

問題解決型学習における認知負荷と認知活動 についての実験的検討

Experimental Investigation on Relationship between Cognitive Loads and Cognitive Activities in Learning through Problem Solving

水野 陽介¹, 三輪 和久¹, 小島 一晃², 寺井 仁³,

Yosuke Mizuno, Kazuhisa Miwa, Kazuaki Kojima, Hitoshi Terai

¹名古屋大学大学院, ²帝京大学ラーニングテクノロジー開発室, ³近畿大学産業理工学部情報学科

¹Graduate School of Information Science, Nagoya University, ²Learning Technology Laboratory, Teikyo University,

³Faculty of Humanity-Oriented Science and Engineering, Kinki University

y.mizuno@cog.human.nagoya-u.ac.jp

Abstract

We investigated changes of cognitive activities during learning through problem solving. We defined three types of cognitive loads caused by related cognitive activities, proposed a cognitive model for explaining such activities, and tested the model with Reversi game as an experimental task. To control three types of cognitive activities, we developed a learning environment in which participants were given the best move as help information; and perceptual representation of discs on the game board was manipulated. We controlled the intrinsic activity with or without presenting help information, extraneous activity by the disc representation, and germane activity by instructor's instruction. Experimental results revealed that the proposed cognitive model was effective, promising the validity of the model-based research for investigation of the cognitive load theory.

Keywords — Cognitive Load Theory, Problem solving

1. はじめに

学習にはワーキングメモリが重要な役割を担う。ワーキングメモリの容量は限られるため、効果的な学習のためには、ワーキングメモリに対する負荷を調整する必要がある。ワーキングメモリに対する負荷は、認知負荷(Cognitive Load)と呼ばれ、1988年に Sweller により提唱されて以来、研究が重ねられてきた[1]。

認知負荷理論では、認知負荷を課題内在性負荷・課題外在性負荷・学習関連負荷の3種類に分類する[2]。課題内在性負荷は、課題遂行に関連する負荷であり、学習において考慮すべき要素の数によって定義されている。課題外在性負荷は、学習とは関連ない処理に発生する負荷で、学習素材のデザインが悪いことにより高まる負荷である。学習関連負荷は、スキーマ構築や記憶など学習と関連する負荷である。

Sweller は、3種類の負荷が研究によって異なる説明がされている問題を指摘し、Element Interactivity (EI)の概念を用いた統一的な定義を与えた[3]。EI とは、

ワーキングメモリ上で同時に処理しなければならない要素の複雑さを表す。課題内在性負荷と課題外在性負荷は EI の大きさによって定義されるため、学習者が同じ程度の知識量を持っていれば課題によって負荷の大きさは課題によって規定される。一方で、学習関連負荷は、学習者のモチベーションや目標などによって大きさが決定される。本研究では、課題の複雑さによって課題内在性負荷と課題外在性負荷を操作し、学習者の内的な目標を操作することで学習関連負荷を操作する。

認知負荷を用いた学習の効果検証のためには、3種類の認知負荷を個別に操作し、測定することが必要である。実際、2000年代中盤以降は、この点に関して研究が行われてきたが、3種類の認知負荷を独立に制御し、測定することができた事例は少ない[4][5][6]。認知負荷の測定には、主に主観評定や第二課題への反応時間が用いられてきた。しかし、最近ではそれらの指標の信頼性に疑問がもたれている[7][8]。

本研究では、認知負荷を発生させる認知活動の側に焦点を当てる。具体的には、課題内在性負荷を発生させる活動を「課題内在性活動」、課題外在性負荷を発生させる活動を「課題外在性活動」、さらに学習関連負荷を発生させる活動を「学習関連活動」と呼ぶ。これらの認知的活動を制御し、それらが発生させる負荷を測定することを行う。また、課題遂行に関する認知モデルを仮定し、3種類の各認知活動がどの認知処理に負荷を与えるかに関する検討を行う。そのために、3種類の認知活動を操作した実験を行い、課題への反応時間を指標に用いた分析を行う。

