

論 文

転炉複合吹錬終点制御モデルの開発

高輪武志*・片山勝美*・布袋屋道則*²・平山憲雄*²The Development of a Mathematical Model of Endpoint Control System
for Top and Bottom Blowing Process in BOF

Takeshi TAKAWA, Katsumi KATAYAMA, Michinori HOTEIYA and Norio HIRAYAMA

Synopsis :

For the endpoint control of top and bottom blowing process in BOF, a simplified mathematical model suitable for online application has been developed on the following procedure.

(1) The basic equations of oxygen consumption rate and temperature increase rate have been developed, which have the comprehensive characteristics in both low carbon range and high carbon range.

(2) Based on these basic equations, the fundamental curves of oxygen consumption and temperature increase, which show the progress of blowing, have been determined by analysis of actual operational data. The fundamental curve of dephosphorization also has been determined in the same way.

(3) The authors have developed a control model for endpoint carbon content and endpoint temperature of metal by using these fundamental curves.

At No. 2 BOF shop in Kashima Steel Works, the model is being used for the automatic blowing and contributes to the reduction of reblow ratio and furnace refractories.

Key words: mathematical model; endpoint control; top and bottom blowing process; BOF; oxygen consumption; temperature increase; fundamental curve; automatic blowing; reblow ratio.

1. 緒 言

転炉製鋼法の導入以来、転炉製鋼プロセスにおける最大の課題は吹錬終点における成分と温度の的中である。この目的のために転炉の計算機制御が 1960 年当初より国内外において開発実施されてきた。

まず SLATOSKY¹⁾ は転炉の炉内反応を物質収支と熱収支にもとづいて数式化し、この関係式を用いて装入原料の量と吹込酸素量を算出するモデルを開発した。次いで桂らは²⁾ 近接した過去のチャージの吹錬結果に吹錬しようとしているチャージの操業要因の影響を補正して、終点温度と吹込酸素量を求める数式を組み立て、各要因の係数を操業データの統計解析により決定するモデルを報告している。これと同種のモデルによる制御は各社で実用化されるようになった³⁾⁴⁾。

しかし、これらのモデルは吹錬の初期条件にもとづいて構成されたものであり、吹錬途中の情報を全く考慮していないため装入原料情報の誤差や吹錬中の外乱を取り除くことができず、その制御精度に限界があつた。そこ

で吹錬途中の排ガス情報を利用する方法が提案された。GRAF⁵⁾ は排ガス成分と流量のデータから鋼浴の脱炭速度を求め、酸素流量とランス高さを連続的に操作して脱炭反応を適正化し吹錬を安定させる方法を発表しているが、これは鋼浴の C 、温度を直接制御するものではなかつた。

これに対して、排ガス情報と投込み式熱電対を利用して C 、温度を制御する方法が MEYER らによつて開発され⁶⁾、我が国でも類似の研究がなされた⁴⁾⁷⁾。しかしこの方法も排ガスの分析精度や投込み式熱電対による測温の代表性の問題などの欠点があつた。

以上の理由により溶鋼成分、温度を吹錬中に直接計測し、その計測情報にもとづいて終点制御を行うという方式が主として我が国で検討され、計測装置としてのサブランス設備の開発が進められた^{7)~10)}。この方式により制御精度は以前に比べて飛躍的に向上し、実操業において大きな成果を得るに至つた^{9)~12)}。

たとえば竹村ら¹²⁾ は終点制御の数式モデルに関して、ある C 値以上の高炭素領域での脱炭速度を一定値、該 C

昭和 59 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 7 月 2 日受付 (Received July 2, 1986)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

*² 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

値以下の低炭素領域でのそれを鋼浴Cの関数として定式化し、あらゆる鋼種の脱炭速度を数種類の脱炭パターンに集約した。竹村ら¹²⁾はまた昇温速度を吹錬末期のサブランス計測から吹錬終点までの期間の脱炭速度の平均値の関数としてモデル化しており、さらにモデルの精度確保の前提条件としてランス操作など転炉操業の標準化を徹底的に進め、プッシュボタン式自動吹錬が可能になったと報告している。

一方田口ら¹¹⁾により、吹錬反応のダイナミックな物質収支と熱収支にもとづいた反応理論モデルが開発されオンライン化に成功したと報告されている。

本研究は、オンライン適用を前提とし、かつ吹錬反応特性をよく表現し複合吹錬へも適用可能な汎用性のある高精度なモデルの開発をめざした。以上の観点より、低炭素領域および高炭素領域でのそれぞれの脱炭特性を考慮して、低炭素領域から高炭素領域までを包括した数式モデルを開発し^{13)~15)}、オンラインへの適用をはかり自動吹錬の実用化に成功した¹⁵⁾¹⁶⁾。以下数式モデルの概要と自動吹錬実施結果について述べる。

2. 数式モデルの構成

2.1 モデルの基本構想

転炉の炉内では、酸素ジェットと溶鋼との接触面でのガス・メタル間反応やスラグと溶鋼との界面でのスラグ・メタル間反応などの複雑な反応が進行しており、さらに副原料の分解、石灰の滓化やスクラップの融解などの現象も伴うため、転炉の吹錬プロセスは非常に複雑な精錬プロセスと考えられる¹⁷⁾。このプロセスを理論的に記述して定式化するのは容易ではなく、仮に定式化できたとしてもモデルの複雑性が増し、直ちに実転炉に適用することはむずかしい。

