

自律型プラント用知識ベース構築のための知識獲得手法の開発

(その3:新たな定性推論手法による原子炉複数ループ冷却系の異常診断法の開発)
(共同研究報告書)

[1993年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター
大阪大学
産業科学研究所

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。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken, 311-1393, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1993

自律型プラント用知識ベース構築のための知識獲得手法の開発
(その3:新たな定性推論手法による原子炉複数ループ冷却系の異常診断法の開発)
(共同研究報告書)

吉川 信治¹⁾ 来村 徳信²⁾ 笹島 宗彦²⁾
池田 満²⁾ 溝口 理一郎²⁾

要旨

原子力プラントの運転を、より安全、確実にこなすための異常診断知識を、矛盾、欠落、表現の不一致等の問題を回避して構築することが求められている。この異常診断の知識を、従来のように経験を積んだ人間へのインタビューによってではなく、情報処理技術を用いてより確実、完全に構築する技術が提案されている。これは知識コンパイラと称する。

この知識コンパイラにおいて、原子炉冷却系の診断知識を定性推論によって導こうとする際に発生する解の曖昧さを回避するための手法がこれまでに2種類提案された。

まず、最初の手法は、ある変数に影響を及ぼす他の変数の定性値をすべて管理しつつ、変数間の因果関係に沿って矛盾が発生する場合を除きつつ定性値を割り当てていく手法である。

2番目の手法は、各変数に対する他の変数からの変化伝播の方向と、サーマルバランスやエネルギー保存に関する変数間の定性的拘束条件を全て定性連立方程式に表し、これを順次分割しつつ局所的に背理法を適用することによって解く手法である。

本報では、これらの手法に基づいたソフトウェアを実際に作成し、それを原子炉複数ループ冷却系に適用した結果について述べる。さらにその結果と、研究を通して得られた知見から、原子力プラントの異常診断知識の統合システムの構成を提案し、また今後取り組むべき課題を考察する。

1) 動燃事業団 大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室

2) 大阪大学 産業科学研究所 電子機器部門

Development of Knowledge Acquisition Methods
for Knowledge Base Construction for Autonomous Plants

S. Yoshikawa¹⁾, M. Sasajima²⁾, Y. Kitamura²⁾,
M. Ikeda²⁾ and R. Mizoguchi²⁾

Abstract

In order to enhance safety and reliability of nuclear plant operation, it is strongly desired to construct diagnostic knowledge base without lacking, contradiction, and description inconsistency. Nowadays, an advanced method "Knowledge Compiler" has been studied to acquire diagnostic knowledge, mainly based on qualitative reasoning technique, without accumulating heuristics by interviews.

Until now, 2 methods to suppress the ambiguity observed when qualitative reasoning mechanism were applied to heat transport systems of nuclear power plants:

In the first method, qualitative values are allocated to the system variables along with the causality direction, avoiding contradictions among plural variables in each qualitative constraint describing knowledge of deviation propagation, heat balance, or energy conservation.

In the second method, all the qualitative information is represented as a set of simultaneous qualitative equations. And, an appropriate subset is selected so that the qualitative solutions of unknowns in this subset can be derived independently of the remaining part. A contrary method is applied for the selected subset to derive local solutions. Then the problem size is reduced by substituting solutions of the subset, in a recursive manner.

In the previous report on this research project, complete computer softwares have been constructed based on these methods, and applied to a 2-loop heat transport system of a nuclear power plant. The detailed results are discussed in this report. In addition, an integrated configuration of diagnostic knowledge generation system of nuclear power plants is proposed, based upon the results and new findings obtained through the research activities so far, and the future works to overcome remaining problems are also identified.

1)The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

2)Frontier Research Section, Advanced Technology Development Division, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

目次

1 緒言	1
2 原子炉冷却系の異常診断知識導出への定性推論の適用研究のこれまでの経緯	2
2.1 定性推論の考え方	2
2.1.1 人間による日常的な推論	2
2.1.2 研究開始時に提案されていた定性推論手法	2
2.2 因果関係による定性推論方式の概要	4
2.2.1 局所的知識	4
2.2.2 大域的知識	8
2.2.3 推論	8
2.3 定性連立方程式による推論方式	12
3 プロセス変数間の因果関係に基づく推論機構の開発	17
3.1 対象としたモデル	17
3.1.1 部品の知識	18
3.1.2 制約式の記述	26
3.2 異常値を伝播する定性推論方式に基づくソフトウェアの製作	32
3.2.1 ワークスペース	32
3.2.2 部品間の推論	34
3.2.3 部品内部の推論	35
3.2.4 実装	36
3.3 推論結果	37
3.3.1 推論の結果	37
3.3.2 推論例	41
3.4 説明の生成	46
4 定性連立方程式に基づく推論機構の開発	50
4.1 定性知識と定性連立方程式	50
4.1.1 局所伝播知識の意味	50
4.1.2 局所伝播知識以外の定性的知識の意味	52
4.1.3 定性方程式の演算	54
4.1.4 定性連立方程式の解法	56
4.2 付加すべき定性式を示唆する機構	62
4.2.1 付加すべき定性式を示唆する機能の必要性	62
4.2.2 定性式を追加して解の曖昧さを抑制することの意味	63

4.3 説明の生成	77
5 原子力プラント用異常診断知識導出システムの構築のために今後必要な技術開発	82
5.1 故障診断	82
5.2 知識記述の語彙の整理	83
6 結論	84

表 目 次

表2.1 スチーム暖房器の診断知識	3
表2.3.1 2変数間の変化伝播と部品間接続による順行推論	14
表2.3.2 2変数間変化伝播に基づく推論の結果	14
表2.3.3 定性連立方程式として表した、変化伝播に関する定性的知識	15
表2.3.4 新たに付加する定性連立方程式	15
表2.3.5 定性連立方程式による順行推論	16
表4.1.1 定性的知識を表わす定性連立方程式	55
表4.1.2 定性連立方程式で得たパラメータ間変化伝播の符号	61
表4.2.1 変化伝播知識	62
表4.2.2 変化伝播以外の定性的知識	62
表4.2.3 処理開始前の定性連立方程式	73
表4.2.4 選択された独立拘束定性式	73
表4.2.5 最初の定性式の追加後	74
表4.2.6 2番目の定性式の追加後	74
表4.2.7 最終的な定性連立方程式	75
表4.2.8 2ループモデルでの局所伝播知識と付加知識	76

図 目 次

図2.1 スチーム暖房内の因果関係	2
図4.1.1 定性連立方程式を解くアルゴリズム(1)	59
図4.1.2 定性連立方程式を解くアルゴリズム(2)	59
図4.1.3 両者のアルゴリズムの解の再帰的等価性	60
図4.2.1 原子炉冷却系モデル	64
図4.2.2 1次系の温度と流量に関する因果関係	64
図4.2.3 独立拘束定性式を選択	70
図4.2.4 定性式の追加請求	70
図4.2.5 0-0条件の充足	71
図4.2.6 付加的定性知識を示唆する全体アルゴリズム	72

第1章 緒言

これまでの研究で、原子力プラントの主冷却系に関する知識を局所的な変化伝播に基づく定性推論を用いてコンパイルする際の曖昧さを抑制するために2つの手法を提案、検討した。

両者とも、局所的な変化伝播に加えて、定性的に表現したエネルギー保存則等の知識を援用して誤った解を排除する手法である。

1つは従来通り因果関係に沿って推論を行う手法で、与えられた兆候から因果関係を逆に辿って可能な原因を列挙する遡行推論と、この推論によって導かれた各原因候補から因果関係に沿って付随する全兆候を導く順行推論から成り立つ。曖昧さの抑制のための改良点は、この順行推論の際に、局所的な変化伝播以外の定性的知識に矛盾する解を排除することである。

2つ目の方法は局所的な変化伝播と、局所的な変化伝播以外の知識を統合的に扱うため、その全てを定性方程式として表し、定性連立方程式に観測された変数とその定性値、及び外因変数中の異常値を取り得る変数の数を与えて、これを解くことによって異常診断知識の導出を行なおうとする手法である。

曖昧さの発生は、定性推論の大きな問題点として認識されている。ある分野では、定性推論が不完全な情報から可能な全ての状態を列挙できる点をメリットとする見方が取られるが、原子力プラントの異常診断知識の獲得のためには、解消できる曖昧さは極力解消すべきであることは論を待たない。

そこで今年度においては、これまでに提案された2つの手法を実際に計算機上に実現して、2ループを有する原子炉冷却系モデルに対して推論を行い、両者の特徴を比較評価した。

これらの手法の概要は第2章で述べる。本報告書の3章及び4章ではこのそれぞれの手法を詳細に説明し、またそれぞれを原子炉2ループ冷却系に適用した結果について述べる。

5章では今後取り組むべき開発課題について論じ、最後に6章では、2つの手法の研究の成果を統合した、原子力プラント用の異常診断知識導出システムの構成、及びいずれの手法によっても解消されない問題点の解決案について考察する。

第2章 原子炉冷却系の異常診断知識導出への定性推論の適用研究のこれまでの経緯

2.1 定性推論の考え方

従来、原子力プラントの挙動を計算機を用いて解析する手法としては、構成部品である各機器の熱流動的な考察に基づいた数値モデルを用いるものが一般的であった。本報告書で取り上げる定性推論は、これらの手法とは異なる性格を有する。

次章以降の議論に進む前に、定性推論に対する基本的な考え方をここで説明しておく。

2.1.1 人間による日常的な推論

我々人間が、例えば暖房機が十分に働かない原因を調べる場合、まず部屋の温度を正確に測定して、あるべき温度との差を計算してからそれを解析するという事は行わない。どこかのパイプが詰まり気味か、モーターが弱っているのか、加熱部が汚れているのか等の原因の候補を挙げておいて、それぞれの原因がもし本当に起こっていたら現れるはずの他の兆候を確認しながら原因を絞り込む。この過程の中で我々は数値的な情報を意識していない。我々がこの過程で用いる知識は、暖房機という対象の中で、パイプが詰まれば空気の流れが減る、モーターが弱ればファンの回転数が減る、加熱部が汚れたら空気が暖まらないというような、あるパラメータの増減と他のパラメータの増減との間の因果関係である。

本報告書では、このように対象の状態をパラメータの正常値に対する大小、つまり定性値で表現し、その対象の挙動を、パラメータの定性的な変位の間で成立する関係、主に因果関係で捉えようとする手法を定性推論と呼ぶ。

2.1.2 研究開始時に提案されていた定性推論手法

上述の手法を計算機上で自動的に実行するために、本研究開始時に提案されていた手法を以下に説明する。例として、スチーム暖房器を取り上げる。

従来提案されていた知識コンパイラ

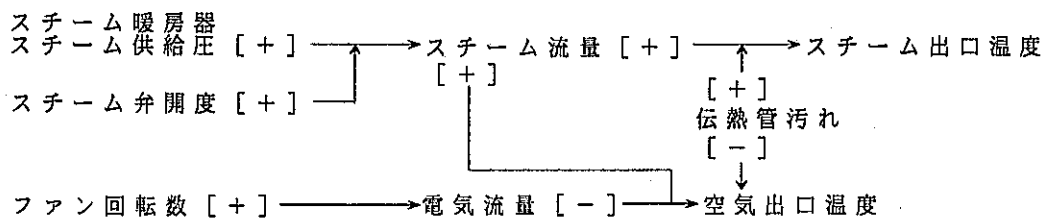
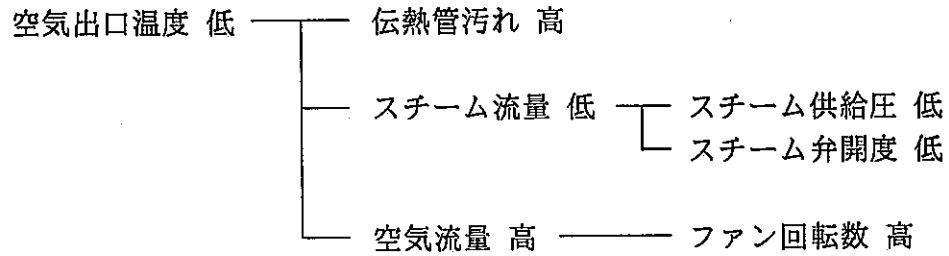


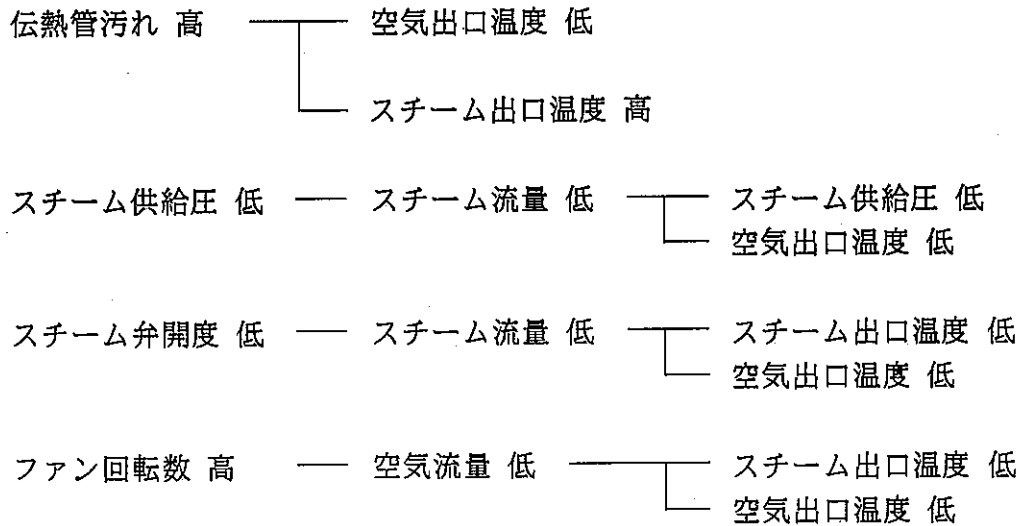
図2.1 スチーム暖房内の因果関係

このようなモデルを構築し、これに対してある兆候、例えば「空気出口温度 低」に対して次のように推論を行う。

①遡行推論－可能性のある原因候補を列挙する。



②順行推論－各原因候補について、それが真の原因である場合の対象の状態を導く



以上の推論結果から、診断知識が次のように導かれる。

	観測すべき変数			原因
	スチーム出口温度	スチーム流量	空気流量	
定性値	高	正常	正常	伝熱管汚れ 高
	低	低	正常	スチーム供給圧 低 スチーム弁開度 低
		正常	高	ファン回転数 高

表2.1 スチーム暖房器の診断知識

2.2 因果関係による定性推論方式の概要

因果関係による推論方式はループがあるような系についても正しい推論を行うことが目的である。従来の推論方式と比較しての特徴は以下の通りである。

- ・複数のパラメータ間に成り立つ制約条件を扱う。
- ・パラメータの値の管理を行う。
- ・パラメータに因果の属性を指定する。
- ・部品ごとに局所的知識を記述する。
- ・曖昧さを減少させるために大域的知識を与える。
- ・推論は部品ごとに制約条件を満たす状態を生成する。
- ・故障仮説や異常徴候の生成は従来と同じである。

このような特徴をもつ因果関係による推論方式は、値の矛盾を起こすことなく推論を行うことができる。また大域的知識を用いることで曖昧さが減少する。

2.2.1 局所的知識

局所的知識は部品ごとに与える。部品を接続情報を用いて接続し組み合わせることで、系全体に関する知識を構成する。この際、部品の知識は系に影響されてはいけない。例えば、パイプの機能を記述する際にパイプがループの一部分を構成していることに依存してはならない。あくまでパイプが単独で果たす機能を記述し、その機能を他の部品の機能と組み合わせることで、ループによる影響が導出されるべきである。

部品に与える知識は

- (1) パラメータ集合
- (2) 制約条件
- (3) 接続関係
- (4) 因果指定
- (5) 故障に関する知識

からなる。

(1) パラメータ集合

パラメータ集合は部品の状態を表現できるだけの物理的パラメータを与える。パラメータの値は定性値で表し、[+],[0],[-]のいずれかである。ここで[0]はパラメータが表す物理量が基準の値に等しいことを表す。[+]は基準値より大きい異常値、[-]は小さい異常値であることを表す。

(2) 制約条件

制約条件は複数のパラメータ間に成り立つ制約を、複数のパラメータと演算子を用いて記述する。制約条件は定量的な物理方程式を定性方程式に直したものであり、定性値をとるパラメータと定性演算子によって記述される。

(3) 接続関係

接続関係は部品間の接続に関する知識である。部品は複数のポートを持ち、それぞれのポートを他の部品に接続することができる。接続関係は部品のポート名の2つ組で表現され、その2つのポートが互いに接続されていることを表現する。また部品のパラメータは0または1つのポートに所属することができる。あるパラメータがポートに所属している場合、その値はポートが接続されている先の部品の対応するパラメータの値に直接的に相互に影響される。接続情報に基づき、部品のパラメータには次のフラグが付加される。

・外部(eXternal:X)

パラメータが部品の外部に継っているかどうかを表す。

外部に継っていれば X(外部)、そうでなければ \bar{X} (内部)と表記する。

(4) 因果指定

一般に部品における物理現象には一方的な因果関係が見られることがある。例えばパイプの両端の温度を考えると、パイプの入口温度が高い時は必ず出口温度も高くなる。しかし出口温度が高くても入口温度は影響を受けない。このようにパイプの出口温度は入口温度に一方的に依存している。したがってパイプに関して推論する際に入口温度の変化から出口温度の変化を推論することは正しいが、出口温度の変化から入口温度の変化を推論することは正しいとはいえないことになる。この2つのパラメータの関係は制約式では (入口温度) = (出口温度) と表現するしかないが、2つのパラメータの関係は等価ではない。制約式に加えて一方的因果関係をなんらかの方法で表現することで、正しい推論を行うことが可能になる。

このような因果関係は物理現象に固有な場合もあるが、大部分は部品の構造や機能などによって物理現象が制約されることによって起こる。したがって因果性に関する情報は部品のパラメータごとに記述する。このような因果性を、パラメータをノードとする有向グラフを知識として与えれば依存関係を完全に記述することができるが、パラメータの依存関係を完全に把握することは難しいと思われる。

以上のような考察を踏まえ、因果性に関する知識を部品のパラメータごとに以下の条件がなりたつかどうかのフラグを付加することで表現する。

- ・原因(Cause:C) そのパラメータの変化が原因となって、部品内の他のパラメータの値が影響されることがあるか。
- ・結果(Effect:E) 部品内の他のパラメータの変化が原因となって、そのパラメータの値が変化することがあるか。

パラメータの属性は記号と否定記号で表す。C は原因になれることを示し、 \sim C はなれないことを示す。この2つの属性は排他的なものではないので、実際にはパラメータには以下の2つの記号の組合せが属性としてつく。

C \sim E: 原因であり結果ではない。

部品内のパラメータの変化によって影響をうけることはなく、他のパラメータに影響を与えるだけである。すなわち部品に対して入力として部品の外から与えられるもの。

(例) 抵抗の抵抗値R (内部定数)
モータの電圧V (外部から与えられる)

\sim CE: 原因ではなく結果である

部品の他のパラメータに影響を与えることはなく、影響を受けるだけのもの。

(例) 抵抗での発熱量 (不可逆過程の結果)
パイプの出口温度 (一方的な依存)

CE: 原因かつ結果である

影響を及ぼし、及ぼされるパラメータ
(例) パイプの入口圧と出口圧と流量

このような部品のパラメータの属性としての因果指定は依存関係の一部分を表現するだけであり、知識を記述する人間にとっては部品内部のパラメータによって影響されるか、影響するかを考えればよく、記述は容易であると考えられる。

なお、原因になれるパラメータを原因パラメータ、結果になれるパラメータを結果パラメータと呼ぶことがある。原因パラメータは CE または C \sim E であり、結果パラメータは CE または \sim CE のフラグを持つ。

(5) 故障に関する知識

故障に関する知識は、その部品で起こりうる故障の概念を表す。部品は機能とする制約条件を指定できる。部品における故障の原因は、診断対象の系の外側の事象をパラメータで表現する外因パラメータ(後述)の異常に帰着する場合と、パラメータではなく制約式にしか原因を求められない場合がある。したがって部品の外因パラメータが異常値をとる場合はその部品の故障であり、またすべての原因パラメータが正しいにも関わらずに制約が成り立たない場合は、後者の制約条件がなんらかの原因でなりたたない、故障モードともいふべき動作モードに移っていると考えられる。この場合に成り立つ制約条件は故障の原因によって異なるので、それぞれ故障モードとその時成り立つ制約式として記述する。

外因パラメータとはそのパラメータの値が診断対象の系のパラメータに依存していないものをいう。これは部品内部の定数のようなものや、診断対象の系の外部にあるものを表すパラメータなどがある。定数(の異常)を決定するものはパラメータでは捉えることができないし、診断対象の外部にあるものの状態を決定することもできない。したがって外因パラメータの異常値は説明することができないので、それをもって故障とする。外因パラメータは接続を表す X フラグと、因果を表す C,E フラグを用いて以下のように定義できる。

- ・外因(exogenous:0)

系の外部の要因で変化するパラメータ。

Cであることが必要。

- 1.内部パラメータであり、C^Eなパラメータ。

内部の定数を表す。

- 2.外部パラメータかつ C^E または CE なパラメータで、

診断対象の系全体の外部と継っているもの。

このパラメータの値は系の外部の要因によって与えられる。

2.2.2 大域的知識

提案する因果関係による推論方式は基本的に前項で述べた局所的知識に基づいて推論を行う。しかし局所的知識だけに基づいて推論を行うと多くの曖昧さが発生する。これは部品が接続して作られるループのような構造がもたらす性質などを局所的知識では表現できないことが原因と考えられる。我々は、このような性質を抽出し知識として記述することで曖昧さを減少させることができると考えており、現在抽出を進めているところである。

現在抽出している曖昧さを減らす知識は大域的知識として表現される。大域的知識は、複数の部品で構成される大域的な構造の性質を複数の部品のパラメータの間で成り立つ制約式として記述する。大域的制約は系がループを組んでいる際の圧力バランスなどの構造によって生じる性質を表すものと、系が到達する定常状態で大域的に成り立つ関係を表すものがある。このような大域的な制約は部品の接続状態に依存しており局所的な知識では表現できず、接続された部品で構成される大域的構造が持つ制約として記述するしかない。また定常状態を規定する制約式を記述することで、系が定常になる状態だけを推論することができる。人工的に機械によって構成された系は定常状態で動作することが多いと考えられ、また熱のように必ず平衡に達する物理現象もあることから、定常状態に到達すると仮定することが合理的といえる場合も多い。このように定常状態に到達すると仮定できる場合は定常状態を規定する制約条件を記述することで、曖昧さを減らすことができる。

