

可視化された知識構造を用いて論理的思考力の育成を

めざす学習システムに関する研究

(A Study of Learning System Aimed at Fostering Logical Thinking
Abilities Using Visualized Knowledge Structures)

学位取得年月 2022年3月

D134182

川本 佳代

概要

現代社会において、論理的思考力は最も重要な能力の1つである。この論理的思考力を小学校から育成することの重要性は、文部科学省の審議会「小学校段階における論理的思考力や創造性、問題解決能力等の育成とプログラミング教育に関する有識者会議」をはじめ各教科の学習指導要領解説等においても指摘されている。また、平成29年3月告示の小学校学習指導要領では、アクティブ・ラーニングの視点に立ち、能動的で主体的な学びが強調されている。能動的で主体的な学びには、学習者が自身の内的理解を構造的に外化する活動が有用とされている。本論文では、構造的な外化の前提として必須となる構造的内的理解の促進として、(1) 問題の構造を的確にとらえる活動(論理的読解活動)、内的理解の構造的な外化の促進として(2) 言語的な構造を外在化する活動(言語的構造外在化活動)、および(3) 計算論的な構造を外在化する活動(計算論的外在化活動)の3つの活動を演習として課すことで、論理的思考力の育成をめざす学習システムを開発し、コンピュータ上に実装して提案システムの有効性を評価することを目的とする。

公式やパターン化された解法をあてはめて問題解決しようとするだけの学習では、すべての公式や解法を暗記する必要があることに加え、類似する他の問題への応用が難しくなる。そこで、論理的思考力を育成するために、論理的読解活動として問題の構造をイメージしやすい図で可視化した知識構造を示しながら直感的な意味付けを繰り返すことで、構造的内的理解の促進させる学習システムを第3章で述べる。このシステムは、百分率と速さの分野を題材とし、「比較量」を求める問題、「基準量」を求める問題および「割合」を求める問題を一貫性のある思考過程を表す図を提示しながら解答を繰り返すことで、公式の丸暗記とその適用をめざす学習ではなく、考え方の理解と記憶を促し、段階的かつ具体的な手順の説明を備え、学習した考え方を定着させることで構造内的理解の促進をめざした。さらに評価実験により、考え方を重視した提案システムが、公式による解き方を重視したシステムに比べ、学習効果があり学習内容の定着が図れることを検証した。

問題解決方法がいくつも存在するような問題においては、ある1つの筋道を立てるだけではなく、複数のあり得る筋道をも立てることが求められる。このような同一対象に対して複数の筋道を立てることを求めるような演習は、これまでインタラクティブな形では取り扱われていなかった。同じ状況の中で様々な論理展開を組み立てるというオープンエンドな演習をインタラクティブに実現する四コマ漫画の論理組み立て課題に取り組む言語的構造外在化活動を通して、与えられた情報を複数の視点からとらえ論理的に試行することで論理的思考力の育成をめざす学習システムを第4章で述べる。このシステムでは、複数の筋道が考えられる四コマ漫画の各コマから読み取れる文を選択肢から選び、四コマ漫画の流れに符合する文章を画面上で作成すること

で、四コマ漫画のもつ筋道の構造を可視化することができる。可視化された構造を見ながら、論理的に妥当な異なる筋道を立てることで、「適切な基準や根拠に基づく、論理的で偏りのない思考」である批判的思考の能力を育成することができ、その思考の元となる論理性を読み取り組み立てる際に必要となる論理的思考力を育成することができる。さらに小学生に対する試験的な運用結果から、批判的思考の能力の育成を推進することが期待できることを示唆した。

小学校児童向けにフローチャートの読解と作成課題を用いた計算論的外在化活動を課す学習システムを第5章で述べる。このシステムでは、可視化された知識構造であるフローチャートを読解させ、問題を解く過程をフローチャートで可視化させて解の評価を繰り返すことで、分析および評価に基づく論理的整合性のある表現をする論理的思考力を育成する。このシステムを用いた評価実験により、(1) 開発したシステムを用いたフローチャートの読解・作成活動を小学校児童が行えること、(2) この活動を行った児童では論理的思考力が必要とされる問題に対する成績が向上していることの2点を実験的に検証した。

本論文の内容は次の通りである。第1章では、本研究の背景を説明することにより、本研究の目的である論理的思考力の育成をめざした学習システムの意義を明らかにする。第2章では、論理的思考とそれに関連する批判的思考について説明し、関連研究を示しながら本研究の位置づけについて述べる。第3章では、基礎となる概念や知識を直感的な意味付けの繰り返す論理的読解活動を課す学習システムについて述べる。第4章では、四コマ漫画の論理組み立てを題材とした言語的構造外在化活動を通じて論理的思考力の育成をめざす学習システムについて述べる。第5章では、フローチャートを用いた論理構造の読解・構築を行う計算論的外在化活動を通じて論理的思考力の育成をめざす学習システムについて述べる。第6章では、これらの研究のまとめを行う。

目次

1	序論	- 1 -
2	論理的思考力と関連研究	- 4 -
2.1	論理的思考と批判的思考	- 4 -
2.2	関連研究	- 5 -
3	論理的読解活動を課す学習システム	- 10 -
3.1	直感的な意味づけによる学習システム	- 10 -
3.2	検証実験と考察	- 17 -
4	言語的構造外在化活動を課す学習システム	- 23 -
4.1	四コマ漫画の論理組み立て課題を題材とした学習システム	- 23 -
4.2	演習システム	- 25 -
4.3	実験と考察	- 28 -
5	計算論的構造外在化活動を課す学習システム	- 33 -
5.1	フローチャート構造作成課題を題材とした学習システム	- 33 -
5.2	評価実験と考察	- 40 -
6	結論	- 44 -
	参考文献	- 45 -
	本研究に関連する主要な成果	- 48 -
	謝辞	- 49 -

図目次

図 3.1.1	直感的な意味づけによる学習システムを用いた学習の流れ.....	10 -
図 3.1.2	「考え方」のシステム画面(「比べる量」ステップ3)の例.....	13 -
図 3.1.3	学習カテゴリ「比べる量」の各学習ステップのグラフの例.....	14 -
図 3.1.4	「練習問題」のシステム画面の例.....	15 -
図 3.2.1	比較システムの「考え方」ページの例	18 -
図 3.2.2	学習カテゴリごとの増加点数の被験者平均と標準偏差.....	19 -
図 3.2.3	事前テストの上位8名と下位8名の事前テストと事後テストの正答率(%)の 被験者平均と標準偏差.....	20 -
図 3.2.4	学習定着率(事後テストにおいて練習問題に合格したステップの問題の正答 率)の被験者平均と標準誤差.....	21 -
図 4.1.1	四コマ漫画における論理展開のイメージ.....	24 -
図 4.2.1	問題レベル選択画面.....	25 -
図 4.2.2	問題選択画面(全体).....	26 -
図 4.2.3	問題解決画面(一部拡大)	26 -
図 4.2.4	演習画面1	26 -
図 4.2.5	演習画面右上のボタン群	27 -
図 4.2.6	演習画面2.....	27 -
図 4.3.1	事前テストで使用した四コマ漫画.....	29 -
図 5.1.1	ろっつメニュー画面.....	34 -
図 5.1.2	凍土エリアの問題例.....	35 -
図 5.1.3	図 5.1.2 の問題の解答例.....	36 -
図 5.1.4	砂漠エリアの問題例.....	36 -
図 5.1.5	森エリアの問題例	37 -
図 5.1.6	火山エリアの問題例.....	38 -
図 5.1.7	図 5.1.6 の問題の解答例.....	39 -
図 5.1.8	まとめ問題の初期画面.....	39 -
図 5.1.9	まとめ問題の解答例.....	40 -

表目次

表 3.1.1	学習カテゴリ「比べる量」「もとにする量」「百分率」の学習ステップ、考え方で用意したページ数ならびに練習問題の種類数(ただし「もとにする量」ではステップ4)を省略した4ステップ構成).....	12 -
表 3.1.2	学習カテゴリ「道のり」「速さ」「時間」の学習ステップ、考え方で用意したページ数ならびに練習問題の種類数.....	12 -
表 3.1.3	学習カテゴリ「比べる量」における学習ステップの学習目標.....	14 -
表 3.1.4	学習分野「百分率」の学習ステップで用意した練習問題の百分率のパターン(ただし「ものにする量」「百分率」ではステップ4)を省略した4ステップ構成..	15 -
表 3.1.5	学習分野「速さ」の学習ステップで用意した練習問題の時間のパターン.	16 -
表 3.2.1	事前テストと事後テストの正解率(%)の被験者平均(括弧内は標準偏差)	19 -
表 3.2.2	練習問題に合格した学習ステップの数(全23ステップ)の被験者平均(括弧内は標準偏差).....	20 -
表 3.2.3	練習問題に合格した学習ステップのうち被験者が新たに学習したと考えられる学習ステップの数の被験者平均(括弧内は標準偏差).....	20 -
表 3.2.4	事前テストで正解した問題の事後テストでの不正回数の被験者平均(括弧内は標準偏差).....	22 -
表 4.3.1	被験者の実質的演習時間.....	31 -
表 4.3.2	本演習の楽しさに関する評価.....	31 -
表 4.3.3	本演習の難しさに関する評価.....	31 -
表 4.3.4	再演習への意欲に関する評価.....	32 -
表 5.2.1	アンケート結果の一部抜粋(直接確率計算).....	42 -

1 序論

現代社会において、論理的思考力は最も重要な能力の1つである。この論理的思考力を小学校から育成することの重要性は、文部科学省の審議会「小学校段階における論理的思考力や創造性、問題解決能力等の育成とプログラミング教育に関する有識者会議」をはじめ各教科の学習指導要領解説等においても指摘されている。また、平成29年3月告示の小学校学習指導要領では、アクティブ・ラーニングの視点に立ち、能動的で主体的な学びが強調されている。能動的で主体的な学びには、学習者が自身の内的理解を構造的に外化する活動が有用とされている。本論文では、構造的な外化の前提として必須となる構造的内的理解の促進として、(1) 問題の構造を的確にとらえる活動（論理的読解活動）、内的理解の構造的な外化の促進として(2) 言語的な構造を外在化する活動（言語的構造外在化活動）、および(3) 計算論的な構造を外在化する活動（計算論的外在化活動）の三つの活動を演習として課すことで、論理的思考力の育成をめざす学習システムを開発し、コンピュータ上に実装して提案した学習システムの有効性を評価することを目的とする。

小学校、中学校、高校の学生や生徒が、計算によって解答を導き出す科目や分野の問題解決過程には、問題の解決方法を説明する「考え方」、考え方に基づいて問題を解けるようにする「問題の定式化」、そして定式化により与えられる式に基づいて答えを求める「計算」とがある。例えば、「 n メートルの直線上に1メートル間隔で木を植えるときに必要な木の本数を求める」問題があったときには、0メートル地点、1メートル地点、 \dots 、 n メートル地点、に木が植えられる状態をイメージして木の本数を数えるという「考え方」がある。この考え方に基づいて、全部で1から n までで n 本あることと0メートル地点の1本を足して $(n+1)$ 本という「定式化」を行い、具体的な n の数値が例えば5と与えられたときに $(5+1)=6$ として「計算」がなされる。このような問題解決においては、「考え方」を理解し「問題の構造」を的確にとらえた上で「問題の定式化」を行うプロセスが重要となるが、実際には「問題が定式化」された後のいわゆる「公式」を活用して計算を行えば試験で得点が取れるため、学生のレベルに応じては「考え方を理解し問題の構造を的確にとらえること（本研究では本質と呼ぶ）」が省略されることも少なくない。文部科学省の「教科書の改善・充実に関する研究報告書」[1]によると、多くの小学生は現在の算数の教科書に対し、簡単な問題から急に難しくなるのでわからなくなること、また絵や写真は少なくともいいがもっと詳しい図や解説がほしいという学生の感想が示されており、説明のわかりやすさと、段階的かつ具体的な手順の説明の必要性がうかがえる。また同報告書においては、多くの小学生が「比較量、基準量、割合」の要素からなる分野の考え方に対し、苦手意識を持っていることが示されている。これには百分率「比べる量、もとにする量、百分率」の分野や、速さ「道のり、速さ、時間」の分野が含まれるが、この両者は、比較量 = 基準量 \times 割合、とい

う構造をもつ。本質を重視した学習が進むことで、片方の分野の理解が他方の理解につながることや、類似する平均値「合計値，平均値，数量」や人口密度「人数，人口密度，広さ」などの分野の理解につながることを期待できる。現在の一般的な教科書及び参考書では、百分率の分野において「 X は Y の $Z\%$ です。 X を求めなさい。」という問題文があったとき、 X が比べる量， Y がもとにする量， Z が割合だと教え、「比べる量 = もとにする量 \times 割合」という公式に当てはめる解き方で教えている。しかし、公式だけを覚えて正しく考え方を理解していない学習者の場合、「 Y の $Z\%$ は X です。 X を求めなさい。」と、問題文が変更されただけでも、公式の適用が困難になる場合がある。公式やパターン化された解法をあてはめて問題解決しようとするだけの学習では、構造的内的理解につながっていないため論理的思考力を育成できているとは言い難い。そこで、本研究では、論理的思考力を育成するために、論理的読解活動として問題の構造をイメージしやすい図で可視化した知識構造を示しながら直感的な意味付けを繰り返すことで、構造的内的理解の促進させる学習システムを開発する。このシステムは、百分率と速さの分野を題材とし、「比較量」を求める問題、「基準量」を求める問題および「割合」を求める問題を一貫性のある思考過程を表す図を提示しながら解答を繰り返すことで、公式の丸暗記とその適用をめざす学習ではなく、考え方の理解と記憶を促し、段階的かつ具体的な手順の説明を備え、学習した考え方を定着させることで問題の構造を的確にとらえる力を養い構造的内的理解の促進をめざした。さらに評価実験により、考え方を重視した提案システムが、公式による解き方を重視したシステムに比べ、学習効果があり学習内容の定着が図れることを検証した。

文部科学省は国家戦略会議において「社会の期待に応える教育改革の推進」を公表した [2]。この中で、「すべての子どもに、課題解決のために自ら考え判断・行動できる社会を生き抜く力を育成」することを表明し、その対策の一つとして「考える力(クリティカルシンキング)やコミュニケーション能力等の育成」を挙げている。クリティカルシンキングは批判的思考とも呼ばれ、E.B.ゼックミスタ等は「適切な基準や根拠に基づく、論理的で偏りのない思考」と定義している [3]。さらにあらゆる研究者が、批判的思考において与えられた情報や知識を一面的ではなく多面的にとらえる能力と態度が重要であると指摘している [4; 5; 6]。しかし、その力を身に付けるための演習の実施は簡単ではない。問題解決方法がいくつも存在するような問題においては、ある1つの筋道を立てるだけでなく、複数のあり得る筋道をも立てることが求められる。このような同一対象に対して複数の筋道を立てることを求めるような演習は、これまでインタラクティブな形では取り扱われていなかった。同じ状況の中で様々な論理展開を組み立てるというオープンエンドな演習をインタラクティブに実現する四コマ漫画の論理組み立て課題に取り組む言語的構造外在化活動を通して、与えられた情報を複数の視点からとらえ論理的に試行することで論理的思考力の育成をめざす学習システムを開発する。このシステムでは、複数の筋道が考えられる四コマ漫画の各コマから読み取れ

