

時系列モデルによる連続製鋼プロセス用 キュポラの操業管理

© 1989 ISIJ
 技術報告
 //

岩崎 武*・磯部 裕*・藤川安生*²・小林 隆*³

Control of Cupola Operation for Continuous Steelmaking Process Using Time Series Model

Takeshi IWASAKI, Yutata ISOBE, Yasuo FUJIKAWA and Takashi KOBAYASHI

Synopsis :

CSM Process is a continuous steelmaking process, developed to supersede electric furnace. In its demonstration plant, melting of scrap was carried out by a hot blast, liningless cupola to supply the steelmaking furnace with molten iron continuously for several days. The essentials of the cupola are to avoid bridging, which is caused by growth of skull at watercooled stack shell, and to keep the molten iron temperature T_M above a certain level. As a result of time series analysis with the records obtained during operation of the plant, following things were revealed.

(1) When the correlation of heat loss from stack shell H_S and windbox pressure P_B is negligible while that of H_S and exhaust gas temperature T_E is appreciable, considerable melting should be taking place near the shell, and bridging is anticipated.

(2) As a function of blast temperature T_B and % coke C_R , the behavior of T_M can be expressed by a time series model, which is useful for forecasting as well as checking the stationarity. According to this model, 10°C rise of T_B should bring approximately 4°C increase in T_M without appreciable delay in average. Effect of C_R to T_M is estimated to be $5\sim 15^\circ\text{C}/\%$ with $3\sim 4$ h delay.

Key words : cupola ; continuous steelmaking ; bridging ; skull ; time series model ; molten iron temperature ; stationarity.

1. 緒 言

電気炉に代わる製鋼法として開発された連続製鋼プロセス (CSM プロセス)¹⁾²⁾の溶解工程に用いられたキュポラは、製鋼用スクラップを主体とした多様な原料を用い、なるべく少ないコークスで長時間安定して製鋼用の溶銑を供給することが要求される。

平均して一定の出湯量を確保するためには、連続操業に支障がおきかないような出湯温度を保ちながら、装入物が棚吊りをおこすことなく順調に下降することが不可欠である。このためには原料の種類、性状に応じて配合、コークス比などの条件を選ぶ必要があるが、多様で、しかもその割合の一定していない原料を用いる場合にはあらかじめ適切な条件を決めることが難しく、操業中に得られる諸測定値を用いて棚吊りの可能性や出湯温度の傾向を判断しなければならない。またキュポラの炉内状況の指標となる出湯温度・成分などは時間とともに不規則

に変動するので、一定時間間隔の測定値を時系列として取り扱う必要がある。

本報告は CSM プロセスの実証プラント³⁾に用いられたキュポラの操業記録に時系列解析を応用して、棚吊りの予知と出湯温度の挙動について検討を試みたものである。

なおキュポラを製鋼原料を作るために用いた例⁴⁾や、鋳物製造で長時間連続操業した例⁵⁾は少なくないが、連続製鋼に用いた例は CSM プロセス以外には見当たらない。

2. 設備概要と操業記録

CSM プロセスの実証プラントは、20 t/h の規模をもち、1983 年 11 月から約 14 か月の間に最高 7 日に及ぶ連続操業が 30 回以上実施された¹⁾。このプロセスの溶解工程はキュポラ本体、装入装置、送風装置、熱風発生装置、排ガス処理装置などから構成されている。キュポ

昭和 62 年 11 月 24 日受付 (Received Nov. 24, 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 菱重製鉄エンジニアリング(株) (MHI Steel Engineering Co., Ltd., 4-6-22 Kanonshinmachi Nishi-ku Hiroshima 733)

Table 1. Operating conditions I.

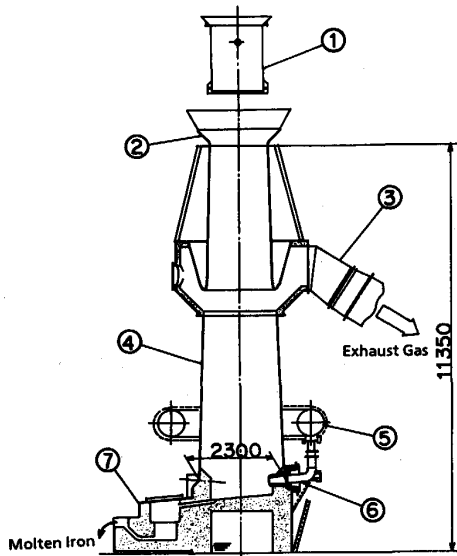
Operation	Date (1984)	Total time (h)	Total Charge (t)	Q_B (Nm ³ /min)	W_M (t/h)	C_R (%)	wt % of total charge		
							Steel scrap		Cast iron scrap
							Shredded	Others	
CSM-29	10/ 2-10/ 7	142	2600	185	18.3	13.8	29.7	60.1	10.2
CSM-32	11/ 9-11/16	167	2948	186	17.3	14.0	30.3	62.5	7.2
CSM-33	11/29-12/ 3	112	2102	190	18.8	13.1	8.0	81.8	10.2
CSM-34	12/ 5-12/ 7	42	766	180	18.3	13.2	14.5	75.0	10.5

Q_B : Blast volume (mean) W_M : Tons of iron charged per hour (mean) C_R : % coke (mean)

Table 2. Quality of coke.

