

JAERI-M

6801

OWL-0プラントの動特性同定と制御系の評価

1976年12月

尾熊 律雄・藤井 義雄・坪 長・米川 出

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

OWL-0プラントの動特性同定と制御系の評価

日本原子力研究所 東海研究所 原子炉工学部

尾熊律雄・藤井義雄・坪 長⁺・米川 出⁺

(1976年11月1日受理)

多変数線型系に対する統計的同定手法を応用してOWL-0プラントの動特性同定が行われた。

同定された数式モデルをもとにプラントの動特性解析ならびに制御系の評価がなされた。その結果セパレータ水位とジェットコンデンサー圧力との相互作用とその制御系におよぼす干渉効果等制御上重要な問題点が明らかにされた。

⁺ 日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

Identification of OWL-0 Plant Dynamics and Its Application
to Evaluation of the Control Systems

Ritsuo OGUMA, Yoshio FUJII, Cho AKUTSU⁺ and Izuru YONEKAWA⁺
Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

(Received November 1, 1976)

The statistical identification technique in linear multivariable systems has been applied to identify dynamics of the OWL-0 plant.

The identified mathematical model was used to study the dynamics and evaluate the plant control. The results revealed problems in plant control, such as mutual interactions of subsystems caused by dynamics relation between the separator water level and the jetcondenser pressure and their interfering effects on the control systems.

⁺) Division of JMTR Project, Oarai, JAERI

目 次

I 序 論	1
II 多変数システムに対する統計的同定手法	5
II-1 共分散関数とスペクトル密度関数	5
II-2 多変数線型システムの表現	5
II-3 自己回帰モデルフィッティング	8
II-4 解析コードの概説	10
III OWL-0 プラントの同定実験	12
IV OWL-0 プラントの同定結果と動特性の評価	16
IV-1 セパレータ, ジェットコンデンサー, サージタンク部の解析 (EXP1).....	16
IV-2 冷却系を中心としたループの解析 (EXP2).....	29
V 結 論	36
VI 謝 辞	37
VII 参考文献	37

I 序 論

あるシステムがその目的に対して機能を十分に発揮しているかどうか現在の状態を把握し、定量的に評価し、より合理的なシステム構成を志向することは大きな意義を持っている。とりわけ制御系の構成は其中でも大きな比重を占めており一般には採用される制御方式、検出あるいは操作端の取捨、選択の仕方、制御パラメータの設定等によって性能は大きく異なる。しかもシステムが複雑になるにつれて、設計された制御系が個々のサブシステムに対して合致したものであっても、他のサブシステムに対して種々の影響を及ぼし、システム全体として見た時には、その機能が異なって来る場合もある。従って制御系の構成はシステム全体を支配する動特性を十分評価する中で行なわれる必要がある。

個々のサブシステムとそれらの相互連関を介して、システムが構成されているといった複雑なシステムの動特性を制御という観点に立って解析する場合

- 各サブシステムが相互にどのように制約しあっているかその連関の強さと物理的メカニズムを明らかにする事が特に重要である。それは個々のサブシステムを支配する法則とそれらが結合してできたシステム全体を支配する法則が一般には異なるからである。

さらにこの結果をもとに

- システムが相互に独立ないくつかのサブシステムのグループに分割できるかどうか
- 得られた特性は制御上いかなる意味を持っているか

などを明らかにして行く作業が不可欠である。

動特性解析の方法としては、例えば、物理現象の素過程を記述する数式モデルを組合わせて、サブシステムのモデルを作り、それらを結合させてシステム全体を表現し解析を進めるといった、いわゆる、ミクロなモデルを積重ねていってマクロな特性の記述を行なう方法が取られて来た。

これによると、システムの構造あるいは物理的性質の把握については有益な情報を得ることが期待出来るが、システムが複雑になるにつれて全体を表現する数式モデルは極めて大規模なものになり次元と簡略化の問題に常に悩まされる。そのために、システム固有の特性を解析するよりも、モデル化、あるいは数値解析のコード化等に要する手間の方に実に多くの労力をついやす場合がしばしば生ずる。しかも得られたモデルを使って、現代制御理論を適用して、制御解を求めようとしても、理論が前提としている条件と、モデルの間に大きなギャップがあったり、制御解を求めるのに余りに膨大な計算機容量を必要としたりして、いきなり、きれいな形で解が求まる事は比較的少ない。

動特性解析のもう一つの方法としては、対象としているシステムに働きかけて、応答波形を実験によって測定し、その波形の解析の中で例えば、線型システムの表現形式と対応付けて、システムの動特性を明らかにして行くといった同定手法にもとづく実験的アプローチが挙げられる。この方法によると、得られたデータに対するフィッティングモデルを求めるといった部分についてだけ考えると、モデル決定までの手順は簡単で解析に要する手間は少なくすむが、一般に得られた結果についての物理的性質の把握は困難であり、さらにフィッティングモデルは同定手法の実用上から見た現段階では定係数線型集中定数系に限られている。又、システム

の同定を実際に行うに先立ってその手法に合致した同定実験条件の設定（入力変数の選択，与える外乱の性質と大きさ，測定変数の選択，etc）と同定実験によって得られたデータの事前処理（実験データの有意性の確認，解析の為の変数の選択 etc）といった問題は同定手法の選択と同様に大きな問題となる。

この様な問題に対して，近年複雑なシステムを対象として動特性解析あるいは制御系設計を行なう上での実用に耐え得る有効な同定手法がいくつか提案されている。例えば，赤池氏は自己回帰モデルに対し，ユニークな評価関数にもとづき最小2乗法フィッティングを行う方法とアルゴリズムを提案し^{1), 3)}，セメントロータリーキルンのDDCに応用して，すぐれた成果を収めている⁶⁾。又，Astromらは，自己回帰平均移動型モデルに対し最尤推定法にもとづくモデルフィッティングの方法を提案し，paper machineの制御に応用されている⁴⁾。又，鈴木氏らは，定常時系列データに対し，インパルス応答関数の重み系列を推定する方法を提案し，火力発電所のボイラ及びタービンの同定実験に応用している⁵⁾。

これらの同定手法の中で，制御という観点に立って動特性解析を行なう上で，重要と考えられる項目をいくつか挙げてみると

- モデル構造を決定する評価関数がすぐれている。
- パラメトリックモデルで伝達関数あるいは状態空間表現に容易に変換可能である。
- 雑音の処理機構が組込まれている。
- 多変数的取扱いが容易でかつ有効な計算アルゴリズムが確立している。

等を指摘できる。

ここで用いる動特性解析のための同定手法は赤池氏によって時系列データの統計的解析手法として提案されたもので，次に述べる様な内容から構成されていて多変数線型システムの範囲内ではその有効性が確かめられている。即ち，得られた時系列データに対する相関関数上で最小2乗法により自己回帰モデルフィッティングを行う。ここでは，有限な長さの時系列データの持つ情報量を評価し，フィッティングモデルの次数を増やすことによって得られるモデルフィットネスとそれによって生ずる推定すべきパラメータの数の増大がもたらす推定結果のばらつき増大との相矛盾する二つの要素のかねあいから最適次数が決定される。評価された最適次数のもとで多変数相関関数上での多次元自己回帰モデルパラメータの最小2乗法による推定が行われる。

この自己回帰モデルフィッティングの過程で得られた評価関数の形，その最小値と推定されたモデルの次数を検討する。さらに同定されたモデルをインパルス応答関数，スペクトル密度関数等の形に変換して表現し，この中から，システムの特性を抽出し，従来の動特性解析結果から得られている知識，それまでの経験的知識等をもとに，得られた特性についての物理的解釈がなされる。これらの結果を総合して，多変数システムの制御上必要な事項，サブシステム間の関連性の定性的定量的評価，システムの分割の問題等について解析を進めて行く。

以上に述べた同定手法によって求めたフィッティングモデルをもとに動特性を解析してゆくアプローチは，先に述べた物理的素過程を記述した数式モデルを組合わせてシステムのモデルを作りあげてゆく，従来の動特性解析の方法とは全く対照的で，まず，マクロにシステムを見て行くという立場に立っている。

ここで我々が対象としている OWL-0 プラント (沸騰水型水ループ) について見ると、このプラントは多くのサブグループが複雑に結合して1つのシステムを構成しており、動特性を解析する場合にも、前述した様な解析のポイントを明確にして、作業を進めて行く事が重要である。

OWL-0 プラントは J M T R の炉内照射水ループ OWL-1 のモックアップ試験装置として製作されたもので、加圧水型 (P) 及び沸騰水型 (B) 両モードで運転される炉外テストループである。このループは Fig. 1. のような構成になっており、ここでは B モードの場合のプラントの動特性解析を目的として同定実験がなされた。その場合ループの状態は1次循環ループにおける蒸気発生器 (テストセクション) の 100 kW 電気加熱によって B モードがつくられ、その除熱は圧力調節系 (スプレー水系) 主冷却器によってなされ、これが2次系循環ループを介して3次系に放出される。

この OWL-0 プラントの主な制御系としては、規定された運転モードを維持し、照射目的に対してはテストセクション部の温度、圧力、流量、及び蒸気の乾き度を所定の値に保つ様に、次のものが設けられている。即ち CV12 バルブによるセパレータレベル L_1 制御、CV19 によるジェットコンデンサー圧力 P_2 制御、CV14-15 による主冷却器出口温度 T_{10} 制御、CV16-17 による圧力調節系冷却器出口温度 T_{14} 制御、CV11 による1次系メインループ流量 F_1 制御等が行われている。このプラントの制御方式は各サブシステムに対してアナログ PID 制御系によるサブグループ制御を基本としており、現在はさらに、これをデジタル化して、デジタル計算機による計算機制御も行われている。

この計算機制御の開発のために現在までにプラント動特性解析、ソフトウェアの開発を始めとして種々の研究開発が行われて来た。²⁾ 又その結果にもとづく実証実験、制御実験をはじめとして多くの実験と運転が行われ、現在の OWL-0 プラントの定値制御は、プラントが定常状態の近傍にある時は、比較的その機能を果している事が確かめられている。しかし、プラントに何らかの原因で大きな外乱が加わったり、P モードから B モードへ移行する場合など、プラントの乱れが小さくない場合には、定常状態近傍で生じなかつた種々の制御上の問題が起り得る。又今迄の運転経験の中からそれに該当するいくつかの問題も指摘されている。

今回行われた OWL-0 のプラントの同定実験及びそれにもとづく動特性の解析は、このプラントに対しては初めての経験であり、この解析によって得られた結果が従来の経験あるいは動特性解析結果と合致しているかどうかを確認し、現有の制御系の評価、新しい制御方式の採用あるいは新たなプラント設計等に対して、どれだけ有効な情報が引出せるか、この種のアプローチの有効性を確かめる事を目的として行われたものである。

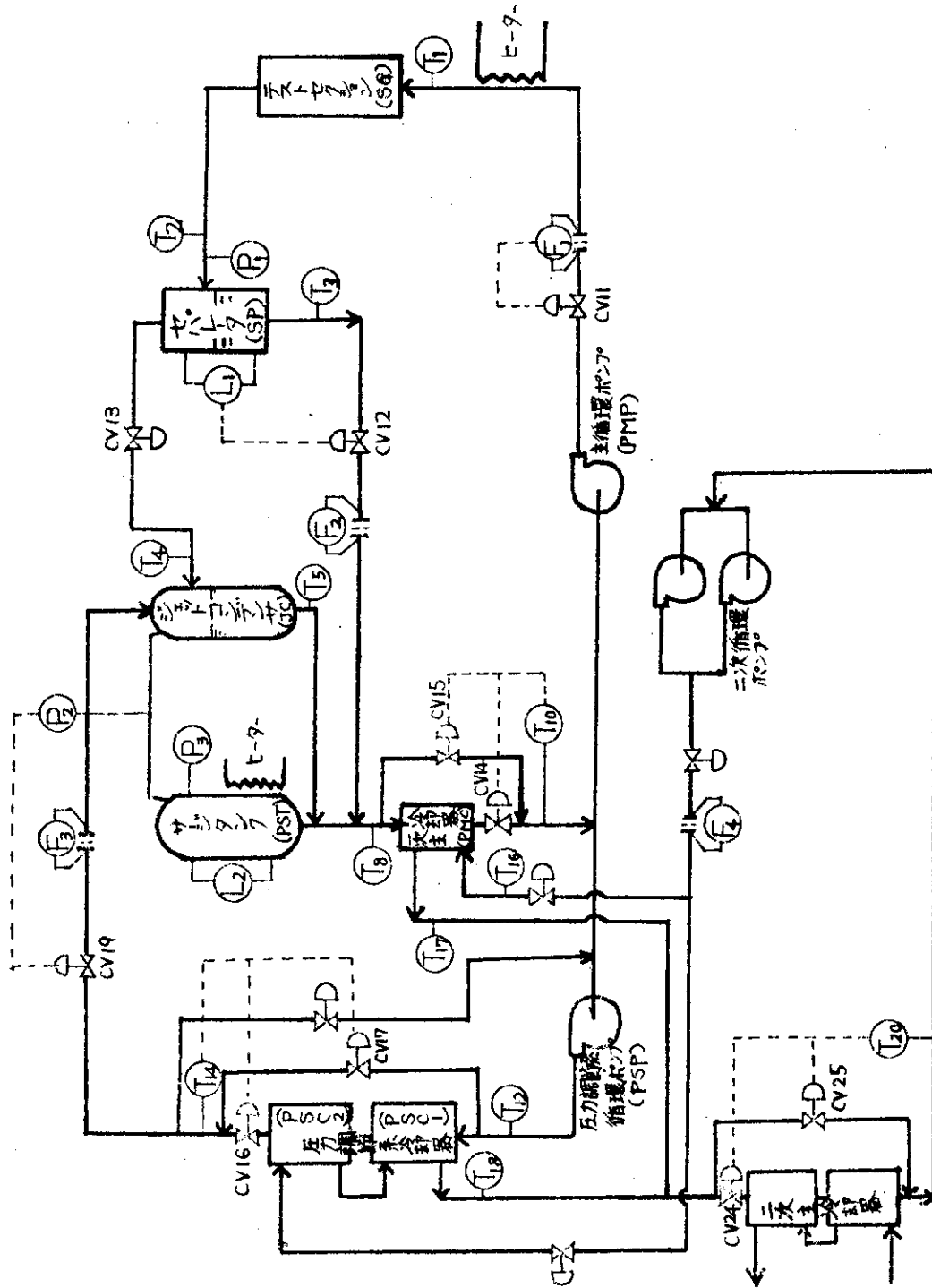


Fig. 1 Schematic diagram of OWL-0 plant.

