

地震による直接被害額のリアルタイム推計に関する研究

A Study on Real-Time Estimation of Direct Economic Losses Caused by Major Earthquakes

豊田 利久¹, 崔 青林^{1,2}, 池田 真幸², 佐藤 純恵¹,
堀江 進也¹, 中村 洋光², 藤原 広行²

Toshihisa TOYODA¹, Qinglin CUI^{1,2}, Masaki IKEDA², Sumie SATO¹,
Shinya HORIE¹, Hiromitsu NAKAMURA², and Hiroyuki FUJIWARA²

¹ 神戸大学

Kobe University

² 防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

The aim of this study is to present a real-time estimation method of economic values of direct stock damages caused by major earthquakes in Japan. The result will contribute to both government and private sectors for their decision making, particularly for budget allocation. First, we develop a simple but evidence-based model for estimating stock losses explained by an earthquake hazard factor and an exposure factor, i.e., seismic intensity and the existing stocks. Second, we carefully check the model specification, estimation and performance so as to be soundly applied to real-time assessment of future earthquake events. Finally, we develop a methodology of exhibiting estimated losses in a 250-meter meshed plane of an afflicted area.

Keywords: *direct economic damage, real time estimation, all physical stocks, seismic intensity scale, tsunami effect, municipality level data*

1. はじめに

大震災発生直後に物的資産の直接被害額が推計されるならば、推計の度に投入される多くの人材、費用、時間を節約でき、復旧への対応に必要な政府の組織編成や必要資源の調達に資するであろう。また、被災した企業や家計も被害額の情報を早めに知ることによって、その置かれた状態を客観的に知り、適切な行動をとることができる。被災しない主体は、被災地に向けた義援金等の支援の目途とすることもできる。

筆者たちは、全国どこで大きな地震（および津波）が発生しても、即時に直接被害額を推計できるシステムの開発を進めてきた。今まで、各市町村の「民力」と観測された震度情報から直接被害額を過去のデータを用いて推定するモデルを開発した¹⁾²⁾。本論文の目的は、従来の研究の蓄積の上にさらに新しい知見を加え、最終的には社会実装が可能なシステムを提示することである。以下、まず、研究の背景と意義を概説する。続いて、新しいモデルの構築とその応用例を示す。具体的には、新しいモデルの説明と複数の式の推定結果、過去のデータ観

測期間内でのパフォーマンスのチェック、最終的に選択された式の観測期間後の適用妥当性のチェックを行う。特に、被害額が公表された一番最近の事例としての2016年熊本地震に対するモデル推計額の妥当性を示す。さらに、現時点で被害額が公表されていない2018年大阪府北部地震への適用例を示す。最後に、新モデルで重要な役割を果たす市区町村別ストック（住宅、公共施設、民間資本の合計）のデータの推計法を付録で示す。

2. 直接被害額のリアルタイム推計の背景と意義

(1) 背景

大規模な災害が発生すれば、気象庁、自衛隊、国土交通省などの各省庁をはじめ、官民の各種機関が被害アセスメントを行う。特に、防災科学技術研究所（以下、防災科研と略称）は、さまざまな観測網を通じて被害のリアルタイム推定を推進し、さらに社会との情報共有に努めている。例えば、開発が進められている地震被害推定システム(J-RISQ)は、全国を網羅する強震観測網(K-NET,

KiK-NET など)を用いることにより、4分の1地域メッシュ(以下、250mメッシュと略称)でリアルタイムに被害情報を発信できるようになりつつある³⁾⁴⁾。このような迅速な災害アセスメントを行う主な目的は、発生直後の初動対応における意思決定支援等に資することである。本論文が目的とするのは、被害状況を経済タームで、すなわち被害額で推定するシステムの開発である。物的タームの被害状況は物理的な観測によって把握できるが、経済タームに置き換えるには、同じリアルタイムとは言え、数時間の時間差が必要になる。そのような条件下でも、なるべく迅速に経済的被害額を推定しようという試みである。

災害直後の物的資産の損失額を詳細に把握する方法は、全資産の損壊状況を悉皆調査し、それらの合計額を算出することであろう。理論的にはそのように言えるが、物的資産といっても、公共的施設(インフラ)、住居等の建築物、そして民間資本等があり、それらのストック残高がどれくらい損失したかの推計は簡単ではない。例えば、資産や損失の価値を推計するために減価償却が必要であるが、その償却の仕方が一様ではないし、そもそも公共施設には減価償却を適用しないものが多い。それでも、小規模災害の場合には、悉皆調査によって比較的短期間に推計することは可能であろう。他方、大規模災害の場合は対象とする資産も多いので、この方法による損失額の推計は困難を極めるし、正確性を求めるほど時間もかかる。

阪神淡路大震災後の直接被害額は、このような積み上げ方式で算出された。国土庁は発災から約1ヵ月後に約9.6兆円と発表し、さらに兵庫県が発災から3ヵ月後に約9.9兆円と発表した。これは、15の被害項目に区分して積み上げ、それを合計したものである。とは言え、膨大な数の住宅や事業所の毀損額の算定に当たっては、地域別毀損率や坪当たり建築単価など、ある程度の平均値を用いた集計がなされた。

東日本大震災の場合には、当初(約2週間後)、内閣府(経済財政分析担当)が大まかな仮定の下での2ケースを発表した。それは、約16兆円と約25兆円であった。後に、発災から3ヵ月過ぎて、内閣府(防災担当)が約16.9兆円とする公式な推計額を発表した。これは被災市町村のストック残高を推計し、それに別の過去の情報や津波被害の程度を酌量して得られる毀損率を掛け合わせて算出された。阪神淡路大震災における積み上げ方式でも、東日本大震災における毀損率を使用する方式でも、最終的な公式推計の発表までには3ヵ月程度を要した。熊本地震の直接被害額の推計でも東日本と同じ手法が用いられた¹⁾。

阪神淡路大震災や東日本大震災のような大規模災害の場合には、直接被害額の推計には、上で見たように3ヵ月程度を要している。これは物的・人的な被害推計が数時間以内、少なくとも数日以内になされるのとは著しく異なる。その最大の理由は、物的・人的被害は可視的かつ単位が数量的で把握しやすいのに対して、経済的被害額は可視的ではなくかつ何らかの経済評価を要するからである。

(2) 意義

本稿の目的は、地震直後に発生する物的資産、またはストックの損失の経済的評価をなるべく即時に把握する方法を提示することである。阪神淡路大震災や東日本大震災において見られた3ヵ月程度を要する公式推計の完

全な代替策を提案するものではないが、迅速な推計を見える形で示すことを目指している。迅速な被害のアセスメントは、物的情報に関してはさまざまな仕組みがすでに社会実装されていることは記述したとおりであるが、災害発生直後の初動対応において、被害額の経済情報も加われば、さらに意思決定支援に役立つと考える。被害額の推計は、このようなリアルタイムな把握、少し期間をかけてより精密に行う把握、さらには時間の経過とともに蓄積されるフローの間接被害額の把握、等さまざまな把握方法があり、それぞれが適用される意味を持っている。

