

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2021-88971

(P2021-88971A)

(43) 公開日 令和3年6月10日(2021.6.10)

(51) Int. Cl.

F03D 7/00 (2006.01)

F I

F03D 7/00

テーマコード(参考)

3H178

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2019-220518 (P2019-220518)

(22) 出願日 令和1年12月5日(2019.12.5)

(71) 出願人 504145342

国立大学法人九州大学  
福岡県福岡市西区元岡744

(71) 出願人 317015294

東芝エネルギーシステムズ株式会社  
神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34

(74) 代理人 100091982

弁理士 永井 浩之

(74) 代理人 100091487

弁理士 中村 行孝

(74) 代理人 100105153

弁理士 朝倉 悟

(74) 代理人 100107582

弁理士 関根 毅

最終頁に続く

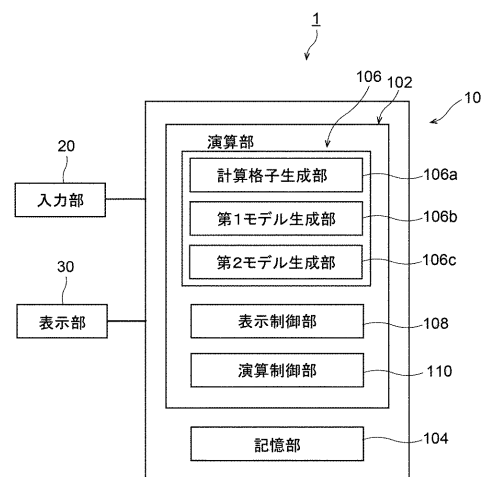
(54) 【発明の名称】 風車後流演算装置、及び風車後流演算方法

(57) 【要約】

【課題】 風車における後流の状態をより少ない演算回数でより高精度に演算可能な風車後流演算装置、及び風車後流演算方法を提供する。

【解決手段】 本実施形態に係る風車後流演算装置は、複数の計算格子で構成されるメッシュモデルを生成する計算格子生成部と、ブレードの回転中心から第1径までの範囲の少なくとも一部に対応する計算格子の範囲に、風車ロータの受風面を固定された抵抗体としてモデル化したアクチュエータディスク部を生成する第1モデル生成部と、第1径からロータ径までの範囲の少なくとも一部に対応する計算格子の範囲に、風車ロータの受風面を遮蔽部としてモデル化した固体部を生成する第2モデル生成部と、支配方程式に基づき、アクチュエータディスク部及び固体部を用いて計算格子毎の風速及び風向を演算する演算制御部と、を備える。

【選択図】 図1



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

複数の計算格子で構成されるメッシュモデルを生成する計算格子生成部と、  
ブレードの回転中心から第 1 径までの範囲の少なくとも一部に対応する前記計算格子の範囲に、風車ロータの受風面を固定された抵抗体としてモデル化したアクチュエータディスク部を生成する第 1 モデル生成部と、  
前記第 1 径からロータ径までの範囲の少なくとも一部に対応する前記計算格子の範囲に、前記風車ロータの受風面を遮蔽部としてモデル化した固体部を生成する第 2 モデル生成部と、  
支配方程式に基づき、前記アクチュエータディスク部及び前記固体部を用いて前記計算格子毎の風速及び風向を演算する演算制御部と、  
を備える、風車後流演算装置。

10

**【請求項 2】**

前記第 1 径は、前記ブレードの翼弦長が最大となる半径位置からロータ径までの間の任意の径に対応する、請求項 1 に記載の風車後流演算装置。

**【請求項 3】**

前記第 1 モデル生成部は、前記アクチュエータディスク部の計算格子の流れ方向の少なくとも一つ上流側の格子における水平方向流速ベクトルに基づき、前記アクチュエータディスク部の外力項を与える、請求項 1 又は 2 に記載の風車後流演算装置。

**【請求項 4】**

前記第 1 モデル生成部は、アクチュエータディスク部の計算格子の流れ方向の少なくとも一つ上流側の格子における流速ベクトルに基づき、前記アクチュエータディスク部の外力項を与える、請求項 1 又は 2 に記載の風車後流演算装置。

20

**【請求項 5】**

前記第 1 モデル生成部は、前記アクチュエータディスク部の計算格子の流れ方向の少なくとも一つ上流側の格子における水平方向絶対流速と鉛直方向絶対流速との比に基づき、ディスク部の外力項を与える、請求項 1 又は 2 に記載の風車後流演算装置。

**【請求項 6】**

前記第 1 モデル生成部は、アクチュエータディスク部の計算格子の流れ方向の少なくとも一つ上流側の格子における鉛直方向絶対流速と、さらに少なくとも一つ上流側の格子における鉛直方向絶対流速の比に基づき、ディスク部の外力項を与える、請求項 1 又は 2 に記載の風車後流演算装置。

30

**【請求項 7】**

前記第 1 モデル生成部は、複数の風車の配置位置に基づき、前記計算格子内の複数の位置に対応させて複数の前記アクチュエータディスク部を生成し、

前記第 2 モデル生成部は、前記複数の風車の配置位置に基づき、前記計算格子内の複数の位置に対応させて複数の前記固体部を生成し、

前記演算制御部は、前記複数のアクチュエータディスク部及び前記複数の固体部を用いて前記計算格子の計算格子毎の風速の時間変化を演算し、

前記複数の風車の配置位置の少なくとも一つに配置される風車に対して、前記複数の風車の中の他の風車の影響を評価する評価部を更に備える、請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の風車後流演算装置。

40

**【請求項 8】**

評価対象の土地における 3 次元の地形データを生成する土地データ生成部を更に備え、  
前記第 1 モデル生成部及び前記第 2 モデル生成部は、前記地形データに基づいて、前記第 1 径の半径位置を変更する、請求項 1 乃至 7 のいずれか一項に記載の風車後流演算装置。

**【請求項 9】**

評価対象の土地における 3 次元の地形データを生成する土地データ生成部を更に備え、  
前記計算格子生成部は、前記メッシュモデルを生成する場合に底面部の形状を前記土地

50

データ生成部が生成した3次元の地形データに基づき設定する、請求項1乃至7のいずれか一項に記載の風車後流演算装置。

【請求項10】

評価対象の土地における流入風速データを生成する風速データ生成部を更に備え、

前記演算制御部は、前記風速データ生成部が生成した流入風速データに基づき、前記計算格子に風速データを設定する、請求項1乃至9のいずれか一項に記載の風車後流演算装置。

【請求項11】

複数の計算格子で構成されるメッシュモデルを生成する計算格子生成工程と、

ブレードの回転中心から第1径までの範囲の少なくとも一部に対応する前記計算格子の範囲に、風車ロータの受風面を固定された抵抗体としてモデル化したアクチュエータディスク部を生成する第1モデル生成工程と、

