

# 物資配送完了時刻の最小化による災害時の避難所と輸送拠点間の配送計画の検討

|             |            |     |        |
|-------------|------------|-----|--------|
| 長岡技術科学大学大学院 | 環境社会基盤工学専攻 | 非会員 | 高村 亘   |
| 長岡技術科学大学大学院 | 環境社会基盤工学専攻 | 正会員 | 佐野 可寸志 |
| 長岡技術科学大学大学院 | 環境社会基盤工学専攻 | 正会員 | 高橋 貴生  |
| 長岡技術科学大学大学院 | 環境社会基盤工学専攻 | 正会員 | 松田 曜子  |

## 1.はじめに

令和元年10月6日に発生した台風19号は勢力を拡大し、大型で猛烈な台風は千葉県をはじめ日本各地に暴風や大雨を発生させた。長岡市内では10月11日から13日にかけて台風が接近し、強風による建物の損壊や豪雨による建物の浸水から多くの避難者が避難を余儀なくされた。

そこで、避難者に対する救援物資の配送に関する問題が多く残り、その問題の一つとして災害後に物資が十分に届かず、物資が届く時刻が避難所によって大きく異なるという問題が発生した。特に後者に関して、災害直後は避難所の避難者数が最も多くなるため、物資を可能な限り早く全ての避難所に届けることが求められる。

そこで本研究では、長岡市において、水害後に救援物資が全ての避難所に十分な量行き届く時刻を最早化するような、輸送車の配送計画を検討することを目的とする。また、本研究では水害時の物資配送を想定するため、道路の浸水による道路ネットワークの影響を考慮できるものとする。

## 2.研究概要

本研究では、輸送車の最適な経路決定を行うため、配送計画問題(Vehicle Routing Problem, 以下 VRP)として定式化を行う。VRPとは物資の輸送拠点と配送先である避難所のネットワークと需要量が与えられたとき、需要量を満たすような最適な経路を求めることである。これまでもVRPに関して数多くの研究がなされている。図1に本研究で扱うVRPの概念図を示す。今回は、目的関数を①総配送時間を最小化したもの、②配送完了時刻を最早化したもの、③配送完了時刻を最早化し、浸水による道路ネットワークお

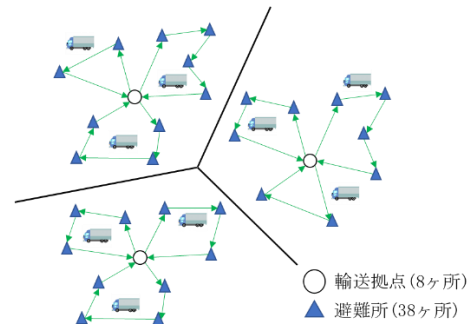


図1 本研究におけるVRPの概念図

よび避難所の影響を考慮したものの3パターンについて、比較および検討を行うこととする。

## 3.前提条件

### 3.1 対象地域

令和元年台風19号において実際に長岡市内で避難に使用された避難所と、新潟県と災害協定を締結している株式会社コメリを輸送拠点とする。図2に、避難所と輸送拠点の位置関係を示す。

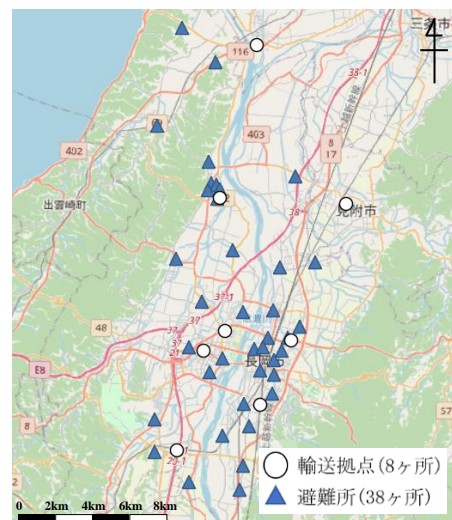


図2 避難所と輸送拠点の位置関係

### 3.2 各輸送拠点の避難所の割り当て

本研究では、輸送拠点ごとに輸送車(複数台)の配送経路を検討する。したがって、輸送拠点ごとに輸送車が巡回する避難所の割り当てを行う必要がある。今回は、輸送拠点を母点とするボロノイ図を描画することによって、輸送拠点の位置関係から避難所を割り当てた。

