

東京都江東区北砂地区における大規模地震発生時の避難行動モデル構築と避難者数推計

渡邊 敬士¹・浅岡 大貴²・紺野 克昭³・秋山 祐樹⁴

¹学生会員 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)
E-mail: me18136@shibaura-it.ac.jp

²非会員 元芝浦工業大学 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)
E-mail: ah15002@shibaura-it.ac.jp

³正会員 芝浦工業大学 教授 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)
E-mail: konno@sic.shibaura-it.ac.jp

⁴正会員 東京大学空間情報科学研究センター (CSIS) (〒227-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)
E-mail: aki@csis.u-tokyo.ac.jp

平成 26 年の地震調査研究推進本部の長期評価によると、今後 30 年以内に 70% 程度の確率で M7.3 クラスの首都直下地震が発生すると推定されている。しかし、東京都内には未だ木密地域が点在しており、老朽化した木造建物の倒壊や延焼火災発生による被害拡大が懸念されている。その一方で、木密地域では公園などのオープンスペースが不足している場合があり、緊急時の住民の避難に支障をきたす恐れがある。今後、合理的な防災まちづくりや避難計画の策定には数的根拠が必要となるが、そういったアプローチは未だ不足している。

そこで本研究では木密地域である江東区北砂地区を対象に、首都直下地震発生時の行動を問う SP 調査を行い、行動モデルを構築することで住民の避難行動に与える要因を分析し、さらに街区単位というミクロな視点で避難者推計を行った。

Key Words : behavior model, prevention of disaster, estimate of evacuation people

1. はじめに

1995 年に発生した兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）は、国内初の都市を直撃した直下型地震であり、阪神地区において甚大な被害をもたらした。特に地震による建物の倒壊や、それに伴った木密地域での延焼火災の発生は都市の地震災害による脆弱性を浮き彫りにした¹⁾。平成 26 年の地震調査研究推進本部の長期評価によると、東京圏においても今後 30 年以内に 70% 程度の確率で M7.3 クラスの直下型地震が発生すると推定されており、近年対策が急がれている²⁾。しかし、東京都内には環状 7 号線付近に木密地域が広がっており、首都直下地震発生時に甚大な被害が出ると予想されている。特に木密地域では、災害発生時に避難できるような公園などのオープンスペースが不足しており、円滑な住民避難に支障をきたすことが予想され、被害の拡大が懸念されている。抜本的な対策に向けて再開発事業や避難計画の策定が必須となるが、それに用いる数値的根拠は未だ不足している。特に、大規模地震発生時の住民の避難行動を事前に把握することは、避難行

動の要因分析や合理的な避難場所の配置検討に必要であると考えられるが、そういった視点でのアプローチは検討の余地が残されている。

住民の避難行動の把握を目的とした研究としては、高田らの SP 調査を用いた避難行動モデル構築による要因分析と避難者推計の事例が挙げられる³⁾。高田らの研究では、足立区千住地区を対象として、首都直下地震をはじめとする複合災害発生時の住民の避難行動を問う SP 調査を行い、町丁目単位で選択肢集合を形成することで、避難行動モデルの構築および避難者数の推計に成功した。しかし、町丁目は空間的な合理性を排除して形成されている場合が多く、ミクロな視点での分析には課題が残る。

そこで本研究では、町丁目単位より緻密である街区単位で選択肢集合を形成し、木密地域である江東区北砂地区を対象として、よりミクロな視点で地域の避難計画や防災まちづくりへの応用を念頭に置いた避難行動モデルの構築と避難者推計を行う。研究の流れを図-1 示す。まず、対象地域において、首都直下地震発生を

想定した SP 調査を行い、住民の避難行動について質問する。その後、基礎分析を行うことで避難行動の有無や避難先選択に与える要因を分析し、構築する行動モデルの構造や組み込む説明変数の検討を行う。モデルの構築に必要な選択肢の設定は、GIS ソフトにより、対象地区の避難先データと道路ネットワークデータを使用して作成し、モデルの推定を行う。最後に、得られた行動モデルを使用し、街区単位でそれぞれの避難先の避難者数を推計し、施設ごとに集約する。

