



# 高炉の数学的モデル

八 木 順 一 郎\*

## Mathematical Models of Blast Furnace

Jun-ichiro YAGI

### 1. 結 言

高炉のみならず製錬反応器のシミュレーションモデルの開発目的がしばしば議論されているが、高炉についてはつぎのように整理することができよう。高炉のように固液気三相が共存し、その中で数多くの反応が生じ、熱交換がおこり、充填構造が変化するような複雑なプロセスにおいても、最終的には、炉内状況の適確な予測、ならびに、安定で効率のよい操業方法の確立を目的とするが、開発の過程において、高炉内の種々の現象の相互作用あるいは複雑なプロセスに対する各種要因の影響、ならびに、その感度などを知ることができる。また、プロセスモデルは測定値との比較などにより、センサー情報の整理や適確なセンサーの選択基準の検討などにも使用される。しかし、もうひとつの重要な側面は、数学的モデルを通して多くの知識を整理し、高炉を解明する上での思考の基準を獲得できるという点である。本稿では過去に報告され、現在なお活用されているプロセスモデル、ならびに、その活用例をまとめて示し、読者の参考に供したい。

高炉のプロセス解析は炉内調査による高炉内現象、および、炉内状況の把握とともに進歩した。ごく最近に至つては移動速度論に基づくプロセスモデルが高炉の解析の主流となり、数値計算法、あるいは、大型計算機の進歩と並行して、数学的モデルの開発が進められてきたといえる。

初期における高炉のプロセス解析は REICHARDT<sup>1)</sup> により行われた区分的熱収支法に基づく熱量線図、ならびに、それを発展させた RIDGION<sup>2)</sup>、あるいは、WARTMANN<sup>3)</sup> のモデルによつて代表される。REICHARDT 線図は明らかに熱的保存帯の存在を指摘しているが、KITAEV<sup>4)</sup> の熱交換理論はこれを明確に示した。一方、SHÜRMANN<sup>5)</sup> の炉内調査に基づいて STAIB and MICHARD<sup>6)</sup> は酸素交換理論を提案し、酸素交換速度のおそい不活性部、すなわち、化学的保存帯の存在を前提として操作線による高炉の解析法を提唱している。熱量線図や操作線図は高炉の基本的特徴をよくとらえており、現代におい

ても簡単に高炉内状況を示す方法として使用<sup>8)9)</sup>されている。

KOUMP<sup>ら</sup><sup>10)</sup> は上述のモデルの組み立てとはまったく異なる移動速度論に立脚した微分方程式によつて構成されるプロセスモデルを提唱した。このモデルは炉内でおこる伝熱あるいは反応を速度式として組み入れており、炉内現象の組み合わせの結果として、従来、高炉の特性として報告された軸方向におけるプロセス変数の分布状況を表現したことで注目され、その後開発されたプロセスモデルがほとんどこの手法に基づいている点を考慮すると現代の高炉の解析法の最初の提唱であるといえる。

ほぼ同時期に、これとは独立に鞭<sup>ら</sup><sup>11)12)</sup>により同様の手法を使つた1次元定常モデルが発表された。このモデルは単に微分方程式によつて構成された基礎式によつて炉内状況を推算するのみでなく、総括熱収支、物質収支を組み合わせ、炉の形状と操作変数を与えれば数学的モデルを通して操業結果を予測することができ、プロセスの性能評価を可能にした点で画期的なモデルである。このモデルの考え方は高炉内における水素の挙動の考察<sup>13)</sup>、高炉シャフト部へのガス吹き込み効果の予測<sup>14)</sup>、高圧操業や酸素富化操業の解析<sup>15)</sup>、送風圧変動の予測<sup>16)</sup>、などに使用された。他方、このモデルをさらに拡張した1次元非定常モデルが提唱され、高炉の火入れ<sup>17)</sup>や吹き却し操業<sup>18)</sup>のシミュレーション、あるいは、低シリコン操業の解析<sup>19)</sup>に使用されてきた。

我が国で数多く実施された高炉の解体調査<sup>20)~24)</sup>は融着層の存在や炉胸部における鉱石とコークスの層状構造などを含めて、半径方向の不均一性が操業に重要な影響を及ぼしていることを強く印象づけた。同時期に RADESTOCK<sup>ら</sup><sup>25)</sup>により ERGUN の圧力損失式<sup>26)</sup>を多次元化し、充填層内を流れるガスの運動の方程式として使う方法が提出された。この方法は充填層の構造の不均一性に基づくガスの不均一流れを評価できるため、その後、開発された2次元モデルにはほとんどこの方法が採用された。

現在、2次元モデルはまだ開発途上にあるが、羽田野、栗田<sup>27)</sup>、桑原、鞭<sup>28)</sup>、八木、大森<sup>ら</sup><sup>29)30)</sup>の研究にみ

昭和 58 年 3 月 31 日受付 (Received Mar. 31, 1983) (依頼解説)

\* 東北大学選鉱製錬研究所 工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, 2-1-1 Katahira Sendai 980)

られるように、主として、我が国において開発が進められており、それらの成果が期待されている。これら2次元モデルに考慮されている現象は同一ではないが、いかに数値解析を行うかということが極めて困難な問題であり、新しい数値計算法あるいはプログラミングの技術の開発が重要な課題になっている。

ここでは、熱力学に基づくモデルについては、紙数の都合で省略し、移動速度論に基づく1次元および2次元モデルの開発状況、ならびに、それらの実炉への応用を中心に高炉の数学的モデルの現状をまとめた。

なお、関連した文献として、1971年に書かれた館<sup>31)</sup>のすぐれた解説があり、1982年には鉄鋼基礎共同研究会高炉内反応部会の最終報告書<sup>32)</sup>が出版されているので参考にしていただきたい。

