

The Systematicity Argument 再考-Predictive Processing の観点から The Systematicity Argument Reconsidered: A Predictive Processing Perspective

加藤 龍彦[†]

Tatsuhiko Kato

[†] 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Technology
skylark@jaist.ac.jp

Abstract

Initiated by the classic paper of Jerry Fodor and Zenon Pylyshyn, there has been the longstanding debate on the systematicity of cognition. Classical computationalists, such as Fodor and Pylyshyn, state that the cognition is pervasively systematic, meaning that cognitive processes are inherently rule-based. However, the assumption of “pervasiveness” of systematicity is questioned by several authors as incompatible with recent experimental results. They argue that cognition has several non-systematic aspects, and classical computationalism alone does not suffice to explain all of them. Instead, they suggest that dual-process theory can explain the distinction between systematic higher cognition and less systematic lower processes of cognition. This article argues against this suggestion by providing some evidence that the cognition does not operate on two distinct processes. Based on this evidence, we instead state that Predictive Processing framework can be the better architecture of cognition, relying only on predictive error minimization operation over the probabilistic generative models.

Keywords — Systematicity Argument, Systematicity, Mental representation, Cognitive architecture, Dual-process theory, Predictive processing

1. はじめに

心的表象（または単に表象）という概念は、長らく認知科学の根本をなすとみなされてきた。心（認知）の本質を情報処理とみなす認知科学において、心は環境中に存在する事物のパターンを異なる形式（表象）に変換し、それに対して様々な操作を行う装置である。そのため、この表象という対象がどのような性質を持ち、それに対する操作がどのようなものであるか、すなわち認知がどのようなアーキテクチャを持つか、という問いは認知科学の主要な問題である。

本稿で扱う the Systematicity Argument/Challenge

[32] はこの問題、つまり認知システムにおいて心的表象がどのような性質を持ち、どのように取り扱われているのか、という問いに対する1つの回答を与える。

この問いは Jerry Fodor と Zenon Pylyshyn によって定式化された [12] (以下 F&P と略す)。F&P によれば認知にはシステム性という性質があり、このシステム性という性質は、離散的な表象と、それに対する規則に基づいた合成操作を与える古典的計算主義のモデルでなければ説明できない。システム性とは、ある状態を表象できる生物は必ず他のそれと関係する別の状態も表象できる、という性質であり、また合成操作とは、2つの対象を組み合わせるより複雑な対象を作り出すことをいう¹。

この問題提起は当時（1988年）活発な論争を引き起こし、コネクショニズムからの反論、古典主義者たちの再反論という形で様々に議論されてきた [1]。こうした議論の中での従来のコネクショニストたちの反論の多くは、実際にシステム性を示すようなニューラルネットワークアーキテクチャを構成することに重点が置かれていた [1, Chapter 7]。しかし近年では、F&P が自明な仮定として前提にしていたシステム性の、認知における広範性が実験的な結果から批判されている。代わりに多くの論者は、認知処理においては2つの異なるタイプを持つメカニズムが働くとする二重過程理論 [9, 10] が、認知の説明理論として適切である、という主張を行ってきた [15, 29, 30, 34]。

しかし、認知処理が異なるタイプの計算処理によって行われているという仮定を疑問に付すような結果も提出されている [8, 23]。本稿ではこの点から二重過程

¹ 例えば「りんご」、「赤い」という語は、「は」という関係によって組み合わせることで、「りんごは赤い」というより複雑な文に合成できる。このように単純な要素（構成素）を組み合わせ、より複雑な対象を作っていくような操作を合成と呼び、このような対象と操作を有するシステムを合成的システムと呼ぶ。

理論を批判し、一元主義的なアーキテクチャの必要性を論ずる。また、そのような理論として Predictive Processing の可能性を検討する。

2. 認知とシステム性

本稿で問題にする Systematicity Argument は、本質的に認知アーキテクチャ²の問題と関わっている。認知アーキテクチャとは、認知処理、特に表象とその操作を記述したモデルを指す。例えば古典的計算主義は認知アーキテクチャを指定するが、それは古典的システムが個々の表象を離散的な対象（構成素と呼ばれる）として扱い、論理的な規則によって表象を合成することにより複雑な表象を生み出す、つまり操作として合成を用いる、という意味においてである。

