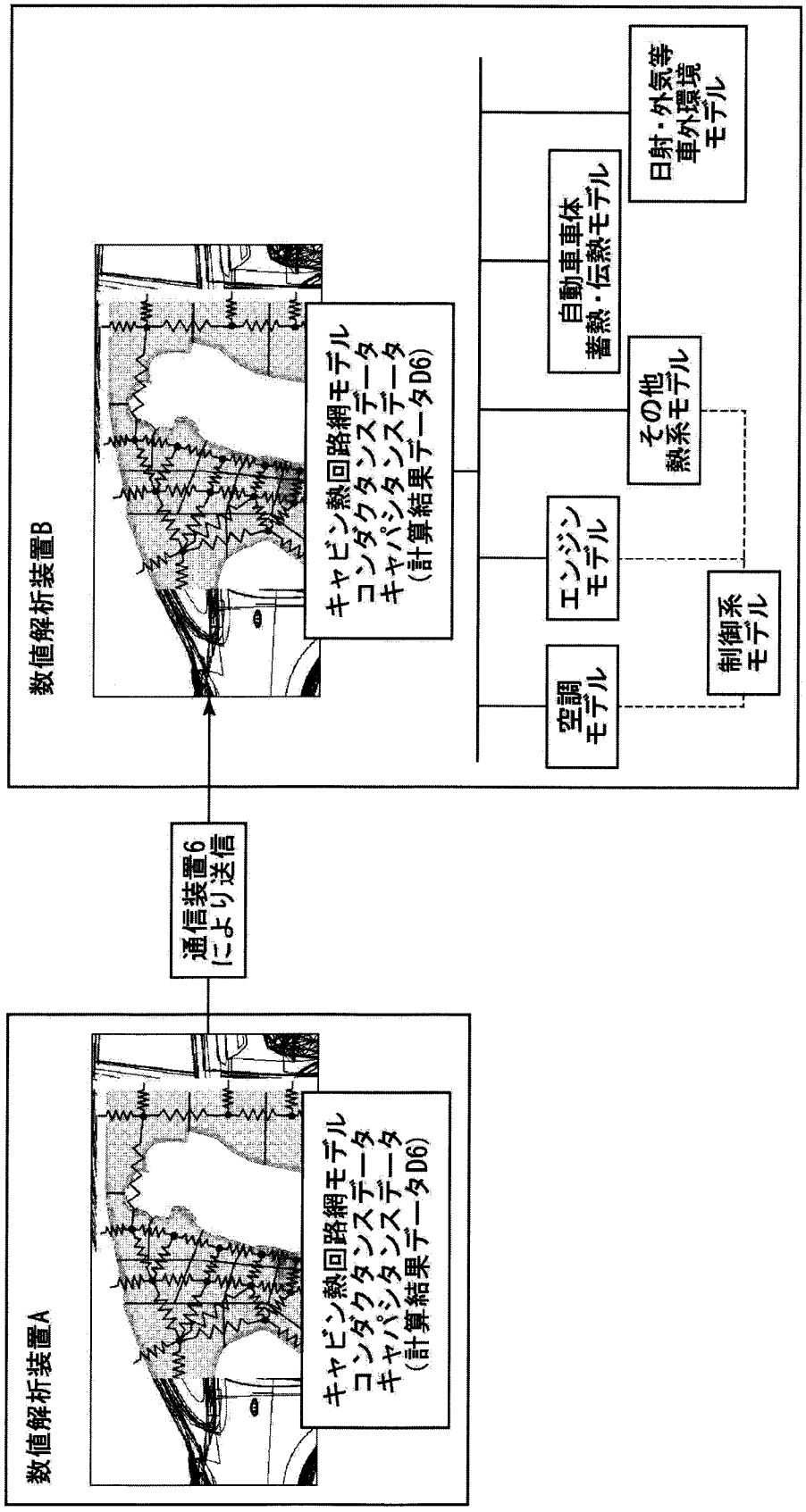
[図18]


開始
S11
計算用データモデルの記憶装置からの呼び出し
S12
補正係数を1とする?
YES
NO
S13
初期計算を実行
S14
補正係数を導出
S15
コンダクタンスとキャパシタンスとを導出
S16
コンダクタンスとキャパシタンスとを導出
S17
キャビン熱回路網モデルを作成、記憶装置に計算結果データとして記憶
終了

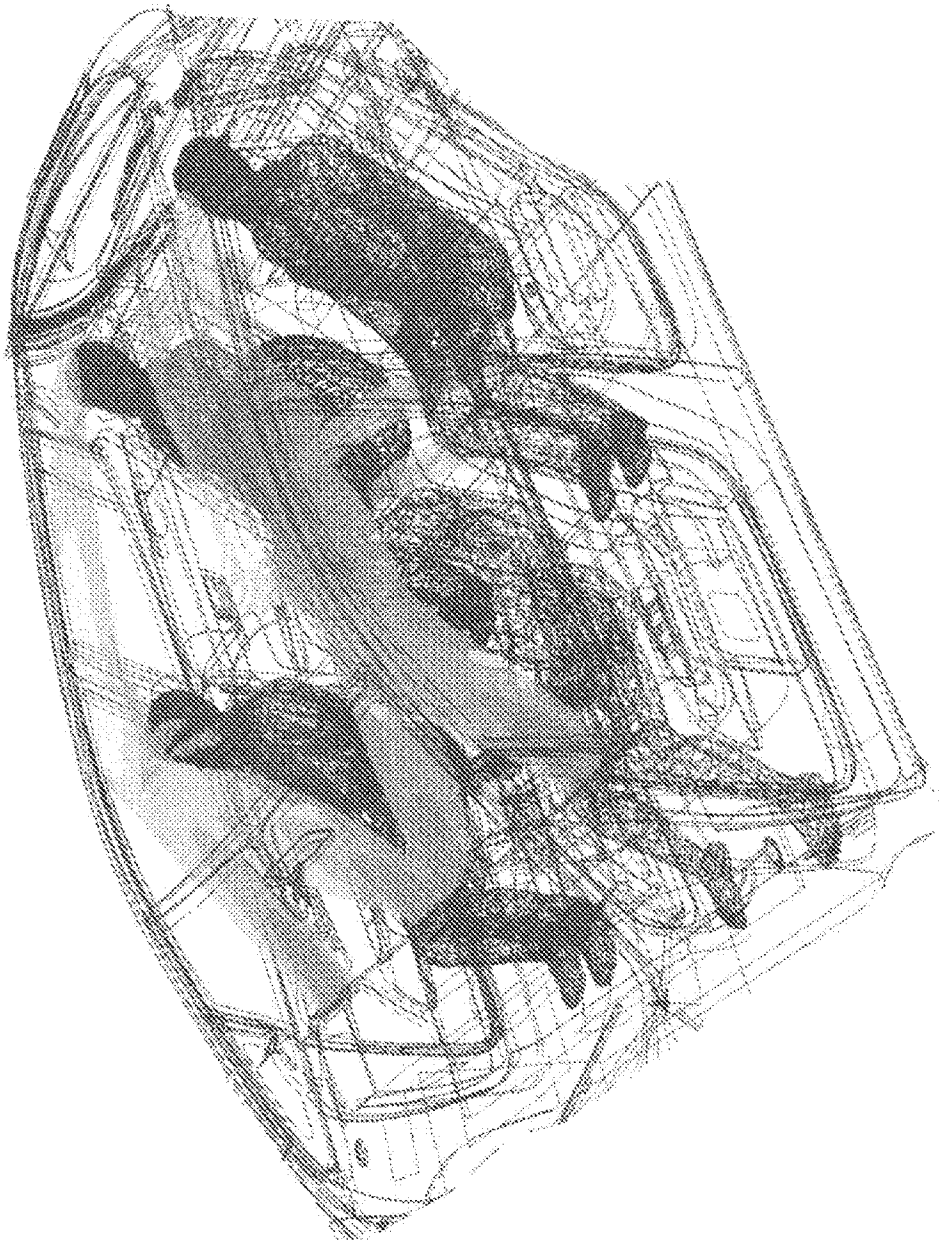
[図19]