そこで理論的な反応モデルによるアプローチではなく、転炉の実操業データの解析から吹錬プロセスの特性を定式化する方法をとることにした。

2.2 モデルの構築

今回のシステムの特徴は、特に吹錬末期に注目し、吹錬の経過を表す酸素消費量、昇温量、脱りん量の各基準曲線を実操業データの解析により確定し、これらを制御の骨格として用いるという点にある。これらの基準曲線はいずれも鋼浴Cの変化に対応した各量の推移を表すものである。

2.2.1 酸素消費量

各チャージごとに計測されるデータを用いて、脱炭にともなつて酸素消費量がいかに増大するかという基準曲線を作成するために、酸素消費速度を以下のごとく定式

化する。吹錬末期の脱炭反応は、脱炭速度が送酸速度によつて変わる高炭素領域と、炭素含有量によつて変わる低炭素領域とに分けることができる¹⁸⁾。

すなわち高炭素領域では、脱炭反応の反応面へのCの到達速度が十分大きく、供給される酸素のほぼ100%が脱炭に消費される。したがつて脱炭速度は吹込酸素量によつて定まるので下式で表現することができる。

$$-\frac{dC}{dO_2/W_{ST}} = k_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし C: 鋼浴炭素含有量 (wt%)

O_2 : 酸素消費量 (Nm³)

W_{ST} : 溶鋼重量 (t)

k_0 : 係数

次に低炭素領域では、脱炭反応の反応面へのCの到達速度が酸素のそれより遅くなり、Cの到達速度が律速段階になり、脱炭速度が炭素含有量にほぼ比例して低下するので、脱炭速度を次式であらわすことができる。

$$-\frac{dC}{dO_2/W_{ST}} = k_1 \cdot C \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし k_1 : 係数

このように吹錬末期の脱炭速度については、高炭素領域では(1)式が成立し、低炭素領域では(2)式が成立する。全炭素域に対しては、包括的に(3)のごとく近似表現することができる。

$$-\frac{dC}{dO_2/W_{ST}} = \frac{1}{\frac{1}{k_0} + \frac{1}{k_1 \cdot C}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)式は低炭素領域のとき(2)式に近似でき、高炭素領域のとき(1)式に近似できる。Fig. 1に上記(1)、(2)、(3)式の関係を概念的に示す。

上式をかきかえると(4)式のごとくになる。

$$-\frac{dO_2/W_{ST}}{dC} = a_0 + \frac{a_1}{C} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 a_0 、 a_1 はそれぞれ k_0 、 k_1 の逆数である。

吹錬中のサブランス計測時点から吹錬終了までの期間

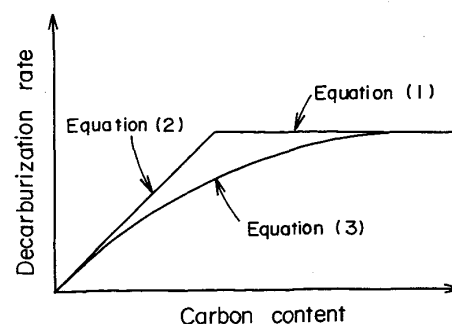


Fig. 1. Schematic diagram of decarburization rate at the final stage of blowing.

の酸素消費量は (4) 式の積分により (5) 式のごとく求めることができる。

$$\frac{\Delta O_2}{W_{ST}} = a_0 \cdot (C_S - C_E) + a_1 \cdot \log \left(\frac{C_S}{C_E} \right) \quad \cdots (5)$$

ただし C_S : サブランス計測時の鋼浴 C (wt%)

C_E : 終点 C (wt%)

ΔO_2 : サブランス計測時点から吹錬終点までの酸素消費量 (Nm³)

実際には酸素消費量はサブランス計測時の鋼浴温度やサブランス計測までに投入された媒溶剂量など各チャージごとに変動する要因にもとづく影響を受けるので、これらの影響を考慮して次式のように表すことができる。

$$\frac{\Delta O_2}{W_{ST}} = a_0 \cdot (C_S - C_E) + a_1 \cdot \log \left(\frac{C_S}{C_E} \right) + \sum_i h_{oi} \cdot (X_i - X_{ik}) \quad \cdots (6)$$

ただし、 X_i は上記の吹錬要因変数、 X_{ik} はそれら変数の基準値を示す。また h_{oi} はそれら要因の変動が酸素消費量におよぼす影響をあらわす係数である。

サブランス計測 C 、終点 C 、酸素消費量などの実績データを用いて回帰分析することにより (6) 式中の係数 a_0 、 a_1 、 h_{oi} を確定することができる。鹿島 2 製鋼の場合 a_0 、 a_1 の値はそれぞれ 2.086、2.760 であった。この係数を用いた場合の酸素消費速度を Fig. 2 に示す。Fig. 2 には小倉 (炉容 70 t、酸素流量約 11 400 Nm³/h、上吹操業) の例と鹿島 2 製鋼 (炉容 250 t、酸素流量約 50 000 Nm³/h、複合吹錬) の例を示した。本来複合吹錬では、鋼浴の攪拌強化により低炭素領域になるほど上吹操業に比して脱炭効率が向上し、酸素消費速度が低減すると考えられるのに、小倉と鹿島 2 製鋼との比較では必ずしもそのような結果になつておらず、これは炉容などの相違によるためと考えられる。

