

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

2017 年度
修 士 論 文

大地震災害における自宅被害の推定および
避難者の自宅復帰モデルの検討

A Study on Estimation of House Damage and Development of
Home-Return Model in Large Earthquake Disasters

2018 年 1 月 22 日提出

指導教員 柴崎 亮介 教授

佐藤 大誓
Taisei,Sato

目次

第1章 序論.....	4
1.1 背景	4
1.1.1 地震災害対策の重要性.....	4
1.1.2 地震災害対策における課題.....	4
1.1.2.1 被害把握の迅速性・網羅性.....	4
1.1.2.2 災害後の避難者状況の把握.....	5
1.1.3 位置情報ビッグデータの蓄積	6
1.2 本研究の目的および本研究の位置づけ	7
1.3 本論文の構成.....	7
第2章 地震災害における迅速で詳細な被害推定手法の検討	9
2.1 本章の概要	9
2.2 利用データ	10
2.2.1 建物マイクロジオデータ	10
2.2.2 推計震度分布図.....	11
2.2.3 倒壊率テーブル	12
2.2.4 熊本地震実被害データ	14
2.3 手法	15
2.3.1 各建物の倒壊率の推定	15
2.3.2 各建物からの避難者数の推定	16
2.4 推定結果.....	16
2.5 検証	23
2.6 まとめ.....	25
第3章 津波災害における発災後日数ごとの自宅復帰率推定モデルの作成	26
3.1 本章の概要	26
3.2 利用データ	27
3.2.1 混雑統計データ	27
3.2.2 復興支援調査アーカイブ	27
3.2.3 推計震度分布図.....	30
3.2.4 上水道断水状況データ	31
3.2.5 国勢調査データ	31

3.2.6 建物マイクロジオデータ	31
3.3 自宅復帰率推定モデル作成に用いた変数.....	32
3.4 データ処理.....	33
3.4.1 混雑統計データと建物被害データの複合処理（該当変数：Y,X3,X4）	33
3.4.1.1 各種処理.....	33
3.4.1.2 自宅復帰率の推定結果.....	34
3.4.2 推計震度分布図の処理(該当変数：X2,X3).....	38
3.4.3 建物被害データの処理（該当変数：X6,X7）	38
3.4.4 浸水被害データの処理（該当変数：X8~X13,X14）	38
3.4.5 上水道断水状況データの処理(該当変数：X15,X16).....	38
3.4.6 国勢調査データの処理(X17~X20).....	38
3.5 相関分析.....	40
3.5.1 対象地域.....	40
3.5.2 分析結果.....	41
3.6. ロジスティック回帰によるモデルの作成.....	44
3.6.1 手法.....	44
3.6.2 パラメータの出力結果.....	45
3.6.3 モデルの検証結果	46
3.7 まとめ.....	47
第4章 自宅復帰モデルのシミュレーション.....	48
4.1 本章の概要.....	48
4.2 利用データおよびデータの処理	49
4.2.1 確率的地震動予測地図（該当変数：X2,X3）	49
4.2.2 津波予測データ（該当変数：X8~X14）	50
4.2.3 建物被害予測データ（該当変数：X4~X7）	51
4.2.4 上水道復旧率推定データ(該当変数：X15,X16)	51
4.2.5 国勢調査データ(該当変数：X17~X20)	53
4.3 モデルの適用結果	54
4.4 まとめ.....	59
第5章 結論.....	60
5.1 本研究の成果.....	60
5.2 本研究の課題と展望.....	61

参考・引用文献	63
謝辞	67

第1章 序論

1.1 背景

1.1.1 地震災害対策の重要性

日本は地理的に、世界でも有数な地震多発地帯であり、日本で発生した地震災害は過去にたびたび甚大な被害をもたらしてきた。例として、1995年阪神淡路大震災では多くの建物の倒壊被害とそれに伴う死者6400人、負傷者4万3700人の人的被害をもたらした[1]。また、2011年東日本大震災では津波を伴う巨大地震によって、死者1万5,859人、行方不明者3,021人（平成24年5月30日警察庁発表）という明治以降では大正12年（1923年）の関東大震災（死者・行方不明者：約10万5,000人）、明治29年（1896年）の明治三陸地震（同：約2万2,000人）に次ぐ極めて深刻な被害をもたらした（[2]より引用）。近年では、2016年熊本地震においても多くの建物被害とともに18万人を超える避難者が発生し、それに関連する災害関連死などの被害をもたらした[3]。将来的にも多くの帰宅困難者が予測される首都直下型地震や、甚大な津波被害が予測されている南海トラフ沖地震の発生が予想されており、とりわけ南海トラフ沖地震については、M8～9クラスの地震が30年以内に、70%程度の確率で発生すると予測されており、対策は急務である[4][5]。想定される南海トラフ沖地震について、震度6弱以上または浸水深30cm以上の浸水面積が10ha以上となる市区町村は、30都府県の734市区町村に及び、その面積は全国の約32%、人口は全国の約53%を占める超広域にわたるものである（[6]より引用）。また、長期浸水による避難の長期化や広域避難などの対処など、求められる対策が広い領域に及ぶため、その事前対策や対応計画の重要性は高いといえる。

1.1.2 地震災害対策における課題

1.1.2.1 被害把握の迅速性・網羅性

災害被害把握の遅れは災害の対応の遅れを意味する。2016年熊本地震においても、被害の詳細を把握するのは難しく、各地で災害対応の遅れがみられた。一般に行われる実地調査では、広域および詳細な被害調査に時間がかかる。災害対応が遅れると、短期的には負傷者の救護の遅れ、長期的には衛生環境の悪い避難生活が長引くことによる健康被害などの二次災害の危険が増える。これらの被害を防ぐためにも、発災後の被害情報の把握のスピード性が課題となっている。

発災直後の災害被害の把握には近年、航空機やUAV（無人航空機）による航空観測が着目されている。これらは半日～1日程度で稼働が可能であり、発災直後の段階での被害把握にも有効とみられている[7][8]。しかし、観測範囲が限られていることから南海トラフ沖地

震のような広域にわたる被害の把握は難しくなってくる。また、実測である以上、発災直後に調査に利用できるリソースは限られており、発災直後の限られた時間とリソースの中で、どこで調査を行うのかといった計画は非常に重要となっている。越村ほか[9]では、衛星画像を用いた手法が、災害被害の広域把握に有効であることを述べている。ただし、災害発生場所や時間によってデータの入手に数日以上かかってしまうことや、建物被害を個別に知ることは難しく、詳細性という面での課題があることについて述べている。

災害の被害把握には、観測データにもとづいたものだけでなく、被害推定モデルなどを用いた被害推定と組み合わせることで、被害把握を行うということも重要である。詳細な被害推定手法の研究としては、加藤[10]が、50m メッシュ単位での詳細な被害推定を行っているが、利用可能データが一部の地域のみで、発災直後の利用ができる状態ではない。

また、迅速な被害推定に関する報告についてはあまりないのが現状である。航空測量などを駆使した上での実測調査には限界があることを踏まえると、発災直後に適用ができ、広域で網羅性のある推定手法にニーズがあるといえる。

1.1.2.2 災害後の避難者状況の把握

我が国では近年、南海トラフ沖地震をはじめとする将来に予測される大地震災害に備えて、建物の耐震化や防波堤の整備などのインフラ整備が盛んに進められており[11]、災害被害による直接的な犠牲者は今後減少していくと思われる。一方で、地震災害に対するレジリエンスな社会の実現のためには、被害そのものを防ぐことだけでなく、被害を受けた後のその後の回復過程についても目を向ける必要がある。

2016年熊本地震の例では、4月16日の本震の後、避難所における避難者数が0となったのは約7か月後の11月18日であり、避難が長期化した[12]。避難の長期化は悪い衛生環境やストレス等から避難者の健康リスクが高まる。同事例においては、死者約250人のうち災害による直接死が約50人、関連死は約200人であり、長期の避難生活による二次被害が甚大なものとなってしまった[13]。実際に熊本地震における避難の長期化への対応は事前の対策不足により、避難所の運営や物資の配分などが問題となった[3]。このことから、将来予測される地震災害においても、避難の長期化を予測し、それに対応するための施策を講じることが重要な課題であるといえる。そのため、避難者が自宅復帰に復帰するタイミングを把握し、避難者の解消過程の把握を行うことは、避難の長期化対策の施策に役立てることができる。また、人々の自宅の復帰は人々の日常生活への復帰への第一歩として、災害からの復旧・復興の観点からも重要である。

人々の自宅復帰に関する研究について、山口ほか[14]では、携帯位置情報の人流データを

用いて、災害前後の人々の日常行動パターンの乖離について分析しており、今後は災害被害に対する復旧・支援体制といった条件による日常行動の回復速度の違いを検討する必要性を述べている。また、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）[15]において、自宅復帰に関連して、避難者状況の推定について、建物被害状況とライフライン被害状況を考慮することが多いことを述べているが、それらの要因の複合的な評価に関する報告はあまりないとされている。このように、既往の研究において、人々の自宅復帰に関する要因の検討や自宅復帰時期の推定に関する知見はまだ十分に得られていないのが現状となっている。

1.1.3 位置情報ビッグデータの蓄積

近年、スマートフォンの普及、IoT の進展、有線・無線ネットワークの高速化・大容量化により、個人や事業者等が、文字情報のみならず、画像・映像データ、位置情報、センサー情報などの、月毎、日毎という定期的な情報だけではなく、リアルタイムで流通・蓄積されるデータについても、インターネットを通じて送受信できるようになった（[16]より引用）。それを受けて、官民データ活用推進基本法（平成 28 年法律第 103 号）をはじめ、国内でビッグデータの活用の動きが進んでおり、災害関連分野でもその有効利用が期待されている。中でも近年、位置情報ビッグデータである GPS による大規模人流データや近年東京大学で整備されたマイクロジオデータがその活用が期待されている。

GPS(Global Positioning System) は、人工衛星を用いた、衛星測位によって対象物の位置座標を特定するシステムのことで、自分の位置 (x,y,z) と時刻についての情報を得ることができる[17]。GPS は近年、GPS 搭載の携帯電話の普及にともなって急速に一般個人にも利用が普及し、その蓄積されたデータの利活用が近年注目されている。GPS による測位情報は、人々の位置情報・移動情報すなわち人流データとして記録・蓄積を行うことができる。それらの蓄積された人流データは、可視化することによって、人々の行動を俯瞰し、その様相を定量的に明らかにすることができる。災害関連分野では、NHK スペシャル「震災ビッグデータ」において、東日本大震災の発災直後に首都で大量の帰宅困難者が発生した時の様子を、GPS の人流データを用いることで、主要駅における 20 万人以上が 1 キロ四方に身動きがとれないまま滞留している状況が可視化された。そして、そこから明らかになったリスクが報じられ、社会的に大きなインパクトを与えた[18]。GPS データによる人流データは個人という詳細な単位で、時系列ごとの分析が可能であり、位置座標をもとに他の様々な空間情報との結びつけが可能であるといった特長があり、その蓄積されたビッグデータは様々な用途での利用が期待されている。一方で個人情報保護の観点などから、

個人単位のデータは基本的に公開されることはなく、データ入手の手続きの難しさから、研究事例は多くない。そのため詳細な GPS データを用いた研究はいまだに模索段階の状況である。

マイクロジオデータとは、東京大学空間情報科学研究センター[47]で開発されているミクロスケールの様々な時空間データのこと、各種デジタル地図データや POI データ、モバイルデータ、Web から取得できる非集計の位置情報データのことである([19]より引用)。マイクロジオデータは企業間取引や空き家の推定および地域活性化といった様々な分野で研究が行なわれており、災害分野においてもその活用が期待されている[22]。同データは全国的に自治体をまたいで利用可能であり、また非集計のデータのため用途が広い。また、データ利用についても正式に手続きを経ることで利用可能である。

1.2 本研究の目的および本研究の位置づけ

以上のような背景から、将来の災害対策の重要性や現状の課題を踏まえ、GPS 人流データやマイクロジオデータといった位置情報ビッグデータを活用し、大地震災害における「迅速で詳細な被害把握のための被害推定手法の検討」および、「自宅復帰に関わる複合的な要因から自宅復帰時期の推定モデルの検討」をそれぞれ行うことの二つを本研究の目的とする。

本研究では、大地震災害の被害発生から回復までの包括的な災害レジリエンスの向上のために、避難者の発生からその自宅復帰までの一貫した推定を研究の全体像とする。ただし、現在用いることできるデータの制約上、本研究では上述の二つの目的に分けて、それぞれの段階ごとの検討を行うことでその全体像の実現に貢献することが本研究の位置づけである。

1.3 本論文の構成

第 1 章の最後に本論文の構成を示す。第 1 章では本研究の背景や目的を述べてきた。第 2 章では、大地震災害における、自宅被害とそれとともなって発生する避難者について、迅速で詳細な被害推定手法の検討を行う。第 3 章では、避難者の自宅復帰に関するモデルの作成と検討を行う。第 4 章では第 3 章で作成したモデルの適用例を示す。そして最後に第 5 章で本研究の成果や今後の研究の展望について述べ、全体のとりまとめをおこなう。

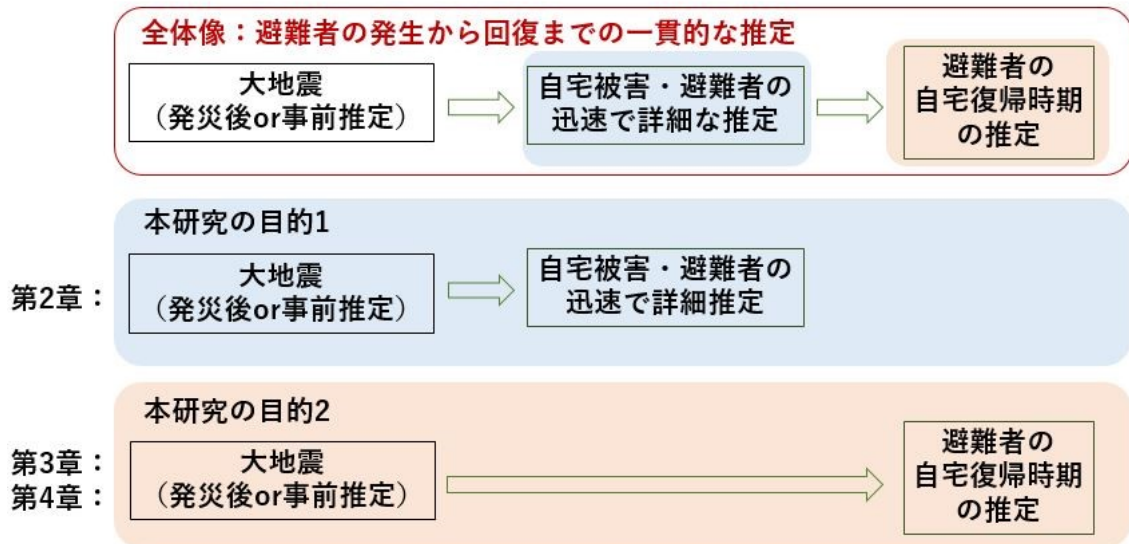


図1：本研究の全体像および目的

第2章 地震災害における迅速で詳細な被害推定手法の検討

2.1 本章の概要

本章では、2016年4月に発生した熊本地震（表1）を対象として、地震災害における迅速な被害推定手法の検討を行う。建物単位のデータである建物マイクロジオデータおよび、発災直後に発表される気象庁の推計計測震度データを用いて、建物被害や避難者数について、詳細なスケールでの推定を試みるとともに、同手法による発災直後の迅速な被害の把握への有効性を検討した。

表1：熊本地震の概要（前震(上)および本震(下)) [3]

発生日時	平成28年4月14日21時26分頃
震央地名	熊本県熊本地方（北緯32度44.5分、東経130度48.5分）
震源の深さ	11km（暫定値）
規模	マグニチュード6.5（暫定値）
津波	無し

発生日時	平成28年4月16日1時25分頃
震央地名	熊本県熊本地方（北緯32度45.2分、東経130度45.7分）
震源の深さ	12km（暫定値）
規模	マグニチュード7.3（暫定値）
津波	無し

2.2 利用データ

2.2.1 建物マイクロジオデータ

建物マイクロジオデータは、2009年住宅地図に住宅土地統計調査等の統計値を配分することによって作成されたデータである[19]。同データは、建物一棟一棟の分布を表すポイントデータであり、住宅地図が持つ属性情報に加え、建築構造や築年代のデータが格納されている[20]。さらに、Akiyama et al.,[21]の手法を用いて、国勢調査の集計値を按分することで、建物単位の居住者数を求めた。同データは全国的に整備されており、任意の地域で利用可能な状態である。本研究においては、熊本県全域のデータを用いた。



図2：本研究で用いた建物マイクロジオデータの属性データ

2.2.2 推計震度分布図

建物ごとに計測震度を与えて解析を行うために、熊本地震発生時の 2016 年 4 月 14 日（前震時）および 4 月 16 日（本震時）の、気象庁提供の推計計測震度分布図の GPV データを用いた（図 3）[23]。推計震度分布図は、震度 5 弱以上を観測した地震を対象に、地震観測記録をもとに表層地盤の増幅度を考慮して、1km メッシュ間隔での震度を推計し、地震計のない地点を含めてその分布を地図上に示したものである。この推計震度分布図は、発災後 5～10 分程度の時間で整備されるため発災直後に利用可能であり、迅速な被害の把握への有効利用が期待できる。

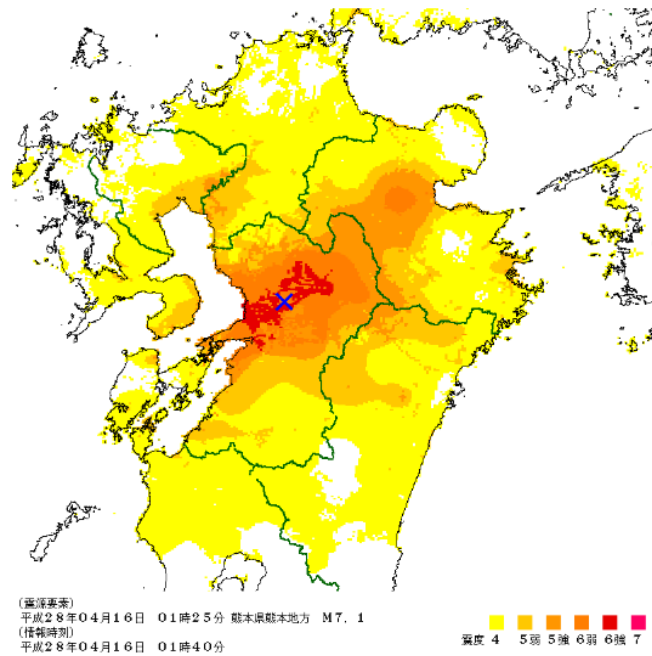


図 3：推計震度分布図（熊本地震本震）[23]

2.2.3 倒壊率テーブル

建築構造や計測震度に応じて、建物単位での倒壊率を求めるために、東京都総務局[24]の建物の全半壊率および全壊率の倒壊率テーブル（表 3）（図 4）を用いた。なお、建物マイクロジオデータの推定値は 1970 年以前の建物データは、詳細な築年代が不明となっているため、1963 年～1971 年の分類にあたる「木造中 1」に分類をして解析を行い、1962 年以前の「木造旧」は使用しなかった。

表 2：本研究で用いた建築分類の定義[24]

建築構造	築年代	分類名
木造	～1962年	木造旧
木造	1963～1971年	木造中1
木造	1972～1980年	木造中2
木造	1981～1989年	木造新1
木造	1990～2001年	木造新2
木造	2002年～	木造新3
非木造	～1971年	非木造旧
非木造	1972～1980年	非木造中
非木造	1981年～	非木造新

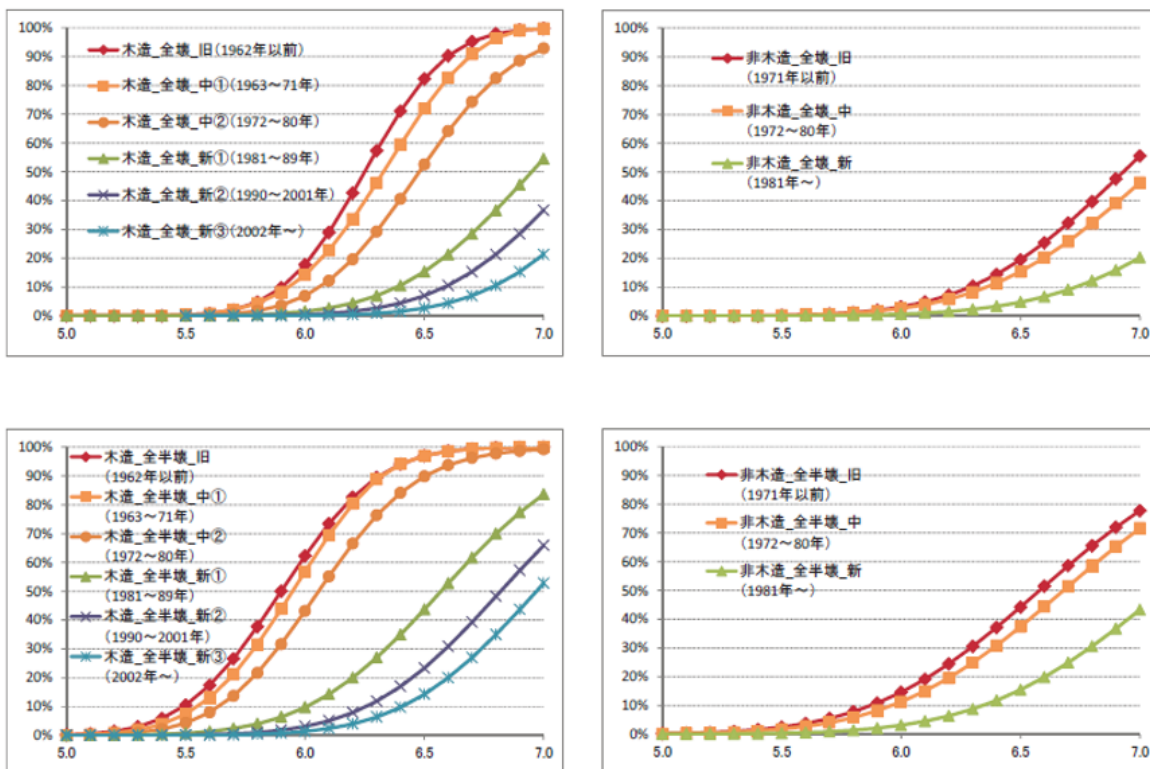


図 4：建築分類ごとの全壊率曲線（上）および全半壊率曲線（下） [24]

