

初心者向けテキスト

制御性能評価/監視

Control Performance Assessment/Monitoring

京都大学大学院工学研究科化学工学専攻
プロセスシステム工学研究室
加納 学

2004年6月 第1版作成

2005年6月 第2版作成

Copyright ©2004-2005 by Manabu Kano. All rights reserved.

[注意事項]

自由に利用させていただいて結構ですが、著作権は一切放棄していません。また、本資料の間違いなどによって生じた不利益などに対して、著者は一切責任を負いません。勿論、間違いの指摘やアドバイスは歓迎します。

目次

1	はじめに	3
2	最小分散制御をベンチマークとする方法	3
2.1	最小分散制御	3
2.2	制御性能評価	5
2.3	設定値追従	6
3	その他の制御性能評価手法	7
3.1	ユーザ定義のベンチマークを用いる方法	7
3.2	PID 制御の性能評価	8
3.3	LQG をベンチマークとする方法	8
3.4	産業界における制御性能監視への取り組み	9
4	おわりに	10

1 はじめに

高い品質の維持，環境負荷低減，コスト削減，安全など，経済のグローバル化を背景に，生産活動に突き付けられる要求は際限なく厳しくなっている．このような時代の要請に応えるためには，生産プラントの能力を最大限に引き出すような運転を実現しなければならず，制御系の性能を高く維持することが最低限必要である．しかし，一般的な生産プラントには非常に多数の制御ループが存在し，どの制御ループがプラント全体の運転効率向上へのボトルネックであるかを見極めることは大変困難である．また，気温の変化，銘柄やロードの変更，触媒の劣化，伝熱係数の変化など多種多様な要因によってプラントの状態は時々刻々と変化するため，一度調整したコントローラであってもその制御性能が劣化している場合も多く，時にはその悪影響がプラント全体にまで及ぶこともある．そればかりか，調整もされないままに使用されているコントローラも少なくないのが現状である．近年では，モデル予測制御に代表される大規模な多変数制御を導入し，高度な運転システムを構築する事例も増えているが，それが計画通りの性能を発揮しているかどうかを常時監視し，必要に応じて再調整を行わなければ，高価なシステムが無駄となりかねない．このため，再調整を必要とするコントローラを検出する目的で，各制御系の性能を評価できるシステムティックかつ実用的な手法が必要である．

制御性能監視に関する最近の研究は，最小分散制御をベンチマークとすることを提案した Harris の論文 [1] に端を発する．本報では，制御性能監視に関連する既存の研究を概観するが，すべてを網羅できるわけではない．そのため，制御性能監視についてより詳しく勉強したい方々には，教科書 [2] やレビュー論文 [3] を読まれることをお勧めする．

2 最小分散制御をベンチマークとする方法

本節では，最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価方法について述べる．以下では，簡単のため，1入力1出力系を対象とする．

2.1 最小分散制御

対象とする制御系について，プロセスおよびコントローラはそれぞれ次のように表されるとする．

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

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

ここで， y, u はそれぞれ制御量および操作量である．いま，プロセスのむだ時間を $d-1$ とすると，プロセスの伝達関数 P は

$$P(q^{-1}) = q^{-d}\tilde{P}(q^{-1}) \quad (3)$$

と表される．一方，外乱は分散 σ_a^2 の白色雑音 a から生成され，その動特性は ARIMA モデルで表現できるとする．また，コントローラの伝達関数を C ，設定値を r とする．このとき，制御系のブロック線図は Fig. 1 のようになる．

外乱の伝達関数 D を q^{-1} について展開すると，次のインパルス応答モデルを得る．

$$\begin{aligned} D(q^{-1}) &= 1 + f_1q^{-1} + \cdots + f_{d-1}q^{-d+1} + f_dq^{-d} + \cdots \\ &= F(q^{-1}) + q^{-d}(f_d + f_{d+1}q^{-1} + \cdots) \\ &= F(q^{-1}) + q^{-d}G(q^{-1}) \end{aligned} \quad (4)$$

