

自由エネルギー原理に基づく設計プロセスのモデルの構築に向けて

C・S・パースの探究の理論を媒介とした検討

Toward a Model of Design Process Based on Free Energy Principle

A Discussion Mediated by C. S. Peirce's Theory of Inquiry

○山口純 (武蔵野美術大学) *1 柳澤秀吉 (東京大学) *2 鈴木杏奈 (東北大学) *3

*1 Jun YAMAGUCHI, Musashino Art University, 1-736 Ogawa-cho, Kodaira-shi, Tokyo, 187-8505, hylozoicdesign@gmail.com

*2 Hideyoshi YANAGISAWA, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo, 113-8656, hide@mech.t.u-tokyo.ac.jp

*3 Anna SUZUKI, Tohoku University, 41 Kawauchi, Aoba-ku, Sendai, 980-8576, anna.suzuki@tohoku.ac.jp

キーワード: 自由エネルギー原理, C・S・パース, 探究, アブダクション, 設計プロセス

1. はじめに

1.1. 目的

本研究は「自由エネルギー原理」(Free Energy Principle)に基づいた設計プロセスのモデルを構築することを目指している。自由エネルギー原理は、脳は自由エネルギーを最小化するように振舞うとする原理である。自由エネルギーとは、予測誤差の指標である。脳は環境からの感覚信号を、内部モデルを基に予想しており、この予想と実際の信号のズレを最小化するように、知覚と行動を行う。

第一著者の山口は哲学者 C・S・パース (Charles Sanders Peirce, 1839-1914) の「探究」(inquiry) の理論に基づいた設計プロセスのモデルを構想している⁽¹⁾。また、第二著者の柳澤は、自由エネルギー原理を用いて人間の感性を数理的にモデル化し様々な設計問題へ応用している⁽²⁾。パースの探究の理論と自由エネルギー原理の間には親和性がある。第三著者の鈴木と山口は地域共創に関する研究において、パースの探究の理論と自由エネルギー原理をつなげて議論した⁽³⁾。本論はより本格的に両者の関係を探索する試論である。

管見の限り、自由エネルギー原理に基づいた設計プロセスに関する既往研究は見当たらない。自由エネルギー原理は環境に適応するシステムの原理として提案されている。設計がそのようなシステムの振る舞いであるならば、自由エネルギー原理に従うはずである。本論の目的は、パースの探究の理論と自由エネルギー原理の対応関係をもとに自由エネルギー原理に基づいた設計プロセスのモデルの構築のための基本的な足掛かりを得ることである。

1.2. 構成

本論ではまず第1章で設計方法論のコンテキストを確認する。設計方法論の研究において、問題設定がなされた後の問題解決のプロセスの合理化・効率化に焦点が当てられてきたが、そのために、問題設定がないがしろにされてきた。そこで、問題設定を重視した設計方法論が求められる。

第2章で、自由エネルギー原理の概説を行う。

第3章では、パースの探究の理論の概説を行い、探究としての設計という考えを示す。パースは、「疑念」から「信念」へと向かうプロセスを「探究」とよび、探究が三つの推論形式すなわち、アブダクション、演繹、帰納からなると考えた。疑念をもたらすのは予想から逸脱する「驚くべき事実」である。設計もまた探究として見なせるが、パースの理論を拡張し、論理的探究のみならず、倫理的、美学的探究を考える必要がある。

第4章では、自由エネルギー原理とパースの探究の理論を対応づけることで、自由エネルギー原理に基づいた設計プロセスのモデルの概要を示す。

第5章は本稿のまとめであり、課題と展望について示す。

1.3. 設計方法論の文脈

設計方法論の体系的な研究が始まったのは1960年代であった。サイバネティクスなどの数理的問題解決の技術を用いて設計を合理化・効率化しようというのが当時の設計方法論の主流であった。建築家のクリストファー・アレグザンダー (Christopher Alexander) の「形の合成に関するノート」はサイバネティクスの理論に影響を受けており、ここで彼は、設計への要求条件の集合の分析に基づいて設計を行う手法を提案した。(ただし彼の意図は合理化・効率化というよりは美しい建築を設計することであった)⁽⁴⁾。しかし後にアレグザンダー自身がこの方向を否定して、単なる要求条件の集合ではなく、「自らバランスを保つ自己言及的なシステム」を考えるべきだとした⁽⁵⁾。ホルスト・リッテル (Horst Rittel) は、設計の問題とは数学の問題と異なり決定的な定式化ができない「意地悪な問題」(wicked problem) であるため、設計は政治的な論争として見なすべきであるとした⁽⁶⁾。哲学者のドナルド・ショーン (Donald Schön) は解決に先立って問題を確定することはできず、不確定性をもった状況との相互作用の中で何が問題であり何が解決であるかを規定する「フレーム」が更新されうるとした⁽⁷⁾。

設計が技術的問題解決に還元できない政治的なものだという事は、設計を専門家だけで閉じて行わずステークホルダーの参加を通して行う「参加型デザイン」や、非標準的なニーズを持ったユーザーの参加を促す「インクルーシブデザイン」の根拠になった。近年では問題設定のさらに手前での問題提起に注目する「スペキュラティブ・デザイン」(speculative design)の考え方も広まっている⁽⁸⁾。問題設定において何らかの将来像が前提となるわけであるが、スペキュラティブ・デザインでは、現実的な将来像や倫理的な善悪の手前で、可能性を探索することで問題設定のスコープを広げようとする。

またシステム論のなかでは、初期のサイバネティクスが外部から観察されコントロールされるシステムを扱っていたのに対して、内部から自己言及的に観察する自律的なシステムを扱おうというセカンドオーダー・サイバネティクスや、オートポイエシスの理論が生まれた⁽⁹⁾。自由エネルギー原理もオートポイエシスの理論を受けて自律的なシステムを扱おうとしている。セカンドオーダー・サイバネティクスからの設計理論も提案されており、そこでは問題解決だけではなく倫理や対話といったことが主題になる⁽¹⁰⁾。

