

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12636

研究課題名(和文) 遷移問題のパラメータ複雑性に関する研究

研究課題名(英文) On the parameterized complexity of the reconfiguration problems

研究代表者

鈴木 顕 (Suzuki, Akira)

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：10723562

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、パラメータ複雑度の観点から、遷移問題を解く高速なアルゴリズムの開発を行った。パラメータ複雑度とは、一般に解くことが難しいとされている問題のあるパラメータに着目し、問題の複雑性、すなわちそのパラメータが小さければ簡単に解くことができるのか、あるいは小さくてもなお難しい問題なのか、について研究する分野であり、問題の難しさの要因を明らかにするという理論的な興味だけでなく、実社会での応用時にも計算困難な問題を高速に解くための足掛かりとなる重要な研究である。本研究では、様々な遷移問題に対して、容易性・困難性の両面から結果を与えることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では遷移問題を扱う。遷移問題とは、ある問題の2つの解が与えられた際に、その一方の解からもう一方の解へと段階的に遷移可能かどうかを判定する問題であり、遷移問題の多くはPSPACE完全と呼ばれる、非常に解くことが難しいとされている問題のクラスに属していることが知られている。一方でこの遷移問題は、電力やインターネット通信等のサービスを止めることなく提供する場合や、監視カメラの配置や運送方法の最適化など、実社会での応用先が非常に多い問題であり、パラメータ複雑度の観点から、遷移問題を解く高速なアルゴリズムの開発を目指す本研究が社会に与えるインパクトは大きい。

研究成果の概要(英文)：In this research, we treat a fast algorithm for solving the reconfiguration problems from the viewpoint of parameterized complexity. Parameterized complexity is a field to study the complexity of a problem, focusing on the parameters of the problem that are generally difficult to solve. In other words, we investigate that when the parameter of a problem is small, can the problem be solved easily, or still difficult. This research is not only a theoretical interest in clarifying the factor of the difficulty of the problem, but also an important research that serves as a stepping-stone for solving a difficult-to-calculate problem at the time of application in the real world.

In this research, we succeeded in giving results to various reconfiguration problems in terms of both ease and difficulty.

研究分野：アルゴリズム理論

キーワード：アルゴリズム理論 組合せ遷移 グラフ理論

1. 研究開始当初の背景

従来からよく研究されてきた問題に、ある条件を満たす解が存在するかどうかを判定する、「探索問題」や、ある条件を満たす解を全て列挙する「列挙問題」等があるが、「遷移問題」は、そのどちらとも異なる問題である。遷移問題は、問題例としてある条件を満たす解が2つ与えられ、その一方の解からもう一方の解へと段階的に遷移可能かどうかを判定する問題である。もし15パズルをご存知であれば想像していただきたい。15パズルは、与えられた盤面から、目標の盤面へ、空いているマスに駒を移動させるという操作を繰り返して遷移させるパズルである。

図1はグラフの頂点彩色問題の遷移問題である。グラフと使用可能な色数が与えられた際に、頂点彩色を探す探索問題や、全ての頂点彩色を列挙する列挙問題と異なり、遷移問題ではグラフの2種類の頂点彩色が与えられ、その一方の頂点彩色から1点ずつ色を変えていくことで、もう一方の頂点彩色へと、頂点彩色の条件を満たしたまま到達することが可能かどうかを判定する。

この遷移問題に対して、学術的な視点からアプローチされたのは最近の事である。2006年にGopalanらは充足割当問題に対する遷移問題を、2007年にBonsmaらはグラフの点彩色問題に対する遷移問題を提唱した。その後2008年に、伊藤らによって様々なグラフ上の問題に対する遷移問題が提唱され、遷移問題の知名度は大きく上昇した。現在では遷移問題に関するワークショップ「International Workshop on Combinatorial Reconfiguration (CoRe)」が開催されたり、SIAMの国際会議「Conference on Discrete Mathematics」で遷移問題に関するセッションが用意されたりと、遷移問題に対する研究は世界各地で盛んに行われている。

