

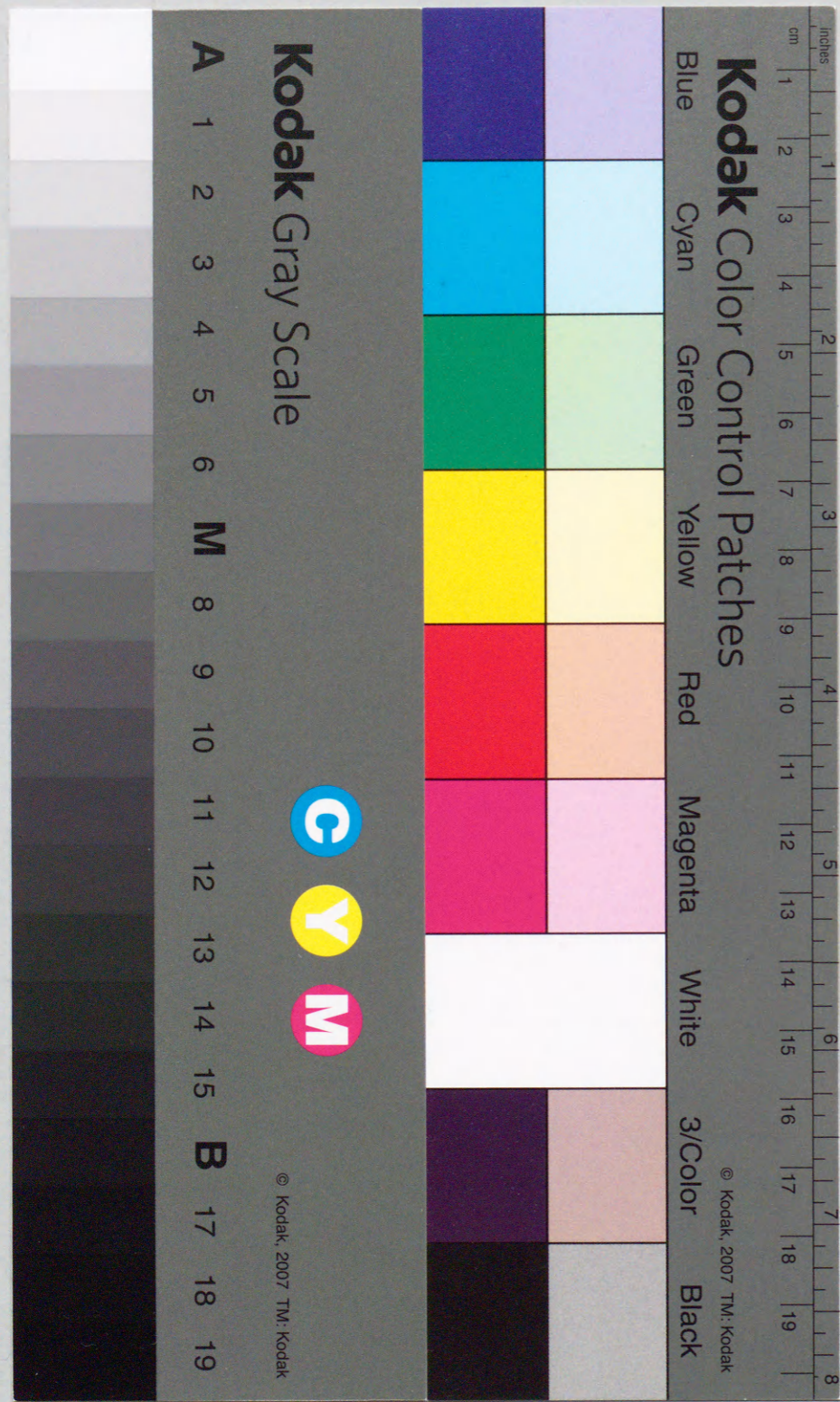
博士論文

知識工学を用いた

システム安全評価と異常診断に関する研究

平成8年3月

島田行恭



知識工学を用いた

システム安全評価と異常診断に関する研究

島田行恭

## 目次

第1章 緒論	1
1.1 はじめに	1
1.2 従来の研究	3
1.2.1 オペラビリティ・スタディ	3
1.2.2 フォールト・ツリー生成法	5
1.2.3 異常診断	8
1.3 研究の目的	11
1.4 本論文の構成	12
第2章 連続プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析	14
2.1 緒言	14
2.2 オペラビリティ・スタディ	15
2.2.1 オペラビリティ・スタディの原理	15
2.2.2 システム工学に基づくオペラビリティ・スタディ	16
2.3 データベースと知識ベース	17
2.3.1 データベース	18
2.3.2 知識ベース	27
2.4 推論機構	33
2.4.1 ずれの想定	34
2.4.2 原因式・影響式作成	35
2.4.3 解析結果出力	40
2.5 結言	43
第3章 回分プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析	44
3.1 緒言	44

3. 2	回分プロセスのオペラビリティ・スタディ	45
3.2.1	回分プロセス	45
3.2.2	回分プロセスのオペラビリティ・スタディ	45
3. 3	データベースと知識ベース	50
3.3.1	データベース	51
3.3.2	知識ベース	61
3. 4	推論機構	67
3.4.1	操作変数のずれの解析	67
3.4.2	操作時刻のずれの解析	72
3. 5	結言	75
第4章 フレームを用いたフォールト・ツリー自動生成		
4. 1	緒言	76
4. 2	演算子	77
4. 3	データベースと知識ベース	81
4.3.1	データベース(演算子, ミニツリー)	81
4.3.2	知識ベース(構造フレーム)	85
4. 4	フォールト・ツリー自動生成	89
4.4.1	プログラムの構成	89
4.4.2	回路レベルのツリー展開	90
4.4.3	要素レベルのツリー展開	91
4. 5	応用例	93
4. 6	結言	95
第5章 フォールト・ツリーを用いた異常診断エキスパートシステムの構築		
96		
5. 1	緒言	96
5. 2	知識ベース1 (プロダクションルール)の構築	97

5.2.1	フォールト・ツリー自動生成	97
5.2.2	プロダクションルール	101
5. 3	知識ベース2 (異常パターン表)の構築	105
5.3.1	検出すべき事象, 測定点の決定	105
5.3.2	異常パターン表	109
5. 4	異常診断	111
5. 5	結言	116

第6章 ニューラル・ネットワークを用いた異常診断エキスパートシステムの構築

96		
6. 1	緒言	117
6. 2	ニューラル・ネットワーク	118
6. 3	異常診断エキスパートシステム構築	120
6.3.1	フォールト・ツリー自動生成	121
6.3.2	検出すべき事象, 測定点の決定	124
6.3.3	異常パターン表	127
6.3.4	ネットワークの構造	130
6.3.5	学習データ作成	131
6.3.6	学習	132
6. 4	異常診断	134
6.4.1	診断用センサが正常である場合	134
6.4.2	診断用センサが故障している場合	134
6. 5	結言	138

第7章 結論

139		
文 献		143
謝 辞		153

## 第1章 緒論

### 1.1 はじめに

近年、石油、化学コンビナート及び原子力発電所の安全に関する問題が、社会的に大きな関心を集めている。化学プラントでは、火災、爆発、有害物質の漏洩、原子炉では放射性物質の漏洩など、大規模災害発生の危険性が存在することがその一因である。特にわが国では、ヨーロッパ諸国と同様に、各種の工場が人口密集地域の近くに位置している場合が多く、工場の産業災害により、周辺の住民が損失を受ける可能性がある。また、プラントが大型化するに従い、各企業においても安全確保と災害防止のための十分な対策を講ずる必要に迫られている。そのためには、設計の段階からプラント、プロセスの安全を評価し、その結果に基づいて改良を加えたり、あるいは現在運転中のプラントでは、リスク解析によりその弱点を明らかにし、対策を講ずるといった実用的な安全解析手法を開発し、確立することが強く望まれている。

1950年代の後半から1960年代の前半にかけて、アメリカの空軍において初めて、システム安全工学の問題が検討された<sup>1)</sup>。1957年のAGREE(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment)の報告書では、試作、生産時の信頼性測定法や信頼性を考慮した仕様書の作成方法などが具体的に示されている<sup>2)</sup>。アメリカでは軍が信頼性活動を指導し、システムや機器を納入する企業に信頼性保証を要求した。アメリカ国防省やアメリカ航空宇宙局が納入メーカーに信頼性を保証することにより、大規模で高性能なシステム開発における信頼性マネジメントが進展した。日本において信頼性保証の関心が高まったのは1960年代頃である。1961年に、航空自衛隊及び日本航空工業会で航空機などの信頼性調査が始められた。その後、システム安全工学に関する研究は、国内、国外において重視されるに至った。

システム安全解析の目的は、そのシステムにおける事故の危険性が、定められた水準以下にあることを確認することである。これまでに、数種類のシステム安全解析手法が開発されているが、実施するプログラムの段階により予備事故解析、サブシステム事故解析、システム事故解析、運用事故解析などに、解

析の数理的方法により定性的解析と定量的解析に、あるいは論理的見地により帰納的解析と演繹的解析に分類される。

システム安全解析の方法としては、

- 1) 故障モード、影響、致命度解析 (FMECA ; Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)<sup>1) 3) 6) ~5)</sup>
- 2) オペラビリティ・スタディ (OS ; Operability Study)<sup>1) 3) 6) ~12)</sup>
- 3) フォールト・ツリー解析 (FTA ; Fault Tree Analysis)<sup>1) 3) 5) 6) 13) ~17)</sup>
- 4) イベント・ツリー解析 (ETA ; Event Tree Analysis)<sup>1) 3) 6) 18)</sup>
- 5) 予備事故解析 (PHA ; Preliminary Hazard Analysis)<sup>1) 3)</sup>
- 6) 管理の手落ちとリスク・ツリー (MORT ; Management Oversight and Risk Tree)<sup>19) 20)</sup>

などがある。

一方、知識工学の目的は、問題解決の対象となる領域に関する専門的知識や専門家が持つ経験的知識を形式化し、知的情報処理システムを実現することにある。知識工学の発展により、種々の問題に対してその応用が試みられており、信頼性、安全の分野の問題に対しても、適用されつつある。

本研究では、ますます大型化、複雑化する化学プラント、原子力発電所の信頼性、安全の問題を解析、評価する方法として有用なオペラビリティ・スタディ、フォールト・ツリー解析に対して、知識工学的手法を導入し、計算機を用いた解析法を提案する。さらにフォールト・ツリーから得られる情報を応用した異常診断法、ニューラル・ネットワークを用いた異常診断法を示す。

## 1. 2 従来の研究

ここではオペラビリティ・スタディ、フォールト・ツリー解析(ツリー生成法)、フォールト・ツリー及びニューラル・ネットワークを応用した異常診断法に関する従来の研究の概要を示す。

### 1.2.1 オペラビリティ・スタディ

#### (1) オペラビリティ・スタディに関する研究

オペラビリティ・スタディ (Operability Study) は 1970 年代の初めに、イギリスの ICI 社で開発された定性的な危険度評価手法である。この手法の基礎となる考え方は、プラント、プロセス内の配管内の“ずれ (deviation)”を取り上げ、その原因及びシステムに及ぼす影響と対策について順次検討することである。これによりプラント、プロセスにおける潜在的な危険を明らかにし、その影響を評価するとともに、必要な対策を講ずることが可能である<sup>1) 3) 6) ~12)</sup>。

1977 年、イギリスの CIA (Chemical Industries Association) より、オペラビリティ・スタディを分かりやすく解説した手引書が発刊された<sup>8)</sup>。Kletz もオペラビリティ・スタディの解説書を発表している (1983)<sup>10) 12)</sup>。この方法を大規模なシステムに適用した事例はあまり公表されていないが、ソルベイ法 (1980)<sup>21)</sup>、酸化エチレンプラント (1984)<sup>22)</sup> 等の事例は発表されている。国内では、1975 年、岡山県保安防災研究会により、コンビナートの危険度評価法の一つとして取り上げられ、大規模プラントへの応用例も 1978 年<sup>23)</sup>、1980 年<sup>24)</sup> に発表され、その一部は 1980 年に紹介されている<sup>9)</sup>。

また、オペラビリティ・スタディが回分プロセスに適用可能であることを明らかにし、簡単な応用例を示したのは CIA より発刊された手引書が最初であろう<sup>8)</sup>。その例は、回分プロセスの原料供給部であり、エゼクタを用いて計量容器を減圧にし、ドラムから原料 C を 100 l 移送する設備である。計量容器から空気を排気する際のずれ、計量容器に原料 C を 100 l 充填する際のずれ、計量容器から反応容器に原料 C を 100 l 移送する際のずれなどを検討している。対象は回分プロセスであるが、解析の内容は連続プロセスの原料供給部の解析

とほとんど変わりはない。

岡山県保安防災研究会においても、回分プロセスのオペラビリティ・スタディを検討しているが、原料仕込みラインと蒸気凝縮ラインを対象としている(1978)<sup>23)</sup>、(1980)<sup>24)</sup>。ICI社の製薬部のKnowltonは、8年間にわたって新設の回分プロセスに対してオペラビリティ・スタディを実施した結果、きわめて有効であった事例を報告している(1979)<sup>25)</sup>。しかし、ここでも回分プロセスの脱気、原料の仕込み工程だけを対象としている。

以上述べたように、回分プロセスに対して、オペラビリティ・スタディを適用した例は数例発表されている。しかし、いずれも原料仕込み、取り出しについて検討しており、実際には連続プロセスに対する手順を回分プロセスに適用したにすぎない。

鈴木らは従来のオペラビリティ・スタディに対して、その問題点を明らかにするとともに、システム工学の入出力の概念を適用して、改良されたオペラビリティ・スタディを提案している(1988)<sup>26)</sup>。この手法では、装置が結合された多段システムに対して、ずれの影響、相互干渉を明確にし、プロセス内で発生すると思われる異常(ずれ)の伝播構造を詳細に分類している。また、回分プロセスに対して、プロセスの運転開始から終了までを操作形式により区分し、それぞれの操作手順毎に入出力の関係を明らかにすることにより、回分プロセスのオペラビリティ・スタディを実施する方法を提案している(1988)<sup>27)</sup>。

## (2) オペラビリティ・スタディ支援システムに関する研究

オペラビリティ・スタディは、国内外において数多くの化学プラント、プロセスに適用され、その有用性は高く評価されているが、ますます大型化、複雑化する実プラントの解析を進めるためには、複数の専門家から構成されるグループにより、多大な時間と労力を必要とする。このような問題に対して、計算機によりオペラビリティ・スタディを支援するシステムが提案されている。Lihouらはオペラビリティ・スタディの解析結果を簡単なアルファベットと数字を用いてコード化し、ずれに対する原因、影響の関係を計算機に入力することにより、配管系の解析に利用した(1980)<sup>21)</sup>、(1986)<sup>28)</sup>。Weatherillらは解析者との対話形式を用いたHAZOPエキスパートシステムを提案している

(1989)<sup>29)</sup>。Venkatasubramanianらはフレーム表現を用いて、配管や熱交換器の解析結果をモデル化し、簡単なプロセスへ適用した例を報告している(1994)<sup>30)</sup><sup>31)</sup>。これらの研究では、いずれも配管部を重視した連続プロセスに対する解析支援システムであり、回分プロセスに適用するための手順は確立されていない。

## 1.2.2 フォールト・ツリー生成法

### (1) フォールト・ツリー生成法に関する研究

1961年にアメリカ空軍は、ミニットマンミサイル打ち上げ制御システムの研究をベル電話研究所に委託した<sup>32)</sup>。その過程で、初めてフォールト・ツリー解析法を開発した。その後ボーイング社の研究者は、この方法をさらに発展させ、1969年には定性的及び定量的解析に必要な計算機コードを開発し、航空、宇宙産業の問題に適用した<sup>33)</sup>。その後、フォールト・ツリー解析は、航空、宇宙工学から原子炉の信頼性、安全工学へと応用の範囲が広がり、1974年のラスムッセン報告<sup>34)</sup>は、これまでの研究成果を集大成したものといえる。現在では、化学産業をはじめとする各分野にもフォールト・ツリー解析が適用されつつあり、特に人間を含む問題にも適用可能と考えられることから、システムの信頼性、安全問題を解析するために、最も有力な方法の一つである。しかし、フォールト・ツリー解析で困難な問題は、いかにしてフォールト・ツリーを生成するかという点である。

Browningは反応器の温度を制御するための流量制御回路及び暴走反応を防ぐために流量を緊急遮断する保護計装システムのフォールト・ツリーを発表した(1972)<sup>35)</sup>。この論文ではツリー生成の詳細については述べず、ツリーの最終形のみを示しているため、ツリー展開の内容が不明である。その後、フォールト・ツリー生成のアルゴリズムはいくつか提案されているが、代表的なアルゴリズムとしては、①ミニツリーを用いる方法、②有向グラフを用いる方法、③デジジョンテーブルを用いる方法がある。

ミニツリーを用いる方法として、Fussellは電気回路に対して、フォールト・ツリーを自動的に生成する方法を提案した(1973)<sup>36)</sup><sup>37)</sup>。電気回路の故障モ

ードを分類し、回路を分割することにより、ツリー生成の論理を明らかにした。そして各要素に対するミニフォールト・ツリーをあらかじめ生成しておき、これを編集して全体のツリーを合成する手順を示している。その後 Taylor (1982)<sup>38)</sup>、Lees (1986)<sup>39)~43)</sup>、Lees (1993)<sup>44)~49)</sup> がミニツリーを用いた、化学プロセスに対するフォールト・ツリー自動生成法を提案している。

Powers らは化学プロセスに対するフォールト・ツリー生成のために、グラフ理論の適用が可能であることを示した(1974)<sup>50)</sup>。Powers らにより提案された、有向グラフによるツリー生成法は、プロセスの状態を有向グラフで表現し、そのグラフに故障モードを記入して、ツリーを生成する方法である。この方法を高温硝酸冷却システムに適用し、ツリー生成例を報告している<sup>51)</sup>。その後いくつかの応用例が報告されているが、Cummings らは電力分配回路に対するフォールト・ツリー生成例を示している(1983)<sup>52)</sup>。また、Powers らのツリーに対しては多くの議論が行われた<sup>53)~57)</sup>。Allen らは Powers らのアルゴリズムに対して、ゲインと変数の表示に改良を加えたアルゴリズムを示している(1980)<sup>58)</sup>。Powers らの方法は、プロセスを構成する要素を一つの単位として有向グラフを求めたのに対して、Shafaghi らはプロセスを制御回路単位に分割して、制御回路を一つの単位として有向グラフを求め、このグラフを用いてフォールト・ツリーを生成する方法を提案している(1984)<sup>59) 60)</sup>。また、Kumamoto らは有向グラフの考え方を基礎として、制御回路に対するフォールト・ツリー生成法を提案している(1986)<sup>61)</sup>。単一の制御回路及び制御回路結合系に対して、外乱、要素故障の種類とその影響を分類し、フォールト・ツリーのトップ構造を表わす演算子を求めている。

これらの方法に対して、佐山は故障モードブロック線図を用いたフォールト・ツリー生成法の基礎を提案した(1981)<sup>62)</sup>、(1982)<sup>63)</sup>。この方法は、有向グラフと自動制御のブロック線図の考え方を基礎とし、各要素についてはデシジョンテーブルを用いて解析する。種々の故障モードを記入したブロック線図を生成し、この線図より逐次的にツリーを展開する方法である。さらに単一の制御回路、遮断回路のフォールト・ツリーのトップ構造を演算子としてまとめ、演算子を組み合わせることにより、回路が複雑に結合したシステムのフォールト・ツリーを生成する方法を提案している(1982)<sup>64)</sup>、(1983)<sup>65) 66)</sup>。

鈴木らはリレー、コイルなどから構成されるシーケンス制御回路を対象としたフォールト・ツリー生成法を提案している。この中で、ツリー生成前の段階において、ブロック線図により故障モード、情報の流れを図示し、この線図に基づいてツリーを生成することの有用性を明らかにしている。また、この手法は化学プラントを含めた一般の待機安全系にも適用可能であることを示している(1986)<sup>67)</sup>、(1992)<sup>68)</sup>。

計算機によるフォールト・ツリー自動生成として Salem らは、デシジョンテーブルを用いたフォールト・ツリー生成法を提案し、フォールト・ツリー自動生成コード CAT (Computer Automated Tree) を開発した(1976)<sup>69)</sup>、(1977)<sup>70)</sup>。デシジョンテーブル法では、各要素の入力、出力、内部モードの状態をデシジョンテーブルを用いて表わし、この表に基づいてツリーを生成する。デシジョンテーブルを用いれば、各要素の機能は詳細に規定することができるが、CAT コードでは、複雑な形式で結合された化学プラントに対して、適用することは不可能であった。

## (2) 知識工学によるフォールト・ツリー自動生成に関する研究

知識工学の目的は、問題解決の対象となる領域に関する専門的知識や専門家が持つ経験的知識を形式化し、知的情報処理システムを実現することにある。知識工学の発展により、種々の問題に対してその応用が試みられており、いくつかの適用例が報告されている。

知識工学によるフォールト・ツリー生成法としては、Garribba らにより、電気回路のフォールト・ツリー構成エキスパートシステムが提案されている(1985)<sup>71)</sup>。熊本らは GO 法に類似した方法を用いて、対象システムをモデル化し、システムに対する事実型知識を生成する方法を提案している(1988)<sup>72)</sup>。また、専門家の原因探索のノウハウ及び論理的探索指針に基づき、ルール型知識を生成する。これらの知識を基に、再帰的な AND/OR グラフ探索により、フォールト・ツリーを生成する方法である。

