
A Dynamic One-Dimensional Simulation Model of Blast Furnace Process

(Hideho Kubo)

(Tetsuji Nishiyama)

(Seiji Taguchi)

:

3

5

Synopsis :

A dynamic one-dimensional simulation model of the blast furnace process was developed for purpose of clarifying the transient behavior of the furnace. For the simplification of the model, some assumptions were made as follows: (1) Indirect reduction, solution-loss reaction, and melting of metal and slag are taken into account. (2) The reaction rate of solution-loss is applied in the temperature range between 950 and 1250 , and is equal to the rate of indirect reduction above 1250 . (3) The melting rate is exclusively controlled by the rate of heat transfer. A set of partial differential equations formulated by applying mass and heat balances to the finite sections of the furnace were converted into ordinary differential equations by means of the characteristics method, and integrated by Runge-Kutta-Gill method. As the most dynamic case of the furnace operation, empty-blowing-out operation of Chiba No.3 BF and blowing-in operation of Chiba No.5 BF were simulated. The predictions were in good agreement with actual results.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

高炉の動特性検討のための数式モデル
A Dynamic One-Dimensional Simulation Model of Blast Furnace Process

久保 秀穂*
Hideho Kubo

西山 哲司**
Tetsuji Nishiyama

田口 整司***
Seiji Taguchi

Synopsis:

A dynamic one-dimensional simulation model of the blast furnace process was developed for the purpose of

For the simplification of the model, the mathematical model was developed as follows:

【図1】 鋼中炭素の酸化反応速度の測定結果 (a) 鋼中炭素の酸化反応速度の測定結果

類似の報告がなされている。

しかし、操業アクションの結果の推定——特に
鋼中炭素の酸化反応速度の測定結果

シオンロス反応、メタル、スラブの溶融をそれぞれ反応速度式で考慮する。

(a) 鋼中炭素の酸化反応速度の測定結果

$$\frac{\partial X_j}{\partial \theta} - V_s \frac{\partial X_j}{\partial Z} = \frac{\sum W_{j,i} \cdot R_i - x_j \cdot \sum \sum W_{j,i} \cdot R_i}{\rho_s} \dots \dots \dots (4)$$

と考へて、(11)式が、導かれる。

$$\frac{\partial(\epsilon \rho_g C_g T_g)}{\partial \theta} = \frac{\partial(C_g \cdot G_g \cdot T_g)}{\partial Z} - h a (T_g \cdot T_s)$$

$$1 \quad 1 \quad , \quad d_{p0} \{(1-f_s)^{-1/3} - 1\}$$

○○○ 結果 → 3本の波の速度 (ノルム)

×カウニングの波速については別途述べ

なお、理論燃焼温度を求める時に必要な、降下コークスの温度は、理論燃焼温度で近似した。

$$\frac{\partial X_i}{\partial \theta} - V_s \frac{\partial X_i}{\partial Z} = R X_i \dots\dots\dots(23)$$

$$\frac{\partial X_i}{\partial \theta} - V_s \frac{\partial X_i}{\partial Z} = \frac{\partial X_i}{\partial \theta} + \frac{dZ}{d\theta} \cdot \frac{\partial X_i}{\partial Z} = \frac{dX_i}{d\theta}$$

(Sの流線に沿って).....(24)

前記基礎式群に反応速度式を導入し、境界条件初期条件を与えて積分すれば、解が求まる。

Fig. 2に、特性曲線法の概念図を示した。炉内を降下する装入物に乗って、現象を観察すると、

.....

式の型の偏微分方程式群になるので、そのまま常微分方程式群として、数値積分できる。

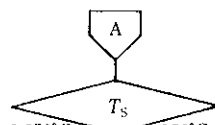
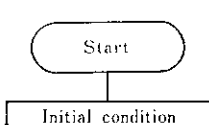
$$0 = \frac{\partial Y_i}{\partial Z} + R Y_i \dots\dots\dots(22)$$

