

情報科学からの教材研究の試み

計算論的思考を指向した内容のコンピューテーショナル化

平嶋宗^{*1}, 林雄介^{*1}

^{*1} 広島大学大学院工学研究科

Investigation of Learning Contents from Information Science

Computationalization for Computational Thinking

HIRASHIMA Tsukasa^{*1}, HAYASHI Yusuke^{*1}

^{*1} Department of Engineering, Graduate School of Hiroshima University

In Open Information Structure Approach, a learning content is described as an operable information structure. The information structure is then provided to a learner as operable external representation. The operations for the external representation can be interpreted as corresponding the learner's thought on the content. Furthermore, the representation and operations can be expected to encourage computational thinking because they should be defined computationally. In this paper, this approach is described as an investigation of learning contents from information science and computationalization of learning content.

キーワード: 教材研究, 計算論的思考, ホワイトボックス, 思考の外在化

1. はじめに

本稿は, 知的学習支援の研究において行われてきた教材知識に関する研究を, 計算論的思考を促進するための教材のコンピューテーショナル化として位置づけよという試みであり, また, 学習・教育に対する情報科学的なアプローチの一つとしても位置付けることができるのではなかとの考察である。

学習者に与える課題の中には, どのように考えれば解けるかの説明が, 論理的で具体的には用意されていないものがしばしば存在していると著者らは考えている。たとえば, 方程式を用いて答えとなる値を導く数学の文章題がその典型である。答えや答えを導くための方程式は明らかであり, 教える側はその方程式を代数的に説明することはできるであろう。しかしながら, 学習者がその方程式を立てるまでにどのように考えればよかったかについて説明するのは容易ではないはずである。少なくとも, 教材においてその過程を論理的かつ具体的に説明しているものは見当たらない。問題文をちゃんと読めばおのずから方程式が導かれる, という説明は, 学習者が具体的にどのようにすればよいかを説明しておらず, 論理的でもない。また, そのプロセスを計算機でも実行可能な処理として記述する試みは, 学術的な研究としての評価が与えられているこ

とからも(Hirashima 2015), この過程の説明が自明ではないことはいえるであろう。文章の読解や講義の理解も, 教える側は当然のことのように要求するが, 文章や講義の内容を読解する・理解するとはどのようなことを指すのかについては, 学習者が真似することができるように説明することは簡単ではないといえる。

Open-end な課題, と宣言した場合には, 教える側も答えがわからないという建前があるので説明できなくても許されることになりそうだが, Closed-end な課題の場合は, 説明できることがその課題を与える前提であろう。しかしながら, 答えを導けることは確かであろうが, 課題から解答を導くまでの過程を論理的かつ具体的に説明すること, 別の言い方をすると, 学習者がまねして同じことを行えるように説明すること, つまり worked example を提供すること, が困難な場合が多々あると思われる。

これらのことは, 「できること」と「わかっていること(≒説明できること)」が異なっていることに対応している筆者らは考えている^{*1)}。この違いは, 認知科学や知識工学における重要な研究課題の一つであり, これまでも多くの知見が積み重ねられている。たとえば, 適応的熟達者と固定的熟達者の分類(波多野 1990)は, この課題における重要な知見といえる。しかしながら教育・学習支援の文脈においては, この違

いは必ずしも重要な研究課題とはなっていないようである。この違い自体を科学として明らかにしたい認知科学や、計算機上でのシミュレーションを目指した知識工学と違い、人を対象とした教育においては優れた知的能力を持った学習者が対象である。このため、説明できない部分は学習者自身が補完することができる場合があり、また、そのような補完ができる学習者が優れた学習者であるとして大きな間違いがなかったことが、この違いが重要視されてこなかった理由の一つ考えられる。しかしながら、このことは、「選抜としての教育」や「分かるよりも解けることを重視する教育」につながっているといえる。

近年の世界的な動向である 21 世紀型スキルの重視や、学習指導要領における「知識・技能」だけでなく「思考・判断・表現」が大事であるとする国内の傾向などは、単に「解ける」のではなく「分かったうえで解ける」の必要性を示しており、この必要性に対応した新しい教育・学習の支援の在り方が求められている。このような要請への対応として、多くの場合、「分からないと解けない課題」を設定するが多い。前述の Open-end な課題は、この文脈においてしばしば言及される。教える側でさえどう遂行してよいか分からない課題を遂行できたとすれば、分かったうえで解けたと推定できる、という解釈と思われる。

