

“Connectionism and the problem of systematicity: Why Smolensky’s solution doesn’t work”

Fodor, J. and McLaughlin, B.P. (1990)

Cognition 35, pp.183-204

【要旨】

Fodor & Pylyshyn はコネクショニスト認知理論に挑戦したが、最近 Smolensky はそれに反論した。Smolensky は、心的プロセスは心的表象の要素構造に因果的に感受的であるということを想定せずに、認知能力の間の体系的関係の存在を説明しようとする。Smolensky は、コネクショニストは「分散」心的表象を使って体系性を説明できると考えている。事実、彼はふたつの分散心的表象、すなわち「弱い」合成構造 (compositional structure) と「強い」合成構造を提案している。対して我々は次のように主張する——弱い合成構造は体系性問題に無関係であり、その一貫性も疑わしい。さらに、強い合成構造 (テンソル積) は体系性を説明できない、なぜならそれは構造感受的な心的プロセスにドメインを与えるような類いの要素を示せないからだ。

1. The systematicity problem and its classical solution

● 体系性の問題

- 認知能力は体系性をもつ。例えば、「その少女がジョンを愛している」ことを考えることができるが、「ジョンがその少女を愛している」ことを考えられないような生物はいない。例えば、 $P \& Q \& R$ から P を推論できるが、 $P \& Q$ から P を推論できないような生物はいない。
- 今回の議論の前提
 - ◇ ①人と類人において、認知能力は一般に次の意味で体系的である。
 - ◇ ②それはノモロジカルに必然的である (そしてそれゆえ反事実を指示する)。
 - ◇ ③その機能が認知能力の体系性に貢献するような、心理学的メカニズムがなければならない。
 - ◇ ④認知アーキテクチャーの適切な理論は、その心理学的メカニズムを示さなくてはならない。
- **体系性メカニズムの古典的説明は、「心的表象が言語様であること」に決定的**

に依存する。特に、心的表象は組み合わせ的な統語論と意味論を持つ。

1.1. Classical syntax and Classical constituents

● 心的表象と自然言語文は似ている

- **心的表象の統語論は、自然言語文の統語論に似たものである。両者とも「古典的要素」(classical constituents)から構築される複合シンボル(complex symbols)を含む。**例えば自然言語文 "John loves the girl" は複合シンボルであり、その古典的要素への分解は階層ツリーで示される。また例えば、John loves the girl と考えるときの心的表象は複合シンボルであり、その古典的要素は John の表象、the girl の表象、loving の表象を含む

● 古典的要素とは何か

- **表現タイプ E1 は表現タイプ E2 の古典的要素である only if E2 がトークン化されるときは常に E1 がトークン化される。**例えば、単語 "John" は文 "John loves the girl" の古典的要素である。この文のトークン化は単語 "John" のトークン化を含意する。さらに、文のトークンは単語のトークンを含む (contain)。“John” と言わずに “John loves the girl” と言うことはできないということだ。
- 同様に、**【John を名指すメンタル語シンボル(msentalese symbol)】は、【John loves the girl ということの意味するメンタル語シンボル】の古典的要素である。**
- 古典的要素がこのような性質を持つがゆえにこそ、古典的要素は「古典的要素を含む複合シンボルでもって定義されるような操作」からアクセス可能である。特に、古典的心的表象は古典的要素をもつ。古典的心的表象は古典的要素を、構造感受的な心的プロセスに関するドメインに対して与える。

1.2. Classical semantics

● 心的表象と自然言語表象に関する古典的ピクチャー

- **複合式(文) S が命題 P を表現するとき、S の要素(constituents)は P のエレメント(elements)を表現(または指示)する。**
- 例えば、John loves the girl という命題は、エレメントとして個体 Johns、the girl、二項関係 loving をを含む。文 “John loves the girl” は、要素として表現 “John”、

“loves”, “the girl” を含む。文 “John left and the girl wept” は、John left and the girl wept という命題を表現し、その命題のエレメントは John left という命題と the girl wept という命題を含む。

