

学習科学最前線
– ピッツバーグにおける事例 –
Current Trends in the Learning Sciences
– What’s up in Pittsburgh? –

松田 昇
ピッツバーグ大学
Learning Research and Development Center

Noboru Matsuda
Learning Research and Development Center
University of Pittsburgh

This article surveys some ongoing research in the multidisciplinary field of learning sciences taking place in the Pittsburgh area. Two major research institutions, University of Pittsburgh and Carnegie Mellon, have received numerous grants to explore phenomena in learning and teaching. Over the last few decades, this research has resulted in new cognitive theories and technological principles in artificial intelligence that promote deeper learning in domains such as physics, algebra, geometry, and computer programming. A trademark of this research, besides the integration of the cutting edge technologies into educational systems, is the use of rigorous and large-scale evaluations that test specific aspects of the cognitive models. Many of these evaluations have made their way into public schools and, in one case, spawned a nationwide commercial company to continue development to meet the practical needs of educators. In sum, the research in Pittsburgh has led to both influential theories in the community of learning sciences as well as practical systems that can be used in the classrooms.

キーワード：知的学習支援システム，学習科学，認知科学，人工知能，仮説検証，ピッツバーグ

1 はじめに

ピッツバーグ界限における学習科学の近年の動向を報告せよとのご依頼を賜った。我が国においても 1990 年代に隆盛を極めた知的学習支援システム (Intelligent Tutoring System) の研究は、2000 年に近づくにつれ、

その勢いが (少なくとも、研究費および出版物の流動という観点から) 緩やかになっている。その変化は、特に研究費の獲得競争の激しい欧米において顕著である。それでも、ピッツバーグ界限には、今だに学習支援システムの開発を継続するための豊富な財力と人力

がある。何がスポンサーの懐を緩めさせているのだろうか？

この問いに答えることは、拙稿の範囲を超えるが、ピッツバーグ界隈の研究者が問い詰めていること、さらには、そのアプローチを紹介することで、何らかの参考になれば幸いである。以下、本稿では、先ず最初に、学習科学を中心に据えた研究グループを紹介する。次に、そこで展開されているプロジェクトを例に取り、探求的な研究、システム開発の研究、および実証的な研究のそれぞれに関して、現在展開中の研究を示す。学習科学という言葉が耳慣れないと感じる読者は多いであろう。同様に、その対訳としての Learning Science は、筆者の知る限り、未だに広く知られた英語としては定着していない。特に、教育に関連した会議等では、科学教育 (Science を Learning している) と混同される恐れがあることは留意に値しよう。

2 研究グループ

かつて鉄鋼の街として栄え、Capital of the World とまで謳われたピッツバーグには、現在は鉄工所の姿はなく、情報産業が街の財源になっている。情報に関連した大小様々な研究機関が、ベンチャーも含めて数多く存在する。情報技術の教育応用に関連した研究所も多い。その中でも、ピッツバーグ大学およびカーネギーメロン大学を拠点とした研究所は、その規模および生産性で特筆に価する。以下に、主な研究組織を示す。

Learning Research and Development Center¹ は、1963 年に、Robert Glaser を中心とした研究グループの取得した、当時としては記録破りな規模の研究費により創設された教育関連の研究所である。教育学、教育工学のみならず、心理学、認知脳科学、言語学、人類学等、多様な専門分野に立つ研究者が、科学教育、言語習得、博物館における教育、インターネットにおける教育、教育政策等、様々なテーマで研究を展開している。現在でも、年間で延べ1400 万ドル以上の研究費を外部の財団から受けている。

Center for Interdisciplinary Research on Construc-

¹www.lrdc.pitt.edu

tive Learning Environments (Circle)² は、Kurt VanLehn を中心とした研究グループが 1998 年に National Science Foundation から受託した研究費で創設された研究組織である。主に、認知科学および計算機科学の研究者から構成され、知的学習支援システムの開発が主な目標とされている。Circle における主たる研究成果は、次の章で示す。

ピッツバーグ流の研究の特徴として、実験室での基礎研究により得た知見を教育現場での実践研究にまで拡張する風潮が挙げられる。そのための研究機関が、いくつか存在する。

Pittsburgh Advanced Cognitive Tutor Center (PACT)³ は、カーネギー・メロン大学の John R. Anderson を中心とした研究グループにより確立された ACT モデルに基づく教授支援システム (Cognitive Tutor) を開発している。様々な内容の教材が開発され、全米の 1400 校を超える学校 (2003 年度実績) で実践的に運用されている。

