線形計画法による流量計の故障診断と測定値補正

九州大学大学院 工学研究院 化学工学部門　柘植義文

化学・石油精製プラントにおいては，流量はフィードバック制御系の操作変数として用いられてきたため，流量の測定値が真の値からずれていても，そのずれが常に同じ値であればプラントの運転には支障がなかった．しかし，近年，高効率運転を求めて，プラントのモデルを用いた高度制御が導入され始めると，流量を正確に測定することが要求されるようになった。線形計画法を利用して，故障している（測定値に偏差が含まれる）流量計を特定して次回の定期修理時に修理すべき流量計を選び，定期修理までは測定値を補正して用いる方法について報告する．

はじめに

流量計はプラントの主要な計器の一つであるが，ほとんど制御のために用いられているため，基準値からの増分を正確に測定することは要求されるが，絶対値を正確に測定することを要求されるのは，原料の受入れと製品の払出しを行うときに限られていた．しかし，近年，プラントの最適運転や高度制御が実用化されたために，プラントから得られるデータが物質収支・成分収支を満たすことを要求されるようになり，流量の正確な絶対値を測定することが必要になってきた．

一方，流量計をプラントから取り外し，較正を行うには，かなりの労力と費用を要するので，プラントの定期修理期間中にすべての流量計の較正を行うことはほとんど不可能である．したがって，予め較正すべき流量計を絞り込んでおく必要がある．運転中のデータから検量すべき流量計を絞り込む方法論を，ここでは，“流量計の故障診断法”と呼ぶことにする．流量計の故障モードの中で，指示値が激しく振動したり，ベースラインに張り付いたり，振り切れたりするモードは，単独の流量計の指示値の変化から，故障であることを容易に判定することができる．しかし，ベースラインの偏りや，ゲインの変化による指示値の偏りは単独の流量計の指示値から見つけることはできない．本研究では，このような故障モードを対象とする．このような故障モードを対象とした故障診断法としては，統計的検定を利用した方法が多数報告されている．これらの方法においては，測定値に含まれる誤差を平均値 0 の正規分布に従うランダム誤差とベースラインの偏りや，ゲインの変化による偏差（系統的誤差）の和と考え，系統的誤差が 0 でない流量計を“故障した流量計”と考えている．

しかし，プラントの管理上は，ランダム誤差であれ系統的誤差であれ，許容範囲を超える大きさの誤差を持つ流量計は，定期修理時の較正の対象と考える場合があり得る．本研究では，管理上の制約から決まる許容範囲（以下では“管理幅”と呼ぶ）を超える誤差を含む流量計を“故障した流量計”と定義して線形計画法を利用する故障診断法を紹介する．また，成分収支式が利用できる場合へ拡張できることを示すとともに，成分分析値の補正方法とその効果について述べる．さらに，定期修理時に流量計の較正を行った場合の情報を利用する方法についても述べる．なお，運転中の測定値の補正については本誌では述べないが，講演時にその概要を説明する．

1．物質収支式を利用した故障の検出と診断

1.1 故障検出問題

n個の質量流量z_j ($j\in J$)に関して，m個の関係式が得られるものとする．

$$\sum_{j\in J} c_{ij} z_j = 0 \quad (i\in I) \tag{1.1}$$

ここで，I，Jは，それぞれ，1 からmまで，および 1 からnまでの整数の集合であり，同時に関係式および流量計の全集合を表す．また，式(1)の係数行列C＝$[c_{ij}]$のランクは$m(<n)$であるとする．質量流量z_jの測定値z_j^*が誤差e_jを含むとすると，次式が成立する．

$$z_j^* = z_j + e_j \quad (j\in J) \tag{1.2}$$

式(2)を式(1)に代入して整理すると，次式が得られる．

$$\sum_{j\in J} c_{ij} e_j = \sum_{j\in J} c_{ij} z_j^* \quad (i\in I) \tag{1.3}$$

誤差e_jの管理幅の上限をL_j，下限を$-L_j$ (L_j>0)とする．

$$-L_j \le e_j \le L_j \quad (j\in J) \tag{1.4}$$

式(4)を満たす誤差を許容誤差，満たさない誤差を

故障誤差と呼ぶ．ここで，

$$x_j = \frac{e_j + L_j}{2L_j} \quad (j \in J) \tag{1.5}$$

$$a_{ij} = \frac{c_{ij} L_j}{\sqrt{\sum_{k \in J} (c_{ik} L_k)^2}} \quad (i \in I, j \in J) \tag{1.6}$$

$$b_i = \frac{\sum_{j \in J} c_{ij} (z_j{}^* + L_j)}{2\sqrt{\sum_{k \in J} (c_{ik} L_k)^2}} \quad (i \in I) \tag{1.7}$$

