

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11813

研究課題名（和文）グラフのライドシェアリング問題とその応用に関する研究

研究課題名（英文）The Ridesharing Problem of Graphs and Its Applications

研究代表者

周 暁 (Zhou, Xiao)

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：10272022

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）：本研究ではグラフのライドシェアリング問題を解く効率のよいアルゴリズムの設計論を構築するとともに、大規模災害発生時の緊急支援物資輸送などへの応用可能な経路策定方法論を研究する目的であり、本研究で得られた成果として、グラフ特に木や木幅が小さいグラフに関する理論的な展開とアルゴリズムの効率化があげられる。

本研究で開発したアルゴリズムは、木やコグラフなどにおける数多くの組合せ問題に適用可能と思われ、効率よいアルゴリズム、多項式時間アルゴリズム、FPTアルゴリズムの開発に貢献でき、しかも得られた成果をまとめた5編の学術論文を発表しており、高く評価できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的貢献として、グラフ特に木や直並列グラフや木幅が小さいグラフに関する理論的な展開とアルゴリズムの効率化があげられる。特に木に対しては、グラフの分割と巧みな動的計画法を導入して、FPTアルゴリズムを開発することにも成功した。特に本研究で開発したアルゴリズムは、木やコグラフにおける数多くの組合せ問題に適用可能と思われ、効率よいアルゴリズム、FPTアルゴリズムの開発に役に立つと思っている。本研究で得られた成果をまとめた5編の学術論文が発表されている。これらのアルゴリズムの開発で導入された手法は多くの組合せ問題に応用可能であり、理論計算機科学分野の重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to construct an efficient algorithm design theory for solving the ride-sharing problem of graphs, and to study a route formulation methodology that can be applied to the transportation of emergency relief supplies in the event of a large-scale disaster. The results of the research include the theoretical development of graphs, especially those of trees and graphs with small tree widths, and the efficiency of algorithms. I think that the algorithm developed in this research can be applied to many combination problems in trees and cographs, etc., and can contribute to the development of efficient algorithms, polynomial time algorithms, and FPT algorithms. We have published 5 academic papers summarizing the results obtained in this research, which can be highly evaluated.

研究分野：グラフアルゴリズム

キーワード：グラフ 木 木幅 アルゴリズム FPTアルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

計算量理論・アルゴリズムの分野において、グラフに関する様々な組み合わせ問題を解くアルゴリズムの研究が活発に行われてきている。これらの組み合わせ問題には、現実世界に現れる重要な問題が多く含まれている。

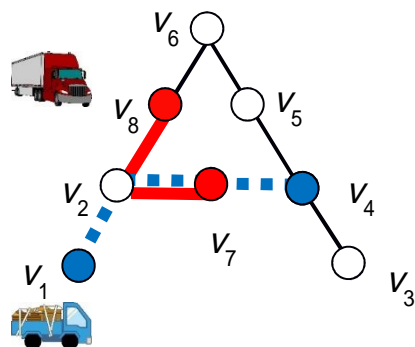


図1

グラフのライドシェアリング問題はそのうちの一つである。グラフのライドシェアリング問題は、大規模災害発生時の緊急支援物資輸送経路策定に、グラフを用いて定式化することにより応用可能である。例えば、2011年(平成23年)3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では災害時に食料や燃料などの緊急支援物資輸送の遅れにより、何千万人もの市民生活に影響があった。このような震災時の問題を解決するための方策の一つとして、刻々変化している道路網の状況に応じた緊急支援物資輸送の経路を効率的に作成する自動化システムがあげられる。この

車両 $i$	始点 $s_i$	終点 $t_i$	経路 $P_i$	容量 $c_i$	荷物量 $n_i$	寄り道時間制限 $d_i$
1	$v_1$	$v_4$	$v_1 \Rightarrow v_2 \Rightarrow v_7 \Rightarrow v_4$	30	10	3
2	$v_8$	$v_7$	$v_8 \Rightarrow v_2 \Rightarrow v_7$	12	10	3

図2

経路策定はグラフを用いてモデル化することができる。例えば、図1のように、町や交差点をグラフの点とし、町の間、交差点の間、町と交差点の間に設置された道路をグラフの辺とする。各道路の通過時間

