

3種の連続鋼片加熱炉におけるスキッドマークの伝熱計算

Calculation of Heat Transfer on Skid Marks in the Three Types
of Continuous Reheating Furnaces

濤 崎 忍*

Shinobu Tosaki

香 月 正 人**

Masato Katsuki

武 田 利 弍***

Toshikazu Takeda

篠 原 虔 章****

Yoshiaki Shinohara

Synopsis :

The occurrence of skid marks on products while they are in continuous reheating furnaces is one of the important problems, having on the product's quality and the heating capacity. Recently, reheating furnaces of walking beam type and pusher type with hot skid are generally employed more than the other types. In this investigation, skid marks in the three types of continuous reheating furnaces (walking beam type, pusher type with hot skid and pusher type with soaking hearth) are studied to see by calculation of heat transfer to what extent the slabs may be marked. The characteristic of skid marks in each furnace is clarified by these calculations, and several adequate plans are considered for the purpose of diminishing the skid marks.

I. 緒 言

大容量の連続鋼片加熱炉では、加熱能力の増大をはかるために、スキッドと呼ばれる水冷のパイプまたはビームの上に被加熱鋼材をのせて上下面から加熱する。したがって炉内においてこのスキッドに接触した部分は、他に比較して温度が低くスキッドマークと呼ばれるマークがつき加熱能力や成品の品質にも影響を与える。このスキッドマークをいかに解消するか、またいかにつけないで加熱するかについては、加熱炉の型式や、被加熱

鋼材の炉内での移送方法も含めて種々研究されてきた。最近、従来の均熱炉床をもったプッシャー式の加熱炉から、ホットスキッドを有するプッシャー式またはウォーキングビーム式の加熱炉が多く採用されるようになった。ホットスキッドは高温で耐摩耗性を有する金属 (UMCO 50, 50%Co, 30%Ni) が開発されて可能となったもので、水冷パイプとスライドバーとの間にセラミックの断熱材を用い、スライドバーを高温にしてスキッドマークを少なくするものである。またウォーキングビーム式は水冷の移動ビームと固定ビームとに被加熱鋼材を交互にのせて炉内を移動することにより

* 水島製鉄所第一圧延部部長

*** 水島製鉄所第二圧延部熱間圧延課課長

** 水島製鉄所動力部副部長

**** 水島製鉄所動力部燃料課課長

スキッドマークを少くしようとするものである。これらはそれぞれ一長一短があり、加熱炉の選定に当たっていつも問題となる。

ここに従来の均熱炉床を有するプッシュヤードとホットスキッドを有するプッシュヤードおよびウォーキングビーム式の3種の加熱炉におけるスキッドマークについて伝熱計算を行ない比較検討したので紹介する。

2. 伝熱計算の基本式

スラブのような平板のスキッドマークを計算の対象とするので、2次元非定常熱伝導の偏微分方程式を差分近似により解くものとする。なお、ここではスラブの昇温過程よりも均熱帯におけるスキッドマークを計算の対象とするので、鋼材の熱伝導率、比熱、密度は一定として計算するものとする。

2次元非定常熱伝導の偏微分方程式は次式のごとくである。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{K}{C \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

- θ : 温度
- t : 時間
- K : 熱伝導率
- C : 比熱
- ρ : 密度
- x, y : 座標

これを差分近似で解くために次の関係式を用いる。

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \approx \frac{\Delta^2 \theta}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{(\Delta x)^2} \left\{ \theta_{(x+\Delta x, y, t)} - 2\theta_{(x, y, t)} + \theta_{(x-\Delta x, y, t)} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \approx \frac{\Delta^2 \theta}{(\Delta y)^2} = \frac{1}{(\Delta y)^2} \left\{ \theta_{(x, y+\Delta y, t)} - 2\theta_{(x, y, t)} + \theta_{(x, y-\Delta y, t)} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \approx \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \left\{ \theta_{(x, y, t+\Delta t)} - \theta_{(x, y, t)} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

以上(2), (3), (4)式を(1)式に代入し整理すると

$\Delta x \approx \Delta y$ のとき

$$\theta_{(x, y, t+\Delta t)} = \frac{\Delta t K}{(\Delta x)^2 C \cdot \rho} \left\{ \theta_{(x+\Delta x, y, t)} - 2\theta_{(x, y, t)} + \theta_{(x-\Delta x, y, t)} \right\} + \frac{\Delta t K}{(\Delta y)^2 C \cdot \rho} \left\{ \theta_{(x, y+\Delta y, t)} - 2\theta_{(x, y, t)} + \theta_{(x, y-\Delta y, t)} \right\} + \theta_{(x, y, t)} \dots\dots\dots (5)$$

$\Delta x = \Delta y = h$ としたとき

$$\theta_{(x, y, t+\Delta t)} = \frac{\Delta t K}{h^2 C \cdot \rho} \left\{ \theta_{(x+h, y, t)} + \theta_{(x-h, y, t)} + \theta_{(x, y+h, t)} + \theta_{(x, y-h, t)} - 4\theta_{(x, y, t)} \right\} + \theta_{(x, y, t)} \dots\dots\dots (6)$$

(5), (6)式を得る。図1に示したごとく網目格子点の温度 $\theta_{(x, y, t)}$ の Δt 時間後の温度 $\theta_{(x, y, t+\Delta t)}$ は、(5), (6)式により求めることができる。