前記第1径からロータ径までの範囲の少なくとも一部に対応する前記計算格子の範囲に、前記風車ロータの受風面を遮蔽部としてモデル化した固体部を生成する第2モデル生成工程と、

支配方程式に基づき、前記アクチュエータディスク部及び前記固体部を用いて前記計算格子毎の風速及び風向を演算する演算制御工程と、

を備える、風車後流演算方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、風車後流演算装置、及び風車後流演算方法に関する。

【背景技術】

【0002】

風車を用いた風力発電機(WTG: Wind Turbine Generator)は、脱化石燃料、CO<sub>2</sub>削減に対してコストパフォーマンスが高いことが一般に知られている。このため、数基の風力発電機から数十基以上の風力発電機から構成される大型のウィンドファーム(WF: Wind Farm)に至るまで、風力発電施設は急速に増加している。

【0003】

日本の陸上風力発電では、山岳地域に大型の風車を複数基集中的に建設せざるを得ない状況になりつつある。このため、風車相互の干渉により全体の発電電力量が低下しないように、その離隔距離を決める後流の状態を評価する後流解析モデル(ウエイクモデル)の開発が重要視されている。さらに、風車の大型化などにともない、風車における後流の状態を現実的な演算回数で演算可能な後流解析モデルの開発が望まれている。また、洋上風力発電においても、後流の状態評価の重要性は同等である。

【0004】

このような後流解析モデルとして、固体円板やアクチュエータディスクを用いたモデルなどが知られている。ところが、固体円板モデルでは風車後流の速度欠損の状態、及びアクチュエータディスクモデルでは風車後流と外部流の運動量の交換の状態それぞれ再現性が低くなる傾向が一般的に知られている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2010-127235号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

本発明が解決しようとする課題は、風車における後流の状態をより少ない演算回数で演算可能な風車後流演算装置、及び風車後流演算方法を提供することである。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0007】

本実施形態に係る風車後流演算装置は、複数の計算格子で構成されるメッシュモデルを生成する計算格子生成部と、ブレードの回転中心から第1径までの範囲の少なくとも一部に対応する計算格子の範囲に、風車ロータの受風面を固定された抵抗体としてモデル化したアクチュエータディスク部を生成する第1モデル生成部と、第1径からロータ径までの範囲の少なくとも一部に対応する計算格子の範囲に、風車ロータの受風面を遮蔽部としてモデル化した固体部を生成する第2モデル生成部と、支配方程式に基づき、アクチュエータディスク部及び固体部を用いて計算格子毎の風速及び風向を演算する演算制御部と、を備える。

10

## 【発明の効果】

## 【0008】

本実施形態によれば、風車における後流の状態をより少ない演算回数でより高精度に再現することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0009】

【図1】本実施形態に係る風車後流演算装置の構成を示すブロック図。

【図2】複数の計算格子で構成されるメッシュモデルを示す図。

【図3】ナビエ・ストークス方程式を示す図。

【図4】アクチュエータディスク部と固体部の設定範囲を模式的に示す図。

20

【図5】第1径を示す図。

【図6】風車モデルのロータ部を正面から見た図。

【図7】風車モデルを側面から見た図。

【図8】外力項を計算するための各変数の関係を示す図。

【図9】風車の正、側面図。

【図10】風車の側面図。

【図11】風車後流の演算結果例を示す図。

【図12】風車後流演算装置における演算処理の流れを示すフローチャート。

【図13】ピッチ角を変更する場合の演算処理の流れを示すフローチャート。

【図14】第2実施形態に係る風車後流演算装置の構成を示すブロック図。

30

【図15】風車の後流状態の演算を実際の気象データを用いて行った例を示す図。

## 【発明を実施するための形態】

## 【0010】

以下、本発明の実施形態に係る風車後流演算装置、及び風車後流演算方法について、図面を参照しながら詳細に説明する。なお、以下に示す実施形態は、本発明の実施形態の一例であって、本発明はこれらの実施形態に限定して解釈されるものではない。また、本実施形態で参照する図面において、同一部分又は同様な機能を有する部分には同一の符号又は類似の符号を付し、その繰り返しの説明は省略する場合がある。また、図面の寸法比率は説明の都合上実際の比率とは異なる場合や、構成の一部が図面から省略される場合がある。

40

## 【0011】

(第1実施形態)

## 【0012】

図1は、本実施形態に係る風車後流演算装置1の構成を示すブロック図である。図1に示すように、本実施形態に係る風車後流演算装置1は、風車における後流の状態を演算し、解析する装置であり、風車後流演算部10と、入力部20と、表示部30とを備えて構成されている。

## 【0013】

風車後流演算部10は、風車における後流の状態を演算する。風車後流演算部10の詳細な構成は、後述する。

50

## 【 0 0 1 4 】

入力部 2 0 は、操作者からの各種の入力操作を受け付け、受け付けた入力情報を風車後流演算部 1 0 に出力する。例えば、入力部 2 0 は、地形データや複数の風車の配置位置の情報を含む配置条件と、風向、風速、および乱流強度などの風の流入条件と、風車形状などの風車に関する情報等を操作者から受け付ける。例えば、入力部 2 0 は、マウスやキーボード、トラックボール、スイッチ、ボタン、ジョイスティック等により実現される。

## 【 0 0 1 5 】

表示部 3 0 は、各種の情報を表示する。例えば、表示部 3 0 は、風車後流演算部 1 0 によって解析された風車後流の状態を示す画像を表示する。例えば、表示部 3 0 は、液晶ディスプレイや CRT ( Cathode Ray Tube ) ディスプレイ等によって構成される。

10

## 【 0 0 1 6 】

ここで、風車後流演算部 1 0 の詳細な構成を説明する。風車後流演算部 1 0 は、入力部 2 0 から入力される入力情報から風車後流の状態を演算する。本実施形態においては、風車後流演算部 1 0 は、演算部 1 0 2 と、記憶部 1 0 4 とを有する。この演算部 1 0 2 は、モデル生成部 1 0 6 と、表示制御部 1 0 8 と、演算制御部 1 1 0 と、を有する。演算部 1 0 2 の詳細は後述する。

## 【 0 0 1 7 】

記憶部 1 0 4 は、例えば、RAM ( Random Access Memory )、フラッシュメモリ等の半導体メモリ素子、ハードディスク、光ディスク等により実現される。記憶部 1 0 4 は、例えば、風速データ、地形データ、及び風車形状に関するデータ、演算結果などを格納する。また、記憶部 1 0 4 は、各種のプログラムを格納する。

