



協調的判断に基づくバイオプロセスの異常診断・操作システムの開発*

鈴木 剛** 先野嘉人*** 中嶋幹男* 藤井 輝夫**
浅間 一** 佐藤一省*** 遠藤 勲****

Development of a Diagnosing and Operating System based on Cooperative Decision Making for a Bio-process

Tsuyoshi SUZUKI, Yoshito SAKINO, Mikio NAKAJIMA, Teruo FUJII, Hajime ASAMA, Kazumi SATO and Isao ENDO

The paper describes a development of a diagnosing and operating system in which mutual cooperation between a system and an operator can be effectively used in decision making. Firstly, a concept of cooperation between the system and the operator was proposed. The authors discuss the cooperative method for plant operation and diagnosis. Then, the authors designed a framework of this system which is composed of three modules, namely a diagnosing module, an interface module and a supporting tool module. In this system, a knowledge base is represented by utilizing a fault tree and describing additional information for cooperative decision making. The authors implemented a prototype of the system for diagnosing human errors and malfunctions in a bio-process system. Finally, the availability of the prototype system is shown through simulated system operation.

Key words: human interface, cooperation, human error, diagnosis, process system

1. 緒 言

近年の製造プラント等に代表される複雑かつ大規模な人工システムは、計算機による自動化・高機能化により、操作員がシステム状態を把握することを困難にしている。このようなシステムのブラックボックス化が進むにつれ、操作員と人工システムとの接点となるマン・マシン・インタフェースの重要性がますます高まってきている。しかし、従来のインタフェースの大半を占めるユーザ主導型意思決定システムは、人間の操作がシステムに直接反映するため、操作員の誤判断・誤操作などのヒューマンエラーがシステム異常を引き起こしてしまう。一方、人間の誤判断を減らすために熟練者の思考過程をモデル化したエキスパートシステムなどのシステム主導型意思決定システムは、与えられた知識以上のことは判断できないため対処できる事態に限界がある。これらは、人間・機械双方の欠点を表している。

人間は、機械には不可能な優れた状態認識や柔軟な思考を行えるが、それは常に完全ではなく、心身の状態や環境などに影響を受けるといふ欠点がある。一方、機械は、人間の苦手とする複雑な演算や反復処理などには優れた能力を発揮するが、情報処理能力は限られており、柔軟性に欠ける。

ここで、人間と機械との長所を活かし双方の短所を補うよう

な、すなわち、機能の相互補完を目的とした協調を実現するようなインタフェースが実現できれば、様々な状況に柔軟かつ適応的に対処することが可能となると考えられる。

そこで本論文では、「人工システムと人間との協調」を考慮したマン・マシン・インタフェースについて議論する。ここで述べる協調とは、人工システムの不得意とする状態認識やそれに基づく総合的な判断などは人間が行い、人間の不得意とする複雑な演算や反復処理、人間が犯してしまう誤操作などに関してはシステムが支援し、適切な操作を行えるようにするなど、人工システムの機能と人間の能力との融合を図ることである。操作員とインタフェースとが協調的判断に基づき人工システムの異常診断と操作を行う意味から、ここでは、本システムを協調的異常診断・操作システムと呼ぶ。

本論文では、操作員の経験が大きく影響する人工システムの一例としてバイオプロセスを取り上げ、操作支援、および、異常診断を目的とした協調的異常診断・操作システムを設計し、そのプロトタイプを構築する。また、シミュレーションにより、本システムの有効性を検証する。

2. バイオプロセスを対象とした協調的異常診断・操作システム

2.1 バイオプロセスの操作支援と異常診断

バイオプロセスは、熟練者と初心者とで操作の信頼性が大きく異なる。これは、プロセスが内包する反応に比べ測定可能な情報量が非常に少なく、熟練者はプロセスの運転中に、機械では測定困難な情報を過去の経験や知識によって補いながら運転制御をしているためと思われる。しかし、熟練者であっても誤判断・誤操作などをする場合があり、このようなヒューマンエラーはシステムの生産性に大きな影響を与える。

* 原稿受付 平成 11年 10月 4日

** 正会員 理化学研究所 (和光市広沢 2-1)

*** 理化学研究所 (当時東京理科大学所属。現、大阪府警察；大阪市中央区大手前 3-1-16)

† 理化学研究所 (現、大阪大学工学部；吹田市山田丘 2-1)