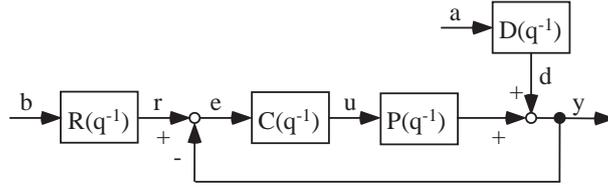


Fig. 1 制御系のブロック線図

ここで、 f_i は i 番目のインパルス応答係数であり、 F は最初の $d-1$ 番目までの応答に対応する．設定値変更を行わない場合、すなわち $r = 0$ である場合には、制御量 y を次式のように表すことができる．

$$\begin{aligned}
 y(k) &= \frac{D}{1 + CP} a(k) \\
 &= \frac{F + q^{-d}G}{1 + q^{-d}C\tilde{P}} a(k) \\
 &= \left\{ F + q^{-d} \frac{G - FC\tilde{P}}{1 + q^{-d}C\tilde{P}} \right\} a(k) \\
 &= Fa(k) + Ha(k-d)
 \end{aligned} \tag{5}$$

ここで、 $Fa(k)$ は現時刻 k から $k-d+1$ まで、 $Ha(k-d)$ は $k-d$ 以前の白色雑音 a によってのみ決まるため、 $Fa(k)$ と $Ha(k-d)$ は独立である．この性質を利用して、制御量 y の分散 $\text{var}\{y(k)\}$ の最小値 σ_{MV}^2 を求めることができる．

$$\begin{aligned}
 \text{var}\{y(k)\} &= \text{var}\{Fa(k) + Ha(k-d)\} \\
 &= \text{var}\{Fa(k)\} + \text{var}\{Ha(k-d)\} \\
 &\geq \text{var}\{Fa(k)\} \\
 &= (1 + f_1^2 + \dots + f_{d-1}^2) \sigma_a^2 = \sigma_{MV}^2
 \end{aligned} \tag{6}$$

ここで、最小分散 σ_{MV}^2 が実現されるのは、 $Ha(k-d) = 0$ のとき、すなわち、

$$C = \frac{G}{F\tilde{P}} \tag{7}$$

のときのみである．このため、このコントローラを用いる制御を最小分散制御と呼ぶ．

最小分散制御とはどのような制御であろうか．既に示したように、最小分散は $\text{var}\{Fa(k)\}$ で与えられる．ここで、 F は外乱の動特性のみによって決まるため、最小分散 σ_{MV}^2 はプロセスにもコントローラにも依存しない．実際、Fig. 1 から明らかなように、ある時刻 l で外乱がプロセスの出力に付加された場合、どのようなコントローラを利用しても、時刻 $l+d-1$ まではその外乱に対して何ら影響を及ぼすことはできない．付加された外乱を除去できるのは、最も理想的な場合でも、時刻 $l+d$ 以降においてのみである．この結論は、プロセスが $d-1$ のむだ時間を持つという事実のみから導かれる．したがって、最小分散制御とは、プロセスのむだ時間に対応する期間は一切の制御を諦め、それ以降において完全な外乱除去を行う制御である．

最小分散制御の特徴は、以下の通りである．

1. コントローラは、プロセスの遅れのない部分の逆数 $1/\tilde{P}$ と、プロセスのむだ時間と外乱の動特性によって決まる部分 G/F との積で与えられる．
2. 外乱の動特性が ARMA モデルで表される場合、コントローラは積分器を持たない．特に、外乱が動特性を持たない場合 ($D = 1$) には、コントローラは 0 となり、制御系は開ループとなる．

3. 外乱の動特性が ARIMA(0,1,1) モデルで表される場合、プロセスの伝達関数が 1 次遅れまたは 2 次遅れであれば、コントローラは PI または PID となる。
4. 外乱の動特性が ARIMA(0,1,1) モデルで表される場合、プロセスの伝達関数が 1 次遅れとむだ時間または 2 次遅れとむだ時間であれば、コントローラはスミス補償型 PI またはスミス補償型 PID となる。

2.2 制御性能評価

コントローラの特性に 관계なく、制御量の分散の最小値 σ_{MV}^2 は決まる。したがって、実際の制御量の分散 σ_y^2 が σ_{MV}^2 に近ければ制御性能は良く、 σ_y^2 が大きければ制御性能は悪いと判断できる。そこで、最小分散と実際の分散の比

$$\eta(d-1) = \frac{\sigma_{MV}^2(d-1)}{\sigma_y^2} \quad (8)$$

を制御性能評価指標として利用する。この指標は Harris index または closed-loop potential (CLP) と呼ばれる。なお、最小分散 σ_{MV}^2 はプロセスのむだ時間 $d-1$ の大きさに依存するため、ここでは評価指標をむだ時間 $d-1$ の関数として表している。評価指標は $0 \leq \eta \leq 1$ の範囲内で変化し、 η が 1 に近いほど制御性能は良い。

