

算数文章題を対象とした作問プロセスシミュレータの設計・開発と

オーサリングツールへの応用

Design and Development of Problem-Posing Process Simulator for Mathematical Word Problems and Application to Authoring Tool

岩井 健吾^{*1}
Kengo Iwai

林 雄介^{*1}
Yusuke Hayashi

松本 慎平^{*2}
Shimpei Matsumoto

平嶋 宗^{*1}
Tsukasa Hirashima

^{*1} 広島大学大学院工学研究科
Faculty of Engineering, Hiroshima University

^{*2} 広島工業大学情報学部
Faculty of Applied Information Science Hiroshima Institute of Technology

This paper describes a development of a problem-posing process simulator for mathematical word problems and an application to an authoring tool. The problem-posing simulator has a diagnostic function of a problem-posing process. In addition to this, the authoring tool for problem-posing assignment and learning support for process are realized by the diagnostic function.

1. はじめに

問題に対して解法を適用して解けるようになったとしても、必ずしもその問題及び解法を十分に理解しているとは限らない。先行研究において理解は大きく二つに分類されており、道具的理解と関係的理解がある[Skemp 92]。問題に対して解法を適用できるが、なぜその解法が適用できるのか十分に理解していない状態は道具的理解と呼ばれ、応用力に欠ける理解であるとされている。その解法が何故その問題に対して適用可能であるのかまで理解している状態は関係的理解と呼ばれ、解法の適用可能性や問題間の関係など解法や問題に関しての構造的な理解が進んだ状態とされており、理解内容の応用力を持った状態であるとされている。一般的な問題演習においては、学習した範囲の問題しか与えられないことが前提であるため、道具的理解の段階でもこなすことができる。このため、関係的理解を促進するためのより進んだ形の問題演習が求められている。

ある解法で解ける問題を作ることをタスクとする作問演習は、解法及び問題に関する関係的理解を深める上での有力な方法として知られているが、問題演習が正解を用意すれば学習者の解答に対する答え合わせを簡単に行えるのに対して、作問においては様々な問題が作られる可能性があるため、学習者に対して適切なフィードバックを返すためには、作成された問題を個別に吟味することが教師に求められることになる。また、学習者にとっても作問は問題解決に比べて認知負荷の大きな活動であり、支援なしに活発な作問活動を行うことは簡単ではないことも示唆されている。したがって、活動自体は関係的理解に資することが分かっているものの、教師と学習者の双方にとって負荷の高い活動であるため、一般的な教育の文脈では作問演習の実践運用は困難であるとされてきた。

これに対して、情報技術を用いて作問学習を支援する試みはいくつか行われているが、問題を学習者に自由に記述させた場合、記述された問題の自動診断の困難さが大きな問題となる。このため、既存の情報技術を用いた作問学習支援に関する研究は、問題の診断を教師や学習者に任せ、問題を共有すること、

及びその診断を協調的に行い、結果を共有することに重きをおいていたといえる。また、これらの手法は高等教育においては適用可能であるが、初等教育においては適用できないものであったといえる。

初等教育において作問学習を実現するためには、作成された問題の自動診断とその診断結果に基づくフィードバックの実現が求められる。本研究では、これを実現する方法としてオープン情報構造アプローチに基づいた学習支援システムの設計・開発を行っている[平嶋 18]。オープン情報構造アプローチでは、学習課題の情報構造を定義することで、その情報構造に基づいた診断およびその診断結果に基づいたフィードバックを計算機上に実現することを可能とする。このアプローチに基づき初等教育における作問学習を実現した研究として、単文統合型作問学習支援システム「モンサクン」に関する研究がある[Yamamoto 12, 山元 13]。このモンサクンは算数文章題を対象としており、一回の四則演算で解ける算数文章題をそれぞれ一つの数量を表す三つの命題から構成されるものとして定義した上で、それぞれ一つの数量命題を表す単文を三つ組み合わせることとして作問を定式化している。このモンサクンはすでに小学校の授業実践において利用されており、一般的な算数文章題の解決成績の向上だけでなく、情報過剰問題、作問課題、プライミングテストなどの道具的理解だけでなく、関係的理解まで必要とするテストにおける成績の向上としても、その効果が確認されている。