- 体系性を説明するために、心的表象の統語論と意味論に関する想定をしよう——
**条件 C: もし命題 P が心的表象体系 M において表現可能なら、M は何らかの複
合心的表象(「心的文」) S を含み、S は P を表現し、S の(古典的)要素は P の
エレメントを表現(または指示)する。**

1.3. Systematicity

● 条件 C で体系性を説明する

- 古典的理論では、条件 C はノモロジカルな必然性によって成り立つ。それは、すべての体系的心を包摂する心理学的法則を表現する。**次の想定をすれば、体系性は容易に説明可能である——①心的表象が C を満たし、②心的プロセスは心的表象の要素構造(constituent structure)に対してアクセスする**
- 例: C は「命題を表象できる人はみな、まさにその事実によって、そのエレメントを表象する」ことを含意する。それゆえこのことは特に次を含意する——John loves the girl という命題を表象できる人はみな、まさにその事実によって、John, the girl, loving を表象できる。
 - ◇ the girl loves John という命題も、同じ個体と関係によって構成されることに注目せよ。命題を表現する心的表象を統合するプロセスは要素にアクセスするとしたら、それゆえ John が the girl を love することを表象できる人は the girl が John を love することをも表象できる。
- 例: P&Q&R を考えるときにトークン化される心的表象の要素も、P&Q と考えるときにトークン化される心的表象の要素も、いずれも P と考えるときにトークン化される心的表象の要素を含む。もし推論を仲介する心的プロセスが、心的表象の要素構造にアクセスするのなら、P&Q&R から P を推論できる人が P&Q から P を推論できることは当然である。

● 要約

- 体系性の古典的解決は次の通りである。①心的表象の体系は C を満たす(さらに、複合心的表象は古典的要素を持つ)。②心的プロセスは心的表象の要素構造に感受的である

- Smolensky への反論は次の通りである。①Smolensky が主張する認知アーキテクチャーは、古典的要素のある心的表象を与えられない。②もし心的表象が古典的要素を持たないとしたら、心的表象がいかんにして構造感受的でありうるかについて、Smolensky は提案できない。③もし心的プロセスが構造感受的でないとしたら、心がいかんにして体系的であるかについて、Smolensky は提案できない。

2. Weak compositionality

● 心的表象 COFFEE と心的表象 CUP WITH COFFEE の関係はいかなるものか？

- 【Smolensky 説】
 - ✧ ①COFFEE と CUP WITH COFFEE は活性ベクトルである
 - ✧ ②CUP WITH COFFEE は COFFEE を非古典要素として（すなわち要素ベクトル component vectors として）含む。 $a+x=b$ であるような x があるとき、 a は b の要素ベクトルである。ベクトル分析によって、ベクトルは非古典要素から導出できる
 - ✧ ③COFFEE と CUP WITH COFFEE は、マイクロ特徴を表象するユニットからなる活性ベクトルである。
 - ✧ ④COFFEE は文脈依存的である。CUP WITH COFFEE 中の COFFEE という活性ベクトルは、COFFEE という活性ベクトルとは異なる。これは次のことを意味するだろう——文脈が特定されない限り、CUP WITH COFFEE 中の COFFEE という活性ベクトルは、コーヒーであるための必要条件をもたらさないし、後に見るように十分条件ももたらさない。
- 【診断】 ①②（心的表象は活性ベクトルであり、非古典要素を持つ）は合成性の「強弱」には関係ないので、3 章で扱う。③は体系的・合成性に関係ない。④は合成性の強弱を分ける。この章では③④を扱う。

● 弱い合成構造（＝文脈依存性）について

- **表象は弱い合成構造を持つ iff 表象は文脈依存的構造を持つ。**
- 【Smolensky 説】 表象をマイクロ特徴のユニットからなる活性ベクトルだとすると、CUP WITH COFFEE から CUP WITHOUT COFFEE を引くと、COFFEE という要素が得られるという。しかしこれは、CUP WITHOUT COFFEE は CUP WITH COFFEE の要素であることを前提している。Smolensky は次のように言