この報告が扱うリアルタイムの情報は、政府や行政にとっていかなる災害対応の組織を編成すべきか、当面の救済や復旧の局面にどのようなヒト、モノ、特にカネ(予算)の配分を行うべきかという政策のための意思決定に役立つものである²⁾⁵⁾。このことは、政策当事者にはよく認識されている。民間の企業や家計にとっても、早期にその置かれた状態を客観的に知り、適切な行動をとるための貴重な情報になる。被災しない主体にとっても、被災地に向けた支援の意思決定に役立つ。

図1は、地震が発生した後の政策対応にリアルタイム推計がどのように資する可能性があるかを図示したものである。物的な被害状況の把握よりは若干遅れること、早期対応の意思決定支援に役立ち、後にはさらに情報が加わると最終的な復興政策へ寄与することを示している。

(3) 先行研究

わが国における直接被害額の公式統計は、ストックの減価償却済みの現在価値毀損額を種目別に積み上げる方式、災害前の種目別ストック存在量とそれらの毀損率をそれぞれ別々に推計して掛け合わせたものを合計する方式、の2つがあることはすでに述べた。このほか、損害保険金の支払額を直接被害額とみなすケースもある。この場合は、ストックの中でも保険でカバーされた住宅や民間資本に限られ、カバーされないストック(公共施設を含む)が含まれないので、全体の被害総額はつねに過小評価される。

本稿が目的とするようなモデルによって直接被害額を推計するアプローチは、それほど多くはない。大災害の経済的インパクトがモデル分析されるようになったのは、Okuyamaがサーベイ論文⁶⁾で述べているように、1994年のノースリッジ地震と翌年の阪神淡路大震災を契機としている。当初は主として地域科学の分野で、IO分析を用いて行われた。後に経済学者も加わり、CGEモデル、SAM(社会会計マトリックス)モデル等のモデル分析が行われるようになった。しかし、これらは間接被害額をモデル分析の対象とするもので、モデルの中ではストック変数を用いるが、直接被害額そのものの推定を目的とするものではない。

直接被害額を過去の地震データでモデル推計した初期の試みとして、谷口・鐘ヶ江⁷⁾、朴・崔・谷口⁸⁾があげられる。しかし、これらは推定を迅速に行って政策への適用を企図したものではない。Cui et al¹⁾、崔ほか²⁾は過去の地震データおよび社会経済的要因と地震動の情報をモデル化して、リアルタイム推定を行った試みである。本研究は、これらの直接被害額のリアルタイム推定の先行業績を改善し、さらに具体的な応用を目指すものである。

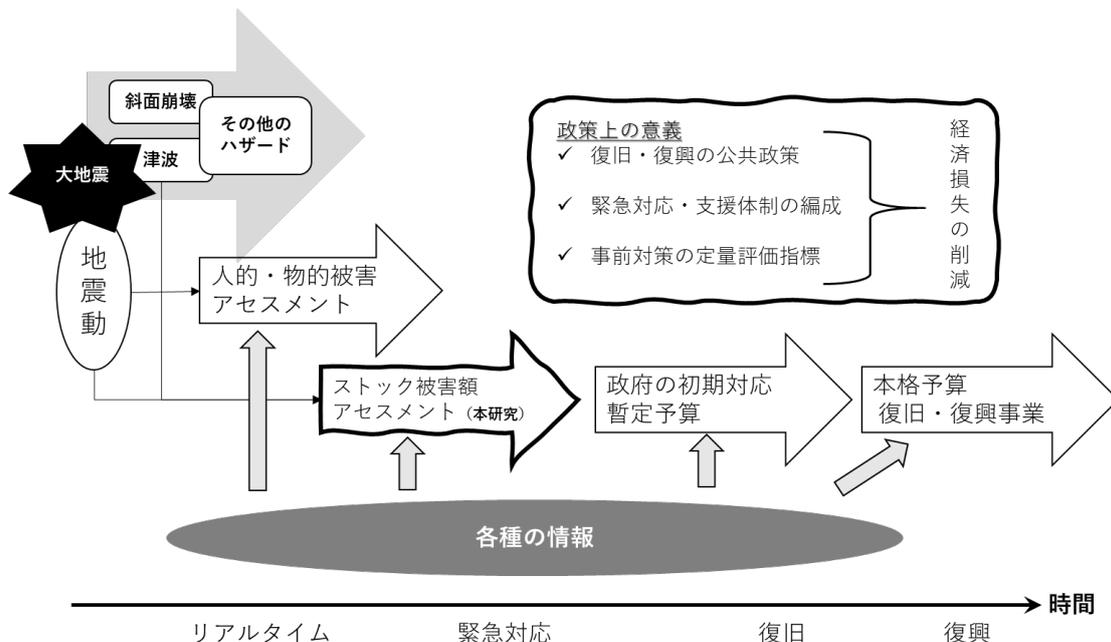


図1 被害額のリアルタイム推計の政策上の意義

3. 新しい直接被害額推計モデル

(1) モデル

災害リスクは、Wisner ほか⁹⁾が提唱して以来、「 $R = H \times V$ 」、つまり災害ハザードと脆弱性の積、またはハザードへの対応能力を考慮した「 $R = H \times (V/C)$ 」という形で把握することが一般化している。ここで、R:災害リスク、H:ハザード、V:脆弱性、C:ハザードへの対応能力を示す^③。この確率概念としてのリスクは、災後には目に見える直接被害と目に見えない間接被害となって露呈する。被害はさまざまな形、過程、現象を伴って現れるので、その把握は容易ではない。この論文は、被害のなかでも地震による物的資産の被害額の推計に焦点を当てているので、人的被害や環境悪化などは対象にしていない。

物的資産ストックは、①公共的社会施設(インフラ)、②建築物、③民間資本、のすべてを考える。経済発展とともにこれらの資産ストックの蓄積が進む。産業が集中し、働く場所を求めて人口も集中し、都市化が進む。この過程で物的資産の蓄積が進むが、それは同時に「自然の加害力」(Wisner ほか)に対してはより大きな被害をもたらす源になる。また技術進歩が次第にこれら資産ストックに体化されて対応能力の向上が進むが、基本的にはそれを織り込んでストック残高は地震に対して暴露される基本的要因と考える。ハザード要因としては、地震動のほかに、津波、液状化、斜面崩壊等が考えられるが、今回のモデルでは津波の影響のみを取り上げる。

想定されるリスクが、具体的な地震発生によっていかなる経済的被害額をもたらすかを即時に推計することは、すでに述べたように容易ではない。特に、災害リスクが各被災地域で異なったハザードの分布をもって露呈する結果、各地域で異なる被害状況が発生する。この点を考慮しながら、被災地全体の経済的被害額を推計する方式を考える。その際、①簡便なものであること、②過去の被害額のデータのエビデンスを重視すること、の2点を方式の特徴として重視する。