遷移問題が研究され始めたものの、得られる結果は困難性に関する結果ばかりであり、得られたアルゴリズムもほぼ自明なものばかりであった。しかし、最近になって、探索問題で培われてきた様々なアルゴリズムのテクニックを遷移問題に適用することに成功し始める研究者が出てきた。報告者もその一人である。報告者は、従来探索問題を対象に考えられてきたパラメータ複雑度の概念を、遷移問題に対して適用した。パラメータ複雑度とは、一般的に解くことが難しいとされている問題のあるパラメータに着目し、問題の複雑性、すなわちそのパラメータが小さければ簡単に解くことができるのか、あるいは小さくてもなお難しい問題なのか、について研究する分野である。なお、この結果は報告者が研究開始当初のさらに3年前カナダに留学した際に受け入れてくださった研究グループのメンバーとの共同研究であり、パラメータ複雑度の概念を遷移問題に対して適用した世界で最初の論文であった。

遷移問題は近年着目を浴びた新しい分野の問題であるが、その研究は国内外で盛んにされており、今後ますます発展していくと予想される。研究開始当初時点で、探索問題で培われてきた様々な手法を遷移問題に取り入れようという動きが出始めているが、先述の通り、遷移問題にパラメータの概念を取り入れたのは報告者であり、この分野をこれからも第一線で切り開き続けて行きたいと考えていた。

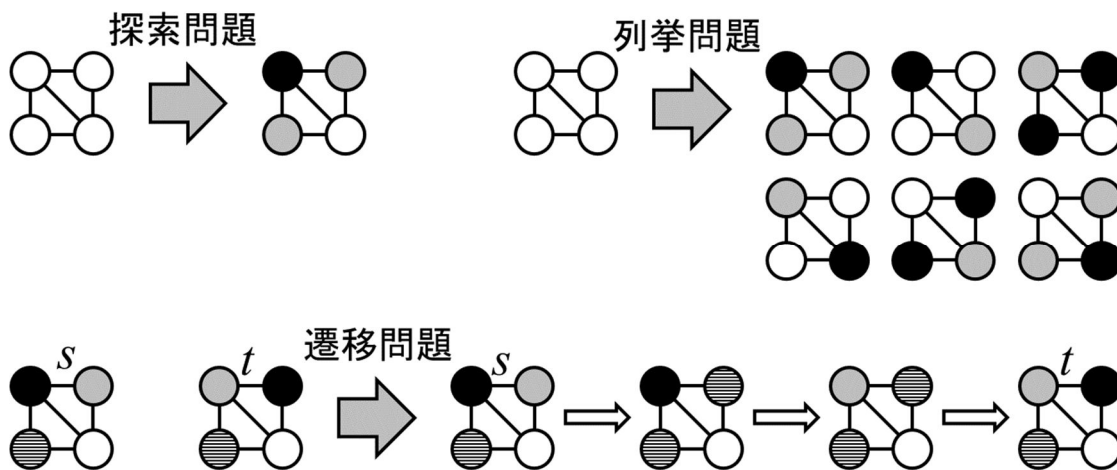


図1：グラフの頂点彩色の探索問題・列挙問題・遷移問題。

2. 研究の目的

グラフの問題は、ローカルな問題とグローバルな問題の2つに分けることができる。前者は頂点彩色問題や独立点集合問題など、解の妥当性を確認する際に、各点のすぐ近くのみを確認するだけでよい問題であり、後者はフィードバック点集合問題やハミルトンサイクル問題など、解の妥当性を確認する際にグラフ全体を見る必要がある問題である。

報告者が遷移問題に対してパラメータ複雑度の概念を導入して以来、世界中で様々な研究グループが様々な遷移問題に対する固定パラメータアルゴリズムを与えている。しかし、報告者自身の結果も含め、それらの結果の多くは、ローカルな問題の遷移問題に対するものであり、グローバルな問題の遷移問題に対する結果は一部存在はするものの、非常に限られたグラフクラス

にのみ適用できるものであった。そこで、本研究では、グローバルな問題の遷移問題に対する固定パラメータアルゴリズムの開発を目指す。一方で、遷移問題に対する既存の固定パラメータアルゴリズムは、ローカルな問題特有の性質を使用したアルゴリズムが多く、それらのアルゴリズムをそのままグローバルな問題に適用することはできない。そこで本研究では、まずいくつかの特定のグローバルな問題に対して固定パラメータアルゴリズムを与え、それを足掛かりにし、より汎用性の高いアルゴリズムの開発を目指す。