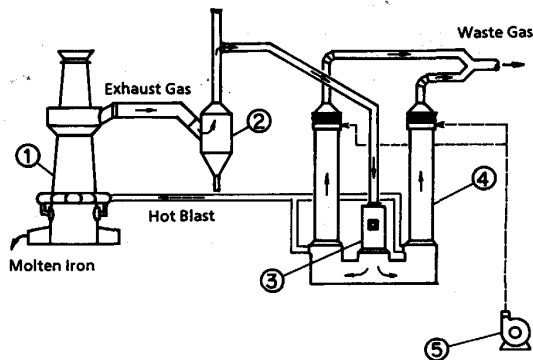
Analysis (M. F.)	
Fixed carbon (%)	90.7
Volatile matter (%)	0.6
Ash (%)	8.7
Sulphur content (%)	0.68
Size (mm)	40-160
Shatter, % on 50 mm screen*	94

* By 'JIS M 8801'



① Charging bucket ② Charging mouth ③ Exhaust duct
④ Cupola shaft ⑤ Windbox ⑥ Tuyeres ⑦ Slagging siphon

Fig. 1. Cupola.



① Cupola ② Dust catcher ③ Combustion chamber
④ Recuperator ⑤ Blower

Fig. 2. Flow of exhaust gas and blast.

ラ本体は Fig. 1 に示すような構造で、5本の水冷突出羽口をもち、ライニングレス、ドライボトム、サイフォン式である。

一定量の原料地金とコークス、造滓材が底開き式バケットによつて、炉内の原料の降下に応じて炉頂から装入される。排ガス系統と送風系統の概略は Fig. 2 に示

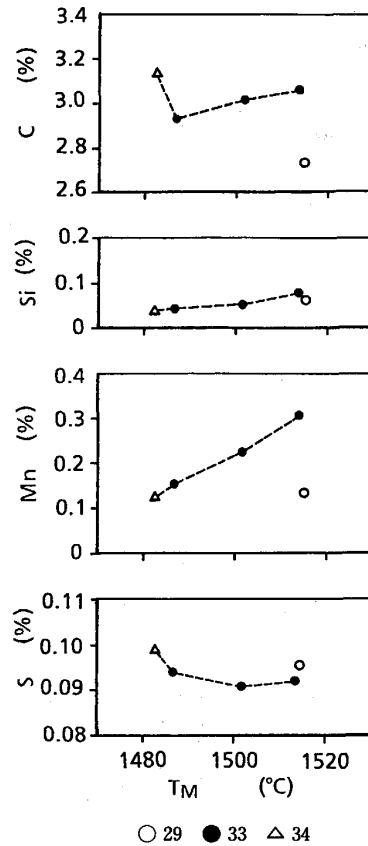


Fig. 3. Composition of molten iron.

す構成で、キュボラから出た排ガスは燃焼室③で燃焼し、希釈空気とその温度を制御した後、熱交換器④に入り熱風をつくる方式である。

全操業にわたつて装入物(地金、コークス、造滓材)それぞれの重量と装入時刻に加えて、送風量(Q_B)、風箱圧力(P_B)、熱風温度(T_B)、排ガス温度(T_B)が5 min 刻みで、また出湯温度(T_M)と成分分析値が30

Table 3. Operating conditions II : data for 5 min sampling interval.

Operation	Data	Date and time	N	Q _B (Nm ³ /min)	W _M (t/h)	C _R (%)	T _M (°C)	C (%)
CSM 29	29-1	10/ 2, 2°50'-10/ 2, 9°50'	85	190	19.8	13.2	1 532	2.82
	29-2	10/ 2, 18°00'-10/ 3, 0°10'	75	190	20.1	13.2	1 523	2.72
	29-3	10/ 3, 18°05'-10/ 4, 3°00'	108	190	20.5	13.3	1 502	2.69
	29-4	10/ 4, 10°50'-10/ 4, 9°35'	46	190	20.1	13.2	1 499	2.62
CSM 32	32-1	11/ 9, 2°30'-11/ 9, 8°30'	73	190	18.3	12.5	1 527	2.96
CSM 33	33-1	11/29, 16°30'-11/30, 5°10'	151	190	19.7	13.1	1 522	3.11
	33-2	11/30, 6°00'-11/30, 13°40'	93	190	18.8	12.8	1 503	3.00
	33-3	12/ 1, 0°35'-12/ 1, 9°05'	103	190	18.8	13.1	1 512	3.15
	33-4	12/ 1, 15°45'-12/ 1, 19°10'	42	200	20.0	12.5	1 498	2.98
	33-5	12/ 2, 9°45'-12/ 2, 14°00'	52	190	18.9	12.3	1 481	3.00
	33-6	12/ 2, 15°15'-12/ 2, 18°40'	42	195	19.4	12.6	1 482	2.75
CSM 34	34-1	12/ 6, 7°30'-12/ 6, 13°30'	73	180	18.5	13.0	1 478	3.19
	34-2	12/ 6, 13°40'-12/ 6, 21°00'	89	180	19.0	13.0	1 491	3.05
	34-3	12/ 6, 21°05'-12/ 7, 4°30'	90	180	19.1	13.3	1 478	3.18

