

STEN (Space-Time Extended Network) を用いた 最適津波避難計画モデルの構築

倉内 文孝¹

¹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: kurauch@gifu-u.ac.jp

今後も繰り返されるであろう津波災害に対し、あらかじめ避難計画を策定することが重要である。本稿においては、最適な避難方法を検討するためのツールとして、時空間ネットワーク (STEN, Space-Time Expanded Network) の概念を用いた最適避難計画モデルの構築を行う。ここでは、単一交通機関による避難を想定し、避難完了時刻の最小化を図ることを目的関数としたモデル化を行う。まず各リンクの所要時間を一定とした上でSTENを構築し、STEN上であらかじめ利用可能性のある経路を探索したうえで、経路群の中で避難完了時刻が最も小さくなる避難方法を求める。仮想ネットワークにおいて提案したモデルを適用し、モデルは想定したとおりの挙動を示すことを確認した。

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

1. はじめに

来るべき南海トラフ巨大地震にそなえ、避難計画の早急な策定の必要性が叫ばれている。それに呼応し、土木計画学の分野では、避難状況の再現や避難計画の策定のためのシミュレーションモデルの構築およびシナリオ分析が多く見られる^{たとえば1,2,3)}。特に最近では、避難者の意思決定過程を調査し、より現実的な意思決定を内包したシミュレーションモデルの開発などが見られる。これらシミュレーションモデルの構築は、現象を理解するための演繹的アプローチとして有効であることはいまでもない。しかしながら、その一方でどのような避難の方法をとればもっとも早く避難を完了することができるのか、それを実現するためにはそれぞれの地域の人がどこに向かって逃げるべきなのか、すなわち最適な避難方法を検討する規範的アプローチの試みは多くは見られない。

当然ながら、規範的アプローチに対しては、特に津波避難のような緊急時にはその誘導に従うこと、あるいはそのような誘導をすること自身が不可能であるため、現実的ではないというもっともな指摘がみられる。しかしながら、このような数理最適化アプローチにより最適な避難方法を検討し、その目標を参照しつつ演繹的アプローチによってよりその最適解に近づける努力をすることは重要であり、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。

以上のような背景をもとに、本研究においては、規範的アプローチを活用した最適避難計画モデルの構築を進める。本研究で構築をめざす最適避難計画策定モデルの特徴は以下の通りである。

1. 想定した津波被災シナリオに対し、避難完了時刻を最小化するような最適な避難方法を検討可能である。
2. STEN (Space-Time-Extended Network, 時空間拡張ネットワーク) の考え方を援用した動的なモデルである。
3. リンクには容量制約を課し、最大容量を超えない範囲で交通量を割り当てる。

なお、本来避難計画策定においては、徒歩での避難を前提とし、やむをえない場合には自動車での避難を認めている。したがって、避難計画を検討する際にはこれら2つの交通機関 (モード) 考慮する必要があるだろう。本稿においては、まだ混合モードに関する検討はできておらず、こちらは今後の課題として位置づけ、単一の交通機関、ここでは自動車のみでの避難を想定し、最適な避難計画を策定するモデルの構築を試みる。

2. 最適避難計画モデルの定式化

(1) 目的関数

本研究では、避難完了時刻の最小化を行いたい。そのためには、すべての人が避難完了するまでの所要時間のうち一番長いものが短くなるような避難方法を求める間

題として定式化する必要がある。そのために、本研究では次のような考え方を使う。

まず、各リンクの所要時間 t_a は既知でありなおかつ定数であるとしよう。そして、利用しうるすべての経路があらかじめわかっている、という強い仮定をおく。このとき、避難完了時刻の最小化を行うためには、できる限り所要時間の長い経路を使わず、なおかつすべての避難者の移動を保証すればよいことがわかる。これを求める方法として、今わかっている経路集合から、最長のものを順に削除していき、全員がぎりぎり避難可能である経路集合を求めればよい。なお、「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、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小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。

(2) 経路集合の生成方法 (列生成法)

