

討13 厚板圧延における鋼板の温度降下

川崎製鉄 千葉製鉄所

鈴木桂一 南谷昭次郎
植田憲治 高橋洋之

1. まえがき

近年各社厚板ミルにおけるCPU自動圧下はプロセスコンピュータおよび圧延理論の発達により製品形状、板厚精度および圧延能率共にほぼ実用化の域に達しつつあるが、その成否を左右する基本的なモデル式のひとつに鋼板の温度降下予測式がある。鋼板の温度降下は鋼板表面と周囲温度との4乗差に比例する輻射、および差に比例する対流または接触熱伝達によるものとされ、表面温度の実測結果より各要因の項の係数を回帰的に求めてCPUプログラム用の簡易式を得るのが一般である。

しかし、板厚の厚い範囲においては鋼板内部と表面との温度差は無視できぬ程大であり、さらにデスケーリングシャワーの使用、ロールとの接触等により複雑に変化するので単に表面温度の実測値のみから上記の係数を適正に定めることは難かしい。本報告においては圧延中の鋼板の表面および内部温度の挙動を差分計算にて近似し、さらに準定常状態を想定した時の表面温度 T_0 を導入して平均温度の変化を推定する方法について検討した。

2. 差分計算による鋼板温度変化の近似

2.1 圧延中の伝熱因子

差分計算に使用した圧延中の各伝熱因子について以下に述べる。

(1) 輻射熱損失 (q_r)

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left\{ (T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right\} \quad (2.1)$$

ここで輻射率 ε は下記の小門⁽¹⁾の式から求めた。

$$\varepsilon = \left\{ \left(\frac{H_0}{H} - 1 \right) \times 0.58 + 0.8 \right\} / \left(\frac{H_0}{H} \right) \quad (2.2)$$

(2) 対流熱損失 (q_c)

$$q_c = \alpha_c (T_s - T_a) \quad (2.3)$$

対流熱損失率 α_c は小門⁽¹⁾によれば7.2 (kcal/m²・hr・°C at 1000°C) であり温度依存性は少ないとのことから全温度域で一様にこの値を採用している。

(3) デスケーリングシャワーによる熱損失 (q_s)

$$q_s = \alpha_s (T_s - T_w) \quad (2.4)$$

デスケーリングシャワー等の熱伝達率については三塚の研究⁽²⁾に詳しいが、この場合の伝熱現象は複雑であり明確な値は定めにくいので経験的にデスケーバイスについては1500 (kcal/m²・hr・°C) ミルデスケーについては粗仕上共1000 (kcal/m²・hr・°C) とした。

(4) 圧延による塑性加工熱 (q_m)

$$q_m = \eta \cdot \frac{1}{A} \cdot K_m \cdot \ln \left(\frac{H_t}{H_{t+\Delta t}} \right) \quad (2.5)$$

塑性加工熱 q_m は板の厚さ方向全域にわたって均一に作用すると考えらる。またこの時の純粋変形仕事量は全材料の温度上昇に費せられると考え熱変換率 $\eta = 1.0$ と設定している。

(5) ロール接触面の摩擦熱(q_F) および接触損失熱

摩擦熱 q_F は平均圧延圧力 P_m (Kg/cm^2)およびロールと材料の相対速度 v_{rm} (m/hr)より下式にて求めた。ここで摩擦係数 $\mu = 0.3$ とし211する。

$$q_F = \frac{1}{A} \cdot \mu \cdot P_m \cdot v_{rm} \quad (2.6)$$

材料およびロールを半無限体と考へれば接触面の境界条件は下式の如く表わすことが出来る(図1)。

$$q_F + k_1 \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = k_2 \frac{\partial (H)}{\partial l} \Big|_{l=0} \quad (2.7)$$

k_1, k_2 : 鋼板, ロールの熱伝導率 ($Kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$)

$\theta, (H)$: 鋼板, ロールの温度 ($^\circ C$)

(2.7)式を展開し、 $\theta_0 = (H)_0$ であることから

$$\theta_0 = (H)_0 = \frac{\Delta l k_1 \theta_1 + \Delta x k_2 (H)_1 + \Delta x \cdot \Delta l q_F}{\Delta l k_1 + \Delta x k_2} \quad (2.8)$$

なお実際の計算の際には物性値の温度依存性を考慮して次式で定義される中,重を用いている。⁽³⁾

$$\phi = \int_0^{\theta} \frac{k_1}{k_{01}} d\theta \quad \Phi = \int_0^{(H)} \frac{k_2}{k_{02}} d(H) \quad (2.9)$$

