

機関番号：17102  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560714  
 研究課題名（和文）長期連続運転を考慮した大規模化学プラントにおける流量計の  
 故障診断と測定値の補正  
 研究課題名（英文）Failure Diagnosis and Measurements Correction of Flow meters  
 in Large-Scale Chemical Plant under Long-Term Continuous Operation  
 研究代表者  
 柘植 義文（TSUGE YOSHIFUMI）  
 九州大学・工学研究院・教授  
 研究者番号：00179988

## 研究成果の概要（和文）：

管理幅を用いた流量計の故障診断結果を考慮して、流量計の測定値に含まれる誤差を推定する2つの方法を開発した。最初の方法は物質収支式と成分収支式を制約条件とする二次計画問題として定式化され、1つの定常状態での測定値を利用する。2つめの方法は物質収支式だけを利用した非線型最適化問題として定式化されたが、長期連続運転中に測定値に含まれる誤差は小さくなることはなく、2つ以上の定常状態での測定値が得られるとしている。エタノールプラントを対象にした数値実験により、これらの誤差推定法の有用性を示した。

## 研究成果の概要（英文）：

We developed the two methods for estimating errors contained in the measured values of flowmeters, considering results of the failure diagnosis method based on control limits. First method was formulated as a quadratic programming problem under constraints of material and component balances using measured values obtained in one steady state. Second method was formulated as an nonlinear optimization problem under constraint of material balance, supposing that errors contained in the measured values don't become smaller and the measured values were obtained in more than one steady states during a long-term continuous operation. The effectiveness of these estimation methods were demonstrated by the numerical simulations with the use of an ethanol plant.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：プロセスシステム工学

科研費の分科・細目：プロセス工学・反応工学・プロセスシステム

キーワード：プロセス運転・設備管理

1. 研究開始当初の背景  
 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、測定誤差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、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。ここで、物理的に流量計の測定誤差を補正するためには、流量計をプラントから取り外して再較正を行うしかないため、プラントの定期修理期間中にしか較正することができない。しかも、かなりの労力と費用を要するので、すべての流量計の較正を定期修理期間内に行うことはほとんど不可能である。一方、昨今は、高压ガス保安法の改正を受けて、4年連続運転を行う認定事業所も多くなり、流量計の較正を行う機会がますます減少している。従って、次の2つの課題がより重要になってきている。

**課題(1)** プラント運転中に流量計の測定誤差を推定して、高度制御に活用する。

**課題(2)** プラント運転中に測定誤差が大きい流量計を特定して、定期修理期間中に較正すべき流量計を予め絞り込み、保全計画に活用する。

課題(1)に関しては、従来からデータリコンシレーションの手法を利用して、物質収支・成分収支を満足するように測定誤差を推定することは可能である。しかしこの方法では、原理的には測定誤差の推定値の自乗和が最小になるような推定を行うために、測定誤差が大きい流量計が混在する場合には、その測定誤差を過小評価した推定結果が得られるという難点がある。

課題(2)に関しては、古くから統計的検定を利用した方法が多数報告されている。これらの方法は、測定誤差を、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“故障流量計”としている。しかし、故障している可能性のある流量計の組合せを全て対象にした故障診断法であったために、化学・石油精製プラントのような大規模プラントには適用できなかつた。

これに対して、本研究代表者は「線形計画法を利用した流量計の故障診断法」を提案している。本診断法では、測定誤差に対する許容範囲(以下、管理幅と呼ぶ)が与えられたときに、管理幅を逸脱する測定誤差を持つ流量計を“故障流量計”と定義し、線形計画法を利用することによって、大規模プラントにも十分適用できるようにしている。本診断法により、課題(2)に対してある程度の成果は得られるようになったが、管理幅を逸脱している可能性のある故障流量計の候補を提示するだけであり、測定誤差の大きさを推定すること

はできない。従って、課題(1)には全く対応できないのが欠点である。

## 2. 研究の目的

本研究では、前述の課題(1)と課題(2)を同時に解決することを目的にして、本研究代表者が開発した「線形計画法を利用した流量計の故障診断法」を利用することにより、故障流量計の候補が提示されたときに、故障の有無にかかわらず全ての流量計の測定誤差を推定する手法を開発する。