鈴木らは①オペラビリティ・スタディと②デシジョンテーブルを用いたフォールト・ツリー自動生成法を提案している(1989)<sup>73) 74)</sup>。①はオペラビリティ・スタディから得られる危険度評価に関する部分的知識を、異常伝播の構造を



基に結合し、対象とするシステムのフォールト・ツリーを生成する方法である。②はプラントの知識表現としてデシジョンテーブルを用い、知識工学の手法により、フォールト・ツリーを自動生成する方法である。この方法ではシステム構成要素に関する知識の入力、出力、内部状態の関係をデシジョンテーブルで表現し、この知識を基に情報を探索し、対象とするシステムのツリーを生成する。

### 1.2.3 異常診断

#### (1) フォールト・ツリーを用いた異常診断法に関する研究

異常診断に関しては、数多くの論文が報告されているが、Berenblutらにより提案された方法がよく知られている(1977)<sup>75)</sup>。この方法は、デシジョンテーブルを基礎としたものであり、応用例としてタンク結合システムに対する異常診断例を示している。異常診断法は、対象システムの特徴や診断目的により分類されるが、その一つの方法として、異常の因果関係モデルを利用する方法がある。因果関係モデルの代表的なものとして、①符号付有向グラフ、②フォールト・ツリーなどがある。松山、大島らは符号付有向グラフによる異常診断法を提案している(1984)<sup>76) 77)</sup>。この方法はプラントの各状態変数を節点に対応させ、それらの間に存在する因果関係を符号付有向グラフにより定性的に表現し、グラフの構造を基に、プロセス異常の原因を推定する方法である。

フォールト・ツリーを用いた異常診断法としては、Lambertらにより、フォールト・ツリーのインポートランスを利用して、診断する方法が提案されている(1977)<sup>78)</sup>。この方法では、フォールト・ツリーの論理構造と基本事象の発生確率を用いる。プロセスの危険度の高い順にチェックリストを作成し、原因を推定するという方法である。Powersらにより提案された方法(1979)<sup>79)</sup>も、フォールト・ツリーの確率データを用いて診断順序を決定するものであり、Lambertらによる方法と類似している。その後、Powersらは再びフォールト・ツリーに基づく異常診断法を提案している(1988)<sup>80)</sup>。有向グラフを用いて生成したフォールト・ツリーを基に、プロセス異常(トップ事象)とプロセス運転情報(センサ出力、制御信号、バルブ開度)の関係を示すツリー(故障検出

ツリー)を生成している。このツリーのミニマルカットセットを用いて診断する方法である。

知識工学とフォールト・ツリーに基づく異常診断法として、冬木らはLappとPowersのフォールト・ツリーの演算子を用い、複数の異常事象の入力に対して、関連する事象を対話的に確認し、その原因を推定する方法を提案している(1984)<sup>81)</sup>。Richらは機械間の物理的関係とプロセス各部の状態をフレームモデルにより、また、フォールト・ツリーの事象間の関係をプロダクションルールにより表わし、異常項目の探索を行う方法を提案している(1987)<sup>82)</sup>。

これらの研究において、異常診断におけるフォールト・ツリーの有用性は明らかにされているが、フォールト・ツリー生成が困難であり、対象プロセスの改良、変更などに対して柔軟に対応することができないという問題点も残されている。

鈴木らはフォールト・ツリーのミニマルカットセットにより、対象プロセスの異常伝播の構造を明らかに、異常診断を行うために検出すべき状態量及び測定個所を選定し、診断に必要な最小限のセンサ配置を決定できる方法を提案している(1990)<sup>83)</sup>。さらにプロセス異常時(トップ事象発生時)のセンサ配置個所における状態量を知識ベースとして格納し、異常診断を行う方法を提案している(1990)<sup>84)</sup>。

#### (2) ニューラル・ネットワークを用いた異常診断法に関する研究

神経回路網をモデルにした人工ニューラル・ネットワークの研究が盛んに行われている。人間の脳のパターン分類・認識の機能及びこの並列・分散処理と同じような機能をもたせるために、様々なネットワークが提案され、学習・認識アルゴリズムが開発されている<sup>85)~89)</sup>。さらにニューラル・ネットワークは学習パターンの訓練により、未学習のパターンに対しても妥当な出力を生成できるという汎化能力を利用し、様々な分野において応用されている<sup>90)</sup>。

化学プラントを対象とした異常診断にも、ニューラル・ネットワークを応用する手法が数多く提案されている<sup>94)~104)</sup>。Hoskinsらは多段連続攪拌反応槽を対象とした異常診断に、ニューラル・ネットワークを導入するための知識の表現法を提案し、ネットワークの設計、シミュレーション環境の設定について

研究している(1988)<sup>91)</sup>。Venkatasubramanianらは流動接触分解装置に対して、ニューラル・ネットワークを用いた異常診断法を提案し、知識ベース型の診断法との比較を行っている(1989)<sup>92)</sup>。この中で、ニューラル・ネットワークが学習したデータのみを診断できるのではなく、ネットワークの汎化能力を利用することにより、学習していないデータについても診断可能であることを示している。また、ネットワークは不完全、不明確なデータも取り扱うことができることを示している。Ungerらは簡単な化学プロセスに対して、故障診断と非線形反応制御を行うためのネットワークを構築している(1990)<sup>93)</sup>。Venkatasubramanianらは連続攪拌反応槽と蒸留塔が結合したプロセスを対象として、異常診断を行うネットワークを構築している(1990)<sup>95)</sup>。この中で、ネットワークの中間層の数、中間層の要素の数を様々に変え、ネットワークの診断精度について検討している。

大規模プラントに対しても容易に診断を行えるシステムを開発するために、複数のニューラル・ネットワークを用いる方法が提案されている。Watanabeらは階層型ニューラル・ネットワークを2段階に結合し、第1段階で異常原因の識別、第2段階で異常の程度を推定する方法を提案している(1989)<sup>96)</sup>。また、渡辺らは複合故障が発生した場合の故障診断について検討している(1993)<sup>97)</sup>。複合故障の場合には、その故障データの入手は困難であるが、単一故障データから複合故障データを作成する方法について述べ、複合故障診断向きマクロ構造ネットワークを提案している。さらにすべての故障パターンを学習させる代わりに、数少ない故障パターンを選択し学習させることで、膨大な種類の故障を診断する方法を提案し、化学反応炉の早期故障診断に応用している(1994)<sup>98)</sup>。Becraftらは複数の蒸留塔が結合したプラントに対して、2段階構造のニューラル・ネットワークを提案している。1段目のネットワークでは、どの装置で異常が発生しているかを推定し、2段目のネットワークで、故障の原因を推定する方法である(1993)<sup>99)</sup>。

その他にも、化学プロセスの異常診断に、ニューラル・ネットワークを導入する研究が数多く行われている。これらの研究では、バックプロパゲーション法により学習したニューラル・ネットワークは、異常診断エキスパートシステムの構築に有用であることが示されている<sup>100)~104)</sup>。

### 1.3 研究の目的

プラント、プロセスの信頼性、安全を評価するための手法として、オペラビリティ・スタディ、フォールト・ツリー解析に関する多くの研究が報告されている。従来の研究については前節に示した。しかしながら、これらの手法に対しては次のような問題点がある。

オペラビリティ・スタディに対しては、①実プラントの解析を進めるためには、複数の専門家から構成されるグループにより、多大な時間と労力を必要とする。②解析者により解析結果が異なったり、解析漏れが生ずる場合がある。③回分プロセスに適用するための手順が確立されていない。

フォールト・ツリー解析において、ツリー生成は多くの人手と時間を必要とし、極めて困難な問題点の一つである。従来報告されているツリー生成法の多くは、FORTRANなどの手続き型言語を用いて、自動的にツリーを生成することを目的としているが、①複雑なアルゴリズムが必要である。②事象の表現、変更、追加、削除が困難となる。③プラントが複雑化、大型化してくると、ツリー生成に必要な情報の整理が困難となる。

本研究では、オペラビリティ・スタディ、フォールト・ツリー生成に対して、知識工学の手法を導入した解析支援システムを開発することにより、これらの問題点を解決する。プログラミング言語として、論理型人工知能言語 Prolog を用いる。Prolog 処理系の述語論理表現を用いることにより、対象プロセスに関する情報を自然言語で表現することができ、さらに情報探索の機能を解析に応用することができる。

また、近年、知識工学の手法を利用した、プロセス異常診断に関する研究が重視されている。プロセス異常診断システムの開発において、知識の獲得と表現は重要である。この問題に対して、プロセス異常に関する知識獲得と表現に、フォールト・ツリーを用いた異常診断法を提案する。さらに従来のパターンマッチングによる診断法の問題点を解決するために、ニューラル・ネットワークを用いた異常診断法を提案する。

## 1. 4 本論文の構成

本論文の構成と要旨を以下に述べる。

### 第1章 緒論

本研究の目的と従来の研究との関係を明らかにする。

### 第2章 連続プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析<sup>105)~107)</sup>

本章では、連続プロセスを対象として、知識工学の手法を用いたオペラビリティ・スタディ自動解析法を提案する。解析システムは、知識ベース、データベース及び推論機構からなる。連続プロセスを構成する一般的な要素の異常に関するデータをデシジョンテーブルを用いて整理し、データベースに格納しておく。推論機構では、知識ベースに入力した対象プロセス固有の情報を基に、ずれに対する原因、影響をデータベースの検索により取り出し、オペラビリティ・スタディの解析結果として出力する。

### 第3章 回分プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析<sup>108) 109)</sup>

本章では、回分プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析法を提案する。回分プロセスの特性を明らかにすることにより、回分プロセスの運転開始から終了までを操作形式により三つの操作手順に分類し、それぞれの操作手順毎に要素の異常に関するデータをデシジョンテーブルを用いて整理しておく。また、回分プロセスでは加熱、冷却、攪拌などの操作を加える時刻のずれもプロセスの運転に重大な影響を与えるため、操作時刻の異常に関するデータもデータベースに格納しておく。これより回分プロセスに対する解析において重要となる反応進行中のオペラビリティ・スタディも計算機を用いて実施することができる。

### 第4章 フレームを用いたフォールト・ツリー自動生成<sup>110)</sup>

本章では、フレームを用いたフォールト・ツリー自動生成法を提案する。対象プロセスの構造の情報をフレームを用いて階層的に表現し、これを基に、プロセスを構成する回路、または要素がどのように接続されているかをまとめ、構造フレームとして計算機に入力する。制御回路、遮断回路などの基本回路のツリーのトップ構造を演算子として表わす。また、要素の異常の因果関係をミ

ニツリーの形で表わし、それぞれ計算機に格納しておく。フォールト・ツリーは2段階に分けて生成する。第1段階では、構造フレームの情報を基に演算子を結合し、対象プロセスのツリーのトップ構造を決定する。第2段階では、ミニツリーを用いて要素レベルのツリー展開を行い、プロセス全体のフォールト・ツリーを完成する。

### 第5章 フォールト・ツリーを用いた異常診断エキスパートシステムの構築<sup>111) 112)</sup>

本章では、プロセス異常に関する知識獲得と表現の方法に、フォールト・ツリーを用いた異常診断エキスパートシステムの構築法を提案する。対象プロセスのフォールト・ツリーのトップ事象近傍の情報をプロダクションルールに変換し、このルールを診断のための知識ベース1とする。さらに制御装置の異常を表現したフォールト・ツリーを用いて、異常に関する知識をプロセス変数のパターンとして表わし、この異常パターンを知識ベース2とする。診断は2段階に分けて行い、診断の第1段階では、プロダクションルールを用いて、制御装置の故障など、回路レベルでの異常部位を推定する。診断の第2段階では、異常パターン表を基に、プロセス稼働時に診断用センサから得られる情報を知識ベースで処理し、要素レベルの故障原因を推定する。

### 第6章 ニューラル・ネットワークを用いた異常診断エキスパートシステムの構築<sup>113) 114)</sup>

本章では、ニューラル・ネットワークを用いた異常診断エキスパートシステムの構築法を提案する。フォールト・ツリーの定性的な情報を基に、プロセス異常に関する知識を獲得し、ネットワークの学習データとする。この学習データをニューラル・ネットワークに学習させ、異常診断エキスパートシステムを構築する。診断では、対象プロセス内に配置された診断用センサからの検出値をネットワークに入力することにより、プロセス異常発生の原因が出力される。

### 第7章 結論

本研究の総括を行う。

## 第2章 連続プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析<sup>105)~107)</sup>

### 2.1 緒言

オペラビリティ・スタディ (Operability Study) は、イギリスの ICI 社で開発された定性的な危険度評価法であり、プロセス内のずれ (deviation) について、その原因及びシステムに及ぼす影響と対策について順次検討する手法である<sup>1) 3) 6) ~12)</sup>。これよりプラント、プロセスにおける潜在的な危険を明らかにし、その影響を評価するとともに、必要な対策を講ずることが可能である。

オペラビリティ・スタディは、国内外において数多くの化学プラント、プロセスに適用され、その有用性が高く評価されているが、実プラントの解析を進めるためには、複数の専門家から構成されるグループにより、多大な時間と労力を必要とする。このような問題に対して、計算機によりオペラビリティ・スタディを支援するシステムが提案されている<sup>2) 28) ~31)</sup>。

一方、鈴木らは従来のオペラビリティ・スタディに対して、その問題点を明らかにするとともに、システム工学における入出力の概念を適用して、改良されたオペラビリティ・スタディを提案した<sup>26)</sup>。この手法では、装置が結合された多段システムに対して、ずれの影響、相互干渉を明確にし、プロセス内で発生すると思われる異常(ずれ)の伝播構造を詳細に分類している。

本章では、連続プロセスを対象としたオペラビリティ・スタディ自動解析法を提案する。システム工学の入出力の概念を適用したオペラビリティ・スタディ法を基に、連続プロセスにおける異常の因果関係を分類した。この分類に従い、連続プロセスを構成する一般的な要素の異常に関するデータをデシジョンテーブルを用いて整理し、自動解析システムのデータベースに格納しておく。解析時には、対象プロセス固有の情報であるプロセスの構造や反応の情報を知識ベースに入力することにより、オペラビリティ・スタディを実施する。

連続プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析システムの開発には、論理型人工知能言語 Prolog を用いる。提案する手法を、ソルベイプロセス<sup>21)</sup>に適用し、オペラビリティ・スタディ自動解析を行うとともに、手法の有用性を明らかにする。

### 2.2 オペラビリティ・スタディ

#### 2.2.1 オペラビリティ・スタディの原理

プラント、プロセスの設計あるいは運転においては、基準となる条件が設定されている。オペラビリティ・スタディの基礎となる原理は、この条件からの“ずれ”に注目することである。基準状態からのずれを組織的に検討するには、表 2.1 の手引用語をプロセス内の各部に適用する。一般に、化学プロセスでは異常事象は配管部で検出されるので、オペラビリティ・スタディは配管部を重視している。この方法を実施する手順としては、各装置を結ぶ配管を 1 本ずつ取り上げ、表 2.1 の手引用語を適用して、異常事象を想定する。次に、想定した異常事象の原因及び異常事象がプロセスに及ぼす影響を順次検討する。これよりプロセス内に潜在する危険要因を明らかにする。以上のような問題発見の過程を図 2.1 に示す。

表 2.1 手引用語一覧

手引用語	意味	ずれの例
No	運転基準を達成すべき事象が全く発生しない	流量なし
Less	基準値より量が減少する	流量減少 圧力低下
More	基準値より量が増加する	流量増加 圧力上昇
Reverse	運転基準と反対の事象または物が発生する	逆流
Other than	全く違う事象	異なる物質を移送する

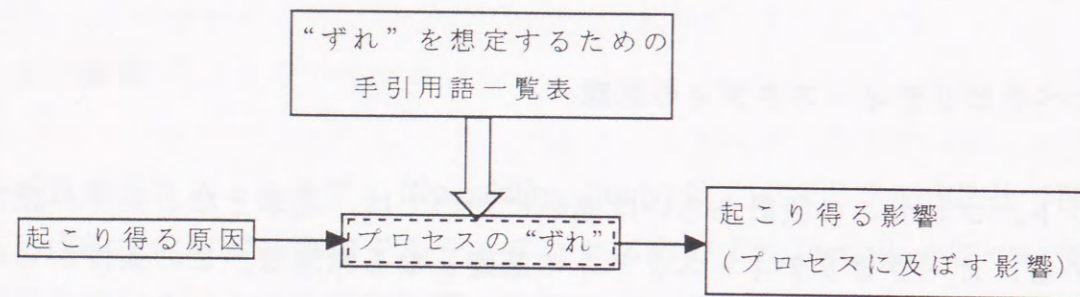


図 2.1 オペラビリティ・スタディの問題発見の過程

### 2.2.2 システム工学に基づくオペラビリティ・スタディ

鈴木らは従来のオペラビリティ・スタディに対して、その問題点を明らかにするとともに、システム工学における入出力の概念を適用して、改良されたオペラビリティ・スタディを提案した<sup>26)</sup>。この手法では、プロセス内の変数を入力と出力の2種類に分類する。プロセスの入力としては、(1)配管部の操作変数と状態変数の初期値(前段の状態変数)、(2)周辺装置の操作変数と状態変数の初期値(冷却水温度、温水温度など)があり、出力としては状態変数が対応する。入力に対してオペラビリティ・スタディの手引用語を適用し、ずれを想定すれば、ずれの結果・影響として出力(状態変数)のずれが明らかとなる。この結果、対象とするシステムに潜在する危険について解析することが可能となる。さらに反応槽が多段に結合したプラントについて、ずれの伝播の構造を示すとともに、ずれの原因と結果・影響の関係を明らかにしている。

### 2.3 データベースと知識ベース

図 2.2 にオペラビリティ・スタディ自動解析システムの構成を示す。ここではより多くのプロセスに適用可能な自動解析システムを構築するため、自動解析に必要な情報を①データベース、②知識ベースに分類する。①②の情報を基に、③推論機構でオペラビリティ・スタディを実施する。

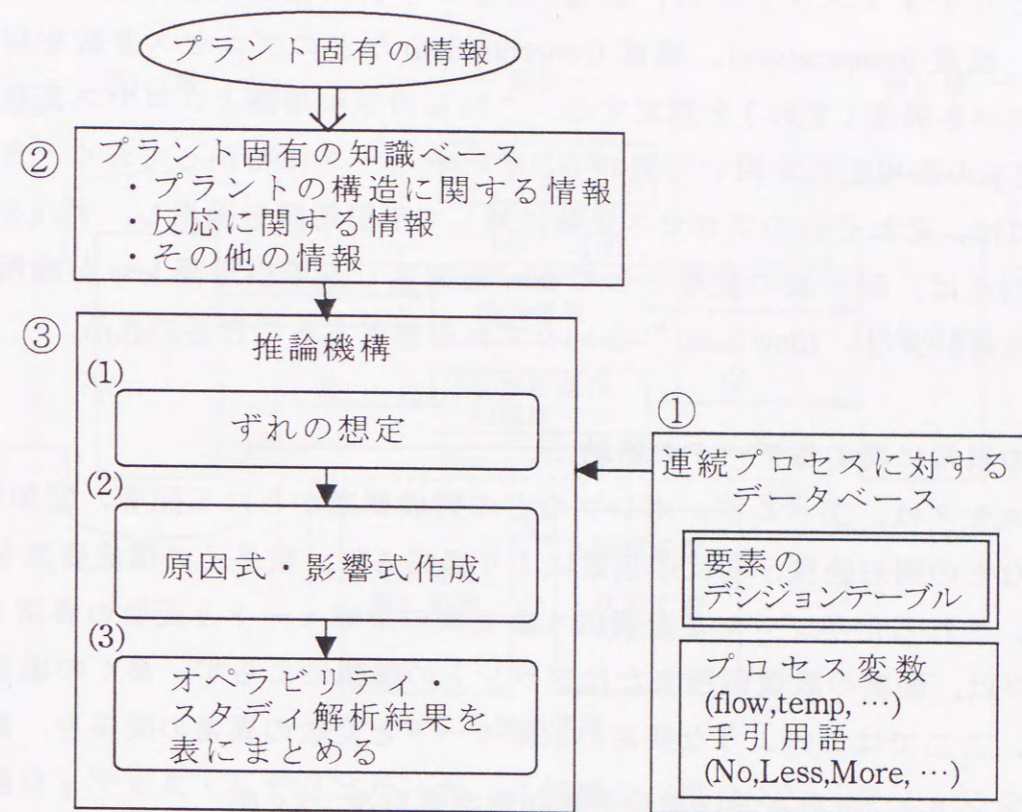


図 2.2 オペラビリティ・スタディ自動解析システムの構成

### 2.3.1 データベース

データベースには、オペラビリティ・スタディ実施のための一般的な知識として、(1)手引用語とプロセス変数、(2)要素の異常に関するデータを格納しておく。ずれを想定し、原因、影響を解析する際に、データベース内のこれらのデータを利用する。このデータベースは、対象となる連続プロセスに共通に利用する。

#### (1) 手引用語とプロセス変数

オペラビリティ・スタディは、表 2.1 に示す手引用語と流量 (flow)、圧力 (pressure)、温度 (temperature)、濃度 (concentration) などのプロセス変数を用いて、解析すべき異常 (ずれ) を想定する。これらの手引用語とプロセス変数を Prolog 処理系の表現形式を用いて表わし、データベースに格納しておく。自動解析の際には、それぞれのプロセス変数に対して手引用語を適用し、ずれを想定する。例えば、配管部の変数として flow を選定し、手引用語 less を適用すれば、“流量が少ない (flow less)” というずれを想定することができる。

