

複数モードを考慮した最適浸水 一次避難計画手法の開発

浅田 智裕¹・杉浦 聡志²

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)

E-mail: t-asada@eis.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学大学院准教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)

E-mail: sugiura@eng.hokudai.ac.jp

近年、台風や豪雨災害による被害が頻繁に報告されており、事前の住民避難計画の重要性は増している。本研究では地区防災計画の参照情報として有用となるような浸水災害時の最適避難計画モデルを開発する。提案モデルでは総避難時間および避難所のサービス水準の総和を最適化する線形計画問題を求解している。この最適化問題では垂直避難や民間施設への避難といった浸水災害避難特有の避難者の行動を表現することで、より現実的な避難計画立案のための手法を提供している。構築したモデルは仮想ネットワークでパフォーマンスを確認し、避難所の混雑率を考慮した避難計画が立案できること、民間施設の避難所能力による影響を分析可能であることを確認した。札幌市の道路ネットワークへの適用では計算負荷が汎用コンピュータでも十分であることを確認した。

Key Words: flood evacuation planning, linear programming problem, many-to-one network

1. はじめに

1976年から2020年にかけて我が国における1時間降水量50mm以上の年間発生回数が増加している¹⁾。気象庁は1時間降水量50mm以上の雨を「非常に強い雨」と表現しており、近年では台風や豪雨災害による被害が頻繁に報告されている。特に顕著だったものは平成30年の7月豪雨や令和元年の台風19号による被害である。これらの被害を受けて令和3年には災害対策基本法が改正され、内閣府は新たな避難情報ガイドラインの運用を開始している²⁾。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方から生まれた地区防災計画の重要性はより増していると言える³⁾。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避難計画モデルを提供する。本モデルでは住民がどの手段でどこに避難所に逃げればよいか、といった最適な避難方法を線形計画問題の求解を通して規範的に示す。モデルの出力結果はあくまで最適化アプローチに従うため、住民が認知する避難の手段、経路と乖離する可能性もあるが、最適な避難計画を現状の避難方法と比較することはより良い避難計画策定の一助となると考える。

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。津波等の外力の発生から避難までの時間的余裕がない災害とは違い、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。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で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。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。

以上の背景に基づいて、本研究では避難者の総避難コストと数日間の避難生活にかかる総負担を同時に最小化する豪雨時の最適避難計画の立案問題を提供する。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

(1) 既往研究の整理

a) 避難の最適化に関する既往研究

東日本大震災後の面接調査から東日本大震災において自動車避難を行った人は全体の 57%を占めることが判明した⁴⁾。これを受けて内閣府は平成 23 年に防災基本計画を修正⁵⁾し、国家公安委員会も「交通の方法に関する教則」を一部改正した。この改正により原則禁止されていた自動車避難が、津波から避難するときのみ認められることとなった⁶⁾。

土木計画学の分野でも自動車避難を取り入れた新たな避難計画を策定するための研究が東日本大震災以後活発に行われた。規範的アプローチによる最適避難計画モデルとして、倉内⁷⁾、荒木ら⁸⁾、安藤ら⁹⁾、横山ら¹⁰⁾は STEN (Space-Time Extended Network) を用いた最適津波避難計画モデルを提案している。特に横山ら¹⁰⁾の研究では歩行者と自動車の交通容量が互いに干渉するような状況のモデル化を提供している。これにより、津波避難時の問題の一つである、車避難に特有と考えられる歩車の干渉による渋滞問題を表現している。また宮城県亘理郡亘理町の実ネットワークにおいてさまざまなケースでモデルを検討し、一時避難所の増設が避難完了時間を大幅に短縮させることを示している。

b) 避難者の効用について

野津田、岸本¹¹⁾は避難所の配置計画問題を考えるにあたって、住民の効用関数をベースとした手法を提案している。効用関数には自宅と避難所を結ぶ最短経路に対する徒歩での所要時間、避難者一人が使用できる避難所の広さ、避難者一人が避難所で得られる食料が含まれていて、政府（自治体）は効用の合計、すなわち社会厚生を最大とするように避難所を配置する。

c) 民間施設の避難所能力について

2018 年 7 月の西日本豪雨では民間商業施設に避難した人が見られた¹²⁾。自治体が商業施設を避難場所に指定する動きは阪神大震災以後広がっている¹²⁾。

讃岐ら¹³⁾は避難場所としての商業施設に注目し、そのアクセシビリティについて調査している。三重県松阪市において公的避難場所に商業施設を追加してアクセシビリティ変化を分析した結果、変化幅は小さいものの平均アクセス距離が短くなり、商業施設を避難する最寄り施設として選択する人口比率が 30%程度であることを示している。