次に吹錬開始から (4) 式が適用できると仮定すると、

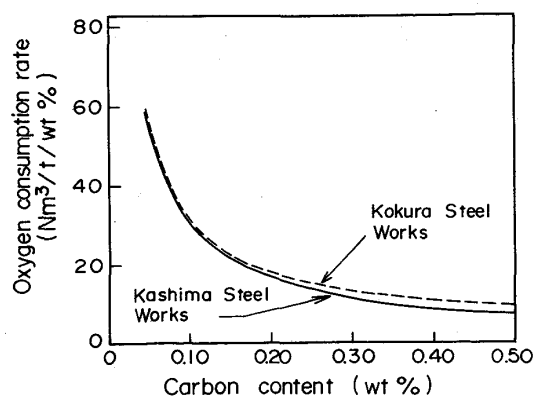
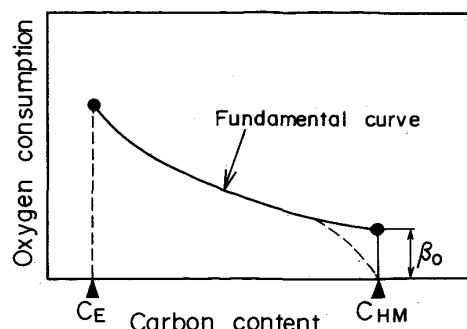


Fig. 2. Oxygen consumption rate at the final stage of blowing.



C_E : Carbon content at end point

C_{HM} : Hot metal carbon content

β_0 : Oxygen consumption for Si oxidation and so on

Fig. 3. Oxygen consumption corresponding to carbon content.

全吹錬期間における酸素消費量は次式で表現される。

$$\frac{O_2}{W_{ST}} = -a_0 \cdot C_E - a_1 \cdot \log C_E + a_0 \quad \cdots (7)$$

ただし、 a_0 は (8) 式で示す量を表し、定数とみなす。

$$a_0 = a_0 \cdot C_{HM} + a_1 \cdot \log C_{HM} + \beta_0 \quad \cdots (8)$$

ただし、 C_{HM} : 溶銑 C (wt%)

β_0 は吹錬初期の Si 酸化などに要する酸素消費量をあらわす。上記の関係を概念的に示したのが Fig. 3 である。

実際には酸素消費量は溶銑成分、溶銑温度、副原料投入量、溶銑率、冷銑率などの吹錬要因の変動にもとづく影響を受けるから、これらの影響を加味して次式のように表すことができる。

$$\frac{O_2}{W_{ST}} = -a_0 \cdot C_E - a_1 \cdot \log C_E + a_0 + \sum_i g_{oi} \cdot (X_i - X_{ik}) \quad \cdots (9)$$

ただし、 X_i は上記の吹錬要因変数、 X_{ik} はそれら変数の基準値を示し、 g_{oi} はそれら要因の影響をあらわす係数である。上式における a_0 、 a_1 は既述の方法で得られた値を用い、実績データの回帰分析により g_{oi} を確定した。なお溶銑 C については計測精度が十分とはいえないので (8) 式中の溶銑 C には標準的な値を用い、チャージごとの溶銑 C の変動量の影響は (9) 式右辺の第 4 項に吸収させた。

上記 (7) 式が所望の酸素消費量基準曲線であり、各チャージの酸素消費量をプロットしたものとの対比を Fig. 4, Fig. 5 に示す。ただし各チャージの酸素消費量の実績は前述のごとく各チャージごとに変動する要因にもとづく影響を含んでいるので、Fig. 4, Fig. 5 のプロットで示す量は実績の酸素消費量からこれらの影響を除外して標準化しておいた。小倉の場合は終点 C の領域が広

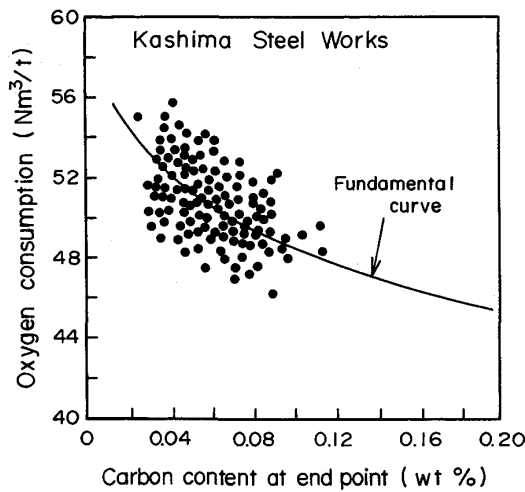


Fig. 4. Oxygen consumption corresponding to carbon content at end point (Kashima Steel Works).

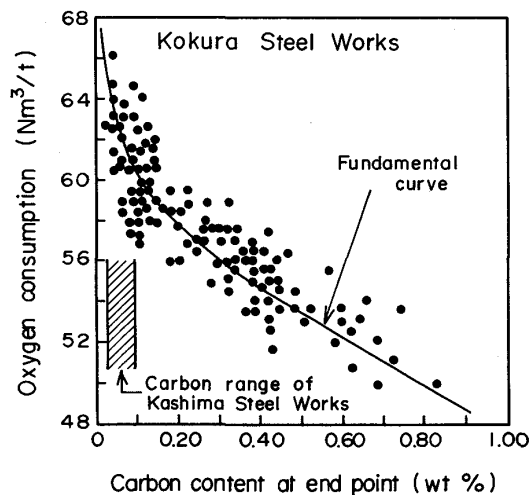


Fig. 5. Oxygen consumption corresponding to carbon content at end point (Kokura Steel Works).

