

討5

加古川製鉄所に於けるLD転炉の計算機制御について

神戸製鋼所 中央研究所 成田貴一 富田昭洋 O片桐 望
加古川製鉄所 喜多村 実 川崎正蔵 金塚幸夫

1. 緒言

LD転炉(以下転炉)は'52年オーストリアで開発されて以来、精錬の高速性を最大の特長として発展し製鋼法に占める位置を不動のものにした。しかしその高速性は制御性の困難という問題を伴ないその矛盾を解決しその特長をさらに伸ばすものとしてプロセス制御が'57年以来各社で取上げられた。当所に於ても'73年1月600万Ton/年体制の確立と同時に転炉の計算機制御を開始した。'74年10月スタティック制御を完成させ、吹止炭素と温度(以下C・T)の同時適中率を約15%向上させた。つづいてサブランス方式によるダイナミック制御の開発に重点を移し、現在80%以上のC・T同時適中率を得るに至った。この過程で炉内の不均一性の問題などいくつかの解析結果と知見を得たのでそれらも含めて報告する。

2. スタティック制御

2.1 モデル式 (2.1),(2.2)の2式で目標C・Tと諸条件を与えられて所要の酸素・冷却剤(鉄鉱石)量を計算する。結果は後述の学習の結果を加えてオペレータガイドとして表示する。これらの2式は(2.1)式に鉄鉱石が説明変数として入っている以外は全く同形である。式中の係数が一部溶鉄配合率(以下HMR)の一次式になっているのは、HMRの大巾な変動にも追従できるようにするためである(図1)。式中の係数は重回帰分析によって決定した。その際データ精選—ほぼスタティック計算値通り吹錬されては適中したチャージのみを採用するという形で行なう—という事に注意した。本モデル式は後述の2系列の学習によって操業条件の変動に適応させている。(2.1),(2.2)式は(2.3)式のように表わせる。以下の検討には(2.3)式を用いる。

$$GO_2 = \sum_{i=1}^{25} (a_i + b_i HMR) \cdot x_i + \sum_{j=1}^4 c_j x_j^2 \quad (2.1)$$

$$Ore = \sum_{i=1}^{25} (a'_i + b'_i HMR) \cdot x_i + \sum_{j=1}^4 c'_j x_j^2 \quad (2.2)$$

$$X = AY + BX_0 \quad (2.3)$$

GO₂: 酸素量
Ore: 鉄鉱石量
X: (GO₂), Y=(C/T)
X₀: C・T以外の説明変数ベクトル
A, B: 係数行列
a_i, b_i, c_i
a'_i, b'_i, c'_i 係数
x_i: 説明変数

2.2 (ショートレンジ)の学習

毎チャージ吹錬終了後(2.4)式よりモデル式の誤差を検出し、その荷重移動平均値を次チャージの修正量とする(積分制御)。誤差がある"しきい値"を越すと学習しない。

$$\Delta X = X_{EX} - (AY_{EX} + BX_0) \quad (2.4) \quad EX: 実績値$$

2.3 ロングレンジの学習 重回帰分析を最近のデータを用いてやり直す事によって行なう学習である。この場合もデータ精選が重要で、上記と同様に行なっている。

2.4 スタティック制御による効果 表1にダイナミック制御の結果とともに示す。ΔT(Δ:目標-実績)のσと再吹錬率の減少が顕著である。

以下はスタティック制御開発途上行なった検討結果の一部である。

2.5 基準チャージ方式の検討

これは(2.5)式を変形して(2.6)式にすれば明らかのように基準チャージの誤差による比例制御である。著者もこの方式について色々検討してみたが前記モデルに勝るとの結論は得られなかった。