A
数値解析装置
B
数値解析装置
(物理量計算装置)
C
CAD装置
N
6
通信装置
1a
CPU
演算部
1aop
5
5a
ディスプレイ
5b
プリンタ
3
DVDドライブ
X
4
4a
キーボード
4b
マウス
2a
記憶装置
2c
プログラム記憶部
S
MBDプログラム
2d
データ記憶部
L
MBDモデル・ライブラリファイル
L1
キャビン熱回路網モデル
L2
ボデー蓄熱・伝熱モデル
L3
車外環境(日射・外気)モデル
L4
空調モデル
L5
エンジンモデル
L6
制御系モデル
L7
その他熱系モデル
D7
計算結果データ

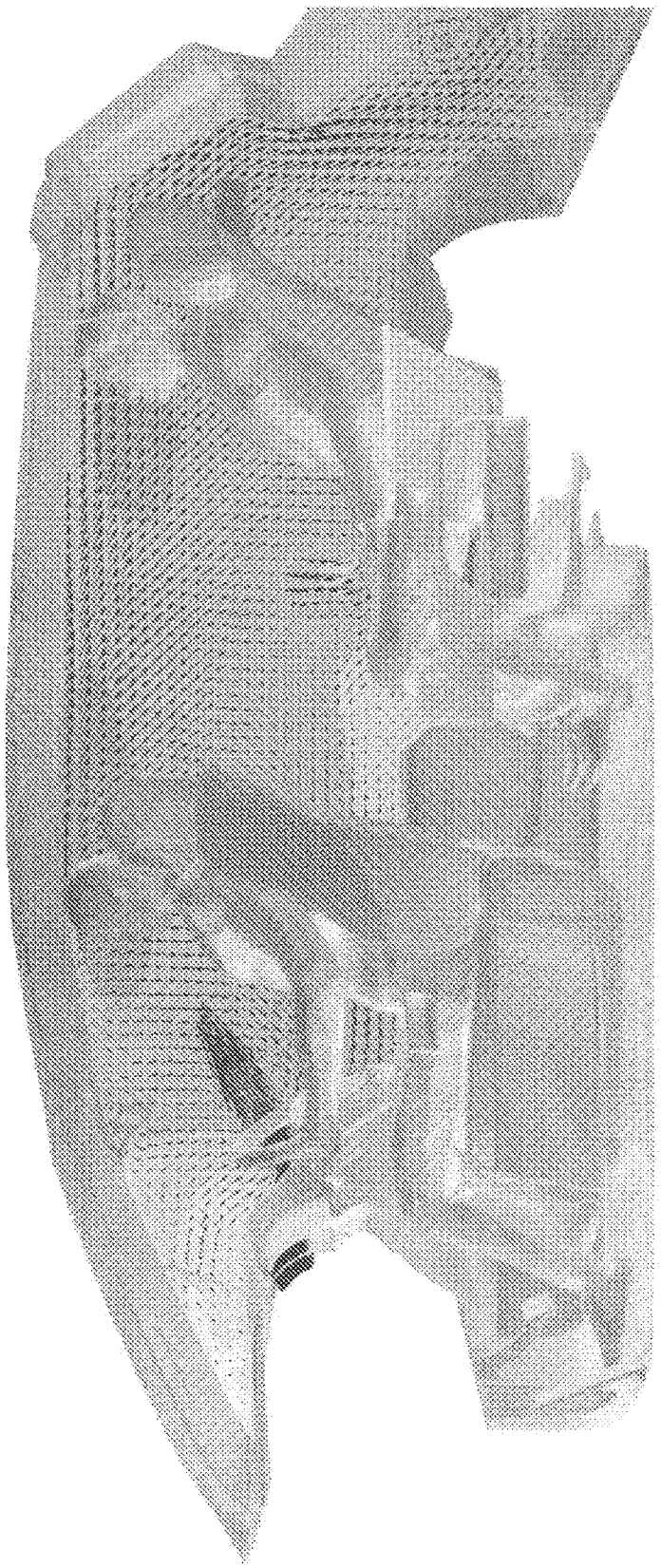
[図20]


数値解析装置A
キャビン熱回路網モデル
コンダクタンスデータ
キャパシタンスデータ
(計算結果データD6)
通信装置6
により送信
数値解析装置B
キャビン熱回路網モデル
コンダクタンスデータ
キャパシタンスデータ
(計算結果データD6)
空調
モデル
エンジン
モデル
その他
熱系モデル
自動車車体
蓄熱・伝熱モデル
日射・外気等
車外環境
モデル
制御系
モデル

