

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12641

研究課題名(和文)交通渋滞を考慮する最適避難施設配置モデルの構築

研究課題名(英文)Constructing location models for evacuation planning

研究代表者

東川 雄哉(Higashikawa, Yuya)

兵庫県立大学・社会情報科学部・准教授

研究者番号：20749486

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：2011年3月の東北地方太平洋沖地震においては、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る。したがって、都市における避難施設配置を災害下の交通渋滞を考慮していかに決定するかは避難計画において重要な問題であると言える。そこで、理論計算機科学において知られている動的フローネットワークと呼ばれる枠組みを導入することにより、交通渋滞による避難時間の遅延を表現することが出来る。本研究では、動的フローネットワークにおいて、各避難者の施設到達時間に基づく多様な評価コストを設定し、各評価コストの最小化問題として定義される施設配置問題に対して、高速なアルゴリズムを設計した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の特色は、交通渋滞を考慮した避難施設配置が可能な理論モデルを扱い、大規模な一般のネットワークに適用可能な高速アルゴリズムの構築を掲げている点にある。本研究において、対象のネットワーククラスを十分に一般化出来たとは言えないが、本研究の成果は、現実の避難計画に理論的保証を与える上で非常に大きな社会的意義を持つと考えられる。

研究成果の概要(英文)：It is known that when the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake occurred in Japan on March 11, 2011, many people failed to evacuate due to traffic congestion and lost their lives. Therefore, from the viewpoint of disaster prevention, it has now become extremely important to establish how to determine where evacuation shelters are located in cities. In order to model the delay of evacuation time, we introduce "dynamic flow networks" which is well-known in the literature on theoretical computer science. In the research project, we considered several criteria based on the evacuation time in dynamic flow networks, and developed efficient algorithms for each criterion.

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：動的フローネットワーク 施設配置問題 アルゴリズム 最大後悔最小化 避難計画

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月の東北地方太平洋沖地震においては、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る。したがって、都市における避難施設配置を災害下の交通渋滞を考慮していかに決定するかは避難計画において重要な問題だと言える。従来、理論計算機科学では、各頂点に重み、各辺に長さを持つ無向グラフにおいて(各頂点の重み)×(最近施設までの距離)の最大値/総和を施設配置の評価コストとするセンター/メディアン問題が知られており、避難施設配置への適用が考えられるが、これらのモデルでは渋滞による避難時間の遅延を表現出来ない。

一方、各頂点に避難者数、各辺に容量と移動時間を持つ無向グラフから成る動的フローネットワークを導入することで、避難者の頂点滞留を踏まえた施設到達時間を表現出来る。動的フローネットワークにおける施設配置問題では、その評価基準として 避難完了時間 / 平均避難時間が考えられる。また近年、研究代表者らは、実際の災害においてはその発生時間帯によって都市の人口分布が大きく変動することに着目し、動的フローネットワークにおける避難者分布の不確定性を考慮した施設配置モデルを初めて提案した。このモデルでは、各頂点の避難者数は値域で与えられ、全値域の直積集合の元をシナリオと呼ぶ。このとき、固定されたシナリオ  $S$  において、ある施設配置  $X$  と最適配置の避難コストの差を  $(X, S)$  の後悔として定義する。さらに、 $(X, S)$  の後悔の全シナリオについての最大値を  $X$  の最大後悔と呼ぶとき、最大後悔を最小化する施設配置の発見が問題の目的となる。本問題においても、避難コストを 避難完了時間 / 平均避難時間とする場合が考えられる。

研究開始当初において、限定された問題設定に対していくつかの結果が知られていたが、上述のように多様な評価基準のもとで交通渋滞を考慮した避難施設配置を行えるモデルの構築が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、動的フローネットワークにおいて、各避難者の施設到達時間に基づく多様な評価コストを設定し、各評価コストの最小化問題として定義される施設配置問題に対して、有用なアルゴリズムを設計することである。本研究では、これまで研究代表者が行ってきた限定的な問題設定に対する研究の知見に基づき、より一般的な問題設定に対する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、動的フローネットワークにおける避難施設配置に関して、多様な評価基準下において問題を設定する。具体的には以下の課題に取り組む。

