

規範的避難オペレーションに基づく 避難インフラの限界能力評価

大石 雪絵¹・桑原 雅夫²・大畑 長³

¹非会員 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: oishi@plan.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学大学院教授 情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

³正会員 東北大学大学院 情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: ohhata-ta@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究では、規範的な避難行動を仮定して、First-Best な避難シナリオを求める方法を提案する。避難計画を設計する上で、最も不確実性が高いものは避難行動であり、数多くの避難行動のシナリオを立てて検討しなければならない。本研究では、避難行動の不確実性を取り除いた規範的な行動を仮定し、避難計画を設計するうえでベンチマークとなる避難シナリオを提供する。モデル化にあたっては、地域の災害実情に柔軟に対応できるように、数種類の目的関数やトリップ目的（避難トリップ、ピックアップ行動など）、さらに災害時の場所の危険度を考慮できるものとした。また、提案手法を宮城県石巻市中心部のネットワークに適用し、計算可能性を検証した。

Key Words : *evacuation operation, normative models, dynamic network, liner programming*

1. はじめに

近年、各自治体は 2011 年に発生した東日本大震災をふまえ、避難計画策定に着手している。従来、避難計画策定には避難状況を再現するシミュレーションモデル¹⁾²⁾が数多く用いられてきたが、その結果は仮定した避難行動（避難出発時刻、避難所選択の基準、避難者の割合等）に大きく左右される。すなわち、特定の避難行動を仮定した場合の結果であるため、どの程度効率よく避難した結果なのか、またさらに避難時間を短縮することはできるのか等は検討することは難しい。

そこで、本研究では避難計画を設計するうえでベンチマークとなる First-Best な避難シナリオを提供するため、規範的な避難行動を仮定し、避難行動の不確実性を取り除いたモデルを定式化する。規範的な避難計画モデルの研究は従来も行われており³⁾⁴⁾⁵⁾、近年においては安藤ら⁶⁾によって時空間ネットワークの概念を用いた避難計画モデルを線形計画問題として定式化され、加藤・瀧澤⁷⁾によって最短避難のアルゴリズムの提案が行われた。しかしながら、これらの研究では特定の目的関数や避難需要のみしか考慮されておらず、モデルの柔軟性が不十分と考える。そこで、本研究では地域の災害実情に柔軟に対応できるように、数種類の目的関数やトリップ目的（避難トリップ、ピックアップ行動など）、さらに災害時の場所の危険度を考慮できるモデルを定

式化する。さらに、提案手法を宮城県石巻市中心部のネットワークに適用し、計算可能性を検証する。また、避難完了時間を減少させるケーススタディを行い、本モデルが避難整備計画の検討にも活用可能であることを示す。

2. 定式化

(1) 本モデルの特徴

a) 規範的避難オペレーションの仮定

本研究では、面的に広がる地域を対象にし避難状況の時間的な変化を記述するため、動的なネットワークモデルを用いる。また、規範的モデルとして、避難行動（避難者の起点出発時刻や避難経路等）を完全に制御できる状況を仮定する。すなわち、ネットワークに待ち行列を作ってしまうことは、待ち行列の延伸によりその上流側の道路容量を低減させる危険があるため、本研究では待ち行列を発生させないように、トリップの経路と出発時刻を制御する。

b) モデルの柔軟性

地域の災害実情に応じて数種類の目的関数やトリップ目的（避難トリップ、ピックアップ行動など）、さらに災害時の場所の危険度を考慮することができるモデル化を行う。

(2) 基本モデルの定式化

柔軟なモデル化を行うにあたり、まず基本となる規範的避難オペレーションに基づいた避難計画モデル（以下、基本モデルと呼ぶ）を定式化する。また、基本モデルをベースに柔軟に拡張したモデルについては次節で定式化する。

a) 問題設定

- 総避難時間を最小化する目的関数を定式化する。
- 全ての需要は避難需要であり、起点からの避難需要は所与とする。これらの需要は目的関数が最適になるように避難所選択を行う。

b) 定式化

図-1 は、横軸に災害発生からの経過時間、縦軸に累積のトリップ数を表しており、左側の曲線は起点からの累積出発トリップ数、右側の曲線は終点の避難所への累積到着トリップ数を表す。したがって、総避難時間は図-1 の黄色部分の面積である。ただし、ネットワーク上に待ち行列が発生しないように出発時刻を制御するため起点での待機時間が発生し、総避難時間は待機時間と避難所までの移動時間の和となる。この問題を定式化すると、次のような線形最適化問題となる。

$$\min \sum_t \sum_d s_d(t) \cdot t \quad (1)$$

subject to

$$-\sum_k \lambda_{ki}(t - T_{ki}) + \sum_j \lambda_{ij}(t) - r_o(t) + s_d(t) = 0$$

$$T_{ki} = \text{given}, \forall i \in N, \forall o \in O, \forall d \in D, \forall t \quad (2)$$

