時系列的な建物被害床面積予測とその環境負荷の評価

ー巨大地震被害予測スキームを用いた時系列被害予測とその環境負荷評価への
応用に関する研究 その2ーEVOLUTIONAL PREDICTION OF DAMAGED BUILDING AREAS
AND ENVIRONMENTAL LOADSEvolutional damage prediction for a mega-thrust earthquake and its application to
the evaluation of environmental load Part 2

川瀬 博*, 那仁満都拉**

Hiroshi KAWASE and Naranmandora

We hypothesized that the scale of the predicted Nankai Earthquake will increase gradually year by year as the time from the last occurrence in December 1946 lengthens, and then we estimated strong ground motions chronologically from 2009 to 2060 for the western Japan. Next, we input the derived chronological strong motions into nonlinear building models and estimated building damage rates for different structure types and numbers of floors. At the same time, we estimated the areas and existing ratios of different building types in the subject regions chronologically, and we conducted "evolutional building damage predictions" for the period from 2009 to 2060 using these statistical data and the derived chronological damage rates. Finally, based on the calculated damaged building areas, we comprehensively calculated the amount of CO₂ emissions from construction waste and the resources and energy necessary to restore those damaged buildings, making clear the extent of the environmental loads of the predicted Nankai earthquake scenarios in comparison with the CO₂ target values set by the Kyoto Protocol of COP3.

Keywords: *Cronological Strong Motion Prediction, Evolutional Damage Prediction, Environmental Load, Nankai Earthquake*

時間依存地震動予測, 時系列被害予測, 環境負荷, 南海地震

1. はじめに

従来の被害予測の一般的方法^{例えば1)}、すなわち歴史地震の推定規模などから起こり得る地震の規模は一定と仮定し、過去の地震による建物被害率に基づいた経験的被害関数と現在の建物統計データを用いて建物被害を推定する方法に対して、我々は強震動を地震の発生時期に依存するものとして評価し、対象地域における建物については地震が発生する時点での建物棟数やその構成比率などが時系列で変化していくと仮定して建物被害を予測する手法、即ち「時系列地震被害予測スキーム」の確立を試みており、その一部をその1²⁾に報告している。

その1²⁾では、想定南海地震の発生時期が基本的に時間予測モデルに従い2036年前後に発生する確率が高いという前提のもとで、発生時期が変動した場合にはその地震規模は最後の発生年（1946年）からの経過時間に比例して変動するものと仮定して、2009年から2060年までの発生時期依存の強震動と建物被害率を算定した。その結果、想定南海地震がその想定発生時期よりずれて発生するほど、対象地域における強震動レベルは大きく変化し、従って予測建物被害率も大きく変化することを明らかにした。

一方、建物被害の総量を精度よく推定するためには、建物被害率に加え、対象地域における建物棟数、およびその構造種別や建築年代の占有比率などをより現実的にかつ時系列的に推定する必要がある。また、南海地震のような海溝型巨大地震が発生すれば、その震

源域周辺における建物群全体にそれは影響を及ぼし、破壊される構造物に加え、一般生活用品からなる災害廃棄物が広域かつ大量に発生すると考えられ、その廃棄物を処理する際には普段の廃棄物以上のCO₂が短期間に排出されることになる。例えば、兵庫県南部地震で発生した廃棄物量はおよそ2,000万トンで、これは全国の年間廃棄物量約4分の1に相当するものであった³⁾。現在我が国では、京都議定書(COP3)を批准しており、さらに今後温室効果ガスを2020年までに1990年比で30%削減し、2050年までに1990年比で60~80%削減する目標設定を立てることが議論されている⁴⁾。このような長期的な温室効果ガス対策において、海溝型巨大地震の発生に伴って生じる被害がどのぐらい影響するかに関して研究した事例は、文献⁵⁾を除き、殆ど見当たらない。

本研究では、報告その1²⁾の時間依存の強震動予測と建物被害率予測に引き続き、時系列地震被害の総量予測とそれに伴う環境負荷を評価する。本研究のフローチャートを図1に示す。

具体的に、まず、総務省統計局⁶⁾による新築床面積を用いて想定南海地震が2009年から2060年の間に発生した場合に対応する対象建物の床面積を構造種類別、階数別に推定する。

次に、推定した時系列対象建物床面積予測と報告その1²⁾で得られた発生時期を考慮した建物被害率を用いて時間依存の建物被害の総量予測を行なう。ここで、得られた時間依存の建物被害予測結果と一般的に用いられる発生時期に依存しない被害予測結果を比較検

* 京都大学防災研究所 教授・工博

** 飛鳥建設株式会社 副主任研究員・工博

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.
Junior Research Engineer, Research Institute of Technology, Tobishima Corp., Dr. Eng.

