

解説

ACT-R と脳科学および教育心理学との接点

寺尾 敦

J. R. Anderson は認知科学のリーダーの 1 人であり、彼の ACT-R 理論は認知科学の研究者に広く知られている。この理論について日本語で学ぼうとするとき、テキストでの簡単な解説や（たとえば、ポズナー、1991）、解説論文（たとえば、寺尾、2015）はあったが、もっと詳細に学ぶには英語の書籍あるいは論文にあたるしかなかった。このたび、ACT-R 理論について現時点での最新の書籍が林勇吾氏によって翻訳・出版されたことをうれしく思う。

第 1 章 1.6 節の付録で簡単に解説されているように、ACT 理論は 50 年近い歴史を持っている。理論のどのバージョンも根本的なフレームワークは同一であり、認知アーキテクチャをプロダクションシステムとしてとらえている。ACT-R モデルを構築するためのソフトウェアは Anderson (1993) ではじめて公開された。これは Macintosh Common Lisp 2.0 で書かれ、System 7 (Mac OS 7) をのせた Macintosh コンピュータで動作した。現在のソフトウェアは ACT-R 7 で、スタンドアロンのアプリケーションが、Windows, Mac, Linux で動作する。ソフトウェア、マニュアル、チュートリアルなど、ACT-R モデルの構築に必要なものはすべて ACT-R のウェブサイト (<http://act-r.psy.cmu.edu/>) から入手できる。

脳科学との接点

ACT-R 理論の近年の重要な発展は、脳科学との接点ができただけである。ACT-R が仮定するモジュールと脳部位との対応が仮定され、モデルの妥当性が functional MRI のデータによって検証されるようになった。ある認知課題の解決プロセスの ACT-R モデルから、課題遂行中に fMRI で計測される blood-oxygen-level-dependent (BOLD) 信号を予測し、実際の BOLD 信号データとの適合を調べる。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（たとえば、本書の図 1.7）、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一致すれば、そのモデルを支持する証拠となる。

個々のモデルを支持する証拠が蓄積されるにつれ、モデルの水準よりも一般的な ACT-R 「理論」の妥当性も高められていくことになる（フレームワーク、理論、モデルの区別については、Anderson, 1993, 1.2.1 節を参照）。

ACT-R での特定のモジュールに対応する脳部位を仮定し、その部位において ACT-R の予測とデータとの適合を調べるアプローチは、Region-of-Interest (ROI) 分析、あるいは、確証的分析 (confirmatory analysis) と呼ばれる (Borst & Anderson, 2017; Stocco & Anderson, 2008)。この部位は、データとは独立に、前もって決められる（本書図 1.8）。Borst & Anderson (2017) によれば、2003 年以来、この部位は変更されていない。たとえば、わかりやすい例として、ACT-R のマニュアルモジュールは中心前回 (precentral gyrus) に対応づけられている。ACT-R モデルにおいてあるモジュールがアクティブになるとき、そのモジュールと対応する ROI がアクティブになると仮定される。伝統的な fMRI データの分析 (Friston et al., 2007) では、総数が数十万にもなるボクセル (fMRI での空間解像度の単位となる立方体) ごとのデータ解析を行うため、フォールスアラームが問題となるが、確証的分析ではこの問題が回避されている (Anderson, 2005, p.324)

教育心理学との接点

ACT-R は、認知アーキテクチャの理論であるとともに、知識獲得（あるいは、スキル獲得）の理論でもある。そのため、ACT-R 理論は教育心理学とも接点を持つ。

本書の第 1 章 1.6 節の付録で述べられているように、1980 年代から 1990 年代にかけて、Anderson らは Cognitive Tutor と呼ばれる知的チュータリングシステム (ITS) の開発を行った。ACT 理論（当時は ACT*）が主張する知識獲得のプロセスが正しいのであれば、この理論に基づいて設計された Cognitive Tutor が学習の助けになることで、理論の妥当性が高められることになる。実際、ACT 理論に基づいて設計された Cognitive Tutor による学習支援は有効に機能しており (Koedinger & Corbett, 2006)、この理論の妥当性を高めている。

