高炉の定常状態モデルと一般逆行列の応用

岩 尾 範 人*

Application of Generalized Inverse Matrix to Blast Furnace Steady State Models

Norito IWAO*

In order to simplify the blast furnace control system, study was made to understand the relations among the reaction raw materials (X), the reaction products (Y), and the reaction rates (r) in the blast furnace by the method described below.

1) Basic model of B.F. operation

The material flow in the blast furnace is diagrammed according to the conservation laws of mass and number of atoms.

This diagram was proposed by the author as the basic model of B.F. operation, to clarify the relations among various process variables.

2) Method of obtaining reaction products (Y)

In seeking the reaction products (Y) from the reaction raw materials (X), it will be found that the number of equations is greater than the number of unknown variables (Y).

Hence, the selection of equations is required for obtaining the solution.

3) Application of generalized inverse matrix

The generalized inverse matrix is the method which uses all equations obtained. And its application is described here.

4) Method of obtaining reaction rates (r)

In seeking the reaction rates (r) in the blast furnace from the reaction products (Y) and the reaction raw materials (X) described in the foregoing paragraph, the node equations are formulated by the use of the basic model.

In this case, the number of node equations is also greater than the number of unknown variables (Y).

It is shown here that the reaction rates (r) must be sought by selecting independent nodes

in accordance with the theory of graph.

5) Result of simulation

It is found that the solution loss value, which is an important B.F. operation index, is different for the traditional method and the generalized inverse matrix method.

This result indicates the necessity to find a method most suited for estimating the state of actual process.

Key Words: blast furnace model, modelling, observability of B.F., process control, control model of B.F.

1. 緒 言

鉄鋼生産技術部門でのわが国の優位性は、「設備大型化への対応の良さ」、「きめの細かい日常操業管理」および、「設備保全技術の優秀性」により達成されたといわれている。

設備大型化のスケールメリットが望めない今後も、この技術基盤の優位性を維持していく必要があり、そのためには、操業管理、設備管理の、より一層の徹底が必要になるであろう。その結果、必然的にプロセスの計測は複雑になり、入出力変数も多くなって、複雑な計測制御システムが作り上げられる。

したがって、鉄鋼プロセスの計測と制御に関係する技術者に課せられた重要課題の一つに、必要な操業指標はどのようなアルゴリズムで求められるかを明らかにし、シンプルな計測制御システムを作ることがあげられる。そこで筆者は、鉄鋼業のシンボルでもあり、製鉄所全体の生産、品質、コスト、エネルギーバランスに、大きな影響を与える高炉プロセスを例にとり、得られたデータで本質的な指標はどうして求められるかを明らかにしたので、ここに発表する。

先に筆者が開発した高炉の基本型モデル¹⁾(BF-BM)を利用し、物質収支と測定値から、反応原料量 (x),

* 新日本製鐵(株)第3技術研究所 北九州市八幡東区枝光 1-1-1

* R & D Labs. 3, Nippon Steel Corporation, Kitakyushu

(Received October 25, 1985)

(Revised March 5, 1987)

反応生成物量 (y), の関係を明確にし, この関係式の選択次第では, 求めたい反応生成物量 (y) の解が多くあることを示した.

また得られる関係式をすべて使い, 各関係式の誤差の 2 乗和が最少が良いという意味で解を求めるのに, 一般逆行列^{2), 6)}の導入があり, ここに提案した.

2. 高炉の概要^{4), 5)}と簡単化高炉の基本型モデル

高炉 (溶鉄炉) は, 炉頂から原料用鉄石と還元用コークスを, それぞれの層厚が平均 0.5 m 程度になるように交互に装入し, 炉底部の羽口から高温空気 (約 1,100°C の熱風) を送り込んで鉄石を還元し, 炉底部より 4~5% の諸元素 (カーボン, シリコンなど) を含む銑鉄を得るプロセスである. 実高炉を細かく解析していくと論旨が細かくなり複雑さを増すので, 本質を失わない程度に簡略化し, しかも実用モデルに発展可能なモデルを Fig. 1 に示し, これで論旨を展開する.

