

技術資料

UDC 681.3.08 : 53.084 : 669.184.244.66

転炉計算制御と検出端*

野坂康雄**・岩尾範人**

Computer Control of LD Process and Its Sensors

Yasuo NOZAKA and Norito IWAO

1. ま え が き

転炉プロセスは従来の精錬プロセスに比較して精錬時間が著しく短い。したがって転炉では、手動による制御はきわめて困難である。また炉体の構造上測温と試料採取が簡単でないことも手動制御をむずかしくしている。転炉の手動終点制御が困難であることは、高い生産性を保つための障害となる。

計算制御はこのような必要性から開発されたもので、すでに転炉の導入実用化がはじまった直後の1958年頃から各社で研究がはじめられ、現在ではほぼ、転炉操業の標準として常識化されている。転炉の計算制御は、ホットストリップミルの計算制御とともに、現在では最も実施例が多く³²⁾効果も大きい。

転炉の計算制御の主目的は、終点適中率の向上にあるが、初期の実施例にくらべると、現在では、終点制御のみならず、データ・ロギング、シーケンス制御、生産管理などの機能を含むものが多くなった⁹⁴⁾。同時に計算制御は、転炉作業の、内部まで侵透し、不可欠なものになっている。

一般に、転炉にかぎらず、計算制御を考える場合、Fig. 1に示すように①システム、②モデル、③検出端について論じられねばならない。したがって本資料は、2章でシステム、3章でモデル、4章で検出端について各方面で試験に試みられたものおよび実施しているものの紹介を行なった。

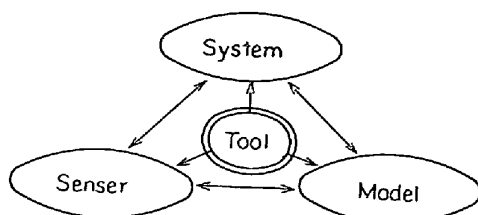


Fig. 1. Tri-angle of computer control.

2. 転炉計算制御システム

制御システムの機能と範囲は、情報伝達、情報の加工という面で、計算機および周辺機器の発達の影響を大きく受ける。すなわち、計算機そのものの機能の発達により、システムの機能と範囲は大きく変わってきて、大体次の3時代に分けることができる。

1) アナログ計算機時代¹⁾³⁾⁹⁹⁾...これは単に従来の計算尺の高速化という位置づけ程度であり、システム工学的な側面はないといえる(1959~63)。

2) デジタル計算機小型時代⁴⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹³⁾²⁰⁾³⁵⁾³⁹⁾...この時代の使用言語は機械語でデジタル計算機がプロセス用に用いられるようになった最初の頃で、その範囲も転炉の終点制御に、重点がおかれていた時代である(1963~65)。

3) デジタル計算機中型時代⁸⁰⁾⁷¹⁾...この時代の使用言語は主としてアセンブラーであり、ようやく、本格的にシステム工学的な側面が表われてきた時代である(1965~現在)。

本章では、システムの概略を、2.1 システムの機能、2.2 システムの動作と構成という面から記述していくことにする。

ホットストリップミルの計算制御に比較して、転炉のそれは、システムについての記述が少ないが、今後システムが大型になるに従い、システムについての記述⁷⁾⁸⁰⁾が多くなってくるものと考えられる。

2.1 システムの機能

現在のコンピュータ・システムの機能¹⁸⁾⁹⁴⁾⁵⁹⁾には、Table 1に示すようにつぎのようなものがある。

* 昭和47年8月21日受付(依頼技術資料)

** 新日本製鉄(株)設備技術センター電気計装技術部

*** 新日本製鉄(株)設備技術センター電気計装技術部電気計装開発室

Table 1. Functions of computer control system.

Functions		Objectives	Actions	Input data
End point control	Hot metal weight calculation	Sound ingots weight	Hot metal weight	Aimed steel weight Scrap weight Pig iron weight Tapping steel yield etc.
	Flux weight calculation	Dephospholization Deoxidation	Burned lime weight	Hot metal analysis Total iron weight Lime stone weight Specification etc.
		End point temperature	Mill scale weight Scrap weight	Aimed end point temperature Aimed end point carbon Hot metal weight Pig iron weight etc.
		End point carbon	Oxygen volume	Scrap weight Ore weight Hot metal temperature Hot metal analysis etc.
Lance height calculation	Adequate blowing conditions	Lance height	Lance gap Charged metal weight Vessel life etc.	
Adjusting calculation	Coolant weight calculation Cooling time calculation	Tapping temperature	Cooling time Coolant weight	Aimed tapping temperature End point temperature Sound ingots weight etc.
	Reblow time calculation	Tapping temperature	Reblow time	Aimed tapping temperature End point temperature Sound ingots weight etc.
		Ladle carbon		Aimed ladle carbon End point carbon Sound ingots weight etc.
Ladle alloy calculation	Deoxidation Ladle analysis	Coke, Fe-Mn, Fe-Si Si-Mn and Al weight	End point analysis Aimed ladle analysis Sound ingots weight Alloy yield Alloy cost etc.	
Data logging	Heat log Technical data log Daily log	Data logging		Operation control data Technical analysis data Daily data etc.
Sequence control		Partial automation of operation Operator guide	Automatic actions and displays	Process data Manual inputs
Production control		Data processing and communication	Operational information	Process data Manual inputs Operation data
Closed loop control		Automatic end point control	Oxygen volume Lance height etc.	End point temperature End point carbon Bath level

1) 終点適中制御：オペレータ・ガイド方式によるスタティックコントロールまたはダイナミック・コントロールで、溶銑量、副材料、酸素量などのチャージ計算および吹錬中のアクションの計算をする機能である。

2) 調整計算：吹き止め後目標の成分・温度になるためにいかなるアクションをとるべきかを計算する機能で副材料計算および合金量計算などである。

3) シーケンス制御：作業の進行状況を監視し、それ

に応じたコンピュータの仕事の区別, データの鋼番別整理, 誤操作防止機能を中心とし, 各種のデータ読み込みタイミングの指定, 副材料投入などのシーケンス制御を含む機能で, 制御と計算, データ・ロギングの基礎となる.

4) データ・ロギング: チャージ別操業実績表・日程などの作表機能

5) 生産管理: 精練以降の情報処理機能を中心とした生産管理²⁾¹⁴⁾で, 真空脱ガス, 連続鋳造を含むことがある. 情報は次の圧延工程へ送られる.

6) 閉ループ制御: 現在考えられる閉ループ制御⁶⁵⁾⁷⁷⁾は, スタティックおよびダイナミック終点制御による自動送酸停止機能である. 将来は, ダイナミック・コントロールにおける中間の閉ループ制御が考えられる. 計算制御導入当初から, 終点制御を目的に, 多大の努力が注がれ, つぎつぎに効果があらわれた. 同時に, 計算機の有効利用として, 上記^{3)~6)}の各種機能も付加されて, 計算制御は転炉作業と密着した. したがって, コンピュータは終点制御用のみでなく必要とときに, 必要な型で管理者, 操業者に種々のデータを提供する道具となつて

いる. また別の見方をすれば, 操業者のよきガイドであり, 作業進行の促進者にもなっている.

2.2 システムの動作と構成

システムの動作について, こまかく議論すれば, 各社

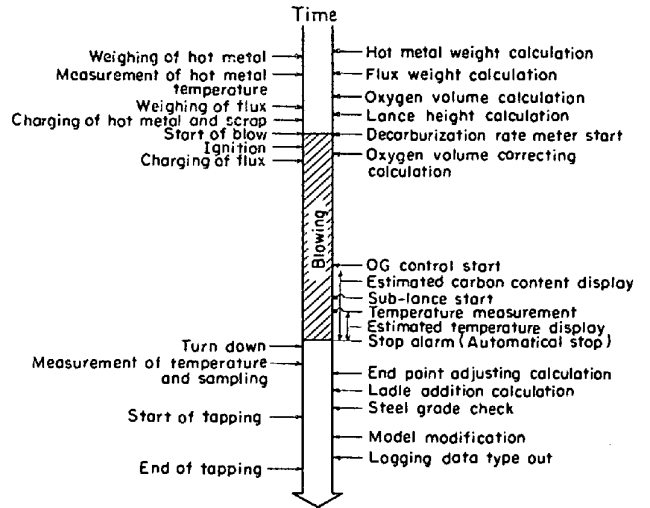


Fig. 2. Computer control sequence (containing dynamic system).

