



定性推論の大規模システムの診断への応用†

石田 好 輝†

1. はじめに

定性推論（定性物理，ナীব物理などとも言ふ。）は1970年代の終りに，Hayes¹⁾により提唱された。定性推論の大きな目標は，物理系の挙動を古典の力学によらずに人間が日常的に処理するように（因果的に）説明することである。このように定性推論は，対象の挙動の因果的説明を可能とするため，これを本質的に必要とする診断などへの応用も，当然，当初から念頭に置かれていた。

一方，1980年代は，知識ベースシステムの開発が多くなされた。プロセスプラントや原子力プラント，ヘリコプタ，航空機といった大規模系の診断を行うシステムもいくつか開発された。それらは，症状から，その症状のもとで起こり得る故障の原因を対応させるルール型の知識からなる。したがって，（1）現在起こっている症状に該当ルールがないときどうするか，（2）また膨大なルールをどのようにして獲得するかが問題となる。これらの問題に解決の道を与えるものとして，定性推論が注目された*。すなわち，（1）の問題に対しては，ルールで表現された浅い経験的知識のほかに，定性モデルで表現された深い知識を用意し，ルールで診断できない場合は定性モデルを用いて診断するという手法がある。また（2）の問題に対しては対象の定性モデル上でシミュレーションを行いルールを組織的に生成する方法がある。

定性推論の技術は，まだ実際の大規模システムに適用できるほどに成熟していない。多くの研究がなされているものの，実際に適用するには，多くの問題点を残している。そこで，ここでは，大

規模システムの診断に適用するための問題点やそれらの解決のアプローチを述べるにとどめる。

以下，2.では，定性推論を大規模システムの診断に応用するときの問題点を述べ，3.ではいままてになされた定性推論による診断方式を，いくつかの事例を紹介してまとめる。また，4.では，特に大規模システムへの応用を目指したアプローチについて述べる。

2. 定性推論の問題点

定性推論は，より詳細には次の二つの過程からなる。すなわち，（1）対象の物理量（たとえばあるところの温度や圧力，速度など）間の制約やプロセス（たとえば，蒸発，反応など）の成立条件を定性的に表現する定性モデリングの過程，（2）得られた定性モデル上で，定性値を伝播させることにより，対象の挙動を定性的な状態の遷移として得る過程である。定性推論を大規模システムに応用しようとしたとき，この定性モデリングと（狭義の）定性推論のそれぞれについて次のような問題が顕在化する。

1. 定性モデリングの問題：非常に複雑かつ大規模な実システムに対し，どのようにその定性モデルを構築するか。

2. 定性推論のあいまい性：システムが大規模になるにしたがって，定性推論はあいまいな状態に陥りやすくなる。

まず1の定性モデリングに関して述べる。定性推論では，大別してコンポーネント中心のモデリング²⁾とプロセス中心のモデリング³⁾が提案されている。前者は，コンポーネントに着目し，そのさまざまな変量間の動的関係を，定性微分方程式で表現する。後者は，蒸発，反応，といったプロセスに着目し，それらの成立条件を定性的に表現する。後者については，その大規模システムへの応用のための研究が報告されている。そこでは，

† Applications of Qualitative Reasoning to Diagnosis of Large-Scale Systems by Yoshiteru ISHIDA (Division of Applied Systems Science, Kyoto University).

† 京都大学工学部応用システム科学教室

* これらの問題に対するほかのアプローチとしてたとえば事例ベース推論がある²⁾。

まずモデル化におけるさまざまな仮定 (*modeling assumptions*) を陽に導入して、それらによりモデルとシミュレーションの複雑さの詳細度 (*grain size*) をコントロールしている⁵⁾。またプロセスプラントを複雑なトポロジーをもつフローによりコンポーネントが結合されたものとみなし、そのような複雑なフロートポロジーを扱うことのできる抽象的なレベルの定性モデルを導入したのもある⁶⁾。この定性モデリングの問題は大規模システムに関して特に問題となるので、4.で詳しく述べる。