る文を選択肢から選び、四コマ漫画の流れに符合する文章を画面上で作成することで、四コマ漫画のもつ筋道の構造を可視化することができる。可視化された構造を見ながら、論理的に妥当な異なる筋道を立てることで、「適切な基準や根拠に基づく、論理的で偏りのない思考」である批判的思考の能力を育成することができ、その思考の元となる論理性を読み取り組み立てる際に必要となる論理的思考力を育成することができる。さらに小学生に対する試験的な運用結果から、批判的思考の能力の育成を推進することが期待できることを示唆した。

理数系に関して能力の高い学習者を育てる必要性が注目されている。文部科学省により2002年度から「スーパーサイエンスハイスクール(SSH)」[7]が、独立法人科学技術振興機構(JST)により2008年度～2011年度「未来の科学者養成講座」、2012年度から「次世代科学者育成プログラム」[8]等が実施されてきた。しかし、これらは中・高校生以上が対象であった。J.S.ブルーナーは形式的操作の段階に入る10～14歳程度の子どもについて「科学的概念を教えるには、小学校の水準においてさえも、子どもの認知力が発達する自然の経路に盲従する必要はない。科学的概念は、教え方によっては、子どもをさらに先に向かって発達させるように彼を励ますものであって、しかも彼が使いこなせる機会を提供することによって、彼の知的発達を促すのである」[9]と述べており、小学生においても高度な科学教育が実現できることを示唆している。そこで本研究では、小学校児童向けにフローチャートの読解と作成課題を用いた計算論的外在化活動を課す学習システムを開発する。このシステムでは、可視化された知識構造であるフローチャートを読解させ、問題を解く過程をフローチャートで可視化させて解の評価を繰り返すことで、分析および評価に基づく論理的整合性のある表現をする論理的思考力を育成する。一般的な児童ではなく、理数に関して高い関心を持っている児童を対象にした評価実験により、(1)開発したシステムを用いたフローチャートの読解・作成活動を小学校児童が行えること、(2)この活動を行った児童では論理的思考力が必要とされる問題に対する成績が向上していることの2点を実験的に検証した。

本論文の内容は次の通りである。第2章では、論理的思考とその思考に関連がる批判的思考について説明し、関連研究を示しながら本研究の位置づけについて述べる。第3章では、基礎となる概念や知識を直感的な意味付けの繰り返す論理的読解活動を課す学習システムについて述べる。第4章では、四コマ漫画の論理組み立てを題材とした言語的構造外在化活動を通じて論理的思考力の育成をめざす学習システムについて述べる。第5章では、フローチャートを用いた論理構造の読解・構築を行う計算論的外在化活動を通じて論理的思考力の育成をめざす学習システムについて述べる。第6章では、これらの研究のまとめを行う。

2 論理的思考力と関連研究

本章では、論理的思考とそれに関連が深い批判的思考について説明し、関連研究を示しながら本研究の位置づけについて述べる。

2.1 論理的思考と批判的思考

現代社会において、論理的思考(Logical Thinking)は最も重要な能力の1つである。文部科学省が発表している各教科の学習指導要領解説等をはじめ領域・分野ごとに、論理的思考の定義には若干の違いがある。井上は、用いられ方の違いにより、論理的思考を、

- (1) 形式論理学の諸規則にかなった推理のこと（狭義）
- (2) 筋道の通った思考、つまりある文章や話が論証の形式を整えていること
- (3) 直感やイメージによる思考に対して、分析、総合、抽象、比較、関係づけなどの概念的思考一般のこと（広義）

と定義している [10]。心理学や数学教育などでは（1）を用いることが多い一方、国語教育や社会教育などでは（2）、（3）のやや広くとらえられている。経済協力開発機構(OECD)が3年おきに読解力、数学的リテラシー、科学リテラシーの3分野で生徒の到達度を調査している。2009年調査でメインテーマとされた「自らからの目標を達成し、自らの知識と可能性を発達させ、効果的に社会に参加するために、書かれたテキストを理解し、利用し、熟考し、これに取り組む能力」である読解力が日本の子どもに不足していることが示唆された。この調査結果が社会に与えた影響は大きく、2009年以降に文部科学省が発表した各教科の学習指導要領解説や審議会「小学校段階における論理的思考力や創造性、問題解決能力等の育成とプログラミング教育に関する有識者会議」等で、読解力を含む論理的思考力を小学校から育成することの重要性が指摘され続けている。近年では小学校教育において、論理的思考と密接に関係する批判的思考(Critical Thinking)やプログラミング的思考(Computational Thinking)の育成も強く求められている。文部科学省により、プログラミング的思考は「自分が意図する一連の活動を実現するために、どのような動きの組合せが必要であり、一つ一つの動きに対応した記号を、どのように組み合わせたらいいのか、記号の組合せをどのように改善していけば、より意図した活動に近づくのか、といったことを論理的に考えていく力」と定義され、基盤的な能力である論理的思考力を育成することの重要性は益々高まっている。

鈴木は批判的思考を「与えられた情報や知識を鵜呑みにせず、複数の視点から注意深く論理的に分析する能力や態度」と定義している [4]。道田は①問題の発見、②解の探究、③解の評価、④解決という問題解決のプロセスの中に批判的思考を位置づけ、見かけに惑わされず、多面的に捉えて、本質を見抜くことと定義している [5]。彼らは定義そのものに多面的視点を含め、特に道田はプロセス②において多面的に捉える必要性を主張している。また、E.B.ゼックミスタ等はクリティカルな考え方をする人の特性の一つにいろいろ

な立場や考え方を考慮しようとする「開かれた心」を挙げ、それは、ものごとの良い面と悪い面の両面を見たり、一つ二つの立場だけでなくあらゆる立場から考慮しようとしたり、偏りのない判断をしたりという行動に表れるとしている [3]。また、楠見は批判的思考のプロセスは①明確化、②推論の土台の検討、③推論、④行動決定の4段階であり、さらに①～④が正しく行われているかを振り返りコントロールする、一段高いメタ認知プロセスがあるとし、このうち②③④において客観的かつ多面的にとらえようとする態度が必要であると述べている [6]。また道田は、「あることについて批判を行うためには、まずそのことをきちんと理解していなければならない」「十分な理解(の努力)なしに行われる批判はたんなる誤解でしかなかったり、揚げ足取りなど本質をはずした議論にしかならない」と述べ、批判的思考における好意的理解の重要性を指摘している [11]。他の論理を正しいものとしてひとまず理解することは多面的視点に他ならない。

批判的思考において論理性は重要である。道田のプロセス [5]においては③に、楠見によるプロセス [6]においては①②③に論理性が求められる。論理性を高めるには論理的思考力の育成が必要であるが、そのためにしばしばトゥルミンモデルが採用される。トゥルミンモデルでは論の成否は文(命題)と文の並べ方や組み立て(レイアウト方法)にあり、並べ方には次の論証の型が必要であるとされる [10]。すなわち、主張 C がなされるためには、それを支える根拠としての D が必要であり、さらにどうして D から C が主張できるのかという理由づけ W がなければならない。さらにその理由の確かさを示す限定 Q、反証(「～でない限りは)を示す R、W を支えるための理由の裏付け B が付け加えられる。この論証の型を導入した作文教育研究がみられる [12; 13]。これらの研究は論理的思考力を高めることを目的としている。

2.2 関連研究

文章として書かれた問題に数式を適用して解答を導く過程には、問題文を読んで理解する問題理解過程と、理解した内容に基づいて問題を解決する問題解決過程の2つがある (14)。文章題の解決には問題理解過程が重要と言われているが、本研究では複雑な文章題を対象とはせず、問題の意味を理解した学生が、どのように解決すればよいかを考え、実際の解答に至るまでの問題解決過程に着目する。すなわち、問題の解法に着目した上で、公式や決まりきった解き方の丸暗記ではなく、公式を導くための考え方を本質として理解させることを目指す。学習者に解法を与えて、その解法が適用可能な問題を作らせる作問支援が解法の定着に有効と示されており (15)、作問学習を支援するシステムも開発されている [16]。作問学習においては文章題を作成することから問題理解過程と問題解決過程の両者を含む学習を促しており、問題解決過程のみの学習に比べ、より高い能力が学習者に要求されると考えられる。本研究においては、提案するシステムを用いるために必要な事前知識や学習能力を低く抑え、公式のみを用いて問題を解く、あるいは公式すら用いられない学習者を対象に含めることを意図し、公式とその公式を使う元となる考え方まで

を学習範囲とする。これにより多くの学習者を対象として、公式のみの学習から脱却できる学習システムを構築する。

一般的な数学の問題解決過程においては、1つの知識によって即座に解答に至ることは少なく、いくつかの論理展開をつないで理解を進めて行く必要がある。そのため、生徒の内発的な問いをつなげて問題解決を進展させる研究 [17]や、生徒のペアがお互いに対話しながら問題解決を図ることの意義に関する研究 [18]がある。しかし本研究では、複数の過程を要する問題を解く前段階として、1つの知識により導かれる式を用いて解答することができなければ、より複雑な問題に対応することはできない。また、問題解決過程においては図を描くことが有効と示されており、特に図を描くことが困難な生徒に、図を描くきっかけを与えることが有効と示されている [19]。そこで本研究では、「比較量、基準量、割合」の3つ組からなる分野を対象として、その3つの数量の関係のみの把握から解決できる問題を対象とした上で、直感的に理解しやすいグラフを用いて表すことで、既知の量と求める量の関係を明確にして問題解決を促す。問題解決を支援する図やその効果に関する研究は古くから行われている。数学教育においては、問題文の状況を説明して問題解決を促す図に「情景図」があり、特に線分を利用して表したものを線分図と呼ぶ。これまでの研究においては、このような図の役割について調査した研究 [20; 21] や、「速さ」や「割合」などの特定の単元を対象として、その分野の問題を幅広く解決することを支援するものが多かった [22; 23]。これらの研究により、図の提示が問題解決につながる事が示されているが、実際には、図そのものを学習者が想起できなければ、独力で問題を解くことはできない。また、多様な問題（たとえば、二人が出会ったり、追い越したりする速さの問題）に対して適切な図を想起することは、理解が十分でない学習者には難しく、まずは記憶に残り、応用が可能になる基本的な問題の解法の定着を目指すことが重要と考えた。そこで本研究では、「比較量、基準量、割合」の3つ組からなる分野に対して、公式の理解を促す基本的な問題において、線分図に相当するグラフを用いた上で、学習者が、頭の中でグラフを再現して問題を解けるようになるシステムの構築を目指す。また、この基本的な問題を通じて、「比較量、基準量、割合」の3つ組からなる分野同士の類似性を、学習者が確認することができる枠組みとすることを目指す。すなわち、対象とする百分率と速さの分野において、見た目が類似するグラフを用いた学習により、複数の分野の理解を相互に促すシステムの構築をめざす。

近年、PC やタブレット端末を利用した学習支援が広く行われるようになってきている [24]。特に知識の定着を目的とした場合、計算ドリルや漢字ドリルなど類似問題を反復して解く学習が一般に行われており、コンピュータを活用したドリル型の学習支援について、その効果が確認されている [25]。コンピュータを活用した学習の利点にはいくつか考えられるが、単純な知識の定着という観点においては、短時間に繰り返し可能な練習問題を自動的に生成することで、集中的に反復が可能になる点が挙げられる。しかし、考え方の学習を目指したシステムでは、時間をかけた学習により知識の定着を目指すことが多

く、学習意欲の維持が困難になり途中で投げ出してしまいう可能性があった。そこで本研究では、公式への当てはめなど、機械的な作業の反復により「知識」を覚えさせる学習システムではなく、問題を解く過程を重視して、頭の中で考えることを短時間に繰り返す練習により、問題を解く際の「考え方」を身につけられる学習システムの構築をめざす。特に、紙や鉛筆を用いずに頭の中で考えさせること、また短時間で多くの問題をこなせるようにすることを重視して、暗算が可能な計算で解ける問題を用意し、考え方の理解と定着に特化したシステムを構築する。

発想力・論理力・表現力・批判的思考力・コミュニケーション力の育成を狙いとして、常に理由を考える教育、カルタを使ってマインドマップを作る授業、フォーマットに従った作文授業などを重ねるフィンランドの教育方法について検討し、導入した教育研究がある [26; 27]。これらの研究はすべて時間をかけて文章を読んだり書いたりすることが前提であり、繰り返しは困難である。このことは、様々な論理構成を試す、あるいはおかしな論理構成を経験し吟味するといったことが困難であることを意味している。本研究では「四コマ漫画」をレイアウトとして短文が書かれたカードを並べることで論理を組み立てる方法を提案する。この方法であれば、様々な論理構成を試し、吟味する演習活動が実現できる可能性がある。

道田は教材として漫画を使用することの積極的利点として以下を挙げている [28]。

- (1) お楽しみや動機づけになり得る。
- (2) 簡潔にポイントを表すことができる。特に四コマ漫画は起承転結などの論理展開を含んでいるのが一般的であり、これらの点が引き立つ。
- (3) すべてが言葉で説明されていないことで、文章説明以上に読み手が自分で言葉や理屈にする余地が残されている。
- (4) プライバシーの問題が生じない。

本研究では、このうち(2)(3)の利点を使用する。すなわち、(2)の簡潔にポイントが表され、その中に論理展開が含まれる点を利用して論理組み立て練習を行う。さらに(3)の利点により、提示される漫画の1コマ1コマの解釈を学習者に委ね、学習者は自由度を持って多面的な視点から論理を組み立てる演習を実現することができる。これらを踏まえ本研究に四コマ漫画を導入した理由は以下のようにまとめられる。

- (1) 結論に至るための論理展開が含まれている
- (2) 内容が限定され、短く簡潔である。

その結果、

- (3) 論理展開自体に焦点を当てて考えやすい。

さらに、セリフや説明をなくすことにより、

- (4) 学習者は各コマを自由度を持って解釈し、多様な論理展開を考えることができる。

すなわち、学習者は四コマ漫画に描かれた絵に拘束されながらも自由度を持って論理展開を組み立てることができる。

そして、これらの結果、

(5) 多様な論理を組み立てる演習をシステムティックに実施することが可能となる。

これまでに行われていた四コマ漫画を使用した研究は以下に大別される。

- (1) 伝達・教育内容を表示する手段として四コマ漫画を使用した研究：各分野
- (2) 四コマ漫画に描かれた内容について説明を求める課題を設定した研究：日本語教育、医療
- (3) 四コマ漫画自体の研究：文学・文化人類学等
- (4) 四コマ漫画の読解には高度な思考を要するという観点から人間の関与を示す証拠として四コマ漫画に対する理解度を利用する研究：ログイン認証
- (5) 学習課題として四コマ漫画作成を導入した研究：教育

