

オープン情報構造指向アプローチに基づく再構成型学習の拡張に関する研究

(A Study of Extension of Recomposition Learning Based on Open Information Structure Oriented Approach)

いわい けんご

岩井 健吾

2021年3月

広島大学大学院工学研究科

概要

人の知的活動の一つである学習を情報工学的に支援する学習支援システムに関する研究が盛んに実施されている。学習支援システムの設計手法は、Ad-hoc Frame Oriented アプローチと Information Structure Oriented アプローチの二つに大別される。前者は、既に教育現場で実施されていることに重点が置かれ、後者は従来実施されていなかった新しい活動を実現することに重点が置かれるものとなっている。それゆえ、当然情報技術の活用方法も設計手法ごとに異なるものになる。この二つの設計手法の主な違いは、計算機上でも処理可能である学習課題に関する知識を学習支援システムに実装するかどうかにある。

Ad-hoc Frame Oriented アプローチに基づいて設計された場合、その学習支援システムは学習課題の知識を持たないものとなる。それゆえ、システム自体は知識に基づく推論機能や質問機能を一切持たないため、学習課題に関する用意は教師が全て行う必要があるものとなる。つまり、システムがケースバイケースでどのように振る舞うかを教師が予め全てプログラムとして手続き的に記述しておかなければならない。このため、教師にとって学習課題の用意は非常に負荷が高くなる。また、予め演習に必要な振る舞いを全て手続き的に記述することは困難であるため、一部の機能が十分に実現されない可能性もある。

その一方で、Information Structure Oriented アプローチに基づいて設計された場合、その学習支援システムは計算機上で処理可能な学習課題の知識を持つものとなる。この手法では、学習課題の知識を情報構造として記述し、その情報構造をシステムに実装することによって、システム上で処理が可能となる。このように実装することで、システム自体が知識に基づいた処理を行うことが可能となり、網羅的な推論機能および質問機能が実現される。これらの機能を活用することにより、教師がシステムの振る舞いを全て記述しなくともシステム自体が判断し処理することが可能となる。それゆえ、この手法は Ad-hoc Frame Oriented アプローチと比較して教員が学習課題を用意する負荷が少なく、また、Ad-hoc Frame Oriented アプローチでは実現することができない知的な処理をシステムに実装することが可能となる。したがって、知的な学習支援システムを設計するためには Information Structure Oriented アプローチは有効な手法であるといえる。その反面、この手法においては、学習課題の情報構造の活用はシステム上で処理することのみに制限されたものとなっている。

Information Structure Oriented アプローチを基礎として、学習課題の情報構造の活用をシステムだけではなく学習者にも活用可能にさせることを目指したものにオープン情報構造指向アプローチが提唱されている。この手法では、以下のように学習支援システムを設計・開発する。まず、学習課題の情報構造を記述し、その情報構造を構成要素と構成要素間の関係に分解し、部品とする。その後、学習者にその部品を与え、記述した元の情報構造を再構成させる演習環境を構築する。このようにシステムを実装することで、学習者はシステム上で情報構造を再構成する活動を行うことが可能となる。情報構造を再構成する演習が可能な学習支援システムは既に様々な学習課題を対象に実現されており、その有効性は実践利用を通して確認されていることから、この手法は学習を促進する上で有効な方法であるといえる。

しかしながら、この手法には次の二つの課題がある。一つ目の課題は、「国語分野に対してオープン情報構造指向アプローチを適用すること」である。先行研究においては、算数、物理、論理、概念の学習課題には適用されているものの、国語分野には適用されていない。先行研究における学習領域は比較的構造化されていることが自明であるが、国語の領域においては必ずしも構造化されていることが自明ではないものとなっている。国語分野の重要性は自明であるため、この分野に対してもオープン情報構造指

向アプローチを適用し、学習課題の領域を拡張する必要があると考えられる。二つ目の課題は、「異なる外的表象間の変換活動を実現すること」である。オープン情報構造指向アプローチで記述された情報構造は学習者の理解を外界に記号で表現した外的表象に相当し、言語表現、図的表現、数式表現など様々な表象形式で記述することが可能となっている。この外的表象は、学習者の理解を深める上で有効に働くことが確認されている。また、異なる外的表象間で変換活動を行うことで学習者の理解が深まるとされている。しかしながら、現状のオープン情報構造指向アプローチでは、一部の外的表象を操作する活動は実現されているが、外的表象間における変換活動は十分に実現されていないものとなっている。

そこで、本研究では、上記の二つの課題を解決するためにオープン情報構造指向アプローチの拡張を行った。一つ目の課題に対しては、国語分野の接続詞の学習課題を対象にオープン情報構造指向アプローチを適用した。国語の分野において、重要な学習対象とされているものの一つとして接続詞がある。接続詞の用法は、1) 既にある文のみからでも読み取ることができる明示的な意味を強調する強調的用法、2) 既にある文と接続詞を統合することによって暗黙的な意味を付け加える含意的用法、の二つに大別できる。前者の用法の学習課題は、一意に正解を定めることが可能なため、その演習化は比較的用意であり、既にこの用法を習得するための演習は数多く実施されている。その一方で、後者の用法の学習課題は、正解が多様に存在するため、その演習化は容易ではなく、この用法の演習の実施例も存在していない。そこで、本研究では、含意的用法の中でも特に重要とされる異義可換性のある接続表現に焦点を当て、その演習環境の実現を目的として、異義可換性のある接続表現の情報構造を定義し、その情報構造を再構成する演習の設計とインタラクティブな学習支援環境の開発を行った。さらに、授業利用において評価を行った結果、実践利用可能であること、および、演習利用の効果があること、の二点が明らかとなった。この研究事例から、国語の分野に対してもオープン情報構造指向アプローチの適用は有効であることが明らかとなった。

二つ目の課題に対しては、図的表現を媒介させた和差の算数文章題演習環境の設計・開発を行った。先行研究において、和差の算数文章題を対象にした作問学習支援システム「モンサクン」が設計・開発されている。このモンサクンでは、算数文章題は三つの単文から構成されるものと定義しており、学習者に対していくつかの単文を与え、指定された数式および物語種類を満たすように単文を組み立てることで1回の和差で答えを求めることができる算数文章題を作る演習活動を行うことが可能である。この演習活動は数式表現から言語表現への変換活動とみなすことができる。本研究では、このモンサクンを基礎としてさらに図的表現を追加することで、言語表現、図的表現、数式表現の三つの表現間の変換活動が可能な算数文章題演習環境を設計・開発した。特に、算数文章題の情報構造に基づいて設計・開発することで言語表現と図的表現を連動させて変換させる活動を実現することが可能となった。しかも、正誤診断およびフィードバックも実現された形となっている。このシステムを授業で実践的に利用し、学習効果を示唆する結果を得た。この研究事例から、異なる外的表象間の変換を行う再構成型演習は学習者の理解を促進する有効な方法であることが明らかとなった。

本論文では、第2章にて学習支援環境の設計手法について述べる。第3章にて異義可換性のある接続表現を対象とした接続詞演習環境について、第4章にて図的表現を媒介させた和差の算数文章題演習環境について述べる。第5章にて結論を述べる。

目次

概要	<i>i</i>
図目次	<i>iv</i>
表目次	<i>v</i>
1. 序論	<i>1</i>
2. 学習支援環境の設計手法	<i>3</i>
2.1. 古典的手法	<i>3</i>
2.1.1. Ad-hoc Frame Oriented アプローチ	<i>3</i>
2.1.2. Information Structure Oriented アプローチ	<i>4</i>
2.2. オープン情報構造指向アプローチ	<i>5</i>
2.2.1. 概要	<i>5</i>
2.2.2. 適用事例	<i>6</i>
2.2.3. 課題	<i>7</i>
2.3. オープン情報構造指向アプローチの拡張	<i>8</i>
2.3.1. 国語を対象としたオープン情報構造指向アプローチの適用	<i>8</i>
2.3.2. 図的表現を媒介させた和差の算数文章題演習環境.....	<i>8</i>
3. 異議可換性のある接続表現を対象とした接続詞演習環境	<i>9</i>
3.1. まえがき	<i>9</i>
3.2. 異議可換性のある接続表現の演習化	<i>11</i>
3.2.1. 文・意味構造対応モデル.....	<i>11</i>
3.2.2. 構造の用意	<i>13</i>

3.2.3. 組立に対する正誤判断	14
3.3. 接続詞演習環境の設計・開発	16
3.3.1. 演習の画面	16
3.3.2. 演習の種類	17
3.4. 試験的利用とその結果の分析	18
3.4.1. 試験的利用の概要	18
3.4.2. プレ・ポストテスト	19
3.4.3. 分析1：授業内での成立に関する分析.....	21
3.4.4. 分析2：学習効果の促進に関する分析.....	23
3.4.5. 分析3：異義可換性の理解の要求に関する分析	23
3.5. むすび.....	24
4. 図的表現を媒介させた和差の算数文章題演習環境.....	25
4.1. まえがき	25
4.2. 三文構成モデルと部分全体図の対応.....	28
4.2.1. 三文構成モデル	28
4.2.2. 部分全体図	30
4.2.3. 三文構成モデルと部分全体図の対応付け	31
4.3. 演習環境の設計・開発	31
4.4. 試験的利用とその結果の分析	34
4.4.1. 試験的利用の概要	34
4.4.2. プライミングテスト	35
4.4.3. 分析1：演習実施状況に関する分析	36
4.4.4. 分析2：学習効果に関する分析	37
4.5. むすび.....	39

5. 結論.....	41
参考文献.....	42

図目次

図 1 SCHOLAR の南米の地理の情報を参考に作成した意味ネットワーク	5
図 2 文・意味構造対応モデル	12
図 3 異義可換性のある接続表現.....	12
図 4 異義可換性のある接続表現の具体的記述	13
図 5 接続詞演習環境の演習画面.....	17
図 6 プレ・ポストテストの一例.....	21
図 7 アンケートの結果	22
図 8 F 値と平均要回答数の散布図	24
図 9 一つの存在文から作ることできる問題事例	29
図 10 モンサクソンの作問インタフェース	30
図 11 部分全体図	30
図 12 三つの表現間の対応.....	33
図 13 演習 1 の前半課題	33
図 14 演習 1 の後半課題	33
図 15 演習 2 の前半課題	34
図 16 演習 2 の後半課題	34
図 17 演習 3 の課題	34
図 18 プライミングテスト	36
図 19 正答数	39
図 20 回答時間.....	39

表目次

表 1 各演習タイプの平均要回答数	22
表 2 アンケートの質問項目	22
表 3 ペア成立数の度数分布表	22
表 4 適合率と再現率	23
表 5 三文構成モデルにおける存在文と関係文の組み合わせ	29
表 6 問題文と部分全体図の対応	31
表 7 演習実施状況	37
表 8 教師に対するアンケート結果	37
表 9 プライミングテストの結果	38

1. 序論

人の知的活動の一つである学習を情報工学的に支援する学習支援システムに関する研究が盛んに実施されている[1][2]. このような学習支援システムに関する研究は, Ad-hoc Frame Oriented アプローチと Information Structure Oriented アプローチの二つに大別される[3]. Ad-hoc Frame Oriented アプローチでは, 既に教育現場で実施されている活動を効率化することを目的としている[12]. 具体的な支援としては, 正誤診断機能, 学習進捗状態の記録機能, などを利用可能な学習支援システムが実現されている. その一方で, Information Structure Oriented アプローチでは, 教育・学習における有効性を主目的としつつ, 学習課題を情報工学的に解釈し, 学習課題の情報構造に基づいた学習支援システムを設計・開発することを目指したものとなっている[12]. 具体的な支援としては, インタラクティブな学習支援システムが実現されている. このシステムでは, 学習者の質問に対して回答を行うことや学習者に対して質問を生成することなどが可能となる.

この二つの手法の決定的な違いは, 学習支援システムに利用可能な学習課題の知識を保持させるかどうかにある. Ad-hoc Frame Oriented アプローチの場合は, 学習支援システムは利用可能な学習課題の知識を保持しないものとなる[3]. この手法における学習課題の用意の方法は, 教師が学習課題に関する問題文, 選択肢, 解答・誤答, 回答に対するフィードバック, 質問などのデータを全て自然言語で記述し, それをデータベースに格納する. さらに, 教師はデータベースに格納された学習課題に関するデータを呼び出すための全ての分岐を予め手続き的にプログラムに記述する. 上記のように学習課題を用意すると, それに関するデータは全て自然言語で記述されるため, システムはその意味を解釈することができないものとなる. つまり, システム上において利用可能な学習課題の知識は存在しないものとなる. また, システムが知識を保持しないため, システム自体が判断能力を一切持たず, したがって, 一度記述した処理の通りにしか動作することができないものとなる. その一方で, Information Structure Oriented アプローチの場合は, 学習支援システムは利用可能な学習課題の知識を保持するものとなる[3]. この手法では, 学習課題の情報構造を記述し, その情報構造を学習支援システムに実装する. 学習支援システムは計算機上で動作するものであるため, 学習課題を情報構造で記述することによって計算機上でもそれを処理可能となる. つまり, 学習課題の情報構造は, システム上で利用可能な知識となる. このように学習課題の知識をシステムが保持すると, システム自体がこの知識を用いて様々な判断や質問を行うことが可能となる. Ad-hoc Frame Oriented アプローチでは実現することが困難である網羅的な正誤診断機能や質問の生成機能および質問に対する回答機能が実現可能であるため, よりインタラクティブな学習支援システムを設計・開発することが可能となるといえる.

Information Structure Oriented アプローチは, 上述したようなインタラクティブな学習支援システムが設計・開発可能となるため, 有効な設計手法の一つであるといえる. しかしながら, その情報構造を計算機上で利用することにのみ焦点が当てられたものであり, 学習者が

利用することに焦点が当てられたものではない。学習者に学習課題の情報構造を可視化する、あるいは、操作可能化することは、外的表象の利用に相当することになる。外的表象とは、学習者の理解を外界に記号で表現したものである[4]。また、外的表象を活用することで学習者の理解が促進されることも明らかとなっている[5][6]。したがって、学習者に対して学習課題の情報構造を活用させることは有効であると考えられるが、Information Structure Orientedアプローチではそのような活用は実施されていないという問題点がある。

これに対して、Information Structure Orientedアプローチを基礎とした、学習支援システム上で学習者に対しても学習課題の情報構造を活用させることを想定したものとして、オープン情報構造指向アプローチが提唱されている[37]。この手法では、1) まず、学習課題の情報構造を記述する、2) 次に、その情報構造を構成要素と構成要素間の関係に分解し、外的表象の部品とする、3) 最後に、分解された部品を組み立てることによって、記述した元の情報構造に対応する外的表象を再構成する演習環境を構築する[11]。このようにシステムを構築すると、外的表象として学習課題の情報構造を学習者が活用可能となる。さらに、学習課題の情報構造を記述しているため、システム上で診断およびフィードバックを返すことも可能となる。このアプローチは、既にいくつかの学習課題を対象に適用はされており、その有効性は実践利用を通して確認されている。

しかしながら、このアプローチには次の二つの課題があると考えられる。一つ目は、「国語分野に対してオープン情報構造指向アプローチが適用すること」である。現状のオープン情報構造指向アプローチは、比較的学习課題の構造化が自明とされる算数、物理、論理、概念を対象とした学習課題には適用されているが[12][13][14][15]、必ずしも全ての領域において構造化が前提とされない国語を対象には適用がされていない。国語が重要な学習対象であることは自明であり、この分野に対してもこの手法が適用されることが望ましい。二つ目は、「異なる外的表象への変換活動を実現すること」である。外的表象は、言語、図、数式などいくつかの記述形式がありえる。これらの記述形式間においては変換を行うことが可能であり、その変換活動は学習を促進する上で有効であると考えられている[5][17][18]。しかしながら、オープン情報構造指向アプローチでの適用事例では、外的表象として学習課題の情報構造を操作することは実現されてはいるものの、異なる外的表象への変換活動に関しては十分に実現されたものではなかった。したがって、異なる外的表象への変換活動を実現することはさらに学習者の理解を促進するために有効な方法の一つであると考えられる。

