

メタ認知活動—「抽象化操作」,「修正操作」,「具体化操作」

Metacognitive Activities – Abstraction Operation, Modification Operation, Instantiation Operation

茅島路子*¹
Michiko Kayashima

溝口理一郎*²
Riichiro Mizoguchi

*¹ 玉川大学文学部
College of Humanities, Tamagawa University

*² 大阪大学産業科学研究所
ISIR, Osaka University

The importance of metacognition in education is universally recognized. However, some researchers indicate that the field of metacognition lacks coherence. As in any field, mutual understanding and sharing of results in metacognition research is essential. In order to overcome this challenge it is necessary that each researcher explains his own research objects and results by using his own or other people's framework of metacognition. We propose a new framework for metacognition which becomes possible not only to identify what types of metacognitive activity a computer system supports but also to propose new functions that support the various types of metacognitive activities.

1. はじめに

メタ認知は、人の認知活動についての知識であるメタ認知知識と認知活動過程を制御するメタ認知活動から構成され[Brown 1983 1987, Flavell 1976 1987], 学習を成功させる重要な要素であると広く認知されている[Wang 1998, Hacker 1998]. 近年, メタ認知研究は隆盛を極め, 教授/学習支援方法や支援システム研究においても, メタ認知の訓練は重要な課題となり, さまざまなメタ認知訓練システムが開発されている[Biswas 2009, Hirashima 2009, Schwartz 2009]. しかしながら, メタ認知に関連する用語に一貫性が欠けているとの指摘もあり, 研究成果の共通理解, 共有, および蓄積が困難な状況にある[茅島 2008, Veeman 2006].

このような現状の打開策の一つとして, 各研究者が, メタ認知のモデルや枠組みを構築し, あるいは, 他者が構築したモデルや枠組みを用い, 各自の研究を説明することが考えられる[Azevedo 2009, 茅島 2008]. メタ認知や Self-regulated learning(SRL)のモデルや概念枠組みは, 既に複数提案されている[Pintrich 2000]. 私たちも, また, 当該領域における研究成果の共有・蓄積を目指して, ドメイン独立を指向したメタ認知活動の枠組みを構築している[Kayashima 2005, 茅島 2008]. 私たちの枠組みの特徴は, メタ認知活動の活動自体は認知活動と同一であり, その相違は対象の違いであることを仮定し, 問題解決をベースに, 何を対象にどんな認知活動を実行するときにかなる難しさがあるかを表現したことにある。しかし, 私たちのメタ認知活動の枠組みは, 「メタ認知活動が駆動することで生じると思われる高度な学習」とそれを生じさせるメタ認知活動のタイプを表現できていなかった。

本研究の目的は, これらを表現した枠組みへと旧枠組みを拡張することにある。枠組みの拡張は, 既存のメタ認知活動の訓練方法や訓練システムを「高度な学習」を生じさせるメタ認知活動のタイプを支援しているのか, 支援しているならばどのように支援しているのか, そして, どのような高度な学習結果を達成しているのか, その特徴や限界を同一の言葉で説明できるようにする。加えて, 既存の訓練方法や訓練システムが「高度な学習」

を生じさせるメタ認知活動を訓練していない場合, それを明らかにし, 「高度な学習」を促すメタ認知活動のタイプを訓練する新たな機能を考案することを可能にし, 既存の訓練方法や訓練システムの改善に貢献できる。

本稿では, 最初に, どのようなタイプのメタ認知活動が「高度な学習」を促すのかについて述べる。次に「メタ認知活動が駆動することで生じると思われる高度な学習」について述べ, メタ認知活動の拡張枠組みを示す。最後に, メタ認知活動の訓練システムとして極めて有効な Betty's Brain[Biswas 2009]と力学の誤概念を捨てさせる EBS(Error Based Simulation)[Hirashima 2009, 今井 2008] を, 拡張した枠組みに基づいて分析し, それらが「高度な学習」を生じさせるメタ認知活動のタイプを直接的に支援しているかどうかを検討し, かつ, それらが「高度な学習」を生じさせるメタ認知活動を支援していない場合, それを支援する新たな機能を提案する。