このような動向に対して筆者らは、単に Open-end な課題を行わせるだけでは、「選抜」や「解けること重視」を脱却できないのではないかとの考えを持っている。これは、「分かる」の解明が後回しにされているからである。成功的教育観(沼野 1984) に立てば、「分かる」を明らかにすることを抜きにして、「分かる」を助けることは困難であるといえる。このため、Open-end な課題を用いた教育は、教師が意図したように教育活動を行えたかどうかを重視する意図的教育観に基づくものとなりがちである。また、「分からないとできない課題」は、一般的に「分からなくても答えを解ける課題」よりも複雑であり、したがって、学習

者はより複雑な課題に対して、より高度で教えられてもいない活動を求められることになる。つまり、(1) 内容と活動の双方を一度に複雑化する、(2) 求められる活動についての情報提供ができていない、ことにならないかとの問題意識である*2)。

筆者らは、このような問題点に対する一つのアプローチとして、単純な課題を「分かる」を求める課題に変換する方法を研究してきた。つまり、課題の内容的な複雑さは変えないまま、その内容に対する活動を、より高度なものにするという考え方である。たとえば、算数文章題を対象とした作問学習が事例となる。対象となる課題(算数文章題)の構造は、解く場合であっても作る場合であっても同様であり、内容の複雑さは変わらない。しかしながら、解く場合にはさほど吟味する必要がなかった問題が解けるための条件を、作る場合には十分に吟味する必要がある。筆者らは、問題構造の再構成としての作問の学習環境を実現し、実践も行っているが、多くの場合学習者の作問活動は、ある程度の試行錯誤を持った探索的なものとなり、作問の経験を経ることで、より効率的な探索に変わっていくことが観測されている。また、問題解決などの通常の測定手段による学習効果も観測できている。図1は、このような考え方を図式化したものであり、筆者らが作ろうとしている課題は、内容的には Closed でありながら、「思考・判断・表現」を必要とする「探索的組み立て課題」であるとしている。なお、ここでの課題は、学習用の課題であると考えており、測定用の課題、つまりいわゆる「テスト」を意図していない。

Open-end な課題		論述・レポート・話し合い・作品
Closed-end な課題	ペーパーテスト(に対応する演習問題)	探索的組み立て課題
	知識技能	思考・判断・表現

図1 課題の分類

*2) 「学習」は学習者が行うものであり、「教える」は学習に資する情報の提供であるとの立場である。この立場では、どのように詳細に教えようとも、学習者がそれについて考え、経験しなければ、学習は起きないことになる。詳細に教えることがよくない結果を生むのは、教えること、つまり情報提供自体ではなく、提供された情報の活用が十分に行われていないからであることになる。

*1) ここで、「分かっていること」を「説明できること」と近似している。解けることは答えを導くことで観察できるが、分かっていることは人の内部状態なので観察ができない。分かっているれば説明できると近似すれば、説明は観察可能であることから、ここでは、説明できるとこととしてわかっていることを捉える。

本稿では、筆者らがこれまで行ってきた教科の中で学ぶ内容の「情報構造化」とその情報構造の「組立課題化」(平嶋 2015; 平嶋 2018; Hirashima 2018)の試みを、情報科学からの教材研究の一つの試みと位置づける。そして、組立課題化可能な情報構造化が教材のコンピューテーショナル化になっており、その組立課題が計算論的(コンピューテーショナル)思考を促す課題になっているとの考察を行う。

本稿ではまず、教材を情報科学の立場から分析するための考え方について概説する。さらに、知的学習支援における教材知識(教材の知識化)に関する研究を教材のコンピューテーショナル化と捉えたうえで、知的学習支援の最初の実現例とされる Scholar で提唱された情報構造指向アプローチ(Carbonell 1970)を教材のコンピューテーショナル化の方法として位置づける。次に、情報構造指向アプローチにおいてはシステムが参照するものであった情報構造を、組立課題化することで、学習者による情報構造に対する操作としての思考を外在化することを指向したオープン情報構造アプローチについて概説し、事例を紹介する。そして、このアプローチを、これまで教科の中で用いられてきた課題を計算論的思考(Computational Thinking, 以下では単にCTと呼ぶ)のための課題に変換する方法として位置づける。

