

津波最適避難施設デザインモデルの 実ネットワークへの適用

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 工学研究科生産開発システム工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: hiroe@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

津波災害を対象とする事前の避難計画では、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の立案が求められている。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たネットワーク整備費用を最小化する最適施設整備デザインモデルを構築し、各地域によって異なる条件を考慮した上での効率的な整備のデザイン手法について数理的アプローチで示した。本研究では、これ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、実際の避難施設の状況や人口分布など地域特有の条件を踏まえた最適な施設整備の提案が可能であることを確認する。この結果を用い、それぞれの地域における事前津波避難計画策定の段階における避難計画支援ツールとしての本モデルの活用可能性について検証する。

Key Words : *Tsunami disaster, optimal evacuation planning, network design problem, practical network application*

1. はじめに

東日本大震災以前、津波避難は家屋倒壊、落下物、道路の損傷、交通渋滞等が発生する恐れがあることから原則徒歩と定められていた。しかし、実際に津波が発生した状況での行動を振り返ると、東日本大震災では、津波到達までの時間が短かったことや避難場所までの距離が遠いなどの地域の実情から、助かった避難者の約半数が車避難を選択していた。とはいえ、車を使用した人のうち4分の1が「渋滞で動けなかった」、「被災で信号が停止していた」、「がれき散乱や道路陥没で通行しづらかった」などと、車を用いた避難の際に何らかの問題が生じている¹⁾。そのため、画一的な徒歩避難への妥当性に疑問が生じ、車による避難の必要性が考えられ始めているものの、交通渋滞等の津波避難時に車を利用する際のリスクに関しては、依然として残されたままというのが現状である。このように実際の災害時の避難状況や被災者の声があり、なおかつ、高齢社会に突入した現在、来るべき南海トラフ巨大地震をはじめとする大地震に備え、徒歩での避難が困難な要避難支援者の存在も考慮し、

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避難計画の策定が求められている。これらの背景を踏まえ、先行研究では、避難時間最小化を目的とし、徒歩と車の2つの交通手段が考慮可能な歩車混合型最適避難計画モデルを構築した²⁾。これにより、避難者全員が避難を完了する時間を最小にするためには、どの地区の住民がどこにどの手段でいつ避難するべきかを示すことを可能としている。さらに、避難の方法や手段を示す避難計画に加えて、津波避難に対する事前準備として、避難施設や交通ネットワークの整備計画も重要である。各地域の条件によって求められる整備の種類や程度は異なり、それぞれの地理的条件や津波到達予想から効率的な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。そのため、津波避難計画を策定する際にひとつのベンチマークとなる最適な避難のあり方を示したうえで、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関して、一定の知見を与えることができる施設整備の指標構築を目的とする最適施設整備デザインモデルを構築した³⁾。最適施設整備デザインモデルは、津波避難

に対する避難施設や交通ネットワークの整備計画を策定する際の事前準備段階における判断材料となることを目指しており、本モデルの活用により実際の地域の現状を踏まえたうえで、どのような検討、提案が可能であるかを確認する必要があるといえる。本稿では、最適施設整備デザインモデルを宮城県亘理郡亘理町の実ネットワークに適用し、亘理町の現在の人口分布、避難施設状況、津波到達時間等の条件を踏まえたうえで、効率的かつ効果的な最適整備案を示す。また、最適施設整備デザインモデルによって得られる最適整備案を適用した際の避難状況の変化、最適な避難のあり方について、歩車混合型最適避難計画モデルを用い考察する。

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」⁴⁾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、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、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、丘陵・津波避難タワーというように、順序に沿って整備方針を決定するようにしており、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、避難困難地域の抽出を行う前段階において、自動車利用が主となる区域について判断をおこなう。自動車利用が主となる区域の抽出条件は、「1. 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については、避難困難地域の抽出において自動車での避難を想定することができる」、「2. 区域内においても、公園や海水浴場等、多くの人の出入りが見込まれる箇所においては、一時的に避難が可能な場所を確保し、徒歩での避難を徹底すること」、の2つのみである。したがって、実際にどの地域を自動車利用が主となる区域の選定は、地方自治体に任せられているのが現状である。本研究で対象地域としている宮城県亘理郡亘理町の津波避難計画⁵⁾における避難時の交通手段の決定プロセスを図-1に示す。亘理町では、

