

2016 年熊本地震における避難者の発生・解消過程に関する基礎的考察

繁田 健嗣¹・能島 暢呂²・永井小雪里³・加藤 宏紀⁴

¹ 学生会員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科修士課程 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: w4523016@edu.gifu-u.ac.jp

² 正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: nojima@gifu-u.ac.jp

³ 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: v3121023@edu.gifu-u.ac.jp

⁴ 正会員 岐阜大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: kato_hir@gifu-u.ac.jp

地震災害による避難者の予測は、地震防災対策を策定するうえで重要課題である。本研究ではその基礎的検討として、2016 年熊本地震で被災した 5 市町村における避難者の発生とその解消過程について、家屋被害、停電・断水、余震、仮設住宅の整備等に関する状況とあわせて、時系列的整理を行った。建物の全半壊人口、停電・断水人口に加えて、社会的回復力を表す時間関数を定義して、避難者数の推移を記述するモデルを構築した。また避難者数のピーク後の解消過程に関するモデルを検討し、短・中・長期に対応した 3 種類の指数関数による混合指数分布を用いてモデル化した。そのモデル係数を用いて、実際の避難者数の推移に関する特徴を考察した。

Key Words: earthquake disaster, evacuee, building damage, lifeline damage, temporary housing, social resilience, mixed exponential distribution

1. はじめに

2016 年熊本地震では、2 度の震度 7 を記録して、その後も余震が頻発した。一連の地震は建物やライフラインに甚大な被害をもたらした。内閣府¹⁾によると、熊本県では死者は 161 人、重軽傷者は 2,620 人で、住宅被害は全壊 8,360 棟、半壊 32,261 棟、一部損壊 138,224 棟である。また熊本県内におけるライフラインの供給停止は、停電 47 万 7000 戸、都市ガス停止 10 万 5000 戸、断水 44 万 5857 戸に及んだ²⁾。これらに伴って、極めて多くの避難者が発生し、ピーク時には熊本県内で 183,882 人に上った³⁾。避難形態としては、指定された避難所への避難や、車中泊、親戚・知人宅への疎開など様々であった。避難理由としては、家屋の破損や住宅内の散乱、電気や水道などのライフラインの停止、頻発する余震への不安などが挙げられる。

こうした避難者数を予測することは、震災後の事後対策や応急復旧の計画を作成するうえで有効である。避難所に避難する人口を推定する方法に関しては、建物被害や断水の影響を考慮した予測手法⁴⁾が確立され、防災実

務で用いられている。しかしライフライン被害・復旧による影響や、避難者数の中・長期的な推移に関するモデル化については、十分に考慮されていないのが現状である。佐藤・塩野⁵⁾は、生活支障の強さを平均低下度(0~10)で定義し、住宅被害やライフラインの停止状況に応じた短期的な避難者数の推定モデルを提案したが、中・長期的推移については扱われていない。また加藤・能島⁶⁾は、上記の避難者数推定式⁵⁾にライフライン機能被害・復旧モデルを導入した避難者数予測モデルを構築したが、断水のみを対象としており、停電の影響は考慮されていない。

以上の背景を鑑みると、避難者の発生・解消予測モデルをより総合的な観点から再構築することが望まれる。本研究では、2016 年熊本地震による被災事例に基づいて基礎的検討を行うものである。以下、2 章では、2016 年熊本地震で被災した 5 市町村における避難者数の推移を示し、家屋被害、停電・断水、余震、仮設住宅およびみなし仮設住宅の整備に関する時系列的状況とともに整理して考察する。3 章では、避難者数に関する従来の予測式において用いられている全半壊人口および断水人口

に加えて、停電人口と、社会的回復力を表す時間関数を導入して、避難者の推移を記述するモデルを構築し、対象5市町村に適用してその整合性を確認する。4章では避難者数のピーク後の減少過程に関するモデルとして、短・中・長期的な減少過程を表すモデルについて検討し、対象5各市町村の避難者数の推移にフィッティングして比較・考察を行う。

2. 5市町村での避難者数とその影響要因の推移

ここではまず、避難者数の実測値の推移と、全壊および全半壊建物の居住人口、停電および断水人口（いずれも戸数単位からの人口換算）を市町村ごとに整理する。本研究では、益城町、西原村、南阿蘇村、御船町、熊本市の5市町村を対象とする。これらの市町村は震源に近く、半壊以上の棟数が多いこと、避難者数が多いこと、停電及び断水被害が発生していることなどの要因から選択したものである。

避難者数および避難所数に関するデータに関しては、基本的に「（政府現地対策本部会議・）熊本県災害対策本部会議」⁵⁾資料に記載された「避難所数及び避難者数の確認状況」を利用した。1日に複数回の報告があった場合には、すべてのデータを採用した。人口については、「熊本県企画振興部統計調査課：平成28年熊本県の人口と世帯数（平成28年4月1日現在）」⁶⁾を用いた。建物被害に関するデータ（全壊・半壊）については、熊本県災害対策本部⁹⁾による2016年11月29日時点でのデータ

（第197報）を用いた。震度の観測については、「気象庁：震度検索データベース」¹⁰⁾を用いた。

経過時間については、2016年4月14日0:00を起点として、各会議の開催時刻との時間差で整理し、以下ではその時間差を経過日数として横軸にとった図を示す。また本文中では、日付と経過日数と併記する（例：4月17日(D3)や4月24日(D10)など）。

なお停電に関して本震直後に得られた最初の停電戸数データは4月16日2:00時点であるが、これは九州全体のデータであり、市町村別の停電戸数データは入手できなかったため、暫定的に停電人口を各市町村の全人口としている。

(1) 益城町（図-1,2）

前震後の4月15日(D1)に最大2,390人の避難者数であったが、解消しないままに本震を迎え、本震の翌日の4月17日(D3)にピークを迎え、全半壊人口に匹敵する16,050人まで増加している。その翌日の4月18日(D4)には9,200人程度に激減したが、4月20日(D6)に再び11,260人まで増加した。その後はほぼ単調減少となっている。避難者数の減少ペースはほぼ一定であるが、5月14日(D30)以降は減少ペースが鈍化していることがわかる。本震から約200日後の10月31日(D199)をもって最後の避難所が閉鎖され、避難者数は0になった。

停電については、前震により停電率約50%となり、あまり復旧進捗がみられないまま本震を受け、停電率100%にいたったと推察される。ただし復旧は早く、翌日の4月17日(D3)には停電率は約50%まで急激に低下

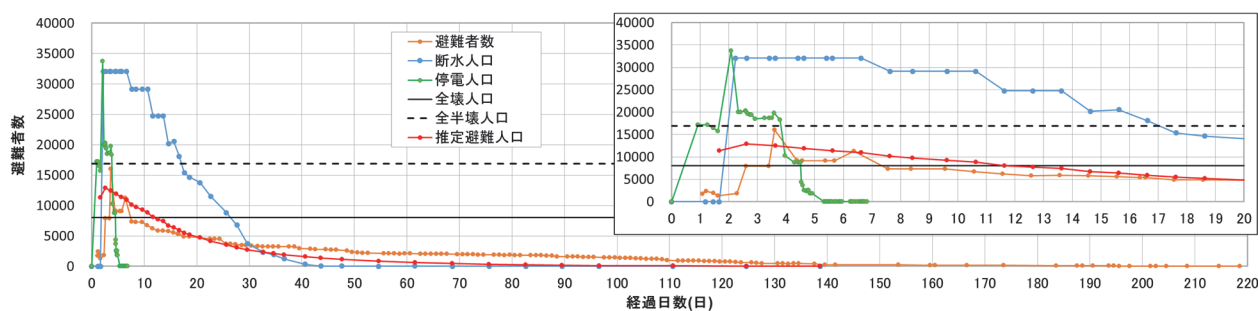


図-1 益城町における停電・断水・全壊・全半壊人口と避難者数および予測式による推定結果
(横軸は4月14日0時00分からの経過日数。10日目(D10)=4月24日、20日目(D20)=5月4日)

