

# 情報構造オープンアプローチに基づく三角ロジックモデルの操作としての 論理演習の設計開発

Design and development of logic exercise as manipulation of triangular logic model based on information structure open approach

北村 拓也<sup>\*1</sup>  
Takuya Kitamura

長谷 浩成<sup>\*2</sup>  
Hironari Hase

前田 一誠<sup>\*2</sup>  
Kazushige Maeda

林 雄介<sup>\*1</sup>  
Yusuke Hayashi

平嶋 宗<sup>\*1</sup>  
Tsukasa Hirashima

<sup>\*1</sup> 広島大学工学研究科

Graduate School of Engineering Hiroshima University

<sup>\*2</sup> 環太平洋大学次世代教育学部

Faculty of Education for Future Generations International Pacific University

This paper describes a triangular logic model proposed to express logic structure and an exercise environment that made the logic structure operable. In the system, automatic diagnosis is realized by setting the target logical structure to syllogism. In this research, firstly, we designed an expression of the learning target, that is, logic structure. Then, operations of the expression were defined as the operation of the logic. Based on the modeling of logic structure, a learning environment where a learner is allowed to change the logic structure. This approach is called an information structure open approach. We also report the results of experiment use of this environment.

## 1. はじめに

Galperin の知的行為多段階形成モデルでは、ある思考形式を身につけるためには、その思考形式を具体物に対する具体的な操作として行えるようにすることが有効であるとしている[駒林 71]。Papert はマインドストームにおいて、対象についての操作可能なモデル表現を持ち、それを操作することが対象の理解に重要であることを指摘している[Papert 80]。これらの研究では、人の思考を情報構造に対する操作として捉えることができると仮定されており、このような仮定に基づき、情報構造を可視化し、操作させる学習支援環境を学習者に提供するアプローチを、情報構造オープンアプローチと呼ぶ[Carbonell 70, 平嶋 13]。筆者らはこの情報構造オープンアプローチに従って、対象を情報構造として記述し、その情報構造についてのインタラクティブな操作を計算機上で実現することで、その対象についてのより深い学びを可能にする学習環境の設計開発と実践利用を行ってきており[平嶋 15]、算数[Hirashima 15a, 山元 13]、力学[Horiguchi 14]などの具体的な教科を対象としてシステム開発を行い、有用性を確認している。本研究では、近年特に重要視されるようになってきている論理的思考力[文化庁 04]に関しても情報構造オープンアプローチが適用可能であると考え、論理の構造を情報構造として具体化し、学習者がインタラクティブに操作活動を行える環境を設計・開発し、その活動の効果を実験的に検証した。

論理の構造を情報の構造として表現するモデルの一つとして Toulmin モデルが知られている[Toulmin 03, Charles 78]。本研究では、根拠、理由づけ、主張の三つで構成される Toulmin モデルの簡略化版としてしばしば用いられる「根拠」「理由づけ」「主張」の三つの要素で構成されるモデル(本稿では、三要素に簡略化された Toulmin「三角ロジックモデル」と呼ぶ)を用いて、この三角ロジックモデルで表現された論理構造を学習者が操作的に組み立てることができる演習環境を設計・開発した。この環境では、キットビルド方式[ Hirashima 15b]を採用すること

で、学習者の作成した論理構造の診断と診断に基づくフィードバックが行えるようになっている。この演習環境の評価として、(1)実験群:プレテスト、システムを用いた演習、ポストテスト、(2)統制群:プレテスト、ポストテスト、の二つのグループを設けて利用実験を行ったところ、実験群でプレテストに対してポストテストの成績が有意(効果量大)に向上し、統制群において有意差がみられなかったことから、本演習の有効性が示唆された。なお、プレテスト、ポストテストとしては、国立教育政策研究所が実施した「特定の課題に関する調査(論理的な思考)」のうち、「一般的な表現形式による問題」を用いている。

以下本稿では、まず操作対象とする情報構造としての論理の構造のモデルについて述べる。次に、その構造の操作としての演習をインタラクティブに行うことのできる演習環境の設計開発について述べる。さらに、利用実験とその結果について報告する。