4章で述べる研究は(2)(4)に関わる。(2)に属する先行研究は日本語を学ぶ留学生の教材や、脳や感覚器等に障害を持つ学習者の症状の明確化するための資料として使用されている。本研究では日本人の健常な小学生を対象とする。(4)はコンピュータによる不正ログインを防止するために人間の高度な認知機能を用いる方法に関する研究である。本研究では高度な思考を対象にしているが、先行研究とは目的が異なる。また、(2)に属する研究に既存の四コマ漫画におけるストーリー展開のパターンを明確にしたものがある [29]。この研究ではコマ間の関係に基づき3パターンに分けている。本研究では、各コマの解釈の多様性を含むため、より多様な論理展開が可能となる。

フローチャートの解読と作成を学習者に行わせるシステムとして、タイルを組み合わせてフローチャートを作成し、オブジェクトを動かす「ことだま on Squeak」システムがある [30]。このシステムでは学習者は自由にオブジェクトを作成し、フローチャートに従ってオブジェクトを動かすことができるが、達成すべき課題、すなわちオブジェクトの目標地点が予め提示される形式をとっていない。その結果、学習者は最初に目標地点に達するためのフローチャートを作成するのではなく、フローチャートを作り、その結果オブジェクトがどこに行くかを見ることから始める必要がある。この場合でも時間が十分にあれば自ら目標を設定してフローチャートを作成するトレーニングになりうるが、限られた時間では目標地点に至る過程を論理的に考えるトレーニングにはなりにくい。また、大学生を対象にしたアルゴリズム学習システム「FLOMAGE」は、記述したフローチャートの通りに数字が変動する様子をアニメーションで表現するシステムである [31]。このシステムはプログラミング能力を高めるために、その基礎となるアルゴリズムを構築する力の向上をめざしている。本研究と目的は類似しているが、対象が大学生であるため、興味はひきにくくても結果がすぐにわかる数値の変化を題材にしたフローチャートを扱っている。アニメーションも数字が変化するだけであり、小学生の学習システムとしては適していない。

これらを踏まえて、4章では、明確な目標を設定した上で、その目標を達成するための手順としてのフローチャートを作成させるとともに、小学生でもフローチャートの作成が可能となるようなシステム設計を行った

3 論理的読解活動を課す学習システム

計算によって解答を導き出す科目や分野の問題解決過程においては、考え方を理解して問題の定式化を行うプロセスは重要である。公式を活用して計算するだけの学習では、すべての公式やパターンを暗記する必要があることに加え、類似する他の問題への応用を考えることができなくなる欠点が生じる。そこで本章では、小学校児童を対象にした構造的内的理解を促進させるための論理的思考力の育成をめざす上で、問題構造を具体的に表現でき（解の構造を具体的にイメージでき）、現有の知識を用いて解答を理解でき、かつ正誤の即時フィードバックが与えられる題材を活用した論理的読解活動として、問題の構造をイメージしやすい図で可視化した知識構造を示しながら直感的な意味付けを繰り返す課題を活用した学習システムについて述べる。

3.1 直感的な意味づけによる学習システム

3.1.1 直感的な意味付けを繰り返す学習システムの構成

直感的な意味付けによる学習システムは、「比較量、基準量、割合」の3つ組からなる分野を学習対象とする。このとき、3つ組の各要素となる「比較量」「基準量」「割合」のそれぞれを求める問題を学習カテゴリと呼ぶ。学習カテゴリは、カテゴリ内で出題される問題を難易度に応じて細分化した学習ステップから構成される。また学習ステップは、そのステップで出題される問題の「考え方」を学ぶ部分と、考え方を定着させるための「練習問題」とから構成される。

図 3.1.1 直感的な意味づけによる学習システムを用いた学習の流れに、学習システムを用いた学習の流れを示す。提案システムを用いる学習者は、学習分野、学習カテゴリ、学

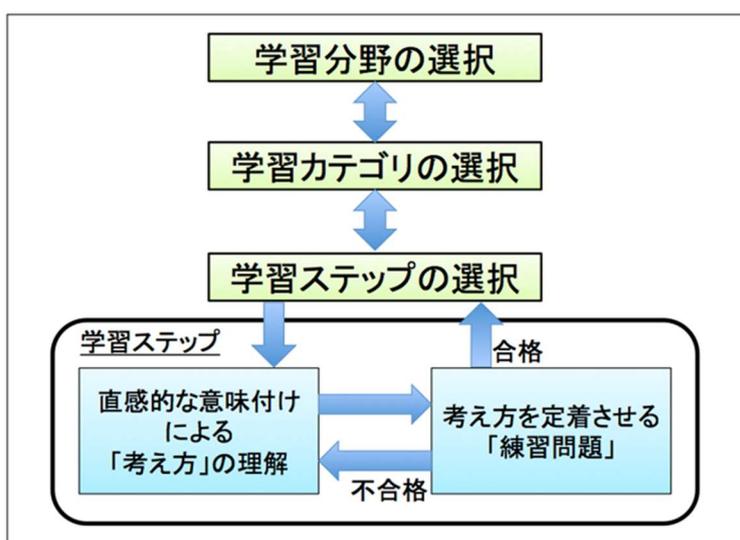


図 3.1.1 直感的な意味づけによる学習システムを用いた学習の流れ

習ステップを選択した後に、指定したステップでの理解目標について、考え方を理解した後、考え方を定着させる練習問題を解く。

3.1.2 学習分野

提案システムでは、「比較量，基準量，割合」の3つ組からなる**学習分野**を対象とする。本研究では、特に「百分率」と「速さ」の分野を対象とした。百分率の分野は「比べる量，もとにする量，百分率」の3つ組，速さの分野は「道のり，速さ，時間」の3つ組から構成される。

本システムの考え方を利用することで，その他の類似する平均値「合計値，平均値，数量」や人口密度「人数，人口密度，広さ」の問題の理解や，より一般的には， $A=B\times C$ の関係がある「A, B, C」の3つ組からなる分野を対象としたシステムへと拡張することが期待できる。また，本論文で明示的に取り扱う対象範囲とはしていないが，このように考え方に類似性がある複数の分野へ，学習システムの拡張を行う際には，複数の分野の類似性を明示したシステムとすることで，1つの分野での学習成果を他の分野の学習に生かせる枠組みとしても期待できる。

3.1.3 学習カテゴリ

「比較量，基準量，割合」の3つ組からなる学習分野において，その1つ1つの構成要素を**学習カテゴリ**と呼ぶ。本研究で対象とする学習分野「百分率」では，「比べる量」「もとにする量」「百分率」，学習分野「速さ」では，「道のり」「速さ」「時間」が学習カテゴリとなる。各学習カテゴリは，3つ組の要素の中で，2つが既知だったときに残り1つの未知の値を求める問題に対応する。すなわち各学習分野は，「比較量」を求める問題，「基準量」を求める問題，「割合」を求める問題の3つの学習カテゴリから構成される。このことによって，学習分野が異なっても，基本的な考え方が同じカテゴリが存在することになり，1つの分野で学習した経験を他の分野での学習に生かしやすくなる。

3.1.4 学習ステップ

表 3.1.2 学習カテゴリ「道のり」「速さ」「時間」の学習ステップ、考え方で用意したページ数ならびに練習問題の種類数

学習ステップと出題を用いる百分率	考え方	問題種類数
1) 1 時間	1 ページ	27
2) 30, 20, 15, 10, 1 分	5 ページ	135
3) 1 時間, 20, 15, 10, 1 分の複数倍	5 ページ	513

表 3.1.1 学習カテゴリ「比べる量」「もとにする量」「百分率」の学習ステップ、考え方で用意したページ数ならびに練習問題の種類数(ただし「もとにする量」ではステップ 4)を省略した 4 ステップ構成)

学習ステップと出題を用いる百分率	考え方	問題種類数
1) 100%	1 ページ	27
2) 50, 25, 10, 1%	4 ページ	108
3) 25, 10, 1%の複数倍	3 ページ	432
4) 100% + ステップ 2), 3)	3 ページ	540
5) 100% - ステップ 2), 3)	3 ページ	540

学習カテゴリで学習する内容に対して、段階的な学習を可能にする細分化を行ったものを**学習ステップ**と呼ぶ。学習分野「百分率」ならびに学習分野「速さ」の学習カテゴリで用意した学習ステップを、それぞれ表 3.1.1 と表 3.1.2 の左部分に示す。両カテゴリのステップ 1) からステップ 3) の3つのカテゴリにおいては、扱う割合を、基準量と同一の値、基準量の $1/n$ (n は整数)で表される単純な値、基準量の $1/n$ で表される単純な値の複数倍を扱った問題として構成した。これらに加えて、学習分野「百分率」では分野特有の出題傾向に応じて、基準量からの増減に関するステップを設けた。

本システムで対象とする問題は、暗算が可能な問題に限ってステップを構成している。これは本研究が、紙を使って計算することなく、頭の中だけで考えて解答を導き出す、考え方の理解に特化した学習を目指していることによる。本研究では対象としなかったが、より一般的な数値を使った、筆算による計算が必要な問題については、本システムにより考え方を学んだ後に、紙に必要なグラフを書いた上で計算を行うことが期待される。各学習ステップは、直感的な意味付けにより考え方の理解を行うための「考え方」部分と、「考え方」を定着させるための「練習問題」から構成される。表 3.1.1 と表 3.1.2 の右部分に、各ステップで用意した「考え方」を説明するページの数と、練習問題で出題される問題種類数を示す。学習者は、この「考え方」のページを閲覧することで、各ステップの問題を解く方法について学ぶ。その上で、学んだ考え方を実際の問題を解きながら定着させるための「練習問題」に進む。

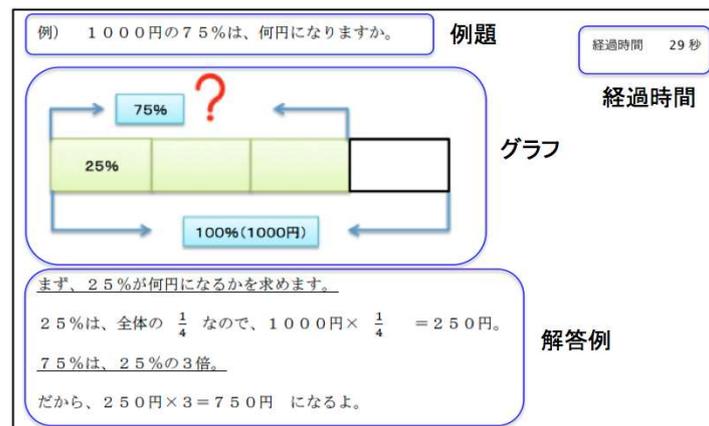


図 3.1.2 「考え方」のシステム画面(「比べる量」ステップ3)の例

[直感的な意味付けによる考え方の理解]

「考え方」を理解するページの構成を図 3.1.2 に示す。考え方を理解するページは、例題、グラフ、解答例、ページの閲覧開始からの経過時間の4つで構成する。各学習ステップにおいては、例題の数値を変更した別の例題の解き方を説明したページを複数用意する。

例題は、各ステップで出題対象となる数値を用いたものとして、最も簡潔な表現で必要な値を求めさせる問題とする。これは、問題理解過程ではなく問題解決過程を支援するために、もっともシンプルに理解できる問題表現を意図したことによる。

グラフは、例題を解く際に、頭の中に描かれるべきイメージを表す図として用意する。すなわち、問題の解き方を解説するためだけの図ではなく、後に同様の問題が出題された場合に、学習者が頭の中で再現しやすい図として、学習カテゴリ内で一貫性のある図を用いる。図 3.1.3 に、学習カテゴリ「比べる量」の各学習ステップのグラフの例を示す。

解答例は、問題を解く方法の説明となることに加えて、頭の中でグラフをイメージしたときに、どのように考えを進めていけばよいか、頭の中の思考過程を表す形で用意する。また、前のステップの考え方を理解している前提で、簡潔な表現となるようにする。例えば、図 3.1.2 では「比べる量」のステップ3)の例題として、75%の値を求める例題が出題されているが、解答例の1文目でまず25%の値を求めるところは、1つ前のステップ2)で25%を求める考え方を理解していることを前提としている。

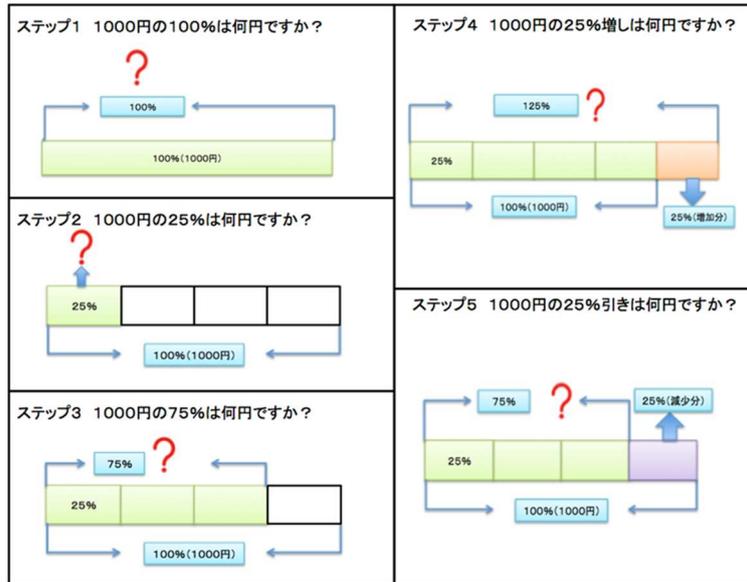


図 3.1.3 学習カテゴリ「比べる量」の各学習ステップのグラフの例

経過時間は、閲覧中の考え方のページを見てからの時間を表示する。これは、考え方を読み飛ばさずに理解してもらうために、次のページに進むための必要閲覧時間（20 秒）を設けた上で、それを確認できるように用意する。

表 3.1.3 学習カテゴリ「比べる量」における学習ステップの学習目標

学習ステップの学習目標 (25%の値を利用する例による説明)
1) 100%は全体を表すことへの理解。 100%と聞くと全体を表す図をイメージできる。
2) 25%は全体の 1/4 を表すことへの理解。 25%と聞くと全体の 1/4 を表す図をイメージできる。
3) 75%は 25%の 3 倍となることへの理解。 75%と聞くと全体の 1/4 が 3 つを表す図をイメージできる。
4) 25%増は全体に 1/4 を加えることへの理解。 25%増と聞くと全体に 1/4 を加えた図をイメージできる。
5) 25%減は全体から 1/4 を減じることへの理解。 25%減と聞くと全体に 1/4 足りない図をイメージできる。