2. 情報科学からの教材の分析

情報科学とは、物事を物質としてではなく、情報として捉えようとする学問の一つである。物質ではなく情報を中心に扱っているといえる学問分野は他にも数多く存在するが、情報科学では、情報の「記述」とその記述された情報の「計算」を定めることを求める。この計算は一般的には計算機的な処理や数学的な処理を指すが、認知科学や記号的人工知能における情報処理アプローチでは、人の思考を「記号の計算」として捉える(往住, 2013)ことから、この人による情報の表現と処理もその対象となる。なお、この情報処理アプローチでは、人が処理対象とする情報の記述をしばしば「表象」と呼び、入力となる表象から、出力となる表象を取り出すまでが、ここでの計算過程となる。この際、実際には表象を作る過程も必要であり、

これも計算として考えることができるが、一般には別の過程として取り扱われる。本稿でもこの過程は取り扱っていない。

一方、教材は、「教育目的を達成するために、児童・生徒の学習に供する素材」(松村 2006)であり、この素材は物質的な場合と情報的な場合があるといえる。教材を情報としての素材提供であるとする、教材を用いた学習者の活動は、情報処理アプローチの基では、情報に対する計算として記述する対象となる。ここで学習とは、「経験による比較的永続的な行動の変容」あるいは「経験によって知識を増すこと」とされており(細谷 1990)、「経験」が学習の結果としての「行動の変容」や「知識」を決めることになる。そして情報処理アプローチの基では、この経験を情報に対する計算として記述できる。もしこれらが記述できれば、教材が促進しようとした学習や、教材に対する個々の学習者の活動の良し悪し、さらに教材自体の良し悪しの分析が可能となる。このように考えると、情報科学からの教材の研究は、多くの可能性を有しているといえる。本稿では、教材の情報としての表現とその計算の仕組みを記述することを教材のコンピューテーショナル化と呼ぶ。

情報としての教材には様々な形態がありえるが、本稿では「学習者が遂行することを求められる課題」、を検討の対象とする。学習者に何らかの課題を遂行させるのは、その遂行の経験が学習に資するものであると想定されるからである。ここでこの遂行を情報の処理に限定すると、この経験は思考の経験であるといえることができる。つまり、学習における課題は、学習者にある思考を経験させることを指向して作成されたものといえることができる。

しかしながら、課題が求める思考はしばしば明示的に記述されておらず、したがってブラックボックス状態にあったとって良い。この思考を明示的に記述すること、つまり課題に対する思考を記述的で計算的なものにするをコンピューテーショナル化と本稿では呼ぶ。ブラックボックス状態のプロセスを、手順を追った処理として記述することは、しばしばホワイトボックス化と呼ばれているが、ここでの教材のコンピューテーショナル化はプロセスのホワイトボックス化と同義である。たとえば、算数の計算課題は、その課題の表

現としての数式は明示的であり, その計算方法も定まっているので, すでに計算課題はコンピューショナル化されているといえる. しかしながら, 算数の文章題の場合においては, 問題文の記述に対してどのような操作を行うことによって計算式が取り出せるのかについては, 明示化されておらず, 文章題はコンピューショナル化が行えているとはいえない. 方程式を立てる数学の文章題の場合でも, 方程式を立てるまでの過程はブラックボックス状態であり, 同様のコンピューショナル化が必要といえる. また, 何かの文章を読んで理解する, あるいは設問に答える, といった課題の場合においても, 理解やその理解に基づく回答を導く過程はブラックボックス状態であり, 教材としてコンピューショナル化されていないといえる*3).

3. 教材のコンピューショナル化

3.1 知的学習支援における教材知識

知的学習支援をシステムティックに実現するうえで, (I) 教材に関する知識, (II) 教授法に関する知識, (III) 学習者に関する知識, をシステムに持たせることが必要であるとされている(大槻 1986). このうち教材知識は, 学習対象に対する知識表現自体であり, 知的支援を実現するうえでの中心的知識となる.

最初の知的学習支援システムとされる Scholar (Carbonell 1970) は, 記憶のモデルとして提案された意味ネットワーク (Quillian 68)を用いて地理に関する知識を記述し, その記述した意味ネットワークに基づく質問生成と学習者の応答の診断を実現することで, 学習者による地理に関する知識獲得を支援している.