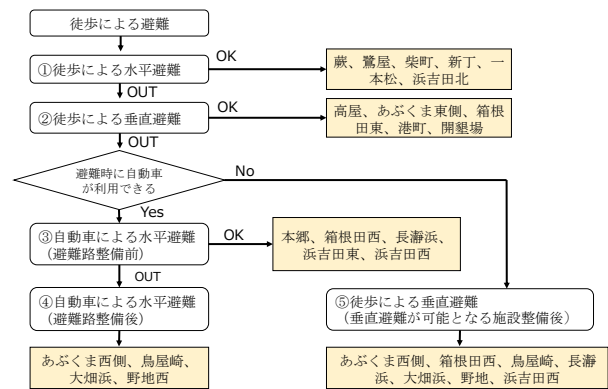


図-1 施設整備検討の流れ⁵⁾

まず徒歩による避難を検討し、水平避難、垂直避難の順で徒歩による避難方法を決定する。それでも避難不可能の場合は避難時に自動車を利用できるかどうか判断をおこない、必要であれば自動車による水平避難のための避難路整備をおこなう。避難時の自動車利用が不可能と判断された地区においては、垂直避難が可能となる施設整備を施すとしている。このようなプロセスは各自治体で統一されているものではなく、沿岸部からの距離等から避難手段を判断する自治体など、判断基準はさまざまである。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、地域の実情に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地域それぞれに見合った検討が可能といえる。

3. 最適避難施設デザインモデル

(1) 最適避難計画モデルについて

本研究の目的は、各地域の実情に見合った避難方法や避難のための整備方針をあらかじめ定めることができる避難計画支援のための指標を構築することである。そのため、それぞれの地域の人がどこに向かって逃げるともっともはやく避難完了することができるのか、といった最適な避難方法を検討するモデルが必要であると考え、規範的アプローチによる最適避難計画モデル、最適避難施設整備モデルを構築した。^{2) 3) 6)} 最適な避難方法の検討では、現実問題に置き換えた際、地震発生の時刻によって人の居場所は変化しており家族のピックアップなど想定外の動きが生じることは十分に考えられる。そのため、避難者全員が構築する避難計画において想定する条件通りに行動することは難しい。さらに、地震被害によって利用可能な経路や避難場所が異なる部分について予

測不可能であり、避難計画に沿った避難が現実におこなわれるとは限らない。しかしながら、最適な避難方法としてのベンチマークを示すことにより、目標としてその最適解に近づく努力をすることは重要であり、住民たちの理解や承知を得るためのツールとなり得ることから、規範的アプローチにより避難計画を検討することには大きな意味があると考えられる。

最適避難施設デザインモデルでは、総避難時間最小化の最適解による避難完了時間を用い、任意の時間以内に全員が避難を完了することを制約条件とした避難施設に関する総投資コスト最小化をおこなっている。総避難時間最小化を目的とする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。

(2) 歩車混合型最適避難計画モデル²⁾

ここではまず、最適避難施設デザインモデルの制約条件となる避難完了時間を求めるための総避難時間最小化問題について述べる。時空間拡張ネットワーク (STEN)⁸⁾ 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。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。そのため、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、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。以下に、Exit Flow最小化問題を目的関数とした定式化を示す。

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

subject to

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

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

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

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

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

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

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

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

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/dt)
- s^p** : 歩行者のリンク交通容量 (人/dt)
- 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、出発地にい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の避難者数に等しいことを示す。なお、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 ($=\gamma$) 乗車することも想定している。

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けるフロー保存を考える。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考える。

d) 避難所における容量制約

前述の通り、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-2 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、これら全てのリンクに対して、(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、(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が構築できた。

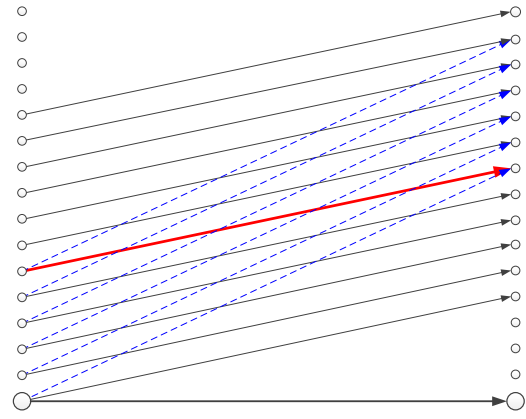


図-2 自動車リンクと歩行者リンクの相関

(3) 最適施設整備デザインモデルへの拡張³⁾

前項で定式化した歩車混合型最適避難計画モデルによって得られる最適解を制約条件とし、避難施設に関する総整備費用最小化問題を持つ最適施設整備デザインモデルへの拡張をおこなった。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なあげられるが、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最適避難施設デザインモデルとする。

