

分置 01

公開資料

PNC TY1602 95-001

## 運転員のプラントに関する知識構造の研究

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
T	Y1602 95-001	9.6.26

この資料は技術管理室保存資料です  
閲覧には技術資料閲覧票が必要です  
動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室

平成8年4月

東京大学大学院  
システム量子工学研究科

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂 1-9-13  
動力炉・核燃料開発事業団  
技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Evaluatin and Patent Office, Power Reactor and Nuclear  
Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku,  
Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団  
(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1995

# 運転員のプラントに関する知識構造の研究

古田一雄<sup>1)</sup>、古濱 寛<sup>2)</sup>、吉川信治<sup>3)</sup>、小澤 健二<sup>4)</sup>

## 要旨

本報告書は、原子力プラントの運転員が、異常診断や対応操作に係わる意思決定を正しく行うために、その担当するプラントをどのように理解しているかについて考察を加え、知識の基本構造について推定し、その知識基本構造を計算機上で模擬した簡易プラントを用いた被験者実験で検証した結果について論ずる。

この研究の目的は、運転員が、異常診断や対応操作に係わる正しい意思決定に適した形でプラントに対する理解を形成していく過程を計算機を用いて支援する方策を開発することにある。

この研究を通じて、プラントを、a)プロセスパラメータ間の変化伝播を記述した定性因果ネットワーク、b)上位の機能が、下位の複数の機能に支持される、という関係を層状に重ねた機能階層レイヤー、及びc)この両者を関連付けるリンク、の3者で記述することにより、兆候からの原因の同定、並びに所要の変化を生じるための操作手順の生成が可能な形で人間に教示できることが明らかになった。

---

1)東京大学工学系研究科システム量子工学専攻

2)東京大学工学系研究科システム量子工学専攻(現在、東京電力)

3)動燃大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室

4)動燃大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室(現在敦賀事務所)

# Research on Knowledge Structure of Plant Operators

Kazuo Furuta<sup>1)</sup>, Yutaka Furuham<sup>2)</sup>, Shinji Yoshikawa<sup>3)</sup>, Kenji Ozawa<sup>4)</sup>

## Abstract

This report describes an assumption of basic knowledge structure of plant operators along which plant operators understand the target plant to enable themselves to properly diagnose and operate the plant. A verification study of this assumption using computer-simulated simplified plant and human subjects is then reported next.

The purpose of this research is to establish a methodology to support human operators to form appropriately organized knowledge of the target plant so that they can perform correct and prompt decision making in identifying anomaly causes and in choosing responsive actions.

A series of surveys and tests described here have revealed that the basic plant knowledge structure can be considered to consist of a) a Qualitative Causal Network(QCN) which represents propagation of process parameter deviations, b) a Layered Plant Function Model(LPFM), which represents how the top plant functions are supported by the sub-functions and how each sub-functions are decomposed into minimal functions of the plant components, and c) Links which represents relations of particular process parameters in the QCN and particular function in the LPFM. This structure has been proved to be effective in teaching an unknown plant in a way that the subjects can diagnose and operate.

---

1)Quantum Engineering & System Science, Graduate School, University of Tokyo

2)Quantum Engineering & System Science, Graduate School, University of Tokyo  
(Tokyo Electric Power Company, at present)

3)Frontier Technology Development Section, Advanced Technology Division, PNC-OEC

4)Frontier Technology Development Section, Advanced Technology Division, PNC-OEC  
(Tsuruga Office, at present)

# 目次

<b>1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 背景	1
1.2 学習理論と学習モデル	4
1.3 訓練支援システム	6
1.4 プラント操作訓練支援システムの研究例	13
1.5 本研究における前提と基本姿勢	16
1.6 本研究の目的	19
1.7 本論文の構成	20
<b>2章 手段目標解析に基づいた過誤原因の同定</b>	<b>21</b>
2.1 過誤原因に関する過去の研究	21
2.2 過誤原因の分類と同定手法	22
2.3 過誤原因同定システム	27
2.3.1 構成	27
2.3.2 動的計画法	27
2.3.3 同定手順概要	29
2.4 実験	29
2.4.1 概要	29
2.4.2 結果と考察	29
2.5 まとめ	32
<b>3章 メンタルモデル</b>	<b>33</b>
3.1 知識表現としてのメンタルモデル	33
3.2 訓練支援システムとメンタルモデル	36
3.2.1 WHY	36
3.2.2 SOPHIE	36
3.2.3 STEAMER	37
3.2.4 QUEST	38
3.2.5 メンタルモデルと問題解決行動	38
3.3 プラント操作員のメンタルモデル構造表現	39
3.4 メンタルモデル構造表現の十分性	41
3.5 メンタルモデル構造表現の妥当性	45
3.6 まとめ	47
<b>4章 制約伝播と状況推論によるプラント操作手順の導出</b>	<b>49</b>
4.1 局所的因果則を用いたプラント挙動の記述	49

4.1.1 要素機器記述	49
4.1.2 構成記述	51
4.1.3 操作記述	52
4.2 制約伝播による操作手順の探索	53
4.3 状況推論による操作手順の導出	57
4.4 実装	57
4.5 まとめ	60
<b>5章 非単調推論と真理値管理技法による学習者モデルの構築</b>	<b>61</b>
5.1 学習者モデル	61
5.2 学習者モデル構築手法	62
5.2.1 非単調推論による知識状態の推定	62
5.2.2 真理値管理技法による論理的整合性の維持	64
5.3 プロトタイプ訓練支援システム	65
5.3.1 構成	65
5.3.2 知識編集機構	66
5.3.3 対話管理機構	66
5.3.4 実装	67
5.4 学習者モデル構築手法の有用性	70
5.5 まとめ	71
<b>6章 結言</b>	<b>72</b>
<b>参考文献</b>	<b>75</b>

# 図目次

1-1 A Schematic model of plant operator's cognitive behaviour	3
1-2 Discourse Management Network Proposed in Ref.69	12
1-3 A supporting environment for causal understanding proposed in Ref.5	14
1-4 Basic constitution of student model in Ref.6	15
1-5 Hierarchical structure of domain knowledge in Ref.8	15
1-6 Situation used in the experiment by Dunker (Ref.68)	17
2-1 Identification of cause of trainee's error	25
2-2 The system architecture and outline of dynamic planning	28
3-1 Framework for representing mental model	40
3-2 Structure of the model plant used in the experiment 1	42
3-3 Appearance of the interface used in the experiment 1 (1)	42
3-4 Appearance of the interface used in the experiment 1 (2)	43
3-5 An example of subject's classified verbal record in the experiment 1	44
3-6 Structure of the model plant used in the experiment 2	45
3-7 Appearance of the interface used in the experiment 2	46
3-8 An example of historical record of subjects' operations in the experiment 2	48
4-1 Component description	51
4-2 Structure description	51
4-3 Operation description	52
4-4 Propagation rule (Sidelong, Partial)	54
4-5 Constraint propagation within an equation	54
4-6 Derivation of a sequence of operations to attain the given goal	56
4-7 An example of a computer output log during derivation of operations	58
5-1 Structure of student model	61
5-2 Architecture of the Prototype Training Support System	65
5-3 An example of a computer output log during operating prototype TSS	68

## 表目次

2-1 Classification of cause of trainee's error	24
2-2 Subject of question and judgement criteria	26
2-3 Appropriateness of identified error causes	31
2-4 Error types observed	31
2-5 Error causes identified for the error type of omission or sequence error	31
3-1 Achievement in finding a non-predefined recovery operation	48
3-2 Knowledge used to find recovery operations	48
5-1 Appropriateness of identified current context	71

# 1章 序論

## 1.1 背景

人間は過誤の発生源か解決器か—そもそも過誤とは人間のある行為に対する目的論的解釈から定義されることを考えれば、この問い合わせに対する二者択一の答えは論理的帰結をみない。しかしすべからく何らかの使命を負って造り出された人工物では、さまざまな物理的詳細度及び機能的抽象度のレベルにおいて、要求される機能を完遂するために、各々使用者である人間をこのどちらかと見なして設計されていると考えられる。そしてどのレベルまで使用者を前者、つまり過誤の発生源と見なすかにより、その人工物に対する使用者の役割が決まってくると言えるだろう。例えば、クルマ。点火タイミングや空燃比を調節してエンジンを適正な状態に保つという機能については、すでに使用者は過誤、あるいはそれにより引き起こされる可能性のある望ましからざる状況に対する問題解決者とは見なされていないと言える。最近では走行中の危険回避という、本来クルマが持つ機能ではなく使用者の果たすべき役割の一つであったものまで、車の担う役割の一つとして、その判断や制御の主導権が使用者からクルマのある部分へと移りつつある。すると、いずれクルマに対する使用者の役割とは、移動の目的地と経路を決めるだけの計画器、あるいは経路すらもクルマが決めて、使用者は単なる目的地設定器にまでなってしまうかもしれない。

発電プラントなど大規模かつ複雑な人工物の運用を対象に、同じように使用者の役割を考えてみる。クルマの運用と大規模プラントの運用では、主に三つの相違点が考えられる。一つは、車の例では使用者と管理者を分けて考えることが可能であるのに対し、大規模プラントでは使用者、つまり操作員イコール管理者である。「分からなければ手を出すな」と、操作員の介入を簡単に切って落とすことはできない。二番目に、クルマと大規模プラントとでは、その規模及び要求される機能の複雑さが大きく異なる。クルマでも特に最近は複雑で、大半の使用者にとって詳細な機構や挙動を理解し、把握することは至難である。まして大規模プラントでは、一個人がそれら全てを掌握することは不可能と言える。そして三番目に、望ましからざる状況になった場合の影響の差が挙げられる。これは想定される被害者数という量的な違いだけにとどまらず、例えば原子力発電プラントのように、そのトラブルが受益者のみならず利害関係のない不特定多数の人間にも被害を与える可能性があるという、質的な違いもある。これらの特徴と、人工物の信頼性や耐久性が飛躍的に向上している現況を鑑みると、大規模プラントなどの操作員は今後、単純作業やルーチンワークの正確な遂行者たる役割は人工物に任せ、それらの人工物では十分に対処できない、予期せぬ事態が起きた場合の適切な問題解決者としての役割を全うすることが、以前にも増して求められると考える。

では前述した、人工物に任せるべきタスクと操作員が行うべきタスクとの違いは何か。この説明には操作対象に存在するタスクを分類する基準が必要だが、ここでは Rasmussen により提案された SRK モデル<sup>[1]</sup>で用いられている、プラント操作員の認知活動のレベルの概念を用いる。SRK モデルでは操作員の振る舞いを、スキルベース、ルールベース、ナレッジベースの三つに分類している。スキルベースの振る舞いは、操作員が特に意識することなく、自動的に行えるものを言い、入力信号に対して反射的に動作が行われるものである。ルールベースの振る舞いは、得られた情報から何が起きているのかを認識し、その認識状態に対応した処置をとるもので、状態とそのときとるべき処置の対応が事前にわかっているものを使う。ナレッジベースの振る舞いでは、入力信号に馴染みがないために反射的な行動も事前に得られているルールの適用も出来ず、対象について持っている心的表象であるメンタルモデルを参照して適切な行動をとろうと試行錯誤する。これらの認知活動の概念図を Figure 1-1 に示す。このモデルに従いタスクを分類すると、実行する頻度が高く、かつ振る舞いの手順がいつも同じであるタスクは、スキルベースの振る舞い、反射的に行えるほど単純で馴染んだものではないが、過去の経験から得られた行動手順に沿って振る舞うだけで対応できるタスクは、ルールベースの振る舞い、未経験のタスクは、ナレッジベースの振る舞いによって、各自処理されることになる。すると、スキルベースで処理されるタスクは、単純で、入出力関係も決まっているために、最も人工物により自動化し易いと言える。ルールベースで処理されるタスクも、多少複雑ではあっても、行うべきことが条件式で書けるために、エキスパートシステムなどによる代行が考えられる。しかしナレッジベースで処理されるタスクは、入出力関係を定式化し難く、自動化が最も困難と考えられる。よって、スキルベースやルールベースの振る舞いで処理できるタスクは、コンピュータなど多機能な人工物による代行が今後も進み、操作員の役割は、ナレッジベースの振る舞いによる問題解決が要求されるタスクへの適切な対応が主要になってゆくと考えられる。

操作員がこの役割を満足に果たすためには、相応の訓練が不可欠であると考える。現在原子力発電プラントの操作員に対して行われている主な訓練には、フルスコープシミュレータを用いた基本操作技能の習得と判断操作の習熟、簡易シミュレータによるプラント特性と運転手順の把握及び種々プラント状態に対する状況判断と応用運転の訓練や、チーム行動の円滑化を目的としたファミリー訓練などがある<sup>[2]</sup>。しかしこれらは SRK モデルの観点からみると、スキルベースもしくはルールベースの振る舞いのための訓練であり、ナレッジベースの問題解決行動のための訓練としては不十分であると考えられる<sup>[3]</sup>。ナレッジベースの行動の訓練には、テキストを用いた座学により操作員にプラントダイナミクスの背後にある物理に関する知識体系を確立させているのが主である。そこで座学を越えてナレッジベースの問題解決能力の育成に寄与できる訓練支援システムが開発できれば、その意義は大きいと考えられる。

え、そのための問題点の整理、及びそれに対する方法論を提案することを、本研究では目指す。本章次節以降では、訓練手法の根拠となる学習理論や訓練支援システムの一般的な構成と各部分の役割について概観し、対象とする領域の特徴を考察して本研究の位置付けを明確にする。

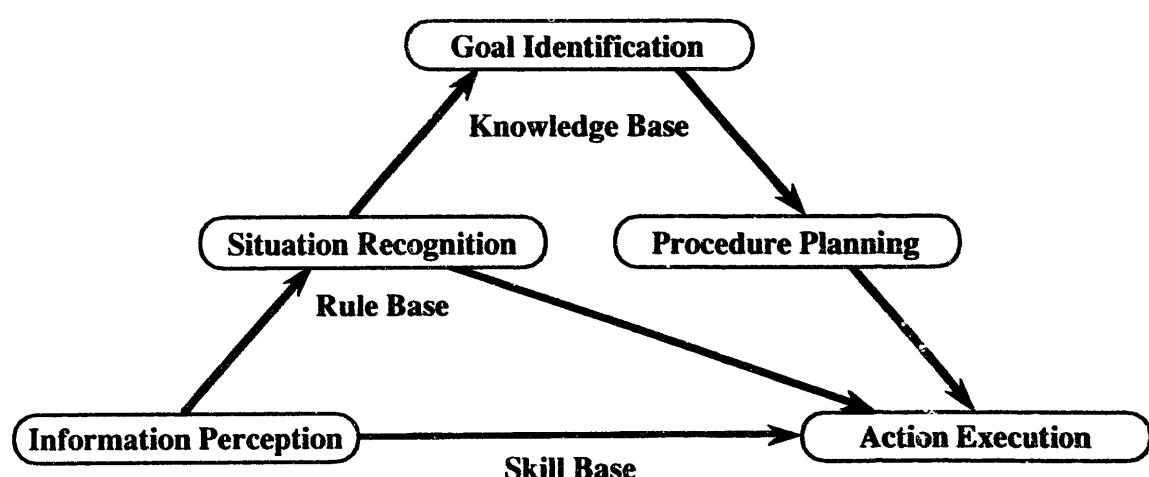


Figure 1-1 A Schematic model of plant operator's cognitive behaviour

## 1.2 学習理論と学習モデル

学習という現象について例えばSimon(横山訳)<sup>[59]</sup>は以下のように定義している。「学習によってそのシステム内に変化が起こるが、その意味は、システムが前と同じタスクまたは同じ個体群から引き出されたタスクを二度目にはもっと効率良く、効果的に行えるようになるということである」

この定義中でいう「システム」とは学習する主体であるから、この定義は、学習を、学習する主体の構造が変化するものとした構造主義的見地に立っているといえる。これに対し、学習を、学習する主体の内的な情報処理過程に全て帰着するものでないとして、学習する主体の社会的参加の在り方、つまりその活動が周囲環境や主体を含む集団の中でいかなる目的、位置付け、意味を持ってゆくかが本質的であるとする主張もある。これは一般に状況的学習論といわれ、他者や外界との相互干渉により、ある実践活動の共同体に参加し、その共同体の成員としてのアイデンティティを形成する過程こそが学習であるとしたLaveとWengerによる正当的周辺参加(Legitimate Peripheral Participation, LPP)論<sup>[60]</sup>や、社会的な相互作用を持つことにより学習する主体に学習を起こさせる場というものを設定し、そこから主体が達成できる学習の量や質を規定しようと試みたVygotskyの最近接発達領域(Zone of Proximal Development, ZPD)論<sup>[61]</sup>などが、心理学、認知科学の分野で注目されている。状況的学習論では共同体、周囲環境といった、学習する主体が相互作用する対象の定義がまだ不明確であり、現状では情報科学や認知工学の分野において記号処理が可能な形で学習のモデルを構築する際の拠り所となる体系を十分に形成しているとは言い難い。しかし主に応用計算機工学からの実践的研究として注目を浴びてきたCSCW(Computer Supported Cooperative Work)<sup>[62]</sup>や、教育工学分野で新たなパラダイムとして話題である(分散)協調学習((Distributed) Cooperative Learning)の研究<sup>[63]</sup>に対して、周囲環境や他者との相互作用を学習の本質の一部と見なすという共通の見地からの概念的背景を与えられるものとして期待されている。また最近では、複数の学習する主体を対象として、対話を管理することで主体同士の相互作用の場を作り上げ、状況的学習の直接的支援を試みた教育支援システムの例<sup>[64]</sup>も見られる。

一方、はじめの定義に基づいた構造主義的見地に立つと、学習とは広義の知識獲得であると言える。ただしここでいう知識獲得とは、数字の羅列やでたらめな文字を丸暗記するような単なる情報の取り込みのことではなく、取得された情報が学習主体により解釈され、汎化されたり既存の知識構造に組み込まれるなどして定着するまでの一連の過程を意味する。前者を無機的学習と呼ぶのに対し、後者は有意味学習と呼ばれ、Ausubelにより提唱されたものである。ここで「どのような知識」を「どのようにして獲得するか」という二つの観点から学習問題を概観してみる。前者について、まず「知識とは何か」という問い合わせに対し、例えば認知心理学における太田の言葉<sup>[65]</sup>を基にして「学習する主体が内的に保持している情報すなわち記憶で

あり、特に主体が外界を解釈し、外界と相互作用し、学習して行くときに道具として利用される長期的に保持されている記憶」と答えることができる。すると、道具として用いるためという知識を分類する基準として、知識の持つ意味と役割という二つが思いつく。知識の持つ意味は各々領域依存になってしまうため、役割によって汎用性のある分類を行うと、「オブジェクト知識」と「メタ知識」という分け方がある<sup>[64]</sup>。両者は厳密には相対的関係によって定義されるものであるが、オブジェクト知識とはある領域や対象に関する事実や規則を直接的に表わしたもの、メタ知識とはオブジェクト知識を用いて問題解決を行う際の制御情報など、オブジェクト知識の用い方についての知識といえる<sup>[62]</sup>。オブジェクト知識の獲得については、次に述べるようにさまざまなパラダイムが提唱されているが、メタ知識についてはその表現形式やオブジェクト知識との関係などについても、未だ確立されているとは言い難い。抽象化された知識の構造であるスキーマを用いて人間の理解のモデル化を試みたスキーマ理論の発展として、スキーマの持つ情報の取捨選択、補足機能を用いて、メタ知識の獲得過程のモデル化を試みる例などもあり<sup>[81]</sup>、今後の展開が期待される。

次に知識の獲得方法については、暗記学習、教示学習、演繹学習、類推学習、帰納学習など多くのパラダイムが提唱されている<sup>[61]</sup>。ただし上述のように、ここでいう知識とはオブジェクト知識を指す。これらは主に機械学習の研究視点から産み出されたものであり、よってどれも人間の学習のある一側面のみを、記号論という一つのアプローチによってのみ説明したものである。より広範かつ包括的な学習過程モデルの研究の経緯については、例えば安西がモデル化のアプローチという視点から概観している<sup>[63]</sup>。これによれば、現在までの学習モデルは三つの世代に分けることが出来る。第一の世代は主に心理学、情報科学などで1950年代半ばまでに手法が確立されてきた、数理的なモデルである。これはブラックボックスあるいは単純な状態構造を持つシステムが与えられた時、そのシステムへの過去の入出力関係から新しい入出力関係をつくり出す問題を扱う。典型例としては確率的状態遷移モデルが挙げられる。第二世代は70年代末までの、学習システムの内部表現およびそのコントロールメカニズムを主題にした記号表現モデルである。意味ネットワークの学習モデルなどが典型例となる。この世代の研究の多くは問題解決を状態空間上の探索と考え、問題解決における学習を経験などに基づく探索効率の向上と見なしている。第三の世代は80年代末までの、分散表現による学習モデルである。記号処理的なモデルでは状況の変化への対応が困難であることから、神経回路網を模擬した並列分散処理モデルによる説明が試みられた。無論この世代にあっても第一世代や第二世代のモデリング手法は進化しており、特に記号表現と分散表現はしばしばその優劣が論争の種となった。この分類に従えば、上記のパラダイムは第二世代に生まれたものとなる。

一方教育学的知見からは、帰納的な思考過程と演繹的な思考過程が新しい手続き

的な知識の獲得に関与していることが知られており、両者の組み合せによって学習が成り立つとするモデルが提案されている<sup>19)</sup>。このモデルでは学習を四つのステップから成るとしている。つまり(1)環境からの情報の取得、(2)取得された情報からの個別の規則としての知識の獲得、(3)知識の汎化、そして(4)知識の定着、である。(1)は学習の前段階ともいえるもので、個々の事実が低レベルの生データとして取り込まれる。この段階ではまだ学習主体によって解釈されていないという意味で知識とは見なされず、単なる情報として扱われる。(2)の段階は帰納推論による学習あるいは発見学習と呼ばれる過程の一部であり、前段階で取得した個々の事例から二つあるいはそれ以上の事象の因果関係を理解し、自分の望む状態を作り出すための手続きを見つけ出す。この段階で獲得した規則は全て状況に依存した形で理解されており、これが状況依存の知識となる。(3)の段階では前段階で獲得した規則を一般化することで規則の適用条件を見つけ出す。ここで知識は状況とは独立した形となる。(4)では(3)で汎化された知識を演繹的に問題解決に適用することによって知識を定着させる。これにより知識は状況独立な形でチャンク化され、どのような環境においても適用可能な規則として既存の知識構造に組み込まれるとされる。これら全ての過程を踏むのは発見学習においてであるが、例えば類推学習は(2)あるいは(3)の段階において雛型がある場合と見なせ、暗記学習、あるいは助言による学習は(2)および(3)において学習主体者自身が獲得および汎化すべき知識が他者あるいは環境から与えられるものとすることで表せる。よってこのモデルは人間の学習過程を表わしたものとしてある程度の汎用性が認められ、次節で述べるように、教育支援システム構築の際にそのシステムの位置付けを明確にするための規範モデルとして用いられることが多い。

### 1.3 訓練支援システム

計算機を用いて教育や訓練を行うシステムを一般に教育支援(Computer Assisted Instruction)システムと呼ぶ。このシステムにより教育を享受する者を学習者といい、学習者からシステムへの入力をオラカルと呼ぶ。教育の対象についての問題解決能力を持たず、学習者の理解度や誤りによらずに、基本的には、あらかじめシステム内に用意されたフレームと呼ばれる教材の系列に沿って情報を提示するという、同じ教示手法に基づいて教育を行なうものを、伝統的CAIと呼ぶ。これに対し、問題解決能力を持ち、高度個別教育と学習者・システム間の双方主導対話の実現を意図したものを、知的教育支援システムと呼ぶ。知的教育支援システムでは早くから、学習対象領域についての学習者の理解状態を表わす学習者モデルが用いられ、これに基づいた学習者毎の教示手法の選択、対話管理の策定が模索されてきた。また、学習者の誤りを解釈するための、誤りを含んだ知識からの推論アルゴリズムや、円滑な対話環境を実現するための自然言語、構文処理技術、マルチメディア技法、および教材知識を基に学習者の理解度に合わせた説明文を編集する手法から、概念立脚のための背景としての学習理論まで、記号論的人工知能工学、情報科学から認知

心理学に至るまで実に広範な知見が知的教育支援システムの研究には必要であり、一つの総合的学際分野を形成していると言える。さらにここで知的教育支援システムとは広義な意味で用いており、実際には教材知識に表わされた正しい知識に学習者の知識を同化させることを基本的な目的とした知的CAIシステムあるいはITS (Intelligent Tutoring System) や、学習者の自由な試行錯誤により創造的、発見的学習を期待したマイクロワールド型あるいはILE (Interactive Learning Environment: 操作型学習環境) など、従来からのパラダイムの延長線上にあるものの他に、最近ではITSでの教示対象の顕在性とILEの文脈独立性という長所の融合を目指したBLE (Bi-Modus Learning Environment)<sup>[117]</sup> や、前節でも触れた分散協調学習支援環境など、異なる学習理論に基づくパラダイムが混在しており、各々必要とする要素技術や概念的背景も大きく異なることを、注記すべきと考える。以下ではこの中でも最も研究の歴史が古く、広範で、本研究にも関わりの深い知的CAIシステム(ITS)について、その要素技術や研究例について述べる。

知的CAIシステムの草分けは、SCHOLAR という地理教育システム<sup>[137]</sup>である。SCHOLARは意味ネットワークで記述された地理に関する教材知識と、主導権混在型と呼ばれる優れた対話インターフェース機能を持ち、学習者からの質問を格文法によって解析し、得られた質問事項を教材知識によって処理し、その応答を文生成機能によって解答文の形で返すことができる。以後、各々の学習者の理解状態を的確に把握し、一方的な知識詰め込み型の教示ではなく、より適切な教育を施すために、知的CAIシステムに要求される機能として、主に以下の七つについて精力的な研究がなされている。

- 学習領域の問題に対する解答を作成できる機能
- 学習者の知識状態を的確に表現する機能
- 学習者の解答の正誤を柔軟に判定する機能
- 学習者の誤答の原因を同定する機能
- 学習者の理解状態に応じた教示指導を行う機能
- 学習者の質間に応答する機能
- 双方主導の対話を実現する機能