範囲であるのに対し、鹿島 2 製鋼の場合は低炭素領域のみである。いずれも基準曲線は鋼浴 C の変化に対応した酸素消費量の推移を良く表しているといえる。また Fig. 6 には溶銑 Si の変動による酸素消費量の変化量を示したが、この場合の係数 g_{0i} の値は $5.1 \text{ Nm}^3/\text{t}\cdot\%$ であり、溶銑率に対する係数値は $0.42 \text{ Nm}^3/\text{t}\cdot\%$ であつた。

以上の記述では (4) 式中の係数 a_1 は定数と考えてきたが、厳密には吹錬末期での上吹酸素流量、底吹ガス流量およびランス湯面間距離の変動の影響を受けると考えられる。通常の操業ではこれら因子のチャージ間の変動が小さく、その影響を定量化することが困難であつたので、実験的にこれらの因子を大きく変動させて a_1 へ

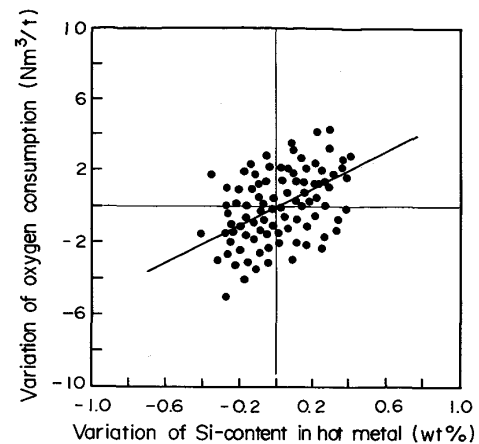


Fig. 6. The influence of Si-content in hot metal on oxygen consumption.

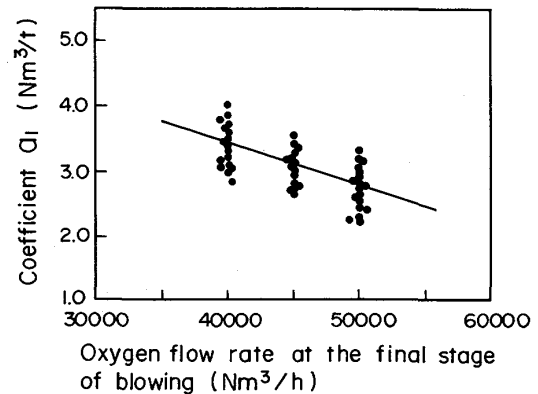


Fig. 7. The influence of oxygen flow rate on coefficient a_1 .

の影響を調査した。この場合の (6) 式から逆算される a_1 の値と上吹酸素流量との関係を Fig. 7 に示す。定性的には、上吹酸素流量が増すと鋼浴の攪拌強化により酸素消費速度が減少するといわれているが、Fig. 7 よりその定量的関係が把握できる。底吹ガス流量についても同様の関係が得られ、これらの関係を用いて係数 a_1 を下式のごとく定量化した。

$$a_1 = g_1 \cdot (F_0 - F_{OK}) + g_2 \cdot (B_G - B_{GK}) + g_3 \cdot (L_H - L_{HK}) + g_0 \dots \dots \dots (10)$$

ただし、 F_0 : 吹錬末期の上吹酸素流量 (Nm^3/h)

B_G : 吹錬末期の底吹ガス流量 (Nm^3/h)

L_H : 吹錬末期のランス湯面間距離 (m)

F_{OK}, B_{GK}, L_{HK} : 上記データの基準値

g_1, g_2, g_3, g_0 : 定数

2.2.2 昇温量

吹錬末期の昇温量は脱炭反応および Fe 酸化反応によ

る発熱量の和で近似的に表現できると仮定すると、次式が成立する。

$$\frac{dT}{dC} = l_1 \cdot \frac{dO_C/W_{ST}}{dC} + l_2 \cdot \frac{dO_{Fe}/W_{ST}}{dC} \quad \dots\dots (11)$$

ただし O_C : 供給される O_2 のうち脱炭に消費される O_2 量 (Nm^3)

O_{Fe} : 供給される O_2 のうち Fe 酸化に消費される O_2 量 (Nm^3)

T : 鋼浴温度 ($^{\circ}C$)

l_1, l_2 : 係数

(11) 式の右辺第 2 項の $dO_{Fe}/W_{ST}/dC$ は全酸素消費速度から脱炭反応に寄与する酸素の消費速度を差し引いた量に近似させ得るので (12) 式で表すことができる。

$$\frac{dO_{Fe}/W_{ST}}{dC} = \frac{dO_2/W_{ST}}{dC} - \frac{dO_C/W_{ST}}{dC} \quad \dots\dots (12)$$

(12) 式を (11) 式に代入すると (13) 式を得る

$$\frac{dT}{dC} = l_2 \cdot \frac{dO_2/W_{ST}}{dC} + l_3 \cdot \frac{dO_C/W_{ST}}{dC} \quad \dots\dots (13)$$