まず、前項で示す歩車混合型最適避難計画モデル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

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

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

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

ラグランジュの緩和問題は次のように書ける。

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

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 $\mathbf{x}$ で微分すると、 $\nabla_{\mathbf{x}} L = \mathbf{f} - \mathbf{A}_{eq}^T \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}$ をえる。これより、

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

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

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。

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

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

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

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。

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

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

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

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

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

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

a) 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 η_1, η_2 を導入する。このとき、式 (21) と以下の式は等価である。

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

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

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、 $\mathbf{f} - \mathbf{A}_{eq}^T\boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}^T\boldsymbol{\lambda}$ 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。

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

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

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

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

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

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

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

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

b) 最適施設整備デザインモデルの構築

以上の知見を用い、歩車混合型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、避難施設整備のための総整備費用最小化をおこなう最適施設整備デザインモデルの構築を試みる。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。

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

subject to

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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。下位問題に解が得られるように上位問題において $\mathbf{y}$ 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。なお、本モデルを用い仮想ネットワークにおいて試算した結果、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、建設コスト、避難所容量等の条件に応じた最適施設整備案が得られることが確認されている³⁾。

4. 実ネットワークにおける最適避難施設デザインモデルの適用

本章では、5.において定式化した最適施設整備デザインモデルを、宮城県亶理郡亶理町の実ネットワークに適用する。最適施設整備デザインモデルは、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、避難施設整備費用最小化をもつネットワークデザイン問題となっているため、未知変数の数が飛躍的に増加する。さらに、時系列の数だけノード、リンク数が増大する STEN の性質も考慮し、ネットワークサイズを小さくするため、より多くの道路を集約した簡易的なネットワークを用いる。また、近隣のリンクの集約時には、リンク容量を足し合わせることで、実際の道路容量を損なわないように配慮した。避難者は夜間人口を想定し、東日本大震災時の津波浸水域内に居住する人口 (7,325人)⁹⁾ をノードに割り付けて設定した。以上の作業により、リンク数は往復合わせて 30、ノード数 12、そのうち、避難所ノード 7、出発地ノード 9 の図-3 に示すネットワークを使用して試算した。浸水域外への避難の扱いとして、東日本大震災時の津波浸水域をもとに、浸水域外に到達した時点で安全とみなすこととし、ネットワーク上で浸水域外に到達する点を安全地帯到達地点とし、3カ所の安全地帯到達地点 (図-3 中の赤星) を設けた。なお、各赤星から流出し仮想の安全地帯に向かうリンクに対し容量制約を課すことで、車両の集中による遅れを表現している。そのほか、浸水域内の緊急一時避難場所は、亶理町津波避難計画より 5カ所の緊急一時避難所を図-3 中の青星のように最も距離に近いノードに割り当てた。なお、浸水域内の避難所は徒歩避難者の利用

のみを想定している。また、避難所位置に到達後、安全な高さまでの到達に要する時間や高速道路階段の利用等を考慮し、階段容量^{10,11)}を設けることで、避難場所に到達してから避難を完了するまでの所要時間を表現する。最適施設整備デザインモデルは避難所の増設、新設を考えるモデルであるが、ここでは既存の緊急一時避難場所は全て増設可能とし、その他のノードすべてにおいて避難所の新設は可能であると仮定した。

最適施設整備デザインモデルは、避難所をそれぞれ1単位増設するためのコストと増設容量の積の総和を最小化することとする。1単位増設するためのコストとして、全国の津波避難タワー施工例¹²⁾より、ステージ高8.0m, 100人用、3本柱用の868,000円/m²の津波避難タワーを想定し、津波避難タワー利用者1人あたり434,000円の費用がかかるものとする。さらに、避難所の設置位置による地価を考慮した建設費設定のため、国土交通省地価公示・都道府県地価調査結果に記される、避難所5カ所の地価調査結果から、各避難所の総整備費を定めた。また、本章で示す結果はすべて、亘理町津波避難計画⁵⁾に記される避難可能時間45分以内に避難者全員が避難を完了することを制約条件とし、車避難をおこなう際の平均乗車人数は2人とする。以下に試算結果を示す。

