

特集 「学習科学と学習工学のフロンティア—私の“学習”研究—（前編）」

# 学習の科学と工学の協同

—アシスタンスジレンマから学習効果減衰仮説を巡って—

## Collaboration of Learning Science and Technology

### —Lessons Learned by Assistance Dilemma and Learning Effect Inhibition Hypothesis—

三輪 和久  
Kazuhiwa 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://www.cog.human.nagoya-u.ac.jp/~miwa

**Keywords:** learning technology, learning science, assistance dilemma.

#### 1. 探求メディアとしての学習支援システム

著者のグループは、学習支援システムを、学習の科学と工学をつなぐメディアと捉え、その観点から、学習支援システムの開発を行ってきた[三輪 04b, 三輪 06]。図1は、メディアとしての学習支援システムを示す概念図である。

学習の「工学」の目的は、学習活動の促進にほかならない。学習支援システムは、学習者の学習活動を補助し、促進する「支援システム」として機能する。一方、著者が大切にしてきたことは、学習の「科学」の側からシステムを眺めたときに見いだされる機能である。その機能とは、「実験システム」としての機能である。学習者は、その学習プロセスの中で、学習支援システムと繰り返し相互作用する。システムのログは、人間の学習を探求するうえで、重要な実証的知見を提供する。

学習の「工学」は、学習者の学習を促進するために、システムをつくり、学習の場に提供する。「こうしたら学習は促進されるに違いない」といった仮説に基づき、システムが設計・実現され、実践に供される。そのアプローチは、トップダウン的であり、演繹的、構成的である。その試みに対して、学習の「科学」がフィードバック

クをかける。実験を通して、そのシステムが導入されることにより、どのように学習者の学習活動が変化し、そこにどのような利益が生まれるかを、実証的データに基づき検討する。そのアプローチは、ボトムアップ的であり、帰納的、分析的である。

このような工学と科学の相互作用を考えるにあたって重要なことは、学習支援システムの設計原理が、人間の認知に関する理論、そこから導き出される学習のメカニズムに根付いていることである。そのときに初めて、そこで得られたデータは、人間の心理学的理論に基づき解釈されるようになり、学習支援システム研究は、認知科学や学習科学など、人間の学習の科学と結びつくことができる。人間の認知の理論にコミットしない「AI技術てんこ盛りシステム」は、ここでのアプローチにおいては虚しいものである。

この両サイドからのアプローチがそろうことによって、システム開発のプロセスに演繹-帰納サイクルが生まれ、学習支援システム研究は、いわゆる自然科学の一般的探究プロセスの上に乗る、健全な深化を遂げることができるようになると思われる。

#### 2. 学習支援研究における確認バイアス

上に述べたように、学習の「工学」は、トップダウン的なアプローチを取る。ここでは、開発者の信念や興味に基づく何らかの「仮説」があり、開発・評価のプロセスは、その仮説に誘導される中で進行していくことになる。そのときに留意しなければならないことが、確認バイアス (confirmation bias) という人間の認知特性である [Nickerson 98]。

確認バイアスとは、信念に基づいて対象を観察し、先入観に合う情報を選択的に受容して、自身の「仮説」を補強していこうとする人間の認知特性である。

確認バイアスの一つに、正事例テストバイアス

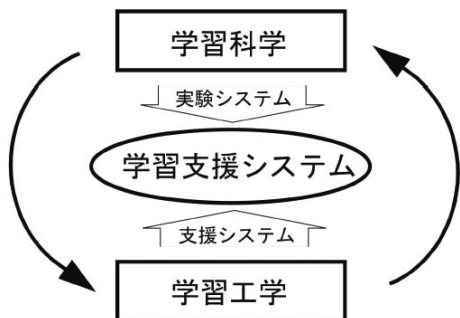


図1 学習の科学と工学を結ぶメディアとしての学習支援システム

(positive test bias) がある [Klayman 87]. これは、仮説を検証するための事例を生成する際に、仮説の正事例のみが生成され、負事例による仮説のテストが排除されるという現象である。「科学に関する認知科学」において蓄積されてきた膨大な実証研究は、正事例テストバイアスは極めて強靱で、そのキャンセルが困難であることを教えている [Mahoney 77, Tweney 80, Wason 60].

