

プラント制御性能診断技術の 開発と適用

住友化学(株) 生産技術センター
久下本 秀 和

Technology of Controller Performance Monitoring and Diagnosis in Chemical Plants

Sumitomo Chemical Co., Ltd.
Process & Production Technology Center
Hidekazu KUGEMOTO

The controller performance monitoring technique, which is based on the principle of minimum variance control, can evaluate the performance of many PID controllers in a plant at a time and is applicable in online. It is important that the origins of failure are analyzed for lower performance controllers. One of them is valve failure and is identified by the proposed methods. In this article, the technology of controller performance monitoring and diagnosis is mentioned and its applications in practical chemical plants are shown.

はじめに

近年、プラント全体のコントローラの性能を評価・監視する技術が開発され、大規模な商用プラントにも適用され始めている。化学プラントには多数のPIDコントローラがあり、これらの性能を改善、維持できる方法として注目されている。これまで、コントローラの状態を把握するため特別な信号を操作量に加える手法が数多く提案されていたが、実プラントに変動を与えなければならず広く普及しなかった。最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価法¹⁾は、このような特別な信号や操作量のデータを必要とせず、制御量のデータだけからコントローラの性能を評価することができ、コントローラの構造にも依存しないなど、実適用において好都合な特徴を持っている。また、比較的簡単な計算で評価できることから、プラント全体のコントローラをオンラインで監視することも可能である。

このように制御性能評価法は、プラント全体の中から性能が悪いコントローラや、経時的に性能が低下しているコントローラを抽出するのに有効な手段であるが、その原因まで診断することはできない。制御性能を改善するためには原因を正しく把握することが必要で、その診断技術が求められている。制御性能低下の原因として、コントローラのチューニ

ング不良やバルブ固着に起因する動作不良、機器の能力不足、相互干渉などがあるが、これらのうち、バルブ固着に起因するバルブ不具合を検出する技術を産学共同で開発した²⁾。

本稿では、制御性能評価法およびバルブ不具合検出法について概説し、これらの方法を使った弊社の取り組みについて紹介する。

制御性能評価法

最小分散制御をベンチマークとする方法はHarrisによって提案され、制御量だけからコントローラの性能を定量的に評価できる手法として発展してきた。この手法を使ってプラント全体のPIDコントローラの性能を評価することができ、制御改善活動やプラントの運転監視にも役立てることができる。

1. 最小分散制御

コントローラを C 、プロセスを P 、外乱の伝達関数を D として、離散時間システムの制御量 y と操作量 u の関係はFig.1において次のように表されるものとする。

$$y(k) = P(q^{-1})u(k) + D(q^{-1})a(k) \quad (1)$$

$$u(k) = C(q^{-1})(r(k) - y(k)) \quad (2)$$

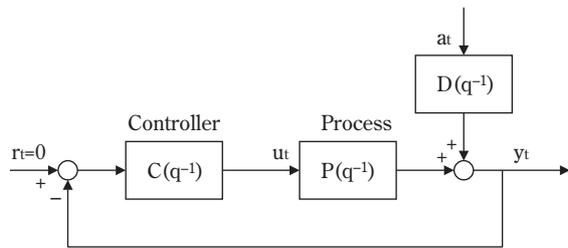


Fig. 1 Block diagram

ここで、 a は白色ノイズ、 r は設定値を表している。プロセスに $d-1$ ステップのむだ時間があるとすると、外乱伝達関数をむだ時間部とむだ時間以降に分割して(3)式が得られる。

$$D(q^{-1}) = F(q^{-1}) + q^{-d}G(q^{-1}) \quad (3)$$

q^{-d} は遅延演算子といい、 d ステップの遅れを表している。制御量 y は、設定値変更がなければ、次式のように表される。

$$\begin{aligned} y(k) &= \frac{D}{1+CP} a(k) \\ &= \frac{F + q^{-d}G}{1 + q^{-d}C\tilde{P}} \\ &= \left\{ F + q^{-d} \frac{G - FC\tilde{P}}{1 + q^{-d}C\tilde{P}} \right\} a(k) \\ &= Fa(k) + Ha(k-d) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 \tilde{P} はむだ時間のないプロセスの伝達関数を表している。コントローラを含むプロセス全体をブラックボックスとして捉えたと、(4)式は、むだ時間内に白色ノイズが外乱伝達関数を通して直接プロセスに与える影響 $Fa(k)$ と、むだ時間以降にフィードバックループを通して与えられる影響 $Ha(k-d)$ とに分けることができる。 $Fa(k)$ と $Ha(k-d)$ は互いに独立であるため、これらの分散には次のような関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \text{Var}\{y(k)\} &= \text{Var}\{Fa(k) + Ha(k-d)\} \\ &= \text{Var}\{Fa(k)\} + \text{Var}\{Ha(k-d)\} \\ &\geq \text{Var}\{Fa(k)\} = MV^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Var および y^2 は分散を表し、 MV^2 を最小分散と呼んでいる。プロセスにむだ時間があると、むだ時間内はいかなるコントローラも影響を与えることができないため、制御量 y の分散は最小分散 MV^2 よりも必ず大きくなる。(4)式の第2項 $Ha(k-d)$ は、むだ時間以降の影響を表しており、これは制御を働かせて小さくできる可能性がある。ここで、むだ時間以降の振れをゼロ、すなわち $\text{Var}\{Ha(k-d)\}=0$ とするような理想

