

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19746

研究課題名（和文）実応用に即した避難施設配置モデルの研究

研究課題名（英文）Research on evacuation facility location models for practical applications

研究代表者

東川 雄哉（Higashikawa, Yuya）

兵庫県立大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：20749486

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、理論計算機科学において知られている動的ネットワークフローを用いて、実応用に即した避難施設配置モデルを構築することである。動的ネットワークフローは、ネットワーク各所での横断時間や滞留時間を表現できるので、実際の災害において重大な問題である交通渋滞による避難時間の遅延を直接的に扱うことができる。本研究では、動的ネットワークフローに基づく避難施設配置問題について、災害発生時の避難者分布や道路閉塞状況の不確定要素を考慮に入れるなど、より現実の問題設定に沿った最適化問題として定式化した上で、問題の組合せ構造を解明し、それに基づく高速アルゴリズムの開発を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、避難計画に対して多くの研究がなされているが、実応用を目指す研究はシミュレーションを用いる定性的アプローチが中心である一方、理論研究の多くは現実への適用を真には考慮できていない。本研究は、現実の避難計画を策定するための理論基盤構築を目指している点で、世界的に類を見ない独自性を有している。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to construct an evacuation facility location model for practical applications using dynamic network flows, which are well known in theoretical computer science. Since dynamic network flows are defined over time, one can directly deal with delays in evacuation time due to traffic congestion, which is a serious problem in actual disasters. In this study, we formulated the evacuation facility location problems as optimization problems based on dynamic network flows in more realistic settings by taking into account uncertainties in disasters, such as the distribution of evacuees or road closure statuses when a disaster occurs. We then investigated the combinatorial structure of the problems, based on which efficient algorithms were developed.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ / 理論計算機科学

キーワード：動的ネットワークフロー 施設配置問題 アルゴリズム 避難計画

1. 研究開始当初の背景

2011年3月の東日本大震災では、津波によって多くの犠牲者が出たが、その際、津波に対するハード対策の限界が露呈し、ソフト対策としての避難の問題が注目を集めるようになっていた。それに相俟って、「津波防災地域づくりに関する法律」の制定、災害対策基本法の改定などにより、避難施設の整備が進み、これまで遅々として進まなかった津波避難タワーの設置や津波避難ビルの指定が加速化していた。また、「津波避難を想定した避難路、避難施設の配置および避難誘導について(第3版)」においても、避難施設の整備・避難路の確保・避難訓練等の事前準備の重要性が指摘されていた。

津波・洪水・原発事故など、緊急を要する大規模災害に対する避難計画を策定する場合、考慮すべき重要な問題として交通渋滞による避難時間の遅延が挙げられる。実際、東日本大震災においては、交通渋滞に起因する逃げ遅れにより多くの犠牲者が出たことが知られていた。しかし、実際に行われている避難計画においては(避難時間) = (移動距離) / (移動速度) と算定するなど、交通渋滞による避難時間の遅延が考慮されていなかった。一方で、マルチエージェントシミュレーションを用いることで都市における交通渋滞を表現することができるが、結果より得られる知見は定性的なものに留まり、避難計画の妥当性を定量的に保証するものにはなり得ない。

そこで、理論計算機科学において知られている、各頂点に避難者数あるいは避難所の可能収容数、各辺に容量と時間が与えられた無向グラフ上で定義される動的ネットワークフローを導入することが考えられる。ネットワーク各所での横断時間や滞留時間を表現できるので、実際の災害において重大な問題である交通渋滞による避難時間の遅延を直接的に扱うことができる。研究開始当初において、動的ネットワークフローに関するいくつかの重要な結果が知られていたが、計算時間や計算領域が非常に大きい、ネットワーククラスが限定されているなど、現実の問題にそのまま適用することは困難な状況であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、現実の避難計画に適用できるように動的ネットワークフローの理論的枠組みを整備し、実応用に即した避難施設配置モデルを構築することである。したがって、本研究では、「避難施設をどこに配置すれば良いか」という問いに対応する最適避難施設配置問題を扱うが、その部分問題である、「誰をどこに逃がせば良いか」という問いに対応する最速避難流問題についても扱う。これらの問題について、より現実に沿う設定を考慮した上で、問題に潜む組合せ構造の解明、およびそれに基づく高速アルゴリズムの開発を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、最速避難流問題と最適避難施設配置問題について、基礎理論の研究を深化させると同時に、より現実に対応した問題設定をフィードバックすることで、さらなる理論展開を試みる。特に本研究では、以下の(A)~(C)の研究テーマに取り組んだ：

