

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

安藤 宏恵¹・倉内 文孝²・杉浦 聡志³

¹学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail: u3121002@edu.gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

³正会員 岐阜大学助教 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)
E-mail: sugi_s@gifu-u.ac.jp

津波災害時の避難に関して、地域の実情に見合った避難計画を策定することが求められており、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については未だ確立されていない。このような背景を踏まえ、本研究では先行研究によって構築された歩車混合型最適避難計画モデルを用いて、目標避難時間内に全員が避難することを制約条件に、ネットワーク整備費用を最小化するbilevelネットワークデザイン問題を構築する。これより、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を明らかにする。今回は、整備方法を避難所容量の拡張とし、本モデルの挙動を確認するとともに、構築したモデルの活用可能性について考察する。

Key Words : *Tsunami disaster, optimal evacuation planning, bimodal transportation, network design problem, space-time extended network*

1. はじめに

これまで、津波避難の際は徒歩避難が原則とされてきた。しかし、2011年の東日本大震災では沿岸に津波が到達する前に避難を始め助かった人の約半数が車避難を選択していたこと¹⁾、津波災害の発生が予想される地域のなかには徒歩避難が現実的ではない地域が存在することなどから、近年、画一的な徒歩避難への妥当性に疑問が生じている。津波による被害が予想される全国のあらゆる自治体において、自動車を使用した津波避難訓練がおこなわれるなど、徒歩に加えて自動車による避難が検討もされ始めている。^{2) 3) 4)} その一方で、東日本大震災時の車避難中の渋滞や道路の損傷、障害物等の問題点もあげられており¹⁾、車避難に制限があることは明らかであることから、津波災害時の車避難を考えるうえで、事前の避難計画が非常に重要な役割を担う。避難計画では、徒歩避難が困難な高齢者や障害者（以下、要避難支援者と呼ぶ）の存在、地域の地形や環境、避難所や高台の位置など、それぞれの地域の実情に合わせたものが必要であるといえる。2013年には、防災基本計画⁵⁾に新たに

「津波災害対策編」が設けられ、自動車避難を検討せざるを得ない場合は、限界量があることを認識し、限界量以下に抑制するよう各地域で合意形成を図るように定められた。しかし、車避難の限界量をどのように求めるのか、より迅速な避難を実現させるためにはどのような対策が効果的であるかは明確にされていない。そのため、各地域の避難時間目標を達成するために車避難の限界量を拡張するべきなのか、徒歩避難が迅速におこなえる環境整備をするべきなのかなど、地域によって異なる目標、課題、手段に対する整備方針の決定に対し、一定の知見を与えることができる避難計画支援のためのツールが必要である。以上を踏まえ、本研究では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る指標を、数理的アプローチによって示す。

先行研究⁶⁾では、Jarvis and Ratliff⁷⁾が示した『動的なmany-to-oneネットワークにおいては総避難時間最小化と避難完了時刻最小化が等価である』ことを援用し、避難完了時刻最小化を目的とした車と徒歩による混合避難での最適避難モデルを構築した。加えて、構築したモデルを宮城県亶理郡亶理町でのネットワークにおいて試算し、

モデルの妥当性を検証した上で、十分実務に適用できることを示した。本研究ではさらに、避難計画の策定の際の施設整備に関する検討を可能とするため、構築した最適避難計画モデルを用いて、制限時間内の避難完了を制約条件とする下位問題、上位問題がネットワーク整備費用の最小化とするbilevelネットワークデザイン問題の定式化をおこなう。津波避難のためのネットワーク整備には、リンク容量の拡張や避難ビル等既存建築物の補強などさまざまあげられるが、本研究では例として、避難所容量の増設または新設の整備を取り扱う。本モデルでは、任意の避難時間内にすべての住民が避難できるように整備を施すには、どこをどのようにすることが最も効率的なのかを明らかにしている。そのため、各地域によって異なる津波到達予想時間や避難設備の現状、観光客の有無などの条件を考慮し、それぞれの地域の実情の合わせた施設整備の検討に活用できる。

2. 現在の施設整備計画指針

現在、実際に示されている津波対策施設整備指針として、2012年3月に宮城県によって定められた「津波避難のための施設整備指針」⁸⁾を紹介する。これは、東日本大震災で明らかとなった課題を踏まえ、津波襲来時に円滑な避難を可能とするための避難場所・津波避難ビル等、避難路、避難誘導サイン等の整備に際して留意すべき事項等について整理し、指針としてとりまとめられている。ここでは、その中でも避難場所・津波避難ビル等に関するものについて示す。これらの検討の流れは、図-1に示すように、沿岸部など地理的条件から避難手段を想定し、現状活用可能な避難場所・津波避難ビル等を考慮したうえで、それでも避難が困難な地域の住民に対して、新たに避難場所・津波避難ビル等の検討がおこなわれている。しかし、避難場所・津波避難ビル等の検討では、現存の施設の利用検討、新たな津波避難ビルの検討、丘陵・津波避難タワーの検討というように、順序に沿って整備方針を決定するようしており、どこをどの程度整備することが最も効率的な解決策であるかという観点では考えられていない。また、避難時の交通手段に関して、沿岸部の農地や緑地・公園等の自動車等による出入りが主となることが想定される区域のみ車避難とし、そのほかは原則徒歩避難としている。そのため、整備によって車避難が可能となる地区や避難者の特性（要避難支援者や観光客の有無）を考慮することが困難であるといえる。本研究で構築したモデルを用いることで、このような現状の整備計画に加えて、整備によって刻々と変化する避難状況を踏まえた交通手段を考慮し、より効率的で効果的な計画が策定可能となると考える。また、地域の实情に

