

(論文)

熱延ホットランテーブル上の鋼板形状と水冷熱伝達率

Cooling Behavior of Steel Sheets with Detoriorated Flatness on Hot-run Table



柳 修介*1
Shusuke YANAGI



山口 証*2
Akashi YAMAGUCHI



奥野利明*3
Toshiaki OKUNO



小林正宜*4
Masanori KOBAYASHI

Deteriorated flatness of steel sheets on a hot-run table (HRT) is considered to change the flow pattern of water retained on the steel sheets and affect their cooling characteristics. Techniques have been reported for predicting the flatness after cooling from the cooling history of the sheets on an HRT, however, no sufficient study has been made for the cases where the sheets has a deteriorated flatness. The present study evaluates the effect of the flatness on the average heat transfer coefficient based on actually measured temperature and flatness. An analysis model was constructed for the temperature and flatness, accounting for strains induced thermally and by transformation to clarify the effect of rolled shapes on cooling.

まえがき＝熱延仕上げミルからコイラまでの冷却帯（熱延ホットランテーブル，Hot-run Table，以下，HRTという）における鋼板の冷却特性は，耳波，中伸びなどの形状不良が原因で生じる滞留水の挙動により変化するとされている。しかし，これまでHRT上の温度履歴から巻取後の平坦度を予測する手法に関する報告は多数あるが^{1)~3)}，HRT上の形状不良が冷却特性に及ぼす影響に関しては十分に検討されていない。本稿では実測したHRT上の鋼板温度，鋼板形状をもとに，平坦度が熱伝達率に及ぼす影響を評価した。さらに，熱および変態によるひずみを考慮した鋼板温度・鋼板形状の解析モデルを構築し，HRT上の鋼板形状が冷却に及ぼす影響について考察した⁴⁾。

1. HRTの設備概要

当社加古川製鉄所におけるHRTの設備概要を図1に示す。HRTには，近接バンクと遠方バンクが設置されており，仕上げ圧延機出側，近接バンク出側，およびコイラ直前の計3か所の板幅方向温度計により鋼板温度(以下，

それぞれFDT，MT1，CTという)を測定した。また，遠方バンクの中間に光切断法⁵⁾による平坦度計を設置し，鋼板全長の形状データを収集した。

2. 平坦度を評価するデータ解析方法

2.1 光切断法による平坦度測定方法

光切断法とは，斜め上方より鋼板表面にスリット状のレーザ光を照射し，板からの反射光(光切断線)を上方のCCDカメラで撮影することにより形状を測定する方法で，板が平坦なとき光切断線は直線であるが，形状不良になると複雑な曲線になる(図2(a))。

2.2 光切断線のTchebycheff展開と平坦度指標

得られた光切断線データを式(1)に示すTchebycheff級数⁶⁾を用いて展開し，各次数の係数で平坦度のパターンと大きさを判定した(図2(b)，(c))。

$$Y = \sum_{n=0}^N C_n T_n \left(\frac{X}{W/2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$T_n(\zeta) = \sum_{k=0}^{\lfloor n/2 \rfloor} (-1)^k \binom{n}{2k} \zeta^{n-2k} (1-\zeta^2)^k$$

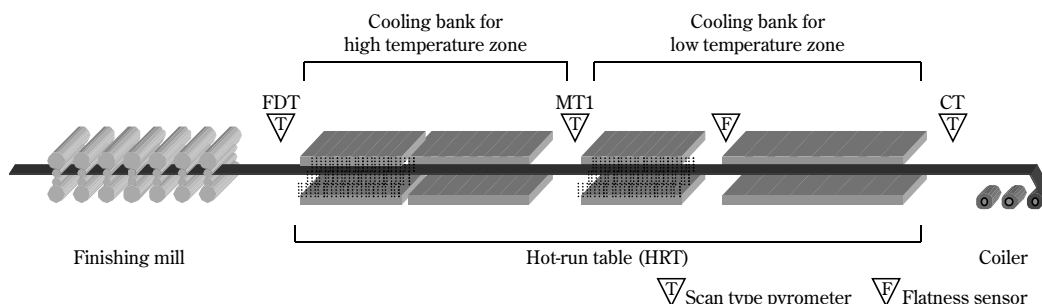


図1 加古川製鉄所HRTの設備概要
Fig. 1 Schematic diagram of hot-run table in Kakogawa hot strip mill line

*1 技術開発本部 材料研究所 *2 技術開発本部 生産システム研究所 *3 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 薄板部 *4 鉄鋼事業部門 技術開発センター プロセス技術開発部