2. メタ認知駆動学習とメタ認知活動

知識を獲得し, それを類似問題に繰り返し適用することで知識の手続き化と適用効率の向上が達成される[Anderson 1982]. これはメタ認知活動を伴わずにできる学習である。同様に, 問題解決過程を調整させるメタ認知方略を知識として獲得し, 問題解決に適用することでメタ認知方略の手続き化が生じ, 繰り返し類似問題に適用することで, メタ認知方略の定着とそれを適用する効率が向上する。これは, メタレベルで生じる学習であるが, メタ認知活動を伴わずにできる学習と同型である。

本稿では, メタレベルで起こった学習というだけでは, 「メタ認知活動が駆動することで生じると思われる高度な学習」とは呼ばない。私たちが目指す「メタ認知活動が駆動する学習(以下, メタ認知駆動学習と記す)」は, 方略の定着や方略適用の効率向上とは質的に異なる, 更に高度な学習である。

2.1 メタ認知駆動学習

メタ認知駆動学習とはどのような学習なのか。Collinsらが示した学習支援にそれが示唆されている[Collins 1988 p.9]. Collinsらは, 学習者たちに彼らが問題解決にまごついていることを気づかせ, 彼らの経験に基づいたより良いメタ認知方略を発見, 理解できるように支援すべきであると述べている。私たちは, 学習者が経験に基づき(学習者たちにとって)より良いメタ認知方略を発見, 理解することがメタ認知駆動学習であると考える。と

*連絡先: 玉川大学文学部人間学科

〒196-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1

kayasima@lit.tamagawa.ac.jp

いうのは、自分の問題解決過程を振り返り、それによる学習で自分の問題解決過程を永続的に調整できるようになるには、学習結果として調整する方略を見出し、問題解決の調整に使用することを習得することが必要だからである。

2.2 抽象化操作, 修正操作, 具体化操作

このようなメタ認知駆動学習を生じるには、新たなタイプのメタ認知活動が必要である。Collinsらは、自分の問題解決過程を特徴づけるには、2種類の抽象化が必要であると述べている [Collins 1988 p.14]. 自分の問題解決過程をオペレータとそれによる状態の遷移といった知覚レベルで抽象化すること、それによって明示された自分の問題解決方法の特徴を、前向き推論などといった言語レベルで抽象化することである。自分の問題解決過程の特徴を言語レベルで抽象化することは、認知活動とそれを適用した問題状況の特殊性を捨てさせ、認知活動とそれが適用可能な状況に共通する特性のみを浮き彫りにする。この言語レベルへの抽象化は、インスタンスである自分の問題解決の仕方がどのような「概念クラス」に所属するかを認定することであり、知覚レベルの抽象化と区別するために、「抽象化操作」と呼ぶ。例えば、 $5x^2-3x+4x-7x^2$ を $(5-7)x^2+(4-3)x$ と変形したとき、変形が分配法則というクラスレベルのルール $(x+y) \times a = ax+ay$ のインスタンス $5x^2-3x+4x-7x^2=(5-7)x^2+(4-3)x$ であることに気がつき、自分の式変形の特徴を「最初に分配法則が適用できないかを考えた」として認定することである。逆に、自分の式変形の特徴をインスタンスレベルに落とすことを「具体化操作」と呼ぶ。また、自分の式変形の特徴を学習者にとってより良いメタ認知方略にするために、特徴の修正、追加、削除が必須であり、これをクラスレベルでの「修正操作」と呼ぶ。クラスの修正、追加、削除は、自分の問題解決過程の特徴の「抽象化操作」、その結果の「修正操作」、修正されたクラスの「具体化操作」を繰り返すことで達成される。これがメタ認知駆動学習である。まとめると、抽象化操作、具体化操作、修正操作というメタ認知活動が駆動する学習がメタ認知駆動学習である。