小谷ら¹⁴⁾は商店街における災害時の住民への食料提供と、空きスペースの避難所利用の可能性に関して検証している。神戸市長田区の大正筋商店街を対象に調査した結果、ライフライン停止時に 1202 人×1 日分の食料、2300 人分の避難所スペースを提供できるとしている。

(2) 本研究の位置づけ

本研究では津波を除く浸水時の最適避難計画問題についてネットワークに基づいたモデル化を目指す。避難最適化の既往研究では、避難に時間的余裕がない津波災害を対象としているため、避難完了時刻の最小化を目的とした最適避難計画モデルを提案している。これに対し豪雨による浸水災害は被害範囲や被災時刻がある程度予測できるため、避難に時間的余裕が存在し、避難者は必ずしも最寄りの避難所に行かなくてもよい。そこで避難者の効用を考えた既往研究を援用し、総避難時間の最小化に加えて、各避難者が受け取れる避難所サービスレベルまで考慮した最適避難計画モデルを構築しているという点に本研究の特徴がある。また民間施設の避難所能力について提案モデルを用いて避難計画の観点から検討している。

豪雨による浸水災害においてアンダーパスや川沿いの道は危険であるため、なるべく避けて避難する必要がある。提案モデルでは標高差を表す係数を経路に設定し、標高が高い場所へと避難者を誘導している。最適化計算を通して避難者にとって安全な避難経路を提案しているという点も本研究の特徴といえるだろう。

3. モデルの定式化

(1) 記号定義

- 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) 提案モデルでおく仮定

提案モデルを構築する上では以下を仮定している.

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需要は全て避難先 (屋内退避含む) に到達可能とする. また簡単のため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をおく. その他の需要を考慮したい場合は, 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.

避難は自動車, あるいは徒歩で行われる. 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. 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ると考え. また道路では歩車分離が明確にされており, 混在しないこととする. 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. 横山ら¹⁰⁾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

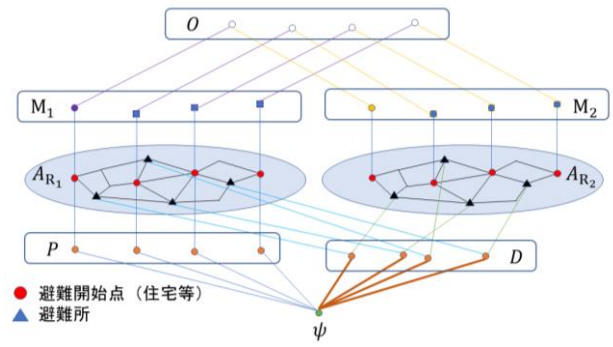


図-1 本研究で用いる many-to-one ネットワーク

うに選択する. 避難者をより安全な経路に誘導するため, 道路に標高のパラメータを定め, 標高が高い方向へ移動することが最適化計算の中で有利になるように設定している. また避難所それぞれに保有しているサービス量と敷地面積を定め, 各避難者が受け取れる避難所サービスがなるべく均等になるように目的関数を定めている. 3.4 項で本モデルの最適化計算については詳しく述べる.

(3) many-to-one ネットワークモデルの概要

本研究では many-to-one ネットワークによって, 徒歩避難と車避難を 2 つのネットワークに分けて表現している. 避難者はこれら 2 つのネットワークにおいて設定した目的関数が最適となるよう振り分けられる. すなわち, 各避難者の最適避難モードは最適化問題の結果として決定されることとなる.