ピッツバーグ大学の LRDC を拠点とした Institute for Learning (IFL)⁴ は、学習支援システムのみならず、従来のメディアを用いた教材も含めて、教授・学習理論に基づく効果的な教材を開発し、全米の学校に配信している。その研究・実践内容は、教材の開発に留まらず、学校の評価、改善、さらには、コンサルテーションまでも含む統合的な研究組織である。ピッツバーグ大学の Alan Lesgold を中心として展開されてきた、ネットワーク環境における協調学習支援システム (NetLearn project) は、現在、実践研究段階に入り、IFL にその活動拠点が移行されている。

ピッツバーグには、もう一つ、学習科学に関連して、学習支援システムの開発とは少々毛色の異なるユニークな研究をしている組織がある。Center for the Neural Basis of Cognition⁵ では、脳科学を中心に据えた立場 (Cognitive Neuroscience) から学習に関する研究がいくつか展開されている。その多くは、fMRI と呼ばれる脳の神経細胞の活動を測定する装置等を用いて、人間の学習のメカニズムをよりミクロな視点から解明しようとしている。

²www.pitt.edu/~circle

³www-2.cs.cmu.edu/~pact

⁴www.instituteforlearning.org

⁵www.cnbc.cmu.edu

以上、学習科学の研究に関して、ピッツバーグにおける代表的な研究組織を紹介した。これらの組織は、互いに交流が親密である。実際、何人かの研究者は、複数の研究組織に在籍している。特に、中規模以上の研究費を調達するに際しては、学際的な研究体制が要求されるために、研究者同士は必然的に複雑なネットワークを構成するようになる。そういった協調的な風土が、ピッツバーグにおける独創的な研究活動の源なのかもしれない。

次の章では、学習支援システムに焦点をあてて、これらの研究機関において実践されている代表的な研究について考察する。

3 学習支援の科学と工学

既に述べたように、ピッツバーグ界限における研究の流儀は、理論から実践への橋渡しである。これらの全てを単一のプロジェクトで手がけることは、現実的ではない。必然的に、個々のプロジェクトは、特定の側面を重点的に研究することになる。本章では、それらを探求的研究、システム開発研究、実証的研究という観点から分類し、それぞれの側面に関して、近年の代表的な研究を紹介する。

探求的研究は、現象そのものを理解することに重点が置かれる。一般に、これらの研究は、複雑怪奇な事象から「測定可能な視点」を抽出することが目的とされる。例えば、「例題を用いた学習は効果があるようだが、例題の何が学習に寄与するのであろうか？そもそも、効果は、どのように測定されるべきなのだろうか？」という、特定の現象に関する叙述的なテーマが扱われる。

システム開発の研究は、特定の学習内容、教授方略等を想定して、それを実現するための技術的な課題を扱う。例えば、「適切な語句が適切に使われているか」という視点から、生徒の書いたエッセイを評価したいのだが、どのような自然言語処理が適切か？」という類の問題を解決することが目的とされる。

実証的な研究では、開発された教授手法および支援システム等の評価を通して、教授および学習に関する新たな理論を確立することが狙いとされる。いかなる教育支援システムの研究においても、「評価」は、必

ず必要であるが、ここで言う実証的な研究は、その評価のスケールが一般に大きく、それ単体で一つのプロジェクトになっていることが、3.3 から読み取れよう。

3.1 現象の探求と洞察

認知科学、特に認知心理学に立脚して、人間の「学習」およびそれを支援する「教授」における認知のメカニズムを解明しようとする研究は、大変活発に行われている。それらは、もっぱら探求的な研究であり、教授・学習活動に関する膨大なデータを分析することにより、人間の教授・学習を支配する原理を見出すことが目的とされる。これらの研究は、それ自体で完結するものではない。そこで得られた知見は、学習支援システムの設計に大いなる影響を与えることになる。以下に、最近の成果を紹介する。