炉頂より装入の原料鉄石は, ユスタイト (FeO) とヘマタイト (Fe₂O₃) とスラグになる (ZS) の 3 成分のみで, それぞれ LFeO (以下単位は, ZS を除いて, kmol/T.P., 毎溶鉄 1 トン当りのキロモルとする. ZS は kg/T.P.), LFe₂O₃, LZS であり, コークスはカーボン (C) とスラグになる成分 (ZS) の 2 成分で, それぞれ CCoke および CZS である. 一方, 羽口よりの熱風は空気のみで, 窒素 (N₂) と酸素 (O₂) と考え, それぞれ BN₂, BO₂ を吹き込む. またこれらにより生成する炉頂ガスは窒素 (N₂), 炭酸ガス (CO₂), 一酸化炭素 (CO) でそれぞれ UN₂, UCO₂, UCO で排出され, 溶鉄は鉄 (Fe) とカーボン (C) のみとし, それぞれ PFe, PC でありスラグは SZS である.

炉内での反応は, Fig. 1, Fig. 2 に示すように, 間

Fig. 1 Schematic figure of simplified blast-furnace

Fig. 2 Basic model of simplified blast furnace (material flow diagram)

接還元帯, 直接還元帯および羽口燃焼帯の三つに区分される. 間接還元帯では, Fig. 1 ①, ②に示す還元がおき, それぞれ iFeO, iFe の反応速度である. 直接還元帯では Fig. 1 ③に示す還元がおき, その反応速度は dFe である. 更に羽口では Fig. 1 ④に示すコークスが熱風中の O₂ で燃焼し, tC だけの反応がおきている.

本論文は, 反応原料量 (X) と反応生成物量 (Y) と炉内でおきている反応速度 (R) の関係を明確にすることがその主旨であるので, 本来高炉で大切な役割をはたす H₂ の挙動および Si の還元などは, 考慮しないで論旨を展開する.

以上の簡略化で, 原料相互間の物流に応じて, 物流線図を作ると, Fig. 2 が得られる. すなわち, 装入原料中 Fe₂O₃ に着目すると, まず iFeO なる反応速度で, CO ガスにより FeO まで還元され, 原料中の FeO と合流し, 更に CO ガスにより一部は Fe まで iFe の速度で還元され, 直接還元帯に降下する. 直接還元帯では化学式 (1) がおき

見掛け上, カーボンが直接 FeO を還元しているように観測される. この反応速度が dFe である. 先に還元された iFe と合流して, PFe の速度で鉄が生産されていくことを示している. 同様にコークス中のカーボンに着目すると, 間接還元帯では, 何の化学変化も受けず, 直接還元帯に入ると, いわゆるソリュ

シヨノロス反応 dFe がおき、一部分が消費され、羽口燃焼帯で tC なる速度でその大部分が消費されて、残りの一部分が PC となり、銑鉄に溶解されて消費していく状態を線図にしている。また羽口より吹き込まれた O₂ についても同様なトレースを行うと、高炉での物質移動が線図により明確になる。このように、質量保存則と、原子数保存則により作られた物流線図を、以後簡単化高炉の基本型モデルという (basic model of simplified blast furnace)。

3. 反応原料量 (X) と反応生成物量 (Y) との関係

高炉にかぎらず、他の化学装置においても、物質収支のみで、一般に反応原料量 (X) から反応生成物量 (Y) を算出することはできない。したがってなんらかの測定、あるいは推定にもとづく関係式が必要になる。

高炉プロセスでは早い情報として炉頂ガスを分析して、その関係式が求められる。また銑鉄中のカーボンは余り変化しないので、この関係が利用できる。

Fig. 1, Fig. 2 にもとづいて、反応原料量 (X) (図中太線四角枠) と反応生成物量 (Y) (図中細線四角枠) の関係は、物質収支と上述測定式を考慮すると、(2) 式で表わされる。