的な制御を考えると、制御量 y の分散は最小分散と等しくなり、これを実現する制御は最小分散制御と呼ばれる。

2. 制御性能評価指標

最小分散制御で制御した場合の分散は MV^2 であり、制御量 y の分散 y^2 との比を取ることでコントローラの性能を評価することができる。

$$(d-1) = \frac{MV^2(d-1)}{y^2} \quad (6)$$

これは、最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価法と呼ばれ、を制御性能指標と呼んでいる。制御性能指標は0~1の範囲の値となり、1に近ければ制御性能が良く、0に近ければ制御性能が悪いと判断される。

さて、実際に制御性能指標を求めるとして、FCOR (Filtering and Correlation Analysis Algorithm) 法³⁾と呼ばれる方法があり、制御量 y と白色ノイズ a の相互相関関数 y_a からこれを求めることができる。

$$\hat{y}_a(i) = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N y_t a_{t-i}}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N y_t^2} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N a_t^2}} \quad (7)$$

$$(d-1) = \sum_{i=0}^{d-2} \hat{y}_a^2(i) \quad (8)$$

ここで、 N は時系列データの個数を表している。

実際には、プロセスに影響を与えているとされる白色ノイズは計測されないため、時系列モデルである自己回帰移動平均(ARMA)モデルを使って、制御量 y から白色ノイズ a を推定する。ARMAモデルは、プロセスが白色ノイズで駆動されているという前提の下でプロセスの動特性をモデル化するものであり、同時に、観測されていない白色ノイズ a も算出することができる。制御量 y と白色ノイズ a を使って、(7)式、(8)式から制御性能指標は計算される。

バルブ不具合検出法

制御性能が低下する原因としてチューニング不良やバルブ不具合などがあるが、筆者の経験では、バルブ不具合は一般的なプラントで10%弱、多いプラントでは38%もあった。バルブ不具合の直接的な原因として、バルブ本体のグリース切れ、流体の漏出による固着、バルブポジションの不良、メカ的なヒステリシスなどが挙げられる。

PIDチューニング不良とバルブ不具合は共に、制御

量の周期的な振動を引き起こす場合が多いが、実改善においては、どちらが原因であるか見極めることが大切である。チューニング不良であれば再チューニングですみ、バルブ不具合であればバルブを取り外して修理する必要がある。もし、バルブ不具合を誤って再チューニングで対処すると、プラントに大きな変動を与えてしまうおそれがあり、これらを事前に的確に診断できる技術が求められる。

1. バルブ固着現象のモデル化

広く用いられている空気圧式調節弁 (Fig.2) を対象に、バルブ固着時の挙動を見てみる。空気圧式調節弁は、主に操作量に対応した駆動用空気圧、アクチュエータ部のスプリング弾性力、グランドパッキン部に生ずる摩擦力の3つの力が作用して動作している。摩擦力は、グランドパッキンの過度の締め付けや流体の漏出、固化などで増大し、バルブの動きを阻害する。この不連続な動作はバルブスティクションと呼ばれる。

バルブ固着現象を表したモデルとして、バルブに働く力学的な作用を運動方程式で表した詳細モデル^{4), 5)}や、操作量とバルブ開度の関係に着目した簡易モデル^{6), 7)}などが提案されている。

バルブ固着現象を、コントローラから出力される操作量と実際のバルブ開度の関係で示すと、Fig.3のような動作となる。破線は摩擦のない理想的な状態を示している。初期状態を点(a)として、点(a)から徐々に操作量を増加させると、点(b)までの区間は静止摩擦が働き、バルブ開度は変化しない。最大静止摩擦 f_s を越える操作量を加えると、静止摩擦は動摩擦 f_D に遷移し、点(b)から点(c)へのスリップジャンプ J を生じる。