討する。

最後に、算定した被害建物面積に基づく建築廃棄物量、およびその建物ストックを再構するのに必要な資源及びエネルギーに伴うCO₂排出量を算定し、想定南海地震が起きた場合に京都議定書に設定したCO₂目標値に比べどのぐらいの環境負荷が発生するかを明らかにする。

図1 本研究のフローチャート

2. 対象建物の時系列床面積の推定

2. 1 対象建物の時系列床面積の推定手法

2004年から2060年までの対象地域における建物床面積を構造別、階数別に推定するに当たっては、総務省統計局⁶⁾による2003年までの木造・非木造新築建物床面積（過去新築建物床面積と呼ぶ）を用いる。一方、その過去新築建物は経過年数によって解体されたりや建て替えられたりされるので、過去新築建物床面積と経年残存率⁷⁾から2003年までの既存建物床面積を構造別、階数別に算定し、さらにそこから2060年までの経年残存床面積を予測する。次に、2004年から2060年までの間の各年の新築建物床面積とその経年残存床面積を計算する。ここでは、2004年以後のある年における新築建物床面積と既存建物床面積の合計面積（その年に現存する建物床面積なので、現存建物床面積と呼ぶ）が総人口に比例すると仮定する。これはすなわち一人当床面積は今後とも一定と仮定したことになる。現実の経年残存率や一人当床面積等は地域によって多少違いがあると推定される。しかし地域別の統計データが限定されていることから、全国の総建物床面積が総人口の変化⁸⁾を反映して同じ率で変化するものと仮定して「建物床面積推定曲線」を作成する。同じく、建物構造比率や階数割合に関しても全国におけるデータから推定し、対象地域における建物床面積の算定に用いる。

2. 2 全国における建物の時系列床面積の推定

1) 1913~2003年までの現存建物面積

総務省による新築床面積の構造分類は木造と非木造しかなく、1962年以前のデータも合計として示されている⁶⁾。本研究では、1958~2005年までの建築統計年報⁹⁾からRC造（SRC造を含む）建物とS造建物の割合を読み取り、1961年以前のRC造建物とS造建物の割合や構造毎の年間新築面積を小松らの構造別統計年間棟数⁷⁾を用いて、比率は同じとして1913年まで推定した。図2にRC造建物とS

造建物の割合を示すが、戦前・戦後によってその比率は大きく変化していることが分かる。1958~2005年までの統計年報によるRC造とS造建物の平均比率は概ね0.5 : 0.5であり、そのうち特に最近の1995年から2005年までの十年間では0.43 : 0.57で非常に安定しているので、2004年以後の比率としてこの値を用いることとした。

過去新築床面積と図3で示している小松らによる残存率⁷⁾を用いて1913~2003年までの建物床面積を構造種別、年代別に算定する。また、建物階数に関しては、木造2階建、RC造では2~13階建、S造では1~5階建を対象とする。その階数ごとの比率は本来時系列的に評価すべきであるが、階数差の少ないS造建物については全体的な結果に及ぼす影響が少ないこと、RC造建物では低層建物の比率が高くその傾向は大きくは変わらないと考え、平成5年建築統計年報⁹⁾から得られた全国の建物階数別延床面積の比率と同じとした。対象とした階数の建物の割合は全建物に対してRC造建物では95%、S造建物では93%を占めている。木造建物ではすべてが3階以下に限られ、その8割程度は2階建のため、階数にかかわらず全木造建物に対して2階建被害予測モデルが適用できるとみなした。

2) 2004~2060年までの現存建物床面積

2004年から2060年までの現存建物床面積は、2003年における既存建物床面積と全国のデータから作成した「建物床面積推定曲線」を用いて推定する。全国人口変化曲線のピークは2004年になるが、全国構造別現存建物面積の時系列変化や統計データ⁹⁾から、木造建物床面積のピークは2006年、非木造建物床面積のピークは2009年になると仮定した。図4に全国における1913~2003年までの現存建物床面積と2004~2060年までの建物床面積推定曲線、および用いた総人口統計値および予測値（右目盛）を重ねて示す。1962~2003年を統計値と表示したのは総務省による統計データから算定したからである。図から2003年までの構造別現存建物床面積は総人口の増大とともに増加してきたことがわかる。現在一人当床面積は既に欧米並み（住宅だけで約41.5m²/人）となっており、それが今後有意に増大していかない限り、人口減少に伴い将来の現存建物床面積は減少する。図4から2060年における建物床面積は2003年の約7割にまで減少すると推測される。その減少傾向の予測近似式を図4中に示しているが、2003年における既存建物面積と近似曲線のピークを繋ぐところでは、急変しないように調整している。

