

定量データから生成した時間概念を用いた定性シミュレーション手法

秋吉 政徳 西田 正吾
三菱電機 (株) 中央研究所

本報告では、大規模な系に発生した挙動の定量データに内在する因果の導出を目的に、定性的挙動の推論過程に定量データを組み入れることを試みる。つまり、与えられた定量データと対象の領域知識に基づいて構築した定性モデルとを取り扱う枠組みを提案する。この枠組みの中で、定量データに基づく時間の管理機構や定性変数の状態遷移機構は、定性モデルに依存することなく構築できる。また、本手法における因果の導出過程で発生する問題について、適用例の結果から考察する。

Qualitative Simulation with Temporal Mechanism generated from Quantitative Data

Masanori Akiyoshi Shogo Nishida

Central Research Laboratory

Mitsubishi Electric Corporation

8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo, Japan

A method of qualitative simulation with temporal mechanism is discussed. In order to explain some phenomena of large-scale physical systems, this method extracts causal relations among qualitative parameters from quantitative data. It first converts quantitative data into qualitative data and second generates conceptual time for observation of causality. Then it proceeds simulation based on the description of qualitative model and qualitative data. Some problems when applying this method to one example are also discussed.

1. はじめに

定性推論の研究における目的の一つとして、物理システムの挙動に内在する因果を推論することが挙げられる。従来から定性モデルをもとにして定性的挙動を推論し、その推論過程から因果を導出する研究が行なわれてきた^[1-3]。しかし、推論過程において複数の定性的挙動が導出されるために、大規模の系への適用はあまりなされていない。このような曖昧性は、挙動の定量データが得られない場合に、定性モデルだけを用いて推論することに起因する問題である。ただし、定量データが得られている場合にも、どのようにその定量情報を利用するかは重要な研究課題である。現在までに、曖昧性の解決に対する研究^[4-6]や定量情報の解釈のモデル化^[7, 8]などの研究も多くなされている。しかし、定量データが得られている大規模な系を対象とした時間のモデルや定性シミュレーションの方法は、まだ十分検討されていない。

本報告では、大規模な系に発生した挙動の定量データに内在する因果の導出を目的に、定性的挙動の推論過程に定量データを組み入れることを試みる。つまり、与えられた定量データと対象の領域知識に基づいて構築した定性モデルとを取り扱う枠組みを提案する。この枠組みの中で、定量データに基づく時間の管理機構や定性変数の状態遷移機構は、定性モデルに依存することなく構築できる。また、本手法における因果の導出過程で発生する問題について、適用例の結果から考察する。

以下、第2節で定量データと定性モデルを扱う枠組みについて、第3節で具体的な適用例から導出した因果について、それぞれ述べ、第4節で因果の導出過程で発生する問題の処理について考察する。

2. 定量データを用いた定性シミュレーションの枠組み

2.1 定量データと定性モデル

定量データが表しているものは、物理システムの挙動そのものである。したがって、例えば専門家がその定量データの因果を説明するときには、対象システムに対する様々な知識（構造知識、動特性知識、計装・制御知識、運転知識、経験知識など）をもとに、解釈を試みる。この

ことは、定量シミュレーションを用いた解析との対応で定性推論の解生成過程を論じた研究^[9]に示された、図1の中のプロセス(1)から(3)に対応していると考えられる。すなわち、定性モデルを構築して、その定性シミュレーションを実行する中で定量データの解釈としての実行結果を得ることに対応している。ただし、従来の定性推論の解生成過程では、「定性モデルだけを用いて定性シミュレーションを実行し、その定性的挙動を導出する」ことで、理解の理論としての完結性を実現している^[10]。

