

算数問題解決を育むコンピュータ利用による メタ認知の活性化

多 鹿 秀 継¹ 中 津 檣 男² 加 藤 久 恵³
藤 谷 智 子⁴ 堀 田 千 絵⁵ 野 崎 浩 成²

Toward Activating Metacognition by Computer-Based Support to
Foster Children's Math Problem Solving

Hidetsugu TAJIKA¹ Narao NAKATSU² Hisae KATO³
Tomoko FUJITANI⁴ Chie HOTTA⁵ Hironari NOZAKI²

要 旨

本論文の目的は、さまざまに工夫された学習形式を利用し、児童の算数問題解決を育む方策を開発してきた著者らの研究プロジェクトをさらに進展させるために、著者らのプロジェクトがここ十年強にわたって取り組んできたコンピュータ利用によるメタ認知の活性化とは異なるコンピュータ利用によるメタ認知の活性化研究を展望することにあつた。この目的を達成するために、コンピュータを中心とするさまざまなテクノロジーの中で、最近出版されたハンドブック「International handbook of metacognition and learning technologies」(Azevedo & Aleven, 2013) で取り上げられた5つの研究成果(①メタ認知のモデルと構成要素, ②メタ認知的知識と技能の評価とモデル化, ③ハイパーメディアとハイパーテキストを使ってのメタ認知と学習への足場かけ(scaffolding), ④知的チュータリングシステム(ITS)と対話のシステム, そして⑤多様なエージェントを使ったメタ認知と自己調整学習の測定と育成)を取り上げ, ①メタ認知のモデルと構成要素ならびに④知的チュータリングシステム(ITS)と対話のシステムを利用したメタ認知を組み込んだ算数・数学問題解決の選択的な展望, で構成した。

キーワード：メタ認知方略, 自己説明, コンピュータ利用, 算数問題解決, 児童

1 本研究の問題と目的

本論文の第一著者を研究代表とした児童の算数問題解決プロジェクトは、これまで児童の算数問題解決能力を育む方策をさまざまに研究開発してきた(たとえば、多鹿・中津・加藤・藤谷・堀田・

野崎, 2011, 2014, 2015, 2016 ; Tajika, Nakatsu, Neumann, Nozaki, Kato, Fujitani, & Hotta, 2012 ; Tajika, Nakatsu, Nozaki, Neumann, & Maruno, 2007)。すなわち、児童の算数問題解決能力を育むそれらの方策は、基本的には児童のメタ認知の活性化に結びつけるもの

であった。メタ認知の発達途上である小学校高学年の児童に対して、メタ認知の活性化を導く手段として、算数問題の解決ステップを自分で説明する自己説明をさせることにより、適切に算数問題を解決できるようにしてきた。算数問題の解決ステップをスモールステップに区分することで、児童が自己説明しやすいように工夫もしてきた。また、児童の自己説明は、面接形式による口頭での説明から始め、児童の説明を引き出すことが難しいことが分かったので、paper and pencilによって児童に書記させる形式に変更した。さらには、paper and pencilによる書記形式からコンピュータ利用の形式に発展させた。すなわち、コンピュータ利用による自己説明とは、コンピュータから繰り出される解決ステップの内容に、児童はコンピュータ上に示されたいくつかの自己説明の選択肢の中から正解と考える選択肢を選択し、選択された結果に対して正誤のfeedbackが与えられるcomputer-based supportによる自己説明の形式であった。

本論文の目的は、上記のように自己説明のさまざまな学習様式を工夫することで、児童の算数問題解決を育むメタ認知方略の効果を吟味してきた研究成果をさらに深化させる目的で、著者らもここ十余年にわたって取り組んできたコンピュータ利用によるメタ認知の活性化に関する研究を展望することにある。

上記の目的を達成するために、本論文では、最近のテクノロジーの発展を受けて、Azevedo and Alevenによる編集によって2013年に出版された「メタ認知と学習テクノロジーの国際ハンドブック (International handbook of metacognition and learning technologies)」(Azevedo & Aleven, 2013)と題する論文集(以下、ハンドブックと省略)に含まれるいくつかの論文を手がかりにして、筆者らのプロジェクトが推進してきたこれまでの研究成果と結びつけることにより、児童の算数問題解決を育むコンピュータ利用によるメタ認知の活性化研究を展望する。

ハンドブックは、メタ認知と学習テクノロジー

に関する最新の学際的研究成果をまとめたものである。ハンドブックは、基本的には以下の5つのテーマに関する研究成果をまとめている。

- (1) メタ認知のモデルと構成要素
- (2) 認知的知識と技能の評価とモデル化
- (3) ハイパーメディアとハイパーテキストを用いたメタ認知と学習への足場かけ
- (4) 知的チュータリングシステム (ITS) と対話のシステム
- (5) 多様なエージェントを使ったメタ認知と自己調整学習の測定と育成

