

令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究

二瓶泰雄¹・仲江川敏之²・中北英一³・竹見哲也³・山田朋人⁴・三隅良平⁵・飯塚 聡⁵・
鈴木真一⁵・柳瀬 亘²・立川康人³・田中茂信³・佐山敬洋³・田中智大³・朝位孝二⁶・
清水義彦⁷・前野詩朗⁸・田中 仁⁹・吉谷純一¹⁰・田中規夫¹¹・泉 典洋⁴・
矢野真一郎¹²・森脇亮¹³・赤松良久⁶・内田龍彦¹⁴・重枝未玲¹⁵・岩崎理樹⁴・
小山 毅¹⁶・長谷川兼一¹⁷・西嶋一欽³・藤本郷史¹⁸・毛利栄征¹⁹・前田健一²⁰・
岡村未対¹³・卜部厚志²¹・森口周二⁹・蝦名裕一⁹・松四雄騎³・王功輝³・竹林洋史³・
鈴木素之⁶・田島芳満²²・佐々木淳²²・信岡尚道¹⁹・森 信人³・有川太郎²³・
鈴木崇之²⁴・下園武範²²・松井正宏²⁵・小林文明²⁶・畑山満則³・牛山素行²⁷・
佐藤 健⁹・梶谷義雄²⁸

- 1 東京理科大学
- 2 気象庁気象研究所
- 3 京都大学
- 4 北海道大学
- 5 防災科学技術研究所
- 6 山口大学
- 7 群馬大学
- 8 岡山大学
- 9 東北大学
- 10 信州大学
- 11 埼玉大学
- 12 九州大学
- 13 愛媛大学
- 14 広島大学
- 15 九州工業大学
- 16 東京電機大学
- 17 秋田県立大学
- 18 宇都宮大学
- 19 茨城大学
- 20 名古屋工業大学
- 21 新潟大学
- 22 東京大学
- 23 中央大学
- 24 横浜国立大学
- 25 東京工芸大学
- 26 防衛大学校
- 27 静岡大学
- 28 香川大学

要 旨

令和元年台風19号では、東日本の非常に広い範囲で長時間の豪雨をもたらし、大規模な洪水氾濫が発生すると共に、台風による過去最多の土砂災害件数、竜巻などの強風被害、記録的な高潮・高波被害が発生し、甚大な人的・物的被害が生じた。その約2週間後には、

日本南岸の低気圧と台風21号による大雨が発生し、千葉県や福島県などにて洪水氾濫が発生した。本研究では、科研費・特別研究促進費による突発災害調査研究により、台風19号、21号による広域災害について、全国から多分野の研究者が集結した総合研究を実施した。本報はその成果の一部を取りまとめたものである。また、今後に向けての提言も一覧できる形でまとめている。

1. はじめに

令和元年（2019年）10月6日に南鳥島近海で発生した台風19号（Hagibis、その後、令和元年 東日本台風と命名（気象庁、2020））は、マリアナ諸島を西に進みながら、中心気圧が一日で77hPa低下する「急速強化」が生じ、大型で猛烈な台風に発達した。その後、台風は進路を次第に北寄りに変え、12日19時前に大型で強い勢力（中心気圧960hPa）で伊豆半島に上陸し、その後、関東地方を通過し、13日12時に日本の東で温帯低気圧に変わった。

台風本体の発達した雨雲が非常に広い範囲で長時間の豪雨をもたらした。静岡県や新潟県、関東甲信・東北地方を中心に広い範囲で記録的な大雨が発生した。10日からの総雨量は神奈川県箱根町で1000mmに達し、関東甲信地方と静岡県の17地点で500mmを超え、大雨特別警報が1都12県（静岡県、神奈川県、東京都、埼玉県、群馬県、山梨県、長野県、茨城県、栃木県、新潟県、福島県、宮城県、岩手県）で発令される状況となった。風については、千葉縣市原市では竜巻と推定される突風が発生すると共に、最大瞬間風速40メートルを超えたのは7地点（関東地方）となった。波に関しては、波高が静岡県石廊崎で13メートルを超え、高潮については、静岡県や神奈川県、伊豆諸島で過去最高潮位を超える値を記録した。

この記録的豪雨により、広範囲にわたる多くの河川において堤防決壊と越水・氾濫が発生しており、堤防決壊したのは71河川、142箇所を上り（国交省、2020）、浸水面積は少なくとも3万5千haとなった（国交省、2019）。合わせて、土砂災害や関連する浸水被害も各地で同時多発的に発生した。これにより、人的・物的被害は甚大となった。さらに、大雨や暴風等により、電気・水道・道路・鉄道施設等のライフラインへの被害が発生すると共に、航空機や鉄道の運休等の交通障害が発生した。特に、千曲川の氾濫により、長野県長野市における新幹線車両基地が浸水し、北陸新幹線の全体の約1/3の車両が水没するなど、甚大な被害となった。

この台風19号上陸から約2週間後の10月25日には、日本南岸の低気圧と台風21号（以下では、単に台風21号による大雨と称す）から暖かく湿った空気が関東南部に入り込み大気が不安定となり、千葉

県・茨城県・福島県を中心として大雨が降り、わずか半日で10月の1カ月の平年降水量を上回る地点が発生した。この大雨により、千葉県・福島県を中心に27河川の氾濫が確認された。これらの被災地域は、台風15号や19号の被災地と重なっており、復旧工事が十分行き届かない段階で再び災害が発生したことになる。

本研究では、令和元年台風19号及び台風21号による広域災害の被害状況・メカニズムの全容を明らかにすることを目的として、被災地域の研究者だけでなく全国の研究者が集結し、多様な専門性を持つオールジャパンの災害研究チームによる文理融合の調査研究を行うものとする。

2. 研究内容と研究体制

本研究では、①台風による豪雨・流出現象の気象学的解明（気象グループ、水文グループ）、②広域にわたる洪水氾濫災害を引き起こしたメカニズムの解明（河川グループ、建築グループ、農業グループ）、③多発した土砂災害・土構造物破壊におけるメカニズムの解明（地盤グループ）、④強風や高潮による被害実態の解明（高潮・高波グループ、強風グループ）、⑤住民の避難行動の実態と防災情報の伝達状況の把握（避難・経済被害グループ）、の5つのテーマ・9つのグループ、に分けて活動した。

各調査研究グループの調査方法や解析等については以下に示す通りとなっている。なお、各調査研究グループには研究推進を担当するグループリーダーを配置し、併せて総合的な研究実施体制を強化するために、分担者の専門分野を考慮して各グループを兼担する研究者を配置している。以下において研究者に付した下線はグループリーダーを示している。

- ① 気象グループ（仲江川、中北、竹見、山田、三隅、飯塚、鈴木、柳瀬）・水文グループ（立川、田中茂、佐山、田中智）

Xバンドレーダを始めとする気象レーダー、解析雨量、メソ解析などの様々な降水・気象観測データを用いて、台風・低気圧の構造、発生環境から、極端豪雨発生メカニズムにアプローチする。また、高解像度非静力学モデルによる台風シミュレーショ

ンによる感度実験を通して極端豪雨のメカニズム・要因解明を行う。温暖化影響については、大量アンサンブル過去・将来気候ダウンスケール実験から類似の極端事象の発生頻度を調査する。また、関東、甲信越、東北地方の河川流域において、2019年台風19号を対象とした降雨流出解析および降雨・流量の水文頻度解析を実施し、今回の豪雨の規模を明らかにするとともに、現地調査を実施して、同様の台風による被害を最小化するための技術的課題を明らかにする。

② 河川グループ（朝位，清水，前野，田中仁，吉谷，田中規，泉，矢野，森脇，赤松，内田，重枝，岩崎）・建築グループ（小山，長谷川，西嶋，藤本）・農業グループ（毛利）

