

論文審査の結果の要旨

氏名 戸澤一成

限定継続とは、断片化された継続をキャプチャするためのプログラミング言語実装上の機構である。通常の継続が、ある時点での状態全体のスナップショットを取っているのに対し、限定継続では、状態の一部のみのスナップショットを取れるようになっている。それを一級オブジェクトとして提供することで、プログラマがフローをより精密に制御することが可能になる。

Ariola, Herbelin, Sabry (2009)による $\lambda\mu\hat{\text{tp}}$ 計算は、限定継続を組み込んだ計算体系である。ベースとなる $\lambda\mu$ 計算で通常の継続を対象としていたのに対し、限定継続を扱えるよう機能拡張されている。評価戦略は値呼びである。

$\lambda\mu\hat{\text{tp}}$ 計算の意味論は、CPS2 変換と呼ばれる継続渡し変換の一種で与えられる。体系のもつ動的な性質と、評価戦略を同時に規定するための変換となつて

いる。

CPS2 変換が規定している二つの機能，すなわち，評価戦略と，限定継続の動的性質とを分離して，二つの変換に分解することを Downen, Ariola (2014) が提案していた。二つの機能を別々に規定することで，それぞれの性質を分離して議論できるようになるという利点がある。しかしその提案では，二つの変換をつなぐ体系の形式化がなされていなかったため，分解が正当であることを数学的に検証する手段がなかった。

これとは別の研究動向として，マクロに代表されるような動的束縛を理論的に形式化する試みがなされてきた。メタラムダ計算は，そのような試みのもとに開発された体系である。ベースとなるラムダ計算の上に，動的な変数束縛の機構をもつ，メタ項を導入することで構成される。最近，Tobisawa (2015) により，クロスレベル計算を許すようなメタラムダ計算の体系が開発された。通常の項とメタ項の間で，一定の順序を強要されることなく，好きな順番で計算できるように設計されているのが，クロスレベル計算である。

本論文の主要なアイデアは，中間体系として，クロスレベル計算をもつメタラムダ計算を用いるというものである。上に述べたように，Downen, Ariola に

よって提示された二つの変換は、二つをつなぐ体系が形式化されていなかったわけだが、そのような体系として、Tobisawa の体系をベースに一部改変を加えたものを用いるという提案である。これにより形式化が完全になされ、二つの変換のもつ数学的性質を議論できるようになった。その上で実際に、次にあげるような重要な結果を得ている。

博士論文の第一の結果は、変換の健全性・完全性である。CPS2 変換を二つに分解し、健全かつ完全な変換 C と変換 D の合成として表した。第一の変換 C についての結果は、項の間の等価性を保ったまま、 $\lambda\mu\hat{\text{tp}}$ 計算からメタラムダ計算へ、埋め込めることを示している。通常の継続と限定継続との差分は、ラムダ計算とメタラムダ計算の差分に埋め込めるということもできよう。この研究により初めて、分解の数学的な正当性を検証する手段が与えられた。

第二の結果は、型付けの保存である。 $\lambda\mu\hat{\text{tp}}$ 計算での型付けが、変換後にメタラムダ計算での型付けになっていることを示した。そのために、メタラムダ計算に対して、新たな contextual modal type 系の型システムを設計した。 $\lambda\mu\hat{\text{tp}}$ 計算の型システムは、直感的な理解の難しい複雑なものであり、それに対して様相論理に基づく解釈を与えたことは明らかに新規性があり、高く評価される

べきである。

全く独立した研究として行われていた、限定継続と、メタラムダ計算の間に、等価性を見出したことは非常に価値が高い。ある対象に別な見方を与えたということであり、今後の発展が広く期待できる。例えば、今回の結果は、限定継続をメタラムダ計算に埋め込んだということであり、後者のメタラムダ計算のうちで使われていない機構はまだたくさんある。そのような機構が、限定継続の側でどう振る舞うのかというのは、重要な発展課題であろう。本論文でも示唆されているように、multiple prompt への拡張は、考えられる一方向である。

以上述べたように、限定継続とメタラムダ計算の等価性を示し、新たな数学的基礎を築いたものとして、本論文は高く評価できる。よって、論文提出者戸澤一成は、博士（数理科学）の学位を受けるにふさわしい十分な資格があると認める。