また知的CAIシステムの構成としては一般に以下の四つのモジュールが考えられており、各々で上記の機能のいずれかを担うことになる。

#### ○教材知識モジュール

狭義には学習者に教授すべき領域に関する知識を表わした知識ベースであるが、学習者への出題や、それに対応した解答、解説文などを作成する機能をシステムが持つ場合には、これを行う機構も含める。

#### ○学習者モデルモジュール

出題領域に対する学習者の理解度、あるいは学習者の知識状態を推論し、その結果を学習者モデルとして表わす。学習者の回答の正誤を判定する機構や、誤った知識を作成、推論したり、誤答の原因を同定する機構も含まれる。

#### ○教授戦略モジュール

学習者モデルに表わされた情報に基づき、与えるべき教示や問題、あるいはヒントなどを決定する。また学習者からの質問などの割り込みへの対処も行う。このモジュールがシステム全体の挙動を制御することになる。

#### ○インターフェース

狭義のインターフェース機能を担うもので、学習者とシステムとの対話を円滑にするための、自然言語処理のための辞書やパーザ、グラフィック入出力変換処理などの機構も含む。

これらの機能、モジュールの具現化に不可欠である五つの要素技術について、以下に簡単に言及する。

#### (1) 知識表現

知的CAIシステムで必要とされる知識は、教材知識および教授戦略知識である。教材知識のための知識表現には、意味ネットワーク、スクリプト、述語論理、フレーム、プロダクションルールなどがよく用いられており、対象とする教材の内容の性質、つまり事実関係のみを表現するか、原因、理由といった因果関係を表現するか、さらに手続き的な知識を取り扱うか、などによって適したもののが選ばれている。いずれを用いるにせよ、適切な学習者モデルの構築や教授戦略の策定のために学習する内容について過不足なく表わせること、学習者との円滑な対話のためになるべく自然言語との親和性の高いこと、問題や解答の作成に用いられるためにシステム内部での知識編集処理のし易い形式であることなどが、教材知識の知識表現には求められる。教授戦略知識の表現には、教授戦略の選択や割り込み入力時の対応などを記すために、プロダクションルールのような手続き的な知識表現が多く用いられるが、学習者の理解状態によって説明の詳細度を変えた教示を行うためにフレーム表現が用いられる場合や、関連した問題の選択のために意味ネットワーク表現が用いられる場合などもある。ただしこれらの場合は教材知識の一部を教授戦略知識として流用することが多い。

#### (2) 問題、解説生成

CAIシステムでは一般に、教材知識の整備に多大な手間がかかる。特にドリル型や紙芝居型の伝統的CAIシステムでは、出題内容とそれに対する回答、および想定される学習者の誤りに対する説明文をあらかじめ全て用意しておかねばならず、その作業量は膨大である。このため学習領域に関する基本的な知識の集合から学習者に対する問題や解説を生成するオーサリングシステムが、CAIシステムの実用化の一つの鍵として注目されるようになった。最近の知的CAIシステムではオーサリン

グシステムを教材知識モジュールに組み込んで用いる場合も見られ、学習者モデルに表わされた学習者の理解状態から、教授戦略知識によって駆動され、問題や解説を生成する。よってこのための技法は教材知識の知識表現手法や内容に大きく依存する。例えば人工物の挙動理解を学習対象とした場合に、その挙動の背後にある物理法則などが教材知識に記述されていれば、表面的な挙動の説明だけではなくその理由の説明も生成することが可能である<sup>[91]</sup>。反対に、教材知識に人間教師の行う推論方式や問題解決手法が記述されていない場合は、これをそのまま用いて解説を生成すると学習者の混乱を招く恐れがあり、教材作成のための別の知識を用意する必要がある。

### (3) 学習者モデル

学習者モデルの構築手法を、主に学習者の持つ誤った知識の表現方法、あるいは学習者が誤りを犯す過程のモデル化という視点から整理したものを、以下に述べる。

#### a. オーバレイモデル

学習者モデルを教材知識の部分集合として表現する方法。教材知識の構成単位ごとに、その知識を学習者が有していることを示す十分な証拠が得られたとき、その知識を学習者モデルに含まれるものとする。この手法はモデルの構築がきわめて容易である反面、学習者の知識の不足と知識の誤りとを区別してモデル化することができない。

#### b. バギーモデル

学習者の持つ誤り（バグ）をモデル化するバグモデルの一つで、あらかじめさまざまな誤答の解析から誤った知識を抽出し、正しい知識とともにネットワーク形式で表わしたもの。Brown らによる BUGGY システム<sup>[82]</sup> で初めてバグの概念を取り入れたモデルとして高く評価されたが、バグ解析のための作業量が多い上にバグが全く領域依存で汎用性がない、事前に想定したバグ以外は表わせないなどの欠点がある。

#### c. 再構成型モデル

バギーモデルの表現能力を高めるために、誤った知識や概念をネットワークではなく小さな基本単位のモジュール構造として正しい知識とともに表わしておき、それらの組み合わせによって学習者の持つ誤りについての仮説空間を生成し、学習者の回答によりその検証、選択を行うもの。学習者の一連の回答を一度に受け取り解析するオフライン型と、逐次的に回答を受け取るオンライン型がある。領域依存のバグ解析のための作業量が多いという欠点はバギーモデル同様である。

#### d. パータベーションモデル

バグを正しい知識に何らかの摂動が加わったものと見なし、この摂動を汎用の手続き的知識の形で用意しておき、これを正しい知識に適用することで学習者の回答の説明を試みるもの。領域依存の正しい知識と、領域独立の摂動とを分けて記述できるため汎用性に富み、作業量も少ないという長所を持つが、摂動や、それを適用する正しい知識をいかに選択するかという問題が残る。

#### e. 論理プログラムモデル

学習者の回答事例やプロトコル情報から帰納的に学習者の理解の状態を推論し、学習者モデルを構築する、帰納推論法の一つであり、モデルの記述にPrologなどの論理プログラム言語を用い、学習者の誤りをバグを含んだプログラムとして表わす手法。例えば河合ら<sup>[93]</sup>は帰納推論アルゴリズムにShapiroのMIS (Model Inference System)<sup>[95]</sup>を用いた例を提案している。MISは有限個の正の事実集合と負の事実集合から、それらを証明するPrologのプログラムを合成するシステムである。誤りに対する教示指導は、合成されたプログラムのデバッグに相当することになる。

#### f. ACM (Automatic Cognitive Modeling)

これも帰納推論法の一つであり、あらかじめ問題の解決に必要な基本オペレータを定義しておき、学習者がそれらを用いた履歴から、基本オペレータの適用条件を帰納推論によって求め、この適用条件を条件部、基本オペレータを実行部としたプロダクションルールによって、学習者モデルを構築するものである。Langleyら<sup>[97]</sup>によって提案された。学習者の回答を説明する基本オペレータの系列をいかに効率良く探索するかが課題となっている。

#### g. 診断型モデル

学習者の回答を説明する正しい知識やバグ知識の集合を、仮説推論によって求める手法。再構成型モデルと類似だが、推論手法が帰納的か診断的かというアプローチが異なる。Self<sup>[76]</sup>は故障診断エキスパートシステムで用いられるGDE (General Diagnostic Engine) を用い、バグ知識を故障仮説の候補と見なして、ATMSを用いた仮説推論により学習者の回答を説明する最小のバグ知識集合を求める手法を提案している。

#### h. 原因分析型モデル

バグの再現のみならず、バグの発生した原因、過程も考慮したモデル。BrownによるRepair理論<sup>[98]</sup>では、学習者が誤りを犯す過程を、まずImpasseと呼ばれる困難な状況に遭遇し、それを解決するために修復操作 (repair) を行うものとしてモデル化し、repairを必要とするようなImpasseを作り出した原因を、バグ原因であるとしている。ただしRepair理論ではこのバグ原因として正しい知識の欠落のみを考慮したため、誤った知識の適用によって引き起こされるバグをモデル化できなかった。これは後にVanlehnによって一部改良され、過度の汎化や特殊化もバグ原因として考慮するSIERRAシステム<sup>[99]</sup>が作られた。

#### i. プロセスモデル

Matz<sup>[103]</sup>は、学習者の誤りを、バグモデルのように誤った知識の正しい適用のみによって生じると見なすのではなく、正しい知識の誤った適用によっても引き起こされると考え、学習者が既存の知識を用いて問題解決を行なう際に生じる誤りを以下の三つの組み合わせとして表わしている。

1. 既存の知識そのものの誤り
2. 既存の知識を新しい問題に適用する際の補間手法の誤った選択

### 3. 問題解決時の実行失敗

このモデルも原因分析型モデル同様、学習者の問題解決過程をモデル化を試みた点に特色がある。

また、以上では誤りの表現方法という観点だけから学習者モデルを整理したが、例えば実行可能性といった他の視点も忘れてはならない。これは学習者モデルに表わされた知識あるいは推論手法を用いて学習者の回答過程がどれほど再現できるかを見るもので、学習者モデルの妥当性の評価のためだけではなく、学習者の回答や問題解決過程を予測して教授戦略に役立てるためにも重要である。特になるべく学習者と同じように問題解決を行うことが望まれる BLE や分散強調学習支援などでは、要であると考える。

## (4) 教授戦略

知的 CAI システムの教授戦略は、以下の二つに大別できる。

### a. 対話型教授

学習者モデルに表わされた知識と教材知識を比較し、抽出された学習者の誤りを直していくよう教示を行なう方式である。一般に、教示は誤りに関する解説や質問によって進められていく。特にソクラテス的対話法と呼ばれる、学習者自身の思考を促すような対話によって教授を進める手法については、実用例も多く、効果を裏付ける成果も多く報告されている<sup>[69]</sup>。この方式で、教授行動を体系的にまとめた例としては、Woolf による Meno-tutor における DMN (Discourse Management Network) が著名である<sup>[69]</sup>。DMN では一つの教授行動を一つの単位（ノード）として、様々な教授行動を抽象度により三つの階層に表わし、異なる階層にあるノードで、抽象度の違いによる関連があるものをリンクで結んでいる。同じ階層中のノードは各々教授行動の異なるモードを表わすことになる。Figure1-2 に DMN を示す。学習者の応答によりモードを選び、リンクを辿ることにより、様々な戦略および抽象度の教授を行うことが可能となっている。

### b. 環境型学習

ある技能を習得させるために、その技能を必要とする環境を教材として学習者に提示し、システムは学習者の振る舞いを監視しながら、必要に応じて適当な助言や指示を与える方式である。学習者は与えられた環境中の体験を通じて技能を習得することが期待されるが、何をどこまで学んだかが明示的に分からぬといふ欠点があり、これがILEからBLEのパラダイムの必要性を生み出した源である。

## (5) インタフェース

インターフェイスはCAIシステムが学習者にとって「知的」に見えるか否かの要とも言える。CSCW のように計算機が人間同士のコミュニケーションのための黒子として振る舞う場合と異なり、CAIシステムでは計算機と学習者との直接的な対話が円滑に行われなくてはならない。このための、インターフェイスに関する技法は、二つに大別できる。つまり人間との入出力に用いられるまさに物理的なインター

フェイス部分に関するものと、入力の解釈や出力の生成のための内部処理に関するものである。前者については、学習者からの入力はキーボードとマウス、出力はディスプレイモニタという構成は、残念ながら従来からあまり進歩していない。最近では音声、特に音声出力が多用されてきているが、仮想現実感生成技法や画像処理技法を用いた革新的なデバイスが、今後は期待される。後者については、自然言語処理など、CAIシステムの内部表現形式と、学習者向けの表現形式との変換技法が焦点となる。自然言語による対話はその実現が最も期待され、研究の歴史も古いが、未解決な問題も多く、制限された範囲の文のみを取り扱っているのが現状である<sup>[38]</sup>。しかし、ある問題領域における教示指導行為という限定された状況では意味を特定しやすく、また文脈や常識を処理するための背景となる知識が教材知識としてすでに用意されているなど、扱いやすい面もあり、今後の研究成果が期待される。また学習者への出力に関しては、語学や人工物の挙動理解を課題としたCAIシステムを中心に、マルチメディア技法の応用が近年急速に進んでおり<sup>[105]</sup>、その実用性の高さから今後の発展が注目される。

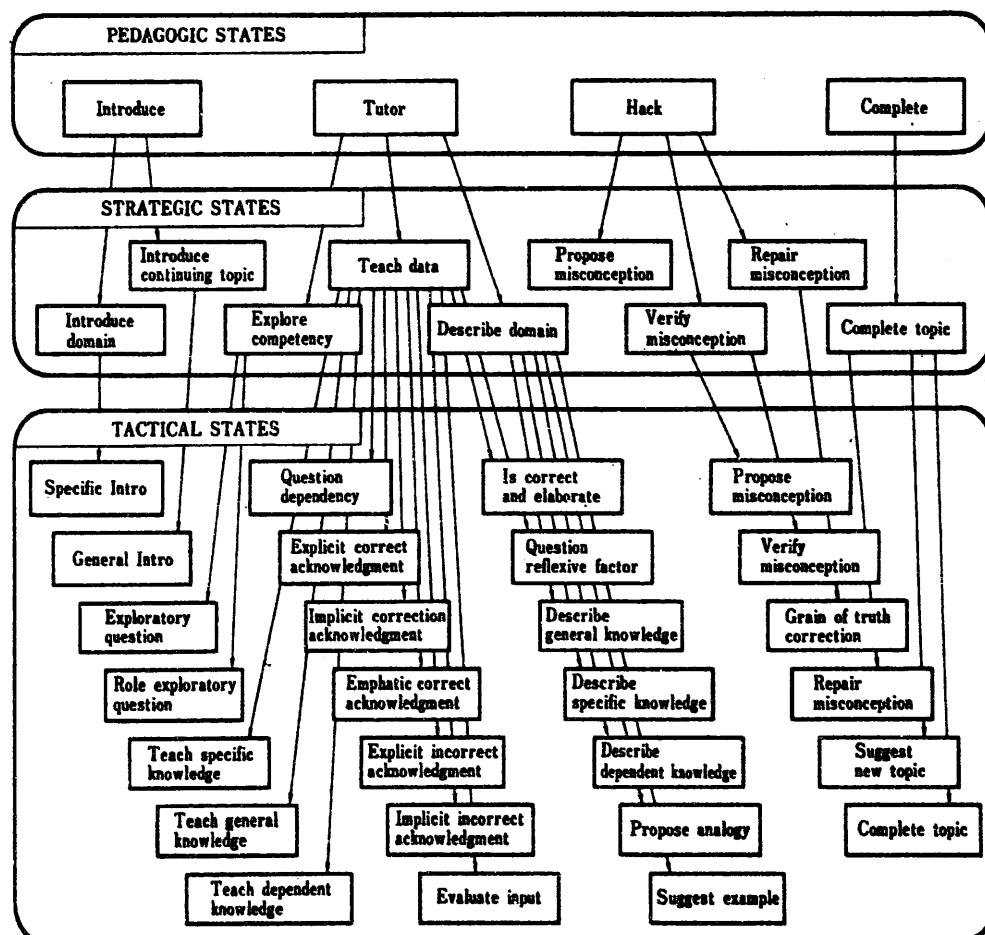


Figure 1-2 Discourse Management Network Proposed in Ref.69

以上のように知的CAIシステム実現のための課題は複雑多岐にわたり、どれも計算機による教育支援の実現には不可欠なものである。しかし、適切な教授戦略は適切な学習者モデルが構築されなければ成り立たないこと、さらに学習者モデルの適切性はその知識構造表現に依ることから、本研究ではプラント訓練支援システムを構築するために適当な、学習者モデルの知識構造表現および学習者モデルの構築手法に、焦点を当てることにする。次節で過去の研究実例をいくつかを見た後、1.5節でこのための課題を整理する。

## 1.4 プラント操作訓練支援システムの研究例

プラント操作では学習対象とする範囲が広範で多岐にわたることから教材知識の作成に労力が費やされ、教授戦略自体は単なる問題と解答の表示といったプログラム学習的なものが多かった。さらに作業員の学習レベルに応じた教示を行なえないため教育効率が悪い、教材が設備の構成や機能の解説に重点をおいているため異常時、事故時における過渡応答の進展理由がわかりにくい、などの技術的課題も有し、これらの問題点を解決した知的CAIシステムの開発が望まれている。

これに対し、例えば秋吉、西田<sup>[5]</sup>は、プラントの振る舞いを物理パラメータの定性的な因果関係で記述し、それをいくつかの機能的抽象度に分けて表わした階層型定性因果モデルを、学習者の操作対象プラントに対するメンタルモデルの構造表現であるとして、階層型定性シミュレーション環境を持つ訓練支援システムを構築している。学習者はその環境の中で、自らのメンタルモデルをプラントの定性モデルとして表わし、シミュレーションを行うことで誤りや矛盾を訂正して、自主的に正しいメンタルモデルを構築することが想定されている。Figure 1-3にこの教示手法の流れ図を示す。これは学習者の自主的なメンタルモデル形成を支援することで、ナレッジベースの問題解決行動の訓練を図った例として、興味深い。また横田、氏田ら<sup>[6]</sup>はプラントの機能を抽象度の階層構造として表わした機能階層モデルに、操作手順や操作開始のための条件などを組み合わせたモデルを学習者モデルとし、これに基づいて理解レベルや弱点に応じた教示が行なえる、緊急時運転手順の教育システムを構築している。Figure 1-4にこの学習者モデルの構成を示す。笠井、大井<sup>[7]</sup>はプラントの挙動理解を主眼とした訓練支援システムの中で、対象システム中のプロセス量変動の定性的な波及効果、つまり定性因果関係をペトリネットにより表わし、対象モデルと同時に学習者モデルとしても用いている。吉村<sup>[8]</sup>は、原因と結果の組として表された事象を教育単位として階層的に教材知識を構築することにより、学習者の理解度を判定、個別指導を可能とした訓練支援システムを構築している。この階層的教育知識表現の概念を、Figure 1-5に示す。またプラント診断知識の学習において、一つの学習対象を異なる方法で学習者に解答させ、学習者の理解の曖昧さも表現可能としたもの<sup>[9]</sup>や、問題解決時の運転員のメンタルモデルを機能

階層モデルとして表わし、プラント操作の目的論的理理解の支援を試みた例<sup>[10]</sup>もある。但し各々の研究で機能階層モデルにおける抽象レベルや因果モデルにおける表現手法はさまざまであり、さらにこれらのモデルの扱い方は少なくとも学習者モデルとして用いる場合と教材知識として用いる場合で異なる。例えば前者は矛盾や不整合も含みうる、動的なモデルとして扱われる一方、後者は健全かつ完全な静的なモデルとして表現される。但し学習者モデルを教材知識からのオーバーレイモデルやバグモデルとして表す場合は、両者の差異は明確ではなくなる。

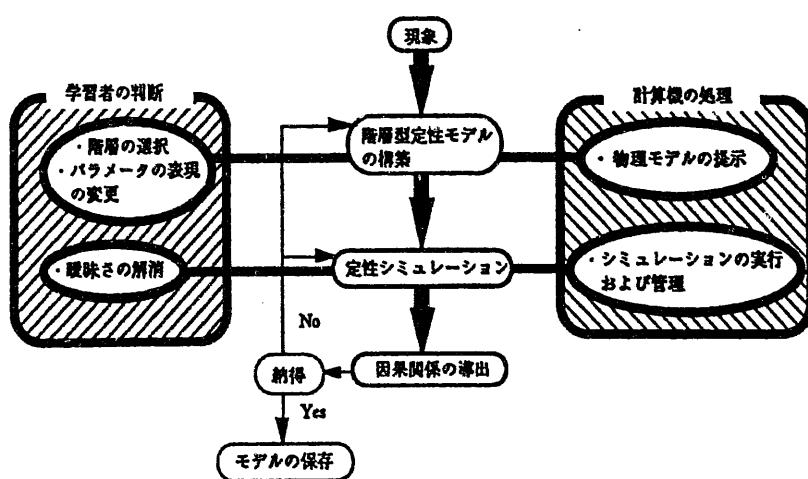


Figure 1-3 A supporting environment for causal understanding proposed in Ref.5

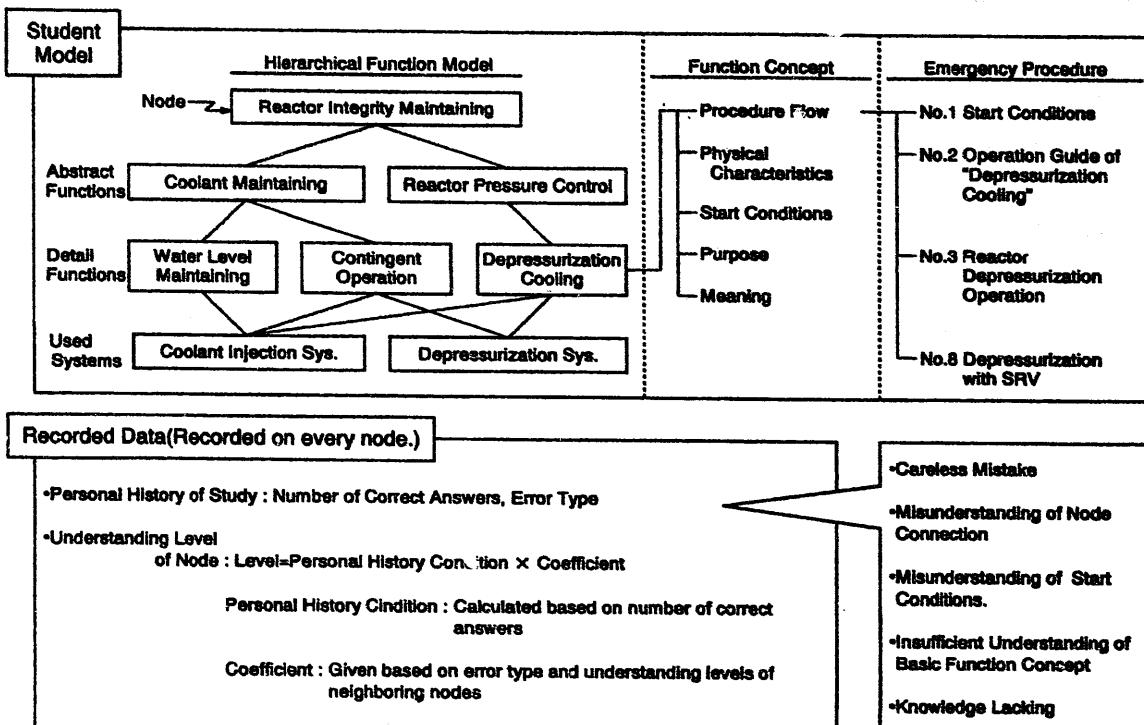


Figure 1-4 Basic constitution of student model in Ref.6

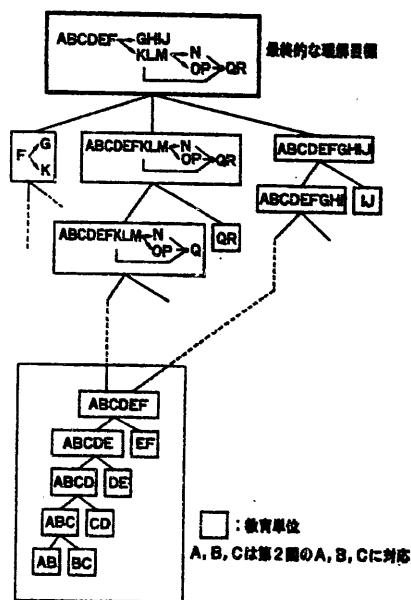


Figure 1-5 Hierarchical structure of domain knowledge in Ref.8

## 1.5 本研究における前提と基本姿勢

本研究ではナレッジベースの問題解決能力の育成に寄与するプラント操作訓練支援システム実現のために、学習者モデルの知識構造表現および学習者モデルの構築手法を提案すると、前節までで述べた。しかし研究の具体的な指針を定めるためには、以下の二点をさらに明確にする必要がある。

- プラント操作においてナレッジベースの問題解決行動が要求される場合とは具体的にいかなる状況と定義されるか。
- 何をもってナレッジベースの問題解決能力の育成に寄与するとするか、またそのために学習者モデルにはどのような情報が表わされていなければならないか。

前者の点については、ナレッジベースの問題解決行動の定義や、プラント操作の訓練の行われ方を鑑み、「想定外事象に対する対応操作時」とする。ただしここでいう「想定外事象」とは、訓練時に想定されておらず、操作マニュアルに対応操作が明定されていないものを指し、その生起が合理的な思考からは導き出せない事象を意味するものではない。この解釈は、全ての工学システムの設計や運用は、リスクや生起確率の適切な評価を基に、想定する異常事象と想定しない異常事象とを明確に分けた上で行われていると考えられること、特に原子力発電プラントについては、この考え方方が安全設計上の指針として明文化されていること<sup>[65]</sup>から、妥当であると考える。よって本研究では以後、ナレッジベースの問題解決行動を、ここで定義した想定外事象に対する対応行動と同一視する。人間の認知活動は、実際にはかなり厳密なプロトコル解析などをもってしても同定が困難であるため、この前提を置くことは特に実験時の状況設定や結果の評価をする上で重要である。

次に後者の点について、いかなる知識あるいは技能を習得することが、想定外事象に対する対応能力を向上させるかをまず考える。ここで、機能の状況依存性に注目する。これは、ある物体なり機構なりの機能が、それが用いられる際の状況や、それを用いる者が持つ既存知識に依存して解釈されることをいい、特に対象を既存知識による慣習的機能にしたがって表象する固執傾向、つまり普段見慣れた、使いなれたものを新しい機能を持つものとして見なし難い現象を、機能的固定と呼ぶ。これを立証する実験の一つに、Dunkerによるロウソク問題がある<sup>[68]</sup>。Figure 1-6 に示すように、机上に一箱の画鉢と何本かのマッチ、ロウソクがある。彼は被験者に、ドアにロウソクをつけるよう要求した。しかしドアの面は垂直であるので、ロウソクを普通に立てることはできない。これに対する正答は、ドアに箱を画鉢で固定し、その箱をロウソクの台として用いることである。図示した状況では被験者が箱を容器としてしか見なせない機能的固定が起きるために、箱に台としての新しい機能を見い出すことが困難であり、箱が画鉢で一杯であるほど箱を容器と見る認知を強化するために作業の困難度が増した。

