

樋型連続製鋼炉における出口 C 濃度の挙動

岩崎 武*・磯部 裕*・藤川 安生*²
渡辺 敏昭*³・福沢 章*³

Behavior of the Outlet C Concentration from the Trough Type Continuous Steelmaking Furnace

Takeshi IWASAKI, Yutaka ISOBE, Yasuo FUJIKAWA,
Toshiaki WATANABE and Akira FUKUZAWA

Synopsis :

Continuous steelmaking furnace is represented by combination of a statistical model derived by linear time series analysis, with a non-linear model consisting of 2 mixed tanks where rate of decarburization is assumed to be proportional to the product of average carbon concentration and apparent oxygen concentration, which is defined as a ratio of total oxygen and residing liquid iron in respective tank.

As a result of simulation by applying measured time series data to the combined model, the performance of the furnace was confirmed to be expressed reasonably well so that forecasting and design of control system may be feasible with the model.

Key words : continuous steelmaking ; statistical model ; non-linear model ; time series analysis ; forecasting and control.

1. はじめに

樋型連続製鋼炉はスクラップを原料とし、コークスをエネルギー源として用いる連続製鋼法の実証プラントに用いられ、その出湯成分の挙動を検討した結果については既に報告した¹⁾。この炉の主な機能は一定流量で入る溶銑に酸素を吹き込んで脱炭を行い、所定の成分をもつ溶鋼を連続してつくることである。実際の操業では出湯 C の分析値に応じて酸素流量を調節することにより、実用上差し支えない範囲に C 濃度を制御することができた^{2)~5)}。しかし定常状態とみられる場合でも、出湯 C 濃度は常時ある程度変動することが認められ、酸素流量はかなり頻繁に変えられている。出湯 C はほぼ一定間隔で分析され、また酸素流量は連続で計測されているので、これらの記録から吹精酸素流量が炉の出口 C 濃度に及ぼす影響が解明できれば、より高度な制御が可能になる。この報告は前報に引き続いて、操業中に得られた記録に時系列解析を応用して炉の動特性を表現するモデルを試作し、その特性と、そのモデルによる予測の精度などの

検討を行つたものである。

2. モデルの考え方

連続プロセスの重要な特徴の一つは、定常状態で操業されるので、外乱があつてもフィードバック制御を行うことによつてその影響を打ち消せることである。入力に対応する出力が確定しているシステムにおいて、出力が連続もしくは十分短い時間間隔で検出されれば、フィードバックによつて高精度の制御ができることは多くの例で実証されている。

しかし連続製鋼炉においては、酸素量の変動に対する出口成分の応答がかなりのばらつきを伴い、その原因は炉内にあるものとみられる¹⁾。そのうえ出口成分をサンプリングして分析する場合には、その頻度が少なくてもよいことが望まれる。このようなシステムを取り扱う一つの方法として、測定可能な入力—確定入力とよぶ—と出力の関係は確定しており、これとは別に計測できない入力—ランダム入力とよぶ—が加わつた結果、出口がランダム変動を示すというモデルを使うことが考えられる。

昭和 62 年 9 月 28 日受付 (Received Sep. 28, 1987)

* 元三菱重工業(株) (Formerly Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

*² 三菱重工業(株)広島製作所 (Hiroshima Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

*³ 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

このモデルで確定入力とそれによる出力が適切に関係づけられ、ランダム入力の性質とその出口に及ぼす影響が評価できれば、任意の時間が経過した後の出力の予測が可能となり制御系の確立を図れる。

線形とみなせるシステムにランダム入力がかわつた場合には、変動の性質を解析してその特性—1変数の場合は伝達関係数—を求め、予測を行い、さらに制御系を設計するという技術は既に実用の域に達している⁶⁾⁷⁾。

種型連続製鋼炉の出入口諸成分の分析値および対応する酸素流量には、線形時系列解析によるいずれも自己回帰モデル (Auto-Regressive model, AR モデル) をあてはめることができる¹⁾。そして出力、すなわち出口 C 濃度は確定入力である酸素流量の関数と、ランダム入力の関数の和として表現される⁸⁾。