2.3 メタ認知駆動学習のメカニズム

抽象化操作、具体化操作、修正操作がどのようにメタ認知駆動学習を達成するのか、そのメカニズムについて、Reciprocal teaching [Palincsar 1984 1986] を例に述べる。Reciprocal teaching は教師と複数の生徒が協同してテキストを理解する方法である。その特徴は、4つの読み方略(質問生成、要約、予想、明確化)を用い、相互教授しながら読みを改善することにある。

カラスの興味深い行動について書かれたパラグラフを読了後、教師に「質問生成」を促された生徒が作った質問文は “What kinds of games do crows play?”であった。教師は想定していた質問ではなかったため、介入し見本を示す。見本質問は “How are crows like people?”であった [Palincsar 1986]. もし、生徒が自分の質問文と教師の質問文が異なっていることに気がつき、

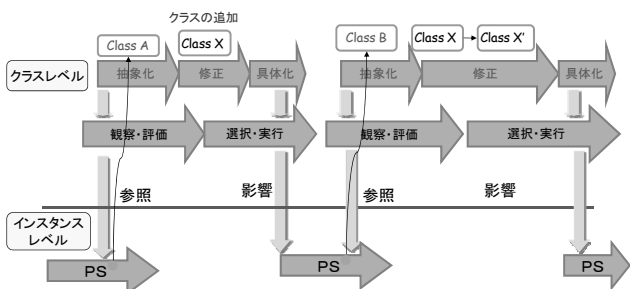


図1 メタ認知駆動学習

自分の質問を「表層的な質問」、教師の質問を「比較質問」と抽象化し(知覚レベルの抽象化に相当する)、かつ、その相違の原因を理解したいと強く望んだ [Collins 1989] ならば、生徒は「抽象化操作」を駆動し、その相違の原因となった自分の認知活動をクラスレベルに上げる。このとき、相違の原因となった自分の認知活動を「どのような質問をすべきかを考えていなかった」(図1の Class A)と抽象化できたならば、「どのような質問をすべきかを考えてから質問を作ろう」といったメタ認知方略を発見でき、新たなクラス(図1の Class X)として追加できる可能性が高い。生徒が新たなクラスを追加できたならば、その後のパラグラフにおいてどのような質問をすればよいかを考えて質問を作るようになるであろう。これは問題解決過程の調整が行われたことになる。しかし、生徒が即座に適切なクラスを追加できるとは限らない。生徒が追加したクラスを適切なものにするまでには、教師のフィードバックを得ながら、クラス属性の明確化やクラス修正(図1の class X から class X'へ)が必要である。このように、学習者が認知活動を調整できるようになるためにはクラスレベルでの「修正操作」が必須であり、「抽象化操作」が重要となる。

3. メタ認知活動枠組みの拡張

メタ認知駆動学習とそれに必要な新たなタイプのメタ認知活動を表現できるように、旧メタ認知活動の枠組みを拡張する。

既存の私たちのメタ認知活動の枠組みは、問題解決の基本となる5つの認知活動、観察(observation)、評価(evaluation)、仮想実行(virtual application)、選択(selection)、実行(performance)、リハーサル(rehearsal)と、その対象である外界、他者の認知活動、そして自分の認知活動による WM(Working Memory)内の生成物から構成される(図2(a)). この旧枠組みに、図2(b)に示すように、新たなタイプのメタ認知活動「抽象化操作」、「修正操作」、「具体化操作」を加え(図2(b)の矢印)、かつ、「メタ認知駆動学習」として達成される「クラスの修正」、「クラスの削除(unlearning)」、「クラスの追加」、「クラスの属性の明確化」をも加え(図2(b)の四角)、拡張する。