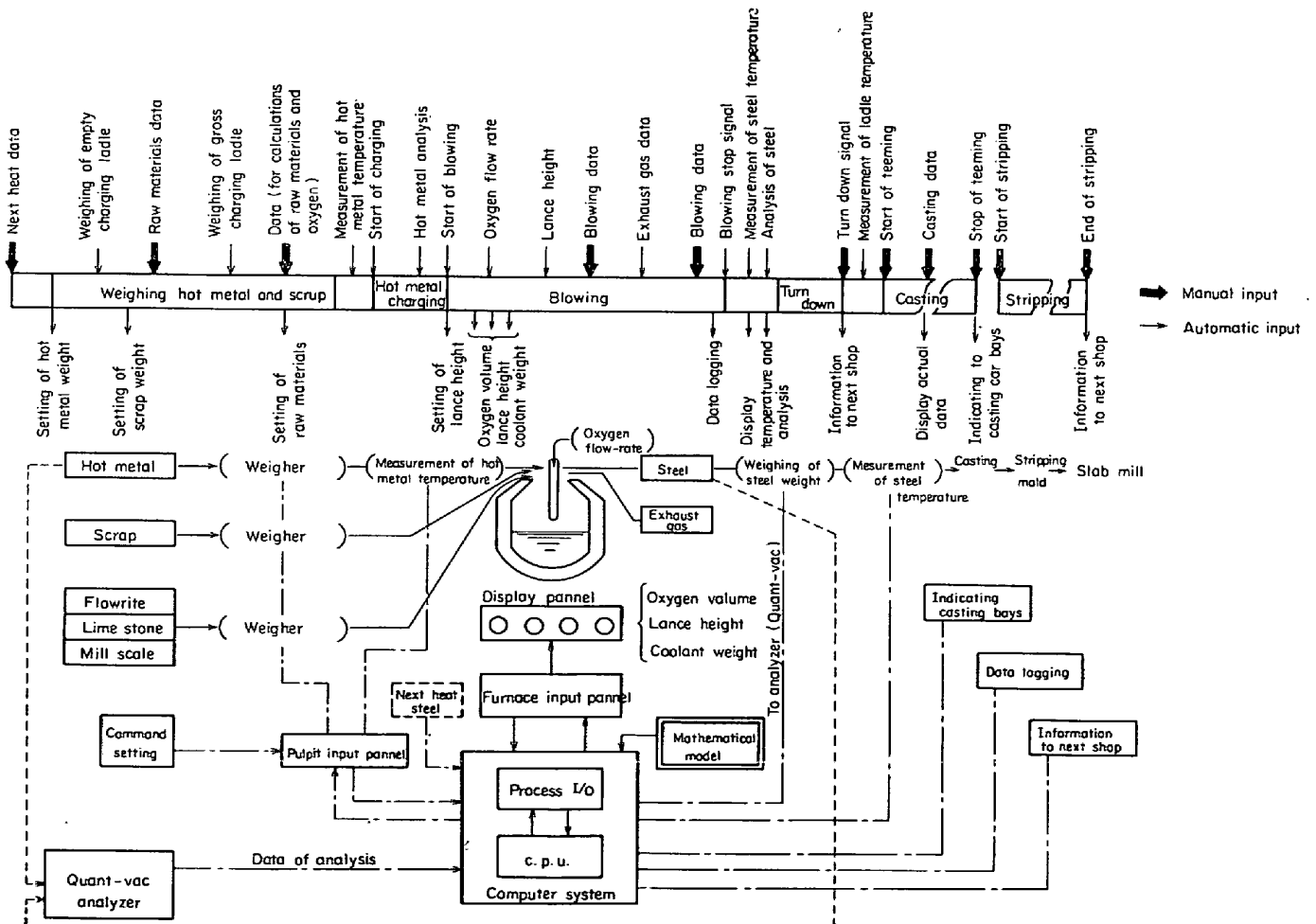


Fig. 3. LD computer control system and its sequence.

各作業所で、システムの機能範囲はまちまちであるが、Fig. 2 に代表的なシーケンス例を示す。この例はOG装置を有効に利用した。OG制御を含む新日鉄戸畑の例である。ダイナミックの機能以外は中型計算機を利用したほとんどのシステムに共通のものである。

システムの構成についても、各社各作業所で、こまかい点はまちまちであるが、代表的なシステムの系統を、Fig. 3 に示す。このシステムは、次工程を含む情報管理を行なっている例である。

制御システムは、つぎの機器から構成されている。

- (1) コンピュータ・システム
cpu, 外部記憶装置, タイプライタ, テープ・パンチ, 汎用入出力制御装置
- (2) プロセス×出力制御装置
- (3) 運転室設定盤
- (4) 運転室表示盤
- (5) 炉前表示盤 (出鋼側, 装入側, 溶銑側)
- (6) ヶ々設定盤
- (7) 各種計測器

転炉作業の性質上、手動入力が多いが、これらは運転室にある運転室設定盤を通じて読み込まれる。計器より直接読み込まれる自動入力としては、溶銑秤量機、副材料秤量機、溶銑温度計、溶鋼温度計、酸素流量計、圧力計排ガス流量計、分析計、しや断弁の開閉などがある。

3. 終点制御モデル

終点制御の方法には、スタティック・コントロールとダイナミックコントロールとがあるが、いずれもオペレータ・ガイド方式がほとんどで、ごく一部に閉ループ制御の例があるにすぎない。しかし将来は閉ループ制御が全面的に可能となると思われる⁸⁰⁾。

スタティックコントロールとは、吹錬開始前に反応に関係する物質収支と、熱収支を基本とする関係式から装入する原料、副原料、ならびに必要な酸素量を計算し(チャージ計算)その計算値を用いて精錬を行なう方法であり、吹錬が終わるまでになんら修正を加えない方式である。

一方、ダイナミック・コントロールは、吹錬開始はスタティック・コントロールと同様であるが、吹錬中のなんらかの情報により、吹止め点を予測または判定して終点を制御する方式である¹⁵⁾。

3.1 スタティック終点制御

スタティック・コントロールの嚆矢は1960年アメリカのJones and Laughlin社のSlatosky¹⁾の発表によるものである。これは専用のアナログ計算機を用いてチャ

ージ計算を行なつたもので、オフラインのオペレータ・ガイド方式である。アナログ計算機による方法では、その後J & L社³⁾、富士製鉄広畑⁹⁹⁾などで試みられたが、あまり普及せず現在の計算機は全部デジタル型である。わが国では、1963年日本鋼管鶴見²⁴⁾で導入されたオペレータ・ガイド方式が最初で、その後続々と実施されている³⁰⁾。

終点制御モデル式の構造から数式モデルを分類⁶⁷⁾するおつぎの2つの形に分類できる。

1) Fig. 4, Fig. 5 に示すようにそのチャージの要因のみから操作量を計算する構造のモデル。

2) Fig. 6, Fig. 7 に示すように過去のチャージの吹錬実績を基準とし、制御しようとしているチャージとの間の要因や目標値の差を補正して操作量を計算する構造のモデル。

SLATOSKY が発表した J & L 社のスタティックモデルもこの型に属する。一般にはこれを理論的モデルとよんでいる。同じく 1) の型に属するものであるが、数式

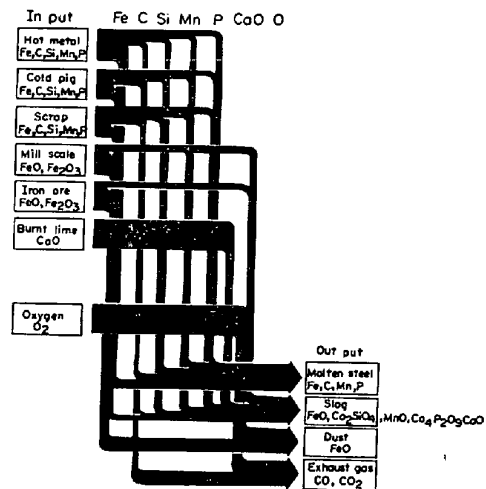


Fig. 4. The material balance.

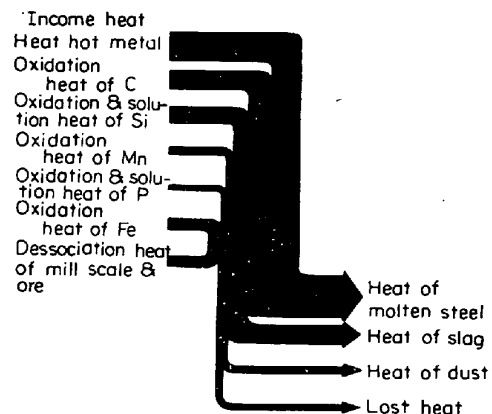


Fig. 5. The heat balance.

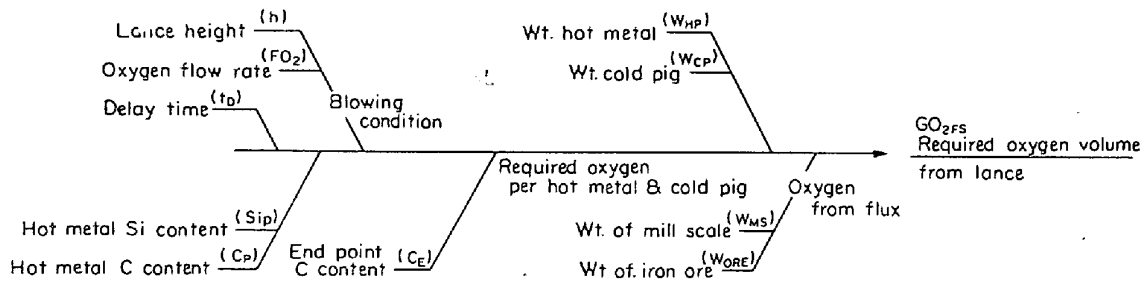


Fig. 6. Characteristic-factor diagram on required oxygen volume.