図5は、2003年に現存する建物（現存ストック）が経年残存率⁷⁾に従って廃棄されていくとした場合の床面積の変化を建物構造別に示しており、非木造建物においては旧耐震（1981年以前）と新耐震（1981年以降）別の結果も示している。2003年における現存建物床面積は木造建物が一番多く、RC造建物とS造建物はほぼ同じで、その比率は約4:3:3である。また、現在の寿命曲線が不変なら2030年以降旧耐震建物は殆どなくなり、その時期はRC造建物よりS造建物のほうが早いことが分かる。

図6には2004年以後の現存建物床面積が総人口に比例するとしたときに得られた年間の推定新築床面積と1913~2003年の過去新築床面積を示す。2004年以後では、木造建物の年間新築床面積は一定の傾向で減少し、非木造は2030年までほぼ横ばい、その後ゆっくりと減少していく傾向となっている。また、70年代~90年代における過去新築床面積の変動から、経済状況など人口以外の要素が新築床面積に明確な影響を与えてきたことが示唆されるが、その変動

幅は全新築床面積に比べそれほど大きくはなく、30年程度の平均値で見れば安定している。また、図7には過去約90年間の現存建物床面積と総人口の関係をプロットしたが、どの構造種別に置いても両者には高い相関関係があることがわかる。日本の戦後の経済発展に伴って人口が増加するとともに、対応して一人当床面積が増大してきたので、人口と床面積の関係の傾き（＝一人当床面積）は右に行くほど増大しているが、ここ30年間に相当する1億人以上の範囲ではほぼ一定といえる。よって将来の総建物床面積を総人口変化から推定することは長期的予測としては妥当と思われる。

以上、各年の総建物面積が総人口に比例するとし、経年残存率が構造種別ごとに変わらないとして2004年以降56年間の建築床面積の推移を推定したが、上述のように一人当床面積は家計の経済状況等により今後わずかではあるが変化する可能性は否定できない。またリフォームの促進や長寿命住宅の推進に向けた政策などによって、経年残存率が変化することも考えられる。そこでここではパラメトリック計算を行ってその影響度を把握することとした。

まず総務省による一人当居住室の畳数⁶⁾を参考にして、2003年以前の過去10年間の一人当床面積変化率を算定したところ、年率約1%で増加していることが分かった。よって2003年における一人当現存建物床面積（約58m²）が2023年まで今後20年間継続して年率1%ずつ上昇していき、その後は一定値（約70m²）を維持するものと仮定して推定した現存建物床面積を図8に示した。その結果、現存建物面積は2023年までゆっくりと増加し、2003年における建物面積より全体で10億m²ほど増加しその後は減少すること、2023年と2060年における現存建物床面積を提案モデルと比較すると、16%～17%ほど多くなることが分かった。

また、2004年以後の総建物面積は総人口に比例するとした「建物床面積推定曲線」のままとし、各構造別に図3に示した経年残存率曲線において建物平均寿命、すなわち残存率が50%になるまでの年数が年率1%ずつ上昇する形で比例的に建物寿命が延びると仮定した場合に、必要とする新築面積を計算して図8に書き加えた。平均建物寿命を年間1%延長すると年間必要新築棟数は急激に減少し、木造建物の場合は2040年以後、RC造建物の場合は2055年以後に完全ストック充足状態（新築不要状態）となることがわかる。ただ以下で行う被害床面積推定においては、建築年代については新耐震か旧耐震かの区別だけで、建物の経過年数による耐震性能の劣化は考慮していないので、この建物寿命の延長は、旧耐震建物がなくなる時期を多少遅らせるはするが、被害建物面積推定には大きな影響は与えない。この旧耐震建物の影響については次章で考察する。

2. 3 被害を受ける市町村における被害建物床面積の推定

報告その1²⁾で得られた大破以上の被害を受けるK-NET、KiK-Net、JMA観測点が位置する市町村を単位として、その市町村における建物床面積を算定する。観測点がなかった市町村でも隣接市町村で大破以上の被害が生じるとされた場合には、当該市町村の建物床面積も算定しておく。算定に当たっては、2003年における対象地域の現存建物床面積と前節で全国のデータから作成した「建物床面積推定曲線」を組み合わせ2004-2060年までの建物床面積を算定する（以降では時系列建物床面積と記す）。図9に大破以上の被害を受ける市町村における建物床面積を構造別、建築年代別に示す。どの構造の建物面積も年代が後になるに従って減少する。建築