2.2.3 推論

この節では因果関係による推論方式が行う推論の概要を述べる。推論は基本的に局所的知識に基づいて部品ごとに行われる。部品ごとに部品内部のパラメータを決定し、次々に隣りの部品の状態を決定していく。部品の内部のパラメータの値はパラメータ間の制約条件に基づいて決定される。この際因果指定を利用して、隣接する部品の値を参照または決定する。

大域的知識は局所的推論によってパラメータの値が決定されたときに参照される。もし局所的に値が決定されたパラメータが大域的制約式に含まれるのであれば、大域的制約式を用いて他の部品に含まれるパラメータの値を決定する。

推論の際に用いられるワークスペースの内容は以下のようなものである。

全パラメータ(名前)と値の組

パラメータ名	名前(部品名+パラメータ名)
pump:press-out	
値	[0]、[+]、[-]
値の個数	$n \geq 0$
値の集合	{}, {0}, {+}, {-}, {0,+}, {0,-}, {+,-}, {0,+,-}

推論はひとつの異常徴候から故障仮説を生成する遡行推論と、故障仮説からその他の異常徴候を生成する順行推論の2つがある。それぞれについて推論の概要を以下に示す。

●遡行(R)

遡行推論は一つの異常徴候からその原因である故障を推論する。その推論は原因から結果への因果の流れを遡って進む。遡行推論は3つのステップで進められる。まず徴候をパラメータの異常値に変換する(ステップR1)。次にその異常値からすべての部品のパラメータを決定する(ステップR2)。最後に推論した全部品の状態から故障仮説を生成する(ステップR3)。以下、ステップごとに動作を説明する。

(R1) 異常徴候から初期状態を作る。

一つの異常徴候をパラメータの異常値に変換する。これは故障に関する知識で行なわれる。例えば、徴候の温度センサ12：高はパラメータの異常値 pump : Tout [+] に変換される。

(R2) 部品での遡行推論

一つの部品の状態の推論は4つのフェイズから構成される。

フェイズ1：隣の部品からの伝播

このフェイズでは、 \sim CEX パラメータ の値を回りの部品からとってくるここで \sim CEX パラメータは外部かつ結果かつ原因ではないパラメータである。 \sim CEX パラメータの値は、所属するポートの接続相手の部品のパラメータの値に一致する。この相手が推論済みである場合はその値であり、未推論である場合はすべての値とする。

フェイズ2：部品内でのパラメータの決定

このフェイズでは結果パラメータから原因パラメータの推定値を生成する。結果パラメータはフェイズ1で決定しているから、原因パラメータにすべての定性値を割り当てて、条件に適合する組だけを残す。

フェイズ3：周りの部品との矛盾チェック

推論した原因パラメータが隣りの既に推論済みのパラメータの値と矛盾しないか、チェックする。推論した原因パラメータを p_1 とし、対応する他の部品での推論済みのパラメータを p_2 とするとき、

1. p_2 が E である場合
 p_1, p_2 の値の集合の積集合に含まれるものだけを残す。
2. p_2 が \bar{E} である
 E, \bar{E} は一致しなくてもよいので、なにもしない。

フェイズ4：次に推論する部品の選択

継っている部品のうち、まだ推論していないもののいづれかを選択する。自分のまわりが全部終わっている場合は、他の推論されていない部品に処理を移す。全部の部品に関して推論すると、推論は終了する。

(R3)故障仮説の生成

部品の機能とする制約条件に含まれる結果パラメータ(複数)を機能パラメータと呼ぶ。ある部品の機能パラメータが異常値である際に、その部品の原因パラメータがすべて正常であれば、その部品は故障している。(制約条件が成り立たなくなる故障)原因パラメータが異常値である場合、そのパラメータが外因パラメータであればその部品は故障している。(外因パラメータの異常、即ちその部品が故障箇所である)外因パラメータでなければ、その異常値は他の部品の故障の影響を受けたものと思われるので、この部品は故障ではない。

以上のように、ある部品の機能とする制約条件に含まれる結果パラメータが異常であり、かつ原因パラメータがすべて正常であるか、または外因パラメータだけが異常値である場合に、その部品の故障仮説が生成される。

●順行推論(P)

順行推論は一つの故障原因から発生する異常徴候を推論する。その推論は原因から結果への因果の流れを沿って進む。順行推論は3つのステップで進められる。まず故障原因から故障している部品のパラメータの値を決定する(ステップP1)。次にその異常値からすべての部品のパラメータを決定する(ステップP2)。最後に推論した全部品の状態から異常徴候を生成する(ステップR3)。以下、ステップごとに動作を説明する。

(P1)初期状態の生成

故障している部品と故障原因から故障している部品のパラメータを決定する。原因パラメータを異常値に設定するか、または故障原因(故障モード)の指定に従って異常値を設定する。

(P2)部品での順行推論

一つの部品の状態の推論は4つのフェイズから構成される。

フェイズ1：隣の部品からの伝播

このフェイズでは C^{EX} パラメータの値を回りの部品からとってくる。ここで C^{EX} パラメータは外部かつ原因かつ結果ではないパラメータである。C^{EX} パラメータの値は、所属するポートの接続相手の部品のパラメータの値に一致する。この相手が推論済みである場合はその値であり、未推論である場合はすべての値とする。

フェイズ2：部品内でのパラメータの決定

このフェイズでは原因パラメータから結果パラメータの推定値を生成する。原因パラメータはフェイズ1で決定しているから、結果パラメータにすべての定性値を割り当てて、条件に適合する組だけを残す。

フェイズ3：周りの部品との矛盾チェック

推論した結果パラメータが隣の既に推論済みのパラメータの値と矛盾しないかチェックする。推論した結果パラメータをp1とし、対応する他の部品での推論済みのパラメータをp2とするとき、

1. p2 が C である場合

p1, p2 の値の集合の積集合に含まれるものだけを残す。

2. p2 が $\sim C$ である

E, E は一致しなくてもよいので、なにもしない。

フェイズ4：次に推論する部品の選択

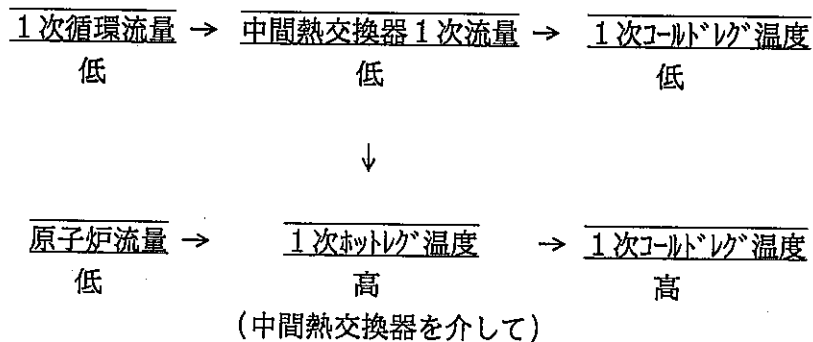
継っている部品のうち、まだ推論していないもののいずれかを選択して、フェイズ1へ行く。自分のまわりが全部終わっている場合はまだ推論されていない他の部品へ処理を移す。全部の部品に関して推論すると、推論は終了する。

2.3 定性連立方程式による推論方式

3年度の研究で明らかになった、2変数間の変化伝播知識に基づく定性推論が有する問題点を、定性連立方程式の応用という観点から、以下に整理する。

3年度に取り上げた知識コンパイラは、元になる知識の記述が簡潔・容易で、診断ルールの生成過程も、推論木の規模の問題を別にすれば人間にとって理解が容易で、現実的で強力な手法である。しかし、これを原子炉冷却系モデルに適用すると、例えば次の問題が生じる。

順行推論では、仮定した原因候補に対し、導かれる対象システムの状態は一意的に定まるべきである。ところが、今仮に「1次主循環流量 低」という事象が、1次コールドレグ温度へ及ぼす影響をこの手法で導くと、次のような矛盾を生じる。



これは個々の推論の枝が誤っているのではなく、用意した局所伝播知識からは、中間熱交換器において「1次入口温度は高いが、1次側の流量は低いので、1次出口温度の定性値は決定できない」のである。即ち、あるパラメータの定性値を、これに影響を与える他の1個のパラメータの定性値のみで決定しようとする事に問題がある。

中間熱交換器においては、1次出口温度、1次出口温度が従属パラメータであり、それぞれ1次、2次の流量及び入口温度の4個の独立パラメータから影響を受ける。従って、正常状態の近傍で線形化した次式を考える。

$$\Delta 1 \text{次出口温度} = k1 \cdot \Delta 1 \text{次流量} + k2 \cdot \Delta 2 \text{次流量} + k3 \cdot \Delta 1 \text{次入口温度} + k4 \cdot \Delta 2 \text{次入口温度}$$

$$\Delta 2 \text{次出口温度} = k5 \cdot \Delta 1 \text{次流量} + k6 \cdot \Delta 2 \text{次流量} + k7 \cdot \Delta 1 \text{次入口温度} + k8 \cdot \Delta 2 \text{次入口温度}$$

4個の独立パラメータから2個の従属パラメータへの定性的変化伝播知識とは、以下のK1～K8の符号の情報である。

係数	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8
符号	+	-	+	+	+	-	+	+

従って例えばこの知識から、1次出口温度の定性値が正であると決定できるのは、以下の場合のみである。

$$\begin{aligned} & (1 \text{次流量が}[+] \text{or}[0]) \text{and}(2 \text{次流量が}[-] \text{or}[0]) \\ & \text{and}(1 \text{次入口温度が}[+] \text{or}[0]) \text{and}(2 \text{次入口温度が}[+] \text{or}[0]) \\ & \text{and}(1 \text{次流量が}[0] \text{and} 2 \text{次流量が}[0] \text{and} 1 \text{次入口温度が}[0] \text{and} 2 \text{次入口温度が}[0]) \end{aligned}$$

このように、ある従属パラメータの定性値を評価する際には、これに直接影響する全ての独立パラメータの定性値を考慮して、定性的な知識と矛盾を生じる定性値の組合せのみを否定する推論機構が必要である。

ところが、定性的な知識と矛盾を生じない定性値の組合せ全てを解として求めると、独立パラメータの特定の定性値の組合せに対して、従属パラメータの定性値の組合せが一意的に得られない場合がある。その例を、原子炉冷却系1ループモデルについて説明する。

このモデルの各部品について、物理量の変化の伝播関係即ち、ある独立変数の変化に対して、これで引き起こされる他の変数の変化の方向の正逆、及び定常時に成立する式を以下に説明する。なお、以下の文中で用いる記号の意味は次の通りである。

Q:原子炉発熱量

W1:1次循環流量

W2:2次循環流量

Wa:空気流量

T1h:1次ホットレグ温度

T1c:1次コールドレグ温度

T2h:2次ホットレグ温度

T2c:2次コールドレグ温度

Taout:空気出口温度

Tatm:大気雰囲気温度

Ri:中間熱交換器伝熱抵抗

Ra:空気冷却器伝熱抵抗

各部品における物理量の変化の伝播関係を表2.3.1に示す。これらの表で +、- はそれぞれ原因となる変化に対してその結果の変化が同符号、異符号である事を示す。

原子炉		中間熱交換器			空気冷却器		
結果原因	T1hへ	結果原因	T1cへ	T2hへ	結果原因	T2cへ	Taoutへ
Qから	+	T1hから	+	+	T2hから	+	+
T1cから	+	W1から	+	+	W2から	+	+
W1から	-	T2cから	+	+	Tatmから	+	+
		W2から	-	-	Waから	-	-
		Riから	+	-	Raから	+	-

表2.3.1 2変数間の变化伝播と部品間接続による順行推論

上の表に示した知識のみによって、各外因変数がそれぞれ一個のみ正であるという情報に対して、従属パラメータの定性値に関する推論結果をまとめたものを以下の表2.3.2に示す。この表では、原因パラメータの各々が1個のみ正の定性値を有した時の、各結果パラメータの定性値を示している。定性値が定まらないパラメータについては？を記している。

結果原因	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout
Qから	+	+	+	+	+
W1から	?	?	?	?	?
Riから	?	?	?	?	?
W2から	?	?	?	?	?
Raから	?	?	?	?	+
Waから	-	-	-	-	-
Tatmから	+	+	+	+	+

表2.3.2 2変数間変化伝播に基づく推論の結果

この表から、定性的な変化伝播知識では、系全体にわたる事象を推論するためには不十分な事がわかる。ここで後の議論のために、表2.3.3に示された知識を、右辺が[0]の定性連立方程式として表わした場合の各変数の係数の符号を表しておく。

定性式 番号	従属パラメータ部					独立パラメータ部						
	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout	Q	W1	Ri	W2	Ra	Tatm	Wa
1	-	+				+	-					
2	+	-		+			+	+	-			
3	+		-	+			+	-	-			
4			+	-					+	+	+	-
5			+		-				+	-	+	-

表2.3.3 定性連立方程式として表した、変化伝播に関する定性的知識

しかしながら定性的な知識としては、変化の伝播に関するもの以外に、パラメータ間の定性的な拘束条件として認識されているものがある。これを以下に示す。

中間熱交換器及び空気冷却器に、伝熱量Q、1次、2次冷却系及び空気側の代表温度という概念を導入して定常時に成立する、次の式6~9から新たな定性式を生成する事ができる。即ち、中間熱交換器において、「1次ホットレグ温度と1次コールドレグ温度の正の重み係数付き平均値と、2次ホットレグ温度と2次コールドレグ温度の正の重み係数付き平均値の差を伝熱抵抗で割ったものが伝熱量である」という関係を式に表すと、

$$(k_{ih} \cdot T_{1h} + k_{ic} \cdot T_{1c}) - (k_{ih} \cdot T_{2h} + k_{ic} \cdot T_{2c}) - Q/R_i = 0$$

同様に空気冷却器においても、次式が成立する。

$$(k_{ah} \cdot T_{2h} + k_{ac} \cdot T_{2c}) - (k_{ah} \cdot T_{aout} + k_{ac} \cdot T_{atm}) - Q/R_a = 0$$

また、式2、4の代りに、「流量とホットレグーコールドレグ間の温度差の積が原子炉発熱量に等しい」事を式に表すと、

$$Q - W_2 \cdot (T_{2h} - T_{2c}) = 0$$

$$Q - W_a \cdot (T_{aout} - T_{atm}) = 0$$

これらの関係を定性化すると以下の表が得られる。

定性式 番号	従属パラメータ部					独立パラメータ部						
	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout	Q	W1	Ri	W2	Ra	Tatm	Wa
6			-	+		+			-			
7	+	+	-	-		-		+				
8					-	+					+	-
9			+	+	-	-				+	-	

表2.3.4 新たに付加する定性連立方程式

原子炉冷却系1ループモデルについて、独立パラメータから従属パラメータへの影響の伝播の方向を求めた結果を表2.3.5に示す。なお、表中A、B、Cはそれぞれ、定性式1～5、定性式1及び6～9、定性式1～9を用いた結果である。

従属変数 独立変数	T1h			T1c			T2h			T2c			Taout		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Q	?	?	+	?	?	+	?	+	+	?	?	+	?	+	+
W1	?	-	-	?	+	+	?	0	0	?	0	0	?	0	0
Ri	?	-	-	?	-	-	?	0	0	?	0	0	?	0	0
W2	?	?	?	?	?	?	?	-	-	?	+	+	?	0	0
Ra	?	+	+	?	+	+	?	+	+	?	+	+	?	0	0
Wa	?	-	-	?	-	-	?	-	-	?	-	-	?	-	-
Tatm	?	+	+	?	+	+	?	+	+	?	+	+	?	+	+

表2.3.5 定性連立方程式による順行推論

(注：？は定性値が一意的に定まらない事を示す。)

この表から、パラメータ間の伝播に関する知識以外の定性的な拘束条件をも加えると、定性推論の有効性が高まる場合があることがわかる。従って、原子力プラントの異常診断知識生成用の定性推論機構には、このような伝播に関するもの以外の定性知識をも取り扱う機能が必要となる。

上記のように定性連立方程式は、パラメータ間の伝播に関する知識と、伝播に関するもの以外の定性知識とを同一形式で扱うのに適している。そこで、3年度ではこの定性連立方程式のソルバーを開発した。このソルバーは、与えられた定性連立方程式を [未知数に関する項の数が最少である式の中で、未知数の組合せが同じ式の数が最大のもの(部分A)] と、 [その他の部分(部分B)] に分け、部分Aに対してのみ背理法を適用してその解を部分Bに代入していくという手順を繰り返す手法を用いている。この結果、定性連立方程式全体に一括して背理法を適用する手法に比して、原子炉2ループ主冷却系の定性モデルの場合で数十倍の処理速度の向上が達成された。

第3章 プロセス変数間の因果関係に基づく推論機構の開発

平成3年度の研究では、部品における因果関係に基づいた推論機構について基本的設計と机上でのシミュレーションを行った。本年度の研究では3年度の研究成果に基づいてさらに考察を進め、人間の認知する因果性に沿った推論を行なうことのできる推論機構を開発した。実際に常陽のモデルを計算機上に実現し、推論機構のプロトタイプによって系の挙動の推論を行なわせた。

推論機構は以下のような特徴を持つ。

- ・複数のパラメータ間に成り立つ制約条件を扱う。
- ・パラメータの値の管理を行う。
- ・パラメータに因果の属性を指定する。
- ・部品ごとに局所的知識を記述する。
- ・曖昧さを減少させるために大域的知識を与える。
- ・推論は異常値を伝播することで行う。
- ・推論は部品ごとの局所的な推論の組合せで行われる。

このような特徴を持つ本推論方式は、値の矛盾を起こすことなく推論を行なうことができる。推論は物理原理に基づいて部品ごとの局所的な伝播で行われ、推論結果の説明を行なうことができる。また、用いた知識は高い独立性/汎用性を持つ。さらに、大域的な知識を用いた推論を行うことで曖昧さが減少する。

本章では開発を行った因果関係に基づく推論機構と構築した常陽のモデルについて述べる。

3.1 対象としたモデル

本節では構築した常陽のモデルについて述べる。用いた知識の記述様式は、平成3年度の研究において考案した記述方式に基づいて、本年度さらに定式化とその洗練を進めたものである。知識の記述は個々の部品ごとの部品の知識と制約式に関する知識に分かれる。以下では知識の記述様式の形式的な定義を行い、それに沿った常陽のモデルを示す。

以下に示す常陽のモデルは常陽の主冷却システムの1ループの熱流動に関する部分のものである。圧力と流量の関係については対象外としている。

3.1.1 部品の知識

(1)記述様式の定義

部品の記述のフォーマットについて定義する。表記には以下の記号を用いる。

1)表記について

拡張BNF表記を用いる。

$::=$ は定義を表し、左辺の非終端記号が右辺の記述に展開されることを表す。

$A \mid B$ はORを表し、AまたはBであることを示す。

$[A, B, \dots]$ はリストを表す。 \dots は同種のもものが繰り返されることを表す。

シングル・クォート(')で括る項は、文字列(終端記号)を表す。

(例) '部品の名前' 部品の名前を表す文字列

表記自身は、

表記 $::=$ (非終端記号 $::=$ 項)

項 $::=$ 非終端記号 \mid 終端記号 $\mid [項、項、\dots] \mid (項 \mid 項)$

非終端記号 $::=$ 全角文字列

終端記号 $::=$ 半角文字列 \mid '全角文字列'

2)部品の知識は以下の情報を持つ。

○componentName : 部品名

部品名 $::=$ '部品の名前'

○port : ポートの情報

部品のポートの集合 $::=$ [ポート, ポート, ...]

ポート $::=$ ['ポートの名前', ポートの種類, '接続先部品名', '接続先ポート名']

ポートの種類 $::=$ next \mid upper \mid lower

next 同じ階層の隣の部品であることを表す。

upper 上位の階層の部品への接続であることを表す。

lower 下位の階層の部品への接続であることを表す。

○parameters : パラメータの情報

部品のパラメータの集合 ::= [パラメータ、パラメータ、...]

パラメータ ::= ['パラメータの名前'、'パラメータの種類'、
因果指定、所属するポートの集合]

因果指定 ::= [原因(C)になれるかのフラグ、結果(E)になれるかのフラグ]

フラグ ::= true | false

原因(C)になれるかのフラグ

部品において他のパラメータに影響を与えることがあることを表す。

値が変化するとそれを原因として部品内の他のパラメータの値が変化することがある。

結果(E)になれるかのフラグ

部品において他のパラメータの影響を受けることがあることを表す。

部品内の他のパラメータの値の変化を原因として、値が変化することがある。

所属するポートの集合 ::= ['所属するポートの名前'、...]

○constraints : 制約式

部品の制約式の集合 ::= [制約式、制約式、...]

制約式 ::= ['制約式の名前'、式の引数]

式の引数 ::= ['パラメータの名前'、...]