学習支援システム研究においても、正事例テストバイアスはさまざまな形で現れると考えられる。例えば、自分が密接に関わる研究グループの研究事例は、検証しようとする仮説の正事例になっているケースが多いだろう。工学系論文と心理学系論文において、参考文献に占める著者グループの論文の割合を比較したデータをもち合わせてはいないが、経験的には、前者においてそれは随分大きくなってはいないだろうか。扱う問題の性質も異なるので、このことの是非は単純ではないだろうが、参考文献のリストが、ほとんど身内の研究論文だけから構成されているような場合は、そこに正事例テストバイアスが生まれていることを懸念せざるを得ない。

正事例バイアスをキャンセルする有効な方法の一つが、協同、特に異なる視点をもった者同士の協同である。その場合、正事例バイアスが、その相互作用の中でキャンセルされることが起こり得る。著者が行った古典的な規則発見課題を用いた協同的発見の研究においても、個人が正事例テストを繰り返している状態において、一方の正事例テストが、他方の負事例テストになる場合が生まれ、正事例バイアスがキャンセルされ、個人では見いだすことができなかった規則が発見されることが報告されている [Miwa 04a].

学習支援システムの開発において、学習の工学と科学という異なる価値観、異なる研究手法をもった研究者が協同して研究を進めることは、その意味でも重要である。とりわけ、学習の「科学」が、学習の「工学」の確証バイアスに対し、適切なフィードバックをかけることができる可能性がある。

### 3. アシスタンスジレンマ

以下では、学習支援におけるアシスタンスジレンマ (assistance dilemma) という問題を取り上げる。アシスタンスジレンマという問題意識は、まさに、上で述べたような学習の科学と工学の協同の中に生まれてきたと考えられるからである。アシスタンスジレンマとは、学習効果を最大化するために、どこまで支援を提供し、どこから支援を保留すればよいのかという支援バランスに関わるジレンマである。

Koedinger & Aleven (2007) [Koedinger 07] は、CognitiveTutor と呼ばれる知的学習支援システムを用いた長期間にわたる大規模な実践を通して (例えば、[Anderson 95]), 学習支援の「保留」と「提供」に関す

表1 アシスタンスジレンマとしての支援の保留

	支援の保留	支援の提供
利益	産出効果 集中力の促進 長期記憶の活動 自律的解決の達成感	正確さ 相互作用の効率 支援下での達成感
損失	エラーによる損失 時間の浪費 失敗による挫折	表層的学習 集中力の欠如 長期記憶活動の消失 成長機会の喪失

る利益と損失を、表1のようにまとめている。

表1は、ただ闇雲に支援の度合いを増やしていけばよいわけではないという見方を示している点で興味深い。具体的には、支援を提供することにより、学習内容を吟味、省察する態度が低下し (表層的学習)、集中力が損なわれ、結果として深い認知処理を伴う長期記憶活動が消失し、学習が定着しない可能性が生じる (成長機会の喪失) 場合があることを示唆している。

近年の知的学習支援システムは、高度なインタラクティブ性を有し、その支援は多岐にわたる [Shute 08]. その能力は、人間のチュータによる1対1の教授に迫るものであるとされる [VanLehn 11]. アシスタンスジレンマは、コンピュータによる支援技術が成熟して初めて現れてきた問題である。支援技術が未熟であり、人間による教授に遠く及ばない状況においては、この問題が生まれる余地はなかったであろう。

さらに、学習の「工学」の側からの視点だけでは、アシスタンスジレンマという課題がテーマ化されることは、困難であったとはいえないだろうか。学習の工学は、支援技術を高度化させていくことにこそその使命があり、支援レベルの上昇は、いわば研究の進歩における正義である。その下で正事例バイアスが駆動されれば、支援を強めていく方向にブレーキをかける方向での議論は、なされにくかった可能性がある。

その意味で、アシスタンスジレンマという課題が、ピッツバーグの研究者のコミュニティの中から生まれたことは、示唆に富む。CMUやUniversity of Pittsburghでは、コンピュータサイエンスと認知心理学を専門とする研究者が、渾然一体となってプロジェクトを進めている。そこには、当たり前のように、学習の工学と科学が一体となった研究環境が醸成されているのである。