2.2 差分計算結果

差分近似による温度降下計算結果の一例を図2に示す。この時の計算条件は板分割間隔 $\Delta x = 0.06$ mm 計算時間間隔 $\Delta t = 0.02$ 秒である。計算結果と実測結果との差はほとんど $\pm 15^\circ C$ 以内に入り、差分による近似計算は実際と良い対応を示しているといえる。

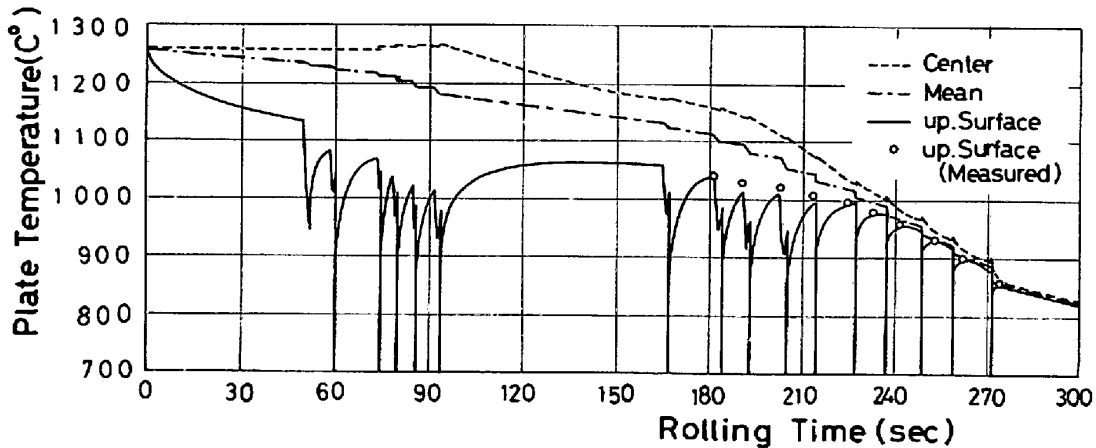


図2. 鋼板温度変化の差分計算結果および実測値
($165 \times 1900 \times 2950 \rightarrow 11.5 \times 3340 \times 24078$)

3. 簡易近似計算

3.1 準定常表面温度 T_s

Fourierの熱伝達方程式を下記(i)~(iv)の仮定および中心と表面の境界条件のもとに解くと鋼板内の温度分布は(3.1)式で表わせる。この時の表面温度 T_s と準定常表面温度と定義する。

(i) 材料の内部に熱源はない。

(ii) 熱伝導率 k , 密度 ρ , および比熱 C は温度に依りて弱い関数である。

(iii) 板巾, 長さ半無限である。

(iv) 板内温度分布と温度降下速度は安定(準定常)状態にあり(20%)は急激な変化はしない。

$$\theta = \frac{q}{H \cdot \rho c} \left\{ \left(\frac{H}{2} \right)^2 - x^2 \right\} + T_{s0} \quad (3.1)$$

q : 表面からの出熱 (Kcal/m²·hr)
 x : 板厚中心からの距離 (m)

ゆえに平均温度 T_M と準定常表面温度 T_{s0} との関係は (3.2) 式で求められる。

$$T_M - T_{s0} = \frac{1}{6} \frac{q}{\rho c} \cdot H \quad (3.2)$$

空冷時の出熱は (2.1) 式 q_r および (2.3) 式 q_c であるから (3.2) 式に代入して空冷時 T_{s0} を求めれば

$$T_{MK} - T_{s0k} = \frac{1}{6} \frac{H}{\rho c} \left\{ \varepsilon \cdot \sigma (T_{s0k}^4 - T_{ak}^4) + \alpha_c (T_{s0k} - T_{ak}) \right\} \quad (3.3)$$

* 添字 k は絶対温度表示を表す。

こゝで $(T_{MK} - T_{s0k}) \ll T_{MK}$ なる関係を利用すれば

$$T_{s0k}^4 = \left\{ T_{MK} - (T_{MK} - T_{s0k}) \right\}^4 = T_{MK}^4 \left\{ 1 - \frac{(T_{MK} - T_{s0k})}{T_{MK}} \right\}^4 \approx T_{MK}^4 \left\{ 1 + 4 \frac{(T_{MK} - T_{s0k})}{T_{MK}} \right\} \quad (3.4)$$