表3：倒壊率テーブル（全壊率(上)、全半壊率（下））[24]

建築分類 計測震度	木造旧	木造中1	木造中2	木造新1	木造新2	木造新3	非木造旧	非木造中	非木造新
5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5	0.3	0.3	0.1	0	0	0	0.2	0.2	0
5.6	0.8	0.8	0.3	0.1	0	0	0.4	0.4	0.1
5.7	2.1	2.1	0.8	0.2	0	0	0.7	0.6	0.1
5.8	4.8	4.3	1.7	0.4	0.1	0	1.2	1	0.2
5.9	9.7	8.2	3.6	0.9	0.2	0	2	1.7	0.4
6.0	17.7	14.2	6.9	1.5	0.4	0.1	3.1	2.6	0.6
6.1	28.9	22.7	12.2	2.7	0.9	0.2	4.8	3.9	1
6.2	42.7	33.6	19.6	4.4	1.5	0.4	7.2	5.8	1.5
6.3	57.3	46.2	29.3	7	2.7	0.9	10.4	8.2	2.3
6.4	71.1	59.4	40.6	10.6	4.4	1.5	14.5	11.4	3.3
6.5	82.3	72	52.5	15.3	7	2.7	19.5	15.4	4.8
6.6	90.3	82.7	64.1	21.3	10.6	4.4	25.5	20.2	6.7
6.7	95.2	90.9	74.3	28.5	15.3	7	32.3	25.8	9.1
6.8	97.9	96.4	82.5	36.7	21.3	10.6	39.7	32.2	12.2
6.9	99.2	99.2	88.6	45.5	28.5	15.3	47.6	39.1	15.9
7.0	99.7	99.7	92.8	54.5	36.7	21.3	55.6	46.3	20.2

建築分類 計測震度	木造旧	木造中1	木造中2	木造新1	木造新2	木造新3	非木造旧	非木造中	非木造新
5.0	0.2	0.1	0.1	0	0	0	0.2	0.1	0
5.1	0.6	0.3	0.2	0	0	0	0.4	0.2	0
5.2	1.4	0.8	0.4	0.1	0	0	0.6	0.4	0.1
5.3	3	1.9	1	0.2	0	0	1	0.7	0.1
5.4	5.9	3.9	2.1	0.4	0.1	0	1.6	1.1	0.2
5.5	10.6	7.5	4.3	0.8	0.1	0	2.5	1.8	0.3
5.6	17.4	13.1	8	1.4	0.3	0.1	3.7	2.7	0.6
5.7	26.6	21.1	13.7	2.4	0.5	0.2	5.5	4	0.9
5.8	37.7	31.5	21.7	4	1	0.4	7.8	5.8	1.4
5.9	50	43.8	31.7	6.4	1.8	0.8	10.8	8.2	2.1
6.0	62.3	56.8	43.2	9.8	3.1	1.4	14.6	11.2	3.1
6.1	73.4	69.4	55.1	14.3	5.1	2.4	19.1	15	4.5
6.2	82.6	80.3	66.5	20	7.9	4	24.5	19.6	6.4
6.3	89.4	88.8	76.4	27	11.9	6.4	30.5	24.9	8.8
6.4	94.1	94.1	84.2	35	17	9.8	37.2	30.9	11.8
6.5	97	97	89.9	43.7	23.4	14.3	44.2	37.4	15.5
6.6	98.6	98.6	93.7	52.7	30.9	20	51.5	44.3	19.8
6.7	99.4	99.4	96.2	61.6	39.3	27	58.6	51.4	24.9
6.8	99.8	99.8	97.7	69.9	48.2	35	65.5	58.5	30.6
6.9	99.9	99.9	98.7	77.3	57.2	43.7	72	65.3	36.7
7.0	100	100	99.2	83.6	65.9	52.7	77.7	71.6	43.3

2.2.4 熊本地震実被害データ

推定値の検証を行うために、熊本地震の実際の被害データ[25][26]（熊本県災害対策本部，2016）のうち全壊・半壊棟数および避難者数のデータを用いた。同データは市区町村単位での集計値であり、全壊・半壊棟数は居住者がいる住宅のみの集計となっている。なお、避難者数のデータは本震の約半日後の4月16日14時半のものを使用した。

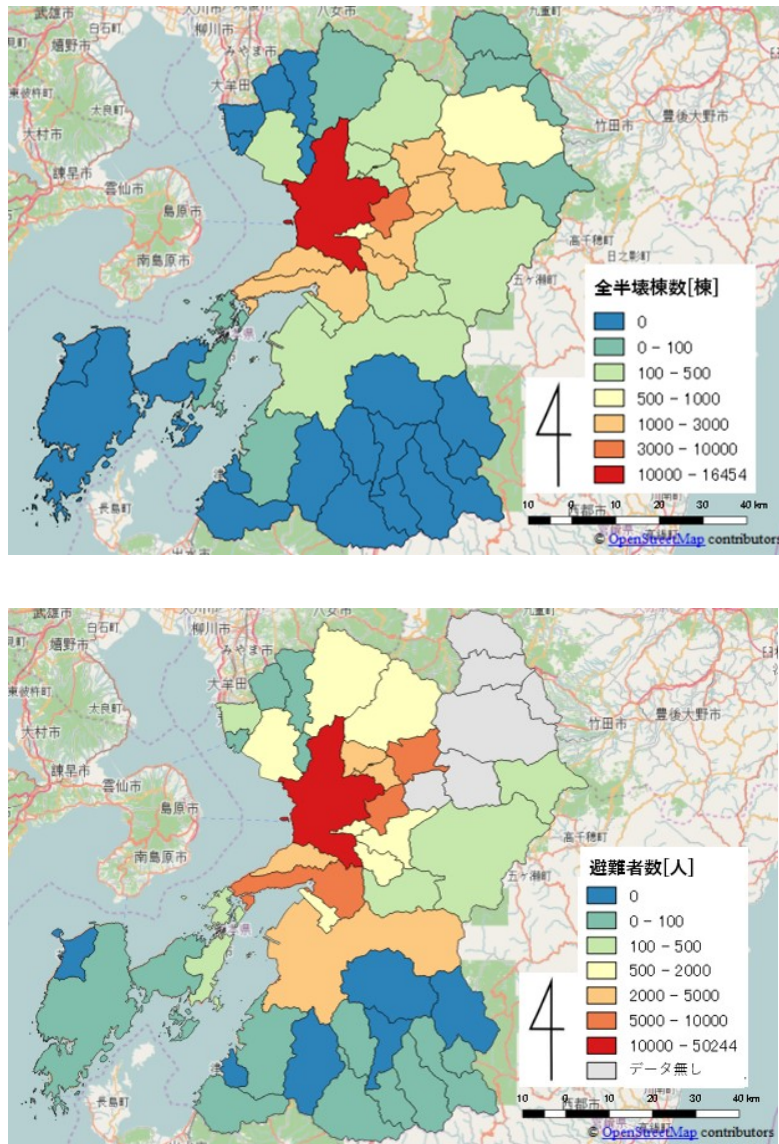


図5：熊本地震の実被害データ(上：全半壊棟数、下：避難者数)

2.3 手法

2.3.1 各建物の倒壊率の推定

手法の全体の流れを図 6 に示す。建物マイクロジオデータと推計震度分布図を用いて、建物ごとに計測震度を与え、建築構造や年代によって、表 3 に基づいて全壊率、半壊率および全半壊率を求めた。また、熊本地震においては、2 回の地震による複合被害について考える必要があるため、式(1)～式(4)を用いて、ある建物 i の前震と本震の 2 回の地震による複合被害の全壊、半壊および全半壊率を求め、以降の計算に用いた。

$$CRa_i = R3_i \cdot Ra2_i + Ra1_i \quad (1)$$

$$CRs_i = R3_i \cdot Rs2_i + Rs1_i \quad (2)$$

$$CRas_i = R3_i(Ra2_i + Rs2_i) + (Ra1_i + Rs1_i) \quad (3)$$

$$R3_i = 1 - (Ra1_i + Rs1_i) \quad (4)$$

$Ra1_i$: 前震による建物 i の全壊率

$Ra2_i$: 本震による i の全壊率

$Rs1_i$: 前震による建物 i の半壊率

$Rs2_i$: 本震による建物 i の半壊率

$R3_i$: 建物 i が前震で倒壊しない確率

CRa_i : 前震と本震の複合による建物 i の全壊率

CRs_i : 前震と本震の複合による建物 i の半壊率

$CRas_i$: 前震と本震の複合による建物 i の全半壊率

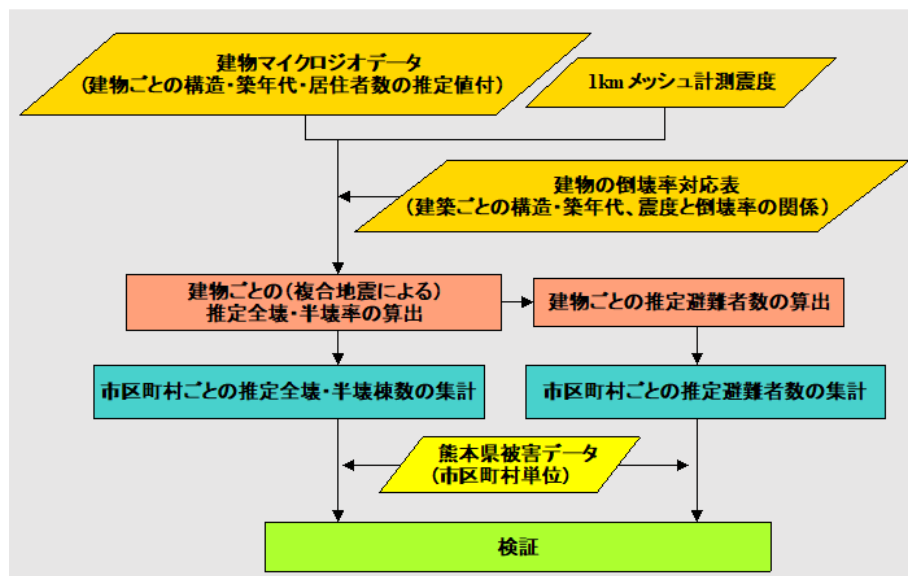


図 6：本研究の手法の流れ

2.3.2 各建物からの避難者数の推定

東京都総務局[27]による式(5)を用いてある建物 i が全壊、あるいは半壊した時にその建物から発生する避難者数を推定した。算出される推定値は人数の期待値である。

$$E_i = C_i N_i + 0.503 H_i N_i \quad (5)$$

C_i : 建物 i の全壊率

H_i : 建物 i の半壊率

N_i : 建物 i の居住者数

E_i : 建物 i から発生する避難者数

2.4 推定結果

図7および図8に、熊本県における建物単位の推定倒壊率および、推定避難者数を示す。建物マイクロジオデータは、全国的に整備がされているため、これらの結果は熊本県だけでなく、全国的に適用することができる。また、建物単位で被害を推定できるため、3.3のように市区町村単位や町丁目単位、メッシュ単位での集計など、任意の単位での被害集計が可能である(図9~図12)。なお、本研究では、検証の際に被害データと条件を合わせるため、居住者が1人以上いる建物のみを対象に集計した。集計した建物の全半壊棟数は期待値である。

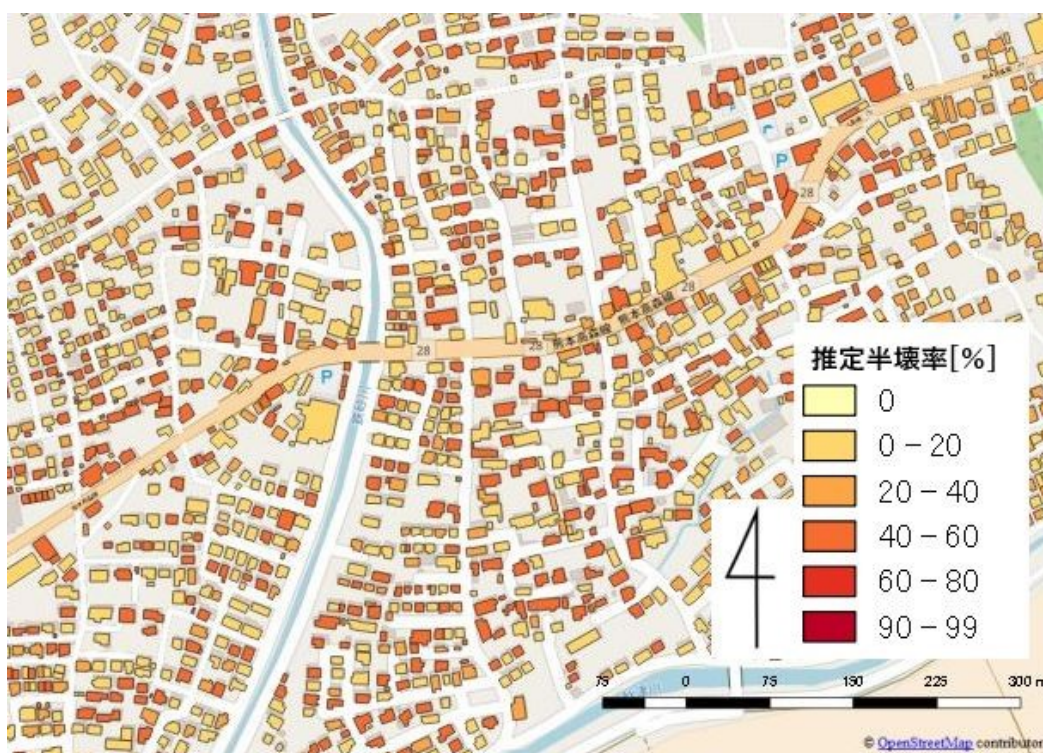
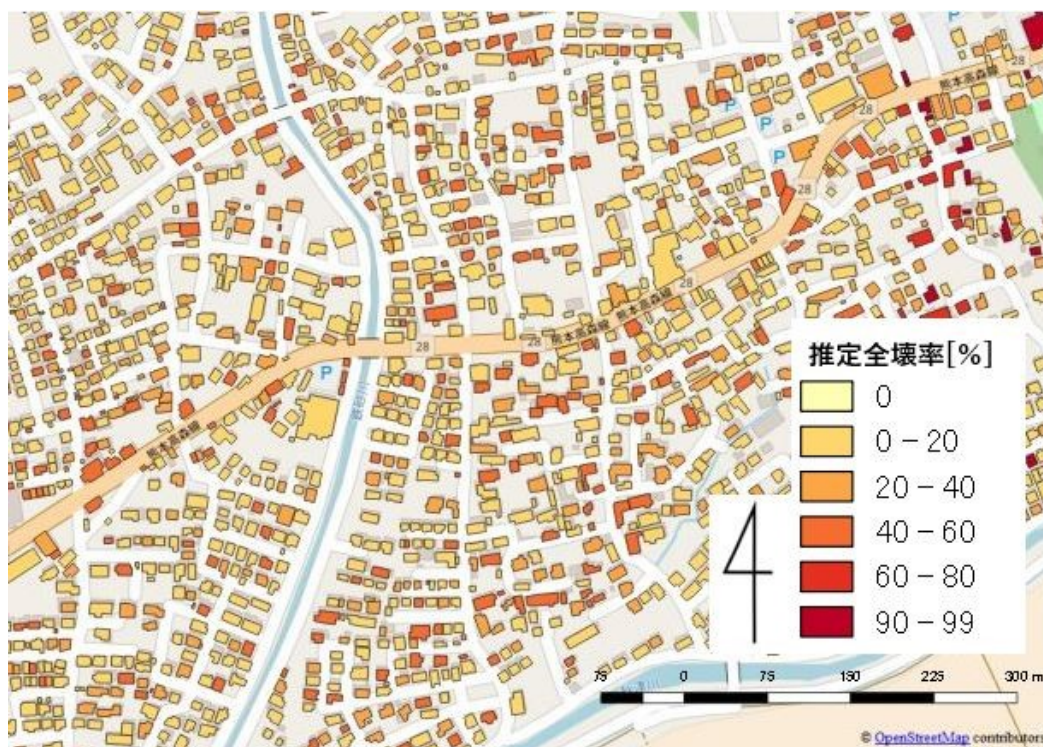


図7：熊本県（一部地域）における建物単位の推定全壊率(上)、推定半壊率(下)

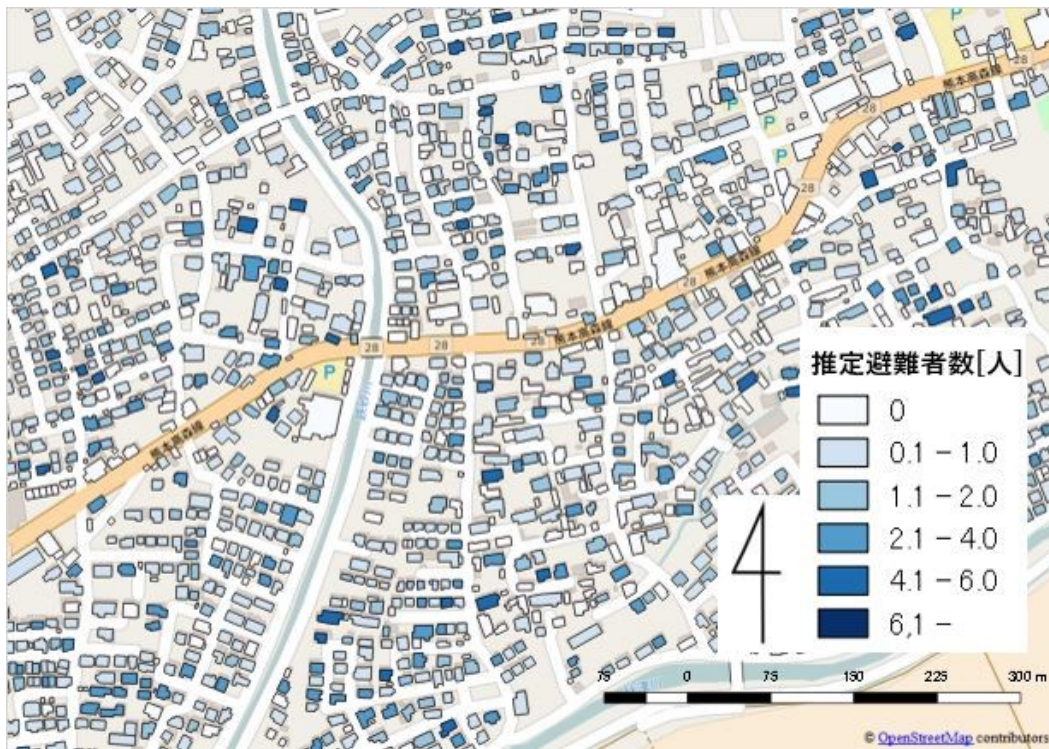
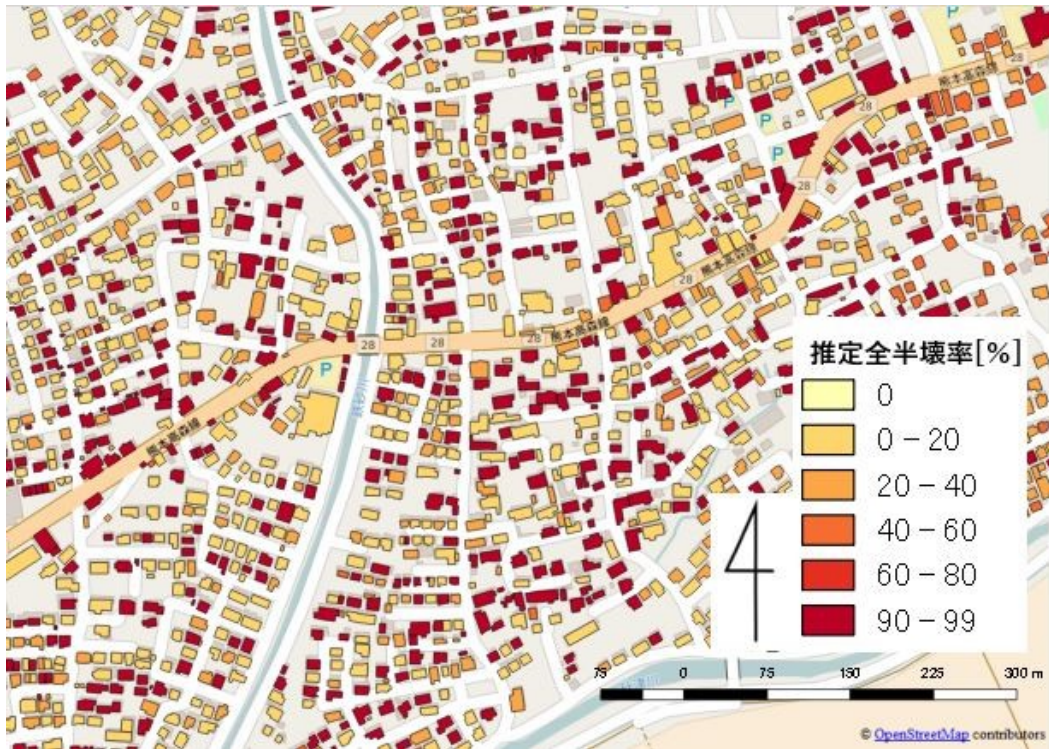


図8：熊本県（一部地域）における建物単位の推定全半壊率(上)、各建物からの推定避難者数(下)