(1) 既存避難所の利用

まず、図-3に示した既存避難所3カ所の安全地帯到達地点、5カ所の浸水域内避難所が使用可能であり、浸水域内避難所は徒歩避難者の利用のみに限定したケースでは、ノード8の位置に67人が避難可能な容量を持つ避難所を新設することが最適な施設整備結果となった。整備前の条件における歩車混合型最適避難計画モデルによって得られた避難完了時間は54分であり、避難所容量増強によって9分の避難完了時間の短縮がおこなわれ、避難可能時間45分を達成している。このときの各ノードの発生交通量、各避難所の既存容量、到達交通量は図-4に示すとおりであり、矢印で示す値は各ノードに設置された高速道路階段へ到達した避難者の数である。ノード5, 6, 9はその場に垂直避難をおこなっており、ノード8では45分以内に安全地帯到達地点へ到達不可能な避難者数67人分の拡張がおこなわれている。ノード11に関しては、その場での避難所容量は2,009人分確保されているものの、発生交通量が2,155人と非常に多いため、人口が少ない地域であり発生交通量の少ないノード10まで徒歩で避難している。人口密集地では十分に起こり得る現象であると考えられるが、沿岸部方向に徒歩で移動するのはリスクが伴う行動であり、実際の津波災害時の心理的状況の中、実現可能な行動といえるかという点については、慎重な議論が必要である。各出発地点における、避難時の交通モード選択状況はそれぞれ図-5

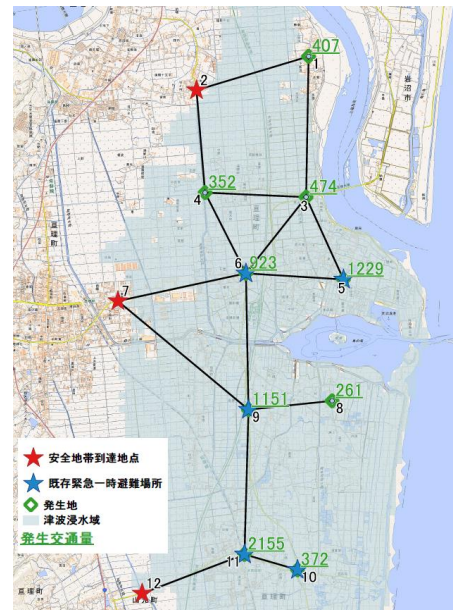


図-3 試算に用いたネットワーク図（下線の値は発生交通量）

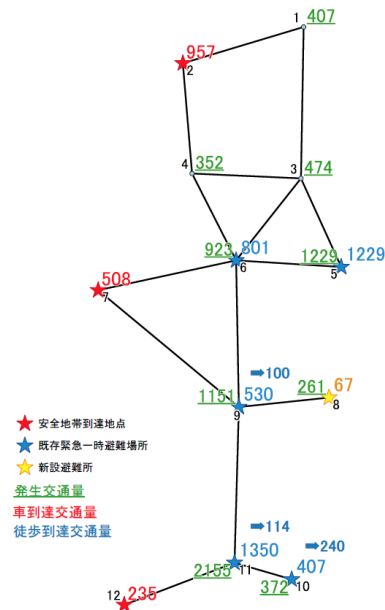


図-4 発生交通量と到達交通量

のような割合となっている。亘理町北部に位置するノード1, 3, 4は全ての避難者が車避難によって安全地帯到達地点に避難している。中心部では徒歩避難者と車避難者の両モードが混在し、沿岸部に位置するノード5, 10における避難者はすべて徒歩避難による垂直避難をしていることがわかる。沿岸部は安全地帯到達地点までの距離が長く、避難可能時間45分以内に到達することが困難なことから垂直避難がおこなわれていると考えられる。

(2) 要援護者の考慮

津波災害時には、早急に安全な場所に避難することが求められるが、支援を必要とする人は各地域に一定数存

在し、それらの避難者を考慮して事前避難計画を検討する必要がある。ここでは、要配慮者を75歳以上の後期高齢者とし、後期高齢者は車避難が必要であり、優先的に車避難によって安全地帯に到達可能とするという条件のもと、すべての避難者が避難可能時間45分以内に避難完了できるよう避難所容量の増強をおこなうこととした。亘理町における地区別後期高齢者率¹²⁾から各地区の後期高齢者数を決定し、優先的に車を利用して避難する避難者とする。後期高齢者数は全体の13.1%にあたる959人である。ここでは後期高齢者すべてが車によって避難することとしているが、後期高齢者のなかにも自力で避難可能な避難者は存在し、かつ、障害者や乳児など後期高齢者以外にも支援を必要とする避難者は存在する。そのため、本来ならば適用時にそれぞれの地域において調査し、実際に車避難が必要な避難者数を明らかにする必要がある。

