

時空間ネットワークを用いた道路啓開のための 施設配置・経路決定問題

板橋 遼¹・日下部 貴彦²・朝倉 康夫³

¹学生会員 東京工業大学 大学院理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)
E-mail: r.itabashi@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学助教 大学院理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)
E-mail: t.kusakabe@plan.cv.titech.ac.jp

³正会員 東京工業大学教授 大学院理工学研究科 土木工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)
E-mail: asakura@plan.cv.titech.ac.jp

巨大地震等の大規模災害で多くの道路が通行不能となった場合、緊急車両が早急に通行できるようにするための最低限の復旧作業、すなわち道路啓開を迅速に行わなければならない。被災後の混乱した状況でもすぐに作業を開始できるよう、事前に計画を立てておく必要がある。本研究では、道路啓開を効率的に実施するための作業起点施設の配置と啓開を行う経路を決定するモデルを構築した。道路啓開の問題を時空間ネットワーク上の配車配送計画問題として捉え、整数線形最適化問題として定式化した。そして仮想ネットワークに適用してモデルの性質に関する考察を行って解の特性を把握し、適切に道路啓開の状況を表現した解が出力されていることを確認した。

Key Words : *Road Restoration, Large Scale Disaster, Location-Routing Problem, Integer Linear Programming, Time-Space Network*

1. はじめに

大地震や津波などの大規模災害が発生した場合、がれきなどによって多くの道路が通行不能になることが想定される。しかし、そのような場合でも、救援物資の輸送や救援部隊の移動、傷病者の搬送など、緊急の移動が必要となることは言うまでもない。そのため、緊急車両を通行可能とするため、がれきなどの障害物を早急に撤去し、できる限り迅速に輸送路を開く作業が必要となる。このような作業を道路啓開と呼ぶ。道路啓開は、道路ネットワークに甚大な被害が出た時に、通常の本格的な復旧作業に先立って最初に行われるものである。道路啓開は重機などの特殊な車両（以下、啓開車と呼ぶ）が道路ネットワーク上を移動することによって行われる。

2011年の東日本大震災で行われた道路啓開は、“くしの歯作戦”と呼ばれる作戦に従い、非常に迅速に行われた¹⁾。これは、東北地方内陸から太平洋沿岸部に向けて平行に走る16本の道路を一斉に啓開し、地震や津波で被災した地域への道を開くというものである。しかし、道路啓開の対象となる道路ネットワークが、くしの歯作戦のような比較的容易に啓開経路決定が行えるネットワーク形状をしているとは限らない。もちろん被災後の状況によって柔軟に判断する必要はあるも

の、効率的な道路啓開を混乱なく迅速に実施するためには、事前に道路啓開の計画、具体的には啓開を行う順序や拠点施設の配置をある程度決定しておく必要がある。そのためには、道路啓開作業の進行、すなわち啓開車の移動を忠実に表現し、最適な施設配置や啓開順序決定を行うモデルの構築が必要となる。本研究では、この問題をネットワーク上の施設配置・経路決定問題として扱い整数線形最適化モデルを構築する。なお、ここで言う施設とは啓開の拠点として人や資材が配置される場所のことで、啓開経路の起点に等しいものであるとする。

道路啓開を対象とした施設配置・経路決定問題をモデル化する上で考慮しなければならないのは、車両が一度通過したリンクは所要時間が短縮されるという点である。すなわち、通行不能となったリンクを一度目に通過する時には啓開作業を行いながらの通過となるため非常に時間がかかるのに対し、二度目以降は既に啓開されたリンクを通過するだけとなるため、平常時に近い所要時間で通過することができる。そのため、平常時を対象とした施設配置・経路決定のモデルをそのまま道路啓開の問題に対して適用することは望ましくない。啓開の前後で所要時間が変わるとい、道路啓開がもつ特有の性質に対応したモデルの構築が必要である。

これまでも、災害から数ヶ月間を要する中長期的な道路復旧のスケジュール決定に関する研究が行われている。例えば、山田ら²⁾は、災害発生後に仮復旧まで終了した状態から、どのような順序で本復旧を行うべきか求めるモデルを構築している。このモデルは各リンクの回復状況によって変化するリンク所要時間を用いて作業段階ごとに OD 交通量配分を行い、総旅行時間の総和の改善が最も早くなる復旧順序を最適解としている。有村ら³⁾や杉本ら⁴⁾は、都市間の時間距離からなるアクセシビリティ指標を用いて、復旧班ごとの復旧スケジュールの決定を行うモデルを構築している。しかし、これらの研究はいずれも災害直後の道路啓開に着目したものではない。また、これらのモデルは復旧順序のみを決めるいわゆるスケジュール問題であり、道路ネットワークの施設配置・経路決定問題として扱ったものではない。