$$J = f_s - f_D \tag{9}$$

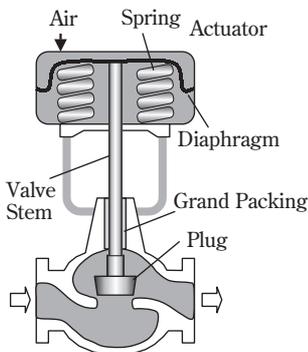


Fig. 2 Cross section diagram of control valve²⁾

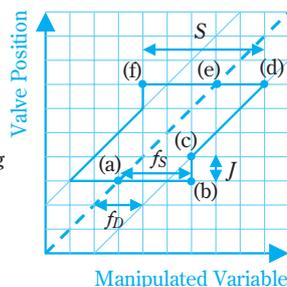


Fig. 3 Manipulated variable and valve position plot²⁾

その後は滑らかに点(d)に向けて推移する。次に、点(d)から徐々に操作量を減少させると、動摩擦 f_D 分を下げた点(e)でストレスのない状態に戻る。引き続き静止摩擦が働くため、点(f)までバルブ開度は変化しない。バルブが動かない不動区間は動摩擦 f_D と最大静止摩擦 f_s の和となり、これはスティック幅 S と呼ばれる。

$$S = f_s + f_D \tag{10}$$

この挙動を表したモデルのフローチャートはFig.4に示される。 u は操作量、 y はバルブ開度とし、 u_s はバルブが静止、あるいは動作方向が変化した時点の操作量、 stp はバルブの静止状態、 d は動摩擦が働く方向を表している。

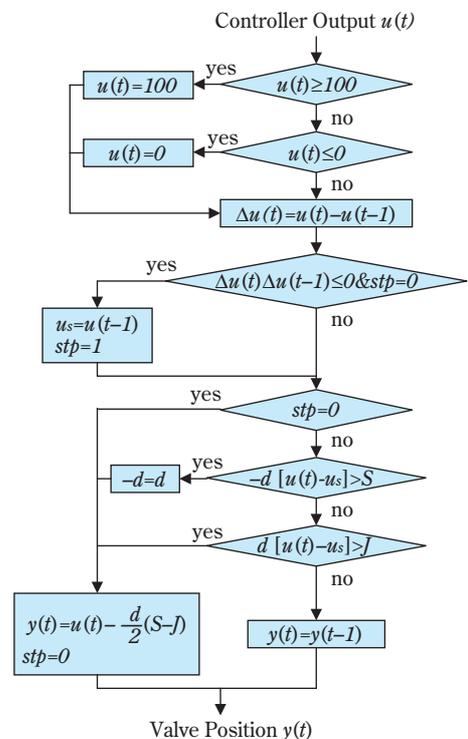


Fig. 4 Valve stiction model²⁾

2. バルブ不具合検出法

バルブ不具合検出法は2つに大別される。一つはフィールドバス計器やインテリジェントバルブポジションナに付属した診断機能を利用するもので、操作量や制御量の他に機器の詳細情報を使って高速に診断できる特徴をもつ。もう一方は、プラント運転データを利用するもので、新たなハードを追加する必要がないといった利点がある。後者のプラント運転データを利用する方法は欧米で熱心に研究されており、すでにさまざまな方法が提案されている。例えば、

本分野の開拓者であるHorchは、相互相関関数から得られる位相遅れの情報を使って検出する方法や、閉ループ時にバルブ開度が矩形波に近い挙動を示す性質を利用した検出法を提案している⁸⁾。Choudhuryらは、高次統計量を利用して非線形性を調べることでバルブの不具合を検出する方法を提案している⁶⁾。Thornhillらは、別の視点から、プラントワイドに伝播する周期データを解析してバルブ不具合箇所を特定する方法を提案している⁹⁾。国内では、総田らがバルブ開度から求められる弁軸速度分布を用いた検出法を提案している⁴⁾。バルブ不具合が原因で制御量が周期的に振動する場合が多いため、ほとんどの手法が周期性を利用した検出法である。

① 周波数解析法¹⁰⁾

制御量のデータの周期性を利用した方法では、チューニング不良とバルブ不具合を正しく識別できることが重要である。チューニング不良は正弦波に近い挙動を示すのに対し、バルブ不具合はバルブ開度、あるいは流量が矩形波に近い挙動を示す特徴がある。これらを同時に、かつ、その違い診断するために周波数解析を用いることができる。

正弦波、矩形波、白色ノイズのパワースペクトルをFig.5に示す。チューニング不良を模した正弦波のパワースペクトルには周期性を表すピークが1つ、バルブ不具合を模した矩形波には基本波の他に高調波のピークがいくつか見られる。一方、正常なデータを模した白色ノイズには目立ったピークは見られない。ここで、矩形波のパワースペクトルに見られる高調波のピークは、(11)式の矩形波のフーリエ級数展開からも明らかのように基本波の奇数倍周期毎に現れ、基本波に対してパワーが $1/(2n+1)^2$ 倍ずつ減衰する。

$$x(t) = \frac{4}{\pi} \left(\sin t + \frac{1}{3} \sin 3t + \frac{1}{5} \sin 5t + \dots \right) \quad (11)$$