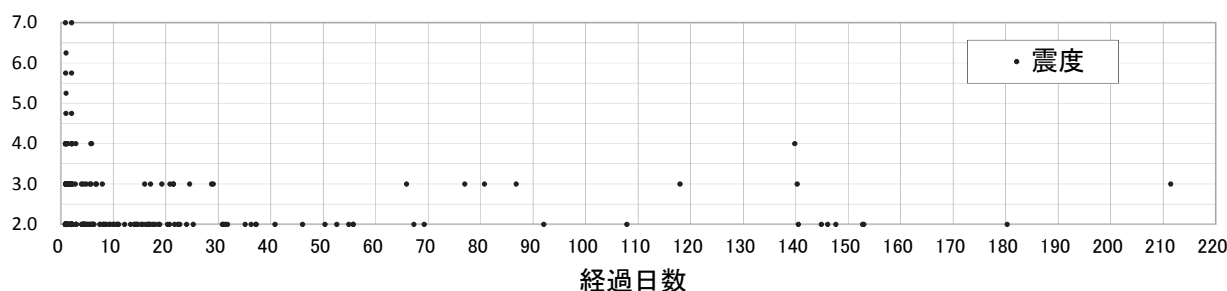


図-2 益城町における震度観測状況

した。本震直後の避難者数の急激な増減に対応しており、余震などとともに、停電が避難行動に大きな影響を及ぼしたものと考えられる。本震から3日後の4月19日(D5)には停電率は0%となった。

断水については、本震により益城町全域で断水したことから、本震直後にピークを迎え、4月20日(D6)までは復旧進捗は見られなかった。その後、断続的に停滞は見られるものの、順調に断水人口は減少した。しかし5月14日(D30)以降の断水人口の減少ペースは鈍化している。これは、当初は復旧対象外とされた家屋損壊が大きい被害甚大地域で復旧作業が行われていた時期に相当する。上記の避難者数の減少ペースの鈍化傾向に整合するものである。最終的には50日経過(D50)で断水人口は0になった。

(2) 西原村 (図-3,4)

前震で836人の避難者数であったが、いったん解消した後本震が発生し、その翌日の4月17日(D3)にピークを迎えて2951人まで増加している。その後減少し4月19日(D5)～21日(D7)で1,400人程度まで避難者数が停滞する。翌日(D8)に1,696人まで増加するが、その後は微少な増減を繰り返し、5月4日(D20)までは停滞している。その後5月10日(D26)までは減少のペースが速いが、その後は7月14日(D91)までは、減少のペースが鈍化しつつも単調減少している。7月14日(D91)から一週間ほどは避難者数の減少のペースが速くなるが7月20日(D97)から再び鈍化し、11月8日(D208)に避難者数が0になる。

なる。

停電については前震では停電が発生せず、本震直後に停電率100%まで急増するが、16日中に激減して翌日には36%まで減少する。これに対応するように避難者数はピーク時の約半数の1,400人程度まで減少している。余震の影響などから停電率は一度微増しているがその後は減少し4月18日(D4)には停電率0%になる。

断水については本震直後にピークを迎え、4月23日(D9)までは復旧進捗は見られなかった。その翌日(D10)に半数近くまで急激に減少するが、4月29日(D15)まで停滞する。その後5月31日(D47)まで単調減少し続け、再び1ヵ月ほど復旧進捗は見られない。これは避難者数の減少のペースが鈍化した要因の一つであると考えられる。7月5日(D82)に再び減少し始め7月19日(D96)に断水人口は0になる。

(3) 南阿蘇村 (図-5,6)

前震直後にもわずかながら避難者数が発生しているが本震までには解消されている。本震の翌日の4月17日(D3)にピークを迎え3,043人まで増加している。その翌日の4月18日(D4)から減少し始めるが全壊人口を下回った4月19日(D5)から22日(D8)まではほぼ横ばい状態で、その後再び減少するが4月23日(D9)から一ヵ月間は避難者数の減少ペースが鈍化し、5月23日(D39)からは再び増加し始める。7月8日(D85)に二回目のピークを迎え、1,057人にまで増加した。この理由として文献¹⁾によると、本震から約1ヵ月後(D32)に「休暇村 南阿

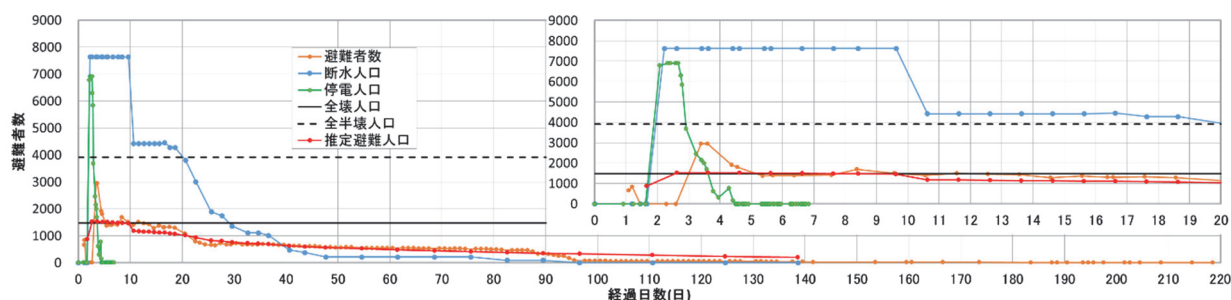


図-3 西原村における停電・断水・全壊・全半壊人口と避難者数および予測式による推定結果
(横軸は4月14日0時00分からの経過日数. 10日目(D10)=4月24日, 20日目(D20)=5月4日)

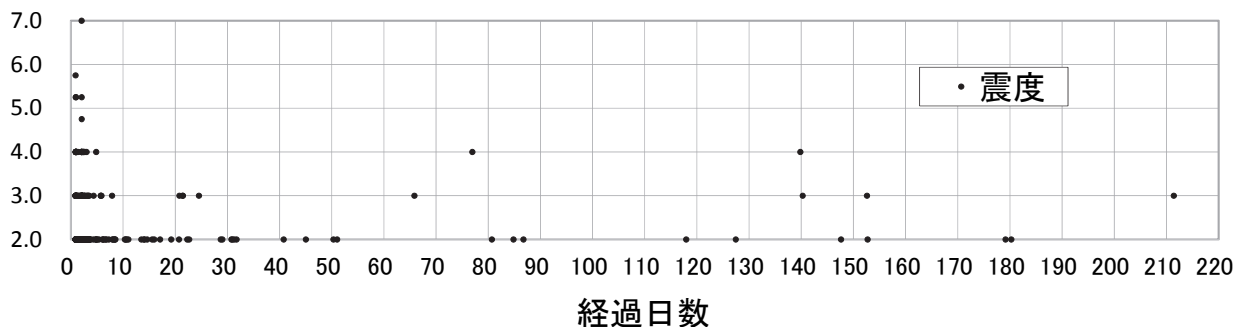


図-4 西原村における震度観測状況

蘇」や「阿蘇ファームランド」といった2次避難所への誘導が行われており、約4ヵ月後(D206)に閉鎖されるまでの間に避難者数が増加したためである。その後はわずかに減少していくが8月3日(D111)に急激に減少し、11月14日(D214)に避難者数は0になる。

停電については本震直後の4月16日(D2)にピークを迎え、停電率は100%まで増加している。翌日の14時までは停電率100%が続き、4月19日8時(D5)の時点では停電率は50%を下回った。この停電率の急激な減少は避難者数の減少に整合する。4月19日10時(D5)に余震の影響などから一度は再び停電率が増加するが4月20日20時(D6)に停電率は0になる。ただしこれは高圧発電機車による応急配電であり、大規模土砂崩壊にともなって被災した送電ルートの復旧が完了して発電所からの通電が可能になったのは、4月28日夜(D14)のことである。

断水については本震直後の4月16日(D2)にピークを迎え、2日間はピークの状態が続く。4月18日(D4)から4月21日(D7)で急激に減少する。この理由として4月17日(D3)～4月20日(D6)で停電が応急配電により復旧したことに起因して断水復旧も進んだためと考えられる。4月24日(D10)に微増した後は減少するが、そのペースは鈍化する。6月21日(D68)までは緩やかながら減少しているがその後は復旧進捗がほとんど見られず8月30日(D138)時点のデータでは完全な解消は見られない。この要因として南阿蘇村の水道形態が一端を担っていると考えられる。南阿蘇村はすべてを地下水からまかなう水道形態をとっていたが、本震による大規模土砂崩壊により

