

水工学シリーズ 22-A-6

洪水・津波と地震の複合災害  
に関する基礎研究

東京理科大学 教授

二瓶 泰雄

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2022年9月

# 洪水・津波と地震の複合災害に関する基礎研究

## Fundamental Study on Compound Disaster due to Flood (Tsunami) and Earthquake

二 瓶 泰 雄

Yasuo NIHEI

### 1. はじめに

我が国では、近年、毎年のように豪雨災害が発生しているだけでなく、地震や津波、火山噴火、高波・高潮、竜巻・強風など多岐にわたる災害が発生している。例えば、2018（H30）年では、次々に災害が発生し、年間被害額は2兆円を超えた<sup>1)</sup>。6月18日には、 $M_w=6.1$ 、最大震度6弱の大阪北部地震が発生し、死者6名の被害が生じた<sup>2)</sup>。続いて、主に7月5～7日に平成30年7月豪雨（西日本豪雨）が発生し、11府県で大雨特別警報が発令され、死者・行方不明者数が245名（2019年1月9日現在）のH30年西日本豪雨が発生した<sup>3)</sup>。これにより、岡山県・広島県・愛媛県で甚大な豪雨災害が発生し、例えば、岡山県倉敷市真備町で高梁川水系小田川の洪水氾濫により、51名の犠牲者が出た<sup>4)</sup>。さらに、9月4日ごろには、非常に強い勢力の台風21号が近畿地方を縦断し、関西空港が浸水するなど大きな高潮災害と共に、最大風速58m/sに伴う甚大な風水害が発生した<sup>5)</sup>。同月6日未明に、 $M_w=6.7$ 、最大震度7を観測した北海道胆振東部地震が発生し、厚真町を中心に大量の土砂崩れが生じ、死者42名に達した<sup>6)</sup>。このように2018年では、地震と洪水による災害が、場所は違うものの時間的に連続して発生した。このように複数種類の災害が同時もしくは同時期に発生する複合災害が懸念されている。複合災害の種類としては、例えば、「地震と津波」、「地震と土砂災害」、「地震と火山噴火」、「高潮と洪水」、「地震と洪水」などが挙げられる。

これらの様々な災害の組合せの中でも、津波発生の原因の72%が地震であることから分かるように<sup>7)</sup>、地震と津波の複合災害は過去に多く発生している。記憶に新しいところでは、2011年の東日本大震災では、世界観測史上4位の $M_w=9.0$ の大地震直後に、海岸堤防高を大幅に上回る津波が発生した<sup>8)</sup>。このため、岩手県宮古市の海岸堤防は地震で100cm沈下し、その後の津波で決壊した<sup>9)</sup>。また、宮城県仙台南部海岸では、最大で12.9mの津波高を記録し、海岸保全施設の6割で被害を受けた<sup>10)</sup>。さらに、地震と津波の複合災害に関しては、松島ら<sup>11)</sup>が東日本大震災における海岸堤防の被災事例調査及び津波越流時の堤防模型実験を行い、地震で損傷した部分の遮水性が低下したことで、裏のり面コンクリートの流失が生じた可能性が高いことを示した。東日本大震災以降、海岸堤防の設計外力としては、数十年から百数十年に一回の高頻度津波（L1、防災）と最大級津波（L2、減災）が想定されている。特に、堤防を越流する規模の津波でも「粘り強く壊れず、背後地域の被害を最小限に抑える」構造が求められている<sup>12)</sup>。しかしながら、この粘り強い構造に対して、地震と津波が連続して発生する状況は想定されていない。海岸堤防に限らず、多くの社会インフラ施設の計画・設計には複合災害対策は直接的に組み込まれておらず、1つの災害のみであれば機能する対策も、複合災害の場合、十分に機能しないことも予想される。

一方、地震と洪水は、発生メカニズムが異なるため同時期の発生の確率は低く、発生事例も少ない。最も有名なものとしては、1948年の福井県では、6月28日に $M_w=7.1$ の地震が発生し、その約1か月後の7月23日に豪雨が発生し、地震により沈下した九頭竜川の堤防が決壊する、という地震・洪水複合災害が発生した<sup>13)</sup>。2018年はそれから70年ということで、災害を風化させないための記念イベントが福井県内で開催された。このような事例や近年の地震・豪雨災害の頻発化を考慮すると、地震と洪水の複合災害もインフラ計画・設計上検

討すべき課題であるが、地震と洪水の同時期発生頻度すら、ほとんど調べられていない。複合災害が発生する場合、地震や洪水単体の被災に比べ被害が増大することが懸念されるため、過去の地震や洪水氾濫状況を整理することは今後の防災対策を行う上で必要不可欠であると考えられる。

2022年の水工学における夏期研修会では、この「複合災害」がメインテーマである。本来ならば、複合災害とは、と全体像を語るべきであるが、扱う範囲が非常に広いため、著者の力量ではとてもその域には達していない。そのため、本報では、著者らがこれまで取り組んできた複合災害に関する基礎研究の一部を紹介する<sup>14), 15)</sup>。最初に、地震・洪水複合災害発生状況の事例調査を行い、地震と洪水の発生頻度や発生間隔の経年変化を調べた結果を示す<sup>14)</sup>。ここでは、洪水としては河川堤防の決壊が発生するイベントとし、地震については震度や震源データを収集する。次に、地震と洪水・津波複合災害用実験水路を作製し、それを用いた地震・津波複合災害における海岸堤防の耐災害性を検討するための基礎的実験を行った結果を示す<sup>15)</sup>。ここでは、三面コンクリート張り堤防を対象とした地震・津波複合災害実験を実施した。

## 2. 洪水・地震複合災害発生状況の事例解析<sup>14)</sup>

### 2.1 方法

#### (1) 地震事例調査の概要

本章では、地震と洪水の事例をそれぞれ調べ、その後、複合災害の可能性があるかどうかを検討する。まず、地震については気象庁の震度データベース検索を用いる。このデータベースは1922年から2日前までの震度1以上のデータが含まれ、発生日時や震度、地震の大きさ（マグニチュード）、震源の深さ、震央地名などを検索条件として、地震データを入手できる。今回は、公開データのうち1990年1月から2018年12月までを対象とする。震度5以下では実際の堤防被害はほとんど発生しないため、対象震度は6弱以上とする。得られたデータは56イベントであり、上記の情報に加え、震度6弱以上を観測した地震観測所情報を集めた。収集されたデータは、発生回数の経年変化を調べると共に、ESRI社のArcGIS10.3を用いて地図上に発生箇所を描画した。なお、我が国の震度観測では、従来まで行われた体感による計測から震度計による測定に1996年に全面的に切り替え、現在では約4370点の観測地点で常時震度計測がなされている。そのため、地震イベントの経年変化を見る上では、対象期間中の観測方法の変更や観測地点数の変化の影響を受ける可能性に注意されたい。