次に、経路集合をどのように生成するかを検討する。経路集合を生成する方法として、列生成 (column generation) 法⁹⁾がある。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ローディングを繰り返すなかで、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、本研究においては、リンク所要時間を定数として取り扱うため、ネットワークローディングを行った結果新たな経路が発見されることはない。そのため、以下のようにネットワーク容量最大化問題を繰り返すことで、経路集合を求めることとする。ただし、この方法はすべてのODペアに対して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。なお、本研究では上記の方法を採用したが、その他複数経路の探索方法はいくつか提案されており、その中で適切なものを選択すればよい。

Step 0 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。

Step 1 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。

Step 2 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。

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

Step 3 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、

$$\begin{aligned} q_w & : \text{ODペア} w \text{のネットワーク容量} \\ \mathbf{K}_w & : \text{ODペア} w \text{の経路の集合} \\ \phi_{ak} & : \text{リンク} a \text{に経路} k \text{が使用するリンク} \\ f_k & : \text{経路} k \text{の交通量} \\ c_a & : \text{リンク} a \text{の容量} \\ \mathbf{A} & : \text{リンクの集合} \\ \mathbf{W} & : \text{ODペアの集合} \end{aligned}$$

である。

(3) 最適避難計画モデルの定式化

以上の議論を元に、避難完了時間を最小化する問題は、全避難者が避難できる中で、最長経路所要時間が最短のものを選択すればよいことになる。そのアルゴリズムは以下の通りである。

Step 1 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。

Step 2 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。

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

Step 3 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、

$$\begin{aligned} t_a & : \text{リンク} a \text{の所要時間} \\ \mathbf{W} & : \text{ODペアの集合} \end{aligned}$$

である。

なお、Step 3については順次経路を削除する方法を採用しているが、たとえば2分割法の考え方を用いてStep 2の総走行時間最小化問題が解を持つ最小の経路集合を求めてもよい。

3. STEN (Space-Time Extended Network)

(1) STENの概要

前章までの定式化において、避難完了時間の最小化を図ることができる。一方で、避難計画において時間軸を

無視することは現実的ではなく、したがって最適計画モデルは動的なものである必要がある。本研究では、容量を超える交通量を割り当てず、かつリンク所要時間を定数と取り扱うことから、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 (Space-Time-Extended-Network, STEN) ⁹⁾ を活用することとする。時間帯に拡張した3次元ネットワークに拡張することで、異なる時間帯に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可能である。STEN のイメージを図1に示す。図1では、出発地 (O) から目的地 (D) までを2つの経路 (Link 1&2, Link 3&4) で接続している。簡単のため、各リンクの交通容量は同じ値 c としよう。今、動的な取り扱いのための時間間隔を dt とおき、すべてのリンクの所要時間を dt の倍数で記述する。図1の例では、リンク 1~4 の所要時間はそれぞれ、 $2dt$, dt , $3dt$, $2dt$ である。また、現在計算対象としているのを6時間帯分とする。STEN では時間帯ごとにそれぞれのノードを作成し、さらに別時点の同一ノードは、隣接する時間帯のノード間で所要時間 dt のリンクを作成し接続する。このネットワークにおいては、2つの経路があるが、6時間帯目終了時までには目的地に到達できる経路は、6本という計算となる。つまり、経路1 (Link 1 & 2) を用いる場合については、所要時間が $3dt$ であり、なおかつ交通量としては、 $4c$ まで受け入れることができる。また、経路2 (Link 3 & 4) については所要時間が $5dt$ であり、 $2c$ まで受け入れることが可能である。このような STEN を活用することで、時間帯別の動的割り当て問題を経路選択問題に帰着することができる。つまり、OD 間の交通需要が c 以下であれば、所要時間が $3dt$ の経路のみを使えばよいいため、所要時間が $3dt$ となる。その後、交通需要の大きさに応じた避難完了時刻は表1のようになる。なお、各リンクの所要時間は dt の倍数となる必要がある。