## 2. 論理構造のモデル

### 2.1 Toulmin モデルと三角ロジックモデル

Toulmin モデルでは、主張・理由づけ・根拠・限定・反証・裏付けの 6 要素によって論証の構造を定式化している。この Toulmin モデルを論理的思考力の基準として全面的あるいは部分的に採用している研究は数多く存在する[富田 04, 鈴木 07]。また、Toulmin モデルを演習環境に取り入れた研究も行われている。例えば、[Karsten 07]はオンラインディスカッション用にシンプルな Toulmin モデルの枠組みで自由記述する形の演習環境を実装している。しかしながら、構成された論理構造を自動診断し即時的なフィードバックを返すと行ったインタラクティブ化を指向した研究は見当たらない。本研究はこのインタラクティブ化を目指したものとなる。

Bryan は Toulmin モデルの六要素のうちの主張・理由づけ・根拠の 3 つが論理構造の本質であり、この三つだけでも論理構造とみなせるとの主張を行っている [Bryan 14]。井上も、Toulmin の示した 6 項目のうち、「根拠」と「理由づけ」と「主張」が論の骨組みであり、「裏付け」「反証」「限定」の三つは一括して但し書きと考えた方が実際に扱いやすいとしている[井上 89]。また、三要素を用いて論理の学習を行っている事例も多く

存在する[堀江 03, 佐藤 10]. 三角ロジックモデルで表した論理構造の具体例を図1に示した(この例は Toulmin モデルで標準的に用いられている例である). 三角形の各頂点は, それぞれ論理構造の特定の要素が割り当てられており, 底辺左の頂点に「根拠」, 底辺右の頂点に「理由付け」, 底辺の対頂点に「主張」が割り当てられる.

本研究では, 取り扱う論理構造を三段論法に限定することで「根拠」, 「理由づけ」, 「主張」の構成要素とそれらの要素間の関係を定式化し, さらに三角形の各辺に推論としての意味付けを追加して, それぞれの推論を演習化していることが特徴となる. したがって, 本稿で扱っている三角ロジックモデルは, 三段論法を表現したものとして話を進める. また本稿では三角ロジックモデルのインスタンスとしての記述を三角ロジックと呼ぶ.

## 2.2 三段論法の表現としての三角ロジックモデル

これまでの Toulmin モデルに関する研究では, 構成された論理構造の妥当性は人が判断するものとされていたため, これらの三つの構成要素の満たすべき性質については厳密には定められていなかった. 本研究では学習者が取り扱う論理構造を仮言的三段論法“(A→B) ∧ (B→C) ⊢ (A→C)”, 定言的三段論法“(A→B) ∧ (B→C) ⊢ (A→C)”に限定する. この場合, 根拠が“A→B/A→B”, 理由づけが“B→C/B→C”, 主張が“A→C/A→C”となる. これら三つはそれぞれ命題となっており, ここで取り扱う論理構造は三つの命題から構成されることになる. また, 命題を構成する A, B, C を本稿では命題要素と呼ぶ. 図1の例(Toulmin が用いた例)であれば, A:彼, B:バミューダ生まれ, C:イギリス人, となる. 三段論法は演繹推論の代表例として学ばれるものであり, これを取り扱えるようにすることは意義があると判断している.

本稿での三角ロジックモデルで取り扱う論理構造を三段論法で記述可能なものに限定することで, 三角ロジックを構成する部品と部品間の関係が明確になる. よって, 教材の用意が容易となり, さらに, 学習者の組み立てた論理構造の診断やフィードバックが設計可能となる. しかしながら, 従来三角ロジックモデルで取り扱われた事例を直接扱えない場合がでてくる. たとえば, 図 1 の例において, 「バミューダで生まれた」を「イギリス領で生まれた」に抽象化し, 「イギリス領で生まれた人はイギリス人である」という, より一般的な理由づけを用いるような事例を考えてみる. 三段論法として考えると, 「バミューダで生まれた人」が「イギリス領で生まれた人」であることは自明ではなく, それを導くための理由付けが必要となる. 本研究では, 「バミューダで生まれた人は, イギリス領で生まれた人である」という理由付けを用いて, 「彼はバミューダで生まれた」を根拠として, 「彼はイギリス領で生まれた」を主張として導き, さらに, この主張を根拠として, 「イギリス領で生まれた人はイギリス人である」を理由付けとすることで, 「彼はイギリス人である」という主張を導くと表現することになる. 図 2 に, 上記論理を三角ロジックで表現した例を示す.

