

熱間圧延後一貫形状予測シミュレータの開発

Consistent Shape Prediction Simulator after Hot Rolling Mill

大 貝 晴 俊^{*(1)} 伊 藤 雅 浩^{*(2)} 平 山 隆^{*(3)}
Harutoshi OGAI Masahiro ITO Ryu HIRAYAMA

抄 録

熱間圧延後の一貫形状予測シミュレータ、すなわちランアウトテーブル、ダウンコイラー、コイルヤード一貫形状予測シミュレータの概要について報告した。最初に、本シミュレータの開発のいきさつと対象プロセスについて述べた。次にシミュレータに用いた伝熱モデルと応力・歪モデル、そして変態モデルについて述べ、これらの三つのモデルを同時に計算する基本モジュールを用いたシミュレータの構成方法について述べた。実ラインで熱間圧延後の各工程で温度、形状を実測し、シミュレータの予測精度の検証を行い、良結果を得た。

Abstract

This paper presents the outline of the run out table, down coiler, coil yard consistent shape prediction simulator. First, the developing motive of this simulator is described. Second, the object process, fundamental equation and model of this simulator are introduced. After that, the composition of this consistency shape prediction simulator and the verification by field experiment are reported.

1. 緒 言

日本の製鉄業は、国際競争力強化に向け更なる生産コストの削減、鋼材品質の向上に取り組んでいるところである。計測・制御技術の観点からは、個別の製造工程でプロセス条件(設備条件、操業条件)を最適化することによる生産コスト削減、鋼材品質向上は限界に近づきつつある状況にあり、今後は、前後の製造工程に跨がったプロセス条件の最適化、すなわち工程間制御の実現によって、従来は達成できなかったレベルの生産コスト削減、鋼材品質向上を実現していくべきであると考えられる。本報では、工程間制御の検討、実現の具体的な取り組みとして熱間圧延後の冷間形状の予測技術の開発、すなわち「ランアウトテーブル、ダウンコイラー、コイルヤード一貫形状予測シミュレータ」の概要と実験による検証結果について述べる。

最初に、本報の形状予測シミュレータを開発するに到った動機について述べる。

熱間圧延の形状制御技術は、クラウン制御あるいはプロフィール制御と共に開発された。6重圧延機やクロスミルのようなクラウン、形状制御性の良い圧延機が開発され、その中間ロールシフト位置やクロス角、ロールベンディング量を適切に初期設定し、更に動的に制御することにより高精度の形状・クラウン制御を実現した。その

結果、形状、クラウンとも圧延直後の状態として所定の目標精度に制御できた¹⁾。しかし、形状は、圧延機直後に目標通りに制御されてもランアウトテーブル上での冷却、ダウンコイラーでの巻取り、その後の冷却過程で形状が変化してしまうことから、最終の冷間形状を平坦に制御するには到っていなかった。冷間形状を目標通りに制御すべく仕上げ圧延機直後の形状と冷却後の形状についての対応を調べる実データの調査も行われたが、精度の高いモデルは構築できなかった。

そこで、物理モデルを用いて冷却後の形状を予測するシミュレータの開発を行うこととした。過去に、ランアウト上での冷却後の形状解析も行われている²⁾が、ダウンコイラーでの巻き取り、コイル状における形状変化、巻き戻しまで考慮した形状予測は行われていなかった。

2. 対象プロセス

熱間圧延の仕上げ圧延機で、鋼板は所定の厚みまで圧延処理され、ランアウトテーブル(ROT)上の冷却設備により鋼種や板厚ごとに定められた所定の冷却速度、冷却パターンで冷却され、巻き取り機(DC)でコイル状に巻き取られる。仕上げ圧延機直後には、形状計が設置され圧延直後の形状が測定される。また、仕上げ圧延機の

⁽¹⁾ 環境・プロセス研究開発センター 計測・制御研究開発部 主幹研究員 工博(早稲田大学 大学院 情報生産システム研究科 教授) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2779

