

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01723

研究課題名(和文) 現代的なプログラミング言語のための漸進的型システムの理論

研究課題名(英文) Theory of Gradual Typing for Modern Programming Languages

研究代表者

五十嵐 淳 (Atsushi, Igarashi)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：40323456

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,500,000円

研究成果の概要(和文)：漸進的型付けはひとつのプログラム中に静的型付けされる部分と動的型付けされる部分を共存させるための、プログラミング言語技術である。これを先進的なプログラミング言語に適用するための理論的基盤の研究を行った。主な成果は、多相性、セッション型、篩型、非決定性、ML型推論、交差型といった先進的なプログラミング言語機構へ漸進的型付けを導入した計算体系を与え、その性質(型安全性など)を証明した。さらに、漸進的型付けの実装技術として提案されている空間効率のよいコアーシオン計算を改良し、コアーシオン渡し形式を経由するコンパイル方法を提案し、実際に実装・評価を行い、その効果を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

漸進的型付けの概念は、JavaScript に静的型を導入した TypeScript の登場などにより、現実のプログラミング言語にも適用され始めているが、先進的な型機構とどう共存できるか明らかではなく、また実行時オーバーヘッドが大きいことが本格的な導入の障壁になっていた。本研究は、漸進的型付けを先進的なプログラミング言語に導入するための理論的基盤を整備するものであると同時に、効率的な実行を可能とするコンパイル手法の理論的改良を提案するとともに、実装を通じてその効果を評価したものである。

研究成果の概要(英文)：Gradual typing is a programming-language technique that allows statically typed and dynamically typed parts to coexist in a single program. We have studied the theoretical foundations for applying this technique to advanced programming languages. The main result is computational calculi that introduce gradual typing to advanced programming language mechanisms such as polymorphism, session types, refinement types, nondeterminism, ML type inference, and intersection types; we have proved its properties (such as type safety). In addition, we improved space-efficient coercions that have been proposed as an implementation technique for gradual typing by coercion passing style compilation, which we implemented and evaluated.

研究分野：プログラミング言語

キーワード：漸進的型付け プログラミング言語 型システム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

プログラミング言語は、エラーの検出方式によって、Lisp や JavaScript など実行時に検出を行う動的型付け言語と、Java、ML、Haskell、Coq などのコンパイル時にエラー検出を行う静的型付け言語に大別できる。Siek と Taha は、ひとつのプログラム中に、動的型付けされる部分と静的型付けされる部分が混在することを許すための漸進的型付け (gradual typing) の概念を提唱した。Siek と Taha の当初の研究では、静的型付けとして単純型を採用していたが、漸進的型付けは、動的型付けと単純型の組み合わせに留まらず、異なる表現力を持つシステムを混在させるための枠組みとして捉えることができる。しかしながら、漸進的型付けを現代的なプログラミング言語に本格的に適用するためには、解決すべき課題が山積している。まず、多くの漸進的型付けの研究でのプログラミング言語のモデルは、ラムダ計算に整数などの基本データ型を入れた程度の単純なものであるため、現実的なプログラミングにおいて非常に重要な、代入・継続などの計算効果をどう取り入れるべきか、といった根本的な問題が(いくつかの研究はあるものの)未解決である。また、JavaScript をはじめとする現代的な動的型付け言語に特徴的な機構が取り入れられているとは言い難い。また、漸進的型付けプログラムの効率的な実装技術も未発達である。

### 2. 研究の目的

本研究では、漸進的型付けを現代的な動的型付け言語へ適用するため原理についての以下のリサーチ・クエスチョン(1)~(3)について解明していくことを目的とする。

(1)動的要素の高い言語機構について漸進的型付けを行うにはどうすればよいか。既に述べたように、JavaScript の漸進的型付け拡張である TypeScript などが登場しているものの、こういった動的型付け言語に特徴的な非常に動的要素の高い言語機構 - 例えば eval、リフレクション、マクロなど - についてはサポートされていない。

(2) 計算効果一般に対して、どういった原理に従って漸進的型付けを設計すべきか。これまでの計算効果をもつ言語のための漸進的型付けは、いくつかの理論が構築されてきたが、計算効果の種類毎に場当たりに理論が構築されてきたこともあり複数の計算効果を組み合わせたり、新しい計算効果を取り入れるための手法がよくわかっていない。