年代別にみると、2030年代以後になると旧耐震建物は殆どなくなり、新耐震建物のみになる。その傾向は平均寿命の短いS造建物の方がRC造建物より早い。

3. 対象地域における大破建物の床面積の算定

大破建物床面積を推定するのに、報告その1²⁾で得られた地震の発生時期を考慮した大破（倒壊含む）建物被害率に、上記の時系列建物床面積をかけて算定する。さらに比較検討のため、2036年に地震が発生した時の大破建物被害率に時系列建物床面積をかけた場合、および発生時依存の建物被害率に2003年における現存建物床面積をかけた場合についても被害建物床面積を算定し比較する。

図2 RC+SRC造建物とS造建物の床面積の割合の推定

図3 小松らによる残存率曲線⁷⁾

図4 全国現存建物床面積、総人口および床面積推定曲線

図5 2003年に現存する建物が残存率⁷⁾に従って変化した場合の建物床面積の構造変化

図6 全国における新築建物の床面積の変化

図7 約90年間の現存建物床面積と総人口の相関関係

図8 一人当床面積の上昇と建物寿命の延長を考慮した検討結果

ここで、非線形応答解析モデル^{10)・12)}にないS造1・2階建の被害率はS造3～5階建の平均被害率で代用した。また、対象観測点がなかった市町村については、隣接している市町村で大破以上の被害が生じるとされた場合には、当該市町村の建物も隣接している市町村の平均被害率の50%の被害を受けるものと仮定した。このように追加された市町村における建物床面積の総計は、観測点があつて被害が生じるとされた市町村の建物床面積総計の約16%に留まっており、これによる過小評価の可能性は8%ほどあることになるが予測被害総量の大勢には影響がないと判断した。逆に観測点が2点以上ある市町村に関しては、その平均被害率を用いることにした。

3. 1 時間依存被害率と時系列建物床面積による大破建物床面積

図9に2009、2018、2027、2036、2045、2054、2060年の建物大破率およびそれぞれの年に対応する各市町村の現存建物床面積（太棒）から得られた大破建物床面積を構造毎、建築年代別（旧：旧耐震、新：新耐震、全：両者の合計を意味し、以後同じ）にして示す（細棒）。南海地震の発生する時期が遅くなるにつれて、構造別建物床面積は減少するが、大破建物床面積は増大する傾向がある。大破建物床面積の増大する傾向はRC造建物が一番明確で、発生時期

図9 構造種別ごとの時系列建物床面積の推移（左目盛）とそれに時系列建物被害率を考慮して求めた大破建物床面積（右目盛）

図10 被害面積の時系列変化率（2036年基準）

表1 2036年に対するそのほか年の大破建物面積の比率

大破建物床面積／2036年における大破建物床面積							
年代	2009	2018	2027	2036	2045	2054	2060
木造建物	0.69	0.82	0.94	1.00	1.00	1.03	0.97
RC造建物	0.19	0.52	0.69	1.00	1.43	2.35	2.81
S造建物	0.63	0.74	0.86	1.00	1.21	1.15	1.22
全体建物	0.65	0.78	0.90	1.00	1.09	1.12	1.13

図11 地震規模が時間依存する場合(右側)としない場合(左側)による大破建物床面積の地震発生時期による違い

が遅いほど大きくなる。木造建物は2054年、S造建物は2045年あるいは2060年で最大となる。建築年代別では、旧耐震RC造大破建物は地震発生が遅れるほど減少し、2036年以後は殆どなくなって新耐震建物のみになる。S造建物の場合は寿命が短いので新耐震建物のみになる時期はRC造建物よりさらに早い。図10と表1には、南海地震が2036年より前後にずれて発生した場合の大破建物床面積の平均変化率を示した。南海地震が2036年より前に約10年間ず

て発生すると、木造建物・S造建物の大破床面積は約1割少なくなりRC造建物はほぼ3割少なくなる。逆にもし2036年の後約10年間ずれて発生すると、RC造建物の大破床面積は約4割大きくなる。これは、対象建物床面積が減少する影響より発生時期の遅延により強震動レベルが大きくなる影響のほうが大きいためであり、特にRC造の場合には元々の被害率が小さいためと思われる。一方、S造建物の場合は時間による変動幅は10年で1.1～1.2倍程度であり、RC造建物ほど顕著でない。木造の場合は係数が最も小さいがこれは年代別の性能を評価していないためである。この2036年を基準にした構造別大破建物床面積の比率変化は、同じく2036年を基準にした構造別大破建物被害率の比率変化（報告その1の表3²⁾）とは異なっており、建物被害予測には、正確な建物被害率の予測だけではなく、対象とする建物床面積の時間変化を正確に把握することが重要であることが示されている。

