

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：62615

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K20247

研究課題名（和文）動的型付けと静的型付けを融合した漸進的型付けのメタ理論

研究課題名（英文）Metatheory for gradual typing integrating dynamic and static typing

研究代表者

関山 太郎（Sekiyama, Taro）

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・准教授

研究者番号：80828476

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では「漸進的型付けの更なる理論的発展」と「漸進的型付けの限界を探る」ため、パラメトリック多相性（以下、単に多相性と呼ぶ）と呼ばれる、型に基づくプログラム部品の再利用機構に着目した。特に(1)多相性と空間効率性の関係、(2)多相性とデータ構造の関係、(3)多相性と計算効果の関係について研究を行った。その結果、(1)漸進的型付けでは多相性と空間効率性にはトレードオフがあることを証明、(2)拡張可能なデータ構造と列多相の漸進的型付けへの導入に成功、(3)多様な計算効果を実現するためのプログラミング機構である代数的エフェクトハンドラに対し、新たな多相型システムの構築に成功、という成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

漸進的型付けは動的・静的型付けの長所を臨機応変に使い分けることのできる新たな型付け方式で、TypeScriptをはじめ、様々なプログラミング言語で実用化されている。一方漸進的型付けによって保証される性質を理論的に解析することは、漸進的型付けの有用性を明らかにする上で重要である。本研究の目的は「漸進的型付けの更なる発展」と「漸進的型付けの限界を探る」ための理論研究を推進することである。またこれらの研究を通じ、将来的に「漸進的型付けの核はどこにあるのか」という根源的かつメタ的な問いを明らかにし、漸進的型付けの研究を正しい方向に加速させ、その抜本的な改革につながることを目指す。

研究成果の概要（英文）：This research aims to "advance the theory of gradual typing" and "explore the limitation of gradual typing." To this end, we focused on parametric polymorphism, a type-based mechanism to enhance the reuse of program components. In particular, we studied (1) a relationship between parametric polymorphism and space-efficiency, (2) a relationship between parametric polymorphism and data structures, and (3) a relationship between parametric polymorphism and computational effects. The results we obtained can be summarized as follows: (1) We proved that there is a trade-off between parametric polymorphism and space-efficiency in gradual typing. (2) We successfully introduced extensible data structures and row polymorphism into gradual typing. (3) We successfully provided novel polymorphic type systems for algebraic effect handlers, a programming mechanism to implement various computational effects in a programmable manner.

研究分野：ソフトウェア

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 多相性 計算効果

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多くのプログラミング言語では型に関するエラー(型エラー)の検出がサポートされており、その中でも型エラーを実行時に検出する動的型付け言語(例: Ruby、Python、PHP など)と、実行前に検出する静的型付け言語(例: Java、C++、OCaml、Haskell など)に大別することができる。これらの言語にはそれぞれ相補的な長所と短所があり、ソフトウェアの開発状況に応じて適切な型エラー検出方法も変化する。そのため一つの言語の中で動的型付け・静的型付けを混在させることのできる漸進的型付け(Gradual Typing)が注目されている。漸進的型付けは既に関数型プログラミングやオブジェクト指向プログラミングといった多彩なパラダイムに適応されていた他、多相性、継続や変更可能な状態などの計算効果、型推論といった、現代的なプログラミング言語がもつ様々な機能に拡張され、理論的にも多くの場合、漸進的型付けがもつべき性質が成り立つことが示されている。これらの理論的成功は漸進的型付けの拡張性を示すものであった一方、どのような場合に漸進的型付けはうまく導入することができ、どのような場合にはできないのか、といった点については明らかにされていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は「漸進的型付けの更なる発展」と「漸進的型付けの限界を探る」ための理論研究を推進することである。またこれらの研究を通じ、将来的には「漸進的型付けの核はどこにあるのか」という根源的かつメタ的な問いを明らかにし、漸進的型付けの研究を正しい方向に加速させ、またその抜本的な改革につながることを目指す。

3. 研究の方法

目的の一つである「漸進的型付けの限界」を探るため、本研究ではパラメトリック多相性(以下、単に多相性と呼ぶ)と呼ばれる、型に基づくプログラム部品の再利用機構に着目した。多相性を漸進的型付けに取り組みするための仕組みは既に Ahmed ら(2011)によって考案されていたが、多相性の重要な性質であるパラメトリシティ(パラメトリック多相なプログラム部品は、どのように具体化されても同じ挙動となることを示す性質)が成り立つかは長らく未解決問題であり、さらにパラメトリシティが成り立つことが Ahmed ら(2017)によって解決された後も、Toro ら(2019)により、パラメトリシティと graduality と呼ばれる、漸進的型付けの重要な性質(同じプログラム式に対し、静的型付けと動的型付けを適用した際の挙動の変化を定式化したもの)が両立しないことが示されていた。そのため、多相性に関する研究を更に進めることが、漸進的型付けの限界を探る糸口になると考え、次の項目について研究を進めた。

