

【特集】「認知科学におけるモデルベースアプローチ」

仮説演繹器・認知シミュレータ・データ分析器としての認知モデル

Cognitive Models as Hypothesis Deduction Machine, Cognitive Simulator, and Data Analytic Machine

三輪 和久
Kazuhisa Miwa

名古屋大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University.
miwa@is.nagoya-u.ac.jp, <http://miwalab.cog.human.nagoya-u.ac.jp/>

Keywords: cognitive science, cognitive modeling, model based approach, theory.

1. はじめに

1.1 劣勢—日本におけるモデルベース研究

20世紀の半ばを過ぎた頃、認知科学と呼ばれる学際的研究領域が確立し、人間の知に関する研究は、新しい局面を迎えることになった[ガードナー 85].

認知科学成立以前は、人間の知に関する研究は、主に「実験的アプローチ」によっていた。認知科学は、それまでの実験的アプローチに加えて、「モデルベースアプローチ」という強力な研究手法を開発した。実験的アプローチは、人間の行動を組織化された方法を用いて観察し、その結果に基づいて人間の心を探る「分析的方法」である。一方、モデルベースアプローチは、人間の心の機能に関する仮説を設定し、その仮説に基づき心の模型を構成し操作することによって人間の知のありようを探る「構成的方法」である。このように、構成的方法とはいわば「つくってわかる人間の心」アプローチである。一般に、この心の模型を「モデル」と呼ぶ。

認知科学における構成的方法の成功においてとりわけ重要であった点は、モデルを、計算機の上で実行可能な形式に実装するという点であった。計算機は、模型に仮定された「仮説」から演繹される「帰結」を、高速かつ正確に導出する「仮説演繹装置」として機能した。このアプローチによって、人間の知の研究は大きな飛躍を果たすことになった。

この心理学的実験に基づく「実験的アプローチ」と計算機モデルに基づく「モデルベースアプローチ」は、認知科学における研究手法として、二つの主要な柱とされてきた。近年、脳活動の測定装置の発達により、前者のアプローチは新たな新展開を迎えている。一方、後者のアプローチに関しては、とりわけ日本において沈滞しているといわざるを得ない。

図1は、日米における認知科学の代表的学術雑誌である“Cognitive Science”と「認知科学」に掲載された論

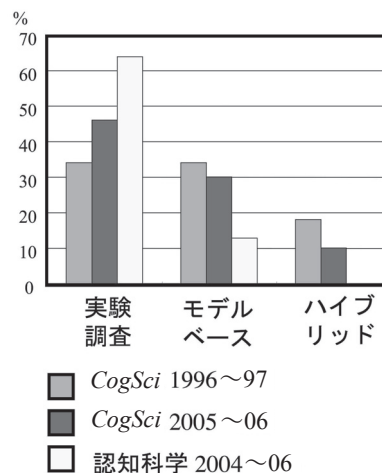


図1 日米の代表的認知科学雑誌における研究アプローチ比較

文を、そこで用いられている研究手法の観点から分類したものである(“Cognitive Science”の1996~97年のデータは、[Schunn 98]に、その他のデータは著者の調査に基づいている)。ここより、米国では、現在もモデルベースアプローチに基づく研究が主要な研究手法として取り上げられているのに対して、日本においてモデルベース研究はマイノリティである。

1.2 モデルベースアプローチの前提と新たな知能観

モデルベースアプローチにおいて、伝統的な認知科学が採用していた前提がある。

一つは、知の本質は「記号処理」であり、より本質的には「計算」であるという立場である[Newell 80]。また、人間の心は、中央装置が個々の周辺装置を制御する「ヒエラルキー構造」をもつものと仮定された[ペリシン 84]。さらに、心は自律的なシステムを形成しており、基本的に「外界と分離して研究可能」であるとされている。

これら三つの要件は、人間の心の基幹構造のアナロジーのベースを、ノイマン型の計算機アーキテクチャに求めたことにより生まれてきた前提である。それは、知の

研究装置として、デジタル計算機を採用したことにより生まれた必然であったといえることができる。

上記の前提に関して、近年、多くの批判が加えられた。そこでは、伝統的な認知科学が扱ってきた知とは異なる「新しい人間の知」に焦点が当てられ、それらの知能観の出現が、結果として、伝統的な知識観に対する批判となったのである。

例えば、そこでは、「身体に埋め込まれた知」が強調された。身体に埋め込まれた知の典型は、「わざ」や「技能」と呼ばれる能力の中に示される [生田 87]。このような身体に埋め込まれた知は、いわゆる暗黙知の一種である。暗黙知とは、言語で明示的に表現できないような、意識化することが困難な知のことである [ポランニー 80]。このような暗黙知は、意識的な認知活動の表現を得意とする伝統的な記号処理のパラダイムでは扱いにくい。身体が表現する知が記号によって表象されているとは考えにくいからである。

