

化学プラントの異常診断システム



技術解説

松山久義*, 柘植義文**, 潮崎淳一***

1. はじめに

化学プラントの事故は、プラント自体の欠陥によるものと人間の誤判断・誤操作によるものとに分類できる。従来の工学的アプローチは、設計技術、製作施工技術の発達を通じて前者を減少させることはできるが、後者に対してはほとんど無力である。緊迫した状況下で大量の情報を短時間に間違いなく処理して、複雑な化学プラントの異常の原因を探索し、対応措置を決定することは、人間の情報処理能力の限界を超える場合があり、計算機を用いた意思決定支援システムが必要である。

著者らは、このような観点から、自動的に異常の原因を探索するシステム（異常診断システム）を開発した。現在、計装メーカー2社により実用システムの開発が行なわれている。

2. 異常診断システムの分類

異常診断システムは、原因→結果→症状の対応関係を基礎データとして持ち、症状が与えられたときにこの対応関係を逆にたどって原因を推定する。この基礎データの作り方により異常診断システムを2種類に分類できる。ひとつは対象プラントにおいて過去に経験した異常状態に関する知識、データを基礎データとして利用するもので、もうひとつは対象プラントのモデ

ルを基礎データとして利用するものである。

前者の例としては、いわゆるエキスパートシステムを利用した異常診断システムがある。プラントの内部で進行する物理・化学的現象が解明されていなくても、過去の経験だけから異常診断システムを作成できることが最大の特徴で、高炉やFCC（流動接触分解装置）のように、工学的解析が困難なプラントの異常診断には有力な方法である。しかし、一方では、プラントの異常は希にしか起こらないので、高炉やFCCのように運転実績の蓄積が十分なプラント以外では、異常診断システムを作成することができないという欠点がある。

後者は、このような欠点を補うために開発されたものである。対象プラントのモデルを作成して基礎データとするので、新規のプラントに対しても適用可能であるが、内部の物理・化学的現象の解明が容易な対象プラントにしか適用できないという欠点がある。

著者らが開発した異常診断システムは、後者に属し、石油精製または石油化学プロセスのようにモデルを作成しやすいプラントを対象としている。

3. 対象プラントのモデルと症状の表現

対象プラントのモデルとしては、プロセスの状態変数を点で、状態変数間の因果関係を矢印（以後「枝」と呼ぶ）で表し、さらに、これらの因果関係を「助長」と「抑制」とに分類して、助長に対応する枝には「+」を、抑制に対応する枝には「-」を与えた有向グラフ（符号付有向グラフと呼ぶ）を用いる。

一方、連続プロセスの定常運転時には、プロセスの各変数の正常値が定数として与えられるので、プロセスの状態変数の値を図1(a)に示すように、しきい値 γ^+ と γ^- によって3段階に分

*松山久義 (Hisayoshi MATSUYAMA), 九州大学工学部化学機械工学科, 教授, 工学博士, プロセスシステム工学

**柘植義文 (Yoshifumi TSUGE), 九州大学工学部化学機械工学科, 助教授, 工学博士, プロセスシステム工学

***潮崎淳一 (Junichi SHIOZAKI), 山武ハネウエル(株), アドバンステクノロジーセンター, 係長, 工学博士, プロセスシステム工学

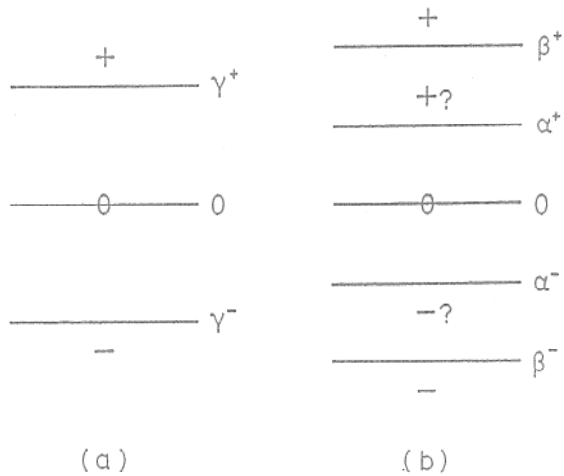


図1 3段階しきい値と5段階しきい値

けることができ、これらの符号の組合せ（異常パターンと呼ぶ）を症状としてプラントの異常状態を表現できる。「0」は正常、「+」は異常に高い、「-」は異常に低いことを意味する。

4. 異常診断アルゴリズム

図2(a)のようなプロセスを例にとると、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。このプロセスに対応する符号付有向グラフは図2(b)のように与えられる。ただし、実線の枝は「+」を、破線の枝は「-」を表す。