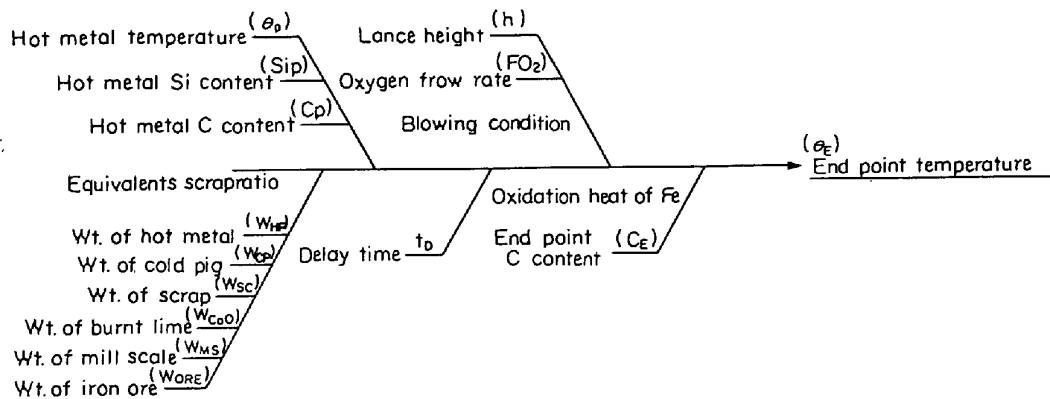


Fig. 7. Characteristic-factor diagram on end-point temperature.

モデルの要因を理論的あるいは経験から定め、係数は多数の吹錬データを用いて統計的手法（重回帰分析）により決定する数式モデルもある。これは、統計的手法を主にしているので統計的モデルとよばれている。2) の型のモデル³⁹⁾は、従来行なわれてきた操業者による終点制御方法から出発したモデルで物質収支や熱収支を基準にしてはいるが、それはあくまでも定性的なものにとどめ要因のとりあげ方、係数の決定方法は、過去の経験や実験によるもので、経験的モデルとよばれている。これも分類的には、各種のものが提案されているが、Fig. 6, Fig. 7 に集約できる⁴⁴⁾⁶⁷⁾。

スタティック・コントロールでは、各種論文に発表されているように、適中成績に限度⁵⁾²²⁾⁶⁷⁾があることがわかった。この主な理由は次の2項目である。

i) 数式モデルに種々の仮定があること⁶⁷⁾（これは求めねばならない項目が、方程式の数よりも多い、すなわち、バランス式のみでは方程式が閉じていないこと）

ii) 状態変数（任意時刻における各種成分、温度）が操業条件に大幅に左右される³⁶⁾³⁷⁾⁹⁷⁾。

i) については、スタティックモデルの立式条件より考えて当初から考えられていたが、ii) については、ダイナミック制御の研究開発の途上、はつきり認識されたものである¹²⁾¹⁷⁾²⁵⁾⁴⁹⁾。

3.2 ダイナミック終点制御

本節では、これまでに発表された各種のダイナミックコントロールの方式を主としてモデル面から、その特徴を明らかにしたものである。

3.2.1 ダイナミック制御の分類

従来ダイナミックコントロールの概念としては、J & L 社の軌道修正方式³⁹⁾³⁶⁾が考えられていたが、その後概念が拡大され、いろいろの方法が提出されている。それらを大別すると次の3つになる。

1) 吹錬条件制御方式：吹錬全期にわたって、吹錬条件を操作することにより、吹錬を安定させる。

2) 軌道修正方式：Fig. 8 ④⑤ に示したように吹錬末期にアクションを加えて、カーボン、温度軌道を修正し、終点での同時適中をねらう。

3) ダイナミックストップ方式：軌道修正は行なわず最適ストップ時点を正確に判定して吹止める。

1) については、そのプロトタイプともいふべき、藤井の台形モデル⁵⁰⁾⁵²⁾がある。これは吹錬全期を通じて1) の型のモデルには、転炉の炉内反応を熱収支と物質収支をもとに、反応論的な関係式や実験式を加えて数式化し、係数も主として熱化学定数から決定するものが多い。バランスのとり方は Fig. 4 と Fig. 5 に示したものである。

脱炭速度計に現われる脱炭速度パターンがあらかじめ設定したパターンにあうように吹錬条件を操作するもので現実の制御システムとしては採用しがたいが、転炉制御の基礎を与えたという点で高く評価される。ヨーロッパの CRM⁷⁵⁾ や Krupp⁷⁸⁾ では、吹錬条件制御方式の開発が活発であり、とくにスラグコントロールを重視している⁸⁰⁾。また川崎製鉄では、スラグコントロールの意味から、副材料の自動分割投入を実施している⁸³⁾。

2) についての先鞭は、J & L 社で、同社では、早くからダイナミックコントロールに着手していたが、1966年に H. W. MEYER が典型的な軌道修正方式を提出した。その概略は、吹錬末期に脱炭速度計と投込式熱電対により鋼浴炭素含有量を連続的に推定し、温度を測定しそれぞれの目標値に達するのに必要な酸素量を算出して両者が異なっていれば冷材投入あるいはラ・ス上昇で、温度調整を行なつて終点での同時適中をはかるといものである。著者らの経験によれば、吹止前のアクション効果を期待するには、少なくとも吹止めの 2~4 min 前にカーボン、温度を測定する必要があるが、この時点での脱炭速度計および投込式熱電対の終点予測精度は、不十分である。またアクションの効果にもばらつきがあり、とくにランス上昇のアクションには問題が多い⁴⁰⁾⁴²⁾⁵⁵⁾⁵⁸⁾。他方新日鉄室蘭⁹⁰⁾では目標カーボンを得るのに必要な酸素量を、スタティック・モデルで算出しておき、吹錬末期にサブランスにより测温して、必要ならば冷材投入あるいは吹錬延長のアクションをとるとい簡明な軌道修正方式を実施している。これはすでに操業に定着しており、生産性向上に寄与している。

3) のダイナミックストップ方式の概要を以下に述べる。吹止直前までは、スタティック・コントロールにより制御し、吹止に近づくところで検出端からの情報を得て、最適ストップ時点を判定して吹止め、吹止後、必要に応じて修正アクションを加える。最適ストップ時点としては、次の 2 条件のいずれかを満すものとする。

- 1) カーボン、温度が同時に適中する。
- 2) カーボン、温度のいずれか一方で適中し、他方は再吹錬のない状態でストップする。

すなわち Fig. 8 において同時適中領域を通過する軌道①では、酸素吹込の過不足を防いで、同時適中をねらい、同時適中領域を通らない軌道②③では、生産能率あるいは品質に悪影響を与える再吹錬を防止する。軌道修正の④⑤の代わりに⑥⑦の修正を行なう⁴⁶⁾⁵¹⁾。

3.2.2 ダイナミックモデル

吹錬中のカーボン温度その他の成分の経時変化を表わし、任意の時点における鋼浴スラグの状態を把握するこ

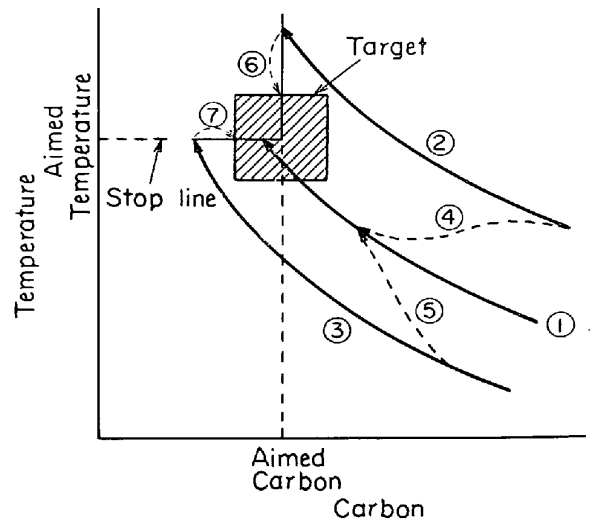


Fig. 8. Outline of dynamic stop system.