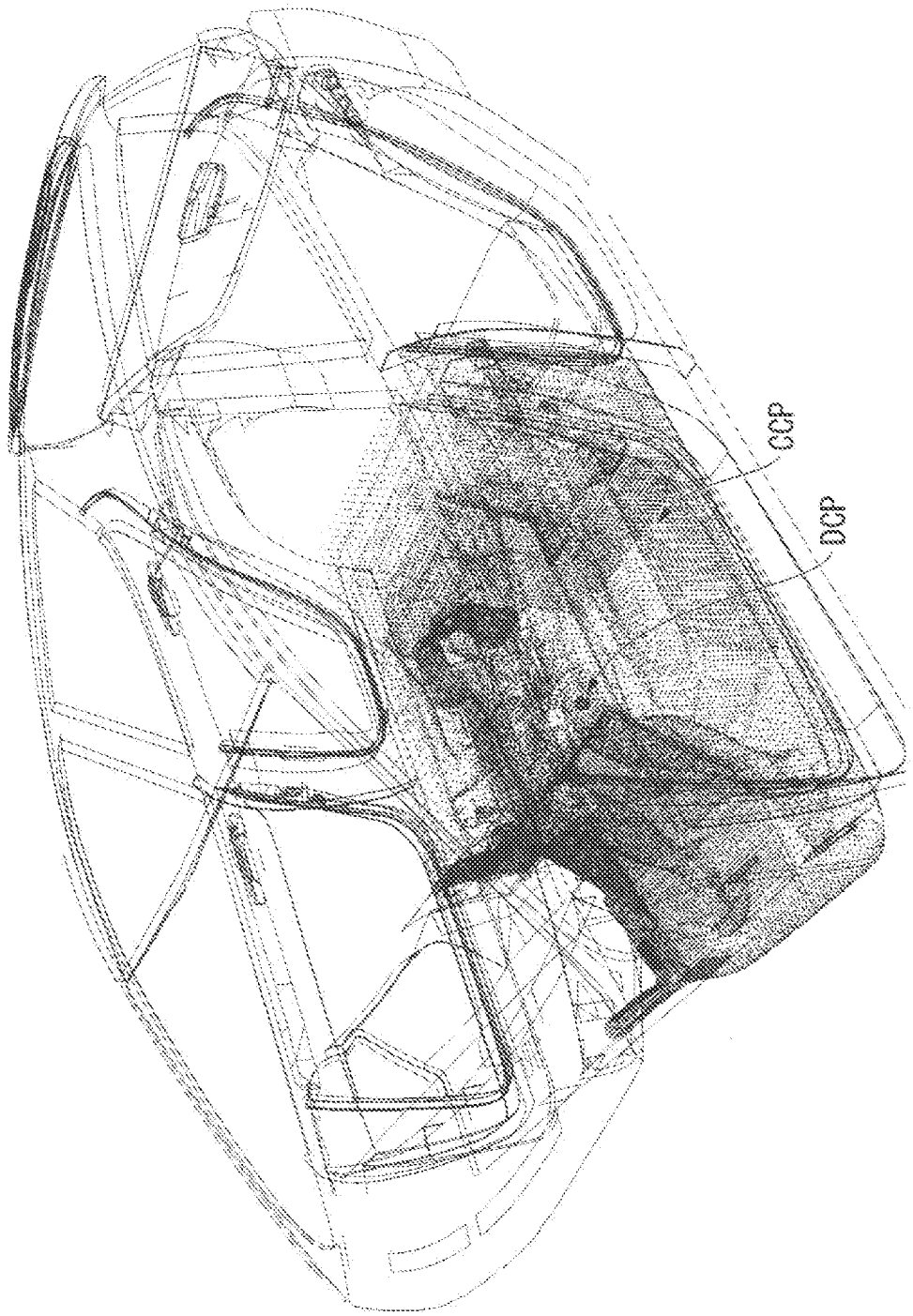
[図21]



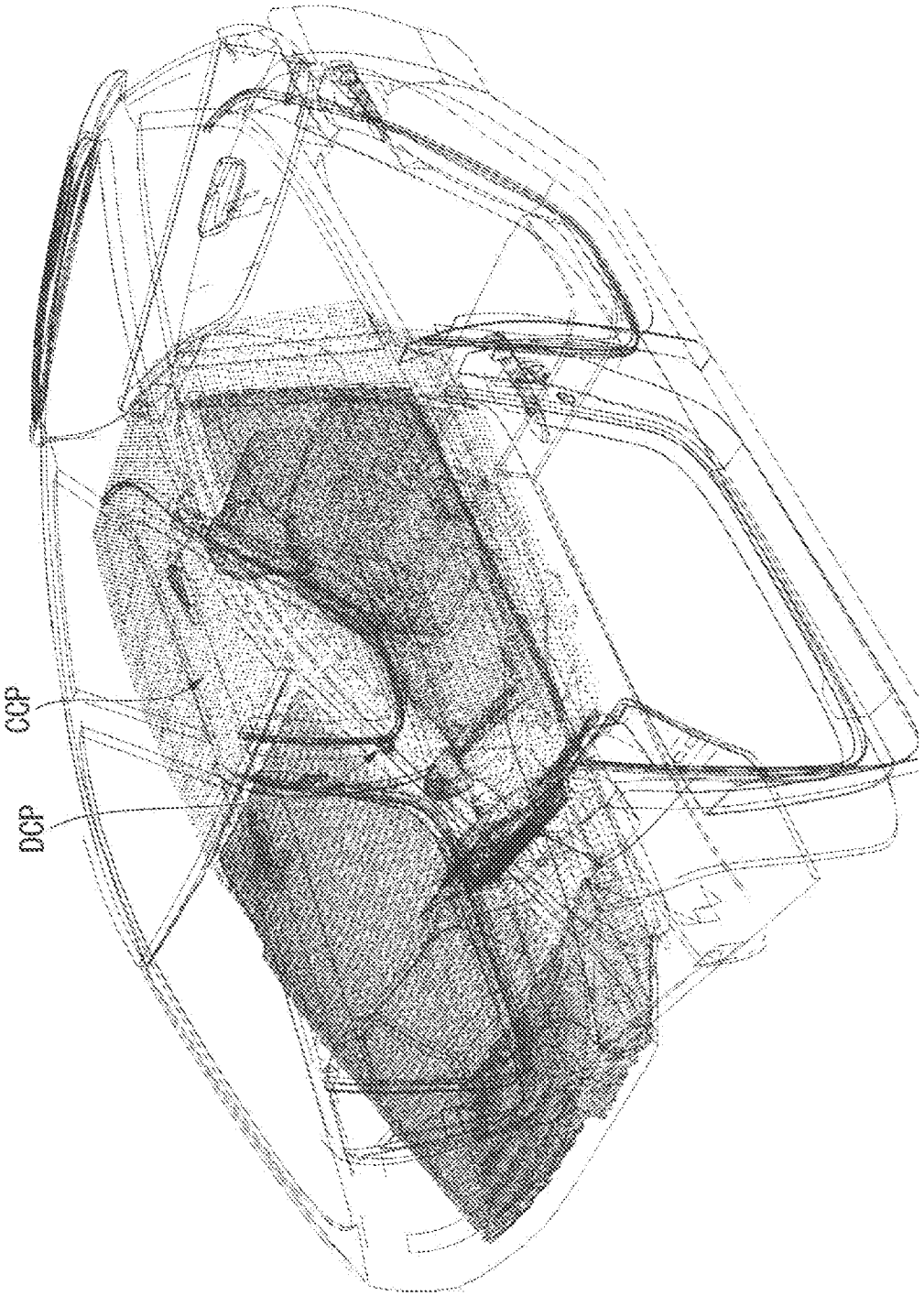
[図22]