ITS は、学習者の能力を、学習者が持っている手続き的知識（プロダクションルール）の集合としてとらえる。ITS は、ある領域（たとえば、幾何の証明問題）で学習者が獲得すべき手続き的知識をすべて保有している。これらすべ

での知識を獲得することが学習者の目的となる。ACT-R 理論によれば、手続き的知識は学習者自身が「なすこと (doing)」によってしか獲得できない。そのため、ITS での教示は問題解決の文脈で行われる。

ITS は、正しい手続き的知識と共に、学習者が持つ可能性のある誤った手続き的知識も保持している。学習者が問題解決を 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特定し、適切なフィードバックを与える。

近年の AI ブームと、文部科学省が「個別最適な学び」を推進する中で、学校教育でのアダプティブラーニング (adaptive learning) に注目が集まっている。これは、IT 技術を使って個々の学習者の学習進捗に合わせて指導戦略を最適化する学習であり、まさに ITS による学習に他ならない (山田, 2018)。ACT-R 理論に基づく ITS の開発は、AI での新しい技術を取り込みながら、今後も継続することが期待できる。

文 献

- Anderson, J. R. (1993). *Rules of the mind*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Anderson, J. R. (2005). Human symbol manipulation within an integrated cognitive architecture. *Cognitive Science*, 29, 313-341.
- Borst, J. P., & Anderson, J. R. (2017). A step-by-step tutorial on using the cognitive architecture ACT-R in combination with fMRI data. *Journal of Mathematical Psychology*, 76, 94-103.
- Friston, K. J., Ashburner, J. T., Kiebel, S. J., Nichols, T. E., & Penny, W. D. (2007). *Statistical parametric mapping: The analysis functional brain images*. Academic Press.
- Koedinger, K. R., & Corbett, A. (2006). Cognitive Tutor. In R. K. Sawyer (ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 61-77). Cambridge University Press.
- ポズナー, M. I. (編), 佐伯 胖・土屋 俊 (監訳) (1991). 認知科学の基礎 1 概念と方法. 産業図書.
- Stocco, A., & Anderson, J. R. (2008). Endogenous control and task representation: An fMRI study in algebraic problem-solving. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 1300-1314.
- 寺尾 敦 (2015). 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. 電子情報通信学会誌, 98, 1083-1090. この解説論文の最後に紹介している筆者のウェブページの URL は http://terao.akiba.coocan.jp/act/act_top.html に変更された.
- 山田誠二 (2018). 人工知能 AI の現状と教育への影響. コンピュータ & エデュケーション, 45, 12-16.

解説

究極の問いを追求するコミュニティの形成にむけて

森田純哉

本書では 2021 年時点での最新の ACT-R 理論が示されている。原書の出版以降も ACT-R のソフトウェアはバージョンアップを続けてきたが、理論的な基盤は保持されている。そして、本書をベースとした研究は、ACT-R ワークショップや International Conference on Cognitive Modeling (ICCM) などのコミュニティにおいて、現在進行系で蓄積されている。これらの場で発表される ACT-R の応用研究は、本書に示される理論を、その時々認知科学のホットなトピックと結びつけ、アーキテクチャの適用範囲を拡大させるものである。以下、本書の構成を追いつつ、ACT-R 理論を認知科学の広い研究の文脈に位置付けることを試みる。

ACT-R による認知モデルのレベル間統合

認知のモデリングには様々な流派が存在する。本書の第 1 章で取り上げられるコネクショニストモデル、情報処理モデル、数理モデルは、認知科学の歴史において、繰り返し参照されてきた代表的な流派である。実際、これらは、有名な Marr (1982) による 3 レベル（実装レベル、アルゴリズムレベル、計算論レベル）と対応する。ACT-R が理論として優れている点は、異なるレベルが扱う認知の側面を、単一のアーキテクチャによって表現することにある。実装レベルはモジュール構造として、アルゴリズムレベルはチャンクとプロダクションルールとして、計算論レベルは合理分析として表現される。異なるレベルの表現を串刺しするがゆえに、ACT-R は認知の統合理論の有力な候補となっている。