研究課題(1) 多相性と空間効率性の関係

研究課題(2) 多相性とデータ構造の関係

研究課題(3) 多相性と計算効果の関係

4. 研究成果

研究課題(1)の成果:

単純な漸進的型付けの下では、プログラム実行時のメモリ使用量が、動的型付けプログラムとして実行した場合と比べて、無制限に大きくならないような、空間効率の良い実装が Herman ら(2010)によって提案された。一方そのような空間効率の良い実装が多相性の下でも可能であるかは明らかではなかった。我々はこの問いを否定的な形で解決した。すなわち、(少なくとも Ahmed ら(2011)によって考案された、多相性を漸進的型付けに導入する標準的な方法を採用した場合)多相性を備えた漸進的型付け言語に対する空間効率の良い実装を与えることはできないことを、理論的に示した(Scheme and Functional Programming Workshop 2021にて発表)。また更に解析を進め、問題が起こるのは多相化されたプログラム部品が動的型によって具体化されたときにのみ起こることを発見した。この発見を応用し、完全なパラメトリシティを諦め、動的型以外の型で具体化された場合にのみパラメトリシティが保証されるような漸進的型付け言語であれば、空間効率の良い実装を与えることが可能であることを示した(PLDI 2024にて発表予定)。

研究課題(2)の成果:

データ構造の拡張可能性を高めるため、パラメトリック多相をデータ構造に応用したものと
して、列多相が知られている。我々は、多彩なデータ構造を表現することのできる拡張可能レ
コード・ヴァリエーションと列多相性で漸進的型付けを拡張し、型健全性という基本的性質が成り立つこ
とを証明した(WGT 2020 にて発表)。しかし、その言語体系の定義が複雑であり更なる拡張が困
難であると判断し、単純化を行い、graduality などのより多くの性質を示すことを目標にドイ
ツの University of Freiburg の研究者および学生と共同研究を進めている。また関連して、静
的型付けと動的型付けにおいて同じような状況で使われるデータ構造(例えば静的型付けのレ
コードと動的型付けのハッシュマップ)間の相互運用を実現する言語処理系の開発も行った(日
本ソフトウェア科学会大会 2022 にて発表)。