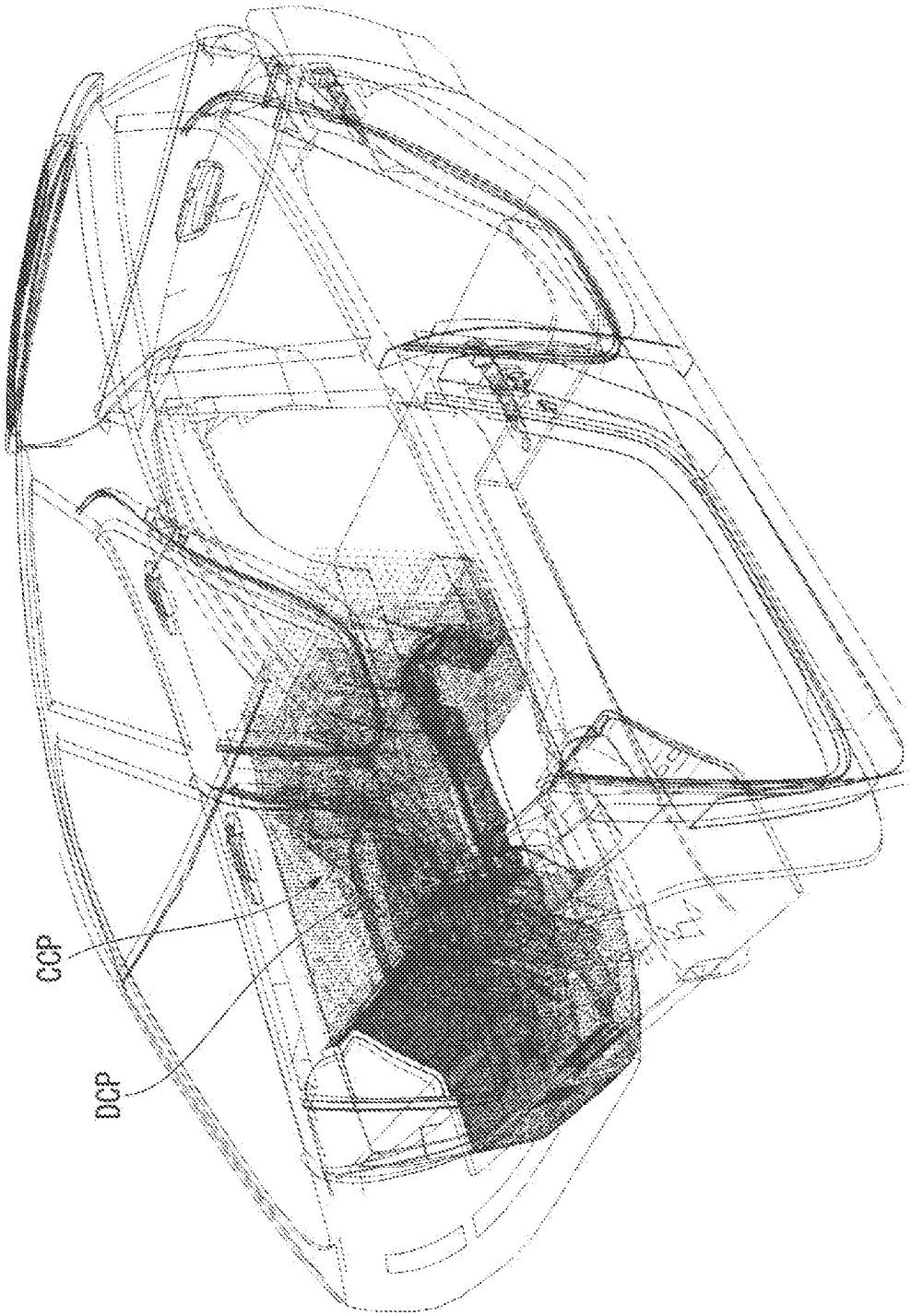
[図23]



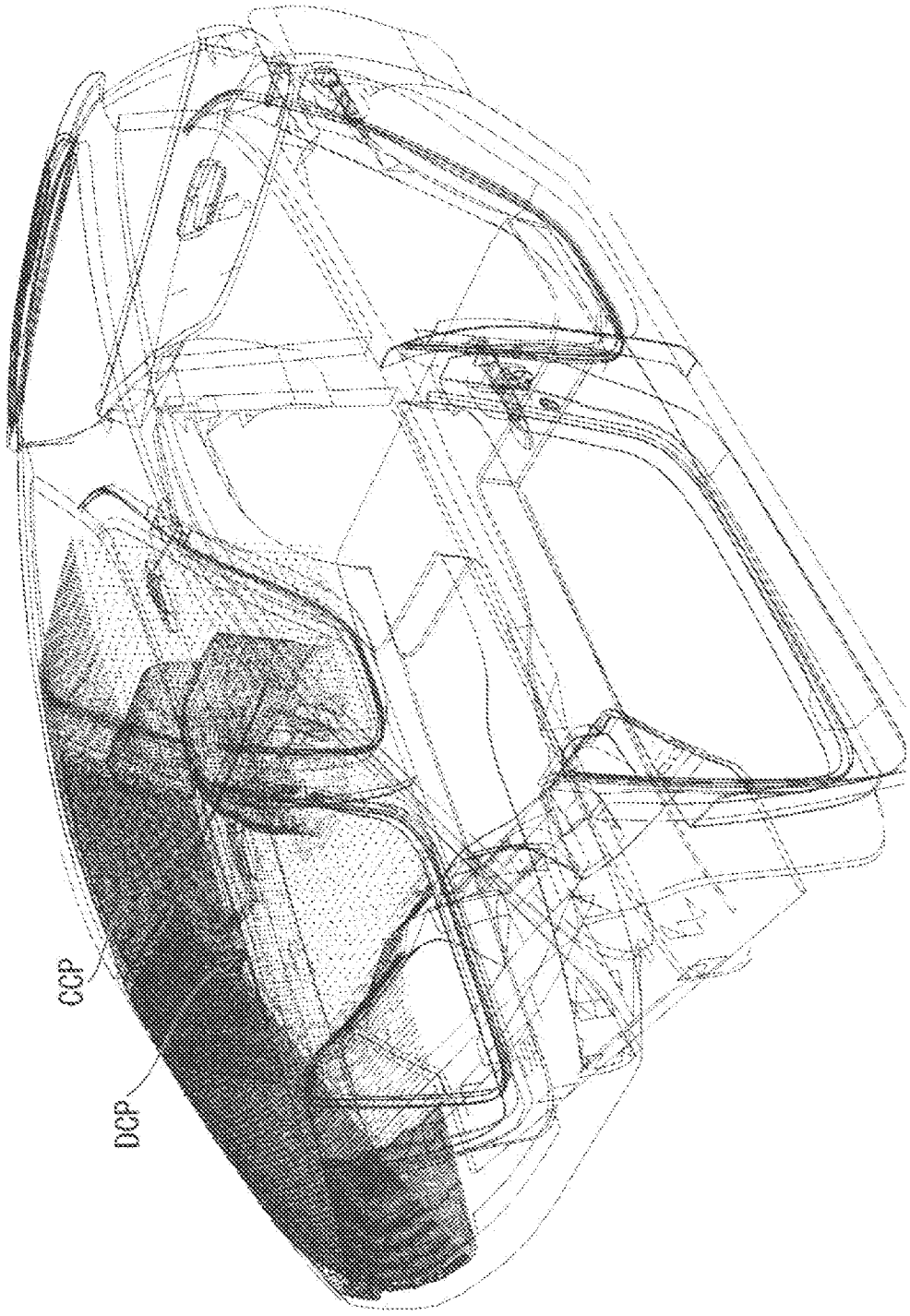
[図24]