以下では、評価指標の計算手順、特に運転データから σ_{MV}^2 を計算する手順を説明する。ここで用いる手法は、FCOR (filtering and correlation analysis) 法と呼ばれる。

制御量の時系列データを MA モデルで表現する。

$$\begin{aligned} y(k) &= Fa(k) + Ha(k-d) \\ &= (1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{d-1}q^{-d+1} + h_1q^{-d} + \dots)a(k) \end{aligned} \quad (9)$$

これより、白色雑音 a と制御量 y の相互相関係数は

$$\rho_{ay}(m) = \frac{E[a(k-m)y(k)]}{\sigma_a\sigma_y} = \frac{f_m\sigma_a}{\sigma_y} \quad (10)$$

で与えられる。ここで、 $E[\cdot]$ は期待値である。したがって、最小分散 σ_{MV}^2 が

$$\sigma_{MV}^2(d-1) = \sum_{m=0}^{d-1} f_m^2\sigma_a^2 = \sum_{m=0}^{d-1} \rho_{ay}^2(m)\sigma_y^2 \quad (11)$$

で求まることから、制御性能評価指標は

$$\eta(d-1) = \sum_{m=0}^{d-1} \rho_{ay}^2(m) \quad (12)$$

となる。この式を用いて η を計算するために必要な白色雑音 a は、制御量 y を白色化することによって得られる。もちろん、FCOR 法を用いずに、 σ_{MV}^2 と σ_y^2 を個別に求め、 η を計算することもできる。

最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価手法の特徴は、以下の通りである。

1. 性能評価のために同定実験を行う必要がなく、プロセスのむだ時間が既知であれば、通常の運転データのみから指標 η を計算できる。
2. 最小分散 σ_{MV}^2 はコントローラに依存しないため、指標 η によって構造の異なるコントローラの性能を絶対的に評価できる。

3. 最小分散 σ_{MV}^2 は分散の下限值を与えるが、現実には最小分散を実現できない場合もある。例えば、(i) コントローラの構造を限定する場合、(ii) 非線形性を含むモデル誤差がある場合、(iii) 制約がある場合には、最小分散を実現できるとは限らない。
4. PID コントローラの性能評価を行う場合、指標 η が小さいことは必ずしもチューニングが悪いことを意味しない。コントローラの構造を限定する場合には、その制御構造で達成可能な分散の下限値をベンチマークとすべきである。特に実用上は PID 制御で達成可能な制御性能の限界を求めることが重要である。
5. 最小分散制御は過激な操作量の変化を要求するため、最小分散を実現することが望ましいとは限らない。したがって、制御系の安定性やロバスト性も考慮した評価指標が必要である。

ここでは、最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価手法の問題点を数多く指摘したが、プロセスや外乱のモデルを必要とせず、通常の運転データのみから制御性能を評価できるという特徴は非常に優れたものである。以下で述べるが、PID 制御で達成可能な評価指標を求める場合など、より高度な制御性能評価を実施するためには、より多くの情報が必要となり、手法の簡便さが失われてしまう。

このような特徴をふまえて、指標 η に基づく制御性能評価方法を以下にまとめる。

1. η が 1 に近い場合、最小分散制御に近い制御が実現できており、制御性能は良いと判断される。
2. η が 1 に近いにもかかわらず、その制御性能に満足できない場合、コントローラの構造やチューニングによっては制御性能の改善が望めないため、フィードフォワード制御の導入やプロセスの改善など、抜本的な対策が必要である。
3. η が 0 に近い場合、何らかの改善が必要である。ただし、貯留タンクの液レベル制御など、制御目的によっては η が低くても良い場合がある。

指標 η が 0 に近い場合、制御性能が悪い原因を究明し、性能を改善するための対策を施す必要がある。しかし、指標 η によっては、原因を究明することも有用な対策を選定することもできない。

以上より、最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価手法の利用方法としては、その簡便さ（同定実験の必要がなく、通常の運転データのみから指標を計算できる）を活かして、第一段階のスクリーニングに利用するのが良いと考えられる。この段階で制御性能が悪いと判断された制御ループについては、さらなる検討が必要である。