令和元年台風19号および後日の低気圧（台風21号を含む）によって関東、甲信、東北地方の各地で甚大な氾濫被害が発生した。その被災規模は平成30年西日本豪雨災害を上回るものとなった。このような氾濫被害に対して本グループでは河川工学、水理学の見地から氾濫の発生メカニズムや被害拡大の要因を解明する。まず、各地で発生した氾濫の現地調査を実施する。また衛星画像解析、氾濫シミュレーション、水文データ解析などを行い破堤や氾濫メカニズム、氾濫流の動態を明らかにする。さらに西日本豪雨災害との比較検討も行う。一方、研究事例が少ない洪水による建築物の被害を、防災、河川工学、構造、材料、環境の観点から分析し、知見の蓄積を行う。被災地の被害状況を調査することで浸水要因を特定し、降雨流出氾濫解析により浸水状況の再現解析を行い、被災建築物の構造材・非構造材被害と照らし合わせて分析する。また、浸水した建築物の継続的使用を踏まえ、浸水による、構造躯体、断熱材などの材料および室内の衛生環境への影響を調査分析する。さらに、洪水氾濫に伴う農業被害の特徴やその要因、対策について調査分析を行う。

③ 地盤グループ（前田，岡村，卜部，森口，蝦名，松四，王，竹林，鈴木）

斜面の崩壊・土石流などの発生状況、河川堤防や道路等の土構造物の被災状況を把握するため、踏査、原位置試験、UAV等を活用した多角的な現地調査を行う。河川堤防の堤体部や道路盛土部は増築、改良、補強等が施された多様な人工構造物であることに加え、基礎地盤や自然斜面は地形・地質や気象の影響を受けた複雑な自然堆積物である。そこで、地球物理、地形学、地質学、地盤工学、土地利用に関する史学の学際的な視点から地盤災害メカニズムを解明

する。

④ 高潮・高波グループ（田島，佐々木，信岡，森，有川，鈴木，下園）・強風グループ（松井，小林）
本グループでは、まず、主に駿河湾、相模湾、東京湾、外房の沿岸部における台風19号に伴う高潮・高波による浸水や海岸構造物や家屋の直接的な被災の調査に加え、避難の実態調査、河口部における水位上昇に伴う影響評価、さらに洪水により発生した大量の漂流ゴミの集積実態とそれに伴う漁業への影響を把握する。また、同年の台風15号や2018年台風21号、24号などの過去の台風に伴う高潮・高波災害との比較を通じ、本災害の特徴を明らかにする。また、台風19号に際して発生した強風について、その実態と建築物や構造物等の被害への影響を調査し、今後の気象災害低減に資する情報としてまとめる。今回の台風の影響は豪雨の影響が強いため、建築物等の受けた影響のなかから強風によると思われるものを抽出する。また、台風に伴って発生することがある竜巻の被害についても現地調査等を実施して、整理する。

⑤ 避難・経済被害グループ（畑山，牛山，佐藤，梶谷）

台風19、21号では、死者104名（うち、災害関連死7名）、行方不明者3名を出す大規模な災害となった。災害救助法適応地域は315市区町村にわたり、241市区町村が適応対象となった東日本大震災を超える広域な被害となったことが特徴である。本グループでは、災害時の被災地における人間行動と経済活動に着目し、人的被害の要因、避難者の行動、避難所での対応と、産業被害について、現地ヒアリングとアンケート調査により実態を明らかにすることを目的とする。

3. 研究成果の概要

以下では、各グループの研究成果を報告する

3.1 気象グループ

台風19号における温暖化の影響評価を行った。ここでは、台風中心より東側を通過する日平均値の水蒸気フラックスを指標として、20km解像度のd4PDFで発生した台風性低気圧と台風19号を比較した。解析データは20km解像度d4PDFの現在気候（60年×50アンサンブル）と将来気候（60年×90アンサンブル）から抽出された台風の日平均水蒸気フラックス、そして気象庁MSMデータによる台風19号が発生した2019年10月10日の日平均水蒸

気フラックスである。d4PDF から上記の抽出基準で抽出された台風の個数は現在気候で 4918, 将来気候で 8196 であった。高度は約 10000m まで、鉛直方向に全ての層で同じ定義で水蒸気フラックスを計算し、鉛直プロファイルを作成した。得られた結果を図 1 に示す。横軸が水蒸気フラックス、縦軸が高度を示す。赤（青）の陰影は d4PDF の将来気候（現在気候）から抽出された台風の水蒸気フラックスの相対頻度を表しており、陰影の色が濃いほど相対頻度が高い（その水蒸気フラックス量を持つ台風の頻度が多い）ことを示す。赤及び青の実線で水蒸気フラックスの最大値（相対頻度 0）のプロファイル、破線で相対頻度 0.001 のプロファイル、そして点線で相対頻度 0.01 のプロファイルを示している。そして、台風 19 号の水蒸気フラックス鉛直プロファイルを黒点でプロットしている。

台風 19 号の結果（黒点で表示）を見ると、5000m 以上の上空を除くほぼ全ての層で青色の実線の外側にプロットされている。このことは、d4PDF という大量アンサンブルデータの解析でも、現在気候では発生し得ないレベルの水蒸気量が台風 19 号によって日本列島付近に供給されていたことが示唆される。また地表面付近だけでなく、高度 10000m 付近までのほぼ全層で最大レベルあるいはそれ以上の水蒸気量がもたらされていた。すなわち、台風によってもたらされた水蒸気量の観点からすると、台風 19 号は現在気候ではほぼ有り得ないレベルの台風であったと言える。一方将来気候においては、台風 19 号の水蒸気フラックスは全層において相対頻度 0.01 以上の場所に位置している。こちらも頻度としては決して高くはなく稀なレベルの水蒸気量ではあるものの、将来気候では東日本付近に発生する台風の中で 100 回に 1 回以上は同程度の水蒸気フラックスを持つ台風が発生し得るということを示唆している。

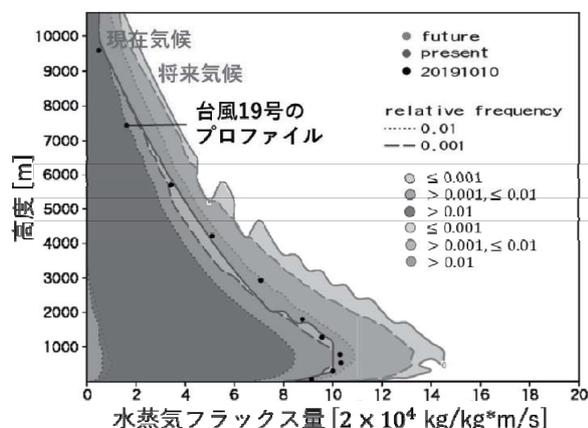


図 1 d4PDF で発生した台風と台風 19 号の水蒸気フラックスの鉛直プロファイル

台風 19 号の降雨帯を対象として、光学式ディストロメータと X バンド偏波レーダ（EBN レーダ）を用いた雨滴粒径分布の特徴を解析し、降水機構を考察した。図 2 に EBN レーダによって観測された 15:04 JST のレーダ反射強度 (Z_H) の RHI (Range Height Indicator) を示す。これより、層状性降水の特性であるブライトバンドが高度 5 km 付近に見られる。一方、高度 3 km より下層では 40 dBZ を超える強いセル状エコーが並んでおり、 Z_H が下層で増大している。高度 6.2 km より上空ではプレート状の氷晶結晶が卓越し、また高度 4.5 km から 6.2 km では、水と氷の混相であることを示した。降水強度が 10 mm h^{-1} よりも大きいとき、高度 3 km 付近で雨滴粒径分布の切片パラメータが急激に増加するとともに、その下層で雨滴の体積中央直径が増加していることが分かった。このことは、台風の降雨帯において、上層から落ちてきた雨滴が、下層で発達した浅い対流雲の中で雲粒捕捉成長するとともに、多数の小さな雨滴が供給されて、降水が強まったことを示唆している。この現象は、一般に「シーダ・フィード相互作用」と呼ばれており、通常は山地で発生する豪雨の原因となる。ところが今次災害では、平地においてもシーダ・フィード相互作用が起こり、それが広範囲の大雨につながった。つまり、過去の台風災害では主に山地で起こっていた豪雨発生機構が、今回は平地で働いたことになる。