$$\sum_t r_o(t) = Q_o \quad \forall o \in O \quad (3)$$

$$\sum_t \sum_d s_d(t) = \sum_o Q_o \quad (4)$$

$$\lambda_{ij}(t) \leq v_{ij} \quad v_{ij} = \text{given}, \forall (i, j) \in L, \forall t \quad (5)$$

$$\sum_t s_d(t) \leq \delta_d \quad \delta_d = \text{given}, \forall d \in D \quad (6)$$

$$\lambda_{ij}(t) \geq 0 \quad \forall (i, j) \in L, \forall t \quad (7)$$

$$r_o(t) \geq 0 \quad \forall o \in O, \forall t \quad (8)$$

$$s_d(t) \geq 0 \quad \forall d \in D, \forall t \quad (9)$$

ただし、

N : ノード集合, O : 起点集合, D : 終点集合, L : リンク集合

t : 災害発生からの経過時刻, T : 避難完了時刻

T_{ki} : リンク (k, i) 所要時間（時間変動しないため所与）

Q_o : 起点 o が所与の避難需要（所与）

v_{ij} : リンク (i, j) の容量（所与）

δ_d : 避難所 d の容量（所与）

$\lambda_{ij}(t)$: 時刻 t にリンク (i, j) に流入する交通流率

$r_o(t)$: 時刻 t に起点 o を出発する交通流率

$s_d(t)$: 時刻 t に避難所 d に到着する交通流率

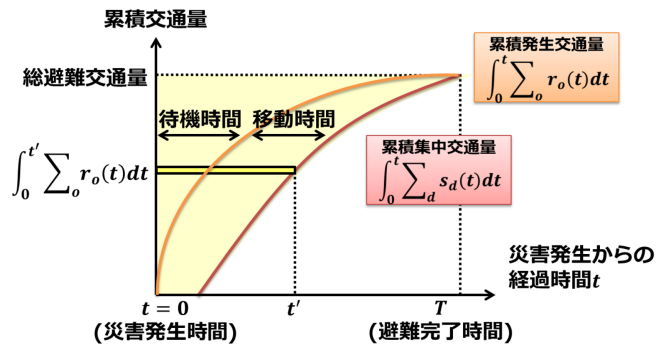


図-1 総避難時間

以上の定式化では、時間軸を等しい間隔の Δt 単位に離散化しており、リンク旅行時間 T_{ki} 、終点到着時刻 t などすべての時間は Δt 単位で表される。

目的関数の式 (1) は、 $s_d(t)$ が目的地に時刻 t に到着した累積トリップ数を表しているの、待機時間と移動時間を合わせた総避難時間を表している。制約条件の式 (2) は、任意のノード i における交通量保存則を表しており、 $\lambda_{ki}(t - T_{ki})$ はリンク (k, i) から時刻 t に流出する交通流率、 $\lambda_{ij}(t)$ はリンク (i, j) に時刻 t に流入する交通流率を表している。また、 $r_o(t)$ 、 $s_d(t)$ は、それぞれ時刻 t に起点を出発する交通流率、終点に到着する交通流率を表す。ここで、 $\lambda_{ki}(t - T_{ki})$ がリンク (k, i) から時刻 t に流出する交通流率に等しい理由であるが、待ち行列が発生しない FIFO の条件下においては、リンク旅行時間は一定値を取るため、時刻 $(t - T_{ki})$ にリンク (k, i) に流入した交通流率 $\lambda_{ki}(t - T_{ki})$ は、時刻 t に当該リンクを流出する流率に等しくなるからである。また、式 (3)(4) は起点が所与の避難需要に関する制約、式 (5) はリンクの容量制約、式 (6) は避難所の容量制約、式 (7) ~ (9) は未知数の非負制約を表す。したがって、基本モデルは $\lambda_{ij}(t)$ 、 $r_o(t)$ 、 $s_d(t)$ を未知数として、式 (2)~(9) の制約条件の下で目的関数を最小化する線形最適化問題となる。

さらに、式 (10) のように、式 (1) の目的関数における避難完了時間 t を n 乗 ($n \gg 1$) しべき乗化を行うことで、遅い時刻に避難所に到着するペナルティを大きくすると、避難完了時間を最小化する目的関数を定式化することができる。

$$\min \sum_t \sum_d s_d(t) \cdot t^n \quad \forall d \in D \quad (10)$$

式 (1) の目的関数では、総避難時間が小さくなくても必ずしも避難完了時間も同様に小さくなるとは限らないという問題がおきてしまうが、式 (10) の目的関数を用いることでこのような問題を簡便に解決することができる。これにより、より正確な限界能力の把握が可能となる。

c) 最適性条件

基本モデルの Karush-Kuhn-Tucker 条件を求めると、次の相補性条件が得られる。ただし、 $\beta_{ij}(t)$, α_d , γ_o はラグランジュの未定乗数である。