避難者は図-1 の many-to-one ネットワークにおいて図中上側に示す O に含まれるいずれかのノードから下側の仮想避難完了点 ψ に移動する. 任意の点 $o \in O$ は避難開始点を想定しており, 居住地や勤務先等が該当する. $o \in O$ 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 o ごとに設定されたモード分岐点を表現しており, M_1 に進んだ避難者は徒歩避難もしくは屋内退避, M_2 に進んだ避難者は車で避難する. A_{R_1}, A_{R_2} はそれぞれ徒歩避難のための道路リンク集合, 車避難のため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 に移動する. 屋内退避を選択した避難者は A_{R_1} 上の避難開始点から屋内退避を表すダミーノード集合 P まで移動する. 最後に D, P 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.

(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避難に関連する各種の条件を表現する。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。

最適化問題の目的関数を式(1)のように定める。

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

δ_a と ρ_a は式(2), (3)で定義される。

$$\delta_a = \begin{cases} \frac{\alpha}{S_{d(a)}} & \text{if } a \in A_\psi \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho_a = \begin{cases} \frac{\beta}{C_{d(a)}} & \text{if } a \in A_\psi \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式(1)は提案モデルの目的関数であり、これは以下3項の線形和となっている。式(1)の括弧内の第1項は標高差を考慮した避難経路の所要コスト、第2項は避難完了点のサービス量の逆数、第3項は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。

制約条件を式(4)から式(8)で示す。

まず、ネットワークのフロー保存は式(4)で表す。

$$\sum_{x=In(n)} x_a - \sum_{x=Out(n)} x_a = \begin{cases} \sum_{o \in O} Y_o & \text{if } n = \psi \\ -Y_o & \text{if } n \in O \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4) \quad \forall n \in N$$

地域全体の全避難者が避難出発点 $o \in O$ から出発し、必ず避難完了点 ψ に到着することを示している。

避難所の収容人数制約を式(5)で表す。

$$x_a \leq \Gamma C_d, \quad \forall a \in A_\psi \quad (5)$$

避難所の駐車場容量制約を式(6)で表す。この値は非常時を想定した各避難所に相当する地点の容量を事前に調査することで得られる。例えば、小学校等であれば運動場を駐車場として利用するケースも想定されるが、この容量も θ_d で表現が可能である。

$$\frac{x_a}{\pi} \leq \theta_d, \quad \forall a \in A_{D_2} \quad (6)$$

道路容量制約を式(7)で表す。この値は想定する避難開始時刻から終了時刻までの時間を単位として混雑が生じないフロー量を想定した値とする。 c_a には一般的な道路種級に基づいた設定や実観測で得られた値の他にも、悪天候下での容量低下等も考慮することが可能である。

$$\frac{x_a}{\pi} \leq c_a, \quad \forall a \in A_{R_2} \quad (7)$$

式(8)はフローの非負制約である。

$$x_a \geq 0, \quad \forall a \in A \quad (8)$$

なお、本稿では歩道の容量が避難者の量に対して十分にあり、歩道で混雑が生じることはない想定しているが、地域によって必要があれば、(7)式と同等の制約を歩道のリンク集合 A_{R_1} にも与えることで表現可能である。

4. 小規模ネットワークでの適用事例と感度分析

(1) 概説

本章では提案モデルを小規模テストネットワークに適用し、避難者の挙動を確認する。また、目的関数の重みパラメータを変化させたときの避難所の使用率の推移を感度分析する。これら小規模ネットワークへの適用、感度分析を通して、提案モデルが地区防災計画の策定の際に有用なツールとなりうるか検討する。

(2) 小規模テストネットワーク

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、ノード7, 18を標高の高い地域として設定している。また制約条件で用いるパラメータは $\alpha = 0, \beta = 1000, \pi = 1.5, c_a = 30$ とした。屋内退避が可能