ただし $l_3 = l_1 - l_2$

上式の右辺第 2 項は化学量論的に一定であり、右辺第 1 項は (4) 式で示されるので (13) 式に代入すると (14) 式に示すごとく酸素消費量の場合と同様の関係式が得られる。

$$-\frac{dT}{dC} = b_0 + \frac{b_1}{C} \quad \dots\dots (14)$$

ただし $b_0 = l_2 \cdot a_0 - l_3 \cdot \frac{dO_C/W_{ST}}{dC}$

$b_1 = l_2 \cdot a_1$

酸素消費量の場合と同様の手順により、吹錬末期のサブランス計測時点から吹錬終了までの期間の昇温量は (15) 式のごとく求められる。

$$\Delta T \equiv T_E - T_S = b_0 \cdot (C_S - C_E) + b_1 \cdot \log \left(\frac{C_S}{C_E} \right) + \sum_i h_{Ti} \cdot (X_i - X_{ik}) \quad \dots\dots (15)$$

ただし ΔT : サブランス計測時点から吹錬終了までの昇温量 ($^{\circ}C$)

T_S : サブランス計測時の鋼浴温度 ($^{\circ}C$)

h_{Ti} : 吹錬要因 X_i の変動が昇温量におよぼす影響をあらわす係数

実績データの回帰分析により (15) 式中の係数 b_0, b_1, h_{Ti} を確定することができる。鹿島 2 製鋼の場合 b_0, b_1 の値はそれぞれ 8.226, 24.15 であった。この係数を用いた場合の昇温速度を Fig. 8 に示す。Fig. 8 では鹿島 2 製鋼の方が小倉の場合より昇温速度が小さいが、これは複合吹錬での攪拌強化による温度降下が大きいためと

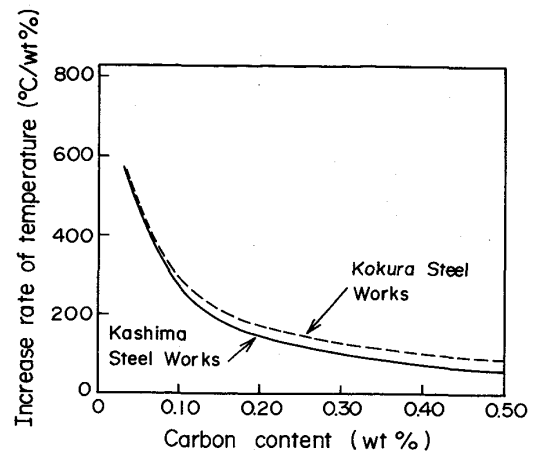


Fig. 8. Increase rate of temperature at the final stage of blowing.

考えられる。

吹錬開始から (14) 式が適用できると仮定すると、(7) 式導出と同様の手順により下式で示す昇温量の基準曲線が得られる。

$$T_E = -b_0 \cdot C_E - b_1 \cdot \log C_E + \alpha_T \quad \dots\dots (16)$$

ただし T_E : 終点温度 ($^{\circ}C$)

上式の α_T は (17) 式で示す量を表し定数とみなす。

$$\alpha_T = b_0 \cdot C_{HM} + b_1 \log C_{HM} + T_{HM} + \beta_T \quad \dots\dots (17)$$

ただし T_{HM} : 溶銑温度 ($^{\circ}C$)

(17) 式右辺の β_T は吹錬初期の Si 酸化などによる昇温量をあらわす。実際には昇温量は酸素消費量の場合と同様に、吹錬要因の変動にもとづく影響を加味して次式のように表すことができる。

$$T_E = -b_0 \cdot C_E - b_1 \cdot \log C_E + \alpha_T + \sum_i g_{Ti} \cdot (X_i - X_{ik}) \quad \dots\dots (18)$$

ただし g_{Ti} : 係数

Fig. 9 に昇温量の基準曲線と各チャージの終点温度をプロットしたものとの対比を示す。

以上の記述では (14) 式中の係数 b_1 は定数と考えてきたが、酸素消費量の場合と同様の手順で上吹酸素流量などの関数として定量化できる。

2.2.3 脱りん量

酸素消費量、昇温量の場合と同様に吹錬末期の鋼浴 P を終点 C の関数として表現し、実績データを用いて解析を行つた結果下式が得られた。

$$P_E = f_P(C_E) + \sum_i g_{Pi} \cdot (X_i - X_{ik}) \quad \dots\dots (19)$$

ただし P_E : 終点 P (wt%)

g_{Pi} : 吹錬要因 X_i の変動が終点 P におよぼす影響をあらわす係数

(19) 式中 $f_P(C_E)$ は鋼浴 C の変化に対応した脱りん

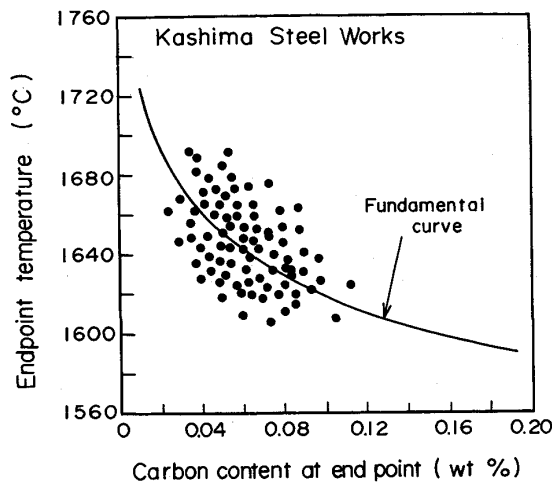


Fig. 9. Endpoint temperature corresponding to carbon content at end point.