二つ目は、「環境・状況の中で発現する知」の重視である。伝統的な認知科学における知の主体は、生体の内側、より具体的には脳の中に存在していた。そこでは、外界は、あくまでその主体が利用する資源であり、主体に対して副次的な意味しかもち得なかった。しかし、「状況的認知」 [レイヴ 93] や「分散認知」 [Hutchins 95, Zhang 94] といった、人間の外側に広がる環境や状況の中に知の主体を求める知能観が生まれた。その最も極端な立場は、「表象なしの認知」と呼ばれるものである [Brooks 91]。そこでは、伝統的な認知科学でいうところの「心的に表象された記号の処理・計算」は、知の発現において必要ないとまで主張された。

最後に、複数の認知主体の相互作用の中で生まれる知、いわば「人と人のあいだに生まれる知」である。重要な点は、そこで生まれる知が、個々の認知主体の知に還元されないという点である。このように、あいだに生まれる知とは、相互作用の中だけに出現する知、相互作用の中で創発する知である [植田 00]。

1.3 心のブラックボックス化と空洞化

日本の認知科学において、モデルベースアプローチが定着しなかった原因の一つに、日本の認知科学が、上記の新たな知能観に基づいた批判をまともに引き受けたことがあげられるように思う。欧米では、モデルベースアプローチ研究の長い歴史があり、研究者のコミュニティもしっかりしている。そこでつくられたコアは、一見、伝統的なモデルベースアプローチと排他的に見えるこれらの批判に動じないだけの重心をつくり上げていた。一方、そのような核をもたない日本のモデルベース研究は、それみたことかと、一気に認知科学の本流から外に追いやりられてしまったようにも思えるのである。

しかし、我々は、ここで立ち止まって考えなければならない。認知科学成立前夜の心の科学は、行動主義と呼

ばれる心理学が君臨していた。行動主義心理学は、冒頭で述べた「実験的アプローチ」に関して、極めて洗練された方法論を開拓し、科学的な心の探求方法の確立に大きく貢献した。一方で、行動主義の心理学では、心の中のメカニズムはブラックボックス化して、心に対する入力としての「刺激」と、出力としての「行動」の関係のみを探求の対象とした。いわゆる心理学からの「心の排除」であり、心の「ブラックボックス化」である。一方、認知科学は、モデルベースアプローチの採用によって、心の科学に「心」を復権させた。「モデル」という形で、心のメカニズムや、心的なプロセスを積極的に取り上げる研究のパラダイムを成立させたのである。

前述した新しい知能観は、それぞれが人間の知に関して、重要な見通しを与えている。しかし、それらはともすると、人間の「賢さ」のありかを、人間という生体の外に求めようとする。その結果、これらの知能観が、人間の「個」の「心」のメカニズムの探求の空虚化につながるものとしたらどうだろう。それは、認知科学成立前夜にあった心の「ブラックボックス化」に対し、心の科学における心の「空洞化」を導くだけのことである。認知科学は、個の中に現に存在する自律的な心を空洞化させてはならない。そしてそこでは、やはり「モデル」という心の探究のための概念装置が、最も重要な鍵となってくるのである。

本論文では、認知科学におけるモデルの役割に関して、この領域の多くの研究者が共有してきた前提に基づき、さらに新たな視点に立った整理を試みてみたい。具体的には、モデルを理論と経験データを媒介する装置と位置づけ、そのモデルの役割を、仮説演繹装置、認知シミュレータ、実験データ分析装置という三つの観点から捉えることとする。

2. フレームワーク・理論・モデル

認知科学は、その成立時期から、一貫して「理論」に対する強い志向性を抱いてきた。「現象」を記述するだけではなく、その現象を説明する「理論」を明らかにしなければ、認知科学者は満足しない。そして、「モデル」は、まさに理論と現象をつなぐ媒介物として存在するのである。モデルは、単に「現象」としての人間の行動をシミュレーションするだけでは不十分である。そのモデルが、その背後にある「理論」と接続されて初めて、モデルはモデルとしての存在意義を認められるということである。

このようなモデルの位置づけに関して、Anderson は、フレームワーク、理論、モデルという3階層の概念を用いて、見通しの良い説明を与えている [Anderson 93] (図2参照)。