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \text{UN}_2 \\ \text{UCO}_2 \\ \text{UCO} \\ \text{PFe} \\ \text{PC} \\ \text{SZS} \\ \hline \end{array} \Rightarrow \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \text{BN}_2 \\ \text{BO}_2 \\ \text{LF}_2\text{O}_3 \\ \text{LF}_2\text{O} \\ \text{LZS} \\ \text{Coke} \\ \text{CZS} \\ \hline \end{array} \\
 \\
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 & & \\ \hline 2 & 1 & & & \\ \hline & 1 & & & \\ \hline -1 & 1 & & & \\ \hline & & -1 & & \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 2 & 1 & 1 & & \\ \hline 1 & 3 & & & \\ \hline & 1 & 2 & & \\ \hline & & 1 & & \\ \hline & & & 1 & \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \text{ebN}_2 \\ \text{ebC} \\ \text{ebO} \\ \text{ebFe} \\ \text{ebZs} \\ \hline \text{emTN} \\ \text{emIN} \\ \text{eeCF} \\ \hline \end{array} \div \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} \quad (2)
 \end{array}$$

$\text{ebN}_2, \text{ebC}, \text{ebO}, \text{ebFe}, \text{ebZs}$ は夫々の収支誤差
 $\text{emTN}, \text{emIN}, \text{eeCF}$ は下記の夫々の測定・推定誤差
 但し、 $t = \{\text{CO}_2\} / \{\text{N}_2\} : \{\text{N}_2\}, \{\text{CO}_2\}, \{\text{CO}\}$ BFG 中 $\text{N}_2, \text{CO}_2, \text{CO}$ の Vol%
 $i = \{\text{CO}\} / \{\text{N}_2\} : \{\text{C}\}, \{\text{Fe}\}$ 溶鉄の Fe, C の w%
 $\text{C} = \frac{[\text{C}]\text{AFe}}{[\text{Fe}]\text{Ac}} : \text{AFe}, \text{Ac}$ 鉄、カーボンの原子量
 一文字表示で $-(B)(Y) + (A)(X) = (e)$

〔本来 (2) 式は反応原料量 (X), 反応生成物量 (Y) は縦ベクトルであるが、マトリックスの見通しを良くするために、以降ベクトルを転置して、(2) 式のように記述する。〕

(2) 式で 1~5 行は、それぞれ N₂, C, O, Fe, ZS についての収支式で、6, 7 行は炉頂ガスの CO₂ と N₂, CO と N₂ の測定値の比であり、8 行は銑鉄中の Fe

Table 1 Selection of equations

と C の推定値との比である。

(2) 式で求めた反応生成物量 (Y) は (UN₂, UCO₂, UCO, PFe, PC, SZS) の 6 変数であるのに、条件式が八つあり、多すぎる。したがって収支がとれているとすると (すなわち (e)=0 とすると)、8 条件の中から 6 条件を選べばいいことになる。このそれぞれのケースを Table 1 に示す。Table 1 中段の○印は (2) 式で採用する行で、無印は不採用の行である。たとえば Case 1 は炉頂ガスの分析値 {CO} を溶鉄成分比 (C) を採用しない。その他の 6 条件を利用したケースである。

Table 1 下方に * で示すように、無差別に 2 条件をすてると、反応生成物量 (Y) にかかる係数行列 (B) の行列式 |B| が零となり、反応原料量 (X) から反応生成物量 (Y) を求めることはできなくなる。たとえば、Case 4 では Fe 収支と、溶鉄成分比 [C] を不採用にしたため、鉄についての式がなくなる。可能なケースは、Table 1 下方に示すように 18 通りである。例と

