

博士学位請求論文審査要旨及び担当者

報告番号 甲 乙 第 号

氏名 佐藤 有理

論文題目 The Cognitive Efficacy of Diagrammatic Representations in Logical Reasoning
(論理推論における図的表現の認知的有効性)

論文審査担当者

主査 慶應義塾大学文学部教授 岡田 光弘
文学研究科委員

副査 慶應義塾大学文学部教授 柏端 達也

副査 同志社大学文化情報学部教授 下嶋 篤

論文概要

本論文は図的論理推論の認知的有効性を考察している。伝統的な論理推論研究の主流は言語的表現を用いてなされてきたが、近年図的表現による論理推論研究の重要性が指摘されてきた。本論文ではオイラー図表現による論理推論の重要性を、論理学、認知科学、脳科学など多層的な研究手法を用いて解明している。特に、三段論法的言語表現やヴェン図表現に対して、オイラー図表現が推論プロセスにおいてより有効であることが理論的な研究と実証的研究を結びつけることにより主張されている。

本論文は5つの章と2つの付録(補足)から構成されている。論文の構成は以下の通りである。

Chapter 1 Introduction (第1章 序論)

1.1 Diagrammatic reasoning (図的推論)

1.2 The efficacy of diagrammatic reasoning (図的推論の有効性)

1.3 The questions of effective use of diagrams in logical reasoning (論理推論における図形の効果的使用に関する問題)

1.4 The structure of this thesis (本論文の構造)

Chapter 2 Theoretical basis of the efficacy of diagrammatic reasoning (第2章 図的推論の有効性に関する理論的基盤)

2.1 General Hypothesis: Interpretational and Inferential efficacy (一般仮説：解釈効果と推論効果)

2.2 Relational analysis of categorical syllogisms (定言的三段論法の関係分析)

2.3 Solving syllogistic reasoning with Euler and Venn diagrams (オイラー図とヴェン図を用いた三段論法推論)

2.4 Predictions (予測)

Chapter 3 Empirical studies of the inferential efficacy (第3章 推論効果に関する経験的研究)

3.1 Reasoning with Euler and Venn diagrams: Experiment 1 (オイラー図とヴェン図を用いた推論：実験1)

3.2 Reasoning with Linear diagrams: Experiment 2 (線図を用いた推論：実験2)

3.3 fMRI analysis of the efficacy of Euler diagrams: Experiment 3 (オイラー図の有効性に関するfMRI分析：実験3)

3.4 Children's reasoning with Euler and Venn diagrams: Experiment 4 (オイラー図とヴェン図を用いた子どもの推論)

Chapter 4 Theoretical-empirical study of the interpretational efficacy (第4章 解釈効果に関する理論的-経験的研究)

4.1 Extracting information from Euler and Venn diagrams (オイラー図とヴェン図からの情報抽出)

4.2 Hypothesis: The structural correspondence of interpretations (仮説：解釈の構造的対応)

4.3 Sentence-diagram matching test: Experiment 5-1 (文—図マッチングテスト：実験5-1)

4.4 Diagram-sentence matching test: Experiment 5-2 (図—文マッチングテスト：実験5-2)

4.5 Discussion (考察)

Chapter 5 Concluding discussion (第5章 結論的考察)

5.1 Conclusion: The efficacy of diagrams in logical reasoning (結論：論理推論における図形の有効性)

5.2 Further discussion: Structural and procedural correspondence (補足的考察：構造的及び手続き的対応)

5.3 Comparison with related literature (関連文献との比較)

5.4 Future works (今後の課題)

Appendix A The efficacy of region-based diagrams (付録A 領域ベース図の有効性)

Appendix B Supplemental data of the experiments (付録B 実験の補足的データ)