う——『『コーヒーの入ったカップ』を表象するベクトルは『コーヒー』という内容の表象と『コーヒーの入ってないカップ』という内容の表象で同定されるようなベクトルから構成される」

- 【診断】 これはまずい。もし『コーヒー』という内容の表象と『コーヒーの入ってないカップ』という内容の表象を結合するのなら、このとき得られるのは『『コーヒーの入ったカップ』という内容の表象ではなく、『『コーヒーの入った、コーヒーの入ってないカップ』という自己矛盾した内容の表象である。Smolenskyにとって心的表象は文脈依存的であり、ゆえに非合成的である。しかしこれでは要素の意味論的性質と複合シンボルの意味論的性質がどのような関係であるかはわからない。

● ミクロ特徴について

- 【診断】 ミクロ特徴があるかどうかは体系性問題に関係ない。ミクロ特徴があるかどうかという問題は、個々のユニットが何の性質を表現するかという問題である（すなわち古典主義で言うと、どのシンボルが原始的語彙を構成するかという問題である）。もしミクロ特徴が存在するなら個々のユニットは「茶色い」「熱い」という感覚的性質だけ表現するであろうし、もしミクロ特徴が存在しないなら個々のユニットはさらに「コーヒーである」という性質をも表現するであろう。しかし**真に問題になっているのは、表象間の関係であるので、ミクロ特徴があるかどうかは関係ない。**

● 文脈依存性を批判する 1

- 【Smolensky 説】 CUP WITH COFFEE から引き算で得られる『『コーヒー』の表象は、CAN WITH COFFEE から得られる『『コーヒー』の表象との家族的類似性があるだけでよい。すべての『『コーヒー』の表象であるような単一ベクトルとしての COFFEE は存在しないし、古典的要素としての COFFEE も存在しない。
- 【診断】 この Smolensky の説がまずいことは本人も承知のようだ。表象 JOHN のトークンは、表象 JOHN LOVES THE GIRL という文脈においても表象 THE GIRL LOVES JOHN という文脈においても同じ内容を持たなければならない。**体系性を説明するためには文脈独立的な要素が必要であるのは明らかだ。**
- 【診断】 Smolensky が、「弱い合成構造（即ち文脈依存性）が体系性に関係ある」と考えているかどうかは、不明瞭で我々にはわからない。また Smolensky

が弱い合成構造と強い合成構造がどのような関係にあるかと考えているのかは不明だが、彼は結局は強い合成構造に訴えているようだ。

● 文脈依存性を批判する 2

- 【Smolensky の議論】 彼に基づいて考えると、CUP WITH COFFEE ベクトルからの引き算で得られた COFFEE ベクトルは、単なる COFFEE ベクトルとは異なることになる。さらに Smolensky は以下のように言う。CUP WITH COFFEE ベクトルからの引き算で得られた COFFEE ベクトルは、『コーヒー』という内容を持つための必要条件を与えない、なぜなら別の COFFEE ベクトルが GLASS WITH COFFEE から得られるからだ。そして十分条件を与えることもない、なぜならこれは特定文脈においてのみコーヒーの表象であるからだ。
- 【診断】 なぜ COFFEE ベクトルが『コーヒー』という内容を持つようになるのか？ Smolensky の文脈依存性によれば、COFFEE がマイクロ特徴で分散表象され、そして COFFEE が CUP WITH COFFEE の要素ベクトルであるからだとしよう。しかし、このような逆合成性（ベクトルの埋め込みが要素の内容を決定する）がいかんして働くかは示されていない。
- 【診断】 もし合成性を放棄し文脈依存性を採用して、COFFEE が CUP WITH COFFEE の要素ベクトルであるゆえに『コーヒー』という内容を持つなどと想定したら、次の疑問が生じる——CUP WITH COFFEE はどのようにして『コーヒーに入ったカップ』という内容を持つのか？ **文脈依存性想定のもとでは、ベクトルが内容を持つためには無限連鎖が生じる。**もしどこかでストップさせて、そのベクトルが内容を持つのは要素ベクトルの内容のおかげだなどと主張するなら想定に違反する。
- 【診断】 心的表象をなす「しかた」が文脈依存的であるという考えはトリビアに真である。しかし心的表象が文脈依存的であるという考えは間違っている。Smolensky は前者と後者を混同している。おそらくそのように混同しているからこそ、マイクロ特徴が知覚的性質ばかりなのであろう。結論として、コーヒーストーリーは体系性問題に関係ない。