定性推論のあいまい性の問題は、(a) 定性的情報を用い定量的な情報を用いてないことのコストとして(b) また、局所的伝播のパラダイムのみにとまっていることより当然起こってくる。この局所的伝播パラダイムに対しては、大局的構造パラダイムといえるものが提案されている。それは、大局的性質を考慮した位相面解析の定性版^{7), 8)} や、システム解析の定性版⁹⁾、構造変化に対する感度解析の定性版¹³⁾ などである。局所的伝播パラダイムを用いた例は多い^{10), 11), 12), 16)} が、大局的構造パラダイムを用いた例は少ない。対象システムの規模が大きくなると、局所的伝播パラダイムは組み合わせ爆発をまねく。今後、大局的構造パラダイムを取り入れていくべきである。また、これらのパラダイムと異なったものとして、因果的順序付け (*causal ordering*)¹⁷⁾ が提案されている。そこでは方程式で表された制約が与えられ、その一部の変数が固定されると、それから出発し、変数間の依存関係を用いて、次々に変数を固定していく。これを動的、静的モデルの混在するシステムをカバーできるように拡張した¹⁸⁾ ものや、フィードバックを含むプロセスの診断を考察した¹⁹⁾ ものもある。

もしかりに(b)の問題が解決されても、(a)のあいまい性の問題は依然としてこのころ。定量的情報をも取り入れようとした研究としては文献 20) などがある。そこでは、+, -, 0 といった定性値を用いるかわりに区間の両端を指定する値のペアを用いて定量的な情報を導入している。これによりたとえば、同じ+でも [0, 100], [100, 500] といったように、いくらでも詳細にできる。また+, -, 0 だけで十分なときは、それぞれ [0, ∞], [0, 0], (-∞, 0) で表現できる。このほか

にも定性推論のあいまい性を克服しようとした研究は多いがこれを積極的に定性診断に用いようとしたものは少ない。

3. 定性推論の診断への応用

3.1 定性診断の方式

定性推論の診断への応用の仕方は、どの診断方式をとるかによっても異なる。診断方式は、症状ベース診断とモデルベース診断に大別される。

図-1 のようなバッファータンクの診断¹⁴⁾ の例で説明する。このタンクではレベルをある一定範囲に保つように、流出量を制御している。症状ベース診断では、表-1 のような、診断知識を症状を索引して対応する故障が見つけられるように整理した症状-故障表 (故障辞書とも呼ばれる) を用意する。診断は、現在、現れている症状によりその故障辞書を索引し、対応する故障を見つけることにより行われる。モデルベース診断では、図-2 のような対象の挙動を記述したモデルを用意する。故障は、このモデルにより予測される状態と観測される状態とのずれのパターンを解析することにより行われる。症状ベース診断では、よく整理された故障辞書を用意することにより効率良く診断できるが、故障辞書にない症状にはまったく対処できない。逆に、モデルベース診断では、モデル上での計算に時間がかかるものの、柔軟な診断が可能となる。1.で述べた知識ベース診断システムの多くは、症状ベース診断の方式をとった。したがって、この方式の欠点である深い知識 (モデル) の欠如という問題が顕在化した。

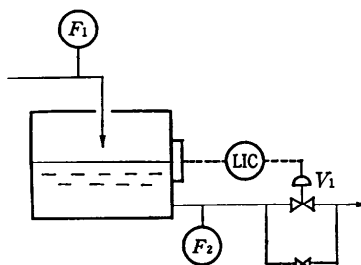


図-1 バッファータンクのダイアグラム¹⁴⁾

$$\begin{aligned}
 4F &= F1 - F2 \\
 dL/dt &= \alpha * 4F \\
 F2 &= \beta * V1 * (L1)^{1/2} \\
 V1 &= \tau * (L1 - \mu) \\
 4F, F1, F2, L1, V1; &\text{ continuous variables} \\
 \alpha, \beta, \tau, \mu; &\text{ appropriately chosen constants}
 \end{aligned}$$