#### (2) 要素の異常に関するデータの格納

化学プロセスは、①バルブ、ポンプなどの構成要素からなる配管、②加熱、冷却装置などの周辺装置、③反応装置により構成され、数多くの構成要素を有している。これら化学プロセスを構成する要素の故障モードと変数の異常 (ずれ) の関係は、要素の設置個所またはプラントの種類によらず、多くの場合共通である。ここではこのような要素の故障モードと変数の異常の関係を、あらかじめデシジョンテーブルを用いて整理し、オペラビリティ・スタディ自動解析システムのデータベースに格納しておく。

デシジョンテーブルはシステム構成要素の入力、出力及び内部状態の関係を表現したものであり、次の特徴を有する。

- 1) 入力状態、内部状態及び出力状態の論理的関係を表現することができる。
- 2) 入出力数に制限がないため、多入力あるいは多出力の複雑な要素でもモデル化することができる。

- 3) 入力状態、内部状態及び出力状態が区別されており、各要素の状態が簡単に記号化でき、計算機での処理が容易である。

データベース内のデシジョンテーブルに対して、後述の知識ベースの情報に従い検索し、対象プロセスのずれと原因、影響の関係を逐次求める。

図 2.3 に多段攪拌槽の異常伝播の基本的な構造を示す<sup>26)</sup>。連続プロセスは、いくつかの反応装置が配管により結合しており、配管はバルブ、ポンプなどの要素により構成される。また、反応装置は加熱、冷却装置などの周辺装置及びこれらの装置を構成する要素からなる。このような連続プロセスの異常伝播は図 2.3 の矢印と番号で示すように、10 種類に分類できる。

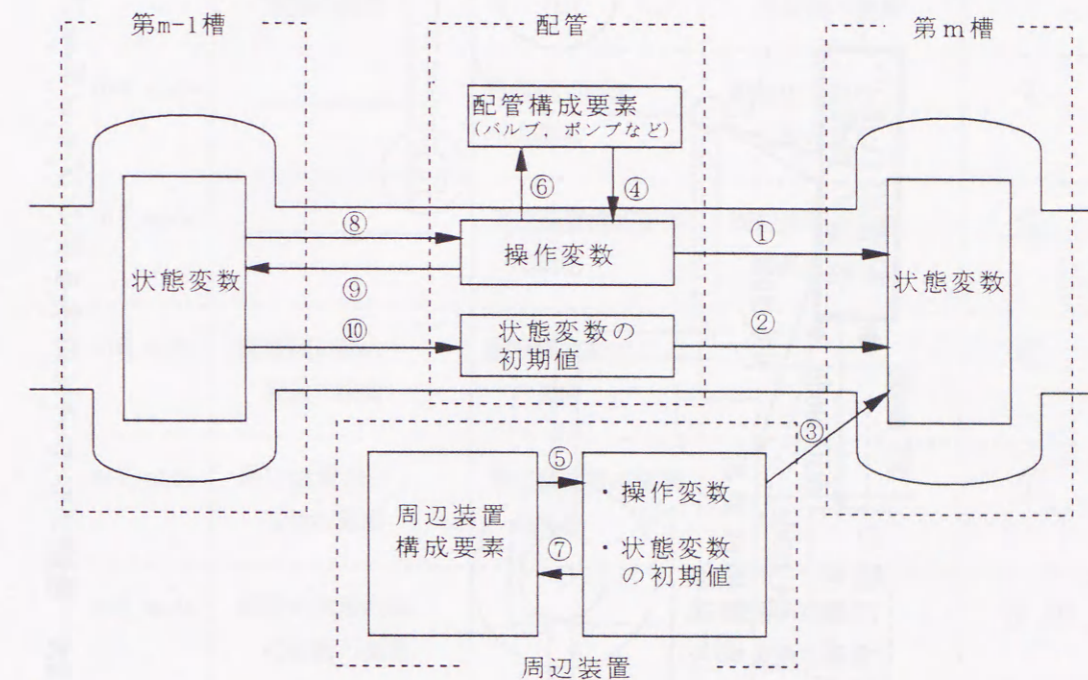


図 2.3 多段攪拌槽の異常伝播の基本構造

図 2.3 の異常伝播の構造に基づき、配管、周辺装置及び反応装置における異常の因果関係を、図 2.4 に示す 10 種類のデシジョンテーブルにより表現する。表 2.2 にデシジョンテーブルと異常伝播の関係を示す。表 2.2 に示すように 10 種類のデシジョンテーブルに対して、配管、周辺装置及び反応装置の変数の状態を入力状態と出力状態の項に記入し、要素の異常を内部状態の項に記入する。

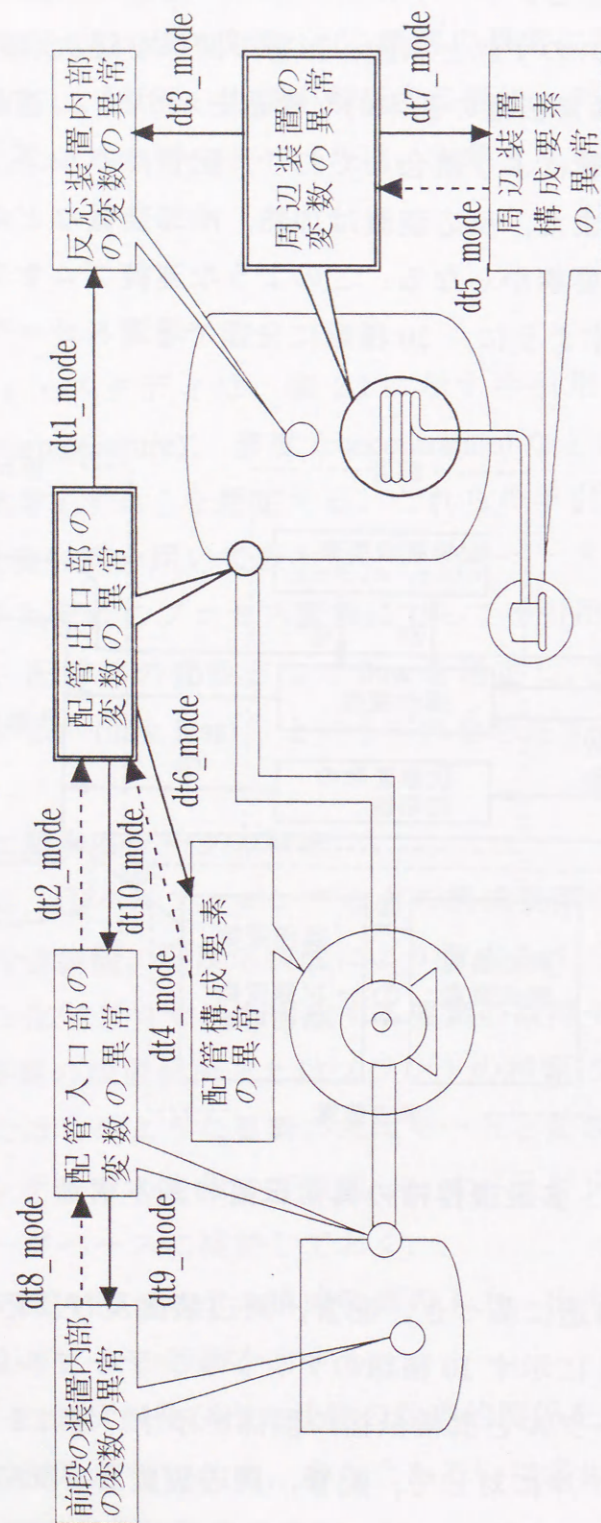


図 2.4 連続プロセスに対するデシジョンテーブルの分類

表 2.2 デシジョンテーブルの分類 (連続プロセス)

分類	入力状態	内部状態	出力状態	図 2.3の異常伝播の番号
dt1_mode	配管出口部の 変数の異常	—————	反応装置内部 の変数の異常	① ②
dt2_mode	配管入口部の 変数の異常	—————	配管出口部の 変数の異常	—————
dt3_mode	周辺装置の 変数の異常	—————	反応装置内部 の変数の異常	③
dt4_mode	—————	配管構成要素 の異常	配管出口部の 変数の異常	④
dt5_mode	—————	周辺装置構成要素 の異常	周辺装置の変数 の異常	⑤
dt6_mode	配管出口部の 変数の異常	配管構成要素 の異常	—————	⑥
dt7_mode	周辺装置の 変数の異常	周辺装置構成要素 の異常	—————	⑦
dt8_mode	前段の装置内部 の変数の異常	—————	配管入口部の 変数の異常	⑧ ⑩
dt9_mode	配管入口部の 変数の異常	—————	前段の装置内部 の変数の異常	⑨
dt10_mode	配管出口部の 変数の異常	—————	配管入口部の 変数の異常	—————

以下、図 2.4 及び表 2.2 に示した 10 種類のデシジョンテーブルについて説明する。

(i) dt1\_mode のデシジョンテーブル

配管出口部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する反応装置内部の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 2.3 の異常伝播①、②に対応する。図 2.3 の異常伝播の分類では、①操作変数に関する異常伝播と②状態変数の初期値に関する異常伝播の 2 種類が存在するが、ここではまとめて配管出口部の変数としている。

(ii) dt2\_mode のデシジョンテーブル

配管入口部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する配管出口部の変数の状態を出力状態の項に記入したものである。図 2.3 では反応装置内部、配管及び周辺装置の間の変数の状態と故障モードの関係を異常伝播の構造として表わしているために、配管入口部から出口部への異常伝播を記述していない。ここではこの異常伝播を dt2\_mode のデシジョンテーブルとして加えた。

(iii) dt3\_mode のデシジョンテーブル

周辺装置の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する反応装置内部の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 2.3 の異常伝播③に対応する。

(iv) dt4\_mode のデシジョンテーブル

配管構成要素の異常を内部状態の項に記入し、これに対する配管出口部の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 2.3 の異常伝播④に対応する。

(v) dt5\_mode のデシジョンテーブル

周辺装置構成要素の異常を内部状態の項に記入し、これに対する周辺装置の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 2.3 の異常伝播⑤に対応する。

(vi) dt6\_mode のデシジョンテーブル

配管出口部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する配管構成要素の異常を内部状態の項に記入したものであり、図 2.3 の異常伝播⑥に対応する。

(vii) dt7\_mode のデシジョンテーブル

周辺装置の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する周辺装置構成要素の異常を出力状態の項に記入したものであり、図 2.3 の異常伝播⑦に対応する。

(viii) dt8\_mode のデシジョンテーブル

前段の装置内部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する配管入口部の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 2.3 の異常伝播⑧、⑩に対応する。ここでも操作変数と状態変数の初期値の 2 種類の変数をまとめ、配管入口部の変数としている。

(ix) dt9\_mode のデシジョンテーブル

配管入口部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する前段の装置内部の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 2.3 の異常伝播⑨に対応する。

(x) dt10\_mode のデシジョンテーブル

配管出口部の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する配管入口部の変数の状態を出力状態の項に記入したものである。dt10\_mode のデシジョンテーブルも dt2\_mode の場合と同様に、ここで追加したものである。

以上の 10 種類のデシジョンテーブルを用いて、要素の異常に関するデータを整理しておく。

デシジョンテーブル作成の例として、図 2.5 に示す配管系の異常と反応装置への異常伝播を考える。図 2.5 の配管系は、ポンプが設置された原料移送管と反応装置であり、移送流体 F は液体 (liq) である。流体 F は配管を通じて反応装置へ移送される。図 2.4 及び表 2.2 の分類により、この系の異常伝播は次の 3 種類のデシジョンテーブルで表わすことができる。

- 1) 配管入口部と配管出口部の変数の異常の関係 (dt2\_mode)
- 2) 配管構成要素の異常と配管出口部の変数の異常の関係 (dt4\_mode)
- 3) 配管出口部と反応装置内部の変数の異常の関係 (dt1\_mode)



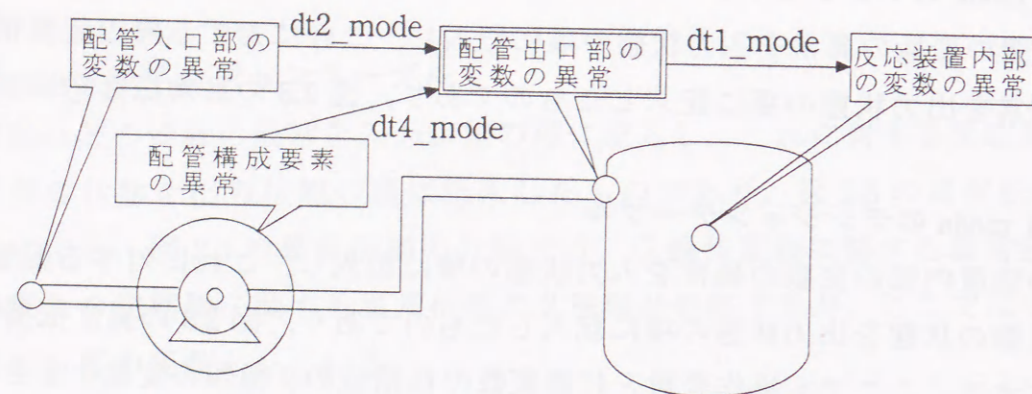


図 2.5 配管系の異常と反応装置への異常伝播

dt2\_mode のデシジョンテーブルは、表 2.3(a) に示すように、配管構成要素 (内部状態) が正常 (good) である場合の配管入口部と配管出口部の変数の異常の関係を表わしている。すなわち、入力状態として配管入口部の操作変数 (流量 (flow), 圧力 (pressure)), 状態変数の初期値 (温度 (temperature), 濃度 (concentration)) の異常を考え、出力状態として配管出口部の変数に与える影響を、デシジョンテーブルの形式で表現したものである。

表 2.3(a) の dt2\_mode のデシジョンテーブルを Prolog 処理系で表現し、データベースに格納しておく。データの一部を以下に示す。

```
dt2_mode([N],[node(N,[flow,no,Fw]),liq,Fw,[flow,no]).
dt2_mode([N],[node(N,[flow,less,Fw]),liq,Fw,[flow,less]).
dt2_mode([N],[node(N,[flow,more,Fw]),liq,Fw,[flow,more]).
dt2_mode([N],[node(N,[press,less,Fw]),liq,Fw,[press,less]).
dt2_mode([N],[node(N,[press,more,Fw]),liq,Fw,[press,more]).
```

表 2.3 デシジョンテーブルの例

(a) dt2\_mode  
配管入口部の変数の異常 → 配管出口部の変数の異常

入力状態		内部状態	出力状態			
			Flow	Press.	Temp.	Conc.
flow	no	good	no	-	-	-
flow	less	good	less	-	-	-
flow	more	good	more	-	-	-
press	less	good	-	less	-	-
press	more	good	-	more	-	-
temp	less	good	-	-	less	-
temp	more	good	-	-	more	-
conc	no	good	-	-	-	no
conc	less	good	-	-	-	less
conc	more	good	-	-	-	more

(b) dt4\_mode  
配管構成要素 (ポンプ) の異常 → 配管出口部の変数の異常

入力状態	内部状態	出力状態
normal	failure	flow no
normal	stroke_too_short	flow less
normal	stroke_too_long	flow more

(c) dt1\_mode  
配管出口部の変数の異常 → 反応装置内部の変数の異常 (発熱膨張反応)

入力状態		内部状態	出力状態			
			Level	Press.	Temp.	Conc.
flow	no	good	no	less	less	no
flow	less	good	less	less	less	less
flow	more	good	more	more	more	more
temp	less	good	-	less	less	less
temp	more	good	-	more	more	more
conc	no	good	-	less	less	no
conc	less	good	-	less	less	less
conc	more	good	-	more	more	more

述語名は dt2\_mode とし、五つの引数がある。第 1 引数は配管入口部のノード番号 (N)，第 2 引数は入力状態，第 3 引数は気体，液体の区別を表わす。第 4 引数は流体 (F)，第 5 引数は出力状態を表わす。

dt4\_mode のデシジョンテーブルは、表 2.3(b) に示すように、配管構成要素の異常と配管出口部の変数の異常の関係を表わしている。内部状態の項には、ポンプの異常として、1) ポンプの故障 (failure)，2) ポンプの輸送量低 (stroke\_too\_short)，3) ポンプの輸送量高 (stroke\_too\_long) を記入し、これらの異常が配管出口部の変数に与える影響をデシジョンテーブルの形式で表現する。配管入口部と配管出口部の変数の異常の関係は、前述のように dt2\_mode としてまとめてあり、ここでは入力状態を正常 (normal) としている。

dt1\_mode のデシジョンテーブルは、表 2.3(c) に示すように、配管出口部と反応装置内部の変数の異常の関係を表わしている。連続プロセスのオペラビリティ・スタディでは、配管で発生するプロセス変数の異常(ずれ)が、反応装置内にどのような影響を与えるかを解析することが重要である。ここでは配管出口部の変数の異常を入力状態、反応装置内部の変数の異常を出力状態と設定する。

反応装置では、反応の種類(発熱、吸熱、膨張、収縮)及び反応物質(原料、触媒、気体、液体など)により様々な異常が発生すると考えられる。ここでは反応の種類と反応物質の組み合わせを考慮し、反応装置内での異常に関するデータを作成する。表 2.3(c) は原料(液体)が反応装置に移送され、反応装置内の反応が発熱膨張反応である場合のデシジョンテーブルを示している。表 2.3(b) の dt4\_mode 及び表 2.3(c) の dt1\_mode のデシジョンテーブルについても、前述の dt2\_mode のデシジョンテーブルの場合と同様に Prolog 処理系を用いて表現し、データベースに格納しておく。

図 2.4 及び表 2.2 に示す 10 種類のデシジョンテーブルを用いて、化学プロセスを構成する様々な要素の異常の因果関係を整理し、データベースに格納しておく。このときデシジョンテーブルは、要素で起こりうるすべての異常を考慮し、記述するため、一つの要素について入力状態、内部状態の組み合わせの数が多く、データ操作が複雑であるなどの問題点がある。これに対しては、Prolog のリスト処理機能を応用することにより解決が可能である。

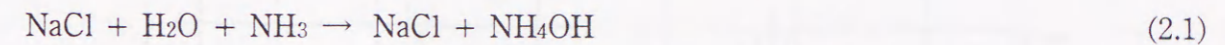
### 2.3.2 知識ベース

計算機によりオペラビリティ・スタディを実施するためには、対象プロセスに固有の情報を知識ベースに入力する必要がある。表 2.4 に示すように、知識ベースに入力すべき対象プロセスに固有な情報として、次の 3 種類を考える。

- (1) プロセスの構造に関する情報
- (2) 反応に関する情報
- (3) その他の情報

(1) は配管と周辺装置について、設置個所とその構成要素に関する情報を表わす。(2) は反応装置内での反応の種類を表わす。(3) は計算機での処理を容易にするために設定するノード番号及びその他の装置(タンク、シリンダなど)に関する情報である。ここでは連続プロセスの例として、図 2.6 のソルベイブプロセス<sup>2.1)</sup>を用いて、知識ベースについて説明する。

ソルベイブプロセスは、アンモニア吸収塔、炭化塔、回収塔の三つの反応装置、タンク、高圧シリンダ、これらを結合する 10 本の配管により構成される。アンモニア吸収塔では (2.1) 式に示すように、飽和食塩水 (NaCl, H<sub>2</sub>O) がアンモニア気体 (NH<sub>3</sub>) と接触し、飽和アンモニア水 (NaCl, NH<sub>4</sub>OH) をつくる。



飽和食塩水はタンクより、アンモニアは高圧シリンダより、それぞれアンモニア吸収塔に送られる。(2.1) 式は発熱反応であるため、アンモニア吸収塔には冷却ジャケットが設置されている。ここで合成される飽和アンモニア水溶液は、配管 3 を通じて炭化塔へ移送される。炭化塔では (2.2) 式に示すように、飽和アンモニア水溶液が二酸化炭素と反応し、重炭酸アンモニウム (NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>) を生成する。

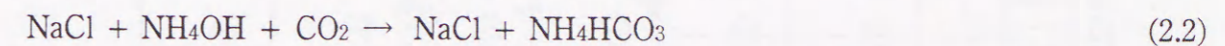


表 2.4 知識ベース (連続プロセス)

	述語名	引数	1	2	3	4	5	6
① 配管	line	6	番号	'ct'	入口側 設定点	出口側 設定点	構成要素	液体 or 気体
	② 周辺装置	4	番号	名前	設定装置	構成要素	-	-
① 反応装置	column	4	名前	反応番号	内部気体	内部液体	-	-
	② 化学反応	5	反応番号	反応物質	生成物質	温度変化	圧力変化	-
① ノード	node	3	番号	設定点	通過流体	-	-	-
	② その他	2	名前	物質名	-	-	-	-