(2) STENの生成

以下の条件における STEN の作成について検討する。

リンク数:	A
ノード数:	N
出発地数:	W
避難場所数:	E
時間間隔:	dt
対象時間帯数:	S
リンク所要時間:	t_a ($=dt$ の倍数)
リンク交通容量:	c_a (台/ dt)

ノード数

まず、すべてのノードに対応し、対象時間帯数に拡張したノード ($N \times (S+1)$ 個) が必要である。なお、時間帯数に対して計算開始時点 ($s=0$) が含まれるため、 $(S+1)$ を乗じている。次に、出発地については、時間帯 0 における当該ノードを指定すればよいいため、上記で作成した

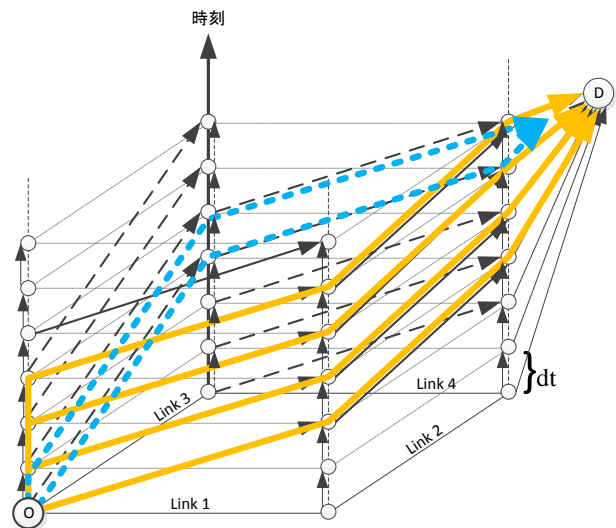


図1 STEN

表1 図1におけるOD需要ごとの避難完了時間の推移

交通需要量	避難完了時間
$0 \sim c$	$3dt$
$c \sim 2c$	$4dt$
$2c \sim 4c$	$5dt$
$4c \sim 6c$	$6dt$
$6c$ 以上	$6dt$ 以上 (解なし)

もので十分である。さらに、避難場所に関しては特に追加でノードを設定する必要はなく、最後に目的地である安全地帯については、一つに集約すればよい。したがって、STENにおけるノード数は、 $(N \times (S+1) + 1)$ となる。リンク数

STEN においては様々なリンクを準備する必要がある。まず、時間帯が異なる同一ノードについて接続する必要がある。図1中の鉛直方向のリンクがそれに該当する。これは、ノード数に時間帯数を乗じた数 ($=N \times S$) である。なお、このリンクの所要時間は dt である。次に、避難所から安全地帯への接続について、避難所に該当する STEN 上の E 個のノードすべてから安全地帯に向かって仮想リンクをはる。その個数は、 $E \times (S+1)$ となる。なお、これらのリンクの所要時間は 0 とすればよいだろう。ただし、もし避難所に容量がある場合、これらのリンクの交通量の総和が容量を超えないという制約条件を付加する必要がある。最後に、STEN 上の移動リンクについて説明する。いま、リンク a の所要時間が t_a ($=dt$ の t_a 倍) であるとする。このとき、対象時間帯に張るべきリンクの数は、 $S - t_a + 1$ となる。たとえば図1においては、 $S=6$, $t_1=2$ であり、張られるリンクの数は、 $S - t_1 + 1 = 6 - 2 + 1 = 5$ 本である。当然ながら、各リンクの所要時間は t_a となる。全リンクの個数は以下の通りである。