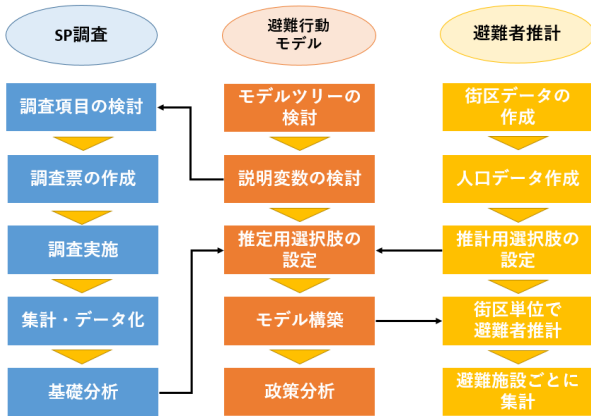


図-1 研究の流れ

2. 対象地域

本研究では東京都江東区北砂 3, 4, 5 丁目地区を研究対象地域として設定する。当地区は老朽化した古い建物が密集し、緻密な道路網が形成されており、防災面での対策が急がれている。特に 3, 4 丁目地区は東京都が行う地域危険度測定調査において、最も危険とされる総合危険度 5 を示している⁴⁾。図-2 に北砂 3, 4, 5 丁目地区と避難施設を示す。避難施設とは、東京都が定める広域避難場所および一時集合場所の他に、公園や学校、寺院など災害発生時に避難できると考えられる施設を抽出したものである。北砂 5 丁目地区に広域避難場所の北砂 5 丁目団地をはじめとした比較的大きな避難施設が集中する一方で、北砂 3 丁目地区では公園や学校といった避難施設が不足していることが確認できる。また、南部に位置する北砂 4 丁目地区では 4 つの公園が配置されているが、いずれも規模は大きくなく、トイレが設置されていない公園もあった。

本研究ではこの北砂 3, 4, 5 丁目に存在する 101 の街区を研究対象とし、設定した避難施設への避難行動について分析する。

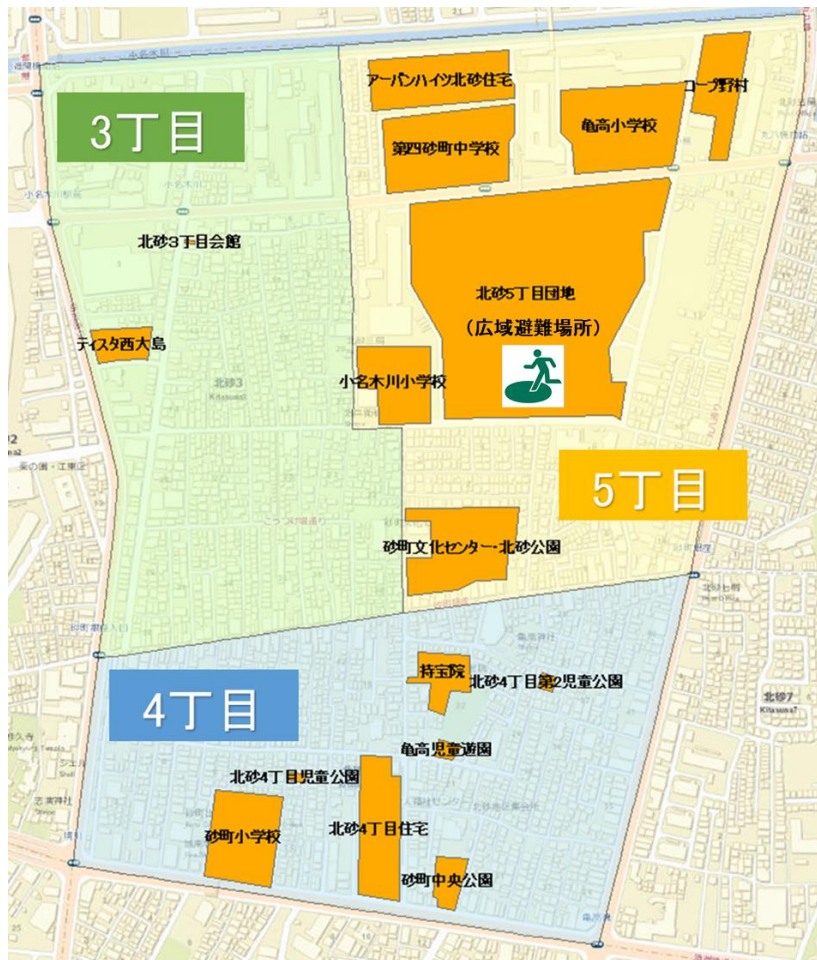


図-2 北砂 3・4・5 丁目地区と避難施設

3. SP 調査

本研究では避難行動モデルを構築することを目的とし、対象地区において SP 調査を行った。概要を以下に示す。

(1) 状況の設定

阪神淡路大震災の記録を参考に、以下の状況設定で 2 ケースに分けて回答者がとるであろう行動について質問した。

【状況】

「風が強い 1 月某日の明け方に、首都直下地震 (M7.3) が発生し、北砂地区では震度 7 の強い揺れを記録。回答者は自宅被災した。」

[ケース 1] 延焼火災なし

[ケース 2] 延焼火災発生 (延焼火災あり)