ここで想定外事象における問題解決行動の様式を考えると、想定外事象の定義から、操作対象が通常時に持つと見なしている機能だけを考慮しては不十分な場合が多いと思われる。よって本研究では、通常時には見い出しにくい、対象の持つ新たな機能を示唆することが、想定外事象への対応能力を向上するものと考える。

次に、いかなるモデルに基づいて、この新しい機能の示唆を与えるかを考察する。本研究で対象とするようなプラントシステムの挙動は、ある程度の近似を行えば、全てシステムに内在する物理パラメータ間の局所的な因果則によって表わされると考えられる。これはシステムの物理的構成が決まれば唯一無二に定まるものであり、システムの各部分の役割や作業目的といった、システムを扱う人間の解釈に依存しない。よってこの局所的な因果則を用いてプラントシステムを記述したモデルを構築すれば、システムの各部分の持ちうる限りの機能をその因果則から導き出すことが可能であり、通常時には想定していない機能についても、通常時に見なされている機能と全く同様に導出することができると考える。これはde Kleerらが提唱した、工学システムの構造からエンビジョニングと呼ばれる技法によりそのシステムのとりうる限りの状態を表わせるモデル（これを本質的機構と呼ぶ）を抽出すれば、その中から実際に起きている現象（これを機能的証拠と呼ぶ）に基づいて、現在のシステムの状態を説明するただ一つの因果モデルが選択できるという概念<sup>[70]</sup>と同じものである。

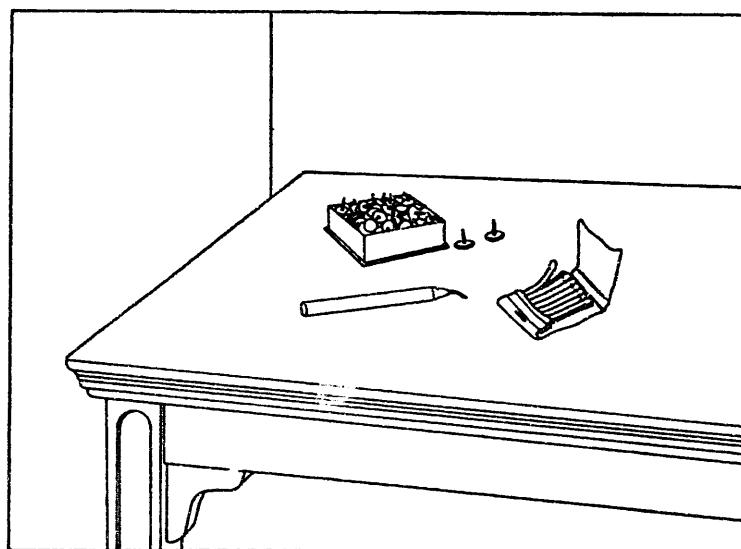


Figure 1-6 Situation used in the experiment by Duncker (Ref.68)

ここまで前提および考察から、学習者モデルに表わされるべき情報が明確になる。つまり、訓練対象としているプラントシステムの挙動を上述のような局所的因果則で表わした場合、それから導き出される、システムのある部分についての複数の機能のうち、学習者がどの機能を知っている、あるいは用いているかが表わされればよい。そして、この情報に基づき、学習者が知らない、あるいは用いていないと予想される新たな機能を示唆してやれば、上述の前提により、それが想定外事象に対する適切な問題解決行動の育成に寄与することになる。

以上に述べた考えは、以下に示す意味で教育支援システムにおける新たなパラダイムを提唱するものと考える。つまり、今までの知的教育支援システム、特に知的CAIシステムにおいては、正しいもの、誤っているものという概念が明確にあり、それが全てオブジェクト知識として表わされていた。これは正しいとされるオブジェクト知識を習得することが、教育の目的であることを意味している。これに対し本研究では、正誤の概念を陽に持たず、学習者が気付いていないと思われる機能を推論し、示唆を与えることで、通常とは異なる見方、考え方が要求される場面において新たな視点を提示し、問題解決を促す。つまり、中立的な因果律から目的指向的な機能、操作が導き出せることの明示によって、そのような推論能力を強化するという方略をとる。これは教育の結果習得されるべき対象としてオブジェクト知識の用いられ方を考えていることを意味し、大袈裟な言い方を御容赦頂ければ、メタ知識の習得を目指した教育支援システムに向けた試みと考える。また同じく正誤の概念を明確に持たないILEと比較すると、学習者に何を理解させるためにどのような知識をいつ与えればよいかをアルゴリズム的に明定できる点が、アドバンテージであると考える。以上の前提及び基本的立場に基づき、次節に本研究の目的をまとめるとする。

## 1.6 本研究の目的

SRKモデルでいうナレッジベースの問題解決行動を訓練するプラント操作訓練支援システムを開発することは、想定外事象への的確な対応という、操作員に要求される役割に鑑みて意義のあることと考える。訓練支援システムでは、学習者が問題解決に用いた知識を推測して学習者モデルを構築することが、要求される一つの重要な機能である。しかし従来の研究では、学習者モデルの表現、構築手法とともに、ナレッジベースの問題解決行動を対象とする訓練支援システムには十分とは言えなかつた。

ナレッジベースの問題解決行動では、操作対象の心的表象であるメンタルモデルが参照されると言われている。メンタルモデルにはプラントの挙動や操作に関して操作員が持つ知識が表わされているが、プラントの各部分の機能は状況依存であり、特に想定外事象への対応時には、通常時に想定された機能とは異なる機能を見い出し、利用することが求められる場合が多いと考える。

以上より本研究では、プラントの構造から導出されるが通常時には必ずしも明白ではない機能を示唆することが、想定外事象への適切な対応能力の育成に寄与するとの前提にたち、上記のような訓練支援システム構築のためにふさわしいと思われる、プラント操作員のメンタルモデル構造表現を提案し、その上にプラント各部分の機能についての学習者の理解状態を表わした学習者モデルを構築する手法を開発することを、目的とする。

## 1.7 本論文の構成

本論文は6章構成である。2章ではプラント操作における過誤の原因を、手段目標解析に基づき同定する手法を提案し、実験により操作員のナレッジベースの問題解決行動を手段目標解析で表わすことの限界を示す。3章ではこの結果を踏まえて、操作員のメンタルモデルの構造表現を提案し、実験により、同表現を想定外事象への適切な対応を訓練する訓練支援システム内で、学習者モデルの枠組みとして用いることの妥当性を調べる。4章ではプラントの構造と状態から、ある目標状態を達成するための操作手順を枚挙し、プラント各部の状況依存の機能を導出する手法について述べる。5章では4章で求めた操作手順を参照して、3章で提案したメンタルモデル構造表現上に学習者モデルを構築する手法を提案し、これに基づいて構築したプロトタイプの訓練支援システム、および同システムを用いて手法の妥当性を調べた実験について報告する。6章に本研究の結論をまとめる。

## 2章 手段目標解析に基づいた過誤原因の同定

前章にも述べたとおり、学習者の学習進捗度に合わせた個別指導は、訓練支援システムに要求される重要な機能の一つである。このためには、訓練支援システムはその内部で学習者の誤りの原因を推測し、その結果に基づいて適切な教示指導方略を決定できなくてはならない。本章ではナレッジベースの問題解決行動のモデルの一つである手段目標解析を基に、プラント操作員の目標駆動の計画作成行動における誤りの分類とその同定手法を提案し、作成した訓練支援システムのプロトタイプを用いた実験により同手法の検証を行う。

### 2.1 過誤原因に関する過去の研究

人的過誤を分類することは、対象とする領域における人間の振る舞いや人間と機械の相互作用の体系化に寄与し、その結果を人間機械系の設計や評価にフィードバックできることから、航空機や発電プラントなど大規模かつ複雑な人間機械系を取り扱う分野でも多くの分類が提案されている。

人的過誤の分類には大きく二つのアプローチ、つまり行動論的アプローチと因果論的アプローチがある。前者の一例として Swain & Guttman<sup>[28]</sup> は、人間信頼性解析 (HRA) のためにオミッショ n、コミッショ n といった人的過誤の基本的な範疇分けを提案している。氏田<sup>[29]</sup> は人的過誤をタスクタイプ、過誤原因、過誤検知の状況という三つの側面から分類し、このうちの二つを組み合わせたマトリクスにより、Licensee Event Report に報告された事例を解析した。また Hollnagel<sup>[40]</sup> は人的過誤の表現型と因子型を明確に区別し、過誤的行為をオンラインで検出する監視装置作成のために、前者の分類を提案している。これらの分類は行動論的アプローチを探っており、「何が起きたか」に注目している。この見地は過誤的行為のパターンや、そのパターンと環境や時間など他の因子との相関を調べるには適しているが、「過誤防止のために何をなすべきか」という、訓練の主題でもある問題に対して与える手がかりは少ない。

一方因果論的アプローチは、人的過誤を引き起こす人間の認知メカニズムに注目している。Rasmussen ら<sup>[41]</sup> は、原子力発電プラントにおける人的過誤に起因する異常事象の分析を体系化するために、人間の情報処理過程という観点から過誤の分類を行っている。Rouse & Rouse<sup>[42]</sup> も同様の観点に立ち、航空機を例として操作員のタスクの概念モデルに基づいた過誤の分類を提案している。この分類には一般および固有の二つの範疇があり、前者では人的過誤の起きる情報処理過程を分類し、後者では各々の過誤的行為についてその特質を述べている。Reason<sup>[43]</sup> は Rasmussen のSRK モデルに基づき、人間の一般的な問題解決行動を手続き的に表わした概念フ

フレームワーク GEMS (Generic Error-Modelling System) を提唱し、これに基づきスキル、ルール、ナレッジベースの認知行動レベルごとの過誤の分類を提案している。

人間信頼性解析の分野においても、人間の振る舞いを認知作用という視点から見直すことの重要性が認識されつつあり、特に因果論的立場からの人的過誤やその原因の分類に関心が寄せられている（例えば<sup>[44, 45]</sup>）。Cacciabue & Hollnagel<sup>[46]</sup> は、人間と機械のダイナミックな相互作用を記述するためのフレームワークの中で、人間の認知的振る舞いを SMoC (Simple Model of Cognition) として表わし、そこで用いられた四つの認知ステップ各々における過誤の表現型とその原因の範疇分けを提案している。Beare ら<sup>[47]</sup> は、操作手順の指示が与えられている状況下で、プラント操作員がその情報検知、診断、および意思決定段階において犯しうる過誤に寄与する因子を分類した。この因子は Macwan & Mosleh<sup>[48]</sup> により行動影響因子 (Performance Influencing Factor) としてもまとめられている。彼等はこの因子を用いて、操作員が非常時の操作手順を遂行する際に意識下において犯すコミッショニングエラーを模擬するための、シミュレーションモデルを提案している。Visciola ら<sup>[49]</sup> は、航空機シミュレータを用いたパイロット訓練中の過誤事例を整理するための指針として、過誤原因を人間の認知過程に求め、実用的な分類を示している。

これらの研究では過誤の根底にある因果的要素、つまり人的過誤の原因を体系的に表わそうとしており、それぞれに提案されている手法は、人間機械系の操作員を訓練する指導者にとって非常に有用なものであろう。しかしながら、これらの分類は以下の条件の両方を満たしてはいないという理由から、本章で用いるには不適切である。まず、分類された人的過誤の原因是、知識の誤りなど、具体的かつ直接的に矯正可能なものでなくてはならない。たとえば「誤った推論」<sup>[49]</sup> といった過誤原因の範疇は、不十分である。なぜなら、学習者が正しく推論できなかった理由こそが、適切な訓練支援のためには重要であると考えるからである。次に、各々の原因是、コンピュータによって合理的に同定できるものでなくてはならない。たとえば「確証の先入観」<sup>[43]</sup> といった心理的要素は、過誤の原因の一つとは考えられるが、人間の経験による判断に頼らずにはその同定は困難であると思われる。これらの理由により、本章では単純かつ有用な独自の人的過誤の原因の分類を模索することとした。

## 2.2 過誤原因の分類と同定手法

本章ではプラント操作における目標駆動の計画作成問題を対象とする。操作員は Rasmussen による SRK モデルでいうナレッジベースの行動をとり、定められた目標を達成するために、状況判断の下、領域知識を用いて操作計画をたて、計画に含まれる単体操作を逐次実行してゆくものとする。領域知識は操作の内容と操作の適用判断に用いられる知識から成る。十分かつ正しい領域知識から合理的な計画作成手

法により導出された操作手順を標準手順と呼び、これを本章では与えられた計画作成問題に対する正解とする。

ナレッジベースの計画作成行動を情報処理モデルとして表わした代表的な例として、Newell & Simon<sup>[53]</sup> の一般問題解決器 (General Problem Solver) で用いられた手段目標解析がある。本章ではこれを、対象とする操作員の認知活動を表わすモデルとして用いる。手段目標解析では、計画作成者は (1) まず操作対象の現在の状態と目標とする状態との差異を求め、(2) この差異を減じるために適切な操作を選択し、(3) 操作を実行して新たな状態に遷移する、という三つのステップを繰り返し行う。ここでは操作を選択する段階をさらに三つのステップに分け、計画作成者は (2-1) 操作の実行によって達成される状態を予測し、(2-2) 現在の状態における操作の実行可能性を調べ、(2-3) すでに計画された他の操作との競合を調べる、と仮定した。これら各々の段階における誤りが、過誤的行為の原因になると想え、以下の七つを、仮定したプラント操作員の計画作成行動における過誤原因の項目として提案する。

最初の、状態間の差異の評価を行う段階では、操作員は現在の状況を誤認する（過誤原因 1、C1 と記す）可能性がある。適切な操作を選択する段階では、操作の想起失敗 (C2)、操作の効果の誤解 (C3)、操作の選択条件の誤解 (C4)、操作の前提条件の誤解 (C5)、そして操作間の競合の誤解 (C6) が、過誤原因として挙げられる。ただし操作の選択条件とは、その操作が嗜好される状況を記したものであり、実行可能な操作が複数あった場合の選定に用いられる。さらに問題解決過程における混乱 (C7) は三つのすべての段階で起こりうる過誤原因である。目標状態はあらかじめ陽に与えられるとしているため、目標状態の誤認は考慮しない。また操作の実行段階における誤り、つまり操作の実行し忘れや意図しない操作を実行してしまう過誤は、一般にスリップあるいはラップスと呼ばれる過誤であり、これは混乱 (C7) に属するものとした。以上の過誤原因の分類のまとめを Table 2-1 に示す。

Table 2-1 Classification of cause of trainee's error

Step in Means-end Analysis		Cause of Error	
Assessment of difference		Misunderstanding the present state (C1)	
Selection of operation	State prediction	Misunderstanding the effects of operation (C3)	Recall failure of operation (C2)
	Applicability check	Misunderstanding the preference conditions of operation (C4)	
		Misunderstanding the prerequisites of operation (C5)	
	Conflict check	Misunderstanding the conflicts between operations (C6)	
Execution of operation		Confusion (C7)	

次に、操作員の言動から過誤の原因を上述の項目に同定する手法を考える。これには二段階の処理を行う。つまり、まずいくつかの簡単な基準を用いて過誤の型を同定し、次いで質問により原因の絞り込みを行う。

過誤の型を同定するための基準には、以下の四つを用いた。

CR0: 操作が現在の状況で実行可能であるか。

CR1: 操作による効果が、現在の状況ですでに全て満たされているか。

CR2: 操作が標準手順に含まれているか。

CR3: 操作による効果が、標準手順に含まれる他の操作により達成されるか。

これらの基準により過誤を八つの型に分類し、各々の型ごとに原因となりうる項目を対応づけた。Figure 2-1 に概要を示す。

たとえば操作員が行ったある操作が、標準手順で次に行うとされている操作と異なり、基準CR0とCR1が満たされたとする。この場合、その操作は実行可能ではあるが冗長な操作であり、考えられる過誤原因としては現在の状況の誤認(C1)、および操作の効果の誤解(C3)が挙げられる。基準CR0とCR2が満たされ、CR1が満たされない場合は、操作省略(オミッショナエラー)あるいは順番間違いであり、その原因項目には操作の想起失敗(C2)および操作間の競合の誤解(C6)が挙げられる。操作省略か順番間違いであるかは、その後の操作を追えば判別可能であるが、ここでは誤った操作を行った直後の原因同定のみを考えているため、これ以上の判別は行わない。CR0およびCR3が満たされ、CR1とCR2が満たされない場合は、操作の意図は正しいが操作の選択の誤りを犯したと判別される。この型の過誤に考えられる原因是、操作の想起失敗(C2)および選択条件の誤解(C4)である。CR0のみが満たされ、他の基準が全て満たされない場合は、操作は実行可能であるが操作の意図も誤っているとし、操作の想起失敗(C2)および効果の誤解(C3)を原因の候

補として挙げる。

CR0が満たされない場合は、実行不可能な操作を選択したことになり、その原因として現在の状況の誤認 (C1) および操作の前提条件の誤解 (C5) が挙げられる。この型と、上記の四つの型の組み合わせにより、さらに四つの過誤の型を設定する。これらの型に対応する原因項目は、二つの型についてそれぞれ挙げられている項目の論理和である。たとえばCR1が満たされCR0が満たされない型に対して挙げられる原因項目は、C1、C3 および C5 である。

各々の過誤の型について挙げられた原因項目を絞り込むために、操作員に対して、領域知識や操作対象の状態などを問う質問を出す。たとえばC1 および C3 が原因の候補として挙げられている場合、プラントの状態および行った操作の効果について、それぞれ操作員に質問する。もし前者の質問に対しては正しく回答したが後者に対しては正答できなかった場合、C1 を候補から削除し、過誤の原因はC3 であったと判定する。操作員が全ての質問に正答した場合、候補には何も残らない。この場合は混乱 (C7) が原因であるとする。Table2-2 に各々の原因項目に対する質問、および回答の判別基準を示す。質問文や複数の項目に対する質問の順番などは、操作員にヒントや求められている正答を与えないよう考慮して策定している。

Identification Criteria		CR0 Is the operation applicable under the present circumstance?		Error Cause	Error Type
		Yes	No		
CR1 Have all goals of the operation already been attained?	Yes	C1, C3	C1, C3, C5	Unnecessary operation	
CR2 Does the operation appear later in the standard operations?	Yes	C2, C6	C1, C2, C5, C6	Omission or sequence error	
CR3 Are the goals attained by any operation later in the standard operations?	Yes	C2, C4	C1, C2, C4, C5	Selection error with right intention	
	No	C2, C3	C1, C2, C3, C5	Wrong Intention (any other categories)	
		Inapplicable operation		Error Type	

Figure 2-1 Identification of cause of trainee's error

Table 2-2 Subject of question and judgement criteria

Error Cause	Subject of Question	Judgement Criteria	
C1	Present state	The status of all parameters are not required to be answered, but correct replies are expected for all doubtful terms*.	
C2	Omission of standard operation	Omitted operation(s)	Correct replies are expected for all omitted operations no matter of their order.
	Unaware of standard operation	1. State to be archived next 2. Operation to attain the state	Replies to the both are expected to match completely with the corresponding standard operation.
C3	Effects of the operation	Correct replies are expected for all effects.	
C4	Preference conditions of the operation	All preference conditions are not required to be answered, but correct replies are expected for all doubtful terms*.	
C5	Prerequisites of the operation	All prerequisites are not required to be answered, but correct replies are expected for all doubtful terms*.	
C6	Applicability of the order of operations: [entered operation (Op1)] ↓ [omitted operation (Op2)] (Yes or No)	'No' is right when the effects of Op1 conflict with the preconditions of Op2, or the effects of Op2 match the preconditions of Op1. 'Yes', otherwise. This question is asked for each omitted operation, if the question for C2 in the above is correctly answered.	

\*Doubtful terms are defined as those incompatible with each other, and upon which the entered operation was judged inappropriate, e.g., a certain precondition of the entered operation and the contradictory term representing the present state.

## 2.3 過誤原因同定システム

前節で提案した手法に基づき、プラント操作の計画作成問題における誤りの原因を同定する、過誤原因同定システムを構築した。

### 2.3.1 構成

本システムは以下の五つのモジュールから成る。

- (1) 計画作成や過誤原因の同定に用いられる、プラント操作やスクリプトを記述した知識ベース。操作やスクリプトの表現法については、後述する。
- (2) 手段目標解析に基づき、知識ベースを用いて、与えられた目標状態に対する標準手順を作成する計画器。計画作成手法については、後述する。
- (3) 学習者が回答したプラント操作の正誤を判定し、誤りである場合にはその原因の同定を行う制御器。このモジュールがシステム全体の制御を司る。
- (4) 学習者の回答や過誤原因同定結果などを記録した学習者データベース。誤ったプラント操作の回答それぞれにつき、行うべきであった操作、回答した操作、同定された過誤の型および原因項目の四つが、記録される。
- (5) 入出力ウィンドウと、プラント状態を図示するグラフィック表示ウィンドウから成るインターフェイス。入出力ウィンドウはメッセージウィンドウ二つとボタンから成る。メッセージウィンドウは、それぞれプラント状態のテキスト表現と質問の提示に用いられる。ボタンは、操作名や数字、符号など、許容される全ての入力を網羅しており、学習者からの入力は全てこのボタンにより行われる。全てのモジュールはPrologおよびC言語によりエンジニアリングワークステーション(EWS)上に構築されている。インターフェイスのグラフィック表示ウィンドウには、エキスパートシェルG2を用いている。

### 2.3.2 動的計画法

訓練支援システムは、いかなるプラント状態からも、目標状態を達成するための合理的な操作手順を作成できなければならない。この機能はシステムに、問題領域を記述するに十分な知識ベースと、手段目標解析に基づき計画を作成する計画作成器を装備することで実現される。学習者の回答したプラント操作が標準的ではないが実行可能である場合、プラントの状態は当初予期されたものから外れてしまう。この場合、計画器がその新たな状態から目標状態を達成するための新たな標準手順を導出する。概要をFigure2-2に示す。これを動的計画法と呼ぶ。標準手順をあらかじめ用意しておく従来の手法では、このような逸脱に対し柔軟に対応することができない。本システムではこの動的計画法により、いかなるプラント状態においても次に行うべき標準的な操作が与えられ、よって学習者の回答する操作の正誤を適切に判断できる。

知識ベースでのプラント操作の記述は、各々その内容、前提条件、選択条件、および効果の四つの節から成る。また各操作記述の独立性を高めるため、操作間の関連は記していない。この表現法は手段目標解析に基づいた計画作成手法で用いるのに適している。スクリプトとは、ある小さな目標を達成するための一連の操作手順をまとめたサブルーチンである。たとえば、プラントを起動するために通常行ういくつかの操作をまとめて、「起動」というスクリプトができる。計画作成時にこのスクリプトを用いることにより、探索空間を縮小できる。

計画器は目標状態をいくつかの副目標に分解し、それぞれの副目標を適切な操作に置き換える。計画作成は二段階で行われる。始めに計画器は、現在の状態および目標状態を含むスクリプトをそれぞれ選び、スクリプトだけを用いて大まかな計画を作成する。次いでスクリプトを全て展開し、各々の操作の正当性を調べ、必要ならば操作の付加、削除や入れ替えを行い、最終的な操作手順を作成する。副目標間の干渉を解決するため、ある特定のスクリプトに属する操作を、どのスクリプトにも属さない操作より優先させるというヒューリスティックを用いている。

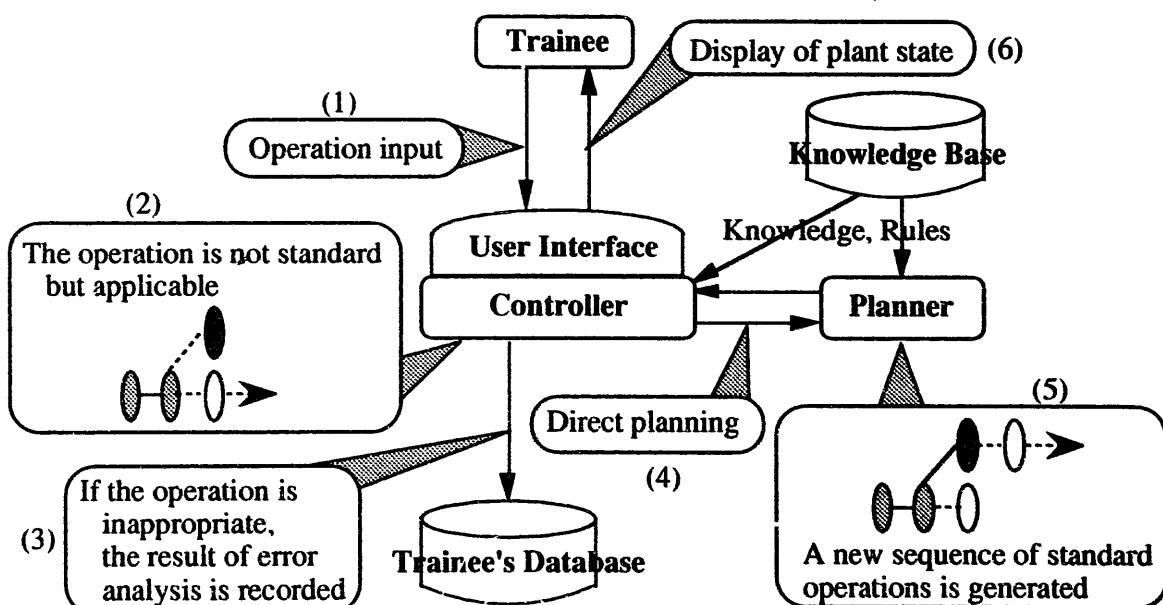


Figure 2-2 The system architecture and outline of dynamic planning

### 2.3.3 同定手順概要

始めに同定システムは学習者に対し、プラントの初期状態および目標状態を提示する。同時に計画器は標準手順を作成する。学習者はマウスにより入出力ウィンドウ上のボタンを選ぶことで、目標状態を達成するために必要と思われるプラント操作を一つづつ入力する。入力した操作が現在のプラント状態で実行可能なものである場合、プラントの状態が更新される。そうでない場合、あるいは入力した操作が標準手順で行うとされている操作と同じ効果を生み出さない場合は、誤りと判定し、その原因の同定を行う。結果や履歴は学習者データベースに記録される。以上のルーチンが、目標状態を達成するか、学習者が放棄するまで繰り返される。