⁽²⁾ 環境・プロセス研究開発センター システム制御技術部 マネージャー

⁽³⁾ 環境・プロセス研究開発センター 計測・制御研究開発部 主任研究員

直後と冷却設備には、鋼板の幅方向中心温度や幅方向の温度分布を測定する放射温度計が設置される。

巻取り後、コイルはコイルヤード(冷却床)に運ばれ、常温まで空冷または水冷される。

常温まで冷却されたコイルは、精整ラインで検査や形状矯正のために巻きほどかれる。そのとき顕在化する形状が「熱間圧延後の冷間形状」である。

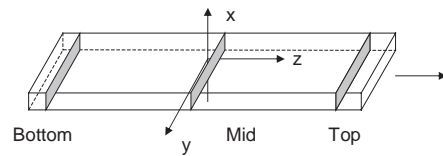


図3 形状予測シミュレータの座標系(C断面)

3. 形状予測シミュレータの考え方と基礎式

本シミュレータは、図1に示すようにROT, DC, コイルヤードにおける鋼板内部における伝熱, 変態進行及び応力, 歪み挙動が相互に絡み合った現象を取り扱う。

本シミュレータは、対象とする鋼板の長手方向の複数地点(例えばトップ部, ミドル部, ボトム部)の幅方向断面(C断面)について、熱間圧延仕上げ圧延以後精整工程に至るまでの冷却, 変態進行及び巻取り, 巻ほだきにより発生する応力, 歪みの変化を, ROT, DC, コイルヤードにわたって一貫して計算することによって精整工程における巻ほだきの際に顕在化する形状を予測する。

図2のように対象とする鋼板のC断面内温度分布, 変態率分布, 応力分布, 歪み分布を各工程間で伝播させることによってシミュレーションを行う。このとき、熱間圧延仕上げ圧延以後の冷却には、変態の進行によって発生する変態発熱を考慮しなければならない。更に、計算した温度分布, 変態率分布を考慮したヤング率や線膨張係数を用いて応力・歪み分布を計算する必要がある。また、巻取り機では巻き張力の応力, 歪み分布への影響を考慮し、精整ラインでは巻き戻しにより顕在化する形状について考慮する必要がある。

本シミュレータでは、鋼板のC断面での温度, 変態, 応力, 歪みを求め、その結果から形状を計算する。

以下、本シミュレータで用いられる基礎式について工程別に説明

する。

記号

T : 温度[K], t : 時間[s], ρ : 密度[kg/m³], c : 比熱[J/kg·K], λ : 熱伝導率[W/m²·K], q : 変態発熱量[W], x : x座標(厚み方向), y : y座標(幅方向)

上記比熱cは、磁気潜熱を考慮しないときの比熱を表す。

ϵ_x : x方向歪み, σ_x : x方向応力[N/m²], E : ヤング率[N/m²]

ϵ_x^p : x方向塑性歪み, γ : 膨張率, ν : ポアソン比,

σ_{xy} : xy平面断面せん断力[N/m²]

なお、添字のある記号については、添字をy, z変更しても同様である。

図3にC断面の座標系を示す。

3.1 ランアウトテーブル(ROT)

3.1.1 伝熱モデル

鋼板C断面内の2次元非定常モデルを考える。熱伝導率は鋼板温度の関数として与える。

$$\text{基礎式: } \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) \right) + \frac{q}{\rho c} \quad (1)$$

$$\text{境界条件: } \lambda \frac{\partial T}{\partial t} = h(T - T_w) \quad (2)$$

ROT冷却モデルは、ROTの冷却条件に応じて、式(2)で与える境界条件中の熱伝達率hを、水冷条件または空冷条件に設定する。水冷条件ではスプレーの冷却式を与える⁹⁾。