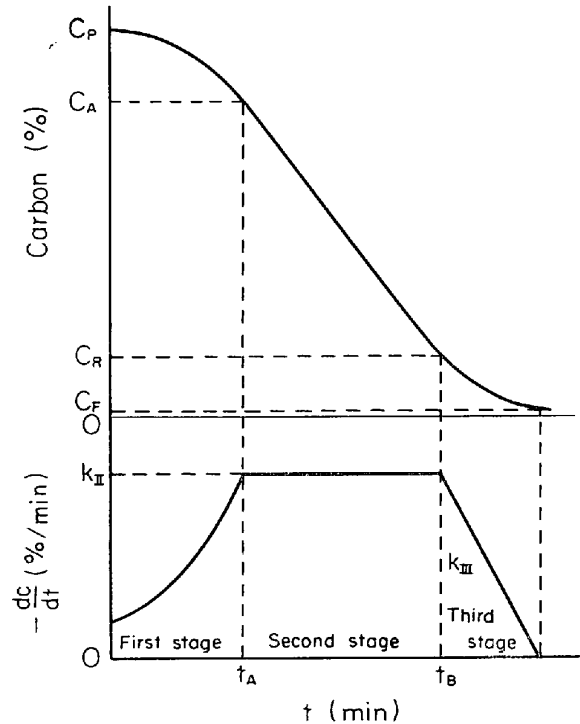


Fig. 9. Basic pattern of decarburization reaction.

とができるようなモデルをダイナミックモデルとよんでいる。しかし一般に、ダイナミックモデルとよばれているものは、吹錬開始前の初期条件のみで構成されることが多く、きわめてスタティックな色彩が強い。一方初期条件に関係なく吹錬中の情報のみを使用するモデルを、ここではとくにダイナミック・コントロールモデルとよんで区別することにする。これまでに発表されたモデルをダイナミックモデルとダイナミックコントロールモデルに分けて Table 2 表に示す。

ダイナミックモデルのうち、住友金属の台形モデル⁵⁰⁾

Table 2 Dynamic model.

Dynamic model		
External feature model	Sumitomo (Fujii) ⁵⁰⁾ Yawata (Nagano) ⁷⁰⁾	Trapezoid model Basic pattern
Reaction mechanism model	Yawata (Miyamura) ⁷⁰⁾ CNRM (Nilles) ⁶⁴⁾ Nippon Kokan (Ozeki) VÖEST (Krausz) ⁷⁴⁾ USSR (Jameljanow) ⁷⁹⁾ Nagoya Univ. (Muchi) ⁸⁹⁾ BSC (Cambridge) ⁸⁶⁾	for LD-AC process
Carbon dynamic control model		
Integral method	IRSID ¹⁶⁾	
Singular point method	Yawata (Yoshizumi) ¹¹⁾ Sumitomo (Fujii) ⁵⁰⁾	C_B and $-\frac{dc}{dt} = kc$
Curve following method	J & L (Meyer) ³⁶⁾	$-\frac{dc}{dt} = \alpha + \beta e^{\gamma c}$
	IRSID ²⁷⁾	$-\frac{dc}{dt} = \alpha e^{-\beta t}$
	Yawata (Nagano) ⁶⁰⁾	$-\frac{dc}{dt} = \alpha \sqrt{c + \beta}$
Endpoint value method	Yawata (Okamoto) ⁷²⁾	$-\frac{dc}{dt} = \frac{\beta}{c + \alpha} + \gamma$
	Yawata (Maeda) ⁷²⁾	$-\frac{dc}{dt} = \alpha c + \beta$
Temperature dynamic control model		
(Sub-lance) (Bomb)	Yawata ⁷³⁾ Kawasaki ⁶⁵⁾	$\frac{d\theta}{dt} = \alpha$

と新日鉄技研の基本パターン⁶⁰⁾は、主として脱炭反応の外部特性にもとづいて構成されている。Fig. 9 に脱炭反応の基本パターンを示す。そのほかのモデルは、炉内反応メカニズムの考察と、その数式表現の上に成り立っている。しかし反応メカニズムの把握に限界があるため、外部特性も利用している。これらのダイナミックモデルは、現段階では、実操業に適用するに至っていないが、将来多成分系の制御、最適制御の段階では、重要である³⁴⁾。

ダイナミック・コントロールモデルは、採用した検出端の特性に従って、構成されており、反応の外部特性に着目した簡単なモデルが多い。ダイナミック・コントロールモデル式の要点は、

- 1) 実際のデータによく適合すること。
- 2) モデル式が簡単で、曲線近似が簡単なこと。
- 3) パラメーターの数が少なく、その感度がにぶいこと。

4) 各パラメーターが独立しており、選択修正が可能であること。

5) 反応メカニズムにそつていること。などであろう。

カーボンモデルは、すべて脱炭速度曲線にもとづいている。IRSID 積分法²⁷⁾は、最も初期に提出された方法であるが、装入カーボンの分析精度および脱炭速度計の絶対精度の面から、実用性がないとみなされている。

また脱炭曲線上の C_B 点 (Fig. 9 に示すように吹錬末期脱炭速度が低下し始める点の鋼浴炭素含有量) は制御困難な要因による変動が激しく、終点制御に用いることはむずかしい。これに対して、(脱炭速度曲線) がカーボン軸と交わる C_F 点の鋼浴カーボン値は比較的安定しており、ヒート内で脱炭曲線を追跡して軌道を予測する場合に用いられている。J & L モデル式は k_{II} (吹錬中期の脱炭速度) と C_F 点を取り入れて、吹錬中期から末期にかけての脱炭曲線の連続性を重視したすぐれた軌道

予測式である。ただ広範囲にわたる脱炭曲線を近似しているために、実際の脱炭曲線と（とくに低炭領域で）適合しにくい部分が出てくる。終点値法は、近接ヒートあるいは類似ヒートの回帰により得られた終点の脱炭速度値とカーボン値との関係を利用する方法でダイナミックストップ方式に用いられている⁹⁶⁾。

温度モデルとしては、吹錬末期で昇温率一定⁴⁸⁾というきわめて簡単なモデルが通用している。

以上のべたように、ダイナミック・コントロールモデルは、そのほとんどが、反応の外部特性のみから構成されており、適用範囲に限界がある。今後は他成分も含め、反応メカニズムを反映したモデルの作成、つまりダイナミックモデルとの結合が望まれる⁴¹⁾。

4. 検出端

ダイナミックコントロールのキポイントは、検出端⁷⁷⁾⁹⁸⁾である。これまでに試みられている転炉吹錬中の検出端を列挙すると Table 3 のようになる。ここではプロセス制御用の検出端を重点的にとりあげたが、測定コストや作業性を重視するプロセス制御用検出端と、絶対精度や特殊情報を重視するプロセス解析用検出端（たとえばサブランスーテレビカメラなど）とは区別して考

るべきである。プロセス制御用検出端の具備条件は、

- 1) 再現精度
- 2) 操作、整備の容易さ
- 3) 永続的使用可能性
- 4) コスト

などである。

連続カーボン測定には、脱炭速度に相当する排ガス諸特性の測定により間接的にカーบอนを推定する方式がとられている。これらのうちもつとも確実なのは、排ガス流量と CO+CO₂% を測定してそれらの積を用いる脱炭速度計であるが、ガス分析の遅れ時間がどうしても問題になる。新日鉄では、これを乾式ガスサンプラーと O₂ G コントロールにより補償しており、新日鉄堺ではすでに実操業に定着化している。間歇カーボン測定としては鋼浴の一部を採取してその凝固温度からカーบอนを推定するカーボンデターミネーター⁵³⁾⁹⁸⁾があるが、測定値の鋼浴代表性に問題がある。

鋼浴温度の測定は、さいわい温度そのものを直接測定できる検出端（たとえば熱電対）があるので、脱炭速度を介したカーボン測定のように複雑でない。VÖEST では、特殊な耐火物の保護管を用いて 10 数メートルにわたる連続測温が可能な VP 法を開発している。一方投込

Table 3. Dynamic sensor.

Continuous	Flame photometer	Sumitomo ¹⁰⁰⁾ CNRM ⁶²⁾ Nippon Kokan ¹⁰¹⁾ J & L ¹⁹⁾ Yawata ³⁹⁾ IRSID ¹⁷⁾ J & L ³⁶⁾ Krupp ⁴⁷⁾ Sumitomo ⁵⁰⁾ Yawata ⁶⁷⁾ etc.
	Exhaust gas thermometer Lance cooling water thermometer Exhaust gas analyser Exhaust gas flowmeter Decarburization rate meter	
Intermittent	Sub-lance—Carbon determinater	Republic ⁵⁶⁾ Bethlehem ⁹⁷⁾ Nippon Steel ⁷⁸⁾⁹¹⁾ Kobe ⁵²⁾
	Bomb—Carbon determinater	
Temperature		
Continuous	Vessel wall—Protective tube—Thermocouple	Max-Planck ⁶⁾ Kobe ²²⁾ VÖEST ⁴⁴⁾ BISRA ⁸⁰⁾ USSR ⁸¹⁾ VÖEST ⁹⁵⁾ Sumitomo ¹⁰⁰⁾ Nippon Kokan ³⁸⁾
	Vessel wall—Ruby—Two color pyrometer	
	Vessel wall—Air purge Water cool tube—pyrometer	
	Sub-lance—Protective tube—Thermocouple	
	Sub-lance—Two color pyrometer	
Intermittent	Sub-lance—Protective tube—Thermocouple	VÖEST ⁴⁴⁾ Nippon Kokan ²⁹⁾ Yawata ⁸²⁾ Nippon Steel ⁹²⁾ J & L ³¹⁾ Kawasaki ⁴⁵⁾ Yawata ³³⁾
	Sub-lance—Expendable thermocouple	
	Bomb—Expendable thermocouple	
Slag condition		
Continuous	Whistle lance	Nippon Kokan ²⁰⁾ Nippon Kokan ²⁰⁾ CNRM ⁶¹⁾ Mannesmann ⁸⁴⁾ Mannesmann ⁸⁴⁾ Krupp ²³⁾ Dortmund ²⁸⁾
	Audiometer	
	Vessel vibration measurement	
	Lance—Electrical conductivity	
	Oxygen balance met'er	
Intermittent	Sub-lance—Electric pole method	Yawata ⁸²⁾