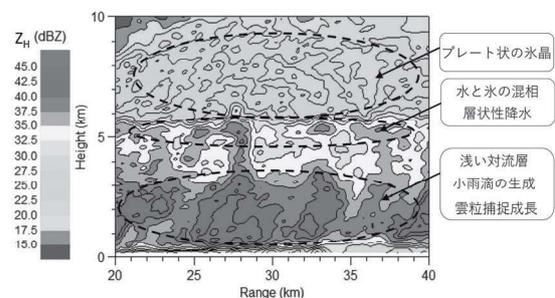


図 2 15:04 JST におけるレーダ反射強度 (Z_H) の RHI と、偏波パラメータから推定された降水過程

3.2 水文グループ

栃木県の中小河川（渡良瀬川支流の秋山川、永野川、黒川、思川など）と阿武隈川上流域の堤防および氾濫調査を実施し、中小河川の被災形態と被害が発生した河川の降水量、河川流量との関連を分析した。図 3 は、流出解析によって推定されたピーク流出高（=ピーク流量/集水面積、単位: mm/h）と当該箇所の集水面積（単位: km^2 ）を示している。赤点で示した地点は、山地からの流出河川に分類されるもので、栃木県の堤防決壊箇所に着目した結果である。

また荒川上流の越辺川で破堤した箇所における推定流量と集水面積との関係を参考にプロットした。青点で示した地点は、同じく栃木県の中小河川における堤防決壊箇所を示すが、平野から流出する河川の結果を青点でプロットした。これより、集水面積が200 km²以下程度の中小河川に着目すると、ピーク流出高がおおよそ35 mm/hを超えるあたりで被害が出ていること、支川の上流部では局所的にさらにピーク流出高が高くなって40 mm/hを上回る地点があることが分かる。同図に併記した秋山川と永野川の河川整備計画による計画流量（流出高に換算した結果）と比較すると、今回の洪水ではそれらの値をはるかに上回っていた。阿武隈川下流に流れ込む五福谷川のピーク流出高は約50 mm/hに迫る値となっており、山地における支川のピーク流出高がそのような値になるときは、斜面崩壊も同時に発生している可能性があり、土砂流出が河道を埋めて、水・土砂ともに氾濫するような水・土砂氾濫の発生が甚大な人的・家屋被害をもたらす可能性がある。

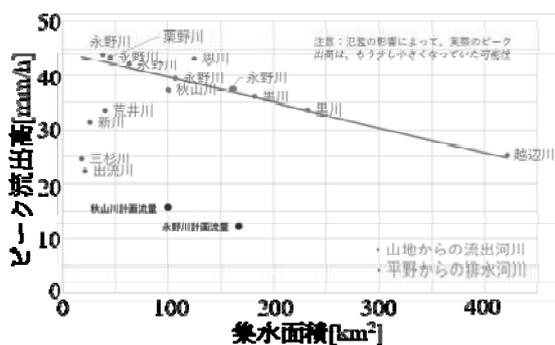
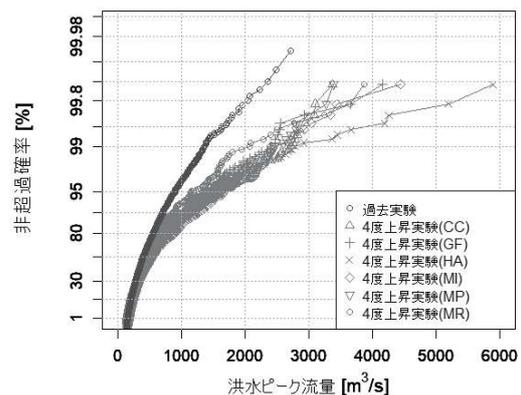


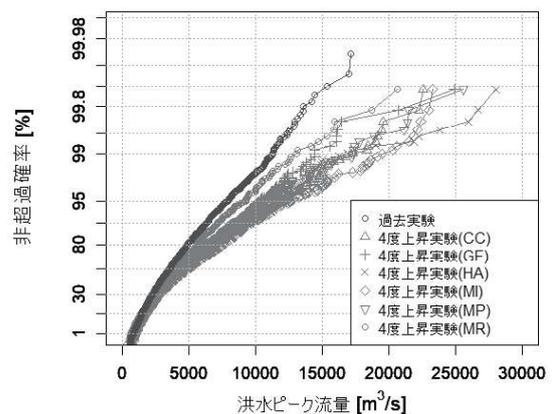
図3 栃木県管理河川の堤防決壊地点における集水面積と推定ピーク流出高の関係：赤印は山地からの流出河川を、青印は上流部に山地流域が無い河川を表す。参考として秋山川および永野川の計画流量を流出高に換算した結果を黒印で示す。

鳴瀬川、阿武隈川について、過去実験および4度上昇実験の年最大洪水ピーク流量と非超過確率をそれぞれ図4に示す。非超過確率の推定には、すべてWeibull公式を用いた。図中の赤線のマークの違ひは、4度上昇実験で与えている海水面温度分布アンサンブルの違ひを表し、凡例中の表記は予測に使用された海水面温度の将来変化パターンの頭文字を意味する。どちらの水系も、4度上昇実験では洪水ピーク流量が大きく増加することがわかる。台風19号の洪水ピーク流量の計算値は鳴瀬川（三本木橋地点）で2,058 m³/s、阿武隈川（岩沼地点）で11,467 m³/sであり、過去実験によると再現期間はそれぞれ535年、123年に相当する。阿武隈川では、台風19号の観測流

量に見られたように、上流の氾濫の影響で実際の流量は計算値よりも小さいと考えられるが、上流域を含めた流域全体として約120年程度の再現期間に対応する規模の洪水であったといえる。4度上昇気候下では、同計算流量の再現期間が6つの海水面アンサンブルに対して、鳴瀬川および阿武隈川でそれぞれ約32年～100年、約16年～58年と推定された。このように、4度上昇気候シナリオの下では高頻度化することが明らかとなった。



(a) 鳴瀬川（三本木橋地点）



(b) 阿武隈川（岩沼地点）

図4 d4PDFの洪水ピーク流量の非超過確率（青：過去実験，赤：4度上昇実験）

3.3 河川グループ

台風19号に起因する豪雨により、千曲川では大規模出水となり、河道内では流路が大きく変動した。特に、上田市においては、流路変動によって堤防が侵食を受け、上田電鉄鉄道橋（KP104付近）が落橋するに至った。平面二次元河床変動シミュレーション結果に基づいて、砂州と流れの時間変化から堤防欠損との関連を考察する。従来交互に形成されていた砂州が、洪水流と土砂移動によってピーク流量時点で下流側に移動をしていた。この砂州の移動と流

路変動、並びに河岸侵食の関係についてより詳細に検討するために、**図 5** に流れの変化と横断面における最深河床位置の変化を示す。**図 5a** に示すように、ピーク流量時点では、流れは流路幅全体に直線的に流れ、最深河床位置も洪水前に形成されている滞筋に沿っている。この時点では、堤防欠損地点から見ると主流路は河川の中央部に位置している。一方、流量の低下に伴い流線は大きく蛇行しはじめ、最深河床位置が下流に移動しつつ、堤防に近づいていく様子がわかる(**図 5b, c**)。この時、川幅全体にわたって大規模な砂州が発達することにより、流れの蛇行と集中を誘発し、河岸を侵食したと考えられる。