ここで、 X および Y は光切断線の水平および垂直方向の位置を表わす座標であり、 W は光切断線の幅、 ζ は -1 から $+1$ の間に正規化された幅方向位置を表わす。 N は展開次数で、ここでは $N = 4$ とした。 C_0 は鋼板の上下方向の移動による光切断線の位置の変化を補正し、 C_1 は光学系の設置時の傾きを補正する係数である。 C_2 は中伸びあるいは耳波、 C_3 は片伸び、 C_4 はクウォータ伸びあるいは中伸びと耳波の複合伸びを表わす係数である。

撮影した光切断線を画像処理し 3 次元的に表示した例を図 3 に示す。鋼板先端部において図 3 (a) では耳波、(b) では中伸びが発生している。そして板がコイラに巻き張力が作用し始めると形状が安定している。図 4 に CT の目標値と実績値の偏差と 2 次の Tchebycheff 係数 C_2 の長手方向の推移を示す。 C_2 の変動が大きい鋼板先

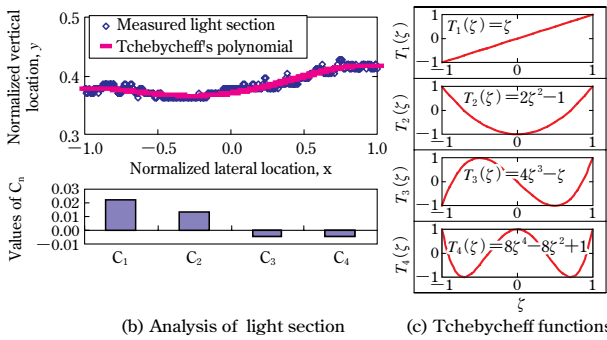
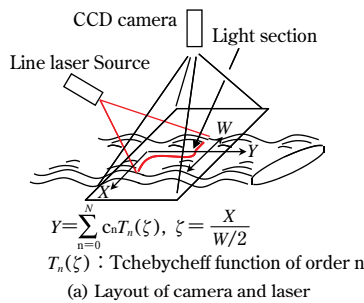


図 2 光切断法による鋼板平坦度の評価手法

Fig. 2 Strip flatness measurement using light section method and data analysis evaluating strip flatness

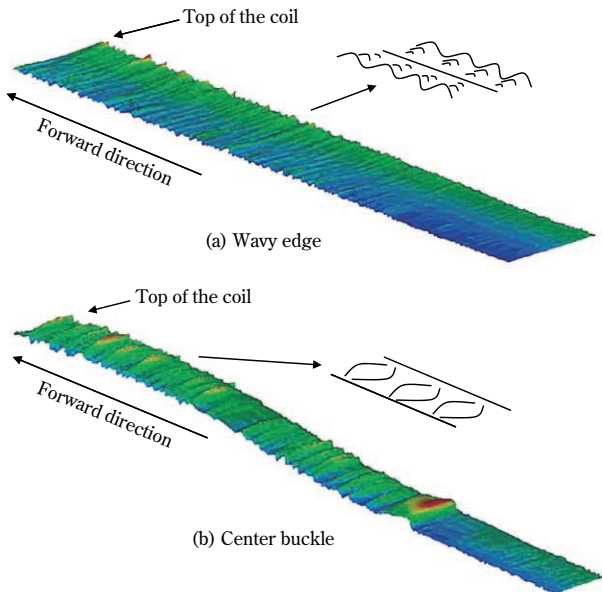


図 3 平坦度の擬似 3 次元表示

Fig. 3 Example of strip flatness photographed by light section method

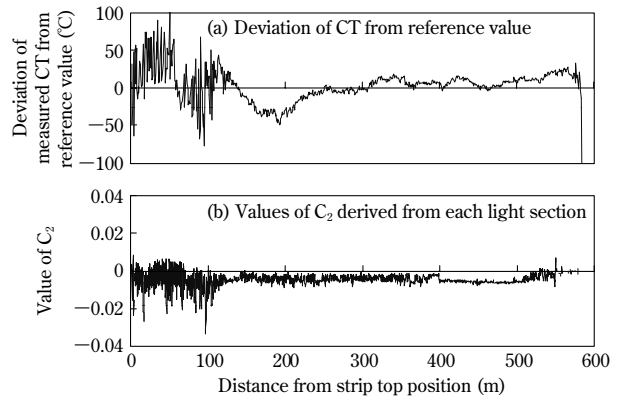


図 4 長手方向の CT の変動と平坦度指標 C_2 の変動

Fig. 4 Longitudinal trend of coiling temperature (CT) and Tchebycheff parameter, C_2