以上のように、設計方法論においては問題解決だけではなく問題設定が問われる。自由エネルギー原理にもとづく設計プロセスのモデルもこの点を踏まえねばならない。

2. 自由エネルギー原理

2.1. モデルと世界とのズレの最小化

自由エネルギー原理は、神経科学における脳機能の説明の原理として Friston (Karl Friston) らによって提案されたものである⁽¹¹⁾。人を含むシステムの環境への適応の仕方は、システムの種類や範囲や時間スケールごとに多様に存在し、異なる分野で研究されてきた。一方でサイバネティクスや一般システム論など、適応的なシステムの統一原理を求める研究も存在してきた。自由エネルギー原理もまたその方向性にある。出自としては神経科学における脳機能の説明の原理であるが、それを超えて分野を横断するフレームワークが目指されている。

適応システムの前提条件として、環境から分離して自律性を有するということがある。システムと環境の分離の形式的な表現が「マルコフ・ブランケット」(Markov blanket)である。マルコフ・ブランケットは活動状態と感覚状態という二つからなる、内部状態と外部状態を区別する境界である。内部状態は活動状態を介して間接的に外部状態に影響を与え、外部状態は感覚状態を介して間接的に内部状態に影響を与える。前者が行動であり、後者が知覚である。内部状態と外部状態は、マルコフ・ブランケットを介して間接的に相互作用するが、直接的には相互作用しない。

自由エネルギー原理は、環境に適応するシステムは知覚と行動をとおして、認識と環境のズレを最小化しようとするはずだと考える。自由エネルギー原理では、このズレが自由エネルギーとして定式化され、知覚と行動の両方が協働的にそれを最小化すると考える。自由エネルギーを下げる推論として捉えられた行動が、「能動的推論」(active inference)と呼ばれる。行動をとおした生態学的ニッチの

形成もまた、自由エネルギー原理の射程にある。

2.2. 無意識的推論

自由エネルギー原理のルーツにあるのは、ヘルムホルツ (Herman von Helmholtz, 1821-1894) が提唱した「無意識的推論」というアイデアである。ヘルムホルツは感覚が直接的に知覚を生み出すのではなく、感覚の原因についての無意識的推論が知覚を生み出すと考えた。たとえば、空からの光は、直接に私たちが普段目にする空についての視覚をもたらすのではない。人間の眼球は周辺視野の分解能が低く網膜には盲点がある。それでも明晰な空の視覚を得ることができるのは、脳が世界の見方を学習し、それに基づいて何を視るかを無意識に予想しているからだと考える。

無意識的推論の考えは近年では「ベイズ脳」仮説として再定式化された。ベイズ脳仮説は脳がベイズ推論を行うという仮説である。ベイズ確率とは、確率を客観的な頻度や傾向ではなく主観的な信念の度合いとして理解する解釈である。ベイズ確率をもとにして、観察可能な事象から、その原因となる観察不可能な事象(隠れ状態)の確率を求める推論がベイズ推論である。しかし完全な世界の知識を持たない生命にとって厳密なベイズ推論は現実的には不可能である。そこで自由エネルギー原理は、変分自由エネルギーを導入することでベイズ推論の変分近似を行うのである。

2.3. ベイズ推論

ベイズ推論を行うには「生成モデル」が必要である。生成モデルは、観察データ o と、その観察データの原因となる世界における隠れ状態(直接観察できない状態) s の、同時確率 $p(s, o)$ として定式化される。

ベイズの規則より、以下の式が成り立つ。

$$p(s, o) = p(s)p(o|s) = p(o)p(s|o)$$

ここで、 $p(s)$ は事前確率と呼ばれ、観察データを受け取る前の、環境の隠れ状態についての知識を意味する。 $p(o|s)$ は特定の隠れ状態のもとで観察データが見られる条件付確率で、尤度と呼ばれる。隠れ状態からどのように観察データが生成されるかについての知識を意味する。 $p(s|o)$ は事後確率と呼ばれる。事後確率は観察データを受け取った後の隠れ状態の確率である。

ベイズ推論は、観察データを受け取ったのち、事前確率を事後確率へと更新する。つまりベイズの規則から次のように事後確率は以下ようになる。

$$p(s|o) = \frac{p(s)p(o|s)}{p(o)}$$

ここで必要な $p(o)$ は観察データの周辺確率であり、同時確率を周辺化することによって求められる。観察データの周辺確率は「モデル証拠」と呼ばれ、その負の対数はサブライズと呼ばれる。

例として、天気は晴れか雨のどちらかであるが、直接に観察できず(隠れ状態)、皮膚が濡れるか濡れないかを観察する(観察データ)ことを考える。事前確率が晴 0.9、雨 0.1 であるとする。また尤度は、晴れで皮膚が濡れる確率 0.01、雨で皮膚が濡れる確率 0.81 であるとする。皮膚が濡れることの周辺確率は、晴れで濡れる同時確率と雨で

濡れる同時確率を足せばよいので（周辺化）， $0.9 \times 0.01 + 0.1 \times 0.81 = 0.09$ となる．したがって，もし皮膚が濡れるときに，そのサプライズは $-\ln(0.09) = 2.4$ ナットであり，晴れであるという事後確率は次のよう計算される．

$$p(s = \text{晴} | o = \text{濡}) = \frac{p(s = \text{晴})p(o = \text{濡} | s = \text{晴})}{p(o = \text{濡})} \\ = 0.9 \times 0.01 / 0.09 = 0.1$$

2.4. 変分自由エネルギー

ベイズ推論が実現すれば，この事後確率を隠れ状態についての認識とすることができるが，実際の生物にとっては事後確率 $p(s|o)$ とモデル証拠 $p(o)$ は計算困難である．そこで，ベイズ推論の変分近似を行うと考える．事後確率を近似事後分布 q で近似する．予測誤差を表すものとして変分自由エネルギー $F[q, o]$ が次のように書ける．（この式は数学的に等価なものに多様に変形して解釈することができる．右辺はそのまま事後確率 $p(s|o)$ とモデル証拠 $p(o)$ を含み計算困難であるが，計算可能な形に変形することができる．）

$$F[q, o] = D_{KL}[q(s) || p(s|o)] - \ln p(o)$$

右辺の第一項はカルバック・ライブラー・ダイバージェンス（KLD）であり，二つの確率分布の非類似度の指標である．この場合，事後確率と近似事後分布の非類似度である．第二項は証拠の負の対数でありサプライズである．自由エネルギー原理は，生物はこの F を知覚と行動を通して最小化しようとすると考えられる．