#### (2) 洪水事例調査の概要

洪水の指標として河川の堤防決壊を選ぶ。堤防決壊が発生した洪水イベントの情報を得るために、国交省が国内外の水害発生状況や治水事業効果を取りまとめた“水害レポート”<sup>16)</sup>をベースとした。国交省のHPに掲載されている水害レポートは1998年以降発行されているが（2002、2003年は未掲載）、1998、1999年分の情報を読み取るのが容易ではなかったため、2000～2018年の水害レポートを対象とした。また水害レポートに未掲載の堤防決壊も多くあるため、個別に過去の災害調査報告書等から入手した。堤防決壊情報の収集項目は、発生日時、水系・河川名、決壊地点、決壊要因、関連する写真や地図である。これらを地震情報と同じくGISにてまとめた。

また、堤防決壊事例と水位の長期変動トレンドとの関連性を検討する。そのため、全国一級水系における水位を水文水質データベースより収集した<sup>17)</sup>。2018年現在、水文水質データベースには、2115箇所の水位データが公開されている。そのうち常時連続的にデータが得られているテレメータ観測所の数は1672である。水位の長期トレンド解析では、年最大水位が計画高水位を上回る観測所数をカウントするため、ここでは計画高水位が公開されている1007箇所の水位観測所における1981年から2018年12月までのデータを解析対象と

する。

### (3) 複合災害発生可能性の検討方法

収集した地震と堤防決壊の情報をGIS上に取りまとめ、地震・洪水複合災害の発生事例を調べる。具体的には、地図上に描画した地震と堤防決壊地点の位置関係を調べ、堤防決壊地点の最寄りの震度観測所で震度6弱以上を観測しているかを確認する。この際、地震発生が確認されたら、震度コンターマップ<sup>18)</sup>を用いて、決壊地点に発生した震度データを収集した。

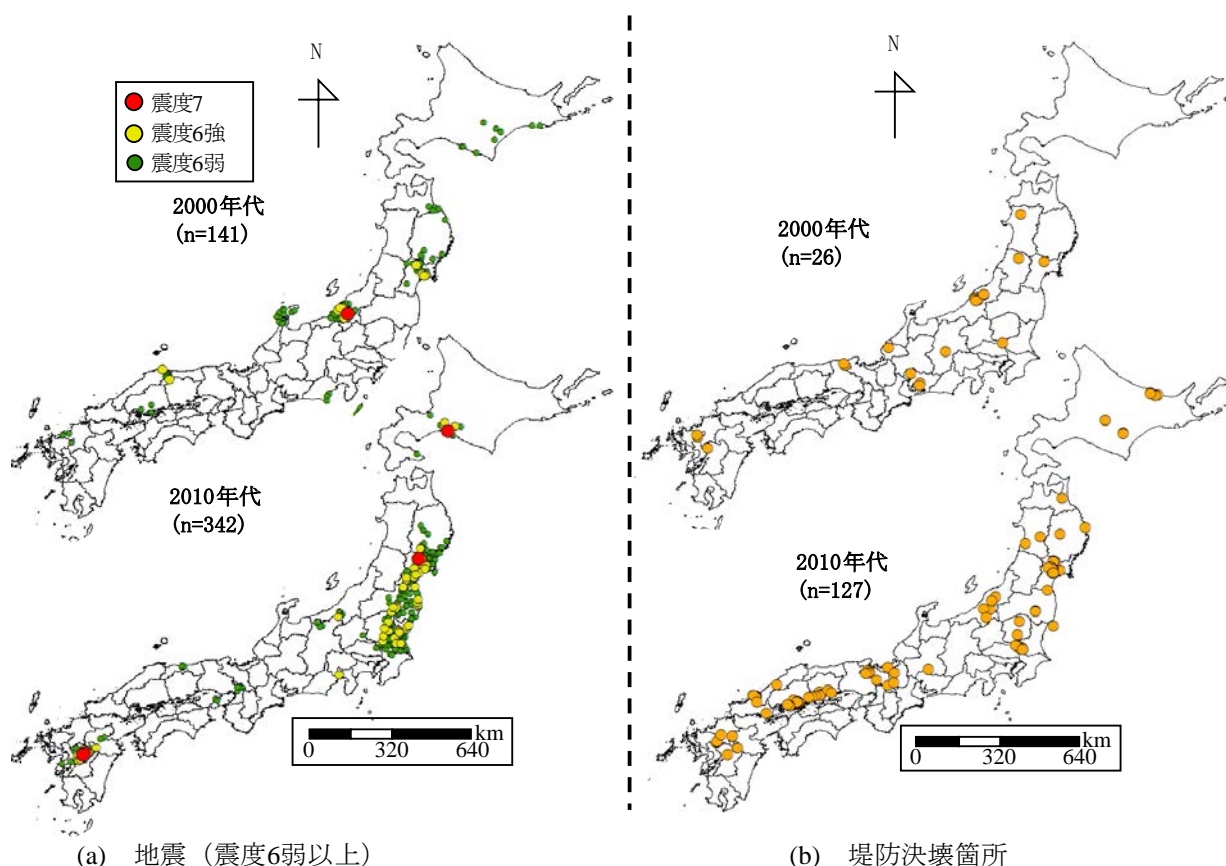


図-1 地震 (震度6弱以上, 左) ・洪水 (堤防決壊箇所, 右) 発生マップ

## 2.2 結果と考察

### (1) 地震・洪水発生マップ

2000年から2018年における地震と洪水それぞれの発生状況の全国マップを図-1に示す。地震発生条件として震度6弱以上を計測した震度観測所の位置、洪水発生条件として堤防決壊地点を、それぞれ2000年代と2010年代(～2018年まで)に分けて図示した。なお、地震に関しては震度6弱, 6強, 7の三段階に分けて表示した。これより、地震に関しては、震度7を記録した地震イベントにて多くの観測所で震度6強・6弱を観測していた。2000年以降に震度7を記録した地震は、2004年新潟県中越地震や2011年東日本大震災、2016年熊本地震、2018年北海道胆振東部地震であった。特にMw=9.0を記録した2011年東日本大震災により、岩手県から千葉県にかけて広範囲に震度6弱以上を記録した。それ以外では、長野県、石川県(能登半島)、鳥取県、広島県、福岡県において、震度6弱以上の地震が比較的多く発生した。47都道府県中、震度6強・6弱以上を観測したのは各々12, 24である。また、2000年代と2010年代を比べると、2010年代の方が多く、2011年東日本大震災の影響を受けたものと考えられる。洪水指標である堤防決壊状況に関しては、全国の多くの県で堤防決壊が発生して