(2) 調査票の作成

まず回答者の個人属性 (性別・年齢など)、住居について (住宅構造、築年代、耐火および準耐火への対応など)、居住街区についての項目を設けた。その後、図のフローに従い、“1. ケース別の避難行動の有無”、“2. 避難先について”、加えて各々の理由について質問した。尚、自宅から屋外の施設に移動する動きを避難と定義した。

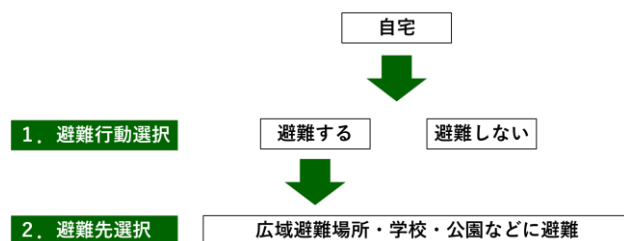


図-3 質問のフロー

表-1 実施概要

配布地区	江東区北砂 3・4・5 丁目
状況設定	ケース 1：延焼火災なし ケース 2：延焼火災あり
対象住宅	第 1 回：集合住宅 (一部戸建て含む) 第 2 回：戸建て住宅
サンプル数	第 1 回：5 2 4 サンプル 第 2 回：2 2 4 サンプル 合計：7 4 8 サンプル

(3) 調査の実施

北砂 3, 4, 5 丁目地区を対象に、2018 年 10 月と 2019 年 3 月の 2 回に分けて調査を行った。調査票の配布は、第 1 回は郵送配布、第 2 回はポスティングとし、対象地区に偏りなく配布した。調査票は郵便返却とし、合わせて 748 サンプルを取得した。

4. 基礎分析

SP 調査で得られたサンプルをもとに、基礎分析を行った。

(1) 避難行動の有無とその理由について

延焼火災なしのケースで約 50%、延焼火災ありのケースで約 75%のサンプルが自宅から避難すると回答した。自宅から避難する理由としては、延焼火災なしのケースでは「余震が怖い」、「倒壊を懸念して」といった地震そのものによる被害を懸念したものが上位を占めた。また、「ライフラインが寸断されたから」、「情報を収集する為」、「救援物資を受け取る為」といった被災後の生活を見据えた理由も多くなった。その一方で延焼火災ありのケースでは「延焼火災を懸念して」という理由が大半となり、延焼火災からの安全確保を最優先に考える傾向が見られた。

(2) 避難先選択とその選択理由について

自宅から避難すると答えたサンプルが選択した避難先を「学校」「公園」「広域避難場所」「その他」の 4 グループに分類した。その結果を図-6 に示す。延焼火災なし・ありの両ケースともに「学校」が全体の約 6 割を占め、その他の避難先も兼ね同様の割合となった。ここで、東京都では二段階避難を計画しており、町会単位で「一時集合場所」を設置している。しかし、意識的に一時集合場所を選択しているサンプルは著しく少なく、認知度の低さが顕著となった。また、ほとんどのサンプルが北砂 3, 4, 5 丁目内の避難先を選択する結果となった。

避難先の選択理由は延焼火災なし・ありの両ケースともに「自宅から近いから」、「敷地が広いから」という 2 つの理由が過半数となった。

(3) 選択した避難先までの所要時間の分布

次に、サンプルが選択した避難先までの移動時間を 1 分刻みで最大 10 分まで集計した。その結果を表に示す。延焼火災なし・ありの両ケースともに約 75%のサンプルが自宅から 5 分圏内の避難先を選択した。さらに徒歩 10 分圏まで広げると、両ケースともに約 95%のサンプルが避難を完了する結果となった。