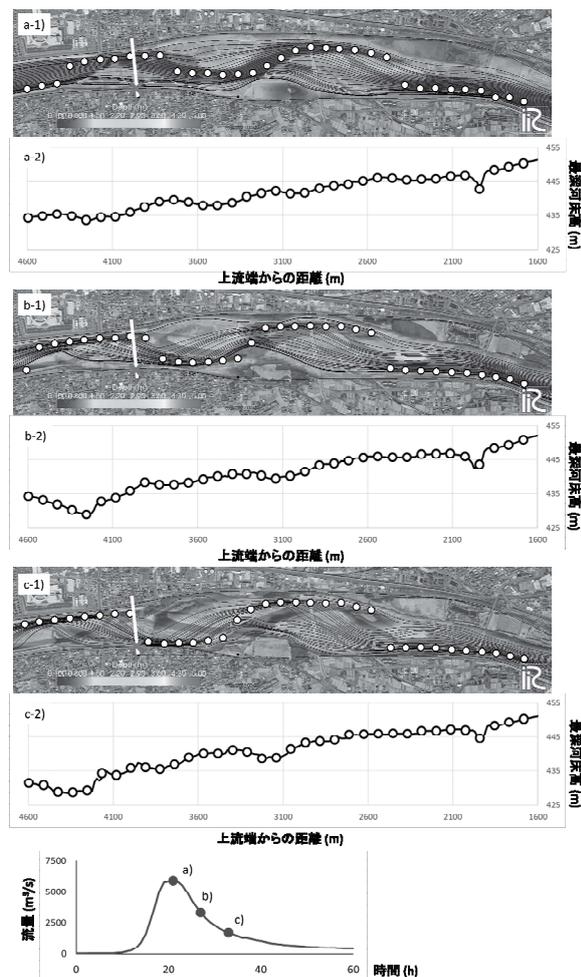


図 5 流れと横断面内における最深河床位置の時間変化。流れ場は、水深コンターと流線により可視化している。また、a-1)、b-1)、c-1)における○は横断面内における最深河床の位置を表しており、a-2)、b-2)、c-2)はその縦断面図を示している。図中の×は落橋地点を示している。

千曲川における砂州は、長年固定化され、植生が密生していたものも多く、河道はいわゆる二極化状態にあった。しかし、ひとたび大規模出水が発生す

れば、急流河川特有の激しい侵食力により砂州や流路が大きく変動し、堤防侵食や落橋といったリスクを引き起こすことが本検討で改めて示された。

久慈川における二線堤の決壊状況を**図 6(a)**に示す。左岸の堤内地を流下してきた氾濫流は二線堤で堰き止められ、水位が上昇し、その後、氾濫流が天端を越える過程でE点(河口から22.5 km)の二線堤を浸食し破堤に至ったと考えられる。SNS で情報提供いただいた10月13日8時頃に撮影された映像を確認した。二線堤の上流側では国道が冠水しているが、下流側では道路のガードレールが見えるなど道路は冠水していないことが確認できる。このことから氾濫流が二線堤により堰上げられていることがわかる。また、国道には陸閘が設置されているが、浸水時には閉じられていなかったことを聞き取り調査によって確認した。この映像が撮影された約1時間半後の9時39分の陸閘付近の様子を**図 6(b)**(常陸太田市防災対策課提供)を示す。二線堤付近の水位が下がり、国道の陸閘を氾濫流が流れている様子がわかり、この時点では二線堤上流側の国道はまだ冠水している状況も確認できる。これらの知見は、今後の流域治水を進めていく上で貴重なものである。



図 6 久慈川・二線堤の決壊状況

3.4 建築グループ

家屋被害状況を、大規模氾濫が発生した千曲川破堤箇所付近(57.5k 左岸の穂保地区)において調査した。以下に示す住宅は、**図 7**中の番号に示すように、いずれも決壊地点近傍に位置する。**図 8(a)**の2階建て木造在来軸組構法住宅(**図 7**住宅③)は流出していないが、急流により1階の壁は流され、柱のみを残した結果、流れが中を通り抜けられるようになり、作用力が減って残存したと考えられる。柱が基礎に緊結され、柱と梁が比較的剛に接合されてい

たことも、流出と倒壊をまぬがれた要因と考えられる。しかしながら、建物基礎周囲は洗堀され、柱が西側に2/100程度傾いているが計測された。



図7 長野県長野市穂保、千曲川破堤箇所近傍の空中写真 (GoogleMap) (赤い丸：流出住宅，オレンジ丸：大破住宅)

住宅④～⑥は、住宅③より破堤点から遠くに位置するがともに流出した(図8(b))。Google Map Street View から④の商店の築年数が古く、水平耐力も低かったと推測される。④の商店は図8(b)右側手前に写る基礎を残し、北西方向に直線的に流され、住宅に衝突して止まったようである。⑤の住宅は、上部構造が基礎にしっかり緊結されていたためか土台が基礎に残っている。また、⑥の住宅は図8(b)に示す元位置からはるか後方(西の方)200mまで比較的無傷の状態で見られている。流出前後の位置を図7に示す。この住宅は、住宅基礎に一般的に設けられている基礎下換気孔(床下と基礎の間の空間の湿気対策および換気用に設けられている)がないタイプの住宅と見られ、かつ、ベタ基礎(住宅下面にコンクリートが敷設されている)であったため、気密性が高かった。住宅⑤などによって破堤直後の強い流体力から守られることで大きな破壊を免れた可能性も高い。このため、住宅⑥では、周囲の急激な浸水深の増加に比べて気密性ゆえに住宅内部への浸水が遅れ、水位の内外差によって大きな浮力が発生して流されたと考えられる。

図8(c)の住宅⑦は1階が完全なピロティとして駐車場として利用されていた2階建て鉄骨造住宅である。浸水を想定した建築的対処方法であったかは定かではないが、1階に壁がほとんどないため流体力を受け流すことができる構造となっている。しかしながら、図7の通り約20m西に流され、駐車場屋根に衝突することで止まった(図8(c)参照)。



(a)大破した2階建木造住宅③



(b) 流出した住宅④，⑤，⑥



(c)住宅⑦(大破して流出した2階建て鉄骨造住宅，1階はピロティ形式)

図8 家屋被害状況(千曲川・破堤箇所周辺)

1階の柱が大きく変形し、大破している。1階のピロティ構造にかかわらず、崩壊にいたった要因として漂流物の蓄積によるダム化が想定される。⑦の住宅の北西隣に位置し、残存した2階建て木と鉄骨の混構造住宅(梁に一部鉄骨が用いられている)前面の堆積物から漂流物の多さが伺える。この住宅が残存した要因の一つとして、その東隣(破堤点側)に位置した1階建て軽量鉄骨小屋に防護されたためであると考えられる。今後人命保護や財産保護を考慮して、内部浸水がしにくい気密性住宅が増えることが想定される。しかしながら、浮力により基礎の滑動

被害が生じ継続利用が困難となってしまう住宅が増えること予想される。

3.5 農業グループ

台風 19 号によるため池被害状況をみると、全国で 12 基の決壊が確認された。そのうち一基のため池を除いて大正期以前に構築された堤体で、経験的な技術によって築造されていた時代の構造様式となっている。一方でため池に関する指針が制定され、近代的な技術によって改修されたため池の決壊は確認されていない。決壊したため池は、堤高が 3m~6m 程度の小規模のもので、改修履歴もなく堤体、洪水吐、取水施設、安全施設の点検では、改修の緊急性は低いと総合判断されている。決壊に至った主要原因を特定することは困難であるが、堤体が全延長に亘って崩壊するのではなく、堤体の一部が V 字状に崩壊していることから（図 9）、底樋などが設置される箇所などの弱点部が起点となっていることが指摘できる。また、下流法面のすべりも認められることから、小規模の堤体であっても降雨浸透によって斜面崩壊が発生していることが確認される。また、越流による堤体崩壊を決定づける明確な情報は得られないが、洪水による貯水位急上昇によるパイピングの発生と下流斜面の崩壊の発生が複合的に発生した可能性が高い。