基本的な関数は、

$$\text{直接ストック被害額} = F[\text{ストック存在量, 震度, 関連ハザード要因}]$$

である。この特定化は、上で述べたように防災学の主流的な考え方に沿うものであるが、最近台頭しつつある災害経済学の実証研究でも見られるものである。間接被害額の発生メカニズム究明には何らかの経済論理が用いられるが、直接被害額を推定するためには上に示した関数の形がよく用いられる⁽⁴⁾¹⁰⁾。

筆者たちの研究グループは、既往研究で資産ストックではなく「民力」という加工指標を使用してきた¹²⁾。民力はある新聞社が全国の市町村別のさまざまな物的、社会経済的、文化的な指標を合成して数値化したもので、地域総合力を示す数少ない自治体レベルのデータとしては便利なものであった。しかし、民力と云えば、上記のリスク概念におけるハザードへの対応能力(上記のC)の響きが強いが、実際には民力が大きいほど経済被害額が大きくなるという結果が得られた。また、民力の統計データの公表が2016年から打ち切られた。そこで、今後は新規にストック額を使用することにした。とは云え、全国の市区町村別の物的ストック統計は存在しない。そこで、その統計を推計して整備することも今回のモデル開発の大きな付随作業であった。

ストック残高、人口集中(都市化)と地震被害の関係を、使用するデータで見ておこう。図2は、今まで震度7を記録した4つの地震(阪神淡路、新潟県中越、東日本大震災、熊本)の各県における、震度5~7を記録した各地域に存在した物的ストックの種類別割合を示す。まず分かることは、民間資本の割合が大きいのは兵庫県、宮城県であり、比較的過疎地帯の被害が甚大であった新潟県、熊本県は比較的小さい。民間資本の割合が多いということはそれだけ産業が集中し、付随して人口も集中していることを意味する。これはあくまで割合を示すものであるが、これら4大地震における被害の県別絶対額の大きさは、やはり兵庫県、宮城県、熊本県、新潟県の順

になる。逆に、社会資本（インフラ）の割合は新潟県、熊本県で多くなっている。

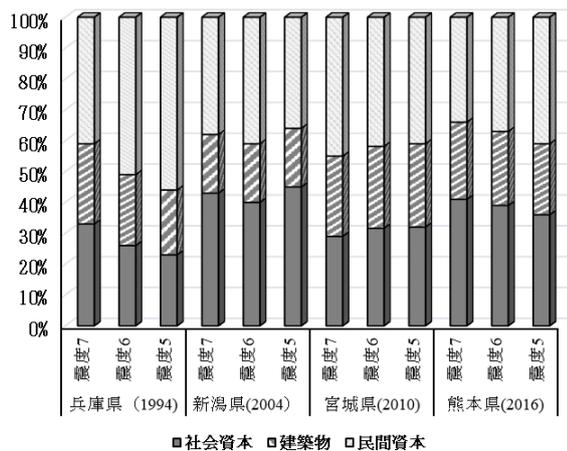


図2 震度7を記録した地震の各地域内のストック残高別割合 (%)

上記の県以外に関しても、物的資産の割合はほぼ同様である。したがって、物的被害の総体的アセスメントを厳密に行うためには、建築物や公共的社会施設の把握だけでは不十分である。少なくとも民間資本ストックが3分の1を占めることに留意したい。

(2) モデルの特定化

ハザードとしての震度は、基本的には市区町村（厳密には地震計が公的に設置されている位置）ごとにデータが発表される。これは、観測数の多いデータである。また、本研究プロジェクトでは独自に、総ストック・データも市区町村レベルで利用可能としている。しかし、直接被害額は1980年代以後の大きな地震で公式被害額が報告されるようになったものの、基本的に都道府県単位で発表される。市区町村のレベルの説明要因で都道府県単位でのみ存在する被害額を説明しなければならない。つまり、大標本として利用可能な震度情報のデータ、市区町村レベルまで按分された総ストック存在量のデータ、小標本の形でしか存在しない直接被害額のデータを対象としている。したがって、観測頻度の異なるデータを対象とする独自の分析を必要とする。本稿は、あえてエビデンスに基づく被害額推計にこだわり、被害額データの人工的加工は行わない。このデータの特殊な観測頻度の差を考慮して、モデルの特定化を次のように行う。

まず、地震による被害額の過去のデータが少ないことから、なるべく多くの情報を得るために、できるだけ過去に遡り、1980年代以後の地震を対象にする。さらに、公式被害額が利用可能な最大震度5以上を対象にする。1996年以後、気象庁の震度区分が以前の5, 6, 7から5弱, 5強, 6弱, 6強, 7と細区分された。しかし、従前のデータと整合性を保つために、5弱, 5強をまとめて震度5に、同様に震度6にまとめて扱うことにする。

対象とする1980年代以降の地震を表1に示す。具体的には、1983年日本海中部地震から2016年熊本地震までをデータのとり得る対象とする。

変数を次のように定義する。

Y_i : i 番目の地震における県単位の直接被害額

ΣS_{ij} : i 番目の地震における震度 j の当該県内市区町村のストックを合計した額 ($j = 5, 6, 7$)

DT_i : 津波被害が発生した場合のダミー変数

具体的な関数形として、将来の広範な適用を考慮して簡便性を最優先する。そのために次の線形回帰モデルを考える。(a, b はパラメータ)。

$$Y_i = a + b_1 \Sigma S_{5i} + b_2 \Sigma S_{6i} + b_3 \Sigma S_{7i} + b_4 DT_i \quad [1]$$

しかし、目的変数である直接被害額は事例ごとの大小差が大きく、それを反映して誤差項の分散が不均一である可能性が大きい。最良線形不偏推定量を確保する視点からは、分散不均一は望ましくない。そこで、実際のモデルの選択の際には、分散不均一性テストを行って、なるべく分散均一性を保証するモデルを適用することにする。

(3) モデルの推定

対象とする地震は、1983年の日本海中部地震から2016年の熊本地震までの36ケースである（ただし、東日本大震災のように12都道府県に及ぶ場合は12のケースとして扱う）。被害額は都道府県単位で公式発表された額を用いる。実際には、このうち東日本大震災の被害額が公式に利用可能でない5都県を除外し、全部で31のケースに限定される。表1の右端に本研究で用いるケースの番号を示している。ストックのデータに関しては付録で推計法を簡単に説明する。被害額、ストック額ともに2011年の実質価格表示額に直して用いる。

図3は、31の標本の内部構造を示す。折れ線が直接被害額を示す。5番目の阪神淡路大震災における兵庫県が最大の値を示し、23番目の東日本大震災における宮城県の値が2番目に大きいことを示す。棒グラフは震度別の被災地の存在ストック総額を示す。棒グラフの下から震度5の地域のストック、次に震度6の地域のストック、最上段は4ケースにおける震度7の地域のストックである（兵庫県・宮城県のほかは、15番目の新潟県、30番目の熊本県のケース）。