$$P_x = X \cdot X^*$$

X は $x(t)$ のフーリエ変換、 X^* は共役複素根、 P_x はパワースペクトルを表している。

正弦波と矩形波の違いを判別するために高調波を利用するのが良いが、パワーが減衰して識別しにくいという問題がある。そこで、(12)式を使ってパワー P_x を増幅する。

$$P_x' = (f/f_0)^2 P_x \quad f = 1 \sim 256 \quad (12)$$

f は周波数、 f_0 は基本周波数、 P_x' は増幅処理後のパワーを表している。この増幅フィルタは、基本波のパワーを基準にして低周波成分のパワーを小さく、高

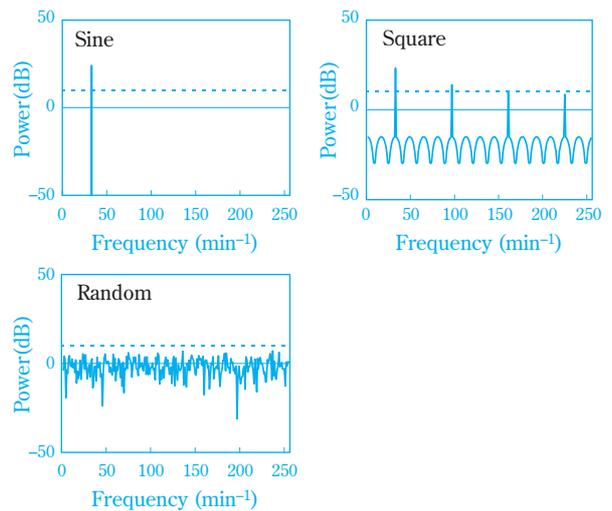


Fig. 5 Power spectra of sine, square and white noise data¹⁰⁾

周波数成分のパワーを大きくするもので、矩形波に見られる高調波のパワーを基本波のレベルまで高める効果がある。

Fig.6にこのフィルタを使った正弦波と矩形波の増幅結果を示す。

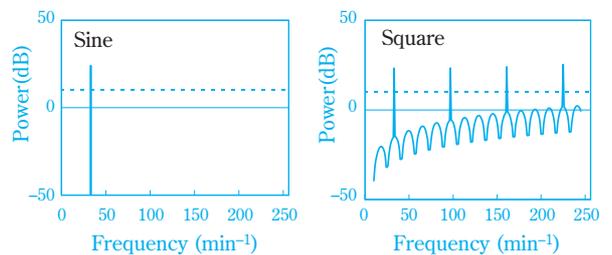


Fig. 6 Amplified power spectra of sine and square data¹⁰⁾

増幅フィルタ処理を施したことで高調波が捉えやすくなっていることがわかる。バルブ不具合の検出では、基本波より高い周波帯で閾値を越えるパワーの有無を確認すれば良いが、データのドリフトや高周波ノイズの影響を受けるため、識別に影響しない程度に低周波帯および高周波帯をカットするか、バンドパスフィルタで前処理しておくが良い。本手法は、データが周期的に振動している場合にしか適用できないが、チューニング不良とバルブ不具合を同時に検出することができる。

② バルブ固着検出法

周期振動の原因としてバルブ不具合があるが、バルブ不具合の全てが周期振動する訳ではない。周期振動するバルブ不具合は、制御性能を直接的に低下

させるものとして改善が望まれるが、周期振動しないバルブ不具合も潜在する不具合として検出されることが望ましい。そこで、周期的に振動しない場合も含めてバルブ不具合を検出できる技術が開発された⁷⁾。

(i) 不動区間をカウントする方法(A法)^{7), 11)}

バルブ固着現象のモデル化で述べたように、バルブに不具合があると、操作量が変化してもバルブ開度、あるいは流量が変化しない不動区間を生ずる。この手法は、操作量と流量が共に変化していない区間を除き、不動区間が全体に占める割合を指標として算出して、バルブ不具合を検出する。指標の値は0~1の範囲で得られ、1に近ければバルブに不具合があり、0に近ければバルブに不具合はないと判断できる。経験的に α が0.25以上であればバルブ不具合の可能性が高い。バルブ開度ではなく流量を使って診断する場合は、計測ノイズを考慮した閾値を設け、閾値以下であれば流量変化がなかったものとみなすと良く、閾値は流量の標準偏差から自動的に与えることもできる。また、流量変化のなかった区間の操作量の幅から、スティック幅 S を求めることもできる。スティック幅 S が1%を超えると、制御量が周期的に振動するなど、制御上、問題となる場合が多い。