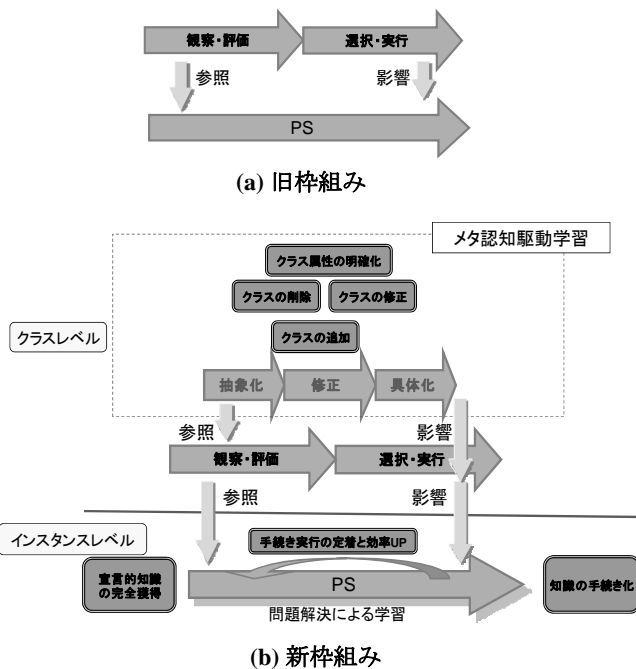


図2 拡張したメタ認知活動の枠組み

4. 拡張枠組みに基づく訓練システムの分析

ここでは、拡張枠組みに基づき、生徒に Computer Agent に教えさせることで学ばせる Betty's Brain と、物体の奇妙な動きが生徒の誤概念を捨てさせる EBS を分析し、支援しているメタ認知活動のタイプと、未支援のメタ認知活動のタイプを特定し、未支援のメタ認知活動を訓練する新たな機能を各々提案する。

4.1 自己調整学習スキルを促す Betty's Brain

Betty's Brain は、生徒に Betty というコンピュータ・エージェントを教えることで複雑な科学的知識を学ばせ自己調整学習 (Self-regulated learning) スキルを習得させることを目的とした学習環境である。生徒はまたメンターの役割を担う Davis と呼ばれるコンピュータ・エージェントの支援を受ける。

生徒は concept map を生成して、Betty にドメイン知識を教える。Betty の学習過程は生徒自身の学習過程であり [Schwartz 2009]、生徒は自分の学習過程を Betty の学習過程として、かつ、外化された concept map として客観的に観察・評価できる。これは、筆者らが言うところの自分の認知活動を観察、評価、調整するというメタ認知活動実行の難しさを大幅に軽減して実行できる [茅島 2008] 環境であり、優れたメタ認知活動訓練環境といえる。

Schwartz らは、自己調整学習方略支援を組み込んだ Betty's Brain システムで、生徒に Betty の学習を調整させる訓練を繰り返すことで、生徒にメタ認知スキルが転移されると述べている [Schwartz 2009 p.356]。その証拠として、自己調整学習の支援を組み込んだ Betty's Brain で学習した生徒たちは、自己調整学習支援を組み込んでいない Betty's Brain で学習した生徒たちに比べ、学習後に自己調整学習支援を取り外した Betty's Brain システムで自己調整学習方略に基づいて Betty を教える率が高かったことを上げている [Schwartz 2009]。このことを拡張枠組みに基づいて分析すると次のようになる。Betty の自己調整学習方略を使用するよにこの助言や、Davis による自己調整学習方略の意義やそれを具体化するタイミングについての教授は、生徒に対する自己調整学習方略(クラスレベル)の「具体化操作」を教え、かつ、教わった方略をコンピュータ・エージェントに対して具体化する訓練であると解釈できる。しかし、具体化操作を繰り返し訓練したとしても、方略適用結果に対する抽象化操作やメタ認知駆動学習には繋がらない。よって、Betty's Brain は、「具体化操作」を直接支援しているが、「抽象化操作」、「修正操作」、「メタ認知駆動学習」を直接支援してはいないと言える。

