

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7332875号
(P7332875)

(45)発行日 令和5年8月24日(2023.8.24)

(24)登録日 令和5年8月16日(2023.8.16)

(51)国際特許分類

F I

B 2 2 D 11/16 (2006.01)

B 2 2 D 11/16 1 0 4 J

G 0 1 K 3/04 (2006.01)

G 0 1 K 3/04

請求項の数 15 (全36頁)

(21)出願番号	特願2019-167469(P2019-167469)	(73)特許権者	000006655
(22)出願日	令和1年9月13日(2019.9.13)		日本製鉄株式会社
(65)公開番号	特開2021-41452(P2021-41452A)		東京都千代田区丸の内二丁目6番1号
(43)公開日	令和3年3月18日(2021.3.18)	(74)代理人	100090273
審査請求日	令和4年5月12日(2022.5.12)		弁理士 國分 孝悦
		(72)発明者	筒井 和政
			東京都千代田区丸の内二丁目6番1号
			日本製鉄株式会社内
		(72)発明者	岸田 豊
			東京都千代田区丸の内二丁目6番1号
			日本製鉄株式会社内
		審査官	柊屋 健太郎

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 連続鋳造鋳型内可視化装置、方法、およびプログラム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

連続鋳造設備の鋳型に浸漬ノズルを介して注入される溶鋼の可視化対象領域の各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量の少なくとも一方を含む状態ベクトルについて、時刻 t での前記状態ベクトルのデータである数値解析データを、数値シミュレーションの結果に基づいて時間隔 Δt ごととに導出することを、時刻 t の前記時間隔 Δt だけ前の時刻 $t-\Delta t$ から当該時刻 t までの間での流入境界条件のパラメータが少なくとも異なる複数のケースのそれぞれについて行う数値解析データ導出手段と、

前記数値解析データ導出手段により導出された前記複数のケースの時刻 t での数値解析データから当該時刻 t での前記状態ベクトルの第1の確率密度関数を導出する第1の確率密度関数導出手段と、

前記連続鋳造設備の各観測位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量との少なくとも一方を含む観測ベクトルについて、時刻 t での前記観測ベクトルのデータである観測データを前記各観測位置に配置されたセンサの測定値に基づいて前記時間隔 Δt ごととに導出する観測データ導出手段と、

前記観測データ導出手段により導出された時刻 t での観測データから当該時刻 t での前記状態ベクトルの尤度関数を導出する尤度関数導出手段と、

前記第1の確率密度関数導出手段により導出された時刻 t での前記状態ベクトルの前記第1の確率密度関数と、前記尤度関数導出手段により導出された当該時刻 t での前記状態ベクトルの前記尤度関数とに基づいて、ベイズ統計のモデリングによるデータ同化を行う

フィルタにより、当該時刻 t での前記状態ベクトルの第2の確率密度関数を導出し、当該状態ベクトルの前記第2の確率密度関数に基づいて、当該時刻 t での前記状態ベクトルの推定値を導出するデータ同化手段と、
を有し、

前記数値解析データ導出手段において時刻 t での前記数値解析データを導出する際の前記複数のケースは、前記データ同化手段により導出された当該時刻 t の前記時間隔 Δt だけ前の時刻 $t - \Delta t$ での前記状態ベクトルの前記第2の確率密度関数に基づいて導出され、

前記状態ベクトルには、前記各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量の少なくとも一方と、当該各計算位置における物理量を導出する際の数値シミュレーションの際に用いた前記流入境界条件のパラメータが含まれ、

前記各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量には、前記溶鋼における流速は含まれず、且つ、前記溶鋼における温度、前記鋳型における温度、または前記鋳型における熱流束が含まれ、

前記流入境界条件のパラメータは、前記浸漬ノズルに流入する溶鋼の流量を含み、前記各観測位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量には、前記鋳型における温度または熱流束が含まれることを特徴とする連続鋳造鋳型内可視化装置。

【請求項2】

前記浸漬ノズルは、第1の吐出口および第2の吐出口を有し、

前記第1の吐出口から、前記鋳型の内壁面であって、相互に対向する2つの内壁面のうちの第1の内壁面の方向に溶鋼が吐出され、前記第2の吐出口から、当該2つの内壁面のうちの第2の内壁面の方向に溶鋼が吐出され、

前記流入境界条件のパラメータは、前記浸漬ノズルの内部の領域のうち、前記浸漬ノズルの軸よりも、前記第1の吐出口側の領域に流入する溶鋼の流量と、前記浸漬ノズルの内部の領域のうち、前記浸漬ノズルの軸よりも、前記第2の吐出口側の領域に流入する溶鋼の流量とのうち、少なくとも一方を含むことを特徴とする請求項1に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

【請求項3】

前記浸漬ノズルに流入する溶鋼の流量は変化しないものとして前記数値シミュレーションが行われ、

前記データ同化手段において前記第2の確率密度関数に基づいて導出される前記流入境界条件のパラメータは、前記浸漬ノズルの軸よりも、前記第1の吐出口側の領域に流入する溶鋼の流量と、前記浸漬ノズルの領域のうち、前記浸漬ノズルの軸よりも、前記第2の吐出口側の領域に流入する溶鋼の流量とのうち、一方のみを含むことを特徴とする請求項2に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

【請求項4】

前記観測位置は、少なくとも前記鋳型の短辺部内に設けられることを特徴とする請求項2または3に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

【請求項5】

前記各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量の少なくとも一方と、前記各観測位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量の少なくとも一方は、時間平均値であることを特徴とする請求項1～4の何れか1項に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

【請求項6】

前記各計算位置における物理量に基づいて導出される物理量は、前記各計算位置における物理量と異なる第2の物理量であり、

前記各観測位置における物理量に基づいて導出される物理量は、前記第2の物理量であることを特徴とする請求項5に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

【請求項7】

前記各計算位置における物理量は、前記溶鋼における温度を含み、

前記各観測位置における物理量は、前記鋳型における温度を含み、

前記第 2 の物理量は、前記鋳型における熱流束を含むことを特徴とする請求項 6 に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

【請求項 8】

前記浸漬ノズルは、第 1 の吐出口および第 2 の吐出口を有し、

前記第 1 の吐出口から、前記鋳型の内壁面であって、相互に対向する 2 つの内壁面のうちの第 1 の内壁面の方向に溶鋼が吐出され、前記第 2 の吐出口から、当該 2 つの内壁面のうちの第 2 の内壁面の方向に溶鋼が吐出され、

前記第 2 の物理量は、前記鋳型のうち、前記第 1 の内壁面を構成する部分における熱流束と、前記鋳型のうち、前記第 2 の内壁面を構成する部分における熱流束との差を表す物理量であることを特徴とする請求項 7 に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

10

【請求項 9】

前記観測位置は、少なくとも前記鋳型の短辺部内に設けられることを特徴とする請求項 8 に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

【請求項 10】

前記データ同化手段により導出された時刻 t での前記状態ベクトルの推定値に基づいて、時刻 t での前記可視化対象領域の各計算位置における前記物理量の表示データを作成する可視化データ作成手段を更に有することを特徴とする請求項 1～9 の何れか 1 項に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

【請求項 11】

前記データ同化手段は、時刻 t での前記状態ベクトルの第 2 の確率密度関数の最頻値を、時刻 t での前記状態ベクトルの推定値として導出することを特徴とする請求項 1～10 の何れか 1 項に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

20

【請求項 12】

前記各計算位置における物理量は、前記溶鋼における温度を含み、

前記各計算位置における物理量に基づいて導出される物理量は、前記鋳型における温度を含むことを特徴とする請求項 1～11 の何れか 1 項に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

【請求項 13】

前記フィルタは、アンサンブルカルマンフィルタまたは粒子フィルタであることを特徴とする請求項 1～12 の何れか 1 項に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置。

【請求項 14】

30

連続鋳造設備の鋳型に浸漬ノズルを介して注入される溶鋼の可視化対象領域の各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量の少なくとも一方を含む状態ベクトルについて、時刻 t での前記状態ベクトルのデータである数値解析データを、数値シミュレーションの結果に基づいて時間隔 Δt ごとに導出することを、時刻 t の前記時間隔 Δt だけ前の時刻 $t - \Delta t$ から当該時刻 t までの間での流入境界条件のパラメータが少なくとも異なる複数のケースのそれぞれについて行う数値解析データ導出工程と、

前記数値解析データ導出工程により導出された前記複数のケースの時刻 t での数値解析データから当該時刻 t での前記状態ベクトルの第 1 の確率密度関数を導出する第 1 の確率密度関数導出工程と、

前記連続鋳造設備の各観測位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量との少なくとも一方を含む観測ベクトルについて、時刻 t での前記観測ベクトルのデータである観測データを前記各観測位置に配置されたセンサの測定値に基づいて前記時間隔 Δt ごとに導出する観測データ導出工程と、

40

前記観測データ導出工程により導出された時刻 t での観測データから当該時刻 t での前記状態ベクトルの尤度関数を導出する尤度関数導出工程と、

前記第 1 の確率密度関数導出工程により導出された時刻 t での前記状態ベクトルの前記第 1 の確率密度関数と、前記尤度関数導出工程により導出された当該時刻 t での前記状態ベクトルの前記尤度関数とに基づいて、ベイズ統計のモデリングによるデータ同化を行うフィルタにより、当該時刻 t での前記状態ベクトルの第 2 の確率密度関数を導出し、当該状態ベクトルの前記第 2 の確率密度関数に基づいて、当該時刻 t での前記状態ベクトルの

50

推定値を導出するデータ同化工程と、
を有し、

前記数値解析データ導出工程において時刻 t での前記数値解析データを導出する際の前記複数のケースは、前記データ同化工程により導出された当該時刻 t の前記時間隔 Δt だけ前の時刻 $t - \Delta t$ での前記状態ベクトルの前記第2の確率密度関数に基づいて導出され、

前記状態ベクトルには、前記各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量の少なくとも一方と、当該各計算位置における物理量を導出する際の数値シミュレーションの際に用いた前記流入境界条件のパラメータとが含まれ、

前記各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量には、前記溶鋼における流速は含まれず、且つ、前記溶鋼における温度、前記鋳型における温度、または前記鋳型における熱流束が含まれ、

10

前記流入境界条件のパラメータは、前記浸漬ノズルに流入する溶鋼の流量を含み、前記各観測位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量には、前記鋳型における温度または熱流束が含まれることを特徴とする連続鋳造鋳型内可視化方法。

【請求項15】

請求項1～13の何れか1項に記載の連続鋳造鋳型内可視化装置の各手段としてコンピュータを機能させることを特徴とするプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

20

本発明は、連続鋳造鋳型内可視化装置、方法、およびプログラムに関し、特に、連続鋳造設備に用いて好適なものである。

【背景技術】

【0002】

図12は、連続鋳造設備の概略構成の一例を示す図である。尚、各図において、X軸、Y軸、Z軸は、向きを示すものである。○の中に×を示しているものは、紙面の手前側から奥側に向く方向を示す。

【0003】

取鍋1からタンディッシュ2へ供給された溶鋼3は、鋳型4へ注入される。タンディッシュ2の底部にはスライディングノズル5が設けられている。スライディングノズル5の下部には、浸漬ノズル6が設けられている。浸漬ノズル6は、鋳型4の水平断面（Y-Z断面）の中央部に配置される。浸漬ノズル6の先端の側面には、左右一対の吐出口7a、7b（Y軸方向の両端の一対の吐出口7a、7b）が形成されている。浸漬ノズル6の先端（吐出口7a、7b）は、鋳型4内（鋳型4で囲まれた領域）に供給された溶鋼3に浸漬された状態にされる。図13は、鋳型4内の溶鋼3の流れの一例を示す図である。

30

【0004】

タンディッシュ2に供給された溶鋼3は、スライディングノズル5を介して浸漬ノズル6内を流下し、左右一対の吐出口7a、7bから鋳型4内に注入される。左右一対の吐出口7a、7bから吐出された溶鋼3は、凝固シェル8に衝突した後、図13の矢印で表されるように上昇流と下降流とに分流される。図12に示す例では、吐出口7aから吐出される溶鋼3は、鋳型4の短辺部4aの内壁面の方向に吐出され、吐出口7bから吐出される溶鋼3は、鋳型4の短辺部4bの内壁面の方向に吐出される。

40

【0005】

図13（a）に示すように、定常時では、左右一対の吐出口7a、7bから吐出される溶鋼の量はほぼ均等になっている。しかしながら、図13（b）に示すように、左右一対の吐出口7a、7bから吐出される溶鋼3の量が不均等になることがある。このように左右一対の吐出口7a、7bから吐出される溶鋼3の量が不均等になることを偏流という。偏流が生じると、浸漬ノズル6を挟んだ左右両側における溶鋼3の流速に差異が生じる。

【0006】

かかる偏流が生じる原因としては、浸漬ノズル6の内面等にアルミナ等の酸化物が付着

50

したり、吐出口 7 a、7 b が溶損して吐出口 7 a、7 b の形状が歪んだりすることが挙げられる。また、スライディングノズル 5 の構造上、溶鋼 3 が浸漬ノズル 6 内を軸対称に流下せず、左右何れかに偏って流下することも、偏流が生じる原因として挙げられる。

【0007】

以上のような理由により鑄型 4 内で溶鋼 3 の偏流が生じると、浸漬ノズル 6 を挟んだ左右両側の領域のうち、溶鋼 3 の量が多い側の領域では、溶鋼 3 が凝固シェル 8 の内面に沿って上方および下方に勢いよく分流することになる。勢いの強い溶鋼 3 の上昇流は、溶鋼 3 の湯面（メニスカス）の盛り上がりを生起する。これにより、溶鋼 3 の湯面上に散布されたフラックスが鑄型 4 の内壁面と凝固シェル 8 との間に供給されるのが阻害される。そうすると、凝固シェル 8 の形状が不均一となりやすく、連続鑄造設備で鑄造される鑄片に発生する皺や割れ等の原因となる。

10

【0008】

また、勢いの強い溶鋼 3 の下降流は、溶鋼 3 の深くまで達して非金属介在物の浮上を妨げる。非金属性介在物がストランド深くまで進入することは、連続鑄造設備で鑄造される鑄片に非金属介在物性欠陥をもたらす等の原因となる。溶鋼 3 の湯面レベル（溶鋼 3 の湯面（メニスカス）の鑄造方向（高さ方向、X 軸方向）の位置）は、湯面レベル計 9 で測定される。湯面レベル計 9 としては渦流センサ等が用いられる。また、図 12 に示す例では、鑄型 4 の短辺部 4 a、4 b（鑄型 4 の領域のうち、鑄造幅方向（左右方向、Y 軸方向）において間隔を有して対向する部分）内には、鑄造方向（X 軸方向）に、複数の熱電対 10 a～10 l が埋め込まれている。また、鑄型 4 の短辺部 4 a、4 b には、冷却水が流通する流路 11 a、11 b が形成されている。

20

【0009】

一方、浸漬ノズル 6 を挟んだ左右両側の領域のうち、溶鋼 3 の量が少ない側の領域では、溶鋼 3 の吐出される流れの勢いが弱くなる。溶鋼 3 の吐出される流れの勢いが弱いと、吐出口 7 内の溶鋼 3 の流れによどみが発生しやすくなり、アルミナ等の析出物が浸漬ノズル 6 内に付着する虞がある。アルミナ等の析出物の付着は、浸漬ノズル 6 内の流路を閉塞する等の原因となる。

【0010】

以上述べたように鑄型 4 内に偏流が生じると、連続鑄造の操業に支障があるばかりではなく、鑄片の品質の低下を招き、好ましくない。従って、偏流が生じた場合には、例えば、鑄造の速度を変更したり、フラックスを変更したり、浸漬ノズル 6 を交換したりする等の処置が必要である。これらの処置を、適切かつ迅速に行うためには、偏流の発生のような鑄型 4 内の状態を、常時監視して把握しておく必要がある。