本研究では、一つ目の課題に対して、1) 国語分野における接続詞の学習課題を対象とした再構成型の学習支援システムの設計・開発を行った。また、二つ目の課題に対して、2) 和差の算数文章題を対象とした図的表現を媒介させる再構成型の学習支援システムの設計・開発を行った。

以下、本論文では、第2章にて学習支援環境の設計手法について整理を行う。第3章にて異議可換性のある接続表現を対象とした接続詞演習環境について、第4章にて図的表現を媒介させた和差の算数文章題演習環境について述べる。第5章にて結論を述べる。

2. 学習支援環境の設計手法

2.1. 古典的手法

情報技術を活用した学習支援環境の設計手法は、「Ad-hoc Frame Oriented アプローチ」と「Information Structure Oriented アプローチ」の二つに大別される[3]。本節では、これら二つのアプローチについて述べる。

2.1.1. Ad-hoc Frame Oriented アプローチ

情報技術の発展に伴い、それを活用した学習支援が実施されてきた。学習支援に対する情報技術の活用方法の一つとして、Ad-hoc Frame Oriented アプローチがある。このアプローチでは、既に教育現場で実施されている活動を効率化することに主眼を置かれている[12]。この目的のための支援では、1) 多肢選択式や穴埋め形式の演習問題を出題する際、自動的に診断およびフィードバックを返すこと、2) 学習者が実施した演習に関する学習データの記録を行うこと、などが計算機上で実現されている。このような支援は情報技術によって実現可能であることは自明であり、それを実現する意義も自明であることから、これらに関連する学習支援は既に多種多様に展開されている[1][2]。

このアプローチを適用した学習支援システムの事例には、Moodle や Massive Open Online Courses (Moocs) が該当する。Moodle では、講義のリアルタイム動画配信、講義資料の配布、演習課題・テストの実施、学習進捗の管理、教員あるいは学生同士とのコミュニケーションなどを全て WEB 環境上で実現可能としている[7][8]。また、Moocs では、インターネットを通して世界中の大学の講義を受講でき、講義受講後のテストで一定の成績を挙げることで修了証を得ることが可能となっている[9]。この二つの事例からも、教育現場で実施されている既存の活動を効率化することに焦点が当てられていることが確認できる。

上記の事例のような Ad-hoc Frame Oriented アプローチに基づいて設計された学習支援システムは、データベースがフレームと呼ばれる学習課題に関するデータから構成されるという特徴がある[3]。フレームは、学習課題に対応する問題文、選択肢、質問、答えなどの各項目の情報が記述されたものである。このフレームは、教師によって自然言語表現で記述されるものであるため、学習支援システム上でその意味を解釈することは困難となっている。それゆえ、教師は、学習課題に関係のあるフレームを予め全て記述する必要があり、学習課題の演習時に想定される分岐を全て洗い出し、その分岐ごとに呼び出されるフレームについても記述しておく必要もある。したがって、学習支援システムの自由度はフレーム系列の分岐によって制限され、柔軟な制御ができないという問題点がある[10]。つまり、多様な振る舞いが可能な学習支援システムを構築するためにはフレームおよびフレーム系列の分岐を全て教師が記述しなければならない、教師にとって非常に負荷がかかるものになる。また、全てのフレーム系列の分岐を網羅的に記述することは現実的には不可能であるため、一部

の機能は制限されることになる。

2.1.2. Information Structure Oriented アプローチ

Ad-hoc Frame Oriented アプローチでは、既に教育現場で実施されている活動を効率化することに主眼を置かれていた。その一方で、Information Structure Oriented アプローチでは、計算機を活用することによって成立する新しい活動を実現することに主眼が置かれている [12]。つまり、従来の紙媒体だけでは実現ができなかった活動を計算機により実現するものといえる。この目的のための支援では、学習課題の情報構造の分析を行い、その情報構造を活用したインタラクティブな学習支援システムの構築が実現されている。このシステムでは、システム自体が情報構造で記述された学習課題に関する知識を有しているため、正誤診断を自動化する、学習者に対して質問を生成する、あるいは、学習者の質問に回答する、ということも実現可能となる。これは、計算機上で処理可能である学習課題の知識をシステムが有することにより、教師は学習課題のフレームおよびフレーム系列の分岐を全て記述する必要はなくなるということの意味する。つまり、Ad-hoc Frame Oriented アプローチの問題点である教師による学習課題の用意の負荷を取り除いたものになっているといえる。なお、学習課題の情報構造の記述にもコストはかかるので一概にはこの点で Information Structure Oriented アプローチの方が優れているとはいえないため、学習課題の種類によっては Ad-hoc Frame Oriented アプローチを使用するということはありえる。しかしながら、網羅的に診断、質問、回答することは Information Structure Oriented アプローチを採用しなければ実現困難となっているため、そのような支援が求められる場合には Information Structure Oriented アプローチを適用することになる。それに加えて、学習課題の知識を一貫性のある情報構造として記述しているため、自然言語表現で記述された一貫性のないフレームと比較して再利用性は高いものであるという利点もある。

Information Structure Oriented アプローチを適用した事例には、SCHOLAR と呼ばれる学習支援システムがある [3]。このシステムでは、情報構造として記述された南米の地理に関する学習課題の知識が格納されており、この知識に基づいてシステムは学習者の質問に回答すること、あるいは、学習者に対して質問を行うことが可能となっている。SCHOLAR では、学習課題を意味ネットワークで表現することによって上記の機能を実現している。意味ネットワークでは、概念をノードで概念間の関係をリンクで表現し、二つのノードと一つリンクを結合することで一つの命題が表現される。例えば、図 1 は SCHOLAR の南米の地理に関する記述の一部を参考に作成した意味ネットワークである(なお、文献 3 で記述された意味ネットワークとは形式が若干異なるが、図 1 のものは標準的な意味ネットワークの形式で記述している)。この図では、「大陸 HAS-A 国」および「国 HAS-A 州」の二つの命題が記述されているが、この二つの命題から「大陸 HAS-A 州」という命題を導出することが可能となる。つまり、意味ネットワークを記述することは論理学における命題を記述することにあたり、さらに、記述した命題に対して論理学の規則(演繹原理)を適用することにより、計

算機上で推論を実現することが可能となる。この性質を基盤として学習者からの質問に回答することおよび学習者に対して質問することが可能となる。例えば、図1の場合は、「国の一種は何ですか?」という質問を生成することや「アルゼンチンの緯度は何度ですか?」という質問に回答することが可能である(図1から前者の回答はアルゼンチンとウルグアイ、後者の回答は-22度から-25度ということが確認できる)。計算機上で推論や質問などの処理を可能にするという観点からは論理プログラミング言語 Prolog と同等の処理を行っているといえるが、意味ネットワークは表現形式がシンプルであるため、人でも解釈をしやすいという特徴がある。したがって、意味ネットワークを学習者に利用させることは、学習課題の理解を深めるための有効な一つの方法となることが期待される。しかしながら、Information Structure Oriented アプローチでは、意味ネットワークのような情報構造は計算機上での利用に留まっており、学習者に利用させることはできていないものになっている。つまり、学習課題の情報構造を学習者に利用させることには焦点が当てられていないものとなっている。

このアプローチでは、学習課題の情報構造を計算機で処理可能なように記述し、その情報構造をシステムに実装することにより、システム上でその情報構造に基づいた診断機能や質問機能が実現される。

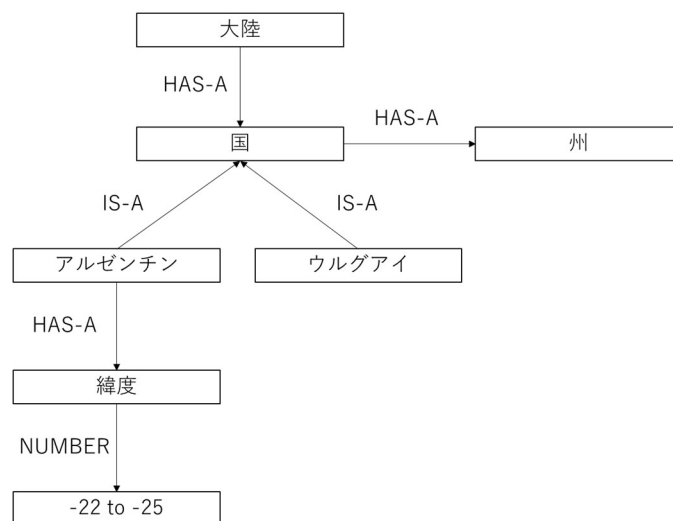


図1 SCHOLAR の南米の地理の情報を参考に作成した意味ネットワーク

2.2. オープン情報構造指向アプローチ

前節で示した Information Structure Oriented アプローチは、学習課題の情報構造を計算機が活用するものとして位置付けたものであった。本節では、学習課題の情報構造を学習者が活用するものとして位置付けたオープン情報構造指向アプローチについて述べる。

2.2.1. 概要

Information Structure Oriented アプローチは、学習課題の情報構造を記述し、その情報構造

に基づいたインタラクティブな学習支援システムを設計・開発するものであった。この方法において、学習課題の情報構造は計算機が活用するものとして位置付けられていた。それに加えて、学習課題の情報構造を学習者に提供し、活用させることにも対応させたものとしてオープン情報構造指向アプローチが提唱されている[37]。

この手法では、学習課題の情報構造を活用することによって、1) 学習者にその情報構造を可視化する、および、2) 学習者に情報構造を直接操作させる、インタラクティブな学習支援システムの実現が可能となる。

学習者に情報構造の可視化することおよび情報構造を操作させることは、学習者の理解を深める上で有効な手法であると考えられる。情報構造の可視化は、学習者の理解を外界に言語、図、数式などの記号で表現することに対応する。この考え方は、人の思考は情報構造および情報構造の操作として表現される、という人工知能の作業仮説に基づく立場であり、この手法はこの作業仮説を支持するものとなっている。この前提においては、理解は人の思考の一部であるため、学習者の理解は情報構造で表現されることになる。ところで、学習者の理解を外界に記号で表現することは、「外化」と呼ばれ、外界に表現されるものは「外的表象」と呼ばれる[4]。また、情報構造の操作は、外的表象に対する操作に対応することになる。外化および外的表象は、学習者が持つ表象(内的表象)を洗練し、学習者の理解を深めるとされている[5][6]。したがって、情報構造を可視化すること、および、情報構造を操作させる活動は学習者の理解を深めるために有効であるといえる。

上記のような考え方に基いてオープン情報構造指向アプローチが提唱されており、このアプローチでは、外化することによる学習の形態の一つである「組み立てることによる学習」の枠組みに基づいて学習支援システムが設計・開発されている[11]。この枠組みでの学習支援システムの実現方法は、まず、学習課題の情報構造を記述し、その情報構造を構成要素と構成要素間の関係に分解し、外的表象の部品とする。そして、学習者にその部品を与え、記述した元の情報構造に対応する外的表象を再構成する演習環境を構築する。この枠組みにおける演習では、与えられた部品を組み立てることで学習者自身が情報構造の操作を行うため、その構造の獲得が促進される。また、外的表象の要素を生成・認識する負荷が軽減されているため、学習者は構造を組み立てることに集中することが可能となる点も特徴となっている。さらに、情報構造を記述しているため、**Information Structure Oriented** アプローチの場合と同様に計算機上でその情報構造に基づいた処理を行うことが可能なため、インタラクティブな学習支援システムが実現される。

2.2.2. 適用事例

先行研究において、オープン情報構造指向アプローチを採用した学習支援システムの設計・開発の事例には、算数、物理、論理、概念を対象としたものが存在する[12][13][14][15]。これらの事例では、学習課題の情報構造化を行い、その情報構造に基づいた学習支援システムの設計・開発を行ったものである。算数や論理の事例の場合は、学習者に単文を予め与え、

その単文を組み立てる演習が実現されている。概念の事例の場合は、ノードとして概念、リンクとして概念間の関係が提供されており、ノードとリンクを組み立てる演習が実現されている。また、どのシステムにおいても、インタラクティブ性のあるシステムとなっている。

2.2.3. 課題

オープン情報構造指向アプローチは、上述した研究事例から既に実践利用においてその有効性が確認されているといえる。しかしながら、この手法には次の二つの課題がある。

一つ目の課題は、国語分野においてオープン情報構造指向アプローチが適用することである。前述したように、算数、物理、論理、概念のような比較的構造化が前提とされた学習課題を対象に適用はされているものの、必ずしも全ての領域において構造化されていることが自明に前提とされない国語分野を対象に適用した事例は存在していない。また、他の分野の学習課題と同様に国語も重要な学習課題であることは自明である。したがって、オープン情報構造指向アプローチを国語の分野まで拡張することが課題の一つであるといえる。

二つ目の課題は、外的表象の異なる表現間の変換活動が実現することである。外的表象は、学習者の理解を外界に記号で表現したものであるが、記号の種類には言語表現、数式表現、図的表現などがある。つまり、同じ学習課題を表す外的表象であっても、その記述には様々な表現がありえるということである。そして、学習者の理解を深めるためには、複数存在する外的表象の表現間の変換活動を実現することが一つの有効な方法になると考えられる。Brunerによれば、学習者が持つ表象は、動作的表象(実物あるいは半具体物)、図像的表象(図、グラフ、表など)、象徴的表象(言語、数式、文字など)、の三つに大別されると主張している[16]。また、これらの三つの表象がそれぞれ相互作用を行うことで対象を理解していると主張している[17]。具体的な研究事例としては、理科学習を対象として三つの表象が独立して機能するのではなく、相互に密接に関連していることが確認されている[5]。つまり、学習者は複数の表象の変換を行うことによって対象を理解しているといえる。さらに、中原はBrunerの研究成果を基礎として算数・数学教育における表象の表現体系を提唱している[18]。この表現体系では、1) 現実的表現(現実世界の実在物)、2) 操作的表現(教具などの具体物)、3) 図的表現(絵、図、グラフなど)、4) 言語的表現(自然言語)、5) 記号的表現(数学的記号)、の五つから構成されるものとしている。また、中原は、ある表現から別の表現に変換することで理解が深まると主張している[18]。以上のことから、異なる表象間の変換活動は学習者の理解を促進する上で有効であると考えられる。また、外的表象を活用することで内的表象が精緻化されることから、外的表象の変換活動も同様に学習者の理解を促進することが期待できる。しかしながら、オープン情報構造指向アプローチにおいて外的表象の変換活動は十分に実現されていない現状にある。したがって、異なる外的表象の表現間の変換活動を実現することも課題の一つであるといえる。

2.3. オープン情報構造指向アプローチの拡張

本節では、前節で言及したオープン情報構造アプローチの課題である、1) 国語分野においてオープン情報構造アプローチが適用すること、2) 異なる外的表象の表現形式間の変換活動が実現すること、の二つに対する実現方法を提案する。

2.3.1. 国語を対象としたオープン情報構造指向アプローチの適用

オープン情報構造指向アプローチは、算数、物理、論理、概念の学習課題を対象に適用されており、その有効性が確認されている。しかしながら、この手法は国語には適用されていなかった。そこで、本研究では、国語分野における接続詞の学習課題を対象にオープン情報構造指向アプローチの適用を行い、「組み立てることによる学習」の枠組みに基づいた再構成型の学習支援システムの設計・開発およびその評価を行った[19]。¹

2.3.2. 図的表現を媒介させた和差の算数文章題演習環境

オープン情報構造指向アプローチを算数文章題に適用した先行研究として、作問学習支援システム「モンサクン」がある。このモンサクンは、既に継続的かつ長期的な実践利用においてその有効性が確認されている[45][46][47]。しかしながら、一部の学習者に対しては学習効果が促進されていないことが実践利用を通して確認されている。このシステムにおける演習では、数式表現から言語表現への変換活動は実現されているものの、図的表現を媒介させる演習は実現されていないため、外的表象の変換活動が十分に実現できていないといえる。ところで、和差の算数文章題の演習においては、図的表現を学習者に与えて理解を促進するという方法は有効であることは既に確認されている[50][51][52]。しかしながら、図的表現を与えるだけでは、図を取り扱う過程で数多くの誤りが発生する、あるいは、個々の活動に手間がかかるため、図を用いた演習を数多くこなすことができないという問題点がある[53][54][55]。この問題点に対しては、図的表現を媒介させる形で「組み立てることによる学習」を実現することが有効な方法の一つであると考えられる。そこで、本研究では、言語表現と図的表現を連動する形で変換する活動が可能な和差の算数文章題演習環境の設計・開発およびその評価を実施した[20]。²