推定結果は表2に示されている。

まず、震度5の要因はいずれの関数形の場合でも有意にならないことが判明した。表2では、 ΣS_5 の係数の推定値は式1についてのみ示されているが、ほかのいずれのケースでもその推定値は有意にならないことを確認した上で、その項を除外した推定結果のみが示されている。実際、震度5の体感はかなりのものであるが、実際に物的被害額は微少にとどまる傾向にあり、推定結果もそれを反映していると理解される。

次に、津波の影響を測るために津波ダミー変数を導入した ($DT =$ 津波を伴う地震のケースのみ1, 他の場合は0)。定数項ダミー、各係数ダミーを別々に導入する場合や、双方のダミー効果を同時に導入する場合などを試みた。その結果、定数項を除くすべての説明変数の統計的優位性が保たれるのは表2における式4と式5であった。特に、定数項ダミーの場合よりも係数ダミーの場合の方が(式5)がより有意性が高い。ただし、式5では最大震度6の場合の津波の効果は把握できない。したがって、当面は、津波を伴う場合のリアルタイム推計には、式4と式5の両方を用いることにする。

津波の影響を明示的に取り入れるためにはダミー変数によるアプローチだけでは不十分で、津波のハザード要因としての津波高、浸水高等を考慮したモデルが必要である。しかし、公表された被害額のデータを伴う津波の

表 1 対象とする過去の地震（被害額は名目）

地震の概要					県域における地震被害				本研究で用いた データNo.
地震名	発生 年月日	震源地	震源深さ (km)	マグニ チュード	対象県	最大 震度	最大津波高 (m)	被害総額 (10億円)	
昭和58年(1983年) 日本海中部地震	1983.5.26	秋田県能代市 西方沖 約80km	14	7.7	青森県	5	10.0	518.11	1
昭和59年(1984年) 長野県西部地震	1984.9.14	長野県木曾郡 王滝村	2	6.8	長野県	6	-	46.87	2
平成5年(1993年) 釧路沖地震	1993.1.15	北海道釧路市 沖約20km	約107	7.8	北海道	6	-	53.08	3
平成5年(1993年) 北海道南西沖地震	1993.7.12	北海道南西沖	34	7.8	北海道	6	16.8	124.31	4
平成7年(1995年) 兵庫県南部地震	1995.1.17	淡路島北部	16	7.3	兵庫県	7	微弱	9,900.00	5
鹿児島県北西部地震※	1997.3.26	鹿児島県阿久 根市付近	20	6.2	鹿児島県	5強	-	9.26	6
鹿児島県地震※	1997.5.13	鹿児島県薩摩 地方	20	6.1	鹿児島県	6弱	-	15.06	7
平成12年(2000年) 鳥取県西部地震	2000.10.6	鳥取県西部山 間部	約10	7.3	鳥取県	6強	-	60.08	8
平成13年(2001年) 芸予地震	2001.3.24	広島県南部安 芸灘	46	6.7	広島県	6弱	-	4.74	10
三陸南地震※	2003.5.26	宮城県沖	71	7.1	岩手県	6弱	-	11.89	11
					宮城県	6弱	-	5.57	12
宮城県北部連続地震※	2003.7.26	宮城県北部	約12	6.4(本震)	宮城県	6強	-	64.97	13
平成15年(2003年) 十勝沖地震	2003.9.26	釧路沖	42	8	北海道	6弱	2.6	30.30	14
平成16年(2004年) 新潟県中越地震	2004.10.23	新潟県中越地 方	13	6.8	新潟県	7	-	3,000.00	15
平成19年(2007年) 能登半島沖地震	2007.3.25	能登半島沖 (輪島西南西40 km付近)	11	6.9	石川県	6強	0.2	348.22	16
平成19年(2007年) 新潟県中越沖地震	2007.7.16	新潟県上中 越沖	17	6.8	新潟県	6強	0.2-0.3	1,500.00	17
平成20年(2008年) 岩手・宮城内陸地震	2008.6.14	岩手県内陸 南部	8	7.2	岩手県	6強	-	29.44	18
					宮城県	6強	-	119.90	19
					秋田県	5強	-	2.64	20
平成23年(2011年)東北地方太 平洋沖地震	2011.3.11	三陸沖	24	9	青森県	5強	4.2	133.70	21
			24	9	岩手県	6弱	8.0	4,276.00	22
			24	9	宮城県	7	8.6	6,492.00	23
			24	9	秋田県	5強	-	公開データなし	-
			24	9	山形県	5強	-	公開データなし	-
			24	9	福島県	6強	9.3	3,129.00	24
			24	9	茨城県	6強	4.0	2,476.00	25
			24	9	栃木県	6強	-	660.90	26
			24	9	群馬県	6弱	-	公開データなし	-
			24	9	埼玉県	6弱	-	公開データなし	-
			24	9	千葉県	6弱	3.0	438.90	27
			24	9	東京都	5強	-	公開データなし	-
平成23年(2011年) 長野県北部地震	2011. 3. 12	長野県北部、 新潟県境	8	6.7	新潟県	5弱	-	28.50	28
					長野県	5弱	-	16.70	29
平成28年(2016年)熊本地震	2016.4.14 2016.4.16	熊本県熊本地 方など	12	7.3	熊本県	7	-	2,800.00	30
					大分県	6	-	650.00	31

(出所) Cui, Q. et al.¹⁾をベースに加筆修正したもの、※正式に命名されていない地震名

ケースが東日本大震災を除いてはほとんどなく、やむを得ず暫定的なモデルとしてダミー変数による処理を行った。このように、地震に伴う津波の効果を把握するためには本研究には限界があり、津波高等のハザード要因を明示的に考慮したモデルの開発は今後の課題としたい。

表 2 は分散均一性に関する検定をした上で、均一性を確保する形での回帰分析の結果を示している。まず、各式に対して分散均一性の 2 種類のテストを行った。第 1 に、Breusch-Pagan 検定を適用したところ、いずれの式も

分散均一性を持つと判定された。第 2 に、White 検定を適用したところ、式 2, 3, 6 の場合には分散不均一性が存在すると判定された。そこで、式 2, 3, 6 に関しては、White 法 (heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimation) を適用して、分散均一性を保つ形の結果を得た。表 2 はそれらの再推定の結果を示している。また、式 4 を除いて、採用するすべての式で定数項を除いて係数推定値は 1% の水準で有意である。式 4 では、津波ダミーだけが 10% の水準で有意である。

