

認知アーキテクチャの理論による 脳の構造と機能の解明

Illuminating Brain Structure and Function
within a Theory of Cognitive Architecture

寺尾 敦

Abstract

本稿では、認知アーキテクチャについての代表的な理論の一つである、ACT-R 理論の概要を解説する。認知アーキテクチャは、ある抽象化水準で脳の機能を特定したものであり、心の機能がどのようにもたらされるかを説明する。ACT-R 理論によれば、人間の認知機能は特定の機能を担う多くのモジュールの相互作用によって実現される。これらのモジュールはそれぞれ異なった脳部位と対応付けられている。この理論に基づいて構成された詳細な認知モデルは、fMRI のデータを利用して検証することができる。

キーワード：認知アーキテクチャ、ACT-R 理論、プロダクションシステム、fMRI、汎用人工知能

1. 心理学と脳科学の理想的関係

2014 年のノーベル医学生理学賞は、自分の位置や目的地を把握するための脳細胞を発見した、John O'keefe, May-Britt Moser, Edvard Moser の 3 氏に授与された。心理学から脳科学に転じた 3 人の受賞者は、心理学者が認知地図と呼んできた脳内のシステムにおいて、重要な役割を果たす細胞を発見したのだった^{(1), (2)}。

認知地図を構成する脳細胞の発見は、心理学と脳科学の理想的関係の好例である。すなわち、心理学が認知的機能を明らかにし、脳科学がその機能を実現する物理的構造を発見している。心理学者 Edward C. Tolman は、ラットに迷路を学習させる実験から、この学習ではラットの脳内に地図のような何かが構築されると考えた⁽³⁾。彼の学習理論は認知心理学の誕生に大きな影響を及ぼしたが、認知地図というアイデアそのものについては、心理学での進展は余り見られなかった。これに対して、脳科学は認知地図の存在を示す証拠を得た。

ただし、心理学が明らかにした認知的機能を実現する脳の物理的構造を明らかにすることは、脳科学が十分に進歩したときに心理学が不要になるということを意味し

ない。生体の行動を説明するためには、最適な水準と語彙を選ぶ必要があり、それはしばしば心理学的なものとなるからである。例えば、現実の社会での複雑な意思決定プロセスを説明するために脳科学の語彙を用いることは、恐らくは不適切であろう。意図、主観確率、効用といった語彙を用いた、心理学的な説明が適している。

2. 認知アーキテクチャ

脳科学の進歩によって心理学が不要になることはなくても、両者の境界は次第に曖昧になっていくかもしれない。心理学が認知的機能を研究し、脳科学がその機能を実現している脳の構造を明らかにするという、明確な作業分担をする必要はない。実際、脳の神経システムが認知機能をいかに実現しているかの解明を目的とした認知アーキテクチャ (cognitive architecture) の研究は、認知科学の領域で既に始まっている。

何人かの認知科学者が少しずつ異なった認知アーキテクチャの定義をしている。脳構造と認知機能の結び付きを明示した定義として、ここではアンダーソン (John. R. Anderson) による定義⁽⁴⁾を採用する：認知アーキテクチャは、ある抽象化水準で脳の構造を特定したものであり、心の機能がどのようにもたらされるかを説明する。

認知アーキテクチャについての理論は、人間の認知の多様な側面を統合的に捉えるので、認知の統一理論

寺尾 敦 青山学院大学社会情報学部社会情報学科
E-mail atsushi@si.aoyama.ac.jp
Atsushi TERAQ, Nonmember (School of Social Informatics, Aoyama Gakuin University, Sagamihara-shi, 252-5258 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.98 No.12 pp.1083-1090 2015 年 12 月
©電子情報通信学会 2015

(unified theory) と呼ばれる⁽⁵⁾。認知地図の学習とその神経基盤のような、人間の認知の特定の側面についての研究はもちろん重要だが、認知アーキテクチャの理論は一般に脳全体を視野に入れる。認知の様々な側面を個別に攻略しても、人間の認知の全体像が明らかになる保証はない⁽⁶⁾。認知には様々な側面があるけれども、それらは全て脳のアーキテクチャに支えられている。認知の統一理論は、認知の全ての側面を扱い、経験的知見を統合する。

3. ACT-R 理論

ACT-R (アクトアール) 理論は、アンダーソンがおおよそ 40 年間にわたって発展させてきた認知アーキテクチャの理論の、現在の姿である。ACT-R というつづりは Adaptive Control of Thought-Rational の頭文字をとったものである。この理論の最初のバージョンは ACTE (アクトイー) 理論と呼ばれた⁽⁷⁾。これが後に ACT* (アクトスター) 理論⁽⁸⁾へと発展し、更に ACT-R 理論となった^{(9), (10)}。どのバージョンも根本的なフレームワークは同一である。すなわち、認知アーキテクチャをプロダクションシステムとして捉えている。