道路ネットワークの施設配置・経路決定問題は OR の分野で昔から数多く研究されており(例えば⁵⁾⁶⁾⁷⁾、それらは一般的に、本研究と同様に整数線形最適化問題として定式化されている。その中で、本研究のように災害時をテーマとしたものとしては Rath and Gutjahr⁷⁾がある。これは救援物資の輸送を扱ったもので、緊急時において需要が供給を上回る状況を考慮したものとなっている。しかし、本研究のように、道路復旧、特に道路啓開を対象としたものや、途中で経路の所要時間が増加すると言う特殊な状況を考慮したモデルを扱ったものは存在しない。

本研究は、道路ネットワーク上において、道路啓開のための最適な拠点施設配置と移動経路の決定を行う整数線形最適化モデルを構築することと、仮想ネットワークにそのモデルを適用して解の性質を確認することを目的とする。

2. 時空間ネットワーク

本研究では、2次元である交通ネットワークに時間軸を加えて3次元とした時空間ネットワークを用いる。時空間ネットワークを用いることで、2次元のネットワークのみでは表現できない車の移動と時間の経過を同時に表現できる。例えば、啓開前後のリンクの所要時間の変化や、同じリンクを複数回通るような経路などを容易に表現でき、ネットワーク上の車の動きをより詳細に表すことができる。

通常の平面の交通ネットワークでは、都市や交差点などをノード、それらを結ぶ道路をリンクとして考える。しかし時空間ネットワークは、都市、交差点などを各時刻ごとに異なるノードとして扱い、ノード間の道路上の移動およびノード上での滞在を有向リンクで表す。

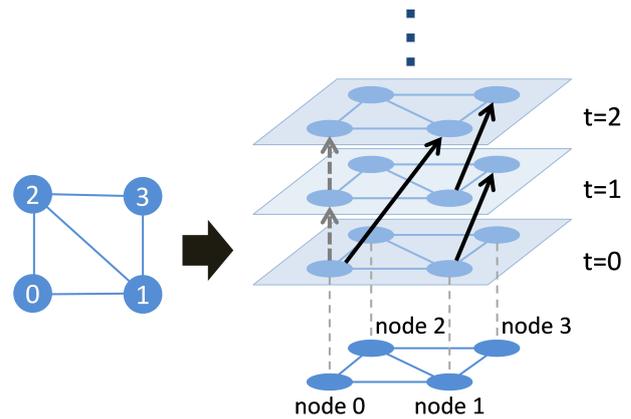


図-1 平面ネットワークと時空間ネットワーク

本研究で用いる時空間ネットワークでは、時刻 t の下限は $t = 0$ とし、時刻間隔は 1 とする。上限 $t = t_{max} \in N$ は事前に適当な値を与える必要がある。図-1 は例として、簡単な平面ネットワークと、それを時空間ネットワーク化したものの一部を示したものである。実線リンクはノード間の移動を、破線リンクはノードでの滞在をそれぞれ意味している。図-1 では見やすくするため一部のみを示しているが、実際には時刻 0 から t_{max} の範囲で各時刻ごとに平面ネットワークを設定し、これらの平面ネットワーク間のノードを結びうる全ての移動リンク・滞在リンクを設定する。

3. モデル定式化

本章では、啓開車の経路と起終点の配置を同時に求める施設配置・経路決定モデルの定式化を行う。実務的には、起点は啓開の車や機材・人などが置かれる場所を表し、終点は、単に最終的に啓開車が到達する点という意味を持つ。実際には、一部の限られたノードのみが起点の候補となっている場合も考えられる。しかし本研究では簡単のため全てのノードを起終点の候補地として扱う。

(1) 問題設定

定式化を行う上で前提とする問題設定や仮定を示す。

- 啓開車の台数は事前に与える。複数台でチームとなって作業を行う場合はそれらをまとめて 1 台の啓開車として扱う。
- どのリンクも、初めて車が通過する際は、それ以降と比べて所要時間が α 倍になる。所要時間 α は事前に与える。 α は 1 より大きい自然数とし、値は経験的に定める。
- 各啓開車は同一ノード・リンクの複数回の通過と、

