

# 発酵プロセス診断用エキスパートシステムの開発<sup>†</sup>

浅間 一・長棟輝行・遠藤 勲

理化学研究所 化学工学研究室<sup>††</sup>

平田 誠・平田 彰

早稲田大学理工学部 応用化学科<sup>†††</sup>

バイオプロダクトの研究開発支援を目的として、発酵プロセスの異常診断エキスパートシステムを試作した。まず発酵プロセスにおける異常の分析と診断システムに要求される機能の明確化を行った。次に診断システムに対する要求仕様を検討し、プロセス変数に注目して発酵プロセスの制御系の診断を行うエキスパートシステムの設計を行った。知識表現に関しては、診断のヒューリスティクスをプロダクションルールで、培養システムのモデルおよび異常事象の因果関係をフレームで表現した。推論では、ルールに基づき異常原因を探索するのみならず、異常事象のフレームをたどりながら異常原因が及ぼす影響を検証することによって信頼性の高い診断を可能にした。最後に、温度制御系、pH 制御系、溶存酸素制御系の診断をインタラクティブに行うエキスパートシステムを構築し、典型的な異常に関して診断を実行させた結果、システムの動作が妥当であることを確認した。

## 緒 言

現在行われている発酵プロセスでは、温度・pH・溶存酸素などのプロセス変数に関する表面的な制御が行われているため、安定した生産性が得られないことが問題となっている。これは生物という対象が持つ本質的なあいまいさに起因しており、このことが発酵プロセスの操作が専門化された熟練者の経験やノウハウに大きく依存している根本的原因となっている。熟練者が、発酵プロセスの状態を認識し、異常の有無・原因を診断しながら、操作を行っていることを考慮すると、発酵プロセスを知的に操作するためには診断機能が不可欠であると考えられる。特に研究開発段階では、培養条件をさまざまに変化させながら複数の人間（それほど熟練していない人間が操作する場合も考え）が実験室レベルで汎用の発酵槽を用いて実験を行うために、さまざまな異常が生じる可能性が高い<sup>1)</sup>。本研究の目的は、こういった状況を想定し、研究開発段階において異常診断を行いながら培養操作を支援するシステムを実現することである。なお、こ

のシステムは発酵プロセス制御システムの上位のシステムとして位置づけられる。

これまでに微生物反応系にAIを適用した研究例は少なく、特にバイオプロセスの異常診断に関してAIの適用が提案されているが<sup>4,5,7)</sup>、研究開発段階の支援を目的として、発酵プロセスのみならずプロセスを操作する培養システム全体を対象とした統合的な枠組みの中で具体的に開発された例はない。本研究ではバイオプロセスに特徴的な状況を考慮して<sup>2)</sup>、温度・pH・溶存酸素といったプロセス変数に関する異常を診断するエキスパートシステムの設計を行い、これに基づき実際に異常診断エキスパートシステムの試作を行う。

## 1. 発酵プロセスの診断機能の検討

### 1.1 発酵プロセスの制御における異常の分析

すでに我々は、発酵プロセスの自動監視制御システム(BIOACS: BIO Advanced Control System)<sup>6)</sup>を開発しており、本研究ではBIOACSを診断対象と仮定した。BIOACSは発酵プロセスの一般的制御機能に加えて、濁度計および自動サンプリング装置・HPLCによって微生物の比増殖速度、基質の比消費速度、生産物の比生成速度などの生理活性情報のオンライン計測機能、カルマンフィルタによるノイズ除去機能、データベース構築機能<sup>3)</sup>等を有しており、信頼性の高い多項目の情報を監視する

<sup>†</sup> 1990年8月29日受理；化学工学会第20回秋季大会（姫路，1987年10月）および同第53年会（仙台，1988年4月）にて発表

<sup>††</sup> 〒351-01 和光市広沢2-1

<sup>†††</sup> 〒169 新宿区大久保3-4-1

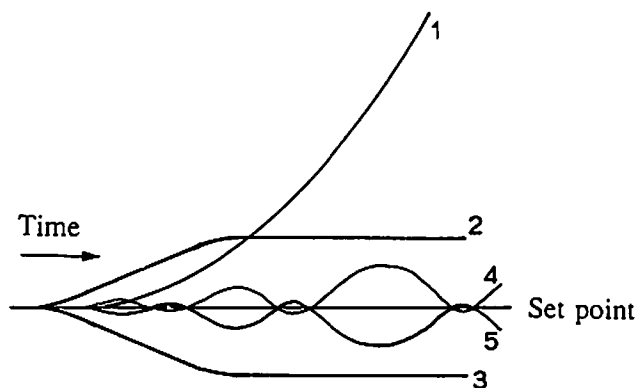


Fig. 1 Typical faulty patterns of process variables

ことが可能である。したがって本研究の異常診断は BIOACS における監視項目、特に汎用性を考慮してプロセス変数に基づいて行うものとした。まず、BIOACS およびその操作を熟知した専門家の経験に基づいて過去の異常事例、すなわち実験失敗例を列挙し、それぞれの場合の異常の原因と、それを診断した際の過程を記録し、異常発生メカニズムについて分析・整理を行った。