30

【0011】

鑄型 4 内は非常に高温であり且つ不透明である。従って、鑄型 4 内における溶鋼 3 の伝熱および流動の状態を直接的に観察することはできない。

そこで、特許文献 1 には、以下の技術が開示されている。まず、鑄型 4 の相互に対向する領域に埋め込まれた熱電対により測定された温度を用いて伝熱逆問題解析を行う。この逆問題解析により、鑄型 4 の相互に対向する領域の一方および他方の側（N 側、S 側）における熱流束の時系列の情報を算出する。この熱流束の時系列の情報から、遅延ベクトルを算出し、この遅延ベクトルの時間推移による軌道を作成することにより、N 側のアトラクタおよび S 側のアトラクタを再構成する。N 側のアトラクタおよび S 側のアトラクタに基づいて、N 側の熱流束の分布および S 側の熱流束の分布を変数とするリカレンスプロットを作成し、このリカレンスプロットに基づいて、偏流の有無を診断する。

40

【0012】

また、特許文献 2 には、以下の技術が開示されている。まず、鑄型 4 の相互に対向する領域に埋め込まれた熱電対により測定された温度を用いて伝熱逆問題解析を行う。この伝熱逆問題解析により、鑄型 4 の内壁面における熱流束の鑄造方向の成分値に基づいて、溶鋼 3 の湯面レベルを、鑄型 4 の相互に対向する内壁面の双方において求める。この溶鋼 3 の湯面レベルの差を、偏流の指標として求める。

50

【先行技術文献】

【特許文献】

【0013】

【文献】特開2003-305553号公報

特開2016-175106号公報

特開2016-22523号公報

【非特許文献】

【0014】

【文献】J. Szekely and T. Yadaya, "The physical and mathematical modeling of the flow field in the mold region in continuous casting systems: Part II. The mathematical representation of the turbulent flow", Metallurgical Transactions, Vo.4, 1379 (1973)

樋口知之編著、「データ同化入門」、朝倉書店、2011年

北川源四朗著、「時系列解析入門」、岩波書店、2005年

King, Aaron A., Dao Nguyen, and Edward L. Ionides. "Statistical Inference for Partially Observed Markov Processes via the R Package pomp." Journal of Statistical Software 69.i12 (2016)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0015】

特許文献1に記載の技術では、リカレンスプロットを偏流の指標とし、特許文献2に記載の技術では、溶鋼3の湯面レベルの差を偏流の指標とする。即ち、特許文献1、2に記載の技術は、単に偏流の指標を求めているだけである。しかしながら、これらの指標では、連続鑄造の操業に支障があるか否か、あるいは、鑄片の品質低下を招くか否かを必ずしも正確に予測（推定）できる訳ではない。そして、予測（推定）が外れても、その原因を究明するための情報が少なく、指標を改善するなどの対策を打つことは困難である。そこで、本発明者らは、鑄型内の溶鋼の状態（温度や流速などの物理量）を可視化することができれば、多くの情報が得られ、操業状態や鑄片の品質との因果関係がより明瞭となり、この因果関係に不整合が生じたとしても対策を講じることを容易くするとの考えに至った。

【0016】

本発明は、以上のような問題点に鑑みてなされたものであり、連続鑄造設備の鑄型内の溶鋼の状態を可視化することができるようにすることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0017】

本発明の連続鑄造鑄型内可視化装置は、連続鑄造設備の鑄型に浸漬ノズルを介して注入される溶鋼の可視化対象領域の各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量の少なくとも一方を含む状態ベクトルについて、時刻 t での前記状態ベクトルのデータである数値解析データを、数値シミュレーションの結果に基づいて時間隔 Δt ごとに導出することを、時刻 t の前記時間隔 Δt だけ前の時刻 $t - \Delta t$ から当該時刻 t までの間での流入境界条件のパラメータが少なくとも異なる複数のケースのそれぞれについて行う数値解析データ導出手段と、前記数値解析データ導出手段により導出された前記複数のケースの時刻 t での数値解析データから当該時刻 t での前記状態ベクトルの第1の確率密度関数を導出する第1の確率密度関数導出手段と、前記連続鑄造設備の各観測位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量の少なくとも一方を含む観測ベクトルについて、時刻 t での前記観測ベクトルのデータである観測データを前記各観測位置に配置されたセンサの測定値に基づいて前記時間隔 Δt ごとに導出する観測データ導出手段と、前記観測データ導出手段により導出された時刻 t での観測データから当該時刻 t での前記状態ベクトルの尤度関数を導出する尤度関数導出手段と、前記第1の確率密度関数導出手段により導出された時刻 t での前記状態ベクトルの前記第1の確率密度関数と、前記尤度関数導出手段により導出された当該時刻 t での前記状態ベクトルの前記尤

度関数とに基づいて、ベイズ統計のモデリングによるデータ同化を行うフィルタにより、当該時刻 t での前記状態ベクトルの第2の確率密度関数を導出し、当該状態ベクトルの前記第2の確率密度関数に基づいて、当該時刻 t での前記状態ベクトルの推定値を導出するデータ同化手段と、を有し、前記数値解析データ導出手段において時刻 t での前記数値解析データを導出する際の前記複数のケースは、前記データ同化手段により導出された当該時刻 t の前記時間隔 Δt だけ前の時刻 $t - \Delta t$ での前記状態ベクトルの前記第2の確率密度関数に基づいて導出され、前記状態ベクトルには、前記各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量の少なくとも一方と、当該各計算位置における物理量を導出する際の数値シミュレーションの際に用いた前記流入境界条件のパラメータが含まれ、前記各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量には、前記溶鋼における流速は含まれず、且つ、前記溶鋼における温度、前記鑄型における温度、または前記鑄型における熱流束が含まれ、前記流入境界条件のパラメータは、前記浸漬ノズルに流入する溶鋼の流量を含み、前記各観測位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量には、前記鑄型における温度または熱流束が含まれることを特徴とする。

【0018】

本発明の連続鑄造鑄型内可視化方法は、連続鑄造設備の鑄型に浸漬ノズルを介して注入される溶鋼の可視化対象領域の各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量の少なくとも一方を含む状態ベクトルについて、時刻 t での前記状態ベクトルのデータである数値解析データを、数値シミュレーションの結果に基づいて時間隔 Δt ごとに導出することを、時刻 t の前記時間隔 Δt だけ前の時刻 $t - \Delta t$ から当該時刻 t までの間での流入境界条件のパラメータが少なくとも異なる複数のケースのそれぞれについて行う数値解析データ導出工程と、前記数値解析データ導出工程により導出された前記複数のケースの時刻 t での数値解析データから当該時刻 t での前記状態ベクトルの第1の確率密度関数を導出する第1の確率密度関数導出工程と、前記連続鑄造設備の各観測位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量との少なくとも一方を含む観測ベクトルについて、時刻 t での前記観測ベクトルのデータである観測データを前記各観測位置に配置されたセンサの測定値に基づいて前記時間隔 Δt ごとに導出する観測データ導出工程と、前記観測データ導出工程により導出された時刻 t での観測データから当該時刻 t での前記状態ベクトルの尤度関数を導出する尤度関数導出工程と、前記第1の確率密度関数導出工程により導出された時刻 t での前記状態ベクトルの前記第1の確率密度関数と、前記尤度関数導出工程により導出された当該時刻 t での前記状態ベクトルの前記尤度関数とに基づいて、ベイズ統計のモデリングによるデータ同化を行うフィルタにより、当該時刻 t での前記状態ベクトルの第2の確率密度関数を導出し、当該状態ベクトルの前記第2の確率密度関数に基づいて、当該時刻 t での前記状態ベクトルの推定値を導出するデータ同化工程と、を有し、前記数値解析データ導出工程において時刻 t での前記数値解析データを導出する際の前記複数のケースは、前記データ同化工程により導出された当該時刻 t の前記時間隔 Δt だけ前の時刻 $t - \Delta t$ での前記状態ベクトルの前記第2の確率密度関数に基づいて導出され、前記状態ベクトルには、前記各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量の少なくとも一方と、当該各計算位置における物理量を導出する際の数値シミュレーションの際に用いた前記流入境界条件のパラメータが含まれ、前記各計算位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量には、前記溶鋼の流速は含まれず、且つ、前記溶鋼における温度、前記鑄型における温度、または前記鑄型における熱流束が含まれ、前記流入境界条件のパラメータは、前記浸漬ノズルに流入する溶鋼の流量を含み、前記各観測位置における物理量および当該物理量に基づいて導出される物理量には、前記鑄型における温度または熱流束が含まれることを特徴とする。

【0019】

本発明のプログラムは、前記連続鑄造鑄型内可視化装置の各手段としてコンピュータを機能させることを特徴とする。

【発明の効果】

【0020】

本発明によれば、連続鋳造設備の鋳型内の溶鋼の状態を可視化することができる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】図1は、連続鋳造鋳型内可視化装置の機能的な構成の第1の例を示す図である。

【図2】図2は、流入境界条件の一例を示す図である。

【図3】図3は、連続鋳造鋳型内可視化装置の処理の第1の例を説明するフローチャートである。

【図4】図4は、連続鋳造鋳型内可視化装置の機能的な構成の第2の例を示す図である。

10

【図5】図5は、連続鋳造鋳型内可視化装置の処理の第2の例を説明するフローチャートである。

【図6】図6は、連続鋳造鋳型内可視化装置の機能的な構成の第3の例を示す図である。

【図7】図7は、連続鋳造鋳型内可視化装置の処理の第3の例を説明するフローチャートである。

【図8】図8は、実施例（発明例1）の結果を示す図である。

【図9】図9は、実施例（発明例2）の結果を示す図である。

【図10】図10は、実施例（発明例3）の結果を示す図である。

【図11】図11は、実施例（比較例）の結果を示す図である。

【図12】図12は、連続鋳造設備の概略構成の一例を示す図である。

20

【図13】図13は、鋳型内の溶鋼の流れの一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

以下、図面を参照しながら、本発明の実施形態を説明する。

〔第1の実施形態〕

まず、第1の実施形態を説明する。

＜本発明者らが得た知見＞

特願2018-114563号には、連続鋳造設備の鋳型内の溶鋼の状態を可視化する技術が提案されている。かかる技術では、時刻 t_0 から時刻 $t - \Delta t$ までの観測データ $y_{t_0:t-\Delta t}$ を基に決定される時刻 t での状態ベクトル x_t の条件付き確率密度関数である第1の確率密度関数 $p(x_t | y_{t_0:t-\Delta t})$ と、当該時刻 t での状態ベクトル x_t が得られたときの観測ベクトル y_t の条件付き確率密度関数 $p(y_t | x_t)$ と当該時刻 t での観測データ y_t とから導出される状態ベクトル x_t の尤度関数 $L(x_t | y_t)$ とを、データ同化を行うフィルタのアルゴリズムに与えることにより、時刻 t_0 から時刻 t までの観測データ $y_{t_0:t}$ を基に決定される時刻 t での状態ベクトル x_t の条件付き確率密度関数である第2の確率密度関数 $p(x_t | y_{t_0:t})$ を導出し、第2の確率密度関数 $p(x_t | y_{t_0:t})$ の最頻値を、時刻 t での状態ベクトル x_t の推定値として導出する。また、第2の確率密度関数 $p(x_t | y_{t_0:t})$ におけるアンサンブルメンバー $x_t^{(k)}$ （ k は、アンサンブルメンバーを指定する添字）に基づいて、時刻 $t + \Delta t$ での数値解析データ $x_{t+\Delta t}^{(k)}$ を数値シミュレーションにより求めるための溶鋼3の温度および流速、並びに境界条件のパラメータを複数導出する。ここで、状態ベクトル x_t は、計算格子点における溶鋼の温度および流速の全ての瞬時値で構成されるベクトルとする。

30

40

【0023】

特願2018-114563号では、全ての計算格子点における溶鋼3の流速を状態ベクトルに含める。しかしながら、溶鋼3のレイノルズ数は大きいことから溶鋼3の流れは大きくゆらぐ。このため、全ての計算格子点における溶鋼3の流速を状態ベクトルに含めると、鋳型4内における溶鋼3の偏流の推定精度が低下する虞があることを本発明者らは見出した。特に、アンサンブルメンバーの数が少ない場合、第2の確率密度関数 $p(x_t | y_{t_0:t})$ におけるアンサンブルメンバー $x_t^{(k)}$ に含まれる溶鋼3の流速分布は、物理的に生じえない（即ち、数値シミュレーションで得られた流速分布とはかけ離れた）ものとなり

50

易い傾向にあることが分かった。そして、本発明者らは、その原因が、溶鋼3の流れが大きくゆらぐにも拘らず、アンサンブルメンバーの数が少ないことから、データ同化を行うフィルタにおいて導出する状態ベクトルのサンプル共分散行列（特に、離れた位置にある計算格子点間における溶鋼3の流速のサンプル共分散）の精度が十分でなくなるためであると考えた。しかしながら、このような事態が生じないようにアンサンブルメンバーの数を増やすことは、計算時間の多大な増加につながり、現実的でない。一方、鑄型4内における溶鋼3の主流を決めているのは、タンディッシュ2から浸漬ノズル6に流入する溶鋼3の流量（吐出口7a、7bから鑄型4内へ吐出される溶鋼3の流量）である。この浸漬ノズル6に流入する溶鋼3の流量は、数値シミュレーションにおける境界条件として与えることができる。本発明者らは、この数値シミュレーションにおける境界条件を状態ベクトルに含めると共に、溶鋼3の流速を状態ベクトルに含めないようにすることで、溶鋼3の流速分布の導出において、離れた位置にある計算格子点間における溶鋼3の流速のサンプル共分散の影響を排除し、鑄型4内における溶鋼3の偏流の推定精度を向上させることができると考えた。以下に説明する本発明の第1の実施形態は、このような知見に基づいてなされたものである。

【0024】

<連続鑄造鑄型内可視化装置100の構成>

図1は、連続鑄造鑄型内可視化装置100の機能的な構成の一例を示す図である。連続鑄造鑄型内可視化装置100のハードウェアは、例えば、CPU、ROM、RAM、HDD、および各種のインターフェースを有する情報処理装置、または専用のハードウェアを用いることにより実現される。連続鑄造鑄型内可視化装置100は、連続鑄造設備の鑄型4内における溶鋼3（熔融金属）の流動および温度の状態を可視化するためのデータを作成する装置である。本発明において、連続鑄造鑄型内の全部または一部の領域における溶鋼（場合によっては凝固シェル）の物理量（流速や温度など）の分布を導出することを可視化と称し、可視化によって溶鋼の物理量の分布を導出する領域を可視化対象領域と称する。尚、以下の説明では、連続鑄造鑄型内可視化装置を必要に応じて可視化装置と略称する。

【0025】

本実施形態では、図12に示した連続鑄造設備の鑄型4内における溶鋼3の流動および温度の状態を可視化する。図12に示す例では、鑄型4の短辺部4a内には、鑄造方向（X軸方向）に、複数の熱電対10a～10fが埋め込まれている。鑄型4の短辺部4b内には、鑄造方向（X軸方向）に、複数の熱電対10g～10lが埋め込まれている。本実施形態では、熱電対10a、10gの鑄造方向（X軸方向）および鑄型4の鑄造厚方向（奥行方向、Z軸方向）の位置は同じであるものとする（即ち、鑄型4の長辺側の幅方向（Y軸方向）の位置だけが異なるものとする）。同様に、熱電対10b、10h、熱電対10c、10i、熱電対10d、10j、熱電対10e、10k、熱電対10f、10lの鑄造方向（X軸方向）および鑄型4の鑄造厚方向（Z軸方向）の位置もそれぞれ同じであるものとする。本実施形態では、以上のようにして熱電対10a～10lを配置する場合を例に挙げて示す。しかしながら、鑄型4内に配置する熱電対の位置および数は、図12に示したものに限定されず、可視化対象領域に応じて定められる。例えば、鑄型4の短辺部4a、4b内において、鑄型4の鑄造方向（X軸方向）だけでなく鑄造厚方向（Z軸方向）にも並ぶように複数の熱電対を配置してもよい。また、鑄型4の長辺部（鑄型4の領域のうち、鑄造厚方向（Z軸方向）において間隔を有して対向する部分）内に、複数の熱電対を配置してもよい。