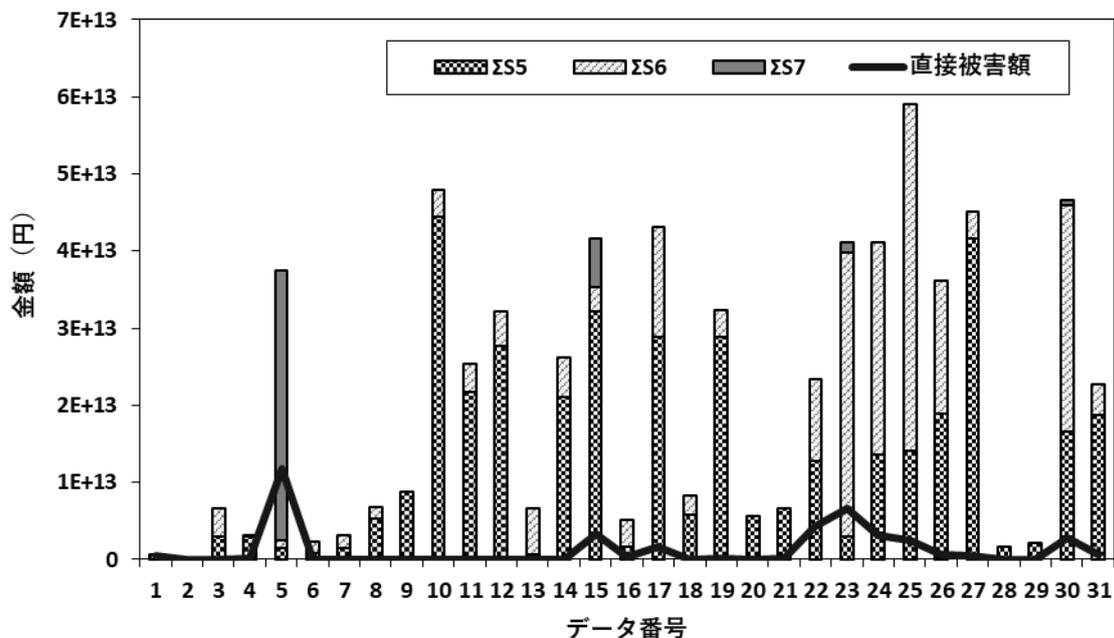


図 3 被害額と震度別被災地ストックのデータ構造

表 2 推定結果

変数・指標 \ 式番号	式 1	式 2	式 3	式 4	式 5	式 6
Constant	1.36E+11	4.97E+10	-3.21E+10	-9.31E+10	1.27E+11	-2.95E+10
Σ S5	-0.0071					
Σ S6	0.1013***	0.1005***	0.0895***	0.0895***	0.0772***	0.0818***
Σ S7	0.334***	0.3354***	0.3364***	0.3406***	0.3319***	0.3366***
DT				7.54E+11*		
DT * Σ S7					2.5975***	
推定法	OLS	White 法	White 法	OLS	OLS	White 法
R ²	0.857	0.861	0.983	0.874	0.902	0.985
F	61.16	94.07	680.89	70.52	92.6	641.31
AIC	58.11	58.05	55.92	57.98	57.74	55.96
標本数	31	31	24	31	31	22
備考			東日本大震災を除外			東日本大震災・熊本地震を除外

(注1) *, **, *** はそれぞれ、有意水準 10%, 5%, 1% で有意であることを示す。

(注2) OLS は通常の最小二乗法、White 法は White が提唱した分散均一化修正後の推定法を示す。

(注3) DT は津波ダミー。ここでは、東日本大震災の領域を、青森・岩手・宮城・福島・茨城・栃木・千葉の 7 県としている。熊本地震の領域は熊本・大分の 2 県としている。

(4) モデルの妥当性の検討

a) 内挿シミュレーション

図4は、式2を用いて、全標本を対象にした実績値とモデルの予測値を示す。両者の差異の程度を測るTheilの不均衡係数は0.164である。全体としてパフォーマンスは良好といえるが、東日本大震災に関しては、岩手県(No.22)と宮城県(No.23)の場合は過少予測になり、茨城県の場合(No.25)は過大予測になる。この原因としては、式2が津波の効果を取り入れていないことが考えられる。他の原因としては、東日本大震災の場合の実績値(すなわち、政府の推計値)が他の場合に比べて過大に計上されたためかも知れない⁽⁵⁾¹¹⁾。

図5は、東日本大震災のデータ(No.21~27)を除外して推定した式3のパフォーマンスを示す。標本内の予測精度は非常に高まる。Theilの不均衡係数は0.058である。

図6は、津波を伴う場合の式5のパフォーマンスを示す。図4に比べて改善することが見て取れる。Theilの不均衡係数も0.135であり、図4の場合の0.164に比べて小さい。

以上の結果から、リアルタイム推定に用いるモデルとして、次のように提案されよう。「津波の影響がない、または影響が軽微な場合は、推定式3を用いる。東日本大震災のように津波の影響が大きい場合(想定される南海トラフ地震等)は、推定式4および5を用いる」。

b) 外挿テスト(熊本地震への適用)

式3を用いて、標本外へ外挿予測してモデルの予測精度をチェックした。そのために、公表された最近の地震被害額が利用可能な熊本地震の場合の予測値と実績値を見ることにする。まず、熊本地震の熊本県と大分県を除いた22の標本で推定する。その結果が式6である。これを用いて両県の予測値を求めれば、それぞれ2.62兆円、2,940億円となる。熊本地震は前震と本震の2回にわたって震度7を計測した異例のケースであった。内閣府(経済財政分析担当)¹²⁾は、熊本県の直接被害額を1.8~3.8兆円、大分県の被害額を0.5~0.8兆円と算出した。したがって、大分県の場合は少し過少推定となっているが、熊本県の場合は完全に予測値が実績値をフォローしている。熊本地震の場合の最大の被災地は熊本県であり、その直接被害をほぼ正確に予測できたので、今後の地震、特に大きな地震のケースには適用可能性があると言える。

以上の推定結果は、点予測を前提にまとめた。予測の現実においては、さまざまな不確実性が存在する。不確実性を重視するならば、区間予測でモデルの適合度を見ることも必要である。熊本地震前の(東日本大震災を除く)標本で式3を推定し、熊本地震の被災地域となった熊本県(No.30)と大分県(No.31)に対して、プラス・マイナス2σ(標準誤差)の区間予測を求めたのが、図7の右端の網付きの部分である。それによれば、熊本県での予測値は、2.61兆円を中心値として、区間(0.94兆円、4.28兆円)が予測される。内閣府の求めた区間(1.8兆円、3.8兆円)を完全に含む。大分県に関しては、0.20兆円を中心値として、区間(0兆円、0.96兆円)が予測される。内閣府が求めた区間(0.5兆円、0.8兆円)をほぼ含む(若干の過少予測)。不確実性を考慮して幅を持って予測する目的でも、式3が適用できることが示された。