(3) 漸進的型付けされたプログラムの実行に伴うオーバーヘッドを削減するためのプログラム解析技術・コンパイル技術は何か。漸進的型付けされたプログラムの実行オーバーヘッドには、検査に要するコストそのものだけでなく、(実は必ず成功することがわかっている)無駄な動的検査の存在、末尾呼出最適化の阻害、実行時に型情報をやりとりするためのオーバーヘッドなど様々な種類のものが指摘されており、これらを削減することは実用的な漸進的型付け言語の実現のために必要不可欠である。

### 3. 研究の方法

**課題(1)について** (Lisp 流の) 擬似引用と eval を使ったコード合成・実行機構に焦点をあて、漸進的型付け理論を構築することとした。最近の研究で整備されてきている擬似引用や eval のための型理論体系 (Davies による (1998) や Tsukada、Hanada、Igarashi の体系 (Hanada&Igarashi 2014, Tsukada&Igarashi 2010) をベースに Siek と Taha (2006) の手法を応用して漸進的型付けの体系へ拡張する。また、上述の型理論ではせいぜい多相型程度までしか取り扱えないが、最終的にはこれを依存型まで拡張したい。しかし、漸進的型付け以前に、そもそも擬似引用・eval と依存型を組み合わせた型理論が研究されていないため、この研究を並行して行う。

**課題(2)について** 計算効果一般に対しての漸進的型付けを考えるためには、まず、計算効果を統一的に扱えるプログラミング言語のモデルを設定し、その上で理論を展開するべきである。今回は、そのモデルとして限定継続とノミナル・ゲーム意味論を採用し、そのモデル上の漸進的型付けを研究することとした。

**課題(3)について** 漸進的型付けに伴うオーバーヘッドを軽減するためのプログラム解析技術・コンパイル技術・実行時技術を研究することとした。

### 4. 研究成果

## 課題(1)について

擬似引用や Eval のための漸進的型付けについては、 をベースにすると制限がきついことがわかったので、Murase と Nishiwaki による多相文脈の研究を元にしてコード片をデータとして扱えるような言語のモデルを設定し、そのモデルに実行時にコード片の型検査を行う機構をキャストの一種として導入し拡張を行い、操作的意味論や型付け規則の形式化を行い、体系のインタプリタ実装を行った。この成果については現在論文を準備中である。また、動的型付き言語では頻繁に使われる拡張可能データ構造のための漸進的型付けを目標とした研究を行った。具体的には拡張可能レコード、ヴァリアントのための列多相に基づく静的型システムに漸進的型付けを導入した計算体系を与え、その基本的な性質を示した(WGT2020 で発表)。

## 課題(2)について

計算効果をもつ言語のための統一的な漸進的型付けについては、数年前に村井らが研究した、公開契約計算のトレース意味論について研究を進め、操作的意味論に対して完全抽象的(fully abstract)なトレース意味論の構築に成功した(PPL2018 で発表)。ノミナルゲーム意味論については研究が滞ってしまったので、代替アプローチとして計算効果を一般的に扱う枠組みであるエフェクトハンドラーと多相性とを組み合わせる研究を行い、新しいエフェクトハンドラーのための多相型システムの構築に成功し(ESOP2019 で発表)、さらに、多相エフェクトのシグネチャ(型)を一定の形に制限し、エフェクトハンドラーがその型の制約を満たすよう実装されていれば、ユーザープログラム側に値制限などの制限を課さず素朴な多相型システムで型付けできれば全体として型安全であることを示すことに成功した(ICFP2020 で発表)。

次に、漸進的型付けを適用する具体的な計算効果として研究した限定継続と非決定計算について述べる。限定継続については、本科研費研究の前に Garcia, Cimini による漸進的型付けのための型推論の理論を Danvy と Filinski による限定継続の型システムに適用する、という研究を行っていた。この研究を通じて、型推論で具体化されずに残る型変数がプログラムの実行に影響する、という問題があることがわかった。これを解決するために、実行時型推論と呼ばれる機構を提案し、その形式化と性質の証明を行った(POPL2019 で発表)。この研究では実行時型推論に焦点をあてて限定継続は扱わなかったため、実行時型推論の枠組みを限定継続まで拡張する必要があったが、そこには至らなかった。また、非決定計算については、漸進的型付けの一種である顕在的契約を導入する理論を構築した(PPDP2018 で発表)。非決定計算に素朴に顕在的契約を導入すると体系が矛盾してしまうという問題があったが、これを coordinated choice と呼ばれる新しい非決定的選択演算子を導入することで解決した。さらに、この研究を通じて、「AかつBかつ...」というような仕様を列挙するような形で記述される契約についての動的検査に応用できることに気付いたことから、顕在的契約計算を交差型で拡張した計算体系を構築し、正しく契約検査ができる、といった性質を示すことに成功した(PLAS2019 で発表)。