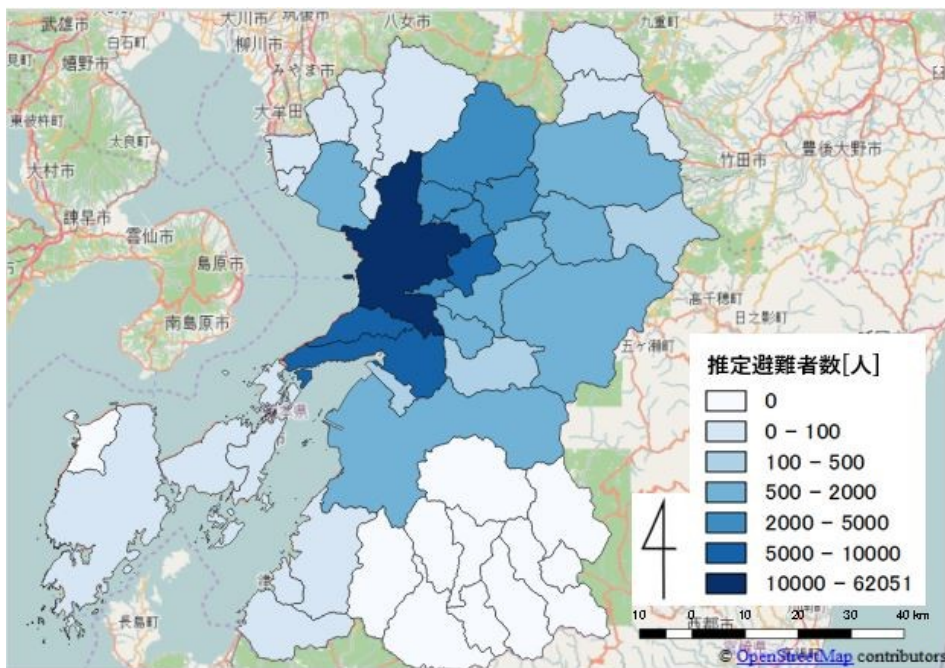
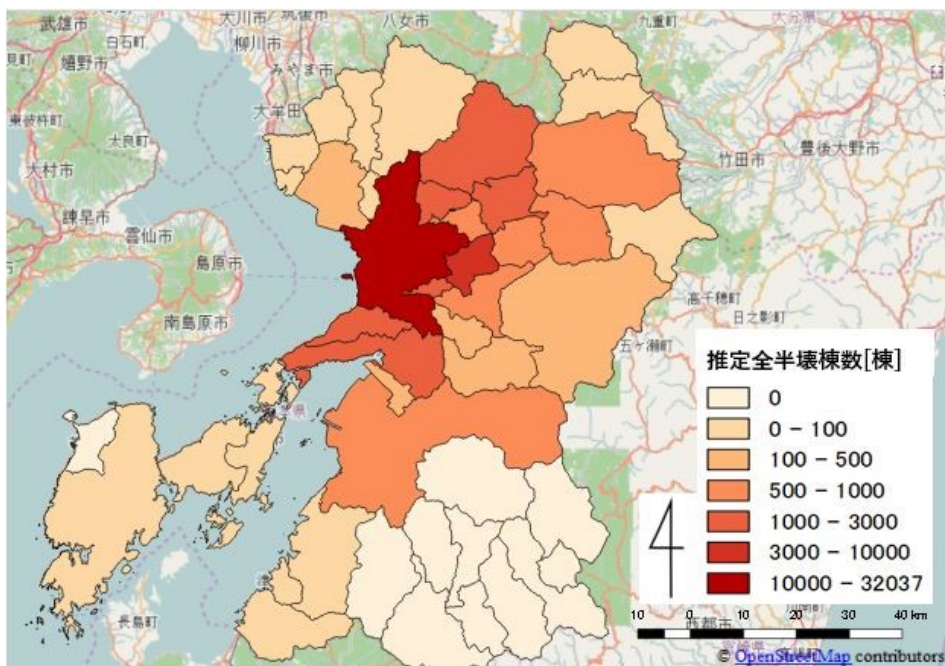


図 9：熊本県における市区町村単位での推定全半壊棟数(上)および推定避難者数(下)

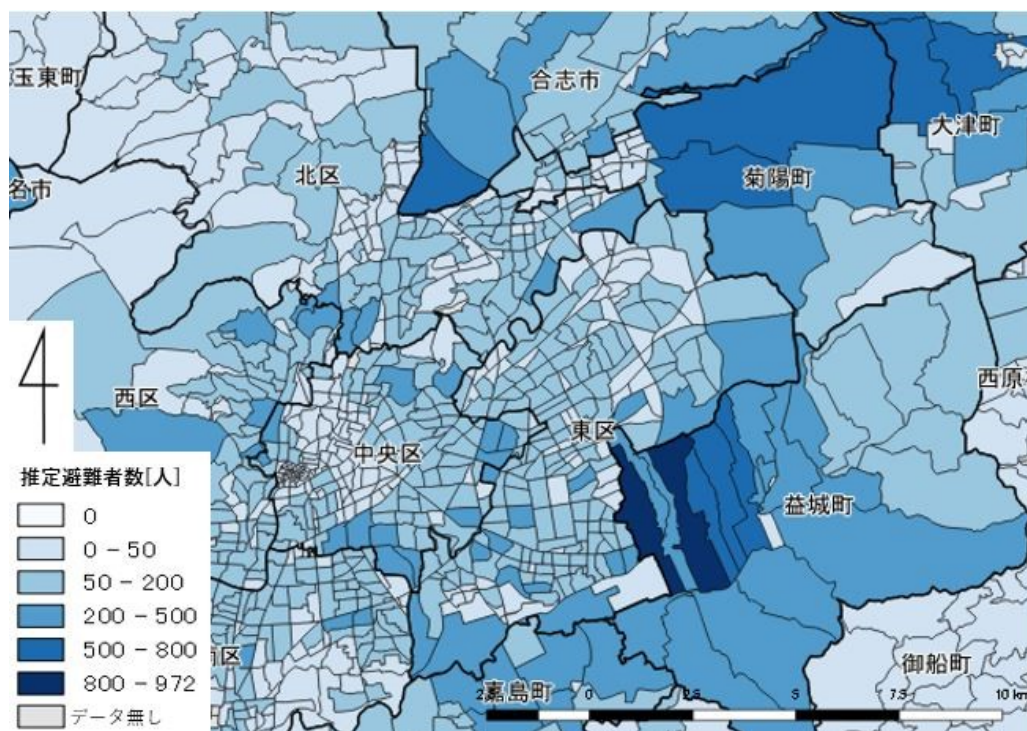
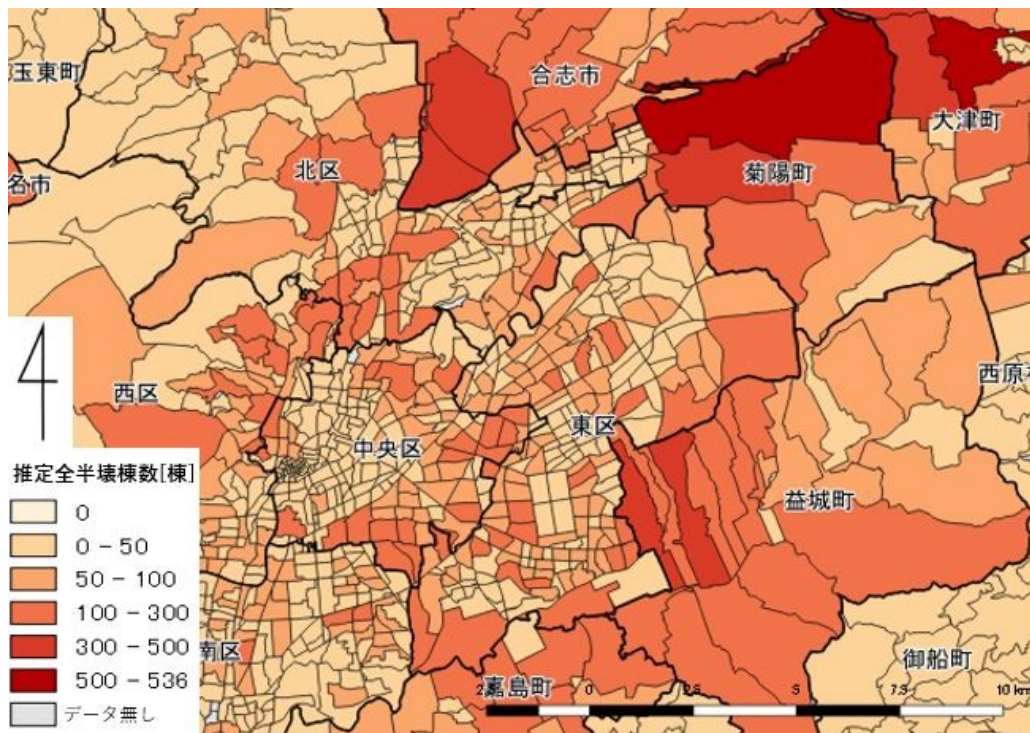


図 10：熊本県(一部地域)における町丁目での推定全半壊棟数(上)および推定避難者数(下)

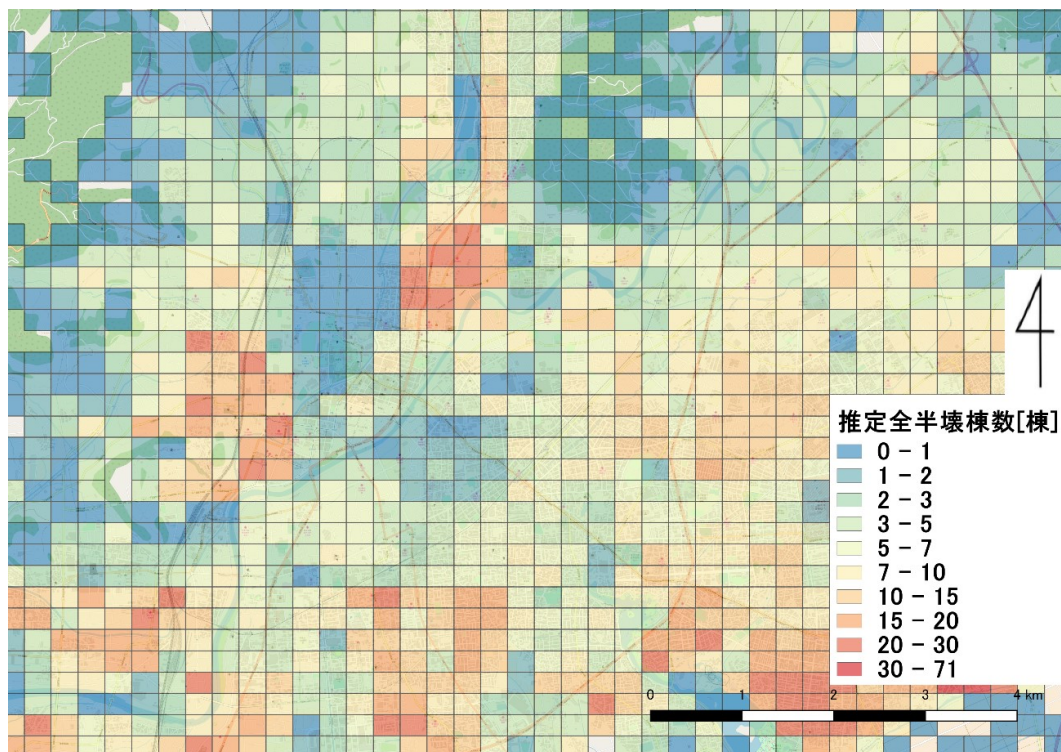
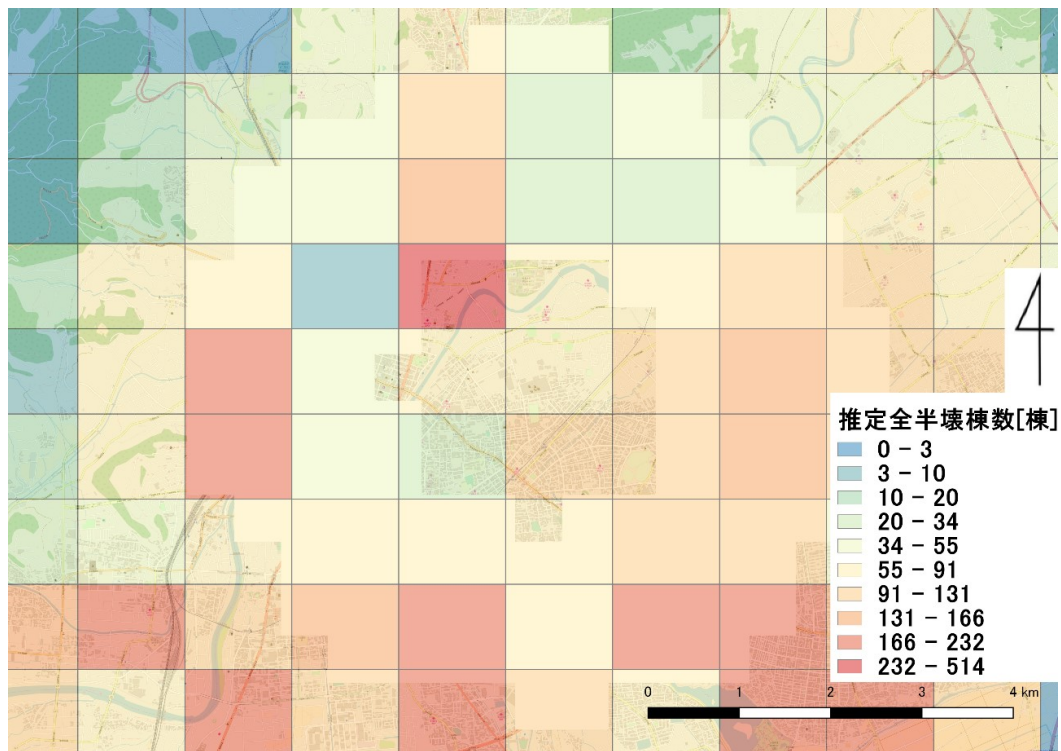


図 11：熊本県(一部地域)におけるメッシュ単位での推定全半壊棟数(上：1km 下：250m)

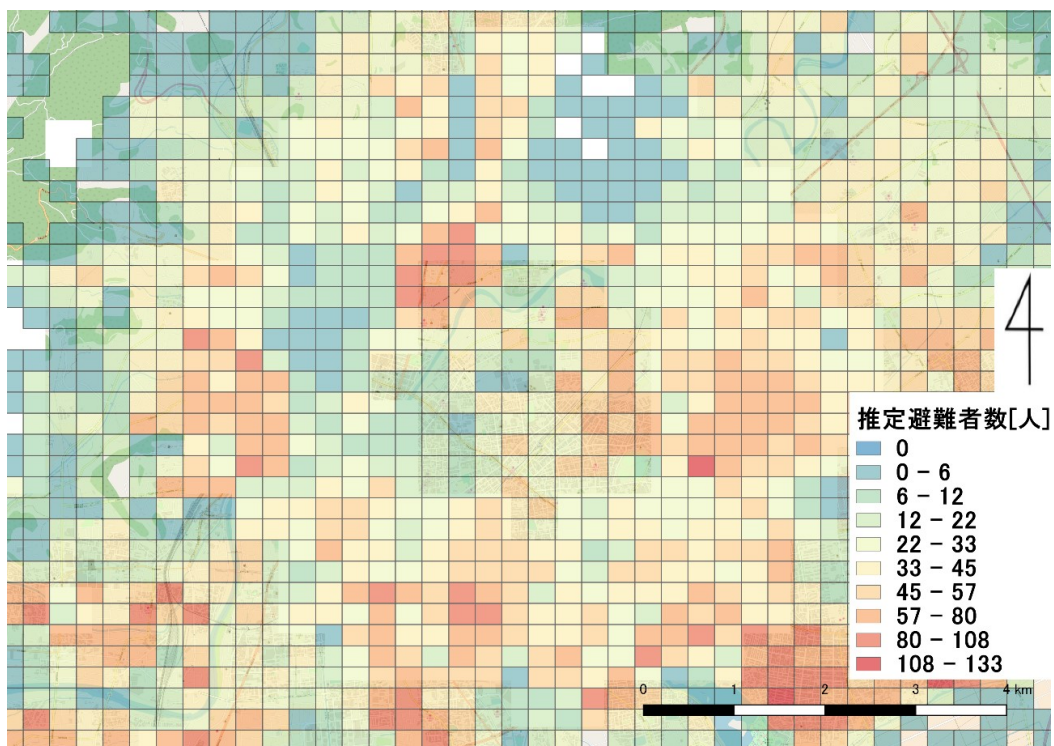
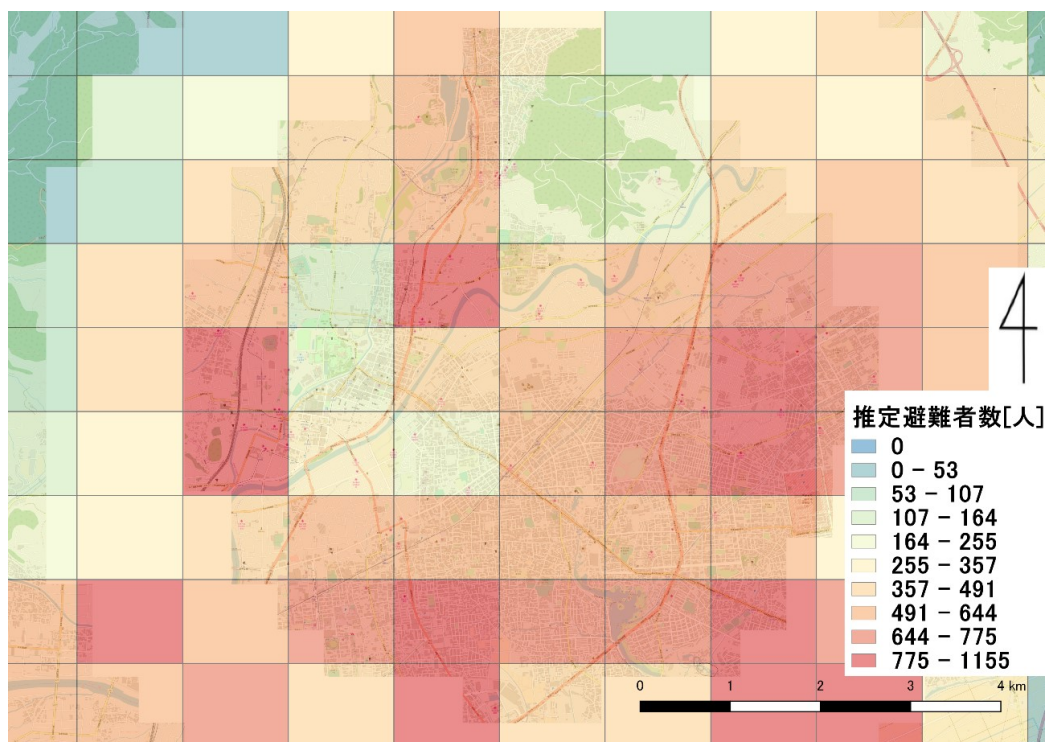


図 12：熊本県(一部地域)におけるメッシュ単位での推定避難者数(上：1km 下：250m)

2.5 検証

市区町村ごとに建物の全壊・半壊棟数と避難者数の集計を行った。その集計結果と 2.4 項の熊本県の被害データを比較して推定結果の検証を行った。検証結果は図 13 のようになった。ただし、熊本市のみ極端に値が大きいため、相関や誤差に影響を与える可能性を考慮し、熊本市を除いた場合についても検証を行った（図 14）。結果として、いずれの場合も有意な相関関係が得られた。ただし推定値は、熊本市を含めた場合は過大評価、熊本市を除いた場合は過小評価となった。これらの誤差は、使用した建物マイクロジオデータ、推計計測震度分布図および建物倒壊率テーブルのデータの精度が影響している可能性がある。まず建物マイクロジオデータが 2009 年のものであるため、2009 年以降に更新された建物による影響が推定値に反映されていると考えられる。特に都市部の熊本市では多くの建築物が更新され、相対的に古い建物が少なくなり過大評価となった可能性が考えられる。また、本解析では表 1 のうち、築年代 1970 年以前の建物は、全て木造中 1 を適用し、倒壊率が最も高い木造旧を適用しなかった。そのため過小評価の市区町村については、実際には木造中 1 よりも木造旧の建物が多かった可能性が考えられる。これらのことから今後は建物マイクロジオデータの更新や、建築構造の分類方法の改善が必要であるといえる。