【0026】

以下に、本実施形態の可視化装置100が有する機能の一例を説明する。本実施形態では、鑄型4の鑄造厚方向（Z軸方向）の中心の位置において、鑄型4の幅方向（Y軸方向）と鑄造方向（X軸方向）とにより定まる2次元平面（X-Y平面）における溶鋼3の流動および温度の状態を可視化する場合を例に挙げて説明する。尚、鑄型4の鑄造幅方向（Y軸方向）および鑄造厚方向（Z軸方向）の中心の位置は、浸漬ノズル6の軸の位置に対

応する。以下の説明では、この2次元平面を必要に応じて可視化断面と称し、可視化断面において可視化の対象となる領域を可視化対象平面領域と称する。本実施形態では、可視化対象平面領域が可視化対象領域の一例になる。

【0027】

(数値解析データ導出部101)

数値解析データ導出部101は、数値シミュレーションにより、可視化対象平面領域の各計算格子点における流速および熱電対10a～10lが配置されている位置における温度を第1の状態ベクトルの成分のデータとして導出し、当該第1の状態ベクトル(の成分)のデータを加工したデータを数値解析データとして導出し、当該数値解析データを成分として含む第2の状態ベクトルのデータを導出する。本実施形態では、数値解析データ導出部101は、数値シミュレーション部101aと、数値シミュレーションデータ加工部101bとを有する。

10

【0028】

((数値シミュレーション部101a))

数値シミュレーション部101aは、可視化の対象となる連続鑄造設備における非定常の伝熱および流動の数値シミュレーションを、連続鑄造設備の操作パラメータおよび溶鋼3の物性値とを用いて行う。連続鑄造設備の操作パラメータおよび溶鋼3の物性値は、予め数値シミュレーション部101aが記憶しているものである。

【0029】

溶鋼3内の伝熱および流動の数値シミュレーションは、ナビエストークス方程式を連続の式およびエネルギー保存式と共に解いて求めることができる。例えば、有限体積法を用いて各式を離散化して解くことにより数値シミュレーションは実行される。

20

数値シミュレーションを実行する際には、初期条件と境界条件とを設定する必要がある。流動および伝熱の境界条件は、例えば、鑄型4の内壁面と、溶鋼3の湯面と、浸漬ノズル6の壁面(即ち、外壁面、吐出口7a、7bが形成されている部分以外の内壁面、及び吐出口7a、7bが形成されている部分の内壁面)と、タンディッシュ2と浸漬ノズル6との境界面(浸漬ノズル6の上端)と、凝固シェル8と溶鋼3との境界面と、溶鋼3の下端とにおいて設定される。溶鋼3の下端とは、可視化対象平面領域のうち最も下の位置(X軸の正の方向の端の位置)を指す。流動および伝熱の初期条件は、溶鋼3において設定される。

30

【0030】

数値シミュレーション部101aは、時刻 t において、時刻 $t - \Delta t$ から時刻 t までの間での境界条件のうち、少なくとも、タンディッシュ2と浸漬ノズル6との境界面(浸漬ノズル6の上端)における境界条件のパラメータ(タンディッシュ2から浸漬ノズル6へ流入する溶鋼3の流量)が異なる複数のケースのそれぞれについて数値シミュレーションを実行することにより、時刻 t における計算格子点における溶鋼3の温度および流速を導出する。後述するように境界条件のパラメータは、ステップ幅 Δt の時間隔毎に更新されるが、時刻 $t - \Delta t$ から時刻 t まで時間が進行する際には不変であるとして、数値シミュレーションを実行するため、ステップ幅 Δt を小さく設定するほど、境界条件のパラメータの変化に起因する溶鋼3の流動および温度の状態の変化を精度良く捉えた可視化を行うことができる。一方、ステップ幅 Δt を大きく設定するほど、可視化を実行するときの処理時間が短くなる。溶鋼3の偏流を可視化する場合、ステップ幅 Δt は、1.5秒以上かつ30秒以下とするのが好ましく、3秒以上かつ15秒以下とするのがより好ましい。以下の説明では、タンディッシュ2と浸漬ノズル6との境界面(浸漬ノズル6の上端)における境界条件を、必要に応じて、流入境界条件と称する。また、流入境界条件のパラメータである、タンディッシュ2から浸漬ノズル6へ流入する溶鋼3の流量を、必要に応じて、単にパラメータと称する。

40

【0031】

図2は、流入境界条件の一例を概念的に説明する図である。

図2において、破線で示す仮想線6aは、タンディッシュ2と浸漬ノズル6との境界面

50

(浸漬ノズル 6 の上端面) を示す。一点鎖線で示す仮想線 6 b は、浸漬ノズル 6 の軸を示す。本実施形態では、浸漬ノズル 6 の内部の領域を、浸漬ノズルの軸 6 b よりも、吐出口 7 a が形成されている側の領域 6 c と、浸漬ノズルの軸 6 b よりも、吐出口 7 b が形成されている側の領域 6 d とに分ける。そして、数値シミュレーションでは、領域 6 c に流入する溶鋼 3 は、全て吐出口 7 a から鑄型 4 内に注入され、領域 6 d に流入する溶鋼 3 は、全て吐出口 7 b から鑄型 4 内に注入されるものとする（即ち、領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量と、吐出口 7 a から鑄型 4 内に注入される溶鋼 3 の流量は同じであり、領域 6 d に流入する溶鋼 3 の流量と、吐出口 7 b から鑄型 4 内に注入される溶鋼 3 の流量は同じであるものとする）。また、タンディッシュ 2 から浸漬ノズル 6 に注入される溶鋼 3 の流量 U は一定であり変化しないものとする。数値シミュレーションでは、タンディッシュ 2 から領域 6 d に流入する溶鋼 3 の流量を u_{inlet} とし、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量は、前述した一定の流量 U から、タンディッシュ 2 から領域 6 d に流入する溶鋼 3 の流量 u_{inlet} を減算することにより導出されるものとする。

【0032】

また、数値シミュレーション部 101 a は、時刻 $t - \Delta t$ から時刻 t までの間での流入境界条件のパラメータに加えて、例えば、時刻 $t - \Delta t$ での計算格子点における溶鋼 3 の温度と、時刻 $t - \Delta t$ での計算格子点における溶鋼 3 の流速と、時刻 $t - \Delta t$ から時刻 t までの間でのその他の境界条件のパラメータの少なくとも何れか 1 つを異ならせてもよい。

【0033】

本実施形態では、計算格子点が計算位置の一例となる。尚、流速は、X 軸方向、Y 軸方向、Z 軸方向の 3 成分の値を有する。本実施形態では、数値シミュレーション部 101 a は、ステップ幅 Δt の時間隔で各計算格子点における温度および流速を導出する。また、本実施形態では、数値シミュレーション部 101 a は、当該導出した温度に基づいて、熱電対 10 a ~ 10 l が配置されている位置における温度を導出する。例えば、数値シミュレーション部 101 a は、鑄型 4 の短辺部 4 a、4 b における伝熱状態が鑄造幅方向（Y 軸方向）の 1 次元定常熱伝導であると仮定して、鑄型 4 の冷却水の温度と、鑄型 4 の熱伝導度とに基づいて、各計算格子点における温度を外挿し、熱電対 10 a ~ 10 l が配置されている位置における温度を導出する。以下の説明では、このようにして導出された温度を必要に応じて推定温度と称する。

本実施形態では、熱電対 10 a ~ 10 l が配置されている位置における温度が、各計算位置における物理量に基づいて導出される物理量の一例となる。

尚、連続鑄造設備に対するナビエストークス方程式、連続の式、およびエネルギー保存式や、初期条件および境界条件の内容については、例えば、特許文献 3 や非特許文献 1 に記載されているので、ここでは、その詳細な説明を省略する。

【0034】

数値シミュレーション部 101 a は、時刻 t_0 (t_0 は最初の時刻) から時刻 $t_0 + \Delta t$ までの間での流入境界条件のパラメータが少なくとも異なる複数のケースに対して、初期値として、予め設定された値を用いる。2 番目の時刻 t 以降に関しては、後述する観測データ取得部 103 a で取得された観測データ（情報）を基に後述するデータ同化部 105 で導出された結果を、時刻 t から時刻 $t + \Delta t$ までの間での流入境界条件のパラメータとして用いる。この点の詳細については後述する。

【0035】

数値シミュレーション部 101 a は、以上の計算結果に基づいて、第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}$ (の各成分) のデータを導出する。本実施形態では、第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}$ が、以下の (1) 式で表される場合を例に挙げて説明する。尚、 $x \rightarrow^{(1)}$ の $\rightarrow$ は、(1) 式において、 x の上に付されている $\rightarrow$ に対応する。

【0036】

【数 1】

10

20

30

40

50

$$\vec{x}^{(1)} = \begin{pmatrix} v_{l1} \\ v_{l2} \\ \vdots \\ v_{lN} \\ v_{t1} \\ v_{t2} \\ \vdots \\ v_{tN} \\ v_{d1} \\ v_{d2} \\ \vdots \\ v_{dN} \\ T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_L \end{pmatrix} \dots (1)$$

10

20

【0037】

ここで、 $v_{l1} \sim v_{lN}$ は、計算格子点における鑄造方向（X軸方向）の流速である。 $v_{t1} \sim v_{tN}$ は、計算格子点における鑄造幅方向（Y軸方向）の流速である。 $v_{d1} \sim v_{dN}$ は、計算格子点における鑄造厚方向（Z軸方向）の流速である。 $T_1 \sim T_L$ は、熱電対10a～10lが配置されている位置における温度である。これらの値は、何れも瞬時値（時刻tにおける値）である。

30

【0038】

((数値シミュレーションデータ加工部101b))
数値シミュレーションデータ加工部101bは、数値シミュレーション部101aで導出された第1の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}$ （の成分）のデータを加工して、第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ のデータを導出する。本実施形態では、第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ が、以下の（2）式で表される場合を例に挙げて説明する。尚、 $x \rightarrow^{(2)}$ の $\rightarrow$ は、（2）式において、 x の上に付されている $\rightarrow$ に対応する。

40

【0039】

【数2】

$$\vec{x}^{(2)} = \begin{pmatrix} u_{\text{inlet}} \\ T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_L \end{pmatrix} \quad \dots \quad (2)$$

10

【0040】

(2) 式に示すように、本実施形態では、溶鋼3の流速を第2の状態ベクトルに含めず、タンディッシュ2から領域6dに流入する溶鋼3の流量 u_{inlet} を第2の状態ベクトルに含める。タンディッシュ2から領域6dに流入する溶鋼3の流量 u_{inlet} は、流入境界条件のパラメータであり、第1の状態ベクトル $x^{(1)}$ (の成分) のデータを導出する際に行われた数値シミュレーションにおける(時刻 t での)境界条件のパラメータの1つである。前述したように、時刻 t において、流入境界条件のパラメータが異なる複数のケースについて数値シミュレーションが行われる。従って、第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ のデータは、当該複数のケースの数だけ存在する。第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ の成分のデータが、数値解析データとして第1の確率密度関数導出部102に出力される。

20

【0041】

(第1の確率密度関数導出部102)

第1の確率密度関数導出部102は、後述する観測データ取得部103aで取得された時刻 $t - \Delta t$ までの観測データ(情報) $y \rightarrow^{(1)}_{t0:t-\Delta t}$ を基に推定される時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の条件付き確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t-\Delta t})$ を導出する。確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t-\Delta t})$ は、数値シミュレーションデータ加工部101bにより導出された複数の数値解析データ $\{x \rightarrow^{(2)}_t(k)\}_k$ が示す確率密度関数である。以下の説明では、この確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t-\Delta t})$ を必要に応じて第1の確率密度関数とも称する。本実施形態では、第1の確率密度関数導出部102は、ステップ幅 Δt の時間隔で、各時刻 t での状態ベクトル x_t の第1の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t-\Delta t})$ を導出する。

30

【0042】

第1の確率密度関数導出部102は、数値シミュレーションデータ加工部101bにより導出された時刻 t での複数の数値解析データ $\{x \rightarrow^{(2)}_t | t-\Delta t(k)\}_k$ の相対度数(度数を全データ数で除した値)を用いた度数分布を導出する。この度数分布が、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第1の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t-\Delta t})$ となる。また、複数の数値解析データ $\{x \rightarrow^{(2)}_t | t-\Delta t(k)\}_k$ の各成分(タンディッシュ2から領域6dに流入する溶鋼3の流量 u_{inlet} 、及び各熱電対10a~10lが配置されている位置における温度 $T_1 \sim T_L$)の度数分布を導出して、これらの積を取ったものを複数の数値解析データ $\{x \rightarrow^{(2)}_t | t-\Delta t(k)\}_k$ の度数分布としてもよい。また、これらの度数分布を所定の関数(例えば、スプライン関数)で近似したものを第1の確率密度関数としてもよい。

40

【0043】

また、第1の確率密度関数導出部102は、数値シミュレーションデータ加工部101bにより導出された時刻 t での複数の数値解析データ $\{x \rightarrow^{(2)}_t | t-\Delta t(k)\}_k$ を用いてアンサンブル近似(モンテカルロ近似)を行うことで、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t-\Delta t})$ を導出することもできる。

また、第1の確率密度関数導出部102は、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第1の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t-\Delta t})$ がガウス分布であると仮定して、数値シミュレーションデータ加工部101bにより導出された時刻 t での複数の数値解析データ $\{x \rightarrow^{(2)}_t(k)\}_k$ から平均値と分散値を導出してもよい。

50

尚、第1の確率密度関数導出部102は、以上のようにして導出される時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第1の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t-\Delta t})$ を、ガウス分布のような確率密度関数に従うノイズを用いて修正してもよい。

【0044】

(観測データ導出部103)

観測データ導出部103は、可視化断面の各観測位置における温度の測定値を観測ベクトルの成分として観測データを導出する。本実施形態では、観測データ導出部103は、観測データ取得部103aを有する。

((観測データ取得部103a))

観測データ取得部103aは、連続鋳造設備において測定された時系列データ(測定値)に基づいて観測データを取得する。

本実施形態では、観測データ取得部103aは、熱電対10a~10lで測定される温度(鋳型4内の温度)の測定値を入力する。

【0045】

このように本実施形態では、観測データ取得部103aは、熱電対10a~10lで測定される温度を観測データとしてステップ幅 Δt の時間隔で取得する。以下の説明では、熱電対10a~10lが配置されている位置を必要に応じて観測位置と称し、観測位置において取得される温度で構成されるベクトルを観測ベクトルと称する。従って、時刻 t での熱電対10a~10lの測定値を $T'_1 \sim T'_L$ とすると、観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ は、以下の(3)式で表される。尚、 $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ の $\rightarrow$ は、(3)式において、 y の上に付されている $\rightarrow$ に対応する。観測データ取得部103aは、観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ を導出する。

【0046】

【数3】

$$\vec{y}^{(1)}_t^{(0)} = \begin{pmatrix} T'_1 \\ T'_2 \\ \vdots \\ T'_L \end{pmatrix} \quad \dots (3)$$

【0047】

(尤度関数導出部104)

