

# 不確実性を考慮した発災前後における救援物資輸送経路決定手法の検討

都市交通研究室 高村 亘

指導教員 佐野 可寸志

## 1. はじめに

我が国において、近年の災害発生状況は甚大・頻発化傾向にあり、自然災害によって毎年多くの人命や財産が失われていることから、自治体の災害対応の重要性が高まっている。災害発生時の対応の効率化にあたって指摘されている問題点は、対応に必要な「災害情報・被災情報」および「限られた人的資源・物的資源」が災害発生からの経過時間に応じて絶えず変化するため、事前計画とは異なる状況で対応する必要がある点である。

そこで本研究では、災害対応の中でも近年の災害において問題点が多数見受けられた救援物資輸送対応に着目し、発災からの経過時間によって変化する輸送条件や制約を考慮した輸送経路決定アルゴリズムの検討を行う。以下に、検討するアルゴリズムの位置づけを示す。

システムは、道路の被災情報および輸送拠点や避難所等の施設の位置情報と輸送経路の可視化を行うための地理情報システムと、輸送最適化計算を行うための最適化ソルバーを組み合わせで構築した。以下に、システムの概要図を示す。

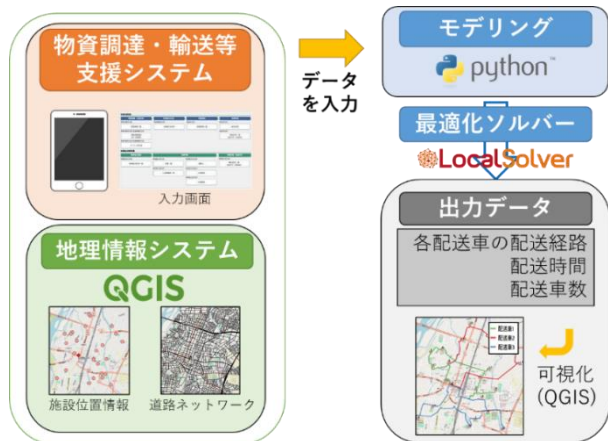


図2 システムの概要図

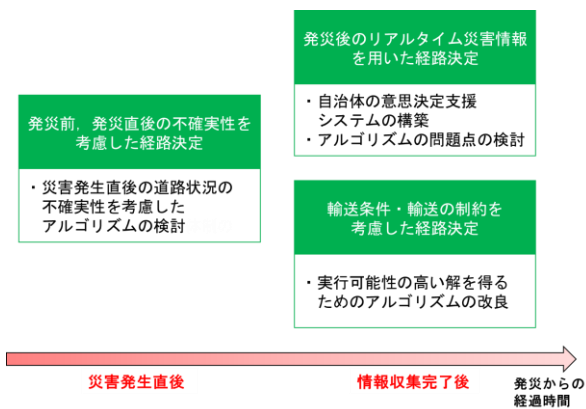


図1 発災からの時間経過と各手法の位置づけ

## 2. リアルタイム災害情報を用いた経路決定

本章では、災害発生後に得られるリアルタイム災害情報を入力し、それを反映した経路決定を行い、自治体の輸送の意思決定を支援するシステムを構築することを目的とする。システムの要件は、長岡市危機管理防災本部とのヒヤリング調査により、その最適な輸送経路、それに要する時間、必要なトラック台数、最適なトラックの物資配分の4項目を限られた時間内に可視化できることをシステムの要件として設計した。

構築したシステムを用いて、長岡市災害対策本部運営訓練で試験運用を行った。訓練中の要請訓練において、訓練中に仮想の物資の要請を避難所の市職員が用いて行い、それを集約したものを構築したシステムに入力することで、限られた時間内で処理を行い、経路等を可視化することができるか検証を行った。以下に訓練中の様子を示す。

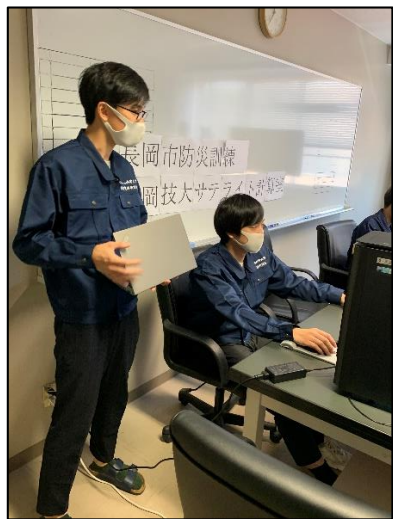


図3 訓練中の様子

次に訓練当日のタイムラインを示す。なお今回の訓練では、データの受領からシステムへ入力し計算結果を出力した後、1時間以内に結果を長岡市と共有することを目標とした。

表1 訓練のタイムライン

時刻	実施内容
7:30	防災訓練開始 避難所開設訓練の開始
9:14	避難所開設の確認 避難所の市職員による物資の要請 本部で情報の集約
10:00	長岡市から要請データの受領
10:02	受領データの確認 データの修正後、データ抽出開始
10:25	最適化計算実行
10:27	最適化結果出力
10:30	結果の可視化開始
11:10	計算結果、可視化結果の共有

