

# 定性推論における時間分解能を規定する因果的時間オントロジー

A Causal Time Ontology for Time Resolution of Qualitative Reasoning

來村 徳信\*, 池田 満, 溝口 理一郎

Yoshinobu Kitamura, Mitsuru Ikeda and Riichiro Mizoguchi

大阪大学 産業科学研究所

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

**Abstract :** Aiming at explicit conceptualization of time-intervals among causal relations generated by qualitative reasoning systems, this article proposes a causal time ontology which defines conceptual primitives for definition of the time-interval concepts in qualitative models, called *time-interval conceptual primitives*. Each of them associated with a modeling technique represents a temporal granularity and/or an ontological viewpoint. They allow us to specify temporal performance of the reasoning engines, called causal time resolutions.

## 1 はじめに

人間のナイーブな物理的対象の理解を実現することを目標のひとつとする定性推論 [2, 3, 4, 6, 8, 9, 11, 12] にとって, 理解において大きな役割を果たしている因果関係を導出することは重要なサブタスクである. 因果関係の理解には原因と結果の間の時間遅れ (時区間) の認識が必須であるため, 推論システムが導出した因果関係における時区間が「どのような長さなのか」「他の時区間とどう異なるのか」といった時区間の意味と関係を説明する必要がある. その答えは時区間のインスタンス固有の長さではなく, 時区間の分類 (クラス) を表す概念に基づいているべきである. さらに, その概念は対象物理世界における概念に対応することが望まれる. 例えば, 「ある因果関係  $r_1$  の時区間  $t_1$  は隣接部品の接続に対応しており, 異なる因果関係  $r_2$  の離れた部品間の影響の伝播に対応する時区間  $t_2$  よりも短い」といった説明が望まれる. このように, 時区間の分類とその概念化は時区間の意味を与えるとともに, 他の時区間との概念的な比較を可能にする.

従来の定性推論 (例えば, QSIM[8]) では時間の長さは数学的な区間と瞬間の 2 種類に分類されているだけであり, 区間の長さは分類されていない. また, Allen は一般的な時間を表す表現プリミティブを同定し, その間の関係を同定している [1]. 物理的因果連鎖における時区間というコンテキストのもとでさらに豊かな時区間概念を同定することが望まれる.

本稿では, 因果性を支える時間概念の明確化を目指して, 定性推論における時区間概念を定義するための「因果的時間オントロジー」を提案する. オントロジーとは概念化の明示的な規約であり, 知識ベースシステムの設計時の

仮定や問題解決の能力を表現することができる [10]. 本オントロジーは定性推論システムの時間に関する能力である「因果的時間分解能」を明示することができる.

まず次節において基本的方針について述べ, 次に時区間概念の例を示す. 4 節で時区間概念を表現するプリミティブを定義するオントロジーを示す. 本オントロジーは公理集合を用いた形式的記述に向けた概念の把握が終了した段階であり, 本稿には概念の意味の厳密な形式的記述は含まれない.

## 2 時区間の概念化とその根拠

因果連鎖における時区間を概念化するためには, 多様なモデル表現形式が暗に意味している時間概念を数え上げる必要がある. 例えば, 対象を部品という概念で捉えたモデル化は部品の間における認知的な時間遅れを暗に意味しており, 異なる部品の変化の間にはそれに対応した時区間が生じる. このようなモデル化に伴う時間概念は, モデル記述者が目的や興味に従って対象をどのように捉えたかに依存しており, 記述意図を反映している.

前述の部品概念に基づいて生成された時区間は, 部品の接続の認識にその根拠をおくことができる. しかし, 定性推論システムによって生成された時区間は必ずしも物理世界における根拠があるとは限らない. 数学的モデルから生成された時区間の物理世界における根拠は明確ではない. 例えば, 平衡式で記述された連立方程式を代入法で解いた場合には, その代入の順序は単に推論エンジンの操作の順序であって, 物理世界における現象には対応していない.

時区間の根拠には「区間的」と「順序的」の 2 つの観点がある. 区間的根拠は時区間の長さ (時間遅れ) 自体の物理的根拠を表し, 順序的根拠はその時区間によって分割され順序付けられたイベント間の順序関係の物理的根拠を表す.

