

## 技術報告

鋼塊内部温度推定とそれに基づく均熱炉  
最適炉温パターンの検討

© 1984 ISIJ

能勢 和夫\*・森田 徹\*<sup>2</sup>・新村鉄三郎\*<sup>3</sup>・土井 健司\*<sup>3</sup>Optimal Heating of Ingots in the Soaking Pit Based on  
Temperature Estimation

Kazuo NOSE, Toru MORITA, Tetsusaburo SHINMURA, and Kenji DOI

## Synopsis:

The investigation is concerned with the optimal operation of soaking pits by means of the systems engineering technique. The mathematical models of heat transfer for ingots and soaking pits are developed. The model for the ingot was evaluated to the data on surface and inner temperatures of ingot, while the model for the soaking pit was tested against the data on fuel flow. The results obtained are satisfactory to estimate the optimal heating pattern of the soaking pits. The optimization equations are formulated and the solution is obtained by using a multiplier method. Numerical results are given and the relation between the track time and the optimal solution is discussed. It is found that there exists an optimal heating time which minimizes the fuel consumption. When the heating time is shorter than the optimal value, the lowest temperature of the ingot becomes the constraint. On the other hand, when the heating time is longer than the optimal value, the mean temperature of the ingot becomes the constraint.

## 1. 緒 言

均熱炉工程は、製鋼工程と圧延工程の中間に位置し、分塊圧延に適した温度に鋼塊を加熱、均熱すると共に、両工程のバッファ機能をも有している。したがって、均熱炉の最適制御技術の確立のためには、鋼塊を最小エネルギーで、かつ、抽出予定時刻に正確に焼き上げる加熱方法、すなわち、最適炉温パターンの研究が重要である。ところで、鋼塊の焼き上げ過程では、後述するように、鋼塊高さ方向ならびに半径方向の温度差が著しい。また、実操業での操業条件のばらつきを考慮すると、種々の操業条件に対して効率良く最適炉温パターンを求めることが必要である。

そこで、本報告では、水平、垂直方向の鋼塊伝熱モデルに基づいて、システム最適化手法を活用することにより、最適パターンを求めることを考えた。すなわち、炉温設定方式による均熱炉の鋼塊焼き上げ過程の伝熱モデルを作成し、このモデルに非線形計画法を結合することにより、最適パターンを導出する。

なお、近年、最適炉温パターンの研究に関し、伝熱モデルの提案<sup>1)2)</sup>や、システム最適化手法の活用<sup>3)</sup>が報告されているが、いずれも、水平方向の鋼塊伝熱モデルに

基づくものであり、鋼塊垂直方向の温度分布は考慮されていない。

## 2. 鋼塊の伝熱モデル

本報告では、ブルーム用6~10tの円柱形に近い鋼塊を考察の対象とし、鋼塊の熱伝導は半径方向および高さ方向の2次元円柱モデルで近似する。

## 2.1 熱伝導の基礎方程式

円柱座標系における軸対称な非定常熱伝導方程式は

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\lambda_0}{\rho} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right); r \neq 0 \dots (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\lambda_0}{\rho} \left( 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right); r = 0 \dots (2)$$

である<sup>4)</sup>。ここに

$t$ : 時刻 h,  $r$ : 半径方向距離 m,  $z$ : 高さ方向距離 m,  $H$ : 含熱量 kcal/kg,  $\phi$ : 特性温度 °C,  $\lambda_0$ : 基準温度における熱伝導率 kcal/mh°C,  $\rho$ : 密度 kg/m<sup>3</sup>,

である。

## 2.2 熱伝導差分方程式

Fig. 1 に示す格子点  $(r, z)$  の時刻  $t$  における含熱量および特性温度をそれぞれ  $H(r, z, t)$  および  $\phi(r, z, t)$

昭和 58 年 11 月 14 日受付 (Received Nov. 14, 1983)

\* (株)神戸製鋼所電子技術センター 工博 (Electronics Technology Center, Kobe Steel, Ltd., 53-3 Aza-Maruyama Gomo Nada-ku Kobe 657)

\*<sup>2</sup> (株)神戸製鋼所電子技術センター (Electronics Technology Center, Kobe Steel, Ltd.)

\*<sup>3</sup> (株)神戸製鋼所神戸製鉄所 (Kobe Works, Kobe Steel, Ltd.)

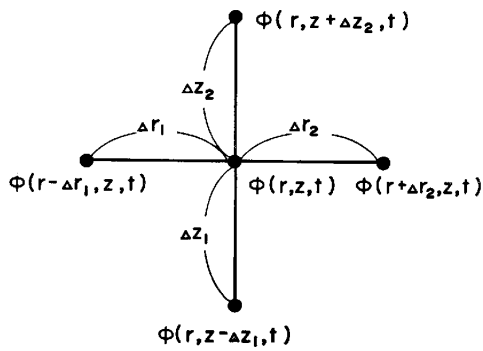


Fig. 1. Finite-difference mesh points.

