

津波による建物被害リスクカーブの GISを用いた推定

唐津 佑一朗¹・森田 紘圭²・福本 雅之³・杉戸 信彦⁴
橘 竜瞳⁵・柴原 尚希²・加藤 博和²・林 良嗣⁶

¹正会員 日本たばこ産業株式会社製造部九州工場

E-mail: karatsu.yuichiro@gmail.com

²正会員 名古屋大学大学院環境学研究科

³正会員 公益財団法人豊田都市交通研究所

⁴非会員 法政大学人間環境学部

⁵学生会員 名古屋大学大学院環境学研究科

⁶フェロー 名古屋大学大学院環境学研究科

今後の国土計画の検討において、極めてまれにしか発生しないものの、ひとたび生じると甚大な被害をもたらす低頻度メガリスクを考慮することが求められている。そこで本研究では、津波リスクの評価に確率論的手法を適用する。まず、津波の損失規模（建物被害額）と発生確率との関係を示す津波リスクカーブをGISを用いて作成し、これを用いて対応策による損失額低減を検討する。このために、南海トラフ沖地震を想定し、静岡県を対象として小地区別に津波規模に応じた建物被害額を推計した上で、リスクカーブを作成した。その結果、沿岸部に人工建物が集中している地域で巨額の被害が生じる確率が非常に高くなることが示された。また、自治体や小地区の範囲での津波リスクの定量把握が可能となった。

Key Words : risk curve, tsunami, Nankai Trough Quake, GIS

1. はじめに

東日本大震災による地震、それに伴う津波により、我が国は甚大な被害を受けた。10m以上の高さの堤防が破壊され、原発事故も起きるなど、地震学者でさえ予想していないマグニチュード9.0の地震による被害は、これまでの国土計画における「安全神話」を根底から覆した。これらを契機に、我が国ではいわゆる「想定外」であった低頻度メガリスク災害に対応するための議論が活発に行われている。何が「想定外」であり、なぜ「想定外」だったのが再検証され、これまで考えられてきた「想定」を見直す考えが多くのメディアや専門家によって取り上げられてきた。その1つとして、2012年8月に中央防災会議より公表された報告書¹⁾では、前回の報告書²⁾を大幅に見直し、マグニチュード9.1クラスの地震が発生した場合の被害規模を推計した結果、建物被害、死者数は従来の推計の数倍になるとされた。これは現時点で最大規模の想定とされている。

また、堤防などのハード整備を進めるための体制や、住民・自治体との合意形成手法といった、具体的な施策

導入の観点からも、「防災」だけではなく「減災」を取り入れた施策を検討する必要性が提言されてきている。そのためには、地域や自治体での適切な災害リスク管理を行うことが重要である。

しかし、具体的な施策の検討や、住民・自治体との合意形成は、現時点での最大規模の被害想定のみでは十分になしえないと考えられる。その理由は、「いつ」「どれ程の規模で」発生するのか分からない災害に対して、どのレベルまでは「防災」し「減災」するのかを決定しなければならず、さらに具体的な施策を実施する場合にも、発生しうる様々な災害を想定し、発生確率とその被害を相対的に検討する必要があるからである。すなわち、多様な想定を行い「リスク」を定量的に把握し、それを基にハード整備のみならず様々な施策の組み合わせによる被害低減を考慮することが必要である。

リスクの定量把握には、一般に確率論的手法が用いられる。地震リスクの定量評価は多数行われており、災害保険額の決定手法として確立されている³⁾。しかし津波については、ハザードの定量評価が先行しており⁴⁾、リスク事象の定量把握を行っている研究は少ない。その理

由として、津波が地震の規模に依存する二次的なリスク事象であり、また発生頻度や規模を予測することが困難なことが考えられる。また、津波防災インフラの有無や都市の規模によって被害が異なることも、リスク事象の定量把握を困難としている。

本研究では、津波被害事象を独立として考慮し、シミュレーションを用いて推計した津波浸水による建物被害額を損失額とすることで、確率論的手法を津波被害に適用し、その損失を定量的に示すことを目的とする。さらに、被害対策を行った場合の建物被害額低減効果について示す。