$$v - v_0 = \sum a_i (x_i - x_{i0}) \quad (2.5)$$

$$v = \sum a_i x_i + (v_0 - \sum a_i x_{i0}) \quad (2.6)$$

O: 基準値

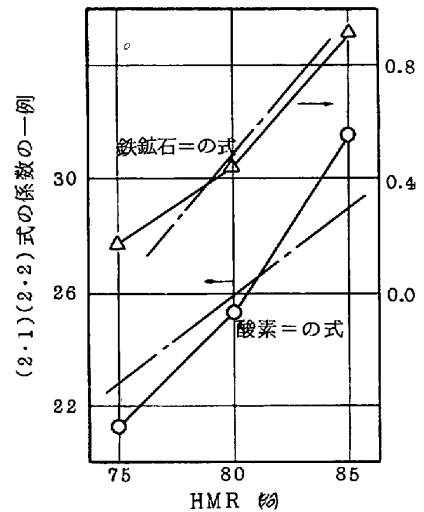


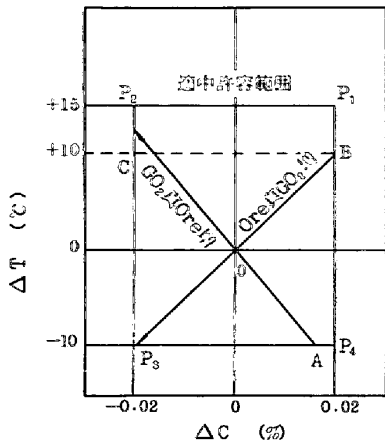
図1 各HMR水準の式の係数とその統一

○今までにHMR3水準で式を用意した。それらの式の各係数とHMRとの関係は図のようであったので各係数をHMRの一次式の形で表わす見通しが得られた。図中一点鎖線はこのようにして得られた結果である。

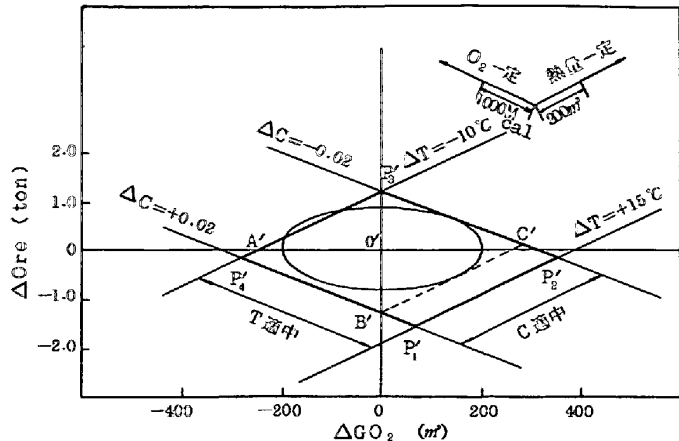
表1 計算機制御による効果

	操業者	スタティック制御	ダイナミック制御
C 適中%	58.1	65.4	95.1
T 適中%	51.4	68.2	84.5
同時適中%	30.1	45.3	80.7
ΔCのσ(%)	0.028	0.024	0.018
ΔTのσ(%)	18.8	13.6	9.0
再吹錬率(%)	24.0	11.0	6.0

○Δ: 実績-目標



a. C・T平面(Δ:実績-目標)



b. CO₂・Ore平面(Δ:計算値-真値)

図2 C・T許容範囲と酸素、鉄鉱石許容範囲の対応(線形変換)(低炭)

(2.13)式によりP₁P₂P₃P₄となる。図中の楕円は現オンライン式の残差σを基に引いたもので、モデル式側から言えばこの楕円内に6.8%予測できる。この図からすると8.0%近く適中できそうだが現実には5.0%弱しか適中していない。

2.6 自己帰帰 変動に対する適応機構が統計モデル使用上の要点の1つである。

A.A.Greenfield¹⁾は毎チャージ次の係数C₁を今までの係数C₀と過去チャージの重み減衰定数α²を用いて計算していく簡単な方法を発表した((2.7)式)。現実的な説明変数の数(=16)で様々にシミュレートしてみたが2.1項のモデルより勝るとの結論は得られなかった(表2)。

表2 自己帰帰結果の一例

α ²	C適中%	T適中%	C.T適中%
0.5	60.8	59.7	38.2
0.7	60.8	61.8	39.9
0.9	61.4	63.8	41.0
1.0	63.1	62.5	39.6
実績	81.9	58.7	50.5

n=298

$$C_1 = (E - \frac{(X'X)^{-1}X'X}{\alpha^2 + X(X'X)^{-1}X'}) C_0 + \frac{(X'X)^{-1}X'Y}{\alpha^2 + X(X'X)^{-1}X'} \quad (2.7)$$