また, この三角ロジックモデルにおいては, 三段論法が成立していることを前提して, 図 1 のように, (1)主張推論, (2)理由付け推論, (3)根拠推論, の3つを定義する事ができる. これらは, 各辺の両端の命題が与えられた場合に対頂点の命題を推論することであり, 主張推論は, 根拠と理由付けから主張を導くことであり, 三段論法そのものとなる. 理由付け推論も, 対応する主張と根拠が決定されていれば, 理由付けを導くことが可能となる. 根拠推論についても同様となる. これらの推論方法に基づいて3章で述べる演習が設計されている.

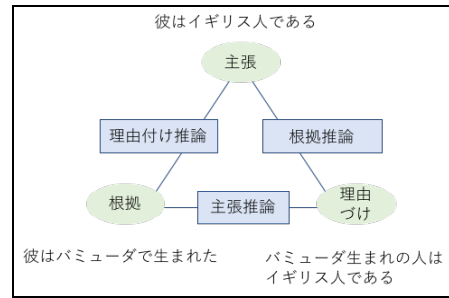


図 1 三角ロジックモデル

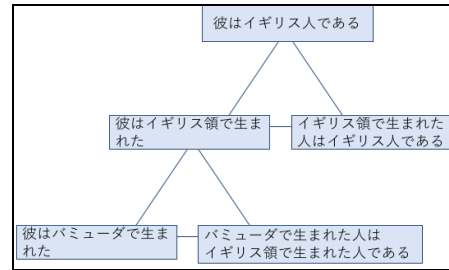


図 2 「彼はイギリス人である」を導く三角ロジック

## 2.3 インタラクティブ化

Toulmin モデルの従来の利用法は, 学習者がこのモデルの図式に合わせて自身の考えた論理構造を表現するというものであった. これだけでも効果があるとされているが, 学習者の作った論理構造を診断し, その結果に基づくフィードバックは, 学習の支援として一般的に望まれるものであるといえる. しかしながら, 学習者自身が論理構造の各要素を記述する形式の場合, その正確な診断は簡単ではなかった. このため, 学習者が Toulmin モデルに基づいて記述した論理表現を自動診断する仕組みはこれまでのところ報告されていない.

本研究では, 予め教授者が正解となる論理構造を三角ロジックモデルに基づいて記述する(教授者三角ロジックと呼ぶ. 図 3(1)). 次にその記述を部品に分解する. 一つの三角ロジックから三つの命題が取り出されるが, これを再構成して三角ロジックを組み立てるためには, 三つの命題の関係を表す三角形の枠組み(三角ロジックフレームと呼ぶ)も必要となる. 命題と三角ロジックフレームのセットをキット(図 3(2))と呼び, このキットを学習者に提供し, 学習者に組み立てさせる. 学習者が再構成したものを学習者三角ロジックと呼ぶ. この学習者三角ロジックは, 教授者三角ロジックと比べることで診断される. 本研究ではこの方式をキットビルド方式[Hirashima 15b]と呼んでいる.

キットビルド方式の場合, 部品自体は用意されたものであるため, それらを用いて作られる構造は, あらかじめ用意された構造との比較によって診断することができる. また, 個々の部品は作り出すのではなく, 認識すればよいので, 構造に焦点を置いた学習になると期待できる. さらに, 一つの三角ロジックから, 三つの命題が部品として取り出されるが, 図 1 に示したように, 三角形の各頂点は, それぞれ, 根拠(底辺左頂点), 理由づけ(底辺右頂点), 主張(底辺対頂点)が配置されるものとしている. このため, 三つの命題の配置の仕方は,  $3 \times 2 \times 1 = 6$ 通りとなる. 3章で述べる演習環境で設計した課題では少なくとも 3 個のダミーの命題を追加しているので,  $6 \times 5 \times 4 = 120$ 通りとなっており, 論理の構造を考えずに再構成することが難しい課題となっている.