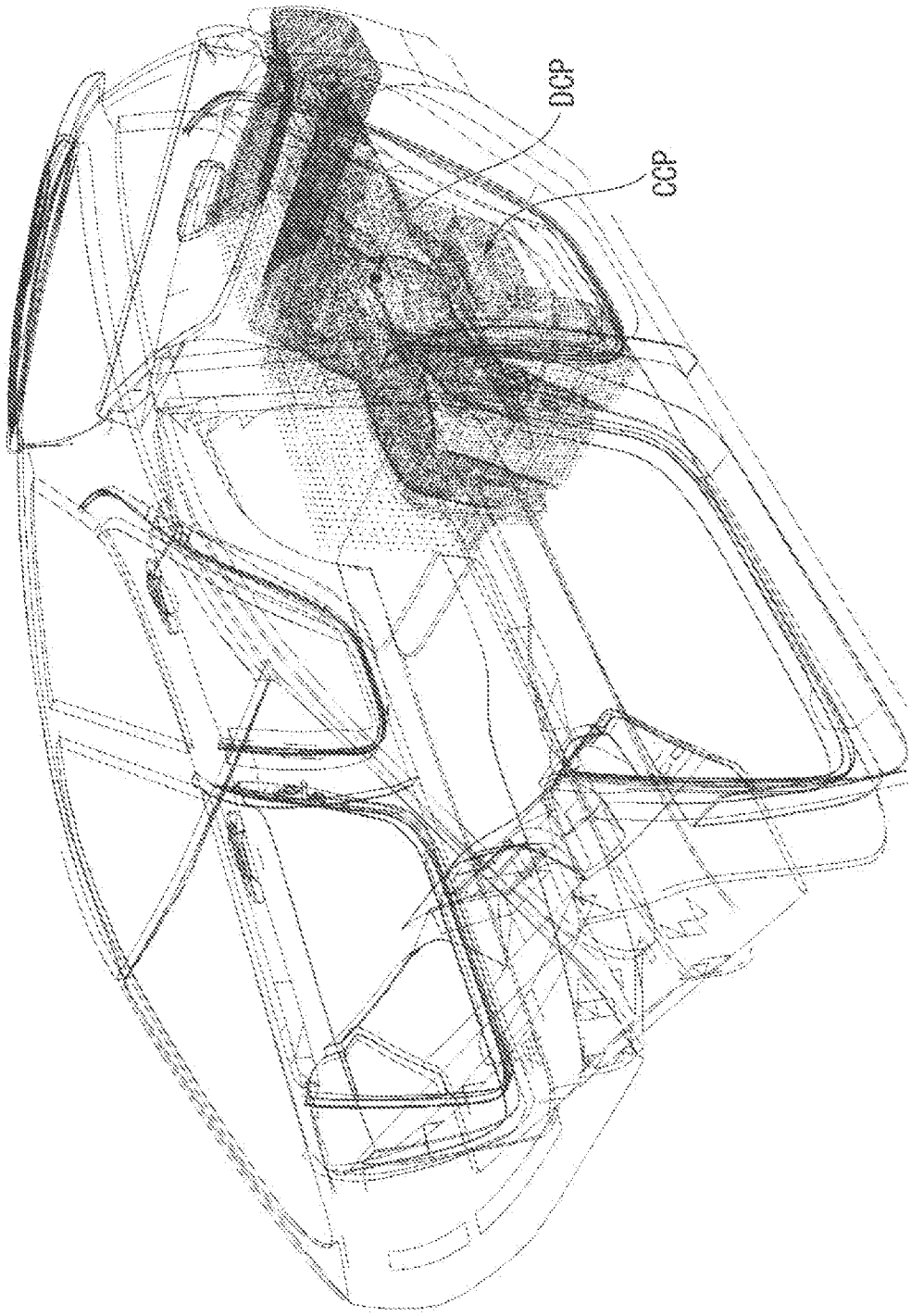
[図25]



