

マルチハザードのコンサルティング技術に関する研究

RESEARCH ON THE MULTI-HAZARD CONSULTING TECHNOLOGY

森田 格*・櫻庭 雅明*・小園 裕司**

Itaru MORITA, Masaaki SAKURABA and Yuji KOZONO

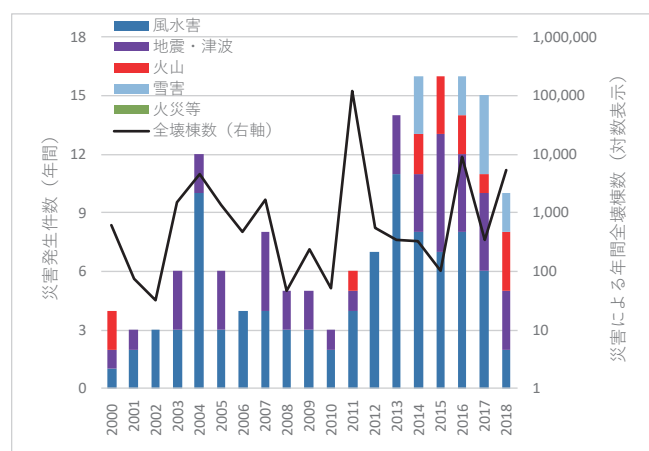
Japan faces many natural disasters due to typhoons, heavy rainfall, earthquake, tsunami, volcanic eruptions, heavy snow and so on. The government is working on consideration of a combination of hazards such as earthquake-flood and storm surge, and flood-landslides. In this paper, we describe the technical field for the consulting of the multi-hazard risk evaluation for the construction field, etc. in Japan covering technical improvement for prediction, evaluation and explanation of methodology. We propose outlines of the multi-hazard prediction and risk evaluation, and introduce a case study of combined hazard and risk evaluation was carried out when a storm surge caused by the largest typhoon occurred after the largest earthquake in Osaka City.

Keywords : multi-hazard, risk evaluation, numerical simulation, natural hazard

1. はじめに

(1) 日本におけるマルチハザード発生状況

我が国では、台風・豪雨、地震・津波、火山噴火、豪雪等により、異なる災害に直面することが多い。近年の日本における災害発生件数等の経年変化（図－1）を見てみると、2004年や2013年以降は年間災害発生件数が10件以上となっている。また、地震や風水害はどちらもほぼ毎年どこかで発生しており、ここ5年位は地震・風水害に加え、火山や雪害も発生している。



※内閣府ホームページの災害状況一覧¹⁾の記載件数

図－1 日本における災害発生件数等の経年変化計

複数種の災害が同時期に同じ場所で発生（マルチハザード）しているか確認するため、同年に同じ都道府県で発生した主な災害を整理した（表－1）。これによると、ここ5年位を中心に九州・中国・東北地方等の県において、同年で地震、台風・豪雨、火山、豪雪のうちの複数種の災害が発生している。例えば、2011年3月の東日本大震災で被災した福島県は、7月の新潟・福島豪雨でも被害が発生している。また、2016年4月の熊本地方を震源とする地震で被災した熊本県では、6月の西日本の大雨、10月の阿蘇山の火山活動も同年に発生している。

一方、地球温暖化による自然災害への影響として豪雨や台風による洪水・土砂災害・高潮等が想定されている（表－2）。例えば、地球温暖化によって降水強度が増加するとともに、豪雨の頻度も増加することで、洪水の被害規模の拡大や発生頻度の高まりが懸念されている。また、地球温暖化による強い台風の増加等による高潮の潮位偏差が増大するとともに、中長期的な海面水位の上昇による被害の深刻化が懸念されている。さらに、土砂災害においては規模によらず発生頻度の増加が懸念されるとともに、局所豪雨による警戒避難のためのリードタイム短縮も懸念されている。

このように、日本においては、現在でもマルチハザードの発生可能性を否定することはできない状況であり、将来的にはマルチハザードの発生可能性が高まることが懸念される状況である。

(2) マルチハザードに関する国の取組

日本におけるマルチハザードへの認識に関して、国の取組を確認してみると、「首都直下地震対策」や「平成30年7月

* 技術本部 先端研究開発センター

** 技術本部 中央研究所 総合技術開発第1部

表－１ 同年に同じ都道府県で発生した主な災害

発生年	マルチハザード種	災害名等	発生時期	死者数	全壊棟数	主な被害都道府県
2003	地震・台風 (秋田県)	平成15年宮城県沖を震源とする地震	2003/05/26		2	岩手・宮城・ 秋田
		平成15年台風第14号	2003/09/11~09/14	3	18	沖縄・ 秋田 ・北海道
2004	地震・台風 (三重県)	平成16年 紀伊半島沖を震源とする地震及び東海道沖を震源とする地震	2004/09/05			三重 ・愛知・大阪
		平成16年台風第21号	2004/09/25~09/30	26	79	愛媛・ 三重 ・山口
2011	地震・豪雨 (福島県)	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)	2011/03/11	19,630	121,781	岩手・宮城・ 福島
		平成23年7月新潟・福島豪雨	2011/07/28~07/30	4	73	新潟・ 福島 他
2014	地震・豪雨・火山・豪雪 (長野県) 地震・豪雨 (広島県)	平成 26 年(2014 年)豪雪	2014/02/14~02/16	26	16	群馬・山梨・ 長野
		伊予灘を震源とする地震	2014/03/14			岡山・山口・ 広島
		梅雨期における大雨等による被害	2014/06/02~07/28	3	15	長野 ・愛媛・福島
		8 月 19 日からの大雨による広島県の被害状況	2014/08/15~09/11	76	179	広島
		御嶽山の噴火	2014/09/27	57		長野 ・岐阜
		長野県北部を震源とする地震	2014/11/22		50	長野 ・新潟
2015	地震・豪雨 (宮城県)	宮城県沖を震源とする地震	2015/05/13			岩手・ 宮城
		平成 27 年 9 月関東・東北豪雨	2015/09/07~09/11	8	80	茨城・栃木・ 宮城
2016	地震・豪雨・火山 (熊本県) 地震・台風 (宮城県)	平成 28 年 (2016 年) 熊本県熊本地方を震源とする地震	2016/04/14	267	8673	熊本 ・大分・佐賀
		6 月 20 日からの西日本の大雨	2016/06/19~06/27	6	15	熊本 ・福岡・愛媛
		平成 28 年台風 10 号	2016/08/28~08/31	22	502	岩手・北海道・ 宮城
		阿蘇山の火山活動	2016/10/08			熊本
		福島県沖を震源とする地震	2016/11/22			福島・千葉・ 宮城
2017	地震・台風 (大分県) 地震・台風・火山 (鹿児島県)	豊後水道を震源とする地震	2017/06/20			大分
		6 月 3 0 日からの梅雨前線に伴う大雨及び平成 2 9 年台風第 3 号	2017/06/30~07/10	42	325	福岡・ 大分 ・広島
		鹿児島湾を震源とする地震	2017/07/11			鹿児島
		平成 29 年台風第 5 号	2017/08/03~08/09	2	2	鹿児島 ・和歌山・兵庫
		平成 29 年台風第 18 号	2017/09/13~09/18	5	3	高知・ 大分 ・香川
		霧島山(新燃岳)の火山活動	2017/10/11			宮崎・ 鹿児島
		平成 29 年台風第 22 号	2017/10/27~10/30		4	宮崎・新潟・ 大分