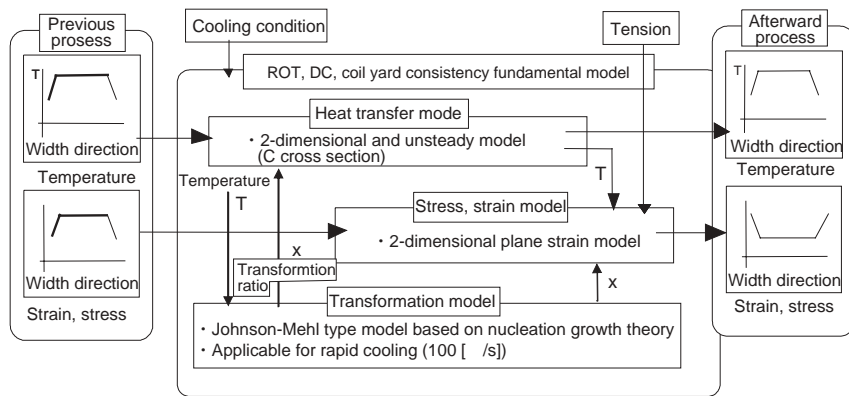


図1 伝熱モデル, 変態モデル, 応力, 歪みの連成モデル

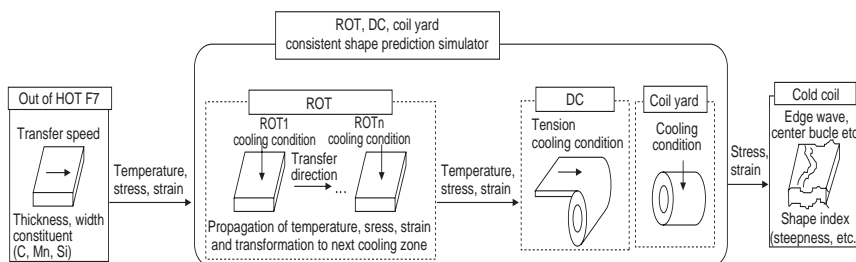


図2 熱間圧延後一貫形状予測シミュレータ

表1 ジョンソン・メーラー型変態モデル

Transformation	Transformation speed	Nucleation and growth rate	Coefficient
Ferrite	Nucleation-growth $\frac{dx}{dt} = 4.046 \left(k_1 \frac{6}{d_\gamma^4} \tau J G^3 \right)^{1/4}$ $\left(\ln \frac{1}{1-x} \right)^{3/4} (1-x)$	$1 = T^{-1/2} D \cdot \exp \left(-\frac{k_3}{RT \Delta G_V^2} \right)$ $G = \frac{1}{2r} D \frac{C_{\gamma\alpha} - C_\gamma}{C_\gamma - C_\alpha}$	$k_1 = 1.7476 \cdot 10^6$ $k_2 = 8.933 \cdot 10^{-12} \exp \left(\frac{21100}{T} \right)$ $k_3 = (\text{cal}^3 / \text{mol}^3) = 0.957 \cdot 10^9$
Pearlite	Saturation-growth $\frac{dx}{dt} = k_2 \frac{6}{d_\gamma} G (1-x)$	$G = \Delta T \cdot D \cdot (C_{\gamma\alpha} - C_{\gamma\beta})$	$k_2 = 6.72 \cdot 10^6$
Bainite		$G = \frac{1}{2r} D \cdot \frac{C_{\gamma\alpha} - C_\gamma}{C_\gamma - C_\alpha}$	$k_2 = 6.816 \cdot 10^{-4} \exp \left(\frac{3431.5}{T} \right)$

d_γ : γ particle size, D [m]: diffusion coefficient of C in γ [m²/s], C_γ : C mole fraction concentration in γ , C_α : C mole fraction concentration in ferrite, $C_{\gamma\alpha}$: C molarity in γ of the γ/α interface, $C_{\gamma\beta}$: C molarity in γ of the γ/cem interface
 ΔT : super cooling from A_e , [K], r : curvature radius of a growth interface

$h = W^\alpha + \beta, \alpha = 0.8, \beta = 100$

3.1.2 変態発熱モデル

変態進行モデルは、核生成成長理論に基づくJohnson-Mehl型モデルを用いた⁷⁾。

変態は、鋼板の所定位置でのC断面における変態率Xの分布を演算するのに、表1に示す変態進行モデルを用いている。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モデルで計算を行って、フェライト変態率XF、パーライト変態率XP、ベイナイト変態率XBを求める。そして、これらを足し合わせたものを、鋼板の変態率Xとして扱っている。

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。

$$q = \rho \left[q_1 \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (q_m \cdot X) \right] \quad (3)$$

$$q_m = \int (c_\alpha - c) dT \quad (3')$$

ここで変態発熱qは、式(3)のように、格子変態に伴う潜熱q_潜[J/kg]と磁性の変化に伴う磁気潜熱q_磁[J/kg]の和としてもとまるものである。磁気潜熱q_磁は、比熱の実測値により式(3)で計算することができる。