これらの構成要素と、学習カテゴリを細分化した段階的な学習ステップは、頭の中でグラフのイメージを作りながら、徐々に問題を解くための考えを進めることにより、「考え方を」身につけられる設計を意図している。実際に用意している、学習カテゴリ「比べる量」における各学習ステップの学習目標を表 3.1.3 に示す。

表 3.1.4 学習分野「百分率」の学習ステップで用意した練習問題の百分率のパターン
(ただし「ものにする量」「百分率」ではステップ 4)を省略した 4 ステップ構成

ステップと時間のパターン	パターン数
1) 100%	1
2) 50, 25, 10, 1%	4
3) ステップ 2) の 2 倍から 9 倍 (100%未満)	16
4) 100% + ステップ 2), 3)	20
5) 100% - ステップ 2), 3)	20

図 3.1.4 「練習問題」のシステム画面の例

[考え方を定着させる練習問題]

理解した「考え方」を定着させることを目的として、考えることを繰り返し練習するための問題を用意する。練習問題は、学習ステップごとに 10 問 1 セットとして用意し、9 問以上の正解で合格とする。9 問以上の正解で合格とした理由は、学習内容を習得していれば全問正解できるはずの問題となっていることと、勘違いや操作ミスが起こる可能性も考慮して、1 問までの間違いは認めたことによる。図 3.1.4 に練習問題の出力構成を示す。練習問題の出力は、問題、グラフ、5 択の選択肢、その問題の解答開始からの経過時間の 4 つで構成する。

表 3.1.5 学習分野「速さ」の学習ステップで用意した練習問題の時間のパターン

ステップと時間のパターン	パターン数
1) 1 時間	1
2) 20, 20, 15, 10, 1 分	5
3) ステップ 1), 2) の 2 倍から 9 倍	10

練習問題で使用する数値の組合せとして、「百分率」と「速さ」の両分野において、「基準量」（「もとにする量」と「道のり」）には 10 から 10 ずつ 90 まで、100 から 100 ずつ 900 まで、1000 から 1000 ずつ 9000 までの 27 パターンを用意し、「割合」（「百分率」と「時間」）には、表 3.1.4 と表 3.1.5 に示すパターンだけ用意した。問題は、これらの可能なパターンの組合せの中から、毎回ランダムに出題する。またこれらの数値パターンは、解答時に暗算が容易になる値とする。具体的には、一桁の数のかけ算または割り算により、答えが 6 桁から 小数点第 1 位までの値になる問題を取り扱う。

グラフは、「考え方」を理解する際に用いたものと同様のグラフを自動的に描画して表示する。ただし基準量の数値は表示せず、学習者に自分で当てはめてもらうことを意図した。学習者は解答時にもこのグラフを頼りにすることで、グラフを用いることが解答のための必要条件となることを理解させ、グラフの形を繰り返し確認しながら独力でイメージしやすくなるように練習を行う。

5 択の選択肢は、解答の入力を素早く行うことで、多くの問題を短時間に解けるようにし、考え方を繰り返し学習できるように用意する。また選択肢は、正答を含みつつ選択肢の組合せで解答が推測できないように用意する。またパソコンの操作に慣れていない小学生でも解答を容易にすることを意図している。

経過時間は、各問題の制限時間（60 秒）を確認できるように用意する。制限時間は、考え方を学習していれば解答が可能な時間として設定する。

練習問題においては、解答の丸暗記を避けるために、数値による出題パターンの違いに加え、学習分野「百分率」の問題においては、値を扱うものとして、お金（円）以外に、人数（人）や本のページ数（ページ）など全部で 8 種類のものの中からランダムに選んで出題する。また、5 択の選択肢の位置もランダムに入れ替えるとともに、各問題の正解をフィードバックしないようにする。ただし、全 10 問に解答した後は、正解した問題の数が表示される。各問題の正解を教えない点については、考え方を理解している場合、各問題に自信を持って解答できると考えたこと、また自信を持って正解できるようになるまでは、考え方を再度理解する学習を行ってもらいたいと考えたことによる。

3.1.5 直感的な意味づけによる学習システムの活用方法

[学習の対象者]

本システムの対象となる学習者は、用意した学習分野に対して「考え方」がわからない、あるいは定着していない学生とする。ただし、短時間での繰り返しによる復習が可能なシステムとなっているため、一度「考え方」を理解したことがある学生であっても、その記憶を呼び起こす目的でも用いられると考えている。

また本システムは、各分野における考え方の理解を促すために、暗算可能な平易な計算により解答を導いてもらうことを前提としている。しかし、この暗算を行うこと自体が困難な学習者の場合は、理解した考え方を頭の中だけで再現して解答に至ることができないため、先に計算練習により暗算ができるようになっておくことが望まれる。

[学習者の学習手順]

本システムを用いる学習者は、図 3.1.1 に示すように、学習分野、学習カテゴリ、学習ステップを選択し、各学習ステップの中で「考え方」を理解し、その考え方を定着させるために「練習問題」を繰り返し行う。学習者が望む分野、カテゴリ、ステップの練習問題で合格すれば、その分野、カテゴリ、ステップを習得したことになる。練習問題で不合格となった学習者には、そのステップの「考え方」を再度閲覧してもらった上で、再び練習問題に挑んでもらう。

[学習者の学習時間]

1つの分野の習得にかかる時間は、「考え方」の閲覧に4分前後、「練習問題」の解答に3分前後の合計7分程度を見込んでいる。練習問題に不合格だった場合は、再度考え方に戻ってから練習問題を解いてもらうため、追加で数分の時間がかかると考えられる。

今回実装した「百分率」と「速さ」の分野について、「百分率」では合計14ステップ、「速さ」では合計9ステップあるため、最もスムーズに学習できた場合、3時間未満(7分×23=161分)の学習で両分野を習得できると考えている。

3.2 検証実験と考察

本節では、構築した直感的な意味付けによる学習システムを用いる学習者が、「百分率」と「速さ」の分野において、「考え方」を理解して、解答を導く能力を身につけられるかを検証した実験について述べる。

3.2.1 実験手順

実験は、ある学習塾の小中学生16名を被験者として、提案システムを用いて学習を行う提案群と、比較システムを用いて学習を行う比較群に8名ずつに分けて行った。被験者にはまず、提案群と比較群へのグループ分けと、後に学習成果を確認するために、事前テストを行ってもらい、テストの点数が同程度となるようにグループ分けを行った。その後、被験者は指定されたシステムを用いて、1日1時間ずつ合計4日間の学習をしてもらった。最後に事後テストを行い、事前テストとの点数の比較、ならびに学習時のログと比較することで、システムの効果を検証する。

$\text{「比べる量} = \text{全体（もとにする量）} \times \frac{\text{百分率（\%）}}{100}\text{」}$	で求めることができます。
例) 1000円の70%は何円ですか？	公式
今回の問題では、比べる量を求めます。 全体が1000円で、百分率は70%ですね。	
公式に代入すると、 $1000\text{円} \times \frac{70}{100} = 700\text{円}$ になるよ。	
	解答例

図 3.2.1 比較システムの「考え方」ページの例

被験者に事前アンケートを行い、学習分野「百分率」「速さ」の公式を知っているかを尋ねたところ、「百分率」の分野で9名、「速さ」の分野で10名の被験者は公式を知らないと答えた。また、事前テストの点数の平均正解率が48.0%（標準偏差16.9）、最高でも74.0%となっており、学習分野「百分率」「速さ」の「考え方」を理解できていない、あるいは定着していないと被験者と言える。

学習期間は、スムーズに両分野のすべてのカテゴリを習得できた場合の想定学習時間（約3時間）をもとに、少し長めの時間設定とした。被験者には、学習時に学習カテゴリを自由に選ぶことを許し、全ての学習ステップに合格することを目標として学習を進めてもらった。すなわち、ある学習カテゴリのすべてのステップに合格しない場合でも、他の学習カテゴリに進むことを認めた。

比較システムには、提案システムにおける「考え方」のページにおいて、グラフの代わりに教科書通りの公式を示し、解答例として公式を適用した解法を提示した。図 3.2.1 に比較システムの「考え方」ページの例を示す。また「練習問題」においては、グラフや公式は表示されない。これは比較システムにおいては、公式は1つの学習カテゴリ内で1つしかなく、考え方で繰り返し参照していることをもとに、練習問題を解く際に、公式を頭の中に思い出させることで、公式の利用法の定着を意図したことによる。

事前テストと事後テストは、各学習カテゴリの各学習ステップで扱う「割合」の種類について1問ずつの合計72問とし、1問1点とした。具体的には、学習分野「百分率」の「もとにする量」「百分率」のカテゴリは各14問、その他のカテゴリは各11問とした。テスト問題はテスト用のシステム（問題と選択肢のみが表示される）上で出題され、5択の選択肢の中から各問題を60秒以内に順次解答してもらった。各問題は、各カテゴリの学習時に練習問題として出題される可能性のある問題の中から無作為に選定して用意した。また、学習前後での正解と不正解を比較することで、選択肢による解答の影響を考慮した分析を行うために、事前テストと事後テストには同一の問題を用いた。

3.2.2 実験結果と考察

表 3.2.1 事前テストと事後テストの正解率(%)の被験者平均 (括弧内は標準偏差)

	提案群	比較群
事前テスト	47.7(17.8)	48.1(18.2)
事後テスト	66.7(16.4)	52.4(18.2)
増加正答率	18.9(14.3)	4.3(8.1)

[事前テストと事後テストに基づく学習効果]

表 3.2.1 に事前テストと事後テストの正答率 (%) の被験者平均を示す。事前テストの結果をもとに、提案群と比較群に平均点が同程度となるようにグループ分けを行い、両群の平均点に有意差がないことを確認した ($F(1,14) = 0.0013, p > 0.1$)。学習者の年齢構成も 6 人の中学生と 10 人の小学生が両グループに均等になるように分けた。

事後テストの結果から、提案群の被験者のみ事前テストの結果に比べて事後テストの点数が有意に増加していた ($t(7) = 3.50, p < 0.01$)。また提案群の被験者が、比較群の被験者に比べて点数が有意に高くなった ($t(14) = 2.35, p < 0.05$)。このことから、公式を利用した解法により解答を導く学習に比べ、グラフを用いて考え方を理解させる学習の方が、効果が高かったことがわかる。

図 3.2.2 に学習カテゴリごとの増加点数の被験者平均を示す。「道のり」「速さ」の学習カテゴリでは、提案群の被験者の点数が、比較群の被験者に比べて有意に点数が増加 ($t(13) = 2.32, 2.51, p < 0.05$)、「百分率」「時間」の学習カテゴリでは、提案群の被験者の点数が、比較群の被験者に比べて有意に高い傾向があった ($t(13) = 1.79, 2.09, df=14.0, 13.6, 0.05 < p < 0.1$)。これらのことから、学習分野「速さ」においては、提案群の被験者の点数が比較群の被験者に比べて増加しており、これは、学習分野「百分率」の

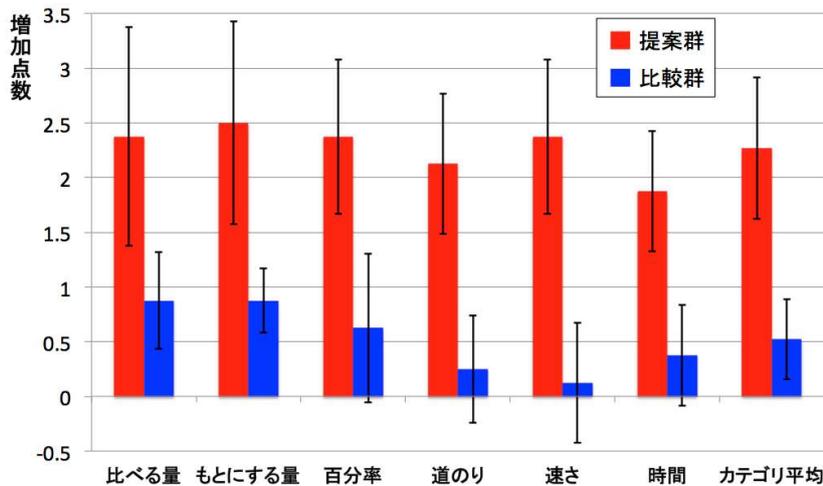


図 3.2.2 学習カテゴリごとの増加点数の被験者平均と標準偏差

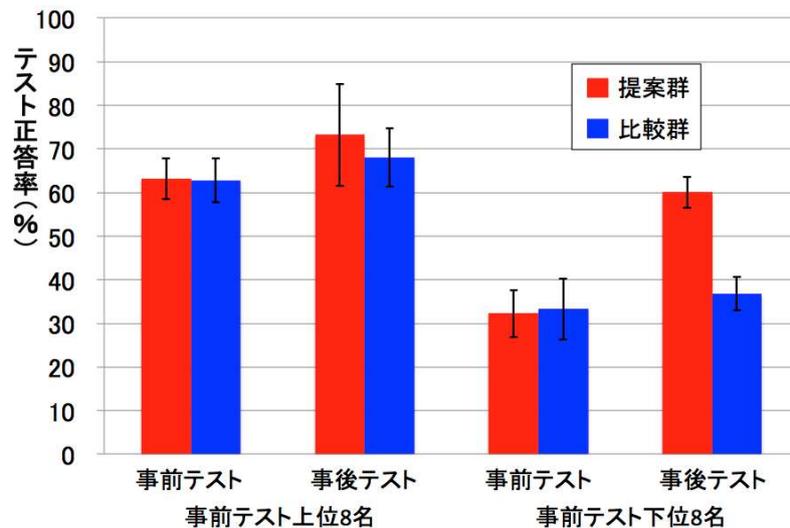


図 3.2.3 事前テストの上位 8 名と下位 8 名の事前テストと事後テストの正答率 (%) の被験者平均と標準偏差

学習成果を生かして、「比較量，基準量，割合」の 3 つ組として類似する分野の学習にスムーズに移行できたこと，あるいは学習分野「速さ」において特に提案システムが効果的だった可能性が考えられる。

図 3.2.3 に，事前テストの上位 8 名と下位 8 名の事前テストと事後テストの正答率 (%) の被験者平均を示す。提案群の被験者のうち，特に事前テストの点数が低かった 4 名の正答率が大きく上昇していた ($t(3)=5.38, p<0.05$)。このことから，学習分野における「考え方」の理解が進んでいなかった学生に対して，本システムの効果が大きかったことがわかる。

[学習の達成度と学習内容の定着]

表 3.2.2 に，被験者が学習により練習問題に合格したステップの数の被験者平均を，表 3.2.3 に，練習問題に合格した学習ステップのうち新たに学習したと考えられる学習ステップの数の被験者平均を示す。ただし，新たに学習したと考えられる学習ステップは，練習問題で合格するまでに，3 回以上練習問題にチャレンジした後に合格したステップとし

