

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03218

研究課題名（和文）先進的型理論に基づく多段階計算体系の設計と実装

研究課題名（英文）Staged Computing based on Advanced Type Systems

研究代表者

亀山 幸義（Kameyama, Yuki Yoshi）

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：10195000

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,800,000円

研究成果の概要（和文）：多段階計算法（マルチステージプログラミング）は、プログラムを用いてプログラムを生成する手法のことであり、パラメータや計算環境に特化した高性能プログラムを得られるものである。この手法は、すでに多数の分野で利用されているが、利用されている先進的な機能の中には型システムなどの保証がないものが多い。

本研究は、安全で信頼できるプログラム生成とするため、モジュールを型安全に生成する仕組み、ジャンプなどの計算エフェクト（副作用）を持つプログラムの型システム、異種プログラム生成（高レベルプログラムを用いた低レベルプログラムの生成）という3点について研究を行い、それぞれ従来の限界を突破する成果をあげた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、従来の多段階計算の限界を突破して、現実に必要なとされる広い範囲の言語機構に対する「型安全なプログラム生成」を保証するために必要な型理論の基礎を構築したことである。具体的には、モジュールのコードの生成、代数的効果、異種プログラム生成などに対応し、かつ、型安全性を保証された多段階計算体系は、オリジナリティが非常に高い研究であると考えている。

社会的意義については、Meta0Caml言語における異種プログラム生成機能の実装や、高性能ソフトウェアラジオの実装などがあげられる。

研究成果の概要（英文）：Multi-stage programming is a means to generate programs by programs, by specializing a program by parameters or computation environments. Although it has been used in various application fields, there are many advanced features used in these applications which are not guaranteed to be safe or reliable. This research project aims to ensure the safety and reliability of generated programs. We have obtained a calculus for type-safe generation of modules, type systems for control operators that are proven sound, and a rigid formulation of heterogeneous program generation.

研究分野：プログラム生成、関数型プログラム言語と型理論

キーワード：プログラム生成 多段階計算 型システム 型安全性 モジュール 計算エフェクト 異種プログラム生成 プログラムの信頼性

1. 研究開始当初の背景

多段階計算(Multi-stage Programming, Staged Computation)は、プログラムを生成するプログラムを記述することによって、様々なパラメータに特化した高性能プログラムを系統的に作成する手法であり、性能と保守性・信頼性の両立をはかることが可能であるとされ注目を浴びていた。多段階計算の中でも特に、生成されるプログラムの型安全性を保証する言語・型システムについての研究が盛んであり、型安全性を保証する堅牢な型システムを参考にして、主流となるプログラム言語への多段階計算機能の実装(OCaml に対する MetaOCaml, Haskell に対する Template Haskell, Scala に対する Scala Lightweight Modular Staging など)がされていた。また、それらの言語を用いて、インタープリタやパーサなどの言語処理系、行列計算を中心とする線形計算、画像フィルタ、データベース問合せなど、多数の応用領域でプログラム生成の成功例が報告されるようになっていた。

このように、多段階計算言語が急速に普及する一方で、多段階計算の本来の目的であった性能と保守性・信頼性の両立という観点からは、不充分、あるいは、未解決の問題が残されたままであった。その中でも特に基本的で、かつ、重要な課題は、(1) OCaml, Haskell, Scala などが持つ先進的で高度な型や機能への対応、(2) 計算エフェクト(副作用)を持つ多段階計算に対する型安全性の保証、(3) 数値計算等で必要な高性能プログラムを生成するための異種(heterogeneous)多段階計算への対応、等であった。多段階計算言語は、非常に速いスピードで様々な分野で利用されるようになっており、これらの課題を放置したまま、利用例ばかり蓄積される状況は好ましくないと考えられた。現実に利用される多段階計算言語のためのプログラム言語が持つ機能のすべて、あるいは、少なくともその主要な機能のすべてをカバーするような、しっかりした基礎理論を構築し、高い安全性・信頼性をもったプログラム生成を可能とすることが課題であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、先進的型システム・型理論に基づいて、多段階計算体系についての上記の未解決課題に取り組み、より強固な基礎のもとに多段階計算を行うことができる理論・言語システムを構築することである。特に、実行時コード生成を行う汎用プログラム言語として、最も先進的なものの1つである MetaOCaml に基づいて、その拡張あるいは修正という形で、応用上有益な様々な機能を取り込んだ上で、型安全性を保証しつつ、高性能・高信頼なプログラム生成を行うための理論・言語・実装を得ることを目的とした。