†† 理化学研究所 (現、東京大学生産技術研究所；港区六本木 7-22-1)

††† 東京理科大学大学院 (新宿区神楽坂 1-3)

†††† 理化学研究所 (和光市広沢 2-1)

従来より、ヒューマンエラーに関しては多くの解析がなされており、例えば、エラーのメカニズムを人間の情報処理の側面から考察したものや、インタフェース設計のためのエラー分析、操作員の生理指標の測定による認知状態の解析など、様々な研究が行われてきた¹²⁾。一方、システム運用時のエラーへの対処に関しては、ファジィ・エキスパートシステムのような、熟練操作員の代替を果たすようなシステム¹³⁾や、プラント操作における協調的インタフェース¹⁴⁾等も開発されてきたが、このようなインタフェースは、主として機械が操作員の操作を支援する方向での議論しかされておらず、人間の判断をシステムに反映させるような、人間が機械を支援する方向も含めた相互協調的なアプローチは行われていない。

バイオプロセスでは、菌体内の化学的变化が生産の基本となるため、人間がシステムの内部状態を正しく予測し操作することは非常に困難である。その一方で、システムがオンラインで測定できる情報は限られており、例えば培地の色やにおいといった微妙な変化を伴う情報は測定不可能であるし、あるいは、人間の経験を記述したり、心理状態を計測することは極めて困難である。また、操作時と同様に、システムの異常時に、その原因が操作員の誤操作なのかシステムの故障なのかを判断するのも困難である。特に、ヒューマンエラーの場合は、操作する人間の状態に要因が依存しているため、システムのみでの診断では認識できない。

協調的な判断支援や異常診断においては、このような情報をシステムと人間とが協調(対話)し適宜補い合うことを可能にする。つまり、システムの操作や異常診断において、システムの情報と人間の知識や経験とを合わせることによって、システムの適切な操作や、従来では究明できなかった異常の要因を診断することが可能となる。異常を引き起こした原因が人的要因に起因するか物的要因に起因するかを認識できれば、エラーからの回復やシステムのメンテナンスなども効率良く行うことができ、さらに、究明された要因をその後の操作やインタフェースの設計などにフィードバックすることによって、エラーへの対応や防止策、システムの改善などを図ることが可能となると考えられる。

2.2 対象としたバイオプロセスの概要

バイオプロセスでは、培養液中に含まれる微量な増殖制御因子の量によってプロセスの挙動が大きく変化するため、プロセスを安定に運転するには、原料を移入した際に、これらの増殖制御因子の濃度を測定し、不足分を適宜添加することが必須である。このような増殖制御因子の濃度がプロセスに大きく影響した例として、ここでは、理化学研究所で保有する *Rhodococcus* 属の一菌株の菌体増殖実験を取り上げた。当研究室で行ったこの菌体増殖実験によって、増殖制御因子として *Rhodococcus* の菌体増殖を促進する未同定のビタミンが酵母エキス中に存在することが判明しており、この酵母エキスの添加量によって菌体の増殖が大きく異なることが既に確認できている。つまり、この *Rhodococcus* の菌体増殖は、酵母エキス添加量をもって制御することが可能であり、最適な酵母エキス量を添加すれば、初期の原料に対し希望の菌体増殖と最大の生産物を得ることが可能となる。しかしながら、培養液中に含有されるビタミン濃度の測定は測定誤差が大きく、酵母エキスの添加量の決定はプロセス操作者の経験に依存する。そのため、操作者のミスやシステムの故障により酵母エキス添加量が最適な値とならなかった場合には、生産物量が低下するという事態が生

ずる。そこで、この *Rhodococcus* の菌体増殖を効率良く行わせるためには、操作者が培養操作をする際の操作支援を行うと共に、生産物量が低下した時には、その原因をヒューマンエラー、システムの故障のどちらの場合についても診断可能な協調的異常診断・操作システムを構築する必要がある。

3. 協調的異常診断・操作システムの設計

操作員の操作支援およびシステムの異常診断を行うために、本論文では図1のような構成のインタフェースの枠組みを設計した。本システムは、診断部、判断支援部、表示部より構成されている。