尤度関数導出部104は、観測データ取得部103aで取得された時刻 t での観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ ($y_t^{(0)}$ は観測位置において取得される熱電対10a~10lの測定値 $T'_1 \sim T'_L$ で構成されるベクトル)の観測ノイズを、過去の当該観測データから評価することにより、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ が得られたときの観測ベクトル $y \rightarrow^{(1)}_t$ の条件付き確率密度関数 $p(y \rightarrow^{(1)}_t | x \rightarrow^{(2)}_t)$ に対する第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ を導出する。尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ とは、条件付き確率密度関数 $p(y \rightarrow^{(1)}_t | x \rightarrow^{(2)}_t)$ を第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の関数と見做したもので、観測ベクトル $y \rightarrow^{(1)}_t$ に観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ を代入することによって第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の関数として確定する。本実施形態では、尤度関数導出部104は、ステップ幅 Δt の時間隔で、各時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ を導出する。

【0048】

観測ノイズは、例えば、平均ベクトルが0(ゼロベクトル)のガウス分布に従うものとし、観測データの分散共分散行列を観測ノイズの共分散行列として用いることができる。この場合、過去の同種の観測データの分散共分散行列値を、全ての種類の観測データについて予め計算しておき、尤度関数導出部104が記憶しておく。即ち、尤度関数導出部1

04は、観測データの種類毎の分散共分散行列値を記憶する。また、観測データの分散共分散行列値は、観測データの各成分（各観測位置での値）の分散値とし、共分散値は0（ゼロ）としたものでもよい。

【0049】

尤度関数導出部104は、時刻 t での観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ と、観測ノイズの分散共分散行列値とに基づいて、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ を導出する。

【0050】

尚、観測ノイズは、ガウス分布に従うとすることに限定されない。例えば、尤度関数導出部104は、時刻 t での観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ と、当該時刻 t よりも前の所定の期間の当該観測データ $y \rightarrow^{(1)}_{t-n\Delta t}^{(0)}$ とに基づいて、これらの複数の観測データ $\{y \rightarrow^{(1)}_{t-n\Delta t}^{(0)}, \dots, y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}\}$ の平均ベクトル $m(y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)})$ を導出し、複数のデータ $\{y \rightarrow^{(1)}_{t-n\Delta t}^{(0)} - m(y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}), \dots, y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)} - m(y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)})\}$ の相対度数（度数を全データ数で除した値）を用いた度数分布を導出する。そして、尤度関数導出部104は、当該度数分布を、時刻 t での観測ノイズの確率密度関数として導出する。また、複数のデータ $\{y \rightarrow^{(1)}_{t-n\Delta t}^{(0)} - m(y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}), \dots, y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)} - m(y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)})\}$ の各成分（各観測位置における各データ）の度数分布を導出して、これらの積を取ったものを複数のデータ $\{y \rightarrow^{(1)}_{t-n\Delta t}^{(0)} - m(y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}), \dots, y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)} - m(y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)})\}$ の度数分布としてもよい。また、尤度関数導出部104は、この度数分布を所定の関数（例えば、スプライン関数）で近似したものを観測ノイズの確率密度関数としてもよい。

【0051】

（データ同化部105）

データ同化部105は、第1の確率密度関数導出部102により導出された時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第1の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t-\Delta t})$ と、尤度関数導出部104により導出された時刻 t での観測データが得られたときの当該時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ とを、ベイズの定理を基礎としたベイズ統計のモデリングによるデータ同化を行うフィルタのアルゴリズムに与えることにより、時刻 t までの観測データが得られたときの時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の条件付き確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t})$ を導出する。以下の説明では、この確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t})$ を必要に応じて第2の確率密度関数とも称する。本実施形態では、データ同化部105は、ステップ幅 Δt の時間隔で、各時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第2の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t})$ を導出する。

【0052】

データ同化を行う際には、システム方程式（状態方程式）と観測方程式とを定める必要がある。システム方程式は、ステップ幅 Δt の時間隔で、前後の時刻の第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_{t+\Delta t}$ 、 $x \rightarrow^{(2)}_t$ の関係を定義する式である。本実施形態では、数値シミュレーション部101aによる複数の数値シミュレーションでこの関係は決定される。また、観測方程式は、観測ベクトル $y \rightarrow^{(1)}_t$ と、第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ との関係式を示すものであり、（4）式で与えられる。

$$y \rightarrow^{(1)}_t = H_t x \rightarrow^{(2)}_t + w_t \quad \dots (4)$$

ここで、 H_t は、観測行列であり、 w_t は、観測ノイズである。例えば、観測ベクトルの第 i 成分が第2の状態ベクトルの第 j 成分の物理量と同一であれば、観測行列 H_t は、その（ i, j ）成分が1で、第 i 行の他の成分が0（ゼロ）である行列となる。また、観測位置 i がどの計算格子点 j とも一致しなければ、第2の状態ベクトルで補間するように観測行列 H_t を定めることもできる。

【0053】

ベイズ統計のモデリングによるデータ同化を行うフィルタとしては、例えば、アンサンブルカルマンフィルタを用いることができる。

10

20

30

40

50

この場合、データ同化部 105 は、第 1 の確率密度関数導出部 102 により導出された時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 1 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t-\Delta t})$ と、尤度関数導出部 104 により導出された当該時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ とを、アンサンブル近似し、アンサンブルメンバー（粒子）を導出する。時刻 $t - \Delta t$ の各アンサンブルメンバー $x \rightarrow^{(2)}_{t-\Delta t}(k)$ を、システム方程式に基づいて更新し、一期先（時刻 t ）の予測分布のアンサンブル $x \rightarrow^{(2)}_t | t-\Delta t(k)$ を第 1 の確率密度関数導出部 102 により導出する。そして、データ同化部 105 は、一期先の予測分布のアンサンブル $x \rightarrow^{(2)}_t | t-\Delta t(k)$ から、フィルタ分布のアンサンブル $x \rightarrow^{(2)}_t(k)$ を導出する。このようなフィルタ分布のアンサンブルの導出を行うことにより、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 2 の確率密度関数が導出される。

10

【0054】

ベイズ統計のモデリングによるデータ同化を行うフィルタは、アンサンブルカルマンフィルタに限定されない。例えば、粒子フィルタを用いてもよい。アンサンブルカルマンフィルタや粒子フィルタについては、非特許文献 2、3 に記載されている。また、アンサンブルカルマンフィルタや粒子フィルタの具体的な計算アルゴリズムについては、非特許文献 4 に記載されている。従って、これらについての詳細な説明を省略する。

【0055】

データ同化部 105 は、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x_t \rightarrow^{(2)}$ の第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ の最頻値 x_m を、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の推定値として導出する。また、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の各成分（ u_{inlet} 、 $T_1 \sim T_L$ ）について、第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ の周辺確率密度関数を導出し、周辺確率密度関数の各成分の最頻値で構成されるベクトルを第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ の最頻値 x_m とし、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の推定値としてもよい。そして、データ同化部 105 は、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の推定値から、時刻 t での第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ の推定値を、流入境界条件のパラメータ（タンディッシュ 2 から領域 6 d に流入する溶鋼 3 の流量 u_{inlet} ）を、流入境界条件に相当する流速の成分に置換することにより、導出する。このとき、データ同化部 105 は、時刻 t での第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ のうち、流入境界条件に相当する流速に直接に関連のない成分の修正を行わない（ u_{inlet} 以外を第 1 の状態ベクトルに戻す操作を行わない）。また、データ同化部 105 は、第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ の推定値から、各計算格子点における温度 $T_1 \sim T_N$ の推定値を、例えば、（数値シミュレーション部 101 a）の項で説明した外挿を行うことにより導出する。

20

30

以上のようにして、時刻 t において、鑄造方向（X 軸方向）の流速 $v_{t1} \sim v_{tN}$ 、鑄造幅方向（Y 軸方向）の流速 $v_{t1} \sim v_{tN}$ 、鑄造厚方向（Z 軸方向）の流速 $v_{d1} \sim v_{dN}$ 、および温度 $T_1 \sim T_N$ の推定値が、各計算格子点において導出される。

【0056】

以上のように本実施形態では、データ同化部 105 は、第 1 の確率密度関数導出部 102 により導出された時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 1 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t-\Delta t})$ と、尤度関数導出部 104 により導出された当該時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ とを融合させて、時刻 t での最も合理的な第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ を導出し、その最頻値 x_m を、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の推定値として導出する。

40

【0057】

また、データ同化部 105 は、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ を数値シミュレーション部 101 a に出力する。数値シミュレーション部 101 a は、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ に基づいて、少なくとも、時刻 t から時刻 $t + \Delta t$ までの間での流入境界条件のパラメータ u_{inlet} を複数導出する。例えば、データ同化部 105 は、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ におけるアンサンブルメンバーを用いて

50

、時刻 t から時刻 $t + \Delta t$ までの間での流入境界条件のパラメータ u_{inlet} を複数設定する。そして、数値シミュレーション部 101a は、当該複数の流入境界条件のパラメータ u_{inlet} のそれぞれのケースについて、次の時刻 $t + \Delta t$ における数値シミュレーションを行い、複数の第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ のデータを導出する。

【0058】

(可視化データ作成部 106)

可視化データ作成部 106 は、データ同化部 105 により導出された時刻 t での、各計算格子点 j における、鑄造方向 (X 軸方向) の流速 $v_{11} \sim v_{1N}$ 、鑄造幅方向 (Y 軸方向) の流速 $v_{t1} \sim v_{tN}$ 、鑄造厚方向 (Z 軸方向) の流速 $v_{d1} \sim v_{dN}$ 、および温度 $T_1 \sim T_N$ の推定値に基づいて、鑄型内 4 の各位置における溶鋼 3 の温度と流速の少なくとも何れか一方の表示データを作成する。

10

可視化データ作成部 106 は、各時刻における各位置における溶鋼 3 の温度と流速を、可視化装置 100 のユーザが認識できるようにしていれば、どのような表示データを作成してもよい。ただし、可視化データ作成部 106 は、可視化装置 100 のユーザが直感的に分かり易い表示データを作成するのが好ましい。

【0059】

例えば、可視化データ作成部 106 は、溶鋼 3 の温度として想定される温度範囲を複数の領域に分けた場合の、それぞれの領域に対し異なる表示態様を予め記憶する。表示態様としては、例えば、色、模様、および濃度の少なくとも 1 つを採用することができる。可視化データ作成部 106 は、データ同化部 105 により導出された時刻 t での各位置における溶鋼 3 の温度から、各位置における温度を特定し、可視化対象平面領域の各位置の画像が、特定した温度に対応する表示態様で表示されるように表示データを作成する。

20

【0060】

また、可視化データ作成部 106 は、溶鋼 3 の流速として想定される流速範囲を複数の領域に分けた場合の、それぞれの領域に対し異なる表示態様を予め記憶する。表示態様としては、例えば、色、模様、および濃度の少なくとも 1 つを採用することができる。可視化データ作成部 106 は、データ同化部 105 により導出された時刻 t での各位置における溶鋼 3 の流速から、各位置における流速を特定し、可視化対象平面領域の各位置の画像が、特定した流速に対応する表示態様で表示されるように表示データを作成する。また、可視化データ作成部 106 は、可視化対象平面領域に対して予め設定された小領域ごとに溶鋼 3 の代表的な向きを導出し、当該向きの方向を向く矢印線が、可視化対象平面領域の当該小領域の画像に重ねて表示されるように表示データを作成する。

30

【0061】

(出力部 107)

出力部 107 は、可視化データ作成部 106 で作成された表示データをコンピュータディスプレイに表示する。また、出力部 107 は、このような表示データに代えてまたは加えて、データ同化部 105 により導出された各時刻での状態ベクトルの推定値を構成する各位置における溶鋼 3 の温度と流速のデータを出力することができる。出力の態様は、可視化装置 100 の内部または外部の記憶媒体への送信、外部装置への送信が挙げられる。このようにすれば、各時刻での各位置における溶鋼 3 の温度と流速を表示するための表示データを、後で別途作成することができる。

40

【0062】

<動作フローチャート>

次に、図 3 のフローチャートを参照しながら、可視化装置 100 の処理の一例を説明する。

まず、ステップ S301 において、数値シミュレーション部 101a は、時刻 t を初期値 (t_0) に設定する。

次に、ステップ S302 において、数値シミュレーション部 101a は、時刻 t から時刻 $t + \Delta t$ までの間での流入境界条件のパラメータ u_{inlet} の初期値を設定する。

【0063】

50

次に、ステップ S 3 0 3 において、数値シミュレーション部 1 0 1 a は、時刻 t を時刻 $t + \Delta t$ に更新して、処理は、ステップ S 3 0 4 に進む。

次に、ステップ S 3 0 4 において、数値シミュレーション部 1 0 1 a は、時刻 t における計算格子点における溶鋼 3 の温度および流速を導出し、その結果に基づいて、時刻 t における第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ のデータを導出する（（1）式を参照）。

【0 0 6 4】

次に、ステップ S 3 0 5 において、数値シミュレーションデータ加工部 1 0 1 b は、時刻 t における第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ のデータを加工して、時刻 t における第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ のデータを導出する（（2）式を参照）。第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ には、溶鋼 3 の流速は含まれず、タンディッシュ 2 から領域 6 d に流入する溶鋼 3 の流量 u_{inlet} が含まれる。

【0 0 6 5】

次に、ステップ S 3 0 6 において、第 1 の確率密度関数導出部 1 0 2 は、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 1 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t-\Delta t})$ を導出する。

次に、ステップ S 3 0 7 において、観測データ取得部 1 0 3 a は、時刻 t での観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ （各観測位置 i における熱電対 1 0 a ～ 1 0 l の測定値）を取得する。

【0 0 6 6】

次に、ステップ S 3 0 8 において、尤度関数導出部 1 0 4 は、観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ に基づいて、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ を導出する。

次に、ステップ S 3 0 9 において、データ同化部 1 0 5 は、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 1 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t-\Delta t})$ と、当該時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ とを、ベイズ統計のモデリングによるデータ同化を行うフィルタのアルゴリズムに与えることにより、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t})$ を導出する。

【0 0 6 7】

次に、ステップ S 3 1 0 において、データ同化部 1 0 5 は、時刻 t での状態ベクトル x_t の第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ の最頻値を、時刻 t での第 2 の状態ベクトルの推定値として導出し、当該第 2 の状態ベクトルの推定値に基づいて、時刻 t での第 1 の状態ベクトルの推定値を導出する。そして、データ同化部 1 0 5 は、時刻 t での第 1 の状態ベクトルの推定値に基づいて、時刻 t での、各計算格子点 j における、鑄造方向（X 軸方向）の流速 $v_{l1} \sim v_{lN}$ 、鑄造幅方向（Y 軸方向）の流速 $v_{t1} \sim v_{tN}$ 、鑄造厚方向（Z 軸方向）の流速 $v_{d1} \sim v_{dN}$ 、および温度 $T_1 \sim T_N$ の推定値を導出する。

次に、ステップ S 3 1 1 において、可視化データ作成部 1 0 6 は、データ同化部 1 0 5 により導出された時刻 t での、各計算格子点 j における、鑄造方向（X 軸方向）の流速 $v_{l1} \sim v_{lN}$ 、鑄造幅方向（Y 軸方向）の流速 $v_{t1} \sim v_{tN}$ 、鑄造厚方向（Z 軸方向）の流速 $v_{d1} \sim v_{dN}$ 、および温度 $T_1 \sim T_N$ の推定値に基づいて、時刻 t での鑄型 4 内の各位置における溶鋼 3 の温度と流速の表示データを作成する。

【0 0 6 8】

次に、ステップ S 3 1 2 において、出力部 1 0 7 は、時刻 t が、予め設定された時刻 t_{end} になったか否かを判定する。この判定の結果、時刻 t が、予め設定された時刻 t_{end} になっていない場合、処理は、ステップ S 3 1 2 に進む。