式あるいはサブランスによる間歇測定も、すでに実操作にとり入れられ、実績をあげている。これは、鋼浴全体の熱容量が大きく、温度変化は外乱に対して、それほど敏感でないために、間歇測定でも十分予測制御が可能であることによる。

外部から転炉炉内に各種の消耗型プローブをおくりこむ手段として、投込式とサブランスが採用されている。投込式は、設備費は安いのが、ランニングコストが高く、結局コスト的にはサブランスの方が有利である。サブランスを操業に使用する場合、プローブの自動着脱装置が必要になるが、新日鉄釜石、八幡 2 製鋼 2 号炉ではサブランスをホイストで炉上から移動して操業床に降下し、操業者が直接プローブ交換を行なう方法をとっている。

スラグに関する情報は、吹錬条件制御を行なう上で、重要な意味をもつので、いろいろの測定方法⁶⁶⁾⁹⁶⁾が研究されているが、その実用化は、今後の課題である。

以上のほか、酸素流量計、湯面測定計なども、ダイナミック・コントロールに重要である。

本章では、現在実用化が進められている検出端として

1) 脱炭速度計 2) 投込式測温計 3) サブランスについての記述を行なうことにする。

一般に検出端の良否を判定するには、測定精度、測定値の代表性の議論が必要であるが、現在まで発表されている諸論文は、検出端測定値と終点適中成績の対比の議論が多い。

このような状態では、検出端が悪いのか、モデル、またはシステムに不都合があるのかを区別することができない。検出端についての精度を詳細に議論しているのはわずかに著者等⁴⁸⁾と日本鋼管¹⁰³⁾の論文と、その他²⁶⁾の数編である。

したがってここでは、著者などの論文を中心に記述を行なつた。

4.1 脱炭速度計

脱炭速度計のおおよその構成を Fig. 10 に示す。この図中、とくに重要な点は、ガスサンプラーのむだ時間とサンプル値の代表性である⁵⁴⁾。

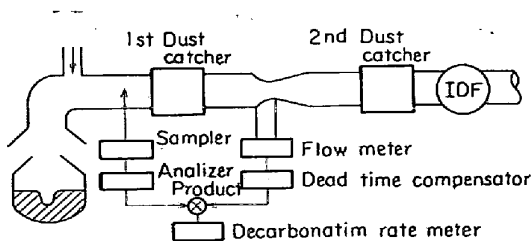


Fig. 10. Schematic diagram of decarburization rate meter method.

脱炭速度計の精度については著者らの論文⁹⁸⁾に詳細に検討してあるので、ここでは結果のみ記述すると式(1)となる。

$$D(t)/R(t) - 1 = -\dot{\eta}(t)/\eta(t) + \varepsilon_f/F_{ex}(t) \cdots (1) \\ + \varepsilon_\eta/\eta(t)$$

$R(t)$: 真の脱炭速度

$D(t)$: 脱炭速度計の指示値

$\eta(t)$: 真の排ガス分析値中の $CO+CO_2$

$\dot{\eta}(t)$: 同上の時間微分値

ε_η : $\eta(t)$ の計測誤差

$F_{ex}(t)$: 真の排ガス流量

ε_f : 排ガス流量計の誤差

式(1)右辺の第2, 3項は測定器の精度であつて、カーボン推定値に換算して 0.005% 程度の誤差となり、カーボン許容幅に十分入っている。したがって第1項を小さくするような方法がとれば、脱炭速度計の誤差を小さくすることが出来る。すなわち、

1) $\eta(t)$ を大きく、換言すれば $F_{ex}(t)$ を小さくすること

2) $\dot{\eta}(t)$ を小さく、換言すれば $\eta(t)$ の変化を小さくすること

3) τ (むだ時間) を小さくすること

である。このために開発した方式が、著者らの乾式サンプラーと OGC 制御 OGC (OG Control) である。OGC とは末期の排ガスを発生 CO, CO_2 に相当する量までダンパーをしぼり、 $F(t)$ を小さくするとともに $\dot{\eta}(t)$ を小さくすることである。この OGC を達成する方式を次に示す。

1) 排ガス流量プログラム制御方式 FPC (Flow Rate Program Control)

2) 炉内圧適応制御方式 PoAC (Po Adaptive Control)

3) 分析値制御方式

3) は最も理想的な方式であるが、むだ時間のある系なので制御性に問題がある。高精度の脱炭速度計のデータから (すなわち OGC を行ない、むだ時間補償を行なつた十分信頼のおけるデータ) 吹錬末期の脱炭速度低下の経時勾配を K_{III} (Fig. 9 参照) としてその頻度分布をとると Fig. 11 のようになる。さらに中炭領域では、鋼浴カーボン値と、脱炭速度の間にかかなりのばらつきがあり、このままでは脱炭速度計でカーボンを制御することはできない。またスタティック・モデルによる制御の限界もこの点に起因することが大きいと推定される (前述 3.1 ii) 参照)

4.2 投込式測温計 (射込式測温計)

本検出端の開発は、各所で早くから手がけられていたが、発表の嚆矢は、J & L 社³⁶⁾である。その後、新日鉄八幡⁶⁵⁾、川崎製鉄千葉⁸⁰⁾よりの発表がある。

測温値の妥当性についての詳細な記述は、著者などの論文にあるので、ここでは結果のみを記述する。

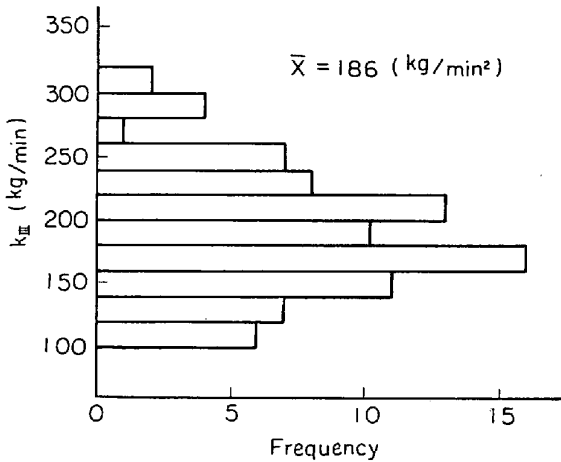


Fig. 11. Frequency distribution of decarburization rate meter gradient.

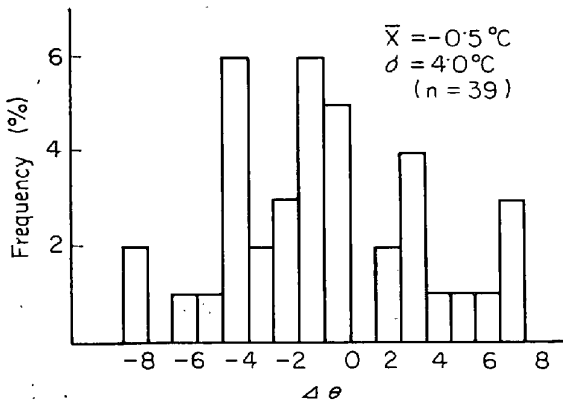


Fig. 12. Accuracy of temperature measured by bomb thermocouple.

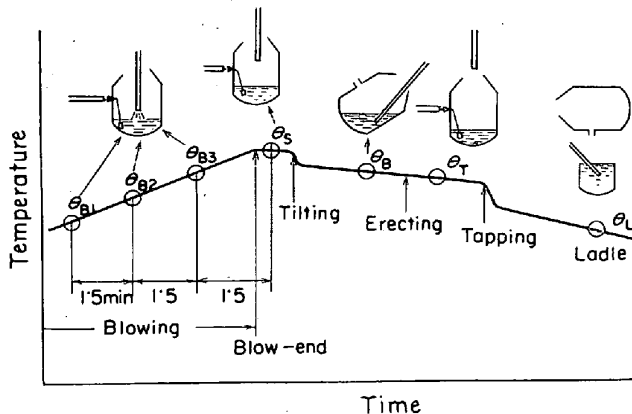


Fig. 13. Temperature measurement sequence.