3. 研究の方法

本研究の具体的な研究計画・方法について、前半と後半の二つに分けて記述する。前半は、本研究の最終目標である後半の研究のための種を蒔く研究であるが、特に期間を区切ることせず、前半の研究から後半の研究へ柔軟にシフトしていった。図2は本研究計画の概略図である。
[前半の研究]

前半の研究では、いくつかの特定のグローバルな問題の遷移問題を対象とし、固定パラメータアルゴリズムの開発を目指す。その最初の目標として、フィードバック点集合の遷移問題及びハミルトンサイクルの遷移問題を対象とする。

目標1. フィードバック点集合の遷移問題に対する固定パラメータアルゴリズムの開発。

目標2. ハミルトンサイクルの遷移問題に対する固定パラメータアルゴリズムの開発。

目標3. その他、グローバルな問題の遷移問題に対する固定パラメータアルゴリズムの開発。

[後半の研究]

後半では、前半の研究で得られた結果や知見を基にアルゴリズムを一般化し、「問題がこのような性質さえ持っていればどのような問題でも解ける」といった、より汎用性の高いアルゴリズムの開発を行う。前半の研究で得られた複数の結果の共通点や相違点を詳しく解析することは、後半の研究の方向性を決めるにあたり、大きな指標になると考えられる。

目標4. より汎用性の高い固定パラメータアルゴリズムの開発。

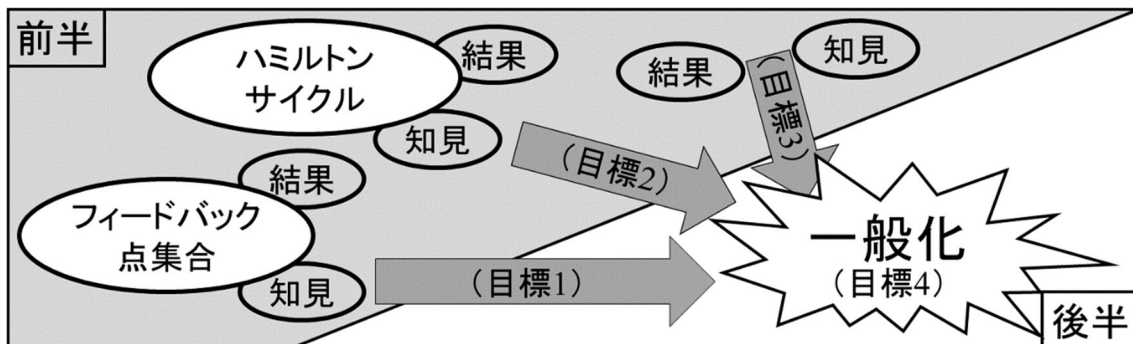


図2：研究計画の概略図

4. 研究成果

目標1. フィードバック点集合の遷移問題に対する固定パラメータアルゴリズムの開発。

フィードバック点集合の遷移問題に対し、入力グラフを限定した際に、高速に解くことのできるアルゴリズムを与えた。先述の通り、フィードバック点集合問題はグローバルな問題であり、既知の手法はほとんど通用しないが、入力グラフを制限する手法は様々な結果が知られており、今回はそのうちのひとつを本研究課題に適用することに成功した。

目標2. ハミルトンサイクルの遷移問題に対する固定パラメータアルゴリズムの開発。

初年度は2つのハミルトンサイクルが互いに遷移可能である十分条件を与えるのみにとどまっていたが、2年目3年目でこのアルゴリズムを足掛かりに改良を進め、最終的に区間グラフへの改良に成功するなど、与えた結果をさらに一般化することに成功した。

目標3. その他、グローバルな問題の遷移問題に対する固定パラメータアルゴリズムの開発。

積極的に国内外の研究者と交流を行い、独立点集合遷移問題、誘導部分グラフ遷移問題など、様々な遷移問題に対して、様々な結果を得ることが出来た。次ページ以降示す通り、得られた成果の多くは既に論文にまとめられ、学術雑誌や国際会議で発表を行っている。