$$\begin{array}{c}
 \text{Case 4} \\
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \text{UN}_2 \\ \text{UCO}_2 \\ \text{UCO} \\ \text{PFe} \\ \text{PC} \\ \text{SZS} \\ \hline \end{array} \Rightarrow \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \text{BN}_2 \\ \text{BO}_2 \\ \text{LF}_2\text{O}_3 \\ \text{LF}_2\text{O} \\ \text{LZS} \\ \text{Coke} \\ \text{CZS} \\ \hline \end{array} \\
 \\
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 & & \\ \hline 2 & 1 & & & \\ \hline & 1 & & & \\ \hline -1 & 1 & & & \\ \hline & & -1 & & \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 2 & 1 & 1 & & \\ \hline 1 & 3 & & & \\ \hline & 1 & 2 & & \\ \hline & & 1 & & \\ \hline & & & 1 & \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \text{ebN}_2 \\ \text{ebC} \\ \text{ebO} \\ \text{ebFe} \\ \text{ebZs} \\ \hline \text{emTN} \\ \text{emIN} \\ \text{eeCF} \\ \hline \end{array} \div \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} \quad (2a)
 \end{array}$$

0 であり |B| = 0 となる

$$\begin{array}{c}
 \text{Case 5 (S-3)} \\
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \text{UN}_2 \\ \text{UCO}_2 \\ \text{UCO} \\ \text{PFe} \\ \text{PC} \\ \text{SZS} \\ \hline \end{array} \Rightarrow \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \text{BN}_2 \\ \text{BO}_2 \\ \text{LF}_2\text{O}_3 \\ \text{LF}_2\text{O} \\ \text{LZS} \\ \text{Coke} \\ \text{CZS} \\ \hline \end{array} \\
 \\
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 & & \\ \hline 2 & 1 & & & \\ \hline & 1 & & & \\ \hline -1 & 1 & & & \\ \hline & & -1 & & \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 2 & 1 & 1 & & \\ \hline 1 & 3 & & & \\ \hline & 1 & 2 & & \\ \hline & & 1 & & \\ \hline & & & 1 & \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \text{ebN}_2 \\ \text{ebC} \\ \text{ebO} \\ \text{ebFe} \\ \text{ebZs} \\ \hline \text{emTN} \\ \text{emIN} \\ \text{eeCF} \\ \hline \end{array} \div \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array} \quad (2b)
 \end{array}$$

して Case 4 (不可能) および Case 5 (S-3) (一般に使用されている方法)^{2), 4)} の係数行列を (2a), (2b) 式で示す。

各採用条件=0 とおいた式であるから、すべての条件に収支上のしわ寄せが発生している。これを計算して各組合せ中どれが良いか決める基準にしておく必要があり、その求め方は、(2) 式を利用した後出の (5) 式である。

4. 一般逆行列^{3), 6)}の導入

実際のプロセス計測には、誤差はつきものであることおよびせつかく測定したデータは利用すべきであるとの考え方で、条件全部を利用して、より正しいらしい値を求める方法に一般逆行列⁶⁾の導入がある。

一般逆行列を基本型モデルに適用することの数学的意味は、つぎのとおりである。(2) 式において、未知数 (Y) は 6 変数であり、係数行列 (A) (B) 反応原料量 (X) は既知であるから、収支がとれているとすると、(3) 式が得られる。これは 6 次元空間に張られた超平面 (Si) である (Fig. 3 中の①式)。収支がとれていれば八つの超平面は 1 点で交わり、それが解になるはずである。