とすると、(1)式に対応する次の差分方程式を得る。

$$H(r, z, t + \Delta t) = H(r, z, t) + \frac{2\lambda_0 \Delta t}{\rho} \{F_r(r, z, t) + F_z(r, z, t)\} \dots\dots\dots (3)$$

$$F_r(r, z, t) = \frac{\Delta r_2 \phi(r - \Delta r_1, z, t) - (\Delta r_1 + \Delta r_2) \phi(r, z, t) + \Delta r_1 \phi(r + \Delta r_2, z, t)}{\Delta r_1 \Delta r_2 (\Delta r_1 + \Delta r_2)} - \frac{1}{2r} \left\{ \frac{\phi(r - \Delta r_1, z, t) - \phi(r + \Delta r_2, z, t)}{\Delta r_1 + \Delta r_2} \right\} \dots\dots (4)$$

$$F_z(r, z, t) = \frac{\Delta z_2 \phi(r, z - \Delta z_1, t) - (\Delta z_1 + \Delta z_2) \phi(r, z, t) + \Delta z_1 \phi(r, z + \Delta z_2, t)}{\Delta z_1 \Delta z_2 (\Delta z_1 + \Delta z_2)} \dots\dots (5)$$

また、(2)式に対応する差分方程式は、(3)式中の $F_r$ に次式を代入したものである。

$$F_r(r, z, t) = 2 \frac{\phi(r + \Delta r_2, z, t) - \phi(r, z, t)}{(\Delta r_2)^2}; \quad \Delta r_1 = \Delta r_2 \dots\dots\dots (6)$$

鋼塊表面や鋳型と鋼塊の境界および鋳型表面などの境界上の温度点に(3)式の差分方程式を適用する場合には、実際には存在しない格子点の温度が必要となる。そこで、それぞれの境界条件を満足する仮想温度を採用すれば、境界の格子点に対しても、境界以外の部分と同様な計算を行うことができる。各種の境界点に対する仮想温度を Table 1 に示す。なお、同表中の①および②は鋼塊の凝固冷却および加熱過程に現れる境界点であるが、③は凝固冷却過程における鋳型内面にのみ現れる境界点である。

2.3 熱伝達量

鋳込みから型抜き、均熱炉装入、炉内焼き上げまでの一連の工程における鋼塊および鋳型の境界における熱伝達を示すと

- ・鋼塊と鋳型との間の熱伝達
- ・鋳型外面あるいは型抜き後の鋼塊表面より大気への熱放散

Table 1. Boundary conditions and corresponding fictitious temperatures.

|   | Boundary condition | Fictitious mesh | Equation of fictitious temperature   |
|---|--------------------|-----------------|--|
| ① |                    |                 | $\phi'_4 = \phi_2 + \frac{2\Delta r}{\lambda_0} \cdot q_4$   |
| ② |                    |                 | $\phi'_1 = \phi_3 + \frac{2\Delta z}{\lambda_0} q_1$<br>$\phi'_2 = \phi_4 + \frac{2\Delta r}{\lambda_0} q_2$   |
| ③ |                    |                 | $\phi'_1 = \frac{1}{3} \left\{ (\phi_3 + \frac{2\Delta z}{\lambda_0} q_1) + 2\phi_1 \right\}$<br>$\phi'_4 = \frac{1}{3} \left\{ (\phi_2 + \frac{2\Delta r}{\lambda_0} q_4) + 2\phi_4 \right\}$ |

・均熱炉内における炉から鋼塊への熱伝達に大別される。以下に、それぞれの場合について熱伝達量の計算式を示す。

(1) 鋼塊と鋳型との間の熱伝達

鋳込み作業は、鋳込みを開始してから終了するまでに鋼塊 1 本当たり 10 min 程度かかる。また、溶鋼を鋳型に鋳込んでから少しの間は溶鋼と鋳型は密着しているが、間もなくエアギャップを生じ、普通この時間は 2 min 程度とみられている。そこで、鋳込みは瞬時的に行われ、最初からエアギャップがあるものとして計算を行う<sup>1)</sup>。

鋼塊と鋳型との間の熱伝達  $q$  は平行平板間の輻射熱伝達式

$$q = \frac{4.88 \cdot \epsilon_I \epsilon_M}{\epsilon_I + \epsilon_M - \epsilon_I \epsilon_M} \left\{ \left( \frac{\theta_I + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_M + 273}{100} \right)^4 \right\} \text{ kcal/m}^2\text{h} \dots\dots\dots (7)$$

