

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5899323号
(P5899323)

(45) 発行日 平成28年4月6日(2016.4.6)

(24) 登録日 平成28年3月11日(2016.3.11)

(51) Int. Cl.

F I

G 0 6 F 19/00 (2011.01)

G 0 6 F 19/00 1 1 0

G 0 6 F 17/50 (2006.01)

G 0 6 F 17/50 6 0 4 A

請求項の数 11 (全 46 頁)

(21) 出願番号 特願2014-535424 (P2014-535424)
 (86) (22) 出願日 平成25年8月1日(2013.8.1)
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2013/070939
 (87) 国際公開番号 W02014/041917
 (87) 国際公開日 平成26年3月20日(2014.3.20)
 審査請求日 平成27年2月10日(2015.2.10)
 (31) 優先権主張番号 特願2012-203601 (P2012-203601)
 (32) 優先日 平成24年9月14日(2012.9.14)
 (33) 優先権主張国 日本国(JP)

(出願人による申告) 平成19年度、独立行政法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業、「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(73) 特許権者 503360115
 国立研究開発法人科学技術振興機構
 埼玉県川口市本町四丁目1番8号
 (74) 代理人 100089118
 弁理士 酒井 宏明
 (72) 発明者 坂上 貴之
 京都府京都市左京区北白川追分町 国立大
 学法人京都大学 大学院理学研究科内
 (72) 発明者 横山 知郎
 京都府京都市伏見区深草藤森町1番地 国
 立大学法人京都教育大学 教育学部数学科
 内

審査官 宮地 匡人

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 流れパターンの語表現方法、語表現装置、および、プログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

制御部と記憶部を備えたコンピュータによって実行される、N個の穴を有する多重連結外部領域を形成する流線図の語表現を作成する流れパターンの語表現方法であって、

上記記憶部は、

一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定するパターン語と、

上記2種類の流れパターンに対して他の一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る5種類の操作によって作られる流れパターンを規定した操作語と、

を記憶し、

上記制御部は、

上記流線図の一つの穴を有する単連結外部領域に含まれるパターンに応じて、上記2種類の流れパターンを規定するパターン語のうち、対応する一つのパターン語を割り当てるパターン語付与ステップと、

上記流線図の上記一つの穴と他の一つの穴とを有する多重連結領域に含まれるパターンに応じて、上記5種類の操作によって作られる流れパターンを規定した操作語のうち、対応する一つの操作語を割り当て、この処理を上記流線図の他の全ての穴について繰り返すことにより、上記N個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を作成する操作語付与ステップと、

を実行することを特徴とする、流れパターンの語表現方法。

【請求項 2】

制御部と記憶部を備えたコンピュータによって実行される、N個の穴を有する多重連結外部領域を形成する流線図の語表現を作成する流れパターンの語表現方法であって、

上記記憶部は、

一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定するパターン語と、

上記2種類の流れパターンに対して他の一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る5種類の操作によって作られる流れパターンを規定した操作語と、

を記憶し、

上記制御部は、

上記流線図の一つの穴と他の一つの穴とを有する多重連結領域に含まれるパターンに応じて、上記5種類の操作によって作られる流れパターンを規定した操作語のうち、対応する一つの操作語を割り当て、この処理を上記流線図の他の全ての穴について繰り返し行うことにより、上記N個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を作成する操作語付与ステップと、

上記流線図の上記一つの穴を有する単連結外部領域に含まれるパターンに応じて、上記2種類の流れパターンを規定するパターン語のうち、対応する一つのパターン語を割り当てるパターン語付与ステップと、

を実行することを特徴とする、流れパターンの語表現方法。

【請求項 3】

請求項 1 または 2 に記載の流れパターンの語表現方法において、

上記記憶部は、

上記一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定する語に加えて、二つの穴を有する二重連結外部領域において吸い込み湧き出し対を持たないパターンを追加した、合計3種類の流れパターンを規定するパターン語を記憶し、

上記パターン語付与ステップは、

上記流線図の一つの穴を有する単連結外部領域に含まれるパターンに応じて、上記3種類の流れパターンを規定するパターン語のうち、対応する一つのパターン語を割り当てることを特徴とする、流れパターンの語表現方法。

【請求項 4】

請求項 3 に記載の流れパターンの語表現方法において、

上記合計3種類の流れパターンは、

1) 上記吸い込み湧き出し対をもち、二つの *ss - ∂ - saddle connection* をもつパターン I、

2) 上記吸い込み湧き出し対をもち、一つの *saddle point*、それを結ぶ *homoclinic saddle connection* と二つの *ss - saddle connection* をもつパターン II、および

3) 上記吸い込み湧き出し対をもたないパターン O、

であることを特徴とする、流れパターンの語表現方法。

【請求項 5】

請求項 4 に記載の流れパターンの語表現方法において、

上記パターン語付与ステップは、

上記流線図の一つの穴を有する単連結外部領域において、*ss - ∂ - saddle connection* が存在するか否かを判定し、*ss - ∂ - saddle connection* が存在する場合に上記パターン I のパターン語を割り当てる I 分類ステップと、

上記 I 分類ステップにおいて *ss - ∂ - saddle connection* が存在しない場合に、上記流線図の一つの穴を有する単連結外部領域において、*ss - saddle connection* が存在するか否かを判定し、*ss - saddle connection* が存在する場合に上記パターン II のパターン語を割り当て、一方、*ss - s*

10

20

30

40

50

saddle connectionが存在しない場合に上記パターン O の パターン語を割り当てる I I / O 分類ステップと、

を含むことを特徴とする、流れパターンの語表現方法。

【請求項 6】

請求項 1 乃至 5 のいずれか一つに記載の流れパターンの語表現方法において、

上記位相幾何学的に採り得る 5 種類の操作は、

1) 一本の ss-orbit を、一つの saddle point、それを結び内部に穴をもつ homoclinic saddle connection と二つの ss-saddle connection に置き換える A_0 操作、

2) 一本の ss-orbit を、二つの ss- ∂ -saddle connection と新たに追加した境界上の二つの ∂ -saddle に置き換える A_2 操作、

3) 一本の closed orbit を、一つの穴と saddle point を追加して 8 の字をした 2 本の homoclinic 軌道に置き換える B_0 操作、

4) 一本の closed orbit を、新たに追加した穴の境界上に二つの ∂ -saddle をつけて一本の ∂ -saddle connection でつなぐような軌道に置き換える B_2 操作、および、

5) 既に $2k$ 個 ($k > 0$) の ∂ -saddle をもつ境界に、新たに二つの ∂ -saddle を付け加えて一本の ∂ -saddle connection でつなぎ内部に新たに付け加えた穴を置く C 操作、

であることを特徴とする、流れパターンの語表現方法。

【請求項 7】

請求項 6 に記載の流れパターンの語表現方法において、

上記操作語付与ステップは、

上記 5 種類の操作を規定した操作語を割り当てる場合に、

1) 一本の ss-orbit が存在することを条件として、上記 A_0 操作または上記 A_2 操作を規定した操作語を割り当て、

2) 一本の closed orbit が存在することを条件として、上記 B_0 操作または上記 B_2 操作を規定した操作語を割り当て、

3) ∂ -saddles を持つ境界が存在することを条件として、上記 C 操作を規定した操作語を割り当てること

を特徴とする、流れパターンの語表現方法。

【請求項 8】

制御部と記憶部を備えた、N 個の穴を有する多重連結外部領域を形成する流線図の語表現を作成する流れパターンの語表現装置であって、

上記記憶部は、

一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る 2 種類の流れパターンを規定するパターン語と、

上記 2 種類の流れパターンに対して他の一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る 5 種類の操作によって作られる流れパターンを規定した操作語と、

を記憶し、

上記制御部は、

上記流線図の一つの穴を有する単連結外部領域に含まれるパターンに応じて、上記 2 種類の流れパターンを規定するパターン語のうち、対応する一つのパターン語を割り当てるパターン語付与手段と、

上記流線図の上記一つの穴と他の一つの穴とを有する多重連結領域に含まれるパターンに応じて、上記 5 種類の操作によって作られる流れパターンを規定した操作語のうち、対応する一つの操作語を割り当て、この処理を上記流線図の他の全ての穴について繰り返し行うことにより、上記 N 個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を作成する操作語付与手段と、

を備えたことを特徴とする、流れパターンの語表現装置。

【請求項 9】

制御部と記憶部を備えた、N個の穴を有する多重連結外部領域を形成する流線図の語表現を作成する流れパターンの語表現装置であって、

上記記憶部は、

一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定するパターン語と、

上記2種類の流れパターンに対して他の一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る5種類の操作によって作られる流れパターンを規定した操作語と、

を記憶し、

上記制御部は、

上記流線図の一つの穴と他の一つの穴とを有する多重連結領域に含まれるパターンに応じて、上記5種類の操作によって作られる流れパターンを規定した操作語のうち、対応する一つの操作語を割り当て、この処理を上記流線図の他の全ての穴について繰り返し行うことにより、上記N個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を作成する操作語付与手段と、

上記流線図の上記一つの穴を有する単連結外部領域に含まれるパターンに応じて、上記2種類の流れパターンを規定するパターン語のうち、対応する一つのパターン語を割り当てるパターン語付与手段と、

を備えたことを特徴とする、流れパターンの語表現装置。

【請求項 10】

制御部と記憶部を少なくとも備えたコンピュータに実行させるためのプログラムであって、

上記記憶部は、

一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定するパターン語と、

上記2種類の流れパターンに対して他の一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る5種類の操作によって作られる流れパターンを規定した操作語と、

を記憶しており、

上記制御部において実行される、

N個の穴を有する多重連結外部領域を形成する流線図の一つの穴を有する単連結外部領域に含まれるパターンに応じて、上記2種類の流れパターンを規定するパターン語のうち、対応する一つのパターン語を割り当てるパターン語付与ステップと、

上記流線図の上記一つの穴と他の一つの穴とを有する多重連結領域に含まれるパターンに応じて、上記5種類の操作によって作られる流れパターンを規定した操作語のうち、対応する一つの操作語を割り当て、この処理を上記流線図の他の全ての穴について繰り返し行うことにより、上記N個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を作成する操作語付与ステップと、

を実行させるためのプログラム。

【請求項 11】

制御部と記憶部を少なくとも備えたコンピュータに実行させるためのプログラムであって、

上記記憶部は、

一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定するパターン語と、

上記2種類の流れパターンに対して他の一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る5種類の操作によって作られる流れパターンを規定した操作語と、

を記憶しており、

上記制御部において実行される、

N個の穴を有する多重連結外部領域を形成する流線図の一つの穴と他の一つの穴とを有する多重連結領域に含まれるパターンに応じて、上記5種類の操作によって作られる流れ

10

20

30

40

50

パターンを規定した操作語のうち、対応する一つの操作語を割り当て、この処理を上記流線図の他の全ての穴について繰り返し行うことにより、上記N個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を作成する操作語付与ステップと、

上記流線図の上記一つの穴を有する単連結外部領域に含まれるパターンに応じて、上記2種類の流れパターンを規定するパターン語のうち、対応する一つのパターン語を割り当てるパターン語付与ステップと、

を実行させるためのプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、流れパターンの語表現方法、語表現装置、および、プログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

従来、気流や水流などの流れ場における最適な構造物の設計を行うために、風洞実験のほか、大規模な数値計算による流体シミュレーションが用いられている。

【0003】

例えば、焼きなまし法 (Simulated Annealing 法) や遺伝的アルゴリズム法等を用いて構造物の設計変数を変化させながら、当該構造物に対する流体シミュレーションを繰り返し行う最適化技術が開発されている。

【0004】

また、近年、流体等の数理モデルを構築して、流れのパターンのトポロジーを数理的に扱うことのできるアルゴリズムやプログラムが開発されている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】Tomasz Kaczynski, Konstantin Mischairow, Marian Mrozek 著 “Computational Homology” Springer, 2000年

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、従来の構造物設計の最適化手法においては、繰り返し行われる大規模計算により計算時間と設計コストの増大化を招くので、それらの制約上、探索範囲を限定せざるを得ず、導き出される最適な構造物が局所最適なものである可能性を排除できないという問題点を有していた。すなわち、従来、探索範囲をどこにするのかは、技術者の経験と直感に頼らざるを得ず、どこに探索範囲を設定したかによって、導き出される構造物の最適化結果が左右されるという問題があった。

【0007】

本発明は、上記問題点に鑑みてなされたもので、流れ場における構造物設計を行うにあたって、構造物に対して採り得る流れパターンを経験や直感に頼ることなく容易に扱うことができる、流れパターンの語表現方法、語表現装置、および、プログラムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

このような目的を達成するため、本発明の流れパターンの語表現方法は、位相幾何学的にN個の穴を有する多重連結外部領域における流れパターンの語表現方法であって、一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定する語のうちのいずれか一語を付与するパターン語付与ステップと、上記パターン語付与ステップにて付与された語に対して、上記流れパターンに一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る5種類の操作を規定した語のうちのいずれか一語を繰り返し付与する

10

20

30

40

50

ことにより、上記N個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を形成させる操作語付与ステップと、を含むことを特徴とする。

【0009】

また、本発明の流れパターンの語表現方法は、位相幾何学的にN個の穴を有する多重連結外部領域における流れパターンの語表現方法であって、上記流れパターンに一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る5種類の操作を規定した語のうちのいずれか一語を繰り返し付与することにより、上記N個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を形成させる操作語付与ステップと、上記操作語付与ステップにて付与された語に対して、一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定する語のうちのいずれか一語を付与するパターン語付与ステップと、を含むことを特徴とする。

【0010】

また、本発明の流れパターンの語表現方法は、上記記載の流れパターンの語表現方法において、上記パターン語付与ステップは、上記一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定する語に加えて、二つの穴を有する二重連結外部領域において吸い込み湧き出し対を持たないパターンを追加した、合計3種類の流れパターンを規定する語のうちのいずれか一語を付与することを特徴とする。

【0011】

また、本発明の流れパターンの語表現方法は、上記記載の流れパターンの語表現方法において、上記合計3種類の流れパターンは、1) 吸い込み湧き出し対をもち、二つの $ss - \partial - saddle\ connection$ をもつパターンI、2) 上記吸い込み湧き出し対をもち、一つの $saddle\ point$ 、それを結び内部に穴を持つ $homoclinic\ saddle\ connection$ と二つの $ss - saddle\ connection$ をもつパターンII、および3) 上記吸い込み湧き出し対をもたないパターンO、であることを特徴とする。

【0012】

また、本発明の流れパターンの語表現方法は、上記記載の流れパターンの語表現方法において、上記パターン語付与ステップは、上記N個の穴を有する多重連結外部領域を形成しうる流線図において、 $ss - \partial - saddle\ connection$ が存在するか否かを判定し、 $ss - \partial - saddle\ connection$ が存在する場合に上記パターンIの語を与えるI分類ステップと、上記I分類ステップにおいて $ss - \partial - saddle\ connection$ が存在しない場合に、上記流線図において $ss - saddle\ connection$ が存在するか否かを判定し、 $ss - saddle\ connection$ が存在する場合に上記パターンIIの語を与え、一方、 $ss - saddle\ connection$ が存在しない場合に上記パターンOの語を与えるII/O分類ステップと、を含むことを特徴とする。

【0013】

また、本発明の流れパターンの語表現方法は、上記記載の流れパターンの語表現方法において、上記位相幾何学的に採り得る5種類の操作は、1) 一本の $ss - orbit$ を、一つの $saddle\ point$ 、それを結び内部に穴をもつ $homoclinic\ saddle\ connection$ と二つの $ss - saddle\ connection$ に置き換えるA₀操作、2) 一本の $ss - orbit$ を、二つの $ss - \partial - saddle\ connection$ と新たに追加した境界上の二つの $\partial - saddle$ に置き換えるA₂操作、3) 一本の $closed\ orbit$ を、一つの穴と $saddle\ point$ を追加して8の字をした2本の $homoclinic$ 軌道に置き換えるB₀操作、4) 一本の $closed\ orbit$ を、新たに追加した穴の境界上に二つの $\partial - saddle$ をつけて一本の $\partial - saddle\ connection$ でつなぐような軌道に置き換えるB₂操作、および、5) 既に2k個 ($k > 0$) の $\partial - saddle$ をもつ境界に、新たに二つの $\partial - saddle$ を付け加えて一本の $\partial - saddle\ connection$ でつなぎ内部に新たに付け加えた穴を置くC操作、であることを特徴とする。

【 0 0 1 4 】

また、本発明の流れパターンの語表現方法は、上記記載の流れパターンの語表現方法において、上記操作語付与ステップは、上記 5 種類の操作を規定した語を付与する場合に、1) 一本の *s s - o r b i t* が存在することを条件として、上記 A₀ 操作または上記 A₂ 操作を規定した語を付与し、2) 一本の *c l o s e d o r b i t* が存在することを条件として、上記 B₀ 操作または上記 B₂ 操作を規定した語を付与し、3) $\partial - s a d d l e s$ を持つ境界が存在することを条件として、上記 C 操作を規定した語を付与することを特徴とする。

【 0 0 1 5 】

また、本発明は、流れパターンの語表現装置に関するものであり、本発明の流れパターンの語表現装置は、制御部を少なくとも備えた、位相幾何学的に N 個の穴を有する多重連結外部領域における流れパターンの語表現装置であって、上記制御部は、一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る 2 種類の流れパターンを規定する語のうちのいずれか一語を付与するパターン語付与手段と、上記パターン語付与手段により付与された語に対して、上記流れパターンに一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る 5 種類の操作を規定した語のうちのいずれか一語を繰り返し付与することにより、上記 N 個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を形成させる操作語付与手段と、を備えたことを特徴とする。

【 0 0 1 6 】

また、本発明の流れパターンの語表現装置は、制御部を少なくとも備えた、位相幾何学的に N 個の穴を有する多重連結外部領域における流れパターンの語表現装置であって、上記制御部は、上記流れパターンに一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る 5 種類の操作を規定した語のうちのいずれか一語を繰り返し付与することにより、上記 N 個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を形成させる操作語付与手段と、上記操作語付与手段により付与された語に対して、一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る 2 種類の流れパターンを規定する語のうちのいずれか一語を付与するパターン語付与手段と、を備えたことを特徴とする。

【 0 0 1 7 】

また、本発明は、プログラムに関するものであり、本発明のプログラムは、制御部を少なくとも備えたコンピュータに実行させるためのプログラムであって、上記制御部において実行される、位相幾何学的に N 個の穴を有する多重連結外部領域における流れパターンの語表現を形成させるために、一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る 2 種類の流れパターンを規定する語のうちのいずれか一語を付与するパターン語付与ステップと、上記パターン語付与ステップにて付与された語に対して、上記流れパターンに一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る 5 種類の操作を規定した語のうちのいずれか一語を繰り返し付与することにより、上記 N 個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を形成させる操作語付与ステップと、を実行させることを特徴とする。

【 0 0 1 8 】

また、本発明のプログラムは、制御部を少なくとも備えたコンピュータに実行させるためのプログラムであって、上記制御部において実行される、位相幾何学的に N 個の穴を有する多重連結外部領域における流れパターンの語表現を形成させるために、上記流れパターンに一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る 5 種類の操作を規定した語のうちのいずれか一語を繰り返し付与することにより、上記 N 個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を形成させる操作語付与ステップと、上記操作語付与ステップにて付与された語に対して、一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る 2 種類の流れパターンを規定する語のうちのいずれか一語を付与するパターン語付与ステップと、を実行させることを特徴とする。