また、本研究が、現実のプログラム生成において真に有効であることを示すため、本研究の成果を用いた応用例を作成すること目的とした。多段階計算の利点は、高性能プログラムを生成するだけでなく、プログラムの移植・再利用が容易であったり、複数グループによる分担開発が可能であったり、また、信頼性の保証が容易であるということであるので、応用例の作成は非常に重要である。

本研究では、上記の諸課題についての研究を遂行することを目的とした。

3. 研究の方法

研究の背景で述べた3つの未解決課題について研究を行った。

課題(1)については、まず、伝統的な多段階計算の型システムの研究では、「項(term)」を生成することを目的とした体系を対象にしていたのに対して、それ以外の言語要素である「型(type)」や「宣言」を含む表現を生成することを目的とした体系を対象にすることを検討した。その中でも応用の観点から重要と考えられる言語機能を取り込んだ型システムを設計・構築し、型安全性などの基本的性質の保証を行うなどの基礎理論の構築を行った。さらに、これらを組み合わせた高レベル抽象化機能として「モジュール」や「クラス」の生成や、一般化代数データ型(GADT)の利用など、様々な先進的な型を取り込んで多段階計算のための型システムの研究を行った。

課題(2)については、本研究開始以前からの研究の蓄積をもとにしつつ、最新の OCaml 言語に取り込まれる代数的エフェクト機能に対応するため、代数的エフェクトをもつ多段階計算のための体系について検討を行った。

課題(3)については、プログラム生成を高水準プログラム言語(MetaOCaml など)で記述し、生成されたプログラムは低水準プログラム言語(C言語に SIMD 命令や GPU 操作を追加した言語)で記述するという異種プログラム生成について検討を行い、そのための言語・システムの設計・実装を行った。

さらに、本研究の有効性を実証するため、データベース問合せ、DSL(領域特化言語)の処理系実装、暗号実装などの分野において、多段階計算による高性能・高保守性・高信頼性を持つプロ

グラムの生成の実例を構築した。

4. 研究成果

本研究の主な研究成果は以下の通りである。

課題(1)に関して： 伝統的な多段階計算の基礎理論が対象としていた「項の生成」を超えて、どのような対象に対する静性を型安全にできるか、という観点で研究を行った。その結果、自由に型や宣言を生成できるような体系は、応用上の利点が明確でないこと、一方で、これらを1つのまとめた抽象化機構であるモジュールを生成できる体系は、有益な応用例があることを見出し、モジュールの生成を型安全に行うための体系および言語設計・実装を行った。モジュールは、大規模な OCaml プログラムの開発では必須の機構である一方、抽象型などの宣言を含み、かつ、各フィールドは先行するフィールドを利用して実装できるという依存性を持つなど、そのコードの生成のための型安全な型システムの構築は非常に挑戦的な課題であった。

本研究では、OCaml 言語がもつ2つのスタイルである「生成的ファンクタ」と「適用的ファンクタ」をもつ2段階計算体系とその型システムを設計し、型安全性を厳密に保証することに成功した。この体系はモジュールのコードの生成は可能な一方、ファンクタのコードの生成は不可とする制限を設けることにより、既存の第一級モジュールを持つ OCaml 言語への変換が可能であることを示した。また、その変換に基づく実装を与え、DSL インタープリタの高速化などの応用例において、性能が向上することを示した。(GPCE 2021 で発表)