フレームワーク、理論、モデルという言葉の区別をしておこう^{(8), (9)}。フレームワークは、理論の水準よりも一般的な主張から構成される。「認知的なスキルはプロダクションルールによって実現される」というのは、

ACT のフレームワークでの、人間の認知アーキテクチャについての基本的主張である。モデルは理論を特定の状況に適用したものである。具体的な認知課題での人間のパフォーマンスに関して、詳細な予測を行う。ACT-R 理論の下でのモデル構築のために、プログラミング環境が用意されている。2015 年 8 月時点でのバージョンは ACT-R 7 である。

図 1 は ACT-R 理論が仮定している認知アーキテクチャ⁽¹¹⁾の全体像である。以下では、この図に表現されている ACT-R 理論の基本的仮定について説明する。

3.1 宣言的知識と手続的知識

ACT-R 理論は宣言的知識 (declarative knowledge) と手続的知識 (procedural knowledge) を区別している。「知識」の代わりに「記憶」という言葉を使うこともある。宣言的知識は人が明示的に述べることのできる事実的知識である。例えば、「日本の首都は東京である」、「3 足す 4 は 7 である」といった知識が宣言的知識である。手続的知識は、何かのやり方に関する知識であり、人はこれを必ずしも明示的に述べることができない。例えば、自転車の乗り方は手続的知識である。

ACT-R 理論では、宣言的知識はチャンク (chunk) と呼ばれる形式で表現される。例えば、「4 足す 5 は 9 である」といった足し算の知識は、次のように二つの数とその合計から構成される。

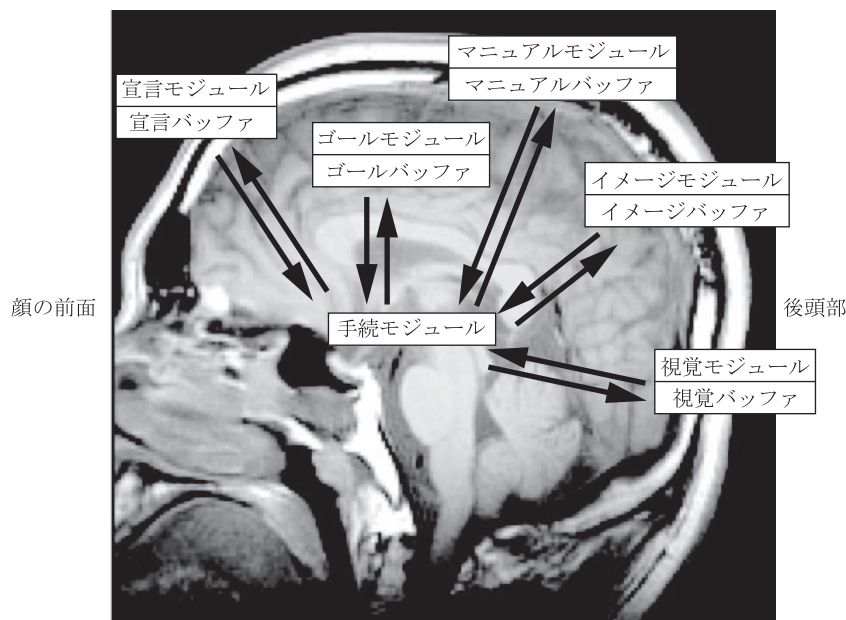


図 1 ACT-R アーキテクチャの全体像 ACT-R 理論が仮定するモジュールと、それらの脳での大まかな位置を MRI 画像 (脳の矢状面) の上に示した。プロダクションシステムの中核である手続モジュールが、ほかのモジュールに付随するバッファの内容を参照し、条件部が現在のバッファの内容に合致するプロダクションルールの一つが実行される。図示されていないが、ほかに聴覚 (aural) モジュールと音声 (vocal) モジュールを仮定している。

Fact4+5

```
isa addition-fact
addend1 four
addend2 five
sum nine
```

手続的知識は、ある条件が満たされたときの行為を決定する、プロダクションルール (production rule) として表現される (以下、単に「ルール」と呼ぶ)。例えば、一次方程式の解決で使われる幾つかの知識のうちの一つは、次のように表現される。

もし (IF)

目標は方程式を解くことであり、
方程式は「式-数1=数2」という形をしており、
数1+数2は数3であるという知識が検索済み、

ならば (THEN)