しかしながら、これまでのモンサクンの評価は総括的なものであり、作問過程がどのように学習に貢献しているのかについての分析は十分には行えていなかった。また、モンサクンでの作問は必ずしも簡単ではなく、作問過程において困難な状況に陥る学習者がしばしばいることも確認されている。さらに、作問課題において提供される単文(問題を構成する数量命題)の集合の構成によって、作問の難しさが大きく左右されることが示唆されているが、その分析も十分には行えていなかった。

本研究では、これらのモンサクンに関する一連の研究が抱えている課題を解決するための基盤として、作問過程の診断が可能なシミュレータが必要であると考え、モンサクンを設計する上での参照モデルとなっている三文構成モデルに基づく作問プロセスシミュレータを設計・開発した。先行研究において、作成された問題の診断機能はこれまでに実装されてきたが、作問プ

連絡先: 岩井健吾, 広島大学大学院工学研究科学習工学研究室, iwai@el.hiroshima-u.ac.jp

ロセスシミュレータを実装することで、(1) 作問過程の状態における診断、(2) 作問過程の状態遷移の診断、が可能となる(正しい場合と誤った場合の両方を診断可能である)。これらの診断は、作問過程での学習者に対する指摘を可能とする。また、(3) 作問過程の説明(何の前提条件に基づいてどのような推論をした結果かを示すこと)が可能となり、提供される単文集合を含めたある作問課題において、誤った状態も含めてどのような作問状態がどのような理由で生成されるかを分析すること、が可能となる。この機能は、作問課題のオーサリングツールにおいて不可欠な機能となる。また、この機能を発展させ、学習者に応じた適応的な作問課題の変更なども実現可能となる。

以下、本稿では、2 章において本研究が採用しているアプローチであるオープン情報構造アプローチについて述べる。3 章では、オープン情報構造アプローチを適用した事例の一つである単文統合作問学習支援システム「モンサクン」について述べ、4 章では、作問過程の診断機能を実現可能な作問プロセスシミュレータの設計・開発について述べる。5 章では、作問プロセスシミュレータの応用可能性、6 章では、まとめと今後課題について述べる。

2. オープン情報構造アプローチに基づく学習支援システムの設計・開発

本研究では、学習課題の情報構造の定義に基づいた学習支援システムの設計・開発を行うオープン情報構造アプローチに基づいて研究を行っている。このオープン情報構造アプローチに基づいて設計・開発をした学習支援システムには、大きく次の二つの特徴がある。(1) 学習課題の情報構造の自動診断及びその診断結果に基づくフィードバックの実現が可能となる。これにより、学習者に対して個別かつ即時の診断及びフィードバックを返すことにつながるため、学習支援として有効であると考えられる。(2) 学習課題の情報構造に基づく情報構造操作(要素および要素間の関係の組み立てや予測)としての演習活動の診断及び設計が可能となる。先行研究において、学習を促進する上で試行錯誤的な情報構造操作を行うことが有効であることが示唆されており[新井 73, Papert 82, 平嶋 13]、したがって、演習活動における情報構造操作の診断及び設計を行うことは重要であるといえる。

先行研究において、オープン情報構造アプローチの適用事例としては様々な学習課題が試みられているが、本稿では適用事例の一例として算数文章題を対象としている。また、作問プロセスシミュレータでは、算数文章題の情報構造に基づく情報構造操作としての演習活動の診断を実現することを目指している。

3. 算数文章題を対象としたオープン情報構造アプローチの適用事例

オープン情報構造アプローチを適用した事例として、単文統合型作問学習支援システム「モンサクン」がある。本章では、まず、算数文章題の情報構造を定義したモンサクンの参照モデルである三文構成モデルについて述べた後、算数文章題における作問学習の自動診断およびその診断結果に基づくフィードバックを実現した単文統合型作問学習支援システム「モンサクン」について述べる。