【 0 0 1 9 】

また、本発明は記録媒体に関するものであり、上記記載のプログラムを記録したことを特徴とする。

【発明の効果】

【0020】

この発明によれば、位相幾何学的にN個の穴を有する多重連結外部領域における流れパターンの語表現を形成させるために、一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定する語のうちのいずれか一語を付与し、付与した語に対して、流れパターンに一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る5種類の操作を規定した語のうちのいずれか一語を繰り返し付与することにより、N個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を形成させる。これにより、本発明は、経験や直感に頼ることなく、構造物に対して採り得る流れパターンを語表現によって容易に扱うことができるという効果を奏する。例えば、一様流を仮定する橋梁や列車や自動車や航空機等の構造物の設計において、経験や直感に頼ることなく、構造物に対して採り得る全ての流れパターンを導き出すことができるとともに、ある流れパターンが採り得る全ての流れパターンのいずれに対応するかを語表現の一致によって確かめることができる。これにより、構造物の設計において、どの範囲を網羅したかを把握することができる。また、予め採り得る全ての流れパターンのうちで最適な流れパターン（例えば、オイルフェンスの設計において封じ込め可能な流れパターン）を決定して、適切な探索範囲で効率的なシミュレーションによる最適設計を行うことができる。

【0021】

また、本発明によれば、上記において、一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定する語に加えて、二つの穴を有する二重連結外部領域において吸い込み湧き出し対を持たないパターンを追加した、合計3種類の流れパターンを規定する語のうちのいずれか一語を付与する。これにより、本発明は、一様流を仮定する流れ場とともに一様流を仮定しない流れ場も含めて全ての取り得る流れパターンを容易に扱うことができるという効果を奏する。

【0022】

また、本発明によれば、上記において、合計3種類の流れパターンは、1) 吸い込み湧き出し対をもち、二つの $ss - \partial - saddle\ connection$ をもつパターンI、2) 上記吸い込み湧き出し対をもち、一つの $saddle\ point$ 、それを結ぶ $homoclinic\ saddle\ connection$ と二つの $ss - saddle\ connection$ をもつパターンII、および3) 上記吸い込み湧き出し対を持たないパターンO、である。これにより、本発明は、基本となる全ての流れパターンに対してパターン語を付与することができ、具体的な流れパターンの語表現を扱えるようになるという効果を奏する。

【0023】

また、本発明によれば、上記において、N個の穴を有する多重連結外部領域を形成する流線図において、 $ss - \partial - saddle\ connection$ が存在するか否かを判定し、 $ss - \partial - saddle\ connection$ が存在する場合にパターンIの語を与え、 $ss - \partial - saddle\ connection$ が存在しない場合に、流線図において $ss - saddle\ connection$ が存在するか否かを判定し、 $ss - saddle\ connection$ が存在する場合にパターンIIの語を与え、一方、 $ss - saddle\ connection$ が存在しない場合にパターンOの語を与える。これにより、本発明は、ある流れパターンが、基本となる3種類の流れパターンのうちのいずれに属するかを容易に把握することができるという効果を奏する。

【0024】

また、本発明によれば、上記において、位相幾何学的に採り得る5種類の操作は、1) 一本の $ss - orbit$ を、一つの $saddle\ point$ 、それを結び内部に穴をもつ $homoclinic\ saddle\ connection$ と二つの $ss - saddle\ connection$ に置き換える A_0 操作、2) 一本の $ss - orbit$ を、二つの $ss - \partial - saddle\ connection$ と新たに追加した境界上の二つの $\partial - saddle$ に置き換える A_2 操作、3) 一本の $closed\ orbit$ を、一つの

穴と $saddle\ point$ を追加して 8 の字をした 2 本の $homoclinic$ 軌道に置き換える B_0 操作、4) 一本の $closed\ orbit$ を、新たに追加した穴の境界上に二つ $\partial - saddle$ をつけて一本の $\partial - saddle\ connection$ でつなぐような軌道に置き換える B_2 操作、および、5) 既に $2k$ 個 ($k > 0$) の $\partial - saddle$ をもつ境界に、新たに二つの $\partial - saddle$ を付け加えて一本の $\partial - saddle\ connection$ でつなぎ内部に新たに付け加えた穴を置く C 操作、である。これにより、本発明は、流れパターンに位相幾何学的な穴を付加する操作を行う場合に、具体的な操作語の語表現を扱えるようになるという効果を奏する。

【0025】

また、本発明によれば、上記において、5 種類の操作を規定した語を付与する場合に、10
 1) 一本の $ss - orbit$ が存在することを条件として、 A_0 操作または A_2 操作を規定した語を付与し、2) 一本の $closed\ orbit$ が存在することを条件として、 B_0 操作または B_2 操作を規定した語を付与し、3) $\partial - saddles$ を持つ境界が存在することを条件として、 C 操作を規定した語を付与する。これにより、位相幾何学的に操作を行うことができる操作に限定した語表現を形成させることができるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図1】図1は、本実施形態の概要に示すフローチャートである。

【図2】図2は、構造安定な流れのパターンを模式的に示した図である。

【図3】図3は、領域における構造安定な流れの位相的分類を行う特徴的な軌道（流線）を全て記述した図である。

【図4】図4は、初期構造となる3種類の流れパターンを模式的に示す図である。

【図5】図5は、穴を一つ付け加えて構造安定な流れを構成する5種類の操作を模式的に示した図である。

【図6】図6は、二つの構造物と一様流がある場合の流れパターンの全分類を示す図である。

【図7】図7は、本実施形態が適用される本語表現装置 100 の一例を示すブロック図である。

【図8】図8は、パターン語の割り当て処理の一例を示すフローチャートである。

【図9】図9は、アルゴリズム B における I 系列の操作語の割り当て処理の一例を示すフローチャートである。

【図10】図10は、アルゴリズム B における I 系列の操作語の割り当て処理の一例を示すフローチャートである。

【図11】図11は、アルゴリズム B における II 系列の操作語の割り当て処理の一例を示すフローチャートである。

【図12】図12は、アルゴリズム B における O 系列の操作語の割り当て処理の一例を示すフローチャートである。

【図13】図13は、アルゴリズム B ($I, II - Word\ alg$) における I, II 系列の操作語の割り当て処理の他の例を示すフローチャートである。

【図14】図14は、アルゴリズム B ($I, II - Word\ alg$) における I, II 系列の操作語の割り当て処理の他の例を示すフローチャートである。

【図15】図15は、アルゴリズム B ($O - Word\ alg$) における O 系列の操作語の割り当て処理の他の例を示すフローチャートである。

【図16】図16は、I 系列におけるアルゴリズム A の処理の一例を示すフローチャートである。

【図17】図17は、II 系列におけるアルゴリズム A の処理の一例を示すフローチャートである。

【図18】図18は、O 系列におけるアルゴリズム A の処理の一例を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0027】

以下に、本発明にかかる流れパターンの語表現方法、語表現装置、および、プログラムの実施形態を図面に基づいて詳細に説明する。なお、この実施形態によりこの発明が限定されるものではない。

【0028】

特に以下の実施形態においては、本発明を二次元流体のシミュレーションに適用した例について説明することがあるが、この場合に限られず、三次元流体のシミュレーションにおける任意の断面（構造物の断面等）についても、同様に本発明を適用することができる。

10

【0029】

[本発明の実施形態の概要]

以下、本発明の実施形態の概要について図1を参照して説明し、その後、本実施形態の構成および処理等について詳細に説明する。ここで、図1は、本実施形態の概要に示すフローチャートである。

【0030】

図1に示すように、まず、本実施形態は、位相幾何学的にN個の穴を有する多重連結外部領域における流れパターンの語表現を形成させるために、一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る2種類の流れパターンを規定する語のうちのいずれか一語を付与する（ステップSA-1）。ここで、本実施形態は、上記の2種類の流れパターンに加えて更に、二つの穴を有する二重連結外部領域において吸い込み湧き出し対を持たないパターンを追加した、合計3種類の流れパターンを規定する語（「パターン語」と呼ぶ。）のうちのいずれか一語を付与してもよい。なお、一様流のない湖などの閉水域での構造物の設計に関しては、二つの穴を有する二重連結外部領域において吸い込み湧き出し対を持たないパターンのみを用いてもよい。

【0031】

そして、本実施形態は、ステップSA-1にて付与された語に対して、流れパターンに一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る5種類の操作を規定した語（「操作語」と呼ぶ。）のうちのいずれか一語を付与し（ステップSA-2）、当該ステップSA-2の処理を穴の数がN個となるまで繰り返し行うことにより（ステップSA-3）、N個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を形成させる。

【0032】

ここで、本実施形態において、「多重連結外部領域」とは、二次元（平面）の中にある領域で、複数の穴があいたものをいう。ここでいう「穴」という表現は、数学的な抽象表現であるが、応用上はさまざまな表現形態であってもよい。例えば、河川の表面の流れに注目した場合、そこに砂州が複数あった場合や、橋脚がいくつか刺さっているような状況があれば、その領域は多重連結外部領域として扱える。その他、海洋の上に島があるような場合も多重連結外部領域である。換言すれば、「流れの中に複数の障害物がある」ような流れを、本実施形態では、多重連結外部領域における流れとして扱う。また、孤立した渦構造や周囲に周期軌道を持つような流れ構造（楕円型の停留点など）も「穴」とみなすことができる。

40

【0033】

本実施形態によれば、流れパターンに対して語表現を割り当てることによって、多重連結外部領域における流れの位相的分類が可能となる。位相的というのは数学の専門用語であり、トポロジー（位相幾何学）とも呼ばれる幾何学の一分野を指す。古典的な幾何学では、三角形や四角形はその角の数の違いにより異なる図形と見なすが、位相幾何学の立場ではそういった細かい情報を見ず、三角形と四角形を例えば輪ゴムを変形させて互いに移りあえるという立場にたって同じ図形と見なす。すなわちすべての多角形は、円と同じと見なす。一方で、円の中にもう一つ円がくりぬかれているような円環領域があったときに円と円環領域は一つの輪ゴムの変形では互いに変形できないので、異なる図形と見なす。

50

多重連結外部領域では、空いている穴の数が異なれば、それらの図形は位相的に異なると見なす一方で、穴の形さえ同じであれば、その穴の形が円であろうが三角形であろうが線分であろうが同じものとみなす。このような理由から流れの領域を特徴づけるのは穴の数のみであるため、本実施形態では、穴の数 $M + 1$ に対して多重連結外部領域を $D_{\zeta}(M)$ と表現する。例えば、穴が 1 つのみの場合は、単連結外部領域 $D_{\zeta}(0)$ であり、穴が 2 つ在る場合は、二重連結外部領域 $D_{\zeta}(1)$ となる。

【0034】

流れの位相的分類を扱うときは、流れを特徴づけるある特定の構造（「位相構造」と呼ぶ。）を捕まえて、その特定の構造をもった流れが二つあったときに、その双方を特定の構造の連続的な（すなわち切ったり貼ったりしない）変形によって互いに変形できないものは異なる流れと見なす。このような流れの分類の中でも、本実施形態では、構造安定な流れを主に扱う。構造安定とは、与えられた流れに小さな擾乱（乱れ）が加わっても流れの特定の位相構造が変化しないものを呼ぶ。これはすべての起こりうる流れのパターンに対してある種の制限をつけることになるが、構造安定な流れは実用上重要なものであるため、その制限は特に問題とならない。すなわち、通常、流れの様子を観測したり、計算機によって流れの様子を可視化した場合には、観測誤差や計算誤差が入るので、こういった誤差によらない流れ構造が観測されやすいからである。

【0035】

[流れの構成要素の説明]

ここで、本実施形態において扱う流れの構成要素について図 2 ~ 図 4 を参照して説明する。本実施形態における「流れ」とは非圧縮流れである。流体の非圧縮性とは、力を加えてもほとんどその体積を変えないような性質をいう。通常の水や大気の流れは、日常生活のスケールで考える場合は、こうした流れの枠組みで考えても概ね差し支えはない。なお、本発明は、これに限られず、圧縮性のある流れを計算上取り扱ってもよい。

【0036】

本実施形態で扱う流れの構成要素は、以下の 3 つである。一つは障害物、一つは渦（vortex）、一つは一樣流（uniform flow）である。障害物は多重連結外部領域における穴のことであり、この形状は位相的分類を考えている上で円としておいても数学的に与える結果に影響はないことが一般的な流体の数学理論から導くことができる。ここで、図 2 は、構造安定な流れのパターンを模式的に示した図である。なお、図 2 (c) は、4 つのサドル点を持つ境界を模式的に示している。

【0037】

図 2 (a) に示すように、渦はそのまわりで回転する流れを作る要素である。一樣流とは、川の流れでいえば基本的な流れのことであり、領域全体を横切るような流れである。一樣流を構成する要素は、吸い込み湧き出し対（1 - source - sink）と呼ぶ（数学的定義 Definition 2.1 参照）。

【数 1】

Definition 2.1. A point $p \in D_{\zeta}(M)$ is said to be an n -source-sink point, if $V|_{D_{\zeta}(M) \setminus \{p\}}$ is a vector field on $D_{\zeta}(M) \setminus \{p\}$ generated by a complex potential whose stream function is denoted by ψ , for which there is a pair of a neighborhood U of p and a homeomorphism h from U to the unit disk D with $h(p) = 0$ such that $\psi \circ h^{-1}|_{D \setminus \{0\}} = -\frac{\sin n\theta}{r^n}$ in the polar coordinates associated with the disk D .

【0038】

ここで、一樣流ではなく吸い込み湧き出し対と呼ぶことには理由がある。その理由の説明のため、いくつかの数学的な解説を以下に行う。一樣流が存在するとき、考えている流れの領域は無限に広がる平面であり、その中に複数の穴（障害物）が埋め込まれているような多重連結外部領域であるが、このような流れを模式的（Schematic）に表現する上では扱いにくい。そのため、数学における stereographic projection（ステレオ射影・立体射影）と呼ばれる射影法によって、平面を球面の上に

投影する。この場合、平面における無限遠点は球面の北極に、平面の原点は南極に対応させることができる。

【 0 0 3 9 】

このようにしておく、一様流は球面の北極における流れの湧き出しと吸い込み対といった流れ構造となり、図 2 (b) のような流れ場に対応していることが数学的に示せる。さらに模式的に流れ場を表現するためには、球面は対称性の高い形状であるということを利用して、北極と南極の位置を適当にずらすことができるので、無限遠点を南極に、ある円形の穴 (障害物) の中心を北極にあわせてから、再び *stereographic projection* を使って平面に投影すると、南極に対応する原点付近の近くでは図 2 (b) のような流れができる。さらに無限遠点に中心を持つ円境界は平面の外側円境界に投影されるので、結果として平面全体の流れ場が、例えば図 2 のような形の有界な領域として表現できる。したがって、図 2 のような表現は適切な射影法を通じて、平面全体の中に一様流が入っている流れと等価なものである。本実施形態の説明では、流れを模式的に示すために便利であることから、このような射影法を用いて図に表現することにする。

【 0 0 4 0 】

図 3 は、このような領域における構造安定な流れの位相的分類を行う特徴的な軌道 (流線) を全て記述した図である。図 3 (a) に示すように、まず吸い込み湧き出し対から出て自分自身に戻ってくる軌道を *ss-orbit* と呼ぶ。次に、図 3 (b) に示すように、吸い込み湧き出し対から出て境界の上につながる軌道を *ss- ∂ -saddle connection* と呼び、図 3 (c) に示すように、その軌道がつながっている境界上の点を *ss- ∂ -saddle* と呼ぶ。

【 0 0 4 1 】

また、図 3 (e) に示すように、吸い込み湧き出し対からではなく、ある境界の上の点から出て同じ境界上の点につながる軌道を *∂ -saddle connection* と呼び、図 3 (d) に示すように、これによってつながれている境界上の点を *∂ -saddle* と呼ぶ。また、図 3 (h) に示すような、境界上にない点を *saddle point* (サドル点) と呼ぶが、図 3 (f) に示すように、吸い込み湧き出し対から出る軌道で、この *saddle point* につながる軌道を *ss-saddle connection* と呼ぶ。また、図 3 (g) に示すように、境界や渦の回りを作る閉曲線軌道を *closed orbit* と呼び、図 3 (i) に示すように、*saddle point* から出てそれ自身に戻るような軌道を *homoclinic saddle connection* と呼ぶ。対象とする構造安定な流れは、これらの軌道の組み合わせによってしか表現されないことが数学的に証明できる。

【 0 0 4 2 】

本実施形態では、上述したステップ S A - 2 において、穴の数が M 個ある多重連結外部領域 $D_k (M - 1)$ の流れに、一つの穴とそれに伴う流れの構造を付け足すことで、一つ穴の多い多重連結外部領域 $D_k (M)$ の構造安定な流れ場を帰納的に構成していく。そのため、もっとも簡単な穴が一つの単連結外部領域 $D_k (0)$ や、二重連結外部領域 $D_k (1)$ で、これらの帰納的構成の初期構造になるものをステップ S A - 1 で与えている。

【 0 0 4 3 】

具体的には、上述した合計 3 種類の流れパターンは、

1) 吸い込み湧き出し対をもち、二つの *ss- ∂ -saddle connection* をもつパターン I、

2) 吸い込み湧き出し対をもち、一つの *saddle point*、それを結ぶ *homoclinic saddle connection* と二つの *ss-saddle connection* をもつパターン II、および

3) 吸い込み湧き出し対をもたないパターン O、

である。ここで、図 4 は、初期構造となる 3 種類の流れパターンを模式的に示す図である。

【 0 0 4 4 】

10

20

30

40

50

すなわち、図4(a)と(b)に示すように、穴が一個の単連結外部領域 $D_k(0)$ にある構造安定な流れは、パターンIとパターンIIの2種類存在する。これらのパターンは、ともに吸い込み湧き出し対を持ち、数学的にはこれら2種類しかないことが証明できる。一樣流を仮定した吸い込み湧き出し対を持つような流れに対して、原則的には二重連結外部領域 $D_k(1)$ は、これらから構成されるが、吸い込み湧き出し対を持たない流れはここから構成されないで、その流れを構成するために必要な初期流れが図4(c)に模式的に示されるパターンOである。なお、これらの位相構造は表現の簡便さのため、吸い込み湧き出し対を丸囲みSと図示し、*ss-orbit*や*closed orbit*は、無限に存在するので表現せず、以後、模式的に図4(d)や(e)のように簡略的に表す。また、図4(c)に示すように、吸い込み湧き出し対を持たない二重連結外部 $D_k(1)$ における構造安定な流れのパターン*closed orbits*も、すべて書かないで図4(f)のように簡略に記す。

【0045】

[操作語の説明]

帰納的に構造安定な流れを構成していくために、穴を一つとそれに伴う流れの構造を追加するという「操作」について、図5および図6を参照して説明する。すなわち、穴の数がM個ある多重連結外部領域 $D_k(M-1)$ の流れに、一つの穴を加えて多重連結外部領域 $D_k(M)$ の流れを求める操作について説明する。

【0046】

上述したステップSA-2において、位相幾何学的に採り得る5種類の操作は、

1) 一本の*ss-orbit*を、一つの*saddle point*、それを結び内部に穴をもつ*homoclinic saddle connection*と二つの*ss-saddle connection*に置き換える A_0 操作、

2) 一本の*ss-orbit*を、二つの ∂ -*saddle connection*と新たに追加した境界上の二つの ∂ -*saddle*に置き換える A_2 操作、

3) 一本の*closed orbit*を、一つの穴と*saddle point*を追加して8の字をした2本の*homoclinic*軌道に置き換える B_0 操作、

4) 一本の*closed orbit*を、新たに追加した穴の境界上に二つ ∂ -*saddle*をつけて一本の ∂ -*saddle connection*でつなぐような軌道に置き換える B_2 操作、および、

5) 既に $2k$ 個 ($k > 0$) の ∂ -*saddle*をもつ境界に、新たに二つの ∂ -*saddle*を付け加えて一本の ∂ -*saddle connection*でつなぎ内部に新たに付け加えた穴を置くC操作、

である。ここで、図5は、穴を一つ付け加えて構造安定な流れを構成する5種類の操作を模式的に示した図である。

【0047】

図5(a)に示すように、操作 A_0 と A_2 は一本の *ss-orbit* に対して行われる。また、図5(b)に示すように、操作 B_0 と B_2 は、一本の *closed orbit* に対して行われる。また、図5(c)に示すように、操作Cは、既に ∂ -*saddles* を持つ境界に対して行われる。なお、構造安定性を維持しながらそのようなことを可能にする操作が、上記の5種類しかないことが数学的に証明可能である (Theorem 3.1, Corollary 3.1, Theorem 3.2 参照)。

【数2】

Theorem 3.1 (Theorem 2.3.8. p.74 [11]). *Suppose that V is a C^r -Hamiltonian vector field on a compact orientable surface. V is structurally stable in $\mathcal{H}^r$, if and only if V is regular and all (∂ -)saddle connections are self-connected.*

【数 3】

Corollary 3.1. *Suppose that the Hamiltonian vector field V is structurally stable in $\mathcal{H}^r$. Then V can be represented by a sequence of the operations starting from the initial pattern O .*

Proof. By Theorem 3.1, the saddle connection diagram consists of homoclinic saddle connections and ∂ -saddle connections that connect two ∂ -saddles at the same boundary. Recall that the Euler number of $\mathcal{D}_\zeta(M)$ is $1 - M$. Since V is regular, we can suppose that there are k_1 saddles and k_2 ∂ -saddles. By Poincaré-Hopf theorem, these numbers satisfy $M - 1 = k_1 + k_2/2$.