2.3 設定値追従

ここまでは設定値変更がない場合を取り扱ってきたが、設定値追従特性も同様にして評価することができる。

簡単のため、外乱がない場合 ($Da(k) = 0$) について考えてみよう。設定値 r が白色雑音 b から生成され、その動特性が $R(q^{-1})$ で与えられるとする。このとき、白色雑音 b から偏差 $e = r - y$ への動特性は

$$e(k) = \frac{R}{1 + CP} b(k) \quad (13)$$

となる。この式は Eq. (5) において、 y, a を e, b に、 D を R に書き換えただけである。したがって、外乱抑制特性と同様に、最小分散制御をベンチマークとして設定値追従特性を評価できる。なお、ステップ状やランプ状の設定値変更も、この枠組みで取り扱うことができる。

3 その他の制御性能評価手法

本節では、最小分散制御をベンチマークとする方法以外に、これまでに提案されている方法のいくつかを紹介する。

3.1 ユーザ定義のベンチマークを用いる方法

最小分散制御下での制御量の動特性は

$$y_{MV}(k) = Fa(k) \quad (14)$$

で、開ループ ($u = 0$) 時の制御量の動特性は

$$y_{open}(k) = Da(k) = (F + q^{-d}G)a(k) \quad (15)$$

で与えられる。したがって、現実的に達成しうる、望ましい制御量の動特性を

$$y_{user}(k) = (F + q^{-d}\tilde{G})a(k) \quad (16)$$

によって指定できる。伝達関数 \tilde{G} は自由に指定することができるが、ここでは、外乱の動特性 G と関連づけて \tilde{G} を指定する方法について述べる。すなわち、何も制御を行わない場合の応答 (の一部) Ga をより速く整定させるために、時定数 τ の一次遅れフィルタ

$$\tilde{G}_F(q^{-1}) = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha q^{-1}} \quad (17)$$

を導入し、

$$\tilde{G} = (1 - \tilde{G}_F)G \quad (18)$$

とする。なお、 ΔT はサンプリング間隔であり、 $\alpha = e^{-\Delta T/\tau}$ である。この場合、ユーザ指定の応答は

$$y_{user}(k) = (F + q^{-d}(1 - \tilde{G}_F)G)a(k) \quad (19)$$

となる。このユーザ指定の応答の分散を計算するためには、伝達関数 G が既知でなければならない。ステップ状やランプ状などの設定値変更に対する追従特性を評価したい場合には、伝達関数 G は既知である。一方、外乱抑制特性を評価したい場合には、外乱の伝達関数 D を同定し、さらに G を求める必要がある。あるいは、 G を求めるかわりに、 \tilde{G} を直接指定しても良い。ユーザ指定の応答の分散を σ_{user}^2 とすると、ユーザ定義のベンチマークを用いる制御性能評価指標 η_{user} は

$$\eta_{user}(d-1) = \frac{\sigma_{user}^2(d-1)}{\sigma_y^2} \quad (20)$$

で与えられる。

Eq. (19) より、フィルタ \tilde{G}_F の役割は明らかであろう。すなわち、 $\tilde{G}_F = 1$ とすると、 $y_{user} = y_{MV}$ となり、最小分散制御を指定することになる。一方、 $\tilde{G}_F = 0$ とすると、 $y_{user} = y_{open}$ となり、何も制御を行わないことになる。したがって、フィルタ \tilde{G}_F は応答を調節する役割を持ち、その調整パラメータは時定数 τ である。

ユーザ定義のベンチマーク、あるいは最小分散ベンチマークを用いて制御性能を評価する場合、Fig. 2 に示すように、閉ループ系のインパルス応答を描くことにより、より多くの有用な情報を引き出すことができる。実際のインパルス応答は制御量を表す MA モデルを構築することにより求められる。また、望ましい、ユーザが定義するインパルス応答は Eq. (19) から、最小分散制御下でのインパルス応答は Eq. (14) から求められる。そこで、これらのインパルス応答を比較することによって、制御の特徴を把握できる。例えば、実際のインパルス応答が振動的であれば、制御が強すぎると考えられる。一方、実際のインパルス応答がユーザ定義の応答よりも遅い場合には、制御が弱いと考えられる。このように、閉ループ系のインパルス応答を描くことによって、制御性能を改善するための方針を立てることができる。