3. 2 2036年の強震動と時系列建物面積による被害予測

過去の被害想定によく見られる、地震がいつ発生したとしても地震規模が一定な場合（地震規模不変モデル）の被害予測結果と比較する。ここでは、次の南海地震が2036年の想定規模のままで、その前後の9年間隔の7つの時期で発生したと想定した場合、2036年規模の地震に対する大破被害率と時系列建物床面積を用いて大破建物床面積を算定した。その結果と前節で得られた地震規模が発生時期に依存するとして算定した結果を比較して図11に示す。地震規模が2036年モデルで一定の場合、大破建物の全体床面積は、地震の発生時期が遅くなるに従ってどの構造種別においても減少する傾向となる。発生時期が遅くなるほど地震規模が大きくなると考えた結果と比較すると、実際の地震が2036年より前に発生した場合には当然予測被害は大きめに、後に発生した場合には予測被害は小さめになる。現時点では2036年よりも前に発生することを支持する情報は少ないので、近々に発生しなかった場合、地震規模を漸次増大させて想定しておくことは安全側の想定となるといえる。

3. 3 時間依存被害率と2003年における現存建物床面積による被害予測

過去の被害予測事例では建物ストックについても予測時点での推計値をそのまま用いることが普通であり、その時間変化を考慮してきていない。ここでは人口減少に対応して総建物ストックが減少するものと想定したが、仮想的に、今後著しい経済発展が持続したり、生活の豊かさの追求で一人当床面積が増大したりして、人口減少にもかかわらず現状の建物ストックが維持されるケースを考えることも可能である。そこで対象地域の既存建物床面積は2003年のままで（建物ストック不変モデル）地震規模だけが変化する場合の大破建物床面積を推定した。その結果を図12に示したが、どの構造種別においても、地震が遅く発生するほど両者の差が大きくなる。木造建物に関しては建物ストック総量の減少が寄与していると考えられる。非木造建物に関しては、その差は大半が旧耐震建物による被害である。図3の残存率曲線から明らかなように、1981年以前の建物が50年以上使用される率は低く、従って先々の発生時点までその高い被害発生率を考慮する必要はない。ここにも建物ストックの時代変化を考慮することの意味が明確に示されている。

以上の結果から、時系列手法を用いた地震被害予測結果は、地震規模、あるいは対象建物床面積が一定であると仮定した従来の方法

図12 建物床面積が時系列変化する場合（右側）としない場合（左側）による大破建物床面積の地震発生時期による違い

で得られた地震予測被害結果とは大きく異なることが分かった。もちろん、用いた建物モデルや強震動評価、建物ストックの予測値には不可避な不確実性があり、ここで示した被害建物床面積の予測絶対値にも相当の不確実性が含まれている。例えば図8に示した一人当床面積が増大したと仮定したケースでは総建物ストックは16%ほど大きくなるので被害総量もそれに伴って増大する。ただ、その絶対値もさることながら、その時系列的な予測結果に表れている差異の意味を考えることが重要であり、その発生時期がある程度推定可能な巨大海溝型地震に対する中長期的な地震対策を立案するうえで、ここで示した発生時期による地震規模依存性や建物ストックの時代変化を考慮した時系列的被害予測手法は有効だと言える。

4. 中破・大破建物によるCO₂排出量及び廃棄物量の時系列予測

我々は、想定南海地震の地震規模が2036年相当の場合で、2003年時点での現存建物床面積を用いて、木造、RC造、S造建物が中破した場合はその修復に、大破以上の被害を受けた場合はその構造躯体の解体、運搬及び建替に伴うCO₂環境負荷と廃棄物量を算定している⁵⁾。

本研究では、ここまで計算してきた時間依存予測被害率と時系列建物床面積を用いて環境負荷を評価する。ここでは、どの程度実施されるか不確定である破壊された建物による生成廃棄物のリサイクルや最終処理に必要なCO₂排出量は考慮しない一方、大破以上の被害建物（大破および倒壊建物）は全棟建て替えるものと仮定する。即ち大破建物の解体、廃棄物運搬、建替に伴うCO₂環境負荷を推定し、また兵庫県南部地震による大破以上の被害率と中破被害率の比