本論文は、上述した5つの研究成果のなかの(1)メタ認知のモデルと構成要素、ならびに(4)知的チュータリングシステム (ITS) と対話のシステムを利用したメタ認知を組み込んだ算数・数学問題解決の内容を取り上げて、コンピュータ利用によるメタ認知の活性化に言及した関連文献を選択的にreviewした。

2 算数問題解決を促すメタ認知の活性化の方法

この節では、算数問題解決を促すコンピュータ利用によるメタ認知の活性化に関する内容を記述するに先立ち、算数問題解決を促すメタ認知の活性化についてまとめ、その後メタ認知の活性化に視点を当てた指導方法を展望する。

算数問題解決を促すメタ認知の活性化の研究については、すでにわれわれはいくつかの紀要で報告した(多鹿, 2012; 多鹿・中津, 2015, 2016; 多鹿・中津・他, 2014, 2015, 2016)。われわれがこれまでに扱ってきた算数問題は、主に手続き的な知識のみによって解決できる四則の計算問題と、問題解決に際して宣言的知識(以下では概念的知識と呼ぶ)と手続き的知識の両知識を必要とする文章題からなる問題であった。小学校教員が指摘する多くの児童が苦手とする算数問題は、一般的には文章題からなる算数問題である。以下の論述において、本論文が算数問題として言及するのは算数文章題を意味する。

さて、算数問題解決の過程は、通常2つの過程

で構成される。児童はまず算数問題を理解する過程からスタートする。次いで理解した内容に基づいて問題を解く過程に移行する。

児童が算数問題を理解するとは、問題文を読んで問題文の意味内容を理解することと、問題文に記述されている算数・数学の概念を理解することの2種類の内容を理解することである。後者の算数・数学の概念の理解とは、論理数学的な概念の理解を意味する。たとえば、割合の文章題の解決を例にとると、児童は割合の文章題を読んで記述されている意味内容を理解したとしても、適切に解くことは難しいことが多い。割合の概念（割合とは比べ（られ）る量ともとにする量の関係で構成される概念）に結びつく論理数学的な概念関係の理解を必要とするからである。このように、児童が算数問題を解決するためには、単に問題に記述された文章の意味内容を理解するだけにとどまらず、論理数学的な概念の理解を必要とする。

算数問題を適切に解決するために必要とする知識の観点から児童の算数問題解決を吟味すると、所与の文章内容の理解にかかる言語的知識や算数・数学の事実に関する知識、論理数学的な概念の理解に必要とされる算数・数学の概念的知識、言語的知識と概念的知識を統合するためのスキーマの知識、理解した内容に基づいて立式を構成する方略的知識、および立式の演算に必要とされる手続き的知識といった、さまざまな知識を指摘することができる。ただし、本来の知識の分類からいえば上記のさまざまな知識も2種類の知識に分類される（ライル, 1949/1987）。すなわち、言語的知識、算数・数学の事実に関する知識、スキーマの知識、および方略的知識は宣言的知識のカテゴリにあり、四則の演算にかかる手続き的知識は手続き的知識のカテゴリに分類される。

児童の算数問題解決を促すためには、このような知識を活性化させるための問題解決方略の適用が求められることは言を俟つまでもない。上記の知識を活性化するための方策として、これまで多くの研究では、問題解決方略として認知方略とメタ認知方略を活性化することを求めた。

言語的知識と算数・数学の事実に関する知識は所与の算数問題を理解するための読解力である。問題文を読解するために必要とされる認知方略として、リハーサルやワーキングメモリの活性化に導く記憶方略を指摘できる。リハーサルやワーキングメモリの活性化を利用することで、問題文の意味内容を理解するために長期記憶に貯蔵している知識を引き出し、何が書かれているかを理解するのである。また、メタ認知方略を活性化することによって、理解した文意が本当に書かれている内容に合致しているのか、何を求める問題であるのかを明確にするのである。

また、言語的知識と概念的知識を統合するためのスキーマの知識の活性化では、上記の問題文理解の知識の活性化だけでなく、既存の知識の活性化を必要とする。ここで必要とされる既存の知識の活性化とは、算数・数学の概念的知識の活性化である。既存知識の活性化は、問題文の理解において構成された表象と照らし合わせて、「この問題は割合を求める問題だ」や「基にする量はわかっているので、比べる量を求める問題だ」といった知識の内省的処理を必要とする。知識の内省的処理はメタ認知と呼ぶ。それゆえ、問題理解の過程における知権の活性化は、問題文の理解を児童の既存の知識に統合することで新たな既存知識を表象するための知識の活性化を必要とすることから、スキーマの知識の活性化と呼んだ。スキーマの知識の活性化には、認知方略とメタ認知方略の両方略の活性化が重要となる。