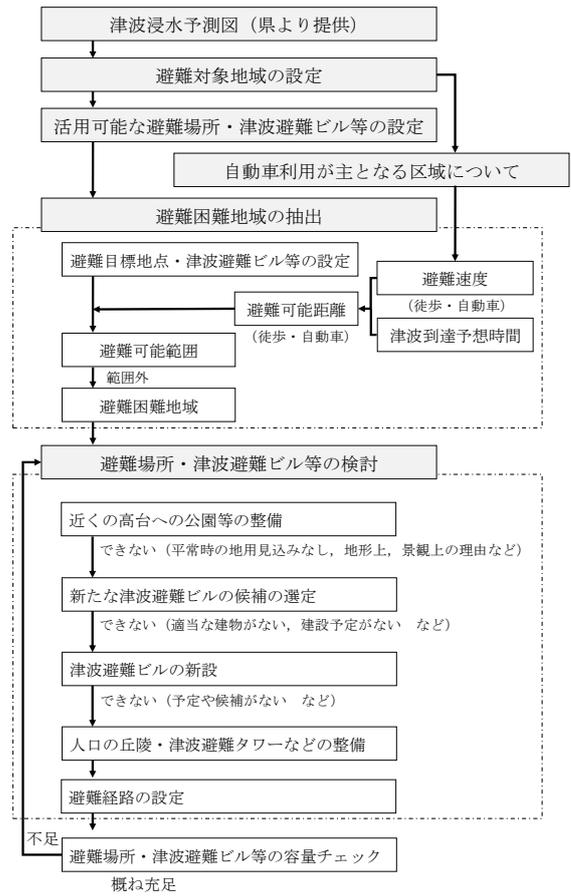


図-1 施設整備検討の流れ⁸⁾

応じた整備計画という点においても、住民の特性や整備費用などの条件から、より細かな要素において地域それぞれに見合った検討が可能といえる。

3. 歩車混合型最適避難計画モデル

本研究で示すネットワークデザイン問題では、下位問題である総避難時間最小化の最適解を条件とし、上位問題において総投資コスト最小化をおこなっている。本章では、下位問題にあたる歩車混合型最適避難計画モデルについて示す。なお、本モデルを用い宮城県亘理郡亘理町の実ネットワークにおいて試算した結果、避難計画策定や避難完了時間短縮のための対策検討に有効であることが確認されている。⁹⁾

(1) 最適避難計画について

最適避難計画とは、計画者が設定した避難計画に避難者全員が従うことを仮定する、規範的アプローチによる最適避難計画としている。また、避難計画において最適避難である状態は、すべての方の避難が完了する避難完了時間を最小とするものであるとし、それぞれの地域住民が、どの交通手段で、どの避難所に避難するべきかな

どの避難の方法を求めるものとする。そのため、実際の各自治体で策定されている地域防災計画の避難計画とは異なる可能性がある。

(2) 最適避難計画モデルの概要

最適避難計画モデルでは、Jarvis and Ratliff⁷⁾ が示した、多出発地単一目的地の動的ネットワークにおいて、避難完了時間最小化と各時間帯の避難完了を示すノードからの流出時間帯で重み付けした最小化問題 (Exit Flow 最小化問題) の等価性に基づく、リンク交通量を未知変数とした Exit Flow 最小化問題によりモデルを構築する。Exit Flow 最小化問題にすることで、避難経路を特定する必要がなく、計算コストの縮小が可能である。

津波避難時の問題のひとつとして、車で避難をおこなった場合の渋滞問題がある。そこで、リンクに容量制約を課し、リンク容量を超えない範囲で交通量を割り当てることにより、待機せざるを得ない避難者が生じ結果として到着時間が遅れる様子を表現する。また、本モデルの最大の特長である歩車混合型での避難の想定が可能である点については、歩車がリンクを混合して使用することにより、双方のリンク容量を減少させるものと考え、歩行者による自動車の容量低下、あるいは自動車による歩行者の容量低下を表現する。

(3) 歩車混合型最適避難計画モデルの定式化

倉内⁹⁾ の時空間拡張ネットワーク (STEN) を活用して、時間軸を考慮したうえで、徒歩と自動車での避難の2つのモードによる避難を想定した最適避難計画に資する数理計画モデルを構築した。ネットワークは図-2に示すような時空間に拡張されたものである。ノードとリンクは以下のように定義される。