ステップ S 3 1 3 において、数値シミュレーション部 1 0 1 a は、数値シミュレーションで使用するデータである時刻 t から時刻 $t + \Delta t$ までの間での流入境界条件のパラメータ u_{inlet} を、ステップ S 3 0 8 でデータ同化部 1 0 5 により導出された、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t})$ に基づいて複数導出する。

【0 0 6 9】

そして、処理は、ステップ S 3 0 3 に進み、時刻 t が、予め設定された時刻 t_{end} になるまで、ステップ S 3 0 3 ～ S 3 1 3 の処理が繰り返し実行される。尚、ステップ S 3 0 4

10

20

30

40

50

においては、ステップ S 3 0 4 の直前のステップ S 3 1 3 で導出された流入境界条件のパラメータ u_{inlet} の値 $u_{inlet}^{(k)}$ が用いられる。

以上のようにして時刻 t が、予め設定された時刻 t_{end} になると、処理は、ステップ S 3 1 4 に進む。ステップ S 3 1 4 において、出力部 1 0 7 は、可視化データ（可視化データ作成部 1 0 6 で作成された表示データと、データ同化部 1 0 5 により導出された各時刻での鋳型 4 内の各位置における溶鋼 3 の温度と流速のデータ）を出力する。尚、表示データは、ステップ S 3 1 0 で表示データが作成される度にコンピュータディスプレイに表示されるようにしてもよい。

【0070】

<まとめ>

以上のように本実施形態では、可視化装置 1 0 0 は、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 1 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t-\Delta t})$ と、当該時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ とを、データ同化を行うフィルタのアルゴリズムに与えることにより、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t})$ を導出する。可視化装置 1 0 0 は、この第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t})$ の最頻値を、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の推定値として導出する。また、可視化装置 1 0 0 は、この第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t})$ に基づいて、時刻 $t + \Delta t$ での数値解析データ $\{x_t^{(k)}\}_k$ を求めるための流入境界条件のパラメータ u_{inlet} を複数導出する。従って、連続鋳造機の内部における溶融金属の流動および温度の分布を、観測データによる事実と、物理法則に基づいた数値シミュレーションによる合理的な数値データとして可視化できて、溶鋼 3 の偏流の様な異常現象の発生の様子を、時々刻々と知ることがきる。よって、鋳造の操業条件を臨機応変に制御したり、問題のある部材の変更、交換をタイミングよく行ったりすることが可能になり、高品質の鋼材を歩留まり良くかつ生産性良く製造することができる。

【0071】

また、本実施形態では、可視化装置 1 0 0 は、数値シミュレーションを行って導出した溶鋼 3 の流速に代えて、当該数値シミュレーションで用いた流入境界条件のパラメータ u_{inlet} を第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ に含める。従って、ノイズの要素になり易い溶鋼 3 の流速ではなく、溶鋼 3 の主流にダイレクトに反映される流入境界条件のパラメータ u_{inlet} を、データ同化を行うフィルタに与えることができる。従って、鋳型 4 内における溶鋼 3 の偏流の推定精度を向上させることができる。

【0072】

<変形例>

本実施形態において、可視化装置 1 0 0 は、第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t})$ の最頻値を、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の推定値として導出したが、第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t})$ の平均値を、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の推定値として導出してよいし、第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t})$ の中央値を、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の推定値として導出してよい。

【0073】

また、本実施形態では、数値シミュレーションでは、タンディッシュ 2 から領域 6 d に流入する溶鋼 3 の流量 u_{inlet} を導出し、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量を、一定の流量 U から、タンディッシュ 2 から領域 6 d に流入する溶鋼 3 の流量 u_{inlet} を減算した値とした。しかしながら、例えば、タンディッシュ 2 から浸漬ノズル 6 に注入される溶鋼 3 の流量 U が一定でない場合、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量も数値シミュレーションにより導出してよい。

【0074】

また、本実施形態では、熱電対 1 0 a ~ 1 0 l が配置されている全ての位置における温度 $T_1 \sim T_L$ を、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ に含める場合を例に挙げて説明した。しかしながら、必ずしもこのようにする必要はない。例えば、熱電対 1 0 a ~ 1 0 l が配置されている全ての位置における温度 $T_1 \sim T_L$ のうち、一部の温度を、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$

に含めるようにしてもよい。例えば、溶鋼 3 の偏流が生じているときと生じていないときとで温度差が生じる位置の温度を選択することができる。

また、熱電対 10 a ~ 10 l が配置されている位置における温度に代えてまたは加えて、湯面レベル計 9 により測定される位置における溶鋼 3 の湯面レベルを用いてもよい。

【0075】

また、本実施形態では、可視化対象平面領域を溶鋼 3 が存在する領域に限定した。しかしながら、必ずしもこのようにする必要はない。例えば、可視化対象平面領域を溶鋼 3 と凝固シェル 8 とが存在する領域にしてもよい。このようにする場合、数値シミュレーション部 101 a は、溶鋼 3 の物性値と、凝固シェル 8 の物性値と、凝固潜熱とを用いて、凝固を伴う非定常の伝熱および流動の数値シミュレーションを行えばよい。

【0076】

〔第 2 の実施形態〕

次に、第 2 の実施形態を説明する。第 1 の実施形態では、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ に含める成分 (u_{inlet} 、 $T_1 \sim T_L$) が瞬時値である場合を例に挙げて説明した。これに対し、本実施形態では、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ に含める成分の少なくとも一部が時間平均値である場合を例に挙げて説明する。このように本実施形態と第 1 の実施形態とは、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の構成が異なることに基づく構成および処理が主として異なる。従って、本実施形態の説明において、第 1 の実施形態と同一の部分については、図 1 ~ 図 3 に付した符号と同一の符号を付す等して詳細な説明を省略する。

【0077】

<本発明者らが得た知見>

第 1 の実施形態で説明したように、溶鋼 3 のレイノルズ数は大きいことから溶鋼 3 は大きくゆらぐ。このため、状態ベクトルおよび観測ベクトルの成分（物理量）として瞬時値を用いると、データ同化において、計算のタイミングにおける溶鋼 3 のゆらぎに起因して、状態ベクトルを過度に修正したり、状態ベクトルを（殆ど）修正しなかったりする虞がある。そこで、本発明者らは、状態ベクトルおよび観測ベクトルの相互に対応する成分として、時間平均値を用いれば、鋳型 4 内における溶鋼 3 の偏流の推定精度を向上させることができる考えた。以下に説明する本発明の第 2 の実施形態は、このような知見に基づいてなされたものである。

【0078】

<連続鋳造鋳型内可視化装置 400 の構成>

図 4 は、連続鋳造鋳型内可視化装置 400 の機能的な構成の一例を示す図である。連続鋳造鋳型内可視化装置 400 のハードウェアは、例えば、第 1 の実施形態の連続鋳造鋳型内可視化装置 100 のハードウェアと同じもので実現することができる。

【0079】

（数値解析データ導出部 401）

数値解析データ導出部 401 は、数値シミュレーションにより、可視化対象平面領域の各計算格子点に流速および熱電対 10 a ~ 10 l が配置されている位置における温度を第 1 の状態ベクトルの成分のデータとして導出し、当該第 1 の状態ベクトルのデータを加工して、数値解析データを成分として含む第 2 の状態ベクトルのデータを導出する。本実施形態では、数値解析データ導出部 401 は、数値シミュレーション部 101 a と、数値シミュレーションデータ加工部 401 a とを有する。

【0080】

（数値シミュレーションデータ加工部 401 a）

数値シミュレーションデータ加工部 401 a は、数値シミュレーション部 101 a で導出された第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}$ のデータを加工して、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ のデータを導出する。本実施形態では、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ が、以下の（5）式で表される場合を例に挙げて説明する。

【0081】

〔数 4〕

10

20

30

40

50

$$\vec{x}^{(2)} = \begin{pmatrix} u_{\text{inlet}} \\ T_{1\text{ave}} \\ T_{2\text{ave}} \\ \vdots \\ T_{L\text{ave}} \end{pmatrix} \dots (5)$$

10

【0082】

$T_{1\text{ave}} \sim T_{L\text{ave}}$ は、熱電対10a～10lが配置されている位置における温度 $T_1 \sim T_L$ の、時刻 t より前の時刻から時刻 t までの所定の時間における時間平均値である。所定の時間は、0.5秒以上かつ30秒以下とするのが好ましく、3秒以上かつ10秒以下とするのがより好ましい。

数値シミュレーションデータ加工部401aは、数値シミュレーション部101aにおいて導出された熱電対10a～10lが配置されている位置における推定温度 $T_1^{(k)} \sim T_L^{(k)}$ の時間平均値 $T_{1\text{ave}}^{(k)} \sim T_{L\text{ave}}^{(k)}$ を時刻 t における $T_{1\text{ave}} \sim T_{L\text{ave}}$ の値として導出する。ここで、 k は、アンサンブルメンバーを指定する添字である。時間平均値 $T_{1\text{ave}}^{(k)} \sim T_{L\text{ave}}^{(k)}$ は、ステップ幅 Δt の時間隔毎に導出された推定温度 $T_1^{(k)} \sim T_L^{(k)}$ の値を用いて導出しても良いし、ステップ幅 Δt を細分した時間隔毎に導出された推定温度 $T_1^{(k)} \sim T_L^{(k)}$ の値を用いて導出しても良い。時間平均値 $T_{1\text{ave}}^{(k)} \sim T_{L\text{ave}}^{(k)}$ を導出する際に用いる推定温度 $T_1^{(k)} \sim T_L^{(k)}$ の値は、0.5秒以上かつ10秒以下の時間隔で取得するのが好ましく、1秒以上かつ5秒以下の時間隔で取得するのがより好ましい。以下の説明では、熱電対10a～10lが配置されている位置における推定温度 $T_1^{(k)} \sim T_L^{(k)}$ の時間平均値 $T_{1\text{ave}}^{(k)} \sim T_{L\text{ave}}^{(k)}$ を、必要に応じて、熱電対10a～10lの位置における推定温度の時間平均値 $T_{1\text{ave}}^{(k)} \sim T_{L\text{ave}}^{(k)}$ と称する。タンディッシュ2から領域6dに流入する溶鋼3の流量 u_{inlet} の値 $u_{\text{inlet}}^{(k)}$ は、時刻 t における数値シミュレーションで使用した値でも、時刻 t より前の時刻から時刻 t までの所定の時間における数値シミュレーションで使用した値の時間平均値であってもよい。ここで、所定の時間は、 $T_{1\text{ave}} \sim T_{L\text{ave}}$ を温度 $T_1 \sim T_L$ の時間平均値と定義した際の平均する時間と同一である。また、第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ には、熱電対10a～10lが配置されている位置における温度 $T_1 \sim T_L$ （瞬時値）は含まれない。

20

30

【0083】

(第1の確率密度関数導出部102)

第1の確率密度関数導出部102は、第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ の成分として、熱電対10a～10lが配置されている位置における温度 $T_1 \sim T_L$ に代えて、その時間平均値 $T_{1\text{ave}} \sim T_{L\text{ave}}$ を用いて、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の条件付き確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_{t0:t-\Delta t})$ を導出する。

【0084】

(観測データ導出部402)

観測データ導出部402は、可視化断面の各観測位置における温度の測定値を第1の観測ベクトルの成分として第1の観測データを導出し、当該第1の観測データを加工して第2の観測データを導出する。本実施形態では、観測データ導出部402は、観測データ取得部103aと、観測データ加工部402aとを有する。

40

【0085】

((観測データ加工部402a))

観測データ加工部402aは、観測データ取得部103aにより取得された観測データである第1の観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t(0)$ を加工して、第2の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_t(0)$ を導出する。本実施形態では、第1の実施形態における観測ベクトルを第1の観測ベクトルと称し、

50

第1の観測ベクトルの時刻 t より前の時刻から時刻 t までの所定の時間における時間平均ベクトルを第2の観測ベクトルと称する。ここで、所定の時間は、 $T_{1ave} \sim T_{Lave}$ を温度 $T_1 \sim T_L$ の時間平均値と定義した際の平均する時間と同一である。従って、第2の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ は、以下の(6)式で表される。尚、 $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ の $\rightarrow$ は、(6)式において、 y の上に付されている $\rightarrow$ に対応する。

【0086】

【数5】

$$\vec{y}^{(2)}_t^{(0)} = \begin{pmatrix} T'_{1ave} \\ T'_{2ave} \\ \vdots \\ T'_{Lave} \end{pmatrix} \quad \dots (6)$$

10

【0087】

$T'_{1ave} \sim T'_{Lave}$ は、熱電対10a～10lの測定値 $T'_1 \sim T'_L$ の、時刻 t より前の時刻から時刻 t までの所定の時間における時間平均値である。熱電対10a～10lの測定値 $T'_1 \sim T'_L$ は、観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ の成分である。時間平均値 $T'_{1ave} \sim T'_{Lave}$ を導出する際に用いる測定値 $T'_1 \sim T'_L$ は、時間平均値 $T_{1ave}^{(k)} \sim T_{Lave}^{(k)}$ を導出する際に用いる推定温度 $T_1^{(k)} \sim T_L^{(k)}$ の値を取得する時刻と同一の時刻に取得する。以下の説明では、熱電対10a～10lの測定値 $T'_1 \sim T'_L$ の、時刻 t より前の時刻から時刻 t までの所定の時間における時間平均値を、必要に応じて、熱電対10a～10lの測定値の時間平均値と称する。ここで、第2の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ には、熱電対10a～10lの測定値 $T'_1 \sim T'_L$ (瞬時値)は含まれない。

20

【0088】

(尤度関数導出部104)

尤度関数導出部104は、(第1の)観測ベクトル $y \rightarrow^{(1)}$ に代えて第2の観測ベクトル $y \rightarrow^{(2)}$ を用い、(第1の)観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ に代えて第2の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ を用いて、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_t)$ を導出する。

30

【0089】

(データ同化部105)

データ同化部105は、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第1の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t-\Delta t})$ に代えて、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第1の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_{0:t-\Delta t})$ を用いると共に、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ に代えて、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_t)$ を用いて、第1の実施形態で説明した処理を行う。

40

(可視化データ作成部106、出力部107)

可視化データ作成部106および出力部107の処理は、第1の実施形態で説明した通りである。

【0090】

<動作フローチャート>

次に、図5のフローチャートを参照しながら、可視化装置400の処理の一例を説明する。

ステップS301～S304は、図3のフローチャートのステップS301～S304と同じである。ステップS304において、数値シミュレーション部101aにより、時刻 t における第1の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ のデータが導出される((1)式を参照)。

50

【0091】

ステップS304の後、処理はステップS501に進む。処理がステップS501に進むと、数値シミュレーションデータ加工部401aは、時刻 t における第1の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ のデータを加工して、時刻 t における第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ のデータを導出する（（5）式を参照）。第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ のデータには、溶鋼3の流速は含まれず、タンディッシュ2から領域6dに流入する溶鋼3の流量 $u_{inlet}^{(k)}$ （の時刻 t での瞬時値）と、熱電対10a～10lの位置における推定温度の時間平均値 $T_{1ave}^{(k)} \sim T_{Lave}^{(k)}$ とが含まれる。

【0092】

次に、ステップS306において、第1の確率密度関数導出部102は、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第1の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_{t-\Delta t})$ を導出する。

次に、ステップS307において、観測データ取得部103aは、時刻 t での（第1の）観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ （各観測位置 i における熱電対10a～10lの測定値）を取得する。

次に、ステップS502において、観測データ加工部402aは、時刻 t における第1の観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ を加工して、時刻 t における第2の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ を導出する（（6）式を参照）。時刻 t における第2の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ には、熱電対10a～10lの測定値の時刻 t における時間平均値 $T'_{1ave} \sim T'_{Lave}$ が含まれる。

【0093】

以降ステップS308～S314においては、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第1の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t-\Delta t})$ に代えて、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第1の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_{0:t-\Delta t})$ を用い、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ に代えて、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_t)$ を用い、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第2の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t})$ に代えて、時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第2の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_{t0:t})$ を用いて、図3を参照しながら説明した処理と同様の処理が行われる。