さらに、昨今の4年連続運転にも対応するために、連続運転期間中に測定誤差が徐々に大きくなる場合や、時期によって運転条件を変更する場合を考慮した手法に拡張する。

### (1) 測定誤差の推定

本研究で対象にする故障流量計は管理幅を超えた測定誤差を持ち、正常な流量計は管理幅以内の測定誤差しか持たないことになる。そこで、従来のデータリコンシレーションによる推定とは異なり、故障診断によって提示された故障流量計の候補については管理幅を超える誤差推定を、それら以外の流量計については管理幅以内の誤差推定が行えるようにする。これにより推定精度の信頼性が向上すると期待される。

一方、本研究で利用する故障診断法では、提示される故障流量計の候補が複数存在する場合がある。例えば、流量計の組合せ(a, b, c)または(a, d)のいずれかであるという診断結果を提示する場合である。それぞれの組合せについて測定誤差を推定できるが、故障流量計の数が異なるために、推定誤差の自乗和などの評価関数で単純に比較することはできない。このような場合でも、どちらの組合せがより妥当であるかを判定する方法まで開発することにより、故障診断の精度の向上を図る。

### (2) 長期連続運転への対応

本研究で基本となる故障診断法は、物質収支・成分収支を満足することを制約条件としているために、ある定常状態で得られる一組の測定データを利用する。しかし、本研究で対象にする流量計の故障モードは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であるために、長期間使用している間に劣化が進行することはあっても改善されることはない。そのために、全く同じ運転条件を維持していても、時期によっては異なる測定データの組が得られる。また、4年間の間に諸事情により運転条件を変更することの方が普通である。従って、4年間の間に、時期によって異なる複数の組の定常状態測定データが存在する。逆に、そのことを利用することによって、診断精度の向上が期待できる。そこで本研究では、故障診断法の定式化を複数の組の定常状態測定データが存在す

る場合にまで拡張し、その有用性の検証までを行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 長期連続運転を考慮した検証データの作成

連続運転を行う化学プラントでは、ある期間内は定常運転が行われるために、その期間内はほぼ一定の定常状態測定データが得られるはずであるが、以下の2つの理由により、4年間といった長期連続運転期間内に、複数個の定常状態測定データが得られる。

(a) 時期によって、運転条件が異なることがある。

(b) 測定値がバイアスを持つような故障(劣化現象)は時間の経過につれて進展する。しかし、今回の問題の定式化においては、(a)のような運転条件の違いによる見かけ上の流量測定値の違いは理論的にはキャンセルされるために (b)のような流量計の劣化現象のみを考慮すればよいはずである。そこで念のために、市販の化学プラント用定常シミュレータを利用して、実プラントで実際に得られる複数個の定常状態測定データを準備できるようにする。今回は流量計を対象にするので、物質収支・成分収支が重要となる化学プラントとして、主として複数の蒸留塔で構成される分離プロセスのシミュレータを作成し、運転条件を変更したシミュレーションを実施する。

一方、(b)に関しては、測定値がバイアスを持つような故障が時間と共に進展するような劣化モデルを流量計毎に想定し、(a)での結果と組み合わせることによって今後の研究での検証データを作成する。

#### (2) 誤差推定法のプログラム作成と検証

管理幅を逸脱する測定誤差を持つ故障流量計の候補集合  $S_{ij}$  が与えられたとき、故障流量計の候補については管理幅を超える誤差推定を、それら以外の流量計については管理幅以内の誤差推定を行う問題は、不等号および等号制約条件のある非線形最適化問題として定式化できる。この問題をそのまま解くことも可能であるが、本研究では、いったん不等号制約条件だけをはずした問題を考えて、二次計画問題として定式化することによって、最終的には連立方程式を解くだけの問題に帰着させる。その結果得られる解が除去した不等号制約条件を満足していれば、そのまま解として採用できる。さもなければ、元々の故障候補集合自体の仮定が違っている(Case1)、あるいは、不等号制約条件を満足するように解を修正する必要がある(Case2)。