- 通常ノード : 実際に存在するノードを時空間に拡張したもの。(Nnum x (Snum+1)個)
- 避難完了時刻ノード : 避難完了時刻を表現するノード。各時間帯にひとつずつ存在する。(Snum+1個)
- 出発地ノード : 避難者が存在するノード。(Onum個)
- 避難完了ノード : 最終的な目的地。図 1 中の△のノード。(1個)
- 通常リンク : 実際に存在するリンクを時空間に拡張したもの。車、歩行者を個別に取り扱う。リンク数は、時間帯数 Snum と各リンクの所要時間の関係により変化する。混雑による遅れは考えず、容量を超える交通を受け入れることはできない。
- 流出リンク : 避難完了時刻ノードと避難完了ノ

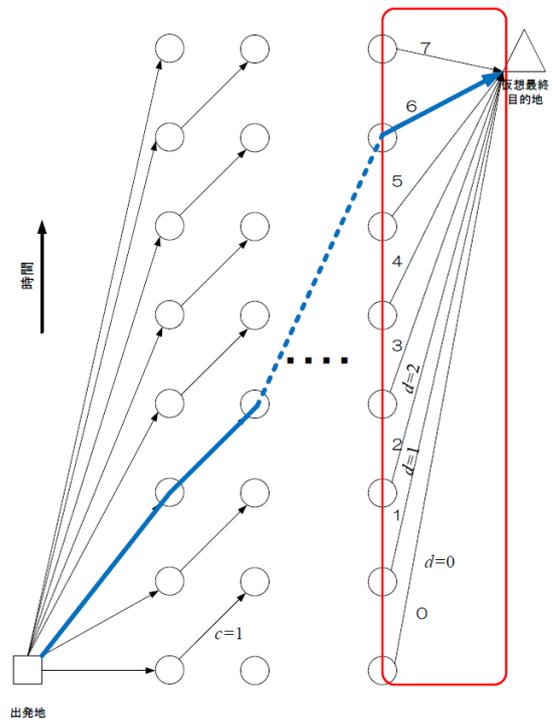


図-2 時空間ネットワーク

ードをつなぐリンク。
(Snum+1)個

避難所リンク : 避難所ノードと避難完了時刻ノードをつなぐリンク。車、歩行者を個別に取り扱う。

(2 x Knum x (Snum+1)個)

出発地リンク : 出発地ノードと通常ノードをつなぐリンク。車、歩行者を個別に取り扱う。(2 x Onum x (Snum+1)個)

以上のノード、リンクを用い、Exit Time 最小化問題とした歩車混合型最適避難計画モデルの定式化を以下に示す。

$$\min \sum_{e \in E} c_e x_e \quad (1)$$

subject to

$$-\sum_{a \in Out(1,o)} \gamma x_a - \sum_{a \in Out(2,o)} x_a + q_0 = 0 \quad \forall o \in O \quad (2)$$

$$\sum_{a \in In(1,e)} \gamma x_a + \sum_{a \in In(2,e)} x_a - x_e = 0 \quad \forall e \in E \quad (3)$$

$$\sum_{a \in In(m,n)} x_a - \sum_{a \in Out(m,n)} x_a = 0 \quad \forall m = 1, 2, n \in N \quad (4)$$

$$\sum_{a \in Out(1,k)} x_a \leq j_k^c \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{a \in Out(k)} x_a \leq j_k^p \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$x_a + \beta_a^{pc} x_b \leq s_a^c \quad \forall b = \{b | l_a = l_b, it_b \leq it_a, ot_b \geq ot_a, b \in A^p\}, a \in A^c \quad (7)$$

$$x_a + \beta_a^{cp} x_b \leq s_a^p \quad \forall b = \{b | l_a = l_b, it_b \geq it_a, ot_b \leq ot_a, b \in A^c\}, a \in A^p \quad (8)$$

$$x_a \geq 0, \quad \forall a \in A \quad (9)$$

ただし、

- O** : 出発地ノードの集合 (個数は $Onum$)
- N** : 中間ノードの集合 (個数は $Nnum$)
- S** : 計算対象の時間帯数 ($s=0 \sim Snum$ まで計算するとし, 個数は $Snum+1$)
- E** : 最終目的地に接続されるリンク (最終流出リンク) の集合 (個数は $Snum+1$)
- K** : 避難所の集合 (個数は $Knum$)
- A^c, A^p** : それぞれ自動車および徒歩の通常リンクの集合

- dt : 単位時間 (分)
- s^c : 自動車のリンク交通容量 (台/分)
- s^p : 歩行者のリンク交通容量 (人/分)
- m_a : 各リンク a のモード (0=区別なし, 1=車, 2=歩行者)

- it_a, ot_a : 各リンクの流入時刻および流出時刻
- l_a : STEN 上のリンク a の静的ネットワーク上のリンク番号

- j_k^c : 避難所 k の自動車での容量 (駐車可能台数に相当). なお, この値を 0 にすることで, 徒歩避難のみ受入可能な避難所を表現可能.