§1 フレームワーク

フレームワークは、認知システムに関する基本的、かつ一般的な主張から構成される。例えば、人間の記憶シ

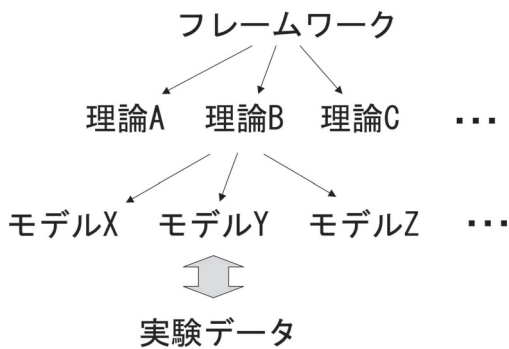


図2 フレームワーク・理論・モデル

システムが、長期記憶と短期記憶という二つの異なるタイプのシステムから構成されるというのは、フレームワークのレベルの記述である。

ある命題が科学的言明であるための条件として、最も広く認められている基準に、その命題の「反証可能性」があげられる。ある経験的事実は、その命題が反証される反証条件が示されて初めて科学的言明となり得るという基準である。反証条件を背負いつつ、その時点でとりあえず生き延びている（死なずに頑張っている）命題のみを、科学的言明として認めようという取決めである。反証可能性により、いわゆる信念・信条などが、科学的言明から排除されることになる。

フレームワークのレベルの記述は、人間の心のシステムに関して、一般的、かつ普遍的な知識を与えるものとして、最も重要なものである。一方で、このレベルの記述は、実験などを通して獲得される経験データと直接接合されていないために、この反証可能性を満たすことができない。

§2 理論

フレームワークのレベルの記述にいくつかの仮定を加えることによって、一つのフレームワークは、複数の理論に分化する。例えば、長期記憶と短期記憶というフレームワークに関して、Atkinson & Shiffrinの理論や、Baddeleyの作動記憶の理論など、いくつかの理論が存在する。それぞれの理論は、短期・長期の記憶の記銘のメカニズムや、両者の相互作用のあり方に関して、特有の仮定を置いている。

理論は、認知システムの行動に関して、ある程度具体的な予測を与えることができる。しかし、理論が導く予測と、実験を通して得られたデータとを直接つぎあわせ、その理論で設定された仮定の真偽を検証できるほどの、具体的な予測を与えることはできない。

§3 モデル

理論のレベルの記述は、さらに具体的な仮定を加えることによって、モデルのレベルの記述にまで精緻化される。モデルは、多くの場合、計算機プログラムの形で計算機上に実装され、シミュレーションを通して、具体的な予測を産出する。すなわち、そこで設定された具体的

な状況、例えば与えられる課題や、実験の手続き、実験手続き上の教示、被験者の状況において、仮定された理論に基づく認知システムが、どのような振舞いを示すのかが具体的に示される。モデルの振舞いは、その問題解決プロセスや、反応時間や正答率、エラー率などの行動指標として測定され、それらは、心理学的実験データと直接照合が可能である。

図2に示されるように、「フレームワーク」や「理論」のレベルの言明は、「モデル」のレベルの記述を介して、心理学的実験で測定される経験事象に接続される。この図式の上で、人間の心に関する知識は、反証可能性を満たし、経験科学における知識としての立場をもつことができるようになる。

モデルベースアプローチにおいて、モデルを設計、実装するという観点からも、この図式は重要な意味をもつ。すなわち、「モデル」はその背後にある「理論」を背負って設計されることが重要である。モデルが、どんなに興味深い行動を示したとしても、ドラステックなデモンストレーションを行ったとしても、それが心理学的理論に接合されていない限り、そこから得られる認知科学的知見は虚しいものである。モデルを、フレームワーク・理論・モデルという3階層の中に位置づけるという考え方は、モデルベースアプローチに基づき研究を行う認知科学者の、最も重要な実践原則を示している。

以下では、ここまで述べてきた図式の上で、特に「理論」と「モデル」の関係を意識しながら、モデルの機能を説明する。具体的には、モデルの役割を、「仮説演繹装置」、「認知シミュレータ」、「実験データ分析装置」という三つの観点から整理していく。その際、説明のための事例として、著者らの研究室で行われてきたいくつかの研究を取り上げることとする。

3. 仮説演繹装置

3.1 仮説演繹装置としてのモデル

モデルの役割の中で、最も重要であり、かつ現実にも多くの研究において多用されてきたのが、「仮説演繹装置」としてのモデルの働きである。ここでは、認知システムの中にある機能を仮定したときに、それによってシステムの行動や問題解決プロセスがどう変化するかを予測するためにモデルを用いる。

機能の「差替え」は、「知識」の単位であったり、ある機能を発現する「システムモジュール」の単位で行われる。プロダクションシステムの場合であれば、知識のユニットは、個々のルールに対応づけて論じられることが多い。また、システムモジュールは、特定の機能を共有するルール集合によって実装される。したがって、これらのルール、もしくはルールセットの追加・削除の影響を検討することによって、システムに特定の機能が仮定されたときの帰結を仮説演繹するのである。

