

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	佐藤 有理
主 論 文 題 名 :				
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)				
(内容の要旨)				
本研究では、論理推論における図的表現の認知的有効性、つまり、人間の論理推論においてなぜ図形表現は効果的なのか、効果的な図形とそうでない図形を区別するものは何なのかという問題が検討される。この問題の背後には、論理推論が表現様式にどれ程依存するものなのか、という一般的問題があり、これらの問題に答えることを目的として研究を行う。 人間は古来より、推論や問題解決などで様々な図形表現を利用してきており、論理推論を支援するための図形表現も多く提案されてきた。特に、オイラー図やヴェン図は、アリストテレス的三段論法を表現するための図形としてよく知られている。しかし、多くの論理学者にとっての関心は、図形よりもむしろ言語的表現における推論にあり、現代論理学の展開以降、その傾向は強まったように思われる。このような見解においては、図形を使った論理推論を行うということは日常的にはよくあるが、それは論理的証明を構成する際の補助的手段でしかなく、論理学の基本を学ぶ際の導入に使用される程度のものでしかなかった。 しかし、図形を対象とした論理学が展開された 1990 年頃以降、図形を用いた論理推論の本格的研究が行われるようになった。このアプローチでは、証明において言語表現と同等の役割を図形表現が担うものとされ、現代論理学が言語表現を用いた推論を形式化するのと同じ方法で図形表現を用いた推論を形式化できるものと考えられた。実際、ヴェン図をはじめ、様々な図形表現を用いた論理推論についての形式的分析が行われてきた (Shin, 1994)。また、同時期に、図形を取り込んだインタフェースのコンピュータを用いた論理学学習支援システムなども開発され、論理学教育において多く活用されるようになった (Barwise & Etchemendy, 1994)。このような図形を対象とした論理学研究に呼応して、認知科学や人工知能における理論的研究では、図形の持ちうる有効性が、図形表現を用いた推論のモデルと言語表現を用いた推論のモデルとの比較によって議論され (Stenning & Oberlander, 1995)、さらに、そういった表現が持ちうる有効性の成立条件の分析などが行われてきた (Shimojima, 1996)。				

こうした人工知能や認知科学における理論的研究に基づいて、問題解決モデルにおいて仮定される認知過程に関する実験研究が行われてきた (Zhang & Norman, 1994)。しかし、形式的・理論的研究の成果を論理推論の認知過程研究に適用する研究、特に、三段論法推論におけるオイラー図の効果の検討はほとんどなされてこなかった。このように、図形を用いた論理推論の研究は、認知心理学などで蓄積された実験研究とはほぼ独立に行われる傾向があり、さまざまに拡張された図形表現系が実際の利用者にとってどのような有効性をもつのかについてはほとんど明らかになっていない。このような状況に挑戦するため、本研究は、論理学、哲学、認知科学、実験心理学の観点からの統合的方法論を用いて、論理推論における図形表現の有効性について論じる。

本研究が焦点を当てる論理推論は、一般的に、宣言的・命題的知識についての操作過程に関するものであり、前提文を解釈するという過程と、その解釈によって得られた情報の統合操作を行う推論過程とに分割される。したがって、論理推論の課題というものを考えた時に、妥当な結論を導くために必要とされる操作や規則は、問題の前提文の中に直接組み込まれているわけでも、前もって明示的に提示されているものでもない。この点において、論理推論の課題は、手続き的知識に関わる他の多くの問題解決の場合と異なる。例えば、典型的なハノイの塔課題の場合では、対象物を決められた規則のうちでどのような手順で操作するのかが問われているので、必要とされる操作や規則は問題の中に組み込まれていなければならない、それらは予め明示的に用意されているのが一般的である。このように、論理推論における図形の有効性を論じるためには、論理推論の課題を、構成するサブ課題に分割して考える必要がある点で特徴的である。このような論理推論課題を研究対象として設定することは、どのような図形表現が、複合的な課題のうちのどこのサブ課題において有効性を発揮するのかという問いを検討するのに適していると考えられる。また、本研究では、論理推論の中でも、量化文から成る三段論法に焦点を当てる。量化文から成る三段論法は、演繹推論の認知心理学では、伝統的に研究課題の中心であり続けている。また、自然言語推論においても、基本的な推論形式として近年盛んに研究されている。しかしながら、量化を含むような論理推論における図形表現の認知的役割は十分に検討されていないのがこれまでの現状であった。

本研究が取り組む課題は、さらに細かく、主に以下の 6 点に整理される。

(1) 上で記したように、論理推論課題は複合的過程から成ると考えられるが、どこの過程において図形は有効性を発揮するのだろうか。推論の前提にあたる自然言語文と、それに対応する図形表現が与えられた状況において、結論として成り立つ文を答えるということが、図的推論課題として考えられる。本研究は、このような設定において、

図形が持ちうる 2 つの役割を認知モデル上で提案する。それは、(i) 図形から得られる意味論的情報が量化文の解釈に与える効果（解釈効果）と、(ii) 図形を直接的に操作することによって結論の妥当性判定を行うという、推論過程そのものに与える効果（推論効果）である。これまで多くの認知科学的研究によって、図形表現が人間のさまざまな問題解決の場面で効果的であることが明らかにされてきた。この分野の古典的研究としてよく知られる Larkin and Simon (1987)では、図形表現は、とりわけ情報の探索や認識の場面において、主として空間的位置表示を利用することができるため、言語表現よりも効果的であることが指摘されている。この見解は、一種の解釈効果として捉えることができ、認知心理学的実験の文脈においても広く支持されている。他方で、Larkin and Simon (1987)は、情報の探索や認識の場面とは異なり、推論の場面では、図形表現の有効性は限定的なものにとどまると主張しており、これまでの実験研究において、この図形の推論効果に関心が集まることは稀であった。そこで、本研究では、主にこちらの推論効果に焦点をあてることにする。

