

辞書式最速流による避難計画作成モデルの実験的解析

小林 和博
海上技術安全研究所

成澤 龍人
アマゾンジャパン・ロジスティクス株式会社

安井 雄一郎
九州大学 & JST COI

藤澤 克樹
九州大学 & JST CREST

(受理 2015 年 4 月 13 日; 再受理 2016 年 1 月 21 日)

和文概要 津波発生時には、浸水対象の地域にいる住民はできるだけ迅速に避難する必要がある。本論文では、浸水域にいる要避難者が効率的に避難するための避難計画を、動的ネットワークフローモデルを用いて求める方法を扱う。特に、避難場所に容量制約がある場合に有効なモデルを扱う。具体的には、要避難者の避難状況を動的ネットワーク上の動的フローとして表現し、効率的な避難計画を辞書式最速流として定式化する。そして、この辞書の最速流を求めるアルゴリズムの実験的解析を、実際の地理情報に基づいて実施する。

キーワード: ネットワークフロー, 避難計画, 最大流, 危機管理, シミュレーション, 普遍的最速流

1. 背景

津波や地震などの災害発生時、被害が予想される地域にいる人々が迅速に安全な場所に避難できる計画を立てることを、緊急時避難計画とよぶ。緊急時避難計画のための数理的手法の研究には、様々なものがある。その中の代表的なものとして、マルチエージェントを用いた手法と、ネットワークフローモデルを用いた手法が挙げられる。マルチエージェントを用いた手法 [9, 18] では、各エージェントを避難者と見立て、その避難者に詳細な行動モデルを設定することができる。これにより、各避難者が局所的に判断し、行動するという意味で、現実の状況をよく模したシミュレーションが可能となる。これに対して、ネットワークフローモデルを用いた手法 [14, 15] では、避難者が全体として最も効率よく避難する計画を得ることができる。このモデルでは、各避難者が計画者の指示通りに行動すると仮定するため、理想的な避難状況を模すことが可能となる。したがって、マルチエージェントを用いた手法とネットワークフローモデルを用いた手法を補完的に用いることで、有効な避難計画の作成・評価が可能となる。

本論文では、動的ネットワークフローモデルを用いた緊急時避難計画モデルを扱う。特に、避難場所の収容者数に上限が設けられている状況では、辞書式最速流によって効率的な避難が定式化可能であることを述べる。そしてその有効性を、実際の地理情報を用いた実験的解析により検証する。

1.1. 本論文の構成

第2章では、ネットワークフローモデルについて述べる。最初に静的ネットワーク上での最大流を導入する。そして、避難計画をモデル化するために有用な動的ネットワークを定義する。さらに、動的ネットワーク上での動的フローの計算のために最速流と時間拡大ネット

ワークを導入したのち、動的ネットワークにおける普遍的最速流を述べる。第3章では、動的ネットワークを用いた緊急時避難計画モデルを述べる。まず、避難場所に容量制約のないモデルを述べた後、より現実に即したモデルとして避難場所に容量制約が課されたモデルを述べる。第4章では、提案する避難計画モデルを用いた実験的解析の結果を述べる。この解析では、徳島県沖洲周辺地域、大阪府大阪市淀川区周辺地域、大阪市周辺地域に対して、提案モデルによる避難シミュレーションを実施した。第5章は、本論文のまとめである。

2. ネットワークフローモデル

ここでは、避難計画のモデル化に用いるネットワークフローモデルを述べる。

2.1. 最大流

点集合 V 、枝集合 A に対して、有向グラフ $G = (V, A)$ を定義する。点集合には、ソース、シンクと呼ばれる特別な要素を考える。ソースは s 、シンクは t と表す。ソース、シンクとも、単一のもの考える場合と複数もの場合がある。始点を u 、終点を v とする有向枝を $e = uv$ と表す。 u から v への並行枝がない場合、単に uv と表す。また、枝 $e = uv$ の始点を $\text{tail}(e)$ 、終点を $\text{head}(e)$ と表す。枝 e 上を流れるものの量をフロー $f: A \rightarrow \mathbb{R}_+$ で表し、 e 上のフローの最大値を容量関数 $c: A \rightarrow \mathbb{R}_+$ で表す。ここで、 \mathbb{R}_+ は非負実数の集合である。 V の任意の部分集合 $X \subseteq V$ に対して、 $\text{tail}(e) \in X$ かつ $\text{head}(e) \notin X$ となる枝の集合を $\delta_D(X)$ 、 $\text{tail}(e) \notin X$ かつ $\text{head}(e) \in X$ となる枝の集合を $\rho_D(X)$ と表す。有向グラフ $D = (V, A)$ 、容量関数 $c: A \rightarrow \mathbb{R}_+$ に対して、静的ネットワーク $N = (D = (V, A), c)$ を定義する。各枝 $e \in A$ における容量制約を $0 \leq f(e) \leq c(e)$ 、各点におけるフロー保存則を

$$\sum_{e \in \delta_D(\{v\})} f(e) - \sum_{e \in \rho_D(\{v\})} f(e) = \begin{cases} q & (v = s) \\ 0 & (v \in V \setminus \{s, t\}) \\ -q & (v = t) \end{cases} \quad (2.1)$$

と定義する。ここで、 q はソース $s \in V$ からシンク $t \in V$ まで流れるフローを表す。各枝で容量制約を満たし、かつフロー保存則を満たすフローの中で、ソースからシンクまでのフロー q が最大となるものを最大流とよぶ。そして、最大流を求める問題を、最大流問題とよぶ。最大流問題を効率的に解くためのアルゴリズムには、さまざまなタイプのものが開発されている [1-3, 6]。

最大流問題は、最短路問題を補完するものである。最短路問題はネットワークフローモデルにおいて最も基本的なものであり、物流をはじめとする多くの適用実績がある。最短路問題では、枝に費用を課すが容量は課さない。これに対して最大流問題では、枝に費用は課さないが容量を課す。このことにより、最短路問題だけではわからないネットワークの特性を明らかにすることができる。最大流問題は、製造、通信システムをはじめとした様々な問題の定式化に用いることができる。なかでも最も直接的なのが物流への応用である。物流活動では、倉庫、港などの拠点間で、船舶、鉄道、トラック、パイプラインなど何らかの輸送手段を用いて物資を輸送する。これは、最大流問題におけるノードを拠点、フローを2拠点間のものの流れ、枝の容量 $c(e)$ を輸送手段の輸送容量と対応付けることで、最大流問題として定式化することができる。

フロー $f(e)$ を単位時間当たりの枝 e の流量とみなすと、これは定常的な流れを表している。静的ネットワークの限界は、時間によって変化する流れを表せないことである。このような時間的な変化を扱うための拡張が、次に述べる動的ネットワークである。動的ネット

ワークにおいては、枝の容量は時刻によらず一定であるが、そこを流れる量は時刻によって変化してよい。また、供給ノードにおける供給量は、全ての量が一斉に流れる必要はなく、一部ずつ別々の時刻に分けて流れ出すことができる。これにより、静的ネットワークにはないモデル化能力を持つことができる。

2.2. 動的ネットワーク

各枝 $e \in A$ に対して、 e 上をその始点 $\text{tail}(e)$ から終点 $\text{head}(e)$ まで流れるのに要する時間を表す移動時間関数 $\tau: A \rightarrow \mathbb{Z}_+$ を定義する。ここで、 \mathbb{Z}_+ は非負整数の集合を表す。また、各点 $v \in A$ に対して、その点で発生する量を表す供給量関数 $b: V \rightarrow \mathbb{R}_+$ を定義する。さらに、シンクの集合 S を点集合 V の部分集合 $S \subseteq V$ とする。これらを用いて、動的ネットワーク $N = (D = (V, A), c, \tau, b, S)$ を定義する。

ここで、避難計画への適用を想定すると、フローは避難者の移動、シンクは避難場所、フローのシンクへの到達は避難者の避難場所への収容を表す。ある点で発生した避難者は、枝上を移動し、いずれかのシンクに到達した時点で避難が完了したとみなす。点 $v \in V$ で発生する要避難者の総数を、その点での供給量 $b(v)$ とみなす。避難場所では避難者の発生はないとするので、 $\delta_D(\{s\}) = \emptyset, b(s) = 0 (\forall s \in S)$ とする。