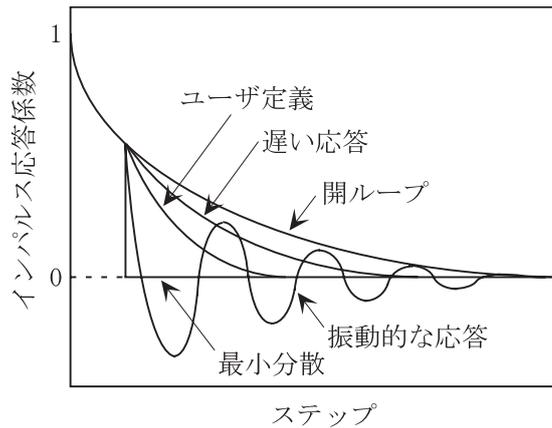


Fig. 2 閉ループ系のインパルス応答

3.2 PID 制御の性能評価

産業界において最も広く利用されている制御手法は PID 制御であるため、PID 制御の性能を評価したいという強い要求がある。プロセスのむだ時間が短く、その動特性が低次のモデルで表現できるような場合には、最小分散制御をベンチマークとする手法を PID 制御の評価に利用しても問題ない。しかし、むだ時間が長く、あるいは複雑な動特性を有するプロセスを制御対象とする場合には、いかに最適なチューニングを行ったとしても、PID 制御で最小分散制御を実現することはできず、最小分散制御はベンチマークとして適切ではない。したがって、PID 制御の性能を評価する場合には、PID 制御で達成可能な分散の最小値をベンチマークとすべきである。ところが、PID 制御で達成可能な分散の最小値を求めるためには、プロセスと外乱の伝達関数が既知でなければならず、さらに最適化計算も必要となる。このため、より簡単で実用的な評価手法の開発が望まれる。

3.3 LQG をベンチマークとする方法

制御性能の評価指標として、多くの場合に制御量（あるいは偏差）の分散が重要であることは確かである。しかし現実には、制御量の分散を小さくすることよりも、制御系の安定性やロバスト性を確保することが重要である。例えば、最小分散制御は過激な操作量の変化を要求するため、制御系の安定性やロバスト性を考慮するならば、最小分散を実現することが望ましいとは限らない。したがって、より実制的な制御性能の評価方法として、制御量の分散だけでなく、操作量の分散も評価関数に取り込む方法が考えられる。制御量と操作量の分散をどの程度の割合で評価に反映させるべきかは対象によって異なる。したがって、この場合の評価関数は、パラメータ λ を用いて

$$J(\lambda) = E[y(k)^2] + \lambda E[u(k)^2] \quad (21)$$

あるいは

$$J(\lambda) = E[(r(k) - y(k))^2] + \lambda E[\Delta u(k)^2] \quad (22)$$

で与えられる。プロセスおよび外乱の動特性が既知であれば、パラメータ λ を変化させることにより、評価関数 J を最小にする $E[y(k)^2]$ と $E[u(k)^2]$ の様々な組み合わせを求めることができる。最適解は、Fig. 3 に示すように、 $E[y(k)^2]$ と $E[u(k)^2]$ を縦軸および横軸とする平面上で 1 つの曲線を形成する。この曲線はトレードオフ・カーブと呼ばれる。このトレードオフ・カーブの上側の領域は実現可能であるが、下側の領域は実現不可能である。したがって、このトレードオフ・カーブから、操作量の分散 $E[u(k)^2]$ をある値に固定した場合に、制御量の分散 $E[y(k)^2]$ を理論上どこまで小さくできるかが判断できる。