(2) 図形推論が効果的であるために必要とされる条件とは何なのだろうか。これは問(1)において想定された図形の有効性についての説明理論として位置づけられる。特に、三段論法推論において、オイラー図が解釈過程における効果だけでなく、推論過程における効果を持つことを理論的に説明する。これまで、自然言語意味論の研究（関連する心理学研究も含む）において、集合間の関係に基づいた量化文の自然な解釈と推論系が提案されてきた。その中でも、包含関係と排他関係に基づく単純な推論系を Mineshima, Okada, and Takemura (2012) は導入した。一方これと同様の関係情報によって、オイラー図を用いた推論を特徴づけることが可能である。しかし、量化文においては、この関係構造は遮蔽状態にあり、自然言語の量化文が包含・排他関係の表現であることは気づきにくく、それゆえ、前提の情報を統合するという推論過程に移行できない。また、三段論法推論は、個体間の関係を扱う関係推論ではなく、集合間の関係を扱う関係推論である点で複雑であると考えられる。一方で、オイラー図を利用することによって、量化文における遮蔽状態にある包含関係と排他関係が可視化され、抽象的な集合演算を具体的な図形操作によって実現可能である。以上の点により、オイラー図を用いることで、通常の言語的三段論法推論課題の遂行における困難さが回避されると考えられる。

(3) 推論に関する有効性は実際の演繹課題を解く際に現れるのか。現れるとすれば、こういった種の図形が効果的であるのか。(2)における分析を基にすると、言語的三段論法推論と共通の性質を持つ図形であるオイラー図は、直接的な共通性を持たないヴェン図よりも効果的であることが予想されるが、それは実際の人間のパフォーマンスにおい

て確かめることができるのか。この目的のため、図形の有効性に関する評価実験として、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)、それに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た。ただし、図形に対する事前知識の影響を避けるため、オイラー図とヴェン図の基本的な表現系の意味を教え(図の操作方法については教えない)、理解できた者のみを分析対象とした。したがって、ここでは解釈効果はあまり問題にされず、推論効果が中心的な問題となる。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、つまり推論効果の存在することが示唆された。また本研究は、オイラー図を一次元上に展開した図形(線図)を使用した実験においても、同様の効果を確認した。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強く示唆された。

(4) 図形推論に関わる脳内機構はどのようなものだろうか。推論過程におけるオイラー図の有効性を脳活動を指標として検討することを試みた。これにより、問(3)の行動実験に関わる検証仮説を、さらに頑健なものとするのが期待される。また、論理推論に関する機能的 MRI などの脳画像装置を用いた研究はこれまでも多く行われてきたが (Goel, 2007)、図形推論に関する脳画像装置を用いた研究は、ほとんど行われてこなかった。本研究では、(3)の実験状況とほぼ同じ状況において機能的 MRI を用いた実験を行い、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明らかにした。この脳部位は、複数のサブ課題を統合することで成立するような複合的課題処理に関わるとされ (Badre & D'Esposito, 2009)、特に Monti et al. (2007) では、演繹推論の負荷(複雑推論と単純推論における脳活動の差分)に特異的な賦活であるとの報告もある。このことから、ここでの左前頭極での賦活変化は、オイラー図の推論過程における負荷軽減を示すものと考えられた。

(5) オイラー図が三段論法推論において有効性を発揮するためには、その図形操作は教わらなくても実行可能な程に直観的でなければならない。(3)における実験では、成人に対して図形操作に関連する教示を与えないという方法をとったが、ここではより直接的に、オイラー図やヴェン図に関する事前知識をほとんど持っていない子どもを対象として検討を行った。オイラー図を構成する円を具体的なカップのようなものとして見れ

ば、それを使って包含関係に関する推移的推論を行うことは、幼児でも可能な自然な操作であることが先行研究により示唆される (Greenfield et al., 1972)。しかし、そのような図形操作を言語的推論の文脈において、三段論法推論とオイラー図操作を結びつけて捉えることができるかは先行研究において明らかにされてこなかった。そこで本研究は、小学校児童を対象とした実験を(3)とほぼ同様の状況で実施し、限定された形式での三段論法についてではあるが、オイラー図の推論効果に関する成人と同様の傾向を確認した。

(6) 文の解釈過程における図形の効果を、図形と量化文の双方から得られる情報のマッチング過程の複雑さの観点から捉えることは可能だろうか。ここでは、図形の推論効果を検討するこれまでの枠組みを、さらに解釈効果に対して適用する。ヴェン図は、オイラー図とは異なる意味規則・統語規則を持つ表現系である。端的には、全ての論理的可能性を表すように領域を設定し、その領域に情報を加えることによって、集合間の意味論的情報を表す。これに関して、本研究は、ヴェン図と量化文の情報マッチングでは、オイラー図と量化文の情報マッチングよりも、複雑な変換・処理過程が必要とされるということを理論的分析と認知心理学的実験によって確かめた。