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \text{N2 バランス} & & & & \\ \hline \text{C} & \text{1} & \text{1} & \text{1} & \\ \hline \text{O} & \text{2} & \text{1} & & \\ \hline \text{Fe} & & & \text{1} & \\ \hline \text{ZS} & & & & \text{1} \\ \hline \text{BFG} \{ \text{CO}_2 \} & \text{-4} & \text{1} & & \\ \hline \text{容鉄} \{ \text{C} \} & \text{-i} & \text{1} & & \\ \hline \end{array} & = & \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \text{CN2} & & & & \\ \hline \text{C} & \text{1} & & & \\ \hline \text{CC} & & \text{2} & \text{1} & \text{3} \\ \hline \text{CO} & & \text{1} & \text{2} & \\ \hline \text{CFe} & & & & \text{1} \\ \hline \text{CZs} & & & & \\ \hline \text{Ct} & & & & \\ \hline \text{Ci} & & & & \\ \hline \text{Cca} & & & & \\ \hline \end{array} \\
 \downarrow (B) & & \downarrow (C) & & \downarrow (A) \\
 \text{一文字表示で } (B)(Y) = (C) = (A)(X) & & & &
 \end{array} \quad (3)$$

—(3)'

したがって 8 平面のうち 6 平面どれを採用しても良いはずである。ところが (2) 式の各式は、それぞれ誤差 (ε) をもっている。いま最も確からしい解の点を p (x₁...x₆) とすると、各平面 Si からの距離は (Fig. 3 中の②式) つぎの (4) 式で表わされる。

Fig. 3 Distance between point P and super plane Si

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline \varepsilon \text{bN2} & \varepsilon \text{bC} & \varepsilon \text{bO} & \varepsilon \text{bFe} & \varepsilon \text{bZs} & \varepsilon \text{mTN} & \varepsilon \text{mIN} & \varepsilon \text{eCF} & \rightarrow (\varepsilon) \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline \varepsilon \text{N2} & & & & & & & & \\ \hline \varepsilon \text{C} & & \text{KC} & & & & & & \\ \hline \varepsilon \text{O} & & & & \text{KO} & & & & \\ \hline \varepsilon \text{Fe} & & & & & & \text{KFe} & & \\ \hline \varepsilon \text{ZS} & & & & & & & & \text{KZ} \\ \hline \varepsilon \text{t} & & & & & & & & \text{Kt} \\ \hline \varepsilon \text{i} & & & & & & & & \text{Ki} \\ \hline \varepsilon \text{ca} & & & & & & & & \text{Kca} \\ \hline \end{array} \quad (4)$$

一文字表示で $(\ell) = (K)(\varepsilon)$

$$\begin{array}{ll} \text{KN2} = 1/\sqrt{1^2} & \text{KZS} = 1/\sqrt{1^2} \\ \text{KC} = 1/(\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2})^{1/2} & \text{Kt} = 1/(\sqrt{1^2 + 1^2})^{1/2} \\ \text{KO} = 1/(\sqrt{1^2 + 2^2})^{1/2} & \text{Ki} = 1/(\sqrt{1^2 + 1^2})^{1/2} \\ \text{KFe} = 1/\sqrt{1^2} & \text{Kca} = 1/(\sqrt{1^2 + 1^2})^{1/2} \end{array}$$

この (4) の 2 乗和 Q が、最小になる点 p を解とすると、条件を全部使用し、かつ各収支に大きく矛盾のない形で解が得られることになる。

解である点 p の求め方のアルゴリズムを (5) 式に示す。超平面 Si よりの距離 (4) は、(2) 式と Fig. 3 ②により (4) 式になり、8 平面までの 2 乗和 Q は、(5) 式になる。

$$\begin{aligned} Q &= (\ell)_t \cdot (\ell) \\ &= (\varepsilon)_t (K)_t (K)(\varepsilon) = (\varepsilon)_t (K^2)(\varepsilon) \\ &= \{ (A)_t (X) - (B)_t (Y) \}_t (K^2) \{ (A)_t (X) - (B)_t (Y) \} \\ &= \{ (B)_t (K^2)(B)_t (Y) - (B)_t (K^2)(A)_t (X) \}_t \{ (B)_t (K^2)(B)_t \}^{-1} \\ &\quad \{ (B)_t (K^2)(B)_t (Y) - (B)_t (K^2)(A)_t (X) \} \\ &\quad \downarrow Q \rightarrow \text{Min} \\ &+ \alpha_t (A)_t (K^2)(A)_t (X) - \alpha_t (A)_t (K^2)(B)_t (Y) \\ &\quad \{ (B)_t (K^2)(B)_t \}^{-1} (B)_t (K^2)(A)_t (X) \} \end{aligned} \quad (5)$$

