

時空間拡張ネットワークによる 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

荒木 麻里¹・倉内 文孝²・杉浦 聡志³

¹岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail:kurauchi@gifu-u.ac.jp

³正会員 岐阜大学研究員 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail:sugi_s@gifu-u.ac.jp

本稿では、先行研究によって構築された、それぞれの地域の住民がどこに、どの経路を通過して避難すべきか、といった規範的な考え方に基づく最適な避難方法を検討するための数理計画モデルについて、実際の道路ネットワークを用いて計算を実施した結果を報告する。適用するモデルでは、避難時間の遅れを考慮するため、一般的な空間ネットワークを時間軸に拡張した時空間ネットワーク (STEN, Space-Time Extended Network) を活用している。また、ここでは、単一交通機関による避難を想定する。このモデルを、宮城県亘理郡亘理町の実ネットワークに適用し最適な避難方法を検討した結果、実際のネットワークにおいても十分実務に適用できる計算時間で計算可能であった。また、様々なケーススタディを通じ、最適津波避難計画モデルの実用性を確認した。

Key Words: Tsunami disaster, evacuation planning, space-time extended network, application

1. はじめに

これまで、津波避難の際は原則徒歩と定められていたが、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。その一方で、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、車避難は必ずしも早く避難できるとは限らない¹⁾。

東日本大震災の経験を踏まえ、内閣府では、徒歩避難を原則としつつもやむを得ない場合の車による避難が認められた²⁾。それに伴い、地域防災計画も地域条件に合わせて見直す必要がある。上記のように綿密な避難計画の策定が求められているのに対し、その具体的な計画手法についてはまだまだ研究途上であるといえる。たとえば、「車避難の限界」をどのように求めることができるのか、そしてその限界量を改善し、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なのか。このような課題に対し、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といえるだろう。

津波避難に関して、シミュレーションモデルの構築やシナリオ分析といった研究は多く見られる^{たとえば 3)4)5)}。これらは、避難時の状況を再現し、現象を理解するための演繹的アプローチとしては有効である。しかし、たとえばシミュレーションであれば、各個人が実際に避難した方向に避難するため、最終的に深刻な渋滞を発生させることもあり、最適な避難方向を選択できていないことも考えられる。したがって、本来各個人はどの方向に避難すべきであるのか、つまり規範的な考え方に基づく避難計画策定を検討することは大きな意味があると考えられる。規範的に設定した避難方法を目標として参照し、演繹的アプローチや住民の避難の事前準備によって最適解に近づける努力をすることが重要になる。

本稿では以上の背景を踏まえて構築された倉内⁶⁾の津波最適避難計画モデルを用い、宮城県亘理町を対象として実際のネットワークに適用したケーススタディを検討した結果について述べる。

2. 最適避難計画モデルの構築

本章では、倉内⁹⁾の時空間拡張ネットワーク（STEN, Space-Time Extended Network）⁷⁾を活用することで時間軸を考慮した最適避難計画モデルの定式化について概説する。

津波最適避難計画モデルでは目的関数をすべての避難者の避難が完了する時刻の最小化として、それぞれの地域の住民がどこに、どの経路を通して避難すべきかを制御変数として最適解を求める。なお、本稿では単一交通機関での避難を想定する。求解の手順は以下の通りとなる。まず、各リンクの所要時間 t_a は既知であり、定数であるとしよう。そして、利用しうる全ての経路があらかじめわかっていることを仮定する。このとき、避難時間最小化のためには、できる限り所要時間の長い経路を使わず、なおかつ全ての避難者の移動を保証すればよいことがわかる。最適な避難経路を求めるには、今わかっている経路集合から最長の時間となる経路を順に削除していき、全員がぎりぎり避難可能となる経路集合を抽出すればよい。ここで「全員が避難可能かどうかを吟味」する方法としては、与えられた経路集合を用いて各リンクの容量を超えないことを制約条件として避難時間の総和を最少化する問題を定義し、この問題に解があるかどうかを確認すればよい。