- j_k^p : 避難所 k の受入可能容量 (一時避難可能人数に相当)

- c_a : 最終流出リンク a のコスト (=流出時刻)
- q_n : 出発地 n からの避難需要 (人)
- $In(n)$: ノード n に流入するリンクの集合
- $Out(n)$: ノード n から流出するリンクの集合

- $In(m, n)$: ノード n に流入するモード m のリンクの集合 ($m=1$, 車, $m=2$, 徒歩)

- $Out(m, n)$: ノード n から流出するモード m のリンクの集合 ($m=1$, 車, $m=2$, 徒歩)

- γ : 自動車の平均乗車人数 (人/台)
- β_a^{cp} : リンク a の自動車の歩行者換算係数 (人/台) (自動車 1 台の歩行者容量に及ぼす影響)

- β_a^{pc} : リンク a の歩行者の自動車換算係数 (台/人) (歩行者 1 人の自動車容量に及ぼす影響)

x_a : リンク a の交通量
 である. なお, 上記の問題は線形計画問題となっている. 制約条件について, 以下に説明する.

a) 出発地ノードにおけるフロー保存

ここでは, 出発地に存在する避難者全員が避難するものとする. 式 (2) は, 各目的地から流出する交通量がその地点からの避難者数に等しいことを示す. ここでの定式化においては, あるノードに流入する場合を正, 流出する場合を負としてとらえている. また, 車を利用する場合には, 複数人 ($=\gamma$) 乗車することを想定する.

b) 避難完了時刻ノードにおけるフロー保存則

Exit Flow を算定するために, 避難完了時刻ノードにお

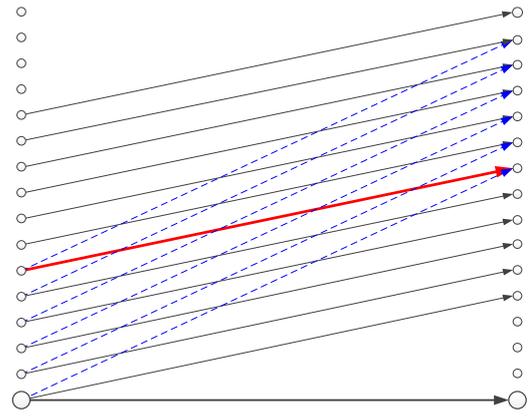


図-3 自動車リンクと歩行者リンクの相関

けるフロー保存を考える. これは, 式 (3) のように書ける. 避難完了時刻ノードから流出するノードは唯一であるため, ここでは x_e と示している.

c) 通常ノードにおけるフロー保存

通常ノードにおいては, モードを個別に取り扱う必要がある. すなわち, 途中で徒歩から自動車に乗り換える, ということはできない. したがって, 式 (4) のように記述できる. なお, 流入・流出リンクには通常リンクだけでなく, 出発地リンク, 避難所リンクも含まれていることに注意が必要である.

以上が等号制約条件として設定される. 次に不等号制約条件について述べる.

d) 避難所における容量制約

各避難所には, 自動車の受入可能容量と避難者の受入可能容量の 2 種類が存在する. よって自動車の受入可能容量を示す式 (5) と, 避難者の受入可能容量を示す式 (6) の 2 つの制約条件となる.

e) リンク容量制約

車と徒歩の 2 モードによる避難に際し, リンク容量制約に対して工夫を加える. すなわち, リンクを徒歩と自動車が混合して使用することによって, 双方のリンク容量を減少させるものとする. なお, この関係式は, STEN において交差しうるすべてのリンクを対象とする. 図-3 を用いて説明する. 今, 車での移動を表すひとつのリンク (赤色) に対して, 青い点線で示された徒歩リンクが交差する. この場合, これら全ての交差しているリンクペアに対して, 式 (7) の容量制約が成立するものとする. 同様に, 歩行者の容量についても自動車が走行することによって低下が生じるものとし, 式 (8) の制約条件を課す.

以上により, 歩行者による自動車の容量低下, あるいは自動車走行による歩行者の容量低下を表現することが可能である. なお, 換算係数 β をリンクごとに設定しているが, これは例えば十分な幅員の歩道が確保されており, なおかつ車道を歩行者が利用することが想定しづら

い場合ゼロにするなど、リンクの特性に応じて柔軟に対応可能とするためである。これより、モードにより避難可能な場所が異なる可能性をもつ、徒歩と自動車が混合することで生じる悪影響を考慮できる最適避難計画モデルを構築した。

4. ネットワークデザイン問題への拡張

前章で定式化した歩車混合型最適避難計画モデルを下位問題とし、上位問題にネットワーク整備費用の最小化をもつbilevelネットワークデザイン問題の定式化をおこなう。