課題(2)に関して： 関数型プログラム言語におけるコントロールオペレータ(制御演算子)の研究において、「代数効果とハンドラ(以下、AEH と略記する)」と呼ばれる言語機構についての研究が非常に盛んになっている。AEH などのコントロールオペレータは、生成されるプログラムで用いる以外に、プログラム生成において、コード重複による肥大化を防ぐために必要である。そこで、AEH を持つ2段階計算言語の型システムを設計し、型安全性を証明した。(論文は準備中)。また、この研究に先行して、代数効果をはじめとするコントロールオペレータの基礎理論についての研究を行い、「ワンショット継続」(継続とよばれるオブジェクトを1回のみ使用可能)に制限した AEH 体系が、コルーチンに変換可能であることを証明し、コルーチン機能を持つ様々なプログラム言語(関数型プログラム言語とは限らず、Ruby, Lua など非常に多数のプログラム言語が該当)において、ワンショット制限付きの AEH を利用可能であることを示した。(TFP2020 で発表)

また、AEH の基礎となる `shift0/reset0` や `control0/prompt0` など4種類のコントロールオペレータに関して、従来与えられてきたものより精密に型付けが可能な型システムを設計し、その型システムによる型付けが CPS 変換で保存されることを厳密に検証することに成功した。この成果は、多段階計算研究に直接貢献するものではないが、コントロールオペレータを多段階計算体系に取り込んだ際の型システム構築において、重要な示唆を与えるものである。(GPCE 2020 で発表、論文賞受賞)

課題(3)に関して： 異種プログラム生成(heterogeneous program generation)は、高レベルプログラム言語で記述されたプログラム生成器で、低レベルプログラム言語で記述された高性能プログラムを生成する技術であり、応用の観点から非常に重要である。これに関して、MetaOCaml 言語システム設計者の立場から、C 言語へのオフショアリング(offshoring)と、タグレスファイナル法に基づく方法の2つの手法を整理して、前者について、従来研究ではあいまいなまま利用されてきた、書き換え可能変数の問題を解決し、安全性・信頼性向上に貢献した。(FLOPS 2022 で発表)

応用例の構築に関して： 多段階計算を様々な分野に適用して以下の応用例を得た。

データベース問合せ言語 SQL と関数型プログラム言語を統合した言語である「統合言語クエリ」に関して、従来研究の手法では、きわめて頻出する構文である GROUP-BY に対応できておらず、実用性が極めて限定されていたが、本研究において世界で初めて、GROUP-BY 構文に対応した統合言語クエリに対する変換アルゴリズムとその実装を与えることに成功した。また、この実装を用いて、GROUP-BY 構文を入れ子で使った問い合わせが高速化されることを実証した。(GPCE 2020, FLOPS 2020 で発表)

暗号実装に対して多段階計算を適用することによって、移植性・汎用性・再利用性・可読性の高いプログラムの生成が可能であることを発見し、次世代暗号の中核の計算である Number-theoretic transform(整数上の高速フーリエ変換)の高速実装を得ることに成功した。本研究の実装は、発表時点では世界で2番目に高速の実装となり、かつ、AVX2, AVX512 など異なる SIMD 演算への移植が非常に容易であるという特徴をもっている。(IWS2021, FLOPS 2022 で発表)

Stream 計算に対する多段階計算の応用においても目覚ましい成果をあげた。本研究開始前の研究において、研究分担者らは、2段階計算の手法により世界最高速の Stream 計算ライブラリの実装を得ることに成功していた。本研究では、そのライブラリを様々な応用領域に適用することを試みた。たとえば、ソフトウェア・ラジオへの提供においては、Stream 計算ライブラリを直接適用できない部分がある事を発見し、それに対応した実装を与えることにより、非常に高性能なソフトウェア・ラジオを実現することに成功した。

上記の研究過程で、当初の研究目的には含まれていなかった新しい発見があり、今後の研究の方向性を示す知見も得られた。その1つとして、暗号実装への応用では、高性能なプログラムで、かつ、保守性に優れたものを得ることが目的であったが、プログラム生成の枠組みをそのまま用いることにより、ある種のプログラム解析・検証が行えることがわかった。実際に、暗号実装が、フーリエ変換の定義式と完全に同じ計算をすることを検証することに成功している。これは、解析や検証のための特別な仕掛けを用意することなく、軽量な手法で解析・検証が可能なる方法ということで、多段階計算研究の今後の方向性を示すものと考えている。