目標4. より汎用性の高い固定パラメータアルゴリズムの開発。

現在は、これまで得られた結果を基に、計算機科学の分野で古くからよく研究されてきた概念に対して遷移問題のフレームワークから捉えることで、より汎用性の高いアルゴリズムを与えるべく研究を進めている。これらについては研究機関終了後も継続して研究していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ito Takehiro, Kaminski Marcin, Ono Hiroataka, Suzuki Akira, Uehara Ryuhei, Yamanaka Katsuhisa	4. 巻 -
2. 論文標題 Parameterized complexity of independent set reconfiguration problems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Discrete Applied Mathematics	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） 10.1016/j.dam.2020.01.022	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 Hanaka Tesshu, Ito Takehiro, Mizuta Haruka, Moore Benjamin, Nishimura Naomi, Subramanya Vijay, Suzuki Akira, Vaidyanathan Krishna	4. 巻 806
2. 論文標題 Reconfiguring spanning and induced subgraphs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 553 ~ 566
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tcs.2019.09.018	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 Yamanaka Katsuhisa, Demaine Erik D., Horiyama Takashi, Kawamura Akitoshi, Nakano Shin-ichi, Okamoto Yoshio, Saitoh Toshiki, Suzuki Akira, Uehara Ryuhei, Uno Takeaki	4. 巻 23
2. 論文標題 Sequentially Swapping Colored Tokens on Graphs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Graph Algorithms and Applications	6. 最初と最後の頁 3 ~ 27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7155/jgaa.00482	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 MANIWA Hiroki, OKI Takayuki, SUZUKI Akira, UCHIZAWA Kei, ZHOU Xiao	4. 巻 E101.A
2. 論文標題 Computational Power of Threshold Circuits of Energy at most Two	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1431 ~ 1439
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.E101.A.1431	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 OSAWA Hiroki, SUZUKI Akira, ITO Takehiro, ZHOU Xiao	4. 巻 E101.A
2. 論文標題 The Complexity of (List) Edge-Coloring Reconfiguration Problem	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 232 ~ 238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E101.A.232	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26件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Alexandre Blanche, Paul Ouvrard, Haruka Mizuta and Akira Suzuki
2. 発表標題 Decremental optimization of dominating sets under the reconfiguration framework
3. 学会等名 The 31st International Workshop on Combinatorial Algorithms (IWOCA 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kei Kimura and Akira Suzuki
2. 発表標題 Trichotomy for the reconfiguration problem of integer linear systems
3. 学会等名 The 14th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation (WALCOM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Duc A. Hoang, Akira Suzuki and Tsuyoshi Yagita
2. 発表標題 Reconfiguring k-path vertex covers
3. 学会等名 The 14th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation (WALCOM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Marthe Bonamy, Marc Heinrich, Takehiro Ito, Yusuke Kobayashi, Haruka Mizuta, Moritz Muhlenthaler, Akira Suzuki and Kunihiro Wasa
2. 発表標題 Shortest reconfiguration of colorings under Kempe-changes
3. 学会等名 The 37th International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 慧, 鈴木 顕
2. 発表標題 整数計画における遷移問題の計算量
3. 学会等名 日本応用数学会, 第16回 研究部会連合発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 慧, 鈴木 顕
2. 発表標題 Computational complexity of the reconfiguration problem of integer linear systems
3. 学会等名 2019年度冬のLAシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Duc A. Hoang, Akira Suzuki, Tsuyoshi Yagita
2. 発表標題 k-バス頂点被覆の遷移問題について
3. 学会等名 九州地区におけるOR若手研究交流会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Duc A. Hoang, Akira Suzuki, Tsuyoshi Yagita
2. 発表標題 Algorithms for k-path vertex cover reconfiguration problem
3. 学会等名 コンピューターション研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiro Ito, Jun Kawahara, Shin-ichi Minato, Yota Otachi, Toshiki Saitoh, Akira Suzuki, Ryuhei Uehara, Takeaki Uno, Katsuhisa Yamanaka, Ryo Yoshinaka
