

学習課題の内容分析とそれに基づく学習支援システム設計・開発：算数を事例として

平嶋 宗*

Content Analysis and Development of Interactive Learning Environments: In Case of Arithmetic

Tsukasa Hirashima*

This review introduces a series of researches of interactive learning environments for arithmetic based on analysis of learning content as a promising approach to realize advance learning and teaching activities on ICT infrastructure. In the content analysis, problems used in exercises are analyzed and modeled them with structural representation. Then, learning and teaching activities are designed based on the modeled problems. In this review, as concrete researches, structurization of calculation problems of fraction in order to diagnose erroneous answers is described as the first one. Then, a framework of structurization of arithmetical word problems and a function of problem explanation are reported. Moreover, several systems of problem-authoring and learning by problem-posing designed based on the framework are introduced.

キーワード：内容分析, Information Structure Oriented, 算数文章題, 学習支援システム, ICT 基盤

1. はじめに

本稿では、筆者がこれまで行ってきた算数を対象とした学習支援システムに関するいくつかの研究事例を取り上げ、それらが、「学習課題の内容分析とそれに基づくシステムの設計・開発」というアプローチで一貫したものであったことを述べる。ここで報告される学習支援システムは、主に算数の文章題の分析に基づいて設計されたものであるため、特定の学習課題に対してのみ有効な事例研究であるといえることができる。しかしながら、内容分析とそれに基づく学習支援システムの設計・開発の一連の手順は異なる学習課題においても適用可能といえ、また、行っている学習課題の内容分析も、計算機でも取り扱い可能な情報構造を取り出すことを目指したものとなっているため、一般的な授業を前提とした分析よりは詳細であり、学習支援システムの設計・開発との関係が明示的なものであるという特徴を持っている。学習支援システムを設計開発する、という研究においては、元々、(1)利用すべき、あるいは開発すべき情報技術、(2)それによって設計できる、あるいは設計すべきシステム、そして(3)目指す

べき、あるいは目指すことのできる教育・学習活動、はそれぞれ密接に関連しあっており、すべてを考慮することが求められてきたといえる。教育・システム・情報という研究分野を多様な分野がそれぞれ独立して存在する「モザイク」として捉えるのではなく、それらを融合する「るつぼ」として捉えるならば、「学習課題の内容分析とそれに基づく学習支援システム設計・開発」は、その融合を促す有力なアプローチになるのではないかと筆者は考えている。

対比できるアプローチとしては、情報技術シーズベースと教育ニーズベースのアプローチがあるであろう。情報技術シーズベースにとって教育・学習活動は、既にある情報技術を効果的に活用する場であり、その活用によってこれまでなかった新しい教育・学習活動を実現することが指向される。教育ニーズベースであれば、教育・学習活動の場におけるニーズ、つまり解決が求められている課題を見つけて、それを解決するものとして情報技術・システムの設計開発を行うことになり、具体的な課題の解決が指向されることになる。

どのアプローチにおいても、課題分析、技術シーズ、教育ニーズは十分に検討されるべきであり、またより高度な教育・学習を実現しようとしているという目標の点で一致していることから、これらはみな、教育・システム・情報という同じカテゴリに属する研究である。しかしながら、研究のプロセスにおいては重視している側面はそれぞれ異なっており、研究を行う、あるいは研究を評価する際には、どのアプローチを基本としているかを把握することは重要であるといえる。

本稿で述べる学習課題の内容分析からのアプローチは、しばしば個々の教科・学習課題に特化した研究、あるいは事例研究であるとみなされており、他のアプローチに比べて、教育・システム・情報の立場から採用される度合いが低いといえる。本稿を通して、その可能性と有効性を明らかにすることができればと考えている。以下本稿では、「学習課題の内容分析とそれに基づく学習支援システムの設計開発」を行ってきたといえる先人の研究事例をいくつか紹介し、歴史的にみれば学習・教育を情報工学的に捉えた場合の基本的なアプローチの一つであったことを示したうえで、筆者の行った一連の研究をこのアプローチに沿ったものとして説明する。まず、計算問題において発生する誤りの原因を、計算問題の持つ構造において捉えようとした研究について述べる。この問題を構造として捉えるという考え方を文章題に対して適用し、問題間の関係や問題の難易を構造に基づいて説明しようとした研究事例を次に報告する。また、問題が構造で表現できるとすると、この構造を組み立てることで、問題を作ることができることになる。このような着想に基づく研究として、教授者側による問題作成に関する研究と、学習者に問題を作らせる作問学習に関する研究事例を報告する。

2. 関連する研究事例

2.1 情報構造指向

最初の知的な学習支援環境（知的 CAI / ITS）とされている SCHOLAR^①では、学習対象である地理に関する知識を意味ネットワーク構造で表わし、その構造に基づいて対話的な学習支援方法を設計開発している。

この研究においては、地理に関する知識を習得することが学習課題であり、意味ネットワークを用いることで習得対象となる知識の構造を分析・表現している。そして、地理に関する知識がそのような意味ネットワーク構造を持っているとしたうえで、どのような対話が学習に有効であろうかということが検討されている。このアプローチにおいては、教育・学習における有効性は当然ながら研究の目標となっているが、従来から行われている教育・学習活動からの発想ではなく、学習課題の構造分析からの発想であり、またその発想を実装可能な情報技術の存在を前提としたものであるといえる。Carbonell^②は、このアプローチを情報構造指向（information-structure oriented）と呼び、従来から行われている教育・学習活動を手本として、それを電子化することを目指すアプローチをアドホックフレーム指向（ad-hoc frame oriented）と呼んで対比している。ここでの学習課題の分析では、コンピュータによって処理可能な情報の構造を取り出しており、更にその構造から教授の方法が導かれている。教授・学習に関する研究が、その学習課題がどのようなものであるか、どう表現されるべきかといった、存在論的な取り組みによっても成果をあげ得ることを示した点で、非常に重要な取り組みであったといえる。また、Carbonell らは、意味ネットワーク構造で表現した知識を用いた教育・学習的な対話を追求する過程で、不完全な知識からの推論法（plausible reasoning）や因果推論（causal reasoning）といった認知科学や人工知能において現在でも重要なテーマとなっている問題提起を行っており、このことも、学習・教育を表面に現れる活動としてだけでなく、その活動を支えている何らかの存在についての本質的検討を行うことが、より発展的な問題提起につながることを示唆している。