※内閣府ホームページの災害状況一覧¹⁾を独自集計

表－２ 地球温暖化による自然災害への影響

災害種		地球温暖化による自然災害への影響
豪雨	洪水	地球温暖化による降水強度と豪雨頻度の増加 洪水を起こしうる大雨事象が日本の代表的な河川流域において今世紀末には現在に比べ有意に増加し、同じ頻度の降水量が1~3割のオーダーで増加することについて、多くの文献で見解が一致している。降水強度が増すことで、現在、たとえば「300 年に 1 度」の頻度で発生する豪雨が、「100年に 1 度」の頻度で発生するようになるなど、これまでの想定に比べて高頻度化することが予測されている。
	土砂災害	地球温暖化の豪雨による土砂災害頻度の増加 短時間強雨や大雨の増加に伴う土砂災害の発生頻度の増加、突発的で局所的な大雨に伴う警戒避難のためのリードタイムが短い土砂災害の増加
台風	洪水	地球温暖化による台風強度・降水強度と豪雨頻度の増加 強い台風の発生数、台風の最大強度、最大強度時の降水強度は現在と比較して増加する傾向があると予測されている。なお、長期的には西太平洋域における台風の発生数は多少減少する。降水強度が増すことで、現在、たとえば「300 年に 1 度」の頻度で発生する豪雨が、「100年に 1 度」の頻度で発生するようになるなど、これまでの想定に比べて高頻度化することが予測されている。
	高潮	地球温暖化の台風による高潮偏差の増大等 気候変動に伴う強い台風の増加等による高潮偏差の増大、波浪の強大化及び中長期的な海面水位の上昇により、さらに深刻な影響が懸念される。
	土砂災害	地球温暖化の豪雨による深層崩壊等の増加 台風等による記録的な大雨に伴う深層崩壊等の増加が懸念される。

※内閣府・防災白書²⁾より抜粋し筆者が災害種ごとに整理

豪雨を踏まえた水害・土砂災害からの避難のあり方」でふられている。それぞれの概要を以下に記載する。

2013 年 12 月に公表された内閣府首都直下地震対策検討ワーキンググループによる首都直下地震の被害想定と対策について(最終報告)³⁾では、海岸保全施設等が沈下・損壊し、洪水・高潮等により浸水が生じる可能性があり、さらに満潮時や異常潮位発生時には浸水域が大きく広がるといった過酷事象を想定しておく必要性を指摘している。そして、2019 年 1 月に公表された国土交通省による首都直下地震対策計画⁴⁾では、海拔ゼロメートル地帯等において、海岸・河川管理施設の被

災想定箇所を把握、河川堤防等の緊急復旧や浸水区域における緊急排水に関する計画の策定、浸水する地下街等での迅速な避難に資する防災行動計画の検討等、複合災害への対応について記載されている。

内閣府・平成 30 年 7 月豪雨による水害・土砂災害からの避難に関するワーキンググループは、2018 年 12 月に「平成 30 年 7 月豪雨を踏まえ 2019 年度出水期までに実施する具体的な取組」を公表し、この中の「マルチハザードのリスク認識」において、「洪水、土砂災害、ため池決壊等によるリスク情報を一元的に把握可能なサイトを構築」「防災気象情報や河川水

位情報等のリアルタイム情報と洪水浸水想定区域図等の災害リスク情報を容易に比較できるようにするとともに重ね合わせて表示するための検討」、「民間事業者等と連携して、スマホアプリ等による防災気象情報および各種災害リスク情報の提供の推進に向けた検討」といった取組が進められている。

このように、地震と洪水・高潮、洪水と土砂災害といったマルチハザードに対する取組が進められており、マルチハザードへの対応が求められている状況である。

(3) 研究目的

防災に関するコンサルタントの持つ技術は、それぞれのハザード（風水害、土砂災害、津波、地震）等の個別専門化が進み、それぞれの専門家は多く存在するが、複合的な災害に対してはコンサルティングとして課題が多い。

また、最近では個別の技術開発でなく複合的・多元的な次元の技術が求められるようになり、特に防災技術については複合的・多元的な技術の開発・普及が必要とされている。これらを実現するためには、それぞれの災害に関する発生可能性やマルチハザードに関する評価手法を確立し、それを一般的に表現できる手法が必要である。

本研究は、マルチハザードの予測・評価・説明手法に関する技術向上を目的としている。また、マルチハザードを踏まえた確率論的な災害リスクを評価できる技術を確立する。そして、国内外における建設分野、保険分野への災害リスク情報のコンサルティングを目的とした技術分野の確立を目指す。

2. 現状の災害リスクのコンサルティング

マルチハザードの予測・評価手法を説明する前に、国土交通省が公表している指針・ガイドライン等を用いて、一般的にハザード予測・評価のコンサルティングにはどのような項目があるかを記載する。また、これらの指針等ではあまり馴染みはないが、保険分野や低頻度大被害の災害への評価手法として、リスク評価の概要について説明する。

(1) 既往のハザード予測・評価の指針等について

災害リスクのコンサルティングに関するフロー例を図-2に示す。災害リスクのコンサルティングでは、一般的にハザードを予測し、これと脆弱性を重ねて被害想定を行い、この結果を災害対策検討に資する情報として提供している。また、保険分野においては、被害想定結果と発生確率を用いてリスクカーブ等を作成し、災害保険額の設定等も行われている。

国土交通省が公表している指針・ガイドライン等において、災害コンサルティングに関する項目を整理した（表-3）。これによると、浸水想定区域図やハザードマップ作成といったハザード予測に関する指針等は河川分野（洪水・豪雨）、砂防分野（土砂災害・火山）、海岸分野（高潮・津波）の各分野で公表されている。被害想定については、経済調査マニユア

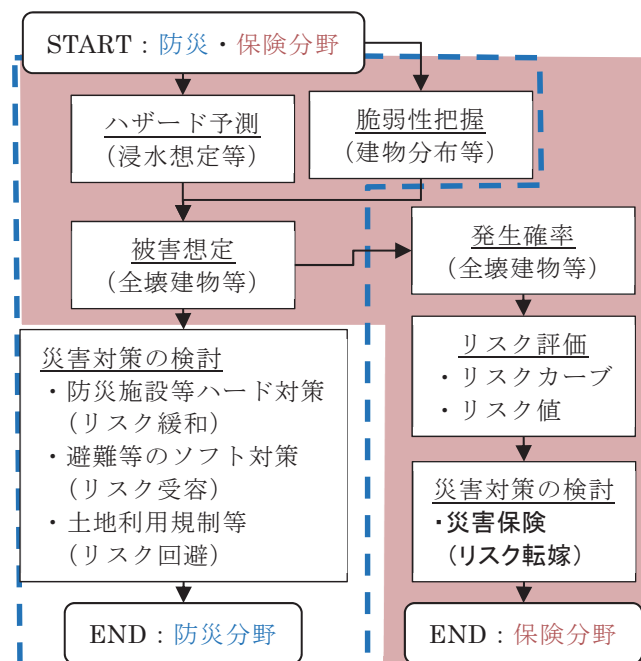


図-2 災害リスクコンサルティングのフロー例

ルや費用便益分析マニュアルによって算出方法が記載されているが、リスクカーブやリスク値の算出といったリスク評価については、まだ指針・ガイドラインで整理されていない。

一方、リスク対応に関する項目を見てみると、河川・砂防・海岸分野の各分野において、防災施設（リスク緩和）の計画・設計に関する指針や、災害情報提供・警戒避難（リスク受容）に関する指針等が公表されているが、土地利用規制等（リスク回避）については、土砂災害や津波に対するものとどまっている。

なお、地震による災害について、防災科学技術研究所から地震の揺れに関するハザードマップ⁵⁾、中央防災会議から津波による浸水想定および地震・津波の被害想定に関する情報⁶⁾が公表されている。

(2) リスク評価

1) リスク評価の概要

保険分野においてはリスクカーブを作成し災害保険の保険金額の検討を行っている。リスクカーブは、損失額等の大きな災害から順番に並べ、各災害の年間発生確率を累積させた年超過確率を算出し、例えば損失額を横軸、年超過確率を縦軸にした曲線等である。

一般的に損失額は過去の災害での被害額を用い、各災害の年間発生確率は災害規模に応じた既往文献等の発生確率（地震なら政府・地震調査研究本部の都道府県ごとの地震活動⁷⁾、豪雨なら気象庁の異常気象リスクマップ⁸⁾など）を用いて、リスクカーブを作成する。