(ii) バックラッシュ逆関数で同定する方法(B法)^{7), 11)}

バルブに不具合があると、Fig.3のように操作量 u とバルブ開度の関係は平行四辺形に近く、不具合がなければ、直線に近い挙動になる。この手法は、(13)式のバックラッシュ逆関数 F を用いて、操作量とバルブ開度、あるいは流量の関係からこの違いを判別する。

$$F(t) = \max\{\min\{F(t-1) + \Delta u(t), F_{\max}\}, 0\} \quad (13)$$

バックラッシュ逆関数 F は、Fig.3の平行四辺形の右辺が左辺に重なるようにスティック幅($S = F_{\max}$)分だけシフトする関数で、変換後の関係が線形となるように F_{\max} を求める。スティック幅 S である F_{\max} は、バックラッシュ逆関数 $F(t)$ と流量の相関係数の絶対値が大きくなるように、最適化計算から F_{\max} を求めれば良く、経験的に相関係数 $|r|$ が0.7以上で、 F_{\max} が0.5以上であればバルブ不具合の可能性が高い。これをA法と同じように指標化するならば、例えば次式を用いる。

$$= |r| \cdot \min(F_{\max}, 1) \quad (14)$$

指標の値は0~1の範囲で得られ、同様に、1に近ければバルブ不具合と判断できる。

(iii) 定性的信号化を用いる方法(C法)^{7), 12)}

この手法は、操作量と流量の挙動をTable 1に示される記号で記号化し、その中からバルブ不具合時の特徴的なパターンである平行四辺形を抽出する。記号化はデータが変化する方向を-、0、+で表し、制御量と流量の2変数の組み合わせから9つの定性的挙動として表現する。この平行四辺形のうち、上辺と下辺を意味する+0と-0が全体に占める割合を指標として算出し、バルブ不具合を検出する。指標の値は0~1の範囲で得られ、1に近ければバルブ不具合と判断できる。経験的に α が0.25以上であればバルブ不具合の可能性が高い。また、バルブ不具合時のパターンはFig.7で示した(+0, ++)(-0, --)の組み合わせの他、(+0, 0+)(-0, 0-)(+0, +-)(-0, +-)があり、このうち、+0と-0の操作量の幅から、スティック幅 S を求めることもできる。

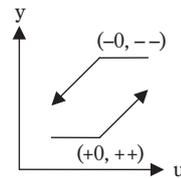


Fig. 7

A pattern of stiction²⁾

Table 1 Patterns of quadric matching²⁾

$\Delta u \setminus \Delta y$	-	0	+
-	--	-0	-+
0	0-	00	0+
+	+-	+0	++

3. バルブ不具合時の周期振動に関する考察

化学プラントで多用されている流量制御と液面制御を例に、バルブ不具合時の周期振動現象についてシミュレーションで考察した。シミュレーションには、Fig.4で示したバルブの固着モデルを使った。

① 流量制御

流量計とバルブ、PIDコントローラで構成される一般的な流量制御について考える。バルブのサイズは限定されないが、ここでは換算しやすいように100m³/hの線形バルブとし、バルブ開度の初期値は50%、流量初期値と流量設定値は共に50m³/hとする。バルブは時定数10sの1次遅れモデルに従うものとし、PIDパラメータは比例帯(PB)100%、積分時間(TI)20s、微分時間(TD)0sのPIコントローラとする。PIDアルゴリズムは、一般的に用いられているI-PD制御とする。スティック幅は1.0%、スリップジャンプ幅は0.2%とする。

シミュレーション開始1分後に流量設定値を0.2m³/h増加させた場合と、1m³/h増加させた場合の結果をFig.8に示す。スリップジャンプがある場合とない場合の両方を重ねて示している。

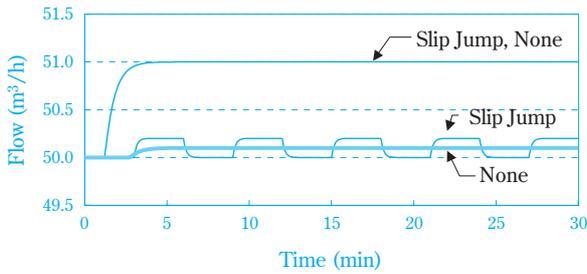


Fig. 8 Simulation results on flow control²⁾

このシミュレーション結果から、スリップジャンプがない場合は、いずれも周期振動をしていない。一方、スリップジャンプがある場合は、スリップジャンプ幅相当の $0.2\text{m}^3/\text{h}$ 以内の設定値変更をした場合のみ周期振動が確認された。このように、バルブに固着があっても、必ずしも周期振動をするとは限らないことがわかる。

従って、前出の周波数解析法は周期振動を前提にした診断法であるため、周期振動をしないバルブ不具合は診断できない可能性がある。そのため、流量制御については潜在する不具合に注意が必要である。