方程式を「式=数3」と変形せよ。

このルールによって、 $3x-4=5$ という式は $3x=9$ と変形されることになる。この変形を実行するとき、「4足す5は9である」という宣言的知識は既に検索済みである。この検索は、今述べたルールと僅かに異なる別のルールによって、前もって実行されたと考えられる。

3.2 プロダクションシステム

ACT-R 理論はプロダクションシステムのフレームワークで構築されている。このフレームワークでは、人間の認知をルールの集合によって説明できると考える。例えば、方程式の問題が与えられると、数の四則演算の結果に関する知識を検索するためのルールや、検索の結果を利用して式変形を行うためのルールなど、関連するルールが連鎖的に実行され、問題解決が行われると考えられる。ルールの実行は「発火 (fire)」と呼ばれる。

ACT-R 理論でのプロダクションシステムは、それぞれ特定の機能を担う、多くのモジュールの相互作用によって実現されている。ゴールモジュール (goal module) は現在の目標 (例えば、方程式を解く) を把握する。視覚モジュール (visual module) は視覚から入力された情報 (例えば、紙に書かれた $3x-5=7$ という方程式) を符号化する。イメージモジュール (imaginal module) は、認知的課題の現在の心的表象 (例えば、変形した方程式 $3x=12$) を保持する。宣言モジュール (declarative module) は、認知的課題の解決に必要な情報 (例えば、 $7+5=12$) を検索する。マニュアルモジュール (manual module) は出力 (例えば、方程式の解答を書く) のプログラムを行う。これらのモジュールを協調的に機能させているのが、ルールをその内部に含む手続モジュール (procedural module) である。

手続モジュール以外のモジュールは、手続モジュールとのインタフェースとして、それぞれバッファ (buffer) を持つ。これらのモジュールは並列に動作可能である。それぞれのモジュールにおいても、並列な情報処理が可能である。しかし、それぞれのモジュールにはボトルネックが存在し、一度に僅かな情報 (一つのチャンク) だけをバッファに置くことができる。例えば、ある時点では一つの目標だけがゴールバッファに置かれる。ACT-R 理論はワーキングメモリという概念を形式的には持っていないが、これらバッファが実質的にワーキングメモリに相当する。

手続モジュールは、そのほかのモジュールのバッファの内容を参照し、それらと条件が一致するルールを一つ選ぶ。このルールに書かれた行為が実行されることで、それぞれのモジュールでの情報処理が行われ、バッファの内容が書き換えられる。すると、バッファの内容と一致する条件を持つ別のルールが選ばれ、その行為が実行される。こうして、認知的課題が最終的に解決されるか、適用可能なルールが見つからなくなるまで、ルールが連鎖的に発火して処理が続く。

3.3 ハイブリッドアーキテクチャ

ACT-R アーキテクチャは「シンボリック」な水準と「サブシンボリック」な水準を持つ。ACT-R でのシンボリックな水準とは、脳が知識を符号化する方法についての抽象的な特徴付けである。宣言的知識をチャンク、手続的知識をルールで表現することは、ACT-R でのシンボリックな水準である。サブシンボリックな水準とは、こうした知識を利用可能にしている神経的な計算の役割についての、抽象的な特徴付けである。どの宣言的知識が利用されるかは、連続変数である活性化 (activation) の計算によって決まる。同様に、どの手続的知識が利用されるかは、やはり連続変数である効用 (utility) の計算に基づく。これら二つの水準を有するという意味で、ACT-R は記号処理と神経的計算の「ハイブリッドアーキテクチャ」である。

ACT-R の宣言的モジュールには、チャンクとして符号化された宣言的知識のネットワークがある。それぞれのチャンクは全て活性化の値を持っている。認知的課題の解決において宣言的知識が検索される時、条件に適合する知識の中で、活性化が最も高いものが選ばれ、バッファに置かれる。活性化を決める要因の一つは使用履歴である。何度も使用されたチャンクと、最近使用されたばかりのチャンクは、活性化が高い。

ACT-R のルールは全て効用値を持っている。現在の状況で利用可能なルールが複数ある場合には、効用が最も高いルールが実行される。ある認知的課題が解決されると、それに関与したルールは全て報酬 (reward) を受け、効用が更新される。

3.4 脳部位との対応

ACT-R 理論でのモジュールは、図 1 に示すように、脳の特定位と関連付けられている。外界からの入力を最初に受ける視覚モジュールは視覚野に、外界への反応を担うマニュアルモジュールは運動野に対応付けられている。これら二つのモジュールの脳部位との対応は、余り異論なく受け入れられるだろう。ほかのモジュールについても、視覚モジュール及びマニュアルモジュールと比べて議論の余地は大きい。脳部位との対応が仮定されている。宣言モジュールは前頭領域、ゴールモジュールは前帯状皮質 (anterior cingulate cortex)、イメージモジュールは頭頂領域と対応付けられている。プロダクションシステムの中核である手続モジュールは、脳の中心部に位置する大脳基底核 (特に、線条体、淡蒼球、視床) がその機能を実現していると仮定されている。

