計算制御とその反応操作への応用

市 川 惇 信*

1959 年ポートアースー (テキサコ) の重合プロセスではじめて実用化されて以来、計算制御の石油、化学プロセスへの適用は 1961 年には 36 例、1962 年には 92 例と急速な発展を遂げてきた。現在では非常に普及をみせており、わが国においてもセメントキルン 2、石油化学 2、その他 2、の適用が見られており、計画中的のものかなりの数にのぼっている。計算制御として発表されてきたものの内容はかなり広範で、単なる計算ロガーからオンライン閉ループに至る種々の段階のものが含まれているが、ここでは閉ループの計算制御に限定してその機能および問題点を検討し、反応操作への適用例の一、二を紹介しよう。

1 計算制御の機能

計算制御とは計算機を制御系構成要素としてとり入れ、その計算、判断、指令の能力を積極的に利用する制御方式をいう。計算機としては現在ほとんどストアプログラム方式のデジタル型またはハイブリッド型に限定され、それ以外のものはきわめてまれである。

1-1 計算機の職務の階級的構成

生産活動をおこなう人間の職務の構成が階級的であるのと全く同様に、計算機の職務も階級的に構成される。図 1 にその典型を示した。第一層は企業経営の計算機である。これは経済動向、新技術市場などに関するデータを入力とし、企業経営上の諸問題に関する決定をおこなうことをその職務とする。第二層は生産管理の計算機である。原料、製品の市況、需注状況、プロセスの能力などを入力情報とし、それに基づいて個々のプロセスの生産

図1 計算機の階級的構成

計画を立案する。第三層はプロセス運転の計算機である。管理計算機よりの指令を実行することがその使命であり、プロセスの状況を把握し、最適の運転条件を決定する。これら三層*1の計算機の間では常に情報の交換がおこなわれており、必要とあればそれぞれの持つ数学モデルが他の層の計算機からの指令によって改変される。

1-2 制御用計算機の機能

制御用計算機はプロセス運転に関するすべての面を司どるが、

* Atsunobu ICHIKAWA, 東京工業大学資源化学研究所：東京都目黒区大岡山。

※1 計算機の職務が三層であることは、計算機のハードウェアが三層になっていることは意味しない。1台の計算機が時分割 (time sharing) でこの三層の職務を果すことも可能である。下層程忙がしいのが世の常であり、したがって第三層は専用の制御計算機が当り、第一層、第二層は大型の計算機1台で兼用されるのが普通である。

その機能は次のように分類できる。

- 1) 状況把握
 - i) プロセスの状況把握
 - データ収集 (測定点のスキュンニング、記憶)
 - データ処理 (修正、較正、推算)
 - プロセス特性認知 (数学モデルの修正)
 - ii) 装置の状況把握
 - プラント、計器の動作のチェック
 - iii) 製品の状況把握
- 2) 作表および警報
 - i) 作表 (時報、日報の作成とそれに必要な計算)
 - ii) 警報 (限界突破の判断、警報)
- 3) プロセス運転
 - i) シーケンス制御 (回分操作、スタート、ストップ)
 - ii) 安定化 (フィードバック、フィードフォワード制御)
 - iii) 最適化 (最適操作条件の決定)
 - iv) 操作 (調節計の設定値変化、DDC※2)

塩化ビニルプロセスの計算制御²⁾を例にとって、これらの機能の間の関連を示そう。図2にこの制御系の概略を示す。128個のプロセス変数の値が計算機 (RW-300) によって監視される。これらは熱電対による数 mV の信号と、空気圧式の検出端の出力を空電変換した 0~10 V の信号よりなる。計算機は 8 秒に 1 回これらの信号をスキュンニングし、A/D 変換器を通して磁気ドラムに記憶する (データの収集)。計算機はさらに自分自身および A/D 変換器の異常の有無をチェックし (装置の状況把握)、異常があれば警報を発する (警報)。異常がなければ次のプログラムを実行する。

- i) プロセス状況の監視、5 分毎、……磁気ドラム内の測定データが所定の範囲内にあるかどうかを調べ異常のある時はその時

図2 塩化ビニルプロセスの計算制御システム

※2 デジタル計算機が直接操作端を駆動する方式 (direct digital control)