## 2.4 実験

### 2.4.1 概要

提案した過誤原因およびその同定手法の有用性を調べるために、構築したプロトタイプ訓練支援システムを用いた実験を行った。操作対象には、液体金属冷却高速炉の一次冷却系へのナトリウム充填操作を選んだ。理由は、目的達成のために一連の操作を順に行ってゆくことが要求され、かつ部分的に代替操作が存在することである。工学系の大学院生五人に被験者となってもらい、操作手順の概要および個々の操作の定義について口頭および文書で学んだ後、一人づつプロトタイプ訓練支援システムを使用してもらった。被験者には目標状態を達成するようにとの指示だけが与えられ、誤った操作を入力するごとに、その操作を選択した理由を自由文で説明してもらった。実験後、システムによって同定された過誤原因と、被験者の口頭説明から同定されたそれを比較した。

対象にした問題領域は27個の操作と八つのスクリプトから成る。実機での操作は、気体圧力やナトリウム流量などを考慮した上での弁の開閉操作であるが、本システムではいくつかの弁操作をまとめて一つの操作とした。たとえばタンクAの圧力を上げるために必要な複数の弁操作をまとめて操作「タンクA加圧」とする。パラメータなどの確認も一つの操作とし、操作の選択条件は不要であったため知識ベースに記述していない。本章ではプラントの状態遷移や操作の実時間性は考慮していないため、プラントの状態は操作の実行によって不連続に変化するものとした。

### 2.4.2 結果と考察

#### (1) 同定された過誤原因の妥当性

過誤原因の同定の正否結果を、Table2-3に示す。得られた27件の誤った操作の回答例のうち、22件において、訓練支援システムが同定した過誤原因と被験者の口頭説明から同定されたそれとが少なくとも部分的には一致し、うち12件では過不足

なく一致した。部分的にしか原因の同定に成功しなかった理由としては、被験者が質問への回答途中に誤りに気付いて正答を与えたことや、偶然正答したことが挙げられる。また原因の同定に失敗した主な理由は、被験者が当てずっぽうでプラント操作を回答したことや、全くの勘違いをしていたことであった。後者の場合は、被験者は誤った操作順序や誤った副目標に固執し、合理的なナレッジベースの計画作成行動を行っていなかった。これは逆に、被験者が手段目標解析で表わされる計画作成行動をしている限りは、本システムは少なくとも部分的には過誤の原因を同定できることを意味している。

## (2) 被験者の欠点の抽出

観察された過誤の型を、Table 2-4 に示す。27件のうち24件までが操作省略あるいは順番間違いであり、うち19件ではさらに実行不可能な操作であった。残り3件は冗長な操作であり、その他の型は観察されなかった。これは被験者は将来行うべき操作は理解しているものの、正確にいつ行うのかを理解していなかったと言える。

また、24件の操作省略あるいは順番間違いの型の過誤に対して同定された原因を、Table 2-5 に示す。操作の想起失敗 (C2) と操作間の競合の誤解 (C6) を比べると、前者は17回同定されているのに対し、後者は8回である。これは、被験者は誤った操作順序を覚え込んでいるよりも、プラントの状態と操作との関連を良く理解していないことを示している。また C5 も多く挙げられていることから、被験者は各操作の前提条件も曖昧にしか理解していないことが言える。

一方、被験者へのインタビューから、彼等は概して操作の大まかな手順といくつかの操作の前提条件は良く理解しているが、操作とそれが行われるべきプラント状態との対応や、細かな前提条件は理解していないことがわかった。この傾向は、上述した訓練支援システムの同定結果から導出された傾向と一致する。よって、本手法により被験者の欠点の抽出が可能であると言える。

Table 2-3 Appropriateness of identified error causes

Appropriateness of Identified Error Causes		Number of Cases	
Appropriate	Complete match	12	22
	Partial match	10	
Inappropriate		5	
Total		27	

Table 2-4 Error types observed

Error Type	Unnecessary Operation		Omission or Sequence Error	Selection Error with Right Intention	Wrong Intention (any other categories)
Number of Cases	3 (0)	○ 1 (0)	24 (19)	○ 11 (9)	0
		△ 0 (0)		△ 10 (8)	
		✗ 2 (0)		✗ 3 (2)	

The numbers in parentheses indicate the number of those errors combined with inapplicable operation. Each sign means that error causes were completely identified (○), partly identified (△), or not identified (✗).

Table 2-5 Error causes identified for the error type of omission or sequence error

Error Cause	C1	C2	C5	C6
Number of Cases	1	17	17	8

以上の実験から、提案した手法によりナレッジベースの計画作成行動における誤りの原因を良く同定できることがわかった。しかし本手法の欠点、限界として、以下の二点が考察される。

○本章では手段目標解析で表わされる認知活動のみを扱った。しかし現実には手段目標解析で表わせるほど問題空間が明確に定義できる問題は、ナレッジベースの問題解決行動がとられる不慣れな状況下ではあまり多くないと考えられる。さらに手段目標解析では学習者の非単調な推論過程を模擬できず、操作目標が不明確な場合のボトムアップ的な行動も説明できない。また本章で用いた例題では、プ

プラントモデルに機能的多重性があまりなかったために、ある操作目的に対する操作手順がせいぜい二通り程度しか考えられない場合が多く、結果として被験者が操作に慣れてしまい、想定したとおりのナレッジベースの計画作成行動をとらないケースが見られた。

○本例題にはリアルタイム性がないために、被験者は離散的な状態遷移のみを考えることとなり、結果として考慮すべき状態変数の数が減って、状況判断を容易にしてしまうという欠点がある。またリアルタイム性の欠如は、被験者にある程度のタイムストレスをかけて問題解決の臨場感を与えることができないという点においても、マイナスである印象を受けた。

これらの結果を受けて、次章以降ではナレッジベースの問題解決行動を観察するための例題として、機能的多重性があり、リアルタイム性を持つことを不可欠な要素と考え、また手段目標解析のような Well-formed な行動だけではなく、非単調で不完全な問題解決行動を扱える方法論を模索することとした。

## 2.5 まとめ

本章では、手段目標解析に基づき、プラント操作員のナレッジベースの計画作成行動における過誤の原因の分類およびその同定手法を提案した。同手法を用いた過誤原因同定システムを構築し、実験により手法の有用性を確認した。提案した過誤原因は操作員の認知活動中の失敗箇所を指摘しており、教示指導を行う上で有用であると考える。

システム構築技法の観点からは、動的計画法を提案し、これにより訓練支援システムの学習者の入力により操作対象の状態が予期せぬものになっても、適切な正誤判断および過誤原因の同定が行えるようになった。実験の結果、ナレッジベースの問題解決行動を期待する課題に必要と思われる要素、および手段目標解析の適用の限界を考察した。

### 3章 メンタルモデル

メンタルモデルとは、あるシステムに対して使用者が持つ心的表象、つまり使用者が頭の中に描いている、対象物のモデルである。ナレッジベースの問題解決行動ではこのメンタルモデルが参照されるといわれ、対象物について人間が持つと思われるメンタルモデルの表現法を策定することは、訓練支援システムで、想定する学習者の知識構造表現を定めることに等しく、一つの要となる。本章ではメンタルモデルの表現法およびその形成支援をうたった訓練支援システムについて概観した後、プラント操作に用いられる知識の特徴に基づき、操作員のメンタルモデルの表現法を提案し、実験によりその妥当性を検証する。

#### 3.1 知識表現としてのメンタルモデル

工学的見地からメンタルモデルが注目された背景には、University of California San Diego にいた Norman の提唱した認知工学にその概念が集約されているように、使用者の視点に立ったモノ作り (User Centered System Design) に対する関心と実践がある。設計者が自身の頭の中に持つシステムのモデル (デザインモデル) に基づいてシステムイメージを設計し、使用者はシステムを使うことでこのシステムイメージと接し、それを解釈してシステムのメンタルモデルを作り上げる。このとき、設計者のデザインモデルと使用者のメンタルモデルが良く一致するよう、システムイメージを設計することが、User Centered System Design である。しかしメンタルモデルの性質上、これを論理的に実践してゆくことは容易ではない。Norman はメンタルモデルの持つ性質として次の六つを挙げている<sup>[51]</sup>。

- (1) 不完全である。
- (2) 非常に限定された形でしか動かせない。
- (3) 不安定である。しばらく使わないと忘れることもある。
- (4) システムモデル（対象物のモデルと操作）との境界は明確ではない。
- (5) 非科学的である。勝手な思い込みが入り込んでいる場合もある。
- (6) ささやかなものである。

さらに、メンタルモデルの形態や内容を知るための方法論は、今のところ使用者の内省に基づくプロトコル解析以外にない。このようにメンタルモデルは漠然としていて検証も困難であるが、人間が行動する際に用いている知識体系を包括的に表わしたものとも考えられ、扱う領域における意味にいかに近い形でデータ構造を表わすかに焦点を当てていたそれまでの知識表現のアプローチに対し、新たな視点を与えたと言える。

メンタルモデルの表現法は、研究対象とする領域にも関連して、代表的な型がいくつか提案されている。一つは常識推論などの分野で扱われる、「ナイーブなヒト」

の持つメンタルモデルである。「ナイーブなヒト」とは、ある問題領域について、そこで起こる事象については理解しているが、事象を記述するための専門知識などは何も持っていないヒトをいう。これはヒトの常識を表現することにはほぼ等しく、空間内のボールの振る舞いを例題に、空間の量子化とボールの振る舞いの分類から、系の状態を離散的に表わし、起こりうるシナリオを状態のシーケンスとして表わした例や、実在論（オントロジー）を用いて、常識を形成する核となる概念実体を説明し、学習の実験結果から、概念実体をプリミティブなスキーマという形で表わすことを試みた例がある<sup>[170]</sup>。また、言語の意味による論理的思考過程を扱った研究では、メンタルモデルを抽象化された論理構造として扱っている。

一方、機械システムの挙動理解など、対象物の振る舞いや機構の理解に用いられるメンタルモデルを表わそうとする領域では、対象物を因果関係の集合体として表わしたものが多い。このような表現の一つの出発点となる概念として、デバイストポロジーがある。これは対象物の物理的な構造を表わしたものであり、状況や解釈に依存しないが、対象物をどの程度の細かさ（粒度）で見るかという自由度は残されているため、唯一に決まるとは限らない。デバイストポロジーにより対象物の構造的制約、たとえば内部でのデータの流れうる経路などが規定されるが、これだけでは各要素の振る舞いや要素間の機能的相関などはわからない。そこで機能を記述するために必要な属性を定義し、この属性間の相関を記述することで対象物を因果モデルとして表わすわけだが、機能とは対象物にかかる主体の目的論的解釈によってさまざまな抽象度で表わすことが可能であり、属性も原理的には一意に定めることはできない。人間の解釈の記述単位（プリミティブ）を定めることで機能を体系的に表わそうとする試みは、たとえば上述のオントロジーにかかる一つの課題であるが、まだ統一的な見解に至っているとは言えない。そこで、対象物に存在する因果則を、人間の解釈という行為のある側面から見て合理的であるように表わす技法が、メンタルモデルを記述する上での重要な鍵となる。

この課題に対し、たとえばJ.de Kleer & J.S. Brown<sup>[107]</sup>は、デバイストポロジーが変わらない範囲で取り得る限りの、状態量の相関の組み合わせをまず抽出し、その中から実際に観察された対象物の振る舞いを説明するものだけを選んでまとめた因果モデルを、メンタルモデルの表現とした。始めの抽出処理は、構造から可能性のある因果モデルをすべて記述することであり、この手続きをエンビジョニング（想見）、得られた因果モデルの集合体を対象物の本質的機構と言い、後の選択処理を機能的証拠による射影と呼んでいる。これは単なるメンタルモデルの表現法の提案ではなく、メンタルモデルの形成過程を、構造により決定されるもの、振る舞いにより決定されるものと、概念的な段階を明確に分けて表わした点に特徴があり、特に故障診断など対象物の機能や構造が変わりうる場合に用いられるメンタルモデルの概念を表わしたものとして興味深い。彼等はブザーを例にとり、本質的機構からの射影により、鳴らないブザーに対するメンタルモデルの表現と導出過程を示し

た。また M.D. Williams ら<sup>[106]</sup> は、メンタルモデルの構成要素として、自律オブジェクトという概念を提唱した。自律オブジェクトは上述のデバイストポロジーの表現で用いられるデバイスモデルとほぼ同義であり、状態及び他のオブジェクトとのトポロジカルな結び付きの明示的な表現、および内的な属性を持っている。各々のオブジェクトには規則集合が関連づけられており、それらが属性値を変更し、オブジェクトの振る舞いを規定している。メンタルモデルは、この自律オブジェクトの結び付きにより表わされることになる。さらに、人間がメンタルモデルを用いて対象物の振る舞いをシミュレートし、推論する過程を、規則とトポロジーに従いながら情報を伝播することで属性値をえてゆく作業として表わした。彼等は、熱交換器の振る舞いを例にとった実験により、プロトコル解析の限界を注意深く認識しながら、自律オブジェクトのメンタルモデル表現能力を検証し、被験者がメンタルモデルを修正してゆく過程も、自律オブジェクトの変更、精緻化により表わせることを示した。この研究も、特に粒度の異なるデバイスモデルを統一的に扱えるメンタルモデルの要素を提案したという点で、有意義と考える。

さらに、上記二例が扱ったような簡素なシステムではなく、大規模で複雑なシステムに対するメンタルモデルを扱う概念として、多層、多重という二つがキーワードになると見える。多層の概念は、さらに二つに分けられる。つまり、構造的多層と、機能的多層である。前者は構造表現の粒度の違いによる多層化であり、後者は機能表現の抽象度の違いによる多層化である。これらは、認知的資源量に限りのある人間が、大規模なシステムの振る舞いを任意の物理的粒度で考えられること、上述のように、機能には本質的に、解釈による抽象度の違いがあることを考えると、ごく自然な概念であると言える。機能的多層化については、後に詳述する Rasmussen による機能階層モデル<sup>[51]</sup> がその良い具体例である。実際に大規模システムの振る舞いを多層モデルを用いて表わした例として、Lind によるマルチレベルフロー モデルがある<sup>[109]</sup>。ここでは質量とエネルギーの流れの位相という、システム要素や機能とは独立の概念を用いて、システムのさまざまな機能的特性を体系的かつ形式的に一貫して表わすことに成功している。これを基にして、さまざまな機能的抽象度のメンタルモデルに適合するようシステムの表示を工夫した例や、抽象度の高い機能的目標レベルから、抽象度の低い物理的形態レベルへと展開してゆく作業と言える、システムの設計問題に応用し、設計の効率化を図った例などが研究されている。また、システムの状態変数を有する機能的抽象度で表わしたものと束とし、束の統合、分解や、さまざまな抽象度の束の組み合わせによって、柔軟性、多様性に富む大規模なシステムに対するメンタルモデルを表わした、Moray の束モデルもある。

多重の概念は、システム構成要素の機能的多重性、及び振る舞い理解の情況（コンテクスト）依存性に由来する。ただしコンテクストとは、システムの内的状態や周囲環境、解釈の視点などを総合した意味での状況を指す。ある要素の同じ振る舞

いも、異なる目的に対しては異なる機能と解釈される場合や、異なるコンテクストの下では扱われる重要度が大きく異なる場合がある。多重の概念ではこのような場合、各々に対応した複数のメンタルモデルが形成されると考える。これは人間の多面的理解を表わしたものであり、佐伯の指摘するように、人間の理解をモデル化する上で重要な概念である。次節で見るように、これら多層、多重の概念は、訓練支援システムの研究分野でも早くから注目されている。

## 3.2 訓練支援システムとメンタルモデル

### 3.2.1 WHY

教育支援システムにおいてメンタルモデルが意識されたのは70年代後半である。Collinsらによって作成されたWHYシステムは、気象学を例題とした個別指導システムであるが、ここでは問題についての直接的な解説を行なわずに、帰納的発見を促すための質問、仮説の正当性を検証するための質問、矛盾を発見させるための質問などによって、学習者に法則や事実を習得させるソクラテス式の教授法のルールを抽出することが狙いであった<sup>[9]</sup>。これは例えば学習者が事象の説明のために提示した事項が不十分な場合は、それで十分であるとするルールを作つて学習者に示し、その真偽を問う、といったものである。最終的には60のルールが抽出されたが、ドメイン知識が、抽象度による階層構造を持ったフレーム表現によるイベント（具体的には降雨現象）間の因果関係の記述のみであったため、降雨プロセスのメカニズムや学習者の誤りを適切に表現できないという問題点が指摘された。そこでStevensらはイベントを駆動する構成要素を機能的に見て、その役割、属性、属性間の関係などを記述する機能的表現を、ドメイン知識に加えた。これにより大局的な教示指導プログラムをイベントについての知識により維持しながら、局所的な誤り同定を機能についての知識を用いて行なうことが出来るようになった。この表現を、彼らは異なる視点から問題対象を見るという意味で多重視点（Multiple Viewpoint）と呼んでいる。その後彼らは多重視点表現に基づき気象プロセスについて人間の持つと思われる概念を、地球レベルの気候モデル、機能的に見た水の循環モデルなど四つのモデルに表し、これを多重メンタルモデル（Multiple Mental Model）と呼んだ。さらに彼らはこれらのモデルを構成要素の抽象度という視点から見直し、抽象度によって階層化されたメンタルモデルとした。ここではあるモデルに記述された関係は、それより抽象度の低いモデルによって説明される。

### 3.2.2 SOPHIE

一方Brownらは学習者と教育支援システムの双方主導型の個別指導システムを構築すべく、電気回路の故障診断をドメインに選び、SOPHIEプロジェクトを起こした<sup>[10]</sup>。このプロジェクトではシミュレーション環境を学習者に提示し、システム側でも同じシミュレーションに基づいて故障診断を行なうことにより、学習者との対話的な教示指導を実現しようとしたものである。シミュレーションベースの推論

手法の開発に重点がおかれた SOPHIE-I、故障診断の「専門家」をシステムに組み込み、その診断プロセスに学習者を誘導的に取り込む試みがなされた SOPHIE-II を経て、SOPHIE-III ではそれまでの定量シミュレーションを定性シミュレーションに切替え、より人間の故障診断に近いシミュレーションベースの推論と教示指導を試みた。ここで初めて、定性因果モデルとしてのメンタルモデルが意識される。彼らが機械的メンタルモデルと呼ぶこのモデルは、まずデバイスを構成要素モデルで表し、その挙動をデバイストポロジー モデルとして表した後、想見 (Envisioning) によって作られる。これはまさに定性推論のプロセスであり、Envision 理論に基づく推論手法はその後の定性推論、定性シミュレーションのベースの一つとなる。この Envision 理論と対比されるものが QP (Qualitative Process) 理論である。どちらも物理世界の心的表現を目的としたものであるが、前者は個体 (Entity) をプリミティブとして、接続された個体間の状態遷移から導かれる属性としてプロセスが定義されるのに対し、後者ではプリミティブはプロセスであり、個体の状態はいくつかのプロセスの作用の組合せによって決まる属性と定義される。

WHY や SOPHIE における試みはメンタルモデル研究の萌芽となったが、両者ではドメイン知識を人間にわかり易い形で記述してゆくというアプローチから出来た産物としてしかメンタルモデルをとらえておらず、教育支援システムにおける積極的なメンタルモデルの形成を意識してはいない。これに対し以下に挙げる STEAMER および QUEST プロジェクトでは、これを陽に試みている。

### 3.2.3 STEAMER

STEAMER は大型船の蒸気推進プラントの操作員のために開発された訓練支援システムである<sup>[94]</sup>。基本的にはアイコン化された各構成要素を学習者が自分で組み立て、その上でシミュレーションを行なって操作対象についての理解を深めるという環境提示型のシステムであるが、操作の手順や基本的な工学的原理は能動的に教授しなければならないとの判断から、既知の手続きの実行過程をフィードバックして教える個人指導モジュールと、特定の要素の振舞いを調べることの出来る「ミニ実験室」の二つのモジュールにより構成されている。このシステムではメンタルモデル形成支援のコンセプトとして「概念的な忠実さ (conceptual fidelity)」に基づく対話的かつ検証可能なシミュレーション (interactive, inspectable simulation)」を挙げている。これは正確な物理モデルではなく、専門家の持つメンタルモデルに忠実に構成したモデルを用いて操作対象の振舞いを可視化することにより、そのまま学習者にメンタルモデルとしてマップさせることを狙っているという意味である。しかしここで注意すべき点は、STEAMER ではこのコンセプトはグラフィカルインターフェイス上でのみ考慮されており、内部表現まで踏み込んではいないことである。STEAMER の持つプラントモデルは定量モデルであり、その機能を抽象的に翻訳して必要に応じてインターフェイス上に表示しているに過ぎない。つまり STEAMER は学習者に形成させようとしているメンタルモデルを、自身では持つ

いない。

### 3.2.4 QUEST

これに対し、QUESTでは学習者のメンタルモデルと同じ形で操作対象モデルを記述するよう試みている<sup>[111]</sup>。QUESTはSOPHIEの定性因果表現と、STEAMERのグラフィカルインターフェイスの長所を取り入れた、電気回路の理解を支援するシステムである。但しSOPHIEと異なり、その目的は故障診断ではなく回路の設計である。QUESTの最大の特徴はメンタルモデルに多重、多層構造を導入した点である。これは先に述べたStevensらによる多重視点の考え方にも通じ、一つの対象をさまざまな視点から見ることによって、全体の理解が相補的に深まるという考え、および操作対象に直接関係する知識のみではなくそれを支える背景知識も扱うことにより、より忠実にメンタルモデルを表せるという考えに基づいている。彼女らはさまざまなモデルを系統的に取り扱うために型(type)、次数(order)、および等級(degree)という3つの次元を導入している。型は定性的、比例的(「より大きい」などの疑似定量的な演算が定義できる)、および定量的の3つである。次数はモデル中で変化を表すための導関数の次数である。例えば静的な電圧や電流の存在、およびスイッチなどによる離散的な状態変化のみを扱うモデルは0次である。等級はモデルの詳細度を表しており、モデル中の制約の数を考えることも出来る。実際の使用においては、まず学習者に詳細度の粗い、0次の定性モデルが提示され、学習者はそのレベルの事象を説明や質疑応答により理解したならば、より詳細(複雑)、高次元のモデルへと進んでゆく。ここでの狙いはさまざまなレベルの内部表現モデルを用意することによって、学習者が自身のメンタルモデルの成長度に合わせてモデルを選択し、現象を理解する環境を提供することである。彼女らはこの根拠として、学習者のメンタルモデルと教えようとしているモデルとの差異は、学習環境の制限によるものであることを主張している。

### 3.2.5 メンタルモデルと問題解決行動

Stevensらの指摘にあるように、メンタルモデル形成支援の貢献度を定量的に図ることは困難である。しかしメンタルモデルの有無によって操作対象の振舞いの理解に大きな差が出ることは、電話器からプラントシステムまでさまざまな例で報告されている。例えばKierasらの簡単なデバイスモデルによる実験<sup>[100]</sup>では、操作対象のモデルを事前に説明されたグループでは単にプロシージャのみを説明されたグループよりも、(1)より早く、正確に手順を覚え、実行し、より良く不必要的手順を単純化でき、(2)未知事象に対する対応をより早く見つけ出し、学びとることが出来たことを報告している。さらに彼らは、これらの効果に最も有用な情報は個々の要素の振舞いを推論する上で必要なそれらの構成や制御構造であり、要素の機能的必要性や一般的原理、アナロジーなどではないこと、単純なタスクではこれらの事前情報は効果がないことを報告している。どのようなドメインにどのようなメンタルモデルが適しているかの議論はまだ確立されたとは考えられないが、ドメイン

およびタスク毎にある程度アドホックなメンタルモデルを仮定してゆかないと誤概念を正しく表せないことは先の Stevens や White らによっても指摘されている。

### 3.3 プラント操作員のメンタルモデル構造表現

訓練支援システムで用いられるメンタルモデル表現は、(1) 学習者の持つ知識構造を表すために十分であり、(2) 学習者の持つ様々な知識状態を反映でき、また(3) 訓練により学習者が持つことが望まれる知識状態を表せるものでなくてはならない。以降ではナレッジベースの問題解決行動の訓練支援システム構築のために適切な、操作員のメンタルモデル表現を提案し、簡単なプラントシミュレータを用いた実験により、この表現の妥当性を上記 (1) および (3) の点について検証する。

学習者のメンタルモデル形成支援を唱ったプラント操作員訓練支援システムの最近の例としては秋吉らの階層型定性シミュレーションシステムがあげられる<sup>[5]</sup>。このシステムでは操作対象の定性モデルをメンタルモデルの一部と考え、学習者が自身の持つ様々な定性モデルをシステムの提供する定性シミュレーション環境中に構築し、その妥当性を検証して、自主的にメンタルモデルを形成することを狙いとしている。しかしここでは操作対象の因果的な振舞いの学習のみに焦点が当てられ、この学習に基づく、操作とその目的の関係の理解は明示的には考慮されていない。

本研究では操作員のナレッジベースの問題解決行動においては、二種類の知識が用いられるとして仮定する。一つはプラントの操作に関する知識、もう一つはプラントの振舞いに関する知識である。前者を操作知識、後者を機構知識と呼ぶ。前者は操作員の目標駆動の行動時に直接用いられるものであり、後者は前者を導出できる知識である。まず両知識のモデルを考える。

操作知識は機能階層モデルで表される。このモデルは操作対象中の要素を機能的観点から分類、グループ化し、そのグループ間に目標レベル、機器レベルといった階層が存在していると見なしてタスク毎に構造化したものである。操作員のバーバルプロトコル解析に基づき、タスク毎の目標—機器、操作の対応についての操作員の知識はこのモデルで表されることが提案されている<sup>[6]</sup>。

機構知識は定性因果モデルで表される。このモデルは操作対象中のプロセス量を各要素機器のパラメータとして表し、その変化による定性的な波及効果を原因—効果の記述や制約式により表したものである。人間は定量値として入ってくる情報を定性的に解釈することで認知的負荷を軽減しながら論理的思考を行なっていると考えられ、定性因果モデルが事象や行動の理由の説明に用いられる知識を良く表していることが一般的に言われている<sup>[7]</sup>。