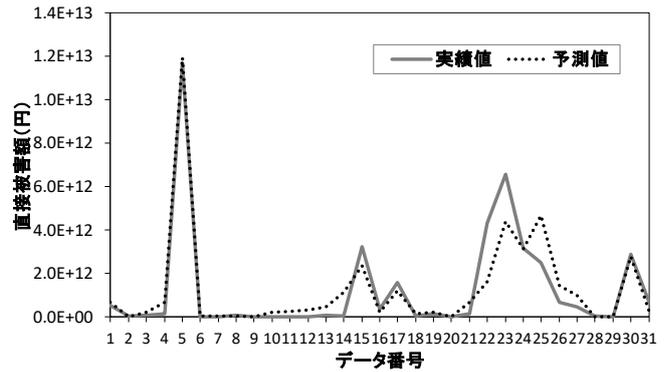


図4 式2のパフォーマンス

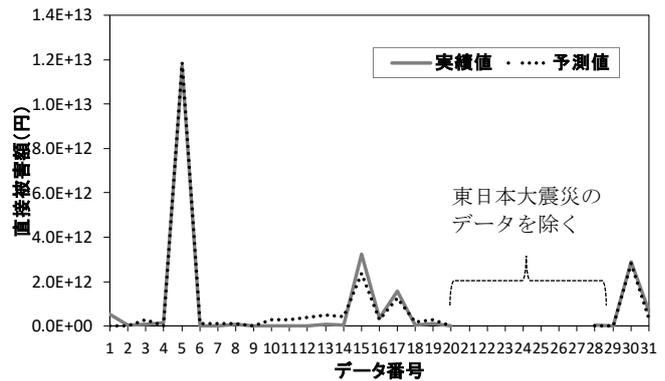


図5 式3のパフォーマンス

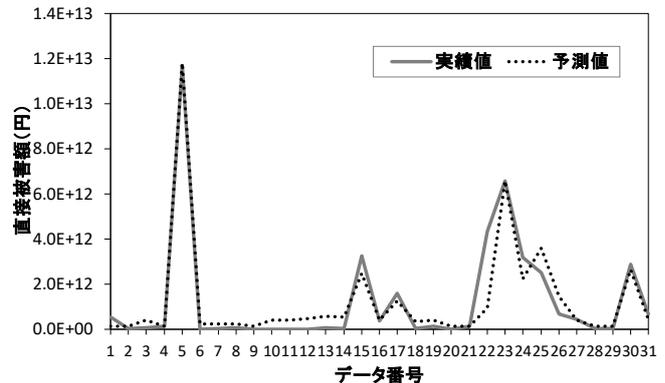


図6 式5のパフォーマンス

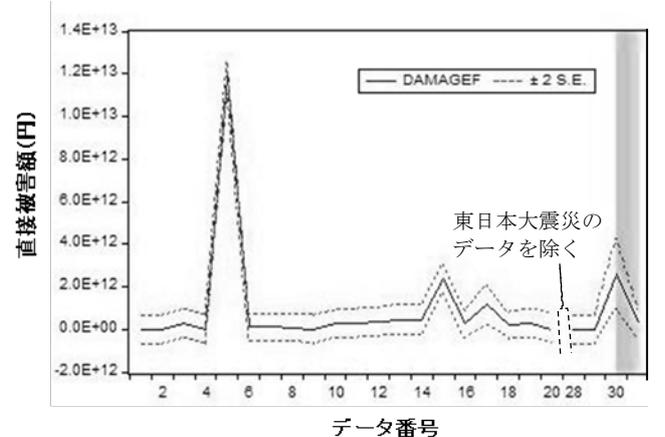


図7 熊本地震における区間予測

4. リアルタイム推計の検討

(1) リアルタイム推計の手順

次に、ここで提案したモデルをどのように使用して地震発生時に被害額推計を行うかを説明する。推計の手順は、図 8 に示されている。防災科研の計測震度分布から各地域における最大震度情報をモデルに投入して、都道府県域における推計値が即時的に算定できる¹³⁾。

都道府県域の直接被害額の推計値が出れば、次に県域での被害額分布を250mメッシュで表示することを目的とする。そのための手順が、図 9 に示されている。基盤地図情報に公開されている建築物面積の250mごとのメッシュを用いて被害額を単位建築物面積あたりに按分し、県域での直接被害額のメッシュ分布を求めて地図表示する。

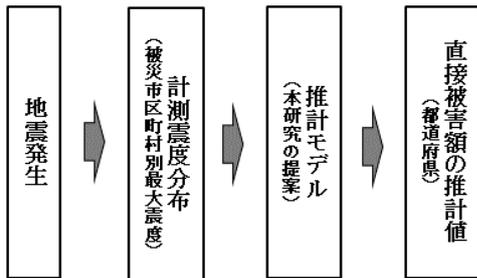


図 8 被害額の推定フロー

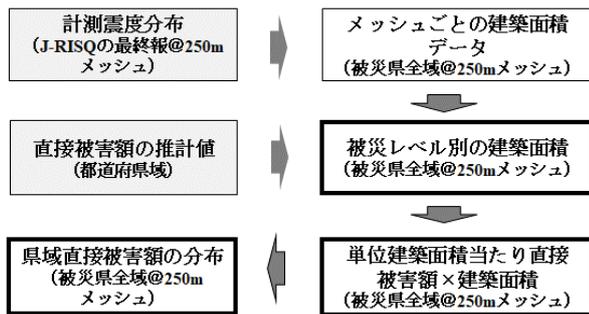


図 9 按分フロー

(2) 地震発生トリガーの自動取得

地震の発生を知らせる仕組みとして気象庁が発表する緊急地震速報等がある。本稿の被害額推計の自動化ではこれを汎用的な電文として受け取ることができる気象庁防災情報 XML を用いて、推計の条件を満たす地震の発生を検知し、市町村別の震度情報を得ている²⁾。この電文の受信を直接被害額推計の開始トリガーとして利用する際の注意点として、緊急地震速報の情報は後から更新されることがある。このため、電文情報に含まれる地震の ID に紐づけて事象ごとの記録を管理し、修正情報の受信時には推計の更新処理を行うよう配慮している。

(3) 建築物面積による 250mメッシュの按分

崔ほか¹³⁾は、直接被害額の推計値をさらに 250mメッシュに按分する技術を提案した。具体的には、民力指数と建築物の面積の関係に注目し、その相関関係から計測震度と建築物面積の分布を用いた按分が可能になった。同様な手法をここでも適用する。すなわち、ストック合計額と建築物面積の相関をチェックして安定的な関係が得られるならば、被災地域の建築物面積と計測震度の分布を用いた按分技法を適用して、被害額のメッシュの分布を求めることができる。

250mメッシュ毎の建築物面積は基盤地図情報の建築物の外周線データから、250mメッシュ別の震度は防災科研のリアルタイム地震被害推定システム（以下、J-RISQ）⁴⁾ から、それぞれ取得することができる。なお、J-RISQの仕様上、震度データの最終報は J-RISQ のトリガーが作動してから約 10 分後に配信されるため、地震発生トリガーの受信から 10 分後に J-RISQ 震度分布データを取得している。また、都道府県境界にまたがるメッシュは都道府県境界で切断し、別のメッシュとして取り扱う。

5. 大阪府北部地震への適用 (リアルタイム推計の例証)