$$\begin{cases} \beta_{ij}(t)\{\lambda_{ij}(t) - v_{ij}\} = 0 \\ \lambda_{ij}(t) - v_{ij} \leq 0, \quad \beta_{ij}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \alpha_d\{\sum_t s_d(t) - \delta_d\} = 0 \\ \sum_t s_d(t) - \delta_d \leq 0, \quad \alpha_d \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \lambda_{ij}(t)\{\pi_i(t) - \pi_j(t + T_{ij}) + \beta_{ij}(t)\} = 0 \\ \pi_i(t) - \pi_j(t + T_{ij}) + \beta_{ij}(t) \geq 0, \quad \lambda_{ij}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} s_d(t)\{t + \pi_d(t) - \theta + \alpha_d\} = 0 \\ t + \pi_d(t) - \theta + \alpha_d \geq 0, \quad s_d(t) \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} r_o(t)\{-\pi_o(t) - \gamma_o\} = 0 \\ -\pi_o(t) - \gamma_o \geq 0, \quad r_o(t) \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

以上で得られた式について、各ラグランジュの未定乗数の意味を考えながら、基本モデルの持つ性質を考察する。

式 (11) は、各時刻においてリンク交通流率はそのリンク容量より小さい場合は $\beta_{ij}(t) = 0$ 、リンク容量限界まで使われている場合は $\beta_{ij}(t) \geq 0$ となることを表す。したがって、 $\beta_{ij}(t)$ は時刻 t におけるリンク (i, j) の通行価値と考えることができ、交通流率がリンク容量で制限されているリンクほど大きい値をとる。

また、式 (12) も同様に考えることができ、避難所の容量が到着する交通流率より小さい場合は $\alpha_d = 0$ 、避難所の容量が限界まで使われている場合は $\alpha_d \geq 0$ となることを表す。したがって、 α_d は避難所 d の利用価値と考えることができ、到着する交通流率が避難所容量で制限される避難所ほど大きい値をとる。

式 (13) は、各時刻 t において、リンク (i, j) に交通量が流入する場合は $\pi_j(t + T_{ij}) - \pi_i(t) = \beta_{ij}(t)$ が成り立つ。この式を用いて、あるトリップのリンクの通行価値 $\beta_{ij}(t)$ を起点 o から終点 d まで、経路 R に沿って足しこむと次が得られる。

$$\begin{aligned} \pi_d(t + \hat{T}_{od}) - \pi_o(t) &= \sum_{(i,j) \in R} \beta_{ij}(t) + \sum_i \hat{T}_{oi} \\ &= \hat{\beta}_{od}(t + \hat{T}_{od}) \end{aligned} \quad (16)$$

ただし、

\hat{T}_{od} = 起点 o から終点 d までの経路 R の旅行時間

$\hat{\beta}_{od}(t)$ = 起点 o を出発し、時刻 t に避難所 d に到着するトリップの経路 R の通行価値

右辺は、終点に時刻 $t + \hat{T}_{od}$ に到着するトリップの起

点 o から終点 d までの通行価値を表しており、簡単に $\hat{\beta}_{od}(t + \hat{T}_{od})$ と表す。一方、左辺の $\pi_o(t)$ は式 (15) より時刻 t に起点 o を出発するトリップが存在するのであれば、 $\pi_o(t) = -\gamma_o$ となり、起点 o に依存した定数をとる。したがって、時刻 t に終点 d に到着するトリップの起点 o から終点 d までの通行価値の総和 $\hat{\beta}_{od}(t)$ は、 $\pi_d(t) - \gamma_o$ となり、起点 o 、終点 d 、到着時刻 t に依存する。

以上をふまえると、式 (14) は終点 d に時刻 t にトリップがある場合には、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \pi_d(t) + \alpha_d &= \theta - t \\ \{\hat{\beta}_{od}(t) - \gamma_o\} + \alpha_d &= \theta - t \\ \hat{\beta}_{od}(t) + \alpha_d &= \theta - t + \gamma_o \end{aligned} \quad (17)$$

したがって、ある起終点のペアについては、経路利用価値と避難所利用価値の合計（左辺）は、到着時刻とともに線形的に変化する。

(3) 基本モデルの拡張

基本モデルを用いて、地域の災害実情に柔軟に対応可能なように拡張したモデルを定式化する。地域の災害実情に応じて問題設定を変えることで、ベンチマークとなる限界能力をより正確に評価することが可能となる。ここでは、まず a)~c) で様々なトリップ目的を扱う制約条件を示し、d)~e) で災害の内容に応じた目的関数を定式化する。

a) 目的地が決められている避難需要を扱う場合

避難所が決められている避難需要 Q_{od} を扱う制約式を定式化する。地域ごとに避難所が決められている場合や自宅避難する場合等に有効である。ただし、このような起終点が決められている需要を扱うには、交通量保存則の式 (2) を、次式 (19) のように交通流率を起点別で表したものをを用いる。したがって、基本モデルとは未知数が異なるため再度定式化を行うと、次のような線形最適化問題となる。