診断部は、異常診断に必要な知識を搭載した知識ベースと、その知識を利用して診断を行う推論機構とから構成されている。

診断部の知識ベースは、異常事象と原因との因果関係を記述し、特に、操作員との協調的判断を実現するために、各事象が「システムのみで自動的に判断可能」、「操作員との協調的判断が必要」といった協調的判断を行うための情報を知識の中に記述できるようにした。

推論機構は、発生した異常事象から診断用の知識ベースを検索し、現在のデータで診断が進められなくなった場合、つまり、知識ベースに記述されている協調的判断のための情報を参照し、協調的な判断が必要となった場合に、オペレータとの対話的協調を経て診断を進め、原因を同定する。

判断支援部は、操作員の判断を支援するツールであり、システムを操作する際に操作員の判断に必要な情報を提供する。この判断支援部によって、操作員は操作前にこれから行う操作方法や操作量などを決定する際の参考とすることができる。

また、操作員は、表示部を通してシステムの操作や情報の入出力を行う。

4. バイオプロセスを対象とした協調的判断・操作システムの試作

本システムは、ワークステーション上に、エキスパートシステム構築ツールである Gensym Corporation・G2リアルタイムエキスパートシステム Version 3.0 を使用して構築した。

4.1 診断部の構築

診断部の知識ベースは、原因と結果の関係が記述しやすく操作者に分かりやすいなどの理由から異常事象とその原因との因果関係をツリー構造によって表現することとした。このツリー構造を持った知識表現は、フォールト・ツリーのように単に各事象間の因果関係のみを表すだけでなく、協調的判断を実現するために、各ノードに「システムのみで自動的に判断可能」、

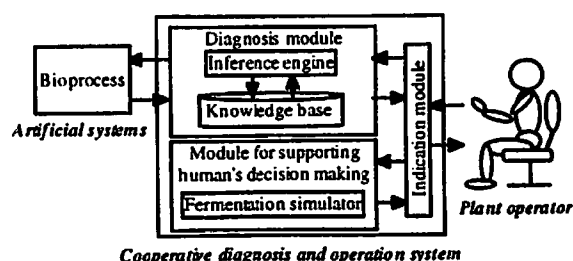


Fig.1 Scheme of a diagnosing and operating system based on cooperative decision making

「操作員との協調的判断が必要」といった「協調的判断のための情報」をツリーの各ノードの中に記述する。

この知識ベースを作成するために、「生産物量の低下」を引き起こす直接的な原因を実験熟練者からのヒアリングにより調査した。その結果、「生産物量の低下」は、

- 1) ビタミン量が最適値よりも少ない、
- 2) ビタミン量が最適値よりも多い、
- 3) ビタミン量が最適値よりも非常に多い、

という3つの原因により生起することが確認された。これらは、ヒューマンエラーや培養槽の故障といった間接的な要因により引き起こされる。ここでは、ヒューマンエラーの例として、操作手順のミス、入力ミス、誤差の見積り間違い、計算ミスなどを、また、培養槽の故障の例として、電気系統の故障や装置の老朽化などによるバルブの故障や培養槽内の圧力異常などを考慮している。この知識ベースのツリー表現の一部を図2に示す。この知識ベースでは、「生産物の消費」や「ビタミン量が非常に多い」といったシステムの機能により計測が可能な原因に関するノードは、システムのみで自動的に判断可能なノードとして表されている。また、図中の太枠の「操作ミス」や「入力ミス」、「操作手順のミス」といった、システム側が判断できない原因に関するノードは、操作員との協調的判断が必要なノードとして表されている。また、これら各事象はORの関係で接続されており、同時には発生しない。G2上では、これらの知識を約600のルールと数値演算処理を行う約200のプロシージャとして構築した。

推論機構は、異常を検出するとツリーの頂上事象であるノード「生産物量の低下」から知識ベースの縦型探索を開始する。システムのみで判断可能なノードでは必要なデータを自動的に計測し、その事象が生起しているか否かの判断を行う。また、例えば、操作員の判断が必要なノードや「ビタミン量の入力ミス」のような操作員の誤操作にかかわる事象を表すノードには、操作員との協調的判断が必要という情報が記述されているため、推論機構は、この情報を参照し操作員に質問を行うことによって、必要な情報の入力を促し、入力された情報に基づいて対応する事象が生起しているか否かの判断を行う。