Carbonell は, まず教える内容を明確に記述し, その記述に基づいて教え方や学習者の状態のモデル化を考るといったアプローチを, Information-Structure Oriented Approach (情報構造指向アプローチ)と呼び,

*3) なお, 同じプロセスであってもその記述の仕方によって行われるコンピューショナル化は異なってくるといえるが, 本稿ではこの問題は取り扱わない. この同一プロセスに対する異なったコンピューショナル化の存在は, 情報の基本要素を何と決定するかという知識工学におけるグレインサイズの決定の問題であり(来村 1998), どのグレインサイズが適当であるかは, 学習・教育の文脈に依存することになる. したがって, コンピューショナル化によって何が出来るかを明示化しておけば, あとは運用において考えるべき問題であるとの立場を本稿ではとる.

それ以前の CAI において採用されていた, 教師が行っている教授活動を分析・単位化し, 計算機上を実現する方法を Frame-Oriented Approach として対比している. この試みは, 意味ネットワークに基づく質問応答を実現していることで, 教材をコンピューショナル化していることになる.

Clancey は, 世界で最初の実用レベルの能力を持ったエキスパートシステムとされる MYCIN の知識ベースを教材として診断法の教授を行う GUIDON (Clancey 79) の設計・開発を通して, 人が学ぶ対象とするためには, 人にとってわかりやすい知識とする必要性に気づき, その知識の再構成 (NEOMYCIN) とその知識を用いた教授システムである GUIDON2 およびそのような知識を構築してゆくためのシェル HERACLES といった一連のシステムの設計・開発を行った (Clancey 86). この試みも, エキスパートシステムと学習者が両方利用可能な診断知識の構築を試みていることから, 教材のコンピューショナル化といえる.

また, 学習者に関する知識の動的な獲得である学習者モデリングとして有名な Buggy や Debuggy などのバグモデル (Wenger 1987) は, 対象とする計算技能を手続き的に記述したうえで開発されたものである. 教授法としての対話戦略に焦点を置いた大槻らの研究も, 教材を異なる粒度の意味ネットワークが互いに関係づけられた多層世界として記述することで, 多様な対話を実現している(大槻 1984). これらの研究も, 教材の内容を学習者と共有できる意味において処理できるようにすることで, 知的な機能を実現しており, 教材のコンピューショナル化であると位置づけることができる.

3.2 電子化と情報化および情報化のレベル

ここでは本稿でのコンピューショナル化の位置付けをより明確にするために, 教材の計算機処理の様々な形態を, (1)電子化と(2)情報化, そして情報化を(2-1)外的特性と(2-2)内的特性, によるもの, さらに内的特性を(2-2-1)キーワードレベルと(2-2-2)構造レベルに分けて説明を試みる. 電子教科書や一般的な eLearning 教材も, 例えば, 電子デバイスでの表示や複製の容易さ, あるいはネットでの配信など, 計算機処理が可能になっているといえる. しかしながら, こ

れらは、計算機処理のための教材の電子化は行っているが、教材の内容に関係した処理は行われていないことから、教材の情報化であるとは言えないと筆者らは考えている。項目応答理論や統計的手法を用いた教材選択は、教材の正解率などのデータに基づいて教材を処理しており、教材の内容に関する処理であるとみなすことができるので、情報化にあたるかと考えている。しかしながら、教材の内容に対する外的な評価が処理対象となっており、外的特性による情報化と分類している。教材内容に含まれる単語を用いた教材のインデックス付けやそれを用いた類似度判定などの処理は、教材の内容自体を取り扱っており、内的特性に踏み込んだ処理になっていると思われるが、処理対象はキーワードであり、一般性はあるものの、教材固有の特性を十分に取り扱っているとは言えない。

単なるキーワードではなく、それら間の意味的關係まで扱うことを構造レベルと本稿ではするが、このレベルの処理によってはじめて教材がその意味を含めて処理可能になる。本稿ではこのレベルでの処理を行えるようにすることを、教材のコンピューショナル化、と呼ぶ。ここでのコンピューショナルの意味は、コンピューショナル・シンキングに対応するものとして用いており、その構造及び処理が計算機においても人においても同じ意味で処理可能であることを前提としている。3.1 で述べた情報構造指向アプローチは、このための具体的な方法の一つとなる。