$$NS + (N + E)S + \sum_{a=1}^A (S - t_a + 1)$$

以上のような方針で STEN を生成し、2.で示した最適

化問題を解くことで最適な避難方法を検討することが可能である。

4. ケーススタディ

(1) 計算条件

本研究で提案した最適津波避難計画モデルの挙動を確認するために、図2に示した仮想ネットワークに対してモデルを適用した。想定としては、避難所がノード5にあり、そしてノード3, 9からは高台に避難することが可能としている。また、それ以外のノード1, 2, 4, 6, 7, 8を出発地として避難する車両が生じるものとする。リンク上に記載されている3つの数字は、左から（リンク番号，所要時間，時間交通容量）を示している。たとえば、リンク1は、所要時間5分で時間交通容量は600（台/時）である。当然ながら、ノード3, 5, 9のいずれかに到達すれば避難完了と判断できる。そのため、それらのノードから「安全地帯」を表す仮想的なノード10へダミーリンクを設定し、すべての車両の目的地を10として計算する。本稿における計算ではダミーリンクの容量は無限大として計算している。交通需要については、ノード1, 2, 4, 6, 7, 8からそれぞれ100台、800台ずつ発生するケースについて検討する。

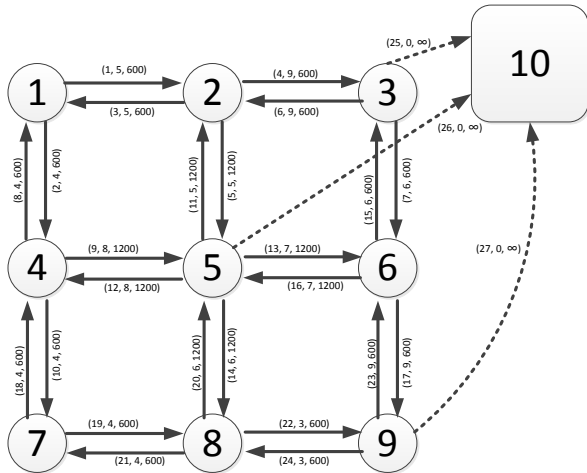


図2 ケーススタディネットワーク

(2) 静的ネットワークでの計算結果

まず、比較対象としてSTENではなく、図2に示した1時間単位の容量を用いて静的なネットワークで計算を実施した。

a. 列生成の結果

まず、すべての発生ノードからの列生成の結果を図3に示す。この計算例では、合計16本の経路が探索された。定式化から当然であるが、本研究で採用した列生成法においては、出発地と目的地の間を途絶させる最小のリンク数、すなわち最小カットセットを構成する経路数が抽出されることになる。一方で、たとえば図3(a)において、