認知のモジュール性と圧縮

ACT-R における実装レベルとアルゴリズムレベルの統合は、認知のモジュール性を論じる第 2 章で掘り下げられる。ここで示される大脳基底核と皮質のループ構造は、伝統的 AI に由来するプロダクションシステムを、生物的な基

盤に接地させるという意味で意義深い。加えて、局所的な神経活動をチャンクとしてカプセル化（圧縮）し、モジュール間通信（神経繊維）に利用するという説明は、現代の深層学習における重要な基盤技術であるオートエンコーダーに接地可能である。実際、こういった構造的な類似を背景とし、近年のACT-R コミュニティでは、最新のコネクショニスト（深層学習）への接続がさかんに議論されている。

認知の二重過程理論と二種類の記憶

第3章と第4章は、異なるモジュールによって担われる二種類の記憶（宣言的記憶と手続き的記憶）が議論される。ACT-Rにおいて、二つの記憶は前頭前野と大脳基底核に割り当てられ、熟考的な処理と反射的な処理として対比される。読者によっては、この対比が、行動経済学で議論されるシステム1とシステム2の区別（Kahneman, 2011）と類似すると考えるかもしれない。

もともとACT-Rにおける記憶の理論は、合理分析に由来し、行動経済学の背景にある意思決定の理論と関連が深い。環境から入力された情報のうち、個人にとって関連の薄いものは減衰し、繰り返される有用な事柄のみが活性を高め、意思決定に利用される。そして、そのようなヒューリスティクスな問題の解決に利用された宣言的記憶が、コンパイルによって手続き的記憶に畳み込まれることで、より早い処理（システム1）への移行がなされる。

コンパイルはデータの圧縮処理であり、別の見方をすれば、繰り返されるパターンの無意識的な予測である。そして、このようにACT-Rの記憶の理論を捉えれば、認知アーキテクチャとは別の統合理論である予測符号化（Friston, 2010）とのつながりがみえてくる。情報理論をベースとするこの理論は、知覚や意思決定、感情など多様な現象を、予測誤差最小化の原理によって説明する。ACT-Rにおけるコンパイルを介した早い処理への移行は、数的に表現される予測誤差最小化のプロセスと同期する可能性があり、両理論の統合を議論することができる（Nagashima et al., 2021）。

意識のモデル

ACT-R と他の理論との接続は、より究極的な認知の領域にも及ぶ。本書の最終章では、心身問題、あるいは意識の問題が語られる。著者は注意深くも、意識をバッファにおけるチャンクと結びつける。チャンクは内省可能な記号で

ある。そして、バッファにおかれた記号は、システムに蓄えられた規則に従って流れていく。このような意識の見方は、哲学者ダニエル・デネットに支持されるものであり、記号的なフレームワークを用いる認知科学者にとって馴染みのものである。さらに、ACT-Rにおけるチャンクは、上で述べたようにニューロンの集合の縮約表現と捉えられる。そして、モジュールの状態は単体で成り立つのではなく、外界からの入力も含めたモジュール間のインタラクションを通して定まる。こういった脳部位間のインタラクティブな観点に立てば、ACT-Rにおける意識の理論は、現象学的な意識の計算理論である統合情報理論 (Tononi et al., 2016) の別の姿とみることできる。

ACT-R の課題

ここまで述べてきたように、ACT-R はアルゴリズムレベルを中心としつつも異なるレベルと接続する強力なアーキテクチャである。しかし、この強力さは諸刃の剣でもある。そもそもモデルとはコミュニティにおいて共通する現象のとらえ方、あるいは現象を記述する言語である。本書の第4章に示されるように、言語の背後には、コンパイルされた膨大な宣言的な知識 (論文) が存在する。よって、ACT-R という強力な言語で認知と脳をとらえるようになると、その言語なしに現象を表現することが困難になる。そして、そのような特定のモデルに基づく思考は、モデルを共有しないコミュニティとのミスコミュニケーションを導く。

