

第8章 閉ループ同定

閉ループ同定についての解説

執筆者

加納 学	京都大学 大学院工学研究科化学工学専攻
喰田 秀樹	出光石油化学(株) 技術部総括課

8.1. 閉ループ系同定の基礎

京都大学 加納 学

8.1.1. はじめに

システム同定には、対象プロセスの入出力データが必要である。前節で述べた持続的励振条件を入力変数が満たすためには、入力変数を運転状態とは無関係に変化させる必要がある。しかし現実には、システム同定のために運転状態を乱すことは好ましくないため、フィードバック制御の下で安定に運転されているプロセスの入出力データからモデルを構築することが望まれる。このようなフィードバック制御下でのシステム同定を閉ループ同定 (closed-loop identification) という。

実は、この閉ループ同定は簡単ではない。例えば、フィードバック制御によって完璧に外乱が抑制されている場合を考えてみよう。当然ながら、設定値を変更しなければ、制御変数は一定で変化しない。したがって、操作変数が制御変数に与える影響を把握することができず、モデルを構築することはできない。この例は極端であるが、閉ループ同定が抱える問題を浮き彫りにしてくれる。本節では、閉ループ同定の問題点を明らかにし、現在までに提案されているいくつかの方法について解説する。

8.1.2. スペクトル解析の利用

1960年代に既に、クロススペクトル密度 (あるいは相互相関関数) を用いる同定方法は閉ループ系の同定に対して役に立たないことが指摘されている。本題に入る前に、ここで利用する重要な用語を整理しておこう。

平均値 0 の変数 $x(t), y(t)$ について、

$$r_{xx}(k) = E[x(t)x(t+k)] \quad (1)$$

を x の自己相関関数 (auto-correlation function) ,

$$r_{xy}(k) = E[x(t)y(t+k)] \quad (2)$$

を x と y の相互相関関数 (cross-correlation function) と呼ぶ。ここで、 E は期待値を意味する。さらに、自己相関関数 $r_{xx}(k)$ のフーリエ変換

$$\phi_{xx}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r_{xx}(k)e^{-j\omega k} \quad (3)$$

を x のスペクトル密度 (spectral density) , 相互相関関数 $r_{xy}(k)$ のフーリエ変換

$$\phi_{xy}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r_{xy}(k)e^{-j\omega k} \quad (4)$$

を x と y のクロススペクトル密度 (cross-spectral density) と呼ぶ。

まず、スペクトル解析を用いた、フィードバック制御を行わない開ループ系の同定方法について述べる。ここでは、対象プロセスが次式で表現されるものとする。

$$y(t) = P(q)u(t) + D(q)d(t) \quad (5)$$

なお、 $P(q)$ はプロセスの伝達関数、 $D(q)$ は外乱の動特性を与える伝達関数であり、操作変数 u と白色雑音 d は無相関とする。システム同定にスペクトル解析を用いる場合、その目的は、入出力 u, y の測定データからプ

プロセスの周波数伝達関数 $P(e^{j\omega})$ を求めることとなる¹．このプロセスのインパルス応答係数を $\{p_m\}$ とすると，

$$P(q) = \sum_{m=0}^{\infty} p_m q^{-m} \quad (6)$$

であることから，周波数伝達関数を

$$P(e^{j\omega}) = \sum_{m=0}^{\infty} p_m e^{-j\omega m} \quad (7)$$

と表現することもできる．同様に，外乱伝達関数 $D(q)$ のインパルス応答係数を $\{d_m\}$ とすると，

$$D(q) = \sum_{m=0}^{\infty} d_m q^{-m} \quad (8)$$

となる．このインパルス応答表現を利用して，入力 u と出力 y のクロススペクトル密度を計算してみよう．まず，相互相関関数を求めると，

$$\begin{aligned} r_{uy}(k) &= E[u(t)y(t+k)] \\ &= E[u(t)P(q)u(t+k) + u(t)D(q)d(t+k)] \\ &= E\left[u(t) \sum_{m=0}^{\infty} p_m u(t+k-m) + u(t) \sum_{m=0}^{\infty} d_m d(t+k-m)\right] \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} p_m E[u(t)u(t+k-m)] + \sum_{m=0}^{\infty} d_m E[u(t)d(t+k-m)] \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} p_m r_{uu}(k-m) + \sum_{m=0}^{\infty} d_m r_{ud}(k-m) \end{aligned} \quad (9)$$

を得る．仮定より， u と d は無相関であるから，任意の k について $r_{ud}(k) = 0$ である．このため，相互相関関数 $r_{uy}(k)$ は

$$r_{uy}(k) = \sum_{m=0}^{\infty} p_m r_{uu}(k-m) \quad (10)$$

と簡単化される．これより，クロススペクトル密度 $\phi_{uy}(\omega)$ は

$$\begin{aligned} \phi_{uy}(\omega) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} r_{uy}(k) e^{-j\omega k} \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} p_m r_{uu}(k-m) e^{-j\omega k} \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} p_m e^{-j\omega m} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} r_{uu}(k-m) e^{-j\omega(k-m)} \right\} \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} p_m e^{-j\omega m} \left\{ \sum_{l=-\infty}^{\infty} r_{uu}(l) e^{-j\omega l} \right\} \\ &= P(e^{j\omega}) \phi_{uu}(\omega) \end{aligned} \quad (11)$$

となる．ここで， $P(e^{j\omega})$ はプロセスの周波数伝達関数であったことから，その推定値 $\hat{P}(e^{j\omega})$ は， $\hat{\phi}$ をスペクトル密度の推定値として，

$$\hat{P}(e^{j\omega}) = \frac{\hat{\phi}_{uy}(\omega)}{\hat{\phi}_{uu}(\omega)} \quad (12)$$

¹連続時間伝達関数 $P(s)$ の周波数伝達関数は $P(j\omega)$ であった．一方，離散時間伝達関数 $P(q)$ の周波数伝達関数は $P(e^{j\omega})$ で与えられる．すなわち， $q = e^{j\omega}$ を代入すればよい．

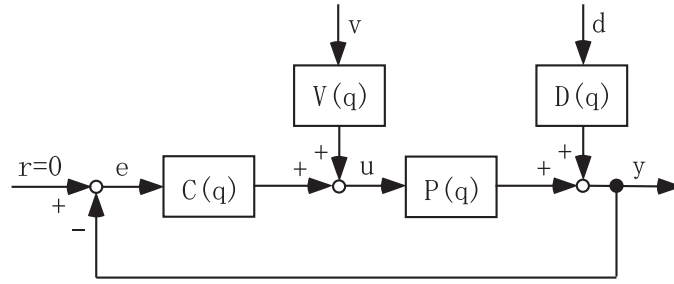


図 1: 閉ループ系のブロック線図

によって求めることができる．これがスペクトル解析を用いたシステム同定手法である．

それでは，次に，図 1 のような閉ループ系を考えよう．この閉ループ系は以下の 2 式で表現される．

$$y(t) = P(q)u(t) + D(q)d(t) \quad (13)$$

$$u(t) = -C(q)y(t) + V(q)v(t) \quad (14)$$

ここで， $P(q), C(q)$ はそれぞれプロセスおよびコントローラの伝達関数， $D(q), V(q)$ はそれぞれ外乱および同定用信号（人為的な付加信号）の動特性を与える伝達関数であり， d, v は互いに相関のない白色雑音とする．閉ループ伝達関数を用いると，プロセスの入出力を以下のように表すこともできる．

$$y(t) = \frac{1}{1 + CP}(PVv(t) + Dd(t)) \quad (15)$$

$$u(t) = \frac{1}{1 + CP}(Vv(t) - CDd(t)) \quad (16)$$

ここで，開ループ系の同定で行った手順をそのまま閉ループ系の同定に適用し，プロセスの周波数伝達関数の推定値 $\hat{P}(e^{j\omega})$ を求めると，次式を得る．

$$\begin{aligned} \hat{P}(e^{j\omega}) &= \frac{\hat{\phi}_{uy}(\omega)}{\hat{\phi}_{uu}(\omega)} \\ &= \frac{-C(e^{-j\omega})|D(e^{j\omega})|^2\phi_{dd}(\omega) + P(e^{j\omega})|V(e^{j\omega})|^2\phi_{vv}(\omega)}{|C(e^{j\omega})D(e^{j\omega})|^2\phi_{dd}(\omega) + |V(e^{j\omega})|^2\phi_{vv}(\omega)} \end{aligned} \quad (17)$$

なお，

$$|X(e^{j\omega})|^2 = X(e^{j\omega})X(e^{-j\omega}) \quad (18)$$

である．これより，周波数伝達関数の推定値が真値と一致する，すなわち $\hat{P}(e^{j\omega}) = P(e^{j\omega})$ となるのは，1) 外乱が存在しない場合 ($d = 0$)，2) フィードバックループが存在しない場合 ($C = 0$)，のいずれかの場合に限られることがわかる．さらに，同定用信号 v が存在しない場合には，

$$\hat{P}(e^{j\omega}) = -\frac{1}{C(e^{j\omega})} \quad (19)$$

となり，プロセス周波数伝達関数の代わりに，コントローラ周波数伝達関数の逆数に -1 を掛けたものが同定されることになる．このように，閉ループ同定では，同定用信号の存在が決定的に重要である．なお，図 1 のようにコントローラ出力に信号を付加する代わりに，コントローラ入力に信号を付加してもよい．コントローラ入力に人為的な信号を加えることは，設定値を変更することに対応する．

さて、特殊な場合を除いて、スペクトル解析に基づく閉ループ同定は成功しないことがわかった。しかし、同定用信号 v が測定される（あるいはコントローラが既知である）場合には、次式に基づく同定が可能である。

$$\begin{aligned}\phi_{yv}(\omega) &= P(e^{j\omega})\phi_{uv}(\omega) + D(e^{j\omega})\phi_{dv}(\omega) \\ &= P(e^{j\omega})\phi_{uv}(\omega)\end{aligned}\quad (20)$$

すなわち、周波数伝達関数の推定値は

$$\hat{P}(e^{j\omega}) = \frac{\hat{\phi}_{yv}(\omega)}{\hat{\phi}_{uv}(\omega)}\quad (21)$$

で与えられる。

8.1.3. 直接法

あたかもフィードバックループが存在していないかのように同定を行う、すなわち開ループ系に対する同定手法を閉ループ系にそのまま適用する方法を直接法（direct identification）と呼ぶ。この方法はフィードバックループの存在を考慮する必要がないため、もし適切な同定が可能であるなら、簡便で優れた方法といえる。はたして直接法を利用しても問題はないのだろうか。予測誤差法を用いる場合について、詳しく検討してみよう。

式 (13) の予測誤差は、 y, u が式 (15), (16) のように表せることから、

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \frac{1}{\hat{D}}(y(t) - \hat{P}u(t)) \\ &= \frac{(P - \hat{P})V}{\hat{D}(1 + CP)}v(t) + \frac{D(1 + C\hat{P})}{\hat{D}(1 + CP)}d(t)\end{aligned}\quad (22)$$

で与えられる。予測誤差法では、 $\varepsilon(t) = d(t)$ となる、すなわち、

$$\frac{(P - \hat{P})V}{\hat{D}(1 + CP)}v(t) = 0\quad (23)$$

$$\frac{D(1 + C\hat{P})}{\hat{D}(1 + CP)} = 1\quad (24)$$

となるパラメータを推定する。問題は、この2つの条件から、

$$\hat{P} = P, \quad \hat{D} = D\quad (25)$$

が導かれるかどうかである。

まず、同定用信号を付加しない場合、すなわち $v = 0$ である場合には、条件式 (23) は自動的に満たされ、実質的な意味をもたない。このため、 \hat{P}, \hat{D} は条件式 (24) を満足するように決定されるが、この条件だけでは $\hat{P} = P, \hat{D} = D$ となるとは限らない。真の伝達関数を同定するためには、コントローラ C が十分に高次である必要がある。ただし、プロセスの真の伝達関数が不明である以上、コントローラの次数が十分であるかどうかはわからない。

一方、同定用信号 v が持続的励振条件を満たしている場合には、条件式 (23) より $\hat{P} = P$ が、さらに条件式 (24) より $\hat{D} = D$ が導かれる。すなわち、プロセスおよび外乱の伝達関数を正しく同定できる。以下では、伝達関数を正しく同定できる性質を可同定性と呼ぶことにする。なお、閉ループ系の同定を可能にする方法として、同定用信号を加える代わりに、同定実験中に複数のコントローラを用いる（異なるコントローラを用いて同定実験を行う）方法もある。1入力1出力プロセスあるいは入出力の数が等しい多変数プロセスの同定であれば、2種類のコントローラを用いれば同定可能となる。

8.1.4. 間接法

間接法 (indirect identification) は以下の2ステップからなり, 同定用信号が測定可能 (あるいはコントローラが既知) であることを前提とする.

< Step 1: 閉ループ伝達関数の同定 >

図1の閉ループ系は, 閉ループ伝達関数を用いて次式のように表現できる.

$$y(t) = H_{yv}(q)v(t) + H_{yd}(q)d(t) \quad (26)$$

$$H_{yv}(q) = \frac{PV}{1+CP}, \quad H_{yd}(q) = \frac{D}{1+CP} \quad (27)$$

いま, v が持続的励振条件を満たし, かつ d と無相関であるとする. このとき, y, v をそれぞれ出力および入力, H_{yv} をプロセスとみなせば, 式(26)は開ループ系の表現式に他ならない. したがって, 例えば予測誤差法を用いて, H_{yv} および H_{yd} を同定できる.

< Step 2: 開ループ系のパラメータ推定 >

C, V を既知とすると, Step 1 で得られた同定結果を利用して, P, D を決定することができる. すなわち,

$$\hat{H}_{yv} = \frac{\hat{P}V}{1+C\hat{P}} \quad (28)$$

$$\hat{H}_{yd} = \frac{\hat{D}}{1+C\hat{P}} \quad (29)$$

を解くことにより, P, D を求められる.

では, 直接法と同様に, 間接法の可同定性について検討してみよう. いま, Step 1において, 閉ループ伝達関数 H_{yv}, H_{yd} は正確に同定できたものとする. すなわち,

$$\hat{H}_{yv} = H_{yv} \quad (30)$$

$$\hat{H}_{yd} = H_{yd} \quad (31)$$

とする. この場合, Step 2では,

$$\frac{\hat{P}V}{1+C\hat{P}} = \frac{PV}{1+CP} \quad (32)$$

$$\frac{\hat{D}}{1+C\hat{P}} = \frac{D}{1+CP} \quad (33)$$

に基づいて, \hat{P}, \hat{D} を求めることになる. 条件式(32)を変形すると,

$$\frac{PV}{1+CP} - \frac{\hat{P}V}{1+C\hat{P}} = \frac{(P-\hat{P})V}{(1+CP)(1+C\hat{P})} = 0 \quad (34)$$

を得る. これは, 直接法の条件式(23)と本質的に同じである. 一方, 条件式(33)を変形すると,

$$\frac{D(1+C\hat{P})}{\hat{D}(1+CP)} = 1 \quad (35)$$

を得る. これは, 直接法の条件式(24)に等しい. すなわち, 可同定性に関して直接法と間接法に差はなく, 持続的励振条件を満たす同定用信号が付加されていれば, いずれの手法を用いても閉ループ同定は可能である. ただし, 可同定性が同じであるということは, 有限個のサンプルを用いて同定を行った結果が同じになるという意味ではない. また, 適用のしやすさも異なる.