メンタルモデル表現は操作知識、機構知識双方を適切に表すべきと考える。そこで操作知識を機能階層モデル、機構知識を定性因果モデルにより表し、これらをリンクで関連付けた二層構造のモデルを、メンタルモデル表現として提案する。Figure3-1にその概念を示す。機能階層レイヤにおけるノードは操作あるいは目的を表し、リンクはそれらの対応関係を表す。定性因果レイヤにおけるノードは要素機器のパラメータあるいはパラメータ間の制約条件を表し、有向リンクはパラメータ間の波及関係を表している。両レイヤを結ぶリンクは三種類ある。前提条件リンクはある操作と、その操作を行なうためにある状態になっていることが必要なパラメータを結ぶ。効果リンクは操作と、その操作により値の変動するパラメータを結ぶ。目的リンクはある目的と、それをパラメータの状態あるいは変動と解釈した時の、対応するパラメータを結ぶ。これにより、機能階層レイヤ上の目的－操作リンクは、定性因果レイヤ上の波及関係により支持されることになる。例えば「ポンプ回転数上昇」という操作は効果リンクで定性因果レイヤ上のポンプの回転数パラメータの値を増加させ、冷却ループの冷却材流量を増加させ、炉心冷却材の温度を減少させ、これが目的リンクにより「炉心冷却」という目的に対応する。

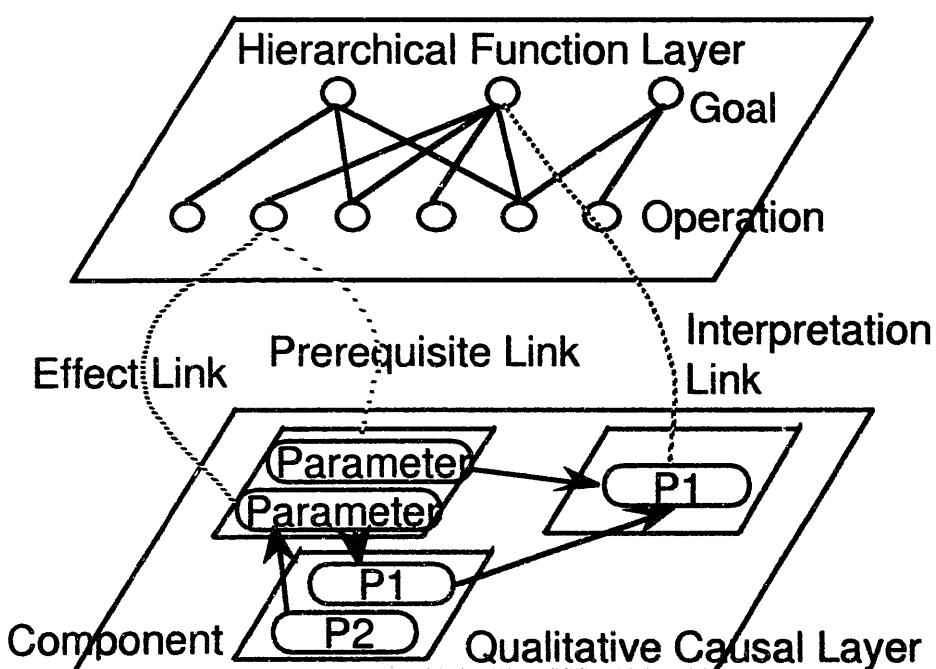


Figure 3-1 Framework for representing mental model

本メンタルモデル表現の長所は三点挙げられる。第一に、本表現では前章で手段目標解析に基づいた問題解決行動時に用いられるとした知識に加え、操作・操作目的の対応関係も表わされており、プラント操作員の広範な知識状態を表わすことができる。第二に、本メンタルモデル表現では各操作に対して、その理由、波及効果などの説明を、定性因果レイヤ上のパスを辿ることで与えられる。第三に、操作知識と機構知識が独立に表されているため、ある目的に対して予め用意されていない代替操作を表すことが可能である。これは想定外事象への対応を訓練する場合、操作員のとった通常時とは異なる操作手順を解釈し、適切か否かの判断を行なうために必要である。

### 3.4 メンタルモデル構造表現の十分性

メンタルモデルと行動の相関関係を調べる目的で行なわれた多くの実験では、被験者のメンタルモデルは事前に与えられた操作対象についての概念的な知識からのみ生成され、これが与えられない場合は手続き的な知識のみが獲得されるという仮定をおいてきた。しかし最近の研究では事前知識が与えられない場合でも、被験者は実験の間にメンタルモデルを自主的に構築していることが示唆されている<sup>[56]</sup>。そこで提案したメンタルモデル表現の十分性を検証するため、自主的に構築されるメンタルモデルの特徴を調べる実験（実験1）を行なった。

実験には簡単な原子炉プラントのコンピュータシミュレーションモデルを用いた。Figure3-2に構成図を示す。モデルは炉容器、熱交換器およびポンプからなる一次循環系と、ガス注入、排出装置とタンク、弁からなる、炉容器内の冷却材の量を調節するための補助系から構成されており、構成要素機器は計10個で、各々が温度、流量といったパラメータを持つ。炉容器内での核反応に関する計算は行っておらず、よって炉容器は電熱器による湯沸かし器と同様のモデルとなっている。二次循環系は、熱交換器で二次側の流体流量を調節できる点でのみ考慮しており、他のタービン系などは考慮していない。独立に調整可能なパラメータは炉容器内での熱出力、ポンプの回転数など七つあり、被験者はマウス操作によりこれらの値を増減させることができる。インターフェイス上にはいくつかの主要なパラメータの値が機器名やパラメータ名を伏せて、メータとトレンドグラフにより表示されており、プラント構成に関する情報は提示されない。Figure3-3および3-4にインターフェイスの外観を示す。工学部の大学院生5名に、一人づつ被験者となつてもらった。第一段階では自由な操作によりプラントの仕組みを推論してもらい、挙動や操作を理解してもらう。その後第二段階ではあるパラメータの値を指示されたように設定する課題を課した。どちらの段階でも、被験者には思い浮かんだことを全て発話するよう求めた。

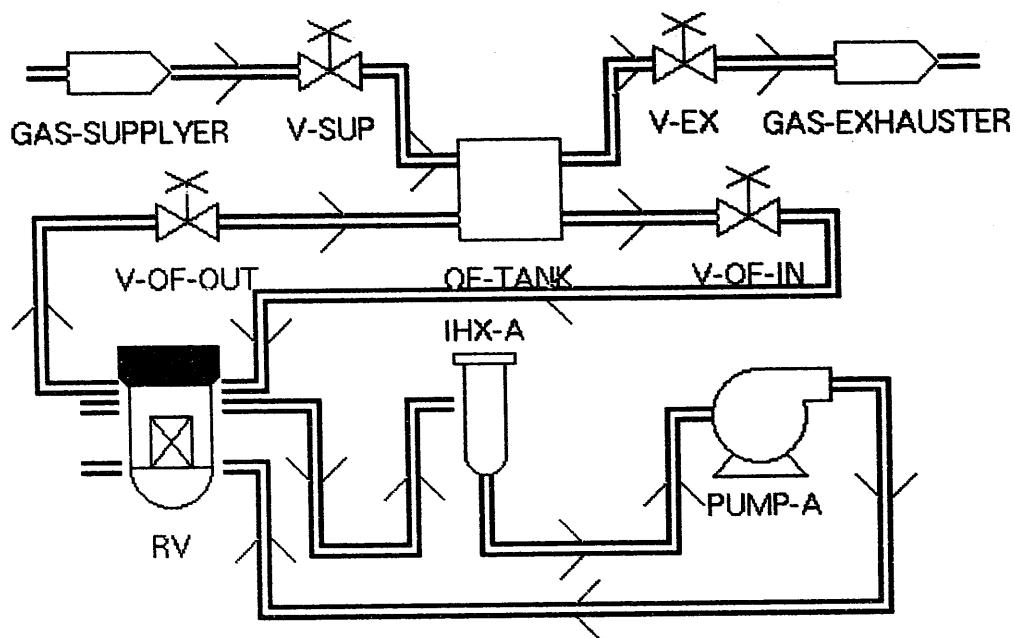


Figure 3-2 Structure of the model plant used in the experiment 1

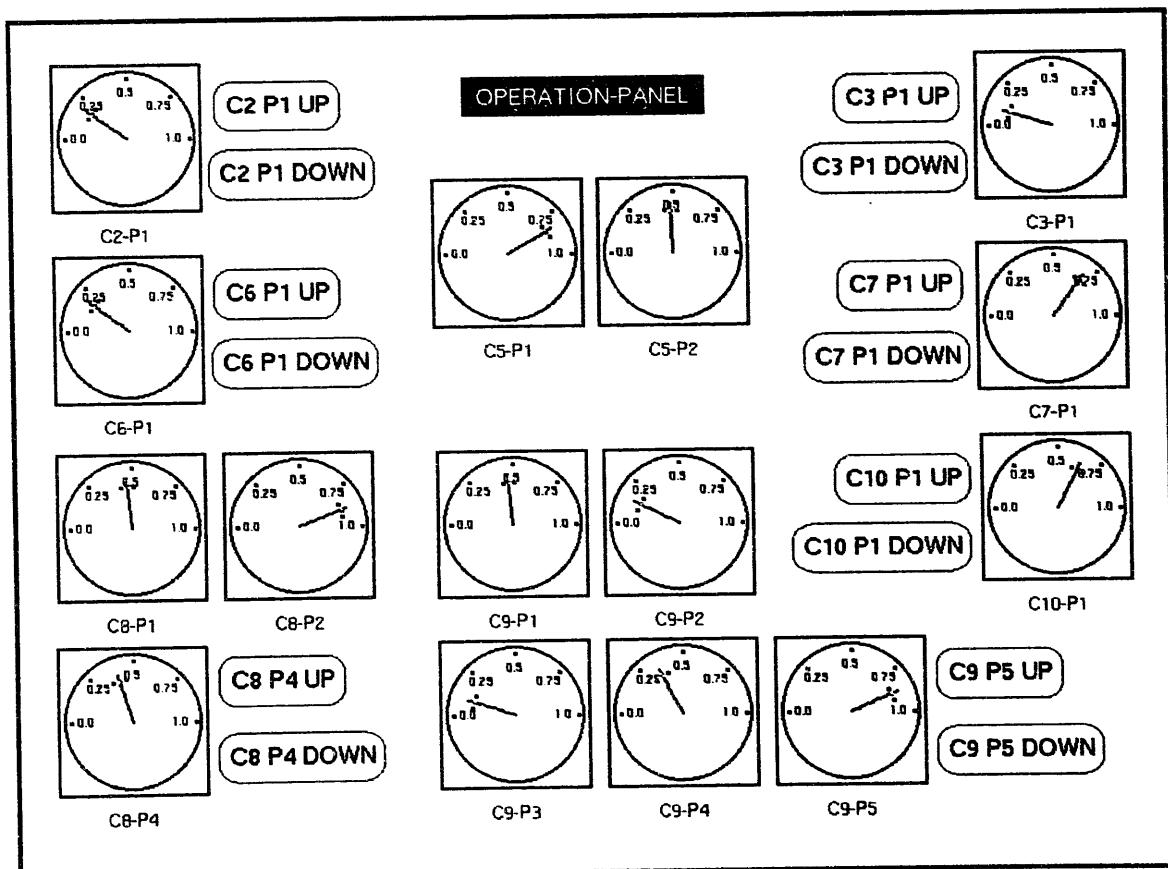


Figure 3-3 Appearance of the interface used in the experiment 1 (1)

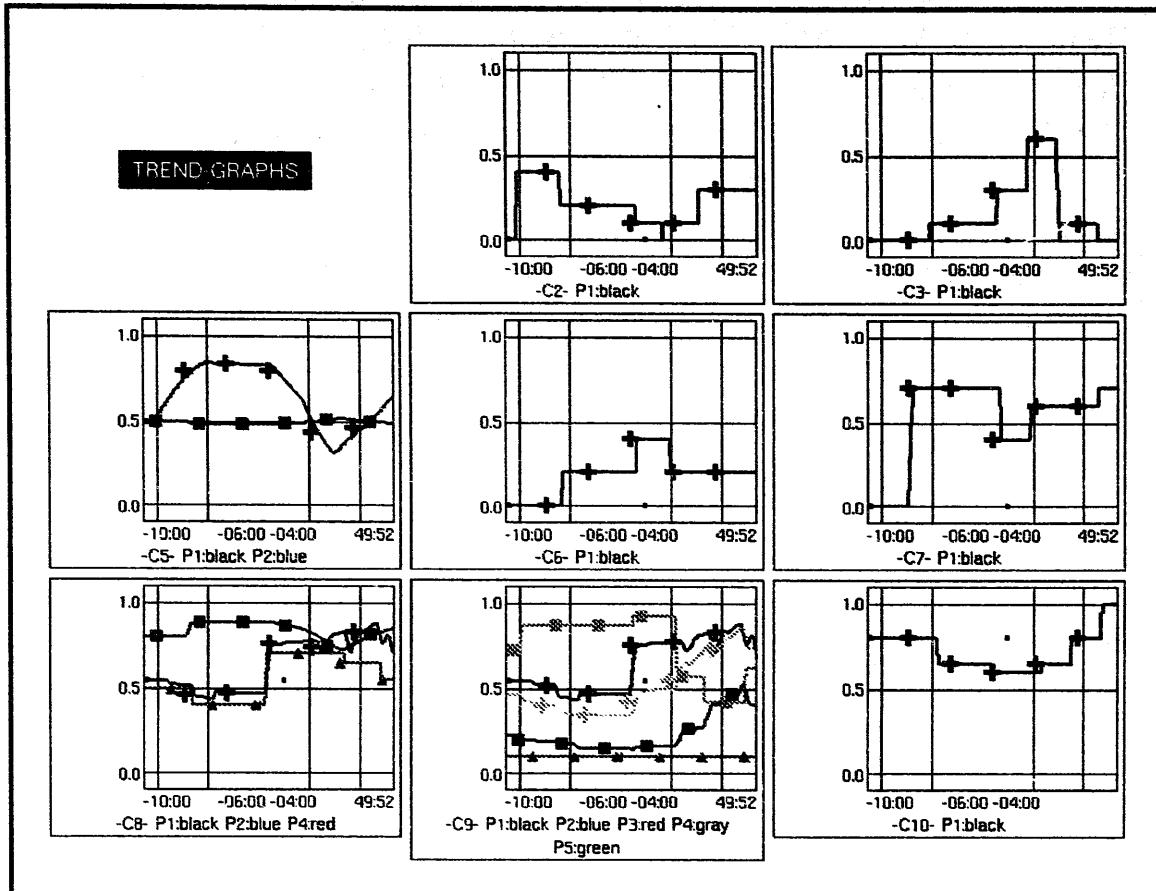


Figure 3-4 Appearance of the interface used in the experiment 1 (2)

発話記録の解析の結果、以下の三点が被験者の一般的な振舞いの特徴として挙げられた。

1. 第一段階ではまずランダムにパラメータ間の相関関係を見つけ、粗い規則集合を作り、次いで各々の規則を検証して取捨選択し、残った規則同士を関連付けて解釈し、次第に多くの規則を説明できる統一的なモデルを作り上げていった。これははじめ「パラメータAの値を上げるとBの値も上がるようだ」「Cの値とDの値は多少の時間遅れをともなって比例している」といった二パラメータ間の相関を調べる発話（発話タイプ1）が多く、次第に「先ほどAを上げたらBも上がったので、Aを下げたらBも下がるか見てみよう」「CからDへの相関はあるが、逆は影響しないようだ」など、仮説として収集した相関規則をさまざまな状況下で試すことで吟味、検証する発話（タイプ2）がみられるようになり、その後「Aが大きいときにBを上げるとCが増えるので、Aは圧力か何かの量で、Bは弁のようなものの開度、Cは何かの積分量だろう」といった、相関規則を物理量の挙動として解釈し、モデルを作り上げる発話（タイプ3）が観察されたことを根拠とする。このような発話履歴の例をFigure3-5に示す。赤色はタイプ1、黄緑色はタ

イブ2、青色はタイプ3の発話を各々表わしており、※印では相関規則からある目的を達成するための操作を導出する行動も見られた。

2. 個々の規則は主にパラメータ間の定性因果関係で表された。これは上記のような発話記録から明らかである。ただし特にパラメータ相関の条件や強弱を詳しく調べる際には、「パラメータAとBはAの値がこのくらいのときまでは相関しないようだ」といった、定量的な情報も入る場合があった。
3. 第二段階では特に与えられた課題の達成が困難な場合、第一段階で作った規則を組み合わせて操作系列を導出する傾向が見られた。ただし組み合わされる規則数は高々2二、三個であった。これは「パラメータAとBは正比例、BとCは反比例していた。よってCを上げるためにAを下げてみよう」といった発話記録からわかる。

第一点目はメンタルモデルが自主的に構築される過程を表しており、第二、三点目から、そのようなメンタルモデルがパラメータの定性的因果関係およびそれに支持された操作知識からなることを示している。これらの結果より本メンタルモデル表現が自主的に構築されるメンタルモデルを表していることの十分性が示されたと考える。

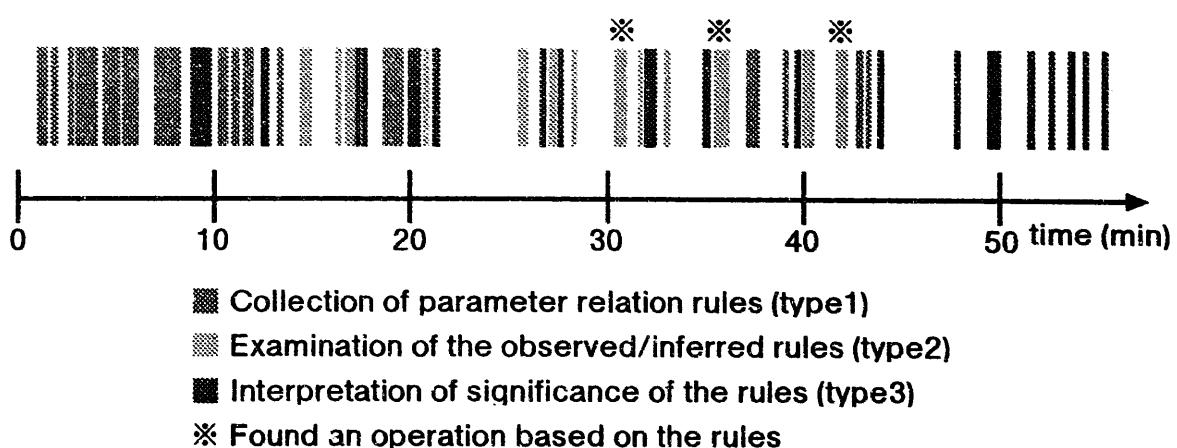


Figure 3-5 An example of subject's classified verbal record in the experiment 1

### 3.5 メンタルモデル構造表現の妥当性

次に、本メンタルモデル構造表現で表わされる知識構造が、ナレッジベースの問題解決行動の訓練の結果、獲得されるべきものとして適切か否かを調べる実験（実験2）を行う。ここでは「機構知識により合理的に支持された操作知識を持つ操作員は、支持する知識を持たない操作知識を持つ操作員よりも適切に未知事象に対応できる」という仮説を検証する。

実験には先の実験とは異なるプラントモデルを用いた。先のプラントモデルは構造が単純で、かつ各構成要素の機能が明確に異なるために、ある目的のための代替操作があまり存在せず、通常の操作手順が行なえない状況において解決策を見つける行動を対象とした実験には不適切と判断した。新しいプラントモデルは5個のタンクと一組のガス注入、排出装置、およびそれらをつなぐ配管上に設置された21個の弁からなる。Figure 3-6に構成図を示す。各タンクには始め半分だけ液体が充填されており、各弁の開閉によるタンク内圧力の調節により、液体を任意に移動させることができる。プラント構造は画面上に図示されず、各タンクの液量、圧力、これらの異常高／低状態を知らせる警告器、および各弁の開閉状態のみが表示された。インターフェイスの外観をFigure 3-7に示す。

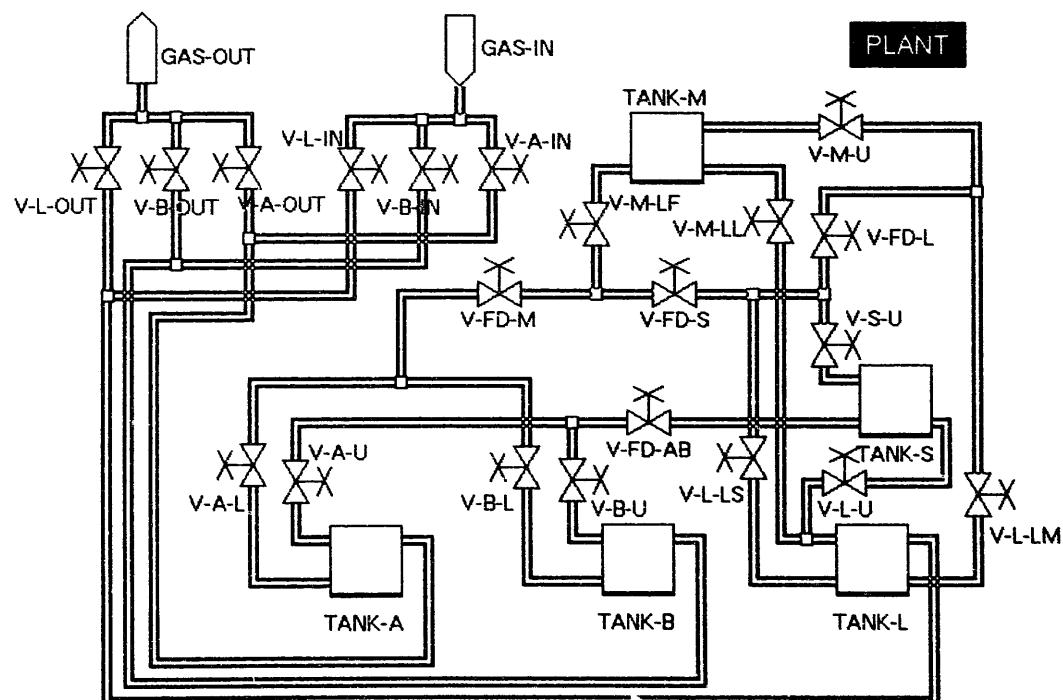


Figure 3-6 Structure of the model plant used in the experiment 2

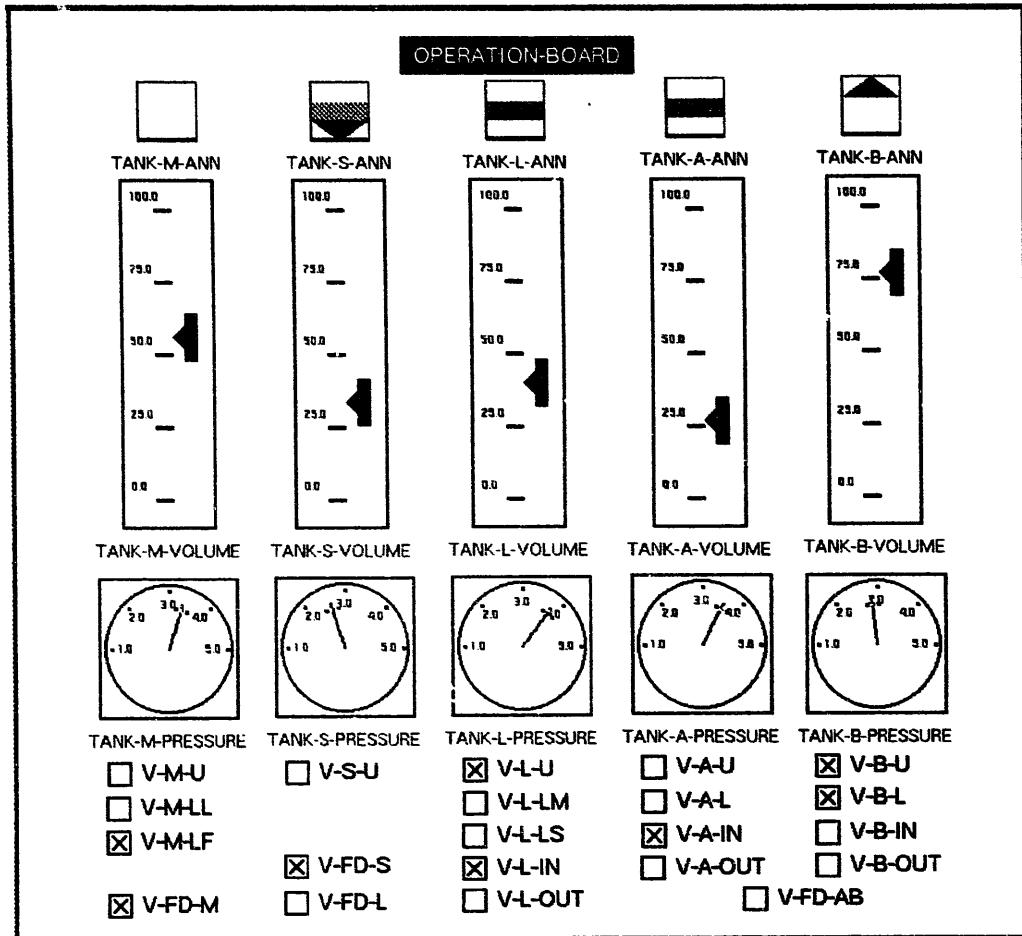


Figure 3-7 Appearance of the interface used in the experiment 2

被験者は事前に与えられた知識により二つのグループに分けられた。一方には標準的な操作手順、および各機器についてその配置と標準的な操作手順における使われ方が文書で説明され、他方にはこれらの知識に加えてプラントの機構の説明が与えられた。前者を手順ベースグループ、後者を機構ベースグループと呼ぶ。機構の説明とは、例えば「通常タンク上部からは気体が、下部からは液体がやりとりされるが、タンクが一杯の時や空の時はこの限りではない」「液体の移動のための駆動力は圧力差のみである」といった内容で、操作手順の根拠をプラント拳動に求めることを促したものである。この機構の説明は被験者の考察によって導き出すことが可能であり、よって厳密にはプラントについて新しい知識を与えたことにはならない。つまりここでは、機構の説明によりプラント拳動と操作手順の関連を示唆された者と、それを自身で導出しなければならない者との、問題解決行動における差異を見ることが狙いである。

両グループ4人ずつ、計8人の工学部の学生および大学院生を被験者とした。練習により標準的な手順に慣れてもらった後、実験ではタンクやバルブに故障が設定

され、被験者は約10分間、どのタンクについても警告器が作動しない範囲に、プラント状態を維持することを求められる。何も操作を行なわないと約4分で最初の警告が発せられる。実験は各被験者とも2ケースの異なる故障のシナリオについて行なわれた。例えば一方のシナリオではあるタンクから液体が漏洩し、そのタンクに液体を補給するために標準的な操作で用いる弁のいくつかが開かないようになっている。つまり被験者は、想定外事象に対する適切な対応操作を求められることになる。今回も被験者には思い浮かんだことを全て発話するよう求めた。

各ケースについて、以下の三つのデータを記録した。

- (1) 警告の発生前にプラント状態維持のための適切な対応操作を見つけたか否か
- (2) その過程で試みられた異なる操作系列の数
- (3) それぞれ操作知識と機構知識に基づいて行なわれた操作系列の数

ただし発話記録から、被験者が標準的な操作手順にしたがって操作を行えば操作知識に基づいて行なわれたと判断し、プラントの挙動に基づき独自の操作手順を考え出して遂行した場合には機構知識に基づいていると判断した。結果を Table 3-1 および 3-2 にまとめる。また両グループの被験者の操作の時間履歴を比較した例を Figure 3-8 に示す。ここで色つきの矩型は被験者が試みた操作系列を表わし、同じ色のものは同じ操作系列を表わしている。

これらの結果より、手順ベースグループの被験者は標準的な操作が功を成さない場合でもそれに固執する傾向が見られ、機構ベースグループの被験者は機構知識により独自の操作系列を試行錯誤し、より高い頻度で想定外事象に対する適切な対応操作を見つけられていることがわかる。両グループの差は、先に提案したメンタルモデル構造表現上に表わされたような、操作知識と機構知識の関連を示唆されているか否かだけであり、よって本メンタルモデル構造表現は想定外事象に対する対応能力の訓練の結果獲得すべき知識構造として妥当なものであると考える。

### 3.6 まとめ

本章では認知科学的知見に基づき、プラント操作員の持つメンタルモデルの構造表現を提案した。この表現ではプラント操作に関する知識とプラント挙動に関する知識を各々機能階層モデルと定性因果モデルで表わしており、前者の知識の正当性が後者の知識から導出できるよう、両モデルをリンクで繋いだ二層構造になっている。プラント操作から経験的に構築されるメンタルモデルの特徴を調べた実験により、同表現を本研究で構築する訓練支援システム中で学習者モデルの枠組みとして用いることの十分性が確かめられた。また、想定外事象への対応を模擬した実験により、同表現で表わされる知識構造を持つことが想定外事象に対する適切な対応能力の向上に寄与することが示された。

Table 3-1 Achievement in finding a not-predefined recovery operation

	Procedure-based group	Mechanism-based group
Success	1 (1)*	5 (1)*
Failure	7	3
Total	8	8

\*The numbers in parentheses indicate the number of cases which subjects succeeded accidentally.