2. 実験システム

本研究では、先に開発したオセロ対戦環境を用いた実験を行った[9][10]。本環境には、ヘルプ提供機能と盤面表示操作機能という特徴がある。

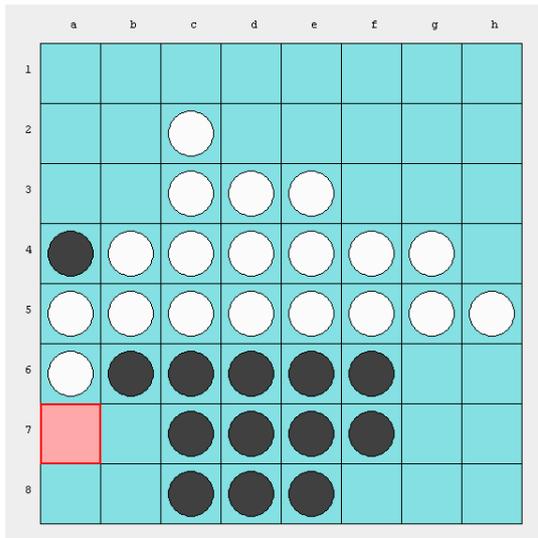


図1 最善手ヘルプが支援された盤面例

ヘルプ提供機能は、図1に示したように最善手の場所を参加者に提供する。本研究における「ヘルプ」とは、参加者が石を置く際に、「最善手」の情報を提供することを意味する。

盤面表示操作機能とは、図2に示したように盤面上の石を通常の黒石、および白石から、漢字の「白」「白」に変更する機能である。

ヘルプ提供機能における最善手の計算および対戦相手のコンピュータが指す石の場所の計算には、オープンソースとして提供される「Edax」を用いた。

実験参加者は先手で黒石を打つこととした。参加者は画面に表示される盤面上をダブルクリックすることで石を置くことができる。ヘルプがある場合でも、候補手を無視していずれの場所にも石を置くことができる。