4. ACT-R 理論の検証

ACT-R 理論のような統一理論は、複雑で、多くの仮定や主張を含み、特定の認知的課題でのパフォーマンスを予測するには抽象的である。よって、ACT-R 理論の評価は、この理論に基づいて構成されたモデルの検証を繰り返すことによって行われる。多くの ACT-R モデルがデータをうまく予測あるいは説明することで、ACT-R 理論の妥当性が高められていくことになる。

4.1 知的チュートリングシステム (ITS)

ACT-R 理論に基づいて詳細な認知モデルが構築され、検証が繰り返されてきた研究テーマの一つは、知的チュートリングシステム (Intelligent Tutoring System, 以下、ITS と表記) による学習支援である。ITS は、人間の学習や問題解決についての認知理論に基づき、コンピュータを用いた個別指導を行う。ACT-R 理論に基づいた ITS として、LISP Tutor⁽⁹⁾、Geometry Tutor⁽⁹⁾、Cognitive Tutor Algebra⁽¹²⁾ などがある。ACT-R 理論に基づいて設計された ITS は、問題解決のように、何かを遂行する状況で学習を支援する。ルールは「なすことによって学ぶ」(learning by doing) しかないと考えられているからである。

ACT-R 理論によれば、ある領域での認知的課題の遂行に必要な知識は、最初にテキストや教師から宣言的知識として与えられる。問題解決の方法は、学習者にとってはまだ手続的知識になっておらず、宣言的な教示の集合である。例えば、 $7x+3=38$ のような一次方程式の解法について、「一次方程式の右辺が数ならば、左辺の式に注目して、それを処理せよ」、「式を処理するとき、数 (この例では 3) が右側にあれば、それを処理せよ」といった一連の教示がなされる。初期の問題解決では、実行すべき教示を検索し、その教示を解釈して問題に適用

していく。解決には時間が掛かり、誤りも多く生じる。

問題解決を繰り返すことで、何ステップも要していた教示の検索と実行が、少数のルールに変わる。例えば一次方程式の学習では、「方程式が式+数1=数2という形ならば、式=数2-数1として、右辺の結果を検索せよ」というルールが学習されるだろう。このルール生成プロセスはコンパイルーション (compilation) と呼ばれる。これにより問題解決のスピードが上がる。

ITS による学習支援では、学習者の持つ知識に関する認知モデルが中心的な役割を果たす。ITS は、学習者が持つ誤ったルールや、獲得すべきルールを保持している。学習者が課題解決を 1 ステップ進めるごとに、ITS は学習者が使用したルールを判断し、適切なフィードバックを与える。このアルゴリズムは、モデルトレーシング (model tracing) と呼ばれる。