この困難さは ACT-R に限らず、全てのモデルの研究が抱えるものである。だからこそ、この困難を乗り越え、統合的なモデルのコミュニティを発展させていくことが必要なのである。そして、そのようなコミュニティの形成においては、著者が言うように、ACT-R という固有名詞へのこだわりは不要であるのかもしれない。先達をリスペクトしつつ、貪欲に新たな知見を取り入れることが、発展するコミュニティの条件になる。内向きの議論に終始し、社会における問題の解決に寄与しないコミュニティは、将来的には消滅してしまうだろう。現在の ACT-R コミュニティにおいては、冒頭で述べたように、本質的な基盤を変更せずに、アーキテクチャをアップデートする試みが継続されている。ビッグデータや深層学習とのつながりが議論され、コミュニケーションや感情など現代社会における重要な問題へのアプローチが進んでいる。本翻訳の出版を契機として、究極の問いに対する先達の歩みを引き継ぎ、グローバルな

コミュニティで存在感を放つ研究が日本から生まれることが期待される。

文 献

- Friston, K. (2010). *The free-energy principle: a unified brain theory?* *Nature reviews neuroscience*, 11, 127-138.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. Macmillan. (村井章子 (訳) (2014). *ファスト & スロー (上) あなたの意思はどのように決まるか?* 早川書房)
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. W.H.Freeman & Co Ltd.
- Nagashima, K., Morita, J., Takeuchi, Y. (2021). *Curiosity as Pattern Matching: Simulating the Effects of Intrinsic Rewards on the Levels of Processing*. ICCM.
- Tononi, G., Boly, M., Massimini, M., & Koch, C. (2016). Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate. *Nature Reviews Neuroscience*. 17, 450-461.

解説

HCI における認知アーキテクチャ

松室美紀

認知アーキテクチャの発展における非常に重要な一冊が日本語訳され出版されることを、ACT-R を用いて研究を行う者の一端として非常に嬉しく思う。ACT-R については認知アーキテクチャはさまざまな分野で活用されているが、ここでは human computer interaction (HCI) 研究における認知アーキテクチャの利用について紹介したい。

HCI 研究と認知アーキテクチャは親和性が高い。ACT-R のホームページの publications のページには、User Modeling や Graphical Users Interfaces 等の HCI と関連するカテゴリが存在し、いくつもの研究が掲載されている。ACT-R を含むいくつかの認知アーキテクチャは、環境から情報を取り込み、処理し、環境へ操作を加えるプロセスをシミュレーションすることが可能である。この特徴は、HCI 研究の対象である、人と機器・システムの動的なインタラクションをモデル化するために適している。

システムやインタフェースの開発プロセスでは、一般的にプロトタイプを作成し、ユーザテストとそれに基づく改良を繰り返し、完成を目指す。しかし、この繰り返しは時間、費用の面でコストが大きい。さらに、ユーザテストの結果に合わせ、改良を繰り返すため、デザインとユーザビリティの関係性のような体系的な知見が蓄積しにくい。そのため、後のデザインのための理論構築が進みにくいという問題がある。

そこで、認知アーキテクチャを利用したユーザモデルを構築し、プロトタイプの使用をシミュレーションすることができる。これにより、容易で統制された評価を、比較的短時間で行うことが可能である。ユーザモデルの構築には、認知プロセスの実装が必要となるため、プロトタイプの使用に関わる人間の認知が明確とされる。さらに、デザインの変化等によるパフォーマンスの変化も検討可能であり、デザインのための体系的な知見を蓄積できる。

このような、認知アーキテクチャを利用した研究は HCI 研究にも散見される。トップカンファレンスとされている Conference on Human Factors in