要援護者を考慮したケースの求解手順を示す。まず、単一モード最適避難計画モデルを用い、要配慮者のみを車避難によって優先的に安全地帯到達地点へ避難させる。その結果を用いて、要配慮者が利用した分のリンク容量を差し引いた条件のもと、最適施設整備デザインモデルによって一般の避難者の45分以内の避難完了のための総整備費用最小化問題を解く。これにより、要配慮者を優先的に車によって避難させたうえで、避難可能時間45分以内の避難完了を達成するための効率的な避難所容量増強の解を得ることができる。

図-3に示す対象ネットワークと既存避難所の利用ケースと同一の条件において試算を行った結果、優先的に車避難によって安全地帯到達地点へ向かう要配慮者は、単一モードでのリンクベース最適避難計画モデルによって得られる解より、36分で避難を完了した。その後、一般の避難者が車と徒歩の2つの交通手段で避難した結果の避難完了時間が69分であり、そこから避難所容量を927人分増強することにより避難完了時間を24分短縮し、避難可能時間45分を達成している。要配慮者を除く一般の避難者は6,365人のうち99.6%の6,324人が徒歩避難、残りの23人のみが車避難であり、ほとんどの避難者が徒歩避難という結果になった。このように、徒歩避難困難者を考慮した上での最適避難を検討することも本モデルで可能であることが確認できた。

5. 詳細ネットワークにおける最適施設整備デザインモデルの検証

本章では、前章における最適施設整備デザインモデルの実ネットワークへの適用によって得られた最適な避難所容量増強策を最適避難計画モデルのための詳細なネッ

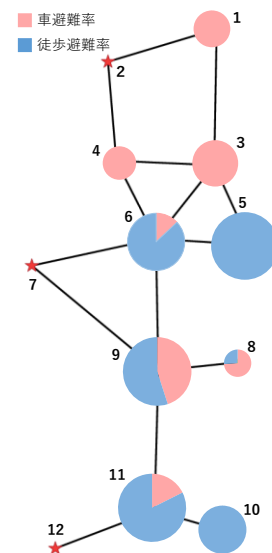


図-5 各出発地の交通モード割合

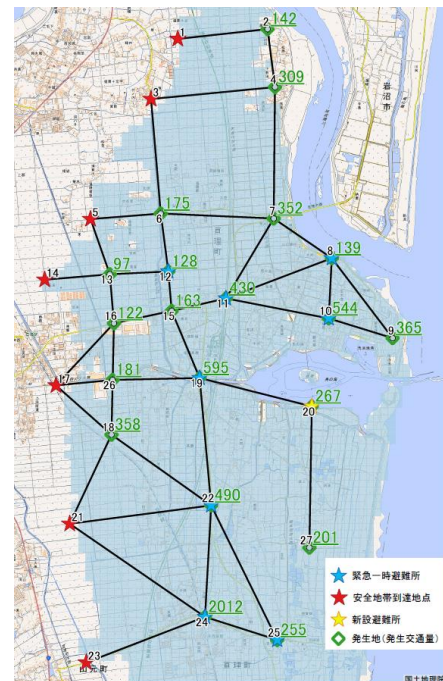


図-6 詳細ネットワーク（下線の値は発生交通量）

トワークに反映する。その上で、再度歩車混合型最適避難計画モデルを解くことで、効率的な避難施設整備による避難状況の変化を確認する。さらに、得られた結果から考察した情報をもとに、行政区分レベルの地区において、本研究で提案したモデルを用いて得られた結果がどのように津波避難に寄与できるかを検証する。

(1) 詳細ネットワークでの検証

対象とするネットワークは、図-6に示すようにノード数 27（安全地帯到達地点 7カ所、発生地 20カ所、緊急一時避難場所 8カ所、新設避難場所 1カ所）、リンク数は往復合わせて 78 で構成される。避難所、リンクの集約に関しては、前章と同様であり、計算単位時間は 2