(1) 歩車混合型最適避難計画モデルのKKT条件

元の問題を簡単のため以下のように記述する。

$$\min Z = \mathbf{f}^T \mathbf{x} \quad (10)$$

subject to

$$\mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{\text{eq}} \quad (11)$$

$$\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (12)$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0} \quad (13)$$

ラグランジュの緩和問題は次のように書ける。

$$\min L = \mathbf{f}^T \mathbf{x} + \boldsymbol{\mu}^T (\mathbf{b}_{\text{eq}} - \mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{b}) \quad (14)$$

subject to

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0} \quad (15)$$

この緩和問題が満たすべき KKT 条件を考える。 L を x で微分すると、 $\nabla_{\mathbf{x}} L = \mathbf{f} - \mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}$ をえる。これより、

$$\mathbf{x}^T \nabla_{\mathbf{x}} L = \mathbf{x}^T (\mathbf{f} - \mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}) = 0 \quad (16)$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \mathbf{f} - \mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0} \quad (17)$$

をえる。また、ラグランジュ乗数に関する KKT 条件は以下の通りとなる。

$$\nabla_{\boldsymbol{\mu}} L = \mathbf{b}_{\text{eq}} - \mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (18)$$

$$\boldsymbol{\lambda}^T \nabla_{\boldsymbol{\lambda}} L = \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{b}) = 0 \quad (19)$$

$$\boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0}, \mathbf{b} - \mathbf{A} \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \quad (20)$$

以上より、この問題が満たすべき KKT 条件をまとめると次のようになる。

$$\mathbf{x}^T (\mathbf{f} - \mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}) = 0 \quad (21)$$

$$\boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{b}) = 0 \quad (22)$$

$$\mathbf{b}_{\text{eq}} - \mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (23)$$

$$\mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{b} \geq \mathbf{0} \quad (24)$$

$$\mathbf{f} - \mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0} \quad (25)$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0} \quad (26)$$

(2) 等価な緩和問題

前節で示した KKT 条件の式 (21) および式 (22) は変数の乗算が含まれているため非線形である。そのため、ここではそれぞれに対応する二値技巧変数 $\boldsymbol{\eta}_1, \boldsymbol{\eta}_2$ を導入する。このとき、式 (21) と以下の式は等価である。

$$\mathbf{x} \leq M \boldsymbol{\eta}_1 \quad (27)$$

$$\mathbf{f} - \mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda} \leq M(\mathbf{1} - \boldsymbol{\eta}_1) \quad (28)$$

ここで、 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 のベクトルである。つまりある行 a について着目すると、 η_{1a} が 0 であるならば、 x_a は 0 とならざるを得ず、逆に $\eta_{1a} = 1$ であれば、 $\mathbf{f} - \mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}$ の a 行目の要素は 0 となる。同様に式 (22) は次のように記述できる。

$$\boldsymbol{\lambda} \leq M \boldsymbol{\eta}_2 \quad (29)$$

$$\mathbf{b} - \mathbf{A} \mathbf{x} \leq M(\mathbf{1} - \boldsymbol{\eta}_2) \quad (30)$$

これらを用い整理すると、最適解が満たすべき線形 KKT 条件は以下の通りとなる。

$$\mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{\text{eq}} \quad (31)$$

$$\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (32)$$

$$\mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda} \leq \mathbf{f} \quad (33)$$

$$\mathbf{x} - M \boldsymbol{\eta}_1 \leq \mathbf{0} \quad (34)$$

$$-\mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda} + M \boldsymbol{\eta}_1 \leq M \mathbf{1} - \mathbf{f} \quad (35)$$

$$\boldsymbol{\lambda} - M \boldsymbol{\eta}_2 \leq \mathbf{0} \quad (36)$$

$$-\mathbf{A} \mathbf{x} + M \boldsymbol{\eta}_2 \leq M \mathbf{1} - \mathbf{b} \quad (37)$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\eta}_1, \boldsymbol{\eta}_2 = \{0, 1\} \quad (38)$$

(3) bilevel ネットワークデザイン問題の構築

以上の知見を用い、最適避難計画モデルによって得られた最適解に基づき、必要な時間内に避難を完了するという条件の下、総投資コスト最小化をおこなう bilevel ネットワークデザイン問題の構築を試みる。ここでは、例として避難所の増設または新設を検討するものとする。避難所の増設については、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 のコスト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、避難完了時刻を目標避難時間以内とするためのコスト最小化問題は次のように記述することができる。

$$\min g^T \mathbf{y} \quad (39)$$

subject to

$$\mathbf{y} \leq \mathbf{Y} - \mathbf{j} \quad (40)$$

$$\mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{\text{eq}} \quad (41)$$

$$\mathbf{A} \mathbf{x} - \boldsymbol{\delta} \otimes \mathbf{y} \leq \mathbf{b} \quad (42)$$

$$\mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda} \leq \mathbf{f}, \quad (43)$$

$$\mathbf{x} - M \boldsymbol{\eta}_1 \leq \mathbf{0}, \quad (44)$$

$$-\mathbf{A}_{\text{eq}}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda} + M \boldsymbol{\eta}_1 \leq M \mathbf{1} - \mathbf{f} \quad (45)$$

$$\boldsymbol{\lambda} - M \boldsymbol{\eta}_2 \leq \mathbf{0} \quad (46)$$

$$-\mathbf{A} \mathbf{x} + M \boldsymbol{\eta}_2 + \boldsymbol{\delta} \otimes \mathbf{y} \leq M \mathbf{1} - \mathbf{b} \quad (47)$$

$$\mathbf{x}, \mathbf{y} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\eta}_1, \boldsymbol{\eta}_2 = \{0, 1\} \quad (48)$$