メタ認知方略を吟味した多鹿他（2016）の紀要では、算数問題解決を促すメタ認知としてメタ認知方略を取り上げた。メタ認知方略とは、メタ認知に基づく学習活動であり、認知方略を基礎とする学習活動に対比して用いられる概念である（多鹿・中津, 2009）。すなわち、メタ認知方略は認知方略を適用することによって得られた成果を、内省的なモニタリングやコントロールによって吟味する方法や活動であるといつてよい（多鹿他, 2014）。

算数（引用する論文によっては数学）問題解決

において、メタ認知を活性化するためにメタ認知を児童（引用する論文によっては生徒や学生）に指導する方法として、ここでは、①Polya (1945/1954) の発見的方法による数学問題解決モデル、②Schoenfeld (1985, 1992) の問題解決指導、③Mevarech and Kramarski (1997) のIMPROVEによる指導、を取り上げよう。

Polya (1945/1954) の発見的方法による数学問題解決モデルは、「所与の問題の未知のものは何か、与えられているもの（データ）は何か、条件は何か、条件を満足させるか、条件は未知のものを定めるのに十分であるか、あるいは不十分であるか、図を書け、適当な記号を導入せよ」といった、問題を理解したり、データと未知のものとの関連を見つけるために、似た問題を思い出せるか、役に立つ定理を知っているか、問題をいいかえることができるか、あるいは与えられた条件はみんな使ったかといった、問題を解くための計画立案であったり、問題全体を振り返ることに関係するメタ認知を活性化させることに関係する。Polyaはメタ認知といった用語は使用していないが、メタ認知は問題の理解や計画立案、あるいは振り返りにおいて導入される。

同様に、Schoenfeld (1985, 1992) は、Polya (1945/1954) の4段階からなる数学の発見的方法の解決モデルを参考にして、6つの解決ステップからなる問題解決モデルを提案し、問題解決における効果的な教授方法を明確にした。6つの解決ステップとは、読解、分析、探究、計画、実行、および確認である。それらの各解決ステップにおけるメタ認知的活動を訓練することで、数学問題解決の促進に導いた。

さらに、Mevarech and Kramarski (1997) は、成績レベルや性別を多様に組み合わせて構成した小集団の生徒の学習に対して、理解に対する自己質問、知識の関連に対する自己質問、方略に対する自己質問、振り返りに対する自己質問、を組み込んだ主に算数・数学と科学の領域で使用されるIMPROVEとよばれるメタ認知指導法を提案して実践した。

IMPROVEは、以下の(1)から(7)までの方法からなる指導段階を含む(Mevarech & Kramarski, 1997; OECD教育研究革新センター, 2014/2015)。

- (1) 導入 (Introduction) : メタ認知のプロセスを活性化させるモデルを示しつつ、新しい教材、新しい概念、問題、やり方をクラス全体に導入する。
- (2) メタ認知に基づく問いかけ (Metacognitive questioning) : メタ認知的な問いかけを、小グループでの学習や個人の学習で用いる。
- (3) 練習 (Practicing) : メタ認知的問いかけを用いて練習する。
- (4) 見直しと難しい観点を減らすこと (Reviewing and reducing difficulties) : 教師と生徒がメタ認知的な問いかけをもちいて、新たな教材を見直して難しい点を減らす。
- (5) 完全習得を達成すること (Obtaining mastery) : 高次および低次の認知プロセスを完全習得する。
- (6) 確認 (Verification) : フィードバックと修正プロセスを用いて、認知スキルとメタ認知スキルの獲得を確認する。
- (7) 深い理解を得ること (Enrichment) : 発見学習と補習により深い理解を得る。

(1)から(7)までの頭文字を組み合わせたIMPROVEの主要な構成要素は、2つ目のメタ認知にある。メタ認知による問いかけは、以下の4つの問いかけをおこなうことによって、学習者の数学の問題解決能力を高めるものである。この4つの問いかけは、上述したPolya (1945/1954) や Schoenfeld (1985, 1992) の研究成果を参考にして構成したものである。それらは、①理解に関する問いかけ：その問題はいったい何なのか。②関連に関する問いかけ：所与の問題は、以前に解いたことのある問題と同じなのか、違うのか。③方略に関する問いかけ：問題を解くのに適切な方略はどのようなものか。なぜそうなのか。④振り返りに関する問いかけ：その解き方は適切か、モニターする。行き詰ったら軌道修正して別の方