分、車避難を行う際の平均乗車人数は2人とする。最適施設整備デザインモデルによる最適整備案（ノード 20 にて 67 人分の避難所新設）を反映させたときの避難状況から、最適整備案適用時のより細かな避難の傾向をみる。

a) 出発地ごとの交通モード

まず、出発地ごとの交通モード選択割合は図-7 のようになった。おおまかに、車による避難所が近い内陸部が車避難、より遠い沿岸部が徒歩避難中心という傾向がみられる。ノード 24 のみ、水平避難と垂直避難が混合しているが、その他は車避難もしくは徒歩での水平避難、車避難もしくは垂直避難という内訳になっていた。67 人分の避難所新設を反映させたノード 20 では、67 人の徒歩避難者以外の避難者は全て車避難によって安全地帯へ向かっている。したがって、新たな避難所の設置により、詳細ネットワーク上でのノード 20 の地域から車避難によって安全地帯到達地点へ避難していた避難者が徒歩による垂直避難が可能となったため、避難時間の短縮効果があらわれたといえる。

b) 最適な避難開始時間

歩車混合型最適避難計画モデルは、最後に避難を完了する人の避難完了時間を最小とする問題であるため、一部の避難者は避難開始後も出発地で待機する必要性が生じる。ここでは、それぞれの時間帯に避難を開始する避難者数を避難需要人数とし、出発地や交通モードによる避難需要人数の分布変化をみる。図-8、図-9 に示す避難開始からの経過時間における各ノードでの徒歩避難者、自動車避難者の避難需要人数の推移より、避難開始直後から徒歩避難者の方が早い時間帯に多くの避難者が避難を開始していることがわかる。これには、徒歩避難の所要時間が長いことも影響していると考えられる。徒歩避難では、最も遅く出発する地区はノード 19、24 であり、30 分の時点で避難需要人数がすべて出発を完了する。車避難においてはノード 24 が最も遅く、40 分の時点ですべての避難需要人数が捌かれる。車避難、徒歩避難のどちらにおいても最も待機時間が長いノード（車避難ではノード 24、徒歩避難ではノード 19、24）のみ突出していることから、最適な状態においても、出発地区によって非常に大きな差が生じることがわかった。いいかえると、互理町全体での最適な避難を実現するためには、それぞれの地区の避難者が最適出発時刻を認識し、待機することが必要であるケースがあるといえる。しかし、実際に地震が発生し津波から逃れるために避難を開始する際、避難者自身が意思決定をおこない、出発地で待機するためには、情報共有、認識の徹底など事前準備が必要不可欠である。そのため、もし全員が一斉に避難を開始した場合に起こりうる状態を視覚的に認識できるシミュレーション等を用いて、避難者が理解しやすいように

