

# 学習支援システムの研究動向に関するレビュー：CAIから adaptive testing へ

## A review of research trends in learning support systems: From CAI to adaptive testing

林 勇吾  
Yugo Hayashi

立命館大学総合心理学部  
College of Comprehensive Psychology, Ritsumeikan University  
y-hayashi@acm.org

### 概要

本論文は、学習支援システム研究で研究が行われてきた CAI(Computer-Assisted Instruction/Computer-Aided Instruction)からその後に発展した適応的な支援を目指す ITS(Intelligent Tutoring Systems)の研究, AI ドリルなどで利用されるコンピュータ適応型テスト(Computerized Adaptive Testing: CAT)についての解説を行い, CAI と ITS に関する文献レビューを通じてこれまでの研究の動向について紹介する。

キーワード：コンピュータ支援教育(CAI), 学習知的学習支援システム(ITS), コンピュータ適応型テスト(CAT), AI ドリル

### 1. はじめに

昨今の社会情勢を受けて、いま全世界でオンラインを中心とした電子環境での学びが展開されている。そして、多くの教育者は、授業の動画コンテンツの作成からその動画の配信、採点業務に追われる日々を送っている。こうした中、電子教材作成や AI を利用したドリルの開発に関する注目が高まっている。国外では、教材のデジタル化方法だけでなく、ネットワーク上で収集される膨大な学習者の行動データを用いて、学習活動を分類するデータサイエンスに関する新たな研究分野も活発化している。こうしたデータを積極的に活用できれば、その情報をもとに駆動される新たな学習支援システムの開発にもつながる。一方で OECD(Greiff, Martin, Koenig, Mustafic, Herborn, Schweitzer, 2017)で指摘される、柔軟性のある知識やスキル、社会的態度、価値観、コンピテンシーといったものは、制約の多い電子環境の中でどのように育成できるのだろうか。こうしたシステム開発の設計に係る課題はたくさんある中、認知科学や学習科学、教育工学を専門とする研究者が議論を交えながら考えていくことは必要不可欠である。

以上の背景から本論文では、認知科学の視点から、教育・学習支援する研究のレビューを行うこととする。こ

こでは、学習支援システム研究の初期の取り組みである CAI(Computer-Assisted Instruction/Computer-Aided Instruction)からその後に発展した適応的な支援を目指す ITS(Intelligent Tutoring Systems)の研究をみていく。そして、これまで CAI や ITS の分野で発表された文献レビューを通じて、これまでの学習支援に係る研究の歴史や現状の動向をみていく。オーガナイズドセッションでは、異分野の研究者との発表を通じて、今後の教育評価やデジタルトランスフォーメーションについての議論を行っていきたい。

### 2. CAI から ITS

学習支援システムとは、教授者および学習者といったユーザが、教育・学習に関する情報コンテンツとのやりとりを行う情報システムとして位置づけられる。ここで扱う学習支援システムには、インタラクティブ性を持つ「応答システム」としての機能や特徴を有する(矢野・平嶋, 2012)。応答システムであるということは、ユーザの入力情報を処理し、その内容に応じて入力と異なる情報を出力することのできる機能を持つことになる。ユーザ(学習者)の支援を目的とした応答システムを開発するということは、知識教授や学習活動を行うユーザの知識が必要となる。こうした点から、人間の知的メカニズムを探究する認知科学や学習科学の知見を取り入れて、システムをデザインすることには大きな意義があるといえる。実際にこれまでの学習支援システムに関する研究の中には、認知科学から人工知能研究、教育工学、教育心理学まで幅広く検討がなされてきた。そして学習支援システムに関する研究では、これまでに上記で触れた CAI や ITS だけでなく、知的 CAI, ILE(Interactive/Intelligent Learning Environment)などもある(Chambers & Sprecher, 1980; Lou, Abrami & d' Apollonia,

2001). 初期の頃に開発された学習支援システムは、子供用のプログラミング言語(LOGO)を通じてインタラクティブに教える・学ぶ道具として利用できることを目標に検討され (Papert, 1980), その後, 地理などの分野で学習者と個別対話を通じて知識教授を行うシステム SCHOLAR(Carbonell, 1970)などが開発されてきた. SCHOLAR は, 知的な対話を実現するという工学的な成功だけでなく, 人間の推論法, 例えば因果推論に関する計算機との比較を行う心理学者や認知科学にも大きなインパクトを残した.