3. Strong compositional structure

● Smolensky の強い合成構造

- 【Smolensky 説】 強い合成構造：①ユニット活性は 0 から 1 の間の連続値を

もつ。②マイクロ特徴に訴えない。③加減に加えて、積を導入する。④心的表象は文脈依存でない。

- **【Smolensky 説】** テンソル積と重ね合わせ表象：コネクショニストマシンの文字表象が例。文字列を文字が占める位置 (role) と、その位置を埋める文字 (letter) に分解する。マシンは、位置を表象するユニット (role unit) 上の活性ベクトルと、文字を表象するユニット (filler unit) 上の活性ベクトルをもち、そして位置に埋まった文字を表象するユニット (binding unit) 上の活性ベクトルをもつ。単語表象は binding unit 上の重ね合わせベクトル (加法による) であり、それは role unit と filler unit の活性ベクトルのテンソル積である。
- **【診断】** このような装置が、古典理論がツリーで表現するような統語論的關係を表象できるどうかはわからない。しかしとりあえず、ツリーが複合ベクトルで暗号化される (ツリーの要素が要素ベクトルに対応する) と想定して議論しよう。
- **【診断】** しかしツリーが複合ベクトルで暗号化されることはもちろん、テンソル積や重ね合わせベクトルが古典要素構造を持つことを保証しない。**ツリーが古典要素を持ち、ツリーが活性ベクトルで暗号化されるときも、活性ベクトルが古典要素を持つとは限らない。** Smolensky もそれを認めているし (複合ベクトルの (filler unit や role unit 上の) 要素ベクトルは実際にマシン上のユニットに対応しなくてもよい)、それは正しい。実際にマシン上でトークン化される活性パターンは、"John"を表象する重ね合わせベクトルである。
- **【診断】** Smolensky の戦略は結局、テンソル積と重ね合わせベクトルの要素が複合シンボルの古典的要素にアナログスであり、それゆえコネクショニストアーキテクチャが心的表象の古典的要素性を捉えることができるというものだ。しかし、テンソル積と重ね合わせベクトルの要素は古典的要素と次の点で異なっている。**古典的な複合シンボルがトークン化されるときその要素がトークン化されるが、対してテンソル積や重ね合わせベクトルがトークン化されるときその要素はトークン化されない。** 複合シンボルの古典的要素はトークン化という因果的帰結に貢献するが、テンソル積と重ね合わせベクトルの要素はそうではない。
- **【診断】** **テンソル積と重ね合わせベクトルの分解の仕方はひとつではない。しかも活性が連続値をとるなら、分解の仕方は無限にある。** 心的表象を有意な要素へ分解する、ということの意味がわからない。

●Smolensky のダイナミカルシステム説

- **【Smolensky 説】** 認知システムはダイナミカルシステムである。個々のユニッ

トを支配する運動方程式があり、これが活性ベクトルの規則性を決定する。そのような運動方程式があれば、特定の分解方法が利用可能になり、この意味で「通常モード」の分解が決定される。例えば、ある重ね合わせベクトルをベクトル和に分解する方法は様々だが、通常モードで分解すればユニークなベクトル和へと分解可能である。こうして古典的複合シンボルと同様のことができ、意味論的に解釈可能なベクトルへと分解可能である。