表－３ 災害コンサルティングに関連する主な指針等（国土交通省）

評価項目	主な指針等の名称（全般）	主な指針等の名称（河川分野）	主な指針等の名称（砂防・海岸分野）
ハザード予測	【河川・砂防・海岸】 河川砂防技術基準	【河川等】洪水浸水想定区域図作成マニュアル 【河川等】内水浸水想定区域図作成マニュアル（案） 【河川等】浸水想定（洪水、内水）の作成等のための想定最大外力の設定手法 【河川等】洪水ハザードマップ作成のための「浸水想定区域図データ」利用ガイド 【河川等】水害ハザードマップ作成の手引き 【河川等】中小河川洪水浸水想定区域図作成の手引き（第2版）	【砂防等】土砂災害防止対策基本指針 【砂防等】砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説 【砂防等】土砂災害ハザードマップ作成のための指針と解説（案） 【砂防等】火山噴火に起因した土砂災害予想区域図作成の手引き（案） 【砂防等】火山地域で発生する土石流が尾根を乗り越える危険に関する調査要領（試行案） 【海岸等】高潮浸水想定区域図作成の手引き 【海岸等】津波浸水想定区域図作成の手引き
被害想定		【河川等】治水経済調査マニュアル（案） 【河川等】水害の被害指標分析の手引 【河川等】各種資産評価単価およびデフレーター	【砂防等】砂防事業の費用便益分析マニュアル（案） 【砂防等】土石流対策事業の費用便益分析マニュアル（案） 【砂防等】地すべり対策事業の費用便益分析マニュアル（案） 【砂防等】急傾斜地崩壊対策事業の費用便益分析マニュアル（案） 【海岸等】海岸事業の費用便益分析指針【改訂版】
リスク評価	リスクカーブやリスク値の作成方針等に関して記載された指針等はない		
リスク対応（緩和）	【河川・海岸】 地下街等における浸水防止用設備整備のガイドライン 大規模工場等に係る浸水防止計画作成の手引き	【河川等】河川構造物の耐震性能照査指針 【河川等】「河川堤防設計指針」の改訂 【河川等】ドレーン工設計マニュアル 【河川等】ダム・堰施設技術基準（案） 【河川等】下流河川土砂還元マニュアル（案）	【砂防等】砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説 【砂防等】土石流・流木対策設計技術指針解説 【砂防等】「地すべり防止技術指針」並びに「地すべり防止技術指針解説」 【海岸等】津波・高潮対策における水門・陸門等管理システムガイドライン
リスク対応（受容）	【河川・海岸】 まるとまちごとハザードマップ実施の手引き（第2版） 大規模水災害時の避難手法検討ガイドブック（案） 地下街等に係る避難確保・浸水防止計画作成の手引き 避難確保計画作成の手引き 水防計画作成の手引き	【河川等】危険水位及び氾濫危険水位の設定要領 【河川等】中小河川の特別警戒水位の設定要領 【河川等】洪水予報河川における避難判断水位の設定要領 【河川等】洪水時における情報提供の充実に係る説明資料について 【河川等】中小河川におけるホットライン活用ガイドライン 【河川等】危機管理型水位計の観測基準・仕様 【河川等】地域の水害危険性の周知に関するガイドライン 【河川等】中小河川における簡易的な水害リスク情報作成の手引き 【河川等】雨水出水特別警戒水位の設定要領 【河川等】洪水等に関する防災情報体系の見直し実施要領について	【砂防等】都道府県と気象庁が共同して土砂災害警戒情報を作成・発表するための手引き 【砂防等】国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒基準雨量の設定手法 【砂防等】土砂災害警戒情報検証手法 【砂防等】土砂災害警戒避難ガイドライン 【砂防等】要配慮者利用施設管理者のための土砂災害に関する避難確保計画作成の手引き 【砂防等】水害・土砂災害に係る要配慮者利用施設における避難計画に係る点検マニュアル 【海岸等】海岸における水防警戒の手引き（案） 【海岸等】高潮特別警戒水位の設定要領 【海岸等】地下街等に係る避難確保計画作成の手引き（津波編） 【海岸等】避難確保計画作成の手引き（津波防災地域づくりに関する法律） 【砂防等】都市計画運用指針 【海岸等】津波防災地域づくり推進計画作成ガイドライン
リスク対応（回避）			【砂防等】土砂災害防止対策基本指針 【砂防等】砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説 【砂防等】土石流・流木対策設計技術指針解説 【砂防等】「地すべり防止技術指針」並びに「地すべり防止技術指針解説」 【海岸等】津波・高潮対策における水門・陸門等管理システムガイドライン

※国土交通省ホームページ・指針・マニュアル・ガイドライン等⁹⁾より抜粋し筆者が災害種ごとに整理

都市計画運用指針¹⁰⁾は国土交通省都市局 HP より引用

津波防災地域づくり¹¹⁾については国土交通省総合政策局 HP より引用

一方、複数の災害のリスクを定量的に比較する場合には、損失額と年間発生確率を掛け合わせたリスク値を算出し、対策優先度の決定に資する情報として提供することが考えられる。例えば、損失額が大きく発生確率も大きい災害に対しては優先的に対策が必要となるが、損失額は大きくないが発生頻度の高い災害と、損失額は大きいが発生頻度は低い災害では、どちらの被害に対して優先的に対策を講じる必要があるか判断することが難しい。このため、それぞれで算出したリスク値を参考に対策優先度を検討することが考えられる。

2) 数値シミュレーションによるリスク評価

前項では既往災害に基づく統計情報を用いたリスクカーブの作成方法について説明したが、災害がかなり昔に発生した場合や、未経験の災害である場合には、現在の脆弱性に即した損失額を把握することは困難であり、条件付きのリスクカーブとなってしまう。このような場合に対しては、数値シミュレーションを用いた損失額等の予測が有効である。

表－４に研究論文等を調査対象とした災害種ごとのリスク評価（被害想定等）方法の概要を記載する。リスク評価の研究が進んでいるのは洪水および地震の分野であり、任意の１ケースのみで被害想定を行うのではなく、ハザードの諸要素（地震なら断層変位等）に確率分布を設定し、モンテカルロシミュレーションでランダムに設定された諸要素でハザードの予測を行っている。一方、国内においてほとんどリスクカーブの作成等が行われていないのは、火山や豪雪といった災害である。

表－４ 災害種ごとのリスク評価手法の概要

災害種	リスク評価手法の概要
洪水	任意ケースの浸水深による人的・建物等被害算出
	モンテカルロシミュレーションによる被害額等算出 ¹²⁾
	土地利用シミュレーションと社会経済シナリオ考慮 ¹³⁾
	将来気候の降水量を用いた降雨流出・氾濫計算 ¹⁴⁾
土砂災害	復旧費用・迂回時間等の経済損失のリスクカーブ ¹⁵⁾
高潮	任意ケースの浸水深による人的・建物等被害算出
	護岸・防潮堤の破壊確率をふまえたリスクカーブ ¹⁶⁾
地震	フラジリティカーブによる人的・建物等被害算出
	モンテカルロシミュレーションによる被害額等算出 ¹⁷⁾
	LCCにおけるリスクカーブの現在価値への割引 ¹⁸⁾
津波	任意ケースの浸水深による人的・建物等被害算出
	確率論的津波遡上評価による損害確率 ¹⁹⁾
火山災害	リスクカーブの検討事例見当たらず ²⁾
雪害	リスクカーブの検討事例見当たらず ²⁾

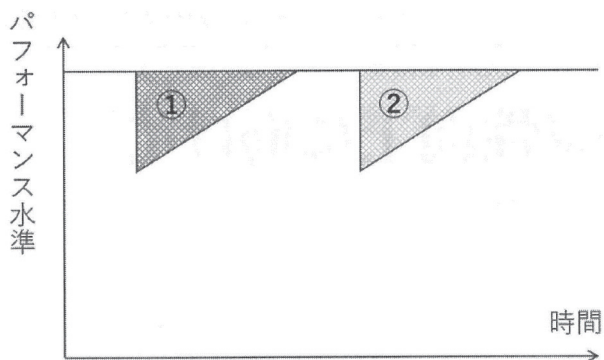
3. マルチハザード・リスク評価

本節では、マルチハザードのリスク評価を行うにあたって、まずマルチハザードを定義し、既往のマルチハザードのリスク評価の研究を概観したうえで、本研究で検討するマルチハザードのリスク評価方法を提案する。