いた。一方、関東南部や中部地方、四国地方、山陰地方では堤防決壊が生じていない。2000年代と2010年代を比べると、2010年代のほうが堤防決壊箇所が大きく増えている。また、この期間内に堤防決壊したのは25道府県であった。

これらのデータを都道府県別に整理したものを表-1に示す。ここでは、2000年から2018年において、地震（震度6強以上）を記録した震度観測所の地点数の総和及び、堤防決壊個所の総和から、上位10の都道府県を表示している。

これより、地震では、前述した震度7を記録した地震が発生した地域が主に含まれている。洪水に関しては、岡山県・広島県は主に2018年西日本豪雨、福岡県は2012年・2017年九州北部豪雨、北海道は2016年豪雨、宮城県・茨城県は2015年関東・東北豪雨、新潟県は2004・2011年新潟・福島豪雨によるものであり、概ね名称が付けられる広域の豪雨発生時に堤防決壊が生じている。さらに、地震と洪水の両方も含まれているのが、北海道・宮城県・新潟県・茨城県・熊本県であり、上位10のうち半数を占めている。このように、地震と洪水は、別のメカニズムで発生しているにも関わらず、いくつかの道県に集中していることが伺える。

表-1 都道府県別災害発生件数（2000-2018年における地震発生回数（震度6強）と堤防決壊箇所数）

順位	震度6強 [地点数]		破堤 [地点数]	
1	宮城県	25	岡山県	27
2	熊本県	15	宮城県	26
3	福島県	11	新潟県	18
4	新潟県	11	広島県	16
5	茨城県	10	山口県	13
6	栃木県	5	茨城県	9
7	北海道	4	北海道	8
8	静岡県	2	福岡県	7
9	鳥取県	2	京都府	6
10	岩手県	1	熊本県	4

## (2) 洪水発生状況の経年変化

これらの結果を用いて洪水発生状況の長期トレンドを調べるために、堤防決壊事例の発生回数の経年変化を図-2に示す。ここでは、発生した水系、河川、地点の数で整理し、データ元として水害レポートと他の報告書に色分けする。また、各データに対する3年移動平均値も折れ線グラフで表示する。これより、堤防決壊した水系数・河川数・地点数の全体は共に経年的に上昇トレンドとなっている、これは水害レポートのみの数でも確認されている。また、移動平均値に対して近似直線を適用したところ、いずれも傾きは正であることを確認している。このデータを用いて、2000年代と2010年代の堤防決壊数を比較したところ、水系数では13→42、河川数では21→82、地点数では26→127となっており、いずれも大幅に増加している。これらのトレンドについてt検定を実施したところ、いずれも有意性を確認できた（水系・河川・地点数の $P=0.0019$ ,  $0.0089$ ,  $0.011<0.05$ ）。

このように、同種の資料（水害レポート）を見ても、2000年代に比べ2010年代の堤防決壊数は増加トレンドであり、その統計的有意性も検証している。しかしながら、堤防決壊発生数の総数の増加傾向が見られる要因として、現時点で情報の入手し易さがここ最近の2010年代とそれ以前の2000年代で差があり、他の報告書により得られる洪水被害情報量の差異が反映している可能性がある。そのため、今後、より多くの資料を収集し、データの精査を続ける必要がある。

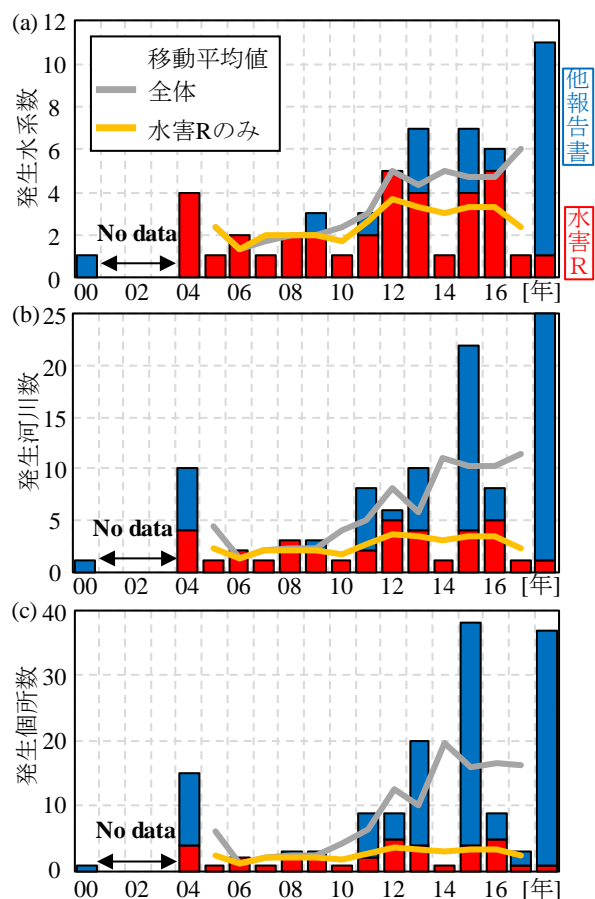


図-2 堤防決壊事例の発生回数の経年変化（水系数(a)，河川数(b)，地点数(c)）

また、このことをより詳細に検討するために、多地点の水位データを用いた長期トレンド解析を行った結果として、1980年から2018年の39年間を対象として、年最大水位が計画高水位を上回った地点数の経年変化を図-3に示す。なお、1007水位観測所を対象としたが、解析期間において地点数が経年的に変化しているため、ここでは各年の計画高水位の超過地点数を同年の観測所数で除し、1000地点あたりに換算した地点数を表示している。図-3中の黒実線は、二次関数の近似曲線である。これより、1980年代では観測所総数当たりの計画高水位を越える水位観測所はピークとなっているが、それから減少して2000年代に極小値をとり、その後、上昇トレンドに転じていた。適用した近似式（二次関数）の統計的有意性も確認した ( $P=0.013<0.05$ )。