4. オープン情報構造アプローチ

4.1 枠組み

筆者らはこれまでに教材の知識表現に関する研究を行ってきており(平嶋 2015)、算数数学の文章題(平嶋 1992)や力学問題(Hirashima 1994)といった解決課題や、IS-A 階層意味ネットワーク(柏原 1995)で表現可能な内容に対する説明課題などを対象とした知的支援において成果を上げている。これらは、解決課題や説明対象についての記述を計算機処理の対象としているだけでなく、人にとっても理解可能な知識表現となっており、本稿の意味での教材のコンピューショナル化をなっている。しかしながら、これらはシステムが参照して用いるものとなっており、学習者が

その知識表現を直接的に利用する仕組みはなかった。

情報処理アプローチに基づいてコンピューショナル化された教材であれば、その記述を学習者に提示し、操作可能なものとするので、学習者に外的なプロセスとして、情報処理アプローチに沿った処理、つまり思考を行わせることができるのではないという考え方が、オープン情報構造アプローチである。このアプローチにおいては、情報構造が外的表象として学習者に提供されるため、認知負荷の軽減とメタ認知の活性化が期待できる。システムとしても、従来は暗黙的であった思考のプロセスが外在化されることになるため、思考のセンサリングとして機能することが期待できる。このセンサリングに関しては、システムだけでなく、他の学習者や教師にとってもある学習者の考えが読み取りやすくなることを意味しており、説明する行為や議論の活性化に資するような結果が得られている。図2は、外的表象(外在化された情報構造)を用いた思考のイメージ図である。

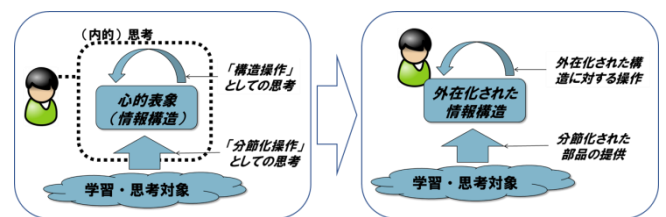


図2 思考外在化のイメージ図

以下本章では、算数・数学の文章題の事例を紹介する。この事例は、ドメインの本質的特性に基づいた情報構造を用いており、ドメインについての強力な推論を可能にしている。ドメインに依存した情報構造を作成することができれば、同一の情報構造から、様々な課題(例えば、問題作成・変更・比較、そして、様々な条件での問題作成など)を容易に作成することができる。本章では、この教材作成に関しても言及する。

なお、本稿では分量の関係で省略するが、初等力学問題の事例は、算数・数学の文章題と同様である。これも本稿では述べないが、キットビルド概念マップの例では、「内容を理解し、質問に応答する」といった従来はブラックボックスであったプロセスと、概念マップの組立と、概念マップの内容に沿った質問の解釈と応答、というか形でホワイトボックス化している。情報構造としてはドメインに依存しない形式での情報構

造の記述となっている。このため、比較的容易に情報構造を記述することができるが、推論能力は乏しいものとなっており、元の情報構造からの課題作成の点では劣ることとなる。

4.2 算数・数学文章題

4.2.1 問題解決過程

言語で記述された状況を数学的記述に変換して答えを導くのが算数・数学の文章題である。ここでは、言語で記述された問題を算術式あるいは代数式に変換して解く問題を取り扱う。この問題解決の解決過程を、(1)理解過程と(2)実行過程に分け、さらに理解過程を、言語から問題解決に必要な要素を抽出する(1-1)変換過程と、要素を組み立てて問題の構造を明らかにする(1-2)統合過程、実行過程を、処理の方法を決定する(2-1)プラン化過程と、処理を実行する(2-2)実行過程、としてモデル化することが広く受け入れられている(ポリア 1975; Hegarty 1995)。図3はこのプロセスモデルの図式化である。



図3 文章題を解くための四つの下位過程

筆者らは、算数・数学の文章題の理解過程を、言語からの量命題の抽出と、量命題の組み合わせ、としてモデル化したうえで、このモデルに基づく問題解決の支援機能の開発を行ってきた(平嶋 1992a, 1992b)。