### 2. 1次元数学的モデル

移動速度論に基づく1次元の数学的モデルは高炉内におけるプロセス変数の軸方向分布を追求するために開発されている。この方法は前述のようにKOUMPら<sup>10)</sup>により始められ、鞭ら<sup>11)12)</sup>により、完全なモデルの形態が提示された。しかし、炉内でおこる、伝熱、反応など個々の移動現象の速度、あるいは、固体、気体、液体の運動に関する研究は急速に展開されており、1次元モデルにも、これらの基礎的な研究がとり入れられて来ている。モデルの表記法も徐々に変化しており、KOUMPら、鞭らの定常状態の記述からFIELDEN, WOOD<sup>39)</sup>、羽田野ら<sup>17)18)</sup>、田口ら<sup>19)</sup>の非定常モデルへと主流が移動している。

Fig. 1のコントロールボリュームに対して1次元の数学的モデルを導出し、田口らの表記法を参考にして、以下に拡散、伝導項を無視した場合の基礎式を示す。

物質収支:

$$A_z \frac{\partial(x_{jk}\rho_{Bj})}{\partial t} + \frac{\partial(x_{jk}V_j\rho_{Bj}A_z)}{\partial z} = A_z \sum_i \sum_k \beta_{ik}^{(i)} R_i^* \dots \dots \dots (1)$$

熱収支:

$$A_z \frac{\partial(c_j\rho_{Bj}T_j)}{\partial t} + \frac{\partial(c_j\rho_{Bj}V_jT_jA_z)}{\partial z} = A_z \left\{ \sum_l h_{l,j} a_{l,j} (T_l - T_j) + \sum_l c_l T_l \sum_k \sum_i \beta_{ik}^{(i)} R_i^* + \sum_i \alpha_i (-\Delta H)_i R_i^* \right\} + \delta_j \{ 2\pi r_z h_w (T_w - T_j) \} \dots \dots \dots (2)$$

圧力分布を求める ERGUN の式:

$$\partial P / \partial z = \{ 1.75 + 150(1 - \epsilon) / Re_p \} (1 - \epsilon) V_g \rho_g / \epsilon^3 d_p \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $a$ : 比表面積 ( $m^2/m^3(\text{bed})$ )、 $A_z$ :  $z$  の位置での炉断面積 ( $m^2$ )、 $c$ : 比熱 ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )、 $d_p$ : 粒子径 ( $m$ )、 $(-\Delta H)$ : 反応熱 ( $kJ/kmol$ )、 $h_{l,j}$ 、 $h_w$ :  $l, J$  相

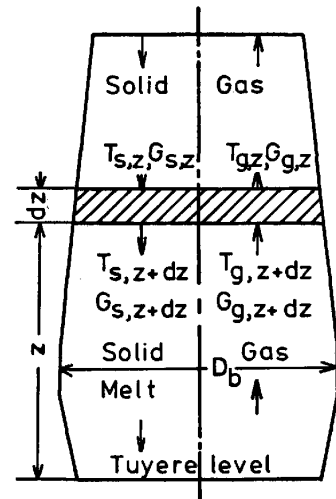


Fig. 1. Control volume in blast furnace.

間および炉壁の伝熱係数 ( $W/m \cdot ^\circ C$ )、 $P$ : 圧力 (Pa)、 $R^*$ : 反応速度 ( $kmol/m^3(\text{bed}) \cdot s$ )、 $Re_p$ : 粒子レイノルズ数、 $r_z$ : 炉半径 ( $m$ )、 $T$ : 温度 ( $^\circ C$ )、 $t$ : 時間 ( $s$ )、 $V$ : 流速 ( $m/s$ )、 $x$ : 各相における質量分率 (-)、 $z$ : 軸方向距離 ( $m$ )、 $\beta_{k,i}^{(i)}$ : 反応により  $l$  相から着目相へ移動する  $k$  成分の質量 ( $kg/kmol$ )、 $\epsilon$ : 空間率 (-)、 $\delta_j$ : 炉壁からの熱損失の  $j$  相からの割合 (-)、[添字]  $k$ : 各相での組成、 $l$ : 相 ( $g, s, m, sl$ )、 $i$ : 化学反応の種類。

(1)、(2)式で着目相  $j$  にはガス ( $g$ )、固体 ( $s$ )、メタル ( $m$ )、スラグ ( $sl$ ) の4相をとることができる。なお、

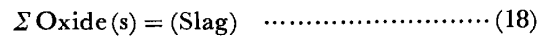
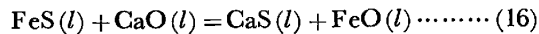
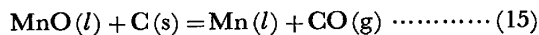
$$\sum_k x_{j,k} = 1 \dots \dots \dots (4)$$

は4つの相においてそれぞれ成立する。したがって、(1)式で  $x_{jk}$  を1とおくと、それぞれの相の連続の式が得られる。気相については、反応に関与する成分は(1)式から求め、不活性な窒素の割合は(4)式から求めるが、固相、液相については連続の式といくつかの着目成分についてのみ(1)式を適用するのが一般的である。ただし、熱収支式の計算には各相の組成平均として次式を使用する。

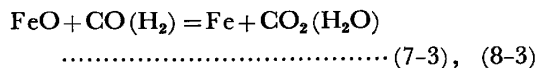
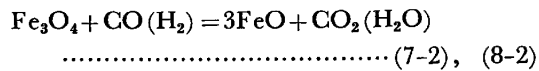
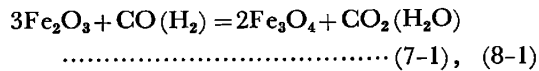
$$c_j = \frac{\sum_k c_k x_{jk}}{\sum_k x_{jk}} = \sum_k c_{jk} x_k \dots \dots \dots (5)$$