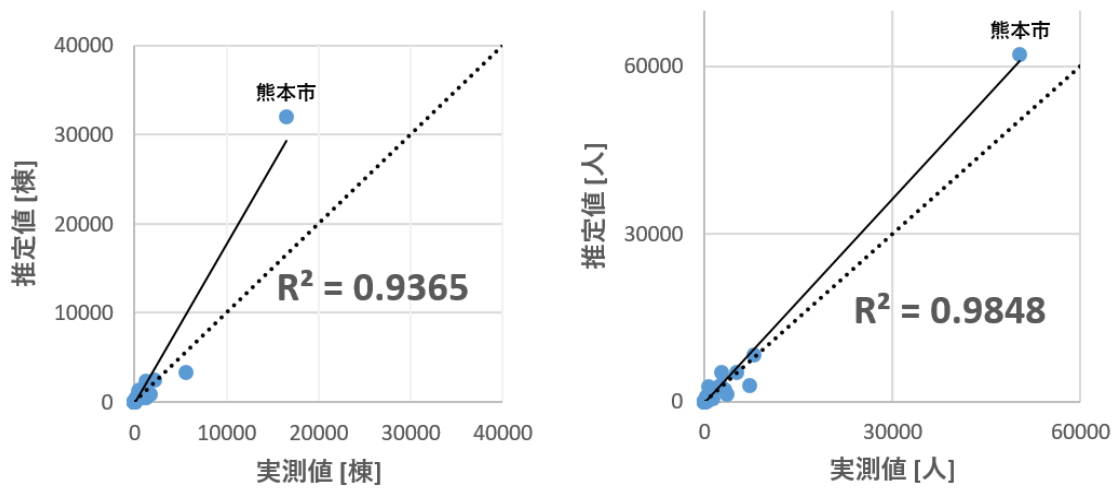


図 13：推定全半壊棟数（左）および推定避難者数（右）の検証結果（市区町村集計）

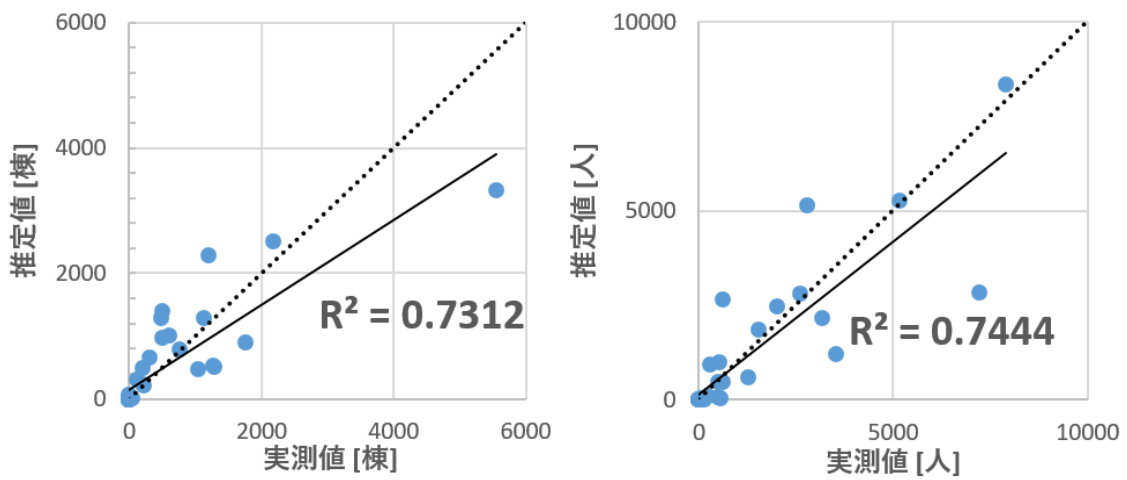


図 14：推定全半壊棟数（左）および推定避難者数（右）の検証結果
（市区町村集計：熊本市を除いた場合）

2.6 まとめ

本章では、熊本県全域において、建物マイクロジオデータおよび推計震度分布図を用いて、建物単位で計測震度を与え、建物ごとに倒壊率および避難者数の推定を行った。また、推定値と実際のデータの間に関連関係が得られた。そのため、推計震度分布図が発災直後に得られることから、本研究の手法は発災直後に迅速かつ詳細な被害の推定が期待できるといえる。本研究の手法を用いて、迅速な被害推定を行い、大まかな被害の把握を行うことで、航空測量等による実際の被害調査の計画などにも役立てるといった活用法が期待される。また、将来的に予測される地震についても、建物マイクロジオデータに想定震度を与えることで、全国的に建物単位での事前の被害予測ができるといえる。同成果は各自治体などで、避難所の最適配置などの防災政策に活用が期待できる。また、各建物の倒壊率を用いて、負傷者の数を推定するといった、避難者数の推定以外にも応用が期待できる。

今後の課題は、推定精度の向上である。そのためには、より細かいスケールでの推定結果の検証や、過去の地震でも同様の解析と検証を行うといったことが必要である。また、今後はより実情に即した推定のために、ライフラインの不通などの建物被害以外による避難者を考慮した上での避難者数の推定を行う必要があるだろう。また、本研究の推定は発災直後に発生する避難者についてのみ想定しているが、実際の災害の場面では、その発生した避難者の推移についても把握することが重要となる。この点については以降の章で取り扱う。

第3章 津波災害における発災後日数ごとの自宅復帰率推定モデルの作成

3.1 本章の概要

本章では東日本大震災の事例（表4）を対象に、津波災害における発災後日数ごとの自宅復帰率モデルの作成を行う。同事例においては、GPSの大規模人流データや、詳細な被害調査データである震災復興支援調査アーカイブおよび自治体の上水道被害状況のデータなど、当時の被害状況を捉えられるデータが充実している。これらのデータを用いて複合的な要因にもとづく自宅復帰状況の推定モデルの作成を行う。なお解析対象は、青森県、岩手県、宮城県、秋田県、山形県、福島県の東北地方6県とした。

表4：東日本大震災の地震の概要[28]

発生日時	平成23年3月11日 14時46分
震央地名	三陸沖（北緯 38. 1 度、東経 142. 9 度）
震源の深さ	24km
規模	モーメントマグニチュード9.0
津波	3月11日 14時49分 津波警報（大津波）発表

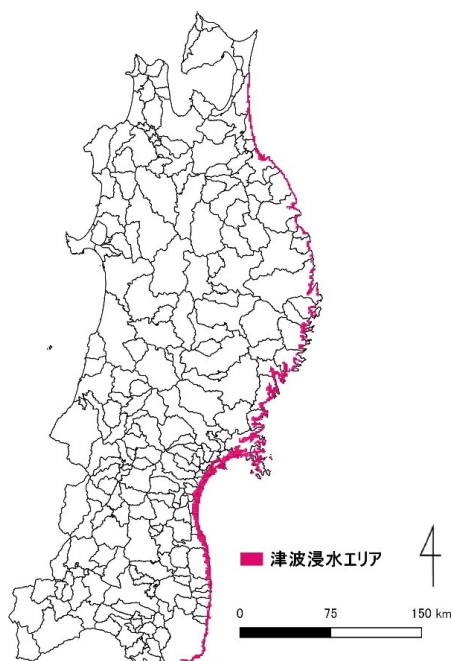


図15：東日本大震災における津波浸水エリア[29]

3.2 利用データ

3.2.1 混雑統計データ

本研究では、東日本大震災における発災後の人々の自宅復帰状態の推定を行うため、GPS 人流データである、株式会社ゼンリンデータコムが提供する「混雑統計®」データを用いた。「混雑統計®」データは、NTT ドコモが提供する「ドコモ地図ナビ」サービスの オート GPS 機能利用者より、許諾を得た上で送信される携帯電話の位置情報を、NTT ドコモが総体的かつ統計的に加工を行ったデータである。位置情報は最短 5 分毎に測位される GPS データ（緯度経度情報）であり、性別・年齢等の個人を特定する情報は含まれない。本研究では 2011 年 3 月 11 日～2011 年 4 月 7 日の約一か月間のデータを用いた。対象サンプルは約 3 万人分のデータである。なお、2011 年 4 月 8 日以降については、4 月 7 日 23 時 32 分に宮城県沖で発生した震度 6 強の余震による影響を鑑みて、本研究での対象期間に含めなかった。

3.2.2 復興支援調査アーカイブ

復興支援調査アーカイブとは、国土交通省都市局の「東日本大震災津波被災市街地復興支援調査」の成果をアーカイブ化したものである（[29]より引用）。同アーカイブについては、国土交通省都市局からデータの提供を受け、東京大学空間情報科学研究センターが運営を行っており、東日本大震災の各種被害データをインターネット上からダウンロードできる[29][30]。各種被害データの提供単位についてはデータごとに異なるが、非集計単位やメッシュ単位といった詳細な単位で利用可能である。本研究では、各種被害状況が自宅復帰状況に与える影響を考慮したモデルの作成のため、同アーカイブのうち建物被災状況および浸水深メッシュ(100m)のデータを用いた（図 16、17 および表 5、6）。なお、建物被災状況については、モデルの作成にあたって、被害区分のうち、1～3 を全壊、4～6 を半壊として利用した。

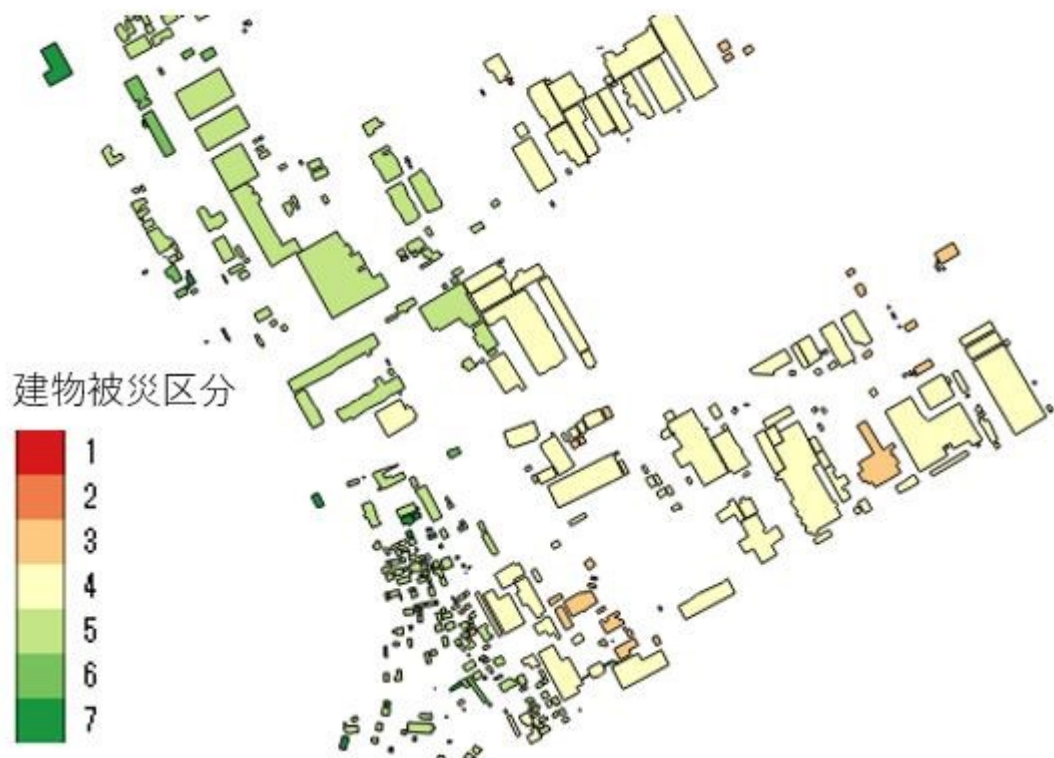


図 16：復興支援調査アーカイブによる建物単位の実被害データ（図は地域を秘匿）

表 5：建物被災区分のコード対応表

■建物の被災区分コード	
コード	区分
1	全壊(流失)
2	全壊
3	全壊(1階天井以上浸水)
4	大規模半壊
5	半壊(床上浸水)
6	一部損壊(床下浸水)
7	被災なし

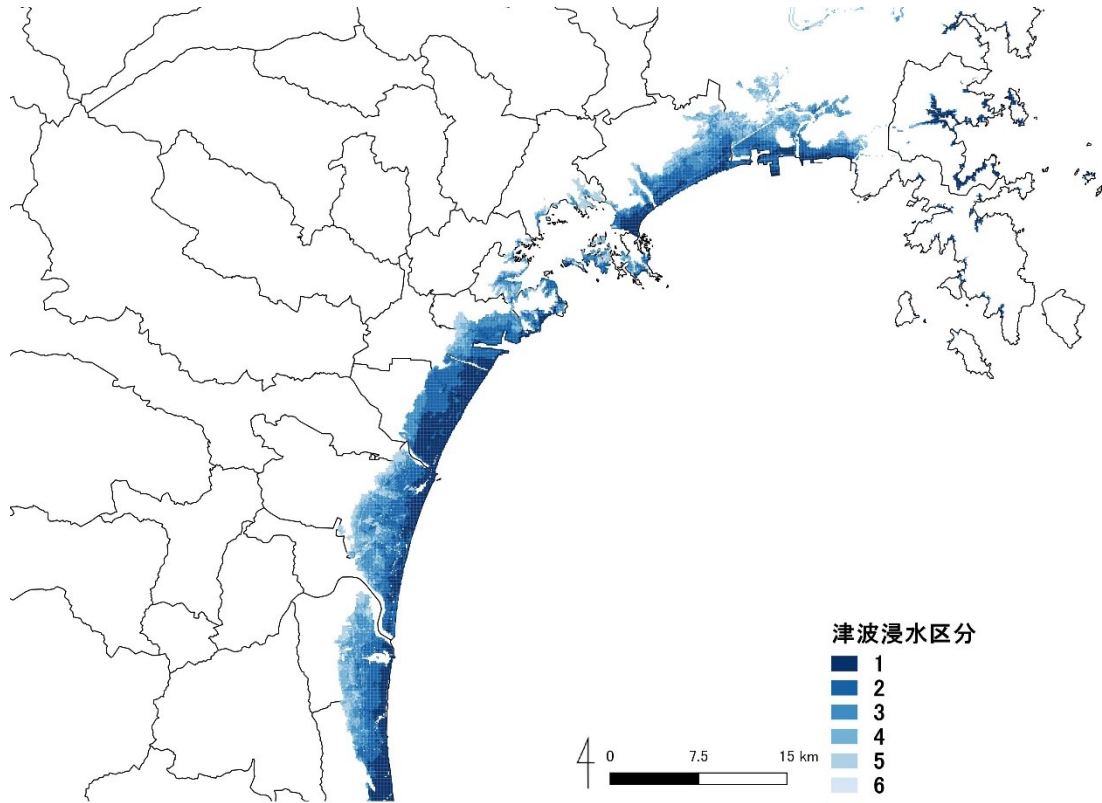


図 17：復興支援調査アーカイブによる津波浸水深データ(100m メッシュ)

表 6：津波浸水区分のコード対応表

■ 浸水深ランクのコード	
コード	区分
1	8.0m～
2	4.0m～8.0m以下
3	2.0m～4.0m以下
4	1.0m～2.0m以下
5	0.5m～1.0m以下
6	0.5m以下

3.2.3 推計震度分布図

本研究では、地震動による影響を自宅復帰モデルの作成の際に考慮するために、2.2.2 項と同様の気象庁の推計震度分布図のうち「2011年03月11日14時46分 三陸沖 M7.9」のデータを用いた（図18）[23]。

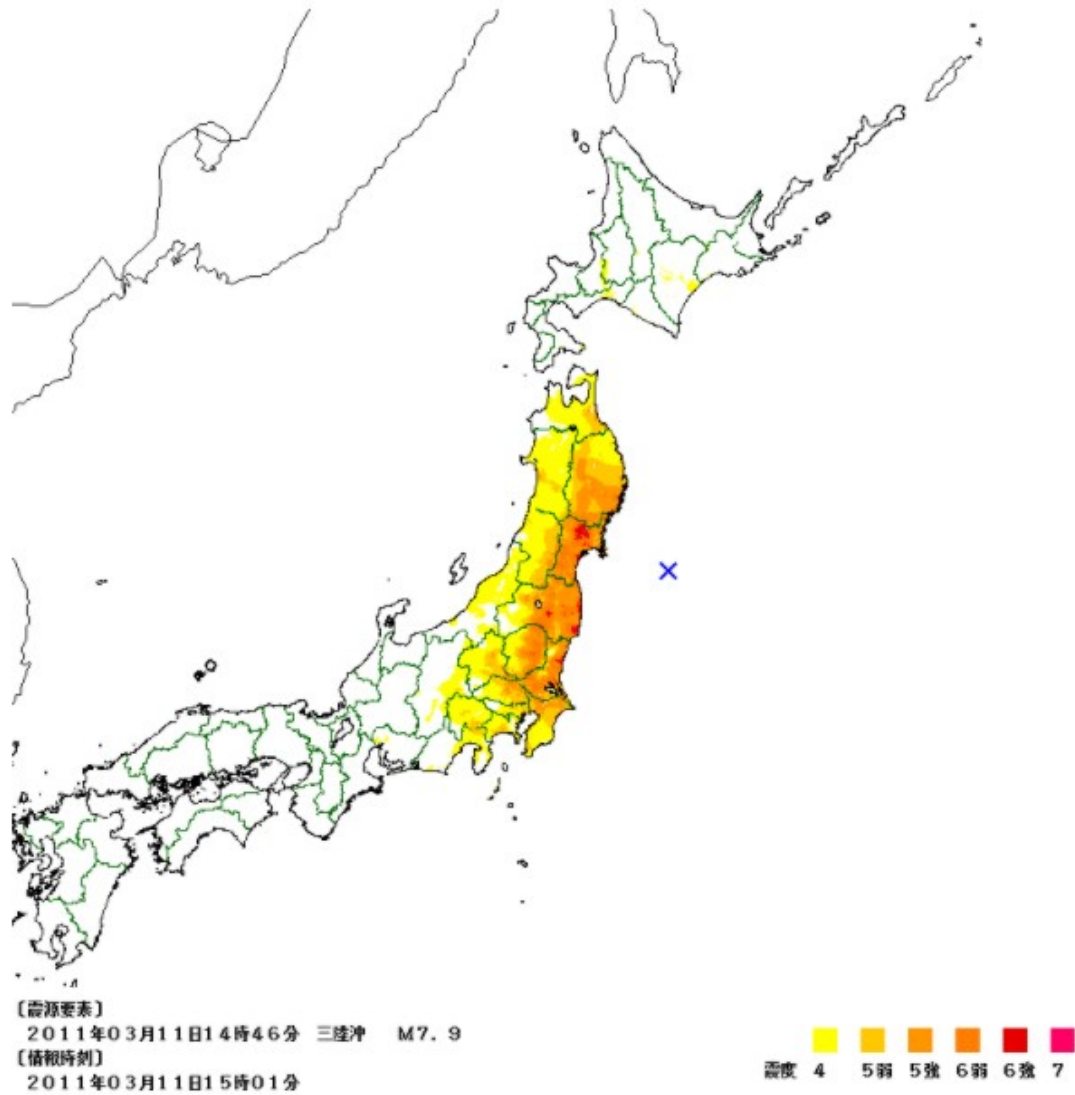


図18：東日本大震災における推計震度分布図[23]

3.2.4 上水道断水状況データ

インフラの復旧状況は、人々の自宅復帰状況に影響を与えるため[15]、本研究においても、人々の日常生活に必要なインフラである上水道について、厚生労働省が公開している市区町村単位での上水道の断水状況データ[31]を用いた。なお、公開されているデータの中で、3月11日および3月12日のものが存在しないため、発災2日後の3月13日以降のデータを用いた。

3.2.5 国勢調査データ

国勢調査とは、国内の人口・世帯の実態を把握し、各種行政施策その他の基礎資料を得ることを目的とし、5年ごとに行われる国の調査のことである[32]。国勢調査のデータは、インターネット上で自由にダウンロードできる[33]。本研究では、避難者の年齢や世帯構成といった属性によって自宅復帰状況に差があると仮定し、平成22年度調査(2010年調査)の市区町村の世帯数や年齢別世帯・人口のデータおよび1kmメッシュの人口データを用いた。

3.2.6 建物マイクロジオデータ

データの詳細については2.2.1項に準ずる。本章では東北6県のデータについて、空間処理や集計処理を行う際に用いた。

3.3 自宅復帰率推定モデル作成に用いた変数

本研究では自宅復帰に関して、地震動、建物倒壊、津波浸水被害、避難者の属性といった複合的な要因を考慮した推定モデルを作成するために、以下の変数を用いた(表7)。また、モデルの作成にあたって各説明変数について、非集計やメッシュ単位のデータ等についても市区町村単位で集計単位を統一したものをを用いた。各種データが持つ情報を各説明変数に当てはめるための処理は事項(3.4 項)で述べる。なお、発災後日数 (X1) については特にデータの処理は必要としないが、上水道の被害状況のデータが発災後 2 日目以降しか存在しないため、発災後 2 日目以降のデータを用いてモデルの作成を行った。

表 7：自宅復帰率推定モデル作成に用いた変数

	目的変数
Y	発災後日数の自宅復帰率
	説明変数
X1	発災後日数
X2	計測震度の平均値
X3	計測震度の最大値
X4	全壊建物居住者の割合
X5	半壊建物居住者の割合
X6	全壊建物の割合
X7	半壊建物の割合
X8	0-0.5mの津波浸水を受けた面積の割合
X9	0.5-1mの津波浸水を受けた面積の割合
X10	1-2mの津波浸水を受けた面積の割合
X11	2-4mの津波浸水を受けた面積の割合
X12	4-8mの津波浸水を受けた面積の割合
X13	8m以上の津波浸水を受けた面積の割合
X14	津波浸水エリアの定住人口割合
X15	発災直後時点(発災2日後)の水道復旧率
X16	発災後日数の水道復旧率
X17	6歳未満の世帯員のいる世帯の割合
X18	65歳以上の世帯員のいる世帯の割合
X19	6歳未満の人口割合
X20	65歳以上の人口割合

3.4 データ処理

3.4.1 混雑統計データと建物被害データの複合処理（該当変数：Y,X3,X4）

3.4.1.1 各種処理

まず、居住地座標の推定および居住地被害状況の付与を行った。Akiyama[34]の手法を用いて、混雑統計の GPS データのもつ個人 ID ごとに、それぞれ推定居住地の座標の付与を行った。推定居住地座標は東日本大震災の発災前年である 2010 年のものを用いた。なお、同手法による推定居住地座標は実際に建物単位で座標が重なるわけではないため、本研究では、推定居住地座標に対して 100m 以内にある建物のうちの最近隣の建物の座標値を最終的な推定居住地座標として用いた。これは混雑統計に用いられるオート GPS の誤差が 100m であることを考慮したためである。また、基準となる建物座標は復興支援調査アーカイブの建物被災状況データおよび建物マイクロジオデータのポイントデータを用いて重ね合わせを行った。なお本研究では、この最近隣処理は ArcGIS(Esri(株))の ArcToolbox 機能の「近接情報テーブルの生成」を用いて行った。そして、各個人 ID ごとに推定居住地座標のある建物の被害状況を、自宅被害状況として付与した。なお、以下の処理は全て、算出した推定居住地の座標値を持つサンプルにもとづく。

次に、Akiyama[34]の手法を用いて、GPS データから、0～4 時の滞留点の抽出を行った。個人個人の各日付の位置座標については、0～4 時の平均値を夜間代表点とした。そして個人 ID ごとの推定居住地と、各日付の夜間代表点の座標を比較し、各個人が自宅に復帰した日の推定を行った。比較の際は、各日付の夜間代表点の座標が、推定居住地座標の 100m 以内にある場合に自宅に復帰したとみなし、その最初の日付を自宅復帰日とした。

最後に、各個人 ID の自宅被害状況ごとに、市区町村単位で、各日付における、居住者の自宅復帰率(Y)の集計を行った。また、市区町村ごとに

X3:全壊建物の居住者割合 = 全壊建物の居住者数(サンプル内) / 全居住者数 (サンプル内)

X4:半壊建物の居住者割合 = 半壊建物の居住者数(サンプル内) / 全居住者数 (サンプル内)