本節では古典的計算主義とコネクショニズムの特徴を概説し、その後 F&P によるオリジナルの議論の概要を示す。

2.1 古典的計算主義とコネクショニズム

よく知られているように、認知科学は 1950-60 年代にかけて、生物の内的情報処理を学際的な視点から研究する学問分野として形成された。この時期には心理学、人工知能、計算機科学、言語学などで並行的に理論的進展があり、認知科学はこれらの成果を直接受け継ぐ形で発展していくことになる [25]。

特に初期の認知科学に影響力を持ったと言われるのは Allen Newell と Herbert Simon の物理記号システム仮説 [3, 28] である。この仮説によれば、「物理記号システムは一般的な知的行動にとって必要かつ十分な手段を持つ」とされる。ここでいう物理記号システムとは、何らかの物理的な装置上で記号的処理を行うシステムのことである (e.g. 典型的にはコンピュータや脳のことを言う)。また記号的処理とは、離散的なパターンとそれに対して定義された操作 (e.g. 論理学の推論規則) のことを言う。この仮説は古典的計算主義の基本的な立場を表明したものである。

コネクショニズムと呼ばれるモデル群（現在の言葉ではニューラルネットワークモデル）は、こうした記

号主義的な立場のモデルが行き詰まってきた 80 年代後半に発達し、認知処理を、脳を模したネットワーク中のユニットが行う計算処理として捉えることを提案した。このアーキテクチャにおいて個々の表象はユニット群のネットワークが示す発火のパターンであり、こうした発火パターンは経験（入力）を通じた学習によって変化、獲得される。このようなモデルは、文法学習や発話処理といったドメインで一定の成功を収めた [31]、新たな認知のモデルとして期待を集めつつあった。F&P はこのような流れに抗して、認知の説明は古典的計算主義抜きでは行えないとする Systematicity Argument を展開したのである。

2.2 The Systematicity Argument

ここでは、McLaughlin [9] による F&P のオリジナルの議論の再定式化を参考に Systematicity Argument を紹介しよう。

まず、F&P は自明な経験的前提として、認知能力はシステム性を持つと主張する。例えば言語能力におけるシステム性とは、ある文を産出、または理解できるときにはそれと関連する他の文も必ず産出、理解できる能力のことを指す。F&P の出した有名な例でいえば、“John loves Mary” が理解できる人は、必ず “Mary loves John” も理解できる。F&P が語彙学習について説明するところでは、「人はフレーズブックのどの部分であっても、残り全てを学ぶことなく学ぶことができる」 [12, p. 25]。つまり、人の学習は個別の文を記憶することによってではなく文の背後にある規則を学習することで行われる。

ここで、認知主体がこうした文を理解できるということは、認知主体が文の意味内容を何らかの形で表象している、ということの意味する。また言語学で標準的に仮定されるように、言語が構成素を持った合成的システムだとするなら、文を理解できるとはその文を表象できるということであるから、認知主体の思考、すなわち心的表象もシステム性を持つことになる [9]。つまり、システム性は以下のように定式化できる。a,b を心的表象、R をそれらの間に成り立つ関係とする時、主体が aRb という状態を表象できるのは、bRa を表象できる時、またその時に限られる。このようなシステム性は言語に依存していないので、F&P によれば、動物、あるいはどのような認知主体にも見ることができるはずである。そのため、心的表象、そして認知能力は広範にシステム性を持つことになる。McLaughlin [9] に

²現在では Soar や ACT-R といった具体的な計算処理のフレームワークを指す場合も多いが、本稿ではより一般的な意味で認知アーキテクチャという語を用いる。

よれば、「[Systematicity Argument の] 最も重要なポイントは、思考（心的表象）が構成素構造を持つ、という主張をすることである。」（□内筆者）