上記の基礎式中  $i$  で示した炉内反応として蒸発、溶融など相変態も含めて、つぎのような反応が考慮されている。

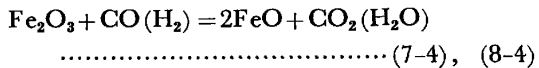
- $H_2O(\text{in solid}) = H_2O(g) \dots \dots \dots (6)$
- $(1/3)Fe_2O_3 + CO = (2/3)Fe + CO_2 \dots \dots \dots (7)$
- $(1/3)Fe_2O_3 + H_2 = (2/3)Fe + H_2O \dots \dots \dots (8)$
- $FeO(l) + C(s) = Fe(l) + CO \dots \dots \dots (9)$
- $C(s) + CO_2 = 2CO \dots \dots \dots (10)$
- $C(s) + H_2O(g) = H_2 + CO \dots \dots \dots (11)$
- $CaCO_3 = CaO + CO_2 \dots \dots \dots (12)$
- $H_2O + CO = H_2 + CO_2 \dots \dots \dots (13)$
- $SiO_2(s, l) + 2C(s, l) = Si(l) + 2CO(g) \dots \dots \dots (14)$



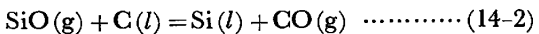
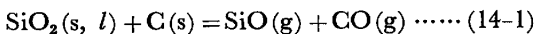
(7), (8)式で示される鉄の還元反応は中間生成物を考慮すると, つぎのような3段反応:



あるいは, 2段反応として速度式が組み立てられることもある。2段反応と考える場合は CO 還元に対して (7-4) 式と (7-3) 式, H<sub>2</sub> 還元に対して (8-4) 式と (8-3) 式の速度をあたえることになる。



また, (14)式によるシリカの還元反応では, 最近の研究によつて SiO ガスを経由した還元メカニズムが主要であることが明確にされ, 次式の反応で表されている。



この外にも, 羽口前レースウェイにおける酸素の関与する反応, あるいは, メタロイドの還元に関する P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> や TiO<sub>2</sub> の反応などがあるが, モデルにそれらの速度が組み入れられた報告はみあたらないので省略する。

反応速度式や速度パラメータの値は研究者により異なるが, プロセスモデルに使用するには温度や濃度などの広範囲にわたる変化に対応できる形式が望ましい。酸化

鉄の還元反応については, 原ら<sup>34)</sup> YANAGIYA ら<sup>35)</sup>, 村山ら<sup>36)</sup>, 高橋ら<sup>37)</sup>の3界面未反応核モデルがすぐれている。ソリューション・ロス反応については, 宮坂, 近藤<sup>38)</sup>, 小林, 大森<sup>39)</sup>, 石灰石の分解反応については HILLS<sup>40)</sup>, スラグ中の FeO の還元については須賀田ら<sup>41)</sup>, SiO<sub>2</sub> の還元反応については樋谷ら<sup>42)</sup>の研究が反応メカニズムを考慮した速度式を提出している。しかし, その他の液相反応や水性ガス変換反応のような触媒反応などについては今後の研究が待たれる。

過去に報告された主要な1次元モデルの特徴を Table 1 にまとめて示した。Table 1 中の各モデルから得られる代表的な結果を以下に示す。定常状態の解析については Fig. 2 と 3 に鞭ら<sup>12)</sup>のモデルから推算されたプロセス変数の軸方向分布および操作条件と操業成績の関係の一例を示した。数学的モデルで予測する場合操業条件を基準の操業から大幅に変化させることは予測精度を低下させるので好ましくないが, 定常状態のモデルを使つて, より効率のよい操業条件の推定が可能であることがわかる。

羽田野らは非定常モデルを使つて高炉の火入れ<sup>17)</sup>, および, 減尺吹き出し操業<sup>18)</sup>のシミュレーションを行つている。火入れ操業におけるシミュレーションの一例を Fig. 4 に示した。炉頂ガスの温度や組成の時間的変化についてはモデルによる予測値は実測値とよく対応している。しかし, れんが温度の予測はやや誤差が大きい。この点についても, 枕木消失の荷下り速度への影響, ならびに, 気固間熱交換係数に適切な値を選ぶことによつて, よいシミュレーション結果が得られたことを報告しており, 火入れ時に発生しやすいれんがのスポーリング割れをさけるため数学的モデルが寄与していることがわ

Table 1. One-dimensional Mathematical Models of Blast Furnace Proposed Up to the Present.

Researcher/year	Situation described	Phase and its components considered	Reaction rate	Remarks	Ref.
KOUMF et al. (1964)	Static	g(CO, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> ) s(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeO, Fe, C, inert)	(7-3), (7-4) (10)	Reaction and heat exchange model for lumpy zone assuming isobaric condition.	10
MUCHI, YAGI et al. (1966)	Static	g(CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> ) s(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe, C, inert) m(Fe, inert) sl(FeO, SiO <sub>2</sub> , inert)	(7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14), (17), (18)	Overall heat and material balance. Estimation of the relationship between operational condition and in-furnace situation. (independent hearth model)	11, 12 14
FIELDEN, WOOD (1968)	Dynamic	g(CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> ) s(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe, C, inert) m(Fe, Si, Mn, P, S, inert) sl(FeO, SiO <sub>2</sub> , MnO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , inert)	(6), (7), (9), (10), (14), (15), (16)	Model by difference equation giving response curves for temperature and composition of top gas and hot metal caused by the change in operational conditions.	33
KUWABARA, MUCHI (1975)	Quasi-dynamic	g(CO, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> ) s(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , C, inert)	(7), (10), (12)	Difference-differential equation model considering periodic steady-state and layered structure of ore and coke.	43
HATANO et al. (1982)	Dynamic	g(CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> ) s(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FeO, Fe, C, inert) m(inert) sl(FeO, inert)	(6), (7-3), (7-4), (8-3), (8-4), (9), (10), (11), (13), (17), (18)	Mass changes of accumulated metal and slag in hearth and temperature of wall brick.	17
TAGUCHI et al. (1982)	Dynamic	g(CO, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> ) s(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe, C, inert) m(C, Si, inert) sl(SiO <sub>2</sub> , FeO, inert)	(7), (10), (14-1), (14-2), (17), (18)	Heat and material balance equations in dropping zone with the reaction rate of Si transfer through SiO gas.	19

