因果とは — オントロジー工学的解答

What Is Causation? – A Solution from Ontology Engineering

溝口 理一郎 北陸先端科学技術大学院大学
 Riichiro Mizoguchi Japan Advanced Institute of Science and Technology
mizo@jaist.ac.jp, <http://www.jaist.ac.jp/ks/english/portfolio/mizoguchi/>

Keywords: causation, direct causation, ontology, ontology engineering, functional account

Summary

From the standpoint of Applied Ontology, we have challenged the problem of causality on the premise that it is real. As a result, it was shown in the former paper the following three items: (1) causation can be mapped to function, and hence it is possible to talk about causation in terms of function, (2) *Cause* can be divided into four subfunctions such as *Achieve*, *Prevent*, *Allow* and *Disallow* by introducing two dimensions of direct/indirect and positive/negative, and (3) using *Achieve* the other three subfunctions are defined and the essence of causality lies in *Achieve*. However, elucidation of *Achieve* itself was left incomplete. In this paper, we first restructure the results obtained in the former paper and summarize it so that the results will become clearer than the original paper. Then, the nature of *Achieve* is revealed to give a world first solution to the problem of what causation is.

1. はじめに

原因とは、因果とは何かという問いは2千年間哲学者を悩ましてきた未解決の問題である[Losee 11, Mumford 13, 鈴木 14]. 哲学において議論される因果問題は、そもそも因果とは実世界に存在するのか、或いは人間が現象を理解するために使う認知的方便に過ぎないのかという根本的な問いが主要な論点の一つになっている。しかし、筆者らはそのような純哲学的な議論の重要性は理解しつつ、自然科学ではこの世にある事象は因果に従っているという前提の上で研究していることを考えて、因果の存在は **Real** であることを前提として議論を進めてきた。その結果、未完ではあるが最初の一步を踏み出すことができた[Toyoshima 19].

その理論の本質は因果が機能に写像可能であることを示して、因果を機能語彙で語ることが可能にしたことにある。そして、直接/間接と Positive/Negative の二つの次元を導入することにより、*Cause* を *Achieve*, *Prevent*, *Allow* and *Disallow* の四つの機能に分割できることを示した。更に *Achieve* を用いて他の三つを定義できることを示し、因果の本質は直接かつ Positive の *Achieve* にあることを導いた。その結果 Dispositional account of causation [Röhl 11]と Counterfactual 理論[CFT]の長所を併せ持ち、いずれの欠点も持たない因果理論を構築することができた。しかし、*Achieve* が何であるかの検討は未完に終わっていた。

本論文では、*Achieve* の説明を完了するための準備と

して[Toyoshima 19]で得られた成果の本質を浮き彫りにする形で要約をした後、*Achieve* の本性を解明して、世界初の因果理論の構築を目指す。議論の進め方はデバイスオントロジー[來村 02a]に基づいており、一見工学的であるように見えるが、工学的であるからと言って議論が浅いわけではない。因果の問題は **Dynamism** を本性として持つ現象とその連鎖を扱うが、そこに工学的な視点を導入することによって、これまでの議論にない新しい視点から直接でかつ **Positive** な因果だけに着目して因果の本質をあぶり出すことが可能になったと考える。その最大の効果はデバイスオントロジーの再帰的適用と最小粒度での振る舞いを議論に組み入れることができたことをあげることができる。それによって *Achieve* の本性を解明して Functional account of causation 理論を完成させる。

2. 諸準備

2.1 関連研究と立ち位置の表明

本論文で考察する問題を明確にしておきたい。因果とは何かという問いは存在論的に最も深い課題の一つであり、因果は人間が現象を理解する際になくてはならない本質的な概念でもある。因果は **Real** なのかそうでないのかという根本問題に加えて、因果の定義に関して、以下のような定義が与えられてきた[Losee 11].

$C \Rightarrow E$ is a causal relation if and only if

- (1) E-type events regularly follow C-type events.
- (2) E is counterfactually dependent on C.

- (3) There is a spatiotemporally continuous transfer of energy or momentum from C to E.
- (4) C raises the probability of E.
- (5) By manipulating C, we could bring about changes in E.
- (6) etc.

初めの二つの理論は因果は Real ではないという主張である。最初は Hume が提唱した理論であり、この世には因果はなく、あるのは出来事が単に規則的に並んでいるだけだという理論である。(2) は $C \Rightarrow E$ の因果の説明を反事実的条件文で説明とするという考えである。強力な理論ではあるが、2.4 節で論じるように他と同様問題をはらんでいる。三つ目は原因から結果の方向にエネルギーや運動量が連続的に移動があるという常識的にも受け入れやすい理論である。しかし、2.5 節で論じる Negative causation は説明できない。次の二つは、結果事象に何らかの影響を与えるものとして原因を捉えるという意味では同列であり、因果関係の同定には使えそうではあるが因果が何であるかの説明としては不十分である。

筆者の因果研究の目的は因果とは何かを解明することであり、特に因果というものの意味を究明したいと考えている。しかしながら、哲学における因果理論には初めの二つに代表されるように、因果は Real ではないという理論があり、AI 研究者が考える因果の意味を直接説明する理論は多くない。最後の三つは筆者の考える方向にある理論ではあるが、ある $C \Rightarrow E$ があったときに、例えば C を操作すると E に影響があることという定義は因果同定においては有効であるとしても、それで因果がわかったということにはならない。

筆者は因果の直接的な「意味」の解明を目指している。そのゴールは、研究が完了したときには因果が何であるかが分ることである。実際、因果の本質は機能の最上位概念である Achieve にあることを示した。この主張は、因果を機能語彙で語ることができることに保証され、因果が Achieve, Prevent, Allow and Disallow の 4 つの機能に分割されること、そして、Achieve を用いて他の三つを定義できることによって支持されている。そして、最後に Achieve が何であるかを分析しその本質を解明することで因果の意味が明らかになる。

2.2 前提事項

本稿で因果を議論するにあたって前提としている事項を整理しておく。

前提 1: 因果は Real であり、単なる人間の認知的便法ではない。

前提 2: 認識論的因果は除外する。

認識論的な因果とは、実際に起こった現象の原因を同定する問題や、それが引き起こす結果現象の予測などが含まれる。

前提 3: 人間的な要素を原因とする因果も除外する(例えば“事故の原因は運転手の不注意である”)。

前提 4: 古典力学で説明できる事象に限定する。

従って、因果関係は非対称的であると仮定する。すなわち、 $C_1 \Rightarrow E_1$ があれば $E_1 \Rightarrow C_1$ はないとする¹。

前提 5: Type レベルではなく、個物レベルの因果を対象とする。すなわち、“喫煙は癌の原因”のような議論は除外する。具体的には、ある事象列 C と E があるとき、「C が E を Cause した」と実例を取り上げたときにその「Cause した」とはいかなるものであるかを議論する。