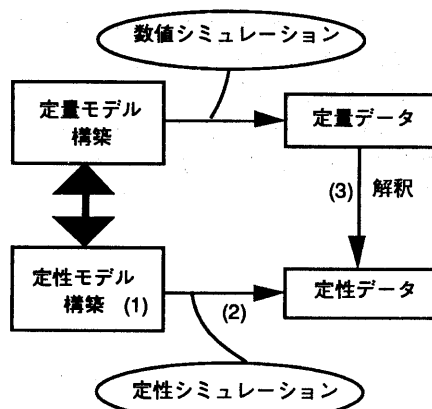


図1 定量解および定性解の生成過程

これは、挙動推論としての完結性を実現したものであろう。ところが、前述した定量データの解釈としての定性シミュレーションを実行する場合には、その実行結果を得る過程に定量データの情報の関与を考慮しないわけにはいかない。すなわち、図1に示された定性シミュレーションの実行に定量データの情報が関係づけられて結果が導き出される図式となる。

以上述べたように、定量データを解釈するために定性モデルを用いるという立場においては、従来の定性シミュレーション手法そのものを適用することはできない。ただし、定性モデルの構築が、定量データに依存することなく実行される点では同じだと考える。このような立場から定量データに内在する因果の導出を目的として、定量データを用いた定性シミュレーション手法に、時間の管理機構や状態遷移機構を構築する。

2. 2 定量データから生成されるデータ

ここで、2. 1節で述べた定量データに内在する因果の導出を実行する場合に、「因果」を次のように定義する。

「因果とは現象の発生する過程を、その影響関係に基づいて順序付けたものである」

この中で現象の発生する過程を捉えるときに、どの詳細度で議論すればよいか問題となるが、この点に関しては定性的状態として同一視できるデータを、局所的に発生する現象と考える。

以上のことから、われわれは定量データから定性データ（局所的現象）を作成する。一般に定量データをトレンド・グラフとして表示すると、その増減の状態からいくつかの特徴点を定義することができる。もちろん、その特徴点は一意的ではないが、例えばデフォルトとして次のような2種類の特徴点を定義する。

(1) 定常状態の時点

(2) 増減の変化する点

この定義をもとに定量データに対するセグメンテーションを実行すると、次のように時間 t_i から t_{i+1} まではある一定の傾向を示しているデータ（増加中の状態）が得られる。例えば図2に示すように、定量データに対する特徴点から定性データが生成される。これらの定性データは、

$\langle Q d i | (v_m, v_n) (t_i, t_{i+1}) \rangle$

v_m ; 定量値, t_i ; 絶対時間
として管理される。

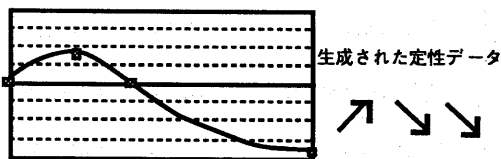


図2 定性データの例

2. 3 定量データに基づく概念的時間

定性データがもつ時間の情報から、因果を導出する際の時間を作ることができる。時間の管理を述べた研究^[11]では、各状態変数ごとに定義される履歴データをもとに時区間一値の対を処理する手法が述べられているが、本手法で定義する時間は定性データに基づいた、より具体的な時間を作成する。

トレンド・グラフ上で生成した定性データに

は、絶対時間軸上での時区間が対応している。全ての変数に対してこの時区間を一つの時間軸上でマージすると、絶対時間軸上に新たに時区間を生成することができる。例えば図3は、2変数の定性データから生成した時間 T_i を示し

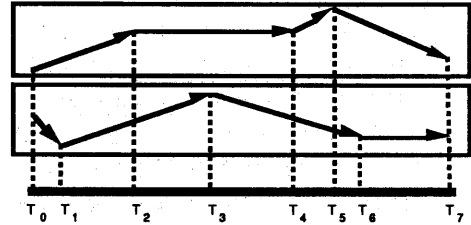


図3 概念的時間

ている。

この作成した時区間を「解釈のための概念的時間」と呼ぶ。また、定量データに内在する因果の導出とは、この概念的時間にそくした定性データ間の因果関係と考えることができる。

2. 4 定性モデル^[13]

対象に関する知識から定性モデルは構成される。従来、定性モデルとしては定性変数を含んだ定性微分方程式などの拘束条件式^[1, 12]に基づいて表現されてきた。また、定性変数としても系の挙動が質的に変化するところが、実数軸を意味的に分割する境界標としてとられてきた。しかし、大規模な系を定性微分方程式として表現することは、困難な点もあり、次のような部分的な知識から導かれる表現をここでは用いている。