II 多変数システムに対する統計的同定手法

同定実験によって得られた各プロセス変数の観測データをもとに解析が進められる。ここでは、まず測定変数の中から解析に必要な変数の選択をし、システムの動特性についての定性的評価を行うために、相関及びスペクトル解析がなされる。これによって各変数の線型独立性、振幅比、周波数特性等をチェックし解析に必要な変数の取捨選択を行う。得られた変数の組に対して自己回帰モデルフィッティングを行い多変数線型差分方程式を同定する。いったん動特性モデルが同定されると線型システムの種々の表現形式に容易に変換が可能であり、それによって対象としているシステムの特性を解析することができる。

基礎概念について以下に述べる。

II-1. 共分散関数とスペクトル密度関数

不規則変動をする定常時系列データを $\{x_i(s), s=1, 2, \dots, N\}$ とする時 $x_i(s)$ の自己共分散関数 $R_{x_i x_i}(\ell)$ は次式によって与えられる。

$$R_{x_i x_i}(\ell) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (x_i(s+\ell) - m_{x_i})(x_i(s) - m_{x_i}) \quad (1)$$

$$\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$m_{x_i} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N x_i(s) \quad (2)$$

又 $x_i(s)$, $x_j(s)$ の相互共分散関数は次式で与えられる

$$R_{x_i x_j}(\ell) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (x_i(s+\ell) - m_{x_i})(x_j(s) - m_{x_j}) \quad (3)$$

(1), (3) で得られた共分散関数をフーリエ変換してスペクトル密度関数を求める。フーリエ変換可能な条件として共分散関数は次式を満していなければならない。

$$\sum_{\ell=-\infty}^{\infty} |R_{x_i x_j}(\ell)| < \infty \quad (4)$$

この時共分散関数とスペクトル密度関数の関係は

$$P_{x_i x_j}(f, \Delta t) = \Delta t \sum_{\ell=-\infty}^{\infty} \exp(-i 2\pi f \ell \cdot \Delta t) R_{x_i x_j}(\ell) \quad (5)$$

$$R_{x_i x_j}(\ell) = \int_{-\frac{1}{2\Delta t}}^{\frac{1}{2\Delta t}} \exp(i 2\pi f \ell \cdot \Delta t) P_{x_i x_j}(f, \Delta t) df \quad (6)$$

II-2. 多変数線型システムの表現

k 次元の定常時系列 $\{X(s), s=1, 2, \dots, N\}$ に対して自己回帰表現が可能であるとして

$$X(s) = \sum_{m=1}^M A(m) X(s-m) + U(s) \quad (7)$$

但し $U(s) = (\epsilon_1(s), \epsilon_2(s), \dots, \epsilon_k(s))'$ は

$$\begin{cases} EU(s) = 0 \\ EU(s)U'(s-\ell) = \Sigma \cdot \delta(\ell) \quad \Sigma_{ij} = \sigma_{ij} \\ EU(s)X'(s-m) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

今 $X(s)$ の平均値は 0 であるとして各要素に分解して書くと

$$x_i(s) = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^k A_{ij}(m) x_j(s-m) + \epsilon_i(s) \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (9)$$

$$\epsilon_i(s) \epsilon_j(s-\ell) = \left(\sum_{m=0}^M \sum_{r=1}^R A_{ir}(m) x_r(s-m) \right) \left(\sum_{n=0}^M \sum_{t=1}^R A_{jt}(n) x_t(s-\ell-n) \right)$$

$$\begin{aligned} \overline{\epsilon_i(s) \epsilon_j(s-\ell)} &\triangleq \ell \lim \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \epsilon_i(s) \epsilon_j(s-\ell) \\ &= R_{\epsilon_i \epsilon_j}(\ell) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M \sum_{r=1}^k \sum_{t=1}^k A_{ir}(m) A_{jt}(n) R_{rt}(\ell-m+n) \end{aligned} \quad (10)$$

但し, $A_{ij}(0) = -1$ である。又, $R_{rt}(\ell)$ は $x_r(s)$ と $x_t(s)$ の相互共分散関数を表わす。
 (10) 式は共分散関数と(7)式の自己回帰モデルを関連付ける式で, 次数 M が与えられると最小 2 乗法による解, 即ち $\epsilon_i(s)$ の 2 乗平均値を最小にする解が求まり

$$\sum_{m=0}^M \sum_{j=1}^k A_{ij}(m) R_{jn}(\ell-m) = R_{in}(\ell) \quad (n=1, 2, \dots, k, \ell=1, 2, \dots, M) \quad (11)$$

この連立 1 次方程式を $i=1, 2, \dots, k$ について解けば, $A_{ij}(m)$ が求まる。

次に(10)式をフーリエ変換してスペクトル表現をすると

$$\sigma_{ij} = \sum_{\ell=-\infty}^{\infty} \exp(-i 2 \pi f \ell) R_{\epsilon_i \epsilon_j}(\ell) =$$

$$\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M \sum_{r=1}^k \sum_{t=1}^k A_{ir}(m) \exp(-i 2 \pi f m) A_{jt}(n) \exp(i 2 \pi f n) \times$$

$$\sum_{\ell=-\infty}^{\infty} R_{rt}(\ell) \exp(-i 2 \pi f \ell) \equiv \sum_{r=1}^k \sum_{t=1}^k A_{ir}(f) \overline{A_{jt}(f)} P_{rt}(f)$$

$$\therefore \sigma_{ij} = \sum_{r=1}^k \sum_{t=1}^k A_{ir}(f) P_{rt}(f) \overline{A_{jt}(f)} \quad (12)$$

$$\text{但し, } A_{ir}(f) = \sum_{m=0}^M A_{ir}(m) \exp(-i 2 \pi f m) \quad (13)$$

(12) 式をマトリックス表示して

$$\Sigma = A(f) p(f) \overline{(A(f))'} \quad (14)$$

逆に

$$P(f) = (A(f)^{-1} \Sigma \overline{(A(f))'})^{-1} \quad (15)$$

$$A(f) = \sum_{m=0}^M A(m) \exp(-i 2 \pi f m) = - \left(I - \sum_{m=1}^M A(m) \exp(-i 2 \pi f m) \right) \quad (16)$$

(12) 又は (14), (15) 式がスペクトル密度関数と(7)式の自己回帰モデルを関連付ける式である。

(9) 式において, $x_j(s)$ を入力とした時の $x_i(s)$ のインパルス応答関数を $a_{ij}(m)$ ($i \neq j$) とすると, これは次の様にして求まる。

今

$$\begin{cases} a_{ij}(1) = A_{ij}(1) \\ a_{ij}(m) = A_{ij}(m) + \sum_{\ell=1}^{m-1} A_{ij}(\ell) a_{ij}(m-\ell) \quad (m=2, 3, \dots) \end{cases}$$

但し, $A_{ij}(m) = 0 \quad (m > M)$

この様にとると

$$\begin{aligned} x_i(s) &= \sum_{m=1}^M A_{ii}(m) x_i(s-m) + \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^{M'} \{ a_{ij}(m) - \sum_{\ell=1}^{m-1} A_{ij}(\ell) a_{ij}(m-\ell) \} \times \\ &\quad x_j(s-m) + \epsilon_i(s) \\ &= \sum_{m=1}^M A_{ij}(m) x_i(s-m) + \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^{M'} a_{ij}(m) x_j(s-m) - \sum_{j=1}^k \sum_{\ell=1}^M A_{ij}(\ell) \cdot \sum_{m=1}^{M'} a_{ij}(m) \times \\ &\quad x_j(s-m+\ell) + \epsilon_i(s) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_i(s) - \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^{M'} a_{ij}(m) x_j(s-m) &= \sum_{\ell=1}^M A_{ii}(\ell) \{ x_i(s-\ell) - \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^{M'} a_{ij}(m) \cdot \\ &\quad x_j(s-m-\ell) \} + \epsilon_i(s) \end{aligned} \tag{17}$$

ここで

$$u_i(s) = \sum_{\ell=1}^M A_{ii}(\ell) u_i(s-\ell) + \epsilon_i(s) \tag{18}$$

と置くと

$$x_i(s) = \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^{M'} a_{ij}(m) x_j(s-m) + u_i(s) \tag{19}$$

従って $\{ a_{ij}(m) \}$ は $x_j(s)$ を入力と見た時の $x_i(s)$ へのインパルス応答関数列を表わしており、そのままフィードバックループの解析に利用できる。さらに(18), (19)に示されているように、ここでは雑音の特性を分離して取り出し自己回帰表現で与えることができる。

前述したインパルス応答関数はシステムの内部変数間の連関を定量的に評価している。ここでさらに測定される変数が被制御変数と操作変数から成る場合について、入力から出力へのインパルス応答関数を求める。今、被制御変数の数が n 、操作変数の数が ℓ で

$$\{ x_1(s), x_2(s) \dots x_n(s), y_1(s), y_2(s) \dots y_\ell(s) \} \text{ とする。}$$

この時(7)式のマトリックス $A(m)$ を

$$A(m) = \begin{bmatrix} a(m) & b(m) \\ * & * \end{bmatrix} \tag{20}$$

但し、

$a(m)$; $(n \times n)$ $b(m)$; $(n \times \ell)$ でシステムマトリックスを表わすとする。

とすると

$$x(s) = \sum_{m=1}^{M'} a(m) x(s-m) + \sum_{m=1}^{M'} b(m) y(s-m) + U(s) \tag{21}$$

但し、 $M' > M$ では $a(m) = b(m) = 0$

ここで $U(s) = 0$ として操作変数から見た被操作変数へのインパルス応答関数列 $\{ c(s) \}$

を求める。

$$\begin{cases} c(1) = b(1) \\ c(s) = \sum_{j=1}^{s-1} a(j)c(s-j) + b(s) & \text{for } s \leq M \\ c(s) = \sum_{j=1}^M a(j)c(s-j) & \text{for } s > M \end{cases} \quad (22)$$

が成立しているとして(22)式に代入すると

$$\begin{aligned} x(s) &= \sum_{m=1}^{M'} a(m)x(s-m) + \sum_{m=1}^{M'} \left\{ c(m) - \sum_{j=1}^{m-1} a(j)c(m-j) \right\} y(s-m) \\ &= \sum_{m=1}^{M'} a(m)x(s-m) + \sum_{m=1}^{M'} c(m)y(s-m) - \sum_{m=1}^{M'} \sum_{j=1}^{m-1} a(j)c(m-j)y(s-m) \\ &= \sum_{m=1}^{M'} c(m)y(s-m) + \sum_{m=1}^{M'} a(m)x(s-m) - \sum_{j=1}^{M'} \sum_{m=1}^{M'} a(j)c(m-j)y(s-m) \\ &= \sum_{m=1}^{M'} c(m)y(s-m) + \sum_{m=1}^{M'} a(m)x(s-m) - \sum_{j=1}^{M'} a(j) \underbrace{\sum_{m=1}^{M-j} c(m)y(s-m-j)}_{x(s-j)} \\ &= \sum_{m=1}^{M'} c(m)y(s-m) \end{aligned}$$

となり、この時の $\{c(m)\}$ はインパルス応答関数列を表わしている。即ち(22)式がインパルス応答関数と(7)式を関係付ける式である。

II-3. 自己回帰モデルフィッティング

1次元定常時系列 $\{x(s); s=1, 2, \dots, N\}$ から自己回帰型の線型予測式を求める。

$$x(s) = \sum_{m=1}^M a(m)x(s-m) + \epsilon(s) \quad (23)$$

ここで $\epsilon(s)$ は、白色雑音で

$$E\epsilon(s) = 0 \quad E\epsilon(s)^2 = \sigma^2 \quad (24)$$

とすると、有限の観測データと次数 M が与えられると平均 2 乗誤差

$$\overline{\epsilon^2(s)} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \epsilon^2(s) \text{ を最小にするように } \{a_M(m)\} \text{ が求められる。有限データから求めた}$$

自己相関関数を $c_{xx}(l)$ とすると

$$\sum_{m=1}^M c_{xx}(l-m)a_M(m) = c_{xx}(l) \quad (l=1, 2, \dots, M) \quad (25)$$

を解けばよい。そこで問題は M の決定であるが、赤池氏は次数決定について最小 2 乗法を適用して得られる係数の推定値を用いて予測を行った場合の one step prediction の誤差の 2 乗平均値の推定値を求め、これを最小にするような M を採用する方法を提案している。即ち、長さ N のデータに最小 2 乗法を適用して得られる $\{a(m)\}$ の推定値を別の新しい同一構造のデータに適用した時の one step prediction の誤差の 2 乗平均値を Final Prediction Error (略して FPE) と定義すると、 M が真の次数より大きければ

$$FPE(M) = \left(1 + \frac{M}{N}\right) \sigma^2 \quad (26)$$

によって近似的に与えられる。最小2乗法を適用して得られた $\{a_M(m)\}$ の推定値を $\{\hat{a}_M(m)\}$ とし

$$S_M^2 = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (x(s) - a_M(\ell) x(s-\ell))^2 \quad (27)$$

とすると、 σ^2 の推定量として $\left(1 - \frac{M}{N}\right)^{-1} S_M^2$ が用いられ

$$FPE(M) = \left(1 + \frac{M}{N}\right) \left(1 - \frac{M}{N}\right)^{-1} S_M^2 \quad (28)$$

がMの適否の評価基準として用いられる。

ここでMが小さすぎるとモデルの適合が不良となり、 S_M^2 が σ^2 に比して大きくなって来る。逆にMが大きすぎると(28)式からわかるように推定精度の低下にもとづく誤差が大きくなって来る。

以上の次数の決定とパラメータの推定は各Mについて何回も解くのではなく、次に示す計算アルゴリズムを使って評価関数の値とパラメータ推定を同時に逐次的に進めていく。

Lをモデルで仮定した最高次数とし初期値を次の様にセットする。

$$a_0(m) = 0 \quad (m = 1, 2, \dots, L) \quad \sigma^2(0) = c_{xx}(0)$$

$a_M(m)$ ($m = 1, 2, 3, \dots, M$), $\sigma^2(M)$ を $M = 0, 1, 2, \dots, L$ に対して逐次式を適用して計算する。

$$\begin{cases} a_{M+1}(M+1) = (\sigma^2(M))^{-1} (c_{xx}(M+1) - \sum_{m=1}^M a_M(m) c_{xx}(M+1-m)) \\ a_{M+1}(m) = a_M(m) - a_{M+1}(M+1) a_M(M+1-m) \quad (m = 1, 2, \dots, M) \\ \sigma^2(M+1) = \sigma^2(M) (1 - (a_{M+1}(M+1))^2) \end{cases} \quad (29)$$

同時に

$$FPE(M) = \left(1 + \frac{M}{N}\right) \left(1 - \frac{M}{N}\right)^{-1} \sigma^2(M) \quad (30)$$

を計算し、 $FPE(M)$, ($M = 0, 1, 2, \dots, L$) の最小値を与えるMに対する $\{a_M(m)\}$ を最終的な推定量として採用する。この時の $\sigma^2(M)$ が σ^2 の推定値として利用される。

以上の議論は容易に多次元自己回帰モデルフィッティングに拡張できる。k次元定常時系列 $\{X(s); s = 1, 2, \dots, N\}$ に対して多次元自己回帰モデルを

$$X(s) = \sum_{m=1}^M A(m) X(s-m) + U(s) \quad (31)$$

但し、 $EU(s) = 0$ $EU(s)U'(s) = \Sigma$ なる白色雑音とする評価関数はシステムの次数をKとすると

$$MFPE(M) = \left(1 + \frac{MK+1}{N}\right)^K \left(1 - \frac{MK+1}{N}\right)^{-K} |d_M| \quad (32)$$

但し、 d_M は次数Mの時の最小2乗フィッティングによって得られた残差系列の共分散マトリクスである。ここで行われる自己回帰モデルのあてはめに対しては、最適パラメータ $A(\ell)$ 、雑音共分散関数 d_M を同時にくり返式的に計算する次の計算式が使われる。

仮定した最高次数をLとして

$$\left\{ \begin{array}{l}
 d_M = c(0) - \sum_{m=1}^M A_M(m) c'(m) \\
 e_M = c(M+1) - \sum_{m=1}^M A_M(m) c(M+1-m) \\
 f_M = c(0) - \sum_{m=1}^M B_M(m) C_M(m) \\
 D_M = e_M f_M^{-1} \\
 E_M = e'_M d_M^{-1} \\
 A_{M+1}(m) = A_M(m) - D_M B_M(M+1-m) \quad m=1, 2, \dots, M \\
 \quad \quad \quad = D_M \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad m=M+1 \\
 \quad \quad \quad = B_M(m) - E_M A_M(M+1-m) \quad m=1, 2, \dots, M \\
 \quad \quad \quad = E_M \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad m=M+1
 \end{array} \right. \quad (33)$$