研究成果の公開に関する活動：

上記の成果のほか、本研究の成果の取りまとめのため、2023年6月に筑波大学において「メタプログラミング研究集会」を開催した。発表者は本研究の代表者・分担者全員と、研究協力者【大学院生】6名であり、2日間にわたり、非常に活発な討論を行った。

Workshop on Metaprogramming (メタプログラミング研究集会)

日時：2022年6月18～19日

場所：筑波大学総合研究棟B

講演者と講演題目：

- 亀山 幸義 (研究代表者、筑波大学)、プログラム生成と検証の統合に向けて
 - 浅井 健一 (研究分担者、お茶の水女子大学)、限定継続理論の現状と課題
 - Oleg Kiselyov (研究分担者、東北大学)、私が配列言語を教えていた
 - 横山 彪人 (筑波大学)、代数効果を持つ2段階計算体系の型システム
 - 石尾 千晶 (お茶の水女子大学)、4種類の限定継続演算子の型システム
 - 大石 美緒 (お茶の水女子大学)、MikiBeta における GADT を使った静的型チェック
 - 藤井 舞花 (お茶の水女子大学)、代数的エフェクトとハンドラの CPS インタプリタと型システム
 - 小林 友明 (東北大学)、Complete なストリーム融合によるソフトウェア無線のデジタル信号処理
 - 粉川 凌我 (東北大学)、データベースクエリにおける Boolean selection のコード生成
-

