

## 乗合バス路線に基づく災害ロードマップ作成

## Developing a bus route based disaster road map

伊角 愛結<sup>1</sup> 沖本 天太<sup>2</sup> 平山 勝敏<sup>2</sup> 酒井 裕規<sup>2</sup> 西村 悦子<sup>2</sup>神戸大学海事科学部<sup>1</sup> 神戸大学大学院海事科学研究科<sup>2</sup>

## 1 序論

防災及び減災をはじめ、傷病者や避難民の救済・救援活動等の災害対策を考えることは、自然災害大国といわれる日本において最重要課題の1つである。平成7年1月17日の阪神淡路大震災及び、平成23年3月11日の東日本大震災は未曾有の大被害を我が国にもたらした。阪神淡路大震災では6,437人、東日本大震災では18,880人の死者・行方不明者が報告されている[4]。また、平成28年4月14日以降、熊本県及び大分県で連続して発生した熊本地震では死者120人が報告されている[3]。

阪神淡路大震災、東日本大震災、熊本地震からの教訓として、「災害時におけるロジスティクス」の重要性が認識されている。ロジスティクスとは、元々、戦闘時の物資の配給や整備、施設の構築や維持など「兵站」を表す軍事用語である。

災害時におけるロジスティクスにおいて重要となるのが災害ロードマップの作成である[2]。災害ロードマップとは、被災地域における避難経路や救済・救援活動に利用可能な道路を指す。例えば、大阪府では広域緊急交通路と呼ばれる災害ロードマップが作成されている(図1:大阪府地域防災計画 関連資料集より)。しかし、市町村単位(狭域)では、このような災害ロードマップを作成している地域は少ない。本研究では、災害ロードマップが存在しない市町村単位の狭域緊急交通路に着目する。従来手法では、役所の職員らが被災地域に存在する無数の道路の中から利用可能な道路を網羅的に探索していた。しかし、この手法では、例えば、(i)各道路の被害状況の調査だけでも多くの時間を必要とし、さらに、(ii)どの道路の被害状況を優先的に調査するののかという道路間の優先順位の問題もある。加えて、道路の被害状況が分かったとしても、(iii)どの道路を基に災害ロードマップを作成・決定するののかという問題もある。

本論文では、乗合バス路線を活用した災害ロードマップ作成ツールの開発を最終目標とし、その第1歩として、被災後、利用不可能となったバス停間の代替路線を探索する災害ロードマップ作成ツールを開発する。バス路線は、より多くの住民の移動を考慮して作成されているため、救済・救援活動の利用に適している。またバス路線を雛型として利用することにより、従来の網羅的な探索が不要になる利点もある。さらに、ある区間が通行不可能な場合は、地元のバス運転手の知識を利用して、近傍の道が通行可能かを調査し、これらの情報を集積することにより、短時間で災害ロードマップの代替案が作成可能となる。

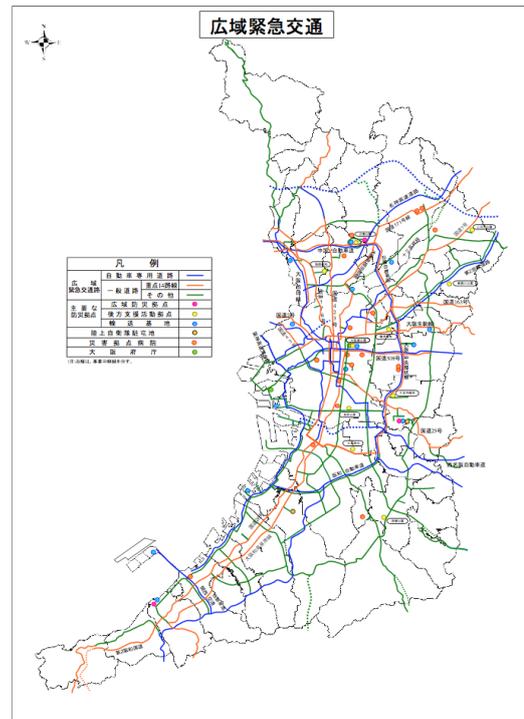


図1 大阪府：広域緊急交通路。

## 2 災害ロードマップ作成問題

本章では、乗合バス路線に基づく災害ロードマップ作成問題を定義する。具体的には、重み付き制約充足問題[1](重み付き制約ネットワーク)のフレームワークを用いて、この問題を定式化する。以下、本モデルの基本用語について説明する。