図 9 宮城県逆川上溜池の決壊状況（農林水産省提供）

3.6 地盤グループ

土砂災害が多発した宮城県丸森町の土砂災害発生状況を調べた。C-X合成レーダによって得られた土石流発生地点における降雨強度の時間的な変化を図10に示す。降雨は、2019年10月12日午前9時ぐらいから10月13日午前2時ぐらいまで降り続いており、12日午後9時6分に最大降雨強度を記録している。近くに住んでいる住民によると、午後9時7分に土石流が発生したとのことであり、ちょうど最大降雨強度の発生

時間と一致している。土石流発生までの積算降水量は309mmであり、同じ花崗岩系の地質で発生した2018年の広島県安芸郡熊野町川角での土石流発生までの積算降水量153mmに比べると、土石流発生までの積算降水量が大きいことがわかる。これは、最大降雨強度と斜面勾配の両地点での違いが影響を与えていると考えられる。2018年の広島県安芸郡熊野町川角で土石流を発生させた豪雨の最大降雨強度は120mmを超えており、子安地区の1.5倍以上となっている。どちらの土石流も表層崩壊起源であることを考えると、斜面表層の土壌水分量の増加によって崩壊が発生していると考えられるため、短時間でも最大降雨強度が大きい方が表層における水分量が一時的に増えるため、積算降雨量が少なくても斜面崩壊が発生しやすい状態となると考えられる。また、広島県安芸郡熊野町川角の斜面勾配は約25度であり、子安地区の18度よりも斜面勾配が急であり、崩壊が発生しやすいと考えられる。

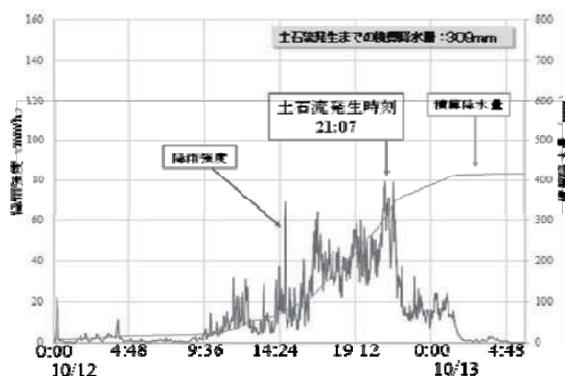


図 10 C-X 合成レーダによる土石流発生地点における降雨強度の時間的な変化

堤防被災状況の特徴を明らかにするために、直轄 3 河川（阿武隈川上流、鳴瀬川、吉田川）の堤防被害数を被害形態ごとに表 1 に示す。被害形態は決壊、裏法崩れ、漏水に分類され、決壊箇所は全て越水による裏法侵食が主原因である。被害形態の内、土質や土層構成等の地盤に関する要因が強く影響する法崩れと漏水については、発生率（1km あたりの発生箇所数）も示す。また、比較のために矢部川、鬼怒川および重信川の被災事例も併せて記載した。

法崩れに関しては、今回の 3 河川での発生率は 0.05~0.17 箇所/km の幅に入っている。鬼怒川や重信川とも大差は無い。3 河川の法崩れ箇所の内、崩壊が法肩近くにまで達する大きなものは阿武隈川上流左岸 17.4k と鳴瀬川左岸 40.7k、吉田川右岸 24.1k で確認した。堤体及び崩壊した堤体土の観察から、阿武隈川と鳴瀬川の被災箇所では、堤体内水位は裏法面中ほどでは堤体底面から 1m 程度上昇した痕跡

表1 被害形態ごとの発生件数と発生率
(各被害数は箇所数, 漏水は基盤漏水と堤体漏水の合算)

	決壊	法崩れ	漏水	被害範囲	法崩れ率 (箇所/km)	漏水率 (箇所/km)
阿武隈川上流	1	10	11	103.4K (5.4~108.8K)	0.05	0.11
鳴瀬川	0	9	0	40.3K (0.4~40.7K)	0.12	0
吉田川	1	14	1	29.7K (1.6~31.3K)	0.17	0.03
鬼怒川(2015)	1	7	23	34.0K (7.9~41.9K)	0.10	0.34
重信川(2017)	0	1	28	4.9K (1.1~6.0K)	0.10	5.71
矢部川(2012)	1	5	17	12.4K (5.0~17.4K)	0.20	0.68

※発生率の算定にあたって、被害範囲は漏水あるいは法崩れが生じた最上流箇所から最下流箇所までの距離とした。吉田川では被害範囲に占める越流区間長および水位が HWL を上回った区間長が 8 割以上、阿武隈川では約 3 割、鳴瀬川ではほぼゼロである。鬼怒川(2015)では約 7 割、重信川(2017)では HWL を超えた区間はなく、矢部川(2012)ではほぼ全区間で HWL を超過した、

(外水位)しか見られず、法面からの雨水の浸透により表層が滑り破壊を生じたものと考えられる。したがって、もしも洪水がさらに長時間継続したとしても堤体内水位が大幅に上昇しなければ崩壊領域がさらに拡大し先端まで崩壊することは無かったものと考えられる。今回の出水による裏法崩れは、何れも堤防の治水機能を損なうようなものではなかった。

次に漏水に関しては、3 河川では全体的に今回の出水による漏水率が低かった。漏水率がゼロの鳴瀬川は、外水位が低く高水継続時間が短かったこと、さらに基礎地盤には透水性の高いレキ層はなく地表には粘土層が広く分布していることがその理由として考えられる。同じ地域を流れ、基礎地盤の特性としては鳴瀬川と比較的類似している吉田川では、大半の区間で HWL 以上の外水位となったにも関わらず僅か 1 カ所、漏水率は 0.03 箇所/km になった。吉田川については、大半の区間で HWL 以上の外力が作用したにも関わらずほとんど漏水が発生せず、漏水に対する安全性が確認されたものと言える。阿武隈川上流の漏水は 11 カ所に上っているが、漏水率は 0.11 箇所/km と低い。漏水率は、基礎地盤や堤体の土質や土層構成によって大きく変わる。基礎地盤および堤体が砂やレキで構成されている重信川では HWL を超える区間が無かったにもかかわらず漏水箇所が多く、漏水率が 1km あたり 5 か所以上と極端に大きい。鬼怒川では漏水被害のあった区間での水位は HWL 前後 (およそ ±1m) と高く、漏水率は 0.34 箇所/km と高い。また、矢部川では全川にわたって HWL を超え (越水区間はなかった)、漏水率は 0.68 箇所/km と高かった。

3.7 高潮・高波グループ

台風 19 号の海岸被災調査は、発達したうねりによる海岸の被災が広範囲に及んだため、御前崎から犬吠埼までの長い海岸線を対象として実施された。台風来襲直後からの複数チームによる調査によって、**図 11** に示すような痕跡高さの分布が得られた。台風 19 号では広範囲の海岸で高潮による水位上昇があったものの、潮位観測記録から東京湾内を除いて痕跡高に占める寄与は 1.0 m 未満であり、計測された高さは主に高波浪の遡上によるものである。特に高い遡上高が見られたのは台風進路に近い相模湾・駿河湾沿いの海岸であり、広い範囲で 5 m (T.P. 上) を越える遡上高が計測された。太平洋に開いた両湾では湾軸に沿って深い海谷が存在し、外洋からのうねりは減衰することなく湾内へと伝わり、湾奥の西湘海岸や富士海岸で大きな遡上を生じた。

