

広域避難計画におけるリスク管理

10 班 三好孝典, 松下義男, 橋本済

指導教員 糸井川栄一, 村尾修

1 背景

地震大国である日本では過去の地震災害による経験から、大地震に備えて早急に都市防災対策を進めていくことが重要である。東京都では全国に先駆けて「東京都震災予防条例」を制定し、震災予防対策を実施してきた。平成 14 年に公表された第 5 回地域危険度測定調査では地域に内在する地震に関する危険性を把握するための指標として、火災危険度、建物倒壊危険度、避難危険度を測定し、この 3 つを統合化した総合危険度及び 3 つの組み合わせにより地域の危険特性を表した危険度特性評価を測定した。しかし、地域コミュニティのつながりの弱体化や昼間都民の増加などの社会状況や都市構造の変化、また阪神・淡路大震災の教訓から脆弱な都市構造の整備の必要性や行政だけによる災害対応の限界により市民や事業者の防災行動力向上が必要不可欠となっている。

2 動機

地域危険度測定調査のうち、避難危険度の算出には、

1. 1 町丁目あたり 1 避難場所割り当てで固定されている
2. 避難経路は最短距離を構成する経路が前提
3. 火災や建物倒壊の危険度の低い地域も同じように避難している
4. 一斉避難が前提
5. 経路選択には重心点を利用しており、実際の道路データではない

といった問題点も指摘されている。避難地割り当てにおいては、避難地から遠い町丁目ほどより遠い避難地へ割り当てられるという不都合が生じ避難危険度が高くなることもある。また避難経路も最短距離を形成する経路のみを利用することになっており、経路が利用できなくなった場合は考慮されていない事から、避難に関する前提条件の見直しも必要であると思われる。以上のことから本研究では避難危険度に着目することにした。

3 目的

本研究では上記で述べられている避難危険度の問題点を考慮に入れることにより既存手法とは異なった、自分たちの視点から考えた避難危険度を提案し、既存手法では見出せなかった震災時の避難におけるリスクや利益を見出せるようになることを目的とした。

4 既存研究のレビュー

避難経路における危険性を移動コストとして考慮に入れた危険性に関する研究として、武末の研究 [1] がある。武末の研究では、避難経路に対する危険量の重み付けや、その危険量が最小となる避難経路である最小避難コスト経路の算出、および避難コストの総和の最小化を目的とした避難場所の割当を行っている。また、第二近隣の避難場所への割当を加えた複数割当や、避難場所の容量を考慮し、距離制約を加えた割当についても同様にシミュレーションを行っている。

地震災害時の避難におけるリスクとは、主に火災に巻き込まれるリスクであると考えることができ

る。火災に巻き込まれるリスクは、

1. 出火の密度
2. 火災の延焼速度
3. 避難経路の長さ

が大きく影響する。地震災害発生時には、阪神淡路大震災にみられるように都市において複数の地点で同時に火災が発生し、避難場所までの避難経路が通過できない場合も考えられる。このような状況を確率的手法を用いて考察した研究として、石井・腰塚の研究 [2] がある。この研究では、延焼領域を避けて避難することができる状況をモデル化している。

5 研究の方法

5.1 避難可能確率最大化を目的とした避難経路の提案

火災に巻き込まれずに避難するためには、避難ルート上に火災が避難場所までの避難可能確率を最大化させる避難経路の選択を提案する。武末の研究では避難コストを最小化していたのに対して、我々が今回提案する手法は、延焼領域に巻き込まれる事無く避難場所まで避難できる可能性を最大化するものとする。リンク単位での通過可能確率を求め、最も通過確率の高い経路を避難経路とする。火災の延焼モデルは石井・腰塚 [2] の研究に従う。また、算出した避難可能確率を用いて、避難場所へ避難可能な人口の最大化を目的とした避難場所割当を行う。

5.2 研究のフロー

5.2.1 算出における前提条件、および計算式

延焼領域の分布の前提条件は、石井・腰塚の研究 [2] に従う。都市領域内のあらゆる地点から出火する可能性があるとして、出火点の分布を特定せず密度 ρ で一様にランダムに出火点が分布しているものとする。延焼動態に関しては、一般的には風速風向によって変化し、ほぼ卵形の形状で拡大