2.2 マインドストーム

プログラミング言語 Logo を開発し、構成的な学習の重要性と計算機を用いたその促進の可能性を示したことで知られる Papert は、その著書である MINDSTORMS : Children, Computers and Powerful Ideas^③において、知識を構成的に獲得することを助ける学習環境を設計する上で、知識や思考を

記述し概念化するといった人工知能研究のアプローチおよび知見が不可欠であることを繰り返し述べている。たとえば、「第6章 頭に入る大きさに砕いた強力な概念」、「第7章 ロゴの根源：ピアジェと人工知能」といった章を設けており、それらの中で、「知識を「頭に入る大きさ」に砕いて考えること」、「より伝達しやすい、同化しやすい、簡単に組み立てやすい」ものになる(訳書 p.199)としている。そして、このような概念あるいは知識を見つけること、それらを教育・学習に活用すること、さらに、そのための道具としてコンピュータを使うことの重要性を述べている。加えて、これらの試みは、「コンピュータ化」ではなく、「考えるための新しい概念的な枠組みを作ったのである」(訳書 p.213)としている。Carbonell の知的学習支援システムの考え方と、Papert の構成主義的な考え方は対照的なものとして捉えられることが多いが、学習という活動をどのように捉え、また、情報技術をどう活用して、どのようなシステムを作っていくのかという観点でみると、「学習課題の内容分析とそれに基づく学習支援システム設計・開発」という点で本質的には同じであると解釈することも可能である。なお、Papert は、教育のために計算機で取り扱い可能な新しい概念的枠組みを作る作業がそれに見合った評価を受けにくいことを指摘しているが、(訳書 p.217)、この懸念は本稿の執筆動機と合致するものといえる。

2.3 学習科学からの取り組み

「学習」は極めて高度な人の心の働きであり、したがって、心理学や認知科学における重要課題であることは明らかである。しかしながら、「学習」、特に教育の対象となっている学習は、多種多様な要因が複雑に関係している場合が多く、またそれらを統制することが難しい上、事例的な側面が強いといえる。このため、心理学あるいは認知科学の題材としては必ずしも扱いやすいものではなかったといえる。これに対して、敢えて「学習」における心の働きを研究対象として取り上げようという分野が学習科学である。そして、この学習科学はより効率的でより深い学習の実現を目指す意味で、学習支援を含んだものとなっているといえ⁶⁾、本稿で述べるアプローチを含んだものと考えることができる。敢えて区別するとすれば、学習科学はやはり

科学、であるのに対して、「学習課題の内容分析とそれに基づく学習支援システム設計・開発」は合目的性を持った工学であるという点であろう。学習科学においては、学習活動が適切に説明されることが重要となるが、「学習課題の内容分析とそれに基づく学習支援システム設計・開発」においては、教授者あるいは学習者に対する新規性として従来の方法では実現できなかった学習活動を行えることが必要となり、また、有効性として学習効果を得ることができることが求められる。つまり、黒板とチョーク、ノートと鉛筆では実施しがたいことを実施可能にすることが求められることになる。このような道具の提供の立場に立った場合、学習についての工学が成立するであろうと思われる。

3. 算数を対象とした研究事例

以下では、筆者が行った一連の研究事例を学習課題の内容分析とそれに基づく学習支援システムの設計・開発という観点から報告する。

3.1 計算問題の構造分析とそれに基づく誤りのモデル化

計算問題に対する誤答は、ランダムに発生するものではなく、特定の規則性を持っていることが知られている。この規則性を誤った計算手続き(バグ)の存在として説明する認知的なモデルがバグモデル⁴⁾である。さらに、このバグがどのようにして獲得されるに至るかを説明する試みが、問題解決の「行き詰まり」とその行き詰まりを脱却するための「間に合わせ方略」の適用によってバグを生成するリペア理論である⁶⁾。この一連のバグに関するモデル化は、人の問題解決活動の計算モデル化の試みとして最も重要な成果の一つである⁶⁾。しかしながら、これらのモデルでは、誤りの原因であるバグは基本的に固定的なものとされており、それらをどのように修正するかに関する示唆はあまり得られなかったといえる。さらに、実際に発生する誤答の多くはそれほど固定的なものではなく、簡単に修正されるとともに、簡単に再発するといったものであり、このような現象を十分に説明するものではなかったといえる。

固定的なものとされているバグによる誤答も、現れ

たり現れなかったりすることからバグによるものではないとされる誤答も、結果としての誤答だけでは区別できない。また、そのような誤答においても、元の問題をみれば、どういった計算を行ったかを想定することができるものが多い。このように考えると、問題を解く過程での若干の問題解決のズレとして誤りをモデル化し、その固定化の程度としてバグを捉えるのが適当ではないとの発想のもとに提案されたのがプロセス駆動型モデル推論法である⁹⁾。この推論法では、(1)問題を解釈し、(2)利用する計算手続きを特定し、(3)その計算を実行する、といった過程を定義し、その過程に対して若干の変更(摂動)を加えることで、正しくない問題解決を実施し、その結果として誤答を導く。この推論を実現するために、問題および計算手続きの構造的な記述と、その構造に基づく摂動を実現している。この推論法では、問題及び計算手続きの構造を保ったまま、その構造中のインスタンスの抽象化と具体化による置換えとしての摂動を行うだけで、分数の計算間違いに対して行われた人手による誤答分析研究事例において説明可能であるとされている誤答のほとんどを再現できている。

この方法では、正しい問題解決過程から、正しく記述された概念の抽象具体の階層構造に沿った抽象化と具体化といった一般則に沿った摂動を行うことで誤りを生成でしている。このため、あらかじめ数多くの誤答を収集するといった作業は必ずしも必要ではなくなる。さらに、誤答を単純に間違いとして否定するのではなく、誤答が導かれるプロセスを説明でき、さらに対応する正答を導くプロセスおよび両者のズレを説明することができる。たとえば、図1の誤答事例1は、演算子の階層構造と計算手順の抽象具体構造を用いて、足し算の場合にも掛け算の場合と同様に分母同士および分子同士を演算する計算手順を導き、それを用いて計算を実行することで生成できる。このように誤りを捉えたと、この誤答に対して演算が足し算であること、および掛け算の場合と同じ計算手順が用いられていることを指摘することが、誤りに気付かせ、修正させるための基本的な指導法となる。図1の誤答事例2は、演算子の階層構造と問題の抽象構造を用いて、元の問題を掛け算の問題に変えて計算することで導くことができる。そしてこの誤答に対しては、掛け算の場合と