をこの道路に対応するグラフの辺に重みとして辺に割り当てられる。図2のように、使用可能な緊急支援物資輸送車両  $i$  にそれぞれ出発点  $s_i$ 、目的地(終点)  $t_i$ 、荷物を積む容量  $c_i$ 、積む予定支援物資の大きさ  $n_i$ 、最短運送経路  $P_i$  が与えられる。さらに物資輸送車両を減らすために、運送車両をシェアし、輸送途中で車両の積む容量があれば、荷物の追加も可能であり、しかも輸送途中で物資を届けること(荷下ろし)も可能である。しかし緊急支援物資輸送のため、指定されている時間内に物資が届く必要があり、そのために、各車両  $i$  に最短運送経路  $P_i$  から離れ、ほかの物資の追加積載や届くため寄り道の時間上限  $d_i$  が与えられている。説明しやすいため、図1にあるグラフの辺の重みを1とする。つまり、各道路の通過時間を1とする。図1の道路網において、図2のような2つ車両と各車両の始点、終点、予定経路、車両の積む荷物容量、運びたい荷物の容量などが与えられている。災害発生時に使用する可能な道路は限りがあり、できるだけ少ない数の車両で、しかも指定された時間内ですべての物資輸送経路を求める問題は緊急支援物資輸送経路策定問題である。例えば、経路  $v_1 \ v_2 \ v_8 \ v_2 \ v_7 \ v_4$  で、車両  $i=1$  を一台のみ使用している物資輸送経路であり、 $v_8$  に寄り道することで、少ない数の車両ですべての物資輸送可能である。緊急支援物資輸送経路策定問題はグラフのライドシェアリング問題の特殊なケースであり、ライドシェアリング問題を解く効率のよいアルゴリズムの構築ができると、実用

上も意義が大きい。

ライドシェアリング問題は 1979 年に K. Ghoseiri らによって提案され、最近活発に研究されている。2016 年に Gu らはスターというグラフに対してすらライドシェアリング問題が NP 困難であることを証明した。しかし、近似困難性やパラメータ複雑性については未解決であり、それらを解く効率のよい近似グラフアルゴリズムや FPT(Fixed-Parameter Tractable)アルゴリズムの設計論を構築することが研究目的である。

## 2 . 研究の目的

上記の緊急支援物資輸送経路策定問題を含む、実社会で生じる問題のほとんどは NP-困難であることが示されている。その一方で、構造がある程度限定されたグラフ、即ち木や部分  $k$  木と呼ばれるグラフを対象を制限した場合には、多くの NP-困難な計算問題が効率よく計算可能であることが明らかになってきている（研究業績参照）。本研究では、具体的に応用上よく現れるグラフのクラスである木や部分  $k$  木に対して、ライドシェアリング問題を解く効率のよい近似グラフアルゴリズムや FPT アルゴリズムの設計論を構築することが研究目的である。

本研究では実用社会によく現れるグラフ、木や部分  $k$  木に制限したグラフのクラスに対するライドシェアリング問題を解く効率のよい近似アルゴリズムや FPT アルゴリズムを研究対象とする。またその理論の根幹をなすと思われる“最大次数総和を保存するように動的な部分グラフへ分解するアルゴリズム”は従来にない独創的なアイデアである。木や部分  $k$  木において、動的計画法や分割統治法の設計理論を用いれば、数多くのグラフ組合せ問題に対して効率のよいアルゴリズムが得られている。例えば、辺素な道問題や辺素な閉路に分解する問題などを多項式時間で解く効率のよいアルゴリズムが得られる。

## 3 . 研究の方法

まず、具体例として緊急支援物資輸送経路策定問題を取り上げ、それを解くアルゴリズムを開発する。実際の（高速）道路網と同規模のグラフに対し、応用上許容される時間と精度で緊急支援物資輸送経路策定問題の近似解を求めるヒューリスティックアルゴリズムを構築し、その実用性を計算機上で検証する。具体的には、従来知られているアルゴリズムを本年度で購入予定の計算機に実装し、様々な入力グラフに対して実際にアルゴリズムの挙動を調べた。特に木に対する結果を拡張し、部分  $k$  木に拡張する予定である。部分  $k$  木は木の一般化であり、普通の木は部分  $1$  木であり、外平面グラフや直並列グラフは部分  $2$  木である。このように部分  $k$  木は直並列グラフの一般化ともいえる。具体的には、部分  $k$  木の分解木という木構造をもつ。分解木の各ノード  $X_i$  について、辺集合  $E(X_i)$  により誘導される  $G$  の部分グラフを  $G[X_i]$  と書く。ある組合せ問題を例として説明すると、その問題の  $G[X_i]$  に対するすべての許容解の集合を  $F$  とする。 $X_i$  での各解  $f \in F$  のベクトル表現  $S(X_i, f)$  をうまく定義することによって、 $X_i$  の解のベクトル表現の種類は高々グラフの入力サイズの多項式で抑えるように、 $X_i$  での同値類を特徴付ける関数を定義する。このようにすれば、 $T$  の葉から根に向かって、動的計画法を用いることによって、その問題を効率よく解くことができることを示すなどを調べた。得られたデータを解析し、グラフクラスを限定することで、なぜ既存のアルゴリズムが正しく動くのか明らかにした。むしろ、これは理論的に証明されていることであるが、それらのグラフ構造が本当に必要不可欠なのか調査した。これにより、グラフ構造とアルゴリズム手法の関係をより詳細に解明し、実験の解析を基に、各