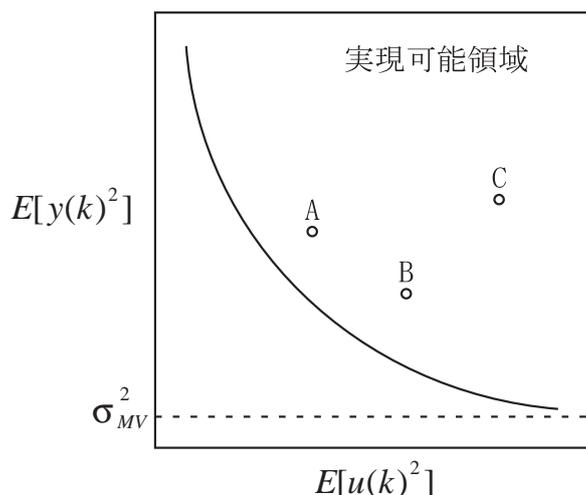


Fig. 3 トレードオフ・カーブ

実際の運転データから制御量と操作量の分散を計算すれば、実現可能領域内に現在の運転状態をプロットできる。その点がトレードオフ・カーブに近ければ、制御性能は良いと判断できる。もちろん、その場合でも、より制御量の分散を小さくしなければならない状況もありえるが、そのためには、操作量の分散が大きくなることを許容しなければならない。一方、実際の運転がトレードオフ・カーブから大きく離れている場合には、制御性能を改善する余地がある。例えば、点 A と点 B はどちらも点 C に比べて制御性能は良いと判断できる。しかし、点 A と点 B のどちらの制御性能が良いかについては、トレードオフ・カーブから判断することはできない。操作量の変動が大きくなって制御量のばらつきを抑えることが重要であれば点 B が良く、逆の場合には点 A が良い。なお、点 A と点 B のいずれの場合でも、まだ制御性能を改善できる余地は残されている。最後に、トレードオフ・カーブと最小分散制御の関係について述べておこう。最小分散制御は制御量の分散を最小化することのみが目的であるため、操作量の分散はどれだけ大きくなって構わない。このため、実現可能な制御量の分散の最小値、すなわちトレードオフ・カーブが漸近する値（図中点線）が最小分散 σ_{MV}^2 となる。

3.4 産業界における制御性能監視への取り組み

本節の最後に、産業界における制御性能監視への取り組みを紹介する。三菱化学では、制御性指標 C_e 、操作性指標 C_u 、 $C_e - C_u$ 散布図、制御性能評価指標 C_p などを利用して、制御性能監視が実施されている [4, 5]。

制御性指標 C_e は

$$C_e = \frac{3\sigma_e}{R_{PV}} \times 100 \quad (23)$$

で定義される。ここで、 σ_e は偏差 e の標準偏差であり、 R_{PV} は制御量の計器レンジである。すなわち、制御性指標 C_e は、偏差のバラツキをレンジで規格化したものである。一方、操作性指標 C_u は

$$C_u = \frac{3\sigma_u}{R_{MV}} \times 100 \quad (24)$$

で定義される。ここで、 σ_u は操作量 u の標準偏差であり、 R_{MV} は操作量のレンジである。すなわち、操作性指標 C_u は、操作量のバラツキをレンジで規格化したものである。これら 2 つの指標はいずれもバラツキを評価するための指標であり、その値は小さいほど良い。さらに、これら 2 つの指標は、プロセスや外乱、さらにはコントローラに関する一切の情報を必要とすることなく、運転データのみから計算できる。実用上、この特徴は極めて有用である。

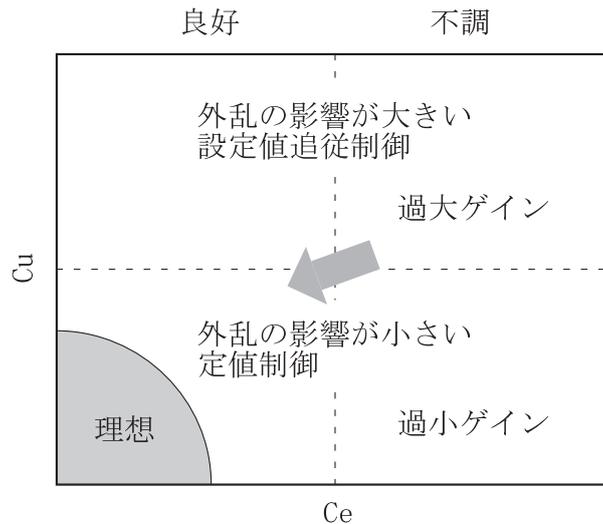


Fig. 4 $C_e - C_u$ 散布図

$C_e - C_u$ 散布図は、Fig. 4 に模式的に示すように、横軸に C_e を、縦軸に C_u をとり、各制御ループの運転データから計算される指標を平面上にプロットしたものである。 C_e と C_u が共に小さいことが理想であるため、すべての点が原点付近に集まるようにコントローラを調整することとなる。ただし、外乱の影響が大きなループや設定値変更を行うループでは、 C_e を小さくするために C_u が大きくなることは避けられない。そのような場合には、点が左方向に移るようにコントローラを調整することとなる。あるプラントの複数の制御ループについて $C_e - C_u$ 散布図を作成した場合、右側の領域に属するループから制御性能の改善を実施すればよい。制御パラメータをチューニングする際には、右上の領域に属している場合にはゲインを小さく、右下の領域に属している場合にはゲインを大きくするという指針に従うことができる。ただし、常にこの指針が妥当であるわけではない。