知覚は第二項を固定したままで，第一項を下げることで， F を下げる．つまり， $p(o)$ は固定したまま F を最小化するように近似事後分布 q を求める．近似事後分布が理想的であり事後確率に等しくなる場合に，KLD はゼロになり，変分自由エネルギーはサプライズと等しくなる．

行動は第一項を固定したままで，第二項を下げることで， F を下げる．つまり，近似事後分布 q を固定したまま認識に合うデータを得ることで証拠を最大化しようとする．

たとえば，晴れているはずだと思っていったのに体が濡れるときに，環境とのズレが生じている．こうしたズレのために，風邪をひくなどして，システムの持続可能性が下がる．知覚は雨であると認識を変える．行動は雨宿りをする．こうして身体と環境のズレが解消される．

2.5. 期待自由エネルギー

期待自由エネルギーは，自由エネルギー原理を将来の行動計画にも拡張するものである．行動計画は，将来得られるであろう観察データに基づいて，可能な行動の系列であるポリシーを推論する． δ と π はそれぞれ時間変化に伴う隠れ状態と観察データの系列あるいは軌道を表し，生物が従うポリシー π に条件づけられる．生成モデルは研究の目的に応じて仮説として任意に設定されるが，いずれにせよ生成モデルにもとづいて期待自由エネルギー $G(\pi)$ が小さくなるようなポリシー π を推論すると考える．期待自由エネルギーも数学的に等価な異なる式で表現できるが，例えば次のように書ける． E は期待値を表している．

$$G(\pi) = -E_{q(\delta|\pi)}[D_{KL}[q(\delta|\pi) || q(\delta|\pi)]] - E_{q(\delta|\pi)}[\ln p(\delta|C)]$$

上式の右辺第一項は観察による認識の変化の程度を表しており，認識的価値を意味する．第二項は選好 C が含まれており実利的価値を意味する．期待自由エネルギーの第一項と第二項は，行動の認識的で探索的な価値と実利的で利用的な価値のバランスを取ることを表現している．

たとえば，皮膚が水に濡れないことへの選好があると考える．周囲を完全に覆うようなシェルターを作れば，皮膚が濡れることはなくなるが外部環境が分からない（認識的価値が低い）．シェルターを出て旅をすれば，天候についての知識が得られるが，びしょ濡れになることもあるだろう（実利的価値が低い）．そこで丁度良い窓を作って，たまに雨が吹き込むことがあっても天気が分かるようにする．

これに加えて，ポリシーの設定においては，変分自由エネルギーと期待自由エネルギーのバランスを取っている．ポリシーの精度を「自信」（confidence）と言い，自信によって期待自由エネルギーへの重みづけを行ってポリシーが選ばれる．シェルターを作れる自信がなければ，とりえず近くの木で雨宿りするのである．

2.6. 注意

自由エネルギー原理において物事は確率分布を持ったものとして扱われる．確率分布の分散が小さいことを精度が高いという．注意は精度を高めることだと理解される⁽²⁾．精度が高いほど予測誤差が大きく捉えられる．たとえば，同じ期待値で晴れると信じていても，天気には注意している（精度が高い）ほうが，注意していないときより雨に驚く．

2.7. 学習

学習は生成モデルの最適化として理解される．知覚や行動が隠れ状態についての認識やポリシーを変えることで自由エネルギーを下げるのにたいして，学習は生成モデルのパラメータの関係についての認識を変えることで自由エネルギーを下げる．後者は前者があつてはじめて成立するものであり，前者よりゆっくりと進む．

2.8. 感情

バーライン（Daniel Ellis Berlyne 1924-1976）の覚醒ポテンシャル理論によれば，新規性，複雑性，予想外さを意味する適度なポテンシャルと，快不快の感情価の関係は，ヴェント曲線を描く．これは，適度に覚醒ポテンシャルがある状態が快感情を最大化するというものである．

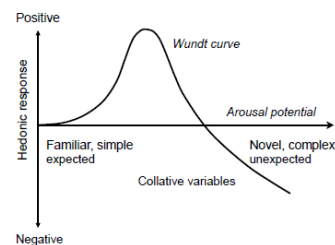


fig.1 Wundt curve⁽¹²⁾

自由エネルギーは新奇性に対する驚き，不確かさ，複雑さがもたらす情報量の和と解釈でき，これらは覚醒ポテンシャルの因子であるため，自由エネルギーを覚醒ポテンシャルの指標とみなしうる⁽¹²⁾．自由エネルギー原理において自由エネルギーは最小化されるはずだと考えるが，短期的には自由エネルギーがある程度あるほうが良い．これは

ある程度自由エネルギーがある状態を求めたほうが学習を行うことができるため長期的には自由エネルギーが下がるからだと考えられる。

また感情は自由エネルギーの変化量として見なす。多義図形の知覚において、ある解釈から別の解釈へと移行するときに、自由エネルギーが一度上がってから下がっていると考える。こうした上下の変化が興味深さの感情をもたらすと考えられる⁽²⁾。このように、感情は環境に適応するシステムの制御のパラメーターとして理解されるのである。

3. 探究としての設計

3.1. 可謬主義的認識論

パースは無媒介的認識という意味での直観が存在しないために知識の絶対的基盤は存在しえず、あらゆる認識は習慣 (habit) に媒介されているために誤りうるという可謬主義 (fallibilism) 的な認識論を採る⁽¹³⁾。習慣は進化する。習慣の進化のプロセスが探究 (inquiry) である。探究を通して、疑念の状態から信念の状態に至る。