異常が発生すると、いくつかの状態変数の値がしきい値を越えて異常パターンが与えられ、図2(c)に示すように符号付有向グラフ上の対応

する点に割り付ける。

異常診断においては、異常を示す変数（点）と異常の伝わる経路（枝）が重要な意味を持つ。異常を示す点（+または-の符号を持つ点）を有効点と呼び、異常が伝わる経路となっている枝を有効枝と呼ぶ。有効枝は、その枝の始点（矢印の根元の点）と終点（矢印の先端の点）の符号の積がその枝の符号に一致するものとして定義できる。

符号付有向グラフ上の全ての点に符号が与えられたとき、有効点と有効枝だけを残して他を消去すると、図2(d)のようなグラフが得られる。このグラフの最上流にある点が異常の原因を代表している。図2(d)の例では、2個のタンク間の配管の閉塞が異常の原因であることが分かる。

以上が基本アルゴリズムであるが、このままでは次のような問題点が残る。

- ① 現実には状態変数のほんの一部しか測定されていない。
- ② 正常か異常かを判定するしきい値を決定するのが難しい。
- ③ 異常が伝わる速度の違いを利用していない。

したがって、実際に使用される異常診断アルゴリズムは次のように改良されている。

問題点①に対しては、符号付有向グラフ内の点を、測定点と非測定点とに分け、非測定点の

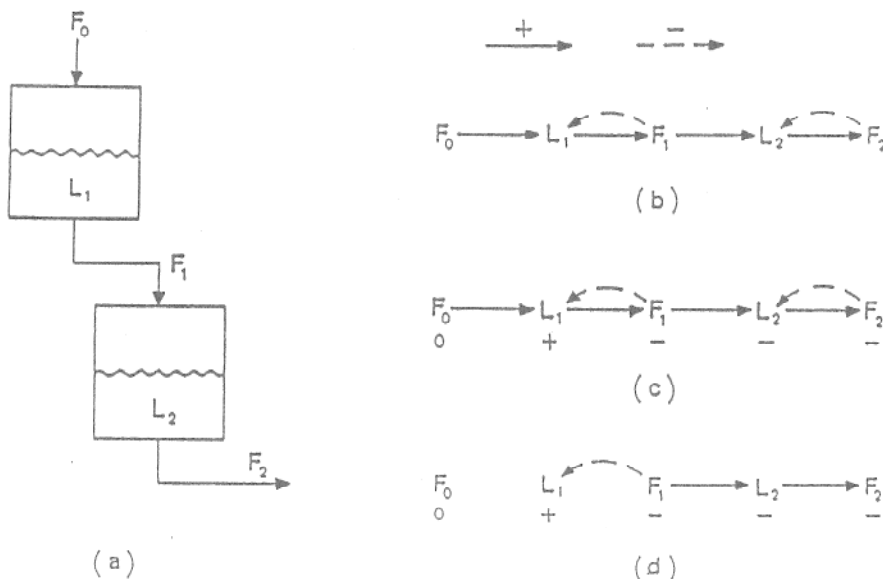


図2 符号付有向グラフによる異常診断

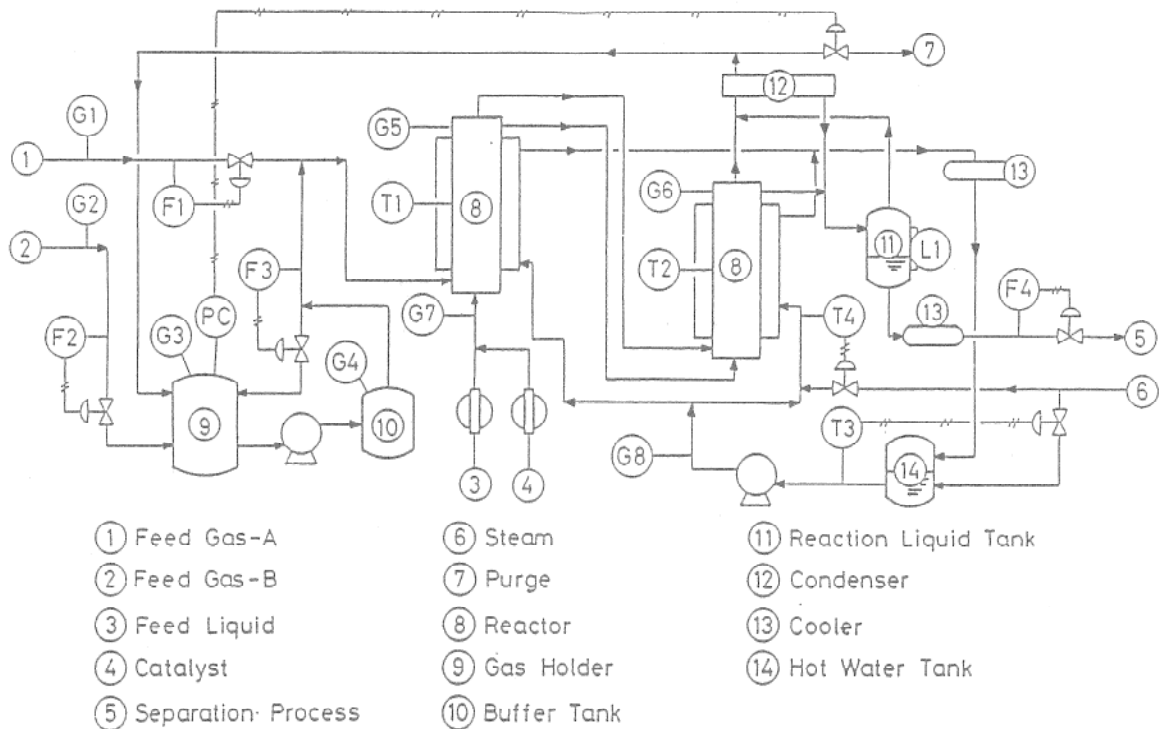


図3 実験に用いたパイロットプラント

符号を“もっともらしく”仮定して、有効枝と有効点だけで構成されるグラフの最上流の点を“原因の候補”として列挙するという方法をとる。“もっともらしい”という基準として単一原因の前提条件を用いる場合^{1,2,3)}と、複合原因をも許す場合⁴⁾とのそれぞれについて、アルゴリズムが開発されている。

問題点②に対しては図1(b)に示すように、あいまいな符号「+?」と「-?」を導入し、これら进行处理できるようにアルゴリズムを改良し、プラントの動特性の測定などの精密な情報なしにしきい値を決定しても、誤診や診断不能に陥らない方法が開発されている⁵⁾。

問題点③は時間の概念の表現法に関する問題で、知識工学において現在最も興味を引かれている問題であるので節を改めて述べる。

5. 実用化試験⁶⁾

1981年の夏、上述した異常診断システムの実用性を確かめるために、パーソナルコンピュータ (Apple II RAM48KB) を用いて、図3に示すパイロットプラントにおいて実験を行い、次の各項目について検討した。

① 異常診断システムの規模

② しきい値の決定法

③ 異常診断システムの速度と精度

④ 計算機に直結していない計器 (オフライン計器) の情報の利用法およびその効果