【0094】

<まとめ>

以上のように本実施形態では、可視化装置400は、熱電対10a～10lが配置されている位置における推定温度 $T_1^{(k)} \sim T_L^{(k)}$ に代えて、その時間平均値 $T_{1ave}^{(k)} \sim T_{Lave}^{(k)}$ を含む第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ のデータを導出し、熱電対10a～10lの測定値 $T'_1 \sim T'_L$ に代えて、その時間平均値 $T'_{1ave} \sim T'_{Lave}$ を含む第2の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ を導出する。従って、第1の実施形態で説明した効果に加えて、データ同化において、計算のタイミングにおける溶鋼3のゆらぎに起因して、状態ベクトルを過度に修正したり、状態ベクトルが殆ど修正されなかったりすることを抑制することができる。従って、鑄型4内における溶鋼3の偏流の推定精度をより向上させることができる。

尚、本実施形態においても、第1の実施形態で説明した種々の変形例を採用することができる。第1の実施形態の<変形例>の項で説明したのと同様に、熱電対10a～10lが配置されている全ての位置における温度の時間平均値 $T_{1ave} \sim T_{Lave}$ を、第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ に含めなくてもよい。

【0095】

[第3の実施形態]

次に、第3の実施形態を説明する。第2の実施形態では、観測される物理量（温度）と同じ物理量の時間平均値 $T_{1ave} \sim T_{Lave}$ 、 $T'_{1ave} \sim T'_{Lave}$ を用いて第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ を構成する場合を例に挙げて説明した。これに対し、本実施形態では、第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ に含める成分の少なくとも一部が、観測される物理量と異なる物理量の時間平均値である場合を例に挙げて説明する。このように本実施形態と第1、第2の実施形態とは、第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ の構成が異なることに基づく構成および処理が主として異なる。従って、本実施形態の説明において、第1、第2の実施形態と同一の部分につ

10

20

30

40

50

いては、図 1～図 5 に付した符号と同一の符号を付す等して詳細な説明を省略する。

【0096】

＜本発明者らが得た知見＞

状態ベクトルおよび観測ベクトルの次数が高いと、データ同化において修正すべき状態ベクトルの成分が多くなり、本来修正すべき成分への修正が適切に修正されなくなる虞がある。そこで、本発明者らは、状態ベクトルおよび観測ベクトルに含める成分を、鋳型 4 内における溶鋼 3 の偏流を可及的にダイレクトに反映する物理量に絞る必要があると考えた。このような物理量として、例えば、熱流束が挙げられる。以下に説明する本発明の第 3 の実施形態は、このような知見に基づいてなされたものである。

【0097】

＜連続鋳造鋳型内可視化装置 600 の構成＞

図 6 は、連続鋳造鋳型内可視化装置 600 の機能的な構成の一例を示す図である。連続鋳造鋳型内可視化装置 600 のハードウェアは、例えば、第 1 の実施形態の連続鋳造鋳型内可視化装置 100 のハードウェアと同じもので実現することができる。

【0098】

(数値解析データ導出部 601)

数値解析データ導出部 601 は、数値シミュレーションにより、可視化対象平面領域の各計算格子点における流速および熱電対 10a～10l が配置されている位置における温度を第 1 の状態ベクトルの成分のデータとして導出し、当該第 1 の状態ベクトルのデータを加工して、数値解析データを成分として含む第 2 の状態ベクトルのデータを導出する。本実施形態では、数値解析データ導出部 601 は、数値シミュレーション部 101a と、数値シミュレーションデータ加工部 601a とを有する。

【0099】

((数値シミュレーションデータ加工部 601a))

数値シミュレーションデータ加工部 601a は、数値シミュレーション部 101a で導出された第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}$ のデータを加工して、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ のデータを導出する。本実施形態では、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ が、以下の (7) 式で表される場合を例に挙げて説明する。尚、 $x \rightarrow^{(2)}$ の $\rightarrow$ は、(7) 式において、 x の上に付されている $\rightarrow$ に対応する。

【0100】

【数 6】

$$\vec{x}^{(2)} = \begin{pmatrix} u_{\text{inlet}} \\ \Delta q_{1\text{ave}} \\ \Delta q_{2\text{ave}} \\ \Delta q_{3\text{ave}} \end{pmatrix} \dots (7)$$

【0101】

$\Delta q_{1\text{ave}}$ 、 $\Delta q_{2\text{ave}}$ 、 $\Delta q_{3\text{ave}}$ は、鋳型 4 の短辺部 4a、4b の領域 41a～41b、42a～42b、43a～43b における熱流束の差の時間平均値であり、数値シミュレーションの結果に基づいて導出されるものである。具体的に、 $\Delta q_{1\text{ave}}$ は、領域 41a における熱流束の代表値の時間平均値から領域 41b における熱流束の代表値の時間平均値を減算したものであり、 $\Delta q_{2\text{ave}}$ は、領域 42a における熱流束の代表値の時間平均値から領域 42b における熱流束の代表値の時間平均値を減算したものであり、 $\Delta q_{3\text{ave}}$ は、領域 43a における熱流束の代表値の時間平均値から領域 43b における熱流束の代表値の時間平均値を減算したものである。

【0102】

ここで、領域 4 1 a ~ 4 3 a、4 1 b ~ 4 3 b は、図 1 2 に示すように、鑄型 4 の短辺部 4 a、4 b を鑄造方向（X 軸方向）において 3 等分した領域の 1 つである。領域 4 1 a ~ 4 3 a、4 1 b ~ 4 3 b における熱流束の代表値は、当該領域の鑄造幅方向（Y 軸方向）における熱流束の代表値であり、例えば、当該（1 つの）領域内の複数の位置における熱流束の平均値、中央値、または最頻値である。平均値は、算術平均値であっても、位置に応じて重み付けをした加重平均値であってもよい。また、領域 4 1 a ~ 4 3 a、4 1 b ~ 4 3 b における熱流束の代表値として、例えば、当該（1 つの）領域内の代表的な 1 つの位置における熱流束を採用してもよい。

また、領域 4 1 a ~ 4 1 b、4 2 a ~ 4 2 b、4 3 a ~ 4 3 b における熱流束の差の時間平均値 Δq_{1ave} 、 Δq_{2ave} 、 Δq_{3ave} は、時刻 t より前の時刻から時刻 t までの所定の時間における時間平均値である。所定の時間は、0.5 秒以上かつ 30 秒以下とするのが好ましく、3 秒以上かつ 10 秒以下とするのがより好ましい。

【0103】

数値シミュレーションデータ加工部 601 a は、例えば、第 2 の実施形態の数値シミュレーションデータ加工部 401 a と同様に、熱電対 10 a ~ 10 l の位置における推定温度の時間平均値 $T_{1ave}^{(k)} \sim T_{Lave}^{(k)}$ を導出する。そして、数値シミュレーションデータ加工部 601 a は、鑄型 4 の短辺部 4 a、4 b における伝熱状態が鑄造幅方向（Y 軸方向）の 1 次元定常熱伝導であると仮定して、熱電対 10 a ~ 10 l の位置における推定温度の時間平均値 $T_{1ave}^{(k)} \sim T_{Lave}^{(k)}$ と、鑄型 4 の冷却水の温度と、鑄型 4 の熱伝導度とに基づいて、熱電対 10 a ~ 10 l の位置における熱流束の時間平均値を導出する。そして、数値シミュレーションデータ加工部 601 a は、熱電対 10 a ~ 10 l の位置における当該熱流束の時間平均値に基づいて、領域 4 1 a ~ 4 3 a、4 1 b ~ 4 3 b における熱流束の代表値の時間平均値を導出し、領域 4 1 a ~ 4 1 b、4 2 a ~ 4 2 b、4 3 a ~ 4 3 b における熱流束の差の時間平均値 $\Delta q_{1ave}^{(k)}$ 、 $\Delta q_{2ave}^{(k)}$ 、 $\Delta q_{3ave}^{(k)}$ を、熱流束の差の時間平均値 Δq_{1ave} 、 Δq_{2ave} 、 Δq_{3ave} の値として導出する。

【0104】

鑄型 4 の短辺部 4 a、4 b（領域 4 1 a ~ 4 3 a、4 1 b ~ 4 3 b）内の温度の時間平均値として、熱電対 10 a ~ 10 l の位置における推定温度の時間平均値 $T_{1ave}^{(k)} \sim T_{Lave}^{(k)}$ を用いなくてもよい。このようにする場合、数値シミュレーションデータ加工部 601 a は、例えば、鑄型 4 の短辺部 4 a、4 b における伝熱状態が鑄造幅方向（Y 軸方向）の 1 次元定常熱伝導であると仮定して、数値シミュレーション部 101 a において導出された短辺部 4 a、4 b との境界上にある各計算格子点における温度の時間平均値と、鑄型 4 の冷却水の温度と、鑄型 4 の熱伝導度とに基づいて、短辺部 4 a、4 b との境界上にある各計算格子点における熱流束の時間平均値を導出することにより、鑄型 4 の短辺部 4 a、4 b（領域 4 1 a ~ 4 3 a、4 1 b ~ 4 3 b）における熱流束の代表値の時間平均値を導出する。

【0105】

（第 1 の確率密度関数導出部 102）

第 1 の確率密度関数導出部 102 は、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ の成分として、熱電対 10 a ~ 10 l が配置されている位置における温度 $T_1 \sim T_L$ に代えて、鑄型上部の熱流束の差の時間平均値 Δq_{1ave} 、鑄型中央部の熱流束の差の時間平均値 Δq_{2ave} 、および鑄型下部の熱流束の差の時間平均値 Δq_{3ave} を用いて、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の条件付き確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_{t0:t-\Delta t})$ を導出する。

【0106】

（観測データ導出部 602）

観測データ導出部 602 は、可視化断面の各観測位置における温度の測定値を第 1 の観測ベクトルの成分として第 1 の観測データを導出し、当該第 1 の観測データを加工して第 2 の観測データを導出する。本実施形態では、観測データ導出部 602 は、観測データ取得部 103 a と、観測データ加工部 602 a とを有する。

【0107】

((観測データ加工部 602a))

観測データ加工部 602a は、観測データ取得部 103a により取得された観測データである第 1 の観測データ $y \rightarrow^{(1)}_t^{(0)}$ を加工して、第 2 の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ を導出する。本実施形態では、第 1 の実施形態における観測ベクトルを第 1 の観測ベクトルと称し、鋳型 4 の短辺部 4a、4b の領域 41a～41b、42a～42b、43a～43b における熱流束の差の時間平均で構成されるベクトルを第 2 の観測ベクトルと称する。従って、第 2 の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ は、以下の (8) 式で表される。尚、 $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ の $\rightarrow$ は、(8) 式において、 y の上に付されている $\rightarrow$ に対応する。

【0108】

【数 7】

$$\vec{y}^{(2)}_t^{(0)} = \begin{pmatrix} \Delta q'_{1ave} \\ \Delta q'_{2ave} \\ \Delta q'_{3ave} \end{pmatrix} \dots (8)$$

【0109】

$\Delta q'_{1ave}$ 、 $\Delta q'_{2ave}$ 、 $\Delta q'_{3ave}$ は、鋳型 4 の短辺部 4a、4b の領域 41a～41b、42a～42b、43a～43b における熱流束の差の時間平均値であり、熱電対 10a～10l の測定値 $T'_1 \sim T'_L$ に基づいて導出されるものである。具体的に、 $\Delta q'_{1ave}$ は、領域 41a における熱流束の代表値の時間平均値から領域 41b における熱流束の代表値の時間平均値を減算したものであり、 $\Delta q'_{2ave}$ は、領域 42a における熱流束の代表値の時間平均値から領域 42b における熱流束の代表値の時間平均値を減算したものであり、 $\Delta q'_{3ave}$ は、領域 43a における熱流束の代表値の時間平均値から領域 43b における熱流束の代表値の時間平均値を減算したものである。以下の説明では、 $\Delta q'_{1ave}$ 、 $\Delta q'_{2ave}$ 、 $\Delta q'_{3ave}$ を、必要に応じて、それぞれ、温度測定値に基づく熱流束の差と総称する。

本実施形態では、鋳型 4 の短辺部 4a、4b の領域 41a～41b、42a～42b、43a～43b における熱流束の差の時間平均値が、各観測位置における物理量に基づいて導出される物理量の一例となる。

【0110】

温度測定値に基づく熱流束の差の時間平均値 $\Delta q'_{1ave}$ 、 $\Delta q'_{2ave}$ 、 $\Delta q'_{3ave}$ は、時刻 t より前の時刻から時刻 t までの所定の時間における時間平均値である。ここで、所定の時間は、熱流束の差の時間平均値 Δq_{1ave} 、 Δq_{2ave} 、 Δq_{3ave} を鋳型 4 の短辺部 4a、4b の領域 41a～41b、42a～42b、43a～43b における熱流束の差の時間平均値と定義した際の平均する時間と同一である。

【0111】

観測データ加工部 602a は、例えば、第 2 の実施形態の観測データ加工部 402a と同様に、熱電対 10a～10l の測定値の時間平均値 $T'_{1ave} \sim T'_{Lave}$ を導出する。そして、観測データ加工部 602a は、鋳型 4 の短辺部 4a、4b における伝熱状態が鋳造幅方向 (Y 軸方向) の 1 次元定常熱伝導であると仮定して、熱電対 10a～10l の測定値の時間平均値 $T'_{1ave} \sim T'_{Lave}$ と、鋳型 4 の冷却水の温度と、鋳型 4 の熱伝導度とに基づいて、熱電対 10a～10l の位置における熱流束の時間平均値を導出する。そして、観測データ加工部 602a は、熱電対 10a～10l の位置における当該熱流束の時間平均値に基づいて、領域 41a～43a、41b～43b における熱流束の代表値の時間平均値を導出し、温度測定値に基づく熱流束の差の時間平均値 $\Delta q'_{1ave}$ 、 $\Delta q'_{2ave}$ 、 $\Delta q'_{3ave}$ を導出する。

【0112】

(尤度関数導出部 104)

10

20

30

40

50

尤度関数導出部 104 は、(第 1 の) 観測ベクトル $y \rightarrow^{(1)}$ に代えて第 2 の観測ベクトル $y \rightarrow^{(2)}$ を用い、(第 1 の) 観測データ $y \rightarrow^{(1)}_{t(0)}$ に代えて第 2 の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_{t(0)}$ を用いて、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_t)$ を導出する。

【0113】

(データ同化部 105)

データ同化部 105 は、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 1 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t-\Delta t})$ に代えて、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 1 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_{0:t-\Delta t})$ を用いると共に、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ に代えて、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_t)$ を用いて、第 1 の実施形態で説明した処理を行う。

10

(可視化データ作成部 106、出力部 107)

可視化データ作成部 106 および出力部 107 の処理は、第 1 の実施形態で説明した通りである。

【0114】

<動作フローチャート>

次に、図 7 のフローチャートを参照しながら、可視化装置 600 の処理の一例を説明する。

ステップ S301～S304 は、図 3 のフローチャートのステップ S301～S304 と同じである。ステップ S304 において、数値シミュレーション部 101a により、時刻 t における第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ のデータが導出される ((1) 式を参照)。

20

【0115】

ステップ S304 の後、処理はステップ S701 に進む。処理がステップ S701 に進むと、数値シミュレーションデータ加工部 601a は、時刻 t における第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ のデータを加工して、時刻 t における第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ のデータを導出する ((7) 式を参照)。第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ のデータには、溶鋼 3 の流速は含まれず、タンディッシュ 2 から領域 6d に流入する溶鋼 3 の流量 $u_{inlet}^{(k)}$ (の時刻 t での瞬時値) と、鑄型 4 の短辺部 4a、4b の領域 41a～41b、42a～42b、43a～43b における熱流束の差の時間平均値 $\Delta q_{1ave}^{(k)}$ 、 $\Delta q_{2ave}^{(k)}$ 、 $\Delta q_{3ave}^{(k)}$ とが含まれる。