認知システムでは、ある一つのモジュールは、ほかのモジュールと複雑に相互作用するため、ローカルなシステムの変更が、システムの全体的挙動にどう影響するかを、規範的に明らかにすることが困難な場合が少なくない。そのような状況において、仮説演繹装置としてのモデルがその力を発揮する。

3.2 図的表象に基づく問題解決に関する理論

仮説演繹装置としてのモデルの役割を、図的表象を用いた問題解決研究の例を通して検討する。以下、図3も参照いただきたい。

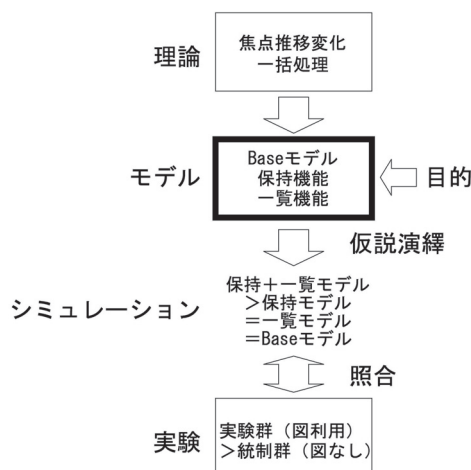


図3 仮説演繹装置としてのモデル

人間は、さまざまな外的資源を利用して効果的に問題を解決する。人間が一般的に利用する代表的な外的資源の一つとして、図的表象があげられる。人間は、問題を図に表し、その図を操作することによって、優れた問題解決能力を発現する。

問題を図に表すと、なぜ問題解決のパフォーマンスが向上するのかという疑問は、認知科学の長年のテーマであった。Larkinらは、「情報論的等価」と「計算論的等価」という概念を用いて、この問題を理論的に検討している[Larkin 87]。

二つの系があるときに、一つの系の情報から推論可能な情報のすべてが、他方の系の情報からも導出可能であり、その逆も成り立つとき、両者は「情報論的に等価な系」であるとする。そのうえで、情報論的に等価な二つの系が、図的表象によって記述されたときと文的表象によって記述されたときとを比較して、前者は後者に比して、情報の探索、情報の認識、推論といった三つの情報処理において、「計算論的な効率」を向上させていることを明らかにした。さらにこれらの計算論的有利性は、データの2次元的な結びつきによる焦点の推移経路の変化、同一の場所に描かれたデータの一括処理、長さや角度の比較など知覚を用いた推論の省力化といった利点として現れることを指摘している。

3.3 研究例

§1 心理実験

著者らは、「洞察」の実験課題の一つとしてしばしば取り上げられる100円問題を用いて、その課題を解決するモデルを実装し、Larkinらの理論的検討を、心理実験データに基づき実証的に検証した[山崎 01, 山崎 02]。100円問題では、問題文中に登場する人物間のお金のやり取りが記述され、そのやり取りの過程であたかも100円がどこかに消えてしまったような錯覚に陥る。課題は、その記述の矛盾点を指摘することである。

著者らはまず、心理学的実験において、図を描きながら問題解決をさせる「実験群」と、図を用いないで問題解決をさせる「統制群」とを設定し、それぞれの実験参加者にこの問題を解かせた。その結果、図を用いることによって、実際に問題解決のパフォーマンスが向上することが確認された。さらに、問題解決プロセスを詳細に検討した結果、実験群の実験参加者の問題解決プロセスに、問題文に書かれていない新規命題が多数生成されるという特徴が観察された。

§2 モデル

モデルの実装は、以下のように行った。まず、100円問題を解決する「Baseモデル」を実装した。Baseモデルは、問題文を述語論理の形式で受け取ると、お金のやり取りを記述した知識（例えば、人物Aから人物BにC円が渡ると、Aの持ち金はC円減り、Bの持ち金はC円増えるといったような知識）を用いて、導出可能な命題を次々と生成していく。問題の矛盾を示すような命題が生成された時点で、モデルは問題を解決したとみなす。

Larkinらの理論によると、図的表象を用いることによって、「データの2次元的な結びつきによる焦点の推移経路の変化」や「同一の場所に描かれたデータの一括処理」という点で、認知システムは計算論的に有利な情報処理を行うことが可能になる。前者の機能を「保持機能」、後者の機能を「一覧機能」と呼ぶ。Baseモデルに保持機能を加えた「保持モデル」、一覧機能を加えた「一覧モデル」、両者の機能を加えた「保持+一覧モデル」を構成した。

§3 シミュレーション結果

シミュレーションの結果、保持+一覧モデルはBaseモデルに比して、より多くの新規命題を構成した。一方、片方の機能だけを追加された保持モデル、および一覧モデルでは、新規命題数の増加は顕著ではなかった。以上より、心理実験で得られたデータを再生できるのは、保持+一覧モデルだけであり、これは、Larkinらが理論的に検討した保持機能や一覧機能の両者が相互作用する中で、図的表象利用の効果が現れてくることを、具体的に支持する結果を示すものである。