間接法は、1) Step 2 において適切に P を決定することが困難である、2) 同定用信号が測定可能であることを前提とする、3) 可同定性については直接法と本質的に同じ性質をもつ、という理由で、直接法と比較してとくに優れた手法というわけではない。間接法をより実用的な同定手法とするために、ユーラ・パラメトリゼーション (Youla parametrization) を用いる方法や 2 段階法が提案されている。ここでは、2 段階法を紹介しよう。2 段階法は以下の 2 ステップからなる。

< Step 1 : 閉ループ伝達関数の同定 >

図 1 の閉ループ系は、閉ループ伝達関数を用いて次式のように表現できる。

$$u(t) = H_{uv}(q)v(t) + H_{ud}(q)d(t) \quad (36)$$

$$H_{uv}(q) = \frac{V}{1+CP}, \quad H_{ud}(q) = \frac{CD}{1+CP} \quad (37)$$

いま、 v が持続的励振条件を満たし、かつ d と無相関であるとする。このとき、 u, v をそれぞれ出力および入力、 H_{uv} をプロセスとみなせば、式 (36) は開ループ系の表現式に他ならない。したがって、例えば予測誤差法を用いて、 H_{uv} および H_{ud} を同定できる。

< Step 2 : 開ループ系のパラメータ推定 >

Step 1 で得られた \hat{H}_{uv} を利用して P を決定することを考える。プロセスの表現式 (13) に式 (36) を代入すると、

$$\begin{aligned} y(t) &= P(q)\{H_{uv}(q)v(t) + H_{ud}(q)d(t)\} + D(q)d(t) \\ &= P(q)H_{uv}(q)v(t) + \{PH_{ud}(q) + D(q)\}d(t) \end{aligned} \quad (38)$$

となる。したがって、 $H_{uv}v$ を入力、 y を出力とみなすことにより、 P を同定できる。

この 2 段階法は、通常の開ループ同定手法を利用してプロセス伝達関数 P を同定できるところに特徴がある。

8.1.5. 入出力結合法

入出力を結合した多次元時系列を考え、時系列モデルの構築を通してプロセスの同定を行う手法を入出力結合法 (joint input-output identification) と呼ぶ。例えば、AR モデル

$$\begin{bmatrix} A_{11}(q) & A_{12}(q) \\ A_{21}(q) & A_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(t) \\ u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \quad (39)$$

を利用するのであれば、予測誤差法等を用いて、この式の適切な構造 (次数) およびパラメータを求めることになる。いま、閉ループ系が式 (13), (14) で与えられる場合には、

$$\begin{bmatrix} 1 & -P \\ C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(t) \\ u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \quad (40)$$

が成り立つことから、

$$P = -\frac{A_{12}}{A_{11}}, \quad C = \frac{A_{21}}{A_{22}} \quad (41)$$

を得る。

このように、入出力結合法はコントローラ C および同定用信号 v が未知である場合にも、プロセス P を同定できる。ただし、AR モデルの次数は高くなる傾向があるため、モデルを低次元化する作業が必要になることが多い。

フィードバック制御下でのプロセスの 動特性同定に関する考察（その1）

喰 田 秀 樹

要 旨

プラントの動特性同定に際して、対象にフィードバック・ループが含まれていると動特性が正しく同定されない場合が生じる。これに対し、伝達関数による考察により、正しい動特性を得るための条件を示した。出力の観測雑音が0とみなせ、かつ入力側には出力や入力自体と無相関な外生信号が存在しておれば、プロセスの特性が同定可能である。さらに、外乱が加わっていても、系を拡大することにより、外乱からの応答も含めプロセスの特性が同定可能であることも明らかになった。

1 はじめに

制御系の設計に代表されるようなケースでは、プラントの動特性を知る必要が生じる。特にモデル予測制御などのモデルベースの制御系においては、モデルの精度が制御性能を左右するので、動特性の把握が非常に重要となる。実プラントの動特性の把握（動特性同定あるいはモデル同定という）の場合、プラントの入力（独立変数）と出力（従属変数）のデータを測定し、それを解析してモデルを同定する方法が一般的である。この際、定常状態において制御ループをオープンとし、独立変数を順次、ステップ状に変化させ、従属変数の変化を観測して解析する手順が最も多くとられている。このとき、制御ループをオープンとしてしまうために、①安定性、

安全性が損なわれる、②ボードマンの負荷が上がる、③順次のテストであるため時間がかかる、といった問題点が生じている。それでは、制御ループをクローズにしたままで同定すれば良いことになるが、データ採取時に対象のプラントにフィードバック・ループが含まれていると、条件によってはプラントの動特性が正しく同定されないという問題が生じる。

しかし、閉ループ同定の問題は一部では議論されてきているものの^{1~3)}、いまだ広く認識されるには至っていない。さらに、同定を阻害する原因は何か、どのような条件下であれば正しい結果が得られるのか、についてもあまり整理されていない。本報では、一般的な例を用いて思考実験によりフィードバック・ループを含む対象に対する可同定性を検証する^{4, 5)}。なお、わかり易さと問題提起を優先して、議論には単純なケースを設定している。次報では、シミュレーションにより、具体的な例を示すとともに、可同定性を定量的に議論する。

本報の結論は、プロセスの動特性が同定可能な条件は、入力側（目標値と外乱のどちらか、あるいは両方）にプロセスに対して有意な変動があり、かつ、出力側の雑音が排除できる場合であることが明らか

<執筆者紹介>

喰 田 秀 樹



Syokuda, Hideki
昭和62年入社
出光石油化学(株)
徳山工場
技術課
出身地：兵庫県

となったことである。

フィードバックとは関係のない外生信号（人が介入することなどにより、対象の外から加わる信号）の存在が、信号処理上、オープンループととらえることを可能にしているといえる。逆に、入力側に有意な変動がなく、かつ、出力側の雑音が排除できない場合にはプロセスではなくコントローラの動特性が同定されてしまうことが確認された。

2 対象について

以下の議論は一般論であり、特定の対象を扱うものではない。しかし、なんらかの例題があった方が理解しやすいと考え、図1に示す例題を提案する。これは、蒸留塔の塔底側を切り出したものである。測定可能なプロセス量として、以下の3種がある。

- ① 出力（制御変数）：N段トレイ温度（ y ）
- ② 入力（操作変数）：リボイラの熱媒流量（ u_1 ）
- ③ 入力（外乱変数）：フィード流量（ u_2 ）

制御系は、N段のトレイ温度を目標値に保つようリボイラの熱媒流量を操作するTC-FCのカスケード制御とする。これに付随して、以下の二つの量は既知とする。

- ① N段トレイ温度目標値： r
- ② リボイラの熱媒流量目標値： u_{11}

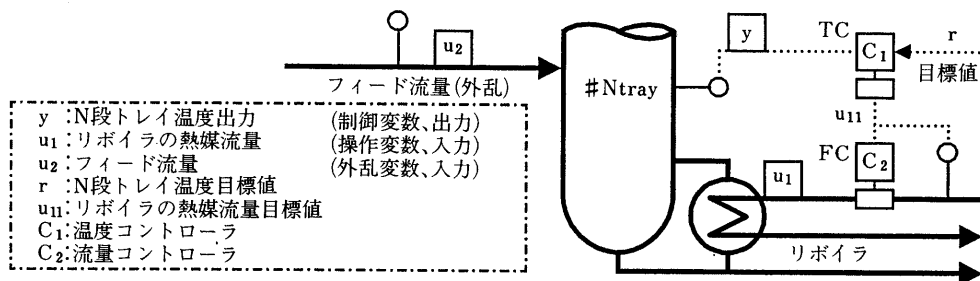
これをブロックダイアグラムに置き換えたものが、図2である。システムが線形で記述可能との前提を置いている。図1に対して追加された記号の意味は以下のとおり。

- G_p ：リボイラの熱媒流量（ u_1 ）からN段トレイ温度（ y ）への動特性
- G_d ：フィード流量（ u_2 ）からN段トレイ温度（ y ）への動特性
- C_1, C_2 ：コントローラの動特性
- d_1, d_2, e ：観測雑音あるいは未知（測定不能）外乱。 u, x, y とは無相関

ここで、外乱とはフィード流量の変化に代表されるように、観測可能でかつ系を変動させるだけの大きさをもった信号、雑音とはランダムな動きをし、系に対して影響を与えないか、与えても小さいものとする。

一般的には、動特性テストの際には、 C_1, C_2 のカスケードを切り、 C_2 の目標値 u_{11} ならびに外乱 u_2 をそれぞれ独立にステップ状に変化あるいは摂動させて出力 y の動きを観察する。この場合は、閉ループによる同定上の問題は生じないが、①制御ループをオープンとしてしまうために、安定性、安全性が損なわれる、②ボードマンの負荷が上がる、③時間がかかるといった問題点が生じる。

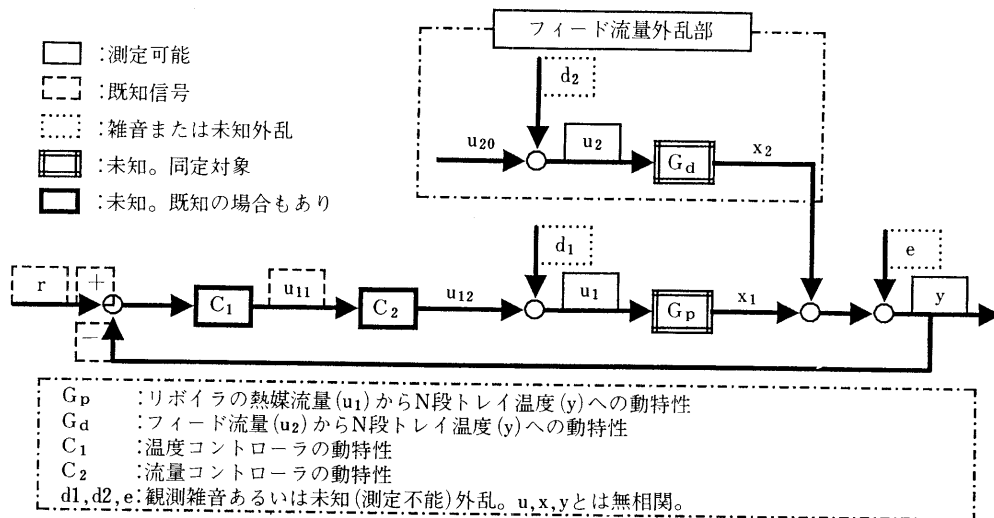
そこで、 C_1, C_2 のカスケードを活かしたままで、 u_1 ならびに u_2 からの応答を一度に同定することを考える。例題において、フィード流量の変動による外乱により、N段トレイ温度が動き、制御系がリボイラの熱媒量进行操作して補正しているという状況を設定する。また、測定値には、 d_1, d_2, e という雑音が付加されているものとする。同定の問題は、この時の u_1, u_2, y を測定して、 G_p, G_d を求めることである。



#N tray の温度をリボイラの熱媒流量で制御している。この制御系はTC-FCのカスケード制御。フィード流量が外乱となる。

図1 動特性同定対象の例（蒸留塔塔底側）

フィードバック制御下でのプロセスの動特性同定に関する考察 (その1)



リボイラに対する応答 x_1 と外乱からの応答 x_2 の和に観測雑音 e が付加されたものがプロセスの出力 y となる。 u_{11} の部分は、コントローラ間の信号の伝送だけであるので、雑音はないものとした。

図2 図1の例題に対するブロックダイアグラム

3 定式化

図2のブロックダイアグラムをもとに、関係式を書き下すと以下ようになる。

リボイラ側 (温度制御ループ含む) のモデル

$$\begin{aligned}
 y &= x_1 + x_2 + e & \dots\dots(1) \\
 x_1 &= G_p \cdot u_1 & \dots\dots(2) \\
 u_1 &= u_{12} + d_1 & \dots\dots(3) \\
 u_{12} &= C_2 \cdot u_{11} & \dots\dots(4) \\
 u_{11} &= C_1 \cdot (r - y) & \dots\dots(5)
 \end{aligned}$$

フィード流量外乱側のモデル

$$\begin{aligned}
 x_2 &= G_d \cdot u_2 & \dots\dots(6) \\
 u_2 &= u_{20} + d_2 & \dots\dots(7)
 \end{aligned}$$

(1)~(7)式をラプラス変換し、中間的な変数を消去して整理すると(8)式が得られる。これが基本式となる。(8.1)式と(8.2)式の違いは、ブロックの切り方のみである。

$$\left(\begin{array}{c|cc} \hline \text{II} & 0 & 0 \\ \hline 0 & \text{II} & C_2 C_1 \\ \hline -G_d & -G_p & \text{II} \\ \hline \end{array} \right) \begin{pmatrix} U_2 \\ U_1 \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{20} + D_2 \\ C_2 C_1 R + D_1 \\ E \end{pmatrix} \dots\dots(8.1)$$

$$\left(\begin{array}{c|cc} \hline \text{II} & 0 & 0 \\ \hline 0 & \text{II} & C_2 C_1 \\ \hline -G_d & -G_p & \text{II} \\ \hline \end{array} \right) \begin{pmatrix} U_2 \\ U_1 \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{20} + D_2 \\ C_2 C_1 R + D_1 \\ E \end{pmatrix} \dots\dots(8.2)$$

4 フィード流量外乱がない場合の同定

まず、フィード流量外乱のないシンプルな場合について考察する。(8.1)式において、 U_1 と Y に関して数式を操作する(行列の右下のブロックを考える)。これにより、入力 U_1 から出力 Y への伝達関数を求めると表1のようになる。目標値 R 、雑音 D_1 、 E の有無によりケース分けしてある。また、リボイラ熱媒流量のSVから応答をとる場合も想定して U_{11} からの伝達関数も併せて求めた。

① リボイラ熱媒流量のPV (U_1) から応答をとった場合

ケース5, 6, 7のように、出力の観測ノイズが0と見なせれば ($E=0$)、プロセスの特性が同定可能である。また、 $R=0 \cap D_1=0 \cap E \neq 0$ の場合(ケース4)にはカスケード一次、二次を合わせたコントローラの特性的逆が求まってしまう。

② リボイラ熱媒流量のSV (U_{11}) から応答をとった場合

$R \neq 0 \cap D_1=0 \cap E=0$ の場合(ケース7)に限り、カスケード二次側のコントローラの特性的も含めた特性が同定可能である。また、 $R=0$

表1 フィード流量外乱がない場合の入出力関係

ケース	変化, 雑音の有無			伝達関数	
	R	D ₁	E	Y/U ₁	Y/U ₁₁
1	有	有	有	$\frac{G_P C_2 C_1 R + G_P D_1 + E}{C_1 C_1 (R - E) + D_1}$	$\frac{G_P C_2 C_1 R + G_P D_1 + E}{C_1 (R - E - G_P D_1)}$
2	無	有	有	$\frac{G_P D_1 + E}{-C_2 C_1 E + D_1}$	$\frac{1}{C_1}$
3	有	無	有	$\frac{G_P C_2 C_1 R + E}{C_2 C_1 (R - E)}$	$\frac{-G_P C_2 C_1 R + E}{C_1 (R - E)}$
4	無	無	有	$-\frac{1}{C_1 C_2}$	$\frac{1}{C_1}$
5	有	有	無	G _P	$\frac{G_P C_2 C_1 R + G_P D_1}{C_1 (R - G_P D_1)}$
6	無	有	無	G _P	$-\frac{1}{C_1}$
7	有	無	無	G _P	G _P C ₂
8	無	無	無	不能	不能

の場合には、D₁、Eが同時に0でない限り、カスケード一次側のコントローラの特性的逆が求まってしまう。

また、PV (U₁) からの場合には、ケース5、6においても、プロセスの特性が同定可能であったものが、ここではできなくなっている点にも注意が必要である。

このように、外生信号の有無ならびにデータ採取箇所によって、得られる結果がまったく異なることがわかった。最悪の場合には、プロセスの動特性を求めたつもりが、コントローラの動特性の逆を求めていることになっている。したがって、プロセスの動特性同定においては、外生信号の有無ならびにデータ採取箇所が非常に重要となる。