図3に描画したボロノイ図を示す。

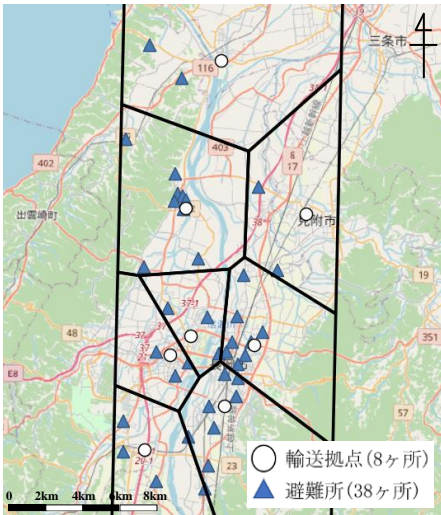


図3 ボロノイ図

### 3.3 データの準備および各数値の設定

必要となる主なデータは以下のとおりである。

- ・輸送拠点と避難所間の道路ネットワーク
- ・想定浸水域データ
- ・各避難所の需要量
- ・輸送車の積載量
- ・使用可能な輸送車数

輸送拠点・避難所間の道路ネットワークはOpenStreetMapよりダウンロードしたものをQGIS上で読み込み、地点ごとに最短経路探索を行い作成した。水害時の配送を想定するための浸水域データは、国土数値情報の信濃川の洪水浸水想定区域のポリゴンデータを用いた。また想定する洪水は被害の大きさを考慮し、120年に1度の洪水とし、浸水深は2m以上5m未満とした。各避難所の需要量、輸送車の容量、使用可能な輸送車数は長岡市とのヒヤリングを基に設定した。まず、各避難所の需要量は、3)を参考に過去の需要量から設定した。配送する救援物資は、短期

間の避難を想定しダンボールベッドとした。配送に使用する輸送車はトヨタライトエースバンとし、使用可能な総輸送車数は15台とした。また、輸送拠点に対する輸送車の割り当ては、避難所の割り当ての際に描画したボロノイ図から各区画の避難所の総需要量を算出し、その比で決定した。避難所の作業時間は他文献を参考に5分とした。

各入力条件を表1に示す。

表1 入力条件

| 対象地域      | 新潟県長岡市            |
|-----------|-------------------|
| 施設数       | 45ヶ所(避難所:37 デポ:8) |
| 救援物資      | 折り畳みダンボールベッド      |
| 需要量       | 1,754人分           |
| 輸送車の積載量   | 95人分              |
| 使用可能な輸送車数 | 15台               |
| 避難所での作業時間 | 5分                |

### 3.4 浸水による制約

本研究では、大雨による浸水を考慮した配送を検討する。以下に浸水による制約を示す。

- ・浸水域上の避難所は巡回せず、その需要量は、浸水域外の最も近い避難所の需要量に加算する。
- ・浸水域上の道路ネットワークは通行できず、迂回して配送を行う。

## 4. 問題の定式化

### 4.1 変数の定義

問題をVRPとして定式化するにあたり、変数を定義する。まず、与えられた点集合を $\{1,2,\dots,n\}$ とし、一般性を失うことなく1を輸送拠点とする。避難所の集合を $V=\{2,3,\dots,h\}$ 、輸送車の集合を $K=\{1,2,\dots,m\}$ 、点 $i,j$ 間の移動時間を $t_{ij}$ 、避難所での作業時間を $s_i$ で表す。また、0-1決定変数 $x_{ij}^k$ で輸送車 $k$ が点 $i$ から $j$ に直接移動する(1)か否か(0)を、0-1決定変数 $y_i^k$ で輸送車 $k$ が点 $i$ に訪問するか(1)否か(0)を表す。また、整数決定変数 $f_{ij}^k$ で点 $i$ から $j$ へ輸送車 $k$ が直接移動する際にそれが保持する仮想の物資量を表し、部分巡回路除去制約で用いる。