2.3 問題設定

筆者がオントロジー工学の理論的側面を研究するに当たって常に気をつけてきたことに「問題の適切な設定」ということがある。これは極めて大切であるがあまりにも自明なためないがしろにされているのではないかと危惧している。というのはいくつかの分野で間違っただけを論じているが故に議論が混乱していることが少なからず見受けられるからである。機能に関して述べると、「機能とは何か?」という問題の議論が、任意の個物に対して、「それが持つ機能は何か?」という問題、言い換えると個物の機能同定問題にすり替わっていることがしばしばある。しかし、筆者に言わせるとそれは不適切な問いというべきものである。なぜなら、機能は本質的に Context に依存するものなので、個物単独ではそれが持つ機能を論じることができないからである。機能とは何かの議論は、個物の機能同定問題とは異なる問題である。機能の具体例を正しく議論するのであれば、問うべきことは「この個物がこの Context にある時に発揮する機能は何か?」でなければならない。あらゆる人工物は設計者がその使用の Context を想定して作ったもので、それ自体が適切な Context を引きずっているから暗黙にその Context が想定される。あるいは設計者の意図と別の Context で使用された場合でも、その使用者が意図する使用 Context は明示されるので、Context が何かという問題は生じない。一方、生体の機能を取り上げると、例えば心臓の機能が Context を明示しなくても議論できるのは、どの心臓も必ず循環器系を Context として機能発揮をしているからであり、人体という全体物の機能の議論が困難であるのは、それが置かれる Context は無数にあり、意味のある Context を特定できないからであると説明することができる。このように、機能の議論においては Context の存在は場合に応じて見え隠れするので、機能の Context 依存性がぼやけることによって問題とする問い自体が揺らいでしまう。そして、面白いことに因果に関しても同様のことをいうことができる。

実は、上の五つの前提の中の最後の前提が問いの適切

¹ 本稿では $C \Rightarrow E$ の記法は C が Cause を、E は Event ではなく Effect を指す。原因の時間先行性は陽には仮定しない。

さに大きく関わっている。実際、Type レベルの議論も多く見られるのであるが、喫煙者全員が癌になるわけではないので、喫煙が癌を引き起こす確率が重要という議論になり、因果に確率が導入されてしまう。これは一見因果理解に資するように見られるため排除することができず議論を混乱させてきた。しかし、前提 5 を見ればわかるように、因果とは何かを存在論的に理解することが真のゴールであれば、確率の導入は不要（不適切）であることがわかる。起こってしまった因果を対象にするからである²。Type レベルの因果を議論すると認識論的な話が紛れ込むことを排除できなくなるので、議論が不必要に困難になっている。起こってしまった因果を対象にしても「因果とは何か」、「ある出来事がある出来事を Cause したとはいかなる意味なのか」を問う、因果の存在論的理解は何の制約も受けないし、因果の本質は何も失われない。我々の議論が成功したとするならば、それはこの問題設定に負うところが大きい。

2.4 二つの典型的な因果理論

既存の因果理論の代表例を二つ上げて論評する。

§ Dispositional account of causation[Röhl 11]

まず Causal efficacy（因果の要因）の問題に触れておく。因果を生み出す源の究明は魅力ある課題であり、その方向の研究として因果の重要な要因に Disposition があると主張する理論がある[加地 18, Mumford 11]。Disposition は日本語では傾向的性質というべきもので、ガラスコップの「割れやすさ」が代表的な例として用いられる。ガラスコップは一定以上の強さの Impact を Trigger として割れるが、この割れるという現象が割れやすさという傾向的性質の実現と言われる。そしてその理論ではこの Disposition がガラスコップに内在する Causal efficacy であると主張する。詳細は[Mumford 11] 参照。Disposition を因果の源であるという理論はある意味自然な発想である。というのは、Disposition が発現することによって特定の現象が生起するが、Disposition はそもそもその現象が生起する源であるからである。言い換えると、Disposition は因果よりもっと深い、現象自体が現れるための源であるとも言える。このことを考えれば、因果を説明する理論としては正当な理論であると言えるそうであるが、残念なことに、2.5 節に述べる Negative causation には適用できないという大きな問題がある。例えば、「電源コードが切れたので扇風機が止まった」という明白な因果を説明することができない。

§ Counterfactual theory of causation[CFT]

常識とも整合性がある最も有名な理論として Counterfactual 理論がある。すでに述べたようにこの理

論は因果が Real ではないことを前提にはしているが、有名でありかつ直感的にも理解しやすいので、ここで簡単に論評する。それは非常に単純で、

■ $C \Rightarrow E$ というのは

もし、C が起こらなければ E も起こらなかったということである

という理論である。具体例としては

■ 押した $\Rightarrow$ 動いた（押したことが原因で動いた）

というのは、もし、押さなかったら 動かなかったであろうからである。

となる。実際、科学者の多くは因果をこのように理解していると考えられる。しかし、この理論は、他の理論も同様であるが、いくつか問題をはらんでいる。

問題点 1: 押さなかったので動かなかった世界（可能世界）を想定する必要があるが、可能世界の意味論と現実世界との関連性の議論という新たな問題を導入してしまうこと。

可能世界という考えは論理的にはわからなくないが、現実存在するこの世界とは異なり仮想的なものであるため、科学者としては受け入れがたいという問題がある。

問題点 2: 「大統領が私の庭の木に水をやらなかったから木が枯れた」という馬鹿げたことが因果と認定されてしまう。なぜなら、「大統領が水をやってくれたら庭の木は枯れなかった」ということが真であるからである。

この問題は理論の発表当初より指摘されてきたもので、この困難さを解消するために可能世界と現実世界との類似性の問題、さらにはコンテキストの導入など様々な改善案が議論されているが[Collins 14]、完全な解決には至っていない。

2.5 Negative causation

Negative causation には Causation of absence と Causation by absence の 2 種類がある。前者の例として

(1) 鍵を掛けたので泥棒が入らなかった
があり、後者の例としては

(2) 鍵を掛けなかったので泥棒が入った
がある。存在論というまでもなく、存在している物事を対象に議論が進められるが、起こっていない出来事は存在していないわけで、存在していないことを関係項として因果を語ることは無意味であることになる。しかしながら、上の例からわかるように、起こっていないことを関係項に用いた因果の例は日常ではごく普通であり、これを説明できない因果理論は実用的には意味をなさない。だからといって、存在していないもの（起こっていない出来事）を因果関係項に含めることは理論的に困難さを伴う。この矛盾の解決は Challenging な課題である。

以下に要約するように、[Toyoshima 19]において論じた我々の理論は Negative causation を扱えると同時に、Counterfactual 理論が持つ欠点も克服している。

² サイコロを振る例を考えると確率の導入は不可欠のように思えるかもしれないがそうではない。振った結果を見ないと何が出るかわからないのは単に知識の不足が原因であり、狙った目を出せないのは知識不足に加えて精密な制御が困難であるからである。

2.6 例を通した諸概念の導入

以下の二つの例を考察する。

- a1. 車が人をはねた
- a2. 目撃者が通報した
- a3. 救急車が被害者を病院へ運んだ
- a4. 被害者が病院に到着した
- a5. 医者が手術をした
- a6. etc.

- b1. 血栓が成長した
- b2. 血管が細くなった
(血管の断面積が小さくなった)
- b3. 血流量が減った
- b4. 下流の臓器が酸欠になった
- b5. 虚血性 xyz 病が発症した
- b6. etc.

