

# 認知負荷の学習効果に関する実験的検討

## Experimental investigation on learning activities affected by cognitive loads

水野陽介<sup>1</sup> 三輪和久<sup>1</sup> 小島一晃<sup>2</sup> 寺井仁<sup>3</sup>

Yosuke Mizuno<sup>1</sup>, Kazuhisa Miwa<sup>1</sup>, Kazuaki Kojima<sup>2</sup>, and Hitoshi Terai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学大学院情報科学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Information Science, Nagoya University

<sup>2</sup>帝京大学ラーニングテクノロジー開発室

<sup>2</sup>Learning Technology Laboratory, Teikyo University

<sup>3</sup>近畿大学産業理工学部

<sup>3</sup>Faculty of Humanity-Oriented Science and Engineering, Kinki University

**Abstract:** Cognitive Load Theory classifies cognitive loads into three independent types: intrinsic, extraneous, and germane. Controversial issues about this definition have been investigated. In this study, we examined learning activities affected by intrinsic and extraneous cognitive loads. To control the intrinsic and extraneous load, we used a learning environment for Reversi game in which participants were given the best move as help information and the disc representation on the board was manipulated. Experimental results suggested that the extraneous load prevents the learning activities and there are two types of germane load, that are dependent on and independent of intrinsic load.

## 1. 序論

学習において重要な役割を担うのがワーキングメモリである。ワーキングメモリは、視覚や聴覚から入力された情報を保持し、必要に応じて長期記憶に保管された情報と照合しながら、計算や文章理解などの認知処理を行う。ワーキングメモリの容量は限られており[1]、容量を超える情報を与えられると、学習は阻害される。それゆえ、効果的な学習にはワーキングメモリ資源を有効に利用することが重要となる[2]。

認知負荷理論は、このようなワーキングメモリ上で行われる情報処理が発生させる負荷に関する理論である。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[3]。

課題内在性負荷は、課題遂行に関連する負荷であり、学習において並列し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、学習とは関連しない処理が与える負荷であり、教材の設計が悪い場合に発生する負荷である。学習関連負荷は、ス

キーマ構築など学習と関連する負荷である。

認知負荷は、1980年代終盤に、ワーキングメモリでの情報の貯蔵と処理に発生する負担と定義され、課題そのものによって発生する課題内在性負荷と教材のフォーマットによって発生する課題外在性負荷に区別された[4]。

認知負荷研究の初期段階は課題外在性負荷を減少させる教材設計の指針に関して研究が行われ、課題外在性負荷を減少させる有用な教材設計理論について多くの知見が蓄積された[2][5]。

一方で、認知負荷を高く設定した実験群のほうが、低く設定した実験群よりも学習の転移が促進され、成績が良かった実験結果から、「必要」な負荷と「悪影響な」負荷に加え、「良い」認知負荷の存在が示唆され、学習関連負荷が提唱された[2][6]。

認知負荷には3種類が存在することが定説となった2000年代中盤以降は、3種類の認知負荷を個別に操作し、測定する研究に重きが置かれるようになった[7]。しかしながら、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[8-13]。

個別に認知負荷を測定できない原因に関しては、測定方法における問題や3種類の認知負荷の定義が曖昧であるという問題が指摘されている。

認知負荷の個別測定には、第二課題への反応時間

\*連絡先:名古屋大学情報科学研究科  
〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町  
E-mail: y.mizuno@cog.human.nagoya-u.ac.jp

や主観評定が主な手法として用いられてきた[7]。しかしながら、それらの指標の信頼性には疑問を呈する研究[14][15]や、学習者は内省で3種類の負荷を区別することは困難であると主張する研究もある[16]。また、認知負荷を計測するために多くの主観評定が開発されているが、その結果は予備的で、一部は一貫性がないと指摘されている[17]。

認知負荷の定義に関しても曖昧な点があり、議論が分かれている。各認知負荷を発生させるメカニズムについては、先行研究ごとに異なる説明がされており[16][18]、その結果として、認知負荷のカテゴリ間の関係について誤解や矛盾が発生しつつあると指摘されている[19]。また、初期の認知負荷理論では、3種類の負荷は独立で加算的であると仮定していた。しかしながら、学習関連負荷は、課題内在性負荷の一部であると主張する研究[18]や、課題内在性負荷とは別であるものの密接に関連した負荷であると主張する研究[16]も発表されている。