次に、拡張枠組みに基づき、Betty's Brain が未支援である「抽象化操作」を訓練する機能を提案する。拡張枠組みに基づく、生徒に自分の認知活動を抽象化させ、その原因の認知活動を抽象化させる機能を提供し、メタ認知駆動学習を促せばよいことがわかる。たとえば、生徒が Betty の説明によって、concept map の因果関係の誤りに気がついたとする。そのとき、コンピュータ・エージェントが生徒に「Betty が因果関係を誤って理解したのはなぜか？その理由を説明せよ」と問いかけ、生徒に Betty が因果関係を誤って学習した過程(生徒自身の知識獲得過程)を振り返らせ、生徒自身に誤った原因を抽象化させる新たな機能を付加することを提案する。このとき、生徒が、Betty(自分)が因果関係を誤って理解した原因を「複数の概念を獲得したが、概念間の関係を考えていなかった」と抽象化できれば、「複数の概念を獲得した場合、概念間の関係を考える」というメタ認知方略(クラス)を発見することが期待できる。このように拡張枠組みによる分析は、未支援のメタ認知活動のタイプを

特定でき、かつ、それを訓練する新たな機能を考案することを可能にする。

4.2 EBS

EBS の目的は、生徒が力学の原理(principle)を説明できるようにすることである [今井 2008, Hirashima 2009]。EBS は、生徒が保有する誤った力学的知識を適用すると、物体が自然界ではあり得ないような動きをするシステムである。最初に、地面に静止している物体が提示される。生徒はその物体に働くと考える力をマウスで描く。描いた力が誤っていた場合、EBS は物体が地面に埋没する、あるいは上空に飛び去るといった奇妙な動きをする。この奇妙な動きが正誤のフィードバックとなり、かつ、正解への導きともなる [今井 2008]。

EBS で学習した生徒に対する事後テストと遅延テスト後の聞き取り調査 [今井 2008] を拡張枠組みに基づき分析することで、EBS が生徒に自分の知識の適用結果を観察、評価、調整させる支援をしているが、メタ認知駆動学習に必要な抽象化操作を促す直接的な支援をしていないことが分かる。たとえば事後テストの聞き取り調査で、ある生徒は次のように応えている。

(a)「最初は重力しか入力しなかったら、物体が落下してしまっただけで、床が物体を支える力を入力しなければいけないことがわかった」

この例は、生徒が物体の奇妙な動き(誤った知識を適用した結果のフィードバック)を観察し、保有している知識が誤りであることに気がつき、インスタンスレベルで知識を修正したと解釈できる。

また、唯一の例ではあるが、次に示すように、事後テスト後の聞き取り調査で自発的に自分の認知活動を抽象化している生徒がいる [今井 2008 p.200]。

(b)「<略>矢印の大きさ、つまり、力の大きさをあまり気にしていなかったが、重力と同じ大きさにしなければならぬことがわかった」

この例は、生徒が自分の誤った認知活動を振り返り、誤りの原因となった自分の認知活動を「力の大きさを考慮していなかった」と言語レベルで抽象化したと解釈できる。この抽象化操作によって、「力の大きさを考慮する」という自分の認知活動を調整する方略(メタ認知方略)を発見し、力の大きさを考慮しながら問題解決を行い、「抗力と重力の大きさは同一」という知識を作り上げたと解釈することができる。このような例は唯一であり、この生徒が自発的に抽象化操作したと考えることができ、EBS が直接「抽象化操作」を支援しているとは言えない。

上述の聞き取り調査の例が示すように、EBS は、生徒が保有している誤った知識を捨てさせる優れた支援システムである。ただし、EBS は生徒たちに誤った知識をインスタンスレベルで捨てさせている。というのは、聞き取り調査結果のすべてが、(a)に示したものと同様に、EBS の物体の奇妙な動きを根拠に、生徒たちが EBS の下で構成したインスタンスレベルの知識の正しさに納得しているか解釈できるからである。つまり、生徒たちは自分たちが保有する知識を物体の奇妙な動きを根拠にインスタンスレベルで「誤り」と認定していることでもある。ゆえに、EBS は生徒たちが保有する知識「静止する物体には重力のみが働く」を「誤り」と抽象化し(知覚レベルの抽象化)、捨てさせたと考えることができる。このことは、EBS での学習から 3 ヶ月後に実施された遅延テストにおける高い正答率からも分かる。しかし、自分が誤った原因を理解しようとするまでには至っていない。