### 4. 過剰支援における学習効果減衰仮説

著者らは、アシスタンスジレンマの課題に関連して、支援のレベルが過度に高くなると、学習フェーズ中の問題解決活動は促進されるが (一見効率良く学習が進んでいるように思われるが)、逆に学習効果は支援のレベルが低い状態に対して抑制されるという「過剰支援による学習効果減衰仮説」を検討してきている。具体的には、

学習の「支援レベル」を操作要因として、「学習効果」を被説明要因とする実験を、さまざまな課題を用いて実施してきた。

#### 4.1 ハノイの塔

ハノイの塔 (Tower of Hanoi) は、初期の問題解決研究において、多くの認知科学者が取り上げた課題である。問題解決研究の実験課題として、その再帰的問題構造 [Kotovsky 85, 中池 02, Zhang 94] や、学習を通して人間が獲得する解法の方略 [Simon 75] が、広く知られている。

著者らの実験では、1時間ほどの時間をかけて、実験参加者にハノイの塔の問題解決方略を学習させた [Miwa 12]。参加者は、任意の「初期状態」から、一つのペグにすべてのディスクが積まれる「目標状態」へ、できる限り少ない手数 (最短手数) によって到達することが求められた。

実験システムは、ハノイの塔を解決する認知モデルを搭載し、学習者に対して、任意の問題解決のタイミングで、さまざまなレベルの支援情報を提示することができる。

ある一つの実験では、参加者は学習フェーズにおいて、現在の状態から目標状態まで最短手を辿る経路における、1手先の状態、5手先の状態、9手先の状態が支援情報として提示された。さらに、そのような支援情報が提示されない状況で学習することを求められた。

実験の結果、学習フェーズ中の成績は、1手先提示 > 5手先提示 > 9手先提示 > 提示なしの順番に高くなった。一方、学習フェーズ終了後のポストテストの成績は、9手先提示による学習で一番大きく、続いて5手先提示、提示なしが続き、1手先提示で学習した参加者において、最も低かった。この結果は、最も支援レベルの高い1手先の教示は、学習の効果を減衰させることを示す。

#### 4.2 Reversi

では、もう少し長期にわたる学習に関してはどうだろうか。著者らは、8×8 Reversi (一般に、日本ではオセロとして知られている) を課題に用いた実験を行った。

著者らは、Edax という Reversi の推論エンジンを用いて、対戦型の学習環境を構築した。実験の参加者は、コンピュータエージェントの対戦相手とゲームを繰り返すことにより、オセロに習熟していく。学習フェーズにおいて、参加者は、さまざまなレベルの支援を受けることができた。具体的には、Edax が計算する最適手、および最適手を含む複数の候補手が提示される。

ある一つの実験では、参加者は、2週間にわたり、毎日30分程度の訓練を行った [Miwa 15]。一つの群では、参加者は常に最適手の提示を受けながら学習を行い、別の群ではそのような支援情報の提示は行われなかった。

実験の結果、学習フェーズにおける対戦成績は、最適手提示群が提示なし群を大きく上回った。しかし、2週

間の学習フェーズ終了後に行われたポストテストの成績は、提示なし群が最適手提示群の成績を上回った。ここでも、支援情報の提示が、学習に関して負の効果を示すことが確認された。

#### 4.3 自然演繹

先の二つの実験で用いられた課題は、どちらかというところ、実験室研究のためのパズルの課題の側面が強かった。では、より実践的な学習領域においても、学習効果減衰仮説は支持されるのだろうか。

著者らは、認知科学や論理学の初学者を対象とする自然演繹の学習支援システムを開発してきた。自然演繹は、前提となる命題に推論規則を適応していき結論となる命題を導く推論方法であり、人間の推論との親和性が高く、一般教育の哲学や論理学の授業で幅広く取り上げられている [戸田山 00]。

学習支援システムには、自然演繹を解くルールベースのエキスパートモデルが搭載されている。モデルは、常時学習者の推論の状況をトレースしながら、任意のタイミングで支援情報、具体的には適用すべき推論規則や有効な推論方略を提示する。