3.2. 探究と推論の三形式

パースはアブダクション、演繹、帰納という三つの推論形式が相互に還元できないものとして存在すると考えた。三段論法の大前提 (法則)、小前提 (事例)、結論 (結果) という三つの命題の入れ替えで三つの推論形式が定義される。つまり、演繹は大前提と小前提から結論を、帰納は小前提と結論から大前提を、アブダクションは結論と大前提から小前提を推論する。

推論の三形式は探究三つの段階に対応する。アブダクションは探究の最初の段階として次のように定式化される (CP 5.189) (CP は参考文献 13 の Collected Papers of Charles Sanders Peirce の略記であり、数字は巻と節)⁽¹³⁾。

驚くべき事実 C が発見される。
 しかしもし A が真であれば C は当然のことであろう。
 したがって A が真であると疑う理由がある。

予想から逸脱する驚くべき事実は、既存の習慣を破綻させ疑念を生み出す。アブダクションはその事実の原因についての新しい仮説を生む。演繹はこの仮説が正しければ何が生じるはずかという予想を展開する。帰納はこれを事実と照合することで検証する。事実と合えば仮説が信念となる。三つの推論形式を以下の図のようにまとめることができる⁽¹⁾。一番右の図は三つの推論形式をあわせて探究になっていることを示している。

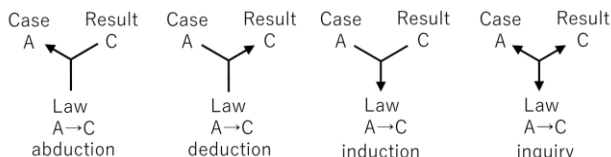


fig.2 three forms of inferences

3.3. 三つのカテゴリー

パースは三つのカテゴリーによってすべての存在のあり方を分類している。すなわち、一次性 (firstness)、二次性 (secondness)、三次性 (thirdness) である。一次性は、質

や可能性の存在様式、二次性は事実や反作用の存在様式、三次性は媒介や法則や習慣の存在様式である。探究の理論を含めてすべてのパースの哲学の全体がこの三つのカテゴリーに従って組織化されている。推論形式に関しては、小前提を一次性、結論を二次性、大前提を三次性に対応させている (CP 2.712)。探究の三つの段階として三つの推論形式をカテゴリーに結び付けて説明すると、アブダクションの契機となるのは、驚くべき事実、つまり演繹された予想と一致しない事実 (二次性) である。アブダクションは驚くべき事実を説明する仮説を可能性 (一次性) として生むが、そのとき習慣 (三次性) の暫定的変化を伴う。演繹は、事実の予想 (二次性) を仮説の帰結として導く。帰納は予想と一致する事実から仮説の妥当性を検証する。これは、アブダクションによって暫定的に変化した習慣 (三次性) が確定される段階である。

3.4. 無意識的推論

無意識的推論の提唱者としてヘルムホルツの他にヴント (Wilhelm Maximilian Wundt, 1832-1920) が知られている (ヴント曲線の由来である)。両者は同時期に互いに影響を与えながらこのアイデアを発展させたようである (ただヴントは後にこのアイデアを捨てる)。パースは同時代に両者の著作を読んでいるが、無意識的推論に関してはヴントの理論として取り入れている⁽¹⁴⁾。推論の三形式は、制御された意識的推論だけではなく、無意識的な習慣に基づく無意識的推論の三つの形式とされる。たとえばアブダクションは知覚判断、演繹は習慣の実行、帰納は習慣形成の形式であるとされる。

知覚判断がアブダクションであることを説明するためにパースは下図を描いている。この図は蛇のように曲がりくねった線か、あるいは石垣のように二通りの仕方に見える。知覚判断とは「知覚内容」(percept) についての解釈である (CP4.539)。知覚内容は直接的な現れであるが、我々は現れをこの場合なら線や境界といった一般的なクラスに無意識的に分類する習慣を持っているのである。知覚判断は習慣に媒介された無意識的推論である。



fig.3 “serpentine line” or “stone wall” (CP 5.183)

さらにいえば「我々の知覚内容すら認知的精緻化の結果である。」 (CP 5.416) したがって知覚判断を推論形式として分析すれば「アキレスと亀の詭弁」のように無限のプロセスを踏んでいることになる (CP 5.181)。他方で、パースは思考とはダイアグラムの描写と観察、解釈のプロセスであるという (CP 1.54, CP 1.35)。幾何学だけではなく、三段論法のような場合においても、三つの命題の間の形式を知覚しなくてはならないのである。パースはこのように知覚と推論は連続的であると考えた。これは、直観と推論を厳密に切り分けようとしたカント (Immanuel Kant, 1724-1804) の感性論を棄却しようというものであった。

3.5. 二重過程

この章の以下では山口・門内⁽¹⁾で行ったパースの理論の

拡張について説明する。意識的推論と無意識的推論からなる過程を二重過程 (dual process) という (ただしパースはこの言葉をつかってはいない)。意識されたものとは知覚されたものであるとみなす。内省的な思考であっても心の中にダイアグラムを描いてこれを知覚している。したがって、意識的な推論は無意識的なアブダクションの結果であり、下図のように、無意識的な推論の生み出す仮説として意識的な推論があると考えられる。

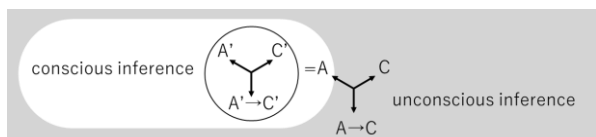


fig.4 conscious and unconscious inferences

無意識のアブダクションは知覚であり、演繹は行動であるとみなす。無意識的推論を媒介する習慣に基づいて行動 (演繹) と知覚 (アブダクション) が生じ、それを通じて無意識的な習慣が形成される (帰納)。行動は何を知覚するであろうかについての無意識的な予想を含む。この予想とのずれを知覚する。