## 課題(3)について

漸進的型付けの効率的な実装技術の理論については、まず、二階の型理論である System F の漸進的型付け拡張の研究の一環として研究を行った。一般に漸進的型付き言語は実行時型検査を行いながらプログラム実行が進むために、型情報をプログラム中や実行時に保持する必要がある。これを素朴に二階の計算体系で考えると、型変数を介した型情報の受渡しのオーバーヘッドが発生することになる。この問題に対して、実行時に型情報を保持する必要があるかどうかを静的に解析し、必要のない部分については型情報を消去する最適化が行えることを示し、インタプリタ実装を行った(ICFP2017 で発表)。

その後、漸進的型付けの効率的な実装技術の理論についての研究に移行し、漸進的型付けの元で末尾再帰の最適化が行えないという問題を解決するコアーション渡しによるコンパイル手法の研究を行った。インディアナ大学の研究グループがオープンソースで開発している Grift という漸進的型付け言語のコンパイラに組込むこと成功した。このコンパイラで各種ベンチマークプログラムで性能比較実験を行い、数倍のオーバーヘッドがかかるものの、末尾呼出しに関わるコアーションの合成ができ、末尾再帰関数でもスタックオーバーフローを起こしてしまうことがあるという問題を解決できることが確認できた(ECOOP2020 で発表)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Sekiyama Taro, Tsukada Takeshi, Igarashi Atsushi	4. 巻 4(ICFP)
2. 論文標題 Signature restriction for polymorphic algebraic effects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages	6. 最初と最後の頁 1~30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3408999	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 IGARASHI ATSUSHI, THIEMANN PETER, TSUDA YUYA, VASCONCELOS VASCO T., WADLER PHILIP	4. 巻 29
2. 論文標題 Gradual session types	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Functional Programming	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) 10.1017/S0956796819000169	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 該当する
1. 著者名 Nishida Yuki, Igarashi Atsushi	4. 巻 -
2. 論文標題 Manifest Contracts with Intersection Types	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Asian Symposium on Programming Languages and Systems (APLAS2019)	6. 最初と最後の頁 33~52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-34175-6_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 Yuya Tsuda, Atsushi Igarashi, Tomoya Tabuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Space-Efficient Gradual Typing in Coercion-Passing Style	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of European Conference on Object-Oriented Programming (ECOOP2020)	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) 10.4230/LIPIcs.ECOOP.2020.8	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 Inoue Hiroaki, Igarashi Atsushi	4. 巻 179
2. 論文標題 A type system for first-class layers with inheritance, subtyping, and swapping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science of Computer Programming	6. 最初と最後の頁 54 ~ 86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scico.2019.03.008	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 Yasugi Masahiro, Muraoka Daisuke, Hiraishi Tasuku, Umatani Seiji, Emoto Kento	4. 巻 -
2. 論文標題 HOPE: A Parallel Execution Model Based on Hierarchical Omission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 48th International Conference on Parallel Processing	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3337821.3337899	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 Nakashima Ryusuke, Yoritaka Hiroshi, Yasugi Masahiro, Hiraishi Tasuku, Umatani Seiji	4. 巻 -
2. 論文標題 Extending a Work-Stealing Framework with Priorities and Weights	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 IEEE/ACM 9th Workshop on Irregular Applications: Architectures and Algorithms	6. 最初と最後の頁 9-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IA349570.2019.00008	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 KIMURA Daisuke, NAKAZAWA Koji, TERAUCHI Tachio, UNNO Hiroshi	4. 巻 37
2. 論文標題 Failure of Cut-Elimination in Cyclic Proofs of Separation Logic	5. 発行年 2020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 1_39 ~ 1_52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11309/jssst.37.1_39	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 Yuki Satake, Hiroshi Unno, and Hinata Yanagi	4. 巻 -
2. 論文標題 Probabilistic Inference for Predicate Constraint Satisfaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the annual AAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2020)	6. 最初と最後の頁 1644-1651