このように導かれた入出力関係を予測あるいは制御に適用するために、低炭素鋼を目標として数多くの操業例についてモデル各項のパラメーターの値を求めたところ、操業ごとによりばらつくことがわかった。LD 転炉の挙動や C-O の平衡関係でも明らかのように、C 濃度が低下すると酸素流量の影響は直線で近似することが難しくなる。したがって平均 C 濃度の広い範囲にわたって適用できる関係式を求めるには、この効果—非線形性—を加味する必要があると思われる。入出力が確定しているシステムでは、非線形要素を含んでもその応答を数値計算によって求めることができる。非線形システムにランダム入力がかわつた場合の取扱いについては、GMDH 法などが提案されてはいるが、線形システムの場合のように一般化してはいない⁹⁾。

この報告では一つの試みとして非線形性をもつ確定入力関係を C, O の物質収支をもとに想定した経験的モデル—帰納モデルとよぶ—で表現し、ランダム入力については線形時系列解析による統計モデルをあてはめ、これらを加えて全体を表すこととした。そしてこのモデルが精錬炉を適切に表現しているかどうかを判断する目安として、次の二つの事柄を考慮した。

(1) 各操業データについて統計モデルが同一の形式で表され、そのパラメーターのばらつきが少ないこと。

(2) これらのモデルにある時点までの測定値を入力して、次の時点の値を予測した場合に、その誤差が少ないこと。

モデルの諸定数の決定とその評価に必要なデータとして、15 min ごとの出口 C の分析値が、途中で条件変更や長い中断がない状態で 45 個以上得られている 8 組の操業記録を使った。これらの記録の平均値を Table 1 に記す。

3. 帰納モデル

このモデルは確定入力に対する出力の非線形性が適切に表現できれば、炉の設計と操業条件から簡単に導けることが望ましい。製鋼炉は Fig. 1 に示すように炉内長 2.8 m、深さ 450 mm、滞留量約 6.5 t の長方形の鋼浴の上から 2 本のランスで純酸素を吹きつける形式である。Ni をトレーサーとしたインパルス応答は、その 1 例を Fig. 2 に示すように T' , T'' を定数、 t を時間として $\exp(-t/T') - \exp(-t/T'')$ の形で表すことができ、2 個の完全混合槽を組み合わせた場合の応答とよく一致する。

炉が 2 本のランスをもつことと、混合状態が 2 個の完全混合槽の組合せで表現できることから、Fig. 3 に示すような帰納モデルを想定した。すなわち炉の内部を 2

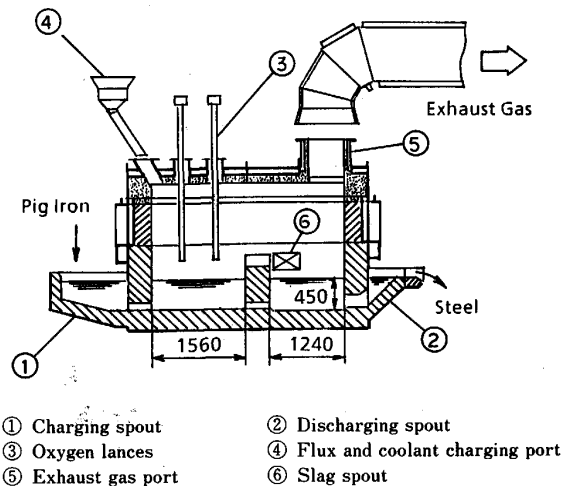
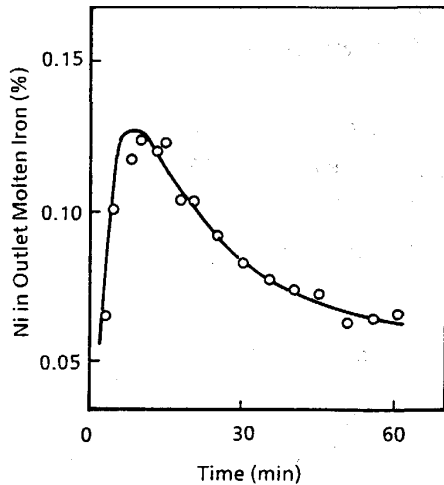


Fig. 1. Continuous steelmaking furnace.