但し、ここで $c(m)$ は(3)で与えられた多次元共分散の推定値である。これと評価関数(32)をくり返し、 $M=L$ になるまで計算し、評価関数を最小とする次数Mに対するパラメータ $\{A_M(m)\}$ によって自己回帰モデルが決定される。

式(7)から明らかのように自己回帰モデル表現では、常に雑音源から出力にいたる伝達特性の評価がなされている。このことは系の同定に当って暗黙のうちに雑音源の間の独立性の仮定が入っている。雑音源の独立性は変数の選択という観点から見るとシステムに含まれている本来の雑音源の数だけ出力変数を取らなければならないことを意味しており、実験、解析を進める上で重要なチェックポイントなる。ここで雑音源の独立性は自己回帰モデルあてはめによって得られた雑音2次モーメント推定値の非対角要素と対応する対角要素で正規化することによって定性的に調べることができる。

II-4. 解析コードの概説

(II-1)～(II-3)で述べた計算アルゴリズムと線型系表現の変換式を使って解析を進める計算コードが整備されている。それらを解析の流れに沿って述べると以下の通りである。

1. 直接法による解析……多次元共分散関数、スペクトル及びコヒーレンシ

直接法によって変数間の相関性のチェック、解析の対象とすべき変数の選択、サンプリング間隔、ノイズ処理等の検討がなされ、システムの大まかな性質をつかむ。計算式は(1)～(6)を用いて行われる。同定実験では一般に実験によって得られた観測データを一度データレコーダに収録し、そのデータを再生し、離散値データに変換してデジタル計算機で解析が行われるケースが多い。この事を考慮して、直接法による計算コード(MLCOSP)⁷⁾は、EAIハイブリッド計算機を用いて解析する様に作られており、データレコーダの出力を直接アナログ計算機アンプに入力してやるだけで、任意に設定されたデータサンプリング間隔に従って、観測データをA/D変換し、相関、スペクトル計算ができるようになっている。又得られた計算結果は

すべてディスプレイターミナルに図形の形で表示できるようになっている。

2. 自己回帰モデルフィッティング

直接法で得られた結果をもとに変数の選択を行ない自己回帰モデルを同定する。その時得られた評価関数の形及び最小値，推定された雑音源の独立性等を検討し，解析変数の選択の妥当性をチェックする。計算式は(2)，(3)を用いて行われる。

3. ステップ応答関数表現

同定された自己回帰モデルをもとに指定された変数から見たある変数へのインパルス応答を計算し，各変数間の関数を定量的に評価する。計算式は(4)，(5)を用いて行われる。

4. モデルフィットネスの確認

同定されたモデルに対し，実験の際用いた操作変数入力を与えて被操作変数の応答を計算し，実験結果と比較して，モデルの適合性を確認する。

以上の計算コードのフローを Fig. 2 に示す。

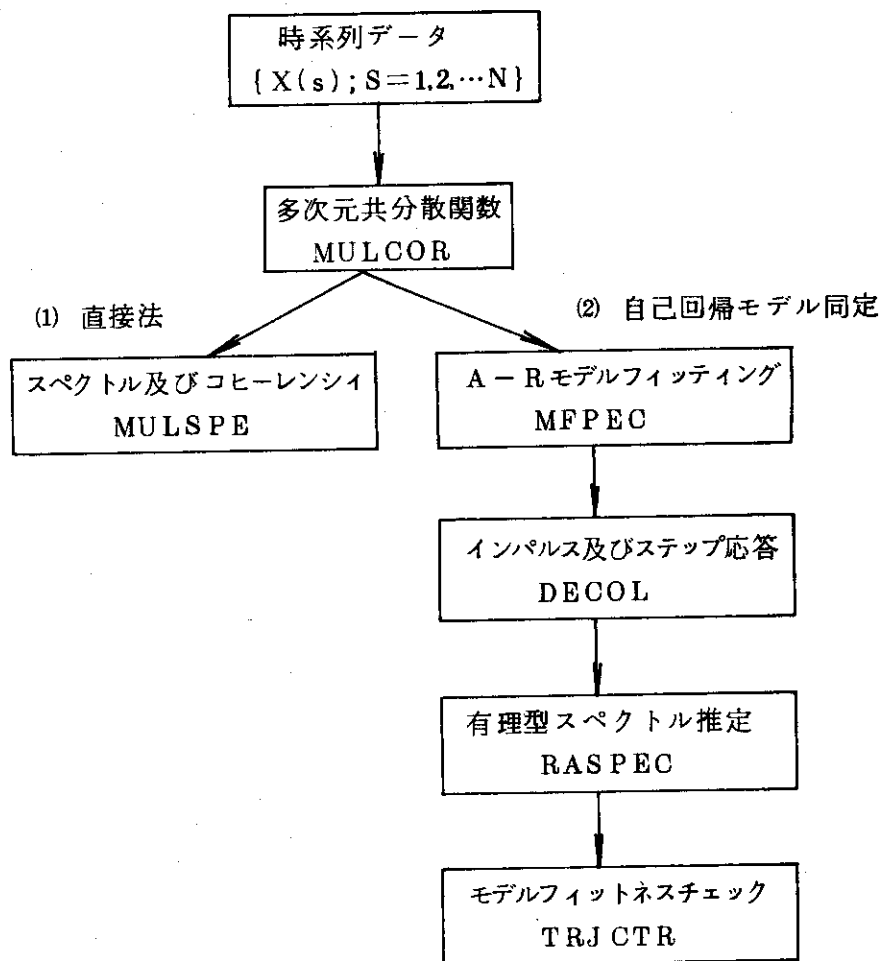


Fig. 2 Flow chart of the computer code for dynamic system analysis based on identification method.

III OWL-0 プラントの同定実験

I章で述べた様に同定手法を応用してOWL-0プラントの動特性を解析し、現有の制御系の評価、新しい制御方式の採用等に対して有効な情報を引き出すことを目的とし、プラント同定実験を行なった。

実験に際しては、プラントを大きく2つに分けて

- (i) 従来からこのプラント動特性上複雑で解析が困難視されていたジェットコンデンサー部に つながる各サブループ間の相互作用の関係
- (ii) 従来の解析では手がつけられていない冷却系統にある2つのクーラーと一次系の関係に焦点を当てて次の2つの実験を行なった。

- 1) 圧力、セパレータレベル等、各状態量の相互関連性を調べるためのセパレータ、ジェットコンデンサー及びサージタンクを含む系の特性測定のための実験 (EXP1)
- 2) 二つの冷却系 (メインクーラー、コンデンサークーラー) の間の干渉及び圧力に対する各変数からの伝達特性を求めるためのコンデンサークーラー系、ジェットコンデンサー系及びメインクーラー系を含む系の動特性測定のための実験 (EXP2)

の2種類が行われた。

実験の場合のプラントはBモードで運転され、蒸気発生器ヒーター60kW、1次系流量22kg/min、蒸気発生器入口温度278℃の条件に保たれた。Table1に行われた実験項目と各ケースでの実験条件を示している。観測データはすべて電圧値に変換されてデータレコーダに一旦収録される。ここではデータレコーダチャンネル数の関係上、操作端と出力端の総計が14を越えない範囲で選び出力信号がほぼ定常不規則な変動をする様に各操作端に手動でかつ独立な変動を与えている。

Table1 Experimental conditions and their contents for identification of OWL-0 plant dynamics.

実験名	操作変数	被操作変数	実験条件及び内容
EXP1 セパレータ及びジェット コンデンサー部の特性測定	CV12 CV13 CV19	L_1, P_2, T_3 T_4, T_5, T_8 F_1, F_3, T_2 F_2	プラントをBモード定常かつセパレータレベル L_1 を50%の状態にして、 L_1, P_2 制御系をはずし、制御フリーにする。(但し T_{10}, T_{14} は制御下にある)この時、操作変数を独立かつ不規則に手動で変動させ、出力への影響を調べる。
EXP2 冷却系及びジェット コンデンサー部の特性測定	CV14-15 CV16-17 CV19	T_{10}, T_{14}, P_2 T_8, T_{12}, T_{16} T_{17}, T_{18}, T_5 F_1, F_3	プラントがBモード定常で、 T_{10}, T_{14}, P_2 制御系をはずし、制御フリーにする。(但し L_1 は制御下にある)この時各操作変数から独立かつ不規則な手動外乱を与え、出力への影響を調べる。

この時得られた測定信号について各変数の定常値近傍での変化分を記録したものをFig.3.

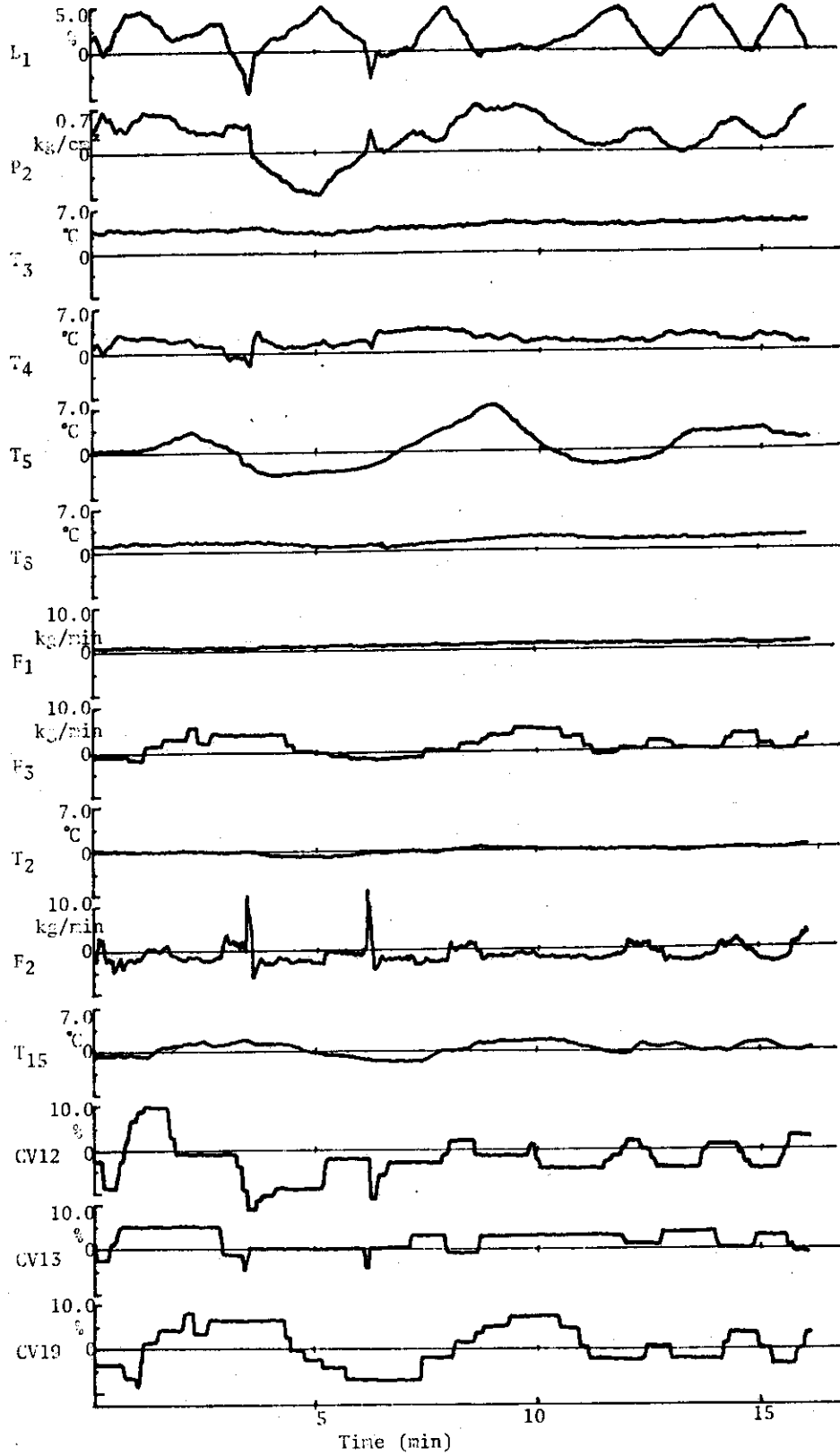


Fig. 3 Time series data derived from OWL-0 identification experiment. (run no. EXPl)

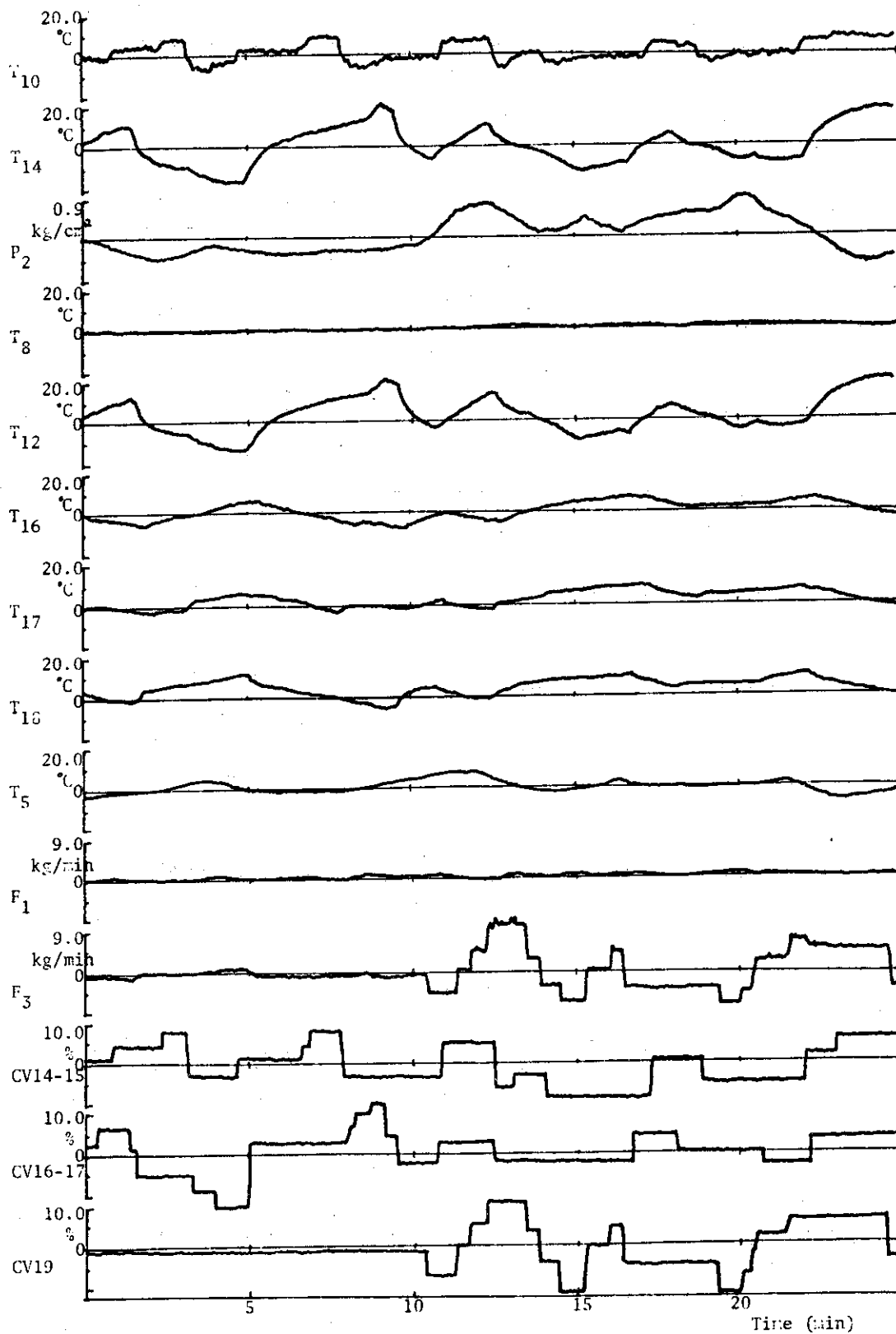


Fig. 4 Time series data derived from OWL-0 identification experiment. (run no. EXP2)