N: Number of records Q_B: Blast volume (mean) W_M: Tons of iron charged per hour (mean) C_R: % coke (mean)
 T_M: Temperature of molten iron (mean) C: Carbon content of molten iron (mean)

Table 4. Operating conditions III : data for 30 min sampling interval.

Operation	Data	Date and time	N	Q _B (Nm ³ /min)	W _M (t/h)	C _R (%)	T _M (°C)		T _M (min)
							Mean	σ	
CSM 29	29-A	10/ 2, 3°30'-10/ 4, 9°30'	105	190	19.7	13.3	1 515	21	1 473
CSM 33	33-A	11/29, 13°30'-11/30, 13°30'	49	190	19.1	13.1	1 514	14	1 486
	33-B	12/ 1, 0°30'-12/ 2, 3°30'	55	190	19.4	13.0	1 502	12	1 478
	33-C	12/ 2, 10°00'-12/ 3, 19°00'	67	189	19.1	13.0	1 487	15	1 457
CSM 34	34-A	12/ 6, 8°00'-12/ 7, 4°30'	42	180	18.9	13.1	1 483	13	1 457

N: Number of records Q_B: Blast volume (mean) W_M: Tons of iron charged per hour (mean) C_R: % coke (mean)
 T_M: Temperature of molten iron (mean) σ: Standard deviation T_M (min): T_M-2σ

min ごとに記録されている。さらに一部の操業では炉壁からの熱損失を示す(炉壁冷却水量)×(水温上昇)の値(H_S)も5min間隔で記録されている。

解析の対象には、操業開始後1~2日間は装入が順調でその後棚吊り現象がみられた場合(“異常操業”とよぶ)の例として操業番号CSM 29, 32を、また終始装入が順調であった場合(“正常操業”とよぶ)の例としてCSM 33, 34を選んだ。これらの操業条件と操業結果の概略をTable 1に、またコークスの性状をTable 2に記す。

時系列解析を行うためには、途中で切れ目のない等間隔の記録の数がある程度以上必要で、数が多いほど信頼性が高くなる。今回の解析では最低40個を目安としたので、間隔の異なる2種の時系列についてデータの区分を変えることにした。5min刻みの記録はそのまま5min間隔の時系列とし、Table 3に示す区分を用いた。30min間隔の時系列にはT_M成分のほか、地金装入速度(W_M)、コークス比(C_R)と、5min刻みの記録についての30min平均値を加えた。対応する区分と操業条件、T_M出湯成分などの平均値をTable 4およびFig. 3に示した。

Fig. 3のSi, Mnの平均値は原料からの推定値(Si

~0.33%, Mn~0.44%)に比べてかなり低いが、これは後段に塩基性の酸素製鋼炉を使用するCSMプロセスにとっては好ましい傾向といえる。

3. 解析方法

測定値の時系列が一定の平均値を中心としてランダムに変動する、いわゆる定常ランダム過程とみなせる場合、その変動を数式で表現する方法の一つに自己回帰モデル(Auto-Regressive model, ARモデル)⁶⁾がある。

このモデルは時点*i*における変数の平均値からの偏りを*w*(*i*)とすると、φ₁, φ₂, …, φ_jを定数として

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

と表現される。ここに*j*は次数、*a*(*i*)はランダム変動を表すホワイトノイズで、相互に無相関である。

時間遅れ記号(演算子)*B*を用いて

$$BX(i) = X(i-1), B^2X(i) = X(i-2), \dots$$

と記すと、(1)式はφ(*B*)を

$$\Phi(B) = 1 / (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots) \dots \dots \dots (2)$$

と定義することにより

$$w(i) = \Phi(B)a(i) \dots \dots \dots (3)$$

と書くことができる。

この時系列モデルで w を表現する場合に、入力として作用し、 w の変動の原因となつているか、またはその変動が先行して w の変動と相関をもち前兆となる量がある時には、それらを考慮することによりモデルを改良することができる。そのような量 v が w と線形関係にあれば、それらの相互相関から伝達関数を

$$F(B) = \frac{\omega + \omega_1 B + \dots}{1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots} \dots\dots\dots (4)$$