のように規格化すると，式(1.3)は次のように変形できる．

$$\sum_{j \in J} a_{ij} x_j = b_i \quad (i \in I) \tag{1.8}$$

全ての誤差が許容誤差であるための必要十分条件は，式(1.8)のx_jが次式を満足する解を持つことである．

$$0 \le x_j \le 1 \quad (j \in J) \tag{1.9}$$

従って，次のような線形計画問題【問題P(φ)】が，y＝0となる最適解を持てば，全ての誤差が許容誤差である．さもなければ，故障誤差を持つ流量計(故障流量計)が存在することになる．

【問題P(φ)】

$$Minimize \quad y = \sum_{i \in I} (x_{i+2n} + x_{i+m+2n}) \tag{1.10a}$$

subject to

$$\begin{aligned} &\sum_{j \in J} a_{ij} x_j + x_{i+2n} - x_{i+m+2n} = b_i && (i \in I) \\ &x_j + x_{j+n} = 1 && (j \in J) \\ &x_j,\ x_{j+n} \ge 0 && (j \in J) \\ &x_{i+2n},\ x_{i+m+2n} \ge 0 && (i \in I) \end{aligned} \tag{1.10b}$$

1.2 故障診断問題

【問題P(φ)】がy＝0となる最適解を持たなければ，故障流量計が存在することは分かるが，どの流量計が故障誤差を持つかは分からない．そこで，FをJの部分集合として，式(1.8)からx_j ($j \in F$)を全て消去したときに得られる関係式

$$\sum_{j \in J-F} a_{ij}{}^F x_j = b_i{}^F \quad (i \in I - R) \tag{1.11}$$

を考える．具体的には，式(8)の係数行列$A | b$=[a_{ij}, b_i]に対して，x_j ($j \in F$)に対応するj列の非零要素(r_j)をピボットとして掃き出し計算を行った後，r行を削除することによって，式(1.11)を得ることができる．Rは削除した行に対応する関係式の集合である．このとき，次に示す【問題P(F)】が，y＝0 となる最適解を持つならば，x_j ($j \in J$-F)に対応する流量計は許容誤差しか持たず，故障流量計の集合はFの部分集合であると期待できる．ここで，診断可能な故障流量計の最大数はm-1 であり，対象となる集合Fの数は次式で与えられる．

$$\sum_{k=0}^{m-1} {}_nC_k = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{n!}{(n-k)!k!} \tag{1.12}$$

流量計の数nや関係式の数mが増えると，対象となる集合Fの数は膨大になるが，全ての流量計の故障頻度が等しい場合は，同時に多くの流量計が故障する確率は小さくなるので，集合Fの要素数|F|が最小の集合が候補集合となる．

【問題P(F)】

$$Minimize \quad y = \sum_{i \in I-R} (x_{i+2n} + x_{i+m+2n}) \tag{1.13a}$$

subject to

$$\begin{aligned} &\sum_{j \in J-F} a_{ij}{}^F x_j + x_{i+2n} - x_{i+m+2n} = b_i{}^F \\ & && (i \in I - R) \\ &x_j + x_{j+n} = 1 && (j \in J - F) \\ &x_j,\ x_{j+n} \ge 0 && (j \in J - F) \\ &x_{i+2n},\ x_{i+m+2n} \ge 0 && (i \in I - R) \end{aligned} \tag{1.13b}$$

1.3 流量計の故障頻度を考慮した診断法

流量計の故障頻度が異なる場合は，集合Fの要素数|F|が最小の場合が適切とは限らない．そこで，y＝0を最適解とする【問題P(F)】に対応する測定器の部分集合Fの中から故障流量計の候補集合として最ももらしい集合を選択する基準として，流量計の故障頻度 p_j ($j \in$F) の対数尤度 L(F) を導入し，流量計の故障診断問題を次のように定式化する．

【故障診断問題】

$y = 0$を最適解とする【問題P(F)】に対応する流量計の部分集合Fの中で

$$L(F) = \sum_{j \in F} \log(p_j) \tag{1.14}$$

を最大にするものを求めよ．ただし，0<p_j<1 でありL(F)は必ず負の値である．

測定器の故障頻度p_jが全て同じである場合には，部分集合Fの要素数｜F|が最小のときに式(1.14)を最大にする．一方，故障頻度が異なる場合には，要素数|F|が同じであっても故障頻度の高い測定器の組み合わせのときに対数尤度は大きくなる．しかしながら，前