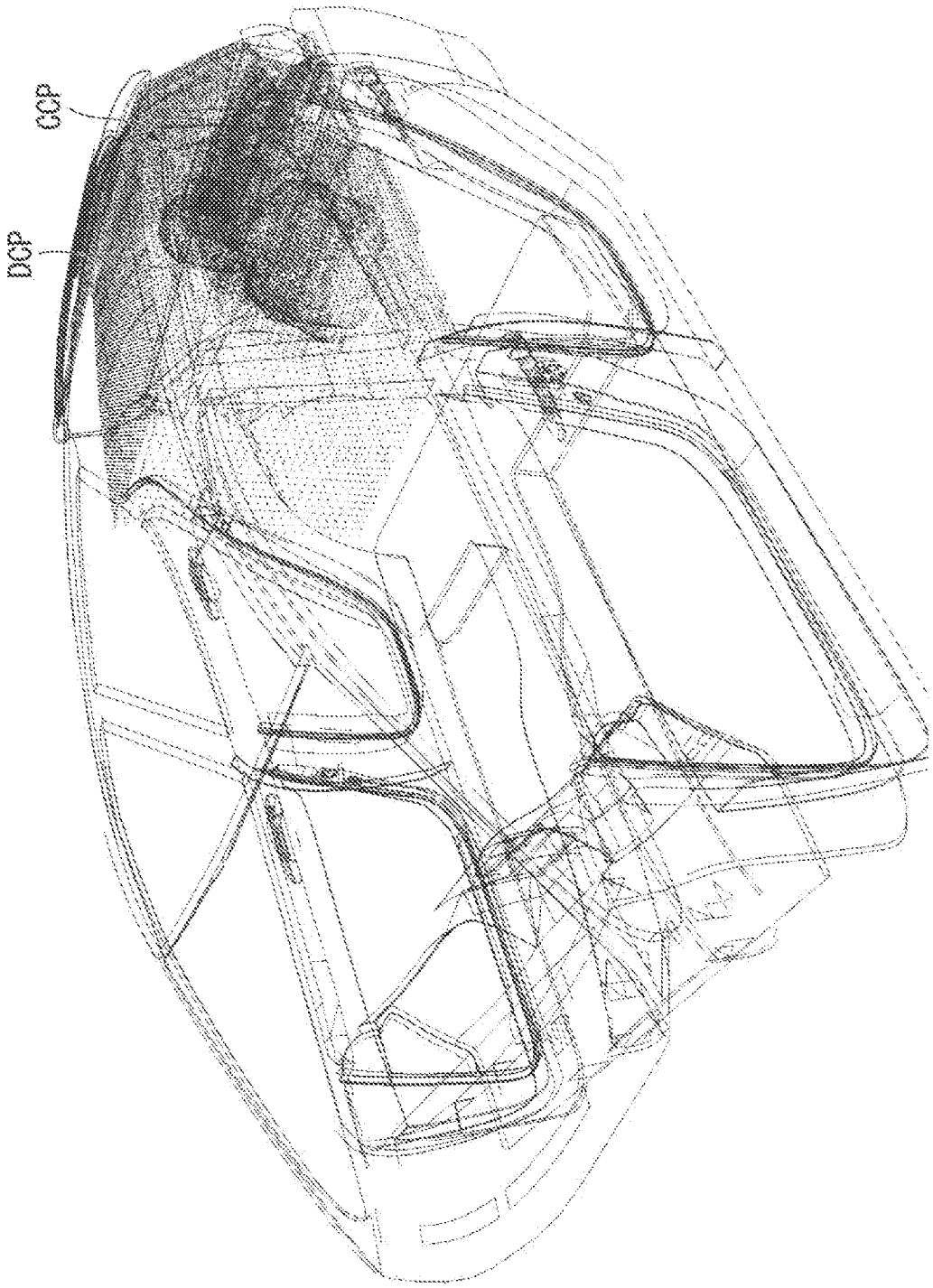
[図26]



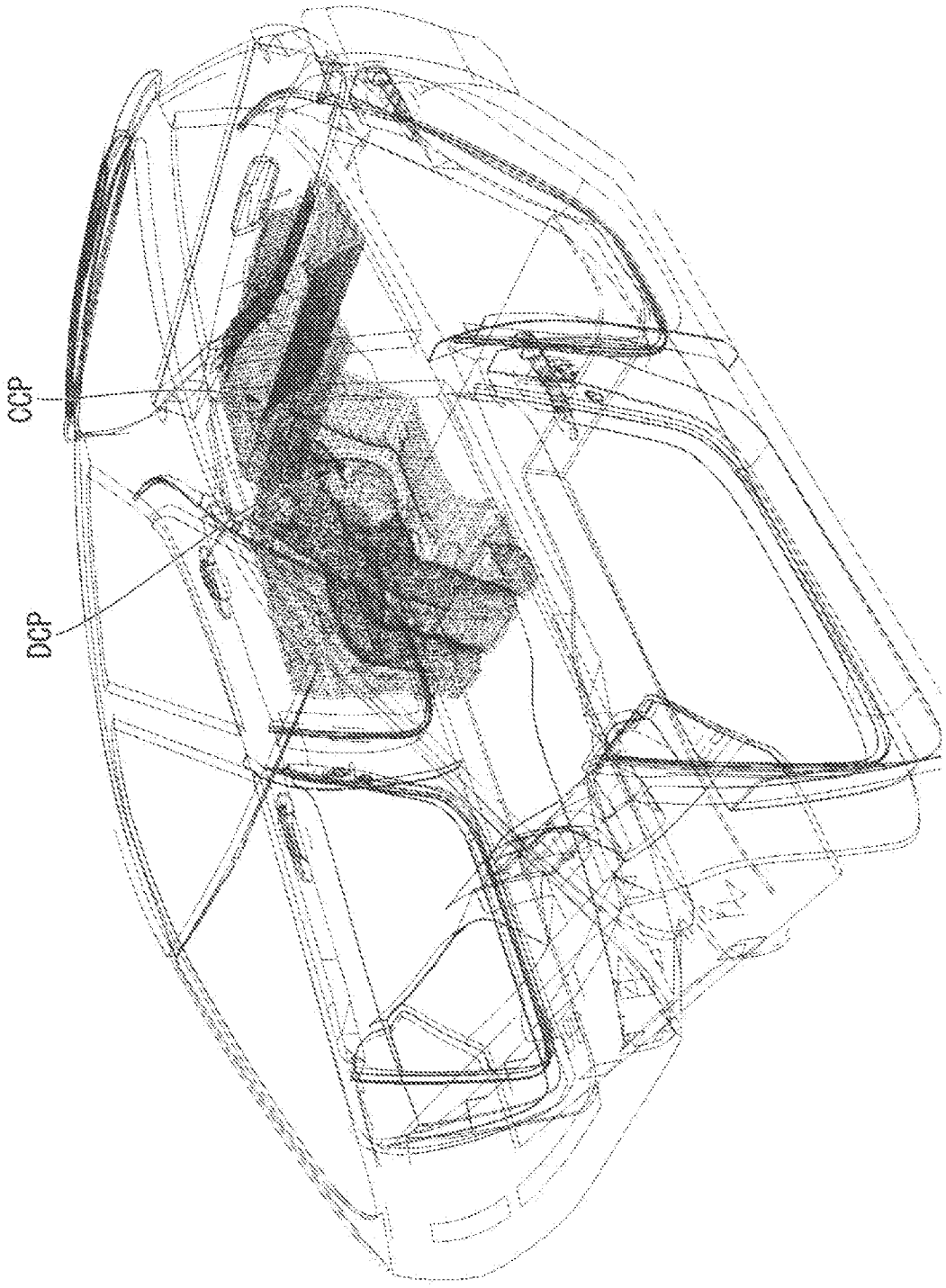
[図27]



