

(続紙 1)

京都大学	博士(情報学)	氏名	小島 健介
論文題目	Semantical study of intuitionistic modal logics (直観主義様相論理の意味論的研究)		
(論文内容の要旨)			
本論文は,主に意味論的な手法を用いて直観主義様相論理の性質を研究するものである.直観主義様相論理は,型付きラムダ計算と論理体系のCurry-Howard 対応などの文脈で計算機科学にも現れるが,そのような文脈に現れる直観主義様相論理の性質は詳細には研究されていない.本論文は,このような背景を念頭に置きつつ,直観主義様相論理を主に意味論的な観点から分析し,その背後にある意味を明らかにしている. 第一章は序章であり,直観主義様相論理が現れる既存の研究について述べ,続いて本論文の目標と概要を示している. 第二章では,本論文で使われる基本的な概念を導入し,その性質を証明している.最初に既存研究でどのようなアプローチが考察されているかを述べ,次に本論文において考察の対象となる Kripke 意味論と,そのいくつかの亜種を定義している.続いて,それらの意味論に対して完全な Hilbert 流の証明体系を与え,完全性の証明を与えている. 第三章では,様相論理の一種である線形時間時相論理 (LTL) の直観主義版について論じている.ここで考察の対象となっている体系は,next 演算子のみをもつ LTL である.本章で扱われる論理は擬似引用機構をもつ型付きラムダ計算に由来するものであり,擬似引用機構のための型システムに対応する論理として自然な振る舞いをするように設計されている.本章に述べられている主な結果は,自然演繹と Kripke 意味論による定式化と完全性の証明,およびシーケント計算による定式化とカット除去定理の証明である.通常の LTL の意味論は遷移関係が写像であるようなモデルを考えているが,本論文ではより広いクラスのモデルを考察している.これは,遷移関係を写像に限ったモデルでは型理論的に自然でない公理が恒真になってしまうためである. 第四章では,様相論理の公理と Kripke frame の性質との対応関係を論じている.古典様相論理においては,多くの公理が推移性や反射性など Kripkeframe の遷移関係の性質と対応することが知られている.本章では,古典様相論理で成立している対応が直観主義様相論理においても成立するための十分条件を与えている.具体的には,ある公理のクラスで構文的特徴付けをもつものを考え,そのクラスに含まれる公理については古典論理でも直観主義論理でも同じ対応関係が成立することを証明している. 第五章では,直観主義様相論理に対する neighborhood 意味論について論じている. Neighborhood 意味論は,Kripke 意味論の一般化として古典論理の枠組の中で考えられたものであるが,同様の手法を直観主義論理の場合に適用することで,従来考えられてきた Kripke 意味論に比べて自然な意味論を与えることができる.本章では neighborhood 意味論の定義とそれに対する完全な公理系を与えている.また,定義した neighborhood 意味論が既存の Kripke 意味論とほぼ等価であることを,モデルの間の相互変換を与えることにより示している.さらに,それらの結果をもとに直観主義様相論理と非正規古典様相論理の間の関係についても新しい結果を得ている.			

第六章では,前章までの結果をもとに,直観主義様相論理の表す意味を議論している.直観主義様相論理に対して従来考えられてきた Kripke 意味論は,その意味するところを自然に理解できるものではなかった.これに対しこの章では,より明快な意味付けを与えるために,observer という概念を導入し,様相論理における真理性の概念を二種類に分けることを提案している.また,この区別をもとに前章までの結果がどのように解釈できるかを論じて,古典的な Kripke 意味論に基づく様相論理と本論文で扱ってきた直観主義様相論理との違いを明らかにしている.

注)論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年プログラミング言語の理論において、型に様々な付加情報を与えるための手段として、Curry-Howard 対応の様相論理への拡張が複数提案されている。このような文脈で現れる様相論理は通常、直観主義様相論理と呼ばれる論理になるが、本論文では、そのような直観主義様相論理の論理学的な観点からの理解を深めることを目指し、主に意味論的な手法を用いてその性質を論じている。得られた主な成果は、次の通りである。

(1) ある型付き計算体系に対応する直観主義線形時間時相論理に対し、証明体系と意味論を与え、完全性やカット除去定理の証明を与えた。この過程で発生する技術的な困難を観察することにより、古典的な線形時間時相論理と比べると、単に直観主義に基づく論理であるという違いだけでなく、様相の意味付けにも重要な違いがあることが指摘されている。

(2) 古典様相論理において知られている公理と frame の性質との間の対応関係が、直観主義様相論理においても成立するための十分条件を与えた。ある公理のクラスで構文的特徴付けをもつものを考え、そのクラスに含まれる公理については古典論理でも直観主義論理でも同じ対応関係が成立することを証明している。既存の研究においては、個々の具体的な公理については言及が見られるが、一般的な議論はほとんどされておらず、この点で斬新な結果であるといえる。

(3) 直観主義様相論理の neighborhood 意味論を与え、これを用いて既存の直観主義様相論理の新たな意味付けを行った。また従来は明らかでなかった古典様相論理との関係付けを明確にした。このようなアプローチの可能性はこれまでほとんど検討されなかったものであり、このような形で定式化が可能であることの発見は、従来知られていなかった直観主義様相論理の解釈を可能にするものである。

本論文は、直観主義様相論理に対して、既存の他の研究には見られない詳細な分析を行い、新たな見方を提示し、直観主義様相論理の理解に貢献するものである。また、既存の研究を吸収する形で新たな意味論を与えるなど数理論理学的に興味深い内容を含んでおり、この点でも価値のあるものと考えられる。

よって本論文は、博士(情報学)の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成24年2月17日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

注)論文審査の結果の要旨の結句には、学位論文の審査についての認定を明記すること。
更に、試問の結果の要旨(例えば「平成 年 月 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。」)を付け加えること。

Webでの即日公開を希望しない場合は、以下に公開可能とする日付を記入すること。
要旨公開可能日: 年 月 日以降