

津波避難施設整備のための最適津波避難計画デザインモデルの実ネットワーク適用

岐阜大学 学生会員 ○安藤宏恵
 岐阜大学 正会員 倉内文孝
 岐阜大学 正会員 杉浦聡志

1. はじめに

津波避難の際は徒歩避難が原則とされてきたが、2011年に発生した東日本大震災での経験や、津波到達予想地域に徒歩避難が現実的でない地域が存在することから、津波避難時における画一的な徒歩避難への妥当性が疑問視されている。その一方で、車の過度な利用は、渋滞発生など円滑な避難を妨げる懸念も存在するため、事前の避難計画が非常に重要な役割を担う。避難計画においては地域の実情に見合ったものが求められており、各地域の地理的条件や津波到達予想などから、効率的な避難施設や交通ネットワークの整備計画を立案する必要があるが、具体的かつ効果的な計画手法は未だ確立されていない。これらを踏まえ先行研究では、目標避難時間内に全員が避難することを制約条件としてネットワーク整備費用を最小化する bi-level 最適津波避難計画デザインモデルを構築した¹⁾。これにより、各地域によって異なる条件を考慮した上で、どのような施設を整備することが最も効率的なのか、について数理的アプローチにより示している。本研究では、構築されたデザインモデルを宮城県亶理郡亶理町の実ネットワークに適用することで、津波災害に対する各地域の実情に応じた整備方針の判断材料となり得ることを確認する。

2. 最適津波避難計画デザインモデル¹⁾

最適津波避難計画デザインモデルは、横山らにより示された歩車混合型最適津波避難計画モデル²⁾を用い、総避難時間最小化の結果得られる避難完了時間の値を均衡制約条件とし、これを制約時間以内に抑えつつ総整備費用最小化をおこなう。計算には時空間拡張ネットワーク (STEN) を使用する。歩車混合型最適避難計画モデル²⁾の目的関数を式 (1) に、等式制約、不等式制約、非負条件をそれぞれ式 (2), (3), (4) に記述する。

$$\min Z = \mathbf{f}^T \mathbf{x} \quad (1)$$

subject to

$$\mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{\text{eq}} \quad (2)$$

$$\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0} \quad (4)$$

等号制約条件はフロー保存を、不等号制約条件は容量制約を表すが、詳細は文献 1) を参照いただきたい。この

問題が満たすべき KKT 条件は相補条件となるため、二値技巧変数 η_1, η_2 を導入し緩和問題として記述することで、デザインモデルの制約条件に最適避難計画モデルの線形 KKT 条件を加える。また、ここでは避難所容量の増設または新設を検討しており、自動車受入可能容量 (j_k^c) を増設するものと、避難受入可能人数 (j_k^p) を増加するものの 2 種類を考え、それぞれ 1 単位増設するために g_k^c, g_k^p の費用がかかるものとする。さらに、物理的な条件から建設可能な最大容量 Y_k^c, Y_k^p が存在することとする。このような条件の下、避難完了時間を制約条件とした最小費用の避難所容量増強する最適津波避難計画デザインモデルは次のように記述できる。

$$\min \mathbf{g}^T \mathbf{y} \quad (5)$$

subject to

$$\mathbf{y} \leq \mathbf{Y} - \mathbf{j} \quad (6)$$

$$\mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{\text{eq}} \quad (7)$$

$$\mathbf{A} \mathbf{x} - \delta \otimes \mathbf{y} \leq \mathbf{b} \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda} \leq \mathbf{f}, \quad (9)$$

$$\mathbf{x} - M \boldsymbol{\eta}_1 \leq \mathbf{0}, \quad (10)$$

$$-\mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda} + M \boldsymbol{\eta}_1 \leq M \mathbf{1} - \mathbf{f} \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\lambda} - M \boldsymbol{\eta}_2 \leq \mathbf{0} \quad (12)$$

$$-\mathbf{A} \mathbf{x} + M \boldsymbol{\eta}_2 + \delta \otimes \mathbf{y} \leq M \mathbf{1} - \mathbf{b} \quad (13)$$

$$\mathbf{x}, \mathbf{y} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\eta}_1, \boldsymbol{\eta}_2 = \{0,1\} \quad (14)$$

ただし、 δ は等号制約条件のうち避難所 k に対応する変数 \mathbf{y} に対応していれば 1 をとる未知変数であり、 \otimes は要素積、 M は十分大きな数、 $\mathbf{1}$ は要素数が一致するすべての要素が 1 のベクトルを示す。

3. 実ネットワークへの適用

対象地域は宮城県亶理郡亶理町 (図-1) とする。亶理町は海岸部に平地が続いており、内陸部まで約 5 km の距離があることから、徒歩のみによる避難が困難である。STEN によりネットワークを時空間に拡張するため、ノード数、リンク数が飛躍的に増加することを考慮し、主要な道路を集約した簡易的なネットワークを用いた。集約したリンクに関しては、リンク容量を足し合わせており、実際の道路の容量は損なわないように配慮した。避難者数は夜間人口を想定し、地域に居住する人口 (総人口 7,325 人) とする。今回の試算では、図-1 のメッシュ部分である東日本大震災時の津波到達範囲を参考とし、

