

1 はじめに

本稿では、フレーム問題と因果律の間の関係について考察する。フレーム問題については、これの意味を狭く捉える立場と広く捉える立場とが存在するが、われわれは情報の部分性の観点から広く捉える立場を支持し、その区別を明確にするために一般化フレーム問題を提唱した。この一般化フレーム問題は情報処理能力が有限である主体にとって完全には解決できない。人間は情報の一部に枠を囲うことによって、ほとんどの場合にうまく疑似解決をしているのである。その枠を構成するものはふつうヒューリスティックスと呼ばれる。

因果律はそのヒューリスティックスの一部であり、客観的・物理学的概念ではない。フレーム問題の意味を狭く捉える立場は、枠を構成するさまざまなヒューリスティックスの中から因果律など特定なものだけを特別視したものである。フレーム問題の本質は、関係があるかないかわからない無数の情報からいかに必要な情報を取り出すかということにある。疑似解決のための枠に用いられている特定のヒューリスティックスの内容に関わる問題ではない。ここではフレーム問題と因果律との間の関係を明らかにすることを目指す。

2 フレーム問題

フレーム問題 (frame problem) とは 1969 年に McCarthy と Hayes が初めて提唱した問題である [1]。ここではフレーム問題について簡単に説明する (詳しくはわれわれの他の文献 [2, 3, 4] を参照されたい)。

McCarthy らが示した例は、(電話を所有している) 人間 P が電話帳で人間 Q の電話番号を調べ、電話をかけて、会話をする、という状況設定である。古典的な論理でこのような行為を記述しようとする時、「ある人が電話を所有していれば、その人が電話帳で誰かの電話番号を調べた後でも、まだその人は電話を所有している」というような、人間にとっては極めて自明な条件を列挙してやらねばならない。このような条件をいちいち記述しては量が膨大になってしまって手に負えなくなる。これがフレーム問題である。一般的に言えば、彼らのオリジナルな定義では、「ある行為を論理で記述しようとしたとき、その行為によって変化しない事象をいちいち変化しないと明示的に記述するのは煩わしい」ということがフレーム問題である。

情報処理では記述の量とともに処理の量が重要である。McCarthy らのフレーム問題は記述の量を減らすことにのみ注目していて処理の量の問題を軽視している。われわれは情報の部分性 (partiality of information) [5] という観点から、「膨大な情報の中から必要なものをどうしたら取り出せるか」という定義を提唱している [2, 3, 4]。記述の量と処理の量を合わせた計算量をどうしたら減らせるか、という意味である。この問題は一般には人間にも計算機にも解けない。オリジナルと区別してわれわれの定義によるものであることを強調するときには特に一般化フレーム問題 (generalized frame problem) と呼ぶ。人間は一般化フレーム問題を解決できないにもかかわらず、日頃はあまりフレーム問題に悩まされているようには見えない。われわれは、人間があたかもフレーム問題を解決しているかのように見えることが多いのはなぜか、という問題を疑似解決 (quasi-solution) の問題と名付けた。

フレーム問題に関するわれわれの見解をまとめると以下の通りである [2, 3, 4]。

1. フレーム問題は有限の情報処理能力しかないシステムが膨大な情報をどのようにして扱うかの問題であり、論理で記述の量をいかに減らすかという問題ではない。
2. その意味でのフレーム問題は人間にも計算機にも決して解決できない。
3. 人間は日常フレーム問題にほとんど悩まされていないように見える。

- 人間がフレーム問題をあたかも解決しているかのように見える（われわれの用語では「疑似解決」している）のはなぜかを解明することが重要である。

本稿は因果律の扱いという新たな観点から、オリジナルな狭い意味とわれわれの広い意味との違いを明確にし、われわれの定義の方が妥当であるという主張を繰り返すものである。

一般化フレーム問題の例として、家庭用電化製品としてかなり普及した電子レンジの話を取り上げよう。アメリカである主婦が雨でびしょ濡れになった飼い猫を乾かそうとして電子レンジに入れてしまうという事件が起きた。当然その猫は死んでしまったが、その主婦は電子レンジの使用説明書に「生き物を入れてはいけない」とは書いてなかったとして製造会社を相手取って損害賠償の訴えを起こした。そして主婦はその裁判に勝訴し、電子レンジの使用説明書に「生き物を入れてはいけない」という一文が加えられた。

