

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†

秋吉政徳^{††} 西田正吾^{††}

本論文では、大規模なシステムの運用に伴う運転員の教育・訓練の高度化にむけて、深い理解を支援する訓練形態のための計算機援用方法を述べる。従来の技能の向上を目指した訓練形態とは異なり、不測時の異常事態に対する的確な判断を実行できるような知識の向上を目指したものである。理解とは主体的に達成されるものであり、理解に対する学習者のメンタル・モデルの効用に着目した。その結果、大規模システムの現象に対する因果理解に焦点をあて、メンタル・モデルの形成を支援することをねらいとする。具体的には、プラントの物理的階層やその機器モデルの定性的表現をもとにして、学習者のメンタル・モデルを反映した階層型定性モデルの構築を支援するとともに、そのモデルを用いて定性シミュレーションによる変数間の因果関係を導出する過程を通して、現象に対する因果ツリーの把握を支援する機能を実現している。このような支援方法は、学習者の保有する曖昧なモデルを計算機上で定性モデルとして構築し、シミュレーションするプロセスを、学習者が納得のいくまで利用できることを特徴としている。多元的な情報獲得を行うユーザ・インタフェースについても述べる。適用例として、原子力プラントをとりあげ、本システムの有効性の検証を行った。

1. はじめに

近年、プラントなどのシステムの大規模化に伴い、発生する現象が複雑化する中で、システムを目的にそった形で効率的かつ安全に運用していくためには、計算機の高度利用とともに、運転員の知識の向上が要求されている。現在のプラントの運用に際しての教育・訓練の形態は、運転マニュアルや機器ごとの機能説明書等を用いたクラス・ルーム・トレーニングとシミュレータを用いた模擬トレーニングが主体である。これらは、運転員のタスク処理の観点からみると¹⁾、スキル・ベースもしくは手順にもとづくルール・ベースの判断のための訓練であり、未経験の事象を処理するナレッジ・ベースの判断のための訓練としては不十分なものであると考えられる。不測時の異常事態に対する的確な判断を実行できるためには、あるいはヒューマン・エラーの軽減のためには、対象システムに対する深い理解が必要である。

以上の観点から、今後の教育・訓練システムとしては、人間のナレッジ・ベースの判断を訓練すること、すなわち運転員自身の知識の向上を目的として研究されていかなければならない。このような目的に対して、筆者らは大規模システムのダイナミクスに対する因果理解に焦点をあて、運転員の対象システムに対す

るメンタル・モデルの形成支援を目指した教育・訓練の形態を考える。従来メンタル・モデルの形成を目的とする教育システムとしては、STEAMER²⁾やQUEST^{3),4)}がある。STEAMERの特徴的な機能として、数値シミュレーションにもとづくプラントの状態を観測あるいは操作するためのグラフィック・インタフェースが、ゲージなどのツールとして提供されている。学習者はこれらのツールを用いて、プラントの現象を調べることを通してメンタル・モデルの形成を行う環境となっている。ただし、数値シミュレーションモデルと学習者のメンタル・モデルの間には、直接の関係はない。QUESTでは、学習者のメンタル・モデルの成長に焦点があてられている。電気回路の構成部品に対して3つの観点から設定したレベルの異なる定性モデル群を用いて、学習者は自身のメンタル・モデルの成長に対応するようにモデルを変換して、現象を理解する環境となっている。ただし、回路を構成し、定性シミュレーションを実行する定性モデル群は、現象に内在する因果よりは電気回路における電圧降下などの基本的概念の理解に焦点があてられた構成である。

本論文では対象システムの定性モデルを学習者のメンタル・モデルの部分的表象であるとの立場から、支援システムの構築方法を提案する。すなわち、学習者は自身の保有する対象システムに対する捉え方にもとづいて、計算機上の物理モデルの構成および定性的モデル化を実行し、その定性モデルを用いて与えられた現象の因果関係（本システムでは、現象に対する対象

† A Computer-Based Supporting Environment for Causal Understanding of Large-Scale Systems by Hierarchical Qualitative Simulation by MASANORI AKIYOSHI and SHOGO NISHIDA (Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation).

†† 三菱電機(株)中央研究所

システムの変数間の因果ツリー)を導出することができる環境である。このための支援機能を実現することにより、学習者の理解の深化を促し、その結果としてメンタル・モデルの形成を支援できると考える。

第2章で支援システムの設計思想について述べる。人間の保有するメンタル・モデルの特徴とその形成に関連する理解のための方略に対する知見をもとに、理解プロセスを重視した支援方式を提案する。第3章で支援方式に基づく階層型定性モデルの表現とそれを用いた現象に対する因果ツリー導出の過程を述べる。第4章でユーザ・インタフェースおよび適用例として原子力プラントを取り上げ、学習者と計算機とのインタラクションを中心にしてその適用結果を述べる。

2. 理解支援システムの設計思想

学習者の現象に対する因果理解を支援するために、どのような観点からそのシステムの機能を構築するかは重要なことである。これに対して筆者らは、学習者の理解プロセスを自然に支援するためには、学習者自身が保有するメンタル・モデルに注目して、考えを進めていくことが必要であると考え。

本章では、この立場からの設計思想を述べ、それに基づく支援方式を提案する。

2.1 理解とメンタル・モデル

人間がある対象を理解した場合には、メンタル・モデルの存在が知られている。また、ある対象を人に説明する場合には、説明者は意識せずに自身の保有するメンタル・モデルを説明のために用いている。しかも、メンタル・モデルは新たな知識の獲得によって変更が加えられる。このように人間にとって、対象のメンタル・モデルを構築することが、理解という行為において重要な位置を占めている。