\* 〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8 番 1 号, Tel:06-879-8416, Fax:06-879-2123, E-mail:kita@ei.sanken.osaka-u.ac.jp

表 1: 流体系の因果連鎖における時区間概念

$T1$ :部品内時区間：部品内の影響の伝播にかかる時間
$T2$ :大域的同時時区間：大域的に同時に変化する時間
$T3$ :部品間時区間：隣り合う部品間の影響の伝播にかかる時間
$T4$ :大域的時区間：大域的な変化にかかる時間
$T5$ :積分時区間：積分によって変化するのにかかる時間
$T6$ :部分的平衡時区間：系の一部分が平衡状態に到達するまでの時間
$T7$ :完全平衡時区間：系全体が平衡状態に到達するまでの時間

さらに、同じモデルを与えたとしても推論システムによって生成される因果連鎖（とその時間的意味）は異なる。これは、推論システムが認識できる時区間の細さがシステムによって異なっていることで説明できる。ある推論システムが認識できる時区間の記述をそのシステムの「時間分解能」と呼ぶ。例えば、Iwasaki らによる因果的順序付け理論 [3] は Kuipers による QSIM[8] より高い時間分解能を持ち、QSIM では導出できないより詳細な（微小な時間における）因果連鎖を導出することができる。このような時間分解能を明示するためには、時区間の概念化が必要である。

本稿で述べる時間オントロジーは、モデルが表しうる時区間概念を表現するための概念プリミティブを定義する。このプリミティブを組み合わせることで、モデルと因果連鎖における時区間の意味を概念的に表現できるとともに、推論システムの時間分解能を記述することができる。また、人間のフィードバックの認識はループに沿った時間遅れの認識に依存しているため、6 章で述べるようにフィードバックの解析にも役立つ。

### 3 時区間概念の例

筆者らは流体系プラントにおける挙動のナイーブな因果連鎖を生成することを目指して、定性推論システムの開発を行ってきた。その過程で、流体の非圧縮性を仮定した上で部品に着目すると、そこでは表 1 に示すような 7 つの時区間概念が存在することが明らかになった [6]。本稿で明確化を目指す時区間概念の一例として、紹介する。

まず部品オントロジーに基づくことから、隣り合う部品間の影響の伝播に時区間（ $T3$ :部品間時区間）が存在し、 $T1$ :部品内時区間と区別される。 $T2$ : 大域的同時時区間は、非圧縮性を仮定した場合の流体の流量の変化のように、異なる部品の変数の値が同時に変化する場合にかかる時間を表現する。一方、 $T4$ :大域的時区間は、大域的熱バランスによる温度の変化のような大域的現象にかかる時間を表す。さらに、積分による変化を表す  $T5$ :積分時区間と、平衡状態への遷移にかかる時間として  $T6$ 、 $T7$  が認識される。これらの時区間概念が表す区間の長さには、 $T1 < T2 < T3 \dots$  という順序関係がある。

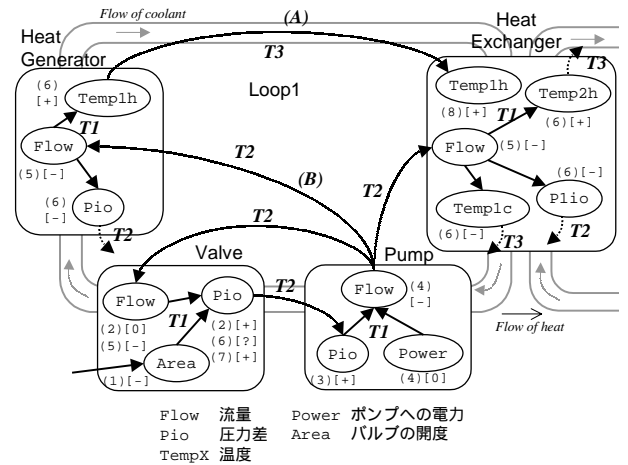


図 1: 時区間概念を伴った因果連鎖の例

これらの時区間概念を用いて、因果連鎖の時区間を説明することができる。図 1 は発電プラントの熱輸送系においてバルブが少し閉まった場合の因果連鎖の一部である。定性値に付けられた番号は変数の定性値の変化というイベントの時間的順序を示している。図の (A) の時区間は隣り合う部品間の温度の伝播 ( $T3$ ) を表しており、流量の変化を表す (B) の時区間 ( $T2$ ) と概念的に異なっており、また後者の方が短いことが分かる。

このように因果連鎖における時区間はさまざまな時区間概念に対応しており、時区間概念の明確化によって、時区間の概念的な識別と長さの比較が可能になる。これは、時区間のインスタンス固有の長さの比較ではなく、クラスとしてまったく異なる種類の長さを表していることに基づいている。また、長さの比較に基づいて、イベントの前後関係を判断することが可能になる。