$$\min \sum_t \sum_{od} q_{od}(t) \cdot t \quad (18)$$

subject to

$$-\sum_k \lambda_{ki}^o(t - T_{ki}) + \sum_j \lambda_{ij}^o(t) + q_{oi}(t) = 0$$

$$T_{ki} = \text{given}, \quad \forall i \in N, \quad \forall o \in O, \quad \forall d \in D, \quad \forall t \quad (19)$$

$$\sum_t q_{od}(t) = \sum Q_{od} \quad \forall o \in O, \quad \forall d \in D \quad (20)$$

$$\sum_o \lambda_{ij}^o(t) \leq v_{ij} \quad v_{ij} = \text{given}, \quad \forall (i, j) \in L, \quad \forall t \quad (21)$$

$$\sum_t \sum_o q_{od}(t) \leq \delta_d \quad \delta_d = \text{given}, \quad \forall d \in D \quad (22)$$

$$\lambda_{ij}^o(t) \geq 0 \quad \forall (i, j) \in L, \quad \forall o \in O, \quad \forall t \quad (23)$$

$$q_{od}(t) \geq 0 \quad \forall o \in O, \quad \forall d \in D, \quad \forall t \quad (24)$$

ただし,

Q_{od} =起終点 od が与えられている需要 (所与)

$\lambda_{ij}^o(t)$ = 起点 o を出発し, 時刻 t にリンク (i, j) に流入する交通流率

$q_{oi}(t)$ = 起点 o を出発し, 時刻 t にネットワークからノード i へ流出する交通流率

ただし, 起点 o 別の交通流率 $\lambda_{ij}^o(t)$ は, 基本モデルで用いた交通流率 $\lambda_{ij}(t)$ と次のような関係がある.

$$\lambda_{ij}(t) \equiv \sum_o \lambda_{ij}^o(t) \quad (25)$$

以上より, $\lambda_{ij}(t)^o$, $q_{od}(t)$ を未知数として, 式 (18) の目的関数を式 (19)~(24) の制約条件の下で最小化する問題となる.

b) 目的地が決まっている需要と, 決まっていない需要の両方を扱う場合

a) で扱った目的地が決まっている需要と, 基本モデルで扱った起点が所与の需要が混合している場合も扱うことができる. このような場合には, a) で示した式 (18)~(24) に次の制約条件を加えればよい.

$$\sum_d \sum_t q_{od}^1(t) = Q_o \quad Q_o = \text{given}, \forall o \in O \quad (26)$$

$$\sum_t q_{od}^2(t) = Q_{od} \quad Q_{od} = \text{given}, \forall o \in O, \forall d \in D \quad (27)$$

$$q_{od}(t) = q_{od}^1(t) + q_{od}^2(t) \quad \forall o \in O, \forall d \in D, \forall t \quad (28)$$

$$q_{od}^1(t) \geq 0, \quad q_{od}^2(t) \geq 0 \quad \forall o \in O, \forall d \in D, \forall t \quad (29)$$

ただし,

$q_{od}^1(t)$ = 目的地がきまっていない避難需要 Q_o のうち, 起点 o を出発し時刻 t にネットワークから目的地 d へ流出する交通流率

$q_{od}^2(t)$ = 目的地がきまっている避難需要 Q_{od} のうち, 起点 o を出発し時刻 t にネットワークから目的地 d へ流出する交通流率

c) Trip Chain を扱う場合

災害時の行動は, a)~b) や基本モデルのように, 起点から終点に向かう 1 つの Trip で完結する行動の他に, ピックアップ行動のような Trip Chain をなす行動も存在する. ピックアップ行動は, 一旦家族の安否確認のため避難所ではない場所に向かい, その後避難所に向かう行動である. 東日本大震災では, このピックアップ行動が避難の遅れに大きな影響を与えたと言われている. この行動を考慮するため, 図-2 のように起点 o を出発した後一旦終点でないノード m に行き, その後終点 d に向かう避難需要 Q_{om} を扱う制約条件を示す. この制約条件を基本モデルに追加することで, Trip Chain を考慮できる.

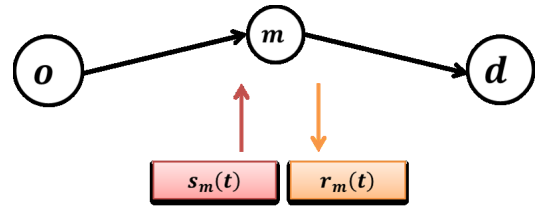


図-2 Trip Chain の動き

$$-\sum_k \lambda_{km}^o(t - T_{km}) + \sum_j \lambda_{mj}^o(t) + q_{om}(t) = 0 \quad \forall m \in N, \forall o \in O, \forall t \quad (30)$$

$$\sum_t r_m(t) = \sum_t s_m(t) = \sum_o Q_{om} \quad \forall m \in N \quad (31)$$

$$\sum_t r_m(\tau) \leq \sum_t s_m(\tau) \quad \forall \tau, \forall m \in N \quad (32)$$

$$\sum_t q_{om}(t) = Q_{om} \quad Q_{om} = \text{given}, \forall o \in O, \forall m \in N \quad (33)$$