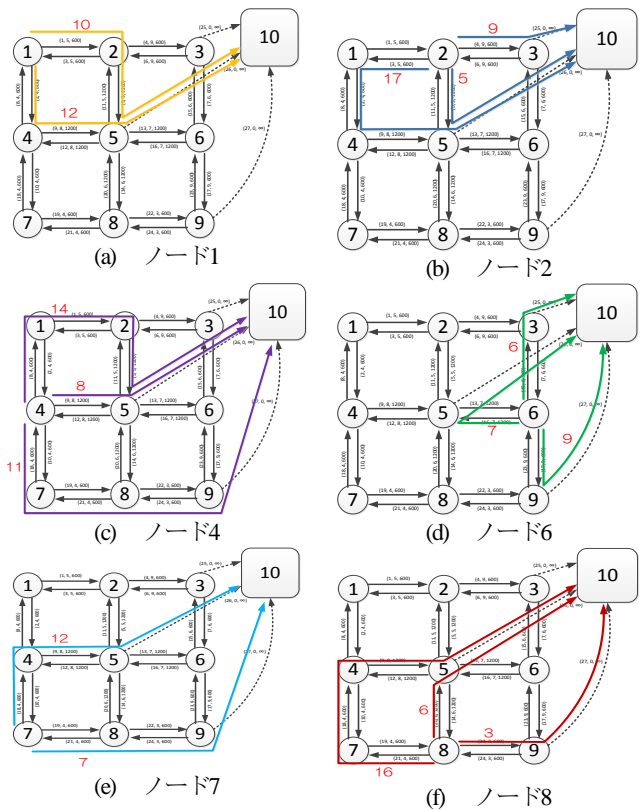


図3 静的ネットワークにおける列生成の結果

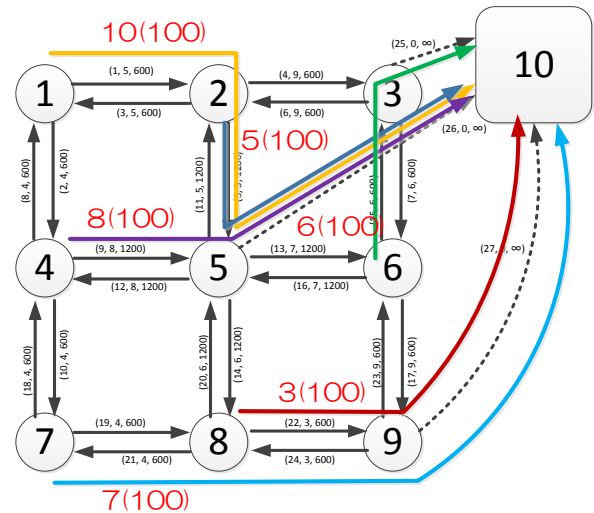


図4 交通需要=100（台/時）の結果

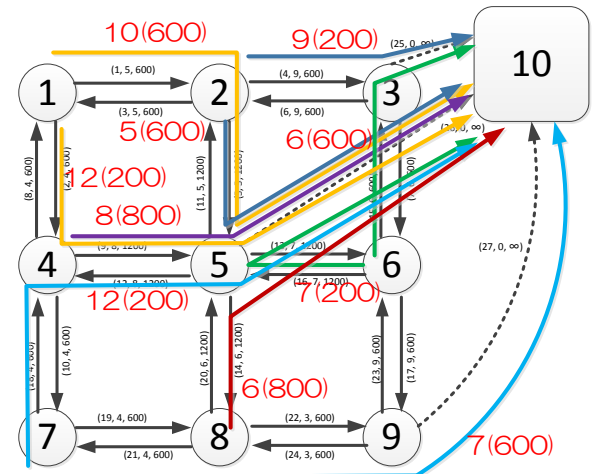


図5 交通需要=800（台/時）の結果

リンク1, 4を用いてノード3から避難する, といった経路は検索されておらず, その妥当性については今後検討する必要があるだろう.

b. 計算結果の考察

図4, 図5は, それぞれ各出発地から100, 800台の需要がある場合の計算結果である. まず, 交通需要が100台の場合を見てみる. この場合, 最も長い所要時間の経路は出発ノード1からであり, 避難所5への避難に関し, 10分となった. また, たとえば出発ノード6からの避難経路をみると, 図3(d)より3つの経路があり, それらの所要時間は6, 7, 9であり最長経路所要時間の10分よりすべて短い, 総走行時間の最小化問題として定式化しているため, 最適解においては最も短い6分の経路が選択されている. このように, 交通容量を満たすなかで最長経路所要時間が最短となるように避難方法を求めていることが確認できた. また, 交通需要が800台の際には, 最長経路所要時間は12分となった. 交通容量が限定されているため, 同じ出発ノードであっても複数の経路を使う必要があることが確認できる.

ところで, ここで示した静的なネットワークでの計算結果から, 静的なフレームワークで避難を取り扱うことの課題を確認できる. 図4, 5より, 交通需要が100台の時には10分, 800台の時には12分が最長経路所要時間であった. しかしながら, これらの値は必ずしも避難完了までの時間が10分, あるいは12分であることを示していない. たとえば, 図4の出発ノード1をみると, ノード1を出発し, リンク1を100台が利用する. リンク1の容量をみると600(台/時)であり, 分換算すると10(台/分)となる. つまり, リンク1を100台のクルマが利用するとすると, 少なくとも最初の車が計算開始時刻に出発したとしても, 最後の車はその10分後しか出発できないことになる. このような出発の遅れは静的なネットワークでは考慮することができず, 避難計画を策定する際の簡便なモデルとしては有効かもしれないが, 動的な取り扱いを行うことが望ましいことがわかるだろう.