研究課題(3)の成果：

本研究課題では異なる計算効果を別個に扱うのではなく、様々な計算効果を統一的に導入する
ために、代数的エフェクトハンドラと呼ばれる仕組みを採用した。代数的エフェクトハンドラは
「残りの計算」を表わす継続を値として取り出すことのできるプログラミング機構で、これによ
り変更可能な状態、バックトラッキング、例外といった様々な計算効果を表現することが可能で
あることが知られている。本研究では代数的エフェクトハンドラを漸進的型付けに導入する前
段階として、まず代数的エフェクトハンドラと多相性の間の関係について研究を行った。既存研
究では多相的に扱える対象を値に限定することで多相性と代数的エフェクトハンドラを安全に
組み合わせることができていることが知られていたが、本研究では代数的エフェクトハンドラの表
現力を制限することで、任意の式に対して安全に多相性を与えることが可能になることを示し
た(ESOP2019 にて発表)。また別の仕組みとして、計算効果に与えられる型を制限し、代数的エ
フェクトハンドラがその型に従って計算効果を実装している限り、任意の式に対して安全に多
相性を与えることが可能であることも示した(ICFP2020、JFP2024 にて発表)。またこれらの理論
的基礎付けの一步として、暗黙的なパラメトリック多相の下で CPS 変換と呼ばれる、継続の基礎
的な意味付けを行うために用いられる変換が、型を保存することを示した(ICFP2021)。一方、こ
れらの成果を応用し、代数的エフェクトハンドラと多相性を漸進的型付けに導入する研究につ
いては、将来の課題となっている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Atsushi Igarashi, Shota Ozaki, Taro Sekiyama, Yudai Tanabe	4. 巻 -
2. 論文標題 Space-Efficient Polymorphic Gradual Typing, Mostly Parametric	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages (PLDI)	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) 10.1145/3656441	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 Sekiyama Taro, Unno Hiroshi	4. 巻 7
2. 論文標題 Temporal Verification with Answer-Effect Modification: Dependent Temporal Type-and-Effect System with Delimited Continuations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages (POPL)	6. 最初と最後の頁 2079 ~ 2110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3571264	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 Kawamata Fuga, Unno Hiroshi, Sekiyama Taro, Terauchi Tachio	4. 巻 8
2. 論文標題 Answer Refinement Modification: Refinement Type System for Algebraic Effects and Handlers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages (POPL)	6. 最初と最後の頁 115 ~ 147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3633280	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 梅木 孝輔、関山 太郎、五十嵐 淳	4. 巻 -
2. 論文標題 暗黙に相互運用可能なレコードとハッシュテーブルのための型推論とコンパイル手法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本ソフトウェア科学会第39回大会論文集	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 無
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 Sekiyama Taro, Tsukada Takeshi	4. 巻 5
2. 論文標題 CPS transformation with affine types for call-by-value implicit polymorphism	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages (ICFP)	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) 10.1145/3473600	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 Kobayashi Naoki, Sekiyama Taro, Sato Issei, Unno Hiroshi	4. 巻 12913
2. 論文標題 Toward Neural-Network-Guided Program Synthesis and Verification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science (SAS)	6. 最初と最後の頁 236~260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-88806-0_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 Sekiyama Taro, Tsukada Takeshi, Igarashi Atsushi	4. 巻 4
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 (ICFP)	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 Takamasa Okudono, Masaki Waga, Taro Sekiyama, Ichiro Hasuo	4. 巻 34
2. 論文標題 Weighted Automata Extraction from Recurrent Neural Networks via Regression on State Spaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI)	6. 最初と最後の頁 5306-5314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1609/aaai.v34i04.5977	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 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 関山 太朗
2. 発表標題 計算効果の推論技術
3. 学会等名 PPLサマースクール（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taro Sekiyama
2. 発表標題 Answer-Refinement Modification: A refinement type system for algebraic effect handlers
3. 学会等名 Shonan Meeting No.203 (Effect Handlers and General-Purpose Languages)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅木 孝輔、関山 太朗、五十嵐 淳
2. 発表標題 暗黙に相互運用可能なレコードとハッシュテーブルのための型推論とコンパイル手法
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第39回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sekiyama Taro
2. 発表標題 CPS transformation with affine types for call-by-value implicit polymorphism
3. 学会等名 International Conference on Functional Programming (ICFP)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoki Kobayashi
2. 発表標題 Toward Neural-Network-Guided Program Synthesis and Verification
3. 学会等名 Static Analysis Symposium (SAS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shota Ozaki
2. 発表標題 Is Space-Efficient Polymorphic Gradual Typing Possible?
3. 学会等名 Scheme and Functional Programming Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sekiyama Taro
2. 発表標題 CPS Transformation with Affine Types for Implicit Polymorphism
3. 学会等名 Dagstuhl Seminar 20312, Scalable Handling of Effects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関山 太郎
2. 発表標題 機械学習によるループ不変条件の発見
3. 学会等名 第24回情報論的学習理論ワークショップ (企画セッション1: ソフトウェア検証と機械学習) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 兼光 琢真
2. 発表標題 分岐付き確率的プログラミング言語の実現に向けて
3. 学会等名 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 (PPL 2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taro Sekiyama, Takeshi Tsukada, Atsushi Igarashi
2. 発表標題 Signature restriction for polymorphic algebraic effects
3. 学会等名 The 25th ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming (ICFP) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taro Sekiyama, Takeshi Tsukada, Atsushi Igarashi
2. 発表標題 Signature Restriction for Polymorphic Algebraic Effects ICFP 2020
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 (PPL2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅木 孝輔, 関山 太郎, 五十嵐 淳
2. 発表標題 レコードとハッシュテーブルの暗黙な相互運用を可能にする型推論とコンパイル手法
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 (PPL2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takamasa Okudono, Masaki Waga, Taro Sekiyama, Ichiro Hasuo
2. 発表標題 Weighted Automata Extraction from Recurrent Neural Networks via Regression on State Spaces
3. 学会等名 AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI) (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 ACM SIGPLAN Workshop on Gradual Typing (WGT) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関山 太郎
2. 発表標題 Weighted Automata Extraction from Recurrent Neural Networks via Regression
3. 学会等名 第22回情報論的学習理論ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

関山 太郎の researchmap ポータルページ https://researchmap.jp/t-sekiym/

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
ドイツ	University of Freiburg			