3.1 算数文章題の情報構造を定義した三文構成モデル

三文構成モデルでは、算数文章題を三つの単文(文章)から構成されると定義している。また、単文の構成要素としては、オブジェクト、数量、述語から構成されるものとして定義しており、単文の種類としては二つに分類され、数量の存在を表す存在

文と数量間の関係を表す関係文がある。存在文の一例としては、“りんごが 5 個あります”があり、関係文の一例としては、“りんごとみかんをあわせて 8 個もらいました”がある。

また、算数文章題の物語の種類は、合併、増加、減少、優量比較、劣量比較の 5 種類あることが知られているが[Riley 83]、三文構成モデルでは、それぞれの物語の種類ごとに、三枚の単文を組み合わせた時にそれらの組み合わせが満たすべき制約条件をオブジェクト制約、数量制約、述語制約、文構造制約として定義している(増加・減少の場合は、順序制約も含む)。一例として、合併の物語の制約条件の定義(図 1)を示す。図 1 に示すように、合併の物語は、(1)オブジェクト制約として、異なる二つのオブジェクトが登場する必要がある。(2)数量制約として、関係文の数量が二つの存在文の数量の和になる必要がある(なお、本研究では、未知数を一つ含む場合を問題と呼び、含まない場合を物語と呼ぶ)。(3)述語制約として、合併の述語が合併の役割を示す述語である必要がある。(4)文構造制約として、存在文二枚と合併の関係文一枚で構成される必要がある。この制約条件を満たす具体的な合併の物語の例としては、“りんごが 5 個あります”、“みかんが 3 個あります”、“りんごとみかんをあわせて 8 個あります”などがある。

存在文1	[A] が [X] こ [あります]
存在文2	[B] が [Y] こ [あります]
関係文	[C] と [D] は [全部で] [Z] こ [あります]

オブジェクト制約: $A = C, B = D, C \neq D$ を満たす(=は等価, \neq は非等価)。
 数量制約: $X + Y = Z$ を満たす。
 述語制約: 関係文の述語が「合併」の役割を表す。
 文構造制約: 存在文2枚と関係文1枚で構成されている。

図 1 合併の物語の制約条件の定義

3.2 単文統合型作問学習支援システム「モンサクン」

三文構成モデルに基づいて設計・開発された単文統合型作問学習支援システム「モンサクン」では、単文カードを捨捨選択および並べ替えることで作問学習を演習可能なシステムである(図 2)。モンサクンで出題する作問課題では、(1)作成する問題の式・物語を指定している問題制約と(2)作問に使用可能なカードを指定している単文カードセット制約が学習者に与えられており、この制約条件を満たすように問題を作成することが求められる制約充足問題となっている。学習者はこの作問課題において問題を作成していき、問題を作成した後に診断ボタンを押すことでシステムによる診断が行われ、正解の場合は正解のフィードバックを返し、不正解の場合は誤りに応じたフィードバックをシステム上で返すことが可能となっている。したがって、先行研究において、算数文章題の情報構造の自動診断およびその診断結果に基づくフィードバックを返す機能が実現されたといえる。さらに、本システムは、継続的に小学校を対象とした実践利用を行っており、その実践利用において学習効果が示唆されているため、システムの有効性も確認できていると考えている。

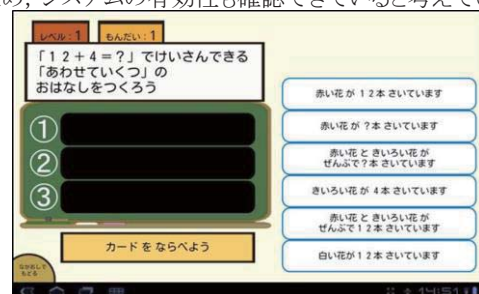


図 2 「モンサクン」のインターフェース

3.3 「モンサクン」の先行研究における研究課題

モンサクンの先行研究において、作成された問題の状態における問題の自動診断およびその診断結果に基づくフィードバックが実現され、学習効果の観点からその有効性が示唆されている。一方で、残された研究課題として作問過程の診断・評価・学習支援の実現が挙げられる。