30

【0116】

次に、ステップ S306 において、第 1 の確率密度関数導出部 102 は、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 1 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_{t-\Delta t})$ を導出する。

次に、ステップ S307 において、観測データ取得部 103a は、時刻 t での (第 1 の) 観測データ $y \rightarrow^{(1)}_{t(0)}$ (各観測位置 i における熱電対 10a～10l の測定値) を取得する。

次に、ステップ S702 において、観測データ加工部 602a は、時刻 t における第 1 の観測データ $y \rightarrow^{(1)}_{t(0)}$ を加工して、時刻 t における第 2 の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_{t(0)}$ を導出する ((8) 式を参照)。時刻 t における第 2 の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_{t(0)}$ には、温度測定値に基づく熱流束の差の時間平均値 $\Delta q'_{1ave}$ 、 $\Delta q'_{2ave}$ 、 $\Delta q'_{3ave}$ が含まれる。

40

【0117】

以降ステップ S308～S314 においては、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 1 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{0:t-\Delta t})$ に代えて、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 1 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_{0:t-\Delta t})$ を用い、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_t)$ に代えて、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の尤度関数 $L(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_t)$ を用い、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(1)}_{t0:t})$ に代えて、時刻 t での第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の第 2 の確率密度関数 $p(x \rightarrow^{(2)}_t | y \rightarrow^{(2)}_{t0:t})$ を用いて、図 3 を参照しながら説明した処理と同様の処理が行われる。

50

【0118】

<まとめ>

以上のように本実施形態では、可視化装置600は、熱電対10a～10lが配置されている位置における推定温度 $T_1^{(k)} \sim T_L^{(k)}$ に代えて、鋳型4の短辺部4a、4bの領域41a～41b、42a～42b、43a～43bにおける熱流束の差の時間平均値 $\Delta q_{1ave}^{(k)}$ 、 $\Delta q_{2ave}^{(k)}$ 、 $\Delta q_{3ave}^{(k)}$ を含む第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ のデータを導出し、熱電対10a～10lの測定値 $T'_1 \sim T'_L$ に代えて、温度測定値に基づく熱流束の差の時間平均値 $\Delta' q_{1ave}$ 、 $\Delta' q_{2ave}$ 、 $\Delta' q_{3ave}$ を含む第2の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ を導出する。従って、第1、第2の実施形態で説明した効果に加えて、状態ベクトルおよび観測ベクトルに含める成分を、鋳型4内における溶鋼3の偏流を可及的にダイレクトに反映する物理量に絞ることができる。従って、鋳型4内における溶鋼3の偏流の推定精度をより一層向上させることができる。

10

【0119】

<変形例>

本実施形態のように、鋳型4の短辺部4a（領域41a～43a）における熱流束の代表値の時間平均値と、鋳型4の短辺部4b（領域41b～43b）における熱流束の代表値の時間平均値との差を用いれば、状態ベクトルの次数を低くすることができるので好ましい。しかしながら、必ずしもこのようにする必要はない。例えば、鋳型4の短辺部4a（領域41a～43a）における熱流束の代表値と、鋳型4の短辺部4b（領域41b～43b）における熱流束の代表値を、状態ベクトルおよび観測ベクトルの成分に含めてもよい。

20

【0120】

また、本実施形態のように、鋳型4の短辺部4a～4bを複数の領域41a～43a、41b～43bに分け、当該領域の代表値を用いるようにすれば、状態ベクトルの次数を低くすることができるので好ましい。しかしながら、必ずしもこのようにする必要はない。例えば、鋳型4の短辺部4a、4bにおける熱流束であって、鋳造方向（X軸方向）の位置が、熱電対10a～10lが配置されている位置と同じ位置における熱流束を用いてもよい。

【0121】

また、例えば、熱電対10a～10lが配置されている全ての位置における温度の時間平均値 $T_{1ave} \sim T_{Lave}$ の中に、溶鋼3の偏流に大きく影響を受ける時間平均値がある場合には、当該時間平均値を本実施形態における第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ にさらに含めるようにしてもよい。このようにする場合、熱電対10a～10lの測定値の時間平均値 $T'_{1ave} \sim T'_{Lave}$ のうち、第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ に含める時間平均値に対応するものを第2の観測データ $y \rightarrow^{(2)}_t^{(0)}$ に含める。

30

この他、本実施形態においても、第1、第2の実施形態で説明した種々の変形例を採用することができる。

【0122】

[実施例]

次に、実施例を説明する。

40

本実施例では、数値シミュレーションとして、以下の(9a)式～(9c)式を基礎式とする数値シミュレーションを行った。

【0123】

【数8】

50

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad \dots (9a)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \beta (T - T_0) \vec{g} + \nu \nabla^2 \vec{u} \quad \dots (9b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T \quad \dots (9c)$$

10

【0124】

(9a)式は、連続の式、(9b)式は、ブジネスク近似による浮力を考慮したナビエ・ストークス方程式、(9c)式は、エネルギー保存式である。尚、 $\vec{u}$ は、流速ベクトル、 T は温度、 t は時間、 p は圧力、 ρ は密度、 $\vec{g}$ は重力加速度ベクトル、 ν は動粘性係数、 β は熱膨張率、 k は熱伝導率、 C_p は定圧熱容量、 T_0 は基準温度である。尚、 $\vec{u}$ 、 $\vec{g}$ は、それぞれ、(9a)式～(9c)式において、 $\vec{u}$ の上に $\rightarrow$ 、 $\vec{g}$ の上に $\rightarrow$ が付されている記号に対応する。

20

【0125】

解析対象領域は、鋳型4およびその下方の領域であり、鋳造幅方向(Y軸方向)の長さが0.6m、鋳造方向(X軸方向)の長さが2.0m、鋳造厚方向(Z軸方向)の長さが0.1mの直方体の領域とした。そのうち、鋳型4内の領域は、0.6m×0.7mの領域である。また、解析対象領域のうち、鋳造幅方向の最も上側の位置(解析対象の領域のうちX軸の値が最小になる位置)がメニスカスの位置に対応するものとした。このような解析対象領域において、空間差分のX軸方向×Y軸方向×Z軸方向の格子点の数は31点×101点×11点とした。

【0126】

メニスカス、鋳型4との境界、その外の境界(凝固シェル8との境界および浸漬ノズル6との境界)には、温度の境界条件として、それぞれ、54.34W/m²/K、1295.8W/m²/K、418.0W/m²/Kの熱伝達係数を定めた。

30

また、鋳造速度(鋳片の引き抜き速度)を1.2m/minとした。また、鋳型4内に注入される溶鋼3の温度を1618℃とした。

【0127】

本実施例では、双子実験によりデータ同化の推定精度を検証した。双子実験は、データ同化の分野で一般的に用いられる手法であるが、その概要を説明すると、計算条件を異ならせた2つの数値シミュレータを用意し、一方の数値シミュレータの計算結果の一部を測定データとし、この測定データを他方の数値シミュレータに送り、当該他方の数値シミュレータでデータ同化を行う。測定データを受け取った当該他方の数値シミュレータの計算結果と、当該一方の数値シミュレータの計算結果とを比較する。両者が近いほど、データ同化から送られた測定データに近い値をするほど、データ同化の推定精度が高いことになる。当該一方の数値シミュレータにおいて、タンディッシュ2から領域6cに流入する溶鋼3の流量：タンディッシュ2から領域6dに流入する溶鋼3の流量 $u_{inlet} = 1.2 : 0.8$ とした。データ同化の手法としてはアンサンブルカルマンフィルタを用いた。アンサンブルメンバーの数は、50とした。

40

【0128】

以上の条件で、第1の実施形態、第2の実施形態、第3の実施形態のそれぞれの手法で、各時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の推定値を導出し、各時刻 t での第2の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}_t$ の推定値に基づいて、各時刻 t での第1の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ の推定値

50

を導出した。第 1 の実施形態、第 2 の実施形態、第 3 の実施形態の手法を発明例 1、発明例 2、発明例 3 と称する。

【0129】

また、発明例 1～3 との対比のため、第 2 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(2)}$ を用いずに第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}$ と、第 1 の実施形態における（第 1 の）観測ベクトル $y \rightarrow^{(1)}$ とを用いて、各時刻 t での第 1 の状態ベクトル $x \rightarrow^{(1)}_t$ の推定値を導出した。この手法を比較例と称する。

図 8、図 9、図 10、図 11 は、それぞれ、発明例 1、発明例 2、発明例 3、比較例の結果を示す図である。何れもステップ幅 Δt を 3 秒とした。また、発明例 2 と発明例 3 において、 $T_{1ave} \sim T_{Lave}$ を温度 $T_1 \sim T_L$ の時間平均値と定義した際の平均する時間および $T'_{1ave} \sim T'_{Lave}$ を測定値 $T'_1 \sim T'_L$ の時間平均値と定義した際の平均する時間を 3 秒とし、時間平均値 $T_{1ave}^{(k)} \sim T_{Lave}^{(k)}$ を導出する際に用いる推定温度 $T_1^{(k)} \sim T_L^{(k)}$ の値を取得する時間間隔および時間平均値 $T'_{1ave} \sim T'_{Lave}$ を導出する際に用いる測定値 $T'_1 \sim T'_L$ を取得する時間間隔を 1 秒とした。

【0130】

図 8 (a)、図 9 (a)、図 10 (a)、図 11 (a) は、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量 (Inlet Value(left side of nozzle)) と時間 (time step) との関係を示す図であり、データ同化の結果を示す。尚、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量は、吐出口 7 a から鑄型 4 内に流入する溶鋼 3 の流量と等しく、タンディッシュ 2 から領域 6 d に流入する溶鋼 3 の流量 u_{inlet} は、吐出口 7 b から鑄型 4 内に流入する溶鋼 3 の流量と等しい。

【0131】

図 8 (a)、図 9 (a)、図 10 (a)、図 11 (a) において、correct val. は、データの送信側（一方の数値シミュレータ）で得られた、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量 (= 1. 2) である。Ens は、各時間ステップにおいてデータの受信側（他方の数値シミュレータ）で得られた、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量（アンサンブルメンバーの値）である。Initial val. は、データの受信側（他方の数値シミュレータ）における、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量（アンサンブルメンバーの値）の初期値である。Assim.val. は、各時間ステップにおいてデータの受信側（他方の数値シミュレータ）で得られた、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量（アンサンブルメンバーの値）の標準偏差の範囲 ($\pm \sigma$) を示し、● は、その平均値を示す。

【0132】

図 8 (b)、図 9 (b)、図 10 (b)、図 11 (b) は、吐出口 7 a、7 b から鑄型 4 内に流入する溶鋼 3 の流量を示す。図 8 (b)、図 9 (b)、図 10 (b)、図 11 (b) において、各矢印線は、各時間ステップにおける、吐出口 7 a から鑄型 4 内に流入する溶鋼 3 の流れを示す。

【0133】

図 8～図 10 に示す発明例 1～3 では、時間の経過（データの受診回数の増加）と共に、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量（アンサンブルメンバーの値）の平均値が、データの送信側の値に近づき、標準偏差の範囲が、データの送信側の値に重なるようになる。特に発明例 3 では、これに対し、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量（アンサンブルメンバーの値）の平均値が、データの送信側の値と略同じになる。これに対し、図 11 に示す比較例では、時間の経過（データの受診回数の増加）と共に、タンディッシュ 2 から領域 6 c に流入する溶鋼 3 の流量（アンサンブルメンバーの値）の平均値および標準偏差の範囲は、データの送信側の値に近づくものの、発明例 1～3 に比べて、両者の乖離は大きい。

以上のように第 1 の実施形態、第 2 の実施形態、第 3 の実施形態の手法により、溶鋼 3 の流れを精度よく導出し、可視化することができることが分かる。

【0134】

尚、以上説明した本発明の各実施形態は、コンピュータがプログラムを実行することによって実現することができる。また、前記プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体及び前記プログラム等のコンピュータプログラムプロダクトも本発明の実施形態として適用することができる。記録媒体としては、例えば、フレキシブルディスク、ハードディスク、光ディスク、光磁気ディスク、CD-ROM、磁気テープ、不揮発性のメモリカード、ROM等を用いることができる。

また、以上説明した本発明の実施形態は、何れも本発明を実施するにあたっての具体化の例を示したものに過ぎず、これらによって本発明の技術的範囲が限定的に解釈されてはならないものである。すなわち、本発明はその技術思想、またはその主要な特徴から逸脱することなく、様々な形で実施することができる。

【符号の説明】

【0135】

1：取鍋、2：タンディッシュ、3：溶鋼、4：鑄型、5：スライディングノズル、6：浸漬ノズル、7a～7b：吐出口、8：凝固シェル、9：湯面レベル計、10a～10l：熱電対、100、400、600：連続鑄造鑄型内可視化装置、101a：数値シミュレーション部、101b、401a、601a：数値シミュレーションデータ加工部、102：第1の確率密度関数導出部、103、402、602：観測データ導出部、103a：観測データ取得部、104：尤度関数導出部、105：データ同化部、106：可視化データ作成部、107：出力部、402a、602a：観測データ加工部