次に、動的ネットワーク N 上の動的フロー $f: A \times \mathbb{Z}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ を定義する。これは、 $e \in A$ と $\theta \in \mathbb{Z}_+$ に対して、離散時刻 θ に枝 e に入る流率として定義され、 $f(e, \theta)$ と表す。ここで、時刻 θ に枝 e の始点 $\text{tail}(e)$ に入るフローは、時刻 $\theta + \tau(e)$ に終点 $\text{head}(e)$ に到着することを注意しておく。容量制約を $0 \leq f(e, \theta) \leq c(e) (\forall e \in A, \theta \in \mathbb{Z}_+)$ 、フロー保存則を

$$\sum_{e \in \delta_D(\{v\})} \sum_{\theta=0}^{\Theta} f(e, \theta) - \sum_{e \in \rho_D(\{v\})} \sum_{\theta=0}^{\Theta - \tau(e)} f(e, \theta) \leq b(v) (\forall v \in V, \forall \Theta \in \mathbb{Z}_+),$$

需要制約を

$$\sum_{s \in S} \sum_{e \in \rho_D(\{s\})} \sum_{\theta=0}^{\Theta - \tau(e)} f(e, \theta) = \sum_{v \in V} b(v) (\exists \Theta \in \mathbb{Z}_+) \quad (2.2)$$

とする。容量制約、フロー保存則、需要制約を満たす動的フロー f は、実行可能であるという。また、実行可能動的流の集合を F と表す。

2.3. 最速流

実行可能動的フロー f のなかで、(2.2) を満たす最小の時刻 Θ を達成するものを、最速流という。避難計画では、そのときの Θ を避難完了時刻といい、 Θ^* と表す。なお、文脈によっては避難完了時間ともよぶ。

2.4. 時間拡大ネットワーク

有向グラフ $D_s = (V_s, A_s)$ 、容量関数 $c_s: A \rightarrow \mathbb{R}_+$ 、供給量関数 $b_s: V \rightarrow \mathbb{R}_+$ 、シンクの集合 $S_s \subseteq V$ に対して、静的ネットワーク $N_s = (D_s = (V_s, A_s), c_s, b_s, S_s)$ を定義する。ネットワーク N_s 上のフロー f_s が、容量制約 $0 \leq f_s(e) \leq c_s(e) (\forall e \in A_s)$ とフロー保存則

$$\sum_{e \in \delta_{D_s}(\{v\})} f_s(e) - \sum_{e \in \rho_{D_s}(\{v\})} f_s(e) = b_s(v) (\forall v \in V_s \setminus S_s)$$

を満たすとき、 f_s を実行可能という。

ここで、2.2 で述べた動的ネットワーク N に対する時間拡大ネットワーク $N(\Theta)$ を導入する。図1は、 N と $N(4)$ の例である。 N の各枝には、 $(c(uv), \tau(uv))$ の値を付記した。また、

シンクの集合は $S := \{s_1, s_2\}$ である．時間拡大ネットワーク $N(\Theta)$ の点集合は， $v \in V$ と $\theta \in \{0, \dots, \Theta\}$ のペアに対して定義される点 $v(\theta)$ からなる．また，枝集合は， $e = uv \in A$ と $\theta \in \{0, \dots, \Theta - \tau(e)\}$ のペアに対して定義される枝 $e(\theta) = u(\theta)v(\theta + \tau(e))$ (容量は $c(e)$) と， $v \in V$ と $\theta \in \{0, \dots, \Theta - 1\}$ のペアに対して定義される枝 $v(\theta)v(\theta + 1)$ (容量は ∞) からなる．点 $v \in V$ に対して， $v(0)$ の供給量を $b(v)$ ，その他の点 $v(\theta)$ ($\theta \in \{1, \dots, \Theta\}$) の供給量は 0 とする．

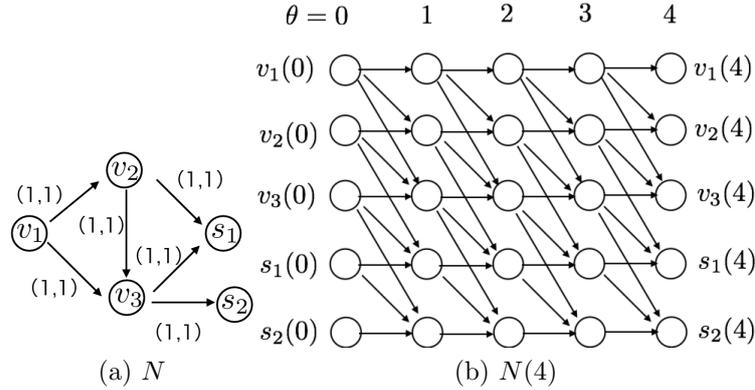


図 1: 動的ネットワークとそれに対応する時間拡大ネットワーク

避難完了時刻が最大でも Θ である動的フローが存在することと，時間拡大ネットワーク $N(\Theta)$ 上に実行可能フローが存在することが同値であることがわかっている [5]．また，ある時刻 θ に対して， $N(\theta)$ に実行可能フローが存在するか否かは，最大流問題を解くことによって判定することができる．これによって，最速流とその避難完了時刻は，時刻に関する二分探索で求めることができる．すなわち， Θ を充分大きな時刻とし，異なる $O(\log \Theta)$ 個の時刻に対して，それを避難完了時刻とする実行可能フローが存在するか否かを確認すればよい．

2.5. 普遍的な最速流

避難完了時刻 Θ^* 以前の各時刻において，それまでの累積避難完了者数が同時に最大になるような動的フロー，すなわち

$$\sum_{s \in S} \sum_{e \in \rho_D(\{s\})} \sum_{\theta=0}^{\Theta - \tau(e)} f^*(e, \theta) \geq \sum_{s \in S} \sum_{e \in \rho_D(\{s\})} \sum_{\theta=0}^{\Theta - \tau(e)} f(e, \theta) \quad (\forall \Theta \in \{1, 2, \dots, \Theta^*\} \text{ かつ } f \in F)$$

を満たす動的フロー f^* を，普遍的な最速流という．

普遍的な最速流は，次に定義する辞書式最大流によって求めることができる．

いま，シンクの順序つき集合 $T = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ に対して， $T' \subset T$ に入る最大流の値を $M(T')$ で表す．ここで， $T(i) = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, k$) とする．このとき，流量が $M(T(i))$ ($i = 1, 2, \dots, k$) である動的フローが存在することがわかっている．この動的フローのことを，辞書式最大流という．この辞書式最大流は容易に計算できることが知られている [14]．

最速流を求めるための時間拡大ネットワーク (図 1b) は，普遍的な最速流を求めるためのものに容易に拡張することができる．すなわち，各時刻 $\theta \in \{0, \dots, \Theta\}$ に対してスーパーシンク $s^*(\theta)$ を加え，各シンク $s \in S$ に対して定義された点 $s(\theta)$ と $s^*(\theta)$ を結ぶ枝を加える．

さらに，スーパーソース v^* を定義し，各点 $v \in V \setminus S$ に対して定義した点 $v(0)$ とを結ぶ枝 $(v^*, v(0))$ (容量は $b(v)$) を加える (図2)．

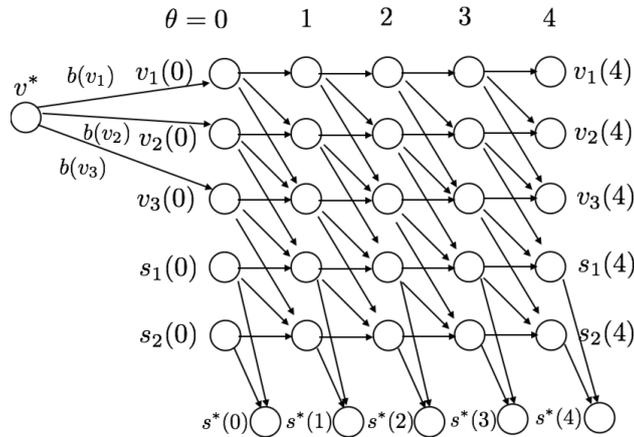


図 2: 普遍的最速流を求めるために拡張された時間拡大ネットワーク

こうすると，シンクの順序つき集合

$$\{s^*(0), \dots, s^*(\theta), \dots, s^*(\Theta)\}$$

に対する辞書式最大流は，避難完了時刻が Θ であるときの普遍的最速流となっている．したがって，普遍的最速流は，まず避難完了時刻 Θ^* を求め，次に対応する時間拡大ネットワーク上で辞書式最大流を求めることによって得られる．