## 4.2 定式化

3)を参考にし、先述したパターン②および③の輸送車の配送完了時刻を最小化する目的関数および制約条件を示す。①に関しては一般的な巡回セールスマン問題であるため省略する。

$$\min \max \left( \sum_i^n \sum_j^n t_{ij} x^k_{ij} + \sum_i^n s_i y^k_i \quad \forall k \in K \right) \quad (1)$$

$$s.t \quad \sum_{k=1}^m \sum_{j=2}^n x^k_{1j} = m \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=2}^n x^k_{hi} = m \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x^k_{ij} = y^k_i \quad \forall k \in K, \forall i \in V \quad (4)$$

$$\sum_{h=1}^m x^k_{hi} = y^k_i \quad \forall k \in K, \forall i \in V \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^m y^k_i = 1 \quad \forall i \in V$$

$$f^k_{ij} \leq (n-1)x^k_{ij} \quad \forall k \in K, (i, j = 1, \dots, n), i \neq j \quad (7)$$

$$f^k_{ij} \geq 0 \quad \forall k \in K, (i, j = 1, \dots, n), i \neq j \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=2}^n f^k_{i1} = n-1 \quad (9)$$

$$f^k_{1j} = 0 \quad \forall k \in K, \forall i \in V \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n f^k_{ij} - \sum_{h=1}^m f^k_{hi} = y^k_i \quad \forall k \in K, \forall i \in V \quad (11)$$

$$x^k_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (12)$$

$$y^k_i \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (13)$$

(1)式は配送完了時刻を最早化する目的関数である。(2),(3)式は輸送拠点を出発した  $m$  台の輸送車がある避難所を訪問し、ある避難所から輸送拠点に戻ることを表す。(4),(5)式は各避難所に対して1本の枝が入り1本の枝が出ていることを表す。(6)式は、各避難所は1台の輸送車によって1回限り訪問されることを表す。(7)~(11)式は部分巡回制約である。

## 5. 計算結果

本研究では Python の pulp モジュールを用いてモデリングおよび最適化を行った。今回は、①総配送時間最小化、②配送完了時刻最早化、③浸水域考慮の3つのパターンについて、輸送車の経路、総配送時間、配送完了時刻をそれぞれ計算した。

ここでは、8ヶ所の輸送拠点の中の1ヶ所について計算結果を示す。この拠点に割り当てられた輸送車は、前述したボロノイ図の区画ごとの需要量の比から3台となった。それぞれの配送経路を図4、図5、図6に示す。避難所の下の数字は避難所の需要量を表している。