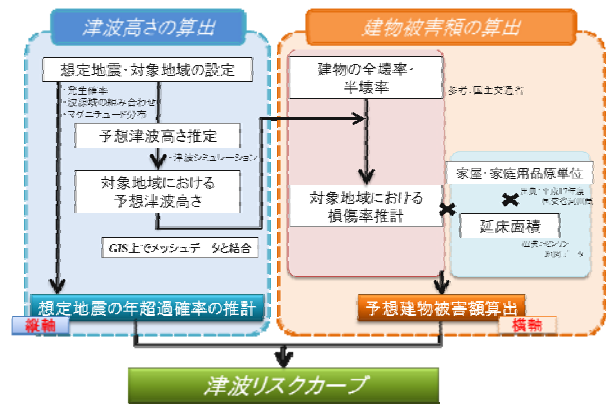


図-1 津波リスクカーブ作成フロー

2. 津波リスクの定量化

本研究では、南海トラフ沖地震によって生じる津波を想定し、静岡県全域を対象とした津波浸水高さを推計し、リスクカーブを作成する。

(1) リスクカーブ作成の考え方

リスクカーブを津波被害へ適用するためのフローを図-1に示す。リスクカーブとは縦軸に災害の年超過確率、横軸に予想損失額をとる。本研究では災害を津波被害に限定するため、津波を発生させる地震を複数想定し、それぞれの発生についての年超過確率を推計する。さらに、対象地域を設定し、想定地震による予想津波浸水高さをGIS上で結合させることで、予想建物被害額を推計する。その上で、損失額を降順で並べ替え、想定津波ごとの発生の累積年超過確率を算出し、リスクカーブ作成に使用する。

(2) 地震発生確率の算出・想定津波発生の年超過確率の推計

想定地震に対しては、a)地震発生確率、b)津波発生域の組み合わせ、c)マグニチュードのばらつき、の3点において確率を計算する。この際の場合分けは図-2に示すロジックツリーで表現できる。各項目の計算方法について説明する。

a) 地震発生確率の算出

本研究では、地震ハザードステーション(J-SHIS)により公開されている「確率論的地震予測地図」⁹⁾より、BPT (Brownian Passage Time) 分布で算出した震源域別発生確率を用いる。これにより年超過確率を算出するために式(1)を用いる。

$$P_i = 1 - \sqrt[n]{1 - p_n} \quad (1)$$

ここで、 P_i : 震源 i の年超過確率

p_n : 震源域の n 年発生確率

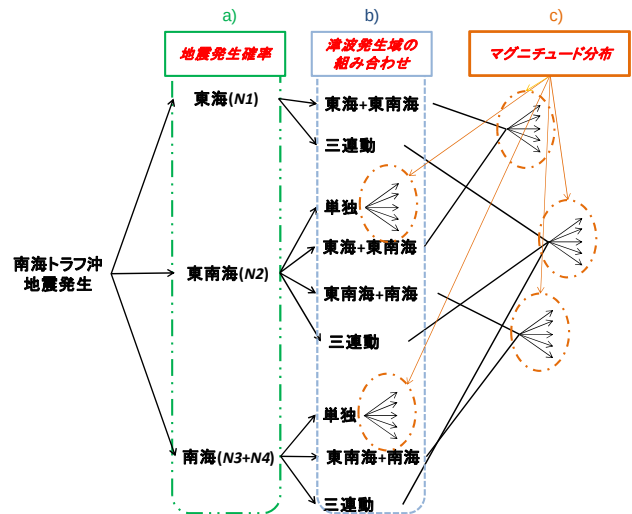


図-2 南海トラフ沖地震を想定したロジックツリー

b) 津波発生域の組み合わせ設定

想定地震発生の年超過確率 P_i を地震発生域の組み合わせごとに分配する計算を行う。ここで地震発生域の組み合わせとは、その地震が単独か連動かを考慮することを意味する。単独発生の場合の確率 P_{Ti} は式(2)、連動発生の場合の確率 P_{Ri} は式(3)で示される。

$$P_{Ti} = P_i \frac{t_i}{A_i} \quad (2)$$

$$P_{Ri} = P_i \frac{r_i}{A_i} + P_{i\pm 1} \frac{r_{i\pm 1}}{A_{i\pm 1}} \quad (3)$$