We will show the assertion by induction on M . Suppose that $M = 1$. Then $k_1 = k_2 = 0$ and so there are no saddles and ∂ -saddles. Hence V is regular and we have O . Suppose that $M > 1$. We say that a connected component in the saddle connection diagram is inner most, if it bounds no other saddles and ∂ -saddles. If an inner most component in the saddle connection diagram of V in $\mathcal{D}_\zeta(M)$ is a homoclinic saddle connection (resp. a ∂ -saddle connection with two ∂ -saddles), then V is obtained by the operation B_0 (resp. B_2) from a structurally stable Hamiltonian vector field $\tilde{V}$ on $\mathcal{D}_\zeta(M - 1)$. By inductive hypothesis, suppose that $\tilde{V}$ is represented by $OO_1 \cdots O_{M-2}$, then V has a word representation $OO_1 \cdots O_{M-2}B_0$ (resp. $OO_1 \cdots O_{M-2}B_2$). Otherwise all inner most components are ∂ -saddle connections with more than two ∂ -saddles. Then V is obtained by the operation C from a structurally stable Hamiltonian vector field $\tilde{V}$ on $\mathcal{D}_\zeta(M - 1)$. Hence, V has a word representation $OO_1 \cdots O_{M-2}C$. $\square$

【数 4】

Theorem 3.2. *The Hamiltonian vector field $V \in \chi_1^r$ is structurally stable, if and only if*

- (1) *the restriction of V on the complement of the 1-source-sink point is regular,*
- (2) *all saddle connections are homoclinic connections,*
- (3) *all ∂ -saddle connections connect two ∂ -saddles located at the same boundary.*

Proof. Obviously the regularity is necessary. Therefore we may assume that the restriction of V on the complement of the 1-source-sink point p is regular. Now suppose that there is a heteroclinic saddle connection between two distinct saddles p and q . Then $H(p) = H(q)$ is satisfied where H represents the Hamiltonian for $V \in \chi_1^r$. We will show that the energy equality does not hold when we perturb the vector field. In order to accomplish it, we introduce a Hamiltonian vector field as follows. Let $b : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ be a smooth non-increasing function such that $b(r) = 1$ for $r \in [0, 1/3]$, $b(r) = 0$ for $r \in [2/3, 1]$, $b'(r) < 0$ for $r \in (1/3, 2/3)$, with which we define an axisymmetric function $f : U \rightarrow [0, 1]$ by $f(r, \theta) := b(r)$ in the polar coordinates (r, θ) of the unit disc U . Let V_f be a Hamiltonian vector field on U defined from f . Then, a contour line of $f(r, \theta)$ for any $r \in (1/3, 2/3)$ is a closed orbit. For arbitrary $\varepsilon > 0$, we define a function $\tilde{H}$ on $\mathcal{D}_\zeta(M)$ by $\tilde{H} := H + \varepsilon f$ on the open unit disk U around p and $\tilde{H} := H$ otherwise. Then $\tilde{H}$ is a smooth function and so define the Hamiltonian vector field $\tilde{V}$. Since $\tilde{H}(p) - \tilde{H}(q) = H(p) + \varepsilon f(p) - H(q) = \varepsilon \neq 0$, there is no orbits connecting p and q . Hence V is not structurally stable.

If there is a ∂ -saddle connection between two ∂ -saddles p and q at different boundaries with the same energy level $H(p) = H(q)$. Then we can show the vector field V is not structurally stable as follows. Considering an annulus $[0, 1] \times S^1$ in $[0, \infty) \times S^2$ around the circular boundary with p , we can define the perturbed Hamiltonian vector field $\tilde{H}$ obtained from H by perturbing it in the annulus with using the function $b(r)$, for which the energy equality no longer holds.

Conversely, suppose that (1), (2) and (3) hold. By Proposition 2.1, V is locally structurally stable at the 1-source-sink point. Let $\tilde{V}$ be a small perturbed vector field of V . Then we may assume that there is a small neighborhood U of the 1-source-sink point on which V and its small perturbation are identical. Hence it suffices to show that any small perturbation $\tilde{V}$ of $V|_{\mathcal{D}_\zeta(M) \setminus U}$ which fixes ∂U is topological equivalence to $V|_{\mathcal{D}_\zeta(M) \setminus U}$. Since the streamlines in the neighborhood of the 1-source-sink point can be obtained from the streamlines around two centers by identifying the centers, we can replace $V|_U$ with some vector field on U with two centers. Then all ss-(∂ -)saddle connections are replaced by (∂ -)saddle connections. By Theorem 3.1, the resulting vector field of V are structurally stable. Hence $\tilde{V}$ is topological equivalence to $V|_{\mathcal{D}_\zeta(M) \setminus U}$. $\square$

【0 0 4 8】

ステップ S A - 1 で与えた初期構造の 3 種類の流れパターン I , II , O から、これら 50

の操作を行って一つずつ穴を増やす ($M \rightarrow M + 1$) ことで、多くの穴を持つ領域における流れが帰納的に構成されるので、本実施形態では、その操作を表す操作語の列を文字列と見なして列挙することで、流れ場の語表現 (Word representation) を得ることができる。ここで、図 6 は、二つの構造物と一様流がある場合の流れパターンの全分類を示す図である。図 6 に示すように、単連結外部領域 $D_{\zeta}(0)$ における初期構造のパターン I, II に対して、操作語を付与することで、二重連結外部領域 $D_{\zeta}(1)$ における全ての流れパターンを記述することができる。ただし、図 6 に示す全ての流れパターンは、2 種類 (I, II) $\times$ 5 種類 (A_0, A_2, B_0, B_2, C) の計 10 種類とはなっていない。すなわち、操作語は、5 種類の操作語を任意に並べてできるわけではなく、数学的な理由から様々な制約がつく。

10

【0049】

ここで、制約について説明すれば以下になる。すなわち、図 5 を用いて上述したように、操作 A_0 と A_2 は、一本の $ss-orbit$ に対して行われるので、この操作を行う前提として、一本の $ss-orbit$ の存在が不可欠となる。また、操作 B_0 と B_2 は、一本の $closed-orbit$ に対して行われるので、この操作を行う前提として、一本の $closed-orbit$ の存在が不可欠である。また、操作 C は、 $\partial-saddle$ を持つ境界に対して行われるので、この操作を行う前提として、 $\partial-saddle$ を持つ境界の存在が不可欠となる。そのため、パターン語を I, II, O のどこからはじめるかによって並べ方のルールは異なる。上記の制約条件に基づいて導出される、各パターン語 I, II, O からはじまる文字列の並べ方のルールについて、以下に説明する。

20

【0050】

まず、湧き出し吸い込み対を持たない O のパターン語からはじめる場合には、次のようなルールがある。 O から始まる語表現に対して、それが構造安定な流れを表すために以下が必要十分である。

$O-1$) 実際に施すことができる操作は、 B_0, B_2, C のみであり、その結果、 O から始まる語表現はこれら三つの語を列挙したものとなる。

$O-2$) 操作列の語表現において C の語が含まれるためには、それ以前に必ず B_2 が存在しなければならない。

【0051】

30

このような文字列を O 系列の語 ($O-Word$) と呼び、そのルールの正しさは数学的に証明可能である (Lemma 3.1 参照)。

【数 5】

Lemma 3.1. *Let $OO_1 \cdots O_{M-1}$ be a sequence of operations, where $O_i \in \{B_0, B_2, C\}$. Then the followings are equivalent.*

1) *The sequence is a word representation for a structurally stable Hamiltonian vector field in $D_{\zeta}(M)$.*

2) *For any i with $O_i = C$, there is some $j < i$ such that $O_j = B_2$.*

【0052】

40

次に、パターン語 I から始まる語表現については、以下のルールが成り立つ必要がある。

$I-1$) 実施可能な操作は A_0, A_2, B_0, B_2, C の全てであり、その結果、 I から始まる語表現はこれら 5 種類の操作語を列挙したものである。

$I-2$) 操作列の語表現において、 B_0 あるいは B_2 の語が含まれるためには、それ以前に必ず C か A_2 が存在しなければならない。

【0053】

このような文字列を I 系列の語 ($I-Word$) と呼び、そのルールの正しさは数学的に証明可能である (Lemma 3.3 参照)。

【数 6】

Lemma 3.3. Let $IO_1 \cdots O_k$ be a sequence of operations, where $O_i \in \{A_0, A_2, B_0, B_2, C\}$ for $i = 1, \dots, k$. Then the followings are equivalent.

- 1) The sequence is a word representation for a structurally stable Hamiltonian vector with the 1-source-sink point in $\mathcal{D}_\zeta(M)$.
- 2) For any $i > 1$ with $O_i = B_0$ or B_2 , there is some $j < i$ such that $O_j = A_0$ or C .

【0 0 5 4】

最後にパターン語 II から始まる語表現については、以下のルールが成り立つ必要がある。

$II - 1$) 実施可能な操作は A_0, B_0, B_2, C であり、その結果、 I から始まる語表現はこれら四つの語を列挙したものである。

$II - 2$) 操作列の語表現において C の語が含まれるためには、それ以前に必ず B_2 が存在しなければならない。

【0 0 5 5】

このような文字列を II 系列の語 ($II - Word$) と呼び、そのルールの正しさは数学的に証明可能である (Lemma 3.4 参照)。

【数 7】

Lemma 3.4. Let $II\tilde{O}_1 \cdots \tilde{O}_k$ be a sequence of operations, where $\tilde{O}_i \in \{A_0, B_0, B_2, C\}$ for $i = 1, \dots, k$. Then the followings are equivalent.

- 1) The sequence is a word representation for a structurally stable vector field with the 1-source-sink point in $\mathcal{D}_\zeta(M)$.
- 2) For any $i > 1$ with $\tilde{O}_i = C$, there is some $j < i$ such that $\tilde{O}_j = B_2$.

【0 0 5 6】

つづいて、上述した本実施形態の方法をコンピュータにより実施するための装置構成や処理の詳細について、以下に詳しく説明する。なお、以上の本実施形態による方法を、人またはコンピュータにより実施してもよく、以下の実施形態による処理等を人により実施する場合に用いてもよいものである。

【0 0 5 7】

〔語表現装置の構成〕

次に、本実施形態における語表現装置の構成について図 7 を参照して説明する。図 7 は、本実施形態が適用される本語表現装置 100 の一例を示すブロック図であり、該構成のうち本実施形態に関係する部分のみを概念的に示している。

【0 0 5 8】

図 7 に示すように、本実施形態における語表現装置 100 は、概略的に、制御部 102 と記憶部 106 を少なくとも備え、本実施形態において、更に、入出力制御インターフェース部 108 と通信制御インターフェース部 104 を備える。ここで、制御部 102 は、語表現装置 100 の全体を統括的に制御する CPU 等である。また、通信制御インターフェース部 104 は、通信回線等に接続されるルータ等の通信装置 (図示せず) に接続されるインターフェースであり、入出力制御インターフェース部 108 は、入力装置 112 や出力装置 114 に接続されるインターフェースである。また、記憶部 106 は、各種のデータベースやテーブルなどを格納する装置である。これら語表現装置 100 の各部は任意の通信路を介して通信可能に接続されている。更に、この語表現装置 100 は、ルータ等の通信装置および専用線等の有線または無線の通信回線を介して、ネットワーク 300 に通信可能に接続されている。

【0 0 5 9】

記憶部 106 に格納される各種のデータベースやテーブル (シミュレーション結果ファイル 106a、流線図ファイル 106b、および、語表現ファイル 106c 等) は、固定ディスク装置等のストレージ手段である。例えば、記憶部 106 は、各種処理に用いる各

種のプログラム、テーブル、ファイル、データベース、および、ウェブページ等を格納する。

【 0 0 6 0 】

これら記憶部 1 0 6 の各構成要素のうち、シミュレーション結果ファイル 1 0 6 a は、シミュレーション部 1 0 2 a により数理的にシミュレーションされた、シミュレーション結果を示すデータを記憶するシミュレーション結果記憶手段である。例えば、シミュレーション結果ファイル 1 0 6 a は、構造物の形状を示す設計変数の値や、その構造物に対する所定の流体（海流や気流等）の流体力学的シミュレーション結果（各空間座標における流体の圧力や流れの向き等）を示すデータであってもよい。なお、シミュレーション結果ファイル 1 0 6 a は、風洞実験等の実験室内でのモデル計測などを通じて事前に入力装置 1 1 2 を介して入力されたデータをシミュレーション結果として記憶してもよい。

【 0 0 6 1 】

また、流線図ファイル 1 0 6 b は、流線図等の流線を示すデータを記憶する流線データ記憶手段である。例えば、流線図ファイル 1 0 6 b に記憶される流線データは、シミュレーション結果を示すデータに基づいて流線解析部 1 0 2 b により解析された流線を示すデータであってもよい。

【 0 0 6 2 】

また、語表現ファイル 1 0 6 c は、語表現データを記憶する語表現記憶手段である。例えば、語表現ファイル 1 0 6 c に記憶される語表現データは、パターン語と操作語の組み合わせからなる文字列等である。

【 0 0 6 3 】

図 7 に戻り、入出力制御インターフェース部 1 0 8 は、入力装置 1 1 2 や出力装置 1 1 4 の制御を行う。ここで、出力装置 1 1 4 としては、モニタ（家庭用テレビを含む。）の他、スピーカを用いることができる（なお、以下においては出力装置 1 1 4 をモニタとして記載する場合がある）。また、入力装置 1 1 2 としては、キーボード、マウス、およびマイク等を用いることができる。

【 0 0 6 4 】

また、図 7 において、制御部 1 0 2 は、OS（Operating System）等の制御プログラムや、各種の処理手順等を規定したプログラム、および、所要データを格納するための内部メモリを有する。そして、制御部 1 0 2 は、これらのプログラム等により、種々の処理を実行するための情報処理を行う。制御部 1 0 2 は、機能概念的に、シミュレーション部 1 0 2 a、流線解析部 1 0 2 b、パターン語付与部 1 0 2 c、操作語付与部 1 0 2 d、および、極大語表現部 1 0 2 e を備える。

【 0 0 6 5 】

このうち、シミュレーション部 1 0 2 a は、構造物に対する流体のシミュレーションを行うシミュレーション手段である。ここで、シミュレーション部 1 0 2 a は、2 次元平面におけるシミュレーションに限られず、3 次元空間における流体のシミュレーションを行ってもよいものである。また、シミュレーション部 1 0 2 a は、公知の最適化手法を用いて、構造物の最適化を行ってもよい。例えば、シミュレーション部 1 0 2 a は、構造物の形状を決定する設計変数を、焼きなまし法や遺伝的アルゴリズム法等を用いて繰り返し変化させながら、当該構造物に対する流体シミュレーションを行って、適切な構造物の形状（例えば、水流に対する抵抗の少ない橋脚の形状等）を求めてもよい。なお、本実施形態において、シミュレーション部 1 0 2 a は、シミュレーション結果を示すデータをシミュレーション結果ファイル 1 0 6 a に格納する。例えば、シミュレーション部 1 0 2 a は、構造物の形状を示す設計変数の値や、その構造物に対する所定の流体（海流や気流等）の流体力学的シミュレーション結果（各空間座標における流体の圧力や流れの向きや抵抗等）を示すデータを格納してもよい。

【 0 0 6 6 】

また、流線解析部 1 0 2 b は、流線解析を行う流線解析手段である。ここで、流線解析部 1 0 2 b は、シミュレーション部 1 0 2 a によるシミュレーション結果に対し流線解析

を行って流線図を導出してもよい。例えば、流線解析部 102b は、シミュレーション結果ファイル 106a に記憶された、数値シミュレーションや実験のデータから、公知の手法を用いて流線図を作成する。具体的には、流線解析部 102b は、数値シミュレーション結果から、*saddle point* や *source-sink* などをすべて計算した後、その点における流れ関数の値と同じ値を持つ流れ関数の等高線をすべて描画し、また、境界 (*boundary*) 上の流れ関数の値と同じ値を持つ流れ関数の等高線をすべて描画することにより流線図の作成が可能となる。なお、3 次元のシミュレーション結果の場合、流線解析部 102b は、構造物における断面における 2 次元のデータに変換してから、流線解析を行ってもよい。断面とする平面は任意であるが好適には、流線解析部 102b は、流体の流れ方向 (一様流) の方向に沿った断面で 2 次元データに変換してもよい。例えば、列車や自動車や航空機等の乗り物においては、進行方向に沿って断面を生成してもよい。また、流線解析部 102b は、*Computational Homology* (非特許文献 1) に記載の技術等を用いて、流れ場から条件を満たす特徴的な構造を抽出してもよい。なお、本実施形態において、流線解析部 102b は、作成した流線図データを流線図ファイル 106b に格納する。