ノードでの一時滞在が許される。

- はじめ全リンクが通行止めになっていると仮定する。
- 起終点の位置は車ごとに異なるノードでもよい。
- 任意の 2 ノード間が往来可能となるまで、つまり全てのノードが接続されるまで啓開を続ける。必ずしも全てのリンクを啓開しなくてもよい。
- 全ノードを起終点配置候補とし、起点と終点は必ずしも同じノードでなくてもよい。

時空間ネットワークの時刻間隔を 1 と設定したため、各リンクの所要時間は常に自然数でなければならない。そのため α も必ず自然数を設定する必要がある。具体的にどのような値にするかは、道路啓開作業にかかる時間を経験的に推定して決定する。

実際には、全てのリンクが通行止めとなることは考えにくい。しかし、どの道路が通行止めになるか事前に予測するのは困難であることと、定式化が簡単となることから、本研究では全リンクがはじめ通行止めになっていると仮定する。

道路啓開は発災直後に輸送路を迅速に確保する作業であり、必要最低限のリンクをできるだけ早く啓開することが求められる。そのため本研究では、全てのノードが接続されるまでの啓開作業を対象とし、接続された時点で作業を終了するものと見なす。

(2) 記号

本研究で用いる記号の定義を示す。

a) パラメータ

モデルのインプットとなるパラメータは、大きく分けて問題の設定を表すもの（問題パラメータ）と、モデルを解くために与える必要があるもの（モデルパラメータ）の 2 種類がある。モデルパラメータは、適切な範囲の値を用いれば解に影響を与えない。

問題パラメータを以下に示す。

n : 啓開車の台数

L : リンク集合

D : ノード集合

$c_{ij} (\forall ij \in L)$: 啓開後のリンク ij の所要時間

$\alpha (\in \mathbb{N})$: 啓開前リンクの所要時間と啓開後リンクの所要時間の比

次にモデルパラメータを以下に示す。

t_{max} : 時刻の最大値

s_{max} : s の最大値（後述）

β, γ : 目的関数の各項の比を示すパラメータ（後述）

$U = \{t | t = 0, 1, \dots, t_{max}\}$: 時刻の集合

$K = \{k | k = 1, 2, \dots, n\}$: 車の集合

$S = \{s | s = 0, 1, \dots, s_{max}\}$: s の集合（後述）

b) 決定変数

モデルで用いる決定変数は以下の通りである。

$x1_{ij}^{t'k}$: 車 k が啓開前のリンク ij を時刻 t から t' にかけて移動する時 1, そうでない時 0

$x2_{ij}^{t'k}$: 車 k が啓開後のリンク ij を時刻 t から t' にかけて移動する時 1, そうでない時 0

$x3_i^{tk}$: 車 k がノード i に時刻 t から $t+1$ にかけて滞在する時 1, そうでない時 0

$x4_{ij}^s$: リンク ij が仮想経路の $(s+1)$ 番目のリンクである時 1, そうでない時 0（後述）

T_i : ノード i に初めて車が訪れる時刻

Z : T_i の最大値

$y1_i^k$: ノード i が車 k の起点である時 1, そうでない時 0

$y2_i^k$: ノード i が車 k の終点である時 1, そうでない時 0

本モデルのアウトプットである経路は $x1_{ij}^{t'k}$, $x2_{ij}^{t'k}$ および $x3_i^{tk}$ から、施設配置は $y1_i^k$ から得られる。

c) 仮想経路

s および $x4_{ij}^s$ は、全てのノードが接続されているという啓開終了条件が満たされているかどうかを判別するためのパラメータである。この終了条件は、各ノードに少なくとも 1 台の啓開車が訪れており、かつ各啓開車の起点が全て接続されていることと同値である。そこで、啓開車 1 の起点からスタートし、啓開済みのリンクのみを通して啓開車 2~ $(n-1)$ の起点を順に経由し、啓開車 n の起点を終点とするような仮想の経路 $x4_{ij}^s$ を定義する。この仮想経路が存在することを制約条件に加えることで、啓開終了条件が満たされることを保証することが可能になる。 s は仮想経路に含まれるリンクの順番で、仮想経路の起点（すなわち啓開車 1 の起点）側から順に 0,1,2,... となる。 s の最大値 s_{max} は、仮想経路が通過するリンク数より十分大きな値である必要がある。また、 s の集合、すなわち 0 以上 s_{max} 以下の整数の集合を S とする。