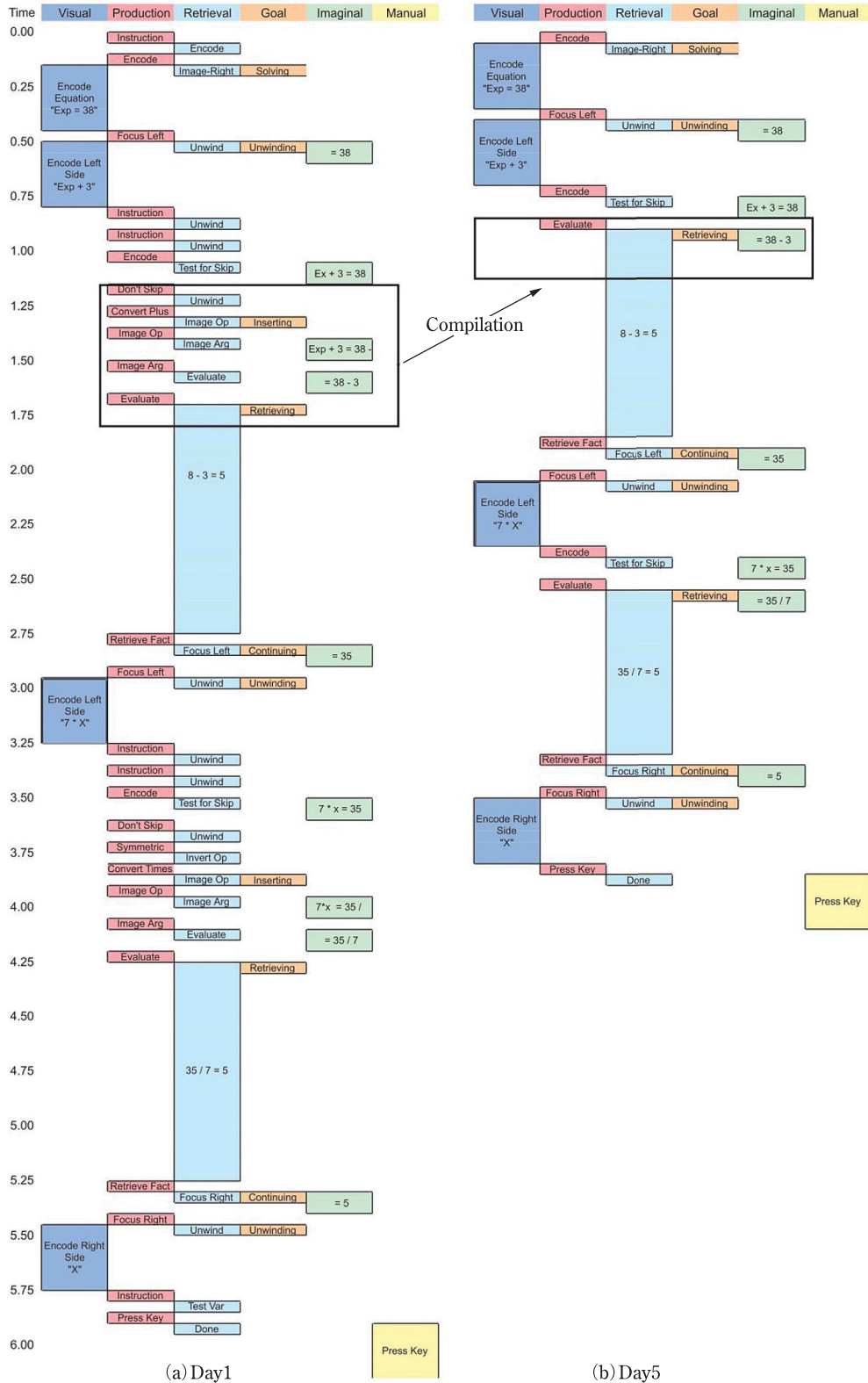
ACT-R 理論に基づいて設計された ITS による学習支援は有効に機能しており⁽¹²⁾、ACT-R 理論の妥当性を高めている。

4.2 fMRI

一次方程式を解くような、数秒からせいぜい 10 秒程度しか要しない問題解決であっても、ACT-R モデルはかなり複雑になる。図 2 は、学習者が $7x+3=38$ という一次方程式を解くプロセスの ACT-R モデルである⁽¹¹⁾。左側 (Day 1) が学習初期、右側 (Day 5) が学習後期の解決プロセスであり、それぞれ六つのモジュール (左から順に、視覚、手続、宣言、ゴール、イメージ、マニュアルモジュール) の活動が時系列で示されている。時系列において四角形が描かれている時間範囲で、そのモジュールが活動している。このモデルによれば、学習初期には 26 個、後期でも 11 個のルールが発火する。ルールが発火するとバッファの内容が更新される。

このように複雑なモデルを検証するには、反応時間や正答率のような行動データだけでは不十分である。モデルが予測する正答率や反応時間がデータによく適合している、モデルが述べているようにルールが発火し、バッファの内容が更新されているのかについては、ほとんど何も分からない。

そこでアンダーソンらは、認知課題を遂行中に fMRI で計測される blood-oxygen-level-dependent (BOLD) 反応を、その課題解決の ACT-R モデルから予測することで、モデルの検証を行う方法を工夫した^{(11),(13)}。図 2 に示すような ACT-R モデルでのタイムコースから得られる需要関数 (demand function) を、血流同態反応関数 (hemodynamic response function) と畳み込むことで、BOLD 反応を予測する。ACT-R モデルはモジュールごとのタイムコースを示すので、そのモジュールに対応する脳部位での BOLD 信号の予測値が観測値とよく



Compilation: コンパイルーション

図2 一次方程式を解くプロセスのACT-Rモデルにおける六つのモジュールの活動 学習初期 (Day 1) と学習後期 (Day 5) での、 $7x+3=38$ という一次方程式の解決プロセスにおける、六つのモジュールの活動を時系列で示している。図の一番左側に時間の経過が示されている。学習初期と後期それぞれの6列は、左から順に、視覚、手続、宣言、ゴール、イメージ、マニュアルモジュールの活動である。時系列において四角形が描かれている時間範囲で、そのモジュールが活動している。(文献(11)から、著作権者の許可を得て転載。Copyright © 2005 Cognitive Science Society, Inc.)