ここで、 t_i : 震源 i での過去の単独地震発生回数

A_i : 震源 i が起因する過去の地震発生総数

r_i : 震源 i での過去の連動地震発生回数

連動地震の考え方として、例えば、震源 i での地震が過去に5回あり、うち3回が単独での地震とされている場合、震源 i 単独の地震確率 $P_i = P_i \times 3/5$ となる。また、5回のうち2回が隣接する震源域 $i\pm 1$ との連動地震であるとする、震源 i が連動地震である確率 $P_{Li(i\pm 1)} = P_i \times 2/5$ となる。この時、震源域 $i\pm 1$ での地震の過去5回中

2 回が連動地震であれば，連動地震 $i \sim i \pm 1$ の確率 $P_{i(i \sim i \pm 1)} = P_i \times 2/5 + P_{i \pm 1} \times 2/5$ と計算される。

c) マグニチュードのばらつきの考慮

前述した「確率論的地震動予測地図」では固有地震のマグニチュードを1つの値に限定しているが、現実には1つの値に限定されないと考えられることや、津波に対してマグニチュードの影響が大きいことから、マグニチュード分布幅を考える必要がある。「確率論的津波ハザード解析の方法」では、マグニチュード分布幅を0.3と0.5に設定している。本研究においては、想定津波をより詳細に区分するため、分布幅を0.5と設定する。分布形は一様分布とした。

以上の3項目を踏まえ、南海トラフ沖地震を想定すると、図-3 に示す確率分布及びマグニチュード分布となる。南海トラフ地震が発生した場合に考慮する組み合わせとして、それぞれの震源域での単独発生、東海+東南海の連動、東南海+南海の連動、三連動が考えられる。文献や調査によれば、東海地震は過去に単独発生したケースがなく、全て連動して発生している地震とされている。そのため、津波発生域の組み合わせは東海地震の単独発生を除く計5ケースとした。マグニチュード(M_w)分布幅の中央値は、歴史上の最大 M_w を参考に設定した。なお、三連動による最大 M_w は、内閣府で想定されている最大のものであるが、これは、南海地震の断層のさらに西側の断層が連動した四連動地震の場合を想定している。この地震は、1000年に1度起こるとされているため、確率配分を0.1%に固定し、残りを一様分布で配分した。

(3) 予想建物被害額の算出方法

リスクカーブの横軸となる被害額の算出方法について説明する。本研究では建物被害のみを対象とする。算出フローを図-4に示す。

予想建物被害額 PL は、対象地域の損傷率と建物価格の積として式(4)で示される。本研究では、半壊は全壊の7割の被害額と仮定する。

$$PL=D \cdot B \quad (4)$$

ここで、 D : 建物の損壊率

B : 建物価格

まず、(2)節で得られた想定地震による津波浸水高さをシミュレーションにより推計する。シミュレーションには、津波シミュレーションシステム「TSUNAMI-K(2011)」を使用した⁷⁾。次に、シミュレーションにより得られた対象地域の津波浸水高さをGIS上で結合させ、建物の損傷度を推計する。このときに重要なのは、津波高さの高低によって建物が被害を受ける程度を算定することである。本研究では、国土交通省による建物構造別