以上のことを前提とするなら、システム性という性質を抜きにして認知能力を完全に説明することはできないと考えられる。しかし F&P によれば、コネクショニズムはこの性質を説明することができない。理由を以下に述べよう。

2.1 で述べたように、古典的計算主義とコネクショニズムでは表象の取扱に決定的な差異がある。古典的計算主義においては、表象は構成素（e.g. 「りんご」、「猫」）と、それらに対する演算規則のみから構成されると考えられる。一方、コネクショニズムのアーキテクチャにおいてこのような表象間の因果的な結合を与える操作は存在しない。つまり先程の定式化を用いれば、コネクショニズムにおいて aRb という状態を表象できることと bRa という状態を表象できることを必然的に結びつけるような操作は存在しない。というのも、コネクショニズムでは表象間の関係は何らかの規則によって与えられるものではなく、連合学習によって形成される統計的、偶然的なものだからである。しかし認知は言語的な構成素構造を持つ。よってコネクショニズムでは、あるいは表象を合成する能力を持たないいかなる認知アーキテクチャも、システム性を説明できないということになる。

3. 認知はどこまでシステマティックか

ここまでは Systematicity Argument の概要を見てきたことになる。この議論は当時古典主義とコネクショニズム両陣営間で多くの論争を引き起こしたが、現在では実験的な成果をもとに様々な問題点が指摘されている。それらの批判の多くは F&P の経験的主張に向けられており、システム性は認知の広範な性質ではないとする [15, 29]。またこれらの論者は、古典的計算主義かコネクショニズムか、といった認知に対してある 1 つの計算メカニズムを指定する見方（「アーキテクチャー元主義」 [39]）を否定し、代わりに二重過程理論のように、認知処理には 2 つの異なるメカニズムが関わっていると考えられる必要があると主張する [15, 29, 30, 34]。本節では Gomila らのシステム性の広範性に対する反証、また二重過程理論について概観する。

3.1 システム性は認知の広範な性質か

Gomila らはシステム性が認知の広範な特徴であるとする F&P の前提を批判する。システム性は認知が発達初期から備えている性質ではなく、言語を学習することで獲得される。彼らの論点は以下の 2 つである [15]。

1. システム性は言語の統語論に依存する
2. 非言語的な存在（幼児を含む）はシステム性を示さない

最初の論点は、F&P の思考の構造に関する主張に関係する。上に見たように F&P の主張は、心的表象は言語と類似した構成素と合成による操作によって記述できるのだから、この意味でのシステム性は認知に広範である、というものであった。しかし Gomila らによれば、この関係は逆である。システム性を持つのは言語構造だけであり、思考がシステム性を持つように見えるのは言語を学習したためであるという。

彼らが挙げている証拠としては例えば以下のようなものがある。

- ・英語圏の子どもは 5 歳近くに受動態を学習するまで、通常の文とその受動化された文とを同じものと判断する [19]。例えば、“Mary is loved by John” と “Mary loves John” とを等価なものとする。もし幼児がシステム性を有しているなら、2 つの文の意味内容は同一なのだから、“Mary loves John” を学習した時点でその受動形も学習できるはずである。しかしこれは事実とは異なる。このことは言語的なシステム性が文法規則に依存しており、幼児の思考において 2 つの文が規則的に結びついてはいないことを示唆する。

- ・ラットに空間的キューを規則的に組み合わせることでしか解けない探索課題をやらせると、ラットはこの課題をうまくこなせない。18-24 月齢の幼児に対してこの課題を改変した実験では、人の幼児でもこの課題をこなせないこと、また大人であればこの課題をこなすことができることが示されている [16]。この結果は、言語を持たない生物がシステム性を示さないことを示唆する。

- ・さらにこの課題に成功する能力は、言語の発達と関わっていることが示唆されている。この課題が解けるようになるのは 6 歳くらいであり、これは「右」や「左」といった空間的な言語の発達と同時期である。また、ヒトの大人でも言語処理を阻害されるとこうした課題をうまくこなすことができなくなる [17]。この結果は、言語発達の過程でシステム性も同時に発達す