20

## 【 0 0 1 8 】

ここで、演算部 1 0 2 の詳細な構成を説明する。図 1 における実施形態では、モデル生成部 1 0 6、表示制御部 1 0 8、演算制御部 1 1 0 にて行われる各処理機能は、コンピュータによって実行可能なプログラムの形態で記憶部 1 0 4 に格納されている。演算部 1 0 2 はプログラムを記憶部 1 0 4 から読み出し、実行することで、各プログラムに対応する機能を実現するプロセッサである。換言すると、各プログラムを読み出した状態の処理回路は、図 1 の演算部 1 0 2 内に示された各機能を有することとなる。ここで、プロセッサという文言は、例えば、CPU ( Central Processing Unit )、GPU ( Graphics Processing Unit )、或いは、特定用途向け集積回路 ( Application Specific Integrated Circuit : ASIC )、プログラマブル論理デバイス ( 例えば、単純プログラマブル論理デバイス ( Simple Programmable Logic Device : SPLD )、複合プログラマブル論理デバイス ( Complex Programmable Logic Device : CPLD )、及び、フィールドプログラマブルゲートアレイ ( Field Programmable Gate Array : FPGA ) 等の回路を意味する。

30

## 【 0 0 1 9 】

モデル生成部 1 0 6 は、風車の後流解析モデルを生成する。このモデル生成部 1 0 6 は、計算格子生成部 1 0 6 a と、第 1 モデル生成部 1 0 6 b と、第 2 モデル生成部 1 0 6 c とを有する。

40

## 【 0 0 2 0 】

図 2 は、複数の計算格子 4 0 a で構成されるメッシュモデル 4 0 を示す図である。主流方向を x で示し、水平方向を y で示し、鉛直方向を z で示している。図 2 中には、風車に対応する領域 4 2 が示されている。図 2 に示すように、計算格子生成部 1 0 6 a は、複数の計算格子 4 0 a で構成されるメッシュモデル 4 0 を生成する。より詳細には、計算格子生成部 1 0 6 a は、本実施形態に係る支配方程式であるナビエ・ストークス ( Navier - Stokes ) 方程式に基づき物理量を算出するためのメッシュモデル 4 0 を生成する。また、ここで、支配方程式とは、メッシュモデル内の物理法則を数学的な方程式で表

50

したものである。

#### 【 0 0 2 1 】

図 3 は、支配方程式の例を示す図である。図 3 に示すように、支配方程式は、ナビエ・ストークス方程式であり、 $\rho$  は流体の密度、 $\mu$  は流体の動粘性係数を示す。また、ナビエ・ストークス方程式には、後述する風車ロータから受ける力の外力項  $F$  が加えられている。 $(F_x, F_y, F_z)$  は外力項  $F$  の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の外力を示す。このように、本実施形態に係る演算では計算格子  $40a$  毎にナビエ・ストークス方程式が演算される。より詳細には計算格子  $40a$  の座標中心  $40b$  毎にナビエ・ストークス方程式が演算される。

#### 【 0 0 2 2 】

図 4 乃至図 7 に基づき、風車 2 のモデルについて説明する。

10

図 4 は、風車 2 の後流解析モデル 50 におけるアクチュエータディスク部 52 と固体部 54 の設定範囲を模式的に示す図である。図 4 では流入風 4 と、風車後流と外部流の境界 8 を更に示している。

#### 【 0 0 2 3 】

図 5 は、風車 2 のブレード 2a を示す図である。図 5 に示すように、第 1 径 46 は、ブレードの翼弦長が最大となる位置からロータ径までの間の任意の径とする。

#### 【 0 0 2 4 】

図 6 は、風車 2 のモデルにおけるロータ部を正面から見た図であり、後流解析モデル 50 におけるアクチュエータディスク部 52 と固体部 54 の範囲を模式的に示す図である。後流解析モデル 50 は、風車 2 の受風面をモデル化する。すなわち、後流解析モデル 50 の外側の円内の領域が受風面を示している。図 7 は、風車 2 のモデルを側面から見た図であり、風車 2 のナセル 2b と、タワー 2c と、アクチュエータディスク部 52 と、固体部 54 とを模式的に示す図である。

20

#### 【 0 0 2 5 】

図 4 乃至図 7 に示すように、ブレードの回転中心から第 1 径 46 (図 5) までの範囲に対応するメッシュモデル 40 (図 2) の範囲にアクチュエータディスク部 52 が配置される。また、第 1 径 46 からロータ径までの範囲に対応するメッシュモデル 40 (図 2) の範囲に、固体部 54 が配置される。

#### 【 0 0 2 6 】

このように、本実施形態に係る第 1 モデル生成部 106b (図 1) は、例えばブレードの回転中心から第 1 径 46 までの範囲の少なくとも一部に対応するメッシュモデル 40 (図 2) の範囲に、アクチュエータディスク部 52 を生成する。

30

#### 【 0 0 2 7 】

本実施形態に係る第 2 モデル生成部 106c は、例えば第 1 径 46 からロータ径までの範囲に対応するメッシュモデル 40 (図 2) の範囲を固体の同心円板として固体部 54 を生成する。そして、固体部 54 に含まれる計算格子  $40a$  (図 2) には流速ゼロの条件を与える。第 1 モデル生成部 106b 及び第 2 モデル生成部 106c の詳細は後述する。なお、本実施形態に係る第 2 モデル生成部 106c は、固体の同心円板として固体部 54 を生成するが、この形状に限定されない。

#### 【 0 0 2 8 】

40

なお、本実施形態では、ブレードの回転中心から第 1 径 46 までの範囲にアクチュエータディスク部 52 を生成するが、これに限定されない。例えば、ナセル前方のハブに対応する領域を固体にするなど、ブレードの回転中心から第 1 径 46 までの範囲の一部の範囲に他のモデルを配置してもよい。このように、ブレードの揚力係数  $C_L$  が比較的低い範囲にアクチュエータディスク部 52 を配置することで、風車後流の速度欠損をより正確に再現できる。

#### 【 0 0 2 9 】

一方で、ブレードの揚力係数  $C_L$  が比較的高い範囲に固体部 54 を配置することで、風車背後の後流と外部流の運動量の交換をより高精度にモデル化できる。これにより、風車背後の後流と外部流の境界の広がり (図 4) を高精度に再現できる。

