

氏 名	かく たに よし ひこ 角 谷 良 彦
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2703 号
学位授与の日付	平 成 15 年 7 月 23 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	Duality between Call-by-Name Recursion and Call-by-Value Iteration (名前呼び再帰プログラムと値呼び繰り返しプログラムの間の双対性)

論文調査委員 (主 査) 助教授 長谷川 真人 教 授 中 島 玲 二 教 授 齋 藤 恭 司

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、計算の実行順序の対称性から導かれる、再帰計算と繰り返し計算の間の対応関係を、それらの圏論的なモデルの上の双対性として正確に定式化・抽象化し、また、その応用として、再帰プログラムと繰り返しプログラムの間の、プログラムの意味を保つような変換を与えたものである。

本研究の背景には、「名前呼び」と呼ばれる、合成された計算を外側から処理していく計算方法と、「値呼び」と呼ばれる、計算を内側から処理していく、対称的な（また、それぞれが多くのプログラミング言語において実際に採用されている）計算方法の比較に関する研究がある。1980年代末に、Filinski は、これらの対称的な計算方法を、圏論的な双対性として捉えることを提唱した。これを、1990年代末に、Selinger が、「コンティヌエーション」と呼ばれる、ジャンプなどを拡張した一種の制御構造の存在のもとで、コントロール圏と呼ばれる構造を導入して正確に定式化した。コントロール圏は、「名前呼び $\lambda\mu$ 計算」と呼ばれる、コンティヌエーションを持つ名前呼び計算系のモデルを与える。一方、「値呼び $\lambda\mu$ 計算」と呼ばれる、値呼び計算系のモデルは、コントロール圏の双対圏（余コントロール圏）として与えられる。この双対性から、名前呼び $\lambda\mu$ 計算と値呼び $\lambda\mu$ 計算の間の、計算の意味を保存するような変換が得られる。

本論文は、以上のような Filinski と Selinger の結果を、計算のもっとも重要な制御構造である「再帰計算」および「繰り返し計算」を含むように拡張するものである。再帰計算は自分自身を呼び出すような制御構造、また繰り返し計算は（適当な条件のもとで）同じ計算を繰り返す制御構造であり、それぞれに関する研究は古くからなされてきたが、これらの間に成り立つ正確な関連の分析は、これまで十分になされていなかった。

本研究の主要な貢献は、名前呼び計算における再帰計算と、値呼び繰り返し計算との間の関係が、上に述べた Filinski と Selinger による双対性の拡張として明快に理解できることを指摘し、またその正確な定式化を与えたことにある。

技術的には、本論文では、名前呼び $\lambda\mu$ 計算に再帰演算子を、また値呼び $\lambda\mu$ 計算に繰り返し演算子を追加したものを考察し、それぞれについて、不動点演算子をもつようなコントロール圏およびその双対圏が健全かつ完全なモデルのクラスを与えることを示した。

また、さらに、この双対性を、 $\lambda\mu$ 計算で記述されたプログラムから構成される構文的なモデル（項モデル）に適用することにより、名前呼び再帰プログラムと値呼び繰り返しプログラムとの間の、プログラムの意味を考慮にいれた上での双射的な変換を得た。これらは、継続渡し方式の変換によるプログラムの実行解釈の結果を変えないような変換となっていることが、モデルに関する一般的な考察から示された。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

申請者の主論文の成果は、以下の点において、計算の理論およびプログラミング言語の理論における顕著な貢献と考えられる。

まず、これまで、計算のモデルの理論においては、個々の制御構造を切り離して研究されてきがちであったのを、本研究では、再帰、繰り返し、また計算順序の制御といった重要な制御構造の間の相互関係について、数学的にきわめて見通しのよい、双対性というかたちで説明することに成功したことにより、今後の理論の発展に新しい展望を与えていること。

次に、それを裏付けるための、圏論的なモデルの理論を、最近の当分野の成果を踏まえつつ精密に展開したこと。実際、コントロール圏を枠組みとして用いた研究としては、現在までのところ本研究は抜きん出た完成度に達しているといつてよい。

最後に、それらのモデルに関する結果を用いて、新しいプログラム変換方法を導き、今後の応用の可能性を示していることも高く評価できる。

主論文の成果のみならず、参考論文「Axioms for Recursion in Call-by-Value」においても、制御構造の組み合わせから生じる豊かな計算現象とそのモデルの理論が明快に扱われており、それらを主論文の成果とあわせて得られる帰結、すなわち名前呼び計算における再帰と値呼び計算における再帰との（値呼び計算における繰り返し計算を仲介させた）対応関係も非常に興味深いものである。

また、より最近の参考論文「Parameterizations and Fixed-Point Operators on Control Categories」では、一様性と呼ばれる自然な条件を満たすモデルについては、主論文においてはやや煩雑であった、複数のパラメータを扱うための定式化が、大幅に簡略化できることを示している。これは、地味ではあるが、極めて精度の高い技術と考察を必要とする成果である。

なお、申請者は、主論文および参考論文に関連して、国内外の学会の賞を受賞しており、これらの一連の仕事の完成度の高さと重要性は、既に国際的に高く評価されている。

申請者は大学院在学5年未満であり、特例を適用するに十分であるかどうかを慎重に審査した結果、以上のような理由により、本論文は、博士（理学）の学位論文として十分なものと考え、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。