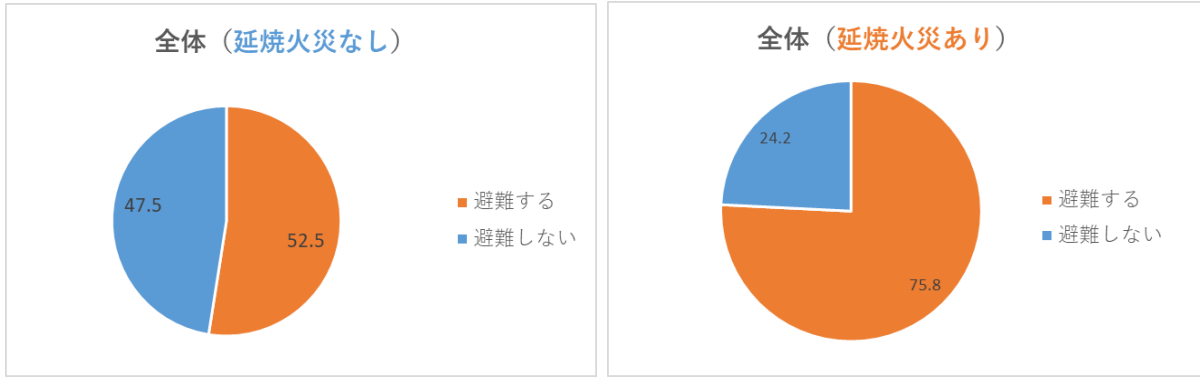


図4 避難行動の割合

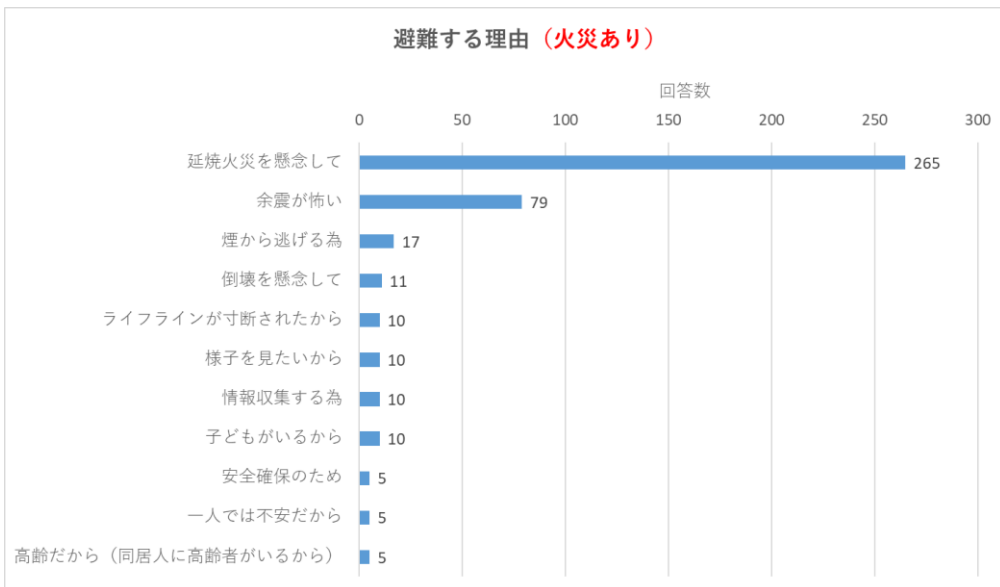
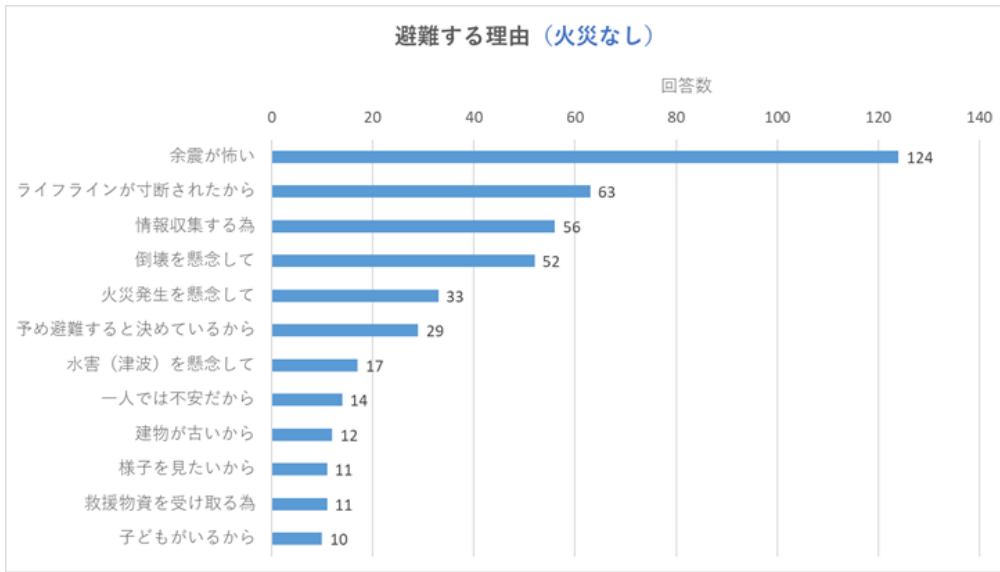