4.2 判断支援部

バイオプロセスでは、あらかじめプロセスの挙動を予測して操作量を決定する必要があるが、操作員が複雑なプロセスの挙

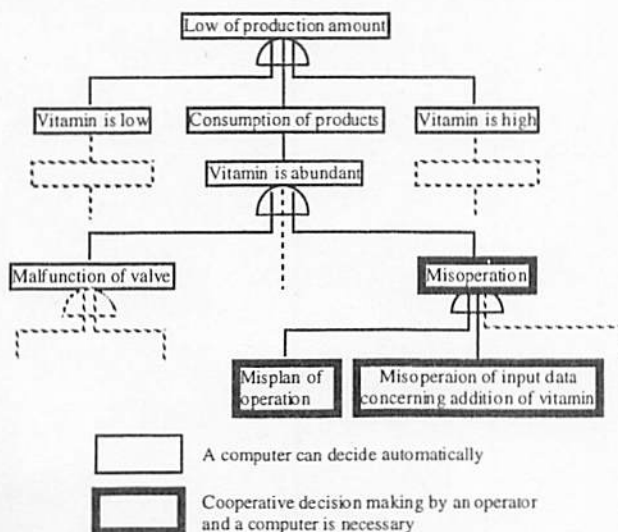


Fig.2 Subpart of a knowledge base

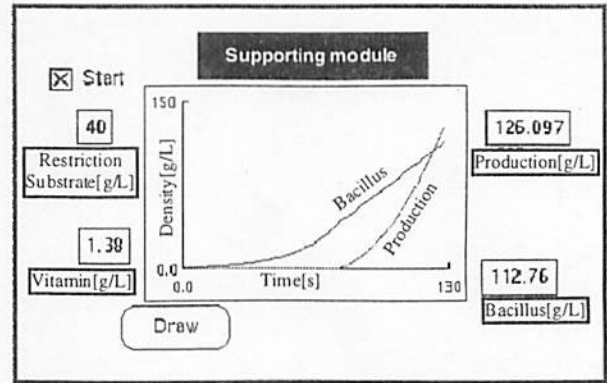


Fig.3 A subwindow of a fermentation simulation module for supporting human's decision making

動をいつも正しく予測することは難しい。そこで、ここでは判断支援部として、操作量の決定に有用な培養プロセスのシミュレータを構築した。この判断支援部は、

- ・ 内部に培養プロセスのダイナミクスが微分方程式を用いたモデル式として記述されており、これに基づいてシミュレーションが行われる。
- ・ 操作量を数値で入力しスタートボタンをクリックすることでシミュレーションが行われ、その結果が数値およびグラフで表示される。これにより、操作量に対する培養プロセスの挙動を予測することが可能である(図3参照)。
- ・ 評価する操作量を繰り返し入力でき、これにより操作員は試行錯誤的に最適操作量を推定することが可能である。

4.3 表示部

表示部は、主として操作具や表示器を通して情報の入出力を行う環境を与える。操作員は、この表示部を介してシステムの操作を行ったりデータを入手するため、表示器や操作具は操作員にとって使いやすいものでなければならない。従って、プラントおよび操作システムからの情報を表示する表示器には、視認性の良さや、異常時に音などにより危険を操作員に知らせるなどの機能が重要となる。図4にプロトタイプシステムの表示部の例を示す。

表示部には、前述の判断支援部や知識ベース、また操作員に培養結果やエラー原因などの情報を表示するメッセージボード、後述の仮想培養槽の操作パネルなどの各ウィンドウが表示される。操作パネルの表示は、視認性を考慮してメータ類の表示を拡大できるようになっている。知識ベースは各ノードが色分けされており、異常診断時には、操作員は各ノードの属性や状態(生起しているか否か)を色によって判断でき、診断の様子を確認できる。また、協調的判断が必要となる場合には、操作員に、Yes/Noや数値の入力を促すためのウィンドウが表示される。異常の発生や診断結果の表示については、ビープ音で操作員に知らせると共にメッセージボードにその内容を表示する。

