

避難所別避難者数予測モデルの構築への試み -2016年熊本地震を通じて-

吉田 護¹・柿本竜治²・畑山満則³・阿部真育⁴

¹正会員 長崎大学水産・環境科学総合研究科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)
E-mail: yoshida-m@nagasaki-u.ac.jp

²正会員 熊本大学大学院 先端科学研究部 (〒 860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1)
E-mail: kakimoto@kumamoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: hatayama@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁴非会員 北海道大学大学力強化推進本部 (〒 001-0021 札幌市北区北 21 条西 10 丁目)
E-mail: mike_abe@cris.hokudai.ac.jp

本研究では、2016年に発生した熊本地震時のデータを用いて、震災後の住民の退避行動の特性を明らかにする。さらに、震災後の避難所別の住民の退避者数予測を行うための住民の退避行動モデルを構築する。東日本大震災後に設けられた指定緊急避難所制度が設けられたことにより、指定緊急避難場所と指定避難所は明確に区別されるようになった。指定緊急避難場所は、あくまで緊急の避難場所であり、指定外の避難先に滞在していた避難者も含めて、避難者が指定避難所に集約されていくことが期待される。こうした避難場所、避難所の特性を考慮することにより住民の避難行動及び避難所選択行動の理解の深化と避難所別の避難者予測モデルを構築することが可能となる。結果として、避難所の集約過程において、指定の有無は大きく影響を及ぼしておらず、指定避難所への避難者の明確な集約は見られないこと、指定緊急避難場所、指定避難所ともに、震災直後は住民の退避先として有効に機能していることが分かった。

Key Words : *shelter capacity, designated/non-designated shelters, sheltering behaviors, 2016 Kumamoto earthquake*

1. はじめに

震災後の住民の避難所への退避行動は、震災後、余震等から身を守るために重要な減災行動である。自治体は、震災後に多くの退避者が出ることを前提として、震災以前の段階から避難所の整備や備蓄を進めておく必要がある。このとき、各避難所に退避してくる住民の数やその特性を予測しておくことにより、より効果的、効率的に避難所の整備を進めることが可能となる。本研究では、このような観点から、2016年に発生した熊本地震の事例を通じて、指定外の避難所を含む避難所別の避難者数を推定するための住民の避難所選択行動をモデル化する。後の分析で明らかにするように、地域を巨大地震が襲う場合、避難所の容量を一時上回って退避者が発生し、周辺の施設や駐車場、大規模な道路沿いに住民が一時退避する場合がある。また、私的空間の確保などを理由に、自動車での退避し、そのまま車中泊を行う住民も少なくない。こうした住民の退避行動を前提として住民行動をモデル化することにより、特定の地震動シナリオ下での現状の指定避難所の容量評価と指定外避難所の発生を予測することが可能となる。

2. 本研究の基本的枠組み

(1) 避難場所、避難所に関する法制度

平成23年3月に発生した東日本大震災時、切迫した災害の危険から逃れるための「避難場所」と、その後の避難生活を送るための「避難所」が必ずしも明確に区別されていなかった。また、災害ごとに避難場所が指定されていなかったため、発災直後に避難場所に逃れたもののその施設に津波が襲来して多数の犠牲者が発生したなど、被害拡大の一因となった¹⁾。このような教訓を踏まえ、平成25年6月に災害対策基本法が改正され、「指定緊急避難場所」と「指定避難所」に関する規定が設けられた。指定緊急避難場所は、津波、洪水等による危険が切迫した状況において、住民等が緊急に避難する際の避難先として位置付けるものであり、住民等の生命の安全の確保を目的とするものである。一方で、指定避難所は、災害の危険性があり避難した住民等を災害の危険性がなくなるまで必要な期間滞在させ、または災害により家に戻れなくなった住民等を一時的に滞在させることを目的とした施設である。特に、指定緊急避難場所は災害種ごとに指定されなければならない(同法第四十九条の四)。また、指定緊急避難場