Table 3-2 Knowledge used to find recovery operations

	Procedure-based group	Mechanism-based group
Operational knowledge	28	20
Mechanistic knowledge	1	12
Total	29	32

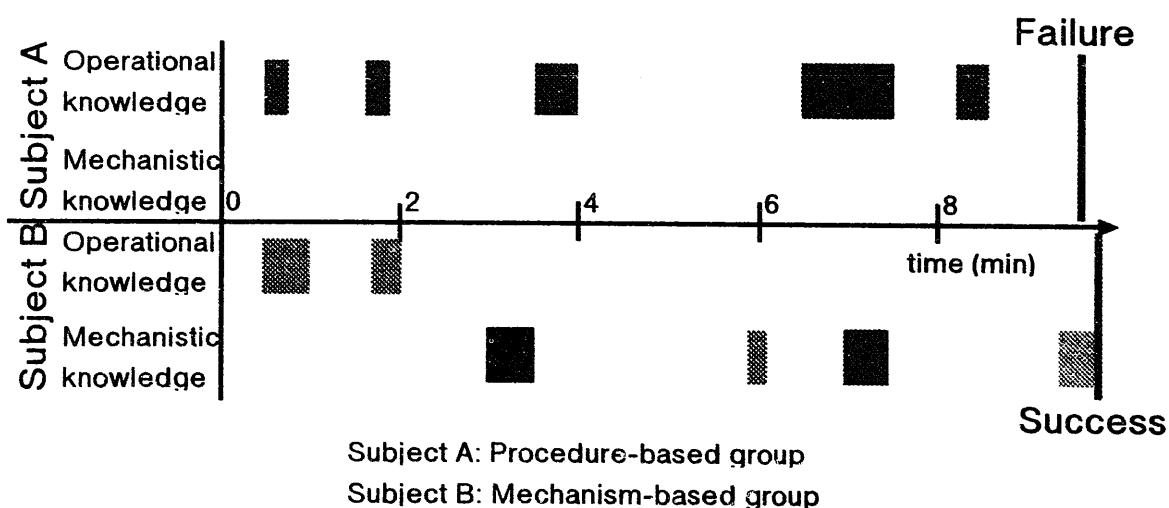


Figure3-8 An example of historical record of subjects' operations in the experiment2

## 4章 制約伝播と状況推論によるプラント操作手順の導出

1章で述べたように、想定外事象への適切な対応の訓練を行うための訓練支援システムでは、対象とするプラント各部分の、通常時とは異なる機能を学習者に示唆するために、(1) プラントの挙動を、プラントを扱う人間の解釈に極力依存しない表現法で記述し、(2) この記述から、プラントの状態に基づき可能な限り多くの操作手順を導出できなければならない。本章ではこのためのプラント挙動の表現法および操作手順の導出手法について報告する。

### 4.1 局所的因果則を用いたプラント挙動の記述

操作手順の導出が目的であること、導出結果や過程を基に前章で提案したメンタルモデル構造表現上に学習者モデルを構築することから、ここでは物理パラメータ間の定性因果関係式を用いてプラント挙動を記述することが適當と考える。但し物理パラメータとは、プラントの各要素機器毎の温度、圧力といった、状態を記述する際に用いられる最小単位である。考えられる限り多くの手順の導出を目指すことから、定性因果関係式を記述する際には以下の二つの原則<sup>[71]</sup>に従う。

- 没機能性の原則：各部品の構造モデルにおいて機能または挙動に関する仮定を立ててはならない。
- 局所性の原則：各部品のモデルは他の部品のことを想定してはならず、文脈に独立して書かれなければならない。

後者の原則より、プラントの挙動をプラントの各要素機器の挙動および要素機器同士の相関関係に分けて記述し、これらと操作や操作目的との対応を記した。以下に各々について述べる。

#### 4.1.1 要素機器記述

上記一番目の原則を守るためにには、各プラント要素機器について、どのパラメータの値がどのパラメータの値によって決まるかというパラメータ間の依存関係を、その機器の機能や役割に依存しない形で記述する必要がある。ここでは文献<sup>[72]</sup>の因果的順序づけの概念を基にして、物理パラメータを以下の五つに分類した。

- a. 内生 (endogeneous) パラメータ：同じ要素機器内の他のパラメータにより値が決定されるパラメータ。熱交換器内での高温側→低温側伝熱量など。
- b. 外生 (exogeneous) パラメータ：他の要素機器のパラメータにより値が決定されるパラメータ。要素機器を一つの平衡構造と見なした場合に外乱あるいは状態変化の原因と見なせる。配管内の流体流量など。
- c. 独立 (independent) パラメータ：操作により値を直接設定することができるパラ

- メータ。外生パラメータの一種である。ポンプの作動回転数など。
- d. 定数 (constant) パラメータ：値が不变と見なせるパラメータ。流体の比重など
- e. 一時 (temporal) パラメータ：要素機器の状態により条件的に存在するパラメータ。

弁の入口側と出口側の圧力差など

一時パラメータは、条件的あるいは離散的な状態変化を含む挙動をパラメータの因果関係式で表わすための、いわゆる見なしパラメータである。たとえば、途中に弁の付いた一本の配管でつながれた二つのタンクというモデルを考える。配管内の流量は両タンクの圧力差によって決まるが、弁が閉まっていれば圧力差があっても流れは生じない。そこで弁の属性として、弁が開いているときのみ存在する、両端の圧力差という一時パラメータを定義し、これによって配管内流量が決まるとすることで、このモデルの振る舞いを記述する。

各要素機器の物理パラメータがいずれに分類されるかは、機器のモデリングの詳細度およびパラメータ間の相関式の記述に依存する。例えば上記で外生パラメータとした配管内の流体流量は摩擦や粘性を考慮すれば内生パラメータとなり、内生パラメータとした熱交換器内の伝熱量も高温側および低温側の配管内流体の温度により決まると記述すれば外生パラメータと見なせる。さらに保存則のように、パラメータ間の相関関係を厳密には定められない関係式を用いて記述される系においては、さまざまなヒューリスティックにより「架空の因果性」を設定しないと因果式を記述できず、よってパラメータの分類も行えない<sup>[73]</sup>。

要素機器内のパラメータの相関は、保存式 () 及び因果式 () により表わす。これらを要素機器内パラメータ相関式と呼ぶ。前者はパラメータ間に単方向の因果関係があると見なせない場合、後者は見なせる場合の記述方法である。因果式においては上記の例で左辺を因果先、右辺を因果元と呼び、因果元から因果先への一方の相関を表わす。但し上述のように厳密な因果関係が設定できるか否かについてはまだ議論の余地も残されている部分があるので、ここではあるパラメータ  $p$  とその時間積分  $P$  では  $p$  から  $P$  への因果関係を、 $p(t)$  ( $t$  は時間) とパラメータ  $q(t + \Delta t)$  の関係を表わす関係式では前者から後者への因果関係を、常識的な現象理解において  $p$  の変化により  $q$  が変化してもその逆を想定できない場合は  $p$  から  $q$  への因果関係を、各々認めるというヒューリスティックを用いた。

プラントシミュレーションモデルで用いるポンプ、タンクなど各要素機器を分類したクラスを定義し、各クラス毎に物理パラメータ、その型、および要素機器内パラメータ相関式を定義した。Figure4-1に例を示す。相関式を用いたパラメータ変化の伝播については、次節で述べる。

Component description
pump end.: <i>none</i>
exo.: $M_{in}, M_{out}, T_{in}, T_{out}, P$
ind.: $R$
$M_{out} = f_*(R)$
⋮

Figure 4-1 Component description

#### 4.1.2 構成記述

すべての要素機器は、要素機器記述で定義したいずれかの要素機器クラスのインスタンスとして表わされ、それぞれ固有名をもつ。要素機器クラスごとに、他の要素機器との接続のための口（ポート）を定義し、各要素機器ごとに、どのポートに何がつながっているかを記述することで、プラント構成を表わしている。また要素機器のクラス毎に、外生パラメータと他の機器のパラメータとの相関を記述する。これを要素機器間パラメータ相関式と呼ぶ。例えばタンク A は「タンク」というクラスの、弁 V はクラス「弁」の、配管 p1 はクラス「配管」の各々インスタンスであり、タンク A の接続口（ポート）1 には配管 p1 がつながっており、弁 V の一方の口にも p1 がつながっていると記述する。さらに要素機器間パラメータ相関式にはクラス「タンク」の外生パラメータ「流入量」はポート 1 につながっているクラス「配管」の外生パラメータ「流量」の値に等しく、さらにクラス「配管」の「流量」は、クラス「弁」の内生パラメータ「通過流量」に等しいと記す。これらにより弁 V の「通過流量」の変化からタンク A の「流入量」の変化が導ける。Figure 4-2 に例を示す。

Connection description
HX cold channel in-port connected to pipe1 ⋮
$M_{in}$ of valve V = $M_{out}$ of pipe connected to in-port of V ⋮

Figure 4-2 Structure description

#### 4.1.3 操作記述

自然言語に近い形式で表わした操作、操作の前提条件および操作目的と、要素機器のパラメータの状態の対応を記したものである。これは前章で提案したメンタルモデル構造表現における、三種類のレイヤ間リンクに相当する。つまり、各操作について、その実行により直接変化するパラメータ名と実行後の状態、およびあれば操作の前提条件となるパラメータ名とその状態を記述する。ここで操作により変化すると記されたパラメータが、独立パラメータである。また想定される各操作目的について、目的達成を意味するパラメータ名とその状態を記述する。例えば操作「弁V開」は「弁V」の独立パラメータ「開度」を「開」状態にすることを意味し、操作目的「タンクA加圧」は「タンクA」の「圧力」パラメータが「増加」状態になれば達成されたことになる。Figure 4-3 に例を示す。

Operation description
prerequisite of valve-A_open is [prs-qval of tank-A, low]
interpretation of fill_up_tank-X is [lvl-qdir of tank-X, increasing]
[prs-qval of tank-A, high] can-be-a-subgoal-of fill_up_tank-X
:

Figure 4-3 Operation description

## 4.2 制約伝播による操作手順の探索

次に前節で述べた知識を基に、ある操作目標が与えられたときにそれを満たすために必要な操作を求める手法を考える。これは全パラメータの全状態の組み合わせで定義される問題空間のなかから、目標とするパラメータの状態を含みパラメータ相関式により到達可能な経路を選び、その経路上で必要となる操作を挙げるという一種の探索問題となるが、これは制約問題として解くことがふさわしいと考える。なぜなら、解くべきパラメータ相関式のなかに保存式、つまり陰関数表現になっているものがあり、関係式により表わされた問題空間内の探索手法として代表的な述語論理では陽関数表現しか許されないからである。よってこの操作の導出問題は、目標であるパラメータの状態を起点となる制約と見なし、相関式によりその制約をパラメータの状態変化として伝播させ、制約を満足させられる操作を枚挙する制約充足問題となる。

一つのパラメータ相関式内での制約伝播は、以下のように行う。

1. 相関式が保存式であるか因果式であるかを問わず、右辺または左辺が多項式である場合は、单一の項、つまり一つのパラメータを葉ノードとした二分木構造で表わす。親ノードには、子ノードを算術記号でつなげたものが入る。
2. ある葉ノード ( $P$  とする) で表わされるパラメータの値を増やすまたは減らすことを出発点として選ぶ。実際にはこれは目標とするパラメータの状態として与えられる。 $P$  を出発ノードと呼ぶ。以下本研究では出発ノード以外には高々一つのノードのみが変化するものとする。またこの時点で全てのパラメータの値の符号(正負) は分かっているものとする。
3.  $P$  と兄弟ノード ( $Q$  とする) 各々の符号、および親ノード ( $R$  とする) に記されたそれらをつなぐ算術記号 ( $op$  とする) により、 $P$  を望ましい方向に変化させるためには  $Q$  が増減どちらの変化をすればよいかを求める。この規則はあらかじめ記しておく。例を Figure 4-4 に示す。この作業を側方伝播 (Sidelong Propagation) と呼ぶ。
4.  $Q$  が葉ノードでない場合、 $Q$  の子ノードについて、 $Q$  を望ましい方向に変化させるために増減どちらに変化させればよいかを各々求める。このための規則も同様に記述しておく。この作業を下方伝播 (Downward Propagation) と呼ぶ。 $Q$  の子ノードが葉ノードでない場合は、葉ノードに到達するまで作業を再帰的に行う。
5.  $Q$  が変化しないと仮定して、 $R$  の変化の方向を同様に求める。このための規則も同様に記述しておく。この作業を上方伝播 (Upward Propagation) と呼ぶ。

6.R を新たな出発ノードとして、木構造中の全てのノードの望ましい変化方向が調べられるまで 3 から 5 までの作業を繰り返す。

7. 作業が終了したときの P 以外の全ての葉ノードの変化方向が、P を望ましい方向に変化させるためにこの相関式から考えうる全ての、他のパラメータの変化を表わしている。但し上述のように出発ノード以外には一つのノードしか変化しないとしているため、これらのパラメータの変化は互いに排他的である。以上の作業の概略を Figure 4-5 に示す。

Operation	A Sign	B Sign	Change Direction
+	pos	pos	opposite
-	pos	pos	same
*	pos	pos	opposite
/	pos	pos	same
...	...	...	...

Figure 4-4 Propagation rule (Sidelong, Partial)

$$\begin{aligned}
 M_H C p_H T_H &= M'_H C p_H T_H + Q \\
 \Downarrow \\
 M_H C p_H T_H - (M'_H C p_H T_H + Q) &= 0 \\
 \Downarrow \\
 &\quad \begin{array}{c} - \\ \diagup \quad \diagdown \\ \times \quad + \\ \diagup \quad \diagdown \\ \times \quad T_H \quad Q \quad \times \end{array} \\
 &\quad \begin{array}{l} \text{Upward} \\ \text{Sidelong} \end{array} \\
 &\quad \begin{array}{c} \diagup \quad \diagdown \\ M_H C p_H \quad T_H \\ \text{Downward} \end{array} \\
 &\quad \begin{array}{c} \uparrow \quad \uparrow \\ M'_H C p_H \quad \uparrow \end{array} \\
 \Downarrow \\
 T_H \downarrow \leftarrow M'_H \uparrow \vee C p_H \uparrow_L
 \end{aligned}$$

Figure 4-5 Constraint propagation within an equation

上述の制約伝播アルゴリズムを用いて、操作目標が与えられたときにこれを達成するための操作手順を導出する手法を述べる。

- 1.要素機器内パラメータ相関式から、操作目標で対象としているパラメータ（これを対象パラメータと呼ぶ）を含む式を一つ選ぶ。因果式の場合は対象パラメータを因果元に含む式のみを対象とする。
- 2.上述の制約伝播アルゴリズムにより、対象パラメータが操作目標にあるように変化するために必要な、他のパラメータ（このうちの一つをMとする）の変化を枚挙する。これを要素機器内パラメータ展開と呼ぶ。
- 3.Mが内生パラメータである場合、他の要素機器内パラメータ相関式を用いて1,2を繰り返す。但し無限ループに陥るのを防ぐため一つの要素機器について一つの相関式は一度しか用いない。
- 4.Mが外生パラメータである場合、要素機器間パラメータ相関式およびプラント構成記述により、Mの変化を隣接する要素機器のパラメータ変化として伝播させてゆく。これを要素機器間パラメータ展開と呼ぶ。また要素機器内、要素機器間パラメータ展開作業により作られたパラメータ変化の伝播を表わす木構造中で、対象パラメータから出発して分岐や後戻りをせずに葉ノードに至る一本の経路を、一つの伝播経路と呼ぶ。
- 5.Mが独立パラメータである場合、それを望む方向に変化させる操作を行うことにより目標が達成されることになり、この操作が一つの解になる。ここまで伝播経路はMの後にこの操作を端として終わる。同様にして求めた、伝播経路の異なる他の操作とは互いに別解と見なせるため、目標を達成するための論理和として表わされる。
- 6.Mが定数パラメータである場合、それを変化させることはできないので、MおよびMまでの伝播経路を削除する。
- 7.Mが一時パラメータである場合、Mを存在させるために必要な操作を選び、それを行うことを伝播経路中に記述し、行ったものとして伝播を続行する。この場合同じ伝播経路中で同様に挙げられた他の操作とは、全てを行うことが目標達成のために必要であるため、目標を達成するための論理積として表わされる。
- 8.同一の伝播経路中で同一パラメータの相反する変化方向が導出された場合、先に展開されている方を優先し、ループになった伝播経路は削除する。このヒューリスティックにより対象とする問題によっては誤った伝播経路を作ってしまう可能

性があるが、アドホックでない他の汎用のヒューリスティックを見い出すことは困難であり、今後の課題である。

9. 以上の作業を伝播を続行できるノードがなくなるまで繰り返すと、完了時には、目標達成のために逐次実行が必要な操作同士は論理積、別解と見なせる操作同士は論理和として、考えられる全ての操作手順が挙げられることになる。

Figure 4-6 に以上の作業の概念を示す。

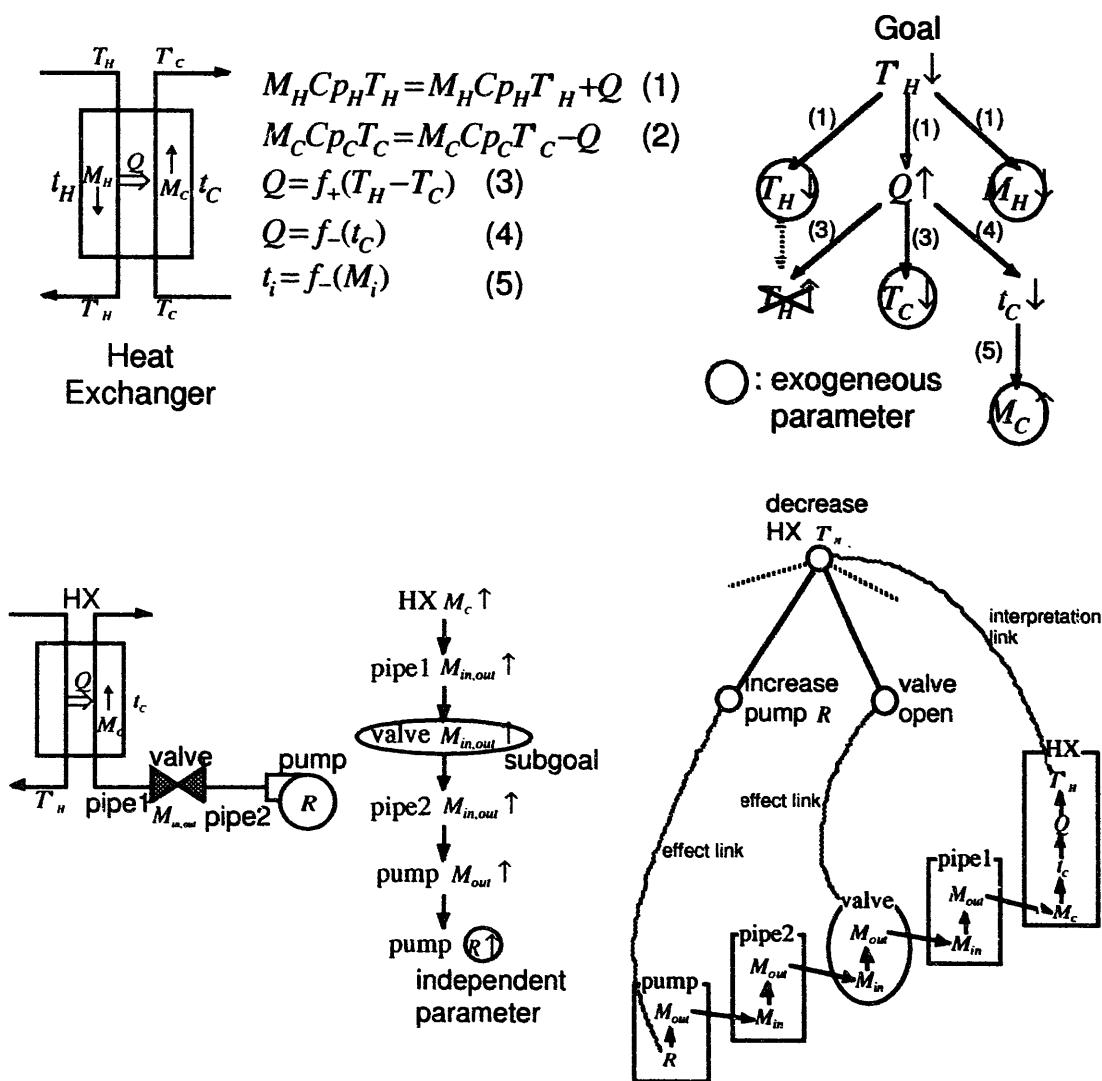


Figure 4-6 Derivation of a sequence of operations to attain the given goal

### 4.3 状況推論による操作手順の導出

前節で述べたアルゴリズムにより、プラントシステムにおいて任意の物理パラメータを増減任意の方向に変化させるために考えられる限りの操作手順を枚挙することができる。しかし「考えられる限りの」ということは、逆に考える必要のない手順や、さまざまな仮定を含んだ手順を導出する可能性がある。例えば途中に弁Vのついた配管でつながっている二つのタンクA, Bがあり、いまAからBに流体を移動させたいとする。上述のアルゴリズムで処理すれば「弁Vを開ける」という操作が、目標達成のために必要として導出される。しかしこれには二つの仮定がある。一つは現在弁が閉まっていること、もう一つはAの内圧がBの内圧以上であることである。前者については考慮しなくとも冗長な操作を表わすことになるだけであり、目標達成のための影響はない。しかし後者については、もし両タンクの内圧が逆の関係であれば、閉まっている弁を開ければ目標とは逆の現象が起きてしまい、弁を開けることは間違った操作になる。これは上述の制約伝播アルゴリズムのみでは解決できない問題であり、目標に対する解となる操作手順に状況依存の条件式を付けていためには、実際に弁やタンクの状態を参照する以外に方法がない。

本研究では、あるプラントの状態からさまざまな操作によって起こりうる状態を推論する、エンビジョニング技法で行うような状態予測が目的ではない。むしろリアルタイムで変化するプラントの状態に合わせ、目標達成のために必要な操作手順を簡潔にリアルタイムで求めることを目指している。よって制約伝播の途中でプラントの状態に依存する条件に出会った場合は、プラントから必要な情報を参照し、伝播経路中に条件分岐を作らないようにする。このように、推論機構が静的に記述された外界の内部表現以外に、外界に存在する情報を用いて推論を行うことを、状況に関する推論あるいは状況推論と呼び、外界の静的な内部表現だけを用いていた従来の状況内推論に対して、新たなパラダイムとして注目されている<sup>[74]</sup>。これによりプラントの状況に基づいて可能かつ妥当な操作手順を枚挙できる。

### 4.4 実装

前節までで提案した手法の妥当性を検証するため、上述のアルゴリズムをProlog言語によりEWS上に実装し、3.5節の実験で用いたリアルタイムプラントシミュレータとコンピュータネットワーク通信により連動させて、操作手順の導出を行った。結果をFigure4-7に示す。ここではタンクAの圧力を下げる目標として与えると、各タンクの圧力や入っている液体の量、弁の開閉状態などを参考しながら制約を伝播させて行き、最終的に八つの操作手順(hf\_operation)が導出されていることが分かる。パラメータおよびその変化でX-qdif plus/minusと記されているものは、各々パラメータXの値の微分値が正/負、つまりXの増減を表わしており、