② 液面制御

液面計が設置されたタンクに一定量の液体がフィードされ、バルブを通して同量が抜き出されている一般的な液面制御について考える。バルブサイズは同一とし、フィード流量、抜き出し流量は共に $50\text{m}^3/\text{h}$ 、タンク容量は 10m^3 とする。液面の初期値と設定値は共に50%とし、PIDパラメータは比例帯(PB)80%、積分時間(TI)900s、微分時間(TD)0sのPIコントローラとする。PIDアルゴリズムはI-PD制御とする。スティック幅、スリップジャンプ幅も同様に1.0%、0.2%とした。

シミュレーション開始10分後に液面設定値を0.5%増加させた結果をFig.9に示す。スリップジャンプがある場合とない場合の両方を重ねて示している。液面の他、抜き出し流量の変化も共に示した。シミュレーション結果から、液面制御ではスリップジャンプの有無に関わらず周期振動が発生し、スリップジ

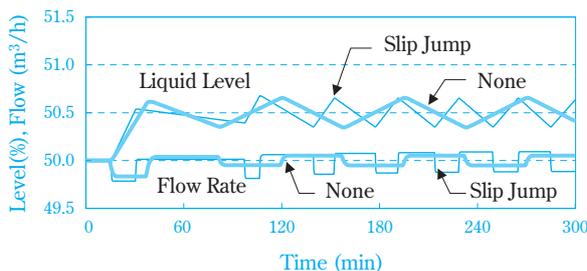


Fig. 9 Simulation results on level control²⁾

ャンプがあると振動周期が短くなっている。また、流量が矩形波状の挙動を示しているのに対して、液面は三角波状の挙動を示しているのが特徴的である。プロセスの遅れが大きい場合や、積分系の場合には周期振動を起こしやすく、振動周期は数十分から数時間とかなり長い周期となる。このような長周期振動はプラントのロードを変化させ、プロセスに悪影響を及ぼす場合が多いので注意が必要である。

実プラントへの適用

以上述べてきた診断法について、実プラントから採取したサンプルデータによる評価と、プラント全体への適用結果の例を示す。

1. 制御性能評価例

前半の制御性能評価法で述べたアルゴリズムを基に、コントローラの制御性能評価ができる制御性能診断ツールLoopDiag (Fig.10)が開発された。このツールはMATLAB®^{注1)}上で開発されたもので、コンパイルして通常のアプリケーションとして利用することができる。MATLAB®の豊富な数学ライブラリを利用でき、制御性能評価の他、時系列データ解析なども行うことができる。

左上2つのグラフがプロセスデータ、左下がARMAモデルから求めた白色ノイズと閉ループインパルス応答を示している。右上のグラフが制御性能指標で、各むだ時間に対応する指標が棒グラフで示されている。最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価法は、プロセスのむだ時間が既知である必要があり、むだ時間に対応する制御性能指標がその評価値となる。例としてバルブ不具合が原因で周期的に振動している液面制御の結果を示しているが、いずれも制御性能指標が0.1未満であり、制御性能が悪いと正しく評価されている。

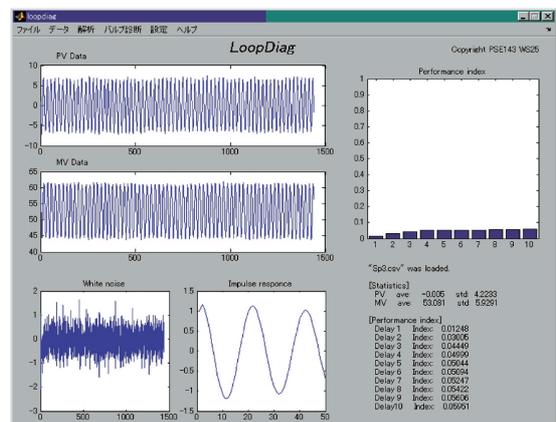


Fig. 10 Controller diagnostic tool "LoopDiag"

実プラントから採取したサンプルデータ13組について、制御性能を評価した結果をTable 2に示す。表は制御性能が低いと評価されたものから順に示しており、右欄に不具合原因を記入した。#1と#3～#8はチューニング不良やバルブ不具合が原因で制御性能が悪いデータであり、制御性能評価法で正しく評価されている。#10は#3のバルブをメンテナンスした後のデータで、バルブを修理したことで本来の制御性能を取り戻していることがわかる。#9～#13の評価値は高く、制御性能に問題はないと診断された。一方、#2および#12はデータの分解能が粗く、#2は制御性能が悪いと誤診された。これは、センサーや変換器などハード的な精度に起因するものではなく、プラントデータ収集システムのデータ圧縮による桁落ち(丸め)によるものである。このように、データ収集システムのフィルタリング係数の設定が不適切であると誤診されるおそれがあるので、注意が必要である。