4. 認知シミュレータ

4.1 認知シミュレータとしてのモデル

認知シミュレータとしてのモデルの利用は、前述の仮説演繹装置としてのモデルの利用に準じるものである。仮説演繹装置としてのモデルにおいては、認知システムに置かれた仮定の帰結を計算機シミュレーションを通して観察する。その目的は、システムの仮定の妥当性を検討することにある。シミュレーションにおいて、心理実験をうまく再現できるような帰結が導かれたとき、その前提として仮定された機能を「是」とするのである。

一方、ここで述べる認知シミュレータとしてモデルを使用する場合、認知システムに実装された機能は、その時点ですでにその妥当性が支持されていることがその前提となる。認知システムが一般的に備えていると考えられるメタな制約、認知心理学の領域で広く認められている事実や、ほかの研究から得られた実証的知見などにに基づき、すでに確約された機能がモデルに実装されるのである。そのうえで、システムのパラメータや能力、方略を操作したときに、システムの問題解決プロセスやパフォーマンスがどのように変化するのかを観察する。認知シミュレータとしてモデルを使用する場合の目的は、モデルの機能を確定することよりむしろ、実験結果を予測することのほうに重点がある。あらかじめ実験結果を予測できることは、心理実験の計画を行ううえで、極めて重要な意味をもつ。この点に関しては、以下で具体的に言及する（図4参照）。

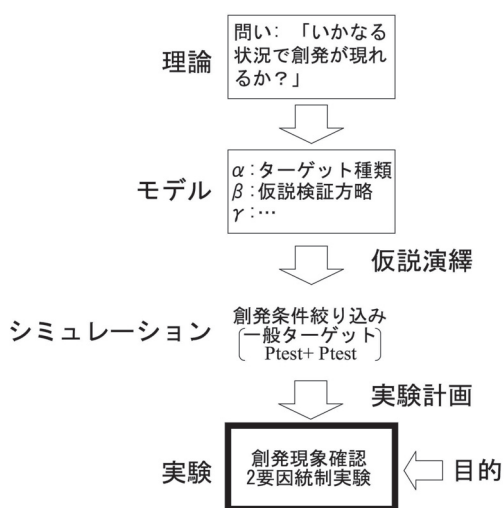


図4 認知シミュレータとしてのモデル

4.2 協同問題解決に関する理論

人間はしばしば、他者と協同することによって、単独では解決困難な問題を解決し、より高次の創造性を発揮するようになる。人間同士の相互作用の中に生まれる「はたらき」の探求は、協同問題解決研究として、数多くの

認知科学者がこの問題に取り組んできた。

「3人寄れば文殊の知恵」という言葉に反して、この格言の是非を検証するために行われた実験的研究は、人間の協同の効果が、我々が抱いているナイーブな直観ほどには顕著に現れるものではないことを示してきた。多くの心理学的実験は、グループの問題解決のパフォーマンスは単独のそれを上回るものの、同数の独立した個人が競争して問題を解決する場合のパフォーマンスを上回ることがないことを明らかにしてきたのである [亀田 97]。すなわち、協同の「数」の効果は確認されるが、相互作用の「あいだ」に生まれる効果が現れることは、むしろまれな現象であることがわかっている。

1.2節で述べたように、近年では、新しい人間の知の一つとして、複数の認知主体の相互作用の中で生まれる知について焦点が当てられている。協同問題解決の研究においては、数の効果を越えてあいだの効果が生まれることを「創発」と呼び、研究の鍵概念となっている。どのような状況において創発が現れるのかという疑問は、協同問題解決研究におけるもっとも重要な「理論的問い」の一つになっている。

4.3 研究例

§1 実験コストの増大

協同問題を実験的に研究している研究者を悩ます問題の一つは、その実験にかかるコストである。普通に考えても、4人のグループのデータを収集するためには、通常の実験の4倍の実験参加者を集めなければならない。成員ごとに実験条件を設定すると、その組合せが多数となり、さらに実験参加者の数が増大する。1セットの実験に、実験参加者600名ということもまれではない (Laughlinの一連の研究。例えば, [Laughlin 02])。加えて、多くの実験試行において、グループの成員の一部が、実験教示に違反したり、実験手続きに従わなかったりする。協同問題解決の研究の場合、グループの成員の1人でもこのような違反者が現れると、そのグループ全体のデータは無効になる。1割の確率でこのような違反者が現れるとすると、4人グループの実験においては、約1/3の実験データを捨てなければならなくなる。これは極めて深刻な問題である。