述したように，対象となる集合Ｆの数は式(1.12)で与えられ，測定器の数nや関係式の数mが大きい場合には膨大な計算量を必要とする．ここで，次の自明な定理を用いると，breadth-first-searchによる効率の良いアルゴリズムが得られる．

【定理】

Ｊの２つの部分集合 S，T(S⊂T)に対して

$$L(S) > L(S) + \max_{j \in J-S} \{\log(p_j)\} \geq L(T) \quad (1.15)$$

が成立する． ［定理終わり］

本定理より，問題 P(S)が y=0 となる最適解を持てば，S を含むような J の部分集合 T に対する問題 P(T)を解く必要はない．また，すでに集合 F(F∈J)に対する問題 P(F)が y=0 となる最適解を持ち，問題 P(S)が y=0 となる最適解を持たないとき，

$$L(F) > L(S) + \max_{j \in J-S} \{\log(p_j)\} \quad (1.16)$$

であるなら，S を含むような J の部分集合 T に対する問題 P(T)を解く必要はない．逆に，

$$L(F) \leq L(S) + \max_{j \in J-S} \{\log(p_j)\} \quad (1.17)$$

であるとき，L(F)と同等以上の L(T)を持つ T が存在する可能性がある．以上より，次のアルゴリズムが得られる．

【故障診断アルゴリズム】

Step0：初期設定

num=1，Lopt=－∞，Copt=φ，V=φ

Step1：問題の選択

J の部分集合 F のうち

(1)F の要素数|F|が num である．

(2)V の全ての要素 S はＦの部分集合でない．

を満足する全ての F を列挙する．

そのような F が存在しなければ，Step4 へ

存在すれば，次へ

Step２：問題 P(F)の解

列挙した全ての F に対応する問題 P(F)を解き，

以下の処理を行う．

(1) y=0 となる最適解を持つとき

1) 暫定解の更新

Lopt＜L(F)なら，Lopt＝L(F)，Copt = {F}

Lopt＝L(F)なら，Copt = Copt∪{F}

2) 限定操作

V = V∪{F}

(2) y=0 となる最適解を持たないとき(限定操作)

$$\mathrm{Lopt} > L(F) + \max_{j \in J-F}\{\log(p_j)\}$$

を満足するなら，V = V∪{F}

Step3：故障計器数の更新

num<m-1 ならば，

num=num+1 として Step1 へ，

さもなければ，次へ

Step4：最適解出力

Lopt と Copt を最適解として終了する．

［アルゴリズム終わり］

２．成分収支式を利用する場合への拡張

2.1 成分収支式の導入と選択

対象プラントにs成分の物質が関与しているとし，質量流量$z_j\ (j=1,2,3,\ldots,n)$に対応して，第k成分の重量分率$W_j^{(k)}\ (j=1,2,3,\ldots,n \quad k=1,2,3,\ldots,s)$を定義すると，成分収支式

$$\sum_{j \in J} c_{ij} W_j^{(k)} z_j = 0 \quad (i \in I, k \in K) \quad (2.1)$$

が成立する．ただし，Kは1からsまでの整数の集合であり，同時に成分の全集合を表す．従って，全成分の分析値が得られるならば，i番目の物質収支式に対して s 個の成分収支式が存在することになるが，これらのs+1個の収支式は独立ではないために，成分収支式を全て利用することはできない．実際には，s+1個の収支式の係数行列のランクの数までの収支式が利用でき，物質収支式だけを利用する診断法よりも精度の向上が期待できる．

2.2 成分の分析値の補正

重量分率$W_j^{(k)}$の分析値を$W_j^{(k)*}$，誤差を$w_j^{(k)}$とすると，次式が成立する．

$$W_j^{(k)*} = W_j^{(k)} + w_j^{(k)} \quad (j \in J; k \in K) \quad (2.2)$$

分析計は標準試料を用いて容易に検定することができるので，ベースラインの偏りやゲインの変動による偏差は除去され，検定によって除去することができないランダム誤差のみが重量分率の測定値に含まれるものと仮定する．また，ランダム誤差は多数の発生源から発生するノイズの和であるので，大数の法則により，平均値０の正規分布に従うと考えられる．従って，誤差$w_j^{(k)}$は，平均値０，分散$\sigma_j^{(k)2}$の正規分布に従う確率変数であり，標準偏差$\sigma_j^{(k)}$は分析計の精度として与えられるものとする．