Table 1. Mean value of Records concerned.

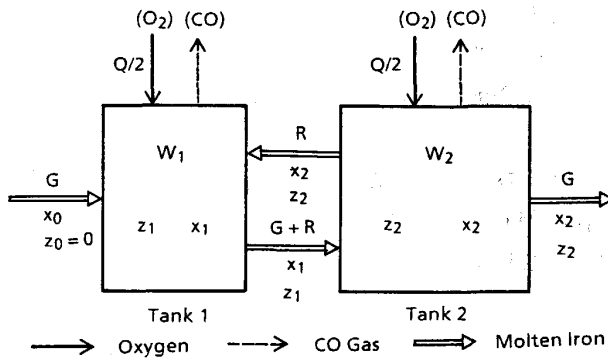
Operation	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8
Number of measurements	60	54	72	45	47	79	72	76
Oxygen flow rate, Q Nm ³ /min	7.43	7.38	9.17	9.51	9.29	9.72	8.73	9.43
Iron flow rate, G kg/min	324	324	323	329	319	328	309	313
Inlet C conc., X_i %	2.53	2.49	3.09	3.18	3.08	3.07	2.88	3.19
Outlet C conc., X_f %	0.16	0.14	0.16	0.18	0.11	0.08	0.07	0.11

Carbon was analysed every 15 min. Time series data were obtained by interpolation into 5 min. Oxygen flow rate were averaged for 5 min. to get time series data. G and X_f were estimated from cupola operation records.



○ : Measured — : Calculated, assuming 2 mixing tanks in series
Background Ni Concentration : 0.052%

Fig. 2. Result of Ni-tracer test.



G : Inlet and outlet flowrate of molten iron (kg/min)
R : Backward flowrate (kg/min)
W : Mass of molten iron in tank (kg)
x : Conc. of carbon (kmol/kg)
z : Total oxygen/Mass of molten iron in tank
Q : Oxygen flowrate (Nm³/min)

Fig. 3. Material flow of "induced model".

本のランスの中央で、それぞれ滞留量 W_1, W_2 , (kg) をもつ完全混合槽 1, 2 に分割する。酸素は $Q/2$ (Nm³/min) ずつ各槽にはいり、全酸素が鋼浴に吸収された後 C と反応して CO を発生する。炉の出入口の溶湯流 G (kg/min) のほかに、槽 1 と槽 2 のあいだには逆流 R (kg/min) があるものとする。モデルを簡単にするため更に次のような仮定をおいた。

- (1) 反応としては、脱炭のみを対象とする。
- (2) 各槽の溶湯滞留量は変化しない。
- (3) 脱炭反応の速度は、全酸素量を滞留量で割った‘見掛けの酸素濃度’ z (kmol/kg) と平均 C 濃度 x (kmol/kg) の積に比例し、その比例定数 K (kg/kmol/min) は 2 槽共通の定数とする。