3.1.3 応力・歪みモデル

応力、歪みは、鋼板C断面内の2次元平面歪みモデルを考える。

仮定1: Z方向の一様性

仮定2: 体積力 = 0

仮定3: $\sigma_{xz} = 0, \sigma_{yz} = 0$

・応力、歪みの関係式

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} \{ \sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \} + e_x, e_x = \epsilon_x^p + \epsilon^T \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} \{ \sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x) \} + e_y, e_y = \epsilon_y^p + \epsilon^T \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} \{ \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \} + e_z, e_z = \epsilon_z^p + \epsilon^T \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} + \gamma_{xy}^p \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \tau_{yz} = 0 \\ \gamma_{zx} &= \frac{1}{G} \tau_{zx} = 0 \\ G &= \frac{E}{2(1+\nu)} \end{aligned} \quad (4)$$

・力の平衡方程式(z方向の微係数は0)

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

・歪みの適合条件

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} &= \frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial x^2} \\ \epsilon_z &= const \end{aligned} \quad (6)$$

上式を変形し、応力関数 を導入すると

$$\begin{aligned} \nabla^4 \varphi &= -E_e [\nu \nabla^2 e_z + g], E_e = \frac{E}{1-\nu^2} \\ g &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}^p}{\partial x \partial y} - \left(\frac{\partial^2 e_x}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 e_y}{\partial x^2} \right) \\ \sigma_x &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \\ \sigma_y &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (7)$$

境界条件: 自由境界 $\frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0$

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \sigma_x + 3\tau^2 \\ \cdot \text{降伏条件} \quad P &= \sigma_p^2 - Y^2 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

・塑性歪増分

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_x^p &= \lambda \cdot \frac{\partial P}{\partial \sigma_x} = \lambda \{ \sigma_x - (\sigma_y + \sigma_z) / 2 \} \\ \Delta \epsilon_y^p &= \lambda \cdot \frac{\partial P}{\partial \sigma_y} = \lambda \{ \sigma_y - (\sigma_z + \sigma_x) / 2 \} \\ \Delta \epsilon_z^p &= \lambda \cdot \frac{\partial P}{\partial \sigma_z} = \lambda \{ \sigma_z - (\sigma_x + \sigma_y) / 2 \} \\ \Delta \gamma_{xy}^p &= 3\lambda \tau_{xy} \end{aligned} \quad (9)$$

図4に示すように を探索、修正しながら収束計算することで応力、歪みを演算する。ヤング率、線膨張率モデルは、鋼板の温度及び変態率を考慮したモデルを用いている。

3.2 ダウンコイラー(DC)

DCでは、長手方向(L方向)の複数位置の鋼板が図5に示すようにコイル状に巻き取られ同心円状に積層されたものとして扱う。鋼板の所定位置でのC断面は、内層のトップ(T部、中間層のミドル(M)部、外層のボトム(B)部の三つの層のいずれかに属する。すなわち、鋼板のトップに位置するC断面は内層に位置し、C断面がトップから離れるにつれて、中間層更には外層に位置することになる。