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Masuda Masahiro, Kameyama Yukiyoishi	4. 巻 12835
2. 論文標題 FFT Program Generation for Ring LWE-Based Cryptography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 151 ~ 171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-85987-9_9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sato Yuhi, Kameyama Yukiyoishi	4. 巻 -
2. 論文標題 Type-safe generation of modules in applicative and generative styles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 20th ACM SIGPLAN International Conference on Generative Programming: Concepts and Experiences (GPCE 2021)	6. 最初と最後の頁 184 ~ 196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3486609.3487209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Youyou Cong, Chiaki Ishio, Kaho Honda, and Kenichi Asai	4. 巻 -
2. 論文標題 A Functional Abstraction of Typed Invocation Contexts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 6th International Conference on Formal Structures for Computation and Deduction (FSCD 2021)	6. 最初と最後の頁 12:1-12:18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.FSCD.2021.12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Maika Fujii and Kenichi Asai	4. 巻 -
2. 論文標題 Derivation of a Virtual Machine For Four Variants of Delimited-Control Operators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 6th International Conference on Formal Structures for Computation and Deduction (FSCD 2021)	6. 最初と最後の頁 16:1-16:19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.FSCD.2021.16	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石尾 千晶、浅井 健一	4. 巻 -
2. 論文標題 4種類の限定継続演算子のための型システム	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第24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論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤井 舞花、浅井 健一	4. 巻 -
2. 論文標題 代数的エフェクトとハンドラのための CPS インタプリタと型システム	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第24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論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawahara Satoru, Kameyama Yukiyoshi	4. 巻 12222
2. 論文標題 One-Shot Algebraic Effects as Coroutines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 159 ~ 179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-57761-2_8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okura Rui, Kameyama Yukiyoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Reorganizing queries with grouping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 GPCE '20: Proceedings of the 19th ACM SIGPLAN International Conference on Generative Programming: Concepts and Experiences	6. 最初と最後の頁 50 ~ 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3425898.3426960	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okura Rui, Kameyama Yukiyoshi	4. 巻 12073
2. 論文標題 Language-Integrated Query with Nested Data Structures and Grouping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 139 ~ 158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-59025-3_9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kiselyov Oleg, Imai Keigo	4. 巻 12073
2. 論文標題 Session Types Without Sophistry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 66 ~ 87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-59025-3_5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kiselyov Oleg, Mu Shin-Cheng, Sabry Amr	4. 巻 31
2. 論文標題 Not by equations alone	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Functional Programming	6. 最初と最後の頁 e2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S0956796820000271	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 高木 尚、亀山 幸義	4. 巻 -
2. 論文標題 型付きDSLに対するプログラム変換の型安全なフレームワーク	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本ソフトウェア科学会第37回大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤井 舞花、浅井 健一	4. 巻 -
2. 論文標題 control/prompt の仮想機械導出	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第2 3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論文集	6. 最初と最後の頁 1~19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuhi Sato, Yuki Yoshi Kameyama, Takahisa Watanabe	4. 巻 -
2. 論文標題 Module Generation without Regret	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of ACM SIGPLAN Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3372884.3373160	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chiaki Ishio, Kenichi Asai	4. 巻 12053
2. 論文標題 Verifying Selective CPS Transformation for Shift and Reset	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 38-57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-47147-7_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 叢 悠悠、浅井 健一	4. 巻 Vol. 36, No. 2
2. 論文標題 限定継続命令をもつ依存型付き言語の設計	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンピュータソフトウェア	6. 最初と最後の頁 47-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11309/jssst.36.2_47	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Oleg Kiselyov, Tiark Rompf, Jennifer Neville, Yuki Yoshi Kameyama	4. 巻 No. 2018-7
2. 論文標題 Meta-Programming for Statistical Machine Learning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 NII Shonan Seminar Report	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Youyou Cong, and Kenichi Asai	4. 巻 Vol. 2, Issue ICFP
2. 論文標題 Handling Delimited Continuations with Dependent Types	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages	6. 最初と最後の頁 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3236764	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kenichi Asai	4. 巻 -
2. 論文標題 Extracting a Call-by-Name Partial Evaluator from a Proof of Termination	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACM SIGPLAN Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation (PEPM '19)	6. 最初と最後の頁 61-67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3294032.3294084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Urara Yamada, and Kenichi Asai	4. 巻 -
2. 論文標題 Certifying CPS Transformation of Let-polymorphic Calculus Using PHOAS	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 16th Asian Symposium on Programming Languages and Systems (APLAS 2018), LNCS 11275	6. 最初と最後の頁 375-393
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-02768-1_20	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jeremy Yallop, Oleg Kiselyov	4. 巻 -
2. 論文標題 Generating Mutually Recursive Definitions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2019 ACM SIGPLAN Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation	6. 最初と最後の頁 75-81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3294032.3294078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Aggelos Biboudis (EPFL, Switzerland), Oleg Kiselyov, Martin Odersky (EPFL, Switzerland)	4. 巻 No.2018-14