比較して誤りを説明することができる。解答の履歴や個々の知識構造の特性についてはモデル内に組み込んでないため、精度と精密さにおいては十分とはいえないものの、近似的な誤答のモデル化とそれに対する指導方法の提案としては価値のある結果と考えている。

学習者の誤答に対して、学習者の計算手順が成立するような解釈を見つけ、その解釈が妥当かどうかを学習者自身に考えさせるといった視点は、以降に筆者が行った誤りの可視化に関する研究につながった⁸⁾。また、問題解決プロセスを摂動させるという方法は、他の幾つかの課題領域においても適用されている^{9,10)}。以下本稿では、問題の構造化に焦点を絞ってさらにいくつかの研究事例を報告する。

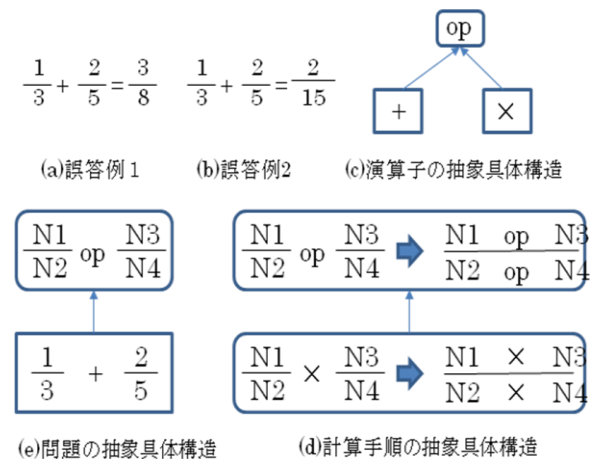


図1 誤答事例と問題および知識の構造的表現

3.2 文章題の構造分析と問題の分類

3.2.1 問題理解過程のモデル化

計算問題では、問題の表現自体が定式化されたものとなっており、その問題表現そのものが数学/算数的に処理すべき構造であるということが出来る。これに対して文章題においては、問題表現自体は自然言語で記述されていることから、算数/数学的に処理すべき構造をその自然言語表現から取り出す過程が必要となる。この過程はしばしば問題理解過程⁽¹¹⁾と呼ばれており、算数の文章題の学習において、最も重要な過程とされている。この過程を記述するモデルの一つとして提案されたのがMIPS(Model of Indexing in Problem Solving)である⁽¹²⁾。このモデルでは、文章題に含まれている概念や数量を関係づけて統合した表現を初期間

題理解ネットワークと呼んでおり、これによって問題構造を表わしている。そして、文章題を解くために用いられる解法は、その解法が適用可能な問題構造を表わす解法インデックスとその解法インデックスが満たされた場合に実行される計算手順、により構成されるとしている。問題理解過程は、解法インデックスと照合できる問題理解ネットワークを生成する過程として表現される。

図2に鶴亀算の基本問題と鶴亀算の解法を用いた場合の計算手順を示した。この問題文から抽出される初期問題理解ネットワークは、図3のようなものとなる。この問題理解ネットワークでは、オブジェクト、属性、および属性値の三つ組みを基本関係と呼び、この基本関係の連結として構成されている。ここで、図3の初期問題理解ネットワークの数値の部分を変数にしたものを解法インデックスとすると、鶴と亀に関しての様々な匹数の組み合わせに対応することができるが、それ以外の概念で構成された問題に解法を適用することはできないことになる。鶴亀算の解法を適用可能であるためには、同様の問題構造を持っているはずであり、したがって3.1で述べた撰動の際において行ったのと同じように構造の構成要素の抽象化を行うことで、ある抽象レベルでこの解法インデックスとの一致をみることができるとはならずである。MIPSでは、図4のような解法インデックスの階層構造を用意しておき、問題理解ネットワークの概念を抽象化することで、この階層構造中のいずれかの解法インデックスと一致を見つけ、解法が適用可能であると判定する。この抽象化操作によって、「タコとイカの問題」や「鉛筆と消しゴムの問題」などに対しての鶴亀算の解法の適用を判定できる。このことは、ある解法が適用できる二つの問題があれば、その二つ問題は解法インデックスの階層構造においてある抽象レベルで一致することになる。この一致の抽象レベルが高いほど、その二つの問題を構成する概念は異なっているといえ、構成概念の観点からの問題の分類の根拠となる。なお、システムによる問題の自動診断においては、診断する問題を構成する数量を基本問題中の数量関係に対応付けた上で、基本問題中の数量間で成立していた演算関係が、その問題を構成する数量においても成立するかどうかを数量間の演算関係知識を用いて検証する(たとえば、「鉛筆

の集合における鉛筆の数」×「鉛筆1つあたりの鉛筆の値段」=「鉛筆の集合の値段」)。

ここまでは解法を適用する上で必要な概念および値が全て問題に明示的に現れていることを前提としたが、明示的には与えられていない情報を問題理解ネットワークに追加する必要がある問題も存在する。たとえば、図2の問題文において、「鶴の足が2本である。亀の足の本数は4本である」の2文を含まない例を考えてみる。この場合、問題から得られる初期問題理解ネットワークは、図3のネットワークから該当する鶴と亀のそれぞれの1匹あたりの足の本数に対応する部分を除いたものとなる。この除かれた情報を鶴亀算の解法を適用する上で必須であり、したがってこれらの部分が欠けたままでは解法を適用することはできない。この場合、これらの情報は一般的な常識として学習者が知っていることを前提とすると、問題中に明示しなくても既有知識を用いて問題理解ネットワークに付加可能であるということが出来る。これを「事実知識を用いた基本関係の付加操作」と呼んでいる。この付加操作により生成される問題理解ネットワークは、抽象化操作によって解法インデックスと照合することができる。MIPSではこのような問題を1次問題と呼んでいる。

