

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4256558号
(P4256558)

(45) 発行日 平成21年4月22日(2009.4.22)

(24) 登録日 平成21年2月6日(2009.2.6)

(51) Int.Cl.

F I

B 2 1 B 38/02 (2006.01)

B 2 1 B 37/00 1 1 6 M

B 2 1 B 37/00 (2006.01)

B 2 1 B 37/00 B B M

B 2 1 B 45/02 (2006.01)

B 2 1 B 45/02 3 2 O Z

C 2 1 D 9/573 (2006.01)

C 2 1 D 9/573 1 O 1 Z

G O 1 B 21/20 (2006.01)

G O 1 B 21/20 G

請求項の数 5 (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2000-67055 (P2000-67055)
 (22) 出願日 平成12年3月10日(2000.3.10)
 (65) 公開番号 特開2001-252710 (P2001-252710A)
 (43) 公開日 平成13年9月18日(2001.9.18)
 審査請求日 平成18年9月7日(2006.9.7)

(73) 特許権者 000006655
 新日本製鐵株式会社
 東京都千代田区大手町2丁目6番3号
 (74) 代理人 100090273
 弁理士 國分 孝悦
 (72) 発明者 平山 隆
 富津市新富20-1 新日本製鐵株式会社
 技術開発本部内
 (72) 発明者 伊藤 雅浩
 富津市新富20-1 新日本製鐵株式会社
 技術開発本部内
 審査官 日比野 隆治

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 鋼板形状判定装置、方法、及びコンピュータ読み取り可能な記憶媒体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

鋼板を熱間圧延処理した後に冷却してコイル状鋼板を製造するホットストリップミルに用いられる鋼板形状判定装置であって、

板幅方向の温度分布及び応力分布と、鋼板の冷却条件と、鋼板に作用する張力と、鋼板条件とを入力する入力手段と、

上記鋼板の冷却開始後の変態率分布の時間変化を、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の冷却開始前の温度分布と、上記鋼板条件とを用いて、変態進行モデルに基づいて演算する変態状態演算手段と、

上記鋼板の冷却開始後の該鋼板の厚み・幅方向の断面における温度分布の時間変化を、
 上記冷却条件と、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の冷却開始前の温度分布並びに上記変態状態演算手段により演算された上記変態率分布の時間変化とを用いて、伝熱モデルに基づいて演算する伝熱状態演算手段と、

上記変態状態演算手段で演算された上記鋼板の変態率分布の時間変化と、上記伝熱状態演算手段で演算された上記鋼板の温度分布の時間変化と、上記鋼板に作用する上記張力と、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の冷却開始前の応力分布とを用いて、応力・歪みモデルに基づいて、上記鋼板の冷却開始後の応力分布の時間変化を演算する応力・歪み状態演算手段と、

上記応力・歪み状態演算手段で演算された上記鋼板の応力分布の時間変化を用いて上記鋼板の形状を判定する鋼板形状判定手段とを備えたことを特徴とする鋼板形状判定装置。

10

20

【請求項 2】

上記変態状態演算手段は更に、上記鋼板の冷却により発生する変態発熱量分布の時間変化を、上記変態状態演算手段により演算された上記変態率分布の時間変化を用いて、変態発熱モデルに基づいて演算し、

上記伝熱状態演算手段は、上記変態状態演算手段により演算された上記変態発熱量分布の時間変化を更に用いて、上記鋼板の冷却開始後の温度分布の時間変化を演算することを特徴とする請求項 1 に記載の鋼板形状判定装置。

【請求項 3】

鋼板を熱間圧延処理した後に冷却してコイル状鋼板を製造するホットストリップミルに用いられる鋼板形状判定方法であって、

板幅方向の温度分布及び応力分布と、鋼板の冷却条件と、鋼板に作用する張力と、鋼板条件とを入力する入力手順と、

上記鋼板の冷却開始後の変態率分布の時間変化を、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の冷却開始前の温度分布と、上記鋼板条件とを用いて、変態進行モデルに基づいて演算する変態状態演算手順と、

上記鋼板の冷却開始後の該鋼板の厚み・幅方向の断面における温度分布の時間変化を、上記冷却条件と、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の上記冷却開始前の温度分布並びに上記変態状態演算手順で演算された上記変態率分布の時間変化とを用いて、伝熱モデルに基づいて演算する伝熱状態演算手順と、

上記変態状態演算手順で演算された上記鋼板の変態率分布の時間変化と、上記伝熱状態演算手順で演算された上記鋼板の温度分布の時間変化と、上記鋼板に作用する上記張力と、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の冷却開始前の応力分布とを用いて、応力・歪みモデルに基づいて、上記鋼板の冷却開始後の応力分布の時間変化を演算する応力・歪み状態演算手順と、

上記応力・歪み状態演算手順で演算された上記鋼板の応力分布の時間変化を用いて上記鋼板の形状を判定する鋼板形状判定手順、からなることを特徴とする鋼板形状判定方法。

【請求項 4】

請求項 1 又は 2 に記載の鋼板形状判定装置の各手段としてコンピュータを機能させるプログラムを格納したことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記憶媒体。

【請求項 5】

請求項 3 に記載の鋼板形状判定方法の各処理をコンピュータに実行させるプログラムを格納したことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記憶媒体。

【発明の詳細な説明】**【0001】****【発明の属する技術分野】**

本発明は、鋼板形状判定装置、方法、及びコンピュータ読み取り可能な記憶媒体に関し、熱間圧延処理を受けた鋼板の形状を判定するものに用いて好適なものである。

【0002】**【従来の技術】**

ホットストリップミルでは、熱間圧延処理を施した後で冷却してコイル状の鋼板を製造しているが、その冷却による生じる熱応力等の応力のために歪みが生じることがある。

【0003】

冷却後の鋼板形状を判定する技術としては、例えば、特開平 7 - 248222 号公報に開示されたものがある。この従来例では、冷却設備の出側に放射温度計を設置し、冷却後の鋼板の幅方向の表面温度を測定することにより、この鋼板の形状を判定するようにしている。