(1) 経路集合の生成（列生成法）

本研究で提案するモデルは、利用し得る経路が既知であることを前提とする。本研究では、以下に示す列生成法⁹⁾を用いて経路集合を生成する。これは、利用者均衡配分の際に、最短経路探索とネットワーククロードイングを繰り返す中で、新たに見つかった経路を順次経路集合に付け加えていく方法である。なお、本モデルではリンク所要時間を定数として取り扱うため、ネットワーククロードイングによって新たな経路が発見されることはない。ただし、この方法は全てのODペアに個別に実施することにする。これにより多くの経路を見つけることが可能である。以下に計算手順を示す。

- Step0 ゼロフロー時を想定し、すべてのリンクを利用可能であるとする。
- Step1 最短経路探索を実施し、見つかった経路を経路集合に加える。このときに最短経路が見つからない（＝最短経路の所要時間が無限大）の場合には、今までで得られた経路群を経路集合とし、列生成を終了する。
- Step2 得られた経路集合を用い、以下のネットワーク容量最大化問題を解く。

$$\begin{aligned} & \max_{q_w, f_w} q_w \\ & \text{Subject to} \\ & \sum_{k \in K_w} \phi_{ak} f_k \leq c_a \quad \forall a \in A \\ & \sum_{k \in K_w} f_k = q_w \\ & f_w \geq 0, \quad \forall k \in K_w \end{aligned}$$

- Step3 上記の最適化問題の解において、リンク交通量がリンク交通容量と一致するリンクを見つけ、そのリンクの所要時間を無限大とし、1.に戻る。

ただし、

- q_w : ODペア w のネットワーク容量
- K_w : ODペア w の経路の集合
- ϕ_{ak} : リンク-パス接続行列
- f_k : 経路交通量
- c_a : リンク容量
- A : リンク集合
- W : ODペアの集合

である。

(2) 最適避難計画モデルの定式化

最適避難計画モデルは、リンク容量付きの総走行時間最小化問題として定式化する。この問題を生成された経路集合で求め、その問題に解が存在する場合には、所定の経路集合で避難可能である。そのため、所要時間が最長の経路を経路集合から順次除去して最適化問題を解き、下記の問題に解が存在する中で最長経路所要時間が最小のものが最適解となる。そのアルゴリズムは次の通りである。

- Step1 列生成法で求められた経路集合について経路所要時間を求め、この値の長い順に並べ替える。
- Step2 得られた経路集合を用い、以下の総走行時間最小化問題を解く。

$$\begin{aligned} & \min_f \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \sum_{a \in A} \phi_{ak} t_a f_k \\ & \text{Subject to} \\ & \sum_{k \in K_w} \phi_{ak} f_k \leq c_a \quad \forall a \in A \\ & \sum_{k \in K_w} f_k = q_w \quad \forall w \in W \\ & f_w \geq 0, \quad \forall k \in K_w, w \in W \end{aligned}$$

- Step3 もし上記について解があるならば、改善の余地があるとし、現在の経路集合のうち最も所要時間がながい経路を削除し2.に戻る。もし解がない場合にはそのひとつ手前の繰り返しの解が最適解である。

ただし、

- t_a : リンク所要時間
- W : ODペアの集合

である。

(3) STENの構築

以上で定式化されたモデルによって避難完了時間の最小化を図ることができる。一方で、避難計画においては時間軸を無視することが現実的でない。したがって、最適避難計画モデルは動的なものである必要がある。定式化されたモデルでは容量を超える交通量をリンクには割り当てず、かつリンク所要時間を定数で与えることから、一般的な交通ネットワークを時間軸に拡張したSTENを活用する。時間帯に拡張したネットワークを用いることで、同一経路を移動するものを別の経路として定義することができる。

3. 実ネットワークへの適用

(1) 対象地域

対象地域は宮城県亶理郡亶理町とした。亶理町は、太平洋に面し海岸部は低平地が続いており、東側の海岸部から西側の内陸部まで約5kmの距離がある。周辺に高台もないため、徒歩での避難が困難な地域もある。東日本大震災では、最大震度6弱を観測し大津波に襲われた。図-1の津波浸水想定区域及び津波浸水実績のとおりに、町の面積の半分である3,493haが浸水し、最大浸水深は約7.3mとなった⁹⁾。亶理町は、地域の特性や震災の経験を踏まえ、車避難も考慮した「津波避難計画」¹⁰⁾を策定した。