【0067】

また、パターン語付与部 102c は、一つの穴を有する単連結外部領域において位相幾何学的に採り得る 2 種類の流れパターンを規定する語 (例えば、パターン語 I, II) のうちのいずれか一語を付与するパターン語付与手段である。ここで、パターン語付与部 102c は、上記に加えて、二つの穴を有する二重連結外部領域において吸い込み湧き出し対を持たないパターンを追加した、合計 3 種類の流れパターンを規定する語 (すなわちパターン語 I, II, O) のうちのいずれか一語を付与してもよい。より具体的には、3 種類の流れパターンは、

1) 吸い込み湧き出し対をもち、二つの *ss-orbit* - *saddle connection* をもつパターン I、

2) 吸い込み湧き出し対をもち、一つの *saddle point*、それを結ぶ *homoclinic saddle connection* と二つの *ss-saddle connection* をもつパターン II、および

3) 吸い込み湧き出し対をもたないパターン O、
である。

【0068】

ここで、パターン語付与部 102c は、流線図から語表現を求めるアルゴリズム (「アルゴリズム B」と呼ぶ。) において、流線図に、*ss-orbit* - *saddle connection* が存在するか否かを判定し、*ss-orbit* - *saddle connection* が存在する場合にパターン I の語を与える I 分類ステップと、I 分類ステップにおいて *ss-orbit* - *saddle connection* が存在しない場合に、流線図において *ss-saddle connection* が存在するか否かを判定し、*ss-saddle connection* が存在する場合にパターン II の語を与え、一方、*ss-saddle connection* が存在しない場合にパターン O の語を与える II/O 分類ステップと、を行ってもよい。これにより、パターン語付与部 102c は、流線図が属する系列 (I 系列, II 系列, O 系列) を適切に判別することができる。

【0069】

また、操作語付与部 102d は、流れパターンに一つの穴を加える場合に位相幾何学的に採り得る 5 種類の操作を規定した語 (例えば、操作語 A_0 , A_2 , B_0 , B_2 , C) のうちのいずれか一語を繰り返し付与することにより、N 個の穴を有する多重連結外部領域に対応する語表現を形成させる操作語付与手段である。より具体的には、5 種類の操作は、

1) 一本の *ss-orbit* を、一つの *saddle point*、それを結び内部に穴をもつ *homoclinic saddle connection* と二つの *ss-saddle connection* に置き換える A_0 操作、

10

20

30

40

50

2) 一本の $ss - orbit$ を、二つの $ss - \partial - saddle\ connection$ と新たに追加した境界上の二つの $\partial - saddle$ に置き換える A_2 操作、

3) 一本の $closed\ orbit$ を、一つの穴と $saddle\ point$ を追加して8の字をした2本の $homoclinic$ 軌道に置き換える B_0 操作、

4) 一本の $closed\ orbit$ を、新たに追加した穴の境界上に二つの $\partial - saddle$ をつけて一本の $\partial - saddle\ connection$ でつなぐような軌道に置き換える B_2 操作、および、

5) 既に $2k$ 個 ($k > 0$) の $\partial - saddle$ をもつ境界に、新たに二つの $\partial - saddle$ を付け加えて一本の $\partial - saddle\ connection$ でつなぎ内部に新たに付け加えた穴を置く C 操作、

である。

【0070】

ここで、操作語付与部102dは、以下の制約条件に従って操作語を付与してもよい。すなわち、操作語付与部102dは、5種類の操作語を付与する場合に、

1) 一本の $ss - orbit$ が存在することを条件に、操作語 A_0 または A_2 を付与し

2) 一本の $closed\ orbit$ が存在することを条件に、操作語 B_0 または B_2 を付与し、

3) $\partial - saddles$ を持つ境界が存在することを条件に、操作語 C を付与してもよい。なお、当該制約条件にしたがった操作語付与部102dの具体的な処理の詳細については、フローチャートを参照して後述する。なお、本実施形態において、操作語付与部102dは、パターン語に対して付与した操作語の文字列である語表現を語表現ファイル106cに格納する。

【0071】

また、極大語表現部102eは、パターン語付与部102cおよび操作語付与部102dにより形成された語表現（パターン語および操作語の組み合わせからなる文字列）を極大語に変換する極大語表現手段である。すなわち、全ての採り得る流れパターンを書き出すアルゴリズム（以下、「アルゴリズムA」と呼ぶ。）において、パターン語付与部102cおよび操作語付与部102dにより形成された語表現群は、流れパターンを全て書き出しているものの、互いに同じ流れパターンを規定した語表現や、互いに包含関係となる流れパターンを規定した語表現が存在する。そこで、極大語表現部102eは、これらの語表現群に対して、重複する語表現や、包含される語表現等を排除することにより、極大語表現（ $maximal\ word\ representation$ ）とする処理を行う。例えば、極大語表現部102eは、以下の表で示される包含関係に従って、語表現を入れ替えて極大語表現を形成させる。なお、下表において「 $=$ 」は一致関係、「 $\leq$ 」または「 $\geq$ 」は包含関係を示す。唯一の例外は B_2 と C であり、これは入れ替えても包含関係が成立しないので、この二つは入れ替えることができないので、このことを、 $B_2C || CB_2$ と象徴的に表している。なお、当該関係式にしたがった極大語表現部102eの具体的な処理の詳細については、フローチャートを参照して後述する。

【表1】

	A_0	A_2	B_0	B_2	C
A_0	$=$	$=$	$\leq$	$\leq$	$=$
A_2		$=$	$=$	$=$	$\leq$
B_0			$=$	$\leq$	$\geq$
B_2				$=$	$ $
C					$=$

【0072】

以上が、本実施形態における語表現装置100の構成の一例である。なお、語表現装置

10

20

30

40

50

１００は、ネットワーク３００を介して外部システム２００に接続されてもよい。この場合、通信制御インターフェース部１０４は、語表現装置１００とネットワーク３００（またはルータ等の通信装置）との間における通信制御を行う。すなわち、通信制御インターフェース部１０４は、他の端末と通信回線を介してデータを通信する機能を有する。また、ネットワーク３００は、語表現装置１００と外部システム２００とを相互に接続する機能を有し、例えば、インターネット等である。

【００７３】

また、外部システム２００は、ネットワーク３００を介して、語表現装置１００と相互に接続され、シミュレーション結果データや流線図データ等の各種データに関する外部データベースや、接続された情報処理装置に語表現方法を実行させるためのプログラム等を提供する機能を有する。 10

【００７４】

ここで、外部システム２００は、ＷＥＢサーバやＡＳＰサーバ等として構成していてもよい。また、外部システム２００のハードウェア構成は、一般に市販されるワークステーション、パーソナルコンピュータ等の情報処理装置およびその付属装置により構成していてもよい。また、外部システム２００の各機能は、外部システム２００のハードウェア構成中のＣＰＵ、ディスク装置、メモリ装置、入力装置、出力装置、通信制御装置等およびそれらを制御するプログラム等により実現される。

【００７５】

以上で、本実施形態の構成の説明を終える。 20

【００７６】

[語表現装置１００の処理]

次に、このように構成された本実施形態における語表現装置１００の処理の一例について、以下に図面を参照して詳細に説明する。

【００７７】

[基本処理]

まず、語表現装置１００により実行される基本処理の一例について、上述した図１を再び参照して説明する。なお、以下の基本処理は、全ての採り得る流れパターンを書き出すアルゴリズムＡにおいても、流線図から語表現を求めるアルゴリズムＢにおいても基本となる処理である。なお、以下の例では、パターン語の付与（ステップＳＡ－１）が先に 30
行われ、操作語の付与（ステップＳＡ－２）が後に行われるが、これに限られず、操作語の付与を先に行い、後にパターン語の付与を行ってもよいものである。

【００７８】

図１に示すように、まず、パターン語付与部１０２ｃは、パターン語Ⅰ，Ⅱのうちのいずれか一語を付与する（ステップＳＡ－１）。ここで、パターン語付与部１０２ｃは、上記に加えてパターンⅢを追加した、合計３種類のパターン語Ⅰ，Ⅱ，Ⅲのうちのいずれか一語を付与してもよい。より具体的には、３種類のパターン語は、

- １）吸い込み湧き出し対をもち、二つの $ss - \partial - saddle\ connection$ をもつパターンを規定するパターン語Ⅰ、
- ２）吸い込み湧き出し対をもち、一つの $saddle\ point$ 、それを結ぶ $homoclinic\ saddle\ connection$ と二つの $ss - saddle\ connection$ をもつパターンを規定するパターン語Ⅱ、および 40
- ３）吸い込み湧き出し対をもたないパターンを規定するパターン語Ⅲ、
である。

【００７９】

そして、操作語付与部１０２ｄは、パターン語付与部１０２ｃにより付与されたパターン語に対して、５種類の操作語 A_0, A_2, B_0, B_2, C のうちのいずれか一語を付与する（ステップＳＡ－２）。より具体的には、５種類の操作語は、

- １）一本の $ss - orbit$ を、一つの $saddle\ point$ 、それを結び内部に穴をもつ $homoclinic\ saddle\ connection$ と二つの $ss - s$ 50

`addle connection`に置き換える操作を規定した操作語 A_0 、

2) 一本の `ss-orbit` を、二つの `ss- $\partial$ -saddle connection` と新たに追加した境界上の二つの `$\partial$ -saddle` に置き換える操作を規定した操作語 A_2 、

3) 一本の `closed orbit` を、一つの穴と `saddle point` を追加して 8 の字をした 2 本の `homoclinic` 軌道に置き換える操作を規定した操作語 B_0 、

4) 一本の `closed orbit` を、新たに追加した穴の境界上に二つ `$\partial$ -saddle` をつけて一本の `$\partial$ -saddle connection` でつなぐような軌道に置き換える操作を規定した操作語 B_2 、および、

5) 既に $2k$ 個 ($k > 0$) の `$\partial$ -saddle` をもつ境界に、新たに二つの `$\partial$ -saddle` を付け加えて一本の `$\partial$ -saddle connection` でつなぎ内部に新たに付け加えた穴を置く操作を規定した操作語 C 、

である。なお、上記の操作は、穴を追加する場合の操作を規定したものであることから、ある流線図に操作語を割り当てていくアルゴリズム B においては、当該流線図に対して上記操作の逆の操作（逆の置き換え操作）を行うことになる。

【0080】

ここで、操作語付与部 102d は、上記の操作が `ss-orbit` や `closed orbit` 等の存在を前提にしていることから、以下の制約条件に従って操作語を付与してもよい。すなわち、操作語付与部 102d は、5 種類の操作語を付与する場合に、

1) 一本の `ss-orbit` が存在することを条件に、操作語 A_0 または A_2 を付与し、

2) 一本の `closed orbit` が存在することを条件に、操作語 B_0 または B_2 を付与し、

3) `$\partial$ -saddles` を持つ境界が存在することを条件に、操作語 C を付与してもよい。

【0081】

そして、操作語付与部 102d は、穴の数が N 個に達したか否かを判定する（ステップ SA-3）。例えば、操作語付与部 102d は、穴が 1 つの単連結外部領域 $D_k(0)$ におけるパターン語 I 、 II に対して、穴が N 個となるまで ($N-1$) 個の操作語を付与し終えたか否かを判定する。また、操作語付与部 102d は、穴が 2 つの二重連結外部領域 $D_k(1)$ におけるパターン語 O に対して、穴が N 個となるまで ($N-2$) 個の操作語を付与し終えたか否かを判定する。なお、アルゴリズム A においては、求める多重連結外部領域の穴の数を N 個と設定しているが、アルゴリズム B においては予め穴の数を設定していない。アルゴリズム B の場合は、操作語付与部 102d は、流線図に対する操作語に従った置き換え操作によって、流線図が初期パターン (I 、 II 、または O) に達したか否かで、穴の数が N 個に達したか否かを判定してもよい。

【0082】

穴の数が N 個に達していない場合（ステップ SA-3, No）、操作語付与部 102d は、これまでに作成した文字列に対して、更に操作語を付与する（ステップ SA-2）。

【0083】

一方、穴の数が N 個に達した場合（ステップ SA-3, Yes）、操作語付与部 102d は、これまでに作成した文字列を語表現として語表現ファイル 106c に格納して処理を終える。

【0084】

以上が、本実施形態における語表現装置 100 の基本処理の一例である。このように語表現を形成させることによって、構造物設計の最適化手法に利用することができる。例えば、語表現装置 100 は、アルゴリズム A において、構造物が採り得る全ての流れパターンを規定する語表現群を語表現ファイル 106c に記憶しておき、アルゴリズム B において、シミュレーション結果がどの流れパターンに対応するか語表現にて表す。これにより

、シミュレーション部 102a により行われた探索範囲が、全ての流れパターンのうちのどの範囲まで行われたかが、語表現の一致によって把握することができる。シミュレーション部 102a は、語表現の一致不一致に従って、探索範囲が一部の流れパターンに限定されていると判断した場合は、最適化手法において探索範囲を広げる処理を行ってもよい。

【0085】

例えば、シミュレーション部 102a は、焼きなまし法において、ローカルミニマムを抜け出せるように、設計変数に対して大きな変更を許容するように、グローバルパラメータ T（温度）を高く設定してもよい。このほか、他の用途として、利用者が、アルゴリズム A にて導出された全ての流れパターンの中から所望のパターン（例えば、オイルフェンスの設計において封じ込め可能な流れパターン）を設定してもよい。その場合、シミュレーション部 102a は、設定された所望のパターンを規定する語表現との一致不一致に従って、探索範囲が当該所望のパターンになるよう調整してもよい。例えば、上記と同様に、シミュレーション部 102a は、焼きなまし法において、探索範囲が所望のパターンと不一致の場合は、設計変数に対して大きな変更を許容するようにグローバルパラメータ T（温度）を高く設定し、一方、探索範囲が所望のパターンと一致している場合は、設計変数に対して小さな変更を求めるようにグローバルパラメータ T（温度）を低く設定してもよい。

【0086】

[アルゴリズム B]

つづいて、上述した基本処理を基礎として、流線図から語表現を求めるアルゴリズム B の処理の詳細について、以下に図 8 ～ 図 15 を参照して説明する。

【0087】

[B - 1 . パターン語の割り当て処理]

上述した基本処理のステップ SA - 1 におけるパターン語の割り当て処理について図 8 を参照して以下に説明する。図 8 は、パターン語の割り当て処理の一例を示すフローチャートである。

【0088】

ここで、与えられた流線図は、図 6 に示したように円内の領域として描画の便宜上記載したが、本アルゴリズムは、もともと一様流を持つ非有界な領域における流れの判定アルゴリズムである。数値シミュレーションや実際の計測によって得られる流れは非有界な流れ場（から必要な部分を切り出した）の流線図であることから、円内の領域への変換が必要であるかどうか問題になるが、本願発明者らによる鋭意検討の結果、本アルゴリズムを適用するにあたり、そのような変換は不要であることがわかった。それに基づいて、与えられた流線図に対して以下の処理を施せば、その流線図が I 系列か II 系列か O 系列かがわかる。すなわち、以下の処理を実施する場合に、流線図をステレオ射影法等によって円内の領域への変換することは不要である。

【0089】

図 8 に示すように、パターン語付与部 102c は、流線図から語表現を求めるアルゴリズム B において、与えられた流線図において、`ss -  $\partial$  - saddle connection` が存在するか否かを判定する（ステップ SA - 11）。

【0090】

`ss -  $\partial$  - saddle connection` が存在すると判定した場合（ステップ SA - 11, Yes）、パターン語付与部 102c は、パターン語 I を付与する（ステップ SA - 12）。すなわち、与えられた流線図は I 系列と判定される。

【0091】

一方、`ss -  $\partial$  - saddle connection` が存在しない場合（ステップ SA - 11, No）、パターン語付与部 102c は、流線図において `ss - saddle connection` が存在するか否かを判定する（ステップ SA - 13）。

【0092】

10

20

30

40

50

そして、`ss - saddle connection`が存在すると判定した場合（ステップSA - 13, Yes）、パターン語付与部102cは、パターン語IIを付与する（ステップSA - 15）。すなわち、与えられた流線図はII系列と判定される。

【0093】

一方、`ss - saddle connection`が存在しない場合（ステップSA - 13, No）、パターン語付与部102cは、パターン語Oを付与する（ステップSA - 14）。すなわち、与えられた流線図はO系列と判定される。

【0094】

以上が、パターン語の割り当て処理の一例である。

【0095】

10

[B - 2. I系列における操作語の割り当て処理]

つづいて、アルゴリズムBにおけるI系列の操作語の割り当て処理の一例について、図9および図10を参照して説明する。図9および図10は、アルゴリズムBにおけるI系列の操作語の割り当て処理の一例を示すフローチャートである。

【0096】

図9に示すように、流線解析部102bは、シミュレーション結果ファイル106aに記憶された、数値シミュレーションや実験データから、流線解析により流線図を作成する（ステップSB - 1）。具体的には、流線解析部102bは、数値シミュレーション結果から、`saddle point`や`source - sink`などをすべて計算した後、その点における流れ関数の値と同じ値を持つ流れ関数の等高線をすべて描画し、また、境界（`boundary`）上の流れ関数の値と同じ値を持つ流れ関数の等高線をすべて描画することにより流線図の作成が可能となる。そのほか、流線解析部102bは、`Computational Homology`（非特許文献1）に記載の技術等を用いて、流れ場から条件を満たす特徴的な構造を抽出してもよい。なお、本実施形態において、流線解析部102bは、作成した流線図データを流線図ファイル106bに格納する。なお、データ管理上、流線解析部102bは、得られたすべての線や`saddle point`, `ss - orbits`, ∂ -`saddle`, `boundary`, `source - sink`に番号をつけて流線図データを扱ってもよい。これにより、それらの包含関係をつけてその順位をつけてデータ構造を決めることによって、以降の前処理や各系列のアルゴリズムを計算機上で扱いやすくなる。

30

【0097】

そして、流線解析部102bは、流線図に対して前処理を施す（ステップSB - 2）。例えば、流線解析部102bは、与えられた流線図に対して以下の三つの前処理を施す。なお、これらの操作を施した回数をエラー数と呼び、語表現にてどの程度流線を表すことができているかの指標となる。例えば、渦潮では、平面上の流体の動きにとどまらず、平面の垂直方向にも海流が移動しているので、以下の前処理を行うことで、平面状の流れと近似して、前処理を行った回数（エラー回数）だけ、真から外れていることの指標としている。

1. ∂ -`saddle`の安定多様体、不安定多様体あるいは極限集合が、`sink`, `source`の`limit cycle`を含むならば、それを閉じて`sink`, `source`, `limit cycle`を消去する。
2. `sink`の（吸引）領域を、`center / disk`と`homoclinic (  $\partial$  - ) saddle connection`に置き換える。
3. `source`の（発散）領域を、`center / disk`と`homoclinic (  $\partial$  - ) saddle connection`に置き換える。

【0098】

そして、操作語付与部102dは、流線解析部102bにより前処理が施された流線図について、 ∂ -`saddle`が存在するか判定する（ステップSB - 3）。

【0099】

∂ -`saddle`が存在する場合（ステップSB - 3, Yes）、操作語付与部102

50

∂ は、ちょうど2つの ∂ -saddle が存在する境界で、 ss - ∂ -saddle connection を持つものがあるか否かを判定する (ステップSB-5)。