所と指定避難所は相互に兼ねることができる（同法第四十九の七）。

このような法改正に伴い、今回分析対象である 2016 年の熊本地震によって被災した熊本市では、災害種別の指定緊急避難場所と指定避難所を指定し、情報開示等を通じて市民への周知に努めてきた経緯がある。表-1 に熊本市 5 区の指定緊急避難場所、指定避難所数、指定緊急避難場所の中で指定避難所を兼ねている割合を表す。指定緊急避難場所には、公園や河川敷、また小・中学校の校庭など長期的な生活拠点として適さない場所が含まれる。指定避難所には、小中学校の校舎や体育館などが指定されており、これらの場所は指定緊急避難場所にも指定されている。このように、指定緊急避難場所の中には、指定避難所として長期的に退避生活を送ることができる施設が含まれていることは留意されたい。

また、同法第八十六の六では、災害応急対策責任者は、災害が発生したときは、法令又は防災計画の定めるところにより、遅滞なく、避難所を供与するとともに、当該避難所に係る必要な安全性及び良好な居住性の確保、当該避難所における食糧、衣料、医薬品その他の生活関連物資の配布及び保健医療サービスの提供その他避難所に滞在する被災者の生活環境の整備に必要な措置を講ずるよう努めなければならない、としている。また、第八十六条の七では、災害応急対策責任者は、やむを得ない理由により避難所に滞在することができない被災者に対しても、必要な生活関連物資の配布、保健医療サービスの提供、情報の提供その他これらの者の生活環境の整備に必要な措置を講ずるよう努めなければならない、とされる。また、法改正により、新たに避難所における生活環境の整備等が規定されたことから、平成 25 年 8 月には、避難所における平常時の対応・発災後の対応として取組を進めるための参考として「避難所における良好な生活環境の確保に向けた取組指針」²⁾ を策定し公表されている。

今回の熊本地震においても顕在化したのが、住民の退避先は自治体が指定した指定避難所に限らない。住民の退避先は、地域のコミュニティ施設や団地の集会所、避難所指定されていない大型の公的スポーツ施設や文化施設が含まれる。また、親戚や知人宅など、自治体が把握しにくい退避先もあるし、公的・民間施設や自宅の駐車場などで車中泊をとった住民も少なくない。本稿では、熊本市が支援物資の配給作業などを通じて把握したそれぞれの指定緊急避難場所、指定避難所、それら以外の退避先の避難者数データを用いて、退避者数の予測モデルを構築するが、これはあくまで熊本市が把握できた退避者の数である。自治体が配慮すべき対象としての退避者を明確にし、震災時に退避者数や

表-1 指定緊急避難場所に占める指定避難所の割合

熊本市(区)	中央	東	西	南	北
指定緊急避難所	64	44	42	60	50
指定避難所	34	31	29	44	36
指定避難所割合(%)	53.1	70.5	69.0	73.3	72.0

退避先でのニーズをいかに把握するか、今後の震災への備えを進める上で重要な検討課題である点は先に申し添えておきたい。

(2) 震災時の退避者数の推定に関する既往研究

震災後の退避者数の予測に関して、国内においては、阪神淡路大震災の事例に基づいてその予測がなされる場合が多い。東京都が実施した首都直下型地震の避難者数の予測では、建物被害人口と被害なし人口数を推定した上で、建物被害人口については、全壊・焼失した場合は 100%、半壊の場合は 50.3%、軽微または被害なし住宅で 36.2%の住民が避難したという調査結果、また、断水が続いた場合、発災 4 日後で約 91%の住民が「限界である」と回答している調査結果に基づいて避難者数の推定を行われている³⁾。また、南海トラフ地震の避難者数の推定においては、津波浸水地域と津波浸水地域外に分けた上で、津波浸水地域外においては、全壊世帯は 100%、半壊世帯は 15%、さらに断水期間に対応する生活困窮度を考慮した断水に伴う避難者数を加えることによって避難者数を算出している⁴⁾。つまり、実務においては建物及び水道の被害予測に基づいて避難者数が推定されている。また、地震被害予測モデル TELES^{5),6)}においては、住宅の被害の程度だけでなく、収入、家屋の所有形態、年齢も避難者数を予測する際の変数として与えることとなっている。こうした手法は、地域全体の避難者数を予測する上では有効であるが、各避難所に避難してくる住民の数や特性を予測できるものではない。