【0004】**【発明が解決しようとする課題】**

しかしながら、上記従来例では、温度を測定した時点、すなわち、冷却後の鋼板形状の結果を判定するだけであり、冷却設備での冷却中や、温度測定時点以降の鋼板の形状変化に

10

20

30

40

50

については考慮されていなかった。

【0005】

又、ホットストリップミルでは、冷却条件を設定する等のために冷却設備の入側に放射温度計を設置することが多く、上記従来例のように冷却設備の出側にまで放射温度計を設置するのは、コストアップの要因となっていた。

【0006】

又、放射温度計は水の影響を受けて検出精度が低下することがあり、上記従来例のように冷却設備での冷却後に温度を測定すると、鋼板上に残った水分の影響により温度の検出精度が低下して、正確な形状判定を行うことができない場合があった。

【0007】

本発明は上述の問題点にかんがみ、鋼板上に残った水分の影響により温度検出精度が低下することなく、温度測定時点以降の鋼板の形状判定を行うことができるとともに、冷却設備での冷却中や温度測定時点以降の鋼板の形状変化を判定することが可能な鋼板形状判定を安価に構成できるようにすることを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】

本発明の鋼板形状判定装置は、鋼板を熱間圧延処理した後に冷却してコイル状鋼板を製造するホットストリップミルに用いられる鋼板形状判定装置であって、板幅方向の温度分布及び応力分布と、鋼板の冷却条件と、鋼板に作用する張力と、鋼板条件とを入力する入力手段と、上記鋼板の冷却開始後の変態率分布の時間変化を、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の冷却開始前の温度分布と、上記鋼板条件とを用いて、変態進行モデルに基づいて演算する変態状態演算手段と、上記鋼板の冷却開始後の該鋼板の厚み・幅方向の断面における温度分布の時間変化を、上記冷却条件と、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の上記冷却開始前の温度分布並びに上記変態状態演算手段により演算された上記変態率分布の時間変化とを用いて、伝熱モデルに基づいて演算する伝熱状態演算手段と、上記変態状態演算手段で演算された上記鋼板の変態率分布の時間変化と、上記伝熱状態演算手段で演算された上記鋼板の温度分布の時間変化と、上記鋼板に作用する上記張力と、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の冷却開始前の応力分布とを用いて、応力・歪みモデルに基づいて、上記鋼板の冷却開始後の応力分布の時間変化を演算する応力・歪み状態演算手段と、上記応力・歪み状態演算手段で演算された上記鋼板の応力分布の時間変化を用いて上記鋼板の形状を判定する鋼板形状判定手段とを備えた点に特徴を有する。

又、本発明の鋼板形状判定装置の他の特徴とするところは、上記変態状態演算手段は更に、上記鋼板の冷却により発生する変態発熱量分布の時間変化を、上記変態状態演算手段により演算された上記変態率分布の時間変化を用いて、変態発熱モデルに基づいて演算し、上記伝熱状態演算手段は、上記変態状態演算手段により演算された上記変態発熱量分布の時間変化を更に用いて、上記鋼板の冷却開始後の温度分布の時間変化を演算する点にある。

本発明の鋼板形状判定方法は、鋼板を熱間圧延処理した後に冷却してコイル状鋼板を製造するホットストリップミルに用いられる鋼板形状判定方法であって、板幅方向の温度分布及び応力分布と、鋼板の冷却条件と、鋼板に作用する張力と、鋼板条件とを入力する入力手段と、上記鋼板の冷却開始後の変態率分布の時間変化を、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の冷却開始前の温度分布と、上記鋼板条件とを用いて、変態進行モデルに基づいて演算する変態状態演算手段と、上記鋼板の冷却開始後の該鋼板の厚み・幅方向の断面における温度分布の時間変化を、上記冷却条件と、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の上記冷却開始前の温度分布並びに上記変態状態演算手段で演算された上記変態率分布の時間変化とを用いて、伝熱モデルに基づいて演算する伝熱状態演算手段と、上記変態状態演算手段で演算された上記鋼板の変態率分布の時間変化と、上記伝熱状態演算手段で演算された上記鋼板の温度分布の時間変化と、上記鋼板に作用する上記張力と、上記熱間圧延処理を受けた鋼板の冷却開始前の応力分布とを用いて、応力・歪みモデルに基づいて、上記鋼板の冷却開始後の応力分布の時間変化を演算する応力・歪み状態

10

20

30

40

50

演算手順で演算された上記鋼板の応力分布の時間変化を用いて上記鋼板の形状を判定する鋼板形状判定手順、からなる点に特徴を有する。

本発明のコンピュータ読み取り可能な記憶媒体は、上記本発明の鋼板形状判定装置の各手段としてコンピュータを機能させるプログラムを格納した点に特徴を有する。

本発明のコンピュータ読み取り可能な記憶媒体は、上記本発明の鋼板形状判定方法の各処理をコンピュータに実行させるプログラムを格納した点に特徴を有する。

【 0 0 2 0 】

上記のようにした本発明によれば、冷却開始後の鋼板の応力分布の時間変化を演算により得ることができ、上記鋼板の応力分布の時間変化に基づいて、応力に大きく影響される鋼板の形状を判定することが可能となる。

10

【 0 0 2 1 】

【発明の実施の形態】

以下、図面に基づいて、本発明の鋼板形状判定装置、方法、及びコンピュータ読み取り可能な記憶媒体の実施の形態について説明する。

【 0 0 2 2 】

図 1 には、本実施の形態の鋼板形状判定装置 1 を設置したホットストリップミルの構成を示す。ホットストリップミルでは、鋼板 2 が仕上げ圧延機 3 により所定の厚みまで圧延処理される。そして、仕上げ圧延処理を受けた鋼板 2 は、冷却設備 4 により冷却されながら、巻き取り機 5 でコイル状に巻き取られる。

【 0 0 2 3 】

上記仕上げ圧延機 3 と冷却設備 4 との間には、鋼板 2 の表面幅方向の温度分布を測定する温度測定器 6 と、鋼板 2 の幅方向の応力分布を出力する応力分布出力部 7 とが設置されている。温度測定器 6 としては、鋼板 2 の表面幅方向の温度分布を測定する放射温度計が用いられる。又、応力分布出力部 7 としては、鋼板 2 の形状を実測することにより鋼板 2 の幅方向の応力分布を得るものが用いられる。

