

化学プラントの異常診断のためのモデル

松山 久義

プラントの異常診断システムは、対象プラントの状態変数を測定して信号に変換する“測定系”、信号から異常状態の特徴（症状）を抽出する“信号処理系”、症状から異常の原因の候補を推論する“推論系”の3つのサブシステムにより構成されている。測定系および信号処理系に使用される技術は、異常診断以外の目的のために開発されたものを借用すればよいが、推論系に用いられる技術は最近の20年間に開発された異常診断特有のものである。ここでは、推論系に用いられる技術を“異常診断法”と呼ぶことにする。

異常診断法は、オペレータの経験をもとにして異常診断を行なう方法と、対象プラントのモデルをもとにして異常診断を行なう方法とに大きく分類できる。前者を経験的診断法、後者を論理的診断法と呼ぶことにする。前者は、さらにニューラルネットワーク [1]、パターン認識 [2] のように定量的データを用いるものと、デシジョン・テーブル [3]、エキスパート・システム [4] のように定性的ルールを用いるものにと分類できる。また、後者は、拡張カルマンフィルタ [5]、ベトリネット [7]、符号付有向グラフ [8] のように定性的モデルを用いるものにと分類できる。

ここでは、有向グラフをもとにした定性的モデルにより対象プラントを表現する方法、および、それを用いた異常診断法について述べる。

1. 異常診断のための初歩的モデル

最も単純なモデルとしては、対象プラントの状態変数を点に、状態変数間の因果関係を枝に対応させた有向グラフが考えられる。状態変数の値が正常であることを“0”で、異常であることを“*”で表わして対応する点に与え、これらの記号の組合せにより対象プラントの異常状態を表現する。

異常診断においては、異常を示す変数（点）と異常が伝わる経路（枝）が重要な意味を持つ。異常を示す点を“有効点”と呼び、異常が伝わる経路を構成する

枝を“有効枝”と呼ぶ。前述のように異常状態を表現する場合には、有効点は“*”を与えられた点であり、有効枝は始点と終点とに“*”を与えられた枝である。

有効点と有効枝だけで構成される有向グラフの強連結成分間の半順序関係において極大となるもの（極大強連結成分）を求めれば、それに含まれる点が代表する事象が異常の原因の候補となる。

【例1】 図1(a)のようなタンク系の状態変数は、流量 F_0 、 F_1 、 F_2 、およびレベル L_1 、 L_2 である。これらの変数間の因果関係を表わす有向グラフは、図1(b)のように与えられる。

第1タンクと第2タンクの間配管がつまりを生じると、 F_1 が減少し、 L_1 が上昇して L_2 が下降する。さらに L_2 の下降によって F_2 も減少する。したがって、図1(c)に示すように、 F_0 には“0”が、 F_1 、 F_2 、 L_1 、 L_2 には“*”が与えられる。