図-2 バッファータンクのモデル

定性推論を診断に応用するとき、診断方式が症状ベース診断の場合、定性シミュレーションを用いて、故障辞書の作成を補助する方式や、よりひろく知識獲得をガイドしていく¹⁵⁾方法がある。また診断方式がモデルベース診断の場合、ベースとなるモデルとして、定性モデルを用い、モデルによる状態の予測に定性シミュレーションを用いたり、また定性モデルと観測された状態との整合性をチェックする方法（以後、これを定性シミュレーションに対し、定性診断と呼ぶ。）がある。モデルベース診断におけるモデルでは、対象が大きくなればなるほど、階層化の必要性がまし、モデル階層の上位のほうでは、より定性的なモデルが必要となる。

定性シミュレーションと時間的に逆に（与えられた症状からその原因に）進行するプロセスとしての定性診断は非常に興味深い問題だが、あまり研究されていない。いまのところ、与えられた症状と定性モデルとの整合性を調べて故障・異常を発見するものが多い。次にこの定性診断と、症状ベース診断に定性シミュレーションを用いた事例を紹介する。

3.2 定性診断の事例

以下では、定性推論をモデルベース診断に応用した HELIX²¹⁾ の例と、定性シミュレーションを

症状ベース診断の故障辞書作成に用いた AQUA²²⁾ の例についてみていく。さらに、AQUA で用いられたモデルベース診断についても、HELIX のそれと比較するために述べる。この際モデルベース診断においては、あらかじめ考慮されていない故障に対しても対応できるという特徴があることに注意されたい。

HELIX ではヘリコプタ診断を、定性モデルと観測された症状の整合性チェックにより次のように行う。

コンポーネントとして、エンジン No. 1, No. 2 とトランスミッション、ロータ、フライトコントローラがある。これらのコンポーネントのそれぞれに、対応する制約がある。たとえばエンジン No. 1 には、その回転数が落ちたときには、それへの燃料フローが増えなければならない、という制約がある。

ここで、症状として次のものを考える。(1)エンジン No. 1 の回転数、トルク、温度、またエンジン No. 1 への燃料フローが減少。(2)エンジン No. 2 へのトランスミッションからのロード増加。(3)エンジン No. 2 の回転数減少。(4)燃料制御機構は、エンジン No. 2 への燃料フローをふやす。

これらの症状と、全システムの制約のうちそれ

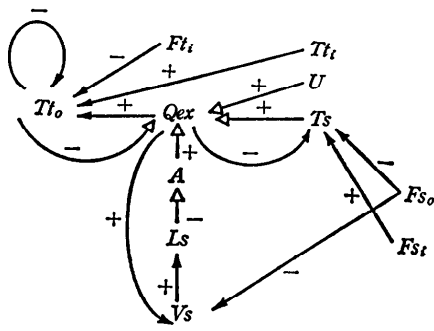
表-1 バッファータンクの故障辞書¹⁴⁾

Rule	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ΔF	+1	-1	N																	
F1				L	H	N														
L1							L	L	H	H	*									
V1							O	N	N	C	*	O	O	O	N	N	C	C	C	N
F2												L	N	H	L	H	L	N	H	N
Event	5	A	1	6l	6h	1	A	A	A	A	1	4	4	6h	4	2, 3	5, 6l	2, 3	2, 3	1
	Flow Balance			Supply			Control Loop				Leaks and Blockage									

+1=positive, -1=negative, N=normal, H=high, L=low, O=open, C=close, *=else

Events:

- (1) Normal operation
- (2) Pipe leakage between F2 and V1
- (3) V1 by-pass open in error
- (4) Blockage in exit line
- (5) Leak in tank
- (6h) Abnormal throughput high
- (6l) Abnormal throughput low
- (A) Anomally (defined as a physically impossible combination of measure outputs from the point of view of the plant)