最適化結果を可視化する部分に40分もの時間を要した。その原因は、経路を可視化する際の最短経路探索の処理に時間を要したことである。したがって、経路決定に用いる道路ネットワークを緊急輸送道路や国道等に限定することで、経路の探索数が減り、処理時間が短縮されることが考えられる。

次に、システムによって最適化計算を行った結果を示す。まず、必要なトラックの数、それぞれの輸送時間を示す。

表2 各トラックの輸送時間

トラック No	輸送時間 [min]
1	78
2	167
3	62
Σ	306

最適化の結果、輸送に必要なトラック数は3台であり、全てのトラックの輸送時間の和は306分となった。物資配分量は各トラックの積載可能量を超えず、かつ巡回する避難所の需要量を満たす最適な配分量である。

次に輸送経路の可視化結果を示す。



図4 可視化結果

システムの試験運用の結果、既存のアルゴリズムの課題が2つ明らかになった。まず、災害発生直後に正確な災害情報を取得することは難しいこと、2つ目に実災害時に生じる制約を考慮する必要がある点である。既存のアルゴリズムの最適解と、実際の輸送状況下で最適な解は異なる。したがって、既存のアルゴリズムをこの2つの課題を考慮可能なものに改良することにより、実災害時に実行可能な解を算出することが可能になる。

### 3. 輸送条件・制約を考慮した経路決定

従来の輸送最適化アルゴリズムの課題を踏まえ、災害発生後に変化する輸送条件や制約を考慮した実行可能性が高い経路決定を行うアルゴリズムを検討する。本研究では、トラック台数の制約を満たした輸送完了時刻、輸送完了時刻の制約を満たせるトラック台数をそれぞれ出力する定式化と、そのケーススタディを行う。

以下に定式化したアルゴリズムの目的関数と制約条件を示す。目的関数は全てのトラックの輸送時間の和とし、制約条件に全てのトラックが設定した輸送完了時刻を超過しない制約を設けた。なお、使用可能なトラック台数と輸送完了時刻はトレードオフの関係にあるため、どちらか一方の制約を入力し、その制約を満たしたもう一方の解を出力するように定式化した。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij}^k + s_j \\ & \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij}^k \leq y \\ & c_{i0} = 0 \end{aligned}$$

- $c_{ij}$  : 施設間*i,j*の所要時間
- $x_{ij}^k$  : 決定変数 ( $k$ :トラック)
- $y$  : 輸送完了時刻
- $s_i$  : 避難所*i*における作業時間

上記のアルゴリズムを用いて、長岡市川東地区の一部の避難所と備蓄倉庫を対象にケーススタディを行った。ケーススタディには制約条件の異なる4つのケースを想定し、それぞれ制約を満たした解を算出可能か検証した。

表1に各ケースの制約条件を示す。

表3 各ケースの制約条件

	制約	制約の値
CASE1	なし	-
CASE2	輸送完了時刻	50分以内
CASE3	輸送完了時刻	40分以内
CASE4	トラック台数	5台

次に、各ケースの算出結果として、必要なトラック台数と各トラックの輸送時間を示す。各ケースにおいて、最も輸送時間が大きなトラックの輸送時間が輸送完了時刻である。

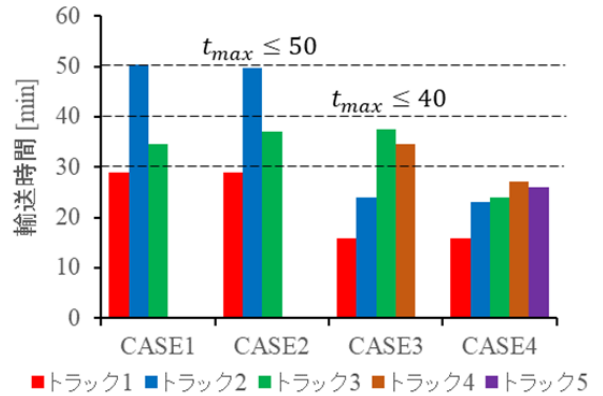


図5 最適化結果

以上のケーススタディの結果、それぞれ設定した制約条件を満たした解が算出され、実際の輸送の制約を考慮した実行可能性が高い解が算出されているといえる

#### 4. 発災直後のロバスト最適化を用いた経路決定

従来の輸送最適化アルゴリズムでは、災害発生直後に正確な災害・被災状況を得ることが困難な場合、経路の決定が不可能である。そこで、事前に浸水規模の異なるシナリオを作成し、不確実な道路状況下においてもその影響を極力受けない経路決定アルゴリズムを検討した。