制約式は次節のフォーマットで記述される。部品の知識においては、制約式の名前とそれを用いる際の引数を記述する。

(2)常陽のモデル

実際に記述した常陽の機器のモデルを以下に示す。全角文字の部分は注釈である。

1)原子炉

{[

componentName: 部品の名前

rx, 原子炉の部品の名前は、rx

Oport : ポートの情報

```
[
  [up,upper,loop1,rx],
    原子炉(rx)の上位の階層の部品としてloop1があることを表す。
    ポートの名前はup、接続先はloop1のrxというポート。
  [in,next,ihx,out1],
    in ポートは中間熱交換器(ihx)のout1ポートに接続。
  [out,next,ihx,in1]
    outポートは中間熱交換器(ihx)のin1ポートに接続。
    in,outといったポートの名前には特別な意味はない。
],
```

Oparameters : パラメータの情報

```
[
  [t1cold,temperature_c,[true,false],[in,up]],
    冷却材入口温度。種類はコールド側温度であり、他のパラメータに影響
    を与えるが、影響を受けない。
    inポートとupポートに属しており、それぞれの接続先の影響を受ける。
  [t1hot,temperature_h,[false,true],[out,up]],冷却材出口温度
  [trx,temperature,[true,false],[]],炉心平均温度
  [dtrx,temperature,[true,true],[]],炉心平均温度の変化量(微分値)
  [qt0,heat,[true,false],[exo]],単位時間当たりの原子炉発熱量
  [qt01,heat,[true,true],[]],単位時間に炉心から伝わる熱量
  [t1,flowrate,[true,flase],[out]],冷却材が通過するのにかかる時間
  [qlin,heat,[true,true],[up]] 冷却材が受けとる総熱量
],
```

Oconstarints : 制約式

```
[
  [heatDiff,[dtrx,qt0,qt01]],熱量バランスによる温度変化に関する式
  [heatPerTime,[qlin,qt01,t1]],冷却材が受けとる総熱量に関する式
  [heatPropagation,[qlin,t1hot,t1cold]],冷却材に関する熱量保存則
  [propHeat2,[qt01,trx,t1hot,t1cold]],伝熱量は温度差に比例する。
  [ifruleCold,[t1cold,qt01,t1,t1hot]],出口温度に関する式
  [integral,[trx,trx,dtrx]] 炉心平均温度の変化を表す積分式
]
}.
```

2)中間熱交換器

```
{
  componentName :  部品の名前
  ihx,
```

Oport : ポートの情報

```
[
  [up1,upper,loop1,ihx],上位の階層の部品 loop1
  [up2,upper,loop2,ihx],上位の階層の部品 loop2
  [in2,next,ac,out1],隣りの部品 ac
  [out2,next,ac,in1],隣りの部品 ac
  [in1,next,rx,out],隣りの部品 rx
  [out1,next,rx,in] 隣りの部品 rx
],
```

Oparameters : パラメータの情報

```
[
  [t1hot,temperature_h,[true,false],[in1,up1]],一次系冷却材入口温度
  [t1cold,temperature_c,[false,true],[out1,up1]],
  一次系冷却材出口温度
  [t2cold,temperature_c,[true,false],[in2,up2]],二次系冷却材入口温度
  [t2hot,temperature_h,[false,true],[out2,up2]],二次系冷却材出口温度
  [t1,flowrate,[true,false],[in1]],一次側冷却材の通過時間
  [t2,flowrate,[true,false],[in2,out2]],二次側冷却材の通過時間
  [hihx,heatextconst,[true,false],[ ]],熱伝達率
  [qt12,heat,[true,true],[ ]],単位時間当たりの伝熱量
  [q1out,heat,[true,true],[ ]],一次側冷却材が放出する総熱量
  [q1outu,heat,[false,true],[up1]],一次側冷却材が放出する総熱量
  [q2in,heat,[true,true],[ ]],二次側冷却材が受けとる総熱量
  [q2inu,heat,[false,true],[up2]],二次側冷却材が受けとる総熱量
],
```

Oconstarints : 制約式

```

[
  [heatPerTime, [q1out, qt12, t1]], 一次側の冷却材の総熱量に関する式
  [heatPerTime, [q2in, qt12, t2]], 二次側の冷却材の総熱量に関する式
  [heatPropagation, [q1out, t1hot, t1cold]], 一次側の熱量保存則
  [heatPropagation, [q2in, t2hot, t2cold]], 二次側の熱量保存則
  [propHeat, [qt12, hihx, t1hot, t1cold, t2cold, t2hot]], 伝熱量に関する式
  [ifruleHot, t1hot, qt12, t1, t1cold]], 一次側の出口温度に関するルール
  [ifruleCold, [t2cold, qt12, t1, t2hot]] 二次側の出口温度に関するルール
  [qeq, [q1outu, q1out]],
  [qeq, [q2inu, q2in]]
]
}].

```

3) 空気冷却器

```

{[
  componentName: 部品の名前
  ac,

```

Oport : ポートの情報

```

[
  [up, upper, loop2, ac], 上位の階層の部品 loop2
  [in1, next, ihx, out2], 隣の部品 ihx
  [out1, next, ihx, in2], 隣の部品 ihx
  [in2, next, exo, out], 接続されていない
  [out2, next, exo, in] 接続されていない
],

```

○parameters : パラメータの情報

```
[
  [t2hot,temperature_h,[true,false],[in1,up]],二次系ホットレグ温度
  [t2cold,temperature_c,[false,true],[out1,up]],
                                     二次系コールドレグ温度
  [t3cold,temperature_c,[true,false],[in2]],大気温度
  [t3hot,temperature_h,[false,true],[out2]],空気冷却器出口温度
  [t2,flowrate,[true,false],[in1,out1]],二次系冷却材の通過時間
  [t3,flowrate,[true,false],[in2,out2]],空気の通過時間
  [hac,heatextconst,[true,false],[ ]],熱伝達率
  [qt23,heat,[true,true],[ ]],単位時間当たりの伝熱量
  [q2out,heat,[true,true],[ ]],二次系冷却材が放出する総熱量
  [q2outu,heat,[false,true],[up]],
  [q3in,heat,[true,true],[ ]],空気が受けとる総熱量
],
```

○constraints : 制約式

```
[
  [heatPerTime,[q2out,qt23,t2]],二次系冷却材の総熱量に関する式
  [heatPerTime,[q3in,qt23,t3]],空気の総熱量に関する式
  [heatPropagation,[q2out,t2hot,t2cold]],二次系冷却材の熱量保存則
  [heatPropagation,[q3in,t3hot,t3cold]],空気の熱量保存則
  [propHeat,[qt23,hac,t2hot,t2cold,t3cold,t3hot]],伝熱量に関する式
  [ifruleHot,[t2hot,qt23,t1,t2cold]],二次側の出口温度に関するルール
  [qeq,[q2outu,q2out]]
]
]}.
```

4)一次系ループ

{[

componentName: 部品の名前

loop1,

Oport : ポートの情報

[

[rx,lower, rx,up],下位の階層の部品 rx

[ihx,lower, ihx,up1] 下位の階層の部品 ihx

],

Oparameters : パラメータの情報

[

[q1,heat,[true,false],[[]],ループの総熱量

[dq1,heat,[true,true],[[]],ループの総熱量の変化量(微分値)

[q1in,heat,[true,false],[rx]],ループに流入する熱量

[q1out,heat,[true,false],[ihx]],ループから流出する熱量

[flowrx,flowrate,[true,false],[rx]],原子炉における流量

[flowihx,flowrate,[true,false],[ihx]],中間熱交換器における流量

[t1hot,temperature_h,[true,false],[rx,ihx]],一次系ホットレグ温度

[t1cold,temperature_c,[true,false],[rx,ihx]]一次系コールドレグ温度

],

Oconstarints : 制約式

[

[heatDiff,[dq1,q1in,q1out]],熱量差に関する式

[ifruleLoop,[q1in,q1out,flow1rx,dq1]],

熱量の変化に関するルール(後述)

[ifruleLoop,[q1in,q1out,flow1ihx,dq1]],

熱量の変化に関するルール(後述)

[integral,[q1,q1,dq1]],熱量の変化

[integral,[t1hot,t1hot,dq1]],熱量の変化による温度の変化

[integral,[t1cold,t1cold,dq1]],熱量の変化による温度の変化

[heatTemp,[q1,t1hot,t1cold]] ループの熱量は温度の和

]

}}.

5)二次系ループ

```
{
  componentName:  部品の名前
  loop2,
```

○port : ポートの情報

```
[
  [ihx,lower, ihx,up2],下位の階層の部品 ihx
  [ac,lower, ac,up] 下位の階層の部品 ac
],
```

○parameters : パラメータの情報

```
[
  [q2,heat,[true,false],[ ]],ループの総熱量
  [dq2,heat,[true,true],[ ]],ループの総熱量の変化量(微分値)
  [q2in,heat,[true,false],[ihx]],ループに流入する熱量
  [q2out,heat,[true,false],[ac]],ループから流出する熱量
  [flowihx,flowrate,[true,false],[ihx]],中間熱交換器における流量
  [flowac,flowrate,[true,false],[ac]],空気冷却器における流量
  [t2hot,temperature_h,[true,false],[ihx,ac]],一次系ホットレグ温度
  [t2cold,temperature_c,[true,false],[ihx,ac]]一次系コールドレグ温度
],
```

○constarints : 制約式

```
[
  [heatDiff,[dq2,q2in,q2out]],熱量差に関する式
  [ifruleLoop,[q2in,q2out,flow2ihx,dq2]],
  熱量の変化に関するルール(後述)
  [ifruleLoop,[q2in,q2out,flow2ac,dq2]],
  熱量の変化に関するルール(後述)
  [integral,[q2,q2,dq2]],熱量の変化
  [integral,[t2hot,t2hot,dq2]],熱量の変化による温度の変化
  [integral,[t2cold,t2cold,dq2]],熱量の変化による温度の変化
  [heatTemp,[q1,t1hot,t1cold]]ループの熱量は温度の和
]
}].
```

3.1.2 制約式の記述

(1)記述様式の定義

1) constName : 制約式名

○制約式名 ::= '制約式の名前'

2) argInfo : 引数の情報の集合

○引数の情報の集合 ::= [引数の情報、引数の情報、...]

3の引数に対応する順序で式で用いられる引数に関する情報を記述する。

○引数の情報 ::= nil | abs_bound | must_bound | must_bound_zero |
diff | integral

式を評価する際の条件や特殊な指定を行う。

・ nil:

指定なし

・ abs_bound:

このパラメータは必ず値を決定してから、この式を用いる。

値が不明の場合、zeroと仮定される。

微分値を決定する式の右辺の変数につける。

・ must_bound:

式を適用する前に、値が確定されてなければならない。

値が確定されていない場合、この式は適用されない。

ifの条件部分のパラメータ。

積分の元の変数。(x' = x + dx の x)

・ must_bound_non_zero;

式を適用する前に、zero以外の値に確定されてなければならない。

そうでない場合、この式は適用されない。

積分式の微分の変数。(x' = x + dx の dx)

・ diff:

微分値であることを表す。

微分値を決定する式の左辺の変数。

異常値が二回連続してはならない。

・ integral:

積分値であることを表す

この値が変更されたときは時間カウンタが進む。(後述)

3) predicate : 制約式

○制約式 ::= [引数の集合、式]

○引数の集合 ::= ['引数1'、'引数2'、...]

○式 ::= 演算子(式、式) | 引数

○演算子 ::= qadd | qsub | qmul | qdiv | qrev | qeq | qneq | qif

・ X = qadd(A,B)

定性的な加算。

? は +, 0, - の 3 値。

A, B の値ごとの X の値は以下の通り。

A \ B	+	0	-
+	+	+	?
0	+	0	-
-	?	-	-

・ X = qsub(A,B)

定性的な減算。

? は +, 0, - の 3 値。

A, B の値ごとの X の値は以下の通り。

A \ B	+	0	-
+	?	+	+
0	-	0	+
-	-	-	?

・ X = qmul(A,B)

定性的な乗算。qadd に等しい。

・ X = qdiv(A,B)

定性的な除算。qsub に等しい。

・ X = qrev(A)

• $X = \text{qrev}(A, B)$

定性的に逆の関係を示す。

A	B	X
+	-	真
0	0	真
-	+	真
他の場合		偽

• $X = \text{qeq}(A)$

• $X = \text{qeq}(A, B)$

定性的に等しいかどうかを返す。その値を返す。

同じ値であれば、成功する。

A	B	X
+	+	真
0	0	真
-	-	真
他の場合		偽

• $X = \text{qneq}(A)$

• $X = \text{qneq}(A, B)$

定性的に等しくないかどうかを返す。その値を返す。

異なる値であれば、成功する。

$\text{not}(\text{neq}(A, B))$ に等しい。

• $X = \text{qif}(A, B)$

Aが成り立つとき、Bを評価する。Bの値を返す。

(2)常陽のモデル(制約式)

1)単位時間当たりの伝熱量に関する式(heatPerTime)

伝熱量の総量 = 単位時間当たりの伝熱量 * 時間

```
{[
  heatPerTime,
  [nil,nil,nil],
  [
    [SumOfHeat,HeatPerTime,Time],
    qeq(SumOfHeat,qmul(HeatPerTime,Time))
  ]
]}
```

2) 熱量の変化に関する式

熱量の変化量 = 変化前の熱量(温度) - 変化後の熱量(温度)
 (熱量の変化量は放出した場合に正の値を取る)

```
{[
  heatPropagation,
  [nil,nil,nil],
  [
    [PropHeat,OldHeat,NewHeat],
    qeq(PropHeat,qsub(OldHeat,NewHeat))
  ]
]}
```

3) 伝熱量に関する式

単位時間当たりに伝わる熱量 = 熱伝達率(高い温度の和 - 低い温度の和)

```
{[
  propHeat,
  [nil,nil,nil,nil,nil,nil],
  [
    [PropHeat,H,HotTemp1,HotTemp2,ColdTemp1,ColdTemp2],
    qeq(PropHeat,qmul(H,qsub(qadd(HotTemp1,HotTemp2),
                                qadd(ColdTemp1,ColdTemp2))))
  ]
]}
```

4) 熱量に関する式

ある物質の持つ熱量 = 物質のある地点での温度 + 物質のある地点での温度

```
{[
  heatTemp,
  [nil,nil,nil],
  [
    [Q,T1,T2],
    qeq(Q,qadd(T1,T2))
  ]
]}
```

5) 熱交換器の高温側の温度に関する式

熱交換器の性質を表す式。流量が変化していないときに高温側の入口温度が増加すると、高温側の出口温度も上昇することを表す。

```
{[
  ifruleHot,
  [must_bound,must_bound,must_bound,nil],
  [
    [HotTemp,PropHeat,Flow,ColdTemp],
    qif(qand(qeq(HotTemp,PropHeat),qeq(Flow,zero))),
                                                    qeq(HotTemp,ColdTemp))
  ]
]}
```

6) 熱交換器の低温側の温度に関する式

熱交換器の性質を表す式。流量が変化していないときに低温側の入口温度が増加すると、低温側の出口温度も上昇することを表す。

```
{[
  ifruleCold,
  [must_bound,must_bound,must_bound,nil],
  [
    [ColdTemp,PropHeat,Flow,HotTemp],
    qif(qand(qrev(ColdTemp,HotTemp),qeq(Flow,zero))),
                                                    qeq(HotTemp,ColdTemp))
  ]
]}
```

7) 熱バランスを表す式

熱の変化量 = 流入する熱量 - 流出する熱量

この式の左辺値は微分値である。

```
{[
  heatDiff,
  [diff,abs_bound,abs_bound],
  [
    [Dtemp,Qin,Qout],
    qeq(Dtemp,qsub(Qin,Qout))
  ]
]}
```

8) 積分式

新しい値 = 古い値 + 微分値

微分値は非zeroでなければならない。

```
{[
  integral,
  [integral,must_bound,must_bound_non_zero],
  [
    [NewValue,OldValue,DiffValue],
    qeq(NewValue,qadd(OldValue,DiffValue))
  ]
]}
```

9) ループに関するルール

流量が変化していて、流入熱量、流出熱量が等しく変化しているときは、熱量の変化量が等しいとみなして、ループの熱量の変化がないとする。

```
{[
  ifruleLoop,
  [must_bound,must_bound,must_bound,nil],
  [
    [Qin,Qout,Flow,DQ],
    qif(qand(qeq(Qin,Qout),qneq(Flow,zero)),qeq(DQ,zero))
  ]
]}
```

・上記の式が成り立つ理由

流量の変化は同時に起こる。各部品において、流量の変化によって熱量が変化するが、その変化量は等しく、また同時に起こると考えられる。流量の変化によるものではなく通常の熱の伝播による場合は時間差があるので、ループの熱量は変化する。

・考察

上記の式は本来推論すべきものである。流量の変化が同時的であること、平衡状態では熱量が定量的に等しいことを用いた、量と時間に関する推論が必要である。

3.2 異常値を伝播する定性推論方式に基づくソフトウェアの製作

前節のような深い知識に基づいた対象モデルを用いて順行推論を行い、系に対する外乱の影響を推論する。系に対する外乱はひとつの故障原因パラメータの異常値で表現されるとする。また、他のパラメータはすべて正常値の[0]であるとする。異常な故障原因パラメータから推論を始め、他のパラメータに異常値を伝播していく。伝播は部品内の制約条件を用いた伝播と、部品間の接続による伝播がある。新たに異常値が生成されなくなれば推論は終了する。

以下では、推論の状態の管理の方式と推論のアルゴリズムについて述べる。なお、以下にてでくる「時間カウンタ」は推論の順序に沿って生成された番号である。この推論の順序と実際の現象における時間の整合性については、次節の5で考察を行う。

3.2.1 ワークスペース

推論状態の管理を行う。相互にORの関係である、系全体の状態を表現するworld stateと部品ひとつの状態を表すstateを組み合わせて、推論のある時点における系の状態が表現される。

(1)系全体の状態 : world state(ws)

系全体(世界と呼ぶ)のひとつの状態を表す。部品の状態の集合で構成される。推論に OR の部分があると複製される。

1)stateName : 状態名

○状態名 ::= 'worldstateの名前'

world0、world1 のように数字を用いた一意な名前がつく。

2)compStates : 各部品の状態の集合。

○部品の状態の集合 ::= [部品の状態、部品の状態、...]

○部品の状態 ::= ['部品名'、部品の根の状態、部品の葉の状態]

○部品の根の状態 ::= 部品の推論を始めた(根の)部品の状態(state)の名前

○部品の葉の状態 ::= 部品の推論が終了した(根の)部品の状態(state)の名前

stateは各部品の状態を表す。

葉の状態が、そのworldstateにおける部品の状態を表す。

3)infrQueue : 推論キュー。

推論しなければならない部品と状態を保持する。

○推論キュー ::= [推論待ちの状態、推論待ちの状態、...]

○推論待ちの状態 ::= ['状態名', '推論する部品名']

4)valid; 有効かどうかのフラグ

有効かどうかのフラグ ::= valid | invalid

5)history; 推論の履歴

推論過程の履歴。主に部分間の伝播の履歴を保持している(説明用)。

(2)部品の状態 : state(s)

一つの部品の状態を表す。部品のパラメータの値などで記述される。一つの伝播(一つの式の適用)で生成され、生成された前の状態と結ばれて、OR木を構成する。

1)stateName : 状態の名前

○状態名 ::= state###

state0, state1、のように数字を用いた一意な名前が与えられる。

2)stateValid : 有効フラグ

○有効フラグ ::= valid | invalid

矛盾した場合などは、invalidになる。

3)prevState,nextState : 以前の状態、次の状態

○以前の状態 ::= '以前の状態の名前'

○次の状態 ::= ['次の状態の名前', '次の状態の名前', ...]

状態は木状に構成される。

複数の値がある場合に枝分かれする。

4) paramValue : パラメータの値の集合

- パラメータの値の集合 ::= [パラメータの値、パラメータの値、...]
- パラメータの値 ::= [パラメータのID、値、時間カウンタ、状態フラグ]
- パラメータのID ::= ['部品名'、'パラメータの名前']
- 値 ::= plus | minus | zero
- 時間カウンタ ::= 1 | 2 | 3 ,....
値が決定されたときの時間を表す。
値を決定した式に含まれる最大の時間カウンタにセットされる。
- 状態フラグ ::= nil | assume
assume; 仮定であることを表す。C^Eのパラメータで、
接続先の部品が未推論であるか、接続されていない場合、
zero と仮定される。

(3)系全体の推論キュー

部品間の推論エンジンを持つ。
現在アクティブで、推論が終了していないworld stateを保持。
['world state 名'、'world state 名'、....]

(4)部品の推論キュー

部品内部の推論エンジンを持つ。
推論が終了していないstateを保持。
[[状態名、部品名]、...]