2.2 メンタル・モデルの特徴とその形成

前述したように、理解という行為に関わりの深いメンタル・モデルの研究は、認知科学の分野で盛んに行われている。ここでは、メンタル・モデルに関するいくつかの知見をとりあげ、さらにその形成における方略を考える。

メンタル・モデルの特徴として、次の点が挙げられている⁵⁾。

- ①メンタル・モデルは不完全であり、しかも不安定である。例えば、人間は利用していたシステムの詳細な部分をしばらく用いないと忘れてしまう。
- ②メンタル・モデルは人間によって異なり、しかも

時としては思い込みによる場合もあり、科学的根拠のないものである。

このように曖昧で記述が困難なメンタル・モデルは、対象を理解する過程で形成される。しかも、対象に関する情報の獲得とともに不完全な部分を補完しながら、常に主体的に自身のメンタル・モデルを修正し、形成を繰り返している。したがって、この形成に対しては人間が対象を理解しようとするときの方略が重要になってくる。この方略として、以下の点に注目する。

(1) 視点を用いた多重モデルの利用^{6),7)}

空間上にある物体に対して、人間はそれを理解するために様々な角度からそれを眺めて、いくつもの側面からの情報を活用している。ただし、この例は対象が物理的なものであり、それは知覚の範囲にとどまる。これに対して、より一般的には人間はある状況を設定して、その中で情報を例示化することによって、現象の一面を把握しようとしているといえる。

このように状況を設定して情報を例示化するという行為が、前述の空間上にある物体を様々な角度から眺めていく視点に対応している。様々な視点を用いることによって、同一の対象に複数のモデルを構築する。人間が対象を理解する場合には、保有する複数のモデルを利用し、それらを使い分けながらモデルそのものを洗練していつている。

(2) 定性情報の利用^{5),8)}

物理システムのダイナミクスを理解する場合に、そこに含まれる変数の定量情報を人間は保有する知識や過去の経験をもとに解釈する。この場合に、人間は定量情報を定性的に捉えなおしていることが多い。例えば、プラントのプロセス量の変化を捉える場合において、厳密な観測値に対して正常値からのずれというような定性量やその変化の状態が増加から減少に変わるというような定性変化量をもとにしている。さらに同じ物理量であっても、人によって特有の観点を加えて捉えなおすことがある。このような物理的定性量をよく用いている。

また、人間はこのような物理的定性量をもとにして因果的説明を行う場合が多い。因果情報は、定量的変動を引き起こす要因を時間軸にそって捉えたものであり、メンタル・モデルの形成には大きく関わっている。

このように、定量情報の上に定性情報の利用が理解には大きく関連している。

以上のように理解を行う上で人間は、状況に対応して各々の方略を自由に使い分けている。

2.3 支援方式

ここでは、2.2節で述べた人間の理解プロセスにおける方略を考慮した上で、次の二点の立場に重点をおいてメンタル・モデル形成支援を試みる。

(1) 物理的階層に基づく視点の設定支援

大規模システムの現象が内包する情報は多様であり、それらを選択して利用するための視点の設定を次のように考える。

例えば、大規模システムの構成要素間には、ある要素が他の要素の部品であるというような物理的階層が存在している。この物理的階層にそくして構成要素ごとに階層を設定することによって、状況を設定することが考えられる。また、これに対してある要素の集合が機能的にみて1つの要素のように振舞い、それらの集合間に階層が存在しているとみることでもできる。これを機能階層と呼ぶ。このような機能という側面から構成要素をまとめあげ、状況を設定することも可能である。ただし、機能階層の場合には機能によって集合が変わり階層が不確定であるが、物理的階層は構造関係なので確定している。機能階層は物理的階層の上に形作られるものであり、深い理解を指向した場合には、状況に依存しない物理的階層をもとに視点設定とその移動を支援する。

具体的には物理的に詳細度の異なるデバイス・モデルを、学習者の視点に基づいて組み合わせることで、現象に対するモデルを構築する。また、このような視点を変えることによって生じる多重モデルの管理を計

算機側で実行する。

(2) 定性情報の活用支援

定性情報を取り扱うことは、従来から定性推論の枠組みの中で行われてきた。物理的定性量として連続量を有限個の区間に分割し、区間と瞬間値の交互の繰り返しによる表現が用いられてきた。区間内では、定性値として同一視することによって、人間の常識的思考に適合するという立場に基づいている。この定性表現に基づいて、物理システムの挙動を個々の部品の振舞いから導出する研究を初めとして、多くの研究がなされている⁹⁾⁻¹²⁾。

本システムにおいても、この表現を基本として用いている。ただし、この定性値の表現に学習者の観点を埋め込むことができる。例えば、連続量としてのプラント変数における正常値や周辺機器が作動する閾値等は計算機側が予め定性軸上に提示する。さらに学習者側が考える概念的に重要な値(例えば、変化率が0となる値)は、その軸上に埋め込むことができる。ここで、その表現に基づく定性モデルを用いて定性シミュレーションを実行し、現象に対する定性変数間の因果関係の獲得を支援する枠組みとなっている。定性モデルについては、詳しくは第3章で述べる。

以上のような点に重点をおいた支援システムの全体像は、図1のようになる。

図1において、数値シミュレータによって作られた現象に対してそこに内在する因果関係を定性モデルを用いて導出する流れの中で、学習者側と計算機側の処理するタスクがそれぞれ存在している。現象に対して、まず計算機に保存されている定性モデルが学習者