50

## 【 0 0 3 0 】

ここで、第 1 モデル生成部 1 0 6 b の詳細な構成例を説明する。図 8 は、外力項 (  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  ) を計算するための各変数の関係を示す図である。図 8 に示すように、第 1 モデル生成部 1 0 6 b は、アクチュエータディスク近似を用いてアクチュエータディスク部 5 2 を生成する。より具体的には、第 1 モデル生成部 1 0 6 b は、ブレードの回転中心から第 1 径 4 6 ( 図 5 ) までの範囲に対応する計算格子 4 0 a ( 図 2 ) 毎の外力項 (  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  ) ( 図 3 ) を任意の半径位置  $r$ 、すなわち回転中心から距離  $r$  における翼弦長  $c$ 、抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$ 、ブレードへの流入迎角  $\alpha$ 、ピッチ角  $\gamma$  の関数として生成する。これらの第 1 径 4 6、距離  $r$  における翼弦長  $c$ 、抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$ 、ブレードへの流入迎角  $\alpha$ 、ピッチ角  $\gamma$  は、予め風車のタイプ別に記憶部 1 0 4 に格納されている。これにより、第 1 モデル生成部 1 0 6 b は、アクチュエータディスク部 5 2 内の計算格子 4 0 a 毎に、ブレードが回転することで発生する接線力とスラスト力を、流体が受ける主流方向および回転方向の反力として、ナビエ・ストークス方程式の外力項 (  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  ) ( 図 3 ) に付加する。抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$  は、風車の設計データを用いて演算してもよい。なお、本実施形態に係る外力項 (  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  ) ( 図 3 ) が、受風面における流体抵抗に対応する。

10

## 【 0 0 3 1 】

より詳細には、第 1 モデル生成部 1 0 6 b は、まず、( 1 ) 式、及び ( 2 ) 式に示すように、ロータ平面が主流方向  $X$  と正対する風車 ( 図 2 ) における、回転中心からブレードの半径方向に距離  $r$  の位置の翼素  $dr$  に作用する揚力  $dF_L$  および抗力  $dF_D$  と相対風速  $V$  との関係を実算する。

20

## 【 数 1 】

$$dF_L = C_L \frac{1}{2} \rho V^2 c dr \quad (1)$$

## 【 数 2 】

$$dF_D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 c dr \quad (2)$$

ここで、 $c$  は翼弦長、 $V$  は相対風速である。

## 【 0 0 3 2 】

次に、第 1 モデル生成部 1 0 6 b は、( 3 ) 式、及び ( 4 ) 式に示すように、推力  $dF_x$  および接線力  $dF_\theta$  を演算する。

## 【 数 3 】

$$dF_x = dF_L \cos(\alpha + \gamma) + dF_D \sin(\alpha + \gamma) \quad (3)$$

## 【 数 4 】

$$dF_\theta = dF_L \sin(\alpha + \gamma) - dF_D \cos(\alpha + \gamma) \quad (4)$$

40

## 【 0 0 3 3 】

次に、第 1 モデル生成部 1 0 6 b は、( 5 ) 式、及び ( 6 ) 式に示すように、原点に位置する回転中心から半径方向に  $r$  のポイントにおける流体がロータから受ける体積力の  $X$  方向成分  $f_x$  および  $Y$  方向成分  $f_y$  を演算する。ここで、ブレード枚数は  $B$  であり、 $R$  は第 1 径 4 6 に対応する。そして、第 1 モデル生成部 1 0 6 b は、 $f_x$  を外力項  $F$  ( 図 3 ) の  $F_x$  成分として出力し、 $f_y$  をそれぞれの方向に分解して、 $F_y$ 、 $F_z$  成分として出力する。 $t$  はアクチュエータディスク部 5 2 の厚みを示している。

50

【数 5】

$$f_x = \begin{cases} -\frac{B}{2\pi r} \frac{dF_x}{\Delta_x dr}, & -\frac{\Delta_x}{2} \leq x \leq \frac{\Delta_x}{2}, r \leq R \\ 0, & \text{その他} \end{cases} \quad (5)$$

【数 6】

$$f_\theta = \begin{cases} -\frac{B}{2\pi r} \frac{dF_\theta}{\Delta_x dr}, & -\frac{\Delta_x}{2} \leq x \leq \frac{\Delta_x}{2}, r \leq R \\ 0, & \text{その他} \end{cases} \quad (6)$$

【0034】

図9は、風車2の正、側面図である。図9に示すように、風車2の後流解析モデル50の範囲は、上述のように正面から見ると円2dの範囲内であり、側面から見ると例えばブレードを囲む2dの範囲である。すなわち、アクチュエータディスク部52の厚みxを2dの範囲に設定する。ブレードを囲む2dの範囲は、例えばブレードに外接する円柱体

20

【0035】

図10は、風車2の側面図である。図10に示すように、風車2の受風面が地表面に対して任意のチルト角度を持って傾くと、アクチュエータディスク部52の厚みxの範囲もチルト角度の傾きに応じて変更される。これにより、風車2の受風面の傾きに応じた風車2の後流の状態を演算可能となる。

【0036】

また、第1モデル生成部106bは、アクチュエータディスク部52の計算格子40aの流れ方向の少なくとも一つ上流側の格子における水平方向流速ベクトル、すなわち2次元の流速ベクトル(図2のx、y)に基づき、アクチュエータディスク部52の外力項を

30

【0037】

また、本実施形態に係る第1モデル生成部106bは、アクチュエータディスク部52の計算格子40aの流れ方向の少なくとも一つ上流側の格子における流速ベクトル、すなわち3次元の流速ベクトルに基づき、アクチュエータディスク部52の外力項を与えてもよい。これにより、全方向の流入風4(図4)に対する風車2の後流をより高精度に演算可能となる。このように、アクチュエータディスク部52の外力項の計算はアクチュエータディスク部52の計算格子40aの流れ方向の少なくとも一つ上流側の格子情報に基づき計算可能である。

【0038】

さらにまた、第1モデル生成部106bは、アクチュエータディスク部52の計算格子40aの流れ方向の少なくとも一つ上流側の格子におけるにおける水平方向(図2のx、y方向)絶対流速と鉛直方向絶対流速(図2のz方向)との比に基づき、ディスク部の外力項を与えてもよい。これにより、流入風4(図4)の向きが鉛直方向の流速成分を有する場合の風車における後流の状態をより高精度に演算可能となる。

40

【0039】

また、第1モデル生成部106bは、アクチュエータディスク部52の計算格子40aの流れ方向一つ上流側の格子における鉛直方向絶対流速(図2のz方向)と、さらに一つ上流側の格子における鉛直方向絶対流速(図2のz方向)との比に基づき、ディスク部の外力項を与えてもよい。これにより、流入風4(図4)の向きが鉛直方向の流速成分を有

50



する場合の、風速の変化の程度を反映可能となり、風車における後流の状態をさらに高精度に演算可能となる。

【 0 0 4 0 】

このように、アクチュエータディスク近似を用いたアクチュエータディスク部 5 2 では、ブレード 2 a が回転することで発生する接線力とスラスト力を、流体が受ける主流方向および回転方向の反力として、ナビエ・ストークス方程式に外力項として付加することが可能となる。これにより、物体としての壁面境界条件を無くすことができ、抵抗体としての減速効果を考慮できる。