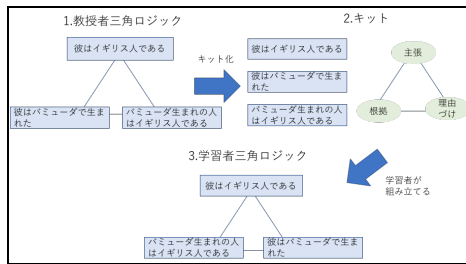


図3 論理の三角ロジックフロー図

### 3. 論理組み立て演習環境

2章で述べた三角ロジックモデルに基づき、(1)すべての命題が配置された三角ロジックの正誤判定を行う演習(判定演習)、(2)二つの命題が配置された三角ロジックと残りの一つの命題の候補集合を提供し、残りの一つの命題を選択・配置する演習(主張推論、理由づけ推論、根拠推論に対応する)(組み立て演習1)、(3)一つの命題が配置された三角ロジックと残りの二つの命題の候補集合を提供し、残りの二つの命題を選択・配置する演習(組み立て演習2)、(4)命題が配置されていない三角ロジックと三つの命題の候補集合を提供し、適切な命題を選択・配置する演習(組み立て演習3)、の四つを実装した。演習画面の例として、組み立て演習1の根拠推論を図4に示す。

#### 3.1 ダミー命題

本演習環境で用いたダミー命題は、以下のような手順で教授者三角ロジックの作成者が作成した。

- (1)教授者三角ロジックの命題を命題要素に分解し、それらを組み合わせた命題を作成した。たとえば、教授者三角ロジックが“(A→B) ∧ (B→C) ⊢ (A→C)”あるいは“(A→B) ∧ (B→C) ⊢ (A→C)”であるとした場合、A、B、Cを命題要素として、教授者三角ロジックにない命題を作成し、ダミー命題候補とした。つまり、B→A、C→B、C→Aがダミー命題候補となる。
- (2)教授者三角ロジックの命題が論理的包含(A→B)の形式であることから、前提を否定に入れ替えたもの(¬A→B)、帰結を否定に入れ替えたもの(A→¬B)をダミー命題候補とした。
- (3)正しい命題が(A→B)の場合に、AやBの命題要素と概念的に近い命題要素に置き換えることでダミー命題候補を作成した。



図4 演習環境の画面: 組み立て演習1 根拠推論

### 4. 評価実験

#### 4.1 実験概要

本演習が、(i)論理的思考を要する演習になっているか、(ii)学習者の論理的思考力育成に効果があるか、を検証するために、評価実験を行った。

(i)に関しては、ある程度論理的思考力が備わっていると考えられる大学生に対する演習環境の利用時間とテストの成績の相関に基づいて評価した。(ii)については、プレテスト、ポストテストの結果から調査した。

#### 4.2 手順

被験者は工学系の大学生・院生 31名で、内訳は演習環境を利用する実験群 15名と、演習環境を利用しない統制群 16名である。実験群における演習手順としては、(1)プレテスト、(2)プレテストの7日後の演習環境の利用、(3)演習環境利用直後のポストテストおよびアンケート・フロー調査となっている。統制群は、(1)プレテスト(2)プレテストの7日後のポストテストとなっている。

プレ・ポストテストには、国立教育政策研究所教育課程研究センターが高校生を対象に論理的に思考する力の育成状況に着目して実施した「特定の課題に関する調査(論理的な思考)」で用いられた問題のうち、「一般的な表現形式による問題」(22問)を用いた。問題例を図5に示した。演習環境には8つの課題を実装しており、8つ全ての課題に正解するまでの時間を計測し、演習環境利用時間とした。8つの課題の内訳は、判定演習が1問、論理組み立て演習1が3問(3種類)、論理構成演習3が4問となっている。課題の種類は、対象が大学生であることを考慮し、難易度の高いと考えられる論理構成演習3を基本とした。