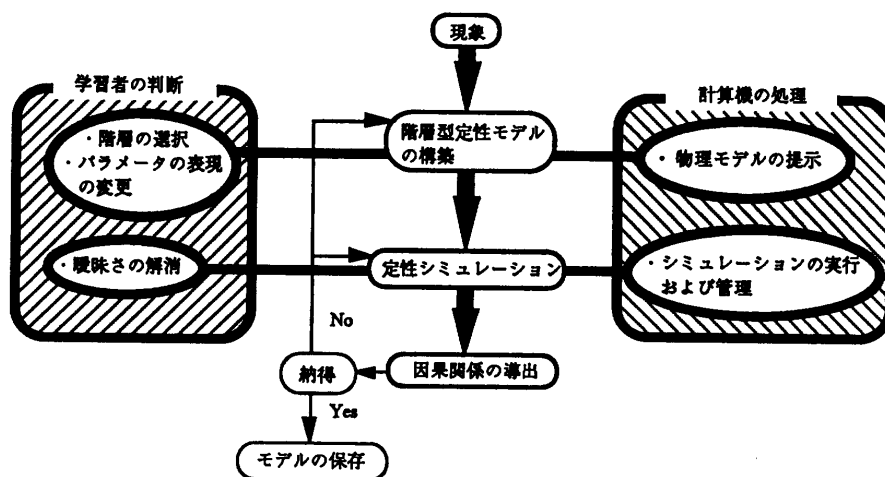


図1 支援方式

Fig. 1 A supporting environment for causal understanding.

側に提示される。次に学習者は自己の観点に基づいて、その定性モデルの物理的階層の選択や物理パラメータの定性的表現を変更して、階層型定性モデルを構築する。この階層型定性モデルの初期状態を学習者が設定した後に、定性シミュレーションが実行される。この場合に定性的表現に基づく曖昧さが発生すると、計算機は学習者にその状況を提示し、その選択を学習者が行う。最後に定性シミュレーションの結果に基づいて、現象に内在する因果関係が導出され、因果ツリーの形で学習者に提示される。学習者はその因果関係が納得できない場合には、階層型定性モデルの構築あるいは定性シミュレーションの任意の時点に戻って、納得のいくまでこの流れを繰り返す。

本システムでは学習方略をもとに計算機側が学習者の理解を支援する方式ではなく、学習者のメンタル・モデルを表象するための主体的なインタラクションを支援する方式を行っている。また、システム・ダイナミクスの定性情報や因果関係を提示するだけでなく、その導出過程をトランスペアレントにする点に本システムの特徴があり、このようなシステムを用いることにより学習者の対象システムに対する理解の深化がかけられるものと思われる。

3. 因果理解支援環境

本章では、2.3 節で述べた支援方式を実現する階層型定性モデルと、それを用いた因果ツリー導出について述べる。本システムは、Symbolics 3650 上で Lisp と Flavors を用いて記述している。なお、数値シミュレータは Fortran によって記述された既存のものを用いている。

3.1 理解支援のための階層型定性モデル¹³⁾

デバイス中心の物理的階層を表現するために、オブジェクト指向の枠組に基づいて記述している。デバイスごとに物理的詳細度に基づく階層を設定し、各々のデバイスはその機能および特性を表現するための特徴パラメータを含んでいる。

①パラメータの表現

パラメータの定性的表現としては、定性値と定性微分値を用いる。定性値は瞬間値と区間で表現されるが、記号的表現を用いずに連続量を $[-1, 1]$, $[0, 1]$, $[-1, 0]$ の区間に変換し、このリスト上に数値を用いて瞬間値と区間を表す。これは、学習者の観点を埋め込むための定

性軸の変更を、計算機で扱いやすくするためである。定性微分値は、その定性値の変化方向を表現するために、一階の微分値として定性的に表現した「増加」、「安定」、「減少」を用いている。例として、原子力プラントの加圧器の圧力の定性値の表現をとりあげる。いくつかの周辺機器の作動を引き起こす値が、瞬間値として定性軸上に表現され、埋め込まれている。機器の稼働する区間は、図 2 に示す範囲のようにになっている。ここで、定性軸は瞬間値のリストで表されている。

②パラメータ間の関係

定性モデルから挙動を導出するには、定性微分方程式を用いるような制約式充足の手法がある^{8), 9)}。これらの手法においては、制約式を満足する定性値の組合せがすべて計算され、可能性のある定性的挙動が導出される。筆者らは、定性シミュレーションを挙動の予測としてではなく、現象を理解するための解釈として利用する目的のために、定性パラメータの間の関係を表現するのに、制約式を用いるのではなく、パラメータ間に存在する関係を個別に記述する方法をとっている。例えば、加圧器内部のヒータの作動によって冷却水が加熱され、加圧器内部の圧力が上昇をはじめるとい現象は、ヒータの熱量を表すパラメータの定性値が加圧器の圧力の定性微分値に作用したとみなせる。この時に、ヒータの熱量パラメータに、加圧器の圧力パラメータへの一次遅れの正（増加）の関係を記述しておく。このことは、厳密な物理的因果そのものというよりも、それを解釈する人間の捉え方を反映しているものを、あらかじめ埋め込むこととなる。このようにパラメータ間の関係は、その定性状態に基づく因果関係を記述したものとなっている。ここではあるパラメータの定性値に影響を与える関係を比例関係、定性微分値に影響を与える関係を微分関係と呼ぶ。実際には図 3 に示されるように、内部では関係と

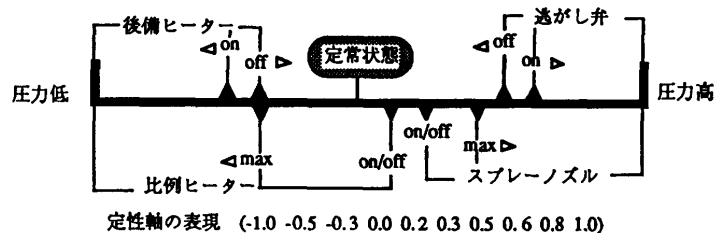


図 2 プラント変数の表現

Fig. 2 An example of the representation for a qualitative parameter.