刻、計器を赤字でタイプする。

ii) 制御方程式の計算、20 分毎、……プロセスの 8 個の制御系の最適設定値を算出し、それらの妥当性をチェックしてから磁気ドラムに記憶し、順次 D/A 変換器を通して調節計に送る（安定化、操作）。

iii) プロセスの時報作成、1 時間毎、……すべてのプロセス変数およびそれから計算された転化率、濃度などをタイプする（データ処理、作表）。

iv) プロセスの最適操業条件の計算、8 時間毎……毎月の生産計画を最低コストで実現するように操業を調整する（最適化）。

v) プロセスの日報作成、24 時間毎……その日の操業を解析した結果、すなわち総流量、操業効率、数学モデルの修正データをタイプする（データ処理、特性認知）。

以上がこの計算制御において遂行されるプログラムである。なおこの計算機は塩化ビニルプロセスのみでなく、アクリロニトリルのプロセスも同時に制御している。

計算制御の機能のうちには、従来の作業者の仕事を代行しているに過ぎないものもあるが、プロセス特性の認知、および最適化の二つの機能は、計算制御によってはじめてオンラインの機能として実用化されたものである。殊に最適化は、計算制御が経済的なメリットを与えるための原動力である。

2 プロセス特性認知

プロセス特性認知 (process identification) とはプロセス操業のデータから、そのプロセスの特性をあらわす数学モデルを作成することである。

2.1 数学モデル

プロセス変数間の関係をあらわす一連の方程式を数学モデルと呼ぶ。数学モデルは計算制御において二つの役割を果たす^{※3}。第一は測定可能なプロセス変数から、測定不可能な変数の値を推算するためのものである。たとえば触媒活性の低下を伴う反応操作において、入口濃度、出口濃度、反応温度などのデータから反応速度定数の現在の値を計算するなどがこれであり、測定不可能な変数またはパラメーターが最適化、安定化に必要な場合がおこなわれる。

第 2 は入力変数^{※4}に対する出力変数^{※4}の応答を予測するためのものであって、後述するように最適化において重要な役割を果たす。前者の目的のものを推定用モデル (inferential model)、後者を予測用モデル (predictive model) と呼んで区別することもあるが、モデルの形式には全く差はない。

定常状態におけるプロセス変数間の特性をあらわすモデルを静特性モデルと呼び、一般に

$$F_i(y_1, y_2, \dots, y_n, x_1, \dots, x_m) = 0 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

または

$$y_i = F_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad i=1, 2, \dots, n$$

のごとく代数方程式であらわされる。ここで y_i は出力変数、 x_i は入力変数である。非定常状態をも含めてプロセスの特性をあら

わすモデルは動特性モデルと呼び

$$\frac{dy_i}{dt} = F_i(y_1, y_2, \dots, y_n, x_1, x_2, \dots, x_m) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

の形の微分方程式であらわされる。数学モデルとしてはこのほかに、プロセス操業の許容限界を示す

$$R_i(y_1, y_2, \dots, y_n, x_1, x_2, \dots, x_m) \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, l \quad (3)$$

が必要である。

2.2 数学モデルの作成

計算制御に用いられる数学モデルはプロセスの理論的および実験的解析から作り上げられる。モデルの作成の定石は未だ確立してはおらずプロセスアナリストの能力に大きく依存するところである。Williams はその著書³⁾の中で一連の筋道を示しており、参考になる面があろう。

2.2.1 理論的方法 装置全体または最少部分について物質収支、エネルギー収支、運動量収支をとり、考え得るすべての基礎過程について速度式を組み上げれば理論的解析の基礎式が得られる。反応操作については装置内の移動、流動現象が次第に明らかにされており、実験的に決定される反応速度式と組み合わせる基礎式を得ることは比較的容易となってきた。