¹ この学位論文の三章は、同じ著者によって「異義可換性のある接続表現を対象とした接続詞演習環境の設計開発とその試験的利用」に基づいており、IEICEの許可を得て[19]から再利用をしている。

² この学位論文の四章は、同じ著者によって「図的中間表現としての部分全体図を用いた和差の算数文章題演習環境の設計・開発とその試験的評価」に基づいており、IEICEの許可を得て[20]から再利用をしている。

3. 異議可換性のある接続表現を対象とした接続詞演習環境

本章では、国語分野の接続詞の学習課題に対してオープン情報構造指向アプローチを適用した事例について述べる。ここでは、オープン情報構造指向アプローチに基づいて学習支援環境を設計・開発することで、学習者が計算機上で学習課題の情報構造を外的表象として活用できる演習の実現を行った。また、学習課題の情報構造を計算機に実装しているため、正誤診断およびフィードバックが可能な学習支援環境となっている。さらに、本研究で対象とした接続詞の学習課題(異議可換性のある接続表現)は従来の教育現場では実施されていなかったものであり、従来は実施されていなかった活動を新しく実現したものとなっている。

3.1. まえがき

接続詞は文章の読解や作成において重要な役割を果たしており、国語の中でも重要な学習対象の一つとなっている[21][22][23]。接続詞の役割は、接続詞の前後に存在する文を論理的に接続することであるとされており、前後の文脈を意味的に理解することができていれば、接続詞は必ずしも必要とされないという考え方もある。このような場合においては、接続詞は既にある文脈に対して新しい意味を追加するものではない。実際に従来行われている接続詞に関する演習もそのほとんどは、接続詞の前後の文(文章)だけによって既に確定している文脈を読み取り、その文脈にふさわしい接続関係を表す接続詞を選択するといったものであった。

しかしながら、読解の過程において読み手に後の文脈を読み取りやすくするための予測を与えることも接続詞の重要な役割であることを多くの研究が指摘している[24][25][26][27][28]。このことは、書き手にとっては、書き手がこれから書いていきたい文脈を予告的に付加する、という役割を果たしているともいえる。つまり、前後の文脈が全て把握された後の時点においては、ある接続詞の選択は必然となりえるが、読解や記述のプロセスにおいては、接続詞自体が意味を付加しうるものであることを示している。

二つの文を与えて、それらの文をつなぐ適切な接続詞を選ばせるのは、接続詞に関する演習の標準的な設定であり、この設定では選択される接続詞は前後の二文によって決まることが前提となっている。しかしながら、選択する接続詞によって異なった意味を与えることになる前後の文のペアを見つけることは難しくない。例えば、以下の2例を考えてみる(以下では、二つの文を接続詞でつないだ表現を接続表現と呼ぶ)[28]。

(接続表現1)「私は毎日懸命に練習して大会に臨んだ。だから、二十人中四位になった」

(接続表現2)「私は毎日懸命に練習して大会に臨んだ。しかし、二十人中四位になった」

これらの二つの接続表現では接続詞前後の文は同じであり、したがって明示的に与えられている意味(以下、表意と呼ぶ)は共通であるが、接続詞が異なることで、これらの接続表現から生起される意味(以下、含意と呼ぶ)は異なるものとなっている。接続表現1におい

では、「二十人中四位になった」ことが「私は毎日懸命に練習して大会に臨んだ」ことに對する順当で予想された結果であることが含意されている。これに對して接続表現 2 においては、「二十人中四位になった」ことが「私は毎日懸命に練習して大会に臨んだ」ことに對する順当ではない結果であるとして接続されており、したがって、「二十人中四位になった」が不本意な結果であることが含意されている。接続表現において接続詞を変えても接続表現として成立することを「可換性」と呼ぶが[26]、接続表現としての含意が変わらない場合と上述のように含意が変わる場合がある。本研究では、含意が変わらない可換性を同義可換性、含意が変わる可換性を異義可換性と呼ぶことにする。本研究は、異義可換性のある接続表現に焦点を当てたものとなっている。

この異義可換性のある接続表現とその重要性に関してはこれまでに多くの研究が指摘している。氏家は、「接続詞は純粹論理・客觀論理を表現するものではない」とし、「私にとって」の意が前提として含まれている」のが接続表現であり、そこに書き手の「個人としての論理」が表現されているとしている[24]。川端も「話し手の認識の在り方」や、「書き手の主觀的な事態把握」を付加するものとしての接続詞の在り方の重要性を指摘している[29]。石黒は、接続詞の持つ「読み手に含意を読み取らせる機能」を指摘し、それを「接続詞の創造的側面」と位置付けている[28]。そして、その含意は書き手の主觀を受け入れれば論理的であることを指摘している。また、国語の教科書においても、異義可換性のある接続表現を取り扱っていると判断できるものがある[30][31][32]。以下教科書での取り扱いの例を示す。

「次の（ ）に、[]の中の言葉を入れて、意味の違いを比べてみましょう。[しかし、それで、だから、けれども]。「子犬はボールを取ってきた。（ ），お母さんに叱られた」このように、異義可換性のある接続表現の存在と重要性が認識されているといえる。

しかしながら、異義可換性のある接続表現の演習の実現方法に焦点を当てた研究はこれまでのところ見当たらない。筆者らが調べた限りでは、接続詞を取り扱った問題集において異義可換性を持った課題は見つけれなかった。教科書においても前述のような取り扱いはあるが、具体的な正誤を判定する課題としては取り扱われておらず、話題提供的なものとしての記載であった。後述する本研究で開発した演習環境の授業での試験的利用にご協力いただいた二名の教員についても、異義可換性のある接続表現が小学校の国語においても重要であることに同意しながらも、教える題材として明示的に用いたことはないとのことであった。これらのことから、接続詞に関する演習においては、接続詞によって意味の変わる異義可換性は取り扱われていなかったと判断している。また、石黒は接続詞に関して行われている演習として、異義可換性を持った接続表現が取り扱われていないことを指摘した上で、「接続詞が純粹論理によって決まるような錯覚を受験生に抱かせ、書き手による選択という接続詞の創造的側面を見失わせてしまう恐れがある」としている[28]。

これらのことから、筆者らは異義可換性のある接続表現を対象とした接続詞演習を実現することの意義は大きいと考え、その学習支援環境の開発を試みてきた[33][34]。しかしな

がら、接続詞によって変わる「含意」を取り扱う必要があるため、演習としての実現は必ずしも簡単ではなかった。本研究では、接続詞表現を、(I) 前後の文とそれらの文をつなぐ接続詞の 3 つの要素で構成される文構造、(II) 文表現を構成する文が明示的に表している二つの表意と接続詞によって示唆される含意の 3 つの要素で構成される意味構造、によってそれぞれ記述し、この二つの構造の対応として異義可換性のある接続表現とその意味を表す方法を提案し、その枠組みを文・意味構造対応モデルと呼ぶ。演習としては、文構造と意味構造を組み立てたり変更させたりする活動を設計し、その活動の結果を診断・フィードバックできる演習環境を開発した[35][36]。これは、対象に対する理解を深める上では、対象の構造の可視化と操作可能化が有用であるとの考え方に基づくものであり、本研究ではオープン情報構造アプローチと呼んでいる[37]。

前述の接続表現 1 を例とすると、文・意味構造対応モデルでは、「私は毎日懸命に練習して大会に臨んだ」、「だから」、「二十人中四位になった」の 3 つの要素で文構造が記述され、これに伴い二つの表意（「私は毎日懸命に練習して大会に臨んだ」、「二十人中四位になった」）と 1 つの含意（「二十人中四位は順当な結果である」）の 3 つの要素によって意味構造が記述されることになる。ここで、文構造の接続詞を「しかし」に置き換えると、この置き換えと連動して、意味構造中の含意が「二十人中四位は順当でない結果である」に置き換わることになる。

本稿では、「異義可換性のある接続表現の演習を可能にする計算機ベースの演習環境の実現を行うこと」を目的として、異義可換性のある接続表現を取り扱った演習環境を設計・開発した。また、本演習環境の評価のために、小学校 4 年生の授業において試験的利用を行い、その運用結果を分析した。その結果、演習環境のログデータ、プレ・ポストテスト、およびアンケート結果から、1) 授業内利用における演習として問題なく実施可能であったこと、2) 異義可換性のある接続表現の理解を要求する演習であったこと、3) 学習効果を促進すること、の 3 つを示唆する結果を得たので報告する。

3.2. 異義可換性のある接続表現の演習化

3.2.1. 文・意味構造対応モデル

本稿では取り扱う接続表現を、接続詞の前の 1 文（前文）、接続詞、接続詞の後の 1 文（後文）、の 3 つの要素で構成されるものとし、接続表現をこの 3 つの要素（前文、接続詞、後文）で記述したものを文構造と呼ぶ。これに対応して、接続表現で表される意味は、前文単独および後文単独での意味を表す 2 つの表意と、前文、接続詞、後文の 3 つ組によって決まる 1 つの含意で構成されるものとし、接続表現の持つ意味をこの 3 つの要素（表意 1、表意 2、含意）で記述したものを意味構造と呼ぶ。そして、この文構造と意味構造のペア（図 2）を文・意味構造対応モデルと呼ぶ。ここで、意味構造中の 2 つの表意（表意 1 および表意 2）は、それぞれ文構造中の前文および後文に対応するものとする。

このモデルに基づいて異義可換性のある接続表現を図式化すると図 3 のように図式化できる。この図式化に基づけば、異義可換性のある 2 つの接続表現の文構造とそれらに対応する意味構造は、文構造が、前文、後文、2 つの接続詞、の 4 つの要素、意味構造が、前文に対する表意、後文に対する表意、前文および後文を 2 つの接続詞と組み合わせることによって生まれる 2 つの含意、の 4 つの要素で構成できる。表意および含意は、文として表現でき、前文・後文とその表意は同一の文で表現すると、異義可換性のある接続表現の組立は、文構造の 4 つの要素と、意味構造の 4 つの要素から、文構造と意味構造の 2 つのペアである文・意味対応構造 1 と文・意味対応構造 2 が組み立てられることになる。図 4 に、具体例を示した。異義可換性のある接続表現をこのモデルに沿って記述することで、接続表現の部品の組立演習化、および組み立てられたものの正誤判定が可能となる。

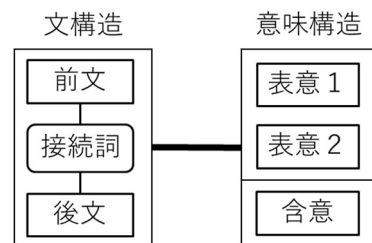


図 2 文・意味構造対応モデル

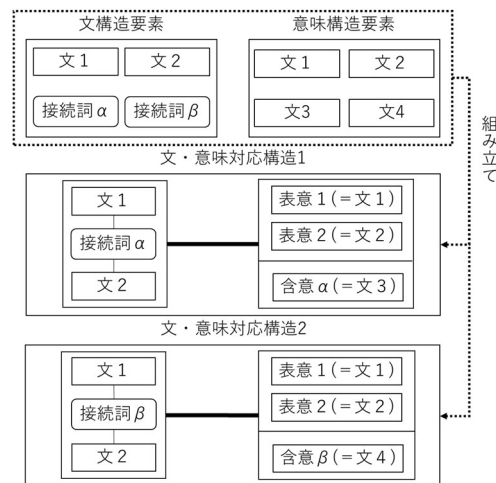


図 3 異義可換性のある接続表現

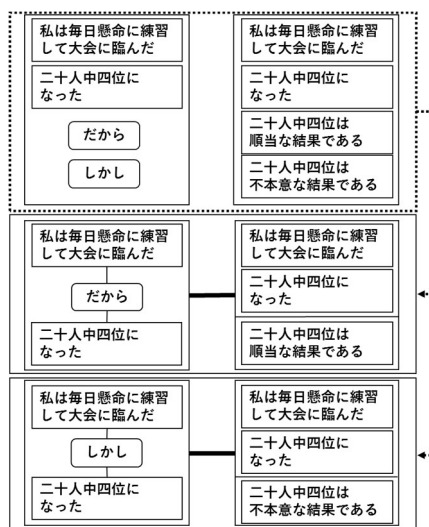


図 4 異義可換性のある接続表現の具体的記述

3.2.2. 構造の用意

本研究では、異義可換性のある接続表現に対する文・意味構造対応モデルに沿った記述の用意を手順化したので、本節で説明する。正誤判断パターンの用意の手順化については、次節で説明する。

本節で述べる手順は、文・意味構造対応モデルで記述可能な異義可換性が存在すること、つまり、共通の前文・後文に対して異なる二つの接続詞をそれぞれ組み合わせた時に異なる含意を記述できること、が前提となる。順接・逆接の接続詞に関しては、この前提を満たす接続表現の作成が可能であるが、他の接続詞に関しては現時点では異義可換性のある接続表現を作ることができるかは事例的に検討する必要がある。また、本研究で実装・検証できたのは順接・逆接に関する異義可換性のある接続表現だけであり、他の場合についてはまだ実装・検証はできていない。以下、異義可換性のある接続表現に対する文・意味構造対応モデルに沿った記述の用意の手順を示すが、手順自体に一般性はあるといえるものの、順接・逆接以外の場合においては、教材作成者に負うところが大きい手順であるといえる。

(1) 前文・後文となる単文（肯定文）を1組用意する。

(例：「友達に会いたい」と「駅に行った」)

(2) 異義可換性のある接続表現となるように(1)の2つの単文を接続可能な接続詞を2つ用意する。

(例：「だから」と「しかし」)

(3) (2)の2つの接続詞で(1)の単文を接続した際の含意を単文にする。

(例：「友達は駅にいる」と「友達は駅にいない」)

(4) 必要に応じてダミーとなる単文を用意する。本研究では、前文・後文の否定文をダミーとしている。(例：「友達に会いたくない」と「駅に行かなかった」)

この手続きにより、6個の単文と、2個の接続詞が用意される。文構造は、前文、接続詞、

後文で構成されることから、2つの文と1つの接続詞を当てはめることができるテンプレートを文構造テンプレートとし、6つの単文と2つの接続詞で構成されるリストを文構造要素リストとする。意味構造は、前文に対応する表意、後文に対応する表意、および含意で構成されるので、2つの表意と1つの含意を表す文を当てはめることができるテンプレートを意味構造テンプレートとし、6つの単文を意味構造要素リストとする。

本演習は、前述の文構造テンプレートと意味構造テンプレートを、文構造要素および意味構造要素で埋めることで、文・意味対応構造を組み立てることを基本活動とする。このため、数多くの可能な組み合わせ、つまり回答が存在し、その組み合わせは、文構造で6文×2接続詞×5文=60通り、意味構造で6文×5文×4文=120通り、となり、全体で60×120=7200通りとなる。また、用意の際に意図した正解以外の正解も複数存在する。その取扱いについて、次節で述べる。

3.2.3. 組立に対する正誤判断

本節では、用意した構造の正誤判断パターンについて説明する。この分類は、前述した前提を満たす場合に適用可能なものとなっている。また、一部の手続きに関しては順接・逆接の場合に特有の方法が存在している。

正誤判断パターンに関しては、(1)形式的に正答と判断できるもの、(2)形式的に誤答と判断できるもの、(3)形式的に正誤判断できないもの、の3つに分類して診断に必要な情報を整理した。(3)に関しては、課題設計者が直接判断を行い、その正誤を決定した。

形式的に正解と判定できるものは、前節の課題設計時に用意した異義可換性のある接続表現のペアである。

前節で用意した前文を肯定文A、後文を肯定文B、2つの接続詞を接続詞 α 、接続詞 β として接続詞 α と2つの肯定文を用いた時に生起される含意を含意C、接続詞 β と2つの肯定文を用いた時に生起される含意を含意Dとすると、用意したペアは以下の基本正解パターン1,2として表現される。また、本研究では、接続詞 α を順接の接続詞、接続詞 β を逆接の接続詞としたものを取り扱った。(表意に関しては肯定文と同じものになるためここでは省略している)。

基本正解パターン1:

「肯定文A. 接続詞 α (順接), 肯定文B. ー含意C」

基本正解パターン2:

「肯定文A. 接続詞 β (逆接), 肯定文B. ー含意D」

これらは明らかに正解となるため、形式的に正解と判定できる。その一方で、形式的に誤答と判定できるものは、1) 文構造の前後文と意味構造の表意の対応関係に起因する誤答(7200通り中の6960通り)、2) 意味構造における不適切な含意の選択に起因する誤答(48通り)、3) 矛盾する意味となる文のペアの使用に起因する誤答(144通り)、の3つがある。

1)は、文構造で使用した前文と後文が意味構造に含まれていない誤答と文構造で使用した

前文を表意 1, 後文を表意 2 として扱っていない誤答に分類される(前者が 5760 通り, 後者が 1200 通り存在する). 2) は, 後述する「基本正解パターンの順列」および「基本正解パターンの肯定文を否定文に置き換えた順列」の接続詞を入れ替えたものである(例えば, 「肯定文 A. 接続詞 α , 肯定文 B. 一含意 C」の接続詞 α を「肯定文 A. 接続詞 β , 肯定文 B. 一含意 C」のように接続詞 β に入れ替えたものが該当する). 3) は, 肯定文と否定文のペア(A と $\neg A$, B と $\neg B$), または基本正解パターンの含意のペア(含意 C と含意 D) を用いた誤答である. なお, 含意のペアに関しては含意 C と含意 D が肯定文と否定文のペアとなる場合に限り形式的に誤答と判断できるものになる. これらのペアが存在すると矛盾が生じてしまうため, 形式的に誤答と判定した.