の形にあてはめることができ、 w は

$$w(i) = F(B)v(i) + \Phi(B)a(i) \dots\dots\dots (5)$$

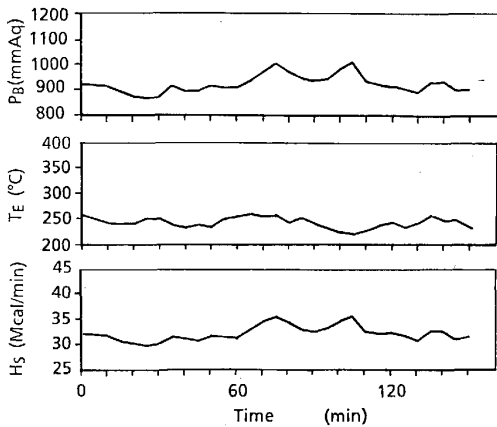


Fig. 4. Variation of windbox pressure (P_B), exhaust gas temperature (T_E) and heat loss from watercooled shell (H_S).

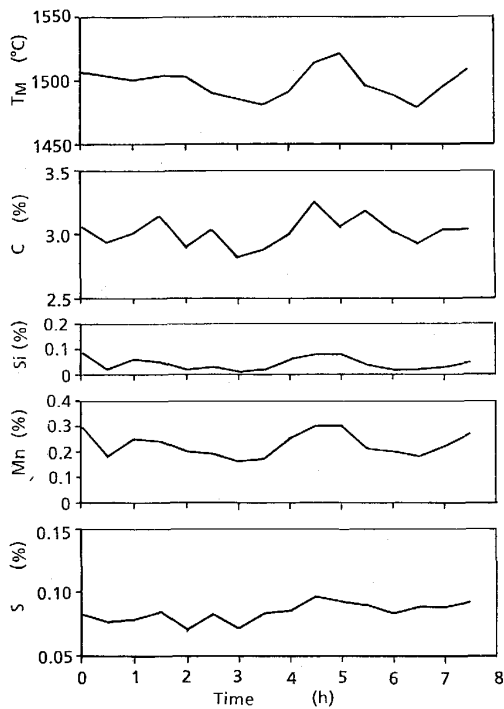


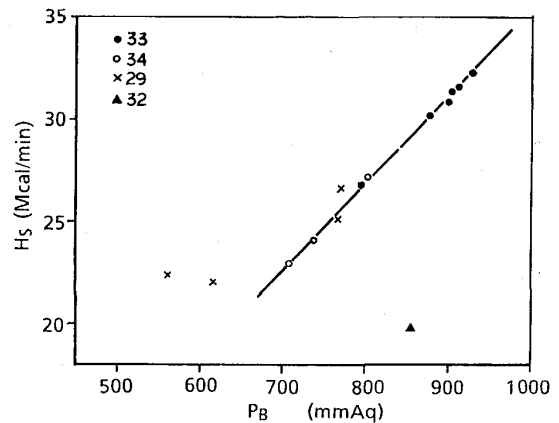
Fig. 5. Variation of molten iron temperature and composition.

と表現される。

5 min 刻みと 30 min ごとのデータの例として CSM 33 の記録の一部をそれぞれ Fig. 4, 5 に示したが、これらの時系列はいずれも (1) 式に代入し、 $2 \geq j$ の範囲で ϕ を適当に選ぶと $a(i)$ が互いにほぼ無相関となり、1~2 次の AR モデルをあてはめることができる。2 組の時系列の相互相関関数は $a(i)$ の時系列を用いて計算できる。

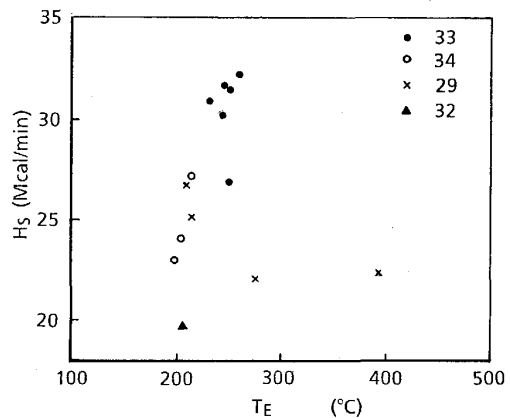
4. 棚吊りの予知

ライニングレス熱風キュボラは溶解帯近辺のライニング補修を要しない代わりに、炉壁に地金付着を発生し、これが成長すると棚吊り状態となり正常な操作ができなくなるということが知られている⁷⁻⁹⁾。このような棚吊り状態は装入物の降下状況から容易に判断できるが、それを正常に戻すことは甚だ困難であり、たとえ操作が継続できても停止後の処理が厄介なので事前に兆候を検出するこ



P_B : Windbox pressure
 H_S : Heat loss from watercooled shell

Fig. 6. Relation between P_B and H_S in average.