重量分率$W_j^{(k)}$の総和は１に等しくなければならないので，誤差$w_j^{(k)}$は次式を満足しなければならない．

$$\sum_{k \in K} W_j^{(k)} = \sum_{k \in K} \{W_j^{(k)*} - w_j^{(k)}\} = 1 \quad (j \in J) \quad (2.3)$$

また，重量分率は非負でなければならないので，次式が成立する．

$$W_j^{(k)} = W_j^{(k)*} - w_j^{(k)} \geq 0 \quad (j \in J; k \in K)$$
$$\therefore \quad W_j^{(k)*} \geq w_j^{(k)} \quad (j \in J; k \in K) \tag{2.4}$$

ここで，式(2.2)を式(2.1)に代入すると，次式が得られる．

$$\sum_{j \in J} c_{ij} \{W_j^{(k)*} - w_j^{(k)}\} z_j = 0 \quad (i \in I; k \in K) \tag{2.5}$$

式(1.1)と(2.1)，または式(1.1)と(2.5)から，任意の i に対応する式だけを取り出すと，z_jに関する(s+1)個の同次連立方程式が得られる．ここで，任意の i に対して，$c_{ij} \neq 0$ (j∈J) を満足する係数の数をα_iとすると，同次連立方程式が$z_j=0$（j∈J）以外の解を持つためには，その係数行列のランクは（α_i－1）以下でなければならない．

すなわち，任意の i に対して，$c_{ij} \neq 0$ となる要素だけを取り出した物質収支式のα_i次元行ベクトルを$v^{(0)}$，成分収支式のα_i次元行ベクトルを$v^{(k)}$（k∈K：別の書き方をするとk=1,2,,..,s）としたとき，これらの（s＋1)個の式からα_i個を選択したα_i次元の連立方程式を考えると，右辺係数行列は０列ベクトル，左辺係数行列はα_i次元の正方行列であり，左辺係数行列のランクがα_iのフルランクであると，その連立方程式の解は０しかありえない．そうでない解が存在するためには，連立方程式が解けない条件を満足しなければいけない．連立方程式が解けない条件は左辺係数行列が正則でない，言い換えると行列式が０である．

前述したように，誤差$w_j^{(k)}$は正規分布に従うと考えられるので，最尤法により，重量分率の誤差を推定する問題は次のように定式化できる．

【問題１】

$$\begin{aligned} &\mathit{Minimize} \quad u = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \left(\frac{w_j^{(k)}}{\sigma_j^{(k)}}\right)^2 \\ &\mathit{subiject\ to} \\ &\quad \det_{k \in \omega}[v^{(k)}] = 0 \quad (\omega \in \Omega; i \in I) \\ &\quad \sum_{k \in K} \{W_j^{(k)*} - w_j^{(k)}\} = 1 \quad (j \in J) \\ &\quad W_j^{(k)*} \geq w_j^{(k)} \quad (j \in J; k \in K) \end{aligned} \tag{2.6}$$

ここで，制約条件の第１式は左辺係数行列から任意にα_i個を選んだときの正方行列の行列式の値が０であることを表しており，Ωは，０から s までの整数から任意にα_i個を取り出す組合せの全集合である．

さらに，問題１の等号制約条件をペナルティ関数として評価関数に加えた新たな評価関数を定義することによって，問題１は次の不等号制約条件だけを持った最小化問題に変換できる．

【問題２】

$$\begin{aligned} &\mathit{Minimize} \quad u = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \left(\frac{w_j^{(k)}}{\sigma_j^{(k)}}\right)^2 \\ &\qquad + \sum_{i \in I} \sum_{\omega \in \Omega} \beta_1 \{\det[v^{(k)}]\}^2 \\ &\qquad + \sum_{j \in J} \beta_2 \{\sum_{k \in K} (W_j^{(k)*} - w_j^{(k)}) - 1\}^2 \\ &\mathit{subiject\ to} \quad W_j^{(k)*} \geq w_j^{(k)} \quad (j \in J; k \in K) \end{aligned} \tag{2.7}$$

ここで，$\beta 1$ と$\beta 2$ は十分大きな正の定数である．さらに，不等号制約条件もペナルティ関数として評価関数に加えて，制約条件のない最小化問題にも変換できる．