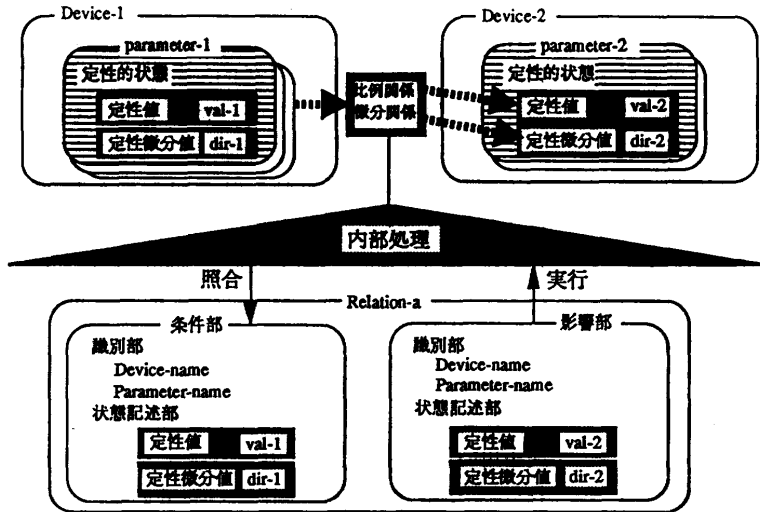


図 3 パラメータ間の関係
Fig. 3 An example of relation between parameters.

の照合とその関係の実行とに分けられる。

この中で関係を活性化する条件部は、モデルの中でパラメータを識別するための識別部と、パラメータの状態と照合を行う状態記述部に分けられる。また、影響部の構造も同じである。状態記述部の定性値として、「以上」、「以下」、「より大きい」、「より小さい」などの区間の表現も、前述のリストによる定性軸の表現を用いると容易に記述される。

①と②をもとに、パラメータ・オブジェクトとリレーション・オブジェクトのクラスを表現すると、図 4、図 5 のようになる。

```
(defflavor parameter
  ((^name)
   (^qualitative-value)
   (^qualitative-deriv)
   (^qualitative-set)
   (^propagated-relations)
   (^history-table)
   (^selected-relation-table)
   (^propagated-relations-table)
   (^fortran-data-file-name)
   (^ambiguity-point)
   (^relation-list)
   (^parameter-window))
  ()
  :readable-instance-variables
  :initable-instance-variables
  :writable-instance-variables)
```

図 4 パラメータのクラス表現
Fig. 4 An example of parameter object.

```
(defflavor relation
  ((^source)
   (^condition)
   (^destination)
   (^effect))
  ()
  :initable-instance-variables
  :readable-instance-variables
  :writable-instance-variables)
```

図 5 リレーションのクラス表現
Fig. 5 An example of relation object.

③デバイスの表現

デバイス・オブジェクトは、そのインスタンス変数の値として、そのデバイスの特徴付けるパラメータのインスタンスをもつ。このように記述すると、簡潔性を失わずに、さらに階層性のあるモデルを構成しやすくなる。

④プラントの表現

視点を反映したプラントのモデルは、シミュレーション・オブジェクトというクラスを記述する。このインスタンス変数の値として、シミュレーション・オブジェクトを構成するデバイスのインスタンスをもつ。

以上の①から④に基づいて学習

者の視点を反映したモデルを、階層をもったオブジェクトから計算機上に構成したものが、階層型定性モデルである。

3.2 定性シミュレーション

パラメータの定性状態（定性値と定性微分値の対）に対応して、各々のパラメータごとに記述されたパラメータ間のリレーション・オブジェクトが、シミュレーションモデル中を伝播される。この伝播されたリレーションをもとにパラメータの状態遷移を実行する。以上の処理は、関係を伝播する処理と関係を実行する処理の2つの局面からなる。

[1] 関係の伝播処理

以下、伝播もとのパラメータを、Cause-パラメータ、その逆を Effect-パラメータと呼ぶことにする。この処理は、図 6 のようになる。

この時に、Effect-パラメータに複数のリレーションが伝播されることが生じる。この状況は Effect-パラメータの中の履歴管理テーブルに記録される。

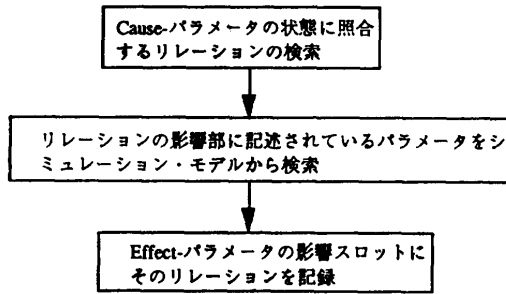


図 6 関係の伝播処理

Fig. 6 Propagation flow diagram of relation-objects.