### (1) 異常のパターン

一般的には培養条件を決定する際、プロセス変数に関しては適当と考えられる設定値をあらかじめ決定し、定値制御が行われる。したがってプロセス変数に基づく異常診断を行う場合、その異常現象は設定値からのずれのパターンとして検出されることが明らかになった。異常時における計測値の変化の典型的パターンは、①設定値から大きくはずれる場合、②設定値から一定のオフセットを持ち一致しない場合、③設定値周辺を振動する場合に分類される。また、制御系のメカニズムを考慮して、設定値の高い方向にずれるときと、低い方向にずれるときとで異なる現象と考えられる場合には、これらを区別することにする。温度制御に関する異常のパターンの例を Fig. 1 に示す。図中、1～5 はそれぞれ①、②高、②低、③高、③低に対応している。

### (2) 異常原因

上記のパターンごとにその異常原因を調査した結果、異常の原因を発酵プロセス自身の異常とその制御システムの異常とに分類することができた。前者は、微生物の履歴、培地組成、培養条件、コンタミネーションなど、生物化学反応にかかわる異常であるが、これは異常というより予想外の挙動が新しい知見として得られたことに外ならない場合もある。また後者は、センサ・バルブ・制御系などのハードウェアの故障や操作する人間の誤操作などが挙げられる。ここでは主に後者の異常に関する診断について議論を行う。

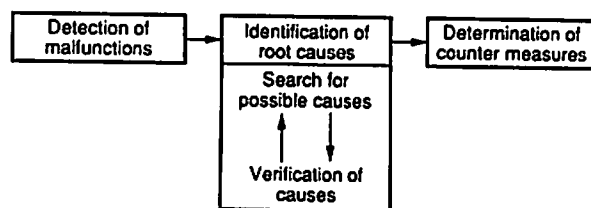


Fig. 2 Required functions for malfunction diagnosis

### (3) 診断に必要な知識

前述の異常に対して、専門家が診断を行う際に必要となる知識を整理した結果、①代謝反応に関する常識、②発酵システムの構造や特徴、③過去のデータ、既知の発酵特性、④異常事例（これは診断の際のヒューリスティクスとなる）に分類された。①②は一般的な知識と特定の知識に分類することができるが、③④は個別的な知識である。

#### 1.2 診断に要求される機能

異常の分析に基づき、異常診断に要求される機能を明確化した。これを Fig. 2 に示す。まず、診断の基本的な機能としては、異常の検出、原因の同定、対策の決定の機能が要求される。この中で原因の同定機能に関しては前述のような多様な異常原因が考えられるので、可能性の高い原因の探索機能と、真の異常原因を検証する機能が要求される。また、対策は異常原因に応じて決定しなければならない。対策としては回復方法の提示、プロセス継続・停止の判断、制御条件の変更、新たな特性の発見・蓄積などが挙げられる。

さらに、診断用エキスパートシステムを実際に設計・開発する上で、必要となるシステム上の要求仕様として、①機能を徐々に高機能化させるための保天性・拡張性、②一般的な発酵プロセス、培養システムに適用するための汎用性、③多様な診断が行えるような柔軟な知識記述の枠組み、④信頼性の高い診断結果を導くための深い推論、⑤監視データ収集周期内で異常診断を行うための高速性などが挙げられる。

## 2. 異常診断エキスパートシステムの設計

### 2.1 知識表現手法

上記の異常診断に要求される機能を検討した結果、以下に示す3種類の知識を表現することとした。

#### (1) 培養システムの構造に関する知識

診断対象である BIOACS の構造を異常診断の立場から表現し、このモデルをフレームのネットワークによって記述した。個々の機器がひとつのフレームに対応している。フレームには各機器の状態が記述されている。また、フレームのスロットが持つポインタを利用して機器間の物理的接続関係を表示し、これをたどることによって