3. 緊急時避難計画モデル

3.1. 容量制約なし避難計画モデル

いずれの避難場所にも収容者数の上限が設定されていない，すなわち何人でも収容できるとしたモデルを，容量制約なし避難計画モデルとよぶ．このモデルでの目的を，避難完了時刻 Θ^* 以前の各時刻において，避難開始時からの累積の避難完了者数を最大にすることとする．このような避難計画は，動的ネットワーク上で普遍的最速流として求めることができる．

3.2. 容量制約付き避難計画モデル

避難場所の収容者数に上限が設定されている場合のモデルを，容量制約付き避難計画モデルとよぶ．避難場所を表す点 $s \in S$ での容量関数 $r: V \rightarrow \mathbb{Z}_+$ を定義すると，容量制約は

$$\sum_{\theta=0}^{\Theta-r(e)} \sum_{e \in \delta_D(\{s\})} f(e, \theta) \leq r(s) \quad (\forall s \in S)$$

と定式化できる．容量制約付きの場合は，容量制約なしの場合と異なり，普遍的最速流が存在するとは限らない．普遍的最速流によって求めた避難計画では，避難完了時刻までの各時刻において，それまでの累積避難完了者数が最大になるのであった．そこで，代わりとなる目的を設定し，それを実現する避難計画を求めることとする．代わりとなる目的を「避難完了時刻までの各時刻において，その間に避難を完了する人数を最大にする」と設定する．このような避難計画は，辞書式最速流によって得ることができる．辞書式最速流は，時刻に関して貪欲的に計算を行うことによって得られる．すなわち， $\theta = 1, 2, \dots, \Theta$ の順に，各時刻

でのスーパーシンク $s^*(\theta)$ への最大流を求めることで得られる．時刻 θ での最大流計算を行う際には，時刻 $\theta - 1$ での最大流計算を行った時点での避難所 s の残余容量を， $s(\theta)$ と $s^*(\theta)$ を結ぶ枝の容量として設定する．一般に，辞書式最速流は普遍的な最速流とは異なる．そして，辞書式最速流の避難完了時刻 Θ_d^* は，普遍的な最速流の避難完了時刻 Θ_u^* よりも大きくなりうる．なお，実装の容易さの観点から本研究では用いないが，避難完了時刻が Θ_u^* 以下であるという条件の下で辞書式最速流を求める方法が知られている [14]．

4. 実験的解析

この解析では，徳島県沖洲周辺地域（以下，沖洲地区），大阪府大阪市淀川区周辺地域（以下，淀川地区），大阪市周辺地域（以下，大阪市）で津波からの避難が必要となる状況を想定した．その避難計画の作成に，3.2 で提案した容量制約付き避難計画モデルを適用した際の避難の状況を解析した．沖洲地区は湾岸の平坦地にあり，かつ紀伊水道に面していることにより，南海トラフ地震による津波被害が懸念されている．したがって実験的解析の対象とした．また，淀川地区を含む大阪市は，大阪府防災会議による南海トラフ地震の津波到達予測範囲のうち，人口が多く津波被害による経済的な影響も大きい地域である．そのため実験的解析の対象とした．

先行研究 [14, 15] では，沖洲地区のみを解析対象としているが，本論文ではそれに加えてより大規模な淀川地区，大阪市を解析対象とする．また，[14, 15] において実験的解析に用いたものとは異なる，より効率的な実装を行い，解析に用いた．実験で用いるデータの生成のために，国勢調査（人口） [12, 13]，全国道路地図データベース（道路情報） [7]，ゼンリン社の ZmapTown II 2005（建物情報）を用いた．道路ネットワークにおける点は，交差点そ

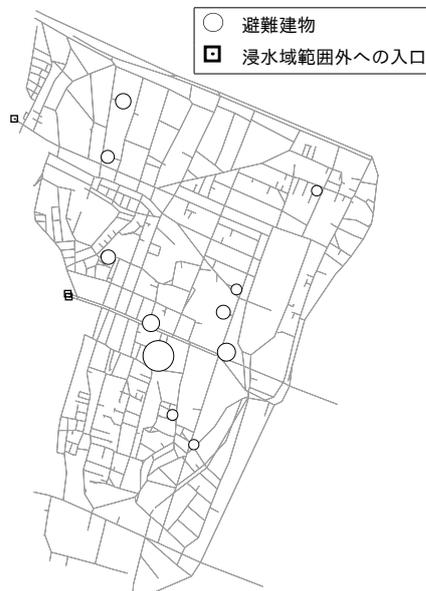


図 3: 沖洲地区ネットワークの避難所の位置

の他道路網表現上の結節点である．そして，枝は点を結ぶ道路を表している．また，ネットワーク上の点の部分集合として避難場所を設定する．避難場所は，「避難建物」と「浸水域範囲外への入り口」の 2 種類に大別する．図 3, 4, 5 は，避難場所の位置を示している．避難建物には容量（人数）が設定されているが，浸水域範囲外への入り口には容量は設定され

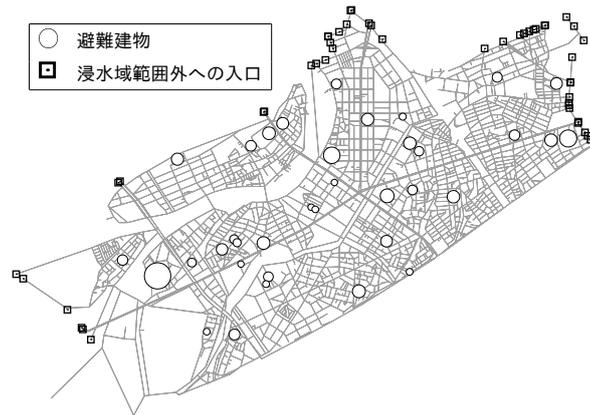


図 4: 淀川地区ネットワークの避難所の位置

ていない、すなわち何人でも避難することができるとした。容量が大きな避難建物は大きな半径の円で、小さな避難建物は小さな半径の円で示した。予想浸水域が広範囲にわたる場合は、全ての浸水域を単一のモデルとして解析するのではなく、適切な範囲に分割して解析を行うことがモデル化の観点から妥当であり、また計算量の観点からも現実的である。この場合の「浸水域範囲外への入り口」は、計算対象とする部分的な浸水域から外に出る道路上の点を表す。

図 3 に、沖洲地区の道路ネットワークを示した。この道路ネットワークでは、点数 864、枝数 2212 である。沖洲地区は、南海地震発生時には最大で 5 m 程度の津波が発生すると予測されている [16]。このため、強靱で高い建物が津波避難ビルとして指定されている [17]。これらの建物 11 点を避難建物とした。これに浸水域範囲外への入り口 3 点をあわせて、14 点の避難場所を設定した。また、津波の最短到達時間は 44 分と予測されている。沖洲地区を含む徳島県は、広範囲で浸水被害を受けることが予想されている。そこで、水際から概ね 1 時間程度の歩行で到達できる範囲を計算の対象地域とした。

各点の要避難者数を、ネットワーク上の点における供給量とし、避難が必要となるのは、住居用建物の 3 階以下の住民であると仮定した。具体的には、各住居用建物で避難が必要となる住民数を、

$$\text{地区の夜間人口} \times \text{各住居用建物の延べ床面積} / \text{地区にある住居用建物の総延べ床面積}$$

によって算出した。この人数をネットワーク上の最寄の点の供給量に加算した。ここで、地区の夜間人口は平成 17 年度の国勢調査の結果を用いた。この仮定に従って算出した要避難者の総数は、7445 人である。なお、この数値をもとに後ほど要避難者数が異なる複数のケースを設定する。また、避難者の移動速度は 1 m/秒とし、動的ネットワークにおける枝の容量は、道路幅に従って設定した。ここで、道路幅は 2 m, 4 m, 6 m のいずれかである。

図 4 に、淀川地区の道路ネットワークを示した。この地域の道路ネットワークは点数 2933、枝数 8924 となった。この地域で避難が必要となるのは、住居用建物の 2 階以下の住民であると仮定した。各点の要避難者数は沖洲地区と同様の方法で算出した。ただし、用いた夜間人口は平成 22 年度の国勢調査の結果である。この仮定に従って算出した要避難者の総数は、49 276 人である。沖洲地区と同様、この数値をもとに後ほど要避難者数の異なる複数のケースを設定する。避難場所としては、大阪市の指定する津波避難ビルのうち、淀川区内にある 36 点（平成 24 年 4 月時点）を避難建物とした [10]。これに浸水域範囲外への入り口 50 点を