【0100】

ちょうど2つの ∂ -saddle が存在する境界を含む ss - ∂ -saddle connection を持つものが k 個ある場合 (ステップSB-5, Yes)、操作語付与部102dは、操作語 A_2 を k 個付与し (ステップSB-6)、流線解析部102bは、流線図上において、これら2つの ∂ -saddles と境界 (boundary) を消去して、一本の ss -orbit に置き換える操作を k 回行う (ステップSB-7)。

【0101】

一方、ちょうど2つの ∂ -saddle が存在する境界を含む ss - ∂ -saddle connection を持つものがない場合 (ステップSB-5, No)、操作語付与部102dは、ちょうど2つの ∂ -saddle が存在する境界で、同じ境界上の ∂ -saddle connection を持つものがあるか否かを判定する (ステップSB-8)。

【0102】

ちょうど2つの ∂ -saddle が存在する境界を含む ∂ -saddle connection を持つものが k 個ある場合 (ステップSB-8, Yes)、操作語付与部102dは、操作語 B_2 を k 個付与し (ステップSB-9)、流線解析部102bは、流線図上において、同じ境界上の ∂ -saddle connection で結ばれた ∂ -saddle と境界 (boundary) を消去して一本の periodic orbit に置き換える操作を k 回行う (ステップSB-10)。

【0103】

一方、ちょうど2つの ∂ -saddle が存在する境界を含む ∂ -saddle connection を持つものがない場合 (ステップSB-8, No)、操作語付与部102dは、4つ以上の ∂ -saddle を持つ境界の中に、同じ境界上の ∂ -saddle connection で、その内側が center/disk であるものがあるか否かを判定する (ステップSB-11)。

【0104】

∂ -saddle を4つ以上含む境界上の ∂ -saddle connection で、その内側が center/disk であるような境界が k 個ある場合 (ステップSB-11, Yes)、操作語付与部102dは、操作語 C を k 個付与し (ステップSB-12)、流線解析部102bは、流線図上において、同じ境界上の ∂ -saddle connection と、それによって結ばれている2つの ∂ -saddle と、それらに囲まれる center/disk を消去する操作を k 回行う (ステップSB-13)。

【0105】

一方、 ∂ -saddle を4つ以上含む境界上の ∂ -saddle connection で、その内側が center/disk であるような境界がない場合 (ステップSB-11, No)、もっとも内側にある Figure eight (すなわち ∂ -saddle-connection で、その内側の少なくとも片方が center/disk であるもの) が存在するので、その数を k 個とし、操作語付与部102dは、操作語 B_0 を k 個付与し (ステップSB-14)、流線解析部102bは、流線図上において、もっとも内側にある Figure eight から saddle と boundary を一つ消去して、center/disk を囲む periodic orbit に置き換える操作を k 回行う (ステップSB-15)。ここで、「Figure eight」とは、一つのサドル点とそれをつなぐ2つの homoclinic connections からなり、各 homoclinic connection はその内部に center/disk を囲んでいるような (8の字のような形をした) 流れの構造を指す。

【0106】

そして、以上の処理を行った後、処理をステップSB-3に戻し、まだ ∂ -saddle が存在する場合は (ステップSB-3, Yes)、語表現装置100は、上述した処理

を繰り返す。

【0107】

一方、 ∂ -saddle がなくなった場合は(ステップSB-3, No)、図10に示すように、操作語付与部102dは、saddle point (サドル点)が存在するか否かを判定する(ステップSB-16)。

【0108】

saddle point が存在する場合(ステップSB-16, Yes)、操作語付与部102dは、Figure eight パターンに存在する saddle point があるか否かを判定する(ステップSB-17)。

【0109】

Figure eight パターンに存在する saddle point がk個ある場合(ステップSB-17, Yes)、操作語付与部102dは、操作語B₀をk個付与し(ステップSB-18)、流線解析部102bは、流線図上において、もっとも内側にある Figure eight パターンを一つの center/disk まわりの periodic orbit に置き換える操作をk回行う(ステップSB-19)。

【0110】

一方、Figure eight パターンに存在する saddle point がない場合(ステップSB-17, No)、操作語付与部102dは、操作語A₀を付与し(ステップSB-20)、流線解析部102bは、saddle point (サドル点)とそれを結ぶ homoclinic connection および、それらに囲まれる center/disk を消去する(ステップSB-21)。

【0111】

そして、以上の処理を行った後、処理をステップSB-16に戻し、まだ saddle point が存在する場合は(ステップSB-16, Yes)、語表現装置100は、上述した処理を繰り返す。

【0112】

一方、saddle point がもはやない場合は(ステップSB-16, No)、語表現装置100は、アルゴリズムBにおけるI系列の操作語の割り当て処理を終える。なお、得られた文字列の中から一つA₂を選んで、それをIと置き換えて文字列の先頭に移動させ、残りの文字列をルールに従って並び替えれば、極大語(maximal word)に変換することができる。

【0113】

[B-3. II系列における操作語の割り当て処理]

つづいて、アルゴリズムBにおけるII系列の操作語の割り当て処理の一例について、図11を参照して説明する。図11は、アルゴリズムBにおけるII系列の操作語の割り当て処理の一例を示すフローチャートである。なお、I系列の操作語の割り当て処理のステップSB-1およびステップSB-2と同様に、流線解析により流線図の作成と前処理が行われていてもよい。

【0114】

図11に示すように、操作語付与部102dは、与えられた流線図について、 ∂ -saddle が存在するか判定する(ステップSC-1)。

【0115】

∂ -saddle が存在する場合(ステップSC-1, Yes)、操作語付与部102dは、ちょうど2つの ∂ -saddle が存在する境界で、その境界上の ∂ -saddle connection を持つものがあるか否かを判定する(ステップSC-2)。

【0116】

ちょうど2つの ∂ -saddle が存在する境界を含む ∂ -saddle connection を持つものがk個ある場合(ステップSC-2, Yes)、操作語付与部102dは、操作語B₂をk個付与し(ステップSC-3)、流線解析部102bは、流線図上において、同じ境界上の ∂ -saddle と ∂ -saddle connection

10

20

30

40

50

を一本の *periodic orbit* に置き換える操作を k 回行う (ステップ $SC - 4$)。

【0117】

一方、ちょうど2つの ∂ -*saddle* が存在する境界を含む ∂ -*saddle connection* を持つものがない場合 (ステップ $SC - 2$, No)、操作語付与部 102d は、4つ以上の ∂ -*saddle* を持つ境界の中に、同じ境界上の ∂ -*saddle connection* で、その内側が *center/disk* であるものがあるか否かを判定する (ステップ $SC - 5$)。

【0118】

∂ -*saddle* を4つ以上含む境界上の ∂ -*saddle connection* で、その内側が *center/disk* であるような境界が k 個ある場合 (ステップ $SC - 5$, Yes)、操作語付与部 102d は、操作語 C を k 個付与し (ステップ $SC - 6$)、流線解析部 102b は、流線図上において、同じ境界上の ∂ -*saddle connection* と、それによって結ばれている二つの ∂ -*saddle* と、それらに囲まれる *center/disk* を消去する操作を k 回行う (ステップ $SC - 7$)。 10

【0119】

一方、 ∂ -*saddle* を4つ以上含む境界上の ∂ -*saddle connection* で、その内側が *center/disk* であるような境界がない場合 (ステップ $SC - 5$, No)、もっとも内側にある *Figure eight* が存在するので、その数を k 個とし、操作語付与部 102d は、操作語 B_0 を k 個付与し (ステップ $SC - 8$)、流線解析部 102b は、流線図上において、もっとも内側にある *Figure eight* パターンを、一つの *center/disk* を囲む *periodic orbit* に置き換える操作を k 回行う (ステップ $SC - 9$)。 20

【0120】

そして、以上の処理を行った後、処理をステップ $SC - 1$ に戻し、まだ ∂ -*saddle* が存在する場合は (ステップ $SC - 1$, Yes)、語表現装置 100 は、上述した処理を繰り返す。

【0121】

一方、 ∂ -*saddle* がもはやない場合は (ステップ $SC - 1$, No)、操作語付与部 102d は、*saddle point* (サドル点) が存在するか否かを判定する (ステップ $SC - 10$)。 30

【0122】

saddle point が存在する場合 (ステップ $SC - 10$, Yes)、操作語付与部 102d は、*Figure eight* パターンに存在する *saddle point* があるか否かを判定する (ステップ $SC - 11$)。

【0123】

Figure eight パターンに存在する *saddle point* が k 個ある場合 (ステップ $SC - 11$, Yes)、操作語付与部 102d は、操作語 B_0 を k 個付与し (ステップ $SC - 12$)、流線解析部 102b は、流線図上において、もっとも内側にある *Figure eight* パターンを一つの *center/disk* まわりの *periodic orbit* に置き換える操作を k 回行う (ステップ $SC - 13$)。 40

【0124】

一方、*Figure eight* パターンに存在する *saddle point* がない場合 (ステップ $SC - 11$, No)、*saddle point* とそれを結ぶ *homoclinic connection* および、それらに囲まれる *center/disk* が存在するので、その数を k 個とし、操作語付与部 102d は、操作語 A_0 を k 個付与し (ステップ $SC - 14$)、流線解析部 102b は、*saddle point* (サドル点) とそれを結ぶ *homoclinic connection* および、それらに囲まれる *center/disk* を消去する操作を k 回行う (ステップ $SC - 15$)。

【0125】

そして、以上の処理を行った後、処理をステップSC - 10に戻し、まだsaddle pointが存在する場合は(ステップSC - 10, Yes)、語表現装置100は、上述した処理を繰り返す。

【0126】

一方、saddle pointがもはやない場合は(ステップSC - 10, No)、語表現装置100は、アルゴリズムBにおけるII系列の操作語の割り当て処理を終える。なお、得られた文字列の中から一つA₀を選んで、それをIIと置き換えて文字列の先端に移動し、残りの文字列をルールに従って並び替えれば極大語(maximal word)に変換することが可能である。

【0127】

10

[B - 4. O系列における操作語の割り当て処理]

つづいて、アルゴリズムBにおけるO系列の操作語の割り当て処理の一例について、図12を参照して説明する。図12は、アルゴリズムBにおけるO系列の操作語の割り当て処理の一例を示すフローチャートである。なお、I系列の操作語の割り当て処理のステップSB - 1およびステップSB - 2と同様に、流線解析により流線図の作成と前処理が行われていてもよい。

【0128】

図12に示すように、操作語付与部102dは、与えられた流線図について、 ∂ -saddleが存在するか判定する(ステップSD - 1)。

【0129】

20

∂ -saddleが存在する場合(ステップSD - 1, Yes)、操作語付与部102dは、ちょうど2つの ∂ -saddleが存在する境界で、同じ境界上の ∂ -saddle connectionを持つものがあるか否かを判定する(ステップSD - 2)。

【0130】

ちょうど2つの ∂ -saddleが存在する境界を ∂ -saddle connectionを持つものがk個ある場合(ステップSD - 2, Yes)、操作語付与部102dは、操作語B₂をk個付与し(ステップSD - 3)、流線解析部102bは、流線図上において、同じ境界上の ∂ -saddle connectionで結ばれた ∂ -saddleと境界(boundary)を消去して一本のperiodic orbitに置き換える操作をk回行う(ステップSD - 4)。

30

【0131】

一方、ちょうど2つの ∂ -saddleが存在する境界を含む ∂ -saddle connectionを持つものがない場合(ステップSD - 2, No)、操作語付与部102dは、4つ以上の ∂ -saddleを持つ境界の中に、同じ境界上の ∂ -saddle connectionで、その内側がcenter/diskであるものがあるか否かを判定する(ステップSD - 5)。

【0132】

∂ -saddleを4つ以上含む境界上の ∂ -saddle connectionで、その内側がcenter/diskであるような境界がk個ある場合(ステップSD - 5, Yes)、操作語付与部102dは、操作語Cをk個付与し(ステップSD - 6)、流線解析部102bは、流線図上において、同じ境界上の ∂ -saddle connectionと、それによって結ばれている二つの ∂ -saddleと、それらに囲まれるcenter/diskを消去する操作をk回行う(ステップSD - 7)。

40

【0133】

一方、 ∂ -saddleを4つ以上含む境界上の ∂ -saddle connectionで、その内側がcenter/diskであるような境界がない場合(ステップSD - 5, No)、もっとも内側にあるFigure eightが存在するので、その数をk個とし、操作語付与部102dは、操作語B₀をk個付与し(ステップSD - 8)、流線解析部102bは、流線図上において、もっとも内側にあるFigure eightパターンを、一つのcenter/diskを囲むperiodic orbitに置き

50

換える操作を k 回行う (ステップ $S D - 9$)。

【0134】

そして、以上の処理を行った後、処理をステップ $S D - 1$ に戻し、まだ ∂ -saddle が存在する場合は (ステップ $S D - 1$, Yes)、語表現装置 100 は、上述した処理を繰り返す。

【0135】

一方、 ∂ -saddle がもはやない場合は (ステップ $S D - 1$, No)、操作語付与部 102d は、saddle point (サドル点) が存在するか否かを判定する (ステップ $S D - 10$)。

【0136】

saddle point が k 個存在する場合 (ステップ $S D - 10$, Yes)、操作語付与部 102d は、操作語 B_0 を k 個付与し (ステップ $S D - 11$)、流線解析部 102b は、流線図上において、もっとも内側にある Figure eight パターンを、一つの center/disk まわりの periodic orbit に置き換える操作を k 回行う (ステップ $S D - 12$)。

【0137】

そして、以上の処理を行った後、処理をステップ $S D - 10$ に戻し、まだ saddle point が存在する場合は (ステップ $S D - 10$, Yes)、語表現装置 100 は、上述した処理を繰り返す。

【0138】

一方、saddle point がもはやない場合は (ステップ $S D - 10$, No)、語表現装置 100 は、アルゴリズム B における O 系列の操作語の割り当て処理を終える。なお、得られた文字列の先頭に O をつけて、それをルールに従って並び替えれば極大語 (maximal word) に変換することが可能である。

【0139】

以上が、流線図から語表現を求めるアルゴリズム B の処理の詳細な例である。これにより、任意の流線図に対応する語表現を適切に求めることができる。なお、以上のアルゴリズム B の処理は、一例に過ぎず、本発明は、上記のアルゴリズムに限定されるものではない。例えば、アルゴリズム B の処理の他の例として、以下の処理を行ってもよいものである。

【0140】

[B-5. I, II 系列における操作語の割り当て処理 (亜種アルゴリズム)]

ここで、アルゴリズム B における I, II 系列の操作語の割り当て処理 (亜種アルゴリズム) の一例について、図 13 および図 14 を参照して説明する。図 13 および図 14 は、アルゴリズム B (I, II-Word alg) における I, II 系列の操作語の割り当て処理の他の例を示すフローチャートである。なお、上述した割り当て処理のステップ $S B - 1$ およびステップ $S B - 2$ と同様に、流線解析により流線図の作成と前処理が行われていてもよい。また、以下の操作語の割り当て処理において、操作語を付与する場合は、後ろから前に付与するものとする。

【0141】

図 13 および図 14 に示すように、操作語付与部 102d は、流線解析部 102b により前処理が施された流線図について、吸い込み湧き出し対 (source-sink) に繋がっていない saddle が存在する、または、 ∂ -saddle connection が存在するか判定する (ステップ $S I - 1$)。

【0142】

吸い込み湧き出し対 (source-sink) に繋がっていない saddle が存在する、または、 ∂ -saddle connection が存在する場合 (ステップ $S I - 1$, Yes)、操作語付与部 102d は、ちょうど 2 つの ∂ -saddle が存在する境界で、 ∂ -saddle connection を持つものがあるか否かを判定する (ステップ $S I - 2$)。

10

20

30

40

50

【0143】

ちょうど2つの ∂ -saddleが存在する境界で、 ∂ -saddle connectionを持つものがk個ある場合(ステップSI-2, Yes)、操作語付与部102dは、操作語B₂をk個付与し(ステップSI-3)、流線解析部102bは、流線図上において、同じ境界上の ∂ -saddle connectionで結ばれた ∂ -saddleと境界(boundary)を消去して一本のperiodic orbitに置き換える操作をk回行う(ステップSI-4)。

【0144】

ちょうど2つの ∂ -saddleが存在する境界で、 ∂ -saddle connectionを持つものがない場合であって(ステップSI-2, No)、もっとも内側にあるFigure eightパターンがある場合(ステップSI-5, Yes)、操作語付与部102dは、操作語B₀を付与し、操作語付与部102dは、流線図上において、もっとも内側にあるFigure eightパターンを一つのcenter/diskまわりのperiodic orbitに置き換える操作を行う(ステップSI-6)。なお、この操作(操作語B₀を付与し、periodic orbitに置き換える操作)は、可能な限り繰り返し実行される。

【0145】

一方、もっとも内側にあるFigure eightパターンに存在するsaddle pointがない場合(ステップSI-5, No)、すなわち ∂ -saddleを4つ以上含む境界上の ∂ -saddle connectionで、その内側がcenter/diskであるような境界がある場合、操作語付与部102dは、操作語Cを付与し、流線解析部102bは、流線図上において、その境界上の ∂ -saddle connectionと、それによって結ばれている二つの ∂ -saddleと、それらに囲まれるcenter/diskを消去する操作を繰り返し行う(ステップSI-7)。なお、この操作(操作語Cを付与し、center/diskを消去する操作)は、可能な限り繰り返し実行される。

【0146】

そして、以上の処理を行った後、処理をステップSI-1に戻し、まだ吸い込み湧き出し対(source-sink)に繋がっていないsaddleが存在する、または、 ∂ -saddle connectionが存在する場合は(ステップSI-1, Yes)、語表現装置100は、上述した処理を繰り返す。

【0147】

一方、吸い込み湧き出し対(source-sink)に繋がっているsaddleのみが存在し、かつ、 ∂ -saddle connectionがもはやない場合は(ステップSI-1, No)、図14に示すように、操作語付与部102dは、ss- ∂ -saddleが存在するか判定する(ステップSH-1)。

【0148】

そして、ss- ∂ -saddleが存在しない場合(ステップSH-1, No)、流線解析部102bは、saddle point(サドル点)とそれを結ぶhomoclinic saddle connectionおよび、それらに囲まれるcenter/diskを消去する操作を1回行う(ステップSH-2)。

【0149】

そして、ss-saddleがk個あるとき、操作語付与部102dは、操作語A₀をk個付与する(ステップSH-3)。

【0150】

そして、流線解析部102bは、saddle point(サドル点)とそれを結ぶhomoclinic saddle connectionおよび、それらに囲まれるcenter/diskを消去する操作をk回行う(ステップSH-4)。

【0151】

そして、パターン語付与部102cは、パターン語IIを付与し(ステップSH-5)

、語表現装置 100 は、アルゴリズム (I, II - Word alg) における I, II 系列の操作語の割り当て処理を終える。なお、得られた文字列は極大語 (maximal word) である。

【0152】

一方、上記のステップ SH - 1 において、 $ss - \partial - saddle$ が存在する場合 (ステップ SH - 1, Yes)、流線解析部 102b は、流線図上において、これら二つの $\partial - saddles$ と境界 (boundary) を消去して、一本の $ss - orbit$ に置き換える操作を 1 回行う (ステップ SH - 7)。

