OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	キュポラ操業の重回帰分析による工程解析と操業管理方式の確立に関する研究
Author(s)	吉村, 浩
Citation	大阪大学, 1969, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2397
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

キュポラ操業の重回帰分析による工程解析と操業管理方式の確立に関する研究

昭和43年12月5日

吉　村　浩

44.12.16

キュポラ操業の重回帰分析による工程解析と操業管理方式の確立に関する研究

昭和43年12月5日

吉　村　浩

目　　次

序　論 …… 1

第1編　キユポラ操業に適合した工程解析方法についての考案 …… 5

第1章　緒　論 …… 5

第2章　キユポラ操業とその操業管理の現状 …… 8

2・1　緒　言 …… 8

2・2　キユポラ操業の現状 …… 8

2・3　キユポラ操業の操業管理の現状 …… 9

2・4　キユポラ操業の工程解析の現状 …… 12

2・5　ま　と　め …… 17

第3章　キユポラ操業の工程解析の方法について …… 19

3・1　緒　言 …… 19

3・2　キユポラ操業の工程解析のためのデータの収集 …… 22

3・3　キユポラ操業の工程解析に重回帰分析法の適用 …… 27

3・4　観測データ相互の時差の選定方法 …… 34

3・5　ま　と　め …… 44

第4章　小　括 …… 46

第2編　キユポラ操業の工程解析 …… 47

第1章　緒　論 …… 47

第2章　半還元鉱を原料とするキユポラ操業の工程解析 …… 50

2・1　緒　言 …… 50

2・2　実験方法 …… 50

2・2・1　実験操業に使用したキユポラの諸元 …… 50

2・2・2　実験操業の操業条件 …… 51

2・2・3　データの収集 …… 52

2・3　実験結果 …… 53
2・4　解析経過と解析結果 …… 55
2・5　考　察 …… 59
2・5・1　解析方法に対して …… 59
2・5・2　解析結果からみたキユポラ操業の状況について …… 63
2・5・3　解析結果のキユポラ操業管理のための考察 …… 65
2・5・4　解析結果についての残された問題 …… 66
2・6　ま　と　め …… 67
第3章　鋼材を原料とする適正送風操業の工程解析 …… 68
3・1　緒　言 …… 68
3・2　実験方法 …… 68
3・2・1　実験に使用したキユポラの諸元 …… 68
3・2・2　実験操業の操業条件 …… 68
3・2・3　データの収集 …… 70
3・3　実験結果 …… 71
3・4　解析の経過ならびに結果 …… 74
3・5　考　察 …… 80
3・5・1　解析結果での注目すべき点について …… 80
3・5・2　解析結果のキユポラの操業管理えの注目すべき点について …… 83
3・6　ま　と　め …… 86
第4章　鋼材を原料とする過剰送風操業の工程解析 …… 87
4・1　緒　言 …… 87
4・2　実験方法 …… 87
4・2・1　実験に使用したキユポラの諸元 …… 87
4・2・2　実験操業の操業条件 …… 87
4・2・3　データの収集 …… 88

4．3　実験結果 …… 88
4．4　解析経過ならびに結果 …… 90
4．5　考　察 …… 91
4．6　ま　と　め …… 93
第5章　鋼材と銑鉄を原料とする操業の工程解析 …… 94
5．1　緒　言 …… 94
5．2　実験方法 …… 94
5．2．1　実験に使用したキュポラの諸元 …… 94
5．2．2　実験操業の操業条件 …… 94
5．2．3　データの収集 …… 96
5．3　実験結果 …… 96
5．4　解析の経過ならびに解析結果 …… 98
5．5　考　察 …… 100
5．6　ま　と　め …… 104
第6章　酸素富化による炉況修正の際の工程解析 …… 106
6．1　緒　言 …… 106
6．2　実験方法 …… 107
6．2．1　実験に使用したキュポラの諸元 …… 107
6．2．2　操業条件 …… 107
6．2．3　データの収集 …… 108
6．3　実験結果 …… 108
6．3．1　酸素富化の影響の時差について …… 108
6．3．2　酸素富化の影響について …… 111
6．4　考　察 …… 112
6．4．1　熱風の酸素富化による影響について …… 112
6．4．2　酸素富化の酸素濃度の影響について …… 113
6．4．3　キュポラの操業管理の手段としての
熱風の酸素富化について …… 114

6．5　ま　と　め …… 114
第7章　小　括 …… 116
7．1　緒　言 …… 116
7．2　半還元鉱を原料とするキユポラ操業の工程解析に関する考察 …… 116
7．3　普通キユポラ操業の因子決定に関する考察 …… 117
7．4　酸素富化による炉況修正の際の工程解析に関する考察 …… 119
7．5　ま　と　め …… 119

第3編　キユポラの新しい操業管理方式の確立 …… 121
第1章　緒　論 …… 121
第2章　キユポラの新しい操業管理方式について …… 124
2．1　緒　言 …… 124
2．2　キユポラの新しい操業管理方式の構想 …… 124
2．3　工程解析の結果からの新しい操業管理方式の考察 …… 128
2．4　キユポラの新しい操業管理方式のフローチヤートおよびまとめ …… 134
第3章　キユポラの新しい操業管理方式の効果を観察するための実験操業 …… 135
3．1　緒　言 …… 135
3．2　実験方法 …… 135
3．2．1　実験に使用したキユポラの諸元 …… 135
3．2．2　実験操業の操業条件 …… 135
3．2．3　操業管理方法 …… 136
3．3　実験結果 …… 138
3．4　考　察 …… 139
3．4．1　管理項目、管理方法の設定について …… 139

3．4．2　炉況修正方法について …… 140
3．4．3　この操業管理方式の効果について …… 143
3．5　ま　と　め …… 144
第4章　キュポラの操業管理方式の近い将来での展開 …… 146
4．1　緒　　言 …… 146
4．2　キュポラの操業管理方式の現在の問題点 …… 147
4．3　キュポラの自動制御方式の構想 …… 149
4．4　ま　と　め …… 150
第5章　小　　括 …… 152

総　　括 …… 153

序　　論

鋳鉄鋳物製品の品質の維持と向上は、鋳鉄の溶解技術に負うところが大きい。そして鋳鉄溶解炉として広く使用されているキュポラの溶解技術は、目ざましい進歩をとげつつあると言える[1]、しかし、キュポラ操業の最も基本的な要求である、目標とした品質の溶湯を均質に保ち、連続して長時間に渉つて得ようとすることは、現状では非常に困難で、これらについて多くの研究の成果もあり[2]、キュポラの構造、関連設備および機器類、装入原材料、また操業方法の改善が計られてきているが、未だ完全ではない。

とくに、最近のキュポラは、相当に計装化されつつあり、操業中の炉況の状態を刻々とつかみ、適切な処置をとろうとする努力が払われている。しかし、キュポラは、たとえ同じ工場に並べて設置されている同一仕様のものでさえ、操業中に個々のキュポラごとに、それぞれ個有の性状を示す傾向がある。そのため鋳物工場の品質管理を推進しようとする場合、キュポラの操業についての特性を経験的に把握している操業担当技術者の、その都度の判断によつて、適切な処置をとつてゆかなければならない面が相当に多い。

最近一部の製鉄会社での溶鉱炉および転炉などの操業の計算機制御が緒についたこともあり、品質管理の最近の動向から、一般に金属工業においても、とくに今まで困難とされがちであつた製錬、溶解などと言つた複雑な工程について工程解析が試みられ、その操業の標準化、さらに計算機制御の基礎的検討が行われるようになつた[3]、しかし鋳物工場においてのキュポラ操業についての工程解析は余り進められているとは聞かない。わずかに発表されている報告を見ても、今のところキュポラ操業の工程解析というよりも、キュポラの操業条件の選定に関する問題について論じられているにすぎない[4]。

そこでキュポラの操業管理のための工程解析を進めるにあたり、今まで個々のキュポラの操業担当技術者にゆだねられていた炉況判断の要因、炉況が

変化していることがわかつたときの処置方法について、今まで十分と言えなかつた。　　そこでキユポラに装備している計測機器類の指示のなかから有効なものを見出し、それらの計測機器類の指示の総合判断方法を確立することを第1の目標とした。

この第1の目標が達成されれば、今まで操業担当技術者の判断によらざるを得なかつたキユポラの定常操業状態の維持について、詳細にわたる標準化を進め得ることになり、さらにキユポラ操業における品質情報処理の機械化、操業管理の自動化まで進む見通しがつけられることになる。この段階は品質管理でいう工程解析では、品質維持のための工程解析の段階であつて、キユポラ操業を定常操業状態に維持する上での、炉況に関与する要因を把握することから、炉況をさらに安定させる方法も確立できる筈であり、つぎの品質向上のための工程解析もつづいて進めて、さらに炉況の安定した、均一な溶湯の品質を保つことが期待できる。

つぎに、キユポラ操業中、定常操業状態を逸脱し、炉況が変化してゆく傾向にあるとき、炉況を回復するに際し、できるだけ短時間で、しかも強力な有効な方法であり、かつ、後の影響の少ない炉況に対するアクション方法の確立を第2の目標とした。

この第2の目標が達成されれば、キユポラの操業管理方式が確立されたことになり、操業管理の自動化も完成することができ、キユポラ操業の原料の装入から出湯までの無人操業の計算機制御のいとぐちがつけられることになる。

キユポラ操業の工程解析の方法としては、まず、他の考慮しない要因による変動が混入のおそれのない実験炉を選び、とくに装入物による炉況の変動をおさえるため、装入物の品質、寸法を一定にするように努め、炉況に変動を与える可能性があると期待される要因、炉況の変動を知らせる情報となると考えられる、キユポラに装備した計測機器類が、時々刻々示しているキユポラ実験操業中の各データの変動を、統計的方法を用いて総合的な立場から、

それらの関係を検討することにした。

つぎに、キュポラ操業中に炉況に変化が起つたことを知つた場合、炉況を急速に元に復するアクション方法の実験と検討を行つた。

最後に、以上得られた結果を用い、生産現場で用いられているキュポラ操業に適用したところ、初期の目的を達成したことを示す結果を得た。

本論文は、3編16章よる成る。第1編は、キュポラ操業の現状とキュポラ操業の工程解析方法、新しい操業管理の方式について述べた。第1章は、緒論であり、第2章は、キュポラ操業の現状について述べた。第3章は、キュポラ操業の工程解析の方法について述べ、とくに実験データ相互の時差を考慮する重要性について述べた。第4章は、小括である。第2編は、キュポラ操業の工程解析の経過と結果である。第1章は緒言であり、第2章は、半還元鉱を原料とし、熱風水冷式ノーライニング塩基性キュポラによる実験操業についてであり、第3章は、鋼材を原料とした熱風水冷式酸性キュポラによる実験操業についてである。第4章は、第3章に用いた熱風水冷式酸性キュポラによる過剰送風を行つた実験操業についてである。また第5章は、銑鉄と鋼材を原料とした熱風水冷式塩基性キュポラによる実験操業についてであり、第6章は、送風に酸素添加をすることにより迅速な、炉況修正方法の定量的検討であり、第7章は、小括である。第3編は、キュポラの新しい操業管理方式を確立することについて述べており、第1章は緒言である。第2章は、キュポラの新しい操業管理方式の設定についてであり、第3章は、熱風水冷式塩基性キュポラの新しい操業管理方式による操業実験である。第4章は、キュポラの操業管理方式の将来えの展開についてであり、第5章は小括である。最後に本論文の総括を行つた。

文　献

(1) 日本鋳物協会：キュポラハンドブック（1968）

(2) 日本鋳物協会：キュポラハンドブック（1968）

(3) 日本科学技術連盟：第８回数学計画シンポジウム「鉄鋼業」資料（１９６６）

(4) 富田、福田、吉川、水谷：鋳物３８（１９６６）、５、２８９

第1編　キユポラ操業に適合した工程解析方法についての考察

第1章　緒　　論

キユポラは、シヤフト炉の一種であり、鉄原料を固体燃料と共に装入し、空気を送つて加熱溶解する金属一般の溶解法として古くから用いられる形式の溶解炉である。

キユポラの操業は、ずつと大型にはなるが、製鉄所における、同じ形式のシヤフト炉の溶鉱炉の操業が、1度点火し操業を開始すると昼夜の別なく、数年間というような、相当長期間連続して操業が続けられるのに対し、最近では、一部で、ある程度操業を長く続けるようになつたとは言え、造型作業の関係もあつて、一般には、毎日5～8時間程度の操業を経過した後、一応中止する場合が最も多い。

しかし、出湯されてくる溶湯から見た場合、溶鉱炉は、非常に長い期間の連続操業をしているにも拘らず、溶湯は、炉底部に溜められ、1日に数回、数時間毎に、間欠的に出湯させるので、見方によつては、溶湯がバッチを形成していると見られるのに対し、キユポラでは、短い時間ではあるが、操業中連続的に出湯されているのが普通で、連続操業と見ることができる。

このような、操業中のキユポラから連続的に出湯される溶湯は、目標とした品質を均質に保ち、連続して長時間に渉つて得ようと努力しているに拘らず、溶湯の品質を時間の経過と共に眺めた場合、炉況の変動によつて、ある範囲の変化を絶えず伴つているものであり、また、一方、操業をつづけていると、ある程度の時間を経過と共に、徐々に溶湯の品質が、かなり変化していることはよくあることである。

もつとも、多くのキユポラでは、前炉を設置しており、数十分の溶湯を溜

め、短時間であるが、ある程度の溶湯の品質の調整は行われているが、長い時間を通じて溶湯の品質の維持をすることが現在では困難である。

キュポラの操業管理のねらいとなる、目標とした品質の溶湯を均質に保ち、連続して長時間に渉つて得るためには、とくに溶湯の管理においては、キュポラから連続して出湯する溶湯の品質の時間的な推移を調べ、溶湯の品質の変化に関連する、炉況の変動を生ずる諸要因をつかむことができればその要因を調整することによつて、今までより一層、溶湯の品質の変化の少ない、精密な、キュポラの操業管理方式を確立することができる。そのためには、キュポラの操業時間が短いとは言え、操業中連続的に出湯する溶湯から容易に試料採取することができるキュポラ操業の方が溶鉱炉より工程解析が行い易いとも言える。

キュポラ操業のような数多くの要因がからみ合つていると予想される工程解析には、最近各方面で脚光をあびつつある、多変量のデータのもつ特徴を要約して、所与の目的に応じた総合を行なうという役割をはたす、多変量解析の手法に注目した[1]。

キュポラ操業の工程解析を進めるに際し、多量解析のなかで、多くの分野で用いられた、これからも用いられるであろう統計的方法として重回帰分析法がある。しかも、最近の電子計算機の普及は、工程解析で必要あれば、今までは手間と時間が非常にかかる重回帰分析を遂行する計算をたちどころに実施できるようになつている[2]。

しかしながら、この重回帰分析法を適用して工程解析を進めることは、果して工程の模様を明確に把握できるかどうかについては、その進め方、結果の解釈のしかたに問題があり、必らずしも簡単ではない。

そこでキュポラ操業中に収集した種々の観測データを用いて、重回帰分析法によつて工程解析を進める方法について検討を行い、まずその可能性の検討を始めた。

重回帰分析法によつて、キュポラ操業の工程解析を進めるとき、つぎに問

題となつたのは、工程解析に用いる観測データの相互に時差が存在していることである。工程解析をするため、キユポラの操業中収集した観測データには、炉況の変動に関係した変化が、出湯する溶湯の各化学組成に、またキユポラに装備した各測定機器類の読みなどに表われる場合、冶金技術的、ならびに計測技術的な理由からそれぞれ個有の時間のおくれを生ずるので、それらの時間のおくれを、各時系列データの時差として、各従属変数に対して、各独立変数の個々が時差を考慮して、各データを、それぞれずらせておいて重回帰分析を行う必要がある。このような観測データ相互の時差の分だけ、各データをずらすことによつて、キユポラ操業の工程解析を進め、キユポラ操業にふさわしい解析結果を得ることができた[3]、[4]。キユポラ操業の工程解析の結果を用いることにより、溶湯の化学組成が変化するような、炉況の変動に関係のあるいくつかの測定機器類の指示を総合的に判断して、また観測データの時差を利用して、なるべく早くそれを知ることにより、その都度、工程解析の結果から知つた、有効な、かつ迅速な手段を講じながら炉況の調整を行い、常に、溶湯の品質を均一に保つてゆくことができると考える。

本編においては、キユポラ操業とその操業管理の現状とキユポラ操業の工程解析の方法、さらにキユポラ操業の工程解析を進めているうちに必要となつた、キユポラ操業中、出湯する溶湯の各化学組成の各データと同時にとつた、キユポラに装備した各測定機器類の読みによる各観測データとの間の、個々の時差を考慮することにより、工程解析を有効に進めることができることから、各観測データ相互の時差の求め方、またそれらの解析結果を用いて、キユポラ操業に、より適合した操業管理方式について考察した。

文　献

(1) 奥野忠一：品質管理17（1966）、8、805
(2) 奥野忠一：品質管理17（1966）、10、983
(3) 吉村、栗原、牧口：鋳物38（1966）、4、46（予報）
(4) 吉村、栗原、笹原、山中：鋳物40（1968）、6、501

第2章　キュポラ操業とその操業管理の現状

2．1　緒　　言

キュポラは、鋳鉄溶解に広く、古くから用いられている溶解炉であるが、一方キュポラによる溶解技術も目ざましい進歩をとげている。そしてキュポラの計測化も進み、その操業管理の方法も種々研究され、実施されているが、キュポラ操業中に出湯する溶湯の品質の管理を行い、その均一性を長時間持続させるための努力は種々試みられ、実施されている。しかし問題なのは、キュポラ操業は、キュポラ内において、種々複雑な現象と工程の連続したものであり、炉況を安定に保つには、計装化の進んだ今日でさえ、結局は、個々のキュポラの性状を習熟した担当技術者の判断によらなければならないことも多い。

この章においては、この問題について、今後のキュポラの操業管理を発展させるため研究を進めるに際し、今回問題とする事柄を主としたキュポラ操業の現状について述べることとした。

2．2　キュポラ操業の現状

キュポラ操業では、キュポラの内張り耐火物の種類によつて酸性操業と塩基性操業とに分けられるが、酸性操業は、古くから行われ、今日でも広く用いられており、通常、スクラグによる溶湯の精錬は考えていない。

塩基性操業は、スクラグの化学反応によつて溶湯の品質に与える影響が大きく、とくに脱硫力があるところから、球状黒鉛鋳鉄の溶解には適している。

最近では、操業の長時間化の要求や球状黒鉛鋳鉄、可鍛鋳鉄などを対象とした場合、精錬をする必要があると共に、溶解帯に高価な塩基性耐火物を全く使用しない、ノー・ライニング・キュポラによる塩基性操業が使われ始めている。

また、キュポラの羽口からの送風についてみると、キュポラに装入するコークスの使用量の低減や低品位のコークスの使用の可能性など経済的な面とキュポラの炉内効果を向上させることから、送風を予熱して熱風を送る熱風操業が増加しつつある。そして熱風操業のさらに良い点は、高温の出湯が可能となり、キュポラ上部の雰囲気は、一酸化炭素が豊富となり、でき上る鋳物の健全性が増すという利点がある(1)。

さらに、キュポラの過熱溶解帯をかこむ炉壁を水冷することにより、炉壁内張りの耐火物が冷却させるため、その減耗速度が遅くなり、炉壁の変化が少なく、そのためスクラグ量が少なく、溶湯の材質の変動が少なくて、長時間均一な溶湯の品質を保つことができる(2)。

そこで、良質な、均質な溶湯を必要とする場合には、熱風水冷式のキュポラを用いることになる。そして、良質な鉄原料およびコークスを用いる場合、あるいは溶湯の品質について厳格な要求をしない場合は酸性操業を、溶湯の品質について厳格な要求をとると共に、低品位の鉄原料やコークスを用いる場合は塩基性操業を用いることになる。

以上のようなことから本研究においても、その研究の目的から第2編に述べる、キュポラ操業の工程解析のための実験操業には、現在使用されている、種々な形式のキュポラの特徴を調べた結果、それぞれの実験の目的に従つて、炉内で活発な反応を起させる操業で、炉壁からの影響を防ぐため、熱風水冷式塩基性操業のノー・ライニング・キュポラ、炉内で精錬が行われない熱風水冷式酸性操業のキュポラおよび多く用いられている熱風水冷式塩基性操業のキュポラを選ぶと共に、これら実験操業の結果を実際の操業での工程解析えの利用の便も計つた。

2．3　キュポラ操業の操業管理の現状

キュポラ操業の操業管理のなかで、溶湯の管理に限定して見た場合、キュポラ操業そのものが、極めて複雑な現象と工程が連続しているとも言え、十

分に管理が実施されているとは言えない。とくに最近のキュポラは、相当に計装化されつつあるにも拘らず、炉況をこれらの計測機器類のみによつて十分に把握しているとは言えない。すなわち、現在、キュポラ操業の溶湯の管理に使われている、炉況を知るための手段としては、図1.1に示したものの中の、いくつかを選んで、多くのキュポラ操業の炉前で使われている。なお、この図1,1において、※印のものは、人の肉眼とか経験に頼つているものである。

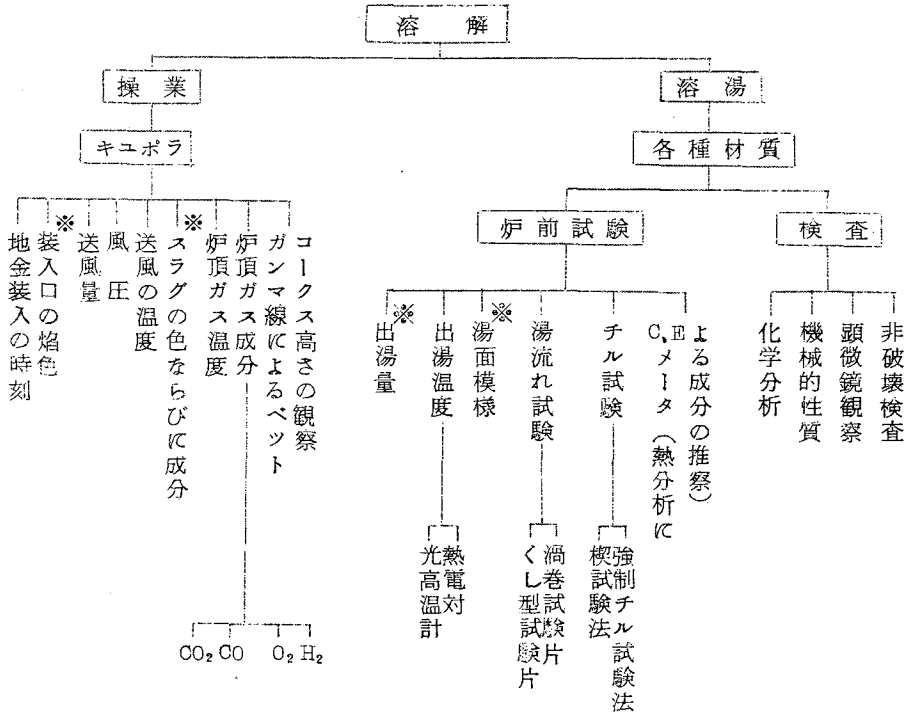


図 1・1 溶解作業の管理状況

キュポラ操業の操業管理に関する研究も、古くから広く行われており、そのなかでも炉内雰囲気に関しての Piwowarsky[3], Jungbluth[4], Patterson[5] などの解明結果は、炉内においてのコークスの存在と送風量との関係、適正送風量の決定法、炉内ガス中の炭酸ガスと一酸化炭素ガスとの関係、さらに炉内の温度分布など詳細に及び、現在広く炉況の維持をはかる上での基礎となつている。

炉況を知る方法についての研究も、数多く行われている。また、本研究においてとりあげている、出湯する溶湯の各化学組成とキュポラに装備されている計測機器類の指示との関係も数多く発表されている。

炉内の酸素系ガスの溶湯成分の変動に及ぼす影響のうち、炉内雰囲気によつて酸化消耗される溶湯の炭素、珪素およびマンガン含有量との関係は、炉内雰囲気の酸化性の強弱に支配されると報告されており、それらの量的な関係も解明されている[6][7]。

また、出湯温度、出湯速度と溶湯の化学組成、とくに炭素含有量との関係については、装入コークスの粒度、コークス比、キュポラの湯溜り部分の容量などという条件を一定とすると、溶湯の温度の高いほど溶湯の炭素含有量は高くなり[8]、コークスの比重が大きく、気孔率の小さい緻密なコークスほど、溶解速度が小さく、加炭量が多くなる傾向があり[9]、したがつて、溶解速度は出湯速度にも直接関係するから、出湯速度が高くなるにつれ、溶湯の炭素含有量が低くなることが認められている。

さらにスラグとの関係については、いろいろ調べられているが、とくに直接溶湯の化学組成、炭素含有量とスラグ中の珪酸含有量および塩基度との関係[10]、溶湯の珪素含有量とスラグの塩基度との関係は、[11]いづれも、スラグ中の珪酸含有量が高いほど、すなわち塩基度が、低いほど、溶湯の炭素含有量は低下し、溶湯の珪素含有量は上昇することが報告されている。

さらに、ベッド・コークス高さの変動も溶湯の品質に関係が深く、小型のキュポラでは、γ 線透過による直接の測定も可能であるが、普通のさらに大

きい型のキュポラでは、γ線が透過せず不可能で、他に風圧の変動が比較的有効な手がかりであるとされているが[12]、風圧もベット・コークス高さの変動以外でも変化し易いのでそれらの判断は簡単にはできない。

これらの研究は、貴重なものであり、現在のキュポラ操業の操業管理の基礎となつているが、種々の要因と溶湯の化学組成との関係は、いづれも他の要因を一定としているか、あるいは考慮しているとは言え、他の要因との関連を、具体的に、計量的に関係づけながら、いろいろな場合に、つねに応用できるようになつているとは言えない。すなわち、いわゆる単相関的関係のみが、わかつているだけであると言つても過言ではない。そこで、これらの関係を実際の炉況の判断に用いる際には、個々のキュポラの特性も考慮し、他の要因の状況も考慮した上で判断しなければならず、結局それぞれのキュポラの特性を経験的に把握した操業担当技術者の判断によつて、経験的な管理を行わざるを得ないのが現状である。また、これらの計測機器類の指示には炉況に変化が起つた時間との時差がある筈であるが、どの指示が早いのかなどは現在まではつきりつかまれていなかつた。

また、炉況の判断を適正にして、その対策を講じていないと、操業中に異状現象を起すことがよくある。これら異状現象のうち頻繁に起り、しかも炉況を悪くするのは棚吊りである。そして棚吊りを解消させても炉況の回復が非常におくれることが多く、その間溶湯の品質は悪化することになるので、常に炉況を管理する方法を講ずる必要があることと、棚吊りを起した場合迅速に炉況を回復する方法を考える必要がある。

2．4　キュポラ操業の工程解析の現状

キュポラ操業の操業管理、とくに溶湯を管理しようとするための工程解析は、鋳物工場に品質管理が導入されてから問題とされ、種々試みられていたことは事実である。

前の2．2に述べたように、出湯する溶湯の各化学組成とキュポラに装備

された、いくつかの計測機器類の指示との関係にみるように、これらのような単相関的な関連性は大分前から調べてきたものであるが、品質管理が導入されて工程解析を進められるようになつてからも、同じようにこれらのような単相関的関係のみを求めていた。そのため、キユポラ操業が、このような単純なものでなく、もつと複雑な要因がからみ合つているので、工程解析の結果を広く活用できるような一般的な結論を引き出すに至らなかつた。

最近、各工業分野においての、計算機制御の基礎とするため、複雑な工程での工程解析が進まないことが多く、そのような工程の品質管理が進まないことが問題となり、品質管理の現状打破の１つの手段として、品質管理で普通に用いられている統計的手法よりも、さらに高度な手法を使つて工程解析を進めるようになつた。もつとも、この裏付けとなつたのは、今まで困難とされていた非常に容量の大きい計算でも、電子計算機の発達と普及で何時、どこでも可能になつたことによるのであるが、今まで各工業分野で扱えなかつた複雑な工程に対して多くの要因の影響を同時に扱う多変量解析法をたいした計算遂行上障害もなく簡単に実施できるようになり、成果をあげるようになつてきたからである。

このような各工業分野での動向、とくに製鉄所での実例がでてくるにつれ[13]、極く最近、極く一部の鋳物工場においても、キユポラ操業の溶湯を管理するための工程解析が進められるようになつた。

それらのうち注目すべきものについて、つぎに記述する。

富田らは[14]、キユポラ操業における、溶湯の化学組成の変動に影響する要因を見出すために、４ t/h冷風式キユポラの酸性操業において、最初、溶湯の化学組成、炭素含有量および珪素含有量を特性値とし配合材料、操業条件、キユポラに装備した計測機器類などの３９種類の要因を選び、日常の操業の際、同一目標の溶解をしているとき、１日に５～７回（約１～２時間ごとに）４ケ月分と５ケ月分の集収したデータを用いて重回帰分析を行つた。その結果、溶湯の化学組成に影響することを示した１５種類の要因を用いて、さら

に同様な要領で集収したデータ、１４ケ月分を用い解析を行つた。

表1.1は、そのときの１５の要因を示す。その結果、溶湯の加炭を促進するものとして、スラグ塩基度、加炭を妨げるものとして絶対湿度、コークス水分、スラグを抜いてからサンプリングまでの出湯量、軟鋼板屑の錆および風圧、溶湯の珪素含有量に対して絶対湿度、軟鋼板屑の厚さが珪素損失を促進するということを知り、これらの結果から、溶湯の炭素含有量について、

表１・１　特性値および要因の単位

NO.	特性値、要因	単位
1	炭素変動量	%
2	珪素変動量	%
3	初湯からサンプリングまでの出湯量	t
4	装入後サンプリングまでの出湯回数	回数
5	スラッグを抜いてからサンプリングまでの出湯量	t
6	出湯間隔	600／100秒
7	風圧	mm－Aq
8	絶対湿度	g／m^3
9	コークス灰分	%
10	コークス揮発部	%
11	コークス固定炭素	%
12	コークス水分	%
13	M.S.（軟鋼屑）錆	1)少ない　2)やや有り　3)多い
14	M.S.板　厚	1)厚い　2)適当　3)うすい　4)混合
15	出湯温度	oP（光高温計読み）
16	スラグ塩基度	$CaO+MgO/SiO_2$
17	スラグ中FeO量	%

つぎの回帰式、

$$\triangle C = 1.0363 - 0.02361 x_2 - 0.02654 x_3 - 0.03668 x_4 - 0.03104 x_5 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1 \cdot 1)$$

ここに

$\triangle C = y_C - x_C$：$\triangle C$：キュポラ炉内での炭素変動量、%

y_C：溶湯の実測炭素含有量、%

x_C：装入原量中の炭素含有量計測値、%

x_2：スラグを抜いてからサンプリングまでの出湯量、t

x_3：絶対湿度、g/m³

x_4：コークス中の水分、%

x_5：装入軟鋼板の錆、1) 少ない、2) やや多い、3) 多い の3段階の計数値

を得て、溶湯の炭素含有量に影響する要因を定量的に求め、この回帰式からキュポラ炉内での炭素変動量△Cの推定計算尺を作成し、配合計算の際の△Cの推定を簡単に行えるようにしたいというものである。

このキュポラ操業の工程解析は、溶鉱炉の工程解析の場合と同じやり方で進めている。すなわち、溶鉱炉操業の場合は、操業時間が、キュポラに比べれば無限大と言つてよいほど長く、炉の容量も、例えば1000t／dayの溶鉱炉の能力をキュポラ流に表わせば、42t／hとなり、普通用いるキュポラの容量は溶鉱炉と比べてはるかに小さい。そして、溶鉱炉は、溶湯を炉底に溜め、数時間に1回出湯し、溶湯の化学組成はその間に相当に調整されているが、キュポラの操業中の炉内変動は比較的活発であり、溶湯を炉底に溜まるとしても少量であり、溶湯の化学組成の変化は、溶鉱炉と比べると活発に変化しているものと考えられる。

しかも、キュポラの操業は、1回5～8時間操業をつづければ、操業を中止し、炉壁耐火物を修正して再び新らたに操業を開始することにしている。

この状態のキュポラ操業において、溶鉱炉の操業の工程解析と同じように、

工程解析のための溶湯、スラグの試料採取を1～2時間ごとにとり、1回の操業中の観測データが少くなるが、つぎつぎの操業データをも含めて、多数のデータを用いて解析した場合、操業中の溶湯の化学組成に影響する要因のうち、その間、何回もくり返えされた、各キュポラ操業の操業を通じて解析したことになり、操業中の時々刻々の炉況の変動の要因というより、操業条件の設定に必要な要因のみが把まれ、操業中の化学組成の変化というような短時間で活発な変化を起す原因となる要因をつかまえることは困難と考える。すなわち、キュポラ操業において当然関係のある筈の出湯温度など要因として浮んでいない。キュポラの操業条件の設定ではなく、操業管理の管理項目を選定するためには、解析に用いるデータのとり方について検討し、溶湯の化学組成の変化とその影響を調べる操業管理のための管理項目設定のための諸要因の相互のデータ時差を選定して、データ時差の分だけずらせて解析する必要があると考えられる。

また、杉本は[15]、キュポラ操業の工程解析を進めるのに際し、解析に用いるデータ集収について、1回の操業中、短時間間隔で連続3～4時間試料採取あるいはデータの読みとりを行つている。そして解析には、時差を考えないで観測データをそのまま用いて重回帰分析を行つている。しかし、その結果は、思わしい結果を得ていない。しかし、解析に用いる各データの集収の方法、各要因のデータを得るに際しての試料採取方法、あるいはデータの読みとりの時間間隔について調べるため1分間間隔で、1時間20分の、比較的変動の多い溶湯中の珪素含有量についてのデータをとり、これらのデータに含まれる誤差も考慮してデータの変化模様について、フーリエ級数に展開し、展開の項の数を求めることから、観測に用いた3 t塩基性キュポラの場合、もしデータの誤差 ≤ 0.05 とした場合5.1分間隔でデータをとつてゆけば、比較的変化の活発な溶湯中の珪素の含有量の変化をつかまえることができることを述べているが、キュポラ操業の工程解析のデータの集収間隔を決めるのに参考となつた。

2・4 まとめ

以上述べてきたことをまとめてみると、

(1) 数年という操業期間の溶鉱炉操業では、数時間ごとに炉底に溶湯を溜めながら間欠的に出湯をくりかえているのと比べ、溶湯の品質の、時間の経過による推移をみた場合、キュポラ操業は、連続的に、たえず出湯をつづけながら、1回の操業が、5～8時間と短いが、連続操業をしていると言える。

(2) キュポラ操業には、現在、担当技術者の経験に頼らざるを得ない点もあり、今後、徹底的に工程解析を進めてゆくべきである。

(3) 最近、キュポラ操業の工程解析が進められるようになつたが、その結果を操業管理に全面的に依存できるものはほとんど見られない。

文 献

(1) 日本鋳物協会：キュポラハンドブック（1968）、266

(2) 日本鋳物協会：キュポラハンドブック（1968）、250

(3) E. Piwowarsky：Hochwertiger Gusseisen (1951)、831

(4) H. Jungbluth：Giesserei 26 (1939)、41

(5) W. Patterson, F.Neumann：Giesserei 48 (1961)、3、49

(6) AFS：Cupola and Its Operation (1954)、272

(7) 日本鋳物協会：キュポラハンドブック（1968）、152

(8) 石野：鋳物37（1965）、8、695

(9) 加山、石川：鋳物35（1963）、9別、94

(10) A.Desy, R.Doat, R.Balon, L.Winandy：Foundry Trade. 99 (1955)、2048、629

(11) D.Logothetis：Metallurgie und Schmelitechnik eines wassergekithlten Heisswind—Kupolofens, Dr.-Ing.-Diss, Technische Hochschule Aachen (1959)

(12) 阿部、斉藤、松村：鋳物２８（１９５６）、１１

(13) 日本科学技術連盟：第８回数学計画シンポジウム「鉄鋼業」資料（１９６６）

(14) 富田、福田、吉川、水谷：鋳物３８（１９６６）５、２８９

(15) 杉本：日本鋳物協会キュポラ部会資料（１９６６）、４１－５－１

第３章　キユポラ操業の工程解析の方法について

３．１　緒　　言

キユポラ操業は、キユポラ内において、種々複雑な現象と工程の連続したものであり、数多くの要因がからみあつているものである。しかも、キユポラ操業中、キユポラ周辺においては、時々刻々の炉況を、前章２．３で図１・１によつて述べたように、出湯しつつある溶湯、スラグ、炉頂ガス、送風状況など、肉眼あるいはキユポラに装備された計測機器類の指示によつて推測していないなどするよりほかはないのである。

そこで、キユポラ操業中、炉況の変動に影響を与えている要因を把えようとする場合、炉況そのものを表示するということは困難であるが、各時点における炉況の結果としての溶湯の品質は、出湯する溶湯から試料採取しておき、後に化学分析を行うことによつて知ることができ、同時に、その時点における炉況に関連して変動している計測機器類の読みによつて、炉況の変動に影響を与える要因に関連した因子として扱い、これらの観測データを対比させて検討することは可能である。

このようなことから、キユポラに点火して操業開始後、その回の操業終了までのキユポラ操業中に、一定の短時間間隔毎に、溶湯およびスラグの試料採取し、後に化学分析によつて化学組成を求めたデータ、また溶湯、スラグを試料採取した各時点における、キユポラに装備されている計測機器類の指示の記録から読みとつたデータ、これら各時点の観測データを用いることによつて、キユポラ操業を、一つの工程として考えた場合、工程解析が可能であると考えられる。

キユポラ操業の工程解析においては、キユポラに装備されている計測機器類の時々刻々の指示の読みを、炉況に変動を与える要因に関連のある因子と

考えるとき同時に多数の因子のデータを検討しなくてはならず、いわゆる多変量解析法のうちでも重回帰分析法が適用できれば便利である。各工業分野で広く使用され始めている重回帰分析法の使用例[1][2][3]を調べ、キユポラ操業の工程解析に重回分析法の適用を試み、その有効性を深めた。すなわち、上に述べたような、キユポラ操業中に得た観測データを用いて、キユポラ操業の工程解析を重回帰分析法によつて実施できるかどうかについて検討し、その可能性をつかんだのである。実際に適用してみた場合、つぎに問題が生じたのは、観測データ相互間の時差が存在しているため、観測されたそのままのデータからは、冶金技術的に考えて、当然選定されるべき因子の極く一部しか、解析の結果を見出すことができなかつた。

すなわち、キユポラ操業中、炉況にある程度の変化が起つたという仮想の時点を基として、その変化の影響が、もし関係があるならば入手した各観測データのそれぞれに変化が現われる時点は、多少の時間のおくれを生じてくるであろうことは当然である。すなわち、観測データ相互に時差があるため、解析の結果が不十分であつたと考えられた。そこで、これらの各観測データ相互の時差を把み、それらの時差の分だけ、各観測データの観測時間をずらせたデータを用いて重回帰分析法によつて解析して始めて炉況の変化に関係するいくつかの要因の種々の因子を選定できると共に、それらの関係を定量的に知ることができることを見出した[4]。

このような各観測データ相互間の時差の選定については、時差相関分析法、時差重回帰分析法など種々試みたが、観測データを得るに至るまでの炉況についての冶金技術、ならびに計測技術的な考慮を払いながら、これらの統計的方法を進める必要があることを知つた[5]。

キユポラ操業の工程解析を進めるについては、上にかかげた、キユポラの定常操業状態における炉況の変動に関係する要因を見出すことと、つぎに重要なことは、キユポラ操業中炉況に変化が積み重なり、以前の状態に復すことが困難となつた場合、送風量を増すとか、熱風温度を高めるとか、あるい

は送風中に酸素ガスを添加するなど急速に、何等かの強力な処置を与える、すなわちアクションを与えることによつて炉況を修正する方法を確立しておき、キユポラの操業管理に使うことを考えるべきであるが、このようなアクションを実施することによつて起される炉況への影響を定量的に把むための解析も行うべきと考える。