端の約 100m までは、CT も大きく変動しており、同様の傾向が認められる。

測定したデータで平坦度不良が発生した形状を見ると、大半が中伸びあるいは耳波のいずれかに分類されたことから、平坦度を表わす指標として係数 C_2 を用いることとした。また、データ解析の結果、 C_2 は鋼板形状が耳波の場合 0 から正の範囲で周期的な変動を繰返し、中伸びの場合には逆に 0 から負の範囲で周期的な変動を繰返すことがわかった。

3. HRT 上の鋼板温度と鋼板形状の数値計算法

冷却過程における板厚・板幅方向の温度分布、ならびに熱膨張と変態による体積変化を考慮した板幅方向の応力分布とその結果生じる鋼板形状の算出方法について以下に述べる。

3.1 鋼板温度の計算法

吉田らの方法¹⁾に従い、2次元の熱伝導方程式(式(2))を解いて⁷⁾冷却過程の板厚・板幅方向の温度分布を計算する。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + \dot{Q} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 x は板幅方向、 y は板厚方向座標、 ρ 、 c 、 λ は鋼板の密度、比熱、熱伝導率、 \dot{Q} は変態による発熱を表わす。

境界条件として与える水冷熱伝達率 a_w を、一定長さの鋼板(切板)の板幅中央における FDT, MT1, CT の実測値と、冷却水の使用実績とから推定した。すなわち、空冷による温度変化を補正して水冷開始および終了温度を求め、板幅中央の温度が実測値と一致するように、収束計算により水冷熱伝達率を推定した⁸⁾。この方法で得られる熱伝達率は、鋼板が水冷バンクを通過した後に残留する滞留水による温度降下も水冷バンク内で冷却されたものとして取扱っており、いわば見かけの熱伝達率である。

板幅方向の熱伝達率の分布については、板端部が過冷されることを考慮して、式(3)で与えた¹⁾。

$$a_w(\eta) = \begin{cases} a_w \left[1 + \epsilon \left(1 - \frac{\eta}{\delta} \right) \right], & \eta < \delta \\ a_w, & \eta \geq \delta \end{cases} \quad \dots \dots \dots (3)$$

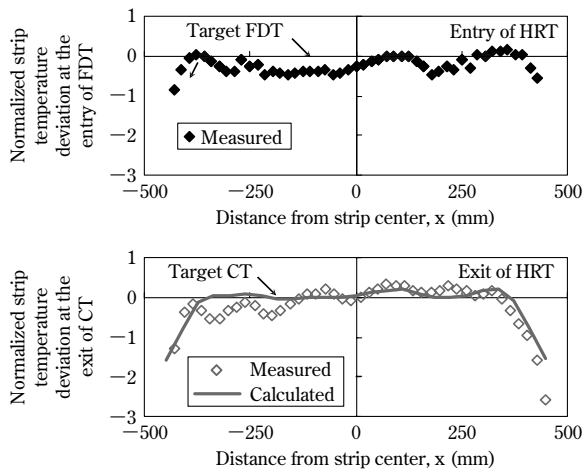


図5 FDTおよびCTの板幅方向分布の実測結果と計算結果
Fig. 5 Measured and calculated strip temperature distributions in lateral direction at FDT and CT

ここで、 α_w は板幅中央部の熱伝達率であり、その推定結果を4章で述べる。 η は板端からの距離、 δ は板端部で熱伝達率が高くなっている領域の幅、 ε は熱伝達率の増加率を表わす。板幅方向の温度分布の実測結果を図5に示す。ただし、縦軸はFDTの板幅方向温度差を0から-1にとり正規化した。板端部が過冷されることにより、FDTの板幅方向の温度差はCTで拡大していることがわかる。この実測結果をもとに、式(3)のパラメータ δ 、 ε を $\delta=100\text{mm}$ 、 $\varepsilon=0.3$ とした。

3.2 相変態の計算方法

変態の加算則が成り立つとしてTTT線図からその開始と進行を計算した⁹⁾。伊藤らの方法¹⁰⁾に従いTTT曲線を式(4)で表現し、数値計算に適用した。

$$\frac{S-S_0}{S_N-S_0} = \frac{1}{\exp(-1/2)} \cdot \left(\frac{U-U_0}{U_N-U_0}\right)^{1/2} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{U-U_0}{U_N-U_0}\right)\right\} \dots (4a)$$

$$\left. \begin{aligned} U &= 1000/(T+273), U_0 = 1000/(T_0+273) \\ U_N &= 1000/(T_N+273), S = \ln t \\ S_0 &= \ln t_0, S_N = \ln t_N \end{aligned} \right\} \dots (4b)$$