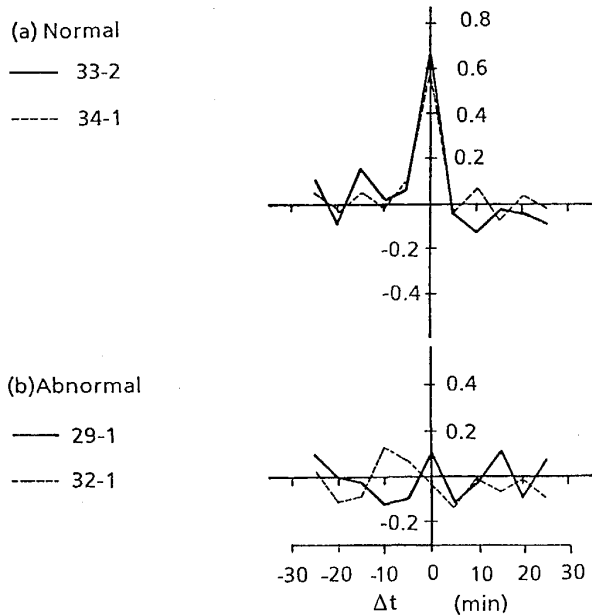


T_E : Exhaust gas temperature
 H_S : Heat loss from watercooled shell

Fig. 7. Relation between T_E and H_S .

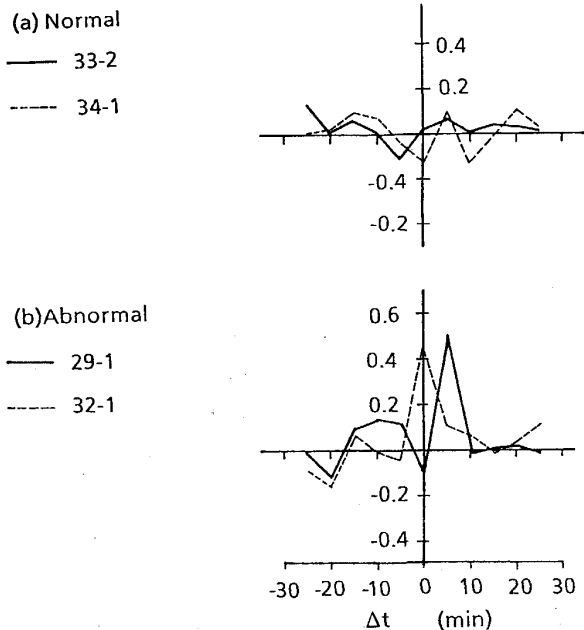
とが望ましい。

Table 3 に記す各操業期間に対応した P_B と H_S の平均値の関係は Fig. 6 に示すように“正常操業”の場合は完全に直線にのるが、“異常操業”の場合は初めこの直



Δt : Time delay $\Delta t > 0$: Windbox pressure is delayed
 $\Delta t < 0$: Heat loss is delayed

Fig. 8. Cross-correlation function between heat loss from water cooled shell and windbox pressure.



Δt : Time delay $\Delta t > 0$: Gas temperature is delayed
 $\Delta t < 0$: Heat loss is delayed

Fig. 9. Cross-correlation function between heat loss from water cooled shell and exhaust gas temperature.

線に近い場合でもしだいに離れる傾向を示す。この相違は Fig. 7 に示す T_E と H_S の関係にもみられるが、Fig. 6 ほど明瞭ではない。

これら諸量の関係は、その変動に注目するといつそう明らかになる。 P_B , H_S の変動は Fig. 8 に示すように“正常操業”の場合には例外なく同時点で相関をもち、その係数が 0.5 以上に達するのに対して、“異常操業”の場合には相関を示さない。また T_E , H_S については Fig. 9 に示すように“正常操業”の場合には相関が認められないが、“異常操業”の場合は T_E が 0~5 min 遅れたところで 0.5 程度の相関係数を与える。

“正常操業”と“異常操業”の場合にみられる P_B , H_S , T_E の相関関係をそれぞれ“正常状態”、“異常状態”とよぶことにすると、データ 29-1, 32-1 のように操業初期で装入が順調であった場合でもこの“異常状態”は極めて明瞭に表れている。このことは“異常状態”が長時間続くと棚吊りに到ることを示しており、操業中に P_B , H_S , T_E の相関を調べることによつてこの種の棚吊りが予知できることがわかる。