特に大きな遡上高が計測されたのは相模湾奥の西湘海岸であり、大磯漁港の西側の海岸では波浪による遡上が最大で 13 m (T.P. 上) に達していた。遡上波によって海岸沿いを走る西湘バイパスでは、盛土区間の海側斜面に侵食が生じ、海側の高速度道路施設も越波被害を受けた。西湘バイパスは、2007年の台風 9 号 (FITOW) や 2017年の台風 21号 (LAN) でも大規模に被災しており、海岸での長周期波 (数十秒～数分程度の周期をもつ波) の発達が被災に関与していることが指摘されている。このような長周期波は、台風によって直接的に生成されるものではなく、浅海域で周期の異なる波浪成分の相互干渉によって生成され、通常の海岸では反射によって沖へと伝わる事が知

られている。沖合に急峻な海底斜面を有する西湘海岸では、沖に向かう長周期波が急斜面で屈折・再反射することで海岸に捕捉されて増幅する傾向がある。台風19号においても、西湘海岸での波浪観測データ（国土交通省による）には著大な長周期成分が記録されており、こうした複雑な地形上での波浪発達過程が大遡上に関与したものと推測された。相模湾奥部の痕跡高は西湘海岸から東側の湘南海岸にかけて急減しており、著大なうねりを減衰させる浅い陸棚が東に向かって拡大することに帰すると考えられる。湘南海岸においては、各地の海水浴場で後浜にまで遡上が達しており、砂浜背後の国道まで浸水している場所もあった。稲村ヶ崎付近の海岸では国道が護岸の吸出しによって沈下し、台風直後の地域交通に大きな影響を与えた。さらに東側の三浦半島の相模湾に面した海岸も高波浪による影響を受けたが、顕著な被害は確認されなかった。

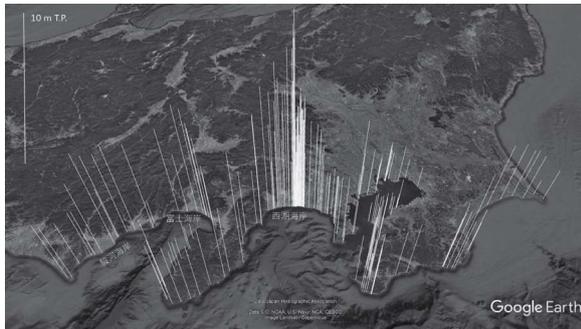


図11 2019年台風19号による御前崎～犬吠埼間の海岸での水位痕跡高の分布（左上のバーが10 m T.P.の高さに相当、データはShimozonoら（2020）に基づく）。

台風来襲時に国土交通省により設置されていた波高計と流速計をもとに、台風ピーク時前後の波浪成分を分析した（水深6～20 m地点、図12）。台風15号では水深13 m地点（P3）で波高約5 m、台風19号では8 mを越える有義波高が確認された。また、主に波群の拘束波として発達したと考えられる長周期成分（ <0.04 Hz）の波高は台風15号で1 m、19号で2 m程度と観測された。これら長周期波の伝播過程をより詳細に把握するため、ほぼ同一水深の三点（P1a, P2a, P3）で流速変動の得られた台風15号での観測結果を対象とし、水位変動と流速の長周期成分との関係を相互相関解析によって分析した。その結果、P3においては岸沖方向流速の長周期成分と水位変動の長周期成分との間に位相差を持った強い相関が存在し、観測された長周期波は主に岸沖方向の部分重複波を形成していることが示唆された。一方で、P1aでは水位変動と沿岸方向流速の間に位相差0

sの強い負の相関が台風ピーク時を中心に確認され、大磯海脚（Oiso Spur）西側では沿岸方向を西側に向かって伝播する成分の存在が示唆された。このことから、台風19号来襲時においても、急峻な地形の影響を受けて、浅海域で発達し、海岸で部分反射した長周期波が屈折によって沿岸方向に伝播していた可能性が示唆された。

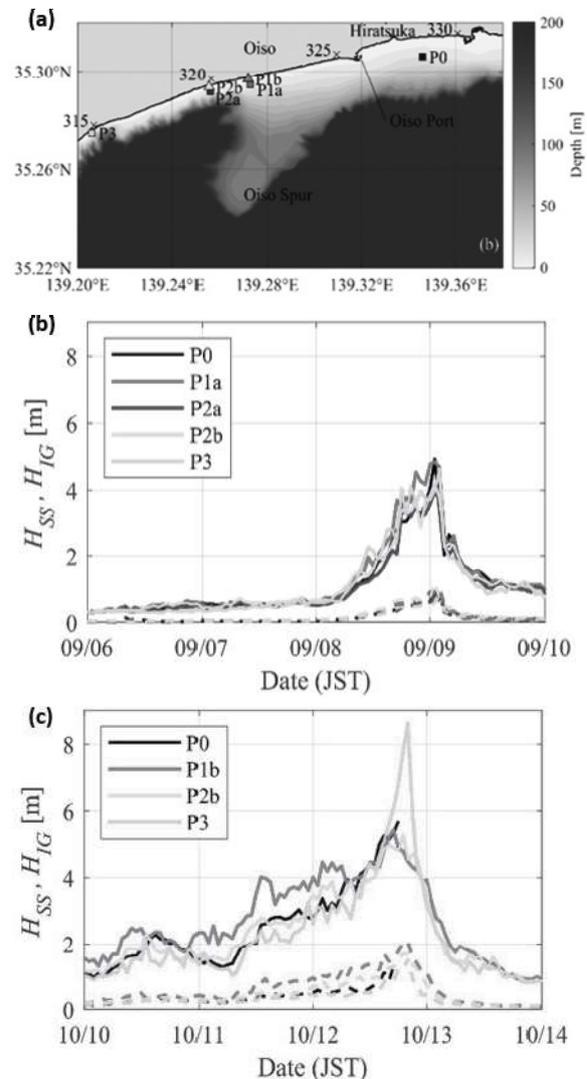


図12 風波波高（実線）および長周期波波高（破線）の観測値（観測位置(a)、台風15号(b)、台風19号(c)）

3.8 強風グループ

表2に2019年台風15号と台風19号の強風被害の特徴を比較して示す。台風19号は、上陸時の暴風・強風半径が台風15号の約3倍と広い範囲に影響を与えた可能性があるが、その影響は上陸後の中心気圧の上昇（勢力の衰退）により顕著なものとはならなかった。住家被害に関しても被害発生地域は、台風19号による影響は台風15号に比べて広い範囲にわ

たっており件数が多いが、その多くは豪雨による水害に起因するものであった。台風15号に比べ浸水被害件数割合が高いことなどからもそれが理解される。

表2 台風15号と19号の強風被害の特徴の比較

項目	台風15号	台風19号
上陸時の台風情報	中心気圧 955～960 hPa 暴風半径 110km, 強風半径 220 km	中心気圧 955～965 hPa 暴風半径 330km 強風半径 650 km
最大風速	神津島 43.4m/s 羽田 32.4m/s, 等	羽田 34.8m/s 神津島 30.7]m/s (一部欠測), 等
住家被害	千葉県房総半島を中心に, 住家被害(全壊, 半壊, 一部損壊合計) 40,304棟*) 床上, 床下浸水合計 207棟*) 浸水件数割合 =0.5% =207/(40304+207)	北海道から九州まで, 住家被害(全壊, 半壊, 一部損壊合計) 67,985棟*) 床上, 床下浸水合計 30,929棟*) 浸水件数割合=35% =37056/(67985+37056)
その他の顕著な被害	千葉県君津市において送電鉄塔2基の倒壊, 千葉県を中心に電柱1,996本の倒壊・損傷 その他, 房総半島を中心に強風による被害多数	千葉県市原市において竜巻による被害発生 強風により建築物, 構造物の劣化等が顕在化した事例が散見された。

*)消防庁統計値は速報値で、住家被害と浸水被害の件数については、重複カウントしていないことを確認した。そこで、件数の差ではなく、被害件数割合で比較することとした。一方、内閣府被災度判定では、浸水深に応じ、住家被害は、全壊、半壊、一部損壊に振り分けられる。この件数は未公表である。