3. 問題解決モデルと認知活動

本論文では、問題解決モデルを仮定し、3種類の認知

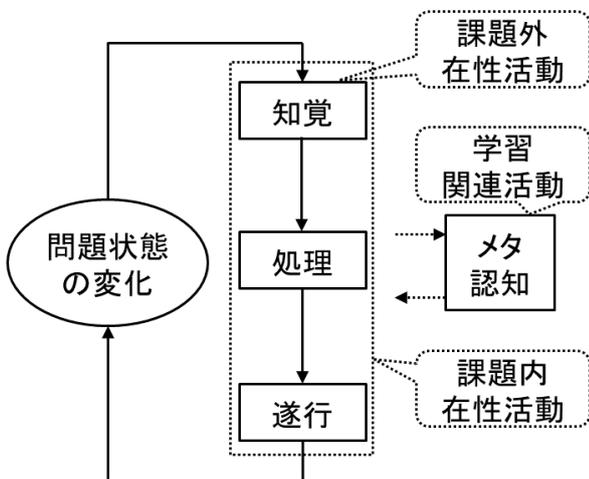


図3 問題解決モデル

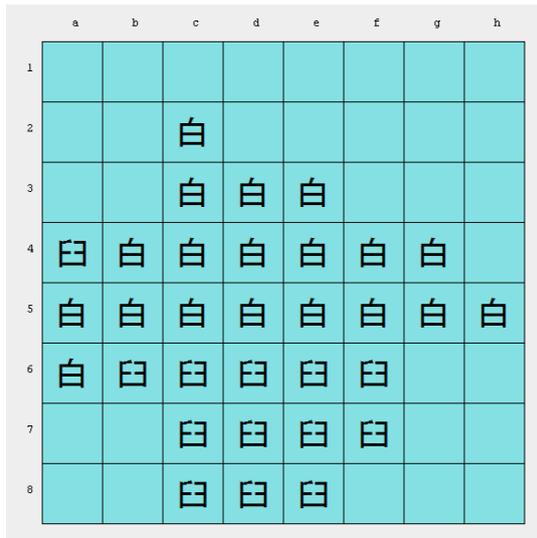


図2 白白盤面の例

活動と認知プロセスとの関係について検討を行う。図3は、オセロ課題を解く参加者の問題解決モデルを表す[11]。最初に、「知覚プロセス」において、参加者は問題状態を認識する。続いて、参加者は既知の定石や先読みなどを利用し、より有利な場所に石を置くべきか決定する「処理プロセス」に移る。次の「遂行プロセス」では、処理プロセスにおいて決定された場所へ、実際に石を置く。参加者が石を置くと、それに続いて対戦相手の石も置かれ、問題状態が変化し、再び次の知覚プロセスへと移行する。この一連のプロセスに対して、各プロセスをモニターするなどして、先読み効率の向上や、既知の定石の更新、新規定石の発見、相手の戦略意図の把握など、効果的な戦略の立案などを行うメタ認知プロセスが関与する。

問題解決モデルにおいて、認知プロセスと3種類の認知活動は以下の関係になると仮定する。課題外在性活動は、課題遂行のためには本来必要ではない認知活動に発生する。本実験の状況においては、後に具体的に述べるように、知覚プロセスに生じる。課題内在性活動は、課題を行うために必要な認知活動に関連し、知覚プロセスから遂行プロセスまでの一連のプロセスに生じる。学習関連活動は学習成績を向上させる認知活動に関連し、ここではメタ認知プロセスに生じる。

本実験では、評価指標として、「1手あたりの平均時間」を用いる。これは、対戦相手が石を置いてから参加者が自分の石を置くまでの平均時間を示す。この指標は、石を置く場所を決定するための思考時間を表し、参加者の内的プロセスに生じた認知活動の量を反映する指標であると考えられる。

本実験では、第2章で述べた実験システムを用いて3

種類の認知活動を操作する。

課題外在性活動は、盤面表示により操作する。課題状況を理解するための知覚プロセスにおいて、「白」と「黒」を用いた盤面を読み替える活動を課題外在性活動と定義する。すなわち、盤面要因により、課題外在性活動を制御する。課題内在性活動は、ヘルプ提供機能により操作する。課題内在性活動は、盤面の状態を把握し、自分の石を配置可能な場所を探し、その中でも有利な場所を先読みや定石を用いて探索する活動と定義する。これらの活動のうち、石の配置可能場所の探索と先読みに関連する活動を最善手ヘルプの提供で軽減する。このように、ヘルプ要因によって、課題内在性活動を制御する。学習関連活動は、参加者への教示により操作する。具体的には、「この目的は、どうしたら相手に勝てるかの「作戦」を発見することである。後でアンケートを行う」という教示を行うことによって、参加者に定石の発見や精緻化、先読み活動の効率化方法の探索、相手の戦略を把握するなど、メタ認知活動を促す。すなわち、教示要因によって学習関連活動を操作する。

仮説

前述の問題解決モデルが妥当であるならば、3種類の認知活動それぞれについて仮説を立てられる。

仮説 1:学習関連活動に関連する教示要因を操作した場合、メタ認知活動が増大するため、1手あたりの平均時間が増加すると考えられる。ゆえに、教示要因の主効果が確認されると予想できる。

仮説 2:課題内在性活動に関連するヘルプ要因を操作した場合、ヘルプを行うことで知覚・処理・遂行の各プロセスに発生する活動量が減少する。そのためヘルプ要因の主効果が確認できると予想できる。

仮説 3:課題外在性活動に関連する盤面要因を操作した場合、知覚プロセスに生じる課題外在性活動が増大すると考えられる。しかし、ヘルプがある場合はヘルプにより知覚プロセスにおける活動が軽減されている。よって、ヘルプなしの場合にのみ盤面要因の効果が観察されることが考えられる。すなわち、盤面要因とヘルプ要因の交互作用が有意となり、その上で、ヘルプなし水準における盤面要因の単純主効果が確認できると予想できる。