ただし,

Q_{om} = 起点 o を出発し, 一旦ノード m に流入した後避難所へ向かう需要 (所与) $r_m(t)$ = 時刻 t におけるノード m の発生交通量

$s_m(t)$ = 時刻 t におけるノード m の集中交通量

$q_{om}(t)$ = 起点 o を出発し, 時刻 t にノード m に流出する交通量

式 (30) は, ノード m における起点別の交通量保存則を表し, 起点 o を出発後, ノード m に一旦流入することを表している. 式 (31) は, ノード m における累積発生交通量と累積集中交通量は, TripChain 行動をなす交通量と等しくなることを表している. 式 (32) は, 避難開始時刻から任意の時刻 τ までの, ノード m の累積集中交通量は累積発生交通量より必ず大きくなることを示している. また, 式 (33) は需要制約である.

d) 危険度の最小化問題

海から近い地域で津波被害が予想される場合には, 単純に避難時間を最小化することを考えるよりも, 津波被害に遭う危険度を小さくするように避難することが適切である. したがって, 津波被害を想定して, 避難行動中に受ける津波被害を最小化する目的関数の定式化を行う. そこで, まず予想される浸水域に含まれるノード i とリンク (i, j) にそれぞれ海からの距離等に応じた危険度 Z_i, Z_{ij} を設定する. ただし, 危険度の単位については, 計画者が適切に決めればよい. 図-3 に示した危険度設定の具体例では, $Z_1 = 250, Z_{12} = 225$ は, それぞれノード 1, リンク (1,2) の危険度が 250, 225 単位であることを示す. 危険度は, 避難行動を開始するまでの起点での待機時間と, 避難行動を開始して避難

所に到着するまでのリンク移動中に発生する。ただし、出発時刻を制御しているため、起点以外のノードに停滞する交通は存在しない。したがって、ネットワーク全体の危険度の総和は次のようになり、式 (34) を基本モデルの目的関数 (1) に置き換え、式 (35) と式 (36) の制約条件を基本モデルの制約条件の式 (2) から (9) に追加すればよい。

$$\min \sum_t \sum_o x_o(t) \cdot Z_o + \sum_t \sum_{ij} x_{ij}(t) \cdot Z_{ij}$$

$$Z_o = \text{given}, Z_{ij} = \text{given}, o \in O, (i, j) \in L \quad (34)$$

where

$$x_{ij}(t) = \sum_t \lambda_{ij}(t) - \sum_t \lambda_{ij}(t - T_{ij}) \quad \forall t, (i, j) \in L \quad (35)$$

$$x_o(t) = x_o(0) - \sum_t r_o(t)$$

$$= Q_o - \left\{ \sum_t \sum_j \lambda_{oj}(t) - \sum_t \sum_k \lambda_{ko}(t - T_{ko}) \right\}$$

$$Q_o = \text{given}, \forall t, o \in O \quad (36)$$

ただし、

$x_{ij}(t)$ = 時刻 t におけるリンク (i, j) の存在交通量

$x_o(t)$ = 時刻 t における起点 o の残留交通量

式 (34) は、起点 o の残留交通量とその起点における危険度の積と、リンク (i, j) における存在交通量とそのリンクにおける危険度の積の和である。ここで、リンク (i, j) の存在交通量 $x_{ij}(t)$ は、流入交通流率 $\lambda_{ij}(t)$ を用いて式 (35) のよう書ける。また、起点 o における残留交通量 $x_o(t)$ は、避難開始時刻の起点 o における残留交通量 $x_o(0)$ から、時刻 t までに起点 o から出発した累積発生交通量を引いたものであり、流入交通流率 $\lambda_{ij}(t)$ を用いて式 (36) のように書ける。ただし、災害発生時刻の起点 o における存在交通量 $x_o(0)$ は、各起点 o 避難需要 Q_o と等しい。