こうした学習支援システムの研究の歴史を辿ると, 学習支援システムの研究は CAI システムに始まり, 人工知能・知識工学の知見を取り入れ, 学習者の学習活動に即してシステム側で学習内容をトレースしながら支援を行う ITS システムへと発展してきたといえる. 当初の CAI は, 従来の教室で行われていた個別的な知識教授をコンピュータ上で行えるようにすることであったのに対して, ITS は従来の教室における学習の延長だけではなく, 学習者の課題遂行時の各ステップや認知活動に応じた適応的な支援も行う. こうした適応的な支援を目指す ITS のシステム設計においては, 当然ながら専門化や学習者の知識, 教授方法のモデルを備える必要があり, これらのモデルの構築において認知科学や心理学の人間の心の働きに関する理論を導入することは, 頑健なシステム作りだけでなく理論の強化にもつながる.

### 3. 認知科学における学習支援研究

認知科学の領域で適応的な学習支援を扱った代表的な学習支援システムの研究例として, 米国カーネギーメロン大学の John Anderson によって考案された Cognitive Tutor が挙げられる (Anderson, Corbett, Koedinger & Pelletier, 1995). Cognitive Tutor は, 高校数学をはじめ科学教育やプログラミングなど数多くの専門分野に対応し, 米国の高校をはじめ数千もの教育現場での利用実績を挙げている. Cognitive Tutor は, ACT-R 理論(Anderson, 1983)に基づいて設計されており, 認知心理学における人間の問題解決モデルを理論的な基盤として開発されている. ACT-R 理論とは, 知覚と運動を含めた複数の心のモジュールを 1 つのシステムとみなす統合的な認知アーキテクチャである. これらのモジュールには, ゴールとイマジナル, 宣言的, 手続き的, 聴覚, 発声, 視覚, 運動といったいくつもの種類の

モジュールがあり, それぞれのモジュール (のバッファ) と中央手続き型システム, すなわちプロダクションルールによる部分マッチングによって各モジュールが相互作用しあう形で動作する. 例えば, このモデルで  $3x5=7$  というような数学の方程式を解く際には, 以下のようなプロダクションルールが利用されることを想定する(Anderson, 2007 より引用).

If the goal is to solve an equation,

And the equation is of the form “expression - number1 = number2,”

Then write “expression = number2 + number1,” 17

ここでは, 1 行目の内容はゴールバッファ, 2 行目の内容は視覚バッファ, 3 行目の内容は動作アクションに対応し, この内容を処理する際には各種モジュールの活性化やプロダクションルール内の知識の更新, そして知識の抽象化のための動的なパターンマッチングが行われる(Anderson, 2007). Anderson (2005) では, 11-14 才を対象とした単純な線形方程式を解く実験で得られたデータと ACT-R を用いた計算機シミュレーションを用いて, 人間の学習過程のメカニズムの説明を行っている. Anderson らはこのような代数学の課題を中心に扱い, 開発当初から扱っていた記号処理だけでなく, 並列分散処理や統計学的手法も取り入れたハイブリッドモデルとして近年もアップデートされ続けている. また, 生理学的なデータを取集し, 脳科学的な妥当性の検証も行っている点も理論的な強化の点でも特筆すべきである.

Cognitive Tutor の初期の研究では, プログラミング言語の教育を目指した LISP Tutor と幾何学を扱う Geometry Tutor が主に開発されてきた(Anderson, Corbett, Koedinger, & Pelletier, 1995). ここで彼らは, これらの対象となる学習領域に必要な知識をプロダクションルールの形で記述し, 宣言的知識と組み合わせて利用する心的活動を「認知スキル」と呼び, そうした認知スキルの獲得に向けた学習支援に取り組んだ. 問題解決の各ステップにおいて適切な解決策を表すプロダクションルールをモデル内で表現し, そのモデルと実際の学習者の活動との対応関係を判定する model-tracing approach を採用することで, 学習支援における適応的なフィードバックを実現している. 具体的には, このモデルを利用して, On-Path Actions (正しい解決策の道に沿った行動)であるのか, もしくは Off-Path Actions (正しい解決策以外の行動)であるのか判定するというも