橋梁に添架された送水管も崩落した。それに伴い大規模な断水が発生し復旧が遅れたと考えられる。このため生活支障が深刻化し、断水被災者が2次避難場所への誘導に応じた可能性がある。

(4) 御船町(図-7,8)

前震直後の4月15日(D1)に全壊人口を超える避難者数が発生していて、その時の最大避難者数は1,506人である。同日中に減少し始めるが本震により再び避難者数が増加する。本震から2日経過後の4月18日(D4)にピークを迎え、全半壊人口に匹敵する6,131人まで避難者数が増加する。ピークから2日後の4月20日(D6)には2,476人まで急減するが、その後は減少のペースが鈍化する。5月4日(D20)に全壊人口に匹敵する1,193人まで減少し、その後もペースは鈍化しながらも減少して、本震から200日経過の11月1日(D201)で避難者数は0になる。

停電については前震により4月15日(D1)でも発生している。完全復旧がみられないまま本震を受け、直後に停電率98%まで増加しているが、当日の14時には52%まで下落する。余震の影響などから4月16日22時(D2)に再び停電率が発生し、前震時に発生した停電率と同程度の20%が発生した。翌日の4月17日19時(D3)には停電率は0%となっている。

断水については他の市区町村と同様に本震の直後の4月16日(D2)でピークを迎え、4月18日(D4)まで復旧進捗は見られなかった。翌日までに900戸ほど減少するが、

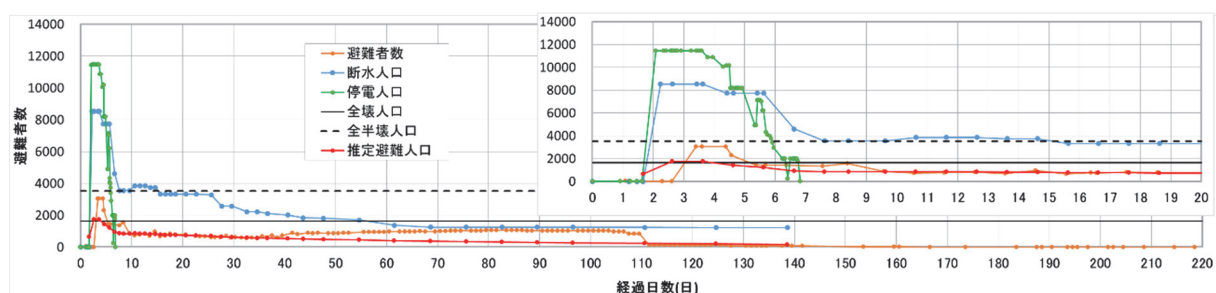


図-5 南阿蘇村における停電・断水・全壊・全半壊人口と避難者数および予測式による推定結果
(横軸は4月14日0時00分からの経過日数。10日目(D10)=4月24日、20日目(D20)=5月4日)

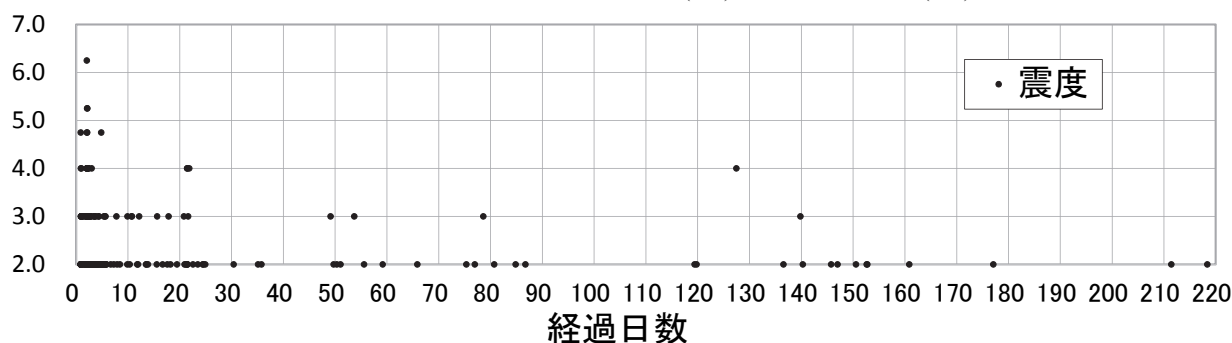


図-6 南阿蘇村における震度観測状況

同日に再び増加する。その後は5月20日(D36)まで単調減少するが、その後は復旧進捗がみられず8月30日(D138)時点では完全な解消がみられない。4月19日(D5)から1ヵ月間の単調減少のペースと避難者数の減少ペースは整合している。

(5) 熊本市 (図-9, 10)

前震直後の4月15日(D1)でも避難者数が25,000人程

度まで増加する。本震の前に5,000人程度まで減少するが、本震により避難者数は増加する。本震の翌日の4月17日9時30分(D3)にピークを迎え、108,266人まで増加する。同日の14時30分には半数以下に減少するが全半壊人口以上であり、4月19日(D5)までは減少は見られない。4月19日(D5)に一度増加するが、その後は減少傾向にある。4月23日(D9)に全半壊人口に匹敵する人数まで減少し、その後は単調減少し9月20日(D159)に避難者数

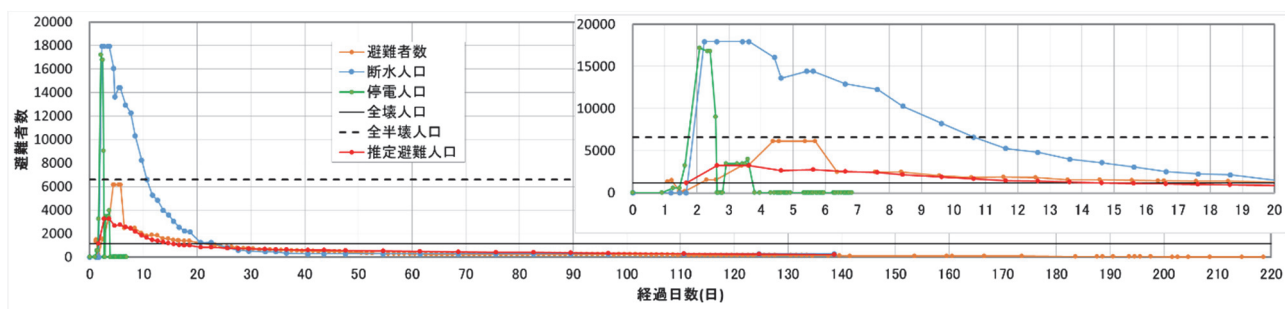


図-7 御船町における停電・断水・全壊・全半壊人口と避難者数および予測式による推定結果
(横軸は4月14日0時00分からの経過日数. 10日目(D10)=4月24日, 20日目(D20)=5月4日)

