

複数モードを考慮した最適浸水一時避難計画手法の開発

Optimization for flood evacuation planning with various evacuation alternatives

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 浅田智裕 (Tomohiro Asada)
北海道大学大学院工学研究院 正員 杉浦聡志 (Satoshi Sugiura)

1. はじめに

近年、我が国では重大な被害をもたらす水害が頻発している。気象庁によれば1時間に50mm以上の雨が降る短時間強雨の回数が増加傾向にある¹⁾。特に2019年の東日本台風は広範囲に甚大な被害をもたらし、これを受けて内閣府は2020年に避難情報に関するガイドラインを改定した。今後も発生が予想される水害に対応するために地域共助の考えから生まれた地区防災計画の重要性はより強調されるべきであろう。そこで本研究では地区防災計画を協議する際に有用なツールとなりえるような浸水災害時の規範的な避難計画モデルを提供する。

水害に関する避難計画モデルは東日本大震災以後、特に津波避難に関してさかんに研究されてきた。例えば横山ら²⁾の最適津波避難計画問題に関する研究では、時間遷移を考えた動的 many-to-one ネットワーク上での最小避難時間問題を解いている。避難時間に猶予がないことを鑑みてネットワーク上では徒歩避難者と車が互いに干渉しあい、混雑を引き起こすように設定されている。しかし豪雨災害の場合は、津波避難とは異なる特有の状況があり、それに対応したモデルを構築する必要がある。

豪雨災害の特徴として事前避難が可能であることが挙げられる。津波等の突発的な災害とは違い、台風、大雨は気象予報技術の発達によってある程度被害範囲や被災時刻が予想できる。したがって地区防災計画の立案に伴って、各避難者が事前に避難先を定めることも可能である。本研究では避難計画問題を単なる経路選択問題とするのではなく、各避難所の備蓄量や収容人数といった避難所の環境水準までも含めた問題として考慮することとする。近年民間施設と自治体が協力して、民間施設を避難所として取り扱う事例が増えてきている。本研究では最適浸水一時避難計画を考える上でこの民間施設の避難所能力についても考察する。また豪雨災害の特徴として屋内退避が可能であることが挙げられる。住宅の床面が浸水面より十分に高く、数日間の生活が可能な物資備蓄があれば避難者は自宅に待機することも可能である³⁾。先に述べた避難所サービス問題を考えるためには、屋内退避者についてもモデルに取り込む必要がある。避難所の環境水準を考えた問題として野津田、岸本⁴⁾の研究がある。野津田、岸本⁴⁾では避難者が避難所で生活する際の負担を避難者と避難所容量の比で表現し、避難者の負担を考慮した避難施設配置問題を解いている。

これらを踏まえて、本研究では避難者の総避難コストと避難生活にかかる総負担の2つの項目を同時に最小化することで豪雨時の最適避難計画を提供する。

2. 浸水時の最適避難計画モデルの定式化

2.1 記号の定義

本研究で用いる記号を以下のように整理する。

- N : ネットワーク中のノード集合.
- A : ネットワーク中のリンク集合.
- H : 移動モードの集合. 各モードは $\eta \in H$ で表記し、 $\eta = 1$ で徒歩、 $\eta = 2$ で自動車とする.
- O : ネットワーク中の避難開始点を示すダミーノードの集合. $O \subseteq N$ であり、任意の避難開始点は $o \in O$ で表記する.
- D : ネットワーク中のモード η での避難完了点を示すダミーノードの集合. $D \subseteq N$ であり、任意の避難終了点は $d \in D$ で表記する.
- P : ネットワーク中の屋内退避者を計測するためのダミーノード集合.
- ψ : 避難完了を表現する終着点ダミーノード. $\psi \in N$ である.
- A_{R_η} : モード η の道路ネットワークを構成するリンク集合. $A_{R_\eta} \subseteq A \forall \eta \in H$ である.
- M_η : 避難開始点 o のモード分岐を表現するためのダミーノード集合. その成分は $\mu_{\eta o} \in M_\eta$ で表記する. $\mu_{\eta o}$ は起点の数だけ存在し、 $|M_\eta| = |O| \forall \eta \in H$ である.
- A_{M_η} : ダミーノード $\mu_{\eta o}$ と対応する o を接続するダミーリンクの集合. $A_{M_\eta} \subseteq A \forall \eta \in H$ である.
- A_{D_η} : ダミーノード d と対応するモード η の道路ネットワーク中のノードを接続するダミーリンクの集合. $A_{D_\eta} \subseteq A$ である.
- A_ψ : ダミーノード d_η と ψ を接続するダミーリンクの集合. $A_\psi \subseteq A$ である.
- C_d : 避難完了点の収容目安人数.
- c_a : リンク a の容量.
- θ_d : 避難完了点の駐車場容量.
- S_d : 避難完了点の備蓄等のサービス量.
- l_a : リンク a の距離(km)
- v_η : モード η の移動速度(km/h)
- $\omega_{a\eta}$: リンク a をモード η で通過する際の抵抗量(無次元であり、両端点の標高差等で決定される)
- Y_o : 避難開始点 o の総避難者数.
- π : 自動車避難の平均乗車人数.