形式的に正誤判定できないものは, i)基本正解パターンを除く「基本正解パターン 1,2 の順列」(10 パターン), ii)「基本正解パターン 1,2 の肯定文を否定文に置き換えた順列」(36 パターン), となる. i)の各順列は, 以下の手順で形式的に求めることができる. まず, ここでは肯定文 A(前文)を A, 肯定文 B(後文)を B, 接続詞 α により生起される含意 C を C, 接続詞 β により生起される含意 D を D として表現する. 肯定文 A, 肯定文 B, 含意 C の 3 つの要素から構成される集合は, 要素集合 $S1 = \{A, B, C\}$ として記述され, 肯定文 A と肯定文 B, 含意 D の 3 つの要素から構成される集合は, 要素集合 $S2 = \{A, B, D\}$ として記述される. この要素集合 $S1$ の 3 つの要素の中から 2 個を取り出し, 順番に並べ, 前文・後文としたものを順列集合 $P1 : \{(A, B), (B, A), (A, C), (C, A), (B, C), (C, B)\}$ として表現する. 接続詞は, 接続詞 α が選択されているものとし, これらが文構造として成立する. 残りの含意は, $P1$ の順列に含まれない $S1$ の残りの要素とした. 表意に関しては, 前文が表意 1, 後文が表意 2 に正しく選択されているものとする. このようにして基本正解パターン 1 の順列は表現される. 基本正解パターン 2 の順列は, 要素集合 $S2 = \{A, B, D\}$ から順列集合 $P2 : \{(A, B), (B, A), (A, D), (D, A), (B, D), (D, B)\}$ を作成して 1 と同様の処理をする. ただし, 接続詞は接続詞 β が選択されている. なお, $P1$ と $P2$ の最初の順列は基本正解パターンとなり, それ以外が形式的に正誤判定できない正解候補パターンとなる. ii)の各順列集合も基本的には上記の否定文を含まない場合と同様の方法で求めることができる(要素集合 $S1 \cdot S2$ の肯定文 $A \cdot B$ のいずれかまたは両方を否定文 $\neg A$, $\neg B$ に変更し, それに基づき順列を作る), この場合, 全ての組が正解候補パターンとなる. ただし, 否定文が 1 個含まれる場合は接続詞をもう片方の接続詞に置き換え, 否定文が 2 個含まれる場合は元と同じ接続詞を用いるものとした. このようにして i)および ii)の正解候補パターンを用意した.

上記の分類を基本として, 形式的に正誤判断できないものの正答を決める作業に関しては人が実施している. この理由は, 今回の課題設計方法では, 肯定文 A, 肯定文 B, 含意 C, 含意 D, 否定文 $\neg A$, 否定文 $\neg B$ の構成要素間関係が自明ではないため, それらが成立する意味構造となっているかを形式的に判定できないからである. また, 用意した要素によっては 1 つの文構造に対して含意が複数存在する場合があるが, このような場合は正答を一

意に確定することができないため、「決められない」という単文を別途正解カードとして人が判断して追加している。例えば、3.2.2 節の課題の場合、「友達は駅にいる。しかし、駅に行かなかった。」に対して、「友達に会いたい」と「友達に会いたくない」の両方が含意として成立し、含意が一意に定まらないものになっている。このような手順を経て正解を用意すると 3.2.2 節の課題設定の場合、32 通りが正解パターンとなった。

なお、この組立に対する正誤判断の作業は現時点では人手に頼るものとなっており、今後の大きな課題となっている。3.2.1 節で述べたように、文構造としては 2 つの文、および 2 つの接続詞、意味構造としては 4 つの文、を用意すれば異義可換性のある文・意味対応構造を作ることができ、これだけの部品を用いた組立であれば、人手での正誤判定を大幅に減らせることができる。今回は、自由度のある活動に対する要望があり、それにこたえる形で、意図した正解に対するダミーを用意し、それを用いた妥当な組立ができるために人手に判断を求める件数が増えたが、ダミーを入れなくても複数の正解が存在することから、ダミーを入れないことも検討の価値があると考えている。また、次節で述べるように実装した演習においては、異義可換性のある接続表現の特徴を明示化するために、与えられている文・意味対応構造における接続詞および含意の部分だけを変更する演習および部分的な組立を行う演習も用いている。このような演習においては、正誤の判断の必要数は大幅に限定されることから、このような演習を中心に用意することも負荷軽減の有望な方法と考えている。

3.3. 接続詞演習環境の設計・開発

3.3.1. 演習の画面

本研究では、3.2.1 節の文・意味構造対応モデル、3.2.2 節および 3.2.3 節の手続きによって用意した構造と正誤診断パターンに基づいて接続詞演習環境を実装した。この演習環境では、1) 学習者による与えられた単文および接続詞の組立、2) 答え合わせボタンが押されることによる正誤診断の実行、3) 正誤診断結果に基づくフィードバックの実行、の 3 つが基本となる。

図 5 は、本演習環境の演習画面を示したものである。学習者は図 5 の左下側に与えられた文構造要素を左上側の黒色の角丸長方形に単文を当てはめ、黒色の長方形に接続詞を当てはめることで文構造の回答を行う。また、右下側に与えられた意味構造要素を右上側の角丸長方形に当てはめることで意味構造の回答を行う。上側の 2 つの角丸長方形には表意となる単文を当てはめ、残りの 1 つには含意となる単文を当てはめる。

上記のように学習者が文構造要素および意味構造要素を回答した後に、左下側に配置された「答え合わせボタン」を押すことで演習環境は正誤診断を実行する。この際に演習環境では内部処理として、1) 課題設計者が用意した正解との比較による正誤診断、2) 誤りの場合、3.2.3 節の分類に基づく誤りの診断、の 2 つを行っている。

正誤診断が実行された後は、その診断結果に基づいて演習環境は学習者に対してフィードバックを返す。本研究において実装したフィードバックは一番基本的な正誤フィードバ

ックを実装した。学習者の回答が正解の場合、「正解です」とフィードバックを返し、学習者の回答が不成立の場合、「不正解です」とフィードバックを返した。なお、本研究の診断結果を活用することで間違いの箇所を指摘する詳細なフィードバックも実装可能であり、このフィードバックは今後実装する予定である。

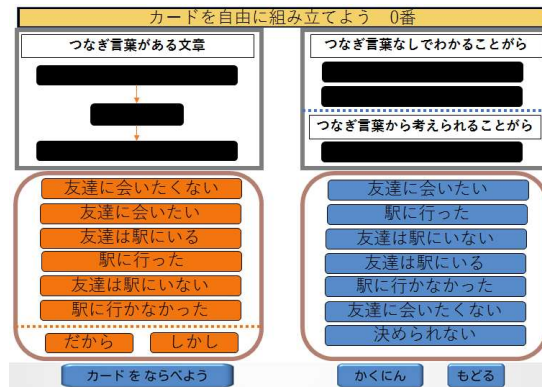


図 5 接続詞演習環境の演習画面

3.3.2. 演習の種類

本演習においては、タイプ1：接続詞・含意変更演習，タイプ2：一部組立演習，タイプ3：自由組立演習，の3つのタイプを用意した。以下，各演習を説明する。

タイプ1の接続詞・含意変更演習では，文構造および意味構造の空欄が全て埋まっている状態から接続詞と含意を変更することで，文・意味対応構造を変更する。この演習では，完成された文・意味対応構造が提供されており，太い枠で囲まれた文構造中の接続詞と，意味構造中の含意が変更対象となる。それを変更するための文構造要素としての接続詞と，意味構造要素としての文が提供されている。接続詞が含意に与える影響を明示化することに焦点を絞った基本的な演習である。正答は一意に決まっている。次章で述べる試験的利用においては，タイプ1が5問用意された。

タイプ2の一部組立演習では，(2-1)含意のみ空欄，(2-2)文構造のみ空欄，(2-3)文構造の1つの要素(前文，後文，接続詞のいずれか)および意味構造が空欄，(2-4)文構造の接続詞と意味構造の含意のみ与えられており，残り空欄，(2-5)意味構造の含意のみ与えられており，残り空欄，の5つを用意し，それぞれ5問ずつ用意した。

タイプ3は，テンプレートが全て空欄となっているものであり，3.3.1節で示した図5がその例である。この演習では前述のように，含意が一意に確定しない場合もあるので，「決められない」の単文も用意している。この演習では，含意が1つの文構造に対して複数存在することを理解していなければ，「決められない」という単文を選択することができないものとなっており，複数の含意が存在することを考慮させる演習になっている。

以上のように本稿では異義可換性のある接続表現の理解を促進するための演習を設計した。基礎としては接続詞を変更すると含意が変わることを扱い，応用としては複数の含意が存在することを考慮させる演習となっている。そのため，プレ・ポストテストの分析では，

異義可換性のある接続表現の成立に関する分析と 1 つの文構造に対してどれだけ多くの含意を考えることができたかを分析するものとした。この分析の詳細に関しては、3 章にて述べる。正誤判定の結果のみを用いた「ゲーム的振る舞い (Gaming the system)」とはなっていないかどうかは[38]、3 章のログ分析において検討する。

3.4. 試験的利用とその結果の分析

本試験的利用の目的は、「本演習環境が異義可換性のある接続表現の演習を実現したこと」の検証である。異義可換性のある接続表現に対する演習が従来は明示的に行われていないことから、まず演習として実施できることが重要であると考え、授業内での検証を試みた。この検証を行うために本研究では、1) 授業内で演習環境の演習が成立する、2) 学習効果を促進する、3) 本演習環境の演習が異義可換性のある接続表現の理解を要求する、の 3 つの評価基準を設定し、分析を実施した。1) に関してはさらに細分化し、授業内で演習が成立する要件を、I) 児童は、演習を途中で放棄することなく、継続的に実行している、II) 児童は、与えられた単文・接続詞をランダムに組み立てて回答はしていない、III) 児童は、演習活動や演習環境を受け入れて実行している、IV) 演習の難易度は児童にとって困難過ぎるものではない、の 4 つに細分化して評価を行った。そして、演習環境のログデータ、プレ・ポストテスト、アンケート結果の 3 つを用いて各評価基準を分析した。(1)本演習環境の演習が授業内で成立することを明らかにするために、(1-1)学習者が継続的に演習を実施していたこと、(1-2)学習者の演習の振る舞いが内容的に妥当に行われていたことをログデータから分析し、(1-3)学習者に演習環境の演習が受け入れられるものであったことをアンケート結果から分析、(1-4)異義可換性のある接続表現の演習の難易度が学習者にとって適切なレベルであったことを、異義可換性を持った接続表現に関する理解を測るテストを考案し、その結果を用いて分析を実施した。また、(2)考案したテストを用いた授業前のテスト(プレテスト)成績と授業後のテスト(ポストテスト)成績から、本演習環境の演習の学習効果を検証した。さらに、(3)本演習環境の演習が異義可換性のある接続表現の理解を要求するものになっていることをテスト成績と演習の遂行具合の相関を分析することで検証した。

3.4.1. 試験的利用の概要

小学校 4 年生 1 クラス 39 名の国語の連続する 2 時限の授業において試験的な利用を行った。国語の授業として意義があるとの判断のもとで行われたものであるものの、カリキュラム的な位置づけはなされていないことから試験的としている。この利用にあたっては、プロトタイプの段階で、国語専科の教諭および研究主任とのミーティングを持ち、異義可換性のある接続表現とその演習化の考え方を説明した。この説明をしたうえで、(1)異義可換性のある接続表現は小学校の国語においても重要な学習対象といえるか、(2)これまでの小学校の国語の授業で明示的に教える対象としていたか、(3)本研究での異義可換性のある接続表

現のモデル化とそれに基づく演習を小学校の授業において実施可能か、について問うたところ、両名とも、(1)および(3)について Yes, (2) について No であった。また、接続詞を「だから」と「しかし」だけに絞れば4年生に対して実施可能ではないかとの見解が示されたため、演習で利用する接続詞の種類をこの2つだけに絞ったうえで、4年生1クラスでの実施が決まった。また、得られたコメントに沿って演習環境の演習画面等の修正を行った。これらの結果として、以下の手順で試験利用を実施することができた。

○1 時限目

- (1) プレテスト(10分) : 3問
- (2) 異義可換性のある接続表現の事例説明 (30分)

○2 時限目

- (3) 演習環境の説明 (5分)
- (4) 演習 1 (15分) : タイプ 1, 2-1~2-5 (各 5問)
- (5) 演習 2 (10分) : タイプ 3
- (6) ポストテスト (10分)
- (7) アンケート

今回の試験利用では、上記(2)にあるように、異義可換性のある接続表現の事例説明を教員が行っている。これは、演習を効果的にするうえでは、演習で用いる考え方を予め説明しておくことが有用との判断からである。また、異義可換性のある接続表現の教え方として具体的なものは見当たらず、この事例説明自体が本研究による新しい提案といえる。また、教員らは、事前説明だけでは授業で採用する価値はなく、演習ができることで初めて授業利用してよいと判断できるとしていた。このような実施形態となっているため、プレテストを事例説明の前に行っているため、ポストテストに現れた効果における事例説明の効果と演習の効果を分離することはできない。したがって、今回検証できた効果は、演習で取り扱っている異義可換性のある接続表現についての事例説明も含めた効果であることになる。演習自体の効果や使い方を明確にする意味で、事例説明単独の効果についても今後調べる必要があると考えている。

3.4.2. プレ・ポストテスト

異義可換性のある接続表現に関する理解度を測るための方法がなかったため、本研究では、試験的利用に関わった2名の教諭と相談の上、序論で述べた教科書での話題的な取り扱い例に、含意を文として与えて、接続詞と含意の文を選択させる形式でのテストを作成した。図6がその例である。この例では、「子犬がボールを取ってきた。(), お母さんにしかられた」が接続表現であり、括弧内に入れるための候補としての接続詞がその下方に6個示されている。ある接続詞が括弧に入りうると判断した場合、接続表現の下の黒丸と、接続詞の上の黒丸を線で結ぶ。接続詞の下に5つ用意されているのが含意の文であり、ある接続詞を選ぶことで含意される文を判断し、接続詞の下の黒丸と含意の文の上の黒丸を結ぶ。学習者