20

【 0 0 2 4 】

本実施の形態の鋼板形状判定装置 1 では、詳しくは後述するが、上記温度測定器 6 で測定された鋼板 2 の幅方向の温度分布（冷却前初期温度分布）、上記応力分布出力部 7 から出力される鋼板 2 の幅方向の応力分布（冷却前初期応力分布）を用いて、冷却開始後（冷却設備 4 での冷却中、冷却後）の鋼板 2 の厚み・幅方向の断面（以下、C 断面と称する）での応力・歪み分布を演算して、鋼板 2 の形状を予測するようにしている。

30

【 0 0 2 5 】

図 2 に、鋼板形状判定装置 1 の構成を示す。図 2 に示すように、鋼板形状判定装置 1 には、上記温度測定器 6 で測定された鋼板 2 の幅方向の温度分布（冷却前初期温度分布）、上記応力分布出力部 7 から出力される鋼板 2 の幅方向の応力分布（冷却前初期応力分布）が入力される。

【 0 0 2 6 】

又、図 2 において、101 は伝熱状態演算部であり、後述する伝熱モデルに基づいて、鋼板 2 の所定位置での C 断面における温度分布の時間変化を演算する。

【 0 0 2 7 】

102 は変態状態演算部であり、後述する変態進行モデルに基づいて、鋼板 2 の所定位置での C 断面における変態率分布の時間変化を演算する。又、演算された変態率分布を用い、後述する変態発熱モデルに基づいて、鋼板 2 の所定位置での C 断面における変態発熱量分布の時間変化を演算する。

40

【 0 0 2 8 】

103 は応力・歪み状態演算部であり、上記伝熱状態演算部 101 で演算された鋼板 2 の温度分布の時間変化と、上記変態状態演算部 102 で演算された変態率分布の時間変化とを用いて、後述する応力・歪みモデルに基づいて、鋼板 2 の所定位置での C 断面における応力・歪み分布の時間変化を演算する。

【 0 0 2 9 】

50

104は鋼板形状判定部であり、上記応力・歪み演算部103で演算された応力分布を用いて、鋼板2の形状を判定する。

【0030】

なお、上述した鋼板2の所定位置とは、演算の対象となる位置をいい、例えば、鋼板2の先端から長手方向に所定間隔ごとに定められた位置をいう。

【0031】

以下、上記伝熱状態演算部101、変態状態演算部102、応力・歪み状態演算部103、及び鋼板形状判定部104の詳細について説明する。

【0032】

伝熱状態演算部101には、通板速度、冷却セグメント長（冷却設備4の水冷域、空冷域）といった冷却条件が入力される。

10

【0033】

又、伝熱状態演算部101には、詳しくは後述するが、変態状態演算部102で演算される鋼板2の所定位置でのC断面における変態率X、変態発熱量qの分布が入力される。炭素を含有する鋼板では、冷却すると、変態潜熱の発生により発熱することが知られている。この変態による発熱は鋼板2の温度変化において大きな影響があるため、温度分布の時間変化を演算する上で変態率X、変態発熱量qの分布を考慮することにしたものである

【0034】

そして、この伝熱状態演算部101では、鋼板2の所定位置でのC断面における温度Tの分布を演算するのに、下記の数1、数2に示す伝熱モデルを用いている。数2に示すのは境界条件であり、熱伝導率λで与えられる。

20

【0035】

【数1】

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho \cdot c(T(x, y, t - \Delta t), X(x, y, t - \Delta t))} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T(x, y, t - \Delta t), X(x, y, t - \Delta t)) \frac{\partial T(x, y, t - \Delta t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T(x, y, t - \Delta t), X(x, y, t - \Delta t)) \frac{\partial T(x, y, t - \Delta t)}{\partial y} \right) \right\} + \frac{q(x, y, t - \Delta t)}{\rho \cdot c(T(x, y, t - \Delta t), X(x, y, t - \Delta t))}$$

【0036】

【数2】

30

$$\lambda(T(x, y, t - \Delta t)) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \alpha(T(x, y, t - \Delta t) - T_w(x, y, t - \Delta t))$$

ただし、T：温度[K]、t：時間[sec]、ρ：密度[kg/m³]、X：変態率[-]、c(T,X)：磁気潜熱を考慮しない条件での比熱[J/kg.K]、λ(T,X)：熱伝導率[W/m².K]、q(x,y,t)：変態発熱量[W]、x：x座標(板厚方向)[m]、y：y座標(板幅方向)[m]、Tw：外気温度[K]（水冷条件の場合は、冷却水温度、空冷条件の場合は、外気温）

【0038】

40

なお、冷却設備4内は一般的に水冷域、空冷域といった複数域に分けられているので、この伝熱状態演算部101でも各冷域ごとにモジュールを配列し、各モジュールでそれぞれの条件を用いて演算を行っていけばよい。

【0039】

上記の伝熱モデルは、鋼板2のC断面を考える二次元の非定常モデルであり、比熱c、熱伝導率λの温度依存性、変態率依存性を考慮している。

【0040】

以上のようにした伝熱モデルにより、仕上げ圧延機3の出側以降における鋼板2の所定位置でのC断面における温度分布の時間変化を演算することが可能となる。なお、冷却設備4内にも温度測定手段が既に存在する場合は、その温度測定結果を用いてこの温度分布

50

の時間変化を補正するようにしてもよい。

【 0 0 4 1 】

なお、上記伝熱モデルを用いて、冷却設備 4 での冷却中だけでなく、コイル状に巻き取られ放置された状態にある鋼板 2 の所定位置での C 断面における温度分布を演算することも可能である。コイル状に巻き取られて放置されている鋼板 2 は、空冷されている状態にある。

【 0 0 4 2 】

図 3 に示すように、コイル状に巻き取られた鋼板 2 を同心円状に積層された鋼板として扱い、所定位置での C 断面が、内層の T 部、中間層の M 部、外層の B 部といった 3 つの層のいずれに属するかを分類する。鋼板 2 がコイル状に巻き取られると、先端側に位置する C 断面は内層に位置し、C 断面が先端から離れるにつれて、中間層さらには外層に位置することになる。

