

$$P_p = V[K + (BYt^2/4 - aK/2)^2 / (2EI)] / 75 \dots\dots\dots (9)$$

特に  $K = \Phi$  について (9) 式を計算すれば次式が得られる。

$$P_{p, K=\Phi} = V B t^2 [Y - Et / (4a)] / (150 \cdot a) \dots (10)$$

また、 $K = 0$  について (9) 式を計算すれば次式が得られる。

$$P_{p, K=0} = V B Y^2 t / (200 \cdot E) \dots\dots\dots (11)$$

IV. 経験との比較

(1) ピンチロールおよびマンドレルモータの所要馬力

(2), (3), (8) および (9) 式はそれぞれつぎのごとく書き改めることができる。

$$P_m = V \cdot B [Et^3 / (12 \cdot a) + a \cdot K'] / (75 \cdot a) \dots (2)'$$

$$P_m = V \cdot B [Y \cdot t^2 / 4 + a \cdot K'] / (75 \cdot a) \dots\dots (3)'$$

$$P_p = V \cdot B [K' + Et^3 / (24a^2)] / 75 \dots\dots\dots (8)'$$

$$P_p = V \cdot B [K' + 6(Y \cdot t^2 / 4 - a \cdot K' / 2)^2 / (Et^3)] / 75 \dots\dots\dots (9)'$$

これらの式から、ピンチロールおよびマンドレルモータの所要馬力は何れの場合でもストリップの速度と巾に比例することがいえる。また、板厚が増加すれば所要馬力が大きくなることが判る。材質に関しては (2)', (3)' および (8)' 式において  $E$  または  $Y$  の値が高い程所要馬力が大きくなる。(9)' 式においても  $E$  の変化する割合が  $Y$  の変化割合の 2 乗以上さらに大きなものでない限り馬力は増大する。以上のことは前報 III-(1) に述べた経験と良く一致している。

(2) ラップロールの操作

捲取るに際して、板が捲付けられている点での張力  $K$  が正である場合はタイトコイルが得られるが、負になる場合はコイルの外表面をなんらかの方法で支えることが必要である。すなわち実作業ではラップロールで支えることとなる。所で、この問題に対する一つの見方として (2) および (3) 式を変形し  $K$  について解くと次式が得られる。

$$K = 75 \cdot P_m / V - BEt^3 / (12a^2) \dots\dots\dots (2)''$$

$$K = 150 \cdot P_m / V - BYt^2 / (2a) \dots\dots\dots (3)''$$

(2)'' および (3)'' 式において、捲取機が与えられた場合でストリップの速度と巾を固定して考える。すなわち  $P_m$ ,  $V$  および  $B$  を固定して考える。この時コイル半径  $a$  が小さいと  $K$  も小さな値となる。いいかえれば捲始めの状態ではコイルをタイトに捲付ける力が小さいといえる。しかもその程度はストリップの材質  $E$  あるいは  $Y$  の値が大きいほど、また板厚が厚くなるほどいちじるしくなるものといえる。このことは、実作業において板厚が厚い場合や板が硬質の場合に捲付後あまり早期にはラップロールを開くことができなかつたりさらに進んで捲取中常にラップロールをコイル外表面に押付けて作業しなければならない状態を示すものである。

(3) 弾性捲取りと塑性捲取り

前報において、コイルは弾性的に捲かれる場合と塑性的に捲かれる場合の 2 種類が考えられることを述べた。そこでこれを裏付ける問題について触れることにする。

前報 (9) および (13) 式より弾性捲取りと塑性捲取りの限界は  $\Phi$  によつて与えられる。いま、前報 (9) 式を書き改めれば  $\Phi$  はつぎのごとく示される。