この笑い話のような実話は、一般化フレーム問題が人間にも必ずしも解けないという例になっている。アメリカでは製造会社にありとあらゆる場合を尽くした使用説明書を付けることを義務付けているので原告はこの裁判に勝訴したが、日本では製造会社はそこまで要求されていないのでおそらく敗訴することになる。一般化フレーム問題の解決不能性 [3] を考えると、アメリカよりも日本の方が対応としては正しいと言える。電子レンジに入れてはいけないものをすべて数え上げるのは原理的に不可能だからである。

AIにはアーキテクチャ問題 (architecture problem) と内容問題 (content problem) があるとされている。アーキテクチャ問題とは、知能の汎用の枠組を研究することである。GPS や SOAR などの一般問題解決システム、プロダクション・システムやフレーム理論などの知識表現の枠組、帰納学習や類推などの学習機構の研究はこのアーキテクチャ問題に相当する。もう一方の内容問題とは、個別の具体的な知識の内容を研究することである。Feigenbaum の「知識は力なり (knowledge is power)」という言葉に代表される知識工学やエキスパート・システム、自然言語理解、画像理解など (の一部) の研究はこの内容問題に相当する。歴史的にはまずアーキテクチャ問題の重要性だけが強調され、次にその反動で内容問題だけが重視されるようになり、最近になってようやく両者とも重要であることが認識されてきた。

われわれの提唱する一般化フレーム問題はアーキテクチャ問題である。McCarthy らの狭い意味に解釈すると内容問題になってしまう。McCarthy らの内容問題としてのフレーム問題にももちろん価値はあるが、フレーム問題はアーキテクチャ問題として捉える方が問題設定として適当である、というのがわれわれの主張である。

3 因果律

本稿では、因果律 (causality) と因果関係 (causal relation) を以下の意味で用いる。

- 因果律 原因と結果との間には、一定の関係が有るという法則 (三省堂新明解国語辞典第3版)
- 因果関係 ある具体的な原因と結果との間の関係

因果律については昔から哲学や物理学などでさまざまに議論されてきた。人工知能においてもプランニングや定性推論や類推において因果律が大きな役割を果たしている。最近では因果律と非単調推論 (nonmonotonic reasoning) との関係について論じた Shoham の論文がある [6]。定性推論では因果関係に着目した立場が存在し [7, 8]、そこではたとえば以下のような条件を満たすものが伝統的な因果関係であるとされている [9]。

1. 原因から結果が一意的に導出できる。

2. 原因と結果が構造的に見て近くにある。
3. 原因が結果よりも時間的に先行する。

これらの条件はそれなりにもっともらしいが、これらの条件だけでは不十分なことは明らかである。安西の本 [10] から例をあげてみよう。ある学生が試験を受けて悪い成績を取ったとする。これが結果である。この結果に対する原因は何かを考えてみると、「試験を受けた」ことがまず上記の条件を満たしそうである。しかしその学生は「試験を受けた」ことが「悪い成績を取った」という結果の原因だとは「推論」しないであろう。「先生が間違った解答に×を付けた」ことが原因だとも「推論」しないであろう。おそらく、「前もって十分に勉強しなかった」ことや「前日に十分睡眠を取らなかった」ことが原因であると「推論」するのである。「試験を受けた」ことや「先生が間違った解答に×を付けた」ことを「推論」しても反省にはならないからである。このように因果関係とは人間が「推論」するにあたって用いる便宜的なものである。結果に結び付いたと思われる無数の事象の中から制御可能性 (controllability) の高いものを原因として「推論」する。この学生にとって、今度からはもっと勉強しておこうとかもっとよく睡眠をとっておこうとかいうことは制御可能だからである。この制御可能性の概念は客観的・物理学的なものではなく、主観的・心理学的なものである。

物理学的には、時間的に前に起きた事象は光の速さで後に起きる事象に影響を与える。これを因果律とすると、ほとんど無限の数の因果関係が存在することになる。たとえば、日本のつくば市で誰かがくしゃみをする、その直後にアメリカのニューヨーク市のすべての人間に影響を与え、その内の何人かはつられてくしゃみをするかもしれない、ということになる。この例ではたとえ影響があったとしても極めて小さいので無視できるが、一般にある事象の影響度を判断するのは難しい。この場合の因果律は、時間が過去から未来への一方向にしか進まないという制約としては意味をなすが、ふつうの意味での原因と結果の間の制約としては意味をなさない¹。ひとつの結果に対して無数の原因が存在してしまうからである。したがって、物理学的な因果律というものを想定することは情報処理を考える上では無意味である。