(3) STENでの計算結果

上記において, 静的ネットワークにより計算することの限界を示した. ここでは, 前述の方法でSTENを構築し, STEN上でモデルを適用した結果を示す. 4(2)の分析と比較することを想定し, 図2に示したネットワークに対し, 全体の計算時間を60分, 計算時間間隔を1分とした. なお, 各リンクの容量はすべて1/60している. つまり, 600(台/時)のリンクは10(台/分)に, 1,200(台/時)のリンクは20(台/分)となる. この結果, リンク数は2,047, ノード数は550の大きなネットワークとなる. このネットワークにモデルを適用した結果, 各交通需要が100(台/時)の場合のSTEN上での有効な経路は47, 避難完了時刻が15分となった. なお, すべての

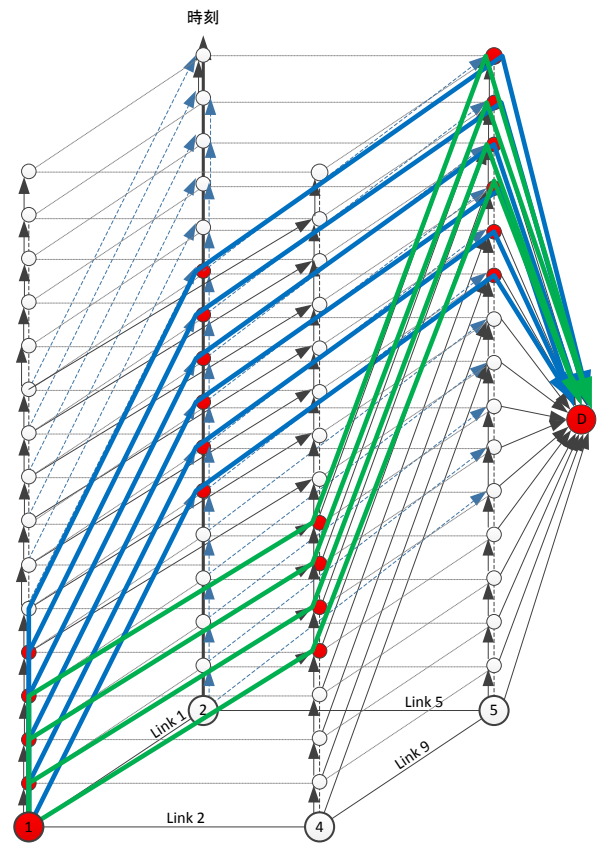


図6 ノード1からの利用経路 (交通需要=100(台/時))

経路をネットワーク上に示すことが容易ではないため, ここでは, 避難完了まで15分かかるノード1および7のうちノード1を出発地とするものの避難方法について考察を加えることとする. 図6に計算結果をネットワークの左上の部分のみを用いて示す. STEN上で利用された経路数は10であった. ノード1からの利用経路としては, 静的なネットワーク解析では1→2→5と移動する所要時間10分の経路のみであったが, これに加えて1→4→5と移動する所要時間12分の経路が利用されている. この理由は簡単で, リンクの容量が10台/分であることを考慮すると, 需要が20台以上であれば, 1→2→5のリンクにおいて2分以上の遅れが生じるため, 所要時間12分の経路も利用されるようになる. 最終的な解としては, 1→2→5の所要時間10分の経路を60台, 1→4→5の所要時間12分の経路を40台利用することで15分後に避難を完了することになる.