Fig. 4 に示す。又 Table 2, Table 3 には各変数の定常値を示している。

Table 2 Steady state values of experimental data
(run no. EXP1)

測定変数		定常値	
記号	変数名	電圧値 (V)	PV値
L ₁	セパレータ水位	2.7 (V)	51.9 %
P ₂	ジェットコンデンサー圧力	2.65	70.63 kg/cm ²
T ₃	セパレータ出口水温度	4.3	288.7 °C
T ₄	セパレータ出口蒸気温度	3.3	286.3 "
T ₅	ジェットコンデンサー出口水温度	2.82	268.3 "
T ₈	主冷却器入口温度	4.8	290.0 "
F ₁	1次系流量	1.42	22.7 kg/min
F ₃	圧力調節系流量	1.4	9.5 "
T ₂	セパレータ入口温度	3.4	290.0 °C
F ₂	セパレータ出口水流量	0.8 (mV)	19.8 kg/min
CV12	セパレータ水位制御弁	2.28	32.0 %
CV13	"	3.62	65.5 "
CV19	ジェットコンデンサー圧力制御弁	2.4	35.0 "
T ₁₅	ジェットコンデンサー入口温度	3.0	200.0 °C

Table 3 Steady state values of experimental data
(run no. EXP2)

測定変数		定常値	
記号	変数名	電圧値	PV値
T ₁₀	主冷却器出口温度	4.4 V	270 °C
T ₁₄	圧調系冷却器出口温度	3.0	200
P ₂	ジェットコンデンサー圧力	2.6	70 kg/cm ²
T ₈	主冷却器入口温度	4.75	287.5 °C
T ₁₂	圧調系冷却器入口温度	3.8	210.0 "
T ₁₆	主冷却器 2次側入口温度	3.4	120.0 "
T ₁₇	" 出口温度	3.55	127.5 "
T ₁₈	圧調系冷却器 2次側出口温度	3.55	127.5 "
T ₅	ジェットコンデンサー出口温度	2.85	269.4 "
F ₁	1次系流量	1.4	22.1 kg/min
F ₃	圧力調節系流量	1.4	9.5 "
CV14-15	主冷却器出口温度制御弁	4.7	92.5 %
CV16-17	圧調系冷却器出口温度制御弁	4.35	83.8 "
CV19	ジェットコンデンサー圧力制御弁	2.35	33.8 "

データレコーダに収録された実験データは当研究所にあるハイブリッド計算機に取込まれ解析が行われる。

N OWL-0プラントの同定結果と動特性の評価

(Ⅲ)で述べた同定実験で得られた各変数についての時系列データをもとに解析を進めて行く。ここでは実験 run no. EXP1とEXP2に分けて以下に解析結果を述べる。

N-1. セパレータ, ジェットコンデンサー, サージタンク部の解析 (EXP1)

(a) 実験データ波形

Fig. 3はEXP1の実験データでサンプル値間隔 2 sec, 1個の変数についてのサンプルデータ個数 400個でとったもので, 実験開始前の平衡状態のまわりの変動分を各変数のプロセス値で示したものである。又各変数の平衡状態の値はTable 2に示してある。これらの各変数の応答波形を比較することによってプラントの特性について若干の性質をつかむことができる。直観的に得られる特徴を以下に列挙すると

- T_3, T_8, F_1, T_2 の各変数の変動は微小である。
- L_1 と P_2 は相関のある動きをしている。
- 流量以外の各変数の変化は低周波の動きをしている。

等が顕著である。

(b) 相関解析

Fig. 5.1~Fig. 5.5はEXP1の各変数について, 自己及び相互共分散関数をすべて計算し, それを立体的に表示して相関関数の形を相互に比較したものである。多変数の相関解析を行う場合, この様に相関関数の形の比較により, 変数間の関係を調べる事が特に重要である。各図の関数の形から次の様な特徴を抽出することができる。

- (L_1, P_2)はLAGの小さい所で負の相関を持つことがわかる。これは L_1 と P_2 が逆動作的な動きをしていることを意味しており, 従来の経験に全く反したものである。
- L_1 は T_3, T_8 と余り強い相関は持たない。
- P_2 は測定全変数に対して比較的強い相関を持つ。
- (P_2, T_2)は比例的な動きをしている。
- (P_2, T_2)は同時相関を持つ。
- T_3 は T_4, T_2 に対してやや大きな相関を持っているが他のいずれの変数に対しても有意な相関を持たない。
- T_4 は飽和蒸気圧温度に規定されているはずである。各変数との相関からも明らかな様に特異な動きをしていることがわかる。特に F_2 と負の同時相関を持つ事から, 配管内でかなりの放熱のある事も予想され T_4 を解析の変数に入れた方が良い事を示唆している。
- T_5 は P_2, P_4, T_8, F_3, T_2 と強い相関を持つが L_1 と F_2 に対してはほとんど無相関である。この事は T_5 が圧力に関連した系の変動によって駆動されている事を示している。
- T_8 は他の変数との相関の性質が T_5 の場合と類似している。
- F_1 は変動の振幅は小さいが他の変数と複雑な相関を持つ。
- F_3 はCV 1.9と比例的な動きをしている。又 T_{15} に対しても T_{15} がわずかに遅れた無駄時間的な動きをしている事がわかる。
- F_2 は $T_3, T_5, T_8, F_3, T_{15}$ は無相関に近い。

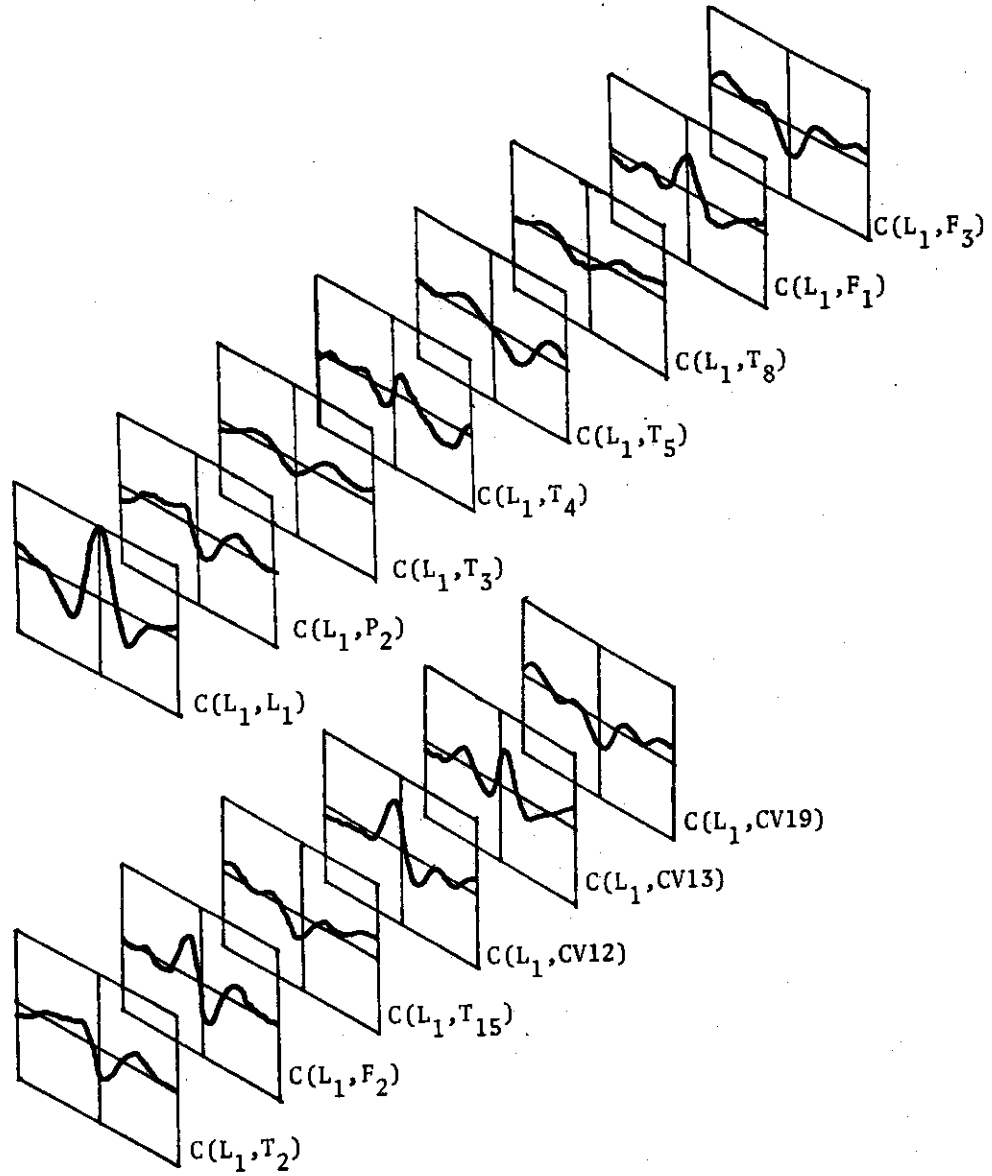


Fig. 5-1 Correlation analysis of the experimental data. (EXP1)

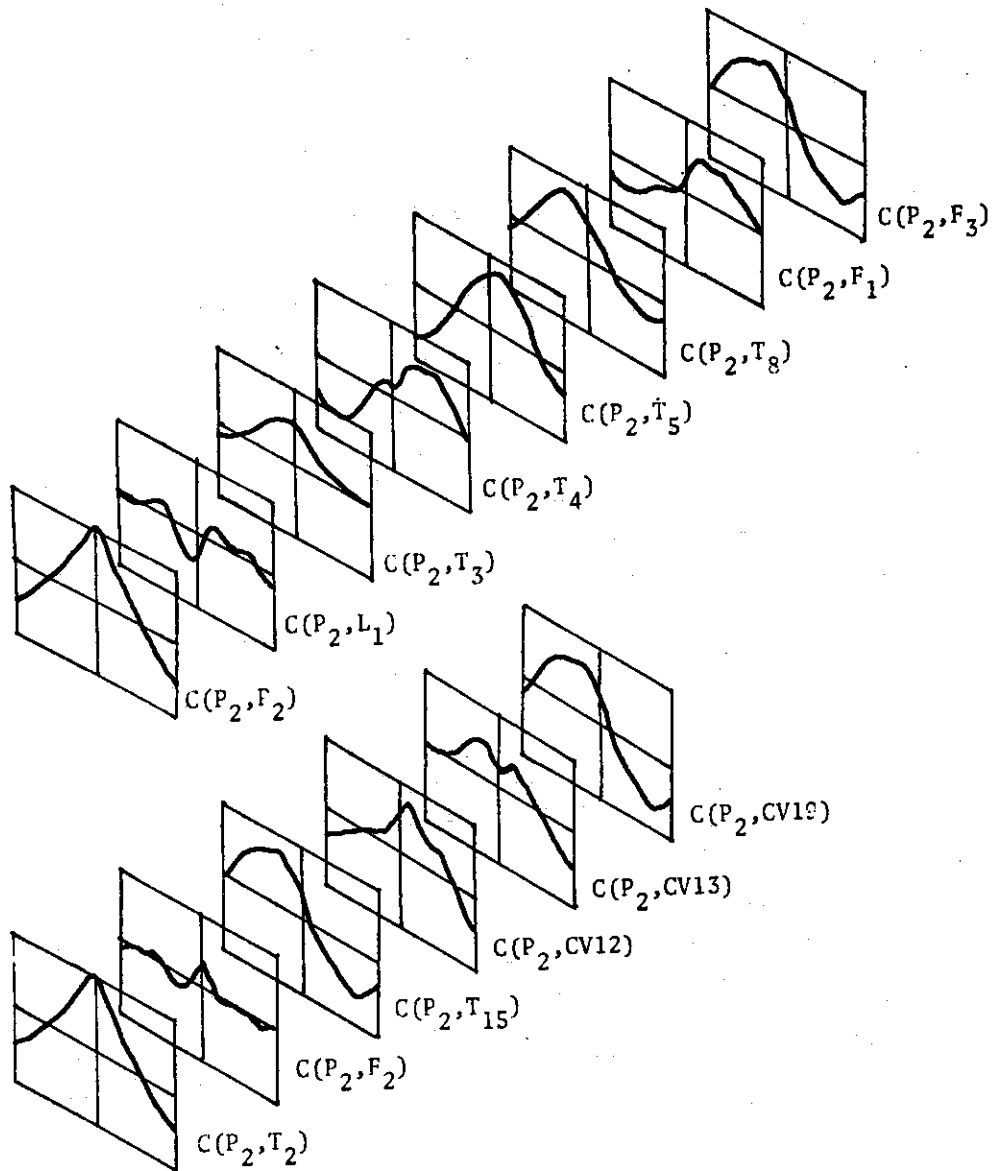


Fig. 5-2 Correlation analysis of the experimental data. (run no. EXP1)

