

# 学 位 審 査 報 告 書

|                                                                                                     |                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| (ふりがな)<br>氏 名                                                                                       | あさだ かずゆき<br>浅 田 和 之                      |
| 学位 (専攻分野)                                                                                           | 博 士 ( 理 学 )                              |
| 学 位 記 番 号                                                                                           | 理 博 第 号                                  |
| 学位授与の日付                                                                                             | 平成 年 月 日                                 |
| 学位授与の要件                                                                                             | 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当                  |
| 研 究 科 ・ 専 攻                                                                                         | 理学研究科 数学・数理解析 専攻                         |
| (学位論文題目)<br><br>Extensional Universal Types for Call-by-Value<br><br>(外延的全称型を持つ値呼び多相型 $\lambda$ 計算) |                                          |
| 論 文 調 査 委 員                                                                                         | (主査) 長谷川 真人 教授<br>高橋 陽一郎 教授<br>照井 一成 准教授 |

理 学 研 究 科

(論文内容の要旨)

ひとつのプログラムが様々なデータ型の要素に適用可能であるという性質をプログラムの多相性と呼び、多相性を表す型を多相型と呼ぶ。多相型を持つ型システムは、プログラムの汎用性を著しく向上させ、特に関数型プログラミング言語において重要な役割を果たすものである。

多相型型システムの理論的基盤は、多相型ラムダ計算とそのモデルの理論として、40年近くに渡って様々な側面から深く研究されてきた。特に、関係パラメトリシティとよばれる、多相型プログラムの満たす一様性原理は、多相型プログラムの性質について推論するための強力かつ数学的に洗練された道具として、プログラム変換などの応用面、またプログラム意味論などの理論面の双方で盛んに調べられてきた。

しかしながら、従来の多相型ラムダ計算の理論は、主として、コンピュータの状態を変更するような副作用を伴わない、いわゆる純関数型プログラムについてのみ有効なものであり、MLをはじめとする、副作用を許す実用的なプログラミング言語においてはそのままでは用いることができないことも、次第に認識されてきた。多相性と副作用との間には高度な相互作用が生じることが問題を複雑にする最大の理由である。また、そのような実用的な言語の多くが、値呼びとよばれる、通常のラムダ計算とは整合的でない評価戦略を用いていることも問題をさらに困難にしている。最近では、そのような副作用を伴う多相型プログラムについて成立する原理、およびそのモデルの構成が、プログラミング言語の理論における重要な課題のひとつとなってきている。本論文は、この問題への基礎的な貢献である。

本研究では、多相型プログラムの型適用に関する外延性に焦点をあてる。ここでの外延性は、多相型プログラムのふるまいは、個々のデータ型におけるプログラムのふるまいで完全に規定されるという性質を指す。外延性は数学的にはごく自然なものであり、パラメトリシティ原理においても不可欠なものであるが、副作用を伴うプログラムについては、その成立は全く明らかではなく、成立しない場合もあることがわかっている。けれども、直観的には外延性に影響を与えないと思われる副作用も多く存在する。

本研究では、型適用に関する外延性を満たす値呼び多相型ラムダ計算と、その圏論的なモデルのクラスを与え、それらのモデルが計算系の等式理論に対して健全かつ完全であることを示した。そのうえで、様々な副作用を許す具体的なモデルを実際に構成した。この結果により、型適用に関する外延性を満たす非自明な値呼び多相型プログラミング言語が、少なくとも理論的には構成できることが明らかになった。

## (論文審査の結果の要旨)

本研究は、プログラミング言語の理論における基礎的な貢献である。プログラムの間に成立する等式理論は、プログラムの振る舞いについて正しく推論し、また最適化するための大前提となるものであるが、理論的な計算系における等式理論に関する研究成果と、実際のプログラミング言語における応用とは、大きな隔たりがある。本研究は、基礎理論の立場から、そのギャップを埋めることを目指した、大変意欲的な仕事である。

プログラムを数学的な関数とみなせる、いわゆる純関数型プログラミング言語においては、ラムダ計算の等式理論およびそのモデルの理論をほぼそのまま用いることができる。しかし、実際のプログラミング言語の多くでは、コンピュータの状態を変化させる副作用を伴う計算が可能であり、そのようなプログラムのための等式理論は純関数型の場合と比べ、はるかに複雑である。また、MLをはじめとする多相型プログラミング言語では、副作用と多相性の非自明な干渉が、健全な等式理論とモデルを構築する上で大きな障害となっている。

本研究は、そのような複雑な状況にあっても、外延性という、純粋な関数の計算の場合と同様の性質が、型適用に関して成り立つ可能性を追求したものである。すなわち、型適用に関する外延性を満たす値呼び多相型ラムダ計算の等式理論およびモデルの理論を確立するとともに、適当な状況では、実は相当多くの種類の副作用について外延性が成立しうることを、具体的なモデルを構成することにより示した。

これらの成果とその証明においては、型理論、プログラム意味論および圏論の高度な成果が縦横に活用されている。

副作用を伴う多相型プログラミング言語の等式理論とモデルの理論は、最近のプログラミング言語の理論における重要な話題であり、現在活発に研究されているが、そのなかで、本研究の成果は、副作用と多相性の干渉が実は多くの場合には外延性を許すほどに整合的であるという、常識を覆す知見を与えるものである。外延性を用いれば、プログラムに関する等式理論は大幅に簡潔なものにすることが出来る。特に、パラメトリシティ原理は外延性を仮定することにより非常に扱いやすくなるので、パラメトリシティ原理を用いたプログラム変換において有利であると考えられる。現時点ではあくまでも理論的な枠組みでの仕事であるが、本研究によって得られた知見が、今後のプログラミング言語の設計と分析に広範な影響を与えるようなかたちで発展することが期待される。

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、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。