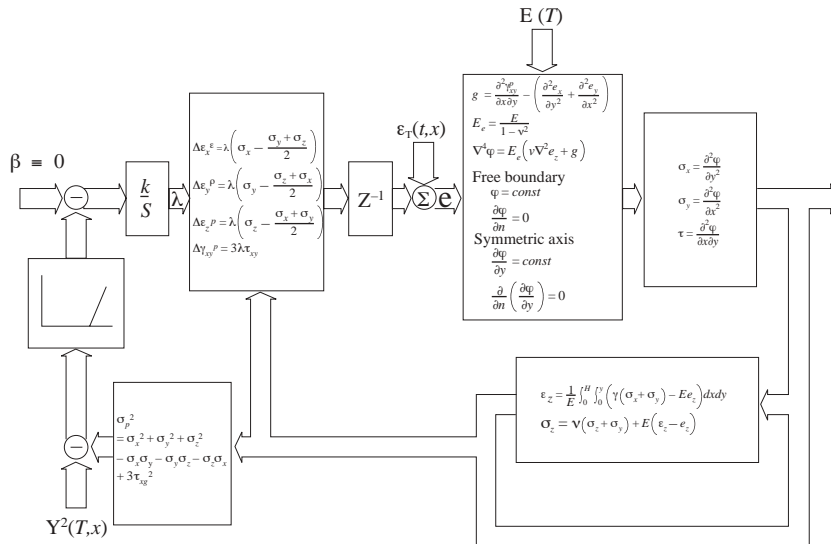


図4 探索による応力・歪計算

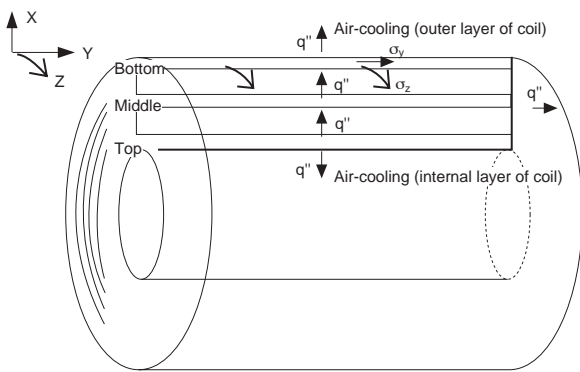


図5 コイラーのモデル

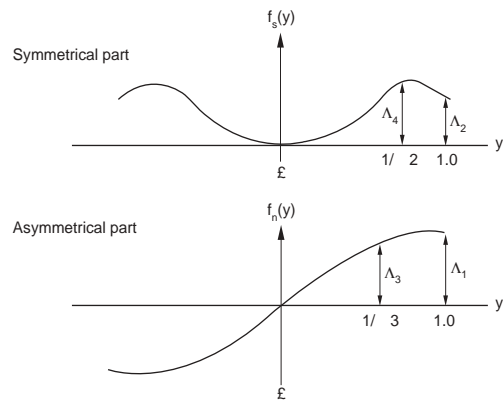


図6 形状指標(2, 4 と 1, 3)

3.2.1 伝熱モデル

対象となっている長手方向のC断面がコイル内のどの位置(層)にあるかに応じて熱伝達率境界条件を設定する。コイル最内周及び最外周に位置するC断面においては、外気と接する面(上面または下面とエッジ面)では対流熱伝達率(空冷条件)を、隣接する鋼板と接する面では熱伝達率(定数値)を与えている。コイル内部に位置するC断面においては、エッジ面のみ対流熱伝達率(空冷条件)を与えている。式(1)の伝熱モデルから、鋼板の所定位置でのC断面における温度分布の履歴を計算する。

3.2.2 応力・歪みモデル

鋼板の所定位置でのC断面における応力分布を演算する。

3.3 コイルヤードと巻き戻し

3.3.1 伝熱モデル

DCでの冷却条件と同様にして境界条件を与える。

3.3.2 応力・歪みモデル

本モデルは、常温に冷却された後の巻き戻しによる応力、歪みを計算する。

3.4 冷間形状予測モデル

鋼板形状予測は、応力・歪みモデルによって計算された巻ほだき後の応力、歪みから形状指標 1 - 4 を求める。

式(10)に示すように、各要素とセンタとの歪み差を長手方向応力の板厚平均値より計算する。

$$\Delta \epsilon_i = \left(\frac{\bar{\sigma}_i}{E(\bar{T}_i)} - \frac{\bar{\sigma}_0}{E(\bar{T}_0)} \right) \quad (10)$$

次に、式(11)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。

$$f(y) = \lambda_0 + \lambda_1 \cdot y + \lambda_2 \cdot y^2 + \lambda_3 \cdot y^3 + \lambda_4 \cdot y^4 \quad (11)$$

そして、式(12)に示すように、1 - 4 を線形変形して、形状指標 1 - 4 を求める。

$$\begin{bmatrix} \Lambda_1 \\ \Lambda_2 \\ \Lambda_3 \\ \Lambda_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1/3 & 0 & 1/3 & 3/0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

以上述べたようにして求められた形状指標 1 - 4 のうち、形状指標 1, 3 は板幅方向の非対称な成分を表し、形状指標 2, 4 は板幅方向の対称な成分を表す。ここで、形状指標 2, 4 は図6に示すように、鋼板の形状を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、2 は板センタと両エッジとの歪み差を示し、4 は板センタとセンタから 1/√2 x 1/2 x B の位置との歪み差を示す。