(2) 試算に使用したネットワーク

STENを用いて亶理町のネットワークにおいて試算する。STENによりネットワークを拡張するため、ノード数、リンク数が飛躍的に増加することを考慮し、実際のネットワークから道路を集約したネットワークを作成した。このとき、近隣のリンクを集約したところは、リンク容量を足し合わせることで、実際の道路の容量を損なわないように配慮した。また、高速道路は災害時に避難路として使用しないものとし、ネットワークから除外した。避難者は地域に居住する人口をノードに割り付けて設定した。すなわち、本稿の避難計画は夜間人口を想定している。以上の作業により、リンク数は往復路合わせて120、ノード数36、そのうち避難所ノードは12、出発地ノードは15の図-2に示すネットワークを作成した。ここで、避難所の容量は無限大を仮定する。これは、各地域の避難者が最も避難時間が短くなるような避難所を選択するためのものである。すなわち、各避難者がどの方向に逃げればよいかを議論するための措置である。実務への適用においては避難所の駐車場、および施設の容量を考慮する必要がある。

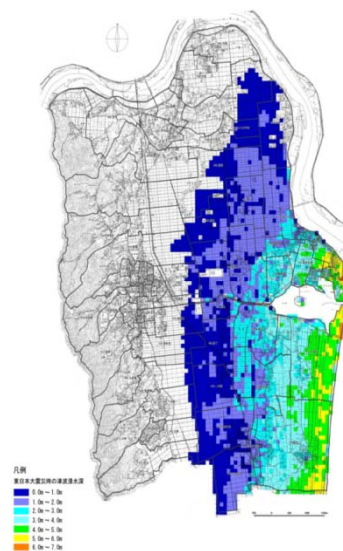


図-1 東日本大震災による津波浸水実績¹⁰⁾

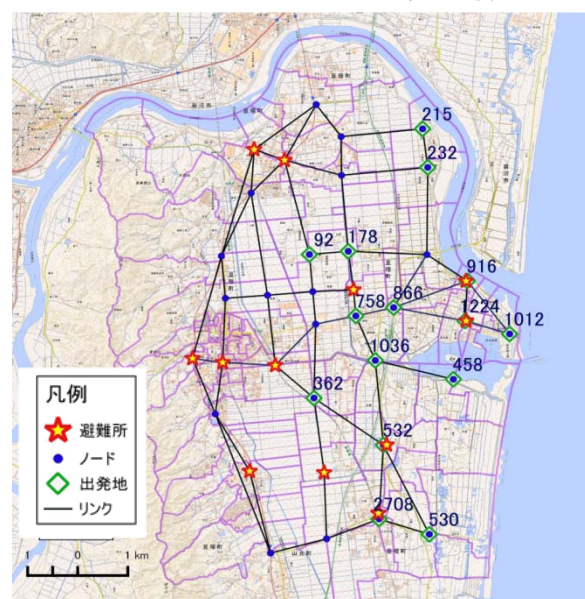


図-2 試算ネットワーク(数値は避難人数)

(3) 結果と考察

a) 基本ケース

基本ケースとして、浸水区域外の避難所(図-3中の赤い星)のみを使用する場合について計算を行った。その結果、避難完了時間は151分となった。図-4に示すように避難開始から120分が経過したときでも広い範囲で混雑が見られ、特に東から西へ向かうリンクで大きな混雑が見られた。これは、避難所が西側であるため、東側に居住する避難者が東西方向のリンクに集中し、大きな混雑が生じたことが理由として考えられる。なお、避難所2, 23, 24, 30は利用されておらず、避難所容量制約を加えれば、さらに避難完了時間が大きくなることが予想される。したがって、東西方向のリンクの容量を増やす、コントラフローにする、新たな避難所を設けるなどの混雑緩和のための解決策が必要である。

b) 乗車率を変化させたケース

リンク混雑を緩和するため、ここでは1台につき2人乗車する場合について検討する。この試算ケースは乗車人数以外の設定を、基本ケースと同じとする。その結果は図-5に示すように、避難完了時間は79分となった。