一方、阪田⁷⁾は避難施設の敷地面積、各地区からの距離のデータを用いて各避難施設の避難者数を説明するハフモデルの構築を行っている。結果として、敷地面積や距離が住民の退避行動を説明する重要な変数であること、一方で、地区の近傍にある避難所の避難者数が理論値を特に下回った傾向にあったことを示している。ハフは商圏分析において広く用いられてきた実績があるが、避難所選択行動を説明するモデルとしても有効なモデルの一つと考えられる。

以上より、本研究では、熊本震災後の住民の震災後の退避行動及び退避先選択行動を明らかにするための住民の退避及び退避先選択行動モデルを構築し、そのモデルに基づいて避難者数を予測するを構築する。先

に述べた通り、避難場所、避難所に関する法改正に伴い、避難所の種類は現在、指定緊急避難所、指定避難所、それ以外の避難所に大きく分類される。こうした避難所の種類を考慮して、避難行動及び避難所選択行動モデルを構築する点が本研究の特徴である。

3. 2016年熊本地震における住民の避難状況

(1) 避難者数及び避難所数の推移

図-1 に熊本市（5区別含む）の避難者数の推移を表す。今回の震災においては、前震と本震があったことから、前震後に2万人を超える避難者数が熊本市内の避難所で観測されているが、本震後の4月17、18日前後において避難者数が最大に達していることが読み取れる。

また、図-1 に熊本市全体における（指定避難所ではない）指定緊急避難場所、指定避難所、それ以外の避難先の避難者数を表す。また、図-2 に全避難者の中で、指定避難所にいる避難者数の割合の時系列上の推移を示す。避難者の多くは指定避難所に避難しているが、指定緊急避難所やそれ以外の避難先に避難している住民も少なくない。時間経過と共に避難者数が減少していくことは、極めて自然なことと考えるが、図-2 から、全避難者に占める指定避難所にいる避難者数の割合が時間経過と共に大きく変化が見られない点は留意されたい。指定緊急避難所やそれ以外の避難先は、長期間の避難所生活に適さないが、避難者の集約が指定避難所に集約されていないことが分かる。この点は避難所数及び避難先の中で指定避難所の占める割合からも読み取れる。図-3 に種類別の開設避難所数の推移、図-4 に全避難所に占める開設指定避難所の割合の推移を表す。これらの図は、自治体の観点からは1度避難者が避難をしてくれば強制的にその避難先を強制的に閉鎖することが困難であることを示唆する。また、住民の観点からは、一度避難してしまえば、指定、指定外問わずその避難施設を移ることに対する身体的、精神的負荷は大きい。また、今回の震災においても見られたが、指定外の避難施設においても自治体やNPO等からの支援はなされるため、その生活環境は改善されていく。自治体の立場にたてば、効果的、効率的な支援を行うため、避難者を特定の施設に集約させていくことは重要であるが、今回の震災においてそのような集約が効果的に行われたとは言い難い。また、中央区や東区、南区では、2016年4月16日に発生し本震当日または翌日に最大の避難者数を迎えるのに対して、北区や西区では、4~5日後に最大の避難者数が観測されている。これは震災に伴う家屋損傷の影響というよりは、インフラ、特に水道が機能停止に陥ったことや、本震後に余震が続いたことが要因と考えられる。地域によっては、発災