認知科学の作業仮説として、(1) 人の思考は、情報構造操作として表現されることと(2) 対象の情報構造により、その情報構造に対する情報構造の操作が規定されることがある。この仮説に基づいて、作問過程における人の思考を解釈すると、作問過程における人の思考は、情報構造の操作として表現され、さらに、学習課題の情報構造により、学習課題における情報構造の操作が規定されると解釈可能である。したがって、本研究では、作問過程における人の思考は、算数文章題を対象とした情報構造の定義を行った三文構成モデルから規定される情報構造の操作として表現されたと考えている。なお、人の思考の再現には様々なレベルがあると考えられるが、本研究では、人の思考の全てを表現するものではなく、学習課題の情報構造から規定される人の思考のみを対象としている。

先行研究において、試行錯誤的な情報構造の操作を学習者自身が行うことが学習を起す上で重要であるとされているが、上述したように作問過程は、情報構造の操作として表現されるため、作問過程の診断・評価・学習支援を行うことも学習を促進する上での重要な研究課題であると考えられる。

3.4 作問過程に関する研究課題に対する解決策の考察

作問過程の診断・評価・学習支援の実現するためにはまず、作問課題の診断を行う必要がある。作問過程の診断が可能になれば、どのような作問過程が学習を促進する上で有効なのかの評価や作問過程を対象とした学習支援も実現可能になると考えられる。そのため、本研究では、まず、作問過程の診断を実現することを目指している。

作問過程の診断を行うには、作問過程がどのようなものになっているかを予測することが求められるが、三文構成モデルの性質を利用することで、その予測を行うことが可能であると考えられる。三文構成モデルの性質として、提示された単文から残りの単文及びその制約条件を予測可能な性質がある。本研究では、これを予測的構造(図 3)と呼ぶ。モンサクンの作問課題は制約充足問題となっており、その作問課題における作問過程では制約条件を考慮することが求められるため、作問過程の予測としては制約条件の予測を行うことが基本になると考えられる。したがって、本研究では予測的構造を計算機上でシミュレーションすることで作問過程の予測を行い、それを利用することで作問過程の診断を行うことが実現可能であると考えている。

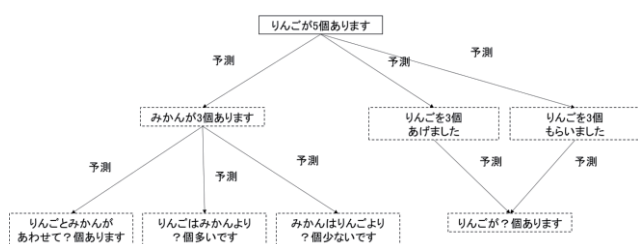


図 3 予測的構造の一例

4. 作問過程の診断を実現する作問プロセスシミュレータの設計・開発

4.1 シミュレータの概要

本研究における作問プロセスシミュレータでは、和差の算数文章題を対象とした単文統合型作問における学習者の思考の表現を行っている。学習者の思考としては、正しい学習者の思考と誤った学習者の思考のそれぞれが想定されるが、正しい学習者の思考を再現できれば、学習者が作問過程において今後どのような単文を選び、どのような問題を作成できるのかが診断できるようになり、また、誤った学習者の思考が再現できれば、学習者の誤りが何を前提条件として、どのような推論を行っているかを分析することにもつながると考えられるため、作問プロセスシミュレータの設計・開発を行うことに意義があると考えている。したがって、本研究で対象としている作問プロセスシミュレータは、単文統合型作問の学習支援を行う上での基盤となるものと位置づけており、このシミュレータを応用したシステムの設計・開発を行うことで様々な学習支援につながると考えている。

4.2 シミュレータの仕組み

本稿では、作問プロセスシミュレータを三文構成モデルの制約条件に基づいた推論を行うことで作問過程における学習者の思考を説明可能な機構として定義している(なお、ここでの説明とは、何の前提条件に基づいて推論を行った結果かを示すことができることを指す)。