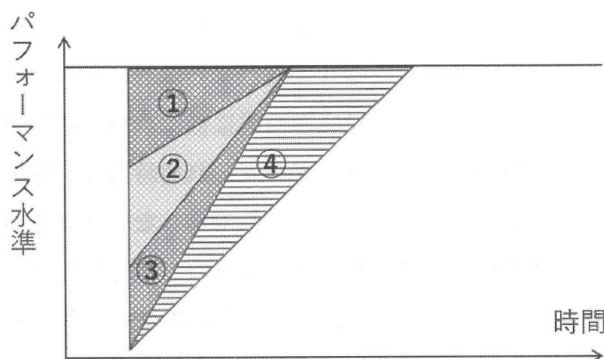
（1）マルチハザードの定義

織田澤（2019）では、複合災害（マルチハザード）を「複数の災害が連続的あるいは連鎖的に発生することによって、被害が拡大する災害事象」と定義している。

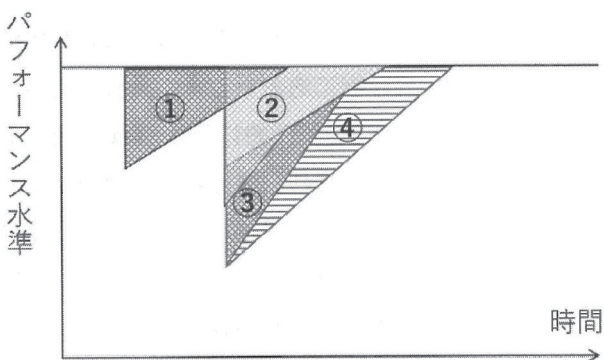
ある地域が一定期間の間に 2 つの災害リスクに晒されている状況を考えたとき、図-3 の (a) のように災害が十分に時間間隔をあけて発生する場合、個々の災害による被災対象のパフォーマンス水準の低下をもたらす被害（領域①と②）だけで済むが、(b) のように災害が同時に発生する場合、個々の災害による被害（領域①と②）だけでなく、同時発生することによる被害（領域③）によってパフォーマンス水準が低下するとともに、復旧期間の長期化による被害（領域④）によって低下した水準が長引き、被害が拡大する恐れがある。また、最初の災害の復旧期間中に次の災害が発生した場合は (c) のようになると考えられる。



(a) 独立生起の場合



(b) 同時生起の場合



(c) 復旧期間中に次の災害が生起する場合

※織田澤 (2019)²⁰⁾ の図-2 を引用

図-3 マルチハザードの被害イメージ

本研究でも、このような考えを念頭にマルチハザード・リスク評価の検討を進めていくこととする。

(2) マルチハザード・リスク評価の既往研究の概観

マルチハザードのリスク評価を行っている既往研究において、災害種の組み合わせを整理したものを表-5 に示す。

ハザード予測を行っている研究が比較的多く、洪水や地震と各種災害を組み合わせたものがほとんどである。被害想定では、洪水と地震・高潮の組み合わせとなっている。

マルチハザードのリスク評価まで行っている研究は田村 (2007) で、洪水・高潮・地震、それぞれの損失額と発生確率を数値シミュレーション等で算出しリスクカーブを作成している。但し、図-3 の領域③（同時発生することによる被害）は考慮されていない。

リスク対応の避難支援（リスク受容）においては、洪水では土砂災害、津波では地震（火災）と土砂災害との組み合わせにおいて、マルチエージェントモデルによる避難シミュレーション等を行っている。

洪水と地震を軸に、土砂災害・高潮・津波・雪害と組み合わせたマルチハザードのリスク評価の研究が進められているが、火山災害については、ほとんど研究が進んでいない状況である。

(3) マルチハザード・リスク評価

1) マルチハザードの予測手法

マルチハザードの予測にあたっては、複数の災害が同時期に発生することによる被害拡大をいかに予測・評価するかがポ

表-5 主なマルチハザード・リスク評価文献数

評価項目	洪水 豪雨	土砂 災害	高潮	地震	津波	火山 災害	雪害	文献等
ハザード予測	○	○		○			○	中林(2009) ²¹⁾
	○	○						山野井(2017) ²²⁾
	○		○	○				大原(2016) ²³⁾
	○			○				中川(2014) ²⁴⁾
			○	○				川崎(2016) ²⁵⁾
				◎			◎	竹田(2015) ²⁶⁾
							◎	上村(2008) ²⁷⁾
被害想定	◎		◎				○	江東5区(2018) ²⁹⁾
	○			○				秋間(2016) ³⁰⁾
								板垣(2016) ³¹⁾
リスク評価	○		○	○				田村(2007) ³²⁾
避難支援	◎	◎						戸田(2016) ³³⁾
		○			○			田中(2015) ³⁴⁾
				○	○			柳川(2016) ³⁵⁾
				○	○			西野(2014) ³⁶⁾
文献数	10	5	5	9	2	1	4	

※該当文献が 2 件を◎で示す

表－6 マルチハザードによる被害拡大のシナリオと技術的な評価可能性

ハザードの組合せ	被害拡大の主なシナリオ	技術的な評価可能性
同時発生することによる被害拡大（図－3の領域③）		
洪水＋地震	豪雨によって斜面が不安定化し、地震時に崩壊被害が拡大する 地震で下水道が損傷し、豪雨で排水処理が追いつかず感染症が蔓延する 地震により防災施設機能が低下し、洪水による人的・建物被害が拡大する 地震により建物が半壊し、洪水時に2階への避難ができず被害が拡大する	○：豪雨後地震時の土砂災害危険度評価の事例あり ◎：既にハザード予測の検討がされている ◎：既にハザード予測の検討がされている ◎：既にハザード予測の検討がされている
＋高潮	洪水と高潮が同時に発生し、浸水範囲が拡大する	◎：既にハザード予測の検討がされている
＋土砂災害	洪水と土砂災害が同時に発生し、避難経路が大きく制限される （避難勧告のタイミングが悪いと被災者が増加する）	◎：既に避難支援の検討がされている
地震＋津波	地震で建物が倒壊して避難路が寸断し、火災・津波から逃げ遅れる 地震により防災施設機能が低下し、津波による人的・建物被害が拡大する	◎：既に避難支援の検討がされている ◎：既にハザード予測の検討がされている
＋高潮	地震により地盤沈降が発生し、高潮による浸水範囲が拡大する 地震により防災施設機能が低下し、高潮による人的・建物被害が拡大する	◎：既にハザード予測の検討がされている ◎：既にハザード予測の検討がされている
＋雪害	地震によって家屋の強度が低下し、豪雪時に家屋倒壊が拡大する 豪雪によって家の出入りが制限され、地震時に避難ができず人的被害が拡大する 豪雪時の地震で大規模雪崩が発生し、孤立化集落の復旧が遅れ被害が拡大する	△：事例は無いが評価の可能性はある △：事例は無いが評価の可能性はある ○：雪崩発生危険箇所評価の事例あり
津波＋土砂災害	津波と土砂災害が同時に発生し、避難経路が大きく制限される	◎：既に避難支援の検討がされている
火山＋雪害	豪雪時の火山噴火で融雪型火山泥流が発生し、被害が拡大する	○：融雪型火山泥流予測の事例あり
復旧期間の長期化による被害拡大（図－3の領域④）		
全般	最初の災害の復旧中に次の災害が発生し、復旧の遅れ等で住民被害が拡大する ・重機、人員、財源不足により復旧が遅れ、被害が拡大する ・地震により道路が寸断され、防災施設の復旧が遅れ、被害が拡大する ・地震により通信設備が機能なくなり、情報不足で逃げ遅れが発生する	◎：既に施設復旧を考慮した被害想定を検討がされている