一つの実験では、参加者は、適用すべき推論規則や有効な推論方略の候補を提示される状況と、そのような支援情報が提示されない状況で学習を行った [Miwa 12]。学習フェーズ中の成績は、前者の状況における成績が後者の状況における成績を上回ったが、学習終了後のポストテストの成績は、逆に後者が前者を上回った。

別の実験では、参加者は、自由に支援のレベルを選択できる状況で学習を行った [Miwa 14a]。学習フェーズでより高いレベルの支援を選択して学習を行っていた群を「高支援選択群」、逆に相対的に支援のレベルを低く保っていた群を「低支援選択群」とした。さらに、支援システムを使用せず旧来のテキストブックを用いた演習を通して学ぶ状況を設定した。

実験の結果、学習支援システムを使って学習を行った参加者のポストテストの成績は、テキストにより学習を行った参加者のテストの成績を上回ったが、前者に関しては、高支援選択群 < 低支援選択群となった。

## 5. 両サイドにおける教訓と展開

著者らの実験は、一貫して、学習効果減衰仮説を支持するものであり、これは学習の「科学」から学習の「工学」サイドへのメッセージであると思っている。このメッセージに対して、学習の工学のサイドにおいては、支援レベルの最適化の課題が現れる。実際に、学習者のレスポンスに基づいて、学習支援システムが適応的に支援レベルを調整する手法が探求されている [Roll 07]。

一方、学習の「科学」の側から学習効果減衰仮説を眺めると、この問題は、二つの心理学的理論の展開に貢献

できる可能性がある。一つは、認知負荷理論である。認知負荷理論では、人間の作業記憶の限界を前提として、いかに効率良く、その資源を学習に関わる活動に割り当てることができるかという点が議論されてきた [Sweller 98].

この理論から学習効果減衰仮説を眺めると、支援を増大することにより、学習を阻害する負荷を減じるだけでなく、学習に関わる認知負荷までも減少させてしまっていることが考えられる [Van Merriënboer 10].

もう一つの理論は、目標達成理論である。この理論では、学習者が志向する目標を、学習目標と遂行目標に分ける [Dweck 86]. 前者は、学習を通して自分自身の能力の向上を指向するのに対して、後者は、能力の向上よりも、自分に対する高い評価が得られることを指向する。いずれの目標をもつかということと、その学習者が指向する支援レベルは、密接な関連をもつことが報告されており [Vaessen 14], 学習効果減衰仮説は、目標達成理論に多くの示唆を与えるものと思われる。

この二つの理論に基づくアシスタンスジレンマのより詳細な議論は、[三輪 14b] を参照いただきたい。

### ◇ 参 考 文 献 ◇

- [Anderson 95] Anderson, J. R., Corbett, A. T., Koedinger, K. R. and Pelletier, R.: Cognitive tutors: Lessons learned, *J. Learning Sciences*, Vol. 4, No. 2, pp. 167-207 (1995)
- [Dweck 86] Dweck, C. S.: Motivational processes affecting learning, *American Psychologist*, Vol. 41, No. 10, p. 1040 (1986)
- [Klayman 87] Klayman, J. and Ha, Y.-W.: Confirmation, disconfirmation, and information in hypothesis testing, *Psychological Review*, Vol. 94, No. 2, p. 211 (1987)
- [Koedinger 07] Koedinger, K. R. and Alevan, V.: Exploring the assistance dilemma in experiments with cognitive tutors, *Educational Psychology Review*, Vol. 19, No. 3, pp. 239-264 (2007)
- [Kotovsky 85] Kotovsky, K., Hayes, J. R. and Simon, H. A.: Why are some problems hard? Evidence from Tower of Hanoi, *Cognitive Psychology*, Vol. 17, No. 2, pp. 248-294 (1985)
- [Mahoney 77] Mahoney, M. J. and DeMonbreun, B. G.: Psychology of the scientist: An analysis of problem-solving bias, *Cognitive Therapy and Research*, Vol. 1, No. 3, pp. 229-238 (1977)
- [Miwa 04a] Miwa, K.: Collaborative discovery in a simple reasoning task, *Cognitive Systems Research*, Vol. 5, No. 1, pp. 41-62 (2004)
- [三輪 04b] 三輪和久, 齋藤ひとみ: 学習科学に基づく学習/教育支援システムの設計と実現, リフレクションに基づく学習支援を題材として, 教育システム情報学会誌, Vol. 21, pp. 145-156 (2004)
- [三輪 06] 三輪和久: 学習の科学と工学を結ぶメディアとしての学習支援システム, 人工知能学会誌, Vol. 21, No. 1, pp. 53-57 (2006)
- [Miwa 12] Miwa, K., Terai, H. and Nakaike, R.: Tradeoff between problem-solving and learning goals: Two experiments for demonstrating assistance dilemma, *Proc. 34th Annual Conf. of Cognitive Science Society*, pp. 2008-2013 (2012)
- [Miwa 14a] Miwa, K., Hitoshi, T., Nana, K. and Ryuichi, N.: An intelligent tutoring system with variable levels of instructional support for instructing natural deduction, 人工知能学会論文誌, Vol. 29, No. 1, pp. 148-156 (2014)