10

【 0 0 4 3 】

そして、演算対象となっている各 C 断面がコイル内のどの位置（層）にあるかに応じて熱伝導率境界条件を設定し、コイルの円周方向については断熱条件を仮定することで、上記伝熱モデルから、鋼板 2 の所定位置での C 断面における温度分布の時間変化を演算することができる。

【 0 0 4 4 】

変態状態演算部 1 0 2 には、上記伝熱状態演算部 1 0 1 で演算された鋼板 2 の所定位置での C 断面における温度 T の分布が入力される。又、初期 γ 粒径等の各種の鋼板条件が入力される。

20

【 0 0 4 5 】

そして、この変態状態演算部 1 0 2 では、鋼板 2 の所定位置での C 断面における変態率 X の分布を演算するのに、下記の数 3 ～ 数 8 に示す変態進行モデルを用いている。数 3 ～ 8 に示す変態進行モデルでは、フェライト変態、パーライト変態、ベイナイト変態ごとに演算を行って、フェライト変態率 X_F 、パーライト変態率 X_P 、ベイナイト変態率 X_B を求める。そして、これらフェライト変態率 X_F 、パーライト変態率 X_P 、ベイナイト変態率 X_B を足し合わせたものを、鋼板 2 の変態率 X として扱う。

【 0 0 4 6 】

【 数 3 】

30

$$\frac{dX_F(x, y, t)}{dt} = 4.046 \left(k_{IF} \frac{6}{d_\gamma^4(x, y, t - \Delta t)} \cdot \tau(x, y, t - \Delta t) \cdot I_F(x, y, t - \Delta t) \cdot G_F^2(x, y, t - \Delta t) \right)^{\frac{1}{4}} \left(\ln \frac{1}{1 - X_F(x, y, t - \Delta t)} \right)^{\frac{3}{4}} \times (1 - X_F(x, y, t - \Delta t))$$

$$\frac{dX_F(x, y, t)}{dt} = k_{2F} \frac{6}{d_\gamma(x, y, t - \Delta t)} G_F(x, y, t - \Delta t) (1 - X_F(x, y, t - \Delta t))$$

$X_F(x, y, t)$: フェライト変態率[-]、 k_{IF} : 17476、 $\tau: T^{\frac{1}{2}}(x, y, t)$ (T は、絶対温度[K])、

$I_F(x, y, t)$: フェライトの核生成頻度、 $G_F(x, y, t)$: フェライトの核成長速度、t: 時刻、 $d_\gamma(x, y, t)$: γ 粒径[m]、 $T(x, y, t)$: 絶対温度[K]、t: 時刻、x: x 座標(板厚方向)[m]、y: y 座標(板幅方向)[m]

40

【 0 0 4 7 】

【 数 4 】

$$\frac{dX_p(x,y,t)}{dt} = 4.046 \left(k_{1p} \frac{6}{d_\gamma(x,y,t-\Delta t)} \tau(x,y,t-\Delta t) \cdot I_p(x,y,t-\Delta t) \cdot G_p^3(x,y,t-\Delta t) \right)^{\frac{1}{4}} \left(\ln \frac{1}{1-X_p(x,y,t-\Delta t)} \right)^{\frac{3}{4}} \times (1-X_p(x,y,t-\Delta t))$$

$X_p(x,y,t)$: パーライト分率[-]、 k_{1p} : 2.01×10^{13} 、 τ : $T^{\frac{1}{2}}(x,y,t)$ (T は、絶対温度[K])、 $I_p(x,y,t)$: パーライトの核生成頻度、 $G_p(x,y,t)$: ペイナイトの核成長速度、 $T(x,y,t)$: 温度[K]、 t : 時刻、 $d_\gamma(x,y,t)$: γ 粒径[m]、 x : x 座標(板厚方向)[m]、 y : y 座標(板幅方向)[m]

【 0 0 4 8 】

【 数 5 】

$$\frac{dX_B(x,y,t)}{dt} = k_{2B} \frac{6}{d_\gamma(x,y,t-\Delta t)} G_B(x,y,t-\Delta t) (1-X_B(x,y,t-\Delta t))$$

$X_B(x,y,t)$: ペイナイト分率[-]、 k_{2B} : $6.816 \times 10^{-4} \times \exp(3431.5/T)$ 、 G_B : ペイナイトの核成長速度、 T : 絶対温度[K]、 t : 時刻、 d_γ : γ 粒径[m]、 x : x 座標(板厚方向)[m]、 y : y 座標(板幅方向)[m]

【 0 0 4 9 】

【 数 6 】

$$I_F(x,y,t) = T(x,y,t-\Delta t)^{\frac{1}{2}} D(x,y,t-\Delta t) \exp\left(-\frac{k_3}{RT(x,y,t-\Delta t) \Delta G_\gamma^2}\right)$$

$$G_F(x,y,t) = \frac{1}{2r(x,y,t-\Delta t)} D(x,y,t-\Delta t) \frac{C_\gamma(x,y,t-\Delta t) - C_\alpha(x,y,t-\Delta t)}{C_\gamma(x,y,t-\Delta t) - C_\alpha(x,y,t-\Delta t)}$$

$I_F(x,y,t)$: フェライトの核生成頻度、 $T(x,y,t)$: 温度[K]、 $D(x,y,t)$: γ 中の炭素の拡散係数[m²/s]、 k_3 : 0.957×10^9 [J³/mol³]、 R : 気体定数、 G_V : Zener-Hillert 方程式 (この値は、Kaufman らによって既に計算されている)、 $G_F(x,y,t)$: フェライトの核成長速度、 $r(x,y,t)$: 成長界面の曲率半径[m]、 $C_{\gamma/\alpha}(x,y,t)$: γ/α 界面の γ 中の炭素モル分率濃度、 $C_{\gamma/\text{sem}}(x,y,t)$: γ/sem (セメンタイト)界面の γ 中の炭素モル分率濃度、 $C_\gamma(x,y,t)$: γ (オーステナイト)中の炭素モル分率濃度、 $C_\alpha(x,y,t)$: α (フェライト)中の炭素モル分率濃度