(4) 逆流 R は酸素流量 Q に比例する。

添え字 1, 2 で槽 1, 槽 2 の諸量を表し、 $W_1/G=T_1$, $W_2/G=T_2$, $R/G=r$, $Q/22.4/G=q$ とおくと、入口 C 濃度を x_0 (kmol/kg) としたときの物質収支は t (min) を時間変数として、次のようになる。

$$T_1 \frac{dx_1}{dt} = x_0 - (1+r)x_1 + rx_2 - T_1 K x_1 z_1$$

$$T_1 \frac{dz_1}{dt} = q - (1+r)z_1 + rz_2 - T_1 K x_1 z_1$$

$$T_2 \frac{dx_2}{dt} = (1+r)x_1 - (1+r)x_2 - T_2 K x_2 z_2$$

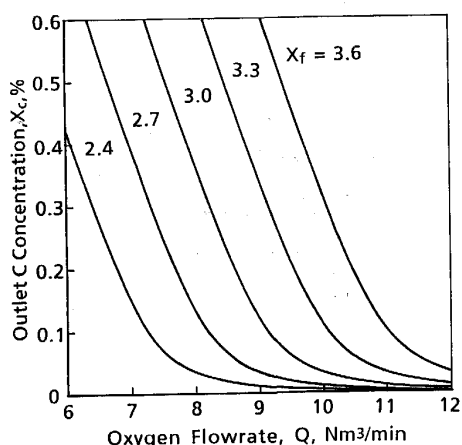
$$T_2 \frac{dz_2}{dt} = q + (1+r)z_1 - (1+r)z_2 - T_2 K x_2 z_2$$

..... (1)

これら 4 式で T_1, T_2, r, K を与えると、 x_1, x_2, z_1, z_2 は x_0, q の関係として計算できる。 T_1, T_2 は図面より計算した $W_1=1.8t, W_2=4.7t$ を溶湯流量 G で割って求めた。次に反応に関与しない成分に関するモデルのインパルス応答がトレーサーテストの結果と一致するように逆流 R を決め、 $r=42Q/G$ とした。反応定数 K は次のように求めた。(1) 式の d/dt の項を 0 とおいて定常状態の関係式を求め、Table 1 に記した各操業の平均値を定常状態の値とみなして T_1, T_2, q, r, x_0 および x_2 を計算し、この式に代入すると x_1, z_1, z_2 および K を求めることができる。解析の対象とした 8 組のデータによると、 K は 6800~7200 の範囲に収まるので $K=7000$ (kg/kmol/min) とした。

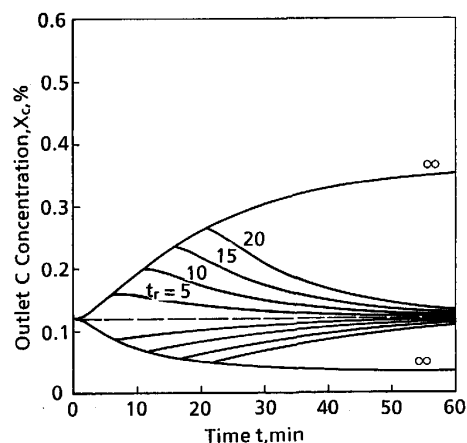
このようにつくられたモデルは非線形項を含むため、一般的な関係をグラフにまとめることができないので、 $G=320$ kg/min の場合についていくつかの例を示すことにする。まず定常特性を求めるために、(1) 式で左辺を 0 とおき、 x_0 をパラメーターとし q を変数として x_2 を計算した結果を、単位と記号を改めて入口 C 濃度を X_f (%), 酸素流量を Q (Nm³/min), 出口 C 濃度を X_c (%) として Fig. 4 に示す。 X_c が高い場合、 Q との関係は勾配 0.3%/(Nm³/min) の直線とみなしうるが、 X_c が 0.1% 以下では著しい非線形性を示す。非線形に移行する C 濃度の値は LD 転炉などの経験からみるとかなり低い。また X_f の変化が X_c に及ぼす効果は Q のそれに相似しており、 $Q-3.0 X_f$ を横軸にとると、曲線はほとんど一致する。

次に酸素流量変化の影響をみるために、定常状態から Q を ΔQ だけステップ状に変えた場合の応答を $X_f=3.0\%$, $Q=9$ Nm³/min, $\Delta Q=\pm 1.0$ Nm³/min として計算した結果を Fig. 5 の最外側の曲線で示した。図中の



Parameter : $X_f = 2.4, 2.7, 3.0, 3.3$ and 3.6%
 $G = 320$ kg/min, $W_1 = 1800$ kg, $W_2 = 4700$ kg,
 $K = 7000$ kg/kmol/min

Fig. 4. Steady state relation between oxygen flowrate and outlet C conc. by "induced model".