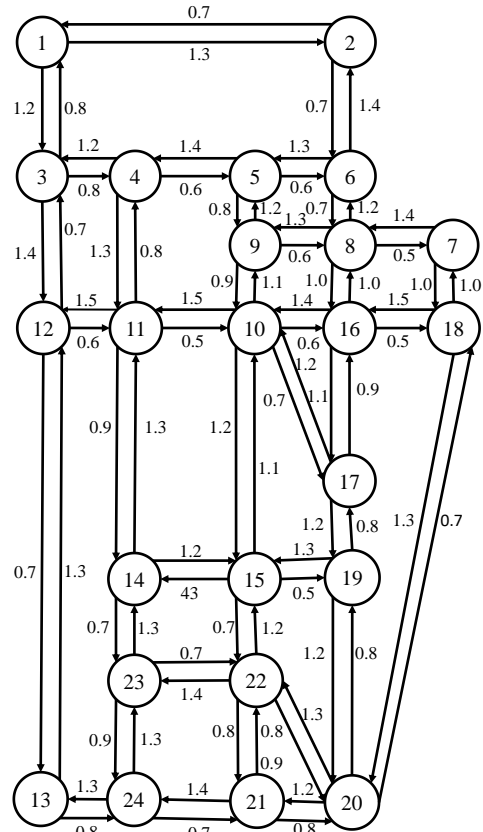


図-2 Sioux Falls ネットワーク

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 2 つのケースに分けて計算を行い、提案モデルの挙動を確認する。

a) 避難所能力を持つ民間施設がない場合

避難出発点をノード 12, 10, 20 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。また避難所をノード 1, 7, 24 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。

b) 避難所能力を持つ民間施設がある場合

a) と同じ条件下で、民間施設を想定して避難所に新たに 15 番を加え、 $c_d = 700$ 人、 $\theta_d = 200$ 台とした。a) の結果と比較することで民間施設が避難所として利用できることの有意性を確認する。

(3) 試算結果

a) 避難所能力を持つ民間施設がない場合

計算結果を図-3、表-3、表-4 に整理した。図-3 は a) におけるネットワーク上の避難者の流れを示している。表-3 は各避難出発点から避難者がどの手段で出発したか（屋内退避したか）を示している。表-4 は各避難所において、避難者がどの手段で流入してきたかをまとめている。全避難者の避難時間を足し合わせた総避難時間は 1276 時間であった。

b) 避難所能力を持つ民間施設がある場合

同様に結果を図-4、表-5、表-6 に整理した。総避難時間は 634 時間であった。a), b) の結果を比較する。総避難時間に注目すると、民間施設が避難所として機能することで約半分に減少することが確認できた。b) のように

表-1 出発地情報

出発地	出発人数
12	400 人
10	500 人
20	300 人

表-2 避難所情報

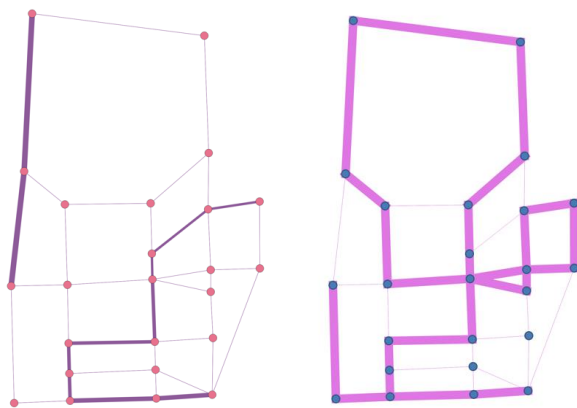
避難所	c_d	θ_d
1	500 人	100 台
7	200 人	100 台
24	500 人	100 台

表-3 a) における避難出発点の避難者モード内訳

	12	10	20
屋内退避	50 人	50 人	50 人
徒歩避難	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 a) における避難所の避難者モード内訳

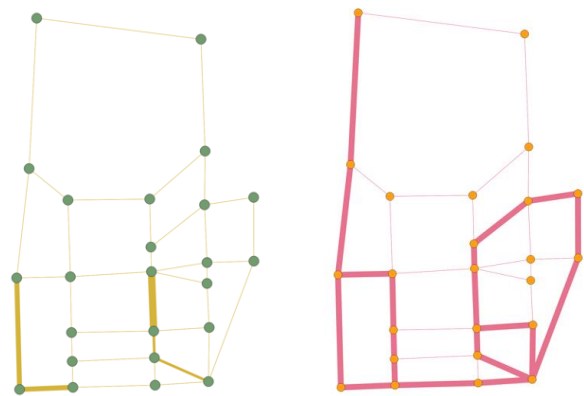
	1	7	24
車避難	60 人	60 人	90 人
徒歩避難	290 人	140 人	410 人
総人数	350 人	200 人	500 人