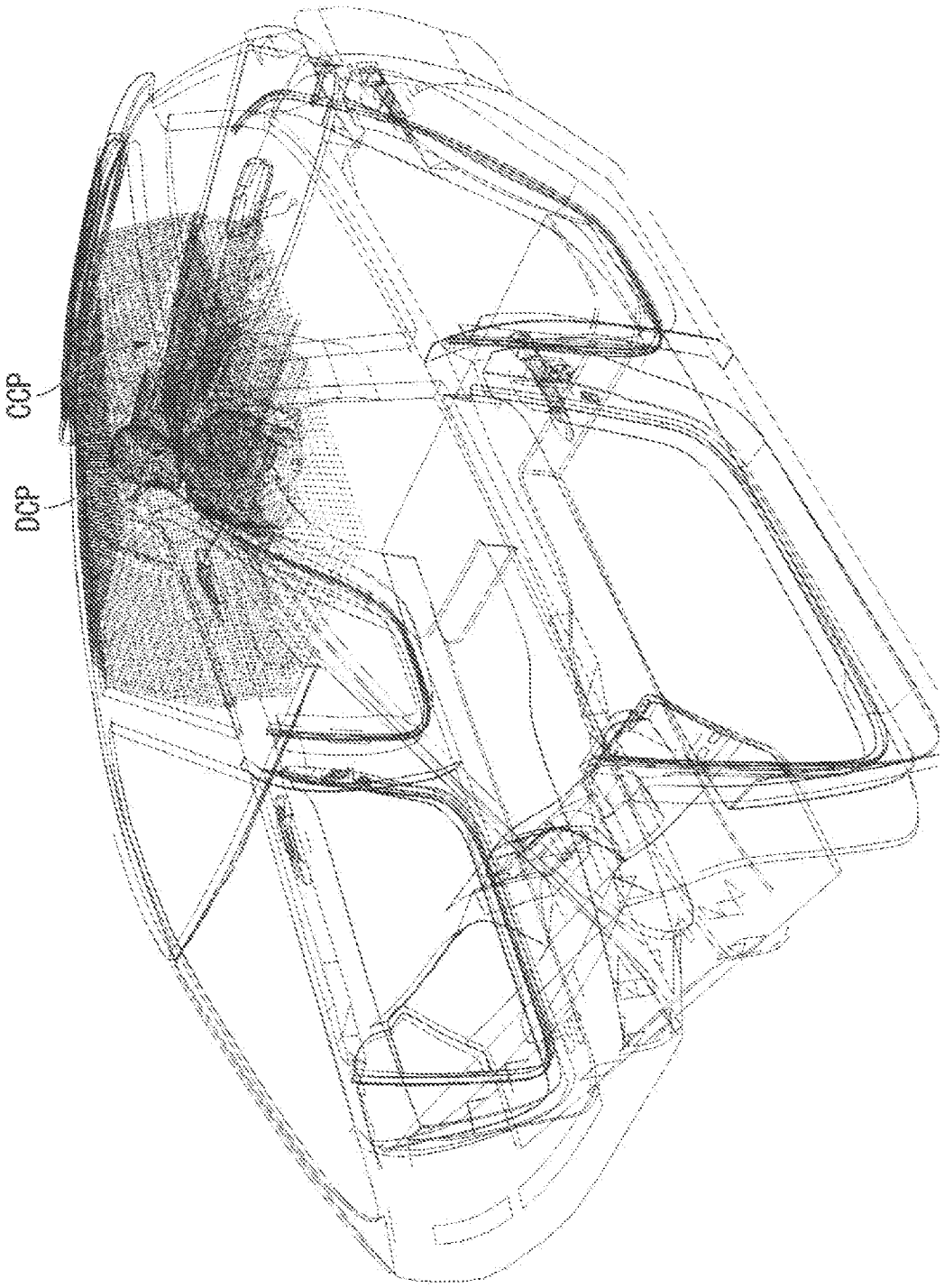
[図28]



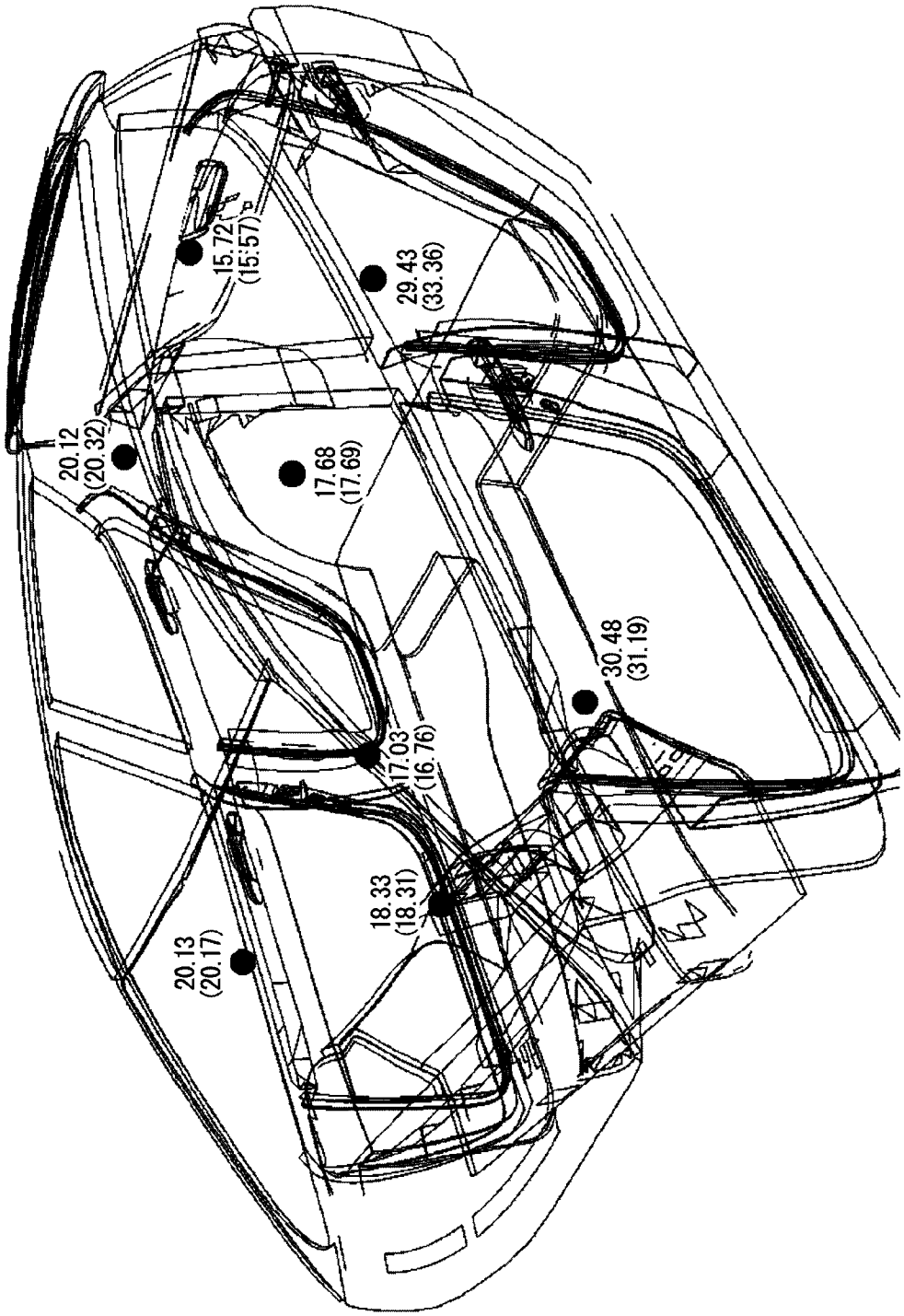
[図29]