- $N = \{1, \dots, n\}$ : バス停の集合。あるバス停  $i$  及び  $j$  に関して  $(1 \leq i, j \leq n, i \neq j)$ , 両バス停間に他のバス停が存在しない場合、 $i$  及び  $j$  を隣接したバス停と呼ぶ。
- $X = \{x_{ij} \mid 1 \leq i, j \leq n, i \neq j\}$ : 変数(隣接したバス停間の道路)の集合。あるバス停  $s$  から  $t$  までの道路は、 $X$  の部分集合により表され、 $\bar{x}_{st} \in X$  と記述し、 $\bar{x}_{st}$  をバス停  $s$  から  $t$  までの経路と呼ぶ。例えば、 $x_{si}, x_{ij}, x_{jk}, x_{kt} \in X$  に関して、 $\bar{x}_{st} = \{x_{si}, x_{ij}, x_{jk}, x_{kt}\}$  のように表される。
- $Dom = \{0, 1\}$ : 変数値の集合。ある道路  $x_{ij} \in X$  を利用する場合は  $x_{ij} = 1$ , 利用しない場合は  $x_{ij} = 0$  となる。

表1 神戸市垂水区のバス路線のデータ.

バス停間	所要時間 (分)	バス停間	所要時間 (分)
(0, 1)	3	(4, 9)	1
(0, 2)	3	(4, 10)	2
(0, 3)	6	(5, 11)	1
(1, 4)	1	(6, 12)	2
(1, 5)	1	(7, 13)	3
(2, 6)	1	(8, 14)	1
(3, 7)	1	(8, 5)	1
(4, 8)	3	/	/

移動にかかる時間は合計で6分です  
 乗車 = 0番の駅です。 , 降車 = 1番の駅です。 , 所要時間はここまでで 3分です。  
 乗車 = 1番の駅です。 , 降車 = 5番の駅です。 , 所要時間はここまでで 4分です。  
 乗車 = 5番の駅です。 , 降車 = 8番の駅です。 , 所要時間はここまでで 5分です。  
 乗車 = 8番の駅です。 , 降車 = 14番の駅です。 , 所要時間はここまでで 6分です。

図2 バス停0から14までの最短経路と所要時間.

- $C = C_h \cup C_s$  : (単項) 制約の集合. 各変数  $x_{ij} \in X$  に対応する単項制約  $c_{ij} \in C$  が存在する.  $C_h$  はハード制約の集合 (被災後, 利用不可能な道路の集合) を表し,  $C_s$  はソフト制約の集合 (被災後も利用可能な道路の集合) を表す.
- $\phi$  : 運行時間に関する目的関数.

定義 1 (災害ロードマップ作成). 災害ロードマップ作成は,  $X$  を変数の集合,  $Dom$  を変数値の集合,  $C$  を制約の集合,  $\phi$  を運行時間に関する目的関数とし, 以下の組により定義される.

$$\langle X, D, C, \phi \rangle. \quad (1)$$

$A$  を変数の割当とし, 単項制約  $c_{ij} \in C$  における割当  $A$  の運行時間は, 以下の式により計算される.

$$\phi(A, c_{ij}) = \begin{cases} 0 & c_{ij} \in C \wedge \{x_{ij} = 0\} \in A, \\ \infty & c_{ij} \in C_h \wedge \{x_{ij} = 1\} \in A, \\ \phi(A, c_{ij}) & c_{ij} \in C_s \wedge \{x_{ij} = 1\} \in A. \end{cases} \quad (2)$$

割当  $A$  における運行時間の総和は, 以下の式により与えられる.

$$\phi(A) = \sum_{c_{ij} \in C} \phi(A, c_{ij}). \quad (3)$$

定義 2 (災害ロードマップ作成問題).