- Γ : 適当な値. 1.5にすると, 避難所容量の1.5倍の人数までその避難所で収容可能となる.
- α, β : 目的関数の各項の重要性を示す重みパラメータ.

2.2 本モデルの仮定と前提

本モデルを構築する上で以下の仮定をおく.

- ・ 避難は自動車, あるいは徒歩で行われる.
- ・ 最適避難計画においては避難情報が発令されてから被災が発生するまで数時間のタイムラグがあると想定し, その間に発生する避難交通需要は混雑を考慮しても全て避難可能である.
- ・ 対象とする避難需要以外は道路を利用しない. すなわち, 道路上は全て避難需要のみが通行する.
- ・ 歩道は当該時間帯に需要が分散しており, 混雑が生じない.
- ・ 自動車についてはリンクに当該時間帯が渋滞せずに通行できる限界量, すなわち容量を設定し, それ以上の自動車が通行できないこととする.
- ・ 道路では歩車分離が明確にされており, 混在しない.

仮定の3つ目は避難需要以外の需要が道路ネットワークを通行しないという強い仮定である. もしその他の需要を考慮したければ, 通過交通等を示す需要を設定し, ネットワークの端部に適宜発生集中点を加えれば, 避難交通との錯綜を表現することも可能である. ここでは簡単のためにこの想定は除外する. また, 5つ目の容量以上の交通が通行できないという仮定も強い. 一般には容量以上の交通も所要時間が増大するが通行が可能である. しかしながら, 本稿で対象とするのは最適避難計画であることから, 渋滞を避けるように行動することは被災リスクを低減するためにも有用であろう. 6つ目の歩車分離は歩道が整備された地域であれば現実的な仮定である. 一方で歩道整備が十分でなく, 歩車の錯綜による影響を考慮する必要があるれば, 横山ら²⁾の方法を援用すればモデル化が可能である.

本モデルにおいて避難者は後述する many-to-one ネットワーク上を避難開始点から避難終了点まで移動する. そのとき避難者は, 移動モード(自動車, 徒歩), 避難所, およびそこまでの経路を地域全体にとって最適となるように選択する.

2.3 本モデルの many-to-one ネットワーク

避難者は図-1の many-to-one ネットワーク上を図中左側に示す O に含まれるいずれかのノードから右側の仮想避難完了点 ψ に移動する. 任意の点 $o \in O$ から出発した避難者はまずダミーノード集合 M_1, M_2 のどちらかに進む. これはモード分岐を示しており, M_1 に進んだ避難者は徒歩避難もしくは屋内避難, M_2 に進んだ避難者は車で避難する. A_{R_1}, A_{R_2} はそれぞれ徒歩で移動する場合の道路リンク集合, 車で移動する場合の道路リンク集合である. ダミーノード集合 M_1, M_2 に接続している A_{R_1}, A_{R_2} 上の丸点が道路ネットワーク上の避難開始点(避難者の住宅等)である. 避難者は A_{R_1}, A_{R_2} の中で避難所を表す三角点まで移動し, そこから避難所を表すダミーノード集合 D に