有効点と有効枝だけで構成される有向グラフは図1

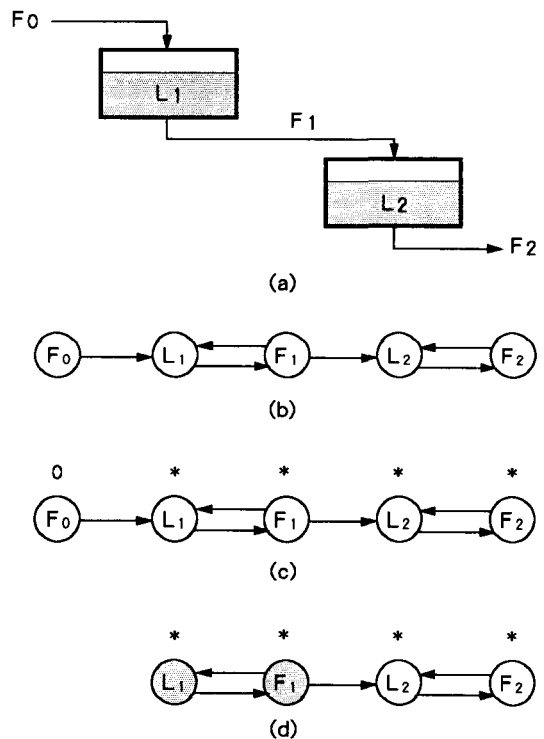


図1 有向グラフを用いた異常診断

(d) のようになり、その極大強連結成分には、 L_1 と F_1 が含まれる。すなわち、 L_1 の代表する事象（第1タンクのもれ）または F_1 の代表する事象（2個のタンク間の配管のつまり）が異常の原因であると判定できる。

この方法の欠点は、対象プラントのモデルの中に大きな強連結成分が存在する場合には、有効点と有効枝だけで構成される有向グラフの極大強連結成分も大きくなり、多数の異常の原因の候補が出力されることである。例1に示した簡単な系についても、異常の原因の候補が2個出力されている。異常の原因を絞り込むには、有向グラフより多くの情報量を持つモデルが必要になる。

2. 異常診断のための基本モデル

因果関係を“助長”と“抑制”に分類し、因果関係が助長であるときは対応する枝に符号“+”を、抑制であるときは符号“-”を与えたものを“符号付有向グラフ”と呼び、対象プラントのモデルとして用いる。符号付有向グラフは次のように定義できる [8]。

【定義1】符号付有向グラフの定義

符号付有向グラフとは、

有向グラフ $G = (N, B, \partial^+, \partial^-)$

写像 $\Psi : B \rightarrow \{+, -\}$

の複合概念 $\Gamma = (G, \Psi)$ である。

また、 $\Psi(b)$ ($b \in B$) を枝 b の“符号”と呼ぶ。

ただし、 N と B は、それぞれ、 G 内の点および枝の集合、 ∂^+ と ∂^- は、それぞれ、各枝の始点および終点を与える連続関数である。

状態変数の値を単に正常と異常とに分類するのではなく、正常値の上下に設定したしきい値によって、“正常”、“異常に高い”、“異常に低い”の3段階に分類し、それぞれ、“0”、“+”、“-”で表わして対応する点に与える。これらを“0”も含めて点の“符号”と呼ぶ。また、これらの符号の組合せを“パターン”と呼び、プラントの異常状態の表現として用いる。パターンは次のように定義される。

【定義2】パターンの定義

写像 $\omega : N \rightarrow \{+, 0, -\}$ を符号付有向グラフ $\Gamma(G, \Psi)$ 上の“パターン”と呼ぶ。

また、 $\omega(n)$ ($n \in N$) を点 n の“符号”と呼ぶ。
ここで、 N は有向グラフ G 内の点の集合である。

上記のようなモデルおよび異常状態の表現を用いたときの有効点と有効枝は次のように定義できる。

【定義3】有効点と有効枝の定義

符号付有向グラフ $\Gamma = (G, \Psi)$ 上に1つのパターンが与えられたとき、

$$\omega(n) \neq 0$$

が成立する点 $n \in N$ を“有効点”と呼び、

$$\omega(\partial^+ b) \Psi(b) \omega(\partial^- b) = +$$

が成立する枝 $b \in B$ を“有効枝”と呼ぶ。

有効点と有効枝だけで構成される有向グラフを作成し、その極大強連結成分を求めれば、それに含まれる点とその符号の対が代表する事象が異常の原因の候補となる。この方法を用いれば、一巡の符号の積が“-”となる閉路は、有効点と有効枝だけで構成される有向グラフの上では必ず切断されるので、極大強連結成分が小さくなり、異常の原因の候補の数が少なくなる。