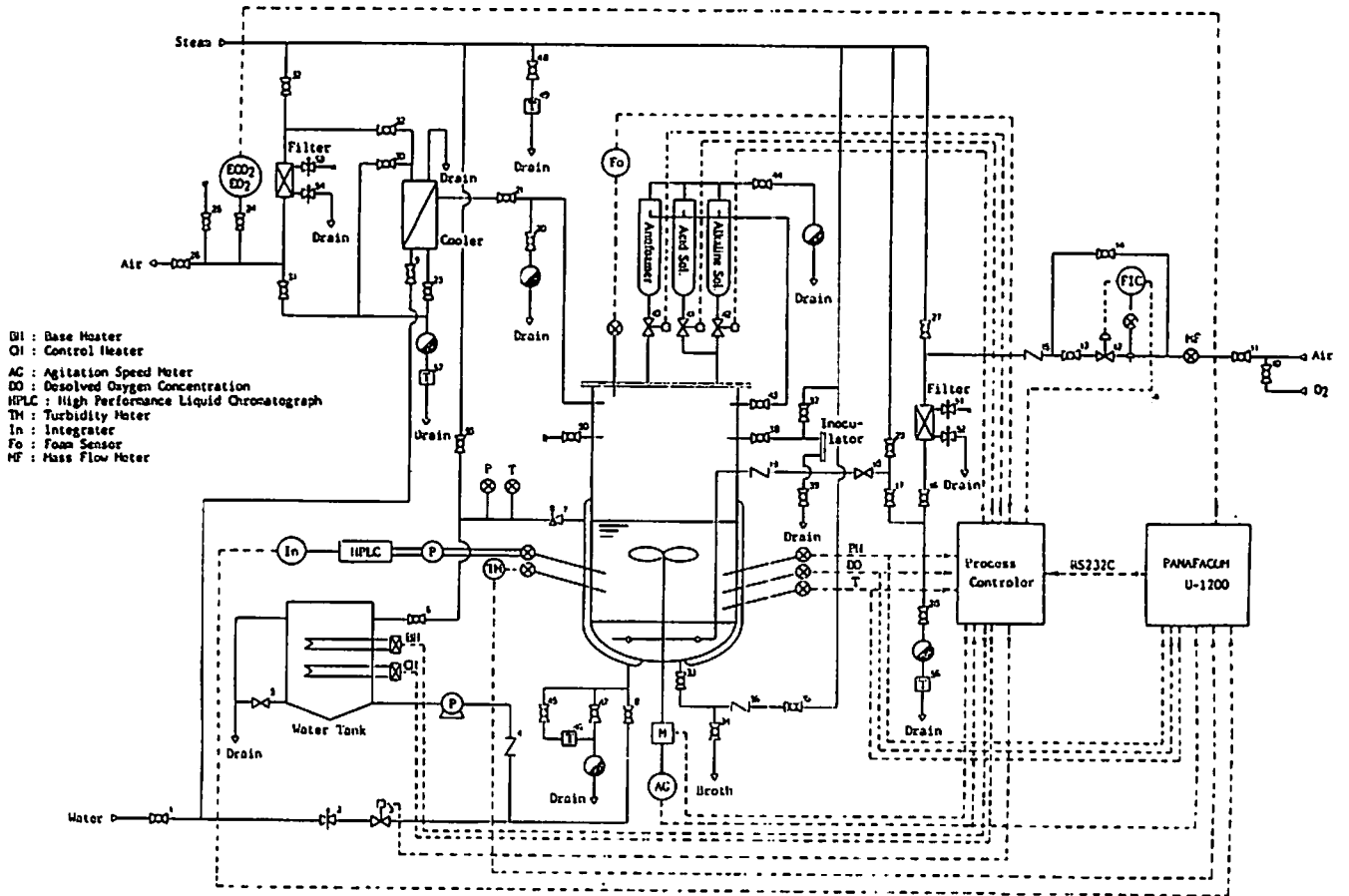


Fig. 3 Structure of cultivating system (BIOACS)

BIOACSにおける情報の流れ（電気的信号など）、物質の流れ（液体や気体の流れ）、エネルギーの流れ（熱伝達など）をトレースすることを可能にした。Fig. 3にBIOACSの構造を示す。BIOACSは、濁度計と自動サンプリング装置（液体クロマトグラフィーに接続されている）を除けば、基本的には汎用の培養システムと同様な構造となっているので、この表現方法によって一般性は失われていない。フレームの接続関係を若干変更することによって他の一般的な培養システムの表現に適用可能である。