(5) 式の第 1 項は、(Y) と (X) についての式である。第 2 項は、(X) のみの式である。したがって (第 1 項の後半部)=0 のとき Q は最小になる。求められる (Y) は (6) 式である。

$$\begin{aligned} (B)_t (K^2)(B)_t (Y) - (B)_t (K^2)(A)_t (X) &= 0 \\ (Y) &= \{ (B)_t (K^2)(B)_t \}^{-1} (B)_t (K^2)(A)_t (X) \end{aligned} \quad (6)$$

以後このようにして求めた方式を (S-19) というようにし、Table 1 に追加する。

5. 高炉炉内反応速度の求め方

前章と前々章で、反応原料量 (X) および、反応生成物量 (Y) (以後外部出力変数 (Z) という) 間の関係は明白になった。本章では、Fig. 1, Fig. 2 に記入している炉内反応、すなわち、iFeO, iFe, dFe, tC を外部出力変数 (Z) を使って、どう計算するかという問題を解決する。

Fig. 2 に示している各 node で収支をとると (7) 式

—文字表示で —(D)(R)+(E)(Y)+(F)(X)=(En)

ところが当然のことながら、反応速度 (R) と反応生成物量 (Y) を求める求め方の間にはある関係があり独立ではない。これを解決する手段は、グラフの理

論^{7),8)}を利用して、独立な node を選定する問題に帰着する。Fig. 4 は、Fe のみに着目して、Fe の流れ図を、Fig. 2 の中で浮彫にし、これに関連する node と反応のみを取り出したものが Fig. 4 であり、これはグラフの理論でいう、Fe に関する連結である。Fig. 4 に示すように node は炉外部にある nFe-balance と炉内部にある $n\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $n\text{FeO}$ 、 $n\text{Fe}$ 、四つあるが、連結されているから、このうち一つは独立でない。どの node をはずしてもよいが、外部入出力変数 (Z) で、反応速度 (R) を求める場合は、nFe-balance は独立とする必要があるので、内部にある node 三つから一つをのぞくと、それぞれは独立の node となる。同様に O についての連結、C についての連結を作ると、それぞれの元素で独立でない node が、一つずつあることになる。すなわち Table 2 の Case 4 は、 $n\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $n\text{FeO}$ 、 $n\text{CO}$ 、 $n\text{Fe}$ を採用しているため Fe についての node が多すぎて、互いに独立な node ではなくなり (D) の行列式 $|D|=0$ となり、反応速度 (R) が計算できない。(7)式の右側の ● の記号は、各 node が、どの元素流の node になっているかを示すものである。

Figure 1 is a diagram illustrating the selection of reaction names for computing reaction rates. It consists of two main parts: a table of cases and a list of reaction names.

The table of cases is organized as follows:

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
nFe ₂ O ₃	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
nCO ₂	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
nFeO	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
nCO	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
nFe	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
nC	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
nO	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Below the table, a horizontal line with arrows indicates the selection process. The arrows point to the following reaction names:

R-1, R-2, R-4, R-5, R-6, R-7, R-8, R-9, R-10, R-11, R-12, R-13, R-14, R-15, R-16, R-17, R-18, R-19, R-20, R-21, R-22, R-23, R-24, R-25, R-26, R-27, R-28.

The diagram also shows the selection of reaction names for computing reaction rates (R-1 to R-28) and the selection of reaction names for computing reaction rates (R-1 to R-28).