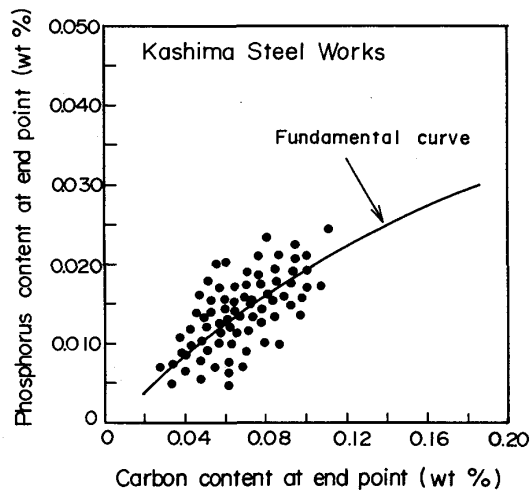


Fig. 10. Phosphorus content corresponding to carbon content at end point.

量の推移を表す項で、右辺第2項は溶銑P、媒溶剤投入量、終点温度などの変動にもとづく影響量を示す。この場合の基準曲線と各チャージの終点Pのプロットとの対比を Fig. 10 に示す。

3. 制 御 方 式

制御のための計算には吹錬開始に先立つて装入原料情報にもとづく必要な酸素量と副原料投入量とを計算する吹錬計算と吹錬末期のサブランス計測情報にもとづく必要な酸素量と冷却剤投入量とを計算する終点制御計算とがある。

3.1 吹錬計算

前述の基準曲線を用いて構成されるバランス式を解く

ことによつて終点目標どおりの温度、成分 (C, P) を得るために必要な酸素量と副原料量とが計算できる。ただし、炉回数の変化によつて実績が基準曲線からシフトしてくる場合に対処して、実測データにもとづくフィードバックが行われる。すなわち、酸素消費量、昇温量および脱りん量のバランス式として、(9) 式、(18) 式、(19) 式にフィードバック項 $\bar{\epsilon}_O$, $\bar{\epsilon}_T$, $\bar{\epsilon}_P$ を加味した下記 (20) ~ (22) 式が用いられる。

$$\frac{O_2}{W_{ST}} = -a_0 \cdot C_E - a_1 \cdot \log C_E + \alpha_0 + \sum_i g_{oi} \cdot (X_i - X_{ik}) + \bar{\epsilon}_O \dots \dots \dots (20)$$

$$T_E = -b_0 \cdot C_E - b_1 \cdot \log C_E + \alpha_T + \sum_i g_{Ti} \cdot (X_i - X_{ik}) + \bar{\epsilon}_T \dots \dots \dots (21)$$

$$P_E = f_P(C_E) + \sum_i g_{Pi} \cdot (X_i - X_{ik}) + \bar{\epsilon}_P \dots \dots \dots (22)$$

これらの各フィードバック項は、先行チャージの酸素量、終点温度、終点Pの実績値と推定値の差を移動平均した量である。

これらのバランス式にもとづいて下記のごとき制御方式を作成した。

(1) 吹錬末期の上吹酸素流量 F_O 、底吹ガス流量 B_G およびランス湯面間距離 L_H が材質グループ別に与えられる。

(2) (10) 式にもとづきパラメーター a_1 を求める。(パラメーター b_1 についても同様。)

(3) 上記で求めた a_1 , b_1 を (20), (21) 式に代入し、終点実績値 C_E , T_E , P_E の代わりにそれぞれの目標値 C_A , T_A , P_A を用いて (20) ~ (22) 式を解けば、制御に必要な操作量すなわち吹込酸素量、冷却剤量および媒溶剤量が求められる。(冷却剤量と媒溶剤量は上式右辺中の X_i の項に含まれている。)

(4) 吹錬計算ではさらに、上述で求められる吹込酸素量より所定の酸素量だけ手前の時期をサブランス計測時期として決定する。

一炉代の終点温度のフィードバック量の推移の一例を Fig. 11 に示す。炉回数の進行につれて炉壁の侵食が激しくなり、炉壁からの損失熱が増加して昇温量が減少していくのが確認される。

吹錬計算では吹錬末期のサブランス計測時の鋼浴Cが終点目標以下にならないように計測時期を精度良く決定することが必要条件となるが Fig. 12 に示すようにこの条件は満足されている。

3.2 終点制御計算

吹錬計算の指示にしたがつてサブランス計測を行つた時点の鋼浴Cが終点1.5 min 前(鹿島2製鋼の場合)の目標からずれた場合はそのずれ量にもとづいた軌道修正

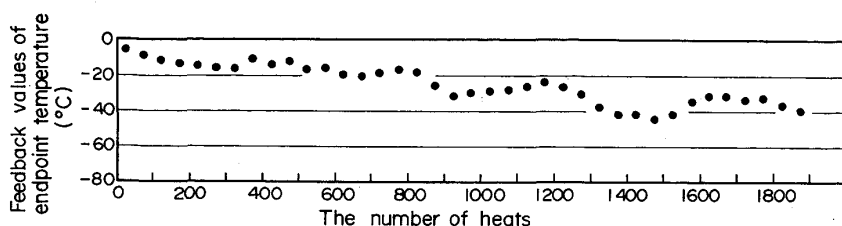


Fig. 11. The change of feedback values of endpoint temperature.