実験に使用したパイロットプラントには、13個のオンライン計器 (流量計4, 液面計1, 圧力計1, 温度計4, 調節計出力3) と8個のオフライン計器 (全て圧力計) があり、その符号付有向グラフは、点90個, 枝196本で構成される。異常診断システムはプログラムとデータをあわせて20kB以下に納まった。

しきい値は図1(b)に示すように2種類用意し、 α^+ , α^- はオペレータが正常と判定した状態における測定変数の値の変動幅の最大値から決定し、 β^+ と β^- は、オペレータ全員が明らかに異常と判定する値から決定した。

オンライン計器の値に異常値が現れると、異常診断システムは起動され、異常の原因の探索を開始する。人間 (パトロールマン) はそれと同時に現場に向かい、オフライン計器の指示値を読んで異常パターンに変換する。このとき、余程の自信がない限り、「0」、「+」、「-」を用いず、少しでも疑問があるときには「+?」、「-?」を用いるように指示し、また、「??」

(不明) という符号を用いることを許した。このようにして作ったオフラインの異常パターンは、パトロールマンが計器室に帰り次第、診断を中断してキーボードから計算機に入力した。既にオンラインの異常パターンのみによる診断が終了していた場合には、オフラインの異常パターンを入力して診断を繰り返した。

表1に示す11個の原因による異常状態について診断を行い、次のような結果が得られた。

表1 人為的に発生させた異常の原因

記号	原因
F 1 (—)	流量計F 1の故障
F 2 (—)	流量計F 2の故障
F 3 (—)	流量計F 3の故障
F 4 (—)	流量計F 4の故障
P C (+)	圧力計P Cの故障
L 1 (—)	液面計L 1の故障
T 1 (—)	温度計T 1の故障
T 4 (—)	温度計T 4の故障
T S (—)	温度制御用温水の温度低下
F P (—)	反応液供給ポンプの流量低下
P U (+)	反応ガス供給圧低下

- ① 全ての場合について、診断終了までに要する時間は2分以下であった。
- ② オンラインの異常パターンだけを用いた診断では、F 2 (—)とT 1 (—)の2つの場合を除いては精度のよい(原因の候補の数の少ない)診断はできなかったが、オフラインの異常パターンを入力すると、T S (—) F P (—)の2つの場合を除いて、顕著に精度が向上した。

1981年当時のApple IIを用いて診断に要する時間が2分間以下であることは、十分実用に耐える速度であるといえる。

オフラインの異常パターンの効果が異なるのは、オフライン計器が全て圧力計であり、T S (—)は温度にのみ影響するために圧力計の情報はほとんど効果がないからである。また、F P (—)についても、反応液供給ポンプはプランジヤ式の定量ポンプであるため、流量低下による圧力低下が圧力の脈動に比べて小さく、目視によって検出できなかったため、圧力計の情報の