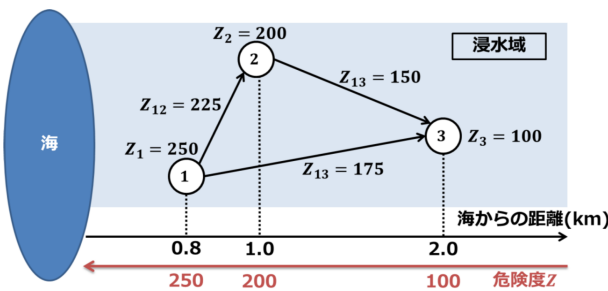


図-3 危険度設定のイメージ図

e) 旅行時間の最小化問題

基本モデルでは、総避難時間を最小化する目的関数を定式化した。総避難時間には、起点を出発するまでの待機時間と移動時間が含まれる。ここでは、移動時間（以下、旅行時間と呼ぶ）を最小化する目的関数の定式化を行う。旅行時間が小さくなるような避難は、原発の事故が発生した場合等に有効であると考えられる。旅行時間の総和は、各リンクの累積流入交通量と、そのリンクの旅行時間 T_{ij} の積で求めることができる。各リンク (i, j) の累積流入交通量は、流入交通流率 $\lambda_{ij}(t)$ を災害発生時刻から完了時刻までの時間で足し合わせることで求められる。したがって、目的関数は以下のようになる。

$$\min \sum_t \sum_{ij} \lambda_{ij}(t) \cdot T_{ij} \quad T_{ij} = \text{given}, (i, j) \in L \quad (37)$$

以上より、基本モデルの目的関数である式 (1) を式 (37) に置き換えることで、旅行時間の最小化問題となる。

3. 実ネットワークでの計算可能性の検討

ケーススタディとして、基本モデルを宮城県石巻市のネットワークに適用し、提案手法が実規模のネットワークに適用可能かどうかを検討する。なお、本検討は提案手法の計算可能性に関することが目的であり、リンク容量、避難所容量、自動車速度などの設定は、実際の諸量を忠実に表したものではないので、計算結果は必ずしも実際の避難パフォーマンスを表すものではないことを断っておく。

(1) 対象地域

対象地域は宮城県石巻市である。石巻市は三陸沿岸の南端に位置し、地震活動が盛んな環太平洋地震帯に含まれているといった地形・地理的特性がある。幾度も津波による被害を経験しており、東日本大震災においては、津波被害により市内で四千人弱の死者・行方不明者が発生した。

(2) 使用ネットワーク

DRM (Digital Road Map) の基本道路をベースとした図 4 のネットワークを用いた。避難需要は石巻市の自動車台数 43,986 台を用いた。自動車の存在する最寄りのノードを起点とし、同様に避難所も最寄りのノードに割り当てて設定した。以上により、有向リンク数 5,418、ノード数 2,086、そのうち起点ノード 521、避難所ノード 95 となった。

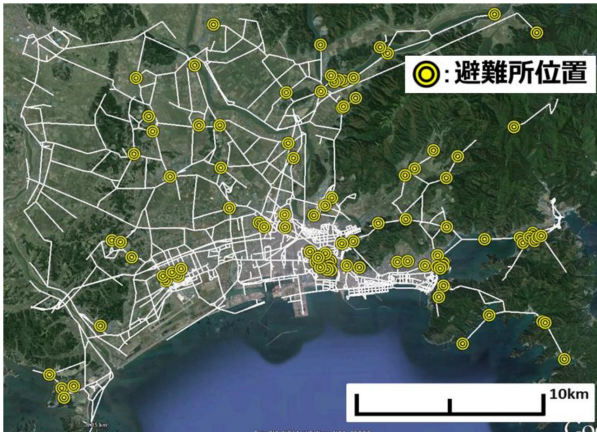


図-4 使用ネットワーク

表-1 避難所容量を変化させた基本モデルの計算結果

	総避難時間 (人・分)	避難完了時間 (分)
施策無し	924,494.3	70.2
10 箇所容量 2 倍	802,337.3	57.3
全て容量無限大	782,029.3	56.3

(3) 計算条件

本モデルは時刻 t の微小区間 Δt に分けて離散化するが、今回は計算精度を保つため $\Delta t = 10(\text{sec})$ とした。また、自動車速度は一律 $60(\text{km/h})$ 、道路容量は 1 車線あたり $600(\text{veh/h})$ 、避難所容量は一律 $700(\text{veh})$ と設定し、Python から数理最適化ソルバー (Gurobi Optimizer) を呼び出して計算を行う。

(4) 計算結果と考察

今回設定した条件下での基本モデルの計算結果を表-1 に示す。何も施策を行わなかった場合、最大限避難インフラを活用すると、災害発生から最後に避難需要が避難所に到着するまでに 70.2 (分) かかる結果になった。さらに、それぞれの避難需要がどのような避難行動をとるのか把握するため、計算結果を可視化するプログラムを作成した。図-5 は災害発生から 10 分後、図 6 は 65 分後の自動車の位置を表している。これより、災害発生直後は避難需要がネットワーク全体に避難需要が広がり、避難完了の直前は図 6 の赤丸部分で示した 3 箇所に避難需要が集中していることが分かる。したがって、赤丸に示した部分のインフラが不足していると考えられる。

さらに、本モデルの結果より、避難インフラのクリティカルなボトルネックの把握が可能である。避難所のボトルネックを把握するには 2.(3) で考察した α_d の値を見ればよい。容量が制限される避難所 d ほど α_d は大きい値をとる。ここで、ケーススタディとして、ネット