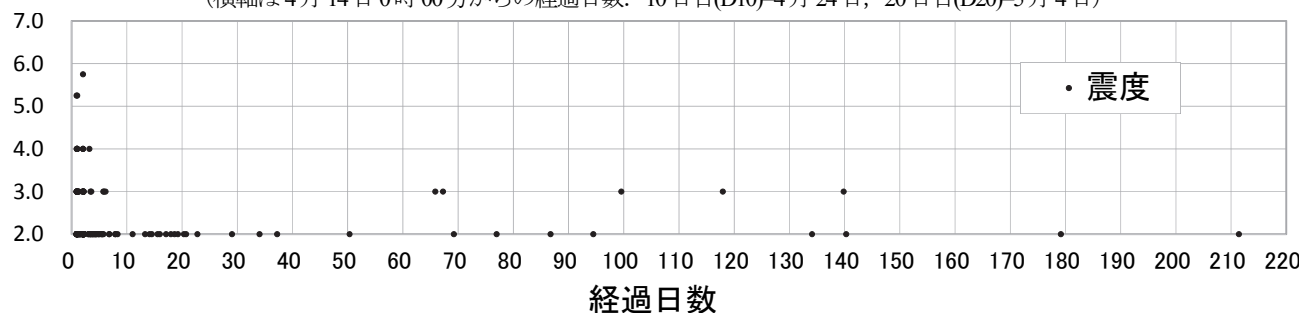


図-8 御船町における震度観測状況

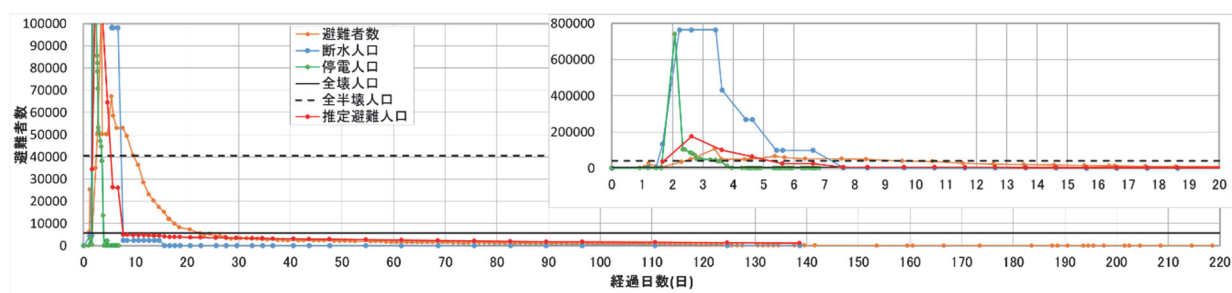


図-9 熊本市における停電・断水・全壊・全半壊人口と避難者数および予測式による推定結果
(横軸は4月14日0時00分からの経過日数. 10日目(D10)=4月24日, 20日目(D20)=5月4日)

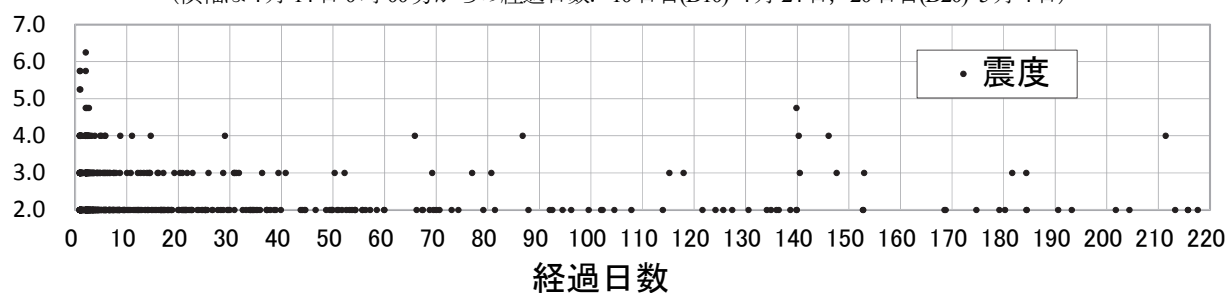


図-10 熊本市における震度観測状況

は0になる。

停電については前震直後の4月15日6時(D1)にも停電率0.4%とわずかではあるが停電が発生している。その後は減少するが本震までに完全には解消できず、本震直後にピークを迎えるが4月16日8時(D2)には停電率14%まで回復し、その後は徐々に減少していく。4月18日(D4)までには完全に解消されるが、頻発する余震の影響などから4月18日10時(D4)にわずかながら再び停電が発生している。しかし、同日の15時には完全に復旧し、その後の停電発生はない。

断水については前震直後の4月15日(D1)から断水人口が発生し、本震直前も増加している。本震直後の4月16日(D2)にピークを迎え、764,057人まで増加している。本震の翌日の4月17日10時(D3)まで復旧は見られないが、同日の15時には急激に減少し、4月19日(D5)には断水人口がピーク時の約8分の1まで減少している。一度復旧は停滞するが4月21日(D7)に急激に減少し、わずか1,000戸を残すのみとなり、5月1日(D17)に断水人口が0となった。

他の4町村とは異なり、断水や停電の復旧過程と避難者数の推移が合わないことがわかる。図-11は4月18日9時(D4)～4月21日7時(D7)までの通水着手の過程を表したものである。4月18日9時(D4)の時点では、約半数の配水区でまだ断水解消に未着手で断水戸数も約11万戸あった。しかし、4月21日7時(D7)では、ほぼ通水に着手しており、断水戸数も約1,000戸まで減少していた。しかし、熊本市は試験通水中の戸数(一部着手や未着手も含む)を断水戸数に含めていないので、通水と断水復旧は同義ではなく、熊本市が断水復旧とみなしても、実際には漏水や水が使えない場合があったため、実際の断水人口は図-9にあるほど急激には減少せず、断水の復旧過程と避難者数の推移が適合しなかったと考えられる。

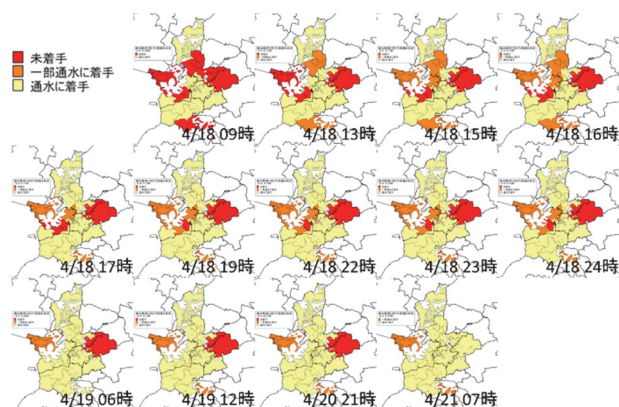


図-11 4月18日9時～4月21日7時までの通水着手の過程

(6) 仮設住宅とみなし仮設住宅

避難所に避難した被災者が避難所を出る要因としては、余震が減ることや、ライフラインの復旧、家の安全が確認できたこと、家族や友人宅に行くことが決まったこと、などが挙げられる。家が全壊もしくは半壊した被災者の避難生活は長期化する傾向にあるが、県や市の市町村が応急的に設置し運営する仮設住宅やみなし仮設住宅¹⁹⁾（『震災などで住居を失った被災者が民間事業者の賃貸住宅を仮の住まいとして入居した場合に、その賃貸住宅を国や自治体が提供する「仮設住宅」に準ずる』住宅に入居する場合もある）。

ここでは、前節で説明した避難者数の推移について考察するため、仮設住宅およびみなし仮設住宅の整備過程をまとめておく。仮設住宅の着手及び完了、みなし仮設住宅の提供に関するデータは避難者数と同様に「（政府現地対策本部会議・）熊本県災害対策本部会議」¹⁹⁾資料に記載された「仮設住宅への対応」と「熊本市災害対策本部会議」¹⁹⁾資料に記載された「住宅被災者支援」を利用した。

図-12は仮設住宅の着手と完了の過程を市町村ごとに表したものであり、図-13はみなし仮設住宅の導入過程を表した図である。両図ともに4月14日0:00を基準として横軸を経過日数としている。

図-12によると、本研究で対象とする5市町村ではいずれも本震から約1ヵ月(D32)までには仮設住宅に着手しており、完了までには2ヶ月程度の時間を要している。戸数が最も多いのは益城町で、仮設住宅の着手の戸数が約1ヶ月(D30)にはそれまでの3倍以上に増え、90日前後(D90)には仮設住宅の建設完了戸数が872戸となった。その時点での避難者数は約1,500人全員が入居できるほどまでになっており、それ以降の避難者数の減少に寄与したと考えられる。最終的には約1,600戸の仮設住宅が建設されていて、これは避難所に避難した人口のピークの約半分近くが入居できる人数となっている。