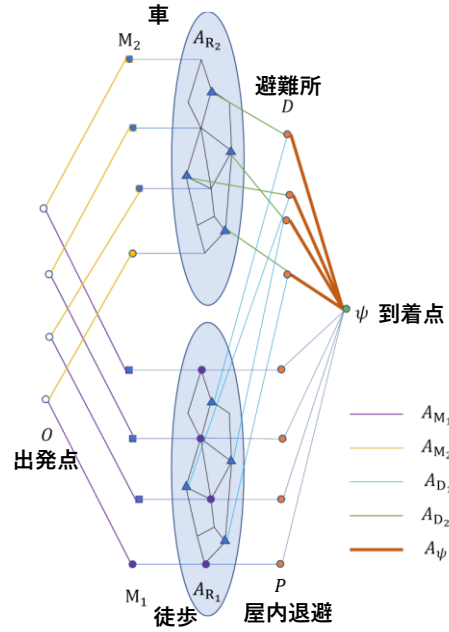


図-1 本モデルで用いる many-to-one ネットワーク

移動する. 屋内避難を選択した避難者は A_{R_1} 上の避難開始点から屋内避難を表すダミーノード集合 H まで移動する. 最後に D, H に進んだ避難者は終着点ダミーノード ψ に移動し, 全ての避難者が ψ に移動したことをもって避難完了とする.

2.4 定式化

以上概説した many-to-one ネットワークのリンク種類に応じた制約条件を課すことで, 条件を表現する. 浸水時の最適避難計画問題を以下のように定式化する. この問題は線形計画問題となり, 汎用のソルバーで求解可能である.

$$\min_x \sum_{\eta \in H} \sum_{a \in A} \left(\frac{\omega_a l_a}{v_\eta} + \delta_a + \rho_a \right) x_a \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{x=In(n)} x_a - \sum_{x=Out(n)} x_a = \begin{cases} \sum_{o \in O} Y_o & \text{if } n = \psi \\ -Y_o & \text{if } n \in O \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\forall n \in N$$

$$x_a \leq \Gamma C_d, \quad \forall a \in A_\psi \quad (3)$$

$$\frac{x_a}{\pi} \leq \theta_d, \quad \forall a \in A_{D_2} \quad (4)$$

$$\frac{x_a}{\pi} \leq c_a, \quad \forall a \in A_{R_2} \quad (5)$$

$$x_a \geq 0, \quad \forall a \in A \quad (6)$$

where

$$\delta_a = \begin{cases} \frac{\alpha}{S_{d(a)}} & \text{if } a \in A_\psi \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$\rho_a = \begin{cases} \frac{\beta}{C_{d(a)}} & \text{if } a \in A_\psi \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

以下、この定式化について解説を加える。式(1)は最適化問題の目的関数である。括弧内の第1項は標高差を考慮した避難経路の所要コスト、第2項は式(7)から避難完了点のサービス量の逆数、第3項は式(8)から避難完了点の収容目安人数の逆数となっている。これらは避難経路と避難先の環境水準をそれぞれ表現したものである。標高差の係数は避難者をより標高の高い安全な経路へ誘導するために加えられている。式(1)を最小化することで避難者の避難時、避難生活両者のコストを最小化する。式(2)は避難者が many-to-one ネットワークにおけるフロー保存則を示している。式(3)は避難完了点の収容人数に関する制約である。ここでは、垂直避難を想定する自宅もこの避難所の1つとして考慮している。容量は十分な床の標高をもつ居住地の収容人数で与えることを想定する。式(4)は避難所の駐車場容量に関する制約である。式(5)は道路容量制約である。式(6)はフローに対する非負制約である。

3. 小規模ネットワークへの提案モデルの適用

図-2 に示す Sioux Falls ネットワークを試算対象道路ネットワークとする。目的関数の ω_a は図-2 で示したパラメータを用い、7番と18番ノードを標高の高い地域として設定している。避難所サービスの定量化方法はここでは $\alpha = 0$ 、 $\beta = 1000$ と設定した。ただし δ_a の項を無視し、 σ_a のみ計算している。また制約条件で用いるパラメータは $\pi = 1.5$ 、 $c_a = 30$ とした。屋内退避が可能な人数は各避難出発点に対し一律で 50 人と設定した。以上の条件においてケース 1 とケース 2 を試算した。2つのケースはそれぞれ以下の通りである。