【 0 0 4 1 】

ここで、第 2 モデル生成部 1 0 6 c の詳細な構成を説明する。第 2 モデル生成部 1 0 6 c は、第 1 径 4 6 ( 図 5 ) からロータ径までの範囲の形状をドーナツ状の同心円の固体部 5 4 として生成する。より詳細には、第 2 モデル生成部 1 0 6 c は、第 1 径 4 6 からロータ径までの範囲に対応するメッシュモデル 4 0 ( 図 2 ) の範囲をドーナツ状の同心円板として固体部 5 4 を生成する。第 2 モデル生成部 1 0 6 c は、固体部 5 4 には流速ゼロの条件を与える。

10

【 0 0 4 2 】

また、第 2 モデル生成部 1 0 6 c は、ナセル 2 b、タワー 2 c ( 図 7 ) の形状をモデル化し、ナセル 2 b、タワー 2 c に含まれる計算格子 4 0 a ( 図 2 ) には流速ゼロの条件を与える。なお、ナセル 2 b、タワー 2 c に関してはモデル化してもよいし、或いは、モデル化しなくてもよい。

20

【 0 0 4 3 】

表示制御部 1 0 8 は、演算部での演算結果を図示して表示部 3 0 に表示させる。例えば、風速に応じた濃淡処理、色処理などを行うことにより、風車後流状態の視認性をより向上させる処理を行う。

【 0 0 4 4 】

演算制御部 1 1 0 は、入力部 2 0 から指示された演算条件にしたがい、モデル生成部 1 0 6 でのモデル生成を含め演算部 1 0 2 全体の制御を行う。より具体的には、計算格子生成部 1 0 6 a に対して計算格子 4 0 a の数、大きさ、形状などを指示して計算格子を生成させる。第 1 モデル生成部 1 0 6 b に対しては演算毎に外力項の値を生成させる。そして、支配方程式に従い、計算格子生成部 1 0 6 a が生成したメッシュモデル 4 0 の計算格子 4 0 a 毎の風向ベクトル、すなわち風速及び風向の演算を演算毎に実施する。

30

【 0 0 4 5 】

図 1 1 は、演算制御部 1 1 0 の制御により演算された風車後流の演算結果例を示す水平断面図である。主流方向を x で示し、水平方向を y で示している。

【 0 0 4 6 】

上側の図は、ブレードの回転中心からロータ径までの全範囲をアクチュエータディスク部 5 2 とした例である。上側の図は、所謂アクチュエータディスクモデルによる風車後流の演算結果に相当する。

【 0 0 4 7 】

風車 2 の後流解析モデル 5 0 におけるアクチュエータディスク部 5 2 だけで後流の状態を生成すると、風車背後の後流と外部流の運動量の交換 ( 図 4 ) が再現されないことがわかる。

40

【 0 0 4 8 】

下側の図は、ブレードの回転中心から第 1 径 4 6 ( 図 5 ) までの範囲をアクチュエータディスク部 5 2 とし、第 1 径 4 6 からロータ径までの範囲を固体部 5 4 とした例である。計算格子 4 0 a 毎の速度を濃淡で示している。

【 0 0 4 9 】

これらから分かるように、下側の図では固体部 5 4 により図 4 で示した風車背後の後流と外部流の運動量の交換の再現性が向上している。一方で、ブレードの回転中心から第 1 径 4 6 ( 図 5 ) までの範囲では、風車の速度欠損を再現する必要がある。下側の図ではア

50

クチュエータディスク部 5 2 を配置することで風車の速度欠損の再現性が維持されている。また、固体部 5 4 内では格子内の計算が不要であるので、上側の図よりも演算回数を低減できる。

【 0 0 5 0 】

このように、ブレードの回転中心から第 1 径 4 6 ( 図 5 ) までの範囲をアクチュエータディスク部 5 2 とし、第 1 径 4 6 からロータ径までの範囲を固体部 5 4 とすることで、風車 2 の速度欠損の再現性を維持しつつ、風車背後の後流と外部流の境界の広がり ( 図 4 の線 8 ) の再現性を向上させることができる。さらに、モデル全体をアクチュエータディスク部 5 2 とする場合よりも演算回数の低減が計れ、大規模な演算にもより適している。

【 0 0 5 1 】

図 1 2 は、風車後流演算装置 1 における演算処理の流れを示すフローチャートの一例である。

図 1 2 に示すように、操作者は、入力部 2 0 により演算に用いる風車 2 の受風面の情報を入力する ( ステップ S 1 0 0 ) 。操作者は、例えば表示部 3 0 に表示される風車形式の一覧の中から風車形式を選択する。続けて、演算制御部 1 1 0 は、選択された風車形式の受風面の情報を記憶部 1 0 4 から読み込み、第 1 モデル生成部 1 0 6 b 及び第 2 モデル生成部 1 0 6 c に供給する。また、演算制御部 1 1 0 は、選択された風車形式に従い、回転中心から距離  $r$  における翼弦長  $c$ 、抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$ 、ブレードへの流入迎角

の情報を記憶部 1 0 4 から読み込み、第 1 モデル生成部 1 0 6 b 及び第 2 モデル生成部 1 0 6 c に供給する。

【 0 0 5 2 】

次に、操作者は、入力部 2 0 により計算格子の生成条件、例えば風速、風向、乱流強度を含む流入風条件を計算条件として入力する ( ステップ S 1 0 2 ) 。演算制御部 1 1 0 は、入力された計算条件に従い、計算格子生成部 1 0 6 a に対して計算格子の数、大きさ、形状などを指示して計算格子を生成させる。

【 0 0 5 3 】

次に、演算制御部 1 1 0 は、計算格子生成部 1 0 6 a が生成した各計算格子 4 0 a に初期値を設定する ( ステップ S 1 0 4 ) 。

【 0 0 5 4 】

次に、演算制御部 1 1 0 は、時間  $t = 0$  として、演算を開始する。

【 0 0 5 5 】

次に、第 2 モデル生成部 1 0 6 d は、初期値に基づきブレードの第 1 径 4 6 からロータ径に対応するメッシュモデル 4 0 の範囲内の各計算格子 4 0 a に固体部 5 4 を設定し、流速ゼロの条件を与える ( ステップ S 1 0 8 ) 。

【 0 0 5 6 】

次に、第 1 モデル生成部 1 0 6 b は、各計算格子 4 0 a に設定された設定値 (  $t = 0$  の時は初期値 ) に基づきブレードの回転中心から第 1 径 4 6 に対応するメッシュモデル 4 0 の範囲内の各計算格子 4 0 a に外力項の値 ( 図 3 ) を設定し、アクチュエータディスク部 5 2 を生成する ( ステップ S 1 1 0 ) 。