- (A) 実用化を踏まえた問題設定の拡張およびアルゴリズムの開発
- (B) 問題に潜む組合せ構造の解明
- (C) 最先端理論・技術に基づく高速アルゴリズムの開発

4. 研究成果

本研究では、上述の(A)~(C)の研究テーマについて、下記(1)~(6)の結果を得た。さらに、総合的な結果として、動的フローネットワークにおける複数施設配置問題に対する研究代表者らの近年の結果について概説記事を執筆し、Springerから出版された書籍「Sublinear Computation Paradigm - Algorithmic Revolution in the Big Data Era」の第5章に採録された。本書籍は、オープンアクセスであることから多くの読者が目を通すことが期待されるなど、本研究課題による成果を発信する意味において大きな意味を持つと考えられる。

[成果1] (対応する研究テーマ:(C))

動的フローパスネットワークにおける平均避難時間最小化型 k -施設配置問題に対する新しい高速アルゴリズムを提案した。本結果では、問題が「リンクコストに凹モンジュ性を有する完全有向非巡回グラフにおける最小 k -リンクパス問題」に帰着されることを示し、最小 k -リンクパス問題に対する既存のアルゴリズムを適用した。リンクコストの計算については、各クエリ計算を劣線形時間で行えるデータ構造を新たに開発して用いている。本結果は、既存アルゴリズムの計算量を大きく改善しているだけに留まらず、同頂点上の避難者の異なる施設への避難を許可する一般の設定においても適用できる。本成果は、査読付き国際会議 The 14th Annual International Conference on Combinatorial Optimization and Applications

(COCO A2020)にて発表された。また、国際論文誌 Theoretical Computer Science の同会議による特集号に招待され、採録された。

[成果 2] (対応する研究テーマ:(A),(B))

各頂点の避難者数が共通の媒介変数に対する線形関数として付与されるパスネットワークにおいて、総避難時間に基づく最大後悔最小化問題シンク配置問題に対する多項式時間アルゴリズムを開発した。本成果は、査読付き国際会議 The 15th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation (WALCOM 2021)にて発表された。

[成果 3] (対応する研究テーマ:(A))

「同じ場所にいる避難者は同じ施設に避難する」という仮定を緩和した一般的なフローモデルについて、パスネットワークおよびサイクルネットワーク上の避難完了時間最小化施設配置問題に対する初の多項式時間アルゴリズムを開発した。本結果は査読付き国際会議 The 21th Symposium on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS2021)にて発表された。

[成果 4] (対応する研究テーマ:(A),(B))

容量一定の辺および単一避難施設を持つ動的フロー格子ネットワークにおいて、避難完了時間を求める効率的なアルゴリズムを開発した。避難完了時間は、一般のネットワークにおける最速避難流問題に対する既存の強多項式時間アルゴリズムによって得られるが、劣モジュラ関数最小化をサブルーチンとして複数回呼び出しているため計算時間が高次多項式となってしまう。本研究で提案したアルゴリズムは、ネットワークの構造に着目した劣モジュラ関数最小化を陽に行わないものであり、計算時間を大幅に改善できている。本成果は、日本オペレーションズ・リサーチ学会 2022 年秋季研究発表会にて発表された。

[成果 5] (対応する研究テーマ:(A))

