

# 最適避難方向指定のための cell-based交通計画モデル

片岡 侑美子<sup>1</sup>・奥村 誠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1, S502-W)  
E-mail:yumiko.kataoka@plan.civil.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学教授 災害国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1, S502b)  
E-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp

東日本大震災の経験を踏まえ、やむを得ない場合での自動車避難が認可された。それゆえ、今までの徒歩を原則とする津波避難計画の見直しが必要となっている。避難計画の策定に際して、最適な経路や時間を計算できる最適モデルは有用である。本研究では、どの時間帯にどこにどれくらいの車が存在するかを明示的に表現するCell-basedモデルをベースとする津波避難最適交通配分モデルを提案する。提案するモデルは、各セルに与えた津波に対する危険度に各単位時間帯の車両数を掛け、その合計である総リスクを最小化する。また、交差点での誘導に関する制約条件を加えたことにより、導入する制御の段階に応じたリスクの減少効果を定量的に計算する方法を開発した。本論文では、簡単なネットワークへの適用例を解説している。

**Key Words :** *optimal model, evacuation, tsunami, cell-based network*

## 1. はじめに

東日本大震災の経験を踏まえ、やむを得ない場合での自動車避難が認可された。それゆえ、今までの徒歩を原則とする津波避難計画の見直しが必要となり、車利用を取り入れた避難計画の研究が盛んになっている。現在までの既存研究の多くは、シミュレーションを用いて現実の事象を捉え、実現可能な避難を策定するものである。一方で、地域全体での安全性の実現のための各車両の避難先や経路への配分を計算できる最適化モデルの役割も大きいと考える。

最適化モデルは、制約条件下において最も理想的な交通配分を求めるモデルであるが、現実には理想的な状態とはほど遠いため、実社会への適用性への疑問や非難は少なくない。しかし、情報が伝わらないとか、周囲の意思に引きずられるという、理想と現実の乖離をもたらす要因は、最適化モデルにおける制約条件として表現することが可能であり、現実の状況を多数の制約条件がついた最適化モデルで表現できる。最適化モデルの強みは、制約条件を加えたり外したりした場合の影響を定量的に計算できることであり、それを用いて理想から遠ざけている原因をとり除くような政策や技術の導入効果を、定量的に知ることができる。

本研究では、各時刻にどこにどれくらいの車が存在す

るかを明示的に表現できる Cell-based モデルを基にした、津波避難最適交通配分モデルを提案する。提案するモデルの特徴として、各セルの各車両が被る危険度の時間変化を与えるとともに、他人に追従するという行動や交差点における方向誘導に関する制約条件を加えたことが挙げられる。本論文では、簡単なネットワークへの適用を通して、モデルの基本的な動きを確認している。

## 2. 津波避難最適交通配分モデル

本研究で提案するモデルは Cell-based Merchant-Nemhauser (M-N)モデル(Nie, 2011<sup>1)</sup>)に基づき、津波避難時のリスクを最小化するモデルである。具体的には、時間と共に変化する津波リスクをモデル内に組み込み、かつ交差点で避難車両を誘導する上での制約条件を加えたところに特徴がある。

### (1) Cell-based (M-N) モデル

まず、本モデルの基礎となるCell-based M-Nモデルのネットワークの構造とモデルの概要について説明する。

従来のCell Transmission Model (CTM, Daganzo<sup>2,3)</sup>)ではセル1つに1つのフロー関数を持っているが、このモデルでは、1つのセルに2つのフロー関数(流出車両と流入車両)をも

つ. セルとセルの間がノードで繋がっており, 流出入量を別々に表現できるため, 分岐点や合流点における複数のセルに対し制約条件を加える必要がなくなり, 定式化が明瞭になる.

#### a) ネットワークの構成

本研究で適応するネットワークはセル( $a \in A$ )とノード( $i \in I$ )で構成され, ノードとリンクで構成された通常の道路ネットワークを元に次のような手順でつくられる.

まず, CTMと同じく設定した単位時間あたりの自由流の移動距離を1つのセルの長さとし, リンクをセルに分割する. 次に分割したセル同士を仮想のノードで繋ぐ. つまり, すべてのセルはノードを介して上流・下流のセルと繋がっており, 分岐点や合流点もノードで表される. セルは車を保有する容量を持っているが, ノードはあくまで隣同士のセルを繋ぐ役割のみを持っており, 実質的な容量を持たない.