ることを示唆する。

これらの結果は F&P らの経験的主張を疑問視するのに十分であるが、Penn ら [29] も動物とヒトの認知を比較する中で、動物の表象システムが知覚的特徴に強く制約されるのに対して、ヒトの表象システムの特徴は規則や構造的特徴といった知覚的な関係から抽象化した対象も扱い得る点にあることを論じている。彼によれば、知覚的判断と F&P がシステム性と呼んだような規則に基づく関係の理解、両方を有するのはヒト固有の特徴である。これらの結果は、F&P のシステム性をヒトやその他の動物の認知にも共通して見られる広範な性質である、という主張に強い疑念を投げかけるものだと言えるだろう。

3.2 認知の二重過程理論とアーキテクチャ多元主義

ここまではシステム性に対して批判的な結果を見てきた。そしてシステム性の議論は、特に認知の説明理論としての古典的計算主義の優位性を示すためのものであった。では、上記で挙げたような認知の特徴を捉えうるアーキテクチャは存在するのだろうか。二重過程理論はその候補であるとされる [15, 29, 30, 34]。

認知の二重過程理論の基本的な主張 [9, 10] は、処理が早く自動的で、高キャパシティのタイプ1処理をデフォルトとし、低速度で反省的、低キャパシティのタイプ2処理が、タイプ1の処理を必要に応じて制御することで、認知処理が行われているというものである。Evans [10] はこれら2つのタイプが異なるメカニズムによって作用する、という点を強調しており、「タイプ」を単なる思考の「様式」(“mode”)と混同しないよう注意している。また同論文はシステム1やシステム2という呼び方(e.g. [15])も相応しくないとする。タイプ1、タイプ2という概念が意味するのは共通する特性を持つ様々なシステムが集まった、異なる2つの心(“mind”)がある、ということであるという。タイプ1に属するシステムたちは進化的に古く、経験的な学習に依存するモジュール的なものである。一方タイプ2に属するシステムたちは、作動記憶を通して明示的な表象を扱う。

Evans [10] の主張は、明示的には言及されていないがFodorの古典的な認知システムの特徴付け [11] に似通っている。Fodorの理論では、タイプ1にあたる機構は入力系と呼ばれており、高度にモジュール化され、「領域特異性」、「自動性」をそなえた「進化的原型」

である。これに対して中央系は、「比較的領域自由」で進化的に遅れて生じたものである。

しかし、二重過程理論とFodorの理論との大きな違いは単一のメカニズムを仮定するかどうかであろう。前者の場合にはタイプ1とタイプ2とで異なる計算メカニズムを指定するのにに対して、後者では、「認知」は古典的計算主義のみによって作動すると考えられており、F&Pもコネクショニズムが認知の脳における実装レベルでの理論であると主張している。システム性が認知の広範な性質ではない、と論じる人々が二重過程理論を支持する理由も、認知において異なるアーキテクチャが働くとするこの理論の主張にある。上記のGomilaらのレビューでも論じられている通り、認知処理が計算主義的アーキテクチャのみによって作動していると考えるのは現在では極めて難しい。一方でシステム性は、GomilaらやPennらの主張では、言語を通して獲得されるヒトの思考の根本的な特性である。

ここまであげた論者らのF&Pに対する応答では、システム性が認知能力の広範な性質かどうか、という経験的主張にフォーカスが当たっていた。それによると、システム性は認知の広範な特徴ではない。システム性を説明できるのが古典的計算主義だけだとしても、認知の他の特徴を説明できない以上認知の完全な説明を与えることはできない。二重過程理論は確かにこの点を克服できる。例えば計算主義的なアーキテクチャとコネクショニスト的なアーキテクチャといった2つのメカニズムを仮定することで、PennらやGomilaらが強調するヒトの認知システムの二重性を説明できるからである。しかし以下に見ていくように、認知が異なる計算プロセスに則っているとする二重過程理論の根本的な仮定は疑問すべきである。