各章の概要

第1章では、本研究の目的およびこの目的を達成するために本研究で採用する方法論について論じている。まず第1節では、図的推論の研究の背景として、論理学、哲学、認知科学、実験心理学における個々の先行研究について検討し、その上で従来の研究の問題点を指摘する。論理図形は、1990年代以降数理論理学の手法を用いて急速に形式化が進んだが、こうした一連の論理学者による研究は、認知科学で蓄積された一般被験者を対象とする研究とはほぼ独立に行われてきた傾向があったと著者佐藤君は分析する。このため、論理学の理論的観点から導出された図的推論の有効性に関する仮説が、論理学の訓練を受けていない一般の人による推論の過程に適合するのかが示されてこなかったと佐藤君は考える。この溝を埋めるため、論理学的理論分析と一般被験者を対象とする認知科学的実験・調査の統合的方法論の必要性が主張される。

第2節では、図形の有効性、つまり図形をはじめとする表現様式の違いが問題の解き易さに与える影響について、先行研究の知見の再検討を行っている。特に、非論理的な問題解決課題における図的表現の役割の検討を通して、図形により支援される論理推論の特異な点について考察を加えている。

第3節では、異なる形式の図形が解釈過程と推論過程から成る論理推論のどちらで効果的なのか、それらの有効性が発揮されるための条件とは何か、こういった図形が実際の推論で効果的なのか、といった本論文で検討される問題が精細に整理されている。また、第4節では、本論文の構造が示されている。

第2章では、論理推論における図形の有効性に関する理論的枠組みと本論文が擁護する仮説を提供している。

まず第1節では、解釈過程と推論過程における図形の役割を明確にするため、文と図を用いた論理推論の認知モデルが導入されている。さらに、図的表現に関する2つの有効性の区別が重要であると主張される、即ち、前提文の解釈に関する効果（解釈効果）と諸前提情報の統合操作に関する効果（推論効果）の区別である。

第2節では、量化文に対応する図の解釈と推論体系が検討されている。具体的には、定言的三段論法推論の推論体系として、包含と排他の集合間の関係に基づく先行研究を精細に検討し、本図的推論研究で採用する推論体系の枠組みを提出している。

第3節では、先行研究のオイラー図を用いた、包含・排他関係の図形的可視化について議論している。抽象的な集合間の関係の推論と、具体的な図形操作による推論との関係が示される。

第4節では、前節までの考察を基にして次章の各実験における作業仮説を設定している。この中で、図的推論の解釈効果と推論効果とを実証的に区別する方法論、オイラー図の持つ自然さの検証法などが明確化されている。

第3章では、三段論法推論を用いて、図的論理の有効性の認知科学的実証研究の成果が報告される。

まず第1節の実験1では、通常の言語的表現による三段論法推論課題の被験者群(言語群)、オイラー図が加えられた被験者群(オイラー図群)、ヴェン図が加えられた被験者群(ヴェン図群)に参加者を分け、妥当性判定の正当率に関する比較を行っている。その結果、オイラー図群、ヴェン図群、言語群の順の成績となり、図形が与える付加的情報を考慮してさえも、オイラー図のみに解釈効果以上の効果、つまり推論効果が示唆された。

第2節の実験2では、オイラー図を一次元で表現した図形(線図)を使用して実験の成果が報告されている、実験1と同様の結果が報告された。この線図は、オイラー図と同様の関係構造を有していることから、関係構造に基づく図形表現・推論であることが三段論法推論の効果的な実行に重要であることが考察されている。

第3節では、推論過程におけるオイラー図の有効性をfMRIの脳活動を指標として検討した実験(実験3)について報告されている。その結果、三段論法推論の妥当性判定にかかる反応時間が、オイラー図群の方が言語群よりも有意に短いという行動結果とともに、中前頭回の吻側、特に左前頭極(BA 10)での賦活が言語群で見られ、オイラー図群では見られないことを報告している。この脳部位に関する先行研究の検討から、この結果は、オイラー図の推論効果を支持するものと著者佐藤君は考えている。