【0153】

そして、 $ss - \partial - saddle$ が k 個あるとき、操作語付与部 102d は、操作語 A_2 を k 個付与する (ステップ SH - 8)。

【0154】

そして、流線解析部 102b は、流線図上において、これら二つの $\partial - saddles$ と境界 (boundary) を消去して、一本の $ss - orbit$ に置き換える操作を k 回行う (ステップ SH - 9)。

【0155】

そして、操作語付与部 102d は、 $ss - saddle$ が k 個あるとき、操作語 A_0 を k 個付与する (ステップ SH - 10)。

【0156】

そして、流線解析部 102b は、 $saddle\ point$ (サドル点) とそれを結ぶ $homoclinic\ saddle\ connection$ および、それらに囲まれる $center/disk$ を消去する操作を k 回行う (ステップ SH - 11)。

【0157】

そして、パターン語付与部 102c は、パターン語 I を付与し (ステップ SH - 12)、語表現装置 100 は、アルゴリズム B (I, II - Word alg) における I, II 系列の操作語の割り当て処理を終える。なお、得られた文字列は極大語 (maximal word) である。

【0158】

[B - 6. O 系列における操作語の割り当て処理 (亜種アルゴリズム)]

つづいて、アルゴリズム B における O 系列の操作語の割り当て処理 (亜種アルゴリズム) の一例について、図 15 を参照して説明する。図 15 は、アルゴリズム B (O - Word alg) における O 系列の操作語の割り当て処理の他の例を示すフローチャートである。なお、上述した割り当て処理のステップ SB - 1 およびステップ SB - 2 と同様に、流線解析により流線図の作成と前処理が行われていてもよい。また、以下の操作語の割り当て処理において、操作語を付与する場合は、後ろから前に付与するものとする。

【0159】

図 15 に示すように、操作語付与部 102d は、与えられた流線図について、 $saddle$ または $\partial - saddle$ が存在するか判定する (ステップ SJ - 1)。

【0160】

$saddle$ または $\partial - saddle$ が存在する場合 (ステップ SJ - 1, Yes)、操作語付与部 102d は、ちょうど 2 つの $\partial - saddle$ が存在する境界で、同じ境界上の $\partial - saddle\ connection$ を持つものがあるか否かを判定する (ステップ SJ - 2)。

【0161】

ちょうど 2 つの $\partial - saddle$ が存在する境界を繋ぐ $\partial - saddle\ connection$ を持つものが k 個ある場合 (ステップ SJ - 2, Yes)、操作語付与部 102d は、操作語 B_2 を k 個付与する (ステップ SJ - 3)。

【0162】

そして、流線解析部 102b は、流線図上において、その境界上の $\partial - saddle\ connection$ で結ばれた $\partial - saddle$ と境界 (boundary) を消去し

て一本の *periodic orbit* に置き換える操作を k 回行う (ステップ $SJ - 4$)。

【0163】

一方、ちょうど2つの ∂ -*saddle* が存在する境界を繋ぐ境界上の ∂ -*saddle connection* を持つものがない場合 (ステップ $SJ - 2$, No)、操作語付与部 102d は、もっとも内側にある *Figure eight* があるか否かを判定する (ステップ $SJ - 5$)。

【0164】

もっとも内側にある *Figure eight* があるもの (すなわち、 ∂ -*saddle connection* で、その内側の少なくとも片方 *center/disk* であるもの) がある場合 (ステップ $SJ - 5$, Yes)、操作語付与部 102d は、操作語 B_0 を付与し、流線解析部 102b は、流線図上において、一つの *center/disk* を囲む *periodic orbit* に置き換える操作を行う (ステップ $SJ - 6$)。なお、この操作 (操作語 B_0 を付与し、*periodic orbit* に置き換える操作) は、可能な限り繰り返し実行される。

【0165】

一方、もっとも内側にある *Figure eight* がない場合 (ステップ $SJ - 5$, No)、すなわち ∂ -*saddle* を4つ以上含む境界上の ∂ -*saddle connection* で、その内側が *center/disk* であるような境界がある場合、操作語付与部 102d は、操作語 C を付与し、流線解析部 102b は、流線図上において、その境界上の ∂ -*saddle connection* と、それによって結ばれている二つの ∂ -*saddle* と、それらに囲まれる *center/disk* を消去する (ステップ $SJ - 7$)。なお、この操作 (操作語 C を付与し、*center/disk* を消去する操作) は、可能な限り繰り返し実行される。

【0166】

そして、以上の処理を行った後、処理をステップ $SJ - 1$ に戻し、まだ *saddle* または、 ∂ -*saddle* が存在する場合は (ステップ $SJ - 1$, Yes)、語表現装置 100 は、上述した処理を繰り返す。

【0167】

一方、*saddle* または、 ∂ -*saddle* がもはやない場合は (ステップ $SJ - 1$, No)、語表現装置 100 は、アルゴリズム $B(0\text{-Word alg})$ における O 系列の操作語の割り当て処理を終える。なお、得られた文字列の先頭に O をつけると、それは極大語 (*maximal word*) である。

【0168】

以上が、流線図から語表現を求めるアルゴリズム B の処理 (亜種アルゴリズム) の詳細な例である。これにより、任意の流線図に対応する語表現を適切に求めることができる。

【0169】

[アルゴリズム A]

つづいて、上述した基本処理を基礎として、 $M + 1$ 個の穴を有する多重連結外部領域 $D_z(M)$ において採り得る全ての語表現を求めるアルゴリズム A の処理の詳細な一例について、以下に図 16 ~ 図 18 を参照して説明する。

【0170】

なお、以下に例示する本実施形態のアルゴリズム A では、パターン語の組み合わせから全文字列を生成したのち、各文字列が極大語になっているか否かを判定し、極大語表現になっていれば書き出すアルゴリズムとなっている。

【0171】

すなわち、操作語を付与する場合の制約条件に従えば、原則的にはすべての構造安定な流れの位相構造は、操作語を列挙することで表現することができる。ただし、注意すべき点は、「一つの流れパターンを表現する語は複数ある」ということである。また一方で「一つの語表現で表される流れのパターンも複数ある」という点である。この実例は、 IA

A_2 と IA_2A_0 等にもみることができる。語表現という観点からすれば、後者の点は特に大きな問題ではない。ある一つの語がある流れパターンの集合（グループ）を表現するにすぎないからである。一方、前者の点の一つの流れを複数の語が表現すると冗長であり、たいへん紛らわしいので問題である。そこで、「極大語表現（maximal word representation）」というものをを用いてこの問題を解決することができる。

【 0 1 7 2 】

この極大語表現は、 I 系列， II 系列， O 系列で与えられている操作を表す文字列の順序の入れ替えによって、それが表現している流れの集合がどうなるかを調べることによって導入される。例えば、文字 IA_0A_2 と IA_2A_0 なる二つの語表現について、これら10
が表す流れのパターンは同じであることが示されるので A_0 と A_2 の入れ替えによって表現されるパターンは変化しない。そこで、「 A_0 のほうが A_2 より先に語表現の中で現れる」というルールを追加して、重複する IA_2A_0 という表現を排除する。このような文字の入れ替えに関して起こる、語表現されるパターンの変化を象徴的に $A_0A_2 = A_2A_0$ のように表現することにする。このように語を入れ替えても、それが表すパターンが変化しないような組み合わせが、Lemma 3.5とLemma 3.6に与えられる。

【数 8】

Lemma 3.5. *The streamline patterns with the word representations $O_0O_1 \cdots O_iA_0CO_{i+3} \cdots O_k$ and $O_0O_1 \cdots O_iCA_0O_{i+3} \cdots O_k$ with $O_0 \in \{I, II\}$ are equivalent. Namely, A_0 and C commute in the word representation.*

Proof. Since A_0 does not increase boundaries with ∂ -saddles and C just changes a boundary with ∂ -saddles, these operations are independently applied. $\square$

【数 9】

Lemma 3.6. *The streamline patterns with the word representations $IO_1 \cdots O_iA_2O_{i+2} \cdots O_k$ and $IO_1 \cdots A_2O_iO_{i+2} \cdots O_k$ with $O_i \in \{A_0, B_0, B_2\}$ are equivalent.*

Proof. Since A_0 and A_2 are applied to an ss-orbit independently, A_0 and A_2 commute. The operation A_2 increases no closed orbits to which B_0 and B_2 are applied. Conversely, B_0 and B_2 add no ss-orbits. Hence B_0 and B_2 commute with A_2 . $\square$

【 0 1 7 3 】

一方で、語を入れ替えることによって、それが表現するパターンの集合が変化する場合もある。例えば IB_0A_0 と IA_0B_0 については、前者が表すパターンの集合は後者が表すパターンの集合に含まれる包含関係がある。すなわち集合の記号を使えば、 $(IB_0A_0) \subset (IA_0B_0)$ となる。このように入れ替えによって、一方が一方のパターンの集合を含んでしまう場合は、含まれる側の語表現は排除して、より大きな語表現のみを採用する。この関係式を象徴的に $B_0A_0 \leq A_0B_0$ と表現することにする。このような包含関係を生むような語の入れ替えの組み合わせはLemma 3.7で与えられる。

【数 10】

Lemma 3.7. *The inclusion relations $B_0A_0 \leq A_0B_0$, $B_2A_0 \leq A_0B_2$, $CA_2 \leq A_2C$, $B_2B_0 \leq B_0B_2$, $B_0C \leq CB_0$ hold for the exchange of two operations in the sequence.*

Proof. First, A_0 is independently applied to an ss-orbit, even if B_0 and B_2 exist in the sequence before A_0 . On the other hand, A_0 adds new closed orbits to which B_0 and B_2 are applied. Hence, we have $B_0A_0 \leq A_0B_0$ and $B_2A_0 \leq A_0B_2$. Second, C does not affect A_2 , since C creates no new ss-orbits. Conversely, A_2 adds a new boundary with two ∂ -saddles to which C can be applied. Thus $CA_2 \leq A_2C$ holds. Third, B_0 increases new closed orbits to which B_2 is applied, but B_2 does not. Hence, we have $B_2B_0 \leq B_0B_2$. Finally, $CB_0 \geq B_0C$ holds, since C increases new closed orbits and B_0 adds no boundary with ∂ -saddles. $\square$

【 0 1 7 4 】

これらの語の入れ替えによる包含関係式をまとめたものが下の表である。なお、 $B_2 C$ $|| C B_2$ は、 B_2 と C が入れ替えても包含関係が成立しないので、この二つは入れ替えることができないことを表している。

【表 2】

	A_0	A_2	B_0	B_2	C
A_0	=	=	$\leq$	$\leq$	=
A_2		=	=	=	$\leq$
B_0			=	$\leq$	$\geq$
B_2				=	$ $
C					=

【0 1 7 5】

なお、ある適切なアルゴリズムを1つ固定すると、これらの語表現の入れ替えによりできる極大語表現は、一つのパターンに対して、必ず一つしかないということを数学的に証明可能である (Lemma 3.8 参照)。

【数 1 1】

Lemma 3.8. *Each structurally stable streamline pattern on $\mathcal{D}_\zeta(M)$ has a maximal word representation.*

Proof. Notice that the relation $\leq$ implies that the reflexive and transitive relation on the set of O -words (resp. I -words, II -words). Since the number of O -words (resp. I -words, II -words) is finite, each word is less than or equal to some maximal word. $\square$

【0 1 7 6】

さらに、これに基づいて極大語表現の標準形を求めることができる。 O 系列に対する極大語表現の標準形を与えたのが Theorem 3.3 であり、 I 系列に対する極大語表現の標準形を与えたのが Theorem 3.4 であり、 II 系列に対するそれは Theorem 3.5 で与えられている。

【数 1 2】

Theorem 3.3. For any maximal O -word for a structurally stable streamline pattern in $\mathcal{D}_\zeta(M)$, there exist integers $k \geq 1$, $s_m, t_m \geq 0$ for $m = 1, \dots, k$ and $u_m > 0$ for $m = 1, \dots, k-1$ such that it is expressed by

$$OW(s_1, t_1, u_1) \cdots W(s_{k-1}, t_{k-1}, u_{k-1}) W(s_k, t_k, 0), \quad (2)$$

where $t_m > 0$ for any $m < k$ with $M = 1 + \sum_{m=1}^{k-1} (s_m + t_m + u_m) + s_k + t_k$.

Proof. Let us first note that it is unable to exchange B_0C and B_2C in the sequence of any O -word to obtain its maximal O -word owing to $B_2C \parallel CB_2$ and $B_0C \geq CB_0$. We show that every O -word assigned to the structurally stable streamline pattern in $\mathcal{D}_\zeta(M)$ can be reduced to the maximal O -word inductively as follows.

Starting the initial word O , we look for the location where $(C)^{u_1}$ first appears in the sequence of the O -word. If there exists no operation C in the sequence, i.e., $u_1 = 0$, then the O -word consist of the operations B_0 and B_2 and thus it can be reduced to $O(B_0)^{s_1}(B_2)^{s_2} = OW(s_1, t_1, 0)$ for some $s_1, t_1 \geq 0$ by exchanging B_0 and B_2 owing to $B_2B_0 \leq B_0B_2$, which ends the proof. On the other hand, if $u_1 \neq 0$, we can rearrange the sequence with B_0 and B_2 between O and $(C)^{u_1}$ by the block component $W(s_1, t_1, u_1)$ for some $t_1 > 0$. This is because if $t_1 = 0$ we have $O(B_0)^{s_1}(C)^{u_1} \cdots \geq O(C)^{u_1}(B_0)^{s_1} \cdots$ owing to $(B_0)^{s_1}(C)^{u_1} \geq (C)^{u_1}(B_0)^{s_1}$, which is not an O -word. Hence, the O -word is expressed as $OW(s_1, t_1, u_1) \cdots$ with $t_1, u_1 > 0$.

Now suppose that $u_m \neq 0$ and the O -word is reduced to $OW(s_1, t_1, u_1) \cdots W(s_m, t_m, u_m) \cdots$ with $t_i > 0$ for any $i \leq m$. Then we look for the location of $(C)^{u_{m+1}}$ in the sequence beyond $W(s_m, t_m, u_m)$. If $u_{m+1} = 0$, then the O -word can be reduced to

$$OW(s_1, t_1, u_1) \cdots W(s_m, t_m, u_m) W(s_{m+1}, t_{m+1}, 0)$$

for some $s_{m+1}, t_{m+1} \geq 0$ by exchanging B_0 and B_2 , which finishes the proof. Otherwise the sequence of B_0 and B_2 between $W(s_m, t_m, u_m)$ and $(C)^{u_{m+1}}$ is reduced to the block component $W(s_{m+1}, t_{m+1}, u_{m+1})$ for some $s_{m+1} \geq 0$ and $t_{m+1} > 0$. The positivity of t_{m+1} is assured as follows. If $t_{m+1} = 0$, we have

$$\begin{aligned} & OW(s_1, t_1, u_1) \cdots W(s_m, t_m, u_m) (B_0)^{s_{m+1}} (C)^{u_{m+1}} \cdots \\ & \leq OW(s_1, t_1, u_1) \cdots W(s_m, t_m, u_m + u_{m+1}) (B_0)^{s_{m+1}} \cdots \end{aligned}$$

owing to $B_0C \leq CB_0$. Then with $\tilde{u}_m = u_m + u_{m+1}$, the sequence is reduced to

$$OW(s_1, t_1, u_1) \cdots W(s_m, t_m, \tilde{u}_m) \cdots,$$

for which we can repeat the process again. □

【数 1 3】

Theorem 3.4. Let p, q, r be non-negative integers. Then, for any maximal I -word for a structurally stable streamline pattern in $\mathcal{D}_\zeta(M)$, there exist integers $k \geq 1$, $s_m, t_m \geq 0$ for $m = 1, \dots, k$ and $u_m > 0$ for $m = 1, \dots, k-1$ such that it is expressed by

$$I(A_0)^p(A_2)^q(C)^r W(s_1, t_1, u_1) \cdots W(s_{m-1}, t_{m-1}, u_{m-1}) W(s_m, t_m, 0), \quad (3)$$

where $t_m > 0$ for any $m < k$ with $M = p + q + r + \sum_{m=1}^{k-1} (s_m + t_m + u_m) + s_k + t_k$, if $p + r > 0$. Otherwise it is represented by $I(A_2)^q$ with $M = q$.

Proof. For a given I -word representing a structurally stable streamline pattern in $\mathcal{D}_\zeta(M)$, we can move all A_0 and A_2 in the sequence of operations before B_0 , B_2 and C by exchanging the order of the operations owing to $A_0 A_2 = A_2 A_0$, $C A_2 \leq A_2 C$, $B_2 A_2 = A_2 B_2$, $B_0 A_2 = A_2 B_0$, $C A_0 = A_0 C$, $B_0 A_0 \leq A_0 B_0$ and $B_2 A_0 \leq A_0 B_2$. Hence, the I -word is reduced to $I(A_0)^p(A_2)^q O_{p+q+1} \cdots O_M$ for some $p, q \geq 0$, in which $O_i \in \{B_0, B_2, C\}$ for $p + q < i \leq M$.

Suppose first that $p = 0$. If $O_{q+1} \neq C$, namely $r = 0$, then there contains no B_0 and B_2 in the following sequence, since they cannot be applied without A_0 or C in the sequence of I -words due to Lemma 3.3. Hence, if $p + r = 0$, the I -word is represented by $I(A_2)^q$ and $M = q$. On the other hand, if $O_{q+1} = C$, then there exists $r > 0$ such that the I -word is represented by $I(A_2)^q(C)^r O_{q+r+1} \cdots O_M$ in which $O_i \in \{B_0, B_2, C\}$ for $q + r < i \leq M$. The remaining sequence $O_{q+r+1} \cdots O_M$ can be reduced to some block components of B_0 , B_2 and C with using the same procedure as for O -words in Theorem 3.3. That is to say, there exist integers $k \geq 1$, $s_m, t_m \geq 0$ for $m = 1, \dots, k$ and $u_m > 0$ for $m = 1, \dots, k-1$ such that the I -word is expressed by

$$I(A_2)^q(C)^r W(s_1, t_1, u_1) \cdots W(s_{k-1}, t_{k-1}, u_{k-1}) W(s_k, t_k, 0),$$

where $t_m > 0$ for any $m < k$. This is the maximal expression for the I -word for $p = 0$ and $r > 0$.

Next we assume $p \neq 0$. Then B_0 and B_2 can exist in the remaining part of the sequence $I(A_0)^p(A_2)^q \cdots$ to which we can apply the same procedure for the remaining sequence of B_0 , B_2 and C as used for O -words. Hence, we have the maximal expression (3). $\square$

【数 1 4】

Theorem 3.5. Let p be a non-negative integer. Then, for any maximal II -word for a structurally stable streamline pattern in $\mathcal{D}_\zeta(M)$, there exist integers $k \geq 1$, $s_m, t_m \geq 0$ for $m = 1, \dots, k$ and $u_m > 0$ for $m = 1, \dots, k-1$ such that it is expressed by

$$II(A_0)^p W(s_1, t_1, u_1) \cdots W(s_{m-1}, t_{m-1}, u_{m-1}) W(s_m, t_m, 0), \quad (4)$$

where $t_m > 0$ for any $m < k$ with $M = p + \sum_{m=1}^{k-1} (s_m + t_m + u_m) + s_k + t_k$.