まず、定式化したアルゴリズムの目的関数と制約条件の一部を示す。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} + \text{Max} \sum_{(i,j) \in E} d_{ij} x_{ij} u_{ij} \\ & \sum_{(i,j) \in E} u_{ij} \leq \Gamma \end{aligned}$$

- $c_{ij}$  : ノード間*i,j*の所要時間
- $d_{ij}$  : ノード間*i,j*の遅延時間
- $x_{ij}$  : 決定変数
- $\Gamma$  : 意思決定変数

浸水規模の異なるシナリオは、想定最大規模の洪水想定浸水区域図を用い、最大浸水深から1mずつ浸水深を下げることによって作成した。次頁に各シナリオとその浸水ランクを示す。

表 4 シナリオの設定

シナリオ	浸水ランク (被害の程度を表す)					
	1	2	3	4	5	6
A	5~6,6~7					
B	4~5	5~6,6~7				
C	3~4	4~5	5~6,6~7			
D	2~3	3~4	4~5	5~6,6~7		
E	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6,6~7	
F	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6,6~7

遅延割合は、基準となる浸水しないリンクの通行速度を 40km/h に設定し、浸水ランクが高くなるにつれ遅延が大きくなるように線形補間することで算出した。以下に、各浸水ランクにおける遅延割合を示す。

表 5 遅延割合の設定

浸水ランク	通行速度 [km/h]	遅延割合
浸水しない	40	0
1	34.3	0.14
2	28.6	0.29
3	22.3	0.44
4	17.1	0.57
5	11.4	0.72
6	5.71	0.86
通行できない	0	-

以下に、最も浸水規模の大きなシナリオ F の最適化の結果を示す。

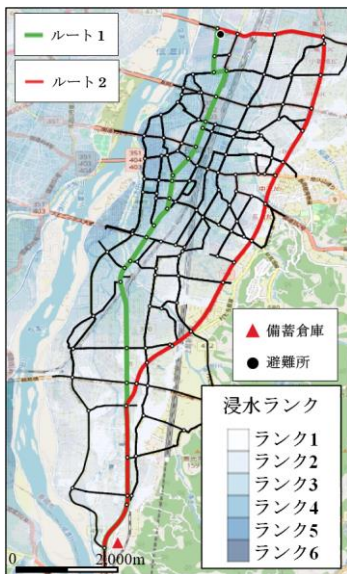


図 6 シナリオ F の経路決定結果

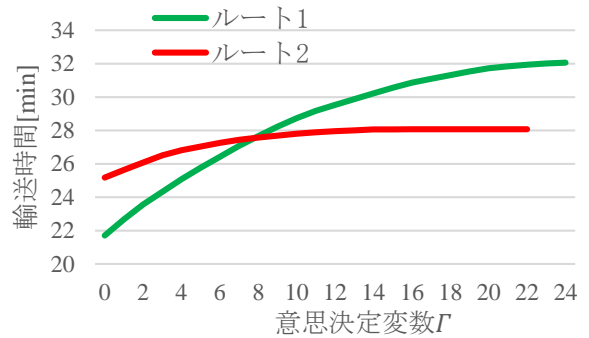


図 7 輸送時間と意思決定変数の関係

経路図をみると、ルート 1 が最短経路、ルート 2 が浸水を考慮した迂回経路になっていることが分かる。輸送時間と意思決定変数の関係を見ると、ルート 2 はルート 1 に比べ浸水による遅延の増加割合が小さく、最悪想定の場合の輸送時間も短い。そのため、浸水時に安定した経路はルート 2 であるといえる。

## 5. 結論

本研究では、既存の輸送最適化アルゴリズムを改良し、発災からの時間経過によって変化する条件や制約を考慮したアルゴリズムの定式化とその数値実験を行った。今後、自治体と連携した数値実験や過去災害時の対応状況の調査等によって実災害時に生じる他の制約や輸送条件を検討し、それをアルゴリズムやパラメータに反映することで、より実行可能性が高く精度の良い最適解の算出が可能になると考えられる。

## 6. 参考文献

1. A.Ben-Tal, A.Nemirovski : "Robust Convex Optimization". Mathematics of Operations Research. 23 (4): 769-805, 1998.
2. T.Lee, C.Kwon : A short note on the robust combinatorial optimization problems with cardinality constrained uncertainty, A Quarterly Journal of Operations Research 12 373-378, 2014