第4節では、図的推論の事前知識を持たない小学校児童を対象に、オイラー図とヴェン図の三段論法推論における有効性の実験(実験4)が報告されている。この実験では非存在命題に関する三段論法に限定した形で実施されている。特に高学年児童においては、オイラー図の推論効果に関する成人と同様の傾向がみられたことが報告している。オイラー図の包含と排他に関する操作規則が、自然な制約に近いものであると佐藤君は結論付けている。

第4章では、文と図の解釈について、論理的意味論などの理論と認知過程実証実験を組み合わせた分析を行い、図が解釈効果を持つための条件が探究されている。

第1節では、表現とそれが表すものの構造的対応が解釈効果の成立にどのように関わるかを考察する。言語表現と図形表現についての意味論的分析がこれまでの先行研究では不十分であり、よって、関連する情報抽出の認知過程が明らかにされてこなかったと著者佐藤君は指摘する。

第2節では、本論文第2章の論理学的意味論分析の再検討を通して、より具体的に、量化文とオイラー図・ヴェン図の情報抽出(解釈)過程が比較・考察されている。

第3節では、オイラー図とヴェン図からの情報抽出過程の有効性を、量化文と図形の適合にかかる反応時間計測という手法により比較調査している。具体的には、第3節では、文から図へのマッチングテスト(実験5-1)の実験成果が報告されている。

第4節では、3節と同様な手法により、図から文へのマッチングテスト（実験5-2）の実験成果が報告されている。

第5節では、3節と4節の実験を受けて、いずれの実験においても、ヴェン図と量化文のマッチング時間は、オイラー図と量化文のマッチング時間よりも長いことが指摘され、これによりオイラー図の持つ効率性が示されたと著者佐藤君は結論する。

第5章では、本論文の結論が述べられている。

第1節では、これまでの様々な実験から得られたオイラー図の有効性に関する知見が整理される。

第2節では、図形の解釈効果を実現する条件としての表現体系の対応（構造的対応）と、推論効果を実現する条件としての推論体系の対応（手続き的対応）についての成果がまとめられている。

第3節では、認知科学における関連する先行研究との比較が行われ、本論文の研究の位置づけが明確にされる。

第4節では、今後の研究課題について考察されている。特に、本研究手法を定言的三段論法型以外の、多様な推論研究へ拡張する可能性について検討している。

本論文ではオイラー図推論を中心とした有効性に着目したが、付録Aではヴェン図推論の有効性について確認を行っている。また付録Bには3章と4章の実験の主要基礎データが記録されている。

審査要旨

佐藤有理君の本論文はこれまでにない新しい方法論を導入して図形論理推論研究に新しい知見を与えたと言える。図的推論の証明論や意味論など最先端の理論的手法と、認知科学や脳科学などの最新の実験調査手法とを結びつけた研究であり、この分野横断的研究手法の導入は佐藤君の大きな国際貢献であると言える。またこれまでの図形論理の国際学界の研究の主流は、論理命題に対応する図的表現の「解釈」の認知プロセスに関わるものが多かったが、佐藤君はさらに一步踏み込んで、図的表現による「推論操作」の認知プロセスを研究テーマとして設定した。これにより本研究の重要さが一段と高いものとなっている。佐藤君は、最新の論理学的理論により図的推論の認知モデルを構成し、認知科学的実験調査手法、機能脳画像研究手法などを組み合わせて、図的推論プロセスを捉える実証測定法を開発した。

専門的論理学の立場から導出される図的推論の認知プロセス理論モデルが非専門的な一般の被験者の図的推論の実験調査と一致するかを調べ、図を用いることにより論理課題の解決がどのように容易になるかを明らかにしたと言える。言語的論理推論研究に対しては、認知科学や脳科学でベンチマーク的研究課題として用いられ