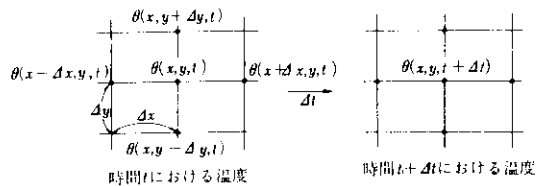


図1 網目格子点の温度

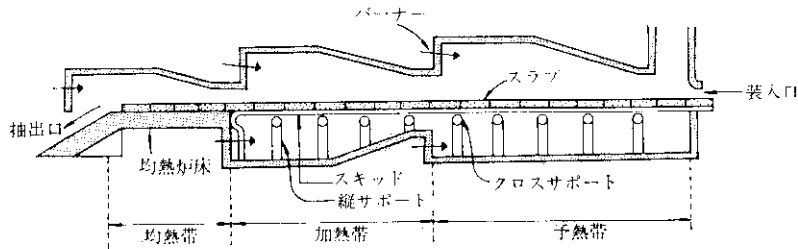


図2 均熱炉床を有するプッシュヤード式加熱炉の例

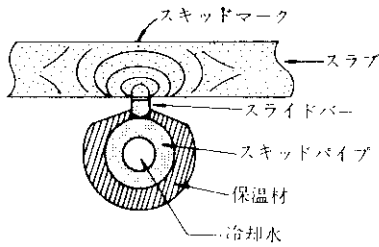


図3 予熱帯、加熱帯におけるスキッドとスラブの状態

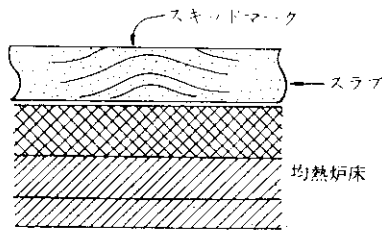


図4 均熱帯におけるスラブの状態

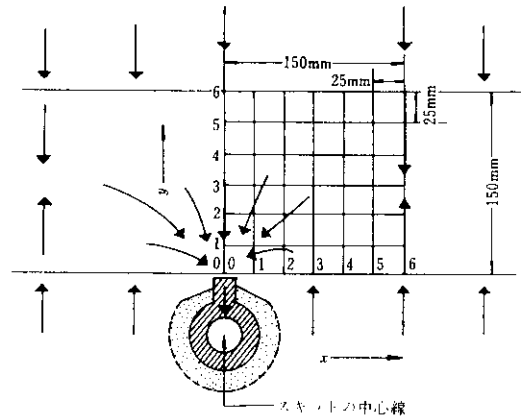


図5 網目の区分 (→印は熱の流れを示す)

3. 均熱炉床を有するプッシャー式加熱炉のスキッドマーク

3.1 炉の概略

この炉の概略を 図 2 に示したが、予熱帯、加熱帯では、水冷したスキッドに直接スラブが載るので、この部分は加熱が遅れかなりつよいスキッドマークがつく。しかし均熱帯に移ってからは、耐火煉瓦で構成された炉床に載るので、スラブ内の熱拡散によりスキッドマークは次第に緩和される。予熱帯、加熱帯のスキッドにスラブが載った状態を 図 3 に、均熱帯における状態を 図 4 に示した。

3.2 スキッドマークの計算方法

3.2.1 網目の区分と定数

厚み 150mm のスラブのスキッドマークについて計算するものとし、計算する部分を 図 5 のような網目に区分する。スキッドマークは、スキッドの中心を軸に対称と考えてよいので半分について計算する。スキッドは 図 5 中(0, 0)点に接

触するものとし、また網目の区分は等間隔で $\Delta x = \Delta y = h$ とする。計算に必要な定数は次のようである。

炉内燃焼ガス温度 T : 上下予熱帯、加熱帯1350°C, 均熱帯1300°C

総括熱吸収率 ϕ_{CG} : 0.5(炉床負荷750kg/m²h程度の加熱炉を想定)

スラブ初期温度 : 30°C

スキッド冷却水温度: 30°C

スラブ厚み : 150mm

網目の区分間隔 $\Delta x = \Delta y = h : 25\text{mm}$

スキッドパイプとスラブの接触幅: 25mm

スラブ下面とスキッド内面との距離 l : 45mm

スラブとスキッドの熱伝導率 K : 25kcal/mh°C (0.06% C鋼)

比熱 C : 0.16kcal/kg°C (同上)

比重量 ρ : 7,750kg/m³ (同上)

計算時間間隔 Δt : 4.5sec

なお加熱時間は、網目格子点(6, 6)の温度 $\theta_{(6,6)}$ が1220°Cになるまでとし、その後は均熱帯炉床に載るものとした。

3.2.2 境界条件

スラブの上下面 $(x, 0)$, $(x, 6)$ は放射伝熱により加熱されるものとする

(1) $1 \leq x \leq 5, y = 0$

$$\theta_{(x,y-h,t)} = \theta_{(x,y+h,t)} + \frac{2h}{K} \times E \dots\dots\dots(7)$$

ここでEは放射伝熱量でステファンボルツマンの式から

$$E = 4.88 \cdot \phi_{CC} \cdot \left\{ \left(\frac{T+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{(x,y,t)}+273}{100} \right)^4 \right\}$$

(2) $1 \leq x \leq 5, y = 6$

$$\theta_{(x,y+h,t)} = \theta_{(x,y-h,t)} + \frac{2h}{K} \times E \dots\dots\dots(8)$$

スキッドライン上では(0, y)を軸に温度分布は左右対称とする

(1) $x = 0, 1 \leq y \leq 5$

$$\theta_{(x-h,y,t)} = \theta_{(x+h,y,t)} \dots\dots\dots(9)$$

(2) $x = 0, y = 6$

$$\left. \begin{aligned} \theta_{(x-h,y,t)} &= \theta_{(x+h,y,t)} \\ \theta_{(x,y+h,t)} &= \theta_{(x,y-h,t)} + \frac{2h}{K} \times E \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

(6, y)ではx軸方向での温度勾配はないものとする

(1) $x = 6, 1 \leq y \leq 5$

$$\theta_{(x+h,y,t)} = \theta_{(x,y,t)} \dots\dots\dots(11)$$

(2) $x = 6, y = 0$

$$\left. \begin{aligned} \theta_{(x+h,y,t)} &= \theta_{(x,y,t)} \\ \theta_{(x,y-h,t)} &= \theta_{(x,y+h,t)} + \frac{2h}{K} \times E \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

(3) $x = 6, y = 6$

$$\left. \begin{aligned} \theta_{(x+h,y,t)} &= \theta_{(x,y,t)} \\ \theta_{(x,y+h,t)} &= \theta_{(x,y-h,t)} + \frac{2h}{K} \times E \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

スキッドが接触する(0, 0)点では、熱伝導により冷却水へ熱が伝わるものとする

$$\left. \begin{aligned} \theta_{(x-h,y,t)} &= \theta_{(x+h,y,t)} \\ \theta_{(x,y-h,t)} &= \theta_{(x,y+h,t)} - \frac{2h}{K} (\theta_{(x,y,t)} - 30) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