(3) 定式化

道路啓開では、孤立したノードの迅速な救援が最優先であると考え、全てのノードに啓開車が到達するまでの時間の最小化を目的関数とする。すなわちノードの孤立が解消されるまでの時間の最小化である。しかし、これだけでは複数の等価な最適解が存在する。これらの中から、さらにより道路啓開の目的に適した解を選択する必要がある。そこで、第 2 番目の項として全車の移動時間の総和を、第 3 番目の項として各ノードに啓開車が訪れるまでの時間の総和をそれぞれ設定する。第 1 項が最小となる解が複数存在する場合にはその中から第 2 項が最小となるものを最適解とし、そ

れも複数ある場合には第 3 項が最小のものを選ぶことにする。これを定式化するため、優先順位パラメータとして β, γ を導入する。これらは $1 \gg \beta \gg \gamma$ を満たす必要がある。

本モデルの定式化を以下に示す。

minimize

$$Z + \beta \sum_{i \in U} \sum_{k \in K} \left(\sum_{ij \in L} (\alpha c_{ij} x1_{ij}^{t_1'k} + x2_{ij}^{t_2'k}) + \sum_{i \in D} x3_i^{t_1'k} \right) + \gamma \sum_{i \in D} T_i \quad (1)$$

subject to

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in D} (x1_{ij}^{t_1'k} + x2_{ij}^{t_2'k}) + x3_j^{t_1'k} \\ & \geq \sum_{i \in D} (x1_{ij}^{t_1'k} + x2_{ij}^{t_2'k}) + x3_j^{t_1'k} \\ & \geq \sum_{i \in D} (x1_{ij}^{t_1'k} + x2_{ij}^{t_2'k}) + x3_j^{t_1'k} - y2_j^k \\ & \quad \forall j \in D \quad \forall t' \in U (t' > 0) \quad \forall k \in K \quad (2) \end{aligned}$$

$$\sum_{j \in D} (x1_{ij}^{0 \alpha c_{ij} k} + x2_{ij}^{0 c_{ij} k}) + x3_i^{0k} = y1_i^k \quad \forall i \in D \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$1 \leq \sum_{i \in U} \sum_{i \in D} \sum_{k \in K} (x1_{ij}^{t_1'k} + x2_{ij}^{t_2'k}) + \sum_{k \in K} y1_j^k \quad \forall j \in D \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} x2_{ij}^{u-c_{ij} uk} \leq n \left(\sum_{t'=\alpha c_{ij}}^u \sum_{k \in K} x1_{ij}^{t_1'k} + \sum_{t'=c_{ij}}^{u-c_{ij}} \sum_{k \in K} x1_{ji}^{t_1'k} \right) \quad \forall ij \in L \quad \forall u \in U \quad (5)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{k \in K} (x1_{ij}^{t_1'k} + x1_{ji}^{t_1'k}) \leq 1 \quad \forall ij \in L \quad (6)$$

$$\sum_{i \in D} x4_{ij}^s \geq \sum_{l \in D} x4_{jl}^{s+1} \geq \sum_{i \in D} x4_{ij}^s - y1_j^n \quad \forall j \in D \quad \forall s \in S \quad (7)$$

$$\sum_{i \in D} x4_{ij}^0 = y1_j^1 \quad \forall j \in D \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K \setminus \{n\}} y1_i^k \leq (n-1) \sum_{s \in S} \sum_{j \in D} x4_{ij}^s \quad \forall i \in D \quad (9)$$

$$\sum_{s \in S} x4_{ij}^s \leq s_{max} \sum_{i \in U} \sum_{k \in K} (x1_{ij}^{t_1'k} + x1_{ji}^{t_1'k}) \quad \forall ij \in L \quad (10)$$

$$\sum_{i \in D} y1_i^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{i \in D} y2_i^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (12)$$

$$T_j \geq u - t_{max} \left(\sum_{t'=0}^u \sum_{k \in K} \sum_{i \in D} x1_{ij}^{t_1'k} + \sum_{k \in K} y1_j^k \right) \quad \forall j \in D \quad \forall u \in U \quad (13)$$