一見したところ両者は、対象ドメインは異なるが因果としては同等（同型）であるように見えるが、注意深く検討すれば、全く異なることがわかる。前者の出来事列では、全て前の出来事が完結した後に次の出来事が起こっているが、後者では、血栓が成長し終わってから断面積が減少するのではなく、血栓の成長、断面積の減少、血流量の減少、酸素供給量の減少は全て同時並行的に起こっているのである。ここで、Waterfall 論文[Galton 09]に従って、完結した出来事を**イベント**、そのとき進行中である出来事を**プロセス**と呼ぶ³。すなわち、前者は完結したイベント間の因果列であるが、後者は進行中のプロセスが各時点で及ぼし合っている因果列なのである。これらのことを図 1 に示している。図 1b の下段の表現が Misleading であると言えるので要注意である。ちなみに、血栓の成長が停止しても、虚血性 xyz 病は治らない。虚血性 xyz 病の原因は、成長というプロセスではなく、成長の結果生まれた、断面積が小さくなった**状態**だからである。これは重要なことを示唆している。というのは、従来の因果理論では、因果関係の関係項は出来事が主であり、状態は含まれないということが常識であったが、この例はその反例となっているからである。

主張 1: 因果において状態は重要な役割を担っている。

図 1(a)が示すように、交通事故の因果列における各イベントの間には状態が存在していることがわかる。事故の後には被害者が傷ついた状態、救急車の中にいる状態などである。言い換えると、各イベント間には直接の相互作用はなく、相互作用は全て間に存在する状態を媒介としている。一方、血栓症の場合にはそのような相互作用の媒介となる状態は見られず、図 1(b)の上段の図が示

すように全ての変化が直結している。この直接性に関しては補足説明が必要であろう。プロセスは状態変化の系列なので、ここで生じている因果は状態を媒介にしていると見える可能性があるからである。しかし、確かにプロセスは状態変化として構成されているが、ここでは隣接する異なったプロセス間の相互作用を論じていることに注意すると、各プロセスは隣接する別のプロセスを直接駆動している。実際、血栓の成長プロセスは断面積を減少させるときに「他の状態」を「媒介」にしておらず、直接駆動している。

ところで、この例も有益なことを示唆している。すなわち、因果に関する相互作用には状態を媒介としない**直接因果**と、状態を媒介とする**間接因果**に分かれるということである。実は、このことは従来の因果理論では余り考慮されてこなかったことで、我々の理論の新規性を示す一つの要素となっている。これを以下のようにまとめておく。

主張 2: 因果に関する相互作用には状態を媒介としない直接因果と、状態を媒介とする間接因果の 2 種類のタイプが存在する。

図 1 二つの因果列

上に紹介したように、イベントは完結した出来事である。イベント間に直接の因果があるとすれば一つのイベントの終了時点と他のイベントの開始時点が一致する場合以外にない。なぜなら、もし二つのイベントに重なる部分があり、その重なり部分で因果関係が発生する場合

³ これは仮の呼び名ではなく、文献[Galton 09]で厳密に定義されたカテゴリであり、イベントはプロセスを材料として構成される。

には、イベントではなくイベントを構成するプロセス間の因果関係になり、イベントという全体物間の因果関係として認定されないからである⁴。そして、「完了した」イベントが他のイベントに及ぼす影響も「直接」与える事ができないことは理論的に自明のことである。故に、

主張 3 : イベント間に直接因果はない⁵。

という重大な帰結を導くことができる。この帰結は因果の本質の解明という問題においては直接因果が主要な因果であることを考慮すると極めて重大な結論ということができる。しかも、従来の因果に関する議論では、因果は出来事の間関係であるということが大前提であったことを考えると革命的とも言える帰結である。

3. 成果の要点

本章では、理論的な課題に関して[Toyoshima 19]で得られた成果の本質的な要点をまとめ、本稿で因果理論を完成させる準備とする。

3.1 因果と機能

今、具体的な $C \Rightarrow E$ が与えられたとき、 C という出来事が起こった結果、ゴールとしての E が達成されたと解釈すれば、 C と E に関与している Entity で構成される一つの Entity A を想定して、その Context において A が C によって E を達成する機能を発揮したということが出来る。従って、

主張 4 : 任意の因果の例 ($C \Rightarrow E$) は機能に写像できる。

と主張することができる。しかし、これは二つの意味で常識に反する主張と言える。一つは、Causation は関係なので機能という Occurrent に写像できるわけがないこと、二つ目は、機能は因果に支えられているものであり、設計者や製造者の意図にまみれた人間的なものであると理解されているからである。前者については、我々は因果関係ではなく to Cause という生起物を対象にして検討を進めたのであり、そのようなタイプ mismatches は成立しない。後者に関しては、心臓にも機能が認定できることを考えれば、その機能は人間の意図やゴールとは独立なはずであり、心臓の機能は収縮・拡張運動によって血に圧力を与えて血流を生み出すという因果列を具現化したものと理解でき、因果から機能への写像ができる可能性を示唆していることに気づく。

この主張 4 を厳密に理解するには筆者の長年の機能に関する研究成果、特に Systemic context と Systemic function、そしてそれらを支えるデバイスオントロジーの詳細を述べなければならず[Mizoguchi 16]、それは本論文の範囲を超えるため省略し、概要を直感的に訴えるだけにとどめる。Systemic function は生体の機能と人

工物の機能の上位概念として定義されたものであり、機能発揮物がより大きなシステムの部分（部品）として存在しているときに発揮する機能である。そのシステムは Systemic context をその部品に提供して、部品が達成すべきゴールを与え、その部品は自身の振る舞いによってそのゴールを達成することによって機能を具現化する。心臓の to pump blood 機能であれば、循環器系というシステムが血を流すというゴールを設定（要求）し、心臓の収縮という動作によって左心室出口の圧力を増すという振る舞いが実現する機能であるということができる。

デバイスオントロジー[来村 02a]は、心臓のような能動的な実体をデバイスと一般化して、内部の動作と外部から見える入力／出力特性を一定の基準に従って語ることが可能にするロール概念の体系である。少し詳しくいうと、入力と出力を持つブラックボックスであり、そのデバイスが行っている事柄を説明するための、**処理主体**、**導管**、**処理対象**、**媒体**という四つのロール概念から構成されている。そして、再帰的に適用することによってモデル化の粒度を任意に設定することができる。一見、たいしたことでもないように見え、そして実際そう見られるのが常であるが、現象の存在論的なモデル化をする上で有用な概念枠組みであると自負している。実際、5 章における議論においても本質的な貢献をしている。

言葉（概念）と論理しか用いずに議論を行うと、何らかの挙動を示すもの（デバイス）から、内部の動作、入力／出力特性、それを取り囲む Context、内部で実体が Play しているロールなどを粒度独立に一貫した方法で語ることは極めて困難といえる。デバイスオントロジーでは、心臓やポンプのような動的な挙動を示すものは当然として、相互に引き合う磁石対、机の上に置かれた本と机、原子力発電所などありとあらゆるものを一貫性のあるぶれない方法でモデル化して適切な概念同定ができる。例えばデバイスオントロジーを用いれば、歩く、押す、洗う、育てる、可能にするの五つの動詞が指示する概念が 5 種類の全く異なる振る舞い Type に属することを見抜くことができる。そして、その区別は振る舞いと機能の存在論的理解には必須なのである。少なくともそれらの混同はしてはならない。以上をまとめると以下の主張がいえる。

主張 5 : 現実世界に起こっている因果列を適切に概念化して存在論的に考察するためにはデバイスオントロジーが本質的な貢献をする。

3.2 因果の本質

因果が機能に写像可能であることがわかったことによって、因果を機能の語彙を用いて語るようになる。すなわち、因果という根源的なものを更に深い概念を用いて語ることはあきらめることにして、因果よりは良く究明された概念である機能を用いて因果を語

⁴ このことは 3.2 節で再び議論する。

⁵ 直接因果はイベント間にはないがプロセス間にはある。

ることによって因果に関する理解を深めようというのがその趣旨である。機能概念には因果が含まれているので因果の説明にはならないのではという懸念があるかもしれない。しかし、因果を支えるより深いものを探しているわけではないので、写像先での議論では問題はない。むしろ、機能に因果が含まれていないと写像が成り立たない。そして、重要なことは機能にまつわる豊富な語彙を活かせることである。実際、Cause を Achieve, Prevent, Allow, Disallow の四つに分解できることに加えて、Achieve で他の三つを定義できることも示したことで、Achieve の解明が完了すれば因果の説明ができたことになる。

そこで、機能の本質は何かということを改めて考えてみると、ある振る舞いによってゴールを達成することと言えることから、多くの具体的な機能を束ねる最上位の機能概念として達成 (Achieve) をあげることができる。