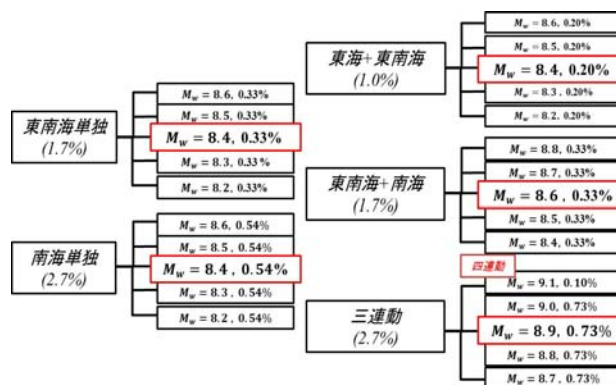


図-3 想定地震の年超過確率及びマグニチュード分布

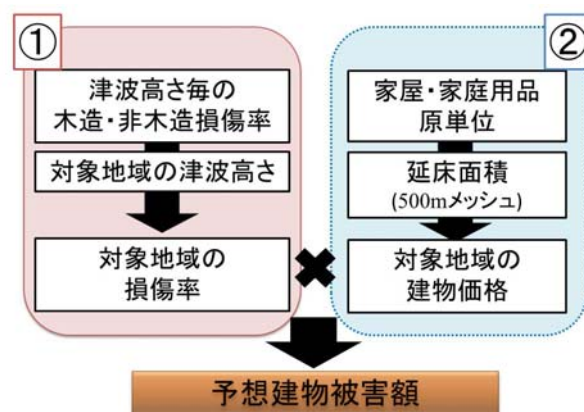


図-4 予想建物被害額算出フロー

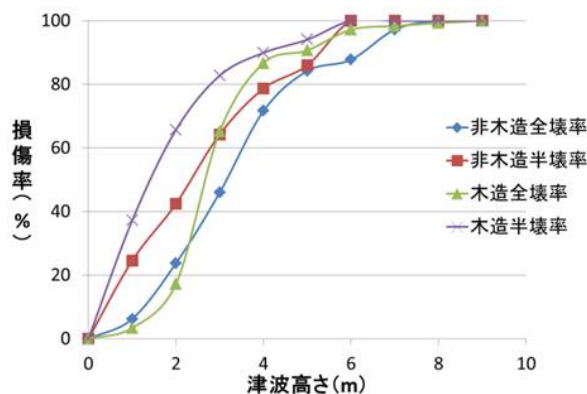


図-5 全壊率・半壊率と津波高さの関係

バックデータ⁹⁾に基づき、木造・非木造建物の全壊率・半壊率 D を算出し、図-5に示すように損傷度を算定した。なお、本研究で用いたシミュレーションでは、現存する堤防などのハードを考慮していない。また、取り扱う建物は簡略化のためすべて2階建てであると仮定している。次に、対象地域の建物価格 B を算出する。対象地域の建物価格は、平成17年度国土交通省河川局による都道府県別家屋・家庭用品原単位⁹⁾を使用し、メッシュ内の延床面積との積を各メッシュごとの建物価格とする。

3. 対象地域の建物被害額及びリスクカーブ推計

(1) 対象地域

本研究では、静岡県を対象として津波リスクカーブを作成する。静岡県は県沿岸部全域で主として東海・東南海地震による津波の溯上が予想されている。また、県西部に位置する浜松市は標高が低いいため、広域にわたる被害が予想される。さらに県中央部に位置する静岡市は、市街地が沿岸部に広がっているため、狭い浸水域であっても甚大な被害発生が予想される。図-6 は、津波シミュレーションにより推定した四連動 $M_w=9.1$ における静岡県西部から中央部にかけての津波浸水高さである。本研究では、静岡県全体でのリスクカーブを作成するとともに、次章において浜松市、静岡市の2市においても個別にリスクカーブを作成する。

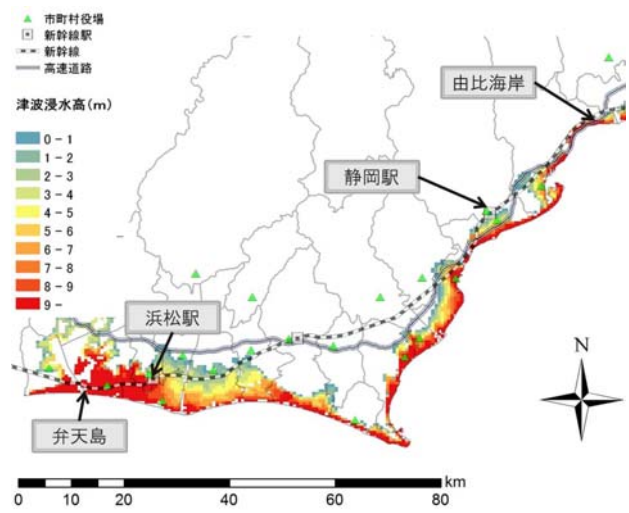


図-6 四連動 $M_w=9.1$ における津波浸水高さ

(2) 静岡県全域での被害額算出

津波に伴う静岡県全域での予想建物被害額を式(4)を用いて算出する。建物の木造・非木造の別は平成20年住宅・土地統計調査¹⁰⁾の値を使用して比率を算出し、各メッシュ内の建物に対してこの比率を割り当てている。