3.6. 探究と規範学

設計は何を作るべきかに関して疑念がある状態から、信念を持つ状態へと至る探究であると考えられることができる。ある目的を設定した上で、その手段にかなする仮説をアブダクションによって生み出し、その帰結を演繹的に導き、その妥当性を帰納的に検証する。このように小前提 (事例) を手段、結論 (結果) を目的に対応させることで、設計の問題解決としての面を探究として理解できる。

ところが一章で述べたように設計を単なる問題解決としてみなすべきではない。問題設定を所与とするのではなく、設計の中で変化する問題設定を含んだものとして設計を捉えることが重要になる。そこで、パースの規範学すなわち、美学、倫理学、論理学の区別を導入する。この三つはそれぞれ、表現性 (expressiveness)、誠実性 (veracity)、真理 (truth) という良さの探究である。より一般的な言い方では表現性は美、誠実性は善である (ただし美が一般的に快を含意するのにたいして、表現性は快でなくてもよい)。論理学は思考についての理論であり、その原理を倫理学に依拠している。そして倫理学は行動の理論であり、感じ方の理論である美学がもたらす理想に依存している。このようにパースは論理学が倫理学に依存し、倫理学が美学に依存すると考える (CP 1.191)。

パースは論理学の中に探究の理論を位置づけた。それは事実を説明する真なる理論を目指す科学的な探究を想定するからである。しかし設計は事実を説明するものではなく、真だけではなく、善や美が問われる。そこで、探究としての設計には論理的な次元だけではなく、倫理的、美学的次元もあると考える。問題設定の後の問題解決にかんしては論理的に真偽を問えるとしても、問題設定したいを論理的に正当化しようとすれば無限後退になる。そこで問題設定は、善かどうかという倫理的な判断であるとみなさなくてはならない。倫理において問われるのは誠実性とは主張を信念に一致させることである (CP 5.570)。問題設定は、目的と制約からなる。つまりそれは現実の制約のなかで何

を目的とするか、である。これは現実の制約を度外視にしたときに何を理想とするかに依存している。この理想を生み出すのが美学的探究であると考えられる。異なった理想を持つてば異なった現実が制約として浮かび上がるのである。美学的探究は感じ方の探究である。感じられるものが変わると現実の認識が変わる。

たとえば、論理的探究は、体が濡れないという目的設定のもとで、手段としていろいろな屋根やそれ以外の方法を考える。そこでは屋根が雨を防ぐかどうかという真偽が問われる。より効率的に雨を防ぐデザインを考えることに論理的次元での創造性がある。

他方で、体が濡らさないといった、目的の設定は倫理的探究においてなされる。そもそも体が濡れないことを善とするのかどうかの判断である。もちろん問題設定についても論理的に根拠を述べるができる。たとえば体が濡れると風邪をひくので濡れないほうが良いと。しかし論理的な正当化は無限後退する。なぜ風邪をひかないのが良いのか正当化しなくてはならない。たまには風邪をひくほうが健康に良いという考えもある。そのなかで、どこかで無限後退を切らないといけない。設計の実際においては慣習的な判断がなされる。慣習が自分の信念に合致していれば、それに沿うことも誠実である。他方で慣習が信念に沿わない場合、慣習を超えてこれまで問題を設定するところに設計の倫理的な創造性があるだろう (たとえば、これまで目的として考慮されてこなかった建物に住む微生物や植物にとっての良さを設計の目的とする、ポスト人間中心主義的な態度)。自由エネルギー原理はシステムが持つべき問題設定を規定しているように思われるかもしれない。しかしながらそこでも、どのシステムにとっての自由エネルギーを最小化しようとするのか、どのような生成モデルを想定するのか (そのシステムの境界をどこに設定するのか、そして期待自由エネルギーの場合は選好をどう設定するのか) といったことは究極的には論理だけでは決まらず、倫理的に設定しなくてはならない。

現実の制約を度外視して理想を生み出すのが探究の美学的次元であり、問題設定は理想に依存している。たとえば、カラッと乾いた感じを理想とするのか、ジメッと湿った感じを理想とするのか、があり、あるいはジメッとした感じとは異なるジトツとした感じやシメツとした感じを見つけるかもしれない。より洗練されたものとして古典主義とロマン主義のような歴史のある理想の違いがある。建築家の安藤忠雄の設計した「住吉の長屋」は居室とトイレの間に屋外の中庭があるため雨の日は傘をさしてトイレに行くという。これも何かしらの美学的な理想ゆえにそうしていると考えられる。この理想のなかでは、雨の日にトイレに行くために傘が必要になることは、建築によって解決されるべき問題とされないのである。

このように設計の論理的次元、倫理的次元、美学的次元の区別をしたうえで設計方法論のコンテキストを振り返ると、初期の設計方法論は合理性や効率性といった設計の論理的次元に焦点をあてたが、その後、参加型デザインやインクルーシブデザインは政治性や公正さといった倫理的次元に焦点をあて、スペキュラティブ・デザインが可能性の拡張という美学的次元に焦点をあてた、と言えるだろう。

3.7. 規範学と記号分類

パースは規範学の三分野を「名辞記号 (rheme)」、「命題記号 (dicisign)」、「論証 (argument)」という記号分類に対応させて記述している。名辞記号は対象が示されていない記号、命題記号は対象が示されているが解釈が示されていない (理由が示されていない) 記号、論証は解釈が示されている (理由が示されている) 記号である。推論は論証であり推論の三形式は論証の細分類である。パースは美学的な良さである表現性は名辞記号、命題記号、論証記号全てが持ちうるが、倫理的な良さである誠実性は名辞記号、論証記号しかもたないという (CP 5.140~142)。一般的に命題が真であると言うことがあるが、命題が真であるというのは、「誠実な知覚判断からの正しい論証によって論理的に導かれたということ」である (CP 5.142)。パースは命題の真理性とは結局のところ命題自体というより、命題を導く論証が持つものなのだと考える。