図4は、鶴亀算における統合過程の結果となる。

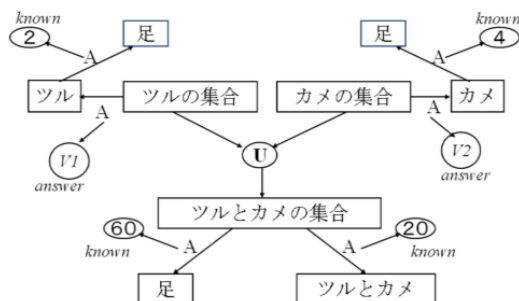


図4 鶴亀算の問題の統合過程生成物の一表現

これらの研究では、これらのモデルは知的な学習支援を実現するための教材の記述として用いられていた。この表現を学習者が操作可能にしようとしたものが、

モンサクン(平嶋 2015)、および三角ブロック(Hirashima 2015)である。以下本節ではそれぞれについて説明する。

4.2.2 モンサクン

モンサクンは、1回の四則演算で解ける算数文章題の作問学習支援システムであり、学習者は提供された量命題を表す文(単文)を取捨選択し、組み合わせることで、文章題を作成する。作成された文章題は量命題の組み合わせとして正誤判定が可能であり、個別診断・フィードバックが実現されている。

モンサクンは、四則演算は、ある量の存在を表す存在量命題が二つと、量と量の関係を表す関係量命題が一つ、適切に組み合わせられることにより構成されるとする三文構成モデルに基づいている。ここで、存在量命題を表す文を存在文、関係量命題を表す文を関係文と呼ぶ。この三文構成モデル(Hirashima 2014)に基づく文章題表現がモンサクンにおける情報構造となる。

三文構成モデルでは、関係量命題を表す関係文は個々の演算および物語の種類に依存しており、存在量命題を表す存在文は、演算や物語の種類に依存せずに利用可能である。図5は、この関係文と存在文の組み合わせの関係を示した事例である。実線で囲まれた分が存在文、破線が関係文となる。

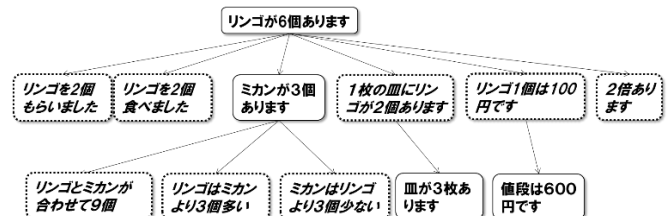


図5 存在文と関係文の組み合わせとしての問題

モンサクンの作問では、文章題としての物語(増える, 減る, 合わせる, 比べる)と計算の方法を指定したうえで、学習者にその要求を満たす組み合わせと作らせる。ここで必要となる思考は、変換過程と統合過程での思考に相当することになり、問題解決における理解過程の外在化になると考えている。また、問題解決においては、計算で解けることがあらかじめ決まっているため、必ずしも問題が成立している条件を考えなくてもよいが、組み立ての場合、誤った組立が数多く存在するため、個々の文及び要求されている条件を吟味することが求められる。このため、探索的な制約

充足としてこの作問過程を分析することができる。問題を解ける学習者にとっても作問が難しいこと、作問ができることと算数の成績に相関があること、作問を繰り返すことで、より適切な探索ができるようになること、そして、成績向上としての効果がみられることがわかっている。これらのことから、算数文章題のコンピュータシヨナル化の一例になっていると判断している。また、図6に作問のインタフェースを示した。この作問は、計算論的思考が求める、問題の分解、パターン発見、抽象化、手順化、といった過程を、(1)問題の分解：問題を量概念の組み合わせとして捉えること、(2)パターン発見：量概念の組み合わせとして演算を作ること、(3)抽象化：組み立てられた問題を計算式と対応付けること、(4)手順化：(1)-(3)の過程が順を追って遂行するものとして整理されている、ことから、計算論的思考と呼べる思考を促していると判断している。



図6 モンサクンの作問インタフェース

4.2.3 三角ブロック

三文構成モデルは、一つの演算が三つの単文（量命題に対応する文）で構成されているとしており、これが文章題の基本単位になっているといえる。これを単文文章題と呼ぶと、複数演算で解く必要がある問題は、この単文文章題の組み合わせとして記述することが可能となる。そして、三つの単文からなる単文文章題を、それぞれの単文を頂点に配置した三角形によって表現し、さらに、頂点の単文（量命題）の共有として単文文章題の連結、つまり複数演算の表現を行ったのが三角ブロックである。図7に三角ブロックによる問題の表現例を示した。三角ブロックを用いた学習支援システムでは、三角ブロック表現と統合過程の生産物とし、問題文、ノード（単文）演算を含んだ三角形、を提供