さて、u₁とyを測定し、(E=0)かつ(R、D₁は同時に0でない)であれば、プロセスの特性が同定できることがわかった。以下で、条件(E=0)かつ(R、D₁は同時に0でない)について考察する。

まず、E=0の信号処理上の意味合いを考える。eは最後に外部から付加される雑音である。したがって、プロセスとはまったく無関係であり、プロセスに関する情報はeからは何ら得られない。そのため、

0であることが要求される。

次に、(R、D₁は同時に0でない)について考察する。RもD₁も外生入力という点では同じ性質を持つ。またRは一定(R=0)の場合が多い。よって、D₁を代表として議論を進める。D₁≠0ということは、eの場合とは逆に雑音が必要ということである。ただし、ただ存在していればよいというのではなく、信号として意味のある大きさを持つ(G_Pの出力x₁に変化が認められる)必要がある。意味のある大きさの雑音である場合は、PVを測定し、フィルタリングは行わずに(行ったとしても相当高周波の部分のみカットする)同定処理をする。逆に、d₁が存在しない(あるいは存在しても不十分な)場合は、何らかのかたちでd₁を付加してやる必要がある。このとき、u、x、yとは無相関であることが要求される。このような付加信号は‘dither信号’⁵⁾と呼ばれている。

さらに、D₁≠0の信号処理上の意味合いを考察する。フィードバックが含まれる場合、u₁₂はyによって動くことになる。そのため、u₁₂→yの因果性だけでなく、y→u₁₂の因果性も発生してしまう。つまり、独立変数と従属変数という切り分けができなくなっ

フィードバック制御下でのプロセスの動特性同定に関する考察(その1)

— 185 —

てしまう(このような問題を多重共線性の問題と呼ぶ)。そこで、 u にも y にも無相関な信号 D_1 を入力側に付加することにより、因果性を保つことができるわけである。

結局、 $E=0$ かつ $D_1 \neq 0$ というのは、 d_1 と x_1 によって G_p を同定するという事にほかならない。フィードバックとは独立した部分でオープンループを作り出し、そのオープンループの信号で同定を行っているため、フィードバックが含まれていても同定が可能となるというわけである。 $R \neq 0$ についても同様な議論が成り立つ。

5 フィード流量外乱がある場合の同定

話題を戻して、フィード流量外乱がある場合について考察する(8.2)式において、以下の(9)から(12)式の変数変換を行い、(13)式を得る。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ -C_2 C_1 \end{pmatrix} = -C \quad \dots\dots(9)$$

$$\begin{pmatrix} -G_d & -G_p \end{pmatrix} = -G \quad \dots\dots(10)$$

$$\begin{pmatrix} U_2 \\ U_1 \end{pmatrix} = U \quad \dots\dots(11)$$

$$\begin{pmatrix} U_{20} + D_2 \\ -C_2 C_1 R + D_1 \end{pmatrix} = D \quad \dots\dots(12)$$

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{II} & -C \\ \hline \dots\dots & \text{II} \end{array} \right) \begin{pmatrix} U \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D \\ E \end{pmatrix} \quad \dots\dots(13)$$

これは、フィード流量外乱がないとした場合のシステムの記述と同じ形式である。したがって、拡大系として取り扱えば、4節の議論がそのまま適用できる。

6 $E=0$ とみなせない場合

e の影響力が大きく、かつ周波数領域においても G_p に近い場合は、 e を雑音ではなく外乱ととらえるべきであろう。たとえば、フィードの流量や組成がかなり大きく恒常的に変動するような場合がそれである。5節で示したように、外乱であっても u_{12} としてその入力信号が測定可能であれば、プロセスの特性、外乱からの特性がともに同定可能である。したがって、 e をフィード流量外乱における x_2 と同等にとらえ、 e について u_2 に相当するものを測

定すべきである。また、制御系として考えた場合、無視できない大きさの雑音はもはや雑音ではない。安定化の達成のためには、外乱として制御系に取り込む必要がある。

結論としては、 $E=0$ とみなせない場合は e を明確な外乱として認識し、出所をつきとめて測定可能とし、多変数拡大系として特性も同定してしまうという取扱いをすべきである。測定できれば、特性の同定も可能である。

7 おわりに

フィードバック・ループが含まれていても、出力の観測雑音が0とみなせ、かつ入力側には出力や入力自体と無相関な外生信号が存在しておれば、プロセスの特性が同定可能であることを示した。また、入力側、出力側の雑音の意味についても触れた。さらに、外乱が加わっていても、系を拡大することにより、外乱からの応答も含めプロセスの特性が同定可能であることも明らかとなった。

また、今回はスペースの都合上割愛したが、フィードバック・ループを含むシステムの同定法としては、目標値 r に摂動を加える方法や同定対象を既約分解する方法^{4, 5, 7)}なども報告されている。

今後は、シミュレーションや実データの解析を通じて、同定可能な条件について、目標値 r の摂動や雑音の影響を中心に、より詳細に検討する予定である。

参考文献

- 1) L. H. Tee, S. M. Wu, *Technometrics*, **14**, 481 (1972)
- 2) G. E. P. Box, J. F. MacGregor, *Technometrics*, **14**, 985 (1972)
- 3) Akaike, H: "Some Problems in the Application of the Cross-Spectral Method", *Proceedings of Advanced Seminar of Spectral Analysis of Time Series* (Ed. by B. Harris), *Jone Wiley & Sons*, (1967), P. 81
- 4) 大野 弘: "プロセスデータの解析と制御", *化学工学会第60年会研究講演予稿集B110* (1995)

— 186 —

出 光 技 報 40 卷 2 号 (1997)

- 5) 加納 学：“フィードバック制御下でのモデリング”，化学工学会関西支部セミナー“プロセスデータの解析と応用”テキスト (1996), P. 22
- 6) G. E. P. Box, J. F. MacGregor, Technometrics, 16, 391 (1974)
- 7) 足立修一：“ユーザのためのシステム同定理論”，計測自動制御学会, (1993), P. 187



報 文

フィードバック制御下でのプロセスの
動特性同定に関する考察 (その2)

喰 田 秀 樹

要 旨

前報では、プロセスの動特性を正しく得るための条件について、伝達関数による解析により明らかにした。本報では、シミュレーションにより定量的かつイメージを伴った事例を示し、前報の結果を補う。まず、入出力信号の各種条件と同定精度の関係を示した。この結果、フィードバック制御下であっても、同定は可能であることが確認された。また、結果を整理して、同定のためのデータ収集時の入出力信号の条件についてまとめた。

1 はじめに

前報では、プロセスの動特性を正しく得るための条件について、伝達関数による解析により明らかにした。本報では、シミュレーションにより定量的かつイメージを伴った事例を示し、前報の結果を補う。

対象は、基本的に前報の解析にて用いたものをそのまま利用する。これに対しシミュレータを作成し、外乱や雑音を与えて入出力データを得る。このデータを用いて同定を行い、得られたモデルを真の応答と比較する。これにより、前報では単純に数式として表現されていたものを、具体的なデータとして解析し、入出力信号の各種条件と同定精度の関係を示す。

2 対 象

解析の対象ならびにそのブロックダイアグラムを図1、図2に示す。基本的に前報で使用した蒸留塔塔底側のモデルと同じである。ただし、問題をより単純化するため、コントローラのTC-FCカスケードは排しTC単一としている。また、FCは排したものの、入力信号は測定する必要があるためFIは残している。状況設定の詳細については、前報ならびに図1、図2を参照願う。また、前報で示した伝達関数解析による入出力の条件の違いの同定結果への影響を表1に再録する。

対象の動特性については、一次遅れによって表現した。具体的には、プロセス側 G_p の時定数が10分、ゲインが2、外乱側 G_d の時定数が4分、ゲインが1としている。また、コントローラはPIコントローラとし、ゲインが1、リセットタイムが8分である。動特性にしる、コントローラにしる単純すぎると思われる向きもあるかもしれないが、本来の目的である「入出力信号の各条件が同定精度に与える影響」を比較するには答自体は単純である方が結果が読み取りやすいため、あえて単純化したものである。

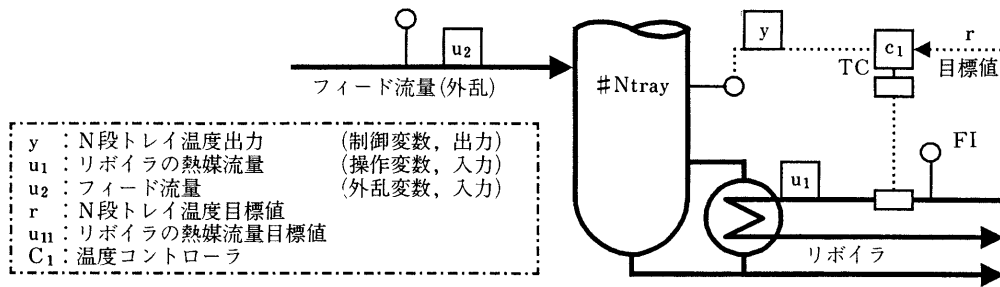
<執筆者紹介>

喰 田 秀 樹



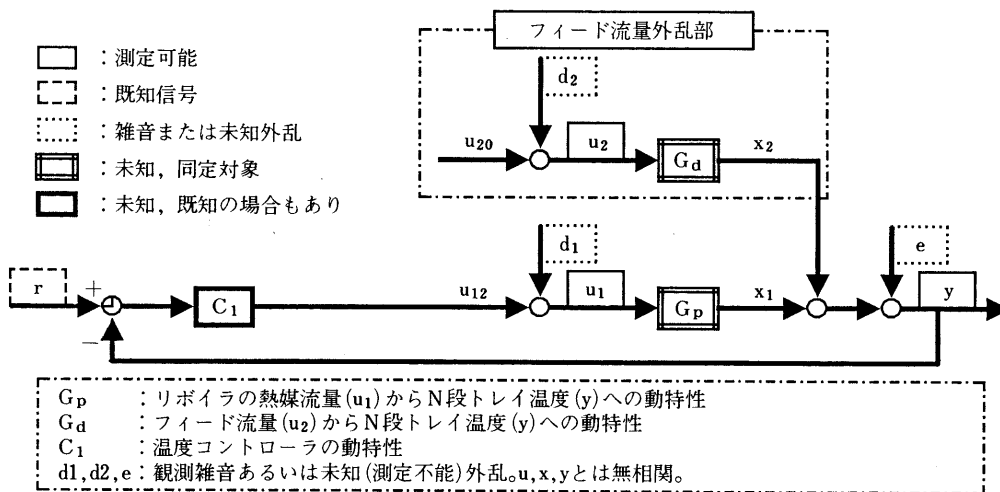
Shokuda, Hideki
昭和62年入社
出光石油化学(株)
徳山工場
技術課
出身地：兵庫県

フィードバック制御下でのプロセスの動特性同定に関する考察 (その2)



Ntrayの温度をリボイラの熱媒流量で制御している。外乱としてフィード流量が存在する。制御系はTCのみである。制御変数はN段トレイ温度、操作変数はリボイラの熱媒流量である。(前報はTC-FCのカスケード制御であったが、単順化のためカスケードは排した)。

図1 動特性同定対象の例 (蒸留塔塔底側)



リボイラに対する応答 x_1 と外乱からの応答 x_2 の和に観測雑音 e が付加されたものがプロセスの出力 y となる。

図2 図1の例題に対するブロックダイアグラム

3 問題設定

問題としては、シミュレーションによって作成された入出力データを用いて、対象の動特性(プロセス側 G_p 、外乱側 G_d)をステップ応答モデル(ステップ応答係数列)として求めるものとした。 z 領域で時定数を直接求める方法もあるが、①ステップ応答モデルとして求める方が実務に即していること、②単に時定数を数値として比較するより、応答波形として比較した方が情報量も多く、また直感的にイメージで訴えられること、によりステップ応答モデルを選んだ。

4 シミュレーション環境

シミュレーション環境にはMATLAB (4.2c) / SIMULINK (1.3c) を用いた。SIMULINKによるブロックダイアグラムの一例を図3に示す。

SIMULINKの時間単位を分とみなし(本来は秒)、0.1分の固定きざみでRK45によりシミュレーションを行っている。シミュレーション期間は200分とし、2001点のデータを得るが、これを1/10に間引き、201点としている。この1分データ201点を同定用のデータとした。

ステップ応答モデルの同定アルゴリズムには、

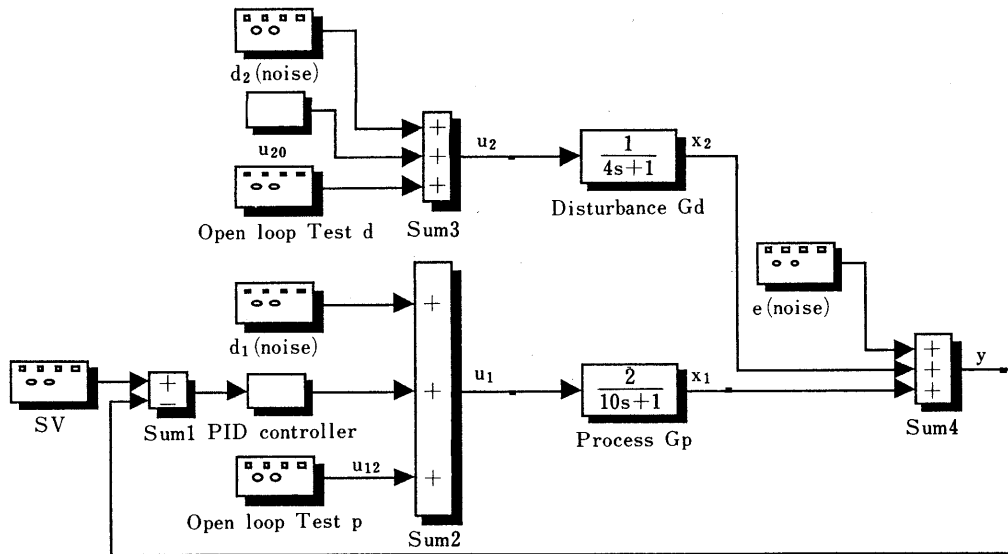


図3 SIMULINKによるブロックダイアグラムの一例

表1 入出力信号の性質とクローズドループの伝達関数の関係

ケース	変化, 雑音の有無			伝達関数 Y/U ₁
	R	D ₁	E	
1	有	有	有	$\frac{G_p C_2 C_1 R + G_p D_1 + E}{C_2 C_1 (R - E) + D_1}$
2	無	有	有	$\frac{G_p D_1 + E}{-C_2 C_1 E + D_1}$
3	有	無	有	$\frac{G_p C_2 C_1 R + E}{C_2 C_1 (R - E)}$
4	無	無	有	$-\frac{1}{C_1 C_2}$
5	有	有	無	G _p
6	無	有	無	G _p
7	有	無	無	G _p
8	無	無	無	不能

MATLABのシステム同定ToolBoxの“arx”を用いた。これは、arxモデルの係数を最小二乗法によって求めるものである。出力側の係数は1で固定し、入力側の係数列を求めている。入力側次数は、対象の時定数を考慮して60次とした。今回は、同定アルゴリズム側の比較が目的ではないので、すべてのケースに対して、上記の設定を使用している。なお、同