このようにして得られる基礎式は一般に制御計算機に入れるには複雑に過ぎるため、大型計算機を用いた摂動計算^{※5} (perturbation run) によって次の 2 段階にわたって簡単化される。第 1 段階で、摂動の影響の小さい入力変数および基礎過程を見出し、これらをモデルから省略する。これによってプロセス特性に寄与する基礎過程のみを抽出し、モデルを組み直す。第 2 段階で入力変数の変動範囲全域にわたって摂動計算をおこない、入力変数と出力変数の間の数値的対応を算出し、この数値的対応を簡単な形の近似式によって表現する。これが制御用計算機に入れられるべき数学モデルである。この段階では数学モデルは 1 次または 2 次式、まれに exponential, logarithm を含む簡単なものとなっている。

第 1 段階の簡単化を経たモデルは、プロセスと物理的対応を持ち、同種他プロセスにも適用できる一般性を有している。これに対して第 2 段階で得られたモデルは最早プロセスとの物理的対応は全くなく、単に特定のプロセス、特定の操業範囲でプロセスの挙動をあらわしているにすぎない。これは基礎式をプロセス自身とみなして、数値計算という実験をおこなって得た実験式であると考えべきものである。

2.2.2 実験的方法 プロセスの入力変数に何らかの変動を与え、それに対する出力変数の動きを観測し、その間の関係を近似式によって整理するのが実験的な数学モデルの作成である。これは i) 有意な入力変数の決定、ii) 入力変数と出力変数の間の回帰式の決定、の 2 段階を経て進められる。

出力変数に影響を及ぼす (有意な) 入力変数の決定に有効な方法は実験計画法と相関分析である⁴⁾。実験計画法は少数の実験回数で多数の変数について検索し、それがランダムな変動に比べて有意かどうかを決定する。相関分析は多数の操業データに対して適用され、これらのデータから有意な入力変数を見出すのに役立つ。入力変数の数は一般に 1 個ではないので多重相関の計算が必

※3 シーケンス制御の論理プログラムをモデルと呼ぶこともあるが、ここでは除外する。

※4 操作変数、外乱などプロセスに入る変数を入力変数 (独立変数) と呼ぶ。プロセスの特性に基づいて入力変数の関数として定る変数を出力変数 (従属変数) と呼ぶ。

※5 摂動計算とは特定の独立変数あるいは基礎過程のパラメータの値を予想される変化範囲にわたって少しずつ変化させて数値計算をおこない、従属変数の値の動きを見ることである。

表1 プロセス動特性測定法

入力の形	測定法	入力 $x(t)$	出力 $y(t)$	数学的背景
過渡信号	デルタ応答法	デルタ関数 $\delta(t)$	$g(t)$	$g(t)$: デルタ応答
	ステップ応答法	階段関数 $u(t)$	インディシャル応答	$y(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$
	パルステスト法 ⁶⁾	任意のパルス $x(t)$		$G(j\omega) = \frac{\int_0^\infty y(t)e^{-j\omega t} dt}{\int_0^\infty x(t)e^{-j\omega t} dt}$
定常信号	周波数応答	$x(t) = X_0 \sin \omega t$	$y(t) = Y_0 \sin(\omega t + \phi)$	$ G(j\omega) = Y_0/X_0, \angle G(j\omega) = \phi$
ランダム信号	相関法 ⁷⁾	定常ランダム入力 i) gaussian noise ii) binary noise		$\varphi_{xy} = \int_0^\infty g(\lambda) \varphi_{xx}(\tau - \lambda) d\lambda$ ここに $\varphi_{xy}, \varphi_{xx}$ は次式で定義される相互および自己相関関数
		疑似ランダム信号系列 ^{**8)}		$\varphi_{xy} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t-\tau) dt$ $\varphi_{xx} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t-\tau) dt$

* フーリエ変換は計算機で数値的におこなう。

** $\varphi_{xx} = \delta(\tau)$ になるような信号系列を用いる。

要となり、汎用の計算機が要求される。

入力変数と出力変数の間の定常的特性は1次あるいは2次の代数方程式によって近似される。誤差の存在のためこれ以上複雑な式を決定することはそれに特別な根拠がない限り無意味である。近似式の係数の決定は回帰分析によっておこなわれる。回帰分析の方法としては古くからの最小自乗法と最近提出された Ridge analysis⁹⁾ がある。後者は推定の精度が勝れているが計算が複雑であり、主として前者が現在でも用いられる。