車両が発生する各ノードには, その上流に容量無限大のダミーの起点セルを設置する. 各ノードで発生が予測される車両数を起点セルに収容する.

目的地に到着した車両を収容するダミーのセルを目的地セルと呼び, もとのリンク-ノードネットワーク上の目的地ノードの下流に設置する. 容量は各地点に応じて設定する.

#### b) 移動時間最小化の定式化

全車両の移動時間を最小化するCell-based M-Nモデルの定式化を式(1)~(7)に示す.

各セルに対して3つの内生変数を考える. 時刻 $t$ でセル $a$ に流出・流入する車両数をそれぞれ $v_t^a, u_t^a$ とし, 時刻 $t$ でセル $a$ から流出せずに時刻 $t+1$ まで留まる車両数を $p_t^a$ とする.

式(3)の $a \in I(i)$ ,  $b \in O(i)$ はそれぞれノード $i$ の上流側, 下流側で繋がっているセルの集合である.

式(4), (5)は流入・流出量の容量を制限しており,  $C^a$ は各セルの流入可能最大車両数である.

式(6)はセル $a$ への流入台数に関する制約であり, セルの収容容量 $H^a$ の中でまだ使われていない容量に比例して流入できることを表し,  $\delta^a$ は渋滞流の密度波速度を自由流の密度波速度で割った定数である.

滞在する車両である $p_t^a$ が大きくなるとセルの収容可能車両数 $H^a$ の制限によって, セル $a$ に流入する車両が減少する. これが上流セルの流出車両に影響し, 滞在車両を増加させる. このようにして, 本モデルは渋滞が上流に伝播する現象を表現している(式(2), (3), (6)参照).

式(7)は初期条件を示しており,  $D^a$ は初期の各セルの車両数である. 参考文献<sup>9)</sup>では, 初期条件とは別に各単位時間における需要量をノードに関して流入させているが, ダミーセルを設置することと本質的には変わらない.

$$\min_{\{v_t^a, p_t^a, u_t^a\}} \sum_{t=1}^T \sum_{a \in A} (p_t^a + v_t^a) \quad (1)$$

$$p_t^a + u_t^a = p_{t+1}^a + v_{t+1}^a \quad (2)$$

$$\sum_{a \in I(i)} v_t^a = \sum_{b \in O(i)} u_t^b \quad (3)$$

$$0 \leq u_t^a \leq C^a \quad (4)$$

$$0 \leq v_t^a \leq C^a \quad (5)$$

$$u_t^a \leq \delta^a (H^a - (p_t^a + v_t^a)) \quad (6)$$

$$v_0^a + p_0^a = D^a \geq 0 \text{ (given)} \quad (7)$$

## (2) 津波避難を想定した最適化モデル

次に, 津波避難を想定した最適化モデルを構築する上で重要な項目を説明する.

#### a) 目的関数

多くの避難研究では, 総所要時間(各避難者の所要時間の和)を最小にする目的関数がとられているが, 本研究では所要時間は問題ではなく, 時間と共に危険度が増大した地域に車両と人が留まってしまうことが問題だと考えている.

そこで, 各セルの津波による危険度を時刻 $t$ ごとに变化するものとして,  $R_t^a$ と与え, 車両数と掛けた合計の総リスクを目的関数とした(式(8)参照). 一般的に, 海に近いほど, また時間が経過するほど危険度は増大すると考えられる.

$$\min_{\{v_t^a, p_t^a, u_t^a\}} \sum_{t=1}^T \sum_{a \in A} R_t^a (p_t^a + v_t^a) \quad (8)$$

#### b) 交差点誘導

津波避難計画を策定する上で, 避難の方向や経路を決めることは重要であり, 本研究ではそれを各交差点においてどの方向にどれほどの車両を誘導するかを通じて表現する. 下流に複数のセルをもつ交差点について, 各セルへの流入車両を制約する変数 $\varepsilon_t^a$ をおき, それを交差点オペレーターと称する.