- **Input:** 災害ロードマップ作成  $\langle X, D, C, \phi \rangle$ , 始点  $s \in X$ , 終点  $t \in X$ ,
- **Question:** 運行時間が最小となるような始点  $s$  から終点  $t$  までの経路をみつけよ.

### 3 災害ロードマップ作成ツール

災害ロードマップ作成ツールについて説明する. 本ツールは, 被災後, 利用不可能となったバス路線の代替案を探索するツールである. 本ツールでは以下の2つの処理を行う.

移動にかかる時間は合計で8分です  
 乗車 = 0番の駅です。 , 降車 = 1番の駅です。 , 所要時間はここまでで 3分です。  
 乗車 = 1番の駅です。 , 降車 = 4番の駅です。 , 所要時間はここまでで 4分です。  
 乗車 = 4番の駅です。 , 降車 = 8番の駅です。 , 所要時間はここまでで 7分です。  
 乗車 = 8番の駅です。 , 降車 = 14番の駅です。 , 所要時間はここまでで 8分です。

図3 バス停5と8間が利用不可能な場合の代替案.

1. バス停間の所要時間の情報を読み込んでリストに格納.
2. ダイクストラ法を用いて最短経路を探索.

具体的には, 災害ロードマップ作成問題を, バス停をノード, バス路線をエッジとした重み付き制約グラフを用いて表現する. 各エッジにはコストが与えられている. ダイクストラ法では, 制約グラフ内の始点から各ノードへの最短経路をその周辺から一つずつ確定し, 終点までの最短経路を選択していく.

以下, 神戸市垂水区のバス路線のデータを用いて実験する. 入力するデータは表1のようなテキストファイルである. 括弧内はバス停を表しており, 例えば, 2行目(左)は0番目のバス停と1番目のバス停がつながっており, その間の所要時間は3分であることを意味している. 以上のように, 実際のバス停の接続情報をすべて書き出し, システム内で読み込ませ, ダイクストラ法を実行する. 例えば, 表1の0番目のバス停から14番目のバス停までの最短経路を探索すると, 図2のような出力を得る. 本ツールでは, どのバス停を通っていけば良いかという情報と所要時間の合計が表示されるようになっている.

さらに, 被災後, ある区間が利用不可能な場合は, 読み込み元のデータ内の, 対象区間の接続情報を削除することにより代替案が探索可能となる. 例えば, 表1の5番と8番のバス停間が利用不可能な場合, 図3のような代替案が求解可能となる.

### 4 結言

阪神淡路大震災や東日本大震災からの教訓として, 災害時におけるロジスティクスの重要性が認識されている. 災害時におけるロジスティクスにおいて重要となるのが災害ロードマップの作成である. 本論文では, 災害ロードマップとして乗合バス路線に着目し, 被災後, 利用不可能となったバス停間の代替路線を探索する災害ロードマップ作成ツールを開発した.

謝辞: 本研究の遂行にあたり, 平成27年度の高橋産業経済研究財団(整理番号: 公財06-003-153)の研究助成を受けました. ここに深く感謝致します.

### 参考文献

- [1] J. Larrosa and T. Schiex. Solving weighted csp by maintaining arc consistency. *Artificial Intelligence*, 159(1-2):1-26, 2004.
- [2] 沖本天太, 酒井裕規, and 西村悦子. 乗合バス路線を活用した災害時の知的ロジスティクス支援システムの構築. 2016.
- [3] 消防庁. 熊本県熊本地方を震源とする地震(第79報).
- [4] 内閣府. 平成23年版防災白書.