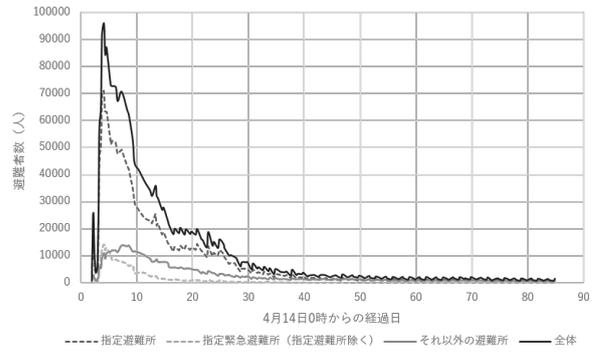


図-1 熊本市の避難者数の推移（5区別含む）

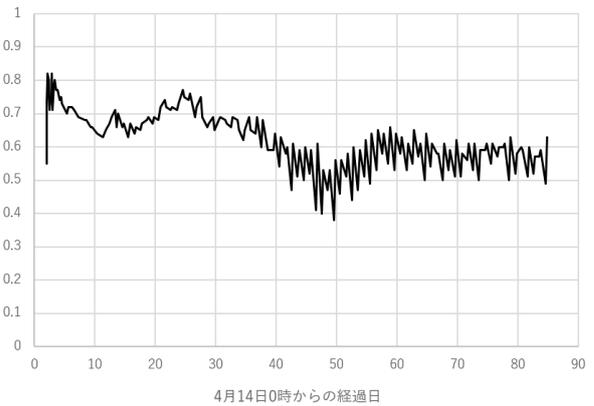


図-2 全避難者に占める指定避難所の避難者の割合

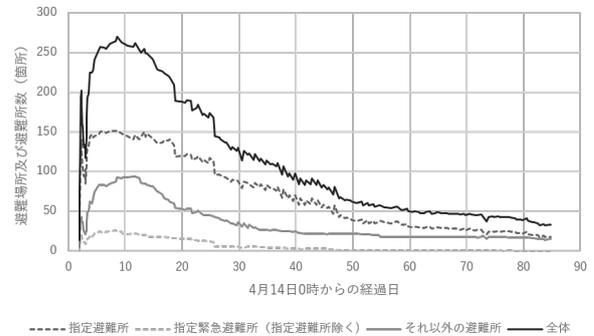


図-3 熊本市の避難所数の推移（種類別含む）

直後に避難者数が最大とはならない点は留意しておく必要がある。

(2) 質問紙調査の概要

今回の震災に際して、熊本県では、今後の防災体制を強化することを目的に、平成28年熊本地震に関する県民アンケート調査、と題して住民調査を実施した。その内容は、日ごろの災害への備えの状況や地震時の行動、行政ニーズなどに及ぶ。以下では、その調査結果から、熊本市の住民で、かつ住民の避難行動に関する

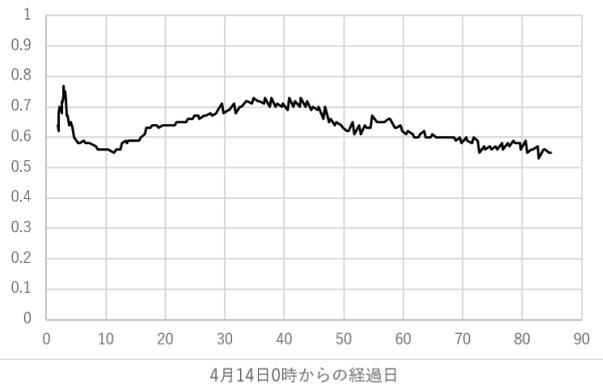


図-4 全避難先に占める指定避難所の割合

結果のみを取り出してその概要を述べる。

図-5 は、自宅の被害状況と避難期間のクロス集計結果を示したものである。このとき、明らかに自宅の被害が大きかった住民ほど避難期間が長くなることが読み取れる。また、特筆すべきことは、被害が全くなかった場合であっても半数以上の住民が避難行動をとっている。その期間は3日以内の割合が高くなっているものの、自宅が被害がなくても多くの住民が避難行動を取る可能性がある点は注意が必要である。