一致すれば、そのモデルを支持する証拠となる。

需要関数 $D(x)$ は ACT-R モデルにおけるモジュールの活動のタイムコースを反映する。単純な需要関数として、時刻 x においてモジュールが活動していれば 1、していなければ 0 という値をとる関数が考えられる⁽¹³⁾。もう少し複雑な需要関数として、時刻 x においてモジュールが活動している確率を用いることができる⁽¹¹⁾。

モジュールの活動は、そのモジュールに対応する脳部位での血流同態反応を引き起こすはずである。この反応は血流同態反応関数 $H(t)$ を用いて表現される。モジュールが活動したときから t 単位時間後の反応を、

$$H(t) = m \left(\frac{t}{s} \right)^a e^{-t/s}$$

とする。パラメータ m , s , a の値は、あらかじめ決めておくか、データから推定する。この関数のグラフは、 $H(0) = 0$ から始まって時間とともに上昇し、 $t = a \times s$ でピークに達し、その後減少する。

モジュールが活動するたびに血流動態反応は累積されていく。したがって、BOLD 反応の予測を与える関数は、需要関数と血流動態反応関数を畳み込むことで得られる。すなわち、時刻 t における BOLD 反応は、

$$B(t) = \int_0^t D(x) H(t-x) dx$$

であると予測できる。

このような畳み込みによる BOLD 反応の予測は、通常の fMRI データ解析においても行われるが⁽¹⁴⁾、ACT-R モデルから導かれる予測は詳細な認知モデルに基づいているという点に特徴がある。

一次方程式の学習を行う実験に 11 歳から 14 歳の 10 人の生徒が参加し、6 日間にわたって学習を行った。fMRI のデータは、2 日目 (図 2 の Day 1) と 6 日目 (Day 5) に得られた。実験では 3 種類の一次方程式が用いられた。それらは、 $1x+0=4$ のように解がただちに得られるもの (0-step), $3x+0=12$ あるいは $1x+8=12$ のように 1 回の四則演算を必要とするもの (1-step), $7x+3=38$ のように 2 回の四則演算を必要とするもの (2-step) であった。

ACT-R モデルに基づく BOLD 反応の予測は、データによく適合していた。図 3 は、宣言モジュールに対応付けられた前頭領域と (図の上側)、ゴールモジュールに対応付けられた前帯状皮質での (図の下側)、BOLD 反応の予測値 (実線でプロット) と観測値 (破線) を示している。横軸は時間、縦軸はベースラインからの BOLD 反応の変化である。それぞれの脳部位において、上側のグラフは、Day1 と Day5 を平均し、3 種類の一

次方程式それぞれについて予測値と観測値を示している。下側のグラフは、3 種類の一次方程式を平均し、Day1 と Day5 それぞれについて予測値と観測値を示している。

図 3 に示された結果を詳細に検討すると、ACT-R モデルはそれぞれの脳部位に固有のパターンをうまく説明できることが分かる。宣言モジュールに対応付けられた前頭領域では、方程式の違いにより BOLD 反応の大きさが異なっている。最も容易な 0-step の問題では反応がほとんどなく、最も複雑な 2-step の問題で最大の反応が生じている。これは、多くのステップを要する問題ほど、教示された解決手続や計算の答えの検索がより多く必要になることに対応した結果である。モデルは前頭領域での学習初期と後期の違いも説明できる。図 2 に示されているように、ルールのコンパイルーションによって、学習後期には検索の要求が大きく減少する。このため、学習後期には BOLD 反応が小さくなると考えられる。ゴールモジュールに対応付けられた前帯状皮質では、方程式の複雑さによる BOLD 反応の違いは前頭領域でのパターンと類似しているが、0-step の問題でも反応が明確に認められる点が異なる。これは、たとえ 0-step の問題でも、解決プロセスのコントロールが必要とされるためと考えられる。前帯状皮質での BOLD 反応が学習初期から後期で余り変化しないのは、必要なコントロールが同一であるためと考えられる。

5. 今後の展望

ACT-R 理論に限らず、認知アーキテクチャの理論が今後進むことを期待される道の一つとして、汎用人工知能 (artificial general intelligence) の研究への貢献が挙げられる。汎用人工知能とは、将棋を指すような特定目的のために設計されるのではなく、人間のように多様な認知的課題に対応できる人工知能のことである。人間は、得意・不得意はあっても、多様な認知的課題に対応することができる。よく知らない状況に置かれても、手持ちの知識で何とか切り抜けることができる。汎用人工知能は人間レベルの知性を超えても構わないが、当面は人間の知能が有するこうした汎用性の水準を目標とすることになるだろう。人間の知能の持つ汎用性がどのような認知アーキテクチャによって実現されているのかを研究することは、汎用人工知能を実現するための重要な手掛かりを与える。汎用人工知能についての概要を知るには、人工知能学会誌での特集⁽¹⁵⁾が参考になる。