式(4)に含まれるパラメータ T_0 、 T_N 、 t_0 、 t_N に関しては、恒温変態試験を行い変態の開始、終了する温度と時間から決定した。

冷却過程での体積変化は、オーステナイト相とフェライト相の体積分率 X_γ 、 X_α を求め、温度変化に伴う体積変化 ΔV_γ 、 ΔV_α に体積分率を乗じて足し合わせた上、変態の進行 ΔX による体積の変化を加えて計算される(式(5))。

$$\left. \begin{aligned} \Delta V &= X_\gamma \Delta V_\gamma + X_\alpha \Delta V_\alpha + (V_\alpha - V_\gamma) \Delta X \\ \Delta V_\gamma &= \beta_\gamma V_\gamma \Delta T \\ \Delta V_\alpha &= \beta_\alpha V_\alpha \Delta T \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

連続冷却試験における試験片の体積変化の実測値を用いて、オーステナイト相とフェライト相の体積変化率 β_γ 、 β_α を求めた(図6)¹¹⁾。

3.3 鋼板形状の計算方法

鋼板形状を以下に示す簡易的な取扱いによって計算した。まず、冷却過程で生じる板幅方向の温度差を求め、次いで熱膨張と変態の進行を考慮して体積変化をひずみに変換し、当該温度域のヤング率を乗じて板幅方向の応力分布を計算した。座屈応力を超える鋼板長手方向の圧

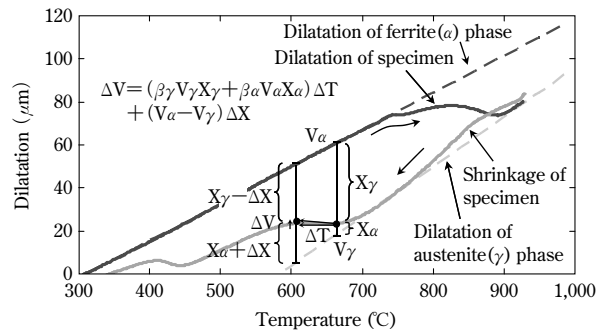


図6 連続冷却試験中の温度と試験片の膨張量の関係
Fig. 6 Relationship between temperature and dilatation of specimen during continuous cooling test

縮応力が発生した場合には、内部応力がすべて解放されて凹凸形状として顕在化するとした。座屈応力 σ_{cr} は、吉田らに従い式(6)で与えた¹⁾。

$$\sigma_{cr} = K \frac{E \cdot \pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{\bar{b}}\right)^2 \dots (6)$$

ここで、 E 、 ν は鋼板のヤング率およびポアソン比、 h は板厚、 \bar{b} は圧縮応力が作用する幅、耳波の場合は $K=0.425$ 、中伸びの場合は $K=4.0$ とされている。

4. HRT上の水冷熱伝達率と鋼板形状の関係

HRT上の温度と平坦度を実測した上、前章で述べた温度解析法を用いて水冷部の熱伝達率を推定し、鋼板形状との関係を調べた。

4.1 定常部の水冷熱伝達率

HRT上で平坦度不良のない定常部を対象に、水冷熱伝達率 α_w^{MID} を推定した⁸⁾。近接バンクと遠方バンクについて、 α_w^{MID} と水量密度の関係を図7に示す。図中、鋼種が異なりヒートパターンが違うものを別々のマーカーで示した。後述する図8も同様である。熱伝達率は従来得られている熱伝達率の実験式(たとえば三塚の式¹²⁾、式(7))と同様の式により整理できることがわかる。

$$\alpha_w = 3567 \times W^{0.663} \times 10^{-0.0014 \cdot T_s}, T_s \geq 600^\circ\text{C} \dots (7a)$$

$$\alpha_w = 5843 \times W^{0.800} \times 10^{-0.0020 \cdot T_s}, T_s \leq 600^\circ\text{C} \dots (7b)$$

ここで、鋼板の表面温度 T_s [°C]には、定常部の水冷開始温度と終了温度の平均値を用い、水量密度 W [m³/(m²·h)]は上下の水量密度の平均で評価した。