3.2.2 部品間の推論

前節で述べたworldstate、state系全体の推論キューを用いて、部品間の推論を行う。以下に推論アルゴリズムの概要を示す。

- ①系全体の推論キューから現在アクティブな worldstate(cws)を取り出す。なければ11へ。
- ②現在の世界の推論キューから推論すべき部品(ccomp)と state(cstate) を取り出す。なければ10へ。
- ③cws、cstateがvalidであることを確認する。
else、goto 9
- ④if cwsにccompに関する状態がある。
then cwsの中のccompの根のstate(orstate)を取り出す。


```

if orstateとcstateが同じ
then 推論しない。(推論しても同じ結果だから) goto 9。
else orstateとcstateを合わせて新しい状態(nrstate)を作る。
    この際と同じパラメータに異なる値がある場合は、パラメータの時間カウンタが新しい(大きい)方の値を用いる。
    時間カウンタが等しい場合、推論しない。 goto 9
if nrstateがorstateと異なる。
then cwsからccompに関する記述を消す。
    nrstateをcstateにする。
else 推論しない。 goto 9。

```

⑤部品で推論を行う(次項参照)

cstateから推論を行う。cstateが根になる。
 複数の葉状態(複数のlstate)が生成されて停止する。

⑥lstateの数-1だけcwsを複製する(複数の nws)

⑦各nwsに、[ccomp、cstate、lstate]を加える。

⑧各nwsごとに、ccompから接続先に伝播する。

各ポートごとに、

- ・接続先の根状態を生成する。
- ・接続先のパラメータが C であること。
- ・次世界状態の推論スタックに積む。

{接続先部品名、接続先根状態}

⑨2へ戻る

⑩1へ戻る。

⑪推論終了

3.2.3 部品内部の推論

前節の5の部品内部での推論のアルゴリズムの概要を示す。ここで推論キューとは部品内推論エンジンが持つもののことである。

- ①推論キューに、根の状態(lstate)を積む。
- ②推論キューから、現在の状態(cstate)、現在の部品(ccomp)を取り出す。なければ終了。
- ③cstateはvalidである。
 else goto 2
- ④部品の制約式をひとつ取り出す。(以下、式)
 式がなくなれば goto 2

- ⑤式に含まれるパラメータの時間カウンタを調べる。
 最大値をtmaxとする。
- ⑥式に含まれるパラメータを一つ取り出す。(para)
 なくなれば8へ。
 if paraに現在なんらかの値が割り当てられている
 then if結果フラグがついている && 時間カウンタ < tmax
 then paraの値は確定しない。式の適用によって決める。
 else 値を確定する。
 else if結果フラグがついている
 then paraの値は確定しない。式の適用によって決める。
 else zeroと仮定する。
- ⑦6へ戻る。
- ⑧if式に含まれるすべてのパラメータが確定しているthen式を評価する。
 if 式を満たす。
 then なにもしない。
 else 状態を invalid にする。
 goto 3.(次の式に行く)
- ⑨else if zero でない値に確定されたパラメータがない then
 なにもしない。
 goto 4(次の式に行く)
- ⑩else (zero 以外の値に確定されたパラメータがあり、未確定な変数もある)評価する。
 複数の値がある場合以下を繰り返す。
 新しい状態を生成。
 パラメータの値を書き込む。
 時間カウンタはtmax。
 if integral then 時間カウンタは tmax + 1
 if diff && 以前非zeroの値が割り当てられていた then
 新しい値 がzero以外ならinvalid
 推論キューに積む。
 goto 2

3.2.4 実装

推論エンジンをUNIX workstation上でオブジェクト指向型Plolog言語であるCommon ESPを用いて実装した。現在、熱・流量に関する事象を推論できる推論エンジンのプロトタイプができている。現在のプログラムは、12個のクラスで記述され、3000行ほどである。

3.3 推論結果

3.3.1 推論の結果

(1) ループモデルにおける推論の結果

3.1で述べたモデルを用いて、推論エンジンのプロトタイプに5つの故障原因パラメータの異常値を与え、それを原因とする系の振舞いの様子を推論させた。その結果を以下の表に示す。

1) 原子炉 炉心発熱量 増加(rx:qt0[+])

① 温度パラメータのみ

trx	t1hot	t1cold	t2hot	t2cold	t3hot	t3cold(外乱)
+	+	+	+	+	+	0

② 全パラメータ

・RX:

dtrx	qlin	qlinu	qt0	qt01	t1	t1cold	t1hot	trx
0	+	+	+	+	0	+	+	+

・IHx:

hihx	qlout	q2in	qt12	t1	t1cold	t1hot	t2	t2cold	t2hot
0	+	+	+	0	+	+	0	+	+

・AC:

hac	q2out	q3in	qt23	t2	t2cold	t2hot	t3	t3cold	t3hot
0	+	+	+	0	+	+	0	0	+

2) 中間熱交換器 熱伝達率 低下(ihx:hihx[-])

① 温度パラメータのみ

trx	t1hot	t1cold	t2hot	t2cold	t3hot	t3cold(外乱)
+	+	+	0	0	0	0

② 全パラメータ

・RX:

dtrx	qlin	qt0	qt01	t1	t1cold	t1hot	trx
0	0	0	0	0	+	+	+

・ IHX:

hihx	q1out	q2in	qt12	t1	t1cold	t1hot	t2	t2cold	t2hot
-	0	0	0	0	+	+	0	0	0

・ AC:

hac	q2out	q3in	qt23	t2	t2cold	t2hot	t3	t3cold	t3hot
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3) 空気冷却器 熱伝達率 低下(ac:hac[-])

① 温度パラメータのみ

trx	t1hot	t1cold	t2hot	t2cold	t3hot	t3cold(外乱)
+	+	+	+	+	0	0

② 全パラメータ

・ RX:

dtrx	qlin	qt0	qt01	t1	t1cold	t1hot	trx
0	0	0	0	0	+	+	+

・ IHX:

hihx	q1out	q2in	qt12	t1	t1cold	t1hot	t2	t2cold	t2hot
0	0	0	0	0	+	+	0	+	+

・ AC:

hac	q2out	q3in	qt23	t2	t2cold	t2hot	t3	t3cold	t3hot
-	0	0	0	0	+	+	0	0	0

4) 一次系流量減少(rx:flow[+] -> rx:t1[-])

① 温度パラメータのみ

trx	t1hot	t1cold	t2hot	t2cold	t3hot	t3cold(外乱)
+	+	+	+	+	0	0

② 全パラメータ

・ RX:

dtrx	qlin	qt0	qt01	t1	t1cold	t1hot	trx
0	+	0	0	+	-	+	?

・ IHX:

hihx	qlout	q2in	qt12	t1	t1cold	t1hot	t2	t2cold	t2hot
0	+	0	0	+	-	+	0	0	0

・ AC:

hac	q2out	q3in	qt23	t2	t2cold	t2hot	t3	t3cold	t3hot
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

③考察

trxが曖昧になっている。これは一次系ループでt1hot + t1coldが0であることが分かっているにも関わらず、原子炉で推論を行なう際にその関係を用いることができないからである。和が0であることを用いれば、trxは0に戻ることが推論できる。

5)二次系流量 低下(ac:t2[+])

①温度パラメータのみ

trx	t1hot	t1cold	t2hot	t2cold	t3hot	t3cold(外乱)
0	0	0	+	-	?	0

②全パラメータ

・ RX:

dtrx	qlin	qt0	qt01	t1	t1cold	t1hot	trx
0	0	0	0	0	0	0	0

・ IHX:

hihx	qlout	q2in	qt12	t1	t1cold	t1hot	t2	t2cold	t2hot
0	0	+	0	0	0	0	+	-	+

・ AC:

hac	q2out	q3in	qt23	t2	t2cold	t2hot	t3	t3cold	t3hot
0	+	-	-	+	-	+	0	0	?

③考察

t3hotが曖昧になっているが、この理由は4でtrxが曖昧になっているのと同じ理由である。

(2) ループモデルにおける推論の結果

以下の2ループモデルにおける推論の結果は、パラメータ数が多いため、理解が容易なように温度パラメータについてのみ記す。

1) 原子炉発熱量 増加

trx	t1hot	t1colda	t2hota	t2colda	t3hota	t3cold(外乱)
+	+	+	+	+	+	0

t1coldb	t2hotb	t2coldb	t3hotb
+	+	+	+

2) Aループ中間熱交換器 熱伝達率 低下

trx	t1hot	t1colda	t2hota	t2colda	t3hota	t3cold(外乱)
+	+	+	-	-	-	0

t1coldb	t2hotb	t2coldb	t3hotb
+	+	+	+

3) Aループ空気冷却器 熱伝達率 低下

trx	t1hot	t1colda	t2hota	t2colda	t3hota	t3cold(外乱)
+	+	+	+	+	-	0

t1coldb	t2hotb	t2coldb	t3hotb
+	+	+	+

4) Aループ1次系流量減少

trx	t1hot	t1colda	t2hota	t2colda	t3hota	t3cold(外乱)
+	+	-	-	-	-	0

t1coldb	t2hotb	t2coldb	t3hotb
+	+	+	+

5)Aループ2次系流量減少

trx	t1hot	t1colda	t2hota	t2colda	t3hota	t3cold(外乱)
?	?	?	+	-	?	0

t1coldb	t2hotb	t2coldb	t3hotb
?	?	?	?

3.3.2 推論例

推論例として、中間熱交換器の熱伝達率が低下(ihx:hixh[-])したという事象からの推論を示す。以下は、部品ごとの推論の様子を推論の順に示したものである。(番号)は一回の部品の推論に対して順番につけた番号である。部品における推論は、部品に対して初期条件(根の状態)を与えて、その影響を受けて到達する結果の状態(葉の状態)を求めることで行なわれる。以下では、部品ごとの推論において与えた初期状態と、結果として推論された状態を上下に並べて示す。状態中で、*がついている値は仮定によるもの(statusがassumeになっている)である。

(1)初期状態から中間熱交換器で推論

{localinfr,ihx,state1,[state8]},

	hihx	qlout	q2in	qt12	t1cold	t1hot	t2cold	t2hot
state1:	[-]							
state8:	[-]	[-]	[-]	[-]	[+]	[0]*	[0]*	[-]

※熱伝達率が低下しているstate1を初期状態として推論を始めて、state8が結果として得られた。熱伝達率の低下から、1次系コールドレグ温度が上昇し、2次系ホットレグ温度が低下することが分かる。結果をloop1,loop2,ac,rxにそれぞれ伝播する。(それぞれ(2),(3),(4),(5)で推論する)

(2)LOOP1で(1)の影響を推論

['infrAState:',loop1,state9],

['notalllower(onlycs)',loop1,state9],

※下位のRXがまだ推論されていないので実行されない。

(3) LOOP1で(1)の影響を推論

['infrAState:', loop2, state10],
 ['notalllower(onlycs)', loop2, state10],

※(2)と同じで推論されない

(4) AC(空気冷却器)で(1)の影響を推論

[localinfr, ac, state12, [state22]],

	hac	q2out	q3in	qt23	t2cold	t2hot	t3cold	t3hot
state12						[-]		
state22	[0]※	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[0]※	[-]

※state12から始めて、state22が結果として得られた。2次系ホットレグ温度の低下から、2次系コールドレグ温度と空気温度が低下することが分かる。結果をloop2, ihxにそれぞれ伝播する。

(5) RX(原子炉)で(1)の影響を推論

['infrAState:', rx, state14],
 [localinfr, rx, state14, [state48]],

	dtrx	qlin	qt0	qt01	t1	t1cold	t1hot	trx
state14						[+]		
state48	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]※	[+]	[+]	[+]

※state14から推論を始めて、state48が結果として得られた。1次系コールドレグ温度の上昇から、1次系ホットレグ温度と原子炉温度が上昇することが分かる。途中の経過として、一度dtrxが[+]になって、trxが[+]になる。その後、dtrxは[0]に戻って安定する。結果をloop1, ihxにそれぞれ伝播する。(それぞれ(6),(7)で推論する)

(6) LOOP1(1次系ループ)で(1)と(5)の影響を推論

['infrAState:', loop1, state50],
 ['merge:', loop1, state9, state50, state53],
 [localinfr, loop1, state53, [state57]],

	dq1	q1	qlin	qlout	t1cold	t1hot
state53			[0]	[-],1	[+],2	[+]
state57	[+]	[+]	[0]	[-]	[+],3	[+]

※(1)の影響と(5)の影響を混ぜたものを推論の初期状態とする。その結果大域的な熱バランスによって1次系ループに熱が溜り、温度が上昇する。熱量の変化量:dq1が[+]のままである(上昇し続ける)。温度の上昇の影響を(7)、(8)で推論

する。

(7)RX(原子炉)で(6)の影響を推論

```
[ 'infrAState: ', rx, state58],
[ "samestate(no infr) : ", rx, state58, state14],
```

※前回と同じなので推論しない。

(8)IHX(中間熱交換器)で(6)の影響を推論

```
[ 'infrAState: ', ihx, state59],
[ 'merge: ', ihx, state1, state59, state60],
[ localinfr, ihx, state60, [state65, state81, state82]],
```

	hihx	qlout	q2in	qt12	t1cold	t1hot	t2cold	t2hot
state60	[-]					[+]		
state65	[-]	[0]	[0]	[0]	[+]	[+]	[0]※	[0]
state81	[-]	[+]	[+]	[+]	[+]	[+]	[0]※	[+]
state82	[-]	[-]	[-]	[-]	[+]	[+]	[0]※	[-]

※(1)における初期状態(熱伝達率低下)に加えて、1次系ホットレグ温度も低下している。その状態から推論を行なうと、3つの状態が生成された。1次系から2次系に伝わる熱量が、正常、増加、減少の3つの可能性がある。世界状態を複製して、それぞれ(9-0),(9-1),(9-2)で推論を続ける。同時に、loop2,ac,rxにも伝播する。(それぞれ、(10),(11),(12)で推論)

(9)LOOP1(1次系ループ)で(8)の影響を推論<qlout[-]の場合>

```
[ localinfr, loop1, state101, []],
[ Invalid state(diff) : state102, loop1, dq1, ],
[ "state is invalid(invalid world) : ", state101, loop1],
```

	dq1	q1	qlin	qlout	t1cold	t1hot
state95			[0]	[-],3	[+],3	[+]

※(8)の推論の3通りの結果のうち、1次系から2次系に伝わる熱量(qlout)が低下している場合を推論する。推論の結果、温度の微分値が0に戻らないことが分かる。これは平衡状態とは言えないので適切ではない。よって、世界状態を無効にする。

(10)LOOP1(1次系ループ)で(8)の影響を推論<q1out[0]の場合>

[localinfr, loop1, state103, [state104]],

	dq1	q1	qlin	qlout	ticold	t1hot
state83			[0]	[0],3	[+],3	[+]

※(8)の推論の3通りの結果のうち、1次系から2次系に伝わる熱量(q1out)が正常の場合を推論する。

推論の結果、温度の微分値が0に戻り、平衡状態に到達することが分かる。結果をrx, ihxに伝播する。

(11)LOOP1(1次系ループ)で(8)の影響を推論<q1out[+]の場合>

[localinfr, loop1, state113, []],

[Invalid state(diff) : state114, loop1, dq1],

["state is invalid(invalid world):", state113, loop1],

	dq1	q1	qlin	qlout	ticold	t1hot
state83			[0]	[+],3	[+],3	[+]

※(8)の推論の3通りの結果のうち、1次系から2次系に伝わる熱量(q1out)が増加している場合を推論する。(9)と同じように、無効とされる。

※(9)~(11)の推論の結果、1次系から2次系に伝わる熱量(q1out)は正常に戻ることが推論できる。これは、中間熱交換器の熱伝達率の低下が、1次系ループに熱が溜まったことによる温度の上昇によって補償されて、伝熱量が正常に戻ること示している。

(12)LOOP2(2次系ループ)で(8)の影響を推論

[localinfr, loop2, state107, [state107]],

	q2in	q2out	q2hot	q2cold
state107	[0]	[0]	[0]	[0]

(13)AC(空気冷却器)で(8)の影響を推論

[localinfr, ac, state109, [state109]],

	hac	q2out	q3in	qt23	t2cold	t2hot	t3cold	t3hot
state109			[0]	[0]				
state109[0]※	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]※	[0]	

※2次系に伝わる熱量が正常に戻ったので、2次系の温度は正常に戻る。これ以降は伝播された影響が同じなので推論されない。推論は終了する。

最終的な状態は以下の通りになる。(world1 の部品の葉の状態)

①RX : state48

dtrx	qlin	qt0	qt01	t1cold	t1hot	trx
[0]	[0]	[0]	[0]	[+]	[+]	[+]

②IHX : state65

hihx	qlout	q2in	qt12	t1cold	t1hot	t2cold	t2hot
[-]	[0]	[0]	[0]	[+]	[+]	[0]※	[0]

③LOOP1:state104

dq1	q1	qlin	qlout	t1cold	t1hot
[0]	[+]	[0]	[0]	[+]	[+]

④AC : state109

hac	q2out	q3in	qt23	t2cold	t2hot	t3cold	t3hot
[0]※	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]※	[0]

⑤LOOP2 : state107

dq2	q2in	q2out	q2hot	q2cold
[0]	[0]	[0]	[0]	[0]

3.4 説明の生成

本推論方式の特徴として、人間の認知に近い推論を行なうことが挙げられる。系の挙動を人間に分かりやすく説明することは大変重要なことである。特に、原子力プラントのような複雑なプラントでは人間の運転員に分かりやすく系の挙動を説明し、推論の正当性を理解してもらうことが重要である。また、運転員の教育などにも用いることができると思われる。

人間の物理現象の理解には因果性が大きな役割を果たしている。本年度の研究においては、物理現象における因果性と物理的な方程式の関係について考察を行なった。本推論方式はその考察に基づいており、因果性に沿った推論を行なうことができる。

本推論方式の認知的側面からの特徴を整理すると以下ようになる。

(1) 定性値

人間は通常定性的に物理現象を理解し、予測を行なうことができる。詳細な値を用いると分解能は向上するが、振舞いの大局的な性質を把握しにくくなる。パラメータの因果関係の理解のためには、定性値で十分であることが多いと考えられる。

(2) 逐次性

因果関係は変数の間に成り立つ順序関係である。本推論方式は式を逐次的に評価し変数の値を変化させていく。したがって、推論過程のパラメータの値の変化はシーケンシャルな系列を構成する。この、パラメータの値が変化した順番によって付けられたパラメータ間の順序関係を「推論による決定順序」と呼ぶことにする。決定順序は原因と結果と解釈することが可能である。例えば変数 x が変化してからある式を用いて変数 y が決定された場合、変数 x の変化が原因となって変数 y の値が変化したと捉えることができる。本推論方式による決定順序の大部分は因果関係と認知できる。

人間がある2つの事象(A,B)の順序関係を因果関係と認知するためには、以下の4つの条件を成り立つ必要がある。

- ① 事象Aが起こると事象Bが必ず起こる。
- ② 事象Aの方が事象Bより時間的に先に起こる。
- ③ 事象Aと事象Bが位置的に近接している。
- ④ 事象Aから事象Bが起こる理由を法則(の短い連鎖)で説明できる。

本推論方式は物理原理に基づくことから条件④は満たしており、以下で述べるように他の条件についても満足する。条件1,2は以下に述べる特徴(4)によって満たされる。条件3は次項(3)によって満たされる。

一方、連立方程式を普通に解くと、変数間に意味のある順序関係をつけることはできない。したがって、挙動がどのようなメカニズムで決まるのか、どの変数がどの変数の影響を受けるのか、などの情報は得ることができず、物理的な振舞いを本質的な意味で説明することができない。定性連立方程式による推論で説明を生成するためには、解の絞り込みの各ステップで用いられた定性方程式とその意味を別に記憶しておく必要がある。

(3)局所性

人間の因果理解において事象間の物理的距離は大きな意味をもっており、通常の場合事象の連鎖は離れたところでは起こらないということを直観的に認めている。したがって、物理的な距離が小さい範囲で起こる物理現象や、隣接していることによる影響の伝達が、因果関係と認識されやすい。

本推論方式では、推論の基本的枠組として、部品内部での推論と、その結果の他の部品への伝播を行なっている。推論における物理原理の適用は完全に局所的に行なわれるため、導出される因果関係は局所性を持つ。

しかし、物理現象の中には局所的なものだけでは説明できないものもある。特に定性推論の場合、定量的な計算であれば局所的な記述のみでも推論できる事象でも、適量的大きさが分からないために生じる曖昧さのために、一意に推論できないことがある。そのため、本推論方式では、部品が階層構造を持つことを許し、大域的な知識を記述できる。大域的知識に記述することで、大域的熱バランスによる温度の変化や、流量のように大域的に同時に変化するパラメータを扱うことができる。

(4)因果指定

一般に方程式は使い方を規定していない。どの値を決定してから式を適用して、どの値を決めるかは使用者に任されており、明示的に記述されていない。したがって、方程式で記述される変数間の関係は対称的であるということが出来る。しかし方程式で記述される、部品における物理現象においては、変化させることについて非対称な関係が見られることがある。前述の条件①を満たすためには、方程式に付け加えて、一方的な依存関係を表現することが必要である。

本推論方式では、部品における一方向的因果性を表現するために、部品におけるパラメータの属性として、他のパラメータに影響を与えることができるか、影響を受けることがあるかどうかを表すフラグを付加する。フラグを因果指定と呼ぶ。因果指定を参照することで実際の物理現象では起こりえない因果関係を排除でき、決定順序が前述の条件1、条件2 を満たすようにできる。

(5)時間に関する考察

前述の2の条件は、原因が結果に時間的に先行していることを保証するものである。ただし、事象Aと事象Bの発生が同時の場合、因果関係と認知できるかどうかは微妙である。特に物理的現象の場合、人間は物理現象を完全に観測できるわけではなく、実際には同時におこる現象に時間的順序をつけて認知したり、少々の時間差は無視して同時的であるととらえることも多い。微分を含まない方程式は変数の変化に要する時間について、なにも表現していない。一般に積分を含まない式を因果的に解釈した結果が因果関係を表現するかどうかについては論争がある。この点が問題になるのは、パラメータが複数の式に依存しており、パラメータの値にフィードバックがかかる場合である。

本推論方式は、因果性が本質的に局所的であることに注目し、部品内における推論と部品間の推論を組合せることで挙動を推定する。部品内における推論は、ひとつの式を適用してありうる値を全て生成し、他の式で検査するGenerate & Test方式で行なう。この過程は式の評価が逐次的であるので因果的に解釈することが可能ではあるが、フィードバックがある場合、実際の現象における因果関係と一致するとは限らない。したがって本推論方式の部品内における推論によって得られる決定関係は、人間の認知のために用意した架空の因果であるということが出来る。

部品間の推論は、部品の接続のトポロジーに沿って影響を逐次的に伝播することで行なわれる。人間は、部品間のように距離がある空間に影響が伝播するにはある程度の時間がかかり、影響は(通常は)離れた空間に直接伝播しない、という認識を持っている。したがって、部品間の逐次的な影響の伝播は、人間にとって因果関係と認知されやすい。しかし、となりあった部品間の伝播だけによる推論では、フィードバックが扱えないことや曖昧さが増大したりすることがある。これらを解決するために、一般的な知識に基づいた大域的な知識と推論を用意する。例えば、流量の変化のような部品間においても同時的である影響は、大域的構造を認識して影響を同時に推論する。

以上のような特徴を持つことで、本推論方式によって決定される変数間の順序関係は人間の認知する因果関係に近いものになっている。したがって、推論過程と推論の順序によって規定される変数の順序関係を用いて、パラメータの変化を説明することができる。例えば、前述の推論例のLOOP1におけるパラメータの変化過程の一部を文章にすると以下のようなになる。

①系に流入する熱量が正常値であり、流出する熱量が基準値以下であるので、一次系ループに熱が残留する。(熱量が増加する)

根拠： 熱量の変化量 = 流入量 - 流出量

②現在熱量は正常値で熱量が増加したので、熱量が基準値以上になる。

根拠： 変化量の積分

③現在ホットレグ温度は基準値以上であるが、熱量が増加するのでさらに増加する。

根拠： 温度は熱量の増加

しかし、本方式は部品内にフィードバックがある場合、順序関係が人間の認知するものにならないことがある。今回モデル化した原子炉、中間熱交換器、空気冷却器は、いづれも伝熱量の決定についてフィードバックがあり、生成・検査法を用いているため、人間にとって理解しにくい結果になっている。部品内フィードバックについても仮定を行なうなどの工夫がさらに必要と思われる。

また、現状で行うことのできる説明はパラメータレベルのものに留まっており、人間の持つ高度な概念などには対応していない。特に故障診断というタスクにおける高度な説明を行なうためには、故障の概念や、故障と密接に関係する機能の概念を扱う必要があると考えられる。

第4章 定性連立方程式に基づく推論機構の開発

4.1 定性知識と定性連立方程式

第2章に述べたように、解の曖昧さを抑制する1方法として、定性連立方程式による推論手法が開発された。3年度まで、色々な考察に基づいて、改良や実験が行われてきたが、定性的な局所伝播知識及びエネルギー保存則等の定性的知識の双方を、因果関係を無視して同一形式で表現する事の意味、定性方程式の言語的解釈、及び複数の定性方程式を連立させて解くことの数学的根拠等に関する考察が不十分であった。

今後、定性推論を含めて、原理・原則に近い知識から、現場で即時適用可能な診断知識を導出する技術の開発を進めるためには、ここで、上述した数々の問題を明確な根拠を以て明らかにして、今までの推論手法開発の意味を確かめる必要がある。