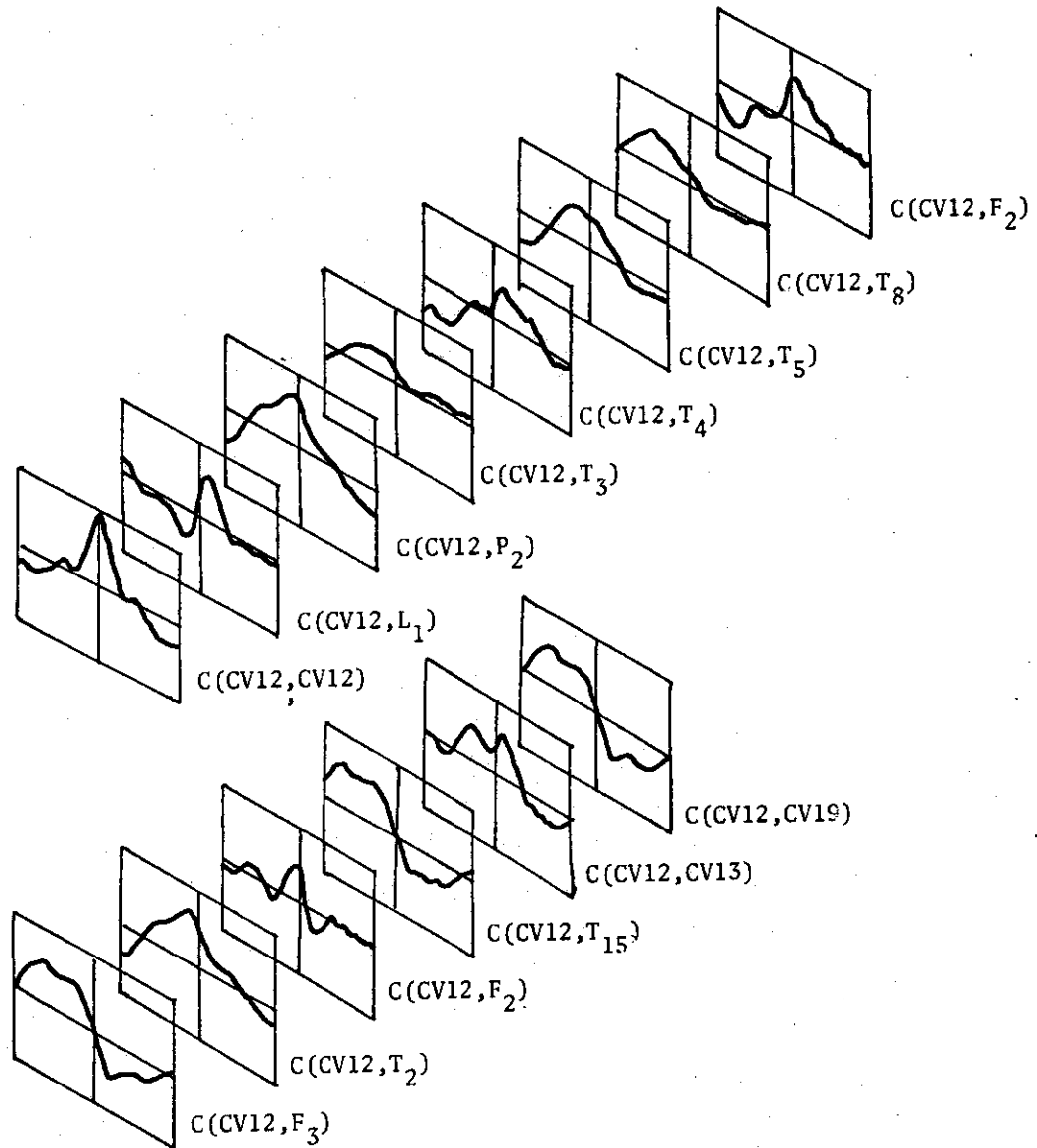


Fig. 5-3 Correlation analysis of the experimental data. (run no. EXP1)

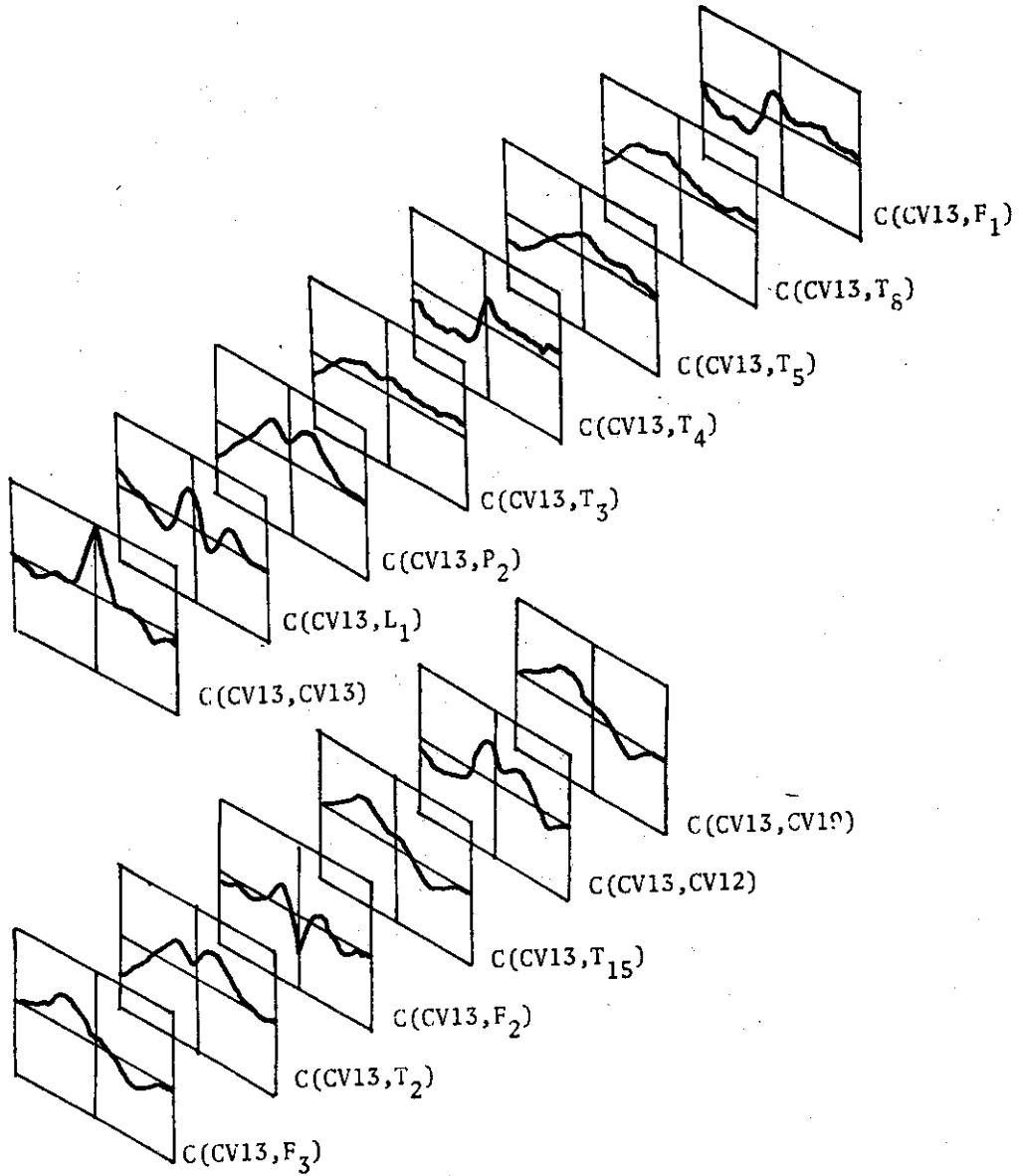


Fig. 5-4 Correlation analysis of the experimental data. (run no. EXP1)

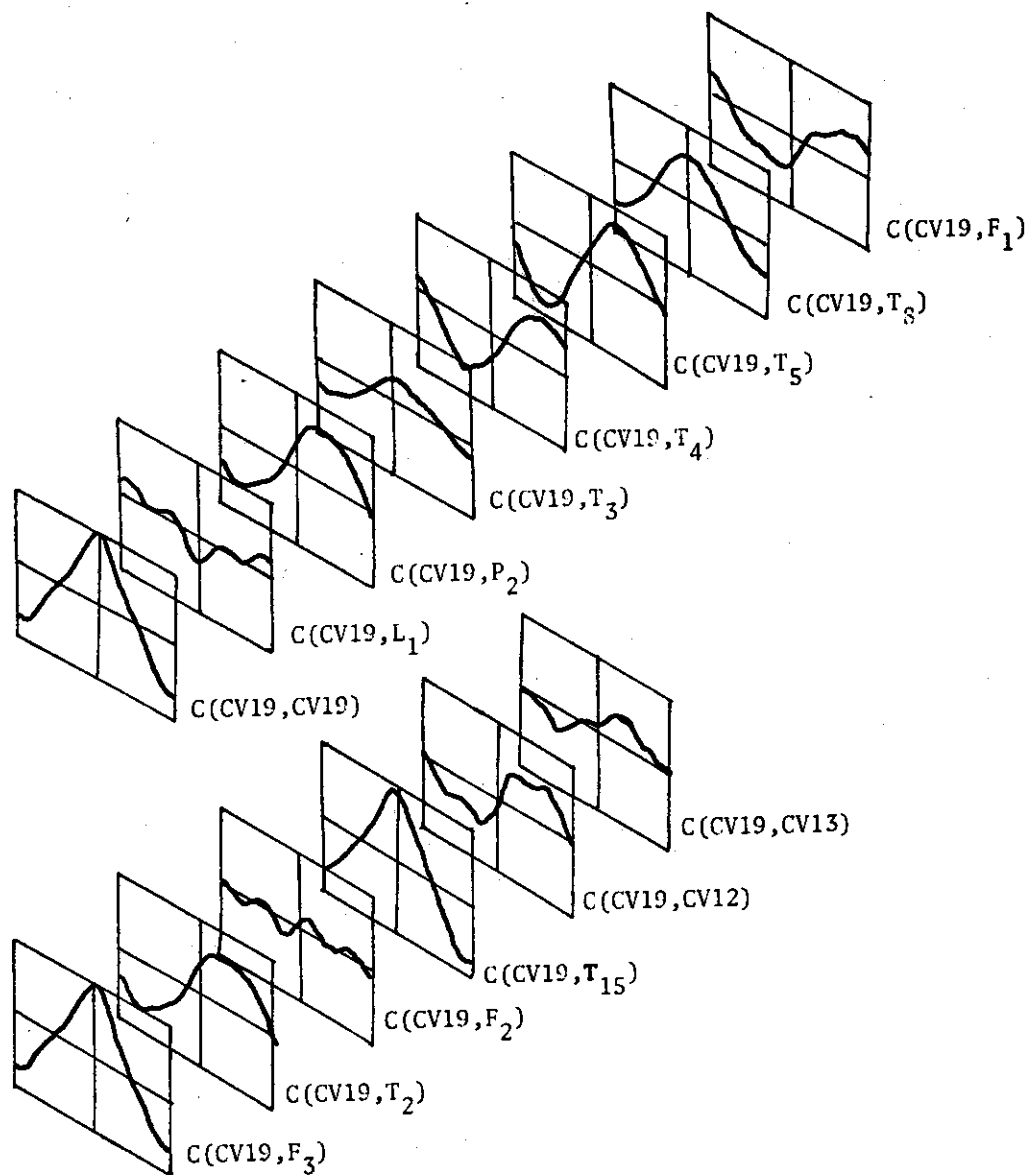


Fig. 5-5 Correlation analysis of the experimental data. (run no. EXP1)

- F_2 は P_2 と T_4 に対しては負号が逆の同時相関を持つ。
- T_{15} は F_3 とほとんど同じ性質を持つ。

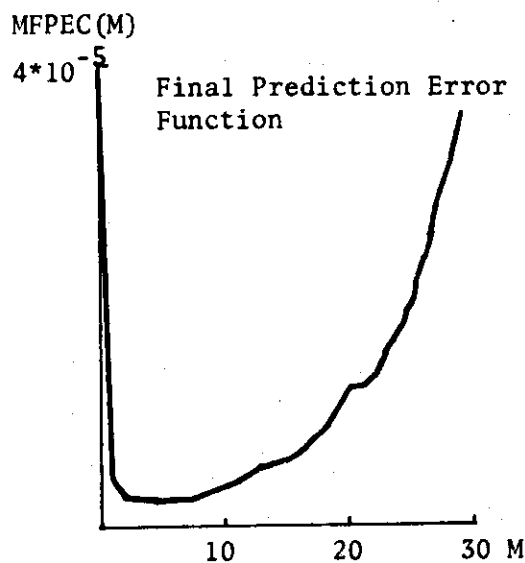
以上の考察から

- F_3 , T_{15} , T_2 は他に同じ動きをする変数が存在することから解析からはずしてよい。
- T_3 , T_8 , F_1 は変動が微小であるから解析の対象からはずす。

等を変数の選択に対して指摘できる。

(c) 自己回帰モデルフィッティング

前述の直接法の結果を参考にして変数の組を出力変数 L_1 , P_2 , T_4 , T_5 , F_2 の5変数, 入力変数を CV12, CV13, CV19 の3変数でモデルフィッティングを行った。Fig. 6はその時



- * MIN. FPEC..... 2.315×10^{-7}
- * GEOMETRICAL MEAN
OF MIN. FPEC.. 4.708×10^{-2}
- * ATTAINED AT M= 4

Fig. 6 Final prediction error function
of A-R model fitting. (run no. EXP1)

の評価関数の形, 評価関数の最小値, 及び評価関数が最大となる時のシステムの次数を示している。得られたシステムの次数は4次, 評価関数最小値は 4.708×10^{-2} (幾何平均値)であった。Table. 4はその時の雑音の二次モーメントを対角要素で正規化した結果を示している。この中で非対角要素が1に近い事は, 対応した2変数の間で雑音の分離が不十分であることを意味しており, この2変数の雑音源が同一のものであるか, あるいは解析の変数として新たに付加すべき変数のある事示している。ここでは L_1 と他の変数の間の雑音の分離が悪いことがわかる。又, T_4 と T_5 の間の雑音の分離も余りよくない。この事から L_1 , T_4 , T_5 等間に共通

Table 4 Normalized value of the estimated noise covariance, (run no. EXP1)

No	Var	L_1	P_2	T_4	T_5	F_2
1	L_1	1.0				
2	P_2	-0.362	1.0			
3	T_4	0.641	-0.186	1.0		
4	T_5	0.703	-0.074	0.427	1.0	
5	F_2	0.161	0.105	0.080	0.226	1.0

の雑音源が存在するか、あるいはこれらの変数の間にさらに付加すべき情報の欠落している事が考えられる。

ここで予想できる点は、サージタンクについての情報の欠落があげられる。今回の同定実験では、サージタンクの容量が他と比して大きいので定常なものとみなし、状態量を全く測定していない。しかし、後述する様にサージタンクはセパレータ、ジェットコンデンサ一部の動特性に関して極めて重要な役割を示している事と T_5 の同定精度が余り良くない原因がサージタンク部の特性の影響と考えられる事等から、サージタンクの影響が同定結果に反映して雑音源の分離を悪くしていると推測できる。

(d) ステップ応答関数

得られた自己回帰モデルを用いて操作変数から見た被操作変数のインパルス応答を計算し、これをステップ応答関数表現し直して、応答を定量的に評価する。

Fig. 7.1~Fig. 7.5は各操作バルブを1%ステップ状に開いた時の被操作変数の応答を見たものである。

- レベル L_1 はCV12に対して約1%減少、CV13に対して約1.5%増となりCV19に対してはほとんど応答を示さないことがわかる。

この事から、レベル制御に対してはCV12-13逆作動操作による制御が可能であることがわかる。

- CV12, CV13に対するレベルの応答は飽和する傾向を持つ。
- 圧力 P_2 は、CV19に対しては $-0.05 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ の勾配で下がること、CV12に対しては極めてゆるやかな勾配で上昇しCV13に対しては一旦上昇した後下降することがわかる。

この様にCV12(あるいはCV13)の圧力に対する影響は無視できない程大きなものであることがわかる。又、CV12の影響を L_1, P_2 について比較して見ると

CV12 開 $\rightarrow F_2$ 増加かつレベル L_1 減少

CV12 開 $\rightarrow F_2$ 増加かつ圧力 P_2 上昇

が明らかであり、 $L_1 - F_2 - P_2$ の関連の下に L_1 と P_2 は逆動作をする事がわかる。従って相関解析で明らかとなったレベルと圧力の逆動作特性は、実はCV12(又はCV13)操作によってもたらされたレベル変動(実際は流量 F_2 変動)が圧力に影響を及ぼして生じたものであることがはっきりする。