例えば1つの上流セル $a$ と2つの下流セル $b, c$ をもつ図1のような交差点における制約条件を式(9)~(12)に示す.

$$u_t^b \leq \varepsilon_t^b v_t^a \quad (9)$$

$$u_t^c \leq \varepsilon_t^c v_t^a \quad (10)$$

$$\varepsilon_t^b + \varepsilon_t^c = 1 \quad (11)$$

$$\varepsilon_t^b \geq 0, \varepsilon_t^c \geq 0 \quad (12)$$

ここで, 式(9), (10)は変数に対し非線形であるが, 大きな数である $L$ を使うことで線形式として書き換えることができる(式(11)~(13)).

$$u_t^b \leq L\varepsilon_t^b \quad (11)$$

$$\sum_{b \in O(i)} \varepsilon_t^b = 1 \quad (12)$$

$$\varepsilon_t^b \geq 0 \quad (13)$$

以上の定式化により本問題は式(8)を目的関数とし、式(2)~(7), (11)~(13)を制約条件とする線形計画問題として表現できる。

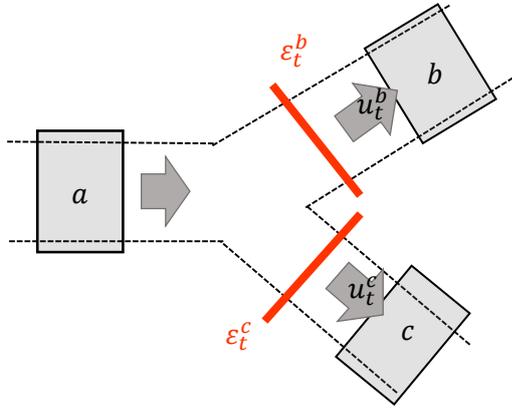


図1. 交差点における制約条件

### 3. 数値実験

#### (1) 設定条件

本研究で提案したモデルの動きを、仮想ネットワークを対象に確認する。対象にするノード-セルネットワークを図2に、各ノードの特性を表1に示す。セル1とセル6はそれぞれダミーセルである起点セルと目的地セルである。今回は十分な容量をもつ避難所を1つの目的地セルを用いて表現したが、他に高台など津波から回避できる場所があれば、容量に制約がある目的地セルを複数加えることができる。ネットワークは、左側が海に面しており、避難者は海から右方の高台の避難所にむけて移動する。セル2, 3からなる経路は比較的高地であるのに対し、セル4, 5からなる経路は低地とする。津波は左側からきて、 $t = 5$ でセル1とセル4を襲い、順にセル2とセル5, セル3まで達する。避難所であるセル6は津波の危険度はない。以上の危険度の設定を表2に示す。時間は8つの単位時間で分けられている。

#### (2) 交差点オペレーターの設定

交差点での誘導によりどれくらいリスクが変動するかを確認するため、誘導方法の異なる4ケースを想定し、相対的に評価する。

ケース1は、各車両が安全を求めて、山側の経路のみを通ると考える。つまり、 $\varepsilon^2 = 1, \varepsilon^4 = 0$ に固定した計算を行う。

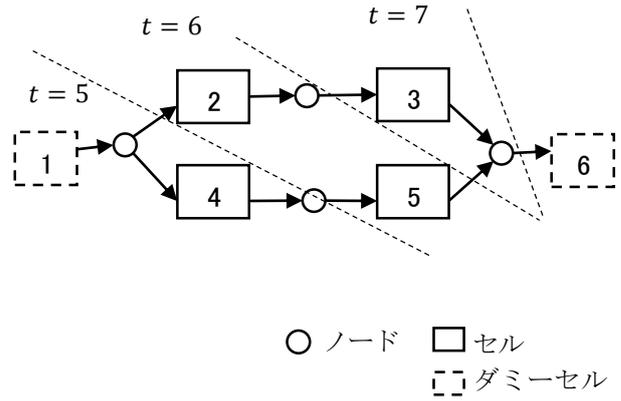


図2. ノード-セルネットワーク

表1. セルの特性

|          | Cell 1   | Cell 2 | Cell 3 | Cell 4 | Cell 5 | Cell 6   |
|----------|----------|--------|--------|--------|--------|----------|
| $C^a$    | 15       | 12     | 6      | 12     | 10     | $\infty$ |
| $H^a$    | $\infty$ | 20     | 20     | 20     | 20     | $\infty$ |
| $\delta$ | 1        | 1      | 1      | 1      | 1      | 1        |

表2. セルの危険度 $R_t^a$

| Time  | Cell 1 | Cell 2 | Cell 3 | Cell 4 | Cell 5 | Cell 6 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 - 4 | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 5     | 20     | 0      | 0      | 10     | 0      | 0      |
| 6     | 20     | 3      | 0      | 10     | 10     | 0      |
| 7     | 20     | 3      | 3      | 10     | 10     | 0      |
| 8     | 20     | 3      | 3      | 10     | 10     | 0      |