次に、「演算関係を用いた基本関係の付加操作」が必要となる場合を説明する。図5の問題2の場合、この問題に明示的に現れている要素だけで構成される初期問題理解ネットワークは、図5の実線部分だけとなり、「足の総本数」に相当する「食塩の量」が含まれておらず、鶴亀算の解法を適用することができない。鶴亀算の解法を適用するためには、この「食塩の量」を問題理解ネットワークに付加する必要があり、その付加は「食塩水の量×食塩濃度=食塩の量」という数量関係の知識を用いることで、破線部分のように行うことができる。これを「数量関係知識を用いた基本関係の付加」と呼んでいる。破線部分を含んだ問題理解ネットワークは、抽象化操作によって解法インデックスとの照合を行うことが可能となる。MIPSではこのような問題を2次問題と呼んでいる。

このように問題理解過程を問題理解ネットワークの構築と解法インデックスとの照合としてモデル化することで、同じ解法で解けるすべての問題は、解法イ

ンデックスの階層構造中のある抽象度において同じものとみなすことができる. したがって, この階層構造において問題を構成する各概念要素間の対応付けが可能となる. たとえば, 食塩水の問題を構成する概念が, 鶴亀算の基本問題を構成する概念のどれと対応しているのかを指摘することができ, さらにその解決過程を鶴と亀の問題に対して行った手続きと対比しながら説明することができる. また, 基本関係の付加が行われた問題理解ネットワークは, その基本関係を元々持っていた問題についての初期問題理解ネットワークと一致する. したがって, 基本関係の付加が行われた問題理解ネットワークを自然言語に変換することで, 問題理解過程における基本関係の付加操作をなくしたという点で単純化されている問題を生成することができる. 特定の解法とその解法に関する基本問題, 概念の階層構造および基本関係の付加操作を用意するといった, 正しい問題解決のために必要な問題の構造化と知識の用意を行うことで, このような説明を自動的に取り出すことができるという点で意義のある成果であったと考えている⁽¹³⁾. なお, この問題の構造化に関する直接的な発展としては, より複雑な問題構造内および問題間の構造を持つ力学問題を対象として行っている一連の研究をあげることができる^(14,15).

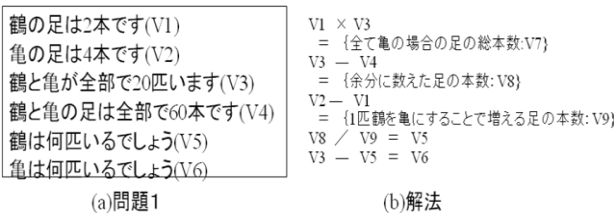


図2 問題例と解法

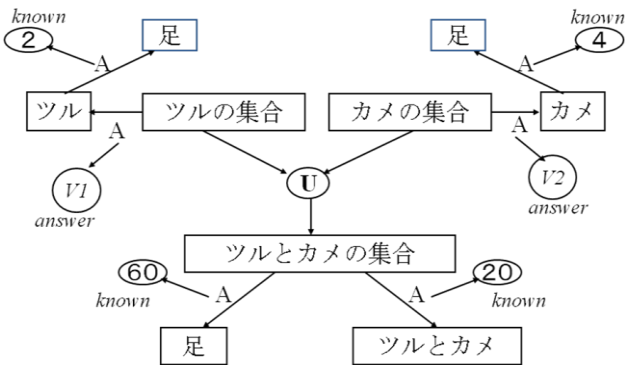
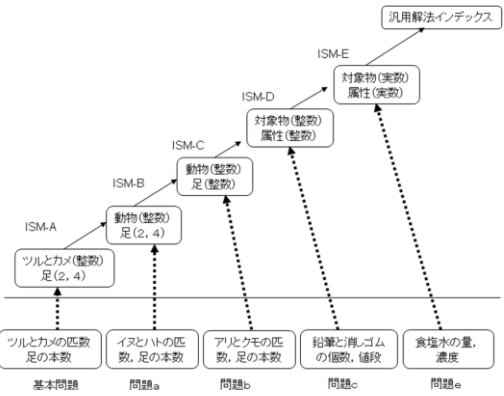
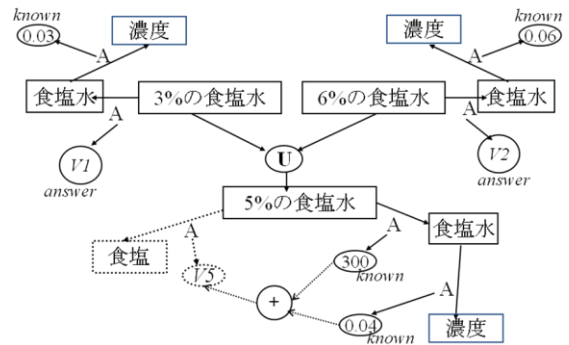


図3 問題理解ネットワーク/解法インデックス



3%の食塩水と6%の食塩水を混ぜると, 300gとなり, 濃度は4%になりました. 3%と6%の食塩水はそれぞれ何グラム混ぜたでしょうか

(a)問題2



(b)問題理解ネットワーク

図4 解法インデックスの階層構造

図5 問題例2

3.2.2 問題のメタデータと問題オーサリング

MIPS では, ある解法で解けるある問題を, 基本問題との差分として表現していることになる. この差分としては, (1)構成要素の違いと, (2)構成要素の有無, つまり基本関係の付加操作の要不要, の2種類がある. ある解法とその解法インデックスを指定した上でこれらの差分を与えると, その問題は特定されることとなり, これらの情報が問題のメタデータとして使えるということになる. このような性質を利用して, 一般ユーザによる文章題のメタデータの作成支援ツールも実現している⁽¹⁶⁾. 図6がそのツールのインターフェースとなる. 入力フィールドには基本問題の構成要素が入力されている. ユーザはこの要素を新しい問題の構成要素に書き換える. たとえば, 「鉛筆と消しゴムの本数と値段」の問題を作るのであれば, 「鶴」と「亀」を「鉛