法を採す，である。

Mevarech and Kramarski (1997) は，2つの研究を通して，伝統的な授業方法に対するIMPROVEを組み込んだ授業の促進効果を見た。主だった研究は研究Iにあり，ここでは研究Iのみを紹介しよう。

研究Iでは中学1年生（7年生）を使用して，数学の成績（基本的な数学の技能と数学の推理の成績）とでIMPROVEの効果を吟味した。IMPROVEは上記の7つの方法からなる指導法であるが，基本となる構成要素はメタ認知，質問，および共同学習の3つであり，上述した4つの質問を含み，深い理解を得るためにフィードバックによる修正機能を組織的に提供する。訓練の最初は構成要素を別々に焦点づけていたが，その後は構成要素がどのように結合されるかに焦点づけがなされる。研究は，IMPROVEによる訓練群と通常の授業をおこなう統制群を1学期間通して実験的に比較した。IMPROVEの指導を経験した教師によって教えられたIMPROVE群は，代数の一般的な知識を問う問題と数学の推理を問う問題のともに学力を3段階に分けた場合においても，統制群よりもよい成績であった。特に，学力中位群の成績の上昇が，2種類の数学の問題で顕著であった（なお，研究IIでは，学力上位群の上昇が顕著であった）。

IMPROVEはイスラエルで設計されたメタ認知活性化方法であるが，広く利用されているようである（OECD教育研究革新センター，2014/2015）。

3 算数問題解決を促すコンピュータ利用におけるメタ認知の活性化

コンピュータを含めたテクノロジーを活用した学習環境として，Mayer (2010/2013) は10の分野を指摘している（Greasser, Chipman, and King, (2008) も参照のこと）。

(1) コンピュータを用いた訓練による学習環境で，コンピュータの画面に提示された内容を学習・テストされ，フィードバックを受け，ある

レベルに達した場合に次のステップに進む習熟度形式の学習環境。

(2) マルティメディアを利用した学習環境（Mayerはこの領域の研究者であり，Mayer (2009) にマルティメディア学習の詳細な分析を示す）。

(3) インターラクティブ・シミュレーションによる学習環境であり，実験や実習でよく利用される学習環境。

(4) ハイパーテキスト・ハイパーメディアによる学習環境であり，ウェブページで用いられるように，クリックできるリンクで教材が構成される学習環境。

(5) 知的学習システム（intelligent tutoring system, ITS）による学習環境で，学習者の知識を把握し，その成果に基づいて表現される学習内容を調整していく教授システムによる学習環境。

(6) 探求型学習を基礎とした情報検索ツール利用による学習環境で，たとえばウェブ検索のためGoogleを用いて学習するような学習環境。

(7) アニメーション化した教育的エージェントによる学習環境で，コンピュータ利用の学習で，画面にアニメのキャラクターを用いて学習者を案内する学習環境。

(8) エージェントを伴った仮想環境による学習環境で，自然な言語を用い，現実の人々との興隆をシミュレートする視覚的に現実的な環境のもとで実行される学習環境。

(9) シリアスゲームによる学習環境で，指導的な機能の提供を意図したゲームによる学習環境。

(10) コンピュータ利用による協調学習（Computer-Supportive Collaborative Learning, CSCL）による学習環境で，共通の課題を，学習者集団の利用によるコンピュータを介してコミュニケーションによって一緒に解決する学習環境。

また，最近の教育心理学の研究では，以前のコンピュータ利用の研究からより進んだ学習テクノロジー（advanced learning technology）の利用

による研究が報告されている（たとえば、Aleven, Beal, and Graesser（2013）編集による最近の Journal of Educational Psychology の 2013年の No. 4 に掲載されている特集論文を参照のこと）。すなわち、そこでは、さまざまな年齢層（幼児から成人、健常児者や障碍児者）や教科、あるいは学習材料を使用し、多様なテクノロジーを用いた研究結果の報告を見ることができる。

Aleven et al.（2013）が定義するより進んだ学習テクノロジーとは、①学習者、学習、および強化を理論的にも経験的にも理解しているデザイナーによって構築されたテクノロジーであること、②学習を適応的なガイドラインを与えられることで高められる学習者の複雑で構成的な活動としてとらえる観点を反映し、高い程度に相互作用を提供できるシステムであること、③学習者が学習領域の知識、学習方略の適用、および感情経験のような異なる心理学的次元に沿ってシステムが使える、学習者を評価できるシステムであること。言い換えれば、より進んだ学習テクノロジーは、学習者一人ひとりの心理学的特性にマッチした道具立てを提供できるシステムを備えているテクノロジーであるといえるだろう。これは、かつて評判になった CAI や CMI といったコンピュータ利用の学習テクノロジーをさすのではない。