図13 想定南海地震で中破以上の被害を受ける建物に伴うCO₂負荷量と廃棄物量の予測分布

図14 県毎におけるCO₂負荷量

図15 対象建物の床面積(左目盛)と想定被害による構造種別環境負荷量と廃棄物量(右目盛)

を用いて中破建物の修復に必要なCO₂環境負荷も考慮する。その中破建物と大破建物の比率、CO₂及び廃棄物の単価（原単位）は参考文献⁵⁾と同じである。

4. 1 2036年における環境負荷の評価

発生確率が高いと思われる2036年発生時における強震動と対象建物床面積を用いて求めた大破建物及び中破建物によるCO₂排出量と

図16 想定南海地震による時系列CO₂量の評価（右目盛）
太棒は現存建物床面積（左目盛）

図17 想定南海地震による時系列廃棄物量の評価（右目盛）
太棒は現存建物床面積（左目盛）

表2 中破・大破建物によるCO₂排出量の比率

中破・大破建物によるCO ₂ 量／(2008-2012年6%削減目標値/5年)*100%							
年代	2009	2018	2027	2036	2045	2054	2060
木造建物	23%	27%	31%	33%	33%	34%	32%
RC造建物	1%	2%	2%	3%	5%	8%	10%
S造建物	18%	21%	25%	29%	35%	33%	35%
全体建物	41%	50%	58%	65%	72%	75%	76%

表3 中破・大破建物による廃棄物量の比率

中破・大破による廃棄物量／1990年の全国産業廃棄物量*100%							
年代	2009	2018	2027	2036	2045	2054	2060
木造建物	2.4%	2.8%	3.2%	3.4%	3.4%	3.5%	3.3%
RC造建物	0.1%	0.4%	0.6%	0.8%	1.2%	1.9%	2.3%
S造建物	1.6%	1.9%	2.2%	2.6%	3.1%	3.0%	3.1%
全体建物	4.1%	5.1%	6.0%	6.8%	7.7%	8.4%	8.8%

廃棄物量の分布を図13に示す。CO₂と廃棄物が比較的に多く排出される地域は建物の被害率分布に対応して震源域から近い沿岸地域に分布している。図14には、中・大破建物のCO₂負荷を県ごとに集計したものを示しており、南海地震が発生した場合には高知・徳島・和歌山の三県で排出される量が全体の80%以上を占めることが分かる。従ってこの三県こそ重点的に被害低減対策を行う必要がある地域であることが指摘される。また、その環境負荷は殆どが大破建物によるものであり、環境対策としては、如何に大破建物数を減少させるかが重要であると言える。図15には構造種別対象建物の総床面積と被害による必要CO₂負荷量・廃棄物量を示したが、木造被災建物の床面積は非木造被災建物より小さいにも関わらず、CO₂負荷量・廃棄物量は非木造建物とほぼ同じであることがわかる。また、非木造建物の環境負荷は、前回の報告⁵⁾と大きく違って殆ど新耐震建物によるものとなることがわかる。これは、3.3で比較したように、前回の推定では建物床面積情報に2003年時点のものをを用いたことにより旧耐震建物の寄与を大きく評価していたため、時系列建物床面積評価の意義を反映した結果であるといえる。

4. 2 時系列モデルによる環境負荷の変化

想定南海地震が2009、2018、2027、2045、2054、2060年に発生したと想定した場合で、発生時期依存の地震規模を用いた場合のCO₂排出量・廃棄物量（細棒）とその計算に用いた構造別建物床面積（太棒）を図16、図17に示す。発生時期が遅くなるほど、RC造建物によるCO₂排出量・廃棄物量は増加し続けるが、木造建物の場合は2054年ごろピークをうち、S造建物の場合は2045年以後同レベルを維持しつづける結果となった。非木造建物の環境負荷ではRC造建物の場合には2036年以降、S造建物の場合には2027年以降になると殆ど旧耐震建物による環境負荷がなくなり、旧耐震建物に対する耐震補強などにより今後経年残存率が大幅に伸びない限り、南海地震による環境負荷の発生は新耐震建物によるものが支配的であると言える。また、2009年から2060年までの環境負荷量を構造別にみると、木造建物とS造建物による量はほぼ同じで、RC造建物による量はそれらと比べると有意に少ないことがわかる。

全建物による環境負荷量は、南海地震の発生時期が遅くなるほど強震動レベルが高くなり、結果被害総量が大きくなるので、当然それを反映して大きくなる傾向がある。その環境負荷量を京都議定書（1997年）に設定した削減年間目標値（目標値/5年）及び1990年の全国産業廃棄物量と比較検討して表2、表3に示す。全体建物によ