することが知られており様々な延焼モデルが提案されているが、ここでは時刻 $T = 0$ で出火してから同心円状に等速度で延焼が拡大するものと仮定する。出火点が一様にランダムに分布するという仮定と、延焼が同心円状に拡大するという仮定を設けることで、どの避難方向におも適用できる被災距離分布を導出する。人の歩行（避難）速度は堀内の文献 [4] を参考に、混雑を考慮して $V_w = 2880\text{m/h}$ とした。延焼領域が拡大する速度 V_f は歩行速度の α 倍 ($0 \leq \alpha \leq 1$) として、 $V_f = \alpha V_w$ であらわす。 α の値は、今回は独自に、避難経路上の各町丁目の延焼速度の平均値を求めて利用した。ここで、

o : 出発点

$T = 0$ (避難開始時刻であり出火時刻)

P_t : 時刻 t における避難者の位置

とおく。微小時間 Δt 移動した地点 $P_{\Delta t}$ まで延焼領域に入らずに移動するためには $C_{\Delta t}$ 内に出火点が無ければ良い。さらに微小時間 Δt 移動して $P_{2\Delta t}$ まで無事に避難することを考えると、 $C_{2\Delta t}$ 内に出火点が無ければ良い。つまり、延焼領域に入らずに避難する条件は、連続的に T を変化させたときにそれぞれの円 C 内に出火点がひとつも存在し無いという事になる。

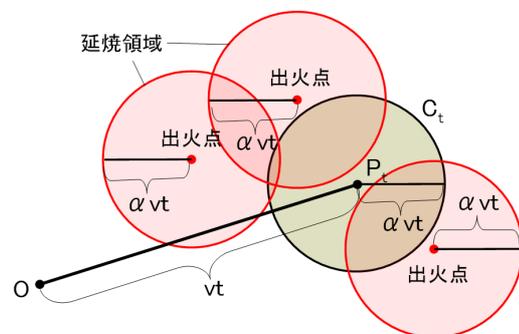


図1 延焼領域に入らない場合

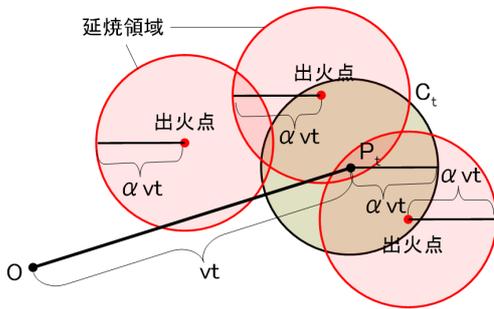


図2 延焼領域に入る場合

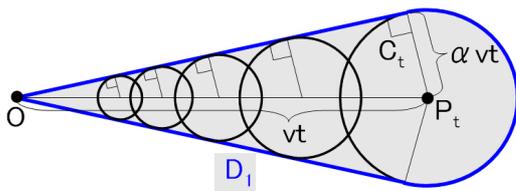


図3 領域 D_1

最終的に、避難経路上の避難距離を実際の道路網を使った避難距離に変換する際には、腰塚・小林の研究 [3] に従った。この研究の中では、道路距離と直線距離の関係について、2地点間の直線距離を用いると計測や定式化が容易であるが、実際の道路網を通過して移動に要する距離のほうが長いのは明らかであり、また、与えられた道路網における2地点間の最短距離（道路距離）と直線距離には、ある種の関係があるとして、その関係を示されている。

都市内の道路はその延長がどんなに大きくなって直線距離と道路距離の比は増加せず以下の関係が成り立つ。

$$R = 1.3u$$

R : 道路距離 u : 直線距離

避難経路の算出

5.2.2 避難経路ネットワークを作成

対象とする地域において、各町丁目の重心点、および各避難場所の各町丁目ごとの重心点を求め、それらをノードとする。隣り合った町丁目同士には、リンクを作成し、接続関係を表する。

5.2.3 各ネットワークリンクの距離を算出

隣り合っていない町丁目間の最短距離を求めるためには、各リンクの長さを求める必要がある。町丁目重心点の座標データから、各リンクの長さを計算し、リンクに対応付けた。

5.2.4 ノードからノードまでの最短距離をあらゆるものについて算出

ダイクストラ法を用いて任意のノード間の最短距離リストを作成 ($i, j = 1, 2, \dots, n$ n : ノード数)

5.2.5 ノードからノードまでの通過可能確率をあらゆるものについて算出

算出した最短距離リストを用いて任意のリンク L_{ij} について、リンク L_{ij} を通るノード k から避難場所 S_m までの最短距離を求める。

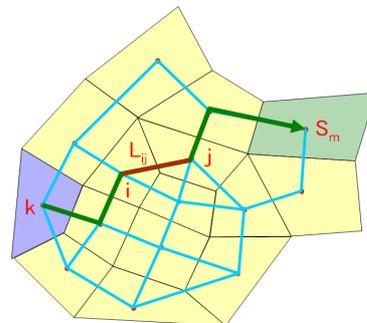


図4 リンク L_{ij} を通るノード k から避難場所 S_m までの距離

5.2.6 各リンクの通過可能確率を算出

領域 D_1 の面積を s_1 とおくと、

$$s_1 = \{\alpha\sqrt{1-\alpha^2} + (\pi - \arccos \alpha)^2\}l^2 \quad (l = V_w t)$$