※表－5の既往文献の内容を整理

イントとなる。マルチハザードによる被害拡大のシナリオと技術的な評価可能性について表－6に示す。

被害拡大シナリオの主なパターンとして、i) 災害が複数発生しその分被害が増加（図－3の領域①②）、ii) 最初の災害によって対象（斜面等）が脆弱化し次の災害で被害が拡大（図－3の領域③）、iii) 最初の災害により防災施設機能等が低下し次の災害で被害が拡大（図－3の領域③）、iv) 最初の災害の復旧中に次の災害が発生し、復旧の遅れ等で被害が拡大（図－3の領域④）といったパターンが考えられる。

例えば、表－6の洪水＋地震の「豪雨によって斜面が不安定化し、地震時に崩壊被害が拡大する」はパターン ii)、「地震により防災施設機能が低下し、洪水による人的・建物被害が拡大する」はパターン iii)、洪水＋高潮の「洪水と高潮が同時に発生し、浸水範囲が拡大する」はパターン i)、「復旧期間の長期化による被害拡大」がパターン iv) である。

技術的な評価可能性としては、概ね既往の技術によって評価は可能である。地震＋雪害の「地震によって家屋の強度が低下し、豪雪時に家屋倒壊が拡大する」、「豪雪によって家の出入りが制限され、地震時に避難ができず人的被害が拡大する」については、研究事例はほとんど見あたらないが評価技術の開発は可能と思われる。

2) マルチハザードの発生確率の設定方法

それぞれの災害では年間で発生する確率を考慮して災害発生のタイミングを検討するが、マルチハザードでは複数の災害で発生タイミングが同時期になった場合を想定する。

規模の大きい主な災害の発生確率を表－7に示す。M9クラスの南海トラフ地震の場合、政府地震調査研究推進本部にお

表－7 災害発生確率

災害名等	年間発生確率の設定例
M9クラスの南海トラフ地震	30年以内に70%～80%より1桁以上低い ³⁷⁾ →【年間発生確率0.23～0.26%】
内陸地震の例 （上町断層帯地震）	30年以内に2%～3% ³⁸⁾ →【年間発生確率0.06%～0.1%】
最大規模台風 （910hPaクラスの台風）	再現期間500～2500年 ³⁹⁾ →【年間発生確率0.04%～0.2%】
マルチハザードの例 （内陸地震×台風）	最大クラス地震と台風の確率を乗じる →【年間発生確率0.000024%～0.0002%】

いて、「30年以内に70%～80%より1桁以上低い」と発表されている。つまり、30年以内に7%～8%より低く、年間発生確率に換算する（7%～8%を30年で割る）と0.23%～0.26%となる。

マルチハザードについては、例えば内陸地震と最大規模台風が同時期に発生した場合を考えると、それぞれの災害の年間発生確率をかけあわせることで、マルチハザードの年間発生確率は0.000024%～0.0002%と算出される。

3) マルチハザード・リスク評価のコンサルティング

これまで記載してきたように、マルチハザード予測や発生確率設定を行うことで、以下のようなコンサルティングを行うことが考えられる。

マルチハザード予測では、各災害の重ね合わせ、被害拡大部分の表示・説明を示したマルチハザードマップを作成し、単独災害時だけでなくマルチハザード時にも警戒しなければならないエリア等の把握を行うことができる。

また、マルチハザードマップに脆弱性を重ねることで、単独災害では被災しないが、マルチハザードで被災する施設等を把握することが可能となる。単独災害でも施設重要度や、重要施設被災時の影響と対策コストの比較等を行うわけだが、特に、生命に危機を及ぼすような施設（生物化学工場、原子力発電所等）については、発生確率の低いマルチハザード等も検討していくことが考えられる。

さらに、住民の命を守る避難についても、マルチハザード等の発生確率の低い災害を対象に、避難路の整備等、必要な設備投資を検討していくことが考えられる。

4. マルチハザードのリスク評価事例

ここでは、マルチハザードのリスク評価事例として、森田 (2019)⁴⁰⁾ に記載した最大クラスの地震後に最大規模の台風が大阪市を直撃した場合のマルチハザードのリスク評価実施例の概要を記載する。

(1) 大阪市の概要

大阪市は、内陸の地震で、たびたび被害を受けてきた。大阪市周辺では、有馬―高槻断層帯、生駒断層帯、上町断層帯等の活断層が確認されている。特に上町断層帯は大阪市中心を南北に延びており、本断層による地震が発生した場合は甚大な地震被害が発生することが考えられる。また、大阪市は大阪湾の湾奥に位置しており、2018 年 9 月に発生した台風 21 号によって高潮が発生し、最大 329cm（大阪検潮所）を記録する等、台風による高潮が生じやすい地理的条件となっている。

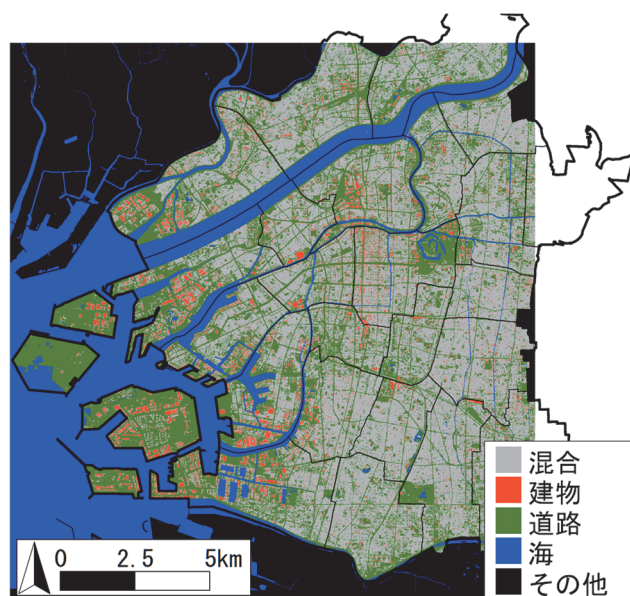
大阪市の人口は約 270 万人、面積は約 2.2 万 ha に達し、市街化区域面積は 95% 近くになる。このうち、居住に関する用途が約 45%、商業が約 20%、工業が約 35% となっている。一部では、地震時に倒壊の危険性がある旧耐震基準の木造住宅が密集する地域があり、大阪市密集住宅市街地重点整備事業によって、建替建設費補助や狭あい道路沿道老朽住宅除却促進が図られている。また、民間住宅の耐震化率は、平成 27 年推計で約 85% となっており、大阪市耐震改修促進計画⁵⁾では、平成 37 年までに 95% を目指すこととなっている。

(2) マルチハザード評価モデル

1) 地震・高潮ハザード予測モデルの概要

本研究で用いた地震・高潮ハザード予測モデルは、地震による地殻変動（隆起・沈降）や、個々の建物の倒壊を考慮した高潮浸水予測モデルとなっている。

図-4 に高潮浸水予測モデルのメッシュ分布を示す。建物で完全に内包されるメッシュ（建物メッシュ）は起伏地物として扱い、建物が完全に存在しない道路や空き地等の場合（道路メッシュ）は相当粗度、建物と道路・空き地等が混在するメッシュ（混合メッシュ）は、合成等価粗度等で計算している。



※森田 (2019)⁴⁰⁾ の図-1 を引用

図-4 高潮浸水予測モデルのメッシュ分布

地殻変動は断層モデルから Okada の式⁴¹⁾を用いて鉛直地殻変動量を算定し、地形データに反映した。

また、建物個々の倒壊被害は、構造種・震度別の建物被害関数⁴²⁾を適用し、残存した建物を高潮浸水予測モデルに反映した。

2) リスク評価手法

リスクを算出するにあたっては、被害規模と災害の発生確率を把握する必要がある。本検討では、被害規模として地震の揺れ・液状化・火災および高潮の浸水による建物被害を算出する。

- 地震の揺れによる建物被害は、前項で算定された倒壊建物を全壊建物とし被害を算定
- 液状化による建物被害は、「内閣府の東南海・南海地震に係る被害想定手法について⁴³⁾」を参照し、液状化による建物の全壊被害について算出
- 地震火災による建物被害は、内閣府の「東南海・南海地震に係る被害想定手法について⁴³⁾」を参照し、火災による焼失棟数について算出
- 高潮による建物被害について、高潮では津波や洪水のように波力を伴わないと考え、高潮による倒壊被害は発生せず、浸水被害（浸水深とし、45cm 以上を床上浸水）のみ算出