$$Z \geq T_i \quad \forall i \in D \quad (14)$$

$$T_i \in \{0, 1, \dots, t_{max}\} \quad \forall i \in D \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & x1_{ij}^{t_1'k} \in \{0, 1\} \\ & \forall ij \in L \quad \forall t \in U (0 \leq t \leq t_{max} - \alpha c_{ij}) \quad \forall k \in K \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & x2_{ij}^{t_2'k} \in \{0, 1\} \\ & \forall ij \in L \quad \forall t \in U (0 \leq t \leq t_{max} - c_{ij}) \quad \forall k \in K \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & x3_i^{t_1'k} \in \{0, 1\} \\ & \forall i \in D \quad \forall t \in U (0 \leq t \leq t_{max} - 1) \quad \forall k \in K \quad (18) \end{aligned}$$

$$x4_{ij}^s \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in L \quad \forall s \in S \quad (19)$$

$$y1_i^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in D \quad \forall k \in K \quad (20)$$

$$y2_i^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in D \quad \forall k \in K \quad (21)$$

ただし、表記の簡単のため、 t_1', t_2', t_1, t_2 という記号を導入した。厳密に表記すると、

$$x1_{ij}^{t_1'k} = x1_{ij}^{t + \alpha c_{ij} k} \quad (22)$$

$$x2_{ij}^{t_2'k} = x2_{ij}^{t + c_{ij} k} \quad (23)$$

$$x1_{ij}^{t_1'k} = x1_{ij}^{t' - \alpha c_{ij} k} \quad (24)$$

$$x2_{ij}^{t_2'k} = x1_{ij}^{t' - c_{ij} k} \quad (25)$$

である。

式 (2) は時空間ネットワークの各ノードにおける保存則を表す。式 (3) は、 $t = 0$ の時、各車はそれぞれの起点にいることを表す。式 (4) は、全ノードに少なくとも 1 回は車が訪れることを表す。式 (5) は各リンクが啓開されるまでは所要時間が長くなることを意味し、式 (6) は各リンクが啓開されるのは 1 回以下であることを意味する。式 (7) から (10) は仮想経路を定義している。式 (7) は各ノードにおける仮想経路の保存則を表す。式 (8) は仮想経路の起点が啓開車 1 の起点に等しいことを表す。式 (9) は各啓開車の起点が仮想経路に含まれることを意味する。式 (10) は、仮想経路が啓開済みリンクのみを経由することを意味する。式 (11) および (12) は、各車の起終点がそれぞれ 1 つずつであることを表す。式 (13) および (14) はそれぞれ T_i と Z の定義を表す。式 (15) から (21) は変数の定義域を表す。

4. 仮想ネットワークへの適用による分析

モデルが問題設定を正しく表現できているか確認し、解の性質を確認するため、モデルを仮想ネットワークに適用し、考察を行う。本研究では数理最適化ソルバー Gurobi Optimizer⁸⁾ を用いて厳密解の求解を行った。

(1) 状況設定

ネットワークやパラメータを変え、ケース 0~4 の 5 パターンの計算を行う。各ケースの計算で用いたネットワークとパラメータを表-1 に示す。

ケース 0 では図-2 左側に示した小さいネットワーク (5 ノードネットワーク) を用いて、モデルの基本的な

表-1 入力パラメータ

ケース	network	n	α	β	γ	t_{max}	s_{max}
0	5 ノード	2				25	8
1		1				90	
2	3×3	2	3	10^{-3}	10^{-6}	60	30
3		3					
4		4					

表-2 最適解

ケース	起点	終点	目的関数の値		
			第 1 項	2 項	3 項
0	2,3	1,2	12	27	24
1	8	11	71	71	389
2	8,3	6,11	31	69	121
3	8,3,9	10,2,11	21	63	111
4	8,3,9,2	1,6,11,10	15	63	75

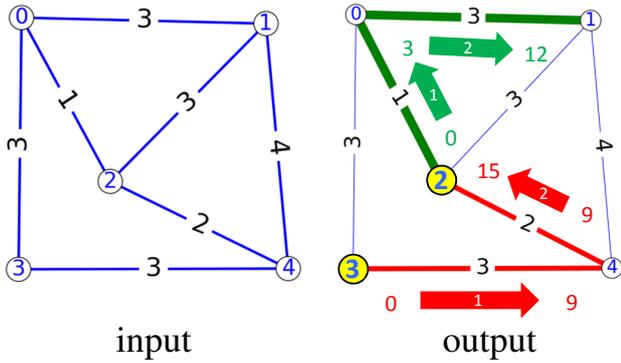


図-2 計算例 (ケース 0)