そこで、EBS がメタ認知活動をも訓練するシステムへと改善するために付加すべき機能として、生徒たちに自分が誤った原因を理解することを促すことを提案する。

EBS の物体の奇妙な動きに支えられて、生徒が試行錯誤しながらインスタンスレベルで正しい知識を構成できたとする。その時に、誤った時に物体に描いた力と、正解に辿り着いた時に物体に描いた力を生徒に呈示し、「誤り時と正解時に描いた力で異なっている力はどれか」と質問し、正誤の相違を認識させる。その後、「誤りと正解の相違をもたらした原因を理解しよう。あなたが物体に力を描いたときに考えたことをその違いがわかるように説明せよ」と促す機能を提案する。この促しによって、たとえば、「ひとつの物体に、いくつかの力が働いている場合、それらの合力を気にしていなかった」と自分の誤りの原因となった認知活動を抽象化できたならば、その後彼は EBS で「ひとつの物体に、いくつかの力が働いている場合、それらの合力を考慮すること」というメタ認知方略を発見し、それをを用いて自分の問題解決を制御するようになるであろう。これは生徒自身による認知活動の調整である。

このように、拡張枠組みに基づいた分析を行うことで、未支援のメタ認知活動のタイプを特定できるので、それを訓練する機能を新たに考案することが可能になり、システムの改善に貢献できる。

5. おわりに

本稿では、学習におけるメタ認知活動の重要性がメタ認知駆動学習にあることを提案し、メタ認知駆動学習には「抽象化操作」、「修正操作」、「具体化操作」といったメタ認知活動が必要であることを述べた。そして、メタ認知活動の旧枠組みにメタ認知駆動学習とそれに必要な新たなタイプのメタ認知活動を追加し、拡張した。続いて、この拡張枠組みに基づき2つの優れたメタ認知活動の訓練システムを分析した。この拡張枠組みに基づくメタ認知活動の訓練システム分析は、各システムのメタ認知活動支援の特徴や限界を同じ言葉で説明すること、加えて、未支援のメタ認知活動のタイプを特定すること、かつ、未支援のメタ認知活動を訓練する新たな機能を考案することが可能になることを示した。

今後の課題としては、拡張枠組みに基づくメタ認知活動訓練方法や訓練システムの整理と、2つのメタ認知活動訓練システムに提案した機能の有効性を検証することが挙げられる。