デバイスオントロジーに加えて、機能分解における What to achieve と How to achieve の概念[来村 02b]を導入することによって Achieve 機能自体を深く理解することができる。上の例で言えば「洗う」と「育てる」の相違を明示することができる。達成すべきゴールはそれぞれ「きれいにする」と「育った状態にする」であるが、前者には「水のような流体を使って」というゴール達成の方式 (How to achieve) が含まれているが、後者には育てる方法は含まれていない。そして Achieve は後者と同様具体的な How to achieve は含まれておらず、純粋にゴールを達成することだけを概念化していることがわかる。具体的な達成方式が含まれていないとはいえ、デバイスが何かをしたことによってゴールが達成されたことは含意されていることはいうまでもない。

さて、任意の $C \Rightarrow E$ が与えられたとき、それにデバイスオントロジーを適用してモデル化すれば、 E を出力に（或いは入力と出力の変化に）対応させ、 C をデバイスの内部で起こっている How to achieve に対応させることによって、 $C \Rightarrow E$ の因果列は一つのデバイスが発揮する Achieve 機能に対応することがわかる。デバイスの粒度に依存するので $C \Rightarrow E$ が一つのデバイスにおける事象とは限らないという疑問が湧くかもしれないが、その懸念はむしろ逆であって、デバイスオントロジーは粒度に依存しないので、任意の $C \Rightarrow E$ 列を、デバイスの内部で行われた処理が原因となって入力と出力の変化の E が生じたということが可能になる。 E がプロセスの場合と状態の場合があるが、プロセスは状態の変化系列であるので、各時点での処理に着目するか、時間を動かした変化の系列に着目するかは相違だけであり、いずれにしても $C \Rightarrow E$ を適切な機能に写像し、その結果 Achieve に対応づけることができる。

3.3 Functional square

因果を考察する視点として 2.6 節において直接因果と

間接因果があることを述べた。また、2.5 節では Negative causation という起こっていない出来事を関係項に持ち込んだ因果もあることを述べた。これらから、因果を分類する二つの軸：直接／間接と positive／negative があり、四つのタイプが存在することがわかる。Achieve は直接かつ Positive である。表 1 は残り 3 種類の機能を含めて四つの機能をまとめている。この表が含意することは極めて重要である。すなわち、to Cause という概念はこの四つの機能で置き換えることができ、これまで曖昧だった直接／間接と positive／negative の区別を明確にして、より詳細で適切な意味を明示して因果を語ることが可能になった。

しかも後に 3.4 節と 4 章で論じるように、Achieve 以外の三つは Achieve を用いて厳密に定義されるので、因果の本質を Achieve に限局できることになる。従って、Achieve が何であるかを明らかにすれば因果の解明がされることを意味している。5 章では Achieve が何であるかを論じるが、その前に、他の三つの機能を定義し、間接因果を論じる。因果理論を実際に適用する場合、Achieve は適用範囲が狭く実用性が劣るので、現実世界の因果を語るために有効な Prevent, Allow, Disallow の三つの機能に関する考察は Applied Ontology として意義深い。まず、直接的で Negative な Prevent を定義した後に間接因果の二つを論じる。

表 1 Functional square.

	positive	negative
direct	achieve	prevent
indirect	allow	disallow

3.4 Prevent

State-centered approach の立場からコイントスを例に考察する。コイントスイベントの結果状態は表と裏に限られる。従って表が出るイベントと裏が出ないイベントは等価であり、裏が出るイベントと表が出ないイベントも等価である。このような場合、表状態と裏状態は incompatible という。この場合、「あるコイントスイベントが、表が出たイベントを Achieve した」という因果は「そのイベントが、裏が出るイベントを Prevent した」という因果と等価となり、起こっていないイベントを指しているという批判をかわすことができる。この例を一般化すると Prevent を以下のように定義できる。

Definition 1 (Prevent): ある Context C において、出来事 X が出来事 Y を Prevent したということは、 C において以下のような Z が存在するときであり、かつそのときに限る。(i) X が Z を Achieve し、かつ (ii) Y と Z が incompatible.

Context への言及が必要であることは incompatibility

の成立が Context に依存することがあるからである。X⇒Y という因果を論じるときに Context を持ち出すことに違和感を持つ読者がいるかもしれないが、これは決して因果を Context に対して相対化する事ではない。むしろ逆であって、因果を一つ取り出すと、それが成り立つ Context が自動的に決まるという事実に基づいている。例えば、「鍵を掛けたので太郎は部屋に入れなかった」ということが因果であるためには、鍵を掛けていたドア以外に部屋に入る方法がなかった（窓は閉まっていた）、ドアを壊すことは許されていなかった等の事実の存在が Context として必要になる。今までの因果に関する議論ではそのような Context を暗黙の前提として受け入れている。

4. 間接因果の考察

従来議論されてきた因果例の多くは間接因果であった。例えば以下の五つの例がある。

- 例 1：太郎は家の鍵を掛けたので泥棒は入らなかった。
 例 2：次郎は家の鍵を掛けなかったので泥棒が入った。
 例 3：Suzy の犬が虫にかまれて目の病気になったが、放っておいて病院に連れて行かなかったので、その犬は失明した[Beebe 04].
 例 4：機械の部品が時間までに届かなかったので(修理ができず)その機械は故障してしまった[Schaffer 04].
 例 5：父親が、走って来る車の道筋に立っている子供を外に押し出したので、子供は命拾いをした[Weber 08].

それにもかかわらず、これまでの議論は「出来事 C が出来事 E を Cause した」という一つのタイプの因果に基づいて行われ、直接因果と、状態を媒介として生じる間接因果とが区別されてこなかった[Losee 11, Mumford 13]. 筆者らは前述の state-centered の戦略を採用して、間接因果を State-mediated causation と概念化した[Toyoshima 19], この効果は大きい。議論されてきた例題のほとんどは Cause と呼ぶべきものがなく、Allow か Disallow と呼ぶべきものであることを明らかにすると同時に、Negative causation を扱うことを可能とした。

4.1 事前条件

出来事の生起に関しては 2 種類の事前条件 (Precondition) が存在する。一つは促進条件であり、もう一つは阻害条件である。両者は以下のように定義することができる。

促進条件：もし Context C で出来事 X が生起すれば、促進条件は C において真となる。

阻害条件：もし Context C で出来事 X が生起すれば、阻害条件は C において偽となる。

本論文では促進条件と阻害条件には以下の公理が成立すると仮定する。

公理 1：Context C において、状態 Z と Z₀ が incompatible であり、Z₀ が出来事 Y の促進条件であるとき、Z は Y の阻害条件となる。

公理 2：Context C において、状態 Z と Z₀ が incompatible であり、Z₀ が出来事 Y の阻害条件であるとき、Z は Y の促進条件となる。

4.2 Allow と Disallow の定義

状態が媒介する間接因果では、状態が果たす役割は促進条件や阻害条件を真または偽とすることにある。一つの促進条件が真となったとしても出来事が生起するとは限らないが、阻害条件は一つでも真になるとその出来事は生起しない。前者を Allow と呼び、後者を Disallow と呼ぶことは語感とも整合性が良い。これらは Cause とは呼び難いことは説明を要しないであろう。以下に、Allow と Disallow を定義する。

Definition 2 (Allow)：Context C において出来事 X が出来事 Y を Allow するとは以下のどれか一つの条件を満たす状態 Z が存在するときであり、そのときに限る。C において、(i) X が Z を Achieve し、Z は Y の促進条件である、(ii) X は Z を Prevent し Z は Y の阻害条件である、(iii) X は Z を Maintain し Z は Y の促進条件である。