4. Predictive Processing とアーキテクチャ多元主義の問題点

前章ではシステム性の広範性に対する経験的な反証、そしてその代替として二重過程理論が有用であるとする主張を見てきた。本章では二重過程理論の問題点を指摘し、それに代わってPredictive Processing (PP)を導入する。また、PPが3節で指摘されたようなヒトの認知の二重性についても説明し得ることを指摘する。

4.1 認知は二重過程として説明できるか

3節では、古典的計算主義とコネクショニズムといった伝統的な対立から離れ、二重過程理論を擁護する論者たちの議論を見てきた。確かに二重過程理論は多元的なアーキテクチャを仮定することで、認知処理に計算主義とは異なるアーキテクチャを同時に認め、Penn ら、Gomila らがあげたような認知に質的に異なるシステム性が存在する、という証拠を説明できる。しかし認知は本当に異なる計算処理を行っているのだろうか。これに対する反証となる研究を2つあげよう。

1つ目は Elman の研究である。Elman は、言語における統語論や意味論に代わるものとして語彙と話者の知識の役割を強調し、語彙が言語理解の際に事象、文脈などの情報を状況に応じて制約し、予測するためのキューとして働くと主張する。彼は自身の主張を支持するものとして様々な実験結果をあげており、例えば話者が文の構造曖昧性の解消に語彙的な知識を用いること、完了形など文のアスペクト情報が語彙処理の段階で事象のプライミングに影響していることなどを挙げている [8]。また彼は語彙知識を重みとして、ノードである話者の知識を文脈に応じて変化させ、出来事を予測するリカレントニューラルネットワークを作成し、自らの理論をシミュレーションで検証している [8]。

あるいはLupyanらは、認知レベルの処理が知覚へ影響することを示す一連の実験を行っている [21]。例えば [23] は、連続フラッシュ抑制によって意識下に抑制された画像を知覚する際、言語的キューを与えることで被験者の成績が有意に向上することを示している。

これらの結果は、どちらもタイプ1と2の関係がそれ程はっきりとしたものではないことを示唆する。二重処理過程理論では異なるメカニズムが関わりとされた明示的な記号の操作とより潜在的な文脈知識の活用が、Elman の実験、モデルにおいてはリカレントニューラルネットワークの行う予測とパターン完成として説明できる。また Elman の結果は、ヒトは言語処理のレベルであってもシステム性に関する議論の中で Penn らや Gomila らが仮定しているように、構成素とそれに対する統語演算といったプロセスによって処理を行っているのではない可能性を示唆する。

また Evans [9] はタイプ2の役割をデフォルトで使

われるタイプ1の処理を制御することのみに留めていた。しかし Lupyan らの結果は、明示的に与えられた言語的なキューが極めて低次の知覚表象を誘導することを示し、高次の認知的処理が単なる入力刺激の制御以上の役割を果たしていることを示唆する。

これらの結果が示唆するのは、二重過程理論で前提されている程にはタイプ1的な処理とタイプ2的な処理とは異なったものではないということである。ではこうした結果を、Gomilaらのシステム性への批判も踏まえた上で説明できるアーキテクチャを考えることはできるだろうか。具体的には、これらの結果を統一的に説明できるアーキテクチャは Penn らや Gomila らの示したような言語の思考への影響を、一元的なアーキテクチャに基いて説明しなければならない。

Predictive Processingはこの役割を果たすのに十分な道具立てを有していることを以下で論ずる。

4.2 Predictive Processing

PP (または階層的予測符号化) は階層的予測による予測誤差の最小化という観点から神経科学、認知、行動に関わる現象を統一的に説明しようとする枠組みである。その特徴は、脳の役割として入力を受動的な処理ではなく階層性を利用したトップダウンの予測や不確実性の推定、それによるアクティブで文脈脈依的な知覚、行動、認知処理を重視する点にある [4, 5, 6, 35]。