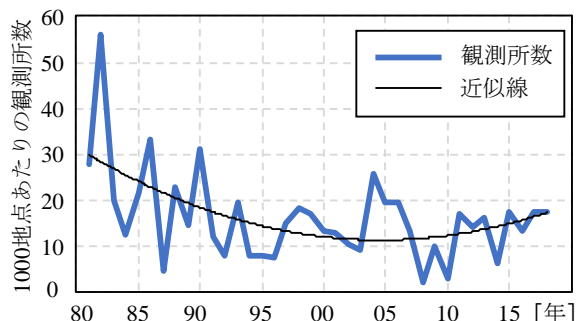


図-3 年最大水位が計画高水位を上回る地点数の長期トレンド（水位観測所1000地点あたりに換算）

このように、2000年代以降を見ても、計画高水位を上回る水位観測所数は増加傾向であり、図-2の解釈である「堤防決壊の発生回数が増加傾向である」ことを支持する結果となった。なお、図-3の長期トレンドの

解釈として、様々な量的・質的な河川整備の進展による1980年代以降の減少傾向や、気候変動に伴う2000年以降の増加傾向等が推測される。ただし、これらのことを正確に把握するには、河川整備情報を正確に入手すると共に、河川毎に丁寧な確認が必要となる。また、気候変動の影響と断定するにはより長期間の観測データの積み重ねが必要となるので、これらは今後の課題とする。

### (3) 地震発生状況の経年変化

次に、1990年以降における地震の発生回数の経年変化を図-4に示す。地震に関しては、本震と余震を分け、一イベント中の最大震度として、震度7、6強、6弱に分けて図示した。また、3年間の移動平均値も折れ線グラフで表示している。これを見てみると、地震発生回数は大地震時に比較的集中し、例えば、東日本大震災（2011）や熊本地震（2016）のように震度7が発生した年は多い。しかしながら、2000年代と2010年代（～2018）の震度6弱以上の地震発生回数の平均値は、それぞれ2.7回、2.6回となっており、横ばい傾向であることが伺える。また、3年移動平均値に近似直線を適用すると傾きは正となったが、その近似式の有意性は確認されなかった（ $P=0.2127>0.05$ ）。このことから近年は地震の発生回数の増加トレンドは、これらのデータのみでは見られないが、震度7クラスの地震発生により広範囲に大きな地震動が生じ、河川堤防への影響範囲も大きいものと推察される。

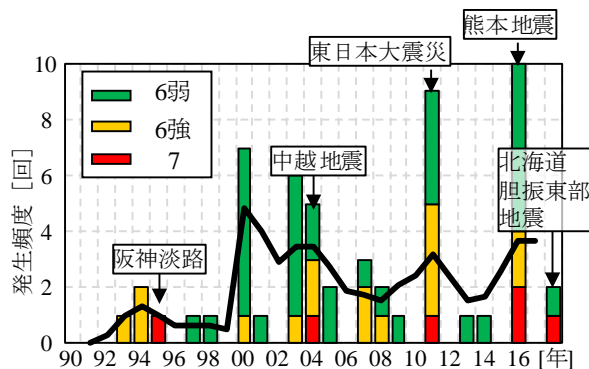


図-4 地震発生回数の経年変化

### (4) 地震・洪水複合災害発生に関する検討

#### a) 長期トレンド

堤防決壊が発生した水系と地震との複合災害の関係を検討するために、決壊発生回数の経年変化に、複合災害発生の可能性を検討した結果を図-5に示す。図中では、地震・洪水複合災害に関しては「発生」、「可能性有」、「可能性無」の3つに分類している。このうち「発生」は、地震による堤防被害が残っている段階で、洪水が発生し堤防決壊が生じた事例である。また「可能性有」は、堤防決壊箇所の最寄りの震度観測所で震度6弱以上を観測したが、地震が影響して堤防決壊した事実が確認できなかった事例である。「可能性無」は上記2つに当てはまらず、堤防決壊地点付近で震度6弱以上を観測しなかった事例である。これより、複合災害となったのが2回（2011年東日本大震災とその6か月後の台風15号による阿武隈川、2016年熊本地震とその2か月後の豪雨による緑川水系木山川）であった。また、「可能性有」は計21水系存在し、全て2009年以降に集中した。

この堤防決壊時と直近の地震（近隣の観測所にて震度6弱以上かMw=7以上）の発生間隔を図-6に示す。これより、2000年代よりも2010年代の方が発生間隔は短く、中央値では2000年代は48年、2010年代は9年と大幅に減少している。このように近年の方が洪水と地震の発生間隔は短くなる傾向が見られる。このことは、地

震・洪水複合災害の発生可能性が大きくなるかもしれないが増加するトレンドになっていることを示唆している。これには、気候変動に伴う災害外力が増加していることに加えて、巨大地震の発生（東日本大震災）により広域の地震被害が寄与しているものと考えられる。