【問題３】

$$\begin{aligned} &\mathit{Minimize} \quad u = \sum_{j \in J} \{ \sum_{k \in K} (\frac{w_j^{(k)}}{\sigma_j^{(k)}})^2 \} \\ &\qquad + \sum_{i \in I} \sum_{\omega \in \Omega} \beta_1 \{\det[v^{(k)}]\}^2 \\ &\qquad + \sum_{j \in J} \beta_2 \{ \sum_{k \in K} \{W_j^{(k)*} - w_j^{(k)}\} - 1\}^2 \\ &\qquad + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \beta_3 \{\max(0, w_j^{(k)} - W_j^{(k)*})\} \end{aligned} \tag{2.8}$$

ここで，β_1，β_2，β_3は十分大きな正の定数である．問題２や問題３はコンプレックス法やシンプレックス法などで解くことができる．

３．定期修理時の情報の有効利用

定期修理時に少なくとも１個の流量計の較正を行ったならば，その流量計の誤差および真値が得られることになるので，その情報を利用して，未較正の流量計の故障診断が可能になる．そこで，$\boldsymbol{T}$ を較正済みの流量計，$\boldsymbol{J_T} = \boldsymbol{J\text{-}T}$ を未較正の流量計の集合とすると，式(1.1)は次のように書き直せる．

$$\sum_{j \in J_T} c_{ij} e_j = \sum_{j \in J_T} c_{ij} z_j^* + \sum_{j \in T} c_{ij} z_j \quad (i \in I) \tag{3.1}$$

誤差e_j を式(1.5)で規格化すると次式が得られる．

$$\sum_{j \in J_T} a_{Tij} x_j = b_{Ti} \quad (i \in I) \tag{3.2}$$

$$a_{Tij} = \frac{c_{ij} L_j}{\sqrt{\sum_{k \in J_T} (c_{ik} L_k)^2}} \quad (i \in I, j \in J_T) \tag{3.3}$$

$$b_{\mathrm{T}i} = \frac{\sum_{j\in J_{\mathrm{T}}} c_{ij}(z_j^{\ *} + L_j) + \sum_{j\in T} c_{ij} z_j}{2\sqrt{\sum_{k\in J_{\mathrm{T}}} (c_{ik} L_k)^2}} \quad (i \in I) \qquad (3.4)$$

従って，このときの故障検出問題および故障診断問題は次のように定式化できる．

【問題$\mathbf{P_T(\phi)}$】

$$\textit{Minimize} \quad y = \sum_{i\in I} (x_{i+2n_{\mathrm{T}}} + x_{i+m+2n_{\mathrm{T}}}) \qquad (3.5a)$$

$$\textit{subject to}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{j\in J_{\mathrm{T}}} a_{\mathrm{T}ij} x_j + x_{i+2n_{\mathrm{T}}} - x_{i+m+2n_{\mathrm{T}}} = b_{\mathrm{T}i} \\ &\qquad\qquad\qquad\qquad (i \in I) \\ &x_j + x_{j+n_{\mathrm{T}}} = 1 \qquad (j \in J_{\mathrm{T}}) \\ &x_j,\ x_{j+n_{\mathrm{T}}} \geq 0 \qquad (j \in J_{\mathrm{T}}) \\ &x_{i+2n_{\mathrm{T}}},\ x_{i+m+2n_{\mathrm{T}}} \geq 0 \quad (i \in I) \end{aligned} \qquad (3.5b)$$

【問題$\mathbf{P_T(F)}$】

$$\textit{MInimize} \quad y = \sum_{i\in I-R} (x_{i+2n_{\mathrm{T}}} + x_{i+m+2n_{\mathrm{T}}}) \quad (3.6a)$$

$$\textit{subject to}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{j\in J_{\mathrm{T}}} a_{\mathrm{T}ij}^{\ \mathrm{F}} x_j + x_{i+2n_{\mathrm{T}}} - x_{i+m+2n_{\mathrm{T}}} = b_{\mathrm{T}i}^{\ \mathrm{F}} \\ &\qquad\qquad\qquad\qquad (i \in I - R) \\ &x_j + x_{j+n_{\mathrm{T}}} = 1 \qquad (j \in J_{\mathrm{T}} - F) \\ &x_j,\ x_{j+n_{\mathrm{T}}} \geq 0 \qquad (j \in J_{\mathrm{T}} - F) \\ &x_{i+2n_{\mathrm{T}}},\ x_{i+m+2n_{\mathrm{T}}} \geq 0 \quad (i \in I - R) \end{aligned} \qquad (3.7b)$$