【 0 0 5 7 】

次に、演算制御部 1 1 0 は、各計算格子 4 0 a に設定された設定値 (  $t = 0$  の時は初期値 ) に基づき、アクチュエータディスク部 5 2 内の各計算格子 4 0 a に対応する外力項の値 ( 図 3 ) を演算する ( ステップ S 1 1 2 ) 。続けて、演算制御部 1 1 0 は、各計算格子 4 0 a に対応するナビエ・ストークス方程式を演算し ( ステップ S 1 1 4 ) 、各物理量を演算する ( ステップ S 1 1 6 ) 。演算制御部 1 1 0 は、各物理量を記憶部 1 0 4 に格納すると共に、表示制御部 1 0 8 に各物理量の情報を含む信号を出力する。表示制御部 1 0 8 は、表示部 3 0 に風車 2 の後流の情報を含む画像を表示する。

【 0 0 5 8 】

次に、演算制御部 1 1 0 は、演算時間  $t$  が  $t_{max}$  未満か否かを判定し ( ステップ S 1 1 8 ) 、  $t$  が  $t_{max}$  未満であれば ( ステップ S 1 1 8 の NO ) 、各計算格子 4 0 a に新

10

20

30

40

50

たな設定値を設定し、ステップ S 1 1 0 からの演算を繰り返す。一方で、 $t$  が  $t_{max}$  以上であれば（ステップ S 1 1 8 の YES）、全体の処理を終了する。

【 0 0 5 9 】

図 1 3 は、ブレードの回転軸に対してブレードのピッチ角を変更する場合の演算処理の流れを示すフローチャートの一例である。図 1 2 と同等の処理には同一の番号を付して説明を省略する。

【 0 0 6 0 】

図 1 3 に示すように、演算制御部 1 1 0 は、ピッチ角を変更する際に抗力係数  $C_D$ 、及び揚力係数  $C_L$  を変更する（ステップ S 1 2 0）。このように、抗力係数  $C_D$ 、及び揚力係数  $C_L$  を変更することによりピッチ角の変更による風車 2 の後流の状態も演算可能である。

10

【 0 0 6 1 】

以上のように、本実施形態によれば、第 1 モデル生成部 1 0 6 b がブレードの回転中心から第 1 径 4 6 に対応するメッシュモデル 4 0 の範囲に、アクチュエータディスク部 5 2 を生成し、第 2 モデル生成部 1 0 6 c がブレードの第 1 径 4 6 からロータ径に対応するメッシュモデル 4 0 の範囲に、固体部 5 4 を生成することとした。これにより、風車 2 の速度欠損の再現性を維持しつつ風車 2 の後流と外部流の境界の広がり 8（図 4）の再現性を向上させることができる。さらに、モデル全体をアクチュエータディスク部 5 2 とする場合よりも演算回数の低減を計ることができる。

【 0 0 6 2 】

（第 2 実施形態）

第 2 実施形態に係る風車後流演算装置 1 は、気象データや土地の形状データを反映した風車 2 の後流の状態を演算できる点で第 1 実施形態に係る風車後流演算装置 1 と相違する。以下では、第 1 実施形態と相違する点に関して説明する。

20

【 0 0 6 3 】

図 1 4 は、第 2 実施形態に係る風車後流演算装置 1 の構成を示すブロック図である。図 1 4 に示すように、本実施形態に係る風車後流演算装置 1 は、風速データ生成部 1 1 2 と、土地データ生成部 1 1 4 と、評価部 1 1 6 とを更に備え点で第 1 実施形態に係る風車後流演算装置 1 と相違する。

【 0 0 6 4 】

風速データ生成部 1 1 2 は、流入風 4 の値を生成する。その値は、評価対象の土地における実際の気象データに基づき生成しても良い。より具体的には、気象庁などのデータベースに記録される評価対象の土地における風速及び風向などのデータを反映した風速データを生成する。例えば、1 年分の各日ごとの平均風速及び平均風向から風速データを生成する。

30

【 0 0 6 5 】

演算制御部 1 1 0 は、風速データ生成部 1 1 2 が生成した風速データに基づき、メッシュモデル 4 0（図 2）の計算格子 4 0 a に流入風 4 の値を設定する。これにより、評価対象の土地における実際の気象データを反映した風車 2 の後流が演算可能となる。

【 0 0 6 6 】

土地データ生成部 1 1 4 は、評価対象の土地における 3 次元の地形データを生成する。これにより、計算格子生成部 1 0 6 a は、メッシュモデル 4 0 を生成する場合に底面部の形状を土地データ生成部 1 1 4 が生成した 3 次元の地形データの情報に基づき設定する。これにより、評価対象の土地の地形を反映した風車 2 の後流を演算可能となる。

40

【 0 0 6 7 】

また、演算制御部 1 1 0 は、地形データに基づいて、第 1 モデル生成部 1 0 6 b 及び第 2 モデル生成部 1 0 6 c における第 1 径 4 6 の長さを変更してもよい。これにより、地形により変わる風車の後流の特性を風車の後流解析モデル 5 0 に反映することが可能となる。

【 0 0 6 8 】

50

評価部 116 は、複数の風車 2 の配置位置の少なくとも一つに配置される風車 2 に対して、複数の風車 2 の中の他の風車 2 の影響を評価する。例えば、評価部 116 は、他の風車がない場合の発電出力と、他の風車がある場合の発電出力との比率を評価値とする。

【0069】

本実施形態に係る第 1 モデル生成部 106 b は、複数の風車 2 の配置位置に基づき、計算格子内 40 の複数の位置に対応させて複数のアクチュエータディスク部 52 を生成する。同様に、本実施形態に係る第 2 モデル生成部 106 c は、複数の風車 2 の配置位置に基づき、計算格子内 40 の複数の位置に対応させて複数の固体部 54 を生成する。演算制御部 110 は、複数のアクチュエータディスク部 52 及び複数の固体部 54 を用いてメッシュモデル 40 の計算格子毎の風速の時間変化を演算する。

10

【0070】

図 15 は、複数の風車 2 の後流の演算を例えば実際のウインドファームにおける風車配置を用いて行った例を模式的に示す図である。

【0071】

図 15 に示すように、点線は風車 2 の後流の範囲を模式的に示している。このように、実際に吹いた風向及び風速の風では、点線で示す風車 2 の後流の範囲に後流側の風車 2 が入っており、前方の風車 2 の後流の影響を受けている様子を容易に確認することが可能である。また、評価部 116 が生成する評価値により、風車 2 の配置による発電効率への影響を評価可能である。このように、実際の風車配置を反映した演算が可能である。

【0072】

以上のように、本実施形態によれば、メッシュモデル 40 を生成する場合に底面部の形状を土地データ生成部が生成した 3 次元の地形データの情報に基づき設定するので、評価対象の土地の地形を反映した風車 2 の後流を演算可能となる。また、風速データ生成部 112 は、評価対象の土地における実際の気象データに基づく風速データを生成するので、評価対象の土地の実施の気象データを反映した風車 2 の後流を演算可能となる。