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Nishida, Atsushi Igarashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Nondeterministic Manifest Contracts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of ACM PPDP	6. 最初と最後の頁 16:1-16:13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3236950.3236964	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 Yusuke Miyazaki, Taro Sekiyama, Atsushi Igarashi	4. 巻 3(POPL)
2. 論文標題 Dynamic Type Inference for Gradual Hindley-Milner Typing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages	6. 最初と最後の頁 18:1-18:29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3290331	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 Taro Sekiyama, Atsushi Igarashi	4. 巻 11423
2. 論文標題 Handling Polymorphic Algebraic Effects	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of European Symposium on Programming (Springer LNCS)	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-17184-1_13	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 Hiroshi Yoritaka, Ken Matsui, Masahiro Yasugi, Tasuku Hiraishi, Seiji Umatani	4. 巻 82
2. 論文標題 Probabilistic guards: A mechanism for increasing the granularity of work-stealing programs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Parallel Computing	6. 最初と最後の頁 19-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.parco.2018.06.003	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 Hiroaki Inoue, Tomoyuki Aotani, Atsushi Igarashi	4. 巻 109
2. 論文標題 ContextWorkflow: A Monadic DSL for Compensable and Interruptible Executions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of European Conference on Object-Oriented Programming (LIPIcs series)	6. 最初と最後の頁 2:1-2:33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ECOOP.2018.2	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 Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, Hidehiko Masuhara, Atsushi Igarashi	4. 巻 156
2. 論文標題 Method Safety Mechanism for Asynchronous Layer Deactivation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science of Computer Programming	6. 最初と最後の頁 104-120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scico.2018.01.006	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 Hiroshi Unno, Yuki Satake, Tachio Terauchi	4. 巻 2 Issue POPL
2. 論文標題 Relatively complete refinement type system for verification of higher-order non-deterministic programs	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages	6. 最初と最後の頁 1~29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3158100	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 Yuki Satake, Hiroshi Unno	4. 巻 -
2. 論文標題 Propositional Dynamic Logic for Higher-Order Functional Programs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of CAV 2018, LNCS	6. 最初と最後の頁 105-123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-96145-3_6	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 Yoji Nanjo, Hiroshi Unno, Eric Koskinen, Tachio Terauchi	4. 巻 -
2. 論文標題 A Fixpoint Logic and Dependent Effects for Temporal Property Verification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of LICS 2018	6. 最初と最後の頁 759-768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3209108.3209204	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 Yuu Igarashi, Taro Sekiyama, Atsushi Igarashi	4. 巻 1
2. 論文標題 On polymorphic gradual typing	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages	6. 最初と最後の頁 1~29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3110284	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 Atsushi Igarashi, Peter Thiemann, Vasco T. Vasconcelos, Philip Wadler	4. 巻 1 Issue ICFP
2. 論文標題 Gradual Session Types	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages	6. 最初と最後の頁 38:1-38:28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3110282	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 該当する