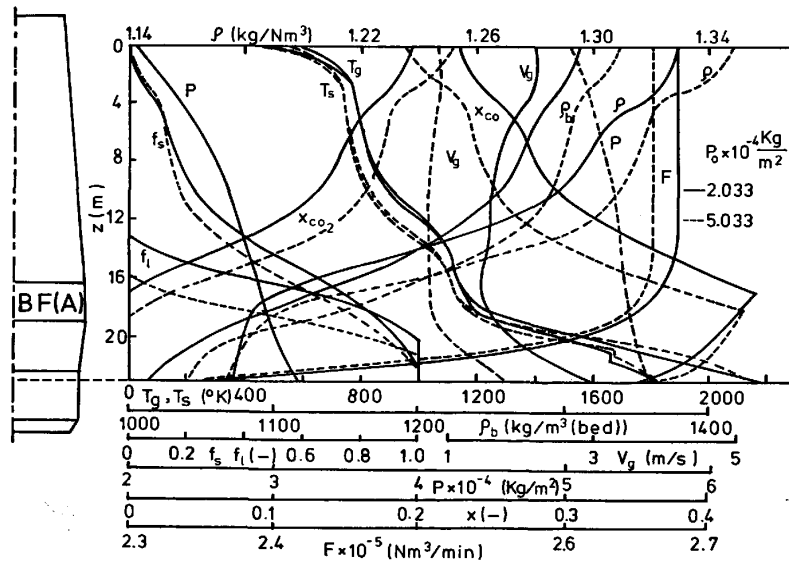


Fig. 2. Longitudinal distribution of process variables in BF(A) for high pressure operations<sup>12)</sup>. ( $F$ : flow rate of gas,  $f_s, f_1$ : fractional reductions of iron oxide and limestone,  $P$ : pressure of gas,  $T_g, T_s$ : temperatures of gas and solid,  $V_g$ : linear velocity of gas,  $x_{CO}, x_{CO_2}$ : molar fractions of CO and CO<sub>2</sub>,  $\rho, \rho_b$ : density of gas and bulk density of solid)

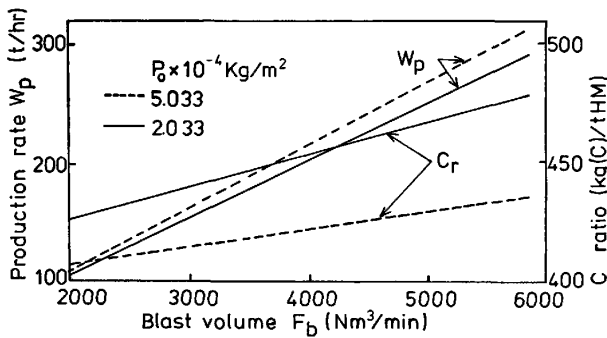


Fig. 3. Effect of the blast volume on  $W_p$  (production rate) and  $C_r$  (carbon ratio) in BF(A)<sup>12)</sup>.

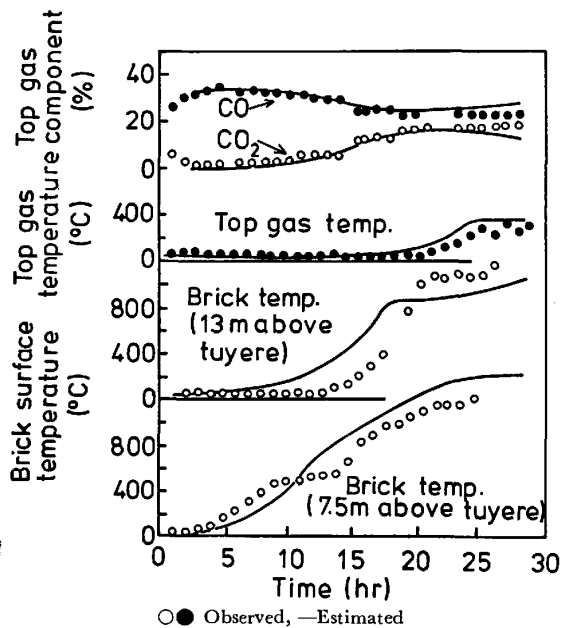


Fig. 4. Comparison between estimated and observed changes in process variables<sup>18)</sup>.

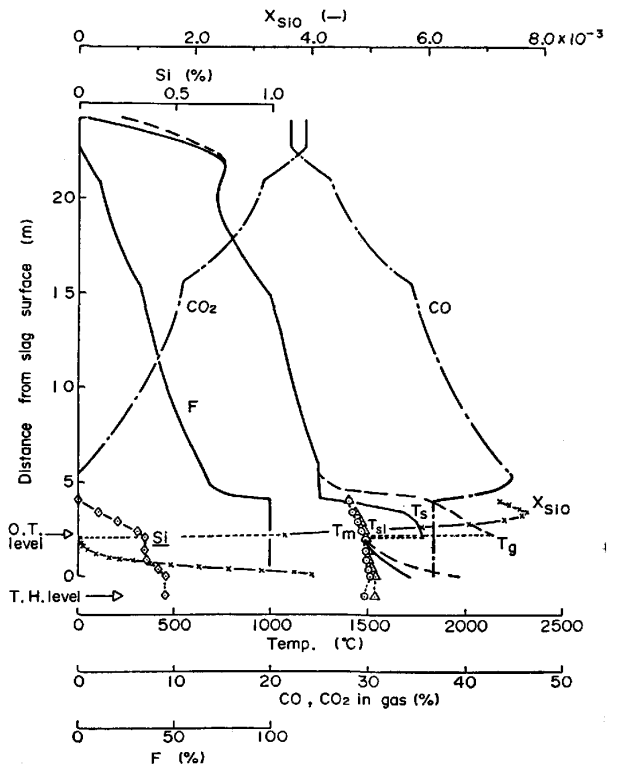


Fig. 5. Computed distribution of in-furnace variables for steelmaking iron<sup>19)</sup>. ( $CO, CO_2$ : CO, CO<sub>2</sub> contents in gas,  $F$ : fractional reduction of iron oxide,  $T_g, T_m, T_s, T_{sl}$ : temperatures of gas, metal, solid and slag,  $X_{SiO}$ : molar fraction of SiO in gas)