図13に台風19号に伴い千葉県市原市で発生した竜巻の被害状況を示す。同図Aで発生した運動場のネットフェンス支持コンクリート中の折損被害は、気象庁日本版改良藤田スケールでは、DI:(24) ネット(野球場・ゴルフ場等), DOD:(2) 支柱の倒壊(代表値65m/s)と判断される。同図Cでは、木造住宅の被害が見られた。2階建て住宅で、屋根小屋組みが飛散している。DI:(1) 木造の住宅又は店舗, DOD:(7) 小屋組の構成部材の損壊又は飛散(代表値65m/s)と判断される。住宅の敷地内に駐車されていた軽自動車は60m程度飛散していた。同図Dでは車両の飛散が見られた。飛散した車両は写真にある通常の乗用車のほかに、軽自動車、トラック等かなり多くの車種にわたって横転、飛散などの被害が発生した。同図Eでは志津公民館の開口部(窓ガラス, サッシ)に被害が見られた。同公民館の敷地内では、比較的直径の大きな樹木の根返りや、受電

設備(キュービクル)の鋼製収納が膨張するように外向きに変形する被害, 受水槽の鋼製の蓋の飛散等, 竜巻の吸引渦の影響によると考えられるような被害が見られた。

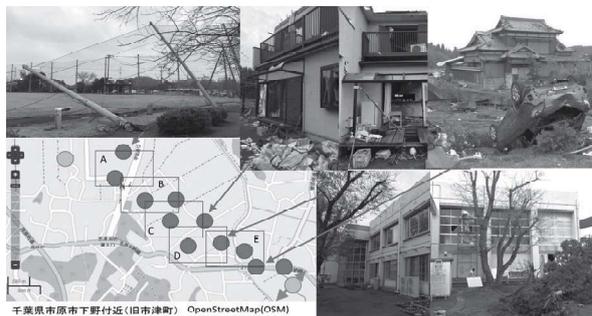


図13 千葉県市原市(下野付近)に発生した竜巻による主な被害

3.9 避難・経済被害グループ

今次台風による犠牲者(死者・行方不明者)の特徴を記述する。原因外力別の犠牲者数は(図14), 1999-2018年の風水害では「土砂」が相対的に多く46%(580人)で、「洪水」23%(285人), 「河川」19%(242人)の順となる。「洪水」, 「河川」は筆者(牛山)独自の分類で、「洪水」が河川からあふれた水に起因する犠牲者, 「河川」が増水した河川等に接近して転落などした犠牲者である。台風19号等では「洪水」が53%を占め, 「河川」と合わせると71%となる。近年の風水害と比べ, 水関係犠牲者の比率がかなり高かったことが台風19号等の特徴である。

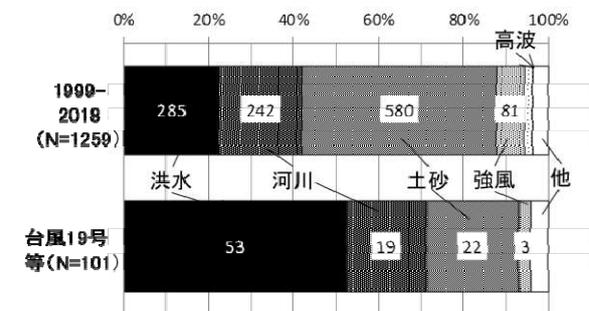


図14 原因外力別の犠牲者数

「洪水」・「河川」犠牲者について、発生位置を推定できたものを対象に洪水等の危険箇所との関係を検討した。ここでは国土交通省「重ねるハザードマップ」を元に、その場所が浸水想定区域(計画規模)または浸水想定区域(想定最大)の「範囲内」かどうかを検討した(図15)。なお被害が多かった福島県いわき市は「重ねるハザードマップ」では浸水想定区域がないが、公表されている市発行のハザードマップを参照した。1999-2018では「範囲内」「範囲近傍」の合計が43%にとどまり, 「土砂」犠牲者とは

傾向が異なる。これは、土砂災害危険箇所等は、地形情報を元に全国的に整備されているのに対し、浸水想定区域は河川単位で整備され、中小河川は整備が進んでいない事の影響が考えられる。台風19号等では、「範囲内」「範囲近傍」の犠牲者が68%と比較的多かったが、それでも土砂災害の一般的な傾向と比べれば「範囲外」がやや多い。

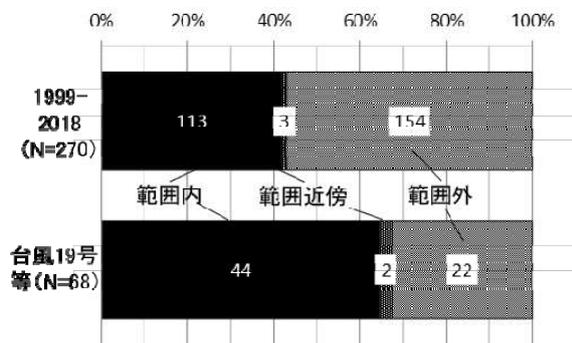


図15 浸水想定区域の範囲内外別の犠牲者数

操業能力の復旧に影響を与えた要因と各要因の平均的な影響日数を図16に示す。建物や設備の被害が復旧に大きな影響を与えているが、専門業者が不足していることも間接的にこうした施設の復旧に影響を及ぼしている。また、長期的にみれば、復旧資金自体が不足していることの影響も大きい。この問題に直面している事業所では操業水準は元のレベルに回復していないケースがほとんどである。ライフラインの中では、都市ガスの被害影響が最も長く続いており、上水道、交通インフラ、通信、停電の順に影響日数が長くなっている。なお、全事業所の被害額の比率は、建物復旧費用：22%、設備復旧費用：37%、在庫被害：10%、建物設備・除却費用：9%と、直接的な被害が大部分を占めるが、受注減少による損失：10%、受注分のキャンセルによる損失：9%、と売り上げに関わる損失も大きい。なお、直接被害と売上減少分は便宜的に合計しているが、被害総額の推計の為に固定費用等の考慮が必要となる。

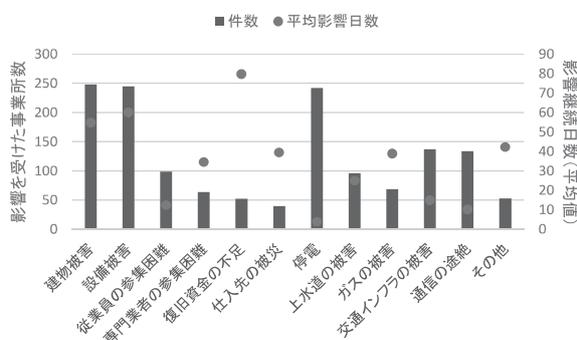


図16 操業能力の復旧に影響を与えた要因と各要因の影響日数

4. 研究成果の発信

得られた研究成果を広く社会一般に公表するために、成果報告会の開催を企画した。当初は、2020年3月26日開催を予定していたが、コロナウイルス感染防止のため、同年7月15日に延期した。開催方法も当初の対面から、WEB会議ツール「zoom」を用いたオンライン会議形式での開催となった。研究者や建設コンサルタント、行政機関、学生などから162名の参加があった。コロナ感染防止に配慮した形で、来たる台風シーズンの前に報告会をなんとか開催できた。また、研究成果を取りまとめた「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究」報告書を作成し、インターネット上で広く公表する予定である。

5. まとめと今後に向けた提言

本研究では、令和元(2019)年台風19号及び台風21号による広域災害の被害状況・メカニズムの全容を明らかにすることを目的とした調査・解析を行った。ここでは、気象、水文(降雨流出)、河川洪水氾濫、土砂災害、地盤、高潮・高波、強風、避難行動、経済被害の観点から、現地調査やデータ解析、各種数値シミュレーションを実施し、多角的に検討した。浸水面積が350km²以上、建物被害が10万棟以上発生し、これは平成30年7月豪雨(西日本豪雨)の約2倍と広範囲かつ甚大な洪水氾濫被害となった。また、台風による土砂災害発生件数も過去最多、沿岸部では強風(竜巻)、高波被害が発生した。