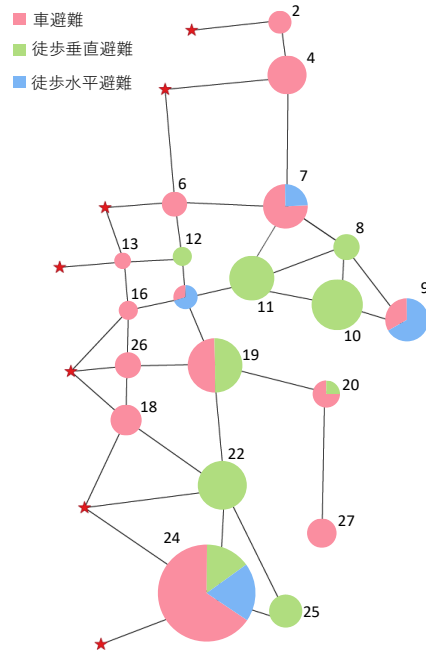


図-7 各出発地の交通モード割合（詳細）

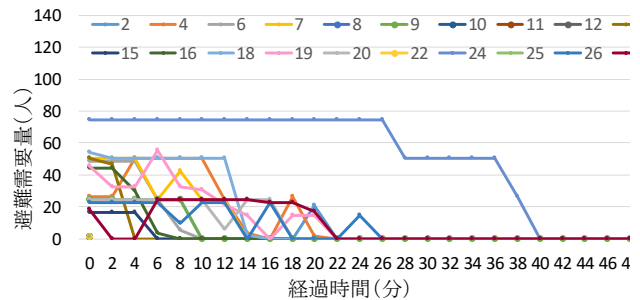


図-8 経過時間ごとの避難需要人数の推移（車避難）

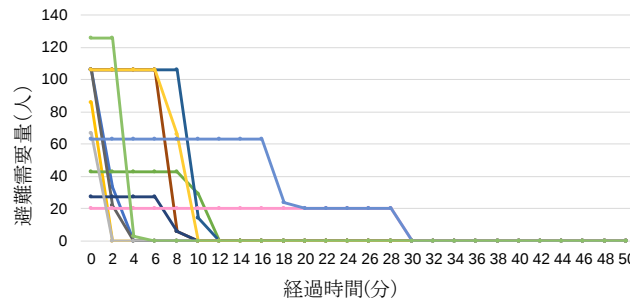


図-9 経過時間ごとの避難需要人数の推移（徒歩避難）

工夫することは、ここで示す最適な避難の方法を提案することともに重要であると考え。

(2) 荒浜地区に着目した検証

最後に、詳細ネットワークにて検討した結果をもとに地区ごとの避難方法が提案可能か検証する。ここでは、互理町沿岸部に位置する荒浜地区に着目し、どのような避難方法が提案され、避難行動選択が考えられるか行政区分単位で考察する。ここで示す行政区分における結果は、各ノードのボロノイ分割によるノードエリアと行政区分の面積比率を用いて、ノードエリアが持つ各ノード

単位で算出される最適解の結果を行政区分に割り当てたものである。避難手段では、図-10の地区別車避難選択率より、荒浜字蒲沼のみが車避難6割以上となっているものの、海に面する部分の車避難割合は3割以下であり、荒浜地区では徒歩による避難が中心となった。また、徒歩避難者が存在する地区での水平、垂直避難の割合は、荒浜字隈崎、荒浜字築港通りは垂直避難の割合が低く、水平避難が中心となった。これは、沿岸部ゆえに垂直避難可能な施設が少なく徒歩による水平避難が最適なためと考えられる。最適な避難開始時間に関する検討結果として、表-1に各行政区分別の各モードの平均待機時間、最長待機時間を示す。自動車による避難、徒歩による避難ともに、リンク容量制約によって混雑が生じることを避けるため、出発地での待機が求められる地区が存在する。ただし、徒歩避難における垂直避難に関しては、すでに避難所に到達しているものの、避難所内での階段容量制約によって避難完了までに時間を要するため、待機時間としてあらわれている。各地区の位置関係と待機時間の関係をみると図-10の行政区分図より、荒浜字蒲沼地区と荒浜字西木倉地区、荒浜字築港通り地区と荒浜字御狩屋（東）地区はそれぞれ隣り合っているにもかかわらず、待機時間の傾向に差が生じている。ここでは1時間帯2分として計算しているため、生じている差は1~2時間帯程度であるが、近隣の地区においても、どの時間帯に出発すべきかという点で違いがあることがわかった。そのため、詳細な地区単位のレベルにおいて、どの手段でどの時間帯に避難を開始するか認識する必要があるといえる。同地区では、荒浜中学校、荒浜小学校、西木倉住宅、巨理スマートICの4カ所の緊急一時避難場所が徒歩避難による避難先としてあげられる。最適避難計画モデルによって得られるモード別リンク交通量、出発地での交通モード選択状況から、同地区の最適な避難行動として、図-11の動きを提案する。図中の北方向、西方向に進む矢印は車避難の動きを示しており、それぞれノード2、4、6を経由して安全地帯到達ノードまで車によって避難する避難者の避難行動である。内部の各一時避難場所への動きは徒歩避難の動きを示す。ノードエリアごとの水平避難割合、垂直避難割合から、どこの住民がどこの避難場所を目指すべきかという一案を提示している。最適避難計画モデルでは、最適解におけるすべての経路を特定することは不可能であるため、発生交通量、リンク交通量、出発地での交通モード選択、地区内の避難施設状況等の情報から、提案するひとつの避難の形に過ぎない。しかし、非常に小規模な地区単位における最適な避難行動を示すことが可能であることは、避難者の津波災害時の避難に対する事前準備や実際の避難時の行動に有用な情報であると考えられる。