Definition 3 (Disallow)：Context C において、出来事 X が出来事 Y を Disallow するとは以下のどれか一つの条件を満たす状態 Z が存在するときであり、そのときに限る。C において、(i) X が Z を Achieve し、Z は Y の阻害条件である、(ii) X は Z を Prevent し、Z は Y の促進条件である、(iii) X は Z を Maintain し、Z は Y の阻害条件である。

機能概念としての Maintain は水道管のように、入ってきた流体をそのまま出力する機能を指す。一般的に言えば、出力が入力と同じになるように維持する機能である。水道管の場合であれば入力流量と出力流量が等しいという結果をもたらす機能である。次郎が鍵を掛けたことは鍵が Unlocked である状態を Maintain したことになる。言い換えると、起こるべき出来事の Omission が（何もしなかったことによって）そのときの状態を Maintain したとするのであって、起こっていない出来事が（別の）出来事を Cause するという理論的困難さを回避している。以上をまとめると、

主張 6：Cause は Achieve, Prevent, Allow, Disallow の四つの概念で置き換えることができる。

主張 7：Achieve 以外の三つの機能は Achieve を用いて定義することができる。

これらの定義に基づいて間接因果と Negative causation を扱えることの、多くの既知の例を用いた説明は省略する。詳細は[Toyoshima 19]を参照のこと。

(a) 間接因果の場合. Causeは各デバイス内にある.

(b) 直接因果の場合. 一つ前のプロセスからCauseが流れてくる.

図 2 二つの device ontology モデル化法

5. 直接因果 Achieve の考察

これまでの議論で因果の本質を Achieve に限局することができた. 本章では関係項 (Relata) ごとの分析を行うことによって Achieve が何であるかを解明する. この解明が成功すれば因果の解明ができたことになる.

5.1 デバイスオントロジーの適用原則

Causation は関係であるが, Cause という動詞が指す Occurrent は実体がある Entity である. [Toyoshima 19] では, 筆者は to Cause という Occurrent が何であるかを問い, Function と答えた. その結果四つの Subfunction を得た. 四つのうち三つは Achieve で定義されることを示し, 因果の本質を Achieve に限局することができた. 直接かつ Positive な形質を持つものが Cause の本質であるという主張である. 以下の議論の一般性を確保するために因果をデバイスオントロジーで捉える方法を明確にしておく. $C \Rightarrow E$ が与えられたとする.

[原則] E を出力 (What to achieve) に対応させ, C をデバイス内部での出来事 (How to achieve) に対応させる. 必要であれば内部の出来事のモデル化はデバイスオントロジーを再帰的に用いる.

[細則 1] 間接因果の場合. 図 2 (a)に示すように, 前段で生成された状態は入力となり, 各デバイスの内部には Achieve に対応する個別の原因が存在する.

[細則 2] 直接因果の場合. 図 2 (b)に示すように, 入力が Achieve に対応する原因となり結果が出力される. この場合再帰が行われる場合は上の原則どおりであるが, 再帰が行われない場合, 後述する等式によるパラメータ変換により E が決定される場合がある. デバイスオントロ

ジーの再帰的適用により最小粒度に到達した場合は再帰が行われないケースに当てはまる.

血栓症の例を上原則・細則に沿って説明する (図 2 参照). 間接因果の場合は上で述べたとおりであるが, 重要なことは認定されたデバイスの中に Achieve 原因があることである. 直接因果について少し詳しく説明する. 最初の因果 (血栓成長プロセスと血栓の垂直面の面積増大プロセス⁶) は原則通りであるが, 血栓の垂直面の面積増大プロセスと血管の断面積減少プロセスの間の因果は, 管の断面積一般に適用可能な状態間の関係式, 断面積 = 生成物の断面積 + 残りの断面積 ($X=Y+Z$) に基づいて計算により得られる. この計算 (変換) 自体は因果とは無関係であるとしても, Y は血栓の成長の結果として得られるものである, 血栓の成長と, Y から計算によって得られる血管の残りの断面積減少 (Z) の間にも因果が認められる⁷. 従って, 図において左の二つのデバイスを囲んでいる長方形 (デバイス) が得られる. それは上述の原則に則っていることは明らかであろう. その後段にある血流量減少をもたらす因果は直接因果の典型例で, 断面積減少という入力を原因として生じる諸現象の結果として血流量減少が得られる. 諸現象の詳細はデバイスオントロジーを再帰的に適用することが可能であるがここでは省略している. 次に血流量減少をもたらす酸素供給量減少であるが, 血液が運ぶ酸素量が流量に比例するという絶対的真理としての等式に基づいて変換された結果である. この因果列最後の因果は酸素供給量減少をもたらす血栓症の発症は, 入力としての酸素供給量減少状

⁶ ここで, プロセスは状態の逐次変化であるという定義に基づいて, 各 Entity は動的な側面に着目するときにはプロセスに, 各時点における静的な側面に着目するときには状態に読み替えられている.

⁷ このことは 5.2 節 § 2 において再度論じる.

態が原因となって種々の因果連鎖の結果生じるが、内部の詳細を省くと図2のようになる。

5.2 Achieve の実体

上述の device ontology の適用原則と二つの細則に基づいて、直接かつ Positive な因果の分析を Relata の種類ごとに行う。

§ イベント⇒プロセス

関係項はイベント、プロセス、状態の3種類である。まず、**イベント⇒プロセス**であるが、その典型例としてビリヤード玉の衝突がある。静止している赤玉に白玉が速度 v で衝突し、白玉は停止し、赤玉は速度 v で走り出すという例である。「白玉と赤玉の衝突イベントが赤玉の運動を Cause した」という因果は一見正しいように見えるが、実世界では衝突は瞬間ではなく、高加速度で短時間の Push プロセスであり、衝突が終了してから動き始めるわけではないので、イベント⇒プロセスではなく、これはプロセス⇒プロセスの例と見なすことが正しい。しかも、赤玉の運動はイベントではなく、駆動される出来事はプロセスである。動き始めることは一種の出発イベントであることは正しいが、それは全ての出来事に共通の開始イベントという**部分イベント**であり、全体物としての出来事しか関係項にはなれないので **Effect** とは認定できない。一方、スイッチが入るイベントとそれによって駆動されるプロセスを考えるとイベント⇒プロセスのように見えるが、そのイベントに因果的意味があるのはイベント終了後に発生するスイッチ On 状態であるので、間接因果であり除外される。

イベント⇒イベントのタイプに加えてイベント⇒プロセスのタイプの直接因果もないということが言えそうであるが、その理由はイベントの本性に起因する。イベントは常に完了した状態でしか扱うことができないが [Galton 09], 完了した生起物が後に続く生起物に直接影響を与えることは理論的に不可能である。唯一の可能性は完了した結果生起した結果状態を媒介としたものに限られるが、それは間接因果である。

この結論に納得できない読者のために図3の例を考えてみる。手でバーを押さえながら右端の方へスライドさせる。手が右端を通り越した瞬間にスライドイベントが完了し、同時に右端を押さえるイベントも完了し、それと同期して左のパネが収縮してそれと同時に右端が上に跳ね上がる。このとき、バー押さえイベント終了時点と

図3 二つの生起物が連続する例

図4 ピストンとクランクシャフト

図5 血栓

右端跳ね上がりプロセスの開始時点は一致するので、イベントの終了点と次のプロセスの開始点が一致して、二つの出来事が連続する例になっていて、バー押さえイベント（の終了）が**直接**右端跳ね上がりイベントを Cause した例になっているように見える。しかし、実際の現象はそうではない。二つのイベントが共有するまさにその時点ではまだ右端は跳ね上がっていない。そして、その時点で右端は「開放」状態の開始時点となる。右端の開放状態は左端のパネの力が右端を跳ね上げるための促進条件であり、二つのイベントに共有されるその時点で真となって右端跳ね上がりイベントを **Allow**するのである。従って、これは直接因果ではない。