本研究では、各負荷と学習効果の関係について検討を行う。具体的には、課題内在性負荷と課題外在性負荷を操作したトレーニングにおいて学習を行う。加えて、トレーニングの前後に、プレテストとポストテストを実施し、トレーニングにおける実験操作と成績の上昇分の関係を分析する。成績の上昇分を学習効果と定義し、学習効果が確認された場合に、学習関連負荷が発生していたと考える。

課題外在性負荷、及び課題内在性負荷と学習関連負荷の関係について、先行研究を踏まえ、2つの仮説を立て、実験結果を基に考察する。

実験システムの題材にはオセロ課題を用いた。オセロ課題には、各負荷の操作が容易であり、広い問題空間を持ち、難易度の調整が容易であるという特徴を持つ。

仮説 1：課題外在性負荷と学習関連負荷については、課題遂行には不要な負荷である課題外在性負荷がワーキングメモリ容量を圧迫すると、学習関連負荷に割り当てが困難になると考えられる。ゆえに、課題外在性負荷は学習を阻害すると考えられる。

課題内在性負荷と学習関連負荷については、両負荷の関係について、前述の通り、先行研究において意見の相違がある。

仮説 2a：学習関連負荷が課題内在性負荷の一部である場合、課題内在性負荷の増加に伴い学習関連負荷も増大すると考えられる。

仮説 2b：一方で、課題内在性負荷と学習関連負荷が独立である場合、課題内在性負荷の減少に伴い、学習関連負荷の割り当てが可能となると考えられる。それゆえ、課題内在性負荷が減少すると、学習関連負荷は増大すると考えられる。

## 2.実験システム

本研究では、先行研究で認知負荷の操作と測定が可能であることが確認されたオセロ対戦環境を用いて実験を行った[20][21]。本環境が提供する最適手表示機能と盤面表示操作機能という機能によって課題内在性負荷と課題外在性負荷を操作する。

最適手表示機能は、図1に示したように、最適手の場所を参加者に提供する。最適手を提供することで、オセロ課題における配置可能場所の探索や先読みといった処理が軽減されると考えられる。このように、最適手表示要因によって課題内在性負荷を操作する。

盤面表示操作機能は、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「L盤面」に変更する(図2)。L盤面によって盤面の視認性を悪くすることで、盤面の読み替えという本来は不要な処理が発生し、課題外在性負荷が増大すると考えられる。このように、盤面要因によって課題外在性負荷を操作する。

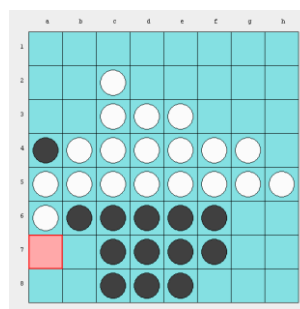


図1 最適手が表示された盤面例

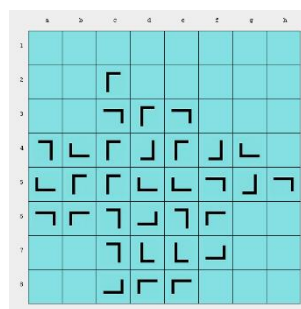


図2 L盤面の例

最適手表示機能における最適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。最適手表示がある場合でも、表示を無視していずれの場所にも石を置くことができる。

本環境において、認知負荷の評価指標には「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負荷の大小を反映する指標であると考えられる。先の研究においては、本環境を用いて、最適手表示要因・盤面要因がそれぞれ課題内在性負荷・課

題外在性負荷を操作し、教示の有無が学習関連負荷を操作することが確認でき、「1手あたりの平均時間」によって各認知負荷を測定可能であることが示された[22][23]。

### 3.実験

#### 目的

前述の2つの仮説を検証し、各認知負荷と学習効果の関係について検討を行うことを目的として実験を行った。

#### 方法

大学生61名が実験に参加した。参加者には実験室にてそれぞれ1台ずつのコンピュータを割り当てた。実験条件については、トレーニングにおける実験要因に関して、以下3条件を設けた。それぞれ、21名、19名、21名の実験参加者が割り当てられた。