ここで，n_{T} は未較正の流量計の数であり，$m < n_{\mathrm{T}} < n$. でなければならない．

従って，プラント運転中に従来の【問題Ｐ(φ)】および【問題Ｐ(F)】を解いて，定期修理時に較正すべき流量計の候補を提示し，それらのいずれかの流量計を較正した結果を使ってさらに，【問題$\mathrm{P_T}$(φ)】と【問題$\mathrm{P_T}$(F)】を解きながら，較正すべき流量計を絞り込んでいくことも可能である．なお，そのときの流量計の選定法については省略するが，基本的には誤差の影響は収支式の右辺係数ベクトルbiに表れるので，その値を参考にして選定を行う．

４．運転中の誤差の補正

これまでに述べてきた線形計画法を利用した流量計の故障診断法だけでは，プラント運転中に故障流量計の候補を提示することはできるが，その誤差を推定することはできない．しかしながら，故障流量計の候補が与えられると，誤差推定問題は２次計画問題として定式化することも可能になる．この点については，研究途上のところもあり，まだ論文として公表していないので，定式化等の説明は省略するが，講演の中で概要を紹介する．

５．数値実験例

5.1 数値実験１

図１に示すような５蒸留塔で構成される分離プロセスを対象にする．プロセスの運転条件および流量計の仕様を表１に示す．今回は６成分を分離するとして成分収支式を適当に与えた．

数値実験は以下の手順で行った．

1) 故障流量計を指定して，それらの真値に故障誤差(L_jの１～２倍)を加えて測定値を作成した．

2) 正常な流量計には、管理幅内の一様乱数を発生させて許容誤差を生成し，これを真値に加えて測定値を作成した．

今回は，一様乱数から作成した100組の許容誤差に故障誤差を１～３個埋め込んで数値実験を行った．また，流量計の故障頻度は，組合せを変えながら４つの流量計に0.1、その他の流量計には0.01を与えた．

一例として，故障流量計が３個の場合の結果を表２～４に示す．表２は故障頻度が全て同じ場合（故障頻度を考慮しない場合と同じ）の診断結果，表３と表４は故障頻度が高い流量計が 3 つあるいは２つ故障している場合の診断結果である．表中、正診は３個の故障流量計の組合せだけを候補とした場合，混診は３個の故障流量計以外の組合せも候補とした場合，誤診は３個の故障流量計の組合せを候補としなかった場合，欠報は故障流量計の候補がなかった場合である．

故障頻度を考慮することによって，故障しやすい流量計が故障した場合に見つけやすくなっているという当然の結果が得られている．

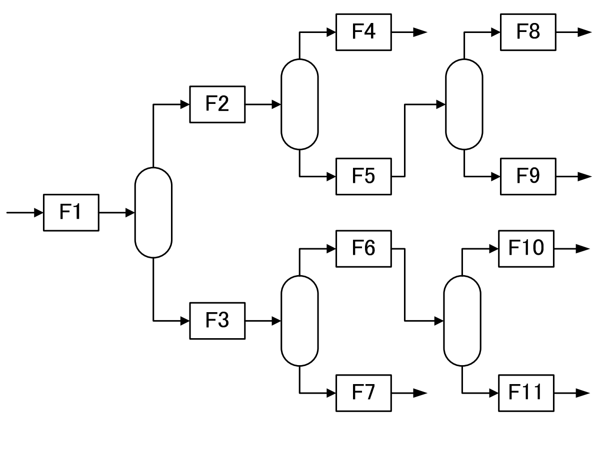

図１　蒸留プロセス（その１）

表１　図１の蒸留プロセスの流量計の仕様

流量計	真値 [kg/s]	ﾌﾙｽｹｰﾙ [kg/s]	管理幅 [kg/s]
F1	40.0	60.0	1.2
F2	16.0	20.0	0.4
F3	24.0	35.0	0.7
F4	6.0	10.0	0.2
F5	10.0	15.0	0.3
F6	14.0	20.0	0.4
F7	10.0	15.0	0.3
F8	4.0	5.0	0.1
F9	6.0	10.0	0.2
F10	8.0	10.0	0.2
F11	6.0	10.0	0.2

表２　故障頻度が同じ時の診断結果

故障流量計	故障頻度0.1	故障の大きさ							
		$H_i^*\times2.0$				$H_i^*\times1.5$			
		正診	混診	誤診	欠報	正診	混診	誤診	欠報
F1,F2,F4	—	78	16	6	0	16	21	59	4
F1,F4,F8	—	71	24	5	0	13	23	59	5
F2,F3,F7	—	69	23	8	0	13	22	60	5
F8,F9,F10	—	60	27	13	0	14	18	65	3