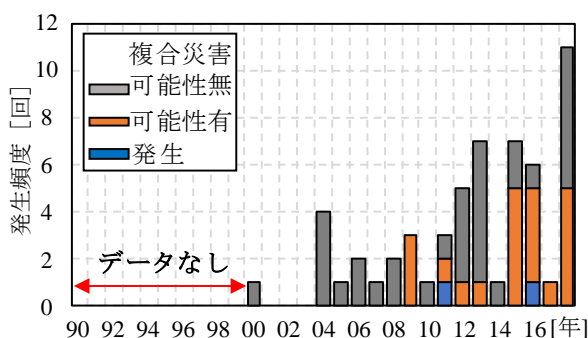


図-5 水系毎の堤防決壊発生回数の経年変化と複合災害の発生・可能性有・無の分類

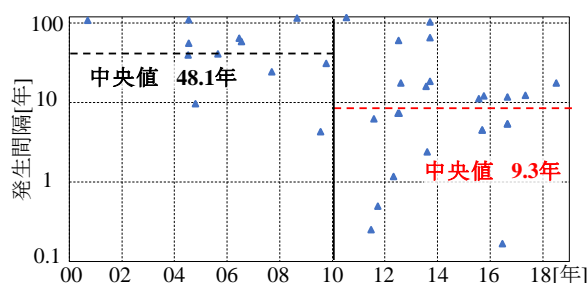
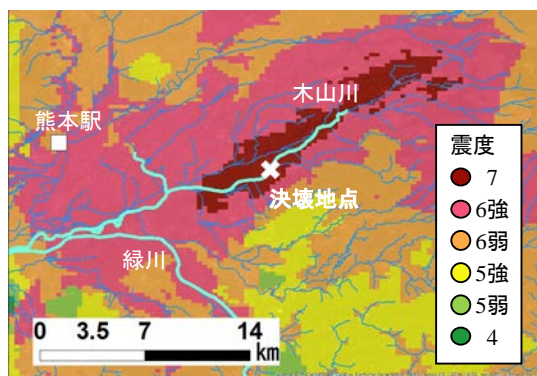


図-6 地震と堤防決壊の発生間隔

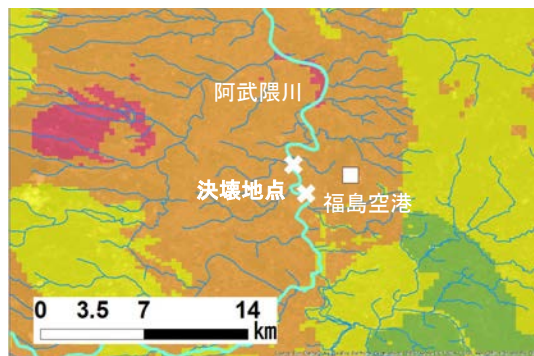
#### b) 複合災害の発生事例及び発生可能性

複合災害の発生事例や発生可能性について調べるために、震度コンター（防災科学技術研究所作成<sup>18)</sup>）と決壊箇所をマッピングしたものを図-7に示す。ここでは、発生事例として、同図(a)に2016年4月の熊本地震と同年6月豪雨による木山川の堤防決壊，同図(b)に2011年3月の東日本大震災と同年9月の台風15号による阿武隈川の堤防決壊である。これらはいずれも地震により堤防が沈下・変形したことが確認され、完全な復旧がなされない状態でその後の洪水で決壊したため、複合災害と判定している。なお、この2箇所はいずれも県管理区間である。堤防決壊箇所は、2016年熊本地震では震度7のエリアで堤防決壊したが、2011年東日本大震災では震度6弱のエリアであった。

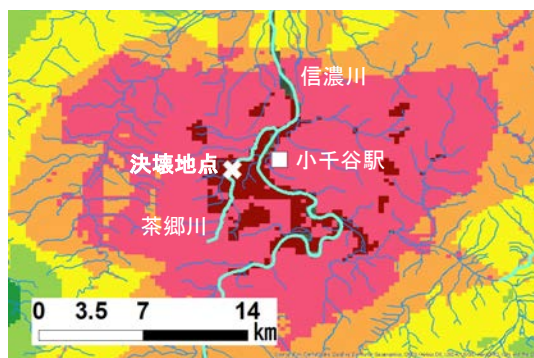
一方、複合災害の発生可能性が高い事例として、同図(c)に2004年10月の新潟県中越地震と7年後の2011年新潟・福島豪雨による信濃川水系茶郷川の堤防決壊を示す。この豪雨では新潟県内の6河川9箇所の堤防決壊が発生する広域の豪雨災害であった。一方、震度コンターより新潟県中越地震でも広範囲に震度7が見られ、決壊箇所もその中に含まれた。そこで複合災害の可能性があると考え、新潟県の河川管理者に聞き取りを行ったところ、7年も経過していたことから復旧も完了していたことが判明した。そのため、「複合災害の可能性有」という分類にした。この可能性有の事例を丁寧に検討し、複合災害発生の詳細を検討する必要がある、今後の課題とする。



(a)発生事例 (2016年熊本地震と2か月後の豪雨による緑川水系木山川の決壊)



(b)発生事例 (2011年東日本大震災と6か月後の豪雨による福島県阿武隈川の決壊)



(c)可能性有の事例 (2004年新潟県中越地震と2011年豪雨による信濃川水系茶郷川の決壊)

図-7 震度コンターと破堤箇所の比較

### 3. 地震・津波複合災害に対する海岸堤防の耐災害性に関する基礎実験<sup>15)</sup>

#### 3.1 実験方法

##### (1) 地震・津波複合災害水路の概要

本実験で用いた地震と洪水・津波複合実験水路は、図-8に示すように、全長33.0m、高さ1.00m、幅0.60mである。これは加振部と接続部、水路部に分かれ、接続部に地震実験では加振装置を設置し、津波（洪水）実験時には接続用水路に付け替える。加振部に接続する加振装置は、空気圧型を用いており、出力可能な加速度は最大で1000gal以上、発生する正弦波の周期は0.4～0.5sである。加振条件はパイロットレギュレータの供給圧、スピードコントローラのバルブの開度、センサ位置調節機構の間隔によって調節可能である。加速度は、加振部に設置した加速度計（AS-5GA、株共和電業製）を用いて計測している。また、水路部中央には段波発生装置が設置され（最大水位差 $\Delta h = 90$  cm）、上流側にはポンプ（最大流量 $0.087\text{m}^3/\text{s}$ ）が接続されている。