し、それを組み立てて、統合させることを課題としている。この三角ブロックシステムは、小学校4、5、6の算数文章題および中学の方程式立式の場面で授業利用されている。

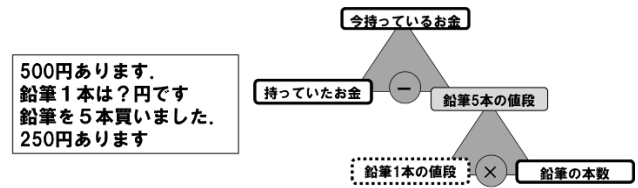


図7 三角ブロックの事例

三角ブロックを組み立てると、算数の場合は計算可能な部分から順次計算していくことで、答えを導くことができる。方程式で解決する場合は、この三角ブロックに基づいて文字式を作成することになる。これは、統合とプラン化を結ぶことになっている。従来の文章題の学習においては暗黙的であった、理解過程とプラン化過程が外在化され、手順を追って実行可能なものとなっており、文章題という教材のコンピュータシヨナル化になっているといえる。また、計算論的思考が求める、問題の分解、パターン発見、抽象化、手順化、といった過程を、(1)問題の分解：問題を量概念の組み合わせとして捉えること、(2)パターン発見：量概念の組み合わせとして演算、つまり単位問題(単位三角形)を見つけ、さらにそれらを連結してゆくこと、(3)抽象化：三角ブロックの算術計算式もしくは文字式に変換すること、(4)手順化：(1)-(3)の過程が順を追って遂行するものとして整理されている、ことから、計算論的思考と呼べる思考を促していると判断している。

4.2.4 情報構造からの多様な課題の作成

算数・数学の文章題に対する情報構造は、単位問題を三つの量概念で構成し、複合問題を単位問題の連結として記述するものである。これは算数・数学の文章題という領域に依存した情報構造の表現であるといえる。また、問題文がどのような量命題で構成されているかについての判断は現時点では人が行う必要があり、また、意味的な解釈が重要であるため、現時点での自動化の目途は立っていない。しかしながら、一度情報構造を作成すれば、その情報構造に基づく様々な課題を生成することが可能である。たとえば、モンサクンで用いている情報構造を用いて、問題の変更課題や問題の比較課題を作成することができる(赤尾 2016)。ま

た, 問題解決に対する支援も設計することができる。さらに, 文章題の構造は時間的に変化するものではなく, 一度適切に記述できれば, 長く利用することができると思われる。また, 多言語化に関しても, 多少の言語表現の差異はあるとしても, そこに含まれる数量関係に関しては国際的に共通と考えられる。このことから, 少なくとも算数・数学の文章題の教材は, その情報構造を精密に記述するコストは得られるゲインに対して十分に見合ったものになると考えられる。

5. まとめ

「学習者による思考」の結果が「学習」であると考ええると, 「学習を助ける」とは, 学習の目的に適した「思考」を助けることになる。さらに, 思考を, 「情報に対する操作」として捉えると, 教育とは, 思考に適した情報を提供することになる。この立場からすると, 教材とは学習者に処理して欲しい情報であり, 何からの処理を前提としたものになっているということが出来る。どのような情報を, どのように処理することを目的とするかを明らかにするためには, 情報科学からの教材へのアプローチが重要であるといえる。そして知的学習支援の研究において行われてきた教材に関連する研究が, これに相当するのではないかとの考察を行ったのが本稿である。