は考えられる限りの接続詞と含意の組を見つけることを求められる。

テストは3問用意し、プレテストとポストテストにおいて同じものを用いた。用意した接続詞は順接・逆接を4つと転換・選択を2つである。転換・選択の接続詞は含意を生起させないダミーとして用意されたものである。順接・逆接の接続詞のうち「だから」と「しかし」は演習で用いられたものとなるが、残りの2つは演習では利用されていない。また、接続表現は演習では使われないものである。このことから、「だから」と「しかし」に関する解答と、残りの接続詞に対する解答を分けた上で分析する（以後前者を同等課題、後者を転移課題と呼ぶ）。ただし、「だから」と「しかし」は演習で用いられたものと同じものではあるが、演習環境の演習で用いた接続表現と生起される含意はこのテストとは異なるものとなっているため、暗記では回答できないものになっている。

このテストを用いた分析では、(1) プレテストの段階で児童が異義可換性のある接続表現について基本的な内容を理解していること、(2) プレ・ポスト間で異義可換性のある接続表現の理解が促進されたこと、の2つを検証することを目的としている。(1)に関しては、本演習は従来実施されていなかった演習を実現したものとなっているので、本演習が児童にとって無理のない適切なレベルの演習となっていることを確認するために実施した。この分析の指標として、異義可換性のある接続表現のペアの成立数の度数分布を用いた。この度数分布では、0：どの課題もペアが成立していない、1：一つの課題でペアが成立している、2：2つの課題でペアが成立している、3：全ての課題でペアが成立している、の4つの階級に分類し、分布を作成した。また、基本を理解していることを確認するためなので、対象は同等課題のみとした。この分布を確認することで、プレテストの段階で異義可換性のある接続表現の基礎を理解していたかを明らかにできる。(2)に関しては、適合率（学習者の回答中の正解数／学習者の回答数）と再現率（学習者の回答中の正解数／総正解数）を用いて学習効果の促進について分析を実施した。このテストの1問あたりの平均回答パターン数は28個であり、そのうちの平均正解回答数は10個である。この指標により、どれだけ多くの含意を作れるようになったかを確認できるため、異義可換性のある接続表現の理解が促進されたことを明らかにすることができるものとなっている。

テスト時間としての10分は学習者が余裕をもって完答できる時間として設定されたものであるが、実際に全員が制限時間内にプレ・ポストテスト共に回答を終了していた。今回はテストを紙面で行ったため、個々の時間は測れていない。また、今回、成績の向上を測定するためにプレテストとポストテストに同一のものを用いており、また、統制群を設けることができなかったので、それとの比較もできていない。このため、2回テストを行ったことによる学習効果の影響に関しては分析できないものになっている。

プレテスト

出席番号

次の () に入ると言う言葉を線で結び、その時に考えられることがらを線で結びましょう。なるべく多くの線を結んでみましょう。

子犬がボールと取ってきた。()、お母さんにしかられた

だから

しかし

けれども

それで

ところで

それとも

お母さんは
子犬がすきだ

子犬はお母さんのボール
を取ってきた

子犬が取ってきたボールは
お母さんのものではなかった

子犬はいつもお母さんと
ボールあそびをしている

お母さんは子犬にボールを
取ってこないでほしかった

図 6 プレ・ポストテストの一例

3.4.3. 分析 1 : 授業内での成立に関する分析

本演習環境のログデータを用いて、1分あたりの回答数(平均回答数)と1課題あたりの回答数(平均要回答数)を分析した。平均要回答数に関しては、「正答にたどり着くまでの誤答の回数+1(正答の回数)」を用いて算出した。平均回答数を分析した結果、演習前半は平均回答数が2.23回($\sigma=1.19$)、後半の演習は平均回答数が1.93回($\sigma=1.22$)であった。平均回答数の時系列データの分析結果から学習者は演習環境利用時間内で継続的に演習を実施していたことが確認できた。

また、平均要回答数を分析した結果は表1のようになった。さらに、ランダムで操作した時の各演習タイプの平均要回答数は、演習1が7回、演習2が約92回、演習3が約394回であった。さらに、各課題の学習者の平均要回答数がランダム時よりも十分に低い平均要回答数を示しており「ゲーム的振る舞い」は観測されなかった。このことから、本演習環境における学習者の内容的な振る舞いは妥当なものであったと判断している。

また、アンケート結果を用いて、学習者の主観的評価の分析を実施した。表2のようなアンケートを実施し、分析を行った結果、図7のような結果となった。ほとんどの質問項目は肯定的な意見の割合が多かった。このことから、演習活動や演習環境は児童に受け入れられたものと判断できる。ただし、演習の難易度についての質問3に関しては否定的な意見の割合が多かった。この結果から、本演習環境の演習は児童にとって容易なものではなかったといえる。しかしながら、他の質問項目は肯定的意見の割合が多かったことから、演習は困難であると認識しつつも演習の意義を感じ、関心を持って演習を行ったものと考えられる。

さらに、授業前のテストの結果を用いて、異義可換性のある接続表現のペアの成立数の度数分布を作成した。表3は、その度数分布表である。この結果から、全ての課題で異義可換性のある接続表現のペアを作成できなかった人は一人しかいないことから、ほとんどの児

童は異義可換性のある接続表現の基本に関しては理解していたといえる。そのため、異義可換性のある接続表現の演習は児童にとってその演習が困難過ぎない難易度であったといえる。これらの4つの分析から、本演習環境の演習は授業内で成立していたものと判断している。

表 1 各演習タイプの平均要回答数

	要回答数(回) (標準偏差)
タイプ1: 変更	1.94($\sigma=1.77$)
タイプ2: 一部	1.76($\sigma=1.47$)
タイプ3: 自由	3.13($\sigma=3.32$)

表 2 アンケートの質問項目

質問1	このシステムで問題に答えることは面白かったですか
質問2	またこのシステムを使ってみたいと思いますか
質問3	システムで問題に答えることはかんたんでしたか
質問4	このシステムを使ってみて、 つなぎ言葉のことが前よりもわかるようになったと思いますか
質問5	つなぎ言葉を変えた時に、 文の意味がどう変わるかわかるようになりましたか

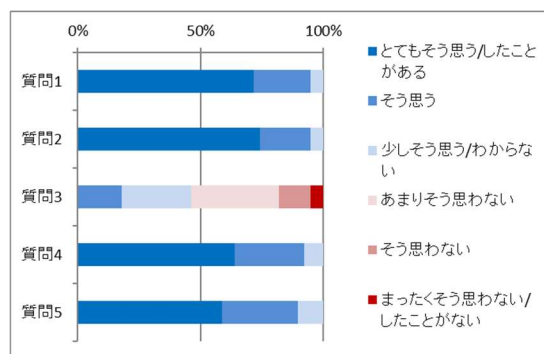


図 7 アンケートの結果

表 3 ペア成立数の度数分布表

ペア成立数(課題)	度数(人)
全課題で不成立	1
1つの課題で成立	1
2つの課題で成立	13
3つの課題で成立	24
計	39

3.4.4. 分析 2 : 学習効果の促進に関する分析

テストの結果を用いて、プレ・ポスト間における適合率および再現率について分析をした。その結果をまとめたものが表 4 となる。適合率に関しては非常に高い値となったため、天井効果を確認したところ、天井効果が確認された。再現率において天井効果はなかった。そのため、適合率を除外して再現率のみに同等課題と転移課題のそれぞれでウィルコクソンの符号順位和検定を実施したところ、同等課題は効果量大($d=0.90$)で有意差あり($p=0.0000<0.0001$)、転移課題は効果量中($d=0.57$)で有意差ありとなった($p=0.0005<0.001$)。この結果から、適合率に関しては天井効果があったため、学習効果が確認されなかったが、プレとポストともに高い水準の適合率であったことが確認できた。再現率に関しては同等課題および転移課題の両方で有意に増加したことが確認された。そのため、適合率を保って再現率が増加したことから、異義可換性のある接続表現の理解を促進することができたと判断している。

表 4 適合率と再現率

	同等課題		転移課題	
	プレ	ポスト	プレ	ポスト
適合率	0.92	0.91	0.90	0.92
	$\sigma=0.12$	$\sigma=0.10$	$\sigma=0.14$	$\sigma=0.11$
再現率	0.52	0.64	0.43	0.52
	$\sigma=0.12$	$\sigma=0.14$	$\sigma=0.15$	$\sigma=0.17$

3.4.5. 分析 3 : 異義可換性の理解の要求に関する分析

考案したテストは、異義可換性のある接続表現の理解を要求するものとして教員によって作成していただいたものであり、ある程度の妥当性は担保できていると考えている。したがって、このテストと演習環境の演習の遂行具合に相関があれば演習環境の演習も異義可換性のある接続表現の理解を要求するものになっていると考えられる。この仮説を検証するために、プレテストの成績である f 値と演習環境の演習の遂行具合を表す平均要回答数を用いた。f 値は、適合率と再現率の調和平均であり、大きければ大きいほど理解していることを表す指標である。平均要回答数は、3.4.3 節と同様のものであり、低ければ低いほど理解していることを表す指標となっている。スピアマンの順位相関係数を用いて相関係数の検定を実施した。分析の結果、相関係数 -0.45 で有意な相関($p=0.004<0.01$)が確認された。図 8 は f 値と要回答数の散布図である。なお、四分位範囲に基づいて外れ値の検出を実施した結果、外れ値は含まれなかった。この分析結果から、本演習環境の演習は、異義可換性のある接続表現の理解を要求するものになっており、本演習の妥当性が示唆された。

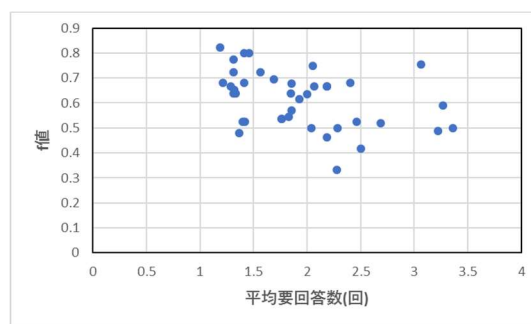


図 8 f 値と平均要回答数の散布図

3.5. むすび

本研究では、「異義可換性のある接続表現の演習を可能にする計算機ベースの演習環境の実現を行うこと」を目的として、接続詞演習環境の設計・開発を行い、小学校4年生を対象に試験的利用を行った。その結果、本演習環境のログデータに基づく学習者の演習の継続度合いおよび内容的振る舞いの分析、アンケートによる主観的評価の分析、プレテストに基づく演習難易度の分析、の4つから本演習環境の演習は授業内で成立していたことが確認された。また、学習効果としては、プレ・ポストテストの結果から異義可換性のある接続表現の学習効果を促進するものであったことが確認された。さらに、プレテストの成績と演習環境の遂行具合の結果から、異義可換性のある接続表現の理解を要求するものになっていたことが確認された。これらのことから、本演習環境の有効性は検証できたと考えている。

今後の課題としては、より厳密な比較実験を設計し本演習環境の有効性を評価することが必要であると考えている。本実験では、従来手法が存在しなかったため、比較実験を実施することができなかったが、統制群用の異義可換性のある接続表現の演習課題等を用意・設計し、比較実験をする必要があると考えている。また、本演習環境で対象とした接続詞は、基本的な接続詞である順接・逆接のみであったため、より多くの接続詞に対応できるように拡張する必要がある。さらに、今回本演習環境が実装したフィードバックは基本的な正誤フィードバックであったが、より高度なフィードバックを返すように拡張することも課題であると考えている。

4. 図的表現を媒介させた和差の算数文章題演習環境

本章では、図的表現を媒介させた和差の算数文章題演習環境について述べる。このソフトウェアは、先行研究である和差の算数文章題を対象にした作問学習支援システム「モンサクン」を基礎に設計・開発したものである。モンサクンでは、算数文章題は三つの単文から構成されるものと定義しており、学習者に対していくつかの単文を与え、指定された数式および物語種類を満たすように単文を組み立てることで算数文章題を作る演習活動を行うものである。したがって、この演習活動は数式表現から言語表現への変換活動とみなすことができる。本研究では、さらに、算数文章題の情報構造に基づいて図的表現を追加することで、異なる三つの外的表象である言語表現、図的表現、数式表現の変換活動が可能な作問学習支援システムを設計・開発した。特に、算数文章題の情報構造に基づいて設計・開発することで言語表現と図的表現を連動させて変換させる活動を実現することが可能となった。しかも、正誤診断およびフィードバックも実現された形となっている。

4.1. まえがき

教育現場においてしばしば図を活用する様々な実践授業が行われ、その有効性が確認されている。その一方で現状の図を活用した実践授業には、大きく二つの問題点があると考えられる。一つ目の問題点としては、教授者が全ての学習者に対して個別対応を行うのが困難なことがある。通常の授業では、教授者と学習者の関係は一对多数となっており、授業時間内に全ての学習者に個別対応することは現実的には困難であるといえる。二つ目の問題点としては、教授者が全ての学習者に対して即時対応を行うのが困難なことがある。先ほどの問題点のときと同様に、教授者と学習者は一对多数の関係なため、教授者が一度に対応できる学習者には限界があり、したがって、全ての学習者に即時対応を行うことは困難であるといえる。これらの問題点に対して本研究では、情報工学の技術を活用し、学習者の個々の試行に対して個別かつ即時の診断・フィードバック可能なインタラクティブな学習支援システムの設計・開発を実現することで問題点の解消を目指している。本論文では、図的中间表現としての部分全体図を用いた和若しくは差の算数文章題演習環境であるソフトウェアを開発した。このソフトウェアを小学校4年生2クラスの算数の授業内で試験的に利用し、学習効果を示唆する結果を得たので報告する。

算数文章題の解決は、言語表現を数式表現に変換する活動と捉えることができる[39]。この言語表現から数式表現に変換する活動においては、問題文中の数量間の関係を表した数式と、答えを求めるために必要となる計算を表している数式が異なっている場合の問題は、逆思考問題と呼ばれ[40][41]、多くの児童にとって困難な問題となっていることが知られている[42][43]。例えば、「リンゴが幾つかありました。リンゴを3個食べました。リンゴが2個あります」といった問題の場合、最初の量、減った量、残った量の三つの量が取り扱われており、その量間の関係は、「 $? - 3 = 2$ 」であり、数式としては減算となる。これに対して

答えを求めるための数式は、「 $3+2=?$ 」であり、加算となる。つまり、量間の関係を表す数式と、答えを求めるための数式が異なっている場合が逆思考問題となる。

また、単に解くことが難しいだけでなく、この逆思考問題を解ける児童においても、それを作問することが難しい場合が多いことも分かっている[44][45][46]。これらの作問の事例では、問題の構成要素となりえる文があらかじめ与えられており、必要な文を取捨選択して並べることによる作問であるため、対象を自分で思いついたり、文を作ったりすることの負荷はなく、適切な組み合わせを見つけることだけが求められる課題となっており、問題に含まれている和と差の関係に関する理解が十分であれば、困難とはいえない課題となっている。したがって、この作問の結果は、問題を解けるようになっただけでは、その構造に関する理解は十分とはいえないことを示唆している。前述の問題例を容易に解くことができる児童であっても、「“リンゴを3個食べました”，を使って足し算で解く問題を作る」ということが非常に難しい課題となることが分かっている。

問題解決及び作問における逆思考問題の困難さは、学習者が演算を「手続き」としては理解しているものの、「関係」としての理解が不十分であることを示唆している。加減算を関係として理解した場合、加減算は三つの量間の関係として理解されることになる。したがって、ある三つの量間に加算が存在することは、それらの三つの量間に二つの減算が存在することを意味する。同時に、一つの減算の存在は、他の一つの減算と一つの加算の存在を意味することになる。前述の例であれば、「最初の量 - 減った量 = 残った量」は、「最初の量 - 残った量 = 減った量」と「残った量 + 減った量 = 最初の量」の存在を意味している。本研究では、この関係を1和2差関係と呼んでいる[47][48]。本研究は、文章題が表す量間の演算を手続きとしてではなく、関係として理解することを関係的理解と呼び、和差の単位文章題（1回の四則演算で解ける問題）の1和2差関係の関係的理解をより深める学習活動の実現を目指したものとなっている。関係的理解は、理解対象を手続きとして捉える道具的理解よりも深い理解となることが知られている[49]。したがって、道具的理解から関係的理解に変えることは重要であるといえる。