続いて、図-6 に、避難した住民の避難先と滞在期間をまとめたものを示す。避難した住民で1ヵ月以上避難した住民の多くは、親戚や知人宅で避難生活を送っていたことが分かる。また、指定外の避難施設で過ごした住民は避難期間に関わらず、指定避難所で過ごした住民とほぼ同じ割合でいたことが分かる。この結果は、先の図-2 と整合的ではない。これは、熊本市が把握している指定避難所の避難者数は6~8割を占めるが、本調査結果に基づけば、指定外の避難施設にもほぼ同数の避難者が避難生活を送っていたことになる。また、車中泊者や親戚・知人宅で避難生活を送った住民も先の避難者数の推移データからもれている。このように、自治体が当時把握できた避難者及び避難先情報には限界がある。本質問紙調査に基づけば、指定避難所で避難所生活を送った被災者は2割を満たない。こうした点を前提として、以下、避難者数を予測するための住民の避難行動及び避難先選択モデルを構築する。

4. 住民の避難及び避難先選択行動モデル

(1) モデルの前提条件及びデータの概要

以下では、地区 $a (\in \mathcal{A})$ の住民の避難所 $j (\in \mathcal{J})$ を選択するをモデル化する。避難所は、自治体が把握していた避難所とし、指定緊急避難所（指定避難所ではない）、指定避難所、それ以外の避難先に分類して避難先のカテゴリー化を行っている。なお、住民の避難行

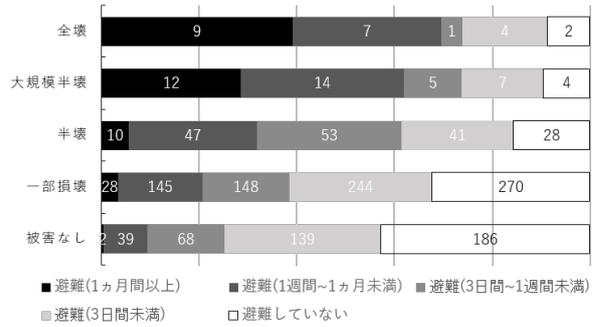


図-5 自宅の被害状況と避難期間のクロス集計表

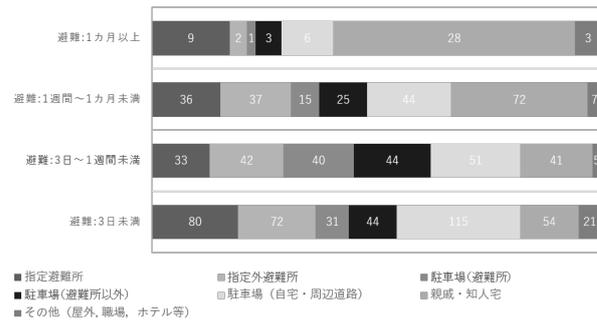


図-6 避難先と避難期間のクロス集計表

動の有無については、県の実施した調査に基づいて避難者割合 r を算出し用いた。なお、 $r = 0.323$ とした。地区 a と避難所 j の距離は直線距離を仮定して、算出した。また、地区人口については平成 27 年度の国勢調査の熊本市の小地域集計結果を用いた。また、各避難所の避難者数については、4月16日6時時点の各避難所の避難者数を用いた。

(2) 避難先選択モデル

いま地区 a の住民数を n_a で表す。また、地区 a から避難所 j までの距離を d_{aj} と表す。また、避難所の種類のダミー変数として、

$$\delta_j^1 = \begin{cases} 1 & : \text{指定緊急避難所 (指定避難所でない)} \\ 0 & : \text{それ以外} \end{cases} \quad (1a)$$

$$\delta_j^2 = \begin{cases} 1 & : \text{指定避難所} \\ 0 & : \text{それ以外} \end{cases} \quad (1b)$$

$$\delta_j^3 = \begin{cases} 1 & : \text{指定外避難先} \\ 0 & : \text{それ以外} \end{cases} \quad (1c)$$