【 0 0 5 0 】

【 数 7 】

$$I_p(x,y,t) = T^{\frac{1}{2}}(x,y,t-\Delta t) D(x,y,t-\Delta t) \exp\left(-\frac{k_4}{RT(x,y,t-\Delta t) \Delta T^2(x,y,t-\Delta t)}\right)$$

$$G_p(x,y,t) = \Delta T(x,y,t-\Delta t) \cdot D(x,y,t-\Delta t) \exp(C_{\gamma/\alpha}(x,y,t-\Delta t) - C_{\gamma/\text{sem}}(x,y,t-\Delta t))$$

$I_p(x,y,t)$: パーライトの核生成頻度、 $T(x,y,t)$: 温度[K]、 $D(x,y,t)$: γ 中の炭素の拡散係数[m²/s]、 k_4 : 2.27×10^9 [J³/mol³]、 $\Delta T(x,y,t)$: Ae1 よりの過冷度[K]、 R : 気体定数、 $G_p(x,y,t)$: パーライトの核成長速度、 $C_{\gamma/\alpha}(x,y,t)$: γ/α 界面の γ 中の炭素モル分率濃度、 $C_{\gamma/\text{sem}}(x,y,t)$: γ/sem (セメンタイト)界面の γ 中の炭素モル分率濃度

【 0 0 5 1 】

【 数 8 】

$$G_B(x,y,t) = \frac{1}{2r(x,y,t-\Delta t)} D(x,y,t-\Delta t) \frac{C_\gamma(x,y,t-\Delta t) - C_\alpha(x,y,t-\Delta t)}{C_\gamma(x,y,t-\Delta t) - C_\alpha(x,y,t-\Delta t)}$$

$G_B(x,y,t)$: ペイナイトの核成長速度、 $r(x,y,t)$: 成長界面の曲率半径[m]、 $C_{\gamma/\alpha}(x,y,t)$: γ/α 界面の γ 中の炭素モル分率濃度、 $C_{\gamma/\text{sem}}(x,y,t)$: γ/sem (セメンタイト)界面の γ 中の炭素モル分率濃度、 $C_\gamma(x,y,t)$: γ (オーステナイト)中の炭素モル分率濃度、 $C_\alpha(x,y,t)$: α (フェライト)中の炭素モル分率濃度

10

20

30

40

50

【 0 0 5 4 】

上記数 3 に示すように、フェライト変態では、核生成・成長機構及びサイト・サチュレーション機構の両方を用いている。核生成・成長機構及びサイト・サチュレーション機構の両方を用いるとは、数 3 に示す式の和を使用するという意味である。一方、上記数 4 に示すように、パーライト変態では核生成・成長機構のみを用い、ベイナイト変態ではサイト・サチュレーション機構のみを用いる。

【 0 0 5 5 】

上記の変態進行モデルは、Johnson-Mehl 型モデルの核生成成長理論に基づくモデルである。この変態進行モデルでは、C、Si、Mn の成分を考慮した計算が可能となり、又、急速冷却条件下 (1 0 0 / 秒程度) での変態進行計算が可能となる。

10

【 0 0 5 6 】

以上のようにした変態進行モデルにより、仕上げ圧延機 3 の出側以降における鋼板 2 の変態率分布の時間変化を計算することが可能となる。

【 0 0 5 7 】

又、この変態状態演算部 1 0 2 では、鋼板 2 の所定位置での C 断面における変態発熱量 q の分布を演算するのに、下記の数 9 に示す変態発熱モデルを用いている。数 9 に示す変態発熱モデルでは、上記変態進行モデルにより得られた変態率 X を用いて、単位体積・単位時間当たりの変態発熱量 q が求められる。

【 0 0 5 8 】

【 数 9 】

20

$$q(x, y, t) = \rho \left\{ q_1 \frac{\partial X(x, y, t - \Delta t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (q_m(x, y, t - \Delta t) \cdot X(x, y, t - \Delta t)) \right\}$$

$$q_m(x, y, t) = \int_{T_1}^{T_2} (c_a(T(x, y, t - \Delta t)) - c(T(x, y, t - \Delta t))) dT$$

$T_s(x, y, t)$: 冷却開始温度[K]、 $T_1(x, y, t)$: 時刻 t における温度[K]、 q_1 : 格子変態に伴う潜熱[J/kg]、ここでは、 16.7×10^3 とする。 $q_m(x, y, t)$: 磁性の変化に伴う潜熱[J/kg]、図 4 の斜線部分に示される値で、上記数 9 に示した式により求められる。 $c_a(T)$: 磁気潜熱を考慮したときの比熱[J/kg.K]、 $c(T)$: 磁気潜熱を考慮しないときの比熱[J/kg.K]。

【 0 0 5 9 】

30

なお、図 4 は温度と比熱との関係を示す図であり、斜線部分の左端の温度 (横軸座標) は T_1 (時間 t における温度)、右端の温度 (横軸座標) は T_s (変態開始温度) である。

【 0 0 6 0 】

以上のようにした変態発熱モデルにより、仕上げ圧延機 3 の出側以降における鋼板 2 の変態発熱量分布の時間変化を計算することが可能となる。

【 0 0 6 1 】

応力・歪み状態演算部 1 0 3 には、上記伝熱状態演算部 1 0 1 で演算された鋼板 2 の所定位置での C 断面における温度 T の分布が入力される。又、変態状態演算部 1 0 2 で演算された鋼板 2 の所定位置での C 断面における変態率 X の分布が入力される。さらに、巻き取り機 5 での巻き取りにより鋼板 2 に作用する張力が入力される。

40

【 0 0 6 2 】

そして、この応力・歪み状態演算部 1 0 3 では、鋼板の冷却開始前の応力分布を基に、鋼板 2 の所定位置での C 断面における応力 σ ・歪み ε の分布を演算するのに、数 1 0 ~ 数 1 2 に示す応力・歪みモデルを用いている。