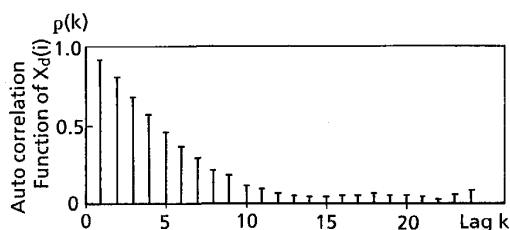
Q is changed stepwise by ± 1 Nm³/min at $t=0$, and returned stepwise to 0 at $t_r = 5, 10, 15, 20$ and ∞ min. $Q = 9.0$ Nm³/min, $X_f = 3.0\%$, $K = 7000$ kg/kmol/min, $W_1 = 1800$ kg, $W_2 = 4700$ kg

Fig. 5. Response of outlet C conc., X_c to oxygen flowrate, Q by "induced model".

枝曲線は、そのステップ入力を t_r min 後に 0 に戻した場合の応答である。また Q を一定として X_f を ΔX_f だけ変化した場合の応答の形は Q が変化した場合のそれとほとんど一致し、 $\Delta Q \approx 3.0 \times \Delta X_f$ に相当する。

4. 統計モデル

統計モデルは帰納モデルと実測値の差を統計的に処理して決める。すなわち酸素流量の実測値を帰納モデルに入力して計算した出力の時系列 $X_c(i)$ と、出口 C 濃度の実測値 $X_r(i)$ の差分 $X_d(i) = X_r(i) - X_c(i)$ を求め、 $X_d(i)$ がランダム変動の効果と酸素流量の変動の効果を表す 2



$X_d(i) = X_r(i) - X_c(i)$
 Sampling interval : 5 min ; 1 k = 5 min

Fig. 6. Autocorrelation function of $X_d(i)$.

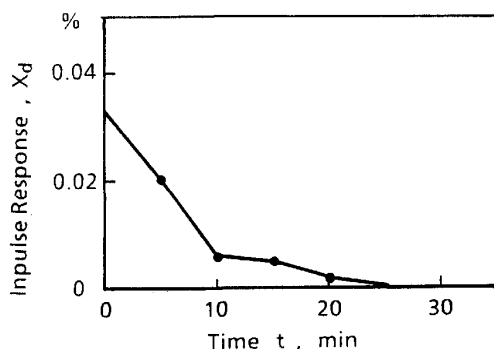


Fig. 7. Impulse response of X_d to oxygen 1 Nm³/min \times 5 min.

項の和からなるものとする。

$X_r(i)$ は精錬炉出口で計測された 15 min ごとの分析値を 5 min 間隔に内挿し、時系列とした。 $X_c(i)$ を求めるにあたって、溶湯流量 G はキューボラ装入原料から推定し、また入口 C 濃度 X_f はキューボラ出口で計測された 30 min ごとの分析値を平均し、それぞれ各操業で一定とした。また酸素流量 Q は連続測定値の 5 min を平均して時系列とした。

差分 $X_d(i)$ について時点 i と、それから k 刻み隔たった値との相関を示す自己相関係数 $\rho(k)$ を k の関数として描くと、各データともよく似た形になる。その 1 例を Fig. 6 に示す。 $\rho(k)$ が k とともに滑らかに減衰していることから、 $X_d(i)$ のランダム変動分は線形時系列モデルの一種である AR モデルで表現できることがわかる⁶⁾。各データの $\rho(k)$ を用いて AR モデルのあてはめを試みると⁶⁾⁷⁾、いずれも 2 次となり、 $X_d(i)$ からその平均値 e を差し引いた変動分の時系列 $w(i)$ は、 ϕ_1' 、 ϕ_2' を定数、 a をホワイトノイズとして

$$w(i) = \phi_1' w(i-1) + \phi_2' w(i-2) + a(i) \dots \dots \dots (2)$$

と表現される。

また酸素流量 Q の変動分 ΔQ を入力した $X_d(i)$ の変動分 $v(i)$ のインパルス応答は各データとも δ' 、 ω' を定

Table 2. Parameters in "statistic model".