(1) 大阪府北部地震の直接被害額

2018 年 6 月 18 日午前 7 時 58 分頃、大阪府北部（北緯 34.8 度，東経 135.6 度）を震源とする最大震度 6 弱の地震が発生した。震度 6 弱は、大阪市北区，高槻市，枚方市，茨木市，箕面市の 5 市区で観測された。震度 5 強は大阪府下 10 市区町，京都府下 8 市区町で観測されるなど、関西圏で広く体感される地震となった。人口と産業が集積する多くの都市部を抱える地域であるために、直接被害の甚大さも予想された。しかし、交通機関，幹線道路などの大きな被害は発生せず，港湾の被害もほぼ皆無という状態であった。ストック被害は建築物や擁壁などに多く見られた。

以下では、主な被害が集中した大阪府に限って分析する。大阪府が最終的にまとめた報告¹⁴⁾によれば、住家の全壊は 18 棟，半壊 512 棟，一部損壊 55,081 棟，住家以外の建築物被害 817 棟であった。その他，人的被害以外は大きな物的ストック被害の情報は公開されていない。

筆者たちが整備した大阪府下の市区町村の全ストック・データのうち，上記 5 市区のストック合計は 27 兆 1,972 億円（2011 年度価格表示）である。その値を式 3 の ΣS_6 に代入して，ストック被害額 Y の値を求めれば，2,760 億円となる。被災地は日本のなかでも物的ストックが高度に集積している地域である。それにも関わらず，住宅の損壊は多くが一部損壊であり，推計値がこの程度に収まったものと考えられる。

(2) 被害額の地域メッシュへの按分

大阪府下の市町村ごとのストック合計と建築物面積との間に有意な線形関係が認められれば，都道府県の直接被害額を震度階級（震度 7，震度 6）と建築物面積に基づいて，250mメッシュに按分することができる。図 10 は，

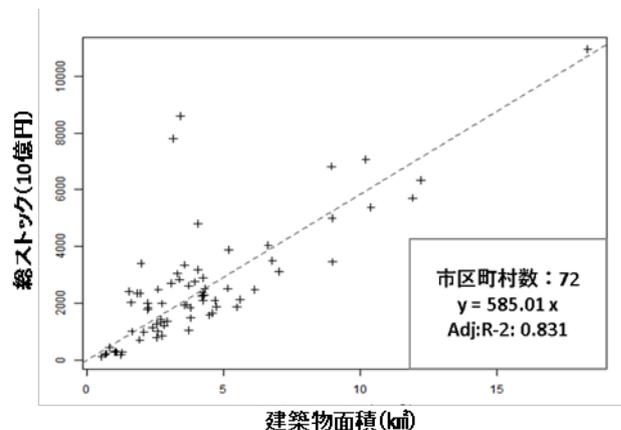


図 10 大阪府下の市区町村ごとのストック合計と建築物面積との相関関係

大阪府下の全 72 市区町村に関して、各ストック合計と建築物面積の相関を調べたものである。決定係数は 0.83 であり、十分な関係があることが確認できる。その上で、防災科研が有する建築物面積の分布及び震度情報を用いた按分を行えば、図 11 のメッシュ表示が得られる。メッシュ単位当たり 2 億円以上の地域が、高槻、枚方、茨木、豊中、箕面、寝屋川各市に加えて大阪市北区において点在している様子が把握できる。

6. むすび

地震による直接経済被害額のリアルタイム推計に関して、市区町村レベルの物的ストック残高と地震動のデータを用いて推計する新しいモデルの開発を示した。社会全体の直接被害額を求めるためには、地震リスクに対して蓄積された物的資産（建築物、公共インフラ、民間資本）が暴露される基本的要素であるので、被災自治体レベルのストック残高を説明要因として取り入れたのが特徴である。1983 年日本海中部地震から 2016 年熊本地震までの公表されているすべての（震度 5 以上の）地震被害額のデータを用いて、予測に用いる推定式を得た。統計的頑健性をさまざまな基準に基づいてチェックした。特に、熊本地震における熊本県の被害額を高い精度で推計できることを示した。さらに、公表値が発表されていないので比較はできないが、大阪府北部地震の被害額は約 2,760 億円であることを示した。震度 6 弱から震度 7 までの地震に対しては、市町村ごとのストック合計と建築物面積との間の有意な線形関係が確認できれば、発生直後にストック被害額およびそのメッシュ上での分布を速報できる体制が整ったと言える。

ただし、津波の影響に関しては、大きな津波を伴ったサンプルの数が少ないことからダミー変数による本研究には限界があり、改善の余地がある。

今後の課題として、次の諸点を考えている。第 1 に、大きな津波被害を伴う場合に対しては、本稿で開発した暫定的モデル（式 4 および 5）以外に、津波ハザードの要因（波高等）を取り入れたモデルを開発することである。例えば、津波の効果を示す被害関数を開発して本研究で用いた回帰式を補正するアプローチが考えられる。第 2 に、防災科研が 1996 年以後の地震に関して整備している地震動のメッシュ地域ごとの分布に関する情報を取り入れる推定式を開発することである。すなわち、震度を 5 弱、5 強、6 弱、6 強、7 に細分するとともに、被害額のメッシュ地域ごとへのさらなる按分が可能になれば、大標本による分析が可能になる。

補注

- (1) 筆者たちが本論文で提案するリアルタイム推定は、阪神淡路大震災の際の国土庁、東日本大震災の際の内閣府（経済財政分析担当）が行った初期推定に相当すると言える。しかし、ここでの提案の方がはるかに迅速になされ、コスト的にもはるかに効率的である。
- (2) 林敏彦は、兵庫県での復興行政に関与した経験を踏まえ、「復興における行政需要を把握するためにも、被災地の復興経済に見通しをつけるためにも、国費の対象となる被害だけでなく、民間被害を含めた被害推定が必要である。・・・経済被害総額を限られたデータに基づいて迅速に推定する方法が必要である・・・」と主張している（文献 5, pp.248-249）。
- (3) Wisner ほか（文献 9）は、ハザードについては「自然の加害力」という概念を使い、「脆弱性」に関しては物的資産の価値だけではなく、ヒト（生活、生業）の側面を重視している。したがって、Wisner ほかの災害リスクの概念を厳密に解釈して適用するためには、災害直後のストック被害だけではなく、時間経過とともに現れるフローの間接被害も考慮しなければならない。筆者たちは間接被害の重要性も十分に認識しているが、本論文は災害直後の直接被害を対象を絞っていることに留意したい。