図5 避難行動の理由



図-6 避難先種別の割合

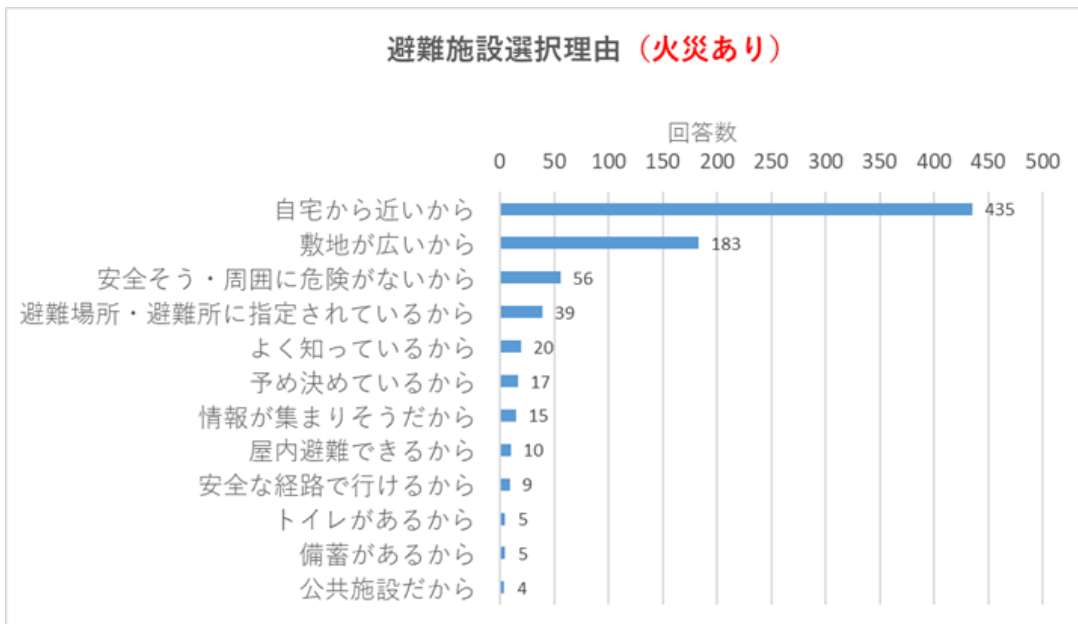
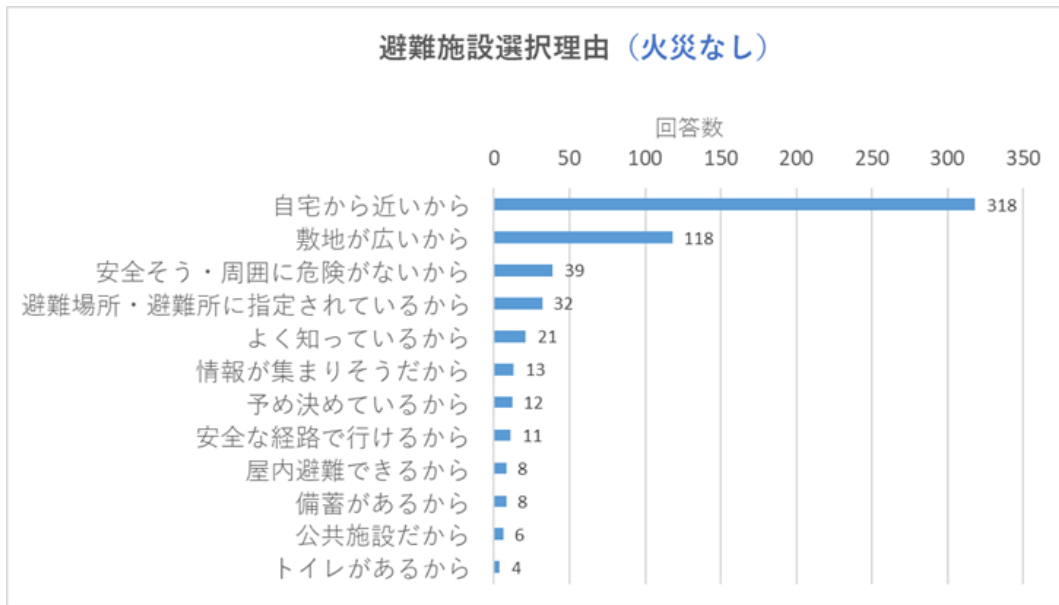


図-7 避難施設の選択理由

表-2 避難施設までの移動時間の分布 (左:延焼火災なし, 右:延焼火災あり)

移動時間 (分)	サンプル数	累積サンプル数	累積割合 (%)	移動時間 (分)	サンプル数	累積サンプル数	累積割合 (%)
0	3	3	0.8	0	4	4	0.8
1	26	29	7.5	1	42	46	8.6
2	30	59	15.3	2	47	93	17.4
3	81	140	36.4	3	108	201	37.7
4	4	144	37.4	4	11	212	39.8
5	143	287	74.5	5	201	413	77.5
6	5	292	75.8	6	7	420	78.8
7	11	303	78.7	7	14	434	81.4
8	4	307	79.7	8	5	439	82.4
9	0	307	79.7	9	0	439	82.4
10	54	361	93.8	10	66	505	94.7