$$X_s(i) = \frac{\omega}{1-\delta B} \cdot \Delta Q(i) + \frac{1}{1-\phi_1 B - \phi_2 B^2} \cdot a(i) + e$$

Operation	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	Mean
e %	0.012	0.016	0.028	0.043	0.020	0.026	0.028	0.039	0.027
ω %/Nm ³ /min	0.023	0.024	0.029	0.035	0.030	0.019	0.020	0.034	0.027
δ	0.45	0.85	0.82	0.85	0.79	0.81	0.77	0.59	0.74
ϕ_1	1.40	1.69	1.54	1.53	1.48	1.66	1.64	1.47	1.55
ϕ_2	-0.48	-0.78	-0.75	-0.75	-0.71	-0.76	-0.78	-0.61	-0.70

$X_s(i)$: Contribution of "statistic model" to outlet C concentration (%)
 ΔQ : Variation of oxygen flow rate (Nm³/min)
 $a(i)$: White noise (%)
 B : Backward shift operator

Table 3. Standard deviation.

Operation	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8
Oxygen flow rate, Q Nm ³ /min	0.57	0.57	0.87	1.17	0.73	0.86	0.78	0.96
Outlet C conc., X_r %	0.052	0.053	0.075	0.071	0.039	0.043	0.028	0.039
White noise a %	0.018	0.012	0.025	0.024	0.015	0.013	0.010	0.015
Outlet C conc., X_s %	0.065	0.062	0.080	0.076	0.044	0.057	0.041	0.046

X_r : Measured X_s : Calculated from eq. (4), assuming $\Delta Q=0$

数として

$$v(i) = \delta' v(i-1) + \omega' \Delta Q \dots\dots\dots (3)$$

のような 1 次式で表せる。インパルス応答の 1 例を Fig. 7 に示す。

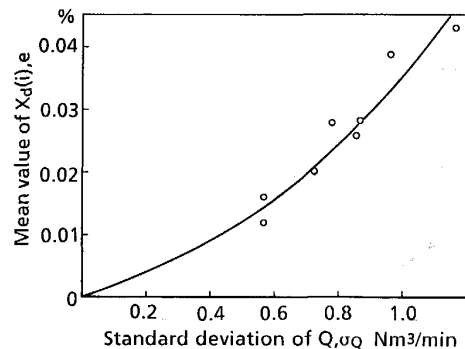
統計モデル $X_s(i)$ はこれらを組み合わせて†

$$X_s(i) = \frac{\omega}{1-\delta B} \Delta Q(i) + \frac{1}{1-\phi_1 B - \phi_2 B^2} a(i) + e \dots\dots\dots (4)$$

とおき、この式に実測値から求めた時系列データを適用し、 $\sum_{i=1}^N (X_d(i) - X_s(i))^2$ の値がなるべく小さくなるようにパラメーター ω, δ, ϕ を決定する。ここで N は各データを構成する測定値の数である。各操業について求めたパラメーターの値を Table 2 に記す。

5. モデル適用の結果

統計モデル(4)式の e は、入力の変動幅が十分小さく、線形とみなせる範囲にあれば 0 になるはずなので、非線形の影響を表している。Table 2 に記した e の値と、Table 3 に記した酸素流量 Q の変動の標準偏差 σ_Q の関係をプロットすると Fig. 8 のようになり、 σ_Q が大きいほど e も大きいという傾向を示している。



e : Mean value of $X_d(i)$ σ_Q : Standard deviation
 Fig. 8. Relation between e and σ_Q .