ACT-R 理論についての最新かつ詳細な情報を得るには、まずは公式 Web サイト (<http://act-r.psy.cmu.edu/>) を訪問するのがよい。ACT-R モデルは、自動車の運転⁽¹⁶⁾、Web での情報検索⁽¹⁷⁾、コミュニケーション⁽¹⁸⁾など、様々な領域で構築されている。Web サイト

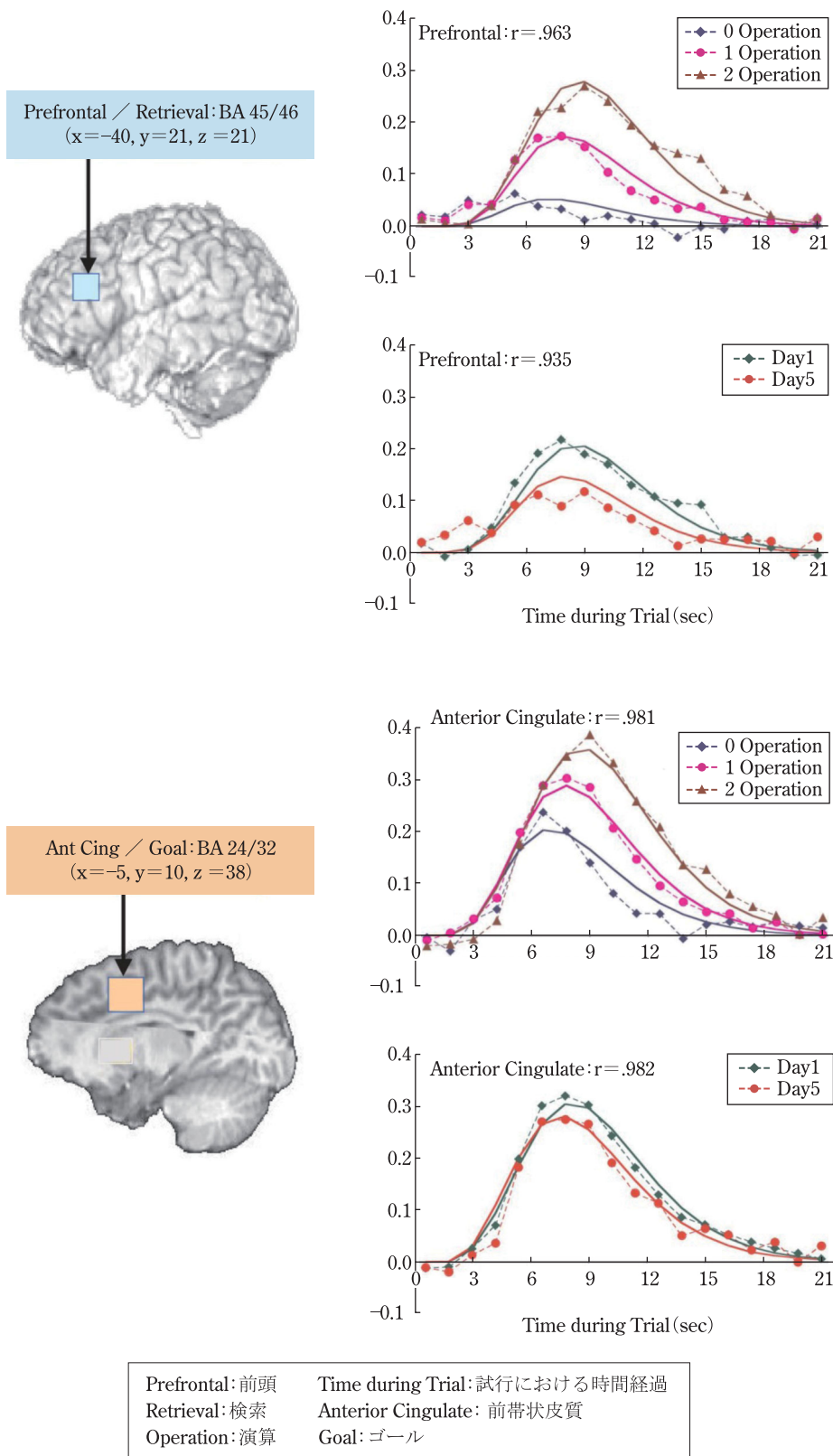


図3 3種類の一次方程式に対する学習初期及び後期のBOLD信号の予測値と観測値 宣言モジュールに対応付けられた前頭領域と、ゴールモジュールに対応付けられた前帯状皮質での、BOLD反応の予測値(実線)と観測値(破線)を示している。それぞれの脳部位において、上側のグラフは、学習初期と後期を平均し、3種類の一次方程式それぞれについて予測値と観測値を示している。下側のグラフは、3種類の一次方程式を平均し、学習初期と後期それぞれについて予測値と観測値を示している。モデルがデータによく適合していることが分かる。(文献(11)から、著作権者の許可を得て転載。Copyright © 2005 Cognitive Science Society, Inc.)