で近似する。ここに  $\theta$ : 温度 °C,  $\epsilon$ : 輻射率であり、添字 I および M はそれぞれ鋼塊および鋳型を示す。

(2) 鋳型あるいは鋼塊表面より大気への熱放散

$$q = 4.88 \epsilon \left\{ \left( \frac{\theta + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_A + 273}{100} \right)^4 \right\} + 2.2(\theta - \theta_A)^{1.25} \text{ kcal/m}^2\text{h} \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。ここに  $\theta_A$ : 大気温度 °C である。

(3) 均熱炉から鋼塊への熱伝達

均熱炉内に置かれた鋼塊への熱伝達量  $q$  は

$$q = 4.88 \phi_{CG} \left\{ \left( \frac{\theta_P + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_I + 273}{100} \right)^4 \right\} \text{ kcal/m}^2\text{h} \dots\dots\dots (9)$$

で計算する。ここに  $\phi_{CG}$ : 総括熱吸収率,  $\theta_P$ : 炉温 °C である。ただし、 $\phi_{CG}$  は、後述するように、鋼塊测温データと計算温度とが良く一致するよう決定され、鋼塊

表面格子点の位置により異なる値をとる。

### 3. 均熱炉の伝熱モデル

最適炉温パターンを求めるためには、炉温パターンが与えられたとき、炉況に応じた燃料使用量を求めることが必要である。均熱炉の燃料使用量は、次の熱精算に基づいて計算する。

- ① 鋼塊吸収熱量
- ② 炉体蓄熱損失
- ③ 燃料発熱量
- ④ 排ガス損失熱量
- ⑤ 2次空気顕熱

#### (1) 鋼塊吸収熱量

鋼塊表面上の微小面  $i$  の熱伝達量を  $q_i$ 、表面積を  $\Delta S_i$  とし、また、装入本数を  $N$  とすると、鋼塊吸収熱量  $Q_I$  は

$$Q_I = N \sum_i q_i \Delta S_i \quad \text{kcal/h} \quad \dots\dots\dots (10)$$

で評価できると仮定する。ただし、 $q_i$  は (9) 式で求める。

#### (2) 炉体蓄熱損失

炉温パターンと、1次元熱伝導方程式に基づいた炉壁内部温度とから、炉体蓄熱損失量を次のように導出する。

Fig. 2 に示す内部格子点に対して、1次元熱伝導差分方程式は次のようになる。

$$H_W(z, t + \Delta t) = H_W(z, t) + \frac{2\lambda_{W0}\Delta t}{\rho_W} \left\{ \frac{\Delta z_1 \phi_W(z + \Delta z_2, t) - (\Delta z_1 + \Delta z_2) \phi_W(z, t) + \Delta z_2 \phi_W(z - \Delta z_1, t)}{\Delta z_1 \Delta z_2 (\Delta z_1 + \Delta z_2)} \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

また、表面点に対しては次式が成立する。

$$H_W(z, t + \Delta t) = H_W(z, t) + \frac{2\lambda_{W0}\Delta t}{\rho_W(\Delta z)^2} \left\{ \phi_W(z + \Delta z, t) - \phi_W(z, t) + \frac{\Delta z}{\lambda_{W0}} q \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

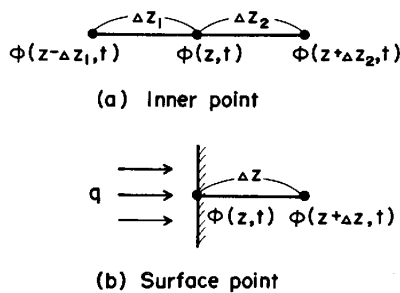


Fig. 2. Finite-difference mesh points in the pit wall.

したがって、(12)式より、時刻  $t$  と  $t + \Delta t$  の炉温が与えられると、 $t \sim t + \Delta t$  間の炉内壁面への熱伝達量  $q$  は

$$q = \frac{\lambda_{W0}}{\Delta z} \left\{ \phi_W(z, t) - \phi_W(z + \Delta z, t) \right\} + \frac{\rho_W \Delta z}{2\Delta t} \left\{ H_W(z, t + \Delta t) - H_W(z, t) \right\} \quad \text{kcal/m}^2\text{h} \quad \dots\dots\dots (13)$$

で算出できる。一方、炉外壁面からの熱伝達量  $q$  は、大気放散式

$$q = -2.2(\theta - \theta_A)^{1.25} \quad \text{kcal/m}^2\text{h} \quad \dots\dots\dots (14)$$