著者の研究グループでは、「発見」の研究に伝統的に用いられてきた2-4-6課題を用いて、協同問題解決の研究を行ってきた [Miwa 04]。この実験で考えられる操作要因は、ざっと取り上げただけでも、問題解決者の仮説形成方略、仮説検証方略、記憶の能力、試行打切りの慎重性、さらには課題に用いられるターゲットの種類など多様であり、それぞれを2人の実験参加者ごとに設定していけば、その組合せは膨大なものになる。これらを、心理学的実験において網羅的に探索していくことは、現実的には実施不可能である。

§2 シミュレーション結果

そこで我々は、これらの問題に対して、モデルに認知シミュレータの役割をもたせ、計算機シミュレーションを通して、創発現象が現れる状況を探索していった。ほとんどすべての実験条件の組合せで「数」の効果は確認されるものの、「あいだ」の効果を確認することはできなかった。その中で唯一、「一般性の高い」ターゲットを発見する状況で、二つのシステムがともに「Positive Test」と呼ばれる仮説検証方略を用いるときにおいてのみ、極めて頑健に創発現象が確認された。さらに我々は、この現象を確認するための2要因実験を、いわば「決め打ち」で実施し、実験室の中でも同様の現象が現れることを確認した。

§3 心理実験

その後、この実験結果に基づいて、相互作用の効果が創発的に現れる状況において、2人の問題解決者の間で何が起こっているのかを注意深く検討したところ、一方の問題解決者の Positive Test が、しばしば他方の問題解決者から見ると Negative Test として機能する場合が存在することが明らかになった。Negative Test は、一般性の高いターゲットを発見するために有利な仮説検証方略であることが知られている。互いに不利な方略で問題解決をしていた2人の問題解決者は、その相互作用の中で、有利な方略をつくり出していたのである。このような効果は、数の効果ではなく、あいだの効果として現れるものであり、これによって、この状況で頑健な創発現象が現れることが明らかになったのである。

5. 実験データ分析装置

5.1 実験データの分析装置としてのモデル

冒頭にも述べたように、認知科学は「理論」への強い志向性をもつ心理科学である。そのため、実験結果は、その背景に存在する特定の理論を下敷きにして、分析、解釈される。「正答率(その逆のエラー率)」や「反応時間」などの指標を用いる場合には、理論から導かれた仮説に基づき、実験におけるそれらの指標の値が予測され実験結果と照合されて、その結果が理論にフィードバックされる。そのような形で、理論と実験データは結びつけられるのである。

一方、高次思考過程でよく用いられるデータとして、発話プロトコルがある。問題解決中に自動的に産出される(独り言のような)発話を、実験参加者の内的情報処理の産物と捉え、それを問題解決者の認知プロセスの手掛りとして用いるのである。このようなプロトコルデータを、理論と接合させる最も一般的な方法は、コーディングスキーマと呼ばれるテンプレートを用いて、個々の発話データをタグ付けし、記号化された発話系列のレベルで問題解決プロセスを検討するものである。コーディングスキーマの設定は、おのおのの問題に特化して試行

錯誤的に行われることが多いが、そこに理論的仮定が反映される。

5.2 類推に関する理論

類推とは、直面する未知の事象に対して、すでによくわかっている領域の既知の事象を対応づけることによって、新たな思考を生み出す活動である。前者を「ターゲット」、後者を「ベース」と呼ぶ。類推研究では、何を手がかりにベースが検索され、どのような制約に基づいてベースの情報がターゲットにコピーされるのかが注目されてきた。類推の理論の中で、最も重要な古典的理論である「構造写像理論」[Gentner 83]では、ベースの探索は両者の間の「表層的類似性」を手掛りに行われる一方、「構造的に類似」した情報がベースからターゲットにコピーされ、未知の事象における問題解決に用いられるとされる。

構造写像理論では、一般に、事象が述語論理の枠組みで記述される。例えば、太陽は赤いという事実は red (sun), 太陽の周りを惑星が回るならば, revolve-around (planet, sun), 太陽が惑星を引きつけることで太陽の周りを惑星が回るならば, cause (attract (sun, planet), revolve-around (planet, sun)) となる。それぞれを、対象の属性、1次の関係、2次の関係と呼ぶ。ここで、「表層的類似性」とは、上記の枠組みにおける低次の対応関係、すなわち属性、もしくは1次の関係の対応関係を意味する。「構造的類似性」とは、1次以上の高次の関係の対応をいう。例えば、「太陽が赤い」と「みかんは赤い」という類似性は表層的類似性であるのに対して、「太陽が惑星を引きつけることで太陽の周りを回る」と「原子核が電子を引きつけることで原子核の周りを電子が回る」というのは、構造的類似性である。