4. 実験 1

目的

前述の 3 つの仮説を検証し、第 3 章で提案した問題解決モデルの有効性を確認することを目的として実験

を行った。

方法

大学生および大学院生計 40 名が一斉に実験に参加した。参加者は練習として 1 ゲームを行った後、実験群ごとに設定を調整したオセロ課題に 10 ゲーム取り組んだ。32 手まで進んでいる盤面を初期盤面とした。初期盤面はオセロプログラム同士を対戦させ、最終的にほぼ同じ程度のスコアとなった盤面を 10 種類算出し、ランダムに設定した。

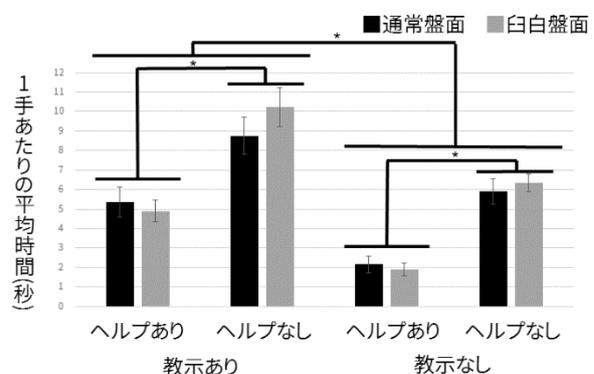
盤面要因に関しては、参加者内要因とし、10 ゲームのうち、奇数回目は通常盤面、偶数回目は白白盤面を設定した。

ヘルプ要因と教示要因に関しては、参加者間要因とし、「ヘルプなし・教示なし群」「ヘルプなし・教示あり群」「ヘルプあり・教示なし群」「ヘルプあり・教示あり群」の 4 条件を設け、ヘルプの有無と教示の有無を操作した。それぞれ 11 名、9 名、10 名、10 名の参加者を割り当てた。ヘルプありの 2 群では、最善手の情報を提供する。教示ありの 2 群では、実験の最初に「この目的は、どうしたら相手に勝てるかの「作戦」(手の打ち方)を発見すること。後でアンケートを行う」と教示を行った。実験後、全群にアンケートを行った。

結果

図 4 に、1 手あたりの平均時間を示す。1 手あたりの平均時間を従属変数とし、教示要因、ヘルプ要因、盤面要因を独立変数とする 3 要因混合計画の分散分析を行った。1 手あたりの平均時間は、実験を通しての平均を用いた。

その結果、教示要因の主効果が有意であり ($F(1,36)=27.23, p<.01$)、ヘルプ要因の主効果が有意であった ($F(1,36)=46.77, p<.01$)。盤面要因の主効果は有



*: $p < .01$

図 4 実験 1 1 手あたりの平均時間

意ではなかった($F(1,36)=0.90, n.s.$).

ヘルプ要因と教示要因の交互作用, および教示要因と盤面要因の交互作用は有意ではなかった(ヘルプ要因と教示要因の交互作用: $F(1,36)=0.05, n.s.$, 教示要因と盤面要因の交互作用: $F(1,36)=0.48, n.s.$). ヘルプ要因と盤面要因の交互作用が有意であった($F(1,36)=4.55, p<.05$). 修正 Bonferroni の方法で下位検定を行うと, 通常盤面水準と白白盤面水準においてヘルプ要因の単純主効果が有意であった(通常盤面水準: $F(1,36)=22.93, p<.01$, 白白盤面水準: $F(1,36)=58.83, p<.01$). ヘルプなし水準とヘルプあり水準において盤面要因の主効果は有意ではなかった(ヘルプなし水準: $F(1,18)=2.72, n.s.$, ヘルプあり水準: $F(1,18)=2.65, n.s.$).