効果が現われなかったと考えられる。

6. 時間に関する情報の利用

符号付有向グラフに時間に関する情報を付加する方法としては、現在までに次の3つの方法が用意されている。

(a) 異常が伝搬するのに要する時間を枝の属性として与える方法

(b) 同一の変数を測定周期毎に異なった点として表現する符号付有向グラフを用いる方法

(c) 測定点が異常を示す順序を利用する方法

方法(a)は、変数間の因果関係すべてについて伝搬遅れをデータとして与えなければならないので煩雑であるが、原因の候補が多数出力される場合に、それらを可能性の高い順に分類することができる。前節の実験で原因の候補が多かったT S (—)に対する診断に適用して、効果を上げることができた⁷⁾

方法(b)^{8,9)}は、因果関係に遅れがあるかないかだけをデータとして必要とするので方法(a)より煩わしくないが、同一の変数を測定周期毎に異なった点として表現するので、莫大な記憶容量を必要とする。計算機のメモリー低廉化は今後も進行すると考えられるので、将来は実用に耐えられると思われるが、現段階では小規模な対象にしか適用できない。

方法(c)^{10,11)}は、有効枝の定義に符号に関する整合性だけでなく、異常を示す順序に関する整合性を追加するだけであるので、時間に関する情報を用いない方法と全く同じ情報を用いてより精度の高い診断結果が得られる。現段階では最も優れた方法であると言える。

7. おわりに

プラントの異常診断システムは、人間に原因の候補を知らせて、対応措置の決定は人間まかせにするのではなく、対応措置の決定を支援するシステムと結合することが理想である。

対応措置の決定を行なうには、異常診断システムの精度(出力する原因の候補の集合の最悪の場合の大きさ)を予め評価できることが必要条件である¹²⁾また、異常診断としての用途だけ

を考へても、ユーザから要求された精度を持つ異常診断システムを設計できなければならない。診断の精度を予め評価する方法論^{13, 14)}が確立していることが符号付有向グラフによる異常診断法の最大の利点である。

さらに一歩進んで、対応措置を自動的に実行するようになれば、制御理論による自動制御システムがカバーできない領域でも有効に働く自動制御システムが完成する。現在は、自動制御システムによっては正常復帰できない状態を「変調」または「異常」と称しているので、対応措置を自動的に実行するシステムが完成すれば、異常状態の定義はそれによっても正常復帰できない状態として、さらに外側に追いやられるであろう。しかし、そのためには、ソフトウェア面での進歩だけでなく、制御弁以外の操作端の開発あるいはプラントの構造の変更などハードウェア面での進歩が不可欠である。

参 考 文 献

- 1) M. Iri, K. Aoki, E. O'Shima, H. Matsuyama: Computers & Chem. Eng., 3, 489 (1979).
- 2) M. Iri, K. Aoki, E. O'Shima, H. Matsuyama: J. Oper. Res. Soc. Japan, 23, 295 (1980).
- 3) J. Shiozaki, H. Matsuyama, E. O'Shima, M. Iri: Computers & Chem. Eng., 9, 285 (1985).
- 4) 潮崎淳一, 松崎隆司, 松山久義, 大島榮次: 化学工学論文集, 11, 343 (1985).
- 5) 潮崎淳一, 松山久義, 田野康一, 大島榮次: 化学工学論文集, 10, 223 (1984).
- 6) 柘植義文, 潮崎淳一, 松山久義, 大島榮次, 井口友二, 淵上正勝, 松下元彦: 化学工学論文集, 10, 240 (1984).
- 7) 柘植義文, 潮崎淳一, 松山久義, 大島榮次, 井口友二, 淵上正勝, 松下元彦: 化学工学論文雄, 10, 531 (1984).
- 8) T. Umeda, T. Kuriyama, E. O'Shima, H. Matsuyama: Chem. Eng. Sci., 35, 2379 (1980).
- 9) 潮崎淳一, 茅野久, 松山久義, 大島榮次: 化学工学論文集, 10, 609 (1984).
- 10) 柴田望洋, 潮崎淳一, 松山久義, 大島榮次: 化学工学論文集, 14, 490 (1988).
- 11) J. Shiozaki, B. Shibata, H. Matsuyama and E. O'Shima: IEEE Trans. on Industrial Electronics, to be published
- 12) H. Matsuyama, H. Kayano and K. Tano: World Congress III of Chem. Eng., (Sept. 1986).
- 13) 柘植義文, 松山久義: 化学工学論文集, 11, 462 (1985).
- 14) 柴田望洋, 松山久義: 化学工学論文集, 15, 395 (1989).