—▷ 位相遅れ=0
 —▷ 位相遅れ=1
 F_{Si} : シェルサイドへのインフロー
 T_s : シェルサイドの温度
 F_{So} : シェルサイドからのアウトフロー
 F_{Ti} : チューブサイドへのインフロー
 T_{Ti} : チューブサイド入口の温度
 T_{To} : チューブサイド出口の温度
 L_s : シェルサイドのレベル
 V_s : シェルサイドの液体容量
 Q_{ex} : 熱交換量
 U : 伝熱係数
 A : 伝熱表面積

図-3 コンデンサタイプの熱交換器の定性モデル

ぞれのコンポーネントの制約をはずした部分制約との整合性をチェックする。そうすると、エンジン No. 1 に対応する制約をはずしたときのみ、症状と部分制約が整合する。(エンジン No. 1 に対応した制約としては、その回転数が落ちたときには、それへの燃料フローが増えなければならない、という制約があるが、それと症状が整合しない。)

このようにしてエンジン No. 1 のコンポーネント故障が診断される。定性診断は、さらにエンジン No. 1 のサブシステムについて同様に行われ、どこが故障しているかを診断する。

次に、AQUA で行われた定性シミュレーションによる故障辞書作成と定性状態間の矛盾検出による定性診断(定性フィルタ)を、熱交換器の例でみていく。図-3 で示されるような、状態間の相互作用の定性モデルが与えられたとする。そこでは変数はグラフの頂点、影響関係はグラフの矢印で表される。たとえば、 T_{to} から Q_{ex} への位相遅れ 0 で負の作用があるが、これは T_{to} の状態が - (低) となったとき Q_{ex} の状態は同時に + (高) となり、 T_{to} が 0 (正常) のとき、ほかに Q_{ex} に影響を与えるものがなければ、 Q_{ex} も 0 (正常) となることを意味する。一方、 Q_{ex} から T_{to} へは位相遅れ 1 の正の作用があるが、これはもし Q_{ex} が - (低) となれば T_{to} はその時間微分が - (減少) となり、したがってある時間経過後 T_{to} は - (低) となることを意味する。

このような定性モデル上で、初期外乱を設定し定性シミュレーションを行うと、その外乱に対する症状が得られる。図-4 は、外乱 $dF_{Si} = (+, 0, 0)$ (シェルサイドの流入量が増加) に対して定性シミュレーションを行った結果である。それぞれ

	1	2	3
F_{Si} (HE 1)	+00	+00	+00
T_s (HE 1)	0+-	++-	++-
T_{to} (HE 1)	00+	0++	+++
L_s (HE 1)	00+	0++	+++
Q_{ex} (HE 1)	0+-	++-	++-
A (HE 1)	00-	0--	---

図-4 外乱 $dF_{Si} = (+, 0, 0)$ に対する定性シミュレーション

の変数の各時点において 3 組の定性値が示されている。これは、それぞれ、はじめのものが定常値からのずれ、次がその 1 次時間微分、最後が 2 次時間微分の定性値である。たとえば T_s (シェルサイドの温度) は第 3 ステップで ++- となっている。これは、 T_s が定常値より高く、しかも増加しているが、その増加の割合は減少(上に凸)していることを示している。

故障としては、変数の定性値で与えられる外乱だけでなく、モデルの矢印を切断したり、あらたに付け加える効果をもつものもある。このような故障についてもその構造的変化があらかじめ指定できるかぎり、シミュレーションにより対応する症状を作成できる。

このように定性シミュレーションの応用として、症状ベース診断のための故障辞書の作成がある。しかし、1. でも述べたように症状ベース診断だけでは、あらかじめ想定されなかった(したがって故障辞書にない)故障が起こったとき対応できない。そこで、そのような状況では、AQUA は上述の定性シミュレーションに用いたのと同じ定性モデルを用いてモデルベース診断も行う。以下では、そのモデルベース診断を HELIX のそれと比較するために述べる。

症状として、シェルサイドの流入フロー (F_{Si}) が高く、シェルサイドの温度 (T_s) が高く、しかも上昇し、またチューブサイドの温度も高く、し

かも上昇し、さらにシェルサイドの液面レベル (L_s) が低くなっているとする。

定性的に説明されるものを消去して (たとえばシェルサイドの温度 (T_s) が高いのは、シェルサイドの流入フロー (F_{si}) が高いことにより説明される.), 説明されないもののみを残すと、次の二つが残る。

