

氏名(本籍)	田中麻峰(静岡県)				
学位の種類	博士(工学)				
学位記番号	博乙第2667号				
学位授与年月日	平成25年11月30日				
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当				
審査研究科	システム情報工学研究科				
学位論文題目	The Semantics of Delimited Control in Sequential and Parallel Languages (逐次及び並列言語における限定継続機構の意味論)				
主査	筑波大学	教授	博士(工学)	亀山 幸義	
副査	筑波大学	教授	Ph. D.	田中 二郎	
副査	筑波大学	教授	博士(理学)	高橋 大介	
副査	筑波大学	准教授	博士(工学)	前田 敦司	
副査	筑波大学	准教授	博士(理学)	南出 靖彦	

## 論文の要旨

プログラム言語における抽象化の機構は、大規模・複雑化するプログラムの保守性・信頼性を高める鍵である。本論文は、特に関数型プログラム言語においてコントロール抽象を実現する最有力な手段として知られている「限定継続機構」に焦点を当て、意味論に基づく基礎理論の展開、言語設計、および、実装について研究を行ったものである。

本論文では、まず、限定継続に関する従来の研究がもつばら値呼び計算を扱っていたのに対して、名前呼び計算の枠組みで限定継続機構の振る舞いを厳密に定式化した。また、この枠組みで記述されたプログラムの検証のための簡潔で使いやすい等式系を提案した。さらに、限定継続機構の意味を厳密に与えるCPS意味論に対して、等式系が健全かつ完全であることを示した。これにより、CPS変換を行うことなく、プログラムの同値変形を行うことができるようになり、ソースコードレベルの最適化や検証などが可能となった。

次に、多数の限定継続機構を階層状に組み合わせた機構に対して、理論的解析を行った。従来の研究では、このような階層的限定継続機構は、非常に複雑な意味論を持つと考えられがちであったが、本論文では、think 変換と呼ばれる変換を使うことにより、限定継続を持つ名前呼び計算の体系が、既存の値呼び計算の体系に帰着できるという洞察のもと、名前呼び計算における階層的限定継続機構の定式化を行った。また、この定式化により、検証のための等式系が得られることを示した。これは、複雑な構成や煩雑な証明を行うことなく検証体系としての性質を導けることを示したものである。

さらに、マルチコアを用いた並列計算の必要性が高まる中、並列計算と限定継続機構を組み合わせるための研究を行った。これら2つを単純に組み合わせると、実行のたびに計算結果が異なる非決定的計算となるが、本論文では、逐次的プログラムの実行を高速化するという目的意識のもとで新しいプログラム言語を提案した。この言語は、状態などの副作用を持つ関数型プログラム言語 Scheme に

基づき、future に基づく手動並列化と限定継続機構を組み合わせたものであり、future の透過性、すなわち、並列計算の結果が逐次計算の結果と一致することが数学的に厳密に証明されている点に特徴がある。本論文の証明手法は、future と call/cc を持つ言語に対する透過性を示した先行研究より、見通しが極めて良く、適用できる体系の範囲が広いものである。

最後に、提案言語の有用性を示すため、処理系を実装した。実装にあたっては、提案言語から並列関数型言語 Erlang へのプログラム変換を行い、最終的に Erlang の機能を利用することで、並列実行を行うコードを生成した。この処理系により、N クイーン問題など、いくつかのテストプログラムが、マルチコアのもとで並列に実行され、逐次実行に比べて一定の高速化が達成できたことを確認した。

## 審 査 の 要 旨

### 【批評】

関数型プログラム言語における限定継続機構の研究は、最近 10 年程度に集中的になされてきたが、これまでの研究は値呼び方式に対するものがほとんどであった。本論文は、名前呼び方式における限定継続機構および階層的限定継続機構に対して、公理的意味論を与え、従来からある CPS 意味論と等価であることを厳密に証明した。また、並列計算の機構と限定継続機構を持つプログラム言語を新しく設計・提案し、この言語に対する操作的意味論が決定的であることを数学的に厳密に証明した。さらに、この言語を並列処理言語に変換する形で実装し、一定の並列計算効果があることを実験的に示した。本論文の理論的成果は、コントロール抽象に関する基礎研究において世界的に未着手の課題に挑戦し、成果を得たという点で大いに評価できる。また、提案した言語については、実験で使用したプログラムが比較的小規模に留まったため、実用性はまだ十分に実証されていないが、並列計算における限定継続という新規性の高い課題に挑戦し、今後の発展につながる言語を提案したという点で評価できる。

### 【学力の確認】

平成 25 年 9 月 30 日、システム情報工学研究科において論文審査委員全員出席のもと、著者の論文について説明を求め関連事項について質疑応答を行った。その結果、国立大学法人筑波大学学位規程第 2 条第 4 項の「大学院の行なう博士論文の審査に合格し、かつ、大学院の博士課程を修了した者と同等以上の学力を有すること」を論文審査委員全員によって確認し、合格と判定された。

### 【結論】

上記の論文審査ならびに学力の確認結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。