定アルゴリズムの都合上(数値的な問題)、入力信号には常にホワイトノイズを加えてある。

5 シミュレーションならびに結果

シミュレーションは大きく分けて以下の3ケースについて行っている。

- ① 単変数(プロセスのみ) オープンループ
- ② 単変数(プロセスのみ) クローズドループ
- ③ 多変数(プロセスと外乱) クローズドループ

今回の議論の焦点は③であるが、議論を進める上では、理想的なケースから順次検討していくこととする。

5.1 単変数(プロセスのみ) オープンループ

コントローラは機能しないようにし、入力u₁₂を別途生成してプロセスに加え、オープンループとして同定する。このとき、伝達関数Y/U₁は式(1)となる。

$$\frac{Y}{U_1} = G_p + \frac{E}{D_1} \quad \dots\dots(1)$$

これを確認する。小分類として以下の3ケースについて確認している。

- (1) 入力u₁₂の変動周期の影響
- (2) 入力雑音d₁の影響

(3) 出力雑音eの影響

以下、それぞれについて同定結果と考察を示す。

5.1.1 入力 u_{12} の変動周期の影響

同定用入力信号として方形波を加えている。その方形波の周期の同定精度への影響を観察した。出力雑音eは0, 入力雑音 d_1 のピークは0.05で固定とする。入出力信号の一例を図4に、同定されたステップ応答モデルの比較を図5にそれぞれ示す。

入力信号 u_{12} の振幅1に固定し、 u_{12} の周期を1:140分, 2:80分, 3:40分, 4:20分, 5:333分と変化させた。Rが真の応答である。1はプロセスが定常に達してから入力に変化するものであり、テスト期間中に3回変化する。この場合は、問題なく同定できている。2から4までは、方形波の周期を1/2ずつに短くしていったものである。入力信号

にプロセスに適合した周波数成分が含まれなくなっていくため、同定精度が低下していく様子が判る。5は、逆に周期を延ばしたものであり、テスト期間中に1回しか変化しない。この場合は、周波数成分的には問題ないが、情報が不足する(変化回数が少ない)ため、うまく同定できないことが確認できる。これより、入力信号は、対象が定常に達する時間の2倍以上の周期を持ち(対象よりも低い周波数成分までを含む)、かつ同定用サンプルデータ中に複数の変化を含んでいる必要があることが確認できる。

5.1.2 入力雑音 d_1 の影響

5.1.1の1番目の条件(入力信号 u_{12} の振幅1, 周期140分, 出力雑音eは0)を固定し、入力雑音 d_1 の大きさを変えて影響を観察したもの。入出力信号の一例を図6に、同定されたステップ応答モデルの

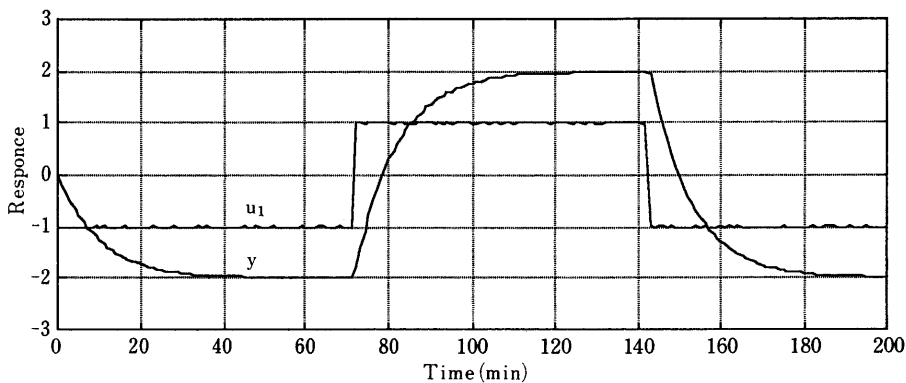


図4 入力 u_{12} の変動周期の影響確認の入出力の例 (単変数オープンループ)

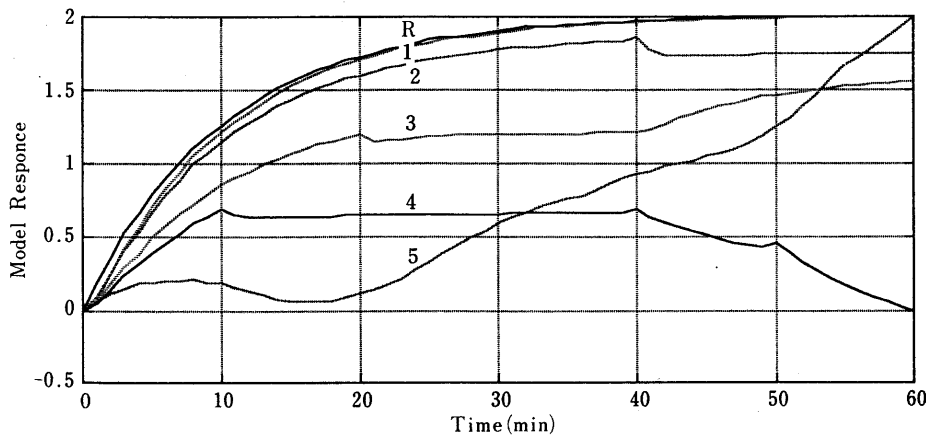


図5 入力 u_{12} の変動周期の影響確認の同定結果 (単変数オープンループ)

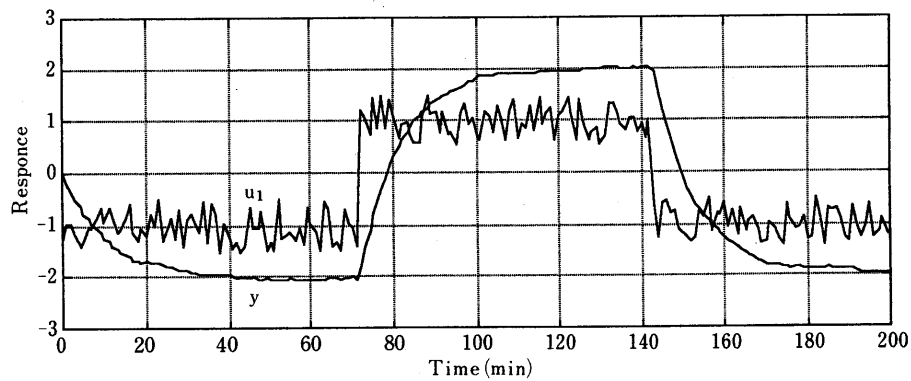
比較を図7にそれぞれ示す。

入力信号 u_{12} の振幅1に対して、入力雑音 d_1 のピークを1:0.05, 2:0.10, 3:0.50, 4:1.00, 5:2.00と変化させた。同定用入力信号の振幅より雑音の振幅の方が小さい1, 2, 3のケースでは、本来のモデル R とほとんど差はない。両者の振幅が同じである4のケースでは若干差が生じる。雑音の振幅が同定用入力信号の振幅の2倍となる5のケースではさすがに誤差が大きくなる。しかし、実用上は許容できる誤差である。式(1)によると、同定結果は入力雑音の影響は受けないことになっているが、現実にはSN比の低下とともに同定精度も低下していることが確認できる。ただし、SN比0.5程度までであれば、実用上は問題ない。

5.1.3 出力雑音 e の影響

5.1.1の1番目の条件(入力信号 u_{12} の振幅1, 周期140分, 入力雑音 d_1 のピーク0.05)を固定し, 出力雑音 e の大きさを変えて影響を観察したもの。入出力信号の一例を図8に, 同定されたステップ応答モデルの比較を図9にそれぞれ示す。

出力雑音 e のピークを1:0.05, 2:0.10, 3:0.50, 4:1.00, 5:2.00と変化させた。式(1)によると, 同定結果は出力雑音のプロセスの応答に足し合わされる形で影響が現れる。図9をみると, 出力雑音 e が大きくなるとともに, モデルの波形の乱れも大きくなっており, 理論どおりの結果が得られていることが確認できる。しかし, 基本波形は本来の応答をトレースしており, 同定精度は極端に悪くなっ



雑音 d_1 の大きさが0.5の場合の例。

図6 入力雑音 d_1 の影響確認の入出力の例 (単変数オープンループ)

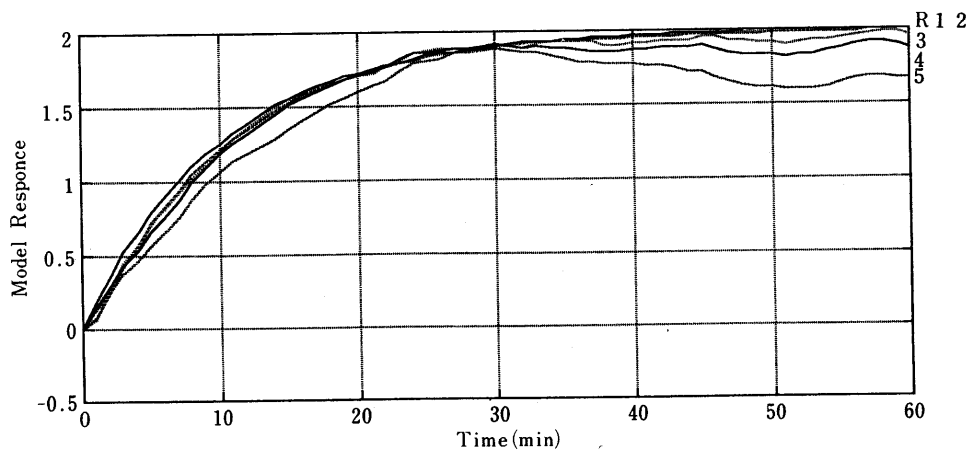
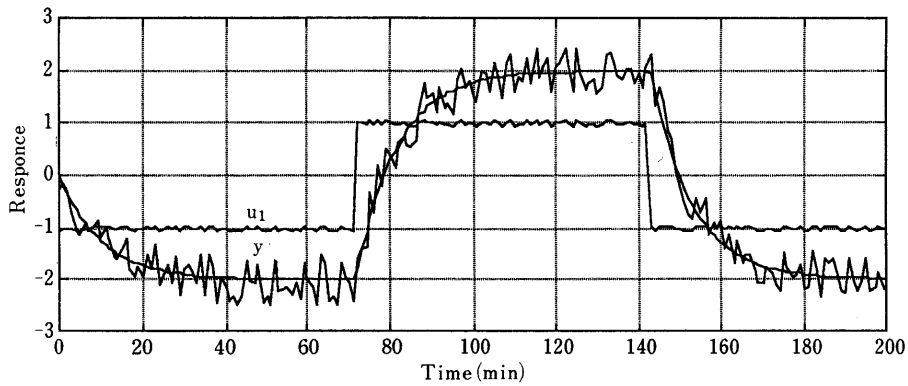


図7 入力雑音 d_1 の影響確認の同定結果 (単変数オープンループ)



雑音 e の大きさが0.5の例。

図8 出力雑音 e の影響確認の入出力の例 (単変数オープンループ)

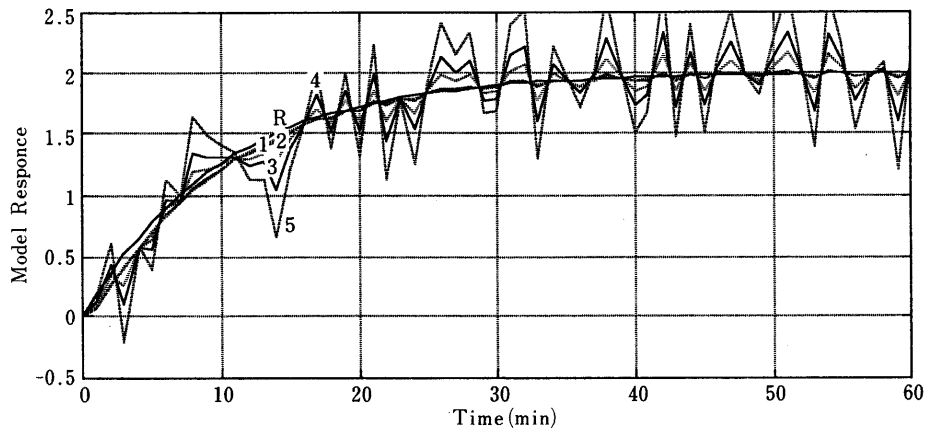


図9 出力雑音 e の影響確認の同定結果 (単変数オープンループ)

ていない。得られたモデルにスムージングを施すことで対応可能である。

5.2 単変数 (プロセスのみ) クローズドループ

コントローラを機能させ、外乱 (この場合は測定不可能)、雑音は e で代表して、クローズドループとして同定する。このとき、伝達関数 Y/U_1 は前報と同じく表1のようになる。小分類として以下の3ケースについて確認している。

- (1) 出力雑音 (外乱も含む) e の影響
- (2) 入力雑音 d_1 の影響
- (3) コントローラの目標値 r の影響

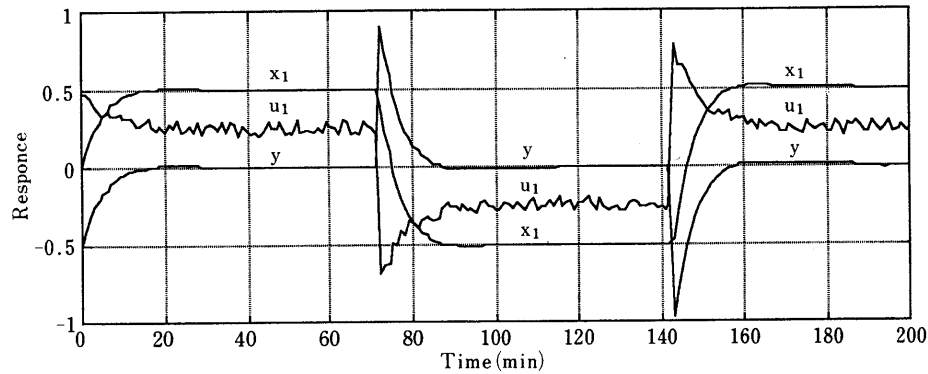
以下、それぞれについて同定結果と考察を示す。

5.2.1 出力雑音 (外乱も含む) e の影響

クローズドループにおいて、目標値 r は0で一定、入力雑音 d_1 のピークを0.05とし、出力雑音 (測定不可外乱も含む) e を加えその影響をみる。入出力信号の一例を図10に、同定されたステップ応答モデルの比較を図11にそれぞれ示す。

- 1 : 出力雑音 e がピーク0.5のホワイトノイズ
- 2 : 出力雑音 e がピーク1.0のホワイトノイズ
- 3 : 出力雑音 e が振幅0.5, 周期140分の方形波
- 4 : 出力雑音 e が振幅1.0, 周期140分の方形波
- 5 : 出力雑音 e が振幅1.0, 周期040分の方形波

表1に示したようにコントローラの逆が求まるケース (4) である。プロセスの特性は同定不可能であ



d_1 の振幅が0.05, 出力雑音 e が振幅1.0, 周期140分の方形波としたときの例。

図10 出力雑音 (外乱も含む) e の影響確認の入出力の例 (単変数クローズドループ)