【例2】例1と同じタンク系（図1(a)）を対象プラントとする。流量 F_0 が増加すればレベル L_1 が増加するので、 F_0 から L_1 への因果関係は“助長”であり、対応する枝の符号は“+”である。流量 F_2 が増加すればレベル L_1 が減少するので、 F_2 から L_1 への因果関係は“抑制”であり、対応する枝の符号は“-”である。以下同様にして、符号付有向グラフを作成すると、図2(a)のように与えられる。ただし、実線の枝は符号が“-”の枝を、破線の枝は符号が“+”の枝を表わす。

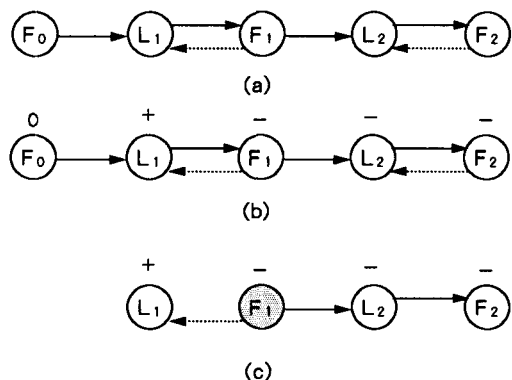


図2 符号付有向グラフを用いた異常診断

第1タンクと第2タンクの間配線につまりを生じると、 F_1 が減少し、 L_1 が上昇して L_2 が下降する。その結果流量 F_2 が減少して図2(b)に示すようなパターンが現われる。

図2(b)において符号付有向グラフ中の有効点と有効枝だけを残すと、図2(c)のような構造の有向グラフが得られる。この有向グラフの極大強連結成分内にある点 F_1 とその符号“-”の対が代表する“2個のタンクの間配管のつまり”を異常の原因と判定できる。

3. 非測定変数の処理

現実のプラントには測定されていない状態変数が多数存在するので、有効点と有効枝だけで構成する有向グラフを作るためには工夫を要する。

測定されている状態変数を“測定変数”、測定されていない状態変数を“非測定変数”と呼ぶ。測定変数に対応する符号付有向グラフ上の点を“測定点”、非測定変数に対応する点を“非測定点”と呼ぶ。また、測定点の符号の組合せを“測定点上のパターン”と呼ぶ。また、測定点のうち、符号+または-を持つものを“有効測定点”と呼ぶ。

異常の原因に対応する点から有効測定点へ異常が伝搬しているから、異常の原因に対応する点と有効測定点とは、一連の有効枝で結ばなければならない。この一連の有効枝をまとめて“有効道”と呼び、大域的な異常の伝搬経路のモデルとして用いる。有効道は次のように定義される。

【定義4】有効道の定義

測定点上のパターンが与えられたとき、有効測定点を終点とする初等的な有向道上の非測定点に+または-の符号を適当に与えてその有向道上のすべての枝を有効枝にすることができるとき、その有向道を“有効道”と呼ぶ。

上のよう定義された有効道の始点とその符号の対が異常の原因の候補となるが、非測定点の符号の仮定のしかたは非測定点の増加とともに指数関数的に増大するもので、非常に多数の異常の原因の候補が列挙される可能性がある。そこで、次の前提条件を用いて、異常の原因の候補のスクリーニングを行なう。

単一原因の前提条件

測定変数のすべての異常は1つの原因によって説明できなければならない。

異常の原因となる事象の発生確率は非常に小さいので、同時に2個以上の異常の原因が発生することはないと考えるのが、単一原因の前提条件である。単一原因の前提条件の下では、すべての有効な測定点は、有効道によってただ1個の点と結ばなければならない。すなわち、次のように定義される。“有効根付木”が異常の伝搬状態を表すモデルとなる。

【定義5】有効根付木の定義

符号付有向グラフと、それに含まれる測定点上のパターンが与えられたとする。符号付有向グラフ上のある点からすべての有効な測定点へ有効道が存在するとき、その点とそれらの有効道とで構成される木を“有効根付木”と呼び、その点をその有効根付木の“根”と呼ぶ。