児童が本研究テーマの課題である算数文章題を解決する場合においても、より進んだテクノロジーとしてのコンピュータ利用が求められるであろう。コンピュータ利用による算数文章題解決によって、より確実にかつ容易に問題が解けたのか、それはどんな学習に対してか、またどのような学習文脈においてなのか。このような問いに対する回答がコンピュータ利用においては常に求められるといえる。

ところで、メタ認知を support する環境を工夫する場合に必要なとされる構成要素（Conati, 2013）には、①望ましいメタ認知過程を scaffold するインターフェースの affordance をデザインすること、および②さらに多くのメタ認知を必要とする生徒のために、インターフェースの

scaffolding を補完する相互作用において、順向的な support を提供することが求められる。たとえば、Geometry Cognitive Tutor は幾何の問題解決中に自己説明を support するようにデザインされた ITS の一例として知られ、生徒が自由な形態の場に自己説明をタイプすることができ、その結果に対して正しい結果をフィードバックする。

コンピュータを利用する児童が、コンピュータから提示されるプロンプトに従って自己説明を積極的にこなうことで、当該の算数問題の解決を促進可能にする。ITS は、当該の学習領域の専門知識を提供し、児童の反応に基づいて児童のさまざまな特性を推論することから児童の学習モデルを構築し児童との対話を促進する環境としてよく知られている（Ma, Adesope, Nesbit, & Liu, 2014）。

ところで、ITS は、①領域固有の知識によって問題を解くことができる、②学習者に解答過程を説明できる、③学習者の誤りを推定し、学習者の理解状態のモデルを構築する、④学習者の誤りに対応した教授を提供できる、などの特徴を有している（多鹿・中津, 2015）。

このような ITS は、コンピュータによる学習訓練のシステムであり、きめの細かなレベルで学習者がコンピュータのチューターと相互作用する。人間のチューターの学習方略をまねることで、コンピュータが学習者にとって理想的な学習方略を提供する（Nye, Graesser, & Hu, 2014）。つまり、ITS は児童生徒に対してチューターの機能を果たすコンピュータシステムであり（Ma et al., 2014）、①学習情報を提示し、②質問をして学習課題を割り当て、③フィードバックやヒントを提供し、④児童生徒によって投げかけられた質問に答え、⑤プロンプトを与えて認知、動機づけ、メタ認知の変化を引き出す。⑥児童生徒の反応から推論して児童生徒の心理的な状態の多次元のモデルを構成する。

ITS の概念の構成要素は、以下の 4 点に集約される。

- (1) 情報を提示して受け取ることによって学習者とコミュニケーションするインターフェース。教材の領域（たとえば、代数）に制限されるが、インターフェースは学習者が問題を解き、情報を求めたり質問へ反応するさいに、正しい反応を作る動きを決定する。
- (2) 児童生徒が学習しようとする知識を表現する領域のモデル。モデルは論理的命題、プロダクションルール、自然言語、適切な知識表現フォーマットの集合である。
- (3) 児童生徒の知識を表現するモデル。それは質問に対する児童生徒の反応やインターフェースとの他の相互作用によって決定される。児童生徒のモデルは領域モデルの下位の集合であるが、いくつかの ITS では、児童生徒モデルは共通の誤概念あるいは児童生徒の知識のバグを表現する。
- (4) 児童生徒が正しい反応を作れなかったり、現在の児童生徒モデルをわずかに超えた知識を必要とする問題を割り当てたとき、ヒントを与えるような教授方略を表現するチューターモデル。

算数・数学の教科に限定せず、ITS によるさまざまな教科での利用に基づく 50 の論文の効果の吟味した Kulik and Fletcher (2016) のメタ分析結果では、テスト得点を .66 標準偏差分高めたことが報告されている。そこで取り上げられた ITS の効果は、ITS を使用した実験群と通常の授業を実施した統制群のテスト得点の比較に基づく結果であり、さまざまな年齢層を利用した研究である。なかでも、Cognitive Tutor による代数や幾何の研究結果も当該のメタ分析の研究資料として多く取り入れられている。

以下では、ITS を利用した研究の一環として、メタ認知方略を組み込んだコンピュータ利用による問題解決のいくつかの研究を吟味しよう（たとえば、McCormick, Dimmitt, & Sullivan (2013) を参照のこと）。それらの多くの研究は、メタ認知方略の利用が自発的に可能な高校生以上の年齢層を研究参加者として使用したものであった。

たとえば、Alevan and Koedinger (2002) は、幾何を学習する高校生を対象に、メタ認知方略として自己説明を組み込んだコンピュータ利用の環境を報告している。