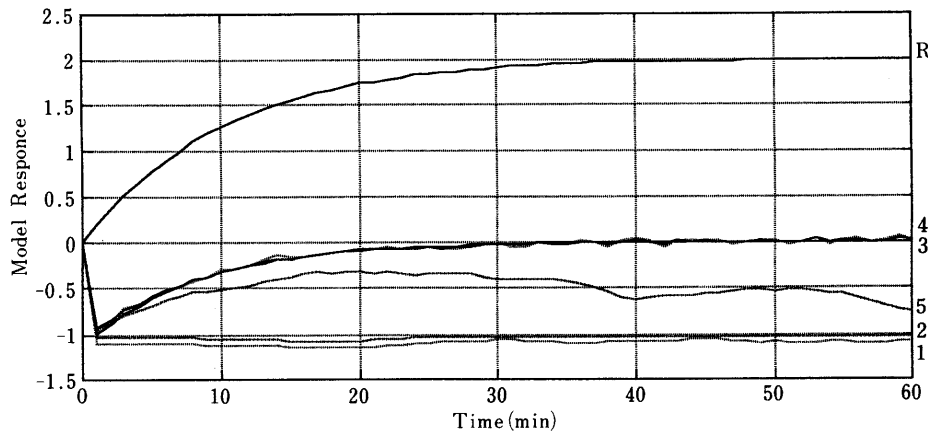


図11 出力雑音 (外乱も含む) e の影響確認の同定結果 (単変数クローズドループ)

ることが確認できる。出力雑音が方形波であり、かつ、周波数成分的にも適当なものであれば (3, 4), コントローラの逆が同定されていることが確認できる (コントローラの逆と 3, 4 はほとんど重なっており, 区別できない)。出力雑音ホワイトノイズである場合 (1, 2) は, 周波数成分の関係からコントローラの逆の初期の応答のみ同定される。これより, 入力側に有意な信号が無い場合には, 雑音, 測定不能外乱の性質によらず, プロセスの特性を同定することは不可能であることが確認できる。

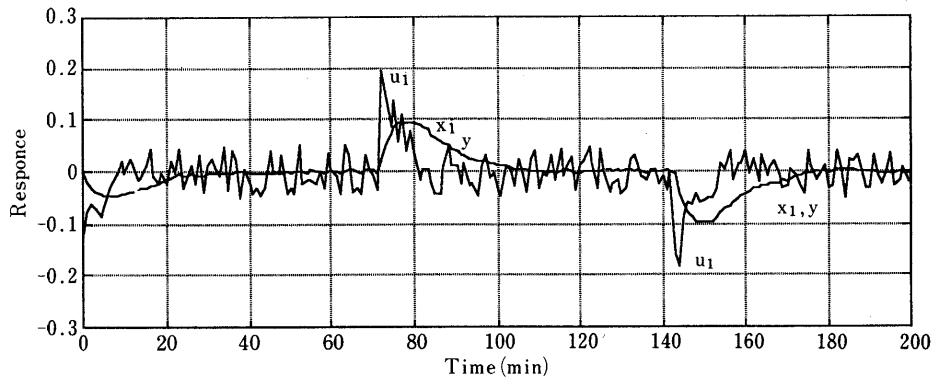
5.2.2 入力雑音 d_1 の影響

クローズドループにおいて, 目標値 r は 0 で一定, 出力雑音 (外乱も含む) e も 0 として, 入力雑音 d_1 を加えその影響をみる。表 1 のケース (6) に当た

る。入出力信号の一例を図12に, 同定されたステップ応答モデルの比較を図13にそれぞれ示す。

- 1 : 入力雑音がピーク0.5のホワイトノイズ
- 2 : 入力雑音がピーク1.0のホワイトノイズ
- 3 : 入力雑音がピーク0.05のホワイトノイズと振幅0.50, 周期140分の方形波の合成
- 4 : 入力雑音がピーク0.05のホワイトノイズと振幅0.10, 周期140分の方形波の合成
- 5 : 入力雑音がピーク0.05のホワイトノイズと振幅0.02, 周期140分の方形波の合成

表 1 に示したようにプロセスが求まるケース (6) である。入力雑音に有意な信号があれば, プロセスの特性が同定可能であることが確認できる (3, 4)。入力雑音の有意成分が, ホワイトノイズよりも小さい場合には, 同定が困難となる (5)。また, 入力雑



d_1 がピークが0.05のホワイトノイズと、振幅0.1、周期140分の方形波の合成としたときの例。

図12 入力雑音 d_1 の影響確認の入出力の例 (単変数クローズドループ)

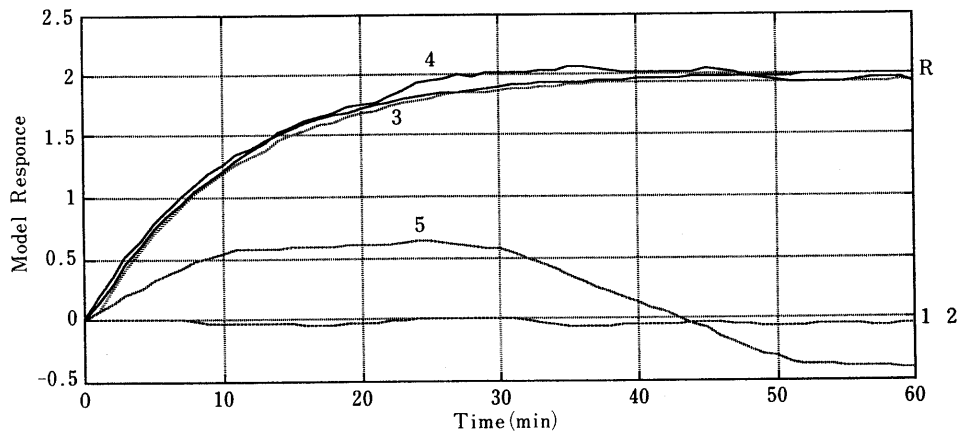


図13 入力雑音 d_1 の影響確認の同定結果 (単変数クローズドループ)

音がホワイトノイズのみの場合には、同定不可能であることも確認できる (1, 2)。

5.2.3 コントローラ的目標値 r の影響

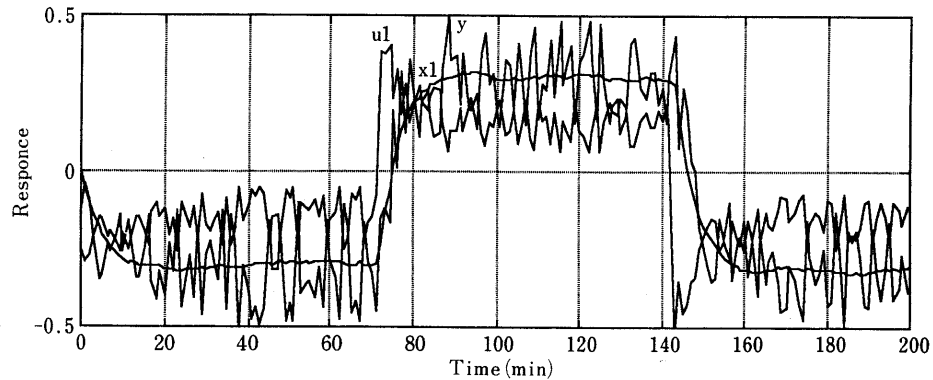
クローズドループにおいて、入力雑音 d_1 は0.05で一定、出力雑音 (外乱も含む) e も0として、目標値 r を変更してその影響をみる。なお、入力雑音 d_1 と出力雑音 e の影響も合わせてみる。表1のケース(7)とその拡張に当たる。目標値 r 、入力雑音 d_1 と出力雑音 e の組合せを表2に示す。入出力信号の一例を図14に、同定されたステップ応答モデルの比較を図15にそれぞれ示す。

表1に示したようにプロセスが求まるケース(7)である。理想に近い条件の1では、ほぼ真の特性に等しいモデルが得られている。また、2では、テス

表2 目標値 r 、入力雑音 d_1 と出力雑音 e の内容

ケース	入力雑音 d_1 のピーク	出力雑音 e のピーク	目標値 r の振幅	目標値 r の変化周期
1	0.1	0.0	0.30	140
2	0.1	0.0	0.30	040
3	0.1	0.0	0.03	140
4	0.1	0.2	0.30	140
5	0.1	0.5	0.30	140

ト信号として印加した場合には周期が短すぎた信号でも、目標値として与えると実用になることが確認できる。3は、入力雑音に比べて目標値の変化幅が小さい場合である。同定精度は低下しているが、信号強度の差から予想されるほど精度は悪化していない。4, 5は、出力雑音 e の影響をみたものである。出力雑音 e のピークが大きくなると、フィードバック



目標値 r の変更が振幅0.2、周期140分の方形波、入力雑音 d_1 がピークが0.1のホワイトノイズ、出力雑音 e がピークが0.1のホワイトノイズとしたときの例。

図14 コントローラの影響確認の入出力の例 (単変数クローズドループ)

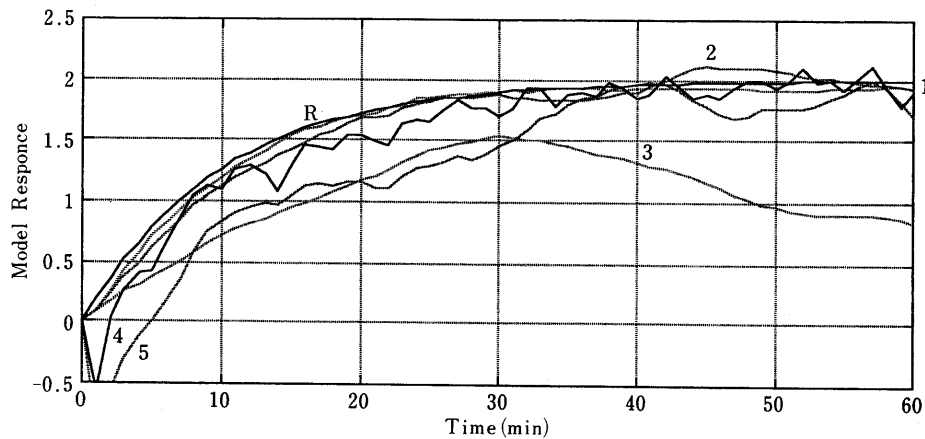


図15 コントローラの影響確認の同定結果 (単変数クローズドループ)

の影響が強く現れるため、モデルの初期に逆応答が観察される。この逆応答は、出力雑音 e のピークが大きくなるほど顕著となるが、定常ゲインに対する影響は小さいようである。なお、ここには示していないが、出力雑音 e のピークを0.1とした場合には、実用上は満足できるモデルが得られている。

これより、同定においては、コントローラの影響確認の目標値 r の変更は有効であることが確認できた。

5.3 多変数 (プロセスと外乱) クローズドループ

外乱を考慮 (測定可能) し、多変数クローズドループとして取り扱う。小分類として以下の3ケースについて確認している。

- (1) 外乱 x_2 (出力雑音 e も含む) の影響
- (2) 入力雑音 d_1 の影響
- (3) コントローラの影響確認

以下、それぞれについて同定結果と考察を示す。

5.3.1 外乱 x_2 (出力雑音 e も含む) の影響

外乱を考慮し、多変数クローズドループとして取り扱う。入力雑音 d_1 は0.1、コントローラ目標値 r も0で固定し、外乱 u_2 を加えその影響をみる。表1のケース(4)に対応する。外乱信号の内容を表3に示す。入出力信号の一例をプロセス側を図16に、外乱側を図17に、同定されたステップ応答モデルの比較をプロセス側を図18に、外乱側を図19にそれぞれ示す。

フィードバック制御下でのプロセスの動特性同定に関する考察 (その2)

プロセス側については、外乱の性質を変えても、求まるモデルに大きな差はない。単変数の場合と同様、プロセス自体への入力に有意なものでない限り、プロセスの特性の同定は不可能であることが確認できる。表1のケース(4)に示されるとおり、コントローラの逆(実線で示されている)の近傍に集まっていることが確認できる。

一方、外乱側については、オープンループとみな

せ、その観点でみると同定可能である信号が加えられているにもかかわらず、まったく同定できていない。加える信号の性質を変化させても改善されない。

コントローラにより作られる入力に有意な信号が含まれていなければ、プロセス外乱ともに同定は不可能である。

表3 外乱信号 u_2 の内容

ケース	外乱 u_{20} の形態	変化幅	変化期間/周期	外乱雑音 d_2 のピーク
1	ランプ	2.0	20~100分	0.5
2	ランプ	1.0	20~100分	0.5
3	方形波	1.0	080分	0.5
4	方形波	1.0	140分	0.5
5	方形波	0.3	140分	0.5

5.3.2 入力雑音 d_1 の影響

外乱を考慮し、多変数クローズドループとして取り扱う。コントローラ目標値 r は0で固定し、入力雑音 d_1 を加え、その影響をみる。併せて外乱 u_2 も変更し同定精度への影響を確認する。表1のケース(6)に対応する。入力雑音、外乱信号の内容を表4に示す。入出力信号の一例をプロセス側を図20に、外乱側を図21に、同定されたステップ応答モデルの比較をプロセス側を図22に、外乱側を図23にそれぞれ示す。

1については、プロセスの同定用信号としては十

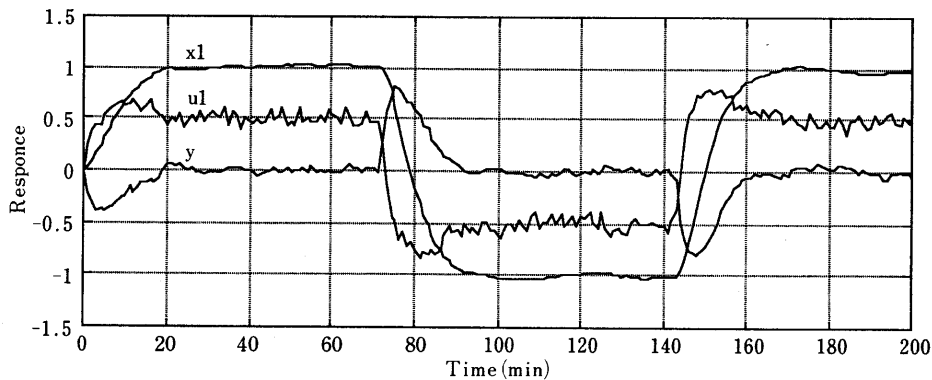


図16 外乱 x_2 の影響確認のプロセス側の入出力の例 (多変数クローズドループ)

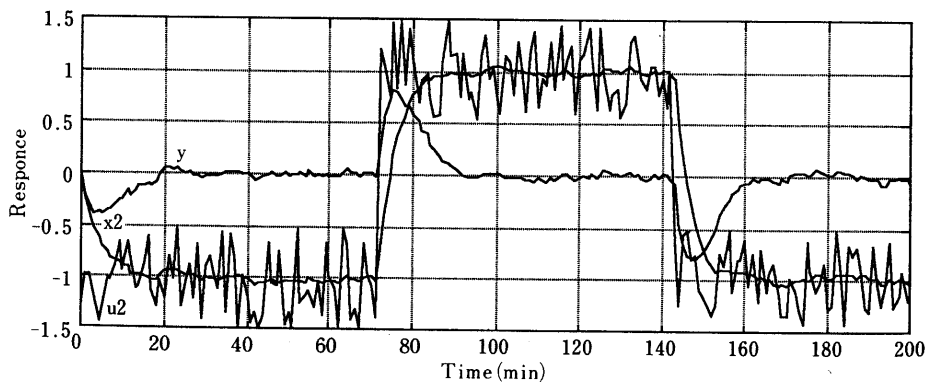


図17 外乱 x_2 の影響確認の外乱側の入出力の例 (多変数クローズドループ)