5. 行動モデル構築

SP 調査で得られたサンプルから延焼火災なし・ありの 2 ケースに分けて, 2 段階の NL モデルを構築する。

(図-8) 前述の基礎分析により, 避難行動選択および避難先選択に影響を及ぼすと考えられる項目を抽出し, モデルの説明変数に設定した。推定結果を下記に示す。

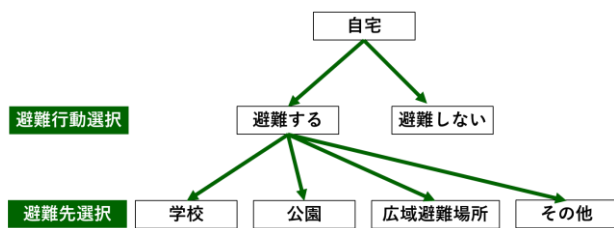


図-8 構築するモデルの構造

(1) 避難先選択

a) 延焼火災なし

「自宅から避難施設までの所要時間」「避難施設の敷地面積」を説明変数に加えた。なお基礎分析の結果から, 自宅から避難する際の交通手段はほぼ全てのサンプルが徒歩と回答していたため, 歩行速度を 60m 毎分に設定して所要時間を算出した。モデルの推定結果は, 修正済み尤度比 0.31 となり, 各説明変数も統計的に有意となった。

表-3 避難先選択 推定結果 (延焼火災なし)

説明変数	推定値	t値	t値 (絶対値)
避難施設までの所要時間/100 (s)	-0.205	-4.107	4.107
敷地面積/1000 (m ²)	0.101	3.288	3.288
定数項 (学校)	2.095	7.544	7.544
定数項 (公園)	1.140	3.842	3.842
定数項 (広域避難場所)	-3.301	-1.944	1.944
初期尤度		-354.61	
最終尤度		-239.51	
尤度比		0.32	
修正済み尤度比		0.31	
的中率		70%	
サンプル数		317	

10%有意
5%有意
1%有意

効用関数 (避難先選択)

$$\begin{aligned}
 V_{school} &= \theta_{a1}(\text{移動時間})/100 + \theta_{a2}(\text{敷地面積})/1000 + \beta_{school} \\
 V_{park} &= \theta_{a1}(\text{移動時間})/100 + \theta_{a2}(\text{敷地面積})/1000 + \beta_{park} \\
 V_{eva} &= \theta_{a1}(\text{移動時間})/100 + \theta_{a2}(\text{敷地面積})/1000 + \beta_{eva} \\
 V_{other} &= \theta_{a1}(\text{移動時間})/100 + \theta_{a2}(\text{敷地面積})/1000
 \end{aligned}$$

図-9 避難先選択 効用関数 (延焼火災なし)

b) 延焼火災あり

「延焼火災なし」の場合に加えて, 東京消防庁から提供して頂いたデータをもとに作成した「(避難施設が属する街区の) 延焼危険度」を説明変数に設定した。しかし, この説明変数は統計的には有意な結果とはならなかった。モデル全体としては修正済み尤度比 0.33 となり, その他の説明変数も統計的に有意な結果となった。

表-4 避難先選択 推定結果 (延焼火災あり)

説明変数	推定値	t値	t値 (絶対値)
避難施設までの所要時間/100 (s)	-0.243	-5.557	5.557
敷地面積/1000 (m ²)	0.105	3.027	3.027
延焼危険度	-0.101	-0.764	0.764
定数項 (学校)	2.123	7.212	7.212
定数項 (公園)	1.221	4.464	4.464
定数項 (広域避難場所)	-3.194	-1.655	1.655
初期尤度		-498.68	
最終尤度		-327.67	
尤度比		0.34	
修正済み尤度比		0.33	
的中率		68%	
サンプル数		445	

10%有意
5%有意
1%有意

効用関数 (避難先選択)

$$\begin{aligned}
 V_{school} &= \theta_{a1}(\text{移動時間})/100 + \theta_{a2}(\text{敷地面積})/1000 + \theta_{a3}(\text{延焼危険度}) + \beta_{school} \\
 V_{park} &= \theta_{a1}(\text{移動時間})/100 + \theta_{a2}(\text{敷地面積})/1000 + \theta_{a3}(\text{延焼危険度}) + \beta_{park} \\
 V_{eva} &= \theta_{a1}(\text{移動時間})/100 + \theta_{a2}(\text{敷地面積})/1000 + \theta_{a3}(\text{延焼危険度}) + \beta_{eva} \\
 V_{other} &= \theta_{a1}(\text{移動時間})/100 + \theta_{a2}(\text{敷地面積})/1000 + \theta_{a3}(\text{延焼危険度})
 \end{aligned}$$

図-10 避難先選択 効用関数 (延焼火災あり)

(2) 避難行動選択

a) 延焼火災なし

基礎分析で避難行動の有無が分かれる要因となった「木造住宅か否か（木造ダミー）」「耐火・準耐火建築物か否か（耐火・準耐火ダミー）」と「避難先選択のログサム変数」の3つを説明変数に設定した。しかし、モデルの推定結果は修正済み尤度比 0.05 となり、統計的に有意なモデルとはならなかった。