Table 2 Results of controller performance evaluation

No.	Tag	Index	Comment
#1	Data10(PC)	0.002	Bad turning
#2	Data9(PC)	0.011	Low resolution
#3	Data3(LC)	0.050	Valve stiction
#4	Data1(FC)	0.119	Quantized output
#5	Data11(LC)	0.150	Bad turning
#6	Data8(FC)	0.222	Valve stiction
#7	Data5(LC)	0.523	Bad turning
#8	Data2(FC)	0.657	Bad turning
#9	Data13(FC)	0.833	Disturbance
#10	Data12(LC)	0.995	After maintenance #3
#11	Data7(FC)	0.998	
#12	Data6(PC)	1.000	Low resolution
#13	Data4(FC)	1.000	

FC: Flow Controller LC: Level Controller
PC: Pressure Controller

2. バルブ不具合検出例

制御性能評価例で使った13組のデータのうち、典型的な挙動をしているFig.11の4組のデータについて評価する。Data3とData8はバルブ不具合、Data11はチューニング不良、Data13は外乱が入ったデータである。なお、Data3はバルブ不具合が原因で周期的に振動しているデータ、Data8はバルブ不具合であるが周期的に振動していないデータである。

① 周波数解析法

これら4組のデータに周波数解析法を適用した。Data3とData11で周期性を示すピークが確認され、増幅フィルタ処理後のData3とData11の結果をFig.12に

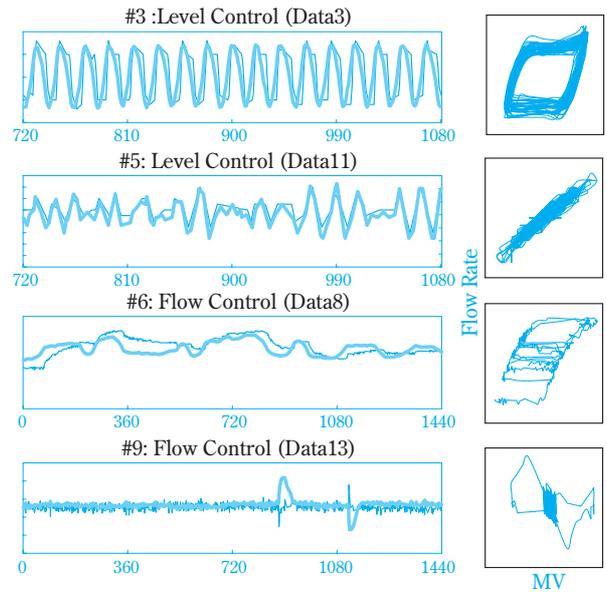


Fig. 11 Sample data for evaluation²⁾

示す。増幅フィルタ処理でData3に閾値を越える高調波が検出されたため、Data3がバルブ不具合、Data11がチューニング不良と診断された。Data8とData13は目立ったピークが見られず正常と診断され、Data8は周期振動していないために誤診された。Data8のように、周波数解析法では周期振動していないバルブ不具合は検出することができない。しかしながら、バルブ不具合の多くが周期変動し、操作量のデータがなくても検出できる利点があるため、簡易診断法として有効である。

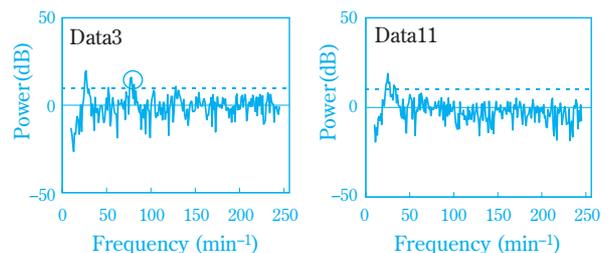


Fig. 12 Amplified power spectra of Data3 and Data11

② バルブ固着検出法

同じ4組のデータに3つのバルブ固着検出法を適用した結果をTable 3に示す。A法とC法でData3とData8の指標が0.25を上回っており、同様にB法もData3とData8の指標が0.7を上回っている。この結果から、3つの方法いずれもバルブ不具合を正しく診断できた。これらの方法は、流量データの他に操作量のデータが必要となるが、周期的に振動していないバルブ不具合についても検出することができる。

Table 3 Results of valve evaluation

	Method A	Method B	Method C	
	(>0.25)	(>0.7)	(>0.25)	
Data3	0.58	0.98	0.58	stiction
Data11	0.14	0.16	0.10	
Data8	0.32	0.97	0.43	stiction
Data13	0.04	0.00	0.02	

3. プラント全体への適用

制御性能評価については、あるプラント全体のPIDコントローラ約300ループについて性能評価を行い、制御性能が低いループから改善に取り組んでいる。制御性能が悪いと評価されたものには、チューニング不良やマニュアルモードのループが多く含まれていた。マニュアルモードのループについては、運転モードが適正であるかどうか見直しを進めている。チューニング不良のループについては、制御動作の強弱で分類し、再チューニングに取り組んでいる。