西原村では、本震から約半月の経過時点(D17)で最も早く仮設住宅の建設に着手していたが、本震から30日経過時点(D32)以降の増加はなく、約300戸となっている。このほか、南阿蘇村では約400戸、御船町では340戸となっている。ピーク時の避難者数が最も多い熊本市では、6月7日(D54)から急増し、その後も徐々に増加して8月30日(D138)の時点で541戸の仮設住宅が建設着手された。戸数としては益城町に次いで多いが避難者数からみると圧倒的に足りないように思われる。しかし、図-13を見ると熊本市のみなし仮設住宅の件数は、9月20日(D159)には約6,000件に達し、熊本県のみなし仮設住宅の3分の2を占めている。また、仮設住宅の戸数をはるかに上回っており、仮設住宅提供の主力であったと推察される。熊本市以外については、みなし仮設住宅は全市町村を合わせても約3,000件にとどまっている。

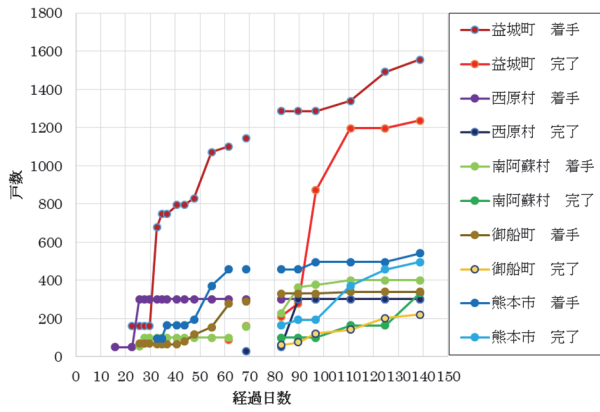


図-12 仮設住宅の着手と完了の過程

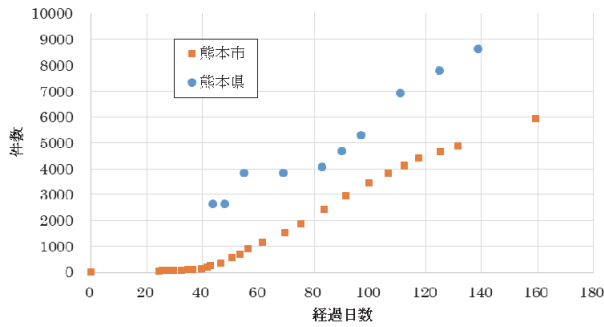


図-13 みなし仮設住宅の導入過程

3. ライフラインの復旧に付随する避難者数の推移とその予測

(1) 従来用いられている避難人口推定式

避難所への避難者数の推定には、建物被害状況とライフライン被害状況を考慮する場合が多い。文献²⁾を参考にすると、地震後経過日数を t とした推定式として、次式が挙げられる。

$$N_E(t) = (M_C + e_H M_H) + (M - M_C - e_H M_H) e_w(t) D_W(t) \times \beta(t) \quad (1)$$

ここで M は全人口、 M_C は全壊・焼失建物の居住人口、 M_H は半壊建物の居住人口、 e_H は半壊建物による避難率、 $e_w(t)$ は地震経過日数 t における断水被害による避難率、 $D_W(t)$ は断水率である。また $\beta(t)$ は避難所率（ $1 - \beta(t)$ は疎開率）であり、避難者を避難所生活者と避難所以外への疎開者数に分ける係数である。これらは全壊・半壊を含めた家屋の破損と断水による影響のみを考慮した予測式となっている。

(2) 避難者の実態を踏まえた避難人口推定式の方針

熊本市が行ったアンケート¹⁵⁾によると、自宅外に避難

した人の避難理由（複数回答）として、自宅を危険と判断したことが 67.0%、余震が続くと思ったことが 66.5%、停電や断水による自宅生活の不安が 35.5%などとなっている。

また自宅外に避難した人が避難所を出た理由（択一方式）としては、余震の減少が 17.9%であり、次いで断水の復旧が 12.4%となっている。このほか、親戚・知人宅など行き先の決定が 11.9%、停電の復旧が 8.3%、避難所の閉鎖が 3.2%、ガスの復旧が 1.3%、交通機関の復旧が 0.1%となっている。この結果より、断水・停電の復旧により避難所を出た人は 20.7%にも及ぶことがわかる。そのため、ライフライン途絶に関しては、断水に加えて停電も考慮する必要があること、ガスに関しては支配的要因ではなく除外しても構わないことが指摘できる。

以上を踏まえて本研究では、2016 年熊本地震における避難所への避難者人口の推定として全壊・半壊人口に加え、ライフライン途絶に伴う避難者として断水人口と停電人口を含めた推定式を考えることとする。

(3) 避難人口推定式の拡張

熊本地震における実測値と比較して、式(1)を拡張する。建物被害の項に加えてライフラインの項として、断水による避難人口と停電による避難人口を考慮する。地震後経過日数 t における避難所における避難者数 $N_E(t)$ の予測式を式(2)に拡張する。

$$N_E(t) = \{(M_C + e_H M_H) + (M - M_C - e_H M_H) \times \max\{e_E D_E(t), e_W D_W(t)\} \times e_S \times R_{es}(t)\} \quad (2)$$

ただし、 e_E を停電による避難率、 $D_E(t)$ は停電率である。また時間関数であった避難所率 $\beta(t)$ を定数 e_S とし、最大値を 1 とした避難者数の解消過程の時間関数 $R_{es}(t)$ を定義する。時間関数 $R_{es}(t)$ を導出するために線形 1 自由度系の自由振動の力学モデル¹⁶⁾を仮定する。運動方程式は次の微分方程式で表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3)$$

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (4)$$

ここで、 m は質量、 c は減衰係数、 k は剛性、 $\omega^2 = \frac{k}{m}$ 、 $h = \frac{c}{2m\omega}$ である。解は減衰定数 h により異なり、 $h > 1$ の場合は過減衰となり、次式となる。

$$X(t) = e^{-at} \left[\frac{d_0(\alpha+\beta)+v_0}{2\beta} e^{\beta t} - \frac{d_0(\alpha-\beta)+v_0}{2\beta} e^{-\beta t} \right] \quad (5)$$

d_0 は初期変位, v_0 は初速, $\alpha = \omega h, \beta = \omega \sqrt{h^2 - 1}$ である. 過減衰の $h > 1$ という条件から常に $\alpha > \beta$ が成り立つ. 本研究では, 初速度 $v_0 = 0$, 初期変位 $d_0 = 1$ とした $X(t)$ を時間関数 $R_{es}(t)$ として用いる.

$$R_{es}(t) = \frac{\{(\alpha + \beta)e^{-(\alpha - \beta)t} - (\alpha - \beta)e^{-(\alpha + \beta)t}\}}{2\beta} \quad (6)$$

本研究ではパラメータとして周期 $T = 100$ 日, 減衰定数 $h = 300\%$ として, 次式で α, β を定める.

$$\alpha = \frac{2\pi h}{T}, \beta = \frac{2\pi \sqrt{h^2 - 1}}{T}, T = \frac{2\pi}{\sqrt{\alpha^2 - \beta^2}}, h = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - \beta^2}} \quad (7)$$

図-14 は時間関数 $R_{es}(t)$ を横軸に経過日数にしたものである. これは家屋の後片付けや安全性の確認, 2.(6)で述べた仮設住宅やみなし仮設住宅の整備過程など避難人口解消過程と関係すると考えられる.