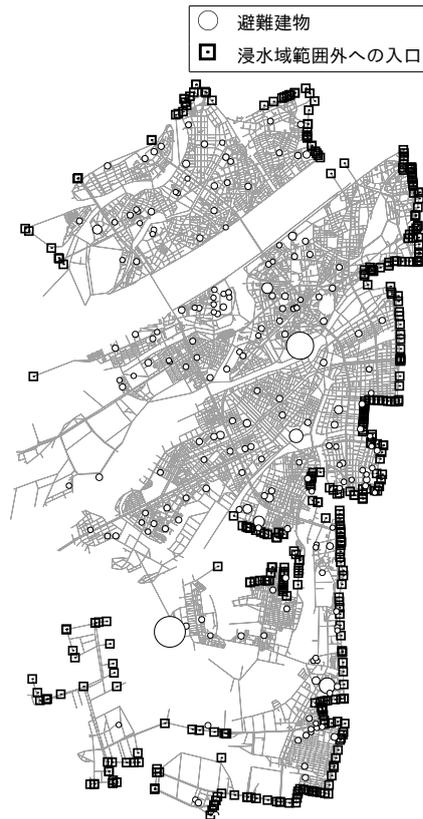


図 5: 大阪市周辺ネットワークの避難所の位置

あわせて、86 点の避難場所を設定した。また、避難建物への収容容量は、津波避難ビルに実際に設定されている避難可能人数とした。図 5 に、大阪市の道路ネットワークを示した。

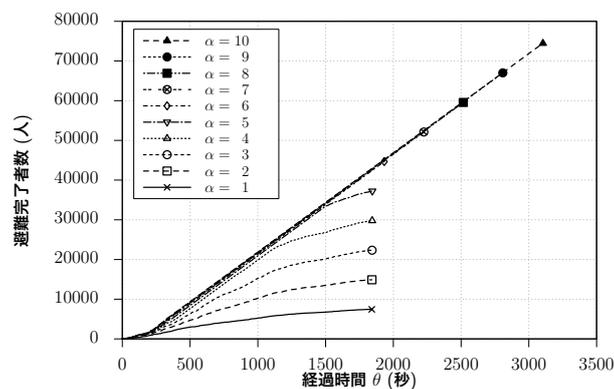


図 6: 沖洲地区における経過時間と避難完了者数との関係

この地域の道路ネットワークは点数 13 076、枝数 20 594 となった。この地域で避難が必要となるのは、住居用建物の 2 階以下の住民であると仮定した。用いた夜間人口は、淀川地区と同様、平成 22 年度の国勢調査の結果である。算出の結果、要避難者の総数は 189 498 人である。避難場所としては、避難建物 197 点、浸水域範囲外への入り口 389 点の、計 586 点を設定した。淀川地区と同様、大阪市の指定する津波避難ビルを避難建物とし、それらの収容容量は、津波避難ビルに実際に設定されている避難可能人数とした。南海トラフの巨大地

表 1: 避難計画の計算時間 (単位は時間)

対象の都市	50%	80%	100%
沖洲地区	0.09	0.32	0.81
淀川地区	0.17	1.75	7.81
大阪市	0.52	3.29	69.05

震発生時の大阪市の津波被害想定では、最大で6 m未満の津波が発生すると予測されている。また、津波の最短到達時間は111分とされている。解析の対象地域は、データ作成時点での浸水想定地域であった10区(福島区, 此花区, 西区, 港区, 大正区, 浪速区, 西淀川区, 淀川区, 住之江区, 西成区)に北区を加えた11区とした。

本数値実験に用いた計算機環境はAMD Opteron(R) 6386 SE (ただし使用スレッド数は1)であり、C/C++コンパイラにはGCC 4.8.2を用いた。

避難開始時点の状況として、10のケースを設定した。それぞれのケースをパラメータ α で表す。前述した住民数を要避難者数とするケースを、 $\alpha = 1$ と表す。そして、 $\alpha = 1$ のケースでの各点での要避難者数(=供給量 $b(v)$)を2倍したケースを設定し、 $\alpha = 2$ と表す。以下同様に、3, 4, ..., 10倍したケースを設定した。本論文と同様のネットワークフローを用いた先行研究における数値実験では、要避難者数として夜間人口が用いられている[15]。しかし、昼間人口が夜間人口よりも多い都市も存在する。したがって、昼間に避難が必要になった状況に対応するためには、夜間人口よりも多くの要避難者が存在する状況での避難計画も必要である。そこで、要避難者数によって避難計画が変化の様子を観察するため、このような10のケースを設定した。

$\alpha = 1$ のケースに対して避難計画を作成した際、要避難者数の50%, 80%, 100%が避難を完了するまでの計算時間を示したのが表1である。単位は時間である。表のとおり、地理的ネットワークの規模が、沖洲地区, 淀川地区, 大阪市と順に大きくなるにつれ、計算時間が長くなる。ここには $\alpha = 1$ の場合のみを示したが、 $\alpha = 2, 3, \dots, 10$ の場合も同様の傾向を示す。この避難計画モデルの計算では、既に述べたように、避難完了時間によって規模の定まる時間拡大ネットワーク上での最大流計算を繰り返し実行している。したがって、地理的ネットワークが大規模であっても、より小規模なネットワークのときよりも長い計算時間がかかるとは限らない。避難時間が十分に短ければ、小規模なネットワークよりも短い時間で計算が終了することもある。

表2は、辞書式最速流によって求めた沖洲地区での避難完了時間 Θ_d^* をケースごとに示したものである。第1列はケースを表すパラメータ α の値、第2列は避難完了時間 Θ^* 、第3列は $\alpha = 1$ のケースに対する避難完了時間の比率、第4列は1だけ小さな α での避難完了時間との差分を示している。図6は、表2に示した避難における各経過時間での避難完了者数を示している。ここで、各ケースのグラフの右端に対応する経過時間が、表2での避難完了時間 Θ^* (2列目)であることに注意する。 α の値に比例して要避難者数が増えるのであるが、 $\alpha = 1, 2, \dots, 5$ まではケース同士で避難完了時間がほぼ同じであることがわかる。避難完了時間と並んで重要なのが、避難の途中経過である。図6において、 $\alpha = 1, 2, \dots, 5$ の5ケースでは、 α の値が大きくなるにしたがって、各経過時間での避難完了者数は大きくなっている。一方、 $\alpha = 6, 7, \dots, 10$ のケースでは、 α が大きいほど避難完了時間は大きくなっているが、途中の経過時間でのグラフは互いに一致している。これは、要避難者数が増えても一定

表 2: 沖洲地区における各ケースでの避難完了時間

ケース	避難完了時間 Θ^*	$\alpha = 1$ のケースに対する比率	差分
$\alpha = 1$	1841	1.000	-
$\alpha = 2$	1842	1.001	1
$\alpha = 3$	1843	1.001	1
$\alpha = 4$	1844	1.002	1
$\alpha = 5$	1845	1.002	1
$\alpha = 6$	1933	1.050	88
$\alpha = 7$	2224	1.208	291
$\alpha = 8$	2516	1.367	292
$\alpha = 9$	2808	1.525	292
$\alpha = 10$	3104	1.686	296

表 3: 淀川地区における各ケースでの避難完了時間

ケース	避難完了時間 Θ^*	$\alpha = 1$ のケースに対する比率	差分
$\alpha = 1$	2697	1.000	-
$\alpha = 2$	2731	1.013	34
$\alpha = 3$	2786	1.033	55
$\alpha = 4$	2897	1.074	111
$\alpha = 5$	2955	1.096	58
$\alpha = 6$	3015	1.118	60
$\alpha = 7$	3070	1.138	55
$\alpha = 8$	3131	1.161	61
$\alpha = 9$	3206	1.189	75
$\alpha = 10$	3292	1.221	86

時間あたりの避難完了者数が増えていないことを示している。

表 3 は、淀川地区での避難完了時間をケースごとに示したものである。図 7 は、表 3 に示した避難における各経過時間での避難完了者数を示している。淀川地区の場合は、沖洲地区の場合と異なり、 α が 1, 2, 3, ... と大きくなるに従って避難完了時間が大きくなっている。要避難者が多い $\alpha = 6, 7, \dots, 10$ のケースでも、沖洲の場合とは対照的に、 α の値が増えるに従って各経過時間での避難完了者数は大きくなっている。