てきたのはアリストテレス三段論法の量化推論体系であった。本論文の図的推論研究の枠組みでも先行研究との比較の目的も兼ねて基本的にこの体系が用いられている。図的論理推論の主流は大きく分けて2つあることが知られている。多くの先行研究が既に存在するヴェン図型推論と、まだ多くの研究の余地が残されていたオイラー図型推論の2つである。本論文では、言語的推論とヴェン図型推論とオイラー図型推論とが多層的な形で比較・分析されている。

成果としては特に、一般被験者への調査により、（１）論理的及び意味論的に同値な推論課題に対して、オイラー図を用いた推論がヴェン図を用いた推論より有効であることを示した。オイラー図の持つ2項関係的構造がそのような有効性を引き出す理由であると佐藤君は主張しているが、これは実験結果に基いた説得力ある主張となっている。（２）オイラー図の特徴を抽象化、単純化した1次元の線分図推論課題でもオイラー図推論と同様の成果が検証され、オイラー図型推論の一般形式に対する認知プロセスの有効性を支持する成果とみなすことができる。（３）fMRIによりオイラー図推論時の脳活動と言語推論時の脳活動とを比較し、オイラー図推論時の方が言語推論時よりも有意に効率的な処理を行っていると考えられるデータを得ており評価に値する。例えば、中前頭回の吻側、特に左前頭極(BA 10)での賦活が言語的推論時で見られたのに対し、オイラー図推論時ではこれが弱いことなどを報告している。これらはオイラー図の論理推論における有効性を支持する結果と言える。（４）小学生児童を被験者とした調査では高学年児童に関してはオイラー図型推論の有効性が確認された。一般被験者として児童も対象にしたことの意義は大きい。（５）推論プロセスだけでなく、図の解釈プロセスの比較実験も行い、オイラー図の有効性を確認している。「推論」プロセスを「解釈」プロセスから分離するうえでこの確認は重要であり、評価できる。

以上のように、多くの注目に値する成果を得ている。審査員一同は、佐藤君の研究目標の意義とオリジナリティ、本研究のために導入された大胆な分野横断的研究手法とともに、そこから得られたこれらの研究成果を高く評価する。またこれだけ多くの実験を、本研究テーマの認知的有効性という観点から首尾一貫して統合的にまとめあげていることも特筆に値する。

ただし次の点に今後のさらなる研究の余地が残っていると考える。（A）オイラー図推論とヴェン図推論を対立した図的推論の型と前提して比較しているが、論理学のより高次の理論面から両者の関係を明らかにできる可能性があり、そのことを通じて図的推論に関する本研究成果に新たな視点を当てることができる可能性があることを指摘しておきたい。（B）成人一般被験者だけでなく、小学生児童被験者の調査を実施したことには意義があるが、成果を確認できたのは一部の高学年だけであった。さらに課題の設定や課題説明を工夫して児童の調査の道を開くことが期待される。（C）fMRI調査を本研究に導入したことは本研究の実証研究的側面を補強する効果を発揮しており、反応時間の比較の測定では成果が明確に出ていると言

える。また素朴な立場で予想されるような（例えば頭頂葉などの）空間的处理部位の賦活の差ではない、より構造的、ネットワーク的脳活動差異が本調査で示唆されていると言えるが、機能脳画像研究面はさらなる成果を期待したい。他の成果と脳画像研究とがどのように結びつくかについても今後の研究を待ちたい。(D) 本論文の成果を基盤にしてさらに広い意味での図的推論研究への発展が期待される。日常生活の中で推論を助けるグラフィック表現や絵的表現のデザイン研究などを通じて、本研究は社会面、生活環境面への応用の可能性を秘めているとも考えられる。

以上のように今後に残された研究課題や期待される課題もあるが、本研究の持つ研究手法の独創性と成果の国際貢献度は高く評価されるべきものであり、慶應義塾大学大学院文学研究科の博士学位に値するものと考える。本審査委員会一同は佐藤有理君に博士（哲学）の学位を与えることを強く推薦する。