5.3 研究例

§1 心理実験

類推の実験的研究では、実験参加者は、事前に実験者が提示した物語などの記憶材料を「ベース」として学習する。実験参加者は、その後、「ターゲット」として課題を与えられ、その課題遂行中に学習されたベースがどう想起され、ベースの情報がどのようにターゲットの問題解決に利用されるのかが検討される。この実験パラダイムにおいては、ベースは、実験者によって実験参加者に植え付けられた知識である。

それに対して著者らは、現実場面で類推がどのように機能するかを検討するために、実験参加者に対して、あらかじめベースを学習させることなく自由に物語を読ませ、物語を読んでいる最中に想起された「エピソード」を答えさせた[森田 05]。頭に浮かんだエピソードが、実験参加者の日常経験の中で蓄積された知識の中から想起された「ベース」であると考えられる。想起された「エピソード」と問題刺激として与えられた「問題文」との

関係を検討することによって、ターゲット（物語文）と、ベース（エピソード）の類似性を検討できる。さらに、実験参加者には、そのエピソードが問題文を理解するときに役立つ度合いを評定させた。役立ち度の評価は、ターゲット課題遂行時の問題解決におけるベース情報の利用可能性の高さを示すものとして解釈される。

§2 MAC/FAC モデル

さて、本研究で収集された「エピソード」は、事後的に収集された一種のプロトコルデータと考えることができる。前述のように、通常は、表層的・構造的類似性を判別できる体系に基づくコーディングスキーマを設定して、実験データとしてのエピソードが分析されることになる。しかし著者らは、この「実験データ」を「理論」とダイレクトに接合させて分析するために、MAC/FAC と呼ばれる認知モデルを用いた分析を行った。MAC/FAC は、構造写像理論をもととして開発された類推を行う認知モデルであり、その際に、表層的類似性に対応する Content Vector（以下、CV と略す）という値と、構造的類似性に対応する Structure Evaluation Score（以下、SES と略す）という値を算出する。分析では、CV 値と SES 値を、それぞれ表層的類似性、構造的類似性を表す指標として用いる。この場合、MAC/FAC は、CV 値、SES 値を計算する実験データの分析装置として働くことになる（図5参照）。

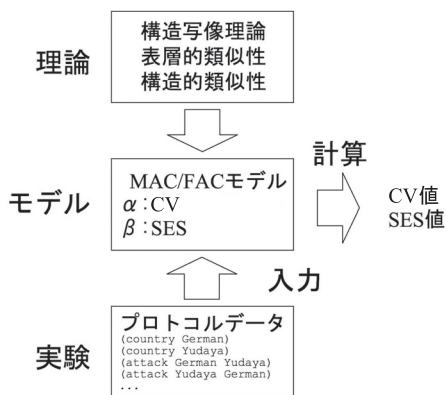


図5 実験データ分析装置としてのモデル

§2 分析結果

まず、実験刺激として用いた「物語文」、および実験参加者から収集された「エピソード」を、すべて述語論理の表現に変換した。変換された物語文とエピソードは、MAC/FACに入力され、両者の間のCVとSESが計算された。その結果、想起されたエピソードに対して計算されるCV値は期待値を有意に上回った。さらに、役立ち度を高く評定されたエピソードは、低く評価されたエピソードに比べ、高いSES値が計算された。これらは、エピソードの想起はSESよりもCVによって良く説明されるのに対して、類推の良さの評定は、逆にCVよりもSESによって良く説明されることを示しており、構

造写像理論の仮定と整合的である。このことは、ベースを実験室で学習させる従来の実験において確認されてきた類推における表層的・構造的類似性の機能が、ベースを提示しない、より現実場面に近い状況においても成り立つことを示すものである。

6. ま と め

ここまで述べてきたように、「モデル」は「理論」と「実験データ」を結びつける媒介物である。認知科学が、「理論的志向性」をもちつつ、同時に「経験科学」としての道を歩もうとするとき、モデルはとりわけ重要な役割をもつ。本論文では、理論と実験データの媒介の仕方に基づいて、仮説演繹装置、認知シミュレータ、実験データの分析装置という三つの観点から、モデルの役割を整理してきた。

本論文の検討は、プロダクションシステムなどに代表される伝統的な記号処理システムのアーキテクチャを前提としている。モデルを実現するアーキテクチャとしては、ニューラルネットなどの分散処理システムがある。そこでのモデルの役割は、本論文で展開した図式とはやや異なるものになることが予想されるが、本論文で論じた基本的な考え方は、両者のアーキテクチャに共通するものである。