$$\Phi = Bt^2 [Y - tE / (3a)] / (2a) \dots\dots\dots (12)$$

(12) 式において、 $t/a$  の値は実際設備上  $10^{-3} < (t/a) < 1/30$  程度である。また、通常  $Y$  の値は  $10^7 \text{ kg/m}^2$  台であり、 $E$  の値は  $10^{10} \text{ kg/m}^2$  台である。従つて  $\Phi$  の値は正、負共に起り得る。一方、捲取作業としては実質上  $K \geq 0$  の状態で行われるから、もし  $\Phi \leq 0$  の場合は捲取りは全て塑性的に行われることとなる。 $\Phi > 0$  の場合は  $\Phi > K \geq 0$  の範囲において弾性的に捲取りが行われる可能性を有するが、この条件を満たすものとして、相対的に  $Y$  の値が大きいかまたは  $t/a$  が極端に小さい値で比較的低張力で捲取の場合が考えられる。事実、前者の例としてステンレス鋼のコイルを、また後者の例として本報の対象設備とは異なるけれども冷間圧延後のティンプレートコイルを挙げることができよう。両者はともに捲戻した場合にコイルの時よりもはるかに大きい曲率半径になるかあるいは全く直線状になつてしまう。

V. 馬力の式に関する補足

馬力の式を使用するに際して、まず  $\Phi$  を計算しその結果  $K$  を決定しなければならない。しかし前項で述べたように  $\Phi$  が負値となる場合は實際上  $K = 0$  の時の式を用いることとなる。また、 $\Phi$  が正值となる場合塑性的な捲取条件を見出すには  $K = \Phi$  の時の式を用いることとなる。(4), (5), (10) および (11) 式はその便を考えてあらかじめ算出したものである。

VI. 結 言

ホットストリップミルのダウンコイルに関して、ピンチロールに要する制動馬力およびマンドレルに要する捲取馬力の計算式を導いた。さらに、従来の作業経験に対して前報から続いた解析結果はこれを良く説明できることを示した。報告を終えるに当つて誤謬を恐れる次第であるが、この問題が今後さらに研究される場合例えいくらかでも糸口とならんことを念じるものである。

621.771.237, 016.2.01

(104) ストリップ冷却状態の解析

(ホットストリップミルのホットランテーブルにおけるストリップの冷却に関する研究-I)

八幡製鉄所戸畑製造所 63104

福田宣雄・木村達也・和田浩爾

Analysis of Strip Cooling and Its Results.

(Study of strip cooling on a hot-run table of hot strip mill-1)

Nobuo FUKUDA, Tatsuya KIMURA and Kouji WADA.

I. 結 言

近年ホットストリップ成品の品質、コストに関する要求が厳しくなり、世界的な趨勢として熱間板圧延設備の自動制御化、ひいてはコンピューターコントロール化が急務となつている。ここでは品質面に重要な関係のあるホットランテーブルにおけるストリップの冷却状態を解析し、それを数式化することによつてコンピューターコントロールの一分野を開拓すると共に、ストリップ冷却作業管理の適正化を試みた。

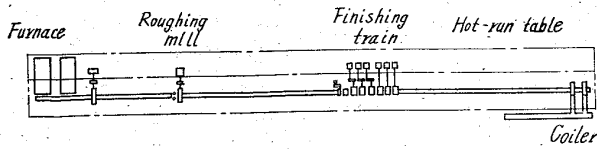


Fig. 1. An example of hot strip mill.

ストリップの冷却は注水による冷却と無注水箇所の輻射による冷却の2つに分けて解析を行なった。

II. ホットストリップミル作業の概要

Fig. 1 にホットストリップミルの一例を示す。材料は加熱炉にて加熱され、粗圧延機で概略の圧延が行なわれ、仕上圧延機によつて所要の寸法形状のものとなる。その後材料はホットランテーブルを通過し、最後に捲取られるが、このホットランテーブルは注水装置を有し、材料はここで所要の捲取温度が得られるように注水冷却される。注水装置はホットランテーブル進行方向に数多くの注水ノズルを有したもので、それらをオンオフ操作あるいは開度調整によつて注水量を変え、捲取温度を調整する。

III. 注水による冷却

Fig. 2 のような矩形断面の板が注水されている場合を考える。いま注水の温度を  $\theta_w$ 、板の表面温度を  $\theta_s$ 、板の平均温度を  $\theta_m$ 、板の比熱を  $c$ 、板の比重を  $\rho$ 、板と水との間の移動熱量を  $Q$ 、板と水との間の熱伝達係数を  $\alpha$ 、板の熱伝導率を  $\lambda$  とすると次式が成立つ。

$$-dQ = 2 \cdot d(\theta_s - \theta_w) \cdot b \cdot l \cdot dt \dots\dots\dots (1)$$

$$dQ = c \cdot b \cdot l \cdot h \cdot \rho \cdot d\theta_m \dots\dots\dots (2)$$

(1)式および(2)式を整理して

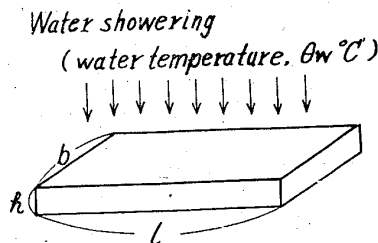


Fig. 2. Strip cooled by water shower.