4.1.1 局所伝播知識の意味

例として、原子炉容器モデル(1ループ)での次の定性的局所伝播知識を取り上げ、その意味を考察する。

「原子炉において、出口温度(T1h)には、発熱量(Q)、入口温度(T1c)が正の方向に、流量(W1)が負の方向に作用する。」

これは、次の3つの命題を意味すると考えて差し支えない。

①発熱量(Q)が「高」又は「正常」、入口温度(T1c)が「高」又は「正常」、流量(W1)が「低」又は「正常」で、但し少なくとも1つは正常ではない ならば 出口温度(T1h)は「高」

②発熱量(Q)が「低」又は「正常」、入口温度(T1c)が「低」又は「正常」、流量(W1)が「高」又は「正常」で、但し少なくとも1つは正常ではない ならば 出口温度(T1h)は「低」

③発熱量(Q)が「正常」、入口温度(T1c)が「正常」、流量(W1)が「正常」
ならば 出口温度(T1h)は「正常」

この意味するところを、各変数の定性値の組合せで表すと、

$$\textcircled{1} (Q=[+or0]) \wedge (T1c=[+or0]) \wedge (W1=[-or0]) \wedge \{(Q=[0]) \wedge (T1c=[0]) \wedge (W1=[0])\} \\ \cdot (T1h=[+]) \quad \text{Eq.4-1-1}$$

$$\textcircled{2} (Q=[0]) \wedge (T1c=[0]) \wedge (W1=[0]) \cdot (T1h=[0]) \quad \text{Eq.4-1-2}$$

$$\textcircled{3} (Q=[-or0]) \wedge (T1c=[-or0]) \wedge (W1=[+or0]) \wedge \{(Q=[0]) \wedge (T1c=[0]) \wedge (W1=[0])\} \\ \cdot (T1h=[-]) \quad \text{Eq.4-1-3}$$

命題p,qに関して、 $(p \cdot q) \cdot (p \wedge q = \phi)$ が一般に成立するので、

②は $(Q=[0]) \wedge (T1c=[0]) \wedge (W1=[0]) \wedge (T1h=[+or-]) = \phi$ と書き換えられる

Eq.4-1-4

従って、 $(Q=[0]) \wedge (T1c=[0]) \wedge (W1=[0])$ と $(Q=[0]) \wedge (T1c=[0]) \wedge (W1=[0]) \wedge (T1h=[0])$ は同値。①は

$$(Q=[+or0]) \wedge (T1c=[+or0]) \wedge (W1=[-or0]) \wedge (T1h=[-or0]) \wedge \{(Q=[0]) \wedge (T1c=[0]) \wedge (W1=[0]) \wedge (T1h=[0])\} = \phi \quad \text{Eq.4-1-5}$$

$$\textcircled{3} \text{は } (Q=[-or0]) \wedge (T1c=[-or0]) \wedge (W1=[+or0]) \wedge (T1h=[+or0]) \wedge \{(Q=[0]) \wedge (T1c=[0]) \wedge (W1=[0]) \wedge (T1h=[0])\} = \phi \quad \text{Eq.4-1-6}$$

というように、伝播元、伝播先の区別のない形に書き換えられる。

なお、上の①、③から、「4つのうち3つの変数の定性値が[0]であれば、残りの1つの変数の定性値も[0]である」ことが下ののように導かれることを付け加えておく。

例えばQ, T1c, W1の定性値が[0]であるとする。

①から、 $(T1h=[-or0]) \wedge (T1h=[0]) = \phi$ より、T1h=[-]が否定され、また③から、 $(T1h=[+or0]) \wedge (T1h=[0]) = \phi$ より、T1h=[+]が否定される。従って、T1h=[0]

変形した①、③の妥当性は次のように再び言語的に表しなおせば確認できる。

① “発熱量(Q)が	「高」又は「正常」、かつ
入口温度(T1c)が	「高」又は「正常」、かつ
流量(W1)が	「低」又は「正常」、かつ
出口温度(T1h)は	「低」又は「正常」、かつ
4者の何れかは	「正常」ではない”
ということは有り得ない。	

③ “発熱量(Q)が	「低」又は「正常」、かつ
入口温度(T1c)が	「低」又は「正常」、かつ
流量(W1)が	「高」又は「正常」、かつ
出口温度(T1h)は	「高」又は「正常」、かつ
4者の何れかは	「正常」ではない”
ということは有り得ない。	

従って、変数Q, T1c, W1, T1h定性値にそれぞれ定性係数[+], [+], [-], [-]を乗じて下の様に表し、「各項が全て0か、又は符号が異なる項が少なくとも1組ある」という意味を持たせたもので表現できる。これを以下定性方程式と称する。

$$[+]Q+[-]W1+[+]T1c+[-]T1h=0 \quad \text{Eq.4-1-7}$$

これは、元の伝播を表すためによく用いられる、 $T1h \cdot [+]Q+[-]W1+[+]T1c$ のT1hの移項に相当する操作で容易に生成できる。

4.1.2 局所伝播知識以外の定性的知識の意味

中間熱交換器において、「伝熱量(Q)は、1次入口温度(T1h)と出口温度(T1c)の平均値と2次入口温度(T2c)と出口温度(T2h)の平均値の差に比例し、伝熱抵抗(Ri)に反比例する」という知識は、熱流動現象としては従属的に値が定まるT1c, T2hと外因変数であるT1h, T2c, Riを用いて、やはり従属変数であるQを規定する知識である点で局所伝播知識ではない。

しかし、この知識に表れる各変数の定性値に関する命題は局所伝播知識と同様に次のように記述される。

①1次入口温度(T1h)が「高」又は「正常」、1次出口温度(T1c)が「高」又は「正常」、2次入口温度(T2h)が「低」又は「正常」、2次出口温度(T2c)が「低」又は「正常」、伝熱抵抗(Ri)が「低」又は「正常」で、但し5者共に正常ではない ならば 伝熱量(Q)が「高」

②1次入口温度(T1h)が「低」又は「正常」、1次出口温度(T1c)が「低」又は「正常」、2次入口温度(T2h)が「高」又は「正常」、2次出口温度(T2c)が「高」又は「正常」、伝熱抵抗(Ri)が「高」又は「正常」で、但し5者共に正常ではない ならば 伝熱量(Q)が「低」

③1次入口温度(T1h)が「正常」、1次出口温度(T1c)が「正常」、2次入口温度(T2h)が「正常」、2次出口温度(T2c)が「正常」、伝熱抵抗(Ri)が「正常」 ならば 伝熱量(Q)が「正常」

また、これらの知識も、複数の変数の定性値の組合せについて、以下のように有り得ない場合を否定する知識である。

$$(T1h=[+or0])\wedge(T1c=[+or0])\wedge(T2h=[-or0])\wedge(T2c=[-or0])\wedge(Ri=[-or0])\wedge(Q=[-])=\phi \quad \text{Eq.4-1-8}$$

$$(T1h=[-or0])\wedge(T1c=[-or0])\wedge(T2h=[+or0])\wedge(T2c=[+or0])\wedge(Ri=[+or0])\wedge(Q=[+])=\phi \quad \text{Eq.4-1-9}$$

$$(T1h=[0])\wedge(T1c=[0])\wedge(T2h=[0])\wedge(T2c=[0])\wedge(Ri=[0])\wedge(Q=[-or+])=\phi \quad \text{Eq.4-1-10}$$

これらの論理式の組も、同様に以下の定性方程式で表現できる。

$$[+]\text{T1h}+[+]\text{T1c}+[-]\text{T2h}+[-]\text{T2c}+[-]\text{Ri}+[-]\text{Q}=0 \quad \text{Eq.4-1-11}$$

以上、定性方程式が、局所伝播知識と、それ以外の定性的知識を同一の形式で表現する手段であること、及び既存の知識から容易に生成できるものであることを示した。

次に、通常の(定量的な)方程式との関係について考察する。定性推論で用いられる知識には、「Aが増えればBが減ずる」というように元々定量的情報を含まない形の知識と、対象の系の挙動を表す数学的モデルを定性化した知識があり、両者を同じ形式で表現して扱える事が重要である。従って、後者の数学的モデルを構成する通常の方程式の定性化の意味を確認しておくことが必要である。

対象の系を構成するパラメータの内、 X_1 から X_n までの、その正常値に対する偏差 ΔX_1 から ΔX_n の関係が、正常状態の近傍で次の式で近似されるとする。

$$A_1 \cdot \Delta X_1 + A_2 \cdot \Delta X_2 + \dots + A_n \cdot \Delta X_n = 0 \quad \text{Eq.4-1-12}$$

この式を定性化するとは、係数 $A_1 \sim A_n$ の符号のみが既知で、絶対値が全て未知である場合に、変数 $\Delta X_1 \sim \Delta X_n$ の符号の組合せについて、この式を満たすか否かを問題にすることである。判定の可否を考えると、次の3通りに分類できる。

①変数全てが0の場合

一式を満たす。

②0以外の項が全て同符号の場合(非0の項が1個のみ存在する場合を含む)

一式を満たさない。

③互いに異符号の項が少なくとも1組存在する場合

一式を満たすか否か判定できない。

複数の定性化された式を同時に満たす変数の符号の組合せを求めるためには、個別の式においては、②の場合に相当する符号の組合せを排除することが必要である。③に相当する符号の組合せは、他の式での判定に委ねるべきである。

従って、変数 $\Delta X_1 \sim \Delta X_n$ の符号の組合せに対する拘束条件は、定性方程式で記述できる。

このように、定性的な拘束条件は、本質的に、「絶対に違うものだけを排除する」ものであって、「絶対に正しいものだけを選択する」ものではない。ここから、よく指摘される定性解の組合せ爆発の問題が発生する。

4.1.3 定性方程式の演算

以上のように、定性方程式による推論とは、定性方程式と矛盾する変数の符号の組合せを否定することであるから、定性連立方程式による推論を行なうとは、本質的には、この手順を各定性方程式について繰り返し、その結果残った符号の組合せ（＝定性解）を解とすることになる。

この小節では、定性連立方程式による推論の過程で、ある特定の変数の定性値が定められた場合、それがそれ以降の推論に対してどのような意味を持つかを考察し、推論アルゴリズムに対する考察に資する。

定性方程式中のある変数の定性値が既知の場合、その式が残りの変数に対して有する意味を説明する。例としてEq.4-1-7を取り上げる。

この式で例えば $Q=[+]$ が既知の場合、この式は $[-]W1+[+]T1c+[-]T1h=[-]$ と変形され、

「 $W1=[+]$ or $T1c=[-]$ or $T1h=[+]$ 」を意味する。さらに $W1=[+]$ も既知であれば、 $T1c, T1h$ の如何成る定性値の組合せに対しても矛盾を生じないので、この式は $T1h, T1c$ の定性値に対して何等の拘束も意味しない。これは、右辺が0の定性方程式の、「各項が全て0か、又は符号が異なる項が少なくとも1組ある」という意味と矛盾しない。

即ち、定性方程式の定義を、右辺が0でない場合も含めて以下のように拡張することで、通常方程式の移項、消去に該当する操作を行なって、推論を行なうことができる。言い換えると、

$$\sum_{i=1}^n q_{li} \cdot x_i = rh \quad \text{Eq.4-1-12'}$$

において、「 $rh=[0]$ の場合は、 x_i が全て0か又は $q_{ls} \cdot x_s$ と $q_{lt} \cdot x_t$ が逆符号になるような x_s と x_t の組が少なくとも1つ存在する、また、 $rh \neq [0]$ の場合は、 $q_{lj} \cdot x_j = rh$ となる x_j が少なくとも1つ存在する。」ことである。

演算の例

スチーム暖房器のモデルを、以上の考えに基づいて定性連立方程式で表すと、以下ようになる。但し、 Ps :スチーム供給圧、 Vs :スチーム弁開度、 Ws :スチーム流量、 Ts :スチーム出口温度、 Nf :ファン回転数、 Fh :伝熱管汚れ、 Wa :空気流量、 Ta :空気出口温度とする

変数 式	スチ-ム出口温度	スチ-ム流量	空気出口温度	空気流量	伝熱管汚れ	スチ-ム供給圧	スチ-ム弁開度	ファン回転数	
1	-	+			+				スチ-ム出口温度に対し、伝熱管汚れ、スチ-ム流量は正に作用する。
2		-				+	+		スチ-ム流量に対し、スチ-ム供給圧、スチ-ム弁開度は正に作用する。
3		+	-	-	-				空気出口温度に対し、スチ-ム流量は正、伝熱管汚れ、空気流量は負に作用する。
4				-				+	空気流量に対し、ファン回転数は正に作用する。

表4.1.1 定性的知識を表わす定性連立方程式

式1)~4)を、説明のためそれぞれ変数名の入った定性方程式に書き直す。

$$[-]Ts+[+]Ws+[+]Fh=0 \text{ Eq. 4-1-13}$$

$$[-]Ws+[+]Ps+[+]Vs=0 \text{ Eq. 4-1-14}$$

$$[+]Ws+[-]Ta+[-]Wa+[-]Fh=0 \text{ Eq. 4-1-15}$$

$$[-]Wa+[+]Nf=0 \text{ Eq. 4-1-16}$$

ここで、「スチ-ム流量が高」が既知であるとする、

$Ws=[+]$ をEq. 4-1-13~15へ代入して、

$$[-]Ts+[+]Fh=[-] \text{ Eq. 4-1-13'}$$

$$[+]Ps+[+]Vs=[+] \text{ Eq. 4-1-14'}$$

$$[-]Ta+[-]Wa+[-]Fh=[-] \text{ Eq. 4-1-15'}$$

が得られる。このそれぞれの意味は以下の通り：

Eq. 4-1-13' : 「スチ-ム出口温度が高」 or 「伝熱管汚れが低」

Eq. 4-1-14' : 「スチ-ム供給圧が高」 or 「スチ-ム弁開度が高」

Eq. 4-1-15' : 「空気出口温度が高」 or 「空気流量が高」 or 「伝熱管汚れが高」

上の演算を物理的知識に照らして見ると、下線部は「スチ-ム流量が高」を原因とする結果であり、枠で囲んだ部分は、「スチ-ム流量が高」という結果を生む原因であることがわかる。

つまり、定性方程式の演算とは、推論における「if~then...」を、実際の現象における因果関係の「~によって...が生じる」に沿った形に固定せず、与えられた情報と求められている情報に応じてif部とthen部を設定するための手法である。通常の数値計算とのアナロジーで言えば、因果に沿った推論は、陽関数による演算に、定性方程式による推論は陰関数による演算に相当する。

この例題で、更に、「ファン回転数が正常」及び「伝熱管汚れが正常」が与えられると、

Eq.4-1-13^o : 「スチーム出口温度が高」($[-]Ts=[-]$)

Eq.4-1-15^o : 「空気出口温度が高」or「空気流量が高」($[-]Ta+[-]Wa=[-]$)

Eq.4-1-16' : 「空気流量が正常」($[-]Wa=0$)

が得られる。

Eq.4-1-16' をEq.4-1-15^o に代入すると、

Eq.4-1-15^o : 「空気出口温度が高」($[-]Ta=[-]$)

が得られ、全ての変数の定性値が求められる。

以上、定性的知識の定性方程式による表現、及びそれを用いた推論の原理を示したが、原子力プラントの挙動を定性推論で求める際の曖昧さを抑制する1方法として、定性方程式が何故どのように有効かを論ずることが本報告書の主旨である。次節以降にこの点を考察する。

4.1.4 定性連立方程式の解法

平成3年度の共同研究において、定性連立方程式の解法として、局所的に背理法を代入して問題の規模を逐次縮小して解く手法を提案した。平成3年度の報告書では、当時取り上げていたモデルにおいて結果的に得られた推論の効率にのみ言及しており、この手法が、定性連立方程式で許される定性解全てを導く事、言い換えれば全体を背理法で解いて得られる解と同値の解が得られる事の証明がされていなかった。

そこで、本小節では、このアルゴリズムで、全体を背理法で解いて得られる解と同値の解が得られる事を以下の手順に沿って証明する。

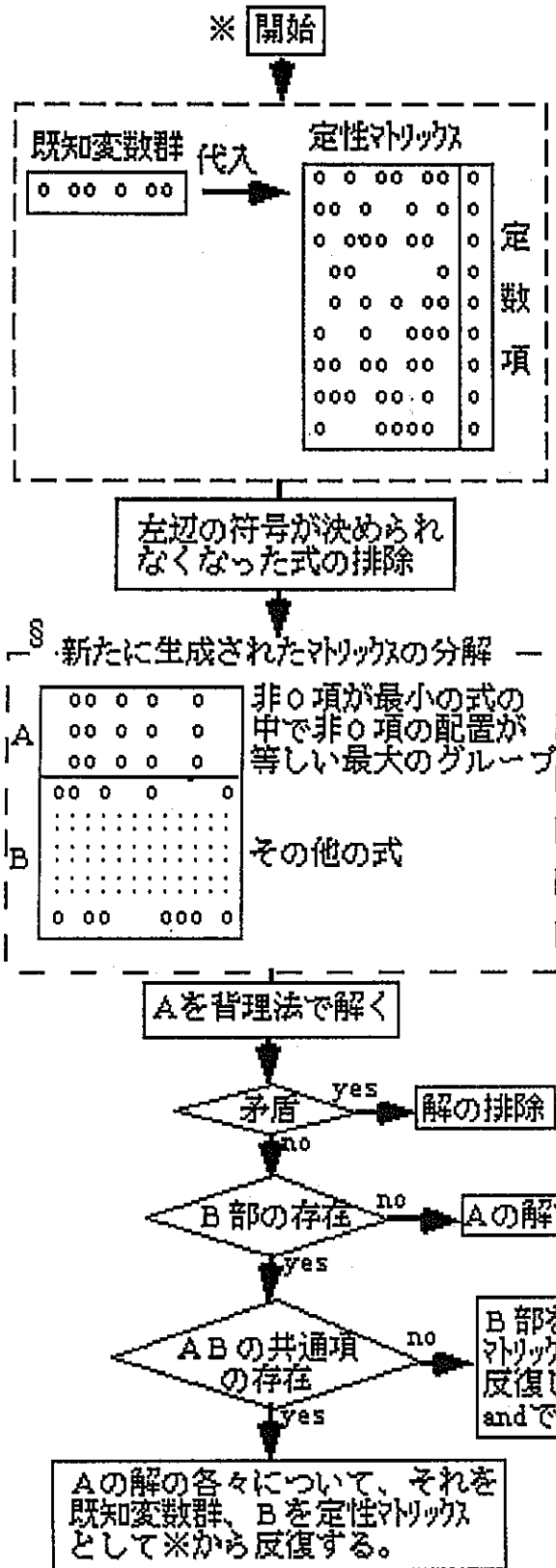
(1) 定性連立方程式を、その中の限られた変数のみを含む部分と、残りの部分に分割し、前者の背理法による解を後者に「代入」して、その結果得られた新たな定性連立方程式の背理法による解と結合したもの(解P)が、最初から一括して背理法を適用して得られた解(解Q)と等価であることを証明する。

1) Pには含まれず、解Qには含まれる解が存在しない事の証明

2) Pには含まれて、解Qには含まれない解が存在しない事の証明

(2) (1)の下線部分の処理を再帰的に反復して得られた解が最初から一括して背理法を適用して得られた解と等価であることを証明する。

(1)完全性を証明しなければならないアルゴリズム



2. ア) の下線部の列アルゴリズムを説明する。
 X_1 から X_n までの n 個の変数に関する m 本の定性連立方程式から成り立つ連立定性方程式を想定し、これを解く以下の列アルゴリズムを考える

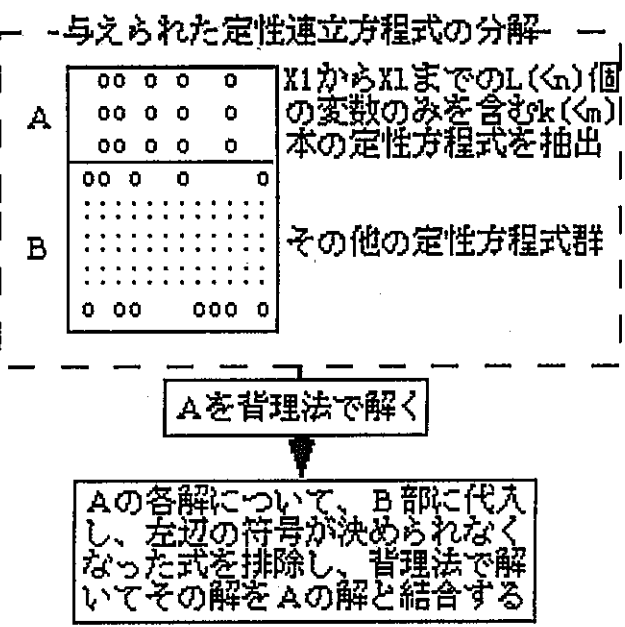


図4.1.2 定性連立方程式を解くアルゴリズム(2)

図4.1.1 定性連立方程式を解くアルゴリズム(1)

図4.1.1のアルゴリズムが、定性連立方程式全てに背理法を適用して得られる解と等価な解を与えることを証明するためには、図4.1.2のアルゴリズムで排除されるが背理法では解として導かれる定性値の組合せが存在しないことと、背理法では排除されるが図4.1.2のアルゴリズムでは解として導かれる定性値の組合せが存在しないことを証明すればよい。

1) Pには含まれず、Qには含まれる解が存在しない事の証明

図4.1.2のアルゴリズムでその定性解が排除されるのは、

①変数 $X_1 \sim X_L$ のみからなる部分定性連立方程式(図4-1-(2)のAの部分)に対する背理法の適用

②変数 $X_1 \sim X_L$ の解を残りの部分に代入して生成した定性連立方程式にに対する背理法の適用

の何れかである。

①の場合、矛盾が検出される式は $1 \leq i \leq k$ なる i 番目の式であるが、この部分に関しては、双方の手法は等価であるので、一方の手法でのみ矛盾が検出されることは有り得ない。

②の場合、矛盾が検出される式は $k+1 \leq j \leq m$ なる j 番目の式である。これらの式に対して、変数の定性値のある組合せ (a_1, a_2, \dots, a_n) が、背理法では矛盾せず、図4.1.2のアルゴリズムでは矛盾すると仮定する。この式に定性値の組合せを代入したものを、変数 $X_1 \sim X_l$ までの部分と変数 X_{l+1} から X_n までの部分に分けて考える。