で与えられる。上式を(12)式に用いることにより、炉外壁面温度の経時変化を知ることができる。

(13)式によつて得られる熱伝達量に基づいて、炉体蓄熱損失  $Q_P$  を次式で評価する。

$$Q_P = \sum_i q_i S_i \quad \text{kcal/h} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 $S_i$  は炉蓋、炉側壁、炉床の面積である。

#### (3) 燃焼計算

液体燃料(重油)の燃焼について記述する<sup>5)</sup>。

液体燃料の発熱量  $H_u$  は、燃料中の元素の質量分率を用いて

$$H_u = 7830c + 28670(h - \bar{o}/7.94) + 2210s - 583w \quad \text{kcal/kg} \quad \dots\dots\dots (16)$$

で求めることができる。ただし、

- $c$ : 燃料中の炭素 kg/kg
- $h$ : 燃料中の水素 kg/kg
- $\bar{o}$ : 燃料中の酸素 kg/kg
- $s$ : 燃料中の燃焼性いおう kg/kg
- $w$ : 燃料中の水分 kg/kg
- $n$ : 燃料中の窒素 kg/kg

である。したがって、燃料投入熱量  $Q_F$  は

$$Q_F = H_u \rho_F u \quad \text{kcal/h} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。ただし  $\rho_F$ : 燃料比重 kg/l,  $u$ : 燃料使用量 l/h である。

次に、空気比  $\alpha$  で燃焼させた場合の燃焼ガス量  $V_W$  は

$$V_W = (\alpha - 0.2095) A_o + 1.866c + 11.1h + 1.24w + 0.8n + 0.699s \quad \text{Nm}^3/\text{kg} \quad \dots\dots (18)$$

となる。ここに、 $A_o$  は理論空気量

$$A_o = 26.5 \left( \frac{c}{2.98} + h - \frac{\bar{o} - s}{7.94} \right) \text{Nm}^3/\text{kg} \quad \dots\dots\dots (19)$$

である。また、燃焼ガス組成は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} (\text{CO}_2) &= 1.866c/V_W && \text{Nm}^3/\text{Nm}^3 \\ (\text{N}_2) &= (0.7905 \alpha A_o + 0.8n)/V_W && \text{Nm}^3/\text{Nm}^3 \\ (\text{O}_2) &= 0.2095(\alpha - 1)A_o/V_W && \text{Nm}^3/\text{Nm}^3 \\ (\text{SO}_2) &= 0.699s/V_W && \text{Nm}^3/\text{Nm}^3 \\ (\text{H}_2\text{O}) &= (11.1h + 1.24w)/V_W && \text{Nm}^3/\text{Nm}^3 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (20)$$

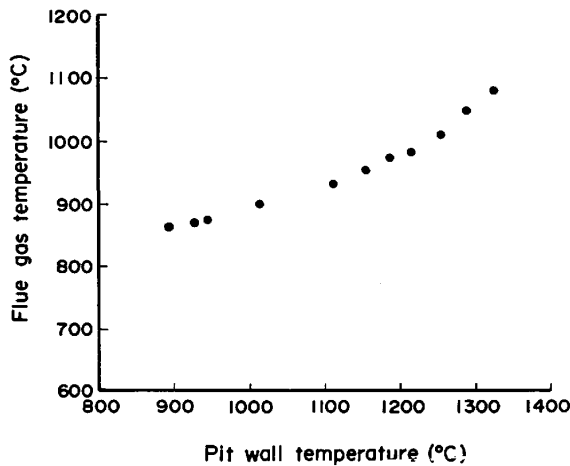


Fig. 3. Relation between pit wall temperature and flue gas temperature.

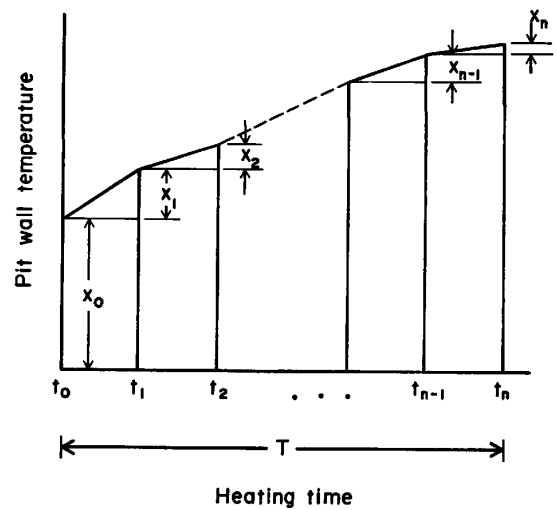


Fig. 4. Decision variables.

