

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	眞田 嵩大
論文題目	Algebraic effects and handlers for arrows (アローに対する代数的エフェクトとハンドラ)		
(論文内容の要旨)			
<p>プログラミング言語において、バグのないプログラムを作成することやプログラムの正しさの検証を行うことは、応用上最も重要な課題である。同時に、複雑な制御構造や計算効果を伴うプログラムについてその正しさを保証することは、理論的に非常に困難な問題であり、実用的な使いやすさ・表現力と理論的な堅牢さ・安全性を両立させたプログラミング言語を設計することは、プログラミング言語の研究の一大目標である。本研究では、その大目標に向けて、特に計算効果を伴う関数型プログラミング言語について新しい言語設計とその数学的な基礎を提示するものである。すなわち、プログラムの計算効果を扱う枠組みであるアローと、計算効果を柔軟に用いるプログラムの記述を可能にする代数的エフェクト及びエフェクトハンドラの両方を兼ね備えたプログラミング言語、及びその数学的基盤である操作的意味論及び表示の意味論を与え、それらの整合性を証明している。</p> <p>1980年代末に、Moggiは、圏論の概念であるモナド (monads) を用いて、計算効果を伴うプログラムの表示の意味論を統一的に展開できることを示した。これに触発され、1990年代には、Haskellを中心とする関数型プログラミング言語において、モナドを用いて計算効果を表現するプログラミング手法が実装され、広く用いられるようになった。</p> <p>その後、2000年代に、モナドを用いた表示の意味論とプログラミング言語設計のそれぞれにおいて、異なる方向への新しい発展がなされた。ひとつはPlotkinとPowerによる代数的エフェクトの理論である。圏論におけるモナドは群や環などの代数構造を一般的に捉えるものであり、モナドに対応して代数の概念が定まる。そのことから、Plotkinらは、計算効果を代数として捉えることを提案した。さらに、PlotkinとPretnarは、代数的エフェクトを処理するエフェクトハンドラと呼ばれる機能を提案した。これは、自由代数から他の代数への準同型写像に相当するものである。一方、Hughesは、関数型プログラミング言語におけるモナドを一般化したアロー (arrows) と呼ばれる仕組みを提案した。モナドが圏と関手の2圏におけるモナドとして特徴づけられるのに対し、アローについては、関係手 (profunctors) の双圏におけるモナド (プロモナド) として特徴づけられることが、後のJacobs、Heunen、蓮尾や浅田らの研究で示されている。</p> <p>本研究では、これらのモナドから始まったふたつの発展の融合を、確固たる理論的基盤のうえで成し遂げた。特に、アローに対応するプロモナドの代数と代数間の準同型写像を明らかにし、それに基づいてアローのためのエフェクトハンドラを設計した。そして、アローに対するエフェクトハンドラを備えたプログラミング言語を、Lindleyらのアロー計算の拡張として設計し、その操作的意味論と表示の意味論を与えた。さらに、意味論の健全性と妥当性を証明し、これらの意味論が整合的であることを示した。</p> <p>本研究のこれらの成果により、モナドから生まれたふたつの発展が、ひとつのプログラミング言語とその意味論として、はじめて具体的な実体を伴って融合されたのである。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、プログラミング言語の理論及び関連する圏論における新しい知見と技術的達成をもたらした、重要な貢献である。

第一に、本論文によって、アローに対応するプロモナドの代数が特定された。先行研究でアローが関係手の双圏のモナド（プロモナド）として捉えられることは示されていたが、その代数がどのようなものであるかはこれまで議論されていなかった。本論文では2圏論の議論からプロモナドの代数を導いた。この代数及びその準同型写像を用いて、アローのための代数的エフェクトとエフェクトハンドラの圏論的な表示的意味論を与えることがはじめて可能となった。

第二に、アローに対するエフェクトハンドラを備えたプログラミング言語を導入し、同時にその操作的意味論と表示的意味論を定めた。類似の言語を設計する試みは先行研究でもなされていたが、それは構文論的な思い付きにとどまるものであり、圏論的考察や表示的意味論を欠き、それゆえ設計の正しさにも疑問が持たれる、不完全なものであった。それに対し、本研究では、圏論的な基礎付けをもとに、正確な構文論と操作的意味論、および表示的意味論を与え、その正当性を保証する健全性と妥当性の証明を行った。結果として、先行研究に含まれていた不備が明らかになった。表示的意味論の構築にあたってはプロモナドの強度の扱いが問題になるが、これを適切にパラメータ化した解釈を行うことで解決した。これも先行研究にはなかった新しい知見である。

さらに、論文中では、アローのエフェクトハンドラで表現できるプログラムについて実践的な例と考察を与えている。特に、条件分岐の扱いが従来の代数的エフェクトの場合と異なることを指摘し、その特徴が生かされる応用領域についても考察している。

このように、眞田氏の成果は、プログラミング言語の理論及び関連分野における基礎的な貢献であり、今後、さらなる理論的発展と実践的な応用をもたらすものであると考えられる。しかも、眞田氏の成果は、圏論における高度に精密な議論から、プログラミング言語のデザインと意味論の構築、その正しさの証明、さらに実践的な応用可能性への考察までを含む、包括的かつ極めて高い水準にあるものである。なお、本研究に関連する発表について、眞田氏は、日本ソフトウェア科学会大会の優秀発表賞及び学生奨励賞を受けるなど、外部からも評価を受けていることも併せて記しておく。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年1月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。