背理法で排除されない全ての場合を、以下のように分類することができる。

元の定性式の定数項	$a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_L \cdot X_L$ の符号	$a_{L+1} \cdot X_{L+1} + \dots + a_n \cdot X_n$ の符号
- , 0 , +	不定(*1)	- , 0 , +
+	+	- , 0 , +
+	0 , -	+
-	-	- , 0 , +
-	0 , +	-
0	0	0(*2)
0	+	-
0	-	+

(注*1) $a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_L \cdot X_L$ の符号が不定になる場合、図4-1-(2)のアルゴリズムではこの式は変数 X_{l+1} から X_n までの部分に対して何等の拘束をも意味しないとして排除するので、この式において矛盾が検出されることは有り得ない。

(注*2) $a_1 \cdot X_1 + \dots + a_L \cdot X_L$ 部が0とは、定性方程式の場合、これらの変数に対する係数が無い場合しかない。従って、実際には、これは1)に含まれる。

上の何れの場合も、元の定数項と $a_{L+1} \cdot X_{L+1} + \dots + a_n \cdot X_n$ の符号が一致して、図4.1.2のアルゴリズムの「無効な式の排除」で矛盾チェックの対象から除外されるか、 $a_{L+1} \cdot X_{L+1} + \dots + a_n \cdot X_n$ の符号と、図4.1.2のアルゴリズムの「代入」（いずれも図4.1.1のA)と同じ)によって、この部分に対して新たに与えられる定数項が一致しているかである。従って、いずれの場合も図4.1.2のアルゴリズムで矛盾とされることはない。

2)Pには含まれて、QBには含まれない解が存在しない事の証明

Aと同様、 $1 \leq i \leq k$ なるi番目の式では、この双方に差がないので、一方の手法でのみ矛盾が検出されることは有り得ない。従って、 $k+1 \leq j \leq m$ なるj番目の式についてのみ考えれば良い。ここにおいても、Aと同様、この式を、変数 $X_1 \sim X_L$ までの部分と変数 X_{L+1} から X_n までの部分に分けて考える。

前者の符号が不定になる場合、図4.1.2のアルゴリズムではこの式は変数 X_{L+1} から X_n までの部分に対して何等の拘束をも意味しないとして排除するので、この式において矛盾が検出されることは有り得ない。

この式で矛盾が検出される場合は以下の通り

	$a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_L \cdot X_L$ の符号	$a_{L+1} \cdot X_{L+1} + \dots + a_n \cdot X_n$ の符号	定数項
①	0,+	0,+	-
②	0	+,-	0
③	+,-	0	0
④	0,-	0,-	+

図4.1.2のアルゴリズムの「代入操作」の定義により、上の1)~4)の場合に、変数 X_{L+1} から X_n までの部分に対応する新たな定数項は次のように設定される。

- ①-[-]
- ②-この式に変数 $X_1 \sim X_L$ の係数がなかった場合と同じで定数項は0のまま
- ③-[-]又は[+]
- ④-[+]

従って、何れの場合も、図4.1.2のアルゴリズムで新たに設定される定数項と、変数 X_{L+1} から X_n までの部分の符号は一致しない、つまり、この定性解は、図4.1.2のアルゴリズムによっても排除される。

以上の1)、2)によって、Pに含まれる解とQに含まれる解が同一であることが証明された。次に、図4.1.2のアルゴリズムを再帰的に反復することで、全体に一括して背理法を適用したのと同じの結果が得られることを説明する。

下図のように、定性連立方程式をA部とB部に分割し、A部の背理法による解を、B部へ代入して、その結果得られた定性連立方程式を背理法で解いた解との結合が、最初に与えられた連立定性方程式に一括して背理法を適用して得られた解と等価である事が、一般に成立するとすると、

A部の背理法による解を、B部へ代入して、その結果得られた定性連立方程式を更にA'、B'の2つに分割して同様にA'の背理法による解と、これをB'に代入して生成された連立定性方程式に背理法を適用した解との結合を、最初のAの解と結合したのも、最初に与えられた連立定性方程式に一括して背理法を適用して得られた解と等価である事が、一般に成立する。

このように、数学的帰納法により、定性連立方程式をA部とB部に分割し、A部の背理法による解を、B部へ代入して、その結果得られた定性連立方程式にまた同じ操作を再帰的に反復して得られた解は、最初に与えられた連立定性方程式に一括して背理法を適用して得られた解と等価である事が、一般に成立する。

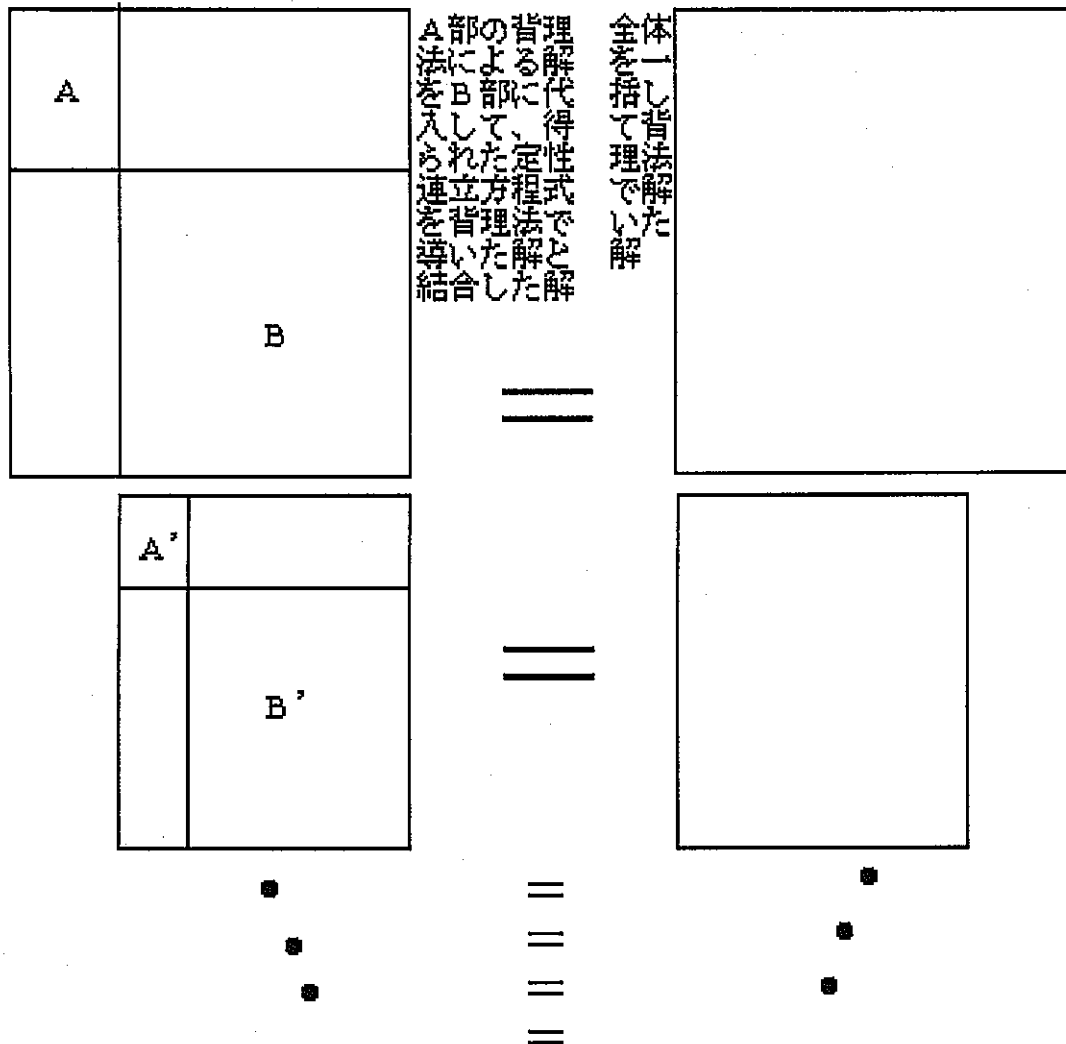


図4.1.3 両者のアルゴリズムの解の再帰的等価性

2ループ原子炉冷却系モデルにおいて、各外因変数の変化に対して定性推論によりに導かれた内因変数の変化。上の表を連立定性方程式として作成したソルヴァーに与えて、独立パラメータ中各々1個のみが正、他は全て0という定性値の組合せに対して矛盾を生じない従属パラメータの定性値の組合せを求めた。その結果を下表に示す。

伝播先 (内因) パラメータ		原子 炉 出 口 温 度	Aループ					Bループ						
			熱 輸 送 量	原 子 炉 入 口 温 度	1 次 循 環 流 量	2 次 ホ ッ ト レ グ 温 度	2 次 コ ー ル ド レ グ 温 度	空 気 冷 却 器 出 口 温 度	熱 輸 送 量	原 子 炉 入 口 温 度	1 次 循 環 流 量	2 次 ホ ッ ト レ グ 温 度	2 次 コ ー ル ド レ グ 温 度	空 気 冷 却 器 出 口 温 度
伝播元 (外因) パラメータ														
原子炉発熱量		+	+	+	0	+	+	+	+	+	0	+	+	+
大気雰囲気温度		+	?	+	0	+	+	+	?	+	0	+	+	+
A ル ー プ	1次循環ポンプヘッド	?	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
	中間熱交換器伝熱抵抗	+	-	+	0	-	-	-	+	+	0	+	+	+
	2次循環流量	?	?	?	0	-	+	?	?	?	0	?	?	?
	空気冷却器伝熱抵抗	+	-	+	0	+	+	-	+	+	0	+	+	+
	空気冷却器空気流量	-	?	-	0	-	-	-	?	-	0	-	-	-
B ル ー プ	1次循環ポンプヘッド	?	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
	中間熱交換器伝熱抵抗	+	+	+	0	+	+	+	-	+	0	-	-	-
	2次循環流量	?	?	?	0	?	?	?	?	?	0	-	+	?
	空気冷却器伝熱抵抗	+	+	+	0	+	+	+	-	+	0	+	+	-
	空気冷却器空気流量	-	?	-	0	-	-	-	?	-	0	-	-	-

表4.1.2 定性連立方程式で得たパラメータ間変化伝播の符号
(但し、外因パラメータの内、左の各欄に示されたもの1個だけが正に変位した時の各従属パラメータの変位の方向を示したものである)

4.2 付加すべき定性式を示唆する機構

4.2.1 付加すべき定性式を示唆する機能の必要性

平成2年度より扱ってきた、原子炉冷却系1ループモデルを対象として問題を考える。

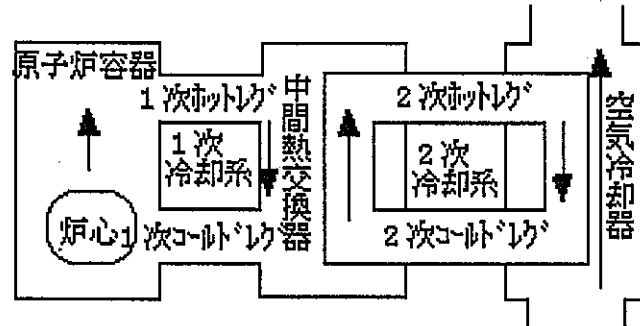


図4.2.1 原子炉冷却系モデル

このモデルで、 Q :原子炉発熱量 W_1, W_2 :1次、2次循環流量 W_a :空気流量
 T_{1h}, T_{1c} :1次ホット、コールド側温度 T_{2h}, T_{2c} :2次ホット、コールド側温度 T_{aout} :空気出口温度
 T_{atm} :雰囲気温度 R_i, R_a :IHX, DHX伝熱抵抗とすると、局所的变化伝播を表わす定性的知識は以下のように表わされる。

式	従属パラメータ部					独立パラメータ部						対象機器	意味	
	T_{1h}	T_{1c}	T_{2h}	T_{2c}	T_{aout}	Q	W_1	R_i	W_2	R_a	T_{atm}			W_a
1	-	+				+	-						原子炉	出口温度への変化伝播
2	+	-		+			+	+	-				IHX	1次出口温度への変化伝播
3	+		-	+			+	-	-				IHX	2次出口温度への変化伝播
4			+	-					+	+	+	-	DHX	Na側出口温度への変化伝播
5			+		-				+	-	+	-	DHX	空気出口温度への変化伝播

表4.2.1 変化伝播知識

式	従属パラメータ部					独立パラメータ部						対象機器	意味	
	T_{1h}	T_{1c}	T_{2h}	T_{2c}	T_{aout}	Q	W_1	R_i	W_2	R_a	T_{atm}			W_a
6			-	+		+			-				2次ループ	熱輸送量 = 流量 * ホット-コールド側温度差
7	+	+	-	-			+						IHX	熱輸送量 * 1次-2次温度差 / 伝熱抵抗
8					-	+					+	-	空気流路	熱輸送量 = 風量 * 出口-入口温度差
9			+	+	-				+				DHX	熱輸送量 * 2次-空気温度差 / 伝熱抵抗

表4.2.2 変化伝播以外の定性的知識

表4.2.1の変化伝播に関する定性式は、従属変数（未知数）と同数あり、これは図4.2.1のモデルにおける従属変数が同定された時点で用意できることがほぼ保証されている。なぜなら、各従属変数について、それがやはり従属変数になっている部品において、その部品内の他の変数が正あるいは負に作用するかを列挙するか、またはモデルの平衡状態を記述する、定量情報を含んだ通常の方程式群を定性化することで得られるからである。

現在までに、定性連立方程式（1～5）からだけでは解が一意的にさだまらないが、これに定性式6～9を追加することで大幅に曖昧さを抑制できることがわかっている。しかし、式6～9は、図4.2.1のモデルに対して式1～5のみからまず推論を行い、その解の中で、予めわかっている正しい挙動と一致しないものを否定するための説明となる知識を抽出することで得られたものである。

今後、より複雑な系、言い換えれば推論結果の妥当性が一瞥しただけでは評価できない、定性推論の有効性が本当に問われるような規模の対象への定性推論の適用を行なうことを考えると、推論を行なってみてはその結果を見て追加すべき定性式を模索するという試行錯誤を断ち切る必要がある。

そのためには、定性推論機構自体に、既に与えられた定性連立方程式を評価し、推論の有効性を高めるためにはどのような定性式を追加しなければならないかをユーザーに提示する機能が備っている必要がある。

4.2.2 定性式を追加して解の曖昧さを抑制することの意味

数値情報を有する通常の線形連立方程式の場合は、未知数と同数の、互いに異なる拘束条件に該当する方程式を連立させれば、全ての未知数の値は一意的に定まるが、数値情報が欠落した定性連立方程式では、解を一意的に求めるためには、一般に、未知数のかずを上回る式を必要とする。これを、上の例について言い換えれば、1次冷却材流量が減少すれば1次コールドレグ温度が下降する、ということは、変化伝播に関する定性的知識だけでは説明できず、エネルギー保存等の他の種類の定性的知識を併用して初めて説明できる。上に示した表4.2.1、表4.2.2の中の全ての定性式は、それぞれ通常の数値的な方程式に対応する。そして、表4.2.2の定性式に該当する各数値方程式は、全て、表4.2.1の定性式に該当する数値方程式から導かれるものである。つまり、表4.2.2に示された知識は、本来表4.2.1に示された知識と同一なものを、別の観点で表現し直したものの、とすることができる。

このように、対応する定量的な拘束条件が互いに独立でない知識も、対象の定性的挙動を一意的に導くためには独立に定義して使用する意義がある。

定性式6～9の式1～5への追加の有効性は、変化伝播とそれ以外の定性拘束条件という知識の種類からだけではなく、定性連立方程式の係数行列の性質からも説明できるはずである。

これがどう説明されるかが分かれば、例えば式1～5から、付加すべき定性式が満たすべき条件を導出し、ユーザーがその条件を見て式6～9をより容易に「思い出す」こ

とが可能になる。

また、付加できる定性式がユーザーの知識、あるいは何等かの情報源に存在しないのであれば、そのモデルに対してはそれ以上曖昧さを抑制できないと判断でき、不要な試行錯誤を回避することができる。

曖昧さの無い推論が行なえるということは、外因変数の定性値の組合せに対して、従属変数の定性値の組合せが一意的に定まるということである。外因変数の定性値の全ての組合せに対して従属変数の定性値が一意的に定まるための条件を定式化することが望ましいが、その定式化には、長方定性マトリックスの数理に関する研究の必要があり、現時点では困難であるし、この条件を定性連立方程式が完全には満たさずとも、ある特定の外因変数の変位に関して、限られた従属変数のみに曖昧さが残る程度の推論は可能であると考えられる。そこで、定性連立方程式が有効であるための、理解と計算機での処理が容易な必要条件を仮に設定して、その必要条件が付加すべき定性式の示唆にどれだけ使用できるかを簡単な系を対象に調べる。その後、一般性を考察する。

図4.2.1の、原子炉とIHXにおける、1次ホットレグ、コールドレグ温度と、1次循環流量との変化伝播を図4.2.2に示す。

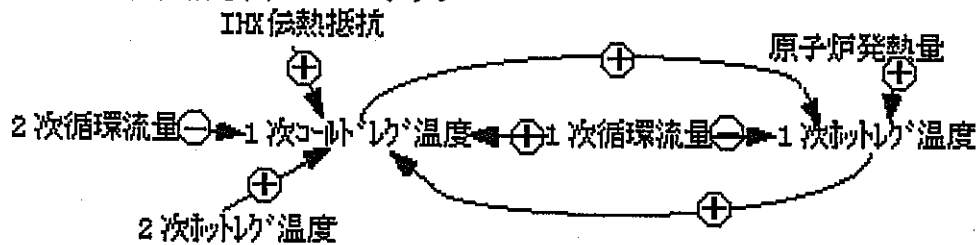


図4.2.2 1次系の温度と流量に関する因果関係

この図から、1次ホットレグ、1次コールドレグ温度の定性値を他の変数の定性値から一意的に定められない理由は、次の2点である。

(1)一次循環流量から、1次ホット、コールドレグ温度のそれぞれへ、符号が逆な2つの変化伝播経路が存在する。

1)1次ホットレグ温度への変化伝播 2)1次コールドレグへの変化伝播

$$T_{1hot} = [+]T_{1cold} + [-]W_1 + [+]Q$$

$$T_{1cold} = [+]T_{1hot} + [+]W_1 + [+]T_{2cold} + [-]W_2 + [+]R_{ihx}$$

両式を移項して、従属変数部、外因変数部に分けて並べると、

変数名	T1hot	T1cold	T2cold	Q	W1	W2	Ri
1)	-	+		+	-		
2)	+	-	+		+	-	+

1)と2)を、W1の係数の符号が一致するようにどちらかを符号反転すると、T1hot, T1coldに関しても係数の符号が一致して、W1以外の外因変数が0の場合、式1が

成立すれば、定性的足し算の性質により、 $T2_{cold}$ は如何なる定性値も取り得る。言い換えれば、 $W1$ の変化について推論する場合に、式2が式1と独立に存在する意味が無くなる。

より一般的に、A)従属変数 $D1$ が外因変数 $E1$ から+の作用を受け、B)従属変数 $D2$ は外因変数 $E1$ から-の作用を受け、従属変数 $D1$ から+の作用を受けるとし、 $D1$ が作用を受ける他の従属変数 $D3 \sim Dm$ の全てから $D2$ はその逆の作用を受け、 $D1$ には作用しないが $D2$ に作用する他の従属変数 $Dm+1 \sim Dn$ があるとすると、この $D1, D2$ への変化伝播を表す定性式は、以下ようになる。

	D1	D2	D3	Dm	Dm+1	Dn	E1	E2	...	EX
A)	-	+	Q_m	Q_m			+	?		?
B)	+	-	$-Q_m$	$-Q_m$	Q_{m+1}	Q_n	-	?		?