として各集計を行った。

3.4.1.2 自宅復帰率の推定結果

データ処理の結果、推定自宅復帰率について図 19 および図 20 のようになった。発災日数を経ったのち、津波被害のあった沿岸部や、原発周辺地域で自宅復帰率が低い結果となっており、実際に即した推定結果を得られたといえる。一方で山間部をはじめ、サンプル数が非常に少ない地域もあり、そういった地域では実際の自宅復帰実態との誤差が大きい可能性がある。

また、自宅被害区分ごとの推定自宅復帰率(東北 6 県集計)は図 21 および図 22 のようになった。この結果によると、自宅被害の程度が大きい居住者ほど自宅復帰が遅いといった傾向になっており、自宅被害が自宅復帰時期に影響を与えていることが定量的に示されたといえる。

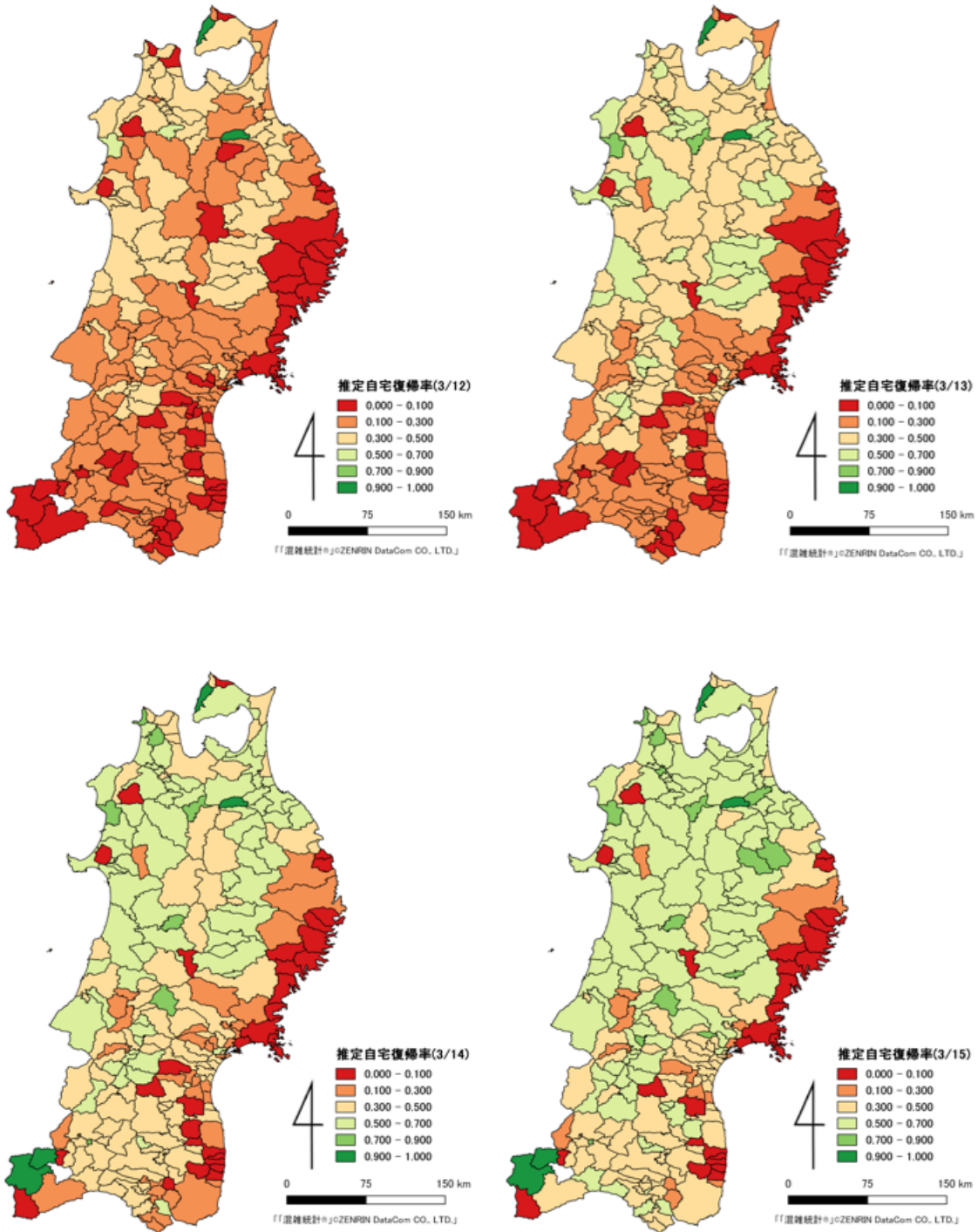


図 19：東日本大震災における時系列ごとの各市区町村における推定自宅復帰率(1)

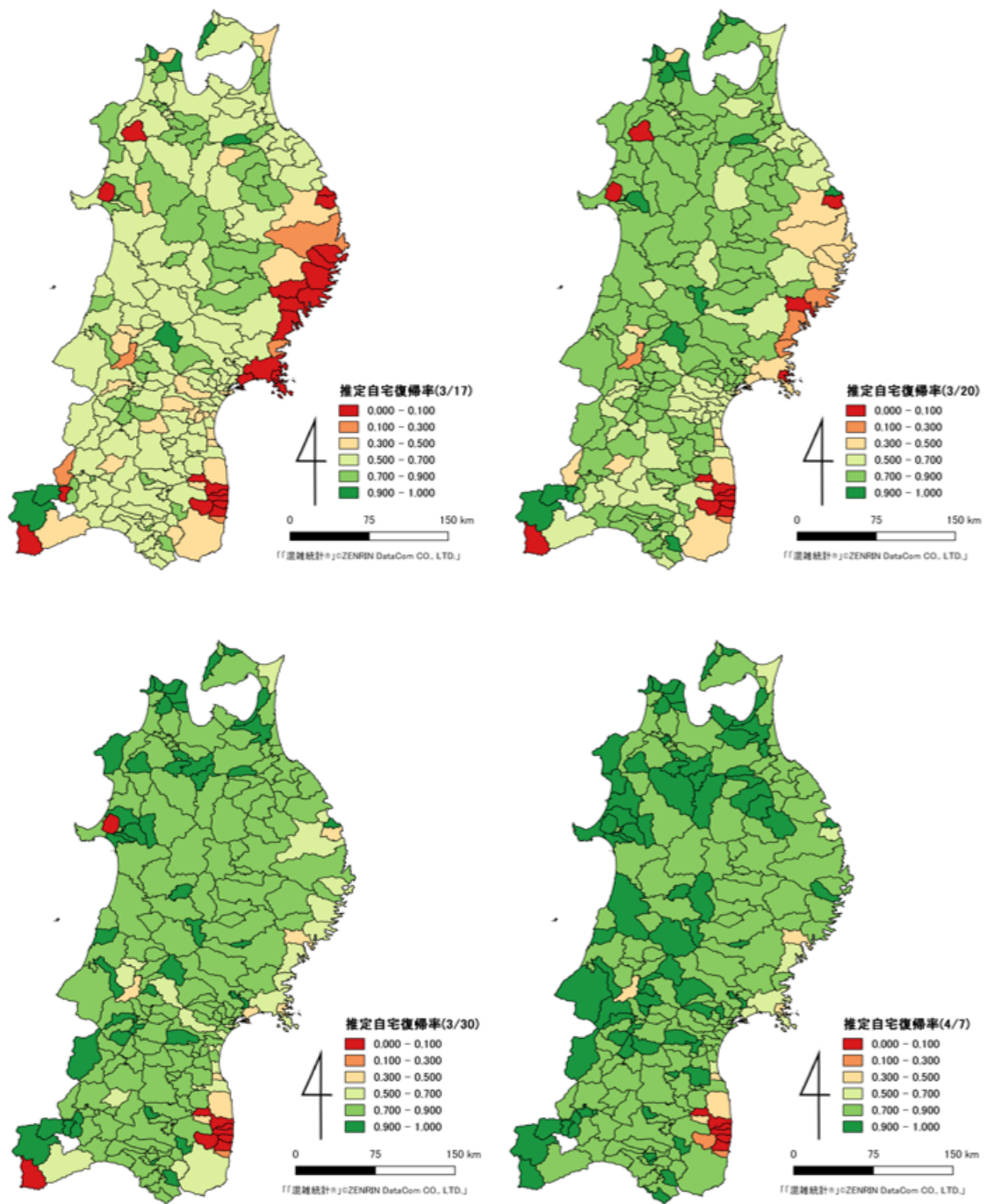


図 20：東日本大震災における時系列ごとの各市区町村における推定自宅復帰率(2)

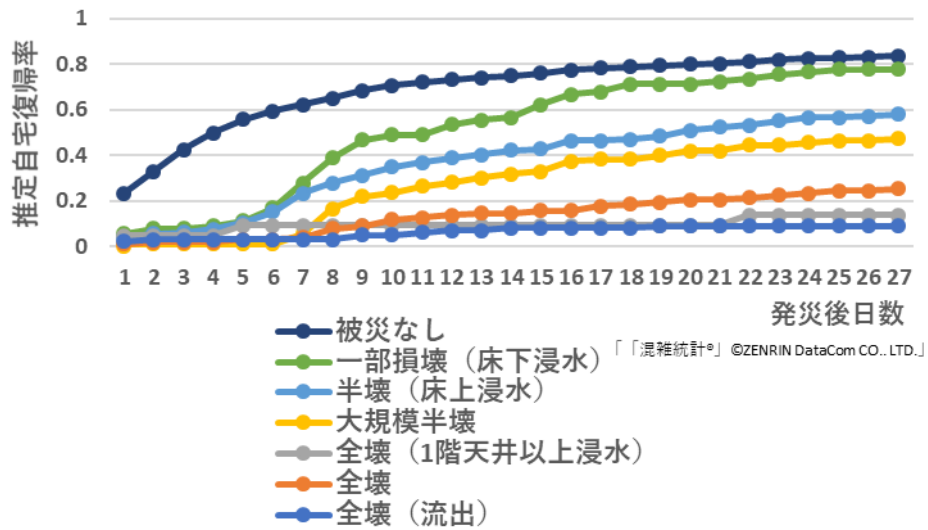


図 21：自宅被害状況別の推定自宅復帰率の推移

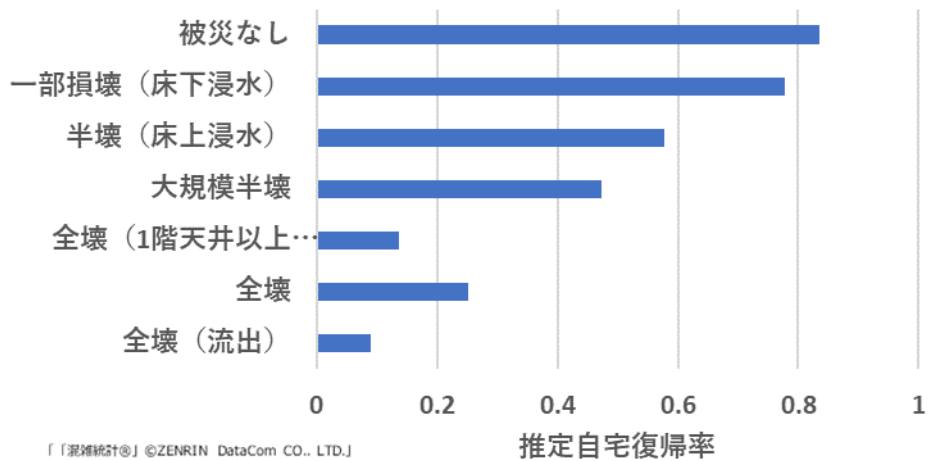


図 22：自宅被害状況別の推定自宅復帰率
(2011年4月7日(発災27日後)時点)

3.4.2 推計震度分布図の処理(該当変数：X2,X3)

推計震度分布図は 1km メッシュのデータのため、各市区町村内で平均の計測震度(X2)および最大の計測震度(X3)をそれぞれ GIS 上で処理を行い、算出を行った。

3.4.3 建物被害データの処理 (該当変数：X6,X7)

復興支援調査アーカイブの建物被災状況データおよび、建物マイクロジオデータを用いて、居住者数が 1 人以上いる住宅のみを対象に、市区町村単位での全壊建物の割合 (X6) および半壊建物の割合(X7)を求めた。

3.4.4 浸水被害データの処理 (該当変数：X8~X13,X14)

被害浸水深ごとの浸水被害面積を算出するために各段階の浸水メッシュの面積を各市区町村の面積で割り、算出した (X8~X13)。また、津波浸水エリアの定住人口(X14)については、復興支援調査アーカイブの浸水深 100m メッシュを 1km メッシュに集計し、国勢調査 1km メッシュの人口データを重ね合わせたものを用いて下記のように算出した。

X14: 津波浸水エリアの定住人口=浸水深のメッシュ内の定住人口の総計/各市区町村の定住人口

3.4.5 上水道断水状況データの処理(該当変数：X15,X16)

本研究では各市区町村の上水道の断水世帯数のデータにもとづき、発災 2 日目を以降、各日付における水道復旧率を

$$\text{水道復旧率} = 1 - \text{被害世帯数} / \text{総世帯数}$$

として算出した。また、その結果は図 23 のようになった。被害世帯数については、出典元の資料が自治体の事実報告を反映して、値が変化する地域がみられるため、それらについては整合性に注意しながら、過去の資料と最新の資料を参照してデータの作成を行った。また、被害状況が「全戸断水」と記載されている地域については水道復旧率 0%とした。なお、「一部断水」と記載されている地域や資料に記載がない地域については、情報が曖昧なため除外して処理を行った。また、水道供給の対象地域が複数まとめて記載されている地域については該当市区町村に対して同一の復旧率を適用した。

3.4.6 国勢調査データの処理(X17~X20)

国勢調査による市区町村の集計データをもちいて、一般世帯総数、0-5 歳世帯員がいる一般世帯数、65 歳以上世帯員のいる一般世帯数、総人口、0-5 歳の人口、65 歳以上の人口、の各属性データを用いて、人口に関する各説明変数(X17~X20)を算出した。

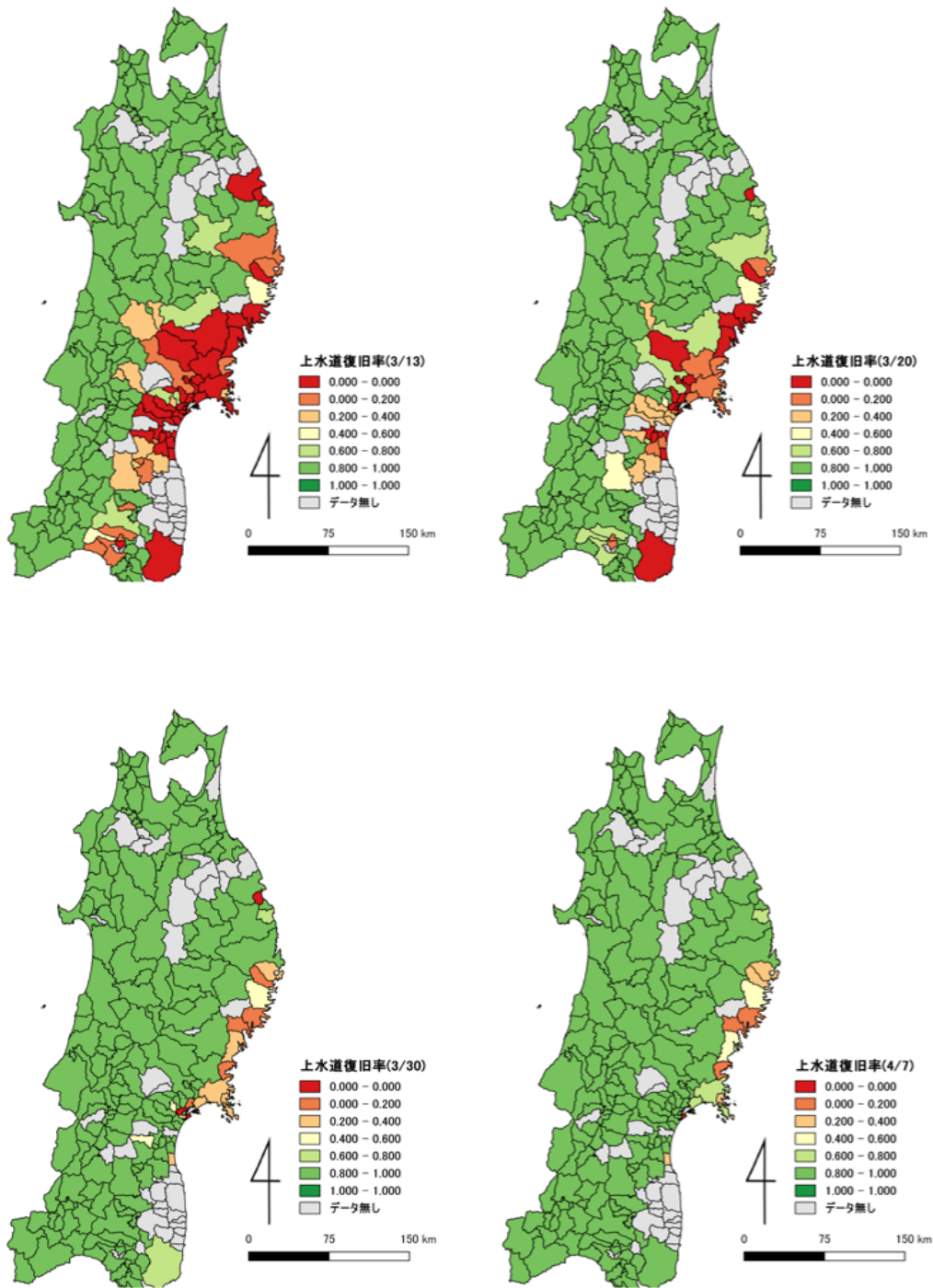


図 23：本研究で用いた市区町村別の上水道復旧状況

3.5 相関分析

3.5.1 対象地域

3.4 項で作成したデータのうち、自治体による避難指示等により発災後の自宅復帰の時期に影響を及ぼすと考えられる、福島第一原発所周辺の避難地域である田村市、南相馬市、川俣町、広野町、楡葉町、富岡町、川内村、大熊町、双葉町、浪江町、葛尾村、飯館村の12市町村は除外した(図24)[35]。また、このほか、GPS サンプル数が極端に少ない地域については推定結果の精度に影響を与えている可能性が懸念されるため、GPS サンプル数が5以下の地域は除外してモデルの作成を行った。

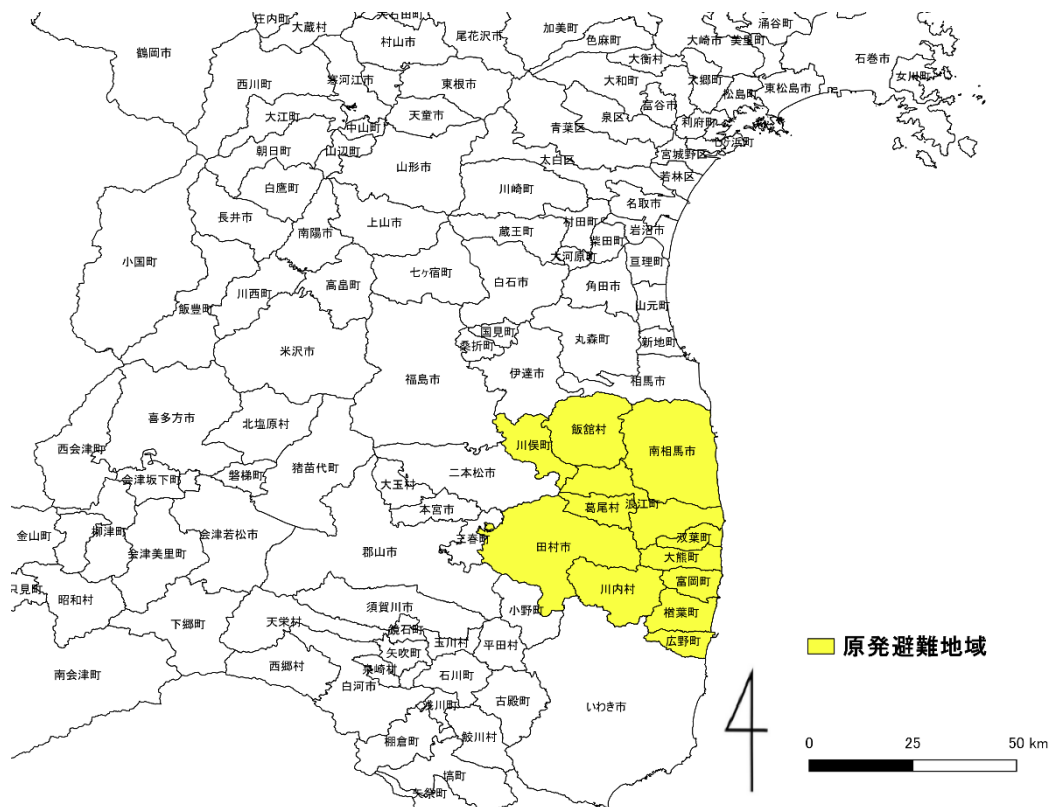


図 35：福島第一原子力発電所周辺の避難地域

3.5.2 分析結果

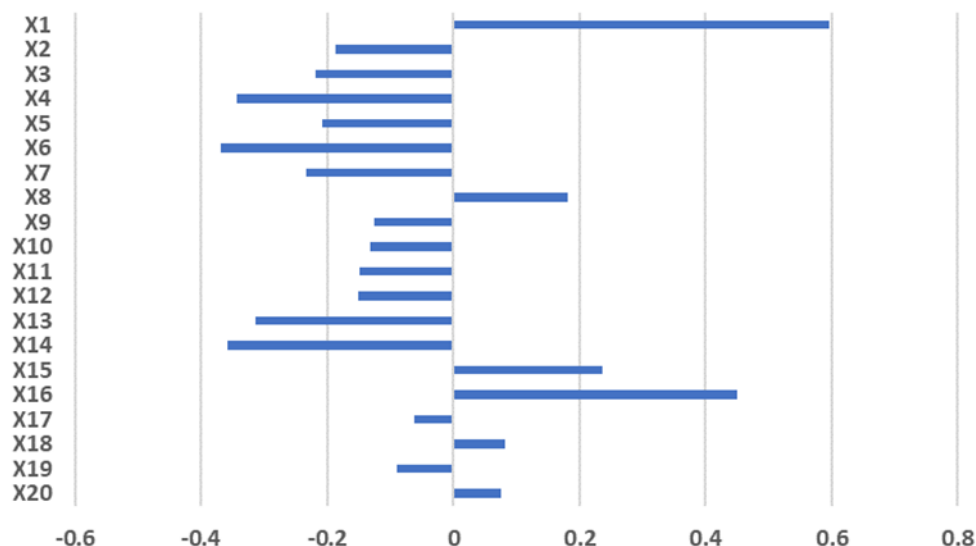
自宅復帰率 Y と各変数の相関関係について、表 8 および図 25 のような関係を得られた。その結果、発災後日数の水道復旧率 (X16) について、相関係数 0.45 程度の正の相関関係を得られた。また、全壊建物居住者の割合(X4)、全壊建物の割合(X6)、8m 以上の津波浸水を受けた面積の割合 (X13) および津波浸水エリアの定住人口割合(X14)について、相関係数 -0.3~-0.4 程度の負の相関関係が得られた。