建物被害額は全壊および床上浸水を対象に算出する。全壊建物については着工建築物工事費予定額⁴⁴⁾の建物構造別平均額を算出し、これに全壊建物数を乗じて大阪市全体の全壊建物被害額とする。床上浸水については浸水建物数に平均額と 5% を乗じて浸水建物被害額とする。5% は火災保険の一部損壊時に適用されるものである。

災害の年間発生確率は既往文献に記載されている発生確率の表現を参考に設定する。本研究では上町断層帯地震を最大

クラス地震、大阪市を直撃する910hPa台風を最大規模の台風とし、最大クラス地震後に最大規模の台風となるマルチハザードが発生する確率は、最大クラス地震の年間発生確率に最大規模の台風の年間発生確率を乗じたものとする。災害発生確率に関する設定値を表－8に示す。

(3) 地震・高潮マルチハザード予測

1) 検討ケース

本研究では、表－9に示すような検討ケースを設定した。地震による建物倒壊については耐震化率を現状と理想の2ケースについて設定した。ケース1は高潮のみの場合で地震は発生しないものとし、ケース2は大阪市の耐震化率85%（現状）で地震と高潮が発生した場合、ケース3は大阪市の耐震化率100%（理想）で地震と高潮が発生した場合である。

2) 計算条件

最大クラスの地震条件は、大阪市の中心を南北に延びる逆断層型の上町断層を設定した。図－5に地殻変動量を示す。本地震における最大隆起沈降量は、断層帯付近で0.4m程度の沈降であった。

建物の形状・高さは小園ら⁴⁵⁾の手法に基づき国土地理院の建物データを用い、構造種別と建物高さは建物外縁データのメタ情報から整理・設定した（図－6参照）。

建物の地震動による倒壊は、上町断層の震度分布⁴⁶⁾に基づいて、個々の建物に震度分布を設定し、耐震および非耐震建物におけるそれぞれの建物被害関数⁴⁷⁾を適用して評価した（図－7）。

表－8 災害発生確率に関する設定値

災害名等	設定内容
上町断層帯地震	30年以内に2%～3% 【年間発生確率0.1%】 (政府地震調査研究推進本部より)
最大規模台風	再現期間500～2500年 【年間発生確率0.25%】 (高潮浸水想定区域図設定の手引き)
最大規模地震＋台風	最大クラス地震と台風の確率を乗じる 【年間発生確率0.00025%】
M9クラスの南海トラフ地震	30年以内に70%～80%より1桁以上低い 【年間発生確率0.25%】

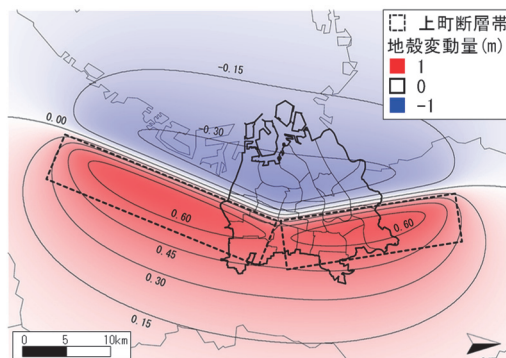
※森田（2019）⁴⁰⁾の表－3を引用

表－9 検討ケース

ケース番号	台風条件	地震条件	水門施設	耐震化率	地震による建物倒壊
1	最大規模	地震前	閉鎖	—	なし
2	最大規模	地震後	開放	85	考慮
3	最大規模	地震後	開放	100	考慮

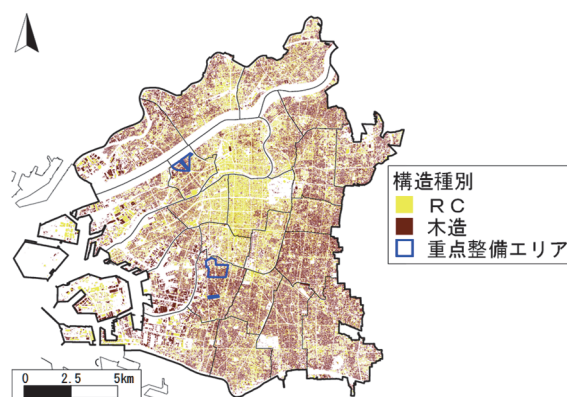
※森田（2019）⁴⁰⁾の表－4を引用

台風条件は、2018年台風21号の経路を基本とし、高潮浸水想定区域図設定の手引き⁴⁸⁾に倣い、中心気圧を910hPaとした。高潮浸水計算の格子幅は広域から大阪市街地まで2,430m～10mとし、標高・水深データは内閣府中央防災会議「南海トラフ巨大地震モデル検討会」⁴⁹⁾に基づき作成し、上町断層モデルによる地殻変動量を反映させた。



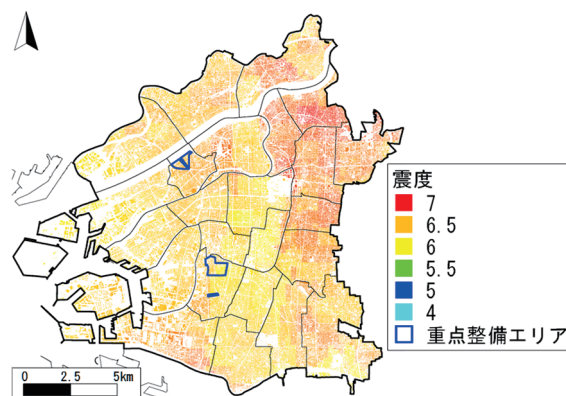
※森田（2019）⁴⁰⁾の図－2を引用

図－5 断層位置と地殻変動量



※森田（2019）⁴⁰⁾の図－3を引用

図－6 構造種別の分布



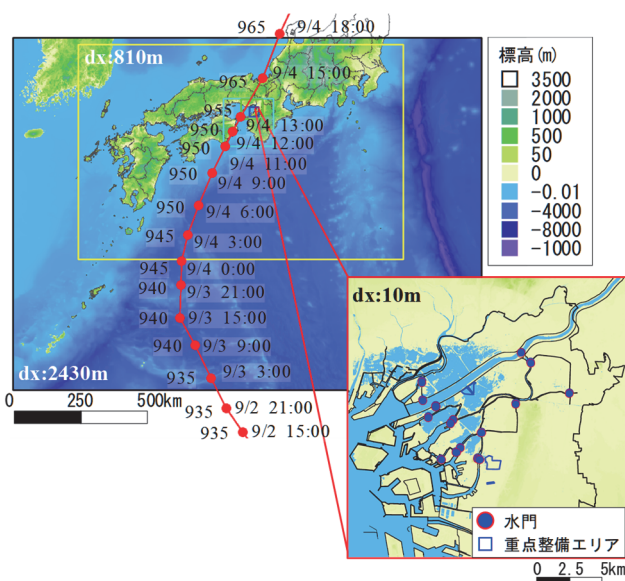
※森田（2019）⁴⁰⁾の図－4を引用

図－7 震度分布

地震の際に機能停止とする水門位置は大阪府西大阪治水事務所 Web 情報⁵⁰⁾より整理を行った。図－8 に本研究で作成した標高・水深コンターと地震後に治水機能が停止する水門位置を示す。

3) 解析結果

図－9 に本解析結果より得られた各ケースの最大浸水域・浸水深を示す。高潮のみと比較して地震と高潮の場合は、浸水域と浸水深が増加することが確認できる。耐震化率が 85% の場合 (ケース 2) と耐震化率 100% の場合 (ケース 3) では、浸水面積はケース 3 の方が小さくなるがその差は小さい。これは耐震化率 85% と 100% では、大阪市全体で見た場合の建物占有率の差は、小さいからであると考えられる。