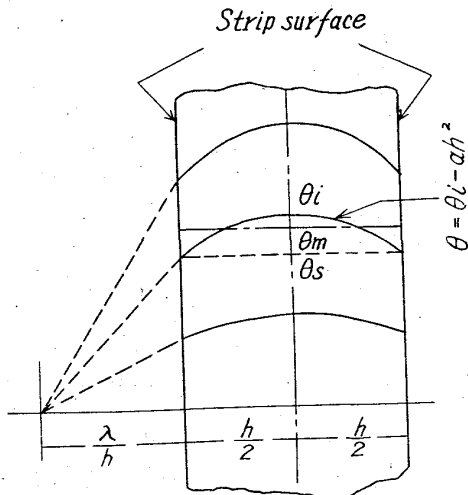


Fig. 3. Temperature distributions within strip.

$d\theta_m / (\theta_s - \theta_w) = -2 \cdot \alpha \cdot dt / (c \cdot \rho \cdot h) \dots\dots\dots (3)$   
 Fig. 3 のごとく、いま板の厚み方向の温度分布を二次曲線で近似すると、伝熱学の理論より板の表面での温度勾配は表面から  $\lambda/\alpha$  離れた処から表面へ引いた直線の勾配にしとしい。ここで二次曲線を、 $\theta = \theta_i - ah^2$  と表わすと ( $\theta_i$  は板内部の最高温度)

$$\begin{cases} \theta_s = (\lambda/\alpha)ah \\ \theta_m = \theta_s + (a/b)h^2 \end{cases}$$

$$\text{従つて } \theta_s = \theta_m / \{1 + (ah)/(6\lambda)\} = \theta_m / D \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{ただし } D = 1 + (ah)/(6\lambda)$$

(4)式を(3)式に代入して

$$d\theta_m / (\theta_m - D\theta_w) = -(2\alpha dt) / (Dc\rho h)$$

材料は時間  $t=t_1$  から  $t=t_2$  の間に温度  $\theta_m = \theta_1$  から  $\theta_m = \theta_2$  まで冷却されるという条件で上式を積分すれば、

$$\ln\{\theta_2 - D\theta_w\} / \{\theta_1 - D\theta_w\} = -2\alpha(t_2 - t_1) / (Dc\rho h)$$

ここで  $t_1 = 0$  にとり、板の速度を  $V$ 、注水長さを  $L$  とすれば、 $t_2 = L/V$  となるから、

$$\ln\{\theta_2 - D\theta_w\} / \{\theta_1 - D\theta_w\} = -(2\alpha) / (Dc\rho h) \cdot L/V \dots\dots\dots (5)$$

あるいは

$$\theta_2 = e^{-2\alpha L / (Dc\rho h V)} (\theta_1 - D\theta_w) + D\theta_w \dots\dots\dots (5)'$$

ここで  $D$  の値について考えてみると、

$$\begin{cases} \lambda = 30 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C (軟鋼の } 600 \sim 800^\circ\text{C における熱伝導率)} \\ \rho = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \\ \alpha = 200 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C (膜沸騰の場合の熱伝達係数)} \end{cases}$$

であるから

$$D = 1 + ah / (6\lambda) = 1 + 200h / (6 \times 30) = 1 + 1.1h / h \text{ in m}$$

ホットストリップミルにおける  $h$  の範囲としては、 $h = 0.0012 \sim 0.0127 \text{ m}$  であるから、 $D_{\max} = 1.014$

従つて  $D = 1$  とおいて実際上差支えない。

故に(5)式および(5)'式は、

$$\ln\{\theta_2 - \theta_w\} / \{\theta_1 - \theta_w\} = -(2\alpha) / (\rho c) \cdot L/hV \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{あるいは } \theta_2 = e^{-2\alpha L / (c\rho h V)} (\theta_1 - \theta_w) + \theta_w \dots\dots\dots (6)'$$