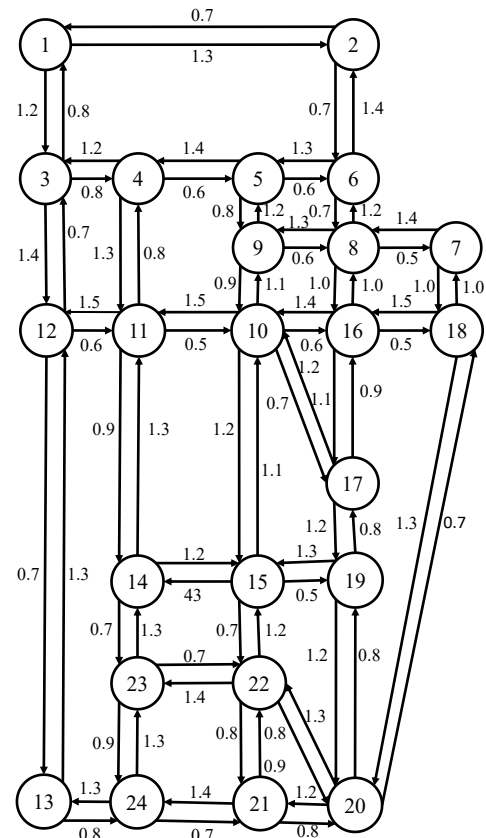


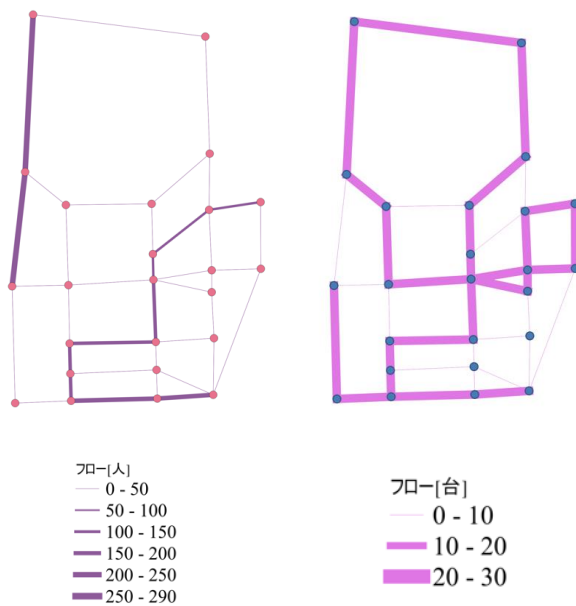
図-2 Sioux Falls ネットワーク

表-1 出発地情報

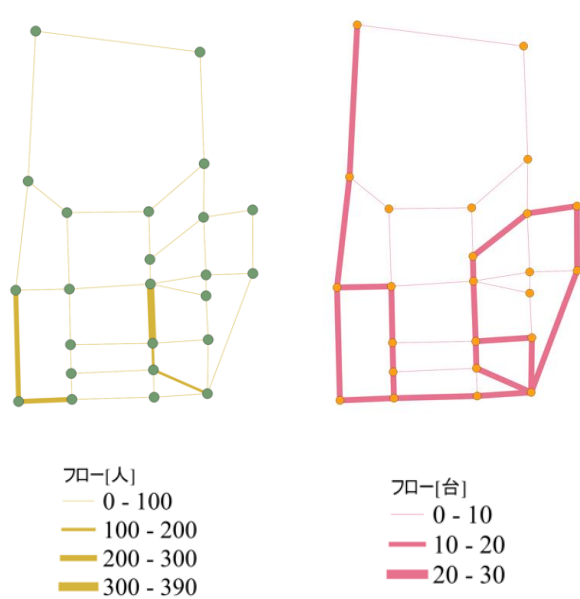
出発地	出発人数
12番	400人
10番	500人
20番	300人

表-2 避難所情報

避難所	c_a	θ_a
1番	500人	100台
7番	200人	100台
24番	500人	100台



(a) 徒歩避難者の流れ (b) 車避難者の流れ
図-3 試算 1 回目の結果



(a) 徒歩避難者の流れ (b) 車避難者の流れ
図-4 試算 2 回目の結果

- ・ ケース 1

避難出発点を 12 番, 10 番, 20 番とし, それぞれのノードから出発する避難者数は表-1 のとおりとする. また避難所を 1 番, 7 番, 24 番と設定し, それぞれの避難所容量 c_d , 駐車場容量 θ_d を表-2 のように設定する.

- ・ ケース 2

ケース 1 と同じ条件下で, 避難所に新たに 15 番を加え, $c_d = 700$ 人, $\theta_d = 200$ 台 を与えた. これは民間施設の存在を想定したものである.

ケース 1, ケース 2 それぞれの A_{R1}, A_{R2} 上のフローを図-3, 図-4 で示す. また具体的な避難者の内訳をそれぞれ表-3, 4 と表-5, 6 で示す.

ケース 1 とケース 2 の試算結果を比較する. 出発地 12 番に注目すると, 民間施設 (15 番) が避難所に加わることで, ケース 1 では遠方の 1 番に避難していた徒歩による避難者が 24 番に集中していることが分かる. 10 番と 20 番から出発する徒歩避難者が 24 番の代わりに 15 番に流れたことによって, 徒歩避難者が 1 番を利用する必要がなくなったと考えることができる. さらにフロー図と表の双方を見ると, 民間施設の追加によって車の主な出発地が 10 番から 12, 20 番に移行し, それに伴って道路上の車のフローが大きく変更されていることがわかる. また避難所の環境水準の観点から計算結果を見ると, 表-6 から民間施設の追加によって 24 番, 15 番に避難者が集中していることがわかる. 本研究の目的である特定の避難所に避難者が集中しない避難計画モデルの策定のためには, 重みパラメータである α, β に関して更なる検討が必要である.

4. まとめと今後の課題