- 最適手表示なし・通常盤面
- 最適手表示あり・通常盤面
- 最適手表示あり・L盤面

実験では、最初にプレテスト、トレーニング、ポストテストの順に行った。

プレテスト、及びポストテストでは、途中状態のある盤面を提示し、最適手を選択させる盤面問題を12問行った。盤面は、トレーニングで学習した戦略を適用することで解答が一意に決定できる盤面である。これらの盤面は、オセロの戦略に関する書籍[24]より引用した。各問題を20秒以内に解答し、20秒を超えたらすぐに答えを確定させるように教示した。問題の構成は、後に詳細な説明をするトレーニングにおいて学習する4つの戦略それぞれについて、トレーニング各セットの1~3問目に提示される盤面(同一盤面)と、同一盤面を90°、180°、270°に回転させるか、水平方向に折り返した鏡像の盤面(派生盤面)、および、トレーニングで提示されていない盤面(新規盤面)を設定した。

トレーニングでは、割り振られた実験群に応じた設定がされた16問のオセロ課題を行った。16問を4セットに分割し、各セットの間に2分の休憩を設定した。各セットにおいて、1つの戦略を学習できるように初期盤面を設定した(表1)。

トレーニングでの各セットでは、1~3問目は同じ

表1 トレーニングで学習する戦略

セット番号	戦略
1	序盤~中盤は石が少ないほど有利
2	隅を利用することで相手に返されない石を増やす
3	隅の斜め隣は不利/相手が置いたら有効利用する
4	隅の隣は不利/相手が置いたら有効利用する

初期盤面が提示され、4問目は、それらとは異なる初期盤面が提示される。これは、1~3問目において同じ盤面から繰り返し開始することで、試行錯誤を行い、戦略の発見を促し、4問目において発見した戦略の確認を促すことを意図している。

#### 予測

前述の仮説に対応して、課題外在性負荷と学習関連負荷の関係についての仮説、課題内在性負荷と学習関連負荷の関係についての仮説の2つの予測を立てられる。

予測1: 課題外在性負荷に関連する盤面要因に関しては、仮説1で想定した通り、高い課題外在性負荷が発生すると、学習関連負荷が減少し、学習は抑制されると考えられる。そのため、学習効果は、L盤面で学習を行う、最適手表示あり・L盤面群では確認できないと考えられる。

予測2: 課題内在性負荷に関連する最適手表示要因に関しては、仮説2aと仮説2bのそれぞれの仮説に対応した予測が立てられる。

(2a)学習関連負荷が課題内在性負荷の一部であるという仮説2aの立場を取る場合、最適手表示によって課題内在性負荷の軽減を行わない、最適手表示なし・通常盤面群に学習効果が確認できると予測できる。(2b)一方で、学習関連負荷と課題内在性負荷が独立であるという仮説2bの立場を取る場合、最適手表示によって課題内在性負荷を軽減した、最適手表示あり・通常盤面群に学習効果が確認できると予測できる。

#### 結果

分析指標には、プレテストとポストテストの正解数の差分を用いた。各テストの得点は、正解を1点とし、12点満点で算出した。ポストテストの得点からプレテストの得点を減じた値をテスト得点差分とし、両テスト間の上昇分を分析した。図3に同一盤面・派生盤面・新規盤面におけるテスト得点差分を示す。以下では、それぞれの盤面における各実験群の得点差分について、1標本t検定を行い、0との間に差があるかを検定した。

##### テスト得点差分(同一盤面)

1標本t検定の結果、最適手表示なし・通常盤面群と最適手表示あり・通常盤面群において、有意なテスト得点の上昇が確認でき、最適手表示あり・L盤面群において有意な上昇は確認できなかった(最適手表示なし・通常盤面群:  $t(20)=3.09, p<.01$ , 最適手表示あり・通常盤面群:  $t(18)=4.72, p<.001$ , 最適手表示あり・L盤面群:  $t(20)=-0.29, p>.05$ )。