均熱炉床に載ってからは、スラブ下面(x, 0)と均熱炉床とは断熱されるものとする

$$\theta_{(x,y-h,t)} = \theta_{(x,y,t)} \dots\dots\dots(15)$$

3.3 計算結果

予熱帯から均熱帯終りまでのスラブ昇温曲線を図6に、加熱帯終りおよび均熱帯終りのスラブ断面の温度分布を図7, 図8に示した。なおここでは、スラブ表面温度 θ_{66} 、中心温度 θ_{63} 、スキッド部温度 θ_{60} とし、スキッド部の強さを表わすための参考値として、スキッド部の平均値 $\sum_{i=0}^6 \theta_{6i} / 7$ をとってみた。このタイプの加熱炉では、均熱帯炉床に載ってから、スラブ内の熱拡散によ

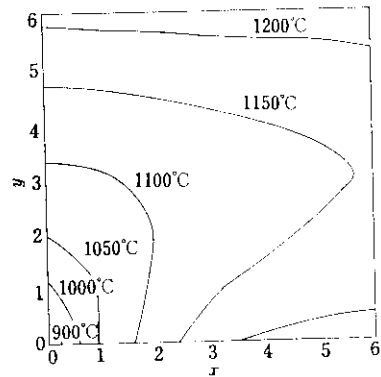


図7 加熱帯終りの温度分布

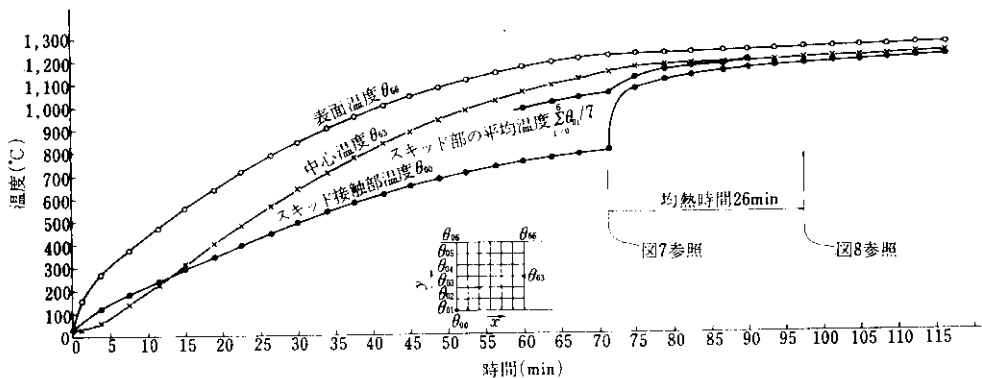


図6 均熱炉床を有するプッシャー式加熱炉における昇温曲線

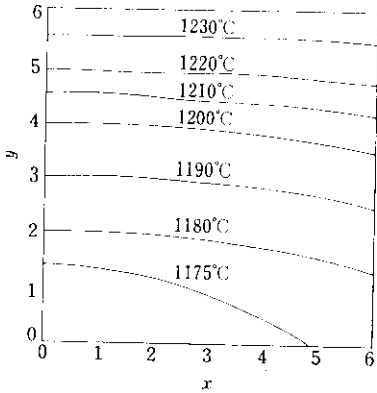


図 8 均熱帯終りの温度分布 (均熱時間26min)

り急速にスキッドマークが消えて行くようすをよく示している。

4. ウォーキングビーム式加熱炉のスキッドマーク

4.1 炉の概略

この炉の一例を 図 9 に示したが、固定スキッドと移動ビームが全炉長にわたって設置されていて均熱炉床はない。スラブはこの固定スキッドと移動ビームとに交互に載りながら炉内を移動するので、スキッドマークは少くなるものと期待される。炉内におけるスラブと固定スキッドおよび移動ビームとの状態を 図 10 に示した。この計算の対象とした炉の移動ビームの運動サイクルは、上昇15sec、送り7.5sec、下降15sec、戻り7.5secで1サイクル45secである。図 11 を参照されたい。したがってどちらかのスキッドに着目するなら

ば、スラブと接触している時間も離れている時間も 22.5sec ずつである。なおこのサイクルは装入スラブの寸法により変えることができるが、この計算では装入から抽出まで終始同一サイクルとする。

4.2 計算方法と条件

4.2.1 網目の区分と定数

厚み 150mm のスラブについて計算するものとし、計算の対象とする部分は、固定スキッドまたは移動ビームのいずれかに着目すれば、3章におけるものと全く同一とすることができる。すなわち固定スキッドまたは移動ビームとスラブの関係は 図 3 と同様で、網目の区分も 図 5 と同じと