4.2 鋼板先端部の水冷熱伝達率

鋼板先端部についても同様に熱伝達率 α_w^{TOP} を推定した結果を図8に示す。鋼板温度が高い近接バンクでは定常部とほぼ同じ曲線に分布するが、鋼板温度が低い遠方バンクでは定常部と同程度の値から2倍程度までの範囲にばらついている。

次に、先端部と定常部の熱伝達率の差 $\Delta\alpha_w = \alpha_w^{\text{TOP}} - \alpha_w^{\text{MID}}$ を求め、鋼板形状との関連を調べた。平坦度として、20m間隔で前述のTchebycheff係数 C_2 の標準偏差を計算した上、中伸びの場合を正に、耳波の場合を負として定義したパラメータ ΔC_2 (式(8))を用いた。

$$\Delta C_2 = \begin{cases} +\sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (C_{2,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^n C_{2,i}\right)^2}{n(n-1)}\right]} \left(\frac{\sum_{i=1}^n C_{2,i}}{n} < 0\right) \\ -\sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (C_{2,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^n C_{2,i}\right)^2}{n(n-1)}\right]} \left(\frac{\sum_{i=1}^n C_{2,i}}{n} > 0\right) \end{cases} \dots (8)$$

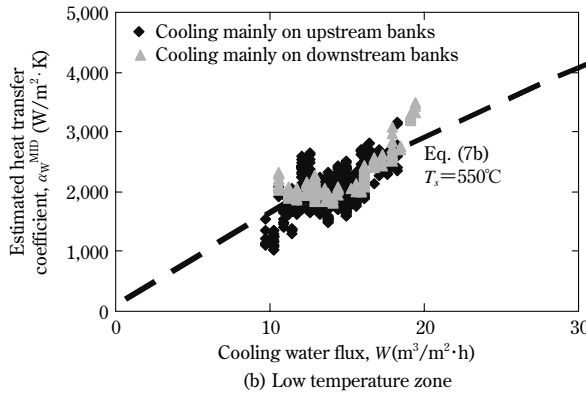
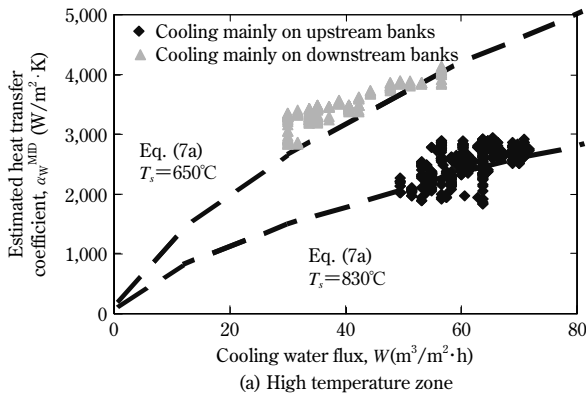


図7 定常部における冷却水の水量密度と熱伝達率の関係、近接バンクでの冷却(a)と遠方バンクでの冷却(b)
Fig. 7 Relation between flow rate of cooling water and estimated heat transfer coefficient of middle part of strip, high temperature zone (a) and low temperature zone (b)

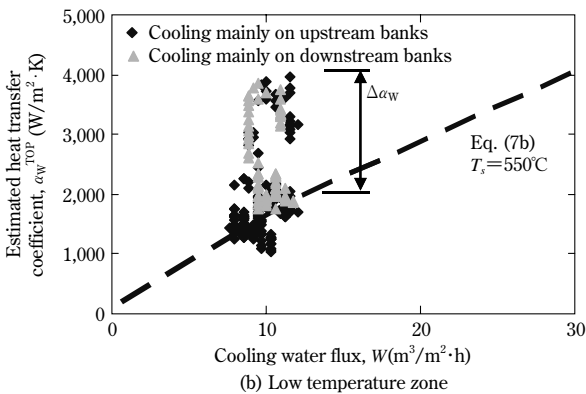
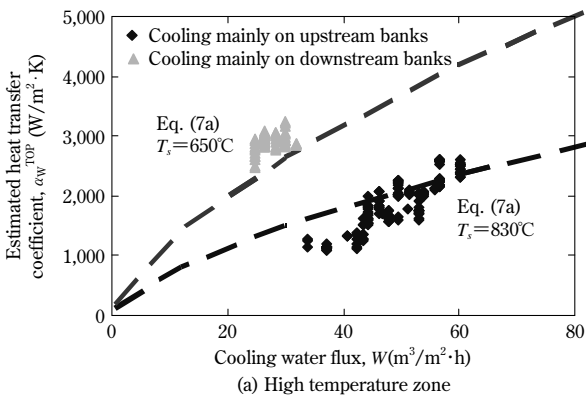