有効根付木の根と根の符号との対は原因の候補を表し、“候補対”と呼ばれる。したがって、符号付有向グラフを用いる異常診断は次のような“組合せ論的列挙問題”に定式化される。

異常診断問題の定式化

測定点上のパターンPが与えられたとき、非測定点の符号を任意に補って、有効根付木を列挙し、その根と符号の対を列挙せよ。このようにして列挙された点と符号の対の集合を“候補対集合”と呼ぶ。候補対集合は異常の原因の候補の集合に対応する。

【例3】 例1と同じタンク系(図1(a))において、レベル L_1 、 L_2 が測定されていない場合を考える。第1タンクと第2タンクの間配管につまりを生じたときには、図3(a)に示すようなパターンが現われる。

L_1 、 L_2 に任意の符号を補って有効点と有効枝だけを残すと、図3(b)、(c)、(d)に示す有向グラフ以外は無効根付木にならない。したがって、図3(a)の有向グラフの極大強連結成分内にある点 L_1 とその符号-の対が代表する“第1タンクのもれ”と図3(b)、(c)の有向グラフの極大強連結成分内にある点 F_1 とその

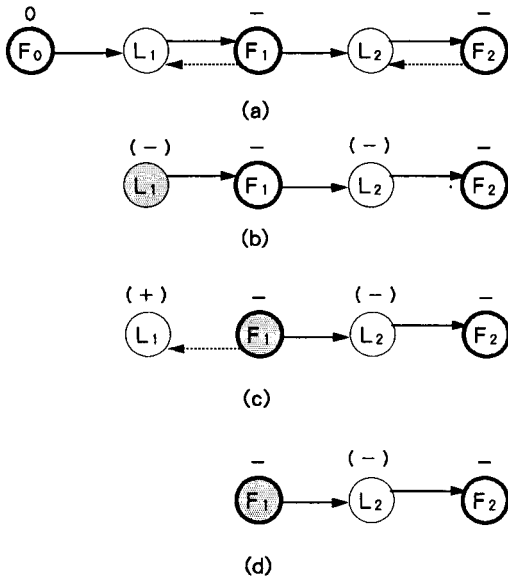


図3 非測定変数の処理

符号-の対が代表する“2個のタンクの間の配管の閉塞”とを異常の原因と判定できる。

4. 基本モデルへの情報の追加

4.1 情報の追加の必要性

パイロットプラントを用いて前節に示した異常診断法の実用化試験を行なった結果、診断速度は十分速いが異常の原因を絞り込む機能が十分でない場合があるという結論が得られた [9]。

たとえば、化学プラント等の流体を扱うプラントで典型的な異常の原因でもある“もれ”を圧力の情報だけで診断する場合に符号付有向グラフを用いると、例4に示すように、“もれ”の発生している場所を同定することができない。

異常の原因の候補を絞るためには、対象プラントから得られるはずの情報をもっと利用しなければならない。

[例4] 図4(a)に示すような左方からガスが供給されているタンク=配管系を考える。この系の状態変数は、圧力 P_i ($i=1, 2, \dots, 5$), 差圧 D_i ($i=1, 2, \dots, 4$), 流量 F_i ($i=1, 2, \dots, 4$), で、符号付有向グラフは図4(b)のように与えられる。ただし、測定点は圧力 P_i ($i=1, 2, \dots, 5$) だけである。