算出結果を表-1に示す。三連動（四連動）地震が他の地震と比較してかなり大きな被害額となった。これは、津波が内陸へ広範囲にわたって遡上することが原因である。一方で、 M_w は同値であっても、波源域と対象地域との位置関係により被害額が異なることが分かり、波源域との距離が大きいほど被害額は小さくなっている。これは、東南海+南海地震による被害額に比べ M_w が小さい東海+東南海地震による被害額の方が大きくなった推計結果にも共通の原因であると考えられる。

表-1 県全域の予想建物被害額

県全域(カッコ内は M_w)					
想定 M_w 中央値からの大小	三連動	東海+東南海	東南海+南海	東南海	南海
+0.2	146,870(9.1)	23,428(8.6)	7,319(8.8)	3,441(8.6)	1,866(8.6)
+0.1	123,000(9.0)	11,253(8.5)	4,574(8.7)	1,332(8.5)	445(8.5)
0	101,820(8.9)	4,587(8.4)	2,169(8.6)	783(8.4)	278(8.4)
-0.1	58,484(8.8)	2,245(8.3)	656(8.5)	244(8.3)	107(8.3)
-0.2	18,444(8.7)	838(8.2)	352(8.4)	52(8.2)	69(8.2)

単位：億円

(3) 県全域でのリスクカーブ作成結果

算出した想定地震の予想建物被害額及び年超過確率を用いて、津波リスクカーブを作成した。結果を図-7に示す。本リスクカーブを用いることによって、建物被害額発生の確率及び年間の津波の発生確率で予想される建物被害額を定量的に把握することが可能である。例えば、予想建物被害額が約14.7兆円になる確率は0.1%であるが、約12.3兆円になる確率は約1%であるように、被害額と損失発生の確率とのギャップが定量的に把握できる。

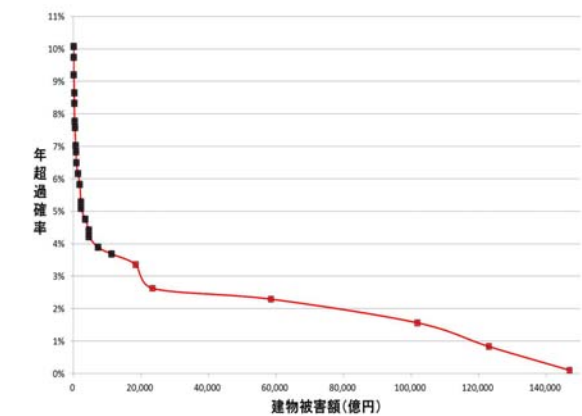


図-7 県全域の津波リスクカーブ

4. 被害低減施策による効果の推計結果

(1) 浜松市、静岡市を対象とした被害額分布

浜松市、静岡市の2市について、建物被害額の地図上での分布を図-8と図-9に示す。図-8で示した四連動 $M_w=9.1$ での被害額分布をみると、2市いずれも広範囲にわた

って被害を受けることが分かる。特に、浜松市ではDIDの多くが被害を受けるため、被害額も大きくなることが分かる。図-9の東海+東南海地震 $M_w=8.6$ と比較すると、被害範囲がDID内に達する度合いが、浜松市の予想建物被害額に大きく影響していることが確認できる。

また、静岡市では、DIDの範囲は浜松市と比べて小さいが、沿岸部付近にDIDが広がっており、被害額が大きくなる。特に、三連動 $M_w=9.1$ による津波浸水域はDID