5. 評価実験

5.1 仮想培養槽の構築

協調的判断・操作システムの試作にあたり、様々なヒューマンエラーや故障の状況を人為的に作り出すことが必要なため、ここでは、実際の培養槽を使用する代わりに培養槽の挙動を模擬する「仮想培養槽」を計算機上に構築し、これを対象システ

ムとして実験を行った。仮想培養槽の構築にあたって考慮したことは、操作量に対する菌体の挙動、および培養中に起こるシステムの故障を模擬することである。

菌体の挙動については、当研究室で行った *Rhodococcus* の菌体増殖実験の結果を基に、菌体量、制限基質量、生産物量、ビタミン量などを考慮したモデルを作成した。また、システム故障に関しては、培養中のランダム時間に、実験中に発生しやすい、例えば酵母エキス供給バルブの故障などを考慮し、その影響によって添加量が変化し菌体の挙動が変化するという事象などを取り上げた。

この仮想培養槽における操作量は酵母エキスの添加量であり、原料に含まれている制限基質量に対して酵母エキスに含まれるビタミン量が最適になるように添加された時に、最大の生産物量が得られる。従って操作員のヒューマンエラーや培養槽の故障などにより、ビタミン量が過大あるいは過小となった場合に「生産物量の低下」という異常が発生する。なお、仮想培養槽においてオンラインで測定可能なデータは、生産物量と菌体量のみである。また、操作員に表示されるデータについては、実際の培養槽で起こり得る計測誤差や外乱、原料のばらつきなどの計測困難な要因を模擬するために、乱数により誤差を発生させることとした。操作員は、培養によって得られる生産物を可能な限り大量に得るために、培養に先だって原料のデータ（制限基質量とビタミン量）を読み取り、これに基づいて、操作量（酵母エキス添加量）を決定し、実際に添加するための指令をシステムに与えることができる。また、培養後に菌体量および生産物量の計測結果を表示する。図4は仮想培養槽の操作パネルの表示である。操作パネルは、左側のメータに誤差を含んだ制限基質量とビタミン量が表示され、それに基づき、操作員はさらに添加するビタミンの量をスライダによって調節し、スタートボタンによって培養を開始する。培養終了後には、培養結果がグラフおよび右側のメータに表示される。

5.2 実験の概要

構築したプロトタイプシステムの機能を確認し、その有効性を評価するために、いくつかの稼働条件のもとで仮想培養槽を操作し、実験を行った。

培養を行う手順としては、まず操作員が仮想培養槽の培養前のデータを読み取り、判断支援部を用いてシミュレーションを行い、読み取ったデータを考慮しながら試行錯誤的に最適ビタミン量を推定し、添加量を決定する。その後、ビタミン添加量を仮想培養槽の入力用スライダを使って添加し、スタートボタンにより培養を開始する。培養終了後、生産物量が特定の量以

上得られたときには培養が成功したものとする。しかし、もし、生産物量が特定の量より少ないときには、システムの故障、あるいは、ヒューマンエラーなどの原因で「生産物量の低下」という異常が発生していることとなり、異常診断が行われる。なお、異常の原因となるエラーについては、次の前提条件を設けた。

- 知識ベースに搭載されていないエラーは起こらない
- 一度に複数のエラーは起こらない
- 協調的判断時には操作員はエラーを起こさない

5.3 実験結果および考察

図5は、実験結果の一例であり、ヒューマンエラーが原因で培養が失敗した場合の表示画面を示している。操作員は、判断支援部を用い酵母エキスの最適添加量を 1.04 g/L と推定し添加した後、仮想培養槽のスタートボタンを押し培養を行った。その結果、異常診断部は「生産物量の低下」を検出し、原因の探索を開始した。原因の探索過程で、ビタミン量が過剰であることが判明し、操作員の操作ミスがあるため、協調的判断が必要なノードに達したとき、システムは、画面中央に操作員に対し質問を行うウインドウを表示した。ここでは、実際にどのくらいの酵母エキスを添加したのかを質問した。これに対し、人間が 1.04 g/L を入力すると、添加量が間違っているというメッセージを表示した。実際に操作員がここで添加していたのは、1.4 g/L であり、誤操作（ヒューマンエラー）の結果、ビタミン量が過剰になり生産物の低下が起こったことが判明した。また、診断部により検知された異常と究明された原因が、それぞれ MESSAGE BOARD を介して提示された。