考察

教示要因の主効果があったことから仮説 1 を, ヘルプ要因の主効果があったことから仮説 2 をそれぞれ確認することができた. しかしながら, 仮説 3 は確認することができず, 盤面要因に関する有意差はなかった. 5 回の白白盤面のゲームを通して, 白白盤面に参加者が慣れ, 容易に「白」と「白」を区別できるようになったのではないかと考えられる. そこで, 実験 2 では, さらに視認性が悪い盤面を作成し, 実験を行った.

5. 実験 2

目的

実験 2 では, 実験 1 で確認できなかった盤面要因について検討を行う. そのため, 操作する要因はヘルプ要因と盤面要因のみとし, 仮説 2 および仮説 3 を検討する.

方法

大学生 45 名が一斉に実験に参加した. 手続きは実験 1 と同様に行った. ただし, 教示要因は検討しないため, 全員が「教示なし」で行った. 実験条件は, 「ヘル

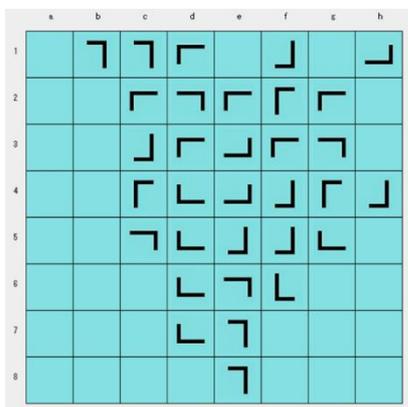


図 5 L 盤面の例

プなし群」「ヘルプあり群」の 2 条件を設定し, それぞれ 22 名, 23 名の参加者を割り当てた. 実験 2 では, 実験 1 の白白盤面に代わり, 「L 盤面」を用いた(図 5). L 盤面では, 参加者の石が「L」を 90° ずつ回転した図形で表され, 相手の石が「反転 L」を 90° ずつ回転した図形で表される. 盤面を読み取るための心的回転や読み替えを行う認知活動が課題外在性活動として生じると考えられる.

結果

図 6 に, 1 手あたりの平均時間を示す. 1 手あたりの平均時間を従属変数とし, ヘルプ要因と盤面要因を独立変数とする 2 要因混合計画の分散分析を行った. 1 手あたりの平均時間は, 実験を通しての平均を用いた.

その結果, ヘルプ要因の主効果と盤面要因の主効果が有意であった(ヘルプ要因: $F(1,43)=17.01, p<.01$, 盤面要因: $F(1,43)=4.89, p<.05$).

また, ヘルプ要因と盤面要因の交互作用が有意であった($F(1,43)=4.71, p<.05$). 修正 Bonferroni の方法で下位検定を行うと, 通常盤面水準と白白盤面水準においてヘルプ要因の単純主効果が有意であり(通常盤面水準: $F(1,43)=12.65, p<.01$, 白白盤面水準: $F(1,43)=15.08, p<.01$), ヘルプなし水準において盤面要因の単純主効果が有意であった($F(1,21)=7.99, p<.05$)が, ヘルプあり水準において盤面要因の単純主効果は有意ではなかった($F(1,22)=0.00, n.s.$).

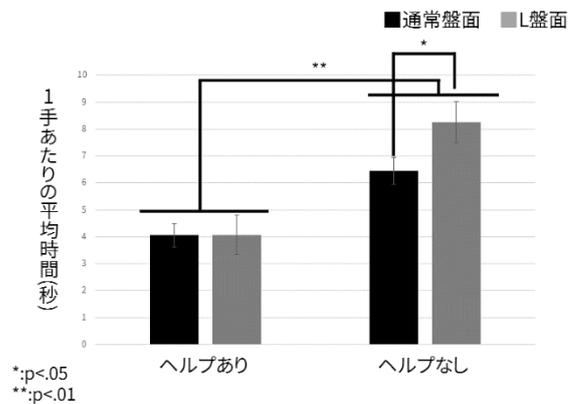


図 6 実験 2 1 手あたりの平均時間

考察

ヘルプ要因の主効果があったことから仮説 2 を, ヘルプなし水準における盤面要因の単純主効果があったことから, 仮説 3 を確認することができた.