Proof. The proof is done similarly as in Theorem 3.4, since Lemma 3.4 indicates that II words have the same rule as O words in terms of the order of operations B_0 , B_2 and C in the sequence. $\square$

【0 1 7 7】

上記の理論に基づいて、文字列が極大語になっているか否かを判定し、極大語表現になっていれば書き出すアルゴリズム A について、図面を参照して以下に具体的に説明する。 40

【0 1 7 8】

[A - 1 . I 系列の極大語判定処理]

まず、I 系列の極大語判定処理について説明する。ここで、図 1 6 は、I 系列におけるアルゴリズム A の処理の一例を示すフローチャートである。

【0 1 7 9】

図 1 6 に示すように、まず、操作語付与部 1 0 2 d は、 A_0 , A_2 , B_0 , B_2 , C からなる M の長さの文字列 O_1 , O_2 , $\dots$, O_M を生成する (ステップ S E - 1)。5 種類のパターン語を M 個並べるので、 5^M 通りの並べ方ができる。

【0 1 8 0】

そして、極大語表現部 1 0 2 e は、文字列のうち判定対象とする文字位置 i を 1 に設定 50

する（ステップ S E - 2 ）。

【 0 1 8 1 】

そして、極大語表現部 1 0 2 e は、判定対象の文字 O i が A₀ か否かを判定する（ステップ S E - 3 ）。

【 0 1 8 2 】

判定対象の文字 O i が A₀ である場合（ステップ S E - 3 , Y e s ）、極大語表現部 1 0 2 e は、O i = A₀ である限り、判定対象とする文字位置 i をインクリメントする（ステップ S E - 4 ）。

【 0 1 8 3 】

そして、極大語表現部 1 0 2 e は、判定対象の文字 O i が A₂ か否かを判定する（ステップ S E - 5 ）。

【 0 1 8 4 】

判定対象の文字 O i が A₂ である場合（ステップ S E - 5 , Y e s ）、極大語表現部 1 0 2 e は、O i = A₂ である限り、判定対象とする文字位置 i をインクリメントする（ステップ S E - 6 ）。

【 0 1 8 5 】

そして、極大語表現部 1 0 2 e は、判定対象の文字 O i が C か否かを判定する（ステップ S E - 7 ）。

【 0 1 8 6 】

判定対象の文字 O i が C である場合（ステップ S E - 7 , Y e s ）、極大語表現部 1 0 2 e は、O i = C である限り、判定対象とする文字位置 i をインクリメントする（ステップ S E - 8 ）。

【 0 1 8 7 】

そして、極大語表現部 1 0 2 e は、文字位置 i が M + 1 に到達した場合（ステップ S E - 9 , Y e s ）、その文字列を極大語として維持し、語表現ファイル 1 0 6 c に書き出す（ステップ S E - 1 0 ）。

【 0 1 8 8 】

一方、上記において、判定対象の文字 O i が A₂ でない場合（ステップ S E - 5 , N o ）、判定対象の文字 O i が C でない場合（ステップ S E - 7 , N o ）、あるいは、文字位置 i が M + 1 に到達していない場合（ステップ S E - 9 , N o ）、i を i - 1 と置き換えて、残りの文字列すべてに対して O j を O j - 1 と置き換えて、O 系列のフローチャートの S G - 3 に移行する。

【 0 1 8 9 】

なお、上記ステップ S E - 3 において、判定対象の文字 O i が A₀ でない場合（ステップ S E - 3 , N o ）、極大語表現部 1 0 2 e は、判定対象の文字 O i が A₂ か否かを判定し（ステップ S E - 1 1 ）、O i = A₂ である限り、判定対象の文字位置 i をインクリメントする（ステップ S E - 1 2 ）。なお、判定対象の文字 O i が A₂ でない場合（ステップ S E - 1 1 , N o ）、そのまま次の処理に移行する。

【 0 1 9 0 】

そして、極大語表現部 1 0 2 e は、文字位置 i が M + 1 に到達したか否かを判定し（ステップ S E - 1 3 ）、文字位置 i が M + 1 に到達した場合（ステップ S E - 1 3 , Y e s ）、その文字列を極大語として維持する（ステップ S E - 1 4 ）。

【 0 1 9 1 】

一方、文字位置 i が M + 1 に到達していない場合（ステップ S E - 1 3 , N o ）、極大語表現部 1 0 2 e は、判定対象の文字 O i が C か否かを判定する（ステップ S E - 1 5 ）。なお、判定対象の文字 O i が C でない場合（ステップ S E - 1 5 , N o ）、その文字列を排除する（ステップ S E - 1 6 ）。

【 0 1 9 2 】

判定対象の文字 O i が C である場合（ステップ S E - 1 5 , Y e s ）、極大語表現部 1 0 2 e は、O i = C である限り、判定対象とする文字位置 i をインクリメントする（ステ

ップ S E - 17)。

【0193】

そして、文字位置 i が $M + 1$ に到達したか否かを判定し (ステップ S E - 18)、文字位置 i が $M + 1$ に到達した場合 (ステップ S E - 18, Yes)、その文字列を極大語として維持する (ステップ S E - 19)。

【0194】

一方、文字位置 i が $M + 1$ に到達していない場合 (ステップ S E - 18, No)、 i を $i - 1$ と置き換えて、残りの文字列すべてに対して O_j を $O_j - 1$ と置き換えて、O 系列のフローチャートのステップ S G - 3 に移行する。

【0195】

10

[A - 2 . I I 系列の極大語判定処理]

つづいて、I I 系列の極大語判定処理について説明する。ここで、図 17 は、I I 系列におけるアルゴリズム A の処理の一例を示すフローチャートである。

【0196】

図 17 に示すように、まず、操作語付与部 102d は、 A_0 、 B_0 、 B_2 、C からなる M の長さの文字列 O_1 、 O_2 、 $\dots$ 、 O_M を生成する (ステップ S F - 1)。4 種類のパターン語を M 個並べるので、 4^M 通りの文字列ができる。

【0197】

そして、極大語表現部 102e は、文字列のうち判定対象とする文字位置 i を 1 に設定する (ステップ S F - 2)。

20

【0198】

そして、極大語表現部 102e は、判定対象の文字 O_i が A_0 か否かを判定する (ステップ S F - 3)。

【0199】

判定対象の文字 O_i が A_0 である場合 (ステップ S F - 3, Yes)、極大語表現部 102e は、 $O_i = A_0$ である限り、判定対象とする文字位置 i をインクリメントする (ステップ S F - 4)。

【0200】

そして、文字位置 i が $M + 1$ に到達したか否かを判定し (ステップ S F - 5)、文字位置 i が $M + 1$ に到達した場合 (ステップ S F - 5, Yes)、その文字列を極大語として維持する (ステップ S F - 6)。

30

【0201】

一方、文字位置 i が $M + 1$ に到達していない場合 (ステップ S F - 5, No)、あるいは、ステップ S F - 3 において判定対象の文字 O_i が A_0 でない場合 (ステップ S F - 3, No)、 i を $i - 1$ と置き換えて、残りの文字列すべてに対して O_j を $O_j - 1$ と置き換えて、O 系列のフローチャートの S G - 3 に移行する。

【0202】

[A - 3 . O 系列の極大語判定処理]

最後に、O 系列の極大語判定処理について説明する。ここで、図 18 は、O 系列におけるアルゴリズム A の処理の一例を示すフローチャートである。

40

【0203】

図 18 に示すように、まず、操作語付与部 102d は、 B_0 、 B_2 、C からなる $M - 1$ の長さの文字列を生成する (ステップ S G - 1)。3 種類のパターン語を $(M - 1)$ 個並べるので、 3^{M-1} 通りの文字列ができる。

【0204】

そして、極大語表現部 102e は、文字列のうち判定対象とする文字位置 i を 1 に設定する (ステップ S G - 2)。

【0205】

そして、極大語表現部 102e は、文字位置 i が M 未満であるか否かを判定する (ステップ S G - 3)。なお、文字位置 i が M に達すれば (ステップ S G - 3, No)、その文

50

字列を極大語として維持する（ステップSG - 14）。

【0206】

文字位置 i が M 未満である場合（ステップSG - 3, Yes）、極大語表現部 102e は、判定対象の文字 O_i が B_0 か否かを判定する（ステップSG - 4）。

【0207】

判定対象の文字 O_i が B_0 である場合（ステップSG - 4, Yes）、極大語表現部 102e は、 $O_i = B_0$ である限り、判定対象の文字位置 i をインクリメントし（ステップSG - 5）、ステップSG - 3 に処理を戻し、上述した処理を繰り返す。

【0208】

一方、判定対象の文字 O_i が B_0 でない場合（ステップSG - 4, No）、極大語表現部 102e は、判定対象の文字 O_i が B_2 か否かを判定する（ステップSG - 6）。 10

【0209】

判定対象の文字 O_i が B_2 でない場合（ステップSG - 6, No）、極大語表現部 102e は、その文字列が極大語ではないとして排除する（ステップSG - 7）。

【0210】

一方、判定対象の文字 O_i が B_2 である場合（ステップSG - 6, Yes）、極大語表現部 102e は、 $O_i = B_2$ である限り、判定対象の文字位置 i をインクリメントする（ステップSG - 8）。

【0211】

そして、文字位置 i が M に到達したか否かを判定し（ステップSG - 9）、文字位置 i が M に到達した場合（ステップSG - 9, Yes）、極大語表現部 102e は、その文字列を極大語として維持する（ステップSG - 10）。 20

【0212】

一方、文字位置 i が M に到達していない場合（ステップSG - 9, No）、極大語表現部 102e は、判定対象の文字 O_i が C か否かを判定する（ステップSG - 11）。

【0213】

判定対象の文字 O_i が C でない場合（ステップSG - 11, No）、極大語表現部 102e は、その文字列は極大語ではないとして排除する（ステップSG - 13）。

【0214】

一方、判定対象の文字 O_i が C である場合（ステップSG - 11, Yes）、極大語表現部 102e は、 $O_i = C$ である限り、判定対象の文字位置 i をインクリメントし（ステップSG - 12）、ステップSG - 3 に処理を戻し、上述した処理を繰り返す。 30

【0215】

以上が、極大語表現の判定を伴うアルゴリズム A の処理の一例である。これにより、任意の穴の数 $M + 1$ を有する多重連結外部領域 $D_k (M)$ において、採り得る全ての流れパターンを重複なく文字列にて列挙することができる。

【0216】

例えば、本実施形態は、橋梁の設計等において用いることができる。まず橋梁の数を決め、その時に発生されうる流れのパターンを、上述したアルゴリズム A によってすべて書き出すことができる。次に、橋梁設計においては数値計算によるシミュレーション、あるいは、実験室内でのモデル計測などを通じて事前に様々なデータを得ておき、それらのデータを可視化したり計算機などで処理をして、流線図という流れの様子をとらえるスナップショットとして表現することができる。これを、上述したアルゴリズム B に入力することによって、それがアルゴリズム A によって求められた、どれに相当するかを把握することができる。 40

【0217】

従来、様々な試行錯誤によって最適な橋梁設計を行う場合、配置を変えて最適な流れの様子を設計するときに、すべての場合が尽くされたかどうか、またその中からどのような配置が最も橋梁設計後の流れにおいて望ましいものかを事前に議論することはできなかった。本実施形態によれば、アルゴリズム A によって、全ての流れパターンを把握すること 50

が可能になり、さらにアルゴリズム B によって、実際に最適化設計を行うようなシミュレーションや実験を行う場合に、得られたパターンがどのような極大語表現を持つかがわかることにより、所望のパターンに到るための配置変更の最も効率的な語表現を介することで、これまでは試行錯誤的に行われていた最適な橋梁設計を行うステップが飛躍的に縮減される。

【 0 2 1 8 】

また、オイルフェンスの設置に関しても、同様にフェンスの個数を入力して、その場合に達成されうるすべての流れのパターンがアルゴリズム A によって書き出されるため、そこからオイルを効率的に集めるために達成できる実現可能な流れを直ちに確定することができる。そして、周辺海流の計測や数値シミュレーションおよび実験などを行って試行錯誤的に最適配置を決める際に、得られた実験計測やシミュレーション結果を流線図として書き出し、それをアルゴリズム B に入力することによって語表現が得られる。それがアルゴリズム A から求められた流れの中のどれに対応しており、それが欲しい流れにどれくらい近いかなを確認することで、最短の探索により最適化を図ることができる。

【 0 2 1 9 】

従来の技術では、起こりうる全てのパターンもわからず、適当な条件のもとで限られた範囲での局所的な最適化しか行われなかったが、本実施形態によれば、全てのパターンとその語表現を予め知ることができ、さらに現在の状況を表現する語表現を知ることによって、大域的な最適化を効率的に行うことが可能になる。このように、河川や海洋、飛行など物体配置と流れの相互作用の最適状態を、短時間および低コストで高精度の計算を行うことが可能となる。また、目的に応じた流線パターンの特定によって、構造物設計の省力化を図ることができる。

【 0 2 2 0 】

[他の実施形態]

さて、これまで本発明の実施形態について説明したが、本発明は、上述した実施形態以外にも、特許請求の範囲に記載した技術的思想の範囲内において種々の異なる実施形態にて実施されてよいものである。

【 0 2 2 1 】

例えば、語表現装置 1 0 0 がスタンドアローンの形態で処理を行う場合を一例に説明したが、語表現装置 1 0 0 は、クライアント端末からの要求に応じて処理を行い、その処理結果を当該クライアント端末に返却するようにしてもよい。

【 0 2 2 2 】

また、実施形態において説明した各処理のうち、自動的に行われるものとして説明した処理の全部または一部を手動的に行うこともでき、あるいは、手動的に行われるものとして説明した処理の全部または一部を公知の方法で自動的に行うこともできる。

【 0 2 2 3 】

このほか、上記文献中や図面中で示した処理手順、制御手順、具体的名称、各処理の登録データや検索条件等のパラメータを含む情報、画面例、データベース構成については、特記する場合を除いて任意に変更することができる。

【 0 2 2 4 】

また、語表現装置 1 0 0 に関して、図示の各構成要素は機能概念的なものであり、必ずしも物理的に図示の如く構成されていることを要しない。

【 0 2 2 5 】

例えば、語表現装置 1 0 0 の各装置が備える処理機能、特に制御部 1 0 2 にて行われる各処理機能については、その全部または任意の一部を、CPU (Central Processing Unit) および当該 CPU にて解釈実行されるプログラムにて実現してもよく、また、ワイヤードロジックによるハードウェアとして実現してもよい。尚、プログラムは、後述する記録媒体に記録されており、必要に応じて語表現装置 1 0 0 に機械的に読み取られる。すなわち、ROM または HD などの記憶部 1 0 6 などには、OS (Operating System) として協働して CPU に命令を与え、各種処理を行う

ためのコンピュータプログラムが記録されている。このコンピュータプログラムは、RAMにロードされることによって実行され、CPUと協働して制御部102を構成する。

【0226】

また、このコンピュータプログラムは、語表現装置100に対して任意のネットワーク300を介して接続されたアプリケーションプログラムサーバに記憶されていてもよく、必要に応じてその全部または一部をダウンロードすることも可能である。

【0227】

また、本発明に係るプログラムを、コンピュータ読み取り可能な記録媒体に格納してもよく、また、プログラム製品として構成することもできる。ここで、この「記録媒体」とは、メモリーカード、USBメモリ、SDカード、フレキシブルディスク、光磁気ディスク、ROM、EPROM、EEPROM、CD-ROM、MO、DVD、および、Blu-ray（登録商標）Disc等の任意の「可搬用の物理媒体」を含むものとする。

【0228】

また、「プログラム」とは、任意の言語や記述方法にて記述されたデータ処理方法であり、ソースコードやバイナリコード等の形式を問わない。なお、「プログラム」は必ずしも単一的に構成されるものに限られず、複数のモジュールやライブラリとして分散構成されるものや、OS（Operating System）に代表される別個のプログラムと協働してその機能を達成するものをも含む。なお、実施形態に示した各装置において記録媒体を読み取るための具体的な構成、読み取り手順、あるいは、読み取り後のインストール手順等については、周知の構成や手順を用いることができる。

【0229】

記憶部106に格納される各種のデータベース等（シミュレーション結果ファイル106a、流線図ファイル106b、語表現ファイル106c等）は、RAM、ROM等のメモリ装置、ハードディスク等の固定ディスク装置、フレキシブルディスク、および、光ディスク等のストレージ手段であり、各種処理やウェブサイト提供に用いる各種のプログラム、テーブル、データベース、および、ウェブページ用ファイル等を格納する。

【0230】

また、語表現装置100は、既知のパーソナルコンピュータ、ワークステーション等の情報処理装置として構成してもよく、また、該情報処理装置に任意の周辺装置を接続して構成してもよい。また、語表現装置100は、該情報処理装置に本発明の方法を実現させるソフトウェア（プログラム、データ等を含む）を実装することにより実現してもよい。

【0231】

更に、装置の分散・統合の具体的な形態は図示するものに限られず、その全部または一部を、各種の付加等に応じて、または、機能負荷に応じて、任意の単位で機能的または物理的に分散・統合して構成することができる。すなわち、上述した実施形態を任意に組み合わせることで実施してもよく、実施形態を選択的に実施してもよい。

【産業上の利用可能性】

【0232】

以上詳述に説明したように、本発明によれば、流れ場における構造物設計を行うにあたって、構造物に対して採り得る流れパターンを経験や直感に頼ることなく容易に扱うことができる、流れパターンの語表現方法、語表現装置、および、プログラムを提供することができる。例えば、橋脚の設計、防波堤の配置、港湾の汚染物の除去、風力発電のブレードの設計、列車のパンタグラフの構造、オイルフェンスの最適配置などのように、構造物設計や配置を伴う様々な分野において極めて有用である。また、スポーツ用品の構造設計などのようにスポーツ力学等の分野に応用することも可能である。

【符号の説明】

【0233】

100 語表現装置

102 制御部

102a シミュレーション部

10

20

30

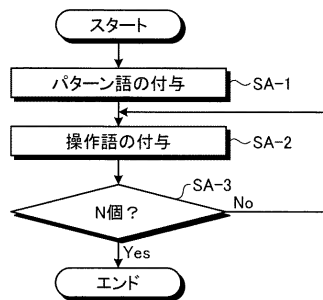
40

50

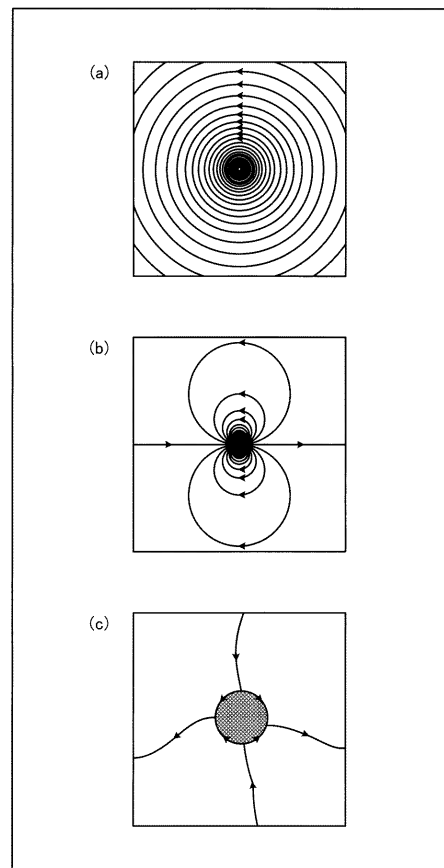
1 0 2 b 流線解析部
 1 0 2 c パターン語付与部
 1 0 2 d 操作語付与部
 1 0 2 e 極大語表現部
 1 0 4 通信制御インターフェース部
 1 0 6 記憶部
 1 0 6 a シミュレーション結果ファイル
 1 0 6 b 流線図ファイル
 1 0 6 c 語表現ファイル
 1 0 8 入出力制御インターフェース部
 1 1 2 入力装置
 1 1 4 出力装置
 2 0 0 外部システム
 3 0 0 ネットワーク