図-5と基本ケースを比較すると避難完了時間が短縮されたが、津波到達時間が1時間と予想されている¹⁰ことを踏まえれば、対策としては不十分である。また、図-6に示すように1台当たりの乗車人数を3.0人としても、避難に55分かかるため、乗車人数以外の対策も検討が必要である。たとえば、特に混雑するリンクの容量を増やす、新しい道路を建設するような対策が考えられる。

c) 避難完了時間短縮のための検討

ここでは、乗車人数を大きくする以外の解決策を適用した計算結果について示す。乗車人数は2.0として、ネットワーク条件等は基本ケースと同じである。

まず、リンクの容量を増加させる方法について検討する。図-7の1)で示す桃色破線上のリンクは基本ケースにおいて特に混雑していたリンクであり、このリンクの容量を2倍にした。その結果、避難完了時間は77分となり、基本ケースと比べ2分短縮された。つぎに図-7の2)で示す青色破線上のリンクを一方通行化(コントラフロー)したときについて計算した。その結果、避難完了時間は77分となり、リンク容量を2倍としたケースと同じ結果となった。図-7の3)に示すリンクを新設し、使用されていない避難所30に目的地を分散させる方法を検討した。その結果も避難完了時間は77分となった。最後に避難所を新しく作ることで、目的地を分散させる方法を検討した。ここでは、新しく避難所を作る位置を図-7のA、B、Cの3地点について検討した。その結果はいずれも79分となり、基本ケースと同じであった。これは、避難所に向かうリンク混雑が著しいため、新しい避難所を西側に設置しても効果が小さいことが原因であると考えられる。

本稿における検討では、大幅な時間短縮とはならなかったが、いくつかの対策を組み合わせることで効果が期待できる。また、それらの検討は本モデルを用いることで検討が可能であることが確認できた。

4. おわりに

本稿では、規範的な考え方に基づくSTENを用いた最適避難計画モデルを実ネットワークに適用した。避難所の増設やリンクの改良、道路新設などのケースで試算した結果を示した。本モデルは最適な避難計画を作成するだけでなく、現状の道路ネットワークでの避難完了時間が目標時間内にならない場合において、避難が完了でき

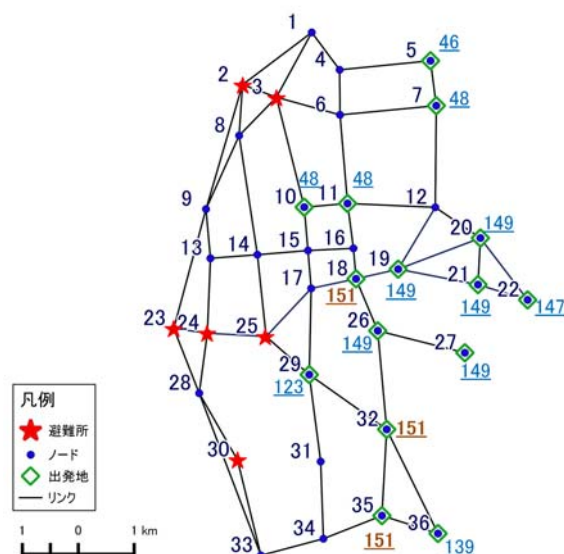


図-3 避難完了時間（基本ケース）



図-4 避難開始120分後のリンク混雑度（基本ケース）

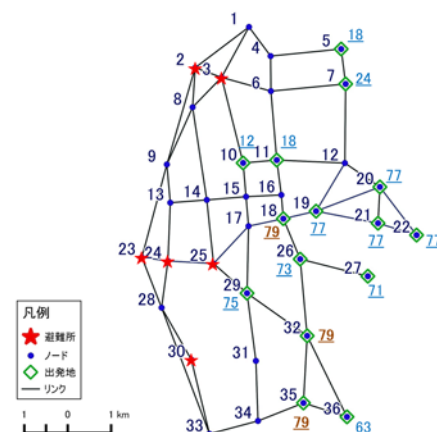


図-5 乗車率を2.0としたときの避難完了時間

るような時間短縮のための対策を検討することが可能であることを確認できた。一方で、今回のケーススタディでは避難完了時間を最小化可能な効率的な対策を見つけることができなかった。また、全ての避難が車により行われるという仮定も非現実的である。今後徒歩と車による最適な混合避難も含め、検討を進めていく必要があると考える。