表 4 は、避難完了者数が要避難者数全体の 50%, 80%, 100% に達するまでの経過時間を示している。100% (4 列目) での数値は、避難完了時間 Θ^* に等しい。沖洲地区では、 $\alpha = 7, 8, 9, 10$ のケースでは要避難者数の増加に比例して避難完了時間が増加するという単純な傾向が見られた。したがって、表には $\alpha = 6$ までのデータを示した。これに対して、淀川地区では $\alpha = 7, 8, 9, 10$ のケースでも沖洲地区ほど単純な傾向は示さなかったため、表には $\alpha = 10$ までのデータを示した。また、括弧内に、 $\alpha = 1$ のケースに対する比率を示した。沖洲地区での $\alpha = 6$ のケースでは、50%での比率は 1.579 であるのに対して、100%での比率は 1.050 と小さくなっている。同様の傾向が、 $\alpha = 2, 4$ のケースでもみられる。これは、要避難者が少

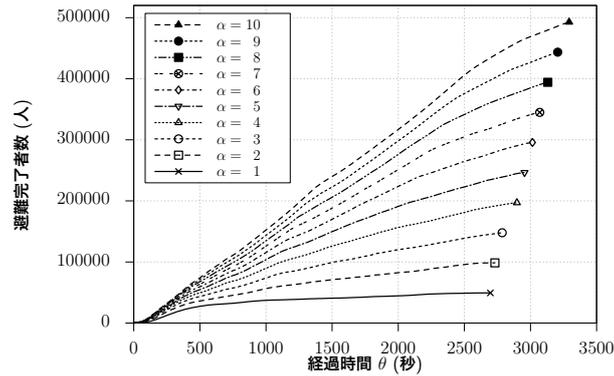


図 7: 淀川地区における経過時間と避難完了者数との関係

表 4: 要避難者の 50%, 80%, 100%が避難するまでの経過時間

(a) 沖洲地区			
ケース	50%	80%	100%
$\alpha = 1$	658(1.000)	1179(1.000)	1841(1.000)
$\alpha = 2$	726(1.103)	1185(1.005)	1842(1.001)
$\alpha = 4$	791(1.202)	1193(1.012)	1844(1.002)
$\alpha = 6$	1039(1.579)	1575(1.336)	1933(1.050)
(b) 淀川地区			
ケース	50%	80%	100%
$\alpha = 1$	431(1.000)	1305(1.000)	2697(1.000)
$\alpha = 2$	855(1.984)	1839(1.409)	2731(1.013)
$\alpha = 4$	1096(2.543)	2029(1.555)	2897(1.074)
$\alpha = 10$	1550(3.596)	2436(1.867)	3292(1.221)

ないケース (= α が小さいケース) では, 多いケースに比べて, より多くの要避難者が早い段階で避難を完了している一方, 避難に長い時間がかかっている少数の要避難者が存在していることを示している. 淀川地区においても同様の傾向がみられる. そして, その比率の差は沖洲地区の場合よりも大きい. たとえば, $\alpha = 10$ のケースでは, 50%での比率は 3.596 と大きな値であるのに対して, 100%では 1.221 まで小さくなっている. 沖洲地区において, 避難に長時間かかっている避難者の避難完了時間を短縮する方法としては, 例えば浸水域範囲外から遠い場所に新たに避難建物を増設することや, 避難建物の収容人数を増やすことが有効であると考えられる. 避難建物を増設した状況で, 再度避難計画計算を実行すれば, その実際の効果を観察することが可能である.

図 8 は, 大阪市での各経過時間での避難完了者数を示している. 大阪市のネットワークは, 沖洲地区および淀川地区のものに比べて大規模であるために計算量が大きい. したがって $\alpha = 1$ のケースのみを扱った. この図から, 要避難者の多くは早い段階で避難を完了するが, 避難に長い時間がかかる少数の要避難者が存在する, という, 沖洲地区および淀川地区と同様の傾向がみてとれる.

要避難者が避難できる場所は, 「避難建物」と「浸水域範囲外への入り口」の 2 種類に分

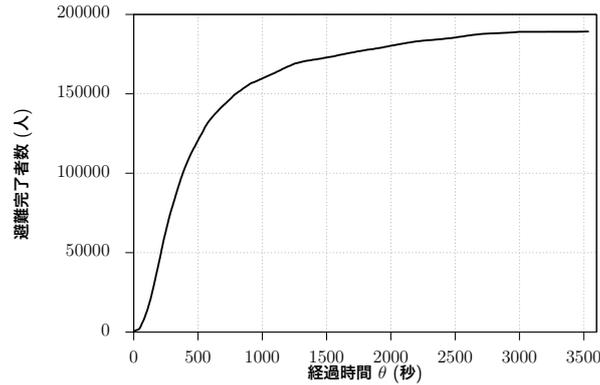


図 8: 大阪市の各経過時間における避難完了者数の推移

表 5: 避難建物と浸水域範囲外ごとの避難完了者数

(a) 沖洲地区					
ケース	総数	避難建物		浸水域範囲外	
		合計	最大	合計	最大
$\alpha = 1$	7 445	1674	10	5 771	25
$\alpha = 2$	14 890	1674	10	13 216	25
$\alpha = 4$	29 780	1674	12	28 106	25
$\alpha = 6$	44 670	1674	14	42 996	25

(b) 淀川地区					
ケース	総数	避難建物		浸水域範囲外	
		合計	最大	合計	最大
$\alpha = 1$	49 276	35 645	83	13 631	41
$\alpha = 2$	98 552	36 549	104	62 003	61
$\alpha = 4$	197 104	36 549	109	160 555	108
$\alpha = 10$	492 760	36 549	116	456 211	216

類される。避難建物には収容できる避難者数の上限（容量）がある。したがって、避難開始時点からの累積の収容者数がある上限に達すると、それ以降は避難者を収容することができない。これに対して、浸水域範囲外には上限はない。また、どちらの避難場所も、単位時間あたりに収容できる人数は、その点を終点とする枝の容量の総和によって制限される。したがって、避難の状況は、その地域に設置された避難場所の容量と位置の影響を受けると考えられる。表5は、避難建物と浸水域範囲外にそれぞれ何人の要避難者が避難したかを示したものである。表中の「合計」列は、全員の避難が完了した時点での、避難建物または浸水域範囲外への避難完了者数の合計である。また、「最大」列は、最大避難完了者数である。ここで、最大避難完了者数とは、単位時間あたりの避難建物または浸水域範囲外への避難完了者数の最大値である。避難建物への避難完了者数は、(b) 淀川地区の $\alpha = 1$ のケースを除いた全てのケースで上限に達している。沖洲地区では、浸水域範囲外への最大避難完了者数は、要避難者数にかかわらず一定値25となっている。これに対して淀川地区では、浸水域範囲外への最大避難完了者数は要避難者数が大きいほど大きくなっている。

図9は、各経過時間での避難建物への避難完了者数を示したものである。避難の初期段

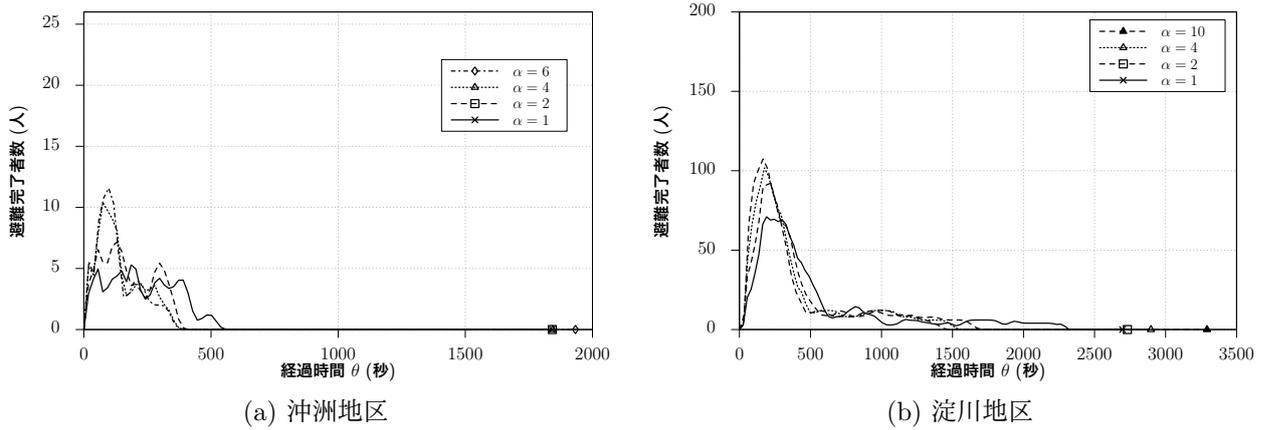


図 9: 各経過時間での避難建物への避難完了者数

階では避難完了者が多いが、時間が経つにつれて避難完了者は急激に少なくなる。沖洲地区では、500秒あたりで避難建物への避難完了者数は0になっている。一方で、淀川地区では、避難中盤以降の1500秒あたりでも避難完了者が存在している。特に、 $\alpha = 1$ のケースでは、避難終盤の2300秒あたりでも避難完了者が存在している。つまり、淀川地区での避難では、沖洲地区と異なり、避難終盤でも収容者が上限に達していない避難建物が存在している。図10は、各経過時間での浸水域範囲外への避難完了者数を示したものである。沖州