なお、キユポラ操業の工程解析の実際については、第2編に述べることとする。

キユポラ操業において、炉況の変動の要因については、明確に確立されているとは言えず、強いて現在考えられる要因をかかげるならば、図1・2のような特性要因図が考えられる。しかし、本編第2章2・3の図1・1にみるように、これらの要因のうち、計測機器類の指示によつて、計量値として把むことができるものもあるが、測定に時間を要するものもあり、また、キユポラの炉前で、監視している技術者の官能によつて判断し、計数値としてしか把み得ないものもある。

また、これらの要因は、それぞれ独立して、単独に関係しているものではなく、相互に関係していることもあり得る。

そこで、操業中のキユポラの周辺で、炉況の変動に関係している要因そのものと言うより、炉況の変動に関係している要因と関連した、計測機器類の読みを因子と呼び、炉況の変動に関係している要因と関連した因子を、操業中のキユポラに装備した計測機器類からの観測データのなかから選定することを目的として、工程解析を進めることとした。

このようなキユポラ操業の工程解析を進めるに際しては、明白に、炉況の変動に影響を与えられる事柄は、一定とするように努め、実験操業を実施した。すなわち、その最も大きいと考えられるものは、装入物からくる変動である。そこで装入物の品質、寸法、形状、1回の装入量、装入方法を一定とするように努め、その他の操業条件も一定とするように努めた。

3．2　キユポラ操業の工程解析のためのデータの収集

キユポラ操業において、炉況の変動の要因については、明確に確立されているとは言えず、強いて現在考えられる要因をかかげるならば、図1．2のような特性要因図が考えられる。しかし、本編第2章2．3の図1．1にみるように、これらの要因のうち、計測機器類の指示によつて、計量値として把むことができるものもあるが、測定に時間を要するものもあり、また、キユポラの炉前で、監視している技術者の官能によつて判断し、計数値としてしか把み得ないものもある。

また、これらの要因は、それぞれ独立して、単独に関係しているものではなく、相互に関係していることもあり得る。

そこで、操業中のキユポラの周辺で、炉況の変動に関係している要因そのものと言うより、炉況の変動に関係している要因と関連した、計測機器類の読みを因子と呼び、炉況の変動に関係している要因と関連した因子を、操業中のキユポラに装備した計測機器類からの観測データのなかから選定することを目的として、工程解析を進めることとした。

このようなキユポラ操業の工程解析を進めるに際しては、明白に、炉況の変動に影響を与えると考えられる事柄は、一定とするように努め、実験操業を実施した。すなわち、その最も大きいと考えられるものは、装入物からくる変動である。そこで装入物の品質、寸法、形状、1回の装入量、装入方法を一定とするように努め、その他の操業条件も一定とするように努めた。

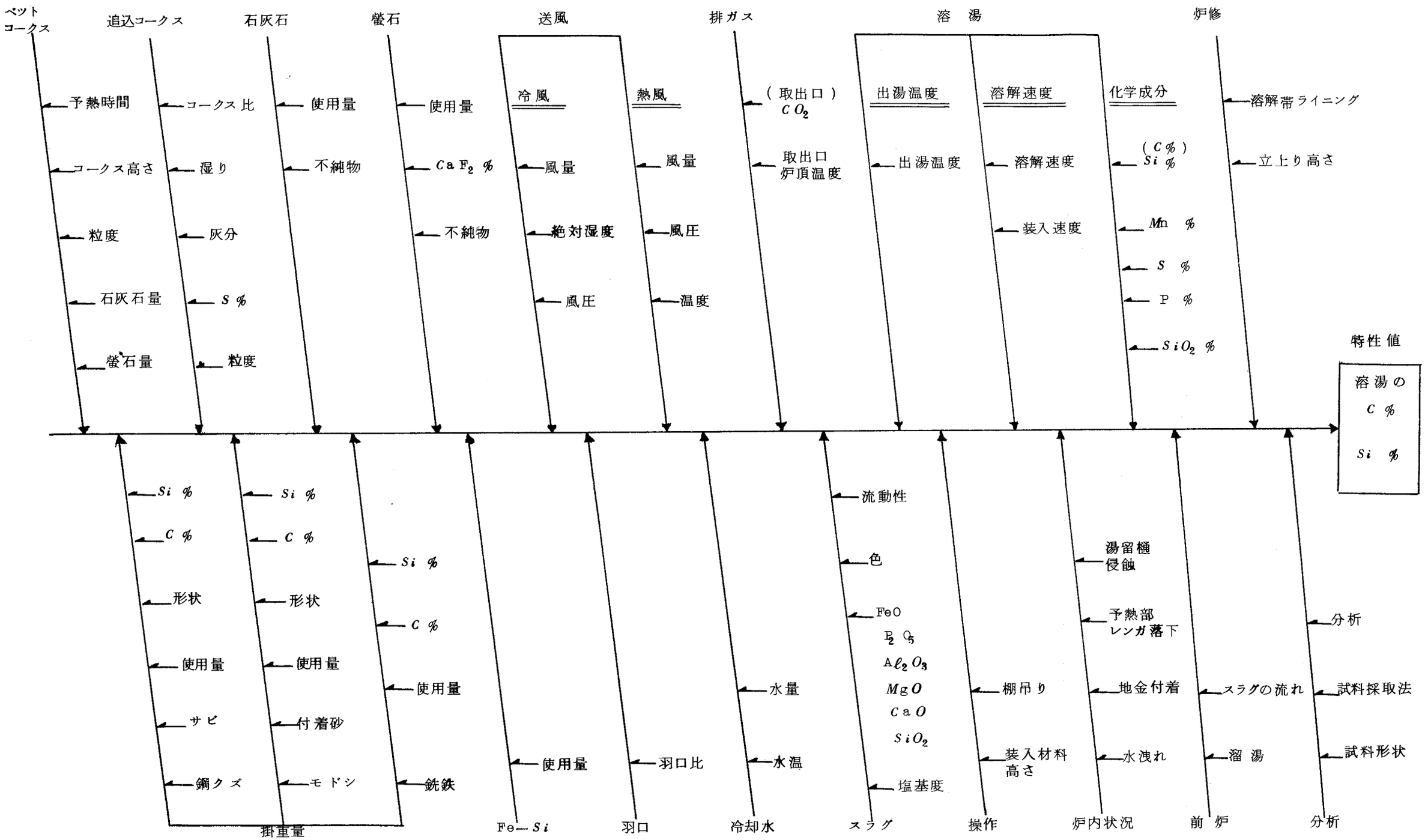


図 1.2 キュポラ操業の特性要因図

このような条件のもとに、工程解析をしようとする対象とするキュポラの操業中、炉況の変動の要因に関連をもつ因子と考えられるもので、計量値として、炉前に迅速に得ることのできる観測データをすべて収集し、それらのなかから、どの因子が炉況判断に有効であるかをつきとめることとした。

そこで、観測データの収集は、対象とするキュポラ操業中、キュポラの周辺において、ある時間にわたつて、短時間間隔で、出湯口において溶湯の試料採取をすると同時に出滓口において試料採取し、後にそれらを化学分析することによつて化学組成のデータを得ると共に、操業中キュポラに装備されている計測機器類の連続記録をしている記録紙に、記録紙の移動の不円滑による時間的誤差の混入を防止するため３０分毎に、各記録紙に該当時間を記入しておき、操業後、これらの記録紙から、溶湯、スラグの試料採取と同じ時間の計測機器類の指示を読みとつた。なお、記録紙の読みとりには、それらの読みとりの短時間間隔の指示の平均値を求めてデータとした。

なお、観測データをとりつづける時間は、あとで統計的方法で解析をするのに各観測データの数が十分余裕があるように２ないし３時間にわたつてつづけてとることとした。

試料採取およびデータの読みとりの短時間間隔は、数回の予備実験の結果、また本編第２章２・４の杉本の提案もあり、炉況の状況を忠実にかつ十分に伝え、影響するおそれのある装入時間の周期的変動の混入を極力防止するため、２分間隔としたが妥当なものと考えている[6]。

これらの観測データは、キュポラ操業中の炉況の変動の要因に関係のある因子と考えられるものであり、その都度の使用したキュポラの装備状況、また操業実験の目的によつて多少異るが、多くの場合図１・３のような因子を採用した。

また、図１・４に示すように、これらの観測データ、すなわち因子は、炉頂ガスの温度、炉頂ガスの化学組成、熱風圧力、溶湯の温度など炉況の模様を単に伝えるだけでけのものを情報因子と呼び、送風量、熱風温度、スラグ

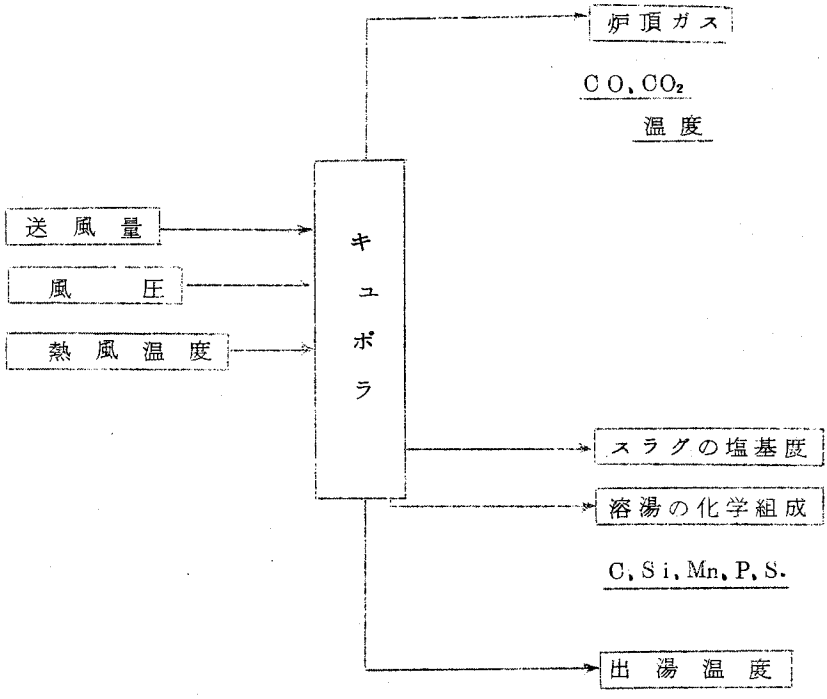


図1．3　要因説明図

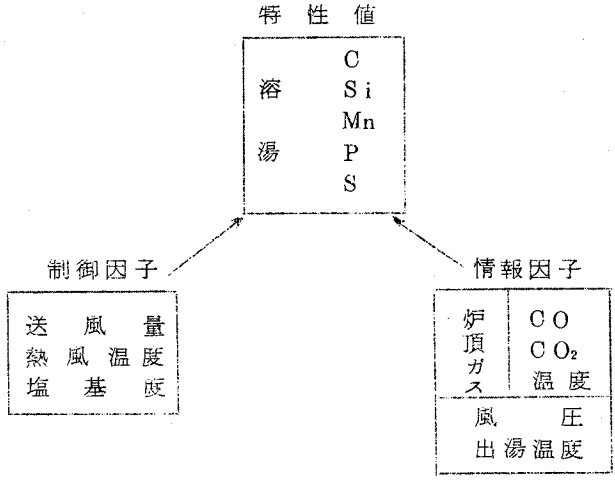


図1・4　各因子の分類

の化学組成、あるいは塩基度などは、これらが変化することにより、あるいは変化させることにより、炉況が大きく変化する可能性があるものであり、これらは、情報因子でもあるが、とくに制御因子と呼ぶこととした。

3．3　キュポラ操業の工程解析に重回帰分析法の適用

キュポラ操業で得られる観測データを用いて工程解析を行なおうとする際、多変量解析法のうちで、よく用いられる重回帰分析法を適用しようとする場合、多くの観測データを従属変数と独立変数とに分けて進めなければならない。

キュポラ操業の性質から、炉況の結果としての溶湯の化学組成、それらの1つ1つの成分を選んでそれぞれ従属変数とし、同時にとつたスラグの化学組成をはじめ、キュポラに装備された計測機器類などの観測データをそれぞれ独立変数とするのが順当と考えられる。

重回帰分析法は[7]、従属変数とする溶湯の化学組成は、炭素、珪素、マンガン含有量などいくつかあり、それらをy_1．y_2，……，y_j，……y_qとし、独立変数とするスラグの化学組成、キュポラに装備した各計測機器類による観測データをx_1，x_2，……，x_i，……，x_pとした場合、従属変数y_jについて、

$$y_j = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots\cdots + \beta_i x_i + \cdots\cdots + \beta_p x_p + \varepsilon \quad \cdots\cdots (1.2)$$

ここに、$i = 1$、2、……、P、　$j = 1$、2、……、q

β_0は常数

β_i：従属変数y_jの場合の独立変数x_iに対する偏回帰係数

ε：正規分布N（0、σ）で変動する誤差、

なる構造式を考え、キュポラ操業中、ある一定の期間を決め、同時に、従属変数およびp種の独立変数に相当する表1．2のような観測データをそれぞ

れt個用いる。また、この表の中のmは、解析のため選定した区間のデータで、m＝1.2……、tとする。

表1－2　観測データの記号

観測時番号	従属変数			独立変数		
	y_1, y_2 ……	y_j, ……	y_q	x_1, x_2, ……	x_i, ……	x_p,
1	y_{11}, y_{21},	y_{j_1},	y_{q_1},	x_{11}, x_{21},	x_{i_1},	x_{p_1},
2	y_{12}, y_{22},	y_{j_2},	y_{q_2},	x_{12}, x_{22},	x_{i_2}	x_{p_2}
m	y_{1m}, y_{2m} ……	$, y_{jm},$	$, y_{qm},$	$x_{1m}, x_{2m},$ ……	$, x_{im},$ ……	$, x_{pm},$
t	$y_{1t}, y_{2t},$ ……	$, y_{jt},$ ……	$, y_{qt},$	$x_{1t}, x_{2t},$ ……	$, x_{it},$ ……	$, x_{pt},$

つぎに、これらの観測データを用い、（1・2）式の常数および偏回帰係数β_iをそれぞれ推定し、これらの推定値b_iを求める。その求め方は、いまm番目の時点の観測データをy_{jm}，x_{1m}，x_{2m}，……，x_{pm}とし、そのときの残差は、$y_{jm} - (b_0 + b_1 x_{1m} + b_2 x_{2m} + \cdots\cdots + b_p x_{pm})$となるから、観測データ全体に対しての残差平方和、

$$S = \sum_{m=1}^{t} \{ y_{jm} - (b_0 + b_1 x_{1m} + b_2 x_{2m} + \cdots\cdots + b_p x_{pm}) \} \quad \cdots\cdots (1.3)$$

を最小となるようなb_iを算出して推定値とするのである。

そこで、従属変数に対してP種の独立変数のうち関係の深いものがあれば、

該当する独立変数x_{im}に対する偏回帰係数βiの推定値b_iは、それらの積$b_i \times x_{im}$が、従属変数y_{jm}に影響する程度の値をとることになる筈である。反対に相互の関係が非常に薄い場合には、逆に偏回帰係数の推定値は、従属変数にほとんど影響しないような小さな値をとることになる筈である。

このようなP種の独立変数のうち、ある独立変数x_iの偏回帰係数の推定値b_iが、従属変数に影響を与えるような数値であるか否かを判定するため、

$$t_{b_i} = \frac{b_i}{\sqrt{V_{b_i}}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.4)$$

ここに、V_{b_i}：b_iの分散

によつて、帰無仮説$\beta_i = 0$、対立仮説$\beta_i \neq 0$として、選定した有意水準（第2編の工程解析の実際では1％、5％）におけるt検定を行い、有意となるかどうかを調べ、有意となるような独立変数、すなわち因子を見出そうとするのである。

元来、回帰分析は、独立変数と従属変数との間の関係を説明するため、回帰式をつくり、独立変数にデータを代入して従属変数を求め、予測をするのに用いられる。

しかし、キユポラ操業で得られるような観測データを用いて、このような回帰分析を進めることは、単に、情報因子、あるいは制御因子を独立変数として、得られた回帰式によつて従属変数としての、工程の特性値である、観測データを収集した時期の溶湯の化学組成を予測することだけではない。その以前に、つぎに述べるような役割りがあると考えられる。

すなわち、現在のところ、キユポラ操業で得られる観測データから、各特性値と個々の情報因子、あるいは制御因子との間の関係は、多くの場合、既に第1編第2章2・3に述べたように、今までの研究成果として、ほとんど単相関の形で、定量的に見出せていることもあり、見出すに至つてないまでも傾向を把んでいるだけである。そこで、種々の因子のうち、どの因子とどの因子が、相互に関連しながら、結果として従属変数としての特性値に関係

しているか、それらの定量的関係についてはわかつていないと言つてよい状態である。

もしそれらの因子とそれらの相互関係がはつきりしているならば、それらの因子についての各観測データを用い、重回帰分析を実施することにより、回帰式を得て、その回帰式から、上に述べたように、必要のある任意の時期に、各因子についての観測データを収集することにより、それらのデータから、その時期の特性値である溶湯の化学組成を予測できる。しかし、はじめは、特性と関係のある因子がわかつていない。そこで、その前に、関係があろうと思われる因子の観測データを用いて、重回帰分析を実施し、求められた各因子の、それぞれの独立変数に対する偏回帰係数に注目し、各偏回帰係数の１つ１つについて調査し、その偏回帰係数が属する独立変数としている因子が、他因子の存在しているもとで、従属変数である特性値を予測するために存在する意味があるかどうかを見とどけることが重要である。実際には、上記のようにｔ検定によつて見出すのである。このようなことから、個々の単相関関係だけでは見出せなかつた、従属変数を予測するために、他の因子との関連の下での、各因子の存在価値を判定してゆくことは、言いかえれば、キユポラ操業で得られる観測データのような、複雑な要因が、からみ合つている工程の工程解析において、それらの要因を見出す解析手段ともなると考えることができる。したがつて、上記式（１．４）によつて有意となつた偏回帰係数が属する独立変数とした因子は、他因子の存在の下で、従属変数、すなわち、特性値に影響がある因子であると言えるのである。

すなわち、このようにして、溶湯の化学組成に影響する因子を見出すことから、炉況の変動に影響を及ぼす要因を見出すことが可能となつてくる。

キユポラ操業で得た観測データを用いて重回帰分析法によつて解析を進めてみると、その結果が、余りにも突飛な因子が有意となつたり、偏回帰係数が正になる筈が負になつていたりすることがあり、また同様の操業で得た観測データを用いて解析をくり返えしたとき、結果が常に一致しないことが多

かつた。その原因を検討したところ、観測データ相互に時差があり、それが原因となつているのではないかということに気付いた。

観測データ相互の時差は、キユポラ操業の性格として、炉況のある程度の変化が起つてから、影響を受けた溶湯は炉内を満下して炉底にとどき出湯されるまでの時間、あるいは、送風関係の影響が炉況に及ぼすにいたる時間、さらに炉況の変化が、炉頂ガスに影響を与えるまでの時間などや、それらが計測機器類に影響が現われる時間など、かなりの時間を要することが考えられ、これらは個々のキユポラの構造、容量、あるいは計測機器類の装備場所、装備方法、計測機器類の特性などによつて各観測データごとにこれらが、加わつたり、相殺されてそれぞれ個々の特有の時差を各観測データがもつのは当然起るべきことである。

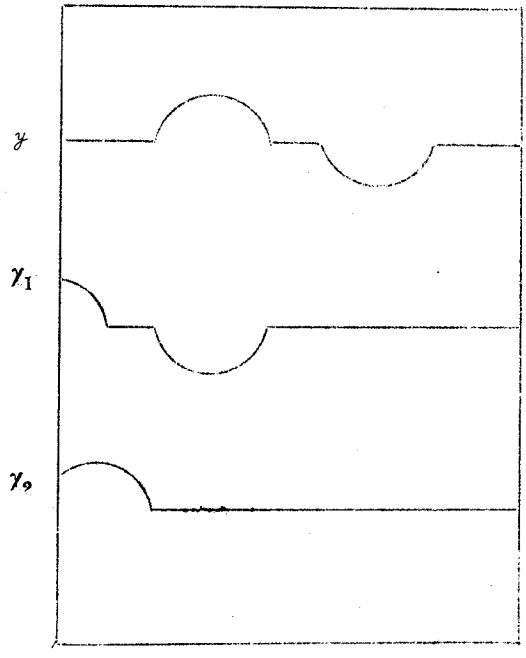
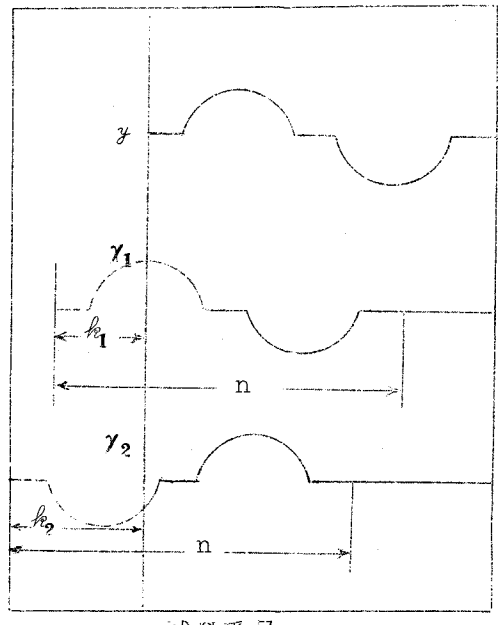
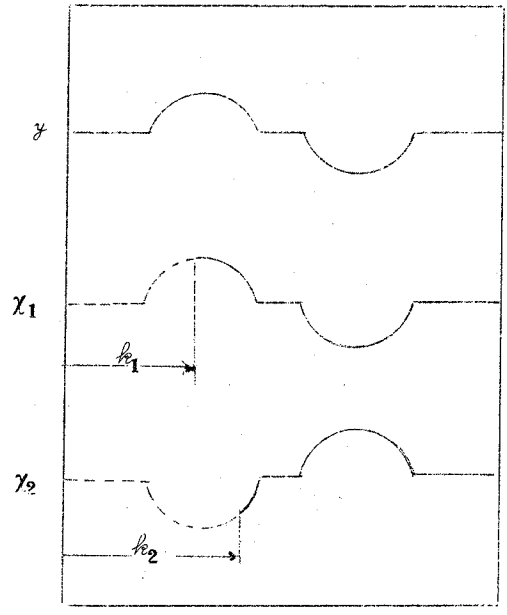


図 1．5－a 各原始観測データをn個づつ区切つたもの



試料番号

図　1．5－b　観測データの γ_1 , γ_2 に対してn個区切る以前の h_1 および h_2 個分さかのぼつたもの



試料番号n

図　1．5－C　観測データの γ_1 および γ_2 について h_1 および h_2 個ずらせて y_2 とそろえたもの

そこで抽象的な図で説明すると観測データ相互に、当然個々の時差が存在するにも拘らず、図１．５－ａに図示するように、観測データy、x_1およびx_2について同時に観測したｔ個づつのデータを区切つて、重回帰分析法によつて解析した場合、あまりはつきりした結果が得られなかつたとしよう。

つぎに、図１．５－ｂに示すようにx_1, x_2のデータを、yのデータと一緒に区切り始める以前にさかのぼつて調べてみた場合、点線で延長して示したように、それぞれk_1およびk_2個分さかのぼると、yと相関関係があることがわかり、図１．５－ｃに示すように、yに対してx_1，x_2はそれぞれk_1，k_2個データを右の方にずらせて、それらを、あらためてｔ個分区切つたもので重回帰分析法によつて解析すれば、それらの関係は明確に出てくるであろうことが了解できるであろう。

上に述べた、観測データyに対してx_1，x_2を、それぞれk_1およびk_2個分さかのぼらせると、yと相関関係があることを見出すのには、時差相関分析法、時差重回帰分析法など時差を求める方法があるが、この問題については、つぎの３．３に述べる。

また、上に述べている、重回帰分析法によつて、図１．４－ｃのように、yに対して、x_1，x_2のデータをずらせるとき、解析がうまく行つたかどうかについては、統計的な判断に、冶金技術的判断も加えて決論するべきであるが、統計的な判断をする方法としては、その重回帰分析をした際の重相関係数を求めて、もし、yとx_1，x_2の間に関連性が存在している場合には、x_1，x_2のデータをずらせながら重相関係数が最大になるように注目して進める。

ここで重相関係数Ｒは、一般に、従属変数y_j，独立変数x_1，x_2……、x_pとすると、

$$R=\sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{t}(\hat{y}_{jm}-\overline{y_j})^2}{\sum_{m=1}^{t}(y_{jm}-\overline{y_j})^2}}=\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\quad(1.5)$$

ここに、$\hat{y}_{jm}$：y_jの推定値$\hat{y}_{jm}=b_0+b_1x_{1m}+b_2x_{2m}+\cdots\cdots b_px_{pm}$

$\overline{y_j}$：y_jの平均値

である[8]。

なお、この重相関係数Rの2乗のR^2を寄与率と呼んでいる。また重回帰分析の結果の信頼性を確かめるには、これらの重相関係数、あるいは寄与率を調べると共に、重回帰分析によつて得られた回帰式の、回帰による平方和と回帰からの平方和を用いて、分散分析をしてみることも必要である。

3．4　観測データ相互の時差の選定方法

観測データ相互の時差を求める方法として、最も一般的な方法は時差相関分析法[4]、[6]である。

すなわち、時差を求めようとする2つの時系列データ、たとえば、溶湯の炭素含有量と炉頂ガスの炭酸ガス含有量の観測データなど、y_{j1}、y_{j2}、……、y_{jm}、……、y_{jt}：x_{j1}、x_{j2}、……、x_{im}……、x_{it}について、これらのデータを全部用いて同時に相関係数を求めた場合をrとすると、図1．6のように

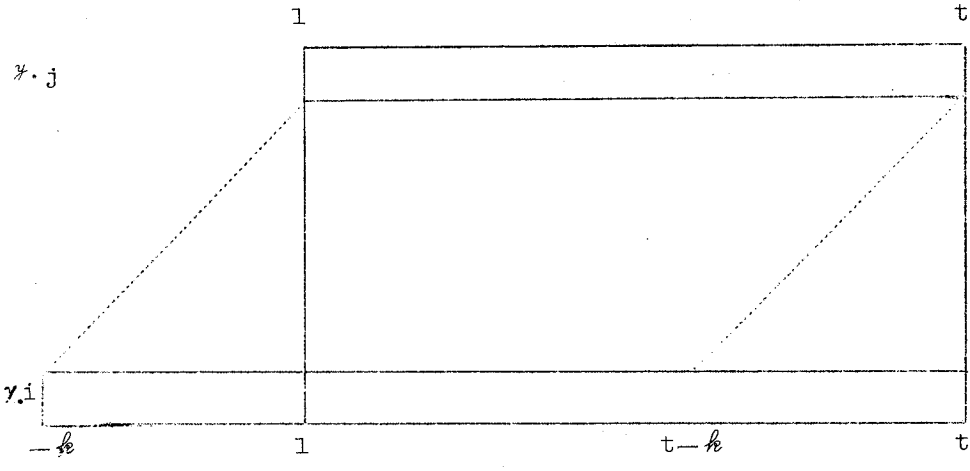


図 1．6　　時差相関に用いたデータのずらし方

時差をkとして、y_{tj}に対してk時点前のデータ$x_{t-k,i}$とを対応させた場合の時差相関係数r_kは、

$$r_k = \frac{\sum_{m=-k}^{t-k} (x_{im}-\bar{x}_i) \sum_{m=1}^{t} (y_{jm}-\bar{y}_j)}{\sqrt{\{\sum_{m=-k}^{t-k} (x_{im}-\bar{x}_i)^2\}\{\sum_{m=1}^{t} (y_{jm}-\bar{y}_j)^2\}}} \quad \cdots\cdots\cdots (1.6)$$

ここに、

$$\bar{x}_i = \frac{1}{t} \sum_{m=-k}^{t-k} x_{im}$$

$$\bar{y}_j = \frac{1}{t} \sum_{m=1}^{t} y_{jm}$$

によつて求められ、意味のある大きな相関係数の現われた場合の時間の差をもつて、この場合の時差とする。

第2編第2章に述べるような、半還元鉱を主原料とした熱風キユポラ操業の場合のような、結果からみて活発な炉内反応が行われていると考えられる場合には、観測データの変化もかなりあり、単相関を用いた時差相関分析法を用いて、あとで行う重回帰分析法に必要とする観測データ相互の時差をそれぞれ求めることができた(6)。

しかし、一般に行われているような、銑鉄、鋼などを主原料としたキユポラ操業では、この時差相関分析法では、時差を求めることは困難であつた。例として、鋼を主原料として熱風キユポラ操業をした場合にとつた観測データの変化は比較的小さく、少ないということから時差相関係数を求めてみると、図1・7のように変化に富み、明確な相関関係を得られず時差を選定することができないことが多かつた(5)。

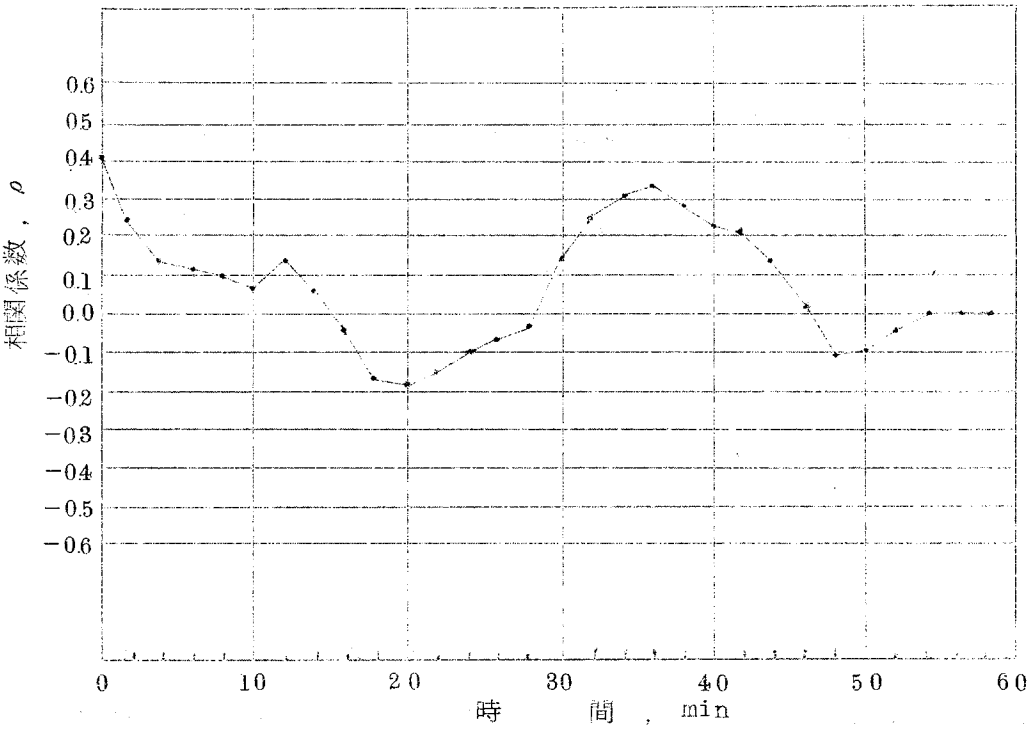


図 1．7　　時差相関の一例

時差を求めるのに、つぎに考えられるのは時差重回帰分析法である[5]、[9]。すなわち、時差を求めようとする観測データを考えようとするとき、あとの重回帰分析法で解析を行う場合、従属変数として扱う観測データは、独立変数として扱う、いくつかの観測データに起つている変動が給合されたものであると考える場合、計算の容量が非常に大きくなるが、独立変数とする各観測データについて時差0から、考え得る時差を十分含められるように、単位時間づつずらせたデータを全部一ぺんに重回帰分析法で解析し、偏回帰係数が有意となり、しかも最も大きくなるずらせたデータの時差を、適正な時差としようとするものである。

いま観測データのうち、従属変数として扱う1つを y_j とし、独立変数として扱うものを x_1、x_2、……、x_p とした場合、図1．8のように独立

変数とした各データの単位時間ごとにずらせたもので、

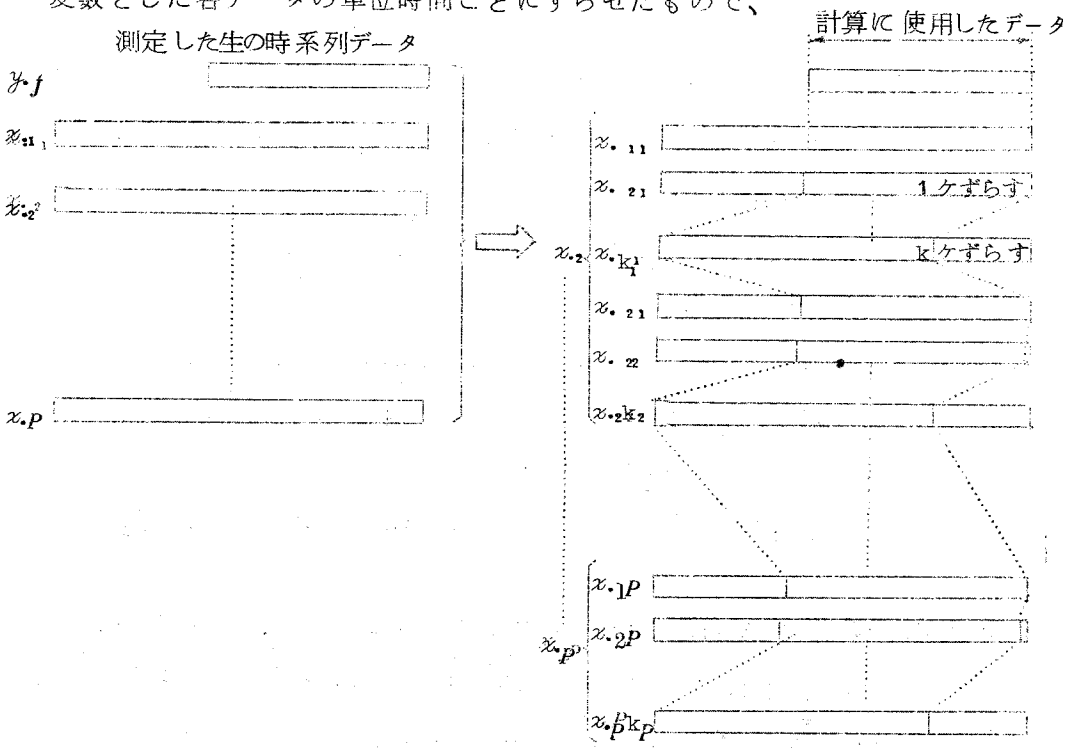


図　1．8　時差重回帰分析に用いたデータのそろえ方

x_1について、　x_{11}、x_{12}、……、$x_{1\cdot t-k}$

x_{12}、x_{13}、……、$x_{1\cdot t-k+1}$

……

$x_{1\cdot k+1}$、$x_{1\cdot k+2}$、……、x_{1t}

x_2について、x_{21}、x_{22}、……、$x_{2\cdot t-k}$

x_{22}、x_{23}……、$x_{2\cdot t-k+1}$

……

$x_{2\cdot k+1}$、$x_{2\cdot k+2}$、……、x_{2t}

……

x_pについて、x_{p_1}、x_{p_2}、……、$x_{p\cdot t-k}$

x_{p_2}、x_{p_3}、……、$x_{p\cdot t-k+1}$

……

$x_{p \cdot k+1}$、$x_{p \cdot k+2}$、……………、x_{pt}

ができ、これら全部を含めた構造式、

$$
\begin{aligned}
y_j = {} & \beta_0 + \beta_{1-(1)} x_{1-(1)} + \beta_{1-(2)} x_{1-(2)} + \cdots\cdots + \beta_{1-(k+1)} \\
& x_{1-(k+1)} \\
& + \beta_{2-(1)} x_{2-(1)} + \beta_{2-(2)} x_{2-(2)} + \cdots\cdots + \beta_{2-(k+1)} \\
& x_{2-(k+1)} \\
& + \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
& + \beta_{p-(1)} x_{p-(1)} + \beta_{p-(2)} x_{p-(2)} + \cdots\cdots + \beta_{p-(k+1)} \\
& x_{p-(k+1)} \\
& + \varepsilon \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.7)
\end{aligned}
$$

ここに、$x_{1-(1)}$ の単位時間づつずらせたデータを $x_{1-(2)}$、……………、

$x_{1-(k+1)}$ ：$x_{2-(1)}$ の単位時間づつずらせたデータを $x_{2-(2)}$、

………、$x_{2-(k+1)}$、…………とする。

β_0 ：常数

$\beta_{1-(1)}$、$\beta_{1-(2)}$、………、$\beta_{1-(k+1)}$、…………：偏回帰係数

ε ：正規分布N（0、σ^2）をする誤差

を考え、最小自棄法によつて偏回帰係数を求め、t検定によつて意味のある偏回帰係数を示す観測データとなつた因子と時差を選定しようとするものである。

この方法によつて、鋼材を主原料として熱風キユポラで操業している場合にとつた観測データについて計算した1例を図1・9に示す。この図に示すような、適当な時差の偏回帰係数を見出せないことがたびたび起つたが、この図からわかるように時差を選定しにくかつた。

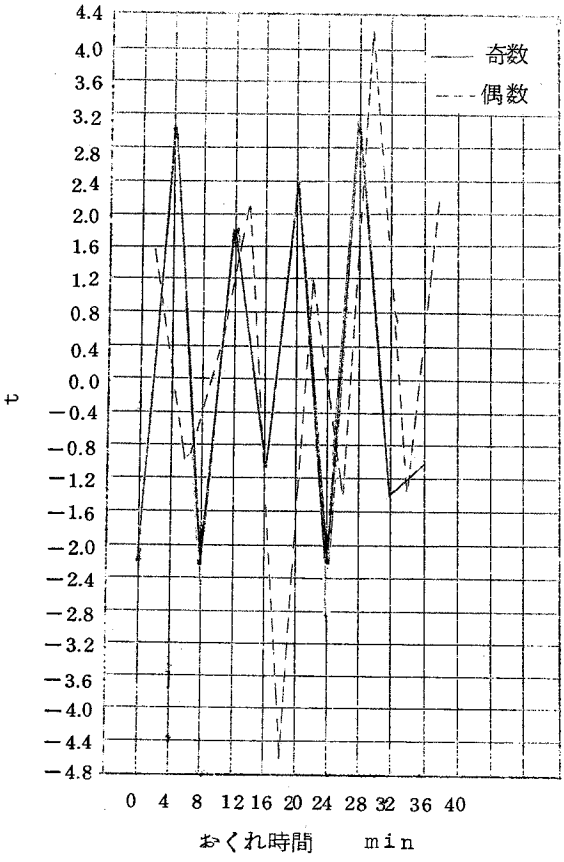


図１．９　時差重回帰分折結果の一例

この計算を行うとき、計算の容量が大きくなりすぎるので、電子計算機の容量から各観測データの奇数番目のものと偶数番目のものと２つに分けて計算したが、キユポラ操業の特徴として、炉況は観測データの収集間隔である２分とか観測データを１つおきにとりあげた４分という短時間で急に変化するものではなく、ある程度のゆるやかさをもつて変化が起るものと考えられるが、図１．９でみるように、観測データの奇数番目と偶数番目のものの計算結果が近似の傾向がみられるのを期待したが、実際の計算の結果では、双方が全然別な結果となつていることがあつた。

このような思わぬ結果がでる原因として、まず、いま扱つているデータは、時間の進歩と共にとつた、いわゆる時系列データとも呼ばれるものであり、

時間の進歩と共に、考えていない、周期的変動が混入しているかどうかについて、ランダム変動の解析を行つてみたが、有意とはならなかつた。つぎにデータの測定によつて計算をする前に、予め観測データの誤差を丸めることを考えた。今扱つているような時系列データの誤差を丸める方法としては、移動平均法が一般に使われる(5)、(10)。