【 0 0 6 3 】

【 数 1 0 】

応力・歪みの関係式

$$\varepsilon_x(x, y, t) = \frac{1}{E(x, y, T(t))} \{ \sigma_x(x, y, t - \Delta t) - \nu(\sigma_y(x, y, t - \Delta t) + \sigma_z(x, y, t - \Delta t)) \} + \varepsilon_x^p(x, y, t) + \varepsilon_T(x, y, t)$$

$$\varepsilon_y(x, y, t) = \frac{1}{E(x, y, T(t))} \{ \sigma_y(x, y, t - \Delta t) - \nu(\sigma_x(x, y, t - \Delta t) + \sigma_z(x, y, t - \Delta t)) \} + \varepsilon_y^p(x, y, t) + \varepsilon_T(x, y, t)$$

$$\varepsilon_z(x, y, t) = \frac{1}{E(x, y, T(t))} \{ \sigma_z(x, y, t - \Delta t) - \nu(\sigma_x(x, y, t - \Delta t) + \sigma_y(x, y, t - \Delta t)) \} + \varepsilon_z^p(x, y, t) + \varepsilon_T(x, y, t)$$

10

$$\gamma_{xy}(x, y, t) = \frac{1}{G(x, y, t)} \tau_{xy} + \gamma_{xy}^p$$

$$\gamma_{yz}(x, y, t) = \frac{1}{G(x, y, t)} \tau_{yz} = 0 \quad (\ominus \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0)$$

$$\gamma_{zx}(x, y, t) = \frac{1}{G(x, y, t)} \tau_{zx} = 0$$

$$G(x, y, t) = \frac{E(x, y, T(t))}{2(1+\nu)}$$

$\varepsilon_x(x, y, t)$: x 方向歪み、 $\sigma_x(x, y, t)$: x 方向応力[Pa]、 $E(x, y, T(t))$: ヤング率[N/m²]、

$\varepsilon_x^p(x, y, t)$: x 方向塑性歪み、 $\varepsilon_T(x, y, t)$: 膨張率、 ν : ポアソン比、 $\tau_{xy}(x, y, t)$:

xy 方向せん断力[N/m²]。なお、添字ある記号を y, z に変更しても同様である。

20

【 0 0 6 4 】

【 数 1 1 】

力の平衡方程式 (z 方向の微係数は 0)

$$\frac{\partial \sigma_x(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}(x, y, t)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y(x, y, t)}{\partial y} = 0$$

$\sigma_x(x, y, t)$: x 方向応力[Pa]、 $\tau_{xy}(x, y, t)$: xy 方向せん断力[N/m²]。なお、添字ある記号を y, z に変更しても同様である。

30

【 0 0 6 5 】

【 数 1 2 】

歪みの適合条件 (分離不能方程式)

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xy}(x, y, t)}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x(x, y, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y(x, y, t)}{\partial x^2}$$

$\varepsilon_x(x, y, t)$: x 方向歪み。なお、添字ある記号を y, z に変更しても同様である。

【 0 0 6 7 】

上記の応力・歪みモデルは、二次元平面歪みモデルであり、膨張率 ε_T 、ヤング率 E の温度依存性、変態率依存性を考慮する。

40

【 0 0 6 8 】

以上のようにした応力・歪みモデルにより、仕上げ圧延機 3 の出側以降における鋼板 2 の所定位置での C 断面における応力・歪み分布の時間変化を演算することが可能となる。

【 0 0 6 9 】

なお、上記応力・歪みモデルを用いて、冷却設備 4 での冷却中だけでなく、コイル状に巻き取られ放置された状態にある鋼板 2 の所定位置での C 断面における応力分布を演算することも可能である。

【 0 0 7 0 】

50

すなわち、上述した伝熱モデルの場合と同様、図 3 に示すように、鋼板 2 の所定位置での C 断面が、内層の T 部、中間層の M 部、外層の B 部といった 3 つの層のいずれに属するかを分類する。

【 0 0 7 1 】

そして、z 方向に曲率半径 ρ の曲げによるベンディング効果を考慮して、数 1 3 に示すモデルにより、y、z 方向応力 σ_y 、 σ_z を演算すればよい。

【 0 0 7 2 】

【 数 1 3 】

$$\sigma_y(x, y, t) = -E_e(x, y, T(t)) \left\{ \varepsilon_y(x, y, T(t)) + \nu \cdot \varepsilon_x(x, y, t) \right\} + \frac{1}{\nu} \frac{E(x, y, T(t))}{\rho(x, y, t)} x + C_0 \quad 10$$

$$\sigma_z(x, y, t) = -E_e(x, y, T(t)) \left\{ \nu \cdot \varepsilon_y(x, y, t) + \varepsilon_x(x, y, t) \right\} + \frac{E(x, y, T(t))}{\rho(x, y, t)} x$$

$$E_e(x, y, t) = \frac{E(x, y, T(t))}{1 - \nu^2}$$

$\varepsilon_x(x, y, t)$: x 方向歪み、 $\sigma_x(x, y, t)$: x 方向応力 [Pa]、 $E(x, y, T(t))$: ヤング率 [N/m²]、
 $\rho(x, y, t)$: 曲率半径 [m]、 ν : ポアソン比、 x : x 座標 (板厚方向) [m]。なお、添字ある記号を y, z に変更しても同様である。

【 0 0 7 3 】

以上述べたようにして応力・歪み演算部 1 0 3 で応力 σ の分布が得られたならば、鋼板形状判定部 1 0 4 では、以下に述べるようにして形状指標 $\Lambda_1 \sim \Lambda_4$ を求め、鋼板 2 の形状を判定する。 20

【 0 0 7 4 】

まず、板幅方向要素分割に従って、板幅方向座標 y_i ($-1 \leq y_i \leq 1$ 、幅センタ $y_i = 0$) を計算し、数 1 4 に示す行列 A^{-1} を作成する。この計算は事前に 1 回だけ行って、作成された行列 A^{-1} を保管しておけばよい。なお、 n_s は要素分割数である。

【 0 0 7 5 】

【 数 1 4 】

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} n_s & \sum y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i^3 & \sum y_i^4 \\ \sum y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i^3 & \sum y_i^4 & \sum y_i^5 \\ \sum y_i^2 & \sum y_i^3 & \sum y_i^4 & \sum y_i^5 & \sum y_i^6 \\ \sum y_i^3 & \sum y_i^4 & \sum y_i^5 & \sum y_i^6 & \sum y_i^7 \\ \sum y_i^4 & \sum y_i^5 & \sum y_i^6 & \sum y_i^7 & \sum y_i^8 \end{bmatrix}^{-1} \quad 30$$