動特性を実験的に定める場合には、入力変数と出力変数の間の微分方程式(2)式は線形定常係数であると仮定し、その係数を決定する。動特性測定の方法は入力変数の形によって表1のように分類される。このうちステップ応答、パルステスト法がその簡便さのために良く用いられ、相関法もプロセスを大きく乱さない点で有利である。

数学モデルの理論的開発と実験の開発は相補っておこなわれるべきである。基礎方程式から出発し、簡単化をおこなって制御計算機に入れるモデルの構造を定め、これに含まれるパラメータを実験によって決定する方法が現在のところ最も有効であり、かつまた技術的蓄積の大きい方法であるといえよう。

2.3 モデル修正

プロセスの特性はたとえば触媒の活性変化、スケールの付着などにより、徐々に変化する。したがって計算制御のモデルはプロセスの特性変化に応じて常に修正されねばならない。計算制御においてはオンラインでこの修正がおこなわれるようにしたものが多い。修正は所定の操業期間から得られるデータから回帰計算をして、モデルの係数を再計算することによりおこなわれる。モデル修正のデータが蓄積されモデルの係数の動きに入力変数との相関が見出されたならば、それを基礎としてモデルの構造を修正することができる。

3 最適化

計算制御における最適化とは、そのプロセスに規定された目的関数が最大または最小となるようにプロセスを運転することである。最適化の考え方、手法は本号、西村、矢木氏の総説に詳しいものと思われるので、ここでは計算制御での問題点に話を限定しよう。

3.1 目的関数

生産活動の目的からいって、究極の目的関数は一般に

$$P = \sum (\text{製品価格}) \cdot (\text{生産量}) \\ - \sum (\text{原料価格}) \cdot (\text{原料使用量}) \\ - \sum (\text{操業コスト}) \\ - \text{プロセス減価償却} \quad (4)$$

の形の経済的利益をあらわすものである。しかしながら個々のプロセスでこの形の目的関数を最大にしたとき、全体の利益が最大になるという保証は特別の場合を除いて全くない。したがってこの形の目的関数は図1の第二層生産管理計算機に与えられるべきものであり、個々のプロセスの制御計算機には管理計算機によって咀嚼された別の形の目的関数が与えられるべきである。計算制御に与えら

れる目的関数は 1) 最大生産量を挙げる、2) 規定生産量を最小コストで達成する、のいずれかの形になることが多い⁹⁾。一般に最大生産量を目的とする計算制御は計算機の償却期間が短く、最小コストを目的とするものは償却期間が長いという報告¹⁰⁾がある。

3.2 定常最適化

連続プロセスで外乱の平均持続時間がプロセスの応答時間に比して十分長い場合には、プロセスが定常状態にあると見做して最適化計算をおこなうことができる。これを定常最適化という。定常最適化問題は目的関数

$$P = P(y_1, y_2, \dots, y_n, x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (5)$$

をプロセス特性

$$F_i(y_1, y_2, \dots, y_n, x_1, x_2, \dots, x_m) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$R_l(y_1, y_2, \dots, y_n, x_1, x_2, \dots, x_m) \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, l \quad (3)$$

の束縛のもとで最大または最小にする問題であり、広義の微分問題である。その解法には微分法、探索法(最大傾斜法¹¹⁾, EVOP¹²⁾, CRST¹³⁾, PROBE¹⁴⁾), リニアプログラミングなどが使用される。常圧蒸留塔¹⁵⁾, FCC の計算制御¹⁶⁾の例では、非線形の(1)(3)(5)式を局所的に線形化してリニアプログラミングを適用することを繰返すことによって最適値を求めている。これは多変数の最適化問題にリニアプログラミングが適していることを積極的に利用したものである。

多段プロセスの定常最適化には、ダイナミックプログラミング(DP), 最大原理が用いられるが、これは微分問題よりも次の変分問題の特別な場合と見做すべきであろう。

3.3 動的最適化

外乱持続時間の短い連続プロセス、触媒活性低下などパラメータの変化を伴うプロセス、回分プロセスでは定常状態が存在しないので、最適化は非定常状態についておこなわれねばならない。これを動的最適化という。この問題は目的関数の積分値

$$\varphi = \int_0^T P(y_1, y_2, \dots, y_n, x_1, x_2, \dots, x_m) dt \quad (6)$$