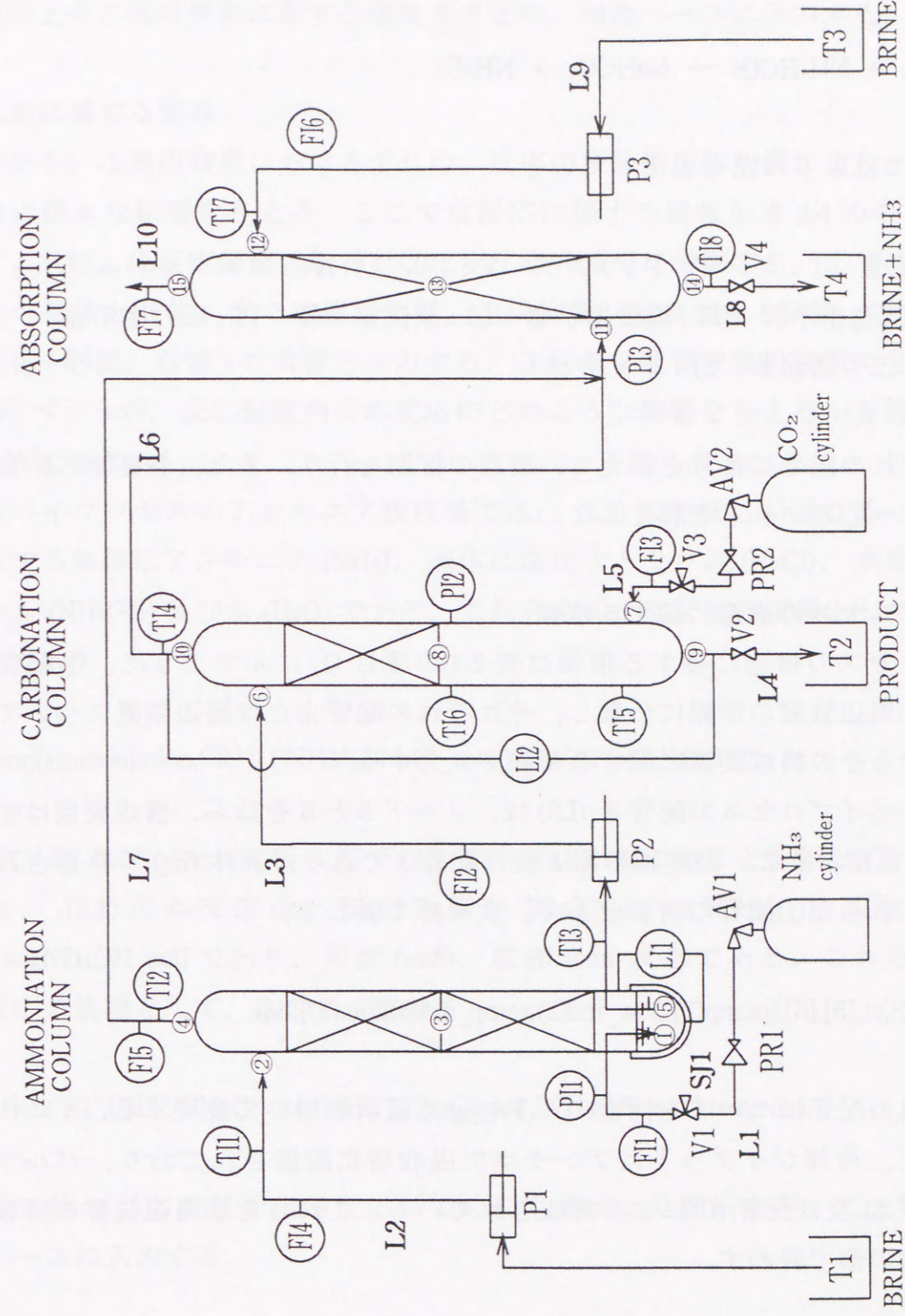


図 2.6 ソルベイブプロセス

(2.2) 式の生成物は (2.3) 式に示すように、ただちに二重分解し、重炭酸ナトリウム (NaHCO<sub>3</sub>) を生成する。

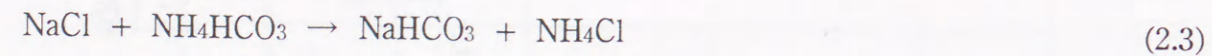


図 2.6 では以下の記号を用いている。

L:配管 T:タンク P:ポンプ V:バルブ AV:アングルバルブ  
FI:流量指示器 TI:温度指示器 LI:液位指示器 PI:圧力指示器  
PR:圧力調節器 SJ:ジャケット

それぞれの記号に番号を添えて、要素の区別を行う。また、各要素の結合点には、①～⑮のノードを設定した。

#### (1) プロセスの構造に関する情報

プロセスの構造に関する情報は表 2.4 の項目 (1) に示すように、①配管の情報、②周辺装置の情報に分類し、それぞれの配管または周辺装置について、設置個所とその構成要素に関する情報を入力する。

ソルベイプロセスの配管 3 (L3) は、ノード 5 と 6 を結ぶ。構成要素はポンプ 2、流量指示器 2、温度指示器 3 及び配管 3 であり、液体 (liq) が移送されている。これらを①配管の情報として、次の形で表わす。

```
line(3,ct,[5],[6],[pump(2),flow_ind(2),temp_ind(3),line(3)],liq).
```

その他の配管についても同様に、Prolog 処理系を用いて表現する。

また、冷却ジャケットはアンモニア吸収塔に設置されており、バルブ d1、ポンプ d1 及び配管 d1 により構成されている。これらを②周辺装置の情報として、次の形で表わす。

```
device(d1,cooling_device(d1),[col,ammoniation],[valve(d1),pump(d1),line(d1)]).
```

このようにソルベイプロセスを構成するすべての配管及び周辺装置について、設置個所とその構成要素に関する情報をまとめ、知識ベースに入力する。

#### (2) 反応に関する情報

配管あるいは周辺装置におけるずれは、反応の種類や反応物質により、反応装置内に様々な影響を与える。ここでは反応に関する情報を表 2.4 の項目 (2) に示すように、①反応装置の情報、②化学反応の情報に分類する。①では反応装置内の気体と液体、②では反応物質、生成物質、温度変化 (発熱, 吸熱)、圧力変化 (膨張, 収縮) の情報を入力する。これより配管や周辺装置で発生する異常 (ずれ) が、反応装置内での反応にどのような影響を与えるかを解析することができる。

ソルベイプロセスのアンモニア吸収塔では、(2.1) 式の反応が起こる。塔内に存在する気体はアンモニア (NH<sub>3</sub>)、液体は塩化ナトリウム (NaCl)、水酸化ナトリウム (NH<sub>4</sub>OH) 及び水 (H<sub>2</sub>O) である。これらを①反応装置の情報として、次の形で表わす。

```
column(ammoniation,['R1'],['NH3'],['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O'],).
```

ここで、R1 はアンモニア吸収塔で (2.1) 式の反応が起こることを示している。

また、(2.1) 式の反応は、反応物質が [H<sub>2</sub>O,NaCl\_sol,NH<sub>3</sub>]、生成物質が [NaCl\_sol,NH<sub>4</sub>OH\_sol] であり、発熱 (exo)、収縮 (con) 反応である。これらを②化学反応の情報として、次の形で表わす。

```
reaction('R1',['H2O','NaCl_sol','NH3'],['NaCl_sol','NH4OH_sol'],exo,con).
```

同様に他の反応装置や化学反応についても Prolog 処理系を用いて表現し、知識ベースに入力する。

### (3) その他の情報

その他の情報として、表 2.4 の項目 (3) に示す①ノードの情報と②その他の装置の情報を与える。

ノード 1 はアンモニア吸収塔に設定されており、アンモニア気体 ( $\text{NH}_3$ ) が流入する。これを①ノードの情報として、次の形で表わす。

```
node(1,[col,ammoniation],[NH3]).
```

ノード 2 ~ 15 についても同様に表現する。

プラント内には配管、周辺装置及び反応装置の他に、タンクやシリンダなどが設置されている。ソルベイプロセスには、原料タンク 1 が設置され、飽和食塩水 ( $\text{NaCl\_sol,H}_2\text{O}$ ) が貯蔵されている。これを②その他の装置に関する情報として、次の形で表わす。

```
other(tank(1),'NaCl_sol','H2O').
```

その他のタンク、シリンダについても同様に表現し、知識ベースに入力する。

以上、表 2.4 に示した情報を、オペラビリティ・スタディを実施するのに必要な対象プロセス固有の情報としてまとめ、知識ベースに入力する。この知識ベースは対象プロセスの設計変更などに対して、その都度修正する必要があるが、プログラミング言語として Prolog を用いており、柔軟に対応することができる。

## 2.4 推論機構

推論機構では知識ベース内の情報を基に、データベース内のデータを検索し、オペラビリティ・スタディ自動解析を行う。図 2.7 にオペラビリティ・スタディ自動解析の流れを示すが、おもに次の三つの手順により解析を進める。

- (1) ずれの想定
- (2) 原因式・影響式作成
- (3) 解析結果の出力

ここでは図 2.6 のソルベイプロセスの配管 3 の解析を例として、推論機構について説明する。

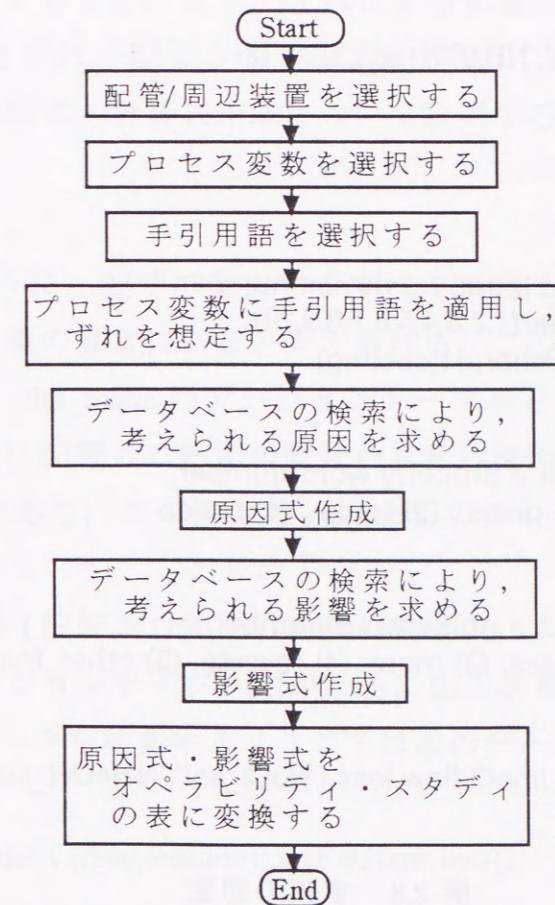


図 2.7 オペラビリティ・スタディ自動解析の流れ

## 2.4.1 ずれの想定

知識ベース内の情報を基に、ずれを想定する。自動解析システムは図 2.8 に示す形式で質問を行う。解析者は質問に対して、解析する配管（または周辺装置）、プロセス変数及び手引用語を選択し、番号を入力する。ここでは配管 3 を選択し、プロセス変数として flow、手引用語として less を適用する。知識ベース内の情報から配管 3 では、流体  $Fw=[NaCl\_sol,NH_4OH\_sol,H_2O]$  が移送されていることが分かる。これより次のずれを想定することができる。

“配管 3 の  $[NaCl\_sol,NH_4OH\_sol,H_2O]$  の流量が少ない”

`line(3,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']).`

Please input a line / a device number.

Line number(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10)

Device number(d1;cooling)

: 3.

Please input a property word number.

(1) flow, (2) press., (3) temp., (4) conc.

: 1.

Please input a guide word number.

(1) no, (2) less, (3) more, (4) reverse, (5) other\_than

: 2.

Deviation : `line(3,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']).`

図 2.8 ずれの想定

## 2.4.2 原因式・影響式作成

オペラビリティ・スタディ自動解析システムは、知識ベース内の情報を基に、データベース内のデータを検索し、ずれに対する原因、影響を求める。図 2.4 に示すように、配管及び周辺装置で発生するずれの伝播は、原因系（点線の矢印）と影響系（実線の矢印）に分類される。原因系はずれとその原因の関係を示したものであり、図 2.4 の点線の矢印で示すデシジョンテーブル (dt2\_mode, dt4\_mode, dt5\_mode, dt8\_mode) を検索することにより、ずれの原因が求められる。また、影響系はずれとその影響の関係を表わしたものであり、図 2.4 の実線の矢印で示すデシジョンテーブル (dt1\_mode, dt3\_mode, dt6\_mode, dt7\_mode, dt9\_mode, dt10\_mode) を検索することにより、ずれによる影響が求められる。以下では、2.4.1 節で想定したずれ“配管 3 の  $[NaCl\_sol,NH_4OH\_sol,H_2O]$  の流量が少ない”の解析を例に、原因式・影響式作成について説明する。

### (1) 原因式作成

図 2.4 に示すように、配管で発生するずれの原因は、配管入口部での変数の異常と配管構成要素の異常にあると考えられる。このずれと原因の関係は、それぞれ dt2\_mode, dt4\_mode のデシジョンテーブルとしてデータベースに格納されている。さらに配管入口部での変数の異常の原因は、前段の反応装置内部での変数の異常であり、この情報は dt8\_mode のデシジョンテーブルとして格納されている。

#### ① dt2\_mode の検索（配管入口部での変数の異常）

dt2\_mode のデシジョンテーブルの中から、出力状態の項が `[flow,less]`（流量が少ない）であるデータを検索する。ここでは次のデータが相当する。

`dt2_mode([N],[node(N,[flow,less,Fw]),liq,Fw,[flow,less]).`

知識ベース内の情報より、配管 3 の入口部はノード 5 (N=5) であり、流体  $Fw=[NaCl\_sol,NH_4OH\_sol,H_2O]$  が移送されている。これよりずれ発生の原因として、配管入口部の変数の異常、すなわち“1) ノード 5 の  $[NaCl\_sol,NH_4OH\_sol,H_2O]$

の流量少”

```
[node(5,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O'])].
```

という異常が取り出される。

### ② dt4\_mode の検索 (配管構成要素の異常)

配管の情報 (line/6) より, 配管 3 には構成要素としてポンプ 2 が設置されている (流量指示器 2, 温度指示器 3, 配管 3 についてはここでは省略する)。従って dt4\_mode のポンプについてのデシジョンテーブルの中から, 出力状態の項に [flow,less] を有するデータを検索する。ここでは次のデータが相当する。

```
dt4_mode([pump(E,stroke_too_short)],pump(E),liq,F,[flow,less]).
```

これよりずれ発生の原因として, 配管構成要素の異常, すなわち “2) ポンプ 2 の輸送量低”

```
[pump(2,stroke_too_short)].
```

という異常が取り出される。

### ③ dt8\_mode の検索 (前段の装置内部での変数の異常)

①で求められた配管入口部での変数の異常 “1) ノード 5 の [NaCl\_sol, NH4OH\_sol, H2O] の流量少” の原因を求める。dt8\_mode のデシジョンテーブルの中から, 出力状態の項に [flow,less] を有する次のデータを検索する。ここでは次のデータが相当する。

```
dt8_mode([column(C,level,less,Fq)],[col,C],liq,[Fa,Fg,Fq],[flow,less]).
```

知識ベース内の情報より, ノード 5 は前段の装置であるアンモニア吸収塔 (C,ammoniation) に設置されており, 液体は  $Fq=[NaCl\_sol,NH_4OH\_sol]$  である。これよりずれ発生の原因として, 前段の装置内部での変数の異常, すなわち

“3) 吸収塔の [NaCl\_sol, NH4OH\_sol] の液位低下”

```
[column(ammoniation,level,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol'])].
```

という異常が取り出される。

以上①～③の検索により, “配管 3 の [NaCl\_sol, NH4OH\_sol, H2O] の流量が少ない” というずれの原因として,

- 1) ノード 5 の [NaCl\_sol, NH4OH\_sol, H2O] の流量少
- 2) ポンプ 2 の輸送量低
- 3) 吸収塔の [NaCl\_sol, NH4OH\_sol] の液位低下

という三つの異常が明らかにされた。ずれと原因の関係を原因式という形で記述する。Prolog 処理系では cause という述語を用いて, 図 2.9(a) のように表わし, 計算機に格納する。

### (2) 影響式作成

図 2.4 に示すように, 配管で発生するずれは, 反応装置内部の変数, 配管構成要素及び配管入口部の変数へ影響を与えられられる。これらのずれと影響の関係は, それぞれ dt1\_mode, dt6\_mode, dt10\_mode のデシジョンテーブルとしてデータベースに格納されている。さらに配管入口部での変数の異常は, 前段の反応装置内部の変数にも影響を与え, このデータは dt9\_mode のデシジョンテーブルとしてデータベースに格納されている。

影響の解析では, 反応装置内での反応の種類 (発熱, 吸熱, 膨張, 圧縮) 及び反応物質 (原料, 触媒, 気体, 液体など) により, 様々な異常を考える必要がある。これに対して自動解析システムには, これらの異常に対するデータは, すべてデータベースに格納されている。また, 対象プロセス固有の反応に関する情報も知識ベースとして入力されるため, より詳細な影響の解析を行うことができる。

### ① dt1\_mode の検索 (反応装置内部の変数への影響)

反応装置内部の変数への影響を求めるため, dt1\_mode のデシジョンテーブルの中から, 入力状態の項に [flow,less] を有するデータを検索する。知識ベー

ス内の情報より、配管3はノード6で炭化塔(C,carbonation)に接続されており、流体[NaCl\_sol,NH4OH\_sol,H2O]は原料である。また、炭化塔では(2.2)式、(2.3)式の発熱収縮反応が起こり、生成物質はFa=[NaHCO3,NH4Cl\_sol]であることから、ここでは次のデータが相当する。

```
dt1_mode([flow,less,F],[col,C],[_],[_],[_],[_],[Fa,Fg,Fq,Fw],[column(C,conc,less,Fa)]).
```

これより反応装置内部への影響として、“1)炭化塔の生成物質[NaHCO3,NH4Cl\_sol]の濃度低下”

```
[column(carbonation,conc,less,['NaHCO3','NH4Cl_sol'])].
```

という異常が取り出される。

#### ② dt6\_mode の検索 (配管構成要素への影響)

配管3には構成要素として、ポンプ2が設置されている。ポンプへの影響を求めるため、dt6\_modeのデシジョンテーブルの中から、入力状態の項に[flow,less]を有するデータを検索する。ここでは次のデータが相当する。

```
dt6_mode([flow,less],pump(E),S,[pump(E,cavitation)]).
```

これより配管構成要素への影響として、“2)ポンプ2のキャビテーション”

```
[pump(2,cavitation)].
```

という異常が取り出される。その他の構成要素については、流量のずれが配管やバルブなどへ影響を及ぼすことはなく、その異常に関するデータはデータベースに格納していない。従ってポンプ2以外の構成要素への影響は、解析結果として出力されない。

#### ③ dt10\_mode の検索 (配管入口部の変数への影響)

配管入口部の変数への影響を求めるために、dt10\_modeのデシジョンテーブ

ルの中から、入力状態の項に[flow,less]を有するデータを検索する。ここでは次のデータ相当する。

```
dt10_mode([flow,less],[N],liq,[node(N,[flow,less,Fw])]).
```

これより配管入口部への影響として、“3)ノード5の[NaCl\_sol,NH4OH\_sol,H2O]の流量少”

```
[node(5,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O'])].
```

という異常が取り出される。

#### ④ dt9\_mode の検索 (前段の装置内部の変数への影響)

③で求められた“3)ノード5の[NaCl\_sol,NH4OH\_sol,H2O]の流量少”という影響に対して、さらに前段の装置内部の変数への影響を求める。dt9\_modeのデシジョンテーブルの中から、入力状態の項に[flow,less]を有するデータを検索する。ここでは次のデータが相当する。

```
dt9_mode([flow,less],[col,C],liq,[Fa,Fg,Fq],[column(C,level,more,Fq)]).
```

これより前段の装置内部の変数への影響として、“4)吸収塔の[NaCl\_sol,NH4OH\_sol]の液位増加”

```
[column(ammoniation,level,more,['NaCl_sol','NH4OH_sol'])].
```

という異常が取り出される。

以上①～④の検索により、“配管3の[NaCl\_sol,NH4OH\_sol,H2O]の流量が少くない”というずれの影響として、

- 1) 炭化塔の生成物質[NaHCO3,NH4Cl\_sol]の濃度低下
- 2) ポンプ2のキャビテーション
- 3) ノード5の[NaCl\_sol,NH4OH\_sol,H2O]の流量少



4) 吸収塔の [NaCl\_sol,NH4OH\_sol] の液位増加  
 という四つの異常が明らかにされた。ずれと影響の関係を影響式という形で記述する。Prolog 処理系では consequence という述語を用いて図 2.9(b) のように表わし、計算機に格納する。

### 2.4.3 解析結果出力

図 2.9(c) に示すように原因式、影響式をまとめ、オペラビリティ・スタディのずれに対する原因・影響の関係を表の形式に変換する。ここでは配管でのずれの解析について説明したが、周辺装置についても同様に解析を行う。

図 2.10 に配管 2、配管 3 及び冷却装置に対する解析結果を示す。配管で発生するずれの原因としては、主にその構成要素の異常が中心となる。影響としては、反応の種類、反応物質などの情報を詳細に分類し、知識ベースに入力したことにより、反応装置内で起こる異常（圧力、温度、濃度の異常など）が出力されている。さらに周辺装置についても同様な解析結果を得ることができた。

```
cause(line(3,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']),
      [node(5,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']),
       pump(2,stroke_too_short),
       column(ammoniation,level,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol'])]).
```

(a) 原因式

```
consequence(line(3,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']),
            [column(carbonation,conc,less,['NaHCO3','NH4Cl_sol']),
             pump(2,cavitation),
             node(5,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']),
             column(ammoniation,level,more,['NaCl_sol','NH4OH_sol'])]).
```