PP は、近年の神経科学における予測符号化や脳のベイズ理論 (“Bayesian brain”) に基づいている。神経科学におけるベイズ的なアプローチでは、脳が感覚情報を確率的に表象しており、それらの情報をベイズの手法に基づいて統合することで最適な知覚、行動を生み出しているとする [20]。脳に入力される感覚情報は環境に関する間接的な情報であり、本質的に不確実性を含んでいる。脳はそうした不確実な情報に基づいて環境の状態を推定し、適切な行動を選択しなければならない。ベイズ的手法はそうした不確実な情報の表現とそれに基づくモデルの更新と選択、視覚や聴覚など複数モダリティ間の情報の統合などを行う上で有効である [27]。

PP は、脳がこうしたベイズ的計算を行う上で予測符号化と呼ばれる手法を用いると考える。それによると、脳の情報処理の本質は環境のモデルに基づいた階層的、並列的な予測の生成とその誤差の修正にある。脳は世

界の因果関係に関する確率モデル（生成モデル）を有し、それをもとに絶えずボトムアップから入力される感覚情報を説明するような予測を生成する。そこで予測によって説明できなかった誤差のみが上位階層に誤差として伝播され、さらに上位の層からの予測と比較される。このようなサイクルによってうまく感覚情報を説明できた仮説が知覚として経験される。こうした処理を繰り返すことで、脳は自然に階層を経るごとに抽象度の高い（低次層では説明できなかった）情報によって表象を形成することができるという。

Active inference は以上の議論を拡張し、知覚と行為とを直接に結びつける。それによると、行為とは予測された感覚情報を実現することである。先に、この理論において脳が環境のモデルとなっており、脳は予測を生成することで入力される感覚情報との誤差を最小化すると述べた。ここで知覚はより良いモデルを選択することで予測誤差を最小化し、行為は予測された感覚情報を運動指令として受け取り、それを実現することで予測誤差を最小化すると考えられる。つまり、知覚と行為とは協同してモデルの予測誤差を最小化する過程だと捉えられるのである [13, 14]。

以上 PP の理論的概要を述べてきたが、この理論はヒトの認知活動の多くの側面を説明できると主張されている。例えば Clark [4, 5, 6] は、PP の有効性を様々な経験的証拠を総括して示している。そこで扱われているのは、錯視、想像とオフラインでの推論、注意、認知の文脈依存性、自己理解と主体性、統合失調症などの精神障害などである。

4.3 PP とシステム性

それでは、PP はどのようにこれまでに提示された結果に対して統一的な説明を与え得るのだろうか。以下ではこのことを説明しよう。

まず PP の枠組みにおいて、Elman や Lupyan らの結果は自然な帰結である。脳は抽象度という点を除いて、感覚情報に区別なく事前知識を用いてそれを予測しようとするので、語彙知識であっても事象を予測するためのキューとして使われる。これが Elman の主張であった。また低次の知覚であっても、感覚情報は常に階層的予測の影響を受けており、そのため Lupyan らの示したような結果が生まれる。

また、システム性は言語の性質であり、言語が思考に影響することで人の思考はシステム性に似た性質を獲得するというのが Gomila らや Penn らの主張であっ

た。こうした結果を説明するのに、PP は二重過程理論よりも遥かに優れている。というのも、上に見たように PP において、ある階層の表象がどの程度システム性を持つか、といった問題は程度問題であり、言語を含む高次認知は実際に感覚情報の誤差を説明することで知覚を変容させ得るからである。言語は、より柔軟性が高く話者が能動的に用いることができるという点において特別なだけである。Lupyan と Clark [22] は、このことを指して言語は「人工的な文脈」（“artificial context”）として機能すると主張している。

以上の議論によって、二重過程理論を主張する Gomila らや Penn の結果、また本稿で二重過程理論に対する反証として上げた結果の両方を、PP が統一的に説明し得ることを示した。よって、PP は認知の説明理論として二重過程理論よりも適したものと言えるだろう。