ただし、 $\boldsymbol{\delta}$ 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 をとる変数であり、 \otimes は要素積を示す。なお、避難完了時間の考慮の方法であるが、ここでは STEN を求められる避難完了時刻までしか構築しないことにした。こうすることで、下位問題に解が得

られるように上位問題において y が決定づけられることにより、避難完了時刻制約を満たすことができる。以上より、Exit Time 最小化問題による避難完了時間を制約条件とした最小コストの避難容量増強というネットワークデザイン問題を構築した。

5. 仮想ネットワークでの試算

(1) 本モデルの挙動確認

前章で示したネットワークデザイン問題の挙動を確認するため、図-4の3x3仮想ネットワークにおいて試算した。出発地ノード6カ所、避難所ノード3カ所、避難所新設候補地ノード3カ所で構成されており、各リンクに歩車それぞれのリンク容量（人/分、台/分）、リンク所要時間（分）が定められている。最適化問題はMATLABから数理計画ソルバー（Gurobi）を呼び出して求解する。表-1の避難所条件のもと、図-4のネットワークにおいて計算をおこなった。なお、全体の計算対象時間を30分とし、時間間隔は1分とした。ここでは、構築したモデルの挙動確認を目的としているため、例として自動車の平均乗車人数 $\gamma = 2$ （人/台）と仮定し、すべてのリンクにおいて歩行者の自動車への換算係数は $\beta_a^{pc} = 0.5$ （台/人）、自動車の歩行者への換算係数を $\beta_a^{cp} = 10$ （人/台）としている。また、全体避難所容量とは、交通手段に限らずすべての避難者を対象とした避難所容量であり、駐車場容量とは車を使用する避難者のための容量である。そのため、車を使用する避難者は駐車場容量と全体避難所容量のどちらにも含まれる。例えば、ある避難所への徒歩避難者が100人、車避難者が50人の場合、全体避難所容量は150人分、駐車場容量は50人（ここでは25台）分必要ということになる。各避難所の容量増設コストおよび増設可能容量については、あえて値にばらつきを持たせ、モデルが想定通りの挙動を示しているか確認する。

サンプルケースとして、時間制約10分としたときの計算結果を表-1の「拡張結果」の欄に示す。まず、駐車場容量に関して最も大きい拡張がおこなわれているのは、ノード3の250台拡張である。ノード3の駐車場容量増設コストは他のノードに位置する避難所に比べてかなり低く設定しており、その結果この避難所を重点的に増設している。全体避難所容量に関しては、ノード5の全体容量増設コストが最も低いため、ノード5を拡張している。しかし、ノード5では増設可能容量が300と定められているため、この値までの拡張しかできず、残りの必要拡張分は他の避難所にて補っていることがわかる。この結果から、本モデルは避難時間、増設可能容量の制約条件のもと、整備コストが最小化されており、モデルが想定通