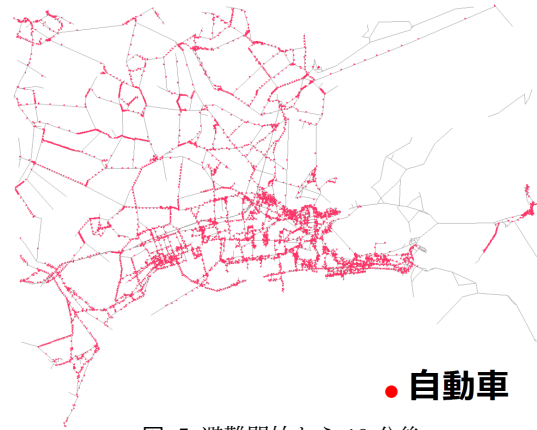


図-5 避難開始から 10 分後



図-6 避難開始から 65 分後

ワークに含まれる避難所 95 箇所のうち、 α_d の値が大きい 10 箇所の避難所容量 (収容台数) を 2 倍 (1400veh) にした計算結果を表-1 に示した。また、避難完了時間の比較として、全ての避難所の容量を無限大とした計算結果も示した。避難所 10 箇所の容量を 2 倍にした場合の避難完了時間は 57.3 分となり、全ての避難所の容量を無限大にした結果の 56.3 分とほぼ等しくなった。したがって、ラグランジュの未定定数を考察することで、本モデルにより避難インフラのクリティカルなボトルネックを把握することができる。道路リンクの容量についても、同様に β_{ij} の大きいリンクがクリティカルであることが容易に分かる。これにより、避難インフラが不足している地域において、効率的なインフラ整備の方針を決定することが可能である。

4. おわりに

本研究では避難計画を設計するうえでベンチマークとなる First-Best な避難シナリオを提供するため、規範的な避難行動を仮定し、避難行動の不確実性を取り除いたモデルを定式化した。また、モデル化にあたっては、地域の災害実情に柔軟に対応できるように、数種類の目的関数やトリップ目的 (避難トリップ、ピックアップ行動など)、さらに災害時の場所の危険度を考慮できるモデルにした。さらに、本モデルを 5000 余りのリン

ク、100 程度の避難所からなる石巻市のネットワークに適用し、現実への適用可能性も示した。また、モデルの一次の最適性条件を考察することで、クリティカルな避難インフラのボトルネックを明らかにすることができ、本モデルが避難整備計画の検討にも活用できることを示した。

しかしながら、本モデルは各時刻のネットワークを表現しているため、大規模なネットワークを想定すると変数の数が膨大になり計算が難しくなる。したがって、今後は計算コストが小さくなる効率的なアルゴリズムの開発が必要である。また、今回のケーススタディでは自動車避難を想定したが、計算条件の設定で、旅行時間や交通容量を変化させることで徒歩避難も対応することができる。しかし、自動車と徒歩の混合避難については、歩行者と自動車がそれぞれ歩道と車道に区別されている場合は対応可能であるが、区別されていない場合には対応することができない。これらの点については、今後の課題とする。

付録 I 基本モデルの一次の最適性条件

基本モデルの一次の最適性条件を導出する。まず、基本モデルをラグランジュ関数として再定義することによって、制約条件を持たない $\lambda_{ij}(t)$, $r_o(t)$, $s_d(t)$ に関する最適化問題に置き換える。ラグランジュ乗数 π , γ , θ , β , α , η , ϕ , ρ を用いて、次のように書くことができる。

$$\begin{aligned}
 L = & \sum_t \sum_d s_d(t) \cdot t \\
 & + \sum_t \sum_i \pi_i(t) \{ - \sum_k \lambda_{ki}(t - T_{ki}) + \sum_j \lambda_{ij}(t) - r_o(t) + s_d(t) \} \\
 & + \sum_o \gamma_o \{ Q_o - \sum_t r_o(t) \} + \theta \{ \sum_o Q_o - \sum_t \sum_d s_d(t) \} \\
 & + \sum_t \sum_{ij} \beta_{ij}(t) \{ \lambda_{ij}(t) - v_{ij} \} + \sum_d \alpha_d \{ \sum_t s_d(t) - \delta_d \} \\
 & - \sum_t \sum_{ij} \eta_{ij}(t) \cdot \lambda_{ij}(t) - \sum_t \sum_d \phi_d(t) \cdot s_d(t) \\
 & - \sum_t \sum_o \rho_o(t) \cdot r_o(t) \tag{I.1}
 \end{aligned}$$