移動平均法は、一連の時系列データ x_{1i}、x_{2i}、x_{3i}、……、x_{mi}、……、x_{ti} に対して、連続 $2\ell+1$ 個の移動平均値をとつてゆくとすると、この時系列データは、

$$a_{\ell+1}=\frac{1}{2\ell+1}\ (x_{1i}+x_{2i}+\cdots\cdots+x_{\ell+1\cdot i})$$

$$a_{\ell+2}=\frac{1}{2\ell+1}\ (x_{2i}+x_{3i}+\cdots\cdots+x_{\ell+2\cdot i})$$

……

$$a_{t-\ell}=\frac{1}{2\ell+1}\ (x_{t-2\ell}+x_{t-2\ell+1\cdot i}+\cdots\cdots+x_{ti}) \qquad \cdots\cdots (1.8)$$

によつて $a_{\ell+1}$、$a_{\ell+2}$、……、$a_{t-\ell}$ という時系列データに転換できる。

例として鋼材を主原料とする熱風キユポラ操業でとつた溶湯の観測データに ℓ を1と3とした場合の移動平均を実施した結果を図1・10に示す。

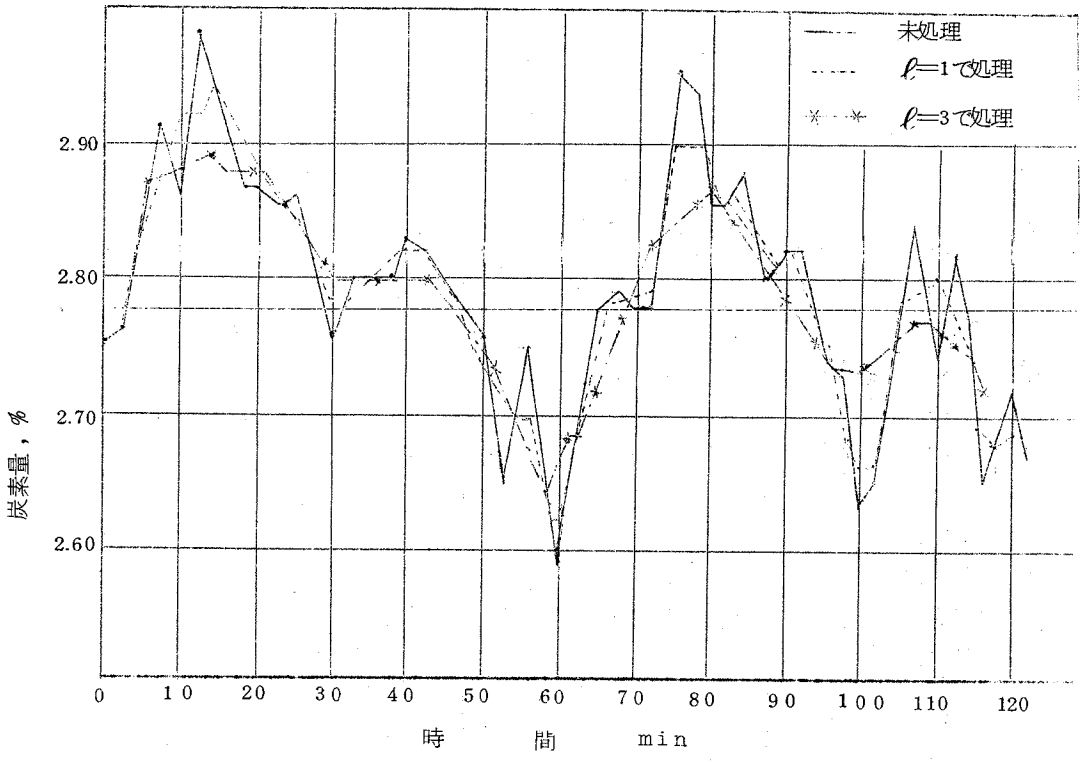


図１．１０　移動平均の計算結果の一例

移動平均法は、平均値の求め方に式（１・８）に示すような単純移動平均値を求めてゆく方法と多項式を用いた加重移動平均値を求めてゆく方法とがあるが、すでに結果がわかつているキユポラ操業の観測データについて、この平均値の求め方とℓにいろいろな値をとつて試みたところ、平均値は、単純移動平均値でよく、ℓの値は、普通のキユポラ操業ではℓ＝３としたときが最も適していることを確認した[11]。

そこで、前の時差相関分析法および時差回帰分析法で思わしい結果を得られなかつた観測データに、この移動平均法を用いて平滑化し、時差を求めるため計算をやり直してみたがやはり以前と同様に思わしい結果が得られなかつた。

このような思わしい結果が得られなかつたことから、図１・１１に図示するようなモデルデータを作り、これらのデータを用いて時差重回帰分析法で

計算してみて問題点をさぐつてみることにした。

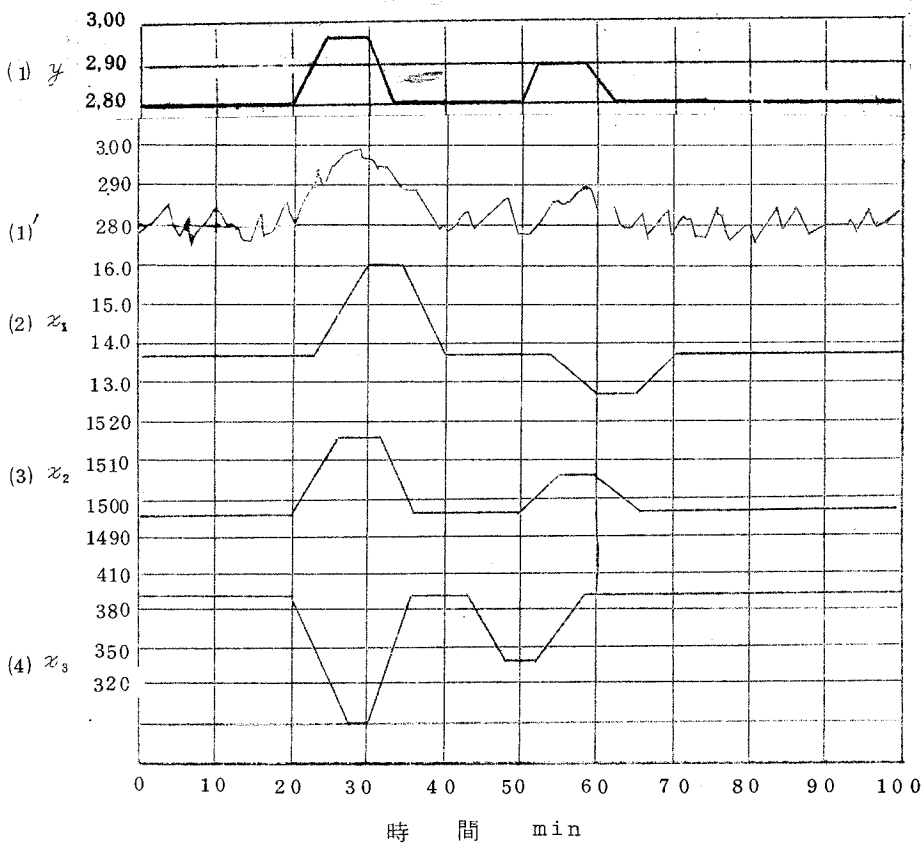


図１．１１　シユミレーションデータ図

これらのデータは、図１・１１の(1)、(2)、(3)および(4)のように、誤差からくるバラツキの入らないデータの全部に、キユポラ操業の観測データで得られる程度のバラツキを加えたものについても計算を試みた。

いづれのデータでも、変動が既知のデータであるが、これらのようなデータを用いて時差重回帰分析法によつて計算した結果も先程経験したように思わしい結果を得られなかつた。

そこで、その原因を追究するため、計算した過程を調査してみると、計算中に、ある行列に、いわゆる「ケタ落ち」が起きていることが認められた。

一般に、最小自乗法による重回帰分析の欠陥として、
独立変数が多いほど、独立変数相互間の相関関係が影響して偏回帰係数の推定を妨害することが知られている[12]。とくに時差重回帰分析法においては、図1・8からわかるように、同じ観測データを単位時間ごとにずらせた相関性の強いデータを幾組か同時に扱うことになるのである。

このような現象は、今のモデルデータなど極端な変動が含まれていないとしても、同様な傾向があつたものと思われる。

キユポラ操業にとつた観測データを用い、時差重回帰分析法を用い時差を選定することは困難であることがわかつたので、キユポラ操業の観測データに適した時差の選定のための手順について種々検討を行つた。

元来、キユポラ操業において炉況に急激な変化が起つたとしても観測データにそれが現われるときは、短時間間隔でとつている時系列データの場合、急にある時点のデータだけが変化するのではなく、多少のゆるやかさをもつて、データの読みとり時間の間隔によるが、数個のデータに変化が見られるのが普通である。いい方を変えるとそのようになるよう、データの読みとり時間間隔を考えるべきである。

そこで、キユポラ操業の工程解析の手順として、

(1) 予め用いる全部の観測データについて、移動平均法によつて、$\ell = 3$としてデータを平滑化する。

(2) 対象としたキユポラの操業状況、観測データの性状、冶金技術および計測技術からみて、従属変数とするデータに対する独立変数とする各データの時差の起り得る範囲を十分にとつた、時差を見出すための、データをずらす範囲を想定する。

(3) 想定したデータをずらす範囲で、最初は大きくずらせながら、考え得る各観測データの時差の組合せを種々作り、それらについて重回帰分析法によつて計算し、偏回帰係数のt値およびその符号に注目し、冶金技術的にも注意してみる。

(4) 各偏回帰係数のｔ値の変化に注目しているうちに、有意となつたものが出た場合、その因子のデータについては、その前後で細かくずらせて重回帰分析法をくり返えす。また他の有意にならないものについてもずらしてみて、同時に重相関係数が最大となるように留意する。

(5) 以上をくり返えすことによつて、最終的に行われた結果が適当した時差であり、解析結果である。

この手順は手数がかかるようにみえるが、電子計算機の普及のおかげで、それほど煩雑ではない。第２編のキユポラ操業の工程解析の実施には、ほとんどこの方法をとつた。

３．５ ま と め

以上述べてきたことをまとめてみると、

(1) キユポラ操業中、収集する観測データについて、炉況の変動の要因に関係のある因子について情報因子と制御因子とに分けて呼ぶこととし、データの収集は、他の影響を防ぎ、炉況の状況を忠実に把めるよう２分間隔でとり、統計的方法で解析するに十分なように２ないし３時間にわたつてつづけてとることとした。

(2) 工程解析には重回帰分析を用いることとした。

(3) 観測データ相互の時差の選定について考察し、キユポラ操業の工程解析に適した手順を選定した。

文 献

(1) 高津：第１回工程解析研究討論会資料「機械工業における工程解析の一例」日本科学技術連盟（１９６６）

(2) 小西：第１回工程解析研究討論会資料「染色工業における重回帰の応用例」日本科学技術連盟（１９６５）

(3) 柳田、熊谷：第１回工程解析研究討論会資料「キユポラ溶解操業えの

多重回帰分析の適用」日本科学技術連盟（１９６６）

(4) 吉村、栗原、牧口：鋳物３８（１９６６）、４、４６（予報）

(5) 吉村、栗原、笹原、山中：鋳物４０（１９６８）、６、５０１

(6) 吉村、栗原、牧口：鋳物３９（１９６７）、５、３９３

(7) 円山由次郎：需要予測と時系列分析（１９６３）、２１９

(8) 円山由次郎：需要予測と時系列分析（１９６３）、２３７

(9) 吉村、栗原、牧口、阿部、笹原：鋳物３９（１９６７）、４、３６５（予報）

(10) 円山由次郎：需要予測と時系列分析（１９６３）、７３

(11) 吉村、栗原：品質管理１８（１９６７）、１１増刊号１３２６

(12) 田口ＱＣ研究会レポート：標準化と品質管理２１（１９６８）、７、７３

第 4 章　小　　括

本編においてはキユポラ操業の工程解析と操業管理に関しての推進計画を明確にするため、キユポラ操業の現状を述べると共に、本研究で始めるキユポラ操業の工程解析方法について考察した。

第 1 章は緒論であり、第 2 章はキユポラ操業とその操業管理の現状について述べ、第 3 章は、本研究におけるキユポラ操業の工程解析方法について考察した。

第2編　キュポラ操業の工程解析

第1章　緒　　論

キュポラ操業の工程解析を実施するに際して，解析の対象とするキュポラ操業，すなわち，使用するキュポラの種類とそれらの操業条件の選定について考察した結果，工程解析を効果的に進めるため，つぎのようなキュポラの実験操業を実施することとした。

すなわち，つぎの通りである。

(1)　半還元鉱を主原料とする熱風水冷式ノーライニング・キュポラの塩基性操業

まず最初は，工程解析方法を確立することを主目的として，キュポラ操業としては，活発な炉内反応が起っていることから比較的炉況の変動が多いと予想される，半還元鉱のみを鉄原料とする熱風水冷式ノーライニング・キュポラ操業を対象とすることとした。そして，一定の形状をなし，化学組成のバラツキの少ない半還元鉱のみを鉄原料としているため，一般のキュポラ操業のように種々の鉄原料を混合したことによる原料の複雑さから混入する溶湯の化学組成の変動がないとみてよく，炉径ならびにライニングの変化がほとんどなく，また，小型のものを使用すると，その他種々の誤差要因が入る恐れもあるので，炉況が比較的安定な[(1)] 2 tノーライニング・キュポラを用いて実験操業を実施することとした。

(2)　鋼材を主原料とする熱風水冷式キュポラの酸性操業

一般のキュポラ操業では，鉄原料としては，銑鉄，鋼材およびそれらのスクラップなどを配合して装入されるが，一般のキュポラ操業に適応する工程解析を進めることを目指して，操業中の炉況の変動に関与する要因に関係した，溶湯の化学組成とスラグの化学組成，キュポラに装備した計測機器類の読みなど諸因子のなかから，関係の深い因子を見出そうとするのであるから，操業中，炉況に影響を与えるおそれのある条件はすべて均一にするようつとめた。とくに，炉況に影響するおそれが強い原材料については，鉄原料は，再圧延した，

一定の寸法の鋼材のみとし，コークスについても成型コークスなどを用いた。

そしてライニング・キュポラとして安定な操業を期待できる最小限度と考えられる1 t熱風水冷式酸性キュポラによって実験操業を実施することとした。

(3) 銑鉄，鋼材を原料とする熱風水冷式キュポラの塩基性操業

実際に近い状態におけるキュポラ操業の工程解析を実施するため，銑鉄，鋼材を原料とする，実際の生産に用いている5.5 t熱風水冷式キュポラの塩基性操業の観測データを収集した。普通，キュポラ操業で，今考えているような操業管理を行って，成果を期待できるのは，比較的厳格な品質を要求する鋳物のための溶湯を溶解している，熱風水冷式塩基性キュポラ操業であると考えられるのでこのような操業を工程解析の対象とした。しかし，この実験操業においても，装入する銑鉄，鋼材およびそれらの返り材，スクラップなどについても，寸法，形状および化学組成をそろえるよう努力した。

このようなキュポラ操業について，キュポラの操業を開始し，ある程度の時間が経過し，キュポラの操業状態が定常操業状態となったと見られるようになってから，2～3時間に渡り，2分間ごとに，第1編第3章3.2に述べたように観測データの収集を行った。ここで，キュポラ操業が定常操業状態と言っているのは，全然操作をすることなく操業状態が一定となっているというのでなく，そのような一定の状態に1歩でも近づこうと，操業担当技術者が，絶えず炉況に注目し，必要あれば，炉況を修正するための処置を行っている状態である。

収集した観測データは，第1編第3章3.2に述べたように

(1) 工程の特性値として観測データ

出湯する溶湯の各化学組成の2分間隔にとったデータ，

(2) 情報因子としての観測データ

同時にとった炉頂ガス関係，熱風圧力，溶湯温度などのデータ，

(3) 制御因子としての観測データ

同時にとったスラグの化学組成または塩基度，熱風温度，送風量などのデータ，

であるが，使用したキュポラの装備状況および実験操業の目的によって多少の変更を行った。つぎの各章には，この件は明記する。

観測データの解析には，制御因子は情報因子ともなるものであるが，制御因子の変更，あるいは変化は炉況に非常に影響があるもので，解析に際しては，あとの操業管理の方式を考察するのに便利なように，まず特性値と情報因子および特性値と制御因子という２種類の組合せを考え，重回帰分析法によって解析を進めた(2)。

この編においては，以下各章において，それぞれ目的をもった実験操業についての工程解析を行った結果について述べることとする。

文　　献

(1) 田中，牧口，村松，菊地，生井，三井，米田，馬場，福田：鋳物３９（１９６７），3, ２０６

(2) 吉村，牧口，栗原：鋳物３９（１９６７），5, ３９３

第2章　半還元鉱を原料とするキュポラ操業の工程解析

2．1　緒　言

キュポラの定常操業状態における，炉況の変動に関係する諸因子を見出そうとするに際し，まず始めに，活発な炉内変動を伴い，観測データに現われる変動が比較的大きいと考えられる，熱風水冷式ノーライニング・キュポラによる，半還元鉱を原料とした場合の操業の解析を行った。

この熱風水冷式ノーライニング・キュポラは，炉径ならびにライニングの影響がほとんどなく，炉況が比較的安定であるので，装入原料を均一にするように努め，操業条件を一定に保っておけば，炉況の変動の模様は，溶湯の化学組成，キュポラに装備した計測機器類の指示からつかめると考えた。

その結果，比較的容易にキュポラの定常操業状態における炉況の変動から影響を受けると考えられる因子を選定することができた。

2．2　実験方法

2．2．1　実験操業に使用したキュポラの諸元

実験に使用したキュポラは，２ｔ熱風水冷式ノーライニング・キュポラ[(1)]で，熱風温度を６５０℃まであげることができ，普通の熱風キュポラより高く，そしてノーライニング・キュポラで，炉壁の影響なく，塩基性スラグ溶解ができるのが特徴である。その要点を示すと表2.1の通りである。

表２．１　２ｔＭＢＣキュポラの諸元

諸　　元		寸　　法
炉の内径	D mm	540
炉の断面積	A m^2	0.229
羽口の断面積	a m^2	0.01908
羽口比	A／a	12
有効高さ比	H／D	8.7
有効高さ	H mm	4,670
炉底から羽口までの高さ	m m	725

2．2．2　実験操業の操業条件

キュポラ操業において炉況の変動に関係する諸因子を見出すことが目的であるから，解析を容易に進めることができるように，操業条件を一定にするように努めた。

とくに装入物からくる変動は大きく，解析を困難にすることが多く，そのため鉄原料としては，印度ゴアの粉鉱をロータリーキルンで還元した，還元度47.5％の半還元鉱のみとし，その他の装入原料も，できるだけ均質なものを選び，一定の形状のものを装入するように努め，炉内の溶解および反応が複雑になり，その結果，溶湯の化学組成の変動が複雑になるのを防いだ。

なお，今回の実験操業の操業条件を決定するについては，このような操業で既に確立した操業条件[(2)]を採用した，表2.2は，目標組成，表2.3は装入原料の重量比による配合割合および寸法，表2.4はその他の操業条件を示す。

表2．2　溶湯の目標化学組成

成分＼量	（％）
C	3.5 ～ 4.0
Si	0.2 ～ 0.3
Mn	0.10～ 0.15

表2．3　原料装入比および寸法

装入物	配合比	寸法
半還元鉱	62％	20㎜φ～40㎜φ
コークス	40％	65㎜φ～80㎜φ
石灰石	10％	20㎜φ～30㎜φ
螢石	1％	20㎜φ～30㎜φ

表2．4　操業条件

項目		量
送風量	N㎥／h	2,800
熱風温度	℃	520
風圧	㎜Aq	600～900
循環冷却水温度	℃	25
塩基度		1.8
コークス比	%	27

2．2．3　データの収集

本研究は，定常状態におけるキュポラ操業についての解析を進めるのであるから，操業中の試料採取および計測機器類のデータの読みとりについては，キュポラの操業を開始し，安定状態となったと認められてから3時間40分にわたって行った。この際因子としては，表2．5に示すように11種類の観測データを対象とし，これらのうち溶湯およびスラグの試料採取間隔は2分間毎とし，他のデータは連続記録による方法を採用し，第1編第3章3.2で述べたようにして観測データを収集した。

表2．5　収集した観測データの種類

特性値	溶湯C含有量
	Si 〃
	Mn 〃
情報因子	炉頂ガスCO含有量
	CO_2 〃
	温度
	熱風圧
	出湯温度
制御因子	送風量
	熱風温度
	塩基度

表2．6　計測器の種類および型式，精度

計器名称	製作所名および形式	範囲	精度
CO_2 ラウター	三鷹工業㈱ AR 1200	5～21%	±0.2%
CO ラウター	三鷹工業㈱ AR 2200	CO_2 0～40%	フルスケール1% ±0.4% CH_4
H_2 ヘイズ	三鷹工業㈱ 641, 10：HO：5—221—15	H_2 0～5%	±0.25%H_2
O_2 ヘイズ	三鷹工業㈱ 631, 10：CO：5—221—15	O_2 0～5%	±0.25%O_2
風圧計	島津製作所 S—120	0～1,500mmAq	定格値 ±1%
温度計	㈱千野製作所 E—434	0～1,600℃	フルスケール ±0.5%
風量計	精立工業㈱ オリフイスRE10～B250	0～3,000Nm³/h 0～4,000Nm³/h	±2%
光高温度計	㈱千野製作所 760	1,200～2,000℃ 700～1,500℃	±15deg ±10deg
カント・レコーダー	島津製作所 真空型 G200		C, Si変動係数2%以下 Mn, P.S.Max±0.05 CaO±0.25, SiO_2±0.15 FeO±0.05
スラグ分析	SCHOELLER AND POWELL 法		

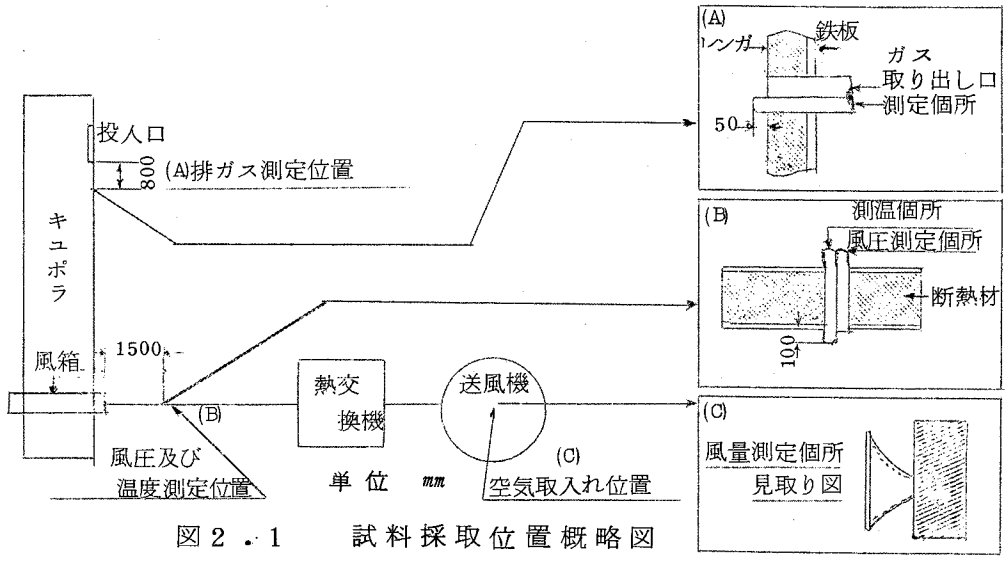


図２．１　試料採取位置概略図

これらの各種のデータの採取に使用した計測機器類の種類，型式および精度は，表2.6の通りであり，各計測機器類の試料採取位置あるいは取付位置の概略は図２－１のようである[3]。

２．３　実験結果

以上述べたようにして，収集したデータを図２－２に示す[3]。これらのデータの変動の模様をつかむため，それぞれの平均値と標準偏差を求めてみると表2.7の通りである。この表をみると，標準偏差が極端に大きなものはなく，今回の実験操業が安定していることを示している。(附図２－１～２－８参照)

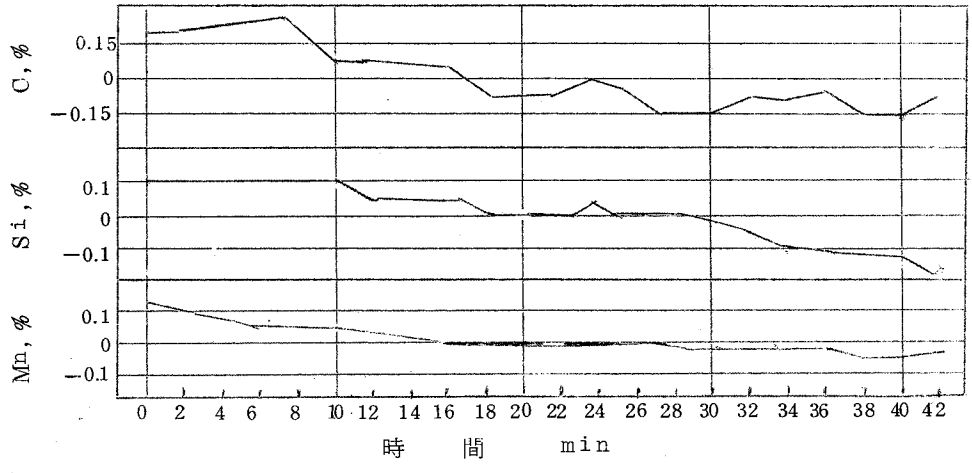


図２．２－a　特性値データ図

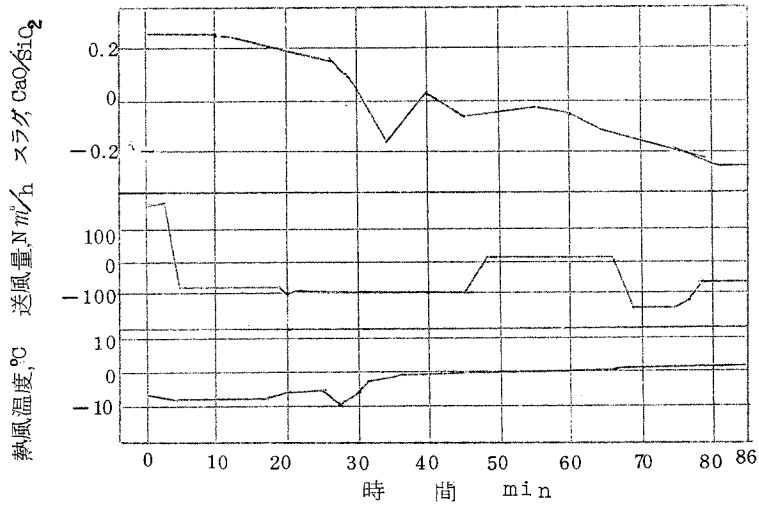


図２．２－ｂ　制御因子データ図

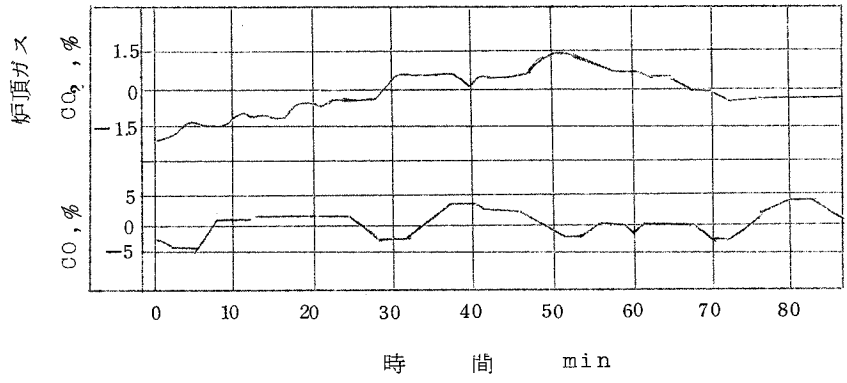


図２．２－ｃ　情報因子データ図

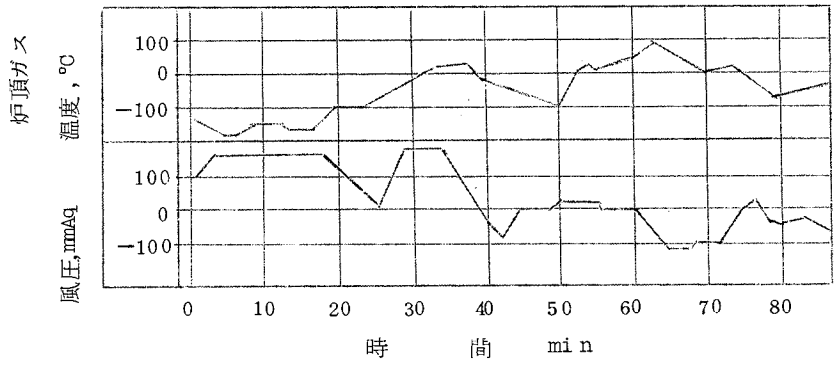


図２．２－ｄ　情報因子データ図

表2・7　各因子の平均と標準偏差

因　　子	平　　均	標準偏差
C	4.02	0.09
Si	0.28	0.07
Mn	0.14	0.02
出湯温度	1346.44	14.43
風　　圧	1145.37	29.08
炉頂ガス温度	373.86	22.17
CO_2	7.52	0.29
CO	23.08	1.84
冷風量	2669.43	178.86
熱風温度	514.00	2.88

しかし，図2－2をみると，データを観測した時間全体を通じて各因子のデータの変動の模様は相当活発になっていることが認められる。

なお，附図2－1～2～8に観測データ全体のグラフの拡大したものを示す。

2．4　解析経過と解析結果

解析には，第1編第3章3.3に述べたように重回帰分析法を用いたが，重回帰分析法を実施するには，収集した観測データを，従属変数と独立変数とに分けて処理する必要がある。

今回の解析は，キュポラ操業としては特殊な，半還元鉱を原料とするキュポラ操業の工程解析をするというよりは，比較的炉況の変動が多いと考えられるキュポラ操業で得られた観測データを用い，重回帰分析法によって解析が実施できるかどうかということと，その解析方法を検討することを主な目的としている。

キュポラ操業という工程の，炉況の変動の結果生じた，工程の特性値として，普通鋳物材料として主要化学成分と考えられている溶湯の化学組成のうち，炭

素，珪素およびマンガン含有量の変動をとり上げることとした。そこで溶湯の炭素，珪素およびマンガン含有量をそれぞれ従属変数としてとり上げたとき，独立変数として情報因子および制御因子をそれぞれ組合せて重回帰分析法によって解析を実施することとした。

重回帰分析法によって解析を進める際，第1編第3章3.3に述べたように，最初に従属変数と独立変数とする観測データ相互間の時差を求めておく必要があり，それらは時差相関分析法によって割合簡単に目的を達することができた。これは，今回の特殊なキュポラ操業で，比較的変化の多い観測データを得られたことによると考えられる。その経過を説明するための一例として図2－3[(3)]に示すように，溶湯の炭素含有量のデータに対して送風量のデータを，観測した単位時間，すなわち2分間ごとにずらせて行ったときの相関係数の模様を見てゆき，相関係数が最も大きく（正の場合と負の場合がある），冶金技術ならびに計測技術的に意味のあるところを選び時差とした。

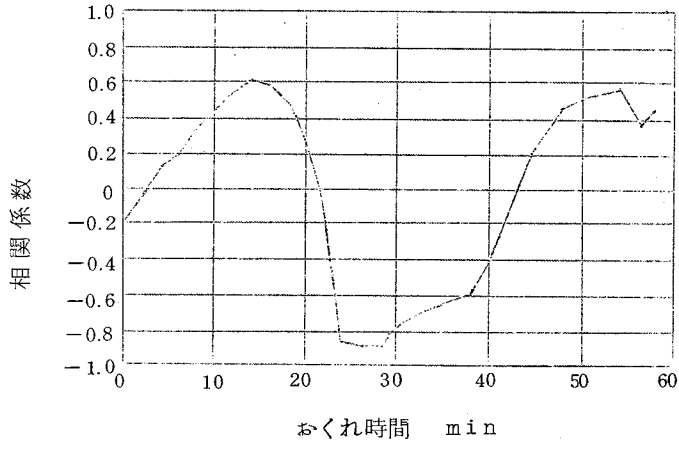


図2・3　炭素量と送風量の時差相関

このような方法で特性値とした溶湯の炭素，珪素およびマンガン含有量に対しての情報因子および制御因子のおのおのに対する時差は，表2.8に示すように選定された[(3)]。

得られた，おのおのの時差を用いて，各特性値と情報因子あるいは制御因子の観測データにより重回帰分析法により解析した結果，各特性値に対する情報

表２．８　特性値と情報因子および制御因子のおくれ時間　　単位 min

従属変数＼独立変数			情報因子						制御因子		
			炉頂ガス				風圧	出湯温度	送風量	熱風温度	塩基度
			CO	CO_2	O_2	温度					
特性値	溶湯	C	24	10	18	4	34	14	14	24	38
		Si	24	40	14	4	32	2	16	24	36
		Mn	18	44	10	4	30	4	14	26	36

表２．９　重回帰分析結果（t検定値および判定）

従属変数＼独立変数		炉頂ガス				風圧	出湯温度	重相関係数
		CO	CO_2	O_2	温度			
溶湯	C	1.329 (24)	0.423 (10)	1.732 (18)	2.146 (4)*	0.058 (34)	3.125 (14)**	0.96448
	Si	0.140 (24)	0.238 (40)	6.691 (14)**	1.566 (4)	0.779 (32)	3.104 (2)**	0.97967
	Mn	0.686 (18)	0.508 (44)	4.274 (10)**	0.117 (4)	0.811 (30)	0.592 (4)	0.96866

〔注〕（　）の数はおくれ時間 min を示す。

＊＊　1％有意　　＊　5％有意

表２．10　重回帰分析結果（t検定値および判定）

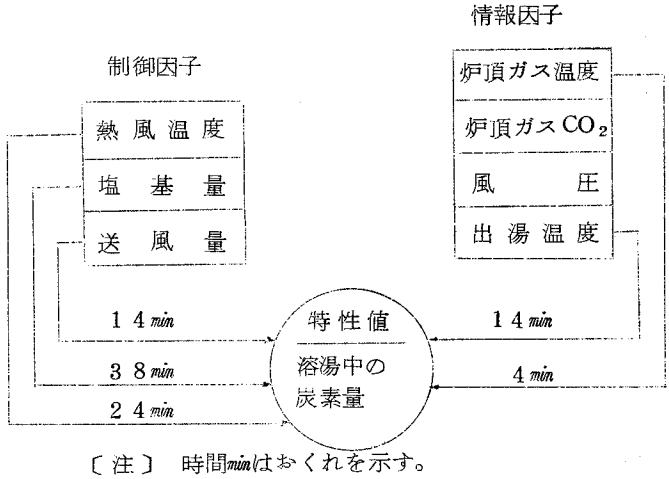
従属変数＼独立変数		送風量	熱風温度	塩基度	重相関係数
溶湯	C	1.418 (14)	2.854 (24)**	2.615 (38)*	0.9079
	Si	0.969 (16)	4.502 (24)**	0.693 (36)	0.8701
	Mn	0.063 (14)	5.512 (26)**	0.361 (36)	0.9284

〔注〕（　）の数はおくれ時間 min を示す。

＊＊　1％有意　　＊　5％有意

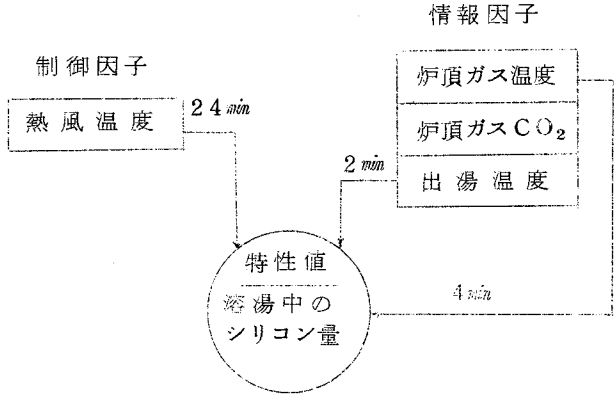
因子えの影響を表2.9，各特性値に対する制御因子えの影響を表2.10に示す[3]。

これらの結果から，溶湯の炭素含有量の変化に影響される情報因子は，炉頂ガスの温度および出湯温度であり，制御因子としては熱風温度，送風量，塩基度である。溶湯の珪素含有量に対しては，情報因子では，炉頂ガス温度，制御因子では熱風温度である。さらに溶湯のマンガン含有量に対しては，制御因子で熱風温度である。これら解析結果を図示すると図2－4a，b，cの通りである。



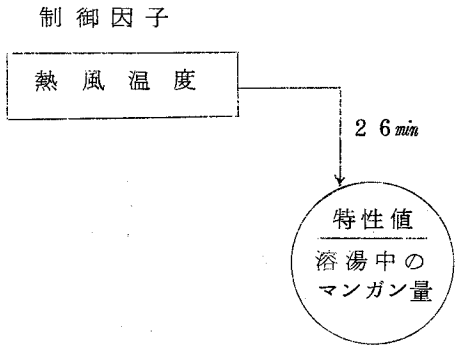
〔注〕 時間minはおくれを示す。

図2．4－a　炭素量に対し有意な因子の時差



〔注〕 時間minはおくれを示す。

図2．4－b　シリコン量に対し有意な因子の時差



〔注〕 時間minはおくれを示す。

図2．4－c　マンガン量に対し有意な因子の時差

2．5　考　察

2．5．1　解析方法に対して

今回の実験操業で得た観測データは，キュポラ操業が操業担当技術者の操作によって定常操業状態に保たれていたにも拘らず，炉内においては活発な還元反応が行われていた結果，炉況の変動がかなり起っていることを示していたので，これらの観測データから工程解析を行うに際しては，まず各特性値と諸因子との間のデータの時差を求めたが，第1編第3章3.4に述べるような手順を用いなくても比較的容易な，単相関による時差相関分析法を用いて時差を求めることができ，重回帰分析法によって解析を進めることができた。そして，解析の過程で，求めた回帰式の存在価値を判定するために，回帰による平方和と回帰からの平方和を用いて分散分析をしたところ，表2.11，表2.12に示すように有意となり，重相関係数も表2.9，表2.10からみるように，かなりの値であり，この重回帰分析の結果は信頼できるものと考えられる。

また，その結果は，つぎの2.5.2で述べるように冶金技術的にも了解できるものであるのでキュポラ操業の工程解析の解析方法として，重回帰分析法を用いることは，今回のような還元反応が活発に起るキュポラ操業の工程解析を実施することが可能であると考えられる。

しかし，今回の実験操業が，熱風水冷式ノーライニング・キュポラによる半

表2.11　分散分析表

(1)　C含有量と情報因子

要因	自乗和 S.S.	自由度 d.f.	平均二乗和 m.s.	F
回帰によるSR	0.329616	6	0.054936	35.84**
回帰からのSE	0.023000	15	0.001533	
合計	0.352616	21		

(2)　Si含有量と情報因子

要因	自乗和 s.s.	自由度 d.f.	平均二乗和 m s.	F
回帰によるSR	0.13770	6	0.022950	62.13**
回帰からのSE	0.00655	15	0.000369	
合計		21		

(3)　Mn含有量と情報因子

要因	自自乗乗和和 s.s.	自由度 d.f.	平均二乗和 m.s.	F
回帰によるSR	0.051931	6	0.008655	40.63**
回帰からのSE	0.003200	15	0.000213	
合計		21		

表2．12　分散分析表

(1)　C含有量と制御因子

要因	自乗和 s. s.	自由度 d. f.	平均二乗和 m. s.	F
回帰によるSR	0.329616	3	0.110987	34.35**
回帰からのSE	0.0579	18	0.000320	
合計	0.387516	21		

(2)　Si含有量と制御因子

要因	自乗和 s. s.	自由度 d. f.	平均二乗和 m. s.	F
回帰によるSR	0.13770	3	0.045899	24.70**
回帰からのSE	0.0334	18	0.001858	
合計	0.17110	21		