【 0 0 7 6 】

以下の計算は、各時間での鋼板 2 の所定位置での C 断面における応力が演算された後に行われる。

【 0 0 7 7 】

まず、数 1 5 に示すように、各要素とセンタとの歪み差 $\Delta \varepsilon_i$ を長手方向応力の板厚平均値より計算する。

【 0 0 7 8 】

【 数 1 5 】

40

$$\Delta \varepsilon_i = - \left(\frac{\bar{\sigma}_i}{E(\bar{T}_i)} - \frac{\bar{\sigma}_0}{E(\bar{T}_0)} \right)$$

$\bar{\sigma}_i$: i 番目の要素の長手方向応力の板厚方向平均値

$\bar{\sigma}_0$: センタにおける長手方向応力の板厚方向平均値

$E(\bar{T}_i)$: i 番目の要素の温度の板厚方向平均値から算出したヤング率

$\Delta \varepsilon_i$: 各要素と幅中心の要素との歪み差[-]、 $\bar{T}_i$: 幅方向 i 番目の要素の温度の板厚方向平均値[K]、 $\bar{T}_0$: 幅中心の要素における温度の板厚方向平均値[K]

【 0 0 7 9 】

次に、数 1 6 に示すように、各要素とセンタとの歪み差の幅方向パターンを最小 2 乗法により 4 次関数で近似する。 10

【 0 0 8 0 】

【 数 1 6 】

$$f(y) = \lambda_0 + \lambda_1 \cdot y + \lambda_2 \cdot y^2 + \lambda_3 \cdot y^3 + \lambda_4 \cdot y^4$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} \sum \Delta \varepsilon_i \\ \sum \Delta \varepsilon_i \cdot y_i \\ \sum \Delta \varepsilon_i \cdot y_i^2 \\ \sum \Delta \varepsilon_i \cdot y_i^3 \\ \sum \Delta \varepsilon_i \cdot y_i^4 \end{bmatrix}$$

20

【 0 0 8 1 】

そして、数 1 7 に示すように、 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ を線形変形して、形状指標 $\Lambda_1 \sim \Lambda_4$ を求める。

【 0 0 8 2 】

【 数 1 7 】

$$\begin{bmatrix} \Lambda_1 \\ \Lambda_2 \\ \Lambda_3 \\ \Lambda_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1/\sqrt{3} & 0 & 1/3\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix}$$

30

【 0 0 8 3 】

以上述べたようにして求められた形状指標 $\Lambda_1 \sim \Lambda_4$ のうち、形状指標 Λ_1 、 Λ_3 は板幅方向の非対称な成分を表し、形状指標 Λ_2 、 Λ_4 は板幅方向の対称な成分を表す。ここで、形状指標 Λ_2 、 Λ_4 の意味について説明すれば、鋼板 2 の C 断面形状を 4 次関数近似した際の板幅方向に対称な成分に関して、板幅を B とすると、 Λ_2 は板センタと両エッジとの歪み差を示し、 Λ_4 は板センタとセンタから $1 / \sqrt{2} \times 1 / 2 \times B$ の位置との歪み差を示す。図 5 には、これら形状指標 Λ_2 、 Λ_4 の関係を示す。 40

【 0 0 8 4 】

上記形状指標 $\Lambda_1 \sim \Lambda_4$ のうちの形状指標 Λ_2 と、実測した急峻度 α (高さ / ピッチ $\times 100$) とを比較してみると、図 6 に示すような結果が得られた。なお、この実測結果と解析結果は、1 本のコイルを長さ方向に複数の断面に関して測定、解析されたものである。図 6 に示すように、実測した急峻度 α と形状指標 Λ_2 との間には、 α と $(\Lambda_2)^2$ との相関関係があることが確認された。したがって、形状指標 Λ_2 が得られれば、急峻度で表される鋼 50

板 2 の形状を判定することが可能となる。

【 0 0 8 5 】

次に、図 7 のフローチャートに従って、鋼板形状判定装置 1 が行う処理について説明する。なお、このフローチャートでは、伝熱状態演算手段 1 0 1、変態状態演算手段 1 0 2、応力・歪み状態演算手段 1 0 3 における処理を示し、鋼板形状判定手段 1 0 4 における処理については省略する。

【 0 0 8 6 】

初期化された状態から、ある時間 t における熱伝導率 λ 、比熱 c 、ヤング率 E 等といった温度、変態率依存性の物性値を計算する（ステップ S 1 0）。例えば、冷却開始時点、すなわち、 $t = 0$ のときは、温度測定器 6 から入力される冷却前初期温度分布に基づいて上

10

【 0 0 8 7 】

次に、数 3 ~ 数 8 に示した変態進行モデルに基づいて、変態率 X の分布を計算する（ステップ S 1 1）。

【 0 0 8 8 】

続いて、上記ステップ S 1 1 で得られた変態率 X の分布に従い、数 9 に示した変態発熱モデルに基づいて、変態発熱量 q を計算する（ステップ S 1 2）。

【 0 0 8 9 】

そして、上記ステップ S 1 0 で得られた熱伝導率 λ 、比熱 c といった物性値、上記ステップ S 1 1 で得られた変態率 X の分布、上記ステップ S 1 2 で得られた変態発熱量 q に従い、

20

数 1、2 に示した伝熱モデルに基づいて、温度 T の分布を計算する（ステップ S 1 3）。

【 0 0 9 0 】

次に、応力計算タイミングかどうかを判断し（ステップ S 1 4）、応力計算タイミングであれば、上記ステップ S 1 0 で得られたヤング率 E といった物性値、上記ステップ S 1 1 で得られた変態率 X の分布、上記ステップ S 1 3 で得られた温度 T の分布に従い、応力分布出力部 7 から出力された応力分布を基に、数 1 0 ~ 数 1 2 に示した応力・歪みモデルに基づいて、応力 σ ・歪み ε の分布を計算する（ステップ S 1 5）。なお、ステップ S 1 4 において、応力計算タイミングでなければ、 $t = t + \Delta t$ として（ステップ S 1 6）、上記ステップ S 1 0 に戻る。