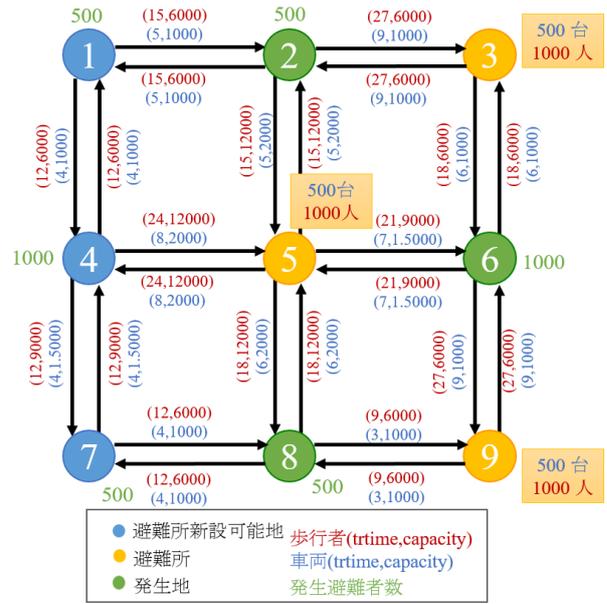


図-4 仮想ネットワーク図

表-1 避難所条件と計算結果

| 避難所ノード | 全体避難所容量 | | | | 駐車場容量 | | | |
|--------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|-----------------|---------|
| | 現状容量 | 容量増設コスト | 増設可能容量 | 拡張結果 | 現状容量 | 容量増設コスト | 増設可能容量 | 拡張結果 |
| | j_k^p | g_k^p | $Y_k^p - j_k^p$ | y_k^p | j_k^c | g_k^c | $Y_k^c - j_k^c$ | y_k^c |
| 1 | 0 | 20000 | 2000 | 200 | 0 | 20000 | 2000 | 0 |
| 3 | 1000 | 200 | 1000 | 500 | 500 | 10 | 1000 | 250 |
| 4 | 0 | 20000 | 2000 | 0 | 0 | 20000 | 2000 | 0 |
| 5 | 1000 | 10 | 300 | 300 | 500 | 10000 | 1000 | 150 |
| 7 | 0 | 20000 | 2000 | 0 | 0 | 20000 | 2000 | 0 |
| 9 | 1000 | 200 | 1000 | 0 | 500 | 10000 | 1000 | 0 |

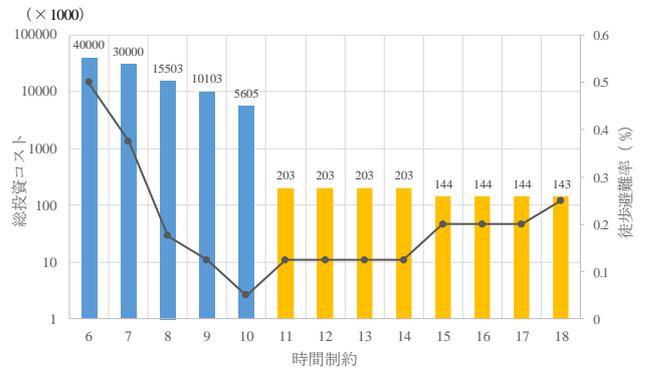


図-5 時間制約による総投資コストと徒歩避難率の変化

りの挙動をしていることを確認した。

(2) 時間制約に伴う効率の整備の変化

津波予想到達時間は地域によって異なるため、それぞれの目標避難時間に応じた整備指針を検討できることが、本モデルの特長である。本節では、仮想ネットワークを用いて、時間制約を変更した際の計算結果から時間制約変化に伴う整備方針の変化について考察する。

時間制約条件と総投資コスト、徒歩避難率の関係を図-5に示す。時間制約が19分以上の場合には避難所を増設する必要がないという結果となったため、図は18分以内

のケースのみ示している。時間制約が18分～11分では、既存の避難所容量を拡張し、車で避難者を増加させることで目標避難時間を達成している。そのため、時間制約が厳しくなるにつれて、総投資コストは上昇し、徒歩避難率は減少している。一方で、時間制約が10分～6分の場合では、既存の避難所容量の拡張のみでは目標避難時間を達成することが不可能となるため、出発地ノードに近接した避難所の新設を始めている。表-1に示すように、避難所を新設する場合は既存避難所の増設と比べ、コストを非常に高く設定している。そのため、避難所を新設すると総投資コストが大きく増加する。また、ここでの新設避難所は、避難タワーや避難ビルといった構造物を想定しており、徒歩避難のみに限定した。これにより、時間制約10分を境として徒歩避難率は再び増加している。時間制約を5分以下とした場合には、避難所容量を最大限に拡張したとしても、時間内に避難者全員が避難することが不可能であり、解は得られなかった。

以上より、避難所の増設と新設を兼ね備えた整備の検討が可能であることが確認された。さらに、今回のケースでは避難所の新設避難所のコストを高く設定したが、これらを各地域の現状の設備などから条件設定をおこなうことで、それぞれの条件に応じた結果を得ることができる。

(3) 交通手段限定の可能性

津波避難時において自動車による避難が検討されはじめた背景のひとつとして、要避難支援者の存在があげられる。地域によっては、高齢者率が非常に高い地域もあり、沿岸からの距離や津波予想到達時間に関わらず、車による避難を必要とする人は少なからず存在し、整備計画を策定する際には考慮しなければならない。これより、本モデルを用いて、車避難を必要とする避難者の割合を出発地毎に設定することで、要避難支援者を考慮したうえで効率的な整備の試算が可能であるか検討した。

図-4に示す出発地ノード6カ所のうち、ノード2, 6, 7において要避難支援者が存在すると仮定した。各ノードの要避難支援者の人数をケースごとに表-2のように設定し、計算をおこなった。それぞれのケースにおける時間制約と総投資コストの関係を図-6に示す。どの時間制約においても、要避難支援者の人数が多いケースほど総投資コストが高くなるのがわかる。このように、地区ごとの要避難支援者の人数に応じて条件設定をおこなうことで、その条件において、目標避難時間を達成するためにはどこにどのような整備をおこなう必要があるのかを示すことができる。また、要避難支援者の人数の増加による影響が大きい地区を把握することも可能であり、大きな規模で考える地域防災計画として、高齢者施設の移転の必要性等の側面も議論できるツールになり得る。