表 3.2.3 練習問題に合格した学習ステップのうち被験者が新たに学習したと考えられる学習ステップの数の被験者平均 (括弧内は標準偏差)

	提案群	比較群
事前テスト 上位	5.3 (1.6)	4.8 (1.1)
事前テスト 下位	8.0 (2.1)	7.3 (1.3)
合計	6.6 (2.3)	6.0 (1.7)

た。これは予め知識がある学習ステップは、考え方を思い出す場合を含めても1回または2回で合格できると考えたことによる。

事前テスト上位の被験者8名について、提案群の被験者は全員が23ステップ全てで合格まで達したのに対して、比較群の被験者は、一人平均3つのステップを合格できなかった。このことから、「考え方」を十分には理解していなかったが、それなりに問題を解ける学生に対して、提案システムを用いた学習によって、曖昧だった「考え方」を明確にする学習効果があったことがわかる。

事前テスト下位の被験者8名について、学習ステップの数ならびに新たに学習したステップの数には、それぞれ両群の間に有意差は見られなかった ($t(14) = 1.68, t(14) = 0.57, p > 0.1$)。このことから、用いたシステムによらず、繰り返しによる学習によって、新たに学習した分野についても、一時的に正しい解答を導ける状態に達したことがわかる。

学習定着率を、事後テストの問題のうち、練習問題に合格したステップの問題の正答率と定義する。この学習定着率(%)の被験者平均を図3.2.4に示す。事前テスト下位の被験者のうち、比較システムを用いた被験者の学習定着率が低い結果となった($t(6) = 4.80, p < 0.01$)。このことから、学習分野の理解が進んでいない学習者に対しては、グラフを用いた直感的にわかりやすい考え方をを用いることが特に有効であり、提案群の事前テスト下位の被験者においては、学習時に理解した考え方を頭に残しやすくする効果があったと考えられる。

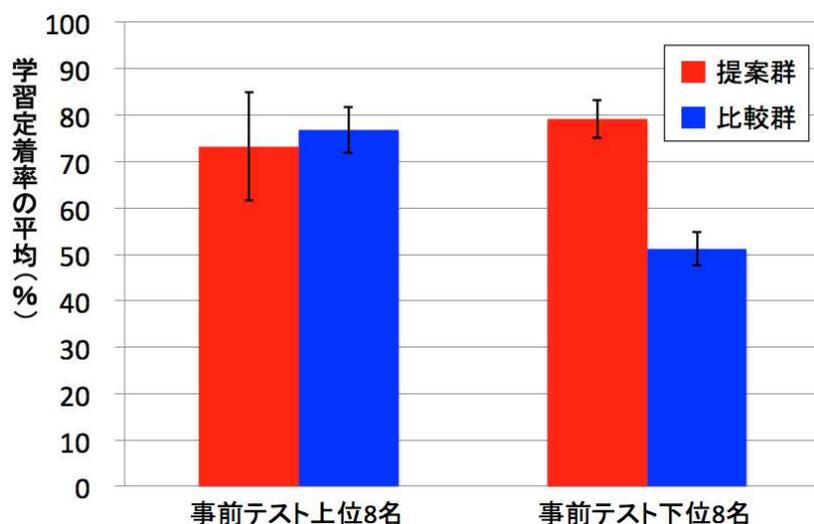


図 3.2.4 学習定着率(事後テストにおいて練習問題に合格したステップの問題の正答率)の被験者平均と標準誤差

表 3.2.4 事前テストで正解した問題の事後テストでの不正回数の被験者平均
(括弧内は標準偏差)

	提案群	比較群
事前テスト 上位	7.3(5.8)	10.3(2.6)
事前テスト 下位	3.8(2.6)	10.8(3.8)
合計	5.5(4.8)	10.5(3.3)

表 3.2.4 に、事前テストで正解した問題のうち、事後テストで間違えた問題数の被験者平均を示す。提案群の被験者の方が、事前テストで正解した問題を事後テストで間違えることが少なかった($t(13) = 2.29, p < 0.05$)。事前テストや事後テストは 5 択の選択肢から解答を選ぶ形式となっているため、偶然正解する可能性がある。これらのことから、提案群の被験者は、学習内容が定着しつつあると考えられるのに対して、比較群の被験者は自信を持った解答を行うことができていなかったと考えられる。

[事後アンケートの分析]

事後テストの終了後、被験者に事後アンケートを行った。事後アンケートでは、学習分野「百分率」「速さ」のそれぞれについて、提案群の被験者に、「学習時に用いたグラフはイメージの向上に役立てられたと思うか？」という質問に、5 段階（思う、やや思う、どちらでもない、あまり思わない、思わない）で回答してもらった。その結果、両分野とも 7 名が「思う、やや思う」と答え、学習時に用いたグラフが役立てられていたことに有意傾向があった（二項検定、 $0.05 < p < 0.1$ ）。

また両分野について、「理解が深まったと思うか？」という質問には、提案群の被験者は、両分野とも 7 名が「思う、やや思う」と答え、比較群の被験者は、「百分率」で 7 名、「速さ」で 6 名が「思わない、やや思わない」と回答した。直接確率計算により、この人数には有意に偏りがある($0.01 < p < 0.05$)ことが確認され、比較群に比べ提案群の被験者の方が両分野とも理解が深まる傾向があった。これらのことから、提案群の被験者は、グラフを用いた考え方の学習により理解を深めるとともに、そのイメージを利用して考え方を定着させていたと考えられる。また比較群の被験者について、図を用いずに公式を利用した解法だけを覚えさせようとしても、それを身につけ理解を深めることは難しかったと考えられる。

4 言語的構造外在化活動を課す学習システム

問題解決方法がいくつも存在するような問題においては、ある1つの筋道を立てるだけでなく、複数のあり得る筋道をも立てることが求められる。このような同一対象に対して複数の筋道を立てることを求めるような演習は、これまでインタラクティブな形では取り扱われていなかった。そこで本章では、小学校児童を対象にした内的理解の構造的外化を促進させるための論理的思考力の育成をめざす上で、問題構造を具体的に表現でき（解の構造を具体的にイメージでき）、文章を創造しやすく、筋道の通った文章や話を複数組み立てられるオープンエンド性と即時に解釈の妥当性が判断できるというインタラクティブ性を有する題材を活用した言語的構造外在化活動として、同じ状況の中で様々な論理展開を組み立てるというオープンエンドな演習をインタラクティブに実現する四コマ漫画の論理組み立て課題に取り組むことで論理的思考力の育成をめざす学習システムについて述べる。

4.1 四コマ漫画の論理組み立て課題を題材とした学習システム

4.1.1 学習課題と方法

学習課題は四コマ漫画について多面的な視点を持つてできるだけ多くのパターンの論理を組み立てることである。まず、システムにより、1つの四コマ漫画（セリフ等の言語による説明抜き）と、1～数文で説明やセリフが書かれたカード群が提供される。学習者はまずそれらを読み、各コマの説明として当てはまりそうなカードを各コマの横に並べる。すべてのカードはいずれかのコマに割り当てることができるように用意されている。また、各課題においてカードは8枚以上が提供されており、1つのコマに複数のカードを割り当てられるようになっている。複数のカードを割り当てることで、複数の論理展開を作ることが可能となる。

コマに対するカードの割り当ての段階の次は、論理展開の組み立て段階となる。ここでは、四コマが論理的につながるように各コマに対して1枚ずつカードを選択して順に並べることが、論理の組み立てとなる。組み立てた論理展開に対して、即時にシステムから正誤フィードバックが与えられる。間違った場合はもう一度正しい論理の組み立てを目指す。続けて学習者は同じ四コマ漫画を見ながら別の論理展開を考え、組み立てる。この一連の流れを繰り返し、1つの四コマ漫画に対して様々な論理展開の組み立てに挑戦する。さらに、用意された別の四コマ漫画についても同様の経験を重ねる。これにより、同じ対象に対する複数の論理を組み立てる演習が実現すると考える。なお、現時点では四コマ漫画に対するカードおよび論理展開の用意・確認は人手で行っており、その診断・フィードバックは正誤判定のみとなっている。

4.1.2 オープンエンドかつインタラクティブな環境

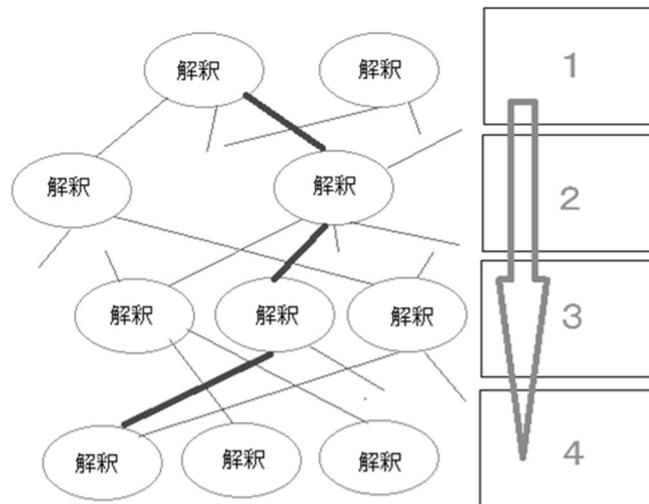


図 4.1.1 四コマ漫画における論理展開のイメージ

図 4.1.1 は四コマ漫画における論理展開のイメージである。提示される四コマ漫画にはセリフや説明がなく絵だけで構成されており、かつ最後のコマに整合する一連の論理展開や部分的な論理展開が含まれる。セリフや説明がない絵の導入により、1 コマ 1 コマに多様な解釈が可能になる、学習者は自分の解釈に従って、どのカードを選んでもどの順番に並べて論理展開を組み立ててもよい。例えば 1 つの四コマ漫画に対して論理を組み立てるためのカードが 10 枚ある場合、 ${}_{10}P_4 = 5040$ 通りの組み合わせが考えられ、正解が 5 パターンある場合は偶然正解する確率は $1/108$ になる。学習者がそれぞれの解釈で複数の回答を正しく導くことができるという意味において、オープンエンドな環境になっているといえる。

なお、論理を組み立てる部品を提供していることから、学習者が完全に自由に考えることを可能にしてはいないが、上記のような試行錯誤的に考えることが可能な探索空間を提供できており、同一対象に対して様々な論理を考えてみるという目標に対しては十分な自由度を提供できていると考えている。また、このようにある程度の自由度を制限することにより、学習者の活動が活発になることを期待している。つまり、部品を与えて解釈を限定していること自体が学習者の論理的な思考を促進する可能性があるとの考え方である。結果として、自由に考えさせるよりも多くの解釈・論理展開が得られることを期待することになる。

また、学習者が並べたカードに含まれる論理展開が正しいものであるか否かをシステムが判定し、即時にフィードバックを提供できるようになっている。これによりインタラクティブな論理組み立て演習が実現すると考える。さらに、どの問題に取り組むか、どのカードを選ぶか、どの順番で並べるか、いつまで異なる論理パターンに挑戦するかなど、学習者の意思に従ってボタンやカードを選択すると、それに応じた演習内容が提示され



図 4.2.1 問題レベル選択画面

る。また、一旦演習を辞めても同じ ID で ログインすれば前回の続きから演習を行うことができる。そして、組み立てた論理展開の正誤および論理展開のパターンに応じてメダルが提供され、学習者のモチベーションを上げる役割をする。これらの点もインタラクティブな環境を支えている。

4.2 演習システム

前節で示した演習を実践できるシステムを設計・開発した。四コマ漫画、四コマ漫画の論理展開を組み立てるためのカード群を 1 セットとする。これを 7 セット、7 種の四コマ漫画について用意した。

個別に与えられた ID とパスワードにより学習者はログインすることができる。ログイン直後は問題レベル選択画面(図 4.2.1)が表示される。問題は 2 つのレベルに分かれており、提示されるカード数がより少なく簡単なレベル 1 から始めることが推奨される。各レベルの下には、学習者が各レベルで何パターンかの論理展開を正しく組み立てることができたかが表示される仕組みになっている。しかし、図 4.2.1 は最初のログイン時のものであるため 0 個である。

問題レベルを選ぶと問題選択画面に移る(図 4.2.2, 図 4.2.3)。各問題の下に全正解パターン数分のモノクロのメダルが並んでいる。学習者が正解を出すと正解パターンに応じてメダルに色が付き、メダルの獲得状況を把握することができる。



図 4.2.2 問題選択画面(全体)

問題選択画面で取り組みたい問題のボタンを押すと演習画面に移る(図 4.2.4)。画面右に四コマ漫画が、左に論理を組み立てるためのカードが並んでいる。カード数は問題によって異なるが8~10枚である。各カードには以下のいずれかに該当する短文が書かれている。

- (1) 四コマ漫画の4コマ目に論理的に整合する一連の説明やセリフの一部
- (2) 四コマ漫画の一部に論理的に整合する説明やセリフ



図 4.2.3 問題解決画面(一部拡大)



図 4.2.4 演習画面1



図 4.2.5 演習画面右上のボタン群



図 4.2.6 演習画面 2

(3) (1), (2)に属するカードと類似した、間違いやすい説明やセリフ
 なお、(1)と(2)に属するカードを集めて並べれば、問題にある四コマ漫画において想定されうるすべての論理展開パターンが表現できるようにしている。想定されうるすべての正しい論理展開パターンの数は問題によって異なり、4~9 パターンである。

学習者は各コマを解釈し当てはまりそうなカードをドラッグ&ドロップにより各コマの横に並べ、並べ終わったら右上のボタン群の中から「けってい」ボタンを押す(図 4.2.5)。すると、各コマの横に選択したカードが整列する(図 4.2.6)。学習者は四コマ漫画の論理展開を考え、それに沿った 4 コマを選び各コマの横に並べる。そして決定ボタンを押すとシステムから正誤のフィードバックが返ってくる。正解の場合は別の論理の組み立てに挑戦する。不正解の場合は作ろうとした論理を再度組み立ててもよいし、違う論理の組み立てを行ってもよい。1つの四コマ漫画について十分論理を組み立てたと思ったら別の問題に取り組んでもよい。

4.3 実験と考察

4.3.1 実験の目的

本研究で目指したオープンエンドでインタラクティブな論理組み立て演習が本システムによって実現できているかどうかを確認することが本実験の目的である。本演習の意義については論証を行ったが、本演習は人手での実現は不可能である。したがって、本演習の意義を実証的に示すためには、対応するシステムの設計・開発が不可欠であり、本節では本実験を通して、本演習に対応するシステムが実現できていることを示す。このような演習およびシステムはこれまでに提案・実現されておらず、その実現を確かめることができれば、新規性の高い結果となる。