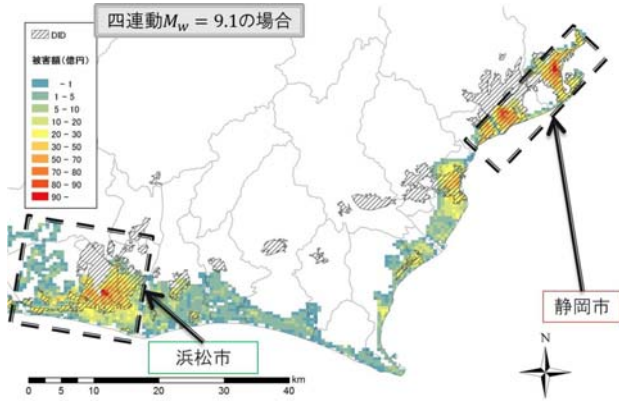
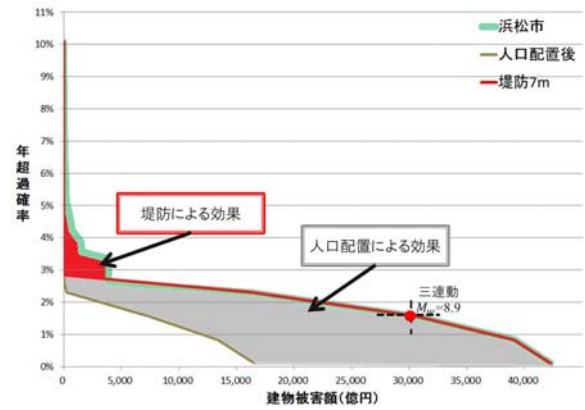
図-8 四連動 $M_w=9.1$ における被害額分布

図-10 浜松市におけるリスクカーブ

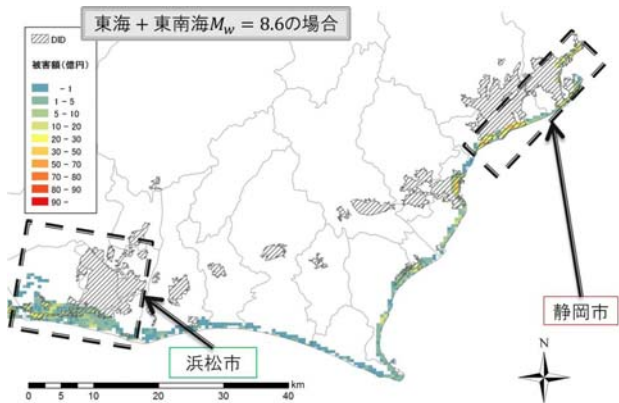
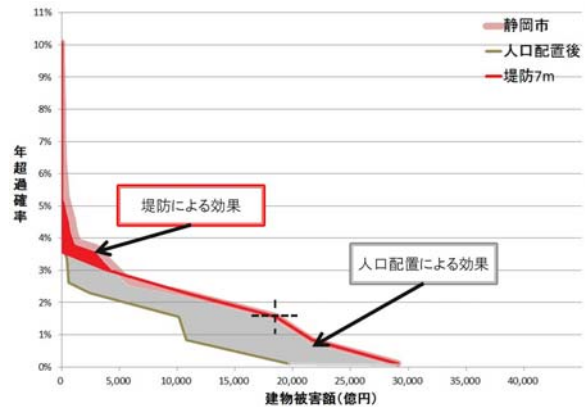
図-9 東海東南海 $M_w=8.6$ における被害分布

図-11 静岡市におけるリスクカーブ

のほぼ全てに及んでおり、都市機能が長期にわたって停止するなどの問題が懸念される。

(2) 被害低減策による効果の推計

津波リスク低減策として以下の2つのシナリオを設定し、浜松市、静岡市についてそれぞれ被害低減効果をリスクカーブ上に示す。

第1の施策として、津波堤防の整備を考慮する。2市において7mまでの津波を防御可能な堤防を整備した際の効果を検証する。

第2の施策として、危険地域からの人口移転を考慮する。木造・非木造ともに建物の100%が全壊する津波浸水高7m以上の範囲内には人が住まないことを仮定する。対象とする地震は、三連動 $M_w=8.9$ の場合とした。以上の2つのシナリオによる効果を図-10、図-11に示す。