### (2) 診断のヒューリスティクス

原因探索を行うためのヒューリスティクスをプロダクションルールで表現した。これは、検出された発酵プロセスの異常に対して非常に多くの原因が仮定できるような場合に、熟練者が経験からどの原因が最も可能性が高いと判断するかといった知識を異常ごとに記録し、これをルール化したものである。その際変更が容易なように各診断項目、診断事象ごとにルールを知識源としてまとめ、モジュール化を行った。これはシステムのデバッグ・チューニングの際に、知識源のモジュール単位で扱えるだけでなく、他の発酵プロセスへ適用する際の変更時にも扱いやすい。なお、ルールでは、異常原因の可能性

を表現するために異常事象ごとに確信度を算出する。

### (3) 異常事象間の因果関係に関する知識

異常事象間の因果関係をフレームのネットワークによって表現した。この知識は、故障診断における故障木に相当する。Fig. 4にフレームで表現された異常事象の因果関係の一部を示す。個々の異常事象はフレームに対応し、事象間の階層関係は、フレームの上位・下位で表現した。また、異常事象の因果関係は、フレームのスロットが持つポイントを利用して表現した。この知識は、探索された原因から最終的な異常に至る過程を確認する際に、あるいは、診断のヒューリスティクスによって異常原因がうまく発見できない場合に、すべての可能性を網羅的に探索する際に参照する。なお、Fig. 4に示したように、上の異常現象と下の異常原因（攪拌故障）を複数の経路で結ぶような自由な記述が許されている。

### 2.2 推論手法

上記の知識を利用して異常診断の推論を行う。ここでは推論過程を異常原因の探索と異常原因が及ぼす影響の検証の2段階に分割した。本研究で用いた知識の構成と推論の流れをFig. 5に示す。すなわち、異常原因の探索では、培養システムの構造に関する知識（フレーム）を参照しながら、モジュール化された診断用ヒューリステ

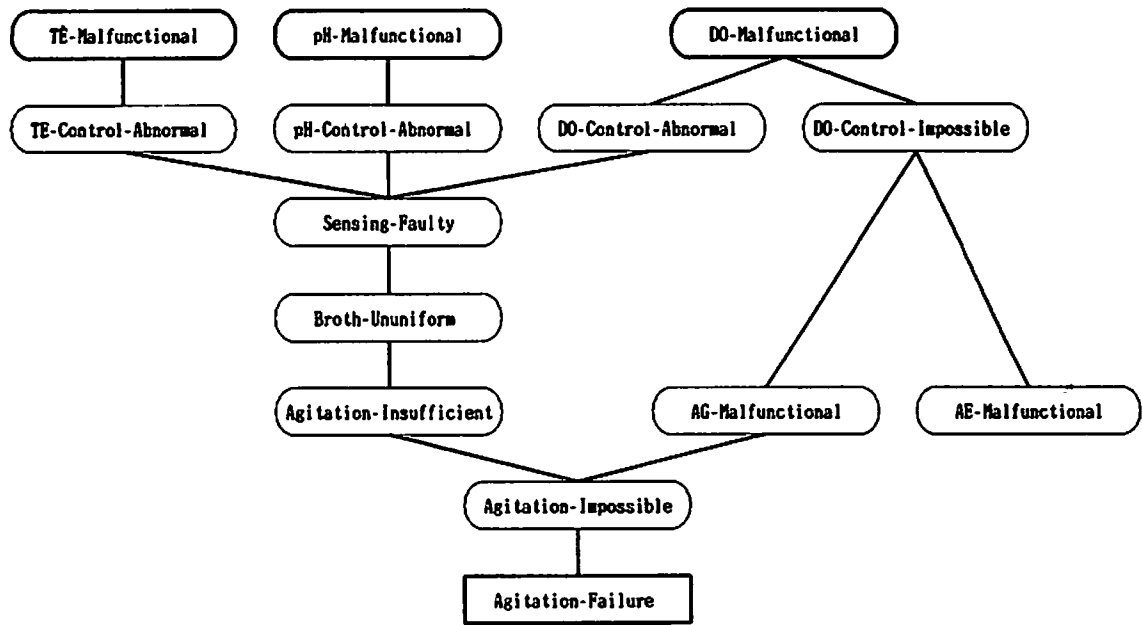


Fig. 4 Causal network of faulty events

イクスの知識源（プロダクションルールの集合）を順次活性化・起動して、可能性のある異常原因をチェックし、異常原因を異常事象を表す知識（フレーム）の中から選択する。さらに、異常原因が及ぼす影響の検証では、選択された異常原因が異常を引き起こす過程を、異常事象間の因果関係に関する知識（フレーム）をたどっていくことによって確認するだけでなく、その異常原因が影響を与え得るすべての現象を求め、それを実際に調べることによって、仮定された異常原因が真の異常原因であるかを検証する。