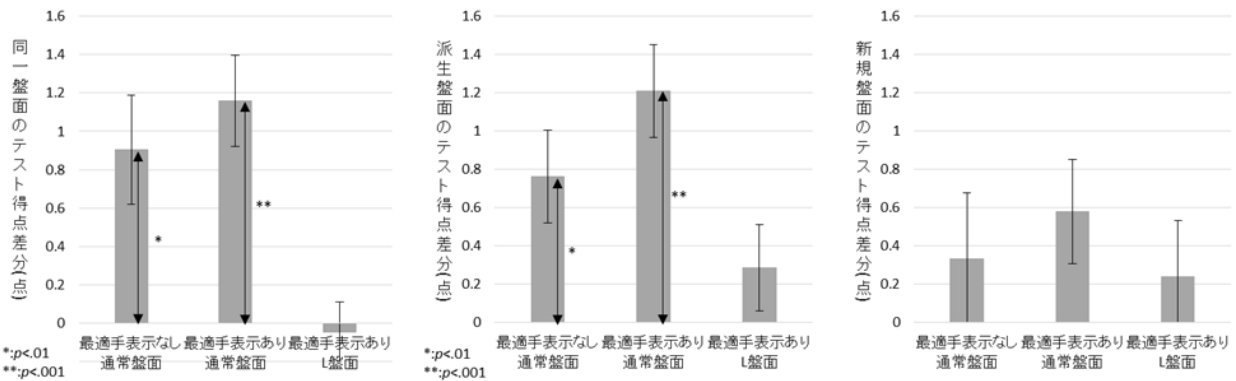


図3 同一盤面・派生盤面・新規盤面のテスト得点差分

### テスト得点差分(派生盤面)

1 標本  $t$  検定の結果、最適手表示なし・通常盤面群と最適手表示あり・通常盤面群において、有意なテスト得点の上昇が確認でき、最適手表示あり・L 盤面群において有意な上昇は確認できなかった(最適手表示なし・通常盤面群:  $t(20)=3.07, p<.01$ , 最適手表示あり・通常盤面群:  $t(18)=4.86, p<.001$ , 最適手表示あり・L 盤面群:  $t(20)=1.24, p>.05$ )。

### テスト得点差分(新規盤面)

1 標本  $t$  検定の結果、すべての群において、有意なテスト得点の上昇は確認できなかった(最適手表示なし・通常盤面群:  $t(20)=0.94, p>.05$ , 最適手表示あり・通常盤面群:  $t(18)=2.07, p>.05$ , 最適手表示あり・L 盤面群:  $t(20)=0.79, p>.05$ )。

## 考察

### 予測 1 の検討

全ての盤面において、最適手表示あり・L 盤面群に有意なテスト得点の上昇が確認できなかった。このことは、予測 1 が確認され、課題外在性負荷が学習を阻害することを示す。

### 予測 2 の検討

同一盤面と派生盤面において、最適手表示なし・通常盤面群と最適手表示あり・通常盤面群に有意なテスト得点の上昇が確認できた。このことは、予測 2a と予測 2b の両方が支持されたことを示す。

一方で新規盤面では、最適手表示なし・通常盤面群と最適手表示あり・通常盤面群においては、他の盤面同様のテスト得点の上昇は確認できなかった。同一盤面は、トレーニングにおいて 3 回行った盤面であり、派生盤面は同一盤面を回転などさせた盤面である。それゆえ、同一盤面と派生盤面のテスト問題は、近い学習転移を測定するテスト問題であると考えられる。一方で、新規盤面はトレーニングにお

いては出題されず、テストのみに出題され、トレーニングにおいて学習した戦略を運用して回答を導くため、遠い学習転移を測定するテスト問題であると考えられる。それゆえ、本実験での 16 問のトレーニングでは、近い学習転移は促進されたが、遠い学習転移を促進するほど十分な学習量ではなかったことが示唆される。

## 4.総合考察

実験を通して、課題外在性負荷が高い群では学習効果が確認できず、仮説 1 を確認することができた。一方で、仮説 2 については、学習関連負荷が課題内在性負荷の一部であるとの仮定から導いた予測と、課題内在性負荷と学習関連負荷は独立であるとの仮定から導いた予測の両方が確認された。このことから、学習関連負荷には、課題内在性負荷と関連する負荷と、課題内在性負荷とは独立な負荷の 2 種類の負荷があることが示唆される。