(4) 排ガス損失熱量

排ガス損失熱量は、排ガス量、排ガス比熱および排ガス温度の積によつて与えられる。

①まず、排ガス比熱  $\bar{C}_L$  は、(20)式の体積分率を重みとする排ガス組成ガスの比熱の加重平均で与えられる。

②次に、排ガス温度については、Fig. 3 に示すように、実炉における炉温  $\theta_P$  と排ガス温度  $\theta_L$  との関係を調べることに、炉温の関数

$$\theta_L = a_0 + a_1 \theta_P + a_2 \theta_P^2 \quad \dots \dots \dots (21)$$

として与えることができる。ただし、 $a_i$  は係数である。

③以上から、排ガス損失熱量  $Q_L$  は、次式で計算される。

$$Q_L = V_W \bar{C}_L (\theta_L) \theta_L \rho_F u \quad \text{kcal/h} \quad \dots \dots \dots (22)$$

④なお、重油だけの炉では、燃焼効率を高めるために、アトマイズ蒸気が添加される。アトマイズ蒸気が炉から持ち出す熱量  $Q_W$  は

$$Q_W = g_0 \{ \bar{C}_{H_2O} (\theta_L) \theta_L - \bar{C}_{H_2O} (\theta_W) \theta_W \} \quad \text{kcal/h} \quad \dots \dots \dots (23)$$

で求められる。ここに

- $g_0$  : アトマイズ蒸気添加量 kg/h
- $\theta_W$  : アトマイズ蒸気温度 °C
- $\bar{C}_{H_2O}$  : 水蒸気平均比熱 kcal/kg °C

である。

(5) 2次空気顕熱

レキュペレータの特性を温度効率  $\eta$  を使って表現すると、2次空気温度  $\theta'_A$  は

$$\theta'_A = \theta_A + \eta (\theta_L - \theta_A) \quad \text{°C} \quad \dots \dots \dots (24)$$

によつて与えられる。したがつて、2次空気顕熱  $Q_A$  は

$$Q_A = \alpha \cdot A_0 \bar{C}_A (\theta'_A) \theta'_A \rho_F u \quad \text{kcal/h} \quad \dots \dots \dots (25)$$

となる。

(6) 炉内熱精算

以上より、時刻  $t \sim t + \Delta t$  の炉温が与えられたとき、均熱炉内の熱精算式は次のようになる。

$$Q_F + Q_A = Q_I + Q_P + Q_L + Q_W \quad \dots \dots \dots (26)$$

したがつて、投入すべき燃料量として次式を得る。

$$u = \frac{Q_I + Q_P + Q_W}{\rho_F (H_u + \alpha A_0 \bar{C}_A \theta'_A - V_W \bar{C}_L \theta_L)} \quad \dots \dots \dots (27)$$

4. 炉温パターンの最適化

与えられた在炉時間において、鋼塊の温度が抽出条件を満たし、かつ、燃料原単位が最小となる炉温パターンを決定するために必要な、決定変数、制約条件および目的関数をそれぞれ次のように設定する。

4.1 決定変数

炉温パターンを決定変数とする方法として、Fig. 4 に示すように、在炉時間  $T = (t_0, t_n)$  を  $n$  分割し、分割時点間  $t_{i-1}$  と  $t_i$  の炉温差を決定変数  $x_i$  とする。

4.2 制約条件

①抽出時の鋼塊平均温度  $\theta_{IM}$  が許容温度  $\theta_{IM}$  以上であること。

$$\theta_{IM}(t_n) = \theta_{IM}(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq \theta_{IM} \quad \dots \dots \dots (28)$$

②抽出時の鋼塊最低温度  $\theta_{IL}$  が許容温度  $\theta_{IL}$  以上であること。

$$\theta_{IL}(t_n) = \theta_{IL}(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq \theta_{IL} \quad \dots \dots \dots (29)$$

③必要燃料投入量  $u$  がバーナ容量  $U_M$  以下であること。

$$0 \leq u(t_i) = u_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq U_M; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \dots \dots \dots (30)$$

④炉温変化率が、割れ等の鋼塊品質条件より決まる許容上下限值  $\Delta\theta_{PU}$ ,  $\Delta\theta_{PL}$  内であること。

$$\Delta\theta_{PL} \leq \frac{x_i}{t_i - t_{i-1}} \leq \Delta\theta_{PU}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \dots \dots \dots (31)$$

4.3 目的関数

最小化すべき目的関数は、燃料投入量累計とする。

$$f = \sum_{i=1}^n u(t_i) \Delta t = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \dots\dots\dots (32)$$