表 1 の時区間概念は非圧縮流体の振舞いを説明するが、その意味の記述は厳密ではなく、順序関係が成り立つ理由も明確ではない。時区間概念の意味を明確に定義するためには、時区間概念を構成する概念プリミティブを同定する必要がある。次節では、時区間概念を表現する空間の軸を同定し、その表現プリミティブを定義する。

### 4 因果的時間オントロジー

ある時区間概念は表 2 に示す 4 つの軸（ディメンジョン。a, b, c, d の記号で示す）を用いた 4 次元上の点として表現される。それぞれの軸は 2 ~ 4 の区分を持ち、それらが時区間概念の表現プリミティブ（時区間概念プリミティブと呼ぶ）となる。時区間概念プリミティブを  $T_{x\#}$  の形式で表す。ここで、 $x$  は軸の記号であり、 $\#$  はその軸の中で長さが小さいものからつけた番号である。

因果連鎖はモデルから生成されるので、その時間的意味はモデルに還元される。そのため、4 つの軸はそれぞれモ

表 2: 時区間概念のディメンジョンとプリミティブ

- (a) 時間変量モデル化  
 $Ta1$ : 相互依存的時区間: 本質的連立式集合内の影響の伝播  
 $Ta2$ : 依存的時区間: 本質的連立式集合間の影響の伝播  
 $Ta3$ : 積分時区間: 積分にかかる時間  
 $Ta4$ : 平衡時区間: 平衡状態へ到達するまでの時間
- (b) 時定数定量化  
 $Tb1$ : 早い現象の時区間: 早い系の平衡の達成までの時間  
 $Tb2$ : 遅い現象の時区間: 遅い系の平衡の達成までの時間
- (c) 部品構造化  
 $Tc1$ : 部品内時区間: 部品内の影響の伝播にかかる時間  
 $Tc2$ : 部品間時区間: 部品間の影響の伝播にかかる時間  
 $Tc3$ : 大域的時区間: 大域的影響にかかる時間  
 $Tc4$ : 系全体時区間: 系全体の振舞いに関する時間
- (d) 期間限定化  
 $Td1$ : 初期反応時区間: ある時区間概念における最初の変化  
 $Td2$ : 中間過渡期区時間: ある時区間概念における途中の変化  
 $Td3$ : 最終反応時区間: ある時区間概念における最後の変化

デルの表現技法を表している。ここではプリミティブの定義の概要を説明する。詳細な定義が [7] にある。

(a) 時間変量モデル化では、現象の時間的特質はモデルの数学的側面によって直接的に表現される。 $Ta1$ :相互依存的時区間はある本質的連立式集合<sup>1</sup>の変数の値が決定されるまでの時間である。 $Ta2$ : 依存的時区間は、本質的連立式集合の間の変化によって、積分を含まない連立式集合の変数の値が充足するまでの時間を表す。 $Ta3$ :積分時区間は微小な変化の蓄積によって値が変化する(積分)のにかかる時間であり、 $Ta4$ :平衡時区間はある変数集合の平衡状態間の時間である。

ここでは、時区間の物理的意味は数学的意味に還元されており、明示的ではない。数学的には、 $Ta2$  が変数間の決定(依存)関係を表し、 $Ta3$  は積分による微小変化の集積を意味している。 $Ta1$  における因果順序には、通常、数学的意味はない。

(b) 時定数定量化は現象の時定数のスケールの違いを表現するために、系を平衡状態へ到達するのにかかる時間  $Ta4$  がまったく異なる複数の集合に分割する。この推論方式は推論空間の分離によって推論の効率が上がるというメリットがある。

(c) 部品構造化は、デバイス・オントロジー [2] に基づいて、対象の部品構造に従ってモデルを構造化する。 $Tc1$ : 部品内時区間は部品内の変数間の影響の伝播を表す。 $Tc2$ : 部品間時区間は隣接した部品の間で行われる影響の伝播を表す。 $Tc3$ :大域的時区間は大域的構造の間の影響の授受を表す。 $Tc4$ :系全体時区間はシステム全体が平衡状態に到達したことを表す。この分類内での時区間概念の順序関係は構造的大きさを反映している。