第3タンクにもれを生じ、その影響が第2タンク、第4タンクにまで及んだ時点のパターンは、図4(b)のように与えられる。

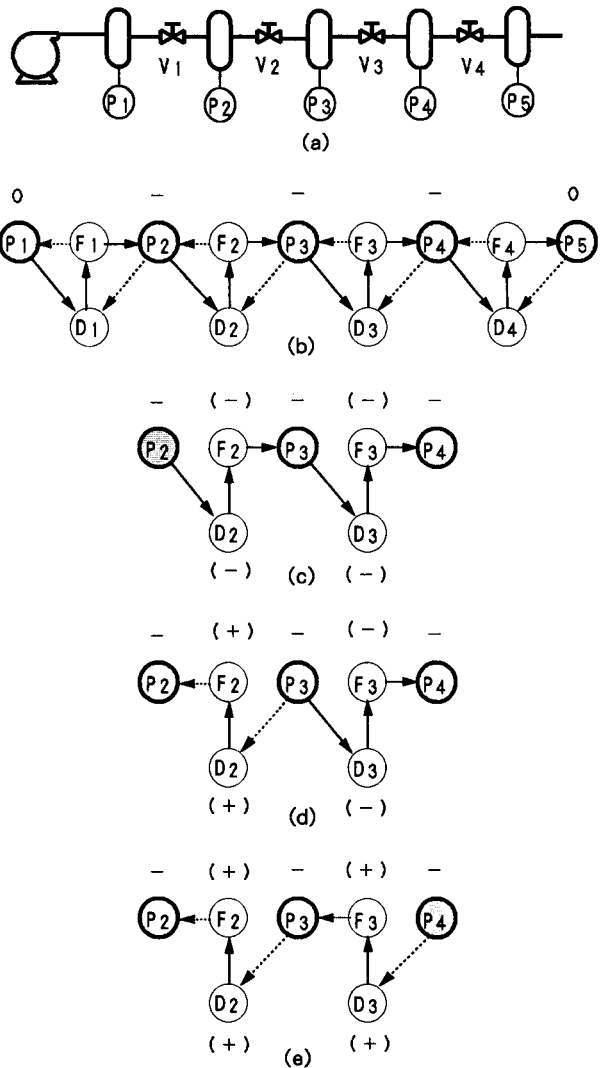


図4 符号付有向グラフを用いた“もれ”の診断

非測定点の符号を仮定して得られる有効根付木を列挙すると、図4(c)~(e)に示す3つの有効根付木が得られる。すなわち、真の原因である“第3タンクのもれ”だけでなく、“第2タンクのもれ”、“第4タンクのもれ”も異常の原因の候補として列挙されることになる。

4.2 長さ・符号付有向グラフ

本節では、異常が伝搬するのに要する時間を利用するモデル [10] について述べる。

変数間の因果関係を通じて異常が伝搬するのに要する時間を“長さ”として、符号付有向グラフ上の対応する枝に与えたものを“長さ・符号付有向グラフ”と呼ぶ。長さ・符号付有向グラフは次のように定義でき

る。

【定義6】長さ・符号付有向グラフの定義

長さ・符号付有向グラフとは、
 有向グラフ $G = (N, B, \partial^+, \partial^-)$
 写像 $\Psi : B \rightarrow \{+, -\}$
 写像 $\Lambda : B \rightarrow R$

の複合概念 $\Xi = (G, \Psi, \Lambda)$ である。ただし、 R は非負の実数の集合であり、 $\Psi(b)$ 、 $\Lambda(b)$ ($b \in B$) を枝 b の“符号”、“長さ”と呼ぶ。

異常の原因から異常を示している測定変数まで異常が伝搬するのに要する時間は、異常を示していない測定変数まで伝搬する時間より短いはずである。異常の原因から測定変数まで異常が伝搬する時間を対応する点同士を結ぶ有向道の長さで表わすと、異常の原因から有効測定点までの有向道の長さは、異常を示していない点までの有向道の長さより短くなければならない。したがって、大域的な異常の伝搬経路である“長さ付有効道”は次のように定義される。

【定義7】長さ付有効道の定義

定義4で与えられた有効道の中で、有効道の始点からすべての正常な測定点までの最短有向道の長さよりも短いものを“長さ付有効道”と呼ぶ。
 ただし、有向道の長さは、それに含まれる枝の長さの和として定義する。