式A)を反転すると、従属変数 $D1 \sim Dm$ の係数の符号は式B)に一致する。外因変数の内、 $E1$ のみが変位した場合、やはり式A)が満たされると式B)も常に満たされる。定性的な拘束条件全体について、外因変数の定性値の組合せに対して従属変数の定性値が一意的に定められるか否かを評価する場合、この式B)に相当する式は除外して考える必要がある。

(2)1次コールドレグ、1次ホットレグ温度共、相手を介して自分に正に帰還する変化伝播経路がある。

このような部分は、「他の変数の現在の定性値に関係のない定性値を取り得る」部分である。

実際の系が、フリップ・フロップ回路のように、外因変数の現在の値のみでなく、過去の外因変数の値も現在の平衡状態に影響するような系ではなく、現在の外因変数の値によって一意的に定まるある状態に静定することが既知であるばあい、それを説明できる他の拘束条件を推論に用いることが望ましい。

外因変数の定性値の組合せ全てに対して、従属変数の定性値が一意的に定められるための条件が得られれば、与えられた定性連立方程式がこれを満たすか否かをチェックし、満たされていないければ、どのような定性式を追加すれば良いのかを知ることができる。しかし、外因変数の定性値の組合せ全てに対して従属変数の定性値が一意的に定まるための必要充分条件を求めることには困難が予想される。またその条件が求められたとしても、それを与えられた定性連立方程式が満たすか否かを判定するために、全ての場合について実際の推論を行なうのと同様以上の計算量が必要であれば、その条件は、少なくともここでは意味が無い。

従って、「外因変数の定性値の組合せ全て」の中の代表の組合せを1個設定し、この組合せについて、従属変数の定性値が一意的に定まるように定性式を追加していく事を考える。この代表の組合せは、「その組合せで従属変数の定性値が一意的に定まることが、他の全ての組合せに対して従属変数の定性値が一意的に定まるための必要条件となる」ように選ぶ。また、その代表の組合せについて定性連立方程式が従属変

数の定性値を一意的に定めるか否かのチェックの時、(1)に該当する定性式を除外してチェックを行うこととする。

以下では、外因変数の定性値が全て0、という組合せに対して従属(内因)変数が全て0という一意的な解を持つことが、他の全ての組合せに対して従属変数の定性値が一意的に定まるための必要条件であることを照明する。以下、下線部の条件を0-0条件と呼ぶ。

記述された定性的拘束条件を、次のように定性連立方程式で表す

$$\begin{array}{cccc}
 Q_{11} & Q_{12} & \cdots & Q_{1m} \\
 Q_{21} & Q_{22} & \cdots & Q_{2m} \\
 \vdots & \vdots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & \vdots \\
 Q_{n1} & Q_{n2} & \cdots & Q_{nm}
 \end{array}
 *
 \begin{array}{c}
 D_1 \\
 D_2 \\
 \vdots \\
 D_m
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 C_1 \\
 C_2 \\
 \vdots \\
 C_n
 \end{array}$$

上の命題が正しいことを示すためには、「 C_1, C_2, \dots, C_n 全てが0の時に、 (D_1, D_2, \dots, D_m) が、 $(0, 0, \dots, 0)$ 以外の解を有するならば、 C_1, C_2, \dots, C_n の如何なる定性値の組合せに対しても、 D_1, D_2, \dots, D_m が複数の解を持つ」ことを証明すれば良い。

[証明]

C_1, C_2, \dots, C_n 全てが0の時の、 (D_1, D_2, \dots, D_m) の $(0, 0, \dots, 0)$ 以外の解を $(S_1, S_2, \dots, S_k, 0, \dots, 0)$ (但し $S_1, \dots, S_k \neq 0, 0 \leq k < m$)としても一般性を失わない。ここで、 (D_1, D_2, \dots, D_m) は、これ以外にこの符号を反転した $(-S_1, \dots, -S_k, 0, \dots, 0)$ という解も有することがあきらかである。

ケースA)

まず、定性式全てが、 D_1 から D_k までの何れかの項を含む場合を考える。この場合、定性式全てが、 D_1 から D_k までの少なくとも2変数に関する項を持たなければならないことがわかる。なぜなら、ある定性式が D_1 から D_k まで

のただ一つの変数に関する項しか持たないとすれば、その式に解 $(S_1, S_2, \dots, S_k, 0, \dots, 0)$ を代入して右辺が0にはなり得ないからである。

ここで、i番目の式の右辺Ciに、0以外の定性値を代入すると、この定性式は、「 $(Q_{ij} \cdot D_j = C_i)$ となるような D_j が少なくとも1つある」を意味する。一方、Ciに0を代入した時は、

「 $Q_{ij} \neq 0$ なる全てのjについて $D_j = 0$ か、又は $Q_{is} \cdot D_s$ と $Q_{it} \cdot D_t$ が逆符号になるsとtの組が少なくとも1つ存在する」を意味する。従って $C_i = 0$ に対する $(0, 0 \dots 0)$ 以外の解 $(S_1, S_2 \dots S_k, 0, \dots 0)$ も、その符号を反転した $(-S_1, \dots -S_k, 0, \dots 0)$ も、Ciに0以外の定性値を設定した場合の式をも満足する。

ケースB)

次に、定性式のあるもの(式p+1~式n)が、変数 $D_{k+1} \sim D_m$ のみに関する場合を考える。

$$\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & \dots & \dots & \dots & Q_{1m} \\ Q_{21} & Q_{22} & \dots & \dots & \dots & \dots & Q_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_{p1} & Q_{p2} & \dots & \dots & \dots & \dots & Q_{p+1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_{n_{k+1}} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & Q_{nm} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix}$$

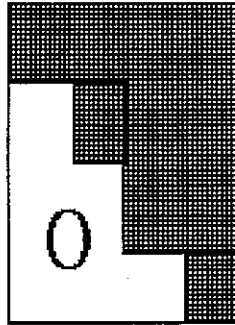
式1~pまでについては、ケースAにより証明済み。さらに、変数 $D_1 \sim D_k$ に $(S_1, S_2 \dots S_k)$ 又は $(-S_1, \dots -S_k)$ の何れを代入しても、式1~1は変数 $D_{k+1} \sim D_m$ を一切拘束しないことがわかる。従って、 $C_{p+1} \sim C_n$ については式p+1~式nのみを考えれば良い。

これらの式が、実際の系について正しい拘束条件を表し、 $C_{p+1} \sim C_n$ の組合せが、実際の系において意味のある外因変数の定性値の組合せに対応しているならば、 $D_{k+1} \sim D_m$ は解を持つ。この解と、変数 $D_1 \sim D_k$ についての解 $(S_1, S_2 \dots S_k)$ 又は $(-S_1, \dots -S_k)$ の組合せがこの定性連立方程式の解となるので、やはり複数の解を有する。

[証明終り]

ここで、与えられた定性連立方程式の従属変数部分の係数マトリックスが0-0条件を満たすための条件、及び満たさない場合に付加すべき定性式を導く手法を考える

まず、係数マトリックスが下図のように表される場合、各対角部分マトリックスが0-0条件を満たすことと、このマトリックスが全体として0-0条件を満たすことは同値である。



次は、各対角部分行列が0-0条件を満たすかどうかのチェックと、満たさない場合に付加すべき定性式の必要条件を導く方法を考える。

例として、以下の3x3の定性行列を考える。

方程式\変数名	a	b	c
方程式1	+	-	
方程式2		+	-
方程式3	-		+

これを、右辺が全て0の定性連立方程式と見なして、aに[+]を代入して解くと、(b,c)=([+],[+])が得られる。解が得られたということは、この行列が(a,b,c)=(0,0,0)以外の解([+],[+],[+])及び符号を反転した([-],[-,-])を持ち、0-0条件を満たしていないことを示す。0-0条件を満たすために付加すべき定性式は、

命題： $\{(a=[+]) \text{ and } (b=[+]) \text{ and } (c=[+])\} \text{ or } \{(a=[-]) \text{ and } (b=[-]) \text{ and } (c=[-])\}$ の否定、つまり

$$(a=0) \text{ or } (b=0) \text{ or } (c=0) \text{ or } \{(a=[+]) \text{ and } (b=[-])\} \vee \{(a=[-]) \text{ and } (b=[+])\} \\ \text{ or } \{(b=[+]) \text{ and } (c=[-])\} \vee \{(b=[-]) \text{ and } (c=[+])\} \\ \text{ or } \{(c=[+]) \text{ and } (a=[-])\} \vee \{(c=[-]) \text{ and } (a=[+])\}$$

これを定性方程式で記述すると、

$$[+]a=0 \text{ or } [+]b=0 \text{ or } [+]c=0 \text{ or } [+]a[+]b=0 \text{ or } [+]b[+]c=0 \text{ or } \\ [+]a[+]c=0 \text{ or } [+]a[+]b[+]c=0$$

従って、上の7個の式の何れかを付加すれば、この定性行列は0-0条件を満たす。

2番目の例として、4変数に関する次の定性行列を考える。（“全て0”以外の解が複数の場合）

方程式\変数名	a	b	c	d
方程式1	+	+	+	+
方程式2	+	+	-	-
方程式3	+	-	+	-
方程式4	+	-	-	+

これに(a=[+])を代入すると、得られる解は

$$(b,c,d)=(+,+,-), (+,-,+), (-,+,+), (-,-,-)$$

で、この定性行列の(a,b,c,d)=(0,0,0,0)以外の解は

(+,+,+,-),(+,+,-,+),(+,-,+,+),(+,-,-,-)とこれらの符号を反転したものである。これの否定は、

$$\begin{aligned} & (a=0) \text{ or } (b=0) \text{ or } (c=0) \text{ or } (d=0) \text{ or} \\ & \langle \{(a=+)\text{and}(b=+)\}\vee\{(a=-)\text{and}(b=-)\}\rangle \text{ and} \\ & \langle \{(c=+)\text{and}(d=+)\}\vee\{(c=-)\text{and}(d=-)\}\rangle \text{ or} \\ & \langle \{(a=+)\text{and}(c=+)\}\vee\{(a=-)\text{and}(c=-)\}\rangle \text{ and} \\ & \langle \{(b=+)\text{and}(d=+)\}\vee\{(b=-)\text{and}(d=-)\}\rangle \text{ or} \\ & \langle \{(a=+)\text{and}(d=+)\}\vee\{(a=-)\text{and}(d=-)\}\rangle \text{ and} \\ & \langle \{(b=+)\text{and}(c=+)\}\vee\{(b=-)\text{and}(c=-)\}\rangle \end{aligned}$$

これを定性式で表すと、

$$\begin{aligned} [+]a & = 0 \text{ or} \\ [+]b & = 0 \text{ or} \\ [+]c & = 0 \text{ or} \\ [+]d & = 0 \text{ or} \\ [+]a+[-]b=0 \text{ and } [+]c+[-]d=0 \text{ or} \\ [+]a+[-]c=0 \text{ and } [+]b+[-]d=0 \text{ or} \\ [+]a+[-]d=0 \text{ and } [+]b+[-]c=0 \end{aligned}$$

となる。

以上のように、ある変数に0以外の定性値、例えば+を代入して定性連立方程式を解けば、解の有無で0-0条件の充足が調べられる。また、充足しない場合は得られた解に関するブール代数的な処理で、付加すべき定性式が満たすべき条件を導くことができる。

変数間の変化伝播や、通常の定量的な方程式から導いた定性的拘束条件について、上の(1)、(2)の問題点をチェックして、このいずれかに該当する場合は、その問題を回避するために追加すべき定性拘束条件についての手がかりを人間に示す機能を計算機上に実現するために、次のアルゴリズムを図1のモデルに対して机上で試験的に適用してみる。

アルゴリズムの記述を簡素にするために、次の手続きを定義する。

手続き名：独立拘束定性式の選択

入力：定性方程式A, 定性方程式B, 外因変数群 (又は従属変数群：区別できれば良い)

出力：定性方程式群

処理：

Aに含まれる従属変数がBに含まれる従属変数より多い？yes→AとBを入れ替える

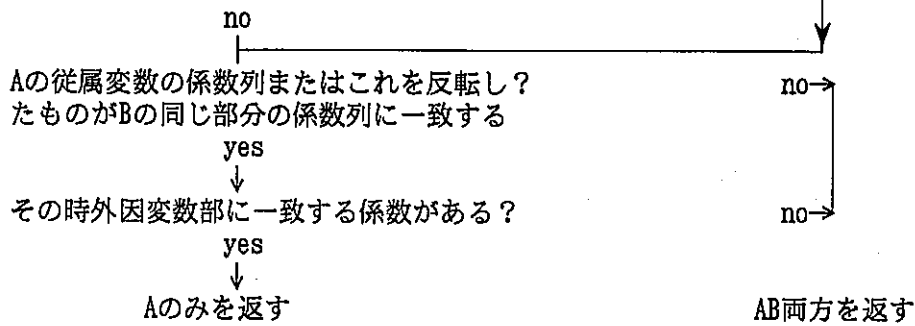


図4.2.3 独立拘束定性式の選択

手続き名：定性式の追加請求

入力：対象変数群、推奨式と禁止式群 (少なくともどちらか一方)

出力：新定性方程式、拡張成功or失敗のフラグ

処理：

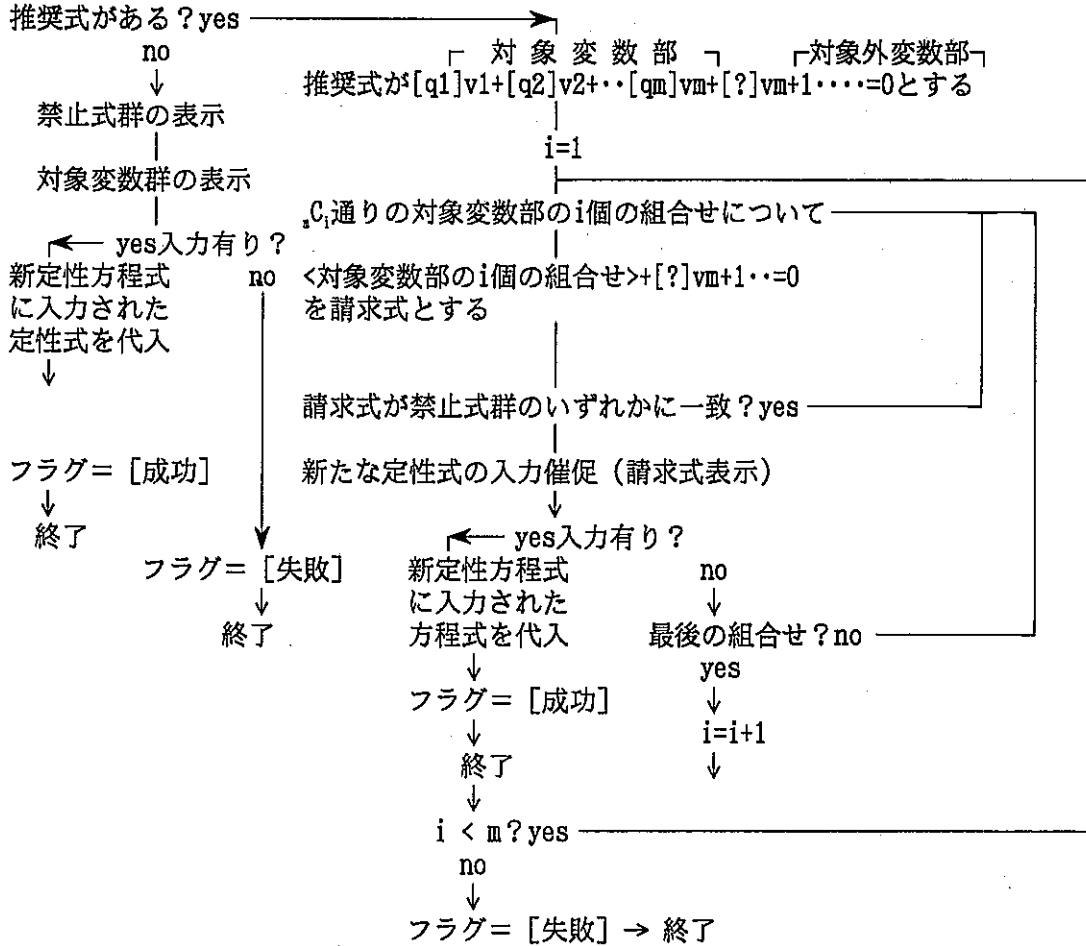


図4.2.4 定性式の追加請求

手続き名：0-0条件の充足

入力：定性方程式群、チェック対象変数群

出力：拡張方程式群、拡張成功or失敗のフラグ

処理：

定性方程式群を禁止方程式群へ代入

チェック対象変数群を対象変数群へ代入

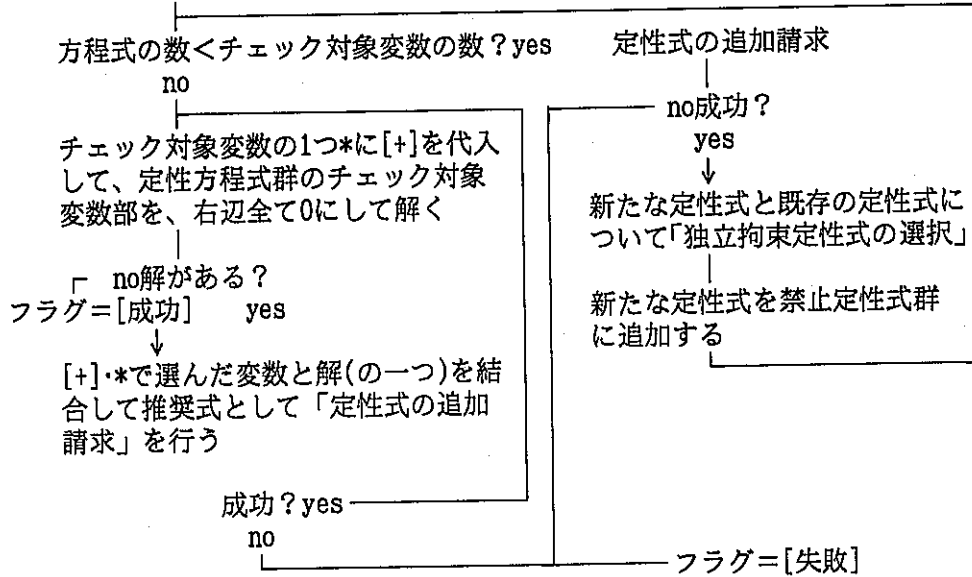


図4.2.5 0-0条件の充足

全体のアルゴリズム

定性連立方程式 (n本)

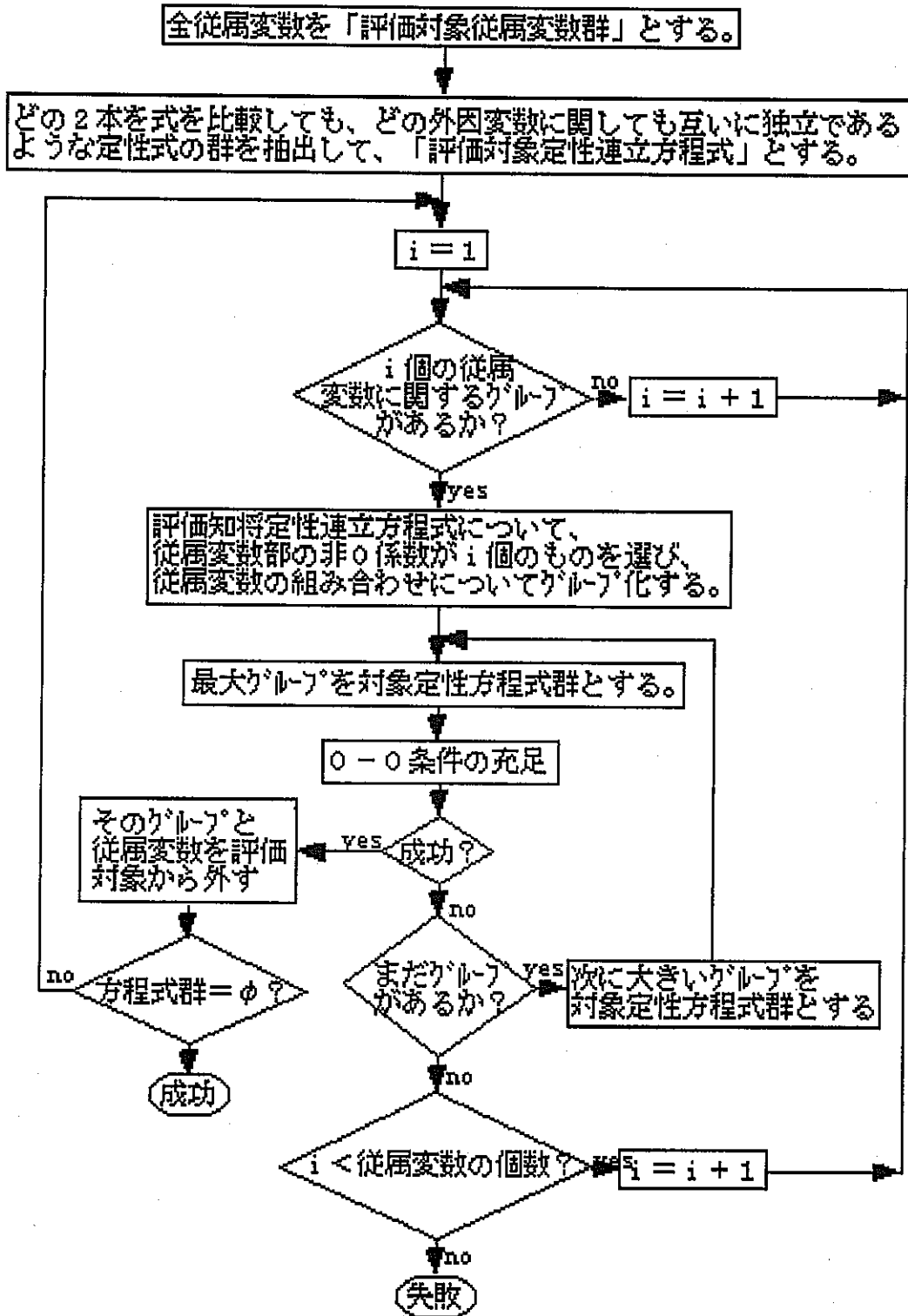


図4.2.6 付加的定性知識を示唆する全体アルゴリズム

考案したアルゴリズムの机上シミュレーション

まず、変数間の局所的な変化伝播の知識が以下のように準備されているとする。

式	従属パラメータ部					独立パラメータ部							対象機器
	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout	Q	W1	Ri	W2	Ra	Tatm	Wa	
1	-	+		+		+	-						原子炉
2	+	-	-	+			+	+	-				IHX
3	+		+	-	-		+	-	-				IHX
4			+						+	+	+	-	DHX
5									+	-	+	-	DHX

表4.2.3 処理開始前の定性連立方程式

①どの2本の式を比較しても、どの外因変数に関しても互いに独立であるような定性式の群を抽出して、「評価対象定性連立方程式」とする。

式1と式2を比較=>式2はW1に関して式1に対して従属=>式2を排除

式1と式3、式4、式5を比較=>互いに独立

式3と式4を比較=>式3はW2に関して式4に対して従属=>式3を排除

式4と式5を比較=>互いに独立

・評価対象定性方程式群=式1、4、5

・評価対象従属変数群=T1h, T1c, T2h, T2c, Taout

式	従属パラメータ部					独立パラメータ部							対象機器
	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout	Q	W1	Ri	W2	Ra	Tatm	Wa	
1	-	+				+	-						原子炉
4			+	-					+	+	+	-	DHX
5			+		-				+	-	+	-	DHX

表4.2.4 選択された独立拘束定性式

②i=1ではグループ無し。

i=2では、

グループA:変数T1h, T1c、式1

グループB:変数T2h, T2c、式4

グループC:変数T2h, Taout、式5

③グループAに対して、 $[+or0]T1h+[+or0]T1c+[?]Q+\dots=0$ に該当する式なし。

グループBに対して、 $[+or0]T2h+[+or0]T2c+[?]Q+\dots=0$ に該当する式なし。

グループCに対して、 $[+or0]T2h+[+or0]Taout+[?]Q+\dots=0$ に該当する式として、

「空気出入口温度の差 x 空気流量 = 炉心発生熱量」を表す

$[0]T2h+[+]Taout+[-]Q+[-]Tatm+[+]Wa=0$ (式8) がある。

式5は式8に対してWaに関して従属=>式5と式8を入れ替え

式	従属パラメータ部					独立パラメータ部							対象機器	
	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout	Q	W1	Ri	W2	Ra	Tatm	Wa		
1	-	+				+	-						原子炉	
4			+	-					+	+	+	-	DHX	
8				-	+	+					+	-	空気流路	熱輸送量= 風量*出口 -入口温度差