(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

避難者が集中する地域の民間施設を避難所として開設した場合、地域の避難行動に関する負担を大きく取り除けることが、提案モデルの出力において確認できる。

次に避難者行動の変化を見る。出発地 12 に注目すると、民間施設が避難所に加わることで、a) では遠方の 1 に避難していた徒歩による避難者が b) では 24 に集中していることが分かる。10 と 20 から出発する徒歩避難者が 24 の代わりに 15 に流れたことによって、徒歩避難者が 1 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 から 12, 20 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。地域の避難施設が増減した際に、最適な避難のためには住民がそれまでの避難手段を見直す必要があるということを提案モデルは示唆している。

避難所の環境水準の観点から計算結果を見ると、表-5 から民間施設の追加によって 24, 15 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 に変更を加える必要がある。b) の場合、民間施設は他の避難所よりも収容人数を多く設定している。よって重みパラメータ β を小さくすることで避難者の分散を誘導することができると推測する。

(4) 感度分析

重みパラメータ β を動かしたときの避難所の使用率変化を計算する。避難出発点を表-7、避難所を表-2 のように設定した。計算結果を図-5 に示す。

図-5 からは地区防災計画に役立つ情報が 2 つ得られていると考える。 β が小さいときは標高を考慮した最短経路探索に基づく計算結果が得られている。よって例えば高齢者の割合が多く、避難時間の短さが重要視されるような地域では、避難所の使用率が高くて β を小さくしたときの結果が最適解となる場合がある。反対に地域全体の避難所容量が小さく、多少避難時間が増加しても、避難所の使用率の低さが重要視されるような地域では β を適度に大きくしたときの結果が最適解となるだろう。目的関数の重みを調整することで提案モデルは地域の住民特性に合わせた最適解を提示できる可能性がある。

5. 札幌市道路ネットワークへの適用事例

(1) 札幌市道路ネットワーク

提案モデルを札幌市の大規模道路ネットワークに適用し、計算負荷を確認する。デジタル道路地図と行政区画データを QGIS で加工し、図-6 のような札幌市西区と中央区の道路ネットワークを作成した。またネットワークの各ノードに 500m メッシュ別将来推計人口データ (H30

表-5 b)における避難出発点の避難者モード内訳

	12	10	20
屋内退避	50 人	50 人	50 人
徒歩避難	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 b)における避難所の避難者モード内訳

	1	7	24	15
車避難	30 人	60 人	90 人	90 人
徒歩避難	0 人	0 人	260 人	520 人
総人数	30 人	60 人	350 人	610 人

表-7 感度分析に用いた出発地情報

出発地	出発人数
12	400 人
10	500 人
20	300 人

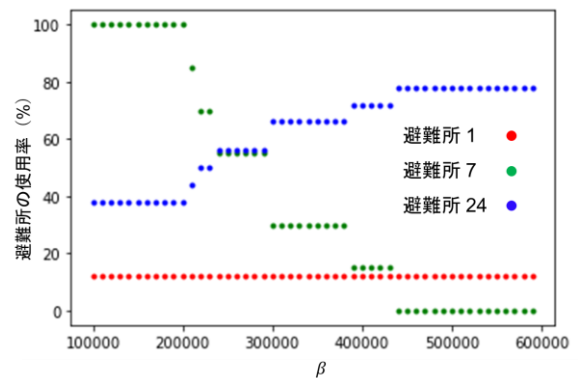


図-5 β を変化させたときの避難所使用率の推移

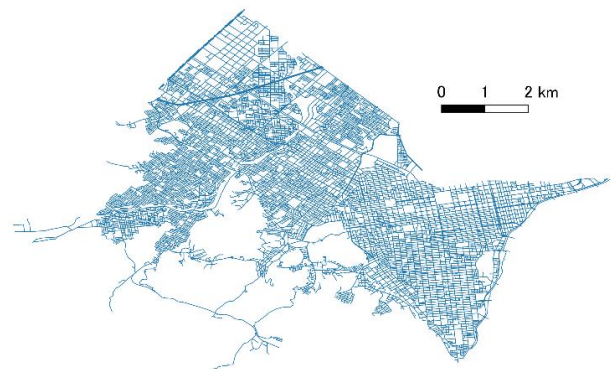


図-6 札幌市西区と中央区の道路ネットワーク

国政局推計¹⁵⁾ から 2015 年時点の人口データを用いて人口を按分し、テストネットワークを作成した。このネットワークを用いて以下の 2 つのケースについて計算を