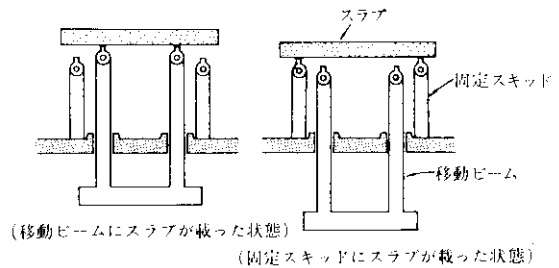


図 10 炉内におけるスラブの状態

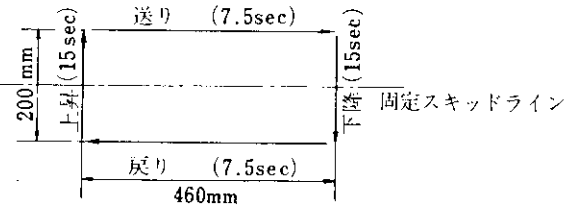


図 11 移動ビームの運動サイクル

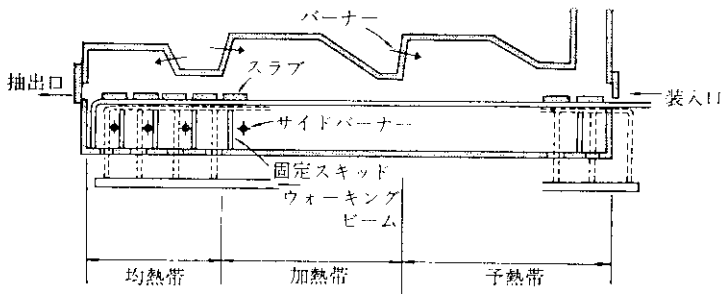


図 9 ウォーキングビーム式加熱炉の例

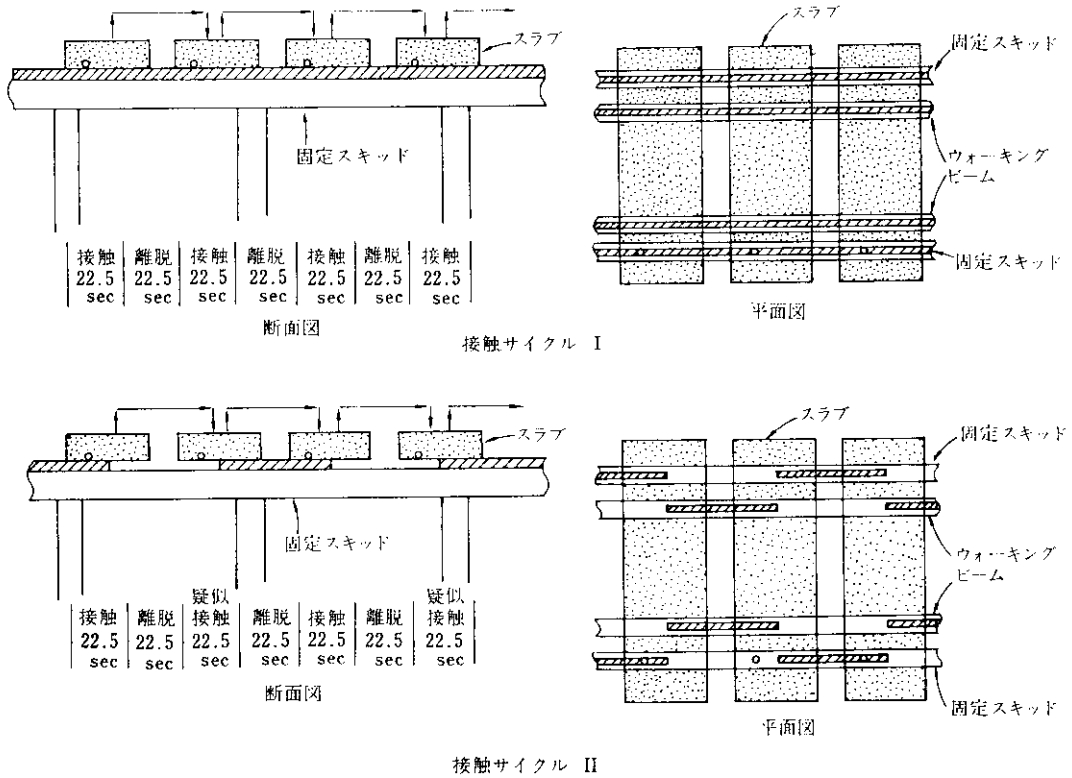


図 12 2種の接触サイクル

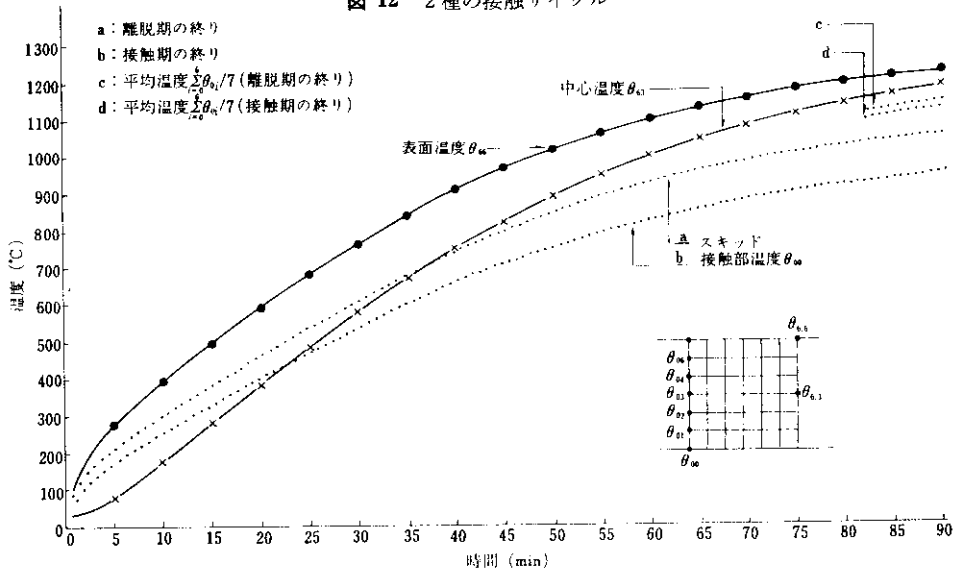


図 13 スラブ昇温曲線

する。スキッドとスラブの接触サイクルは、スキッドの接触する部分の構造を変えることによって種々かわるが、ここでは次の2種の接触サイクルについて計算を行なうことにする。

接触サイクル (I) 接触→離脱→接触
 接触サイクル (II) 接触→離脱→疑似接触→離脱→接触
 この2種の接触サイクルについて 図 12 に示し

た。また計算に必要な定数は、炉内燃焼ガス温度 T を 1300°C (予熱帯, 加熱帯, 均熱帯ともに) とした以外は、すべて 3.2.1 に示した定数と同じ値を使用した。

4.2.2 境界条件

3.2.2, に示した境界条件とほぼ同じであるが、変えなければならないところは、スキッドに接触する点 $x = 0, y = 0$ における境界条件である。

(1) 接触サイクル I

i) スキッドに接触している場合

これは 3.2.2 の(14)式と同じである。

ii) スキッドから離れた場合

放射伝熱により加熱されるものとする

$$\left. \begin{aligned} \theta_{(x-h,y,t)} &= \theta_{(x+h,y,t)} \\ \theta_{(x,y-h,t)} &= \theta_{(x,y+h,t)} + \frac{2h}{K} \times E \end{aligned} \right\} \dots\dots(16)$$

(2) 接触サイクル II

接触サイクル I の i), ii) の条件に、疑似接触の場合の条件が追加される。この場合放射伝熱による加熱は余り期待できないので断熱される程度と考えれば

$$\theta_{(x,y-h,t)} = \theta_{(x,y,t)} \dots\dots(17)$$

4.3 計算結果

(1) 接触サイクル I の計算結果

図 13 に予熱帯から均熱帯終りまでのスラブの昇温曲線を、そして均熱帯の終りの拡大図を図 14 に、またスキッドの離脱期の終りおよび接触期の終りでのスラブ断面の温度分布を図 15, 16 に示した。網目格子点のどの温度をとって曲線にしたかは、図中にも示しているが 3 章のとり方と全く同じである。スキッドが接触したり離れたることによる θ_{00} の変化がよく出ている。