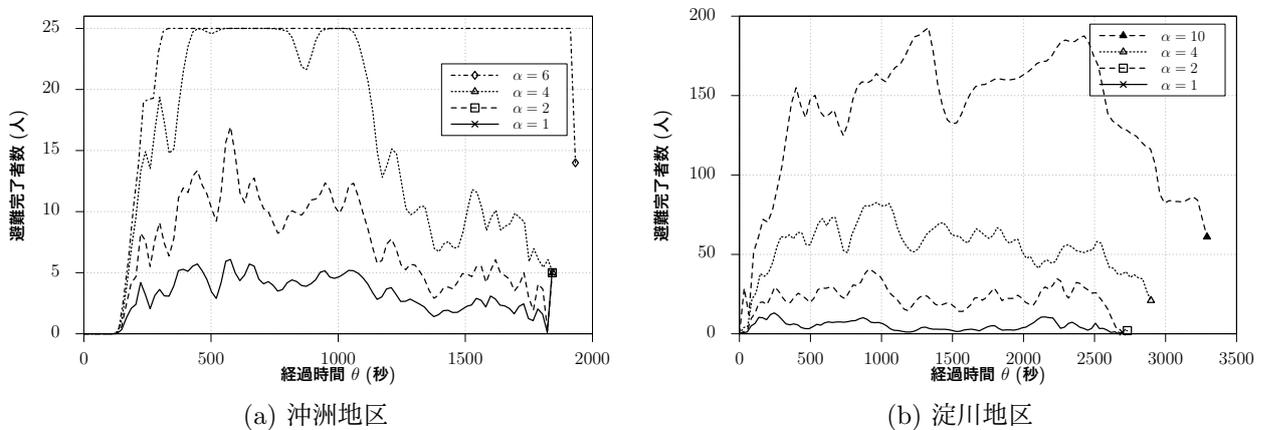


図 10: 各経過時間での浸水域範囲外への避難完了者数

地区の $\alpha = 6$ のケースでは、避難開始後早い段階で避難完了者数が一定値25になっている。これと図9(a)とを考えあわせると、避難開始後早々に避難建物への避難完了者数が容量上限に達し、それ以降の避難者は全て浸水域範囲外に避難していることがわかる。ここで、沖州地区では浸水域範囲外への最大避難完了者数が、枝容量の制限により25より大きくなならないことに注意する。このことにより、要避難者数が増えると、避難完了時間がそれにしたがって大きく増えることになると考えられる(表2も参照のこと)。淀川地区では、要避難者数が大きい場合($\alpha = 10$)でも、避難終盤まで避難完了者数は増加している。これと図9(b)とを考えあわせると、避難終盤においても避難建物に避難する避難者と浸水域範囲外に避難する避難者の両方が存在することがわかる。淀川地区では、要避難者数が多くなる

と、沖州地区とは異なり最大避難完了者数が増えている。このことにより、要避難者数が増えたときの避難完了時間の増え方が、沖州の場合に比べると相対的に緩やかになっていると考えられる。

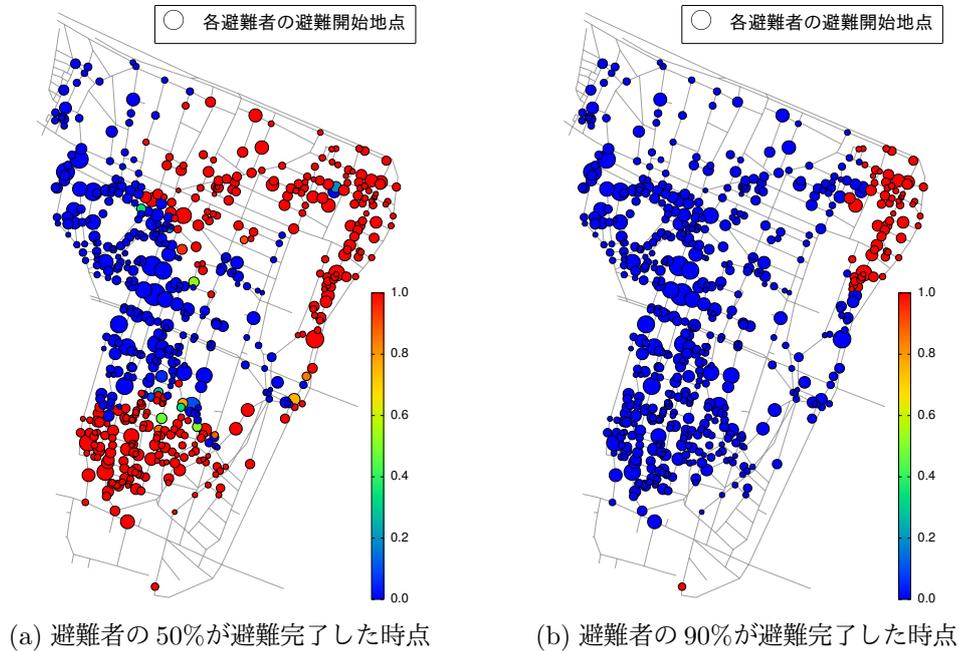


図 11: 沖州地区における避難未完了者の避難開始地点 ($\alpha = 1$ のケース)

個別の要避難者に注目すると、避難にかかる時間は、その要避難者の避難開始時点（住所）に依存すると考えられる。図 11 は、沖州地区において避難完了者数が全体の 50% および 90% に達した時点での避難未完了者が避難を開始した地点を示したものである。各地点での要避難者数の大きさを、円の半径の大きさで示している。また、円内部の描画の濃淡によって、その点での避難未完了者の割合を示している（図 12, 図 13 においても同様の方法で描画している）。90% の時点では、浸水域範囲外から離れた地点を避難開始地点とする避難未完了者が多いことがわかる。図 12, 図 13 は、淀川地区において避難完了者数が全体の 50% および 90% に達した時点での避難未完了者数が避難を開始した地点を、それぞれ $\alpha = 1$ のケースと $\alpha = 10$ のケースに対して示したものである。沖州地区の場合と同様、90% の時点では、浸水域範囲外から離れた地点を避難開始地点とする避難未完了者数が多いことがわかる。

図 14, 15 は、大阪市周辺地域において、避難完了者数が要避難者数全体の 50% および 90% に達した時点での避難未完了者が避難を開始した地点を示したものである。避難未完了者の避難開始地点近くの避難建物への避難完了者数は、全体の 50% が避難を完了した時点で既に上限に達している。そのため、避難未完了者はより遠くにある避難建物または浸水域範囲外まで移動しなければならない。

5. まとめ

本論文では、動的ネットワークフローによる緊急時避難計画モデルを述べた。避難の様子は動的ネットワーク上の動的フローとして表現される。避難場所に容量制約がない場合、各経