すべての知識源において推論方法は前向き推論を用い、マッチングは各知識源ごとに1回のみ、シングルヒットとした。各制御系の診断において考慮した推論過程を以下に示す。

#### (1) 温度制御関連の診断

培養システムの構造の知識の中から、温度制御に関連する部分を抽出し、電気的信号や水・培養液の流れ、熱伝達に注目して、詳細な異常のチェックをインタラクティブに行う。温度制御に関連する主な部分はFig. 3の温度センサー→プロセスコントローラ→ヒータ（冷却水弁）→ジャケット→発酵槽という経路である。加熱と冷却で操作変数が異なるために、異常のパターンが設定値の高低いずれの方向にずれているかが診断の際に重要となる。ただし、培養液が不均質になる状況も想定して、攪拌制御系の診断や培養液量の確認をも同時に行う。

#### (2) pH制御関連の診断

培養システムの構造の知識の中から、pH制御に関連する部分を抽出し、電気的信号やpH調製液の流れに注目して、詳細な異常のチェックをインタラクティブに行

#### A Model of Fermentation System (Frames)

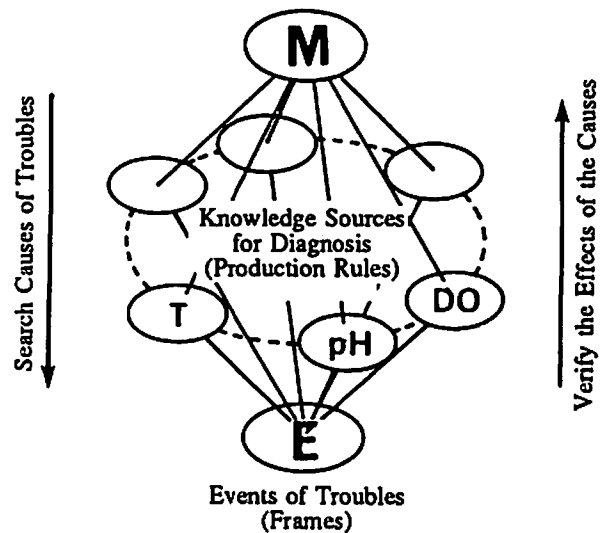


Fig. 5 Configuration of knowledge base and inferring flow

う。pH制御に関連する主な部分はFig. 3のpHセンサー→プロセスコントローラ→アルカリ液添加弁（酸液添加弁）→発酵槽という経路である。pHの高低で開閉する弁が異なるために、異常のパターンが設定値の高低いずれの方向にずれているかが診断の際に重要となる。ただし、温度制御関連の診断同様、培養液が不均質になる状況を想定した診断をも同時に行う。

#### (3) 溶存酸素 (DO) 制御関連の診断

培養システムの構造の知識の中から、DO制御に関連する部分を抽出し、電気的信号や気体の流れに注目して、詳細な異常のチェックをインタラクティブに行う。DO

```

RULE# <1>
IF
  (EQ (@FGET '弁-43' 状態 '(0 N)) 'CLOSE)
THEN
  1 PROPOSE
  CHANGE TYPE: ADD
  EVENT NAME : 結果出力
  LEVEL      : 診断状況
  ATTRIBUTES : 診断要素 = 'アルカリ液添加不良
                <CF> 0.9
                診断要素 = '酸液添加不良
                <CF> 0.8
                同定事象 = '弁43閉

```

Fig. 6 An example of production rules for diagnosis

制御には、攪拌速度によって制御するモードと通気流量によって制御するモードが存在するので、モードに応じて起動する知識源を切り換える。DO制御に関連する主な部分はFig. 3のDOセンサ→プロセスコントローラ→通気流量制御弁（攪拌制御）→発酵槽という経路である。

### 3. 診断用エキスパートシステムの構築

#### 3.1 システムの概要

以上の議論に基づき、発酵プロセスの異常診断用エキスパートシステムを試作した。本システムは、大型計算機 Fujitsu M780 上でエキスパートシステム構築用ツール Eshell を用いて構築した。プロダクションルールおよびフレームは Eshell のシンタックスによって記述し、Eshell の提供する推論機構を利用した。ただし、付加手続きなど一部の関数は UTILISP によって構築した。黑板と呼ばれる記憶領域を利用し、推論における中間状態や部分的結果をここに保存することとした。今回試作したシステムで対象とした異常原因は、主に弁・センサ等の故障、操作盤や弁の開閉などに関する誤操作、制御系の設定値の適性などである。