20

【0073】

本実施形態による風車後流演算装置 1 におけるデータ処理方法の少なくとも一部は、ハードウェアで構成してもよいし、ソフトウェアで構成してもよい。ソフトウェアで構成する場合には、データ処理方法の少なくとも一部の機能を実現するプログラムをフレキシブルディスクや CD-ROM 等の記録媒体に収納し、コンピュータに読み込ませて実行させてもよい。記録媒体は、磁気ディスクや光ディスク等の着脱可能なものに限定されず、ハードディスク装置やメモリなどの固定型の記録媒体でもよい。また、データ処理方法の少なくとも一部の機能を実現するプログラムを、インターネット等の通信回線（無線通信も含む）を介して頒布してもよい。さらに、同プログラムを暗号化したり、変調をかけたり、圧縮した状態で、インターネット等の有線回線や無線回線を介して、あるいは記録媒体に収納して頒布してもよい。

30

【0074】

以上、いくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例としてのみ提示したものであり、発明の範囲を限定することを意図したものではない。本明細書で説明した新規な装置、方法及びプログラムは、その他の様々な形態で実施することができる。また、本明細書で説明した装置、方法及びプログラムの形態に対し、発明の要旨を逸脱しない範囲内で、種々の省略、置換、変更を行うことができる。

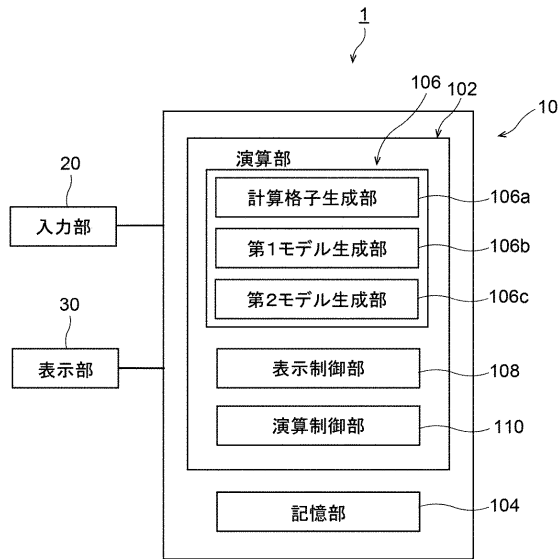
40

【符号の説明】

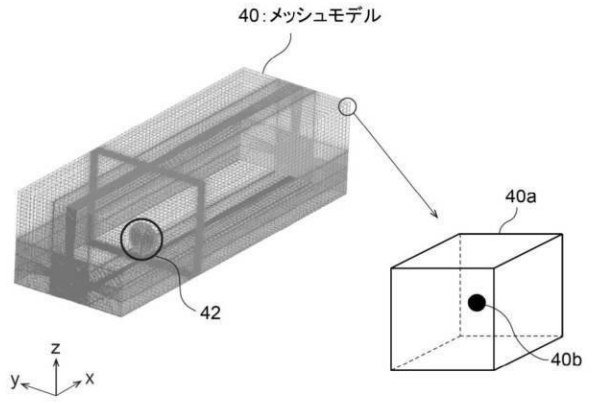
【0075】

1：風車後流演算装置、2：風車、2a：ブレード、40：メッシュモデル、40a：計算格子、46：第 1 径、52：アクチュエータディスク部、54：固体部、106a：計算格子生成部、106b：第 1 モデル生成部、106c：第 2 モデル生成部、110：演算制御部、112：風速データ生成部、114：土地データ生成部、116：評価部

【図1】



【図2】



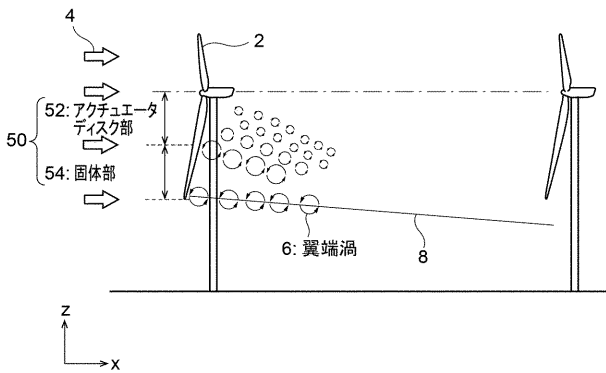
【図3】

$$\begin{array}{l}
 \text{x方向} \\
 \text{y方向} \\
 \text{z方向}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\
 \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\
 -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\
 -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{l}
 \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\
 \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\
 \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)
 \end{array}
 +
 \begin{array}{l}
 F_x \\
 F_y \\
 F_z
 \end{array}$$

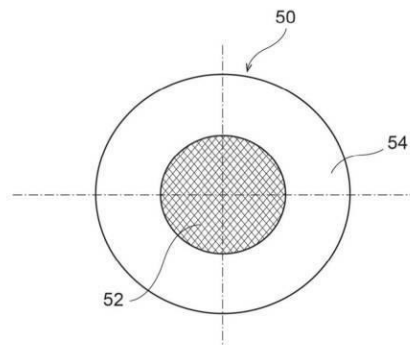
時間項      移流項(対流項)      圧力項      粘性項      外力項

$u, v, w$ : 各軸方向の速度成分  
 $p$ : 圧力  
 $F$ : 外力  
 (各計算格子はこれらの値を持っている)