INNER Prop, INTER Prop および TEMPORAL Prop は、それぞれ要素機器内パラメータ展開、要素機器間パラメータ展開、および一時パラメータの処理を行っていることを意味し、READ VALでプラントシミュレータでのパラメータ値を参照している。j\_path はパラメータの変化が伝播していく、一本の伝播経路を表わしており、この経路上にある操作、つまり目標達成のために全て行わなければならない操作が、リスト形式で hf\_operation に表わされている。異なる伝播経路は異なる番号の j\_path および hf\_operation で表わされ、これらは互いに別解となる。すでに行われている操作は hf\_operation に含まれていない。各 j\_path で最後の葉ノードに相当するものに satisfied あるいは satisfied と記されているのは、現時点ですぐにこの操作を行えば目標が達成される（前者）か、あるいはこのノードに記されたようにパラメータを変化させてから、挙げられた操作手順を行うべきか（後者）を意味している。つまり後者では副目標が設定されることになる。これも状況推論によるものであり、8番の操作手順ではタンク L の圧力がタンク A の圧力よりも低いために、挙げられた弁の開閉操作を行うだけでよいが、1番ではタンク B の圧力が高いために、まずそれを下げるからここに挙げた操作を行うべきであることを示している。

Goal = tank-a pressure-qdif minus

READ VAL = 3.03

Tank Pressure = 3.03

# # # INNER prop

Target = pressure-qdif minus

Using Equation 1

Target = gas-quantity-qdif minus

Using Equation 3

Target = liquid-volume-qdif minus

Using Equation 2

\*\*\*INTER prop

READ VAL = 50.0

(中略)

# # # INNER prop

Target = liquid-mflow-qval plus

Using Equation 1

====TEMPORAL prop

READ VAL = 0.0  
READ VAL = 3.0

\*\*\*INTER prop

# # # INNER prop

\$\$\$ Propagation Completed \$\$\$

hf\_goal (1,normalize-tank-a) .

j\_path (1,1,39,tank-b,pressure-qdif,minus,subgoal) .  
j\_path (1,1,38,v-b-l,valve-position,open,ind) .  
j\_path (1,1,34,v-b-l,prs-diff-qval,minus,tmp) .  
j\_path (1,1,29,v-b-l,gas-mflow-qval,minus,end) .  
j\_path (1,1,24,upper-drain-right,gas-mflow-qval,minus,exo) .  
j\_path (1,1,22,v-a-l,valve-position,open,ind) .  
j\_path (1,1,15,v-a-l,prs-diff-qval,plus,tmp) .  
j\_path (1,1,10,v-a-l,gas-mflow-qval,plus,end) .  
j\_path (1,1,4,tank-a,gas-mflow-qval,minus,exo) .  
j\_path (1,1,1,tank-a,gas-quantity-qdif,minus,end) .  
j\_path (1,1,0,tank-a,pressure-qdif,minus,end) .  
(中略)  
j\_path (1,8,86,tank-l,pressure-qdif,minus,satisfied) .  
j\_path (1,8,85,v-l-lm,valve-position,open,ind) .  
j\_path (1,8,81,v-l-lm,prs-diff-qval,minus,tmp) .  
j\_path (1,8,79,v-l-lm,gas-mflow-qval,minus,end) .  
j\_path (1,8,70,upper-drain-left,gas-mflow-qval,minus,exo) .  
j\_path (1,8,68,v-fd-l,valve-position,open,ind) .  
j\_path (1,8,65,v-fd-l,prs-diff-qval,plus,tmp) .  
j\_path (1,8,62,v-fd-l,gas-mflow-qval,plus,end) .  
j\_path (1,8,57,upper-drain-midleft,gas-mflow-qval,minus,exo) .  
j\_path (1,8,53,v-fd-s,prs-diff-qval,plus,tmp) .  
j\_path (1,8,51,v-fd-s,gas-mflow-qval,plus,end) .  
j\_path (1,8,43,upper-drain-midright,gas-mflow-qval,minus,exo) .  
j\_path (1,8,41,v-fd-m,valve-position,open,ind) .  
j\_path (1,8,35,v-fd-m,prs-diff-qval,plus,tmp) .  
j\_path (1,8,30,v-fd-m,gas-mflow-qval,plus,end) .  
j\_path (1,8,24,upper-drain-right,gas-mflow-qval,minus,exo) .

```
j_path (1,8,22,v·a·l,valve-position,open,ind) .
j_path (1,8,15,v·a·l,prs-diff-qval,plus,tmp) .
j_path (1,8,10,v·a·l,gas-mflow-qval,plus,end) .
j_path (1,8,4,tank·a,gas-mflow-qval,minus,exo) .
j_path (1,8,1,tank·a,gas-quantity-qdif,minus,end) .
j_path (1,8,0,tank·a,pressure-qdif,minus,end) .

hf_operation (1,1, [v·a·l-open,v·b·l-open]) .
(中略)
hf_operation (1,8, [v·a·l-open,v·fd·m-open,v·fd·l-open,v·l·lm-open]) .
```

Figure 4-7 An example of a computer output log during derivation of operations

## 4.5 まとめ

本章ではリアルタイムで変化するプラントの状態に追随して、プラント要素機器のある物理パラメータの増減という与えられた目標に対し、可能かつ妥当な操作手順を枚挙する手法を提案した。本手法では、まずプラントの挙動を、プラントの状態や要素機器の機能に依存しない局所的定性因果相関式で表わし、これを基に、制約伝播アルゴリズムにより、目標達成に寄与するパラメータの変化およびそれを実現するための操作を導出する。この過程でプラントの状態に依存した条件分岐が起きた場合には、プラントでのパラメータ値を参照し、導出された操作手順が常に現在のプラントの状況下で妥当であるようにする。本手法をEWS上に実装し、プラントシミュレータと連動させて操作手順の導出を行った結果、その妥当性が確認された。

## 5章 非単調推論と真理値管理技法による学習者モデルの構築

1章で述べたように、想定外事象に対する適切な対応操作を学習者に示唆するためには、操作対象の各部分について潜在的に複数存在する機能のうち、学習者がどの機能を知っているかが学習者モデルに表わされていることが必要である。本章ではそのような学習者モデルの構築手法を提案し、これに基づき作成したプロトタイプの訓練支援システムの詳細を報告する。また実験により手法の妥当性を検証する。

### 5.1 学習者モデル

3章で提案したメンタルモデル構造表現上で、二つのノードを結ぶ一つのリンクを、一つの知識単位と定義する。すべての知識単位は、in, out, unknown のいずれかを取る信念値を持つ。これは訓練支援システム内で、オラクルや推論規則を根拠に、学習者がその知識単位を持つ、持たない、どちらか分からないと見なしていることを意味する。このようにして表わされた知識単位の信念体系を、本研究での学習者モデルとする。二つ以上の連続した知識単位から成る経路をパスと呼び、パスによって結ばれる二つのノードを互いに可達であると言う。特に機能階層レイヤ上の知識単位 A の両端のノードが、定性因果レイヤを経由するパス 1 により可達である場合、パス 1 を知識単位 A の正当化パス (Justification Path) と呼ぶ (Figure 5-1 参照)。

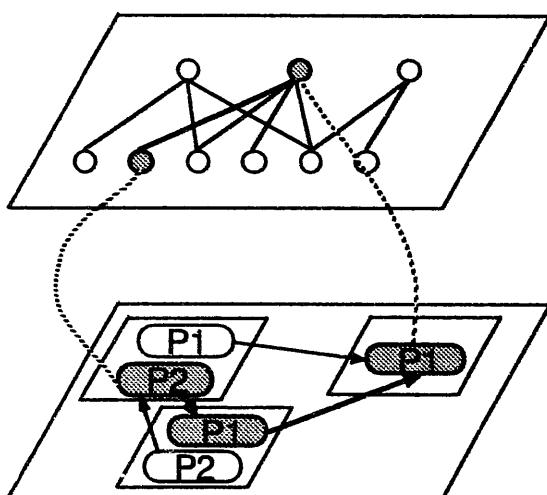


Figure 5-1 Structure of student model

このように定義した学習者モデルにより、学習者が知っていると思われるプラントのある部分の機能が表わされるとする根拠は、以下のとおりである。すなわち、機能階層レイヤ上のある知識単位の信念値がinであるとは、その知識単位の一方の端にあるノードで表わされた操作Aは、他方の端にあるノードで表わされた操作目的Xのために行われるということを、学習者が知っていると推論していることを意味する。これはAにより状態が変化する部分の持つ機能のうち、Xを満たすためという機能を学習者が知っていると見なしていることに等しい。よって前章で述べた手法により、プラントの状態を考慮した操作と操作目的の正しい対応関係を導出しておけば、対応関係のあるべきリンクでその信念値がoutになっているものを学習者に提示して新しい機能を示唆したり、逆に対応関係のあってはならないリンクでinになっている部分を、誤った知識を持っている可能性があるとして指摘でき、これが1章で述べた、想定外事象に対する適切な訓練能力の向上に寄与すると考える。

## 5.2 学習者モデル構築手法

一般に学習者モデルを多くのオラクルと適合させようとすると、その内部での論理的整合性の維持が困難になる<sup>[76]</sup>。これは学習者が必ずしも首尾一貫した回答をするとは限らないこと、およびそもそも学习の本質として学習者の考えが変わってゆくことから、学習者モデル構築上の不可避のトレードオフと考えられる。本研究では、多数のオラクルに対する適合性よりも、論理的整合性を重視する。本手法では、メンタルモデル構造表現上の知識の有無を、オラクルから推測してルールによって表わし、非単調推論と真理値管理機構の技法により、このルールの集合を論理的に無矛盾な状態に維持する。以下本節では、プラントの状態により操作目的とすべきパラメータ変化が選定されており、前章で述べた手法により、その各々について可能な限りの操作手順が導出されているとする。これらは全てプラントの物理パラメータの局所的因果則により合理的に求められた妥当な操作手順であり、これをメンタルモデル構造表現上で操作・操作目的のリンクおよびその正当化パスとして表わしたものを、規範的学習者モデルと呼ぶ。操作目的とすべきパラメータ変化の選定方法については、5.3節で述べる。

### 5.2.1 非単調推論による知識状態の推定

学習者がプラントモデルに対する操作を入力する毎に、非単調推論の一種であるデフォルト推論の技法によりデフォルトルールを作成または更新することで、学習者モデル中の知識単位の信念値を更新する。デフォルトルールも知識単位と同じ意味で信念値 in, out, unknown のいずれかを持ち、全ての知識単位およびデフォルトルールの作成初期の信念値はunknownである。以下に信念値更新のアルゴリズムを示す。

1. 学習者の操作目的を、学習者モデル中の機能階層レイヤ上で、信念値がinまたはunknownの知識単位により、学習者が入力した操作と結ばれている操作目的であるとする。これが複数存在する場合には、目的スタックに挙げられている、順位の高いものを選ぶ。目的スタックとは、プラントモデルの状態から操作の目的とすべき事項を選定し、優先度の高いものから順に並べたリストである。この選定手法については5.3節で述べる。該当する知識単位が学習者モデル中に存在しない場合は、規範的学習者モデルを用いて、同じ基準により選ぶ。

2. 選んだ操作目的Xと、学習者の入力した操作Aのあいだの正当化パスを求める。これは操作に対する操作目的を上に述べたように選んでいるため、規範的学習者内ですでに求められている。例えば他の操作Bを行うことを条件に知識単位(X-A)の正当化パスが同定された場合、以下のようなデフォルトルール(ルール番号1)を作る。

$$\frac{(X-A):(X-B)}{X \leftarrow A \wedge B}$$

これは学習者の操作Aの入力に対し、その操作目的をXとし、オラクルを基にした知識単位(X-A)を学習者が持つことを前提部、知識単位(X-B)を持つことをデフォルト部として、このデフォルト部が否定されない限り、操作A,Bを行うことでXが達成されるという結論部を学習者が知っていると仮定することを意味する。この仮定に基づき、正当化パス中の全ての知識単位および前提部とデフォルト部にある知識単位の信念値をinとし、信念値の根拠としてこのルールの番号を記録する。この例では知識単位(X-A), (X-B)の信念値をinとし、その根拠にルール1を記録する。

3. XとAのあいだに正当化パスを見つけられなかった場合は、Aと結ばれている他の操作目的について、ゴールスタックに挙げられている順に調べてゆく。そのような操作目的がない場合、あるいは該当する全ての操作目的について正当化パスが見つけられなかった場合には、操作の目的が不明であるとして、デフォルトルールは作成しない。

4. 以後学習者が新たな操作を入力する毎に、まず既存のデフォルトルールのデフォルト部に記述されている操作であるか否かを調べる。該当するデフォルトルールが見つかれば、入力された操作を、そのルールに表わされた操作手順の続きであると見なし、入力した操作に対応する、デフォルト部にあった知識単位を、前提部に移す。そのようなルールが見つからない場合は、新たな操作手順を開始したと見なし、上記1からの作業により、その操作目的や正当化パスを求め、新たなルールを作る。これは、ある操作目的を達成するためにある操作手順を開始した

場合は、それが完遂されるまでは他の操作手順を新たに開始はしないとの仮定に基づく。

- 5.一番最近に、4の処理により続行していると見なされた操作手順を、現在学習者が遂行している操作手順と見なし、カレントコンテクストとして記録する。これは学習者の操作の意図を推論したことに等しい。該当する操作手順が複数存在する場合や、新しいデフォルトルールを作成した直後で、続行していると判断した手順がない場合は、デフォルト部に記述された知識単位で信念値がinであるものの多い順、outであるものの少ない順、合計の知識単位数の少ない順に、カレントコンテクストの候補として枚挙する。これは操作目的を達成するために今後行われなくてはならない操作を知っていると思われ、かつその数が少ない手順を、優先して選んでいることを意味する。
- 6.上記4の処理によりデフォルト部が空集合となったルールRがある場合は、Rで表わされる操作手順を完遂し、それにより操作目的Xが達成されたことを意味する。この場合Rはデフォルト部が存在しないためこれ以上変化することはなく、その信念値をinとする。このような信念値がinのルールを根拠に持つ知識単位は、後述する真理値管理技法によりその信念値が変更されることなく、常にinである。またRと同じ操作目的Xを持ち、デフォルト部が空集合でない他のルールSについては、目的Xが達成された後は存在理由を失う。これについては、操作を行ってから実際に効果が現われるまでの時間遅れを考慮し、ゴールスタックにXが挙げられている間はそのまま保持しておくが、Xが挙げられなくなると、Sを削除し、知識単位の根拠からSを除く。これにより根拠となるルールがなくなった知識単位については、その信念値をunknownとする。
- 7.一旦デフォルトルールが作成されたものの、一定時間以上、その操作目的が達成されないままになっている場合は、その操作目的についての全てのルールの信念値をoutとし、信念値がoutのルールのみを根拠に持つ知識単位の信念値をout、outとunknownのルールだけを根拠に持つ知識単位の信念値をunknownとする。

### 5.2.2 真理値管理技法による論理的整合性の維持

前節で述べたように、知識単位の信念値はオラクルによるデフォルトルールの作成、更新により変更されうる。しかしある知識単位 $\alpha$ の信念値がoutとなった場合、これにより他のデフォルトルールとの間に矛盾が生じることがある。そこで以下の真理値管理規則に従い信念値やルールを変更することで、学習者モデルを常に一番新しいオラクルに対して整合する、無矛盾な信念値体系として維持する。

1.  $\alpha$ を前提部に持つルールについて、そのデフォルト部に記述された知識単位の信

念値を unknown とし、ルールを削除する。

2.  $\alpha$  をデフォルト部に持つルールについて、前提部にある知識単位に対して、 $\alpha$  を含まない別の正当化パスを探索する。成功すればデフォルト部を変更し、失敗すればルール内の  $\alpha$  以外の全ての知識単位の信念値を unknown とし、ルールを削除する。

### 5.3 プロトタイプ訓練支援システム

前章および本章で述べた手法の有用性を検証するために、プロトタイプの訓練支援システムを構築した。本節ではこのシステムの詳細を報告する。

#### 5.3.1 構成

Figure 5-2 に、作成したプロトタイプ訓練支援システムの構成を示す。

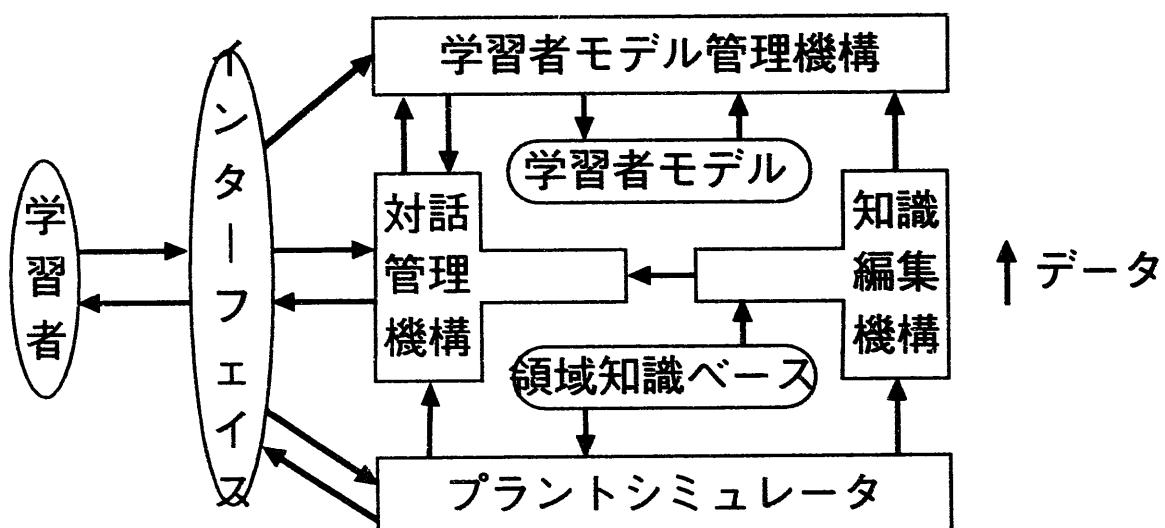


Figure 5-2 Architecture of the Prototype Training Support System

領域知識ベースにはプラントシミュレーションモデルや操作について、4.1 節に述べた形式で記述してある。知識編集機構ではプラントシミュレーションモデルの状態に基づいて操作目的となりうるパラメータ変化を選定し、その各々について4.2 節および4.3 節に述べた手法に従い、可能な操作手順を枚挙する。これが規範的学習者モデルとなる。学習者モデル管理機構では規範的学習者モデルを参照して、5.2 節に述べた手法で学習者モデルを構築する。対話管理機構では学習者の要求に応じて、行うべき操作やその根拠を提示する。

### 5.3.2 知識編集機構

知識編集機構で規範的学習者モデルを作成する理由は、プラントシミュレーションモデルで要素機器の故障を設定すると、故障のシナリオごとに規範的学習者モデルを用意せねばならず、想定外事象を扱う訓練支援システムとして、柔軟性、汎用性に欠けることである。操作目的が与えられた場合に可能な操作手順およびその正当化パスを導出する手法は前章で述べた。ここではプラントモデルの状態から想定される操作目的を選出する手法について述べる。

プラントモデルの状態を参照し、以下の二つの手続きにより、プラントモデルを標準的な状態に維持するために必要と思われる操作目的を選出し、ゴールスタックと呼ぶリストに優先度の高い順に記録する。但し各パラメータ毎に、その標準値と制限値が与えられている。

1. プラントモデル内の全パラメータより、標準値からの値の逸脱の方向（より大きい…+、より小さい…-）と、値の変化率（増加…+、減少…-）が、同符合であるものを選び出す。
2. パラメータの値及びその変化率から制限値到達までの時間猶予を算出し、少ない順にパラメータ名と修正の方向（増減）の対をゴールスタックに並べる。一組のパラメータとその修正方向が一つの操作目的となる。

ゴールスタックはプラントモデルの状態変化により、一定時間毎に更新される。これが更新されると規範的学習者モデルも更新され、よって変化するプラントモデルの状態に合わせて、常に適切な規範的学習者モデルが作成されることになる。またゴールスタックは、学習者の回答した操作の操作目的を同定する際の優先順位づけや、操作目的達成の確認にも用いられる。

### 5.3.3 対話管理機構

対話管理機構は、学習者からの要求に応じ、現在のプラントモデルの状態においてとることが最も望ましいと考えられる操作、およびその根拠を提示する。

学習者は操作が分からなくなった時などに、プラントシミュレータ上におかれたヘルプボタンを押すことで、行うべき操作についての教示を得ることができる。ここで行うべき操作とは、カレントコンテクストに挙げられている操作手順の中で、まだ行われていない操作のうちの任意の一つを指す。学習者がさらに他の操作手順を要求した場合には、ゴールスタックに挙げられている操作目的の順に、また同じ操作目的については必要な操作数が少ない順に、提示してゆく。また学習者がある

操作手順についてその根拠を求めた場合は、その操作手順に対応する正当化パスを表示する。

#### 5.3.4 実装

本訓練支援システムを、EWS上に実装した。プラントシミュレータはエキスパートシェルツールG2を用いて構築し、他のモジュールはProlog言語によりコーディングした。シミュレータの内容は3.5節の実験に用いたものと同一であり、表示形式などに若干の変更を加えてある。システム全体としての実行速度を上げるため、シミュレータとそれ以外のモジュールは各々別のマシン上で実行し、TCP/IPプロトコルによるコンピュータネットワーク通信により、両者間でのデータの受け渡しを行っている。これを行うためのプラントシミュレータ側の通信インターフェイスは、C言語で記述した。

プラントシミュレータ、知識編集機構、学習者モデル管理機構、および対話管理機構は、各々非同期に動作する。プラントシミュレータはその内部に記述されたシミュレーション式により1秒刻みで状態を更新し、知識編集機構は5秒ごとにプラントシミュレータからシミュレーションモデルの各パラメータの値を受け取り、規範的学習者モデルを作成する。学習者モデル管理機構および対話管理機構は学習者からの入力の度に起動される。

自分で仮の被験者となり、システムの動作試験を行った結果をFigure5-3に示す。ここではプラントモデルにタンクAの圧力およびタンクMの液量が増えるような故障を設定してある。まずそれらを正常値に戻すことがゴールスタックに挙げられ(GOAL)、各々について考えられる操作手順が枚挙されている(hf\_operation)。操作を入力すると、hf\_operationに挙げられている操作手順を基にデフォルトルール(default\_rule)を作り、知識単位(unit\_knowledge)の信念値を変更し、カレントコンテクスト(Current Context)をデフォルトルールの番号として求めている。デフォルトルールの二番目の引数は前提部、三番目はデフォルト部にある知識単位の番号を示しており、四番目の引数は操作目的、六番目は信念値である。知識単位の二番目の引数には操作目的、三番目には操作、四番目には根拠となるデフォルトルールの番号、そして五番目には信念値が各々記述されている。ある操作によって目的が達成されると対応するルールの信念値が変更され、その正当化パス(j\_path)およびどこからどこに何を移動させたことによってこの目的が達成されたか(solution)が、各々記録される。

\*\*\*\*\* START \*\*\*\*\*

@@@GOAL = normalize-tank-a

@@@GOAL = normalize-tank-m

@@@GOAL = drain-tank-m

hf\_operation (1,1, [v-a-out-open]) .

hf\_operation (1,2, [v-a-u-open,v-fd-ab-open]) .

hf\_operation (1,3, [v-a-u-open,v-b-u-open]) .

hf\_operation (1,4, [v-a-l-open,v-b-l-open]) .

hf\_operation (1,5, [v-a-l-open,v-fd-m-open,v-m-lf-open]) .

hf\_operation (1,6, [v-a-l-open,v-fd-m-open,v-fd-s-open,v-s-u-open]) .

hf\_operation (1,7, [v-a-l-open,v-fd-m-open,v-fd-s-open,v-l-ls-open]) .

hf\_operation (1,8, [v-a-l-open,v-fd-m-open,v-fd-s-open,v-fd-l-open,v-m-u-open]) .

hf\_operation (1,9, [v-a-l-open,v-fd-m-open,v-fd-s-open,v-fd-l-open,v-l-lm-open]) .

(中略)

v-m-lf-open was done.

Series Operation → Current Context 8

unit\_knowledge (2,normalize-tank-a,v-m-lf-open, [1] ,in) .

unit\_knowledge (5,normalize-tank-a,v-s-u-open, [2] ,in) .

unit\_knowledge (6,normalize-tank-a,v-l-ls-open, [3] ,in) .

unit\_knowledge (8,normalize-tank-a,v-m-u-open, [4] ,in) .

unit\_knowledge (3,normalize-tank-a,v-fd-m-open, [5,4,3,2,1] ,in) .

unit\_knowledge (9,normalize-tank-a,v-l-lm-open, [5] ,in) .

unit\_knowledge (7,normalize-tank-a,v-fd-l-open, [5,4] ,in) .

unit\_knowledge (4,normalize-tank-a,v-fd-s-open, [5,4,3,2] ,in) .

unit\_knowledge (1,normalize-tank-a,v-a-l-open, [5,4,3,2,1] ,in) .

unit\_knowledge (10,normalize-tank-m,v-m-lf-open, [6] ,in) .

unit\_knowledge (12,normalize-tank-m,v-fd-m-open, [7,6] ,in) .

unit\_knowledge (11,normalize-tank-m,v-b-l-open, [7,6] ,in) .

unit\_knowledge (15,normalize-tank-m,v-fd-s-open, [7] ,in) .

unit\_knowledge (14,normalize-tank-m,v-fd-l-open, [7] ,in) .

unit\_knowledge (13,normalize-tank-m,v-m-u-open, [7] ,in) .

unit\_knowledge (16,drain-tank-m,v-m-lf-open, [8] ,in) .

unit\_knowledge (17,drain-tank-m,v-b-l-open, [8] ,in) .

unit\_knowledge (18,drain-tank-m,v-fd-m-open, [8] ,in) .

```
default_rule (2, [3] , [5,4,1] ,normalize-tank-a,0, unknown) .  
default_rule (3, [3] , [6,4,1] ,normalize-tank-a,0, unknown) .  
default_rule (4, [3] , [8,7,4,1] ,normalize-tank-a,0, unknown) .  
default_rule (5, [3] , [9,7,4,1] ,normalize-tank-a,0, unknown) .  
default_rule (7, [12] , [11,15,14,13] ,normalize-tank-m,0, unknown) .  
default_rule (1, [2,3] , [1] ,normalize-tank-a,0, unknown) .  
default_rule (6, [10,12] , [11] ,normalize-tank-m,0, unknown) .  
default_rule (8, [16,18] , [17] ,drain-tank-m,0, unknown) .  
(中略)
```

v-a-u-open was done.