<sup>1</sup>代入によって解けない制約式集合のことを言う [2]。

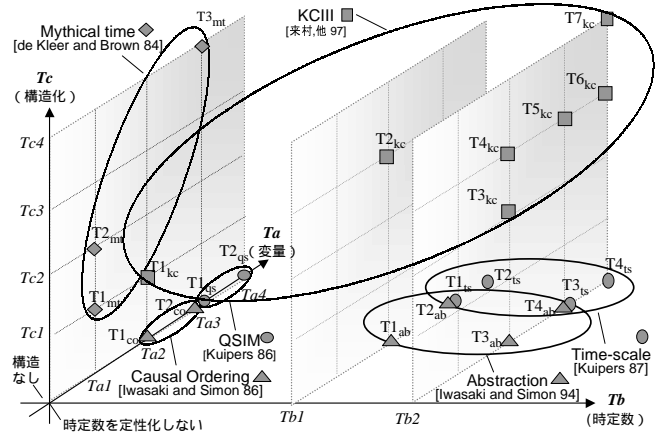


図 2: 定性推論システムの時区間概念

$Tc2, Tc3$  は部品構造に基づいた区間的根拠を持つが、トポロジー情報だけでは順序的根拠を与えることはできない。一方、 $Tc1$  は区間的・順序的のどちらの意味でも物理的根拠がない。このモデル化手法を選択する意図としては、機能を果たしている部品や構造にそって流れる媒体を反映した因果連鎖を導出したいということがある。

(d) 期間限定化は初期応答といった物理現象の特定の時間期間だけに注目してその部分だけを扱うためのモデル化である。ここでは、時区間の長さではなく、時区間の数が制約される。例えば、QUAF [12] は  $Td1$  における初期応答と、 $Td3$  における最終状態のみを推論し、 $Td2$  における中間過渡期は扱っていない。この手法は曖昧さの抑制と計算量の削減に貢献する。

## 5 因果的時間分解能

時区間概念プリミティブを用いて、従来の定性推論システムが扱う時区間概念を定義することができる。図 2は時区間概念のディメンジョン a,b,c を用いて、各システムが扱っている時区間概念を点として表現したものである。例えば、QSIM[8] は  $Ta3, Ta4$  における時間のみを扱っている。数学的微分方程式だけを用いて、制約式による値の決定に Generate&Test の一種を用いており、 $Ta3$  への過渡期における因果順序は生成されない。QSIM の時間は  $Ta3$  に対応する。Iwasaki らによる因果的順序づけ理論 [3] は、より細かい  $Ta2$  における因果連鎖を導出する。これらにおいては時定数の定量化 (b) や部品に基づく構造化 (c) は行われていない。

一方、de Kleer らの推論方式 [2] は部品の概念に基づいて、より細かい  $Ta1$  を扱っている ([2] では「架空の時間」と呼ばれている)。したがって、その時区間概念  $T1_{mt}, T2_{mt}$  (図中では  $T1_{mt}, T2_{mt}$  で示している) は  $Ta1$  と  $Tc1, Tc2$  の組み合わせで定義される。前述したように、 $Tc2$  が表す時区間概念には部品の接続関係のトポロジー情報だけでは区間的根拠がないため、de Kleer らは物理的直感を表す一般的な

ヒューリスティックスを用意している．ヒューリスティックスはありえる因果関係から物理的に意味を持ち得るものを選ぶ役割を果たしている．

時間スケールの枠組み [9] では  $Tb$  で表される時定数の違いを扱っている．また，[4] でも  $Tb$  に対応する 2 つの抽象化の方法が議論されている．

さきほど述べた我々のシステムの 7 つの時区間概念（図では 示している）も明確に定義することができる．例えば， $T2_{kc}$  は  $Ta2, Tb1, Tc3$  の組み合わせとして定義されており，平衡式で表現された早い大域的現象にかかる時間であることがわかる．また， $T2 < T3$  が時定数の違いに基づくものであることが明確になっている．

## 6 時区間概念に基づく推論

### 6.1 基本的枠組み

時区間概念に基づく推論は複数の時間軸上での遷移を繰り返すプロセスとして捉えることができ，時区間概念プリミティブは長さの順序関係において隣接する時区間概念プリミティブへの遷移条件で定義される．このような枠組みに基づき，複数の時区間概念を扱う一般的な推論プロセスを定義した [7]．時区間概念プリミティブを組み合わせることで多様な時区間概念を定義し，それに基づいた因果関係を導出することができる．また，従来の定性推論システムの基本的な推論アルゴリズムを時区間概念の定義とこの一般的な推論プロセスによって説明することができる．