例えば、原子力プラントの加圧器では「圧力が正常値から $1.8\text{kg/cm}^2\text{g}$ 以上上昇すると、その圧力を下げるためにスプレー弁が開く」、あるいは炉心において「制御棒の挿入によって、中性子束が減り、いったん炉の出力が低下する」などの知識がある。このような知識を定性的に記述するために、定性変数とその変数間の影響関係を次のように記述する。なお、対象システムは常態が存在するとして考えている。

(a) 定性変数の表現

定性変数は、常態時の値を「定常」として、その値からのずれで表現する。ただし、境界標として設定するものは、先ほどの例で挙げたようにその変数に関連して予めわかっている値を記号表現する。このようにして作成された定性

軸に基づいて、定性変数の定性値が表現される。また、定性値の変化方向を表現するのは、1階の定性微分値を「増加」、「安定」、「減少」で表現する。

(b) 影響関係の表現

影響関係の表現は、上記の定性軸上での定性値をもとに行なう。加圧器の例では、「圧力の定性値が<スプレー動作点より高>ならば、スプレー弁開度の定性値が<通常より大>になる」という影響が記述される。もちろん、スプレー弁から圧力側への影響も記述する。このように2変数間に考えられる影響を、挙動データとは無関係にまた部分的に表現する。影響の種類としては、次の3種類を考える。

- ・ Value Type
現在の定性値が不連続に変化して、ある値に変化する影響
- ・ Derivative Type
現在の定性微分値が、ある値に変化する影響
- ・ Mixed Type
Value TypeとDerivative Typeの混合した影響

以上述べた二つの表現を用いて、定性モデルを構築する。

2. 5 定性シミュレーション

定性シミュレーションは、定性変数間でそれぞれの状態に対応する影響関係を伝播し、定性変数の状態を変更しながら概念的時間を進める。つまり、シミュレーションの実行には、

- (1)概念的時間の進行（時間管理機構）と
- (2)定性変数の状態遷移の決定（状態遷移機構）の二つの側面がある。

(1)時間管理機構

定量データから生成した概念的時間は、次のように移り変わる。

$$T_0 \Rightarrow (T_0, T_1) \Rightarrow T_1 \Rightarrow (T_1, T_2) \dots$$

T_i ; i 番目の概念的時間

ここで、それぞれの時区間での定性変数の状態が、予め作成された定性データの制約を満足している場合に、その時区間での影響は全て伝播され、因果が導出されたと考える。時点から時区間への進行をP-transition、その逆をI-transitionと呼ぶ。

(2)状態遷移機構

影響関係を伝播された定性変数における処理は、次のように二つに分けられる。

(a) P-transitionの場合

Step1 影響に記述された内容に従って、状態遷移可能候補を求める。

Step2 定性データの制約を満足する場合には、その定性状態を書き換える。

もちろん、複数の影響が伝播されることもあるが、この方法ではそれぞれの影響を実行することによって、最終的に状態を決定することができる。ここで、Step1における状態遷移可能候補の導出は、伝播された影響関係の種類によって異なる。

- ・ Value Typeの影響が伝播された場合
定性変数の定性値を、影響関係に記述された定性値に変え、定性微分値を「安定」にする。
- ・ Derivative Type
定性変数の定性微分値を、影響関係に記述された定性微分値に変え、表1の状態遷移表に基づいて状態遷移可能候補を計算する。
- ・ Mixed Type
定性変数の定性値と定性微分値を、影響関係に記述されたそれぞれの値に変える。

なお、状態遷移表は従来の定性推論^{[1][2]}で用いられているものに若干変更を加えている。

$\langle lj, steady \rangle$	\longrightarrow	$\langle lj, steady \rangle$
$\langle lj, increase \rangle$		$\langle (lj\ lj+1), increase \rangle$
$\langle (lj\ lj+1), increase \rangle$		$\langle (lj\ lj+1), increase \rangle$
$\langle lj, decrease \rangle$		$\langle (lj-1\ lj), decrease \rangle$
$\langle (lj\ lj+1), decrease \rangle$		$\langle (lj\ lj+1), decrease \rangle$
$\langle (lj\ lj+1), steady \rangle$		$\langle (lj\ lj+1), steady \rangle$