単一原因の前提条件の下では、次に示す“長さ付有効根付木”が、異常の伝搬状態を表わすモデルとなる。

【定義8】長さ付有効根付木の定義

符号付有向グラフとそれに含まれる測定点上のパターンが与えられたとする。符号付有向グラフ上のある点からすべての有効測定点へ長さ付有効道が存在するとき、その点とそれらの長さ付有効道とで構成される木を“長さ付有効根付木”と呼び、その点を長さ付有効根付木の“根”と呼ぶ。

長さ・符号付有向グラフを用いる場合には、プラントの動特性の測定が必要となるが、符号付有向グラフに比べて異常の原因を絞り込む能力は高い。

【例5】例4と同じ系(図4(a))を対象とする。圧力と差圧との関係、差圧と流量との関係には、ほとん

ど遅れが存在しないが、流量と圧力との関係には大きな遅れが存在する。タンクの容積がすべて等しい場合には、流量から圧力に向かう枝の長さはすべて等しいので、長さはすべて1とすると、長さ・符号付有向グラフは図5(a)のように与えられる。

例4と同じ異常が発生したときには、 P_2 から P_4 への有効道の長さは P_2 から P_1 への有向道の長さより短いので、図4(c)に示した有効根付木は長さ付有効根付木にはなり得ない。同様の理由で、図4(e)に示した有効根付木は長さ付有効根付木にはなり得ず、長さ付有効根付木は図5(b)に示したものだけとなる。したがって、異常の原因の候補は、真の原因である“第3タンクのもれ”だけに絞りこむことができる。

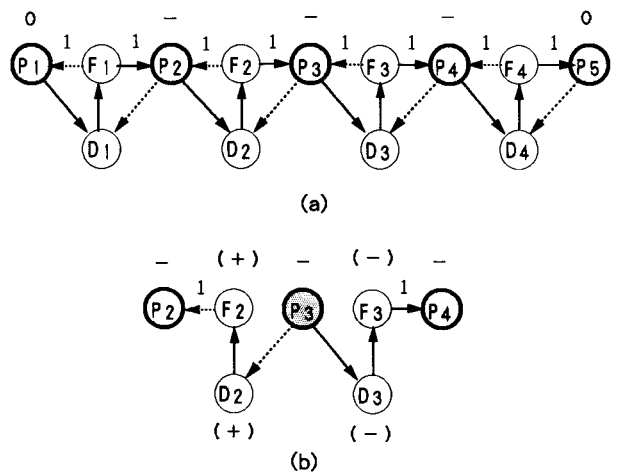


図5 長さ・符号付有向グラフを用いた“もれ”の診断

4.3 その他のモデル

さらに符号付有向グラフの表現力を高めるために行なわれた改良の試みのいくつかの概略を紹介する。

(1) 長さ・符号付有向グラフへのファジィ数の導入

長さ・符号付有向グラフを用いて異常診断を行なう場合に、枝の長さに誤差が含まれれば、誤った診断結果を出力する恐れがある。枝の長さをファジィ数で表わすと、誤差によって誤った診断を行なう可能性を非常に小さくすることができる [11]。

(2) 異常発現時刻の利用

測定変数が異常を示す時刻(異常発現時刻)を利用して、定義4による有効道の中で、上流側の測定点の異常発現時刻が下流側の測定点の異常発現時刻より早いものだけを異常の伝搬経路として採用することにより、異常の原因の候補を絞り込むことができる [12]。

(3) 因果関係のゲインの利用

化学プラントの中で進行する物理現象の大部分は、運動量、熱、物質の輸送現象であり、これらの駆動力である圧力、温度、濃度は、熱力学の第2法則に従って減衰するので、圧力から圧力へ、温度から温度へ、濃度から濃度への有向道のゲインは、発熱反応、自触媒反応が関与する場合を除いて1より小さくなる。このことを利用して異常の原因の候補を絞り込むことができる [13].