かる。

田口ら<sup>19)</sup>は低シリコン操業の解析に数学的モデルを使用した。この場合非定常モデルであるから経時変化を求めることができるが、一定の操業条件下でプロセス変数

の分布を計算し、時間的に変化しなくなった時点で定常状態と考え Fig. 5 に示すような結果を得ている。特に、液相 (メタル、スラグ) の滴下帯における温度、ならびに、Si 濃度が求められる点が特徴である。

桑原、鞭<sup>43)</sup>は FIELDEN and WOOD<sup>39)</sup> の考え方を発展させ鉍石層が層状に存在しているという炉内構造を考慮し、鉍石とコークス層各一層からなる一ブロックが一定時間滞留した後瞬間的につぎの場所に降下するという仮定のもとに、一定滞留時間内では非定常的に反応と伝熱が進むとして、周期的定常状態が表現できるモデルを作成し鉍石とコークスの層状構造に基づく、プロセス変数の振動状態を表現している。

### 3. 1次元モデルによる半径方向分布の推定

重見ら<sup>45)</sup>、下村ら<sup>46)</sup>は高炉を半径方向に 20 分割し、各区間に鞭らの 1 次元モデルを適用し、炉頂で測定したプロセス変数の半径方向分布を使用して各区間における炉頂-溶融レベル間のプロセス変数の軸方向分布を推算し、半径方向の温度や反応率の分布を求めている。解体調査で得られた融着帯の分布と計算で得られた温度分布の比較を Fig. 6 に示したが、この方法によつて、測定

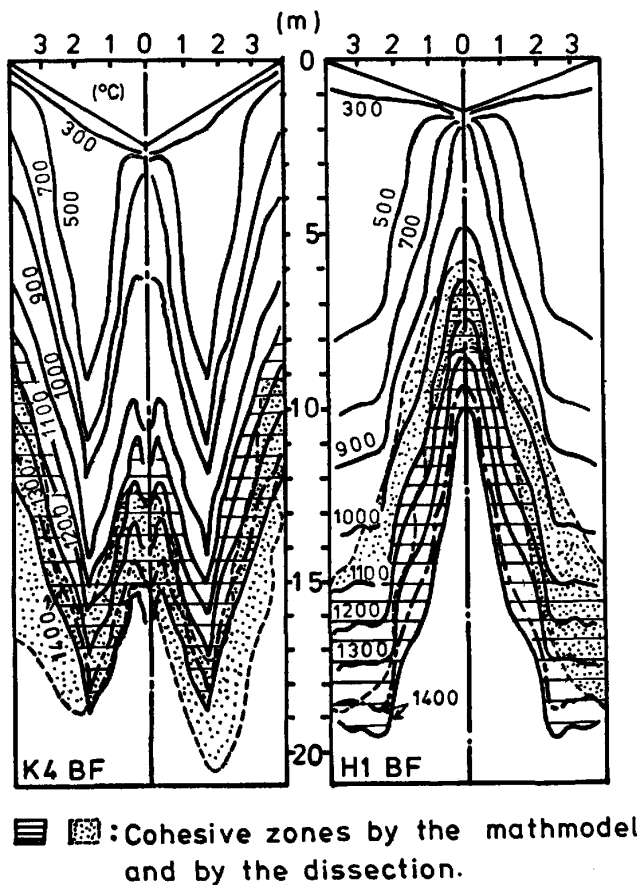


Fig. 6. Radial temperature distribution and profile of cohesive zone estimated by a mathematical model<sup>46)</sup>.

値にかなりよく対応した半径方向分布が得られることがわかる。この考え方は田村ら<sup>47)</sup>によつて融着帯外部形状を含めた高炉塊状帯状況推定モデルに発展した。他方、桑原ら<sup>43)</sup>は高炉を半径方向に 5 分割し、前述の差分微分モデルを各区間に適用して、高炉の半径方向における温度と反応率の分布を求めている。このモデルにおいてはガスの流速分布は ERGUN の式に基づき半径方向で等圧の条件を使つてあらかじめ与えている。得られた結果の一例を Fig. 7 に示した。なお、このモデルによつて、成田ら<sup>48)</sup>は高炉の解体調査時に炉内状況の予測を行い良好な結果が得られたことを報告している。

### 4. 2次元数学的モデル

高炉の 2 次元数学的モデルの基礎式はつぎのように表される。

ガスの運動の方程式:

$$-\text{grad}(P) = (f_1 + f_2 |V_g|) V_g \dots\dots\dots (19)$$

固体の運動の方程式:

$$-\text{grad}(\phi_s) = V_s/a_s \dots\dots\dots (20)$$

j 相の連続の式:

$$\frac{D}{Dt} (\rho_{Bj} V_j) + \rho_{Bj} \text{div} (V_j) = \sum_k \sum_l \sum_i \beta_{i,k}^* R_k^* \dots\dots\dots (21)$$

j 相の熱収支:

$$\frac{D}{Dt} (c_j \rho_{Bj} T_j) + c_j \rho_{Bj} T_j \text{div} (V_j)$$

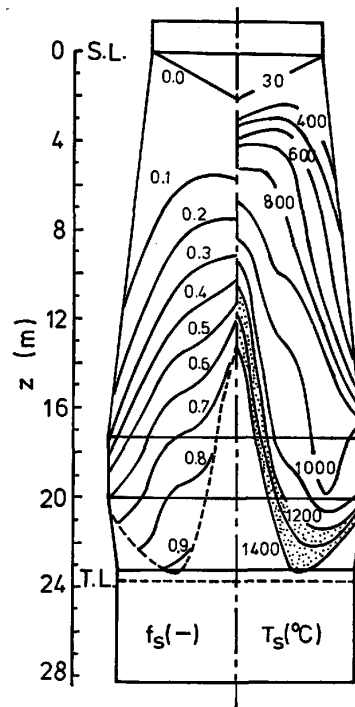


Fig. 7. Computed distribution of equi-fractional reduction ( $f_s$ ) and isotherm of solid ( $T_s$ ) in a blast furnace<sup>43)</sup>.