上式で、板と冷却水との間の熱伝達係数  $\alpha$  は、注水圧力によつて定まる定数である。

IV. 輻射による冷却

輻射による熱の移動は次式で表わされる。

$$-dQ = 2bl \cdot c_s \cdot a \{(\theta/100)^4 - (\theta_a/100)^4\} dt \dots (7)$$

ここで、 $c_s$  は Stefan-Boltzmann 定数、 $a$  は emissivity、 $\theta$  は板の表面温度、 $\theta_a$  は板の周囲温度(いずれも絶対温度)である。いま  $\theta_a = 373^\circ\text{K}$  (すなわち  $\theta_a = 100^\circ\text{C}$ ) とし、 $\theta = 500 \sim 800^\circ\text{C}$  の時の  $(\theta_a/\theta)^4$  を計算すると、 $\theta = 500^\circ\text{C}$  で  $(\theta_a/\theta)^4 = 0.054$ 、 $\theta = 800^\circ\text{C}$  で  $(\theta_a/\theta)^4 = 0.015$  となり、いずれも 1 に比して小さな値である。

従つて  $(\theta_a/\theta)^4 = \eta^4 = \text{const.}$  と見做すと、(2)式および(7)式より  $d\theta/\theta^4 = -K_R(1-\eta^4)/h \cdot dt$

$$\text{ただし } K_R = 2acs / (10^8 c\rho)$$

$$\text{積分して } 1/\theta_2^3 = (1-\eta^4) \cdot 3K_R \cdot L / (hV) + 1/\theta_1^3 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\theta_1$  = 無注水箇所のはじめの温度  $^\circ\text{K}$ 、 $\theta_2$  = 無注水箇所の後の温度  $^\circ\text{K}$ 、 $L$  = 無注水長さ、

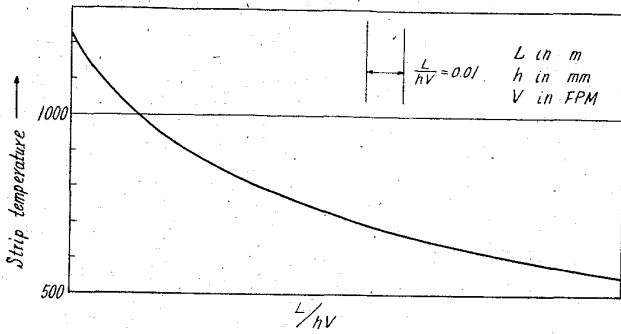


Fig. 4. Strip cooling by radiation.

(8)式に下記の数値を代入して得られた図表がFig. 4である.  $\eta^4=0.04$ ,  $c=0.155 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ ,  $a=0.80$ ,  $c_s=4.88 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{K}(100)^\circ\text{C}$

V. 結 言

ホットランテーブル全長にわたって全力注水した場合あるいは無注水の場合は、(6)式あるいは(8)式によつて捲取温度を求めることができる。この場合、 $\theta_1$ ,  $\theta_1$ は仕上圧延終了温度で、 $\theta_2$ ,  $\theta_2$ は捲取温度である。

ホットランテーブルで前半注水、後半無注水の場合は(6)あるいは(6)'式にて  $\theta_2=\theta_M$  (注水後温度) とおいて、

$$\theta_M = e^{-2\alpha L_1 / (c\rho hV)} (\theta_1 - \theta_W) + \theta_W$$

( $L_1$ : 注水長さ)

より  $\theta_M$  を求め次いで (8) 式にて

$$\theta_2 = \theta_2 - 273 = 1 / \{ (1 - \eta^4) 3K_R L_2 / (hV) + 1 / \theta_M^3 \}^{1/3} - 273$$

より捲取温度  $\theta_2$  が求まる。(  $L_2$ : 無注水長さ) 逆に任意の  $\theta_1$  から所要の捲取温度  $\theta_2$  を求めるための注水長さ  $L_1$  を計算することができる。

621, 771, 237, 016, 2, 01  
 (105) ストリップ冷却状態の解析式の実作業への適用 63/05

(ホットストリップミルのホットランテーブルにおけるストリップの冷却に関する研究—II)  
 八幡製鉄所戸畑製造所 484~486.  
 福田宣雄・木村達也・○和田浩爾

Application of the Strip-Cooling Formula to Actual Operations.