アルゴリズムに共通して現れる手法が得られた。

#### 4 . 研究成果

研究実施計画通りに研究を進めてきた。本研究で得られた成果として、グラフを木に限定したヒューリスティックアルゴリズムを構築し、その実用性を計算機上で検証した。様々な入力に対して実際にヒューリスティックアルゴリズムの挙動を調べ、木の葉の数がある程度限定されたときに、多項式時間で解くアルゴリズムが存在することを明らかにした。

特に本研究で開発したアルゴリズムは、木、コグラフなどにおける数多くの組合せ問題に適用可能と思ひ、効率よいアルゴリズム、多項式時間アルゴリズム、FPT アルゴリズムの開発に役に立つと思っている。本研究で得られた成果をまとめた5編の学術論文を発表しており、高く評価できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yusuke Yanagisawa, Yuma Tamura, Akira Suzuki and Xiao Zhou	4. 巻 13025
2. 論文標題 Decremental optimization of vertex-coloring under the reconfiguration framework	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 27th International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2021), Lecture Notes in Computer Science (LNCS)	6. 最初と最後の頁 355-366
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 Yuma Tamura, Takehiro Ito and Xiao Zhou	4. 巻 849
2. 論文標題 Approximability of the Independent Feedback Vertex Set Problem for Bipartite Graphs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 227-236
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tcs.2020.10.026	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 Yuma Tamura, Takehiro Ito and Xiao Zhou	4. 巻 181
2. 論文標題 Minimization and Parameterized Variants of Vertex Partition Problems on Graphs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 31st International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC2020), Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)	6. 最初と最後の頁 40:1-40:13
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 Yuma Tamura, Takehiro Ito and Xiao Zhou	4. 巻 12049
2. 論文標題 Approximability of the Independent Feedback Vertex Set Problem for Bipartite Graphs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 286-295
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-39881-1_28	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 Tatsuhiko Hatanaka, Takehiro Ito and Xiao Zhou	4. 巻 E102-D
2. 論文標題 The Coloring Reconfiguration Problem on Specific Graph Classes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Trans. on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 423-429
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2018FCP0005	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 Haruka Mizuta, Tatsuhiko Hatanaka, Takehiro Ito and Xiao Zhou	4. 巻 138
2. 論文標題 Reconfiguration of Minimum Steiner Trees via Vertex Exchanges	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Leibniz International Proceedings in Informatics	6. 最初と最後の頁 79:1-79:11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.MFCS.2019.79	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 -

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Yusuke Yanagisawa, Yuma Tamura, Akira Suzuki and Xiao Zhou
2. 発表標題 Decremental optimization of vertex-coloring under the reconfiguration framework
3. 学会等名 The 27th International Computing and Combinatorics Conference (COCOON 2021) (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Yanagisawa, Akira Suzuki, Yuma Tamura and Xiao Zhou
2. 発表標題 Optimization variant of vertex-coloring reconfiguration problem
3. 学会等名 情報処理学会 第185回アルゴリズム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 颯介, 鈴木 顕, 伊藤 健洋, 周 暁
2. 発表標題 区間グラフに対するハミルトン閉路遷移問題
3. 学会等名 電子情報通信学会 2021年 総合大会 COMP 学生シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuma Tamura, Takehiro Ito and Xiao Zhou
2. 発表標題 Minimizing a Vertex Set Satisfying Specific Graph Properties
3. 学会等名 情報処理学会 第180回アルゴリズム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuma Tamura, Takehiro Ito and Xiao Zhou
2. 発表標題 Approximation of the Independent Feedback Vertex Set Problem
3. 学会等名 情報処理学会 第177回アルゴリズム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuma Tamura, Takehiro Ito and Xiao Zhou
2. 発表標題 Approximability of the Independent Feedback Vertex Set Problem for Bipartite Graphs
3. 学会等名 the 14th International Conference and Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuma Tamura, Takehiro Ito and Xiao Zhou
2. 発表標題 Approximability of the Independent Feedback Vertex Set Problem for Bipartite Graphs
3. 学会等名 Proceedings of the 14th International Conference and Workshop on Algorithms and Computation (WALCOM 2020), (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruka Mizuta, Tatsuhiko Hatanaka, Takehiro Ito and Xiao Zhou
2. 発表標題 Reconfiguration of Minimum Steiner Trees via Vertex Exchanges
3. 学会等名 Proceedings of the 44th International Symposium on Mathematical Foundations of Computer Science (MFCS 2019)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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