$$\begin{aligned}
 & -\text{div} \{K_j \text{grad} (T_j)\} - \sum_i h_{ij} a_{ij} (T_i - T_j) \\
 & -Q_j = 0 \dots\dots\dots (22)
 \end{aligned}$$

ここで、 $Q_j = \sum_i c_i T_i \sum_k \beta_{ik}^{(j)} R_i^* - \sum_i \gamma_{ij} (-\Delta H_i) R_i^*$

j相の物質収支:

$$\begin{aligned}
 & \frac{D}{Dt} (\rho_{Bj} x_{jk}) + \rho_{Bj} x_{jk} \text{div} (\mathbf{V}_j) \\
 & -\text{div} \left\{ \sum_m \alpha_m E_m \text{grad} (C_{jm}) \right\} \\
 & - \sum_i \beta_{ik}^{(j)} R_i^* = 0 \dots\dots\dots (23)
 \end{aligned}$$

ここで、 $a_s$ : 比例定数、 $C_{jm}$ : j相中におけるm成分の濃度 (kmole(m)/m<sup>3</sup>(bed)),  $E_m$ : m成分の混合拡散係数 (m<sup>2</sup>/s)、 $K_j$ : j相の有効熱伝導度 (W/m<sup>2</sup>·°K)、 $\alpha_m$ : 換算係数 (kg/kmole(m))、 $\gamma_{ij}$ : 反応iによる反応熱のj相が取得する割合、その他の記号は1次元モデルの場合と同じである。

ガスの運動の方程式は ERGUN の式を多次元化したものであり、慣性項の有無あるいは拡張形式などの議論<sup>49)</sup>があるが、一般的には(19)式の形で使用されている。塊状帯における固体の運動については(20)式で表されるようにポテンシャル流れとして解析できるようであるが、羽口近傍での固体の運動<sup>51)~53)</sup>は今後の課題である。また、滴下帯における液体の運動についてはポテンシャル流れとしての解析例<sup>54)</sup>があるのみである。炉床における液体の運動についても2, 3の報告があるが、詳細は原論文<sup>55)~57)</sup>を参考にされたい。熱収支、物質収支式の左辺第三項は2階の偏微分項であるが、無視できるくらい小さいとの指摘<sup>27)</sup>もある。固相、液相については、この項が考慮された解析例はない。なお、上記の基礎式は

運動の方程式以外実質微分記号を使用して一般的に非定常形で書いたが、現在の段階では2次元モデルは定常状態に対して数値解析法の開発が進められており、非定常2次元モデルあるいは3次元モデルへの拡張は今後の課題として残されている。

高炉内における2次元ガス流れの解析は RADESTOCK ら<sup>25)</sup>が ERGUN 式を(19)式のようにベクトル表示してガスの運動の方程式として使用して以来急速に発達した。特に、杉山ら<sup>58)</sup>は解体調査で得られる鉱石とコークスの層状構造を表すのに、3次の多項式を使用しガスの半径方向における流速分布を推定している。一方、大野ら<sup>59)</sup>、八木ら<sup>29)30)</sup>は有限要素法を使用して炉内における層構造をより厳密に表現できる数値解析法をガス流れの計算に応用している。この方法は入田ら<sup>60)</sup>により、融着帯の形成に関するモデル実験の1つの解析手段に、また、国分ら<sup>61)</sup>により、加湿送風による高炉の通気性の変化の検討に使用された。有限要素法によるガス流れの解析は八木ら<sup>30)</sup>により伝熱と組み合わせられ、炉内における層構造とガス流れ、温度分布の関係が推定されている。計算結果の一例を Fig. 8 に示した。この計算結果から、ガス流れは、主として、層構造(粒子径、空間率、層厚)によつて支配され、ガス流れが温度分布を支配するという基本的関係を示している。流動と伝熱に関するモデル実験もいくつか報告<sup>60)62)63)</sup>されており、数学的モデルによるシミュレーションも行われている。

流動と伝熱に、さらに、反応を含む物質収支をも同時に解析した結果が羽田野、栗田<sup>27)</sup>、桑原、鞭<sup>64)</sup>によつて最近報告されている。羽田野らの計算結果の一例を Fig. 9 に示す。同図はガスの流れ、熱的状态、ならば

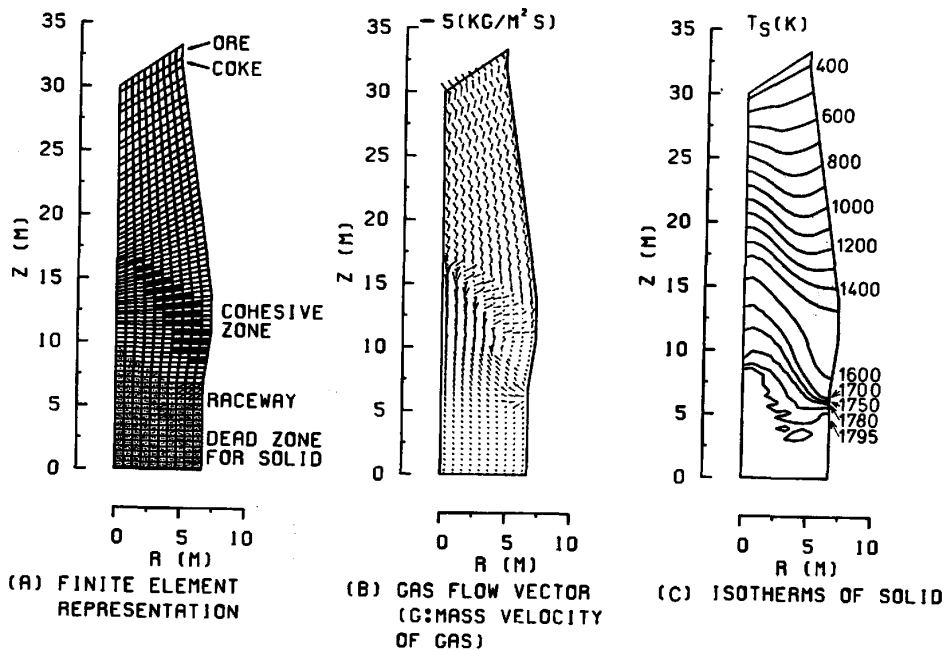


Fig. 8. Bed structure and computed results for gas flow and isotherm in a blast furnace<sup>30)</sup>.