この1和2差に相当する和差の文章題がもつ数量関係の関係的理解の重要性はこれまでも知られており、その促進する方法としてしばしば用いられているのが、和演算の結果数を全体とし、和演算の二つの演算数を部分とする部分全体図である。言語表現から数式表現の変換過程において図的表現（部分全体図）を媒介させることで文章題の説明を行っている。この部分全体図を用いた文章題の説明は、教科書においても採用されており、また、様々な実践授業の実施とその有効性が報告されている[50][51][52]。しかしながら、部分全体図を児童が取り扱う過程において、数多くの間違いが発生すること、また、個々の活動に手間がかかるため、活動自体を数多くこなすことができないことが問題点として挙げられる[53][54][55]。また、関係的理解を促進する上で、学習者自身による試行錯誤的な対象の操作が大きな役割を果たすとされているが[56][57][58]、現状ではこのような活動を実施することは簡単ではなかったといえる。なぜならば、試行錯誤が行えるのは、「試行」が「間違っ

ている」と認識できるからであるが、多くの学習者にとって自身の振る舞いの間違いに気づくことは簡単ではないからである。一般的な教育の場において、学習者の個々の試行を個別に診断・フィードバックすることは、実現不可能とあってよい。ソフトウェアを用いた学習支援の最も重要な意義の一つは、このような学習者の試行を診断し、フィードバックを返すことで試行錯誤を促すことである。これまでのところそのような実現例は報告されておらず、したがって、学習者の間違いに対する個別対応も実現できていなかったといえる。

本研究では、筆者らがこれまでに研究してきた単位算数文章題に関する三文構成モデル [47] に基づき、学習者が和差の算数文章題に含まれる 1 と 2 の差関係を部分全体図として直接的に操作することにより言語表現から数式表現への変換過程を図的表現で媒介させ、その正誤に関するフィードバックを即時的に受けることができるソフトウェアを設計開発し、タブレット上で運用した。具体的な活動としては、(1) 三つの単文で和差の文章題を作成する、(2) 文章題を構成する三つの文を部分全体図に割り当てる、(3) 部分全体図に割り当てられた三つの文に基づいて、その部分全体関係において成立している三つの演算関係 (1 と 2 の差関係) を答える、(4) 文章題から直接三つの演算関係を答える、の四つを設計・開発した。(1) は既に有用性が確認されている作問学習支援システムを利用したものであり [44][45][46]、(2)-(4) が新しく開発した演習となる。(1) に該当する先行研究であるモンサクンにおいては、学習者の活動は言語表現と数式表現を直接的に対応付ける活動であったのに対して、本研究では言語表現と数式表現の間に部分全体図としての図的表現を介在させているところが先行研究に対する新規性となる。また、学習者の図的表現の操作活動を診断・フィードバックする機能を実現したこと、及びその有効性を事例的ではあるものの検証したことが学習・教育的観点からの新規性となる。なお、先行研究である作問学習支援において、学習者の行った作問に対する診断・フィードバックが、学習者の試行錯誤的な作問を促すこと、及びその試行錯誤がランダムなものではなく、意味的に解釈可能なものであることは、学習者の作問プロセスのデータ分析を通して検証されている [59][60]。

先行研究において、同様な演習活動を個別に対する即時フィードバックを伴った形で実現した例は見当たらなかった。この事例の実現を妨げる理由として、学習者の活動に対する診断・フィードバックを行う上でそれらの活動をどのような単位で学習者に提供し、システムで記録し、診断処理を行うかを設計するという課題が困難であったからと考えられる。また、その実現可能性は自明とはいえないことから、本研究の新規性とその新規性についての信頼性は担保されていると考えている。また、(I) 授業内で支障なく利用可能であったこと、(II) 教諭がソフトウェアの授業利用に関して有効であったと判断していること、(III) プライミングテストをプレ・ポストテストとして用い、得点と回答時間の比較から 1 と 2 の差関係に対する関係的理解の向上を示唆する結果が得られていること、から本研究の有用性とその信頼性についても担保できていると判断している。なお、本論文では文章題として和差の文章題 (1 回の和若しくは差で表現される演算関係を含んだ問題) を扱い、特に断りなく文章題とした場合は、この和差の単位文章題のことを指すこととする。

4.2. 三文構成モデルと部分全体図の対応

本研究では、和差の算数文章題が含む 1 と 2 の差関係に対する関係的理解の促進を目指して、算数文章題（言語表現）、部分全体図（図的表現）、及びそこに含まれる演算関係（数式表現）、の三つの表現の変換を具体的な操作として行うことのできるソフトウェアを設計・開発している。この演習の実現においては、(1) 三文構成モデルに基づく文章題の二つの部分と一つの全体への部品化、(2) それらの部品に基づく部分全体図の構成、及び(3) 部分全体図中における三つの演算関係の可視化、が基礎となっている。本章では、まず和差の文章題の構造について定式化したうえで、その構造と部分全体関係の対応付けについて説明する。

4.2.1. 三文構成モデル

筆者らは、学習対象の構造化とそれに基づく対象構造の操作としての学習活動の設計・開発を行う情報構造指向アプローチに基づいて学習支援システムに関する研究を行ってきた[58][61]。算数文章題に関しては、様々な算数の文章題を対象として情報構造化[62] や、その構造化に基づく構成要素の組み立てとしての作問活動の定式化をこれまでに行ってきた[63][64]。以下、本節では、まず単位算数文章題を構造化したモデルの一つである三文構成モデル[47]の説明を行う。更に、三文構成モデルに基づいて設計された学習活動としての作問学習についても説明する。

一回の四則演算で解ける算数の文章題（単位文章題）は、二つの演算数と一つの結果数で構成される。三文構成モデルは、これら三つの数をそれぞれ表す三つの文（以下、単文と呼ぶ）で単位文章題を表現するものである。この単文には関係文と存在文の 2 種類があり、一つの単位文章題は、二つの存在文と一つの関係文によって構成される。そして、存在文は四則で共通に利用可能となるが、関係文は問題の種類に特有のものとなる。

和差の単位文章題は、(1) 関係文が演算数を表す場合と、(2) 関係文が結果数を表す場合、に分けられ、前者の場合は更に、(1-1) 増える関係文の場合、(1-2) 減る関係文の場合に分けられ、後者の場合は、(2-1) 合わせる関係文の場合、(2-2) 比べる(大きい/小さい) 関係文の場合に分けられる。図 9 は一つの存在文（「リンゴが 6 個あります」）がこれら四つの関係文と組み合わせることで問題において様々な役割を果たすことになることを事例的に示したものである。この図では、角丸長方形は存在文であり、長方形は関係文であり、上から順に文が並べられているとする。存在文の形式は 1 種類であるが、その役割は関係文との組み合わせによって変わってくる。この存在文と関係文の役割を整理したものが表 5 である。4 種類の問題は、従来の分類法に沿っている[43]。増加問題及び減少問題においては、存在文 1、関係文、存在文 2 の順序が意味をもち、合併問題と比較問題においては、順序は可変である。

この三文構成モデルによる作問学習支援ソフトウェアとして開発されたモンサクン

[44][45][46]では、学習者に(1) 単文集合、(2) 作る問題の種類、(3) その問題が含むべき数式、を作問の条件として与え、その条件を満たす作問を行わせている。図 10 はモンサクンのインターフェースであり、この例では、「8-3」で計算して答えを求める合併問題をインターフェースの右に提供された単文集合から必要な単文を選択し、適切に並べることで作成することが学習者に求められている。これは、逆思考問題の作問に相当し、逆思考問題を解ける学習者にとっても困難な課題となっている。

なお、積商の問題も同様に二つの存在文と一つの関係文により表現される。例えば、(I)「りんごが 6 個あります」、(II)「りんご 1 個 80 円です」、(III)「代金は 480 円です」、といった場合、(I) 及び(III) はそれぞれりんごの個数とお金の金額を表現しており、存在文となる。したがって、これらの存在文を和差の文章題の存在文として用いることもできる。(II) は、りんごと代金の関係を表す文となっており、関係文となっている。積商においても 1 積 2 商の関係が存在し、その理解も重要な課題となっているが、積商の場合は前述の例のように種類の異なる量を取り扱うことになるため積商に特有の図式化を行う必要があり、本研究の範囲外としている。

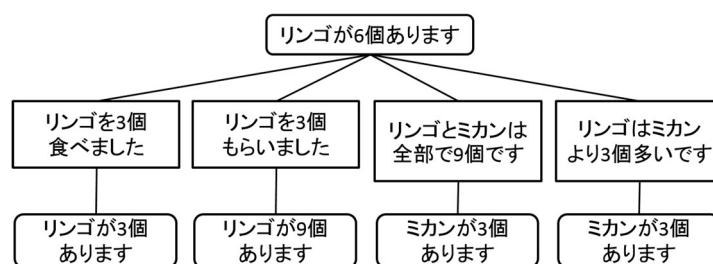


図 9 一つの存在文から作ることのできる問題事例

表 5 三文構成モデルにおける存在文と関係文の組み合わせ

	存在文 1	存在文 2	関係文
増加問題	増加前 存在文	増加後 存在文	増加 関係文
減少問題	減少前 存在文	減少後 存在文	減少 関係文
合併問題	合併 存在文 1	合併 存在文 2	合併 関係文
比較問題	比較 存在文 1	比較 存在文 2	比較 関係文

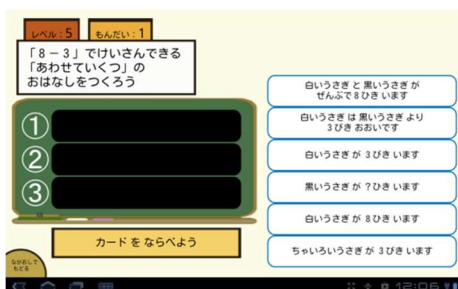


図 10 モンサクンの作問インターフェース

4.2.2. 部分全体図

1回の加算または減算で表現できる文章題を構成する三つの数量概念は、二つの部分量とその二つの部分量を合わせた一つの全体量として図 11 のように部分全体図（部分全体スキーマとも呼ばれる）として表現することができる[50][51][52]. この部分全体図は、二つの部分量の和が全体量となり、全体量と一つの部分量の差がもう一つの部分量の差になることを、直感的に分かる形で可視化しており、1 和 2 差関係及びその関係の把握が求められる逆思考問題に関する学習にしばしば用いられている。

しかしながら、この部分全体図を用いて説明するだけでは不十分であることも指摘されており、部分全体図を教えてその図を描けるようになったとしても、実は、(1) 文章題と部分全体図を対応付けることがしばしば困難である、(2) 部分全体図を読み取って数式にすることがしばしば困難である、といったことがあるとされている[53][54][55]. 部分全体図はそもそも文章題との対応、数式の対応において理解されるべきものであるが、実際の学習活動において学習者がその対応付けを直接的に行う機会に乏しく、またそれを行ったとしても、その妥当性についてのフィードバックを受けることは困難であったということが出来る。



図 11 部分全体図

表 6 問題文と部分全体図の対応

	増加 問題	減少 問題	合併 問題	比較 問題
全体	増加後 存在文	減少前 存在文	合併 関係文	比較 存在文 (大)
部分	増加前 存在文	減少後 存在文	合併 存在文	比較 存在文 (小)
	増加 関係文	減少 関係文	合併 存在文	比較 関係文

4.2.3. 三文構成モデルと部分全体図の対応付け

三文構成モデルでは、算数の文章題をそれぞれ一つの数量概念によって表現する三つの単文によって表現される（以下、この表現を三文表現と呼ぶ）。この単文は、部分全体図を構成する二つの部分と一つの全体に対応づけることができる。三文構成モデルに基づいて設計された作問学習支援ソフトウェア「モンサクン」では、三つの単文を組み合わせることによって一つの問題を作成する。この枠組みを用いれば、一つの問題を構成している三つの単文を、部分全体図の三つの構成要素に当てはめる活動を設計することができる。更に、問題と数式、及び部分全体図と数式、を結び付ける活動も行わせることが可能である。しかもこれらの活動の正誤を判定・フィードバックすることも可能となる。

表 6 に、表 5 で分類した各文が、部分全体図の部分に対応するか、全体に対応するかをまとめた。なお、二つの部分の区別（左右の部分の区別）については、それらを区別する規則を定め、学習者と合意することが困難であるので、区別しないこととしている。また、比較問題においては、問題文中の比較存在文の配置に順序は求められないが、部分全体図においては、二つの大小関係を判断する必要がある。

4.3. 演習環境の設計・開発

部分全体図を導入することで、図 12 に示したように、(A) 三文表現（言語表現）、(B) 部分全体図（図的表現）、(C) 数式表現、の三つを対応付けることができる。この図では、部分全体図の全体量に三文表現の「ラケットとテニスボールがあわせて 5 こあります」と数式表現の「5」が対応し、部分量に三文表現中の残りの 2 文と数式表現中の「3」と「2」が対応する。また、数式表現中の最初の式は、「部分量」+「部分量」=「全体量」、残りの二つの式は、「全体量」-「部分量」=「部分量」を表していることになる。

本研究では、(演習 1) まず単文を組み合わせて三文で構成される問題を作成し、作成した問題を構成する三文を部分全体図の一つの全体及び二つの部分の箇所割り当てる、(演習 2) まず与えられた単文を部分全体図に割り当て、その部分全体図が含む 1 和 2 差の三つの数式表現を導く、(演習 3) 三文表現から 1 和 2 差の三つの数式表現を導く、の三つの演習活動を設計し、タブレット上での操作として実施できるように実装した。これら三つの演習は、演習 1 により、文章題を構成する量の部分全体関係を把握し、演習 2 で部分全体関係が含む 1 和 2 差関係の数式表現を導けるようにし、更に演習 3 で、部分全体図を経由しなくても、文章題に含まれる 1 和 2 差関係の数式表現を導けるようにすることを意図している。なお、これらの演習においては、計算して答えを求めるのが目的ではなく、一つの文章題に一つの和と二つの差が含まれていることを把握することが目的となる。このため、特定の値を未知としてその計算の仕方を意識させることは適当ではないとの考えから、未知数を含まない文章題を扱っている。演習 1 では、図 13 のように、三文で問題を作成する作問課題をまず行う (演習 1 前半課題)。次に、三文で作成した問題を、図 14 のように部分全体図に割り当てる (演習 1 後半課題)。図 14 では、既に二つの単文が部分全体図に割り当てられている状態である。これらの操作は、単文カードをドラッグして所定の位置に移動させることで行うことができる。三文で問題を作成する活動は、小学校 1 年生においても演習として行えることが確認されている[46]。なお、二つの部分の比率は、空欄の場合に同じ大きさとなっているが、正しく単文を割り当てると、正しい数値の比率に合わせた大きさになる。単文カードを不適切な箇所に割り当てようとした場合には、カードの配置が拒否され、その位置から弾かれる振る舞いを提示することで、学習者に再考を促すフィードバックとしている。

演習 1 では、課題が 3 問用意されている。なお、今回は部分全体図に関しては、正しい量関係のみしか可視化しないという方針を取ったため、誤った単文カードの配置を許さないことにしている。誤った配置を行った場合に、その量に合わせたおかしな部分全体図を表示する、あるいは、配置は許すが単に誤りであることを指摘する、といった方法も考えられるが、部分全体図の意味付けに関して誤った示唆を児童に与える可能性があると考えたため、今回の方法を取った。誤った単文カードの配置に対する対応に関しては、更に検討の余地があると考えている。

演習 2 は、演習 1 を行った後に実施するものとして設計されており、まず、幾つかの単文カードが提供され、それらを部分全体図に割り当てる活動を行わせる (図 15, 演習 2 前半課題)。この活動に対するフィードバックは、演習 1 におけるカードの部分全体図への割當時のものと同様である。次に、その部分全体関係において成り立つ数式を選ばせる (図 16, 演習 2 後半課題)。この際には、1 和 2 差の数式に加えて、ダミーの数式を与えて、それらの中から選ばせている。選択が間違っていた場合は、間違いであることのみ学習者に知らせ、再度の選択を行わせ、正解になるまで回答を繰り返させる。演習 2 では、課題が 3 問用意されている。