因果律は人間と無関係な客観的概念ではない。人間（推論主体）があってはじめて因果関係が成立する。因果律は人間（推論主体）が推論するためのヒューリスティクス (heuristics) なのである。無数に存在する事象の中の一部を便宜的に因果という関係で結び付けることによって、推論を可能にしている。Shoham も因果律が推論の計算効率を上げるという要請からきたことを指摘している [6]。このことを Shoham は「因果律は非単調推論と関係している」という言い方を [6] が、従来の論理の文脈にとられ過ぎた言い方であると思う²。このことは人間（推論主体）が膨大な情報の中の一部しか扱えないという情報の部分性からきたものであり、非単調推論は情報の部分性の一側面に過ぎない。むしろ不完全情報推論と関連すると言うべきであろう。

4 因果律とフレーム問題

前に、「人間も一般化フレーム問題を解決できないにもかかわらず、日常はほとんど悩まされていないように見えるのはなぜか」という疑似解決の問題が重要であると述べた。この疑似解決の問題に対する構造的な解答はまだ得られていない³が、とりあえず次のような考察を行なった [4]。

¹最近の物理学では、時間の向きが逆転した世界も考えられるということになっている。その世界ではこの世界のような因果律は成り立たない。

²Shoham の研究自体は重要であり高く評価したい。

³この解答が得られれば計算機に知性を持たせるという試みが半ば実現したと考えていいのではないと思う。

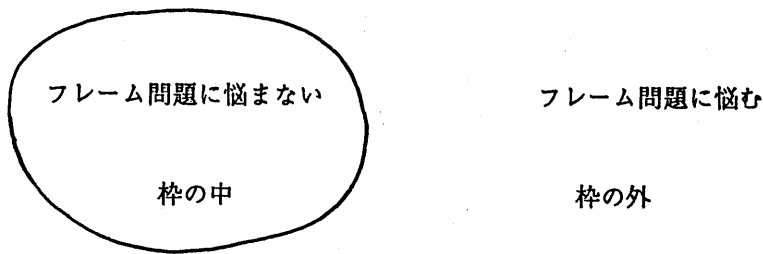


図 1: 情報に対する「枠」

人間はふつう有限の大きさの「枠」(frame)を情報に対して囲っている。ほとんどの情報処理はその枠の中の情報を参照することによって済むようになっていく。フレーム問題と直面する(そしてその結果として当然解けずに苦しむ)ことを回避しているのである。それでもたまにはその枠の中の情報だけでは済まないことがある。そうするとフレーム問題に直面し、解けずに苦しんでしまう。図 1 に情報の「枠」の様子を示す。枠がかなりうまくできていることが、人間がめったにフレーム問題に直面しないで済む最大の理由である。枠の中に求めている情報が存在しないときは、枠の中から最もましな情報を引き出してその代わりとするか、枠の外に出てフレーム問題に悩みながら求める情報を探るか、のどちらかになる。人間は一度囲ってしまった枠の外を探すことはあまりないように思える。その傾向のために、人間はときとして誤りを犯すのである(枠の中から無理矢理引き出した情報が間違っていたということである)。人間は、そのような犠牲を払った代償として、日常はフレーム問題に悩まずに済むという柔軟性・経済性を得ていることになる。

フレーム問題の疑似解決のための枠を構成しているのが一般にヒューリスティックスと呼ばれるものである⁴。これらのヒューリスティックスにしたがって(枠の中だけで)推論すればほとんどうまくいくようになっていく。ある領域の専門家はその領域に関するヒューリスティックスを持っているので適切な枠の中だけで推論することができる。初心者は持っていないので適切な枠を囲うことができずにフレーム問題に直面して苦しむことが多い。一般の人間が持っていると思われるヒューリスティックスには例えば以下のようなものがある。これらは厳密に分離されているものではない。

- 因果律(結果には原因がある)
- ものごとは時間的にほぼ連続的に推移する。
- ものごとは空間的にほぼ連続的に推移する。
- 自分が及ぼす影響は、ほぼ自分の身の回りの範囲までに限定される。
- 自分に影響を及ぼすのは、ほぼ自分の身の回りの範囲からに限定される。

これら以外にも人間はさまざまなヒューリスティックスを持っている。フレーム問題を狭くとらえる立場は、われわれから見れば、数多いヒューリスティックスの中の特定なもの(特に因