5. ま と め

工学的解析が非常に難しい対象プラント（溶鉱炉、流動層型反応器など）の異常診断を行なう場合には、過去の異常状態のデータおよび経験による“経験的診断法”を用いるのもやむを得ないが、この診断法は、対象プラントの改良工事が行なわれた後では使えなくなってしまうという致命的欠陥を持つ。

モデルを用いる“論理的診断法”は、対象プラントの改良工事に追従できることはもちろんであるが、異常診断システムの限界（異常の原因の候補をどこまで絞れるか）をあらかじめ自動的に生成できること [15] などの長所がある。

しかし、対象プラントの定量的モデルを作るには、莫大な労力と費用を必要とするので、定性的モデルに期待が寄せられる。

参考文献

- [1] Watanabe, K., I. Matsuura, M. Abe, M. Kubota and D. M. Himmelblau : "Incipient Fault Diagnosis of Chemical Process via Artificial Neural Networks" *AICHE J.*, 35, 1803-1812 (1989)
- [2] Kutsuwa, Y. and H. Matsuyama : "An Improved Method of Fault Diagnosis of a Batch Process Using a Pattern-Recognition Technique" *International Chem. Eng.*, 32, 114-122 (1992)
- [3] Berenblut, B. J. and H. B. Whitehouse : "A Method for Monitoring Process Plant Based on a Decision Table Analysis" *The Chemical Engineer*, March, 175-181 (1977)
- [4] Ramesh, T. S., J. F. Davis and G. M. Schwenzer : "Systems for Continuous Process Operations Based upon the Framework" *Computers & Chem. Eng.*, 16, 109-127 (1992)
- [5] Watanabe, K. and D. M. Himmelblau : "Fault Diagnosis in Nonlinear Chemical Processes" *AICHE J.*, 29, 243-261 (1983)
- [6] Tylee, J. L. : "Generalized Likelihood Ratio Approach to Detecting and Identifying Failures in Pressurizer Instrumentation" *Nuclear Technology* 56, 484-492 (1982)
- [7] J. Prock : "A New Technique for Fault Detection Using Petri Nets" *Automatica*, 27, 239-245 (1991)
- [8] Iri, M., K. Aoki, E. O'Shima and H. Matsuyama : "A Graphical Approach to the Problem of Locating the Origin of the System Failure" *J. Operations Research Society Japan*, 23, 295-311 (1980)
- [9] 柘植, 潮崎, 松山, 大島, 井口, 淵上, 松下 : "化学プラント用異常診断システムの実用化試験" *化学工学論文集*, 10, 240-246 (1984)
- [10] 柘植, 潮崎, 松山, 大島, 井口, 淵上, 松下 : "化学プラント用異常診断システムにおける表示法の改善" *化学工学論文集*, 10, 531-534 (1984)
- [11] 武田, 柴田, 柘植, 松山 : "定性的モデルに基づく化学プラントのための頑健な異常診断法" *化学工学論文集*, 20, 373-381 (1994)
- [12] Shiozaki, J., B. Shibata, H. Matsuyama and E. O'Shima : "Fault Diagnosis of Chemical Processes Utilizing Signed Directed Graphs - Improvement by Using Temporal Information -" *IEEE Trans. on Industrial Electronics* 36, 469-474 (1989)
- [13] 立野, 柴田, 柘植, 松山 : "符号付有向グラフと5段階パターンを利用する化学プロセスの異常診断法の精度の向上" *化学工学論文集*, 19, 30-40 (1993)
- [14] 柴田, 松山 : "符号付有向グラフを用いた異常診断システムの診断精度の事前評価" *化学工学論文集*, 15, 395-402 (1989)
- [15] 立野, 柴田, 柘植, 松山 : "化学プラントの符号付有向グラフの自動生成" *計測自動制御学会論文集*, 30, No.11 (1994)