

**京都大学教育研究振興財団助成事業  
成 果 報 告 書**

平成21年12月24日

財団法人京都大学教育研究振興財団  
会 長 辻 井 昭 雄 様

所属部局・研究科 情報学研究科 知能情報学専攻

職 名・学 年 助 教

氏 名 中 澤 巧 爾

事 業 区 分	平成21年度・中期派遣助成		
研 究 課 題 名	シーケント計算の計算論的意味		
受 入 機 関	フランチールズ ポール・サバティエ大学 計算機科学研究所(IRIT) 研究員 ラルフ・マテス		
渡 航 期 間	平成21年9月21日 ~ 平成21年12月19日		
成 果 の 概 要	タイトルは「成果の概要 / 報告者名」として、A4版2000字程度・和文で作成し、添付して下さい。「成果の概要」以外に添付する資料 無 有( )		
会 計 報 告	交付を受けた助成金額	750,000円	
	使用した助成金額	750,000円	
	返納すべき助成金額	0円	
	助成金の使途内訳 (使用旅費の内容)	渡航費	300,000円
		滞在費	450,000円

## 成果の概要 / 中澤 巧爾

数理論理学における論理体系と、計算機科学における型システムの間には、Curry-Howard 同型と呼ばれる密接な対応関係があり、この対応により論理学と計算機科学は相互に影響を及ぼしながら発展している。このアプローチは主に自然演繹と呼ばれる特定の形式における証明体系について深く研究されており、他の形式化についてはまだ発展途上である。とくに、シーケント計算と呼ばれる形式における証明体系に対する Curry-Howard 同型については近年多くの研究がなされているが、まだ理論的に完成していると言える段階には達していない。自然演繹は直観主義論理の形式化に適した体系であり、計算と論理の対応関係も直観主義論理を中心に深く研究されて来た。一方、シーケント計算は、古典論理を形式化するのに適した体系であり、シーケント計算の計算論的な性質を明らかにする事は、Curry-Howard 同型の古典論理への拡張を議論する上でも重要である。

本研究では、シーケント計算の計算論的側面に関して研究を行なった。シーケント計算はその証明を簡単化するためのカット除去と呼ばれる手続を持つが、これが、計算プロセス、すなわち計算体系における簡約関係に対応する。本研究では、カット除去に対応する簡約関係に注目し、その基本的性質を証明した。とくに、Curien と Herbelin によって提案された体系の基本的性質を明らかにした。この体系に関しては、既に Espirito-Santo や Matthes らによって、直観主義論理に対応する部分体系の合流性や強正規化性といった基本的性質が調べられていたが、この議論を古典論理にまで拡張した。さらに、既存研究ではカット置換手続を一方向に限定したものが考えられていたが、本研究ではもう一方向のカット置換を採用することによって得られる体系について、その基本的性質を調べた。これらのカット置換の制限は、関数型プログラミング言語におけるプログラムの評価戦略を規定することに対応しており、Espirito-Santo らが考察した体系は「名前呼び戦略」、本研究で扱ったものは「値呼び戦略」にそれぞれ対応している。より具体的には以下の結果を得た。

1. 値呼び戦略に対応するカット除去を持つ直観主義シーケント計算に対応する計算体系を、Curien-Herbelin の体系の部分として定義し、その性質を明らかにした。定義した計算体系と、既に知られている値呼び戦略を持つ計算体系との間に、簡約対応 (reduction correspondence) と呼ばれる関係があることを証明した。これは、本研究で定義した体系が値呼び計算体系として必要充分であることを示すものであると考えられる。また、本体系から単純型付ラムダ計算への継続渡し形式 (continuation-passing-style, CPS) と呼ばれる変換を与え、この CPS 変換が狭義簡約関係を保存することを示した。これは、本体系が強正規化可能であることの新たな証明を

導く．また，体系の合流性も証明した．さらに，この CPS 変換が，モナド構造を持つラムダ計算への変換の一つの具体例として特徴付けられることを，2-level ラムダ計算の手法を用いて証明した．

2. 古典シーケント計算に対応する計算体系の継続渡し形式変換について，その性質を明らかにした．1 における CPS 変換に関する議論を，古典論理にまで（すなわち，Curien-Herbelin の体系まで）拡張し，「名前呼び」「値呼び」それぞれに対応する古典シーケント計算から単純型付きラムダ計算への CPS 変換を与え，これが狭義簡約関係を保存することを示した．これは，それぞれの体系が強正規化可能であることの新たな証明を導く．とくに値呼び体系に対する CPS 変換は，モナド構造を持つ古典自然演繹の体系であるモナディック・ラムダ・ミュー計算（monadic lambda-mu calculus）を中継することにより，モナディック変換の具体例として特徴付けられることを示した．この結果は 1 におけるモナディック変換による特徴付けを古典論理に拡張したものと思えるが，古典論理の場合 2-level ラムダ計算は不要であり，議論はより単純である．

名前呼び戦略に対応する古典シーケント計算の狭義簡約関係を保存する CPS 変換は，値呼びに対応するものよりも複雑な定義が必要である．この点について考察を深め，名前呼びの場合の CPS 変換でも，同様のモナディック変換による特徴付けを行なうことが今後の課題である．

本滞在研究の受け入れ先機関である計算機科学研究所（IRIT）では，Ralph Matthes 研究員をはじめとする多くの方々に御助力頂いた．京都大学大学院情報学研究科の佐藤雅彦教授をはじめとする研究室スタッフ，学生のみなさまには，三ヶ月に渡る滞在研究を快諾いただいた．以上のみなさまと，本研究を援助いただいた京都大学教育研究振興財団にこの場を借りて厚く御礼を申し上げたい．