#### (A) 各避難者数を確定的に持つ一般の動的フローネットワークにおける最適施設配置問題

避難完了時間基準下での計算複雑性の解明及び問題に対する高速アルゴリズムの開発

平均避難時間基準下での計算複雑性の解明及び問題に対する高速アルゴリズムの開発

#### (B) 各避難者数を値域で持つ一般の動的フローネットワークにおける最大後悔最小化施設配置問題

避難完了時間基準下での計算複雑性の解明及び問題に対する高速アルゴリズムの開発

平均避難時間基準下での計算複雑性の解明及び問題に対する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)- , (B)- のそれぞれについて、下記(1)～(6)の結果を得た。さらに、総括的な結果として、動的フローネットワークモデルに基づく施設配置問題に関する既往研究を網羅したサーベイ論文を執筆し、査読付国際学術誌 *The Review of Socionetwork Strategies* に採録された。本論文は、当該分野における世界初のサーベイ論文であり、当該分野の発展に寄与することが期待される。また、本研究課題による成果を発信する意味においても大きな意味を持つと考えられる。

##### **(A)- に関する結果**

- (1) パス状の動的フローネットワークにおける避難完了時間最小化型の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。本研究では、避難完了時間が一定以下となる施設配置の存在判定問題を劣線形時間で解くことができるデータ構造を開発し、パラメトリック探索などの最適化手法と組み合わせることで準線形時間アルゴリズムを与えた。また、辺容量一定の場合に対してはさらに高速なアルゴリズムを示しており、既存の結果 [Theoretical Computer Science, 2015] を改良している。本結果は、査読付国際会議 *The 15th Workshop on Algorithms and Data Structures (WADS2017)* において発表された。

##### **(A)- に関する結果**

- (2) パス状の動的フローネットワークにおける平均避難時間最小化型の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。本研究では、部分パスにおける（片方の端点への避難に関する）平均避難時間を効率的に計算できるデータ構造を開発し、動的計画法の枠組みと組み合わせることで、初の多項式時間アルゴリズムを与えた。また、辺容量一定の場合に対してはさらに高速なアルゴリズムを示しており、既存の結果 [Theoretical Computer Science, 2015] を改良している。本結果は、査読付国際会議 *The 29th International Workshop on Combinatorial Algorithms (IWOCA2018)* において発表された。さらに本会議の特集号に招待され、より改善された結果が査読付国際学術誌 *Theoretical Computer Science* に採録された。
- (3) 上記(4)の結果を改善し、アルゴリズムのさらなる高速化に成功した。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、(4)で得られた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。本結果の一部については、国際会議 *The 30th European Conference on Operational Research (EURO 2019)* において発表された。現在、より詳細にまとめた論文を、査読付国際会議に投稿している。

##### **(B)- に関する結果**

- (4) サイクル状の動的フローネットワークにおける最大後悔最小化型の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。本研究では、目的関数である最大後悔を避難完了時間に基づき定義した。辺容量一定かつ単一施設配置の場合、任意の施設配置点に対する最悪シナリオの候補数が多項式上限を持つことを示し、この性質に基づいて初の多項式時間アルゴリズムを開発した。本結果は、査読付国際会議 *The 15th Annual Conference on Theory and Applications of Models of Computation (TAMC 2020)* において発表された。