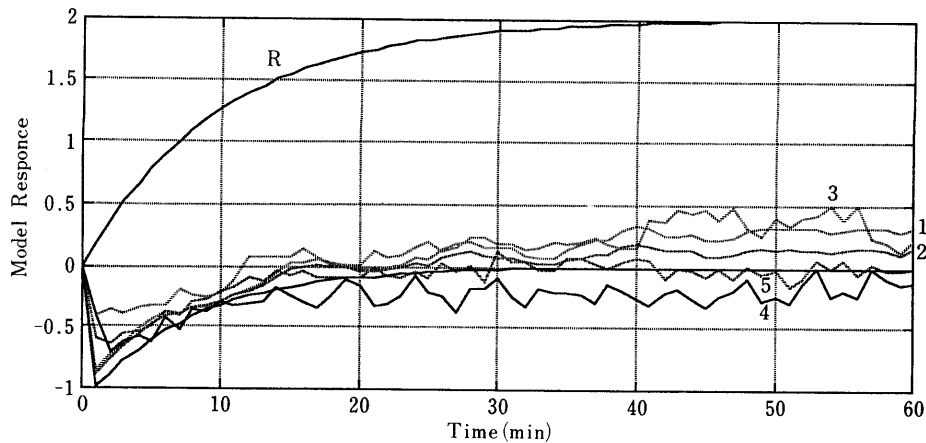


図18 外乱 x_2 の影響確認のプロセスの同定結果 (多変数クローズドループ)

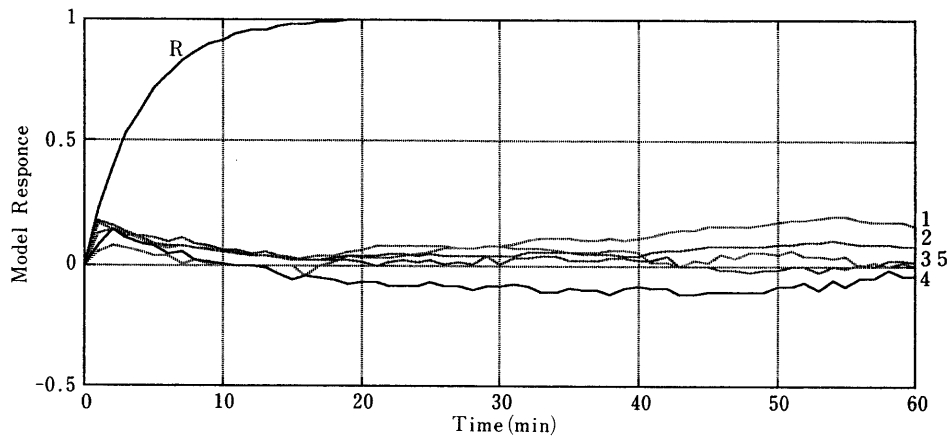


図19 外乱 x_2 の影響確認の外乱の同定結果 (多変数クローズドループ)

表 4 入力雑音, 外乱信号の内容

ケース	外乱 u_{20}			入力雑音 d_1	
	形態	変化幅	変化期間/周期	振幅	周期
1	ランプ	1.0	20~100分	1.0	140
2	ランプ	1.0	20~100分	0.3	140
3	方形波	1.0	080分	1.0	140
4	方形波	1.0	140分	1.0	140
5	方形波	1.0	125分	1.0	140
6	方形波	1.0	125分	0.3	140

分であるが、外乱側の信号が十分でないため、2つのモデルがうまく分離できなかったものである。2については、1に対してプロセス側の同定用信号の強度を弱めているため、さらに分離がうまくできなくなったものである。3については、個別(単変数

として扱った場合)の同定用信号としては十分なはずであるが、2つを同時に加えた際に、干渉や位相が悪い方向に働いたものとする。4については、2つの同定用信号の位相がそろってしまっていることが原因であろう。同定用信号としてM系列のようなランダムな信号が必要である理由がわかる。5については、上記の問題点がほぼ解消されているので、良い結果につながったものである。6については、プロセス側の同定用信号の強度が弱いことが読み取れる。5、6より、プロセス側の同定用信号の強度も重要な要因である(強ければよいというものでもない)ことがわかった。

また、3、5を比較すれば判るように、プロセス側と外乱側では、同定精度を上げるための条件が必ずしも一致しないことも確認できる。

フィードバック制御下でのプロセスの動特性同定に関する考察 (その2)

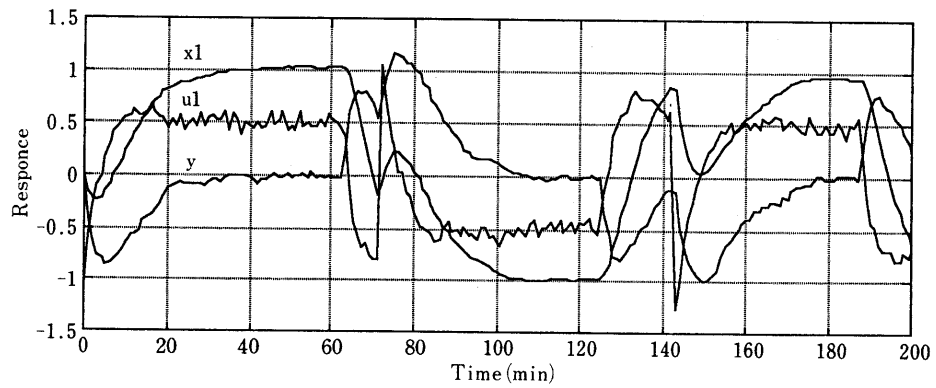


図20 入力雑音 d_1 の影響確認のプロセス側の入出力の例 (多変数クローズドループ)

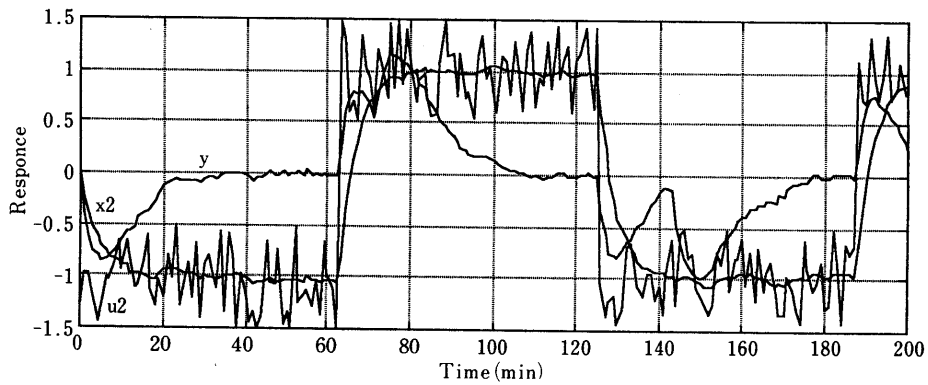


図21 入力雑音 d_1 の影響確認の外乱側の入出力の例 (多変数クローズドループ)

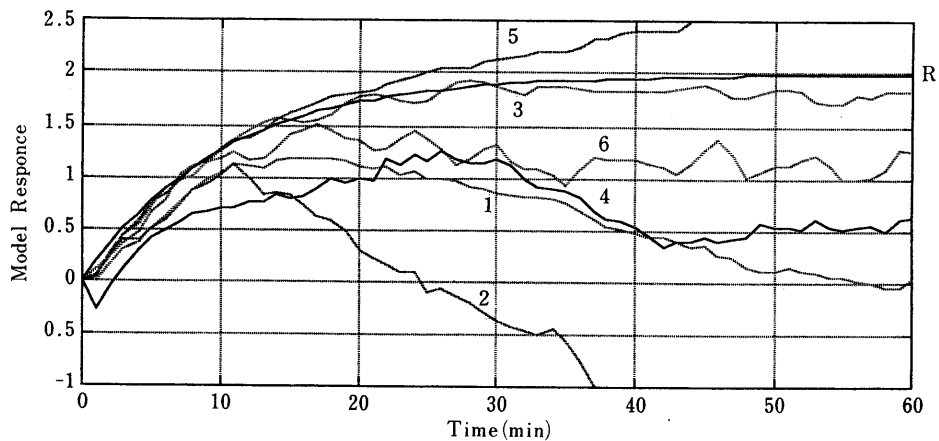


図22 入力雑音 d_1 の影響確認のプロセスの同定結果 (多変数クローズドループ)

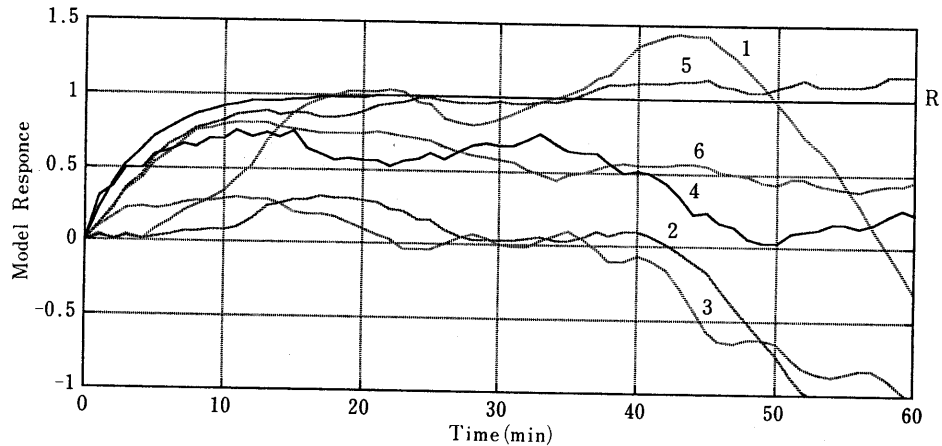


図23 入力雑音 d_1 の影響確認の外乱の同定結果 (多変数クローズドループ)

5.3.3 コントローラの目標値 r の影響

外乱を考慮し、多変数クローズドループとして取り扱う。入力雑音 d_1 は0.1で固定し、コントローラ目標値 r を変化させてその影響をみる。併せて、外乱側の信号も変更し、同定精度を確認する。表1のケース(7)に対応する。コントローラ目標値 r と外乱信号の内容を表5に示す。入出力信号の一例をプロセス側を図24に、外乱側を図25に、同定されたステップ応答モデルの比較をプロセス側を図26に、外乱側を図27にそれぞれ示す。

1については、プロセスの同定信号としては十分であるが、外乱側の信号が十分でないため、2つのモデルがうまく分離できなかったものである。2については、個別(単変数として扱った場合)の

表5 コントローラ目標値 r と外乱信号の内容

ケース	外乱 u_{20}			コントローラ目標値 r	
	形態	変化幅	変化期間/周期	振幅	周期
1	ランプ	1.0	20~100分	1.0	140
2	方形波	1.0	080分	1.0	140
3	方形波	1.0	140分	1.0	140
4	方形波	1.0	125分	1.0	140
5	方形波	1.0	125分	1.0	100
6	方形波	1.0	125分	0.3	140

同定用信号としては十分なはずであるが、2つを同時に加えた際に、干渉や位相が悪い方向に働いたものとする。3については、2つの同定用信号の位相がそろってしまっていることが原因であろう。

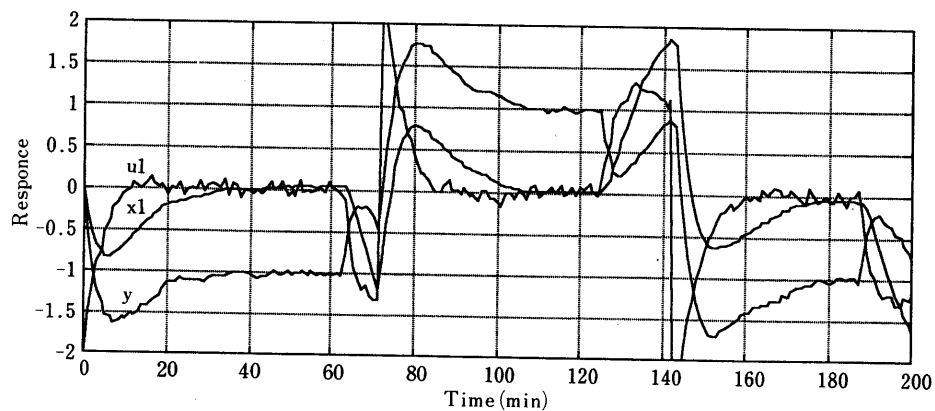


図24 コントローラの目標値 r の影響確認のプロセス側の入出力の例 (多変数クローズドループ)

フィードバック制御下でのプロセスの動特性同定に関する考察 (その2)

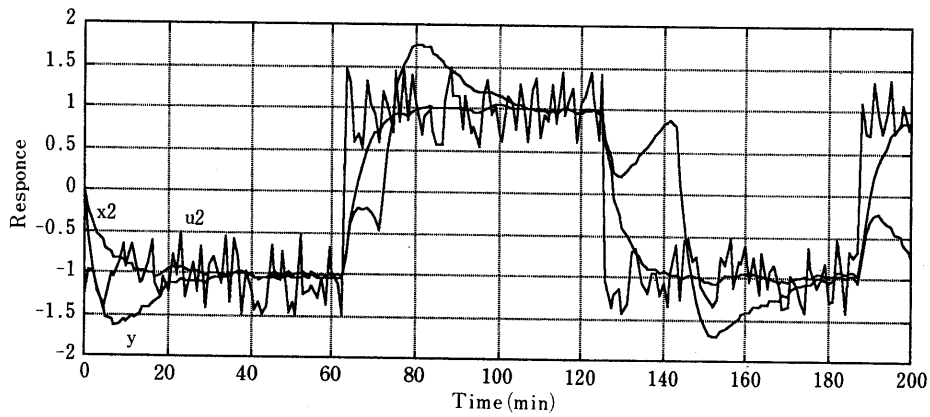


図25 コントローラの影響確認の外乱側の入出力の例 (多変数クローズドループ)

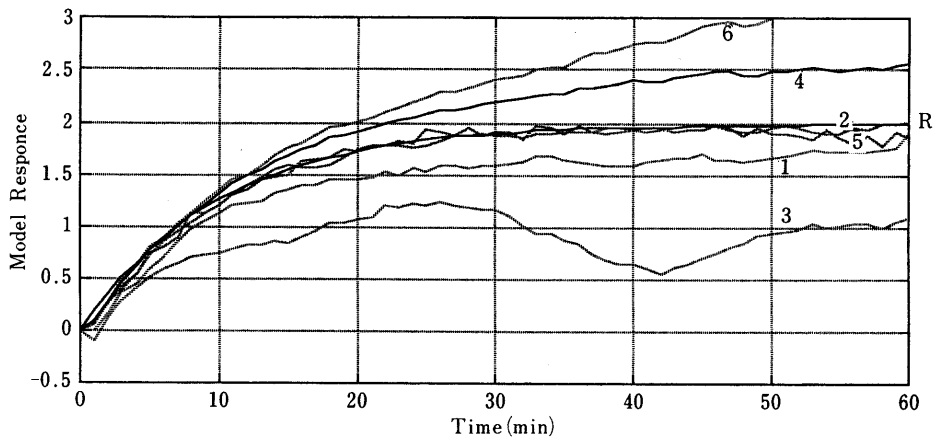


図26 コントローラの影響確認のプロセスの同定結果 (多変数クローズドループ)

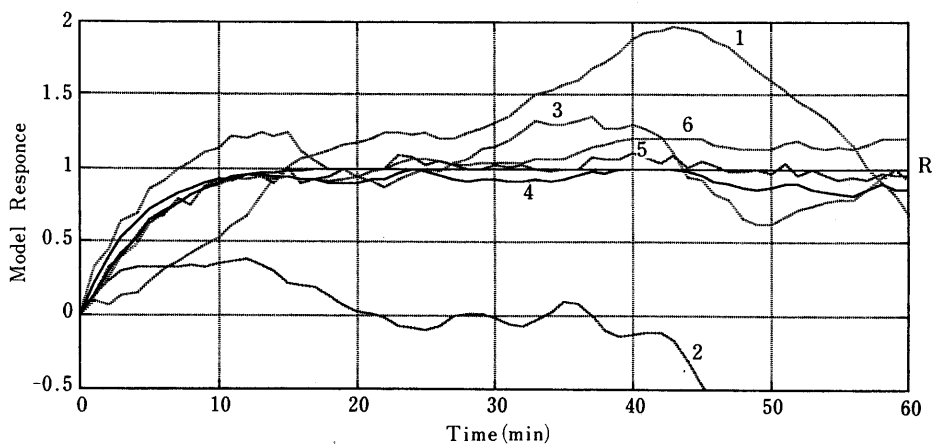


図27 コントローラの影響確認の外乱の同定結果 (多変数クローズドループ)