演習 3 では、図 13 と同様の作問を行った後、図 17 のように問題に対して三つの数式を選ばせる課題となっている。選択が間違っていた場合は、間違いであることのみを学習者に知らせ、再度の選択を行わせ、正解になるまで回答を繰り返させる。この演習においても課題が 3 問用意されている。

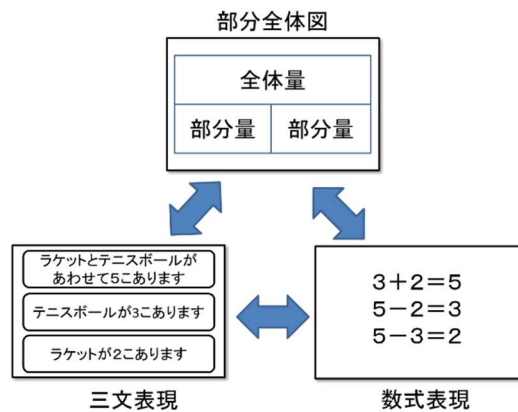


図 12 三つの表現間の対応

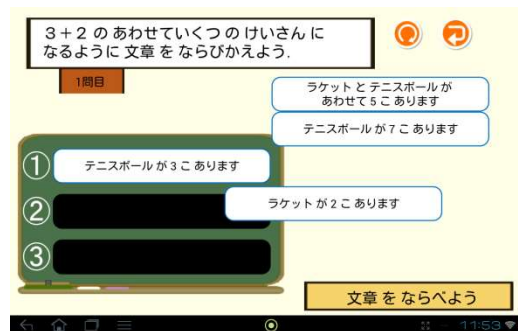


図 13 演習 1 の前半課題

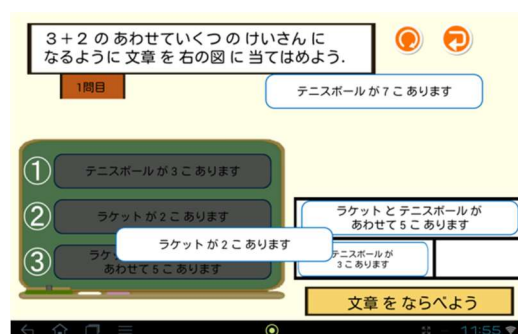


図 14 演習 1 の後半課題

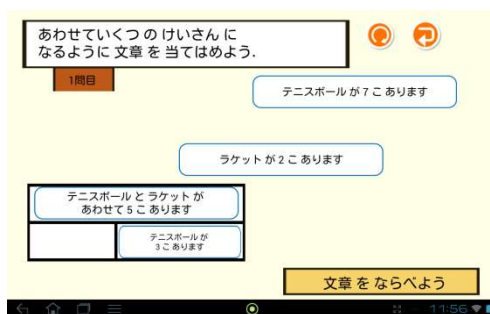


図 15 演習 2 の前半課題

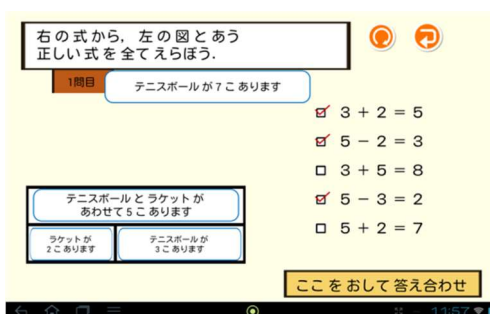


図 16 演習 2 の後半課題

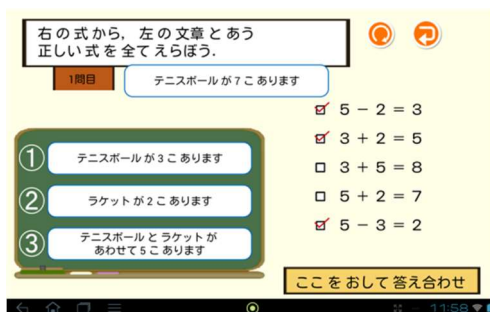


図 17 演習 3 の課題

4.4. 試験的利用とその結果の分析

4.4.1. 試験的利用の概要

小学4年生45名(2クラス)に対してシステムを用いた1時限の演習を正規授業内で行った。全ての学習者は、三文構成モデルに基づいて設計された作問学習をカリキュラムに体系的に組み込んだ授業[46][65]を経験しており、文章題が三文で構成されていることの理解と、タブレット上での単文カードの操作に関しては問題ないといえる。なお、本利用は授業時間を利用して行っているが、1時限のみの利用であり、カリキュラムに体系的に組み込まれて

いるとはいえないため、試験的利用と呼んでいる。

本試験的利用では、本システムの利用約 25 分の前後において、約 5 分のプライミングテスト[48]を実施し、その結果分析により本システム利用の効果を評価した。プライミングテストについては次節において述べる。部分全体図と文章題の関係については、既に既習事項であるため、授業は実施しておらず、システムの使い方のみ 2 分程度説明した。これは、授業責任者である算数専科の教諭の判断に沿ったものである。

4.4.2. プライミングテスト

今回用いたプライミングテストはタブレット上で個々の学習者に提示され、実施されるテストであり、三文で構成される算数文章題（未知数なし）が、1 文ずつ若干の間隔をあけて提示される（0.3 秒間隔）。三文を提示し文章題が完成した後で、言葉の式の形式で提示された数量関係を二つ提示し、どちらが提示された文章題に合致するかを判定させる。具体例を図 18 に示す。図 18 では、「プリンが 4 こあります」、「ケーキが 9 こあります」、「プリンはケーキより 5 こ少ないです」、の三つの文が順次提示されていく。三文揃った後で、「ケーキの数からプリンの数をひいた数がプリンとケーキのちがいの数です」と「ケーキの数とプリンの数をたした数がプリンとケーキのちがいの数です」の二つの選択肢が提示されている。このどちらかを選ぶことが求められる。図 18 の選択肢の場合、比較問題に対する差の数量関係を正解としており、順思考を求める課題となっている。これに対して、「プリンとケーキのちがいの数とプリンの数をたした数がケーキの数です」を正解として設定すると、逆思考を求める課題となる。本プライミングテストでは、増加、減少、合併、比較（多い）、比較（少ない）の 5 種類の問題に対して、それぞれ順思考課題を 2 課題、逆思考課題を 2 課題用意した。順序効果を避けるために、これらの課題をランダムに提示するようにしている。選択肢の選択までの時間制限を設けていないが、正解数と回答時間が記録されることを事前に説明し、素早く正確に回答することへの動機づけを与えている。

プライミングテストは、スキーマ・プライミングテストとも呼ばれ、問題スキーマを活性化しうる情報をプライム（先行的に提示される情報）として提示し、その後で活性化された問題スキーマが適用可能な判断課題を与えるものであり、問題スキーマの活性化合いを、テストのスコアや反応時間で評価できるとされている[66][67][68]。問題スキーマの利用能力が高い場合には、高いスコアや短い反応時間が期待できるからである。本演習の目的は、文章題（言語表現）、部分全体図（図的表現）及び演算関係（数式表現）の相互の関係づけによる、1 和 2 差関係の关系的理解の促進である。これは問題スキーマ及びその利用能力の強化に対応するものであると考え、このプライミングテストを用いている。なお、作問学習の効果をプライミングテストで評価する試みは、これまでも同様な考えに基づいて行っているが[48][69]、それらは三つの単文を段階的に見せて、その三つの単文で問題が成立するかどうかを判断するものであった。これに対して今回用いた課題では、提示された問題が含んでいる数量関係を判定するものであり、部分全体関係に焦点を当てたものとなって

いる。

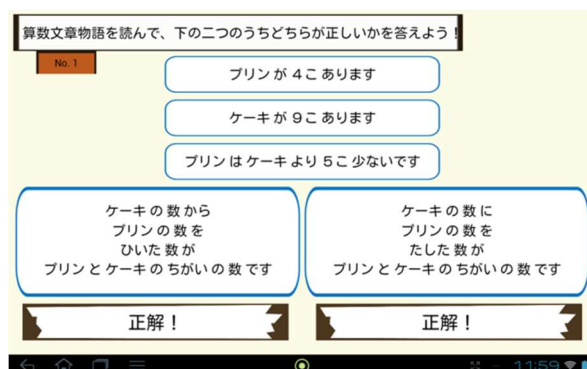


図 18 プライミングテスト

4.4.3. 分析 1：演習実施状況に関する分析

表 7 に各演習における要回答数の平均を示した．ここでの要回答数とは，正解に至るまでに必要となった回答の数としている．本演習では，単文カードの部分全体図への対応付け時には誤った回答を許していない．このため，要回答数は，演習 1 においては演習 1 前半課題（作問），演習 2 後半課題（数式選択），及び演習 3（数式選択）に対するものとなっている．演習 2 の要回答数が高いことは，部分全体図を示したうえでも，1 和 2 差関係を数式に結び付けることが必ずしも簡単ではないことを示唆している．また，演習 3 では，部分全体図を経由せずに問題文に対する数式を選択させており，演習 2 よりも難易度が上がっているといえるが，要回答数が有意に減少し，効果量も中となっていることから ($p=0.0013 < 0.01$, Cohen's $d=0.52$)，演習 2 を行った効果が伺われる．なお，ランダムな操作で正解するときの要回答数はダミーカードの数などが関係するため課題によって異なるが，3. で例示した課題に関して計算すると，図 13, 14 の演習 1 の課題で 12.5 回，図 15, 16 の演習 2 と図 17 の演習 3 の課題で約 33 回となる．今回の演習結果はそれに対して十分に低い要回答数となっており，考えながら行われたことが示唆される．

全課題終了までの平均時間は 19 分 46 秒（標準偏差 3 分 47 秒）であり，72 名（96%）が全課題を終了し，3 名のみ未達成であった．なお，この 3 名も最後まで課題に取り組んでいたことはログから確認できている．

本試験利用を実施した教師及び見学した教師（算数専科）の本利用に対するアンケートと結果を表 8 に示す．また，利用可能学年について質問したところ，1 名は 3 年生，もう 1 名は 2 年生から利用可能ではないかとの回答があった．

表 7 演習実施状況

	要回答数(回) (標準偏差)
演習 1 (3 課題)	1.36 (0.70)
演習 2 (3 課題)	3.40 (3.84)
演習 3 (3 課題)	1.90 (1.20)

表 8 教師に対するアンケート結果

	強く 同意	同意	不 同意	強く 同意
児童は熱心に 取り組んでいた	2	0	0	0
算数に有用だ	2	0	0	0
演習はスムーズに 行えていた	1	1	0	0
課題が簡単すぎる ことはない	2	0	0	0

4.4.4. 分析 2 : 学習効果に関する分析

次にプライミングテストの結果を用いた学習効果の分析を行う。分析には、正解数と回答時間を用いた。そのまとめが表 9 である。児童全体において事前事後の差を調べたところ、正解数において有意差があったが($p=0.01 < 0.05$)、回答時間においては有意差が見られなかった($p=0.39 > 0.05$)。正解数上位と正解数下位における事前事後の変化に違いが見られたので、事前テストにおいて平均正解数以上の児童を上位群、以下の児童を下位群とし、更に分析を行った。それぞれのデータを表 9 及び図 19 と図 20 に示す。正解数について 2 要因分散分析 (上位群-下位群, 事前テスト-事後テスト) を行ったところ、交互作用が見られたので($p=0.000 < 0.001$)、単純主効果を検定したところ、事前テスト及び事後テストにおける上位群と下位群、及び下位群における事前テストと事後テストにおいて有意な差が見られ (いずれも $p = 0.000 < 0.001$)、上位群における事前テストと事後テストにおいては有意な差は見られなかった($p=0.92 > 0.05$)。下位群での正解数上昇に関しては、効果量大であった($d = 1.05$)。回答時間について 2 要因分散分析 (上位群-下位群, 事前テスト-事後テスト) を行ったところ、交互作用が見られたので($p = 0.008 < 0.01$)、単純主効果を検定したところ、事前テストにおいて上位群と下位群に有意差があり($p = 0.005 < 0.01$)、事後テストにおいて両群に差がなかった($p = 0.77 > 0.1$)。また、上位群において事前テストと事後テストにおいて有意差があり($p = 0.02 < 0.05$)、下位群において差がなかった($p = 0.14 > 0.1$)。上位群の回答

時間の減少に関しては、効果量小であった($d = 0.39$).

演習の実施状況としては、4.3.1 で述べたように、(1) ほとんどの学習者が全課題を達成し、残りの学習者もログから時間の最後まで演習に取り組んでいることが確認できたこと、(2) 本演習は選択及び組み合わせによる回答形式を採用しているため、ランダムに行っても正解する可能性はあるが、その要回答数よりも十分に低い要回答数を示していること、(3) 実施担当及び見学の教師が今回の演習が授業として意義があると評価していること、が確認できた。これらのことから授業として本演習が成立することが実証できたと判断している。

事前事後テストの結果分析より、本演習は、上位群については回答時間の減少効果、下位群に関しては、正解数の上昇効果、をもたらしたことがいえた。したがって、本演習は授業として成立しただけでなく、学習効果を上げることができたということができ、有用性が検証できたと判断している。

今回の結果を部分全体関係の理解という観点から更に考察すると、上位群は、事前テストの段階での高い正解数から既に部分全体関係の理解が進んでいたため、演習による正解数の変化は見られなかったが、演習を通してその使い方が向上したことから、回答時間の減少につながったと推測できる。下位群に関しては、事前テストの段階では部分全体関係の理解が十分でなかったため正解数が少なかったが、演習を通してその理解が進んだため、正解数が大きく（効果量大）向上したと推測できる。また、回答時間に着目すると、事前テストで下位群が上位群より有意に短い時間（ $d = 0.72$ ，効果量中）で回答しており、事後テストで回答時間の差がなくなったことから、下位群は事前においては問題構造を用いた判断ができていなかったため正解数は少なく、また、回答にも時間をかけていなかったが、事後においては問題構造を用いた判断ができるようになったため正解数は増えたが、構造を用いる手間が増えたため、回答時間については減少しなかったと推測できる。これらのことはより詳細な実験計画と分析を行って確認を試みる価値のある結果であると判断している。

表 9 プライミングテストの結果

	正解数 (満点:20)		回答時間 (秒)	
	事前	事後	事前	事後
全体群 (75名)	16.7 (SD=3.3)	17.9 (SD=2.8)	198.2 (SD=81.9)	186.2 (SD=89.4)
上位群 (47名)	18.8 (SD=1.1)	18.9 (SD=2.1)	219.5 (SD=70.0)	188.4 (SD=87.2)
下位群 (28名)	13.0 (SD=2.6)	16.3 (SD=3.6)	162.7 (SD=86.3)	182.5 (SD=91.3)

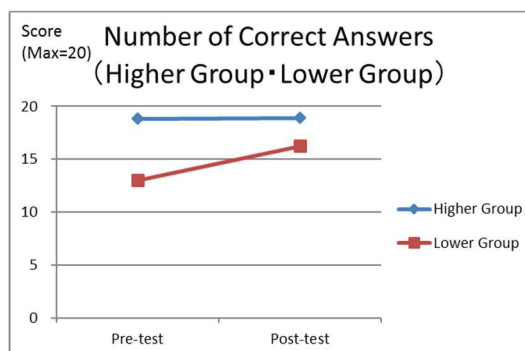


図 19 正答数

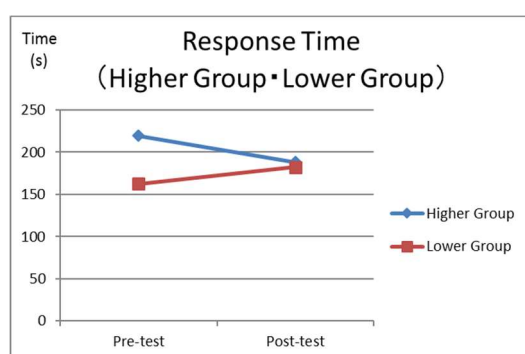


図 20 回答時間

4.5. むすび

本論文では、和差の算数文章題の1と2の差関係における関係的理解の促進を指向し、文章題及び数式と連動して部分全体図を操作する活動を可能にするソフトウェアを設計・開発し、小学校4年生の授業で利用した。児童の利用ログの分析及び教師のアンケートから、ソフトウェアを用いた活動が問題なく遂行できたことが確認できた。学習効果としても、問題に対する関係的理解を評価する際に用いられるスキーマ・プライミングテストにおいて事前に対する事後での成績の向上が確認できた。これらのことから、本ソフトウェアの有用性が確認できたといえる。