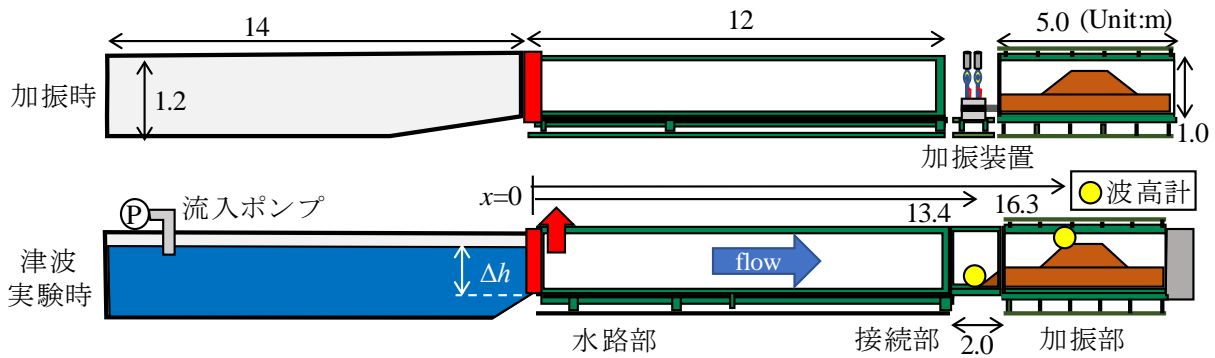


図-8 地震と洪水・津波複合災害水路の概要

## (2) 事前検討実験について

事前検討実験では、津波発生条件（ $\Delta h$ とポンプ流量  $Q$ の設定、Case1）と堤体条件（基礎地盤厚さの設定、Case2）を調べた。津波発生方法として、既存の津波実験では、造波装置による孤立波や仕切り板の上下による段波をそれぞれ発生させるが、いずれも津波の継続時間が短い。また、ポンプを用いて越流のみを発生させるケースもあるが、これでは津波到達時の状況を再現できない。そこで本実験では、長時間の津波越流を再現するために、ポンプと段波発生装置を併用する。具体的には、図-9に示すように、所定の流量  $Q$ で沖側に水を貯め（図中①）、設定条件の水位差  $\Delta h$ に達したらゲートを開ける（②）。その後、津波は岸側に向けて遡上し（③）、海岸堤防を越流するが、海岸堤防や沖側の水路端部にて反射波が発生するため、越流は断続的に起こる（④）。しばらくすると反射波が消滅し、定常越流状態となる（⑤）。

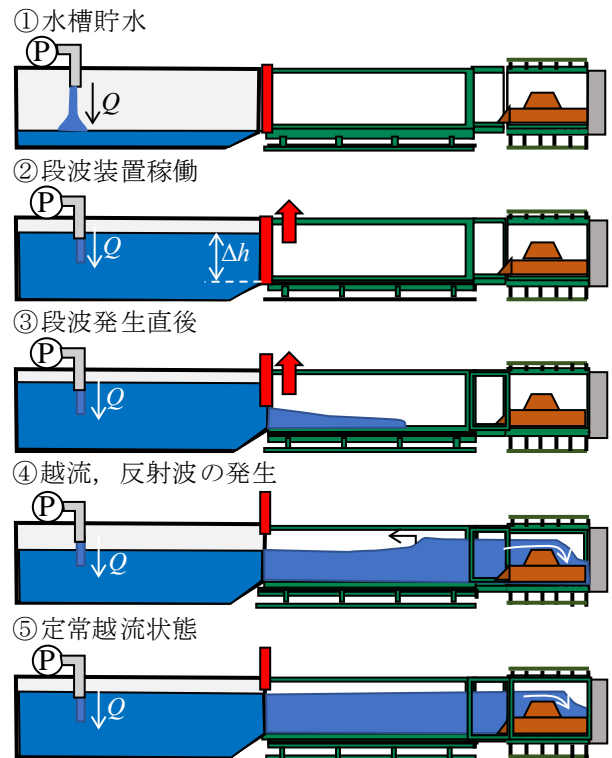


図-9 本実験における津波発生状況

詳細な実験条件としては、津波発生条件の検討 (Case 1) では、水位差  $\Delta h = 0.70, 0.80, 0.90\text{m}$ と、ポンプ流量  $Q = 0, 0.040, 0.087\text{ m}^3/\text{s}$ を設定する。また、Case 1では津波発生条件のみに着目し、海岸堤防の侵食は考慮する必要がないので、木製の堤防模型を作製した。その際、堤防サイズは高さ  $0.40\text{m}$ 、表・裏のり面が2割勾配と固定し、基礎地盤厚さ  $\delta$ を  $0, 15, 30\text{cm}$ とした。これらを組み合わせて全24ケース（ $\delta = 0\text{ cm}$ かつ  $Q = 0.040\text{ m}^3/\text{s}$ における  $\Delta h = 0.70, 0.80, 0.90\text{m}$ の3ケースが未実施）の実験を行った。津波発生状況を測るために、容量式波高計（CH4-50、(株)ケネック社製）を堤防前面（ $x = 13.4\text{m}$ ）と堤防の表のり肩（ $x = 16.3\text{m}$ ）に設置し、段波発生から5分間計測した（ $0.2\text{s}$  間隔）。

次に、堤体条件の検討 (Case 2) では、基礎地盤厚さ  $\delta$  が堤体の加振実験結果に及ぼす影響を見るために、天端にアスファルト舗装した土堤に対して、基礎厚さ  $\delta = 5, 15, 30\text{cm}$  の3ケースを設定した。堤体作成には、銚田砂（ $D_{50} = 0.18\text{mm}$ 、 $F_c = 12.3\%$ ）を用い、層厚  $4\text{cm}$ 、締固め度  $D_c = 90\%$ 、最適含水比で締固めた。加振条件は、目標  $800\text{gal}$  の正弦波を30波与えた。なお、加振前に、基礎地盤上端付近まで水を張り浸透させ、浸潤面が概ね基礎地盤上端となるように設定した。なお、事前検討実験の結果はここでは省略する。

### (3) 地震・津波複合災害実験について

地震・津波複合災害実験（Case 3）を行う。海岸堤防の条件としては、現地海岸堤防<sup>10)</sup>の1/10 程度を念頭に、図-10に示すように、堤体高さ40cm、基礎地盤厚さ30cm、のり面勾配2割とした。堤防の構造形式としては、表・裏のり面及び天端上にコンクリート製被覆工、その直下にフィルター層と不織布（堤体土の吸出し防止用）、その下の堤体材料から構成される。堤体材料はCase 2 と同じ銚田砂であり、締固め度 $D_c=90\%$ 、最適含水比で締固めた。被覆工下のフィルター層には碎石2.5-5mmを用い、厚さ5cmとし、フィルター層と堤体土の間に不織布（家庭菜園用不織布、日本マタイ(株)製）を敷設した。