(3)　Mn含有量と制御因子

要因	自乗和 s. s.	自由度 d. f.	平均二乗和 m. s.	F
回帰によるSR	0.051931	3	0.017310	43.45**
回帰からのSE	0.007171	18	0.0003984	
合計	0.059102	21		

表2.13　半還元鉱を原料とした2t熱風水冷式塩基性ノーライニングキュポラの実験操業（定常操業）の工程解析結果

操業番号	重回帰分析において偏回帰係数が有意となった因子と時差		重相関係数
1	①溶湯の炭素含有量ー情報因子	②溶湯の炭素含有量ー制御因子	
	炉頂ガス温度＊（4）	熱風温度＊（24）	① 0.9645
	出湯温度＊＊（14）	塩基度＊（38）	② 0.9079
2	①溶湯の炭素含有量ー情報因子	②溶湯の炭素含有量ー制御因子	
	炉頂ガス温度＊＊（6）	熱風温度＊（22）	① 0.9587
	出湯温度＊（14）	塩基度＊（36）	② 0.9024
3	①溶湯の炭素含有量ー情報因子	②溶湯の炭素含有量ー制御因子	
	炉頂ガス温度＊（4）	熱風温度＊＊（24）	① 0.9477
	出湯温度＊＊（12）	塩基度＊（36）	② 0.9126
4	①溶湯の炭素含有量ー情報因子	②溶湯の炭素含有量ー制御因子	
	炉頂ガス温度＊（6）	熱風温度＊（20）	① 0.9549
	出湯温度＊（12）	塩基度＊（36）	② 0.9091
5	①溶湯の炭素含有量ー情報因子	②溶湯の炭素含有量ー制御因子	
	炉頂ガス温度＊（4）	熱風温度＊（22）	① 0.9462
	出湯温度＊（14）	塩基度＊（38）	② 0.9035

（注）（　）内の数値は時差（*min*）を示す。

＊＊1％有意　＊5％有意

還元鉱を原料とするという特殊のものであることから，この実験操業および解析結果がただちに他の普通のキュポラ操業に適用できるか否かは，今後の研究に待たなければならない。しかし，統計的方法を用いて工程解析が可能であったということは十分に立証されたと言える。

なお，この解析結果の再現性を把むため，今回使用したキュポラを用い，同じ操業条件で実験操業をさらに4回実施し，それらの観測データを用いて工程解析を実施した，それらの結果，表2.13に示すように，何れも同じ因子が選定され，それらの特性値に対する時差もほとんど近似しており，何れも重相関係数もすべて高い値を示している。これらのことから，この解析結果の再現性が十分あるとみてよいと考えられる。

なお，解析に用いた観測データの問題とする変動の大きさと観測の際の計測機器類の誤差との関係は，表2.6と表2.7，図2－2－a，b，c，dとを比べてみると，十分観測データで問題となる変動より1／5～1／10 以下に計測機器類の誤差が入っていることを知る。

また，計測機器類の試料採取位置，取付位置など使用上の問題についてはあとで言及する。

2. 5. 2　解析結果からみたキュポラ操業の状況について

実験操業における観測データの解析結果をまとめた図2－4を見ると，キュポラの操業管理の対象とする特性値，溶湯の化学組成と関係をもつ因子は，溶湯の炭素含有量については関係する因子が最も多く，珪素，マンガンの順で関係する因子の数が減少している。

このような傾向は，キュポラ内における加炭，脱炭のような溶湯に対する炭素の変動現象に対しては，今回扱った因子以外に，さらに未確認の因子も含めて種々の要因が複雑な形で作用していることを示すものと考えられる。一方，溶湯の珪素およびマンガン含有量の変動は，炭素含有量ほど複雑でないと考えられる。ただ，今回の実験操業で溶湯の珪素含有量の変動に，このような簡単

な結果が得られたのは，実験操業に使用したキュポラがノーライニングであり，珪素の供給源となる耐火材料（珪酸化物）が存在していないためと考えられる。

特性値，すなわち溶湯の炭素，珪素およびマンガン含有量の変動のいづれにも共通して影響される情報因子はないが，溶湯の炭素および珪素含有量については，出湯温度が影響する。

このような出湯温度と溶湯の化学組成との関係は，炉内温度が高くなるとコークスとの接触による加炭反応が進み，溶湯の炭素含有量が増し[4]，また炉内の予熱帯および溶解帯での滴下する溶湯の珪素の損失が炉内温度によって影響をうけ，炉内温度が高いほど燃焼帯が下がるので珪素の損失は少なくなり，このような珪素含有量が変動することを示している[5][6][7]。しかしマンガンは，溶湯中の含有量が少ないことからはっきりしない。

また制御因子では，溶湯の炭素，珪素およびマンガン含有量の変動に共通して影響をうけるのは熱風温度である。これらの関係は，上に述べた出湯温度との関係に関連しており，熱風温度が高くなった場合，炉内の燃焼温度が高くなるため，燃焼帯が下方に下り，狭くなり，装入原料は，その部分で集中的に溶解されるため溶湯温度が高くなる。この現象については，報告がある[5]。

以上のように，解析した結果は，既に解明されている冶金技術から納得のできるところである。

なお，特性値と各因子の観測データの間の時差が個々に異っている問題については，因子の性格によっていろいろである。

炉頂ガス関係は，炉頂部の試料採取個所から計測機器までの距離，試料採取部の取付方法などが非常に関係し，実際に燃焼部分から炉頂部に達する時間に加わることになる。

また溶湯温度，溶湯の化学組成などは，炉内で溶解され，反応が起された部分から炉中を降下し，炉底の湯溜り部で稀められた後外部に出てきて計測，または試料採取されることになるので，かなりの時間が必要となる。

そして，これらの時差は，上に述べた過程の時間的相殺があった後現われる

ものであるが，個々のキュポラ，その時の操業条件，事情によって異ってくることも考えられる。

2. 5. 3　解析結果のキュポラ操業管理のための考察

解析結果からキュポラの操業管理方式を考える場合，現在，既にわかっている関係と一致しているということで，そのような因子が，たとえ便利であると言っても，単独で使用してはならない。今回行った工程解析では，関係があると考えられた諸因子を用いた上で出された結果であるから，総合的に他の因子との関係において判断しなくてはならない。そこで，解析の結果が，既発表の冶金技術と一致すると言っても，既発表の冶金技術は，個々の前提条件下における，例えば溶湯の珪素含有量の増減量と送風温度と言った単相関的関係とみられるものが多く，炉況に影響する要因としては，今回の解析の結果の諸因子の総合的判断にまたなくてはならないと考えられる。

今回の解析の結果でつぎに問題となるところは，図２－４から明らかなように，特性値に対する制御因子との時差が，情報因子との時差よりも一般的に長い傾向にあるということである。すなわち，制御因子に変化が起ってから，これらが特性値である溶湯の化学組成に影響を生じさせるまでの時間が比較的長く，制御因子の種類によって１４～３８分である。

これに対して，情報因子に変化が認められてから，溶湯の化学組成に変化が起る前に，直ちに制御因子の制御を行ったとしても，炉況が調整されるのは相当おくれることになる。

そこで，情報因子で炉況の変化を知った場合，制御因子を調整すると共に溶湯の化学組成に変化が現れる前に，一時的に急激に，強い何らかの操作をほどこしておき，あとを制御因子の調整にゆだねるというようなことができれば，溶湯の化学組成はそれほど変化しないですむことになる。要は，そういう，炉況を急激に強く操作する方法を見出すことで，これは今後の問題である。

しかし，現在でも，今回の工程解析の結果，むしろ制御因子の変動を見てい

て，炉況の変化を知り，必要あれば調整のため制御因子によって制御を行うことが適当ではないかと考えられる。ただし，その後，情報因子によって，その変化を確認し，炉況が回復したと判断できれば制御を中止するのである。換言すれば，定常操業において溶湯の化学組成の変動を少なくし，十分な溶湯の品質の管理を期待する場合には，制御因子のうち熱風温度および送風量の変動を最小にとどめるようにすることは必要であると言える。

なお，制御因子で炉況を制御しようとする場合，今回得た解析結果を用いるとすれば，解析の際，使用した制御因子の観測データの変動範囲でしか使えない。もしそれ以上の制御をする場合には，それ相応の実験を行う必要がある。また，重回帰分析で得られた回帰式を用いることにより，キュポラ操業中，時差を考慮して，各因子のデータをとって，操業中の時々刻々の特性値，すなわち，溶湯の化学組成の予測を行うことができるが，今回の実験操業は，特殊な原料によるキュポラ操業であり，キュポラ操業の工程解析の可能性を調べることを目的としたので，回帰式については割愛する。

2. 5. 4　解析結果についての残された問題

つぎに，各因子に対する時差が，比較的長いということに対して，今回使用した計測機器類の試料採取位置，あるいは取付位置が，従来のキュポラ操業の概念によっていたという原因があるように考えられる。

従って，今後，キュポラ操業の工程解析のための実験操業をする際，得ようとするデータの試料採取の条件，すなわち，計測機器類の試料採取位置，あるいは取付位置に十分検討を加える必要があると共に，計測機器類の改善も考えなくてはならない。また新らしい情報因子の開発も常に心掛けてゆかねばならない。

2. 6 ま と め

以上の結果を総括してみれば，つぎの通りである。

(1) 今回の熱風水冷式ノーライニング・キュポラによる，半還元鉱を原料とした特殊の条件の実験操業で得た観測データを用い，キュポラの定常操業状態にある場合，工程解析ができるか試みたところ，比較的容易に実施することができ，結果も技術的に了解できるものであった。

(2) 特性値とした溶湯の化学組成に対しては，種々の因子に影響のあることを見出したが，寄与する因子の数は，炭素，珪素，マンガン含有量の順に減少する。

(3) 溶湯の化学組成炭素，珪素，マンガン含有量に共通する制御因子は熱風温度である。

(4) 観測データ相互間の時差が比較的長いことについては，時差がキュポラの構造からくる冶金技術的に起っている部分と計測技術的に起っている部分と加わったり，相殺されたものである。とくに，計測機器類の試料採取位置および取付位置に起因している部分とが大きく左右すると考えられ，工程解析に，あるいはさらにキュポラの操業管理に適した方法を検討しなければならない。

(5) また，このような実験操業をくり返えし実施し，工程解析を行ったところ，ほとんど同じ結果を得ており，解析結果の再現性は十分あると考えられる。

文 献

(1) 生井，牧口，菊地，村松，持田，馬場：鋳物３８（１９６６），１０，７０７

(2) 田中，牧口，村松，菊地，生井，三井，米田，馬場，福田：鋳物３９(１９６７)，３，２０６

(3) 吉村，牧口，栗原：鋳物３９（１９６７），５，３９３

(4) 石野：鋳物３７（１９６５），８，６９５

(5) E. L. W. Löffecke: Foundry Trade J. 101(1956), 2095(/Dec.), 659

(6) H. Jungbluth, K. Stockkamp : Gieserei 43(1956), 6, 129

(7) AFS : Cupola and It's Operation (1954), 272—273

第3章　鋼材を原料とする適正送風操業の工程解析

3. 1　緒　言

キュポラの定常操業状態における，炉況の変動に影響される諸因子を見出そうとするに際し，前章に述べたような活発な炉内変動を伴い，観測データの変動がある程度大きい場合には比較的容易に操業に関係する因子を選定することができたが，一般のキュポラ操業においては，各データの変動はそれほど大きくないと考えられ，解析を進める場合，解析方法を十分考慮しなくてはならないことを経験した。その結果，第1編第3章3.4に述べたような一般のキュポラ操業に適用できるような解析の手順を作成した。

そこで鉄原料としてとくに均一な鋼材１００％を用い，1 ton 熱風水冷式酸性キュポラによる一般のキュポラ操業に対してのモデルともなるような，不要な炉況の変動原因を極力抑えた実験操業で得られた観測データから，炉況の変動に影響される諸因子を選定することを試みた[1]。

3. 2　実験方法

3. 2. 1　実験に使用したキュポラの諸元

今回の実験は一種のモデル実験であり，大型炉は炉況の変動が小さいため，炉況の変動が種々の観測データとして外部で得易くする必要があり，また小型にすぎると，他の小型なためからくる複雑な要因が混入する恐れがあるので，実験に使用したキュポラは，１ｔ熱風水冷式酸性キュポラとしたが，その諸元の要点を示すと表2. 14の通りである。

3. 2. 2　実験操業の操業条件

操業条件を設定するに際して，溶湯の化学組成の変化を知り易くするため，とくに装入物からの変動原因をおさえるよう努めたが，鉄原料については地金類の混合を行うとこれら地金類の溶解時期の差によって，溶湯の化学組成が変

表２．１４　熱風水冷式キュポラの諸元

諸　　元		寸　　法
炉の内径	D mm	480
炉の断面積	A m^2	0.180864
羽口の断面積	a m^2	0.0441131707
羽口比	A／a	4.1
有効高さ比	H／D	6.5
有効高さ	H mm	3050
炉底から羽口までの高さ	mm	450

表２．１５　原料の装入配合比および寸法

装入物	配合割合	寸　　法
鋼材	100%	70mm×(100～130)mm×25mm
コークス	14%	85mmφ～95mmφ
石灰石	3%	25mmφ～35mmφ
SiC	4%	85mm×80mm×85mm

表2.　１６　操業条件

項　　目		量
送風量	m^3／min	18
熱風温度	℃	330～340
風圧	mmAq	300～500
循環冷却水温度	℃	20
塩基度		0.6
コークス比	%	14

動するおそれがあったのでとくに均一な鋼材１００％を用い，その他の装入物，すなわち成型コークス，石灰石，炭化珪素についても同様に寸法もそろえ均一となるように努めた。

表２.15は本実験操業における装入物の重量比および寸法であり，表2.16は操業条件を示す(2)。

3. 2. 3　データの収集

本研究においても，キュポラ操業を開始し，操業が安定状態に入ったあと1時間５４分にわたって，２分間隔で溶湯およびスラグを試料採取して化学分析をすると共に，操業に関係を有すると思われる種々の因子については，キュポラに装備した計測機器類の連続記録からあとで２分間隔で読みとりデータとした。

表２.17は，各種のデータの読みとりに使用した計測機器類の種類，型式および精度を示し，図２－５は，各計測機器類の試料採取または計測位置を示す。

なお出湯量は，３分ごとに約１０^{Kg}容量の取鍋に溶湯が一杯になる時間をストップウオッチで計測し，つづいて取鍋に入った溶湯の重量を求め^{Kg}／hr の単位に換算し，グラフにプロットし，２分ごとに読みとった。

表２.１７　　計測器の種類および型式，精度

計器名称	製作所名および形式	範　　囲	精　　度
CO_2 ラウター	三鷹工業㈱　AR 1200	5～21%	±0.2%
風　圧　計	東京機器工業㈱　RD1	0～1200 mmAq	±0.25%
風　量　計	日立製作所㈱　DQR11	0～30 m^3／min	1～1.5%
温　度　計	㈱千野製作所　E—434	0～1600℃	フルスケール ± 0.5%
γ線レベル計	日立製作所㈱　RLS型	炉底～装入口　実施範囲 炉底から 500～600 mm	± 5 mm
カント・レコーダー	島津製作所　真空型G200		C,Si 変動係数２%以下 Mn, P. S. Max±0.05
スラグ分析	SCHOELLER AND POWELL法		CaO±0.25, SiO_2±0.15 FeO±0.05

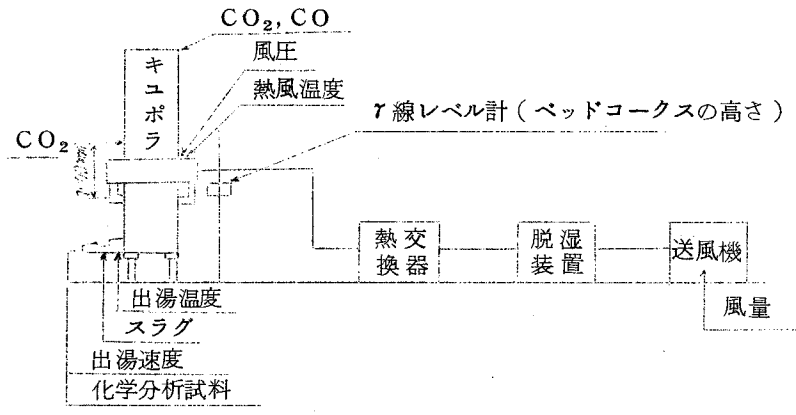


図2・5　データ測定位置

表2.14，図2－5の計測機器類のうちγ線レベル計は，ベッドコークス高さの測定に用いたもので，炉内密度の関係から余り大型のキュポラには使えないが，キュポラの炉体の外部で炉体をはさんで縦方向に同時に移動できるようになった線源のコバルト60とハロゲン・ガイガーミューラー管によって構成されたものでベッドコークス高さの測定に適したものである(3)。

3．3　実験結果

以上述べたようにして収集した観測データを図2－6，図2－7に示す。これらのデータの変動の模様をつかむため，それぞれの平均値と標準偏差を求めてみると表2.18の通りである。

表2．18　各因子の平均値および標準偏差

特性値および因子の名称		平均値	標準偏差
特性値	炭素量	2.77	0.05
情報因子	出湯量	1,137.03	68.14
	風圧	342.11	20.74
	炉頂 CO_2	10.70	0.18
	出湯温度	1,488.71	0.32
	コークスベッド高さ	536.46	4.95
制御因子	熱風温度	309.85	3.59
	送風量	18.62	0.96
	スラグ FeO	0.66	0.07
	スラグ CaO	31.32	1.52
	スラグ SiO_2	53.13	0.33

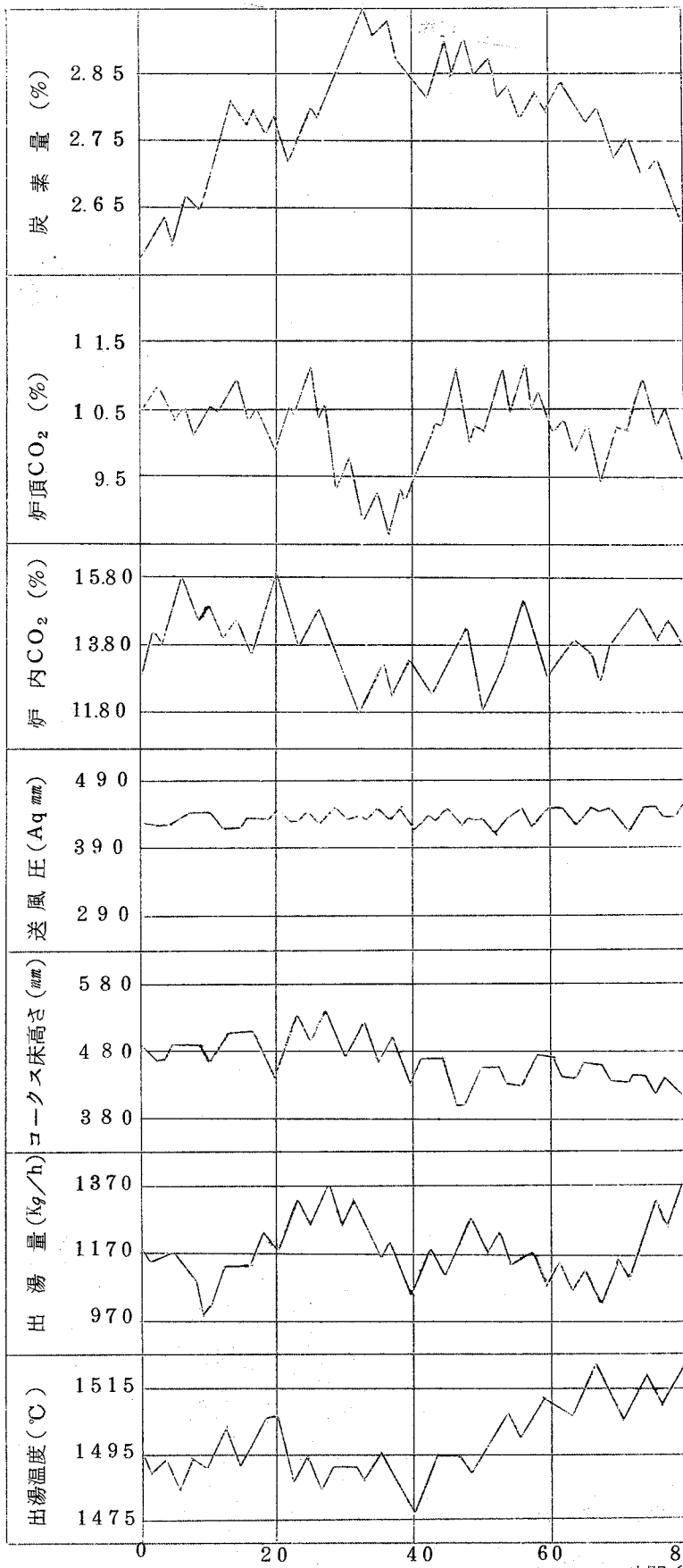


図２．６　特性値及び情報因子のデータ図

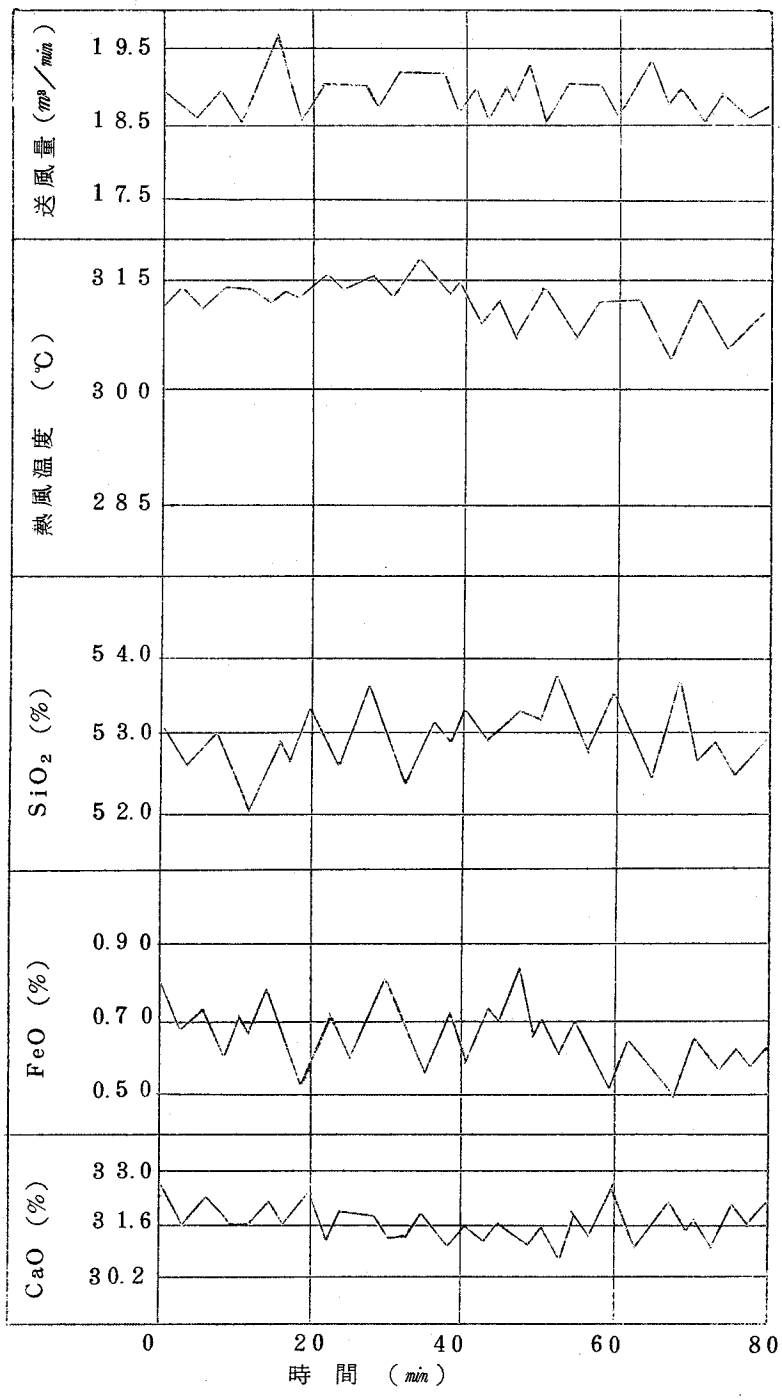


図２．７　制御因子のデータ図

図２－６，図２－７および表2.１５をみると，定常操業状態で収集したデータであるので，１，２の因子を除いては，全般的に変動は少いことを示している[(1)]。

３．４　解析の経過ならびに結果

キュポラの定常操業における工程解析には重回帰分析法を用いるのが，第１編第３章3.3に述べたように適当と考えられ，本編第２章でそのことは裏書きされたと考えている。そこで今般のような，前の第２章の比較的変動の多い観測データを得られた，炉内で還元反応を伴う，半還元鉱を原料とした熱風水冷式ノーライニング・キュポラによる塩基性操業に対して，一般のキュポラ操業に近い，鋼材を原料とした熱風水冷式キュポラによる酸性操業で得られた，変動もずつと少い観測データによつての解析を試みることとした。

特性値とする溶湯の炭素，珪素およびマンガン含有量をそれぞれ従属変数とし，情報因子および制御因子をそれぞれ独立変数として重回帰分析法によって解析を進めるに際し問題となったのは，従属変数と独立変数とする各観測データ相互間の各時差の選定である。本編第２章で用いた時差相関分析法で時差の検出は成功せず[(2)]，結局，第１編第３章3.4に述べたようなキュポラ操業の工程解析の手順を用いることによって解析を進めることができた。

キュポラ操業の工程解析の手順に従って，まず解析に用いるデータを移動平均法によって丸め，試料採取誤差ならびに測定誤差等を除却した後，溶湯の炭素，珪素およびマンガン含有量のデータをそれぞれ従属変数として，各従属変数に対しての情報因子および制御因子とする観測データによって，時差０から，冶金技術的ならびに計測技術的考慮を払い，はじめは大きくずらせながら重回帰分析をくり返えす。そして，注目すべき時差を見出し，それらの附近で細かに前後にずらせて再び重相関係数の最大となるように重回帰分析をくり返えした。

表2.１９は，特性値とした溶湯の炭素含有量に対して情報因子との関係を求

表２．１９　偏回帰係数の検定値(t)及び重相関係数

計算番号	出湯量	風圧	炉頂ガスCO_2	出湯温度	コークスベッド高さ	重相関係数
1	(0) 0.31	(0)−4.01**	(0) 0.06	(0) 4.98**	(0)−1.19	0.9902
2	(2) 0.13	(0)−1.92	(6) 2.32*	(0) 1.80	(6) 1.76	0.9929
3	(2)−0.39	(0)−4.23**	(6) 2.42*	(0) 3.22**	(4) 1.83	0.9930
4	(2) 2.24*	(0)−1.54	(4) 5.32**	(0) 3.87**	(6) 4.46**	0.9967

（注）　（　）内の数値はおくれ時間（*min*）を示す。

** 1％有意，　* 5％有意

めるために重回帰分析をくり返えした際の主な結果である[1]。表2.19において，計算番号1は，時差を全部0とした場合の偏回帰係数のt値を示す。この場合，重相関係数は0.9922でかなり高いが，情報因子として有意となっている出湯温度を除いて注目すべきものがない。

その後，さきに述べたように，各因子のデータを時差を考慮しつつずらせてゆき，重回帰分析をくり返えし，それらの主な結果として計算番号2，3を示す。

そして最終的に，計算番号4において，重相関係数が0.9967となり，各因子の時差ならびに偏回帰係数のt値の妥当なものを見出した。

なお，最初，従属変数と独立変数の観測データについて時差0で重回帰分析を行った後，つづいて冶金技術的ならびに計測技術的に考慮を払いながら大きくデータをずらせて重回帰分析をくり返えすとき，必らず，どの場合にも使えるとは言えないが，独立変数とする各因子の観測データの自己相関係数を求めておくと，自己相関係数が小さくなる場合には，そこまでデータをずらせてみることにより，重回帰分析の結果の変化を期待できる。しかし，かなりずらせても自己相関係数が余り変らないこともよくあるが，その場合には，冶金技術的ならびに計測技術的にのみの考慮を扱わざるを得ない[2]。

ここで，一般に，ある測定データx_1，x_2，……，x_i，……，x_tについて，データをkだけずらせた場合の自己相関係数r_kは，

$$\gamma_k = \frac{\sum_{i=1}^{t-k}(X_i - \bar{X}_t),\ \sum_{i=k+1}^{t}(X_i - \bar{X}_{t-k})}{\sqrt{\left\{\sum_{i=1}^{t-k}(X_i - \bar{X}_t)^2\right\}\left\{\sum_{i=k+1}^{t}(X_i - \bar{X}_{t-k})^2\right\}}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2.1)$$

ここに，

$$\bar{X}_t = \frac{1}{t-k}\sum_{i=1}^{t-k} X_i\ , \qquad \bar{X}_{t-k} = \frac{1}{t-k}\sum_{m=k+1}^{t} X_i$$

である。

今回の情報因子とした各観測データの自己相関係数を求めると表2.20の通りとなり，出湯量，炉頂ガス炭酸ガス含有量および出湯温度の各データについては，データをずらせることによって，自己相関係数の変化する模様も一応留意して重回帰分析を進めるのに便利であった(1)。

表2.20　各因子の自己相関係数

因子の名称＼おくれ時間	0 分	2 分	4 分	6 分	8 分	10 分
出湯量	1.0000	0.9607	0.8537	0.6967	0.5077	0.3214
風圧	1.0000	0.9967	0.9896	0.9815	0.9743	0.9678
炉頂 CO_2	1.0000	0.9136	0.7421	0.5248	0.2437	−0.0384
出湯温度	1.0000	0.9631	0.8700	0.7456	0.6177	0.5077
コークスベット高さ	1.0000	0.9845	0.9632	0.9635	0.9672	0.9651
熱風温度	1.0000	0.9984	0.9955	0.9925	0.9909	0.9921

表2.21　偏回帰係数の検定値(t)及び重相関係数

従属変数＼独立変数		出湯量	風圧	炉頂ガス CO_2	出湯温度	コークスベット高さ	重相関係数
溶湯	C	2.24* (2)	−1.54 (0)	5.32** (4)	3.87** (0)	4.46** (6)	0.9967
	Si	1.03 (2)	−1.70 (0)	3.30** (6)	4.06** (0)	3.74** (6)	0.8173
	Mn	0.41 (2)	−4.84** (0)	4.83** (4)	2.34* (0)	0.69 (0)	0.6330

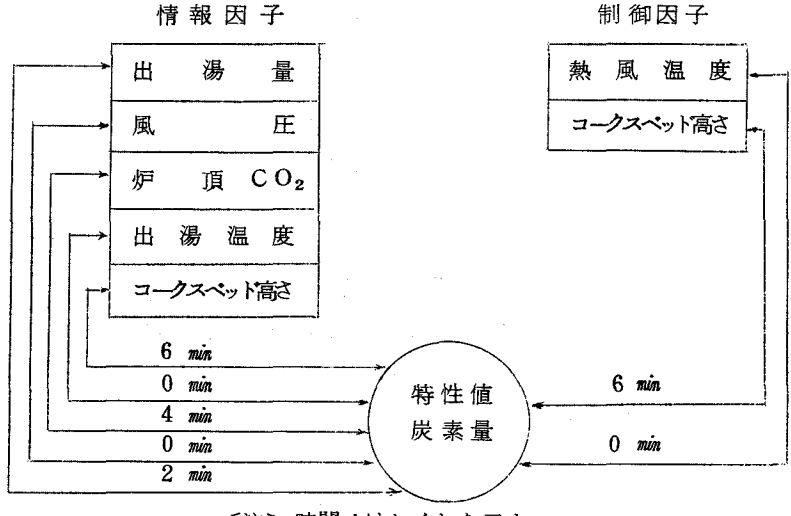
（注）　（ ）内の数値はおくれ時間（*min*）を示す。

** 1%有意，　* 5%有意

表2. 21は，今回の実験操業の解析結果である(1)。この結果からみると，溶湯の炭素含有量と珪素の変動に対して，情報因子としては，出湯量，出湯温度およびベッドコークス高さおよび炉頂ガス炭酸ガス含有量が影響する ことを示しており，また溶湯のマンガン含有量の変動に対しても，出湯温度，ベッドコークス高さ，送風圧および炉頂ガス炭酸ガス含有量が影響する ことを示している。また制御因子としては，溶湯の炭素含有量に対しては熱風温度のみをとり上げたが，かなり影響する ことを示しており，この場合の相関係数も0.7～0.8程度であった。しかし，溶湯の珪素およびマンガン含有量と熱風温度との関係は見出すことができなかった。

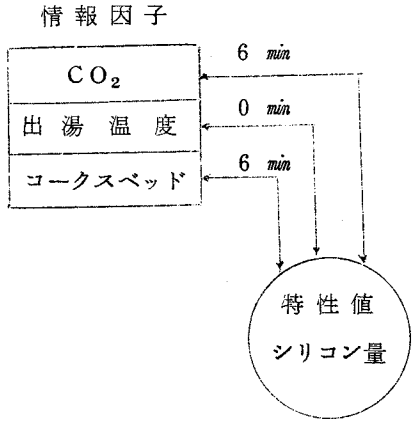
これら解析の結果を整理して図示すると図2－8ａ，ｂ，ｃの通りとなる(1)。

また，この重回帰分析の結果得られた回帰式の存在価値を知るため，回帰による平方和と回帰からの平方和を用いて分散分析を行ったところ，表2. 22にみるように有意となることと重相関係数もかなりの高い値を示していることを認めた。



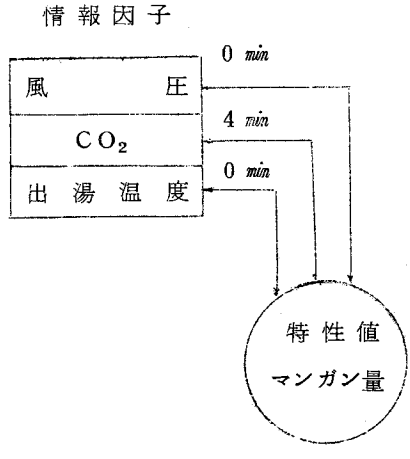
〔注〕時間minはおくれを示す。

図２．８ａ



〔注〕 時間 min はおくれを示す。

図2・8－b　シリコン量に対して各因子の時差



〔注〕 時間 min はおくれを示す。

図2・8c　マンガン量に対して各因子の時差

表2．22　分散分析表

(1)　C含有量と情報因子

要因	自乗和 S．S．	自由度 d．f．	平均二乗和 m．S．	F
回帰によるSR	0.057290	5	0.011458	** 1032.51
回帰からのSE	0.000377	34	0.000011	
合計	0.057667	39		

(2)　Si含有量と情報因子

要因	自乗和 S．S．	自由度 d．f．	平均二乗和 m．S．	F
回帰によるSR	0.331270	5	0.066254	** 13.68
回帰からのSE	0.164630	34	0.004842	
合計	0.4959			

(3)　Mn含有量と情報因子

要因	自乗和 S．S．	自由度 d．f．	平均二乗和 m．S．	F
回帰によるSR	0.005826	5	0.001165	** 4.54
回帰からのSE	0.008725	34	0.000257	
合計	0.014551			

3．5　考　察

3. 5. 1　解析結果での注目すべき点について

本編第2章のような還元反応を伴い，炉況が活発に変動しているキュポラ操業に対して，第1編第3章3.4に述べ，本章3.4において解析の経過を述べたように，解析の過程で，時差の検定に，とくに注意を払うことによって，勿論加炭が行われたり，珪素の反応など炉内で反応が行われているが，極言すれば再溶解に近い一般に広く行われている，キュポラ操業における観測データを用いても，重回帰分析法により十分に解析に成果を得られることがわかった。

表2.18および図2－8の解析結果をみると，溶湯の炭素含有量の変動に関係のある因子が最も多く，珪素およびマンガン含有量の変動に関係するものは，これについでいる。また，因子の種類をみると炭素含有量の変動に関係のある因子のなかに，珪素およびマンガン含有量の変動に関係のある因子はおよそ含まれている。この事実は，炉況の変動に，溶湯の炭素含有量が最も敏感[(1)(3)]であることを示している。しかも，溶湯の化学組成としては，炭素含有量が最も重要なものである。

そこで今後，キュポラ操業の工程解析を進めてゆくに際して，溶湯の炭素含有量に主として注目してゆけば，おのずから炉況を安定させる要因を把み，炭素およびそれ以外の他の化学組成の変動も狭くすることができると考えられる。

また，情報因子として炉内炭酸ガス含有量を用いようとしたが，収集したデータは変動が比較的大きかったが，データ採取位置が1ケ所であったため，キュポラ全体というよりも，試料採取場所附近の影響を強く受けている傾向があり[(4)]，同様の実験操業をくり返えした場合，同様な結果を常に得られなかったのでこの観測データは削除して解析を実施することとした。

つぎに，図2－8から明らかなように，炉況が変化して溶湯の炭素含有量に変化が現れるまでに，時差に相当する時間だけ早く，ベッドコークス高さ，炉頂ガス炭酸ガス含有量，出湯量および出湯温度に変化が認められることになる。

これらの溶湯の炭素含有量の変化に関係する炉況の変化を知らせる情報因子

のデータの読みは，他の制御因子の場合も含み，2分間における平均値をとっているので，時差0分とは0～2分間，時差2分とは2～4分間，時差4分とは4～6分間を意味している(4)。

また，溶湯の炭素含有量の変化に関係する諸因子，いまの場合情報因子は，とり上げた情報因子の変化を総合して判断すべきである。溶湯の炭素含有量の変動のなかには，いろいろな因子の影響が含まれており，たとえ今回の解析で非常に関係が深いということになっても，個々の情報因子をぬき出して溶湯の炭素含有量の変動との関係を見出すことは，多くの場合困難なことが多い。正確に知るためには知りたい因子だけを用いて解析をやり直してみる必要がある。

そこで，今回の実験の結果，4～6分前にベッドコークス高さと炉頂ガス炭酸ガス含有量に変化が起り，2～4分前に出湯量に変化があり，さらに0～2分前に出湯温度に変化が起れば，溶湯の炭素含有量が変化を起してゆくということになる。

つぎに制御因子について考えてみると，今回の実験では，熱風温度だけしかとり上げなかったが，図2－8aでみるように，熱風温度だけでも，溶湯の炭素含有量の変動に極めて強く影響している。しかも，この場合の時差は0であった。すなわち，制御因子という考え方から熱風温度に変化を与えれば0～2分の間に溶湯の炭素含有量を変化させ得るということになる。

これらの熱風温度の影響は，直接炉内温度に関係し，それが溶湯の化学組成，とくに炭素含有量には敏感に影響することは第2章2.5.2に述べたように，冶金技術的にも既に立証されているところである。

なお，今回使用したキュポラを用い，同じ操業条件の場合と，操業中に熱風温度を20％変化させた場合と合せて都合3回の実験操業をくり返えした結果，表2.23に示すように，何れも同じ因子が選定され，それらの特性値に対する時差もほとんど近似しており，何れも重相関係数がかなり高い値を示しており，この解析結果の再現性は十分あるとみてよいと考えられる。