今後の課題としては、(1) 学習者群、(2) 利用期間、の拡大・分析が必要と考えている。今回の学習者群は、(i) 三文構成モデルに慣れている、(ii) 比較的高い学力が担保されている（国立大学附属小学校での実施のため）、という点で特殊性があった。したがって、より幅広い範囲の児童においての利用可能性及び学習効果を検証することが必要と考えられる。部分全体図は一般的に用いられているものであり、三文構成モデルについても、既に様々な小学校での利用実績が存在する[70]。また、今回は初めての利用ということで4年生を対象として用いたが、立ち会った二名の教員はともにより低学年での利用可能性を指摘しており、本活動自体、問題の構造をより分かりやすいものにするための活動を目指しているもの

であり、より幅広い児童を対象とした利用は可能であると考えている。また、今回は短時間の利用で学習効果がみられたが、前述のような学習者群の特殊性によるところが大きいと推測できる。したがって、利用学習者群を拡大するとともに、より長期的な利用、特に、三文構成モデルに基づく算数文章題の表現の学習との組み合わせとしての利用を検討していく必要があると考えている。

5. 結論

本研究では、1) 国語分野の学習課題に対してオープン情報構造指向アプローチを適用すること、2) 異なる外的表象へ変換する活動が演習可能な学習支援システム的设计・開発を行うこと、の二つに関する課題に取り組んだ。前者に関しては、国語分野における接続詞の学習課題の一つである異議可換性のある接続表現を対象に、その学習支援システム的设计・開発および評価を実施した。その結果、従来は教育現場において実施されていなかった活動である異議可換性のある接続表現を対象とした演習を実践利用内で実現可能であったことを確認した。この結果から、国語分野を対象にした場合においてもオープン情報構造指向アプローチは有効であることが明らかとなった。後者に関しては、先行研究である作問学習支援システム「モンサクン」を基礎として、図的表現を媒介させた和差の算数文章題演習システム的设计・開発および評価を行った。この事例では、学習課題の情報構造を分析することによって、単に図を媒介させるというだけではなく、言語表現と図的表現を連動させる形で変換する演習が実現された。しかも、正誤診断およびフィードバックも実現されている。この結果から、異なる外的表象間の変換活動が可能な再構成型演習の有効性が明らかとなった。以上二つの研究事例から、オープン情報構造指向アプローチの拡張を行うことができたと考えている。

参考文献

- [1] 菅原 良, 村木 英治: “日本におけるeラーニングの発展に関する時系列的再整理 — eラーニングの発展過程, 定義, 分類に注目して—”, コンピュータ&エデュケーション, Vol.23, pp.17-22, 2007.
- [2] 富永 敦子, 向後 千春: “eラーニングに関する実践的研究の進展と課題”, 教育心理学年報, Vol.53, pp.156-165, 2014.
- [3] 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.
- [4] 山崎 治, 三輪 和久: “外化による問題解決過程の変容”, 認知科学, Vol.8, No.1, pp.103-116, 2001.
- [5] 和田 一郎, 長沼 武志, 森本 信也: “子どもの理科学習における表象移行を促進する教授方略に関する事例的研究”, 理科教育学研究, Vol.56, No.2, pp.235-247, 2015.
- [6] Prajakt Pande: “Representational competence: towards a distributed and embodied cognition account”, Studies in Science Education, Vol.53, No.1, pp.1-43, 2017.
- [7] 喜多 敏博, 穂屋下 茂, 大西 淑雅, 奥村 晴彦, 上木 佐季子, 木原 寛, 長谷川 理, 不破 泰: “Moodleの開発体制と日本の大学における管理運用事例”, 教育システム情報学会誌, Vol.32, No.1, pp.16-26, 2015.
- [8] 善積 実希, 小松 泰信: “大学初年次を対象とする研究倫理教育 —eラーニングコンテンツを活用した試み—”, 大阪女学院大学紀要, Vol.16, pp.111-118, 2020.
- [9] 福原 美三: “MOOCの可能性と課題”, 日本教育情報学会年会論文集, Vol.30, pp.4-7, 2014.
- [10] 溝口 理一郎: “知的教育システム”, 情報処理, Vol.36, No.2, pp.177-186, 1995.
- [11] 平嶋 宗: “学習課題の情報構造としての再定義とその内容に基づいて設計された活動としての組み立てることによる学習”, 第 29 回人工知能学会全国大会, 1B3-CS-2, 2015.
- [12] 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.
- [13] 堀口 知也, 平嶋 宗: “誤りの修正を支援するシミュレーション環境 —誤り原因の示唆性を考慮したError-Based Simulationの制御—”, 人工知能学会論文誌, Vol.17, No.4, pp.462-472, 2002.
- [14] 北村 拓也, 長谷 浩也, 前田 一誠, 林 雄介, 平嶋 宗: “論理構造の組み立て演習環境の設計開発と実験的評価”, 人工知能学会論文誌, Vol.32, No.6, pp.1-12, 2017.
- [15] 平嶋 宗, 長田 卓哉, 杉原 康太, 中田 晋介, 舟生 日出男: “キットビルド概念マップの小学校理科での授業内利用の試み”, 教育システム情報学会誌, Vol.33, No.4, pp.164-175, 2016.

- [16] Bruner.J: “認識能力の成長<上> 岡本夏木他訳”, 明治図書, 1968.
- [17] Bruner. J, et al.: “Studies in cognitive growth: a collaboration at the Center for Cognitive Studies”, New York, NY: John Wiley & Sons, pp.30-67.
- [18] 中原 忠男: “算数・数学教育における構成的アプローチの研究”, 聖文社, 1995.
- [19] 岩井 健吾, 緒方 祐, 林 雄介, 平嶋 宗: “異義可換性のある接続表現を対象とした接続詞演習環境の設計開発とその試験的利用”, 電子情報通信学会論文誌 D, DOI: 10.14923/transinfj.2020PDP0047, Vol.J104-D, No.04, Apr. 2021.
- [20] 岩井 健吾, 合田 将治, 林 雄介, 平嶋 宗: “図的中间表現としての部分全体図を用いた和差の算数文章題演習環境の設計・開発とその試験的評価”, 電子情報通信学会論文誌D, Vol.J101-D, No.6, pp.1-11, Jun. 2018.
- [21] 市川 孝, “国語教育のための文章論概説,” 教育出版, 1978.
- [22] 山室和也, “文法教育における構文的内容の取り扱いの研究”, 溪水社, 2008.
- [23] 馬場俊臣, “国語教育における接続詞指導・習得に関する研究文献とその概要,” 札幌国語研究, vol.10, pp.1-25, 2005.
- [24] 氏家洋子, “「関係づけ表現」としての「接続詞」,” 早稲田大学語学教育研究所紀要, vol.12, pp.1-16, 1973.
- [25] 伊藤俊一, 阿部純一, “文章理解における接続詞の働き,” 心理学研究, vol.59, No.4, pp.241-247, 1988.
- [26] 伊藤俊一, 阿部純一, “接続詞の機能と必要性,” 心理学研究, vol.62, No.5, pp.316-323, 1991.
- [27] 浅井美恵子, “論説的文章における接続詞について,” 言葉と文化, vol.4, pp.87-98, 2003.
- [28] 石黒圭, “文章は接続詞で決まる,” 光文社新書, 2008.
- [29] 川端元子, “論理的文章における接続表現の機能,” 愛知工業大学研究報告, vol.44, pp.17-26, 2009.
- [30] 光村図書, “国語 四下 はばたき,” 光村図書, 2012.
- [31] 教育出版, “ひろがる言葉 小学国語4下,” 教育出版, 2012.
- [32] 三省堂, “小学生の国語 四年,” 三省堂, 2012.
- [33] 井上裕貴, 平嶋 宗, “接続詞が含意する論理構造の可視化とそれに基づく学習支援システムの設計,” 教育システム情報学会中国支部研究発表会講演論文集 vol.11, no.1, pp.13-16, 2011.
- [34] 緒方 祐, 平嶋 宗, “接続詞を用いることによって発生する文脈の推定演習の提案,” 2012年度教育システム情報学会学生発表会, 2013.
- [35] 緒方 祐, 林 雄介, 平嶋 宗, “接続詞を伴った文表現と含意を伴った状況表現の双方向組立による接続詞演習環境の設計・開発,” 電子情報通信学会技術研究報告. ET, 教育工学 vol.114, no.513, pp.163-168, 2015.

- [36] Kengo IWAI, Fonteles Furtado PEDRO GABRIEL, Yu OGATA, Yusuke HAYASHI, Tsukasa HIRASHIMA, "Design and Development of a Conjunctive Word Learning Support System for Conjunctive Expressions with Different Meaning Commutativity and its Experimental Use," Proc. of ICCE2019 vol.1 pp. 624-633, 2019.
- [37] 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,” SIG-ALST, 2018, vol.B5, no.03, pp.55-60, 2018.
- [38] Baker, R.S.J.d. “Is Gaming the System State-or-Trait? Educational Data Mining Through the Multi-Contextual Application of a Validated Behavioral Model,” Complete On-Line Proceedings of the Workshop on Data Mining for User Modeling at the 11th International Conference on User Modeling 2007, pp.76-80, 2007.
- [39] R.E. Mayer, Thinking, problem solving, cognition. Second ed., pp.455–489, W.H. Freeman, New York, 1992.
- [40] 山田篤史, 逆思考問題の問題解決に関する調査とその分析, イブシロン, vol.26, pp.21-30, 2004.
- [41] 黒崎東洋郎, 数と計算の指導, 小学校算数科の指導 (志水廣編), pp.49-104, 建帛社, 2009.
- [42] J.W. Stigler, K.C. Fuson, M. Ham, and M.S. Kim, “An analysis of addition and subtraction word problems in American and Soviet elementary mathematics textbooks,” Cognition and Instruction, vol.3, no.3, pp.153–171, 1986.
- [43] M.S. Riely and J.G. Greeno, “Development analysis of understanding language about quantities and of solving problems,” Cognition and Instruction, vol.5, no.1, pp.49–101, 1988.
- [44] T. Hirashima and M. Kurayama, “Learning by problem posing for reverse-thinking problems,” Artificial Intelligence in Education, pp.123–130, 2011.
- [45] 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.
- [46] 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,” 信学論 (D), vol.J96-D, no.10, pp.2440-2451, Oct. 2013.
- [47] T. Hirashima, Y. Hayashi, and S. Yamamoto, “Triplet structure, model of arithmetical word problems for learning by problem-posing,” Proc.HCI2014 (LNCS 8522), pp.42–50, 2014.
- [48] 神戸健寛, 山元翔, 吉田祐太, 林雄介, 平嶋宗, “単文統合型作問学習支援システムの利用効果の問題構造把握の観点からの評価,” 信学論 (D), vol.J98-D, no.1, pp.153-162, Jan. 2015.
- [49] R. Skemp, “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.
- [50] 栗山和広, “子どもの数理解における部分-全体スキーマの発達: 整数について,”

- 九州保健福祉大学研究紀要, vol.5, pp.35-40, 2004.
- [51] 川間健之介, “算数文章題に困難を示す児童の指導: 基礎的加減算文章題の類型に基づいて,” 障害科学研究, vol.33, pp.237-248, 2009.
- [52] 小林美穂, 船橋篤彦, “広汎性発達障害児における算数文章題の指導に関する一考察,” 愛知教育大学研究報告. 教育科学編, vol.62, pp.29-37, 2013.
- [53] 平井安久, “加法・減法の逆思考問題についての一考察: テープ図からの演算決定のむずかしさ,” 岡山大学教師養育開発センター紀要, vol.2, pp.102-111, 2012.
- [54] 石田淳一, 土田圭子, 岡本彩希, “2 学年の逆思考文章題単元におけるテープ図指導に関する研究,” 日本数学教育学会誌, vol.89, no.6, pp.2-11, 2007.
- [55] 石田淳一, 村上希久子, “3 学年の逆思考文章題解決における線分図指導に関する研究,” 日本数学教育学会誌, vol.92, no.2, pp.2-9, 2010.
- [56] 新井邦二郎, “知的行為の多段階形成理論,” 教育心理学研究, vol.21, no.3, pp.56-61, 1973.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] A.A. Supianto, Y. Hayashi, and T. Hirashima, “Visualizations of problem-posing activity sequences toward modeling the thinking process,” *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, vol.11, no.1, p.14, 2016.
- [60] A.A. Supianto, Y. Hayashi, and T. Hirashima, “Model-based analysis of thinking in problem posing as sentence integration focused on violation of the constraints,” *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, vol.12, no.1, p.12, 2017.
- [61] 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,” 人工知能学会学会誌, vol.30, no.3, pp.277-280, 2015.
- [62] 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, vol.7, no.3, pp.475-486, 1991.
- [63] 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,” 信学論 (D-I), vol.J83-D-I, no.6, pp.539-549, June 2000.
- [64] 平嶋宗, “「問題を作ることによる学習」の分類と知的支援の方法,” 教育システム情報学会研究報告, vol.20, no.3, pp.3-10, 2005.
- [65] 山元翔, 赤尾優希, 室津光貴, 前田一誠, 林雄介, 平嶋宗, “算数文章題の構造的理解を指向した作問学習支援システムの乗除算への拡張とその実践利用,” 信学論 (D), vol.J100-D, no.1, pp.60-69, Jan. 2017.
- [66] C.S. Robinson and J.R. Hayes, *Making inferences about relevance in understanding problems,*

in R. Revlin, R.E. Mayer (eds.), *Human Reasoning*, pp.195–206, 1978.

- [67] 岡本真彦, 算数文章題の解決によるメタ認知の研究, 風間書房, 1999.
- [68] 瀬田和久, 島添彰, 森兼隆, 岡本真彦, “スキーマプライミングテストを用いたスキーマの形成と縦断的評価-小学校算数文章題を題材として,” 信学論 (D), vol.J98-D,no.1, pp.94-103, Jan. 2015.
- [69] 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.
- [70] 山元翔, 平嶋宗, “特別支援学級でのモンサクンを用いた作問学習実践事例,” 教育システム情報学会誌, vol.30,no.4, pp.243-247, 2013.

本研究に関連する主要な成果

第3章

1. Kengo IWAI, Fonteles Furtado PEDRO GABRIEL, Yu OGATA, Yusuke HAYASHI, Tsukasa HIRASHIMA: “Design and Development of a Conjunctive Word-Learning Support System for Conjunctive Expressions with Different-Meaning Commutativity and its Experimental Use” , Proc. of The 27th International Conference on Computers in Education, vol.1, pp. 624-633, 2019/12/2-12/6.
2. 岩井 健吾, 緒方 祐, 林 雄介, 平嶋 宗:” 異義可換性のある接続表現を対象とした接続詞演習環境の設計開発とその試験的利用”, 電子情報通信学会論文誌 D, DOI: 10.14923/transinfj.2020PDP0047, Vol.J104-D, No.04, Apr. 2021.

第4章

1. 岩井 健吾, 合田 将治, 林 雄介, 平嶋 宗:” 図的中間表現としての部分全体図を用いた和差の算数文章題演習環境の設計・開発とその試験的評価”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J101-D, No.6, pp.1-11, Jun. 2018.

謝辞

本論文は筆者が広島大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。指導教員である広島大学工学研究科平嶋宗教授，林雄介准教授には終始ご指導をいただいた。ここに深謝の意を表す。また，他大学ながらも有益な議論をさせていただいた広島工業大学山岸秀一教授，松本慎平准教授にも同様に感謝の意を表す。さらに，著者が所属する学習工学研究室の各位にも日頃より研究に関して多大なご協力をいただいた。ここに深謝の意を表す。