のである(Anderson et al. 1995). もし、システムが現在の状態を On-Path Actions と判定されれば、そのまま解決策を考えるように学習者に伝え、もし Off-Path Actions と判定されれば、正しい解決へのパスに戻すためにフィードバックもしくはファシリテーション(ヘルプ)などを提示することができる。また、支援の程度も調整でき(バグメッセージ)、その内容に関する説明を求めて学習者の説明活動を促す方法も考案され、数多くの実証的な研究が展開されている(Koedinger, Anderson, Hadley, Mark, 1997; Alevan & Koedinger, 2002)。

#### 4. 学習支援のパーソナライズ化: AI ドリル

オンライン学習の普及に伴い、デジタル教材を用いた学習者の支援に関する検討も多く行われるようになってきている。e-learning をはじめとするプラットフォームの開発においては、上述したような CAI や ITS システムに対して知的な要素を追加する機能に関する検討は進んでいる一方で、学習者にパーソナライズ化された問題提示方法に関する検討も長らく検討が行われている。パーソナライズ化されたシステムを導入にあたっては、オンライン上で収集される膨大なデータから学習者の行動履歴を収集し、学習能力を指標化し、それを用いて問題の提示を変更するというものである。こうした学習支援のためのソフトウェアやサービスは、ちまたには「AIドリル」と呼ばれ、近年では小学校等での学習教材の製品化に向けた動きも近年では見られる。一方で、学習支援システムの研究分野ではこうしたパーソナライズ化された学習(personalized learning)に関する検討の歴史は長く、コンピュータ適応型テスト(Computerized Adaptive Testing: CAT)の研究として検討が進められてきた。これらの研究では、基本的に学習者の回答パターンに応じて、その個人ごとに難易度の異なる問題を提示するためのアルゴリズムの検討が中心に検討される。具体的には、項目反応理論(Item Response Theory: IRT)と呼ばれるロジスティック回帰モデルを用いた評価式によって評価する。

$$P_i(\theta) = \frac{1}{1+e^{-(\theta-b_i)}} \quad (1)$$

ここで、 $\theta$ は学習者の特性、 $b_i$ は難易度を示す。これまでには、こうした複数のパラメータを組み合わせた際に、どのようなアルゴリズムが最も効率的に学習者に支援を提供できるのかに関する検討が行われてきている(分寺, 2019)。ただし、これらの領域で検討されて

いるアルゴリズムは、統計学的な推定に基づくモデルが中心であり、CAI や ITS に比べてまだまだ貧弱であるといった批判もある。今後の研究課題としては、こうした手法に CAI や ITS を組み合わせた検討も今後は重要であると考えられる。

#### 5. CAI と ITS 研究に関する研究の動向

以下では、上記で触れた CAI と ITS の研究に関する研究の動向を文献のレビューという形で紹介していく。このレビューでは、文献データベースの検索エンジン、Web of science(<https://apps.webofknowledge.com/>)を用いた。ここでは、CAI に関しては(“Computer-Assisted Instruction” OR “Computer-aided instruction”), ITS に関しては(“Intelligent Tutoring System”)としキーワードを設定し、トピック(タイトル, 抄録, 著者キーワードなど)検索を行った。学術雑誌論文(Article)のみに着目した結果、CAI は 2,751 件、ITS は 1,697 件となった(検索日: 2021 年 4 月 30 日)。これらに対して、CAI と ITS のそれぞれの年代別の論文数を年代別にみみると、図 1 のような結果が得られた。



図 1. 年代別の論文数の推移の比較結果。

以上の結果から、ITS に関する論文は認知科学の研究が学習支援研究に導入され始めた 90 年代頃から徐々に増え続けていることが伺える。これは、上記で触れた Cognitive Tutor をはじめとする適応的なシステムが進んだ時期とも重なる。一方で、CAI に関する研究についても同時期から増えていることも確認でき、これも特筆すべき点である。つまり、CAI 研究が ITS 研究へと移行しているのではなく、CAI 研究は継続して検討が行われているということである。では、CAI と ITS では、それぞれどのような分野を扱い、誰に対してどのような内容を検討しているのだろうか。

以上を踏まえて、次に Web of Science で分類される研究分野別の検討を行った。ここでは、研究分野を Education (教育関係), Computer Science (計算機科学), Psychology (心理学), Linguistics (言語学) に分類し、各分

野の比率を算出した (図2 参照.)