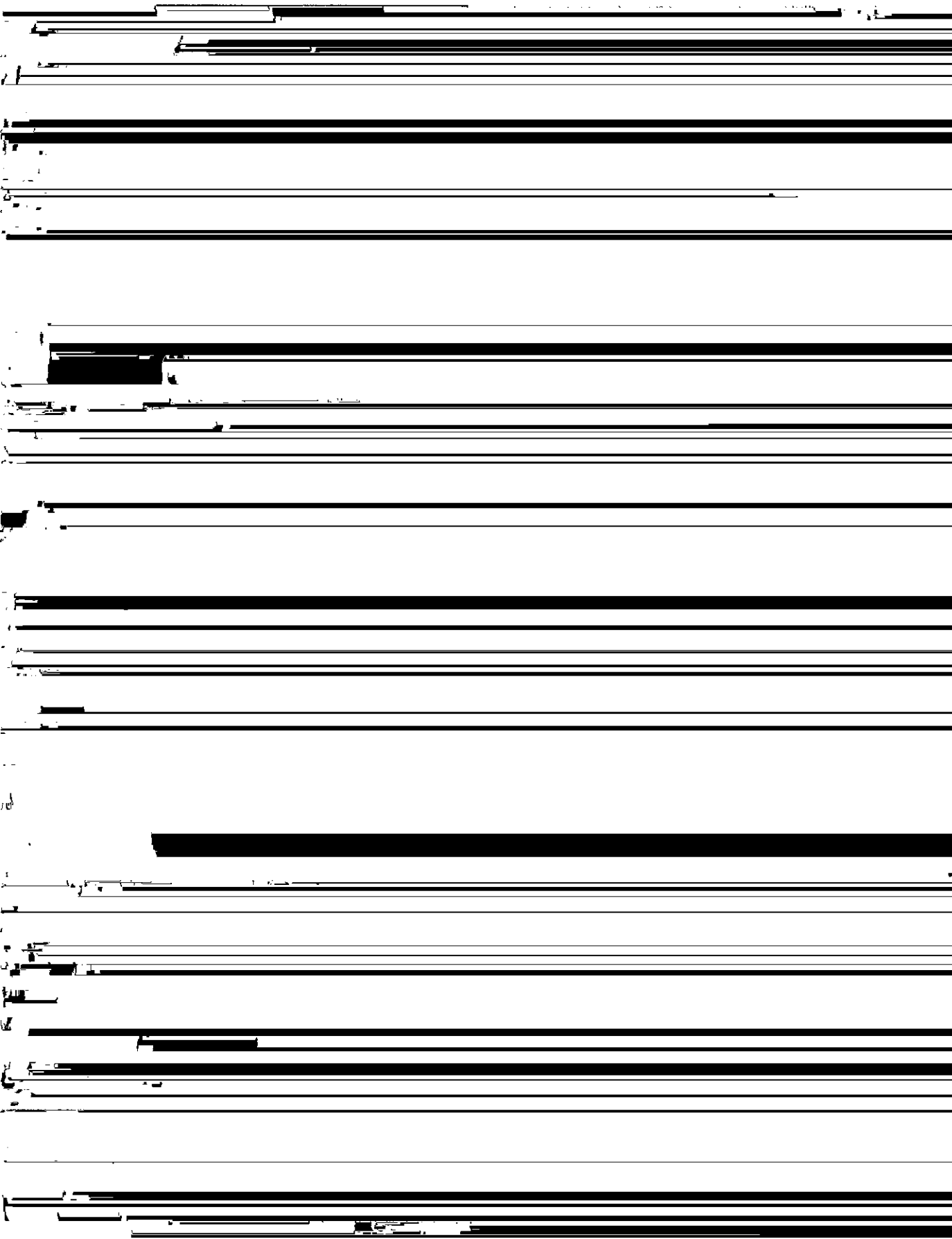
固体変数に関しては、(23)式の型の偏微分方程式群だが、 $dZ/d\theta = -V_s$ の関係により、(24)式のように

$\Delta\theta$ 時間の積分は、装入物降下曲線A-Bに沿って積分したことを意味する。

なお、時間軸の積分きざみは、1分、高さ軸の積分きざみは、0.1mである。

数値積分は Runge-Kuffa-Gill法によった。また、同じ高さでの解の時間変化を求めるために、上下





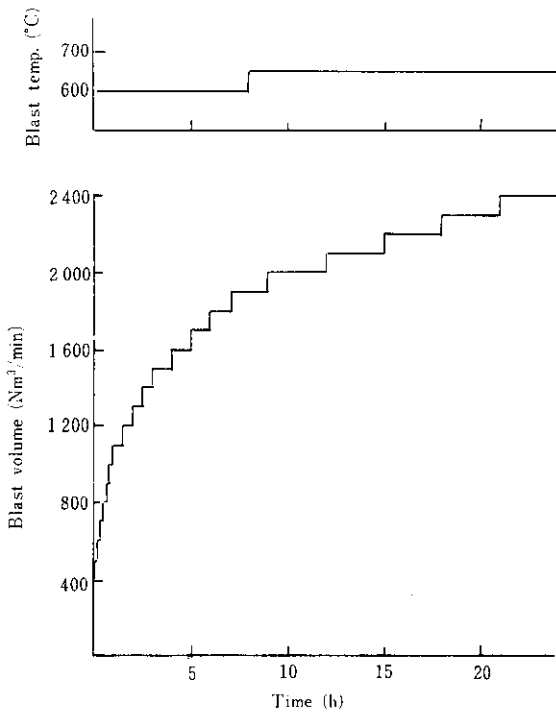


Fig. 7 Plan of blowing-in operation
(input condition of simulation)