2. 発表標題 Shortest universal sequences of adjacent transpositions
3. 学会等名 コンピューターション研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Alexandre Blanche, Paul Ouvrard, Haruka Mizuta and Akira Suzuki
2. 発表標題 Optimizing dominating sets under constrained transformation
3. 学会等名 The fifth Bordeaux Graph Workshop (BGW 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Marthe Bonamy, Marc Heinrich, Takehiro Ito, Yusuke Kobayashi, Haruka Mizuta, Moritz Muhlenthaler, Akira Suzuki and Kunihiro Wasa
2. 発表標題 Diameter of colorings under Kempe changes
3. 学会等名 The 25th International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Horiyama, Shin-Ichi Nakano, Toshiki Saitoh, Koki Suetsugu, Akira Suzuki, Ryuhei Uehara, Takeaki Uno and Kunihiro Wasa
2. 発表標題 Max-Min 3-dispersion Problems
3. 学会等名 The 25th International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiro Ito, Haruka Mizuta, Naomi Nishimura and Akira Suzuki
2. 発表標題 Incremental optimization of independent sets under the reconfiguration framework
3. 学会等名 The 25th International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehiro Ito, Haruka Mizuta, Naomi Nishimura and Akira Suzuki
2. 発表標題 Optimizing independent sets under constrained transformation
3. 学会等名 The 11th Hungarian-Japanese Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications (HJ 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大澤 弘基, 鈴木 顕, 伊藤 健洋, 周 曉
2. 発表標題 点彩色の有向制約付き遷移問題について
3. 学会等名 数理計画問題に対する理論とアルゴリズムの研究
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩本 裕二, 鈴木 顕, 伊藤 健洋, 周 暁
2. 発表標題 グラフ上の経路固定サーバ割当問題のパラメータ複雑性
3. 学会等名 情報処理学会第81 回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊池 正太, 鈴木 顕, 伊藤 健洋, 周 暁
2. 発表標題 グラフ上のパケットルーティング問題のパラメータ複雑性に関する研究
3. 学会等名 情報処理学会第81 回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tesshu Hanaka, Takehiro Ito, Haruka Mizuta, Benjamin Moore, Naomi Nishimura, Vijay Subramanya, Akira Suzuki and Krishna Vaidyanathan
2. 発表標題 Reconfiguring spanning and induced subgraphs
3. 学会等名 アルゴリズム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Osawa, Akira Suzuki, Takehiro Ito and Xiao Zhou
2. 発表標題 Algorithms for coloring reconfiguration under recolorability constraints
3. 学会等名 The 29th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大澤 弘基, 鈴木 顕, 伊藤 健洋, 周 暁
2. 発表標題 一般化彩色遷移問題に対する線形時間アルゴリズム
3. 学会等名 コンピューテーション研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Horiyama, Shin-ichi Nakano, Toshiki Saitoh, Koki Suetsugu, Akira Suzuki, Ryuhei Uehara, Takeaki Uno, Kunihiro Wasa
2. 発表標題 Max-min dispersion problems
3. 学会等名 コンピューテーション研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Suzuki,
2. 発表標題 On the dominating set reconfiguration problem
3. 学会等名 The First Workshop on Development of Algorithmic Techniques for Combinatorial Reconfiguration (The first DATCORE workshop) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tesshu Hanaka, Takehiro Ito, Haruka Mizuta, Benjamin Moore, Naomi Nishimura, Vijay Subramanya, Akira Suzuki and Krishna Vaidyanathan
2. 発表標題 Reconfiguring spanning and induced subgraphs
3. 学会等名 The 24th International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayato Konno, Akira Suzuki, Katsuhisa Yamanaka, Takehiro Ito, Xiao Zhou
2. 発表標題 Colored token swapping problem on graphs
3. 学会等名 2017年度冬のLAシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Osawa, Akira Suzuki, Takehiro Ito and Xiao Zhou
2. 発表標題 Complexity of coloring reconfiguration under recolorability constraints
3. 学会等名 The 28th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroki Osawa, Akira Suzuki, Takehiro Ito, Xiao Zhou
2. 発表標題 Complexity of coloring reconfiguration under recolorability constraints
3. 学会等名 アルゴリズム研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Akira Suzuki's Web Site
<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/alg/suzuki/>

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