Computing Systems (CHI) でも、その性質上、数は多くないものの、複数の研究が発表されている。そのいくつかの研究を簡単に紹介する。ただし、ここでの認知アーキテクチャは ACT-R に限らない。

GUI における視覚情報と運動系のモデルの 1 つとして、Ehret (2002) は ACT-R/PM モデルを構築し、ボタンの位置の学習に関するシミュレーションを行い、その特徴を示した。また、Salvucci, Taatgen, and Borst (2009) は、複数の課題を同時に行う二重課題を実行中の人間の行動を、ACT-R を含む複数の理論に基づき説明している。二重課題の遂行に関しては、Zhang and Hornof (2014) が EPIC を用いたモデルのパラメータを操作し、大量のシミュレーションを行うことにより、方略の個人差を示している。

認知モデリングが有用である一方で、モデルを構築する手間は、その利用をためらわせることがある。そこで、モデリングを簡単にするためのツールやアプローチも発表されている (John, Prevas, Salvucci, & Koedinger, 2004)。

CHI から離れれば、さらに多くの認知アーキテクチャを利用したモデルが発表されている。ACT-R を利用した、web での情報探索行動の SNIF-ACT モデルや (Fu, & Pirolli, 2007)、ACT-R/PM を利用したメニューの選択のモデル (Byrne, 2001) など、その内容は多岐にわたる。

ACT-R の HCI 研究における利点は、モジュールの拡張や追加が容易である点も含まれる。たとえば、ユーザインタフェースの評価においては、視覚情報の処理は非常に重要である。Salvucci (2001) は、眼球運動と視覚情報のエンコードに関するモデル EMMA を導入することで、ACT-R 理論を拡張した。他にも、アンドロイドアプリ等の新しいインタフェースとの接続も行われている (Ruswinkel, Prezenski, Dörr, & Tamborello, 2018)。加えて、ACT-R 7.6 以降では、Lisp プロンプトを通さずに、外部の課題や環境とやりとりをすることが可能となった。このような機能は、多種多様な環境におけるユーザモデルが必要とされる HCI 研究における、認知モデリングの利用を可能とする。

ここでは紹介しきれない様々な研究があるが、残念ながら、日本ではまだこのような研究はあまり活発ではない。ACT-R に興味を持った皆さんは、ぜひ私のホームページ (<http://www.ritsumei.ac.jp/~m-muro/actr.html>) で公開されている ACT-R のチュートリアル日本語訳を用い、認知モデリングの楽しさを感じて欲しい。最後になるが、このような素晴らしい本の翻訳作業に関わりを持たせてくれた林勇吾先生と関係者の方々に、心からお礼を申し上げます。

文 献

- Byrne, M. D. (2001). ACT-R/PM and menu selection: Applying a cognitive architecture to HCI. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55, 41-84.
- Ehret, B. D. (2002, April). Learning where to look: Location learning in graphical user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 211-218).
- Fu, W. T., & Pirolli, P. (2007). SNIF-ACT: A cognitive model of user navigation on the World Wide Web. *Human-Computer Interaction*, 22, 355-412.
- John, B. E., Prevas, K., Salvucci, D. D., & Koedinger, K. (2004, April). Predictive human performance modeling made easy. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 455-462).
- Salvucci, D. D. (2001). An integrated model of eye movements and visual encoding. *Cognitive Systems Research*, 1, 201-220.
- Salvucci, D. D., Taatgen, N. A., & Borst, J. P. (2009, April). Toward a unified theory of the multitasking continuum: From concurrent performance to task switching, interruption, and resumption. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 1819-1828).
- Russwinkel, N., Prezenski, S., Dörr, L., & Tamborello, F. (2018). ACT-Droid meets ACT-Touch: Modelling differences in swiping behavior with real Apps. In *Proceedings of the 16th International Conference on Cognitive Modeling* (pp. 121-125).
- Zhang, Y., & Hornof, A. J. (2014, April). Understanding multitasking through parallelized strategy exploration and individualized cognitive modeling. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 3885-3894).