このとき、地区 a の住民が避難所 j を選択する確率 p_a^j を

$$p_a^j = \frac{\exp \left[\sum_{m=1}^3 \beta_m \delta_j^m + \beta_4 d_{aj} \right]}{\sum_{k=1}^J \exp \left[\sum_{m=1}^3 \beta_m \delta_k^m + \beta_4 d_{ak} \right]} \quad (2)$$

のように定義する。なお、 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4)$ は、各変数のパラメータである。このとき、避難所 j の避難者数 s_j は、

$$s_j = \sum_{a \in \forall A} n_a \times r \times p_a^j, \quad \forall a \in A \quad (3)$$

避難所別の避難者数データを \tilde{s}_j と表す。このとき、非線形最小二乗法を用いて

$$\min_{\beta} \{ \tilde{s}_j - s_j(\beta) \}^2 \quad (4)$$

を解くことにより、最適なパラメータ β^* を導出される。なお、パラメータの算出にあたっては、matlab の Nelder-Mead のシンプレックスアルゴリズム⁸⁾ を実装した fminsearch 関数を用いた。パラメータの推定結果を表-2 に示す。

表-2 パラメータの推定結果

β_1^*	β_2^*	β_3^*	β_4^*
0.610	0.622	-0.216	-0.211

分析結果からわかるように、震災直後においては、指定緊急避難場所と指定避難所の係数はほぼ同値となっている。一方で、それ以外の避難先のダミー変数のパラメータは、これら二つのパラメータと比較して明らかに小さくなっている。この結果は、震災直後は、指定緊急避難場所や指定避難所に区別はなく、自治体が事前に指定していた場所に住民が避難する傾向が読み取れる。また、距離のパラメータは負となっている。すなわち、住民は近い避難先に避難する傾向があり、この結果は直観に沿う結果であった。

5. 今後の課題

本研究では、指定緊急避難場所、指定避難所に関する制度改正を踏まえた上で、2016 年の熊本地震の避難者の動向を考察すると同時に、住民の避難所選択行動モデルを構築した。

本モデルは、本震発生直後の 4 月 16 日 6 時の避難者数データを用いてパラメータの推定を行ったが、時間の推移と共にパラメータの値は変化していくことが予想される。また、今回のモデルでは避難所の特性（敷地面積等）を含められていないが、車中泊の多さを鑑みれば、駐車場の有無が住民の避難先の決定行動に大きく影響を及ぼしている可能性は高い。また、指定避難所は、支援や情報の集約拠点としての役割を担ったことから、指定外の避難先であっても指定避難所により近いほうがアクセスがしやすかった可能性がある。すなわち、指定外避難所は、指定避難所の周辺に形成された可能性が高い。こうした点は今後の課題である。

参考文献

- 1) 内閣府: 平成 27 年版防災白書, 2015.
- 2) 内閣府: 避難所における良好な生活環境の確保に向けた取り組み指針, 2013.8.
- 3) 東京都防災会議: 首都直下地震等による東京の被害想定報告書, 2012.4.
- 4) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ: 南海トラフ巨大地震の被害想定項目及び手法の概要, 2013.3. (www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130318_shiryo4.pdf, H29.7.31 アクセス可)
- 5) Yeh C.H.: Taiwan Earthquake Loss Estimation System-(TELES), National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipei, 2003.
- 6) Chou, J.-S., Ou, Y.-C., Cheng, M.-Y., Lee, C.-M.: Emergency shelter capacity estimation by earthquake damage analysis, *Natural Hazard*, 65, 2031-2061, 2013
- 7) 阪田弘一: 震災時における避難者数推移および避難所選択行動の特性, 日本建築学会計画系論文集, 537, pp.141-147, 2000.
- 8) Lagarias, J.C., J.A.Reeds, M.H.Wright, P.E.Wright: Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions, *SIAM Journal of Optimization*, 9(1), pp.112-147, 1998.

(平成 29 年 7 月 31 日 受付)