⁴ヒューリスティックスという用語を否定的に捉える傾向が一部にあるが、われわれはヒューリスティックスが情報処理における本質であると考えている。

果律)だけを特別視している⁵。これまでのフレーム問題の議論によく登場したものに STRIPS[11]とイェール射撃問題(Yale Shooting Problem: YSP)[12]がある。STRIPSはロボットの行動計画の自動生成システムであり、ロボットの行為を、次の3つ組で表現した。

- その行為が実行可能であるための前提条件
- その行為を行なうことによって状態に新たに加わることになる記述
- その行為を行なうことによって状態から取り除かれることになる記述

イェール射撃問題は以下のような問題である。

AとBの二人がいる。Bは銃を持っている。Bは銃に弾を込める。ある程度の時間が経過する。BはAに向けて銃を撃つ。(弾を込めた銃で撃たれると人は死ぬと仮定した上で)はたしてAは生きているか死ぬか?

非単調論理でこの問題を単純に解こうとすると、Aは生きているとAは死ぬの2つの解が出てきてしまうことがフレーム問題とからめて議論された[13, 14]。解を一つにするための工夫は以下の3つに分類される[14]。

- 時間の流れに沿った推論
- 明示された因果関係による推論
- 逆方向の推論を許さない推論

われわれの立場からすると、STRIPSもイェール射撃問題も、いかに特定のヒューリスティックスを効率的に記述するかという議論しかなされていなかったように思う。このことはフレーム問題がアーキテクチャ問題としてではなく内容問題として議論されていたことを示している。もちろんプランニングを考えるとときにはSTRIPSのように状態変化に関する特定の具体的なヒューリスティックスを数え上げることに内容問題としての価値は存在する。イェール射撃問題についても同様である。しかし内容問題を考えてばかりいても、そのようなヒューリスティックスがいったいどのような仕組でフレーム問題の疑似解決のための枠として出てきたのかについては知見が得られそうにない。特定のヒューリスティックスにこだわることなく、アーキテクチャ問題としてフレーム問題の疑似解決を捉えるべきである。

5 類推におけるフレーム問題と因果律

ここでは類推におけるフレーム問題と因果律について少し考えてみよう。類推にはいろいろな定義があるが、Winstonは「既知の状況から新しい未知の状況に(一部の)関係を写像すること」と定義している[15]。1980年台になって類推研究は盛んになってきたが、大きく分けてGentnerに代表される(Winstonを含む)シンタックス派(ボトムアップ派)[15, 16]と、Hollandに代表されるプラグマティック派(トップダウン派)[17, 18]との間で論争が繰り広げられている⁶。類推のモデルを考えるにあたっては、以下の2つの大問題が存在する。

⁵因果律だけではなく、いくつかのヒューリスティックスが絡み合っている場合もある。しかしヒューリスティックスの中の一部だけを特別視していることにはかわりはない。

⁶ここでは両派の詳しい説明は省略する。文献[19]にシンタックス派の類推の説明がある。

- ある未知の状況に対し、無数に存在する知識の中から適切な既知の状況をどのようにして選び出すか？
- ある既知の状況が選び出されたとして、その状況全体の中からどの関係を選んで未知の状況に写像するか？

簡単に言ってしまうえば、シンタックス派はこれらの問題はシンタックスによって（のみ）決定されると主張し、プラグマティックス派はプラグマティックスによって決定されると主張している。単純なボトムアップの照合ではまさにフレーム問題に直面することになり、計算量の爆発に苦しむことになってしまう。そこでシンタックス派は因果という（構文的な）関係を特別視して、この関係をてがかりに状況間の照合を取ることでフレーム問題を回避しようとする。プラグマティックス派は類推を行なう際の目的に応じたヒューリスティックスを考えて、そのヒューリスティックスが類推の過程を制御してフレーム問題を回避する（計算量の爆発を回避する）と見なしている。そのヒューリスティックスとして代表的なのが因果律である。われわれの立場からすると、両派の対立は実はささいなものに過ぎない。シンタックス派にしてもプラグマティックス派にしても、類推の過程を制御する因果律を場当たりのみで与えているだけであり、その因果律がどのようにして出てきたかについては満足な説明ができていない。類推のモデルでは、因果律をはじめとするヒューリスティックス⁷がどのようにして出てきたかを説明することが最も重要と考える。