表1 状態遷移表

(b) I-transitionの場合

これは、次の時点 T_i がその変数の定性データの集合から導かれたものか、そうでないかによって異なる。図4が示すようにシミュレーションが進行している時間 T_i と定性データの間には2種類の場合がある。Case1では、その定性データが示す値を含んだ定性軸上での定性値が厳密に計算されるが、Case2では、厳密な計算がされずにその定性データを含んだ定性

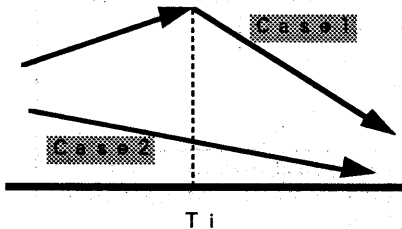


図4 状態遷移 (I-transition) での場合わけ

軸上での定性値に変更される。このことは、Case1では特徴点としての定性状態を重視するが、Case2ではある状態にあるという認識さえされていれば構わないという立場にたった処理である。もちろん、厳密な計算は実行可能であるが、挙動を予測するのではなく定性データに基づく因果を導き出すという立場から、必要不可欠な計算だけ実行する方式をとっている。また、定性微分値は時区間で値をそのまま用いる。

以上(1)と(2)の流れをまとめた流れが、図5および図6である。なお、定性状態が書き換えられた変数は、その時区間で状態が同定されたとしてJustifiedというマークを付ける。また、その時の影響関係を因果として記録する。

ただし、図5に示すように影響関係を伝播しても定性変数の状態に定性データの制約を満足しない場合が発生する可能性がある。これは、定性モデルに表現された影響関係の記述に完備性が保証されない点を考慮した処理である。このような導出できない因果に対する処理は、適用例を通して行なった結果をもとに後述する。

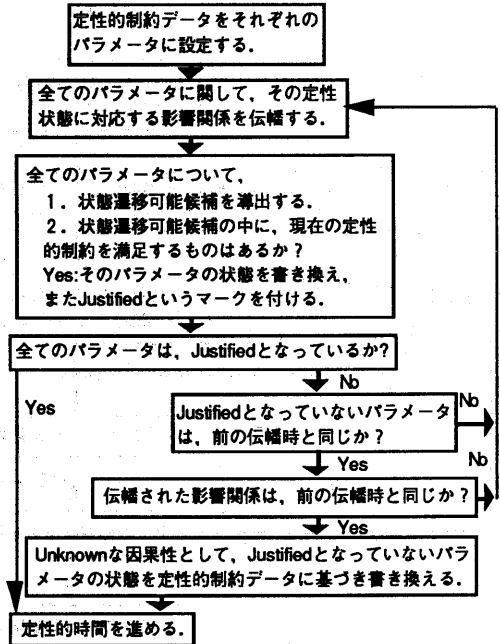


図5 定性シミュレーションの時間管理機構

3. 適用例

本節では、提案する手法を原子力プラントに適用した結果を述べる。

3.1 原子力プラント・モデル

原子力プラントを構成している機器内のプロセス変数は、蒸気流量や冷却水の温度から炉内の中性子束まで、量のオーダーが大きく異なっている。そして、これらの変数が複雑に相互作用して、いろいろな現象が発生する。これらをどの詳細度で捉えてモデル化し、因果を導出するかは重要な課題であるが、本報告ではある詳細度で捉えたモデルに対するプロセス変数の定量データが得られている状況から考える。

定量データは数値シミュレータから得たものであり、その中でモデル化された機器およびプロセス変数をもとに定性モデルを構築した。例えば、蒸気発生器では以下の定性変数を用意した。