堤体土の侵食防止用としてのり面に敷設したコンクリート製被覆工（比重 $2.3\text{ton/m}^3$ ）には、裏のり面被覆工に流失防止用の切り欠き<sup>19)</sup>を設けた。被覆工サイズは $20\text{cm}\times 14.5\text{cm}$  であり、実験準備の都合で、厚さは表のり面3cm、裏のり面5cm とした。また、全被覆工に、水路側面と平行な面に緩衝材を入れ、水路壁面によって模型堤防が拘束されないよう考慮した。また、裏のり尻には洗掘防止工（厚さ10cm、長さ50cm）を設置した。事前検討実験の結果を参考として、津波条件は $\Delta h=0.80\text{m}$ 、 $Q=0.065\text{m}^3/\text{s}$ とした。加振条件は400galと800galを各30波与えた。

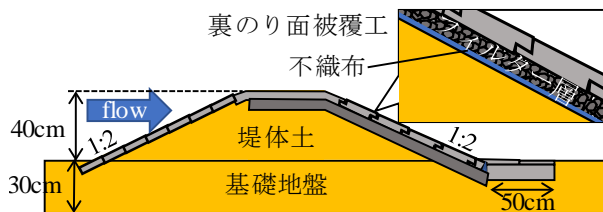


図-10 Case 3 の堤体条件（三面コンクリート張り海岸堤防）

## 3.2 結果と考察

### (1) 堤防の加振時堤体変形形状

海岸堤防における加振時の変形状態を明らかにするために、加振前、加振後10、20、30波目（最終）における堤体形状を図-11に示す。これより、10波目で既にフィルター層の変形が見られ、天端と裏のり肩被覆工との間に段差が生じ始めている。20波目では、10波目にて生じたフィルター層の変形が増大し、天端工が傾き始めた。また、被覆工間の隙間や不陸が発生し、のり面のはらみ出しが生じると共に、表のり肩付近に大きな亀裂が発生した。30波目にかけて、フィルター層の変形がより進み、裏のり面のみならず、表のり面でも被覆工間の隙間が発生・拡大した。30波目では裏のり面における被覆工間の不陸は最大で1.8cmであり、裏のり尻洗掘工と被覆工の間にも隙間が生じ、洗掘工は奥行方向に傾いた。また、表のり肩と被覆工間に幅・深さ共に4.8cmの隙間が生じた。

天端沈下量の時間変化を見ると（図-12）、5波目から徐々に沈下が始まり、20波目以降沈下が大きく進んだ。最終的には、天端沈下量の最大値は5.2cm（堤体高さの13%）であり、同じ加振条件の天端アスファルト舗装を施した土堤よりは沈下量は小さい。

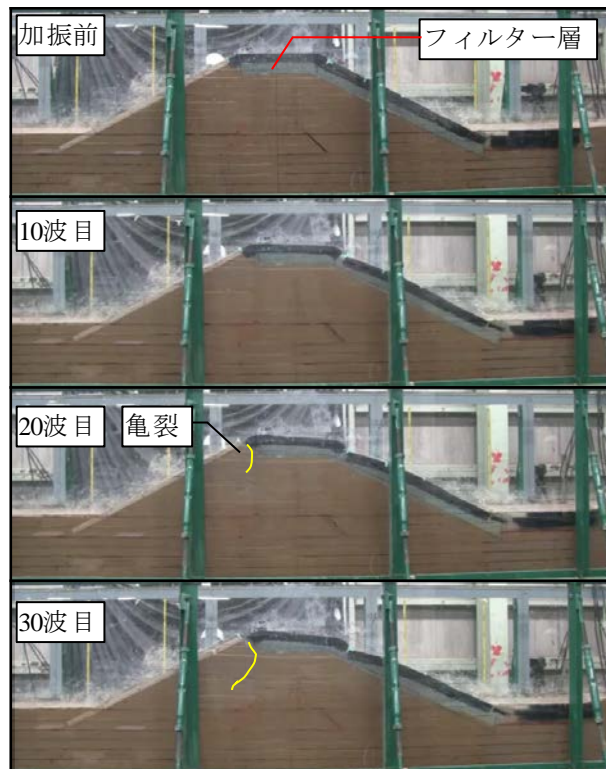


図-11 海岸堤防の加振時変形パターン (Case 3)

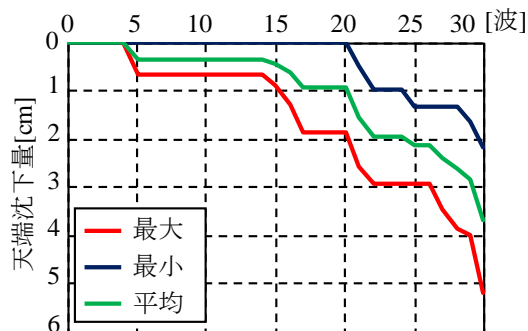


図-12 Case3における天端沈下量の時間変化

## (2) 津波越流時の堤体侵食プロセス

加振により変形した海岸堤防における津波越流時の侵食過程を見るために、堤体の面積（全体とフィルター層）・高さ残存率の時間変化を図-13に示す。各残存率は時々刻々の値と初期値の比である。また、津波の水位変化 ( $x=13.4\text{m}$ ) も示す。まず津波状況としては、最大水位 $0.90\text{m}$ （越流水深 $0.20\text{m}$ ）の津波（周期 $25\text{s}$ ）が到達し、その後、反射波がいくつか来襲し、津波到達からの時間 $t=130\text{s}$ 以降では定常越流状態（越流水深 $12\text{cm}$ ）に移行した。堤体全体の面積残存率は津波到達後から徐々に減少し、高さ残存率が $100\%$ を下回った $t=193\text{s}$ 以降、面積残存率も大きく減少した。 $t=193\text{s}$ の直前には、フィルター層の面積残存率が急激に低下した。詳細に検討するべく堤防侵食過程の推移を図-14に示す。越流開始直後では、堤体の侵食は生じず、 $t=180\text{s}$ までは加振後の堤体形状を概ね維持した（同図（a））。その直後にフィルター層の急激な流失と被覆工沈下が発生し（同図（b））、その後、表のり肩の侵食が拡大し、かつ、のり尻付近の被覆工が流失し（同図（c））、支えを失った被覆工が次々と流失した。以上の津波実験の結果から、加振後の堤体形状を $t=180\text{s}$ まで概ね維持していたことから、裏のり面被覆工に設けた切り欠きによる被覆工流失抑制効果が見られた。一方、加振時の表・裏のり肩や裏のり尻部の隙間の発生やフィルター層の変形が耐越流性を低下させており、