6 おわりに

フレーム問題と因果律との間の関係について述べた。McCarthyらの狭い意味でのフレーム問題は、因果律などの特定のヒューリスティックスだけを特別視したものである。フレーム問題の疑似解決の枠を構成するヒューリスティックスは無数に存在し、その中の一部だけを特別視することはフレーム問題の疑似解決の機構を解明するという目的にはそぐわない。因果律を効率的に扱うようにするために、その他のヒューリスティックスを犠牲にしてしまう可能性がある。それに対して、われわれの提唱する一般化フレーム問題は、因果律だけを特別視することなく疑似解決の枠を構成するヒューリスティックスを平等に扱っている。フレーム問題の疑似解決というアーキテクチャ問題を考える上ではわれわれの立場の方が適当であると考え、今後は疑似解決の問題の構成的な解答を得るべくさらに考察を進めていきたい。

謝辞

フレーム問題における電子レンジと猫の例は名古屋大学教養部の戸田山和久氏夫妻との会話からヒントを得ました。また時間と空間の話は「意味と理解研究会」における議論に影響を受けました。日頃からフレーム問題と因果律について議論していただいている電総研の中島秀之氏に感謝します。

参考文献

- [1] McCarthy, J. & Hayes, P. J.: "Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence", *Machine Intelligence*, vol.4, pp.463-502 (1969). (「人工知能になぜ哲学が必要かーフレーム問題の発端と展開ー」, 哲学書房 (1990) に翻訳が収録)
- [2] 松原 仁, 山本 和彦: "フレーム問題について", *人工知能学会誌*, vol.2, no.3, pp.266-272 (1987).

⁷シンタックス派はこれらが構文的に表現されていると主張していることになる。

- [3] 松原 仁, 橋田 浩一: "情報の部分性とフレーム問題の解決不能性", 人工知能学会誌, vol.4, no.6, pp.695-703 (1989).
- [4] 松原 仁: "フレーム問題をどうとらえるか", 日本認知科学会編「認知科学の発展」, vol.2, pp.155-187 (1990). (「人工知能になぜ哲学が必要かーフレーム問題の発端と展開ー」, 哲学書房 (1990) にも若干の改編の上で収録)
- [5] 橋田 浩一: "制約と言語", コンピュータ・ソフトウェア, vol.6, no.4, pp.16-29 (1989).
- [6] Shoham, Y.: "Nonmonotonic reasoning and causation", Cognitive Science, vol.14, pp.213-252 (1990).
- [7] de Kleer, J. & Brown, J.S.: "A qualitative physics based on confluences", Artificial Intelligence, vol.24, pp.7-83 (1984).
- [8] Iwasaki, Y. & Simon, H.A.: "Causality in device behavior", Artificial Intelligence, vol.29, pp.3-32 (1986).
- [9] 西田 豊明: "定性推論 - 常識的思考法のモデル -", 人工知能学会誌, vol.2, no.1, pp.30-43 (1987).
- [10] 安西 祐一郎: "問題解決の心理学", 中公新書 (1985).
- [11] Fikes, R. & Nilsson, N.: "STRIPS: a new approach to the application of theorem proving to problem solving", Artificial Intelligence, vol.2, pp.189-208 (1971).
- [12] Hanks, S. & McDermott, D. "Nonmonotonic logic and temporal projection", Artificial Intelligence, vol.33, pp.379-412 (1987).
- [13] 松原 仁, 山本 和彦: "フレーム問題, 非単調論理, イェール射撃問題の間の関係についての一考察", 人工知能学会誌, vol.4, no.1, pp.70-76 (1989).
- [14] 佐藤 健: "Yale Shooting 問題とその解決へのアプローチ", 人工知能学会誌, vol.3, no.2, pp.132-138 (1988).
- [15] Winston, P.: "Learning and reasoning by analogy", CACM, vol.23, no.12, pp.689-703 (1980).
- [16] Gentner, D.: "Structure mapping: theoretical framework for analogy", Cognitive Science, vol.7, pp.155-170 (1983).
- [17] Holland, J., Holyoak, K., Nisbett, R. & Thagard, P.: "Induction: processes of inference, learning, and discovery", MIT Press (1986).
- [18] Holyoak, K. & Thagard, P.: "Analogical mapping by constraint satisfaction", Cognitive Science, vol.13, pp.295-355 (1989).
- [19] 半田 剣一, 松原 仁, 石崎 俊: "学習におけるアナロジー", 人工知能学会誌, vol.2, no.1, pp.44-51 (1987).