さらに (3.4) 式を (3.3) 式に代入すれば (3.5) 式が得られ T_{MK} から T_{s0k} を求めることが可能になる。

$$T_{s0k} = T_{MK} - \frac{H}{6 \rho c} \left\{ \varepsilon \cdot \sigma (T_{MK}^4 - T_{ak}^4) + \alpha_c (T_{MK} - T_{ak}) \right\} / \left\{ 1 + \frac{H}{6 \rho c} (4 \varepsilon \sigma T_{MK}^3 + \alpha_c) \right\} \quad (3.5)$$

抽出, 圧延, デスケーリング等の後の空冷によって温度分布は急速に安定状態に近づくが, この時の表面温度の漸近線が上記で求めた T_{s0} である。以下の簡易近似計算では表面温度として T_{s0} を利用する。

3.2 各圧延過程における入出熱の近似計算

(1) 空冷時の出熱 (Q_A)

(3.5) 式および (3.2) 式から安定した空冷における出熱 q_{A0} を計算できるが, 空冷時間 t_A の間に T_M の降下によって q_{A0} の小さくなる量 Δq_{A0} は

$$\Delta q_{A0} \approx \varepsilon \cdot \sigma \cdot 4 \Delta T_{s0k} T_{s0k}^3 \approx 4 \cdot q_{A0} \frac{\Delta T_{s0k}}{T_{s0k}} \approx 4 q_{A0} \frac{\Delta T_{MK}}{T_{MK}} \approx 8 q_{A0} \frac{1}{T_{MK}} \frac{q_{A0} t_A}{\rho c H} \quad (3.6)$$

ゆえに空冷時間 t_A の間の出熱 Q_{A0} (Kcal/Kg) は (3.7) 式で近似される。

$$Q_{A0} = \frac{q_{A0} \cdot t_A}{\rho \cdot H} \left(1 - \frac{4 q_{A0} \cdot t_A}{T_{MK} \cdot \rho \cdot c \cdot H} \right) \quad (3.7)$$

ところで実際の状況においては表面温度が急激な変化を受けた後に安定状態に達するには若干の時間を要するので差分計算にて求めた空冷時の出熱 Q_{A0} と (3.7) 式の Q_{A0} とは等しくならない。その関係を示したのが図3であり, この結果から空冷時出熱 Q_A は次式で近似することが出来る。

$$Q_A = \left\{ (a_1 + a_2 \ln \frac{t_A}{H}) \left(1 - \frac{4 q_{A0} \cdot t_A}{T_{MK} \cdot \rho \cdot c \cdot H} \right) \right\} \frac{q_{A0} \cdot t_A}{\rho \cdot H} \quad (3.8)$$

a_1, a_2 : 常数

(2) デスケーリングシヤワーによる損失熱 (Q_s)

表面温度を T_{s0} 一定, 熱伝達率を α_s として (2.4) 式より求めたデスケーリングシヤワー使用時の損失熱 Q_{s0} は表面温度降下の影響を無視することになるので差分計算にて求めた Q_{s0} より一般に大となり, その比率は図4から t_A の関数として近似することが出来る。ゆえに出熱 Q_s (Kcal/Kg) は

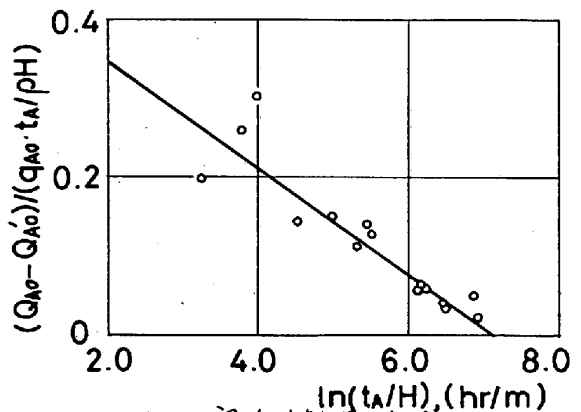


図3. 空冷時熱損失効率

$$Q_s = (b_1 e^{-b_2 t_s} + b_3) d_s t_s (T_{s0} - T_w) \frac{1}{\rho \cdot H} \quad (3.9) \quad \begin{matrix} t_s: \text{シヤワ-時間 (hr)} \\ b_1, b_2, b_3: \text{常数} \end{matrix}$$

(3) 圧延による塑性加工熱 (Q_M)

(2.5)式よりロ-ル噛込みから噛抜けまでのθ_Mを積算すればQ_M(kcal/kg)は下式で求まる。

$$Q_M = \eta \cdot \frac{1}{A} \cdot k_m \left(\frac{H_{in}}{H_{out}} \right) / \rho \quad (3.10) \quad \begin{matrix} H_{in}: \text{噛込板厚 (m)} \\ H_{out}: \text{噛抜板厚 (m)} \end{matrix}$$