容量一定の辺を持つ動的フロー格子ネットワークにおける避難完了時間最小化施設配置問題に対する多項式時間アルゴリズムを開発した。同問題に対しては、これまでパス・サイクル・木など限定されたネットワーククラスを扱う研究はあったが、本研究では複数のサイクルが存在するネットワークに対して初の多項式時間アルゴリズムを提案できている。関連分野における重要な結果であると言える。本成果は情報処理学会第 190 回アルゴリズム研究発表会にて発表された。

[成果 6] (対応する研究テーマ:(A),(B))

動的フローパスネットワークにおける歩車混合避難問題に対する多項式時間アルゴリズムを開発した。同問題について、一般のネットワークにおいては NP 困難であることが知られていたが、本研究によって多項式時間で問題が解けるネットワーククラスが存在が明らかとなった。本成果は情報処理学会第 190 回アルゴリズム研究発表会にて発表された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuya Higashikawa, Naoki Katoh, Junichi Teruyama, Koji Watase	4. 巻 873
2. 論文標題 Almost linear time algorithms for minsum k-sink problems on dynamic flow path networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 87-113
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tcs.2021.05.003	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 Robert Benkoczi, Binay Bhattacharya, Yuya Higashikawa, Tsunehiko Kameda, Naoki Katoh, Junichi Teruyama	4. 巻 96
2. 論文標題 Locating Evacuation Centers Optimally in Path and Cycle Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 21th International Symposium on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems (ATMOS2021)	6. 最初と最後の頁 13:1-13:19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4230/OASIcs.ATMOS.2021.13	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 該当する
1. 著者名 Yuya Higashikawa, Naoki Katoh, Junichi Teruyama, Koji Watase	4. 巻 LNCS12577
2. 論文標題 Almost Linear Time Algorithms for Minsum k-Sink Problems on Dynamic Flow Path Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th Annual International Conference on Combinatorial Optimization and Applications (COCO2020)	6. 最初と最後の頁 198-213
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-64843-5_14	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 Tetsuya Fujie, Yuya Higashikawa, Naoki Katoh, Junichi Teruyama, Yuki Tokuni	4. 巻 LNCS12635
2. 論文標題 Minmax Regret 1-Sink Location Problems on Dynamic Flow Path Networks with Parametric Weights	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 15th International Conference and Workshops (WALCOM 2021)	6. 最初と最後の頁 52-64
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-68211-8_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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yuya Higashikawa, Naoki Katoh, Junichi Teruyama, Koji Watase
2. 発表標題 Almost Linear Time Algorithms for Minsum k-Sink Problems on Dynamic Flow Path Networks
3. 学会等名 The 14th Annual International Conference on Combinatorial Optimization and Applications (COCO2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tetsuya Fujie, Yuya Higashikawa, Naoki Katoh, Junichi Teruyama, Yuki Tokuni
2. 発表標題 Minmax Regret 1-Sink Location Problems on Dynamic Flow Path Networks with Parametric Weights
3. 学会等名 The 15th International Conference and Workshops (WALCOM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸國 友貴, 加藤 直樹, 照山 順一, 東川 雄哉
2. 発表標題 移動時間と容量が一定である辺を持つ双方向グリッドネットワークにおける最速避難問題
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2022年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西井 彩乃, 照山 順一, 戸國 友貴, 東川 雄哉
2. 発表標題 格子状の動的フローネットワークにおける避難施設配置問題
3. 学会等名 情報処理学会 第190回アルゴリズム研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川 理紗, 加藤 直樹, 東川 雄哉, ベンコツィ ロバート
2. 発表標題 パス状の動的フローネットワークにおける混合避難問題
3. 学会等名 情報処理学会 第190回アルゴリズム研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 N. Katoh, Y. Higashikawa, H. Ito, A. Nagao, T. Shibuya, A. Sljoka, K. Tanaka and Y. Uno (Eds.)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 418
3. 書名 Sublinear Computation Paradigm: Algorithmic Revolution in the Big Data Era	

〔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
---------	---------