浜松市における被害低減策の効果は、人口移転による建物被害額の低減が顕著に見てとれる。これは、三連動 $M_w=8.9$ における7m以上の津波浸水範囲が広範囲にわたっているためである。人口移転を行うことでほぼ津波被害を免れることが可能となるが、この施策を全面的に導入することは現実的とは言えないため、堤防による被害

低減効果を踏まえた上で、実際の施策を検討する必要がある。本研究で作成したリスクカーブはこのような議論を行う際の1つの有効な指標となり得る。

静岡市における被害低減策の効果は、浜松市と比べると低減額は小さいが、低減策実施後に建物被害額1兆円前後における確率が大きく変化しているという特徴がある。本研究で作成したリスクカーブを用いて、このような確率の不連続点を明確化することで、着目すべき災害の規模を明確にし、規模別に講じる施策を検討することが可能になる。

5. おわりに

本研究は、東日本大震災を契機として検討のニーズが増している津波のような低頻度メガリスク災害について、確率論的手法を用いて津波リスクカーブを作成する手法を開発した。さらに南海トラフ沖地震を想定した静岡県での津波被害を推計し、静岡県全域、浜松市、静岡市、での予想建物被害額の推計及びリスクカーブを作成した。また、被害費用低減策を講じた場合の浜松市及び静岡市

におけるリスク低減効果を検討した。

本研究の成果としては以下の2点が挙げられる。

- 1) 浜松市は三連動（四連動）地震により低地である市街地周辺に被害が及ぶことがわかり、その脆弱性が明確になった。
- 2) 静岡市は沿岸部に都市機能が集約されているため、三連動（四連動）地震に比べ小さな地震に対しても都市機能への被害が発生する可能性があることが分かった。

本研究の課題としては以下の3点が挙げられる。

- 1) 直接被害の項目として建物のみを考慮しているが、インフラや産業基盤などの他の被害も考慮することで、より包括的に被害規模を示すことができる。
- 2) 現存する防災インフラを全く考慮していないため、現時点で防御可能な想定地震が存在するにもかかわらず、過大な被害予測となっていることが考えられる。過大な被害予測は自治体や住民を混乱させ、冷静な議論の妨げになるため、現状の防災インフラを考慮し分析を行う必要がある。
- 3) 本来であれば、地震発生から津波襲来までを考慮した上で被害を推計しなければならない。津波リスクカーブに加え、地震リスクカーブを算出し統合評価することが可能になれば、地震に起因するリスクをより包括的に表現することが可能となる。

謝辞：本研究は、文部科学省のグリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス(GRENE)事業 環境情報分野「環境情報技術を用いたレジリエントな国土のデザイン」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 中央防災会議：南海トラフ巨大地震の被害想定について，2012.
- 2) 中央防災会議：東海・東南海・南海地震想定，2003.
- 3) 兼森孝：リスク分析，土木学会誌，Vol.85，No.7，pp.13-17，2000.
- 4) 郷右近英臣，越村俊一，松岡昌志，行谷佑一：2009 年米領サモア地震津波における津波被害関数の構築，土木学会論文集 B2，Vol.67，No.2，pp.I_1321-I_1325，2011.
- 5) 社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価部会：確率論的津波ハザード解析の方法，2011.
- 6) 地震ハザードステーション：J-SHIS 地震ハザードステーションマップ，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>，2012.
- 7) 株式会社構造計画研究所：津波シミュレーションシステム「TSUNAMI-K」，2011.
- 8) 国土交通省：東日本大震災の津波被災現況調査，2012.
- 9) 国土交通省河川局：家屋・家庭用品原単位，2005.
- 10) 国土交通省：平成 20 年住宅・土地統計調査，2008.

(2013.5.7 受付)

An Estimation of Risk Curve of Structural Damage by Tsunami Using GIS

Yuichiro KARATSU, Hiroyoshi MORITA, Masayuki FUKUMOTO, Nobuhiko SUGITO,
Ryudo TACHIBANA, Naoki SHIBAHARA, Hirokazu KATO and Yoshitsugu HAYASHI