表２．２３　鋼材を原料とした１ｔ熱風水冷式酸性キュポラの実験操業の工程解析結果

操業番号	実験内容	重回帰分析において偏回帰係数が有意となった因子と時差	重相関係数
1	定常操業	①溶湯のＣ含有量ー情報因子　②溶湯のＣ含有量ー制御因子 出湯温度 ** (0)　熱風温度 ** (2) 炉頂ガス CO_2 ** (4) 出湯量 * (2) コークスベッド高さ ** (6)	① 0.9967 ② 0.9045
2	定常操業	①溶湯のＣ含有量ー情報因子　②溶湯のＣ含有量ー制御因子 出湯温度 ** (2)　熱風温度 ** (2) 炉頂ガス CO_2 ** (6) 出湯量 * (4) コークスベッド高さ ** (4)	① 0.9928 ② 0.9125
3	過剰送風操業	①溶湯のＣ含有量ー情報因子　②溶湯のＣ含有量ー制御因子 風圧 ** (2)　熱風温度 * (0) 炉頂ガス CO_2 * (2) 出湯量 ** (2) コークスベッド高さ ** (2)	① 0.839 ② 0.851
4	過剰送風操業	①溶湯のＣ含有量ー情報因子　②溶湯のＣ含有量ー制御因子 風圧 * (0)　熱風温度 * (2) 炉頂ガス CO_2 * (4) 出湯量 ** (2) コークスベッド高さ ** (2)	① 0.825 ② 0.845
5	熱風温度変動操業	①溶湯のＣ含有量ー情報因子　②溶湯のＣ含有量ー制御因子 出湯温度 ** (2)　熱風温度 ** (2) 炉頂ガス CO_2 ** (6) 出湯量 * (2) コークスベッド高さ ** (4)	① 0.9913 ② 0.9038
6	熱風温度変動操業	①溶湯のＣ含有量ー情報因子　②溶湯のＣ含有量ー制御因子 出湯温度 ** (0)　熱風温度 ** (2) 炉頂ガス CO_2 ** (4) 出湯量 * (4) コークスベッド高さ ** (6)	① 0.9925 ② 0.9119

（注）（）内の数値は時差（min）を示す

** 1％有意，　* 5％有意

操業番号３，４については本編第４章に述べる

3. 5. 2　解析結果のキュポラの操業管理えの注目すべき点について

今回の解析結果から，溶湯の炭素含有量に対しての情報因子の関係を表 2. 1 9 の計算番号 4 の時差の場合の計算結果から回帰式をつくると[1]，

$$I_c = -4.68 + 0.000143 X_{IV} - 0.000936 X_{BP} + 0.144 X_{CO_2} + 0.00360 X_{IT} + 0.0012 X_{CB} \quad \cdots\cdots (2.2)$$

ここに，

I_C ： 溶湯の炭素含有量　%

X_{IV} ： 出　湯　量　kg／h

X_{BP} ： 送　風　圧　mmAq

X_{CO_2} ： 炉頂ガス炭酸ガス含有量　%

X_{IT} ： 出湯温度　℃

X_{CB} ： ベッドコークス高さ　mm

となる。

そこで，（2.2）式によって求めたＩＣ，すなわち溶湯の炭素含有量にある限度以上の変化が現われたことを知った場合，炉況を調整する操作，すなわち制御を実施することになる。

つぎに，情報因子によって炉況の変化を知ることは可能となったが，予知される溶湯の化学成分炭素含有量の変化を防ぐために，いかにして制御するかが問題となってくる。そこで前節で述べたように制御因子としてとり上げた熱風温度について考えてみる。

熱風温度は制御因子として扱ったが，熱風温度に変化があった場合は炉況に変化が起ることを予測できるとも言え，情報因子として扱えないこともない。

また現在，一般に使用されている熱風発生用の熱交換器では，だいたい最大出力に近いところで稼動させていることが多く，熱風温度を急に変化させたり，急に高く上げることはむずかしい。今回使用したキュポラも同様である。

上に述べたような一般のキュポラでは，１つの提案として，溶湯の炭素含有量の変化についての予測を得たとき，溶湯の炭素含有量の変化を少しでもくい

止め，その安定をはかるため，ひとまず熱風温度を直ちに可能なかぎり上げるようにすると共に，少し遅れるが熱の供給源として，追い込めコークス量を一時的に増すことによって補ってみてはどうかと考えてみた。そしてベッドコークスの高さを測定しながら調節することによって安定した操業を経続できるのではないかと考え，先程の熱風温度を情報因子とも考えるのとは逆に，制御因子として熱風温度と情報因子として扱ったベッドコークス高さを制御因子として加えて解析を行ってみた。

そこで溶湯の炭素含有量のデータに対して，ベッドコークス高さと熱風温度のデータを用いて，適切な時差を選定し，重回帰分析を行った結果，表2.24を得た。この表の計算番号7が，最も確からしい結果と考えられる。

この結果を利用して，情報因子によって炉況の変化を知り，ベッドコークス高さと熱風温度とによって制御するという方式が成立すると考えられる。

なお，溶湯の炭素含有量とベッドコークス高さおよび熱風温度との関係を表

表2.24　偏回帰係数の検定値（t）及び重相関係数

計算番号	コークスベッド高さ	熱風温度	重相関係数
1	（2） 2.93 **	（0） 1.90	0.8117
2	（〃） 0.57	（2） −0.14	0.7658
3	（〃） −1.61	（4） −2.49 *	0.8348
4	（4） 5.14 **	（0） 3.79 **	0.8938
5	（〃） 2.30 *	（2） 1.62	0.8239
6	（〃） −0.44	（4） 1.13	0.8091
7	（6） 7.39 **	（0） 5.04 **	0.9371
8	（〃） 5.22 **	（2） 3.86 **	0.9155
9	（〃） 2.23 *	（4） 1.46	0.8545

（注）（　）内の数値はおくれ時間（*min*）を示す。

** 1%有意，　* 5%有意

わす回帰式を上記の解析の計算結果から求めると，

$$I_C = -6.06 + 0.00382\,X_{CB} + 0.0217\,X_{BT} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.3)$$

ここに，

I_C ： 溶湯の炭素含有量 %

X_{CB} ： ベッドコークス高さ mm

X_{BT} ： 熱風温度 ℃

となる(1)。

式（2.2）と式（2.3）の回帰式は，この式を作るのに使った各データの変動の範囲で成立するもので，それらの変動の範囲外の数値に対しては，成立することは保証できない。そこでこれらの回帰式は，今回の実験操業に用いたキュポラで同一の操業条件で操業した場合，計算に用いた範囲とほとんど同程度の範囲で，このように適用範囲は限定されるが，操業管理を実施する目安を得ることができる。

3. 6 まとめ

以上の結果を総括してみるとつぎの通りである。

(1) 今回の実験操業のような，変動の比較的少ない観測データが得られる操業の工程解析に十分使える解析手順を確立できたと考える。

(2) 特性値として溶湯の炭素，珪素およびマンガン含有量について解析を行つたが，炭素含有量が炉況の変動に敏感であり， 他の珪素およびマンガン含有量に関係する因子も含まれており，しかも炭素含有量が溶湯の化学組成として重要なものなので，今後のキュポラ操業の工程解析には，炭素含有量のみを対象として考えることとした。

(3) 1t 熱風水冷式酸性キュポラにおいて鋼材を原料として操業した場合，溶湯の炭素含有量の変動には，情報因子としてベッドゴークス高さ，炉頂ガス炭酸ガス含有量，出湯量および出湯温度が関係が深い。

(4) また制御因子としては熱風温度が有効である。さらに熱風温度とベッドコークス高さとによって，今回のキュポラ操業の管理あるいは制御が可能である。

(5) 今回の実験操業のような操業を一定に保つことを考え，最も適切な，なるべく少い情報因子となる計測機器の選定と炉内温度を急速に，大きくも小さくも思うように調整できる，すなわち範囲の広い管理あるいは制御手段を見出す必要がある。

(6) また，このような実験操業をくり返えし実施し，工程解析を行ったところ，ほとんど同じ結果を得ており，解析結果の再現性は十分あると考えられる。

文　　献

(1) 吉村，栗原，笹原，山中：鋳物４０（１９６８），１０，７９９

(2) 吉村，栗原，笹原，山中：鋳物４０（１９６８），６，５０１

(3) 阿部，笹原：鋳物３８（１９６６），４，２２５

(4) 吉村，牧口，栗原：鋳物３９（１９６７），５，３９３

(5) 吉村，栗原，牧口，阿部，笹原：鋳物３９（１９６６），４，３６５
（予報）

第4章　鋼材を原料とする過剰送風操業の工程解析

4. 1　緒　　言

キュポラの定常操業状態における炉況の変動に影響される諸因子を見出すことを目的として研究をつづけているが，炉況に変化が起り，炉内温度が低下したことがわかった場合，炉内温度をあげるために，まず現状として考えられるのは，熱風温度を上げようとしても，普通のキュポラの熱風設備では限度があり，結局は送風量をあげることを普通考える。

元来，送風量については，コークスの燃焼にバランスした空気量を基準とした適正送風量が決められているが[(1)]，炉内温度を上げるためにある時間，過剰送風を行った場合，炉況に如何なる影響を与えるか，現在進めている研究の進め方としては，溶湯の化学組成のうち，最も炉況に敏感に影響される炭素含有量に如何なる影響をおよぼすか，そのほか炉況を知るための諸因子にどのような影響が起るかをつかむことを目的として研究を行った[(2)]。

4, 2　実験方法

4. 2. 1　実験に使用したキュポラの諸元

実験に使用したキュポラは，前章の実験に使用した1 t熱風水冷式酸性キュポラで，その諸元は，前章の表2. 11に同じである。

4. 2. 2　実験操業の操業条件

前章の実験同様，操業条件の設定に際して，とくに装入物からの変動原因をおさえるように努めた。

表2. 25は，本実験操業における装入物の重量比および寸法である。また表2. 26は，操業条件を示す。

表2. 26において，操業Aと操業Bとあるのは，この表からもわかるように操業Aは，送風量18 m^3/min とした適正送風の場合で，操業Bは送風量23 m^3/min

表2.25　原料の装入配合比および寸法

装入物	配合割合	寸法
鋼材	100%	70mm×(100～130)mm×25mm
コークス	14%	85mmφ×95mm
石灰石	3%	25mmφ～35mmφ
SiC	4%	85mm×80mm×85mm

表2.26　操業条件

項目	量 操業A	操業B
送風量 m^3/min	18	21
熱風温度 ℃	330～340	330～340
風圧 mmAq	300～500	300～500
循環冷却水温度 ℃	20	20
塩基度	0.6	0.6
コークス比 %	14	14

としたやや過剰送風の場合である。

4. 2. 3　データの収集

本研究においても，操業A，Bとも，キュポラ操業を開始し，操業が安定状態に入ったあと操業A130分間，操業B150分間にわたって，いづれも2分間隔で溶湯およびスラグを試料採取して化学分析をすると共に，操業に関係を有すると思われる種々の因子については，キュポラに装備した計測機器類の連続記録から，あとで2分間隔で読みとり観測データとした。

これら計測機器類の種類，型式および精度，試料採取または計測位置は，前章の表2.14，図2－5を参照のこと。

4. 3　実験結果

以上述べたようにして，収集したデータを図2－9，図2－10に示す。　こ

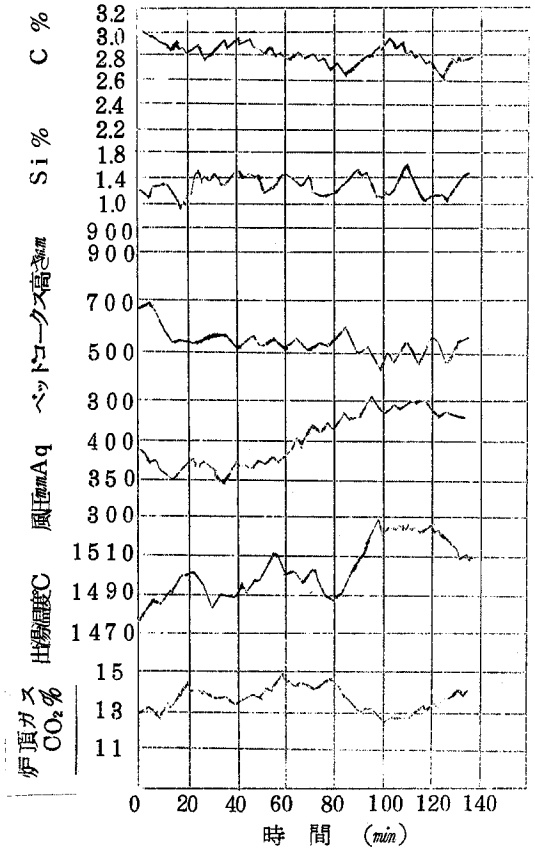


図２．９ 操業A観測データ図

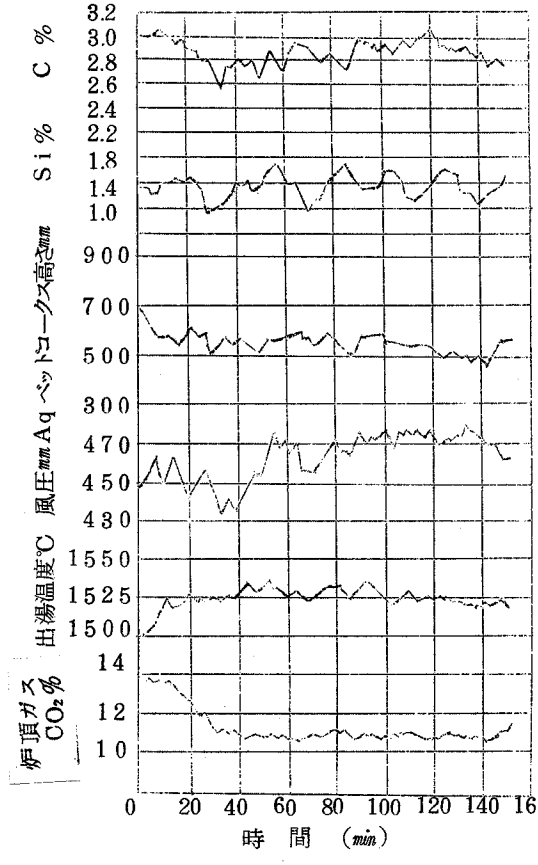


図２．１０ 操業B観測データ図

表2. ２７ 各因子の平均と標準偏差（操業Ａ）

因　子	平　均	標準偏差
C	2.79	0.06
風　圧	407.26	36.85
出湯温度	1498.79	9.67
CO_2	13.71	0.54
出　湯　量	1175.82	77.81
コークスベッド	505.11	18.20
風　量	18.58	0.31
熱風温度	306.17	6.58

表2. 28　各因子の平均標準偏差（操業B）

因　子	平　均	標準偏差
C	2.86	0.06
風　圧	464.19	6.77
出湯温度	1527.57	3.22
CO_2	10.73	0.69
出湯量	1376.65	58.07
コークスベッド	540.69	27.09
風　量	21.07	0.16
熱風温度	298.53	1.41

れらの観測データの変動の模様をつかむため平均値，標準偏差を求めてみると表2.27，表2.28の通りとなる。

図2－9，図2－10と表2.27，表2.28を見て，操業Aの適正送風と操業Bの過剰送風の場合を比べてみると両方の変動に差がなく，とくに表2.18から操業Bの方が範囲が小さいように見える。しかし，表2.18の平均値でみて，ベッドコークス高さ，出湯温度，炉内ガス炭酸ガス含有量，風圧など操業Bの方が何れも高く，とくに炉内ガス炭酸ガス，風圧は範囲も大きいことを示している。

4．4　解析経過ならびに結果

特性値としての溶湯の化学成分については，炉況の変動に敏感である炭素含有量のみについてとり上げ，あとでもし必要あれば他の化学成分もとり上げることとした。他の化学成分も同様な方法で容易に調べることができるのは勿論である。

最初に，従属変数として溶湯の炭素含有量，独立変数として風圧，炉内ガス炭酸ガス含有量，出湯量およびベッドコークス高さと言った情報因子を用い重回帰分析を行った。この重回帰分析と述べているのは勿論，第1編第3章3.4

の解析手順に従い，時差を考慮して解析を行った。その結果を表2.29の計算番号1，2に示す。計算番号1は操業A，計算番号2は操業Bの場合である[(2)]。

表2.29　回帰係数の検定値(t)および重相関係数

計算番号	操業条件	風　圧	炉頂ガスCO_2	出湯量	コークスベッド	重相関係数
1	A	−1.10 (4)	＊ 2.68 (6)	＊ −2.16 (6)	＊ 2.32 (6)	0.729
2	B	＊＊ 7.57 (2)	＊ −2.13 (2)	＊＊ −3.76 (2)	＊＊ 5.12 (2)	0.839

（注）　（　）内の数値はおくれ時間（min）を示す。

＊＊ 1％有意、＊5％有意

これらの結果から操業Aの適正送風の場合は，溶湯の炭素含有量に対し，炉頂ガス炭酸ガス含有量に非常に関係があり，また出湯量，ベッドコークス高さにも関係のあることを示しており，操業Bの過剰送風の場合は，風圧，出湯量ベッドコークス高さが非常に関係があり，炉頂ガス炭酸ガス含有量も関係があることを示している。また操業Bの過剰送風の方が時差が2分と小さくなっている。

4.5　考　察

観測データで溶湯の炭素含有量の変動が，操業Bの過剰送風の場合に大きかったことについては，送風量が過大になると，ベッドコークス高さの変動が大きく，活発になり，とくに小規模の棚吊りなどが発生しているらしく，炉況の安定性を失っていることに関連していると考えられる。

表2.29でみるように炉内ガス炭酸ガス含有量の変動は，溶湯の炭素含有量に関係があることを示しており，確かに過剰送風をした操業の場合には，炉内ガス炭酸ガス含有量の変動は，炉内の酸化性が高まり，通常の操業の場合と反対の関係が溶湯の炭素含有量に現われている。

以上考察を進めてきたことから，情報因子をベッドコークス高さだけにしぼり，時差を考慮しながら回帰分析を行い，表2.30の結果を得た。表2.30において計算番号1は，操業Aの適正送風の場合で，溶湯の炭素含有量の変動に対し極めて関係があることを示しているが，計算番号2は，操業Bの過剰送風の場合で，この場合は溶湯の炭素含有量との変動とは関連があるとは言えず，また相関係数も，適正送風の場合0.461であるのに対し過過剰送風の場合は0.154で，ベッドコークス高さは適正送風の場合には炉況を判断する情報として使えるが，過剰送風の場合には使えず，表2.24の計算番号2でみるように，他の因子の模様を総合してみなければならないと考えられる。

なお，同様な実験操業をくり返えし，前章の表2.23の操業番号3および4のような結果を得たが，この工程解析の結果の再現性があることを示していると考える。

表2.30　回帰係数の検定値(t)および重相関係数

計算番号	操業条件	コークスベッド	相関係数
1	A	3.82** (6)	0.461
2	B	−1.01 (2)	0.154

（注）（　）内の数値はおくれ時間（min）を示す。

＊＊　1％有意

4．6　ま　と　め

以上の結果を総括してみるとつぎの通りである。

(1)　1 t熱風水冷式酸性キュポラにおいて鋼材を原料として操業をした場合，溶湯の炭素含有量の変動には，適正送風の場合，炉頂ガス炭酸ガス含有量，出湯量，ベッドコークス高さが関連のあることを示しており，過剰送風の場合には，風圧も加えてこれらの各因子が関連があり，また時差がいづれも2分と小さくなっている。

(2)　問題のない情報因子としてベッドコークス高さが残ったが，適正送風の場合には情報因子として使えそうであるが，過剰送風の場合には使えず，この場合は，各因子の模様を総合して判断しなくてはならない。

(3)　適正送風より送風量を28％も増加した過剰送風の場合には，炉況の変動が烈しく起っているらしく，小規模な棚吊りなど発生している模様で炉況の安定性を失っていると見られた。そのため，炉況回復手段としての過剰送風は，適切な処置と考えることは避けた方がよいと判断せざるを得ない。

文　献

(1)　日本鋳物協会：キュポラハンドブック，(1967)，178

(2)　N. Kayama, K. Abe, H. Yoshimura：35th International Foundry Congress Paper, (1968), 29

第5章　鋼材と銑鉄を原料とする操業の工程解析

5．1　緒　言

今回は，鋼材と銑鉄を原料として熱風水冷式塩基性キュポラ操業と言うような，一般のキュポラ操業とほとんど同じ状態の実験操業においての炉況の変動に関係する諸因子を見出すことを目的として研究を進め，炉況の変動の結果，溶湯の化学組成を変動を少なく維持してゆくため管理，または制御方式についての考え方に言及した[(1)]。

5．2　実験方法

5. 2. 1　実験に使用したキュポラの諸元

実験に使用したキュポラは，5.5 t熱風水冷式塩基性キュポラであって，その諸元の要点を示すと表2. 31の通りである。

表2．31　キュポラの諸元

諸　　元	寸　　法
炉の内径　Dmm	1,000
炉の断面積　Am^2	0.785
羽口の断面積　am^2	0.066
羽口比　A／a	12
有効高さ　Hmm	4,600
有効高さ比　H／D	4.6
炉底から羽口までの高さ　mm	550

5. 2. 2　実験操業の操業条件

操業条件を設定するに際して，とくに装入物からの変動原因をおさえるように努め，装入する鉄原料の大きさが変化すると炉内風圧，湯溜り深さ等が変動し，これらが溶湯の特性値に影響を及ぼすおそれがあり，そのため装入物の大

きさおよび化学組成の影響をできるだけ除いた[(2)]。

表2.32は，本実験操業における装入物の重量比および寸法であり，表2.33は目標成分，表2.34は操業条件を示す。

表2. 32　装入原料の配合割合と寸法

装入物	配合割合(%)	寸法(mm)
銑鉄	9.6	2つ割り
戻し銑	42.4	≒300×40×30
鋼材	48	≒300×30×10
コークス	15.2	60φ～80φ
石灰石	10.4	30φ～50φ
螢石	3	30φ～50φ
Fe—Si	0.7	30φ～40φ

表2. 33　目標成分

成分＼量	(%)
C	3.9
Si	1.3
Mn	0.4
S	<0.015

表2. 34　操業条件

項目		量
送風量	m^3/min	75
熱風温度	℃	420
風圧	mmAq	700
循環冷却水温度	℃	40～60
コークス比	%	15

5. 2. 3　データの収集

解析のためのデータの収集は，キュポラの炉況が安定し，定常操業状態となっていた区間１４４分にわたつて，２分間隔で，出滓桶から溶湯，出銑口からスラグを連続試料採取し，化学分析を行い化学組成を求めると共に，キュポラに装備した計測機器により，情報因子として炉頂ガス温度，炉頂ガス炭酸ガス含有量，出湯温度，送風圧について連続記録しておき，あとでそれらの記録用紙から溶湯，スラグの試料採取の時間と合せて２分間隔に，各２分間の平均値を求めて観測データを作つた。

また同様な方法で制御因子としては熱風温度，送風量についての時系列データを作つた。

表2. 35は，各計測機器類の種類，型式および精度を示し，図２－１１は，各計測機器類の試料採取または計測位置を示す。

表2. 35　計測器の種類および型式，精度

計器名称	製作所および形式	範囲	精度
CO_2 ラウター	三鷹工業㈱ RA 1100	5～21 %	±0.2 %
風量計	東京機器工業㈱ RD 1	0～120m^3/min	±0.25%
風圧計	東京機器工業㈱	0～1,200mmAq	±0.25%
温度計	横河電気㈱ ER6-3012-23	0～1,000 ℃	フルスケール±0.5
温度計	㈱千野製作所 E－434	0～1,600 ℃	フルスケール±0.5
カント・レコーダー	島津製作所 真空型G200		C, Si変動係数2.%以下 Mn, P, S, Max ± 0.05
スラグ分析	SCHOELLER AND POWELL法		CaO±0.25, SiO_2±0.05, FeO±0.05

5．3　実験結果

以上述べたようにして，収集したデータで解析に用いたものを図２－１２，図２－１３に示す。

これらのデータの変動の模様をつかむため平均値と標準偏差を求めてみると，表2. 36の通りである。図２－１２，図２－１３，表2. 36をみると，今回の実験操業が安定していることを示している。

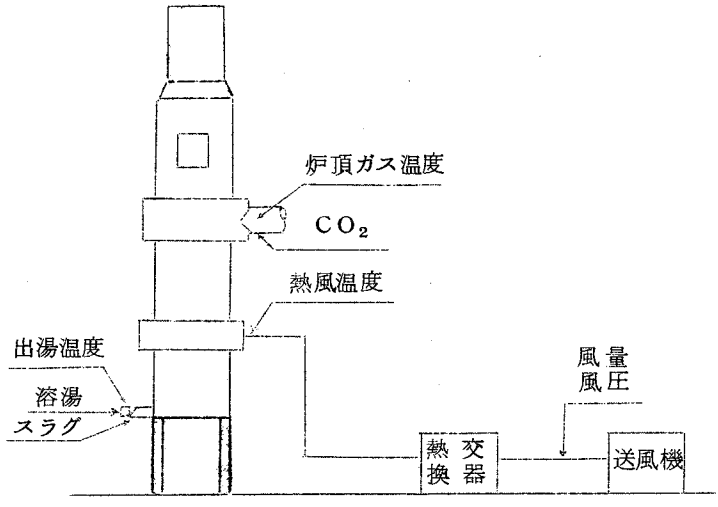


図２・１１　データ測定位置

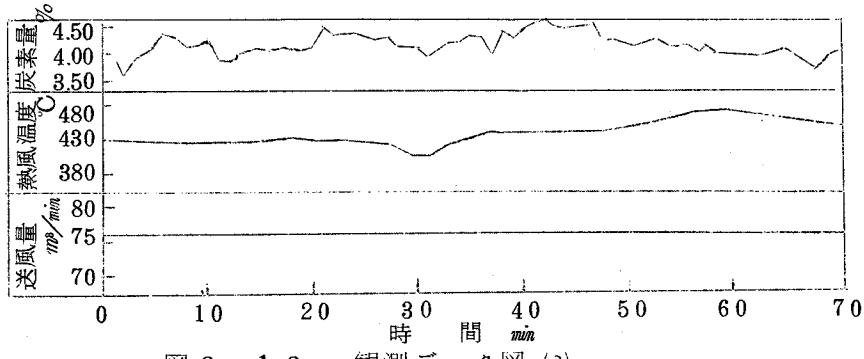


図２．１２　観測データ図（1）

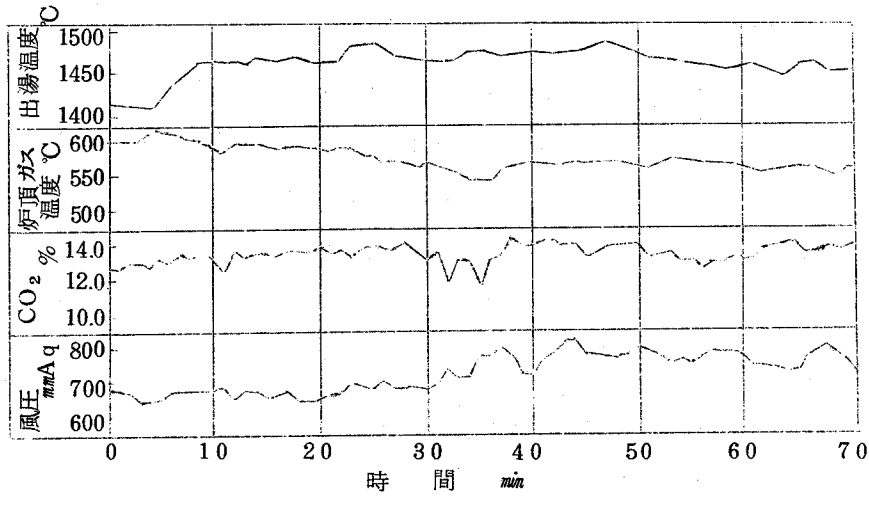


図２・１３　観測データ図（2）

表2. 36　各因子の平均と標準偏差

因　　子	平　　均	標準偏差
風　　圧	721.90	54.49
炉頂ガスCO_2	13.49	0.34
炉頂ガス温度	568.10	13.37
出湯温度	1,466.41	3.14
C	4.14	0.09
熱風温度	426.68	8.55
送風量	76.00	0.00

特性値として用いる溶湯の化学成分については，前の第3章に述べたように，炉況の変動に敏感で，しかも溶湯の化学成分として重要な炭素含有量について解析しておけば，他の化学成分については，必要あれば同様な方法で容易に解析ができるので，炭素含有量をまずとり上げることとした。

5．4　解析の経過ならびに解析結果

特性値としては，先に述べたように，まず溶湯の炭素含有量をとりあげ，情報因子と制御因子と別々にそれぞれ，第1編第3章3.4に述べた解析手順に従い，時差を考慮して解析を行った。その結果を表2. 37，表2. 38に示す。

表2. 37　偏回帰係数の検定値(t)および重相関係数

計算番号	風　　圧	炉頂ガスCO_2	炉頂ガス温度	出湯温度	重相関係数
1	(0) −0.50	(0) 1.89	(0) −1.56	(0) 2.81*	0.7612
2	(6) 1.64	(4) 2.23*	(10) 0.82	(4) 5.86**	0.9209
3	(6) 3.05**	(6) 4.29**	(12) 1.74	(6) 6.50**	0.9422
4	(6) 1.30	(8) 11.83**	(10) −1.75	(4) 13.76**	0.9861

（注）　（ ）内の数値はおくれ時間（*min*）を示す。

** 1%有意，　* 5%有意

表2.38　回帰係数の検定値(t)および相関係数

番　号	熱風温度	相関係数
1	(0)　0.56	0.10488
2	(8)　0.53	0.55549
3	(10)　4.15**	0.61755

〔注〕　( )内の数値はおくれ時間(*min*)を示す。
**　1%有意

表2.39　各因子の自己相関係数

時間(*min*)	風　圧	CO_2	炉頂ガス温度	出湯温度	熱風温度
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.994	0.911	0.988	0.924	0.971
4	0.983	0.746	0.957	0.726	0.885
6	0.970	0.510	0.911	0.465	0.748
8	0.955	0.207	0.853	0.217	0.570
10	0.937	−0.069	0.791	0.038	0.363
12	0.917	−0.348	0.727	−0.047	0.140

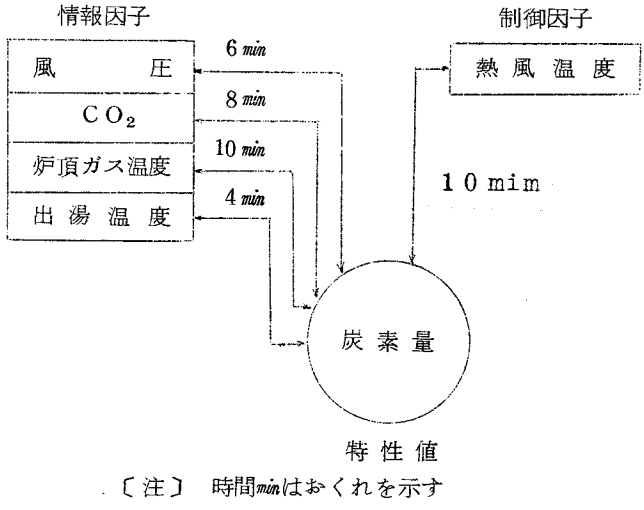
表2.39は，時差を考慮するときに参考とする各因子のデータの自己相関係数を示す。炉頂ガス炭酸ガス含有量，出湯温度および熱風温度は，データをずらせることによって自己相関係数が急に減少することを示しているので，重回帰分析をくり返えして行う際，それらのデータをずらせるとき参考となる。

なお，制御因子は送風量も計測したが，制御されているため，データに変動がほとんどみられなかったので解析から削除し，熱風温度のみをとりあげることとした。

これらの両方の解析経過および結果をみると，すなわち表2.37，表2.38の計算番号を追ってゆくと，情報因子は表2.37の計算番号4で，重相関係数も最大となり，溶湯の炭素含有量に対して炉頂ガス炭酸ガス含有量が時差8分で，出湯温度が時差4分で極めて関連があることを示しており，制御因子は，表2.37の計算番号3で，時差10分で極めて関連があることを示している[1][3]。

5．5　考　　察

今回のキュポラ実験操業における，定常操業状態の場合の炉況の変動に伴う溶湯の炭素含有量の変動と情報因子および制御因子の変動との関係を解析した。先に述べた結果を整理して図示すると図２－１４の通りとなる。



〔注〕　時間minはおくれを示す

図２．１４　炭素量に対して各因子の時差

図２－１４から明らかなように，炉況が変化して溶湯の炭素含有量に変化が現われるまでに，時差に相当する時間だけ早く炉頂ガス炭酸ガス含有量，出湯温度に変化が認められることになる。

これらの時差，すなわち溶湯の炭素含有量の変化に関連する炉況の変化を知らせる情報因子のデータの読みは，２分間における平均値をとっているので，時差４分とは４～６分，時差６分とは６～８分，時差８分とは８～１０分，時差１０分とは１０～１２分を意味している(1)。

また，これらの特性値と情報因子との関係は，特性値としての溶湯の炭素含有量と情報因子個々の関係ではなく，扱った情報因子を総合して判断したものであり，特定の情報因子との関係をぬき出して正確に知るためには解析をやり直してみる必要がある。

さらに，情報因子および制御因子全体を通じて眺めた場合，各種の型式のキ

ュポラのいろいろな操業条件の場合と比べて，溶湯の化学組成に関係の深い因子は，大体同じと言ってもよいが，求められた時差は，同じ因子についてみてそれぞれ異っている。

これらは，実験に用いたキュポラの形式，容量，その他個有の特性，さらに計測機器の性能，取付位置の違いから出ているものと考える。

なお，情報因子のなかの炉頂ガス温度は，表2.31の計算番号を通じて見ると，偏回帰係数のt値は，正となるべきと考えられるが，正となったり負となったりしており，しかも有意と言えない値であるので，計算番号4をとり上げることとした。

なお，今回使用したキュポラを用い，同じ操業条件で実験操業をくり返えした結果，表2.40に示すように，何れも同じ因子が選定され，それらの特性値に対する時差もほとんど近似しており，何れも重相関係数がかなりの高い値を示しており，この解析結果の再現性は十分あるとみてよいと考えられる。

今回の実験操業，鋼材と銑鉄を原料として熱風水冷式塩基性キュポラで操業している場合，この操業を管理または制御することを目的として，先に述べた解析結果を考えてみると，情報因子としては，溶湯の化学組成の変化が起る前になるべく早く，炉況の変化を知る必要があり，そのためには，まず炉頂ガス炭酸ガス含有量および出湯温度に変化が生じたとすると，その4～6分後に溶湯の炭素含有量が変化してゆくことが解析の結果からわかった。

そこで，いかにして溶湯の炭素含有量の変化を少く維持してゆくために管理ないし制御するかについて検討してみよう。今回の解析の経過および結果で述べたように，制御因子としては熱風温度のみをとりあげたが，表2.32でみるように，熱風温度を調整することが有効でないかと考えられる。また熱風温度は制御因子ではあるが，熱風温度に変化が起った場合には，炉況に変化が起きていることを知り得るとも言えるので情報因子としても扱える。他の情報因子による判断と共に判断するのがよいと考える。

いま扱っている解析の結果は，各特性値および因子の観測した変動範囲内で

表2.40　鋼材と銑鉄を原料とした5.5 t熱風水冷式塩基性キュポラの実験操業の工程解析結果

操業番号	実験内容	重回帰分析において偏回帰係数が有意となった因子と時差	重相関係数
1	定常操業	①溶湯のC含有量ー情報因子　②溶湯のC含有量ー制御因子 出湯温度 ** (4)　熱風温度 ** (0) 炉頂ガスCO_2 ** (8)	①0.9861 ②0.6175
2	定常操業	①溶湯のC含有量ー情報因子　②溶湯のC含有量ー制御因子 出湯温度 ** (6)　熱風温度 * (0) 炉頂ガスCO_2 ** (8)	①0.9851 ②0.5987
3	定常操業	①溶湯のC含有量ー情報因子　②溶湯のC含有量ー制御因子 出湯温度 ** (4)　熱風温度 ** (0) 炉頂ガスCO_2 ** (6)	①0.9793 ②0.6037
4	定常操業	①溶湯のC含有量ー情報因子　②溶湯のC含有量ー制御因子 出湯温度 ** (8)　熱風温度 * (0) 炉頂ガスCO_2 ** (8)	①0.9845 ②0.6013
5	熱風温度変動	①溶湯のC含有量ー情報因子　②溶湯のC含有量ー制御因子 出湯温度 ** (4)　熱風温度 ** (0) 炉頂ガスCO_2 ** (6)	①0.9597 ②0.6159
6	熱風温度変動	①溶湯のC含有量ー情報因子　②溶湯のC含有量ー制御因子 出湯温度 ** (4)　熱風温度 ** (0) 炉頂ガスCO_2 ** (6)	①0.9838 ②0.6173
7	熱風温度変動	①溶湯のC含有量ー情報因子　②溶湯のC含有量ー制御因子 出湯温度 ** (6)　熱風温度 ** (0) 炉頂ガスCO_2 ** (8)	①0.9857 ②0.6088
8	熱風温度変動	①溶湯のC含有量ー情報因子　②溶湯のC含有量ー制御因子 出湯温度 ** (4)　熱風温度 ** (0) 炉頂ガスCO_2 ** (6)	①0.9837 ②0.6148

（注）　（）内の数値は時差（*min*）を示す

** 1％有意，* 5％有意

適用されるものである。

そこで，今回の解析の結果から，情報因子と溶湯の炭素含有量の関係の回帰式を作ると，

$$I_C = -24.645 + 0.000317\ X_{BP} + 0.152\ X_{TGCO_2} - 0.00111\ X_{TGT} + 0.0185\ X_{IT} \quad \cdots\cdots (2.4)$$

ここに，

I_C ： 溶湯中の炭素含有量 %

X_{BP} ： 送風圧 mm Aq

X_{TGCO_2} ： 炉頂ガス炭酸ガス含有量 %

X_{TGT} ： 炉頂ガス温度 ℃

X_{IT} ： 出湯温度 ℃

となる。

また，制御因子としての熱風温度と溶湯の炭素含有量の関係の回帰式を解析結果から作ると，

$$I_C = 0.7806 + 0.007907\ X_{HBT} \quad \cdots\cdots (2.5)$$

ここに，

I_C ： 溶湯の炭素含有量 %

X_{HBT} ： 熱風温度 ℃

を得る[1]。

これらの式は，今回の実験の結果の回帰式であるから，一般に適用させることはできない。それぞれのキュポラで同一操業をくり返えした結果，偏回帰係数をそれぞれ決めねばならない。

しかし，この式は，少くとも，今回の実験で溶湯の炭素含有量と熱風温度の変動範囲内での変化に適用されるものであり，これ以上広い範囲に熱風温度を変化させた場合の溶湯の炭素含有量えの変化の模様については，別に，そのような実験をしなくては明確なことは言えない。

なお，式（2.4）の回帰式を，この回帰式を求めた実験操業を実施した時か

ら２ケ月後に，同じキュポラで同じ操業条件で実験操業を行い，第３編第３章で述べるような，操業中の溶湯の炭素含有量の予測に用いたところ，この回帰式が十分成立することを認めた。

しかし，長い期間のうちには炉の修理をしたり，炉の状況が変化することもあるので，数ケ月毎，あるいは必要と認めたときには，実験操業を実施し，回帰式を作り直す必要があると考えられる。

熱風温度を制御することによって炉況を維持し，溶湯の炭素含有量を一定に保つようにする問題は，熱風温度の制御する範囲をどれくらい拡げたらよいかということを実験によって知り，熱風を加熱する方法を検討する必要がある。

また熱風温度によって制御しようとする場合，今回の解析結果で表2.32からわかるように時差１０分となっているため，情報因子によって溶湯の炭素含有量の変化を予測できるのが４～６分前ということになるので制御した結果はやや遅れて現われることになり，その間多少の溶湯の炭素含有量の変化は，やむを得ないことになる。

以上のことから，炉況を維持し，溶湯の炭素含有量をはじめ各化学成分を一定に保ってゆくためには，ある範囲までは熱風温度を変えることによって制御ができるが，もっと早く，もっと大きく制御したいときは，炉内温度を急速に変化させる効果的な，何らかの方法を考える必要があると思われる。

5．6　ま　と　め

以上の結果を総括してみるとつぎの通りである。

(1) 鋼材と銑鉄を原料として熱風水冷式塩基性キュポラの定常操業について，溶湯の化学成分，とくに炭素含有量の変動には，情報因子として炉頂ガス炭酸ガス含有量，出湯温度が関係が深い。