(Case1)に対しては、故障候補集合の仮定を変更して二次計画問題を解けばよい。一方、(Case2)に対しては、不等号制約条件を満足

するように解を修正する。まずこのような誤差推定法のためのプログラムを作成して、1つの定常状態測定データが得られた時の故障診断と誤差推定の精度等の検証を行う。

#### (3) 誤差推定法の拡張

前述の誤差推定法は定常状態測定データが1組しかない場合である、これを定常状態測定データが2組以上存在する場合に拡張する。ただし、単純な拡張は無理であるため、元々の問題に立ち返り、誤差は時間と共に進展することはあっても改善することはないことを考慮して非線形最適化問題として定式化する。その後、前述(1)の検証データに適用して有用性を検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) 対象プロセスと測定データの作成

プロセスシミュレータ“HYSYS”を利用して、図1に示すエタノール精製プロセスのシミュレーションを行い、流量測定値と成分分析値を得た。表1にある定常状態下での質量流量真値と管理幅を示す。誤差が管理幅内であれば正常な流量計であり、管理幅を逸脱したときに故障と見なす。また、このときの各タワー毎の成分組成を分析値とした。表2にタワーAの成分組成を示す。対象プラント内の主要成分はエタノール、水、二酸化炭素であり、その他に微量成分を含む。本研究では2年間の連続運転中に、6、14、22ヶ月目に定常状態での真値データに誤差を付加して流量測定データとした。このとき、1個または2個の故障流量計が含まれていると想定し、14ヶ月目で故障誤差を持つよう設定した。その他の正常な流量計は誤差の進展方向(+/-)をランダムに決定し、該当する許容誤差を設定した。表3に設定例を示す。数値は管理幅で規格化した値であり、許容誤差は[0,1]の範囲内にあり、0.5の時は誤差なし(真値)に対応する。

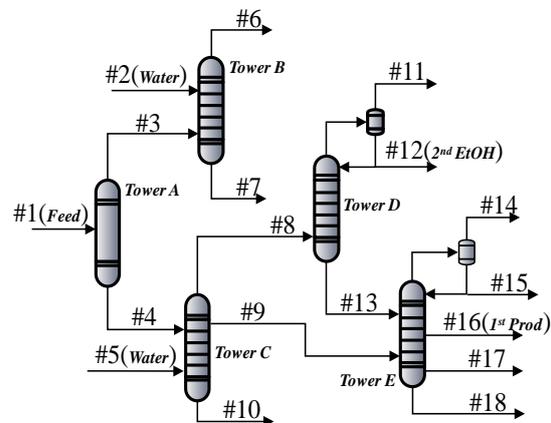


図1 対象プロセス

表 1 各ストリームの質量流量・管理幅

No.	Flow rate [kg/h]	$L_j$ [kg/h]	No.	Flow rate [kg/h]	$L_j$ [kg/h]	No.	Flow rate [kg/h]	$L_j$ [kg/h]
1	46716.7	915.00	7	2406.9	30.00	13	128.2	3.50
2	2341.9	112.50	8	301.8	3.50	14	4.3	0.35
3	2857.2	30.00	9	7426.9	112.50	15	2.0	0.15
4	43859.5	915.00	10	47130.8	915.00	16	2954.8	112.50
5	11000.0	155.00	11	68.9	0.95	17	3.0	0.15
6	2792.2	30.00	12	104.7	3.50	18	4591.0	112.50

表 2 成分組成(Tower A)

Stream number	1	3	4
Mass flow rate [kg/h]	46716.7	2857.2	43859.5
Components [-]			
Ethanol	0.06367	0.01818	0.06663
H <sub>2</sub> O	0.87590	0.01713	0.93185
CO <sub>2</sub>	0.06014	0.96462	0.00122
Others	0.00029	0.00007	0.00030
Methanol	0.00004	0.00001	0.00005
Aceticacid	0.00001	0.00000	0.00001
1-Propanol	0.00003	0.00001	0.00003
2-Propanol	0.00003	0.00001	0.00003
1-Butanol	0.00003	0.00001	0.00003
3-M-1-Butanol	0.00010	0.00002	0.00010
2-Pentanol	0.00002	0.00001	0.00002
Glycend	0.00003	0.00000	0.00003

表 3 誤差の設定例(管理幅で規格化)

Month	$k$	Failure flowmeters	Normal flowmeters	
			(+)	(-)
0	-	0.500	0.500	0.500
6	1	0.909	0.527	0.473
14	2	<b>1.454</b>	0.564	0.436
22	3	<b>2.000</b>	0.600	0.400