教室での一斉授業と比較して、個人教授 (tutoring) は、格段に学習効率が高い [5]。しかしながら、高度個別指導を謳い文句にした学習支援システムは、人間の個人教授の半分ほどの効果もないことが知られている [3]。「何故、人間の個人教授は、それほどまでに効果的なのか？」という疑問が必然的におこる。Micheline Chi らのグループは、その問いに真正面から取り組んでいる。個人教授のセッションをビデオテープに記録し、それを分析するという手法により、多くの興味深い現象が観察されている [6]。例えば、誰もがその効果を疑わない「教師の説明」は、時として学生に上辺だけの理解を植えつけることが明らかになった。その落とし穴は、極めて興味深い場所にあることが報告されている：(1) 教科書に明示されていない情報を暗黙に仮定した説明、(2) 日常的な言葉遣いに置き換えた説明、(3) 教師の説明を学生自身の言葉に置き換えさせる場合。このように、一見して効果的と思われる説明の仕方が、逆効果になることもあり得るとするのは、興味深い。さらに、これらの発見を踏まえて、Chi らは、教師が説明する代わりに、生徒自らに説明をさせ、教師は『どうして？』『本当にそう？』『もう少し説明して下さい』等、内容に依存しない応答をするだけで、高い学習効果が上がることを見出した。この知見は、3.3 で紹介する Conati らのシステムを始め、一連の Self-explanation システムの研究へと繋がっていくことになった。

Kurt VanLehn らのグループは、学生をつまずきが学習の契機になっているという仮説の基に、42 名の大学生が物理の問題解決を学習している様子を記録し、分析した [13]。人間の教師は、学生をつまずきを巧みに検知し、それを上手に利用して、効果的な学習に導くであろうという、極めて直感的に受け入れ易い仮説から研究が出発している。しかしながら、彼らが実験を通して発見したことは、むしろ驚きに値する。例えば、「短い説明の方が学習を促進する傾向にある」「異なる物理法則のそれぞれに異なった教授戦略が必要とされる」「問題解決の手順を構造化して示すことは、必ずしも効果的ではない」「学生の犯す誤りの頻度は、学習と関連している」などは、いずれも学習支援システムの設計に大いなる示唆を与えよう。

個別教授が、教室での一斉授業を比較して、学習効果が高いことは、確固たる事実であるが、個別教授の何が学習効果を高めているのか? という点に関しては、更なる探究的な研究が必要とされる。

3.2 システム開発

紙面の都合上、ここでは特に、ピッツバーグで近年積極的に議論されているテーマに焦点をあてて、代表的なシステムを紹介する。具体的には、認知モデル、自己説明 (self-explanation)、および自然言語処理をテーマとした研究である。

認知科学を学んだ経験があれば、ACT と呼ばれる学習理論には馴染みがあるであろう。上述した PACT は、まさに ACT の生産工場と呼んでも過言ではない。ピッツバーグ大学およびカーネギー・メロン大学では、PhD の研究テーマとして、ACT を応用した学習支援システム (Model Tracing Tutor) を開発する事例が多い。その一つとして、Neil Heffernan の開発した Ms. Lindquist は、方程式の文章題を教授するシステムである [9]。Difficult Factor Analysis と呼ばれる手法により、文章題を方程式で表現する際の難しさを分析し、それを克服するための教授方略が実装されている。具体的には、方程式の立式の過程がプロダクション・ルールとして記述されている。個々のプロダクション・ルールを習得させることが教授目標であり、ルールの 1 つ 1 つに、学習のための対話が用意されてい

る⁶。

学習における自己説明の効果は、1989 年に Chi により提唱された。問題解決の学習において、第三者の答案を見ながら学習することによる効果は、以前から認められていた (例えば、[12])。Chi は、その効果を詳細に検証する過程において、「人の答案を自分の言葉で説明すると、学習効果が上がる」ことを発見した。その後、自己説明の効果を解明する研究は、様々な学習分野で研究されるようになった (例えば、[1, 4, 11])。

自己説明の機能を実装した学習支援システムもいくつか開発されている。カーネギー・メロン大学の Vincent Aleven らは、問題解決の各ステップに対して、ステップの正しさを支持する原理 (公理、定理、法則など) を明示的に入力させることにより、学習効果が向上することを見出した [2]。Aleven らのシステムでは、説明は、「参照による説明」として実装されている。具体的には、原理の名前を入力することが自己説明に該当する。一般に、現時点における自然言語処理の技術では、学生の入力した説明を計算機に理解させることは、困難であり、今後発展の期待されるテーマであろう。