ケース2は、各車両が先行車両の避難方向に従ってしまふ場合を想定し、交差点において時刻に関わらず一方のみに誘導する場合である。実際には、避難用の道路標識や看板を設置する場合に対応する。

ケース3は時刻により誘導方向を指定できるケースであり、信号による制御が行われ、各車両が先行車両の方向に引きずられないでその指示に従うケースに相当している。

ケース4は、各車両はどの方向に行けば全体リスクが最小になるかという完全な情報を持っており、かつ先行する避難車両の方向には引きずられないケースである。例えば、リアルタイムで指示してくれるカーナビゲーションシステムを全車両が搭載している場合に相当する。

以上の4つの誘導方法に対応する交差点オペレーターを表3にまとめた。

表3. 各ケースの交差点オペレーター

|      |   |
|------|---|
| ケース1 | 静的バイナリ変数<br>(最小リスク経路の方向に固定)   |
| ケース2 | 静的バイナリ変数<br>( $\varepsilon_t^a = \varepsilon^a, \forall t \in \{0, T\}$ ) |
| ケース3 | 動的バイナリ変数( $\varepsilon_t^a = \{0,1\}$ )                                   |
| ケース4 | 動的連続変数( $0 \leq \varepsilon_t^a \leq 1$ )                                 |

### (3) 結果と考察

各ケースの総リスクの値を図3に示す。

ケース1からケース4の順に総リスクは減少しているが、減少幅は異なっている。ケース2はケース1に比べてリスクが308減少しているのに対し、ケース3はケース2に比べ457減少している。またケース4はケース3より143減少しており、かつ総リスクが0、つまり全車両が安全に避難できていた。リスクの減少幅を考察すると、カーナビゲーションの導入は、何も行わない場合や標識を立てるのに比べ大きな効果を持つが、信号による誘導とは大差がない。コストや現実性を考えれば、まずは信号による制御を進める必要があることを示唆している。

もちろん、この結論は与えるネットワークの設定に依存するため、実際の道路ネットワークに対し、本モデルによる分析を行うことが望まれる。

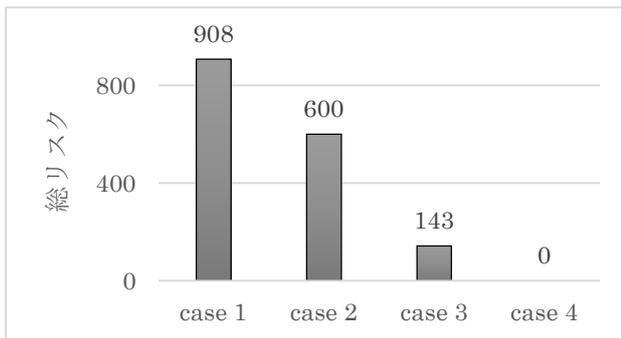


図3. 各ケースの目的関数の値

### 4. 結論および今後の課題

本研究では、津波に対するリスクを最小化する避難交通配分モデルを提示した。その際、交差点における複数の制御方法を制約条件を変えることで表現し、制御の効果を定量的に比較することができた。

今後の課題としては、提案したモデルを実ネットワークへの適用することが挙げられる。

### 参考文献

- 1) Nie, Yu Marco. : A cell-based Merchant–Nemhauser model for the system optimum dynamic traffic assignment problem, *Transportation Research Part B: Methodological* 45.2 (2011): 329-342.
- 2) Daganzo, C. F. : The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory, *Transportation Research Part B: Methodological* 28.4 (1994): 269-287.
- 3) Daganzo, C. F. : The cell transmission model, part II: network traffic, *Transportation Research Part B: Methodological* 29.2 (1995): 79-93.

(2015.4.24 受付)

## CELL-BASED MODEL FOR OPTIMAL ROUTE DIRECTION OF TSUNAMI EVACUATION

Yumiko KATAOKA and Makoto OKUMURA

Evacuation using a car got allowed if it is needed after the 2011 Great East Japan Earthquake. Each local government have to renew its evacuation plan with consideration of car usage.

Optimal model is effective way to make an evacuation plan because we can get the optimal route and time from that model. The proposed linear optimization model finds the optimal route direction strategy which minimizes the sum of staying risk against tsunami multiplied by the number of cars in all over time and road. This model is cell-based model which figures out the number of cars on each road and each time by dividing the road into homogeneous sections (cells). Moreover we add the intersection operator as a new constraint for considering human behavior of following. Numerical experiment have been done in a simple network.