発災後日数ごとの相関係数について図 26 および図 27 に示す。発災後日数ごとにみると、全壊建物居住者の割合 (X4) や全壊建物の割合(X6)および津波浸水エリアの定住人口割合 (X14)について、発災一週間後以降に、相関係数が-0.4~-0.6 程度と発災直後に比べて負の相関関係が強いという結果を得られた。また、発災後日数の水道復旧率(X16)についても発災後一週間頃を下限として、その後、正の相関係数が大きくなる傾向となった。これらのことから、発災一週間後 (発災 5~7 日後) の時期については、水道の復旧率よりも、建物の全壊状況や津波の浸水を受けた人口の割合などが自宅復帰率に寄与しやすいことが示唆された。また、総じて、発災後の時期によって復帰に与える要因やその影響度合いが異なることが示唆された。

表 8：推定自宅復帰率 Y と各説明変数との間の相関係数

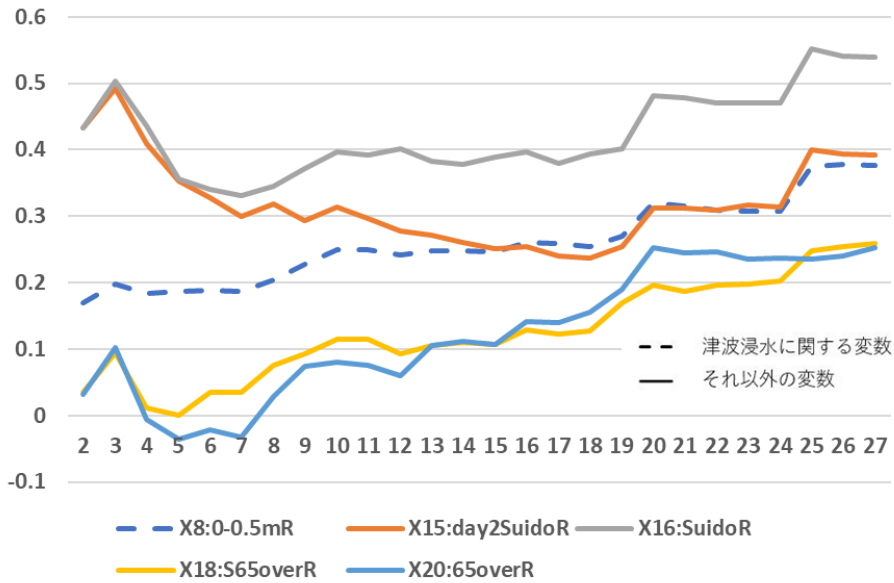
	説明変数	相関係数
X1	発災後日数	0.597
X2	計測震度の平均値	-0.186
X3	計測震度の最大値	-0.218
X4	全壊建物居住者の割合	-0.343
X5	半壊建物居住者の割合	-0.207
X6	全壊建物の割合	-0.368
X7	半壊建物の割合	-0.232
X8	0-0.5mの津波浸水を受けた面積の割合	0.180
X9	0.5-1mの津波浸水を受けた面積の割合	-0.126
X10	1-2mの津波浸水を受けた面積の割合	-0.131
X11	2-4mの津波浸水を受けた面積の割合	-0.150
X12	4-8mの津波浸水を受けた面積の割合	-0.152
X13	8m以上の津波浸水を受けた面積の割合	-0.313
X14	津波浸水エリアの定住人口割合	-0.358
X15	発災直後時点(発災2日後)の水道復旧率	0.236
X16	発災後日数の水道復旧率	0.450
X17	6歳未満の世帯員のいる世帯の割合	-0.062
X18	65歳以上の世帯員のいる世帯の割合	0.081
X19	6歳未満の人口割合	-0.090
X20	65歳以上の人口割合	0.076

「混雑統計®」©ZENRIN DataCom CO., LTD.」



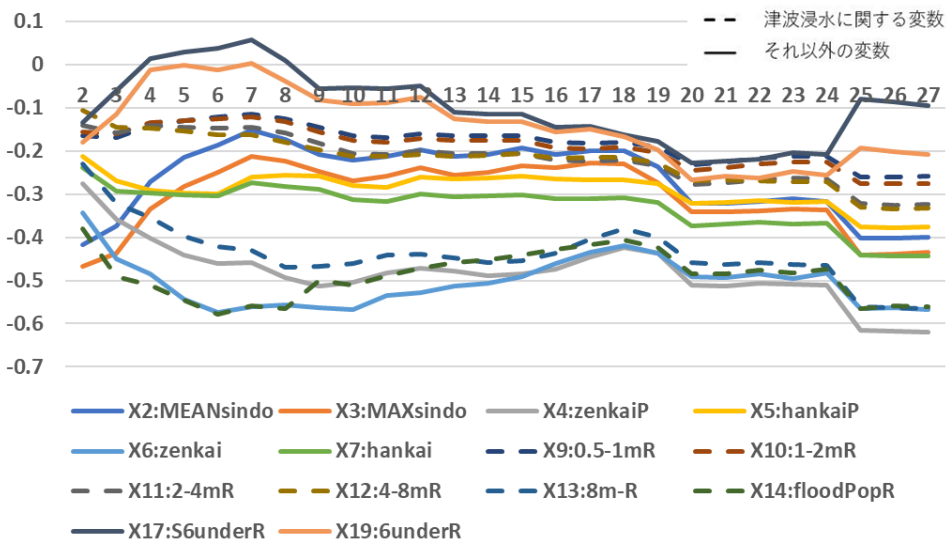
「混雑統計®」©ZENRIN DataCom CO., LTD.」

図 25：推定自宅復帰率 Y と各説明変数の相関係数



「混雑統計®」©ZENRIN DataCom CO., LTD.

図 26：発災後日数ごとの相関係数の推移（正の相関）



「混雑統計®」©ZENRIN DataCom CO., LTD.

図 27：発災後日数ごとの相関係数の推移（負の相関）

3.6. ロジスティック回帰によるモデルの作成

3.6.1 手法

3.4 項で作成したデータを用いて、モデルの作成と検証を行った。本研究では発災後日数の自宅復帰率 Y を $0 \leq Y \leq 1$ に従う確率で表すために、ベータ累積分布を仮定してリンク関数をロジスティック関数として回帰することでモデルの作成を行った。なお、ベータ累積分布関数は式(6)で定義される。ここで $B(\alpha, \beta)$ はベータ関数 (式(7)) であり、確率変数は $0 \leq x \leq 1$ の値をとる。このベータ累積分布に従って、ロジットモデル (式(8)) に近似を行い、モデルの作成を行った。

また、モデルの検証は、n-fold cross validation を用いた。本研究ではサンプルデータをランダムに 5 分割し、5 分の 4 をモデル作成に用いる教師データ、5 分の 1 をモデルの検証用のデータとして処理を行った。なお対象地域は 3.5.1 項に準ずる。

$$F(x|a, b) = \frac{1}{B(a, b)} \int_0^x t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt \quad (6)$$

$$B(p, q) = \int_0^1 x^p (1-x)^q dx \quad (p > 0, q > 0) \quad (7)$$

$$y = \frac{1}{1 + e^{-1(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \cdots \beta_n x_n)}} \quad (8)$$

n : 説明変数の数

y: 予測する事象の生起確率 ($0 \leq y \leq 1$)

x_n : 説明変数

α 切片 (定数)

β_n 各説明変数に対する偏回帰係数 (定数)

e 自然数 (定数)

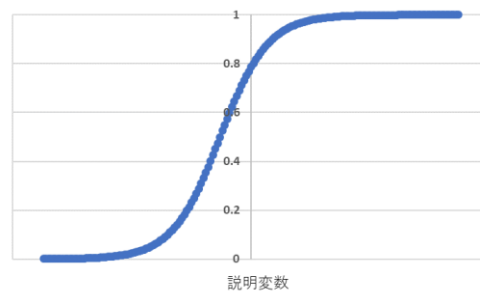


図 28 : ロジットモデルによる確率分布

3.6.2 パラメータの出力結果

作成したモデルの切片 α および説明変数 x_n の各係数は表9のようになった。これらのパラメータを式(8)に当てはめることで、発災後日数ごとの自宅復帰率の推定を行うことができる。津波浸水深(X8~X13)の係数について、他の係数に比べて数値が特に大きいため一見影響が大きい、説明変数の性質上 X8~X13 の和は1になるため、浸水深の度合に限らず同程度の寄与率になるといえる。他の変数については、全壊および半壊建物の居住者の割合(X4,X5)および、6歳未満の人口に関する変数(X19)が負の値が大きく、同モデルにおいて、自宅復帰の遅くなる要因として寄与率が高いといえる。

表9：各種パラメータの値

	変数	パラメータ
α	切片	-112.235
X1	発災後日数	0.085
X2	計測震度の平均値	-0.094
X3	計測震度の最大値	-0.101
X4	全壊建物居住者の割合	-5.182
X5	半壊建物居住者の割合	-5.198
X6	全壊建物の割合	-0.450
X7	半壊建物の割合	11.970
X8	0-0.5mの津波浸水を受けた面積の割合	113.851
X9	0.5-1mの津波浸水を受けた面積の割合	120.476
X10	1-2mの津波浸水を受けた面積の割合	111.924
X11	2-4mの津波浸水を受けた面積の割合	109.740
X12	4-8mの津波浸水を受けた面積の割合	114.886
X13	8m以上の津波浸水を受けた面積の割合	125.422
X14	津波浸水エリアの定住人口割合	-0.609
X15	発災直後時点(発災2日後)の水道復旧率	-0.089
X16	発災後日数の水道復旧率	0.239
X17	6歳未満の世帯員のいる世帯の割合	7.882
X18	65歳以上の世帯員のいる世帯の割合	0.320
X19	6歳未満の人口割合	-28.697
X20	65歳以上の人口割合	-2.895

3.6.3 モデルの検証結果

モデルによる推定値と真値を比較したものを図 29 に示す。また、精度については表 10 のようになった。検証の結果、 $r=0.856$ の強い相関関係を得られた。また $RMSE=0.106$ であり誤差 10%程度の精度が示された。95%信頼区間は $0.839 < x < 0.874$ であり、図 29 のように推定自宅復帰率が低いほど精度が低い。このことから自宅復帰率が低いのは発災直後であるため、同モデルでは発災直後の予測についてバラつきが大きくなってしまう可能性を示唆している。一方で自宅復帰が進むにつれてその精度は高くなるとも考えられるため、長期的な視点で考えて、自宅復帰が進んだ後の残った自宅未復帰者の割合について、高精度で推定を行えるともいえる。

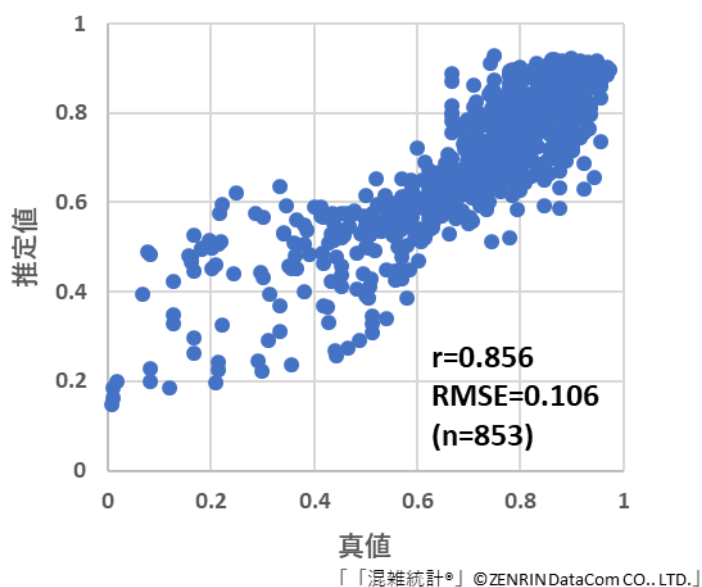


図 29：モデルによる推定値と真値の関係

表 10：検証結果

t値	df	p値	95%信頼区間	相関係数r	RMSE	n
48.624	851	<2.2e-16	0.839<x<0.874	0.856	0.106	853

「混雑統計*」©ZENRIN DataCom CO., LTD.]

3.7 まとめ

本章では東日本大震災の事例を対象に、地震動、建物被害、津波被害および人口データに関する各種説明変数について、ロジスティック回帰による、津波災害における発災後日数ごとの自宅復帰率推定モデルの作成を行った。その結果、作成モデルは推定自宅復帰率が低い場合の精度に課題はあるが、全体としては $r=0.856$ の強い相関関係および $RMSE=0.106$ （誤差 10%程度）の精度を得られた。

また、本章においては、混雑統計データによる GPS 人流データを用いた推定自宅復帰状況を用いた分析によって、自宅被害程度の違いが自宅復帰状況に影響を与えることが定量的に示された。また、自宅復帰率と各要因との間の相関関係を調べたところ、自宅復帰に対して、要因ごとに影響を与える時期が異なることが示唆された。本研究では、発災後日数を説明変数に組み込んだが、発災後日数によって変数の影響度合いに変化がみられることから、発災後の時期を分けてのモデルの作成といったことも今後検討できる。また、地域特性を考慮し、市区町村別のモデルの作成といったことも検討できる。また、人口データに関する情報を GPS との関連付けを行ってより実測に即したモデルの作成や因子分析を行うことについても今後余地がある。他にもモデルの説明変数に上水道以外のライフライン情報の変数としての追加や、他の回帰分析を用いて説明変数の選択を行ったモデルの作成などが今後の展望として考えられる。

第4章 自宅復帰モデルのシミュレーション

4.1 本章の概要

本章では、3.6項で作成したモデルを、将来想定される南海トラフ沖地震に適用し、発災後日数ごとの自宅復帰率の推定を行う。モデルの適用に用いる各種説明変数は、既存の研究や既存のデータから作成可能なものを用いる。本章では、南海トラフ沖地震の自宅復帰率のシミュレーションを行うと同時に、現存するデータや既存の手法を用いることで、モデルの適用による自宅復帰率の事前推定が可能であること示す。対象地域は、利用可能な津波予測データ(4.2.2項)の対象地域となっている高知市、南国市、土佐市、須崎市、香南市の5地域に加えて、その周辺の内陸の地域である(図30)。なお、モデルの適用は1kmメッシュ単位でデータを作成して行った。



図30：本研究におけるシミュレーション対象地域

4.2 利用データおよびデータの処理

4.2.1 確率的地震動予測地図（該当変数：X2,X3）

確率論的地震動予測地図とは、日本とその周辺で発生する全ての地震の位置・規模・確率に基づいて、地震動の「強さ」・「期間」・「確率」の関係情報を扱い、各地点がどの程度の確率でどの程度揺れるのかをまとめて計算し、その分布を地図に示したものである（[36]より引用）。同データは、国立開発研究法人防災科学技術研究所地震調査研究推進本部[36]によって提供されており、インターネット上でダウンロードが可能である。本研究では、巨大地震を想定し、最大被害でのモデルの適用を行うために、50年間超過確率2%のデータを用いた。地震動の超過確率とは、着目地点において、その地点に影響を与える様々な地震について、ある期間内に少なくとも1回、地震動の強さがあるレベルを超える確率のことをいう。超過確率2%とは、発生確率は小さいものの規模の大きい巨大地震のことを指す[37]。50年間超過確率2%の確率的地震動予測地図は、巨大地震レベルの地震が起きた場合の想定地震動の分布のことである。

本研究では、上記機関から提供される250mメッシュ単位のデータを1kmメッシュ単位での平均計測震度、最大計測震度について集計し、処理を行った(図31)。なお、以降のデータ処理において計測震度を適用する際には、同データの最大震度を用いた。

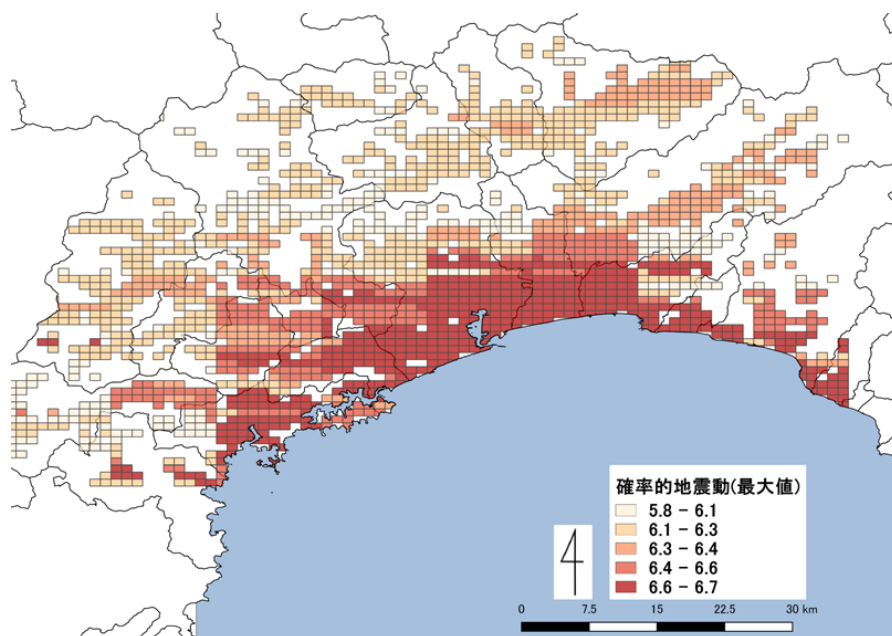


図31：1kmメッシュ単位で集計した確率的地震動[36]

4.2.2 津波予測データ（該当変数：X8～X14）

本研究では東北大学越村俊一教授[38]より提供を受けた津波予測データを用いた。同データは南海トラフ地震を想定した津波遡上シミュレーション結果である。データに関する概要は表 11 の通りである。同データは、180 分(30 秒間隔)、すなわち 360 シーンの 10m メッシュ単位のデータである。本研究では同データの最大浸水深のデータを用いて 1km メッシュごとの各段階の推定津波浸水深の割合(X8～X13)を求めた。また建物マイクロジオデータ(2.2.1 項)の居住者データと合わせて津波浸水エリアの定住人口の割合(X14)を算出した。

表 11：津波遡上シミュレーションの概要[42][43]（[41]より引用）

項目	内容
想定地震	南海トラフ地震
格子間隔	陸域10m
領域	高知県:(x,y)=(-16210,42650),(x,y)=(18830,66290)で囲まれた範囲
格子数	8,283,456
基礎方程式と解法	非線形長波理論式, Leap-Frog差分法（東北大学モデル）
時間	180分(30秒間隔)
座標系	平面直角座標(4系)
断層モデル	1707/10/28（宝永）東海・南海地震（相田モデル2）
測位	満潮を考慮
側面摩擦	Maning粗度係数を考慮

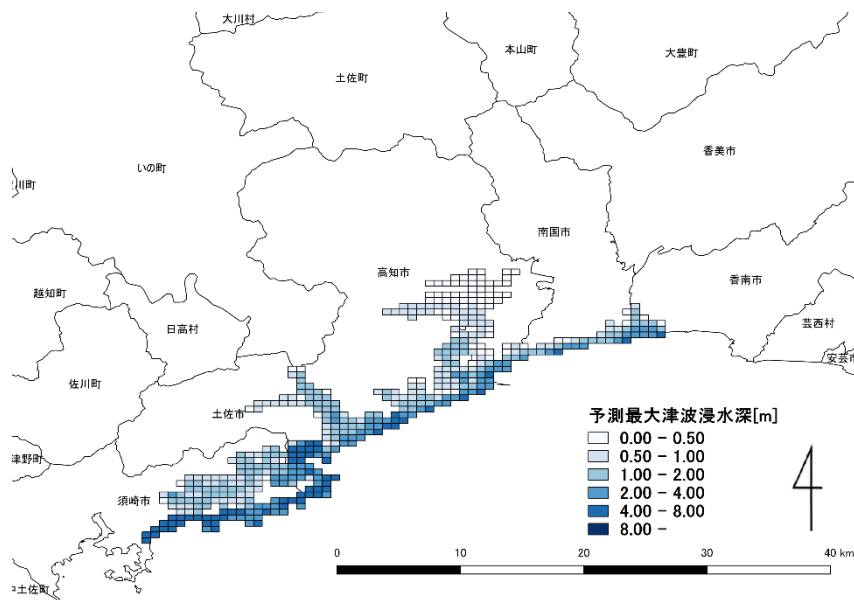


図 32：本研究で用いた予測津波浸水深（図は 250m メッシュ単位） [38]

4.2.3 建物被害予測データ（該当変数：X4～X7）

小川[41]などの手法をもとに建物マイクロジオデータ(2.2.1 項)を用いて南海トラフ沖地震における各建物被害の推定を行い、1kmメッシュでの集計を行った(図33)[39][40][41]。建物被害については、津波による倒壊、火災による焼失および地震による倒壊を合わせて計算を行った。また、想定されるシナリオには、冬の夜のケースを用いた。また、推定に利用する地震データおよび津波データにはそれぞれ50年間超過確率2%の確率的地震動予測地図(4.2.1.項)と南海トラフ沖地震を想定した津波データ(4.2.2 項)を用いた。

4.2.4 上水道復旧率推定データ(該当変数：X15,X16)