(2) 制御因子としては　熱風温度が有効と考えられる。また熱風温度は定常操業状態では，情報因子としても扱える。

(3) 制御因子としての熱風温度を，今回の実験の範囲以上変化させて，その炉

況えの影響，さらに溶湯の化学組成との関係を知ることにより，その有効さはもっと明確となると考える。

(4) 情報因子となる計測機器の選定と取付方法を検討することと，炉内温度を急速に，大きくも小さくも思うように調整できる，範囲の広い管理あるいは制御手段を見出す必要がある。

(5) また，このような実験操業をくり返えし実施し，工程解析を行ったところ，ほとんど同じ結果を得ており，解析結果の再現性は十分あると考えられる。

文　　献

(1) 吉村，栗原，土井：鋳物４０（１９６８），１１，８８３

(2) 吉村，牧口，栗原：鋳物３９（１９６７），５，３９３

(3) 吉村，栗原，牧口，山地，土井，石塚：鋳物３８（１９６６），９，５５１（予報）

第6章　酸素富化による炉況修正の際の工程解析

6．1　緒　　言

定常操業状態にあるキュポラ操業における工程解析を進めているうちに，連続して出湯している溶湯の化学組成の変動から，炉況の変動に関係する要因と関連する因子として，溶湯温度，ベッドコークス高さ等の情報因子，送風量，熱風温度等の制御因子が常に示されてきている。

これらの一連の工程解析のためのキュポラの実験操業においては，装入原材料をはじめ操業条件は，でき得る限り一定に保ったのであるが，観測データを収集している実験中とはいいながら，従来の経験から，炉況が変化してきたと判断したときには，操業担当技術者の手によって炉況の調整を実施していた。それ故に，工程解析の結果でてきた，炉況に関係の深い制御因子としての送風量や熱風温度は，実験操業中情報因子をどの程度総合的に検討し，これらの時差を考慮して判断したかどうかは別として，操業担当技術者の炉況の調整の操作によるものと見ることができる。

このように炉況の調整のために，各操業担当技術者が，キュポラの送風の，送風量や熱風温度を操作することはよく見掛けるところであるが，普通のキュポラでは，送風のための　送風機　や送風の予熱設備は，通常の操業に要するそれらの能力にさらに可成りの余力のあるものは設備しておらず，たとえ送風量や熱風温度をあげようとしても，わずかの余力を使っているので，それほどの著しい効果もなく，また時差の存在もあってある程度の時間がたってから，わずかに炉況に変化を与える程度であると考えられる。

とくに送風量については，本編第4章に述べたように，たとえ２０％程度の過剰送風を行ったとしても，当座は直ちに炉内温度があがるかも知れないが，ある程度の時間持続したことにより，かえって炉況の不安定を招くおそれもある。

以前に，半還元鉱を原料とする２ｔ熱風水冷式ノーライニング・キュポラに

よる実験操業において，送風に酸素富化を行った場合の炉況に対する影響を検討していたところ，普通のキュポラ操業において酸素富化を行うことにより，炉況の調整を行うことの可能性を把んだ[1][2]。

現在までに一連のキュポラ操業の工程解析において，炉況の変動に関する要因に関連した情報因子および制御因子を通覧すると，多くが炉内温度が要因として浮び上ってくる。そこで炉内温度が低下した場合，急速に炉内温度を上昇させる方法としては，前述のような，送風量や熱風温度をあげるよりももっと急速に目的を達する方法としては，溶鉱炉の方で試みられている送風に重油を吹込む方法とか，あるいはＬＰＧガスを吹込む方法などが考えられるが，もし送風に酸素ガスを吹込み，すなわち酸素富化によって目的を達することができれば，これは最も軽便な方法と考えることができる。

酸素富化操業についての報告は，既に発表されているが[3]，今回は，キュポラ操業中炉況調整を目的として，送風に酸素富化を単時間実施したときの炉況えの影響について実験を行い，その結果について検討することとした[4]。

6．2　実験方法

6. 2. 1　実験に使用したキュポラの諸元

実験に使用したキュポラは，１ｔ熱風水冷式酸性キュポラであって，その諸元は，本編第３章に述べたものと同じで，炉内径４８０㎜φ，羽口比４．１，有効高さ３０５０㎜である。

6. 2. 2　操業条件

操業条件を設定するに際しては，とくに装入物からの影響を極力抑えるため鉄原料としては鋼材のみとし，その他の原材料も含めて寸法もそろえ一定となるように努めた。

この実験操業における操業条件は，本編第３章に述べた通りで，全鋼材操業で，コークス比１４％，送風量１８㎥／㎜，熱風温度３３０～３４０℃とした。

6. 2. 3　データの収集

この実験操業において，熱風に酸素ガスを添加したあと，溶湯の化学組成，各因子の多くに，ある程度の時差をもって影響してくると考えられるので，熱風に酸素ガスを添加する前後に，かなりの時間的余裕をもたせて，2分間隔で溶湯の試料採取を行うとともに，溶湯の温度をはじめ，その他諸因子の、各計測機器類の記録紙から，あとで溶湯の試料採取時間に合せて読みとり時系列データを作った。

データの読みとりに使用した計測機器類の種類，型式および精度は本編第3章に述べた通りであるが，各計測機器類の試料採取および計測位置，ならびに熱風に酸素ガスを吹込む方法は図2－15に示す。

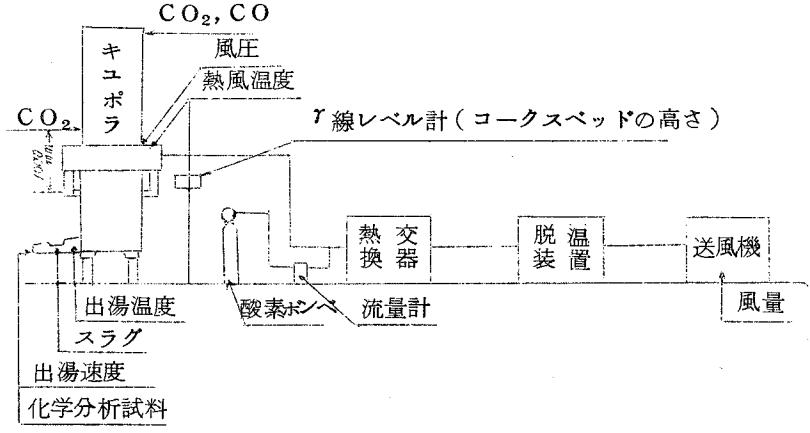


図2．15　　データ測定位置

6．3　実験結果

6. 3. 1　酸素富化の影響の時差について

前述6. 2. 3 に述べた方法によって収集したデータの一部を図2－16に示す。

まず最初に，熱風の酸素含有量を22.7％に増加させて酸素富化を行った場合，その影響が，溶湯の溶湯温度，化学組成，炭素および珪素含有量に現われ

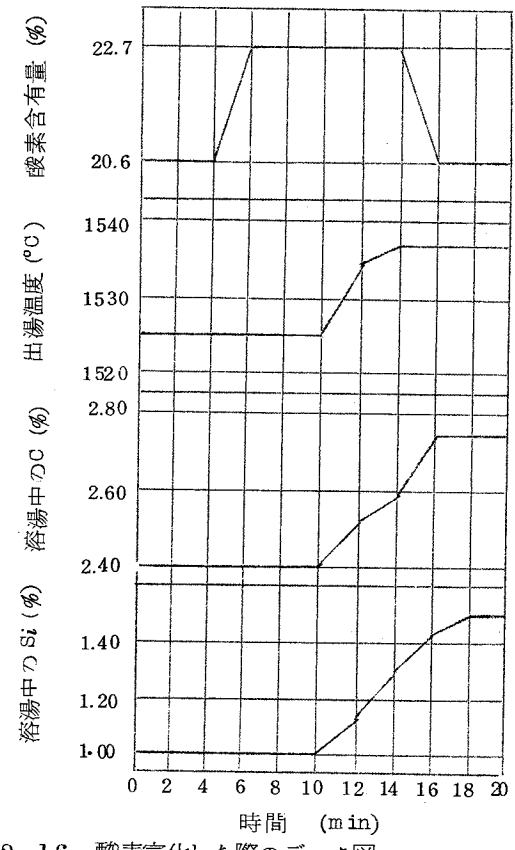


図2．16　酸素富化した際のデータ図

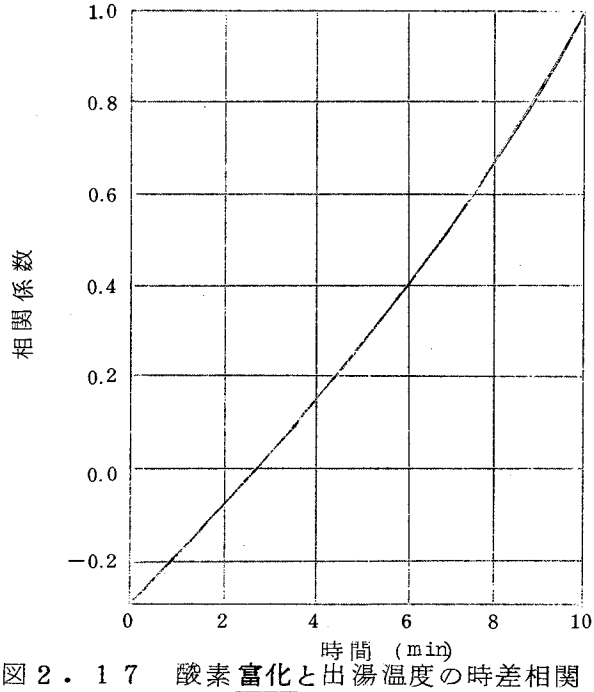


図２．１７　酸素富化と出湯温度の時差相関

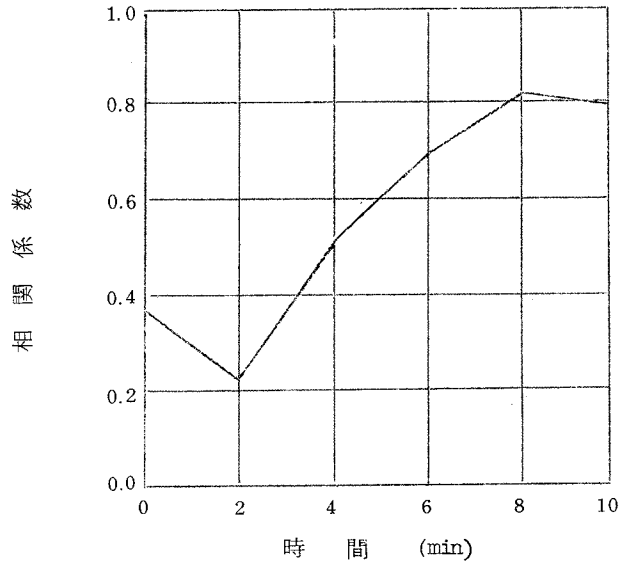


図２．１８　酸素富化と溶湯中の炭素量との時差相関

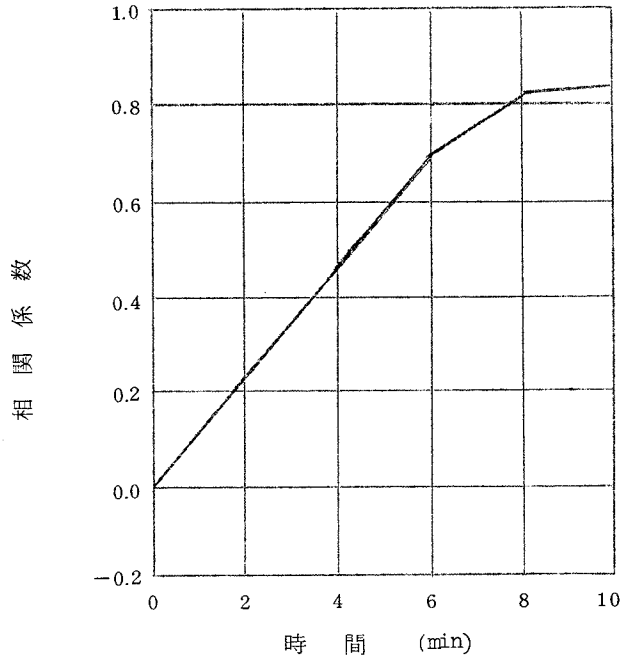


図２．１９　酸素富化と溶湯中のシリコン量との時差相関

る時差を見出すため時差相関分析(5)(9)を行ったが，その結果を図２－１７～図２－１９に示す。ここに熱風の酸素富化濃度を表わすには，実験の際の熱風取入口の酸素含有量を温度換算したところ２０.６％であり，図２－１５に示したように酸素ボンベから，流量計を見ながら熱交換器を出たところで熱風に酸素富化を行ったが，そのときの流量計の読みから，２０.６％に酸素富化量を加えて酸素含有量として表わした。

これらの結果から，熱風の酸素富化後，溶湯　溶湯温度１０分，炭素含有量８分，そして珪素含有量１０分の時差があり，何れも正の相関があることを示している。

6. 3. 2　酸素富化量の影響について

酸素富化を行うに際し，熱風の酸素含有量を２１.６％，と２２.７％に富化した場合の，酸素富化による溶湯温度，溶湯の炭素，珪素含有量の変化を調べてみると何れも正の相関を示す。

図２－２０は，溶湯の炭素含有量に対する影響で，直線的な関係とみることができる。

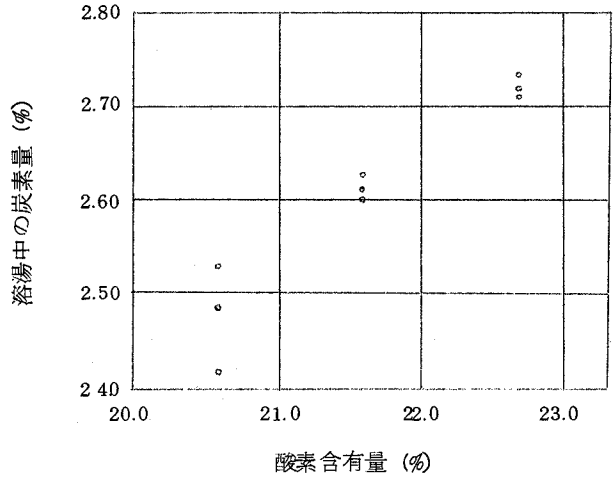


図２．２０　酸素濃度と溶湯中の炭素量の関係

6．4　考　　察

6. 4. 1　熱風の酸素富化による影響について

熱風の酸素富化をすることにより図２－１６から見るように，時差１０分という僅かの時間で溶湯温度が１５２５℃から急激に，１５３７℃に上昇することが認められる。これより熱風の酸素富化は，炉内温度を上昇させるのに有効な方法と考えられる。

また，図２－１６の熱風の酸素含有量を２２.７％となるように酸素富化を行った場合の，時間の経過による溶湯の温度の上昇の模様を計数化するため回帰式を作ると，

$$I_t = 1527.2 + 1.85t \quad \cdots\cdots (2.6)$$

ここに，

I_t ： 溶湯温度　℃

t ： 経過時間　min

を得る。

このように熱風の酸素富化は，キュポラ操業において炉況を急速に変化させるのに有効な手段であるが，溶湯の化学組成に対する影響について考えてみる必要がある。そこで溶湯の炭素，珪素含有量に対しての影響を計数的に扱えるように回帰式を作ってみると，

$$I_C = 2.415 + 0.0525\ t \quad \cdots\cdots (2.7)$$

$$I_{Si} = 1.044 + 0.0575\ t \quad \cdots\cdots (2.8)$$

ここに，

I_C ： 溶湯の炭素含有量　％

I_{Si} ： 溶湯の珪素含有量　％

を得る。

すなわち，熱風の酸素富化による影響として今回の酸素濃度範囲では，酸化の傾向は認められず，かえって溶湯の炭素，珪素含有量が増加の傾向を示し，顕微鏡組織，残渣分析結果でもこれを裏付けている。

なお，今回の実験結果の妥当性を検討するため，吉岡[3]の報告のなかの熱風の酸素濃度を23.1％とした場合の溶湯温度への影響の実験データから式(2.6)のような回帰式を作ると，

$$It = 1534.8 + 6.65\,t \quad \cdots\cdots (2.9)$$

を得ることができ，今回の実験から得られた式(2.6)と同様な傾向のものを得た。

6. 4. 2 酸素富化の酸素濃度の影響について

酸素富化の酸素濃度の影響について実験結果から回帰式を作ると，

$$It = 1436.7 + 4.27\,Vc \quad \cdots\cdots (2.10)$$

$$IC = 0.359 + 0.1037\,Vc \quad \cdots\cdots (2.11)$$

$$ISi = -2.182 + 0.1583\,Vc \quad \cdots\cdots (2.12)$$

ここに，

Vc ：熱風の酸素濃度 ％

となり，式(2.10)によると酸素量の増加と共に溶湯温度が上昇し，すなわち炉内温度が上昇することを示している。

次に，上記の結果の妥当性を検討するため吉岡の報告[3]からこの関係を求めてみると，

$$It = 1035.0 + 17.08\,Vc \quad \cdots\cdots (2.13)$$

となり，同様の直線的関係にあるが，やや酸素量の増加によって溶湯温度の上昇の度合が大きいようである。これは，酸素富化以前の溶湯温度が，筆者等の研究より140℃低いために，Vcの係数が大きくなったものと考えられる。

なお溶湯の炭素，珪素含有量との関係については，

$$IC = 0.8726 + 0.0962\,Vc \quad \cdots\cdots (2.14)$$

$$ISi = -1.348 + 0.1387\,Vc \quad \cdots\cdots (2.15)$$

を得られるが，今回の実験結果と同様な傾向にあると考えられる。

これらの結果から，係数そのものゝ値は，炉の種類，操業条件により異なる

が，筆者等の基本的考え方は，他の場合にも十分適用し得るものと考えられる。

6. 4. 3　キュポラの操業管理の手段としての熱風の酸素富化について

以上述べたように，熱風の酸素富化をしたとき，熱風の酸素濃度を22.7％にする程度で，それほど多量に酸素を富化しなくても，熱風に酸素を吹き込んでから，10分という僅かの時間で，溶湯温度が急速に12℃上昇し，炉内温度が急激に上昇していることを示している。

そこで，熱風の酸素富化が，キュポラ操業において，炉内温度が低下したと認められたときの炉況回復対策として，有効に使えることを示している。

しかしながら，熱風の酸素富化の溶湯，とくに溶湯の化学組成に対する影響は，今回の筆者等の実験のような熱風の酸素濃度22.7％まで，熱風えの酸素富化の持続時間8分までの間では問題がないが，酸素濃度，持続時間をさらに多くするときには，炉内における酸化の影響についても考慮する必要がある。

そこで，熱風の酸素富化の濃度22.7％まで，酸素富化の持続時間約5分ぐらいまでで炉内調整をするのが現在のところ無難であると考えられる。

これ以上の炉内調整を期待する場合には，さらに高濃度の酸素富化の実験，また熱風の酸素富化ではない，他の方法を開発すべきと考える。

なお，この実験操業を同じキュポラについて3回くり返えしたが，ほとんど同じ結果を得た。

6．5　ま　と　め

以上の結果を総括してみればつぎの通りである。

(1)　酸素濃度22.7％という，比較的軽度の熱風の酸素富化により，炉況を急速に変化させることができる。

(2)　熱風の酸素富化による溶湯の化学組成に対する影響は，今回の実験の範囲内，熱風の酸素濃度，酸素富化の持続時間内においては溶湯の炭素，珪素含有量が増加の傾向にあり，酸化の影響は全然認められなかった。

(3) 酸素富化の際の酸素濃度の影響については，今回の実験の範囲内では，酸素濃度の影響は図２－２０にみるように，直線的である。

(4) キュポラの操業管理の手段としての熱風の酸素富化を考えた場合，今回の実験の範囲内では有効な手段と考えられるが，これ以上の炉内温度の上昇を期待する場合は，別の方法を開発することを考えるべきである。

文　献

(1) H. Yoshimura, Y. Kurihara and T. Makiguchi : Proceedings of the Memorial Lecture Meeting on the 10th Anniversary of the Foundation of National Research Institute for Metals ,(1966), 113

(2) 吉村，栗原，牧口 ： 鋳物３８（１９６６），9. ５５２（予報）

(3) 吉岡 ： 燃料協会誌 ３２(１９５３)，１１，６３４

(4) 吉村 ： 鋳物 ４１（１９６９），３．１８７

(5) 吉村，牧口，栗原 ： 鋳物３９（１９６７），５，３９３

第7章　小　括

7．1　緒　言

キュポラ操業に対する工程解析を行うことにより，キュポラの操業管理のための管理手段を見出そうという試みは，可能であることがわかった。

すなわち，キュポラ操業という工程の特性値として，キュポラ内の炉況の変動の結果としての溶湯の化学組成の変動に関係する諸因子について，情報因子と制御因子とに分けて関係を求めてみた結果，比較的容易に，それらの関係のあるものを見出すことができた。

種々の型式の，種々の条件の下のキュポラ操業において，溶湯の化学組成の変動に対して関係のある諸因子として求められた結果をみた場合，特別な場合を除き，大体，同じ因子が全体として関係していることを示しているが，厳密な因子の種類，それらの溶湯の化学組成との時差は，主として実験に使用した個々のキュポラの炉の構造，設置条件，キュポラに装備された計測機器類の種類，試料採取位置，設置場所などにより個々に異なつていることを示していた。

7．2　半還元鉱を原料とするキュポラ操業の工程解析に関する考察。

半還元鉱を原料とした熱風水冷式ノーライニング．キュポラの塩基性操業で得た観測データによつて工程解析をする際，操業中の炉況の変動の活発なことから，観測データも変動が大きいため，解析を進める上で比較的容易であつた。すなわち，観測データ相互間の時差を求めるにも知ろうとする，2つの観測データのみによる単相関を求めてゆく時差相関分析法で目的を達することができた。一般のキュポラ操業の解析に用いるために策定した，第1編第3章3．4に述べた解析手順によつても勿論可能である。試みにこの解析手順によつて時差を求めてみたところ，表2．41のような結果を得たが，本編第2章の表2．9の結果とほとんど同じ結果を得た。

表2. 41 計算方法による時差の違い min

計算方法	出湯温度	炉頂ガス温度	炉頂ガスCO_2
時差相関法によって求めた時差	14	6～8	14～16
第1編第3章3.4の解析手順によって求めた時差	12～14	4	14～18

また，使用したキュポラが，ノーライニングであるということもあるが，特性値である溶湯の化学組成に対して，種々の情報因子が，関係するが，寄与する因子の数は，炭素，珪素，マンガンの順に減少する。そして，溶湯の化学組成、炭素，珪素，マンガンに共通する制御因子は熱風温度であった。

溶湯の化学組成の変動に対する諸因子の時差が，比較的長いことについては時差がキュポラの構造からくる冶金技術的に起っている部分と計測技術的に起っている部分とが加わったものである。とくに計測機器類の試料採取位置および取付位置に起因している部分とが大きいと考えられ，工程解析に，あるいはさらにキュポラの操業管理に適した方法を検討しなければならない。

7．3 普通キュポラ操業の因子決定に関する考察

一般のキュポラ操業においては，炉内において鉄原料の再溶解が主となっているため，それほど活発な炉内変動も起らず，このような操業から得られる観測データも全般的に，それほど大きな変動を起していない。このような観測データの解析を進める場合，解析方法を十分考慮しなくてはならない。

そこで鉄原料として，とくに均一な，鋼材１００％を用い，１ｔ熱風水冷式酸性キュポラによる実験操業で得られた観測データを用い，一般のキュポラ操業に対する解析方法について検討した結果，キュポラ操業の工程解析を進める場合，一般に広く使える第1編第3章3.4に述べる解析手順の有効性を確認した。その要点は，観測データに伴う誤差を移動平均法によって予め丸めておきそのような丸めたデータによって重回帰分析を行う。観測データ相互間の時差

の選定については，冶金技術，計測技術的な判断によって，種々の時差で重回帰分析法をくり返えし，統計的判断により各データ間の時差を決定し，同時に解析を完了するという手段である。なおその場合，本編第3章3．4に述べたように時間をずらせた場合の各データの自己相関を求めておくことも参考となる。

この手順を用い，熱風水冷式酸性キュポラによる鋼材を原料とした通常操業，非常に広く用いられている熱風水冷式塩基性キュポラの鋼材および銑鉄を混合した通常操業，熱風水冷式酸性キュポラによる鋼材を原料とした過剰操業における工程解析によつて，溶湯の化学組成の変動に関係する因子として，情報因子として，炉頂ガス温度あるいは炭酸ガス含有量など炉頂ガス関係の諸因子，溶湯温度，ベッドコークス　高さ，制御因子として熱風温度，送風量，あるいはベッドコークス高さなどがあげられた。また，過剰送風の場合は，炉況の変動が不安定となり，多くの因子から総合的に判定しなくてはならないことを示していた。

各種のキュポラの実験操業の結果，溶湯の化学組成の変動に関係する各因子とそれらの観測データの時差について，工程解析の結果を調査すると，それらの関連性と時差は，キュポラの構造，設置条件，それらのキュポラに装備された計測機器類の種類，試料採取位置，設置場所など，各キュポラの個有の性状をもつていることを示しており，確かに，各種のキュポラの解析結果が示していることは，炉内温度の変動によつて特性値をはじめ，関係する各観測データに変動が現われていることを示している。

しかし，実験操業に使用した，装備されている計測機器類をも含めたキュポラの設置条件によつて実際に観測データから関係を知る因子は，それぞれ個々に変つていることを知つた。

すなわち，対象とするキュポラの与えられた操業条件の操業をそれぞれ個々に工程解析を実施し，それぞれのキュポラの与える操業条件によつてキュポラの操業管理方式が細部においていくらか異なつており，それらを知つて操業管

理方式を樹立すると共に，一方において，とくにキュポラの炉況変動を知るための情報因子とする計測機器類の開発，改善，さらに適当な制御因子の発見，また制御方法の開発を行うべきである。

7．4　酸素富化による炉況修正の際の工程解析に関する考察

キュポラ操業中，炉況に変化が起った場合，情報因子によって総合的に判断できるが，炉況の変化がある限度を超え，そのまゝ放置することによって炉況を修復することが困難となることがよく起るが，炉況の変化が，予め設定した限度を超えた場合，でき得る限り迅速に炉況を修正する必要を感ずる。

炉況の修正の手段としては，送風量，熱風温度を変更するなどの方法がとられているが，普通のキュポラでは，通常の操業状態で，送風機や熱風のための熱交換器の能力には余力が余りなく，炉況修正のためには，それほどの効果があがらない。

そこで，比較的容易に効果を上げられる方法として熱風に酸素を添加して酸素濃度を高める，いわゆる酸素富化を実施することが考えられ，実験操業中に試みたところ，その有効さを確認することができ，その効果を定量的に把むことができた。

もっとも，定量的に把んだとは言いながら，実験操業に使用した１ｔ熱風水冷式酸性キュポラで鋼材のみを原料とした場合の操業についてであり，一般にこの効果を利用するには，同様な方法で，個々のキュポラの必要とする操業条件での実験操業を行い，観測データから定量的な関係を把む必要がある。

また計量的には把めなかったが，実験操業中，棚吊りが起ったときには，熱風の酸素富化を短時間ほどこすことにより，簡単に棚吊りを解消していることが認められた。

7．5　ま　と　め

以上の事柄を総括してみるとつぎの通りである。

(1) キュポラ操業のプロセス解析に，広く使用することのできる解析手順を確立した。

(2) 半還元鉱を原料としたノーライニング塩基性キュポラ操業において，キュポラ操業を管理する際の情報因子の数は，いろいろあるが，溶湯の化学組成炭素，珪素，マンガンの順に減少する。

(3) 一般のキュポラ操業において，キュポラ操業を管理する因子は，情報因子として炉頂ガス温度，あるいは炭酸ガス含有量など炉頂ガス関係の因子，溶湯温度，ベッドコークス高さ，制御因子としては熱風温度，送風量，あるいはベッドコークス高さなどが有効で，要するに炉内温度の関係したものであると言える。しかし，これらの関係する諸因子の種類，それらの観測データの溶湯の各化学組成との間の時差は，計測機器類も含めたキュポラの設置条件によって異なる。

(4) キュポラ操業の工程解析を進める際，溶湯の化学組成のうち重要な炭素，珪素およびマンガンについて解析の結果を検討したところ，炭素含有量の変動が各因子との関連性が一番多く，しかも珪素およびマンガン含有量の変動に関係する因子も含まれており，しかも炭素含有量は溶湯の品質としても最も重要と考えられるので，工程解析の特性値としては溶湯の炭素含有量のみを対象として進めてよいと判断した。

(5) 熱風に酸素ガスを添加する酸素富化は，必要あるとき炉況修正をするには，効果的な方法であると考えられる。

(6) キュポラの炉況変動を適格に把握するための情報因子となる計測機器類の開発，改善，さらに適当な制御因子の把握，そして制御方法を考えなくてはならない。

第3編　キュポラの新らしい操業管理方式の確立

第1章　緒　　論

現在のキュポラ操業の操業普理は、日常の操業条件の設定することについては、多くの研究成果があり、標準化され、技術標準として作成され使用されている。しかし、操業開始後の溶解作業の詳細な管理項目，処置方法については、既に第1編第2章に述べたように、キュポラの計装化が今日においても、個々のキュポラの性状に左右されがちであり、結局は、個々のキュポラの特性に習熟した操業担当技術者の判断によらざるを得ないのが現状である。

それ故、キュポラ操業の操業標準については、個々のキュポラの性状に左右されるところから、各工場の管理項目について調べると、それぞれ異なっており[1]、管理規準が明確になっていないことが多く、たとえ明確に示してあっても、個々の操業担当技術者の当面した状況に際しての判断が必要とされ、その判断の上で処置をとる、処置方法のみが規定されているのが現状である。

本編においては、キュポラ操業のためのなるべく完備した操業標準を作成するため、操業管理の方式を改善し、管理項目と管理規準を定め、処置方法を確立することを目標として、とくに、第2編の工程解析の結果を用いて、溶湯の管理を中心として述べることとする。

一般にキュポラ操業における溶湯の管理を考える場合、連続して出湯する溶湯の品質を均一に保つためには、装入する原材料の品質、この場合、この品質には化学組成ばかりでなく、形状および寸法も含んでいるが、そのような品質をできるだけ一定に保つことから、装入順序、1回の装入量と言った装入方法の管理をすると共に、キュポラ操業中の炉況を一定に保つ溶解作業

が含まれる。

第2編に述べたキュポラ操業の工程解析は、上に述べた、主として、キュポラ操業中の炉況を一定に保つため、炉況の変化の発見と必要ある場合の操作方法の探究を主とした目標として行ったものであるが、これらを中心として、ここに、キュポラの新らしい操業管理方式を提案したい。

その要旨としては、第2編でキュポラ操業の工程解析を行った結果から、各キュポラの設置条件によって異なるが、工程解析の結果得た情報因子を用い、各キュポラ個有の情報因子の時差を考慮の上、炉況判断をすることにより、必要があれば、まずはじめは制御因子を操作することによって、ある限度まで炉況を調整することであり、つぎにある限度を超えて回復しない場合には、熱風に酸素ガスを添加する酸素富化を実施することによって熱風温度を急速にあげ、炉況を迅速に、大きく修正する方法を組合せた方式である。ただこの方式の具体化には、観測データ相互間にわずかの時差があるとは言え、情報因子を絶えず監視し、できるだけ早く計算を行って炉況を判断しなくてはならないという問題があり、実験操業においては可能としても、実際の作業に応用するには、計測方法，計測機器類および計算方法の改善等、解決しなくてはならない問題が存在している。とくに、この問題の解決には、計測技術的な考慮と共に電子計算機を導入することにより、容易に可能となると考える[(2)(3)]。しかし、現在まで、個々のキュポラの性状に習熟した操業担当者の、その都度の判断を、定量的に、合理的に誰でも実施できる見通しがついたと考えられる。

本編第2章には、この新しい操業管理方式について述べ、つづいて第3章には、この方式を実際操業に適用した状況の報告と、第4章には、この新しい操業管理方式を基礎として、キュポラ操業の自動制御方式えの展開のための諸問題について述べる。

文　献

(1) 日本総合鋳物センター研究調査報告６１「鋳物の品質管理」（１９６６）１３２

(2) 吉村：鋳物４０（１９６８），３，３３８

(3) 日本鋳物協会「キュポラハンドブック」（１９６７），４２４

（吉村担当）

第2章　キュポラの新らしい操業管理方式について

2・1　緒　　言

現在のキュポラ操業の工程解析の結果から、とくに溶湯の管理を中心とした、現在のキュポラの操業管理方式の改善について考察することにより、新らしい操業管理方式について提案したい。つぎに、キュポラのこの新らしい操業管理方式を効果的に活用するための問題点について検討し、準備すべき事項を整理した。

2・2　キュポラの新しい操業管理方式の構想

一般にキュポラ操業における操業管理を考える場合、連続して出湯する溶湯の品質を均一に保つことを目的としているが、その実施を考える範囲は広い。要はキュポラ操業の炉況を長時間に渉って安定に保つということなのであるが、炉況を変化させる要因をすべてつかみ、それらが原因となって炉況を変化させることがないようにしてゆかなければならない。

普通、溶湯の品質として炭素，珪素，マンガン，硫黄などの化学組成で表わすが、実際には、操業中炉内雰囲気で影響される少量の酸素，水素含有量も問題になるであろうし、出湯する溶湯の温度も品質であると言える。しかし、第2編のキュポラ操業の工程解析において、キュポラ操業という工程の特性値として溶湯の化学組成、とくに炭素含有量を使用したのは、溶湯の品質のうち炭素含有量だけを抜き出して管理をしようとしたのではなく、上に述べたような広く見た溶湯の品質を作り出す炉況のパラメーターとして、炉況の状況に非常に影響のある炭素含有量に注目したのである。

キュポラ操業中の炉況を非常に左右するのは、大別して、つぎの3つ、すなわち、

(1)　そのキュポラ操業に採用した操業条件

(2)　装入する原材料の品質と装入方法

(3) 溶解作業の監視と処置

と考えられる。

これらのうち個々のキュポラに適した(1)の操業条件は、同じキュポラについて、同じ品質の溶湯の溶解をくり返えしてデータをとり、既に発表されている幾多の研究成果を織り込めば、比較的容易に選定することができる。

問題は、使用する原材料の品質と装入方法および溶解作業の監視と処置である。

まず装入する原材料の品質と装入方法についてであるが、原材料の品質と言った場合、単に、それらの化学組成だけではなく、物理的性質を始め、それらの状態、とくに形状および寸法も含まれる。

装入する原材料の品質をなるべく均一なものとしてキュポラに装入して操業をするようにしていないと、他で如何に努力しても、炉況を安定に保つことは不可能である。とくに、装入する原材料の形状および寸法は簡単なことであるが、これらを均一に保つことは工数や労力がかかり、なかなか実行は困難である。

装入原材料は、キュポラ操業中、炉頂部分から装入され、徐々に炉内を降下してゆくが、個々のキュポラにふさわしい装入原材料の大きさがある。たとえば、鉄原料について言えば，銑鉄，返り銑，鋼屑などそれらの種類，形状，寸法によって炉内を降下しつつ溶解する位置が異なってきて、溶湯の品質の不均一さを招く。またコークスについても、とくに大きさの不ぞろいにより炉内降下中の燃焼する位置，速さが異なり、炉内雰囲気を正常に保てなくなる。さらに比較的、量が少ないとは言え、装入する石炭石，ホタル石，フエロアロイなども、大きさがそろっていないと、炉内を降下中適当な位置で反応を起さず、そのため予想する効果を期待できず、溶湯の品質の不均一さを招く原因となる。(1)

このように装入原材料は、形状，大きさをそろえることに注意して品質を保持するだけで、計算通りの装入原材料を、ただ装入するだけではなく、装

入方法にも注意しなくてはならない問題がある。

それは、まず、キュポラに装入するときの、バケットに入れる1回の装入量、いわゆる装入物1山の量についてである。出湯する溶湯の品質を均一に保つことを考えた場合、できるだけ1山の量を小さくして、鉄原料、コークス等を交互に装入する方が望ましい。しかし、交互に装入するコークスの炉内における層の厚みについても考慮しておかないと、その間の鉄原料の詰まり方が不均一になりがちで、炉内ガスの通過が一様でなく炉況に影響する。そこで、炉況になるべく影響しない1山の量を決め、常に同じように装入しなければならない。(2)

また、装入原材料の装入順序も注意しておく必要がある。鉄原料は、普通、銑鉄、返り材、鋼屑等であるが、これらの溶融点が異なることから、装入の際、溶融点の高い鋼屑が上になるようにして、その下に銑鉄、返り材が位置するように装入した方が、溶融点の低い銑鉄、返り材が先に、炉内の高い位置で溶解し下方に融体となってから早く降下し、銑鉄類の下にあった鋼屑は、低い位置まで固体のまゝで降下するが、固体状態での降下速度が遅いため熱吸収率がよく、結局、出湯温度が高く維持でき、溶湯の品質の変動も少ないという報告がある(2)。

このように、装入原材料の化学組成、物理的性質を始め、それらの状態、とくに形状および寸法というような、いわゆる大きさについても、装入するキュポラに適した品質を選び、できるだけ均一になるように留意してゆかねばならない。

そのためには、以上述べたようなことから装入原材料の品質をはじめ装入方法についての詳細な標準化を実施し、とくに原材料の大きさをそろえるとか、装入量を正確に秤量するなど、人件費、運搬費などがかかる作業を厳格に実施するためには、機械化、自動化を考える必要がある。

また、第2編第3章の工程解析において明らかになったように、ベッドコークス高さの変動は、炉況の変動に密接な関係があり、溶湯の品質に影響す

るので、何等かの原因でベッドコークスの消耗が起った場合には、迅速に追込コークスを装入してコークスを補給する必要がある。上記装入方法の標準化、機械化あるいは自動化が行われていても、このような緊急な必要が、溶解作業の監視中に起った場合には処置できるようにしておく必要がある。

つぎに(3)の溶解作業の監視と処置であるが、既に何回も述べたように、個個のキュポラの性状に習熟した操業担当技術者の判断によって、キュポラに装備された計測機器類やキュポラの出湯状況、スラグの状況あるいは炉頂ガスの様子によって総合的につかみ監視し、必要を認めた場合に適切な処置をしていたことを、第2編のキュポラ操業の工程解析の結果から導び き出せると考えた。

具体的には、つぎの2，3に述べるが、要は、キュポラ操業中、そのキュポラの周辺で行われている作業が、作業標準通り行われているかどうかをチエックすると共に、第2編に述べた炉況の変動に関係する諸因子、すなわち情報因子の動向から、炉況を表わすためのパラメータとしての計算した時々刻々の溶湯の炭素含有量を絶えず注視しており、それぞれのキュポラの平常の定常状態にある場合の溶湯の炭素含有量の限界内を超えた場合、適切な処置をとり、炉況の修正を実施するのである。

キュポラ操業の工程解析結果、炉況の変動に関係する情報因子を見出した場合、第2編で述べたように、出湯する溶湯の化学組成の影響されるに至った時差を求めてあるので、この時差を用いてできるだけ早い処置をすれば、炉況は修正されることによって溶湯の品質の変化は早く回復できることになる。

このようなキュポラ操業中の操業管理の中枢となる、溶解作業の監視を行うには、チエックする技術者の行動を考えると、前に述べた装入作業のチエックも含めて計測機器類の集中化とチエックの機械化、自動化の方向に検討を進める必要が起ってくる。ここにキュポラの計算機制御の目標が生れてくるのである。

2・3　工程解析の結果からの新らしい操業管理方式の考察

いま、キュポラ操業中、数時間に渉り、数分間隔というように短時間ごとに出湯口で溶湯の試料を採取して、化学分析をして、溶湯の化学組成のあるもの、たとえば炭素含有量の試料をとった時間の順にならべたグラフを図3.1とする。