表 6 可同定の条件についてのまとめ

同 定 用 入 力 信 号	操 作 変 数 からの 応 答	外 乱 変 数 からの 応 答
入 力 対 象	コ ン ト ロ ー ラ 目 標 値	外 乱 自 体
信 号 波 形	ス テ ッ プ の 繰 返 し	同 左
繰 返 し 周 期	ラ ン ダ ム (M 系 列 な ど)	同 左
最 長 周 期	条 件 な し	整 定 時 間 以 上
振 幅	出 力 へ の 影 響 が 確 認 で き, か つ 雑 音 の ピ ー ク の 1/2 以 上	同 左

同定用信号としてM系列のようなランダムな信号が必要である理由がわかる。4については、上記の問題点がほぼ解消されているので、良い結果につながったものである。5については、目標値の変更周期を短くすることが同定精度に対して良い影響を及ぼしている。短すぎても問題と考えるが、今後詳細に検討したい。6については、プロセス側の同定用信号の強度が弱いことが読み取れる。

6 可同定の条件についてのまとめ

コントローラを機能させたまままで採取したデータ

を用いても、対象の動特性は同定可能であることが確認された。このときの条件について、表6にまとめる。

7 おわりに

入出力信号の条件の違いの同定精度への影響を代表的なケースを例に定量的に示した。条件と得られるモデルの関係のイメージは示せたと考えている。また、フィードバック制御下にあっても、同定は可能であることが確認された。これは、動特性テストというと、制御はマニュアルにするという従来の常識を覆すものである。外乱の存在下で運転状態の変更（つまり目標値の変更）が行われる場合には、運転データだけでも（目標値の変更や外乱に多少の条件はあるものの）動特性が同定可能である。また、動特性テストの実施に際しても、コントローラは機能させておけるため対象プロセスの安定性は保持できることを意味している。

また、今回は一般的な同定ツールを使用したがる、ステップ応答モデル同定のための専用ツール（DMIやSMC-Modelなど）で同様な検討を行い、性能を評価するというのも興味深い。



フィードバック制御下でのプロセスの 動特性同定に関する考察 (その3)

喰 田 秀 樹

要 旨

最近の制御手法は、対象の動特性モデルを用いることが一般的になってきている。動特性モデルを得るためには、操作変数を摂動させ制御変数の応答を観測するテストを行う。この際、通常用いられているフィードバック制御系を切り離して行う方法は、安定性やオペレータ負荷の点で不利となる。そのため、制御系を稼動させた状態のデータから動特性を同定する手法が検討されている^{1), 2)}。ここでは、その一つである、制御変数の目標値を摂動させるケースを実プラントに適用し、それが有効であることを確認した。また、閉ループでのテスト、同定の特徴についても考察した。

1 はじめに

最近の制御手法は、対象の動特性モデルを用いることが一般的になってきている。動特性モデルを得るためには、操作変数を摂動させ制御変数の応答を観測するテストを行う。この際、通常用いられているフィードバック制御系を切り離して行う方法は、安定性、オペレータ負荷の点で不利となる。そのため、フィードバック制御系を稼動させたままで、動特性テストを行うか、あるいは制御下の通常運転データを同定に使用することが望まれている。既報^{3), 4)}では、フィードバック制御下においてプロセスの動特性を正しく同定するための条件と、シミュレーションによる具体例を示した。本報では、実際のプラントのデータを用いて、同定のための条件を

検証した例を示す。

フィードバック制御下での可同定性の条件として、制御変数の目標値を摂動させればよいというものが得られている。実プラントにおいて、この条件下でデータの収集、同定を行い、その方法が実プラントでも有効であることを確認した。

なお、以下では簡素化のため、フィードバック制御が稼動している状態を閉ループ、稼動していない状態を開ループと呼ぶ。

2 対 象

検証の対象としてある蒸留塔を選んだ。図1にシンプルフローを示す。

通常の制御は、塔頂側が塔頂代表段温度と抜き出し流量のTC-FCのカスケード制御、塔底側が塔底代表段温度とリボイラスチーム流量のTC-FCのカスケード制御である。今回は、フィードバック制御の有り無しという違いを明確にするため、塔底側のリボイラスチーム流量を一定として塔頂系だけの単変数系のテストとした。

外乱としてはフィード流量をはじめ数種あるが、テスト期間中は極力一定に保った。

<執筆者紹介>

喰 田 秀 樹



Syokuda, Hideki

昭和62年入社
出光石油化学(株)
徳山工場
技術課
出身地：兵庫県

(3)

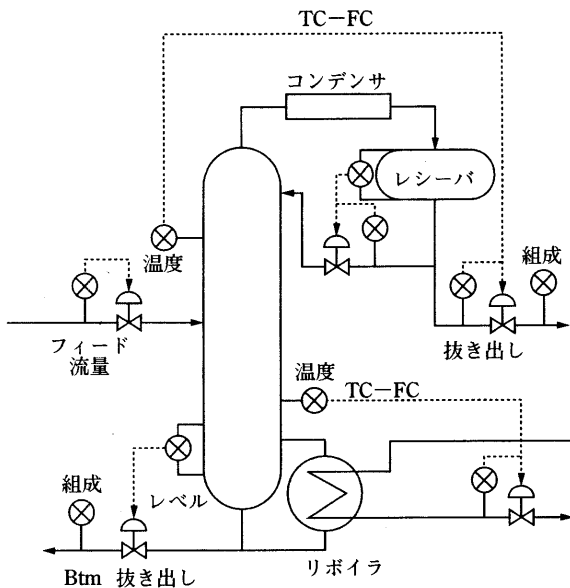


図1 対象装置シンプルフロー

3 問題設定

フィードバック制御下での可同定性条件の一つである「制御変数の目標値を摂動させる」の有効性を、実際のプラントで確認する。このため、ケースとして次の二つを設定し、得られた結果を比較検討する。同定の対象は、塔頂抜き出し流量と塔頂代表段温度ならびに塔頂Heavy Key濃度の動特性モデルである。塔頂Heavy Keyとは、塔頂にリークする重質分の代表である。塔頂Heavy Key濃度を追加した理由は、むだ時間の影響を観察するためである。塔

頂代表段温度と塔頂Heavy Key濃度はほとんど同じ挙動を示すが、分析計の動作の影響でむだ時間が付加されることと観測値が離散的になることの違いが生じる。この違いが、同定結果に与える影響を調べる。

3.1 開ループテスト (フィードバック制御なし)

塔頂代表段温度と抜き出し流量のTC-FCのカスケード制御を切り離し、開ループとする。塔頂抜き出し流量をステップ状に変化させて、塔頂代表の温度と塔頂Heavy Key濃度の変化を観測する。一般的なステップテストである。正しい動特性モデルが得られるケースである。

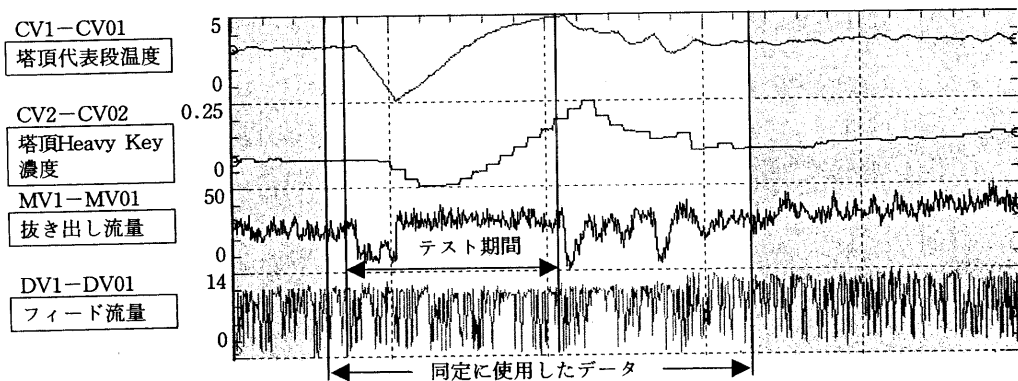
3.2 閉ループテスト (フィードバック制御あり)

塔頂代表段温度と抜き出し流量のTC-FCのカスケード制御を稼働させた閉ループのままとする。塔頂代表段温度の目標値をステップ状に変化させ、抜き出し流量、塔頂代表段温度、塔頂Heavy Key濃度の変化を観測する。閉ループ同定であるが、目標値を変化させているので同定可能となるケースである。

4 テスト結果

4.1 開ループテスト

図2に開ループでのステップテストのトレンドを示す。運転上の制約で、テスト期間が十分にとれて



テスト期間を含む24時間のトレンドである。抜き出し流量をステップ状に変化させている (PVをとっている)のでノイズ分の変動はある。塔頂代表段温度と塔頂Heavy Key濃度は抜き出し流量の変化に対して明確に応答している。また、両制御変数の挙動はむだ時間を除き似通っている。外乱のフィード流量の変動はノイズ成分のみである。テスト自体はあまり長時間継続できておらず、ややデータ不足である。そのため、同定には、テスト終了後の閉ループ部分も一部含めた。

図2 開ループでのステップテストのトレンド

おらず、データ点数としては十分とはいえない。操作変数の第1のステップ入力に対しては、制御変数が定常に達するまで待たれていない。第2のステップ入力に対しては、制御変数が目視で定常ととらえられるまで操作変数側は無変化に保っている。塔頂代表段温度と塔頂Heavy Key濃度は抜き出し流量の変化に対して明確に反応している。トレンドデータから、モデル長は6時間程度あること、ほぼ一次遅れとみなせる単純な特性であることが読み取れる。

4.2 閉ループテスト

図3に閉ループでのステップテストのトレンドを示す。他の変数も摂動させている一連のテストの一部である。トレンドの始めと終わりの部分で、フィード流量が若干変化しており、制御変数に影響を与えている。

こちらは、コントローラを稼働させた状態で、制御変数の目標値をステップ変化させたテストデータである（目標値のトレンドは省略している）。温度コントローラのチューニングは、通常使用されている状態のままで、今回のテストに際して再チューニングなどは行っていない。閉ループであるので、操作変数は温度コントローラの実出力（＝塔頂抜き出し流量）となっている。そのため、操作変数だけ見る

とインパルス応答テストのようにになっている。目標値変更のステップの振幅は一定であるが、間隔はランダムにしてある。テスト期間、ステップの回数とも十二分とはいえないが不足はしていないと考える。トレンドから目視で動特性を読み取ることは困難である。

5 同定結果

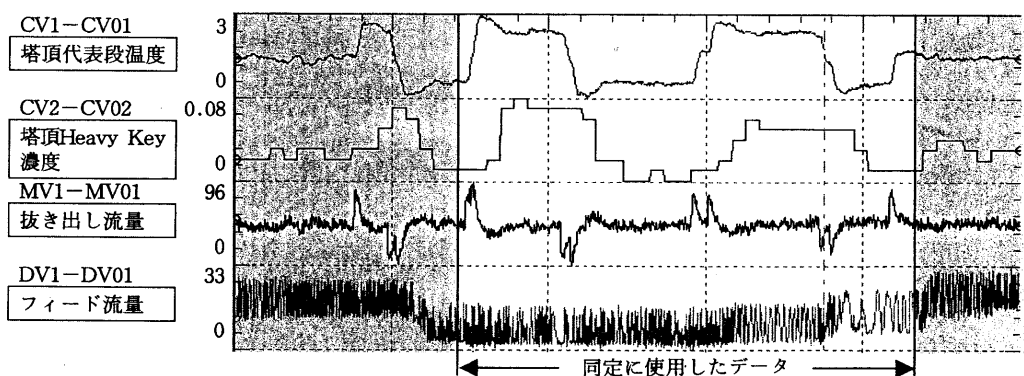
ここでの目的は、閉ループ同定でも制御変数の目標値を変化させておれば、プロセスの動特性が同定可能であることを実プロセスのデータで示すことである。したがって、モデル精度の追求には重きを置いておらず、またそのためのテクニックも用いていない。そのため、同定手順もシンプルなものとし、ツールにあるオプション類もほとんど使用していない。

また、両テストの間に少し期間が開いてしまったため、運転条件が一部異なっている。さらに、外乱は極力排除したが、若干の影響は出ている。同定自体は、外乱を考慮せずに行っている。

同定用ツールには、RMPCT（Honeywell社製）のオフラインツールを使用した。

5.1 開ループテスト

データ長が不十分のため、やむを得ずテスト終了



テスト期間を含む24時間のトレンドである。塔頂代表段温度と抜き出し流量が閉ループになった状態で、塔頂代表段温度の目標値をステップ状に変化させている（目標値はここには示していない）。抜き出し流量は、インパルス状に変化している（PVをとっているためノイズ分の変動はある）。塔頂代表段温度と塔頂Heavy Key濃度は抜き出し流量の変化に対して明確に反応している。また、両制御変数の挙動はむだ時間を除き似通っている。外乱のフィード流量が変動しているため、その部分のデータは同定対象から外している。

図3 閉ループでのステップテストのトレンド

後の閉ループのデータも含んで同定を行った。使用区間を図2に併せて示している。モデル長は、180, 240, 300, 360で試行し、360のものを選択した。本同定ツールはモデルを最終的に伝達関数で表現する。そのため、モデルのプロット上はモデル長が360より長くなる。

図4に得られたモデルを示す。トレンドの目視と比較して矛盾のないモデルが得られている（当然、現象論的に見ても矛盾はない）。濃度のモデルには逆応答が認められるが、これはむだ時間が処理しきれなかったものであろう。ほとんどの同定ツールは、大きなむだ時間が存在する場合、解析者がむだ時間を指定してやらないと、逆応答を出してくる。

図5に、制御変数の実測値とモデルによる推定値の比較を示す。実測値はほぼ重なっており、妥当なモデルが得られたと結論づけられる。詳細に見ると、塔頂代表段温度は、ゲインが若干不足気味である。また、塔頂Heavy Key濃度は、逆応答部分が災いしていることが観察できる。

5.2 閉ループテスト

トレンドの始めと終わりの部分で、フィード流量

が若干変化しているため、この部分は同定の対象から外した。使用区間を図3に併せて示している。モデル長は、180, 240, 300, 360で試行し、360のものを選択した。

図6に開ループテストと閉ループテストそれぞれから得られたモデルを示す。両テストとも大きな違いのないモデルが得られている。これによって、閉ループ同定でも制御変数の目標値を変化させておれば、プロセスの動特性が同定可能であることが、実プロセスのデータにおいて確認できた。また、濃度の方はむだ時間を陽に指定しなかったにもかかわらず、逆応答ではなくむだ時間として同定されている。データ量の違いによるものと推定されるが、閉ループでのテストであるからデータ量を増やせたものである。

塔頂代表段温度に関しては、表現上で差異は出ているものの、実質的な違いはないモデルが得られている。

塔頂Heavy Key濃度に関しては、逆応答の有無とゲインが異なっている。開ループの方はガスクロの遅れ分のむだ時間を処理しきれずに、逆応答として同定している。この原因として、テスト期間が短