- {一次冷却水の流入温度、一次冷却水の流出温度、蒸気発生器内の温度、蒸気発生量、水位、一次冷却水の平均温度}

図7に示す系統に対する定性変数の数は43である。ここで取り上げた現象は、タービンに接

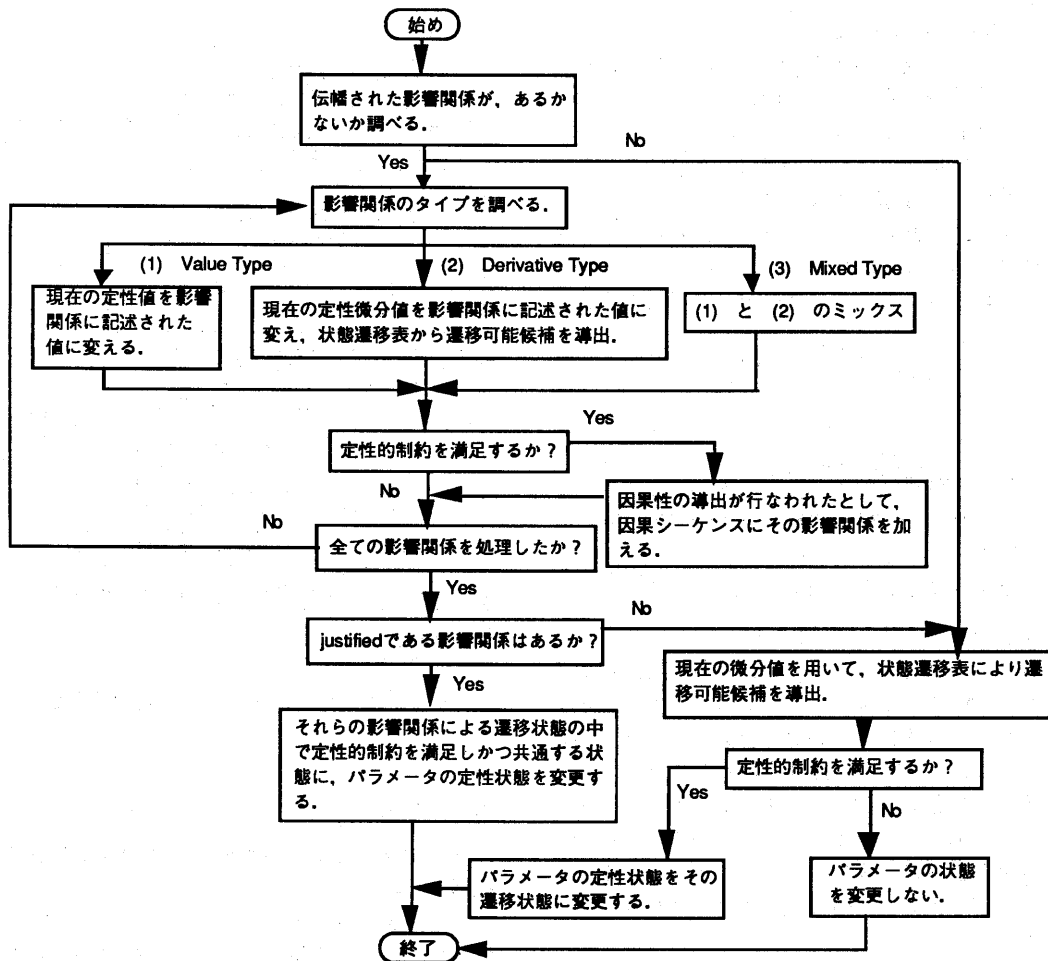


図6 定性変数の状態遷移機構

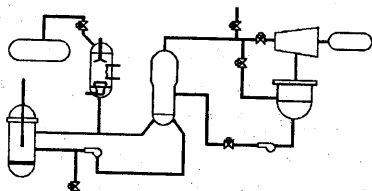


図7 プラントの系統図

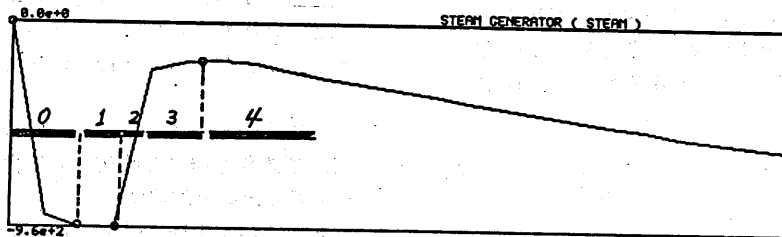


図8 蒸気発生量の定量データ

続した発電機の負荷が50%急激に減少する時の「50%の負荷遮断」と呼ぶものである。この時の特徴的な現象は、「蒸気発生器内の温度上昇」、「加圧器内の圧力上昇」、「蒸気ダンプ系の作動」、「炉心内への制御棒の挿入」、「加圧器内のスプレーとヒータの作動」などが挙げられる。

3.2 因果の導出結果

前節で述べた現象に対して定性シミュレーションを実行した。ここで図8に示される蒸気発生器内の蒸気発生量の変化を例に、その因果的説明を調べる。なお2.2で述べた特徴点をもとに図8の蒸気発生量に対する捉え方は、「定常状態から減少し、ある一定状態をとった後に再び増加し、そしてまた緩やかに減少しはじめる」となっている。全体としては図9に示すような因果の連鎖が導出される。

(1) 蒸気発生量が急減した因果

負荷の急減による蒸気加減弁の急閉から、二次系の蒸気フローが抑圧されたために発生量も急減。(図9のTime0)

(2) 蒸気発生量が一定した因果

蒸気発生器内の温度が一定のため、蒸気発生量は一定の傾向を示す。(図9のTime1)

(3) 蒸気発生量が増加した因果

蒸気発生量が通常より少ないので、器内の温度が上昇した結果、再び蒸気発生量が増加。(図9のTime2)

(4) 蒸気発生量が増加した因果

炉心の出力低下に伴う一次冷却水の温度降下から、蒸気発生器内の温度降下が引き起こされ、それに伴って蒸気発生量が再び減少し始める。(図9のTime4)

以上のように、図8の定量データにそくした因果を導出することができた。

3.3 導出できない因果

2.5節で述べた「導出できない因果」は、前節の例では発生していない。ところが、図8に示される蒸気発生量の定性データを、「定常状態から減少した後に増加し、そしてまた緩やかに減少しはじめる」という捉え方を偶然行ない、定性シミュレーションを実行した。この時に「減少から増加に変わる因果」が導出できな