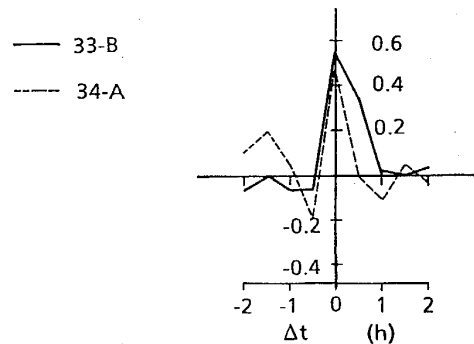
なお Table 3 に示した T_M , 出湯 C , W_M , などからは“正常操業”と“異常操業”の相違は明らかでない。

またこれら諸量と、 P_B , T_E , H_S の 30 min 平均の時系列との相関からも特定の傾向は見出されなかつた。

5. 出湯温度の挙動

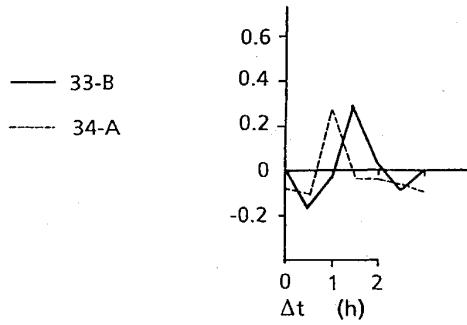
T_M を時系列モデルで表現するにあつて他の諸量との関係を調べると、 P_B , T_E , W_M とは相関が認められず、出湯成分の変動は同時点である程度の相関を示すが、先行はしていない。また入力には C_R , T_B とともに Q_B が考えられるが、 Q_B は変化させていないので C_R と T_B のみを考慮することにした。

対象としたデータの T_M と T_B の相関係数を求める



Δt : Time delay $\Delta t > 0$: Iron temperature is delayed
 $\Delta t < 0$: Blast temperature is delayed

Fig. 10. Cross-correlation function between blast temperature and molten iron temperature.



Δt: Time delay Δt>0: Iron temperature is delayed

Fig. 11. Cross-correlation function between coke rto and modified molten iron temperature (Effect of T_E is excluded).

と, Fig. 10 に示すように, いずれの操業においても同時点で 0.5 程度の値が得られる. 一方 T_M と C_R の場合には T_M が 1~1.5 h 遅れた時点で最高 0.3~0.5 の相関係数を示すが, かなりのばらつきがみられた. したがって C_R の影響をモデルに入れるためには, むだ時間の大きさも決める必要があるため, ここでは手順を 2 段階に分けて, まず T_M と T_B の関係を求め, 次に T_M から T_B の影響を除いた時系列と C_R の関係を求めることにした. T_B , T_M の関係は, 平均値からの変動分をそれぞれ X , Y とし, その間の伝達関数と Y の AR モデルを組み合わせるにより, ω_X , δ , ϕ をパラメータとして

$$Y(i) = \frac{\omega_X X(i)}{1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2} + \frac{n(i)}{1 - \phi B} \quad \dots\dots\dots (6)$$

の形式にまとめることができた. ここで $n(i)$ は $X(i)$ に無関係でホワイトノイズの性格をもつ時系列である.

C_R の変動分の時系列 $Z(i)$ と $n(i)$ の相関は Fig. 11 に示すように, むだ時間にばらつきはあるが, いずれもほぼ一点に集中して存在するので $n(i)$ と $Z(i)$ の関係は ω_Z をパラメータとして

$$n(i) = \omega_Z Z(i - b) + a(i) \quad \dots\dots\dots (7)$$

と表現できる. ここで $a(i)$ は $X(i)$, $Z(i - b)$ と無関係なホワイトノイズ, b はむだ時間の刻み数である.

各データについてモデルのパラメータの値と, $a(i)$ の標準偏差を Table 5 に記した.

T_M の平均値と, 時系列モデルの諸パラメータの値には, Table 4, 5 にみられるように, ある程度のばらつきが認められる. 各データの違いを定量的にみるために, T_M の平均値を検定すると, それらは同一母集団からの標本とはみなしえないことがわかる. このことは操業を開始する前にあらかじめ T_M の平均値, 分散等を想定して温度管理を行うことが難しく, 操業中に計測した

Table 5. Time series model for molten iron temperature.

Model	$Y(i) = \frac{\omega_X X(i)}{1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2} + \frac{n(i)}{1 - \phi B}$ $n(i) = \omega_Z Z(i - b) + a(i)$						
	ω_X	δ_1	δ_2	ϕ	ω_Z	b	σ_a
33-A	0.35	-0.69	-0.07	0.78	2.0	3	8.0
33-B	0.37	-0.01	-0.40	0.65	2.4	2	5.8
33-C	0.45	-0.42	0.26	0.61	1.8	3	8.5
34-A	0.45	0.04	0.60	0.61	5.8	3	8.0

B : Backward shift operator (sampling interval=30 min)
 X : Variation of blast temperature ($^{\circ}\text{C}$)
 Y : Variation of molten iron temperature ($^{\circ}\text{C}$)
 Z : Variation of % coke
 a : White noise ($^{\circ}\text{C}$)
 σ_a : Standard deviation of a ($^{\circ}\text{C}$)