6. まとめ

実験 1 および実験 2 を通して, 仮説 1~3 の正当性を確認することができ, 3 種類の認知活動と, 問題解決モデルの各プロセスとの関係が明らかになったと考え

る。

しかしながら、本研究に関しては課題が残る。学習関連活動の指標は、前後にテストを行い、そのパフォーマンスで計測するのが一般的であるが、本実験では前後のテストを行っていない。また、従来から行われてきた主観評定など、反応時間以外の指標による認知活動測定を行い、反応時間の信頼性を検証する必要がある。

また、認知活動と認知負荷の関係についてもさらなる検討が必要である。認知負荷の観点から考えると、学習効果は2種類の認知活動によってもたらされると考えられる。一つは、ある課題に対する課題内在性活動を行うコストが減ることによる学習効果である。これは、特定の課題遂行に割ける認知資源が増大することで得られる効果である。もう一つは、より活発な学習関連活動を行うことの成果として、宣言的記憶に蓄積される知識の精緻化による効果である。従来の認知負荷理論では、学習に関連する負荷は学習関連負荷であるとされているが、その他の負荷を発生させる認知活動との観点から議論されるべきである。

今後は、それぞれの負荷が学習に及ぼす影響をプレテストとポストテスト間のパフォーマンスで計測する実験を行う。

7. 謝辞

本研究の一部は公益財団法人中山隼雄科学技術文化財団、およびJSPS 科研費 15H02927 の助成による。

参考文献

- [1] Sweller, J., (1988) "Cognitive load during problem solving: Effects on learning", *Cognitive Science*, Vol. 12, No. 2, pp. 257-285.
- [2] 三輪 和久・寺井 仁・松室 美紀・前東 晃礼, (2014) "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, No. 2, pp. 156-167.
- [3] Sweller, J., (2010) "Element interactivity and intrinsic, extraneous, and germane cognitive load", *Educational psychology review*, Vol. 22, No. 2, pp. 123-138.
- [4] Cierniak, G., Scheiter, K., & Gerjets, P., (2009) "Explaining the split-attention effect: Is the reduction of extraneous cognitive load accompanied by an increase in germane cognitive load?", *Computers in Human Behavior*, Vol. 25, No. 2, pp. 315-324.
- [5] DeLeeuw, K. E., & Mayer, R. E., (2008) "A comparison of three measures of cognitive load: Evidence for separable measures of intrinsic, extraneous, and germane load", *Journal of Educational Psychology*, Vol. 100, No. 1, pp. 223-234.
- [6] Galy, E., Cariou, M., & Melan, C., (2012) "What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types?", *International Journal of Psychophysiology*, Vol. 83, No. 3, pp. 269-275.
- [7] Naismith, L. M., Cheung, J. J., Ringsted, C., & Cavalcanti, R. B., (2015) "Limitations of subjective cognitive load measures in simulation-based procedural training", *Medical Education*, Vol. 49, No. 8, pp. 805-814.
- [8] Haji, F. A., Rojas, D., Childs, R., Ribaupierre, S., & Dubrowski, A., (2015) "Measuring cognitive load: performance, mental effort and simulation task complexity", *Medical Education*, Vol. 49, No. 8, pp. 815-827.
- [9] 水野 陽介・三輪 和久・寺井 仁, (2015) "オセロ課題を用いたアシスタンスジレンマの実験的検討", 第73回先進的学習科学と工学研究会資料(SIG-ALST-B403), pp. 51-55.
- [10] Miwa, K., Kojima, K., & Terai, H., (2015) "An experimental investigation on learning activities inhibition hypothesis in cognitive disuse atrophy", In *Proceedings of the Seventh International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications (Cognitive 2015)*, pp. 66-71.
- [11] Miwa, K., Kojima, K., Terai, H., & Mizuno, Y., (2016) "Measuring Cognitive Loads Based on the Mental Chronometry Paradigm", In *Proceedings of the Eighth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications (Cognitive 2016)*, pp. 38-41.