## (2) 数値実験結果

表 4 に、同時に 2 個の流量計が故障していることを想定した数値実験結果の一例を示す。故障流量計の組合せ {f1, F4}, {f1, F8}, {f1, f9} のいずれの場合も、14 ヶ月目の時点で故障誤差を持つ。表中、P(F) の欄はその時の定常状態測定値だけを利用した故障診断により得られる故障候補を、Q(S) の欄は前者を考慮した 2 次計画問題として定式化した誤差推定法により得られた推定値が故障誤差をもつ流量計を示している。一方、QT の欄はそれまでに得られている複数組の定常状態測定データを利用して非線形最適化問題として定式化した誤差推定法により得られた推定誤差が故障誤差である流量計を示す。

### (2-1) 誤差推定(2次計画問題)

#### <Case1 : {f1, f4}>

物質収支だけを利用すると、14 ヶ月目の時点では、故障診断 P(F) では故障を見逃し、誤差推定 Q(S) でも、故障ではない f10 が故障誤差を持つような推定をしている。22 ヶ月目の時点でも、故障診断 P(F) は誤診であり、誤差推定 Q(S) でも改善はみられない。しかし、成分収支を利用すると、故障診断 P(F) の段階で正解だけを候補とするため、誤差推定 Q(S) でも妥当な推定値を得ることが出来た。

#### <Case2 : {f1, f8}>

物質収支だけを利用すると、14 ヶ月目の時点では、故障診断 P(F) では故障を見逃し、誤差推定 Q(S) でも、f1 だけが故障誤差を持つような推定をしている。22 ヶ月目の時点でも、故障診断 P(F) で f1 だけは検出しているが、誤差推定 Q(S) では正解の組合せ以外の候補 {f1, f12} も提示している。しかし、成分収支を利用すると、故障診断 P(F) の段階で正解だけを候補とするため、誤差推定 Q(S) でも妥当な推定値を得ることが出来た。

#### <Case3 : {f1, f9}>

物質収支だけを利用すると、14 ヶ月目の時点では、故障診断 P(F) では故障を見逃し、誤差推定 Q(S) でも、f1 だけが故障誤差を持つような推定をしている。22 ヶ月目の時点では、故障診断 P(F) で f1 だけは検出しているが、候補として f4 も提示して混診の状態であるが、誤差推定 Q(S) では正解の組合せだけを提示している。このケーススタディーでも、成分収支を利用すると、故障診断 P(F) の段階で正解だけを候補とするため、誤差推定 Q(S) でも妥当な推定値を得ることが出来た。

### (2-2) 誤差推定(非線形最適化問題)

14 ヶ月目の時点で、6 ヶ月目からの誤差の進展を考慮した誤差推定 QT を行うことにより、Case1 : {f1, f4}, Case2 : {f1, f8}, Case3 : {f1, f9} のいずれの場合でも、物質収支式だけを利用して正解の組合せの流量計が共に故障誤差であるような推定値が得られた。図 2 に Case3 : {f1, f9} に対する推定結果を示す。図の横軸の番号は流量計の番号であり、縦軸が管理幅で規格化した誤差であり、[0, 1] の範囲内が許容誤差、それを逸脱すると故障誤差である。青色のバーがシミュレーションで設定した誤差であり、f1 と f9 が管理幅の約 1.5 倍の故障誤差を持つ。14 ヶ月目の時点での Q(S) の解は f1 のみであったために、それを信じて QT を解いた結果がオレンジ色のバーである。このとき、f9 の推定値が管理幅の上限に張り付いたため、f9 も故障している可能性があるが、QT を解き直した結果が紫色のバーである。最終的には、紫色の推定値の組合せを妥当な値として採用した。