(2) 接触サイクル II の計算結果

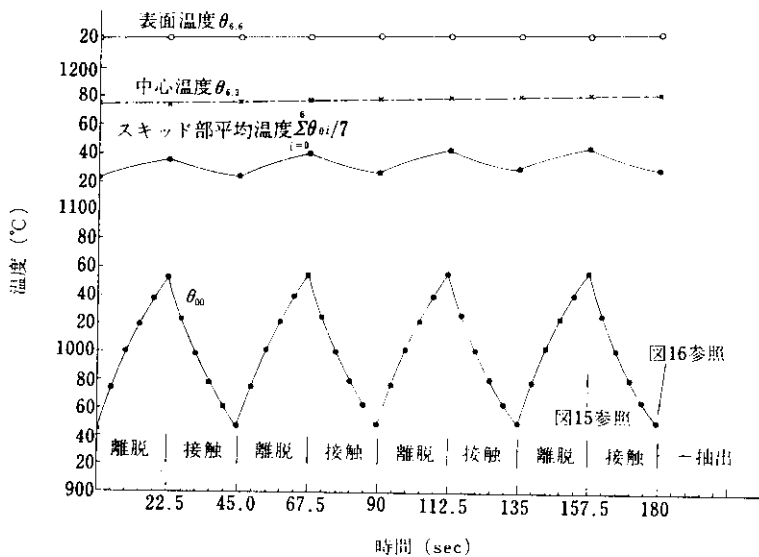


図 14 抽出前の温度曲線 (接触サイクル I)

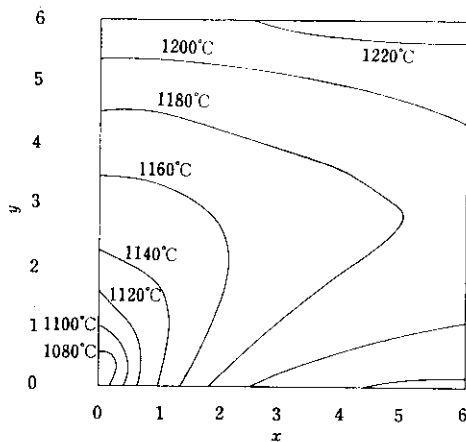


図 15 均熱帯での離脱期終りの温度分布

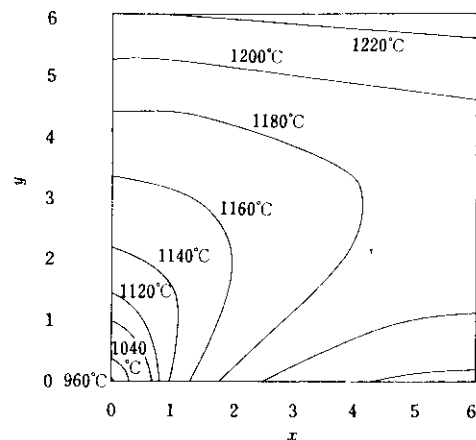


図 16 均熱帯での接触終りの温度分布

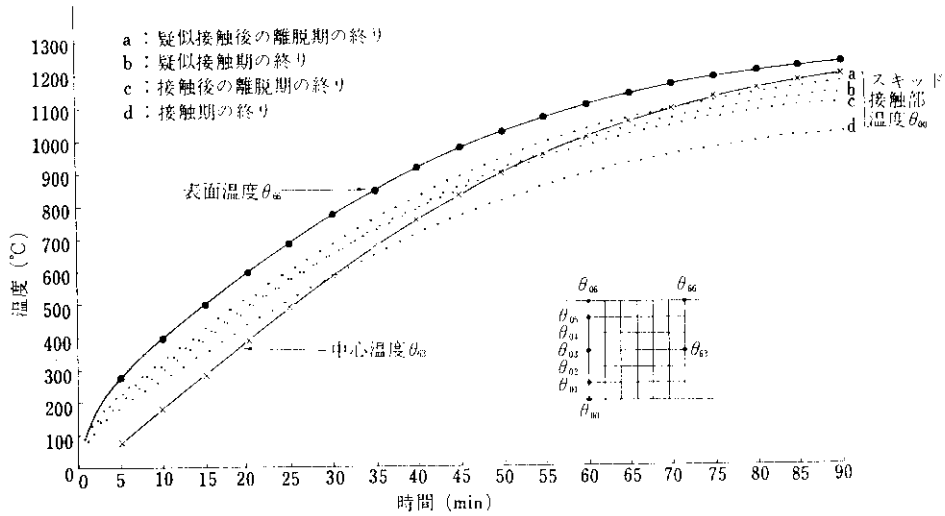


図 17 スラブ昇温曲線 (接触サイクル I)

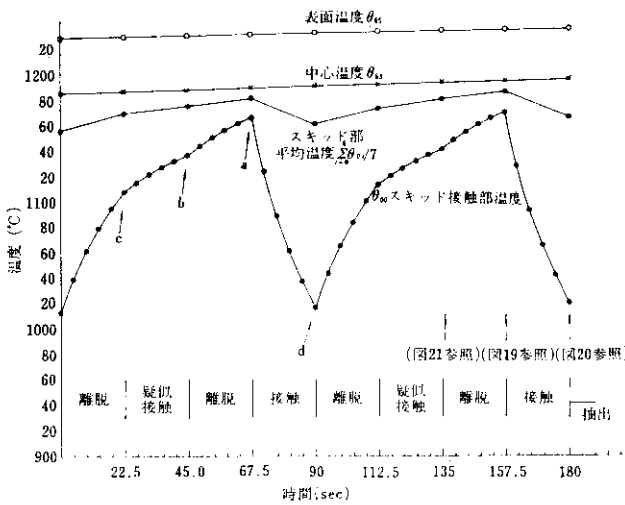


図 18 抽出 3 min 前の温度曲線 (接触サイクル II)