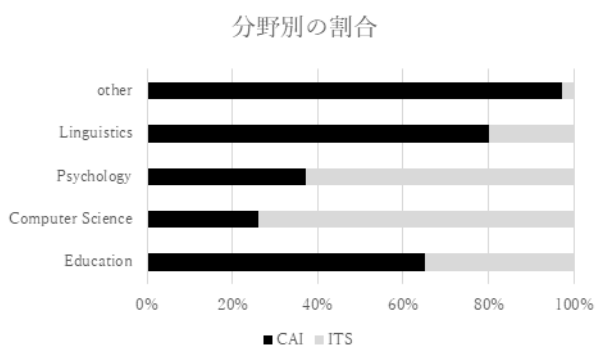


図2. 論文の分野別の割合の比較結果.

上記の内容より, ITSに関連する論文では, CAIの論文よりも計算機科学や心理学関連の内容を扱っていることを示していることが伺える. これも上記で取り上げたように, ITSをはじめとする学習支援システムの研究が人間の心(認知)のメカニズムを取り入れて検討をしている論文が多いことも伺える. 一方で, CAIの論文のほうでは, これらのカテゴリ以外の分野(other)が多く, これは臨床分野をはじめとするものも多く, 扱う専門分野の違いもあることが明瞭となった.

次にこれらの論文の中で, 学習者に対して扱っていた科目に関する検討も行った. ここでは, 上記抽出されたすべての論文のアブストラクトの中から, 算数・数学をはじめとする理系の分野に関する主要な科目に関するキーワード Programming, Statistics, Algebra, Fractions, Geometry, Chemistry を検索し, 論文数の比較を行った (図3 参照).

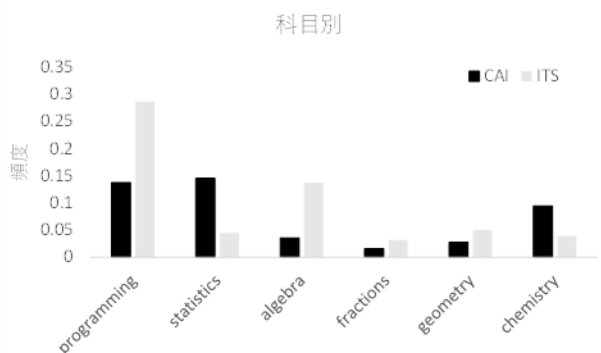


図3. 科目別の論文数の比較結果.

以上より, CAIの論文では統計や化学といった科目の論文が比較的多く, ITSの論文ではプログラミングや代数学の論文が多いのが特徴である.

最後に学習者層に関する分析として, university, college, high school, middle school, junior, primary, elementaryに着目したキーワードの分析も行った. 図4はその結果を示す.

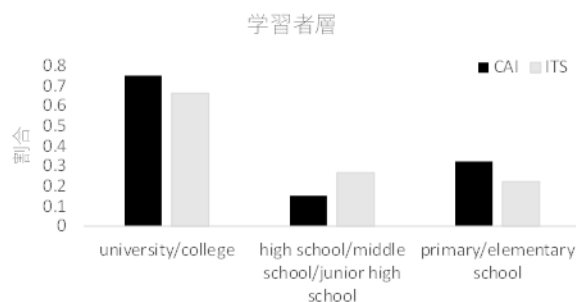


図4. 学校別(学習者層)の比較結果.

この結果から, 大学等の高等教育での研究論文が圧倒的に多いことが示されており, 小中高での学習支援システムの導入, 学習データのマイニング等のための学習環境の整備といったことがより一層, 期待される. 但し, これらの結果は, まだ単純なキーワード検索による粗い分析であるため, より詳細な本文内容の確認を経た二重チェック, 検索条件をより絞り込んで分析する必要もある.

## 6. まとめ

本論文では, まず学習支援システム研究の初期の取り組みであるCAIから適応的な支援を目指す認知科学の代表的なITS研究に着目してレビューを行った. そして, 後半では, これまでの発表された文献のレビューを通じて, これまでの学習支援に係る研究の歴史や現状の動向を分析した. その結果, ITS研究は, 90年代から論文数が増大し, 計算機科学や心理学関係の分野での発表が多いことが示された. これは, 人間の適応的な支援に向けて, 異分野による取り組みが行われていることを示す. また, Cognitive Tutorをはじめとする知的な学習支援システムに関する多くの研究は, プログラミングや代数学を中心に成果を挙げている. ここで紹介した学習支援システム以外のシステムは, 林(2018)を参照されたい.