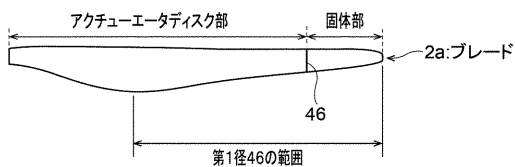
【図4】



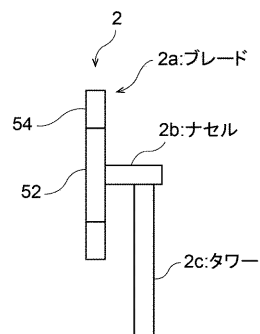
【図6】



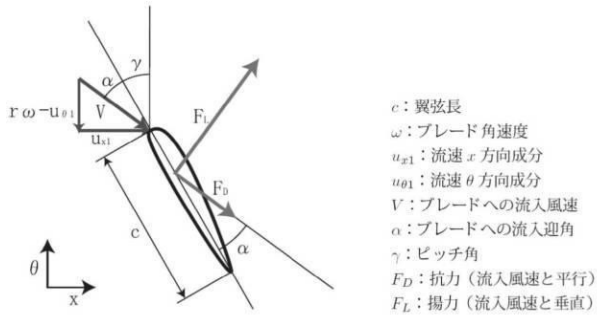
【図5】



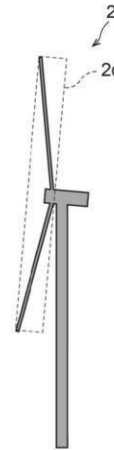
【図7】



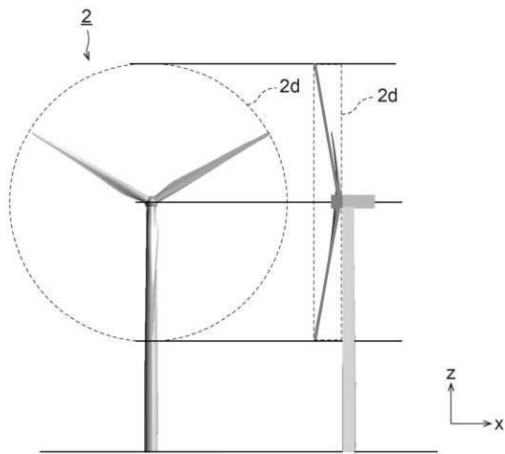
【図 8】



【図 10】



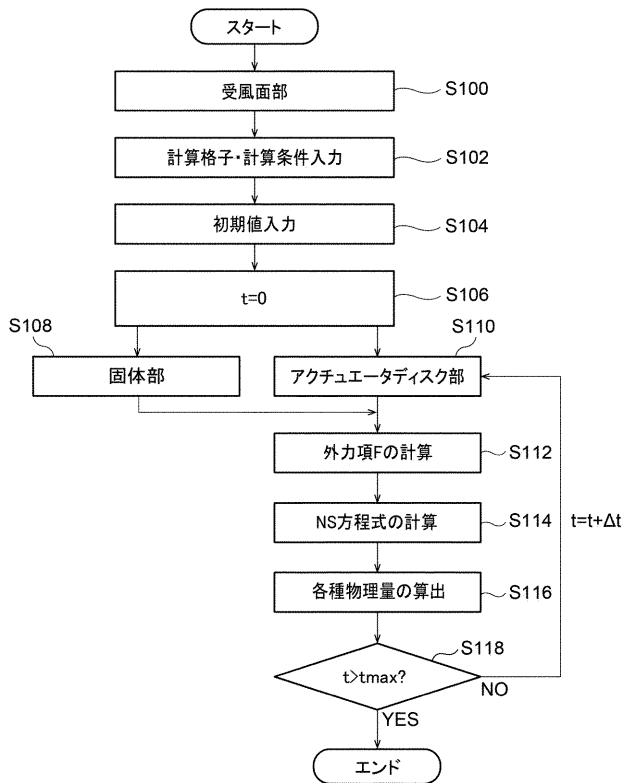
【図 9】



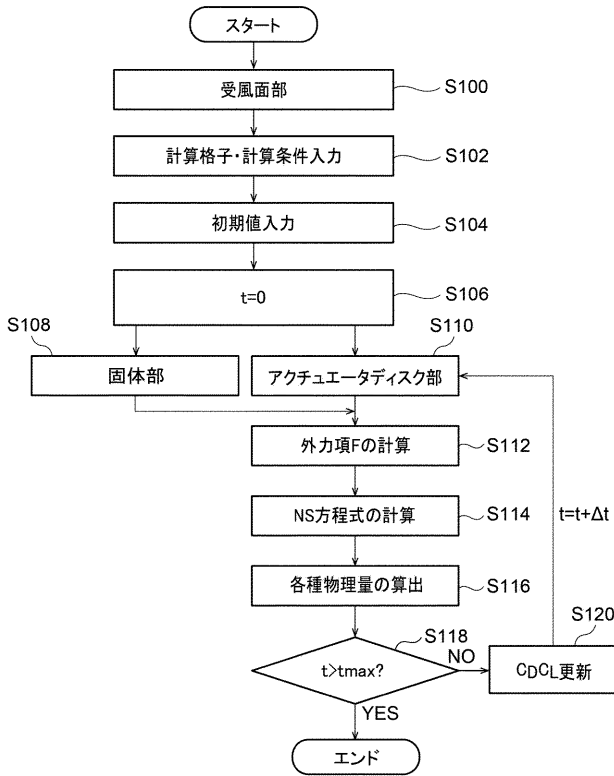
【図 11】



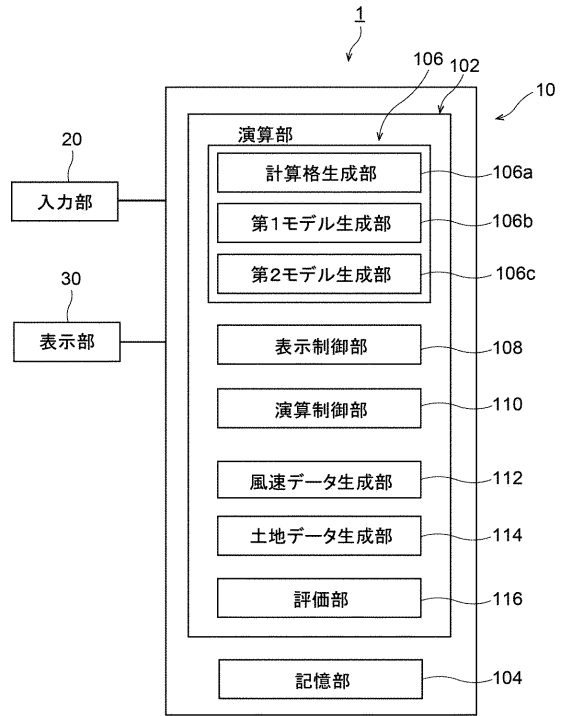
【図 12】



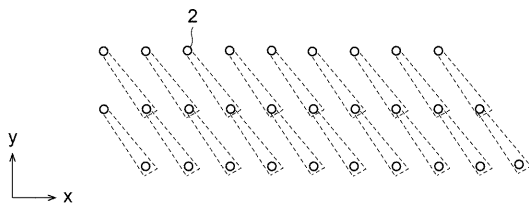
【図13】



【図14】



【図15】



---

フロントページの続き

- (74)代理人 100124372  
弁理士 山ノ井 傑
- (74)代理人 100125151  
弁理士 新畠 弘之
- (72)発明者 深谷 侑輝  
神奈川県川崎市幸区堀川町7番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
- (72)発明者 谷山 賀浩  
神奈川県川崎市幸区堀川町7番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
- (72)発明者 内田 孝紀  
福岡県福岡市西区元岡7-4-4 国立大学法人九州大学内
- (72)発明者 猪亦 麻子  
神奈川県川崎市幸区堀川町7番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
- (72)発明者 谷川 慎次  
神奈川県川崎市幸区堀川町7番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
- (72)発明者 中野 三知子  
神奈川県川崎市幸区堀川町7番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
- (72)発明者 野呂 芙有子  
神奈川県川崎市幸区堀川町7番地34 東芝エネルギーシステムズ株式会社内
- Fターム(参考) 3H178 AA03 AA40 AA43 AA51 BB31 BB77 CC02