- (1) シェルサイドの流入フロー (F_{si}) が高く、
- (2) シェルサイドの液面レベル (L_s) が低くなっている。

このうち(1)はこの熱交換器に結合しているほかの要素から説明される可能性があり、その方向の探索がなされるが、(2)はコンポーネント内での矛盾である。したがって定性診断は、液面のレベル自体、あるいはそのレベルメータの異常に焦点を当てる。

上に述べた部分整合制約探索 (HELIX) と定性フィルタ (AQUA) の定性診断手法は、表裏一体の関係にある。症状とモデル (制約) を突き合わせて、前者は不都合な制約のほうを探索し、後者は整合しない症状のほうを探索する (整合する症状をフィルタする)。したがってどちらがより良いかは、診断対象の性質に依存する。

4. 大規模システムの定性モデリング

プロセスプラントなどの大規模システムの定性モデリングで最も問題になるのは、現在の定性推論では、単一レベルの定性モデルしか用意していないということである。de Kleer と Brown³⁾ はいくつかのレベルの詳細度の定性モデルについて議論している。しかし彼らはどのレベルでも定性微分方程式 (*confluence*) を用いている。

これに対して Falkenhainer と Forbus⁵⁾ は、目的に応じてモデルの詳細度を決定する枠組みを与えてスケールアップを計っている。またプロセスプラントを実際に定性モデリングするさいに問題となった複雑なフロートポロジに焦点を当てて、フロートポロジそのものを定性モデルとして、より大規模システム向けの粗い定性推論もある⁶⁾。以下の2節で、この二つをみていく。

4.1 定性プロセス理論のための大規模システムモデリング

Falkenhainer と Forbus⁵⁾ は陽にモデル仮定 (*modeling assumptions*) を導入して、それによ

りモデルとシミュレーションの複雑さの詳細度 (*grain size*) をコントロールしようとした。彼らの方法では、ターゲットシステムの記述とその標準的挙動を選択することによりモデルの詳細度を上げることができる。モデル仮定は、単純化仮定 (*simplifying assumptions*) と動作仮定 (*operating assumptions*) からなる。すなわち、モデル構築のときに用いる単純化仮定はモデル記述がどのようなとき、適用可能かを陽に指定する。たとえば、フローの熱特性まで考慮するか、などである。これらを陽に指定することにより、さまざまな詳細度や見方に対処したモデルを組織化することができる。

また、モデル解析のときに用いる動作仮定は標準的挙動や、デフォルトの条件を記述する。たとえば、熱交換器は、正常モードでは、常に熱供給側のフローの温度のほうが、熱を受ける側のフローの温度より高い、などである。これにより可能でかつ当を得た挙動を絞り込むことができる。これら2種類のモデル仮定を陽に表現することにより、目的に応じた適当な詳細度のものを選択できるとする。

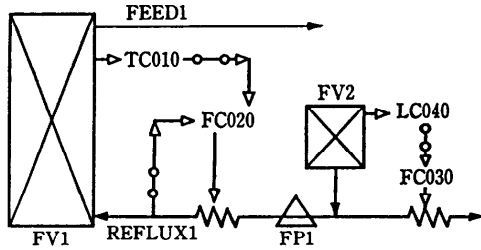
しかし、このようなモデルの記述の集合を、実際のプロセスに対して用意するのは必ずしも容易でないと考える。特に、モデル仮定の相互作用についての注意は、彼ら自身も指摘している。整合的なモデル仮定を設定すること自体が困難な作業となるであろう。

診断というタスクの性質だけでなく診断対象の性質にも依存して定性推論の方式を開発すべき場合がある。ここで述べる FLOW⁶⁾ は、対象として大規模なプロセスプラントを想定し、その特徴である複雑なトポロジーのフローネットワークを扱わなければならないという要請に基づいて開発された。したがって同じ大規模システムの診断でも機械システムなどには適用は困難であろう*。