をプロセス動特性

$$\frac{dy_i}{dt} = F_i(y_1, y_2, \dots, y_n, x_1, x_2, \dots, x_m) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$R_l(y_1, y_2, \dots, y_n, x_1, x_2, \dots, x_m) \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, l \quad (3)$$

の束縛のもとで最大または最小にする問題であり、広義の変分問題である。その解法としては変分法¹⁷⁾, ダイナミックプログラミング(DP)^{18,19)}, 最大原理²⁰⁾, 関数空間における探索法²¹⁾が提

出されている。反応操作に関しては回分反応器でおこなわれる逐次水添反応

の最小反応時間問題が Eckman ら²²⁾ によって変分法で計算されて以来 DP²³⁾, 最大原理²⁴⁾, 関数空間最大傾斜法²⁵⁾ によって計算されている。

連続攪拌槽反応器のスタートアップにおける最小時間問題は変分法²⁶⁾, DP²⁷⁾, 最大原理^{28,29)} により取扱われ、いずれもパンパン制御あるいはそれに近い解が得られている。触媒活性の低下の伴う反応操作について最適の触媒交換時期の決定が DP により解かれている¹⁹⁾。以上の例はいずれも単なる計算のみあるいは実験室規模のテストである。小規模のプラントの例として DuPont の重合プロセスの例があるが DP を用いているというだけで詳細な報告はない。

一般にプロセスの計算制御における変分問題をオンラインの制御用計算機で直接解くことは計算速度、記憶容量の点から不可能であり、またその必要がないといえる。変分問題はオフラインの大型計算機を用いて解き、その結果得られる操作変数の最適経路をプロセスの状態および時間の関数として表あるいは近似式の形に圧縮し制御用計算機に記憶させればよい。DP 計算の結果得られる DP 表、パンパン制御における切換線(面)などはこの好例である。この方法によれば最適操作経路がプロセスの実際の状態を通して決定されるため、数学モデルの誤差に基く最適経路の誤差が大幅に改善される。一般に制御系はこのようなフィードバックの経路を持つことが望ましく、最適化制御においてもこのことに留意すべきである。

4 反応操作の計算制御実例

以上述べてきた計算制御の機能および問題解法をまとめる意味で、反応プロセスに適用された計算制御の実例を一、二紹介する。反応操作の計算制御としてアナウンスされたもの、実施中と噂されているものの数は多いが、その詳細が公表されているもの^{16,30,31)}はきわめて少ない。したがってここに御紹介するものはかなり古いものであることを御了承頂きたい。

4.1 流動接触分解(FCC)の計算制御¹⁶⁾

これは Standard Oil California と IBM とによって開発されたものであって FCC プロセスから得られる特定製品の生産量を最大にしようとする計算制御である。

4.1.1 プロセスと数学モデル プロセスへの入出力変数を図

図3 FCC プロセスのプロセス変数

表2 FCC プロセスの記号

$x_1 \sim x_6$	原料流入量	m_1, m_2	反応器、再生器の比熱
x_0	再生器への空気流入量	H	カーボン中の水素の重量比
F_c	触媒流量	M_H, M_C	水素およびカーボンの分子重量
$T_1 \sim T_0$	流入ガス温度	k	再生器流出ガス中の CO ₂ と CO のモル比
Q_1	カーボン燃焼熱	$\rho_1 \sim \rho_0$	流入ガスの密度
Q_2	反応熱(吸熱)	a, b, c	実験的に求められる定数
Q_3, Q_4	熱損失	K', K_1, K_2, K_3	原油品質によつて定まる定数
y_1	反応温度	m, n, A	触媒重量
y_2	再生器温度	W_c	F_c/W_c
y_3	副生物収率	C_D	触媒上のカーボン%
y_4	再生器流出ガス中の酸素容積比	B	θ 時刻までの反応器中の触媒の wt%
y_5	目的生成物収率	ΔB	$\theta \sim \theta + \Delta \theta$ 時間での反応器中の触媒の wt%
y_6	反応器内カーボン生成速度		
y_7	再生器内カーボン燃焼速度		
$q_1 \sim q_0$	流入ガス比熱		
h_1, h_2	流出ガス比熱		