自然言語処理の教育応用は、ピッツバーグ界限においても、もっとも精力的に推進されている研究テーマの一つである。Atlas は、教授のための自然言語による対話を実現するための汎用モジュールである [8]。KCD (Knowledge Construction Dialogue) と呼ばれるスクリプト形式の知識表現言語により、有限オートマトンとして、対話のシナリオを記述する⁷。現在、Atlas は、物理の学習を支援するシステム (Andes) に組み込まれ、その有効性を実証する研究が進められている。

従来、自然言語による対話と言え、キーボードから文字を入力し、画面に出力された文章を読むという形態であった。近年では、音声認識、音声合成の技術が実用段階に入り、音声対話による学習支援システムが開発されるようになった。カーネギー・メロン大学

⁶注: これは、Model Tracing Tutor の一般的なフレームワークである。

⁷有限オートマトンとして対話のシナリオを記述するというアイデアは古くから存在するが、Atlas では、学習者の発話を状態遷移関数に対応付ける部分に、LC-FLEX と呼ばれる頑強なパーサを用いている部分が新しい。

の Jack Mostow を中心とした Project LISTEN では、「英語の読み」を教授する知的学習支援システムを開発している [10]. 学生は、ヘッドセットを通して、画面に表示された文章を読み上げる。システムは、その読み上げの正しさを評価する。経験を積んだ人間の教師による個人教授と比較して、同程度の教育効果が短期間で上げられることが実証されている。

ピッツバーグ大学の Diane Litman を中心としたグループによる ITSPOKE (Spoken dialogue for ITS) は、Atlas のバックエンドとして、音声対話による教授を目指したシステムである。2003 年に発足したばかりの萌芽的なプロジェクトであるが、今後の発展が大いに期待される。

3.3 検証と理論化

ピッツバーグ流学習科学の研究作法では、先端的な技術を用いて新奇なシステムを開発すること以上に、開発されたシステムの有用性の検証および新しい学習環境における学習活動の解明が重要視される。いわゆるシステムの評価に関わる段階である。

最先端の技術を教育に応用した場合の効果を模索するような、探求的な目的でシステムが開発されている場合を除き、評価実験に際しては、想定されるシステムの有用性を定量化し、それを測定する手法が検討される。そして、反証することが可能な命題を立証するために、統制群が準備される。新たな理論は、そのような統計的推論に裏付けられている。

多くの場合、学習支援システムの開発を通して得られた理論は、「A という学習には、B という支援形態が効果的である」ことを支持する。そこで、統制群として、A という学習を B 以外の形態で支援するシステムを構築し、B と比較する。残念ながら、どれほど緻密に実験計画を立てても、必ずしも、期待通りの結果が得られるとは限らない。ピッツバーグ界限では、学習支援システムの評価実験で意味のある結果が得られるのは、4 割から 5 割と言われている。

したがって、学習支援システムの評価に際しては、期待される効果が見出せなかった場合の解釈を予め検討しておく必要がある。科学においては、命題の持つ情報量が問題視されるので、一見して差があっても当然のような 2 つの支援形態を比較して、実は二者には

差がなかったことが実証されるのは、ある意味において意義深い。その例として、次にあげる 2 つの研究は、注目に値する。

Conati と VanLehn は、自己説明の効果を検証するために、物理の問題解決を支援するシステムに、解答の各ステップの正しさを説明させる機構を追加した [7]. 「自己説明の仕方は、教授可能である」という仮設の基に、「自己説明の仕方を教授すれば、自己説明の質が向上し、ひいては学習の向上につながる」という命題を検証しようとした。学生が解答ステップの正しさを説明できない場合に、その説明の仕方を教える機能を付加したシステム (SE-Coach) と、そのような付加機能を持たないシステムを比較した。結果的に、両群に同等の学習効果が観測された。Conati らは、SE-Coach が有意により効果的であることを示せなかった。この研究は失敗であろうか？答えは、否である。実際、Conati らは、教師の助言の有無に関わらず、自己説明をすることにより、学習効果が上がることを確認したのである。このように直感的にありそうもないことが実証されれば、次にその原因を解明するための研究へと発展が期待される。