#### 4.3 テスト結果の分析

プレテスト及びポストテストの結果を表1に示す。演習環境利用の有無を被験者間要因、テストのプレ・ポストを被験者内要因としてANOVA4を用いた2要因分散分析を行ったところ、交互作用が有意であった( $p=0.0000<0.001$ )。下位検定を行ったところ単純主効果として、プレテストにおいて実験群と統制群の有意差はなく( $p=0.059>0.05$ )、ポストテストにおいて有意差が見られた( $p=0.020<0.05$ )。また、実験群においてプレテストとポストテストにおいて有意差があり( $p=0.000<0.001$ )、効果量大( $d=1.30$ )となった。統制群においてプレテストとポストテストにおいて有意差は見られなかった( $p=0.840>0.05$ )。今回、プレテスト、ポストテスト共に同じテストであったが、統制群の結果より、ポストテストの成績に対するプレテストを受けた効果はないと判断できる。したがって、実験群におけるポストテストの成績向上は、演習環境の効果であることが示唆される。今回の実験は、他の方法との比較とはなっていないが、(1)内容としては高校生対象の調査が行われていることから大学生以上であればすでに様々な方法で学んできたものであるといえること、(2)知識の量に依存しないような内容になっていること、(3)効果量が大きであったことから演習環境を用いた演習が有力な方法であることが示唆されていると判断している。

##### 4.3.3 演習時間とテスト成績の相関

演習時間とプレテスト及びポストテストにおける相関を表2に示す。演習時間とプレテストの成績に有意に高い負の相関が出ており、プレテストの時点で成績が悪い場合には、演習を終了するのに時間もかかっていることを示している。これは、演習が論理的思考を要するものになっていることを示唆する。また、成績が向上した後のポストテストにおいても同様に高い負の相関が現れており、成績の変化(プレテストとポストテストのスコアの差)と演習時間には有意な相関がみられなかった( $r=0.02$ ,  $p=0.94>0.05$ )。これらのことから、比較的簡単に演習を行えた

場合(演習が簡単であった場合)でも、演習を行うのが困難であった場合(演習が難しかった場合)でも学習効果があったことが示唆される。

(2) 次の推論は正しくない。なぜ、正しくないと言えるか、その理由を答えなさい。

3の倍数を2つ加えて得られる数は3の倍数である。  
 $a$ と $b$ はいずれも3の倍数ではない。  
 ゆえに、 $a$ と $b$ を加えて得られる数は3の倍数ではない。

図5 調査問題例

表1 プレテスト/ポストテストの得点

	プレ (SD)/22	ポスト (SD)/22	プレポスト の差	効果量 (d)
実験群 (15人)	12.6 (3.48)	16.73 (2.84)	0.00000 <.001	大 (1.30)
統制群 (16人)	14.5 (2.21)	14.38 (1.90)	0.8402 >.05	
両群の 差	0.0594 >.05	0.0203 <.05		

表2 システム利用時間と得点の相関

	プレテスト	ポストテスト
相関	-0.71( $p=0.003$ )	-0.79( $p=0.0005$ )

## 5.システム改善

本10件でのアンケート結果からシステムのフィードバックへの評価が、3.0/5と高くなかったことから、フィードバック機能の修正を行った。具体的には、文字でのフィードバックを、誤り部分を構造の可視化により示すように修正した。

また、複数の三角ロジックを組み合わせる、複合三角ロジック機能を実装した。

## 5.まとめ

対象を情報構造化し、その情報構造を操作する活動を通じて対象について学ぶという情報構造オープンアプローチに基づいて、論理の構造を組み立てる活動を通して論理的思考力についての学習を行う演習支援システムを設計開発し、実験的利用を通してその活動の有用性を示した。論理の構造の情報構造化としては、Toulminモデルの三要素モデルを採用している。これを三角ロジックモデルと呼び、さらに、表現する論理の構造を三段論法に限定することにより、正誤判定と判定に基づくフィードバックを実現している。フィードバックに関しては、文字情報だけでなく、構造の可視化によるフィードバック機能も実装している。

現在、三角形一つ分の論理構造しか扱っていないが、これを拡張し、複数の三角形で構成される論理構造を扱う演習への拡張も実装している。また、選言的三段論法の取り扱いも行う予定である。さらに、今回用いた調査問題にはいくつかの種類の論理構造が含まれていることから、それらの論理構造を分析し、本演習がどのような問題に対して有効であったのかを分析することも一つの課題となる。また、今回、他の学習の方法との比較を行っていないため、従来型の論理の演習との比較を行うことも次の段階として必要であると考えている。なお、この点に関しては、空間的に配置される構造記述を学習者に操作させ、その操作結果にフィードバックを返すことのできる環境における学びが、