第1に素子単体の測定精度を Fig. 12 に示す。これは現行の炉前で使用されている消耗型浸漬温度計から推測される値と、ほぼ同一の $\sigma = 4.0^\circ\text{C}$ である。

第2に代表性についての検討として、Fig. 13 に示すタイミングで実験を行なった。この結果の一例を Fig. 14 に示す。また θ_{B1} , θ_{B2} , θ_{B3} により近似した直線からの測定値の偏差の分布を Fig. 15(a), (b) に示す。これからいえることは、1) 少なくとも同一吹錬である限り同一場所を測温しているか、または 2) 吹錬末期では火点以外は、極端な温度偏析はないかのどちらかである。いずれであっても代表性があるといえる

第三に吹錬末期の昇温率についての検討のために、 θ_{B1} , θ_{B2} , θ_{B3} の測温値から求めた昇温率の分布を Fig. 16 に示す。それによれば、平均昇温率は $d\theta/dt = 280^\circ\text{C}/\text{min}$ であり、標準偏差は $\sigma = 6.6^\circ\text{C}/\text{min}$ とヒートごとに昇温率がかなり異なっている。

現在残された問題は、

- 1) いかに素子の使用本数を少なくして昇温率を精度よく判定するか。
- 2) 素子の価格をいかにして低減するか。の 2 点である。

Table 4 に示すよりに射込素子の現在の価格は、約 2000 円/本と高価であり日常作業用として使用するには 1000 円/本程度までのコストダウンが必要であるが、これを解決することは、なかなか困難である。したがって各社においても、後述のサブランスの実用化ともあいまってダイナミック・コントロール検出端としての投込測

Table 4. Cost of bomb thermocouple probe.

Material cost	Bomb	255
	Composation wire	480
	Paper sleeve	235
Production cost	Element	400
		700
Total		2 070 円/probe

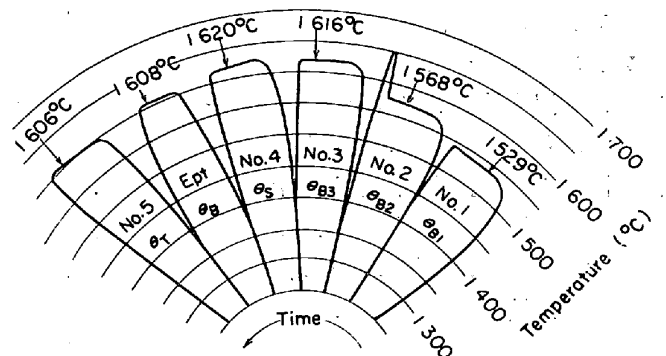


Fig. 14. Measuring curve of bath temperature.

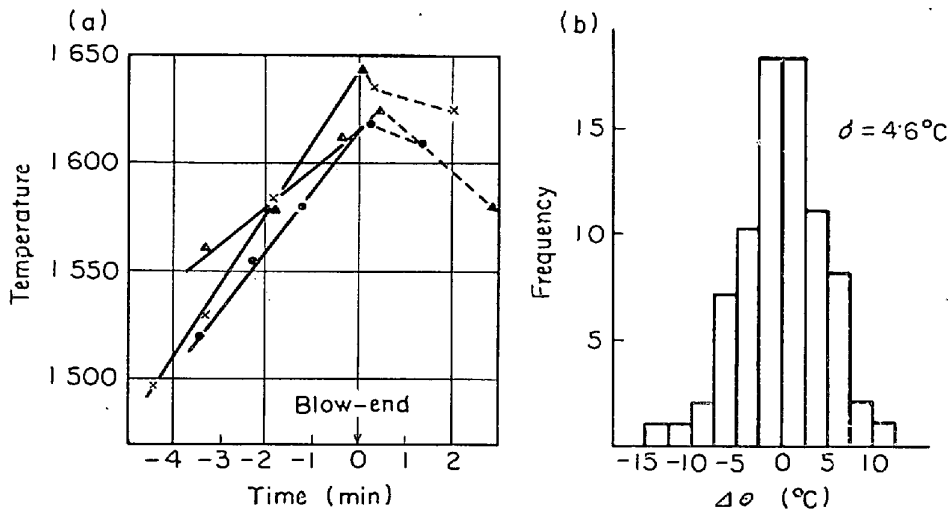


Fig. 15. Linearity of temperature rising at the last stage of blowing.

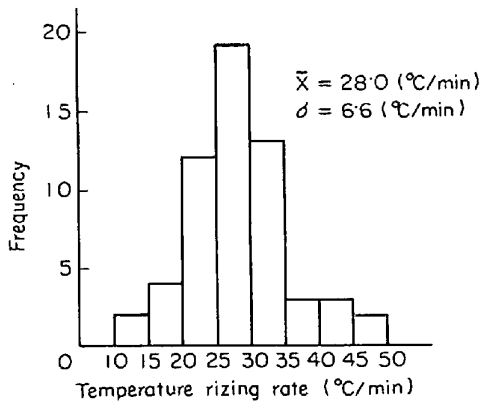


Fig. 16. Frequency distribution of temperature rising rates (by bomb type thermocouple).

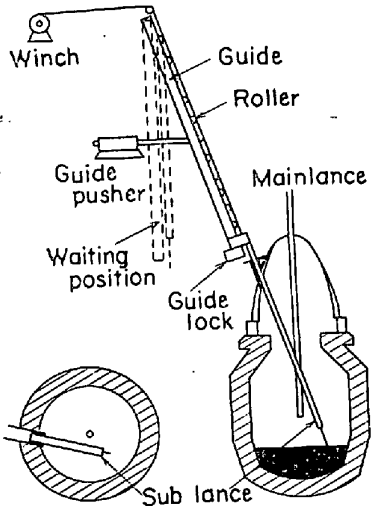


Fig. 17. Profile of sublance.

温の使用はないものと考えられる。

4.3 サブランス

サブランスについては著者らの論文⁵⁴⁾⁹⁸⁾をはじめ多数の論文²⁰⁾が紹介されている。その構成の概念図をFig. 17に示す。

最新型のサブランスは安価に作る目的からほとんど垂直型が採用される傾向にある。

サブランスの特徴はその多目的性にあるが、本節ではサブランスのもつとも重要なダイナミック制御システムにおける温度検出端としての機能についてのみ言及する。すなわち、サブランス測温における測温精度とその代表性および吹錬末期の昇温率についてである。

第1に測温精度を調べるために出鋼前の同一鋼浴をプローズをとりかえて繰り返し測温した。6ヒートについて測定した結果をFig. 18に示す。各ヒートごとに回帰直線を求め、この回帰直線を真の温度とみなし、測定点の回帰直線からの差($\Delta\theta$)の分布から測温精度を求め

た。 n 数がやや少ないが $\sigma_p = 2.9^\circ\text{C}$ であった。これは消耗型イメージンの精度に匹敵する。ただしこの測定は静止浴で行なっており、吹錬中の動浴の場合にはややばらつきは大きくなると考えられる。

第2に、測定値の代表性についての検討として、吹錬中にサブランスを約 3.3 cm/sec の低速で降下させ、鋼浴内高さ方向の温度分布を調査した。測定結果のうち2例をFig. 19に示す。この2例⁹⁸⁾でも鋼浴のほぼ上半分での鋼浴温度は計器の応答性を考慮してもかなり均一であることがわかる。火点からある程度はなれたところで広範囲にわたって温度がかなり均一であることから、鋼浴内の熱的偏析は少なく、サブランスにより測定した鋼浴温度の代表性は十分あると考えられる。

第3に、吹錬末期の昇温率についての調査結果を示す。サブランスで吹錬後半間歇的に測定したデータをま

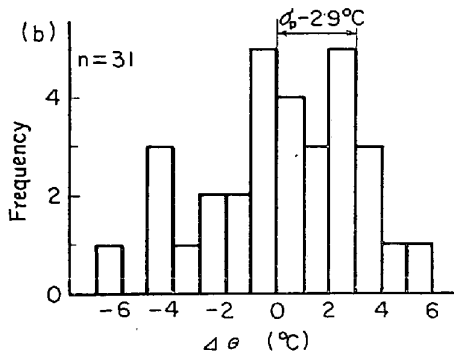
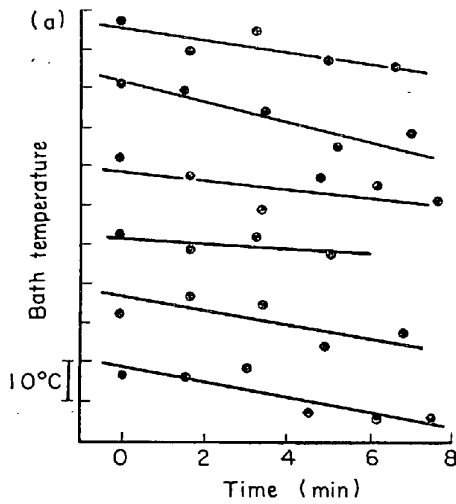


Fig. 18. Accuracy of temperature measured by sub-lance.