時区間概念に基づく推論の結果として，時区間ごとに対応する時区間概念が同定される．つまり，因果関係における時区間の長さの違いを明示することができる．また，因果関係がないイベント間に時間的順序関係を付けることができる場合がある．イベント  $e_1, e_2$  の共通の先祖（最後に分岐したイベント）を  $e_0$  としたときに  $e_0$  と  $e_1$  の間の因果連鎖の時区間が時区間概念  $T_1$  で表され， $e_0$  と  $e_2$  のそれが  $T_2$  で表されるとき， $T_1 < T_2$  であれば  $e_1$  の方が  $e_2$  より先に起こったと言える．これは， $T_1$  と  $T_2$  の長さがまったく異なっており，時区間  $t_1, t_2$  について  $\forall t_1 \in T_1, \forall t_2 \in T_2, t_1 < t_2$  and  $\sum t_1 < \sum t_2$  が成り立つことに基づいている．

### 6.2 フィードバックの解析

人間のフィードバックの認識はそのループの一周にかかる時間遅れに依存している．例えば，あるフィードバックの時間遅れが非常に短く，興味のある時区間概念より小さい場合は，値の変化を追う必要がない．したがって，フィードバックの経路にそった時区間を表す  $T$  が事前に決定された閾値  $T_s$  より小さかった場合，準フィードバックとして扱うことができる．つまり，フィードバック後の新しい値が従来の物と異なる場合は，影響は無視される．これは，「自分の値を瞬間的に覆すフィードバックは存在しない」というヒューリスティックスに基づいている（さらに詳しい議論が [7] にある）

我々の推論システム [6] は，表 1 に示す 7 つの時区間概念に基づいて，このようなフィードバックの解析を含む因果導出を行うことができる．図 1 はその例であり，流体のループ全体での総圧力差が曖昧になっている（イベント番号 6）が，フィードバックループに沿った時間差が  $T2$  であることから瞬間的なフィードバックであることが分かり，ヒューリスティックスに基づいて曖昧さを解消することができる．

## 7 まとめ

本稿では，定性推論における時区間概念の表現プリミティブを与える因果的時間オントロジーを提案した．定性モデルとそれから生成される時区間の意味とその根拠を概念的に明確にできるとともに，従来の推論システムの能力を明確に特徴づけることができることを示した．また，プリミティブを組み合わせで定義される時区間概念に基づく推論について述べた．

本稿では議論の対象を連続な変化に限った．しかしながら，[5, 11] など議論されているように不連続なモデルが非常に早い現象を表すために用いられるときがある．そのような不連続なモデルを用いるモデル化手法については今後の検討課題としたい．

## 参考文献

- [1] J. F. Allen. Towards a general theory of action and time. *Artificial Intelligence*, 23:123-154, 1984.
- [2] J. de Kleer and J. S. Brown. A qualitative physics based on confluences. *Artificial Intelligence*, 24:7-83, 1984.
- [3] Y. Iwasaki and H. A. Simon. Causality in device behavior. *Artificial Intelligence*, 29:3-32, 1986.
- [4] Y. Iwasaki and H. A. Simon. Causality and model abstraction. *Artificial Intelligence*, 67:143-194, 1994.
- [5] Y. Iwasaki et al. Modeling time in hybrid systems: how fast is “instantaneous”? *Proc. of IJCAI-95*, pages 1773-1780, 1995.
- [6] 来村徳信 他. モデルに基づく問題解決のための流体と時間のオントロジーの構築とその評価. 人工知能学会会誌, Vol.12, No.1, pp.132-143, 1997
- [7] Y. Kitamura, M. Ikeda, and R. Mizoguchi. A Causal Time Ontology for Qualitative Reasoning, *Proc. of IJCAI-97*, pp.501-506, 1997.
- [8] B. J. Kuipers. Qualitative simulation. *Artificial Intelligence*, 29:289-338, 1986.
- [9] B. J. Kuipers. Abstraction by time scale in qualitative simulation. In *Proc. of AAAI-87*, 621-625, 1987.
- [10] 溝口理一郎，池田満：オントロジー工学序説，人工知能学会誌，Vol.12, No.4, pp.559-569 (1997).
- [11] T. Nishida and S. Doshita. Reasoning about discontinuous change. *Proc. of AAAI-87*, pages 643-648, 1987.
- [12] P. Rose and M. A. Kramer. Qualitative analysis of causal feedback. *Proc. of AAAI-91*, pages 817- 823, 1991.