5. 結論

本稿では、F&P による Systematicity Argument の概要、またそれに対する現代的な立場からの応答を見てきた。F&P の主張によれば、認知はその広範な特徴としてシステム性を有している。システム性は心的表象に関して成り立つものであり、心的表象が構成素と合成による操作に従う（構成素構造を持つ）とする。

そのため、認知を完全に説明するにはこの性質を説明する必要があるが、F&P によればこの点を完全に説明できるのは合成性を定義的に持つ古典的計算主義だけである。しかし Gomila らや Penn らによれば [15, 29]、このような意味でのシステム性は言語を持たない動物、あるいは人の幼児にさえも見ることはいできない。彼らによればシステム性は言語の持つ性質であり、人は言語を学習することでのみ思考、心的表象におけるシステム性を獲得することができる。つまり、システム性は認知の広範な性質とはいえない。

こうした結果を元にして、多くの論者は認知の理論として、二重過程理論のような多元的なアーキテクチャを用いるべきだと主張してきた。これは、直感的で素早い判断を行うタイプのシステム群と、遅く反省的な処理を行うタイプのシステム群という二つの異なる計算システムの競合によって認知処理を説明しようとする理論である。

しかし、本稿であげた Elman や Lupyan らの研究は

認知処理が二重過程理論の指定するように質的に区別できるものではないことを示唆する。この点を踏まえて、本稿は Predictive Processing フレームワークは二重過程理論よりも優れた認知の説明理論を構成すると主張した。PP は予測誤差最小化という一元的な観点から行為、知覚、認知の統一的な説明を与える。PP において、脳は絶えず入力される感覚情報との誤差を、並列的、階層的にあらゆる手がかりを用いて最小化する予測機械である。このアーキテクチャでは、言語に代表される高次の認知表象も、知覚のような比較的低次の表象も同様の役割を果たす。そのため、二重過程理論の支持者たちが主張するように異なるアーキテクチャを指定する必要はない。代わりに一元的な、確率的表象を用いた階層的な予測誤差の最小化というメカニズムのみで、低次表象から高次表象に至る段階的な抽象化の側面を説明できる。以上のことから、PP は古典的計算主義、二重過程理論など、他のアーキテクチャよりも適した認知の説明理論だと言えるであろう。