表-5 避難行動選択 推定結果（延焼火災なし）

説明変数	推定値	t値	t値（絶対値）
木造ダミー	0.700	3.338	3.338
耐火・準耐火ダミー	0.806	4.326	4.326
ログサム変数	0.709	4.321	4.321
定数項（避難しない）	1.673	3.445	3.445
初期尤度		-454.01	
最終尤度		-425.80	
尤度比		0.06	
修正済み尤度比		0.05	10%有意
的中率		56%	5%有意
サンプル数		655	1%有意

効用関数（避難行動選択）

$$V_{no} = \theta_{b1}(\text{耐火・準耐火ダミー}) + \beta_{no}$$

$$V_{yes} = \theta_{b2}(\text{木造ダミー}) + \lambda(\text{ログサム変数})$$

図-11 避難行動選択 効用関数（延焼火災なし）

b) 延焼火災あり

基礎分析の結果から高齢者ほど避難しなくなる傾向があることが明らかとなったため、説明変数に「高齢者ダミー（70歳以上）」を加えた。また、延焼火災ありの場合では居住地の延焼危険度が高くなるほど避難する傾向があると考えられる為、「居住地の延焼危険度」も説明変数に設定した。モデルの推定結果は修正済み尤度比 0.18 となり、各説明変数も兼ね有意な結果となった。しかし、避難先選択と同様に説明変数「延焼危険度」は統計的に有意な結果とはならなかった。

表-6 避難行動選択 推定結果（延焼火災あり）

説明変数	推定値	t値	t値（絶対値）
木造ダミー	1.151	3.587	3.587
耐火・準耐火ダミー	0.496	2.179	2.179
延焼危険度（居住街区）	0.086	0.690	0.690
高齢者ダミー（70歳以上）	0.472	2.412	2.412
ログサム変数	0.431	2.898	2.898
定数項（避難しない）	0.149	0.207	0.207
初期尤度		-427.67	
最終尤度		-343.23	
尤度比		0.20	
修正済み尤度比		0.18	10%有意
的中率		71%	5%有意
サンプル数		615	1%有意

効用関数（避難行動選択）

$$V_{no} = \theta_{b1}(\text{耐火・準耐火ダミー}) + \theta_{b3}(\text{高齢者ダミー}) + \beta_{no}$$

$$V_{yes} = \theta_{b2}(\text{木造ダミー}) + \theta_{b4}(\text{延焼危険度}) + \lambda(\text{ログサム変数})$$

図-12 避難行動選択 効用関数（延焼火災あり）

6. 避難者推計

本研究では構築した避難行動モデルを利用して、研究対象地区内において街区単位で避難者数を推計し、避難施設ごとに集計することで、各避難施設への避難者数を算出した。避難者数推計にあたり、街区単位での定住人口のデータが必要となるが、国勢調査をもとにしたオープンデータでは丁目単位が最小となる。そこで、本研究では東京大学空間情報科学研究センター（CSIS）から提供して頂いたマイクロ人口統計データを利用し、GISソフトを用いて街区単位での定住人口データを作成した。このマイクロ人口統計データは、建物の位置・形状・面積の情報に基づいて国勢調査の統計値を非集計化することで5歳階級ごとに居住者の情報を推定したものである⁹。推計結果を下記に示す。

a) 延焼火災なし

下図では各避難施設に集まる避難者数を敷地面積で除することで、避難者の密度をカラーランプで表現した。その結果、南部の北砂4丁目地区で密度が高くなる傾向が見られた。この原因として、北砂4丁目地区では地理的に広域避難場所から離れるため、所要時間が徒歩10分以上と算出された地域が多かったことが考えられる。その結果、広域避難場所を選択できなかった住民が最寄りの公園や学校などに配分されたために、他地域よりも密度が高く算出されたと考察する。

b) 延焼火災あり

延焼火災ありのケースでも延焼火災なしのケースと同様の傾向が見られた。延焼火災なしのケースと比較して全体的に避難者数が増加している為、全体的に各避難施設の密度が上昇している。特に南部の北砂4丁目地区の公園ではキャパシティに不安が残る結果となった。