Alevan and Koedinger (2002) は、自己説明を組み込んだチューターとしてのコンピュータプログラム（上述した Geometry Cognitive Tutor と呼ばれている通常の幾何の問題解決ソフトウェアに、メタ認知方略としての自己説明を組み込んだ改良版と位置づけられる。ここでは実験群とする）を作成し、高校生に幾何の問題を解かせた。

Cognitive Tutor は、Anderson らが自身の認知心理学と人工知能を結びつけて開発したもので、学習者の獲得する知識と志向の認知を計算論的にモデル化したものである (Anderson, Boyle, & Reiser, 1985)。

実験研究として、彼らは 2 群を構成した。1 つは自己説明を組み込んだ Geometry Cognitive Tutor から提示される課題を解決することで、幾何の問題を解決する実験群であった。他の群は、自己説明を組み込んでいない通常の Geometry Cognitive Tutor から幾何の問題を解決するだけの統制群であった。実験群と統制群の Geometry Cognitive Tutor は、自己説明の課題を含んでいるかないかのみが異なり、他の内容は同一であった。2 条件群ともに、プリテストとポストテストが実施された。どちらのテストも 3 種類のテスト項目で構成されていた。実験の結果、プリテストでは、3 種類のテスト項目について 2 条件群間で違いはなかった。他方、ポストテストでは、「情報が不十分」のテスト項目と、「理由づけ」のテスト項目で違いが見られ、自己説明を組み込んで構成された Geometry Cognitive Tutor を学習した実験群がよい成績であった。「情報が不十分」のテスト項目とは、生徒が幾何問題の角度を測定するに、与えられた情報が不十分であると認知できるかどうかについてのテストであった。また、「理由づけ」のテスト項目とは、生徒が Geometry Cognitive Tutor を学習したときに行ったのと同じように、テスト項目の理由づけを説明

できるかどうかを評価するテストであった。このテストは、ある意味で転移テストとして位置づけられている。

ただ、上述したように、メタ認知方略を組み込んだ ITS による問題解決の多くは、メタ認知方略の利用が自発的に可能な高校生以上の年齢層を研究参加者として使用したものであった。たとえば、Aleven and Koedinger (2002) は、幾何を学習する高校生を対象に、メタ認知方略を組み込んだコンピュータ利用の環境を実験的に実証した。

また、メタ認知を含む ITS を利用して児童生徒に算数文章題を解かせた研究として、AnimalWatch を指摘することができる (Beal, 2013)。AnimalWatch は基本的には数学の文章題を解かせるさいに中学生に適応的な教示を提供する ITS である。文章題の問題は絶滅危惧種の動物についての情報等を含む現実的な内容からなり、生徒が適切な解決方略についてのガイダンスを受けることでオンラインの相互作用を通して、問題を解決するように工夫されている。文章題は、数感覚、代数学や関数、および幾何と測定を含む小学 6 年生の代数への準備を含む問題である。AnimalWatch に含まれるメタ認知は、学習者が問題を選択したり問題解決に要する時間をコントロールしたりといった自己調整機能を含めていることである。

Beal (2013) の報告によれば、AnimalWatch を使って数学文章題を解決させたある研究では、研究参加者は 6 週間の夏季プログラムに参加し、週 2 時間国語の学習をし、週 2 時間数学の学習をした。ある群は週 1 時間、AnimalWatch で学習し、他を数学の教師について数学を学習した。第 2 群は週 2 時間数学教師について数学を学習した。夏季プログラムの数学教師は経験豊かな数学教師で、4～6 名の生徒を教えた。生徒は数学のプリテストとポストテストを受けた。プリテストは 2 群で差がなかった。ポストテストはプリテストよりもともに改善したが、AnimalWatch を利用した群 (第 1 群) が数学教師自身だけから教えてもらった第 2 群より改善の水準は高かった。

このように、メタ認知を含む ITS を利用した算数数学問題解決に参加する対象は、少なくとも一般的には、中学生あるいは高校生以上であることがわかる。

ITS に対して、Web に基づく学習環境は以下の特徴をもつ (Narciss, Koerndle, & Proske, 2013)。それらは、①多くの情報リソースに非直線的にアクセスする (すなわち、電子図書、オンラインの図書館、データベース、電子百科事典ほか)、②多様な表現によっていろんな内容をコードし貯蔵する (例えば、テキスト、図、シンボルの記号、視聴覚の形式、シミュレーション)、③聴覚、資格、あるいは視聴覚の情報処理で情報を提示 (書きテキスト、話テキスト、静止図あるいはアニメ図、シミュレーションあるいはアニメーション)、④違ったタイプの相互作用を提供 (リソースの技術的な操作、社会的な相互作用、心の取り組み)、などである。