統計モデルの諸パラメーターは Table 2 に記したように各操業で多少のばらつきがみられる。このばらつきが 1 刻み、すなわち 5 min 先の予測値に及ぼす影響を調べるために帰納モデルと統計モデルを併せてシミュレーションを行った。ある時点 $i+1$ までの酸素流量の記録……、 $Q(i-1), Q(i), Q(i+1)$ と時点 i までの出口 C 濃度の実測値……、 $X_r(i-1), X_r(i)$ から 1 時点先の予測値 $\hat{X}_r(i+1)$ を計算するにあたって、まず統計モデルの諸パラメーターに各操業について別々に求めた値を入れ、 $X_r(i+1) - \hat{X}_r(i+1)$ の標準偏差を計算した。次に各パラメーターの平均値を用い、同様に予測誤差の標準偏差を計算し、結果を比較すると Table 4 に示すように両者はほぼ一致している。

シミュレーションによる予測の経過の一部を酸素流量

† (2), (3) 式を時間遅れ記号 (演算子) B を使って $Bw(i) = W(i-1)$, $B^2 w(i) = w(i-2)$ などと記すと

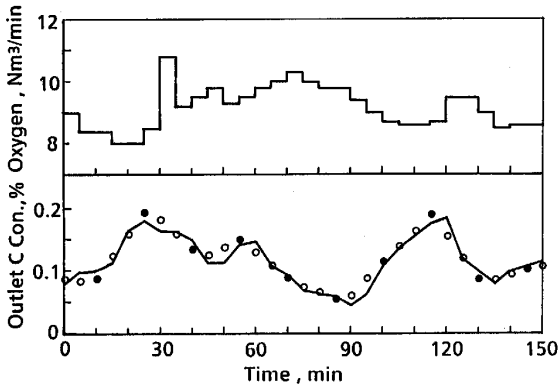
$$w(i) = \frac{1}{1-\phi_1 B - \phi_2 B^2} a(i)$$

$$v(i) = \frac{\omega'}{1-\delta B} \Delta Q(i)$$

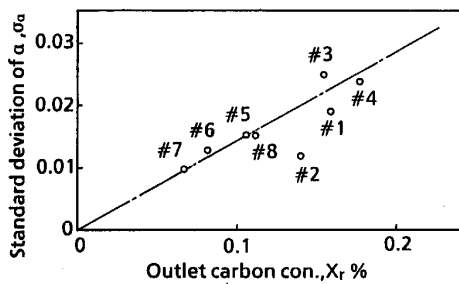
と書ける。

Table 4. Standard deviation of forecasting errors.

Operation	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8
With individual parameters	0.015	0.012	0.024	0.024	0.015	0.013	0.010	0.015
With common parameters	0.015	0.013	0.025	0.028	0.016	0.013	0.010	0.015



Real lines : Forecast Marks ● : Measured, ○ : Interpolated
Fig. 9. Result of simulation.



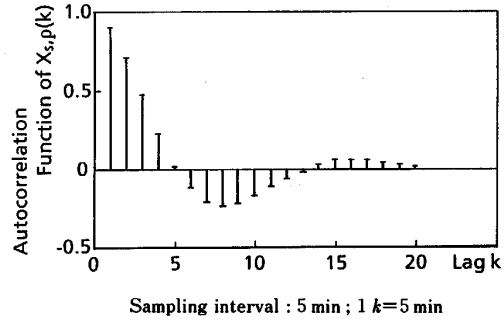
X_r : Outlet carbon conc.
 σ_a : Standard deviation of a (White noise)
For operation no. #1, #2, ... #8, see Table 1

Fig. 10. Relation between σ_a and X_r .