2. 論文標題 Functional Stream Libraries and Fusion: What's Next?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 NII Shonan Seminar Report	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計26件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Masahiro Masuda and Yukiyoshi Kameyama
2. 発表標題 FFT Program Generation for Ring LWE-Based Cryptography
3. 学会等名 16th International Workshop on Security (IWSEC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuhi Sato and Yukiyoshi Kameyama
2. 発表標題 Type-safe generation of modules in applicative and generative styles
3. 学会等名 20th ACM SIGPLAN International Conference on Generative Programming: Concepts and Experiences (GPCE 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Youyou Cong, Chiaki Ishio, Kaho Honda, and Kenichi Asai
2. 発表標題 A Functional Abstraction of Typed Invocation Contexts
3. 学会等名 6th International Conference on Formal Structures for Computation and Deduction (FSCD 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Maika Fujii and Kenichi Asai
2. 発表標題 Derivation of a Virtual Machine For Four Variants of Delimited-Control Operators
3. 学会等名 6th International Conference on Formal Structures for Computation and Deduction (FSCD 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Oleg Kiselyov and Jeremy Yallop
2. 発表標題 let (rec) insertion without Effects, Lights or Magic
3. 学会等名 ACM SIGPLAN Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation (PEPM 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Okura Rui, Kameyama Yuki Yoshi
2. 発表標題 Language-Integrated Query with Nested Data Structures and Grouping
3. 学会等名 International Symposium on Functional and Logic Programming (FLOPS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Okura Rui, Kameyama Yuki Yoshi
2. 発表標題 Reorganizing queries with grouping
3. 学会等名 The 19th ACM SIGPLAN International Conference on Generative Programming: Concepts and Experiences (GPCE '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木 尚, 亀山 幸義
2. 発表標題 型付きDSLに対するプログラム変換の型安全なフレームワーク
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第37回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井 舞花, 浅井 健一
2. 発表標題 control/prompt の仮想機械導出
3. 学会等名 第23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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keigo Imai, Oleg Kiselyov
2. 発表標題 Session Types without Sophistry
3. 学会等名 International Symposium on Functional and Logic Programming (FLOPS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林 友明, Oleg Kiselyov
2. 発表標題 より清浄なStream Fusion
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第37回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 庄司諭 Oleg Kiselyov
2. 発表標題 配列言語の長所を分かりやすく味わう: OCaml上の埋め込み配列言語
3. 学会等名 第23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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Asai Kenichi, Cong Youyou, Ishio Chiaki
2. 発表標題 A Functional Abstraction of Typed Trails
3. 学会等名 ACM SIGPLAN Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation (PEPM '21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuhi Sato, Yuki Yoshi Kameyama, Takahisa Watanabe
2. 発表標題 Module Generation without Regret
3. 学会等名 2020 ACM SIGPLAN Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoru Kawahara, Yuki Yoshi Kameyama
2. 発表標題 One-shot Algebraic Effects as Coroutines
3. 学会等名 21st International Symposium on Trends in Functional Programming (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Oleg Kiselyov, Jeremy Yallop
2. 発表標題 let (rec) insertion without effects, lights or magic
3. 学会等名 ML Family Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石尾 千晶、山本 充子、浅井 健一
2. 発表標題 Agda の Reflection API を用いた自動証明に向けて
3. 学会等名 第22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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古川 つきの、浅井 健一
2. 発表標題 algebraic effects を含むプログラムのステップ実行
3. 学会等名 第22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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Oleg Kiselyov
2. 発表標題 Session Types without Sophistry: Practical embedding of DSLs with sophisticated type systems
3. 学会等名 IFIP WG2.11 20th Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukiyoshi Kameyama
2. 発表標題 Language-Integrated Query with Nested Data Structures and Grouping
3. 学会等名 IFIP WG2.11 20th Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukiyoshi Kameyama
2. 発表標題 A Lightweight Approach to Module Generation
3. 学会等名 IFIP Working Group 2.11, 18th meeting (Kyoto, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菊地 綾音, 亀山 幸義
2. 発表標題 Polymorphic Staged Calculus with Cross-Stage Persistence and Side Effects
3. 学会等名 情報処理学会第122回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 叢 悠悠、浅井 健一
2. 発表標題 動的変数をもつ依存型付きラムダ計算
3. 学会等名 第21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論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石尾 千晶、浅井 健一
2. 発表標題 shift/reset のための selective CPS 変換の正当性 の証明
3. 学会等名 第21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論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oleg Kiselyov
2. 発表標題 Session types without sophistry
3. 学会等名 IFIP Working Group 2.11, 18th meeting (Kyoto, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 オレグ キセリョーフ 今井 敬吾
2. 発表標題 セッション型、簡潔に
3. 学会等名 第21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 (poster)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Metaprogramming Workshop: https://www.cs.tsukuba.ac.jp/~kam/meta2022/
Yukiyoshi Kameyama's Publication https://www.cs.tsukuba.ac.jp/~kam/publication.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	浅井 健一 (Asai Kenichi) (10262156)	お茶の水女子大学・基幹研究院・教授 (12611)	
研究分担者	K i s e l y o v O l e g (Kiselyov Oleg) (50754602)	東北大学・情報科学研究科・助教 (11301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	増田 正博 (Masuda Masahiro)		
研究協力者	河原 悟 (Kawahara Satoru)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	横山 彪人 (Yokoyama Ayato)		
研究協力者	佐藤 佑飛 (Sato Yuhi)		
研究協力者	大倉 瑠維 (Okura Rui)		
研究協力者	石尾 千晶 (Ishio Chiaki)		
研究協力者	大石 美緒 (Oishi Mio)		
研究協力者	藤井 舞花 (Fujii Maika)		
研究協力者	小林 友明 (Kobayashi Tomoaki)		
研究協力者	粉川 凌我 (Konakawa Ryoga)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 NII Shonan Meeting on Meta-Programming for Statistical Machine Learning	開催年 2018年～2018年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	Cambridge Univesrity			