30

【 0 0 9 1 】

ステップ S 1 5 で応力 σ ・歪み ε の分布が得られた後、計算を終了するか否かを確認し（ステップ S 1 7）、計算を続けるのであれば、 $t = t + \Delta t$ として（ステップ S 1 6）、上記ステップ S 1 0 に戻る。

【 0 0 9 2 】

なお、ステップ S 1 6 で $t = t + \Delta t$ とされると、ステップ S 1 0 では、前回の一連の処理で得られた変態率 X の分布、温度 T の分布に従い、熱伝導率 λ 、比熱 c 、ヤング率 E 等といった物性値を計算して、ステップ S 1 1 ~ 1 7 を繰り返す。

【 0 0 9 3 】

以上述べた実施の形態の鋼板形状判定装置によれば、温度を測定した時点以降、すなわち、仕上げ圧延機 3 の出側（冷却設備 4 の入側）以降の鋼板 2 の所定位置での C 断面における応力分布の時間変化を演算することにより、任意の時間での鋼板 2 の形状を判定することが可能となる。特に、鋼板 2 の C 断面に関して各演算を行うことにより、演算量を抑え、演算スピードを高速化させることができる。そして、このように演算によって鋼板 2 の形状を判定できれば、鋼板 2 の形状を実測する必要がなくなり、鋼板形状の管理を容易化することが可能となる。例えば、上述したようにコイル状に巻き取られた鋼板 2 の形状を判定できれば、この鋼板 2 をいちいち巻き戻して形状を判定するような必要がなくなる。

40

【 0 0 9 4 】

又、これまでも必要とされていた冷却設備 4 の入側の温度測定器 6 をそのまま利用するこ

50

とができるので、本実施の形態の鋼板形状判定装置を実現するのに際してコストアップするのを避けることができる。

【0095】

さらに、冷却設備4での水冷前の鋼板2の温度を測定するので、温度測定器6として放射温度計を使用する場合でも、水の影響を受けずに検出精度を維持することができ、正確な形状判定を得ることが可能となる。

【0096】

なお、上記実施の形態の機能を実現するためのソフトウェアのプログラムコードをコンピュータに供給するための手段、例えばかかるプログラムコードを格納した記憶媒体は本発明の範疇に含まれる。

【0097】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、冷却開始後の鋼板の応力分布の時間変化を演算することにより、任意の時間での鋼板の形状を判定することができる。このように、演算によって鋼板の形状を判定できるので、鋼板の形状を実測する手間を不要にでき、鋼板形状の管理を容易化することができる。

【0098】

又、冷却開始前に鋼板の温度分布を測定することは従来からなされていたことであり、新たに温度測定手段を設けるような必要はないので、本発明を実行する際にコストアップするのを避けることができる。

【0099】

さらに、冷却設備での水冷前の鋼板の温度を測定するので、放射温度計を使用するような場合であっても、水の影響を受けずに検出精度を維持することができ、形状判定の精度を大幅に向上させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】ホットストリップミルの構成を示す図である。

【図2】鋼板形状判定装置1の構成を示す図である。

【図3】コイル状に巻き取られた鋼板2を説明するための図である。

【図4】温度と比熱との関係を示す図である。

【図5】形状指標 Λ_2 、 Λ_4 の関係を示す模式図である。

【図6】形状指標 Λ_2 と実測した急峻度 α との関係を示す図である。

【図7】鋼板形状判定装置1が行う処理を説明するためのフローチャートである。

【符号の説明】

1 鋼板形状判定装置

2 鋼板

3 仕上げ圧延機

4 冷却設備

5 巻き取り機

6 温度測定器

7 応力分布出力部

101 伝熱状態演算部

102 変態状態演算部

103 応力・歪み状態演算部

104 鋼板形状判定部

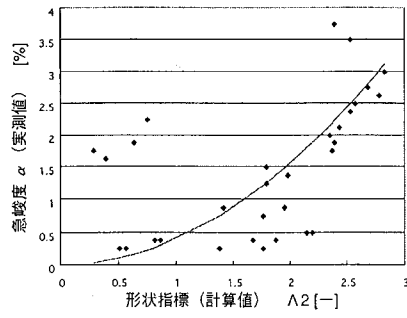
10

20

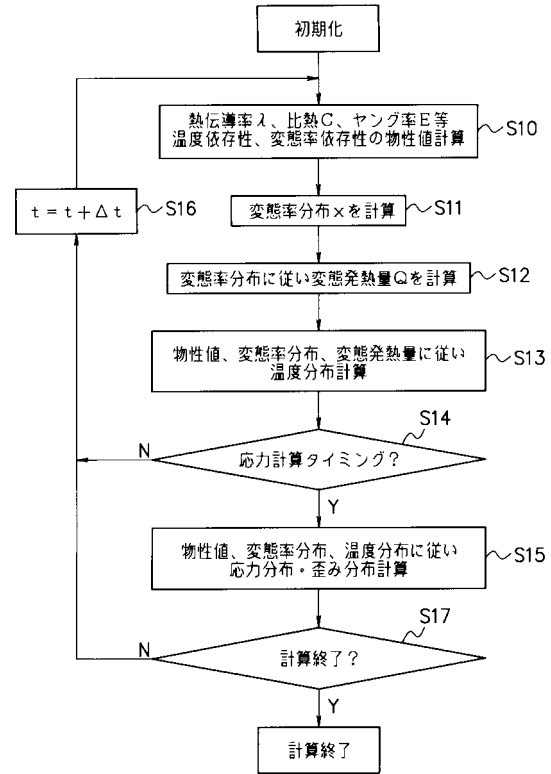
30

40

【図 6】



【図 7】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平 1 0 - 0 1 5 6 0 8 (J P , A)
特開平 0 8 - 3 1 8 3 0 3 (J P , A)
特開平 0 7 - 2 4 8 2 2 2 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

B21B 38/02

B21B 37/00

B21B 45/02

C21D 9/573

G01B 21/20