本モデルの元素は、N, C, O, Fe, ZS, の5元素であるが、反応にあずかるのは、Fe, O, C, の3元素である。したがって、反応生成物量 (Y) を求めるのに、この3元素のバランスすべてを採用したもの、すなわち、Table 1 に示す (S-1), (S-2), (S-4), (S-5) (S-9), (S-13) については、グラフの理論で示される。独立な node さえ選択されていれば、反

Fig. 5 Unbalance generating node

応速度 (R) の解は一意に求まる。すなわち、node 選定の組合せがどのように変わろうとも、解は一通りであり、Table 1 の上段 3 行中にある数 1 はこのことを意味している。ところが (S-3) (一般に採用されている計算法) は、外部入出力変数 (Z) 間で、O のバランスがとれていない。したがってこの場合は、どの node の組合せを選ぶかによって同じ外部入出力変数 (Z) を使っても、反応速度 (R) は異なった値になる。Fig. 5(a) に示すように、node 選択の (R-1) を利用すると、外部入出力変数間のアンバランスのしわよせは、nO に生じる。ところが (R-11) (一般に採用されている計算法²⁾) の選択を行うと、Fig. 5(b) に示すように、O 収支の誤差が、nFeO に発生する。ところが、Fe, C, バランスは、それぞれとれているので、Fe については、nFeO に発生した O についてのアンバランスの修正を行う必要があり、アンバランスの誤差が、nFeO と nFe の 2 node に発生する。

このようにして求めていくと、反応生成物量 (Y) を求めるのに、O バランス、Fe バランス、C バランスをそれぞれ一つずつはずした場合、および二つにはずした場合で、いろいろなケースがおきる。この場合の数を一つずつ取りあげて数えあげ、Table 1 の上部に示した。結局計 125 通りの解があることになる。すなわち、(S-1) の場合、いかなる独立な node の選定を行っても、反応速度 (R) の解は 1 通りである。しかし (S-3) の場合には、node の選定により、7 通りの解がでる。同様に (S-16) を選ぶと、node の選択で 15 通りの解の組合せが発生することを示している。

6. シミュレーション

本モデルは、高炉プロセスを極端に簡易化したモデルであり、実プロセスのデータでシミュレーションをすることはできない。本論文の主旨が、現状の定常状態モデルがもっている測定誤差からの問題を指摘する

ことが目的であるため、(8)式による模擬データを作り各種のシミュレーションを行った。

Fig. 2 の物流線上に示した数値は、ほぼ現在の高炉法による原料の物流図の代表的な平均値であり、これらの値は、完全に各元素ごとの収支はとれている。

いま、測定誤差として、LFeO, LFe₂O₃, Ccoke BN₂, t, i, c, LZS, CZS が (8) 式に従ってランダムに変化しているとした。また BO₂ は、空気中の O₂ の成分だから BO₂ = 0.25 × BN₂ であるとして計算した。またデータ数は 50 データとした。

$$\bar{X} = \bar{X} \left\{ 1 + \frac{1}{10} (RND - 0.5) \right\} \quad (8)$$

但し (1) RND: 0 ~ 1 までの一様擬乱数

(2) $\bar{X}$: LFeO, LFe₂O₃, Ccoke, BN₂, t, i, c, LZS, CZS の平均値

6.1 外部入出力間のノルムについて

Table 1 に示すケース全体の計算を行い、各収支での誤差を求め、(7)式により、超平面までのノルムの 2 乗和を求めてみると、Table 3 が得られ、当然のことながら、一般逆行列法 (S-19) が誤差の 2 乗和が最小である。

6.2 ソリューションロス dFe について

炉熱を表わす、大切な操業指数にソリューションロス dFe (高炉内で最大の吸熱反応) がある。この dFe をすべてのケースで計算し、その結果を示すことは大変であり、またあまり意味のない選択もあるので、ここではつぎの 3 通りについてのみ Fig. 6 に示す。

(S-3) (R-11) … 外部入出力変数の求め方は通常法 (T) で、node の選定も通常法 (T)

(S-19) (R-11) … 外部入出力変数は、一般逆行列法 (G) で求め node の選定は通常法 (T)

(S-19) (R-28) … 外部入出力変数も、node 方程式も、一般逆行列法 (G, G)