筆」と「消しゴム」に書き換え、「亀の足の数」や「鶴の足の数」を、それぞれ「鉛筆の値段」や「消しゴムの値段」に書き換える。これによって、新しい問題の構成要素が基本問題の構成要素と対応付けながら与えられたことになる。さらに、もし基本関係の付加が必要な場合には、入力フィールドに存在するある基本関係を与えないという選択をすることができる。このような選択をすると、その基本関係を付加するための操作をさらに入力することが求められる。演算関係による付加が選択された場合には、その演算関係を入力するとともに、その演算を実施する上で必要となる基本関係の追加も行うことができる。たとえば、タコやイカの問題を作る場合であれば、タコやイカの足の本数は事実知識による付加と指定し、問題中には明示的に現れないものと指定することができる。また、図5の問題2のような食塩水の問題の場合であれば、食塩水の量と濃度から食塩の量を導く演算関係を入力するとともに、基本問題には対応するものが含まれていない、「できた食塩水の濃度」の追加が行われる。このように基本問題の書き換えとしてある問題を入力することで、その問題のメタデータを獲得することができ、その入力された問題に対しても3.2.1で述べたような問題の解説を行うことができるようになる。なお、この問題オーサリングにおいては、解法インデックスの階層構造に関しては未対応となっている。

図6 問題オーサリングツール

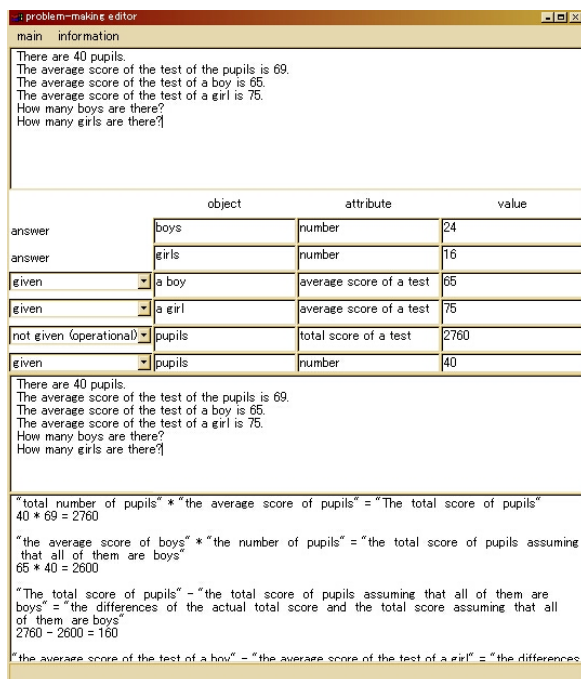
3.3 問題を作ることによる学習

3.2.1では、内容分析に基づいて得られた問題の構造的表現をシステム内での処理に用いていた。3.2.2では、この構造を教授者側が取り扱える可能性を示した。さらにこの構造を学習者に組み立てさせる試みとして行ったのが「問題を作ることによる学習」の支援システムに関する研究である。問題解決演習においては、与えられた問題は既知の解法を用いて解決可能であることが前提であり、したがって、与えられた問題が知っている解き方のどれに当てはまるかだけを考えればよいことになる。このため、なぜその解き方が適用できるか十分に理解していなくても、ある程度問題が解けることになる。これに対して、ある解法で解ける問題を作ろうとした場合、その解法が適用可能な問題の性質を十分に知っていなければ、問題を作ること自体が難しく、また、不適切な問題を簡単に作成してしまうことになる。このため、問題を作ることによる学習は、問題解決演習よりも難易度の高い学習活動であり、また、学習効果も見込めるものとされている⁽¹⁷⁾。

ここでは、ある解法で解ける問題の構造のモデル化に基づいていることから、ある解法で解ける問題を作成させるといった解法ベースの作問学習が対象となる。システム化としては、作問学習の個別対応が指向されている。以下では、具体的な作問学習支援のシステム化として、単文テンプレートを用いて鶴亀算等の比較的サイズの大きな解法が適用される問題の作問とその診断を実現した試み、対象をより実践的な和差の演算に絞って問題テンプレート方式で実現した試み、および現在取り組んでいる単文統合方式による作問の試みの三つの研究事例について報告する。

3.3.1 単文テンプレート方式

作問学習支援の最初の試みとして、3.2で述べたような構造表現で表される鶴亀算等の算数の文章題を対象とした作問学習支援環境であるPOP-Aを開発した⁽¹⁸⁾。問題理解ネットワークは基本関係（オブジェクト、属性、属性値の三つ組み）の連結として表現されるが、POP-Aでは、問題理解ネットワークを構成する基本関係の組を作成することとして、作問を行わせている。基本関係は単文を使って表現できるので、単文



中においてオブジェクト, 属性, 属性値といった基本関係の構成要素を空欄とした単文テンプレートと, その空欄を埋めるために使うオブジェクト, 属性, および属性値を用意することで, 基本関係の作成を行わせることができる. このような作問形式では, 学習者は提供されたものの選択・組み合わせとして問題を作ることになるが, これは, ある解法の定着を作問の目的とした場合, 妥当であろうと考えている. また, この方式は作問における学習者の負担を軽減するとともに, 計算機による自動診断を可能としている. このような組み立てとしての作問は, 以降の作問学習支援においても採用されており, また, 同様の考え方を概念マップに適用した KitBuild 概念マップに関する研究にもつながっている(19).

図7は POP-A のインターフェースである. インタフェース左下にあるのが単文テンプレートである. インタフェース左上方に, 「ツルカメ算」「ツルカメ算の基本問題を作問しましょう」という表記があるが, これが作問課題となっている. その下が作成された問題であり, 六つの基本関係で構成されている. その右には, この問題の診断結果が表示されている. 下中央に単文テンプレートのオブジェクトと属性の位置に入れることのできる概念が用意されている. 右下のテンキーは属性を入力するために使われる.