- **【診断】** いよいよ体系性を考えよう。心的表象の古典的要素は因果的役割を持つ（即ち古典的要素は心的プロセスにドメインを与える）古典的要素は複合シンボルのトークン化の因果的帰結に貢献する。対して**複合ベクトルの要素ベクトルは普通はトークン化されず、通常モードの分解においてのみ要素ベクトルへと分解「可能」であるだけだ**。六が 3×2 で表象可能であるからといって、その事実はコンピューター内の因果プロセス（六が **6** として表象されている）に影響しない。テンソル積は要素という概念を歪めてしまっている。
- **【Smolensky の反論】** 原子を構成する電子も、ベクトルで表現できる。各電子は内部状態（スピン）と軌道を持ち、それは原子全体のうちで役割を持つ。スピンを表象するベクトルと軌道を表象するベクトルのテンソル積でもって、電子を表象することができる。原子全体は、このテンソル積の重ね合わせベクトルでもって表象できる。同様に心的表象においても、テンソル積が要素を歪めることにはならない。
- **【診断】** **テンソル積が「要素構造を表象できる」ことは当然だ。問題は、テンソル積表象が「要素構造を持つ」かどうかだ**。「拡張された意味での要素構造」を認めるとしても、それが因果プロセスによって感受されるような要素構造であるかどうかは問題だ。なぜなら結局、体系性を説明するのは構造感受性だからだ。答えは明らかである——**複合ベクトルの要素は「そこ」にはないので、複合ベクトルのトークン化の因果的帰結が要素構造感受的であることなど奇跡である**。

● 因果的役割は誰が担うのか

- **【Smolensky 説】** 心的表象の要素は、トークン化の際の因果的役割を持たない。因果的役割を持つのは個々のユニットの活性値であり、これによってシステムの進化を支配する運動方程式が定義される。「要素は因果的ではないけれども、ベクトルの進化は要素の進化で（少なくとも近似的に）説明されるので、心的表象の体系性が出現すると考えられる。」
- **【診断】** 要素ベクトルが因果的に不全（それどころか想像上のものかもしれない

い) なら、何がベクトル進化をもたらすのか？ それは Smolensky にとっては、個々のユニットに作用する未知のプロセス（運動方程式）のようだ。結局 Smolensky の主張は次のものでしかない——体系性は神経プロセスの帰結である。そんなことはもちろん真であるが、それは Smolensky の長ったらしい説に直接依存する必要などない。

- 【診断】 人はこのように尋ねてくる——Smolensky は要素ベクトルを明示できるようなメカニズムを構築できないのですか？ このような質問は、体系性の何が問題なのかを見落としている。**説明すべきは、体系性がコネクショニストアーキテクチャで「可能」であることではなく、体系性が「必然的」であることであり、および認知能力が体系的であるということがいかにして法則であるかである。**もちろん Smolensky は、 aRb を表象するベクトルをもつのは bRa を表象するときそのときに限るようなネットワークを構築することはできるであろう (a, R, b の任意性をどう実現するかは分からないが)。困難なのは、 aRb を表象するベクトルを持つのは、 zSq を表象するベクトルがあるときそのときに限るようなネットワークを構築することだ。

4. Conclusion

● 因果的役割を捉えよう

- 【Smolensky 説】 「我々はふつう、真の原因は物理的なもので、シンボルよりも低いレベルのものと見なす。古典マシンでシンボル操作が真の原因であるのは、原子レベルで記述されるマシン状態について完全なアルゴリズム的ストーリーを言うことができるということに他ならない。」
- 【診断】 これはある種の随伴現象説である。これに対して我々は以下のように答える。Smolensky は正確性と因果の実在性を混同している。もしシンボルレベルの因果が実在でないなら、ユニットレベルの因果も実在でない。**マイクロに下るほど正確性が増すだろうが、それは何が真の因果であるかには関係ない。**因果的説明をすることができるかどうか問題であり、その際にどのくらい正確かを競うだけではなく、どのような一般言明を表現できるかが大事だ。ユニットレベルの心理学は因果的一般言明を見落とすことになる。Smolensky は、コネクショニストモデルが要素を再構築できるというが、それは因果性以外の部分である。