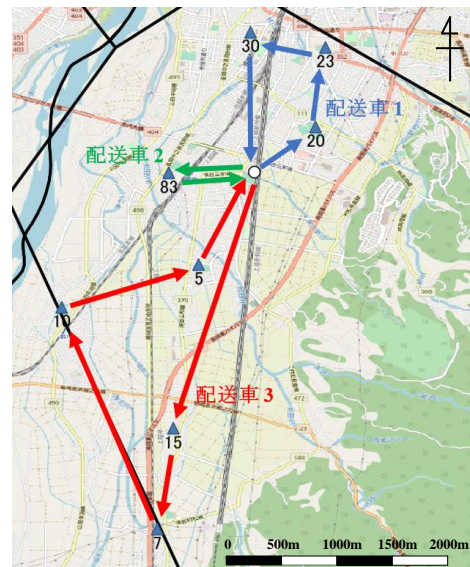


図4 ①最小化の配送経路

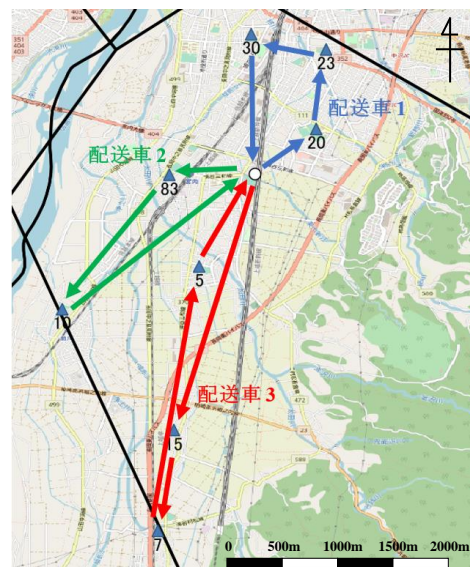


図5 ②最早化の配送経路



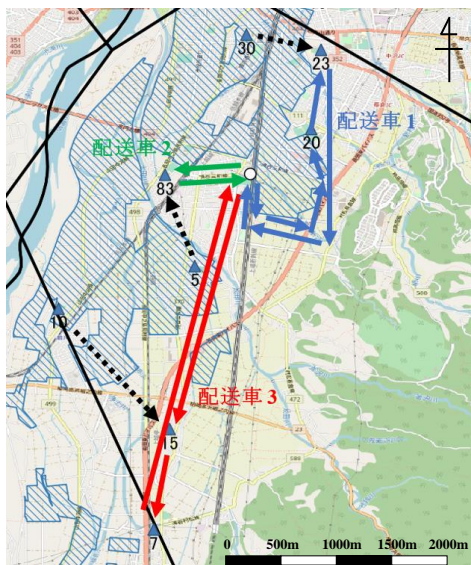


図 6 ③浸水域考慮の配送経路

③の配送経路に関して、配送時間最小化、配送時刻最早化は同じ結果になった。次に総配送時間、各輸送車の配送時間の計算結果について図 7、図 8 に示す。

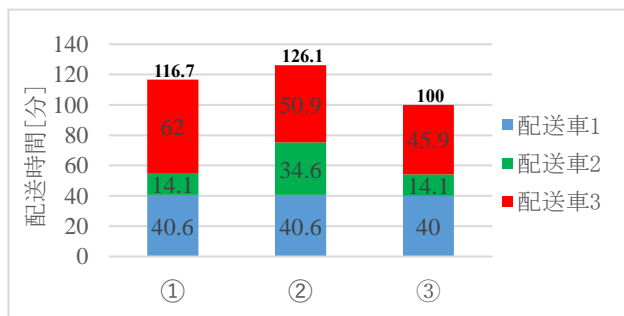


図 7 総配送時間

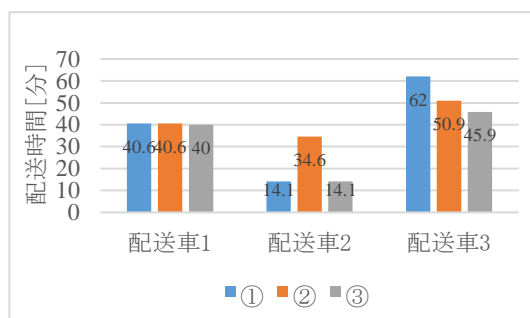


図 8 各輸送車の配送時間

まず、配送経路を比較すると、輸送車 1 は①と②、輸送車 2 は①と③が同じ結果となった。次に図 7 の総配送時間を比較すると、③、①、②の順で早くなっている。③が一番早くなった原因としては、浸水域上の

避難所を巡回しないことによって避難所での作業時間が減り、その減少量が浸水による輸送車の迂回による配送遅延時間を上回ったためと考えられる。次に図 8 の配送完了時刻を表す輸送車 3 をみると、③、②、①の順で早くなっている。③が最も早くなった原因は総配送時間の場合と同様に巡回する避難所数が減ったことによる避難所での作業時間の減少が原因であると考えられる。①と②を比較すると、配送完了時刻を最早化した②の方が①よりも 10 分程度早くなっていることが分かる。この差はそれぞれの配送経路をみると、避難所 1 か所分の作業時間とその避難所への配送時間であると分かる。

## 6. まとめ

配送完了時刻を目的関数にすることによって、物資を可能な限り早く全ての避難所に届けるような配送経路を算出することができた。しかし、水害時の浸水を考慮した配送に関しては、通常時の配送と比較すると整合性は確認できなかった。したがって、今後は浸水を考慮した場合の配送について再検討する必要があると考えられる。また、避難所での作業時間に関して、作業時間の設定が配送時間および配送完了時刻に大きく影響することが本研究の例で分かった。今回は避難所での作業時間を一律に 5 分と設定していたが、実際の配送では配送量に応じて作業時間は異なるため、各避難所の配送量に応じて作業時間をそれぞれ設定する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 久保幹雄 (2001) ロジスティクス工学 朝倉出版
- 新潟県長岡市：令和元年台風第 19 号 被害等の概要 令和 2 年 6 月 1 日
- 沼田一道, 松浦隆文, 原恒介：minmax 型 m 人巡回セールスマン問題の解法に関する研究 東京理科大学工学部経営研究科
- 鈴木敦夫, 千田裕士：自然災害時の救援物資における配送計画問題 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集 2013, 98-99, 2013-03-05