もう一つ重要な点として、近年の認知科学では、脳活動測定装置の発達に伴って、脳の活動を実験データに用いることができるようになってきた。「理論」は、旧来の「行動データ」に加えて、「脳活動データ」の上に立脚することができるようになってきたのである。この場合も、モデルは、経験データと理論をつなぐうえで、強力な役割を担うことになる。その一つの実践例は、ACT-Rである[Anderson 07]。ACT-Rに関しては、本特集におけるRitter論文で大きく取り上げられるので、参照いただきたい。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（B）：193000089）の援助を受けた。また、本稿のドラフトに対して、山崎 治氏（千葉工業大学）、森田純哉氏（北陸先端大学院大学）、寺井 仁氏（東京電気大学）から有益なコメントを得た。記して謝意を表す。

◇ 参 考 文 献 ◇

[Anderson 93] Anderson, J. R.: *Rules of the Mind*, LEA (1993)
 [Anderson 07] Anderson, J. R.: *How Can the Human Mind Occur in the Physical Universe?* Oxford University Press (2007)
 [Brooks 91] Brooks, R.: Intelligence without representation, *Artificial Intelligence*, Vol. 47, pp. 139-160 (1991)
 [Forbus 95] Forbus, K. D., Gentner, D. and Law, K.: MAC/FAC: A model of similarity-based retrieval, *Cognitive Science*, Vol. 19, pp. 141-205 (1995)

- [ガードナー 85] ハワード・ガードナー 著, 佐伯 胖ほか 監訳: 認知革命—知の科学の誕生と展開, 産業図書 (1985)
- [Gentner 83] Gentner, D.: Structure-mapping: A theoretical framework for analogy, *Cognitive Science*, Vol. 7, pp. 155-170 (1983)
- [Hutchins 95] Hutchins, E: *Cognition in the Wild*, MIT Press (1995)
- [生田 87] 生田久美子: 「わざ」から知る, 東京大学出版会 (1987)
- [亀田 97] 亀田達也: 合議の知を求めて—グループの意思決定, 共立出版 (1997)
- [Larkin 87] Larkin, J. H. and Simon, H. A.: Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words, *Cognitive Science*, Vol. 11, pp. 65-100 (1987)
- [Laughlin 02] Laughlin, P. R., Bonner, B. R. and Miner, A. G.: Groups perform better than the best individuals on Letters-to-Numbers problems, *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, Vol. 88, pp. 605-620 (2002)
- [Miwa 04] Miwa, K.: Collaborative discovery in a simple reasoning task, *Cognitive Systems Research*, Vol. 5, pp. 41-62 (2004)
- [森田 05] 森田純哉, 三輪和久: 計算機モデルによる Open-end な状況での認知の分析, 人工知能学会論文誌, Vol. 20, No. 4, pp. 306-317 (2005)
- [Newell 80] Newell, A.: Physical symbol systems, *Cognitive Science*, Vol. 4, pp. 135-183 (1980)
- [ピリシン 84] ゼノン・ピリシン著, 信原幸弘 訳: 認知科学の計算理論, 産業図書 (1984)
- [ポランニー 80] マイケル・ポランニー著, 高橋勇夫 訳: 暗黙知の次元—言語から非言語へ, 紀伊國屋書店 (1980)
- [レイヴ 93] ジーン・レイヴ, エティエンヌ・ウエンガー著, 佐伯 胖 訳: 状況に埋め込まれた学習 - 正統的周辺参加, 産業図書 (1993)
- [Schunn 98] Schunn, C. D., Crowley, K. and Okada, T.: The growth of multidisciplinary in the Cognitive Science Society, *Cognitive Science*, Vol. 22, pp. 107-130 (1998)
- [植田 00] 植田一博, 岡田 猛: 協同の知を探る—創造的コラボレーションの認知科学, 共立出版 (2000)
- [山崎 01] 山崎 治, 三輪和久: 外化による問題解決過程の変容, 認知科学, Vol. 8, pp. 103-116 (2001)
- [山崎 02] 山崎 治, 三輪和久: 図的な外化による問題解決変容過程のシミュレーションモデル, 認知科学, Vol. 9, pp. 135-148 (2002)
- [Zhang 94] Zhang, J. and Norman, D.: Representations in distributed cognitive tasks, *Cognitive Science*, Vol. 18, pp. 87-122 (1994)

2009年1月6日 受理

著者紹介



三輪 和久 (正会員)

1984年名古屋大学工学部卒業。1989年同大学院工学研究科博士課程修了(情報工学専攻)。工学博士。同年名古屋大学情報処理教育センター助手, 1993年同大学院人間情報科学研究科助教授を経て, 2004年より名古屋大学大学院情報科学研究科メディア科学専攻教授。1991~92年, 米国 Carnegie Mellon University, Dept. of Psychology, visiting assistant professor。認知科学, 人工知能, 教育学の研究に従事。

とりわけ, 発見, 創造, 洞察, 協同など, 人間の high-order 思考過程に興味がある。