※森田 (2019)⁴⁰⁾ の図－6 を引用

図－8 台風経路図と水深

(4) マルチハザードのリスク評価

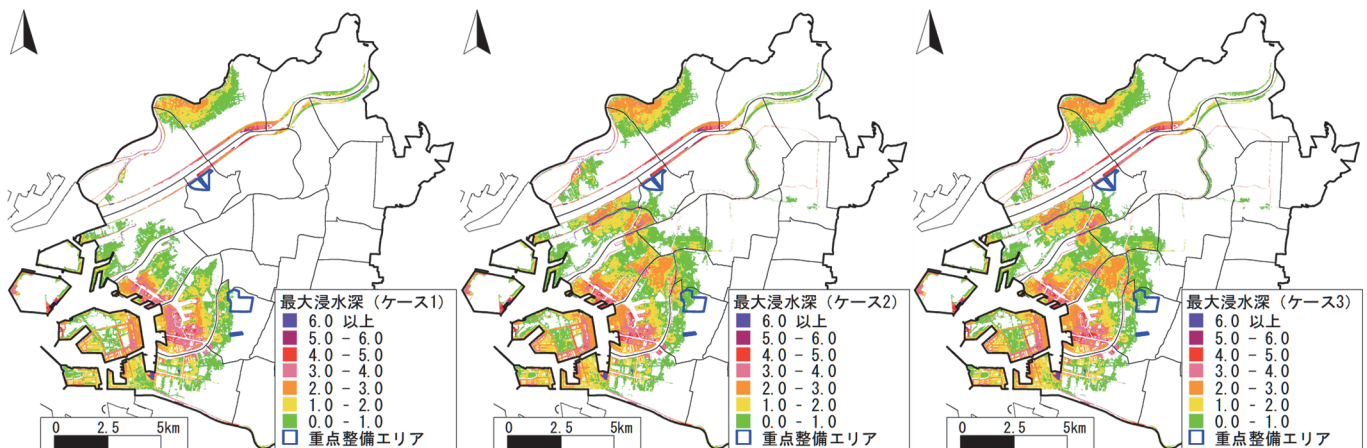
算出した最大クラス地震 (上町断層帯地震) および最大規模台風の建物被害を表－10 に示す。揺れによる全壊棟数は現状の耐震化率 85% から理想の耐震化率 100% にすることで約 17% 減少、液状化では約 6% 減少する結果となった。地震火災については、大阪市が保有する消防車数 460 台で炎上出火の火面周長を上回る結果となったことから、焼失建物は発生しないという試算結果を得た。また、高潮による床上浸水棟数は現状の耐震化率 85% から理想の耐震化率 100% にすることで約 1% 減少する結果となった。

表－11 にケース 2、3 および上町断層帯地震のみの年間発生確率と年間期待被害額を示す。また、これらの推計値を既往の被害想定結果と比較するため、南海トラフ巨大地震のケースを比較として記載した。最大クラス地震後に最大規模台風が来襲 (ケース 2) することで、上町断層帯地震のみのケースと比較して 451 億円程度の建物被害額が増加する。この増加分は床上浸水の被害分に相当する。災害の発生確率を考慮した年間期待被害額について、ケース 2 (現状の耐震化率) は上

表－10 最大クラス地震と台風による建物被害

災害等	全壊・浸水棟数
最大クラス地震	揺れ: 68,016棟 (ケース2: 耐震化85%) 56,498棟 (ケース3: 耐震化100%) 液状化: 3,783棟 (ケース2: 耐震化85%) 3,561棟 (ケース3: 耐震化100%) 地震火災: 0棟
最大クラス台風	浸水: 26,020 棟 (ケース1: 高潮のみ) 45,269棟 (ケース2: 耐震化85%) 44,669棟 (ケース3: 耐震化100%)

※森田 (2019)⁴⁰⁾ の表－5 を引用



※森田 (2019)⁴⁰⁾ の図－7 を引用

図－9 高潮浸水結果の比較 (左: ケース 1、中央: ケース 2、右: ケース 3)

表－11 各ケースの年間発生確率と年間期待被害額（建物）の比較

ケース概要	災害発生確率	年間の発生確率	建物被害額 (億円)	年間期待被害額 (万円)
最大クラス地震+高潮 (現状の耐震化率, ケース 2)	最大クラス地震の年間発生確率に 最大規模の台風の年間発生確率を 乗じたもの	0.00025%	15,522	39
最大クラス地震+高潮 (理想の耐震化率, ケース 3)			13,131	33
上町断層帯地震 (現状の耐震化率)	30年以内に2%～3%	0.10000%	15,071	15,071
M9クラスの南海トラフ地震	M8～9の発生確率(30年以内に 70%～80%)より1桁以上小さい	0.25000%	15,737	39,342

※森田（2019）⁴⁰⁾の表－6を引用

町断層帯地震のケースの0.26%となっており、ケース3（理想の耐震化率）とした場合、更に15%程度低くなる。ケース2と南海トラフ巨大地震を比較した場合、建物被害額は同程度となったが、年間期待被害額は1/1,000程度となった。

5. おわりに

本研究は、中央研究所の骨太研究として2年前から始まったばかりの研究であり、今後も検討を重ねていく必要がある。ここでは、これまで記載してきた内容をふまえ、分野横断的な連携の必要性、ハザード予測、リスク評価、システム化の観点から、今後の研究方針等について記載する。

(1) 分野横断的な連携の必要性

「3. (3) 1) マルチハザードの予測手法」において、既往の研究にもとづき、マルチハザードの被害拡大の主なシナリオを整理したが、ここで挙げたものは一部にすぎず、検討対象地域等によって更に検討すべきシナリオが出てくると思われる。個別災害の専門家が連携して、更なるマルチハザードのシナリオを検討し、事例を積み重ねる必要がある。なお、火山災害や雪害については、マルチハザードの検討事例自体少なく、まずは検討を始める必要があると考えている。

(2) ハザード予測

「2. (2) 2) 数値シミュレーションによるリスク評価」において、非常に古い災害や未経験の災害等に対してもハザード予測を行う場合、洪水や地震分野では、モンテカルロシミュレーションによるハザード予測が行われているが、このような精緻な数値シミュレーションで対象地域の様々な条件をふまえたシミュレーションを実施する場合、計算コストが膨大となり、コンサルティングのコストが高くなる等の問題が考えられる。

このような問題に対しては、数値解析による確率論的リスク評価を適用し、計算コストを低減させることが考えられる。これは、確率分布で設定されたパラメータ群（津波なら断層のすべり角・すべり量等）と、これらを用いて計算された予測変数群（津波なら津波高等）から応答局面を作成し、パラメータ

群から予測変数を計算する応答関数を構築する方法である。これにより、応答関数の計算自体は小さいため計算コストを大幅に低減させることが可能となる。

また、近年話題となっている深層学習等を活用することによって、予測精度を十分維持したまま計算コストを大幅に低減させる可能性がある。

さらに、国等で取組が進められているデータ駆動社会に関連して、応答関数等を実測データを入力することで、リアルタイムでの予測への展開可能性が考えられる。

(3) リスク評価

マルチハザードにおいて現在考えられるリスク対応としては、マルチハザードマップ等を活用した重要施設の災害対策（リスク緩和）や住民避難（リスク受容）である。今後は被害想定と発生確率から算出されるリスクカーブやリスク値等を参考として、土地利用規制（リスク回避）や災害保険（リスク転嫁）等へのコンサルティング技術を模索していきたい。

(4) システム化

「(2) ハザード予測」の応答関数の構築等が進められると、社内データベースから地点・災害種別・災害規模・頻度別などの統計評価が可能になるようなシステムが構築でき、多元・複合災害支援用プラットフォーム等によって情報提供が可能になると考えられる。

また、これらの評価結果の見える化にあたっては、VR・AR等の可視化技術を高度化させることで、より説明性の高い情報提供が可能になると思われる。

参考文献

- 1) 内閣府：防災情報のページ・災害情報・災害状況一覧、<http://www.bousai.go.jp/updates/>
- 2) 内閣府：気候変動に伴い予想される災害の激甚化、平成28年版防災白書、pp.23-28、2017
- 3) 内閣府首都直下地震対策検討ワーキンググループ：首都直下地震の被害想定と対策について（最終報告）、http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/pdf/syuto_wg_report.pdf