バルブ不具合検出については、Microsoft® Excel^{注2)}上で実行できるツールを開発した。Excelを通してプラントの運転データとリンクすることができ、解析対象を登録しておけば、ボタン1つでバルブ不具合を診断することができる。サンプルデータを取得したプラントとは別のプラントに本ツールを適用したところ、118ループのうち12件がバルブ不具合と診断され、うち4件が実際にバルブ不具合であった。バルブ不具合が判明した一例をFig.13に示している。この例ではスティック幅1%のバルブ不具合が検出された。残る8件は、収集システムのデータ圧縮やノイズ、工程スタートアップ時のポンプ圧力変動などが原因であったが、数多くのループの中からバルブ不具合箇所を絞りこむのに有効である。誤診に対応するため、複数の方法のうち2つ以上で検出された場合にバルブ

不具合と判定するなど、組み合わせて使うのが実用的である。

おわりに

最小分散制御をベンチマークとするコントローラの制御性能評価手法と、バルブの不具合検出法について述べた。競争力のあるプラントを目指して、高度化、少人化が進んでおり、コントローラの状態を監視し、問題があれば運転員に的確にガイダンスするような支援システムが求められている。欧米ではプラントの制御性能評価をオンラインで行う大規模な制御性能監視システムの稼働が報告されている。国内では、大規模な制御性能監視システムの適用例は報告されていないが、制御性能評価とは切り口の異なる、運転支援システムを利用したプラント監視システムの構築が進んでいる。

今回産学共同で開発したバルブ不具合検出法は制御性能診断技術の一部に過ぎないが、主要な原因の1つを診断できるようになり、日常の保全業務の効率化につながるものと考えている。今後は、制御性能診断技術をベースに、コントローラだけでなく機器の能力やプロセスの状態を広域的に監視できる技術の開発が進むものと考えられ、これらの技術を盛り込んだプロセス監視やボードマン支援システムの構築を目指したい。

謝辞 本研究は、バルブ不具合検出法の一部を除いて、日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会ワークショップNo.25「制御性能監視」の共同成果に基づいている。本会の皆様をはじめ、京都大学の加納 学氏に謝意を表します。

引用文献

- 1) T. J. Harris, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67, 856 (1989).
- 2) 久下本 秀和, 加納 学, *計測と制御*, 44(2), 143 (2005).
- 3) B. Huang and S. L. Shah, "Performance Assessment of Control Loops: theory and applications", Springer-Verlag London (1999).
- 4) 総田 長生, 大塚 亮, 長坂 文雄, 香川 利春, *計測自動制御学会論文集*, 35, 594 (1999).
- 5) F. Muller, *Proceedings of the 1994 Summer Computer Simulation Conference*, 742 (1994).
- 6) M. A. A. S. Choudhury, S. L. Shah and N. F. Thornhill, *Automatica*, 40, 1719 (2004).
- 7) 山下 善之, 久下本 秀和, 加納 学, 丸田 浩, *化学工*

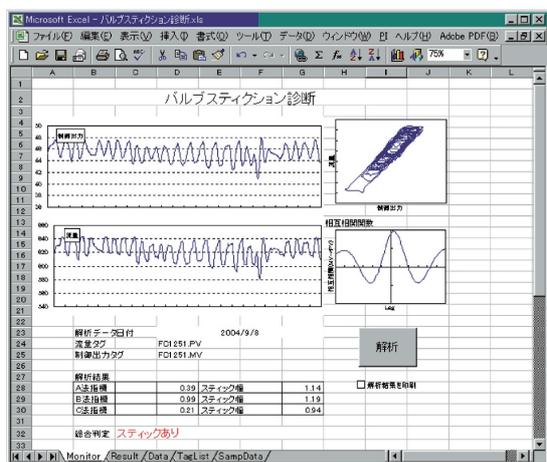


Fig. 13 Valve diagnosis tool on Microsoft® Excel²⁾

- 学会第69年会研究発表講演要旨集, 113 (2004).
- 8) A. Horch, PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (2000).
- 9) N. F. Thornhill, J. W. Cox and M. A. Paulonis, *Control Engineering Practice*, **11**, 1481 (2003).
- 10) 久下本 秀和, 計測自動制御学会第3回制御部門大会資料, 347 (2003).
- 11) 丸田 浩, 加納 学, 久下本 秀和, 清水 佳子, 計測自

動制御学会論文集, **40**, 825 (2004).

- 12) Y. Yamashita, *Control Engineering Practice*, In Press.

注¹⁾ MATLAB[®] はThe MathWorks, Inc社の米国およびその他の国における登録商標です。

注²⁾ Microsoft[®] はMicrosoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標です。

PROFILE



久下本 秀和
Hidekazu KUGEMOTO
住友化学株式会社
生産技術センター
主任研究員