#### 3.2 診断用知識ベース

本エキスパートシステム内に記述されたプロダクションルールの例を Fig. 6 に示す。ルールは異常の原因として考えられる事象を診断するための知識源を可能性の高いものから順に呼び出す。ルールの IF 部では、培養システムのモデルを表現するフレーム内の必要な属性値を随時参照することによって、培養システムの状態を把握し、異常原因として探索された事象を表すフレームの真偽値（確信度）を決定する。

本エキスパートシステム内で機器類を記述したフレームの例を Fig. 7 に示す。このフレームには、機器類の属性・状態・機能をスロット値として記述し、値が不明な項目に関してはオペレータに対して入力を促すための付加手続きを記述した。配管内を流体が流れたり、ケーブルによって電気的な信号が送信されたりする現象は、弁間の物質的接続関係あるいは電気機器間の電気的接続関係ととらえ、機器フレームへのポインタを接続関係記述

```

(@DEFRAME
  '弁-3
  '(CLASS (YVALUE (INDIVIDUAL)))
  '(AKO (YLINK (電磁弁)))
  '(状態 (YIF-NEEDED ((@FGET 'トグル-MY' 状態 '(0 N))))))
  '(NC (YIF-NEEDED ((@FGET '操作盤-TE' NC '(0 N))))))
  '(オフ時間 (YIF-NEEDED ((@FGET '操作盤-TE' AS '(0 N))))))
  '(オン時間 (YIF-NEEDED ((@FGET '操作盤-TE' AO '(0 N))))))
  '(CONNECTED (YLINK (弁-8)))

```

Fig. 7 An example of frames representing an equipment

```

(@DEFRAME
  '酸液過剰添加
  '(CLASS (YVALUE (GENERIC)))
  '(SUPER (YLINK (酸液添加不良)))
  '(SUBC (YLINK (酸液弁等開) (酸液タイマ不週性開) (酸液不週性)))
  '(メッセージ (YVALUE ('したがって酸液が過剰に添加されています。'))))
  '(CONNECTED (YLINK (酸液添加不良)))

```

Fig. 8 An example of frames representing a faulty event

```

(@DEFRAME
  'ASW 弁42故障開
  '(CLASS (YVALUE (GENERIC)))
  '(SUPER (YLINK (アルカリ液弁等開)))
  '(メッセージ (YVALUE ('ASWもしくは弁-42が故障しています。'))))
  '(対策 (YVALUE ('ASWもしくは弁-42を交換して下さい。'))))
  '(CONNECTED (YLINK (アルカリ液弁等開)))

```

Fig. 9 An example of frames representing a root cause

用スロットに書き込むことによってこのような接続関係を表現した。たとえば、温度制御の診断において、弁間の接続を順次追っていくことによって、配管内の水の流れに沿って順次弁の異常をチェックすることができる。

本エキスパートシステム内で異常事象を記述したフレームの例を Fig. 8 に示す。事象には、異常の原因である根源事象と、観察された異常と根源事象を関連づける中間的事象とが存在する。事象のフレームには、事象の内容（メッセージ）や、異常事象間に階層性が存在する場合には、上位（Superclass）・下位（Subclass）の関係を記述した。因果関係は他の事象フレームへのポインタによって表現されている。なお、根源事象に関しては、Fig. 9 に示すように、その異常原因に対する対策が記述されている。

#### 3.3 診断過程

異常が生じた項目（温度・pH・DO）と Fig. 1 に示された異常のパターン（観察された異常事象）をシステムに入力することによって、これをトリガとして異常診断は開始される。まず、ルールによって判定された異常の内容は黑板の<診断項目>に書き込まれ、診断の進行に応じて探索された異常原因の候補とその確信度が黑板の<診断状況>として追加されていく。Fig. 10 に黑板の構造を示す。黑板を参照することによって診断の過程を確認することが可能である。次に、異常原因の候補の中から根源事象が同定されると、異常事象を表すフレーム