(b) 影響式

DEVIATION:line(3,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']).	
CAUSE	CONSEQUENCE
node(5,flow,less, ['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']) pump(2,stroke_too_short) column(ammoniation,level,less, ['NaCl_sol','NH4OH_sol'])	column(carbonation,conc,less, ['NaHCO3','NH4Cl_sol']) pump(2,cavitation) node(5,flow,less, ['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']) column(ammoniation,level,more, ['NaCl_sol','NH4OH_sol'])

(c) オペラビリティ・スタディ

図 2.9 解析結果出力

LINE 2 flow less

DEVIATION:line(2,flow,less,['NaCl_sol','H2O']).	
CAUSE	CONSEQUENCE
flow_indicator(4,failure) flow_indicator(4,indicating_too_high) pump(1,failure) pump(1,stroke_too_short) line(2,cracked) line(2,partly_blocked)	pump(1,cavitation) column(ammoniation,press,more,['NH3']) column(ammoniation,temp,less,['NH3','NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']) column(ammoniation,level,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']) column(ammoniation,conc,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol'])

LINE 3 flow less

DEVIATION:line(3,flow,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']).	
CAUSE	CONSEQUENCE
column(ammoniation,level,less,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']) flow_indicator(2,failure) flow_indicator(2,indicating_too_high) pump(2,failure) pump(2,stroke_too_short) line(3,cracked) line(3,partly_blocked)	pump(2,cavitation) column(carbonation,temp,less,['CO2','NaCl_sol','NH4Cl_sol','H2O','NaHCO3']) column(carbonation,level,less,['NaCl_sol','NH4Cl_sol','H2O','NaHCO3']) column(carbonation,press,more,['CO2']) column(carbonation,conc,less,['NaHCO3','NH4Cl_sol','NaCl_sol','NH4OH_sol','NH4HCO3']) column(ammoniation,level,more,['NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O'])

DEVICE d1 temp more

DEVIATION:device(d1,temp,more).	
CAUSE	CONSEQUENCE
coolwater_tank(d1,temp,more)	column(ammoniation,temp,more,['NH3','NaCl_sol','NH4OH_sol','H2O']) column(ammoniation,press,more,['NH3']) column(ammoniation,conc,less,['NH4OH_sol'])

図 2.10 オペラビリティ・スタディ自動解析結果

## 2.5 結言

本章では、連続プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析法を提案した。システム工学の入出力の概念を適用したオペラビリティ・スタディ法を基に、異常の因果関係を分類した。この分類に従い、要素の異常に関するデータをデシジョンテーブルにより整理し、データベースに格納しておく。知識ベースに入力される対象プロセス固有の情報を基に、ずれに対する原因、影響をデータベース内のデータの検索により取り出し、オペラビリティ・スタディの解析結果として出力する手法である。提案する手法に基づき、Prolog によるオペラビリティ・スタディ自動解析システムを開発した。

応用例としてソルベプロセスに適用した。プラント内の9本の配管(L1~L9)と冷却ジャケットに対して自動解析を行い、93のずれについてオペラビリティ・スタディ解析結果を得た。自動解析の結果は、人手による解析結果と一致しており、解析漏れなどを防ぐことができている。

以下にオペラビリティ・スタディ自動解析法の特徴を示す。

- 1) 対象プロセスに固有な情報を知識ベースとしてまとめ、計算機に入力するだけで、あらゆるプロセスに共通な、一般的な異常はすべて出力される。この解析結果を基に、解析者は対象プロセス固有の異常についての解析に専念できる。
- 2) プログラミング言語として Prolog を用いた。これより容易にデータの追加、修正を行うことができ、対象プロセスの変更に対しても柔軟に対応できる。また、解析結果は対象プロセスの異常に関する情報として計算機に格納されており、フォールト・ツリー生成や異常診断に応用することができる。

なお、ソルベプロセスに対する知識ベース及び解析結果、連続プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析システムのプログラム及びデータベースは別冊付録に示す。

### 3.1 緒言

近年、装置産業においても多品種少量生産の必要性が高く、回分プロセスが果たす役割は重要であるが、プロセス設計、運転段階においても信頼性、安全を十分に検討する必要がある。回分プロセスにオペラビリティ・スタディを実施した例もいくつか報告されているが、いずれも配管部の解析を重視しており、実際には連続プロセスに適用したものと同一である。鈴木らは回分プロセスの特性を明らかにし、システム工学における入出力の概念を適用したオペラビリティ・スタディを回分プロセスに適用するための実施手順を示している<sup>27)</sup>。

一方、オペラビリティ・スタディは、多大な時間と労力を必要とし、各分野の専門家でなければ、解析を行うのが難しいという問題点がある。これに対して、計算機を用いたオペラビリティ・スタディ支援システムが提案されている<sup>21) 28) ~ 31)</sup>が、いずれも配管部を重視した連続プロセスに対する解析支援システムであり、回分プロセスに適用するための手順は確立されていない。第2章においては、連続プロセスを対象として、知識工学の手法を応用したオペラビリティ・スタディ自動解析法を提案した。

本章では、回分プロセスを対象としたオペラビリティ・スタディ自動解析法を提案する。回分プロセスの特性を明らかにすることにより、回分プロセスの運転開始から終了までを操作形式により三つの操作手順に分類し、それぞれの操作手順毎に要素の異常に関するデータをまとめておく。また、回分プロセスでは加熱、冷却、攪拌などの操作を加える時刻のずれもプロセスの運転に重大な影響を与えるため、操作時刻の異常に関するデータも格納しておく。対象プロセス固有の情報を計算機に入力することにより、オペラビリティ・スタディを実施する。

回分プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析システムの開発には、論理型人工知能言語 Prolog を用いる。提案する手法を、ポリ酢酸ビニル製造プラント<sup>27) 115)</sup>に適用し、オペラビリティ・スタディ自動解析を行うとともに、手法の有用性を明らかにする。

### 3.2 回分プロセスのオペラビリティ・スタディ

#### 3.2.1 回分プロセス

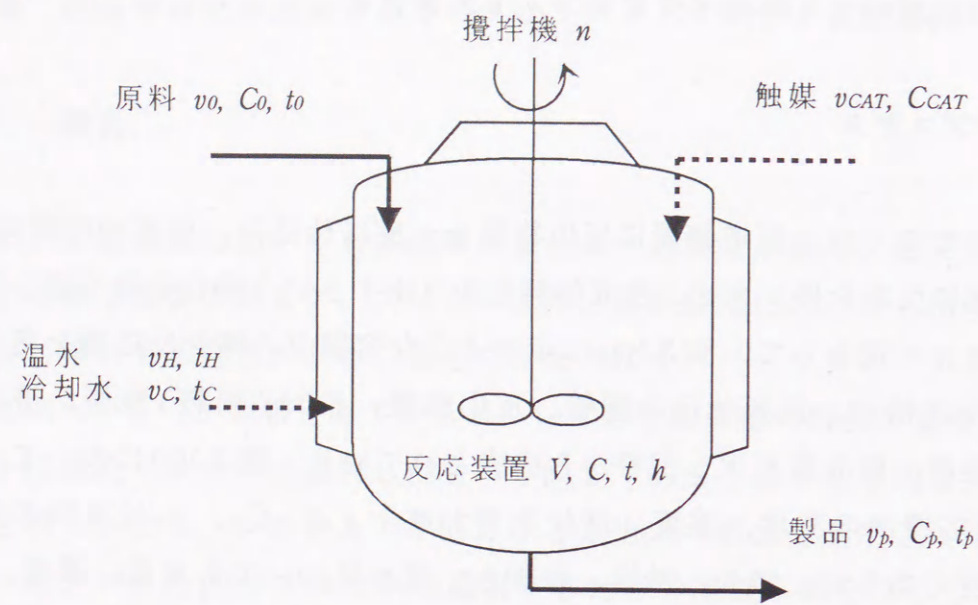
回分プロセスでは、反応装置に反応物質を一度に仕込み、所定の時間だけ反応させた後に反応を停止させ、生成物質を取り出すという操作を繰り返し行う。回分プロセスの例として、図 3.1(a) に示すような容積  $V$  の攪拌反応槽を考える。この攪拌反応槽は、原料仕込み配管、反応装置、冷却(加熱)装置、攪拌機、触媒添加装置、製品取り出し配管から構成されている。図 3.1(a) において、 $C$ 、 $t$ 、 $h$  は反応槽内の濃度、温度、液位を表わす。 $v_0$ 、 $C_0$ 、 $t_0$  は原料の流量、濃度、温度であるが、製品、触媒、冷却水、温水についても流量、濃度、温度を  $v$ 、 $C$ 、 $t$  を用いて表わし、それぞれに添え字を付けている。 $n$  は攪拌機の回転数を表わす。この攪拌反応槽では、図 3.1(b) の操作手順に従い運転するものとする。 $(\theta_{01}, \theta_{02})$ 、 $(\theta_{H1}, \theta_{H2})$ 、 $\dots$  は原料仕込み、加熱などの操作時刻(操作開始時刻、操作終了時刻)を表わす。

連続プロセスでは、反応物質は一定流量で供給、排出されるので槽内の濃度、温度は一定に保たれており、定常状態で運転されている。一方、回分プロセスでは、図 3.1(b) に示す [1] で反応物質を仕込み、[2] ~ [4] で反応させ、最後に [5] で製品が取り出される。ここでは [1] を原料仕込み、[2] ~ [4] を反応進行、[5] を製品取り出しと呼ぶ。[2] ~ [4] では反応物質の出入りがまったくない状態で反応が進行し、温度、濃度が常に変化する非定常状態で運転される。

#### 3.2.2 回分プロセスのオペラビリティ・スタディ

鈴木らは回分プロセスの特性を明らかにし、回分プロセスに対するオペラビリティ・スタディを提案している<sup>27)</sup>。

連続プロセスでは、反応装置内の濃度、温度は一定であるが、回分プロセスでは、反応開始とともに、濃度、温度は時間とともに変化するので、正常な運転条件下において変化する値が基準となる。これより回分プロセスでは時間も独立変数となり、入力として検討することが重要であり、この点が連続プロセ



(a) 簡単な回分プロセスの例

使用装置		操作手順		原料仕込み				反応進行				製品取り出し	
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]		
配管	原料仕込み配管	←→ $\theta_{01}$ $\theta_{02}$											
周辺装置	加熱装置		←→ $\theta_{H1}$ $\theta_{H2}$										
	冷却装置			←→ $\theta_{C1}$		→→ $\theta_{C2}$							
	攪拌機		←→ $\theta_{S1}$			→→ $\theta_{S2}$							
	触媒添加装置			←→ $\theta_{CAT1}$ $\theta_{CAT2}$									
配管	製品取り出し配管											←→ $\theta_{P1}$ $\theta_{P2}$	

(b) 回分プロセスの操作手順

図 3.1 回分プロセス

スと異なる。また、連続プロセスでは配管、攪拌機などの設備により入力进行分类したが、回分プロセスでは、操作形式が時間毎に異なるので、運転の開始から終了までを操作形式(原料仕込み、反応進行、製品取り出し)により区分し、それぞれの操作形式毎にオペラビリティ・スタディを実施する。

回分プロセスは配管(原料仕込み配管と製品取り出し配管)、周辺装置(加熱、冷却、攪拌、触媒添加装置など)及び反応装置により構成されている。原料仕込み時及び製品取り出し時には、それぞれ配管を用いて原料及び製品を移送するため、配管に対するオペラビリティ・スタディを実施すればよい。これは連続プロセスの場合と同じである。一方、反応進行中は、周辺装置を用いて反応装置内の反応を制御するため、周辺装置で発生した異常が反応装置での反応に影響を与える。ここでは回分プロセスのオペラビリティ・スタディとして、反応進行中の周辺装置に対する解析について説明する。

表 3.1 に回分プロセスにおける反応進行中の入力と出力の関係を示す。入力は操作変数、状態変数の初期値及び操作時刻の3種類であり、出力は反応槽内の状態変数である。

操作変数とは加熱用温水流量  $v_H$ 、冷却水流量  $v_C$ 、攪拌機回転数  $n$ 、触媒添加量  $v_{CAT}$  などである。

状態変数の初期値とは温水温度  $t_H$ 、冷却水温度  $t_C$ 、触媒濃度  $C_{CAT}$  などである。これらの値は一定であるが、ずれがあれば反応槽内の状態に影響を与える。

操作時刻とは加熱、冷却などの操作を開始する、または操作を終了する時刻である。例えば、加熱装置は図 3.1(b) に示す区間 [2] で作動するが、加熱開始時刻及び加熱終了時刻はあらかじめ、それぞれ  $\theta_{H1}$ 、 $\theta_{H2}$  に設定されているとする。しかし、“加熱開始時刻が早すぎる” というような操作時刻のずれが起こると、反応槽内では温度が異常に上昇するなど、反応進行に対してきわめて重大な影響を与える。冷却、攪拌、触媒添加の時刻についても同様であり、それぞれの装置の操作時刻を入力と考え、オペラビリティ・スタディ実施の際に検討する必要がある。これは連続プロセスのオペラビリティ・スタディとは異なる点である。

一方、出力は反応槽内の圧力  $p$ 、温度  $t$  及び濃度  $C$  という状態変数である。ただし、圧力  $p$  は操作方式によっては入力ともなり得る。

表 3.1 回分プロセスに対する入力と出力の関係 (反応進行中)

入力			出力	
操作変数	温水流量	$v_H$	圧力	$p$
	冷却水流量	$v_C$		
	攪拌機回転数	$n$		
	触媒添加量	$v_{CAT}$		
状態変数の初期値	温水温度	$t_H$	温度	$t$
	冷却水温度	$t_C$		
	触媒濃度	$C_{CAT}$		
操作時刻	加熱開始/終了時刻	$\theta_H$	濃度	$C$
	冷却開始/終了時刻	$\theta_C$		
	攪拌開始/終了時刻	$\theta_S$		
	触媒添加開始/終了時刻	$\theta_{CAT}$		

図 3.2 に反応進行中の周辺装置におけるずれの伝播構造を示す。①は操作変数のずれ、②は状態変数の初期値のずれ、③は操作時刻のずれである。一方、操作変数、状態変数の初期値及び操作時刻のずれの原因は、④周辺装置構成要素の異常であり、要素故障、人間エラーなどを含む。さらに⑤に示すように、操作変数のずれが構成要素自身に影響を与える場合がある。このように周辺装置についても、図 3.2 のずれの伝播構造を基に、入力に手引用語を適用することにより、配管の場合と同じように、オペラビリティ・スタディを実施することができる。

プラント、プロセスの操作時刻のずれとしては (1) 操作時刻が早い、(2) 操作時刻が遅れるという 2 種類である。ここでは操作時刻のずれと手引用語の関係を次のように定義する。すなわち、(1) 操作時刻が早いというずれに対しては LESS、(2) 操作時刻が遅れるというずれに対しては MORE という手引用語を適用し、ずれの検討を行う。

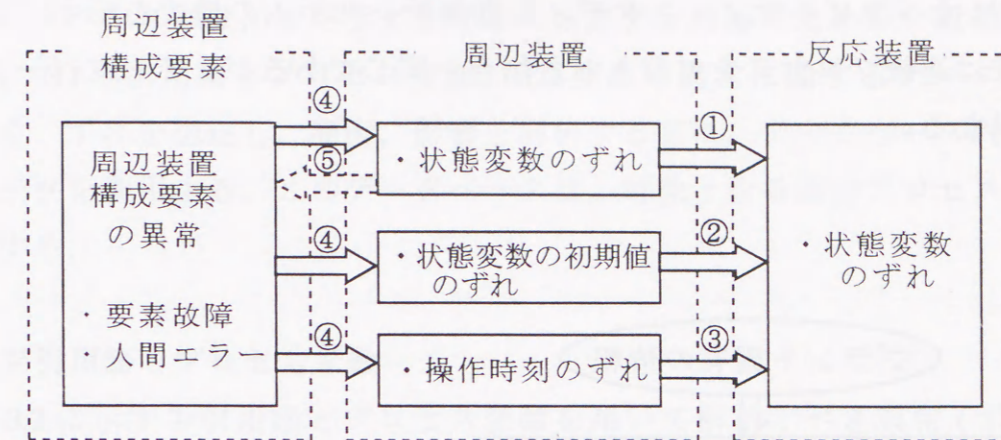


図 3.2 回分プロセスにおけるずれの伝播 (反応進行)

### 3.3 データベースと知識ベース

図 3.3 にオペラビリティ・スタディ自動解析システムの構成を示す。システムの構成は連続プロセスを対象とした場合と同じであるが、データベース作成方法が異なる。

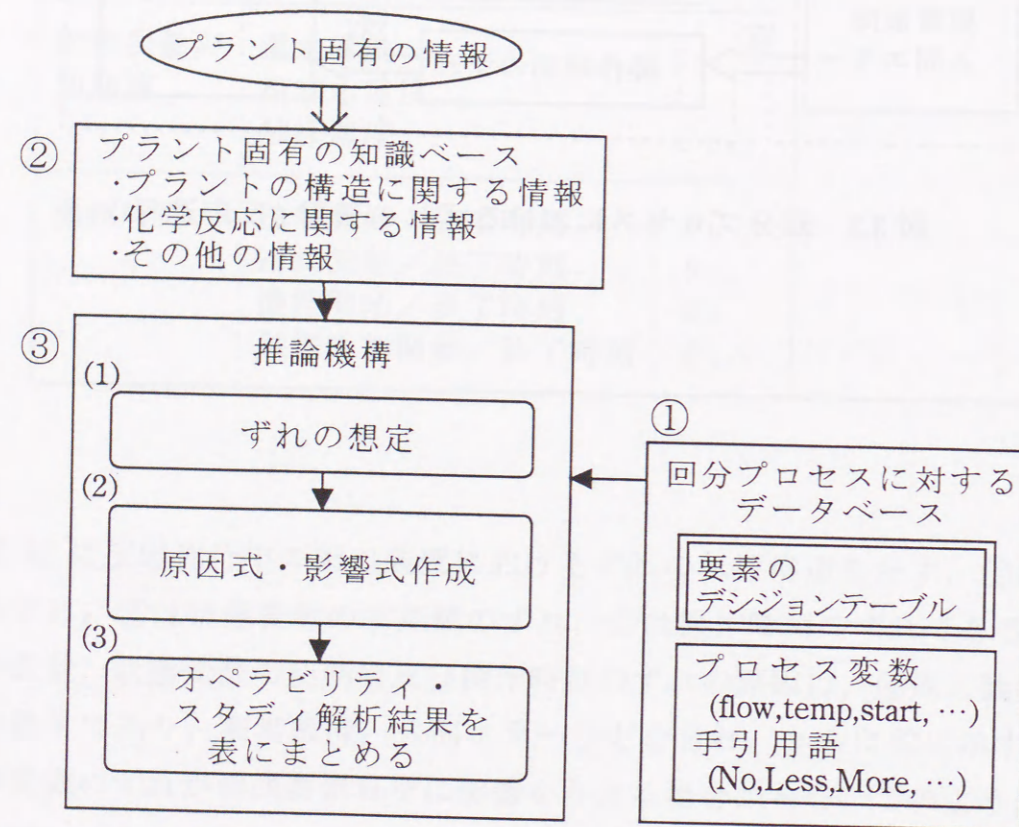


図 3.3 オペラビリティ・スタディ自動解析システムの構成

### 3.3.1 データベース

データベースには、オペラビリティ・スタディ実施のための一般的な知識として、(1)手引用語とプロセス変数、(2)要素の異常に関するデータを格納しておく。ずれを想定し、原因、影響を解析する際に、データベース内のこれらのデータを利用する。このデータベースは、対象となる回分プロセスに共通に利用する。

#### (1) 手引用語とプロセス変数

表 3.2 に示す手引用語とプロセス変数を用いて解析すべき異常(ずれ)を想定する。回分プロセスでは、操作時刻のずれも入力として検討するため、操作開始時刻(start)と操作終了時刻(stop)をプロセス変数と同様に扱う。これらの手引用語と変数を Prolog 処理系の表現形式を用いて表わし、データベースに格納しておく。自動解析の際には、変数に手引用語を適用し、ずれを想定する。例えば、変数として start を選定し、手引用語 less を適用すれば、“操作開始時刻が早い(start less)”というずれを考えることができる。

表 3.2 手引用語とプロセス変数

手引用語	No Less More Reverse Other than
プロセス変数	(1) 操作変数 流量 (flow) 圧力 (press.) 回転数 (revol.) (2) 状態変数の初期値 温度 (temp.) 濃度 (conc.) (3) 操作時刻 開始時刻 (start) 終了時刻 (stop)

## (2) 要素の異常に関するデータの格納

回分プロセスは、①バルブ、ポンプなどの構成要素からなる配管、②加熱、冷却装置などの周辺装置、③反応装置により構成され、数多くの構成要素を有している。これら回分プロセスを構成する要素の故障モードと変数の異常(ずれ)の関係は、要素の設置個所またはプラントの種類によらず、多くの場合共通である。ここでは回分プロセスを構成する要素の故障モードと変数の異常の関係を、あらかじめデシジョンテーブルを用いて整理し、データベースに格納しておく。データベース内のデシジョンテーブルに対して、後述の知識ベースの情報に従い検索し、対象プロセスのずれと原因、影響の関係を逐次求める。