記号は文献1)参照

2.7 XY間の係数行列の実験的推定 XY間の係数行列はダイナミック制御データと鉄鉱石増減試験(鉄鉱石投入量をスタティック制御計算値+1ton,-1tonとした吹錬をくりかえす)からも推定する事ができる(表3)。(2.8)式はそうして得られたもの、(2.9)式はその変形、(2.10)式は(2.3)式の係数を各変数の平均値近傍で定数化したもので、それぞれ吹錬末期の挙動の表現である。

$$\Delta Y = \begin{pmatrix} -0.025 \times 10^{-4} & -0.0157 \\ 0.040 & -8.1 \end{pmatrix} \Delta X \quad (2.8) \quad \Delta X = \begin{pmatrix} \Delta GO_2 \\ \Delta Ore \end{pmatrix}$$

$$\Delta X = \begin{pmatrix} -7070 & 14.0 \\ -34.9 & -0.055 \end{pmatrix} \Delta Y \quad (2.9) \quad \Delta Y = \begin{pmatrix} \Delta C \\ \Delta T \end{pmatrix}$$

$$\Delta X = \begin{pmatrix} 300 & 14.3 \\ -12.0 & -0.061 \end{pmatrix} \Delta Y \quad (2.10)$$

表3 鉄鉱石±1ton試験結果

ΔOre	n	ΔC (%)	ΔT (%)
-0.2~0.2	42	0.0136	-0.857
-0.8~1.2	21	0.0293	7.29
-1tonによる効果		0.0157	8.1

① (2.9)式と(2.10)式を比較してみるとΔTの係数はよく一致している。(実験結果と重回帰分析結果の一致。)

② (2.9)式によるC・T平面とGO₂・Ore平面の対応は図2の如くなった。図b中の矢印は酸素量一定および熱量一定の線の傾きを示すもので、それぞれ図bのC・T一定の線にはほぼ平行になっている。但しそれらは、鉄鉱石中の酸素は200m³/ton、その吸熱量は964Mcal/ton²⁾、吹錬末期のFe・Cの燃焼熱は4.7Mcal/Nm³O₂などとして求めた。又図より得られる脱炭酸素効率、熱効率はそれぞれ約1.6%、4.0%であった。

③ 鉄鉱石の冷却係数は(2.11)式の如く与えられ、現場経験値20°C/tonとよく一致した。第一項はCを吹下げないという条件より与えられる吹込み酸素減少による項である。240tonの溶鋼と30tonのスラグがともに比熱0.2Kcal/kg・°Cであるとして計算してみると、964/(0.2×270)=17.9°C/tonとなりよく一致した。又酸素量の減少がなくても残る8.1°Cという冷却能も上記の熱効率からは説明できた。

$$\text{冷却係数} = |a_{21}(-a_{12}/a_{11}) + a_{22}| = |0.040(-0.0157/0.025 \times 10^{-4}) - 8.1| = |-10.0 - 8.1| = 18.1 \text{ °C/ton} \quad (2.11)$$

但しa_{ij}は係数行列のi・j成分で、a₁₁・a₂₁はそれぞれ単位酸素量当りの脱炭%,昇温で、a₁₂・a₂₂はそれぞれ単位鉄鉱石量当りの脱炭%,昇温を意味する。

3. ダイナミック制御

3.1 吹錬末期多点測定 モデルの確定に先だって吹錬末期の脱炭昇温挙動を把握する目的で2本のサブランスを用いて吹錬末期多点(途中3点)測定を行なった。

- ① 得られた脱炭曲線は ΔGO_2 と $\log(C+0.022)$ の形で直線化され、これはダイナミック制御データについても確認された。³⁾そこで(3.1)式に定義する「修正対数脱炭率」を用いて制御している。これは台形モデルを基礎とするものであるが0.022に特別の意味はない。また、得られた η の平均値より脱炭最盛期は $C = 0.36\%$ 程度まで続くという事になったがこれは時間遅れ(約30秒)を考慮した排ガスデータの結果ともほぼ一致している(図3)。