参考文献

- [Anderson 1982] Anderson, J.R.: Acquisition of Cognitive Skill, *Psychological review*, 89(4), pp.369—406, 1982.
- [Azevedo 2009] Azevedo, R.: Theoretical, Conceptual, Methodological, and Instructional Issues in Research on Metacognition and Self-Regulated Learning: A Discussion. *Metacognition Learning*, 4(1), pp.87—95, 2009.
- [Biswas 2009] Biswas, G., Roscoe, R., Jeong, H., Brian Sulcer, B.: Promoting Self-Regulated Learning Skills in Agent-based Learning Environments. *Proceedings of ICCE*, 2009. <http://www.icce2009.ied.edu.hk/pdf/C1/proceedings067-074.pdf> 2010年2月20日アクセス
- [Brown 1983] Brown, A. L., Bransford, J., Ferrara, R., Campione, J.: Learning, Remembering, and Understanding. In Musen, P.H. (ed.) *Handbook of Child Psychology*. vol. III, Wiley, New York, pp. 77-166, 1983.
- [Brown 1987] Brown, A.: Metacognition, Executive Control, Self-regulation, and Other more Mysterious Mechanisms. In: Weinert, F. E., Kluwe, R. H. (eds.) *Metacognition, Motivation, and Understanding*, LEA, pp. 65-116, 1987.
- [Collins 1988] Collins, A., Brown, J.S.: The Computer as a Tool for Learning through Reflection. In Mandl, H., Lesgold, A. (eds.) *Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems*. Springer, New York, pp.1-18, 1988.
- [Collins 1989] Collins, A., Brown, J.S., Newman, S.E.: Cognitive Apprenticeship: Teaching the Crafts of Reading, Writing, and Mathematics. In L.B. Resnick (ed.) *Knowing, Learning, and Instruction: Essays in Honor of Robert Glaser*. pp. 453-494. LEA, 1989.
- [Flavell 1976] Flavell, J. H.: Metacognitive Aspects of Problem-Solving. In Resnick, L. B. (ed.) *The Nature of Intelligence*, LEA, pp.231-235, 1976.
- [Flavell 1987] Flavell, J. H.: Speculations about the Nature and Development of Metacognition, In Weinert, F. E., Kluwe, R. H. (eds.) *Metacognition, Motivation, and Understanding*, LEA, pp. 21-29, 1987.
- [Hacker 1998] Hacker, D. J., Dunlosky, J., Graesser, A. C.: *Metacognition in Educational Theory and Practice*, LEA, 1998.
- [Hirashima 2009] Hirashima, T., Imai, I., Horiguchi, T., Toumoto, T.: Error-based simulation to promote awareness of errors in elementary mechanics and its evaluation, In V. Dimitrova, R. Mizoguchi, B. Du Boulay, A. Graesser (Eds.) *Artificial Intelligence in Education - Building Learning Systems that Care: From Knowledge Representation to Affective Modelling*, IOS Press, 2009.
- [今井 2008] 今井功, 東本崇仁, 堀口知也, 平嶋宗: 中学理科における Error-based Simulation を用いた授業実践—「ニュートンに挑戦」プロジェクト, *教育システム情報学会誌*, 25(2), pp.194-203, 2008.
- [Kayashima 2005] Kayashima, M., Inaba, A. and Mizoguchi, R.: What Do You Mean by to Help Learning of Metacognition? *Proc. of the 12th Artificial Intelligence in Education*. pp.346-353, 2005.
- [茅島 2008] 茅島路子, 稲葉晶子, 溝口理一郎: メタ認知活動の困難さに関するフレームワークの提案 *教育システム情報学会誌* 25(1), pp.19-31, 2008.
- [Palincsar 1984] Palincsar, A.S., Brown, A.L.: Reciprocal Teaching of Comprehension-Fostering and Monitoring Activities. *Cognition and Instruction*, 1, pp.117-175, 1984.
- [Palincsar 1986] Palincsar, A. S.: Metacognitive Strategy Instruction. *Exceptional Children*, 53(2), pp.118-124, 1986.
- [Pintrich 2000] Pintrich, P. R. : The Role of Motivation in Self-Regulated Learning. In Boekaerts, M., Pintrich, P. R., Zeidner, M. (Eds.) *Handbook of Self-Regulation*. Academic Press, New York, pp.451-502, 2000.
- [Schwartz 2009] Schwartz, D. L., et al.: Interactive Metacognition: Monitoring and Regulating a Teachable Agent, In D. J. Hacker, J. Dunlosky, A. C. Graesser (eds.) *Handbook of Metacognition in Education*, Routledge, pp.340-358, 2009.
- [Veenman 2006] Veenman, M. V. J., Van Hout-Wolters, Bernadette H. A. M. and Afflerbach, P.: Metacognition and Learning: Conceptual and Methodological Considerations, *Metacognition Learning*, 1(1), pp.3-14, 2006.
- [Wang 1998] Wang, M. C., Haertel, G. D., Walberg, H.J.: What Influences Learning?: A Content Analysis of Review Literature, *J. of Educational Research*, 84(1), pp.30-43, 1990.