最後に本論文で取り扱った, CAIやITSといった学習支援システムは, しばしば異なる学習観によって分類されることがあり, CAIは行動主義的, ITSは表象主義的といった形での解釈されている(矢野, 平嶋, 2012). 一方, これらの分類に加えて, 比較的最近では構成的・発見的な学習を支援する対話的な学習環境として, 学習科学と連携したCSCL(Computer Supported Collaborative Learning)の研究がこうした学習支援システムの研究にも頭角を現し, それは社会構成主義的な

立場として整理されている。しかし、最近の学習支援システムの研究は、さらに人工知能（エージェント）や生体情報センシングをはじめとする計測技術も取り入れ、コンピュータサイエンスの影響を受けながら多角的な方面で検討が行われてきている。またデジタルトランスフォーメーションによって、今後の需要も変わっていくことも考えられ、適応的な学習支援の方法について引き続き議論していく必要がある。

## 謝辞

本論文の作成にあたって、下條志巖氏に助言をいただいた。本研究は文部科学省科学研究費補助金研究（基盤 B 課題番号：20H04299）「協同学習における主体的な学びの育成のための知的学習支援システムに関する総合的検討」の助成を受けた。ここに感謝の意を記す。

## 文献

- Aleven, V. A., & Koedinger, K. R. (2002). An effective metacognitive strategy: Learning by doing and explaining with a computer-based cognitive tutor. *Cognitive Science*, 26, 147–179.
- Anderson, J. R. (1983). *The Architecture of Cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Anderson, J. R. (2005). Human symbol manipulation with an integrated cognitive architecture. *Cognitive Science*, 29, 313–342.
- Anderson, J. R., Corbett, A. T., Koedinger, L. R., & Pelletier, R. (1995). Cognitive Tutors: Lessons Learned, *Journal of the Learning Sciences*, 4(2), 167–207.
- Anderson, J. R. (2007). *Oxford series on cognitive models and architectures. How can the human mind occur in the physical universe?* Oxford University Press.
- Carbonell, J. R. (1970). AI in CAI: An artificial-intelligence approach to computer-assisted instruction. *IEEE transactions on man-machine systems*, 11(4), 190–202.
- Chambers, J. A. & Sprecher, J. W. (1980). Computer assisted instruction: current trends and critical issues. *Communications of the ACM*, 23(6), 332–342.
- Greiff, S., Martin, R., Koenig, V., Mustafic, M., Herborn, K. & Schweitzer, N. (2017). PISA 2015 collaborative problem solving (CPS) validation study final report (tech. Rep.). PISA Governing Board (PGB) and Organization for Economic Co-operation and Development (OECD).
- Koedinger, K. R., Anderson, J. R., Hadley, W. H., Mark, M. A., (1997). Intelligent tutoring goes to school in the big city, *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 8(1), 30–43.
- Lou, Y., Abrami, P. C., & d'Apollonia, S. (2001). Small group and individual learning with technology: A meta-analysis. *Review of Educational Research*, 71(3), 449–521.
- Papert, S. A. (2020). *Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas*. Basic books. (奥村 喜世子 (監訳) (1998). *マインドストーム: 子供, コンピュータ, そして強力なアイデア* 未来社) Anderson, J. R. (1983). *The Architecture of Cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Papert, S. & Solomon, C. (1971) *Twenty things to do with a computer*, AI laboratory, MIT.
- 矢野米雄, 平嶋宗(2012) *教育工学とシステム開発*, ミネルヴァ書房
- 林勇吾(2018) 私のブックマーク「知的学習支援システム (Intelligent Tutoring Systems)」, *人工知能*, 33(4), 527–530. < [https://www.ai-gakkai.or.jp/resource/my-bookmark/my-bookmark\\_vol33-no4/](https://www.ai-gakkai.or.jp/resource/my-bookmark/my-bookmark_vol33-no4/)>(2021年4月30日)
- 分寺杏介(2019) 制限時間のある適応型テストにおける項目選択アルゴリズムの比較検討, *日本テスト学会誌*, 15(1), 1–20.