図 3.1(b) に示すように、回分プロセスは操作形式により、原料仕込み、反応進行、製品取り出しの三つの操作手順に分けられ、操作手順毎にオペラビリティ・スタディを実施する必要がある。この点が連続プロセスと大きく異なり、回分プロセスに対しては操作手順毎に要素の異常の因果関係をまとめ、図 3.4 に示す 12 種類のデシジョンテーブルに分類する。ここでは各操作手順における反応装置内部を次のように表わしている。

反応装置内部 (CH): 原料仕込み時の反応装置内部

反応装置内部 (RE): 反応進行中の反応装置内部

反応装置内部 (DC): 製品取り出し時の反応装置内部

表 3.3 にデシジョンテーブルと異常伝播の関係を示す。12 種類のデシジョンテーブルに対して、表 3.3 に示すように、配管、周辺装置及び反応装置内部の変数の状態を入力状態と出力状態の項に記入し、構成要素の異常を内部状態の項に記入する。以下では、図 3.4 及び表 3.3 に示した 12 種類のデシジョンテーブルの分類について説明する。

### (i) dt1\_mode ~ dt5\_mode のデシジョンテーブル

原料仕込み時には配管を用いるため、配管部における異常伝播について考える。これは連続プロセスに対するオペラビリティ・スタディと同じである。原料仕込みでは、図 3.4(a) 及び表 3.3 に示す dt1\_mode ~ dt5\_mode の 5 種類のデシジョンテーブルに分類する。ここでは反応装置内部の異常状態を検討することが重要であるため、反応装置内部への異常伝播についてのみ考慮している。

### (ii) dt6\_mode ~ dt8\_mode のデシジョンテーブル

反応進行中には、加熱、冷却、触媒添加装置などの周辺装置を用いて、反応を制御するため、周辺装置における異常伝播について考える。ここでは周辺装置の異常に関するデータを、Fig.3 に示した反応進行中の周辺装置における異常伝播①~⑤を基に、図 3.4(b) 及び表 3.3(b) に示す dt6\_mode ~ dt8\_mode の 3 種類のデシジョンテーブルに分類する。dt6\_mode のデシジョンテーブルは、周辺装置の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する反応装置内部 (RE) の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 3.2 の異常伝播①~③に対応する。dt7\_mode のデシジョンテーブルは、周辺装置構成要素の異常を内部状態の項に記入し、これに対する周辺装置の変数の状態を出力状態の項に記入したものであり、図 3.2 の異常伝播④に対応する。dt8\_mode のデシジョンテーブルは、周辺装置の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する周辺装置構成要素の異常を内部状態の項に記入したものであり、図 3.2 の異常伝播⑤に対応する。

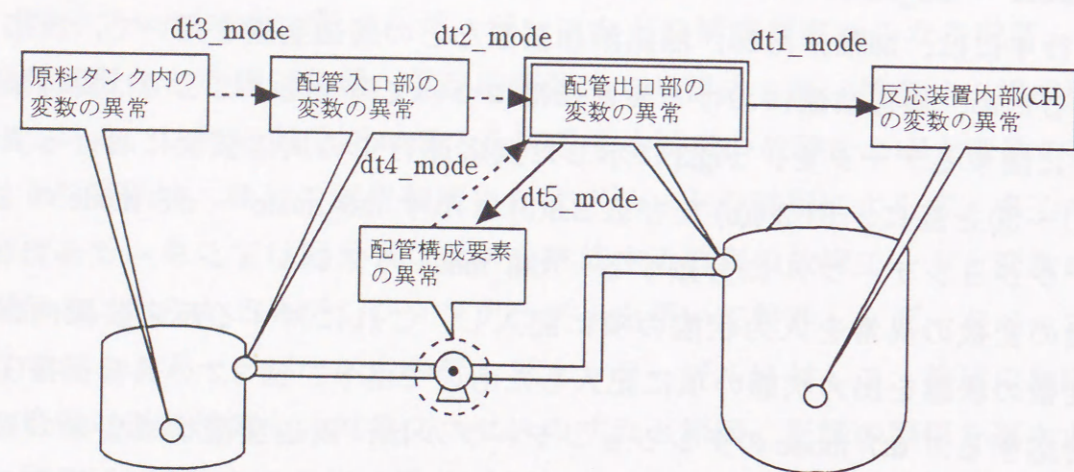
### (iii) dt9\_mode, dt10\_mode のデシジョンテーブル

製品取り出し時には配管を用いるため、配管部における異常伝播について考える。これは原料仕込み時の場合と同様に取り扱い、図 3.4(c) 及び表 3.3(c) に示す dt9\_mode と dt10\_mode の 2 種類のデシジョンテーブルに分類する。

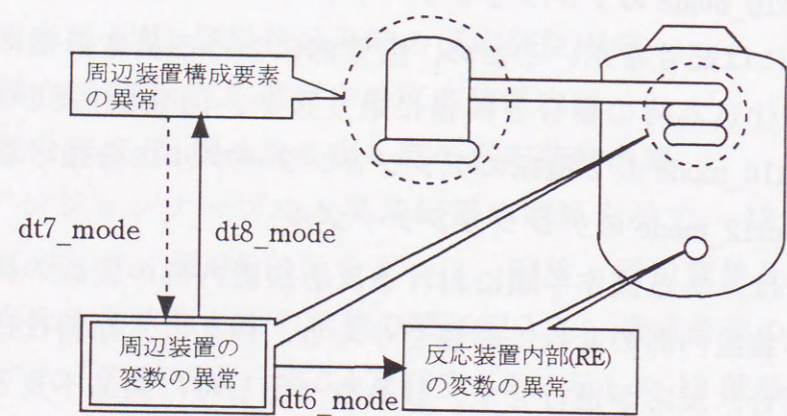
### (iv) dt11\_mode, dt12\_mode のデシジョンテーブル

回分プロセスでは、ある操作手順における反応装置内部の変数の異常が、次の操作手順の反応装置内部の変数に影響を与える。例えば、原料仕込み時に原料の濃度が低い場合、反応が進行せず、製品取り出し時に製品不良となる。また、反応進行中に触媒の濃度が低い場合にも局部反応となり、製品不良となる。このような異常伝播を、図 3.4(d) 及び表 3.3(d) に示す dt11\_mode と dt12\_mode の 2 種類のデシジョンテーブルに分類する。dt11\_mode は原料の異常に関する異常伝播であり、dt12\_mode は製品の異常に関する異常伝播である。これらは回分プロセスに特有な異常伝播である。

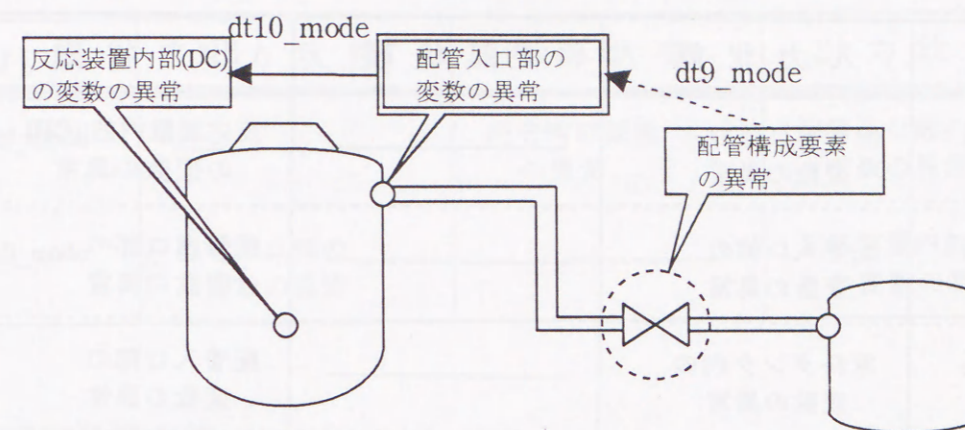
以上 12 種類のデシジョンテーブルを用いて、回分プロセスを構成する要素の異常に関するデータを整理する。



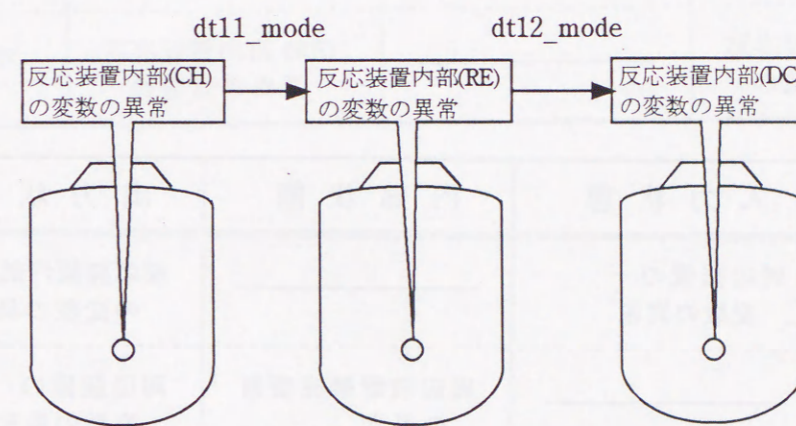
(a) 原料仕込み



(b) 反応進行



(c) 製品取り出し



(d) 反応装置内部

図 3.4 回分プロセスに対するデシジョンテーブルの分類

図 3.4 回分プロセスに対するデシジョンテーブルの分類 (続き)



表 3.3 デシジョンテーブルの分類 (回分プロセス)

(a) 原料仕込み

分類	入力状態	内部状態	出力状態
dt1_mode	配管出口部の 変数の異常	_____	反応装置内部 (CH) の変数の異常
dt2_mode	配管入口部の 変数の異常	_____	配管出口部の 変数の異常
dt3_mode	原料タンク内の 変数の異常	_____	配管入口部の 変数の異常
dt4_mode	_____	配管構成要素 の異常	配管出口部の 変数の異常
dt5_mode	配管出口部の 変数の異常	配管構成要素 の異常	_____

(b) 反応進行

分類	入力状態	内部状態	出力状態
dt6_mode	周辺装置の 変数の異常	_____	反応装置内部 (RE) の変数の異常
dt7_mode	_____	周辺装置構成要素 の異常	周辺装置の 変数の異常
dt8_mode	周辺装置の 変数の異常	周辺装置構成要素 の異常	_____

表 3.3 デシジョンテーブルの分類 (回分プロセス) (続き)

(c) 製品取り出し

分類	入力状態	内部状態	出力状態
dt9_mode	_____	配管構成要素 の異常	配管入口部の 変数の異常
dt10_mode	配管入口部の 変数の異常	_____	反応装置内部 (DC) の変数の異常

(d) 反応装置内部

分類	入力状態	内部状態	出力状態
dt11_mode	反応装置内部 (CH) の変数の異常	_____	反応装置内部 (RE) の変数の異常
dt12_mode	反応装置内部 (RE) の変数の異常	_____	反応装置内部 (DC) の変数の異常

デシジョンテーブル作成の例として、図 3.5 に示す冷却装置の異常と反応装置内部 (DC) への異常伝播を考える。図 3.4 及び表 3.3 の分類により、この冷却装置の異常と反応装置内部 (DC) への異常伝播は、次の 2 種類のデシジョンテーブルで表わすことができる。

- 1) 周辺装置と反応装置内部 (RE) の変数の異常の関係 (dt6\_mode)
- 2) 反応装置内部 (RE) と反応装置内部 (DC) の変数の異常の関係 (dt12\_mode)

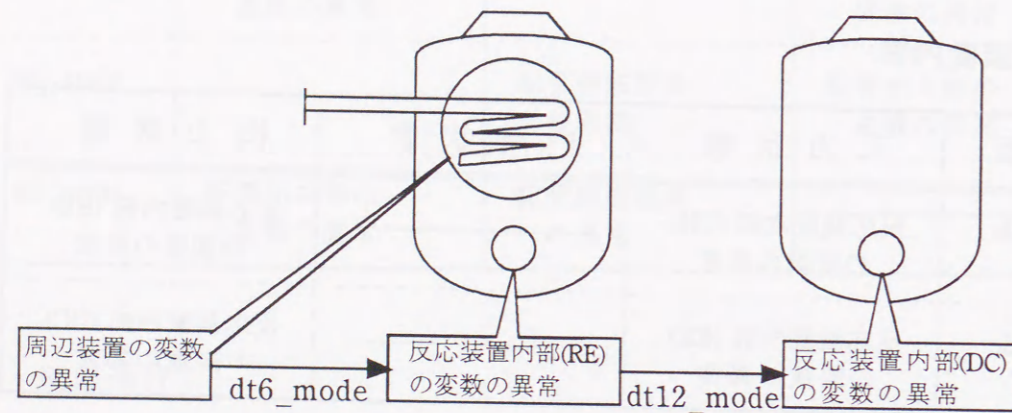


図 3.5 冷却装置の異常と反応装置内部 (DC) への異常伝播

dt6\_mode のデシジョンテーブルは、表 3.4(a) に示すように、周辺装置 (冷却装置) と反応装置内部 (RE) の変数の異常の関係を表わしている。すなわち、入力状態として周辺装置の操作変数 (流量 (flow)), 状態変数の初期値 (温度 (temperature)), 操作時刻 (開始 (start), 終了 (stop)) の異常を考え、出力状態として反応装置内部 (RE) の変数に与える影響を、デシジョンテーブルの形式で表現したものである。

反応装置では、反応の種類 (発熱, 吸熱, 膨張, 収縮) により様々な異常が発生すると考えられる。ここでは反応の種類毎に、反応装置内での異常に関するデータを作成しておく。表 3.4(a) は反応装置内の反応が発熱膨張反応である

表 3.4 デシジョンテーブルの例

(a) dt6\_mode  
周辺装置 (冷却装置) の変数の異常 → 反応装置内部 (RE) の変数の異常 (発熱膨張反応)

入力状態	内部状態	出力状態			
		Press.	Temp.	Conc.	Other
(操作変数)					
flow no	good	more	more	more	fire_hazard
flow less	good	more	more	more	fire_hazard
flow more	good	less	less	less	_____
(状態変数の初期値)					
temp less	good	less	less	less	_____
temp more	good	more	more	more	fire_hazard
(操作時刻)					
start less	good	less	less	less	_____
start more	good	more	more	more	fire_hazard
stop less	good	more	more	more	fire_hazard
stop more	good	less	less	less	_____

(b) dt12\_mode  
反応装置内部 (RE) の変数の異常 → 反応装置内部 (DC) の変数の異常

入力状態	内部状態	出力状態	
		Product	Other
(状態変数の初期値)			
conc no	good	no	_____
conc less	good	less	_____
conc more	good	less	_____

場合のデシジョンテーブルを示している。表 3.4(a) の dt6\_mode のデシジョンテーブルの入力 - 出力の関係を Prolog 処理系で表現し、データベースに格納しておく。データの一部を以下に示す。

```
dt6_mode([flow,no],cooling,[exo,exp],[Fa,Fg,Fq],[column(temp,more,Fa),
column(press,more,Fg),column(conc,more,Fa),column(fire_hazard)]).
dt6_mode([flow,less],cooling,[exo,exp],[Fa,Fg,Fq],[column(temp,more,Fa),
column(press,more,Fg),column(conc,more,Fa),column(fire_hazard)]).
.
dt6_mode([start,less],cooling,[exo,exp],[Fa,Fg,Fq],[column(temp,less,Fa),
column(press,less,Fg),column(conc,less,Fa)]).
dt6_mode([start,more],cooling,[exo,exp],[Fa,Fg,Fq],[column(temp,more,Fa),
column(press,more,Fg),column(conc,more,Fa),column(fire_hazard)]).
```

述語名は dt6\_mode とし、五つの引数がある。第 1 引数は入力状態、第 2 引数は周辺装置名、第 3 引数は温度変化と圧力変化を表わす。第 4 引数は反応装置内部 (RE) の物質を表わす変数 (Fa: 生成物質, Fg: 反応装置内部の気体, Fq: 反応装置内部の液体), 第 5 引数は出力状態を表わす。

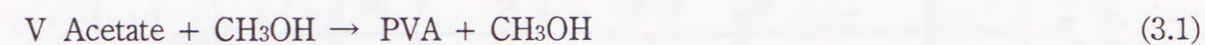
dt12\_mode のデシジョンテーブルは、表 3.4(b) に示すように、反応装置内部 (RE) の変数の異常を入力状態の項に記入し、これに対する反応装置内部 (DC) の変数への影響を出力状態の項に記入したものである。表 3.4(b) の入力 - 出力の関係も Prolog 処理系で表現し、データベースに格納しておく。dt12\_mode のデシジョンテーブルを作成することにより、反応進行中の反応装置内部の変数の異常が、製品にどのような影響を与えるかを解析することができる。

図 3.4 及び表 3.3 に示す 12 種類のデシジョンテーブルを用いて、回分プロセスを構成する様々な要素の異常の因果関係を整理し、データベースに格納しておく。

### 3.3.2 知識ベース

回分プロセスを対象とする場合にも、表 3.5 に示すプロセスに固有な情報を、知識ベースに入力し、オペラビリティ・スタディを実施する。知識ベースに入力する情報は、第 2 章で説明した連続プロセスを対象とする場合と同じ形式であり、(1) プロセスの構造に関する情報、(2) 反応に関する情報、(3) その他の情報の 3 種類を考える。ここでは回分プロセスへ適用例として、図 3.6 に示すポリ酢酸ビニル製造プラントを取り上げ、知識ベースへの入力について説明する<sup>27) 115)</sup>。

図 3.6 のポリ酢酸ビニル製造プラントでは、(3.1) 式に示す重合反応により、酢酸ビニルモノマー (V\_Acetate) からポリ酢酸ビニル (PVA) を製造する。



プラントは反応塔 1, 原料仕込み配管 1, 製品取り出し配管 10, 加熱装置, 冷却装置, 触媒添加装置, 攪拌機などから構成される。各要素の結合点には、①~③のノードを設定した。ポリ酢酸ビニル製造プラントの作業手順を以下に示す。

[原料仕込み]

- 1) 原料の酢酸ビニルモノマーと溶剤のメタノールを反応塔 1 に仕込む。

[反応進行]

- 2) 温水タンク 2 から反応塔 1 のジャケットに温水を送り、反応塔 1 を昇温する。
- 3) 反応開始剤 (触媒) の過硫酸アンモニウムを投入し、攪拌を開始する。
- 4) 反応塔 1 のパイプとジャケットに冷却水を送り、反応温度を調節する。
- 5) 重合反応後、熟成を行う。

[製品取り出し]

- 6) 出来上がった製品を取り出す。

表 3.5 知識ベース (回分プロセス)

	述語名	引数	1	2	3	4	5	6
(1)	① 配管	6	番号	操作手順	入口側 設定点	出口側 設定点	構成要素	液体 or 気体
	② 周辺装置	4	番号	名前	設定装置	構成要素	-	-
(2)	① 反応装置	4	名前	反応番号	内部気体	内部液体	-	-
	② 化学反応	5	反応番号	反応物質	生成物質	温度変化	圧力変化	-
(3)	① ノード	3	番号	設定点	通過流体	-	-	-
	② その他	2	名前	物質名	-	-	-	-

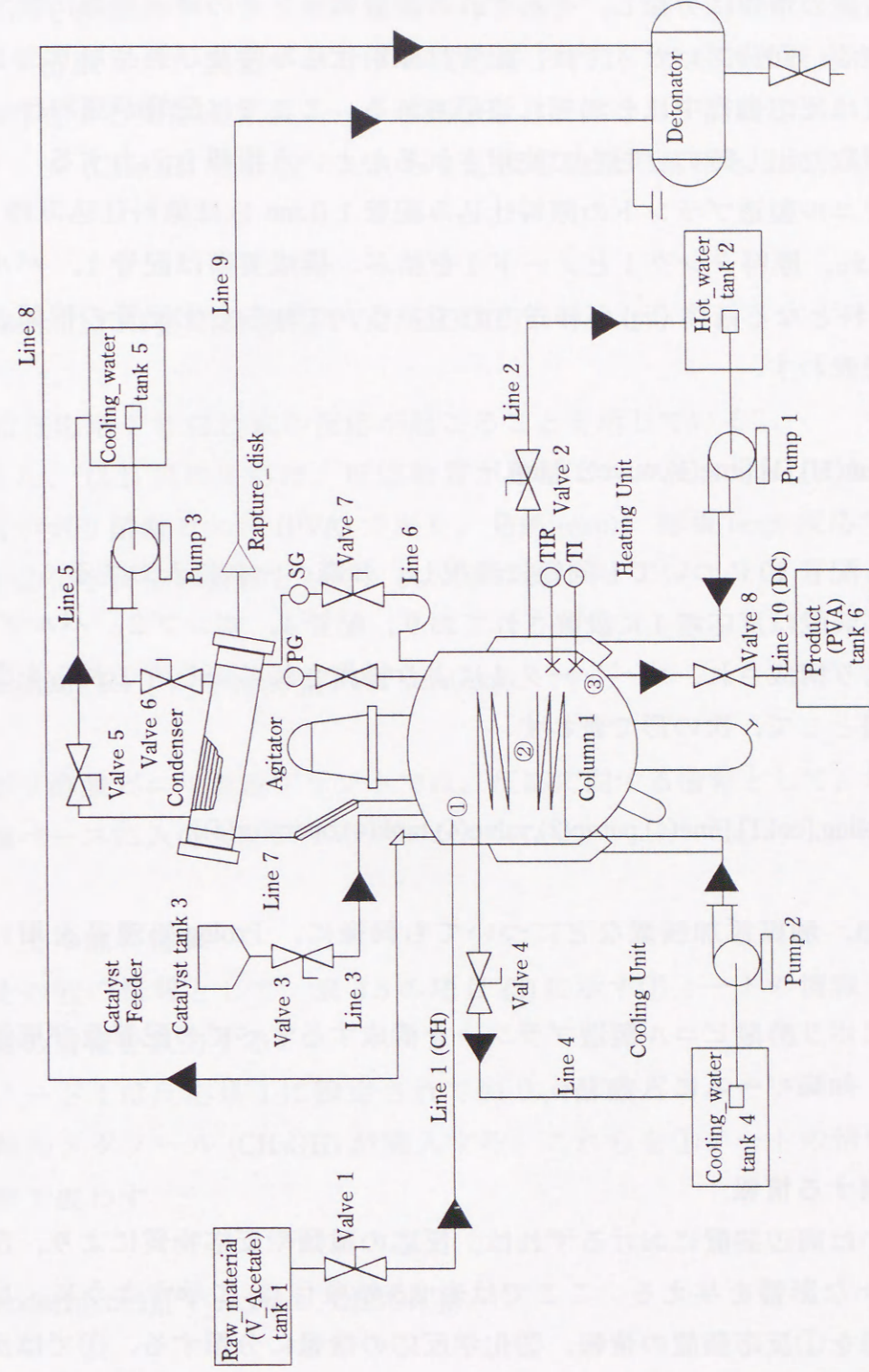


図 3.6 ポリ酢酸ビニル製造プラント

### (1) プロセスの構造に関する情報

表 3.5 の項目 (1) に示すように、プロセスの構造に関する情報を①配管の情報、②周辺装置の情報に分類し、それぞれの設置個所とその構成要素に関する情報を入力する。回分プロセスでは、配管は原料仕込み時及び製品取り出し時に、周辺装置は反応進行中にそれぞれ使用される。ここでは配管が原料仕込み時または製品取り出し時のどちらで使用されるかという情報も入力する。