[2] 関係の実行処理

この処理は、リレーション・オブジェクトの中の影響部の状態記述をもとに、各々のパラメータの状態（定性値と定性微分値）を変えていく処理である。したがって、リレーション・オブジェクトの伝播がないパラメータは、現在の定性状態に基づく状態遷移を起こす。リレーション・オブジェクトが伝播されたパラメータに関しては、以下の流れにそって処理を行う。場合としては2つあるが、学習者が行う処理はほとんど同じである。この時に、定性シミュレーションは中断している。

(1) 伝播されたリレーション・オブジェクトが1つの場合

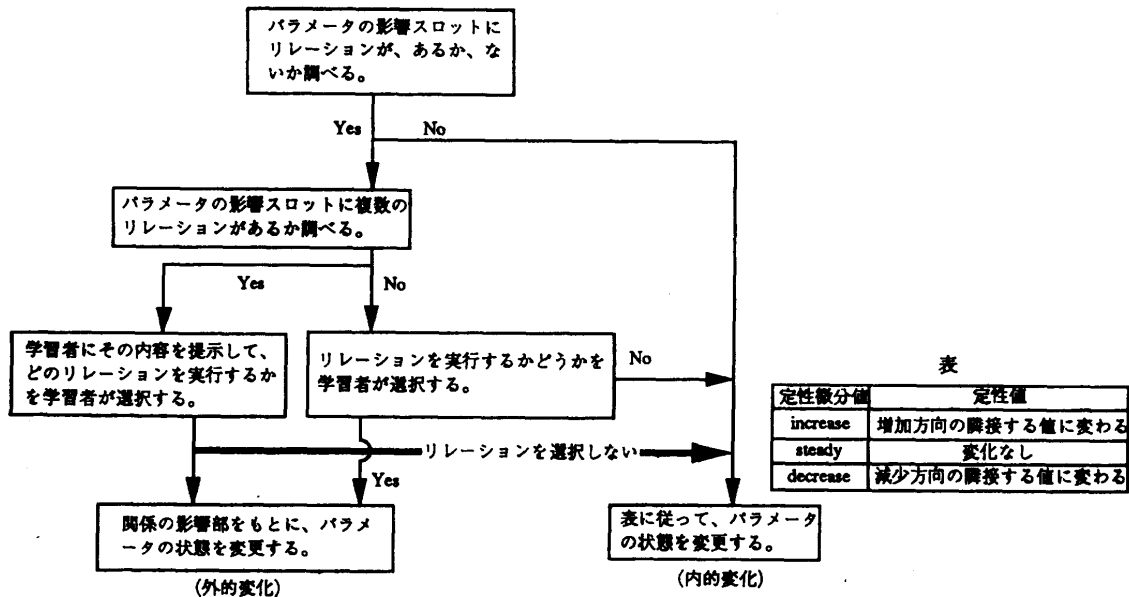
伝播された影響の定量的な強さによっては、パラメータの現在の状態に影響がでない場合もある。この

ことを定性モデルだけから決定することはできないので、パラメータの現在の定性状態と伝播されたリレーション・オブジェクトの内容を学習者に表示し、そのリレーションを実行するかどうかを学習者が選択する。

(2) 伝播されたリレーション・オブジェクトが複数の場合

(1)と同様にパラメータの現在の定性状態と伝播されたリレーション・オブジェクトの内容が表示される。この時に、学習者の可能な選択は、①リレーション・オブジェクトを全く選ばない、②リレーション・オブジェクトを1つ選ぶ、③同じ影響のあるリレーション・オブジェクトを複数選ぶ、④異なる影響のあるリレーション・オブジェクトを複数選ぶ。①の場合は、因果的に影響をうけていてもその影響が弱い状況に対応する。②、③の場合は、その影響に基づいて状態が変わる状況に対応する。④の場合には相反する影響なので、その中でさらに学習者の解釈に基づいて選ばれた影響に基づいて、状態が変わる状況に対応する。

(1), (2)ともに定性的表現では学習者は適切な選択を行うのが困難であるために、学習者に利用可能な情報として、各々のリレーション・オブジェクトのCause-パラメータとEffect-パラメータに関してもあらかじめ得られている数値シミュレータのトレンド・データが示される。



定性微分値	定性値
increase	増加方向の隣接する値に変わる
steady	変化なし
decrease	減少方向の隣接する値に変わる

図 7 関係の実行処理

Fig. 7 Execution flow diagram of relation-objects.

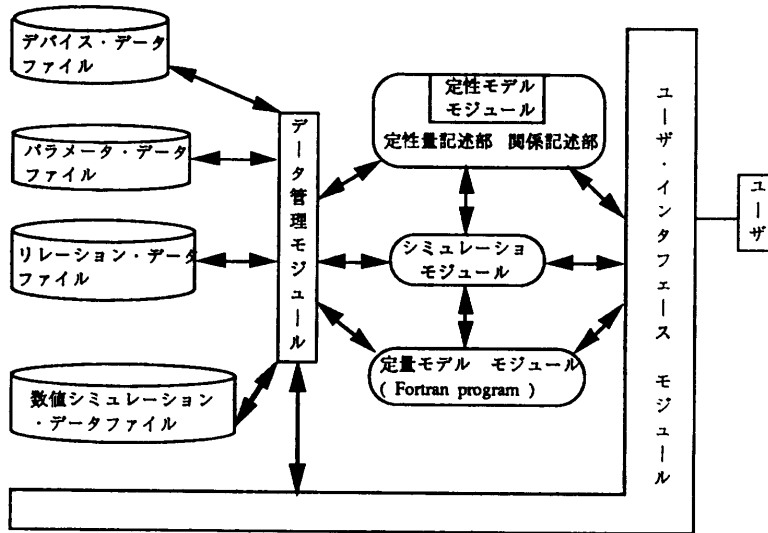


図 8 支援システムの構成
Fig. 8 Software architecture.