フローレベルの定性推論には、フローのトポロジー以外に、そのフローに課せられた制約を表すための制御要素が必要となる。フローに対する初期外乱**と、フローの制約はこれらの制御要素とおしてのみ明らかとなる。したがって、フロー

* 機械システムの動作を支配するのは、そのトポロジーが問題となるフローと異なり、機械要素の連動した相互動作である。

** システム内部のほかの部分の外乱が伝播した2次的なものでなく、はじめにシステムの外部から与えられた外乱。



- 制御要素のリスト
- △ : フロードライブ
 - ∩ : 抵抗
 - : スイッチ
 - ⊠ : コンプレックスコンポーネント
- L1, F1, P1, T1: メータ
L1, FC, PC, T1: コントローラ

図-5 PFDの一部を抽象化して得られたフローモデルの一例

モデルは二つのプリミティブよりなる。すなわち、方向づけられた線で表されるフローネットワークとその上に配置された制御要素である。このようなフローモデルは、図-5のようにプロセスプラントを設計する際に用いる。PFD (Process Flow Diagram) を抽象化・定性化することにより得られるものである。

フローコントローラはフローの属性に対して、それをある時間の間「固定」という制約を課する。上記の例では、フロー REFLUX1は、もしそれが温度制御 (TC) から切り離されたなら、ある時間の間「固定」されるという制約を課せられる。もし流量制御 (FC) が TC と接続されるなら (カスケード制御)、フロー FEED1 の温度はその時間の間「固定」され、フロー REFLUX1 は「開放」される。

このようなフローモデルに関して、複雑なフロートポロジーにおけるフロー変化の定性推論は、ここでは詳述しない。図-6のようなルールをさまざまな基本トポロジーに対して用意し、それらを、制御要素により規定されるコンテキストのもとに適用させて行う。

たとえば、制御要素 FV1 の温度が (高) という異常に対する定性診断を考える (図-7 参照)。これに対し (熱) フローに対する推論から、熱流入フローが高いか、熱流出フローが低いという可能性がでてくる。この後者をフローネットワーク上で実現するものとして、(a) REFLUX1 が (低) または (b) REFLUX1 の温度が (高) という事象の可能性がある (REFLUX1 は FV1 に対して低温)。このうち REFLUX1 (低) に対しては、フローを上流に遡り、(a-1) そのフロードライブの異常と、(a-2) フローコントローラの異常が

合流:
 $f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in}$: インフロー
 f_o : アウトフロー

変化予測ルール cp1:
 $\delta f_{i1} > 0 (< 0)$ は $\delta f_{ik} < 0 (> 0)$ $k=2, \dots, n$ と $\delta f_o > 0$ を引き起こす。
 $|\delta f_{i1}| > |\delta f_o|, |\delta f_{i1}| > |\delta f_{ik}|$.

変化予測ルール cp2:
 $\delta f_o > 0 (< 0)$ は $\delta f_{ik} > 0 (< 0)$ for $k=1, 2, \dots, n$ を引き起こす。

図-6 合流に対する変化予測ルール

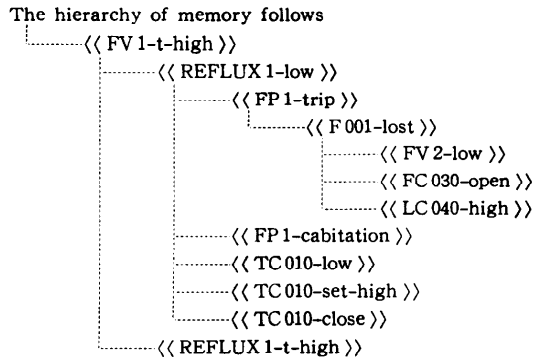


図-7 事象 FV1 t-high (温度高) に対する定性診断

診断される。フロードライブとしてのポンプ FP1 の異常として、その (a-1-1) トリップおよび (a-1-2) キャビテーションが考えられ、トリップについてはその原因として、(a-1-1-1) フロー F001 の喪失があげられる。さらにこの喪失の可能な原因として、(a-1-1-1-1) FV2 の低表示、(a-1-1-1-2) FC030 の誤開、(a-1-1-1-3) LC040 の高設定があげられる。