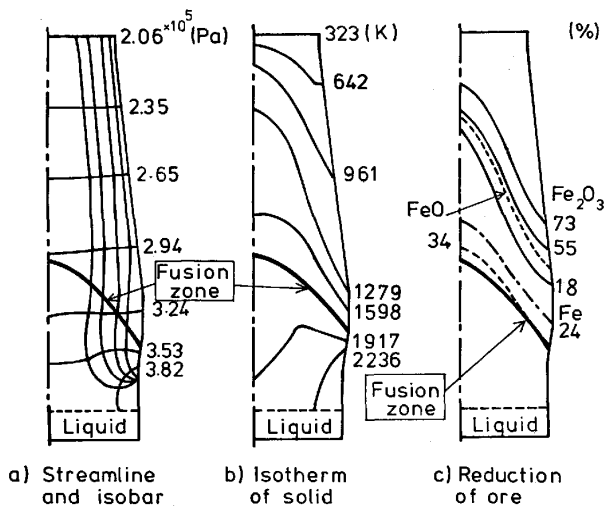


Fig. 9. In-furnace situation of a blast furnace estimated from a mathematical model<sup>27)</sup>.

に、化学反応の進行に関する半径方向の不均一性を示している。操業状態の変化にともなう融着帯の変化も予測することができるようになりつつある。

2次元モデルに使用されている数値計算法には2階の偏微分方程式を差分近似し緩和法(S.O.R.法)を適用する方法<sup>64)</sup>、伝熱、物質移動の方程式から拡散、伝導項を落とし、1階の偏微分方程式にして、特性曲線法を使用する方法<sup>27)</sup>、有限要素法による方法<sup>29)30)59)</sup>が開発されている。関連する数値計算法は種々の学問分野で開発が試みられているが、高炉のプロセスモデルはかなり特殊なものであり、これらの方法を導入するばかりでなく演算時間や収束性の面から状況にあわせた改良あるいは新しい方法の開発が望まれている。

最後に、羽田野ら<sup>65)</sup>は高炉のみならずコークス炉、焼結炉、熱風炉のプロセスモデルを有機的に結びつけ、製造工程全体にわたるシステムのシミュレーションモデルを開発しており、将来が期待される。

## 5. 結 言

従来発表された高炉のプロセスモデル、ならびに、その活用状況を概観した。熱量線図、操作線図による解析、ならびに、移動速度論に基づく1次元の数学的モデルはほぼ完成されており、個々の目的に従って実炉の操業改善や特性の把握に使用されている。2次元モデルについては、いくつかの数値解析法が開発されつつあるが、トータルモデルの実用化は今後の課題である。しかし、ガス流れの2次元解析はすでに実用化されているといえよう。

移動速度論に基づく高炉のプロセスモデルは外形ができ上がったのみであり、よりよいモデルに仕上げるには炉内で起こる現象のメカニズムと速度を正確に表現することが不可欠の要因である。例えば、固体の装入、降下時の運動、粉化、軟化溶解、これらと関連した空間率の

変化、伝熱メカニズム、焼結鉱のような不均質で不規則形状粒子の反応速度、融体の運動、レースウェイ内の現象、液相の関連する反応の速度などは最近徐々に研究が進められているが、まだ、数多くの問題が残されている。最後に、実炉やモデル実験から得られた知見を数学的モデルに集約し、高炉の解明のためにより高いレベルでの思考の基準が得られることを期待する。

## 文 献

- 1) P. REICHARDT: Arch. Eisenhüttenwes., 1 (1927), p. 77
- 2) J.M. RIDGION: JISI, 200 (1962), p. 398
- 3) V.R. WARTMANN: Arch. Eisenhüttenwes., 34 (1963), p. 87; 35 (1964), p. 15; 35 (1964), p. 159; 35 (1964), p. 173
- 4) B.I. KITAEV, Yu. G. YAROSHENKO, and V.D. SUCHKOV: Heat Exchange in Shaft Furnace. (Translated from the Russian by M.M. PAGE and H. SIMONS) ed. by P.A. YOUNG (1967) [Pergamon Press, Oxford]
- 5) E. SHURMANN, W. ZISCHKALE, P. ISCHEBECK, and G. HEYNERT: Stahl Eisen, 80 (1960), p. 854
- 6) C. STAIB and J. MICHARD: J. Met., 17 (1965), p. 33, p. 165
- 7) A. RIST and N. MEYSSON: J. Met., 19, Apr. (1967), p. 50
- 8) 宮下恒雄, 西尾浩明, 下間照男, 山田健夫, 大槻満: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 608
- 9) 小林 正, 中谷文忠, 岡部俠児, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 881
- 10) V. KOUMP, R.H. TIEN, R.G. OLSSON, and T. F. PERZAK: Mathematical Simulation of the Blast Furnace in "Process Simulation and Control in Iron and Steelmaking", ed. by J. M. Uys and H.L. BISHOP, (1964), p. 125 [Gordon and Breach Science Pub., London]
- 11) 靱 巖, 田村健二, 八木順一郎, 森山 昭: 日本金属学会誌, 30 (1966), p. 1109
- 12) J. YAGI and I. MUCHI: Trans. ISIJ, 10 (1970), p. 392
- 13) 杉山 喬, 下村泰人, 原 行明: 鉄と鋼, 68 (1982), S80
- 14) 八塚健夫, 中山一之, 大森和男, 原 義明, 井口正昭: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 624
- 15) 若林敬一, 藤浦正巳, 森 孝, 井上展夫: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 867
- 16) 宮坂尚親, 須賀田正泰, 原 行明, 近藤真一: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 18
- 17) 羽田野道春, 栗田興一, 山岡秀行, 横井 毅: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2369
- 18) 同上, p. 2377
- 19) 田口整司, 久保秀穂, 榎谷暢男, 一藤和男, 岡部俠児: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2303
- 20) 神原健二郎, 萩原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平本信義: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 535
- 21) 佐々木寛太郎, 羽田野道春, 渡辺雅男, 下田輝久, 横谷勝治, 伊藤孝夫, 横井 毅: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 580