表4.2.5 最初の定性式の追加後

- ・評価対象定性方程式群=式1、4
- ・評価対象従属変数群=T1h, T1c, T2h, T2c
- ・非対象従属変数=Taout

再びi=1として

②i=1ではグループ無し。

i=2では、

グループA:変数T1h, T1c、式1

グループB:変数T2h, T2c、式4

③グループAに対して、

$[+or0]T1h+[+or0]T1c+[?]Taout+[?]Q+\dots=0$ に該当する式なし。

グループBに対して、

$[+or0]T2h+[+or0]T2c+[?]Taout+[?]Q+\dots=0$ に該当する式として、

「2次系平均温度-空気側平均温度・炉心発生熱量/DHX伝熱抵抗」を表す

$[+]T2h+[+]T2c+[-]Taout+[-]Tatm+[-]Q+[-]Ra=0$ (式9) がある。

式	従属パラメータ部					独立パラメータ部							対象機器	
	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout	Q	W1	Ri	W2	Ra	Tatm	Wa		
1	-	+				+	-						原子炉	
4			+	-					+	+	+	-	DHX	
9			+	+	-	-				+	-		DHX	熱輸送量 \propto 2次-空気温度 /伝熱抵抗
8				-	+	+					+	-	空気流路	熱輸送量= 風量*出口 -入口温度差

表4.2.6 2番目の定性式の追加後

- ・評価対象定性方程式群=式1
- ・評価対象従属変数群=T1h, T1c
- ・非対象従属変数=Taout, T2h, T2c

再びi=1として

②i=1ではグループ無し。

i=2では、グループA:変数T1h, T1c、式1

③グループAに対して、 $[+or0]T1h+[+or0]T1c+[?]T2h+[?]T2c+[?]Taout+[?]Q+\dots=0$ に該当する式として、「1次系平均温度-2次系平均温度・炉心発生熱量/IHX伝熱抵抗」を表す

$$[+]T1h+[+]T1c+[-]T2h+[-]T2c+[-]Q+[-]Ri=0 \text{ (式7)}$$

がある。

式	従属パラメータ部					独立パラメータ部							対象機器		
	T1h	T1c	T2h	T2c	Taout	Q	W1	Ri	W2	Ra	Tatm	Wa			
1	-	+				+	-							原子炉	
7			+	-		-		+						IHX	熱輸送量∞ 1次-空気温度差 /伝熱抵抗
4			+	-					+	+	+	-		DHX	
9			+	+	-	-				+	-			DHX	熱輸送量∞ 2次-空気温度 /伝熱抵抗
8				-	+	+					+	-		空気 流路	熱輸送量= 風量*出口 -入口温度差

表4.2.7 最終的な定性連立方程式

以上、単純な例を対象に、追加すべき式を示唆する手法の概要を述べた。

実際の使用に当っては、式が満たす条件を、人間に理解しやすい形に変換する機能が必要になると思われる。

例えば $[+]a+[-]b+[?]c+[?]d=0$ が新たな式の条件ならば、ユーザーへの示唆に際して、

「aがbへ、あるいはbがaに正の方向に作用するという知識、又はa、bがcかdに共に同じ方向へ寄与するという知識がありますか？」というような質問を行なうことが適当だと思われる。

平成3年度の報告書で採り上げた、2ループ主冷却系のモデルでは、A、Bそれぞれのループを通して単位時間に伝えられる熱量、というパラメータを設定し、このパラメータに関する定性的知識を付加することで、曖昧さが抑制されている。上述の手法では、既に設定されたパラメータの間に成立する知識については、どのようなものを付加すべきかの示唆は得られるが、2ループモデルの場合のように、数値的な処理においては表現の重複に当るようなパラメータの追加が定性推論においては必要で有効であることを示唆する事はできない。参考のため、2ループモデルにおける、変化伝播知識と、付加的な定性的知識を下に示す。

2ループモデルでの例：

局所伝播知識

	原子炉出口温度	Aループ					Bループ					原子炉発熱量	大気雰囲気温度	Aループ					Bループ											
		熱輸送量	原子炉出口温度	1次循環流量	2次ホットレグ温度	2次コールドレグ温度	空気冷却器出口温度	熱輸送量	原子炉出口温度	1次循環流量	2次ホットレグ温度			2次コールドレグ温度	空気冷却器出口温度	1次循環ポンプ水頭	中間熱交換器伝熱抵抗	2次循環流量	空気冷却器伝熱抵抗	空気冷却器空気流量	1次循環ポンプ水頭	中間熱交換器伝熱抵抗	2次循環流量	空気冷却器伝熱抵抗	空気冷却器空気流量					
イウエオカキクケコサシ	- +++	+	- + +	- +	+	- +	+	- +	- +	+	- +	- +	- +	+	- +	- +	+	- +	- +	+	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +

付加知識

	原子炉出口温度	Aループ					Bループ					原子炉発熱量	大気雰囲気温度	Aループ					Bループ											
		熱輸送量	原子炉出口温度	1次循環流量	2次ホットレグ温度	2次コールドレグ温度	空気冷却器出口温度	熱輸送量	原子炉出口温度	1次循環流量	2次ホットレグ温度			2次コールドレグ温度	空気冷却器出口温度	1次循環ポンプ水頭	中間熱交換器伝熱抵抗	2次循環流量	空気冷却器伝熱抵抗	空気冷却器空気流量	1次循環ポンプ水頭	中間熱交換器伝熱抵抗	2次循環流量	空気冷却器伝熱抵抗	空気冷却器空気流量					
アスセソタチツテトナニ	++ +++	- +	- +	+	- +	- +	+	- +	- +	- +	+	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +

表4.2.8 2ループモデルでの局所伝播知識と付加知識

4.3 説明の生成

定性推論が従来の数値解析的な手法と大きく異なる点の1つに、その結論が何故導かれたかを自ら説明する機能を付加できる事が挙げられる。

2章で採り上げたスチーム暖房器の例では、

$$\begin{array}{rcl}
 \text{スチーム暖房器} & & \\
 \hline
 \text{スチーム供給圧}[+] \text{—} & \text{スチーム流量}[+] & \text{スチーム出口温度} \\
 & [+] & \\
 & & [+] \\
 \hline
 \text{スチーム弁開度}[+] \text{—} & & \text{伝熱管汚れ} \\
 & & [-] \\
 & & \\
 \hline
 \text{ファン回転数}[+] & \text{空気流量}[-] \text{—} & \text{空気出口温度}
 \end{array}$$

元々入力されている知識は、以下の通りである：

- ①スチーム流量に対して、スチーム供給圧は正に作用する。
- ②スチーム流量に対して、スチーム弁開度は正に作用する。
- ③スチーム出口温度に対して、スチーム流量は正に作用する
- ④スチーム出口温度に対して、伝熱管汚れは正に作用する
- ⑤空気流量に対して、ファン回転数は正に作用する
- ⑥空気出口温度に対して、空気流量は負に作用する。
- ⑦空気出口温度に対して、スチーム流量は正に作用する。
- ⑧空気出口温度に対して、伝熱管汚れは負に作用する。

スチーム供給圧、伝熱管汚れ、ファン回転数、伝熱管汚れが正常で、スチーム弁開度が少ない場合の暖房器の状態を推論すると、

スチーム弁開度が低、スチーム供給圧が正常なので、スチーム流量が低。

ファン回転数が正常なので、空気流量が正常。

スチーム流量が低、伝熱管汚れが正常なので、スチーム出口温度が低。

空気流量が正常、スチーム流量が低、伝熱管汚れが正常なので、空気出口温度が低。

以上のような文章は、入力知識①～⑧による推論の経過から容易に生成でき、人間にとっても理解が容易なものとなっている。

しかし、定性連立方程式による推論手法は、定性的知識の中の因果関係を(少なくとも推論結果の導出においては)無視し、また因果的ではない知識を因果的な知識と同等に定性連立方程式で表して扱う手法である。この手法の有効性を評価するためには、解の導

出効率のみではなく、説明の生成機能がどのように実現されるかも評価しなければならない。この評価がこの節の目的である。

例題として、4.2の、「1次主循環流量 低」からの順行推論を取り上げる。即ち、

$\{(Q=[0]), (W1=[-]), (Ri=[0]), (W2=[0]), (Ra=[0]), (Tatm=[0]), (Wa=[0])\}$

に対して矛盾しない $\{T1h, T1c, T2h, T2c, Taout\}$ の定性値の組合せを求める。

式番号	従属パラメータ部					この例題での 右辺の値
	T1c	T1h	T2c	T2h	Taout	
1	+	-				-
2	-	+	+			+
7	+	+	-	-		0
3		+	+			+
4			-	+		0
6			+	-		0
9			+	+	-	0
5				+	-	0
8					-	0

①式8からTaout=[0]

式8：「伝熱量は(空気出口温度－大気雰囲気温度)×空気流量に比例する。」

大気雰囲気温度、空気流量、伝熱量が正常なので空気出口温度も正常。

式番号	従属パラメータ部				この例題での 右辺の値
	T1c	T1h	T2c	T2h	
1	+	-			
2	-	+	+		
7	+	+	-	-	
3		+	+		
4			-	+	
6			+	-	
9			+	+	
5				+	

②式5からT2h=[0]

式5：「空気出口温度へは、伝熱量が正、空気流量が負、Na流量が正、Na入口温度が正に作用する。」

空気出口温度、伝熱量、空気流量、Na流量が正常なので、Na入口温度も正常なはず。

式番号	従属パラメータ部			この例題での 右辺の値
	T1c	T1h	T2c	
1	+	-		-
2	-	+	+	+
7	+	+	-	0
3		+	+	+
4			-	0
6			+	0
9			+	0

③式4～9によりT2c=[0]

式4：「空気冷却器Na出口温度に対し、Na入口温度、大気雰囲気温度、Na流量は正に、空気流量は負に作用する。」

Na入口温度、大気雰囲気温度、Na流量、空気流量が正常なので、Na出口温度も正常。

式6：「伝熱量は(2次ホットレグ温度-2次コールドレグ温度)×2次Na流量に比例する」

伝熱量、2次ホットレグ温度、2次Na流量が正常なので、2次コールドレグ温度も正常

式9：「伝熱量は、{(2次ホットレグ温度+2次コールドレグ温度)-(空気出口温度+大気雰囲気温度)}に比例する」

伝熱量、2次ホットレグ温度、空気出口温度、大気雰囲気温度が正常なので、2次コールドレグ温度は正常

定性式 番号	従属部		この例題での 右辺の値
	T1c	T1h	
1		-	-
2	+	+	+
7	-	+	0
3	+	+	+

④式3よりT1h=[+]

式3：「IHXにおいて、2次出口温度に対し、1次入口温度、2次入口温度、1次流量は正に、2次流量は負に作用する」

2次入口温度、2次出口温度、2次流量が正常、1次流量が低なので、1次入口温度は高のはず。

定性式 番号	従属部	この例題での 右辺の値
	T1c	
1	+	不定
2	-	不定
7	+	-

⑤式7よりT1c=[-]

式7：「伝熱量は、{(1次ホットレグ温度+1次コールドレグ温度)-(2次ホットレグ温度+2次コールドレグ温度)}に比例する」

伝熱量、2次ホットレグ温度、2次コールドレグ温度が正常、1次ホットレグ温度が高なので、1次コールドレグ温度は低

なお、式1、2とも矛盾は生じない。

式1：「炉容器出口温度へは、炉容器入口温度、発熱量(=伝熱量)が正、流量が負に作用する。」

伝熱量は正常、炉容器出口温度は高、流量は低なので、入口温度は高でも低でも矛盾しない。

式2：「IHXで1次出口温度へは、1次入口温度、2次入口温度、1次流量が正、2次流量が負に作用する」

2次入口温度、2次流量が正常、1次流量が低、1次入口温度が高なので、1次出

口温度は高でも低でも矛盾しない。

この例では、1回の操作につき1個の変数の定性値が求められた。次に、1回の操作で同時に複数の変数の定性値を求める必要のある場合について、説明の生成をどのように行なえば良いのかを考察する。

この場合の例として、「空気流量 低」からの順行推論を取り上げる。即ち、

$\{(Q=[0]), (W1=[0]), (Ri=[0]), (W2=[0]), (Ra=[0]), (Tatm=[0]), (Wa=[-])\}$

に対して矛盾しない $\{T1h, T1c, T2h, T2c, Taout\}$ の定性値の組合せを求める。

定性式 番号	従属パラメータ部					独立パラメータ部						この例題での 右辺の値	
	T1c	T1h	T2c	T2h	Taout	Q	W1	Ri	W2	Ra	Tatm		Wa
初期化	?	?	?	?	?	0	0	0	0	0	0	-	
1	+	-				+	-						0
2	-	+	+				+	+	-				0
7	+	+	-	-		-		+					0
3		+	+	-			+	-					0
4			-	+						+	+	-	-
6			+	-		+			-				0
9			+	+	-	-				+	-		0
5				+	-				+	-	+	-	-
8					-	+					+	-	-

①式8からTaout=[-]

式8：「伝熱量は(空気出口温度-大気雰囲気温度)×空気流量に比例する。」

大気雰囲気温度、伝熱量が正常、空気流量が低なので空気出口温度は低。

定性式 番号	従属パラメータ部				この例題での 右辺の値
	T1c	T1h	T2c	T2h	
1	+	-			0
2	-	+	+		0
7	+	+	-	-	0
3		+	+	-	0
4			-	+	-
6			+	-	0
9			+	+	+
5				+	?

②式4からT2c=[+] or T2h=[-]

式4：「空気冷却器でNa出口温度に対して、Na入口温度、Na流量、大気雰囲気温度は正に、空気流量は負に作用する。」

Na流量、大気雰囲気温度は正常、空気流量は低なので、Na入口温度が高、又はNa出口温度が高

式6から

$(T2c=[0] \text{ and } T2c=[0]) \text{ or } (T2c=[+] \text{ and } T2h=[+]) \text{ or } (T2c=[-] \text{ and } T2h=[-])$

式6：「伝熱量は(2次ホットレグ温度-2次コールドレグ温度)×22Na流量に比例する」

伝熱量、2次Na流量が正常なので、2次ホットレグ温度、2次コールドレグ温度は共に高、共に正常、又は共に低。

式9からT2c=[+] or T2h=[+]

式9：「伝熱量は{(2次ホットレグ温度+2次コールドレグ温度)-(空気出口温度+大気雰囲気温度)}に比例する」

空気出口温度が高、大気雰囲気温度が正常なので、2次ホットレグ温度が高、又は2次コールドレグ温度が高。

従ってT2c=[+]andT2h=[+]。

定性式 番号	従属部		この例題での 右辺の値
	T1c	T1h	
1	+	-	0
2	-	+	?
7	+	+	+
3		+	?

③式1より

(T1c=[+]andT1h=[+])or(T1c=[0]andT1h=[0])or(T1c=[-]andT1h=[-])

式1：「炉容器出口温度へは、炉容器入口温度、発熱量は正に、1次Na流量は負に作用する。」

発熱量、1次Na流量が正常なので、炉容器出口温度、炉容器入口温度は共に正、共に負、又は共に正常。

式7よりT1c=[+] or T1h=[+]

式7：「伝熱量は、{(1次ホットレグ温度+1次コールドレグ温度)-(2次ホットレグ温度+2次コールドレグ温度)}に比例する」

伝熱量が正常、2次ホットレグ温度、2次コールドレグが高なので、1次ホットレグ温度が高又は1次コールドレグ温度が高

従って1次ホットレグ温度が高、1次コールドレグ温度が高

○考察

因果関係に沿った推論によって生成された説明と比較すると、定性連立方程式を用いる方式から生成された説明は、必ずしも因果を順に追ったものではないので、理解の容易さでは劣る一方、推論の分岐が抑えられているので、簡素である。

本研究の題目にある自律型プラントとは、人間の果す知的機能を全て計算機によって代替したプラントを指している。このようなプラントの診断機構において、知識コンパイラの説明機能は不要であるという指摘がされることもあろう。しかし、自律型プラントといえども、実際の診断に用いる知識のある部分は、プラントの設計や運転条件の詳細が決定された後、プラントの運用に先立ってコンパイラにより生成しておくことが適当と考えられる。プラントの診断知識は当然プラントの安全性に直接関係するものであるから、コンパイラの動作や、診断知識の根拠となる「深い」知識の妥当性を人間が検証する必要がある。このような観点から、知識生成過程の説明機構は知識コンパイラに不可欠のものである。

第5章 原子力プラント用異常診断知識導出システムの構築のために今後必要な技術開発

5.1 故障診断

現在のシステムは、パラメータの異常で表される系に対する外乱事象によって起こる系の挙動を推論することができる。しかし、故障の原因は、パラメータの異常だけではなく制約式自身が成り立たなくなることもある。また、現在の故障の概念はパラメータレベルのものであるが、さらに高度な「故障とは部品の機能が果たせない状態のこと」と捉えることも必要と思われる。また、効率よく故障診断を行なうためには、徴候を与えられてその原因と考えられる故障原因を導出する枠組が必要である。

したがって、故障診断を行うシステムを構築するためには今後、

- (1)機能と故障概念の整理を行なうこと
- (2)故障原因を導出する枠組を開発すること

が必要と思われる。以下にそれぞれの技術の予定される内容を述べる。

(1)は次項とも関連するが、故障診断を行なう際の故障概念を整理し、より高度な部品のモデルを構築することを目標とする。そのために、故障が起こったときの部品の状態を定義する「故障モード」を導入し、部品のモードの切替えにより制約式自身が成り立たない故障状態を表現する。また、部品の機能を表現する語彙を整理し、モデルに部品の機能を記述することで、より高度な故障概念を扱えるようにする。

(2)は異常徴候を与えられたときに故障原因を導出するシステム(故障原因探索システム)を開発することが目標である。このシステムと本年度に開発したシステムを組み合わせることで、効率のよい故障診断を行なうことができる。

さらに高度な異常徴候の扱いについても考察が必要と思われる。現在、異常徴候は基準値との大小関係のみで表現されているが、実際の診断においては値の逸脱の大きさ(非常にはずれている、など)、時間的変化の形(だんだん大きくなる、振動する、など)、時間的な変化の度合(瞬時的、ゆっくり、など)などが、大きな意味をもっていると思われる。このような徴候の特徴の定性化を行い、推論における時間の扱いを工夫することで、さらに有意義な故障診断が行なえらると思える。

5.2 知識記述の語彙の整理

現在のシステムで扱える知識はパラメータレベルのものである。今後、人間の認知レベルに近い、知識の基本的語彙を整理することが必要である。部品の振舞い、目的、機能といったものを注目し、特に機能を表現する語彙を拡充する。人間の認知レベルに近い語彙を整理することによって以下の利点があると思われる。

A：知識記述が容易になる

モデルベースシステムの適用に当たってはモデルを記述することが最も困難なことである。あらかじめ使用される語彙を用意しておくことで、知識記述が容易になる。また、人間が普段用いている概念に対応する語彙を整理すれば、記述する人間にとって知識レベルのギャップが発生しないため、記述が容易になると考えられる。さらに、語彙をドメインに依存しない汎用性のあるものにするすることで、記述したモデルの汎用性が向上し、他のドメインにおいても再利用することができる。このような多様なドメインにおける対象物を記述できる語彙は、ドメインオントロジーと呼ばれており、近年非常に注目されつつある。

B：より高度な故障診断

ある部品の故障とはその部品が機能を果たしていない状態ととらえることができる。したがって、機能に関する認知レベルの知識を用いることにより、より高度な故障診断を行なうことができると考えられる。

C：推論の過程の理解(説明)

認知レベルの知識を用いることにより、推論過程の説明をより高度なものにすることができる。現在の推論の過程を用いてできる説明はパラメータレベルである。より高度な、人間に近い表現を用いた説明を行なう機構を実現する。特に部品の機能に関する人間の認知に近い語彙を用いることにより、機能と密接な関係のある故障を、より人間に分かりやすく表現することができる。そのために、部品の機能などを表現できる、人間の認知レベルに近い抽象度の語彙を整理する。

第6章 結論

以上、6章まで、定性推論の主要な問題点である曖昧さの発生を抑制するための2つの推論手法に基づいて製作したソフトウェアを原子炉2ループ冷却系モデルに適用した結果について論じた。両者の概要を再度以下に要約する。

A：プロセス変数間の因果関係に基づく推論手法

この手法は、基本的に人間がある機械系について未経験な異常に遭遇した際の原因同定手順を工学的に実現しようとするものである。原因の候補を列挙する遡行推論と、各原因に付随すべき全症候を導く順行推論の2段階で知識のコンパイルを行うので、計算量が多いが、その全過程は人間にとって自然で理解が容易である。

B：定性連立方程式に基づく推論手法

この手法は、全ての定性的知識について、その個々の知識から、因果関係を削除して、原因となる変数とその影響を被る変数との区別を無くした形で表現して、制約充足問題として解く手法である。同時に原因となり得る外因変数の数を指定することで、1度の手順で知識がコンパイルできるが、推論の過程は人間にとって必ずしも理解容易ではない。

以下に、本年度の研究の結果明らかになった両手法の特徴を述べる。

項目	手法 A：プロセス変数間の因果関係に基づく推論手法	手法 B：定性連立方程式に基づく推論手法
推論に必要な計算量	多い	少ない
モデル構築に必要な時間	やや多い	やや少ない
大域的制約条件(変化伝播以外の定性的知識)の扱い	遡行推論には使用せず。順行推論での使用タイミングに改良の余地あり。	推論の枝の発生を最少にするのに最適な時点で使用される。
拡張性	if-thenの形で表現できる知識であれば(例:Aが大小どちらにずれてもB増加)記述可能。	線形代数とのマッチ-を用いた定性知識(群)の評価が可能。

○両者の優位な点を活用した統合システムの構成

今年度、原子炉冷却系2ループモデルに対して実際に2つの手法を適用して得られた知見に基づいて以下に考察する。

深い知識から浅い知識を導出する部分については、人間に対する推論過程の透明性が重要なことから、基本的には因果関係に沿った推論手法に基づいて構築することが適当と考えられる。但し、推論の速度や、説明のコンパクトさを重視する場合も考えられるので、両者の手法をより上位のレベルで一般化して、場合によってその何れをも選択できることが望ましい。つまり、予め用意された個々の定性的知識の発火順序の制御を、オプションによって、因果関係に沿って行なうか、マトリックスの構造に基づいた判断によって行なうかを切換えられるシステムが構築できれば、浅い知識の導出がより柔軟に行えるであろう。

本年度の、定性連立方程式による推論の研究で、定性係数のマトリックスの評価から、追加すべき定性的知識をユーザーに示唆する機構が可能なことがわかった。これは、異常診断知識導出システム全体から見れば、いわば深い知識の評価及び構築支援部分となる。定性的な知識(群)を、線形代数とのアナロジーに基づいて解析することにより、このように追加して有効な定性知識を導出したり、解の曖昧さを抑制するために最小限必要な定量情報を限定して、導出される浅い知識が同種の系に共通か或いは固有の仕様に依存するかを明確にしたりする機能は、知識の汎用性、再利用性等の点から重要なものであると考えられる。