2 節で指摘した、Mevarech and Kramarski (1997) の IMPROVE も、最近ではハイパーリンクを使って情報のノードを結びつけたウェブに基づく学習指導環境に改良されているようだ (Kramarski & Michalsky, 2013)。ウェブに基づく学習指導環境で IMPROVE を起動させるため、単にコンピュータだけでなく、ビデオ等も組み込んだ情報の多表現を含む環境で起動するように工夫されている。IMPROVE の指導の基本理念は以前と同様であり、学習領域の高いレベルでの概念的理解やメタ認知の改善を目指している。

たとえば、Kramarski and Mizrahi (2006) は、7 年生の数学の能力と自己調整学習に関するオンライン議論が効果的であるかどうかについて、4 週間にわたって研究した。研究はオンラインの有無×メタ認知の有無の 4 群で構成された。オンラインはインデックスカードに IMPROVE の手がかりをウェブで配信したものを利用して議論するものである。また、オンラインなしは、2 名の生徒が対面による議論をおこなうものである。メタ認知訓練はメタ認知的足場作りを取り入れたものである。

4 結論と今後の課題

本論文は、ハンドブックに含まれる、①メタ認知のモデルと構成要素、②認知的知識と技能の評価とモデル化、③ハイパーメディアとハイパーテキストを使ってのメタ認知と学習への足場かけ、④知的チュータリングシステム (ITS) と対話のシステム、⑤多様なエージェントを使ったメタ認知と自己調整学習の測定と育成、の5つの研究成果から、①メタ認知のモデルと構成要素と④知的チュータリングシステム (ITS) と対話のシステムを利用したメタ認知を組み込んだ算数・数学問題解決の内容を取り上げ、コンピュータ利用によるメタ認知の活性化に関する選択的な review を行った。

review の結果からわかることは、中学生や高校生の数学の授業を対象として、コンピュータ利用によるメタ認知活性化はあくまでも当該の授業過程の一環において使用される補助手段として位置づけることである。コンピュータ利用によって、算数問題のさまざまな領域の解決に必要なとされるメタ認知 (領域一般のメタ認知と、領域固有のメタ認知) を常時活性化させることは、上記の review から不可能に近い。教師は、児童が算数問題を解決するとき有用とされるメタ認知を、日々の授業の過程で、その時々必要性に応じてコンピュータ利用を取り入れて活性化すればよいだろう。

5 引用文献

- Aleven, V., Beal, C.R., & Graesser, A.C. (2013). Introduction to the special issue on advanced learning technologies. *Journal of Educational Psychology, 105*, 929-931.
- Aleven, V., & Koedinger, K.R. (2002). An effective metacognitive strategy: Learning by doing and explaining with a computer-based cognitive tutor. *Cognitive Science, 26*, 147-179.
- Anderson, J.R., Boyle, C.F., & Reiser, B.J. (1985). Intelligent tutoring systems. *Science, 228*, 456-468.
- Azevedo, R., & V. Aleven, V. (Eds.). *International handbook of metacognition and learning technologies*. New York: Springer.
- Beal, C.R. (2013). AnimalWatch: An intelligent tutoring system for algebra readiness. In R.Azevedo & V. Aleven (Eds.), *International handbook of metacognition and learning technologies* (pp. 337-348). New York: Springer.
- Conati, C. (2013). Modeling and scaffolding self-explanation across domains and activities. In R.Azevedo & V.Aleven (Eds.), *International handbook of metacognition and learning technologies* (pp. 367-383). New York: Springer.
- Graesser, A.C., Chipman, P., & King, B.G. (2008). Computer-mediated technologies. In J.M.Spector et al. (Eds.), *Handbook of research on educational communications and technology*. (3rd ed., pp. 211-224). New York: Erlbaum.
- Kramarski, B., & Michalsky, T. (2013). Student and teacher perspectives on IMPROVE self-regulation prompts in web-based learning. In R.Azevedo & V.Aleven (Eds.), *International handbook of metacognition and learning technologies* (pp. 35-51). New York: Springer.
- Kramarski, B., & Mizrachi, N. (2006). Online discussion and self-regulated learning: Effects of four instructional methods on mathematical literacy. *Journal of Educational Research, 99*, 218-230.
- Kulik, J.A., & Fletcher, J.D. (2016). Effectiveness of intelligent tutoring systems: A meta-analytic review. *Review of Educational Research, 86*, 42-78.
- Ma, W., Adesope, O.O., Nesbit, J.C., & Liu, Q. (2014). Intelligent tutoring systems and learning outcomes: A meta-analysis. *Journal of Educational Psychology, 106*, 901-918.
- Mayer, R.E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press.
- Mayer, R.E. (2010/2013). テクノロジーを活用した学習 OECD 教育研究革新センター (編) (立田慶裕・平沢安政 (監訳)) 学習の本質－研究の活用から実践へ－ (pp.211-232). 明石書店
- McCormick, C.B., Dimmitt, C., & Sullivan, F.R. (2013). Metacognition, learning, and instruction. In I.B.Weiner (Editor-in-Chief), W.M.Reynolds & G.E.Miller (Vol. Eds.), *Handbook of psychology*