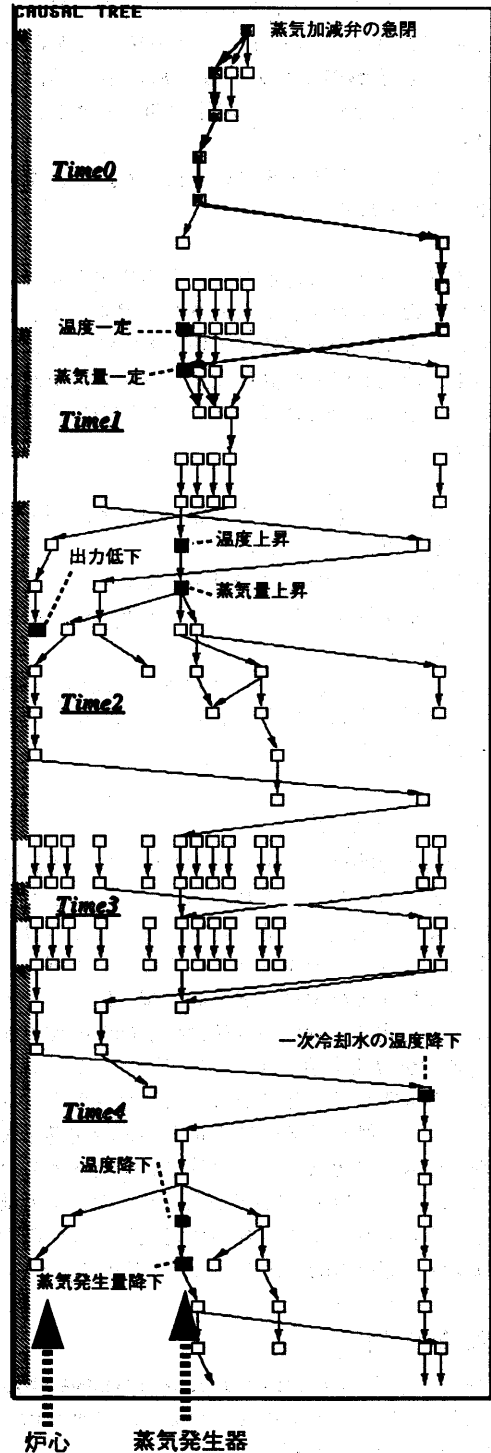


図9 因果シーケンスの例

ループに入り、これはUnknownな因果性として処理された。もちろん、その後「温度の上昇」による影響からの因果は導出されるが、Time1からTime2までの因果は導出されることはない。

このことが示す本手法の不都合な点は、次のようにまとめられる。

・定量データから定性データを生成する際に、特徴点の定義が適切なものでない場合、すなわち定性モデルの影響関係の記述と定性データの示す局所的影響との間に記述レベルの違いがあると、Unknownな因果性として処理が進む可能性がある。

現在、われわれはこの問題に対して、以下の処理を試みようとしている。

- (1) 定量データの特徴点を変更することで、定性的視点を変え、またそれに伴う概念的時間を変更する。
- (2) 定性モデルに表現された影響依存関係に、新たな関係を付加することで、局所的に定性モデルを修正する。

4. まとめ

大規模な物理システムの挙動に内在する因果を導出するために、定量データをもとにした概念的時間を生成し、その時間にそくした定性シミュレーションを実行する手法について提案した。本手法の特徴は、概念的時間を用いることによって定性変数間の局所的影響関係の記述から挙動全体の因果を導出する定性シミュレーションを実行する点である。又、定性シミュレーションを構成する時間管理機構と状態遷移管理機構は、定性モデルとは独立に構築されている。現在、本手法はLispとFlavorsを用いて大部分が実現されている。今後は定性モデル中の影響関係の記述機能を強化していく予定である。

参考文献

- [1] Kleer, J. D. and Brown, J. S. : A qualitative Physics Based on Confluences, Artificial Intelligence, Vol.24, pp.7-83 (1984)
- [2] Kleer, J. D. : How Circuits Work, Artificial Intelligence, Vol.24, pp.205-280 (1984)

[3] Kuipers, B. : Qualitative Simulation as Causal Explanation, IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics, Vol.SMC-17, No.3, pp.257-266 (1987)

[4] Lee, W. W. and Kuipers, B. : Non-Intersection of Trajectories in Qualitative Phase Space: A Global Constraint for Qualitative Simulation, Proc. of AAAI-88, pp.286-290 (1988)

[5] Struss, P. : Global Filters for Qualitative Behaviors, Proc. of AAAI-88, pp.275-279 (1988)

[6] Kuipers, B. and Chiu, C. : Taming Intractable Branching in Qualitative Simulation, Proc. of IJCAI-87, pp.1079-1085 (1987)

[7] Forbus, K. D. : Interpreting Measurements of Physical Systems, Proc. of AAAI-86, pp.113-117 (1986)

[8] DeCoste, D. : Dynamic Across-Time Measurement Interpretation, Proc. of AAAI-90, pp.373-379 (1990)

[9] Kuipers, B. : Commonsense Reasoning about Causality: Deriving Behavior from Structure, Artificial Intelligence, Vol.24, pp.169-204 (1984)

[10] 溝口, 古川, 安西 共編 : 定性推論 第2章, pp.11-76, 共立出版 (1989)

[11] Williams, B. C. : Doing Time: Putting Qualitative Reasoning on Firmer Ground, Proc. of AAAI-86, pp.105-112 (1986)

[12] Kuipers, B. : Qualitative Simulation, Artificial Intelligence, Vol.29, pp.289-338 (1986)

[13] 秋吉, 西田 : 大規模システムの挙動理解のための階層型定性シミュレーション, 情報処理学会論文誌, Vol.32, No.1 (掲載予定)