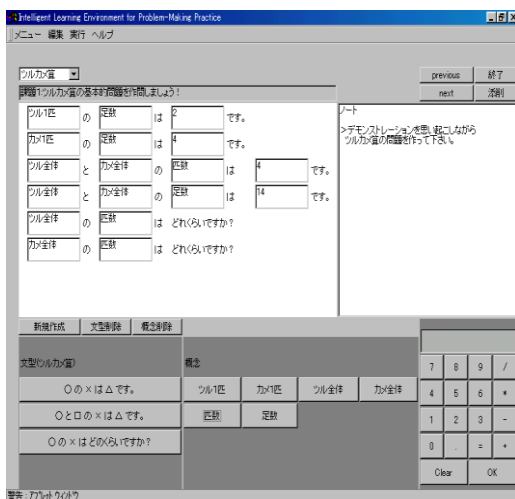


図7 POP-Aのインターフェース

POP-A はいくつかのツルカメ算のほか, 和差算や過不足算などを対象として実装されており, 大学生による試験的な利用を通して, (1)テンプレート用いた作

問, と(2)システムによる問題診断・フィードバック, といった算数の文章題を対象としたインタラクティブな作問学習活動の可能性が示された. しかしながら, ツルカメ算等の文章題の学習が必ずしも一般的ではなかったことと, テンプレートを用いて単文を作っていくという作業が柔軟性はあるものの負荷の大きな作業であったこと, などのため教育の現場における利用には至らなかった. 教育現場での作問学習の実現を目指して, 算数の文章題の最も初期の課題である1回の和もしくは差によって解ける問題の作成を対象としたのが, 問題テンプレート方式を用いた POP-B であり, これは次頁で述べる.

3.3.2 問題テンプレート方式

1 回の和や差で表現される演算関係は, 被演算数, 演算数, および演算結果数の三つの数で表現される. これは, それぞれ一つの数を表す三つの文で構成することができる. また, 和や差の文章題の学習は, どのような状況において和あるいは差が使えるかを理解し, 和差の演算を使いこなせるようになることである. このことは, 三つの文で表現される様々な状況と和や差を用いて演算との関係を考えさせるような演習が意味を持ってくることを示唆している. そこで, 三つの文で構成される問題のテンプレートをあらかじめ用意しておき, その空欄に概念や数値を入力することで作問させるのが, POP-B(20,21)である.

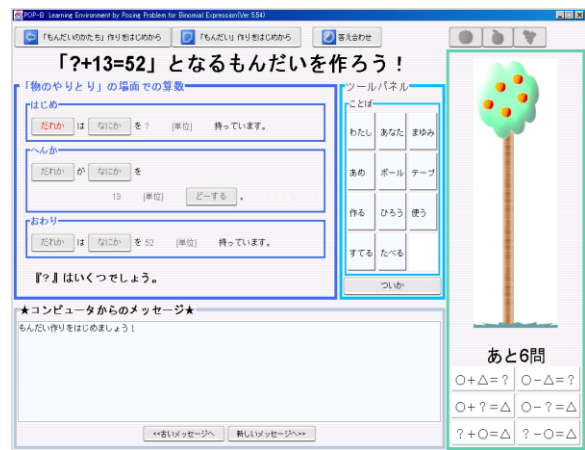


図8 POP-Bのインターフェース

POP-Bのインターフェースを図8に示した. 「? $+13=52$ 」を表す問題を作ることが課題となっている. 問題は「はじめ, へんか, おわり」の三つの文で構成さ

れ、それぞれの文において概念を追加すべき位置が決まられている。これが問題テンプレートである。入力すべき概念を右にあるツールパネルから選んでいくことで問題を作成することになる。作られた問題に対しては、問題として成立しているか、課題となる式に対応しているかなどの診断が行われる。

このPOP-Bは、4年間で計41時限の授業で利用され、750名の小学生4, 5, 6年生が本システムを用いた作問活動を行った。また、学習効果に関して、作問能力の向上、情報過剰問題の解決能力の向上などとして測定することができた。これらの結果、問題の構造化に基づく学習支援システムが、教育現場において実践的に利用できることを示している。この一連の研究は、内容分析に基づいて発案された学習活動とそれを可能にするいわゆる知的学習支援システムが、教育の場において実践的に利用され、学習効果が測定されたという点では、少なくとも日本においては最も初期の例に属するといえる。

3.3.3 単文統合方式：モンサクン

問題テンプレート方式での作問を実現することにより、教育現場でも実践的に利用できる作問学習支援システムを実現したことがPOP-Bの意義であったが、低学年での利用については無理であるというのが教育現場における判断であった。このため、既に学習が終わったことについての補足的な学習としての位置づけであった。これを算数の文章題の学習の重要なステップとするためには、より低学年で実施可能なものとしての作問活動の実現が求められる。そこで現在筆者らが考案したのが単文統合型の作問であり、その実装システムがモンサクンである^(22,23)。単文統合型の作問では、学習者に対してそれぞれ何らかの数値を表わす幾つかの単文が与えられ、そこから適切なものを取捨選択し、適切な順序に並べることで問題を作成することになる。

文章題の解決過程を、変換過程、統合過程、プラン化過程、実行過程、の四つに分け、このうちの前の二つの過程を問題理解とし、特に統合過程が文章題の解決における最も重要な過程であることは、既に多くの研究において指摘されている^(24,25)。ここでは、変換過程は問題を構成する各文を読んで言語的に理解することであり、いくつかの文の意味を統合して算数としての意味を取り出す過程が統合過程であるとされている。

このような基本的な合意に基づけば、個々の文についての言語的な理解はそれほど重要ではなく、それらを統合して算数的に理解することが重要であるとする事ができる。したがって与えられた単文を取捨選択し、算数として意味を持つように統合する単文統合による作問は、この統合過程に学習者を注力させる活動になっているということができる。

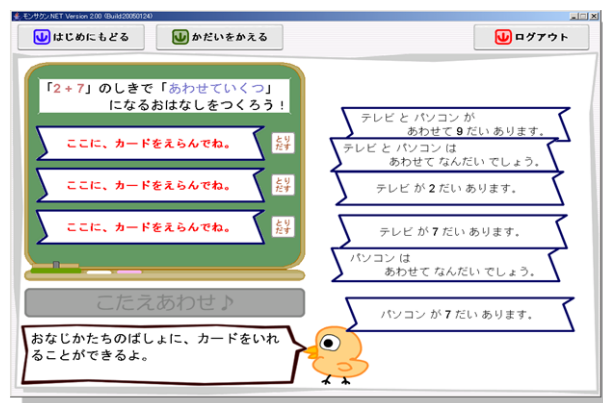


図9 モンサクンのインターフェース

図9は単文統合型の作問学習支援システムモンサクンのインターフェースである。モンサクンでは、POP-Bと同様に三つの文で一つ問題が構成されるが、この三つの文は、更に二つの存在文と一つの関係文で構成されるとしている。存在文はある数の存在を示す文であり、たとえば、「リンゴが5個あります」、「ミカンが?個あります」といった文となる。関係文とは、存在文で現れされる二つの量の関係を表わす文であり、増える、減る、合わせる、比べる、の四つに分類されている。この四つは和差の算数の文章題の分類そのものとなる。そして作問課題としては、この問題の種類と関係式（ここでは、変数一つ含んだ和もしくは差の2項演算の等式）が与えられ、問題の種類と関係式を満たす問題を与えられたカードより作成することが学習者の行う作問活動となる。このモンサクンは、3年間に渡って、673名の小学校1, 2, 3年生が47時限授業利用し、また、2ヶ月間3クラスの教室に各2台のノートPCを置いておき、自由に使ってもらおうという形式で99名が利用した。これらの研究を通して、低学年においても作問活動が実施可能であり、また、学習効果がみられることを確認している。これは、作問学習がその課題自体を学んでいる段階においても取