なお, 静的ネットワークへの適用時と同様に, 各ノードからの需要を800(台/時間)として計算したところ, 解が存在しなかった. この理由は, 経路の所要時間の遅れを考えると時間交通容量すべては利用できないためである. つまり, 交通容量が c_a (台/時), リンク所要時間が t_a (分)の場合, 実際利用できる最大台数は, $c_a(60-t_a)/60$ となる. また, 横軸に各出発地からの交通需要, 縦軸に避難完了時間を取り, 交通需要ごとの避難完

了時間を示したのが図7である。今回の設定では、交通需要と避難完了時間には線形の関係があるようである。

5. モデルの改良方針

本稿では、STENを活用した最適な避難計画を策定するための規範的アプローチとして、最適避難計画モデルの構築を試みた。提案したモデルは、利用可能性のある経路があらかじめわかっているという想定のもと、最も避難完了時刻がはやくなるような避難方法を求めるものである。具体的には、各リンクの交通容量および各地域からの避難需要をもとに、最適な出発時刻、経路、避難場所を決めるものである。ここでは、列生成法に準じた方法により探索した経路を用いて分析を進めた。その結果、得られた結果は納得できるものであり、モデルは想定通りの挙動を示している。ここでは、今後取り組むべき課題と改良方針について述べておく。

(1) 避難場所における容量の考慮

ここで示した計算においては、避難所容量については考慮していない。そのため、図5の解のようにある避難場所に交通が集中する可能性がある。そのため、適切な避難所容量を設定することが重要である。提案したモデルにおいては、以下の制約条件を付加することで容易に対応可能である。

$$\sum_{k \in K_e} f_k \leq d_e \quad \forall e \in E$$

ただし、

d_e : 避難所 e の受入可能容量

K_e : 避難所 e を目的地とした経路の集合

E : 避難所の集合

である。

(2) 徒歩と車の混合避難

我が国における地域防災計画では、原則徒歩により避難し、やむを得ない場合には自動車利用を認める、というスタンスである。したがって、あくまで徒歩で逃げることを想定して計画をたて、どうしても目標値に届かない場合に、たとえば避難タワーの建設や避難方向の再検討などの取り組みを行うことが多い。このような現状からみると、単一モードのみを想定している本研究で提案したモデルは現実の避難計画に則しておらず、実用性には課題が残る。なお、混合モードによる避難については、車と歩行者が分離されている場合、つまり歩行者は歩道、車は車道を避難する場合においては、単純にSTENを車用、歩行者用に2つ準備すればよいだけであるため大きな問題はない。一方で、歩道がなく車と歩行者が同一空間を共用する場合の取り扱いについて検討が必要となる。この場合、車と歩行者の移動速度が異なることに注意が必要となる。図8には同一リンクについて車

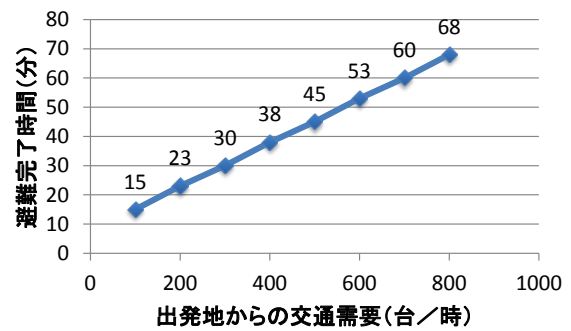


図7 出発地からの交通需要と避難完了時間の関係

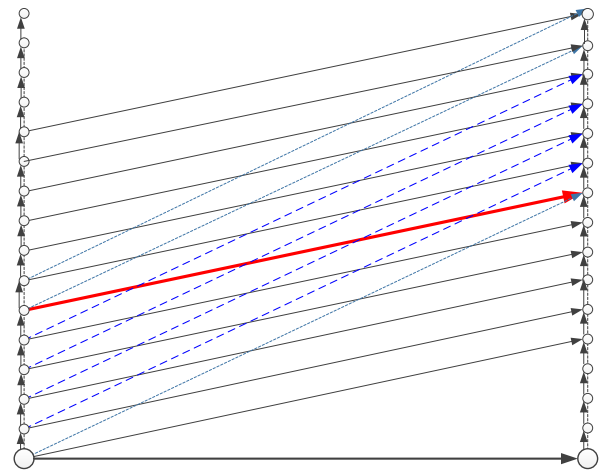


図8 自動車と歩行者の相互作用について

のリンク (実線) と歩行者のリンク (点線) を重ね合わせたものである。この場合、赤い自動車のリンクは4つの歩行者のリンクと交差する。つまり、それらのリンクと限られた道路空間を共有しなければならないこととなる。なお、交通流の特性を考えると、赤い自動車リンクの交通量に青い歩行者流に歩行者換算係数を足したものがいずれも交通容量を超えないように記述すればよいと考えられる。