前述した Project LISTEN では、1993 年から開発され始めたシステム (Reading Tutor) をめぐる評価が、1999 年より長期的かつ大規模に継続されている [10]. Mostow らは、学校現場に Reading Tutor を導入し、学生に個別に利用させた。他方で、経験豊富な補助教員を別の学校に配置し、教室での授業と平行して個別教授をする機会を提供した。Reading Tutor の評価は、まさに、人間対機械の比較として行われた。その結果、彼らが発見したことは、「Reading tutor は、人間の教師と同程度の学習効果を有する」ということであつた。すなわち、ここでも、開発されたシステムが有意により効果的であることは示せていないわけである。しかしながら、経験豊富な補助教員を配置するコストを鑑みれば、Reading Tutor の利用価値は、高く評価されるであろう。

4 おわりに

学習科学の研究は、特に、学習支援システムの開発を通して実証的な理論立てを行おうとすれば、莫大な時

間と人力を必要とする。一般的に、現象 (教授・学習) は複雑で、一見して捉えどころがなく、どれほど制約を課しても、構築されたシステムが期待通りに動くことは少ない。実験に際しては、予想だにしないような状況に遭遇することは珍しくない。そういう一切合財を含めて、自然科学としての学習科学なのであろう。

紙面の都合で、多くを議論することはできなかったが、1月ともなれば、終日氷点下の日が続くピッツバーグ界隈で、熱い研究が展開されている雰囲気が少しでも紹介できたならば幸いである。

References

- [1] Shaaron Ainsworth and Andrea Th Loizou. The effects of self-explaining when learning with text or diagrams. *Cognitive Science*, 27(4):669–681, 2003.
- [2] Vincent A. W. M. M. Aleven and Kenneth R. Koedinger. An effective metacognitive strategy: Learning by doing and explaining with a computer-based cognitive tutor. *Cognitive Science*, 26(2):147–179, 2002.
- [3] John R. Anderson, Albert T. Corbett, Kenneth R. Koedinger, and Ray Pelletier. Cognitive tutors: lessons learned. *The Journal of the Learning Sciences*, 4(2):167–207, 1995.
- [4] Robert K. Atkinson, Alexander Renkl, and Mary Margaret Merrill. Transitioning from studying examples to solving problems: Effects of self-explanation prompts and fading worked-out steps. *Journal of Educational Psychology*, 95(4):774–783, 2003.
- [5] Benjamin S. Bloom. The 2 sigma problem: The search for methods of group instruction as effective as one-to-one tutoring. *Educational Researcher*, 13:4–16, 1984.
- [6] Michelene T. H. Chi, Stephanie A. Siler, Heisawn Jeong, Takashi Yamauchi, and Robert G. Hausmann. Learning from human tutoring. *Cognitive Science*, 25:471–533, 2001.
- [7] Cristina Conati and Kurt VanLehn. Toward computer-based support of meta-cognitive skills: a computational framework to coach self-explanation. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 11:389–415, 2000.
- [8] Arthur C. Graesser, Kurt VanLehn, Carolyn P. Rose, Pamela W. Jordan, and Derek Harter. Intelligent tutoring systems with conversational dialogue. *AI Magazine*, Winter:39–51, 2001.
- [9] N. T. Heffernan and K. R. Koedinger. An intelligent tutoring system incorporating a model of an experienced human tutor. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Tutoring Systems*, 2002.
- [10] Jack Mostow, Greg Aist, Paul Burkhead, Albert Corbett, Andrew Cuneo, Susan Eitelman, Cathy Huang, Brian Junker, Mary Beth Sklar, and Brian Tobin. Evaluation of an automated reading tutor that listens: comparison to human tutoring and classroom instruction. *Journal of Educational Computing Research*, 29(1), 2003.
- [11] Wangari Mwangi and John Sweller. Learning to solve compare word problems: The effect of example format and generating self-explanations. *Cognition and Instruction*, 16(2):173–199, 1998.
- [12] Lynne M. Reder, Davida H. Charney, and Kim I. Morgan. The role of elaborations in learning a skill from an instructional text. *Memory and Cognition*, 14(1):64–78, 1986.
- [13] Kurt VanLehn, Stephanie Siler, Charles Murray, Takashi Yamauchi, and William B. Baggett. Why do only some events cause learning during human tutoring? *Cognition and Instruction*, 21(3):209–249, 2003.