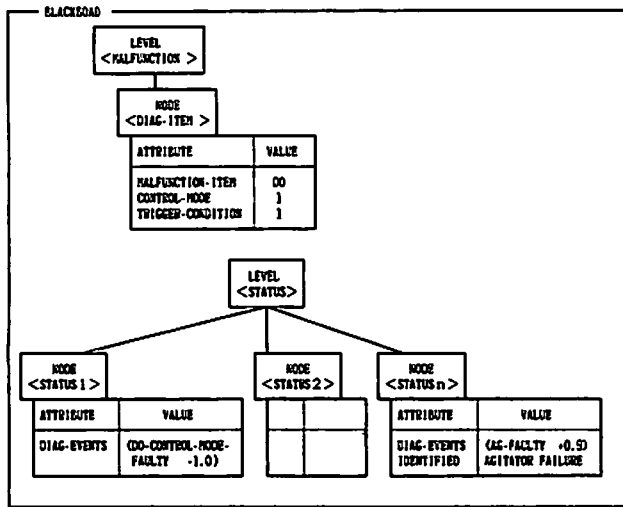


Fig. 10 Structure of blackboard

のネットワーク上の、同定された根源事象から検出された異常に至る経路をトレースしながら、フレームに記述された異常事象の内容を次々に表示することによって、異常が発生したメカニズムの説明を行う。さらに、根源事象フレームに記述された対策を出力し、オペレータに対して回復を促す。最後に、異常事象を表すフレームのネットワークをあらゆる方向にたどることによって、同定された異常原因の影響によって推定されるすべての異常を出力する。これを実際に確認することによって、その異常原因が真の原因であるかを検証することができる。

### 3.4 システムの仕様と診断実行例

本エキスパートシステムには、各制御系の診断に特有な知識源と共通の知識源が存在する。共通の知識源としては、初期化・結果出力用知識源などの他に、すべての制御系の診断において必要となる知識源（たとえば、攪拌制御の診断や培養液のレベルの確認など）が挙げられる。共通の知識源の数は6、それに含まれるルール数は16である。また、温度制御系、pH制御系、DO制御系の診断用知識源はそれぞれ11、26、20であり、それに含まれるルール数はそれぞれ21、53、52である。すなわち知識源およびルールの総数はそれぞれ63および142である。

本エキスパートシステム内のフレームのうち、培養システムのモデルを表す機器フレームに関しては、概念を表すクラスフレーム数は23、具体的な機器を表すフレーム数は47、合計70である。ここでは、とりあえず各制御系の診断に関連する機器類についてのみ記述した。また、異常事象を表すフレームには、温度制御系、pH制御系、DO制御系に特有な異常事象を表すフレームと、これらに共通な異常事象を表すフレームとが存在する。すべての異常事象は中間的事象と根源事象に分類できる。異常事象フレームの数は、温度制御系45（うち中間的事象28、

異常の検出された監視項目を入力して下さい。  
 (1. 温度 / 2. pH / 3. DO) 2  
 トリガの番号を入力して下さい。 1  
 pHのパネルスイッチNCの状態を入力して下さい。(ON/OFF) off  
 pHの設定値を入力して下さい。(VALUE) 7.0  
 調整液は培養槽内に流れ込んでいますか？ (YES/NO) no  
 酸液ポット内に酸液は残っていますか？ (YES/NO) yes  
 pHのトグルスイッチのBSWの状態を入力して下さい。  
 (AUTO/OFF/MANUAL) auto  
 弁-43の状態を入力して下さい。(OPEN/CLOSE) open  
 BSWをMANUAL. ASWをOFFにして下さい。液が添加されますか？ (調べた直後にそれぞれをAUTOにして下さい) (YES/NO) no

\*\*\* 診断結果 \*\*\*  
 弁-41が故障しています。このためpHコントロール用の酸液添加に関する弁が閉じたままの状態にあります。したがって酸液を添加することができません。酸液の添加が正常になされていないことによりpHを制御することができなくなっています。

\*\*\* 対策 \*\*\*  
 弁-41を交換して下さい。

\*\*\* 推定される異常 \*\*\*  
 NIL

\*\*\* 黒板の内容 \*\*\*  
 \*\* 異常診断の CURRENT ノード \*\*  
 NODE NAME <診断項目>  
 PROTO: 異常診断  
 異常項目・pH異常  
 コントロールモード・NIL  
 トリガ・1  
 \*\* 診断状況の CURRENT ノード \*\*  
 NODE NAME <診断状況1>  
 PROTO: 診断状況  
 診断要素・((pH制御モード不満足 -1.0))  
 NODE NAME <診断状況2>  
 PROTO: 診断状況  
 診断要素・((酸液添加不良 1.0))  
 同定事象・(弁41故障)

Fig. 11 An executed example of the diagnosing system

根源事象17)、pH制御系64（うち中間的事象31、根源事象33）、DO制御系54（うち中間的事象24、根源事象30）、共通異常事象9（うち中間的事象5、根源事象4）であり、異常事象のフレームの総数は172（うち中間的事象88、根源事象84）である。