ラグランジュ関数の一次の最適性条件は、Karush-Kuhn-Tucker 条件より以下ようになる。

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{ij}(t)} = \pi_i(t) - \pi_j(t + T_{ij}) + \beta_{ij}(t) - \eta_{ij}(t) = 0 \tag{I.2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial s_d(t)} = t + \pi_d(t) - \theta + \alpha_d - \phi_d(t) = 0 \tag{I.3}$$

$$\frac{\partial L}{\partial r_o(t)} = -\pi_o(t) - \gamma_o - \rho_o(t) = 0 \tag{I.4}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \pi_i(t)} = - \sum_k \lambda_{ki}(t - T_{ki}) + \sum_j \lambda_{ij}(t) - r_o(t) + s_d(t) = 0 \tag{I.5}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \gamma_o} = Q_o - \sum_t r_o(t) = 0 \tag{I.6}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = \sum_o Q_o - \sum_t \sum_d s_d(t) = 0 \tag{I.7}$$

$$\begin{cases} \beta_{ij}(t) \frac{\partial L}{\partial \beta_{ij}(t)} = \beta_{ij}(t) \{ \lambda_{ij}(t) - v_{ij} \} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \beta_{ij}(t)} = \lambda_{ij}(t) - v_{ij} \leq 0, \quad \beta_{ij}(t) \geq 0 \end{cases} \tag{I.8}$$

$$\begin{cases} \alpha_d \frac{\partial L}{\partial \alpha_d} = \alpha_d \{ \sum_t s_d(t) - \delta_d \} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_d} = \sum_t s_d(t) - \delta_d \leq 0, \quad \alpha_d \geq 0 \end{cases} \tag{I.9}$$

$$\begin{cases} \eta_{ij}(t) \frac{\partial L}{\partial \eta_{ij}(t)} = \eta_{ij}(t) \cdot \lambda_{ij}(t) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \eta_{ij}(t)} = -\lambda_{ij}(t) \leq 0, \quad \eta_{ij}(t) \geq 0 \end{cases} \tag{I.10}$$

$$\begin{cases} \phi_d(t) \frac{\partial L}{\partial \phi_d(t)} = s_d(t) \cdot \phi_d(t) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \phi_d(t)} = -s_d(t) \leq 0, \quad \phi_d(t) \geq 0 \end{cases} \tag{I.11}$$

$$\begin{cases} \rho_o(t) \frac{\partial L}{\partial \rho_o(t)} = r_o(t) \cdot \rho_o(t) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \rho_o(t)} = -r_o(t) \leq 0, \quad \rho_o(t) \geq 0 \end{cases} \tag{I.12}$$

上記のうち、式 (I.10)~(I.12) に、それぞれ式 (I.2)~式 (I.4) 式を代入すると次の式が得られる。

$$\begin{cases} \lambda_{ij}(t) \{ \pi_i(t) - \pi_j(t + T_{ij}) + \beta_{ij}(t) \} = 0 \\ \pi_i(t) - \pi_j(t + T_{ij}) + \beta_{ij}(t) \geq 0, \quad \lambda_{ij}(t) \geq 0 \end{cases} \tag{I.13}$$

$$\begin{cases} s_d(t) \{ t + \pi_d(t) - \theta + \alpha_d \} = 0 \\ t + \pi_d(t) - \theta + \alpha_d \geq 0, \quad s_d(t) \geq 0 \end{cases} \tag{I.14}$$

$$\begin{cases} r_o(t) \{ -\pi_o(t) - \gamma_o \} = 0 \\ -\pi_o(t) - \gamma_o \geq 0, \quad r_o(t) \geq 0 \end{cases} \tag{I.15}$$

参考文献

- 1) 長尾一輝, 大畑長, 柿元祐史, 花房比佐友, 二上洋介, 江藤和昭, 桑原雅夫: 大規模地震時における自動車避難行動を考慮した避難施策の評価. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.71, No.5, pp.153-168, 2015
- 2) 畑山満則, 湯川誠太郎, 枝廣篤, 多々納裕一: エージェントベース広域避難シミュレーションシステムの開発ー滋賀県姉川・高時川下流域を対象とした事例研究ー. 土木計画学・論文集, Vol.27, No.2, pp.323-330, 2010.

- 3) Sherali,H.D., Carter,T.B., Hobeika,A.G.: A location-allocation model and algorithm for evacuation planning under hurricane/flood conditions. Transportation Research PartB, Vol.25(6), pp.439-452, 1991.
- 4) Kongsomsaksakul,S., Yang,C., Chen,A.: Shelter location-allocation model for flood evacuation planning. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.6, pp.4237-4252, 2005.
- 5) Ng,M., Park,J., Travis Waller,S.T.: A hybrid bilevel model for the optimal shelter assignment in emergency evacua-
tions. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineer-
ing, Vol.25(8), pp.547-556, 2010.
- 6) 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志: 時間拡張ネットワークを用いたリンクベース最適避難計画モデルの構築. 第 52 回土木計画学研究発表会・講演集, pp.369-377, 2015.
- 7) 加藤直樹, 瀧澤重志: 最速避難計画のモデリングと解法. オペレーションズ・リサーチ, 2015 年 8 月号, pp.437-442, 2015.

(2016. 4. 22 受付)