10

20

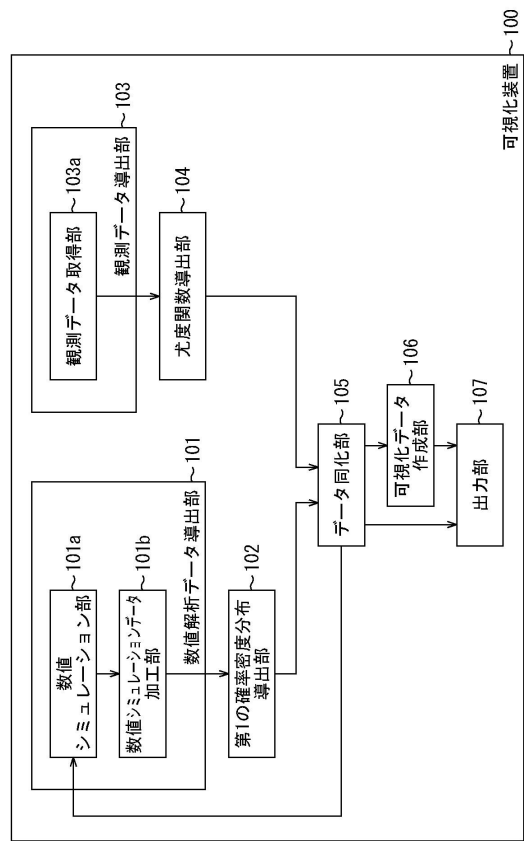
30

40

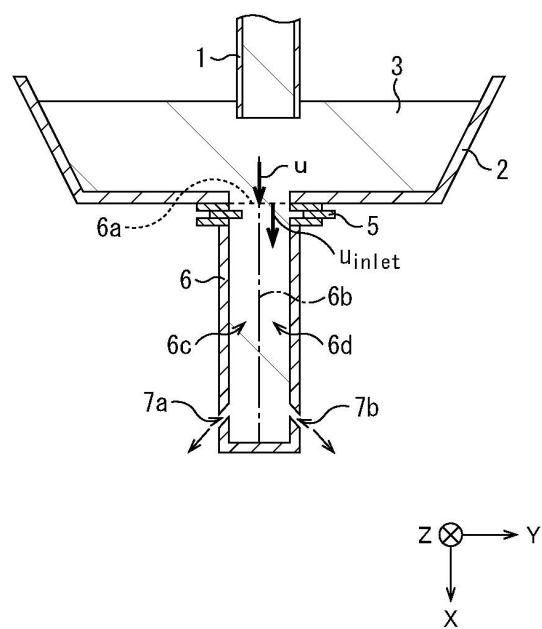
50

【図面】

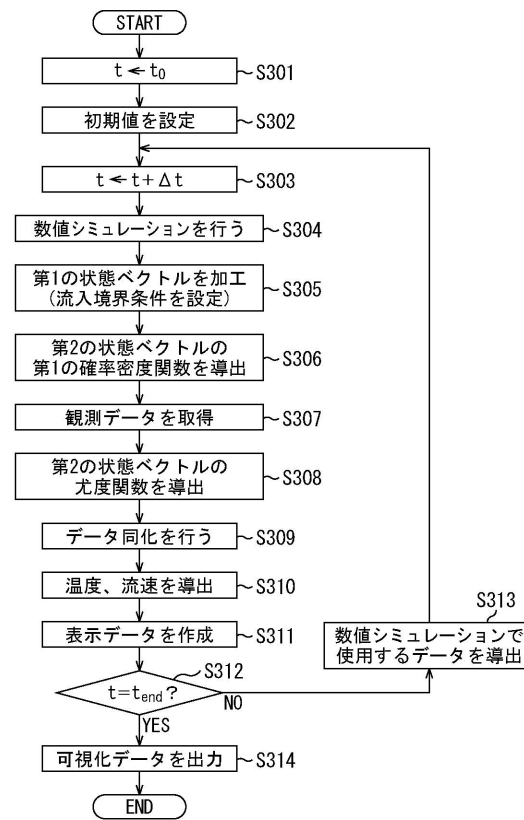
【図 1】



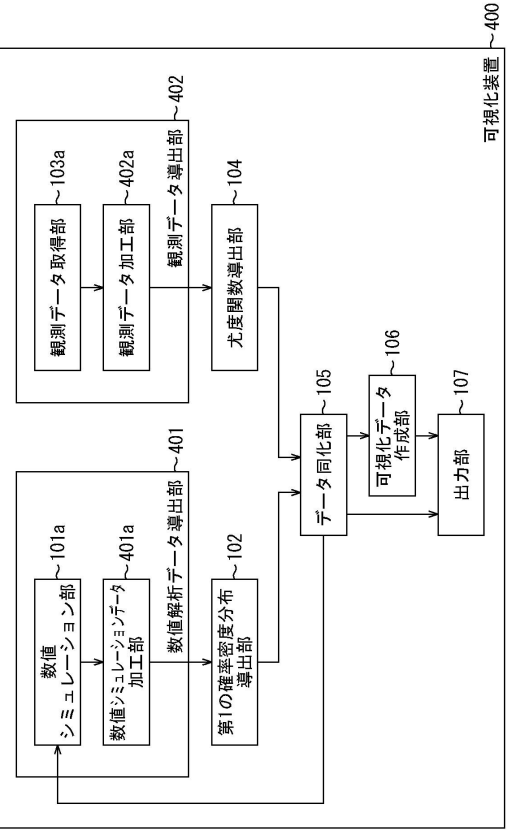
【図 2】



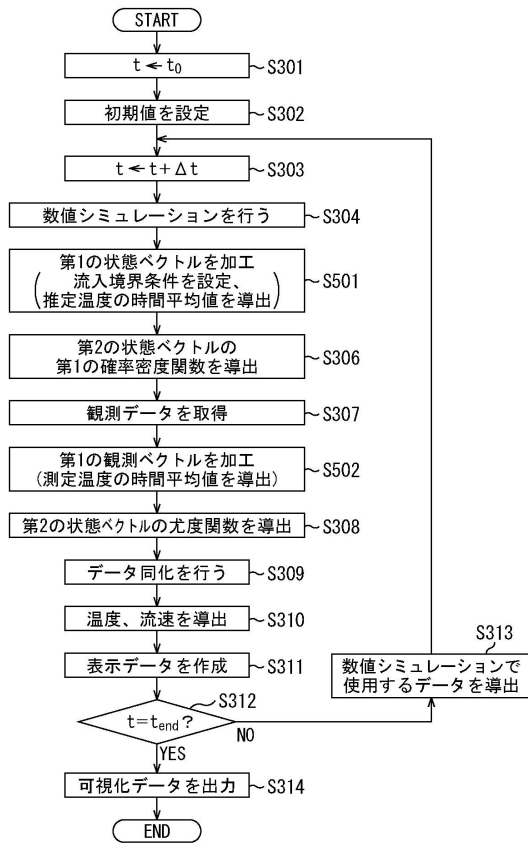
【図 3】



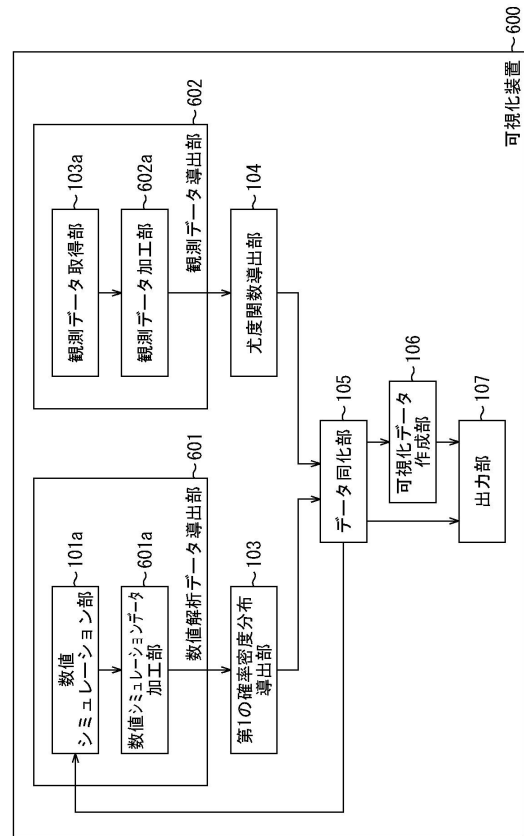
【図 4】



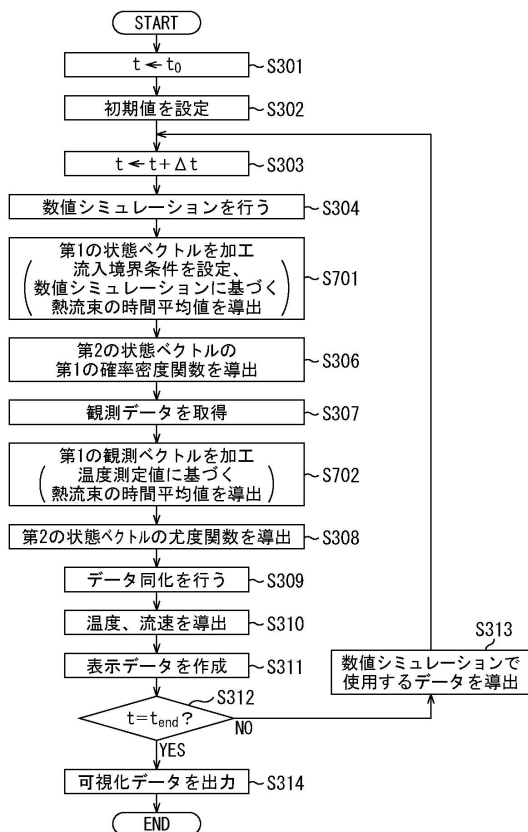
【図 5】



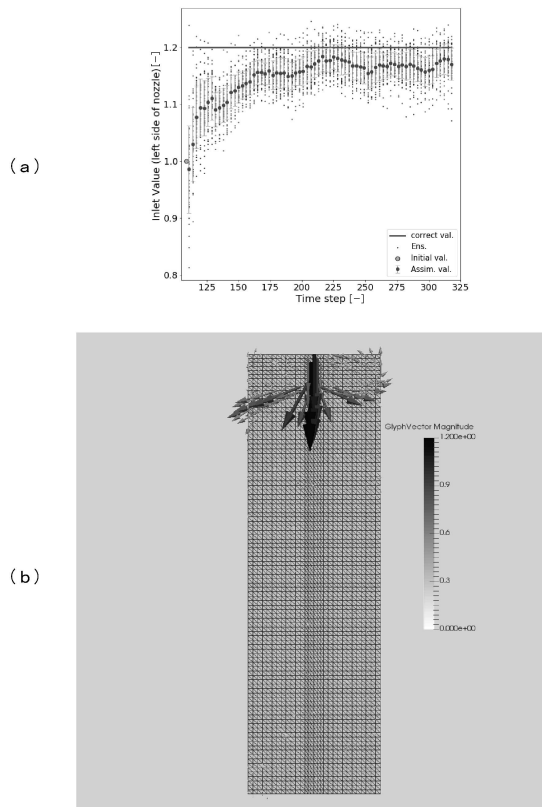
【図 6】



【図 7】



【図 8】



10

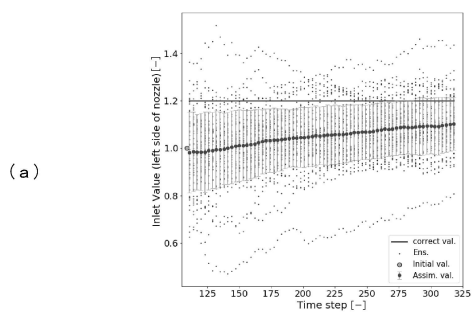
20

30

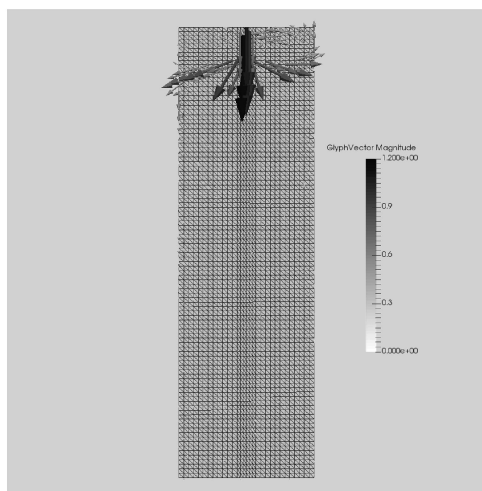
40

50

【圖 9】

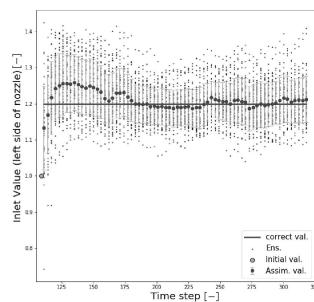


(a)

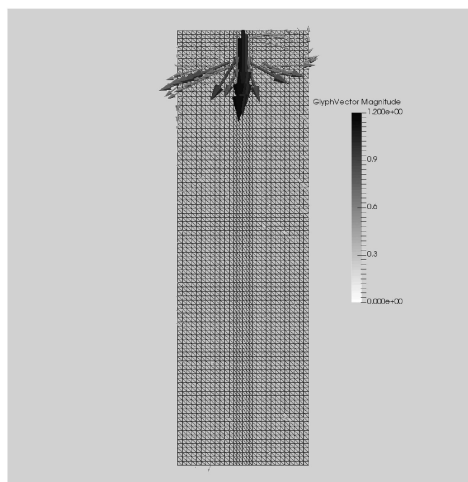


(b)

【図 10】



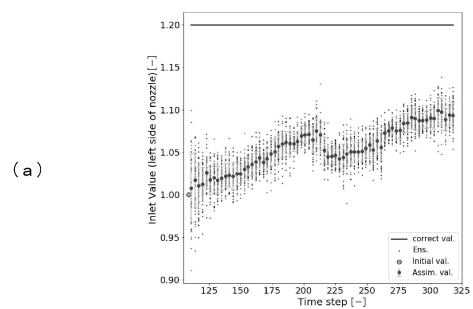
(a)



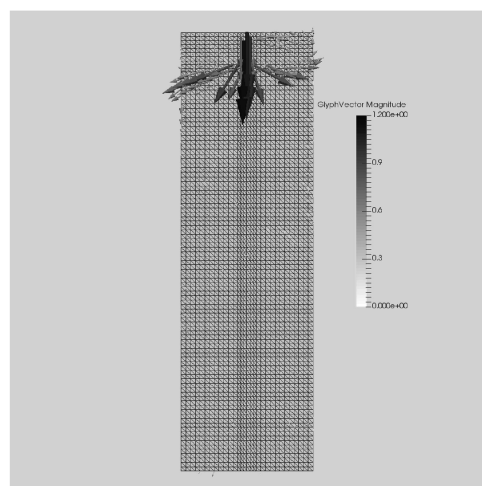
(b)

10

【図 11】

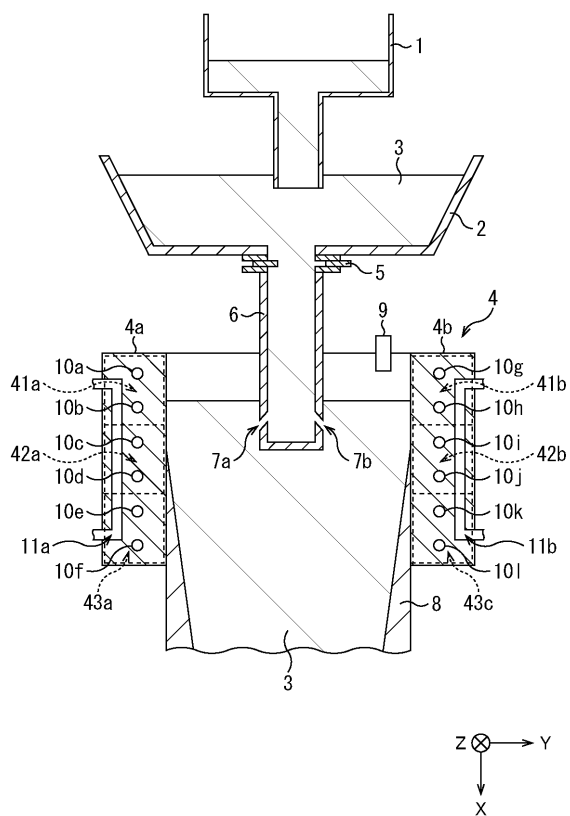


(a)



(b)

【図 12】

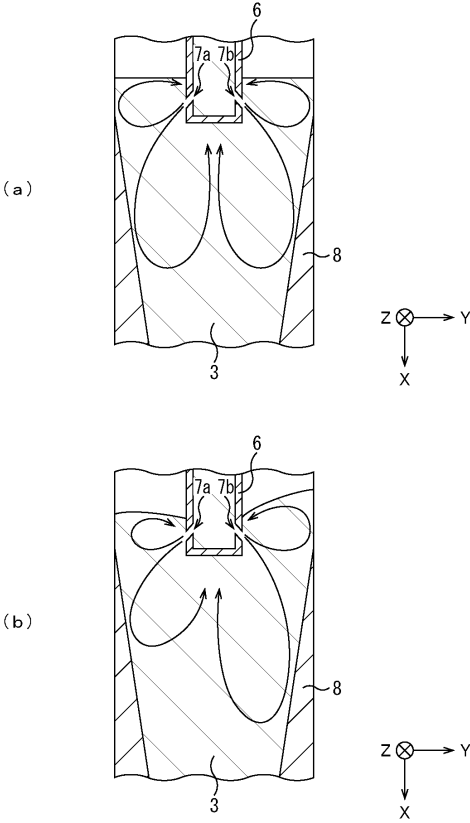


30

40

50

【図 13】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開２０１９－２１７５１０（ＪＰ，Ａ）
 特開２０１６－０１６４１４（ＪＰ，Ａ）
 特開２０１７－１５９３６３（ＪＰ，Ａ）
 国際公開第２０１６／０３１１７４（ＷＯ，Ａ１）
- (58)調査した分野 (Int.Cl., ＤＢ名)
- Ｂ２２Ｄ １１／１６
 Ｇ０１Ｋ ３／０４