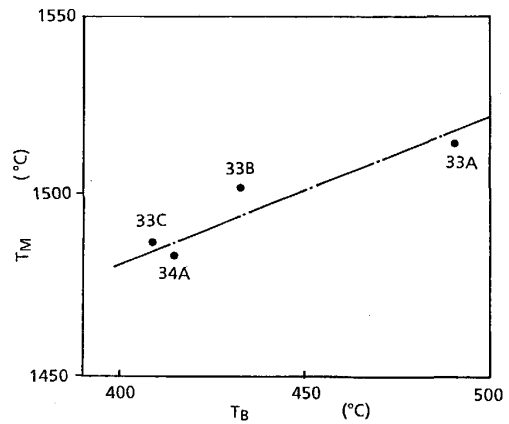


Fig. 12. Relation between mean blast temperature T_B and mean molten iron temperature T_M .

値からその挙動を推測する必要があることを示している. T_M の挙動は過去に得られた記録から時系列モデルを作り, 操業中の計測値で平均値とパラメータを修正していくことにより, 定量的に表現することができる.

対象にしたデータの時系列モデルによると, T_B , C_R が一定の場合 T_M のランダム変動の標準偏差は 6~8 $^{\circ}\text{C}$ となる. そして T_B の 10 $^{\circ}\text{C}$ の上昇はほとんど遅れなしに T_M に約 4 $^{\circ}\text{C}$ の上昇をもたらすことになる. この値は R. L. HACHTMAN, A. B. DRAPER の調査結果¹⁰⁾ が 2.2~2.4 $^{\circ}\text{C}$ であるのに比べるとかなり大きい, T_M と T_B の平均値の関係は Fig. 12 のような傾向をもち, $\Delta T_M / \Delta T_B = 0.4$ の直線に近い.

また C_R を 1% ステップ状に変化すると T_M は 1.5~2 h のむだ時間をもつて指数関数状に変化し, その時定数は 1~2 h で, 最終値は 5~15 $^{\circ}\text{C}$ の間にばらつく.

6. 出湯温度の安定性と予測

安定操業には柵吊りを起こさないだけでなく, 常時変動を示す T_M の最低値を操業に支障のない範囲に保たな

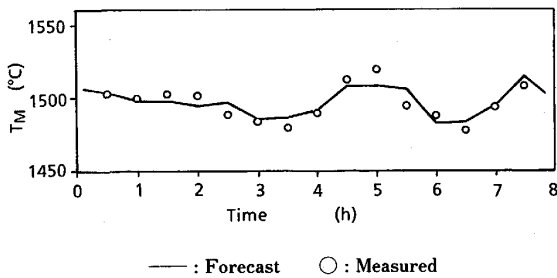


Fig. 13. Forecast of molten iron temperature.

なければならない。ある時点での測定値は、平均値と変動の代数和と考えられるので、 T_M が一定値以下にならないためには、その平均値と変動が安定していること、すなわち定常ランダム過程であることが必要である。

時系列モデルによると、時点 k で新たに得られた測定値から (6), (7) 式の関係を使つて求めた $a(k)$ の値が、 $k-1$ 以前のデータから推定される母集団に属すると認められる場合は、その測定値が定常ランダム変動の範囲にあるので T_M は安定と判断される。

定常ランダム過程と認められれば、その分散なども一定しているので T_B , C_R を与えれば T_M が必要最低温度以下にある危険率も推定できる。また T_M の変動分 $Y(k)$ の 1 刻み先の予測値 $\hat{Y}(k+1)$ も $a(k)$, $a(k-1)$, \dots ; $Z(k-b+1)$, $Z(k-b)$, \dots と $X(k+1)$, $X(k)$, $X(k-1)$ \dots の値を用い、 $a(k+1)=0$ とおくことによつて (6), (7) 式から計算できる。この方法で T_M の 1 刻み先の予測値を求めた例を Fig. 13 に示した。予測誤差 $Y(k+1) - \hat{Y}(k+1)$ は $a(k+1)$ に等しく、その標準偏差は Table 5 に記した標準偏差 σ_a と同じく $6 \sim 8^\circ\text{C}$ 程度とみられる。以上の T_M に関する取扱いは、他の測定値にも応用できる。出湯成分のうち、C, Si, Mn, S については T_B に対してほとんど遅れなく正の応答があり、 C_R に対しても $1 \sim 1.5$ h 遅れて正の相関を示すので、 T_M と全く同様に扱うことができる。またキューボラ内では変化しないとみられる P, Ni, Cr, Cu などについては、 T_B , C_R と相関をもたないので、(1) 式の AR モデルのみによつて定常性の判断と予測ができる。