4. 熱間圧延後形状予測シミュレータ

4.1 形状予測シミュレータの構成

前章で述べた伝熱モデル、変態進行モデル、応力・歪みモデル、形状予測モデルを実装した形状予測シミュレータは、TRASという新日本製鐵の開発したシミュレータ構築環境⁵⁾の上に構築してい

る。図7は、ROTの1冷却ゾーンの温度、変態、応力状態を計算するモジュールを示す。

ROT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、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る。図8は、5冷却ゾーンのある場合で、各モジュールで計算した温度、変態率、応力情報を下流の冷却モジュールに受け渡すことによって所定断面の計算が実行される。

図9はダウンコイラーでの計算モジュールを示し、3層に分割した場合の例を示している。

本シミュレータでは、ROT、DC、コイルヤード、巻き戻しまでの一貫した形状計算がモジュールを接続することで可能である。また、鋼材通板方向の複数断面のトラッキングと同期計算をおこなっているので、長手方向複数点での形状計算が可能である。このことを用いて形状のダイナミック制御もシミュレーションできる。ま

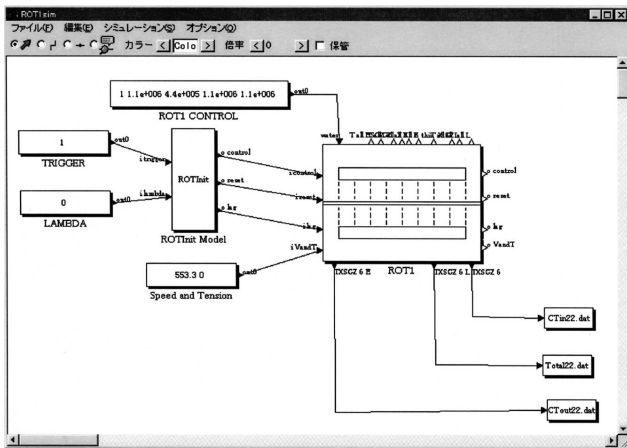


図7 冷却ゾーンの基本モジュール

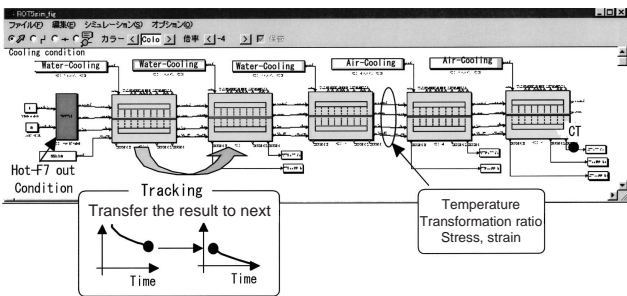


図8 5つの冷却ゾーンから構成されるROTシミュレータ

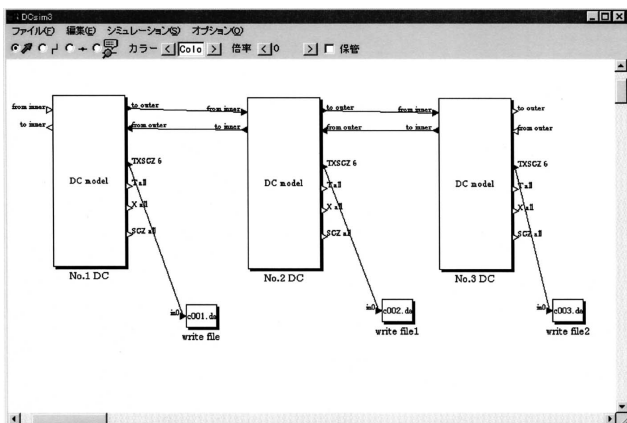


図9 ダウンコイラーのシミュレータモジュール

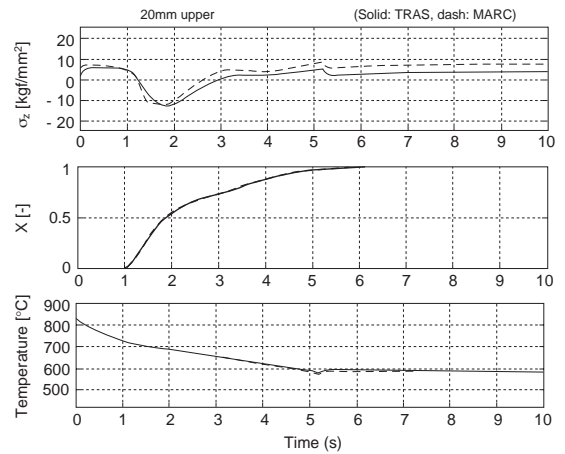


図10 冷却ゾーンのシミュレータ精度検証結果(端部20mm、上表面)