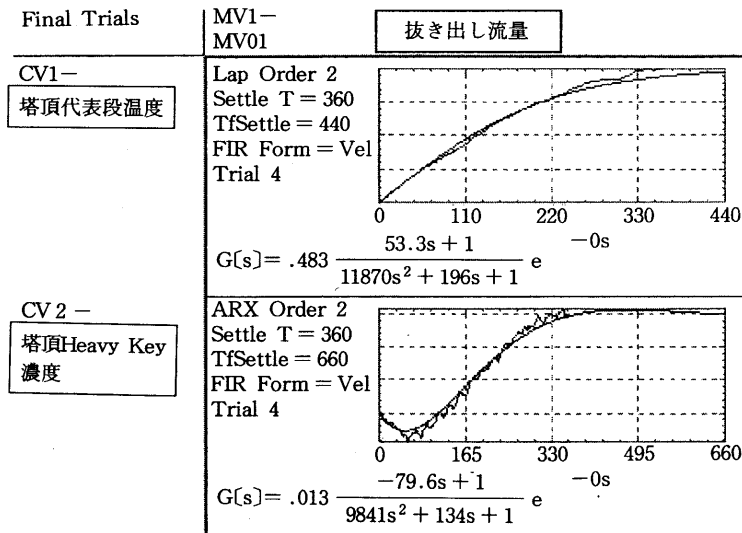
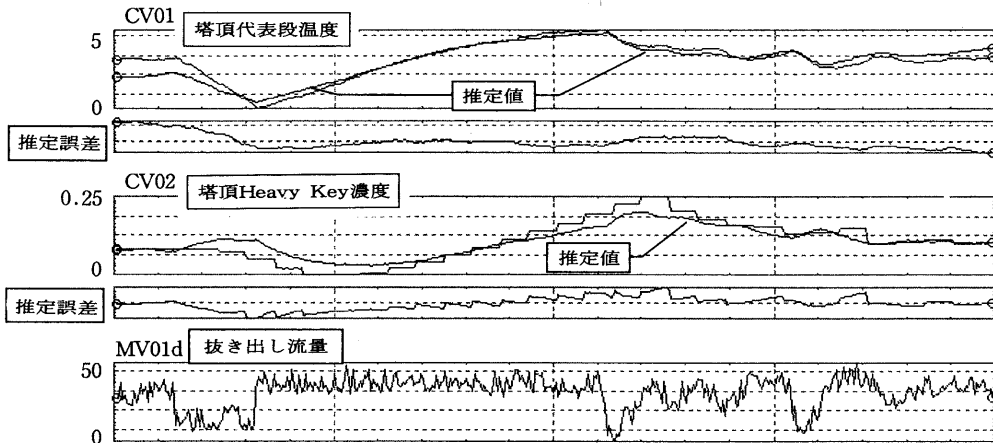


図2から、6時間程度の整定時間があることが見て取れるが、それと矛盾のないモデルとなっている。塔頂Heavy Key濃度の方はガスクロの遅れ分のむだ時間を処理しきれずに、逆応答として同定している。

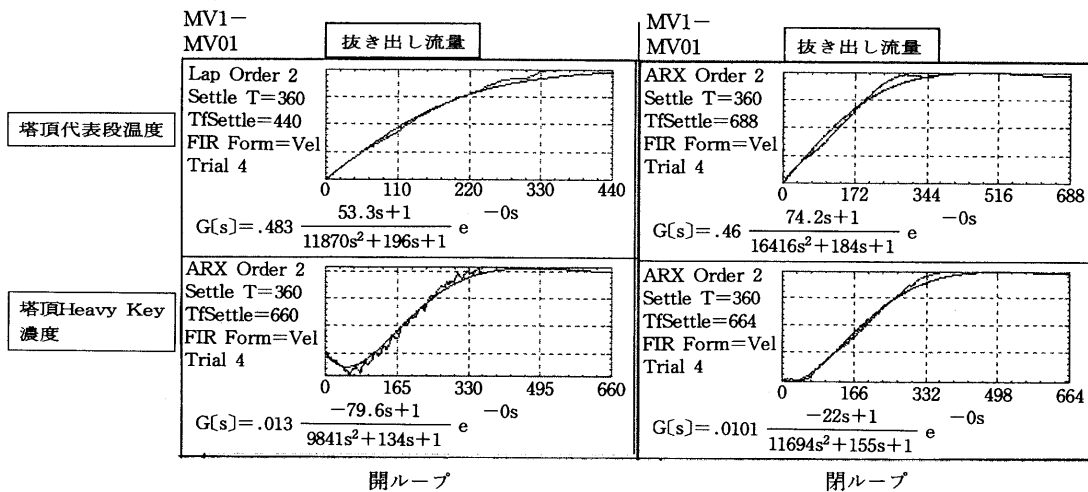
図4 開ループテストによるデータから得られたモデル

フィードバック制御下でのプロセスの動特性同定に関する考察 (その3)



塔頂代表段温度は、ゲインが若干不足気味である。また、塔頂Heavy Key濃度は、逆応答部分が災いしていることが観察できる。

図5 制御変数の実測値とモデルによる推定値の比較 (開ループテスト)



塔頂代表段温度に関しては、表現上で差異は出ているものの、実質的な違いはないモデルが得られている。塔頂Heavy Key濃度に関して、逆応答の有無とゲインが異なっている。

図6 両テストによるデータから得られたモデルの比較

かったことによるデータの不足、それを補うために制御部分まで含めたことによるコントローラ特性の影響が考えられる。塔頂代表段温度との比較では、データ量そのものは同じであるが、むだ時間を含む分、塔頂Heavy Key濃度の方が相対的に不足となったものであろう。閉ループの方は、むだ時間はうまく処理できている。厳密に見ると小さな逆応答があるが、無視しうるレベルである。こちらは、ゲイン

が低めに出ている。原因としては、目標値のステップ変化の周期が、モデルの長さより短いものばかりであったことが考えられる。

図7に、制御変数の実測値とモデルによる推定値の比較を示す。実測値と推定値はほぼ重なっており、妥当なモデルが得られたと結論づけられる。詳細に見ると、塔頂代表段温度は、後ろ1/4でゲインが若干不足気味である。しかし、これは外乱の影響に

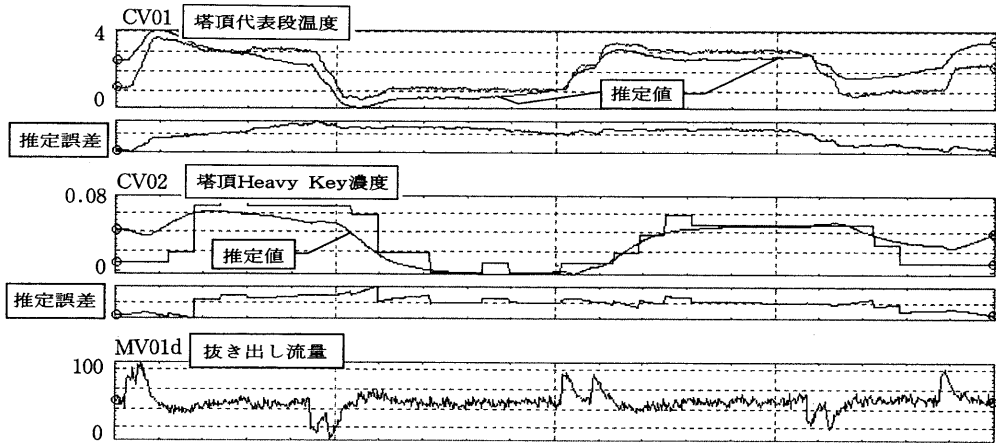
(7)

よるところが大きい。また、塔頂Heavy Key濃度は、開ループからのモデルのような逆応答がないため動きはスムーズであるが、ゲインが若干不足気味である。

5.3 モデルの比較

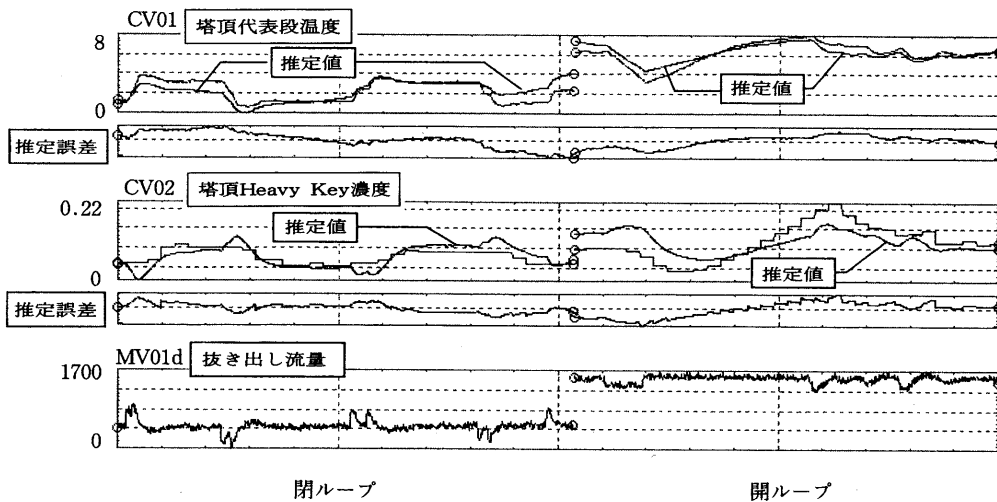
両モデルの違いをトレンド上で比較する。

図8は、開ループテストで得られたモデルを両方のデータに適用したものである。塔頂代表段温度は、



塔頂代表段温度は、後ろ1/4でゲインが若干不足気味である。しかし、これは外乱の影響によるところが大きい。また、塔頂Heavy Key濃度は、開ループからのモデルのような逆応答がないため動きはスムーズであるが、ゲインが若干不足気味である。

図7 制御変数の実測値とモデルによる推定値の比較 (閉ループテスト)



塔頂代表段温度は、どちらのデータに対してもゲインが若干不足気味であるが、おおむね挙動を表現している。閉ループの、後ろ1/4の大きなずれは、モデルを変えても改善されない。外部要因であることの裏付けにもなる。

塔頂Heavy Key濃度は、開ループのデータにも逆応答の悪影響が出ている。また、開ループデータに対しては、ゲインがほぼ適正であるが、閉ループデータに対してはゲインが若干不足気味である。

図8 開ループテストによるデータから得られたモデルを両方のデータに適用したものの

どちらのデータに対してもゲインが若干不足気味であるが、おおむね挙動を表現している。閉ループ側の、後ろ1/4の大きなずれは、モデルを変えても改善されない。外部要因であることの裏付けにもなる。また、塔頂Heavy Key濃度は、開ループ側のデータにも逆応答の悪影響が出ている。また、開ループ側データに対しては、ゲインがほぼ適正であるが、閉ループ側データに対してはゲインが若干不足気味である。

図9は、閉ループテストで得られたモデルを両方のデータに適用したものである。塔頂代表段温度は、どちらのデータに対してもほぼ適正に挙動を表現している。また、塔頂Heavy Key濃度は、開ループ側のデータ自体に対してもゲインが低めである。開ループ側ではこれが助長されている。閉ループ側のモデルには逆応答が含まれていないので、この点は改善されている。

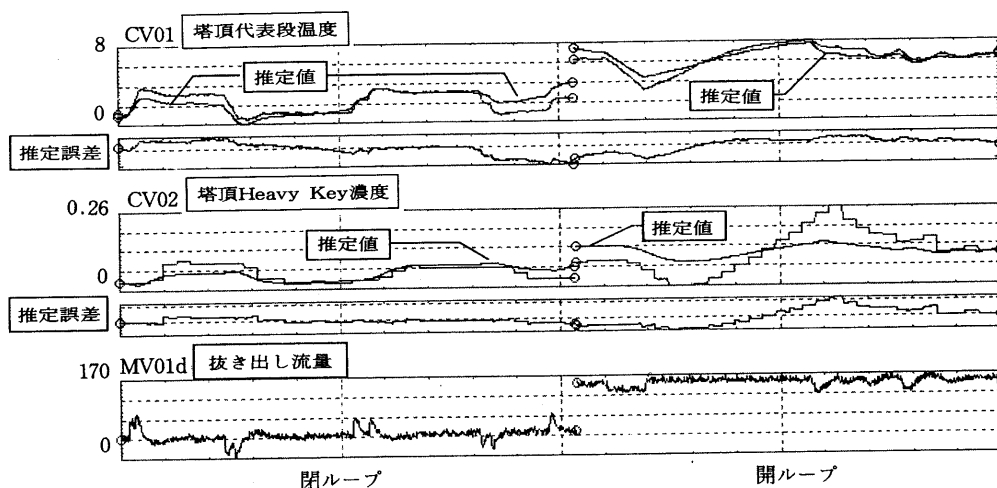
6 考 察

閉ループ、開ループ両ケースで、大きな差異のないモデルを得ることができた。また、これらのモデルは、現象論的にも矛盾はなく、実測値と推定値の比較でも、満足できるものであった。このことより、

閉ループ同定における可同定性の条件の一つである「制御変数の目標値を摂動させる」が正しいことを、実プロセスで確認できたといえる。理論、シミュレーションで可能なことが示されていたが、実データで確認できたことの成果は大きい。また、定常ゲインの精度を犠牲にすれば、目標値のステップ変更の周期がモデルの長さより短くても良いことも判った。

閉ループ、開ループ両ケースで、得られたモデルに若干の差が認められる。しかしながら、この差はループの開閉によるものではなく、それ以外の条件、データ量、外乱の有無、大きさなどに起因するものと考えられる。どちらの場合とも、データの長さなどの条件が同じであれば、得られるモデルの精度は同等と推定できる。しかし、全般的に見ると、閉ループテストには以下のような優位性がある。

- (1) 制御系が機能しているので、プラントの安定性は損なわれない。オペレータの負荷も下がる。
- (2) 制御変数の変化幅は目標値という形で既知であるので、設定が容易である。また、開ループテストでは、制御変数が管理値を超えないように操作変数の摂動幅を事前に明らかにしておく検討が必要である。閉ループでは、制御変数の摂動幅を設



塔頂代表段温度は、どちらのデータに対してもほぼ適正に挙動を表現している。また、塔頂Heavy Key濃度は、開ループのデータ自体に対してもゲインが低めである。開ループ側ではこれが助長されている。閉ループのモデルには逆応答が含まれていないので、この点は改善されている。

図9 閉ループテストによるデータから得られたモデルを両方のデータに適用したものの

定するため、事前検討は不要となる。

- (3) 定常ゲインの補正を前提とすれば、ステップを加える周期を短くできる。結果として、テスト期間が同じであれば、より多くのステップを加えることができ、情報量を増やせる。
- (4) プラントの安定性が保たれているため、テスト期間をより長くすることができる。結果として、モデルの精度向上にも寄与する。

7 おわりに

フィードバック制御下（閉ループ）であっても、制御変数の目標値を摂動させるテストを行うことによって、プロセスの動特性が正しく同定できることを、実際のプロセスのデータにより示した。また、閉

ループで同定を行う場合の特徴についても言及した。

今後は、閉ループ同定の特徴をより明確にするとともに、理論的な裏付けを行いたい。また、多変数の場合における可同定性の条件（現場で使える具体的な内容の）についても明確にしたい。

参考文献

- 1) 大野 弘, “プロセスデータの解析と制御”, 化学工学会第60年回研究予稿集B110 (1995)
- 2) 加納 学, “フィードバック制御下でのモデリング”, 化学工学会関西支部セミナープロセスデータの解析と応用テキスト (1996), P.22
- 3) 喰田秀樹, 本誌, 40, (2), 71 (1997)
- 4) 喰田秀樹, 本誌, 40, (3), 82 (1997)