- 22) 日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会：第1回高炉反応部会 (1977) (私信)
- 23) 橋爪繁幸, 高橋洋光, 中川敏彦, 富田貞雄, 佐藤政明, 森岡恭昭, 小板橋寿光: 鉄と鋼, 64 (1978), p. S108
- 24) 吉村研三, 佐藤 忠, 富貴原璋, 島崎重信, 成田貴一, 前川昌大, 金山宏志: 鉄と鋼, 64 (1978), S551
- 25) J. RADESTOCK and R. JESCHAR: Stahl Eisen, 90 (1970), p. 1249
- 26) S. ERGUN: Chem. Eng. Progr., 87 (1952), p. 48
- 27) 羽田野道春, 栗田興一: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1898, 63 (1977), S432
- 28) 桑原 守, 鞭 巖: 鉄と鋼, 68 (1982), S782
- 29) 八木順一郎, 武田幹治, 大森康男: 鉄と鋼, 66 (1982), p. 1888
- 30) J. YAGI, K. TAKEDA, and Y. OMORI: Trans. ISIJ, 22 (1982), p. 884
- 31) 館 充: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1402
- 32) 高炉内現象とその解析 (高炉内反応部会報告書) (高炉内反応部会編) (1982) [日本鉄鋼協会]
- 33) C.J. FIELDEN and B.I. WOOD: JISI, 206 (1968), p. 650
- 34) 原 行明, 土屋 勝, 近藤真一: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 1261
- 35) T. YANAGIYA, J. YAGI, and Y. OMORI: Ironmaking Steelmaking, 6 (1979), p. 93
- 36) 村山武昭, 小野陽一, 川合保治: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1099
- 37) 高橋礼二郎, 黒豆伸一, 高橋愛和: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 336
- 38) 宮坂尚親, 近藤真一: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 1427
- 39) 小林三郎, 大森康男: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 187, p. 1081
- 40) A.W.D. HILLS: Chem. Eng. Sci., 23 (1968), p. 297
- 41) 須賀田正泰, 杉山 喬, 近藤真一: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 1363
- 42) 槌谷暢男, 徳田昌則, 大谷正康: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 1927
- 43) 桑原 守, 鞭 巖: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 301, p. 787
- 44) 鞭 巖, 森山 昭, 八木順一郎, 田村健二: 日本金属学会誌, 31 (1967), p. 97
- 45) 重見彰利, 鈴木 明, 肥田行博, 山口一良: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 547
- 46) 日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会：第4回高炉内反応部会 (1978) (私信)
- 47) 田村健二, 林 洋一, 松井正昭, 彼島秀雄, 山本崇夫: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2287
- 48) 成田貴一, 小林 敷, 清水正賢, 稲葉晋一: 学振 54 委-No. 1576 (昭和 56 年 11 月)
- 49) 八木順一郎: 日本金属学会報, 16 (1977), p. 357
- 50) M. CHOUDHARY, M. PROPSTER, and J. SZEKELY: AIChE J., 22 (1976), p. 600
- 51) M. KUWABARA, Y. SHENG, K. ISOBE, and I. MUCHI: Preprint for Int'l Blast Furnace Hearth & Raceway Symposium (1980), Newcastle, Australia, p. 7-1
- 52) 宮崎富夫, 梶原義雅, 神保富生: 鉄と鋼, 66 (1980), S91
- 53) 佐藤裕二, 杉山 喬, 中村正和, 原 行明: 鉄と鋼, 66 (1980), S635
- 54) 高炉内現象とその解析 (高炉内反応部会中間報告書) (高炉内反応部会編) (1979), p. 147 [日本鉄鋼協会]
- 55) J. OHNO, M. NAKAMURA, Y. HARA, M. TACHIMORI, and S. ARINO: Preprint for Int'l Blast Furnace Hearth & Raceway Symposium (1980) Newcastle, Australia, p. 10-1
- 56) 岡部俠児, 吉川文明, J. Szekely: 学振 54 委-No. 153B (昭和 55 年 11 月)
- 57) J.M. BURGESS, D.R. JENKINS, M. J. MCCARTHY, L.P. NOWARK, W.V. PINCZEWSKI, and W.B. U. TANZIL: Preprint for Int'l Blast Furnace Hearth & Raceway Symposium (1980), Newcastle, Australia, p. 9-1
- 58) 杉山 喬, 下村泰人, 原 行明: 鉄と鋼, 68 (1982), S706
- 59) 大野陽太郎, M. SCHNEIDER: 鉄と鋼, 64 (1978), S31
- 60) 入田俊幸, 磯山 正, 原 義明, 奥野喜雄, 金山有治, 田代 清: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2295
- 61) 国分春生, 佐々木晃, 田口整二, 槌谷暢男: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2338
- 62) 大野陽太郎, 名雪利夫, 近藤国弘, K. KREIBICH: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 112
- 63) 田村健二, 榎戸恒夫, 斧 勝也, 高松 猛, 中原義臣, 浅井謙一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 789, p. 790
- 64) 桑原 守, 鞭 巖: 鉄と鋼, 68 (1982), S782
- 65) 羽田野道春, 西岡邦彦, 佐藤 駿, 山岡秀行, 田中勉: 鉄と鋼, 68 (1982), S115