使い方を説明する。図-2 のノード上に示された数字はノード ID，リンク上に示された数字は啓開後の通過にかかる所要時間を表す。

ケース 1~4 ではノード数 12 のグリッド型のネットワークを用い，台数 n を 1~4 台まで変化させて計算する。モデルから得られる解の特性を確認し，台数を変えることによる解の変化を見る。

例としてケース 0 のモデルへのインプットとなるパラメータを具体的に記述すると以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 D &= \{0, 1, 2, 3, 4\}, \\
 L &= \{(0, 1), (0, 2), (0, 3), (1, 0), (1, 2), (1, 4), (2, 0), (2, 1), \\
 &\quad (2, 4), (3, 0), (3, 4), (4, 1), (4, 2), (4, 3)\}, \\
 c_{01} &= c_{10} = 3, \\
 c_{02} &= c_{20} = 1, \\
 c_{03} &= c_{30} = 3, \\
 c_{12} &= c_{21} = 3, \\
 c_{14} &= c_{41} = 4, \\
 c_{24} &= c_{42} = 2, \\
 c_{34} &= c_{43} = 3, \\
 n &= 2, \\
 t_{max} &= 35, \\
 s_{max} &= 35, \\
 \alpha &= 3, \\
 \beta &= 10^{-3}, \\
 \gamma &= 10^{-6}
 \end{aligned}$$

(2) 計算結果と考察

計算によって得られた各ケースの最適解での目的関数の各項の値と，そのときの起点，終点ノードを表-2 に示す。

a) ケース 0

図-2 右側はケース 0 の計算結果である最適起点配置・経路を示す。この図は，黄色く塗られたノードは各車の起点を示しており，各色の矢印がそれぞれの啓開車の経路を示し，矢印の前後に書かれた数字がリンク通過時刻を示す。例えば図-2 右側で緑色で示した啓開車はノード 2 を時刻 0 に出発し，ノード 0 を経由してノード 1 に時刻 12 に到着する。決定変数の値は以下であった。

$$\begin{aligned}
 x_{20}^{031} &= x_{01}^{3121} = x_{34}^{092} = x_{42}^{9152} = 1, \\
 x_{34}^{04} &= x_{42}^{41} = x_{20}^{42} = x_{01}^{43} = 1, \\
 T_0 &= 3, \\
 T_1 &= 12, \\
 T_2 &= 0, \\
 T_3 &= 0, \\
 T_4 &= 9, \\
 Z &= 12, \\
 y_{12}^1 &= y_{13}^2 = 1, \\
 y_{21}^1 &= y_{22}^2 = 1, \\
 &\text{これら以外の変数は全て 0 である。}
 \end{aligned}$$

b) ケース 1~4

ケース 1~4 の計算結果である最適起点配置・経路を図-3 に示す。

図-3 のケース 1 および 2 の結果の図より，リンクの複数回の通過や所要時間の変化が正しく表現されていることが確認できる。例えばケース 1 では，車がリンク 6-7, 3-7, 2-6, 9-10 を複数回通過し，2 回目は短い所要時間で移動できるようになっている。ケース 3 および 4 ではそのようなリンクが存在しないが，これは複数回通過を行ってもより良い解が得られないことを意味する。ノードにおける啓開車の滞りも時空間ネットワークの導入により本モデルで表現可能となったが，今回の計算結果には示していない。