§ プロセス⇒プロセス

この型としてはピストンとクランクシャフトが典型例である（図4参照）。ピストンとクランクは連結点を共有しているのでそれぞれの運動は直結しており、ピストンの上下運動とクランクの回転運動は必然的に連動する。この性質はこのタイプの多くの相互作用に共通する性質である。プロセスは状態変化の系列と定義されることを考えると、二つのプロセスが相互作用を行うためには二つの状態の間で何らかの変換が行われなければならない。プロセス⇒プロセスの特徴は、デバイスオントロジーを再帰的に適用しない（できない）場合、法則としての方程式や等式に基づいて結果が生成されることにある。例えば、力を加えて何かを動かした場合は $f = ma$

という等式によって押すプロセス (f) が加速プロセス (a) を直接駆動しており、f が一定であっても v は増加し、f が増えれば a は必然的に増える。いずれの場合も押すプロセスと動くというプロセスは共に継続している⁸。しかし、法則の本質は経験則なので根拠が弱いので、存在論を議論する時には使うことは最大限避けることが望ましい⁹。以下の議論では、原則として、使う等式は絶対的に受け入れざるを得ない等式のみとする。

ピストンとクランクは一点を共有しているので全ての挙動に関して $X=Y$ が成り立つ。押した⇒動いた の場合は押手と対象物は少なくとも一点を共有して一緒に動くので、やはりその共有点の居場所や速度に関して $X=Y$ の等式が支配している。この場合 $X=Y$ は法則ではなく a priori に受け入れるべき真理といえる。上述の血栓の場合も、血管の断面積=血栓の垂直面の面積+残りの面積 は $X=Y+Z$ の等式に基づいている。これも法則ではなく、無条件に受け入れるべき真理である。

§ 等式による変換と因果

ここで問題となることは、等式に支えられた変化 (変換) は因果と言えるかということである。 $X=Y$ のとき、X が増加すれば Y も共に増加するが、そこには因果らしきものが見えない。ピストンとクランク問題が良い例である。共有している一点の存在が Key であるが、ピストンの上下運動とクランクの回転運動は厳密に同時に生起する。いや、同時に起こるというよりは、この現象は一つの運動を二つの別の観点で述べたことになっている。従ってピストンとクランクの例において X から Y への相互作用は因果から除外されるべきである。しかし、ピストンが押す場合とクランクが下に引っ張る場合の動作は全く同じであるが、物理的には別で、かつ因果的にも区別されるべきなので、この現象は因果と言って良いようにも見える。この問題は更に詳細な検討が必要である。

血管の断面積減少も、 $X=Y+Z$ という等式に支配された因果的決定と言えそうな例である。X が一定のとき、Y が増加すれば Z は減少せざるを得ない。しかし、血栓の場合、残りの断面積の減少は自分から起こし得ない。必ず血栓の成長が原因となりその結果として値が決まる。このことは **プロセス⇒結果状態** 型の因果にも着目すべきことを示唆している。

これまでの議論では、**プロセス⇒結果状態** のパターンを排除してきたが、精密に何が起こっているかを理解するためには **プロセス⇒結果状態** をパターンとしてではなく、各時点で生じている因果を知るためには有用である。実際、5.2 節 § 4 で論じるように **イベント⇒結果状態** が因果であるなら **プロセス⇒結果状態** も後述の純粹自動詞現象の場合を除いて因果と言える。両者の相違点

は、プロセスの場合には状態の変化自体がプロセスなので結果状態と言い難いだけで、厳密には各時点において血栓全体の成長プロセスの一側面である血管の垂直面の面積の増加(変化)は血栓の成長プロセスの結果であり、それに対応して「計算される」残りの断面積は二次的結果状態ということになる。すなわち、計算で得られる両者の間には因果はないかもしれないが、成長プロセスの結果として得られた血栓の断面積は因果の結果と言えるので、二次的結果状態としての断面積小状態も血栓成長の結果と言えるということになる。同様に、 $X=Y$ の場合も、ピストンの下降プロセスの結果としての新しく得られた X が結果状態と言えるので、Y はそれに従って計算される二次的結果状態ということができる。

ここで上の二つの場合の注目しているプロセスが体现している Achieve の実体の解明が不完全であると見える場合には、すなわち現在想定している粒度で解明が十分ではない場合は、デバイスオントロジー適用の原則に従ってそこにデバイスオントロジーを再帰的に適用して細粒度のデバイスに基づいて同様に議論をすることで解決できる¹⁰。

要するに、プロセス⇒結果状態の場合は各時点において連続的に結果状態を生成し続けていると言える。そして前提とする等式による変換で生成される状態は二次的結果状態と認定される。

§ 純粹自動詞現象

プロセス⇒プロセスの場合は (いわゆる微係数正の) 「変化」が対象になっている。血栓の成長⇒断面積の減少もそのタイプの変化を対象にして論じている。しかし、上のことは他動詞のプロセスは当然として多くの自動詞にも適用できるが、純粹自動詞が指す (変化しているものそれ自体の変化) プロセスには適用できないことに注意が必要である。例えば、**計測した身長値が大きくなるプロセス⇒身長値の増大** はだめである。これを純粹自動詞と呼ぶ。なぜならそれは単に微係数が正というだけの事象なので、微係数が正であることは値の増加の原因ではなく、値が増えていること自体には因果はないからである。これを受け入れたら全ての微分方程式が因果を体现しているとみなす過ちを犯すことになってしまう¹¹。しかし **成長⇒面積増大** は純粹自動詞現象ではない。というのは「成長」は成長の原因となる複数の内部プロセスを総合した現象なので面積増大はその結果であり、細胞分裂とか細胞自体の増大プロセスなどが総合されて、血栓が大きくなっているからである。「歩く」は自動詞であるが、**歩く⇒場所移動** も純粹自動詞現象ではない。「歩く」は 2 本の脚の前後移動というプロセスを原因とする

⁸ 従って、以下に述べる $X=Y$ の等式によって結果が生成される。しかし、a を大きくすることで f を大きくすることはできない。

⁹ 例外があるとすれば、ボイルの法則であろう。

¹⁰ 問題の先送りになっている可能性が心配であろうが、それは 5.3 節 § 2 で解決される。

¹¹ 微分方程式は変化が起こる順序を規定することが本質であり因果を直接体现するものではない。

場所移動だからである。

§ 状態⇒状態

イベント⇒プロセス、プロセス⇒プロセスのパターンは詳しく分析した。次は状態⇒状態のパターンである。典型例としては、図 2(b)に示した血栓がある（図 1、図 5 も参照）。これは流体系における流量制御弁と相似の動作をする。「バルブの開度が半分の状態が流量半分の状態を引き起こす」と言える。状態が原因となるのは、それが装置の内部状態を表すときに限られるパターンである。実際、バルブの開度は流量制御弁の内部状態である。いうまでもなく、血栓の成長は動的にその場所で流量制御弁（流量阻害装置）を生成していることと等価である。

これまで論じてきた因果は全て「（いわゆる微係数正という）変化の伝搬」としての因果であったが、このパターンはそうではなく、正常値からの変異という意味での変化が装置の内部状態になっているときに出力も同様に正常値からの変異を起こすという意味での因果であり、この因果関係は物理的に深い（細粒度の）因果の上に成り立っている。しかし、面白いことに、このケースは通常の「変化の伝搬」であるイベント⇒状態（後述）とプロセス⇒状態の組み合わせでモデル化できることを以下に示す。議論の本質は、その因果を一つのデバイスに押し込んで理論の粒度独立性とデバイスオントロジーの再帰的適用（上述の原則）に基づいている。