## **(B)- に関する結果**

- (5) パス状の動的フローネットワークにおける最大後悔最小化型の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。本研究では、目的関数である最大後悔を平均避難時間に基づき定義した。辺容量一定かつ単一施設配置の場合、任意の施設配置点に対する最悪シナリオの候補数が多項式上限を持つことを示し、この性質に基づいて多項式時間アルゴリズムを開発した。本結果は、査読付国際学術誌 *Theory of Computing Systems* に採録された。
- (6) 上記(1)の結果を改善し、アルゴリズムのさらなる高速化に成功した。(1)では、任意の施設配置点に対する最悪シナリオの候補数が多項式上限を持つことを示した上で、各候補シナリオに対する最適配置の計算を線形時間で行なっていたが、本結果では、シナリオの順序性に着目することで同計算を償却的に劣線形時間で行えることを示した。本結果は、査読付国際会議 *The 29th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2018)* にて発表された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 B. Bhattacharya, M. J. Golin, Y. Higashikawa, T. Kameda and N. Katoh	4. 巻 -
2. 論文標題 Improved Algorithms for Computing k-Sink on Dynamic Flow Path Networks	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of The 15th Workshop on Algorithms and Data Structures (WADS 2017)	6. 最初と最後の頁 133-144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-62127-2_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 該当する
1. 著者名 Y. Hanawa, Y. Higashikawa, N. Kamiyama, N. Katoh and A. Takizawa	4. 巻 36
2. 論文標題 The Mixed Evacuation Problem	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Combinatorial Optimization	6. 最初と最後の頁 1299-1314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10878-017-0237-7	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 Y. Higashikawa, S. W. Cheng, T. Kameda, N. Katoh and S. Saburi	4. 巻 62
2. 論文標題 Minimax Regret 1-Median Problem in Dynamic Path Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Theory of Computing Systems	6. 最初と最後の頁 1392-1408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00224-018-9861-6	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 該当する
1. 著者名 R. Benkoczi, B. Bhattacharya, Y. Higashikawa, T. Kameda and N. Katoh	4. 巻 -
2. 論文標題 Minsum k-Sink Problem on Dynamic Flow Path Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 29th International Workshop on Combinatorial Algorithms (IWOCA 2018)	6. 最初と最後の頁 78-89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-94667-2_7	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 B. Bhattacharya, Y. Higashikawa, T. Kameda and N. Katoh	4. 巻 -
2. 論文標題 An $O(n^2 \log^2 n)$ Time Algorithm for Minmax Regret Minsum Sink on Path Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 29th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC 2018)	6. 最初と最後の頁 14:1-14:13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ISAAC.2018.14	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 該当する

1. 著者名 Y. Higashikawa and N. Katoh	4. 巻 13(2)
2. 論文標題 A Survey on Facility Location Problems in Dynamic Flow Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Review of Socionetwork Strategies	6. 最初と最後の頁 163-208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12626-019-00047-z	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 R. Benkoczi, B. Bhattacharya, Y. Higashikawa, T. Kameda and N. Katoh	4. 巻 -
2. 論文標題 Minmax-Regret Evacuation Planning for Cycle Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of The 15th Annual Conference on Theory and Applications of Models of Computation (TAMC 2019)	6. 最初と最後の頁 42-58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-14812-6_4	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 R. Benkoczi, B. Bhattacharya, Y. Higashikawa, T. Kameda and N. Katoh	4. 巻 806
2. 論文標題 Minsum k-Sink Problem on Path Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 388-401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2019.05.047	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 B. Bhattacharya, M. J. Golin, Y. Higashikawa, T. Kameda and N. Katoh
2. 発表標題 Improved Algorithms for Computing k-Sink on Dynamic Flow Path Networks
3. 学会等名 The 15th Workshop on Algorithms and Data Structures (WADS 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 B. Bhattacharya, Y. Higashikawa, T. Kameda and N. Katoh
2. 発表標題 An $O(n^2 \log^2 n)$ Time Algorithm for Minmax Regret Minsum Sink on Path Networks
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 R. Benkoczi, B. Bhattacharya, Y. Higashikawa, T. Kameda and N. Katoh
2. 発表標題 Minsum k-Sink Problem on Dynamic Flow Path Networks
3. 学会等名 The 29th International Workshop on Combinatorial Algorithms (IWOCA 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大勝章平, 巳波弘佳, 加藤直樹, 照山順一, 東川雄哉
2. 発表標題 媒介変数表示される重みに対する最大後悔最小化1-センター問題
3. 学会等名 コンピューテーション研究会 (電子情報通信学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Benkoczi, B. Bhattacharya, Y. Higashikawa, T. Kameda and N. Katoh
2. 発表標題 Minmax-Regret Evacuation Planning for Cycle Networks
3. 学会等名 The 15th Annual Conference on Theory and Applications of Models of Computation (TAMC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Higashikawa, N. Katoh and J. Teruyama
2. 発表標題 An Improved Algorithm for Minsum k-Sink Problems on Dynamic Flow Path Networks
3. 学会等名 The 30th European Conference on Operational Research (EURO 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸國友貴, 加藤直樹, 東川雄哉, 照山順一, 藤江哲也
2. 発表標題 避難者数が媒介変数に依存する最大後悔最小化1-シンク配置問題
3. 学会等名 2020年春季研究発表会 (日本オペレーションズ・リサーチ学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸國友貴, 加藤直樹, 東川雄哉, 照山順一, 藤江哲也
2. 発表標題 避難者数が媒介変数に依存する最大後悔最小化1-シンク配置問題
3. 学会等名 コンピューテーション研究会 (電子情報通信学会)
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----