以上のように場合分けによってすべての可能性を調べるよりは、学習者が定量的情報や保有する知識をもとにして選択することによって、シミュレーションを続行し、その場合分けが発生した記録だけを残すことにしている。この記録をもとに学習者は、任意の状態に戻ることができる。つまり、この支援環境では学習者は現象を定性的に解釈していく中で、因果的に複雑な時点を認識し、計算機の提示する情報をもとに解釈を実行しているという位置づけになる。

この実行処理の流れをまとめると、図7のようになる。

3.3 システムの構成

システムの構成は、図8のようになっている。学習者の視点を反映した階層型定性モデルは、データ管理モジュールによってデータ・ファイルに記録され、再利用可能となる。また、定性モデルとそのモデルを用いた定性シミュレーションは、ユーザ・インタフェース・モジュールにより、学習者が容易に情報を得るためにアクセスすることができる。

4. ユーザ・インタフェースおよび適用例

以上のような支援システムを利用する場合には、そこに存在するマン・マシンインタラクションが重要となり、またそれをユーザ・フレンドリーに実現するインタフェースが必要である。本システムでは、モデル構築とシミュレーション実行および因果ツリー導出のそれぞれの局面におけるグラフィック・インタフェ

スを構築する。

4.1 学習者と支援システムとのインタラクション

現象を因果的に理解するため、学習者はモデル構築を行い、定性シミュレーションを通して因果ツリー導出を行う。ここではその過程を通して、学習者と支援システムのインタラクションについて述べる。基本的にはグラフィック・インタフェースを用いて、学習者はいろいろな機能を利用できるようになっており、コマンドは、メニュー形式になっている。

ウィンドウの構成は2種類あり、学習者がプラントに関するいろいろな情報を取り出して、階層

型定性モデルを構築し、また初期状態を設定して定性シミュレーションを実行するためのプラント・ウィンドウと、定性シミュレーションの結果から作成された因果ツリーを表示し、因果情報を得るためのツリー・ウィンドウがある。

①階層型定性モデル構築

プラントの物理的階層に基づいて、階層型モデルを構築するためには視覚的に各々の接続関係を認識し、機能情報を獲得する必要がある。一般にはプラントの系統図とそれに伴う機能仕様書を用いて行う。ここでは図9のようなプラント・ウィンドウ上のグラフィックスをマウスでクリックすることによって、そのドキュメントを見たり、階層を変更することができ、階層を変更した結果はグラフィックスとシミュレーション・オブジェクトに反映される。

デバイスのパラメータの定性的表現と現在の値を認識するためには、プラント・ウィンドウ上でデバイスをクリックすることによって、そのパラメータ・リストのメニューが現れ、選択した結果がプラント・ウィンドウ内の右にあるパラメータ表示ウィンドウに示される。このパラメータの定性的表現を変更する場合や、その初期値を設定する場合には、パラメータ表示ウィンドウ上で、マウスを用いて新たな定性区間を作成したり、初期値の設定を行う。パラメータ間の関係を定義したり、変更するにはこのパラメータ表示ウィンドウの横に記述用のエディタが現れる。

これらを用いて、学習者はプラントのモデルを再構

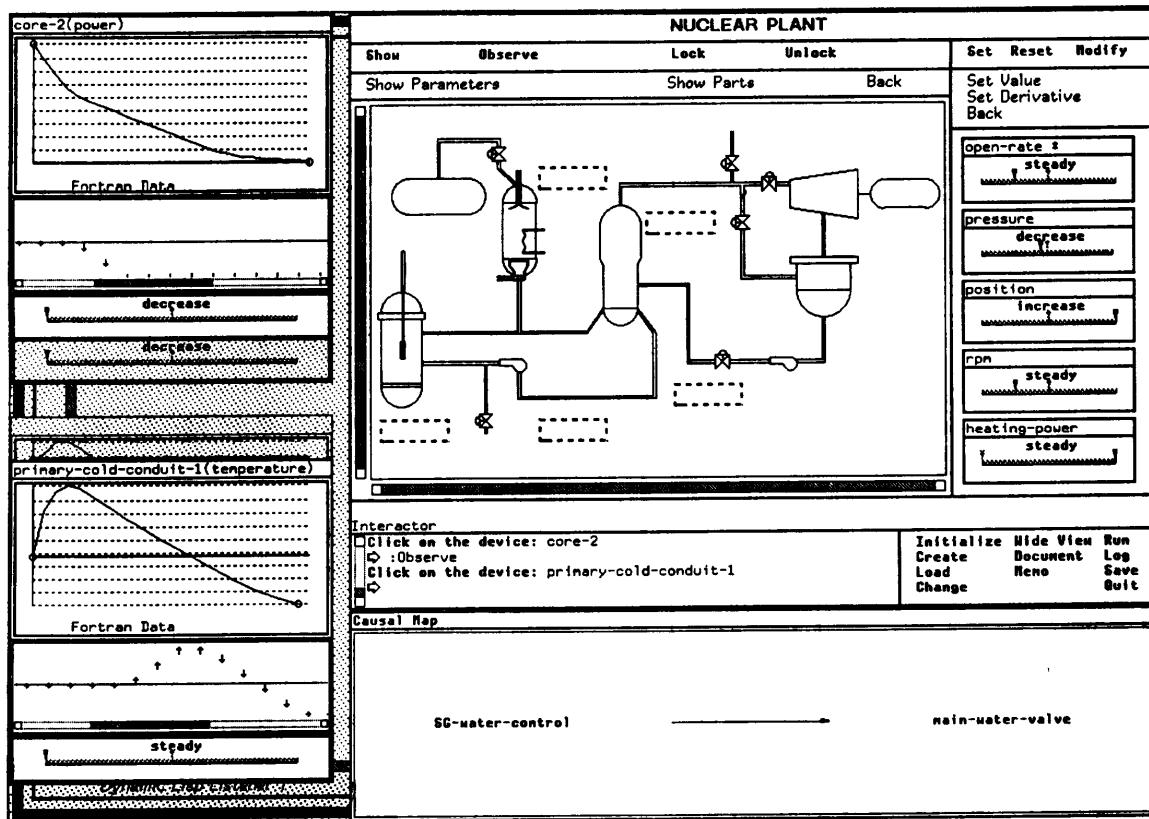


図9 プラント・ウィンドウ

Fig. 9 A window for displaying a plant model.