本研究の調査研究の成果に基づいて、各グループでは、今後に向けた提言を作成した。それらの提言を一覧できる形でまとめたものを表3に示す。ここでは、各グループの提言を、分野別(気象、洪水氾濫、土砂災害、高潮・高波、建築・農業他)に分類した。また、内容として、メカニズム解明、予測・リスク評価・技術開発、対策に分けた。対策については、ハード対策全般、流域対策、気候変動関連、ソフト対策、に細分化した。ハザードとしては、台風19号の災害の特徴を反映して、洪水氾濫に対する提言が最も多い。また、洪水氾濫の被害を受ける建築分野・農業分野からも提言が含まれている。内容については表3を参照されたい。

なお、本文中で示された全ての結果や図表に関しては、令和元年度科学研究費助成事業・特別研究促進費研究「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究」報告書から引用した。

表3 今後に向けた提言

分野	気象	洪水氾濫 (全般)	洪水氾濫 (堤防、ため池)	土砂災害	高潮・高波/強風	建築・農業他
メカニズム 説明	(気象)発生した気象現象のメカニズムに関する知見の体系化を図るべきである。	(地盤)よりリスクの高い地点の周知と越水・破堤による予測される災害現象を理解する必要がある。	(地盤)合流する支流の堤防の浸透による不安定化や氾濫の危険性の監視する必要がある。	(避難)土砂災害危険箇所「範囲外」であっても、リスクは存在することを周知する必要がある。		(避難)浸水想定区域図だけでなく地形分類情報も有益である。地形分類情報を活用できる人材の育成が必要である。
	(水文)降雨パターンの変化による水害リスクの変化を認知する必要がある。	(地盤)現行の土砂災害対策に土砂洪水氾濫の要素を加え見直しながら運用する。				
予測・リスク 評価・技術 開発	(気象)観測事実の再現可能なモデル構築と予測技術向上により、ハザード予測を災害予測にまで活用できる技術開発が継続して必要である。	(水文)アンサンブル予報による不確実性を含めた長時間洪水予測情報を提供する必要がある。 (河川)ハザードマップでは読み取れない浸水リスクを明示し、特に本川と支川の合流部の浸水リスクが高いことを周知する必要がある。	(地盤)堤防情報の在り方を検討し、研究・技術開発を継続するしくみづくりが必要である。 (地盤)想定すべき作用に対して堤防の発揮すべき性能を発揮できるように設計論を進展させるとともに、ねばり強さを発現させるような研究・技術開発に注力する必要がある。	(地盤)斜面前壊の発生場・発生時・発生規模の予測と土石流の到達範囲予測を組み合わせた動的なハザードマップや、土砂・洪水氾濫のリスク評価に向けた流域からの土砂生産量の推定を高度化してゆく必要がある。	(高潮)海岸長周期波の発達・捕捉の予測技術開発と海岸保全・防災対策に反映する必要がある。 (強風)台風時のリアルタイムモニタリング技術の向上等を通じて、局所的な竜巻等の突風予測を実現し、防災に結びつける必要がある。	(建築)住宅流出防止を目的とした浮力評価方法は検討すべき課題である。 (農業)長延長となる水利システムの機能と危険度を適正に評価し、洪水予測に基づく事前対策の実施が必要である。
		(河川)最新の計測技術を有効活用して、中小河川管理に不可欠な基礎データ整備を効率的に促進する。			(強風)海岸付近の地表面の空気力学的抵抗が小さい地域では、慎重な設計風速の評価が必要である。	(避難)水害広域化や少子高齢化による復旧資源減少を踏まえ、浸水を前提とした産業早期復旧の備えが重要である。
		(地盤)ハザードマップ作成や洪水時の水位予測などにおいて、河床変動の影響の考慮すべきである。				
対策(全般)		(河川)台風19号の洪水規模と現況の河川治水体力を比較すると共に、河川整備計画を可及的速やかに達成することが不可欠である。	(農業)中山間地域のため池は、越流により簡単に破堤しない構造様式とし、そのための新技術を用いた改修基準を策定する必要がある。			(建築)建築的観点から求められる洪水対策について、技術的・費用対効果の観点から研究を積み重ねる必要がある。
		水文提言3: 地形的な特徴を踏まえた中小河川の洪水対策が必要である。				
対策(流域)		(河川)堤防決壊や越流に伴う大規模氾濫が多いため、堤内地での氾濫流制御と共に、早急に河道に戻す工夫を行って、氾濫面積・時間を最小化する必要がある。			(避難)学校施設を避難所として活用するためには、施設の防災機能を上げるだけでなく、学校機能を早期に回復させるための計画も検討しておく必要がある。	
		(河川)浸水被害が頻発した支川合流部の水害リスクを認知し、土地利用規制・誘導を含む流域対策を積極的に進めることが必須である。 (水文)河道では流しきれない氾濫流の制御方法を、流域全体で都市計画、地域計画と一体として考える必要がある。				
気候変動	(気象)温暖化の影響が出だし、後悔しない適応が重要である。科学的予測を元にした適応計画を構築し今すぐ実行することが重要である。			(地盤)気候変動に伴う土砂輸送増加量を定量化するため、素因・誘因を用いた評価技術の開発が必要である。	(高潮)気候変動に伴う海岸外力の増大並びに、それに対する防護施設の強靱化・漂流物対策の検討を進めることが必要である。	
ソフト対策		(地盤)土石流発生が予測される地点に対して土石流の数値シミュレーション等を実施し、避難方法決定に役立てる。 (避難)立ち退き避難が必要な人に、避難行動をとってもらうためには地域や離れた場所ですら家族とのコミュニケーションが求められる。				(建築)浸水想定区域住民のための住宅仕様選定・住宅清掃・補修マニュアルを整備する。

謝 辞

本稿は、令和元年度科学研究費助成事業・特別研究促進費「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究」（研究代表者：二瓶泰雄，課題番号：19K24678）の助成を受けて、今次台風により災害発生メカニズム把握や人的・物的被害の解明のための調査研究を総合的に実施し、取りまとめました。調査に際しては、土木学会，日本気象学会，日本建築学会，地盤工学会などに所属する研究者・技術者・学生に多くの協力を得ました。また，現地調査実施や関連データの提供に対して，国土交通省関東・北陸・東北地方整備局，農林水産省，長野県，宮城県，福島県，栃木県，千葉県，神奈川県，仙台市などの関係機関，被災地の住民の皆さんにご協力いただきました。メソアンサンブル数値予報モデルGPVの降水予測情報は気象庁予報部より提供いただきました。また，文部科学省による複数の学術研究プログラム（「創生」，「統合」，SI-CAT，DIAS）間連携および地球シミュレータにより作成されたd4PDFを使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 気象庁（2020）：令和元年に顕著な災害をもたらした台風の名称について，https://www.jma.go.jp/jma/press/2002/19a/20200219_typhoonname.html（閲覧日：令和2年4月17日）。
- 国土交通省（2019）：台風第19号による被害及び今後の対応策，https://www.zenken.com/kensyuu/kousyuuikai/H31/660/660_morikubo.pdf（閲覧日：令和2年8月11日）。
- 国土交通省（2020）：堤防決壊箇所一覧（4月8日12:00時点），https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_191012.html（閲覧日：令和2年4月12日）。
- Shimozono, T., Y. Tajima, K. Kumagai, T. Arikawa, Y. Oda, Y. Shigihara, N. Mori(2020): Coastal impacts of Super Typhoon Hagibis on Greater Tokyo and Shizuoka areas, Japan., *Coastal Engineering Journal*, Vol.62, No.2, pp.129-145.