以上より、最適炉温パターンは、制約条件(28)~(31)式を満たし、目的関数(32)式を最小とする  $n$  個の変数  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  により表示される。

上記最適化問題を解くために開発した炉温パターン最適化プログラムの構成を Fig. 5 に示す。なお、(28)~(32)式は、決定変数の陽関数表示ではない。したがって、Fig. 5 中の非線形計画法には、制約条件、目的関数の微係数の陽関数表示を必要としない乗数法のアルゴリズム<sup>6)</sup>を用いた。

5. 数 値 計 算

計算の対象とした鋼塊および鋳型の格子点の座標を Fig. 6 に示す。また、鋼塊凝固過程における鋼塊と鋳型との境界条件の種類も同図に示しておく。

5.1 モデルの精度

炉温パターンの最適化を検討する前に、次の数値計算を行い、鋼塊および均熱炉の伝熱モデル中に含まれる未知パラメータの同定や計算精度の確認をしておく。

(1) 鋼塊凝固冷却過程

凝固、冷却過程の計算精度を確認するために、サーモ

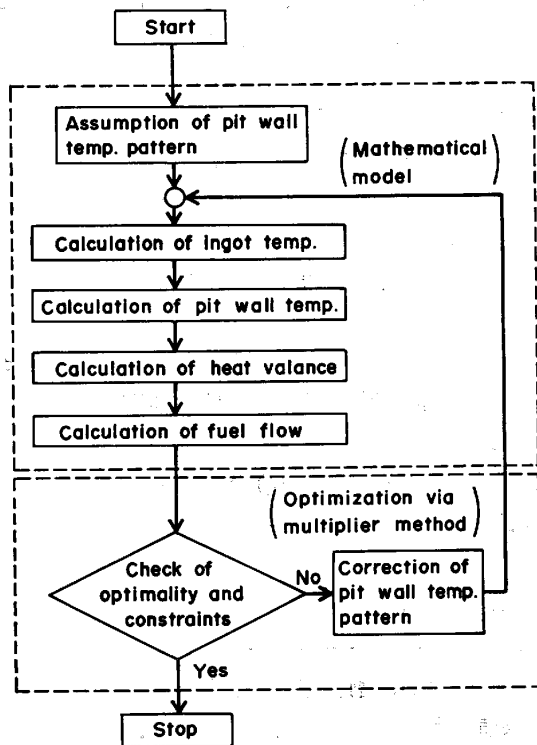


Fig. 5. Diagram of optimization of pit wall temperature pattern.

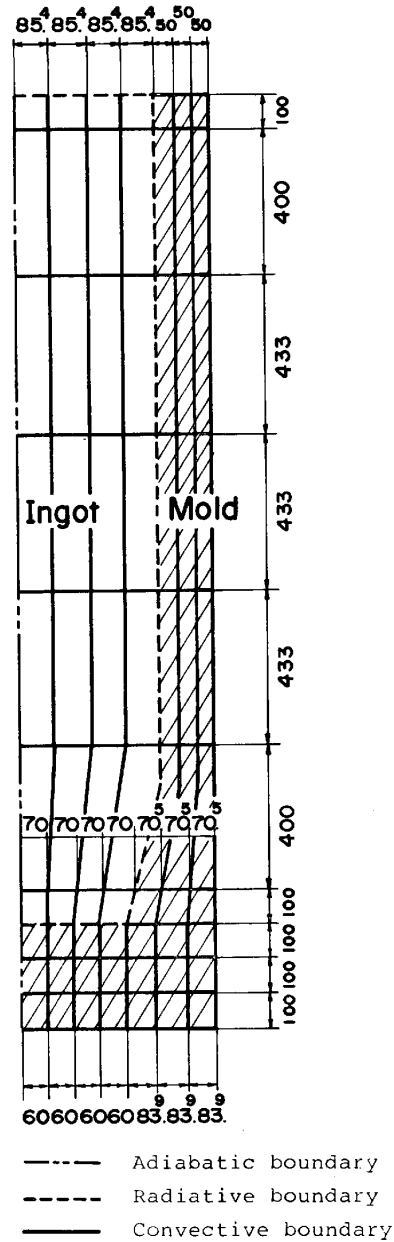


Fig. 6. Mesh point configuration of an ingot in a mold.