制御性指標 C_e と操作性指標 C_u を同時に考慮して、1つの指標で制御性能を評価するために、制御性能評価指標 C_p が提案されている。制御性能評価指標 C_p は

$$C_p = \sqrt{\frac{C_e C_u}{\tilde{C}_e \tilde{C}_u}} \times 100 \quad (25)$$

で定義される。ここで、 \tilde{C}_e, \tilde{C}_u はそれぞれ制御性指標 C_e と操作性指標 C_u のベンチマークである。ベンチマークとしては、制御性能改善作業を行う際には改善作業前の指標を、制御性能劣化監視を行う際には監視開始時点での指標を用いる。したがって、前者の場合には、制御性能評価指標 C_p を小さくすることが目的となり、後者の場合には、 C_p が大きくなりつつあるループを見付け、適切な対策を施すことが目的となる。

4 おわりに

本報では、最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価手法を中心に、これまでに提案されている手法のいくつかを紹介した。ここで述べたような手法を利用することによって、現在の制御性能が理想的であるかどうかを容易に判断することができる。しかし、制御性能が悪いと判断された場合に、その原因を究明する作業は決して容易ではない。制御性能を劣化させる原因としては、コントローラが適切に設計されていないこと他に、センサーやアクチュエータの故障、不適切なサイズのパルプの使用、ヒステリシス、制約条件などが挙げられる。例えば、アクチュエータのヒステリシスがリミットサイクルを発生させ、制御量および操作量を振動させる原因となることはよく知られている。このような問題を、コントローラのチューニングによって解決することはできない。したがって、制御性能を劣化させている真の原因を究明す

るシステマティックな方法論が必要である。

本報では、1入力1出力系のみを対象としたが、多入力多出力系の制御性能監視も重要である。最小分散制御やLQGをベンチマークとする制御性能評価手法の多変数系への拡張については、文献 [2] に詳しく記述されている。多変数系の制御性能評価に関しては、特に、モデル予測制御の制御性能評価が実用的にも重要である。基本的には、モデル誤差がない理想的な状態で達成可能な制御性能と、現実に実現されている制御性能とを比較することになるが、モデル予測制御で利用されている評価関数は市販パッケージによって異なるため、評価手法も個別に開発せざるをえない。モデル予測制御に関しては、制御性能評価の他にも、制御性能を改善する余地がある場合、あるいは制御性能が劣化した場合に、制御パラメータのチューニングのみで対応可能か、あるいはモデル同定を再度実施する必要があるかを判断できるような仕組みの開発も望まれる。さらに、マルチループ制御に代えて、モデル予測制御などの多変数制御を利用することによって、どの程度制御性能を改善できるかを定量的に見積もる方法の開発も実用上極めて重要である。

この他にも、実際に制御性能監視を実施するに際しては、プラントの運転目的と関連づけて制御性能を評価する必要があることを認識しなければならない。例えば、均流液面制御のように、制御量である液レベルの偏差を小さくすることが制御目的ではない場合に、最小分散制御をベンチマークとして制御性能を評価しても無意味である。したがって、重要な変数とそうでない変数を区別し、主要な変数の変動を抑制するために、どの部分での変動を許容すべきかを判断しなければならず、その方策に沿った制御性能評価を行う必要がある。

参考文献

- [1] T. Harris: "Assessment of Closed Loop Performance", *Can. J. Chem. Eng.*, **67**, pp.856-861 (1989).
- [2] B. Huang and S.L. Shah: *Performance Assessment of Control Loops: theory and applications*, Springer-Verlag London (1999).
- [3] S.J. Qin: "Control performance monitoring – a review and assessment", *Comput. Chem. Eng.*, **23**, pp.173-186 (1998).
- [4] 赤松耕二, 島廻昭朗, 小河守正: "性能監視とチューニング", *化学工学*, **65**, pp.665-668 (2001).
- [5] 西澤淳: "三菱化学の制御性能監視に対する取組み", *学振 PSE 第 143 委員会ワークショップ No.25 第 2 回研究会資料* (2002).