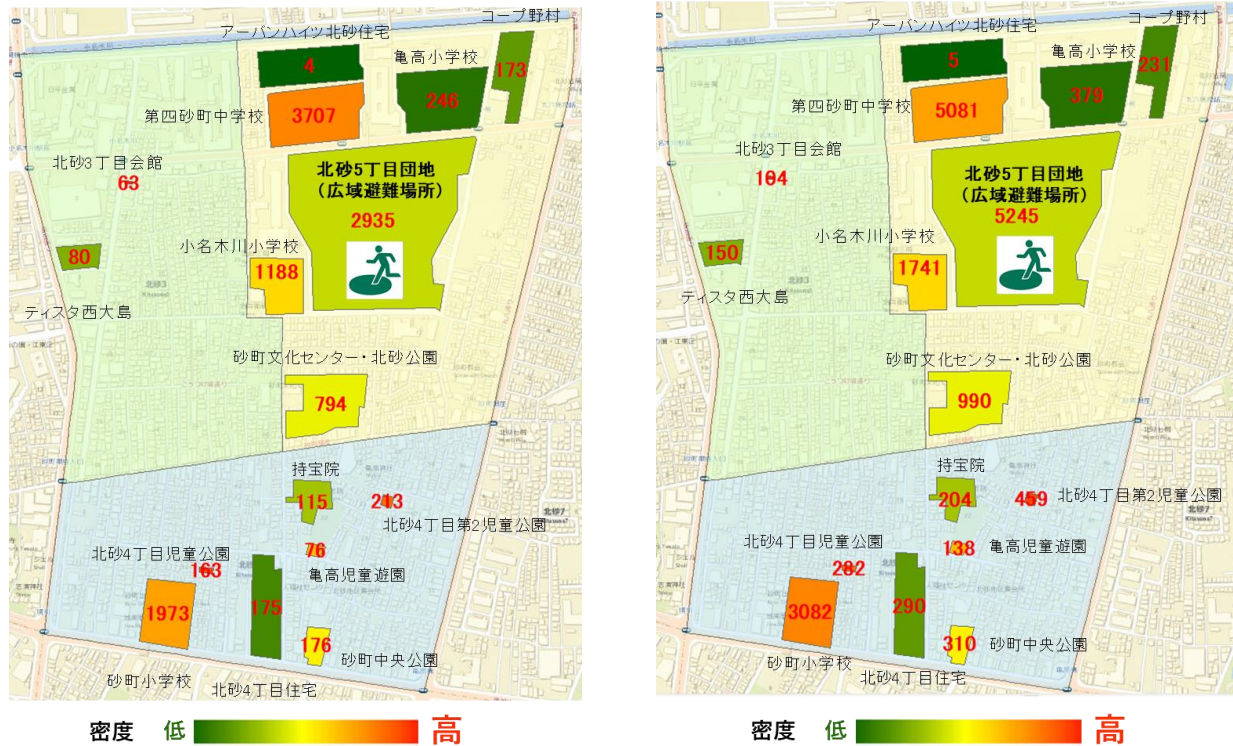


図-13 避難者数 推計結果 (左: 延焼火災なし, 右: 延焼火災あり)

7. 考察とまとめ

本研究では独自に SP 調査を行い、避難行動モデルを構築し、街区単位というマイクロな単位で避難者数を推計することに成功した。また、基礎分析の結果から一時集合場所の認知度の低さや、避難場所と避難所の概念の混同など、行政と住民との間に認識の差が存在することが明らかとなった。モデルの精度や推計手法には未だ課題が残るが、今後も合理的な避難計画の策定や防災まちづくりの指針建てへの貢献を目指し、モデルを用いた政策分析を行って現状の地域計画の有効性を検証していくことが目標である。

謝辞

本研究は「東京大学空間情報科学研究センター (CSIS)」と共同で行わせて頂きました。(研究番号 831) 避難者推計に使用させて頂きましたマイクロ人口統計データは秋山祐樹先生の研究成果です。

また、行動モデルの構築で使用した延焼危険度のデータセットは「東京消防庁」からご提供いただきました。

さらに SP 調査にあたり、「江東区北砂三・四・五丁目地区の住民の方々」や「江東区都市整備部地域整備課」, 「北砂三・四・五丁目まちづくり協議会」に多

大なご協力を賜りました。この場をお借りし厚く御礼を申し上げ、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 内閣府 防災情報のページ 阪神・淡路大震災復興誌 第 1 章 阪神・淡路大震災の概要と被害状況, <http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/pdf/101.pdf>
- 2) 地震調査研究推進本部, 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価 (第二版) 概要資料 (平成 26 年 4 月), https://www.jishin.go.jp/main/chousa/14apr_sagami/sagami_gaiyou.pdf
- 3) 高田・藤生・大原・山下・金野: 選好意識データを用いた災害時避難行動モデルの推定, 日本地震工学会論文集 第 16 巻 第 5 号, 2016
- 4) 東京都都市整備局: 平成 30 年 第 8 回 地域に関する地域危険度測定調査, http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_6/home.htm
- 5) 東京大学秋山研究室: Akiyama, Y., Takada, T. and Shibasaki, R., Development of Micropopulation Census through Disaggregation of National Population Census, CUPUM2013 conference papers, 110, 2013.