表３　故障頻度が高いものが３つ故障している場合

故障流量計	故障頻度0.1	故障の大きさ							
		$H_i^*\times2.0$				$H_i^*\times1.5$			
		正診	混診	誤診	欠報	正診	混診	誤診	欠報
F1,F2,F4	F1,F2,F4,F10	98	2	0	0	58	14	24	4
F1,F4,F8	F1,F2,F4,F8	97	2	1	0	57	12	26	5
F2,F3,F7	F2,F3,F7,F8	96	4	0	0	60	10	25	5
F8,F9,F10	F1,F8,F9,F10	88	11	1	0	47	16	34	3

表４　故障頻度が高いものが２つ故障している場合

故障流量計	故障頻度0.1	故障の大きさ							
		$H_i^*\times2.0$				$H_i^*\times1.5$			
		正診	混診	誤診	欠報	正診	混診	誤診	欠報
F1,F2,F4	F1,F3,F4,F10	91	5	4	0	34	17	45	4
F1,F4,F8	F1,F2,F5,F8	93	4	3	0	32	25	38	5
F2,F3,F7	F2,F5,F7,F8	88	7	5	0	28	26	41	5
F8,F9,F10	F1,F2,F9,F10	78	9	13	0	28	15	54	3

5.2 数値実験２

実験１では，成分収支式の重量分率には真値を利用した．しかし，実際は分析誤差があるので，分析機器の標準偏差が0.001（誤差１％）と0.0005（誤差0.5％）の場合を設定して，分析誤差の影響を調べた．

一例として，管理幅の上限の２倍の故障誤差を持つ流量計が１個の場合の結果を表５～７に示す．表５は重量分率の真値を利用した場合，表６は真値に分析誤差を加味して作成した分析値を利用した場合，表７は分析値を補正した場合である．真値を利用した場合はほとんど正診になっているのに対して，分析値をそのまま利用すると診断精度はかなり低下する．

表５　重量分率の真値を利用したときの診断結果

故障流量計	成分分析値に与える誤差							
	誤差0.5%				誤差1%			
	正診	混診	欠報	誤診	正診	混診	欠報	誤診
F1	99	1	0	0	99	1	0	0
F2	100	0	0	0	100	0	0	0
F3	99	1	0	0	99	1	0	0
F4	100	0	0	0	100	0	0	0
F5	99	1	0	0	99	1	0	0
F6	100	0	0	0	100	0	0	0
F7	100	0	0	0	100	0	0	0
F8	97	3	0	0	97	3	0	0
F9	100	0	0	0	100	0	0	0
F10	93	6	1	0	93	6	1	0
F11	99	1	0	0	99	1	0	0

表６　分析値をそのまま利用した時の診断結果

故障流量計	成分分析値に与える誤差							
	誤差0.5%				誤差1%			
	正診	混診	欠報	誤診	正診	混診	欠報	誤診
F1	36	63	0	1	13	84	0	3
F2	36	64	0	0	13	87	0	0
F3	37	58	0	5	9	72	0	19
F4	36	61	0	3	10	90	0	0
F5	38	62	0	0	13	87	0	0
F6	35	63	0	2	9	71	0	20
F7	36	63	0	1	11	65	1	23
F8	41	59	0	0	15	85	0	0
F9	34	66	0	0	9	91	0	0
F10	48	52	0	0	14	85	0	1
F11	6	28	32	34	0	10	29	61

表７　補正値を利用した時の診断結果

故障流量計	成分分析値に与える誤差							
	誤差0.5%				誤差1%			
	正診	混診	欠報	誤診	正診	混診	欠報	誤診
F1	94	6	0	0	55	44	0	1
F2	94	6	0	0	53	47	0	0
F3	93	7	0	0	52	44	0	4
F4	94	6	0	0	57	43	0	0
F5	94	6	0	0	57	43	0	0
F6	96	4	0	0	53	46	0	1
F7	95	5	0	0	46	44	5	5
F8	91	9	0	0	57	43	0	0
F9	94	6	0	0	54	46	0	0
F10	95	5	0	0	64	35	0	1
F11	93	7	0	0	53	44	2	1