三文構成モデルでは算数文章題の情報構造を制約条件として定義しているため、三文構成モデルにおける算数文章題の作問活動は制約充足問題として規定されることになる。したがって、本研究では、三文構成モデルに基づく作問を対象とした場合、学習者の思考を説明することは何の制約条件を前提としてどのような推論を行ったのかを示すことであると解釈している。正しい学習者の思考を説明する場合は、三文構成モデルにおける制約条件を全て考慮して推論を行うこととなり、誤った学習者の思考を説明する場合は、三文構成モデルの制約条件の一部を緩和して推論を行うことになると考えられる。

シミュレーションの基本的な処理フローとしては、(1) 提示された単文を決定し、(2) 単文の情報を三文構成モデルの制約条件に当てはめることで残りの単文の制約条件の予測を行い、(3) 残りの単文の制約条件の予測結果に基づいて残りの単文の選択および生成を行う。また、本研究では、この一連の流れのことを作問過程と呼ぶ。

4.3 シミュレータの診断機能

作問プロセスシミュレータを実装することで(1) 作問過程の状態における診断、(2) 作問過程の状態遷移の診断、(3) 作問過程の説明が可能となる。一つ目の機能である作問途中の状態の診断では、提示された単文の組み合わせが 0,1,2 枚時の状態である作問過程の状態に対しても診断を行うことが可能となっている。診断内容としては、提示された単文の組み合わせに対して、(1) その単文の組み合わせから問題として成立するために必要な残りの選択および生成可能な単文の制約条件、(2) 提示された単文の組み合わせにおける制約充足の状態を診断することが可能となっている。二つ目の機能である作問過程の状態遷移の診断では、ある単文の組み合わせから他の単文の組み合わせに遷移可能かを診断することが可能となっている。三つ目の機能である作問過程の説明では、正しい作問過程と誤った作問過程を診断することができ、ある作問状態がどのよ

うな制約条件に基づいて生成されるのかを説明することが可能となっている。また、この診断機能は、異なる単文カードセットに対して作問過程の診断を行うことで、探索空間の違いを比較することにつながると考えられる(図4は正しい作問過程の診断結果の例)。

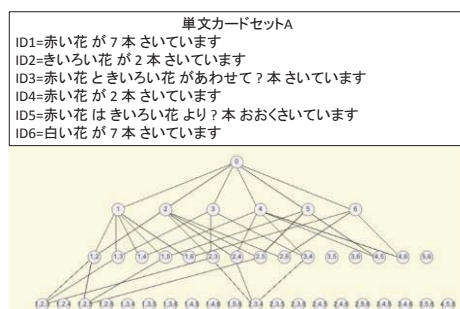


図4 正しい作問過程の診断結果の例

5. 作問プロセスシミュレータの応用可能性

作問プロセスシミュレータの設計・開発を行うことで作問過程の診断機能が実現される。本章では、その診断機能を応用した事例としてオーサリングツールと作問過程を対象とした学習支援の検討を行う。

5.1 作問課題設計支援のためのオーサリングツール

作問プロセスシミュレータの応用事例の一つとして、単文統合型作問学習支援システム「モンサクン」における作問課題設計の支援を対象としたオーサリングツールが考えられる。

モンサクンにおける作問課題設計の支援を行う背景としては、人手のみだけで作問課題を設計することが困難であるという現状がある。モンサクンの作問課題において、基本的に単文カードが6枚提示されるがこの6枚から規定される探索空間における全ての作問途中の状態を作問課題ごとに人が解釈し、作問課題を設計することは現実的に困難であると考えられる。現状の作問課題の設計方法としては、探索空間における作問過程の状態を考慮した設計を行う手法ではなく、ダミーカードの生成規則に基づいた作問課題の設計が行われている。この手法に基づいて作問課題を設計することでも一定の学習効果は示唆されているが、探索空間における作問過程の状態を考慮した設計を行うことでより効果的な学習支援につながると考えられる。