図8 先端部における冷却水の水量密度と熱伝達率の関係、近接バンクでの冷却(a)と遠方バンクでの冷却(b)
Fig. 8 Relation between flow rate of cooling water and estimated heat transfer coefficient of top 100m of strip, high temperature zone (a) and low temperature zone (b)

ここで、 n は長さ20m内に含まれる測定点数で、通板速度により異なり60~80点である。式(8)より、 C_2 が正の範囲で変動する耳波の場合には ΔC_2 は負となり、 C_2 が負の範囲で変動する中伸びの場合には ΔC_2 は正となる。

$\Delta \alpha_w$ についても約20m間隔の平均値 $\overline{\Delta \alpha_w}$ を求め、 ΔC_2 と比較した結果を図9に示す。近接バンクでは、 ΔC_2 が大きく鋼板形状が悪くても $\overline{\Delta \alpha_w}$ は小さく形状による冷却特性が小さい(図9(a))。一方、遠方バンクでは、中伸びの場合($\Delta C_2 > 0$)、 ΔC_2 が大きくなると $\overline{\Delta \alpha_w}$ も大きくなるが、耳波の場合($\Delta C_2 < 0$)には明瞭な傾向が見られない(図9(b))。

以上のことから、鋼板温度が高い近接バンクでは、鋼板形状によらず安定した沸騰膜が形成され、熱伝達率の変動が小さくなったと推定される。鋼板温度が低い遠方バンクでは、耳波の場合、滞留水が板上から排出されやすく膜沸騰の維持が容易になり、熱伝達率の変動が小さくなったと考えられる。一方、中伸びの場合、凹部の滞留水が板上から排除されにくいいため、周囲よりも温度が下がり、膜沸騰から遷移沸騰へ移行する領域が板面上に局所的に形成されるようになる。この結果、熱伝達率が鋼板の長手方向に大きく変動し、図4(a)に示されるようなCT変動につながると考えられる。

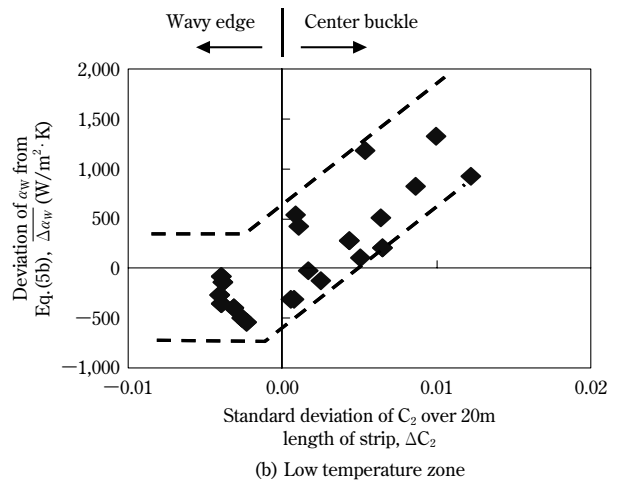
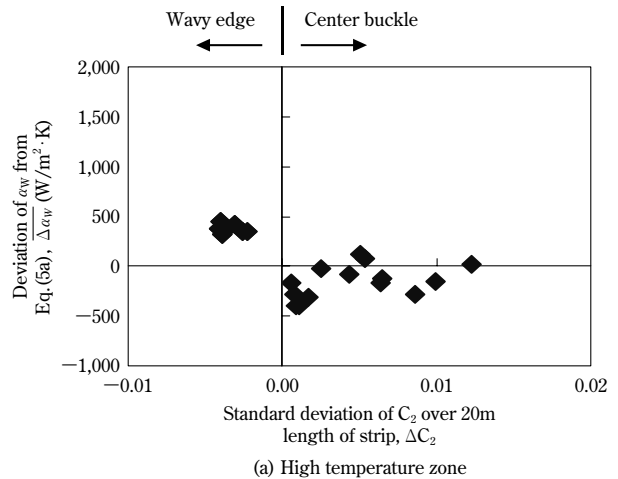


図9 冷却曲線から推定された先端部の熱伝達率の変動 $\overline{\Delta \alpha_w}$ と同じ位置での平坦度指標 C_2 の長手方向の変動 ΔC_2 の関係
Fig. 9 Relation between standard deviation of Tchebycheff parameter, C_2 and deviation of heat transfer coefficient, $\Delta \alpha_w$