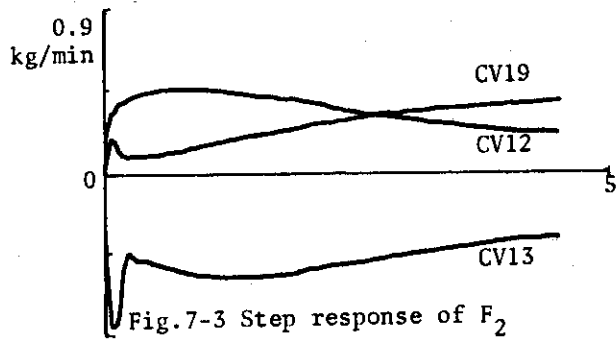
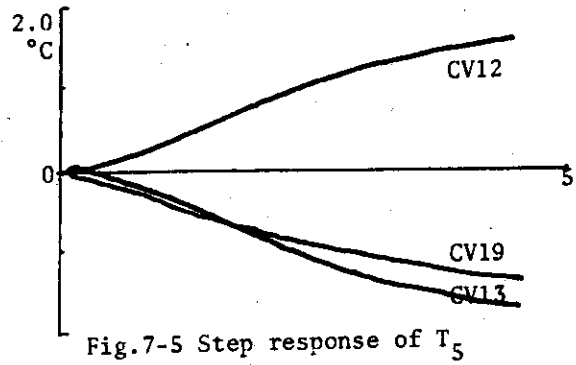
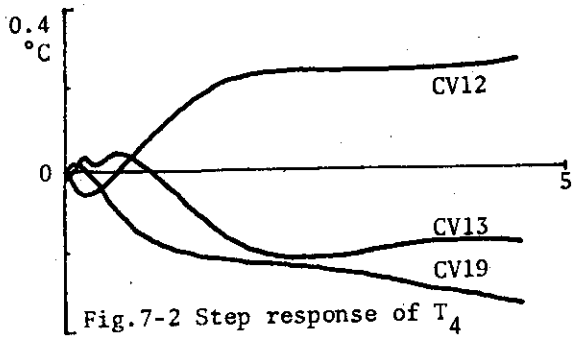
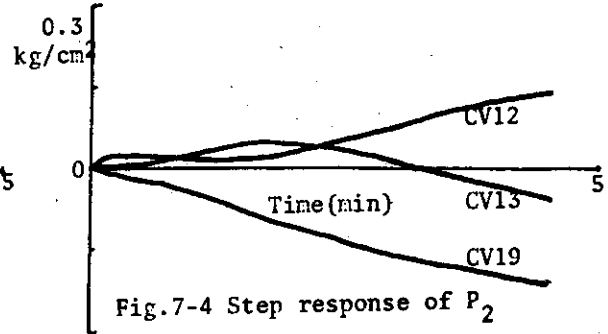
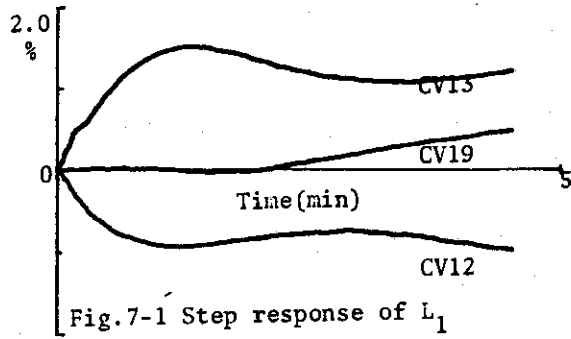


Fig. 7 Step responses to inputs derived from A-R model. (run no. EXP1)

○ T_4 は変化範囲が $\pm 0.3^\circ\text{C}$ で CV12 に対しては速い応答で一旦下降し、約 30 sec 後には上昇を始めゆるやかな勾配で上昇し、約 2 min で飽和する。CV13 に対してはほぼ逆動作をしている。CV19 に対しては比較的速い応答で下降し、約 2 min 後には飽和する。蒸気相温度 T_4 は定常値自体も T_2 、 T_3 と比べて約 4°C 低いこと、さらに CV12、CV13 のバルブ操作に対して応答が速いこと等から T_4 を測定しているパルプでかなりの放熱のあることが考えられる。

○ T_5 は各バルブ変化に対して極めてゆっくりとした応答をする。又、圧力 P_2 の傾向に追従した動きをしていることがわかる。

○ F_2 は CV12 に対して正の応答、CV13 に対して逆の応答をしている。

以上のステップ応答の傾向と相関解析結果から、これらの特性は次の様なメカニズムを経て現象化している事がわかる。

(1) CV12 開 → セパレータからメインクーラー入口までの圧力損失減少 → セパレータ液相流量 F_2 増加 → レベル L_1 低下
 ↓
 メインループ流量は一定であるからセパレータドレン水流量増加分はサージタンクレベルの上昇をもたらす → 圧力 P_2 上昇 → 蒸気発生器蒸気発生量減少 → レベル L_1 減少割合が小さくなり平衡状態に落ち着く → 流量 F_2 も平衡状態に落ち着く

とする。

(2) CV13 に対しては逆の効果

(3) CV19 開 → 低温スプレー水流量 F_3 増加 → 圧力 P_2 下降 → T_4 、 T_5

以上の結果をまとめて、そのブロック図を Fig. 8 に示す。

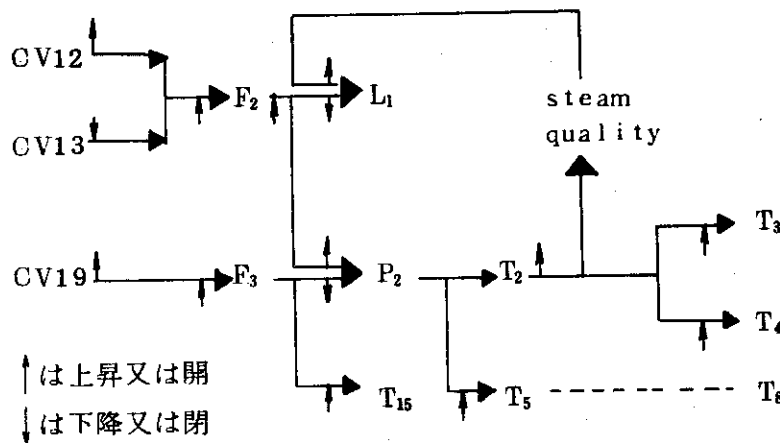


Fig. 8 Dynamics relations among each quantities of separator, jet condenser and surge tank.

(e) モデルフィットネスのチェック

得られた自己回帰モデルを使って実験データに対するフィッティングシミュレーションを行った結果を Fig. 9 に示す。各出力変数の応答の推定結果はプラントの非線型特性と見られる急激な変動域を除いて比較的よく一致している。但し、 T_5 のフィッティング精度は他の変数に比べて悪く、しかも速い変動に対して、応答がほとんど得られていないことがわかる。(a)~(d)までの結果から判断して T_5 のこの様な速い応答は実測されている変数からの影響だけからは

説明がつかない。ここで考えられる点としてジェットコンデンサー部の分布系的な取扱い（無駄時間効果）の必要性和サージタンク部の情報の欠落があげられる。特にサージタンクの影響は従来から、スタティックなものとして余り重要視されず、今回の同定実験でも変数を全く測定していない。しかし、(d)の圧力 P_2 の応答の物理的解釈で明らかにしたように、セパレータ、サージタンク、ジェットコンデンサーは共に動特性として強い関連を持っており、ジェットコンデンサーに対してサージタンクの影響は無視出来ないものと考えられる。

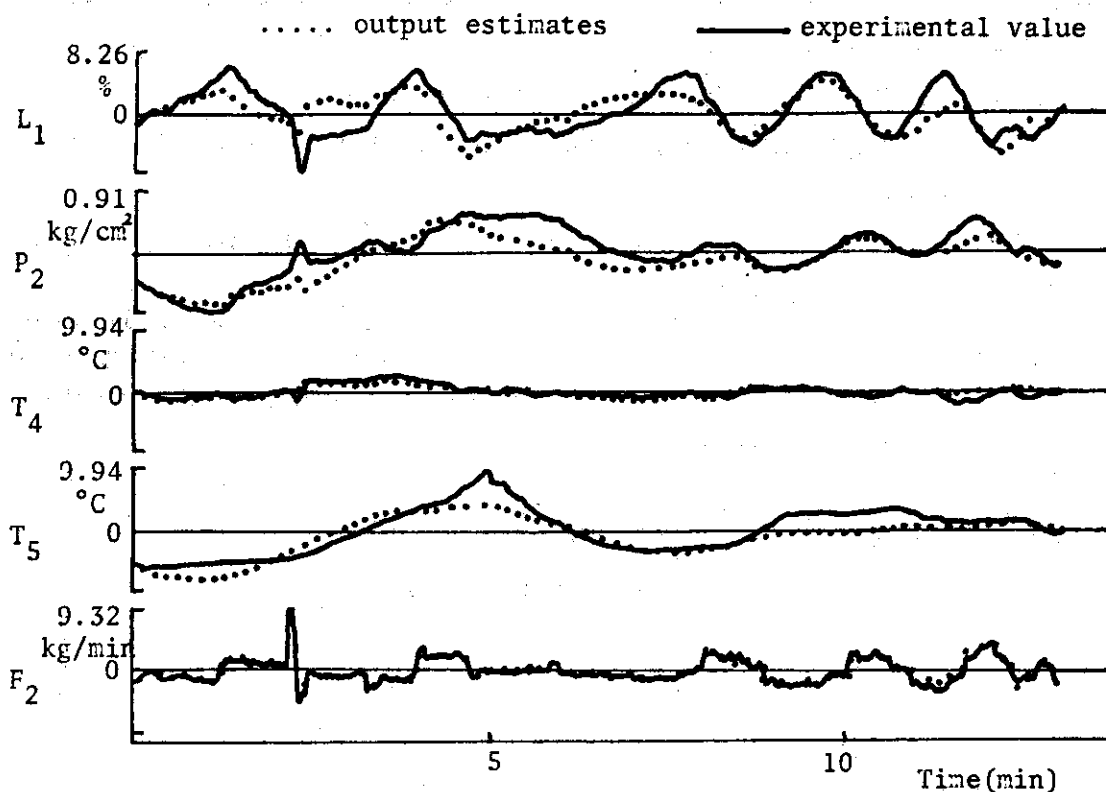


Fig. 9 Estimation of the outputs based on A-R model and model fitness check. (run no. EXP1)

(f) 得られた特性のまとめ

(a)~(e)で得られた特性のうち制御上重要と思われるものを以下に要約すると

- (i) セパレータドレン水流量 F_2 、温度 T_3 の変動にもかかわらず、メインループ流量 F_1 、及び主冷却器入口温度 T_6 はほとんど変化しない。
- (ii) CV12、CV13に対する L_1 の応答は逆動作に近い。
- (iii) CV12、(又はCV13)の開度変化に対して、レベル L_1 は積分的な応答をするが、これと同時に起る圧力変動の影響を介してレベル L_1 は飽和する傾向を持つ。
- (iv) CV12(又はCV13)変化に対しては、セパレータ液相流量変化を介して、 L_1 と P_2 の逆動作現象を引起す。その結果CV12(又はCV13)の圧力 P_2 への影響はかなり顕著なものとなる。
- (v) 各バルブ変化に対する圧力へのきき方は比較的遅くランプ状に近い。さらにその効果はほぼ同じ程度である。

(g) 同定結果の検討と現有制御方式に対する評価

以上得られた特性のうち④を除く各特性は従来の経験と合致しているか、又は、従来の経験から充分予想されるものである。JMTRでは現在OWL-1, OWL-2が炉内水ループとして稼動中であるが、これらの照射ループには前述した特性のいくつかがすでに生かされている。例えば、OWL-1ではCV12-13逆作動操作によるセパレータレベル制御が行われており、OWL-2ではプラントの負のフィードバック効果にもとづく自己制御性を考慮してセパレータレベル制御は行っていない。

しかし④で述べた特性は本解析ではじめて明らかにされたばかりか従来の経験からは全く逆に考えられていたものである。従って、この「圧力とセパレータレベルの逆動作現象」がプラントの実際の運転の中でどのような効果を及ぼしているか検討をする必要がある。

先に述べた様にOWL-0プラントでは、CV12によるセパレータレベル制御、CV19による圧力制御、と各サブループ毎の制御が行われているが④で得られた結果は、セパレータレベル制御のためのCV12操作が、ここでは圧力に対する外乱源となっている事を意味する。

今、プラントがPモードからBモードに移行しまだ充分安定となっていない状態で、自動制御をかけた時を考えると、従来の制御方式では、まずききの良いレベル制御に制御効果が現われるが、逆にこの時行ったバルブ操作は、圧力に対して大きな変動要因となり、プラントの安定化をそこなう結果となっている。この様な各サブシステム間の相互作用は一般にプラントが定常になってからは顕著ではないが、いったん定常状態からずれると、その効果が現われる場合がしばしば起る。その時にサブシステム毎に行われている制御が他のサブシステムに対して安定化をそこなう様な要因となる場合は注意を要する。現在OWL-0プラントは定常状態の制御に対して、充分その機能を果しているが、今述べた事柄にまさに該当していることがわかる。

従って、セパレータ、ジェットコンデンサー、サージタンク部の制御を考える時、これらを一体化した多変数制御を行う必要があることがわかる。又、物理関係式を組合わせて動特性モデルを作っていく場合にも、サージタンクを無視すること、あるいはサージタンクとジェットコンデンサーの関係を不用意に簡略化してモデルリングすることは許されないことがわかる。さらにプラントの設計に対しても、ここで得られた結果をもとに定性的な議論ができる。即ち、この種の構造を持つプラントに対しては、セパレータ、ジェットコンデンサ、サージタンクのサイズの比及びセパレータドレン水を流す配管の大きさ等を圧力とレベルの干渉効果を考慮して決める必要がある。

(h) 補足

圧力とレベルの逆動作特性の物理的なメカニズムと制御系の評価について、本解析で明らかにした結果を裏付ける実験データが後で得られた。実験は蒸気発生器(SG)ヒーターに一定時間ランダムなオンオフ信号を与えて、セパレータ、ジェットコンデンサー、サージタンク部の各変数について応答を測定したものである。この実験では通常のアナログ制御系はすべて自動になっており、このデータ解析から制御下での各サブシステム間の相互作用を見ることができる。ここでは相関解析によって定性的に相互作用についての議論を行う。Fig. 10にはこの実験で得られたデータの中から、セパレータレベル L_1 、サージタンクレベル L_2 、サージタ

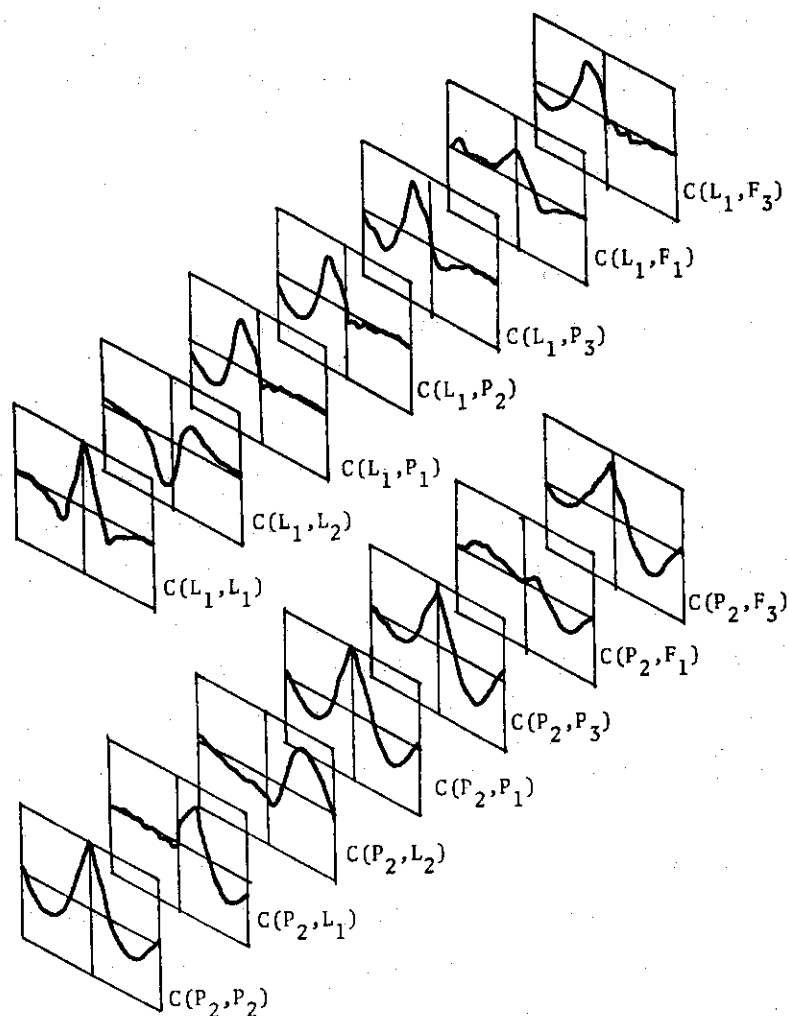


Fig. 10 Correlation functions which show interfering effects among subsystems.