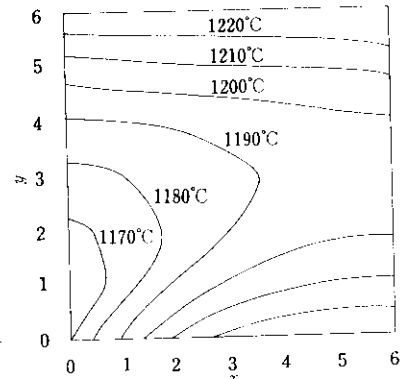


図 19 離脱期終りでの温度分布

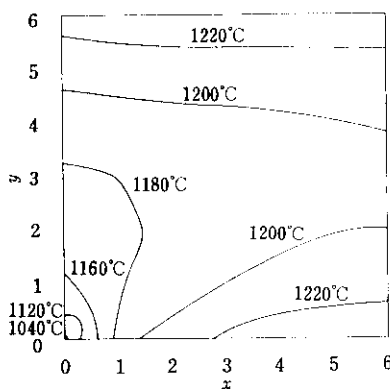


図 20 接触期終りでの温度分布

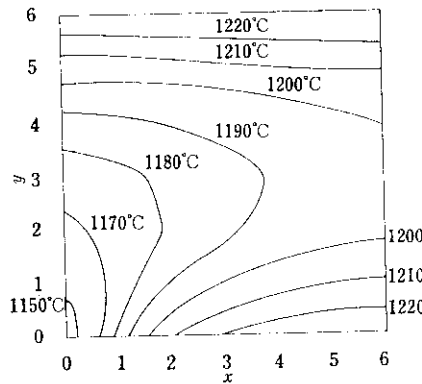


図 21 疑似接触期終りでの温度分布

図 17 にスラブの昇温曲線, 図 18 に均熱帯終りの拡大図を示した。そしてまたスキッドの離脱期の終り, 接触期の終り, 疑似接触期の終りでの温度分布を, 図 19, 図 20, 図 21 に示した。スキッドの接触サイクルの中に疑似接触を組み入

れることによりスキッドマークは少くなることがわかる。

5. ホットスキッドを有する加熱炉のスキッドマーク

5.1 炉の概略

この炉はブッシャー式であるが、水冷パイプとスライドバーとの間に断熱材を入れてスライドバーを高温にしてスキッドマークを少なくすることができるので、均熱炉床はない。図 22 に計算の対象とするホットスキッドを有する加熱炉の概略を示した。ホットスキッドは予熱帯から均熱帯まで全炉長にわたって用いることもできるが、この炉は、予熱帯は従来の型式のものであり、加熱帯はホットスキッド材は用いるが断熱材を入れないセミホットスキッドで、均熱帯だけに完全なホットスキッドを用いている。各帯におけるスキッドの概略を 図 23 に示した。

5.2 計算方法と条件

5.2.1 網目の区分と定数

厚み 255mm のスラブについて計算するものとし、計算の対象はホットスキッドがあるためスキッド部も含めて行なうことにした。スラブの計算部分は 255×600 の範囲で、スキッド部については網目に区分しやすいように、形状を簡略化した。網目の区分はスラブとスキッドおよび x 軸方向、 y 軸方向で区分間隔 Δx , Δy を変えた。したがって計算式は(5)式を使用する。図 24 に網目の区分状況を示した。なお各帯のスキッドには、予熱帯から順に A, B, C の記号をつけ各数値を区別するためにサフィックスとしても使用することにした。スラブがスキッドと接触する点は、スキッドのスライドバーおよびスライダの幅によって変えた。予熱帯では、(0, 0), (1, 0), 加熱帯では(0, 0), (1, 0), (2, 0), 均熱帯では(0, 0), (1, 0), (2, 0), (3, 0)点で接触するものとした。

計算に用いた定数を次に示した。

炉内燃焼ガス温度 T : 予熱帯 1220°C , 加熱帯 1320°C , 均熱帯 1300°C

総括熱吸収率 ϕ_{CG} : スラブ上面, スキッドに対して 0.8, スラブ下面 0.6
(炉床負荷 $800\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$ 程度の加熱炉を想定, 下面はス

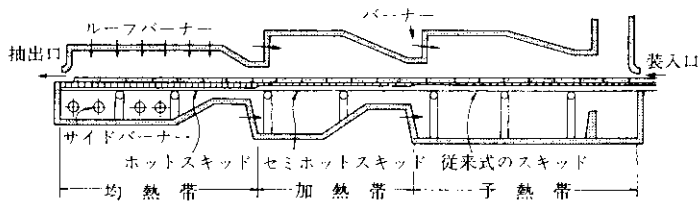


図 22 ホットスキッド有するブッシャー式の加熱炉の例

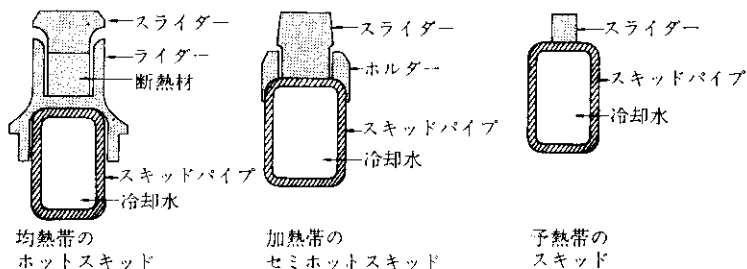


図 23 各帯におけるスキッド

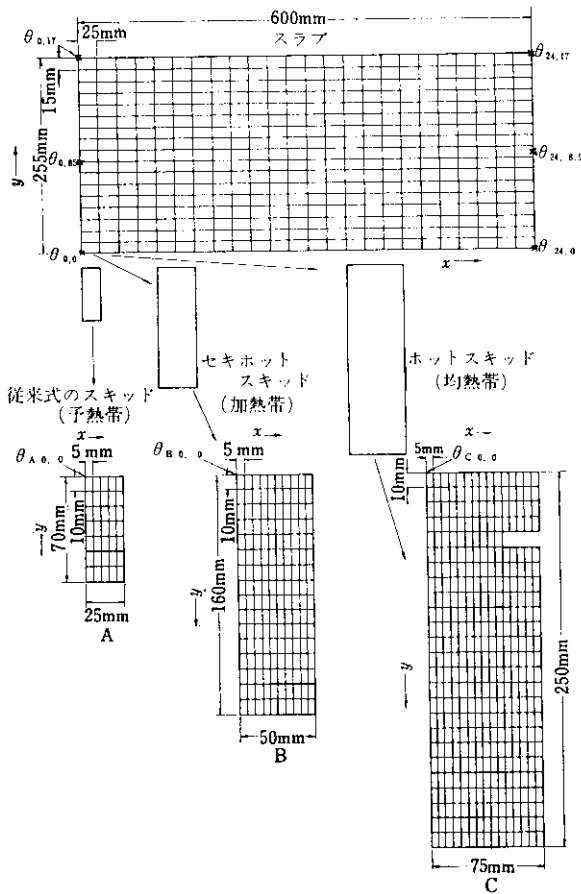


図 24 スラブとスキッドの網目区分

スキッドの影響を考慮して小さめとした)