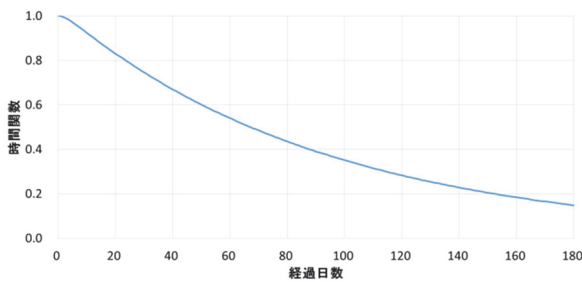


図-14 避難者数の解消過程の時間関数 (過減衰モデル $R_{es}(t)$: $T=100$ 日, $h=300\%$, $d_0=1$, $v_0=0$)

(4) 拡張した避難人口推定式の5市町村への適用

式(2)を避難者数の実測値に整合するようにパラメータを設定し, 5市町村に適用して挙動を見ることとした. 結果については, 図-1, 3, 5, 7, 9中の赤線で示している. 表-1は各市町村のパラメータをまとめたものである. ただし, 本震直後の急激な変動は対象外とする.

a) 益城町 (図-1)

図-1の推定避難人口は式(2)を益城町に適用したものである. 6日目(D6)の避難者数の増加以外は概ね適合している.

b) 西原村 (図-3)

10日目(D10)~20日目(D20)では推定人口が少し過小評価している. 21日目(D21)~27日目(D27)ではわずかながら過大評価している. その他の部分以外は適合している.

c) 南阿蘇村 (図-5)

40日目(D40)~110日目(D110)では推定人口と避難者数の実測値が適合せず, 推定人口が過小評価している. 前述のように, 本震から約1か月後に行われた2次避難所への誘導による避難者数の増加が主な要因である.

d) 御船町 (図-7)

他の地点とは異なり, 推定人口は本震直後(D2)に急増しその後に減少するが, 実際には本震から2日後(D4)にピークを迎え減少する. 12日目(D12)前後に若干の過小評価がみられるが, ほとんど適合している.

e) 熊本市 (図-9)

本震から2~3週間(D16~23)の避難者数はかなり過小評価していることが見て取れる. 他の4町村では, 断水の解消家庭を反映した避難人口推定式がかなり適合することを考慮すると, 通水状況に基づく断水戸数のデータが過小評価であった可能性がある.

以上をまとめると, 各市町村において所々差異が生じているが, 熊本市以外は拡張した推定避難人口と実測値は概ね適合しているといえる.

4. ピーク時からの避難者の減少過程に関する検討

(1) 混合指数分布モデルの検討

前章では, 避難者の発生に関しては, 建物全壊・半壊, 停電, 断水, 余震などが関与することを示した. また避難者数の解消には, 停電・断水の解消, 余震の減少, 応急仮設住宅やみなし仮設住宅の整備などの社会的回復力が影響を与えることも示した.

本章では, これらの変動を共通の尺度で比較検討するため, 最大避難人口を1に正規化し, その最大値からの減少過程をモデル化する. 上述のように, 減少過程は明らかに異なる要因の影響を受けるため, 本研究では, 複数の指数関数の線形和で定義される混合指数分布モデル

表-1 市町村ごとのパラメータ

	e_H	e_E	e_W	e_S
益城町	0.50	0.80	0.80	0.83
西原村	0.55	0.50	0.53	0.31
南阿蘇村	0.50	0.50	0.35	0.25
御船町	0.40	0.50	0.70	0.25
熊本市	0.35	0.95	0.50	0.25

を検討する。

$$y = \sum_{i=1}^n a_i e^{-b_i t} \quad (8)$$
$$\sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad 0 \leq a_i \leq 1 \quad 0 < b_i$$

ここに t は避難者がピークに達する日時からの経過日数であり、 a_i 、 b_i は変数はモデル係数である。本研究では短・中・長期の3段階を考慮することとし、 $n = 3$ とする。

観測値と式(8)によるフィッティングの残差二乗和の最小化を満たすモデル係数を求めるため、最適化法として、制約条件を加味できるL-BFGS-B法を用いる。

以下の適用例において、図-15～19の横軸は避難所の避難人口が最大となった時からの経過日数を取り、○線で表す観測値と、赤太線で示す式(8)の関数値、および、3本の線で項別の値を比較している。

a) 益城町 (図-15)

ピーク直後に急減する緑線は停電の復旧や余震の減少による短期的減少、30日程度で0に漸近する橙線が断水の復旧による中期的減少、さらに長期を要する青線が

仮設住宅などの社会的回復による長期的減少に対応している。益城町ではこのように、短期・中期・長期の減少過程が明確に分かれている典型例であるといえる。フィッティングの適合度はかなり高く、混合指数分布によるモデル化が妥当といえる。

b) 西原村 (図-16)

ピーク直後の急減については、短期的減少として、かなり適合している。その後の期間においては、平均的には傾向をとらえているものの、20日付近および80日付近の急減と、そこに至るまでの停滞については、適合度は悪い。こうした不規則な変動については、指数分布の混合数を増加しても表現できないと考えられる。

c) 南阿蘇村 (図-17)

西原村と同様に、ピーク直後の短期的減少については適合している。しかし指数分布の混合数は2となっており、中期的減少が欠落したモデルとなった。送水管被害による断水の長期化によって、中期的減少に対応する減少過程がなかったことが関与していると考えられる。

このため、30日程度までの中期的減少傾向と、その後の2次避難場所への誘導による避難者数の増加と停滞、

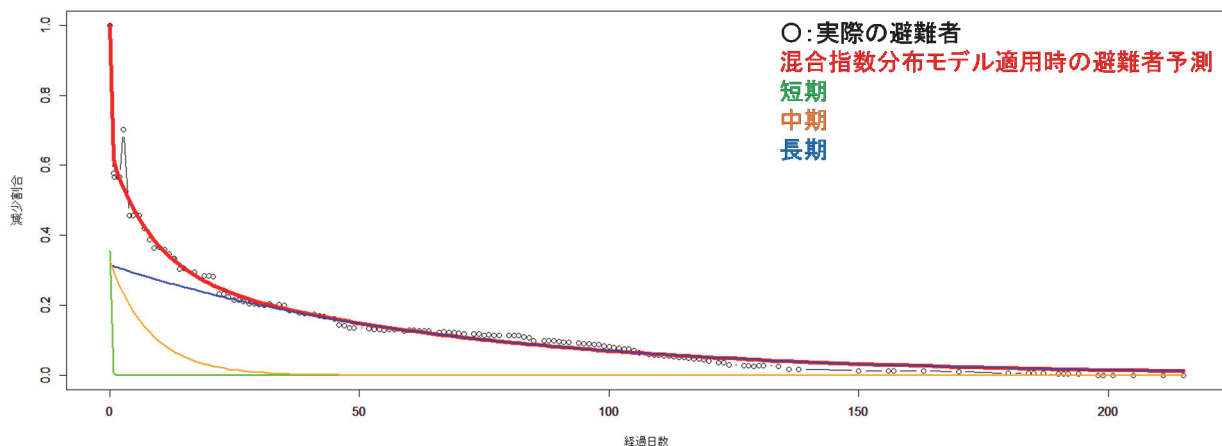


図-15 混合指数分布モデルの適用(益城町)

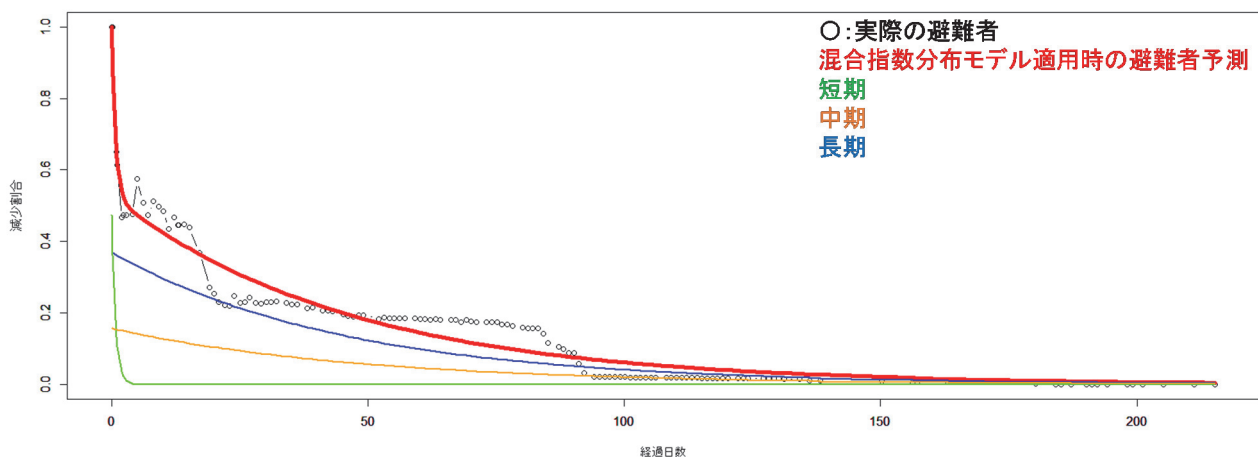


図-16 混合指数分布モデルの適用(西原村)