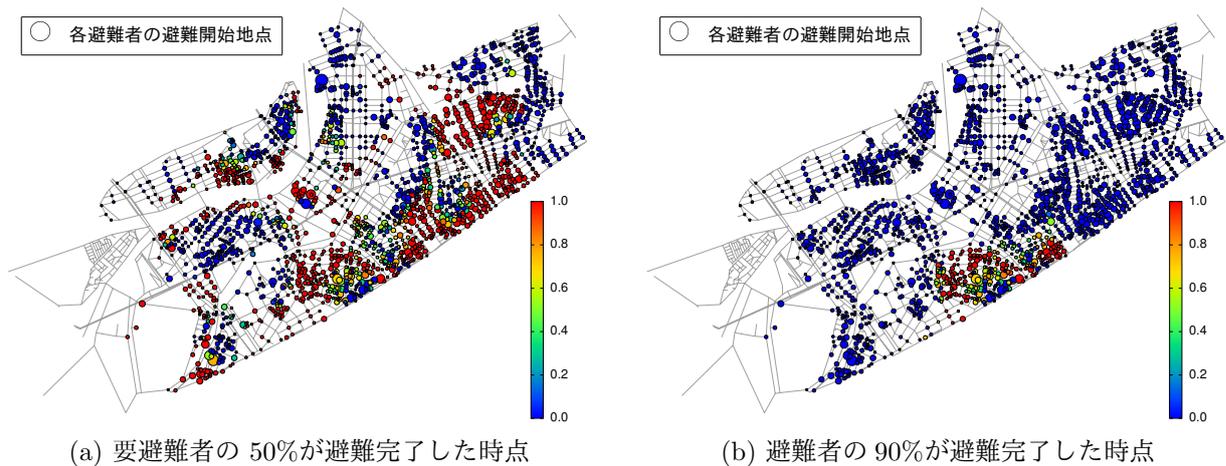


図 12: 淀川地区における避難未完了者の避難開始地点 ($\alpha = 1$ のケース)

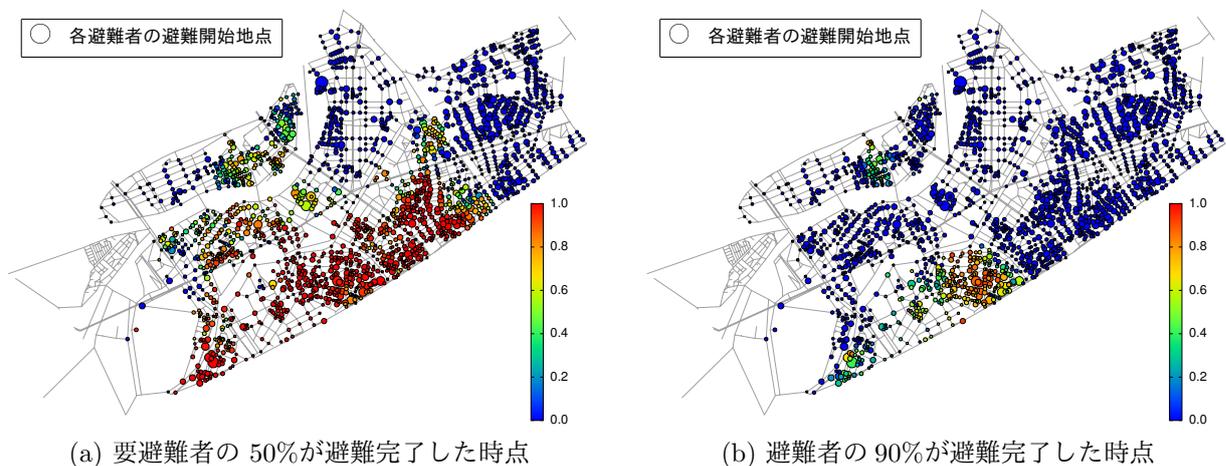


図 13: 淀川地区における避難未完了者の避難開始地点 ($\alpha = 10$ のケース)

過時間において避難完了者数が最大となる動的フローは、普遍的な最速流により求めることができる。しかし、避難場所に容量制約がある場合は、普遍的な最速流が存在するとは限らない。そこで、代わりに辞書式最速流を用いる。この辞書式最速流を求めることにより、避難計画を作成することができる。

実験的解析では、提案モデルを徳島県沖洲周辺地域、大阪府淀川区周辺地域、大阪市周辺地域に対して適用し、避難者数が夜間人口の1, 2, ..., 10倍とした各ケースでの避難の様子を解析した。それにより、避難建物の容量、要避難者の避難開始位置、およびネットワークの構造が避難者の避難完了時間に及ぼす影響を考察した。全体の傾向として、要避難者のうちの一部が、それ以外の要避難者に比べて長い避難時間がかかることがわかった。また、沖洲地区では、避難開始後早い段階で避難建物への収容人数が上限に達し、それ以降は浸水域範囲外に避難する必要があることがわかった。これに対して、淀川地区では避難の最終段階まで避難建物と浸水域範囲外への両方に避難する避難者が存在した。

今後の課題として、より大規模なネットワークを処理するための計算の高速化が挙げられる。現在は、大阪市のネットワークに対する避難計画を計算するのにおよそ69時間かかっ