REFLUX1 (低) のフローコントローラの原因として、FC020 がカスケード制御されているため TC010 に焦点が当てられ、その (a-2-1) 低表示、(a-2-2) 誤開、(a-2-3) 高設定、が可能な原因としてあげられる。

4.2 コンポーネント指向とプロセス指向

コンポーネント指向の定性モデリングを大規模システムに適用するとき、(1)それがコンポーネ

* 基本トポロジーとしては合流のほか、分流、サイクル、再取れんするファンアウトパスなどがある。さらにフローとしては、フローの質量速度 (mass velocity) のほか、フローの圧力、温度などがある。

ントモデルを用意しそれを組み立てて全モデルを作るというボトムアップアプローチとなる。したがってつねにコンポーネントモデル間の詳細度、パラメータの整合性やモデル結合の境界条件という困難性を本質的にもなっている。(2)また文献5)で指摘されているように、それがシステムダイナミクスを抛り所にしているため、「実際の世界からモデルへのマッピング過程を扱わない」という欠点を受け継いでいる。

Forbusらはプロセス指向には上記(2)のような欠点はないとしている。しかし、4.1で述べたプロセス指向では、逆にさまざまな状況に関する仮定を導入してモデルを指定していくというトップダウンのアプローチである。したがって大規模システムを組み立て式に構築していくという簡便性はえられない。プロセス指向のみで大規模システムのモデル化を試みるなら、化学工学のユニットプロセスの概念にみられるよう、むしろユニットプロセスへの分解、それらの結合などプロセスのモジュール化を計るべきだろう。

実際のプロセスプラントがそうであるように、制約をかけてプロセスを生み出すコンポーネントと、またコンポーネントの状況における機能的意義を決定するプロセスは両輪である。

5. おわりに

定性推論が大規模システムの診断へ適用しようとしたときの課題をまとめておく。第一に現在最も標準に行われているような、局所的伝播パラダイムによるものは、そのあいまい性のために、大規模システムに適用しようとするとき、致命的な組み合わせ爆発を招く。これに対し3.で述べたような定性診断以外に、グローバルな挙動の定性的解析方法や定性的感度解析などの異なったパラダイムによる定性推論を定性診断に取り入れていくことが必要である。第二に大規模システムの定性モデリングの詳細度、規模の制御が問題となることを4.で述べたが、この問題をより精密に議論する必要がある。

さらに、定性推論を実際の診断システムに用いる際に避けて通れない問題が、数値で表される信号から記号で表される定性表現への変換であるが、この種の研究は少ない²³⁾。一般的な定性推論の枠組みでは、ある値が高とか上昇しているとか

の因果関係を定性的にさぐる。しかしある値が「徐々に増える」とか「急激に減る」などの時間的変化の定性表現やある値が「張り付いている」とか、「はげしく振動している」などの定性的態様の説明を行おうとするものはない。このような定性状態は、実際の診断に大いに用いられる。

また、これまでの定性推論の枠組みは、一つの値の定性状態のみに着目し、値間の関係についての定性的情報には目をつむっている。ある値が他の値より大きいとか、ある値が他の値に追従して変化しているなどの関係の定性的情報は、また人間の定性診断では大いに用いられる。実用的な定性診断の実現のためには今後このような診断向きの定性推論が考えられるべきである。