本研究の今後の展望として、この問題点に対して作問プロセスシミュレータを応用したオーサリングツールの設計・開発を行うことで解消することを考えている。作問プロセスシミュレータにより、単文カードセットから規定される探索空間を診断可能なため、(1)単体の単文カードセットの探索空間の分析(2)複数の単文カードセットの探索空間の比較(3)過去の作問課題における探索空間との比較が実現されると考えられる。

5.2 作問過程を対象とした学習支援

作問プロセスシミュレータを応用した他の事例の今後の展望として、作問過程を対象とした作問学習支援があると考えられる。作問過程を対象とした学習支援としては、(1)作問課題における正しいおよび誤った作問過程の説明(2)適応的な作問課題の変更(3)作問過程を考慮する発散的作問課題の設計・開発への応用が期待される。

一つ目の作問課題における正しいおよび誤った作問過程の説明に関しては、本研究で対象としている作問における正しいおよび誤った作問過程の拡張を行ったものになっており、作問課題における正しい学習者と間違った学習者の作問過程を再

現し、それを説明することが可能になる。さらに、これが可能になると作問課題において何の制約条件を考慮する課題となっているかが診断可能となり、より詳細に作問課題の設計を行うことにつながると考えられる。

二つ目の適応的な作問課題の変更に関しては、作問プロセスシミュレータを用いることで作問過程の観点から探索空間の分析が可能になるため、前述した通り、ある作問課題があった時にどのような制約条件を考慮する課題となっているかが分析できる。また、作問プロセスシミュレータにより、単文カードセットを変えれば探索空間が変わることも分析可能なため、これらを活用することで作問過程の状態を考慮した上でできる学習者に対しては単文カードを増やすことで難易度を上げたり、できない学習者に対しては、単文カードを減らすことで難易度を下げたりするような適応的な作問課題の変更が可能になると考えられる。

三つ目のプロセスを考慮する発散的作問課題の設計・開発に関しては、作問プロセスシミュレータを用いると問題として完成していない状態の単文の組み合わせから残りの単文を予測することが可能だが、その残りの単文を学習者に予測させるといったような作問課題の設計・開発も可能になると考えられる。

以上のように、作問プロセスシミュレータを用いることで、作問過程を対象とした様々な学習支援にもつながると考えられる。

6. まとめと今後の課題

本研究では、単文統合型作問学習支援システム「モンサクン」に関する一連の研究が抱えている作問過程の課題を解決する基盤となる、三文構成モデルに基づく作問プロセスシミュレータの設計・開発を行った。先行研究において作成された問題の診断機能は実現されてきたが、作問プロセスシミュレータでは、作問過程を対象とした診断機能を実現した。

今後の課題としては、作問課題の設計を支援するオーサリングツールへの応用および作問プロセスを対象とした様々な学習支援につなげていきたい。

参考文献

- [Skemp 92] Skemp R.: 新しい学習理論にもとづく算数教育—小学校の数学—(平林一榮監訳), 新曜社, (1992).
- [平嶋 18] 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, SIG-ALST-B509(2018).
- [Yamamoto 12] Sho YAMAMOTO, Takehiro KANBE, Yuta YOSHIDA, Kazushige MAEDA, Tsukasa HIRASHIMA: "A Case Study of Learning by Problem-Posing in Introductory Phase of Arithmetic Word Problems", Proc. of ICCE2012, pp.25-32, (2012).
- [山元 13] 山元翔, 神戸健寛, 吉田祐太, 前田一誠, 平嶋宗: “教室授業との融合を目的とした単文統合型作問学習支援システムモンサクン Touch の開発と実践利用”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J96-D, No.10, pp.2440-2451 (2013).
- [Riley 83] Riley M.S., Greeno J.G., Heller J.I.: Development of Children's Problem-Solving Ability, (1983).
- [新井 73] 新井邦二郎: 知的行為の多段階形成理論, 教育心理学研究, 21, 3, pp.56-61 (1973).
- [Papert 82] S. Papert, "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).
- [平嶋 13] 平嶋宗: 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: 算数を事例として, 教育システム情報学会誌, Vol.30, No.1, pp.8-19(2013).