表3 FCC 数学モデル

$$\text{反応器熱収支} \quad m_1 \dot{y}_1 = \sum_{i=1}^5 q_i T_i x_i - \left(\sum_{i=1}^5 x_i - y_0 \right) y_1 h_1 - Q_2(y_1 + a) \sum_{i=1}^5 x_i + Q_0 - Q_3 \quad (8)$$

$$\text{全体の熱収支} \quad \dot{Q} = m_1 \dot{y}_1 + m_2 \dot{y}_2 = \sum_{i=1}^5 q_i T_i x_i - \left[\left(\sum_{i=1}^5 x_i - y_0 \right) y_1 h_1 + (x_0 + y_7) y_2 h_2 \right] + Q_1 y_7 - Q_2(y_1 + a) \sum_{i=1}^5 x_i - (Q_3 + Q_4) \quad (9)$$

$$\text{全体のカーボン収支} \quad \dot{C} = y_0 - y_7 \quad (10)$$

$$\text{定常状態におけるカーボン燃焼式} \quad y_7 = \frac{(b - c y_4) x_0}{(c y_4 + 1) \frac{H}{M_H} + \frac{(1 - H)}{M_C} \frac{(2k + c y_4 + 1)}{k + 1}} \quad (11)$$

$$\text{カーボン生成速度} \quad y_0 = \frac{K' F_c}{\sum_{i=1}^5 x_i} (e^{-A/y_1}) \sum_{i=1}^5 \left[\frac{\Gamma(n_i + 1)}{h(n_i + 1)} x_i \right] \quad (12)$$

$$\text{目的生成物収率} \quad y_5 = K_1 \sum_{i=1}^5 \frac{x_i}{\rho_i} \frac{(y_0)^m}{\left(\sum_{i=1}^5 x_i \right)^m} \quad (13)$$

$$\text{副生物収率} \quad y_3 = K_2 y_5 (y_1 + K_3) \quad (14)$$

$$\text{入力変数許容範囲} \quad \left. \begin{aligned} 0 &\leq x_1 \leq U_1 \\ 0 &\leq x_2 \leq U_2 \\ x_1 + x_2 + x_3 &\leq U_3 \\ L_4 &\leq x_4 \leq U_4 \\ x_4 + x_5 &\leq U_5 \\ L_6 &\leq x_6 \leq U_6 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\text{出力変数許容範囲} \quad \left. \begin{aligned} L_7 &\leq y_1 \leq U_7 \\ L_8 &\leq y_2 \leq U_8 \\ L_9 &\leq y_3 \leq U_9 \\ L_{10} &\leq y_4 \leq U_{10} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

3に示す。自由に操作できる変数は $x_1 \sim x_6$ の6個であり、従属変数は $y_1 \sim y_7$ の7個である(このうち y_1, y_2, y_3 のみが測定可能である)。したがって7個の方程式が必要である。図3に基づく物質収支、熱収支から表3の(8)~(11)の4個の方程式は直ちに導かれ、カーボン析出の速度式(12)、目的物の収率(13)式、副生物の収率(14)式は過去に得られている経験式を基にして導かれた。

このプロセスの装置制約から入力変数 $x_1 \sim x_6$ の許容範囲として表3(15)式、さらに従属変数 $y_1 \sim y_4$ の許容範囲として表3(16)式が与えられる。

このプロセスの目的生成物は y_5 であり、この収率を最大にすることを目標とする。すなわち目的関数は(13)式そのものである。

このプロセスに入る外乱は原料の性質の変動である。これは原油の性質の変動に基づくものであって避け難い。この変動をプロセス運転条件の変更によって吸収し、常に y_5 の最高収率を実現することが必要である。

4.1.2 最適化

(1) 非線形モデルの局所線形化 制約条件(15), (16)式および独立変数の数から判断して、この問題の解法にはリニアプログラミングが望ましい。そのためには(8)~(14)式を線形化しなければならない。まず特定の操作条件 $x_{11}, \dots, x_{61}$ に関して(8)