10

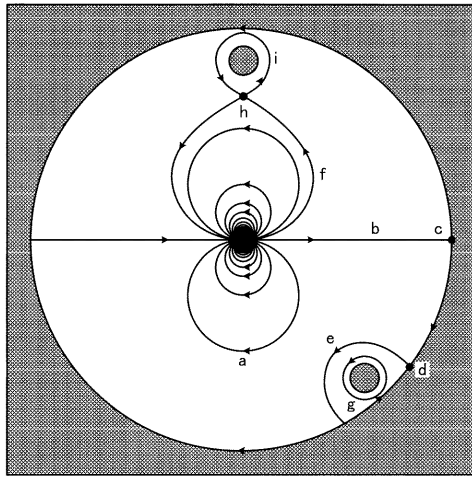
【図 1】



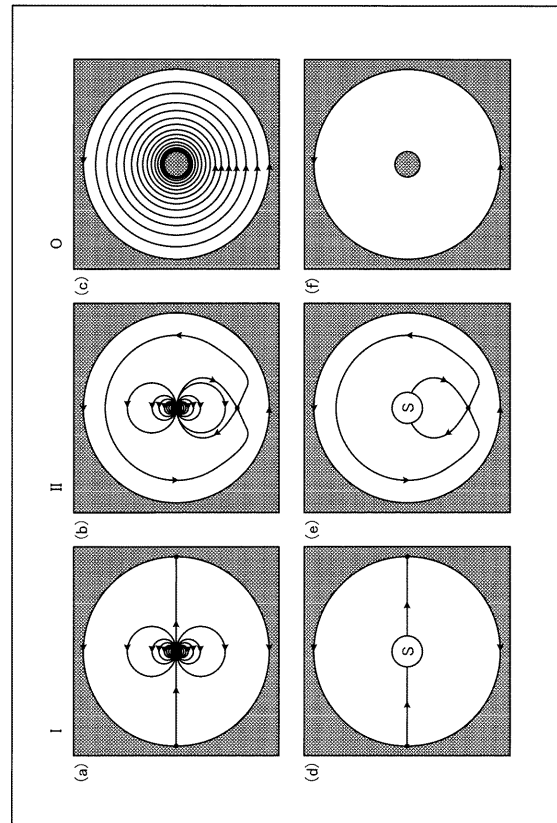
【図 2】



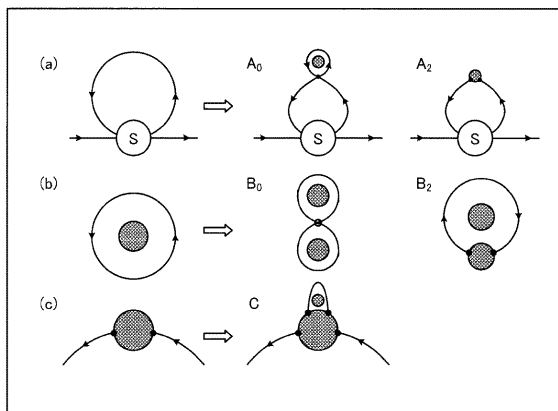
【図 3】



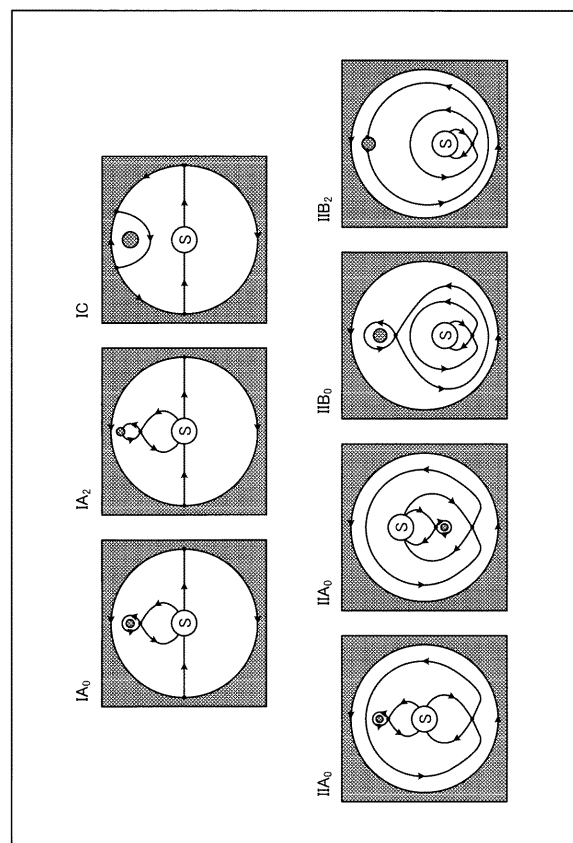
【図 4】



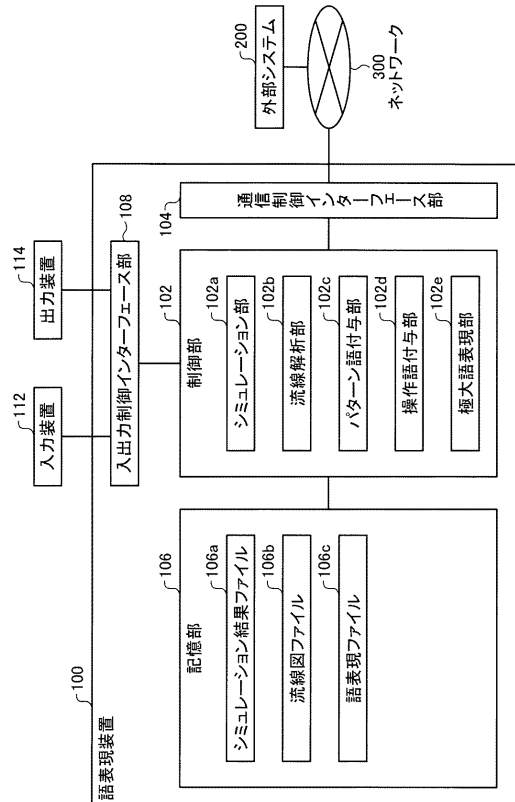
【図 5】



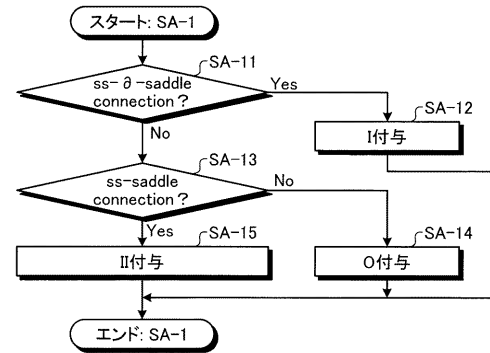
【図 6】



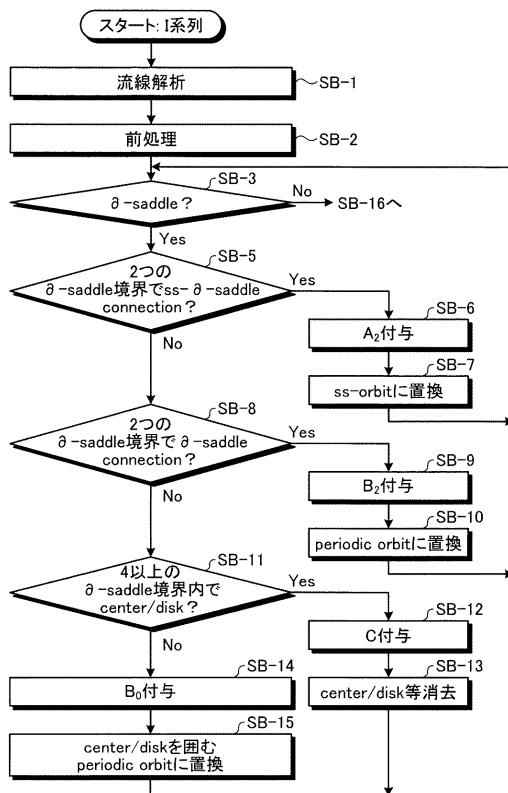
【図 7】



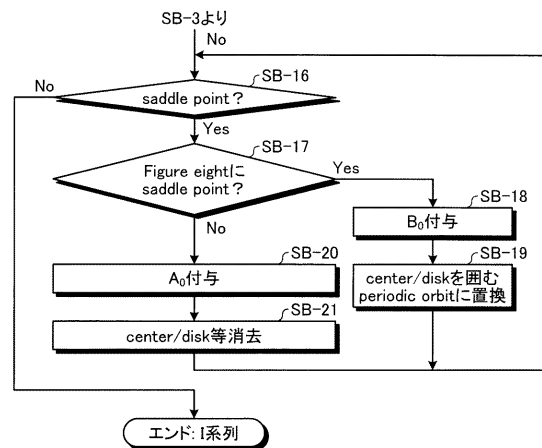
【図 8】



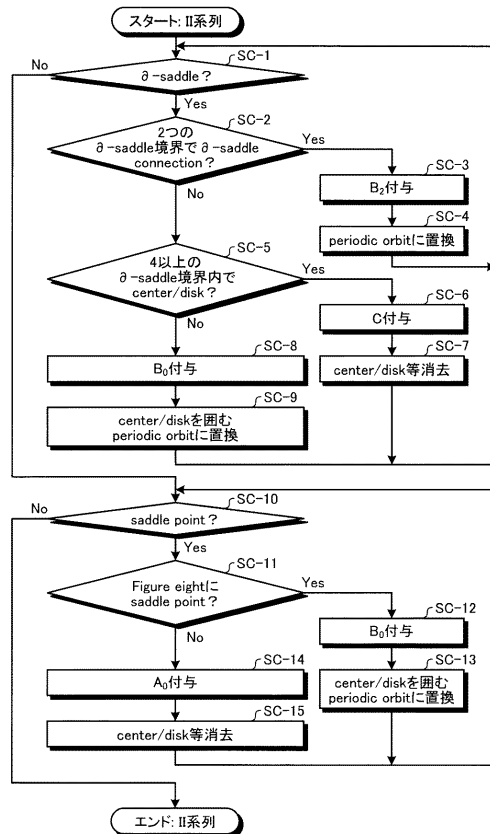
【図 9】



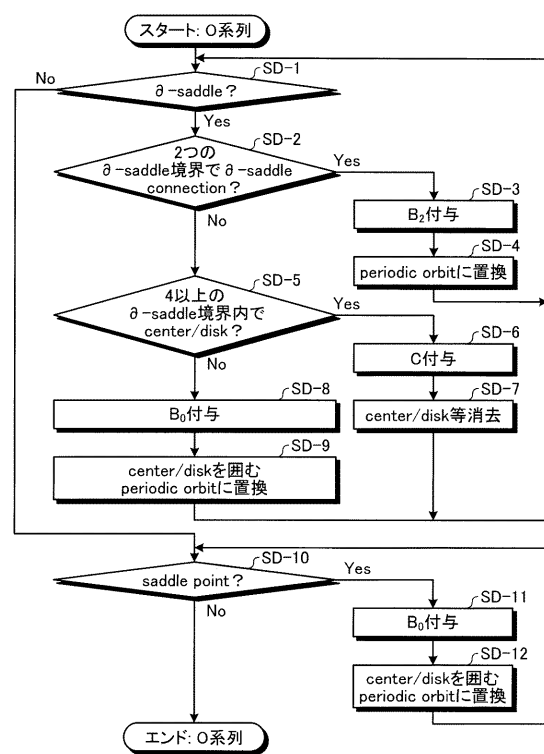
【図 10】



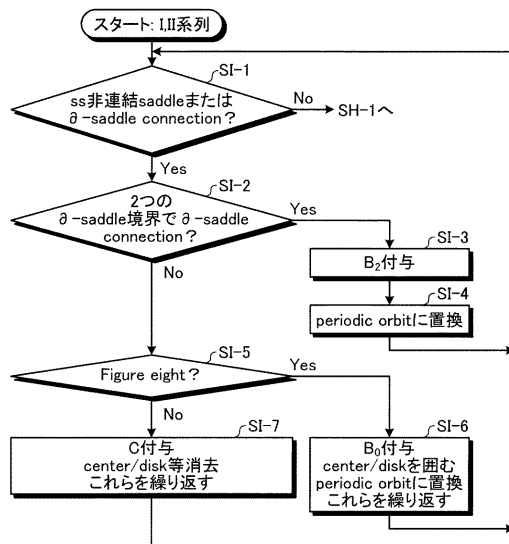
【図 1 1】



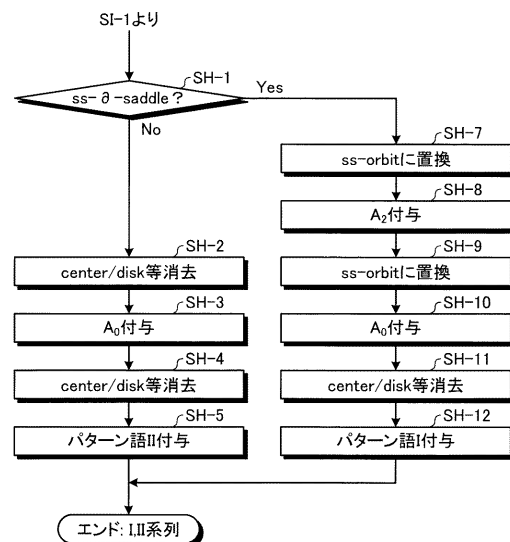
【図 1 2】



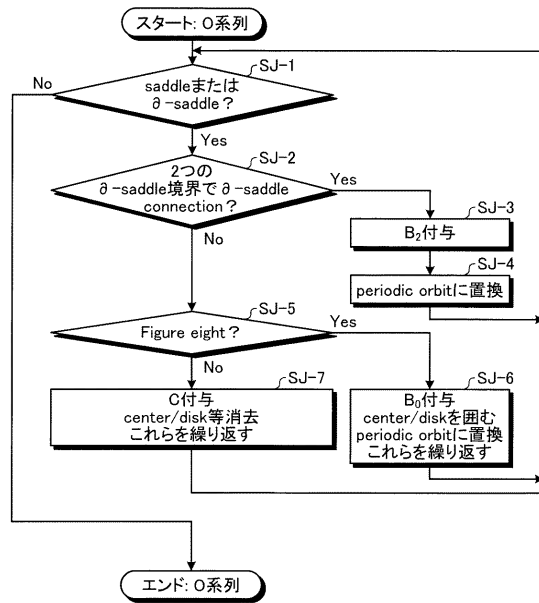
【図 1 3】



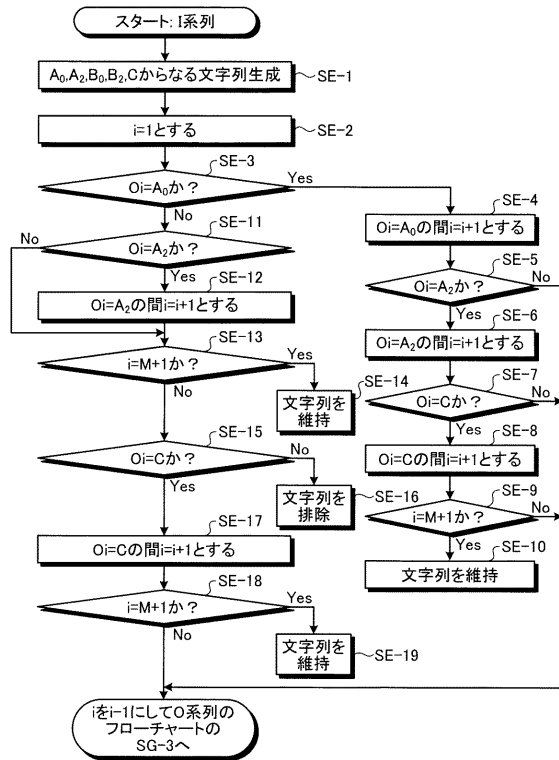
【図 1 4】



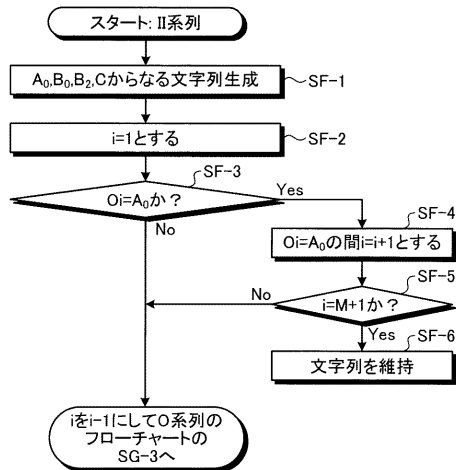
【図 15】



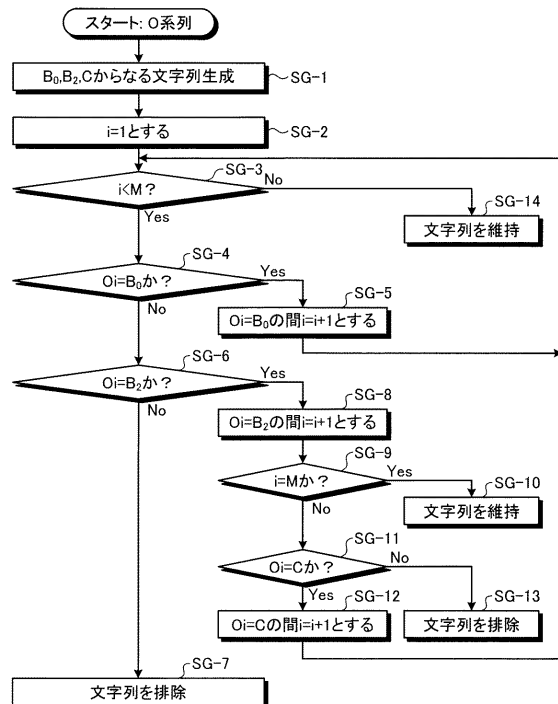
【図 16】



【図 17】



【図 18】



フロントページの続き

- (56)参考文献 大林 茂，フルードインフォマティクス，技報堂出版株式会社，2010年 4月30日，初版，pp.43-72
白山 晋，知的可視化，丸善株式会社，2006年 5月25日，初版，pp.169-182
坂上 貴之，多重連結領域の点渦力学，オイラー方程式の数理：カルマン渦列と非定常渦運動100年研究集会，2011年 7月21日，pp.1-16

(58)調査した分野(Int.Cl.，D B 名)

G 0 6 F 1 9 / 0 0

G 0 6 F 1 7 / 5 0

C i N i i

J S T P l u s (J D r e a m I I I)