スラブの初期温度: 30°C

スキッドの初期温度: 予熱帯 $\theta_{A,x,y} = 65^{\circ}\text{C}$

加熱帯 $\theta_{B,x,16} = 65^{\circ}\text{C}$,
 $\theta_{B,x,0} = 600^{\circ}\text{C}$ とし y 軸方向に直線的な温度勾配があるものとした。

均熱帯 $\theta_{C,x,25} = 65^{\circ}\text{C}$,
 $\theta_{C,x,0} = 800^{\circ}\text{C}$ とし y 軸方向に直線的な温度勾配があるものとした。

スキッド冷却水の温度: 60°C

冷却水とスキッドパイプとの熱伝達係数:

$$2000\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$$

熱伝導率 K : ①スラブ, 予熱帯スライダバー,

およびスキッドパイプ $25\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ (0.06% C鋼)

②各帯のスライダバー $8.0\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ (UMCO 50)

③ホットスキッド充填断熱材 $2.68\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ (耐火プラスチック)

比熱 C : ①について $0.16\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$

(0.06% C鋼)

② " $0.19\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$

(UMCO-50)

③ " $0.26\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$

(耐火プラスチック)

比重 ρ : ①について $7,750\text{kg}/\text{m}^3$

② " $7,750\text{kg}/\text{m}^3$

③ " $3,000\text{kg}/\text{m}^3$

網目の区分間隔: スラブについて $\Delta x = 25\text{mm}$,

$$\Delta y = 15\text{mm}$$

スキッドについて $\Delta x = 5\text{mm}$,

$$\Delta y = 10\text{mm}$$

計算時間間隔: $\Delta t = 1.8\text{sec}$

在炉時間: 2.5h

5.2.2 境界条件

境界条件についての主な考え方を以下に示した。

(1) スラブについて

i) スラブの上下面 $(x, 0)$, $(x, 17)$ は放射伝熱により加熱される。

ii) スキッド上の $(0, y)$ では、これを軸に温度分布は左右対称とする。

iii) $(24, y)$ では x 軸方向での熱の流れはないものとする。

iv) スラブとスキッドのスライダバーとの接触抵抗は 0.8 とする (接触幅が広がるので接触抵抗を考慮した)。

(2) スキッドについて

i) 炉内にさらされる部分は、スラブの上下面と同様に放射伝熱により加熱されるものとする。

ii) 互に接触する面での接触抵抗は 0.8 とした。

iii) スキッドパイプと冷却水との伝熱は、熱伝達係数 $2000\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ で行なわれるものとする。

5.3 計算結果

図 25 に予熱帯から均熱帯終りまでのスラブの昇温曲線とスキッドのスライダー上面の温度を示した。また予熱帯終りのスラブ断面の温度分布を図 26, 加熱帯終りのそれを図 27, 均熱帯終りのそれを図 28に示した。スキッドのスライダー

算により求めたが、それぞれの炉の特徴がその結果に示されている。

均熱炉床を有するプッシュャー式加熱炉では、加熱帯終りでかなり強いスキッドマークがついているが、均熱炉床に載ってからは、スラブ内の熱拡散により急速に解消へ向う。しかしある時間を過

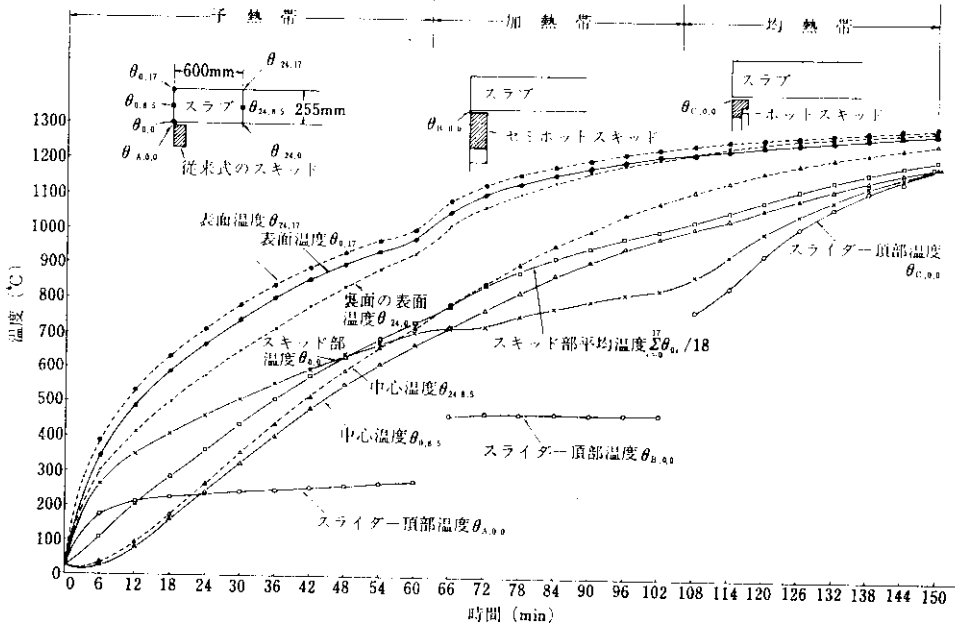


図 25 スラブの昇温曲線とスキッドのスライダーの温度

上面の温度を見てみると、予熱帯、加熱帯では冷却水の影響を受けて温度が低い、均熱帯ではスラブの温度に近くホットスキッドの効果を表わしている。なお予熱帯62min, 加熱帯43min, 均熱帯45minで計2.5hの在炉であった。