$$\eta = -\{\log(C+0.022) - \log(C_{SL}+0.022)\} / \Delta GO_2 \quad (3.1)$$

C_{SL} : 途中測定C値、

ΔGO_2 : 途中測定以後の送酸量

- ② 温度と酸素の関係はほぼ直線的であったので、(3.2)式に定義する昇温率を用いて制御している。

$$\theta = (T - T_{SL}) / \Delta GO_2 \quad (3.2)$$

T_{SL} : 途中測定温度

3.2 制御モデルおよび制御方法

- ① 上記知見に基づいて(3.3)、(3.4)式の形の式を重回帰分析より求めそれぞれ脱炭と昇温モデルとしている。

$$\eta = \sum_{i=1}^{13} a_i x_i \quad (3.3) \quad a_i, a'_i: \text{係数}$$

$$\theta = \sum_{i=1}^{16} a'_i x_i \quad (3.4) \quad x_i: \text{説明変数}$$

この場合も前と同様の学習を行ない、途中測定以後の鋼浴C・Tの変化をオペレータガイドとして表示している。

- ② 途中測定時期は、当該チャージの計算 η 値(η_{CAL})と目標C、 $C_{SL}(C_B \cdot C_{SLB})$ を用いて(3.5)式のように求めている。ここで C_{SL} の目標値としては別途確認した最適な C_{SL} 値を用いている(図4)。

$$GO_{2SL} = GO_{2SC} - \{\log(C_{SLB} + 0.022) - \log(C_B + 0.022)\} / \eta_{CAL} \quad (3.5)$$

但し、 GO_{2SL} : 途中測定酸素量、

GO_{2SC} : スタティック制御計算酸素量

- ③ (3.3)、(3.4)式より目標Cになった時の温度を計算し、目標温度に比べて高い場合には石灰石量を計算して表示する。石灰石の冷却係数として13.5℃/tonの値を得ているが、これも先と同様の熱量計算の結果とはほぼ一致している。又温度が低い場合にはソフトブローの指示を出している。この場合の $\eta \cdot \theta$ の変化を表4に示す。

3.3 操業面の改善 上記検討と併行して操業面でも種々の改善を行ない吹錬の安定化を図った。

- ① 湯面測定プローブの実用化による湯面測定精度の向上。
- ② スクラップの重量および形状制限(max1.5ton, 最大厚み300mm)
- ③ ランス使用回数の上限定(max200回)
- ④ 鉄鉱石の投入時期の規制(途中測定4.5分前には投入完了)

3.4 ダイナミック制御の効果

操業上の改善、モデル式の精度向上などにより表1に示すような適中率を得るまでになり、大きな成果を上げることができた。

4. 炉内不均一性

上記開発過程で炉内不均一性の問題について一部明らかにすることができたのでそれについて述べる。

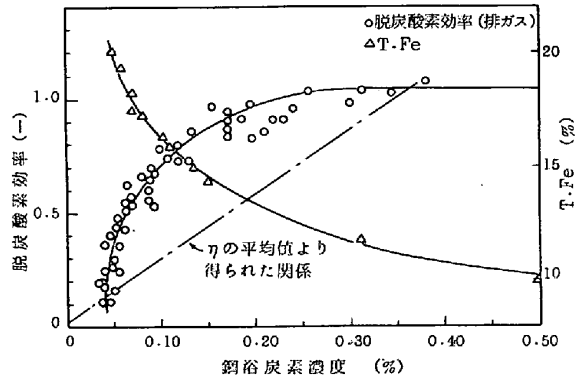


図3 吹錬末期の脱炭酸素効率の低下

- 岡中のT.Feの値は鋼種グループ毎の平均値をプロットしたものの。
- 3者はよく対応している。
- 脱炭酸素効率=1.0の時30秒で0.15%程脱炭される。

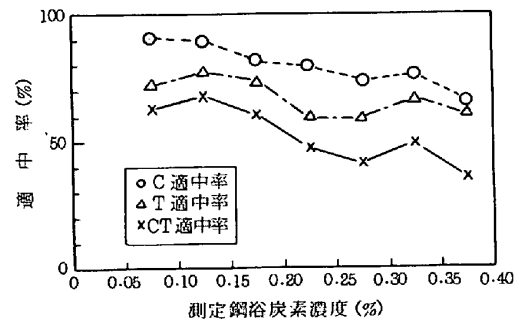


図4 最適測定時期の検討

表4 ソフトブローによる効果

吹錬法	標準吹錬	ソフトブロー
$\eta(\log(\%C)/Nm^3)$	44.0×10^{-5}	37.1×10^{-5}
$\theta(^\circ C/Nm^3)$	44.2×10^{-8}	47.9×10^{-8}