行った。

a) 避難所能力を持つ民間施設がない場合

重みパラメータ α, β を 500 万, 各避難所のサービス量 S_d , 収容目安人数 C_d を 1 万, $\pi = 1.5$, $c_a = 500$ と設定する。この条件下で各ノードから按分した人口を避難させる。

b) 避難所能力を持つ民間施設がある場合

a)と同じ条件で、避難所に札幌市西区、中央区に含まれる商業施設を追加する。具体的にはイオン札幌発寒店、イオン札幌琴似店、イオン札幌桑園店の3施設を加えた。各商業施設のパラメータは $S_d = C_d = 20,000$ と設定した。

(3) 試算結果

a) 避難所能力を持つ民間施設がない場合

歩行者ネットワークにおけるリンク交通量を図-7, 車ネットワークにおけるリンク交通量を図-8に示す。総避難時間は 79750 時間であった。また以下の汎用計算機において python によりコーディングを行い、汎用線形計画問題ソルバーである Gurobi で最適化演算を行った結果、計算時間は 4 秒程度だった。

CPU: Intel(R) Core(TM) i3-7100

RAM: 8GB

OS: Windows 10 Home

提案モデルの計算負荷は実際の地域の避難計画でも十分適用可能であることが確認できた。

図-7に注目すると、避難所に近づくにつれてリンク交通量が大きくなっている様子を観察できる。この結果により、避難所に対してどのリンクを用いて、どの方向から避難者が流入してくるかを把握することが出来る。

図-8に注目すると、札幌市中央区の中心部から、札幌市西区の避難所や中央区の南側の避難所に向けてリンクが伸びていることが分かる。この結果は人口が多い中央区中心部の住民が、近くの避難所に入れなかったために、車を用いて遠くの空いている避難所に流入していることを表している。

b) 避難所能力を持つ民間施設がある場合

歩行者ネットワークにおけるリンク交通量を図-9, 車ネットワークにおけるリンク交通量を図-10に示す。総避難時間は 72912 時間であった。

a)と比較して総避難時間が減少することを確認した。また図-10の車ネットワークに注目すると、a)の図-8と比べて、地域の周縁部で交通量に差がみられる。a)の時は中央区中心部から車避難者が周縁部まで流れてきており、周縁部の避難所駐車場は優先的にそれらの避難者の車を収容していた。しかしb)でイオン札幌桑園店が増えたことで中央区中心部の避難者は周縁部まで避難