た、本シミュレータの各モジュールは差分計算によって高速に計算できるため、リアルタイムでの応用も可能である。

4.2 検証

ランアウトテーブルの冷却ゾーンでの本シミュレータの精度を、有限要素法(MARC)との計算結果と比べた。本シミュレータの結果(TRAS)とMARCの結果はほぼ同等の計算結果が得られた(図10)。

5. 形状変化メカニズム検討と現場実験による検証

5.1 実験条件と測定項目

新日本製鐵の連続熱延工場で、ROT、コイルヤード、精整ラインにおいて、一貫の温度、形状測定実験を行った。このように一つの鋼板についてその履歴を追跡した例はほとんどなく、大変有意義なデータが得られた。実験条件と測定項目について図11に示す。

5.2 計算結果の評価

5.2.1 ROT、DC、コイルヤードでの計算結果

図12にROT及びDC、コイルヤードにおける本シミュレータの計算結果を示す。温度データはシミュレータの伝熱モデルの熱伝達率の調整に使用し、図中のように計算結果と測定結果を一致させることができた。

図13に鋼板トップ位置での、ROT - 常温巻ほどもまでの残留応力の変化結果の計算例を示す。この結果からROT、DC、コイルヤード、精整ラインにおける形状変化のメカニズムを理解することができる。ROTの冷却においてエッジに張力が発生(中のび形状)であったものが、DCの巻取りによってエッジ部の張力が緩和され耳なみ

Object material		Thickness×width [mm] 2.92 × 1243
4 coil		Component [wt%] C: 0.177
Steel Normal steel		F7 out/CT temperature [°C] 800/550 (set value)
		DC winding tension [kgf/mm²] 2.23 (set value)
ROT (F7 out)	Coil yard	Finishing line
Measurement item		
- F7 out temperature (computer)	- Temperature (contact)	- Wave height (contact)
- Width distrib. (scan-type PM)	- Outer: width direction 3 pt.	- Line speed
- Center-edge 3pt. (fix-type PM)	- Internal: width direction 3 pt.	
- CT temperature (computer)	- Edge: radius direction 5 pt.	
- Width distrib. (thermviewer)	- Total 11 pt.	
- Rolling speed (computer)		
- DC winding tension (computer)		
- F7 out steepness (computer)		
	* 5-day continuous observation	

図11 実験条件と測定項目

に変化している。コイルヤードの空冷によって更に耳なみが成長している。冷却後、精整ラインでの巻ほどもでは、耳なみが一部緩和されるものの耳なみが残っている。

5.2.2 形状予測モデルの検証

一貫形状予測シミュレータで冷却後の形状を予測した結果と、精整ラインでの実測形状を比較し、形状予測の精度を評価した。

図14は一貫形状予測シミュレータの予測値と実測値との比較をしたものである。実測値は急峻度、計算結果は伸び率に対応する形状指標値であるので、実測値と計算値は二乗の関係にあるが、結果もそのようになっており良い対応を示している。一部のデータで、対応していないものがあるが、これらは非定常な部分であったため除外した方がよいものであった。この結果、本シミュレータにより一貫形状予測は可能であることが明らかになった。

6. 結 言

熱間圧延のROT, DC, コイルヤード一貫形状予測シミュレータを開発した。本報では、そのモデル、実装モジュール、実験との比較結果について述べた。その結果、熱間圧延後の一貫形状予測が可能であることが明らかになった。

今後、本技術を現場に応用し、精整工程の形状予測に活用する予

定である。また、本シミュレータの結果について品種別に調査して、熱間圧延での目標形状を自動的に設定する技術を確立したいと考えている。本シミュレータを手掛かりに、更なる複数工程にまたがる新たな制御技術に取り組んでいきたいと考えており、一層の研究開発に尽力していきたい。