- [三輪 14b] 三輪和久, 寺井 仁, 松室美紀, 前東晃礼: 学習支援の提供と保留のジレンマ解消問題, 教育心理学研究, Vol. 62, pp. 156-167 (2014)
- [Miwa 15] Miwa, K., Kojima, A. and Terai, H.: An experimental investigation on learning activities inhibition hypothesis in cognitive disuse atrophy, *Proc. 7th Int. Conf. on Advanced Cognitive Technologies and Applications (Cognitive 2015)*, pp. 66-71 (2015)
- [中池 02] 中池竜一, 三輪和久: ハノイの塔を用いた協動的目標設定プロセスの研究, 認知科学, Vol. 9, pp. 285-302 (2002)
- [Nickerson 98] Nickerson, R. S.: Confirmation bias: A ubiquitous phenomenon in many guises, *Review of General Psychology*, Vol. 2, No. 2, p. 175 (1998)
- [Roll07] Roll, I., Alevan, V., McLaren, B. M. and Koedinger, K. R.: Designing for metacognition-applying cognitive tutor principles to the tutoring of help seeking, *Metacognition and Learning*, Vol. 2, No. 2-3, pp. 125-140 (2007)
- [Shute 08] Shute, V. J.: Focus on formative feedback, *Review of Educational Research*, Vol. 78, pp. 153-189 (2008)
- [Simon 75] Simon, H. A.: The functional equivalence of problem solving skills, *Cognitive Psychology*, Vol. 7, No. 2, pp. 268-288 (1975)
- [Sweller 98] Sweller, J., Van Merriënboer, J. J. and Paas, F. G.: Cognitive architecture and instructional design, *Educational Psychology Review*, Vol. 10, No. 3, pp. 251-296 (1998)
- [戸田山 00] 戸田山和久: 論理学をつくる, 名古屋大学出版会 (2000)
- [Tweney 80] Tweney, R. D., Doherty, M. E., Worner, W. J., Pliske, D. B., Mynatt, C. R., Gross, K. A. and Arkkelin, D. L.: Strategies of rule discovery in an inference task, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 32, No. 1, pp. 109-123 (1980)
- [Vaessen 14] Vaessen, B. E., Prins, F. J. and Jeuring, J.: University students' achievement goals and help-seeking strategies in an intelligent tutoring system, *Computers & Education*, Vol. 72, pp. 196-208 (2014)
- [Van Merriënboer 10] Van Merriënboer, J. J. and Sweller, J.: Cognitive load theory in health professional education: Design principles and strategies, *Medical Education*, Vol. 44, No. 1, pp. 85-93 (2010)
- [VanLehn 11] VanLehn, K.: The relative effectiveness of human tutoring, intelligent tutoring systems, and other tutoring systems, *Educational Psychologist*, Vol. 46, No. 4, pp. 197-221 (2011)
- [Wason 60] Wason, P. C.: On the failure to eliminate hypotheses in a conceptual task, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 12, No. 3, pp. 129-140 (1960)
- [Zhang 94] Zhang, J. and Norman, D. A.: Representations in distributed cognitive tasks, *Cognitive Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 87-122 (1994)

2015年2月9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。1989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年から1992年、米国 Carnegie Mellon University, Dept. of Psychology, visiting assistant professor。認知科学、人工知能、教育工学の研究に従事。とりわけ、発見、創造、洞察、協同など、人間の高度思考過程に興味がある。