本研究では, 複数の避難モードを考慮した浸水災害時の最適避難計画モデルを構築した. Sioux Falls ネットワーク上で試算し, モデルの挙動を確認した. より大規模なネットワークでの試算結果は講演時に報告する. また試算では目的関数の避難所サービスの項を省いて計算している. 今後は実際の地域にこのモデルを適用することを目指し, 実務上どのように物資が備蓄されているかを調査し, 実地に即したパラメータの特定を試みたい.

参考文献

1. 気象庁: 全国 (アメダス) の 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html (閲覧日 2021.12.14)
2. 横山宗一郎, 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志: 徒歩と自動車の混合モードにおける津波最適避難計画モデル, 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集, pp.2167-2174, 2016.
3. 内閣府: 新たな避難情報に関するポスター・チラシ
http://www.bousai.go.jp/oukyu/hinanjouhou/r3_hinanjouhou_guideline/pdf/poster.pdf (閲覧日 2021.12.14)
4. 野津田宗聡, 岸本達也: 地域避難施設の最適割当てと最適配置手法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 589 号, pp.115-122, 2005 年.

表-3 避難出発点の避難者モード内訳

	12番	10番	20番
屋内退避	50人	50人	50人
歩行避難	320人	300人	220人
車避難	30人	150人	30人
総人数	400人	500人	300人

表-4 避難所における避難者モード内訳

	1番	7番	24番
車避難	60人	60人	90人
歩行避難	290人	140人	410人
総人数	350人	200人	500人

表-5 避難出発点の避難者モード内訳

	12番	10番	20番
屋内退避	50人	50人	50人
歩行避難	260人	390人	130人
車避難	90人	60人	120人
総人数	400人	500人	300人

表-6 避難所における避難者モード内訳

	1番	7番	24番	15番
車避難	30人	60人	90人	90人
歩行避難	0人	0人	260人	520人
総人数	30人	60人	350人	610人