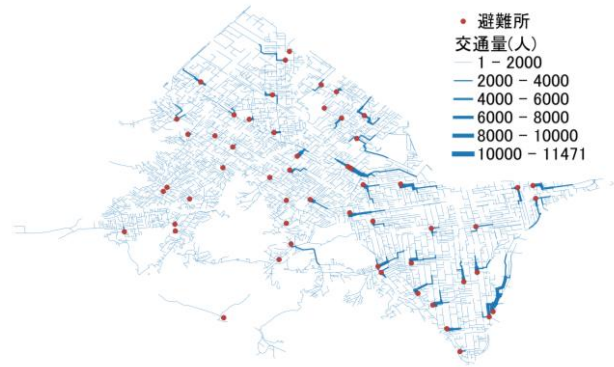


図-7 a)における歩行者ネットワーク上のリンク交通量



図-8 a)における車ネットワーク上のリンク交通量

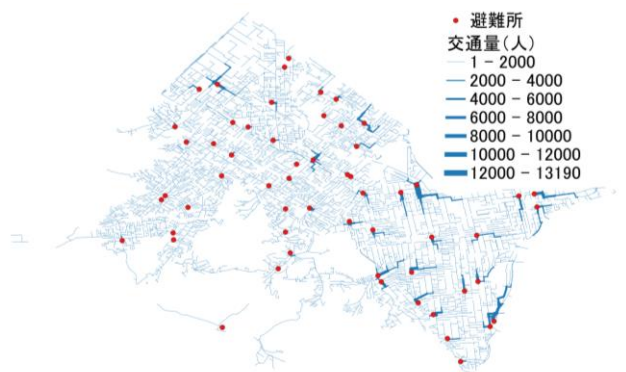


図-9 b)における歩行者ネットワーク上のリンク交通量

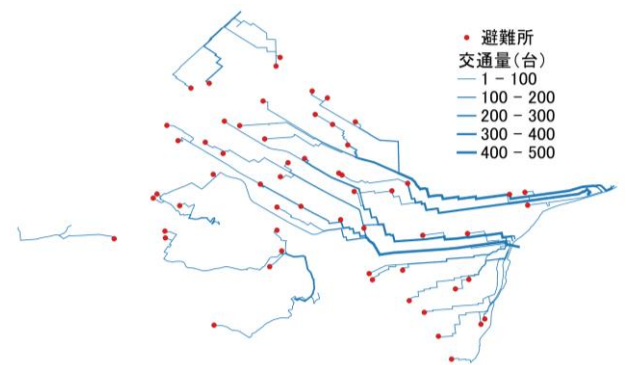


図-10 b)における車ネットワーク上のリンク交通量

する必要がなくなり、周縁部の避難者の車避難が可能になったと推測できる。

6. おわりに

本研究では浸水時の最適避難計画問題を取り扱った。地域住民が地区防災計画を協議する際に有用となるツールの提供を目的として、浸水災害時の規範的な避難計画モデルを構築した。提案モデルでは徒歩による避難だけでなく、車による避難、自宅での屋内退避を表現した。また従来の津波避難計画問題に関する研究では取り扱われなかった、避難所のサービスレベルを表現した項を目的関数に追加した。避難所サービスレベルを考えるにあたって、近年注目されている、避難所能力を持った民間施設についても考慮した計算例を示した。

小規模テストネットワークの適用事例においては避難者の避難方法や、ネットワーク上の各リンクにおける徒歩避難者、車避難者の交通量が示されており、地域全体の避難負担を最小化するための避難者行動をモデルで表現することが出来た。また避難所に民間施設を導入して再度数値計算することで、避難時間が大幅に減少することを確認した。そのとき、リンク交通量だけではなく、避難者の避難手段も変化することが確認できた。この情報は避難所として民間施設を開放する事業者にも有用であり、実際に災害が起きた際に何人の避難者が来るのか、またどのような手段で施設に来るのかといった情報の検討に有用となろう。自治体にとっても地域の民間施設の協力のための参考情報として利用できるだろう。本稿は民間施設の避難所能力を測るために、避難所を増やして計算を行ったが、例えば避難所の老朽化等を鑑みて、避難所を減らして計算結果を比較することもできる。地域住民全体の避難時間や、避難行動を考慮して、維持すべき避難所を検討するためのツールとしても有用な情報を提供できると考える。

小規模テストネットワークでは最適化問題の目的関数の重みパラメータを変更したときの感度分析も行った。その結果適切な重みを与えることで避難所の使用率の最大値が抑えられることを確認した。また重みパラメータの調整により、地域の住民特性に合わせて複数の避難計画案を提示できることを確認した。

札幌市西区と中央区の道路ネットワークにおいて提案モデルの数値計算を行った。結果から避難所に対してどの方向から、どの程度の人数が流入してくるかをネットワーク上で示すことが出来た。また人口が密集している地域で避難所に入れなかった避難者が車を用いて周縁部の避難所に流入する結果が得られた。近年甚大な水害に対して自治体をまたいで避難する、広域避難が注目され

ている。本モデルが提示できる車避難者の動きは広域避難の検討において有益なツールになりうると考える。また計算時間も数秒程度に抑えられており、複数の避難計画案を容易に示すことが出来る。