血栓成長と因果的に同型である流量制御弁を例にとる¹²。標準の開度から少し閉じて停止したとし、そのときの開度状態を S1 とする。その現象全体は開度減少（変化）イベント E1 であるが、上で議論した純粹自動詞現象に対応するため E1⇒S1（開度小）という因果はできない。しかし、S1 は標準から少しずれて閉じた状態である。この場合上述の原則に基づいてその S1（あるいは S1 の変化としてのプロセス P1 やそれが構成するイベント E1）を原因としてデバイス内部で起こる現象の結果として流量小（S2）を実現するデバイスであるとモデル化できる（図 2 (b) 参照）。このことを開度減少が進行中というプロセスと減少完了イベントとに分けて述べる。開度が減少途中はプロセス（P1 と呼ぶ）であり、それが原因となってデバイス内部で様々なプロセスを引き起こした結果、流量が漸次減少するというプロセス P2 が並行して実行され続けているので P1⇒P2 が成り立ち、その間の任意の時点において流量小状態（S2）にある。一方、減少が停止した時には E1⇒S2 が成立し S2 が出力される。S1⇒S2 パターンは E1 完了後の状態が継続していることに対応するので「完了以前に生じた状態の継続」という解釈が正しい。再度変化したときには最初と同様のことが起こり、上の議論が繰り返して適用される。

上に述べた、プロセスが継続中の状態と完了時の状態

が同一（あるいは連続である）ことは一見自明のように見えるかもしれないが、実はそうではないことに注意を要する。任意のイベントはそれ固有のプロセスによって構成されている[Galton 09]。変化プロセスが完了したときに生成される状態とプロセスが随時生成する状態との関係に着目すると、全てのイベントはその二つの状態に連続性がある場合とない場合の 2 種類に分類される。

ある対象を「暖める」行為を例にとる。暖めている途中、すなわち温度上昇プロセス中は対象物の温度は連続的に変化し、終了したときにはある温度に達するが、プロセスの実行中の各時点で得られる結果として生成される温度とイベント完了時の温度は連続である。これは上の制御弁と同型である。しかし、切断イベントを考えると、切断中のいかなるときも対象物はつながっているが、切断完了後に突然二つの部分に分離され、プロセス実行中の接続状態とイベント完了後の接続状態には連続性がない。すなわち、この種の生起物に関しては、イベントの完了の結果得られる状態とそれに対応するプロセスが実行中に得られている結果状態は異なり両者に連続性はない。このような不連続タイプの生起物には「切断」以外には、「殺人」、「到着」などがある。切断のような不連続イベントの場合には結果状態の意義が特に大きく、プロセス実行中に生成される状態の継続ではなく、プロセス完了時点で新しい状態が生成されるという意味において因果の重要要素を構成している。

次に、プロセス⇒状態が候補になりそうであるが、これはすでにプロセス⇒プロセスのところで議論し終わっている。従って残るのはイベント⇒状態となる。

§ イベント⇒状態

イベントが完了したときは必ず結果状態が生じており、完了後一定時間の間その状態が継続する。ものを切れば切断対象物は切り離された状態となり、千円でものを買えば、所持金が千円減少した状態が生まれ、購入物の所有権を得た状態が生まれ、散歩が完了すればまた家にいる状態が生まれるように、全て結果状態が Achieve されている。この考察は粒度に依存しないことも考慮すると、直接因果の本質を示唆しているように見える。新しい状態が生まれるという事は事象が「起こる／生じる」ことの源と言えるからである。プロセス⇒プロセスや状態⇒状態は新しい事象を生み出すが、継続させる意味合いの方が強い。

この理論を念頭に置いてイベント⇒状態を解釈すると以下の主張が成立することがわかる。

主張 8：イベントには結果状態を生成するという Causal efficacy が内在している。すなわち、一つのイベント自体に因果が内在している。

以上論じてきたことをまとめると、状態を軽んじてきた従来の因果を論じる立場とは真逆の立場として、状態

¹² 例は単にわかりやすくするためだけに用いており、議論の一般性は失われていない。

を最重要要素として前面に押し出して因果問題を検討した結果、従来の議論ではできなかった因果の本質に迫る可能性が見えたと言える。従って、主張 8 とこれまでの議論の結果を総合すると、次の主張を得ることができる。

主張 9: 因果の本質は Achieve にあり、イベント⇒状態は核となるパターンである。

5.3 Achieve とはなにか？

いよいよ Achieve の本性を議論できる準備が整った。結局、因果の本質は直接&Positive の Achieve にあり、それを詳しく分析することによってわかったことは以下の 3 点にまとめることができる。Achieve の本性は、

- (1) 間接因果の素である、イベント⇒状態によって生成された状態の生成
- (2) (2.1)プロセス⇒状態によって生成された状態を等式によって変換した状態の生成と
(2.2)その状態の変化プロセスであるプロセス⇒プロセスとして現れる直接因果
- (3) 上のイベントとプロセスに絡めて原則に基づいてモデル化されたデバイスに内蔵された細粒度の因果

の三つである。三つ目は因果の所在を先送りした形になっているが、この問題はデバイスオントロジーの再帰的適用の議論を精密に行うことで解決できることを 5.3 節 § 2 で示す。プロセス⇒状態の場合の状態変換は等式に基づく変換であり、その変換自体には因果はない場合が多い。そして直接因果には、イベント⇒状態と同様のプロセス⇒状態による**状態生成が本質**であることがわかったので、(3) の解決を前提にすると因果の本質はイベントまたはプロセスによる**状態生成**にあることになる。

§ 化学反応の場合の検討

Achieve の Relata ごとの分析は終了したが、それでもなお純粋のプロセスのように見える化学反応を検討する。例えば、 $2\text{H}+\text{O}=\text{H}_2\text{O}+\text{大量の熱}$ 。この場合 H と O の反応プロセス (P) と H_2O 生成プロセスは同一のプロセスのように見えるがそうではない。上の化学式が示すように、水素と酸素の反応自体が C (デバイス内部で行われているプロセス) であり、反応の結果として生成される水が出力として現実世界に現れるプロセス E はデバイスの入出力に対応するが、それは入力なし (あるいは、一方が C に存在して他方が入力) で出力が水の生成という I/O 関係に対応する別プロセスであり、それを P1 と名付ける。P1 は熱生成プロセス P2 と共に直接生起している。すなわち $\text{P}=\text{P1}$, $\text{P}=\text{P2}$ に状態の介在はない。一つの化学式にだけ着目すると、反応をプロセスではなくイベントと見る場合は H_2O が存在する状態の生成と見るべきなので、イベント⇒状態となる。いずれの場合もデバイスオントロジー適用の原則に則ってモデル化できる。

それでは、砂糖や塩の溶解はどうであろうか？ 角砂糖がコーヒーに溶ける例を考える。例えば、コーヒーに角砂糖を入れたとすると、マクロに見れば入れたことが原因で、溶けたことが結果であるが、溶解中の水と角砂糖の相互作用はいずれの物質にも注目しない場合やミクロに見る場合には単なる相互作用であるように見える。しかし上の化学反応と同様、両者の相互作用を原因とし、生成される溶液が結果になるように切り出す (モデル化する) ことで、因果を同定できる。

もちろん水が砂糖を「溶かしている」とも言える。すなわち水がデバイスで砂糖を入力と見なし解釈する場合にも因果を認定できる。逆も同様である。このように用いる視点によって因果解釈は異なるので、着目する相互作用の因果を一意に同定しようとする議論自体の意義は薄いことがわかる。