- Vol. 7: *Educational psychology* (2nd ed., pp. 69-97). Hoboken, NJ: Wiley.
- Mevarech, Z.R., & Kramarski, B. (1997). IMPROVE: A multidimensional method for teaching mathematics in heterogeneous classrooms. *American Educational Research Journal*, 34, 365-394.
- Narciss, S., Koerndle, H., & Proske, A. (2013). Challenges of investigating metacognitive tool use and effects in (rich) web-based learning environments. In R.Azevedo & V.Aleven (Eds.), *International handbook of metacognition and learning technologies* (pp. 243-260). New York: Springer.
- Nye, B.D., Graesser, A.C., & Hu, X. (2014). Multimedia learning with intelligent tutoring systems. In R.E.Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed., pp. 705-728).
- OECD 教育研究革新センター (編) (篠原真子・篠原康正・髪岩 晶 (訳)) (2014/2015). *メタ認知の教育学—生きる力を育む創造的数学力—* 明石書店
- Polya, G. (1945). *How to solve it: A new aspect of mathematical method*. Princeton, NJ: Princeton University Press. (柿内賢信 (訳) (1954). *いかに問題をとくか* 丸善)
- ライル, G. (1949). *The concept of mind*. London: Hutchinson. (坂本百大・宮下治子・服部裕幸 (訳) (1987). *心の概念* みすず書房)
- Schoenfeld, A.H. (1985). *Mathematical problem solving*. New York: Academic Press.
- Schoenfeld, A.H. (1992). Learning to think mathematically: Problem solving, metacognition, and sense making in mathematics. In D.A.Grouws (Ed.), *Handbook of research on mathematics teaching and learning* (P. 334-370). New York: MacMillan.
- 多鹿秀継 (2012). 算数問題解決における転移を促すための方策 神戸親和女子大学大学院研究紀要, 8, 23-32.
- 多鹿秀継・中津榎男 (2009). 算数問題解決と転移を促す知識構成の研究 東京: 風間書房
- 多鹿秀継・中津榎男 (2015). 児童の算数問題解決におけるメタ認知方略使用を支える学習環境の吟味 神戸親和女子大学大学院研究紀要, 11, 47-56.
- 多鹿秀継・中津榎男 (2016). 児童の算数問題解決におけるメタ認知方略使用の活性化 神戸親和女子大学大学院研究紀要, 12, 1-10.
- 多鹿秀継・中津榎男・加藤久恵・藤谷智子・堀田千絵・野崎浩成 (2011). 自己説明と算数・数学の問題解決 神戸親和女子大学研究論叢, 44, 97-108.
- 多鹿秀継・中津榎男・加藤久恵・藤谷智子・堀田千絵・野崎浩成 (2014). 児童の算数問題解決とメタ認知方略の評価 神戸親和女子大学研究論叢, 47, 35-45.
- 多鹿秀継・中津榎男・加藤久恵・藤谷智子・堀田千絵・野崎浩成 (2015). 児童の算数問題解決を育むメタ認知方略の吟味 神戸親和女子大学研究論叢, 48, 1-10.
- 多鹿秀継・中津榎男・加藤久恵・藤谷智子・堀田千絵・野崎浩成 (2016). メタ認知方略としての自己説明の特性 神戸親和女子大学研究論叢, 49, 1-10.
- Tajika, H., Nakatsu, N., Neumann, E., Nozaki, H., Kato, H., Fujitani, T., & Hotta, C. (2012). Mathematical word problem solving in children engaged in computer-based metacognitive support: A longitudinal study. *Educational Technology Research*, 35, 11-19.
- Tajika, H., Nakatsu, N., Nozaki, H., Neumann, E., & Maruno, S. (2007). The effects of self-explanation as a metacognitive strategy for solving mathematical word problems. *Japanese Psychological Research*, 49, 1-9.

6 付記

本研究は、2016年度 (平成28年度) 科学研究費補助金 (基盤研究 (C), 課題番号: 26380912) の補助を受けて実施したものである。

7 注

- 1 神戸親和女子大学
- 2 愛知教育大学
- 3 兵庫教育大学
- 4 武庫川女子大学短期大学部
- 5 関西福祉科学大学