以上の数値計算と感度分析の結果を通して、提案したモデルが地区防災計画等において、規範的なアプローチから有益な避難計画案を提供するツールになりうると考える。

モデル自体が抱える課題として、計算結果がリンク交通量のみで与えられ、避難者がどこからどこに移動したか分からないということが挙げられる。よって避難者一人ひとりの避難時間を求めるということができず、得られるのはあくまで一人当たりの平均避難時間である。そのため避難者の中に突出して避難時間が長い人がいても結果からは分からず、実際の避難時に危険な状況に陥る避難者がいる可能性がある。この問題の解決策として各避難出発点から避難完了点までの最短経路探索の結果から、移動経路を推定する方法があるが、計算負荷が高いため、現在の提案モデルに導入するためにはさらに工夫する必要がある。

本研究のモデルの特徴として、車ネットワークの制約を、渋滞を避けるためのリンク容量のみにしていることが挙げられる。そのため例えば交差点での混雑など、道路上で起きる複雑な交通事象を再現できていないという問題がある。数値計算では適当な値を設定したが、実際の避難計画に用いる際には、絶対に渋滞が起きないようにリンク容量の値を慎重に設定する必要がある。

札幌の道路ネットワークにおける数値計算では、札幌市西区、中央区の全ての夜間人口が避難所に避難するという仮定をおいている。それに対応して全ての避難所の収容目安人数を1万人として計算している。しかし小学校等の避難所は数百人程度の収容能力しか持ち合わせていない。そのため地域の中で避難すべき人、避難しなくてもよい人を適切に設定する必要がある。しかし提案したモデルでは最適化に従うため、今後は垂直避難の在り方を考慮して、垂直避難リンクにリスクの重みを与えるような拡張を考えた避難計画策定モデルの構築を目指す。

謝辞：本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」（管理法人：国立研究開発法人防災科学技術研究所）、およびJSPS 科研費 21K14258 によって実施されました。

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/extr/eme/extreme_p.html（閲覧日 2022.2.2）

- 2) 内閣府:避難情報に関するガイドラインの改定(令和3年5月) http://www.bousai.go.jp/oukyu/hinanjohou/r3_hinanjohou_guideline/ (閲覧日 2022.2.2)
- 3) 消防庁:平成30年版消防白書
- 4) 内閣府:平成23年東日本大震災における避難行動等に関する面接調査(住民)分析結果 <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/7/pdf/1.pdf> (閲覧日 2022.2.2)
- 5) 内閣府:防災基本計画 <http://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/kihon.html> (閲覧日 2022.2.2)
- 6) 国家公安委員会:交通の方法に関する教則 <https://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku/kyousoku/index.htm> (閲覧日 2022.2.2)
- 7) 倉内文孝:STEN(Space-Time Extended Network)を用いた最適津波避難計画モデルの構築,土木計画学研究・講演集,Vol.50,CD-ROM,2014.
- 8) 荒木麻里,倉内文孝,杉浦聡志:時空間拡張ネットワークを用いた津波最適避難計画モデルの実ネットワークへの適用:宮城県亘理町を対象として,土木計画学研究・講演集,Vol.51,CD-ROM,2015
- 9) 安藤宏恵,倉内文孝,杉浦聡志:時空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,土木計画学研究・講演集,Vol.52,CD-ROM,2015
- 10) 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,土木計画学研究・講演集,Vol.53,CD-ROM,2016.
- 11) 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.
- 12) 中国新聞:ネット調査から<上>民間の避難先 商業施設に高い関心 https://www.chugoku-np.co.jp/column/article/article.php?comment_id=5236668&comment (閲覧日 2022.2.2)
- 13) 讃岐亮,佐藤栄治,鈴木達也,吉川徹,牧紀男:避難場所としての立地ポテンシャル評価 紀伊半島の食料を供する施設を対象として 日本建築学会計画系論文集,第78巻,第692号,pp.2127-2134,2013.
- 14) 小谷仁務,横松宗太,伊藤秀行:商店街における災害時の住民への食料提供と空きスペースの避難所利用の可能性に関する調査研究:神戸市長田区の商店街を対象として 京都大学防災研究所年報,第61号,B,2018.
- 15) 国土交通省:国土数値情報(500mメッシュ別将来推計人口(H30国政局推計)) <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-mesh500h30.html>

(Received ?)
(Accepted ?)