- 4) 国土交通省：首都直下地震対策計画、http://www.mlit.go.jp/river/bousai/earthquake/pdf/capital/20190129_02.pdf
- 5) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション、<http://www.j-shis.bosai.go.jp>
- 6) 中央防災会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフの巨大地震に関する津波高、浸水域、被害想定公表について、http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html
- 7) 政府 地震調査研究本部：都道府県ごとの地震活動、<https://www.jishin.go.jp/>
- 8) 気象庁：異常気象リスクマップ、<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/dbindex.html>
- 9) 国土交通省：指針・ガイドライン等、http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/index.html
- 10) 国土交通省：都市計画運用指針、http://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/crd_city_plan_fr_000008.html
- 11) 国土交通省：津波防災地域づくりに関する法律について、<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/point/tsunamibousai.html>
- 12) 大楽浩司、平野淳平：東京都市圏における水害リスク評価手法の開発、土木学会論文集 B1（水工学）、Vol.69、No.4、pp.I_1555-I_1560、2013
- 13) 大楽浩司、山形与志樹、平野淳平、瀬谷創：東京都市圏の水害リスクと不動産への影響、日本不動産学会誌、第 29 巻第 1 号、pp.40-45、2015
- 14) 清原桂子、田中智大、立川康人、宮脇航平、市川温、萬和明：d4PDF を用いた庄内川流域での最大クラスの外水氾濫の分析、水文・水資源学会研究発表会要旨集、2017
- 15) 粕谷悠紀、善功企、陳光斉、笠間清伸：地震による斜面災害復旧へのリスクマネジメントの適用、地震工学論文集、29 巻、pp.996-1001、2007
- 16) 松田真盛、河田恵昭、永田茂：高潮防災へのリスクマネジメント手法の適用、海岸工学論文集、50 巻、pp.1326-1330、2003
- 17) 福島誠一郎、矢代晴実：地震リスクの証券化における条件設定に関する解析、日本建築学会計画系論文集、67 巻 555 号、pp.295-302、2002
- 18) 中村孝明：ライフサイクルコストにおけるリスクカーブの評価とその利活用、海洋開発論文集、23 巻、pp.27-32、2007
- 19) 福谷陽、Suppasri Anawat、安倍祥、今村文彦：確率論的津波遡上評価と津波リスクの定量化、土木学会論文集 B2（海岸工学）、70 巻 2 号、pp.I_1381-I_1385、2014
- 20) 織田澤利守：複合災害と都市の災害脆弱性、都市計画、337 号、pp.38-41、2019
- 21) 中林一樹、小田切利栄：日本における複合災害および広域巨大災害への自治体対応の現状と課題、地域安全学会論文集、11 巻、pp.33-42、2009
- 22) 山野井一輝、藤田正治：土砂災害マルチハザードシミュレータを用いた警戒避難情報の発令手法に関する研究、平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集、pp.536-537、2017
- 23) 大原美保、藤生慎、高田和幸：地震・水害・複合災害時における地域住民・通勤通学者の避難意向に関する調査—東京都足立区千住周辺地区の事例—、日本地震工学会論文集、16 巻 5 号、pp.5_69-5_82、2016
- 24) 中川直子、河村明、天口英雄、湯浅信平：都市河川流域を対象とした地震豪雨複合災害時における病原感染リスク評価手法の提案、土木学会論文集 B1（水工学）、70 巻 4 号、pp.I_907-I_912、2014
- 25) 川崎浩司、金明奎、下川信也、村上智一：巨大地震・台風の複合災害による大阪港沿岸部の高潮浸水予測、土木学会論文集 B3（海洋開発）、72 巻 2 号、pp.I_13-I_18、2016
- 26) 竹田周平、池本敏和：雪国特有の複合災害に関する基礎研究、福井工業大学研究紀要、45、pp.76-83、2015
- 27) 上村靖司、渋谷健人：地震—豪雪複合災害の経験に基づく積雪期地震の被害想定、その 2、雪氷研究大会 2008 東京大会、2008
- 28) 河島克久、伊豫部勉、松元高峰、片岡香子、和泉薫、佐々木明彦、鈴木啓助、齋藤武士：御嶽山 2014 年噴火に対する雪氷・火山複合災害の視点からの調査活動、雪氷研究大会講演要旨集、2015
- 29) 江東 5 区広域避難推進協議会：江東 5 区大規模水害広域避難計画、2018
- 30) 秋間将宏、風間聡、小森大輔：再現確率にもとづく洪水氾濫・高潮複合災害潜在被害額推定、土木学会論文集 B1（水工学）、72 巻 4 号、pp.I_1267-I_1272、2016
- 31) 板垣修、松浦達郎、服部敦：地震と洪水の複合災害に係る被害低減対策効果の特性の分析、日本地震工学会論文集、16 巻 5 号、pp.5_83-5_92、2016
- 32) 田村敏一、永田茂、高原秀夫、若林亮：マルチハザード・リスクの実用的な評価手法の提案、地震工学論文集、29 巻、pp.88-97、2007
- 33) 戸田淳治、田中賢治、浜口俊雄、田中茂信：佐用川流域で発生した洪水災害及び土砂災害の検証と避難意思決定支援の在り方、水文・水資源学会誌、29 巻 6 号、pp.345-361、2016
- 34) 田中耕司、金淵中、中島秀明、中北英一、養老伸介、羽生雅則：豪雨による洪水・土砂流の発生を想定したマルチ・ハザードと避難判断基準に関する研究、河川技術論文集、第 21 巻、2015
- 35) 柳川竜一、岩間俊二、麦倉哲：岩手県大槌町臨海地域における複合災害発生を考慮した避難支援マップの作成、土木学会論文集 B2（海岸工学）、72 巻 2 号、pp.I_1579-I_1584、2016
- 36) 西野智研：火災気流を考慮した市街地火災避難モデルの地震動、火災および津波の複合災害への拡張、日本建築学会計画系論文集、79 巻 699 号、pp.1079-1088、2014
- 37) 政府 地震調査研究本部：南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）の概要資料、https://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/nankai_gaiyou.pdf
- 38) 政府 地震調査研究本部：上町断層帯、https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_katsudanso/f080_uemachi/
- 39) 農林水産省：高潮浸水想定区域図作成の手引き、<https://www.>

- mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kaigan/takashioshinsui_manual.pdf
- 40) 森田格、小園裕司、櫻庭雅明：最大クラス地震と高潮のマルチハザードを対象とした大阪市における建物被害およびリスク評価、土木学会論文集 B2（海岸工学）、Vol.75、No.2、2019
- 41) 大阪市：大阪市耐震改修促進計画、H28.3、<https://www.city.osaka.lg.jp/toshiseibi/cmsfiles/contents/0000006/6306/honpen.published2803.pdf>
- 42) Okada.Y.： Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.82, No.2, pp.1018-1040, 1992
- 43) 気象庁：震度に関する検討会、<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/shindo-kentokai/index.html>
- 44) 内閣府東南海、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、H15.4、http://www.bousai.go.jp/jishin/tonankai_nankai/pdf/sankou_siryou.pdf
- 45) 国土交通省：建築着工統計調査用途別、構造別／建築物の数、床面積、工事費予定額、2019.1、<https://www.e-stat.go.jp/>
- 46) 小園裕司、高橋智幸、桜庭雅明、野島和也：南海トラフ地震津波を対象とした建物倒壊および災害がれきを考慮した津波被害予測モデルの適用と被害軽減効果の検討、土木学会論文集 B2（海岸工学）、Vol.73、No.2、pp.I_403-I_408、2017
- 47) 防災科学技術研究所、地震ハザードステーション J-SHIS、<http://www.j-shis.bosai.go.jp>
- 48) 内閣府中央防災会議：南海トラフの巨大地震モデル検討会、<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>
- 49) 大阪府 Web：西大阪の河川管理施設、<http://www.pref.osaka.lg.jp/nishiosaka/river/riv-w-osaka.html>
- 50) 大阪府 Web：西大阪の河川管理施設、<http://www.pref.osaka.lg.jp/nishiosaka/river/riv-w-osaka.html>、参照2019-03-01