そこで次のように考える。探究の論理的次元は論証を、倫理的次元は命題記号を、美学的次元は名辞記号を主題とする。下図で、「C. A→C. ∴A」という無意識的なアブダクションの結果が意識されている。論理的次元は「C'. A' →C'. ∴A'」という論証の真理性に焦点をあてる (この例はアブダクションだが、他の推論形式でもよい)。たとえば、「私は濡れていない場所で暮らしたい、屋根があれば濡れない、したがって私は屋根のある場所で暮らしたい」である。この論証は、たとえば、設計における問題 C' と解決 A' の論理的関係が正しいのかを問う。倫理学は命題記号の誠実性に焦点をあてる。たとえば、問題 C' が誠実な問題設定であるのかを問う (他の命題、つまり A' や A' →C' でも良い)。「私は濡れていない場所で暮らしたい」という主張が信念に合致するのかという誠実性が問われる。命題記号はたとえば「b は c である」と書けるが、その対象を示す主語を省いた「~は c である」が名辞記号である。美学的次元においてはその対象がなんであるかを度外視して、c の表現性を追求する。c は問題から対象という制約を取り去った理想として解釈できる。「私がそこで暮らす」といった制約を度外視して、濡れていない、カラッとした感じの質の可能性を探究する。

設計において、三つの次元を往復することで、論理的次元においては問題解決をしつつ倫理的次元において問題設定を行い、さらに美学的次元においてその前提となる理想を更新する。

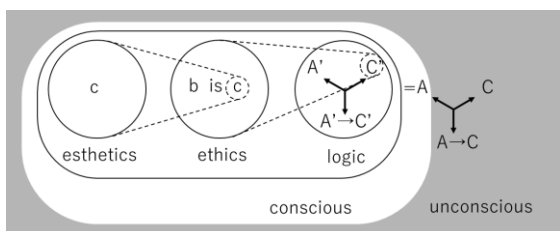


fig.5 inquiry with esthetical, ethical, and logical dimensions

4. 自由エネルギー原理と設計

4.1. 推論の三形式と自由エネルギー原理

自由エネルギー原理とパースの無意識的推論の三形式と

の対応関係として、大前提が生成モデル $p(s,o)$ 、小前提が隠れ状態についての認識 $q(s)$ 、結論が観察データ $p(o)$ に対応すると考えることができるだろう (fig.6 中央)。すなわち、知覚はアブダクションであり、観察データを固定した上で自由エネルギーを下げるような隠れ状態の認識を推論する。行動は演繹であり、隠れ状態についての仮説を固定した上で自由エネルギーを下げるようなデータを生むように推論する。学習は帰納であり、知覚と行動の繰り返しによって生成モデルを形成する。

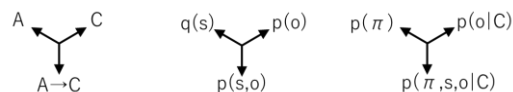


fig.6 inferences in terms of free energy principle

この対応関係はもちろん、完全なものではない。自由エネルギー原理は計算機による実装が可能なものでありうるが、実装されたプログラム上のエージェントの振る舞いは法則に従うだけなので、知覚も学習も演繹とみなされるだろう。しかし、あるプロセスが、アブダクション、演繹、帰納のどれなのかは解釈による。人間の心も、システムの外からみたときに、既存の法則性にしがって演繹的に作動しているだけだとみなすことができる。ところが少なくともシステムの内側からみると、そのような完全な法則性は知られておらず、可塑的な習慣が存在し、その習慣から逸脱する「驚き」をきっかけにアブダクティブに変化する。自由エネルギー原理において、最適な生成モデルの選択や、生成モデルのパラメーターの最適化としての学習を考慮することができるが、いずれにせよ予め最適化の枠組みが与えられている。パースの習慣に相当するものとして生成モデルを考えることになるが、習慣はあらかじめ最適化の枠組みが与えられているものではなく、探究を通じて最適性の基準となる目的の進化があると考えられる。

4.2. 隠れ状態についての認識としての意識

パースやヘルムホルツの無意識的推論の考え方では、知覚された内容はすでに無意識的推論の結果である。自由エネルギー原理では、観察データからの無意識的推論あるいは知覚によって、隠れ状態についての認識が得られる。そこで、意識されているのは隠れ状態についての認識であり、観察データ自体ではないと考える。パースがアキレスの亀のたとえで述べたように、観察データじたいを意識しようとすれば、それもまた、より生の観察データからのアブダクションの結果であることになる。

4.3. 隠れ状態の階層

探究に美学的次元、倫理的次元、論理的次元を区別し、それぞれが意識の上で名辞記号、命題記号、論証が主題となると考えた。名辞記号、命題記号、論証の関係を確率論的因果関係に還元できるとは考えない。しかし自由エネルギー原理に沿った理論展開のために、名辞記号、命題記号、論証に対応する隠れ状態 s_1, s_2, s_3 からなる生成モデルを考えることができるだろう。そこには多様な構造が想定できるが、たとえば以下のようなものを考える。 s_1, s_2, s_3 をそれぞれ、直接的な現れ、事実、法則性 (習慣) として解釈できる。それぞれに関する認識として、 $q(s_1), q(s_2), q(s_3)$ を考える。

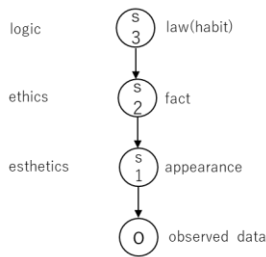


fig.7 generative model with three levels of hidden states

無意識的推論はこの生成モデルに基づく自由エネルギーの最小化としてなされると考える。美学的次元、倫理的次元、論理的次元においてはこの生成モデルの部分がそれぞれ別の仕方意識されている。この生成モデルは法則性が事実を介して観測データをもたらすという生成プロセスのためのモデルであるため、論理的次元に倫理的次元が依存し倫理的次元に美学的次元が依存している。一方で探究は観測データから事実の認識を介して法則性の認識へと向かうため、逆に美学的次元に倫理的次元が依存し、倫理的次元に美学的次元が依存する。