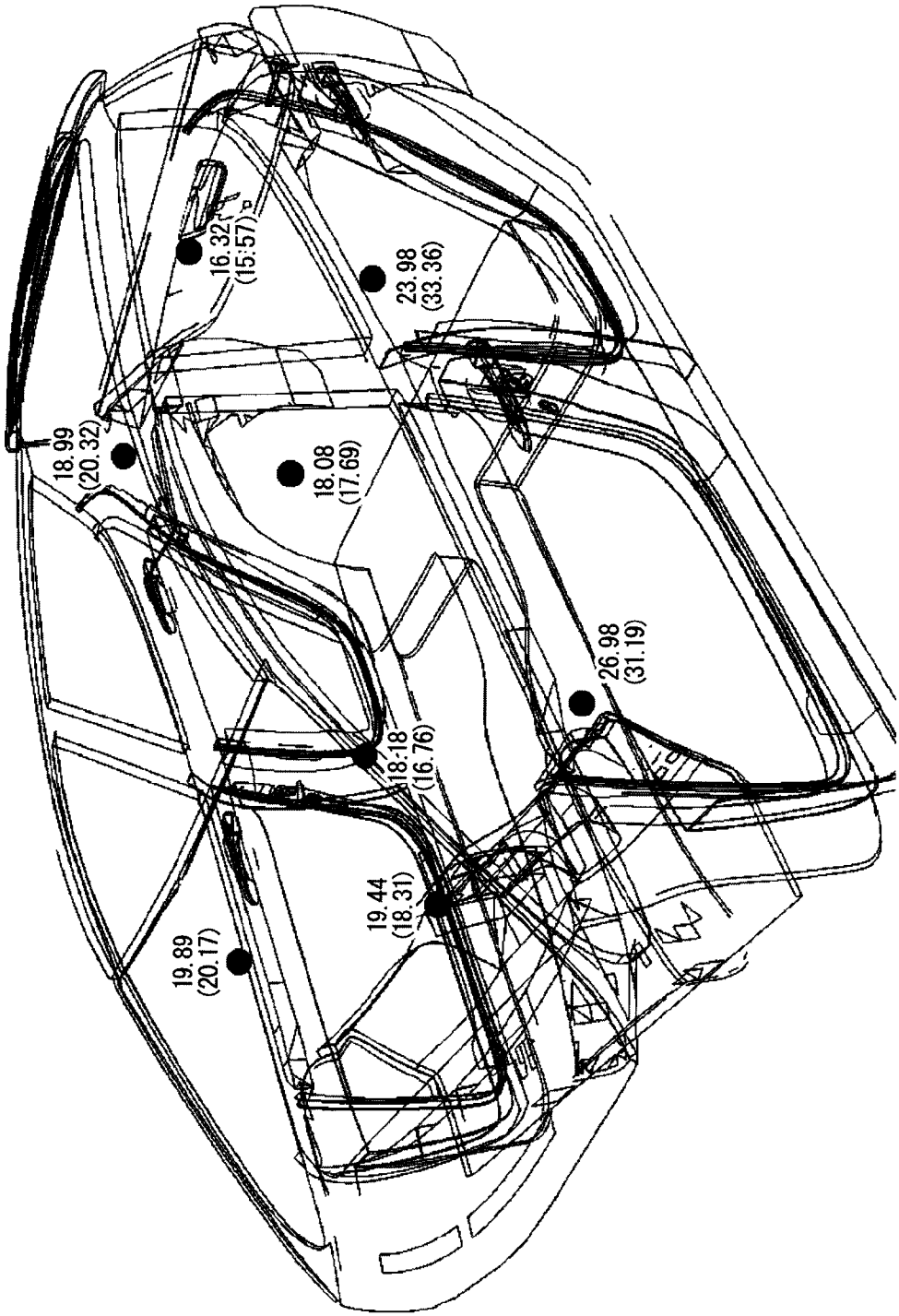
[図30]



[図31]


15.72
(15.57)
29.43
(33.36)
20.12
(20.32)
17.68
(17.69)
30.48
(31.19)
17.03
(16.76)
18.33
(18.31)
20.13
(20.17)

[図32]


16.32
(15.57)
23.98
(33.36)
18.99
(20.32)
18.08
(17.69)
26.98
(31.19)
18.18
(16.76)
19.44
(18.31)
19.89
(20.17)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2018/043832

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int. Cl. G16Z99/00(2019.01)i, 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. G16Z99/00, G06F17/50

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)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2012/026383 A1 (ASAHI GLASS CO., LTD.) 01 March 2012, entire text, all drawings & US 2013/0173239 A1 & EP 2610772 A1 & CN 103080941 A & KR 10-2013-0098306 A & RU 2013112926 A	1-13
A	WO 2010/150758 A1 (ASAHI GLASS CO., LTD.) 29 December 2010, entire text, all drawings & US 2012/0095738 A1 & EP 2455874 A1 & CN 102804187 A & KR 10-2012-0047863 A & RU 2012102394 A	1-13

☒ 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	Date of mailing of the international search report
15.01.2019	22.01.2019
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/JP2018/034232

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	大畠明, モデルベース開発のための複合物理領域モデリング, 初版, TechShare 株式会社, 30 November 2012, pp. 55-65, ISBN 978-4-906864-02-7, non-official translation (OHATA, Akira. Complex Physical Region Modeling for Model-Based Development. First Edition, TechShare Inc.)	1-13

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１８／０４３８３２

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, 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.　G16Z99/00, G06F17/50

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）

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	WO 2012/026383 A1 (旭硝子株式会社) 2012.03.01, 全文, 全図 & US 2013/0173239 A1 & EP 2610772 A1 & CN 103080941 A & KR 10-2013-0098306 A & RU 2013112926 A	1-13
A	WO 2010/150758 A1 (旭硝子株式会社) 2010.12.29, 全文, 全図 & US 2012/0095738 A1 & EP 2455874 A1 & CN 102804187 A & KR 10-2012-0047863 A & RU 2012102394 A	1-13

☑　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	国際調査報告の発送日
１５．０１．２０１９	２２．０１．２０１９

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ）
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）　５Ｌ　３７９６
宮地　匡人
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	大畠　明，モデルベース開発のための複合物理領域モデリング，初版，ＴｅｃｈＳｈａｒｅ株式会社，2012.11.30，pp.55-65，ISBN 978-4-906864-02-7	1-13