7. 考 察

“正常状態”と“異常状態”で H_S , P_B , T_E の関係が異なることは、“正常状態”の場合溶解が主として中心部で行われ、炉壁への熱移動が燃焼ガスの対流によるのに対して、“異常状態”の場合は周辺部でも溶解が起り、炉壁への熱移動の主な媒体がガスではなく、溶銑、溶融スラグなどからなる溶融生成物と考えれば理解できる。対流による熱移動では相似則から圧損と熱伝達係数は比

例するはずであるから、“正常状態”で H_S と P_B の相関が極めて高く、 H_S と T_E に相関がみられないことは、 H_S の変動が熱伝達係数の変動に支配されており、 T_E の変動が主として中心を流れるガス温度に支配されていると推定される。また炉壁への熱移動の媒体が溶融生成物であれば、 H_S は P_B と直接には関係をもたず、 H_S と T_E の間に正相関があるのは周辺溶解が盛んになるほど T_E が上がることを示している。この場合溶融生成物は炉壁に熱を伝えるとともに一部が付着し、それが成長すると棚吊りに移行するものと考えられる。周辺溶解を極力少なくするために CSM キューボラでは比較的大きな炉径、逆テーパーと突出羽口を採用している。しかし原料地金のなかでシュレッダー以外の鋼スクラップの性状は極めて変化に富んでおり、極端に性状の異なる多種類のスクラップを原料とする操業では“異常状態”となることもあつたが、その場合でも配合を適当に選ぶことによつて、棚吊りが避けられることがわかつた。

CSM キューボラの最低コークス比は、主として変動の結果現れる最低出湯温度を一定値以上に維持するという条件から決まるものと考えられる。Table 4 のなかで $\min(T_M)$ の項は T_M の平均値からその標準偏差の 2 倍を差し引いた $T_M - 2\sigma$ の値で、各データの間にかんがりの差が見られるが、その操業中の最低温度とみなすことができる。操業条件で C_R は原料地金の約 13% を標準としているが、C の分析値に相当する Fe-C 系の融点と $\min(T_M)$ とを比較すると、かなりの余裕があるので、安定性の検討を行いつつさらに低下させることが可能と思われる。

8. 結 言

CSM プロセスに用いられたライニング熱風キューボラは、棚吊りをおこさず、出湯温度が安定していれば極めて長期間の安定操業が可能である。付着地金の成長による棚吊りは周辺溶解が原因と推定され、操業中にえられる風箱圧力、排ガス温度および炉壁からの熱損失の測定記録の相関を調べることによつて予知できることが確認できた。操業中にこの種の棚吊りが予知された場合には操業条件、とくに原料配合を変更することによりその発生を回避することができる。

また出湯温度の挙動は線形時系列モデルで表現することができる。モデルの形式は過去の記録から決定できるが、パラメーターは測定値によつて修正していく必要がある。操業の安定性はこのモデルを使つて、測定された出湯温度の値が定常ランダム変動の範囲にあることを確認することによつて判断できる。検討の対象としたデー

タから導かれたモデルによると、コークス比と熱風温度が一定の場合、出湯温度変動の標準偏差は $6\sim 8^{\circ}\text{C}$ であり、また熱風温度 18°C の上昇は 30 min 以内に約 4°C 、コークス比 1% の増加は 3~4 h の遅れで $5\sim 15^{\circ}\text{C}$ の出湯温度の上昇をもたらすことになる。

最後に本報告を作成するにあたって有益な御意見を下さった早稲田大学中江秀雄教授ならびに時系列解析を御指導下さった東京商船大学大津皓平、堀籠教夫両教授に厚く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) 大多和公昭, 藤川安生, 大林省三, 小林 隆: 三菱重工技報, 21 (1984) 6, p. 765
- 2) K. OHTAWA, T. KOBAYASHI, and Y. FUJIKAWA: 5th

International Iron and Steel Congress, Proceedings of the 6th Process Technology Conference, Washington, 6 (1986), p. 1095

- 3) 岩崎 武, 磯部 裕, 藤川安生, 渡辺敏昭, 福沢 章: 鉄と鋼, 75 (1989), p. 267
- 4) R. B. SHAW: Iron Steel Eng., 45 (1968)1, p. 75
- 5) J. OLSON, and R. MITCHELL: Foundry M&T (1980) March, p. 56
- 6) G. E. P. BOX, and G. M. JENKINS: Time Series Analysis, forecasting and control (1976)[Holden-Day]
- 7) AFS Cupola Handbook (1975)[American Foundrymen's Society]
- 8) 中原 衛, 沖原洋二: クボタ技報, 2 (1977), p. 85
- 9) 松田政夫, 西岡弘雄, 板野直巳: 鋳物, 50 (1979), p. 475
- 10) R. L. HACHTMAN, Jr. and A. B. DRAPER: AFS Transactions, 88 (1980), p. 489