の記録と併せて Fig. 9 に実線で示した。図中●印が実測値、○印が内挿による統計モデルへの入力である。

ランダム変動の源である a の値は、また 1 刻み先の予測を行う場合の誤差でもあり、その標準偏差 σ_a は当然予測誤差の標準偏差とよく一致している。(Table 3, Table 4)。また σ_a の大きさは、Fig. 10 に示すように、入口 C 濃度 X_f が等しいものについては出口 C 濃度の平均値 X_r が高いものほど大きく、また X_r の平均値が同じものについては X_f が低いほど小さいという傾向を示している。

Q の変動がない場合、出力の変動は a の項だけとなるが、この場合の $X_r(i)$ の分散と自己相関係数は ϕ_1, ϕ_2 から計算できる。各操業について求めた標準偏差を Table 3 に、各パラメーターに平均値を入れた場合の自己相関係数を Fig. 11 に示す。この図によると、ランダ



Sampling interval : 5 min ; 1 k=5 min
Fig. 11. Autocorrelation function of X_r by eq. (4) with $\Delta Q = 0$.

ム変動は時定数約 30 min で減衰しつつ、周期約 80 min で振動する性質をもっているが、この原因が反応系にあるのか、プラントの他の装置から誘導されたものかは明らかでない。

帰納モデルが正確であれば、統計モデルで ΔQ の影響を表す(4)式第 1 項は 0 となるはずであるから、この項は帰納モデルを補足するものと考えられる。いずれの場合も $\omega > 0$ であるから、帰納モデルによる酸素の効果の評価が実際より大きかったことを意味している。

6. おわりに

帰納モデルの単純化を図つたため、統計モデルに酸素の影響が残るとともにその各パラメーターには操業ごとにある程度の相違が生じたが、そのばらつきは少なくとも予測に関しては大きな影響はなく、パラメーターに平均値を代入した統計モデルと帰納モデルを併用したモデルによる予測値は実操業の場合の指針となるものと思われる。

また帰納モデルでの仮定に起因する誤差は統計モデルで扱われることになるので、仮定に代わつて実測値が入力できれば、統計モデルのパラメーターのばらつきや、ノイズの大きさを減らすことにより、より正確な予測ができるはずである。

連続製鋼炉の制御を考える場合、基本的に次の二つの方法があると思う。一つは予測誤差が 0 となるように入力を制御する方法、他は後続する系が大きな容量を持つことができる場合、その均一化の効果を考慮して許容する分散を決め、その範囲に入るような制御に留める方法である。精度をあげるには、前者ではサンプリング間隔

を短くする必要があり、後者では設備の容量を大きくとる必要がある。どのような制御を行うかは成品の種類、設備の操業性、経済性といった総合的な見地から選ぶべきであるが、このような検討を行うためには変動の性質が定量的に把握されている必要があり、この目的には今回のモデルは十分役立つと思われる。

最後に時系列解析について御指導下さった東京商船大学 大津皓平、堀籠教夫、両教授に深謝致します。

文 献

1) 岩崎 武, 磯部 裕, 藤川安生, 渡辺敏昭, 福沢 章:
鉄と鋼, 75 (1989), p. 267

2) R. NAKAGAWA, S. YOSHIMATSU, T. IWASAKI, and Y. FUJIKAWA: *Iron Steel Eng.*, 61 (1984) 6, p. 57
3) 大多和公昭, 藤川安生, 大林省三, 小林 隆: 三菱重工技報, 21 (1984), p. 765
4) K. OHTAWA, T. KOBAYASHI, and Y. FUJIKAWA: 6 th Process Technology Conference, Proceedings (1986), p. 1094
5) 吉松史朗: 第 114・115 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1986), p. 283
6) G. E. P. BOX, and G. M. JENKINS: *Time Series Analysis, forecasting and control* (1976) [Holden-Day]
7) 赤池弘次, 中川東一郎: *ダイナミックスシステムの統計的解析と制御* (1972)[サイエンス社]
8) 菅沢勇夫, 古谷勝美, 大津皓平, 堀籠教夫: 東京商船大学第 33 回学術講演論文集 (昭和 60 年 2 月), p. 53
9) 榎木義一, 小西正躬: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 491