に (24)(25) 式から R, S を求めて調節計に指令してプロセスを運転する。

4・2・4 モデル修正 計算機は操業データから反応の速度定数 K_1, K_2, K_3 の値を再決定する。触媒の活性変化が避けられないこのプロセスでは重要な機能である。計算機は塔への実際の流入量 f_2' と塔頂の実際の留出量 D' を読みとって

$$f' C' x_2 = 0.95 D' + 0.05 (f_2 - D') \quad (31)$$

を用いて C' を算出する。実測された C' のデータが 24 個蓄積したならば $\sum_{i=1}^{24} (C_i - C'_i)^2$ を最小とする K_1, K_2, K_3 を算出し、以後の計算に用いる。

計算機の果す役割を図 5 に流れ図の形で示した。

図 5 計算制御プログラム流れ図

一文 献

- 1) F. Ryan, *Control Eng.* 10, 73 (1963) No. 10.
- 2) J. M. Madigan, *Chem. Eng. Progr.* 56, 63 (1960) No.

- 5.
- 3) T. J. Williams, "Systems Engineering for the Process Industries". McGraw-Hill N. Y. (1961).
- 4) C. A. Bennett, N. L. Franklin, "Statistical Analysis in Chemistry and the Chemical Industry", John Wiley N. Y. (1954).
- 5) A. E. Hoel, *Chem. Eng. Progr.* 58, 54 (1962) No. 3.
- 6) J. O. Hougen, R. A. Walsh, *Chem. Eng. Progr. Symp. Series*, No. 36, 74 (1961).
- 7) 古屋, 安達訳, "自動制御系の統計的解析法", コロナ社(昭和38).
- 8) 古田, 伊沢, 計測と制御, 3, 665 (1964).
- 9) R. D. Eisenhardt, T. J. Williams, *Control Engineering*, 7, No. 7, 103 (1960).
- 10) T. Q. Eliot, D. R. Longmire, *Chem. Engineering*, 69, No. 1, 99 (1962).
- 11) G. E. P. Box, K. B. Wilson, *J. Royal Statistical Soc. B*-13, 1 (1951).
- 12) J. S. Hunter, *Chem. Eng. Progr. Symp. Series*, 56, No. 31, 10 (1960).
- 13) C. W. Carrol, *Operations Research*, 8, 169 (1960).
- 14) R. A. Mugele, *IBM Systems Journal*, 1, 1 (1962).
- 15) R. H. Crowther, et al., *Chem. Eng. Progr.* 57, 39 (1961).
- 16) C. T. Leondes, editor, "Computer Control System Technology", Chap. 20, McGraw Hill N. Y. (1961).
- 17) R. Weinstock, "Calculus of Variation", McGraw Hill N. Y. (1952).
- 18) R. Bellman, "Adaptive Control Processes, A Guided Tour", Princeton University Press (1961).
- 19) S. M. Robert, "Dynamic Programming in Chemical Engineering and Process Control", Academic Press (1964).
- 20) L. S. Pontriagin, et al., "The Mathematical Theory of Optimal Processes", Interscience (1962).
- 21) G. Leitmann, "Optimization Techniques", Chap. 6, Academic Press (1962).
- 22) D. P. Eckman, I. Lefkowitz, *Trans. ASME*, 81, 569 (1959).
- 23) S. M. Robert, J. D. Mahoney, *Chem. Eng. Progr. Symp. Series* 58, 1 (1962) No. 37.
- 24) 高松ら, 化工 29 年会発表
- 25) 高松ら, 化工 29 年会発表
- 26) 市川, 第1回化工総合シンポジウム
- 27) H. E. Grethlein, L. Lapidus, *A. I. Ch. E. Journal* 9, 230 (1963).
- 28) 平塚ら, 自動制御 3, 198 (1964).
- 29) J. E. Cotter, Y. Takahashi, *Chem. Eng. Progr. Symp. Series* 59, No. 46, 119 (1964).
- 30) J. G. Auricoste, *Proceedings 1st IFAC* 4, 282 (1961).
- 31) 武城ら, オートメーション 9, 51 (1964) No. 1.