築することができる。

②定性シミュレーションの実行

初期状態を設定して定性シミュレーションを実行する時に、定性情報を観測するツールがある。これは、学習者が注目しているパラメータの定性的変化の履歴と各々の時点ごとの定性状態を観測するためのものである。また、関係の実行処理中に、学習者がリレーションの選択を実行する上で、定量データを観測するためのツールがある。図9においてプラント・ウィンドウの左にある2つのウィンドウがこれらを組み合わせたものである。そのほかに、リレーションの伝播の状況を視覚的に捉えるためのウィンドウを、プラント・ウィンドウの下に用意する。関係の選択に対しては、別のウィンドウを用いて行うようになっている。

③因果ツリーを用いた理解

導出した因果関係は、図10のようなツリー・ウィンドウに示される。ツリー・ウィンドウは、横方向にプラントのデバイス名を表示し、縦方向にシミュレーションのステップがとられている。ただし、図10は導出したツリー・ウィンドウをつないだものである。

図10に示されているように、視覚的に因果の流れは把握することができるが、さらに詳細にその因果関係を理解するためには、次のような機能がある。図中において、ノードはデバイス・オブジェクトを、アークはリレーション・オブジェクトを表している。ノードをクリックすることで、各々の時点におけるデバイスのパラメータの状態の情報を、アークをクリックすることで、伝播されたリレーションの情報を得ることができる。

また、学習者は任意の時点から再解釈を行いたいという要求がある。このためのシミュレーションの履歴管理機構を用いて、コマンド入力で容易に実行できる。

以上のようなグラフィック・インタフェースを用いたインタラクションを通して、学習者はプラントの挙動を様々な観点から捉えて、理解を進めていくことができる。

4.2 適用例

原子力プラントに対して、本システムを適用した結果を報告する。ここで構成したプラントの定性モデル

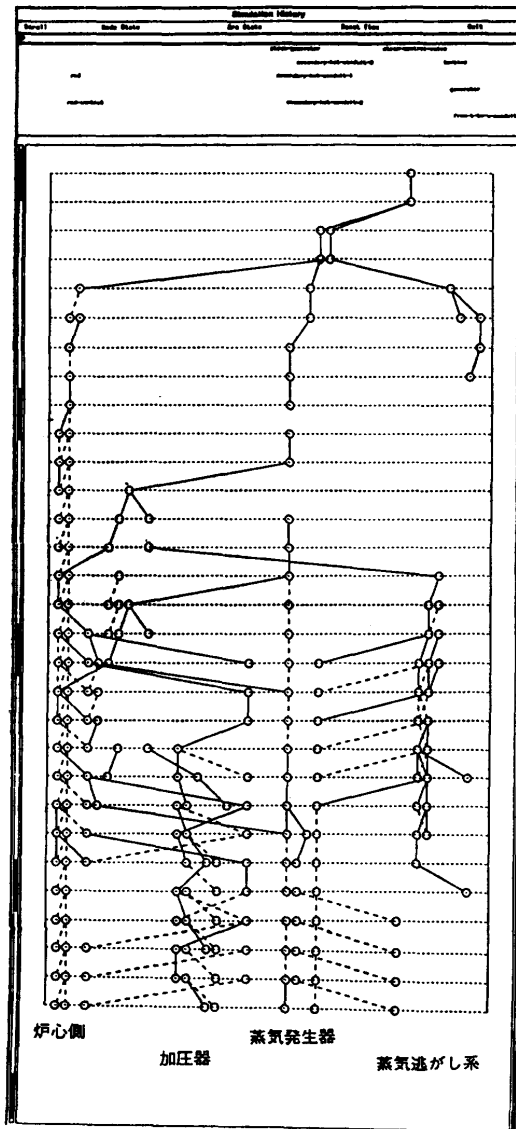


図 10 導出した因果ツリー
Fig. 10 An example of a causal tree.

は、デバイスの数が 41、プラント変数の数が 120 となっている。

発電機に接続した電力系統の負荷が急激に減少した時に、負荷遮断と呼ばれる現象が発生する。50%の負荷遮断が発生すると、プラントのいろいろな部分に変化が生じる。例えば、次のようなことが起こる。

①一次側の一次冷却水において、いったん温度上昇が起こり、その後ゆるやかに下降していき、定常時よりも低い値になる。

②二次側の蒸気ダンプ弁が、しばらくすると開き、その後閉じられる。

③原子炉内に制御棒が挿入される。

この現象に対して学習者は次のようなモデルを構築した。数値シミュレーションの結果から加圧器の周辺機器の中で作動する機器があったために、圧力パラメータに対して詳細化された加圧器モデルを用いた。これに対応して、周辺機器のヒータやスプレー弁がシミュレーションモデルに自動的に組み込まれる。ここで導出した最終的な負荷遮断の因果ツリーから、「蒸気加減弁の急閉に伴い、一次系の側で制御棒を制御する動作が起こり、制御棒を炉心に挿入して原子炉の熱出力を下げる因果シーケンス、二次系の側で蒸気量のフローの急減によって、二次系の循環水の温度上昇が起こる因果シーケンス、さらに蒸気ダンプ弁が開く因果シーケンスがみられる。また、時間がたつにつれて、蒸気発生器で一次系と二次系の間に相互作用が生じ、その結果が各々に影響を及ぼしあう」ことがわかる。