謝辞：亘理町における試行計算において、亘理町役場、東北大学国際災害科学研究所奥村誠教授、金進英助教（現（株）交通システム研究所研究員）にはデータの借用などにおいて多大なる協力を賜った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 「第 86 回津波どう逃げる？中」，中日新聞，2014 年 2 月 3 日
- 2) 中央防災会議：防災基本計画，2014 年 1 月
- 3) 金進英，片岡侑美子，奥村誠：交通シミュレーションを用いた自治体の避難計画の評価，土木計画学研究，Vol.49，CD-ROM，2014
- 4) 清田裕太郎，岩倉成志，野中康弘：東日本大震災時の都区内道路のグリッドロック現象に関する基礎的考察，土木計画学研究，Vol.47，CD-ROM，2013
- 5) 長尾文平，嶋本寛，中村俊之，宇野伸宏，Jan-Dirk Schmöcker，山崎浩気：自動車利用と避難開始時間帯を考慮した津波避難計画の評価，土木計画学研究，Vol.49，CD-ROM，2014
- 6) 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，～
- 7) Bell, M.G.H. and Iida, Y.: “1.11 Time Dependency”, In Transportation Network Analysis, Wiley, 15, 1997.
- 8) Bell, M.G.H. and Iida, Y.: “2.8 Path Enumeration and

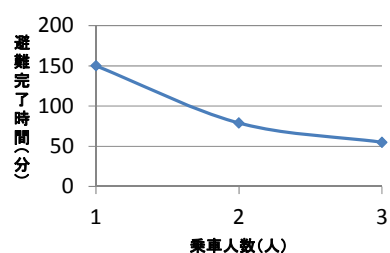


図-6 乗車人数と避難完了時間の関係

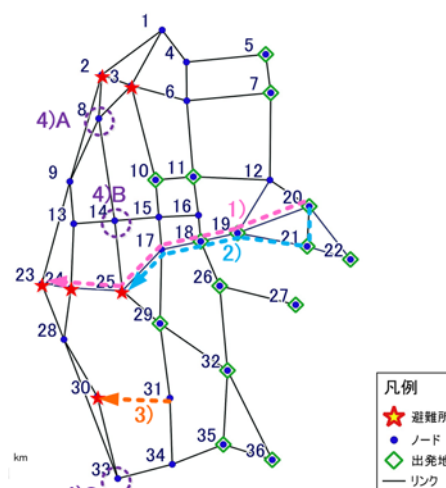


図-7 対策の検討

Column Generation”, In Transportation Network Analysis, Wiley, 29, 1997.

- 9) 亘理町防災会議：亘理町地域防災計画第 2 編津波対策編，2014 年 2 月
- 10) 亘理町：亘理町津波避難計画，2014 年 2 月

(2015.04.23 受付)

Implementation of Optimal Tsunami Evacuation Planning Model Using STEN (Space-Time Extended Network) on Practical Network : Study Case in Watari Town, Miyagi

Mari ARAKI, Fumitaka KURAUCHI and Satoshi SUGIURA

This paper reports the results of implementing the formerly developed mathematical model minimizing the time to finish the evacuation based on the prescriptive assumptions onto the real road network. STEN (Space-Time Extended Network) has been applied to evaluate the delay in evacuation time due to capacity constraints. We applied the model onto the practical network of Watari Town, Watari County, Miyagi Prefecture, and sought for an optimal evacuation plan. The optimum solution can be obtained within a reasonable computational time, and the practicability of the proposed optimal evacuation planning model is confirmed through the various case studies.