密度 ρ で一様にランダムに分布している点が面積 S の領域内に x 個含まれる確率 $P(x, S)$ はポアソン分布に従うので

$$P(x, S) = \frac{(\rho S)^x}{x!} e^{-\rho S}$$

と表すことができる。よって、面積 s_1 に出火点が1つも無い確率 $P(0, s_1)$ は

$$P(0, s_1) = e^{-\rho s_1}$$

となる。計算に用いる出火密度 ρ 、延焼速度 $V_f (= \alpha V_w)$ は、通過する町丁目の値の平均値を求めた。

$$\bar{\rho} = \frac{\sum S_c \rho_c}{\sum S_c}$$

$$\bar{V}_f = \frac{\sum S_c \rho_c V_{fc}}{\sum S_c \rho_c}$$

$$\bar{V}_f = \alpha V_w$$

S_c : 各町丁目面積 ρ_c : 各町丁目出火密度
 V_{fc} : 各町丁目延焼速度
 V_w : 歩行速度 (= 2880m/s)

リンク L_{ij} の通過可能確率は

$$p_{ij} = \frac{P_{kj}}{P_{ki}}$$

で求めることができる。

5.2.7 広域避難場所までの避難可能性最大ルートを算出

通過可能確率 p_{ij} を各リンクの重みとして、ノード k から広域避難場所 S_m までの避難可能確率が最大ルートを求める。

$$P = \prod p_{ij} \rightarrow \max$$

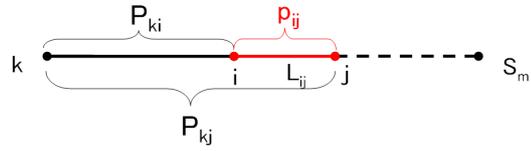


図5 各リンク L_{ij} の通過可能確率の計算

ダイクストラ法を用いるため、次のように式をおく。

$$q = -\log p_{ij}$$

として

$$\sum q_{ij} \rightarrow \min$$

を実現するルートをダイクストラ法を用いて求める。

5.2.8 結果の出力

求まった経路と、現行の避難経路の比較を行う。

避難場所割当

現行の広域避難場所割当は避難経路上のリスクを考慮せずに行われている。経路上のリスク及び避難場所容量を考慮した上で、避難可能人数が最大となるような避難場所割当の最適化を行う。

5.2.9 避難可能人口が最大となるように避難場所を割当

線形計画計算

パラメータ

H_k : 町丁目 k の人口

C_S : 避難場所 S の容量

P_{kS} : k から S への避難可能確率

変数

$$x_{iS} = 0, 1$$

目的関数

$$\max \sum \sum H_k P_{kS} x_{iS}$$

制約式

$$\sum_S x_{kS} = 1$$
$$\sum_k H_k P_{kS} x_{kS} \leq C_S$$

5.2.10 結果の出力

現行の避難場所割当と比較し，優位点，問題点などを考察する．

6 大田区における分析

木造住宅密集地域が存在し，地震災害の際には火災に巻き込まれる危険性が高いと判断されたことから，東京都大田区を対象に，ネットワークデータを作成し，シミュレーションを行った．大田区は，現状の避難場所割当では避難場所の容量の問題から，遠くの避難場所へ避難しなければならない地区も存在する．この避難場所割当を改善することも考慮に入れ，まず大田区を対象とした．

6.1 分析結果と考察

大田区の中でも，火災危険度，建物倒壊危険度が比較的高い町丁目が存在し，また，それらの町丁目を通り過ぎて避難しなければならない町丁目が多く存在することから”多摩川河川敷・六郷橋一帯”の避難場所を対象にシミュレーションを行った結果を示す．