ポリ酢酸ビニル製造プラントの原料仕込み配管 1 (Line 1) は原料仕込み時 (ch) に使用され、原料タンク 1 とノード 1 を結ぶ。構成要素は配管 1、バルブ 1 であり、原料となる液体 (liq) が移送されている。これらを①配管の情報として、次の形で表わす。

```
line(1,ch,[tank(1)],[1],[line(1),valve(1)],liq).
```

製品取り出し配管 10 についても同様に表現し、知識ベースに入力する。

また、冷却装置は反応塔 1 に設置されており、配管 4、ポンプ 2、バルブ 4、タンク 4 により構成され、オペレータ 4 により操作されている。これらを②周辺装置の情報として、次の形で表わす。

```
device(4,cooling,[col,1],[line(4),pump(2),valve(4),tank(4),operator(4)]).
```

その他の加熱、触媒添加装置などについても同様に、Prolog 処理系を用いて表現する。

このようにポリ酢酸ビニル製造プラントを構成するすべての配管及び周辺装置について、知識ベースに入力する。

### (2) 反応に関する情報

配管あるいは周辺装置におけるずれは、反応の種類や反応物質により、反応装置内に様々な影響を与える。ここでは表 3.5 の項目 (2) に示すように、反応に関する情報を①反応装置の情報、②化学反応の情報に分類する。①では反応装置内の気体と液体、②では反応物質、生成物質、温度変化(発熱、吸熱)、

圧力変化(膨張、収縮)の情報を入力する。これより配管や周辺装置で発生する異常(ずれ)が反応装置内での反応にどのような影響を与えるかを解析することができる。

ポリ酢酸ビニル製造プラントの反応塔 1 では、(3.1) 式の反応が起こる。塔内に存在する気体はメタノール (CH<sub>3</sub>OH)、液体はポリ酢酸ビニル (PVA) 及びメタノール (CH<sub>3</sub>OH) である。これらを①反応装置の情報として、次の形で表わす。

```
column(1,['R1'],['CH3OH'],['PVA','CH3OH']).
```

R1 は反応塔 1 で (3.1) 式の反応が起こることを示している。

また、(3.1) 式の反応は、反応物質が酢酸ビニルモノマー (V\_Acetate)、生成物質がポリ酢酸ビニル (PVA) であり、発熱 (exo)、膨張 (exp) 反応である。これらを②化学反応の情報として、次の形で表わす。

```
reaction('R1',['V_Acetate'],['PVA'],exo,exp).
```

ポリ酢酸ビニル製造プラントでは、反応に関する情報として、以上の二つを知識ベースに入力する。

### (3) その他の情報

その他の情報として、表 3.5 の項目 (3) に示す①ノードの情報と②その他の装置の情報を入力する。

ノード 1 は反応塔 1 に設定されており、酢酸ビニルモノマー (V\_Acetate) と溶剤のメタノール (CH<sub>3</sub>OH) が流入する。これらを①ノードの情報として、次の形で表わす。

```
node(1,[col,1,['V_Acetate','CH3OH']).
```

ノード 2、3 についても同様に表現する。

プラント内には配管，周辺装置及び反応装置の他に，タンクなどが設置されている．ポリ酢酸ビニル製造プラントには，原料タンク 1 が設置され，酢酸ビニルモノマー (V\_Acetate, CH<sub>3</sub>OH) が貯蔵されている．これを②その他の装置の情報として，次の形で表わす．

```
other(tank(1),['V_Acetate','CH3OH']).
```

製品タンク 6 についても同様に表現し，知識ベースに入力する．

### 3.4 推論機構

知識ベースの情報を基にデータベースを検索し，オペラビリティ・スタディ自動解析を行う．図 3.3 に示すように，次の三つの手順により解析を進める．

- (1) ずれの想定
- (2) 原因式・影響式作成
- (3) 解析結果出力

(1)，(3)については2章で説明した連続プロセスを対象とする場合と同じ方法であるため，ここでは省略し，(2)原因式・影響式作成の過程を示す．

回分プロセスに対する解析では，図 3.4 に示したずれの伝播構造に従い，解析を進める．配管及び周辺装置で発生するずれの伝播は，図 3.4 に示すように，原因系（点線の矢印）と影響系（実線の矢印）に分類される．反応進行中の周辺装置で発生するずれの解析では，図 3.4(b) の点線で示すデシジョンテーブル (dt7\_mode) を検索することにより，ずれの原因が求められる．また，図 3.4(b) の実線で示すデシジョンテーブル (dt6\_mode, dt8\_mode) を検索することにより，ずれによる影響が求められる．さらに図 3.4(d) の実線で示すデシジョンテーブル (dt12\_mode) を検索することにより，製品取り出し時の製品への影響も求めることができる．

ここでは図 3.6 のポリ酢酸ビニル製造プラントの冷却装置を対象として，操作変数及び操作時刻のずれの解析を例に，推論機構を説明する．

#### 3.4.1 操作変数のずれの解析

操作変数のずれの解析例として，冷却装置の冷却水流量を考える．自動解析システムからの質問に対して，冷却装置を選択し，操作変数として flow，手引用語として less を適用すると，“冷却装置の冷却水流量が少ない”

```
device(cooling,flow,less).
```

というずれを想定することができる．このずれの原因，影響を解析する．

### (1) 原因式作成

図 3.4(b) に示すように、周辺装置で発生するずれの原因は、周辺装置構成要素の異常にあると考えられる。このずれと原因の関係は dt7\_mode のデシジョンテーブルとしてデータベースに格納されている。

#### ① dt7\_mode の検索 (周辺装置構成要素の異常)

冷却装置の情報 (device/4) より、構成要素としては配管 4、ポンプ 2、バルブ 4、タンク 4 であり、オペレータ 4 が操作している。dt7\_mode のデシジョンテーブルの中から、出力状態の項に [flow,less] (流量が少ない) を有するデータを検索する。これよりずれ発生の原因として、周辺装置構成要素の異常、すなわち “1) 配管 4 のつまり、2) ポンプ 2 の輸送量低、3) バルブ 4 の開度が不十分、4) オペレータ 4 の誤操作”

```
[line(4,plugged),  
pump(2,stroke_too_short),  
valve(4,insufficiently_open),  
operator(4,human_error)].
```

という四つの異常が取り出される。タンク 4 については原因となる異常が考えられず、データベースに格納していない。従ってタンク 4 については原因は解析結果として出力されない。

ずれと原因の関係を原因式という形で記述する。Prolog 処理系では cause という述語を用いて次のように表わし、計算機に格納する。

```
cause(device(cooling,flow,less),  
[line(4,plugged),  
pump(2,stroke_too_short),  
valve(4,insufficiently_open),  
operator(4,human_error)]).
```

### (2) 影響式作成

図 3.4(b) に示すように、周辺装置で発生するずれは、反応装置内部 (RE) の変数及び周辺装置構成要素へ影響を与えられられる。これらのずれと影響の関係は、それぞれ dt6\_mode, dt8\_mode のデシジョンテーブルとしてデータベースに格納されている。さらに図 3.4(d) に示すように、反応装置内部 (RE) の変数の異常は、反応装置内部 (DC) の変数にも影響を与え、これは dt12\_mode のデシジョンテーブルとしてデータベースに格納されている。

連続プロセスの場合と同様に、影響の解析では、反応装置内での反応の種類 (発熱、吸熱、膨張、収縮) により、様々な異常を考える必要がある。これに対して自動解析システムには、これらの異常に対するデータは、すべてデータベースとして計算機に格納されており、また、対象プロセス固有の反応に関する情報も知識ベースとして入力されるため、より詳細な影響の解析を行うことができる。

#### ① dt6\_mode の検索 (反応装置内部 (RE) の変数への影響)

知識ベース内の情報から、冷却装置は反応塔 1 に設置されており、塔内での生成物質は  $F_a=[PVA,CH_3OH]$ 、気体は  $F_g=[CH_3OH]$  で、反応は発熱膨張反応である。反応塔 1 内 (RE) への影響を求めため、冷却装置に関する dt6\_mode のデシジョンテーブルの中から、入力状態の項に [flow,less] を有するデータを検索する。これより反応塔 1 内部 (RE) の変数への影響として、“1) 反応塔 1 内の [PVA,CH<sub>3</sub>OH] の温度上昇、2) 反応塔 1 内の [CH<sub>3</sub>OH] の圧力上昇、3) 反応塔 1 内の [PVA,CH<sub>3</sub>OH] の濃度異常、4) 反応塔 1 内で爆発の恐れ”

```
[column(1,temp,more,['PVA','CH3OH']),  
column(1,press,more,['CH3OH']),  
column(1,conc,more,['PVA','CH3OH']),  
column(1,fire_hazard)].
```

という四つの異常が取り出される。

#### ② dt8\_mode の検索 (周辺装置構成要素への影響)

冷却装置の構成要素としてポンプ 2 が設置されている。ポンプ 2 への影響を

求めるため、dt8\_mode のデシジョンテーブルの中から、入力状態に [flow,less] を有するデータを検索する。これより周辺装置構成要素への影響として、  
“5) ポンプ2のキャビテーション”

[pump(2,cavitation)].

という異常が取り出される。流量のずれが配管やバルブなどへ影響を及ぼすことはないと考え、その影響に関する情報はデータベースに格納していない。従ってポンプ2以外の構成要素への影響は、解析結果として出力されない。

③ dt12\_mode の検索 (反応装置内部 (DC) の変数への影響)

①で得られた“3) 反応塔1内の [PVA] の濃度の異常”という影響に対して、さらに製品 Fc=[PVA] への影響を求める。dt12\_mode のデシジョンテーブルの中から、入力状態の項に [conc,more] を有するデータを検索する。これより製品への影響として、“6) 反応塔1内の製品 [PVA] の不良”

[column(1,product,less,['PVA'])].

という異常が取り出される。

以上①～③の検索により、“冷却装置の冷却水流量が少ない”というずれの影響として、六つの異常が明らかにされた。ずれと影響の関係を影響式として記述する。Prolog 処理系では consequence という述語を用いて次のように表わし、計算機に格納する。

```
consequence(device(cooling,flow,less),
  [column(1,temp,more,['PVA'],'CH3OH')],
  column(1,press,more,['CH3OH']),
  column(1,conc,more,['PVA'],'CH3OH'),
  column(1,fire_hazard),
  pump(2,cavitation),
  column(1,product,less,['PVA']))].
```

### (3) 解析結果出力

図 3.7(a) に示すように原因式、影響式をまとめ、オペラビリティ・スタディのずれに対する原因・影響の関係に変換する。また、図 3.7(b) に“攪拌機が動作しない”というずれの解析結果を示す。回分プロセスの異常に関するデータとして、配管、周辺装置及び反応装置における異常の因果関係を原料仕込み、反応進行、製品取り出しの三つの操作手順毎に分類し、要素毎の異常の因果関係をまとめた。これより回分プロセスの反応進行中についても、オペラビリティ・スタディを実施できる。さらに操作手順間の異常の因果関係のデータを dt11\_mode, dt12\_mode のデシジョンテーブルとして追加することにより、製品取り出し時の製品にどのような影響を与えるかを解析できる。

Deviation : device(cooling,flow,less).	
CAUSE	CONSEQUENCE
line(4,plugged) pump(2,stroke_too_short) valve(4,insufficiently_open) operator(4,human_error)	column(1,temp,more,['PVA'],'CH3OH') column(1,press,more,['CH3OH']) column(1,conc,more,['PVA'],'CH3OH') column(1,fire_hazard) pump(2,cavitation) column(1,product,less,['PVA'])

(a) device(cooling,flow,less)

Deviation : device(agitator,revol,no).	
CAUSE	CONSEQUENCE
operator(3,human_error) control_system(3,failure) motor(3,failure) motor(3,power_cut)	column(1,temp,more,['PVA'],'CH3OH') column(1,press,more,['CH3OH']) column(1,fire_hazard)

(b) device(agitator,revol,no)

図 3.7 オペラビリティ・スタディ自動解析結果 (操作変数)



### 3.4.2 操作時刻のずれの解析

操作時刻のずれの解析例として、冷却装置の操作開始時刻を考える。変数として start, 手引用語として less を適用すると、“冷却開始時刻が早い”

```
device(cooling,start,less).
```

というずれを想定することができる。このずれの原因、影響を解析する。

#### (1) 原因式作成

##### ① dt7\_mode の検索 (周辺装置構成要素の異常)

dt7\_mode のデシジョンテーブルの中から、出力状態の項に [start,less] (開始時刻が早い) を有するデータを検索する。これよりずれ発生の原因として、周辺装置構成要素の異常、すなわち “1) オペレータ 4 の誤操作”

```
[operator(4,human_error)].
```

という異常が取り出される。操作時刻のずれに関する原因としては、その他の構成要素の異常を考えず、データベースに格納していない。従ってオペレータ 4 以外の構成要素の異常を原因として出力されていない。

原因式は次のように表わされる。

```
cause(device(cooling,start,less),  
[operator(4,human_error)]).
```

#### (2) 影響式作成

##### ① dt6\_mode の検索 (反応装置内部 (RE) の変数への影響)

操作時刻のずれが反応塔 1 内 (RE) の変数へ与える影響を求めため、冷却装置に関する dt6\_mode のデシジョンテーブルの中から、入力状態の項に [start,less] を有するデータを検索する。これより反応塔 1(RE) の変数への影響として、

“1) 反応塔 1 内の [PVA,CH<sub>3</sub>OH] の温度低下, 2) 反応塔 1 内の [CH<sub>3</sub>OH] の圧力低下, 3) 反応塔 1 内の [PVA,CH<sub>3</sub>OH] の濃度異常”

```
[column(1,temp,less,['PVA','CH3OH']),  
column(1,press,less,['CH3OH']),  
column(1,conc,less,['PVA','CH3OH'])].
```

という異常が取り出される。

##### ② dt8\_mode の検索 (周辺装置構成要素への影響)

操作時刻のずれが周辺装置構成要素に影響を及ぼすことはないと考え、その影響に関する情報はデータベースに格納していない。従って周辺装置構成要素への影響は出力されない。

##### ③ dt12\_mode の検索 (反応装置内部 (DC) の変数への影響)

① で得られた “3) 反応塔 1 内の [PVA,CH<sub>3</sub>OH] の濃度異常” という影響に対する影響を求める。入力状態の項に [conc,less] を有するデータを検索する。これより製品への影響として、“4) 反応塔 1 内の製品 [PVA] の不良”

```
[column(1,product,less,['PVA'])].
```

という異常が取り出される。

以上①～③の検索により、“冷却開始時刻が早い” というずれの影響として、四つの影響が明らかにされた。影響式は次のように表わされる。

```
consequence(device(cooling,start,less),  
[column(1,temp,less,['PVA','CH3OH']),  
column(1,press,less,['CH3OH']),  
column(1,conc,less,['PVA','CH3OH']),  
column(1,product,less,['PVA'])]).
```

### (3) 解析結果出力

図 3.8(a) に示すように原因式, 影響式をまとめ, オペラビリティ・スタディのずれに対する原因・影響の関係に変換する. また, 図 3.8(b) に“攪拌開始時刻が遅い”というずれの解析結果を示す. 回分プロセスでは操作時刻のずれもプロセスの運転に重大な影響を与える. これについては操作時刻の異常に関するデータをデータベースに格納しておくことにより, 解析が可能となった.

Deviation : device(cooling,start,less).	
CAUSE	CONSEQUENCE
operator(4,human_error)	column(1,temp,less,['PVA','CH3OH']) column(1,press,less,['CH3OH']) column(1,conc,less,['PVA','CH3OH']) column(1,product,less,['PVA'])

(a) device(cooling,start,less)

Deviation : device(agitator,start,more).	
CAUSE	CONSEQUENCE
operator(3,human_error) control_system(3,failure)	column(1,temp,more,['PVA','CH3OH']) column(1,press,more,['CH3OH']) column(1,fire_hazard)

(b) device(agitator,start,more)

図 3.8 オペラビリティ・スタディ自動解析結果 (操作時刻)

### 3.5 結言

本章では, 回分プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析法を提案した. 回分プロセスの特性を明らかにすることにより, 異常の因果関係の分類を行い, 要素の異常に関するデータをデータベースに格納しておく. 連続プロセスを対象とする場合と同様に, 知識ベースに入力される対象プロセス固有の情報を基に, オペラビリティ・スタディ自動解析を行う手法である. 提案する手法に基づき, Prolog によるオペラビリティ・スタディ自動解析システムを開発した.

応用例としてポリ酢酸ビニル製造プラントに適用した. プラント内の 2 本の配管と四つの周辺装置に対して自動解析を行い, 46 のずれについてオペラビリティ・スタディ解析結果を得た. 自動解析の結果は, 人手による解析結果と一致していた.

以下に回分プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析法の特徴を示す.

- 1) 回分プロセスの運転開始から終了までを操作形式により三つの操作手順に分類し, それぞれの区分毎に要素の異常に関するデータをデシジョンテーブルを用いて整理し, データベースに格納しておく. これより回分プロセスにおいて重要となる反応進行中のオペラビリティ・スタディも計算機を用いて実施することができる.
- 2) 回分プロセスでは加熱, 冷却, 攪拌などの操作を加える時刻のずれも重大な影響を与えるため, 操作時刻の異常についてのデータもデータベースに格納しておく. これより回分プロセス特有の異常である操作時刻のずれについても解析結果を得ることができる.

なお, ポリ酢酸ビニル製造プラントに対する知識ベース及び解析結果, 回分プロセスに対するオペラビリティ・スタディ自動解析システムのプログラム及びデータベースは別冊付録に示す.