では論文のリストを検索できるので、興味ある領域の論文が必ず見つかるだろう。モデルのソースコードが公開されている論文もある。モデル構築のためのソフトウェアも公式 Web サイトから入手できる。ソフトウェアにはチュートリアルテキストが含まれている。詳細なリファレンスマニュアルも提供されている。集中的に学習するなら、ほぼ毎年開催されているサマースクールに参加することを考えてもよいだろう。日本語で読める情報はほとんどないので、筆者は ACT-R についての情報提供を日本語で行う Web サイトの構築に着手した

(http://homepage3.nifty.com/~terao/act/act_top.html). この解説が ACT-R 理論への興味を喚起することを願う。

文 献

- (1) E.R. Kandel, J.H. Schwartz, T.M. Jessell, S.A. Siegelbaum, and A.J. Hudspeth, *カンデル神経科学, メディカル・サイエンス・インターナショナル*, 2014.
- (2) L.R. スクワイア, E.R. カンデル, *記憶のしくみ(上)(下)*, 講談社, 東京, 2014.
- (3) E.C. Tolman, "Cognitive maps in rats and men," *Psychological Review*, vol. 55, no. 4, pp. 189-208, July 1948.
- (4) J.R. Anderson, *How can the human mind occur in the physical universe*, Oxford University Press, 2007.
- (5) A. Newell, *Unified theories of cognition*, Harvard University Press, 1990.
- (6) A. Newell, "You can't play 20 questions with nature and win," *Visual information processing*, W.G. Chase, ed., Chapter 3, Academic Press, 1973.
- (7) J.R. Anderson, *Language, memory, and thought*, Erlbaum, 1976.
- (8) J.R. Anderson, *The architecture of cognition*, Erlbaum, 1983.
- (9) J.R. Anderson, *Rules of the mind*, Erlbaum, 1993.
- (10) J.R. Anderson and C. Lebiere, *The atomic components of thought*, Erlbaum, 1998.
- (11) J.R. Anderson, "Human symbol manipulation within an integrated cognitive architecture," *Cogn. Sci.*, vol. 29, no. 3, pp. 313-341, 2005.
- (12) K.R. Koedinger and A. Corbett, "Cognitive tutor," *The Cambridge handbook of the learning sciences*, R.K. Sawyer, ed., Chapter 5, Cambridge University Press, 2006.
- (13) J.R. Anderson, D. Bothell, M.D. Byrne, S. Douglass, C. Lebiere, and Y. Qin, "An integrated theory of the mind," *Psychological Review*, vol. 111, no. 4, pp. 1036-1060, 2004.
- (14) R. Henson and K.J. Friston, "Convolution methods for fMRI," *Statistical parametric mapping: The analysis of functional brain images*, K.J. Friston, J.T. Ashburner, S.J. Kiebel, T.E. Nichols, and W.D. Penny, eds., Chapter 14, Academic Press, 2007.
- (15) 山川 宏, 市瀬龍太郎, "特集「汎用人工知能 (AGI) への招待」にあたって," *人工知能誌*, vol. 29, no. 3, pp. 226-227, May 2014.
- (16) D.D. Salvucci, "A multitasking general executive for compound continuous tasks," *Cogn. Sci.*, vol. 29, no. 3, pp. 457-492, 2005.
- (17) W. Fu and P. Pirolli, "SNIF-ACT: A cognitive model of user navigation on the World Wide Web," *Hum.-Comput. Interact.*, vol. 22, no. 4, pp. 355-412, 2007.
- (18) 森田純哉, 金野武司, 橋本 敬 "コミュニケーション成立の観察実験に基づく認知モデルの設計," *日本認知科学会第 28 回大会発表論文集*, no. O2-3, pp. 45-52, Sept. 2011.

(平成 27 年 5 月 30 日受付 平成 27 年 8 月 18 日最終受付)



てらお あつし
寺尾 敦

昭 62 和歌山大・教育卒。平 11 東工大大学院システム科学専攻博士課程了。博士 (学術)。日本学術振興会特別研究員, Carnegie Mellon 大ポストドク, 北大博士研究員を経て, 現在, 青学大・社会情報・准教授。数学教育に関連した研究に従事。