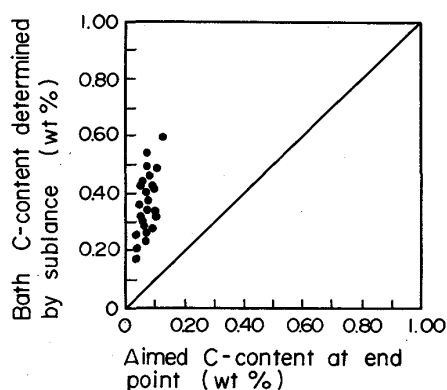


Fig. 12. The accuracy of timing of substance measurement.

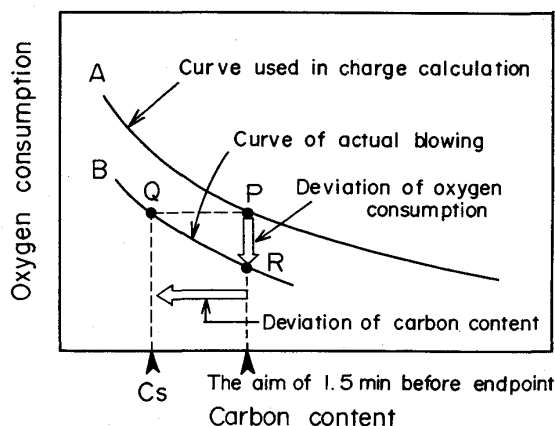


Fig. 13. Trajectory modification based on substance measurement.

が必要である。Fig. 13で説明すると吹錬計算にもとづいたサブランス計測時点は図中の点Pであると想定していたが実際には点QになったとすればPQ間の距離がCのずれでありPR間の距離がそれに対応する酸素消費量のずれということになる。したがって終点制御では吹錬計算で用いる曲線Aをサブランス計測値により曲線Bに軌道修正(上下平行移動)している。

具体的には下記の手順で計算が行われる。

(1) パラメーター a_1 , b_1 については吹錬計算で使った値を用いる。

(2) 酸素消費量, 昇温量のバランス式としては, (6)

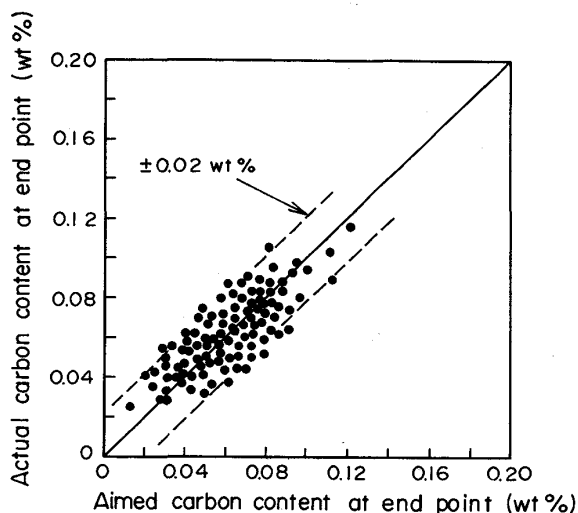


Fig. 14. The accuracy of carbon content at end point.

式, (15) 式にフィードバック項 $\bar{\delta}_O$, $\bar{\delta}_T$ を加味した下記 (23), (24) 式が用いられる。

$$\frac{\Delta O_2}{W_{ST}} = a_0 \cdot (C_S - C_E) + a_1 \cdot \log \left(\frac{C_S}{C_E} \right) + \sum_i h_{oi} \cdot (X_i - X_{ik}) + \bar{\delta}_O \quad (23)$$

$$\Delta T \equiv T_E - T_S = b_0 \cdot (C_S - C_E) + b_1 \cdot \log \left(\frac{C_S}{C_E} \right) + \sum_i h_{Ti} \cdot (X_i - X_{ik}) + \bar{\delta}_T \quad (24)$$

上式中の終点実績 C_E , T_E の代わりにそれぞれの目標値 C_A , T_A を用いて解けば, サブランス計測以降に必要な吹込酸素量と冷却剤量とが求められる。モデルによる終点Cの精度は Fig. 14 に示すごとく良好である。

4. 自動吹錬システム

鹿島2製鋼では自動制御機能として, ランス高さ制御, 酸素流量制御, 底吹ガス流量制御, 副原料自動投入, サブランス自動降下および酸素自動停止の機能があり, それぞれプロセスコンピューターから設定あるいは変更指令を受けて制御が行われる。上記のうち, ランス高さ, 酸素流量, 底吹ガス流量, 副原料投入については経験的に決められた操作基準にしたがって制御される。Fig. 15 にその一例を示す。

前章で述べたごとく制御モデルの有効性が認められた

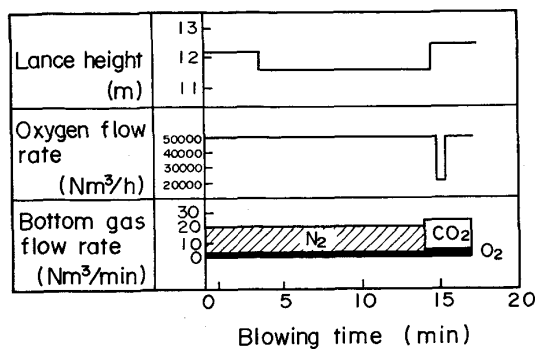


Fig. 15. An example of operational standard for blowing.