2 種類の負荷の大きさを調べるため、同一盤面、および派生盤面のテスト得点差を被説明変数、実験要因(3 水準)を説明変数とする 1 要因分散分析を行った。その結果、同一盤面、及び派生盤面において実験要因の主効果が確認された(同一盤面:  $F(2,58)=7.10, p<.001$ , 派生盤面:  $F(2,58)=3.58, p<.05$ )。修正 Bonferroni の方法による多重比較の結果、同一盤面においては、最適手表示あり・L 盤面群と他 2 群の間に有意な差があったが、最適手表示なし・通常盤面群と最適手表示あり・通常盤面群の間には差がなかった(最適手表示なし・通常盤面群-最適手表示あり・通常盤面群:  $p>.05$ , 最適手表示なし・通常盤面群-最適手表示あり・L 盤面群:  $p<.01$ , 最適手表示あり・通常盤面群-最適手表示あり・L 盤面群:  $p<.01$ )。派生盤面においては、最適手表示あり・通常盤面群と最適手表示あり・L 盤面群の間に有意な差

があったが、最適手表示なし・通常盤面群と最適手表示あり・通常盤面群の間には差がなかった(最適手表示なし・通常盤面群－最適手表示あり・通常盤面群： $p>.05$ ，最適手表示なし・通常盤面群－最適手表示あり・L盤面群： $p>.05$ ，最適手表示あり・通常盤面群－最適手表示あり・L盤面群： $p<.05$ )。両盤面において、学習効果が確認された最適手表示なし・通常盤面群と最適手表示あり・通常盤面群の間には差がなかったことから、2種類の負荷の学習効果は同程度であったと考えられる。

序論で述べた通り、課題内在性負荷と学習関連負荷の関係については明確にされていなかった。先行研究では、学習関連負荷を発生させる認知活動には、以下の4種類を挙げている[16]。

1. 学習戦略を意識的に応用する認知活動
2. 認知スキーマをさらに抽象化するために学習題材からパターンを見つける認知活動
3. より問題を簡単に解くために問題状態を再構築する認知活動(例:洞察)
4. 認知と学習をモニターするメタ認知活動

これらは、単なる課題遂行を超えた認知活動であるが、課題内在性負荷よりも大きくなることはなく、学習とは学習関連負荷だけでなく課題内在性負荷とも組み合わせによると主張されている。

今回示唆された2種類の学習関連負荷のうち、課題内在性負荷の一部と示唆される学習関連負荷は、上記のような、より効率的な課題遂行や熟達のための手続き的知識の学習に関連すると考えられる。本実験においては、石を配置可能な場所の探索やゲーム展開の先読み等を行う認知活動に伴った学習であると考えられる。

一方で、課題内在性負荷とは独立の学習関連負荷の存在も示唆された。これは、課題内在性負荷を減少させることで生じるワーキングメモリの空き容量に割り当てられた認知活動により発生し、宣言的知識に関連すると考えられる。本実験においては、最適手が表示された場所の意味を考える等のメタ認知活動による学習であると考えられる。ワーキングメモリの空き容量に、追加的な認知活動を割り当てるかどうかは、学習者のモチベーションで規定されると考えられる。それゆえ、課題内在性負荷と独立の学習関連負荷は、学習者のモチベーションに影響されると推測できる。

以上のように、学習効果の要因には、課題内在性負荷をより効率的に処理することを目的とした学習効果と、課題遂行とは別に、追加的な認知活動によってさらなる学習が促進されることによる効果があると考えられる。これらの学習効果の区別を考慮し、学習者の熟達や学習内容に応じた支援が提供できれ