5. HRT上の鋼板温度と鋼板形状のシミュレーション

3章で述べた計算手法および4章で述べたHRT上での熱伝達率の実測結果を用いて、鋼板温度と鋼板形状のシミュレーションを行い、実測結果と比較・検討した。計算には、HRT上で鋼板先端部に顕著な中伸びが形成され、巻取温度の変動が認められたときの実績を用いた。

5.1 シミュレーション結果

仕上げ圧延機とコイラ間に張力が作用しない鋼板先端部を対象に、温度と形状の計算を行った。計算の前提として、冷却開始前の板は完全にフラットであり熱応力もないとし、FDTの板幅方向温度分布を冷却開始前の初期温度として与えた。また、冷却中に熱応力により鋼板が座屈して凹凸形状として顕在化した場合、計算領域を凸部、凹部、平坦部の3つの領域に分け、凸部は滞留水がないために冷えにくく、逆に凹部は滞留水により冷えやすく、平坦部は平均的な冷却速度で冷却されるという前提を置き、各部に異なる熱伝達率を与えた(図10)。平坦部の熱伝達率には式(7)を用い、4章で述べた先端部の熱伝達率 a_w^{TOP} の変動範囲から凸部と凹部の熱伝達率を決定した。

温度履歴(a)、変態の進行(b)、熱応力(c)、急峻度(d)の計算結果を図11に示す。ここで(b)の潜伏期の消費 Z とは温度 T における変態開始までの潜伏時間 ξ (T)と冷却履歴を用いて式(9)で計算される指標であ

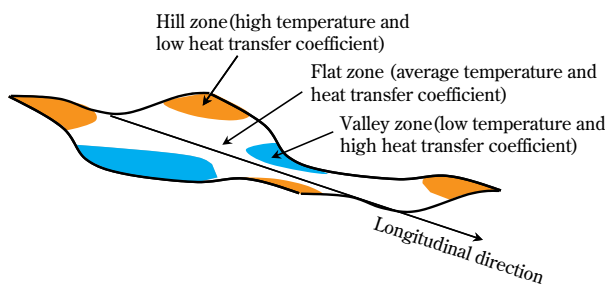
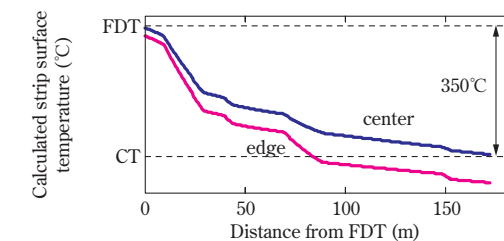
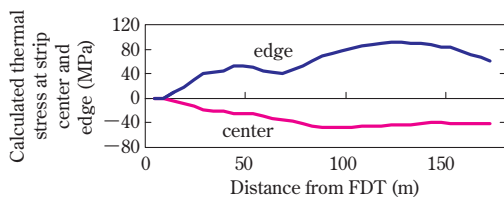


図10 平坦度による冷却特性の差を簡易的に評価するための計算方法
Fig.10 Modeling of dependence of cooling characteristics upon strip flatness



(a) Calculated heat pattern on HRT



(c) Calculated thermal stress

り⁹⁾、潜伏期がすべて消費されたとき($Z=1$)、変態が開始する。

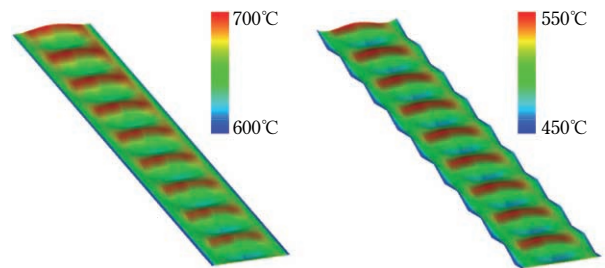
$$Z = \int_{t=0}^{t=T} \frac{1}{\xi(T)} dt = \int_{T=T_0}^{T=T} \frac{1}{\xi(T)} \frac{dT}{dT} dt \dots\dots\dots (9)$$

図12にはHRT上の中程、および出側付近での温度分布の計算結果を示した。冷却開始後に板中央部と板端部の温度差が拡大し、従来の報告^{1)~3)}と同様に、HRT上では板端部で引張り、板幅中央部で圧縮となる応力分布が形成される。そして、鋼板がHRT上の中央付近に達したときに圧縮応力が座屈応力を上回り、板幅中央部が座屈して中伸びが発生している。計算で得られる中伸びは、急峻度にして1.2%程度である。