温度制御系、pH制御系、DO制御系のさまざまな典型的異常について、本エキスパートシステムを用いて診断を行った。Fig. 11はpH制御系の診断実行例である。この例に代表されるように、診断結果はいずれも妥当であることが確認された。Fig. 11の例では、異常パターンを入力をトリガとして診断は開始され、診断に必要な情報はオペレータに尋ね、インタラクティブに診断は進む。診断を行った後、システムは異常原因と異常が生じたメカニズムの説明を行い、その対策を提示している。最後に黒板の内容（診断の過程）を書き出している。なお、診断に要する時間はTSS環境で約1~2秒程度であり、1分周期のトレンドデータ収集を考慮すれば、十分な高速性が確保されていると言える。

## 結 言

バイオプロセスの研究開発段階を支援するシステム開発を目指し、発酵プロセスを対象として、プロセス変数に関する制御系の異常診断を行うエキスパートシステムの設計・構築を行った。具体的には、発酵プロセスの制御における異常の分析、診断に要求される機能の明確化に基づき、異常診断のための知識表現手法および推論方法について議論し、診断用エキスパートシステムの設計を行った。さらに、温度制御系、pH制御系、溶存酸素

制御系の異常診断用エキスパートシステムを実際に構築し、典型的な異常に関してエキスパートシステムによる診断を例題的に行い、診断結果の妥当性を確認した。今後、知識の追加に伴う診断機能の向上を図るとともに、本エキスパートシステムをワークステーションへ移植し、プロセスコントローラと接続することによってオンラインの診断を可能にすることが課題として挙げられる。本システムではプロセス変数のみに基づいて診断を行っているので、異常発酵やコンタミネーションに関する診断は現段階では困難である。将来的には比速度等の計測により生理活性情報も考慮した診断を行うことによってこれらの機能を付加していく予定である。

[謝辞] Eshellを用いてエキスパートシステムを構築するにあたり、松岡成典氏、小泉典子さんをはじめとする富士ファコム制御(株)の方々に貴重な技術的助言を頂いた。ここに深く感謝する。

#### Literature cited

- 1) Asama, H., T. Nagamune, M. Hirata, A. Hirata and I. Endo: "Biochemical Engineering VI", *Annals of N. Y. Acad. Sci.*, 589, 569 (1990)
- 2) Endo, I., H. Asama and T. Nagamune: "Bioproducts and Bioprocesses", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 338 (1989)
- 3) Endo, I. and T. Nagamune: *Bioprocess Engineering*, 2, 111 (1987)
- 4) Karim, M.N. and A. Halme: "4th Int. Congress on Computer Appl. in Fermentation Tech." (1988)
- 5) O'Connor, G.M. and C.L. Cooney: "ACS Meeting", Anaheim, MBTD paper 85 (1988)
- 6) Report of Development "Automatic Monitoring and Control System for Fermentation Processes", RIKEN, Komatsugawa Chemical Eng. Co., Ltd., Fuji Facom Co. (1985)
- 7) Stephanopoulos, G. and G. Stephanopoulos: *Trends in Biotechnol.*, 4, 241 (1986)

## Development of an Expert System for Diagnosing Fermentation Processes

Hajime Asama, Teruyuki Nagamune and Isao Endo

Chem. Eng. Lab., the Inst. of Phys. and Chem. Research, Wako 351-01

Makoto Hirata and Akira Hirata

Dept. of Applied Chem., Waseda Univ., Tokyo 169

**Key Words** : Expert System, Fermentation Process, Diagnosis, Intelligent Process Control, Design Theory, Knowledge Representation

Aiming at supporting research and development of bioproducts, an expert system for diagnosing malfunctions of bioprocesses was prototyped. At first, malfunctions in fermentation processes were analyzed, and the functions required for the diagnosing system are clarified. Next, requirements for the expert system were determined, and an expert system for diagnosing a control system of fermentation processes was designed, focusing on process variables. Concerning knowledge representation, heuristic knowledge for diagnosis was represented by production rules, and the model of a cultivating system and causality of malfunctions were represented by frames. In the inference process, while root causes of the malfunction are searched with activating rule sources, the effects introduced by the root cause were verified by tracing the frame network representing the causality. This inference made reliable diagnosis possible. Finally, an expert system was implemented which diagnoses temperature control system, pH control system, and dissolved-oxygen control system interactively. Diagnosis of typical malfunctions was tested by the expert system. The results proved reasonable.