上水道復旧率の推定データについては、能島・加藤[44]によるモデルをもとに作成を行った。同モデルは計測震度を与えることで、発災後日数ごとの上水道の復旧状況を推定することができる(図 34)。能島らは同モデルを用いた市区町村別簡易評価法のシステム構築も行っており、この簡易評価法をユーザーが独自の条件設定のもとでの評価を可能とするExcel/VBAでの評価ツール実装し公開している[45][46]。本研究では同モデルと確率的地震予測地図(4.2.1 項)による計測震度を用いて、南海トラフ沖地震における発災後日数ごとの上水道の復旧率推定値を算出した。

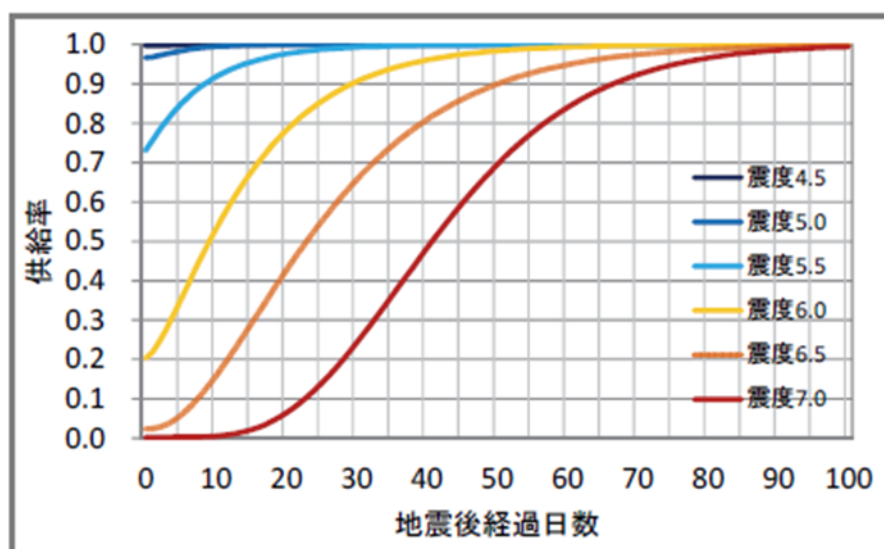


図 34：地震動ごとの上水道の復旧曲線（[44]より引用）

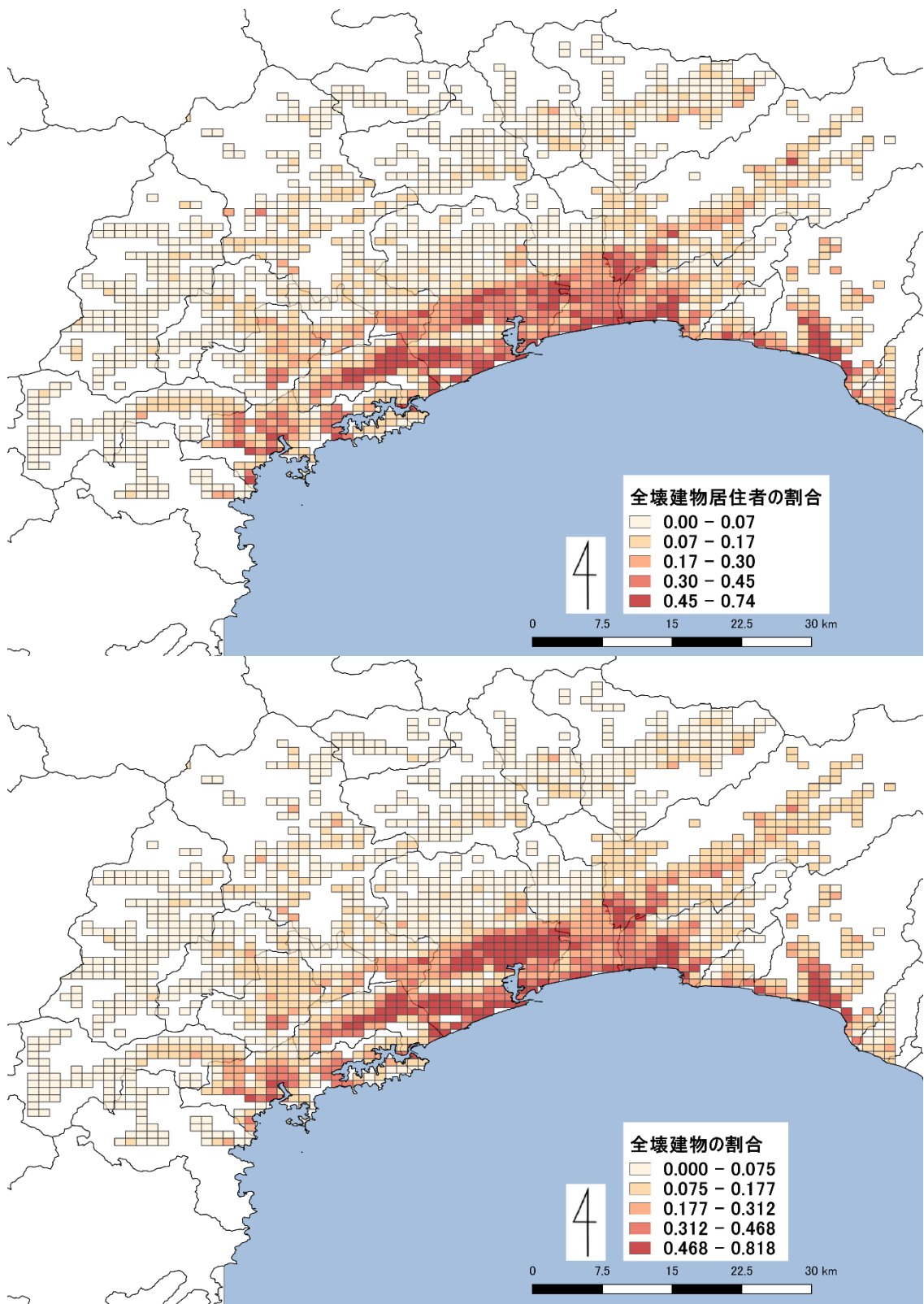


図 33：本研究で用いた南海トラフ沖地震における推定建物被害状況（1km メッシュ集計）

4.2.5 国勢調査データ(該当変数：X17～X20)

国勢データに関する解説は 3.2.5 項に準ずる。本章では、平成 27 年度の調査データの 1km メッシュ単位のデータを用いた。なお、当該データの属性のうち 6 歳未満の人口数が存在しないため、X17,X19 については 0～14 歳の人口の割合で代用した。すなわちそれぞれの変数について、

X17:0-14 歳世帯員のいる一般世帯数/一般世帯総数

X18:65 歳以上世帯員のいる一般世帯数/一般世帯総数

X19: 0-14 歳の人口/総人口

X20:65 歳以上の人口/総人口

として算出した。また、同データは秘匿処理のためメッシュごとの合算が行なわれている地域があり、これらのメッシュは合算先メッシュと同じ数値を適用して処理を行った。

4.3 モデルの適用結果

1km メッシュごとの推定自宅復帰率について、図 35～図 37 のようになった。全体的な傾向として、津波の浸水地域や地震動の影響のある地域で自宅復帰時期が遅いという推定結果となった。いの町や仁淀川町など、内陸地域で点在する自宅復帰が遅い地域について詳細を調べたところ、半壊建物居住者の割合が大きく、かつ全壊建物居住者の割合もある程度存在する地域であった。また、高知市を中心として自宅復帰が遅い地域は全壊建物居住者の割合が大きい地域であった。また、市区町村ごとに集計した平均の推定自宅復帰率は図 38 のようになった。津波の影響のある 5 市が最も自宅復帰が遅い、といった推定結果となった。総じて、建物被害については、津波による倒壊も含めているため、建物被害が総合的に大きくなりやすい津波浸水地域が最も自宅復帰が遅く、津波浸水地域以外にも建物倒壊の危険性が高い地域が次に自宅復帰が遅い地域という推定結果になったといえる。

なお、南海トラフ沖地震の津波被害の際に、高知県については地理的な特性による長期浸水が予測されている。本モデルでは、浸水時間の説明変数はないが、浸水時間は従属関係にある浸水深を利用しておりある程度その影響を反映しているといえる。ただし、浸水深割合によるパラメータの差異が少ないため、浸水時間に対する効果は十分とはいえない。今後は、浸水時間やそれに代替される標高や地盤のデータなども考慮にいったモデルの作成も検討が必要である。説明変数の追加以外にも、モデルの簡略化のために説明変数の吟味も必要である。

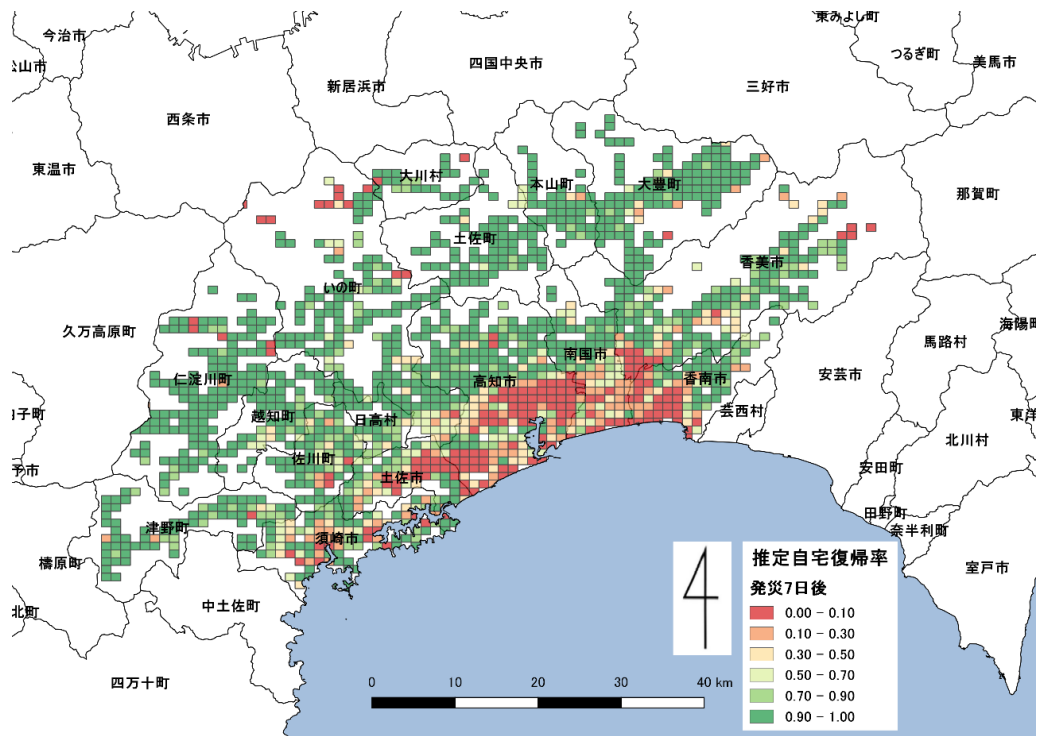
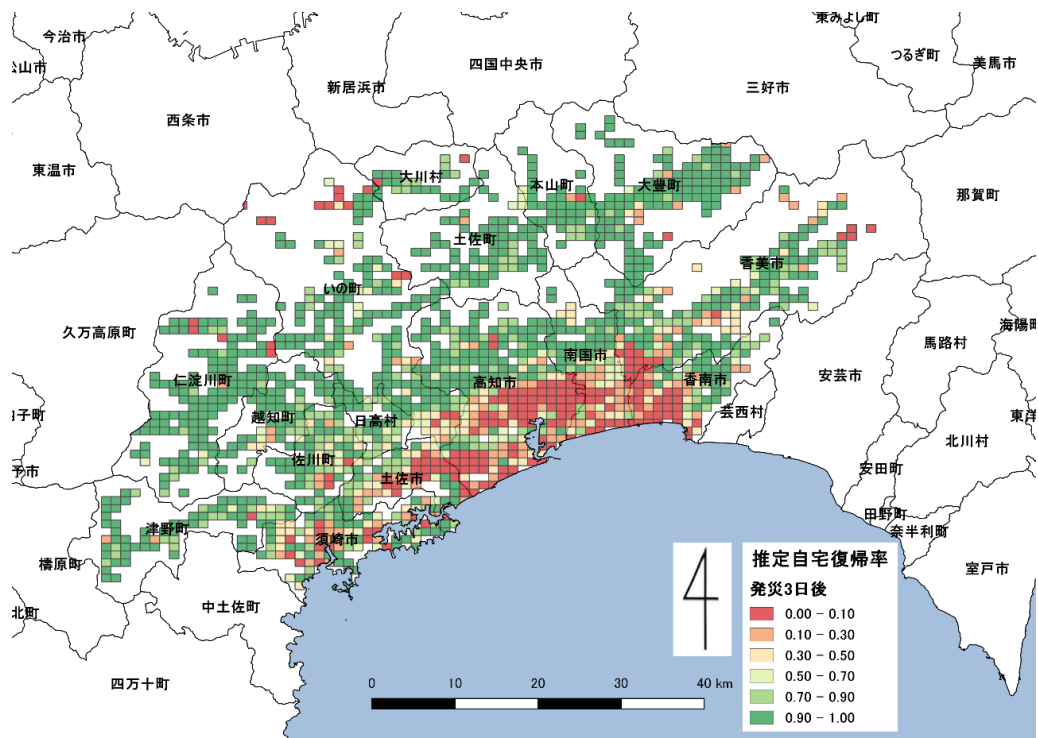


図 35：南海トラフ沖地震における推定自宅復帰率(発災 3 日後、発災 7 日後)

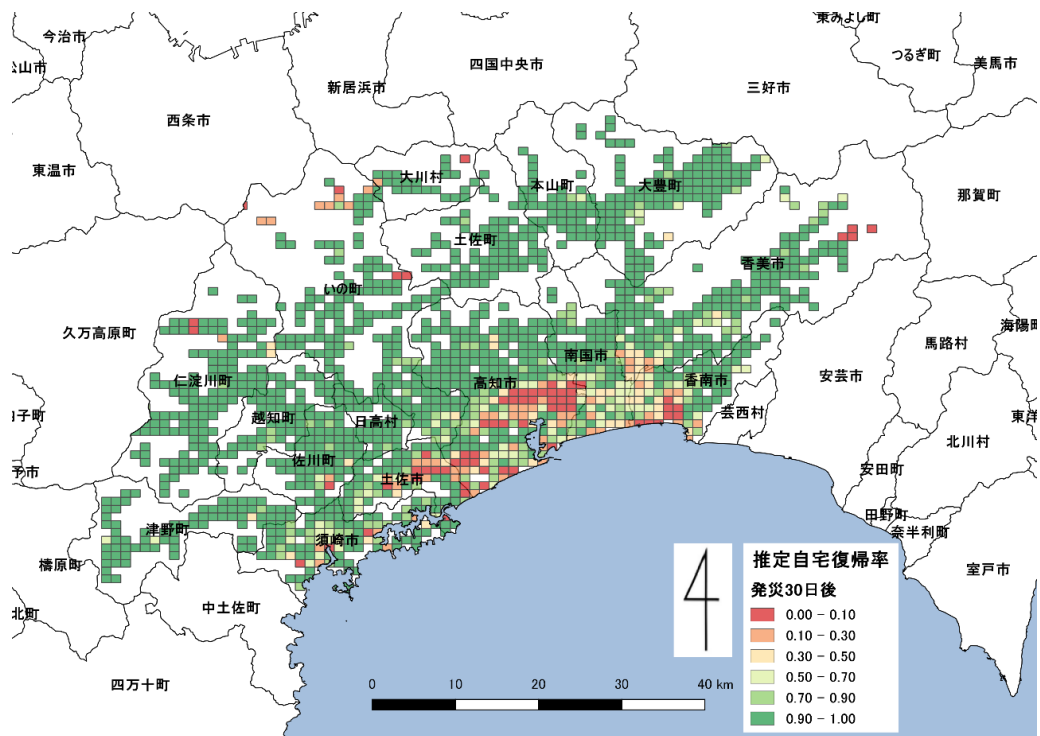
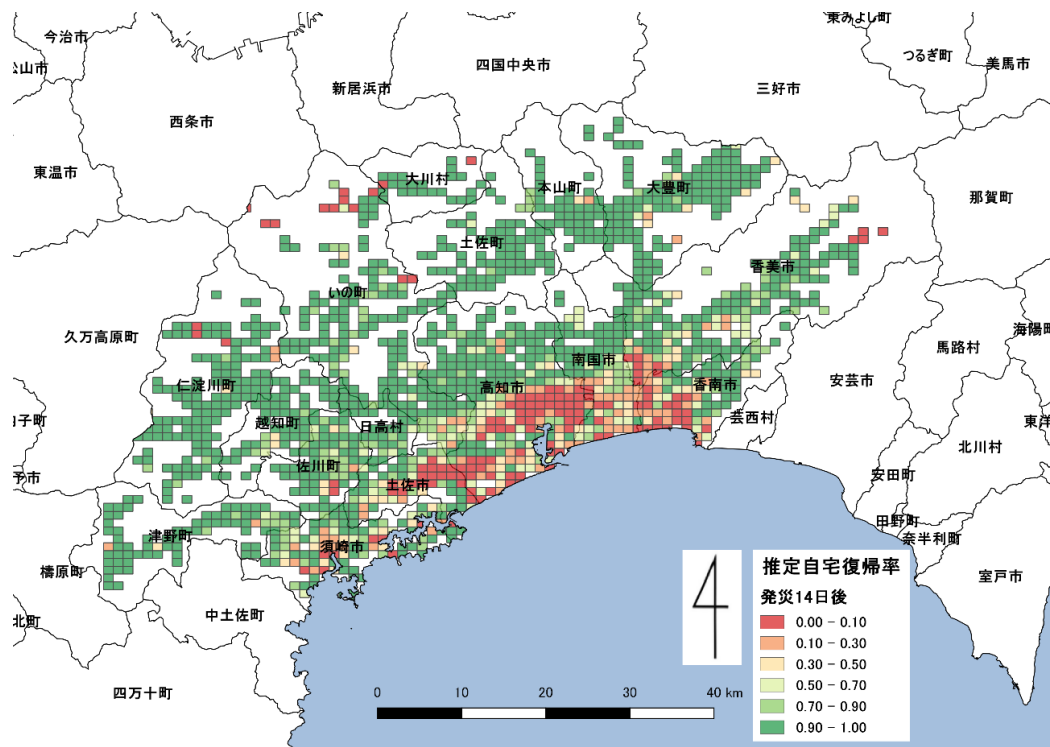


図 36：南海トラフ沖地震における推定自宅復帰率(発災 14 日後、発災 30 日後)

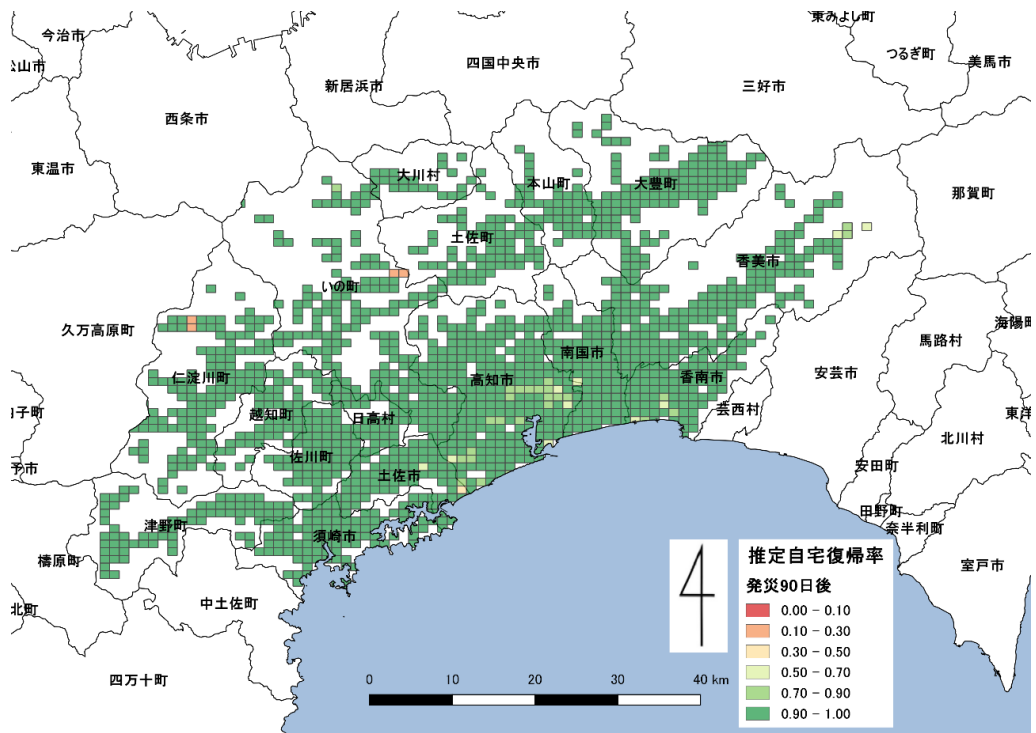
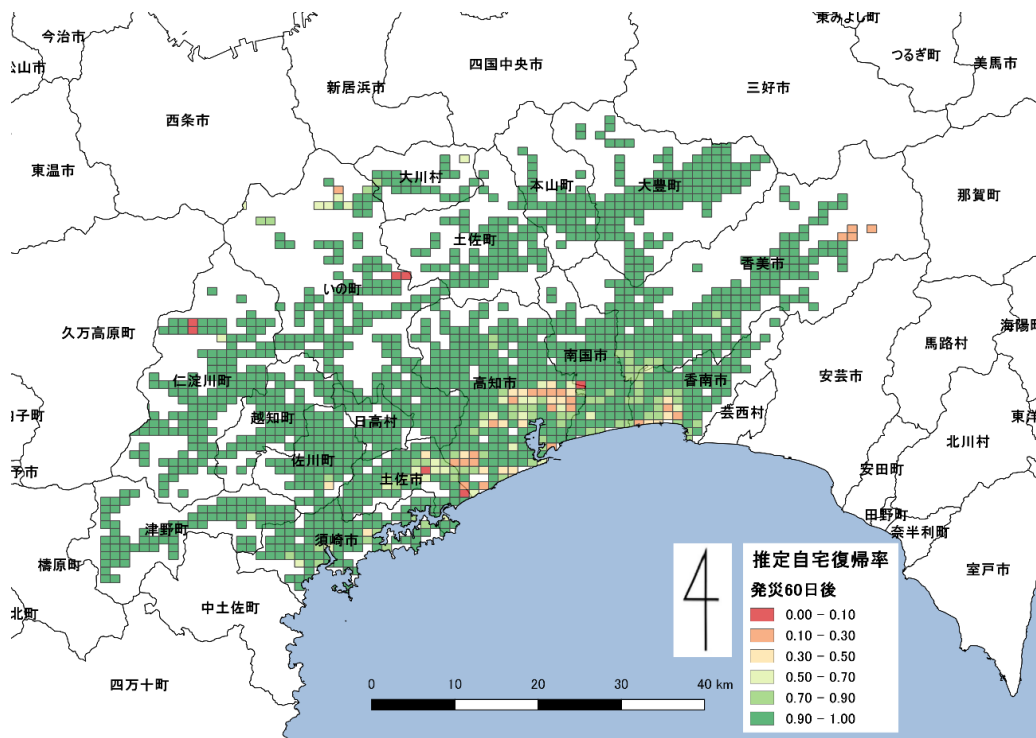