1. 著者名 Taro Sekiyama, Atsushi Igarashi, Michael Greenberg	4. 巻 39
2. 論文標題 Polymorphic Manifest Contracts, Revised and Resolved	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACM Transactions on Programming Languages and Systems	6. 最初と最後の頁 1~36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/2994594	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

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Yuki Nishida, Atsushi Igarashi
2. 発表標題 Manifest Contracts with Intersection Types
3. 学会等名 Asian Symposium on Programming Languages and Systems (APLAS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuya Tsuda, Atsushi Igarashi, Tomoya Tabuchi
2. 発表標題 Space-Efficient Gradual Typing in Coercion-Passing Style
3. 学会等名 European Conference on Object-Oriented Programming (ECOOP2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taro Sekiyama, Atsushi Igarashi
2. 発表標題 Gradual Typing for Extensibility by Rows
3. 学会等名 Workshop on Gradual Typing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuya Tsuda, Atsushi Igarashi, Tomoya Tabuchi
2. 発表標題 Space-Efficient Gradual Typing in Coercion-Passing Style
3. 学会等名 Workshop on Gradual Typing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本 孝太, 八杉 昌宏, 平石 拓, 馬谷 誠二
2. 発表標題 汎用送受信に対応したHOPEコンパイラの研究
3. 学会等名 情報処理学会 第125回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西牟禮 亮, 八杉 昌宏, 平石 拓, 馬谷 誠二
2. 発表標題 ワーカの重要度を考慮した並列実行フレームワークの障害耐性評価手法の検討
3. 学会等名 情報処理学会 第125回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Tatsuta, Koji Nakazawa, and Daisuke Kimura
2. 発表標題 Completeness of cyclic proofs for symbolic heaps with inductive definitions
3. 学会等名 The 17th Asian Symposium on Programming Languages and Systems (APLAS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福井 康介, 中澤 巧爾, 石井 沙織, 結縁 祥治
2. 発表標題 古典論理に対する汎用的自然演繹の証明正規化
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 Yuki Nishida, Atsushi Igarashi
2. 発表標題 Nondeterministic Manifest Contracts
3. 学会等名 The 20th International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming (PPDP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Miyazaki, Taro Sekiyama, Atsushi Igarashi
2. 発表標題 Dynamic Type Inference for Gradual Hindley-Milner Typing
3. 学会等名 The 46th ACM SIGPLAN Symposium on Principles of Programming Languages (POPL 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taro Sekiyama, Atsushi Igarashi
2. 発表標題 Handling Polymorphic Algebraic Effects
3. 学会等名 European Symposium on Programming (ESOP 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Inoue, Tomoyuki Aotani, Atsushi Igarashi
2. 発表標題 ContextWorkflow: A Monadic DSL for Compensable and Interruptible Executions
3. 学会等名 European Conference on Object-Oriented Programming (ECOOP 2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬谷 誠二
2. 発表標題 JVM上の動的言語のための抽象解釈
3. 学会等名 情報処理学会第121回プログラミング研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬谷 誠二
2. 発表標題 JVM上の動的言語のための抽象解釈の実装
3. 学会等名 第60回プログラミング・シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南條 陽史, 海野 広志
2. 発表標題 一階不動点論理の循環証明体系とプログラム検証への応用
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第35回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Unno
2. 発表標題 Horn Clauses and Beyond for Relational and Temporal Program Verification
3. 学会等名 The 5th Workshop on Horn Clauses for Verification and Synthesis (HCVS'18) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kaede Kobayashi, Atsushi Igarashi
2. 発表標題 Gradual Session Types In Imperative Style
3. 学会等名 Fourth Workshop on Behavioral Types (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津田優也, 五十嵐淳
2. 発表標題 空間効率の良いコアーション計算のためのコアーション渡し形式
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(PPL2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Igarashi, Taro Sekiyama
2. 発表標題 Handling Polymorphic Algebraic Effects
3. 学会等名 NII Shonan Meeting No. 146 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 鉄也, 中澤 巧爾
2. 発表標題 高階契約に対するトレース意味論の完全抽象性
3. 学会等名 第20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 (PPL2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 五十嵐 琢磨, 馬谷 誠二
2. 発表標題 アクセス制御論理に基づくIoT向け分散型アクセス制御フレームワーク
3. 学会等名 第15回 ディベンダブルシステムワークショップ (DSW 2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuu Igarashi, Taro Sekiyama, Atsushi Igarashi
2. 発表標題 On Polymorphic Gradual Typing
3. 学会等名 ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Atsushi Igarashi, Peter Thiemann, Vasco T. Vasconcelos, Philip Wadler
2. 発表標題 Gradual Session Types
3. 学会等名 ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西田 雄気, 五十嵐 淳
2. 発表標題 非決定的顕在的契約計算
3. 学会等名 第20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 (PPL2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Unno, Yuki Satake, Tachio Terauchi
2. 発表標題 Relatively complete refinement type system for verification of higher-order non-deterministic programs
3. 学会等名 ACM Symposium on Principles of Programming Languages (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Satake, Hiroshi Unno
2. 発表標題 Propositional Dynamic Logic for Higher-Order Functional Programs
3. 学会等名 International Conference on Computer Aided Verification (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoji Nanjo, Hiroshi Unno, Eric Koskinen, Tachio Terauchi
2. 発表標題 A Fixpoint Logic and Dependent Effects for Temporal Property Verification
3. 学会等名 ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

五十嵐淳のホームページ  
<http://www.fos.kuis.kyoto-u.ac.jp/~igarashi/>

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	馬谷 誠二  (Umatani Seiji)  (40378831)	神奈川大学・理学部・准教授    (32702)	
研究分担者	中澤 巧爾  (Nakazawa Koji)  (80362581)	名古屋大学・情報学研究所・准教授    (13901)	
研究分担者	海野 広志  (Unno Hiroshi)  (80569575)	筑波大学・システム情報系・准教授    (12102)	

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0件

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	エジンバラ大学			
ポルトガル	リスボン大学			

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	フライブルク大学			