

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(C)  
 研究期間： 2006 ～ 2009  
 課題番号： 18500011  
 研究課題名（和文） 関数型言語の解析・検証・効率的実行のための書換え系理論の研究  
 研究課題名（英文） Study on Rewriting Theory for Analysis, Verification and Efficient Execution of Functional Programs  
 研究代表者  
 酒井 正彦 (SAKAI MASAHIKO)  
 名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授  
 研究者番号： 50215597

## 研究成果の概要（和文）：

プログラムの正しさを保障することは、信頼性の高いシステム構築に重要である。本研究では、関数型と呼ばれる言語で書かれたプログラムの性質を調べる手法について理論的に研究を行なった。理論の基礎としてこれまでによく研究がなされてきた項書換え系と呼ばれるプログラムモデルを用いるため、実際のプログラム言語との差を埋めることが必要であり、実際にこれらの差のうちいくつかを埋めることができた。

## 研究成果の概要（英文）：

Guaranteeing the correctness of programs is indispensable for constructing high-reliable systems. This research theoretically progressed methods for investigating properties of programs written by so-called functional languages. Since we use a well-studied program model, called term rewriting systems, it is necessary to fill gaps between the model and real programming languages, some of which are succeeded.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,000,000	0	1,000,000
2007 年度	700,000	210,000	910,000
2008 年度	700,021	210,000	910,021
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	3,300,021	690,000	3,990,021

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：項書換え系、関数型言語、停止性、合流性、単純型書換え系、定理自動証明、潜在帰納法

## 1. 研究開始当初の背景

「項書換え系は関数型言語のモデルである」と一般に言われていたにもかかわらず、項書換え系における理論的結果を実際に関数型言語に適用しようとする意外に大き

なギャップが存在する。

## 2. 研究の目的

本研究の主目的は、項書換え系においてこれまでに得られている種々の理論的結果を

関数型言語に適用する上で妨げとなっているギャップを取り除くことにある。それらのギャップとしては、関数を扱う関数が扱える「高階性」、複数の規則が同一箇所で適用可能な場合に優先順序により使用できる規則が決定する「優先順序」、エラーを表す値とその捕捉・処理を行なう機能である「例外処理」、プログラムを構造化して記述する「モジュール機能」などが挙げられる。

### 3. 研究の方法

項書換え系での理論的研究としては、計算結果に到達するために必要な計算箇所を求める「計算戦略」、計算結果の一意性を保証する「合流性」、計算が必ず終了することを保証する条件である「停止性」、どんな計算もある一意な法則での計算順序に並べ替えられることを意味する「標準化定理」、ソフトウェア検証を目指す「定理自動証明」、プログラムの効率化を計る「プログラム変換」、プログラム上の方程式の解を求める「E単一化」などが挙げられる。

以上で述べたギャップと理論的成果の組み合わせについて、これまでに解明して来た結果を踏まえ、本研究では以下について理論の側面から重点的に研究する。

### 4. 研究成果

本研究による主な研究結果は以下のとおりである。

(1) 「高階」—「停止性」の組み合わせ：依存対法による停止性証明において、以下を行なった。

- ① 証明可能なクラスを拡張し、「関数安全渡し」と名付けた。
- ② 実効規則の概念を高階に拡張した。また、直積型は高階関数と共に用いられると停止性証明が難しくなるため、直積項へのラベル付け方を提案した。
- ③ 引数フィルタによる改良手法は、型つき高階書換え系に適用しようとする型を破壊してしまうという欠点を改良した。

(2) 「高階」—「定理自動証明」の組み合わせ：潜在帰納法により高階性を持つ単純型項書換え系の定理自動証明系を試作した。帰納的定理の自動証明を実用に近づけるためのリップリングと呼ばれる補題探索手法が高階の場合にでも利用できることを示し、それを実装・実験した。

(3) 「高階」—「正規化戦略」の組み合わせ：1階の項書換え系における正規化戦略を高階書換え系に拡張した。実際に、

- ① 与えられた項の書換えるべき箇所を発見する手続き

- ② この戦略が適用可能な書換え系かを判定する手続きを明らかにした。

(4) 「書換え戦略」—「停止性」の組み合わせ：

- ① 準構成子項書換え系のクラスでは、最内停止性と文脈依存停止性がいずれも決定可能であることを示した。
- ② 長さ2の文字列書換え系のクラスでは、停止性と合流性がいずれも決定不能な性質であることを示した。
- ③ 依存対の右辺が線形かつシャローである項書換え系に対して、停止性、最内停止性、文脈依存停止性がいずれも決定可能な性質であることを示した。
- ④ 文脈依存停止性が決定可能なクラス「依存対の右辺が線形かつシャローな項書換え系」のクラスの拡張できた。