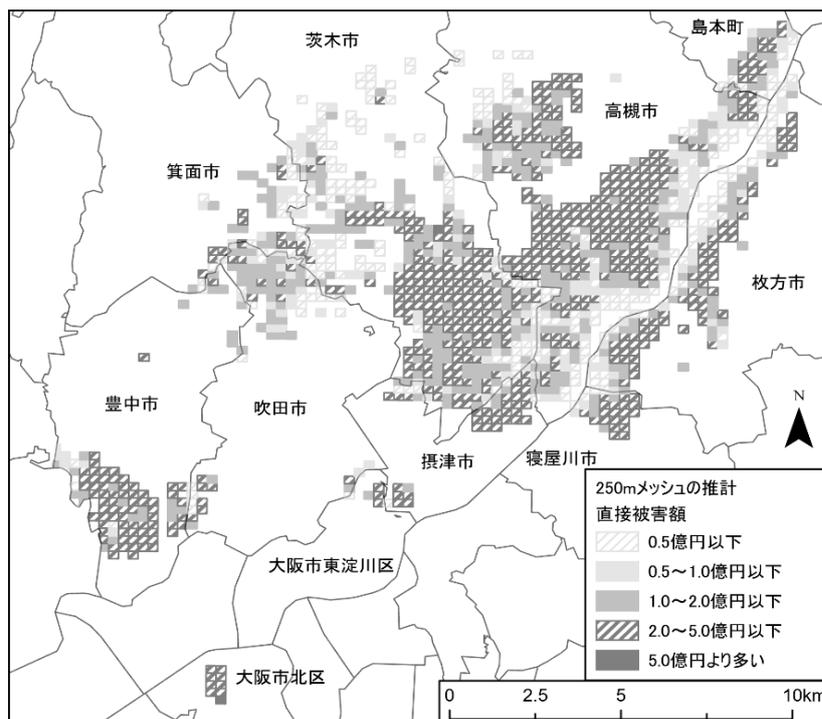


図 11 直接被害額の 250mメッシュ表示

- (4) Noy (文献 10) は、直接被害 (対 GDP 比率) を GDP とハザード要因によって説明する回帰モデルの国際比較をまとめ、どちらの要因も直接的経済被害を大きくすることを示している。しかし、1 国における直接被害額のリアルタイム推定を目的とした内容ではない。
- (5) この点は、斎藤誠が文献 (11) で主張している。

震度 5 弱以上を観測したすべての市町村に関して、同様な線形外挿によって、2016 年度のストック額を推計した。

謝辞

2 名の匿名査読者から適切なコメントをお受けした。記して謝意を表します。

付録：市区町村ストック・データの推計方法について

本研究で用いた市区町村レベルのストック・データを推計する方法について簡単に記す。

ストックは、社会資本ストック、民間企業資本ストック、建築物 (住宅と学校) ストックの 3 種類から構成される。本研究で必要とされるような市区町村レベルの公表されたストック・データは存在しないため、以下のような推計を行った。

1 社会資本ストック

内閣府の「都道府県別経済財政モデル・データベース」にある「社会資本ストック」のデータを利用した。本データは 1980 年から 2014 年まで都道府県別に提供されており、2011 年基準価格となっている。本研究では学校ストックを別に推計しているため、ここでは社会資本ストックから学校施設のストックを除いたデータを作成し、それを、都道府県別社会資本ストック・データとした。次に、市区町村別の社会資本ストックを推計するために、世帯数を按分指標として用いた。世帯数は、総務省「都道府県・市区町村のすがた (社会・人口統計体系)」のデータを用いた。

2 民間企業資本ストック

都道府県別の民間企業資本ストックは、内閣府の「都道府県別経済財政モデル・データベース」にある「民間企業資本ストック」のデータを利用した。本データは 1980 年から 2014 年まで提供されている。本データは 2000 年基準価格で評価されているため、推計を行うにあたり、2011 年基準に変換した。按分比率には、事業所数を用いた。

3 建築物 (住宅と学校) ストック

住宅ストック

「実質住宅ストック額」については、内閣府「固定資産残高に係る参考試算値」にある「実質期末資産残高」の中の「住宅」の値を使用した。このデータは 2005 年基準となっているため、2011 年基準に変換した。この値は全国の数なので、世帯数を用いて都道府県別に按分した。最後に、都道府県別粗住宅ストックに世帯数を用いた按分比率をかけることにより、市区町村別粗住宅ストックを求めた。

学校ストック

都道府県別の学校ストック・データは、内閣府の「都道府県別経済財政モデル・データベース」にある「社会資本ストック」のうち「社会資本ストック (学校施設)」のデータを使用した。按分指標には学校数のデータを採用した。

4 応用例で用いた大阪府の 2018 年度ストック

上記の方法で推計されるストック残高は 2014 年度末までの値である。大阪府の全 72 市区町村に関して、それぞれの 2014 年までの過去 5 年間の期末ストックの値を線形外挿して 2018 年度のストック額を推計した。なお、モデルの推計に用いた熊本地震に関しては、熊本、大分両県の

参考文献

- 1) Cui, Q., Cui, M., Toyoda, T. and Taniguchi H.: Simple Estimation Method for the 2016 Kumamoto Earthquake's Direct Damage Amount, *Journal of Disaster Research*, Vol, 12 No. sp, pp. 656-668, 2017.
- 2) 崔青林・豊田利久・中村洋光・臼田裕一郎・藤原広行: 2016 年大阪北部地震による直接被害額の推計 (速報), 第 37 回日本自然災害学会講演会講演概要集, pp.117-118, 2018.
- 3) Nakamura, H., et al.: Prototype of a Real-Time System for Earthquake Damage Estimation in Japan, *Journal of Disaster Research*, Vol, 8 No.5 pp.981-989, 2013.
- 4) Fujiwara, H., et al.: Development of a Real-Time Damage Estimation System, *Journal of Disaster Research*, Vol.14, No.2, pp.315-332, 2019.
- 5) 林敏彦: 大災害の経済学, PHP 研究所, 2011.
- 6) Okuyama, Y.: Economic Modeling for Disaster Research, *Economic Systems Research*, Vo.19, No.2, pp.115-124, 2007.
- 7) 谷口仁士・鐘ヶ江秀彦: 地震災害地域経済に及ぼす経済的影響, JOOSSA2000, 論文集, 2000.
- 8) 朴ジョンヨン・崔青林・谷口仁士: 過去の地震・津波の経験に基づいた被災地経済復興計画立案の分析方法に関する研究: 地域学研究, 第 43 巻第 3 号, pp.291-305, 2013.
- 9) Wisner, B., et al.: At Risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters (2nd ed.), Routledge, 2003 [岡田憲夫監訳: 防災学原論, 築地書館, 2010] .
- 10) Noy, I.: The Economic Consequences of Disasters, *Journal of Development Economics*, No.88, pp.221-231, 2009.
- 11) 斎藤誠: 震災と経済, 東洋経済出版社, 2015.
- 12) 堤雅彦ほか: 28 平成 28 年熊本地震の影響試算の推計方法について, 経済財政ディスカッション・ペーパー DP/16-1, 内閣府政策統括官, 2016.
- 13) 崔青林・花島誠人・佐伯琢磨・佐野浩彬・中村洋光・臼田裕一郎: 地震による直接被害額のリアルタイム状況把握技術—2016 年熊本地震をケーススタディーとして, 地域安全学会論文集, No.33, pp.147-156, 2018.
- 14) 大阪府防災危機管理司令部: 大阪府北部を震源とする地震 (平成 30 年 11 月 2 日, 24 : 00 現在) .
<http://www.pref.osaka.lg.jp/attach/33785/00294862/201811021400zentai.pdf>

(原稿受付 2019.8.23)
(登載決定 2020.3.7)