4.1 緒言

近年、システム信頼性、安全工学は産業界及び社会からもその必要性が認められている。特に対象とするシステムの定量的リスク評価が可能なフォールト・ツリー解析 (Fault Tree Analysis, FTA) は、化学プラント、原子力発電所などの安全評価問題に適用され、その有用性が認められている。しかし、フォールト・ツリー解析において、ツリー生成は困難な問題の一つであり、これまでに数多くの研究が報告されている<sup>3)5)~7)4)</sup>。

本章では、フレームを用いたフォールト・ツリー自動生成法を提案する。対象プロセスの構造の情報をフレーム (frame) により整理し、これを基に、プロセスを構成する回路、または要素がどのように接続されているかをまとめ、構造フレームとして計算機に入力する。フレームは人間の記憶及び認知の過程をモデル化するための枠組みとして、1975年に Minsky により提案されたものであり<sup>1)16)</sup>、対象を典型的な状況、事象などの概念的記述とそれらの間の階層的関係の記述を用いて表現することができる。また、制御回路、遮断回路などの基本回路のツリーのトップ構造を演算子として表わし、要素の異常の因果関係をミニツリーの形で表わし、それぞれ計算機に格納しておく。フォールト・ツリーは2段階に分けて生成する。第1段階では、演算子を用いて回路レベルのツリー展開を行い、フォールト・ツリーのトップ構造を決定する。第2段階では、ミニツリーを用いて要素レベルのツリー展開を行い、プロセス全体のフォールト・ツリーを完成させる。

フォールト・ツリー自動生成システムの開発には Prolog を用いる。提案する手法を、流量制御回路直列結合系<sup>6)4)</sup>に適用し、フォールト・ツリー自動生成を行い、手法の有用性を明らかにする。

図4.1(a)にフィードバック (FB) 流量制御回路の例を示す。佐山らはこのような基本的な制御回路、遮断回路に対して、フォールト・ツリーを生成し、ツリーのトップ構造を演算子としてまとめた。図4.2(a)にFB制御回路の演算子を示す。演算子は回路の機能と異常の因果関係を示したものであり、ツリー生成の基礎とすることができる。さらに複数の回路が結合されたシステムに対しては、各回路の演算子を結合することにより、フォールト・ツリーのトップ構造を決定できることを示している。

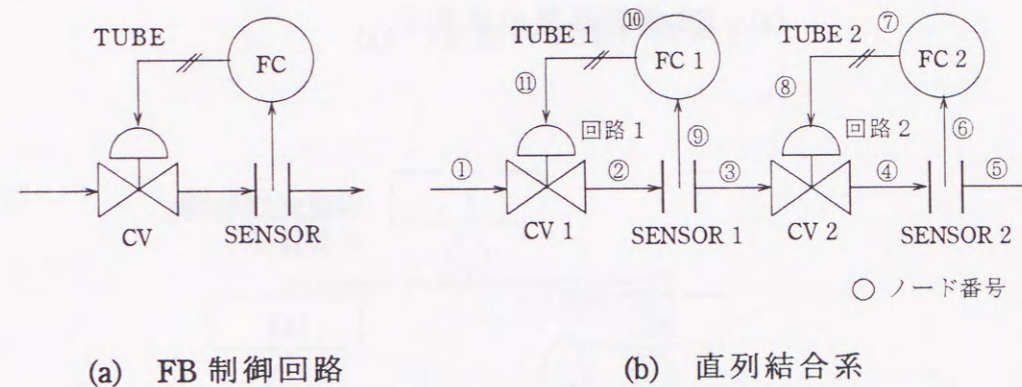
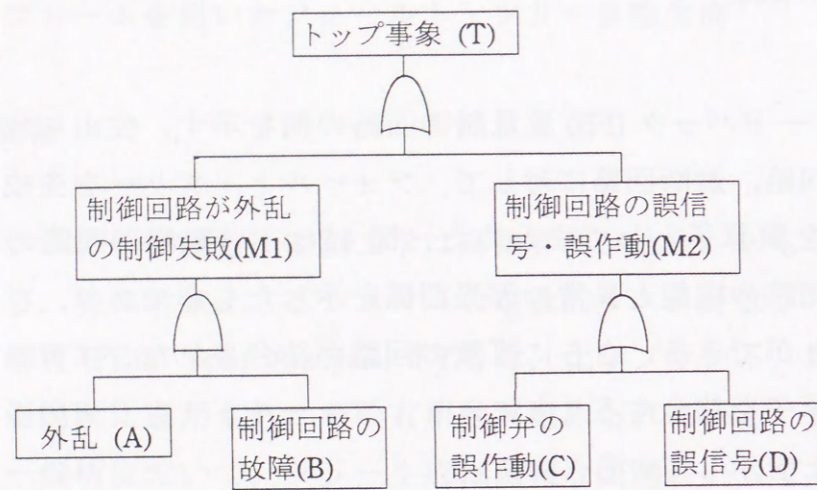


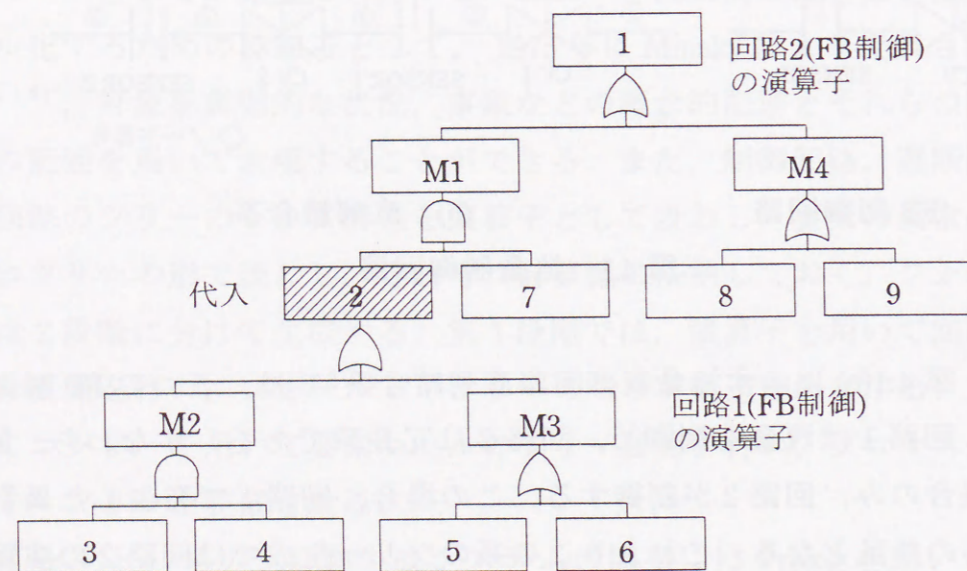
図4.1 流量制御回路

例えば、図4.1(b)に示す流量制御回路直列結合系<sup>6)4)</sup>は、二つのFB制御回路からなり、回路1は流量を制御し、回路2は冗長系である。すなわち、回路1が異常な場合のみ、回路2が制御する。この場合、回路1で発生した異常事象は回路2への外乱となる。これよりこの系のツリー生成では回路2の演算子の外乱の項に、回路1の演算子のトップ事象を代入すれば、プロセス全体のフォールト・ツリーのトップ構造を決定することができる。図4.2(b)に流量制御回路直列結合系のツリーのトップ構造を示す。図4.2(b)では事象のつながりを説明するため、事象内容の説明は省略した。

図4.3にFB遮断回路、フィードフォワード (FF) 制御回路、FF遮断回路の演算子を示す。

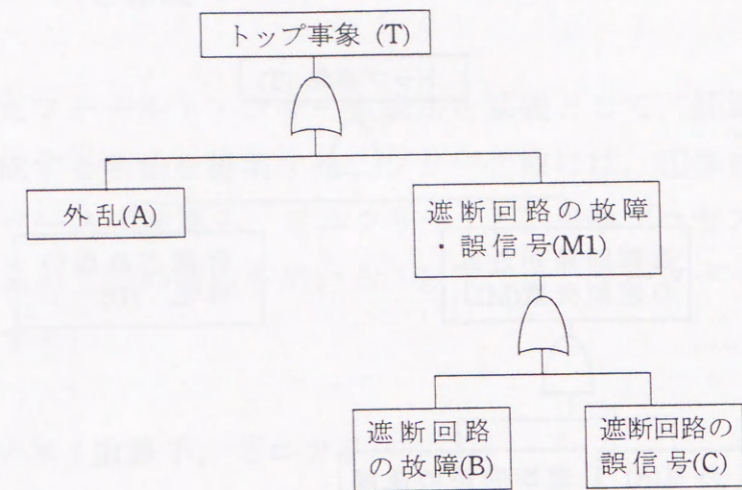


(a) FB 制御回路の演算子

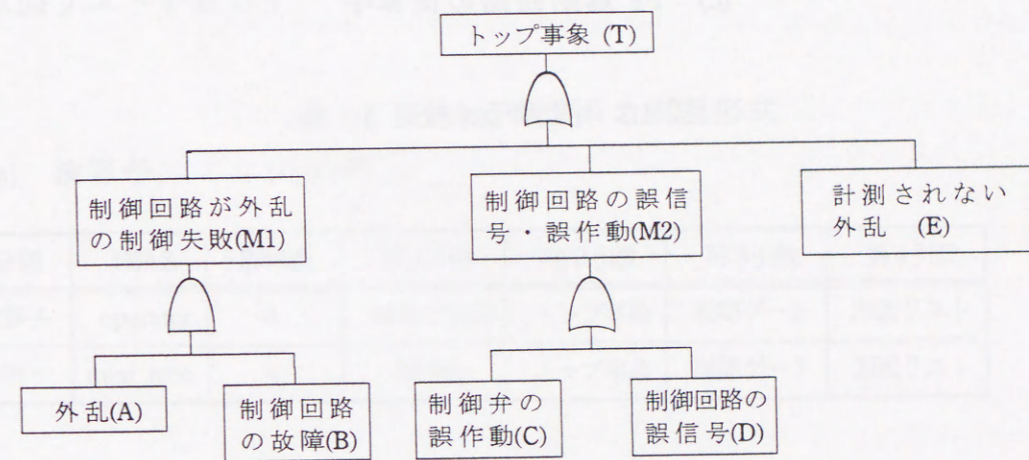


(b) 演算子の結合

図 4.2 FB 制御回路の演算子

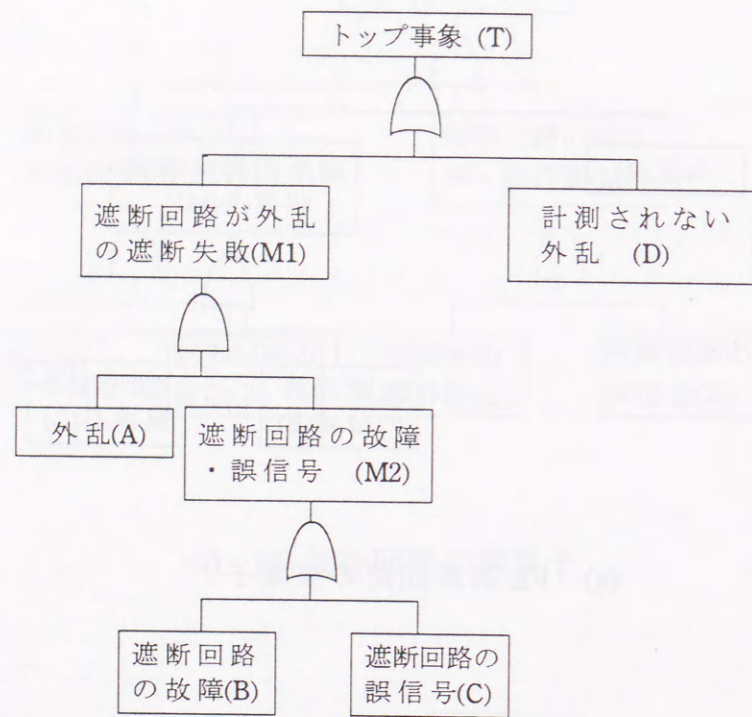


(a) FB 遮断回路の演算子



(b) FF 制御回路の演算子

図 4.3 演算子



(c) FF 遮断回路の演算子

図 4.3 演算子 (続き)

### 4.3 データベースと知識ベース

演算子を用いたフォールト・ツリー生成法を基礎として、計算機によりツリーを自動的に生成する手法を提案する。ツリー生成には、①異常の因果関係を表現したデータベース (演算子, ミニツリー) と②対象プロセスの構造を表現した構造フレームの二つの情報を用いる。以下では、データベース, 知識ベースについて説明する。

#### 4.3.1 データベース (演算子, ミニツリー)

##### (1) 演算子

フォールト・ツリーのトップ構造を決定するために演算子を用いるが、演算子は表 4.1(a) に示す Prolog 処理系で表現し、計算機に格納しておく。述語名は operator を用い、第 1 引数は回路の種類、第 2 引数はトップ事象、第 3 引数は展開ゲート (+ は OR 結合, \* は AND 結合, = は直接結合), そして第 4 引数は原因リストを表わす。

表 4.1 Prolog 処理系の表現形式

##### (a) 演算子, ミニツリー

分類	述語名	引数の数	第1引数	第2引数	第3引数	第4引数
演算子	operator	4	回路の種類	トップ事象	展開ゲート	原因リスト
ミニツリー	mini_tree	4	要素名	トップ事象	展開ゲート	原因リスト

##### (b) 構造フレーム

分類	述語名	引数の数	第1引数	第2引数	第3引数	第4引数	第5引数
回路パベル	frame	5	1	system	プロセ番号	接続関係	ノード番号
要素パベル	frame	5	2	回路の種類*	回路番号	接続関係	ノード番号

\* 回路の種類  
 FB 制御回路 : fb\_ctrl    FB 遮断回路 : fb\_shdw  
 FF 制御回路 : ff\_ctrl    FF 遮断回路 : ff\_shdw

図 4.2(a) の FB 制御回路の演算子を Prolog 処理系で表現すると図 4.4(a) のようになる。図 4.3 に示す回路の演算子についても同様に表現すると、図 4.4(b) ~ (d) のようになる。図 4.4 の演算子をデータ 1 として計算機に格納しておく。

```
operator(fb_ctrl,[top,event,2],[[middle,point,1],[middle,point,2]]).
operator(fb_ctrl,[middle,point,1],[[dst,disturbance,1],[fail_to_work]]).
operator(fb_ctrl,[middle,point,2],[[erroneous_movement],[erroneous_signal]]).
```

(a) FB 制御回路の演算子

```
operator(fb_shdw,[top,event,2],[[dst,disturbance,1],[middle,point,1]]).
operator(fb_shdw,[middle,point,1],[[fail_to_work],[erroneous_signal]]).
```

(b) FB 遮断回路の演算子

```
operator(ff_ctrl,[top,event,2],[[middle,point,1],[middle,point,2],
                                [unobservable_disturbance]]).
operator(ff_ctrl,[middle,point,1],[[dst,disturbance,1],[fail_to_work]]).
operator(ff_ctrl,[middle,point,2],[[erroneous_movement],[erroneous_signal]]).
```

(c) FF 制御回路の演算子

```
operator(ff_shdw,[top,event,2],[[middle,point,1],[unobservable_disturbance]]).
operator(ff_shdw,[middle,point,1],[[dst,disturbance,1],[middle,point,2]]).
operator(ff_shdw,[middle,point,2],[[fail_to_work],[erroneous_signal]]).
```

(d) FF 遮断回路の演算子

図 4.4 演算子の Prolog 処理系による表現

## (2) ミニツリー

演算子を用いてフォールト・ツリーのトップ構造を決定した後に、要素レベルのツリーを展開する。要素レベルのツリー展開のためにミニツリーを用いる。ミニツリーは回路を構成している要素について、その異常と原因の因果関係を表現したモデルであり、プロセスを構成するあらゆる要素についてあらかじめミニツリーを生成し、計算機に格納しておく。

例として、図 4.1(a) の回路の要素である流量コントローラ (FC) のミニツリーを示す。ミニツリーの生成には、故障モードブロック線図を用いる<sup>6.4) 6.5)</sup>が、ここでは生成過程については省略し、生成されたミニツリーを図 4.5(a) に示す。図 4.5(a) のツリーにおいて、プロセスの状態を表わす変数、信号には、次の記号を用いた。

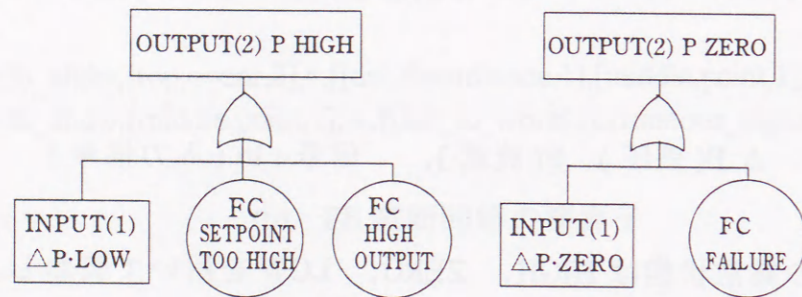
変数 : P (圧力)  $\Delta$  P (差圧) F (流量), 信号 : In (入力信号)

また、プロセスの異常状態は HIGH, ZERO, LOW を用いて表わし、表 4.2 に定義を示す。

表 4.2 プロセス状態量

状態量	定義
HIGH	変数の値が基準値より増加する。変動量は正符号。 (例えば、温度、圧力が上昇する。)
ZERO	変数の値が基準値とある範囲内で一致している。 (例えば、温度、圧力が変動しない。)
LOW	変数の値が基準値より減少する。変動量は負符号。 (例えば、温度、圧力が低下する。)

図 4.5(a) のミニツリーを表 4.1(a) に示す Prolog 処理系で表現する。述語名は mini\_tree を用い、第 1 引数は要素名、第 2 引数はミニツリーのトップ事象、第 3 引数は展開ゲート、第 4 引数は原因リストを表わす。流量コントローラのミニツリーを Prolog 処理系で表現すると図 4.5(b) のようになる。バルブ、センサなどの要素についても同様にミニツリーを生成し、データ 2 として計算機に格納しておく。



(a) ミニツリー

```
mini_tree(fc,[press,high,2],+,[def_press,low,1],[set_point_too_high],[high_output]).
mini_tree(fc,[press,zero,2],+,[def_press,zero,1],[failure]).
```

(b) Prolog 処理系による表現

図 4.5 流量コントローラ (FC) のミニツリー

### 4.3.2 知識ベース (構造フレーム)

知識表現の代表的な形式にフレーム表現があり、対象を階層的に記述することができる。ここではフォールト・ツリー自動生成に演算子を用いるため、対象プロセスの構造を、FB 制御回路、FF 遮断回路などの回路レベルのフレーム (レベル 1 のフレーム) と、バルブ、センサなどの要素レベルのフレーム (レベル 2 のフレーム) を用いて、階層的に記述する。これより対象プロセスの構造を回路レベル、要素レベルで表現することができ、回路レベルでは演算子を用いたツリーのトップ構造の決定、要素レベルではミニツリーを用いたツリー展開が可能となる。

図 4.1(b) の流量制御回路直列結合系は、FB 制御回路 1 と FB 制御回路 2 の二つの回路からなり、さらに各回路はバルブ、センサなどの要素から構成されている。各要素の結合点を①～⑩の番号で表わし、この点をノードと呼ぶ。

図 4.1(b) のフローシートを基に、プロセスの構造を表 4.3 に示すスロットを用いてフレームにより表現する。表 4.3 で、name は回路名または要素名、class は階層レベル、self は上位フレーム名、category は回路の種類 (FB 制御回路、FB 遮断回路、FF 制御回路、FF 遮断回路) を表わす。

表 4.3 スロットの内容

Frame	番号
name	回路名または要素名
class	階層レベル    プロセス全体 : level 0 回路レベル    : level 1 要素レベル    : level 2
self	上位フレーム名
category	回路の種類 (class が level 1 の場合のみ記述)

図 4.1(b) の流量制御回路直列結合系をフレームを用いて階層的に表現すると図 4.6 のようになり、次のように分類される。

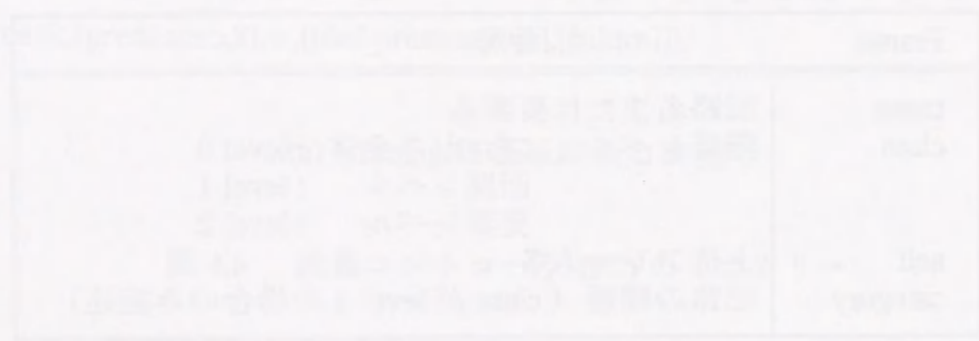
(a) プロセス全体の情報 (level 0) : プロセス全体の情報を表わすフレーム (Frame No.0).

(b) 回路レベルの情報 (level 1) : 回路 1, 回路 2 の情報を表わすフレーム (Frame No.1, No.2).

(c) 要素レベルの情報 (level 2) : センサ 1, バルブ 1 などの要素の情報を表わすフレーム (Frame No.3 ~ No.10).

図 4.6 のフレーム表現を基に、プロセス構成要素がどのように接続されているかを、表 4.1(b) に示す Prolog 処理系で表現し、構造フレームとして計算機に入力する。述語名は `frame` とし、5 個の引数がある。第 1 引数はフレームのレベル、第 2 引数は上位フレームの種類 (回路レベルの場合は `system`, 要素レベルの場合は回路の種類) を表わす。第 3 引数はプロセス (回路) 番号、第 4 引数は二つの回路 (要素) がそれぞれどのように接続されているかを表わす。第 5 引数は接続点のノード番号を表わす。

例えば、回路レベルでは図 4.7(a) に示すように、FB 制御回路 1 の出力点 `[fb_ctrl,1,2]` と FB 制御回路 2 の入力点 `[fb_ctrl,2,1]` がノード 3 で結ばれている。これを Prolog 処理系では、図 4.8(a) のように表現する。また、要素レベルでは、FB 制御回路 1 の要素は図 4.7(b) のように接続されており、これを Prolog 処理系では、図 4.8(b) のように表現する。



Frame No.0	
name	システム
class	level 0

(a) プロセス全体

Frame No.1		Frame No.2	
name	回路 1	name	回路 2
class	level 1	class	level 1
self	システム	self	システム
category	FB 制御	category	FB 制御

(b) 回路レベル

Frame No.3		Frame No.4	
name	sensor1	name	cv1
class	level 2	class	level 2
self	回路 1	self	回路 1

Frame No.5		Frame No.6	
name	fc1	name	tube1
class	level 2	class	level 2
self	回路 1	self	回路 1

Frame No.7		Frame No.8	
name	sensor2	name	cv2
class	level 2	class	level 2
self	回路 2	self	回路 2

Frame No.9		Frame No.10	
name	fc2	name	tube2
class	level 2	class	level 2
self	回路 2	self	回路 2

(c) 要素レベル

図 4.6 流量制御回路直列結合系のフレーム表現