(5) 「書換え戦略」—「到達可能性」の組み合わせ：

- ① 線形な左シャロー項書換え系のクラスでは、最内到達可能性と文脈依存到達可能性がいずれも決定可能であることを示した。
- ② 線形な右シャロー項書換え系のクラスでは、文脈依存かつ最内な書換えによる到達可能性が決定可能な性質であることを示した。

(6) 「例外処理」—「モデル化」「停止性」の組み合わせ：SMLに代表される関数型言語における例外処理を持つプログラムの停止性を示すための、文脈依存項書換え系への変換法を示し、非常に簡単な例題プログラムに対しては停止性証明が可能であることを示した。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

(1) Naoki Nishida, Masahiko Sakai, Completion after Program Inversion of Injective Functions, Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 査読有、237巻、2009、39-56.

(2) Yoshiharu Kojima, Masahiko Sakai, Naoki Nishida, Keiichirou Kusakari, Toshiki Sakabe, Context-sensitive Innermost Reachability is Decidable for Linear Right-shallow Term Rewriting Systems, IPSJ Transactions of Programming on Information, 査読有、2巻、2009、20-32.

(3) Keiichirou Kusakari, Yasuo Isogai, Masahiko Sakai, Frederic Blanqui, Static Dependency Pair Method based on Strong Computability for Higher-Order Rewrite Systems, IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有、E92-D 巻、2009、2007-2015.

(4) Keiichirou Kusakari, Masahiko Sakai, Static Dependency Pair Method for Simply-Typed Term Rewriting and Related Techniques、IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有、E92-D 巻、2009、235-247.

(5) Hideto Kasuya, Masahiko Sakai, Kiyoshi Agusa、Head-Needed Strategy of Higher-Order Rewrite Systems and Its Decidable Classes, IPSJ Transactions of Programming, 査読有、2 巻、2009、144-165.

(6) Hideto Kasuya, Masahiko Sakai, Kiyoshi Agusa, Recognizability of Redexes for Higher-Order Rewrite Systems, IPSJ Transactions of Programming, 査読有、2 巻、2009、166-175.

(7) Keiichirou Kusakari, Masahiko Sakai, Enhancing Dependency Pair Method by Strong Computability in Simply-Typed Term Rewriting、Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing, 査読有、18 巻、2007、407-431.

(8) 櫻井敬大、草刈圭一朗、酒井正彦、坂部俊樹、西田直樹、単純型項書き換え系上の依存対法における実効規則と直積型項へのラベル付け、電子情報通信学会論文誌、査読有、J90-D 巻、2007、978-989.

[学会発表] (計 27 件)

(1) Masahiko Sakai、Decidability of Termination for CS-TRSs with Right-Linear Right-Shallow DPs, The 33rd Workshop on Term Rewriting Systems, Tsu, Feb. 23 2010.

(2) 馬場正貴、酒井正彦、濱口毅、西田直樹、坂部俊樹、草刈圭一朗、例外処理を持つ関数型プログラムの停止性証明法、第 12 回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ PPL2010、ポスター・デモ発表、琴平市、2010 年 3 月 3 日.

(3) Jose Iborra, Naoki Nishida, German Vidal, Improving the Termination Analysis of Narrowing in Left-Linear Constructor Systems, 19th International Symposium on Logic-Based Program Synthesis and Transformation, 査読有、Coimbra, Sep. 10 2009.

(4) Yoshiharu Kojima, Masahiko Sakai, Naoki Nishida, Toshiki Sakabe, Keiichirou Kusakari、Context-Sensitive Innermost Reduction of Linear Right-Shallow Term

Rewriting Systems Effectively Preserves Regularity、夏の LA シンポジウム、東松島市、2009 年 7 月 23 日.

(5) 鈴木翔、草刈圭一朗、坂部俊樹、酒井正彦、西田直樹、高階書換え系における引数切り落とし方と実効規則、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、香川市、2009 年 12 月 17 日.

(6) 御宿義勝、酒井正彦、坂部俊樹、草刈圭一朗、西田直樹、右線形右シャローな項書換え系における文脈依存停止性の決定可能性について、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、香川市、2009 年 12 月 17 日.

(7) Masahiko Sakai、Decidability of termination for TRSs with right-shallow DPs, The 31st Workshop on Term Rewriting Systems, Yamanaka, Feb. 24 2009.

(8) Yoshiharu Kojima, Masahiko Sakai、Innermost Reachability and Context Sensitive Reachability Properties are Decidable for Linear Right-Shallow Term Rewriting Systems、19th International Conference on Rewriting Techniques and Applications, 査読有、Hagenberg, Jul 15 2008.