Norm Total . XBAR, SG			
Method	Norm Total	XBAR	SG
S 1	28.903	0.578	0.275
S 2	21.199	0.428	0.225
S 3	24.140	0.482	0.257
S 4	28.259	0.565	0.259
S 5	38.663	0.773	0.548
S 6	87.566	1.751	1.092
S 7	28.677	0.473	0.257
S 8	23.170	0.468	0.241
S 9	73.644	1.472	1.013
S 10	75.294	1.505	1.136
S 11	26.998	0.539	0.319
S 12	15.218	0.304	0.140
S 13	121.804	2.436	1.958
S 14	96.536	1.930	1.134
S 15	78.938	1.578	1.085
S 16	16.301	0.326	0.165
S 17	36.141	0.722	0.415
S 18	28.079	0.461	0.239
S 19	10.727	0.214	0.103

Table 3 Simulation result

Fig. 6 Solution loss carbon values of each case

Fig. 6 に見られるように、(S-3)(R-11)の通常法のみ同一データで他の2法に比べて形が相異している。どの選択が正しいかについては、実データを利用して、長期に観察し、他の要素から決めるべきであろう。たとえば、炉熱が高いのに溶銑温度が低かったりしていないか、また炉熱を予測するのにどの選定が適正であるかを調べるべきであろう。

7. 結 論

7.1 外部入出力変数について

高炉にかぎらず、多くの化学反応装置は、入出力変数間に各種の関係があり、それらを充分利用する方法に一般逆行列法が考えられ、今後この利用法を活用していきたい。

7.2 内部反応速度について

内部反応速度についても、各 node で収支がとれていると考えること自体無理があるので、ここにも(R-28)のように、一般逆行列を適用することが考えられる。

7.3 今後の方向

いずれにしても、測定誤差があるため、計算方法に

より推定値が異なるので、実データを実プロセスモデルに適用し、その正しいような計算法を大至急求める必要がある。それには、各種計算法で示される操作指標が、別途単独で測定可能なプロセスデータである炉熱、溶銑温度、溶銑[Si]および融着帯の大きさなどで比較すべきであろう。

更にこのような考え方にもとづいたとき、時系列的な検討も必要となる。すなわち、ソリューションロス(dFe)の推移と、羽口吹込み成分の関係などを、時系列的に調べる必要があろう。

高炉の基本型モデルの誘導については、東海大学教授野坂康雄氏に多くの助言をいただいたこと、およびマトリクスの計算およびシミュレーションについて、川惣電機(株)広崎忠行氏および新日本製鐵(株)藤原登氏、諏訪健一氏に多大のご協力をいただいたことを、ここに感謝します。

参 考 文 献

- 1) N. Iwao: Study of Steady State Model of Blast Furnace Operation, International Meeting on Iron and Steel Making, Bruxelles, Düsseldorf, May (1976)
- 2) 深川, ほか: ソリューションレートに基づく, コークス比の考察と高炉操業への応用, 鉄と鋼, 50-11, 1607/1609 (1964)
- 3) T. Terano, N. Iwao, K. Yasuda and A. Ezaki: Modeling of Blast Furnace Conditions through Factor Analysis, IFAC 6th Triennial World Congress Proceedings, 39.2.1/6 (1975)
- 4) 重見: 製鉄ハンドブック, 5章(p. 134), 6章(p. 178), 地人書館 (1979)
- 5) 鉄鋼協会: 第3版, 鉄鋼便覧II (製銑, 製鋼), 第5章 217/327 (1979)
- 6) 児玉, 須田: システム制御のためのマトリクス理論, 第12章, 計測自動制御学会 (1978)
- 7) 岸, 木田: 線形回路論エンデニヤリング, サイエンス講座 20, 2章(p. 6), 4章, 共立出版 (1976)
- 8) 平山, ほか: 電気回路論, 第5章, p. 112, 電気学会 (1971)