この部分の強化が複合災害対策として必要である。

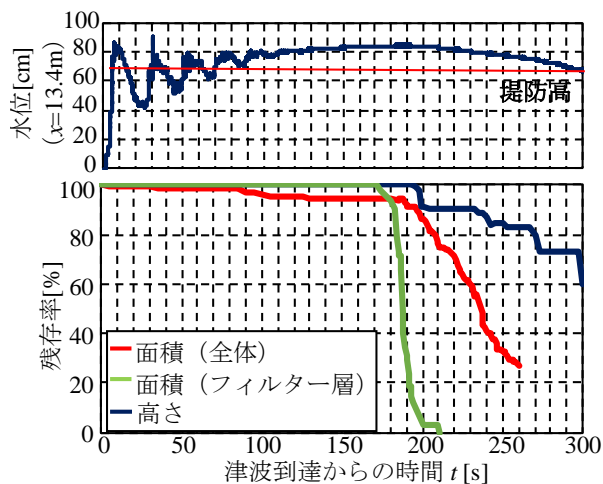


図-13 津波実験時の堤体面積・高さ残存率の時間変化



(a)  $t = 180s$



(b)  $t = 199s$



(c)  $t = 209s$

図-14 堤防侵食過程の推移 (Case 3, 点線は加振直後の堤体形状)

#### 4. まとめ

本報で得られた結論は、以下の通りである。

<地震・洪水発生事例調査>

- (1) 2000・2010年代では地震の発生回数がほぼ横ばいだが、堤防決壊の平均発生回数は増加傾向であった。
- (2) 一級水系の年最大水位が計画高水位を超過した回数は、2000年以降増加しており、堤防決壊の増加を支持する結果となった。

- (3) 2000年代に比べて2010年代の方が、地震と洪水による複合災害の発生可能性が高まっていることが分かった。2000年代の地震と洪水破堤の発生間隔は41年（中央値）である一方、2010年代のそれは9年（中央値）であり、発生間隔が短い。これには、前述の洪水発生頻度の増加が寄与していると考えられる。

#### <地震・津波複合災害時の海岸堤防実験>

- (4) 海岸堤防では、加振時にフィルター層の変形や被覆工間の隙間・不陸や天端の傾斜が生じた。  
(5) 津波実験では、加振時に生じた天端工と被覆工の間の隙間や、段差の部分からフィルター層が流失し、決壊への要因となった。この点に複合災害の影響が見られ、耐震対策の必要性が示唆された。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究（A）（課題番号：16H02365）によって実施された。また、本実験を遂行するに当たり、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室の学生諸氏には、多大なご協力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) AON Empower Results : Weather, Climate & Catastrophe Insight 2018 Annual Report, 2p., 2019.
- 2) 消防庁緊急対策室：大阪府北部を震源とした地震による被害及び消防機関等の対応状況（第31報），[https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/h310312\\_31.pdf](https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/h310312_31.pdf), pp.1-2, 2019.
- 3) 内閣府：平成30年7月豪雨による被害状況等について（平成31年1月9日17:00現在），[http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon7/pdf/310109\\_1700\\_h30typhoon7\\_01.pdf](http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon7/pdf/310109_1700_h30typhoon7_01.pdf), pp.4-5, 2019.
- 4) 岡山県「平成30年7月豪雨」災害検証委員会：平成30年7月豪雨災害検証報告書，[http://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/601705\\_5031910\\_misc.pdf](http://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/601705_5031910_misc.pdf), pp.26-30, 2019.
- 5) 内閣府：平成30年台風第21号に係る被害状況等について（平成30年10月2日17:00現在），[http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon21/pdf/301003\\_typhoon21\\_01.pdf](http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon21/pdf/301003_typhoon21_01.pdf), pp.1-4, 2018.
- 6) 内閣府：平成30年北海道胆振東部地震に係る被害状況等について（平成31年1月28日15:00現在），[http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin\\_hokkaido/pdf/310128\\_jishin\\_hokkaido.pdf](http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin_hokkaido/pdf/310128_jishin_hokkaido.pdf), pp.1-2, 2019.
- 7) PACIFIC TSUNAMI MUSEUM : <http://tsunami.org/what-causes-a-tsunami/>（閲覧日：令和元年5月15日）。
- 8) Mori, N., T. Takahashi and The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2012): Nationwide post event survey and analysis of the 2011 Tohoku earthquake tsunami, *Coastal Engineering Journal*, Vol.54, No.1, 1250001(27pages).
- 9) 岩手県：田老地区海岸復旧工事事業概要，2017.
- 10) 仙台国道河川事務所：仙台南部海岸堤防復旧プロジェクト 海岸堤防復旧説明資料，2017.
- 11) 松島健一，三島尚人，桐博英，中達雄：津波越流に対する従来型式の海岸堤防の被災メカニズム，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.71, No.2, pp.I\_1123-I\_1128, 2015.
- 12) 中央防災会議：「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」中間とりまとめに伴う提言 ～ 今後の津波防災対策の基本的考え方について～，<http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/pdf/teigen.pdf>, 2011.
- 13) 内閣府：報告書(1948福井地震) 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書「1948福井地震」, pp.206-214, 2011.
- 14) 本間升一朗，片岡智哉，二瓶泰雄：地震・洪水複合災害発生状況の事例解析，土木学会論文集B1（水工学），Vol.75, No.2, pp.I\_103-I\_108, 2019.11.
- 15) 上野瑞樹，二瓶泰雄：地震・津波複合災害に対するアーマレビー型海岸堤防の耐災害性に関する基礎的

検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.75, No.2, pp.I\_859-I\_864, 2019.

- 16) 国土交通省：水害レポート, [http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet\\_jirei/suigai\\_report/index.html](http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/suigai_report/index.html) (2019年5月25日閲覧)。
- 17) 片岡智哉, 二瓶泰雄：一級水系における長期間・多地点水位観測データ解析に基づく年最大水位の長期変動トレンドの把握, 河川技術論文集, Vol.23, pp.245-250, 2017.
- 18) 防災科学技術研究所：J-RISQ 地震速報, <http://www.j-risq.bosai.go.jp/report/R-20190525152102-0051> (2019年5月25日閲覧)。
- 19) 国総研：津波越流に対する海岸堤防の粘り強い構造の要点, 2018.