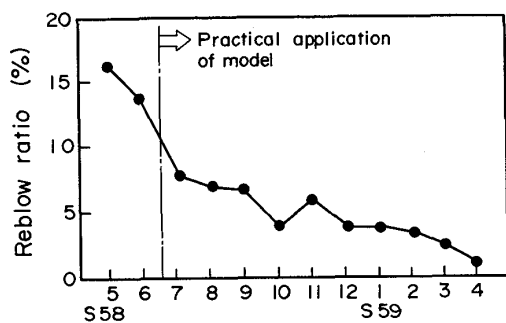


Fig. 16. Transition of reblow ratio.

ので上述の自動制御機能に制御モデルを組み込んで、1983年7月より本格的な自動吹錬に移行した。自動吹錬の実用化により、再吹錬比率はFig. 16に示すごとく14%から1%に減少し、製鋼時間(Charge to tap)も37 minから29 minに短縮できた。これによる耐火物原単位低減、出鋼歩留向上など多大の効果が確認されている。

5. 結 言

転炉の吹錬制御の研究は、吹錬末期のサブランスによる溶鋼成分、温度の直接計測にもとづく終点制御が主流となり、そのためのモデル開発が進められてきた。本研究では、自動吹錬を目的として簡潔で汎用性のある数式モデルを開発する研究を行い次の結果を得た。

(1) 吹錬末期の低炭素領域および高炭素領域でのそれぞれの脱炭特性を考慮して、低炭素領域から高炭素領域までを包括した酸素消費速度と昇温速度の各基礎式を作成した。

(2) 上記基礎式にもとづいて、鋼浴Cの変化に対応し

た酸素消費量、昇温量の推移を表す基準曲線を転炉の実操業データの解析により確定した。脱りん量についても、吹錬末期のPを終点Cの関数として表現し基準曲線を作成した。

(3) これらの基準曲線を用いて、装入原料情報にもとづく吹錬計算とサブランス計測情報にもとづく終点制御の各制御モデルを開発した。

(4) この制御モデルを鹿島2製鋼に導入して自動吹錬に移行した結果、再吹錬比率減少が可能となり耐火物原単位低減などの効果が得られた。

最後に、本研究に対して御支援、御指導いただいた、住友金属工業(株)前中央技術研究所所長西岡邦夫博士に深謝の意を表するとともに、有益な助言をいただいた制御技術センタ制御OR部長美坂佳助博士および鹿島、小倉製鉄所の技術者の方々の熱心な御討議に対しまして厚く感謝いたします。

文 献

- 1) W. J. SLATOSKY: Trans. Metall. Soc. AIME, **221** (1961), p. 118
- 2) K. KATSURA, K. ISOBE and T. ITAOKA: J. Met., **16** (1964), p. 340
- 3) 島田道彦, 大石将司, 岩尾範人, 内藤功一郎, 前田 実: 製鉄研究 (1969) 266, p. 137
- 4) 植村卓郎, 山本哲也, 北川美教, 成輪秀之, 池内祥晴, 大井淳一: 住友金属, **25** (1973), p. 71
- 5) H. GRAF: Proc. Intern. Conf. of Autom. on Iron and Steel Making, Luxemburg (1970), C-1
- 6) H. W. MEYER and J. A. GLASGOW: Blast Furnace and Steel Plant (1966) July, p. 595
- 7) 岩尾範人, 前田 実, 長野 裕, 山本志郎: 製鉄研究 (1971) 272, p. 127
- 8) 阪本英一, 久保雅信, 矢野幸三, 安居孝司, 鈴木勝也, 橘 克彦: 日本鋼管技報, **58** (1972), p. 541
- 9) 池内祥晴, 佐々木恵一, 青木紀之, 中村敏夫, 加藤木健: 住友金属, **27** (1975), p. 383
- 10) 飯田義治, 江本寛治, 難波明彦, 武 英雄, 土田 剛, 高橋英幸, 小川正勝, 中路 茂, 増田康男: 川崎製鉄技報, **10** (1979), p. 314
- 11) 田口喜代美, 尾関昭矢, 長谷川輝之, 白谷勇介, 坪井 勇, 松井邦雄: 鉄と鋼, **63** (1977), A95
- 12) 竹村洋三, 加藤 郁, 福田重美: 製鉄研究 (1977) 291, p. 12147
- 13) 高輪武志, 美坂佳助, 谷口 寛, 片山勝美, 辻川 宏, 桜場和雅: 鉄と鋼, **66** (1980), S231
- 14) 高輪武志, 美坂佳助, 片山勝美, 辻川 宏, 桜場和雅: 鉄と鋼, **66** (1980), S766
- 15) 高輪武志, 片山勝美, 戸崎泰之, 布袋屋道則, 平山憲雄, 長沢尚人: 鉄と鋼, **70** (1984), S895
- 16) 多賀雅之, 戸崎泰之, 布袋屋道則, 平山憲雄, 長沢尚人, 高輪武志, 片山勝美: 鉄と鋼, **70** (1984), S261
- 17) 鞭 巖, 森山 昭: 冶金反応工学 (1972), p. 270 [養賢堂]
- 18) 藤井毅彦, 荒木泰治, 丸川雄雄: 鉄と鋼, **53** (1967), p. 973