表 4 に示した故障流量計以外の組合せについても、ほぼ同様の結果が得られた。

表4 故障診断及び誤差推定結果の一例

Time Failure [month] flowmeters errors	P(F) Q(S)	物質収支だけを利用			成分収支を導入	
		Candidates	$S_{estimate}$	QT $S_{estimate}$	Candidates	Q(S) $S_{estimate}$
6 <b>f1,f4</b> 0.909	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$
14 1.455	$\phi$	{f10}	{f1,f4}	{f1,f4}	{f1,f4}	{f1,f4}
22 2.000	{f5},{f10}	{f10}	{f1,f4}	{f1,f4}	{f1,f4}	{f1,f4}
6 <b>f1,f8</b> 0.909	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$
14 1.455	$\phi$	{f1}	{f1,f8}	{f1,f8}	{f1,f8}	{f1,f8}
22 2.000	{f1}	{f1,f8},{f1,f12}	{f1,f8}	{f1,f8}	{f1,f8}	{f1,f8}
6 <b>f1,f9</b> 0.909	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$	$\phi$
14 1.455	$\phi$	{f1}	{f1,f9}	{f1,f9}	{f1,f9}	{f1,f9}
22 2.000	{f1},{f4}	{f1,f9}	{f1,f9}	{f1,f9}	{f1,f9}	{f1,f9}

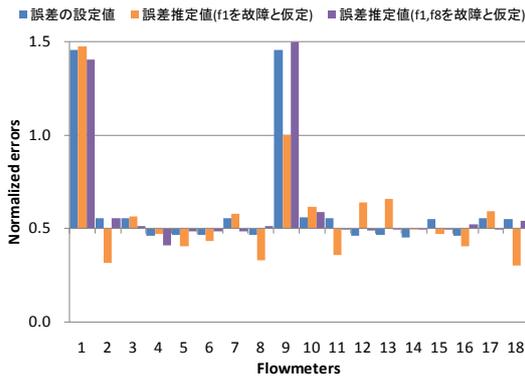


図2 QTによる推定値 ({f1, f9}14ヶ月目)

(3) 成果のまとめ

流量計の故障診断と同時に誤差推定を行う方法を開発した。この方法では、物質収支式の他に成分収支式も活用することにより、故障誤差を持つ流量計を特定すると同時に測定値の補正に利用可能な誤差の推定値を得ることが出来る。しかし、成分収支式を活用するためには、各ストリーム内の成分を分析する必要があるために、常に利用出来るとは限らない、そのような場合でも、長期間の運転中に誤差が進展することに着目した新たな誤差推定法を開発した。この手法で物質収支式だけを利用しても、故障誤差を持つ流量計を特定して妥当な誤差推定が出来ることを示した。今後は、実プラントで得られる実測値に適用していきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- 1) A Proposal of Error Estimation Method for the Improvement of Failure Diagnosis based on Control Limits  
Satoshi HATANAKA, Naoki KIMURA, and Yoshifumi TSUGE

Proceeding of the 23rd International Symposium on Chemical Engineering,

Fukuoka, Japan, OI-03, December, 2010

- 2) A Method for Error Estimation of Flowmeters considering Results of Failure Diagnosis Based on Control Limits

Shinichi KOMATSU, Naoki KIMURA, and Yoshifumi TSUGE

Proceedings of 5th International Symposium on Design, Operation and Control of Chemical Processes (PSE Asia 2010), Singapore, p.p.1184–1194, July, 2010

- 3) An Error Estimation Method of Flowmeters using Results of Failure Diagnosis Based on Control Limits

Shinichi KOMATSU, Naoki KIMURA, and Yoshifumi TSUGE

Proceeding of the 22nd International symposium on Chemical Engineering, Daejeon, Korea, OG-03, December, 2009

- 4) 管理幅を基にした故障診断の結果を考慮した誤差推定法の改良

小松真一, 木村直樹, 柘植義文

信学技報, R2009-33, pp. 1-5, 2009年10月

[学会発表] (計4件)

- 1) 管理幅を基にした流量計の故障診断および測定値の補正

小松真一, 木村直樹, 柘植義文

化学工学会第42回秋季大会, 2010年9月

- 2) 管理幅を基にした故障診断法の診断精度の改善に役立つ誤差推定法の提案

畑中 聡, 木村直樹, 柘植義文

第12回化学工学会学生発表会, 2010年3月6日

- 3) オンストリームにおける流量計の故障診断と測定値の補正

小松真一, 鳥越陽介, 木村直樹, 柘植義文

日本設備管理学会, 創立20周年記念大会研究発表大会, 2008年12月

- 4) 長期連続運転を考慮した大規模化学プラントにおける流量計の故障診断

鳥越陽介, 小松真一, 木村直樹, 柘植義文

日本設備管理学会, 創立20周年記念大会研究発表大会, 2008年12月

6. 研究組織

- (1) 研究代表者

柘植義文 (TSUGE YISHIFUMI)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 00179988