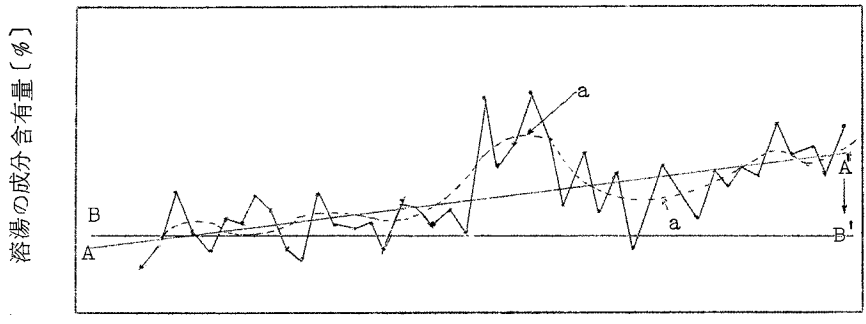


図３．１　キュポラ操業中の溶湯成分の変化の模様

この図において、操業している長い時間のうちに、試料採取および化学分析などに起因すると思われる微変動を除いて、移動平均をとった点線を眺めていると、比較的大きいａというような波と、ＡＡ'線に示すような傾向で変化してゆくことをみることは、よくあることである。そこで、比較的大きいａというような波も、ＡＡ'線を軸としないで、横軸に平行なＢＢ'線を軸として変化していれば、溶湯の化学組成も非常に改善される筈である。

そこで、ａのような、ある程度大きい変化を示すときと、全体としてＡＡ'線に従って変化してゆく傾向を、各種の計測機器類の指示を総合して知ることができれば、そのような傾向をなるべく早く知って、何等かの急速な処置を行って炉況を調整する方法がないかなどということが、第２編の工程解析の目的であった[3]。

このような目的から、キュポラ操業の工程解析を進め、炉況の変動のパラメータとして、主として溶湯の炭素含有量の時間的な変動に対する、炉況の変動に関係する要因と関連した諸因子を見出したが、溶湯の炭素含有量の時系列データと諸因子の各時系列データ相互の間に時差があり、それらの時差を検出することができた。

これらの時差は、図3.2のように、炉況の変動に関係して起るものである

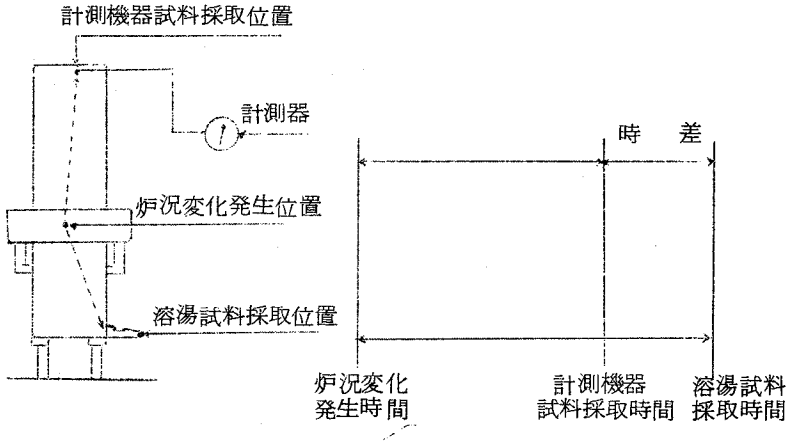


図3－2　時差の発生の姿

が、それらの絶対時間はわからず、炭素含有量のデータに変化の現れた時間と諸因子の観測データに変化の現れた各時間との差を時差として求めたことになる。

これらの絶体時間がわからないことから、炉況の変動を知り、できるだけ迅速な炉況調整を実施しても、ある時間は炉況が変化しており、その間は、溶湯の品質が変化したことになるが、早く炉況を修正したことにより、それだけ今までのキュポラ操業より、溶湯の品質の変化も少くてすむようになる筈である。

キュポラ操業の工程解析を行うため、２６回に渉るそれぞれ数時間に及ぶ各種のキュポラの実験操業における溶湯の炭素含有量のデータに対する各因子の観測データとの時差の検出を行ったのであるが、それらの結果から、実験操業に用いた個有のキュポラごとに、検出した時差を整理してみると表3.1の通りである。

表３．１　各キュポラで観測したデータの時差（min）

キュポラの種類		2 t 熱風水冷式 ノーライニング キュポラ	1 t 熱風水冷式 酸性キュポラ	5.5 t 熱風水冷式 塩基性キュポラ
所在		金属材料技術研究所	埼玉県機械鋳物工業試験場	自動車鋳物(株)
溶湯の炭素含有量	出湯温度	１２～１４	０～２	４～８
	炉頂ガス温度	４～８	２～４	６～１０
	炉頂ガス Co_2	１４～１８	４～６	６～８
	送風圧	４～６	０～２	４～６
	熱風温度	２０～２４	０～２	１０
	ベッドコークス高さ	－	６～８	－
	出湯量	－	２～４	－
	送風量	１４～１６	－	６～１０
	スラグ C_aO	塩基度３６	－	１２
	スラグ F_eO		－	１０
	冷却熱量	－	－	４～６

これらの結果を整理してみると、時差は負になる可能性も考えられるが、負になったことはなく、最小０以上正の値となっている。

また、計測機器類のブランクテストを試み、炉頂ガスの炭酸ガス計および一酸化炭素計の炉頂部の試料採取口に煙を入れ、計測部に、これらの機器についている真空ポンプを働かせて、計器の読みにふれのでるまでの時間を計

測したところ、表3.2のような結果を得た。

表3．2　CO_2，COメータの感知時間の実験

キュポラの種類	所在	距離(m)	感知時間 (min)
2t熱風水冷式ノーライニングキュポラ	金属材料技術研究所	16	6
1t熱風水冷式酸性キュポラ	埼玉県機械鋳物工業試験場	5	8

この結果から、個々のキュポラごとに、個有の事情、試料採取口の位置、形状、計測機器のある場所までの距離、計測機器の感度によって異なっており、改良の余地のあることを見出した。

また、第2編に述べた、キュポラの工程解析に用いる観測データを収集するについて、計測機器類そのもの、各計測機器類の試料取入部、いわゆる感知部の状態など個々の設備条件によって、観測データに誤差が混入することが考えられる。しかし実験操業をくり返えし、同様な解析結果を得られなかったものは困るから除いた。

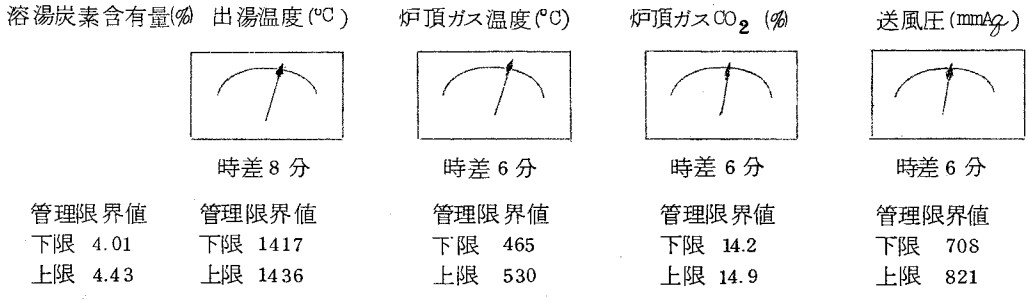
さらに、観測データの誤差については、観測データの変動範囲の $\frac{1}{5}$ 以下の精度をもつ計測機器類を用いることとし、あらかじめ点検の上実験に使用した。その結果として、今回報告しているように再現性もあり、十分信頼できると考えられる。このことは、将来のキュポラに装備する計測機器類を選定したり、開発するために重要なことであると考える。

つぎに、各キュポラの底部の湯溜り部の深さと出湯の位置によっても、炉況の変動から溶湯の化学組成の変化するまでの時間は変ってくるであろうし、湯溜り部の深さが深いときには、小さな溶湯の品質の変動は、湯溜り部で薄められて、外には余りはっきりしないこともあると考えられる。

以上のようなことから、差当りは現状のキュポラに適用する操業管理について、キュポラ操業の工程解析の結果から、新らしい操業管理方式を考える

としても、観測データ相互の時差については、今後、改善の余地があり、新らしい操業管理方式の有効性は、増々向上してくるものと考えられる。

キュポラの新らしい操業管理方式の中枢となる、溶解作業の監視の具体的な方法としては、第2編に述べた工程解析の結果、個々のキュポラによって、それぞれのキュポラに装備された、上に述べた計測機器類の事情、さらにそれらの計測機器類の管理状況によって、重回帰分析の結果、有意となり、選定した炉況に関連する諸情報因子は多少異なっているし、特性値の炭素含有量のデータとの時差も異なるが、第2編、第3章、あるいは第5章などに示した式（2.2）、（2.3）、（2.4）などの回帰式を作り、それらを用い、これらの回帰式を構成する各情報因子の、平常の定常操業状態における各観測データのなるべく多くの平均値と標準偏差を標準値とし、品質管理に用いられている管理図のように、平均値に対して標準偏差の3倍を管理限界値として、図3.3のように、時差を考慮しながら、各情報因子のどれかが管理限



$$Ic = 5.13 + 0.00135X_{It} - 0.000489X_{TGT} - 0.271X_{TGCO_2} + 0.00183X_{BP} \cdots\cdots$$

・・・・・・・回帰式

図3．3　監視する情報因子と時差との管理限界値の例

界値を超えた場合、回帰式を計算し、回帰式から求めた、パラメータとしての溶湯の炭素含有量が、各情報因子の管理限界値と同様に計算した、平常の定常操業における溶湯の炭素含有量の平均値に対して、標準偏差の3倍の管

理限界値を超えた場合、炉況にみのがせない変化が起ったとして何等かの炉況に対する処置をとることにするのである。

なお、溶解作業の監視中に、回帰式を計算してパラメータとしての溶湯の炭素含有量を予測する場合、計測機器類の読みは2分間ごとの読みとし、2分間の平均値を求めておき、連続7点（第1編第3章、式（1.8）において$\ell=3$の場合）の平均値の移動平均値を1点として、連続して移動平均値をみてゆき、この移動平均値が管理限界値から出るかどうかをチエックすることとした。

炉況に対する処置方法としては、第2編の工程解析の結果、

(1) 熱風温度の変化

(2) 送風（熱風）に対する酸素富化

など炉内温度を平常にもどすような、炉内に対する熱的操作が効果のあることがわかり、その処置をする場合の計量的関係は、例えば、第2編第3章、第5章の式（2.2）、（2.4）、などのように回帰式として求めることができ、それらの回帰式によって処置の程度を決定して行う。しかし、操業中にとくに異状変動がキュポラに起ったとみられた場合、たとえば、棚吊り気味で出湯量に異状を感じ、また送風圧が異状に上った場合など、上記回帰式でも指示されるが、さらに計測機器類の観測値の異状さから判断することができ、そのような場合、(2)の送風に対する酸素富化で多くの場合処置できると考えられが、このような比較的大きな処置を実施した場合には、

(3) 装入物の調整

により、もしベッドコークスが消耗したとみられるならば、効果が現れる時間が遅くなるので、迅速にコークスを補給するため装入物の調整を行う必要がある。

なお、炉況を監視するための上に述べた各情報因子の観測データをチエックするための管理限界値は、季節の変化、炉況条件の変化、炉の補修の影響などあるのでその都度、時々観測データをとり、再計算をしてみて、必要が

あれば修正をしておく必要がある。

2・4　キュポラの新らしい操業管理方式のフローチャートおよびまとめ

以上考察したことから、キュポラの新らしい操業管理方式として、つぎの附図3－1のフローチャートを作成した。

このフローチャートに示す、キュポラの操業管理方式の実施については、個々のキュポラの実際操業について工程解析を予め行い、炉況判断に用いる情報因子ならびに制御因子の選定とそれらの、炉況の変動のパラメータとする特性値、たとえば溶湯の炭素含有量との間の時差もおのおの求めておく必要がある。

この操業管理方式を、現状のキュポラ設備のまゝで応用しようとするときには、装入原材料の管理はできるだけ、この線に添う努力をすると共に、溶解の監視についても前に述べたように、キュポラに装備されている計測機器類の指示が個有の性状を示しがちであることから、使われる情報因子を指定することはできないが、主として炉内の熱に関係したものは使うことになる。しかし、余り因子の数が多いと、実験操業では、人手もあり、可能としても、観測する技術者が多忙となるので、使用する回帰式の重相関係数は低くなるが、因子の種類を減らして、時々刻々のパラメータとしての溶湯の炭素含有量を予測し操業を管理することは不可能ではない[4]。この場合、予測に使わなかった因子の状況も、それらの計測機器類によって異状変動の発生に注意していなくてはならない。

文　献

(1) 加山、野崎、高森：鋳物29（1957），5，333

(2) 加山、中江：日本鋳物協会キュポラ部会提出資料（1967年2月）

(3) 日本鋳物協会「キュポラハンドブック」（1967），429（吉村担当）

(4) 吉村、栗原、笹原、山中：鋳物40（1968），10，799

第3章　キュポラの新らしい操業管理方式の効果を観察するための実験操業

3・1　緒　　言

本編第2章で述べたキュポラの新しい操業管理方式の効果を観察するための実験操業として、5.5 t 熱風水冷式塩基性キュポラ、その他を用いた結果について報告すると共に、この操業管理方式の可能性について検討した。

その結果、この操業管理方式が、実用性のあるものと認められることを確信すると共に、この方式のキュポラ炉前の観測データの収集と処理に手間がかかり易いため、これらについての準備を予めしておく必要があることを知った。また、炉前の手間を少くするため、さし当って、この管理方式を一部採用することについても検討した。

3・2　実験方法

3・2・1　実験に使用したキュポラの諸元

実験に使用したキュポラは、第2編第5章の実験に使用した5.5 t 熱風水冷式塩基性キュポラで、その諸元は、第2編第5章の表2.31に同じで、その内径1,000 mmφ、羽口断面積0.066 ㎡，羽口比 A/a ＝12，有効高さ4,600 mm、炉底から羽口までの高さ550 mmである。

3・2・2　実験操業の操業条件

第2編第5章の実験同様、操業条件の設定に際しては、とくに装入物からの炉況の変動原因を極力おさえるように努めた。装入鉄原料は銑鉄1、戻し鉄4、鋼材5の割合で用い、操業の際の目標成分は、炭素3.9％、珪素1.3％とし、操業条件は、送風量 75 ㎥/min，熱風温度420℃，風圧700 mm Aq であり、第2編第5章の表2.32、表2.33および表2.34の通りである。

3・2・3　操業管理方法

この実験操業に非常に近い2ケ月の間に、予め工程解析を実施した4回の結果を用いて、炉況の監視に使用した情報因子および制御因子の種類、予想する炭素含有量との時差、管理限界値を表3・3の通り決めた。

表3・3　管理限界値の計算

特性値＼操業番号	1	2	3	4	平均値	管理限界値 上限	管理限界値 下限
C	4.14 0.08	4.14 0.09	4.22 0.06	4.17 0.07	4.17 0.08	4.41	3.93
出湯温度	1450.77 2.02	1466.41 3.14	1426.63 6.53	1408.42 13.65	1438 6.1	1456	1410
炉頂ガス温度	551.93 17.58	568.10 13.37	497.29 10.79	502.30 12.81	530 13.6	571	489
炉頂ガス CO_2	13.69 0.15	13.49 0.34	14.55 0.11	14.41 0.15	14.03 0.189	14.60	13.56
風圧	667.98 17.74	721.90 54.49	714.59 18.82	707.89 27.41	703 29.6	792.8	714.2
熱風温度	434.22 12.41	426.68 8.55	446.92 8.47	444.77 12.61	438 10.5	470	407

使用した回帰式は、同じキュポラについて、この実験操業を行った時期から、2ケ月前に実験操業をした、第2編第5章の式（2・4）を用いた。

回帰式の計算に使用する観測データは、第2編第5章の表2・35および図2・11の計測機器類を用いた。そして、各因子について2分間ごとに、その2分間の平均値を用い、4種類の情報因子に異状を認めた場合、連続7ケの移動平均値をとり、管理限界値と照合して、炉況の変化を判定する。

炉況の変化を判定した場合、図3・4に例を示すような炉況修正をする。

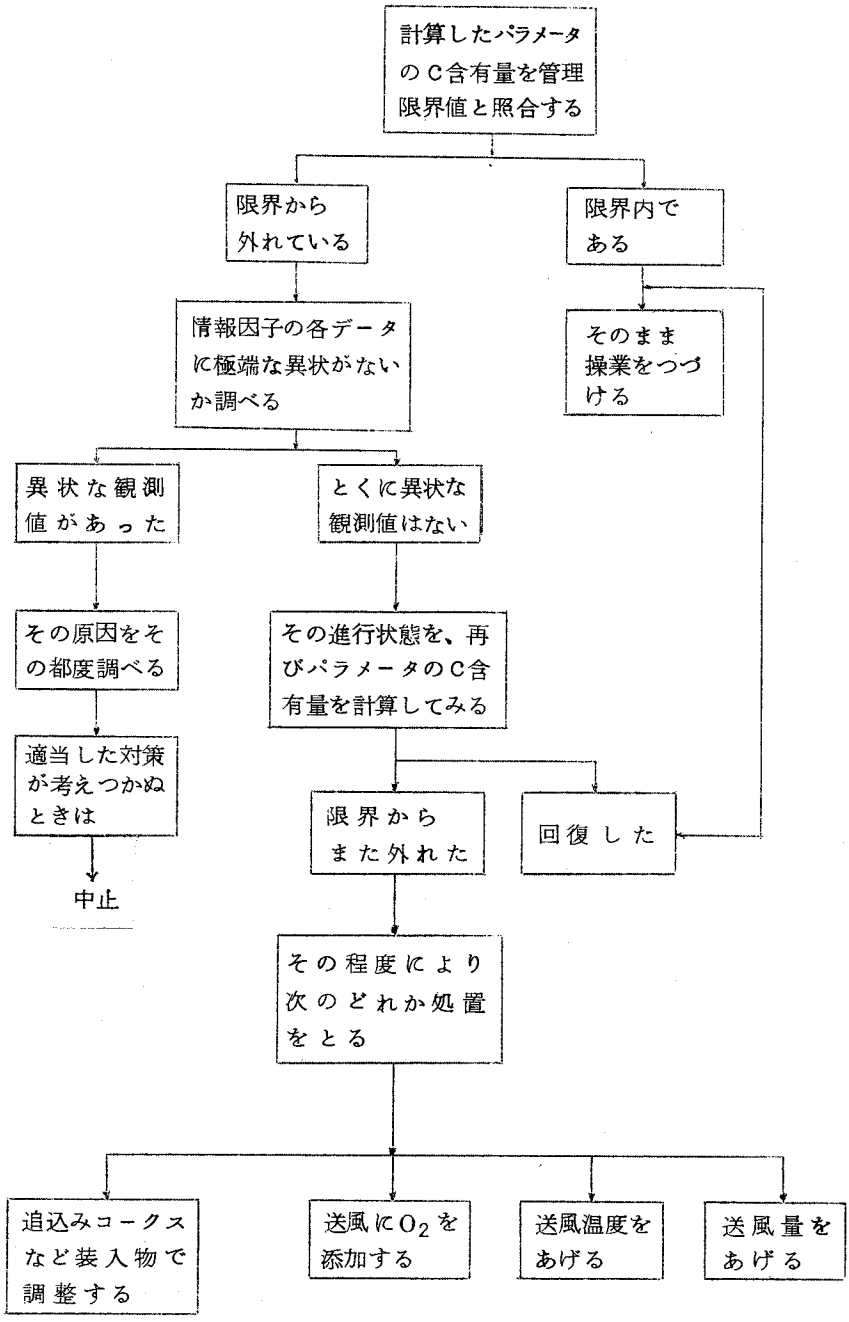


図 3 ・ 4　炉況修正方法説明図

図３・４は、このキュポラの工程解析をくり返えし行った結果と、操業担当技術者の意見により作成するとよい。

なお実験操業中、制御因子としての熱風温度の観測値も監視しており、炉況修正のため熱風温度の調整に供えていた。その場合の回帰式は、第２編第５章の式（２・５）を用いた。またこの式から図３・５を作り、炉況修正で熱風温度を調整する際に準備した。

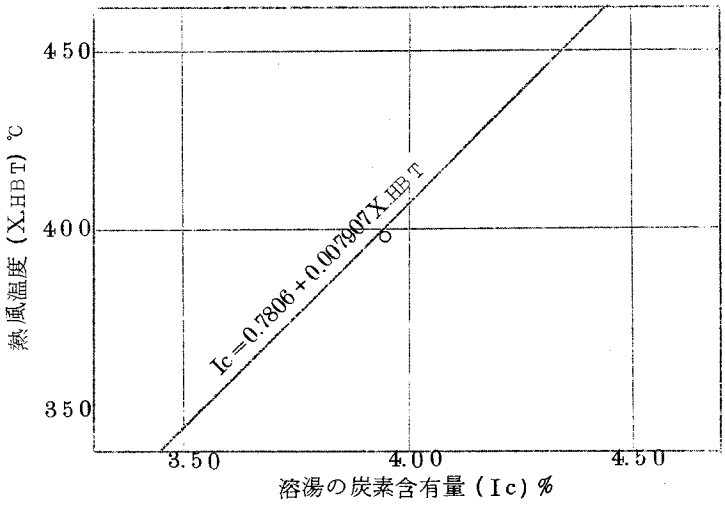


図３．５　溶湯の炭素含有量と熱風温度との関係

この実験操業の結果を、後に検討するため、選定した情報因子、制御因子も観測値を読みとり、操業後、観測データを作成すると共に、溶湯の試料採取も実験操業中、連続して２分ごとに試料採取し、炭素含有量を化学分析し、データを作成した。

３・３　実験結果

以上述べたようにして実施した結果をつぎの附図３－２に示す。この附図

において、各因子の観測データのグラフは、観測値から作成したが、各グラフの中の▲，△の記号は、実験操業中、観測値を読みながら計算を始めた時刻、Calと書いた範囲が移動平均値を計算した範囲、判定の結果熱風温度の調整をすることにし、図３・５によって実施した時刻を〔〕の記号によって表わした。

実験操業中、附図３－２に示したように、１３時３６分までにとった情報因子の観測値から、炭素含有量を予測したところ、第２編第５章の式（２・４）によって、パラメータとしての溶湯の炭素含有量の予測値は

$$Ic = 3.52\ \%$$

となったので、図３・４と照合すると管理限界値の下限以下となっているので、図３・４から、他の因子の動向をみて熱風温度を上昇させることにし、図３・５のグラフから、溶湯の炭素含有量の管理限界値内におさめるには、熱風温度を３９８℃以上に維持しなければならないので、熱風温度を１３時３８分に上昇させる操作をした。しかし、操作後、熱風温度の上昇には時間がかかり、熱風温度を維持する下限の３９４℃まで上昇するのに、１２分かかっている。

３・４　考　察

３・４・１　管理項目、管理方法の設定について

操業管理を行うための管理項目は、第２編第５章の工程解析に用いた実験操業が、２ケ月前のものであったので、その解析結果による回帰式を使用すると共に、今回の実験操業を実施する２ケ月前の４回の実験操業の観測データを用いて、管理限界値を表３・３のように設定した。

実際には、もう少し多くの観測データから得るべきである。毎日操業しているキュポラ本体の性状および装備している計測機器類の指示は、設備管理をしていて同一条件のつもりでも、　長期間の間に操業状態、作動状態が徐々に変化する傾向があるので、このような管理限界値の計算と工程解析によ

る回帰式の調整は、ある期間、少くとも数ケ月毎に行い調整する必要がある。

また、図３・４の炉況修正要領の設定は、今回の実験操業に用いた５．５ｔ熱風水冷式塩基性キュポラの設置事情から、出湯速度の測定や、容量が大きく、炉径が大きいためベッドコークス高さの測定も行わなかったが、第２編の工程解析の結果から、キュポラ操業の炉況の変動は、原材料からの変動がないとする場合、炉内温度とベッドコークス高さの変動が大きく影響することがわかったが、今回使用した図３・４のような、炉況修正要領の作成の際は、使用可能な因子のみを使い、炉況修正要領で解析できない状況、あるいは異状な現象が起った場合は、操業担当技術者の判断によって炉況修正対策を講ずるのは仕方がない。

また、この操業管理方式は、監視する因子の種類が多いときは、それらの観測データの収集と処理に手間がかかるので、強い影響のある因子のみ用い、重回帰分析をやり直し、回帰式を作り直して使用することは、時に因子の種類によって感度は落ちるが、修正がきかない場合、操業担当技術者の判断の助けによって操業管理を実施できる。その場合でも、あとの３・４・３に述べるように、このような操業管理方式を実施しない場合より炉況を安定に保つことができると信ずる。

そして、なるべく有効な因子を見出し、観測データの収集や処理を考慮する方が効果があり、炉況の把握のための情報因子となる計測機器類の開発と、計測機械の設置方法の改善、データロガー，機械計算機、あるいは電子計算機の導入により効果を期待することができる。

３・４・２　炉況修正方法について

今回の実験操業で経験したように、熱風温度の調整による炉況調整は、非常に効果の現われるのに時間がかかることである。これは、今回の操業実験で、熱風温度を８０℃以上も上昇させるということを試みたこともあるが、現在のキュポラの熱交換器に、重油バーナーで加熱をするという方式では無理である。しかし、このような方式以外の加熱方式を考えると運営経費や設

備が非常にかかる。

そこで、別な方式として、熱風温度を上昇させるというよりも、送風の際、重油とかLPGガスを添加して炉内に送り、炉内において燃焼させる方法とか、送風に酸素添加をすることにより、炉内燃焼を活発に行う方法が考えられる。

重油、ＬＰＧガスを添加する方法は、これらを完全燃焼させるために、相当多量の熱風を送らねばならないため、送風設備を大きくして、バーナーにも考慮を加えることが検討されているが、現在までまだ成功していない[(1)]。

送風に酸素添加をする方法は、２ｔ熱風水冷式ノーライニング・キュポラで半還元鉱を原料とする塩基性操業において、送風量の不良を酸素添加によって補えるかどうかの実験で、試みたことがある[(2)(3)]。図３．６は、その際の工程解析のための観測データであるが、約３０分間、送風中に酸素添加を中止し、送風量をあげた場合の前後の炉況に対する影響を示したものである。

この解析結果から、送風中の酸素添加を中止し、添加していた分の酸素含有量を維持するだけの空気を、増加させても、炉頂ガス中の炭酸ガス含有量、出湯温度などに炉内温度が低下しているらしい顕著な影響があることを示し、表3.4に示すように、酸素の添加の再開をした時の方が回復時間が早いことを示している。

表３．４　時差相関分析結果

min

特性値および要因 ＼ 要因		酸素富化 中止	酸素富化 再開
溶湯	C	18	6
	Si	16	0
	Mn	6	0
	P	12	0
炉頂ガス	CO	0	0
	CO_2	0	0
	温度	0	0
出銑温度		10	6
熱風圧力		0	0
熱風温度		10	4

この結果から、１ｔ熱風水冷式酸性キュポラでの酸素添加の量的関係の工程解析を第２編第６章に行ったが、その効果を示

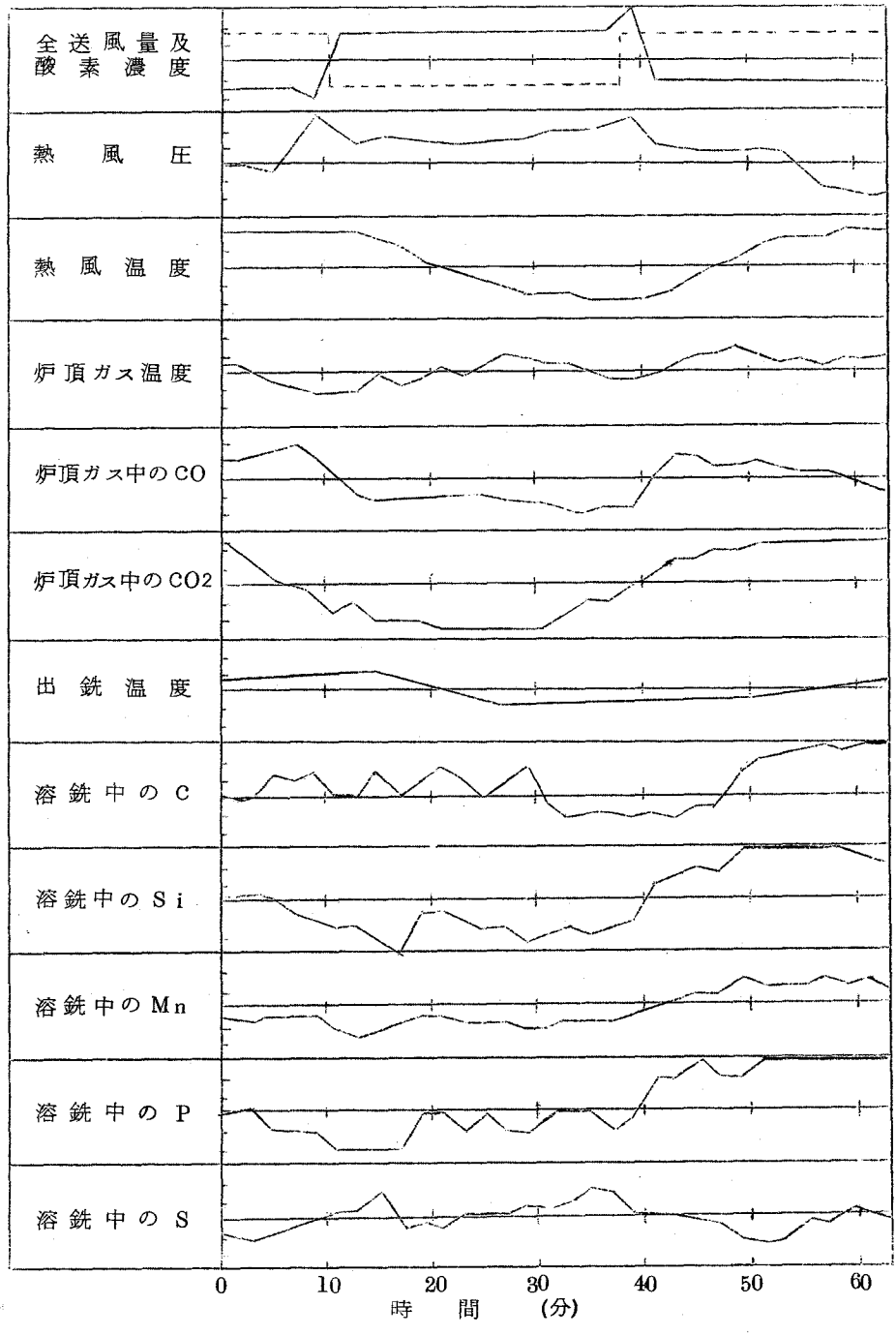


図３．６　酸素富化実験の観測データ図

すものとして、この工程解析とは別の操業実験において、同じキュポラの操業中、送風に酸素添加を実施した観測データを図3.7に示す。この図からみるように、送風の酸素添加により溶湯の炭素および珪素含有量、出湯温度に顕著な影響があることを示している。

送風えの酸素添加は、ベッドコークス高さを消耗するので余り長い時間添加したときは、その分だけの追込コークスを装入する必要がある。

このようなことから、炉況修正のため熱風温度の調整をする場合より、とくに炉内温度を上昇させたい場合には、送風に酸素添加をすることは有効なものと考える。

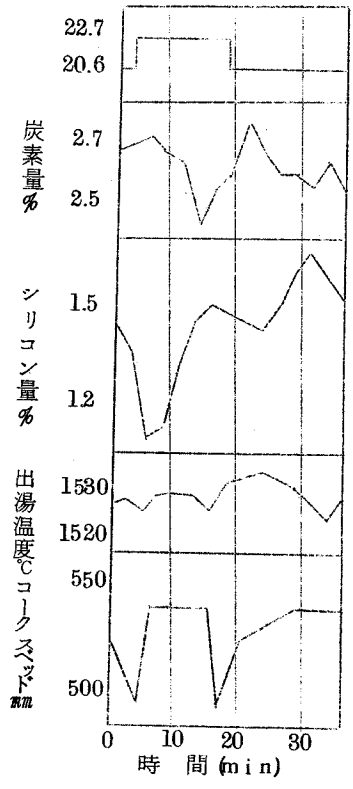


図3．7
1t熱風水冷式キュポラの送風酸素添加の実験

3・4・3　この操業管理方式の効果について

この操業管理方式の効果を調査するため、この実験操業中の溶湯の炭素含有量の平均値と標準偏差を表3.5、ヒストグラムを図3.8に示す。これから、とくに図3.8のヒストグラムから、観測データのバラツキの巾が少く、その形状は、正規分布に近くなり、等分散の検定の結果でも表3.6に示すように有意となつており、この操業管理方式が炉況の安定化に効果があることを示している。

表3．5　平均値と標準偏差

	平 均 値	標準偏差
操業管理をしたとき	4.07	0.058
操業管理をしないとき	4.13	0.106

表３．６　等分散の検定結果分散分析表

要　　因	自　乗　和	自由度	平均自乗和	F
操業管理をしない時	0.195750	30	0.006525	5.07＊＊
操業管理をした時	0.046578	42	0.001109	

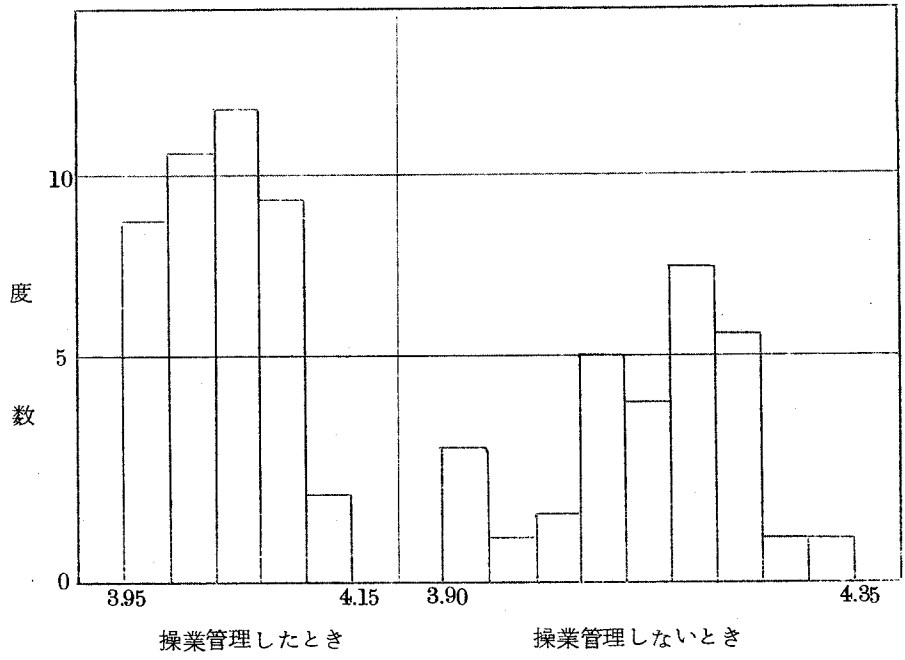


図３．８　ヒストグラム

３．５　ま　と　め

以上の結果を総括してみると、つぎの通りである。

(1)　新しい操業管理方式は炉況の安定化に有効であることを示している。

(2)　選定した情報因子、制御因子が多くなると観測データの収集、処理に手数がかかるが、炉況を把握する情報因子となる計測機器類の開発と観測データの収集、処理の機械化、自動化を考えるべきと思う。

(3)　現状で、困難な場合には、強い関係のある因子のみを採用し、回帰式を作り直し使っても、操業担当技術者の助けで補うことにより、相当の効果

が期待できる。

(4) 炉況修正の方法として熱風温度の調整は有効であるが、時間がかかるので、現在のところ送風の酸素添加が有効と考える。

文　献

(1) Foundry Trade J. (1967), April 20, 449

(2) H, Yoshimura : Proceedings of the Memorial Lecture Meeting on the 10th Anniversary of the Foundation of National Research Institute for Metals : 1966, 113

(3) 吉村，牧口，栗原：鋳物38 (1966)，9，552（予報）

第4章　キュポラの操業管理方式の近い将来での展開

4・1　緒　　言

キュポラの新しい操業管理方式として、今回各種のキュポラの種々な実験操業により緒についた、観測データを統計的方法によって総合的に扱って炉況を判断しながら、溶解作業の監視をすることを中心とする方法は、今後、改善すべき種々の問題をもっている。

一層完全な姿の操業管理方式とするためには、まず炉況判断のための有効な計測機器類の開発が問題である。今回の実験操業では、近い将来実現性のあるものについては極力とりあげ、場合により人手により簡易化して測定するなどしたが、炉況判断には効力のあるものをいくつか見出した。また既存の計測機器類についても、工程解析において見出した観測データ相互の機器そのもの、および設置方法による個有の時差からみて、溶湯の化学組成との関係ではなく、炉況の変化をできるだけ早く知る方法も考える必要がある。そして、計測機器類の発達により、炉況の判断方法も変り、操業管理方式も変化し発展してゆくものと思う。

また、炉況を知るための観測データの種類が多いと、操業管理の実施中、データ処置に困難が生ずるので、まずデータロガーにより、観測データの自動記録を考える必要があり、さらに観測データを整理し、計算するとか、各観測データをアナログ量として集めて、炉況を総合的に判断し、必要あれば炉況修正処置までも行えるような計算器制御えと発展させる必要がある[(1)(2)]。

しかし、キュポラの操業管理を計算機制御へ発展させ、無人操業を実施するには、現状からみて、自動車工業、その他の多量生産を行う工業など一部では可能性があるが、鋳物工業全体を眺めた場合、工業形態に変革があり、各地の鋳物工業の多い地区で、溶湯を集中生産し、各工場に分配して鋳物を作るということが実現しなければ、設備コスト、運営コストからみて、ある

程度の容量のキュポラを使わないと、その実現が遠いと考えられる。

4・2　キュポラの操業管理方式の現在の問題点

できるだけ完全な姿の、キュポラの操業管理方式とするためには、まず、炉況判断のための有効な計測機器類を開発させる必要がある。

本研究のための、各種キュポラについての実験操業では、普通の鋳物工場で広く使われていないもの、まだ実際には使われたことのないものなど、種々の計測機器類を使用した。たとえば、現在余り大型のキュポラには使われないγ線により炉内透過して、ベッドコークス高さを測定したり、炉内温度の変動を知るため水冷式キュポラの冷却水の出入口で温度を測定して冷却の程度を熱量で求めたり、炉内の状況を知るため羽口の真上から炉内ガスの炭酸ガス含有量を測定したり、連続する出湯量の変動の測定であるとか、あるいは、小型の保護管で感度を高くして溶湯温度を連続的に長時間測定するなど試みたが、これらはいずれも炉況判断に有効であることを見出した。

このようなこと以外に、炉況の変化を知るための新しい測定方法もあると考えられる。また出湯する溶湯の化学組成、たとえ炭素含有量のみでもよいから連続的に瞬間的に測定することができれば役立つが、現在進行中の溶湯のレザーによる分光分析方法の開発など、新しい炉況の把握方法の開発が望まれる(1)。

また、現在使われている、キュポラに装備されている各種の計測機器類の指示についても、今回行った工程解析では、溶湯の炭素含有量のデータとの時差について主として論じたが、観測データ相互間の時差が、キュポラの構造、計測機器類自身、およびそれらの試料採取位置、設置方法などによって個有の指示の遅れも時差の原因となっており、炉況の状態、とくに第2編の工程解析の結果、ベッドコークスの変動と炉内温度の変化等に関する何等かの方法で、これらを迅速に知ることができるように、装備する計測機器類の改善が望まれる。

炉況が変化したときの修正方法として、本研究では、熱風温度の調節と送風に酸素添加することを実施したが、迅速に炉況を修正する、炉内雰囲気も考慮した炉内温度を上昇させる方法として、重油、あるいはＬＰＧ燃焼、その他の方法なども考慮する必要がある。これらは現在のところバーナに問題があり、炉内温度を上昇させる効果があがっていない。