Series Operation -> Current Context 9 11

Goal Attained! normalize-tank-a

(中略)

```
default_rule (9, [19,20] , [] ,normalize-tank-a,1, in) .  
(中略)
```

```
j_path (1,normalize-tank-a,40,tank-b,pressure-qdif,minus,satisfied) .  
j_path (1,normalize-tank-a,33,v-b-u,prs-diff-qval,plus,tmp) .  
j_path (1,normalize-tank-a,28,v-b-u,gas-mflow-qval,plus,end) .  
j_path (1,normalize-tank-a,21,lower-drain,gas-mflow-qval,minus,exo) .  
j_path (1,normalize-tank-a,20,v-a-u,valve-position,1,ind) .  
j_path (1,normalize-tank-a,12,v-a-u,prs-diff-qval,minus,tmp) .  
j_path (1,normalize-tank-a,8,v-a-u,gas-mflow-qval,minus,end) .  
j_path (1,normalize-tank-a,4,tank-a,gas-mflow-qval,minus,exo) .  
j_path (1,normalize-tank-a,1,tank-a,gas-quantity-qdif,minus,end) .  
j_path (1,normalize-tank-a,0,tank-a,pressure-qdif,minus,end) .  
(中略)
```

solution (normalize-tank-a,tank-a,tank-b,gas,9) .

(中略)

\*\*\*\*\* END \*\*\*\*\*

Figure 5-3 An example of a computer output log during operating prototype TSS

## 5.4 学習者モデル構築手法の有用性

本節では前節までで構築したプロトタイプ訓練支援システムを用いて、学習者モデル構築手法の妥当性を調べるために行った実験について報告する。

実験では3.5節で用いたものと同じプラントシミュレータを用い、タンクの上部または下部に穴が開いている、配管に穴が開いている、弁が開固着あるいは閉固着になっている、といった故障シナリオを入れた。被験者は工学系学科の卒業生4人であり、3.5節の実験と同様、まずプラントの構成や標準的な操作について文書および口頭で説明した後、操作と発話の練習のため20分ほど故障シナリオの入っていないプラントモデルを操作してもらい、その後実験を行った。3.5節の実験と異なり、本実験ではFigure 3-5に示したプラントの構成図が表示されている。被験者には操作目的とそれを選んだ理由、およびそれを達成するために行う操作を発話してもらい、これをビデオカメラおよびマイクを用いて記録した。一方訓練支援システム内では、被験者が操作をとる毎に上記のログに示したようにカレントコンテクストおよびデフォルトルールと知識単位の信念値が記録されており、実験後にこれらの記録を用いて、被験者の行おうとした操作手順と、その時に同定されたカレントコンテクストを比較した。但し実験では故障して開かない弁など、操作を行っても実際には効果のない場合があるため、訓練支援システム側でも、そのような操作を行った場合には、もしその弁が正常であればどのような操作手順を行うつもりであったかを記録し、この意図が合っているか否かを見た。

故障シナリオは2ケース用意し、各被験者に両方のシナリオを与え、計8回の実験を行った。うち1ケースでは訓練支援システム内のログがとれなかつたため、残り7ケースについて発話記録と訓練支援システム内の記録とを比較した。結果をTable5-1に示す。First candidateとは被験者の操作意図が一つ以上挙げられたカレントコンテクスト候補の最上位のものと一致した場合、Lower candidateとは最上位以外に挙げられたカレントコンテクスト候補と一致した場合を意味する。被験者の意図がカレントコンテクスト候補として推論されなかつた11回のうち、2回は被験者が意図した箇所と異なる操作を行つたためであつた。

Table 5-1 Appropriateness of identified current context

Appropriateness of Identified Current Context		Number of Cases	
Appropriate	First candidate	17	31
	Lower candidate	14	
Inappropriate		11	
Total		42	

## 5.5 まとめ

本章では非単調推論および真理値管理の技法を用いて、首尾一貫しない恐れがある学習者の回答履歴から、常に学習者の最新の回答と整合する論理的に無矛盾な学習者モデルを構築する手法、およびプラント操作を課題として学習者の意図する操作目的と操作系列を推論する手法を提案した。この手法と前章で提案した規範的学習者モデルの構築手法を用いて、プロトタイプの訓練支援システムを構築した。実験により、本手法が学習者の操作意図を同定するために有用であることが示された。これによりプラント各部分の機能についての学習者の理解状態を表わした学習者モデルの構築手法が提案されたと考える。

## 6章 結言

本研究では、SRK モデルでいうナレッジベースの問題解決行動による、プラントの想定外事象に対する適切な対応を訓練する訓練支援システム構築のための方法論の提案を目的とし、以下の知見を得た。

1. 目標駆動のプラント操作計画作成行動における操作員の過誤原因の分類、および計算機によるその同定手法を手段目標解析に基づいて提案した。同手法を実装した過誤原因同定システムを用いた実験から、特に操作と操作目的の対応関係を被験者が理解していない場合は正しく過誤原因を同定できないという、手段目標解析に基づく手法の限界が示された。
2. 操作員の持つプラント操作に関する知識とプラントの振る舞いに関する知識を、各々機能階層モデルと定性因果モデルによって表わし、後者の知識から前者の知識の正当性が導出できるよう、両モデルをリンクで繋いだ二層構造の知識モデルを、操作員の持つメンタルモデルの構造表現として提案した。簡単なプラントシミュレータを用いて経験的に構築されるメンタルモデルの特徴を調べた実験により、プラント操作員のメンタルモデルを表わすための、同表現の十分性を確かめた。またプラントシミュレータ上で想定外事象を扱った実験により、同表現で表わされる知識を持つことが、想定外事象に対する適切な対応能力の向上に寄与することが示された。よって同表現を、本研究で構築する訓練支援システムの中で学習者モデルの枠組みとして用いることの妥当性が確かめられた。
3. プラントモデルに対して学習者が行った操作から、学習者の持つ知識を推論して、上記のメンタルモデル構造表現上に学習者モデルを構築し、デフォルト推論と真理値管理の技法により、その論理的整合性を維持する手法を提案した。またプラントモデル中でのパラメータ変化の制約伝播により、プラントの状態を鑑みて妥当な操作手順を枚挙する手法を提案した。これらの手法に基づきプロトタイプの訓練支援システムを構築し、学習者モデル構築手法について、その妥当性を実験により検証した。

本研究の結果、想定外事象への適切な対応を訓練するための訓練支援システムの構築のために、今後解決すべきと課題として考えられるものを三点考察する。まず教授指導方略。学習者モデルについて、状況に応じて操作対象に複数存在すると考えられる機能に関する学習者の理解状態が表わせるという要求は、本研究で提案した手法により達成されたと考える。よって次に「学習者がまだ気付いていないと思われる機能を示唆する」と1章で述べた教授指導方略の基本方針に従い、いかなるタイミングでどのような情報を学習者に提示するかを考察し、汎用性のあるアルゴ

リズムとして記述する必要がある。

次にプラント操作において用いられる知識についての再考。これは例えば、本研究では4章で述べたように、プラント操作手順を導出する際に制約伝播で先に扱ったパラメータ変化を優先するとしているが、これは認知工学的に根拠のないヒューリスティックであり、実際に人間が行っている推論方法あるいは用いているヒューリスティックを適切に模擬しているとは言い難い。このため例えば素朴物理学やオントロジー理論に踏み込み、人間が物理式で記述される対象の挙動を理解する際に用いていると考えられている「深い知識」と、問題解決時に直接用いられている「浅い知識」との相関について、考察を加える必要があると考える。故障診断への応用では精力的な研究が見られるが、状況診断過程と計画作成過程はRasmussenによる認知活動の梯子モデルにおいても明確に分かれており、各々で用いられる「深い知識」が同一の表象により表わされるとは限らない。知識表現問題の再考である。

最後はナレッジベースの問題解決過程に対する、機能的同型性の違いの影響について。これは応用的な興味からであるが、本研究3.5節や5.3節で用いたプラントモデルは機能的多重性に富み、そのためさまざまなバックアップ操作手順が考えられるという長所を持つが、基本的には全て圧力差による流体移動という、きわめて単純なメカニズムによっており、一度それに気付けば機能的固定に陥らずに済む場合が多い。これに対しより機能的同型性の薄い、つまり新しい機能を見つけ難く、一つが見つかってもそれだけでは問題解決には不十分であるような例題に対しても、本研究での手法が通用するか否かを調べることは、興味深い。

本研究は、人間の情報処理過程を決定論的なモデルで表わし、それにより人間機械系の設計、評価の体系化を図ろうとする、認知工学的アプローチに則っている。本研究の成果により、広義のヒューマンインターフェイス工学の進展に有意義な貢献ができた信じている。

## 参考文献

- [1] J.Rasmussen, "Skills, Rules, and Knowledge : Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-13 (1983)
- [2] 宮岡, "原子力の安全性とヒューマンファクター", 原子力工業, Vol.36, No.11 (1990)
- [3] 西田, 佐伯, ヒューマン・コンピュータ交流技術, オーム社 (1991)
- [4] J. Rasmussen, Information Processing and Human-Machine Interaction, An Approach to Cognitive Engineering, NY, North-Holland (1986)
- [5] 秋吉, 西田, "大規模システムの挙動理解のための階層型定性シミュレーション", 情報処理学会論文誌, vol.32, no.1 (1991)
- [6] N.Tanikawa, T.Shida, H.Ujita, T.Yokota, and K.Kato, "An interactive simulation-based education system for BWR emergency procedure guidelines"
- [7] 笠井, 大井, "プラント挙動理解のためのCAIシステム", 人工知能学会研究会資料, SIG-IES-9303 (1994)
- [8] 吉村, "知識処理技術を用いた運転員教育システムの開発", 日本原子力学会誌, Vol.32, No.9 (1990)
- [9] E. Wenger, Artificial Intelligence and Tutoring Systems, Morgan Kaufmann Publishers, Inc. (1987)
- [10] 溝口, 角所, "知的CAIにおける学習者モデル", 情報処理, Vol.29, No.11 (1988)
- [11] 西田, "メディアテクノロジーの現状と将来", システムと制御, Vol.30, No.7 (1986)
- [12] 若林, 吉川, 河野, "電力会社、メーカー、大学等におけるヒューマンファクター研究の現状", 原子力工業, Vol.36, No.11 (1990)
- [13] 豊田, 中村, "知的CAIにおける知識表現と教授法", 情報処理, Vol.29, No.11 (1988)
- [14] 近藤, "原子力発電所自動化の課題", エネルギーレビュー, No.12 (1990)
- [15] 伊藤, "知的CAIシステム探訪", 情報処理, Vol.29, No.11 (1988)
- [16] J. Lave and E. Wenger, Situated Learning: legitimate peripheral participation, Cambridge University Press (1991)
- [17] 広瀬, "人工現実感はどこまで実現するか", Human Interface, Vol.5, No.2 (1990)
- [18] 人工知能学会ヒューマンインターフェイスと認知モデル研究会資料(第15回) (1992)
- [19] 人工知能学会全国大会(第6回)論文集 (1992)
- [20] 人工知能学会ヒューマンインターフェイスと認知モデル研究会資料(第17回) (1992)
- [21] 大槻, 山本, "知的CAIのパラダイムと実現環境", 情報処理, Vol.29, No.11

(1988)

- [22] 池田, 盛岡, 広瀬, 大塚, 渡辺, "プラント機能学習シミュレータとCAI導入による運転員教育の充実", 火力原子力発電, Vol.39, No.3 (1988)
- [23] 高野, 沢柳, 可部谷, "電力中央研究所におけるヒューマンファクター研究の現状(その2)", 火力原子力発電, Vol.42, No.6 (1991)
- [24] 高橋, 佐藤, 北村, 梶山, "プラント運転員教育用知的CAIにおける学生モデル構築法", 人工知能学会研究会資料 (1991)
- [25] Erik Hollnagel, "The design of fault tolerant systems : Prevention is better than cure", Reliability Engineering and System Safety, vol.36 (1992)
- [26] 原子力工学試験センターヒューマンファクターセンターモデル研究グループ編, 人間の振舞モデルはやわかり (1990)
- [27] 古田, 大学院講義「原子力工学特論」講義資料, (1992)
- [28] Swain, A.D., Guttman, H.E., Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278 (1983)
- [29] H.Ujita, M.Fukuda, "Operator Performance Evaluation Program", Paper for IAEA Specialist Meeting on "Man-Machine Communication for Emergency Operation in Nuclear Power Plants" (1988)
- [30] 橋本, "マンマシンシステムにおける人間の特性の過誤", 計測と制御, Vol.19, No.1 (1980)
- [31] 渕監修, 古川, 溝口共編, 知識の学習メカニズム, 共立出版 (1986)
- [32] M.Visciola, A.Armando, and S.Bagnara, "Communication patterns and errors in flight simulation", Reliability Engineering and System Safety, vol.36 (1992)
- [33] A.Rizzo, S.Bagnara, and M.Visciola, "Human error detection process", Int. J. Man-Machine Studies, Vol.27 (1987)
- [34] 波多野編, 認知心理学講座4 学習と発達, 東京大学出版会 (1982)
- [35] D. Meister, Human Factors : Theory and Practice, Wiley-International (1971)
- [36] W.J. Clancey, Knowledge-Based Tutoring : The GUIDON Program, MIT Press (1987)
- [37] J.R. Carbonell, "'AI in CAI' : An artificial intelligence approach to Computer-Assisted Instruction", IEEE Trans. Man-Machine Systems, vol.11, no.4 (1970)
- [38] C. Dede, "A review and synthesis of recent research in intelligent computer-assisted instruction", Int. J. Man-Machine Studies, vol.24, pp.329-53 (1986)
- [39] H. Ujita, "Human Error Classification and Analysis in Nuclear Power Plants", J. Nucl. Sci. Technol., vol.22, no.6 (1985)
- [40] E. Hollnagel, "The phenotype of erroneous actions", Int. J. Man-Machine Studies, vol.39, pp.1-32 (1993)
- [41] J. Rasmussen, et al., "Classification system for reporting events involving human malfunctions", RISO-M-2240 (1981)
- [42] W.B. Rouse, S.H. Rouse, "Analysis and classification of human error", IEEE Trans.

- Syst., Man, Cybern., vol. SMC-13, no.4 (1983)
- [43] J. Reason, Human Error, Cambridge University Press (1990)
- [44] P.C. Cacciabue, "Cognitive modeling : A fundamental issue for human reliability assessment methodology?", Rel. Eng. & System Safety, vol.38 pp.91-97 (1992)
- [45] G.W. Parry, "The need for, and a proposed structure of, a second generation HRA methodology", Proc. of the Int. Conf. on Probabilistic Safety Assessment and Management II (PSAM-II) , 20-25 Mar. 1994, San Diego, California, ed. G.E. Apostolakis. vol.2 pp.054-7 - 12 (1994)
- [46] P.C. Cacciabue and E. Hollnagel, "Human models in Reliability and safety analysis of interactive systems", Proc. of Probabilistic Safety Assessment Int. Topical Meet. (PSA'93) , 26-29 Jan. 1993, Clearwater Beach, Florida, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, vol.1 pp.25-31 (1993)
- [47] A.N. Beare, C.D. Gaddy, G.W. Parry, and A. Singh, "An approach for assessment of the reliability of cognitive response for nuclear power plant operating crews", Proc. of the Int. Conf. on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM) , 4-7 Feb. 1991, Beverly Hills, California, ed. G.E. Apostolakis. Elsevier, New York, NY, vol.2 pp.827-32 (1991)
- [48] A.P. Macwan and A. Mosleh, "A simulation-based approach to modeling errors of commission during nuclear power plant accidents : Application to PRA", Proc. of Probabilistic Safety Assessment Int. Topical Meet. (PSA'93) , 26-29 Jan. 1993, Clearwater Beach, Florida, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, vol.1 pp.40-46 (1993)
- [49] M. Visciola, A. Armando, and S. Bagnara, "Communication patterns and errors in flight simulation", Rel. Eng. & System Safety, vol.36, pp.253-59 (1992)
- [50] 正田, ヒューマンエラー, エイデル研究所 (1988)
- [51] D.A. Norman, The Psychology of Everyday Things, NY, Basic Books Inc., (1988)
- [52] K. Furuta, and S. Kondo, "An approach to assessment of plant man-machine systems by computer simulation of an operator's cognitive behaviour", Int. J. Man-Machine Studies, vol.39, pp.473-93 (1993)
- [53] A. Newell, and H. Simon, GPS-A Program that Simulates Human Thought, Computers and Thought, Feigenbaum, E.A. and Feldman, J. eds., McGraw-Hill, NY (1963)
- [54] 黒田, "ヒューマンファクターとは", 原子力工業, Vol.36, No.11 (1990)
- [55] Y. Furuhama, K. Furuta and S. Kondo, "Identification of causes of human errors in support of the development of intelligent computer-assisted instruction systems for plant operator training", Rel. Eng. & System Safety, vol.47 pp.75-84 (1995)
- [56] 古田, 駒崎, "メンタルモデルの自発的形成過程と対象との同型性", 認知科学, vol.2, no.1 (1995)
- [57] 吉川, "原子力の高度化への新しい視点", 日本原子力学会誌, Vol.31, No.1 (1989)
- [58] 長町, 三上, 福場, 伊藤, 長谷川, 辻, 西野, 神代共著, 現代の人間工学, 朝倉書

店 (1986)

- [59] R.S.Michaelski eds., 電総研人工知能研究グループ訳, 知識獲得と学習シリーズ  
第1巻 知識獲得入門 帰納学習と応用, 共立出版 (1987)
- [60] R.S.Michaelski eds., 電総研人工知能研究グループ訳, 知識獲得と学習シリーズ  
第3巻 教示学習と知的CAI, 共立出版 (1987)
- [61] R.S.Michaelski eds., 電総研人工知能研究グループ訳, 知識獲得と学習シリーズ  
第4巻 知識獲得と認知科学 学習とは何か, 共立出版 (1987)
- [62] 古川, 溝口共著, 淀監修, 知識情報処理シリーズ第2巻 知識の学習メカニズム, 共立出版 (1986)
- [63] 日本認知科学会編, 認知科学の発展第4巻, 講談社 (1991)
- [64] 大須賀, 佐伯共著, 知識工学講座第3巻 知識の獲得と学習, オーム社 (1987)
- [65] 科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室監修, 原子力安全委員会安全審査指針集 改訂5版, 大成出版社 (1989)
- [66] 前沢, 概説 安全工学, 共立出版 (1973)
- [67] 太田, 多鹿編, 認知心理学: 理論とデータ, 誠信書房 (1991)
- [68] J.R.Anderson eds., 富田, 増井, 川崎, 岸 訳, 認知心理学概論, 誠信書房 (1986)
- [69] B. Woolf, "Theoretical Frontiers in Building a Machine Tutor" in Kearsley, G eds., Artificial Intelligence and Instruction : Application and Method, pp.193-267, Addison-Wesley (1987)
- [70] 古川, 溝口共著, 淀監修, 知識情報処理シリーズ第1巻 メンタルモデルと知識表現, 共立出版 (1986)
- [71] 西田, 定性推論の諸相, 朝倉書店 (1993)
- [72] Y. Iwasaki and H.A. Simon, "Causality in device behaviour", Artificial Intelligence, Vol.29, pp.3-32 (1986)
- [73] 鶴尾, "物理法則に基づく外的駆動型因果性の導出", 人工知能学会誌, Vol.5, No.4 (1990)
- [74] 中島, "状況に依存した推論", 人工知能学会誌, Vol.7, No.3 (1992)
- [75] 田中, 定性推論, 共立出版 (1989)
- [76] J. Self, "Model-based cognitive diagnosis", J. of User Modeling and User-Adapted Interaction, Vol.3, pp.89-106 (1993)
- [77] L.S. Vygotsky, Mind in society : The development of higher psychological process, Cambridge MA, Harvard University Press (1978)
- [78] J. Roschelle, "Designing for conversations", AAAI Symposium on knowledge-based environments for learning and teaching (1990)
- [79] 例えは Int. J. of Man-Machine Studies, Special issue : Computer-supported Cooperative Work and Groupware. Part 1 and 2, Vol.34, No.1,2 (1991)
- [80] 例えは 人工知能学会知的教育システム研究会資料, SIG-IES-9501 (1995)
- [81] N.G. Bourbakis eds., Applications of Learning & Planning Methods, World Scientific (1991)

- [82] J.S. Brown, et al., "Diagnostic Models for Procedural Bugs in Basic Mathematical Skills", *Cognitive Science*, Vol.2, pp.155-191 (1978)
- [83] 河野, 時森, 池田, 野村, 溝口, "非単調性の定式化に基づく学習者モデル構築方式", *人工知能学会誌*, Vol.8, No.4 (1993)
- [84] 平嶋, 中村, 池田, 溝口, 豊田, "ITSを指向した問題解決モデル MIPS", *人工知能学会誌*, Vol.7, No.3 (1992)
- [85] 岡本, 森広, "非単調推論による学習者の理解構造のモデル化の一方法", *人工知能学会誌*, Vol.7, No.3 (1992)
- [86] 池田, 溝口, 角所, "学生モデル記述言語 SMDL と学生モデルの帰納推論アルゴリズム SMIS", *電子情報通信学会論文誌 (D-II)*, Vol.J72-D-II, No.1 (1989)
- [87] 島崎, 奥畑, 坂根, 野村, 太田, 池田, 溝口, "ITSのための汎用フレームワーク FITSにおける教授戦略の運用法", *人工知能学会誌*, Vol.8, No.2 (1993)
- [88] 中村, 平嶋, 上原, 豊田, "学生の誤りを解釈する機構の開発 -ITSのための一般化および類推を用いたモデル生成法-", *電子情報通信学会論文誌 (D-II)*, Vol.J72-D-II, No.7 (1989)
- [89] 大槻, "知的CAIの技術課題と今後の動向", *計測と制御*, Vol.31, No.12 (1992)
- [90] 山口, 溝口, 田岡, 小高, 野村, 角所, "深い知識に基づく一般ユーザー向けの説明機能", *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.J70-D, No.11 (1987)
- [91] 例えば山口, 溝口, 中村, 小澤, 鳥越, 野村, 角所, "対象モデルと故障モデルに基づく知識コンパイラ II の構築と評価", *人工知能学会誌*, Vol.7, No.4 (1992)
- [92] 溝口, "知的教育システム", *情報処理*, Vol.36, No.2 (1995)
- [93] 河合ら, "論理プログラミングと帰納推論による汎用的CAIシステム", *情報処理学会論文誌*, Vol.26, No.6 (1985)
- [94] J.D. Hollan, E.L. Hutchins, and L. Weitzman, "STEAMER : An interactive Inspectable simulation-based training system", *AI Magazine*, 1984 Summer (1984)
- [95] E. Shapiro, *Algorithmic program debugging*, MIT Press (1982)
- [96] J. Self, "Bypassing the intractable problem of student modeling", *Proc. of ITS '88*, pp.18-24 (1988)
- [97] P. Langley, et al., "Automated Cognitive Modeling", *Proc. of National Conf. on Artificial Intelligence*, Austin, Texas, pp.193-197 (1984)
- [98] J.S. Brown and K. Vanlehn, "Repair Theory : A generative theory of bugs in procedural skills", *Cognitive Science*, Vol.4, pp.379-426 (1980)
- [99] K. Vanlehn, "Learning one subprocedure per lesson", *Artificial Intelligence*, Vol.31, pp.1-40 (1987)
- [100] D.E. Kieras and S. Bovair, "The role of mental model in learning to operate a device", *Cognitive Science*, Vol.8, pp.255-273 (1984)
- [101] P.N. Johnson-Laird, "Mental models in cognitive science", *Cognitive Science*, Vol.4, pp.71-115 (1980)
- [102] D.A. Norman, "Twelve issues for cognitive science", *Cognitive Science*, Vol.4,

pp.1-32 (1980)

- [103] M. Matz, "Toward a process model for high school algebra" in D.H. Sleeman and J.S. Brown eds., Intelligent Tutoring Systems, Academic Press (1982)
- [104] J.D. Moore, "What makes human explanations effective?", Proc. of 5th Ann. Conf of Cognitive Science (1993)
- [105] 例えば 人工知能学会知的教育システム研究会資料, SIG-IES-9403 (1994)
- [106] M.D. Williams, J.D. Hollan, and A.L. Stevens, "Human reasoning about a simple physical system" in D. Gentner and A.L. Stevens eds., Mental Models, Lawrence Erlbaum Associates, Inc. (1983)
- [107] J. de Kleer and J.S. Brown, "Assumption and ambiguities in mechanistic mental models" in D. Gentner and A.L. Stevens eds., Mental Models, Lawrence Erlbaum Associates, Inc. (1983)
- [109] M. Lind, M.N. Larsen, and A. Osman, "Applications of multilevel flow modeling", Proc. of Int. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Vol.4, pp.42-3-1 - 10, Tokyo (1992)
- [110] J.S. Brown, R.R. Burton, and J. de Kleer, "Pedagogical, natural language, and knowledge engineering techniques in SOPHIE I, II, and III" in D.H. Sleeman and J.S. Brown eds., Intelligent Tutoring Systems, Academic Press (1982)
- [111] B.Y. White and J.R. Frederiksen, "Intelligent tutoring systems based upon qualitative model evolution", Proc. of the National Conf. on Artificial Intelligence, Philadelphia, pp.313-319 (1986)
- [112] 三木, 高速増殖炉, 日刊工業新聞社 (1972)
- [113] 西田, 定性推論の諸相, 朝倉書店 (1993)
- [114] E.M. Dougherty Jr. and J.R. Fragola, Human Reliability Analysis : A systems engineering approach with nuclear power plant applications, Wiley-Interscience (1988)
- [115] 安西, 岩波講座ソフトウェア科学 16 認識と学習, 岩波書店 (1989)
- [116] 海保, 原田編, プロトコル分析入門 - 発話データから何を読むか-, 新曜社 (1993)
- [117] 大槻, "発見的学习とその支援環境", 人工知能学会誌, Vol.8, No.4 (1993)
- [118] M.W. van Someren, Y.F. Barnard, and J.A.C. Sandberg, The Think Aloud Method : A practical guide to modelling cognitive processes, Academic Press (1994)
- [119] R.J. Seidel and P.R. Chatelier eds., Advanced Technologies Applied to Training Design, Plenum Publishing (1993)