探究の三つの次元の違いは、どの階層の隠れ状態に注意を向けるかである。注意は確率分布の精度（分散の小ささ）としてみなされる。

探究の美学的次元では、 $q(s1)$ にかかわる自由エネルギー $F[q(s1), o]$ を最小化するように、知覚と行動を行うと考える。意識の上で $q(s1)$ の精度が高い。たとえば、カラっとしたとか、ジメットとしたとかいうような質感に注意を向ける。探究の倫理的次元では、 $q(s2)$ にかかわる自由エネルギー $F[q(s2), o]$ を最小化するように、知覚と行動を行うと考える。意識の上で $q(s2)$ の精度が高い。たとえば皮膚が濡れているのかいないのかという事実の判断に注意を向ける。探究の論理的次元においては、 $q(s3)$ にかかわる自由エネルギー $F[q(s3), o]$ を最小化するように、知覚と行動を行うと考える。意識の上で $q(s3)$ の精度が高い。ここで意識的な推論が行われる。たとえば皮膚が濡れている理由を与える論理構造に注意を向ける。

4.4. 期待自由エネルギーと設計

設計という語は動詞あるいは名詞として用いられる。名詞としての設計は、あるべき事態（あるべき隠れ状態）についての記号である。設計を生み出すプロセスが動詞としての設計である。このあるべき隠れ状態は、まだ存在しておらず、だからこそ設計する。設計は現実の世界だけではなく可能な世界についての思考である。ポリシーとは可能な行動の系列であるが、数学的には単に隠れ状態の状態遷移系列を与えるものである。名詞の設計は、それじたいが「行動」ではなくても、後者の意味におけるポリシーに含めることができる。その上で、動詞としての設計を、期待自由エネルギーを最小化するように名詞としての設計（ポリシー）を設定するという（能動）推論の一例として捉えることを試みる。

期待自由エネルギーと無意識的推論の三形式との対応関係として、大前提が生成モデル $p(\pi, \delta|C)$ 、小前提がポリシー $p(\pi)$ 、結論が選好される観測データの軌道 $p(\delta|C)$ に対応すると考える。アブダクションは、 $p(\delta|C)$ を固定した上で期待自由エネルギーを下げるようなポリシーを推論

する。演繹は行動であり、ポリシーを実行することで $p(\delta|C)$ を達成しようとする。帰納をとおしてこの生成モデルが形成される。(fig.6右)

以上は無意識的なレベルでの推論である。そこでは選好される観察データが無意識的な目的となっている。しかし意識的に行われる設計は将来の隠れ状態の選好 $p(\delta|C)$ を目的とする意識的な推論によってポリシーを設定する。これを $p(\delta|C)$ にかんする期待自由エネルギーを最小化するようなポリシー $p(\pi)$ の選択とみなしたい。

そしてここにも名辞記号、命題記号、論証に対応する隠れ状態 $s1, s2, s3$ にかんする選好を想定することができるだろう。つまり、 $p(\overline{s1}|C)$ は制約を度外視した可能性としての目的であり、美しさや雰囲気の新しさなど、 $p(\overline{s2}|C)$ は具体的な状況としての目的であり、法規に従うことなど、 $p(\overline{s3}|C)$ は習慣としての目的であり、合理性を実現しようとするなどである。

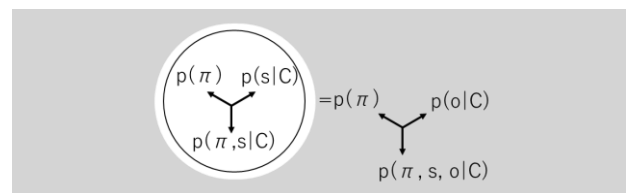


fig.8 Policy selection as unconscious and conscious inference

$p(\delta|C)$ じたいは意識することはできないが、そこからのアブダクションの結果としてのポリシーや隠れ状態の選好 $q(\delta|C)$ を意識している。そして、観察データに関するアキレスの亀のパラドックスはここでも同じである。ポリシーや隠れ状態の選好の前提となる観察データの選好を意識しようとするれば、それもすでにアブダクションの結果である。

4.5. 設計における認識的価値と実利的価値

期待自由エネルギーは、行動の認識的で探索的な価値と実利的で利用的な価値のバランスを取ることを表現している。設計もまた、それを通して学びがあるという認識的価値と、好ましい隠れ状態を将来に実現するという実利的価値をもとめる。新しい知識の獲得を目的とした実験的な設計は前者を、役に立つことを目指した実務的な設計は後者に重きが置かれるだろう。また、上述のように実利的価値を観察データではなく隠れ状態の選好として捉え、隠れ状態に三つのレベルを区別すれば、実利的価値にもそれに応じた三つのレベルが区別される。

4.6. 設計における自信の制御

ポリシー設定において変分自由エネルギーと期待自由エネルギーの最小化を同時におこなっている。このどちらかを重視するかを、「自信」の概念で理解した⁽²⁾。自信がある場合ほど期待自由エネルギーを重視する。設計において自信がない場合とは、問題を分析したり対象についてのリサーチを行ったりと、(将来の構想ではなく)現状の認識を優先するということだろう。ブライアン・ローソン (B. Lawson) や、J. ダーク (J. Darke) は、設計者が必ずしも問題の分析から設計を始めず、まずは解決を推測することを指摘している⁽¹⁵⁾。これは自信があることに相当する。分析から始めるのか推測から始めるのかは、設計プロセスを通じた自信の制御の違いとして見なせるかもしれない。

4.7. 探究としての設計の三つの次元

期待自由エネルギーの最小化に関しては、 $p(\bar{\sigma}|C)$ にかかわる期待自由エネルギーを下げるような無意識的推論がおこなわれる。これは、美学的次元においては $q(\bar{s}1)$ によって、倫理的次元においては $q(\bar{s}2)$ によって、論理的次元においては $q(\bar{s}3)$ によってなされる。それぞれたとえば、カラっとした感じを理想とすること、皮膚が濡れないことを問題設定とすること、屋根によって雨を防ぐというような問題解決の合理性である。