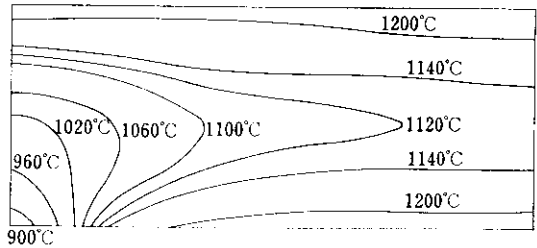


図 27 加熱帯終りにおけるスラブ内部の温度分布

6. 比較検討

各種加熱炉におけるスキッドマークについて計

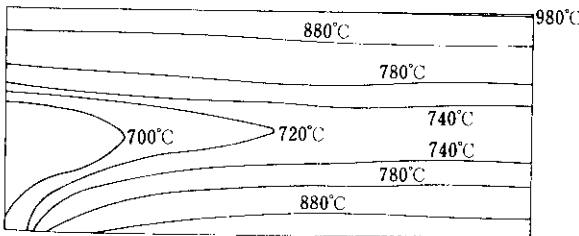


図 26 予熱帯終りにおけるスラブ内部の温度分布

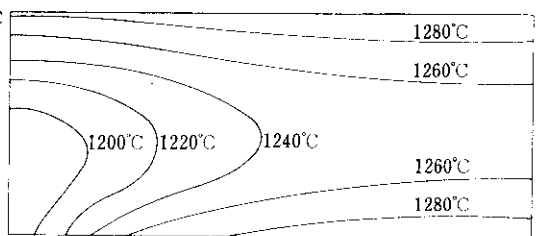


図 28 均熱帯終りにおけるスラブ内部の温度分布

ぎるとその速度は遅くなり、均熱時間を長くする割にその効果は薄れる。

ウォーキングビーム式では、均熱帯においても水冷スキッドとの接触、離脱を繰り返すので接触したときには局部的ではあるがかなり温度が下る。また接触サイクルの中に疑似接触を組み入れることは、非常に効果的であることがわかった。

ホットスキッドを有するプッシャー式加熱炉の場合は、各帯のスキッドの形式が違うものについて計算を行なったが、それぞれのスキッドの特徴がよく出ている。ホットスキッドは、冷却水の影響を完全に絶つことができ効果的である。加熱帯のセミホットスキッドは、やはり冷却水の影響を受けるが、予熱帯のスキッドほどではなく、それなりの効果は見られた。全炉長にわたってホットスキッドを採用すれば、もっとスキッドマークを少なくすることは可能であろう。

ここで各種加熱炉の抽出時のスキッドの強さについて比較検討するために、均熱帯終りにおける各部の温度を表1に示した。スキッドマークの強さをどのような数値で表現するかは、非常にむ

ずかしいことであるが、ここでは4種の数値で表わしてみた。このうち正延時まで残るスキッドマークの強さを比較的良好に表わすものは $\theta_{6,6} - \sum_{i=0}^6 \theta_{0,i}/(i+1)$ であると思われる。この値によってスキッドマークの少ない順に並べると、①均熱炉床を有するプッシャー式加熱炉、②ウォーキングビーム式加熱炉（接触サイクルⅡ）、③ホットスキッドを有するプッシャー式加熱炉、④ウォーキングビーム式加熱炉（接触サイクルⅠ）となる。しかしながらウォーキングビーム式加熱炉でも、またホットスキッドを有するプッシャー式加熱炉においても、スキッドマークを減少させるための対策を講ずることができる。たとえば、前者では接触サイクルのくふうまたはホットスキッドの採用などであり、後者については全炉長にわたってホットスキッドを設置すること、または均熱帯ホットスキッドを予熱帯、加熱帯のスキッドとずらすことなどである。

なおこれらの計算において、スキッドの影によるスラブと炉体放射面との角関係の低下については考慮していないので、固定スキッドとウォーキ

表1 スキッドマークの計算結果

炉の型式		均熱炉床を有するプッシャー式	ウォーキングビーム式		ホットスキッドを有するプッシャー式	
			接触サイクルⅠ	接触サイクルⅡ		
スラブの厚さ (mm)		150	150	150	255	
抽出時のスラブ温度 (°C)	スキッド接触点 $\theta_{0,0}$	1170	952 (接触期の終り)	1020 (接触期の終り)	$\theta_{0,0}$	1190
	表面 $\theta_{6,6}$	1245	1228	1235	$\theta_{24,17}$	1295
	中心 $\theta_{6,3}$	1195	1184	1195	$\theta_{24,8.5}$	1250
	スキッド部の平均 $\sum_{i=0}^6 \theta_{0,i}/7$	1195	1132	1165	$\sum_{i=0}^{17} \theta_{0,i}/18$	1210
スキッドマーク (°C)	$\theta_{6,6} - \theta_{0,0}$	75	276	215	$\theta_{24,17} - \theta_{0,0}$	105
	$\theta_{6,3} - \theta_{0,0}$	25	236	175	$\theta_{24,8.5} - \theta_{0,0}$	60
	$\theta_{6,6} - \sum_{i=0}^6 \theta_{0,i}/7$	50	96	70	$\theta_{24,17} - \sum_{i=0}^{17} \theta_{0,i}/18$	85
	$\theta_{6,3} - \sum_{i=0}^6 \theta_{0,i}/7$	0	52	30	$\theta_{24,8.5} - \sum_{i=0}^{17} \theta_{0,i}/18$	40

ングビームとが隣接して設置されるウォーキングビーム式では、このことを考慮して計算するとスキッドマークはもっと強くなると考えられる。したがってこの炉ではできるだけこれらの間隔を大きく取ることが必要である。

7. 結 言

(1) 3種の連続鋼片加熱炉におけるスラブのスキッドマークについて、2次元非定常熱伝導の偏微分方程式を差分近似により計算機を用いて計算した。これによりこれら加熱炉のスキッドマークの特徴を把握することができた。

(2) 均熱炉床を有するプッシャー式加熱炉におけるスキッドマークは、均熱炉床に載って急速に

回復に向うが、ある時間を過ぎると均熱時間を長くする割りにその効果は薄れる。

(3) ウォーキングビーム式加熱炉では、均熱帯に入ってから水冷スキッドと接触するので、局部的であるが、その部分の温度低下は大きい。しかし接触サイクルの中に疑似接触を組み入れることによりかなり効果があることがわかった。

(4) ホットスキッドでは、水冷スキッドパイプとスライダーとが十分断熱され、その効果がよくでていた。

終りにこの計算を行なうにあたってご協力して下さった千葉製鉄所システム課および水島製鉄所システム課の諸氏に対して心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) R. J. Sarjant, M. R. Slack : J. Iron & Steel Inst., 177 (1954) 8, 428
- 2) E. Laturell, R. Jeschar, H. Weineck : Arch. Eisenhüttenw., 41 (1970) 3, 259
- 3) 原 隆啓 : 鉄と鋼, 49 (1963) 11, 27
- 4) 野田, 横井 : 電気製鋼, 34 (1963) 1, 17