および、110 日程度における急減については、適合していない。不規則的な傾向は西原村より以上に強く、混合指数分布でのモデル化は困難である。

d) 御船町 (図-18)

ピーク直後の数日間における短期的減少、50 日程度の中期的減少、その後の長期的減少がかなりよく表現されている。益城町同様に、全体的に適合度はかなり高く、

混合指数分布によるモデル化が妥当といえる。

e) 熊本市 (図-19)

ピーク直後の短期的減少がかなり急激であり、停電の復旧や余震の減少などによる帰宅が多かったことを示唆している。指数分布の混合数は 2 となっており、長期的減少が欠落したモデルである。4 日程度に増加が見られ、最適化の過程において、これらの増減の中間的傾向

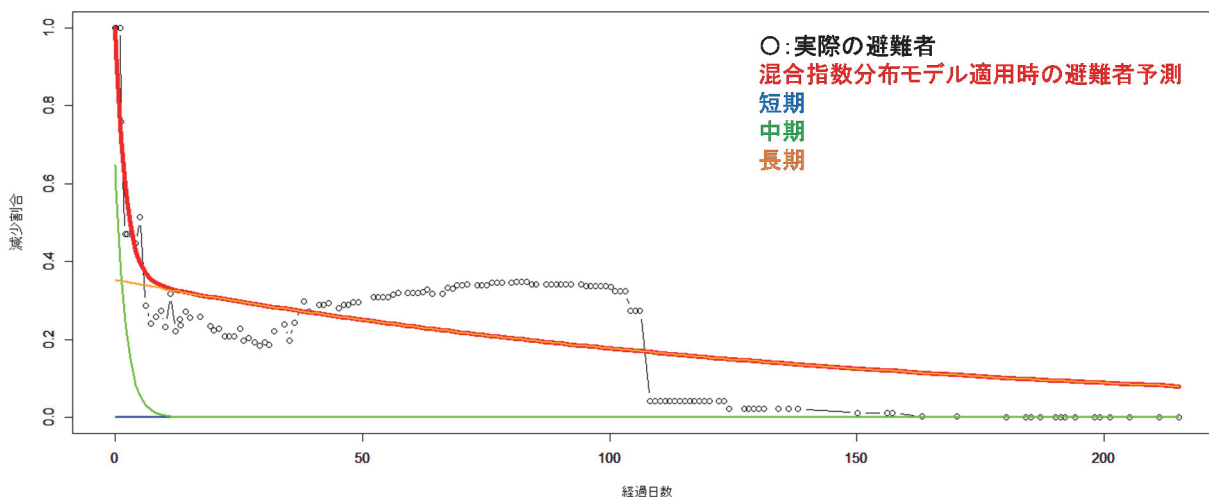


図-17 混合指数分布モデルの適用(南阿蘇村)

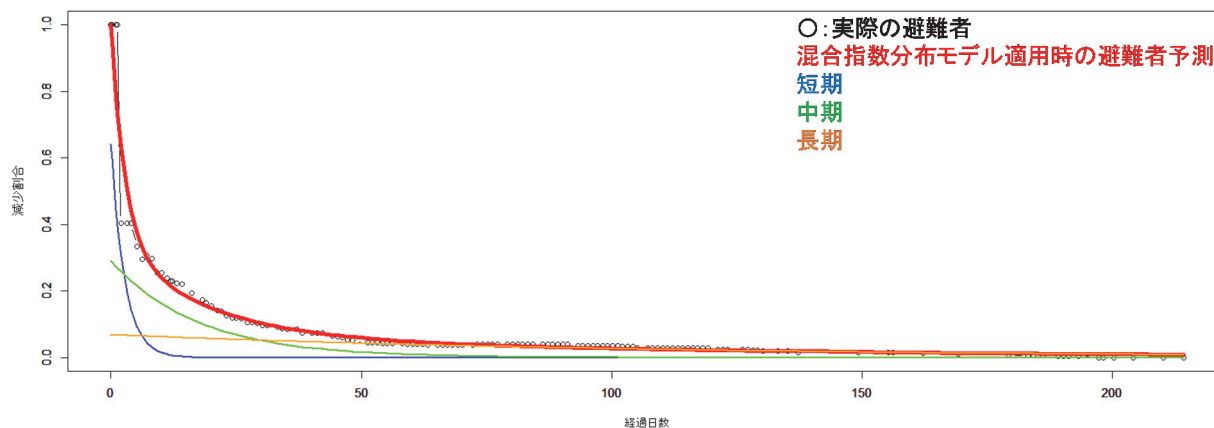


図-18 混合指数分布モデルの適用(御船町)

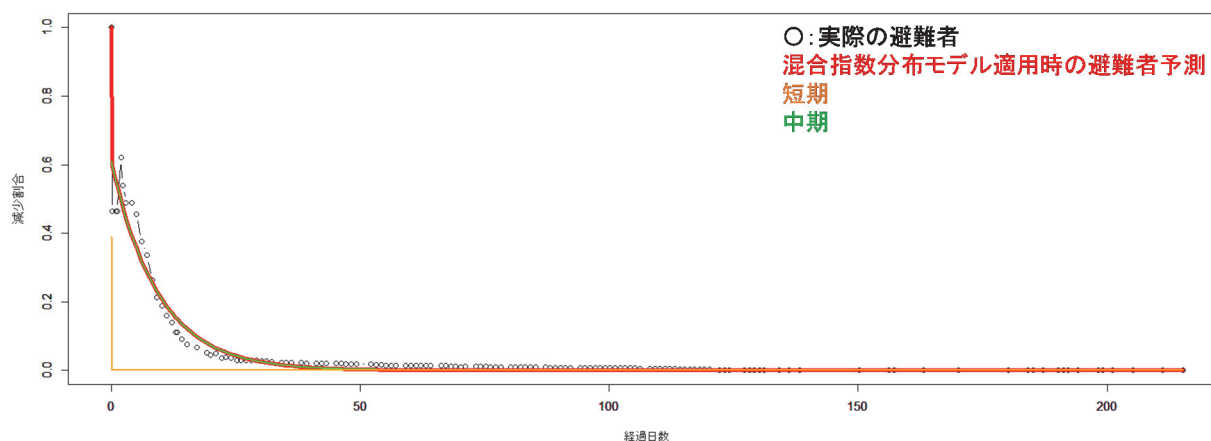


図-19 混合指数分布モデルの適用(熊本市)

を表すようになっており、結果として、中期的減少の減少勾配が緩くなっている。熊本市の人口が多いため、長期的な避難者数は相対的割合が小さいものの、絶対数としてはかなりの人数に上ることには注意すべきである。不規則な増加がなければ、中期的減少と長期的減少が分離された可能性もある。