(Study of strip-cooling on a hot-run table of a hot strip mill— I)

Nobuo FUKUDA, Tatsuya KIMURA and Kouji WADA.

I. 結 言

第1報で述べたごとく、われわれはホットランテーブルにおけるストリップの冷却状態を表わす数式を求めることができた。ここではこの数式と実験値との比較および数式の適用例について述べる。なお、実験は八幡製鉄(株)戸畑製造所、第2熱延工場において行なつたものである。

II. 数式と実験値との比較

まず、第2熱延工場のホットランテーブル注水装置について説明すると、注水長さは80mで、これは8コのセクションに分けられている。通常各セクションはそれぞれ一定の注水圧力に設定されており、捲取温度の調整は諸条件に応じて適当にいくつかのセクションを撰択し、オンオフ操作によつて行なつている。

捲取温度  $\theta_2$  とそれに影響する諸要因の関係は、式(6)および式(8)(いずれも第1報参照)で与えられ、熱伝達係数  $\alpha$  以外は一定数値として取扱うるものであるかまたは、測定することによつて容易に求め得るが、 $\alpha$  は注水圧力によつて定まる値である。

従つて本実験は、注水圧力と  $\alpha$  の関係を求めること、および注水圧力を一定にした場合(すなわち  $\alpha$  一定)に理論式が実験値とどの程度の精度で一致するかを求めることにある。現状では全セクションを同一の注水圧力に設定して各種サイズの板についての実験を数多く行なうことは困難であつたので、注水圧力最高(圧力=10kg/cm<sup>2</sup>)の場合と注水圧力4.5kg/cm<sup>2</sup>の2つの場合について実験した。

Table 1に実験値および実験を行なつたときの諸条件を代入して数式より求めた計算値を示す。

Table 1を図示したのが Fig. 1 である。

Table 1における  $K$  の値は (6)' 式(第1報参照)において注水長さ  $L$  を注水セクション数で表示し、板厚を mm, ストリップの速度を fpm で表わし、 $c=0.15 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ ,  $\rho=7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  を代入したときの  $2\alpha/c\rho (=K)$  である。

最高注水圧力の場合と注水圧力4.5kg/cm<sup>2</sup>の場合のそれぞれの  $K$  の値を  $\alpha$  に換算すると

$$\begin{aligned} \text{注水圧力 } 10 \text{ kg/cm}^2 & \quad \alpha = 148 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \\ \text{注水圧力 } 4.5 \text{ kg/cm}^2 & \quad \alpha = 97 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

となり、純粋膜沸騰時の  $\alpha$  の値より幾分低目となるが、

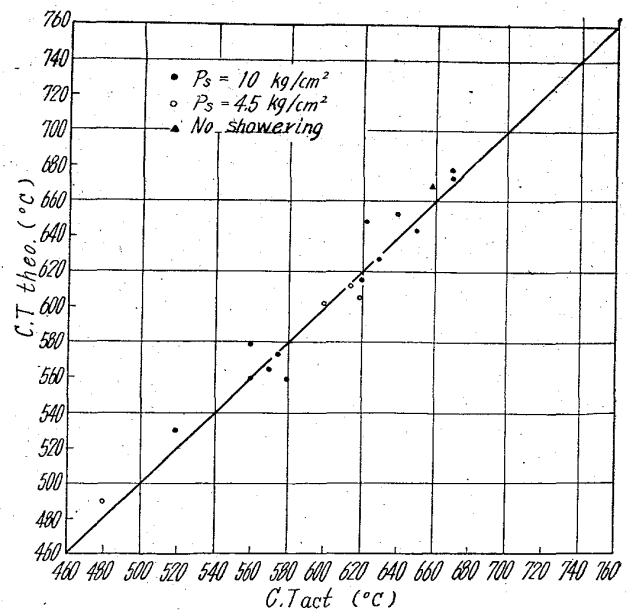


Fig. 1. Comparison of the actual coiling temperature with the calculated temperature.