5.2 鋼板形状の実測結果との比較と考察

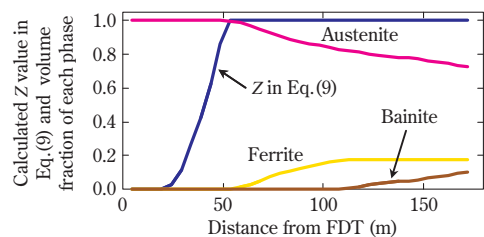
光切断法によって撮影した画像から C_2 を求め、カメラとレーザの位置関係を考慮して C_2 の変動を実寸法に換算して中伸びの平坦度を推定すると、波の高さにして50~60mm程度であった。HRT上での板の搬送速度から計算される波のピッチ(約2~2.5m)より急峻度を求めると2.0~3.0%となり、シミュレーションにより計算される急峻度よりも大きな中伸びがHRT上で観察されていた。

この理由として、
・冷却前の鋼板形状がフラットではなく、中伸びであった

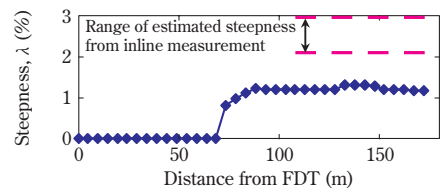


(a) Middle position on HRT (b) Exit position on HRT

図12 HRTの中間位置および出側付近での温度分布の計算結果
Fig.12 Calculated temperature distribution within strip in two different position on HRT



(b) Calculated progress of phase transformation



(d) Strip steepness of strip on HRT (Calculated value ◆, and measured value □)

図11 HRT上での温度履歴、変態の進行、熱応力、急峻度の計算結果
Fig.11 Calculated temperature, thermal stress, and flatness of strip on HRT

- ・凹部滞留水により幅方向だけでなく、板厚方向にも温度分布が発生し、この影響によるひずみあるいは応力に変形を助長したことが想定される。

以上のことから、冷却を安定するためには、圧延形状をフラットあるいは耳波状に制御してHRT上で中伸びの形成を防ぐこと、冷却後の水切りにより板上の滞留水を確実に除去すること、が有効と考えられる。

むすび＝ HRT上での鋼板形状と熱伝達率の関係を調べ、以下の結論を得た。

- ・平坦度の計測手法として、光切断法とTchebycheff級数展開を用いる方法を提案し、HRT上の平坦度はTchebycheff級数の2次の係数 C_2 で評価できることを見出した。
- ・HRT上で中伸び形状となっている場合、鋼板温度が高い遠方バンクでは C_2 と熱伝達率に明瞭な関係は認められず、鋼板温度が低い近接バンクでは C_2 の変動が大きいほど熱伝達率が大きくなることを明らかにした。
- ・HRT上で耳波となっている場合には、温度域によらず C_2 と熱伝達率の間に明瞭な関係が認められないこと

を確認した。

- ・圧延形状が中伸びの場合には、冷却過程で形状が悪化したり、板面上で局所的に遷移沸騰域に移行し冷却が不安定になることがある。この改善には、圧延形状をフラットあるいは耳波に制御すること、水切りの強化により滞留水を確実に除去することが有効と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 吉田 博ほか：鉄と鋼，68-8 (1982)，p.965.
- 2) 明石 透ほか：CAMP-ISIJ, Vol.17 (2004)，p.1034.
- 3) 大貝晴俊ほか：新日鐵技報，379 (2003)，p.43.
- 4) 柳 修介ほか：CAMP-ISIJ, Vol.21 (2008)，p.1216.
- 5) 井口征士ほか：三次元画像計測，(1990)，p.36，昭晃堂.
- 6) 力武常次ほか：物理数学 I, (1990)，p.74，学会誌刊行センター.
- 7) 矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門，(1983)，p.103，培風館.
- 8) 日本鉄鋼協会，特別報告書 No.29：鋼材の強制冷却，(1978)，p.107.
- 9) 須藤 一ほか：鉄鋼材料，(1985)，p.29，丸善.
- 10) 伊藤 庸ほか：鉄と鋼，64 (1978) S806，p.352.
- 11) 大和久重雄：S曲線，(1967)，p81，日刊工業新聞社.
- 12) 日本鉄鋼協会，冷却技術小委員会報告書：鉄鋼製造プロセスにおける冷却技術，(1988)，p.70.