論理的次元においては、無意識的推論だけではなく意識的な推論が行われる。ここではデザインの目的となる $p(\bar{s}1|C)$ 、 $p(\bar{s}2|C)$ 、あるいは $p(\bar{s}3|C)$ にかかわる期待自由エネルギーが下がるようにデザイン $p(\pi)$ をアブダクションし、その帰結として起こる隠れ状態を演繹するということが意識的に行われる。したがって論理的次元における問題解決は、美学的、倫理的、論理的な目的に依存している。

たとえば、屋根 $p(\pi)$ のデザインにおいて、それがもたらす雰囲気 $p(\bar{s}1|C)$ を重視するのか、雨を防ぐとか象徴の役割を果たすといった具体的な機能 $p(\bar{s}2|C)$ を重視するのか、屋根に関連する諸要素の論理構造の合理性じたい $p(\bar{s}3|C)$ を重視するのか（たとえば諸要素の関係のダイアグラムからデザインが導かれているようにすることなど）、という注意の違いがある。設計においてはこの三つの次元を往復するだろう。

5. おわりに

5.1. 振り返り

自由エネルギー原理は知覚と行動をとおして環境に適応するシステムの原理として提案されている。設計がそのようなシステムとしての人間の振る舞いであるならば、自由エネルギー原理に従うはずである。自由エネルギー原理は生物学的なレベルの無意識的推論を主に扱ってきたため、人間の意識的な推論を含む設計への適用は新規性がある。

設計の問題は「意地悪な問題」であり、環境への適応の要件を設計に先立って規定することはできない。このことは、人間が自律的に作動するシステム、つまり、外から与えられた問題についての解決を行うのではなく自ら問題を設定するシステムであることの現れである。そして問題設定を行うとは、論理的次元のみならず倫理的、美学的次元で探究することを意味する。

パースの探究の理論に基づいて、アブダクション、演繹、帰納をとおした習慣の変化のプロセスとして設計を理解し、さらに探究に論理的次元だけではなく、倫理学、美学的次元があると考えた。この探究の理論と自由エネルギー原理の接続を試みた。探究を構成する無意識的推論にかんして、自由エネルギー原理の概念と良い対応関係が見出された。すなわち、推論を構成する大前提、小前提、結論の三つの命題記号はそれぞれ、変分自由エネルギー原理の生成モデル、認識、観測データに、または期待自由エネルギー原理の生成モデル、ポリシー、選好された観測データに、それぞれ対応させることができる。自由エネルギー原理を導入することで、対象を確率的に扱い、その精度の制御を議論することができる。精度は注意によって高まる。探究の三つの次元を、名辞記号、命題記号、論証に対応する隠れ状態のどの層に注意を向けるかだと考えた。

しかしパースの探究の理論が完全に自由エネルギー原理に翻訳される訳ではない。自由エネルギー原理において学習の枠組みや選好を事前に決定しなくては計算ができないが、これらも探究を通じて変化しうる。

5.2. 課題と展望

探究の美学的、倫理的、論理的次元の区別と自由エネルギー原理のあいだの今回の対応付けにかんしては不透明な部分が多い。

自由エネルギー原理と結びつけることで、設計プロセスにおける感情というテーマを扱うことができる。自由エネルギーの上下変動がポジティブな感情をもたらすと考えられる⁽²⁾。これは探究としての設計が持ちうるプロセスじたいの価値に光を当てる。

自由エネルギー原理は主に生物学の文脈を想定している。一方で人間は、シンボル（無契的記号）を使用する思考という点で、他の生物から逸脱していると考えられてきた。設計において人間は、現実には存在するスケッチや模型を扱いながらも、現実ではない可能世界について思考する。設計におけるシンボル使用や反実仮想を自由エネルギー原理との関連でどう理解するかが問われる。

文 献

- (1) 山口 純, 門内 輝行: 設計プロセスにおける論理的、倫理的、美学的次元の関係, 日本建築学会計画系論文集, 2014, 79 巻, 703 号, p. 1881-1890
- (2) 柳澤秀吉: 感情力学と探究サイクル (興味と好奇心の数学原理), 設計工学 (印刷中, 2023 年 58 巻 11 号出版予定).
- (3) 鈴木杏奈, 山口純: 感性駆動的な共創の場の提案 -論理学・倫理学・美学の区別に基づく理論化-, 第 32 回設計工学・システム部門講演会 (2022)
- (4) Alexander, Christopher: *Note on the Synthesis of Form*, Harvard, 1964.
- (5) グラボー, S.: クリストファー・アレグザンダー『一建築の新しいパラダイムを求めて』工作舎, 1989
- (6) Protzen, Jean-Pierre, and Harris, David J.: *The Universe of Design: Horst Rittel's Theories of Design and Planning*, Routledge, 2010.
- (7) Schön, Donald A., Rein, M.: *Frame Reflection*, Basic Books, 1994
- (8) ダン, A.・レイビー, F.『スペキュラティブ・デザイン』ビー・エヌ・エヌ新社 (2015)
- (9) Glanville, R. A.: "Second order cybernetics", in Francisco Parra-Luna (ed.) *Systems Science and Cybernetics*, in *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, 2003
- (10) 山口純: 対話を通じた探究としての設計, Design シンポジウム 2019, 2019
- (11) パー, T.・ベッツェロ, G.・フリストン, C.『能動的推論—心, 脳, 行動の自由エネルギー原理』ミネルヴァ書房 (2022)
- (12) 柳澤秀吉: 自由エネルギーを用いた認識・行動・感情の数理モデル (感性設計のための数理 第 3 報), 設計工学, 75, 2(2022), 41-48.
- (13) Hartshorne, C., Weiss, P. (eds.): *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, Volume I-VI, 1978-1980, Burks, A.W. (ed.): *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, Volume VII-VIII, The Belknap Press of Harvard University Press, 1979.
- (14) Cristalli C.: Unconscious inferences in perception in early experimental psychology: From Wundt to Peirce. *J Hist Behav Sci.* 2022 Oct;58(4):432-448.
- (15) Lawson, Bryan: *How Designers Think*, Butter Worth Architecture, 1988
- (16) Alexander, C.: *The Phenomenon of Life: The Nature of Order, Book 1*, Routledge, 2003