津波浸水域外に達した時点で安全地帯到達としたうえで、さらなる避難所の整備について考える。安全地帯到達地点として津波浸水域の境界線上 3 ヶ所にノードを設置し、そのいずれかに達した避難者は安全地帯に到達したとみなす。浸水域内の新たな避難所設置の候補地についてはあらかじめ 8 ヶ所を定める。本稿で示す試算では、安全地帯到達地点、浸水域内避難所の条件項目は仮に表-1 のように設定しており、安全地帯の容量は十分に大きく、増設費用は発生しないものとした。また、浸水域内の既存の避難所は考慮せず、新たに設置する際の配置、規模についてのみ検討した結果を示す。

最適化問題は MATLAB から数値計画ソルバー (Gurobi) を呼び出して求解し、計算対象時間を 90 分、STEN の単位時間間隔は 3 分とした。その他の設定条件として、平均乗車率、自動車と歩行者の換算係数をそれぞれ 2.0 (人/台)、3.3 (人/台)、0.3 (台/人) に定め計算した。避難完了時間制約条件の変化と避難時の交通手段、総整備費用の関係を図-2 に示す。時間制約が厳しくなるにつれ安全地帯まで避難可能な避難者数は減少し、浸水域内の避難所を必要とする避難者数が増加しており、それに伴い整備費用が増加していることがわかる。また、避難完了時間制約が 24 分以上では徒歩により安全地帯に避難するものが存在するが、それ以下では安全地帯に到達するには車での避難が必須となる。さらに、各避難所の増設費用による影響を確認するため、8 ヶ所の浸水域内避難所候補地のうち居住人口が少ない地区 4 ヶ所を低密利用地とみなし、その避難所増設費用を駐車場、全体ともに 5 まで削減した場合の結果を図-3 に示す。同じ時間制約条件のもと、浸水域内避難所の建設状況を比較すると、費用削減前は 94% の建設が 4 ヶ所の人口集中地でおこなわれていたが、費用削減後は費用の小さい低密利用地で 42.4% が建設されていた。このように、それぞれの建設費用条件に応じた結果を得ることができる。以上より、時間制約によって必要とされる避難所の配置や特徴は変化し、本モデルを用いることで、地域特有の地理的条件や津波到達予想などを考慮したうえで、最適な施設整備を提案することが可能であることが確認できた。

4. おわりに

本稿では最適津波避難計画デザインモデルを実ネットワークへ適用した結果を示したが、その設定値は便宜上のものであり、今後、現実的な設定値について精査する必要がある。今後、各地域の避難計画への指針とするため、実際の避難施設の状況を把握、適用した試算結果からさらなる本モデルの活用方法について検討する。また、計算時間の関係で今回の試算では対象地域の道路ネ

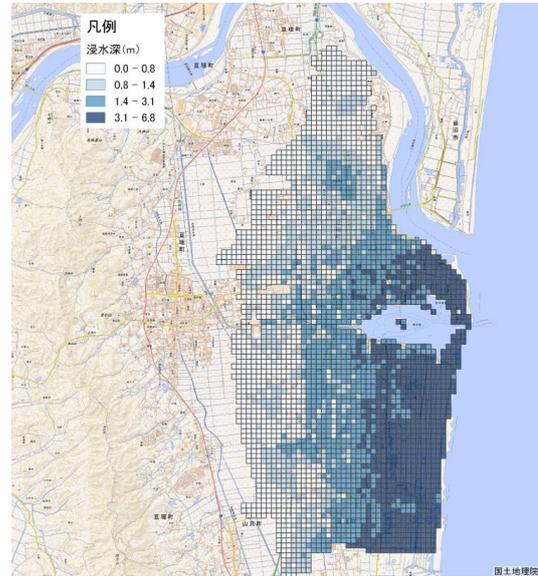


図-1 互理町の津波浸水域

表-1 避難所整備条件の設定項目

	ノード数	駐車場			全体		
		現状容量	容量増設費用	増設可能容量	現状容量	容量増設費用	増設可能容量
		j_k^c	g_k^c	Y_k^c	j_k^p	g_k^p	$Y_k^p - j_k^p$
安全地帯到達地点	3	∞	—	—	∞	—	—
浸水域内避難所	8	0	10	2000	0	20	2000

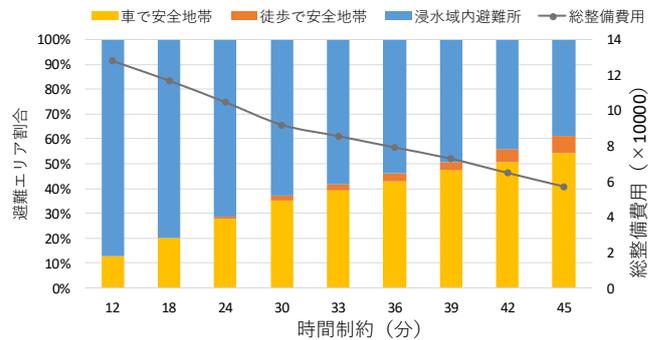


図-2 避難状況と総整備費用の推移

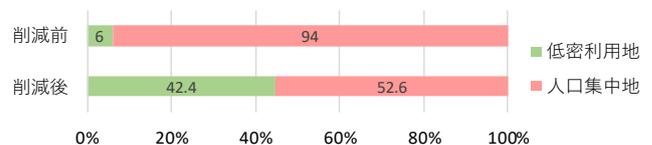


図-3 費用削減による避難所立地の変化

ットワークを簡略化したものを用いたが、より実際の道路網に近いネットワークへの適用を試みる。

参考文献

- 1) 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志: 徒歩と自動車による最適な津波避難計画策定のためのネットワークデザインモデルの構築, 土木計画学研究・講演集, Vol.54, CD-ROM, 2016.
- 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, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, CD-ROM, 2016.