図 37：南海トラフ沖地震における推定自宅復帰率(発災 60 日後、発災 90 日後)

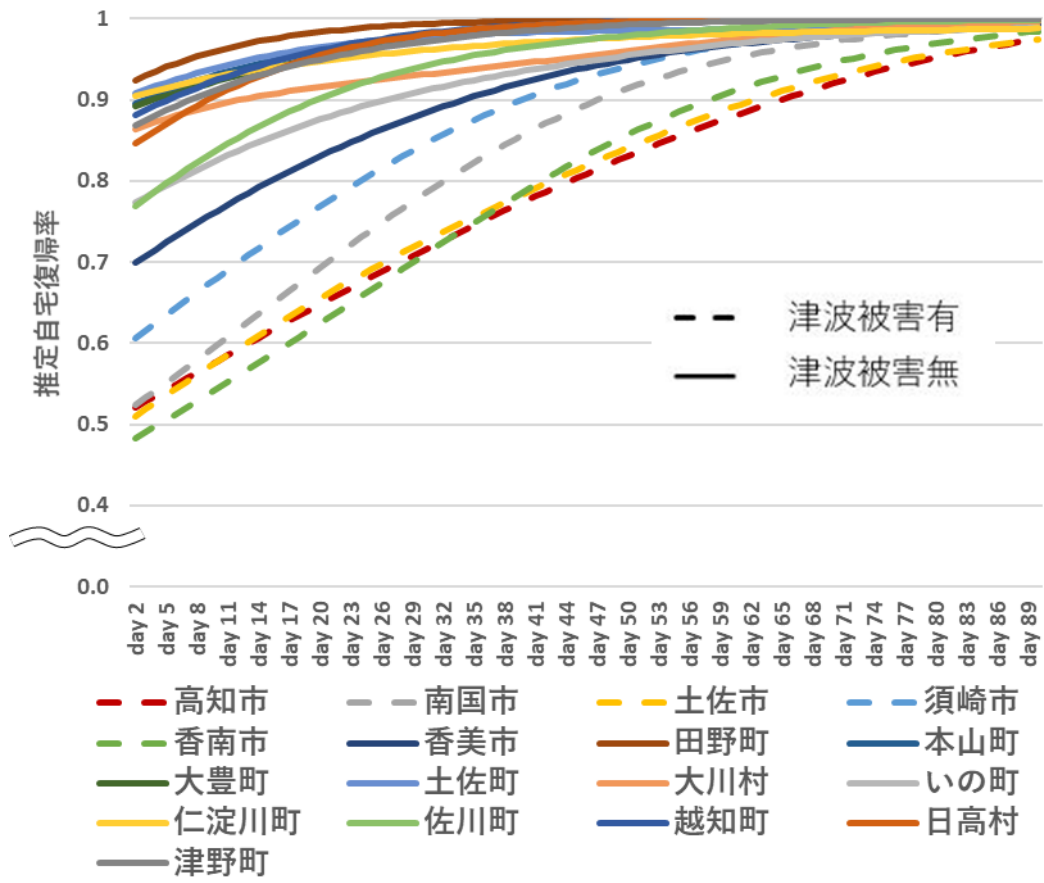


図 38：南海トラフ沖地震における市区町村ごとの推定自宅復帰率の時系列変化

4.4 まとめ

本章では高知県を対象に、3.6項で作成したモデルを適用し、将来予測される南海トラフ沖地震における回復過程の推定シミュレーションとして、発災後日数ごとの自宅復帰率の推定を行った。本シミュレーションによる事前推定結果は、津波被害も含む総合的な建物被害状況が自宅復帰状況をよく反映した結果となった。なお、モデルの適用に用いる各種説明変数は、既存の研究や既存のデータから作成可能なものを用いたが、モデルに適用する各説明変数が同じであれば、他のデータも使用可能である。今後の研究等によって精度の高いモデルやデータが利用可能になった際に、それに置き換えてシミュレーションを行うこともできる。

また、本研究の成果は、事前推定だけでなく実際に発災した場合にリアルタイムの被害状況のデータを適用することで、各地の自宅復帰状況の推定にも役立てることができる。例えば、本シミュレーションでは、上水道の復旧率の計測震度と従属関係にあるため、あまりそれぞれの独立的な影響を自宅復帰率に反映できていないが、事前推定ではなく発災後の上水道復旧状況のリアルタイムの実被害データを適用することで、より正確な推定ができると考えられる。発災後についても、リモートセンシング技術による津波浸水被害の把握など、観測データとの組み合わせによって、より精度の高い自宅復帰状況の推定が期待できる。

第5章 結論

5.1 本研究の成果

まず本研究では、熊本地震の事例を対象として、迅速で詳細な災害被害把握のための推定手法の検討を行った。その結果、本研究で用いた推計震度分布図と建物マイクロジオデータを用いた手法は、迅速で詳細な被害推定に有効であることが示された。本研究の手法を用いて、発災直後に被害状況を把握し、災害対応に活かすことが期待される。また、被害の把握そのものについても、本研究の手法による推定結果をもとに、航空測量等による実際の被害調査の計画などにも役立てるといった活用が期待される。また、同手法については発災直後だけでなく詳細な事前推定にも適用が可能であり、事前対策の政策などへの貢献が期待できる。

次に本研究では、東日本大震災の事例を対象として、津波被害のGPS人流データを用いた発災後日数ごとの自宅復帰状況の把握、および自宅復帰時期の推定のモデルの作成を行った。GPS人流データを用いて各個人の自宅被害状況の結びつけを行い、自宅復帰状況と自宅被害状況による違いを調べたところ、自宅被害程度の違いが自宅復帰の時期に影響を与えることが定量的に示された。また、本研究で作成した自宅復帰モデルについて誤差10%程度の精度を得ることができた。

最後に、作成した自宅復帰モデルを南海トラフ沖地震に適用したシミュレーションを行った。同モデルは現存するデータや既存研究による推定モデルなどを用いることで適用することができ、実際に現時点でも利用可能であることが示されたといえる。なお、同成果は、事前の推定に限らず、今後実際に災害が発生した場合に事前推定に限らず発災後の被害状況の把握にも役立てることができ、リアルタイムの実被害観測データを適用することで、より高精度の推定もできると考えられる(図39)。

これらの成果は、様々なフェーズにおける災害対策・災害対応に貢献できるといえる。また、本研究全体を通して、大地震災害における自宅被害の推定から避難者の発生およびその自宅復帰時期の推定まで一貫した推定ができることが示唆された。

5.2 本研究の課題と展望

本研究で用いた迅速で詳細な自宅被害推定手法について、精度の向上をはじめ、建物被害以外の要因の考慮が今後の課題である。また、本研究で作成した自宅復帰モデルに関して、モデルの作成手法やモデルの変数選択など、改良の余地があるといえる。

手法やモデルのさらなる開発のためには、各種データの入手が課題である。例えば、本研究ではデータの制約上、熊本地震の事例では本研究の手法による自宅復帰モデルの作成を行うことができなかった。ただし今後、全国的にビッグデータ活用の動きが広まる中で、位置情報データや各自治体の調査データなどのデータ整備や利用が広まる可能性も期待できる。データの入手が可能になれば、本研究の手法により、熊本地震をはじめ、津波の被害のない地震被害のみのケースについてのモデルの作成も行うことができる。また、本研究では東日本大震災の事例において、復興支援調査アーカイブによる建物単位の実被害データと個人単位の GPS 人流データを用いることで、自宅被害状況と個人の自宅復帰状況の関係を明らかにした。しかし、上水道の復旧状況のデータが市区町村単位でしか入手できなかったため、個人単位でのデータの結びつけができず、上水道の復旧状況に関する複合的な自宅復帰時期への影響の分析を十分に行うことができなかった。そのため、今後、上水道などライフラインの詳細な単位でのデータが利用可能になれば、GPS データと個人単位での結びつけを行うことで、自宅復帰要因に関するさらなる分析の余地があるといえる。

今後は災害に対する総合的なレジリエンスを意識した被害推定やモデルの検討が重要になってくるといえる。例えば、災害事例の実被害データの充実や観測・調査技術の向上といった各領域における社会的基盤の整備や、災害被害推定に関する研究の深化は本研究で用いたような被害予測モデルの精度の向上や有用性の向上につながる(図 39)。時代の変化とともに今後増えていく利用可能なデータや、観測技術向上により有効性が高まっていくデータなど、データ流通や技術革新のといった動向も意識し、実際に災害時にも適用のしやすいモデルや被害推定手法の開発を行っていく必要があるといえるだろう。

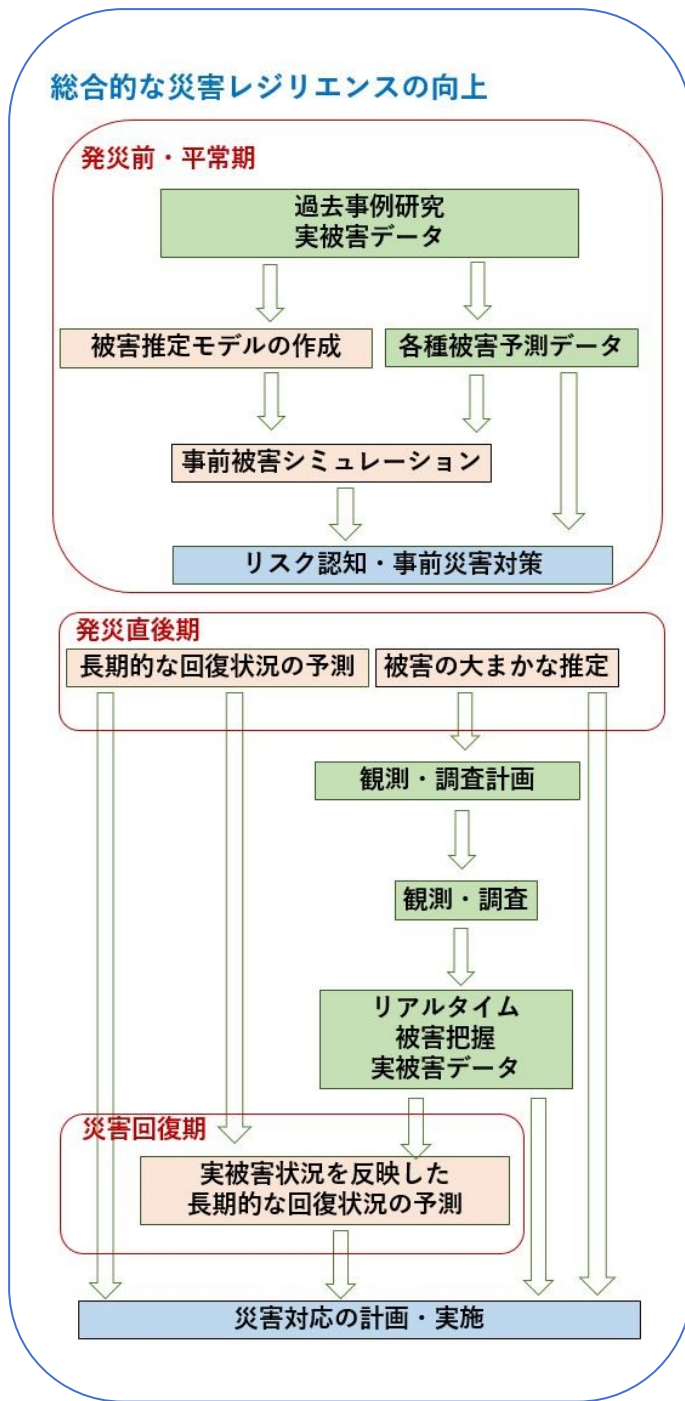


図 39：被害状況推定モデルによる総合的な災害レジリエンス向上への貢献

参考・引用文献

- [1]内閣府 防災情報 HP「阪神・淡路大震災教訓情報資料集阪神・淡路大震災の概要」
http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_awaji/earthquake/index.html (2018 年 1 月 4 日閲覧)
- [2]内閣府「平成 24 年版防災白書」
- [3]東京都総務局総合防災部防災管理課 2016 年「平成 28 年熊本地震 支援の記録～都の防災対策の実効性向上に向けて～」
- [4]内閣府防災担当 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ 2013 年「首都直下地震の被害想定と対策について（最終報告）」
- [5]政府 地震調査研究推進本部 2013 年「南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）」
- [6] 内閣府防災担当 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ 2013 年「南海トラフ巨大地震対策について（最終報告）」
- [7]西弘幸 2017 年「南海トラフ巨大地震を想定した防災ヘリコプターと DiMAPS の活用」平成 29 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集
- [8]尾無雅実 2017 年「災害時における UAV(無人航空機)の活用について」平成 29 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集
- [9]越村俊一・郷右近英臣・福岡巧巳・林里美, 2012 年, 「リモートセンシングによる 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の広域被害把握」, 日本地震工学会論文集, 12(6), 6_50-6_62.
- [10]加藤直哉 2015 年「逗子市の詳細な地震危険度マップの作成に関する研究」,<http://hdl.handle.net/10748/7355>,(2016 年 8 月 23 日閲覧)
- [11]内閣府防災担当 2014 年 中央防災会議「南海トラフ地震防災対策推進基本計画」
- [12]熊本県 2017 年「熊本地震への対応と今後の課題等について」
- [13] 産経 WEST ニュース
<http://www.sankei.com/west/news/171128/wst1711280079-n1.html>(2018 年 1 月 4 日閲覧)
- [14]山口裕通,・奥村誠・金田穂高・土生恭祐 2016 年「携帯電話 GPS 情報から分かる熊本地震による行動パターンの被災・回復過程」第 54 回土木計画学研究・講演集 CD-ROM, 181
- [15]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Ⅲ章 被害予測手法の整理 地震保険研究 27 損害保険料率算出機構： 2014 年 5 月、pp.331-339.
- [16]首相官邸政策会議 2017 年「市町村官民データ活用推進計画策定の手引」
- [17]国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）

- http://www.jaxa.jp/countdown/f18/overview/gps_j.html (2017年1月8日閲覧)
- [18]NHK スペシャル「震災ビッグデータ」<http://www.nhk.or.jp/datajournalism/about/>
(2017年1月8日閲覧)
- [19]秋山祐樹・小川芳樹・仙石裕明・柴崎亮介・加藤孝明 2013年「大規模地震時における国土スケールの災害リスク・地域災害対応力評価のためのマイクロな空間データの基盤整備」, 第47回土木計画学研究・講演集 CD-ROM, 392
- [20]Ogawa, Y., Akiyama, Y. and Shibasaki, R., 2013. Evaluation of Catastrophic Earthquake Damage throughout Japan using Estimated Micro Data, CUPUM2013 conference papers, 103.
- [21]Akiyama, Y., Takada, T. and Shibasaki, R., 2013. Development of Micropopulation Census through Disaggregation of National Population Census, CUPUM2013 conference papers, 110.
- [22]マイクロジオデータ研究会 HP <http://microgeodata.jp/> (2017年12月10日閲覧)
- [23]気象庁 推計震度分布図 <http://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/suikai/eventlist.html>
- [24]東京都総務局総合防災部防災管理課 2013年「南海トラフ巨大地震等による東京の被害推定」
- [25]熊本県災害対策本部 2016年「熊本地震に係る被害状況等について (第144報)」
- [26]熊本県災害対策本部 2016年「第4回政府現地対策本部会議・第7回災害対策本部会議資料」
- [27]東京都総務局総合防災部防災管理課 2012年「首都直下地震等による東京の被害想定」
- [28]総務省消防庁 2017年「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)について (第156報)」
- [29]復興支援調査アーカイブ <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>
- [30]関本義秀・西澤明・山田晴利・柴崎亮介・熊谷潤・樫山武浩・相良毅・嘉山陽一・大伴真吾 2013年「東日本大震災復興支援調査アーカイブ構築によるデータ流通促進」GIS-理論と応用, 21(2), 87-95.
- [31]厚生労働省 2011年「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の被害状況及び対応について」2011/3/13(第11報)~2011/4/12(第46報)
- [32]国勢調査 HP <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/qa-1.htm> (2017年12月29日閲覧)
- [33]政府の統計窓口 <https://www.e-stat.go.jp/>
- [34]Akiyama, Y., Ueyama, S., Shibasaki, R. and Adachi, R., 2016, Event Detection Using Mobile Phone Mass GPS Data and Their Reliability Verification by MDSP/OLS Night light Image, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information

Sciences, III-2, 77-84.

[35]ふくしま復興ステーション

<http://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/list271-840.html>(2017年12月12日閲覧)

[36] 防災科学研究所地震調査研究推進本部,

http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/ (2018年1月7日閲覧)

[37]防災科学研究所地震調査研究推進本部, 「確率的地震動地図技術報告書」

[38]東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター<http://www.dcrc.tohoku.ac.jp/>

[39]Ogawa, Y., Akiyama, Y. and Shibasaki, R., Extraction of Significant Scenarios for Earthquake Damage Estimation Using Sparse Modeling. ISCRAM2017 proceedings, 150-163, 2017.

[40]Ogawa, Y., Akiyama, Y., Kanasugi, H., Shibasaki, R. and Kaneda, H., Evaluating the Human Damage of Tsunami at Each Time Frame in Aggregate Units Based on GPS Data, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B8, 133-138, 2016.

[41]小川芳樹 2016年 「マイクロジオデータを利用した大規模地震・津波被害リスクの推定と分布から見た災害想定シナリオの重要度評価に関する研究」東京大学大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻 博士論文

[42]相田勇 1981年「東海道沖におこった歴史津波の数値実験, 東京大学地震研究所彙報」 56, pp. 367-390.

[43] 相田勇 1981年「南海道沖の津波の数値実験, 東京大学地震研究所彙報」 56, pp. 713-730.

[44]能島暢呂, 加藤宏紀 2013年「供給系ライフラインの地震時機能評価モデルの改良と再検証 -東日本大震災を対象とした都道府県別評価-」第5回 相互連関を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム講演集, pp.94-104.

[45]加藤宏紀・能島暢呂 2015年「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 -市区町村別簡易評価法のシステム構築-」日本地震工学会論文集 (JAEE 特集号) 第15巻, 第7号, pp.7_354-7_367.

[46] 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

https://www1.gifu-u.ac.jp/~nojima/take_out_LLEQ.htm (2017年12月15日閲覧)

[47] 東京大学空間情報科学研究センター<http://www-new.csis.u-tokyo.ac.jp/>

・佐藤大誓・秋山祐樹・柴崎亮介, 2016年「マイクロジオデータを用いた2016年熊本地震における建物単位の避難者人数の推定」第25回地理情報システム学会講演論文集,

CD-ROM C-3-3

・佐藤大誓・小川芳樹・秋山祐樹・柴崎亮介 2017年「東日本大震災における復旧・復興の早期回復要因の推定手法に関する検討」第26回地理情報システム学会講演論文集, D-4-1

謝辞

本研究にあたって、多くの方々からご指導ご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。指導教員である、柴崎亮介教授には研究の遂行、本論文の執筆にあたり大変丁寧かつご熱心なご指導を賜りました。研究に対する的確なアドバイスだけでなく、物事に対する視野の広さ、柔軟な発想・考え方、チャレンジする姿勢など、私自身の成長となる多くを学ばせていただきました。研究を深化するとともに、私自身の中での思考を深めることができ、研究というものの面白さを実感できるよい2年間となりました。心から感謝しております。副指導教員の貞広幸雄教授には誠意のあるご指導を賜り、その中で研究の方向性に関するアドバイスや、気づかなかった着眼点の提示をしていただき、本研究を進めるうえで大変有意義なご指導をいただきました。ここに感謝申し上げます。

また本研究の解析は、気象庁より頂いた推計震度分布図や株式会社ゼンリンデータコム様からの人流データの提供によって実現することができました。また、東北大学の越村俊一教授には、詳細な津波シミュレーションデータをご提供頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

また、本論文の執筆にあたって、秋山祐樹助教には大変お世話になりました。建物マイクログジオデータを用いた研究についても、秋山助教なくては行うことができず研究方針の相談や論文の添削など多くの面で助けられました。また空間情報の業界的な話やアカデミック分野の話など、なんでも伺うことができ、とてもよくしていただきました。大変感謝しております。所属研究室の研究員である小川さんには大変お世話になりました。修士研究にあたって様々な面でアドバイスをいただき、文献の紹介や研究の方向性の提示など、何から何までお世話になりました。特に自宅復帰モデルの作成にあたっては、データ整備やプログラミングのお手伝いをしていただき、小川さんなしでは、修士研究の達成はなしえなかったと思います。小川さんには、これまで私のために多くの時間を割いていただけたこと、感謝しても感謝しきれません。本当にありがとうございました。

また一緒に研究に励んだ研究室の同期である、大崎君、古賀さん、山本君には普段の院生生活をはじめ、学会前や各発表の際などの大変な時期や論文の執筆の際などあらゆる面で助けられました。私が充実した院生生活過ごすことができたのも皆さんのおかげです。ここに挙げた方々以外にも、研究室内外を問わず、また研究以外での活動においても多くの方々力添えによって本論文を完成させることができました。この場をお借りして、謹んでお礼申し上げます。