表８　第１成分の重量分率の分析値，補正値，真値（％）

No.of 流量計	成分1		
	(A)測定値	(B)補正値	(C)真値
F1	14.75	15.09	15.16
F2	37.67	37.60	37.69
F3	0.38	0.22	0.14
F4	98.59	98.86	99.20
F5	0.65	0.65	0.78
F6	0.35	0.54	0.18
F7	0.24	0.73	0.10
F8	0.94	0.31	1.50
F9	0.26	0.27	0.30
F10	0.34	0.30	0.20
F11	0.54	0.11	0.15

それに対して，補正値を利用することによって，診断

精度はかなり改善されている．参考までに，分析誤差が１％のときの第１成分の重量分率の分析値，補正値，真値を表８に示す．真値に対して分析値と補正値はそれほど大きく異なるわけではない．

5.3 数値実験３

定期修理時の較正結果を利用する例として，図２に示すプロセスでの数値実験例を紹介する．また，表９に流量計の仕様を示す．

一例として，管理幅の上限の２倍の故障誤差を持つ流量計が１個ある時に，物質収支式だけを利用した診断結果を表10と11に示す．表中で，定期修理時（基準１）は，運転時の診断で得られた候補の中から，較正すべき流量計を選択した場合であり，定期修理時（基準２）は，全ての流量計の中から，較正すべき流量計を選択した場合である．物質収支式だけを利用した運転時の診断では，混診や欠報が多いが，１個の流量計を選定・較正することによって，診断精度は向上している．

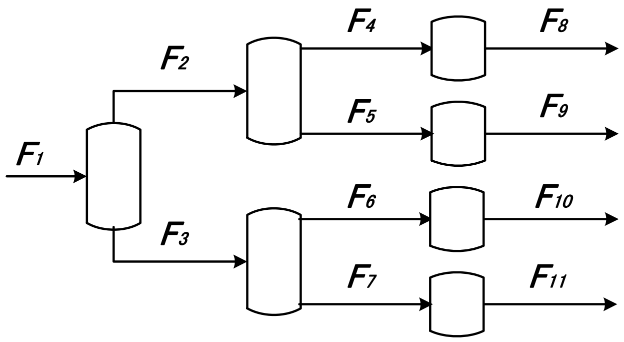

図２　蒸留プロセス（その２）

表９　図２の蒸留プロセスの流量計の仕様

Flowmeter	レンジ [t/h]	管理幅 [t/h]	真値 [t/h]
F_1	60.0	±1.2	40.0
F_2	20.0	±0.4	16.0
F_3	35.0	±0.7	24.0
F_4	10.0	±0.2	6.0
F_5	15.0	±0.3	10.0
F_6	15.0	±0.3	10.0
F_7	20.0	±0.4	14.0
F_8	10.0	±0.2	6.0
F_9	15.0	±0.3	10.0
F_{10}	15.0	±0.3	10.0
F_{11}	20.0	±0.4	14.0

表10　運転中の診断結果

故障流量計	運転時			
	正診	混診	誤診	欠報
F_1	80	19	0	0
F_2	18	49	0	33
F_3	34	54	0	12
F_4	5	54	0	41
F_5	6	56	0	38
F_6	4	45	0	51
F_7	7	53	0	40
F_8	6	48	0	46
F_9	8	47	0	45
F_{10}	3	44	0	53
F_{11}	9	44	0	47

表11　定期修理時の診断結果

故障流量計	定期修理時（基準1）				定期修理時（基準2）			
	正診	混診	誤診	欠報	正診	混診	誤診	欠報
F_1	100	0	0	0	100	0	0	0
F_2	89	2	0	9	86	5	0	9
F_3	100	0	0	0	100	0	0	0
F_4	87	1	0	12	88	0	0	12
F_5	87	3	0	10	90	0	0	10
F_6	82	2	0	16	82	0	0	16
F_7	92	2	0	6	91	3	0	6
F_8	84	1	0	15	83	2	0	15
F_9	88	1	0	11	86	3	0	11
F_{10}	86	2	0	12	86	2	0	12
F_{11}	83	2	0	15	82	3	0	15

おわりに

本報では，線形計画法を利用して，プラントの定常運転中に故障流量計（測定値に大きな偏差がある流量計）の候補を提示する方法を紹介した．しかし，線形計画法だけでは，測定値に含まれる偏差を推定することはできない．そこで，故障流量計の候補が与えられたときに，それを踏まえて測定値を補正する方法も検討している．両者を組み合わせることにより，測定値の補正を行いつつ診断精度の向上も期待できる．また近年，２～４年の長期連続運転も行われており，その間に故障が進行したり，異なる定常状態で運転することもあり得るので，それらを考慮した診断法の開発も行っている．