また、システム側の故障が起こった場合も同様に原因の究明が可能であった。操作員が判断支援部を用いて添加量を決定した後、酵母エキスを添加し培養を行った結果、異常診断部は「生産物量の低下」を検出し、異常原因の診断を開始した。診断過程で、ビタミン量が少ないことが判明し、システム側が考えられる原因を表示し、電気系統のシステムの状況などをさらに詳しく操作員に質問し総合的判断を仰いだ結果、酵母エキス供給バルブの故障を検出することが可能であった。

培養が成功した場合には、培養が成功したことを示すメッセージが提示されることを確認した。

以上の実験より、

- 1) 判断支援部を用いた最適操作量の決定
- 2) プロセスの異常の検出および機械による情報の提示という、機械から人間への操作支援と、
- 3) 操作員による情報の入力
- 4) 操作員による総合的判断

という、人間から機械への判断支援の四つの機能相互補完的な協調が確認でき、プラントの操作、およびヒューマンエラーや人工システム側の故障に起因する異常の診断が有効に行えることが確認できた。

今後の課題として、この実験では、主に本システムの基本機能について実証するために、いくつか前提をおいたが、柔軟かつ適応的なシステムを構築するためには、これらの基本機能をさらに拡張しなければならない。例えば、協調判断時に操作員が誤入力をした場合や、同時多発的に異常が発生した場合の対処、知識ベースにはない原因により新たな異常が発生した場合などにおける操作員とシステムの協調的な対処が考えられる。また、表示部に対しては、さらに人間工学的・認知工学的な見地からの画面構成や協調時の対話性の向上などの改良を行うこ