(9) 坂田翼、西田直樹、酒井正彦、草刈圭一朗、坂部俊樹、プレスブルガー文付き項書換え系における書換え帰納法について、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、宮崎市、2008 年 5 月 29 日.

(10) 西田直樹、坂田翼、酒井正彦、草刈圭一朗、坂部俊樹、制約付き項書換え系の定理自動証明における等式の方角付けのための簡約化順序、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、松江市、2008 年 9 月 17 日.

(11) Keita Uchiyama, Masahiko Sakai, Toshiki Sakabe, Keiichirou kusakari, Naoki Nishida、Decidability of Termination Properties for Term Rewriting Systems consisting of Shallow Dependency Pairs、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、高知市、2008 年 12 月 19 日.

(12) Masahiko Sakai、On Decidability of Innermost Termination for Shallow Term Rewriting Systems、Mini-Workshop on Rewriting Techniques、能美市、2008 年 8 月 1 日.

(13) Masahiko Sakai、On confluent property of shallow term rewriting systems, The 30th Workshop on Term Rewriting Systems、Sapporo, Aug. 25-26 2008.

(14) Keiichirou Kusakari, Masahiko Sakai、Static Dependency Pair Method for Simply-Typed Term Rewriting and Related Techniques、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、長崎市、2008 年 3 月 3 日.

(15) 水野清貴, 西田直樹, 坂部俊樹, 酒井正彦, 草刈圭一朗, 等式を規則化する変換の停止条件、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、長崎市、2008年3月3日。

(16) Masahiko Sakai, Wang Yi, Undecidable Properties on Length-Two String Rewriting Systems、7th International Workshop on Reduction Strategies in Rewriting and Programming、査読有、Paris、Jun. 25 2007.

(17) Keita Uchiyama, Masahiko Sakai, Toshiki Sakabe, Decidability of Innermost Termination and Context-Sensitive Termination for Semi-Constructor Term Rewriting Systems、7th International Workshop on Reduction Strategies in Rewriting and Programming、査読有、Paris、Jun. 25 2007.

(18) Naoki Nishida, Masahiko Sakai, Terutoshi Kato, Convergent Term Rewriting Systems for Inverse Computation of Injective Functions、9th International Workshop on Termination、査読有、Paris、Jun. 29 2007.

(19) Kiichirou Kusakari, Yasuo Isogai, Masahiko Sakai, Toshiki Sakabe, Naoki Nishida, Static Dependency Pair Method for Proving Termination of Higher-Order Rewriting Systems、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、能美市、2007 6/22.

(20) 磯谷泰巨, 草刈圭一朗, 酒井正彦, 坂部俊樹, 西田直樹, 二階の書換え系における引数切り落とし法、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、能美市、2007 6/22.

(21) 村田俊樹, 西田直樹, 酒井正彦, 坂部俊樹, 草刈圭一朗, 左線形は定向条件付き項書換え系における到達可能な項集合の近似集合を認識する木オートマトン、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、札幌市、2007 8/2.

(22) 笹田悠司, 酒井正彦, 西田直樹, 坂部俊樹, 草刈圭一朗, 振舞等価性の証明のための等式付き書換えに基づく潜在帰納法、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、札幌市、2007 8/2.

(23) 水谷知博, 西田直樹, 酒井正彦, 坂部俊樹, 草刈圭一朗, 導出木からのループ検出による論理プログラムの非停止性証明法、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、黒川郡 2007 10/22.

(24) Wang Yi, Masahiko Sakai, Decidability of Termination for Semi-Constructor TRSs, Left-Linear Shallow TRSs and Related Systems、Proc. of 17th Int'l Conference on Rewriting Techniques and Applications、査読有、Seattle、Aug 14 2006.

(25) Wang Yi, Masahiko Sakai, On

Non-looping Term Rewriting、Proc. of 8th International Workshop on Termination、WST2006、査読有、Seattle、Aug 15 2006.

(26) 蒲田 明憲, 草刈 圭一朗, 西田 直樹, 酒井 正彦, 坂部 俊樹, 単純型項書換え系における定理自動証明系 HOPSYS、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、福岡市、2006 12/14.

(27) 三浦浩一, 西田直樹, 酒井正彦, 坂部俊樹, 草刈圭一朗, 等式付き書換え系の等式数を削減する変換、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、岡山市、2006 6/22.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

酒井 正彦 (SAKAI MASAHIKO)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号：50215597

### (2) 研究分担者

坂部 俊樹 (SAKABE TOSHIKI)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号：60111829

草刈 圭一朗 (KUSAKARI KEIICHIROU)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号：90323112

西田 直樹 (NISHIDA NAOKI)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号：00397449

粕谷 英人 (KASUYA HIDETO)

愛知県立大学・情報科学部・講師  
研究者番号：10295579