参考文献

- [1] Aizawa, K. K. (2012). *The Systematicity Arguments*. Boston, MA: Springer Science & Business Media.
- [2] Bechtel, W., & Abrahamsen, A. (1991). *Connectionism and the Mind*. Wiley-Blackwell.
- [3] Bermudez, J.-L. (2010). *Cognitive Science*. Cambridge University Press.
- [4] Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, 36(03), 181–204.
- [5] Clark, A. (2013). The many faces of precision (Replies to commentaries on “Whatever next? Neural prediction, situated agents, and the future of cognitive science”. *Frontiers in Psychology*, 4, 1–9.
- [6] Clark, A. (2016). *Surfing Uncertainty*. Oxford University Press, USA.
- [7] Doya, K. (2007). *Bayesian Brain*. MIT Press.
- [8] Elman, J. L. (2014). Systematicity in the Lexicon. In P. Calvo & J. Symons (Eds.), *The Architecture of Cognition*. MIT Press. pp. 115–145.
- [9] Evans, J. S. B. T. (2003). In two minds: Dual-process accounts of reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(10), 454–459.
- [10] Evans, J. S. B. T. (2010). Intuition and Reasoning: A Dual-Process Perspective. *Psychological Inquiry*, 21(4), 313–326.
- [11] Fodor, J. A. (1983). *The Modularity of Mind*. MIT Press, 伊藤公一・伊藤笏康・信原幸弘 (訳) (1985). 『精神のモジュール形式』。産業図書.
- [12] Fodor, J. A., & Pylyshyn, Z. W. (1988). Connectionism and cognitive architecture: A critical analysis. *Cognition*, 28(1), 3–71.
- [13] Friston, K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 127–138.
- [14] Friston, K. J., Daunizeau, J., Kilner, J., & Kiebel, S. J. (2010). Action and behavior: a free-energy formulation. *Biological Cybernetics*, 102(3), 227–260.
- [15] Gomila, A., Travieso, D., & Lobo, L. (2012). Wherein is Human Cognition Systematic? *Minds and Machines*, 22(2), 101–115.
- [16] Hermer, L., & Spelke, E. S. (1994). A geometric process for spatial reorientation in young children. *Nature*, 370, 57–59.
- [17] Hermer-Vazquez, L. E. A. (1999). Sources of Flexibility in Human Cognition: Dual-Task Studies of Space and Language. *Cognitive Psychology*, 35, 3–36.
- [18] Kahneman, D. (2011). *Thinking, Fast and Slow*. Penguin UK, 村井章子 (訳) (2012). 『ファスト&スロー (上)』。『ファスト&スロー (下)』。早川書房.
- [19] Karmiloff, K., & Karmiloff-Smith, A. (2009). *Pathways to Language*. Harvard University Press.
- [20] Knill, D. C., & Pouget, A. (2004). The Bayesian brain: the role of uncertainty in neural coding and computation. *Trends in Neurosciences*, 27(12), 712–719.
- [21] Lupyan, G. (2015). Cognitive Penetrability of Perception in the Age of Prediction: Predictive Systems are Penetrable Systems. *Review of Philosophy and Psychology*, 6(4), 547–569.
- [22] Lupyan, G., & Clark, A. (2015). Words and the World: Predictive Coding and the Language-Perception-Cognition Interface. *Current Directions in Psychological Science*, 24(4), 279–284.
- [23] Lupyan, G., & Ward, E. J. (2013). Language can boost otherwise unseen objects into visual awareness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(35), 1–6.
- [24] Martínez-Manrique, F. (2015). Systematicity and conceptual pluralism. In P. Calvo & J. Symons (Eds.), *The Architecture of Cognition*. MIT Press. pp. 1–28.

- [25] McLaughlin, B. P. (2009). Systematicity redux. *Synthese*, 170(2), 251–274.
- [26] Miller, G. A. (2003). The cognitive revolution: a historical perspective. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 141–144.
- [27] Mumford, D., & Lee, T. S. (2003). Hierarchical Bayesian inference in the visual cortex. *Josa A*, 20(7), 1434–1448.
- [28] Newell, A., & Simon, A. H. (1976). Completer Science as Emprical Inquiry: Symbols and Search. *Communications of the ACM*, 1–14.
- [29] Penn, D. C., Holyoak, K. J., & Povinelli, D. J. (2008). Darwin's mistake: Explaining the discontinuity between human and nonhuman minds. *Behavioral and Brain Sciences*, 31(02), 531–70.
- [30] Ramsey, W. (2014). Systematicity and Architectural Pluralism. In P. Calvo & J. Symons (Eds.), *The Architecture of Cognition*. MIT Press. pp. 263-276.
- [31] Rao, R. P. N., & Ballard, D. H. (1999). Predictive Coding in the Visual Cortex: a Functional Interpretation of Some Extra-classical Receptive-field Effects. *Nature Neuroscience*, 2(1), 79–87.
- [32] Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1986). *Parallel Distributed Processing Volume 2: Psychological and Biological Models*. MIT Press.
- [33] Symons, J., & Calvo, P. (2014). Systematicity : An Overview. In P. Calvo & J. Symons (Eds.), *The Architecture of Cognition*. MIT Press. pp. 1–25.
- [34] Travieso, D., Gomila, A., & Lobo, L. (2014). From Systematicity to Interactive Regularities. In P. Calvo & J. Symons (Eds.), *The Architecture of Cognition*. MIT Press. pp. 371-392.
- [35] Wiese, W., & Metzinger, T. K. (2017). Vanilla PP for Philosophers: A Primer on Predictive Processing. (T. K. Metzinger & W. Wanja, Eds.) *PPP - Philosophy and Predictive Processing*. pp. 1–18. Johannes Gutenberg Universität Mainz.