このツリーの導出には、29ステップかかった。ただし、シミュレーションの後半には多くの機器間に因果関係が発生し、学習者は数回定性シミュレーションのある時点まで戻って再解釈を実行する必要がある。なお、破線で示されている因果関係は関係の実行処理中影響が弱いとみて実行されなかったリレーション・オブジェクトを示している。一方、炉心がトリップする時に発生する現象に対しては、このような加圧器の部分の詳細化しなくても、炉を中心とする現象は理解できる。この場合に学習者は負荷遮断のモデルではなく、加圧器の部分の粗くしたモデルを用いて同様に定性シミュレーションを実行し、因果ツリーを導出する。

以上のように、本システムがこのような実規模の例題に対しても、学習者が現象を理解するために主体的かつ反復的なアクションをとることができ、最終的に納得のいく因果ツリーを導出することができた。この結果、本システムが2.2節で述べた理解のための方略を支援し、学習者の理解の深化に有効に機能していると考えられる。

5. おわりに

本論文では、大規模システムに対する運転員の深い理解を達成するためのメンタル・モデルの形成支援に向けて、現象の因果理解に焦点をあてたアプローチを行った。その方式として、機器の物理モデルに対して学習者のメンタル・モデルに基づく対象システムの捉

え方を反映させた定性的モデル化を行い、現象の因果ツリーを導出する過程を利用した支援について述べた。その特徴として、①対象システムのモデル化を詳細度の異なる機器モデルから構成し、②学習者の観点を反映する定性変数を用いて、③定性シミュレーションによる因果関係の導出を支援する機能をもたせている。

本システムを原子力プラントを例に専門家が評価したところ、

- 現象を定性的に捉える視点の設定ができるのが良い
- わかっているつもりでも、考え直す時のための道具として使いたい

という意見がえられた。

本システムの有効性の検証は、今後さらに行っていくが、学習者の認知的側面に注目して計算機と学習者とのインタラクションを考えて、改善を進めていくつもりである。筆者らは原子力プラントなどの大規模な系における運転員の訓練に対して、従来の訓練の“teaching”の観点からとは異なる“learning”の観点からの試みを行っており、認知科学、定性推論技術との両方向からさらに充実を図りたい。

参 考 文 献

- 1) Rasumussen, J.: Skills, Rules, and Knowledges: Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-13, No. 3, pp. 257-266 (1983).
- 2) Hollan, J.D., Hutchins, E.L. and Weitzman, L.: STEAMER: An Interactive Inspectable Simulation-Based Training System, *The AI Magazine*, Summer 1984, pp. 15-27 (1984).
- 3) Wenger, E.: *Artificial Intelligence and Tutoring Systems*, Morgan Kaufmann Publishers, Los Altos (1987).
- 4) White, B.Y. and Frederiksen, J.R.: Intelligent Tutoring Systems Based upon Qualitative Model Evolutions, *Proc. of AAAI-86*, pp. 313-319 (1986).
- 5) Gentner, D. and Stevens, A.L.: *Mental Models*, Lawrence Erlbaum Associates, London (1983).
- 6) 佐伯(編): 認知心理学講座 3 推論と理解, 東

京大学出版会, 東京 (1982).

- 7) 宮崎, 上野: 認知科学選書 1 視点, 東京大学出版会, 東京 (1985).
- 8) Kleer, J.D. and Brown, J.S.: A Qualitative Physics Based on Confluences, *Artif. Intell.*, Vol. 24, pp. 7-83 (1984).
- 9) Kuipers, B.: Qualitative Simulation, *Artif. Intell.*, Vol. 29, pp. 289-338 (1986).
- 10) 西田, 川村, 堂下: 動的因果関係解析法による電子回路の定性的解析, 情報処理学会論文誌, Vol. 28, No. 2, pp. 177-188 (1987).
- 11) 大木, 藤井, 古川: 物理法則に基づいた定性推論, 情報処理学会論文誌, Vol. 29, No. 7, pp. 694-702 (1988).
- 12) Iwasaki, Y. and Simon, H.A.: Causality in Device Behavior, *Artif. Intell.*, Vol. 29, pp. 3-32 (1986).
- 13) 秋吉, 西田: 階層型定性シミュレーションによるシステムダイナミクスの理解支援, 情報処理学会知識工学と人工知能研究会, 65-5, pp. 61-69 (1989).

(平成 2 年 2 月 5 日受付)

(平成 2 年 10 月 9 日採録)



秋吉 政徳 (正会員)

昭和 36 年 9 月 3 日生. 60 年 3 月京都大学工学部数理工学科卒業. 62 年 3 月同大学院工学研究科数理工学専攻修士課程修了. 同年 4 月三菱電機(株)入社. 以来, 同社中央研究所にて, 理解支援, 定性モデルの研究に従事. 日本認知科学会会員.



西田 正吾 (正会員)

昭和 27 年 1 月 5 日生. 49 年 3 月東京大学工学部電子工学科卒業. 51 年 3 月同大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了. 同年 4 月三菱電機(株)入社. 現在, 中央研究所システム基礎研究部第 4 グループマネージャ. 主として大規模システムの運用・制御, 教育訓練システム, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 59 年 3 月工学博士. 59 年 9 月より 1 年間マサチューセッツ工科大学メディアラボ客員研究員. 61 年電気学会論文賞. IEEE, 計測自動制御学会, 電気学会各会員.