参考文献

- 1) 永沼洋一 高橋英雄 大貝晴俊 馬場勲次 増田俊一: 製鉄研究 (317),41(1985)
- 2) Naganuma, Y., Takahashi, H., Ogai, H.: Nippon Steel Technical Report, 27,43(1985)
- 3) Naganuma, Y., Ogai, H.: Control-Theory and Advanced Technology, 1-1, 1985, p.47
- 4) Naganuma, Y., Takahashi, H., Ogai, H.: Preprint of IFAC Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, 1986, p.354
- 5) 今野雄介 塩谷政典 植山高次: 新日鉄技報. (257),53(1995)
- 6) 三塚正志 福田敬爾: 鉄と鋼. 69(1983)
- 7) 矢田 瀬沼: 日本金属学会会報. 29(6), 430(1990)
- 8) 吉田 佐々木 田中 広瀬: 鉄と鋼. 68(8),71(1982)
- 9) Ogai, H., Ito, M., Hirayama, R.: Preprint of IFAC Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, 2001, p.63
- 10) 大貝晴俊 伊藤雅浩 平山隆: 電気学会金属産業研究会 研究会資料. MID-02-7, 2002, p.29
- 11) 大貝晴俊 伊藤雅浩 平山隆: 平成14年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集. 2002, p.692

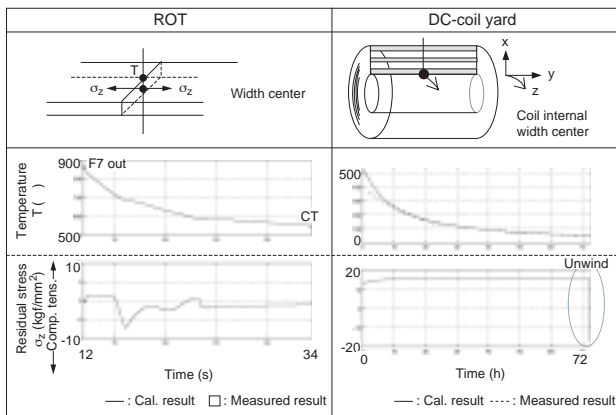


図12 ROT,ダウンコイラー,コイルヤードでの計算例

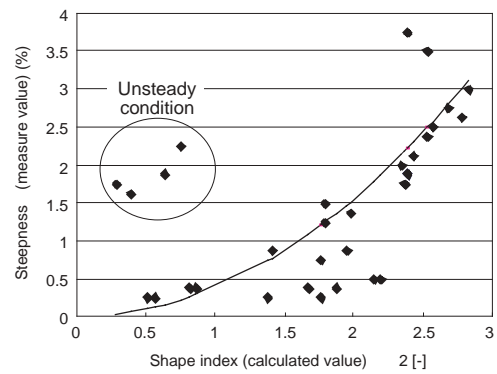


図14 最終形状の予測値と実測値

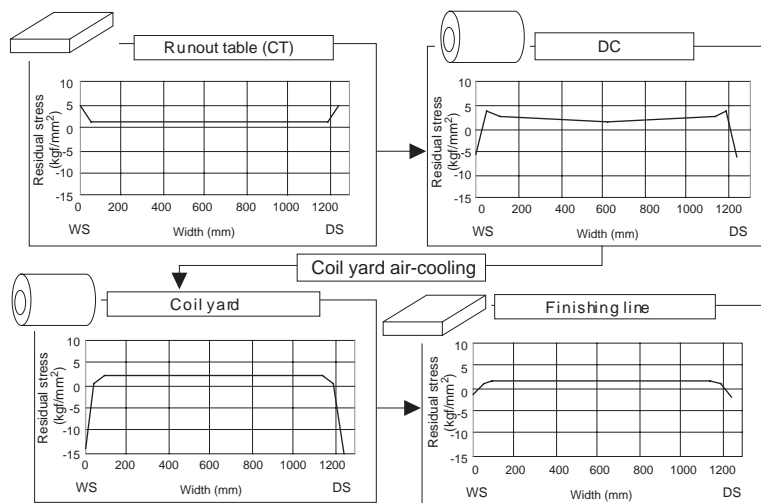


図13 残留応力変化の計算例 (ROTから整精ラインまで、トップ部)