るCO₂排出量は年間目標値の41%から76%までという結果になり、環境負荷の影響度の変化が大きいことが分かる。一方、廃棄物量については、1990年の全国産業廃棄物の約4%から9%程度を占める結果となり、2018年の時点で兵庫県南部地震による廃棄物³⁾と同じレベルになる。また南海地震の発生が遅くなるほど木造建物より非木造建物による環境負荷が大きくなる。

以上のことから、長期的な環境負荷評価やそれに対する環境負荷削減計画を立てるには、定常状態では想定していないエネルギー・環境負荷を発生させる巨大地震のリスクをも考慮する必要があることがわかる。日本において今後発生を危惧すべき巨大地震は本研究で対象とした南海地震だけではなく、東南海・東海地震や首都圏直下地震など複数あることを忘れてはならないだろう。

5. まとめ

本研究では、南海地震を例として、地震規模と建物床面積が時間的に変化する新たに提案した時間依存被害予測モデルと地震規模が変化せず建物床面積だけが時系列で変化する地震規模不変モデル、地震規模の変化は考慮するが建物床面積が変化しない建物ストック不変モデルによる大破建物床面積を評価して、それらの差を明らかにした。また時系列被害予測モデルの総被害床面積を用いて建物被害に伴う環境負荷の時系列予測を行った。

前報その1においては、非線形建物被害予測モデルに、2009～2060年までのある時期に発生するとして規模の発生時期依存性を考慮した強震動を入力して被害予測を行った結果、高知、徳島、和歌山など震源域を中心に、沿岸地域と川沿いの沖積地盤地域などの比較的地盤が軟らかいところで大破以上の建物被害が生じる可能性があることを明らかにした。またS造建物、木造建物、RC造建物の順に被害率が小さくなること、いずれの構造種別でも地震規模の増大によって建物被害率が増大するが、特に当初の被害率が低いRC造建物の増大率が顕著であることを報告した。

そこで本研究ではまず、全国人口予測曲線とその時点での総建物床面積が比例する、すなわち一人当床面積は一定と仮定して「建物床面積推定曲線」を作成し、その「建物床面積推定曲線」と2003年における各市町村の既存建物床面積から2004年から2060年までの対象建物の時系列床面積を推定した。その際設定した仮定の変動が予測結果に与える変動量を求め、想定できる範囲内のパラメータ変動では結果の解釈に影響するような大きな違いは生じないことを確認した。なお今後平均寿命が年率1%で延長していった場合にはS造以外は2050年以前に新築市場が消滅するという予測となった。

次に、地震発生時期を考慮した建物被害率と、ここで得られた時系列建物床面積から大破建物床面積を時間依存で推定したところ、大破建物床面積は地震発生時期によって大きく変化することが分かった。南海地震の発生する時期が遅くなるほど大破床面積は大きくなり、2045年まではほぼ直線的に増大するが、2045年前後からは頭打ち傾向となった。これは規模の増大に対して被害が増大する傾向と人口減に伴って被災対象建物数が減少する傾向が相殺するからである。しかしRC造建物の場合は、その高い耐震性により早い発生時期の場合は大破床面積が非常に少ないが、地震規模の増大に伴い被害発生地点が増え、結果として発生時期が遅ければ遅いほど大きくなった。

比較検討のために、地震規模が2036年のままであり、建物床面積だけが時系列変化する場合（地震規模不変モデル）の予測結果を求め、時間依存の大破建物床面積と比較したところ、2036年より前に地震が発生した場合には、どの構造種別の建物においても被害予測結果は安全側に（被害を大きめに）評価することになること、一方2036年以後に発生した場合にはそれとは逆に被害を少なめに評価してしまうことがわかった。従ってかなり先の将来の地震を予測するに当たっては規模の発生時期依存性を考慮に入れる方が安全側となる。

また、建物床面積が2003年のままとして（建物ストック不変モデル）大破建物床面積を計算して、同じく時間依存の大破建物床面積と比較したところ、地震が遅く発生するほど両者の差が大きくなることがわかった。非木造建物に関しては両者の差は殆どその旧耐震建物によるもので、現時点での一人当床面積や建物寿命が今後も大きく変わらないのであれば現存ストック量を用いた予測はかなり被害を過大評価すると考えられる。特に実際に居住に供する建物総量は今後の人口増に伴って減少することはほぼ確実であり、建物ストックの時系列予測を被害予測に組み込むことの重要性が指摘できる。