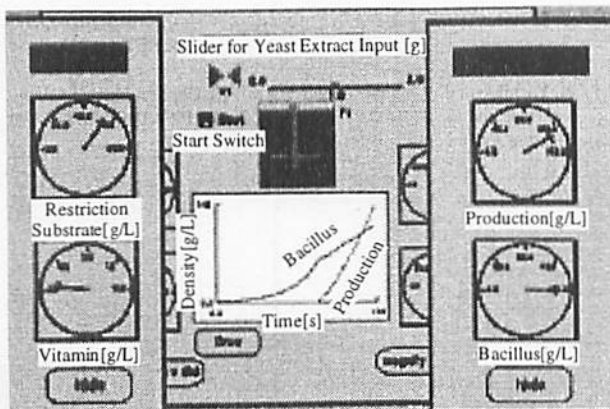


Fig. 4 Operation panel for a virtual fermenter

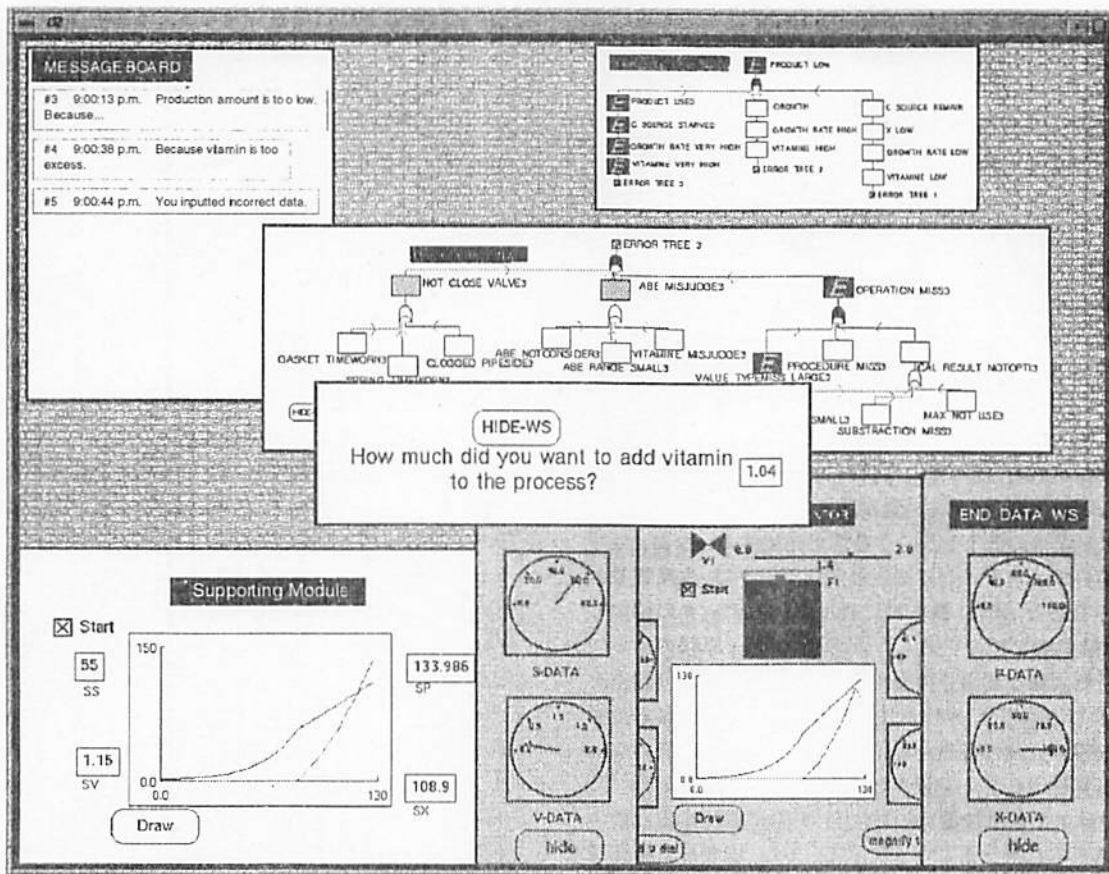


Fig.5 Example of a human error for cooperative decision-making and operation

とが好ましい。

6. 結 言

本論文では、人工システムの操作ループに積極的に操作員を含めることにより、操作員と人工システムの操作システムが協調しながらお互いの欠点を補い、より高度な機能を実現するための協調的判断に基づく異常診断・操作システムの枠組みを提案した。そのプロトタイプシステムとして、自動化が困難であり、かつ、操作員の経験的な判断が必要とされるバイオプロセスを対象とした協調的異常診断・操作システムを構築した。また、評価実験を行うことにより、プラントの操作、および、ヒューマンエラーや人工システム側の故障に起因する異常の診断が有効に行えることを示した。

本研究で提案した協調的異常診断・操作システムの枠組みは、人工システムの操作における操作員の役割を重視しており、また、様々な人工システムに適用可能なため、人間-機械系を実現する汎用的枠組みとなり得る。

なお、本研究は、科学技術庁の平成6年度科学技術振興調整費による「システムと人間の協調のための人間特性に関する

基礎的・基盤的研究」の一環として、理化学研究所で実施した「人工システムと熟練操作員の協調的判断・操作機構の研究」の成果の一部をまとめたものである。

参 考 文 献

- 1) 林 喜男：人間信頼性工学—人間エラーの防止技術—，海文堂出版(1984)。
- 2) 谷村富男：ヒューマンエラーの分析と防止，日科技連出版社(1995)。
- 3) C. von Numers, M. Nakajima, T. Siimes, H. Asama, P. Linko and I. Endo: A Knowledge Based System Using Fuzzy Inference for Supervisory Control of Bioprocesses, *J. Biotechnol.* **34** (1994) 109.
- 4) T. Siimes and P. Linko: Real-Time Fuzzy-Knowledge-Based Control of Baker's Yeast Production, *Biotechnol. and Bioeng.*, **45** (1995) 135.
- 5) 中村孝太郎, 小林 重信：並列対話方式に基づく故障診断システム，*人工知能学会誌*，**4**, **1** (1989) 52.
- 6) J. J. Lisboa: Nuclear Power Plant Availability and the Role of Human Factors Performance, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **37**, **2** (1990) 980.
- 7) C. R. Hardy, S. M. Randall: A Software Tool for Incorporating Operator Response into Nuclear Plant Accident Analysis, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **4**, **4** (1994) 1394.
- 8) H. Yoshikawa, M. Takahashi and T. Arai: Concept on Mutual Adaptive Interface and the Related Experimental Study, 1994 Japan-U.S.A. Sym. Flexible Automation, (1994) 503.