り組むことができる可能性を示しているという点で大きな意義があったと考えている。

3.3.4 計算式からの作問：モンサクンⅡ

モンサクンでは、関係式からの作問を行わせていた。この場合、問題の構造を十分に意識していなくても、関係式に沿って数値を並べるといった方法をとることである程度作問することができてしまう。和差の算数文章題の解決において学習者が困難を感じやすいのは、関係式と計算式（問われている問題の答えを計算するための式）が異なっている場合である。たとえば、「 $5 + 3$ 」を計算して8を導く問題としては、関係式が「 $5 + 3 = ?$ 」となるもの以外に、「 $? - 5 = 3$ 」, 「 $? - 3 = 5$ 」, となるものがあり、後の二つは、問題が減る問題もしくは比べる問題であり、引き算を示唆しているにも関わらず計算が足し算となることで、混乱しやすい問題となっている。この計算式からの作問におけるタスクのモデルを整理し、それに基づいて設計・開発されたのがモンサクンⅡ⁽²⁶⁾である。

計算式からの作問まで扱うことで、1回の和もしくは差で解ける文章題の要素はすべて含まれたこととなり、作問演習としての量及び質が大幅に向上したといえる。このため、モンサクンでの授業利用は2時限が限度であったが、モンサクンⅡでは、4年生1クラス(39名)による7時限の利用、2年生1クラス(39名)による6時限の利用、1年生1クラス(39名)による9時限の利用を行っており、また、これらの作問演習を通して学習者の作問能力の向上がみられることを確認している。このうち1年生の利用に関しては(2011年度実施)、タブレット、無線LAN、サーバを用いた、通常教室での運用に成功している(タブレット版モンサクンをモンサクン Touch と呼んでいる)⁽²⁷⁾。図10はこのモンサクン Touch の利用風景である。

3.3.5 問題構造の教授の試み

過去のモンサクンの実践利用の多くは、モンサクンを用いた追加的な演習としての位置づけであり、教師による授業とは切り離された形で行われていた。これに対して、最近の実践利用においては、教師がモンサクンで利用されている問題の構造自体を教える価値のあるものとして学習者に伝える試みを始めている。いままでシステムの内部処理のためのものであった問題

構造が、直接教授の対象となりえることを示唆している。モンサクンで取り扱われている問題構造を教え、その構造を意識的に利用した作問活動を行わせるといったモンサクンと授業の連動が成立すれば、モンサクンの利用場面は飛躍的に拡大すると思われる。現在、小学校教諭と共同でモンサクンを取り込んだ形での指導案作りが進行中である⁽²⁸⁾。

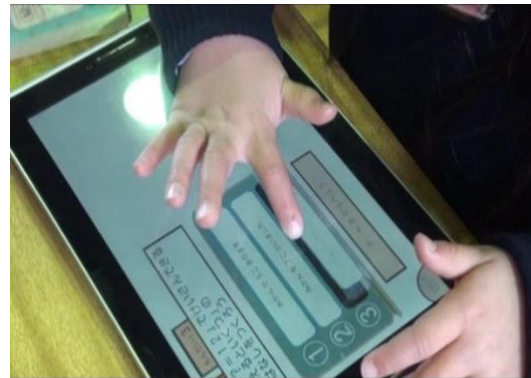


図10 モンサクン Touch の利用風景

4. まとめ

本稿では、筆者が算数を対象として行ってきたいいくつかの研究事例が、「問題」の構造を分析し、そこから様々な教授活動・学習活動を考案し、その活動を実現する支援システムを設計・開発する、といったアプローチに基づく一連の研究として位置付けられることを述べた。学習課題を限定して研究することは、一般性や発展性が少ないのではとみられることも多い。事例研究がしばしば事例に留まるのは、その事例においてよくみられる教授活動や学習活動といった比較的表面的といえる事象の観察・分析に焦点を当てているからではないだろうか。これに対して、たとえ事例を対象としていても、その事例が内在する構造を中心に分析することで、様々な教授活動や学習活動をその構造に準拠して提案することができる場合があることは、本稿で述べた一連の研究で示されているといえるであろう。この対比は、Carbonellの述べた、ad-hoc frame oriented と information structure oriented にそのまま対応するであろう。

社会一般における情報インフラの整備が急速に進むことに伴って、教育現場における情報基盤の整備も

必然として進むであろうと思われる。教室でのタブレット利用や教科書の電子化,そしてLAN接続の普及も時間の問題といえる。したがって,これらの情報インフラに依ることが教育・学習としてどのような価値を持つのかを示すことが,情報・システムを用いた教育・学習の促進に関する研究の喫緊の課題ではないかと考えている。情報インフラが整備されてしまえば,情報インフラを用いること自体の意義は小さなものとなり,その情報インフラの上で,黒板とチョーク,ノートと鉛筆ではできない,そして価値の高い何ができるのかが問われることになる。この問いに答えるためには,学習課題の内容分析が重要な役割を果たすであろう。本稿が,「学習課題の内容分析とそれに基づく学習支援システム設計・開発」という研究アプローチへの関心の喚起に寄与すれば幸いである。