製鉄用溶鉱炉においては、炉況の修正方法として、重油燃焼と送風の湿度調整が行われているが[3]、キュポラ操業においては、炉容量がはるかに小さいため、バーナに改良を加えなければ、重油燃焼による炉内温度の上昇を実施する見込みがなく[4]、また送風の湿度調整も、溶鉱炉とキュポラの炉内雰囲気が大分異なり、またこれらの連続操業の長さも全然異なり、キュポラ操業では、大気湿度を操業条件の設定の際考慮するにとどまり、炉況の変化に使用して効果が現れた報告はない。

炉況把握のための情報因子の種類が多いときには、それらの観測データの収集と処理には手数がかかるようになる。本編第2章に述べたように、新しい操業管理方式においては、各因子ごとの観測データの、時差を考慮して、短い時間で処理しつづけながら炉況を監視するには、データロガーを使うなど観測データの収集と処理の機械化を計る必要がある。

当座の操業管理としては、データロガーで観測データの収集と処理の機械化を計るとして、データ処理中の計算は、人手による機械計算機や共線図表などを準備することによって可能であろうが、機を失することなく、必要な炉況の修正を、頻繁に実施して炉況の安定をはかってゆくには、多くの観測データを処理するのにデジタル計算機を用いることを考えるべきである。さらに将来には、各情報因子からのアナログ量を処理し、必要な制御を自動的に実施するアナログ計算機を用いることによって、キュポラの計算機制御が出現することになる[1][2]。

4・3　キュポラの自動制御方式の構想

本論文で提案したキュポラの新しい操業管理方式を全面的に実施してゆくためには、キュポラ操業中の炉況判断を行う時の各種観測データの収集と処理を行ってゆかねばならないが、これらを迅速に、正確に、人手もかけぬように実施するためには現在考える方向として、電子計算機を用いるということになる。

キュポラの操業管理に電子計算機を用いようとするときには、本論文で考察してきた、キュポラ操業中の溶解作業の監視ばかりでなく、キュポラへの装入原材料の管理、さらに注湯作業までの管理を含めて、各種の観測データの収集と処理を行い、キュポラの操業担当技術者の判断を容易に実施させ、つづいて操作方法を選択し、適切な操作を行うという、

（電子計算機）→（人）→（キュポラ）

というシステムがまず考えられる。

本格的な自動制御に発展させるためには、上記制御システムのなかに人が入って判断したり操作しているのは、主として計測機器類の読みとり、デジタル量として電子計算機に入れて計算するとか、管理限界値との比較、操作方法の選択、適切な操作の程度の計算、必要なキュポラに対する操作などを行うことになるが、これらのデータをすべてアナログ量としてアナログ計算機によって処理し、人手によらないでキュポラ操作機能に伝達して動作させることができれば、キュポラ操業の計算機制御を達成したことになる。

つぎの附図3－3は、キュポラ　の計算機制御の構想図である。この計算機制御の概要は、現在のキュポラにも一部採用されている送風量制御、熱風温度制御など、部分制御できるものは全部制御し、操業中のキュポラの各部からとった情報を示すアナログ量をアナログ計算機によって処理し、必要な指令を上記各部制御部分に与え、必要な制御量を変更して制御してゆく。つぎに、各部分の主な制御および測定ループは、

(1)　送風量制御

(2) 送風温度制御

(3) 酸素添加量制御

(4) 出湯温度測定

(5) 装入レベル測定

(6) ベッドコークス高さ測定

(7) 炉頂ガス分析および温度測定

(8) 溶湯量測定

(9) 溶湯分析

(10) 原材料切出し、　　配合

であり、これらからの情報は、デジタル量は、アナログ変換器によりアナログ量に切換えられ、管理限界値に相当する所定の目標値に一致させるようアナログ計算機により処理され、必要な制御ループに命令が指示され、制御される。また制御状況は、一定の時間ごとに、タイプライターでロギングされてゆく。

そして、キュポラ操業の計算機制御は、上記制御および測定ループでも見られるように、例えば、現在のベッドコークス高さの測定が大型炉には使えないことや、溶湯化学組成の連続瞬時分析がまだ無理であることなど、今後の発展を待つべきものがあり、これら計測方法の今後の発展によって制御方式も変ってくるであろうが、キュポラ操業というシステム全体を見た場合、システム内のむだ時間が長すぎ、オンラインのフィードバックコントロールでは不可能であり、むしろフィードフォワードコントロールを主体としたものになるであろうことが考えられる。

4・4 まとめ

本研究で提案したキュポラの操業管理方式を発展させ、最終的には、キュポラ操業の計算機制御まで到達するには、さし当って、つぎのような事項、

(1) 炉況把握に効果的な計測方法の開発、

(2) 現在のキュポラに装備されているものも含めて、計測機器類の指示のおくれを少くするように改良するとか、装着方法の改善を計ることが問題となる。これらが解決するならば、その実現も容易となると考える。

文　献

(1) 日本鋳物協会編「キュポラハンドブック」（１９６７），４２８（吉村担当）

(2) 吉村：鋳物４０（１９６８），３，３９３，日本鋳物協会第７４回講演大会講演概要（３）

(3) K·Katsura, T·Yamamoto : Proceedings of the International Conference of Automation on Iron and Steel Making (1965), 207

(4) H·J·Leyshon, B·Sc·and R·B·Coates, B·Sc·, A·I·M· : Foundry Trade J· (1967), April 20, 449

第5章　小　　括

第3編は、第2編のキュポラ操業の工程解析の結果を用いて、キュポラの新しい操業管理方式を提案したことと、この方式を用いた操業実験の状況を報告し、さらに今後のこの操業管理方式の展開の方向について論じた。

第1章は緒言で、第2章では、個々のキュポラの性状に習熟した操業担当技術者の判断を、情報因子とした計測機器類の指示から炉況を判断し、適切な処置をするという内容のキュポラの新しい操業管理方式について考察し、実行案を作成した。

第3章では、前章で作成した操業管理方式を5.5 t熱風水冷式塩基性キュポラの実験操業に適用し、この方式がキュポラ操業の改善に有効なことを見出した。また炉況修正のために、熱風温度の調整が効果があるが、その効果を表わすのに多少時間がかかるので、迅速に効果を表わす送風に酸素添加をする方法について検討した。

さらに第4章では、この操業管理方式を実施するとき、常時観測データの収集と処理をすることの機械化について考察し、最終的には計算機制御の実現までの問題点について述べた。

総　　括

本論文は、代表的な金属溶解炉の１つであるキュポラについて、今まで困難とされた、操業中の炉況の把握方法について、最近、各工業分野において、活用され始めた多変量の工程解析を実施したところ、キュポラ操業に適した工程解析方法を設定することができた。その方法により、種々のキュポラを用い各種の操業について工程解析を実施し、それらの結果を用いてキュポラの新しい操業管理方式を計画し、実験操業に適用したところ、その有効なことを確認した。

本研究で明らかになったことがらは、各章、各編の末尾に述べたので、ここでは、これらの主要なことのみを述べることにとどめる。

第１編においては、キュポラ操業およびその操業管理のための工程解析方法の現状について述べると共に、キュポラ操業にふさわしい工程解析方法を検討した。使用した重回帰分析法は、計算の際、各独立変数相互の相関性の存在が解析を困難にすることと、キュポラ操業では炉況の変動が活発なので、２分間間隔という短時間間隔である時間、時系列データを観測して解析をする場合、各観測データ相互の時差を検出しておく必要があることを知り、キュポラ操業で得られる観測データの時差の検出方法について考察した。

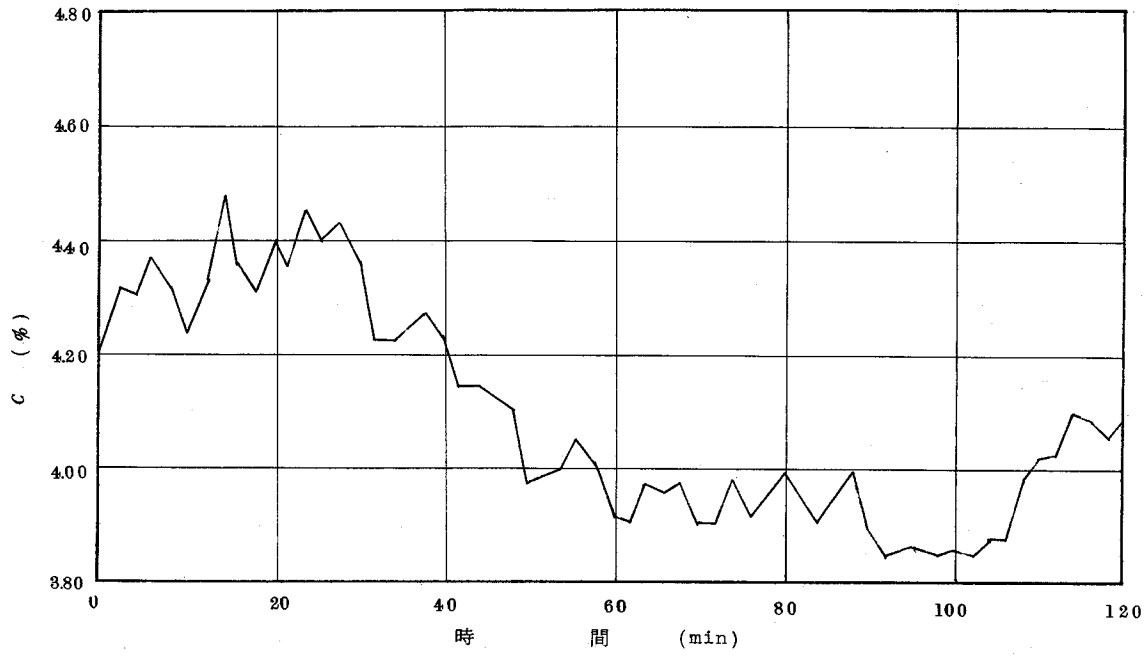
第２編においては、種々のキュポラを用い、各種の操業について工程解析を試み、炉況の変動に関係する要因と関連した情報因子と制御因子とを見出した。炉況の変動に関係する要因としては、炉内温度に関連した諸因子が関係あることを見出した。また制御因子として、送風量、熱風温度が関係が深く、検討した結果、熱風温度による炉況調整が有効であることを知った。また迅速に、強力に炉況調整するための送風に対しての酸素ガス添加の効果を調査した。

第３編においては、キュポラ操業の工程解析の結果から、現在まで、細部

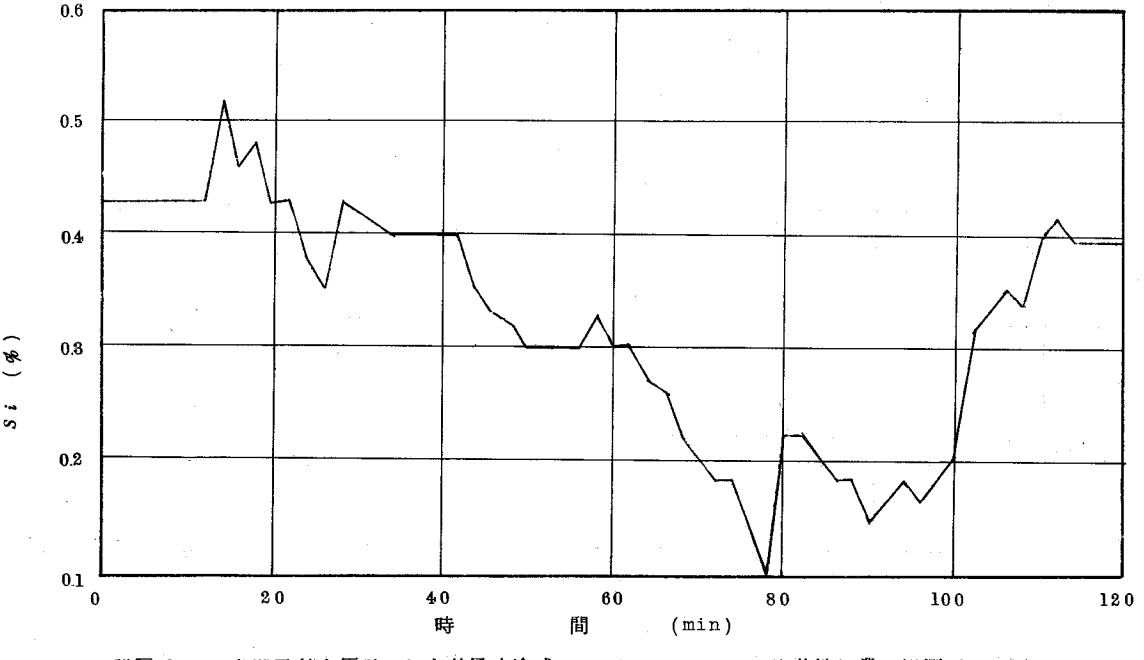
については、個々のキュポラ操業の性状に習熟した操業担当技術者の判断に頼っていた炉況判断を、計測機器類の指示により、総合的に判断し、適切な処置をすることによって、炉況の安定化を計り、溶湯の品質の均一性を増すための操業管理方式を計画し、実験操業によって、その有効性を確認した。つづいて、この操業管理方式で、多量の観測データの収集と処理をしなくてはならないので、その方法を検討し、近い将来の計算機制御の展開について考察した。

謝　　辞

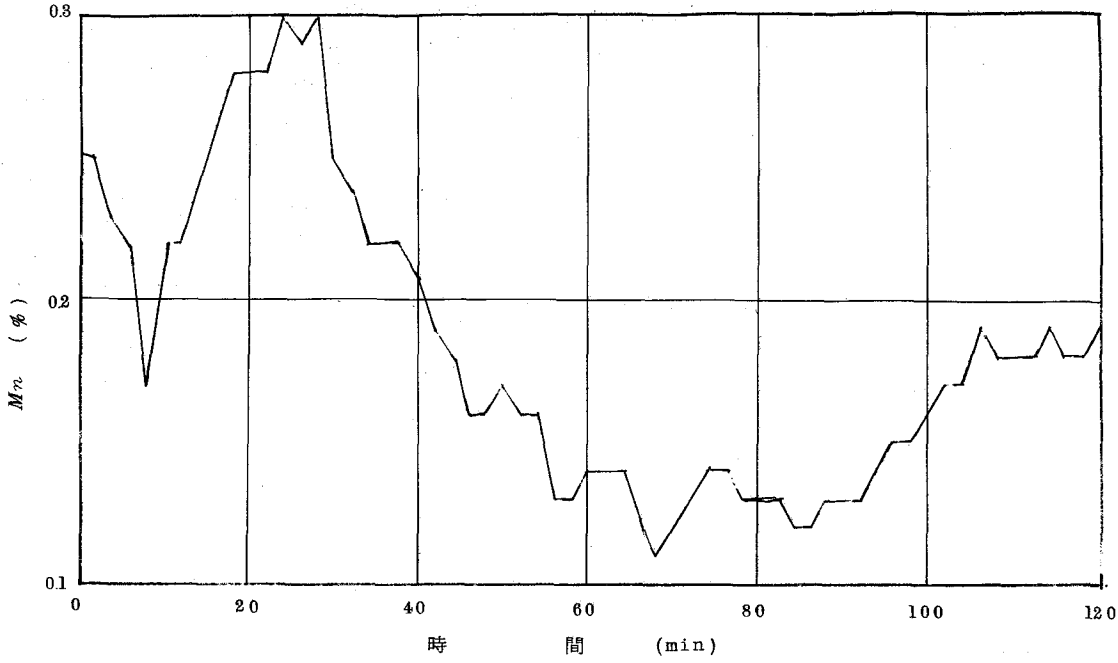
本研究実施にあたり、いろいろ御教示を賜つた茨木正雄教授，足立　彰教授，千々岩健児教授，三谷裕康教授，藤田広志教授，田村英雄教授，西田俊夫教授に深甚の謝意を表す次第である。



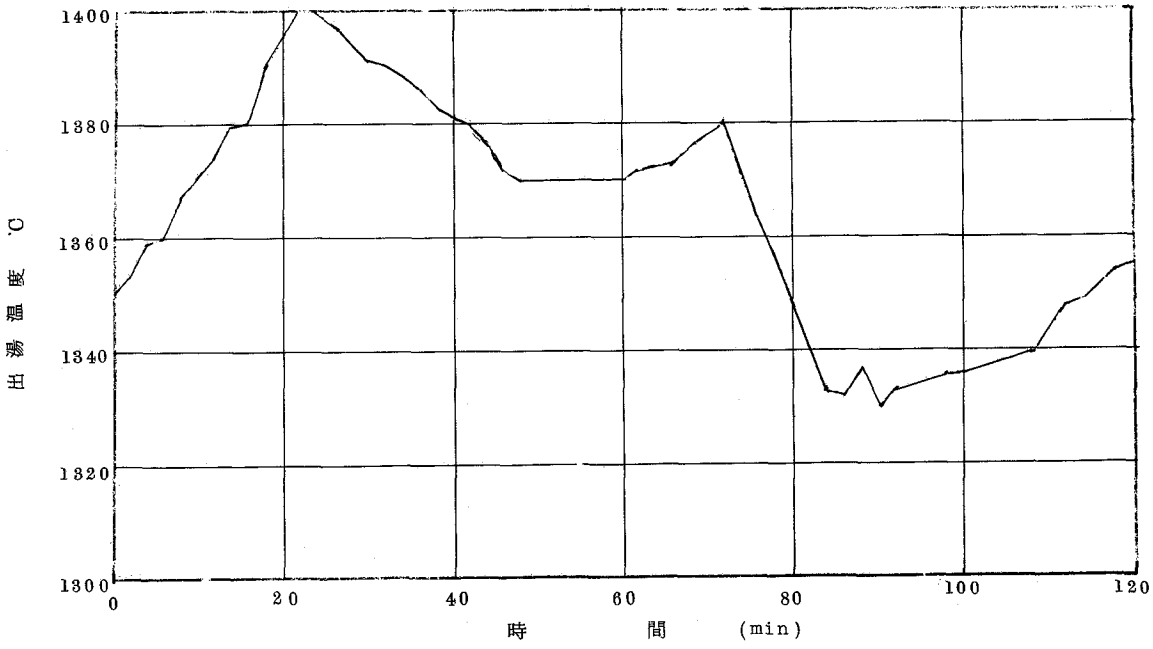
附図２－１ 半還元鉱を原料とした熱風水冷式ノーライニングキユポラの塩基性操業の観測データ(1)



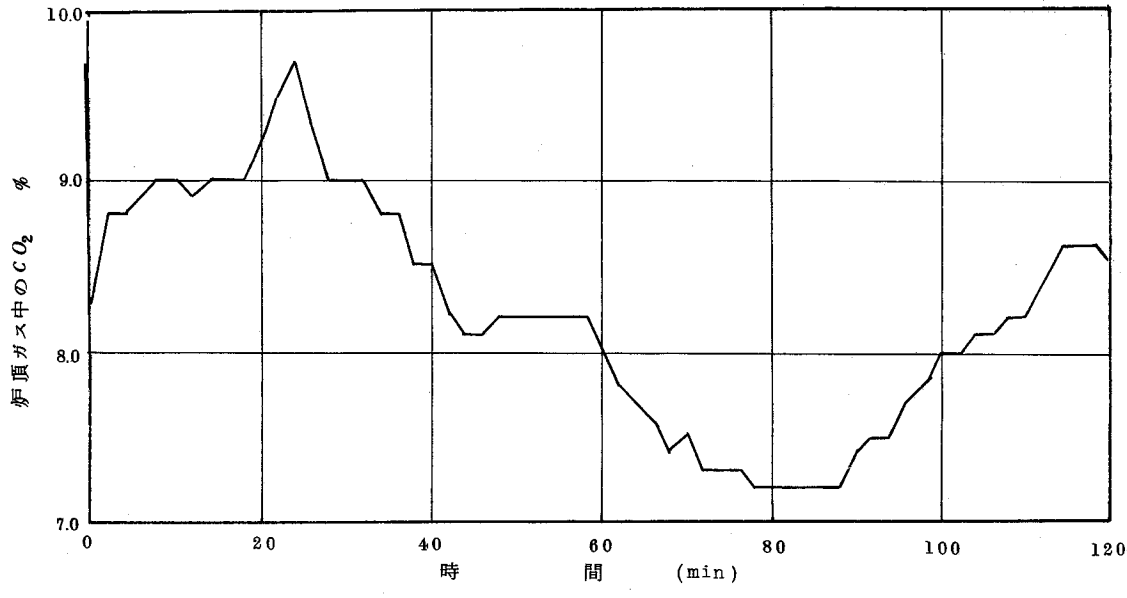
附図 ２－２ 半還元鉱を原料とした熱風水冷式ノーライニングキユポラの塩基性操業の観測データ(2)



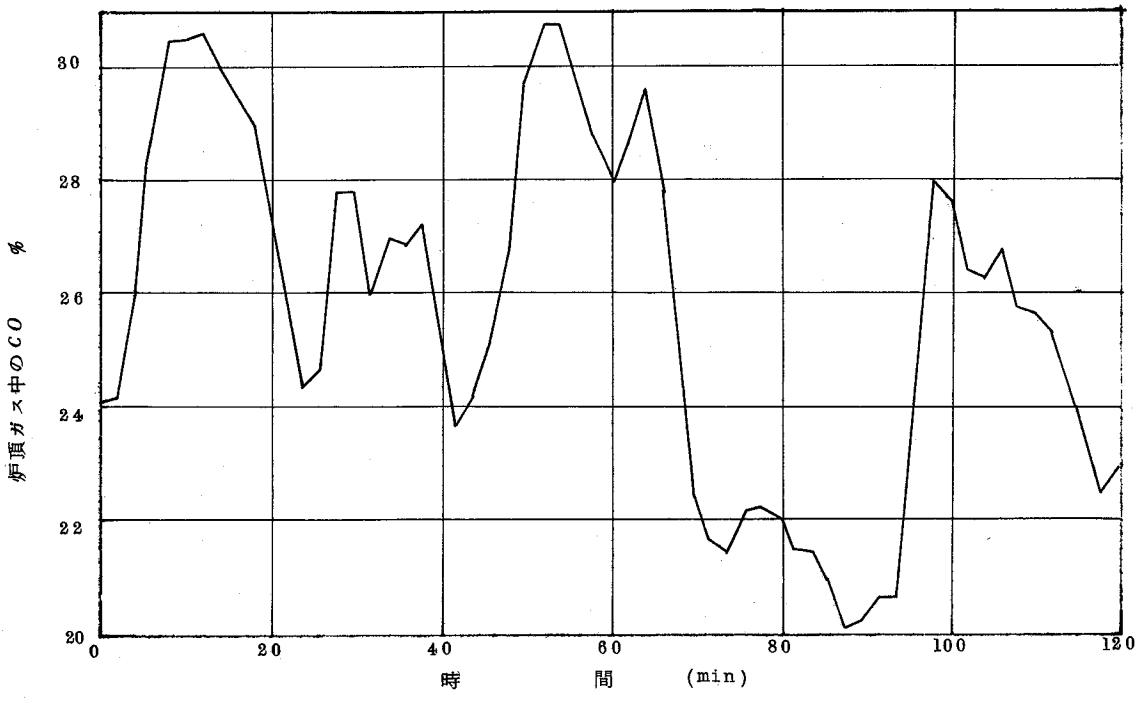
附図 2 -3 半還元鉱を原料とした熱風水冷式ノーライニングキユポラの塩基性操業の観測データ(3)



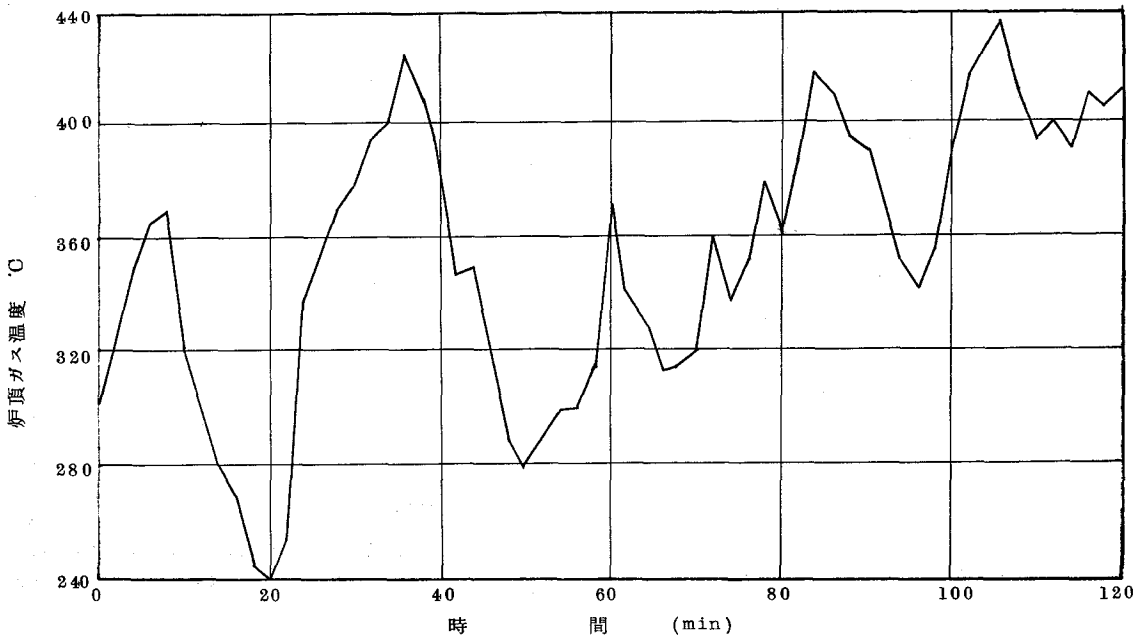
附図 2 -4 半還元鉱を原料とした熱風水冷式ノーライニングキユポラの塩基性操業の観測データ(4)



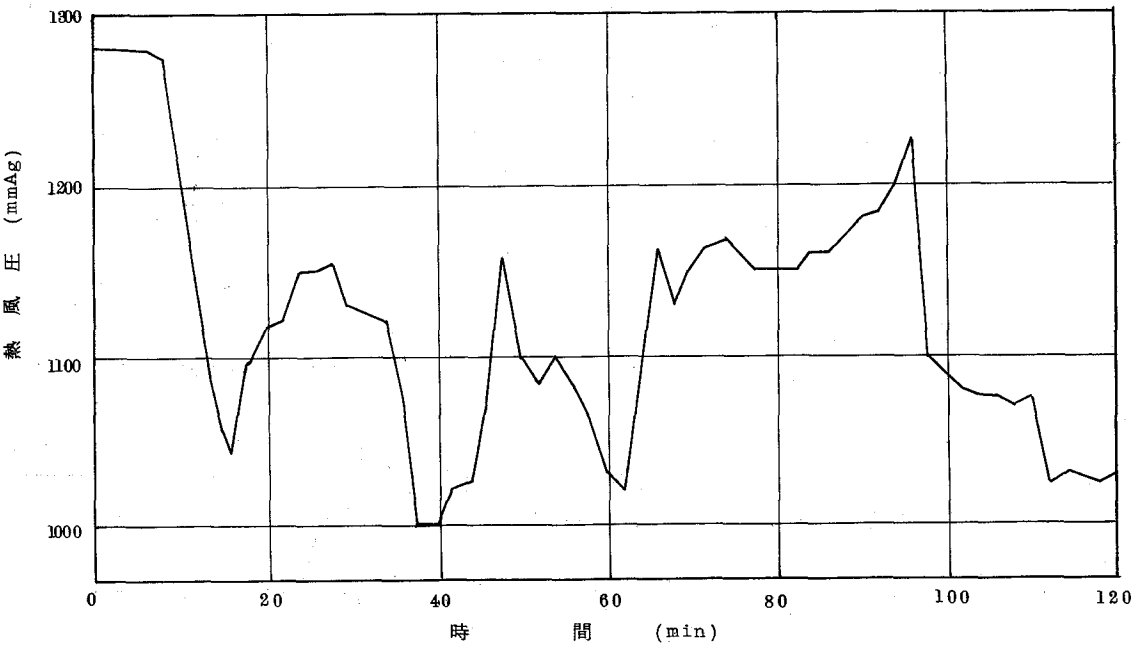
附図 2－5 半還元鉱を原料とした熱風水冷式ノーライニングキユポラの塩基性操業の観測データ(5)



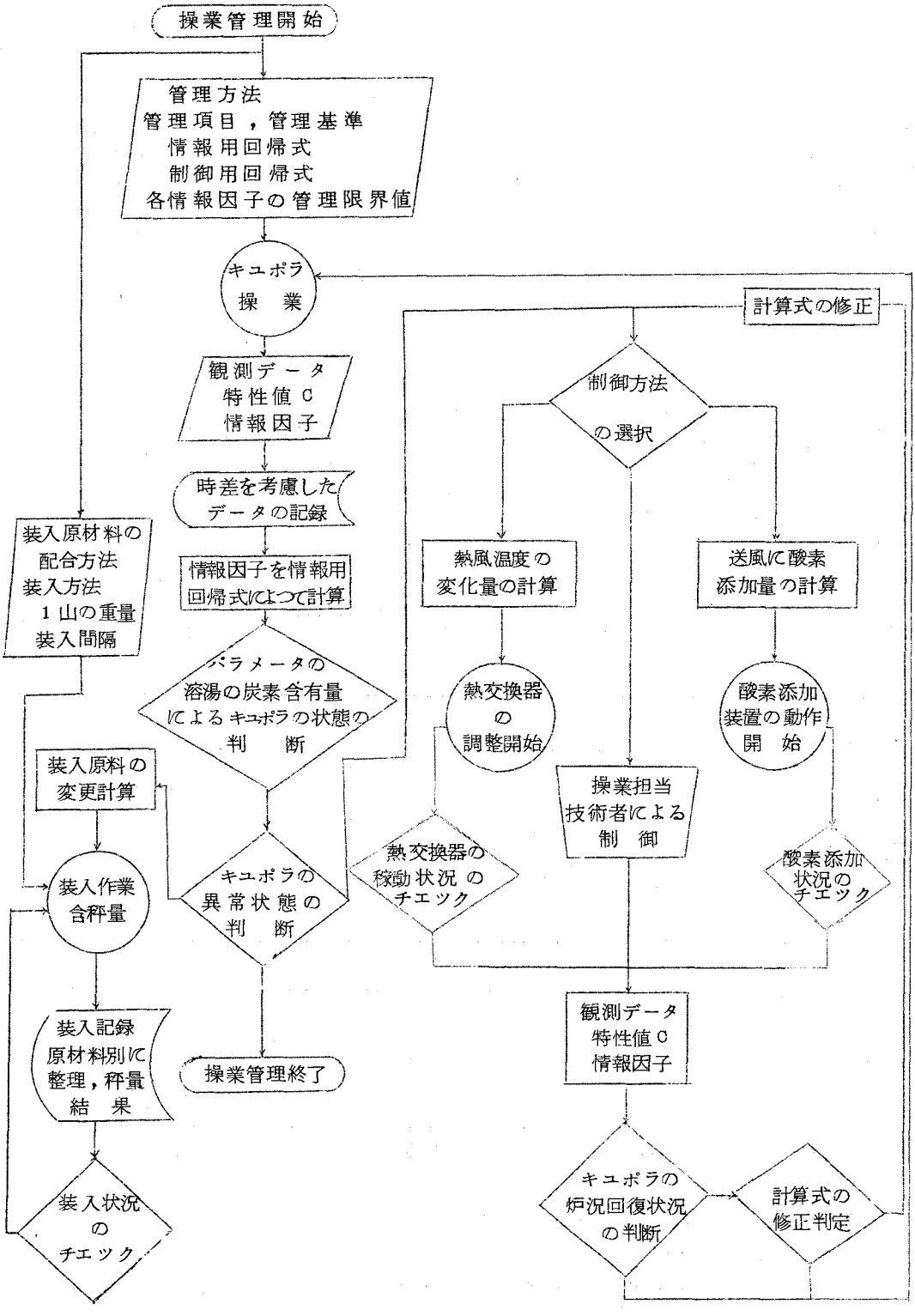
附図 2 －6 半還元鉱を原料とした熱風水冷式ノーライニングキユポラの塩基性操業の観測データ(6)



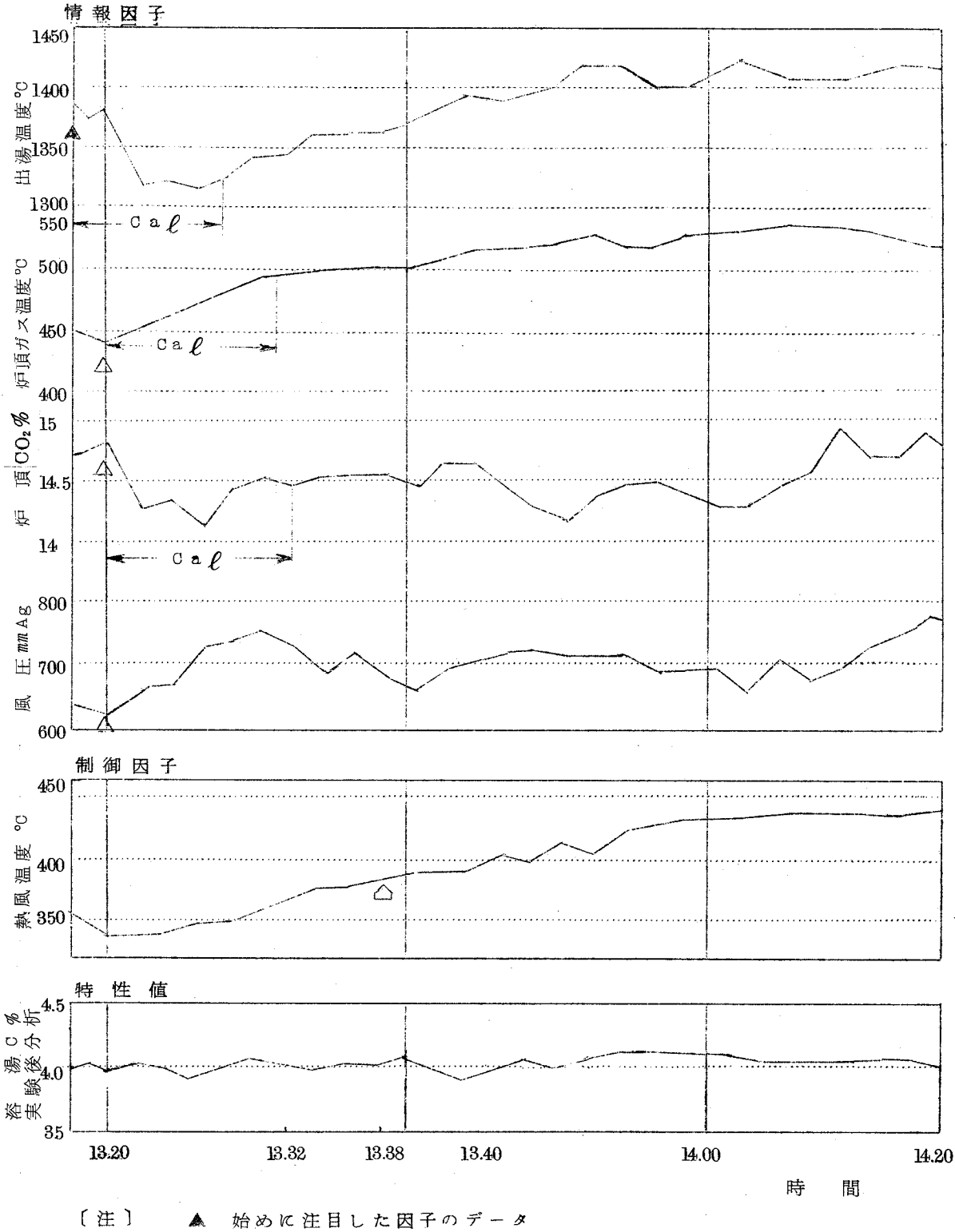
附図 2－7 半還元鉱を原料とした熱風水冷式ノーライニングキユポラの塩基性操業の観測データ(7)



附図 2－8 半還元鉱を原料とした熱風水冷式ノーライニングキユポラの塩基性操業の観測データ(8)

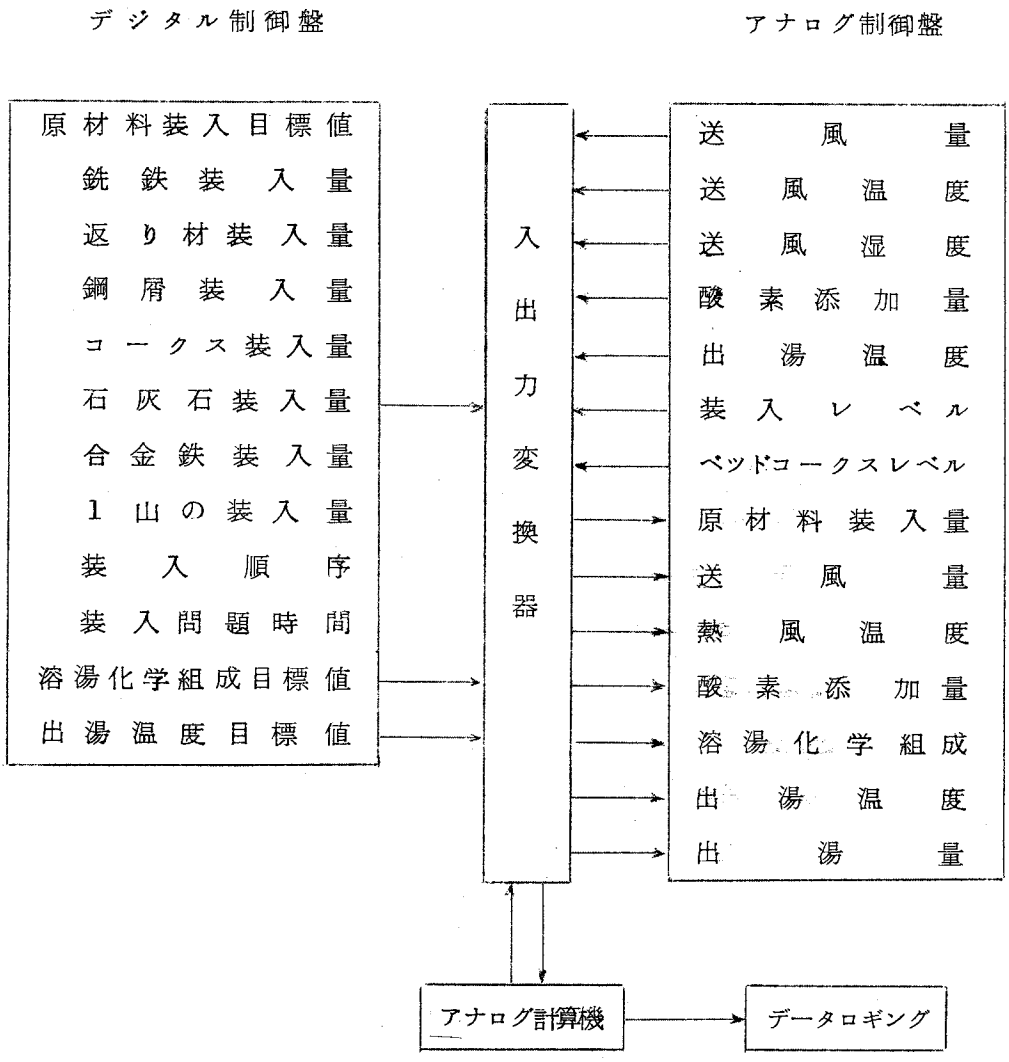


附図３－１　キユポラの操業管理のフローチヤート



〔注〕 ▲ 始めに注目した因子のデータ
△ 同時に注目した因子
⏢ 熱風温度を上昇させた時刻

附図 3－2 新しい操業管理による5.5t熱風水冷キユポラの操業実験


デジタル制御盤
アナログ制御盤
原材料装入目標値
銑鉄装入量
返り材装入量
鋼屑装入量
コークス装入量
石灰石装入量
合金鉄装入量
1山の装入量
装入順序
装入問題時間
溶湯化学組成目標値
出湯温度目標値
入出力変換器
送風量
送風温度
送風湿度
酸素添加量
出湯温度
装入レベル
ベッドコークスレベル
原材料装入量
送風量
熱風温度
酸素添加量
溶湯化学組成
出湯温度
出湯量
アナログ計算機
データロギング

附　図　3 － 3