謝辞 本解説の編集の際に多くの貴重なコメントをくださった査読者の方々に深謝いたします。

参考文献

- 1) Hayes, P. J.: *The Naive Physics Manifesto*, in: D. Michie ed. *Expert Systems in the Microelectronic Age*, Edinburgh University Press, Edinburgh (1979).
- 2) Ishida, Y.: *A Framework for Dynamic Representation of Knowledge*, Proc. of KR '89, Toronto, pp. 170-179 (1989).
- 3) De Kleer, J. and Brown, J. S.: *A Qualitative Physics Based on Confluences*, *Artificial Intelligence* 24, pp. 7-83 (1984).
- 4) Forbus, K. D.: *Qualitative Process Theory*, *Artificial Intelligence* 24, pp. 85-168 (1984).
- 5) Falkenhainer, B. and Forbus, K. D.: *Setting Up Large-Scale Qualitative Model*, Proc. of AAAI 88, pp. 301-306 (1988).
- 6) Ishida, Y. et al.: *An Application of Qualitative Reasoning on Flow Topology-Reasoning without Qualitative Equations*, *Int. J. Eng. Appl. of AI*, Vol. 2, June, pp. 139-143 (1989).
- 7) Struss, P.: *Global Filters for Qualitative Behaviors*, Proc. of AAAI 88, pp. 301-306 (1988).
- 8) Lee, W. and Kuipers, B.: *Non-Intersection of Trajectories in Qualitative Phase Space*, Proc. of AAAI 88, pp. 286-290 (1988).
- 9) Ishida, Y.: *Using Global Properties for Qualitative Reasoning*, Proc. of IJCAI 89 (1989).
- 10) Umeda, T., Kuriyama, T., O'shima, E. and Matsuyama, H.: *A Graphical Approach to Cause and Effect Analysis of Chemical Processing Systems*, *Chem. Eng. Sci.* 35 (1980).
- 11) Oyeleye, O. O. and Kramer, M. A.: *Qualitative Simulation of Process Plants*, Proc. of 10th IFAC World Congress on Automatic Control

- (1987).
- 12) Dalle Molle, D. T. and Edgar, T. F.: *Qualitative Modeling of Dynamic Systems, Proc. of AIChE Annual Meeting* (1987).
- 13) Weld, D.: *Theories of Comparative Analysis, AI-TR-1035* (1988).
- 14) Belenblut, B. J. and Whitehouse, M. B.: *A Method for Monitoring Process Plant Based on Decision Table Analysis, Chem. Eng.*: 175-181 (1973).
- 15) Ishida, Y.: *An Application of Qualitative Reasoning: Rule Generation by Qualitative Simulation, Proc. CAIA '88*, pp. 124-129 (1988).
- 16) Hollan, J. et al.: *STEAMER: An Interactive Inspectable Simulation Based Training System, AI Magazine, Summer* (1984).
- 17) Iwasaki, Y. and Simon, H. A.: *Causality in Device Behavior, Artif. Intel.* 29, pp. 3-32 (1986).
- 18) Iwasaki, Y.: *Causal Ordering in a Mixed Structure, Proc. of AAAI 88*, pp. 313-318 (1988).
- 19) Bandekar, V. J.: *Causal Models for Diagnostic Reasoning, Artif. Intell. in Eng.*, pp. 79-91 (1989).
- 20) Kuipers, B. and Berleant, D.: *Using Incomplete Quantitative Knowledge in Qualitative Reasoning, Proc. of AAAI 88*, pp. 324-329 (1988).
- 21) Hamilton, T. P.: *HELIX: A Helicopter Diagnostic System Based on Qualitative Physics, Int. J. Artif. Intell. Eng.* Vol. 3, No. 3, pp. 141-150 (1987).
- 22) Ishida, Y. and Eshelman, L.: *AQUA: Integrating Model-Based Diagnosis and Syndrome-Based Diagnosis, cmu-cs-87-111* (1987).
- 23) Forbus, K.: *Interpreting Measurements of Physical Systems, Proc. of AAAI 86* (1986).
(平成2年8月31日受付)



石田 好輝

1957年生. 1981年京都大学大学院修士課程修了. 86-87年米国カーネギー・メロン大学計算機学科客員研究員. 1987年京都大学工学部応用システム科学助手. 人工知能, 故障診断の研究に従事. 工学博士. 米国人工知能協会 (AAAI), IEEE, 電子情報通信学会, 日本ソフトウェア科学会, システム制御情報学会など各会員.