4.3.2 対象

公立小学校パソコン部の児童 24 名(4 年生 10 名, 5 年生 10 名, 6 年生 4 名)である。パソコンの操作には慣れている。

4.3.3 実験手順

- (1) システムおよび演習方法の説明 (2 分)
- (2) 事前テスト:四コマ漫画(図 4.3.1)を提示し、筋が通るように話を記述するように、またできるだけたくさんの方の話を作成するように指示 (15 分)
- (3) システムを使用した演習:各自ログインして問題 1 に解答 (分)
- (4) 問題 1 を例に問題の解き方の確認 (3 分)
- (5) システムを使用した演習:残り 6 問について 1 種類ずつ論理を組み立てた後、好きな問題について 2 種類以上の話(論理展開)を作成するように指示 (23 分)
- (6) 事後アンケート (5 分)

ログインからログアウトまで 33 分である。このうち 3 分は解き方の確認のために使用され、30 分間がシステムを使用した演習に充てられる。

4.3.4 評価

(1) 事前テスト

被験者が記述式で何種類の話を作成できるか、どれくらいのレベルの記述ができるかを調べる。

(2) 事後アンケート

演習は楽しかったか、問題は難しかったか、またやりたいか等演習の感想を問う。

(3) 演習ログ

被験者が見たページ、押したボタン、組み立てた論理展開パターン、各行動を起こした時間等が全て記録される。



図 4.3.1 事前テストで使用した四コマ漫画

4.4 結果と考察

事前テスト終了時にほぼすべての被験者が書き終えていたことから、事前テストの時間は被験者が思いつく話を全て書くのに十分であった。しかし、被験者が書いた四コマ漫画に関する話は説明不足が多く、論理展開が把握できるものは少なかった。そこで4コマ分の説明が書いてあり話の形式が取られていれば1つの話とみなした。

一方、システムを使用した演習においては、全問題において様々な論理展開を組み立てるには時間が全く足りず、また実験手順(3)でまず全問題について1つずつ話を作るよう指示したために、多くの問題が1パターンのお話を作っただけで放置されていた。この現象は特にレベル2の問題でよく見られた(約44%の放置)。つまり、多くの被験者がレベル1の問題を中心に演習を行っていた。そこでレベル1の問題1, 2, 3での演習における1問当たりの獲得メダル数(組み立てられた論理展開数)と、事前テストにおける作文数との比較を行った。その結果、レベル1の1問当たりの獲得メダル数は2.22個 ($SD = 1.42$)、事前テストにおける平均作文数は1.46個 ($SD = 0.83$)であった。これらについて、一対の標

本による差の検定を行った結果、システムによる演習レベル1における1問当たりの獲得メダル数、すなわち論理展開のパターン数が有意に多かった ($t(23) = 2.49, p < .05$)。このことから、システムでの演習によってより多くの論理展開パターンを組み立てられるようになると思われる。

次に本システムを利用した演習において獲得したメダル数(作成した論理展開パターン数)を調べたところ、1人平均 11.91 個($SD = 4.71$)であった。それなりの数の論理展開パターンを組み立てることができたことがわかる。上述のように事前テストで紙に話を記述させた場合は 15 分で平均 1.46 個 ($SD = 0.83$)しか書けず、しかもその論理を読み取れるもの、つまり別の論理と比較・検討が可能といえるものはごく少数でしかなかった。システム利用時間は倍の 30 分であるが、その間に組み立てることができた適切な論理展開のパターン数は 8 倍以上であり、かつこれらは他の論理展開と比較することが可能なものとなっている。また、可能な組み合わせの数を考えると、論理的に考えることなしにこれらの適切な論理展開を作成することは不可能であるといえる。これらのことから、紙の上では単一の論理展開さえ組み立てることが難しかった被験者が、システムにおいては同一の対象に対して少なくとも複数の論理展開を組み立てることができたといえる。

また、学年でメダル数を比較したところ、6年生の平均が 15.25 個($SD=1.89$)、4、5年生の平均は 11.25 個($SD=4.84$)であった。両群に対して差の検定を行った結果、6年生が有意に多くのメダルを獲得していた($t(19)=2.77, p<.05$)。つまり6年生の方が多面的な視点からより多くの論理を組み立てることに成功している。岸によれば、文章の論理構造に関する知識は4年生から6年生の間に獲得され、6年生では論理構造上重要な部分の把握が大学生とそれほど差がないレベルまで到達する [32]。この発達の違いが結果に表れたのかもしれない。

次にシステムを利用した演習時間について検討する。個々の演習ログから実質的に演習をしたと見られる時間を抜粋し、合計し、個々の実質的演習時間とした。実質的演習とは、関係のないページを移動したり、きゅうけいボタン(図 4.2.5)を押していたり、長時間何もシステムに働きかけない時間を除き、システムに働きかけながら4コマ漫画を解釈したり、論理展開を考えだし、それに従ってカードを移動させる等の活動を指す。

表 4.3.1 は各被験者がどれくらいの時間、実質的に演習を行ったかを示すものである。 χ^2 検定の結果有意であり、25~30 分間演習した人が多く、15~20 分しか演習していない人は少なかった。

システムを使って演習することができる時間は合計 30 分であった。これに対して 30~35 分実質的に演習を行った者が 2 名いるが、これは途中の「問題 1 を例に問題の解き方の確認」の時間や事後アンケートに回答すべき時間までもシステムを使って演習をしていたと考えられる。多くの学生が 25 分から 30 分間、すなわち最初から最後までほぼずっと実質的演習を行っていたことになる。実質的演習 20~25 分の被験者もいるがそれなり

に演習を行っていると考えられる。このことから、被験者は本システムを使った演習に十分参加したと考えられる。

次にアンケートによる主観的評価である。表 4.3.2 の通り、被験者の多くが本演習を難しかったと答えている。一方、本演習が楽しかった、そして同様の演習をまたやりたいという被験者が有意に多かった(表 4.3.3, 表 4.3.4)。すなわち、難しい演習にも関わらず、この演習を楽しむことができ、再度同様の演習をしたいと意欲を見せている。このことから、学習者に受け入れられうる演習とみなすことができよう。

表 4.3.1 被験者の実質的演習時間

実質的演習時間(分)	人数
30~35	3
25~30	12
20~25	7
15~20	2
$\chi^2(3) = 10.33, \quad p < .05$	

表 4.3.2 本演習の楽しさに関する評価

質問項目	人数	検定
本演習は楽しかった	23	p < .01
本演習は楽しくなかった	1	

表 4.3.3 本演習の難しさに関する評価

質問項目	人数	検定
本演習は難しかった	19	p < .01
本演習は難しくなかった	5	

表 4.3.4 再演習への意欲に関する評価

質問項目	人数	検定
同様の演習をまたやりたい	20	p < .01
同様の演習はもうやりたくない	2	

5 計算論的構造外在化活動を課す学習システム

本章では、小学校児童を対象にした内的理解の構造的な外化を促進させるための論理的思考力の育成をめざす上で、問題構造を具体的に表現でき（解の構造を具体的にイメージでき）、文問題の構造を文章や式を用いて理解でき、解の論理的な流れを見出し表現でき、かつ解の評価ができる題材を活用した言語的構造外在化活動として、小学校児童向けに可視化された知識構造であるフローチャートの読解と問題を解く過程をフローチャートで可視化させて解の評価を繰り返して分析および評価に基づく論理的整合性のある表現をする課題を用いた計算論的外在化活動を課す学習システムについて述べる。

5.1 フローチャート構造作成課題を題材とした学習システム

5.1.1 問題設定

問題状況の把握から解答までの過程を自律的に考える経験が少ないことが論理的思考力の育成の大きな問題であると言える。フローチャートの作成活動は、この経験不足を補うためのものと位置づけることができる。すなわち、

① 一連の現象や文章からその中に埋め込まれた論理展開を読み取りフローチャートで表現する経験（フローチャートの作成）と、

② フローチャートを通して論理展開の骨子を把握したうえで実際の現象や文章の中にもこのように論理展開が表れているかを確認する経験（フローチャートの読解）

を重ねることにより、漠然と見える現象や文章の中から論理展開を読み取る力、骨組みのみの論理展開を実際の行動や文章で表す力がつき、論理的思考力が育成されることが期待できると考えた。

そこで、次の4種のトレーニングを設定した。

- (1) 初期状態から問題解決までの道筋を論理立てて考えフローチャートを作成するトレーニング[凍土エリア]
- (2) フローチャートで表現された論理展開から状態の変化を予測するトレーニング[砂漠エリア]
- (3) 肉付けされた文章の中からその骨格となる論理展開を読み取りフローチャートで表現するトレーニング[森エリア]
- (4) 文章の一文一文からより詳細に論理的関係を把握しフローチャートで表現するトレーニング[火山エリア]

(1) と (2) は「挙動」と「フローチャート」の対応づけとなっている。また、(3) は順序構造のみ、(4) は加えて少しの分岐のみを扱い、フローチャートとしては単純ではあるが、文章の読解を取り扱っている点で難しくなっている。さらに、(3) は文章全体を読めばおよその話の展開が把握できる問題で構成されていることから、いわば文章とフローチャートの関連を学ぶ導入と位置づけられる。一方、(4) はやや複雑な論理構成を含み、

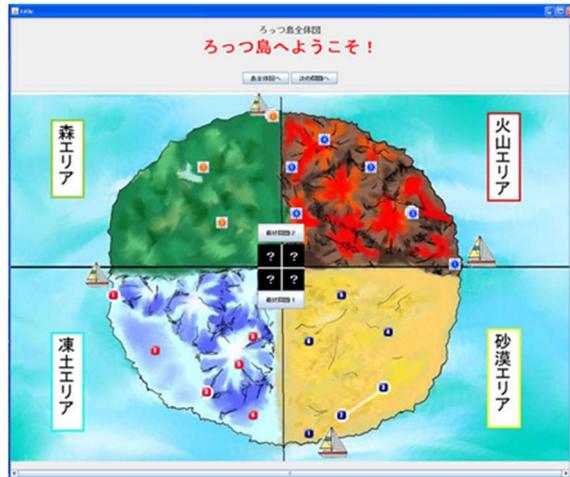


図 5.1.1 ろっつメニュー画面

かつ一文一文から論理展開を読み取らなければならないことからより高度な課題であると言える。

5.1.2 システム概要

JavaSwing を用いて、フローチャートの解読と作成を通して論理的思考力を育成することを目的とするシステム「ろっつ (LOTS: Logical Thinking Training System)」を開発した。上述の4種類のトレーニングに対応した4タイプの問題群を用意している。また、全体の総括となる難易度の高いまとめ問題を1問用意している。

[メニュー画面]

アカウントとパスワードを使ってログインすると、島に見立てたメニュー画面が表示される(図 5.1.1)。4タイプのトレーニングに対応するように島を4つのエリアに分け、それぞれ凍土エリア、砂漠エリア、森エリア、火山エリアと名付けた。凍土エリアは5.1節の(1)のトレーニング、砂漠エリアは(2)のトレーニング、森エリアは(3)のトレーニング、火山エリアは(4)のトレーニングに対応している。以下では各エリアについて説明する

[凍土エリア]

凍土エリアには、初期状態から問題解決までの道筋を論理立てて考えフローチャートを作成するトレーニングとして、スタート地点にある車をゴール地点まで動かすフローチャートを作成する問題を6問設定した。凍土エリアの問題例を図 5.1.2 に示す。上部に問題文が表示され、左部にあるフローチャートのパーツを使って中央部にフローチャートを作成する。右部には道に見立てたマス目があり、スタート地点には車が、その他ゴール地点

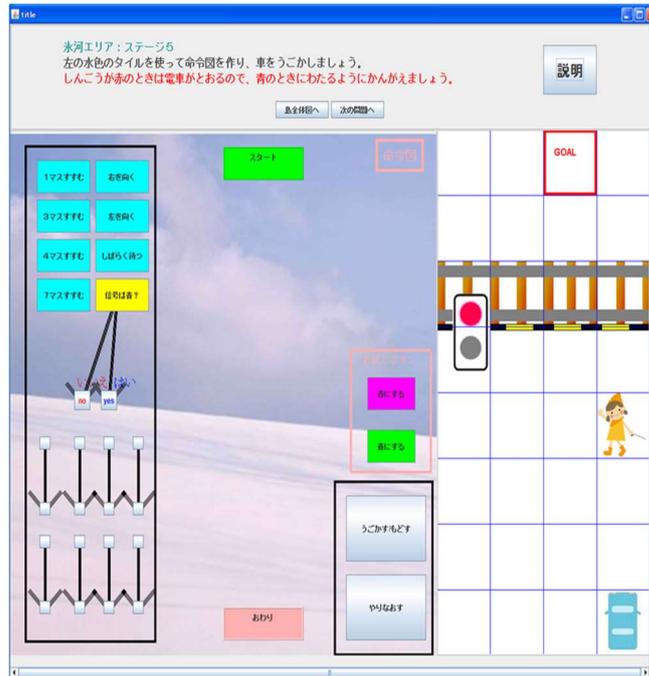


図 5.1.2 凍土エリアの問題例

や障害物等がある．そして，学習者が中央下部の枠内にある2つのボタンのうち上の「動かす」ボタンを押すと，フローチャートに従って車が移動する．

この問題では，フローチャート用パーツを組み合わせて，右下のスタート地点にある車が一番上にあるゴールにたどり着くための正しいフローチャートの作成が求められる．学習者は作成したフローチャートと車の動きの確認を繰り返し，問題のクリアを目指す図 5.1.3 は図 5.1.2 の問題の解答例である．このフローチャートでは，スタートから左折や直進等で踏切まで進み，踏切の信号の色により条件分岐している．信号が青の場合はそのまま進み，赤の場合はしばらく待つて進む．この時，必ずしも全てのパーツを使うわけではないので容易に解答を導くことはできない．

凍土エリア内に問題例と同様の形式で難易度の異なる問題群を用意した．難易度が上がるにつれ複雑なフローチャートを扱う．例えば使用するタイルが増えたり，複雑な条件分岐を導入する必要が出たりする．他のエリアも同様に徐々に複雑になるように問題系列を構成している．

[砂漠エリア]

砂漠エリアには，フローチャートで表現された論理展開から状態の変化を予測するトレーニングとして，提示されたフローチャートを見て，車がどこに移動するかを予測する問題を6問設定した．砂漠エリアの問題例を図 5.1.4 に示す．上部には問題文，左部にフローチャートが表示され，右部には道に見立てたマス目が描かれている．そしてスタート地