ば、より効果的な教材設計につながるため、3種類の認知負荷が学習に与える影響に関して、さらなる研究が期待される。

## 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] Miller, G. A.: The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information, *Psychological Review*, Vol.63, No.2, pp. 81-97 (1956)
- [2] Sweller, J., Van Merriënboer, J. J., Paas, F. G.: Cognitive architecture and instructional design, *Educational Psychology Review*, Vol.10, No.3, pp. 251-296 (1998)
- [3] 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, No.2, pp. 156-167 (2012)
- [4] Sweller, J.: Cognitive load during problem solving: Effects on learning, *Cognitive Science*, Vol.12, No.2, pp. 257-285 (1988)
- [5] Mayer, R. E., Moreno, R.: Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning, *Educational Psychologist*, Vol.38, No.1, pp. 43-52 (2003)
- [6] Paas, F. G., Van Merriënboer, J. J.: Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills: A cognitive-load approach, *Journal of Educational Psychology*, Vol.86, No.1, pp. 122-133 (1994)
- [7] Paas, F. G., Tuovinen, J. E., Tabbers, H., Van Gerven, P. W.: Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory, *Educational Psychologist*, Vol.38, No.1, pp. 63-71 (2003)
- [8] Ayres, P.: Using subjective measures to detect variations of intrinsic cognitive load within problems, *Learning and Instruction*, Vol.16, No.5, pp. 389-400 (2006)
- [9] DeLeeuw, K. E., Mayer, R. E.: 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 (2008)
- [10] Cierniak, G., Scheiter, K., Gerjets, P.: 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 (2009)
- [11] Eysink, T. H., de Jong, T., Berthold, K., Kolloffel, B., Opfermann, M., Wouters, P.: Learner performance in multimedia learning arrangements: An analysis across

- instructional approaches, *American Educational Research Journal*, Vol.46, No.4, pp. 1107-1149 (2009)
- [ 1 2 ]Galy, E., Cariou, M., Mélan, C.: What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types?, *International Journal of Psychophysiology*, Vol.83, No.3, pp. 269-275 (2012)
- [ 1 3 ]Leppink, J., Paas, F., Van Gog, T., van Der Vleuten, C. P., Van Merriënboer, J. J.: Effects of pairs of problems and examples on task performance and different types of cognitive load, *Learning and Instruction*, Vol.30, pp. 32-42 (2014)
- [ 1 4 ]Naismith, L. M., Cheung, J. J., Ringsted, C., Cavalcanti, R. B.: Limitations of subjective cognitive load measures in simulation-based procedural training, *Medical Education*, Vol.49, No.8, pp. 805-814 (2015)
- [ 1 5 ]Haji, F. A., Rojas, D., Childs, R., Ribaupierre, S., Dubrowski, A.: Measuring cognitive load: performance, mental effort and simulation task complexity, *Medical Education*, Vol.49, No.8, pp. 815-827 (2015)
- [ 1 6 ]Schnotz, W., Kürschner, C.: A reconsideration of cognitive load theory, *Educational Psychology Review*, Vol.19, No.4, pp. 469-508 (2007)
- [ 1 7 ]De Jong, T.: Cognitive load theory, educational research, and instructional design: some food for thought, *Instructional Science*, Vol.38, No.2, pp. 105-134 (2010)
- [ 1 8 ]Beckmann, J. F.: Taming a beast of burden? On some issues with the conceptualisation and operationalisation of cognitive load, *Learning and Instruction*, Vol.20, No.3, pp. 250-264 (2010)
- [ 1 9 ]Sweller, J.:Element interactivity and intrinsic, extraneous, and germane cognitive load, *Educational Psychology Review*, Vol.22, No.2, pp. 123-138 (2010)
- [ 2 0 ]水野陽介, 三輪和久, 寺井仁: 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, Vol.B4, No.3, pp. 51-55 (2015)
- [ 2 1 ]Miwa, K., Kojima, K., Terai, H.: 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 (2015)
- [ 2 2 ]水野陽介, 三輪和久, 小島一晃, 寺井仁: 問題解決型学習における認知負荷と認知処理の関係についての実験的検討, 第76回先進的学習科学と工学研究会資料, Vol.B5, No.3, pp. 7-11 (2016)
- [ 2 3 ]Miwa, K., Kojima, K., Terai, H., Mizuno, Y.: 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 (2016)
- [ 2 4 ]村上健: 史上最強カラー図解 強くなるオセロ, ナツメ社 (2011)