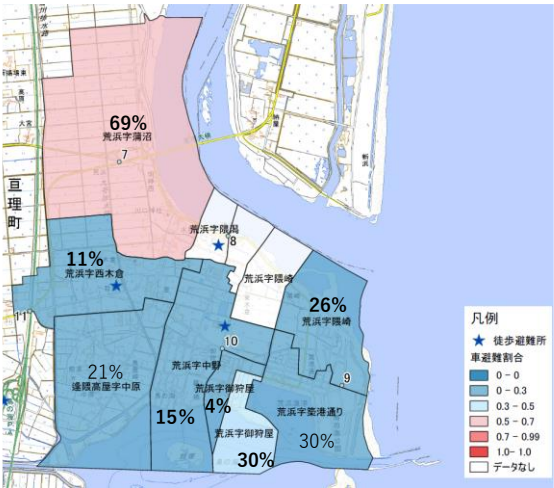


図-10 着目した地区での車避難割合



図-11 避難方法の提案
(赤線：ノードエリア，黒線：行政区分)

表-1 各地区における出発待機時間の平均値，最大値

行政区分名	人口	自動車避難		徒歩避難	
		平均待機時間(分)	最長待機時間(分)	平均待機時間(分)	最長待機時間(分)
荒浜字蒲沼	345	4.07	12	0.05	6
荒浜字西木倉	273	0.75	12	2.26	10
荒浜字隈崎	154	3.09	8	4.04	10
荒浜字中野	373	0	0	2.96	10
逢隈高屋字中原	384	0	0	2.32	10
荒浜字築港通り	292	3.34	8	4.61	10
荒浜字御狩屋(西)	100	0	0	3.92	10
荒浜字御狩屋(東)	21	0.39	8	2.31	10

6. おわりに

本研究では、津波災害時の避難を対象とし、先行研究によって構築された最適施設デザインモデルを宮城県巨理郡巨理町の実ネットワークに適用し試算することで、本モデルが人口分布や津波到達時間、避難施設状況等の実情に合わせた施設整備の検討に活用できることが確認

できた。また、最適施設整備デザインモデルによって得られる最適施設整備案を適応した際の避難状況の把握として、どこにどの手段でいつ避難することが地域全体として最適なのかを示す最適避難計画モデルを用いることで、小規模な地区単位における最適な避難行動を提案することが可能となり、避難者の津波災害時の避難に対する事前準備や実際の避難時の行動に有用といえる。

最後に、今後の課題を述べる。ここで示す最適な避難を実現するには、避難計画の事前理解、周知が必要不可欠である。そのため、避難計画と乖離した行動をする避難者が現れた場合に生じる状況をシミュレーション等によって視覚的に示す必要がある。また、行政区分単位の地区での最適な避難行動の一案に関して、これらの提案をより現実に合わせてものとするためには、実際の街に出向き、細かな現状の把握、住民との協議、提案と現状の照らし合わせ等が必要不可欠である。

参考文献

- 1) 中日新聞「半数以上が車で避難」, 2014.2.3.
- 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, pp.2167-2174, 2016.
- 3) 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, pp.421-428, 2016.
- 4) 宮城県: 津波避難のための施設整備指針, 2012.3.
- 5) 亘理町: 亘理町津波避難計画, 2014年2月
- 6) 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, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 72 (5), pp.683-694, 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) Bell, M.G.H. and Iida, Y.: "1.11 Time Dependency", In Transportation Network Analysis, Wiley, pp.15, 1997.
- 9) 亘理町, 行政区別年齢別集計表, 2013.5
- 10) 建築基準法施行令 第23条 階段及びその踊場の幅並びに階段のけあげ及び踏み面の寸法
- 11) 奈良松範, 大島泰伸, 渡部学, 避難時の群集歩行速度について - 階段における歩行-, 日本火災学会論文集 vol.45, No.1+2, pp.11-17, 1996
- 12) 建設総合ポータルサイトけんせつ Plaza 津波避難用タスカルタワー http://www.kensetsu-plaza.com/details/ci3382700_mi296940 (2016.12.20 閲覧)
- 13) 総務省統計局: 平成22年国勢調査

(2017.?? 受付)

Application of Optimal Tsunami Evacuation Facility Design Model onto Practical Network

Hiroe ANDO, Fumitaka KURAUCHI and Satoshi SUGIURA

The evacuation plan against Tsunami should be efficient depending on geographical conditions and the expected arrival time of the Tsunami. The previous study constructs 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. Using the proposed models, this paper applies the design model onto the practical network of Watari Town, Watari country, Miyagi Prefecture to verify the practical of the model, and sought for an optimal evacuation plan considering the conditions such as the population of each area, the arrival time of the tsunami, the situation of the evacuation facility.