参考文献

- (赤尾 2016) 赤尾優希, 林雄介, 平嶋宗, “作問課題作成演習の設計・開発とその評価—作問プロセスの自己説明活動として—”, 人工知能学会論文誌, Vol.31, No.5, D-G33_1-10(2016).
- (Carbonell 1970) Carbonell, J. R., “Ai in CAI: An artificial intelligence approach to computer-assisted instruction”, *IEEE Trans. on Man-Machine Systems*, Vol. 11, No. 4, pp. 190-202 (1970).
- (Clancey 79) Clancey W.J.: Tutoring Rules for Guiding a case method dialogues, *International Journal Man-Machine Studies*, Vol.11, pp.25-49(1979)
- (Clancey 86) Clancey W.J.: From GUIDON to NEOMYCIN and HERACLES in twenty short lessons: ONR final report 1979-1985, *AI Magazine*, Vol.7, No.3, pp40-60(1986)
- (波多野 1990) 多野誼余夫・稲垣佳代子, “人はいかに学ぶか—日常的常識の世界—”, 中央公論社(1990)
- (Hegarty 1995) Hegarty, H., Mayer, R.E., Monk, C.A., “Comprehension of Arithmetic Word Problems: A Comparison of Successful and Unsuccessful Problem Solvers”, *Journal of Educational Psychology*, 87(1), pp.18-32(1995).
- (平嶋 1992a) 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.475-486(1992)
- (平嶋 1992b) 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”, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J75-A, No.2, pp.296-304(1992).
- (Hirashima 1994) T. Hirashima, T. Niitsu, K. Hirose, A. Kashiwara, J. Toyoda, “An indexing framework for adaptive arrangement of mechanics problems for ITS”, *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77 (1), pp.19-26(1994).
- (平嶋 2006) 平嶋宗, “メタ認知の活性化支援”, *人工知能学会誌*, 21(1), pp.58-64(2006).
- (Hirashima 2014) Hirashima, T., Hayashi, Y., Yamamoto, S., “Triplet Structure Model of Arithmetical Word Problems for Learning by Problem-Posing”, *Proc. of HCI2014(LNCS 8522)*, pp.42-50(2014).
- (平嶋 2015) 平嶋宗, “「学習課題」中心の学習研究: 情報構造としての学習課題の再定義と構造操作としての学習活動の設計”, *人工知能学会誌*, 39(3), pp.277-280(2015).
- (Hirashima 2015) T. HIRASHIMA, Y. HAYASHI, S. YAMAMOTO, K. MAEDA, “Bridging Model between Problem and Solution Representations in Arithmetic/Mathematics Word Problem”, *Proc. of ICCE2015*, pp. 9-18, (2015)
- (平嶋 2018) 平嶋宗, 林雄介, “メタ問題設計法としてのオープン情報構造アプローチ”, *人工知能学会研究会資料*, SIGALST-B509(2018).
- (Hirashima 2018) Hirashima, T., Hayashi, Y., “Design of Meta-Problem with Open Information Structure Approach”, *ICCE2018 Workshop Proceedings*, pp.288-290(2018).
- (細谷 1990) 細谷俊夫 (編), *新教育学大事典*, 第一法規出版(1990).
- (柏原 1992) 柏原昭博, 菅野昭博, 平嶋宗, 豊田順一, “説明における認知的負荷の適用と実験的評価”, *人工知能学会誌*, Vol.10, No.3, pp.393-402(1995)..
- (来村 1998) 来村徳信, 溝口理一郎, “問題解決システムにおけるオントロジー”, (<http://www.ei.sanken.osaka-u.ac.jp/japanese/lectures/mbpsont/mbpsont.html>)
- (松村 2006) 松村明(編), *大辞林*第三版, 三省堂(2006).
- (中島 2015) 計算論的思考, *情報処理*, Vol.56, No.6, pp.584-587(2015).
- (沼野 1984) 沼野一男. “教授工学の発想.” *医学教育* 15.6 (1984): 399-401.
- (大槻 1984) 大槻説平, 竹内章, “自然言語対話のモデルとCAIへの応用”, *情報処理学会論文誌*, Vol.25, No.4, pp.665-673(1984).
- (大槻 1986) 大槻説平, “高度個別教育における知識情報処理: ITS のふるまいと機能”, *人工知能学会誌*, Vol.1, No.2, pp.196-202(1986).
- (往住 2013) 往住彰文, *情報処理*, 最新心理学事典, 平凡社(2013)
- (ポリア 1975) G.ポリア, “いかにして問題をとくか”, 丸善, 1975.
- (Quillian 68) Quillian, M.R.: *Semantic Memory, Semantic Information Processing*, pp.227-270, MIT Press(1968).
- (Wenger 1987) E.Wenger, “Artificial Intelligence and Tutoring Systems, Morgan Kaufmann(1987).
- (Wing 2006) J. M. Wing “Computational Thinking”, *CACM*, Vol.49, No.3, pp.33-35 (2006).