4.1. その予想

次の6点より途中測定値には大きな誤差が含まれ、しかもそれは反応の進行に対応したものであるとの予想を得た。

- ① $\eta \cdot \theta$ ともにプロセス自体のバラツキとは考えられない程大きなバラツキを示した。このバラツキが全て途中測定値の誤差によるものとして、その大きさを推定してみるとC・Tそれぞれ約0.05%, 9 σ (1 σ)であった。
- ② 脱炭最盛期の脱炭酸素効率のバラツキより途中測定C値について同様に推定してみると $\sigma=0.09$ 多程であった。
- ③ 排ガスデータとの整合性より同様の推定をしてみると $\sigma=0.07$ 多程であった。
- ④ 前記多点測定より得られた脱炭昇温図で同一酸素量だけずれたような点が多数発見された。³⁾
- ⑤ η と θ をプロットしてみると0.4~0.5位の正の相関が確認された。
- ⑥ 途中測定C・T値とその計算値との差を $\Delta C, \Delta T$ とし、それらをプロットしてみると-0.3程度の負の相関が確認された。⑤, ⑥はともに測定誤差間の関係に起因するものと考えられた。

4.2. 実験的確認

炉の中心から同一半径上の異なる2点で同時にC・Tを測定する実験を行なった(図5)。C・Tそれぞれ最大約0.15%, 40 σ 程相違し、上記予想が確認された。

4.4. 原因の推定および対策

以上のように確認された炉内不均一は火点から流出する低炭高温な溶鋼流の関係で生ずるものと考えてまず次の2点について効果を調査した。

- ① メインランスの噴出孔とサブランスの角度関係の影響(図6)
- ② 測定時酸素流量の増減による影響。

結果の一例を図5, 表5に示す。3炉代にわたる実験の結果、吹止C・Tの予言能力の比較から図6の(b)で、かつソフトブローの場合が良いとの結論を得た。データの詳細は当日発表する。

5. 結 言

'73年1月以来データ精選と学習を重視した統計モデルによるスタティック制御, ダイナミック制御の開発を進めた結果現在80%以上の同時適中率を得るまでになった。その過程で次の諸点を明らかにする事ができた。

- ① 基準チャージ方式およびA・A・Greenfieldが提出した係数修正法の効果は確認できなかった。
- ② 実験的に得られた係数行列は理論とよく一致した。
- ③ 吹錬末期の脱炭挙動は $\log(C+0.022)$ の形でよく記述できる。
- ④ 炉内には大きな不均一が存在しそれは反応の進行に対応したものである。又それは上に述べたような操業条件によって代表性の向上を図れる。

6. 参考文献

- 1) A・A・Greenfield: Mathematical Process Model in Iron & Steelmaking (J.W.Arrowsmith LTD Bristol) (P.125)
- 2) 土居 襄: 転炉製鋼法 日刊工業新聞社
- 3) 神戸製鋼 加古川: 第66回製鋼部会資料

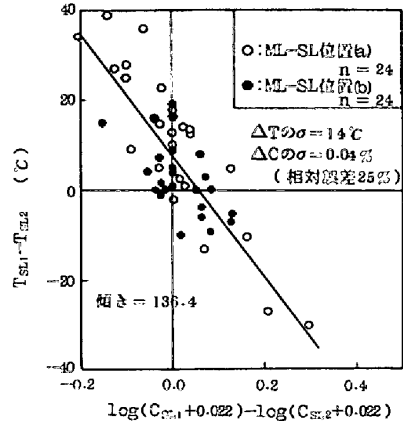


図5 2点同時測定時のC・Tの相違

○得られた傾きは $\bar{\theta} = 0.0460, \bar{\eta} = 0.000467$ より予想される値98.5よりやや大きい。がほぼ反応の進行に対応するものである。

表5 η, θ の σ の比較(炉1サブランス)

	(a)	(b)	(b)かつハードブロー	(b)かつソフトブロー
η ($\log(C) / \text{Nm}^3$)	0.214×10^{-3}	0.125×10^{-3}	0.135×10^{-3}	0.103×10^{-3}
θ ($^\circ C / \text{Nm}^3$)	0.0168	0.0129	0.0153	0.0109

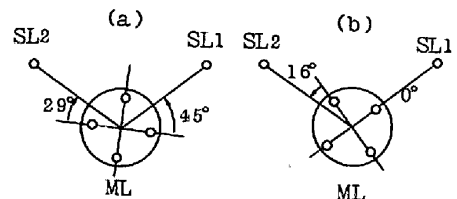


図6 メインランス(ML)の噴出孔とサブランスの角度関係