(3) 経路の数え上げ

本稿においては、最短経路探索とネットワーク容量最大化問題を繰り返し解き、経路集合を設定する方法を採用した。しかしながら、数え上げの結果からも、最短所要時間経路にかなり依存した経路集合の抽出となっていることが明らかとなった。最終的な解においては、総走行時間最小化問題を解くことから、より所要時間の短い経路が優先されるべきであり、大きな問題は生じないと考えられるが、いずれにせよ厳密解が保証されているわけではない。なお、循環経路を許さないとしても、すべての経路を数え上げることは実際のネットワークでは現実的でない。

厳密解を得る一つの方法としては、リンク交通量を未知変数として総走行時間最小化問題を解くことで避難完了時刻の上限値を求める方法があげられる。今、ここで

示した問題は、多出発地、単一目的地のいわゆるmany-to-oneネットワークである。このとき、総走行時間を最小化するリンク交通量は一意に決まる。そして、総走行時間最小化問題の解であるリンク交通量を実現する経路交通量セットのひとつの実行可能解を求めると、最短避難完了時刻は上記により得られた経路所要時間の最大値より必ず小さいか等しくなるはずである。上記の手順により経路所要時間の上限値が得られるため、経路の数え上げの際にこの上限値を超えた段階で経路探索をやめればよいことになる。この方法について、今後検討する。

6. おわりに

本稿においては、避難完了時刻を最小にするような単一モードでの最適避難計画策定モデルの構築を行った。提案したモデルはSTENを活用し、動的な取り扱いが可能であり、なおかつ最適な避難計画を求めることができる規範的アプローチである。仮想ネットワークに適用し、モデルの妥当性を検証した。さらに、より現実性を高め

るために、避難所の容量、混合モードによる避難、経路生成に関する展望を整理した。今後、上記3点の改良方針を検討するとともに、実際のネットワークへのモデル適用を進めていく。

参考文献

- 1) 長尾, 大畑, 柿元, 花房, 二上: “大規模地震時における自動車避難行動に基づく避難施策の評価”, 土木計画学研究, Vol. 49, CD-ROM, 2013
- 2) 高田, 大原, 藤生, 山下: “複合災害時における避難行動の分析 —千住地域を対象として—”, 土木計画学研究, Vol. 49, CD-ROM, 2013
- 3) 片岡, 金, 奥村: “実規模交通避難シミュレーションに基づく道路渋滞の分析”, 土木計画学研究, Vol. 49, CD-ROM, 2013
- 4) Bell, M.G.H. and Iida, Y.: “2.8 Path Enumeration and Column Generation”, In Transportation Network Analysis, Wiley, 29, 1997.
- 5) Bell, M.G.H. and Iida, Y.: “1.11 Time Dependency”, In Transportation Network Analysis, Wiley, 15, 1997.

OPTIMAL EVACUATION PLANNING MODEL AGAINST TSUNAMI DISASTER USING STEN (SPACE-TIME EXTENDED NETWORK)

Fumitaka KURAUCHI

It is important to prepare against Tsunami disaster by constructing an effective evacuation plan in advance. This paper attempts to construct an optimal evacuation planning model using a concept of STEN (Space-Time Extended Network) that can handle a traffic movement dynamically. The model minimises a maximum evacuation time until all people move to a safe area with a single mode; on foot or by car. We first construct STEN by assuming constant link travel time, and a path set is predetermined on the STEN. Then, paths actually used to minimise a maximum evacuation time are determined and evacuation plan can be constructed from the result. The model is applied to a simple hypothetical network and the validity of the model is confirmed.