Table 2. Comparison of surface temperatures between measured values and computed values.

| Track time (min) | Measured temp. (°C) | Computed temp. (°C) |
|------------------|---------------------|---------------------|
| 180              | 890                 | 850                 |
| 210              | 830                 | 807                 |

ビューにより、型抜き直後の鋼塊表面中央部の測温を行った。Table 2 に、測定値と計算値との比較を示す。

(2) 冷塊焼き上げ過程

Fig. 7 に示す位置に熱電対を取り付けて、冷塊の昇温状況の測定を行った。そして、測定値と計算値とが良く一致するように、鋼塊各部の総括熱吸収率を求めた。その結果を Fig. 8 に示す。

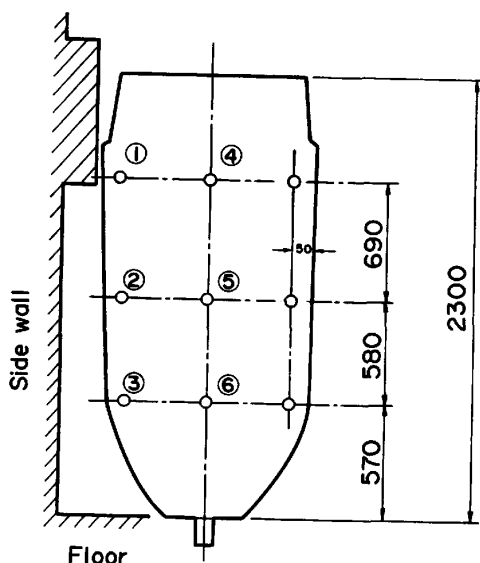


Fig. 7. Measurement points of the ingot.

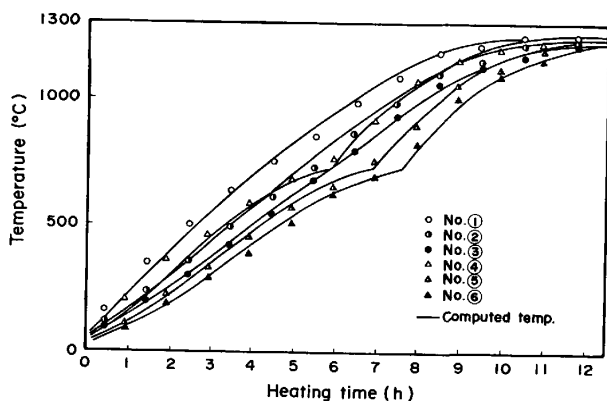


Fig. 8. Computed results vs measurement data.

(3) 熱塊焼き上げ過程

均熱炉モデルの精度を確認するために、トラックタイムが4hの6tキルド鋼塊の実操業における焼き上げ過程の炉温パターンを与えて、必要燃料投入量の計算を行った。実測値と計算値との比較を Fig. 9 に示す。

以上のように、本モデルによる計算結果は実測値と良く一致することが確認された。そこで、本モデルを使って、以下に最適炉温パターンについて考察する。

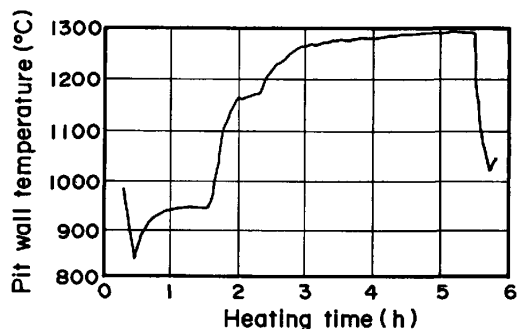
5.2 最適炉温パターン

(1) 抽出条件の把握

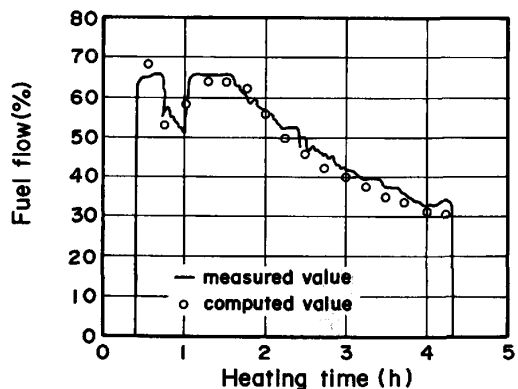
まず、本モデルを使って、実操業における鋼塊抽出条件を推定した。推定結果は、鋼塊平均温度 1220°C、最低温度 1140°C であった。そこで、以下の最適化における鋼塊抽出制約条件には、上記温度を採用した。

(2) 最適炉温パターンの効果

Fig. 9 に示した炉温パターンに対して、最適化プログラムによつて得られた最適パターンを Fig. 10 に示す。両炉温パターンによる重油使用量計算値は、実操業



(a) Pit wall temperature



(b) Fuel flow

Fig. 9. Soaking pit data.