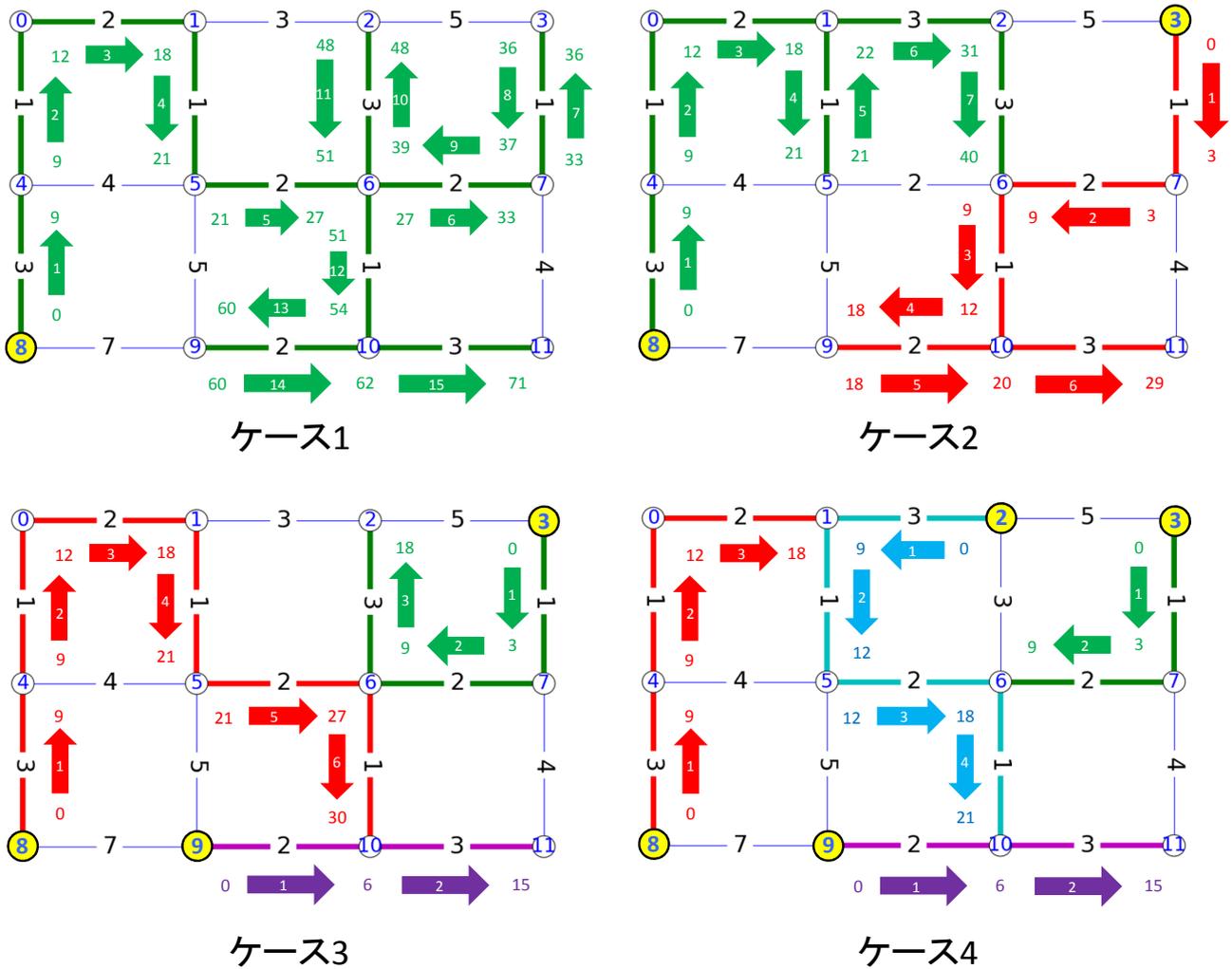


図-3 最適解 (ケース 1~4)

表-2 の目的関数値に注目すると、台数の増加に伴って各項の値は小さくなっており、改善していることが確認できる。特に第 1 項と第 3 項は、それぞれのノードに車が訪れるまでの時間の関数であるため、台数が多ければ多いほど小さい値になる。一方で第 2 項は、車の移動時間の総和である。台数が増えても啓開されるべきリンクの数はあまり変化しないため、総移動時間も大きくは変化しない、そのため第 2 項は、車の台数による改善幅があまり大きくないと考えられる。

台数の変化に伴う最適経路・起点配置を比較する。まず経路、すなわち啓開されるリンクに注目すると、台数が変化してもほとんど変わっていないことがわかる。台数によって啓開される場合とそうでない場合があるのは、リンク 1-2, 2-6, 5-6 のみとなっている。台数に関わらず、ネットワークごとに啓開されるべきリンクがある程度決まっており、それを台数に応じて分割して各車で分担する形になっていると言える。また、本モデルでは全ノードに車が到達するまでの時間を目的関数としているため、各車の移動時間・距離は極端に