(2) パラメータごとの比較

図-20 は、式(8)において混合される指数関数の係数(a_1, a_2, a_3)、すなわち、図-15～19 に示した項別の指数分布の切片を比較したものである。また図-21 は、式(8)における各指数部の係数(b_1, b_2, b_3)を用いて、式(9)により避難者数が半減するまでの日数(指数分布の中位数¹⁷⁾で平均値の 0.693 倍に相当し、半減期¹⁸⁾ともいわれる)を各市町村で比較したものである。

$$t_{(1/2)} = \frac{\ln 2}{b_i} = \frac{0.693}{b_i} \quad (9)$$

a) 益城町

係数 a_i はいずれも近い値であるので、各項の影響度合いがほぼ同等であるといえる。短期・中期・長期の半減期はそれぞれ 0.15 日、5.8 日、46.2 日である。図-3 および図-4 との対応を見ると、短期については停電解消の影響を強く受けている。中期については断水解消に近い傾向を示し、長期については仮設住宅およびみなし仮設住宅の整備に誓い傾向を示しており、それぞれの特徴をとらえていることが見て取れる。

b) 西原村

短期の係数が 0.47 と大きく、短期的な減少の影響が強い。ただし中期と長期の半減期は 31.5 日と 34.7 日で差は小さく、これらをまとめると係数は 0.53 となり、むしろ中長期の影響が強かったともいえる。いずれにしても、図-5 との対応を見ると、段階的に急減した傾向を表現することは難しい。

c) 南阿蘇村

前述のように短期・長期で混合数 2 となった。南阿蘇村では短期の係数が 0.65 と大きく、長期が 0.35 と小さい。長期の半減期は約 100.4 日ときわめて長いものの、図-17 からわかるように、2 次避難所の開設などに伴う増減を反映できておらず、あくまでも平均的な傾向を表現しているに過ぎない。

d) 御船町

短期・中期・長期の半減期はそれぞれ 1.9 日、12.2 日、74.5 日であり、益城町と比較していずれも長くなっている。しかし、上記の係数が益城町よりも短期側にシフトしていることから、避難者数の解消自体はそのものは、益城町よりも迅速であったことが表現されている。

e) 熊本市

前述のように短期・中期で混合数 2 である。短期の半減期は 0.01 日と極めて短く、中期の半減期は 6.5 日と短い。避難者が減少するペースは速いが、熊本市は人口が多く、前述のように実際の避難者数は多く残されている。

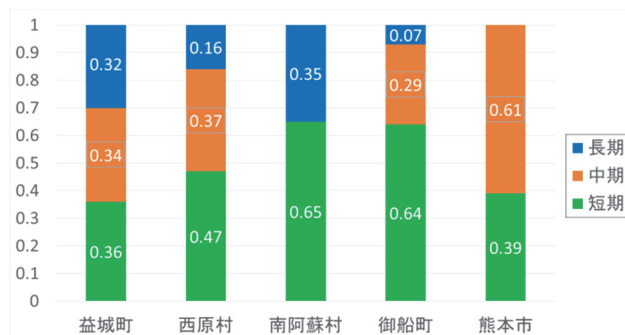


図-20 混合指数分布の項別の係数

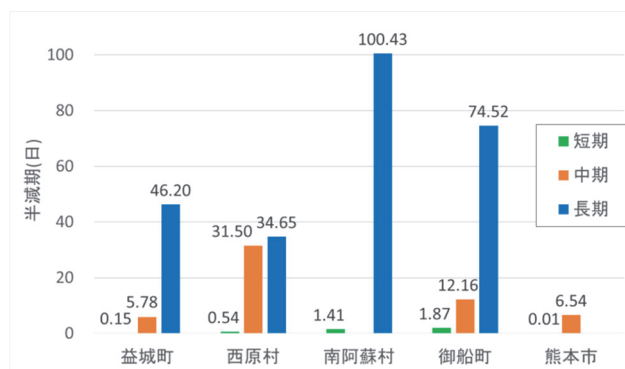


図-21 混合指数分布の項別の半減期

5. おわりに

本研究で得られた成果を以下に要約する。

- 2016 年熊本地震で被災した 5 市町村(益城町、西原村、南阿蘇村、御船町、熊本市)を対象として、避難者数の発生・解消の推移、停電・断水人口の推移、余震の観測状況、応急仮設住宅およびみなし仮設住宅の整備状況について、時系列的な整理を行った。被災した各市町村における避難者数の推移について、災害対応状況とあわせて相互比較し、各市町村の特徴を明らかにした。
- 家屋の全半壊人口、停電・断水人口の推移に加えて、社会的回復力を表す時間関数(線形 1 自由度系の過減衰形)を定義して、避難者の推移を記述するモデルを構築した。本研究では説明変数の実数を当てはめて適合度が高くなるようなモデル係数を求めた。家屋被害予測および停電・断水の被害復旧予測と組み合わせることで、予測モデルとして使うことがで

きる。

- 3) 避難所における避難者数のピーク時からの解消過程を表現するモデルについても検討した。避難理由に応じて避難期間を短・中・長期の3区分として、3種類の指数関数による混合指数分布モデルを用いてフィッティングを行った。対象5市町村すべてにおいてピーク直後の短期におけるモデル適合度は高い結果が得られた。中・長期については、不規則な避難者数の増加、停滞、急減がある場合（西原村、南阿蘇村）は適合度が低くなるものの、それらが無い場合（益城町、御船町、熊本市）は適合度が高くなることが分かった。

謝辞：本研究はJSPS科研費JP 17H02068の助成を受けたものである。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 内閣府 非常災害対策本部：平成28年(2016年)熊本県熊本地方を震源とする地震に係る被害状況等について、2016年12月14日。
- 2) 損害保険料率算出機構：国・自治体の地震被害想定における被害予測手法の調査(平成25年度調査)第2部 地震被害想定手法の整理、第4章 被害予測手法の整理、地震保険研究27, pp.331-339, 2014年5月。
- 3) 佐藤翔輔, 塩野計司：地震によるライフライン停止と住宅損傷を考慮した短期的避難需要の評価モデル-生活支障の計量評価を利用した震害波及過程の記載-, 地域安全学会論文集, No.5, 2003.11
- 4) 加藤宏紀, 能島暢呂：供給系ライフラインの地震時機能的被害・復旧評価モデルー市区町村別簡易評価法のシステム構築一, 日本地震工学会論文集(JAEE特集号) 第15巻, 第7号, 2015, pp.7_354-7_367.
- 5) 熊本県：熊本県災害対策本部会議資料(第2回～第49回), 2016年4月15日～8月30日。
- 6) 熊本県：平成28年熊本地震に係る被害状況等について, 170報～195報, 2016年8月31日～11月14日
- 7) 熊本県：避難所数及び避難者数の確認状況, 2016年11月18日
- 8) 熊本県：平成28年 熊本県の人口と世帯数, http://www.pref.kumamoto.jp/kiji_8718.html
- 9) 災害対策本部：平成28年熊本地震に係る被害状況等について, 197報, 2016年11月29日
- 10) 気象庁：震度データベース検索, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>
- 11) 南阿蘇村：二次避難のお知らせ(第2回), <http://www.vill.minamiaso.lg.jp/site/28kumamotozisinn/nizihinan-dai2kai.html>, 2016年5月17日
- 12) 新語時事用語辞典：みなし仮設住宅, <http://www.weblio.jp/content>
- 13) 熊本県：熊本県災害対策本部会議資料(第23回～第49回), 2016年4月29日～8月30日。
- 14) 熊本市：災害対策本部会議資料(第36回～第63回), 2016年5月8日～9月20日。
- 15) 熊本市：平成28年度 市政アンケート調査 結果報告書, 2016年8月。
http://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c_id=5&id=14042&sub_id=1&flid=93610
- 16) Reed, D., Wang, S., Kapur, K. and Zheng, C.: Systems-Based Approach to Interdependent Electric Power Delivery and Telecommunications Infrastructure Resilience Subject to Weather-Related Hazards, *Journal of Structural Engineering*, Vol.142, Issue 8, August 2016, DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001395.
- 17) 蓑谷千風彦：すぐに役立つ統計分布, 東京図書, 1998, 266p.
- 18) 一石賢：道具としての物理, 日本実業出版社, 289p., 2011年2月。

(2017.?? 受付)

A FUNDAMENTAL STUDY ON OCCURRENCE AND DISSIPATION OF EVACUEES IN THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Kenshi SHIGETA, Nobuoto NOJIMA, Sayuri NAGAI and Hiroki KATO

Prediction of the number of evacuees in an earthquake disaster is an important issue for post-disaster management. In this study, as a fundamental investigation, the initial number and its decreasing process of the evacuees in five municipalities damaged by the 2016 Kumamoto earthquake have been compiled on a daily basis in conjunction with building damage, blackout, suspension of water supply, aftershocks and supply of temporary housing. In addition to the population occupying houses completely or partially destructed and the population without electricity and/or water supply, the time function representing the degree of social resilience has been introduced in order to model the temporal change of the number of evacuees. In addition, the post-peak decreasing process of the number of evacuees has been modeled using a mixed exponential distribution composed of three kinds of exponential functions corresponding to the short-, medium- and long-term effects. The change of the number of evacuees have been characterized by the model coefficients.