ンク圧力 P_3 、ジェットコンデンサ圧力 P_2 、セパレータ入口圧力 P_1 等の間の相関計算の結果を示している。この中から得られるいくつかの特徴を以下に述べる。

i) 水位 (L_1 , L_2) は逆動作的な動きをしている。

この関係は動特性的に見てセパレータレベル L_1 が下がる (従って F_2 増加) とサージタンクレベル L_2 が上がり圧力 P_2 を上昇させるというメカニズムを示している。

ii) 水位と圧力の関係 (L_1 , P_2) は水位変動が圧力に対して極めて大きな外乱源となっている事を示している。

iii) 圧力 (P_1 , P_2 , P_3) は一体に近い動きをしているが相互にダイナミクスを持って動いている。

以上の特徴は制御下でのセパレータ、サージタンク、ジェットコンデンサー間の干渉効果として述べた(g)での結論をよく裏付けており、同定結果とそれにもとづく解析の妥当性を立証している。

N-2. 冷却系を中心としたループの解析 (EXP2)

(a) 実測データ波形

Fig. 4はEXP2の実験データでサンプル値間隔2sec, 1個の変数についてのサンプルデータ個数, 745個で取ったものである。これらの応答波形から直観的に得られる特徴を列挙すると

- T_8, F_1 の変動は微小
- T_{14}, T_{12} の応答波形は極めてよく似ている。
- T_{16}, T_{17}, T_{18} の応答波形は比較的良好に似ている。

等が顕著である。

(b) 相関解析

Fig. 11-1~Fig. 11-2はEXP2の各変数についての自己及び相互共分散関数計算結果である。関数の相互の比較から, 次の特徴を抽出する事ができる。

- T_{10} は $P_2, T_8, T_5, F_3, CV16-17, CV19$ 等に対して相関が小さい。
- T_{16}, T_{17}, T_{18} は T_{10} に対して無駄時間的な関係を持つ。
- F_1 は T_{10} に対して強い負の相関を持つ。
- T_{14} と P_2, T_5 の間には, 大きな無駄時間特性がある。
- T_{14} は T_{10} と異なり $CV14-15, CV16-17, CV19$ のいずれに対しても相関を持っている。
- P_2 は $CV16-17$ に対して無駄時間特性を持つ
- T_{16}, T_{17}, T_{18} は無駄時間特性を持ち, 比例した動きを示す。
- $CV14-15$ は T_{10}, T_{14}, T_{12} に対して正の相関を持つ。逆に $T_{16}, T_{17}, T_{18}, F_1$ に対しては負の相関を持つ。又, T_5, F_3 に対しては無相関
- $CV16-17$ は T_{12}, T_{14} に対して正の相関を持つ。逆に T_{16}, T_{17}, T_{18} に対しては負の相関を持つ。又, T_{10}, F_1, F_3 に対して無相関
- $CV19$ は $T_{10}, T_{16}, T_{17}, T_{18}$ に対して無相関である。即ち, 2次系及びメインクーラーに対しては無相関
- $CV19$ は T_{14}, T_{12} に対しては正の相関を, 又, P_2, T_5 に対しては負の相関を持つ。
- F_3 は $CV19$ と比例した動きをする。

以上の考察をもとに変数の選択を行うと

- T_{12}, T_8 を解析変数からはずす。
- 冷却系温度を中心にモデルを同定する場合, $T_{10}, T_{14}, P_2, T_{16}, T_{17}, T_{18}, CV14-15, CV16-17, CV19$ の変数の組で行う。
- 他の変数も含めて同定する場合, 二次系温度を T_{16} で代表させて $T_{10}, T_{14}, P_2, T_{16}, F_1, T_5, CV14-15, CV16-17, CV19$ の変数の組で行う。

(c) 自己回帰モデルフィッティング

冷却系温度を中心に変数を選択し, $T_{10}, T_{14}, P_2, T_{16}, T_{17}, T_{18}, CV14-15, CV16-19$ の変数の組で同定を行った。Fig. 12では, その時の評価関数の形, 最小値及びその時の次数を

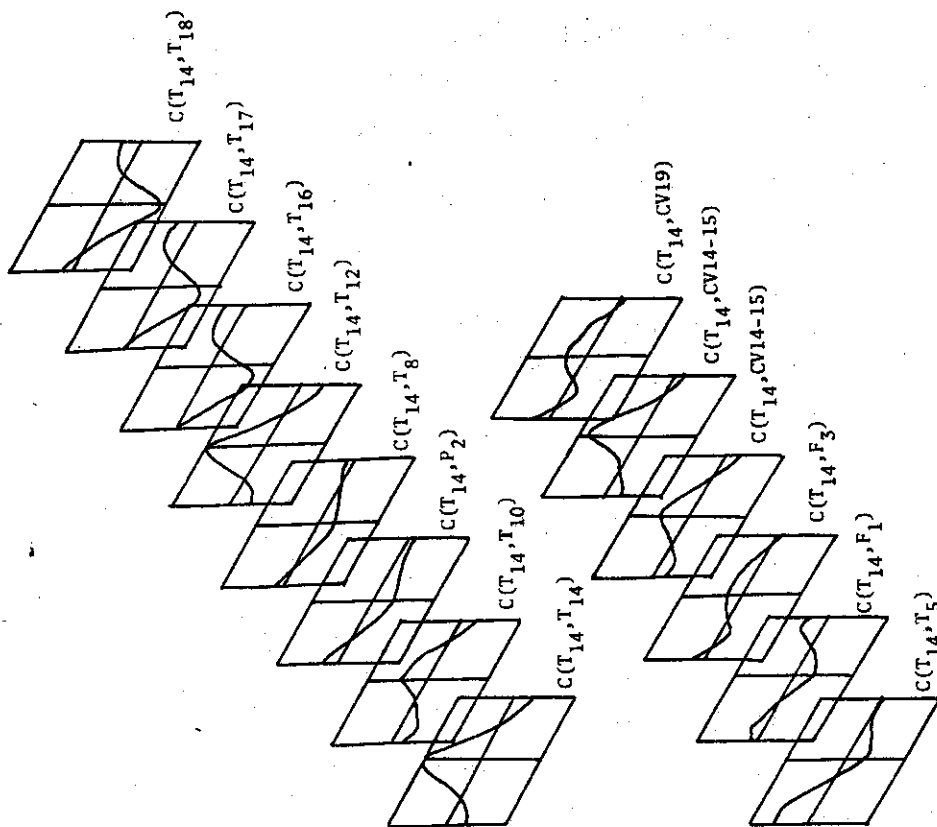


Fig. 11-2 Correlation analysis of the experimental data. (run no. EXP2)

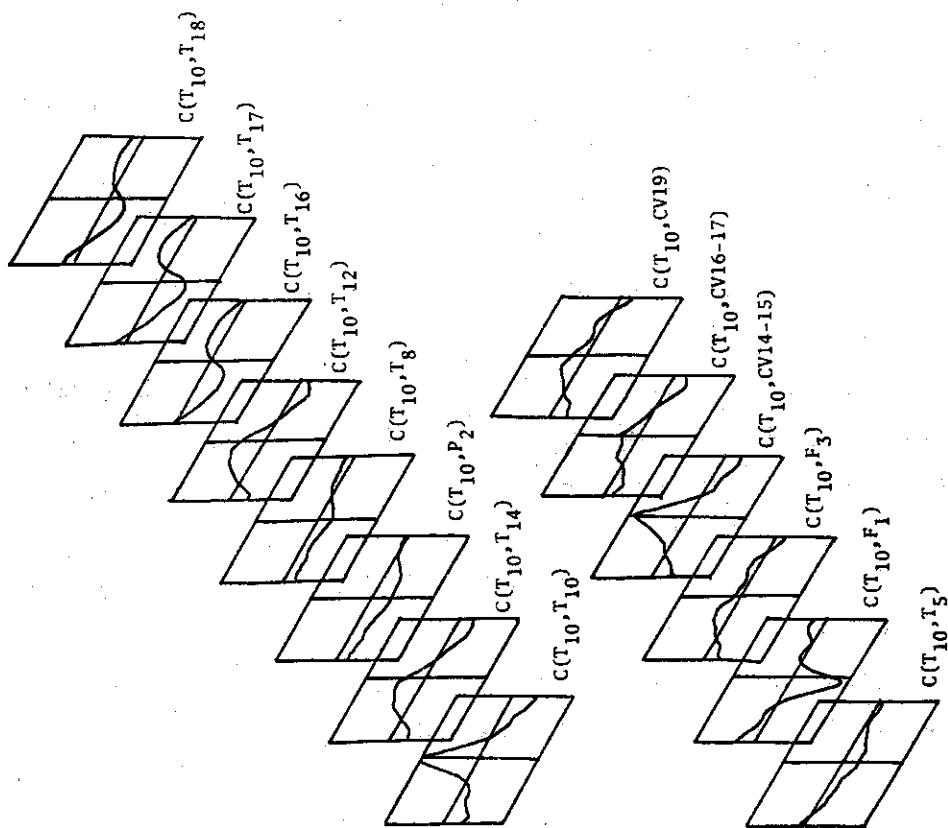
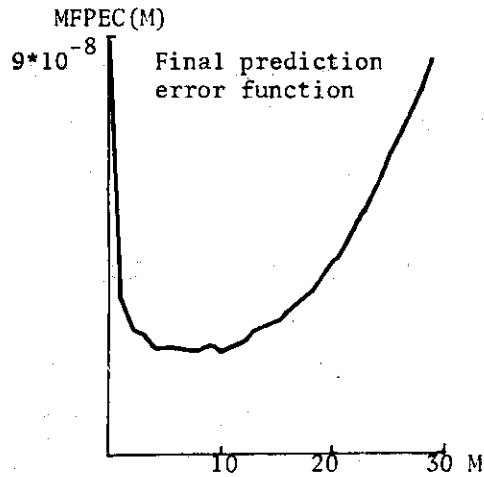


Fig. 11-1 Correlation analysis of the experimental data. (run no. EXP2)



- * MIN. FPEC..... 1.919×10^{-8}
- * GEOMETRICAL MEAN
OF MIN. FPEC... 7.986×10^{-8}
- * ATTAINED AT M= 10

Fig. 12 Final prediction error function
of A-R model fitting. (run no. EXP2)

示している。得られた次数は10次、評価関数最小値は 7.986×10^{-8} (幾何平均)であった。又 Table 5 は正規された Noise Coraiance matrix の各要素を示している。ここでは T_{14} と P_2 あるいは T_{17} と T_{18} に関連した各変数の間の雑音の分離が悪いことを示している。又、Fig. 15 から明らかな様に、特に P_2 、 T_{14} については、カーブフィッティングの精度が落ちている。雑音源の分離の問題についてはさらに深い検討が必要である。

Table 5 Normalized value of the estimated noise covariance (run no. EXP2)

No	Var	T_{10}	T_{14}	P_2	T_{16}	T_{17}	T_{18}
1	T_{10}	1.0					
2	T_{14}	0.219	1.0				
3	P_2	-0.113	-0.629	1.0			
4	T_{16}	-0.130	-0.041	0.194	1.0		
5	T_{17}	-0.095	-0.591	0.686	0.198	1.0	
6	T_{18}	-0.197	-0.631	0.585	0.240	0.539	1.0

(d) ステップ応答関数表現

得られた自己回帰モデルを用いて、各操作変数から見た被操作変数へのステップ応答関数を計算した結果を Fig. 13-1~Fig. 13-6 に示す。これらの応答の物理的關係と特徴を以下にまとめて示す。

○ T_{10} の応答

CV14-15 開 → 冷却器側流量減 (バイパス流量増) → T_{10} 急上昇 → 冷却器出口温度下降 (弁開後冷却器長さだけ時間的遅れがある)。→ バイパス管との合流点温度 T_{10} 上昇 → 平衡の間 CV14-15 1% 開に対して T_{10} は約 0.8 °C 上昇することがわかる。

CV16-17, CV19 からの応答はほとんどないものと考えて良い。従って、メインクーラーに関しては、他のサブシステムと独立に切離して扱って良い。

○ T_{14} の応答

CV14-15 開 → T_1 上昇 → 圧調系冷却器入口温度 T_{12} 上昇 → T_{14} 上昇 この場合約 10 sec の無駄時間のあることがわかる。又 CV14-15 の 1% 開に対して T_{14} は約 0.36 °C 上昇する。

CV16-17 開に対する T_{14} の応答は CV14-15 に対する T_{10} の応答の場合と同じである。しかし応答波形は多少異っていて、 T_{14} の方が T_{10} に比して応答が遅くかつ大きく変化することがわかる。(CV16-17 1% 開に対して T_{14} は約 1.5 °C 上昇)

CV19 開 → 流量 F_3 増加 → 圧調系循環流量増 → T_{14} 上昇 → バイパス流路を経て T_{12} 上昇 → 新しいバランス点に達する。

この様に T_{14} はすべての操作外乱に対して大きな応答を示し、他のサブシステムからの干渉を受け易いことがわかる。

○ P_2 の応答

CV14-15 からの影響はない。

CV16-17 開 → T_{14} 上昇 → ジェットコンデンサースプレー水温度上昇 → 圧力 P_2 上昇 相関関数上では約 2 min の大きな無駄時間が認められるが、この応答には必ずしもはっきりと特性が出ていない。この原因は必ずしもはっきりと特性が出ていない。この原因は自己回帰モデルフィッティングにおいて系の最高次数を 30 次 (従って相関関数上で 60 sec までの時間減が考慮されている) までしか取っていないことによるもので、本同定手法がこの様な大きな無駄時間を持つ系に対してうまくいかない事を示している。

CV19 開 → 流量 F_3 増 → P_2 下降

この場合、CV19 1% 開に対して 5 min 後で 0.2 kg/cm² 減少する。

○ T_{16} の場合

CV14-15 開 → 冷却系部流量減 → 2 次側へ伝わる熱量減少 → T_{17} 下降 → T_{16} 下降

CV16-17 についても同じ。

CV19 開 → 流量 F_3 増 → コンデンサー系クーラ流量増 → 2 次系へ伝わる熱流量増加 → T_{18} 上昇 → T_{16} 上昇

○ T_{17}, T_{18} についても同じ傾向

以上の結果をまとめてそのブロック図を Fig. 14 に示す。

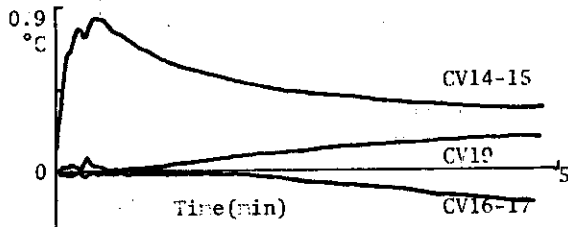


Fig.13-1 Step response of T_{10} .