偏ることは無く、ある程度均等になっていることがわかる。

起点配置については、台数を 1 台増やしてもそれまでに置かれた起点は動かず、空いたノードに新しい起点が 1 つ追加される形になっている。またそれぞれの配置は中央付近に固まるのではなく、ネットワークの外周にある程度散らばって配置されている。分散型の配置のほうが、孤立ノードをできるだけ早く解消するという目的が達成されやすい可能性が示唆される。

5. おわりに

本研究では、ネットワーク上での道路啓開を対象とし、施設配置・経路決定モデルの構築を行った。道路啓開を行う前後ではリンクの所要時間が変化するという特徴があり、一般的な施設配置や経路決定モデルよりも車の動きが複雑なものとなる。このため、より詳細に表現できる時空間ネットワークを導入し、整数線形計画問題として定式化した。その上で、定式化した

モデルを仮想ネットワークに適用し、厳密解を求める計算を行った。その結果、ケース 1 およびケース 2 から、道路啓開時の特徴的な車の動きを適切に表現できていることが確認された。また、ケース 1~4 の計算例を比較することで、解の特徴が見出された。具体的には、台数が変化しても啓開されるリンクや起点ノードがほとんど変化しないことや、起点ノードの配置は一部のエリアに集中せずある程度分散されることが明らかとなった。

今後の課題としては、計算負荷を軽減しより大きなネットワークに適用するため、計算アルゴリズムの改良やモデルの改良・簡略化を検討する必要がある。特に計算アルゴリズムについては、本研究では商用ソルバーを用いてモデルの最適化問題を解き厳密解を求めたが、一般的に厳密解の求解が困難な最適化問題に対しては、遺伝的アルゴリズムなどのヒューリスティックな解法を用いることが多い。本モデルをより大きなネットワークに適用するためには、ヒューリスティック解法を導入する必要があると考えられる。

また、本研究では道路啓開モデルのみの提案と分析を行ったが、例えば道路啓開を前提としないより一般的な施設配置・経路決定モデルで得られる解と比較するなど、より広い観点から見て本モデルを分析する必要があると考えられる。また、本研究では台数は予め与えられるものとして扱ったが、実際には最適な台数も併せて求める必要が出てくると考えられる。手法としては、現実的に設置可能な台数を順にモデルに適用してゆき最適な台数を探す方法や、台数を変数に含めた新たなモデルを開発する方法が挙げられる。これらの定式化や比較を行う必要がある。

参考文献

- 1) 夏山英樹, 神田佑亮, 藤井聡: 東日本大震災「くしの歯作戦」についての物語描写研究「啓開・復興における地元建設業者の役割」, 土木学会論文集 F5 (土木技術者実践), Vol. 69, No. 1, pp. 14-26, 2013.
- 2) 山田善一, 家村浩和, 野田茂, 伊津野和行: 道路交通網の最適な震後復旧過程の評価, 土木学会論文集, No. 368, pp. 355-362, 1986.
- 3) 有村幹治, 上西和弘, 田村亨, 杉本博之, 榎谷有三: 都市間時間距離に基づく被災道路の最適復旧モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol. 14, pp. 333-340, 1997.
- 4) 杉本博之, 田村亨, 有村幹治, 斎藤和夫: 復旧班の協力を考慮した被災ネットワーク復旧モデルの開発, 土木学会論文集, No. 625, pp. 135-148, 1999.
- 5) Laporte, G. and Nobert, Y.: An exact algorithm for minimizing routing and operating costs in depot location, *European Journal of Operational Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 224-226, 1981.
- 6) Tuzun, D. and Burke, L. I.: A two-phase tabu search approach to the location routing problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 116, No. 1, pp. 87-99, 1999.
- 7) Rath, S. and Gutjahr, W. J.: A math-heuristic for the warehouse location-routing problem in disaster relief, *Computers & Operations Research*, Vol. 42, pp. 25-39, 2011.
- 8) Gurobi Optimization Inc.: Gurobi Optimizer Reference Manual, <http://www.gurobi.com>.

(???? ? ? 受付)

A LOCATION-ROUTING MODEL WITH SPACE-TIME REPRESENTATION FOR RESTORATION OF A DAMAGED ROAD NETWORK

Ryo ITABASHI, Takahiko KUSAKABE and Yasuo ASAKURA