参考文献

- (1) Carbonell, J. R.: Ai in CAI: an artificial intelligence approach to computer-assisted instruction. IEEE Transaction on Man-Machine Systems, Vol.11, No.4, pp.190-202(1970).
- (2) Papert S.: Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas, Basic Books (奥村喜世子訳: マインドストーム—子供, コンピューター, そして強力なアイデア, 未来社(1982))
- (3) 三輪和久, 斎藤ひとみ: 学習科学に基づく学習/教育支援システムの設計と実現, 教育システム情報学会誌, Vol.21, No.3, pp.145-157(2004).
- (4) Brown, J. S., Burton, R. R.: Diagnostic models for procedural bugs in basic mathematical skills. Cognitive Science, 2, pp.155-192(1978).
- (5) Brown, J.S., VanLehn: Repair Theory: A Generative Theory of Bugs in Procedural Skills, Cognitive Science, 4, pp.379-426(1980).
- (6) VanLehn, K.: Mind bugs: The origins of procedural misconceptions. Cambridge, MA: MIT Press (1990).
- (7) 平嶋宗, 中村祐一, 上原邦昭, 豊田順一: 認知的考察に基づく知的 CAI のための学生モデルの生成法—プロセス駆動型モデル推論法, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.73-D-II, No.3, pp.408-417(1990).
- (8) 平嶋宗, 堀口知也: 誤りからの学習」を指向した誤り可視化の試み, 教育システム情報学会誌, Vol.21, No.3, pp.178-186(2004).
- (9) 舟生日出男, 穂山雅史, 平嶋宗: 問題解決プロセスを利用した選択問題の誤選択肢および解説の自動生成, 電子情報通信学会 D, Vol.93-D, No.3, pp.292-302(2010).
- (10) 小川 修史, 松田憲幸, 平嶋宗, 瀧寛和: Prolog による解法知識を用いた誤答解説文付き多肢選択問題の生成, 教育システム情報学会論文誌, 30, 2(2013)
- (11) G.ポリア: いかにして問題をとくか, 丸善 (1975).
- (12) 平嶋宗, 中村祐一, 池田満, 溝口理一郎, 豊田順一: ITS を指向した問題解決モデル MIPS, 人工知能学会誌, 7,3, pp.(1992).
- (13) 平嶋宗, 河野隆宏, 柏原昭博, 豊田順一: 算数の文章題を対象とした問題演習支援機能の実現, 電子情報通信学会 A 分冊, Vol.J75-A, No.2, pp.296-304(1992).
- (14) Tsukasa Hirashima, Toshitada Niitsu, Kentaro Hirose, Akihiro Kashihara and Jun'ichi Toyoda, "An Indexing Framework for Adaptive Arrangement of Mechanics Problems for ITS", IEICE Trans. Inf.& Syst., Vol.E77-D, No.1, pp.19-26(1994).
- (15) 大川内 祐介, 上野 拓也, 平嶋 宗, 派生問題の自動生成機能の開発とその実験的評価, 人工知能学会論文誌, 27 卷, 6 号 A, pp.391-400(2012).
- (16) 平嶋 宗, 梅田 多一, 志岐 隆弘, 竹内 章, "XML を用いた算数の文章問題の作成・共有環境", 教育システム情報学会誌, Vol.18, No.3, pp.284-296(2001).
- (17) Silver, E.A., Cai, J.: An Analysis of Arithmetic Problem Posing by Middle School Students, Journal for Research in Mathematics Education, Vol.27, No.5, pp.521-539(1996).
- (18) 中野 明, 平嶋 宗, 竹内 章, "「問題を作ることによる学習」の知的支援環境", 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J83-D-I, No. 6, pp.539-549(2000).
- (19) Yamasaki, K., Fukuda, H., Hirashima, T., Funaoi, H.: Kit-Build Concept Map and Its Preliminary Evaluation, Proc. of ICCE2010, pp.290-294(2010).
- (20) 中野 明, 平嶋 宗, 竹内 章, "演算の理解を指向した知的作問学習支援環境", 人工知能学会論文誌, Vol. 17, No.

- 5, pp. 598-607(2002).
- (21) 中野 明, 柳原 健志, 平嶋 宗, 岡本 真彦, 竹内 章, "和と差の二項演算に関する作問学習支援環境利用による算数能力への影響調査", 日本教育工学会論文誌, Vol.28, No.3, pp.205-216(2004).
- (22) 横山 琢郎, 平嶋 宗, 岡本 真彦, 竹内 章, "単文統合としての作問を対象とした学習支援システムの設計・開発", 教育システム情報学会誌, Vol.23, No.4, pp.166-175 (2006).
- (23) 横山 琢郎, 平嶋 宗, 岡本 真彦, 竹内 章, "単文統合による作問を対象とした学習支援システムの長期的利用とその効果", 日本教育工学会論文誌, Vol.30, No.4, pp.333-341 (2007) .
- (24) Kintsch, W., Greeno, J.G.: Understanding and Solving Word Arithmetic Problem. Psychological Review, 92-1, pp.109-129 (1985).
- (25) Mayer, R.E.: Frequency norms and structural analysis of algebra story problems into families, categories, and templates. Instructional Science, 10, pp.135-175 (1981).
- (26) 倉山めぐみ, 平嶋宗: 逆思考型を対象とした算数文章題の作問学習支援システム設計開発と実践的利用, 人工知能学会論文誌, Vol.27, No.2, pp.82-91(2012).
- (27) 山元翔, 神戸健寛, 吉田祐太, 前田一誠, 平嶋宗, "作問学習支援システムモンサクンのオンライン・タブレット化と実践運用 — 一般教室での教師による運用を指向して —", 人工知能学会研究会資料 SIG-ALST-B103_pp25-31(2012) .
- (28) 山元翔, 神戸健寛, 吉田祐太, 前田一誠, 平嶋宗, "算数の文章題を対象とした問題構造の教授とその確認としての作問: 小学1年生を対象として", JSiSE2012 第37回教育システム情報学会全国大会, C5, (2012) .

学大学院工学研究科教授. 人間を系に含んだ計算機システムの高度化に関する研究に従事. 工学博士. ED-MEDIA95・ICCE2001・ICCE2002 Best paper awards. AIED2009 honorable mention award, 2008・2009年度教育システム情報学会論文賞等受賞. 人工知能学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 教育システム情報学会, 教育工学会, 日本教育心理学会, IAIED, APSCE 各会員.

著者紹介



1986年大阪大学工学部応用物理学専攻卒業, 1991年同大学院博士課程了, 同年同大産業科学研究所助手. 同講師, 九工大・情工助教授を経て, 2004年より広島大