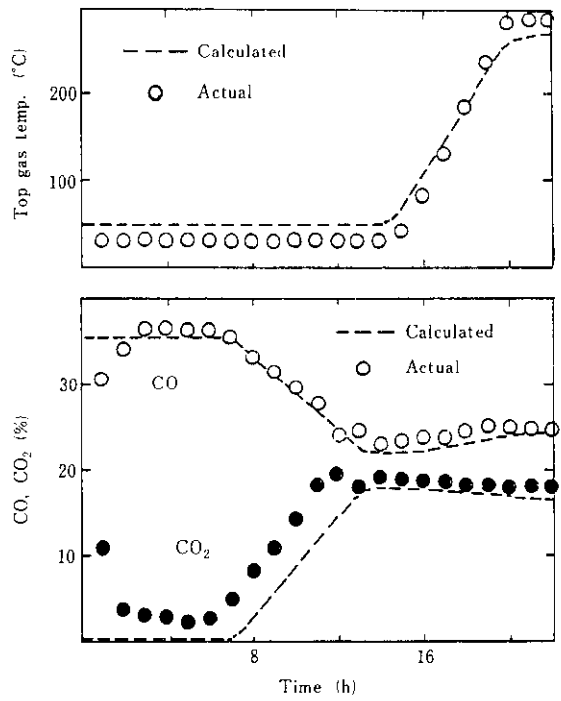
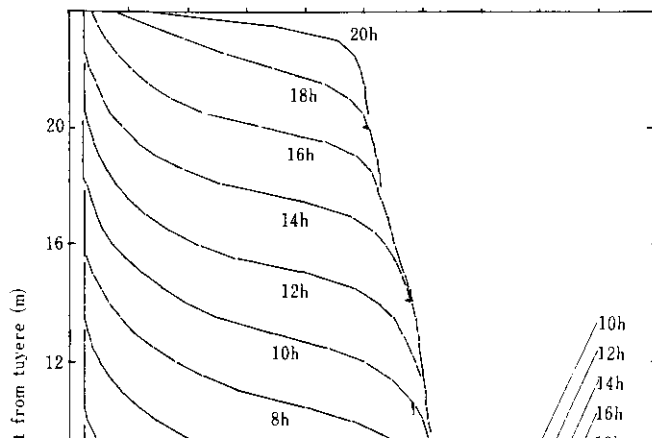


Fig. 9 Comparison between calculated and actual
results at blowing-in operation of Chiba
No. 5 BF



の送風条件を示した。

シミュレーション結果の例として、炉内固体温度分布の時間変化を Fig. 8 に示した。送風開始後、炉内が加熱されていく状況、融着帯が形成されていく状況が明らかにされている。

Fig. 9 に、予測と実績の比較を示した。熱伝達速度の指標として、炉頂ガス温度を、また反応速度の指標として炉頂ガス組成の経時変化を示したが、いずれもほとんど一致しており、モデルの妥当性が確認された。

6. 結 言

非定常次元高炉モデルを作成した。特色は、位置と時間に関する偏微分方程式群を数値積分することにより、位置についても、時間についても連続した解を求められることである。

また、本モデルの検証のため、高炉のダイナミックスの最も顕著なケースとして、減尺吹き卸しと火入れを選び、予測と実績を比較し、充分な妥当性を確認した。

の拡大を目指していくつもりである。

Appendix - I 間接還元反応平衡定数 K_x の式

$$f_s < 0.111 \quad (\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4)$$

$$K_x = \exp (4.905 + 6235 / (T_s + 273))$$

ϵ : 空隙率

ϵ_U : 鉱石空隙率

f_s : 鉱石還元率

G_g : 気体質量速度 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

h_p : 熱伝達係数 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$)

H_r : 反応の反応熱 ($\text{kcal}/\text{kg} \cdot \text{h}$)

$$K_x = \exp (2.130 - 2050 / (T_s + 273))$$

$$0.333 \leq f_s \quad (\text{FeO} \rightarrow \text{Fe})$$

G_g : 気体質量速度 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

h_p : 熱伝達係数 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$)

H_r : 反応の反応熱 ($\text{kcal}/\text{kg} \cdot \text{h}$)

R_i : i 種反応の反応速度 ($\text{kmol} \cdot \text{t} / \text{m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{bed}$)

y : CO_2 モル分率

T : 気体温度 ($^{\circ}\text{C}$)

V_{coke} : 固相中 coke 容積比 ($\text{m}^3 \cdot \text{coke} / \text{m}^3 \cdot \text{bed}$)

ρ_r : " (kg / Nm^3)

V_{ore} : " ore " ($\text{m}^3 \cdot \text{ore} / \text{m}^3 \cdot \text{bed}$)

ρ_s : 固体嵩密度 ($\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{bed}$)

V_s : 固体の降下速度 (m / h)

ρ_c : コークスの密度 ($\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{bed}$)

$W_{j,i}$: i 種反応による j 元素の生成量 ($\text{kg} \cdot \text{t} / \text{kmol} \cdot \text{t}$)

ρ : 気体の密度 (kg / Nm^3)

x : CO モル分率

θ : 時間 (h)

x^* : 平衡 CO モル分率

ξ : 補正係数

X_j : Fe , C , O , 等の固体中濃度 ($\text{kg} \cdot \text{t} / \text{kg} \cdot \text{solid}$)

参 考 文 献

- 1) Ridgion : JIS1 200 (1962) 5, 389
- 2) 西山ら : 社内レポート : エネ技室
- 3) Fliermanら : Iron Steel (U.K.) 38 (1965) 6, 284
- 4) Bogdandyら : Arch. Eisenhütten 36 (1965) 3, 221
- 5) 西山ら : 社内レポート (1966)