図 5.1.3 図 5.1.2 の問題の解答例

点には車が、他の場所には障害物等がある。学習者はフローチャートを解読して車の動きを考え、最終的に到達するマス目を予測し、クリックする。そして「答え合わせ」ボタン

図 5.1.4 砂漠エリアの問題例

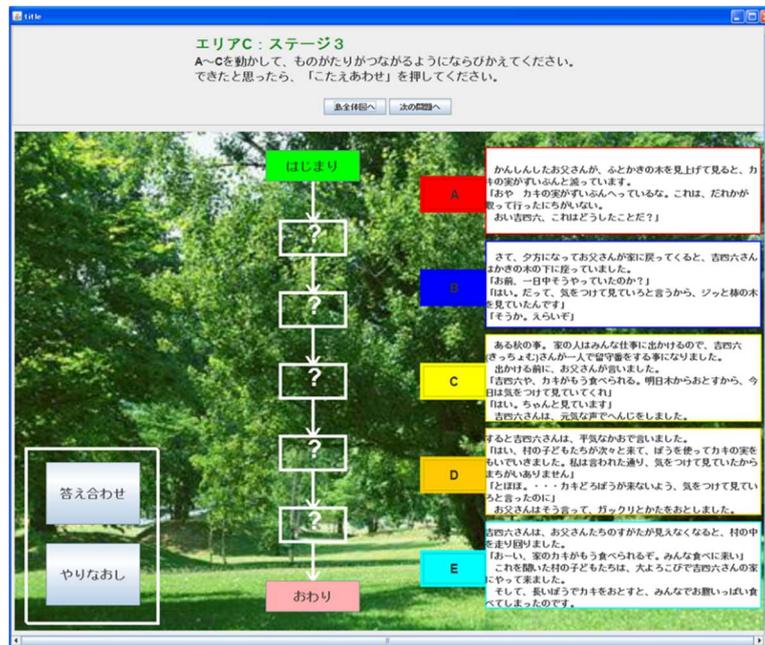


図 5.1.5 森エリアの問題例

で車を動かし、実際に予測した地点に到達するか確認する。例の問題では、車はフローチャートに沿って直進や右左折を繰り返し移動し、経路上にあるコインを拾うしくみになっている。フローチャートは「2マスすすむ」「右を向く」「コインの数は2つより多い?」といった処理で構成されている。その過程で拾ったコインの枚数がフローチャートの分岐条件である。この問題の場合、拾ったコインが2枚より多いかどうか分岐条件である。2枚より多い時は左に向き、1枚以下の場合は右に向き、その後1マス直進する。今回は最も左の列の上から3番目のマスを選ぶと正解である。

[森エリア]

森エリアには、肉付けされた文章の中からその骨格となる論理展開を読み取りフローチャートで表現するトレーニングとして、段落ごとに分けられ、並び替えられた文章を読み、それらを正しい順番に並び替えてフローチャートを作成する問題を3問設定した。森エリアの問題例を図 5.1.5 に示す。右部には色分けされた複数の枠があり、上から順に ABCD としている。各枠の中には文章が一段落ずつ順不同に入っている。この問題例の場合、それぞれ概要は「A 雲が浮いていられなくなり水になって落ちる」「B 雨のしくみを知っていますか?」「C 空中の水分が雲になる」「D 上昇気流により空中の水分が空高く上がる」である。学習者は各枠内の文章を読み、正しい順番を予測した後、各枠の左にある枠と同じ色の四角を中央に用意された枠にドラッグ&ドロップさせることでフローチャートを作成する。フローチャートが完成したら左下の枠内上側の「答え合わせ」ボタンで正誤を確認し、間違っていたら再度挑戦する。この問題の正解は上から順に B-D-C-A となる。

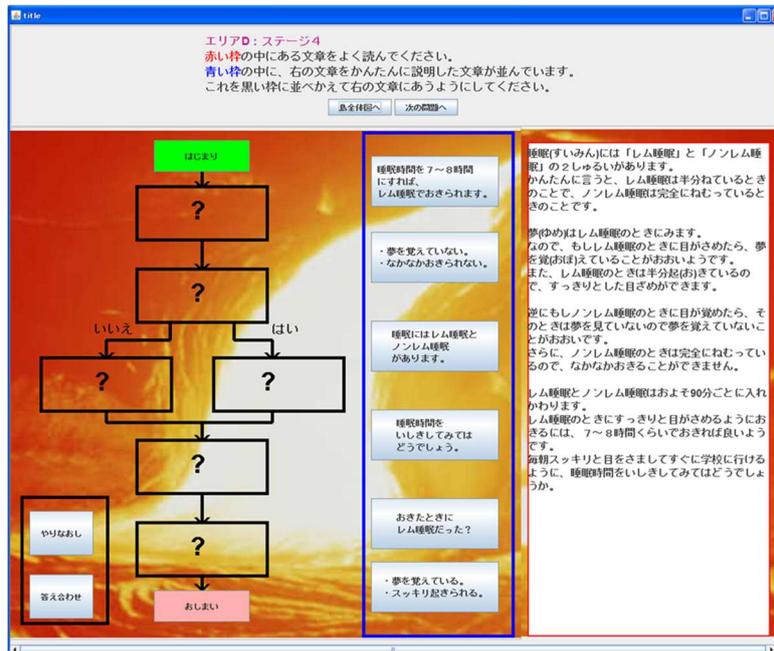


図 5.1.6 火山エリアの問題例

[火山エリア]

火山エリアには、文章の一文々々からより詳細に論理的関係を把握しフローチャートで表現するトレーニングとして、文章を読み、予め用意されたその文章の各段落の要点を並び替えて、文章の構成をフローチャートで表現する問題を6問設定した。

火山エリアの問題例を図 5.1.6 に示す。最も右の枠の中に元の文章があり、中心の枠の中に、各段落の要点が書かれた枠が順不同に並んでいる。学習者は、左部の枠に各段落の要点の枠を移動させてフローチャートを作成する。フローチャートが完成したら、「答え合わせ」ボタンで正誤を確認し、間違っていたら再度挑戦する。

図 5.1.7 はその解答である。「はじまり」に続き、睡眠にはレム睡眠とノンレム睡眠があることを説明し、起きた時にレム睡眠だったかどうかにより条件分岐する。レム睡眠の場合は「起きにくい」、ノンレム睡眠の場合は「すっきり起きられる」である。その後、レム睡眠で起きるのにちょうどよい時間を紹介し、睡眠時間を意識することを提案して、「おしまい」に至る。

[まとめの問題]

メニュー画面の島の中央をクリックするとまとめの問題が表示される(図 5.1.8)。

仮想のクラスの学級委員を選ぶ方法をフローチャートで示す問題である。フローチャートを作成するためのノード枠と枠同士を結ぶ線、そして分岐線のみが用意されており、枠内の文章は学習者自身が記入するようになっている。

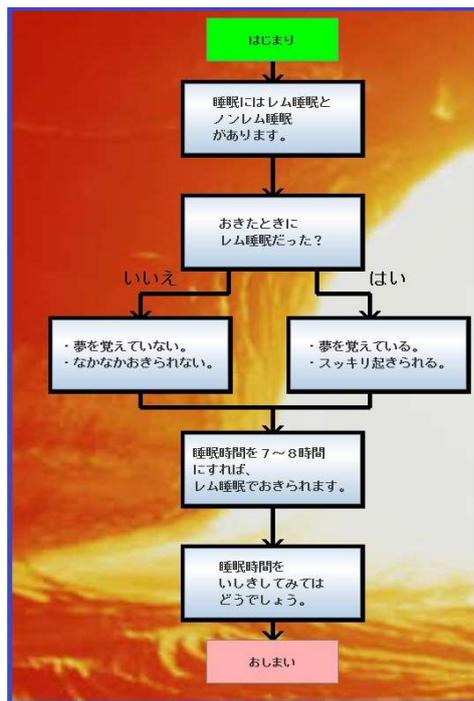


図 5.1.7 図 5.1.6 の問題の解答例

学級委員を選ぶ方法は様々で多様な正解が考えられることから、システムによる自動即時評価ではなく、後日その結果を回収して人手で評価し、学習者に評価結果を知らせた。図 5.1.9 は解答例である。最初の「スタート」から、(学級委員に)なりたいたい人を探し、「なりたいたい人がいた」かどうかで条件分岐する。「なりたいたい人がいた」場合は右下に進み、さら

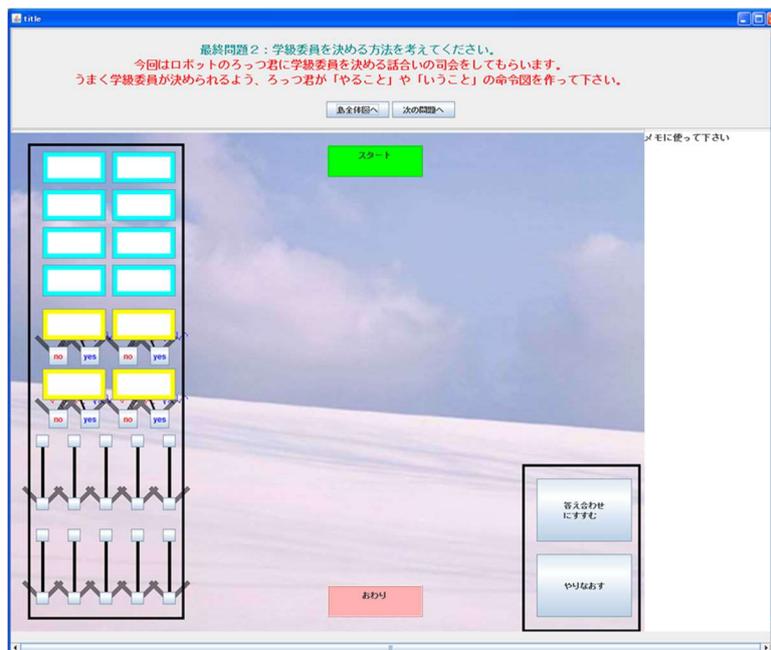


図 5.1.8 まとめ問題の初期画面

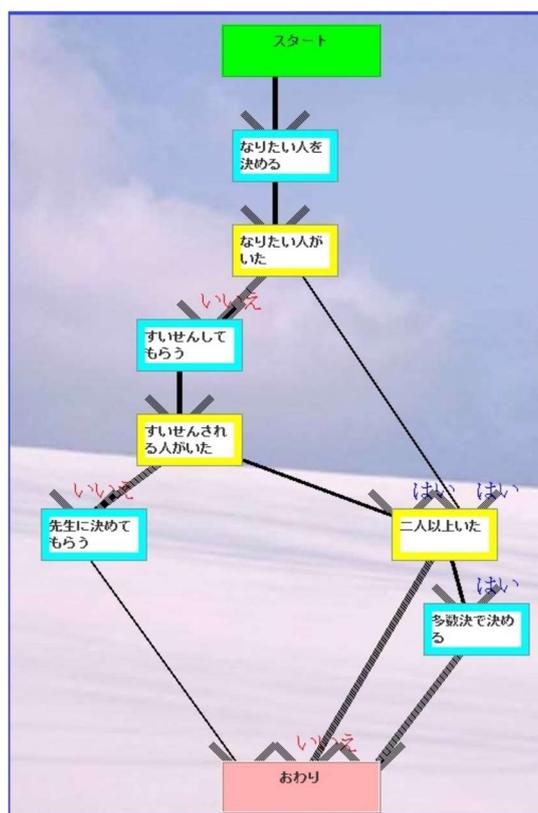


図 5.1.9 まとめ問題の解答例

なりたい人が「2人以上いた」かどうかで条件分岐する。2人以上いない場合は終了である。いた場合は右下「多数決で決める」に分岐し、終了する。一方、「(学級委員に)なりたい人がいた」が「いいえ」だった場合は、左下「すいせんしてもらおう」に進む。そして、推薦された人がいたかどうかで条件分岐する。いない場合は左下「先生に決めてもらおう」に進み終了となる。いた場合は、さきほどの「2人以上いた」に進み、以下同様に進み終了に至る。

5.2 評価実験と考察

5.2.1 被験者

被験者は「ひろしまコンピュータサイエンス塾」(以下 HCS 塾)の受講生 15 名である。HCS 塾は広島市立大学大学院情報科学研究科が主催し、「理数に関して卓越した意欲・能力を有する児童生徒が学校外で発展的な内容を体系的、継続的に学べる場を作ることにより、その能力をさらに伸ばし、質の高い科学者のたまごを育成する」ことを目的としている。一般公募で集まった小学校 3 ～ 6 年生に理数に関する試験を課したうえで選抜して塾生としている。6 月～翌年 3 月までに 5 回の定期講座と 2 回の特別講演、2 回の工場見学が行われた。本実験は 3 回目の定期講座終了後(10 月 2 日)から第 5 回の定期講座前(12 月 10 日)に行われ、実験期間内に定期講座が 1 回(テーマ「計算機」: 講義お

よび演習)行われた。講座は広島市立大学に児童を集めて対面で行われたが、本実験の中心となるろっつによる学習は、自宅で行う課外活動として位置づけられた。

5.2.2 実験手順

- (1) 第3回定期講座終了後、塾の活動の一環として、全員を対象に事前テストとして論理的文章を書くテストを実施した(約10分)。
- (2) 引き続き、フローチャートに関する簡単な講義を行った後、コンピュータを使用したフローチャート作成実習をさせた(約30分)。
- (3) 自宅での活動として、ろっつを使用した学習を行った。期間は、第3回定期講座後から第5回定期講座前までの約2カ月となる。
- (4) 第5回定期講座の直前に塾の活動の一環として事後テストを実施した。これは、
 - ① 2カ月前との能力の違いを自己評価するアンケート(約10分)、
 - ② 提示された文章の論理展開をフローチャートに示すテスト(約15分)、
 - ③ 論理的文章を書くテスト(事前テストと同じ)(約10分)からなる。
- (5) 続けて、ろっつでの学習状況や感想を聞くアンケート(約10分)を行った。

5.2.3 結果と考察

[事前テスト]

事前テストでは、じゃんけんを知らない人に「じゃんけんのルール」をわかりやすく説明する文章を書く課題を出した。宇佐美 [33]や藤沢 [34]の文献を参考に調整した文章の論理性を評価するためのチェックリストを作成し、これに照らしながら理数系の大学院生が説明文を採点した(延べ6人)。このチェックリストは「箇条書やナンバリングを用いている」などの客観的評価6項目(9点満点)、「必要な接続語が欠けていない」等の主観的評価10項目(11点満点)からなる。1枚の解答につき人が採点し、3人の平均点をその解答の得点とした。その結果、平均10.67点であった(標準偏差1.83,最低点6.67点,最高点13.33点)。

表 5.2.1 アンケート結果の一部抜粋（直接確率計算）

	難しい問題に出会った時, 細かく分けて解く		文章を読む時, 組み立てを考える	
	該当しない	該当する	該当しない	該当する
ろっつ学習 前	15 人	0 人	13 人	2 人
ろっつ学習 後	7 人	8 人	6 人	9 人
p 値	p < .01		p < .05	

[自己評価アンケート]

自己評価アンケートでは、

- (1) 難しい問題に出会ったときの対処方法、
- (2) 文章の構成（論理展開）の把握、
- (3) 文章の構成（論理展開）と表現との関係、

の 3 点に関する知識、態度、技能について、2 カ月前と現在の変化を自己評価し、該当するものをチェックさせた。アンケート結果の一部を表 5.2.1 アンケート結果の一部抜粋（直接確率計算）に示す。ろっつによる学習前は難しい問題に出会ったとき、細かく分けて考えたり、文章を読むときに組み立てを考えたりしなかったが、学習後は両者共行うようになったという学習者が有意に多い。このことから、ろっつ学習により、問題や文章に対しより分析的、論理的に取り組むようになった可能性が示唆される。