表-2 各ノードの要避難支援者数 (人)

| | ケース1 | ケース2 | ケース3 | ケース4 | ケース5 |
|------|------|------|------|------|------|
| ノード2 | 0 | 100 | 200 | 300 | 500 |
| ノード6 | 0 | 100 | 200 | 300 | 500 |
| ノード7 | 0 | 100 | 200 | 300 | 500 |
| 計 | 0 | 300 | 600 | 900 | 1500 |

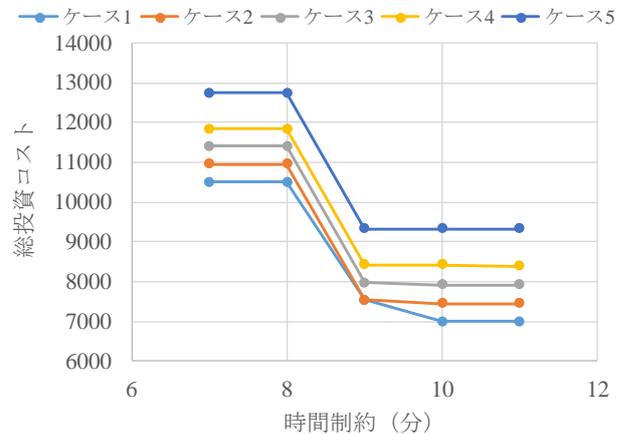


図-6 各ケースの時間制約による総投資コスト

6. おわりに

本研究では、先行研究で構築された歩車混合型最適避難計画モデルによって得られる避難完了時間を制約条件として、上位問題にネットワーク整備費用の最小化をもつbilevelネットワークデザイン問題を構築した。さらに、仮想ネットワークでの試算によりモデルの挙動を確認し、目標とする避難完了時間に応じた整備指針を示すことが可能であることが確認された。また、目標避難時間以外の地域によって異なる要素として、要避難支援者の存在を考慮した整備も検討できることを示した。本研究で定式化したネットワークデザイン問題の活用により、今回対象とした避難所容量の拡張のみならず、道路整備や避難ビルの補強など様々な整備内容を考慮することが可能である。

今後の課題としては、ここで定式化したネットワークデザイン問題を用いて、実ネットワークにおいて試算することで、ネットワーク整備の検討課題に対してどのような提案が可能であるか確認する必要がある。また、今回は避難所容量の拡張の整備のみに着目し、整備コスト最小化を試みたが、その他の整備内容も考慮し、それらを組み合わせた整備コスト最小化モデルに改良することで、より広い視野で整備計画の指針を示すことができると考える。さらに、下位問題の歩車混合型最適避難計画モデルにおいて、交差点の存在が考えられていない。制

約条件である避難完了時間の精度向上のためにも、交差点容量を考慮した最適避難計画モデルに改良することが求められる。そのほか、モデルのインプット情報となる自動車と歩行者の換算係数、避難所の拡張費用などの設定方法についても検討する必要があるだろう。

参考文献

- 1) 中日新聞「半数以上が車で避難」, 2014.2.3.
- 2) 高知新聞「最大津波」と付き合い黒潮町 諦めない「思想」紡ぐ, 2016.3.8. <https://www.kochinews.co.jp/article/13677/> (2016.7.28閲覧)
- 3) 照本清峰: 自動車利用を含めた津波避難ルール(案)に関する地域モデルの形成 -和歌山県みなべ町を事例とした実践に基づく検討, 都市計画論文集 Vol.50No.3, 2015
- 4) 亘理町: アンケート結果 (H25.6.9 防災訓練時実施) 集計結果, 2013年7月
- 5) 中央防災会議: 防災基本計画, 2016.5.
- 6) 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.
- 7) Jarvis, J.J. and Ratliff, H.D.: Some Equivalent Objectives for Dynamic Network Flow Problems, *Management science*, 28, pp.106-108, 1982.
- 8) 宮城県: 津波避難のための施設整備指針, 2012.3.
- 9) 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.

(2016.?? 受付)

THE NETWORK DESIGN PROBLEM FOR OPTIMAL BIMODAL EVACUATION AGAINST TSUNAMI DISASTER

Hiroe ANDO, Fumitaka KURAUCHI and Satoshi SUGIURA

It is necessary to construct an evacuation plan against tsunami disaster considering the requirement of each region. The investment plan of evacuation-related facilities and transport network should be efficient depending on geographical conditions and the expected arrival time of the Tsunami. However, concrete and effective planning methods to discuss such plans have not been established yet. Based on these background, this paper attempts to construct a network design problem where the objective of the upper-level problem is to minimise the total investment cost while ensuring that the evacuation time is smaller than a predetermined value, which is formulated as a lower-level problem. This model is able to reveal the criterion of efficient investment considering the requirement for each region. We applied the proposed model to minimise the shelter capacity expansion cost as a case study to verify the model performance.