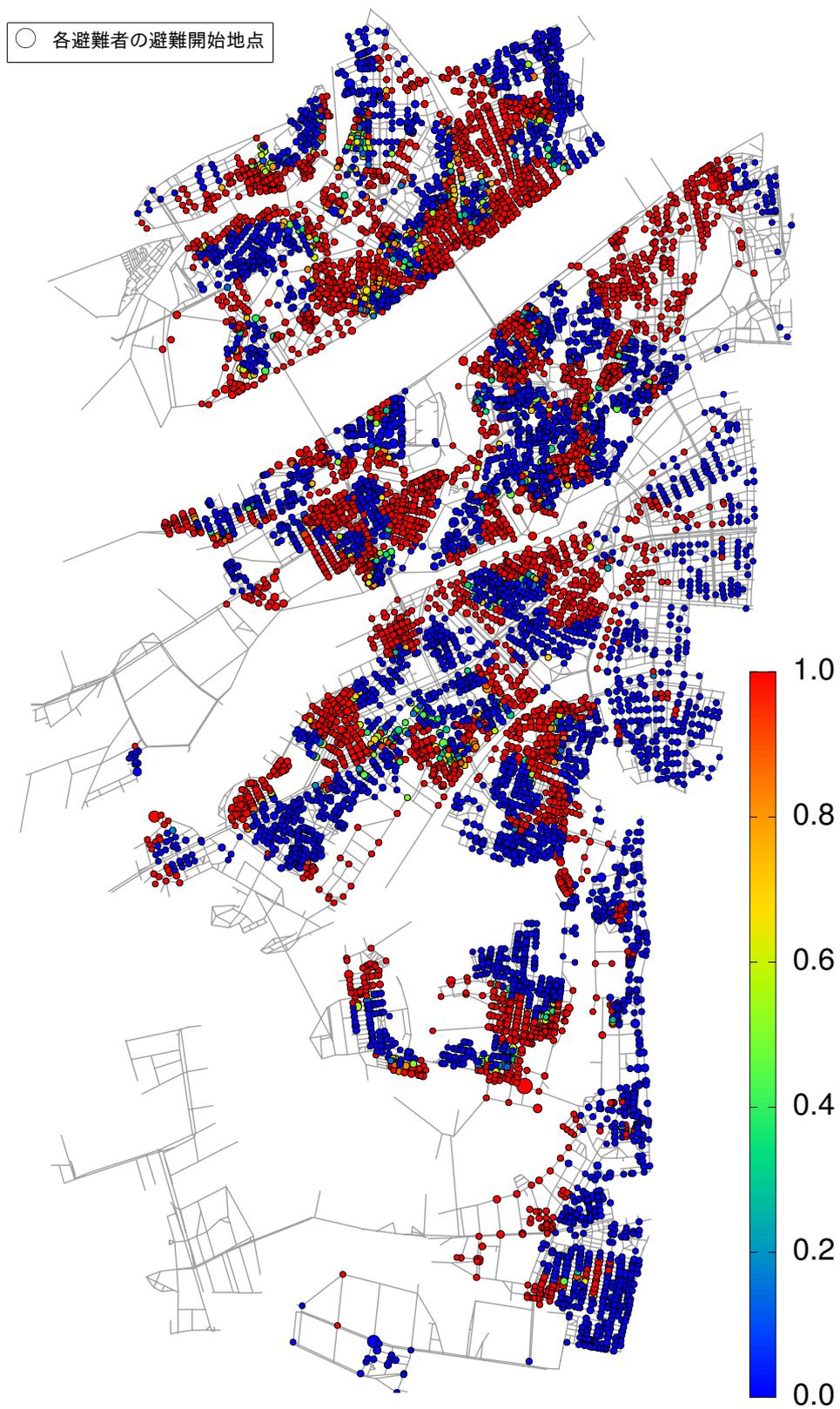


図 14: 大阪市における避難未完了者の避難開始地点 - 要避難者の50%が避難完了した時点

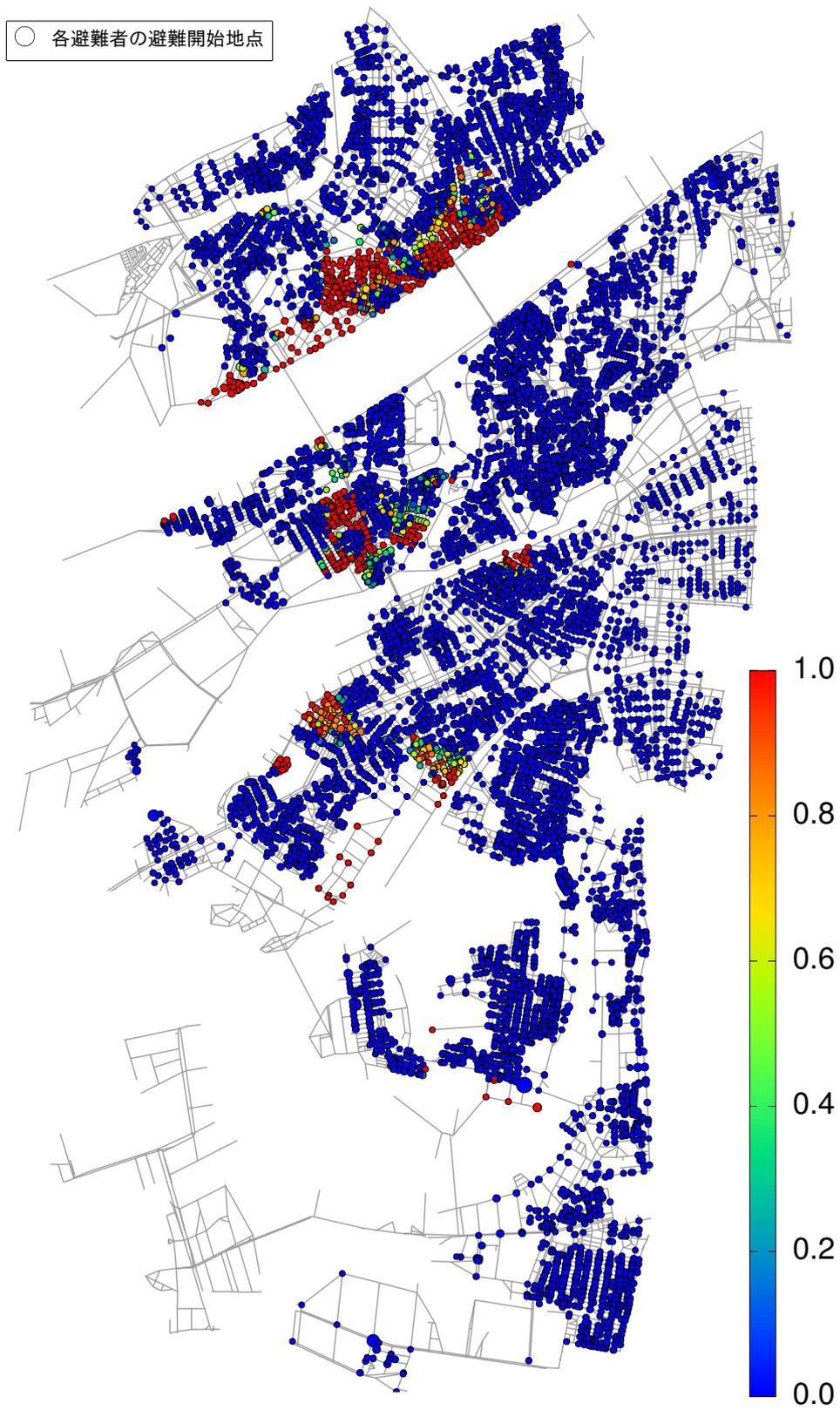


図 15: 大阪市における避難未完了者の避難開始地点 - 要避難者の90%が避難完了した時点

ている。複数のケースを計算対象とする場合、またはより大規模なネットワークを対象とする場合は、現在の実装では計算性能が十分ではない。そこで、並列演算やメモリ処理の効率化を取り入れた、より高性能な実装を実現することが望ましい。

また、実験的解析で用いた最速流計算アルゴリズムは、海事分野における航路ネットワーク上の貨物流動解析 [11] など、避難計画以外の様々な分野の問題にも適用可能である。このような様々な問題での計算性能評価も今後の課題である。

謝辞

本研究は JST CREST の研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」における研究課題“ポストペタスケールシステムにおける超大規模グラフ最適化基盤”及び JST COI プロジェクト九州大学共進化社会システム創成拠点からの支援を受けた。また、実験的解析に用いた地理情報データは、大阪市立大学瀧澤重志准教授に提供いただいた。

参考文献

- [1] R.K. Ahuja and J.B. Orlin: A fast and simple algorithm for the maximum flow problem. *Operations Research*, **37-5** (1989), 748–759.
- [2] E.A. Dinic: Algorithm for solution of a problem of maximum flow in a network with power estimation. *Soviet Mathematics Doklady*, **11** (1970), 1277–1280.
- [3] L.R. Ford and D.R. Fulkerson: Maximal flow through a network. *Canadian Journal of Mathematics*, **8** (1956), 399–404.
- [4] L.R. Ford and D.R. Fulkerson: Constructing maximal dynamic flows from static flows. *Operations Research Letters*, **6** (1958), 419–433.
- [5] L.R. Ford and D.R. Fulkerson: *Flows in Networks* (Princeton University Press, 1962).
- [6] A.V. Goldberg and R.E. Tarjan: A new approach to the maximum-flow problem. *Journal of the Association for Computing Machinery*, **35-4** (1988), 921–940.
- [7] 一般財団法人日本デジタル道路地図協会: データベース標準, <http://www.drm.jp/database/standard.html>.
- [8] E. Minieka: Maximal lexicographic and dynamic network flows. *Operations Research*, **21** (1973), 517–527.
- [9] 大鑄 史男, 小野木 基裕: セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション. 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, **51** (2008), 94–111.
- [10] 大阪市: 「津波避難施設」の確保を進めています, <http://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/page/0000138173.html>.
- [11] 柴崎隆一, 渡部富博: 東アジア圏を中心とした国際海上コンテナ貨物流動シミュレーションモデルの構築, 国土技術政策総合研究所研究報告, **37** (2009).
- [12] 総務省統計局: 平成 17 年度国勢調査, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2005/>.
- [13] 総務省統計局: 平成 22 年度国勢調査, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/>.
- [14] A. Takizawa, M. Inoue, and N. Katoh: An emergency evacuation planning model using the universally quickest flow. *The Tenth International Symposium on Operations Research and Its Applications (ISORA2011)*, China (2011), 115–125.

- [15] A. Takizawa, M. Inoue, and N. Katoh: An emergency evacuation planning model using the universally quickest flow. *The Review of Socionetwork Strategies*, **6-1** (2012), 15-28.
- [16] 徳島県: 徳島県津波浸水想定の公表について 参考資料-最高津波水位分布, <http://anshin.pref.tokushima.jp/docs/2012121000010/files/saikousuii.pdf>.
- [17] 徳島市: 津波避難計画, http://www.city.tokushima.tokushima.jp/kiki_kanri/gaiyo40.html.
- [18] 安福 健祐, 阿部 浩和, 吉田 勝行: 避難シミュレーションシステムの経路障害発生時への適用. 日本建築学会計画系論文集, **73-626** (2008), 721-727.

小林和博

国立研究開発法人 海上技術安全研究所

〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1

E-mail: kobayashi@nmri.go.jp

ABSTRACT

EXPERIMENTAL ANALYSES OF THE EVACUATION PLANNING
MODEL USING LEXICOGRAPHICALLY QUICKEST FLOW

Kazuhiro Kobayashi
National Maritime Research Institute

Ryuto Narisawa
Amazon Japan Logistics K.K.

Yuichiro Yasui
Kyushu University & JST COI

Katsuki Fujisawa
Kyushu University & JST CREST

In the case of disasters such as tsunamis, people should be quickly evacuated from the area affected by the disasters. In this article, we consider a dynamic network flow model of the evacuation planning for the people in the affected area. In the model, we represent the evacuation of the people as the dynamic flow, and the effective evacuation plan as the lexicographically quickest flow. More specifically, we show the model in which the capacity constraint of refugees is taken into account. We conduct computational experiments using the geospatial information and census data of local cities in Japan.