[論理的文章を書くテスト：事後テスト]

事前テストと同じく、じゃんけんを知らない人に「じゃんけんのルール」をわかりやすく説明する文章を作成する課題を課した。評価項目・評価方法は事前テストと同様である。その結果、平均 12.2 点であった（標準偏差 2.64、最低点 8.33 点、最高点 17.67 点）。事前テストと事後テストの平均点を比較した結果、事後テストが有意に高かった（両側検定： $t(14) = 2.46, p < .05$ ）。ほかの方法と比較をしていないので確かなことは言えないが、ろっつ学習を行うことで、学習前よりも論理的文章が書けるようになった可能性が示唆される。

[システム内まとめ問題]

システム内のまとめ問題は、学級委員を決める方法のフローチャートを一から記述する問題であり、小学生にとってはかなり難易度が高いと考えられる。評価については次の 2 つの観点から評価項目を作成し、12 点満点で評価を行った。

- (1) 文章の論理展開を的確に捉えること、

(2) 条件分岐を含むフローチャートが作成できること。

回収できたログ 10 件を使用し、システム内のまとめ問題を評価した結果、平均点は 8.57 点であり、また、10 人中 9 人が 8 点以上であった。ほかの方法との比較を行っていないため、確かなことは言えないが、まとめ問題は難問であるにもかかわらず、ろっつで学んだ学習者は論理展開を学習者は的確に捉え、条件分岐を含むフローチャートを作成できていたことは、小学校児童がこのシステムを用いたフローチャートの読解・作成活動を行えること、そして、システム利用の有効性を示唆すると考えられる。

[ろっつにおける学習状況と学習成果]

ろっつにおける学習状況と学習成果の関係を分析した。学習状況を調べるうえで十分なログが取れなかったため、代わりに学習状況を調べるアンケートを行った。「すべての問題にチャレンジ」し、かつ「すべての問題をクリアした」と答えた学習者 4 名は全員、文章の論理展開をフローチャートに示すテストにおいて満点を取った。t 検定の結果、これらの学習者はそうでない学習者 11 名と比べ、有意に高得点であった (100 点 : 74.5 点, 両側検定 : $t(13) = 4.44, p < .005$)。なお、両群の事前テストの結果について t 検定を行った結果、有意差はなかった (10.67 点 : 10.42 点, 両側検定 : $t(13) = 0.35, p > .10$)。このことから、ろっつ の問題すべてにチャレンジし、すべての問題について最終的に正解に至れば文章の論理展開をフローチャートに示す力をつくことが示唆された。なお、システム内でクリックなどのイベントが発生した時間をログとして取得しておりこのログと成績の関係の分析も行ったが、意味のある関係は取得できなかった。これは、このシステムを用いた活動においては学習者が具体的な作業を行わずに考える時間帯が存在するが、イベントが発生していない時間帯が実際に考えているのか、あるいは別の作業をしているのかといった区別がつかないことが原因であると考えている。今後は、このような思考の時間が重要となる課題についてのログ取得が重要になると考えている。

[実験のまとめ]

実験を通して、ろっつを使用することで、状況や文章の論理構成／論理展開を的確に捉えて考えられるようになったことがわかる。また、統制群との比較はないものの、ろっつ学習前に比べ、学習後に高得点が観測されたことは、ろっつを用いた活動が論理的思考力の育成に有効である可能性が示唆される。ただし、論理的思考力を伸ばすことを指向したほかの方法との比較に関しては今後の課題であると言える。

6. 結論

本論文では、論理的思考力の育成をめざし小学校児童を対象とした3つの学習システムを開発した。

第3章では、問題の構造をイメージしやすい図で可視化した知識構造を示しながら直感的な意味付けを繰り返すことで構造的内的理解を促進させる学習システムを実現した。さらに、評価実験により、解答を構成する定義・公理等を図で可視化し直感的な意味づけを繰り返す考え方を重視した提案システムが、公式の丸暗記による解き方を用いたシステムより、問題の構造を正確に理解し学習内容の定着が図れることを検証した。また、対象とする学習分野の考え方を十分に理解していない学生に、提案システムの効果が高いことを確認した。今後は、「比べる量、基準量、割合」の3つ組からなる他の学習分野に対して本システムを適用することや、共通の考え方で問題を解くことが可能な複数の分野の学習において、複数の分野に共通する考え方を提示することで、ある分野の学習成果を、他の分野の学習に生かす方法について検討していきたいと考えている。

第4章では、四コマ漫画を題材としたオープンエンドかつインタラクティブな論理組み立て演習を提案し、その演習を可能にすることで内的理解の構造的な外化を促進する学習システムを実現した。そしてその演習が実現できていることを実験的に確認した。これにより、これまでできなかった同じ対象に対して複数の論理を組み立てる経験を子ども達に積ませることができるようになる。これは多面的な視点から論理的に分析する力や態度につながる。すなわち、これからの社会において生きていくうえで必要な批判的能力の育成を促進につながると期待できる。今後は、この提案システムを用いた演習を教育の文脈に組み込む方法の研究、および学習効果を測定・分析する研究を行っていく必要がある。

第5章では、論理的思考力育成をめざし、小学校児童が利用可能なフローチャート活用学習システムを開発し、提案システムの有効性を実験的に検証した。直線的なフローチャートと、条件分岐を含むフローチャートを扱う問題を題材とした提案システムを利用することで、内的理解の構造的な外化が促進され成績が向上することが示された。しかし、他の方法よりも優れていることを示すためには、今後、同じ目的を持つ他の方法との比較実験を行う必要がある。また、繰り返しを含むフローチャートを導入するなど、より複雑な論理展開を扱う問題を導入すると同時に問題を充実させ、より高度な論理的思考を対象としたシステムに発展させることが重要な課題となる。

本研究では、本稿で与えた学習システム以外にも、小学校児童を対象として開発した論理的思考力育成をめざす学習システムを中学校・高等学校の生徒や大学の学生を対象とした、言語的構造外在化活動に基づく「数論問題の証明過程」 [35]および「平面図形問題の解答過程」 [36]、さらに計算論的構造外在化活動に基づく「キットビルド方式によるフローチャート組み立て課題」 [37]や「グラフ理論を用いた問題解決過程」 [38]に応用した学習システムをそれぞれ開発している。

参考文献

1. 教科書の改善と充実に関する研究報告書（算数）. 文部科学省, 2008.
2. 社会の期待に応える教育改革の推進. 文部科学省, 2012.
3. ゼックミスタ B.E., ジョンソン E.J. クリティカルシンキング 入門篇. (訳) 宮元博章, ほか. 京都: 北大路書房, 1996.
4. 鈴木健, 大井恭子, 竹前文夫, (編). クリティカル・シンキングと教育 日本の教育を再構築する. 世界思想社, 2006.
5. 道田泰司. メタ認知の働きで批判的思考が深まる. 現代のエスプリ (497), 2008. ページ: 59-67.
6. 楠見孝. 良き市民のための批判的思考. 心理学ワールド (61), 2013. ページ: 5-8.
7. スーパーサイエンスハイスクール. (オンライン) <https://www.jst.go.jp/cpse/ssh/>.
8. 次世代科学者養成プログラム・未来の科学者養成講座. (オンライン) <http://www.jst.go.jp/cpse/fsp/>.
9. ブルーナー J.S. 教育の課題. (訳) 鈴木祥蔵, 佐藤三郎. 岩波書店, 1967.
10. 井上尚美. 思考力育成への方略ーメタ認知・自己学習・言語理論ー <増補新盤>. 明治図書, 2007.
11. 道田泰司. 批判的思考における soft heart の重要性. 琉球大学教育学部紀要, Vol.60, 2002. ページ: 161-170.
12. 舟橋秀晃. 「論理的」に理解し表現する力を伸ばすための国語科作文教材の開発--実践「鍛えれば強くなる!--反論で磨こう主張文」(中三)を通して. 滋賀大国文, Vol.48, 2011. ページ: 15-24.
13. 渋谷博之. 「評論文指導の研究」(高校): 読解を小論文指導につなげる. 全国大学国語教育学会発表要旨集 101, 2001. ページ: 186-189.
14. Greeno, W. and Kintch, J. G. *Understanding and solving word arithmetic problem*. Psychological Review, 1985. pp. 109-129.
15. Polya, G. *How to Solve It, A New Aspect of Mathematical Method*. Princeton University Press, 1957.
16. 橋本拓也, 山元翔, 神戸健寛, 吉田祐太, 前田一誠, 平嶋宗. 乗算文章題を対象とした作問学習支援システムの比の三用法に基づく設計・開発. 教育システム情報学会 2012 年度第 6 回研究会, 2013. ページ: 97 - 104.
17. 清水祐子. 問題解決過程における問い方の発達を促す支援: Scaffolding の考え方を取り入れて. 数学教育論文発表会論文集, Vol.41, 2008. ページ: 117 - 122.
18. 清水美憲. 数学的問題解決の過程における対話の意義(II). 数学教育論文発表会論文集, Vol.23, 1990. ページ: 48 - 54.

19. 松田由香里. 児童の問題解決過程における図の役割に関する研究：小学校3年生に対する授業分析を通して. 数学教育論文発表会論文集, Vol.35, 2002. ページ: 151- 156.
20. 菊地光司. 算数の問題解決における図的表現の働きに関する研究. 日本数学教育学会誌, Vol.78, No.12, 1996. ページ: 334 - 339.
21. 山口耕. 算数学習における絵図的表現の研究：表現レベルが文章題解決に及ぼす影響について. 数学教育論文発表会論文集 Vol.38, 2005. ページ: 151 - 156.
22. 水井裕二. 「速さ」の非定型文章題の問題解決に有効な図的表現. 日本教科教育学会誌, Vol.24, No.1, 2001. ページ: 1-10.
23. 新堀栄. 数学的道具としての概念形成を目指した教材構成に関する研究：割合指導の問題提示場面に用いられる図の視覚的影響. 数学教育論文発表会論文集, Vol.32, 1999. ページ: 317 - 322.
24. 横山隆光, ほか. 中学校数学・理科におけるタブレット PC と電子黒板を活用した協働学習. 出版地不明：日本教育情報学会学会誌, Vol.29, No.3・4, 2014. ページ: 37-42.
25. 王戈, ほか. 学習支援システムの使用が小学生の学力に及ぼす効果：パネル研究による評価. 出版地不明：日本教育工学会論文誌, Vol.29, 2006. ページ: 45-48.
26. 清水典子. 論理的思考力・表現力を高める学習指導の工夫:「フィンランド・メソッド」導入の可能性. 出版地不明：全国大学国語教育学会発表要旨集 114, 2008. ページ: 67-70.
27. 瀧田和也. 国語科のカリキュラム開発の課題は何か-日本・フィンランドの説明的文章教育の比較考察-. 言文, Vol.55, 2007. ページ: 29-43.
28. 道田泰司. マンガを用いた授業実践の試みとその評価. 琉球大学教育学部紀要 第一部・第二部, Vol.53, 1998. ページ: 317-326.
29. ホンホービエット, 渡邊豊英, 加藤ジェーン. 4 コマ漫画におけるストーリー展開の分析. 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集 2000 年基礎・境界ソサイエティ大会講演論文集, 2000. ページ: 212.
30. 荒木恵, 岡田健, 大岩元. 小学校におけるオルゴールと「ことだま on Squeak を用いたプログラミング教育の試み. 情報処理学会, 2007. ページ: 69-75, 情報処理学会研究報告: コンピューターと教育研究報告.
31. 田島章, 大谷紀子. アルゴリズム学習システム"FLOMAGE". 東京：武蔵野工業大学環境情報学部情報メディアセンター, 2007. ページ: 84-90, 論文.
32. 岸学. 説明文理解の心理学. 京都：北王子書房, 2004.
33. 宇佐美寛. 新版論理的思考：論説文の読み書きにおいて. メヂカルフレンド社, 1989.
34. 藤沢晃治. 「わかりやすい文章」の技術ー読み手を説得する 18 のテクニック. 講談社, 2004.
35. 川本佳代, ほか. 数学証明問題を用いた論理的思考力育成支援システムの開発. 2018 年度人工知能学会全国大会（第 32 回, JSAI2018）, 2018. ページ: 1L301.

36. 川本佳代, ほか. 平面図形問題を用いた論理的思考力育成支援システムの開発. 人工知能学会第 86 回先進的学習科学と工学研究会(SIG-ALST), 2019. ページ: 18-23.
37. 日浦美咲, ほか. キットビルド方式によるフローチャート組み立て課題を導入した論理的思考力育成システム. 2018 年度人工知能学会全国大会 (第 34 回, JSAI2020), 2020. ページ: 2B6GS1201.
38. 田中鈴乃, ほか. グラフを用いた問題解決プロセスを導入した論理的思考力育成システム. 情報処理学会研究報告, 火の国情報シンポジウム 2020, 2020.

本研究に関連する主要な成果

第3章

- 砂山渡・長田佳倫・川本佳代, 直感的な意味付けとその繰り返しにより問題の考え方の理解と定着を促す学習システム, 日本知能情報ファジィ学会誌 27 巻 5 号, 723-733 (2015)

第4章

- 川本佳代・出口直輝・林雄介・平嶋宗・砂山渡, 論理的思考力育成を指向したフローチャート活用学習システムと小学校児童による実験的評価, 教育システム情報学会誌 Vol. 32, No. 3 pp. 214-219 (2015)

第5章

- Kayo Kawamoto, Yusuke Hayashi, Tsukasa Hirashima, An Open-ended and Interactive Learning Using Logic Building System with Four-Frame Comic Strip, Human Interface and the Management of Information: Applications and Services. HIMI 2016. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9735, pp.146-158 (2016)

謝辞

本研究に取り組み、学位論文をまとめるまでに、多くの方々のご支援とご指導を賜りました。博士論文を上梓するにあたり、お世話になった皆様方に、この場をお借りして感謝の意を申し上げます。

はじめに、主指導教員である広島大学 大学院先進理工系科学研究科 教授 平嶋宗先生には、本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、ご指導いただきました。ここに深謝の意を表します。

広島大学 大学院先進理工系科学研究科 教授 金田和文先生と同研究科 准教授 林雄介先生におかれましては副査として多くの御指導、御助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

滋賀県立大学 工学部 電子システム工学科 教授 砂山渡先生におかれましては長年にわたり多くの共同研究を遂行してくださいました。ここに感謝の意を表します。

広島市立大学 大学院情報科学研究科 教授 岩城敏先生、同研究科 講師 池田徹志先生、同研究科 助教 高井博之先生におかれましては日ごろからご指導・ご支援いただきました。ここに感謝の意を表します。

また、実験に協力してくださった全ての方々にお礼を申し上げます。

最後に私をサポートしてくれた家族にも感謝いたします。