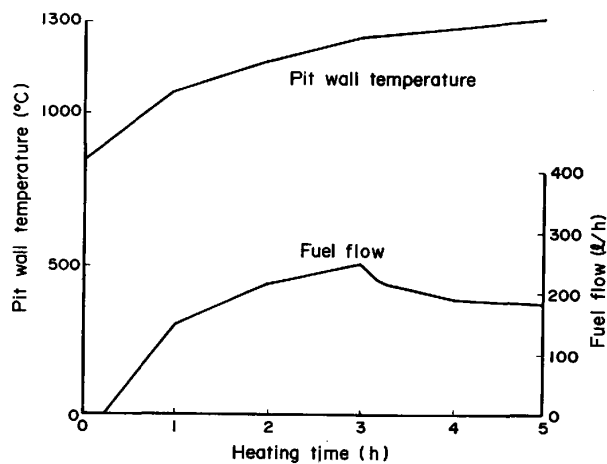


Fig. 10. Optimal solution.

パターン時 957 l、最適パターン時 891 l となつた。したがつて、この場合、最適炉温パターンを採用すれば、燃料原単位として、約 6.9% の低減が期待できることがわかる。

(3) 操業条件と鋼塊抽出条件

Fig. 11 は、最適パターンで加熱した場合の、トラックタイム、在炉時間と燃料原単位、鋼塊抽出制約条件の関係を示したものである。図において、●印は、抽出時鋼塊平均温度が 1220°C で、最低温度は 1140°C 以上である場合、■印は、鋼塊平均温度が 1220°C 以上で、

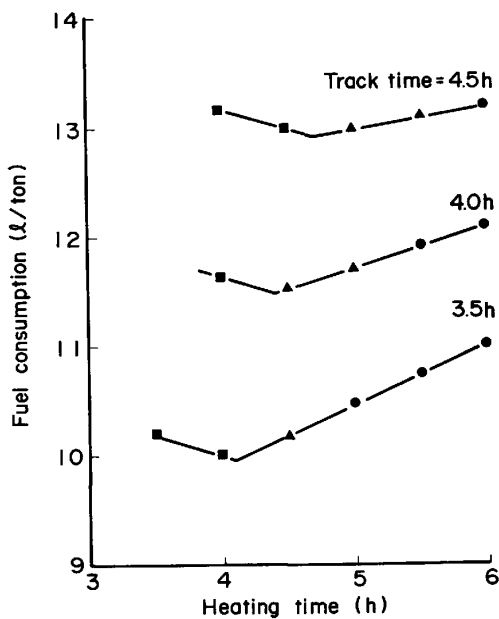


Fig. 11. Fuel consumption and thermal condition of ingot at drawing.

最低温度が $1140^{\circ}\text{C}$ である場合、▲印は、鋼塊平均温度が $1220^{\circ}\text{C}$ で、最低温度も $1140^{\circ}\text{C}$ である場合を示したものである。同図より、トラックタイム、在炉時間と燃料原単位、鋼塊抽出制約条件との間に以下の関係があることがわかる。

①燃料原単位は、在炉時間に関して上に凹型となり、最も燃料原単位の少ない在炉時間（最適在炉時間）が存在する。その時、鋼塊平均温度ならびに最低温度はいずれも制約値に一致する。

②在炉時間が最適値よりも短い時は、鋼塊最低温度が抽出制約条件となり、最低温度を確保するために燃料原単位が高くなる。逆に、在炉時間が最適値よりも長い時は、鋼塊平均温度が抽出制約条件となり、平均温度を確保するために燃料原単位は高くなる。

③トラックタイムが長くなるほど、最適在炉時間も長くなり、燃料原単位は高くなる。しかし、在炉時間が最適値よりずれた時の燃料原単位の増加率は低くなる。

## 6. 結 言

本報告では、非線形計画法を活用することにより、種の操業条件に対して、効率よく最適炉温パターンを求めることを提案した。そして、本手法を活用して、トラックタイム、在炉時間と燃料原単位、鋼塊抽出制約条件の関係を考察した。

本手法は、均熱炉に限ることなく、加熱炉等のバッチ炉に容易に適用できるものである。

## 文 献

- 1) E. Y. KUNG, J. R. DAHM and G. B. DELANCY: ISA Trans., 6 (1967), p. 162
- 2) 田村庸一, 国岡計夫, 芳賀行雄: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 1947
- 3) 中 紀範, 福田和之, 北門達男, 鈴木 豊: 鉄と鋼, 65 (1979), S797
- 4) 日本鉄鋼協会編: 連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法 (1971), p. 68 [日本鉄鋼協会]
- 5) 水谷幸夫: 燃焼工学 (1977), p. 38 [森北出版]
- 6) 志水清孝: システム最適化理論 (1976), p. 52 [コロナ社]