避難経路

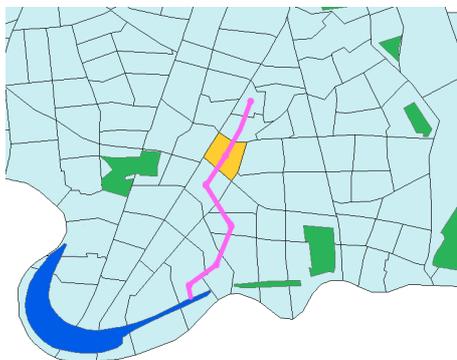


図6 ある町丁目からの避難経路（現状の最短経路）



図7 ある町丁目からの避難経路（提案手法）

図6,7に示した例では，通過する際のリスクが高い町丁目（黄色く示されている町丁目）を通るか通らないか，という違いが見られる．現状の最短経路を通るときの避難可能確率は0.8417，提案手法である避難可能確率を最大にする経路を通ったときは0.8536となった．パーセンテージにして1%強の違いだが，通過するリスクが高いリンクを回避しているのがわかる．

避難場所割当

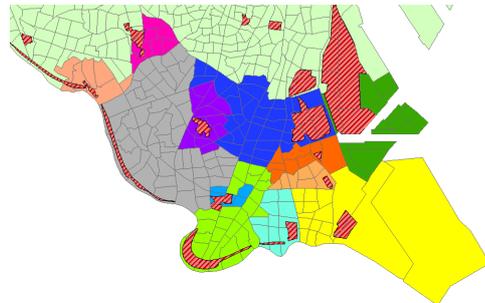


図8 避難場所への割当（現状の割当）

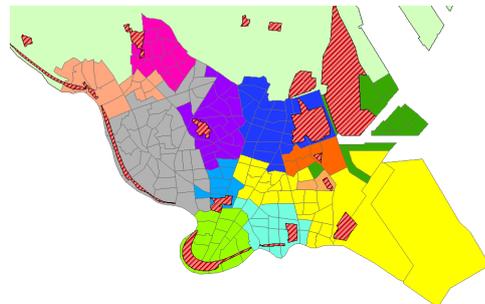


図9 避難場所への割当（提案手法による割当）

現在の割当と、今回提案した手法を使って新たに割当を行った結果をそれぞれ図 8,9 に示す。今回新たに割当を行った結果では、避難距離が伸びた町丁目が存在する。制約条件に避難距離を加える事を検討する必要があるだろう。

提案手法を使って、大田区全体の避難可能人数を算出した結果を図 10 に示す。今回の手法では、現行の割当と比較して、36724 人多く避難可能になった。この人数は、大田区全体の昼間人口と比較すると、約 5.63% にあたる。



図 10 算出した避難可能人数の比較

7 まとめと課題

まとめ

本研究では、現状の地域危険度調査、特に避難危険度の抱えてる問題点に着目し、新たなリスク評価指標の提案、および実際に東京都大田区のデータを用いてシミュレーションを行った。

既存研究の調査を行い、既に試みられた提案手法の比較と、問題点の解決を試みた。

火災・延焼を考慮に入れた避難可能確率を使った避難経路選択手法と、無事に避難場所まで到着できる住民の数の期待値を最大とする避難場所の割当手法を提案した。

課題

避難場所割当の際に用いる線形計画法における制約式には、距離や避難時間の制約など、加える必要がある条件が存在するのではないだろうか。これら

の制約条件を加えた場合のシミュレーション結果との比較、考察も必要だろう。

謝辞

本研究を進めるにあたって、お忙しい中ご指導頂きました糸井川栄一先生、村尾修先生、卒業論文を参考にさせて頂いた武末裕樹氏、そしてアドバイスを頂いた鎌田智之氏、ご協力頂いたリスク工学専攻の皆様へ深く感謝致します。

参考文献

- [1] 武末裕樹, 火災や建物倒壊の影響を考慮した避難場所地区割当に関する研究, 筑波大学 社会工学類 卒業論文, 2005
- [2] 石井儀光・腰塚武志, 同時多発火災における直線的避難距離の分布に関する理論的考察, 日本都市計画学会学術研究論文集 vol.33 pp.331-336, 1998
- [3] 腰塚武志・小林純一, 道路距離と直線距離, 日本都市計画学会学術研究論文集 vol.18 pp.43-48, 1983
- [4] 堀内三郎, 新版 建築防火, 朝倉書店, 1994
- [5] 国土交通省 都市・地域整備局 まちづくり推進課, 都市防災対策室,
<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sigaiti/tobou/index.htm>
- [6] 東京都, 東京都震災対策条例,
http://www.reiki.metro.tokyo.jp/reiki_honbun/g1010173001.html
- [7] 東京都, 第 4 回 地震に関する地域危険度測定調査報告書, 1997
- [8] 東京都, 第 5 回 地震に関する地域危険度測定調査報告書, 2002
- [9] 東京都危機管理監, 東京都の震災対策,
<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/shutochokka/3/shiryou1.pdf>