ここで、最初に述べた我々の方針を思い出そう。我々は個々の現象列の因果同定を行っているのではない。意味があるのは、それらのいずれの場合においても、Cause するという意味が同じであることが本質であることを見失ってはいけない。**世界に存在する現象の切り出し方は多様であるが、それが一意に決定できないことは我々の研究には影響を与えない。**それがどのように切り出されても to Cause の意味がなにであるかの究明には影響を与えないからである。

化学反応の世界は、世界のモジュラー化の思想に基づいて、それより粗粒度の世界と切り離すことができ、上の (粗粒度の) 世界の因果を議論しているときは下の細粒度の世界の概念(entity)を Primitive とすることが許される。下の世界 (化学の世界) では上に例示したように、これまでと同様の分析を行うことができる。そして我々の理論は粒度独立であることから同型の議論になることが保証される。

§ 再帰的適用の終端条件

さて、最後の議論として粒度独立理論に基づくデバイスオントロジーの再帰的適用の終端条件の議論が必要である。上の議論では、5.1 節で述べたデバイスオントロジー適用における [原則] に基づいて $\text{E1}=\text{S2}$ と $\text{P1}=\text{P2/S2}$ に内在する因果はデバイスに内在する因果として先送りされているが、それが許されるためにはデバイスオントロジーの再帰的適用における終端において因果の説明が先送りされない (完結する) ことが保証されなければならないからである。しかし、この問題の解決は意外に容易である。再帰の終端状態は最小粒度に行き着いたときであるので、そこには「最小」の定義から device の内部に因果は存在しない。すなわち、

- (1) もしあるとしたら、入力と出力が直接それより細粒度のデバイスによる因果には還元できない因果関係、例えばアルファ崩壊のような自発的な現象に基づいたものである場合

- (2) $E1 \Rightarrow S2$ の場合. $S2$ が $E1 \Rightarrow S1$ 自体に内在する因果によって得られた $S1$ から何らかの等式によって導出された結果である場合
- (3) $P1 \Rightarrow P2/S2$ の議論で用いた等式による変換によって得られる場合

の三つだけが変化に関して残された可能性となる。最後の二つは因果の要因が特定されるので問題は(1)だけである。還元不能な根源的原理（例えば原子のアルファ崩壊）なるものが実際に存在して本理論に影響するかどうかという問題である。しかし還元不能な究極の原理・法則はあるとしても極めて限られたものになると思われる。従って、それを **Primitive** として因果理論に組み込むことによって因果の解明が阻害されることはないと考えられる。

主張 10 因果の実体は個々の生起物に内在する結果状態の発現による新しい状態の生成である。

6. むすび

因果を関係としてではなく **to cause** という **occurent** に着目して、因果の本質を **State-centered approach** に基づいて筆者らの機能オントロジーとデバイスオントロジーの考えを導入することで解明することができた。主な成果は 10 個の主張としてまとめることができた。

振り返ってみると、本研究は従来にない、いや従来の常識をことごとく疑い、独自の視点で因果の問題の解明に取り組んだ結果として得られた成果と言える。独自のプロセス/イベント理論に基づいて状態の媒介がない直接因果と、状態の媒介を必要とする間接因果の二つのタイプがあることを見抜いたことの意義は大きい。その結果、従来から軽視されてきた状態が果たす役割の重要性に着目して状態主導の **approach** を徹底して、従来は当然とされていた「因果は出来事間の関係」であるという大前提に疑問を投げかけて、出来事の一つであるイベント同士には直接の因果はないという結論を導出した。因果を機能語彙で語ることができることを保証した後、因果が **Achieve, Prevent, Allow and Disallow** の四つの機能に分割されることを示して、因果の本質が **Achieve** にあることを示した。最後に各 **Relata** ごとの分析を徹底することによって **Achieve** が何であるかを解明し、因果の本質がイベントやプロセスによる状態生成にあることを解明した。実用的な貢献としては、状態主導の方法論は **State-mediated causation** の概念を生み出し、それを用いることによって **Negative causation** を含めてこれまでの議論で知られている正例と反例を説明する理論を構築することができた。

しかし、哲学的には残された問題は少なくない。前提条件、特に阻害条件の定義は **Counterfactual** 的であり更なる検討が必要である。**Systemic context** の厳密な定義も残された課題であり、存在論的には状態 (**State**)、そして **System** とは何かを厳密に定義しなければならない。

とはいえ、**Context, State** と **System** の定義は哲学的に未解決な問題であり、これらの残された問題によって本理論の意義が傷つくことは小さいと考えている。

◇ 参考文献 ◇

- [Beebe 04] Beebe, H.: Causing and nothingness. In J. Collins, N. Hall and L. A. Paul (eds.), *Causation and Counterfactuals*, 291-308. MIT Press, 2004.
- [CFT] <https://plato.stanford.edu/entries/causation-counterfactual/>.
- [Collins 14] J. Collins, N. Hall and L. A. Paul (eds.): *Causation and counterfactuals*, MIT Press, 2014.
- [Galton 09] Galton, A. and Mizoguchi, R.: The water falls but the waterfall does not fall: New perspectives on objects, processes and events. *Applied Ontology* 4(2): 71-107, 2009.
- [加地 18] 加地大介: もの: 現代の実体主義の存在論, 4 章, 春秋社, 2018.
- [来村 02a] 来村徳信, 溝口理一郎: オントロジー工学に基づく機能的知識体系化の枠組み, 人工知能学会論文誌, 17 (1), 61-72, 2002.
- [来村 02b] 来村徳信 他: オントロジーに基づく機能的知識の体系的記述と その機能構造設計支援における利用, 人工知能学会論文誌, 17 (1), 73-84, 2002.
- [Losee 11] Losee, John: *Theories of causality*, Transaction Publishers, New Brunswick, New Jersey, 2011.
- [Mizoguchi 16] Mizoguchi, R., Kitamura, Y. and Borgo, S.: A unifying definition for artifact and biological functions. *Applied Ontology* 11(2): 129-154, 2016.
- [Mumford 11] Mumford, S. and Anjum, R. L.: *Getting causes from powers*. Oxford University Press, 2011.
- [Mumford 13] Mumford, S. and Anjum, R. L.: *Causation: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2013.
- [Röhl 11] Röhl, J. & Jansen, L.: Representing dispositions. *Journal of Biomedical Semantics*, 2(Suppl 4), S4, 2011.
- [Schaffer 04] Schaffer, J.: Causes need not be physically connected to their effects: The case for negative causation. In C. Hitchcock (ed.), *Contemporary Debates in Philosophy of Science* (pp. 197-216). Basil Blackwell, 2004.
- [鈴木 14] 鈴木生郎, 秋葉剛史, 谷川卓, 倉田剛: 現代形而上学, 4 章, 新曜社, 2014.
- [Toyoshima 19] Toyoshima, F., Mizoguchi, R., Ikeda, M.: Causation: functional perspective, *Applied Ontology* 14(1), 1-36, 2019.
- [Weber 08] Weber, E.: The debate between causal realism and causal constructivism: Metaphilosophical reflections. *Philosophia*, 36: 59-71, 2008.

[担当委員: 三宅 陽一郎]

2019 年 5 月 7 日 受理

著者紹介

溝口 理一郎 (正会員)

1977 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。大阪大学産業科学研究所助手、助教授、教授を経て、2012 年北陸先端科学技術大学院大学教授。現在同大学フェロー。工学博士。パターン認識、エキスパートシステム、知的学習支援システム、オントロジー工学の研究に従事。本学会長、Intl. AI in Education (IAIED) Soc. President, Asia-Pacific Society for Computers in Education President, Semantic Web Science Assoc. Vice-President を歴任。