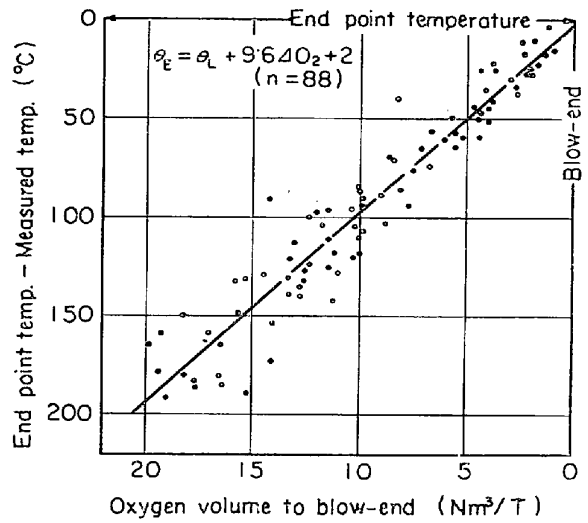


Fig. 20. Distribution of measured temperatures.

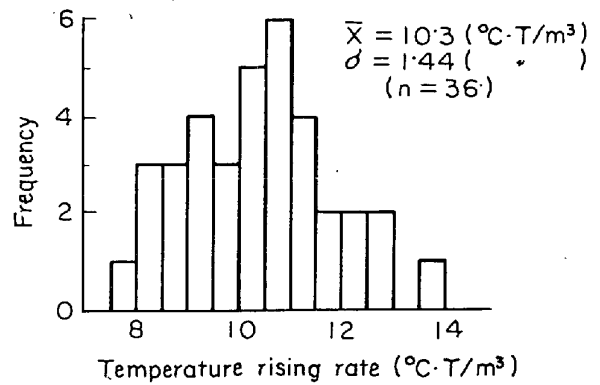


Fig. 21. Frequency distribution of temperature rising rates (by sub-lance).

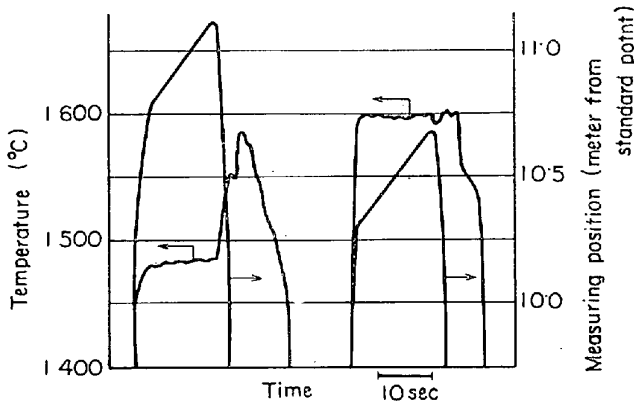


Fig. 19. Temperature variance during sub-lance movement.

とめた Fig. 20 (吹止カーボン 0.05~0.15%) から末期の昇温は、吹込酸素量に対して、ほぼ直線的であると考えられる。Fig. 20 の横軸は測定時点から吹止までの酸素量を製出鋼量でノルマライズしており、縦軸は測定温度と吹止温度との差を表わしているが、この場合の吹止温度は倒炉後の炉前测温値に吹止から炉前测温まで

の時間経過による温度降下を補正してある。次に吹錬末期 2 点 (一部 3 点あり) 测温を行なったヒートから得られた昇温率の分布を Fig. 21 に示す。昇温率は平均 $10.3 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{T}/\text{m}^3$ ($=30.6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$) であるが、ヒートごとにかなり異なっており、そのばらつきは、 $\sigma_R = 1.44 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{T}/\text{m}^3$ ($=4.2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$) である。2 点測定の時間間隔を 2 min、吹錬中测温の再現精度を $\sigma_p^* = 2.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ とみなすと、测温のばらつきを除いた本来の昇温率のばらつき σ_R は次のように $4 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$ 程度となる。

$$2\sigma_R^2 + 2\sigma_p^2 = 2\sigma_{R'}^2$$

$$\therefore \sigma_R = \frac{1}{2} \sqrt{4\sigma_{R'}^2 - 2\sigma_p^2} = \frac{1}{2} \sqrt{4 \times 4.2^2 - 2 \times 2.0^2}$$

$$= 4.0 \text{ } (^\circ\text{C}/\text{min})$$

すなわち、昇温率はヒートごとにかなり異なっていることがわかるが、これは前述のごとく、もつとも測定密度の高い投込测温でも認められており、脱炭速度計で見い出された脱炭酸素効率のばらつきとも対応する。

5. あとがき

転炉における計算制御は、計算機の発達と関係各方面のたゆまない研究開発の努力により着実に現場に定着してきた。特に当初の主目的であった終点制御とともに生産管理面での有用性が認識されてきている。

また、モデルおよびプロセス解析の面でも数多くの考え方が提案され、一応スタティック制御の限界が明白になり、ダイナミック制御の必要性が認められるようになって来た。

さらに、検出端について言及するならば、1965年頃考えられていた脱炭速度計、投込測温計、およびサブランスによる測温も一応完成の域に達したと言える。

しかしながら測定技術および制御工学的にこのプロセス制御の現状を展望すると、未だ緒についたばかりとも言える。すなわち、吹錬制御にとって特に重要なプロセスの動特性測定ひとつとつてみても制御系の設計と言う問題にはとてもなっていない。

これは、主としてプロセスの状態変数（分析値または温度）を適確にとらえる検出端の開発が十分でないことに起因していると言える。

本資料を作成するために1959年頃からの論文、および特許のうちで入手できるもの約150編を調査した結果測定精度、または測定値の妥当性、代表性についての資料はわずかに5編程度しかなかった。今後は検出端の精度および代表性に焦点を合わせて、各方面の議論を集中するようにしないと、これ以上の進展はのぞめないと考えられる。

一方、モデル作成またはプロセス解析に関する論文は実に数多く出揃っており、この面からみても実用に供しうる検出端を早期に開発する必要性が痛感される。

さらに本資料には紙数の関係上と時間の都合でふれられなかつたが、後刻ぜひともふれてみたいものとして、次の項目がある。

1) 溶鋼の凝固温度を測定することにより炭素含有量を推定するカーボン・データミネータを吹錬中に利用する方法：本件に対する着実な接近法が数論文⁹⁾発表されている。

2) 溶鋼酸素計：これについても各方面の研究開発がさかんであり一部実用にも供されつつある。

3) スタティック・モデルの統合：従来からの懸案事項であった理論的モデルと経験的モデルの統合もテンソルを使用して線型化を行えば可成見通しのよいものが得られること。

4) ダイナミック・モデルの良否の判定：現在発表さ

れているダイナミック・モデルで、鋼中カーボンと脱炭速度、脱炭速度と時間、および時間と鋼中カーボンの三つの関係を見ることにより、そのモデルの妥当性がある程度判定できること。

おわりに、本資料作成にあたって、終始助言を下されたことおよびデータ提供に貢献して下さった新日鉄、電気計装技術部 吉谷豊、鈴木久夫、内藤功一郎、長野裕の各氏および新日鉄八幡 前田実氏に感謝の意を表します。

文 献

- 1) W. J. SLATOSKY: *J. Metals*, (1960), p. 3
- 2) W. N. SPRAY: *Iron Steel Eng.*, (1961), p. 12
- 3) W. J. SLATOSKY: *JISI*, (1962), p. 1
- 4) J. E. CLOUGH, F. L. JOHUSTON, and T. M. STOUT: *Computer Control and Data Handling System for Oxygen Steelmaking at great Lakes Steel* (1962) 10
- 5) M. M. FISHER: *ISA* (1962) 10
- 6) W. A. FISCHER: *Stahl u. Eisen*, 82 (1962) 13, p. 797
- 7) D. I. TURKENICH: *Stal*, (1963) 1
- 8) DUMONT, FILLON, F. MANGIN, C. BACHET, and H. PIERRARD: *Revue de Métallurgie*, (1963) 2, p. 105
- 9) E. J. BORREBACH: *The Iron Age*, (1963) 3
- 10) K. S. GARGER, A. I. NIKITIN, B. V. LYAUDIS, B. N. MALINOVSKII, O. I. BEL'SKII, L. G. VOLKOV, M. P. KUZNETSOV, A. A. SOROKIN, A. D. STAKHURSKII, L. M. TRUBRTSYN, A. I. TRUSEEV, T. K. SHAFRAN, P. I. SHESTAK, D. P. UL'YANOV, and A. D. KUTSENKO: *Stal* (1963) 7
- 11) 太田, 芥田, 西脇, 吉住: 特許 No 523643 (1963, 9 出願)
- 12) H. W. MEYER, D. A. DUKELOW, M. M. FRSCHER: *ダンケルク国際会議* (1963) 9
- 13) 桂, 中村: *国際会議* (1963) 9
- 14) J. F. ROTH: *Iron Steel*, (1964) 3
- 15) 桂, 磯部, 板岡: *J. Metals*, (1964) 4
- 16) J. DUMONT-FILLON, P. VAYSSIERE, B. TRENTINI: *J. Metals*, (1964) 6
- 17) H. W. MEYER, D. A. DUKELOW, and M. M. FISHER: *J. Metals*, (1960) 6
- 18) M. V. HOLT: *IBM. Report* (1964) 7
- 19) D. MACFARLANE: *J. Metals*, 16 (1964) 9, p. 715
- 20) 日本鋼管: 第29回計測部会資料 No 2-4 (1964, 10)
- 21) 青山, 飯浜, 林, 松永, 小林: *鉄と鋼*, 50(1964) 11, p. 1723
- 22) P. BOOSTER: *Steel Times*, (1965) 1
- 23) J. MAATSCH, K. BOROWSKI, and H. KREINER: *International conference on automation in iron and steel making*, Amsterdam, Düsseldorf