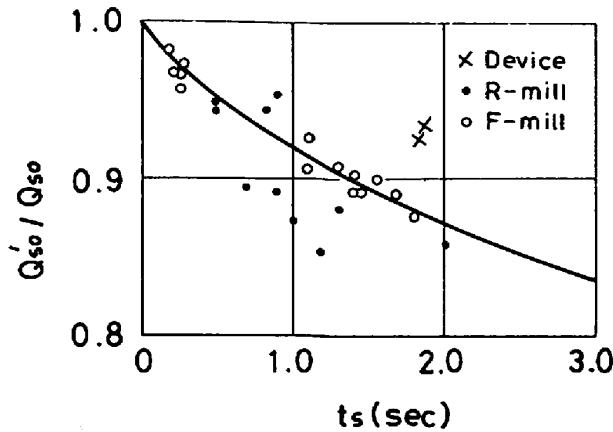


図4. シヤワ-冷却効率

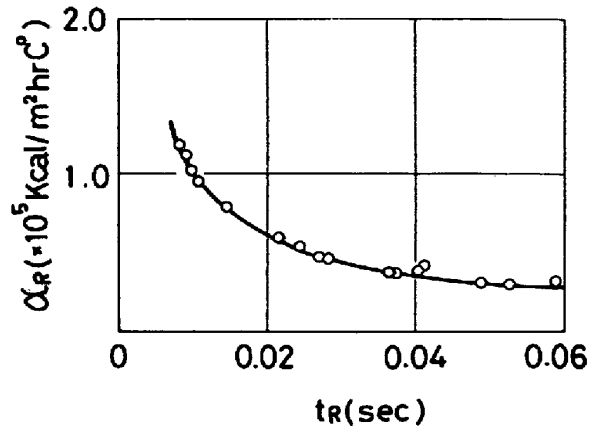


図5. ロ-ル熱伝達率 alpha_R

(4) ロ-ル接触損失熱 (Q_R)

差分計算結果より求めたロ-ル接触時の熱伝達率 alpha_R は Seredynski⁽⁴⁾の数値と良い一致を示す。また alpha_R は接触時間 t_R の関数として表わすことができ Q_R (kcal/kg) は次式で近似できる。

$$Q_R = (C_1 e^{C_2 t_R} + C_3) t_R (T_{s0} - T_R) / \rho \cdot H_{in} \quad (3.11) \quad \begin{matrix} T_R: \text{噛込時ロ-ル温度 (C)} \\ C_1, C_2, C_3: \text{常数} \end{matrix}$$

(5) ロ-ル接触面摩擦熱 (Q_F)

ロ-ルと鋼板との相対速度 v_{rm} は噛込時に v_{rmin} 噛抜時に v_{rmout} とすると

$$v_{rmin} = v_R \left(\xi \frac{H_{out}}{H_{in}} - 1 \right) \quad (3.12)$$

$$v_{rmout} = v_R (\xi - 1) \quad (3.13)$$

ξ: 先進率
v_R: ロ-ル周速 (m/hr)

ここで噛込後 0.6 t_R で相対速度 v_{rm} = 0 となり、かつ v_{rm} は時間に対して1次で変化すると仮定すれば摩擦熱 Q_F (kcal/kg) は (2.6)式より接触弧長 L (m) を用いて次式のように近似できる。

$$Q_F = \frac{1}{A} \cdot \mu \cdot P_m \cdot L \cdot \left\{ \xi \left(0.2 - 0.3 \frac{H_{out}}{H_{in}} \right) + 0.1 \right\} / \rho \left(\frac{H_{in} + H_{out}}{2} \right) \quad (3.14)$$

上式で求めた Q_F は差分計算にて求めた Q_F' に対して平均値で 95%、1σ = 1.7% である。

3.3 簡易近似計算結果

以上のように圧延の各過程における入出熱の近似計算式を用いて鋼板の最終仕上り温度を求めた結果ほとんどが実測値 ± 25°C 以内に入ることを確かめた。

(参考文献)

- (1) 小内 : 塑性加工 vol. 11, No. 118 (1970-11)
- (2) 三塚 : 鉄と鋼 54年 (1968) 14号
- (3) 日本鉄鋼協会: 連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法
- (4) Seredynski: British Steel Coop. No. CE/B/19/70