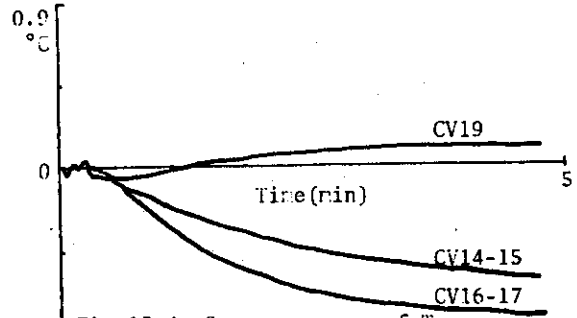


Fig.13-4 Step response of T_{16} .

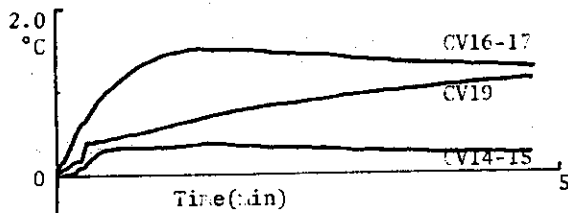


Fig.13-2 Step response of T_{14} .

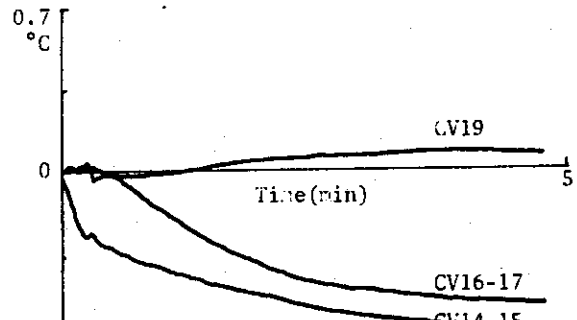


Fig.13-5 Step response of T_{17} .

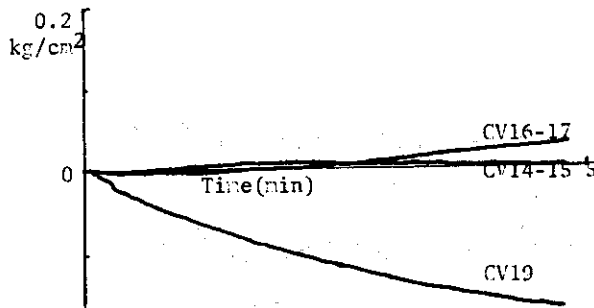


Fig.13-3 Step response of P_2 .

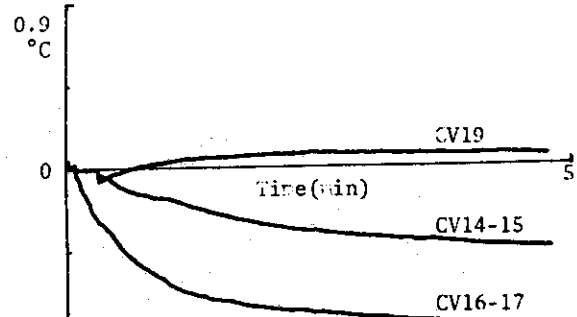


Fig.13-6 Step response of T_{18} .

Fig. 13 Step responses to inputs derived from identified A-R model.
(run no. EXP2)

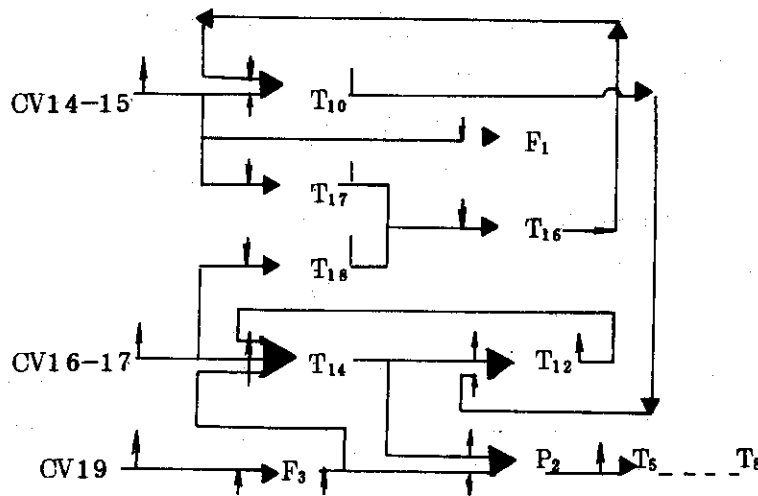


Fig. 14 Dynamics relations among each quantities of main cooler, condenser cooler and jet condenser.

(e) モデルフィットネスのチェック

得られた自己回帰モデルを使って実験データに対するフィッティングシミュレーションを行った結果をFig. 15に示す。ここでは先の同定結果EXP1に比して、はるかに良いフィッティング結果が得られている。この事は、冷却系部の動特性は線型モデルで十分表現されていることを示している。しかし、他の変数に比して圧力 P_2 のフィッティングがよくない。これは、前述した様に本同定手法が無駄時間特性に対して弱い事に起因している。

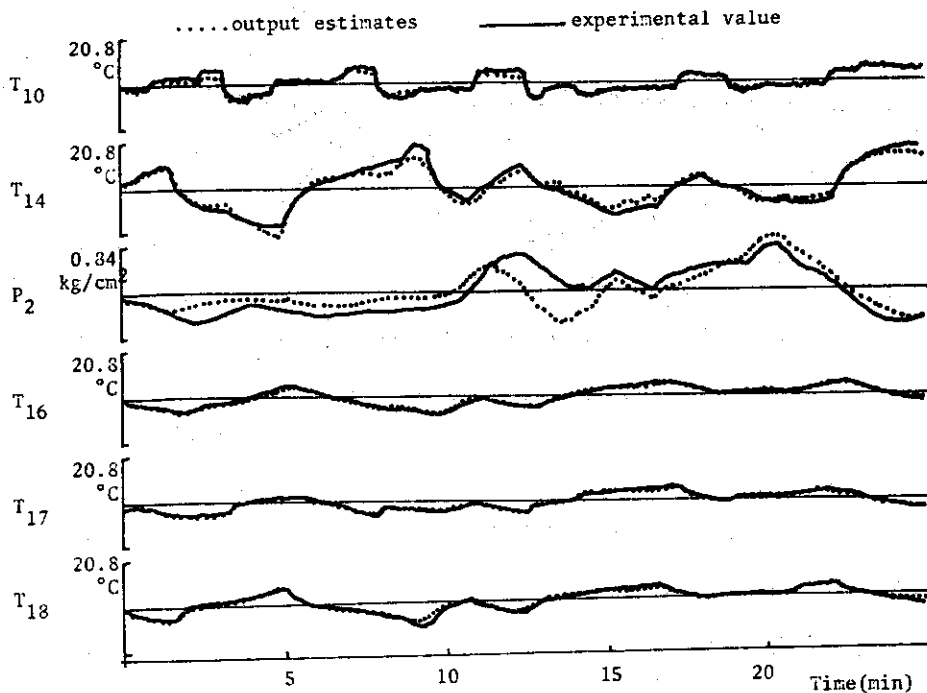


Fig. 15 Estimated outputs using identified A-R model and model fitness check. (run no. EXP2)

(f) 得られた特性のまとめ

(a)~(e)で得られた特性のうち制御上重要と思われるものを以下に要約すると

- 冷却系及び圧調系の変動は T_8 に影響を与えない。
- メインクーラーは他のサブシステムからの影響をほとんど受けない。
- T_{14} は、CV14-15, CV16-17, CV19のいずれの操作変数からも強い影響を受ける。
- P_2 はCV19に対しては負の応答, CV16-17に対しては約2 minの無駄時間を持った正の応答をする。

(g) 同定結果の検討と現有制御方式に対する評価

以上得られた特性は大半従来の経験から見て妥当なものと考えられる。しかし、圧力調節系ループを中心に、冷却系、圧調系などの間の動特性的関係を解析したのは今回がはじめてで、特に T_{14} 制御の極めて困難であることが定量的にうきばりにされた。この冷却系とジェットコンデンサーは、各々の制御系の操作変数から互いに強い影響を受けることが明らかであり、この部分は圧力制御にウェイトを置いて、一体化して制御系を設計した方がよい。

又、主冷却系は、 T_8 が一定を保つことから、他のサブシステムと切離して独立に扱って良いことがわかった。

(h) 補足

本解析で明らかにされた、各冷却系差動バルブ1%変化に対する T_{10} , T_{14} の応答波形の違いは次の様な理由によるものである。即ち、一般に、冷却器入口温度が与えられると、冷却器の除熱量は流量によって規定されFig. 16の様な特性を示す。OWL-0プラントでは主冷却器

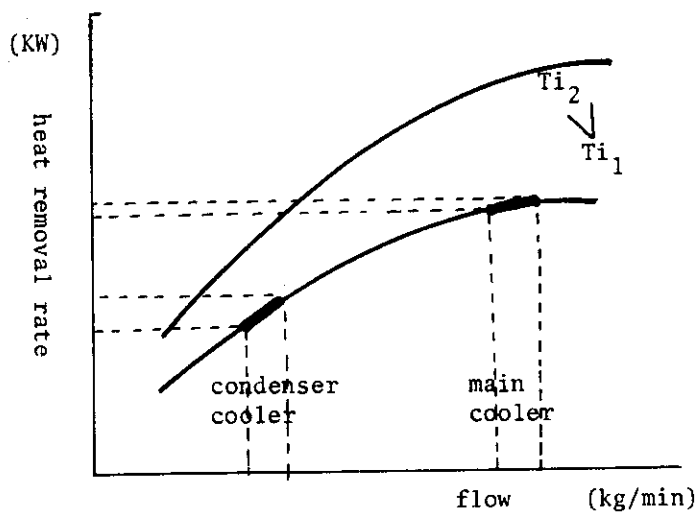


Fig. 16 Characteristics relation between flow through cooler and heat removal rate.

は容量一ぱいの所で使用されているのに対し、圧調系冷却器は、容量の約 $1/4$ 程度の所で使用されている。その為流量の単位量変動に対して T_{10} より T_{14} の方がはるかに大きい感度を持つことがわかる。

V 結 論

N章では、同定実験データについて二つのケースを取り出して、同定によって得られたモデルを用いてOWL-0プラント動特性について定性的な議論を行なった。

得られた結果を総合すると、このプラントの圧力制御は圧調系ループスプレー水流量操作による、サブループ制御だけに着目したものは極めて不十分で、ジェットコンデンサー、サージタンク、セパレータ部、さらに圧調系冷却器、ジェットコンデンサー部を各々一体と見なし、圧力制御方式を考える必要がある。(この場合、セパレータと圧調系冷却器は独立)

又、そのための動特性解析に於いては、サージタンク部の特性を組み込んだモデルを作らなければならない事が指摘された。さらにメインクーラーについては他のサブシステムと切離し、従来のサブループ制御を行えば良い事も指摘された。これらの各部分について同定されたモデルを用いて、例えばレギュレータ問題として、目標値偏差の2乗誤差平均値最小化といった最適制御ゲインを求める事は容易である。しかし注意すべき事は、同定されたモデルは、あくまでもカーブフィッティングに過ぎないということである。特に一つの実験データの一度のカブフィッティングだけから多くを議論することは危険である。又、解析によって明らかにされた動特性についても、それがいかなるレベルでの特性であるか押えておく必要がある。例えば、今回のOWL-0プラントの同定に於いては、プラント全体について見れば、メインループ流量及びメインクーラー入口温度がほぼ一定なる条件の下での特性であり、これらがおかされる様な外乱が加わった場合の特性は又変ってくる。(但し、 T_0 一定なる性質はプラントの性質から特殊な外乱が加わらない限り成立する。)

本解析を通じて、複雑なプラントの系全体を支配する主要な法則を概括的に押え、制御系評価に対する定性的議論を行なう上で、本同定手法を応用して動特性を解析する方法の有効性が確認された。

VI 謝 辞

本研究の遂行と同定実験の実施に当り、多大な御助力と、適切な御教示をいただいた原子炉工学部制御研究室室長原昌雄氏に深く謝意を表します。また、OWL-0 ループ実験に際して材料試験炉部照射2課桜井課長をはじめ池島義昭，鍋谷栄昭，斎藤春雄の各氏に多大な御協力をあおいた事を記し深く謝意を表します。

VII 参 考 文 献

1. 赤池，中川 "ダイナミックシステムの統計的解析と制御" S 47.4サイエンス社
2. 照射2課，原子炉制御研究室 "OWL-0 の計算機制御開発" 1974.9 JAERI-M 5844
3. H. Akaike "On a decision procedure for system identification"
4. I. Gustavsson "Survey of application of identification in chemical and physical process" Automatica 1975 Vol. 11 pp3~24
5. 鈴木，藤井 "プロセス同定問題への最小2乗推定法の応用" 計測と制御 S 46.8 第10巻 8号 pp563~578
6. T. Otomo, T. Nakagawa, H. Akaike "Statistical approach to computer control of cement rotary Kilns" Automatica 1972 Vol. 8 pp35~48
7. 尾熊，藤井，白井，渡辺 "ハイブリッド計算機による多変数相関及びスペクトル解析コード(MLCOSP) 1975.10 JAERI-M 6252
8. 尾熊，藤井 "照射用水ループ(OWL-0)の同定と制御系の評価" 1975.8 第14回 SICE 学術講演会

VI 謝 辞

本研究の遂行と同定実験の実施に当り、多大な御助力と、適切な御教示をいただいた原子炉工学部制御研究室室長原昌雄氏に深く謝意を表します。また、OWL-0 ループ実験に際して材料試験炉部照射2課桜井課長をはじめ池島義昭，鍋谷栄昭，斎藤春雄の各氏に多大な御協力をあおいた事を記し深く謝意を表します。

VII 参考文献

1. 赤池，中川 "ダイナミックシステムの統計的解析と制御" S 47.4 サイエンス社
2. 照射2課，原子炉制御研究室 "OWL-0 の計算機制御開発" 1974.9 JAERI-M 5844
3. H. Akaike "On a decision procedure for system identification"
4. I. Gustavsson "Survey of application of identification in chemical and physical process" Automatica 1975 Vol. 11 pp3~24
5. 鈴木，藤井 "プロセス同定問題への最小2乗推定法の応用" 計測と制御 S 46.8 第10巻 8号 pp563~578
6. T. Otomo, T. Nakagawa, H. Akaike "Statistical approach to computer control of cement rotary Kilns" Automatica 1972 Vol. 8 pp35~48
7. 尾熊，藤井，白井，渡辺 "ハイブリッド計算機による多変数相関及びスペクトル解析コード(MLCOSP) 1975.10 JAERI-M 6252
8. 尾熊，藤井 "照射用水ループ(OWL-0)の同定と制御系の評価" 1975.8 第14回 SICE 学術講演会