- (1965) 5
- 24) 桂, 斉藤: CNRN 国際会議 (1965) 5
- 25) H. W. MEYER, M. M. FISHER, and W. F. PORTER: J. Metals, (1965) 7
- 26) J. W. PEIRCE and P. H. LOESECKE: Iron Steel Eng, (1965) 8
- 27) IRSID: 仏特許 No 1459900 (1965, 8 出願)
- 28) W. DÖRR, W. RECKNAGEL: Stahl u. Eisen, 85 (1965) 25, p. 1686
- 29) 川上, 藤井, 内堀: 鉄と鋼, 52 (1966) 3, p.380
- 30) A. WEGSCHEIDER: BISRA Rep (1966) 3
- 31) A. E. SCHRAEDER: Iron Steel Eng., 43 (1966) 5, p. 137
- 32) J. F. ROTH: Iron Steel Eng., (1966) 5
- 33) H. W. MEYER and J. A. GLASGOW: Iron Steel Eng., 43 (1966) 7, p. 116
- 34) G. W. PERBIX: J. Metals, (1966) 7
- 35) USINOR: Steel Times, (1966) 7
- 36) H. W. MEYER and J. A. GLASSGOW: Iron Steel Eng., (1966) 7
- 37) H. W. MEYER and J. A. GLASSGOW: Blast Furn. Steel Pl., (1966) 7
- 38) 永岡, 白井, 八反田: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, p. 1493
- 39) 島田, 大石, 中山, 内藤: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, p. 1496
- 40) J. MAATSCH, D. WINKLER, K. BOROWSKI, and K. H. ULRICH: Stahl u. Eisen, (1966) 9
- 42) J. KOENITZER and K. A. ZIMNERMANN: Stahl u. Eisen, (1966) 10
- 43) F. W. DITTMAN: J. Metals, (1966) 11
- 44) R. F. RINESCH and G. STROHMEIER: Berg und Hüttenmännische Monatshefte, 112 (1967) 1, p. 1
- 45) 古茂田, 岡崎, 越川: 鉄と鋼, 53 (1967) 3, p. 281
- 46) D. L. KEENON, N. R. CARTSON, and L. F. MARTZ: Instruments and Control System, (1967) 5
- 47) K. BOROWSKI, J. MAATSCH, and H. RÖHM: Arch. Eisenhüttenw., 38 (1967) 7, p. 501
- 48) 八幡製鉄: 第 37 回製鋼部会資料 No 974 (1967)
- 49) BLUM, J. M. SCHWARTZENBERG, and F. C. LUXL: Iron Steel Eng., (1967) 7
- 50) 藤井, 荒木, 丸川: 鉄と鋼, 53 (1967) 8, p.973
- 51) J. A. GLASSGOW and W. F. PORTER: J. Metals, (1967) 8
- 52) 藤井, 林: 鉄と鋼, 53 (1967) 11, p. 1205
- 53) P. B. DUNNIL and H. ATKINSON: Steel Times, (1968) 1, p. 13
- 54) F. J. HOFRAGEL, W. DÖRR, and W. RECK NAGEL: Stahl u. Eisen, (1968), 1
- 55) Y. N. RUNDNITSKII, A. D. FAERSHTEIN, I. I. KAGAN, and I. Y. SIKURGAR: Stal, (1968) 1
- 56) P. N. DASTUR and C. B. GRIFFIFFITH, G. W. PERBIX: Iron Steel Eng., 45 (1968) 3, p. 77
- 57) H. W. MEYER, J. SZEKELY, and G. C. SMITH: J. Metals, (1968) 7
- 58) YAVOISKII: Stal (1968) 7
- 59) D. G. BOLTZ: Blast Furn Steel Pl., (1968) 9
- 60) 長野, 一戸: 金属学会・鉄鋼協会九州支部共同講演会資料 (1968) 10
- 61) R. HOLPER and E. DENIS: CNRM, No 15
- 62) P. NILLES and E. DENIS: CNRM, No 17 (1968) 11
- 63) 岩尾, 前田, 川口, 大石: 鉄と鋼, 55 (1969) 3, S94
- 64) P. NILLES and E. M. DENIS: J. Metals, 21 (1969) 7, p. 74
- 65) 野坂, 岩尾: オートメーション, 14 (1969) 9, p. 42
- 66) 八幡製鉄: 第 44 回製鋼部会資料 No 8 (1969) 10
- 67) 島田, 大石, 岩尾, 内藤, 前田: 製鉄研究 No 266 (1969), 137
- 68) K. HAGEN and P. G. OBERHÄUSER: Stahl u. Eisen, 89 (1969) 23, p. 315
- 69) P. HOTIAS, E. DENIS, R. HOLPER, R. PIRLET, and Y. NÖEL: CNRM No 20 (1969), p. 41
- 70) 一戸, 山本, 長野, 宮村: 製鉄研究, No 266 (1969), 55
- 71) 小沢, 荒川: 富士製鉄技報, 第17巻 (1969)
- 72) 八幡製鉄: 第45回製鋼部会資料, No 9 (1970) 3
- 73) 長野, 岩尾, 甲谷: 鉄と鋼, 56 (1970) 4, S73
- 74) A. KRAUSZ: International conference on automation in iron and steel making, Luxemburg, Düsseldorf, 1970, 4
- 76) H. IKEGAMI and A. OZEKI: International conference on automation in iron and steel making, Luxemburg, Düsseldorf, 1970, 4
- 77) M. OISHI, A. TANAKA, and N. IWAO: International conference on automation in iron and steel making, Luxemburg, Düsseldorf, 1970, 4
- 78) H. GRAF: International conference on automation in iron and steel making, Luxemburg, Düsseldorf, 1970, 4
- 79) S. W. JEMELJANOW, G. D. SURGUTSCHOW, G. I. MOSSALOW, and E. N. DERKATSCHOW: International conference on automation in iron and steel making, Luxemburg, Düsseldorf, 1970, 4
- 80) 鉄鋼オートメーション国際会議出張報告 (計測部会) (1970) 6
- 81) V. M. VINOGRADOV, U. Y. TREISTER, G. A. IZMAILOV, and O. B. KLESSIKO: Metallurg., (1970) 6, p. 19
- 82) 長野, 岩尾, 馬場, 塩田, 森田: 鉄と鋼, 56 (1970) 6, p. 807
- 83) 古茂田, 川崎, 塩川, 羽田: 川崎製鉄技報, (1970) 7, p. 291
- 84) F. BARDENHEUER: Stahl u. Eisen, (1970) 7
- 85) H. ROSSNER: Iron Steel Eng., (1970) 8

- 86) E. L. CAMBRIDGE, J. R. MIDDLETON, and R. ROLLS: International conference on the science and technology of iron and steel, Tokyo, 1970, 9
- 87) Y. NAGANO, N. IWAO, and T. KOTANI: International conference on the science and technology of iron and steel, Tokyo, 1970, 9
- 88) N. NAGAOKA, G. USUI, A. OZEKI, and M. ISHIGURO: International conference on the science and technology of iron and steel, Tokyo, 1970, 9
- 89) I. MUCHI, S. ASAI, and M. MIWA: International conference on the science and technology of iron and steel, Tokyo, 1979, 9
- 90) S. TSUZUKI, T. KUWABARA, and T. FURUSAKI: International conference on the science and technology of iron and steel, Tokyo, 1970, 9
- 91) 長谷川, 山本, 古橋: 鉄と鋼, 56 (1970) 11, S 400
- 92) 都筑, 高橋: 鉄と鋼, 56 (1970) 11, S 401
- 93) CHIGRAI, et al.: *Stal in English*, (1970) 12
- 94) 野坂: 鉄鋼業のコンピューターコントロール (産業図書) (1970) 81
- 95) M. TRUPPE: *Stahl u. Eisen*, 90 (1970) 23, p. 1315
- 96) F. BARDENHEUER and P. G. OBERHÄUSER: *Stahl u. Eisen*, 90 (1970), p. 789
- 97) D. W. KERN, P. D. STELTS, and R. J. FRADE-NECK: *J. Metals*, (1971) 8
- 98) 岩尾, 前田, 長野, 山本: 製鉄研究, No 272 (1971) 3, S 127
- 99) 渡辺, 平尾, 本間, 大久保, 古垣: 鉄と鋼, 49 (1963) 3,
- 100) 山本, 橋本, 松永, 鳥越: 住友金属, 17 (1965) 7, 212
- 101) 永井: 特許 No 288312 (1953. 3 出願)
- 102) 甲谷, 岩尾, 長野: 鉄と鋼, 56 (1970) 4, S 73
- 103) 日本鋼管, 第50回計測部会資料, No 50-3-1 (1972) 3