従来の方法で同等の内容を学習する場合よりも、学習者の動機づけや能動性を高め、高い学習効果を得ることができるとは、筆者らがこれまで行ってきた算数や理科、あるいは英語等の学習支援に関する研究において情報構造オープンアプローチとその効果として示してきたことであり、同様の方法論を採用している本研究も有望であると考えている

## 謝 辞

本研究は、科学研究費15K12413および15H02931の支援を受けたものである

## 参考文献

- [Bryan 14] Bryan, H. J., et al.: A NEW LEARNING PROGRESSION FOR STUDENT ARGUMENTATION IN SCIENTIFIC CONTEXTS (2014).
- [文化庁 04] 文化庁:「これからの時代に求められる国語力について」文化審議会答申(2004).
- [Carbonell 70] 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).
- [Charles 78] Charles W. Kneupper :Teaching Argument: An Introduction to the Toulmin Model, College Composition and Communication, Vol. 29, No. 3, pp. 237-241(1978).
- [平嶋 13] 平嶋 宗:学習課題の内容分析とそれに基づく学習支援システムの設計・開発:算数を事例として, 教育システム情報学会誌, Vol.30, No.1, pp.8-19(2013).
- [平嶋 15] 平嶋 宗:「学習課題」中心の学習研究:情報構造としての学習課題の再定義と構造操作としての学習活動の設計, 人工知能学会誌 30 (3), 277-280(2015).
- [Hirashima 15a] Hirashima, T., Hayashi, Y., Yamamoto, S.Maeda, K.: Bridging Model between Problem and Solution Representations in Arithmetic/Mathematics Word Problem, Proc. of ICCE2015, pp. 9-18, (2015).
- [Hirashima 15b] Hirashima, T., Yamasaki, K., Fukuda, H., Funaoui, H.: Framework of Kit-Build Concept Map for Automatic Diagnosis and Its Preliminary Use, Research and Practice in Technology Enhanced Learning 10:17(2015).
- [Horiguchi 14] Horiguchi, T., Imai, T., Toumoto, T. Hirashima, T.:Error-Based Simulation for Error-Awareness in Learning Mechanics: An Evaluation, Journal of Educational Technology & Society, Vol.17, Issue 3, pp.1-13 (2014).
- [堀江 03] 堀江 祐爾, 成瀬 雅巳:思考力・判断力・表現力を育成するために言語活動を取り入れた効果的な指導方法の研究:論理的に「話す・聞く」「書く」指導をとおして, 平成24・25年度「理論と実践の融合」に関する共同研究活動成果報告書(2003).
- [井上 89] 井上 尚美:言語論理教育入門-国語科における思考, 明治図書 p.86-1(1989).
- [駒林 71] 駒林 邦男:「知的行為の多段階形成理論」研究覚書, 岩手大学教育学部研究年報, 31.1-86(1971).
- [Papert 80] Papert, S: Mindstorms: children, computers, and powerful ideas, New York:Basic Books(1980).
- [佐藤 10] 佐藤 佐敏:解釈する力を高める発問, 上越教育大学研究紀要 第29巻(2010).
- [鈴木 07] 鈴木 宏昭 ほか:Toulminモデルに準拠したレポートライティングのための協調学習環境, 京都大学高等教育研究(2007).
- [Toulmin 03] Toulmin, S.E:The uses of argument, Updated Edition, Cambridge:Cambridge University Press(First published:1958)(2003).
- [富田 04] 富田 英司, 丸野 俊一:思考としてのアーギュメントと研究の現在, Japanese psychological review, vol.47, No2, 187-209(2004).
- [山元 13] 山元 翔, 神戸 健寛, 吉田 祐太, 前田 一誠, 平嶋 宗:教室授業との融合を目的とした単文統合型作問学習支援システムメンサク Touch の開発と実践利用, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J96-D, No.10, pp.2440-2451(2013).