最後に、予測した被害建物床面積に基づいて、中破以上の被災建物によるCO₂負荷量を時系列的に予測した。想定南海地震が2009年から2060年の間に発生したとした場合、全建物によるCO₂排出量は京都議定書に設定した年間当目標値の41%から76%を占める結果になり、廃棄物量は1990年の全国産業廃棄物の約4%から約9%を占める結果になった。巨大地震による環境負荷の影響は無視するにはかなり大きく、本研究で実施した地震規模と建物ストックの時間依存性を考慮した時系列的な評価はその長期的な対策立案に適しているといえる。ただ言うまでもないことであるが、被害低減対策自体もCO₂排出量を増大させるわけで、それと被害に伴うCO₂排出量との比較考量の上で最適な対策を考えていく必要があり、本研究の結果から直ちに被害低減に向けた積極的施策が導かれるわけではない。

今回の結果は、前回の地震からの経過時間の影響を平均すべり量に反映させた発生時期依存の予測強震動と人口変動に対応して変動すると仮定した建物床面積から総合的に評価した結果であり、その推定結果には相当量の不確定性が含まれているのは確かであるが、長期的な地震被害予測は当然その時期が確定していない未来の地震発生時点における予測をするべきものであり、たとえ困難ではあってもその時点で最もありそうな将来予測に基づいた被害想定を考えるべきである。今回、旧耐震建物に対する対策は南海地震対応として考えた場合には意味が薄いことを明らかにするなど、従来は考慮されていなかった時間依存性を考慮した被害予測手法がリアリティ

に立脚した対策を考えるためには有効であることを示すことができた。

今後は強震動評価精度のさらなる向上、木造建物に対する年代別被害予測モデルの導入、仮定パラメーターの時代変化を考慮した建物床面積の予測精度の向上、旧耐震建物の耐震補強などによる建物寿命延伸効果の評価、および地域係数の政策的変更の予測被害総量に与える影響などについて、詳細に検討していきたい。また東南海・東海連動型地震も南海地震に先だって発生することが当然予想されるので、それについても同様の時系列予測を実施し、2地震合わせた被害総量とその環境負荷を予測して効果的被害軽減施策を検討したいと考えている。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（若手研究(B), No.19760391, 研究代表者：包那仁満都拉, 研究期間：平成19年～平成20年および基盤研究（A）No.21241044, 研究代表者：川瀬博, 研究期間：平成21年～平成24年）により実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 内閣府中央防災会議東南海・南海地震等に関する専門調査会：東南海・南海地震に係る被害想定手法について、平成15年4月17日、<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/10/index.html> (参照 2009-07-31).
- 2) 那仁満都拉, 川瀬 博：時系列的な建物被害率評価- 巨大地震被害予測スキームを用いた時系列被害予測とその環境負荷評価への応用に関する研究その1-, 日本建築学会構造系論文集, 第636号, pp.253-258, 2009.2.
- 3) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：震災廃棄物の処理, 阪神・淡路大震災調査報告共通編-3, pp.470-488, 1999.
- 4) 環境省地球環境局：EU首脳会議（欧州理事会）における気候変動に関する合意事項, 平成19年3月、<http://www.env.go.jp/council/32tokubetsu21c/y320-03/ref03.pdf> (参照 2009-07-31).
- 5) 包那仁満都拉, 川瀬 博：想定南海地震の予測被害率から推定される環境負荷とそれに対する耐震施策の与える影響, 日本建築学会総合論文誌, No.6, pp.87-92, 2008.2.
- 6) 総務省統計局：平成15年住宅・土地統計調査, 平成17年3月、<http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2003/index.htm> (参照 2009-07-31).
- 7) 小松幸夫, 加藤裕久, 吉田倬郎, 野城智也：わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告, 日本建築学会計画系論文報告集, 第439号, pp.101-110, 1992.9.
- 8) 総務省統計局：国勢調査報告, 2005.
- 9) 建設省建設経済局調査情報課：建築統計年報, 昭和13～平成17年度計.
- 10) 長戸健一郎, 川瀬博：建物被害データと再現強震動によるRC造構造物群の被害予測モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第544号, pp.31-37, 2001.6.
- 11) 長戸健一郎, 川瀬博：鉄骨造建物群の被害予測モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集, 第559号, pp.101-106, 2002.9.
- 12) 長戸健一郎, 川瀬博：観測被害統計と非線形応答解析に基づく木造建物被害予測モデルの構築と観測強震動への適用, 第11回日本地震工学シンポジウム, 2002.11.

(2009年2月10日原稿受理, 2009年8月19日採用決定)