

津波，高潮・高波に対する防災・減災の これまでとこれから

名古屋大学 教授

富田 孝史

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2021年8月

津波、高潮・高波に対する防災・減災のこれまでとこれから

Disaster Management against Tsunamis and Storm Surges

from the Past to the Future

富田 孝史

Takashi TOMITA

1. はじめに

人間社会は海から豊かな恵みや多様な空間機能を享受してきている反面、津波や高潮など災害の脅威にさらされてきている。1959年には、もともとの発展していた繊維工業に加えて機械工業が発展を始めた中京工業地帯の重要な地域である伊勢湾沿岸が伊勢湾台風による高潮・高波災害をうけ、愛知県、三重県だけでも死者・行方不明者は4,651人、被害額は5,050億円に達する被害が発生した¹⁾。この被害額は当該年度の国家予算の39%に相当する。津波に関しては、2011年に東北地方太平洋沖地震とその津波（以下、2011年津波という）により死者・行方不明者1万8千人以上、直接被害だけでも16.9兆円（当該年度の国家予算の18%に相当）に達する大きな災害が東北および関東地方を中心にして発生した。

地震および津波の発生メカニズムより、南海トラフ、日本海溝、相模トラフなどにおいて巨大地震が将来発生することが懸念されており、さらに地球温暖化にともなった平均海水面の上昇および台風の強大化による厳しい高潮の襲来も予想されている²⁾。一方、杉本ら (<https://www.esri.com/news/details/99132/>) による日本の2010年10月時点の人口に基づいた分析によると、全国人口の約3割が標高10m未満、さらにその半分以上が標高5m未満の地域に居住している。なかでも東京湾、伊勢湾および大阪湾の湾奥部沿岸に多くの人が集まっており、これらの地域はかつて大きな高潮災害が発生している。さらに、臨海部はエネルギー基地、物流基地など社会・経済に重要な施設が数多くある。すなわち、これらの地域は津波、高潮・高波に対する脆弱性を示している。

津波、高潮・高波の発生機構および特性に関する解説書などは数多くあるので、本稿ではそれらについての詳述は省略し、主に日本に着目して、土地利用と災害の歴史を振り返りつつ、津波および高潮・高波への防災・減災対策について紹介する。

2. 沿岸域の開発および利用

沿岸域における自然災害の有無や大きさは、ハザードとしての津波などだけでなく、人間が沿岸域をどのように使用しているのかにも影響される。日本列島という平地が狭い島国において、我々日本人は豊かな恵みを享受するだけでなく、干拓、埋立など自然への働きかけによって沿岸部を利用してきた。海に接する干拓地や埋立地は津波や高潮による災害の脅威を受けやすい一方、その背後地を高潮や津波に対して防護する機能も有している。ここではこれまでの日本における干拓や埋立による沿岸域の開発・利用について概説する。

2.1 近世以前の沿岸域の開発および利用

干拓 干拓は、古くは推古天皇の時代（600年前後）に有明海北部沿岸の佐賀県杵島（きしま）郡において行われていた³⁾。鎌倉時代にも干拓が行われた記録があり⁴⁾、その頃の干拓堤防は、図-1(a)に示すように満潮位よりも上の地盤に築造されていたが、江戸時代には朔望平均干潮位よりも低い地盤上に海側面を石積みで

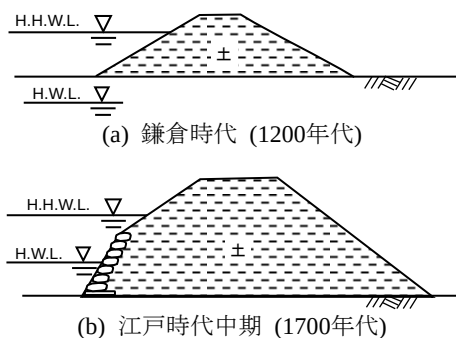


図-1 干拓堤防の形式 (原図⁵⁾に基づいて概略図を作成)

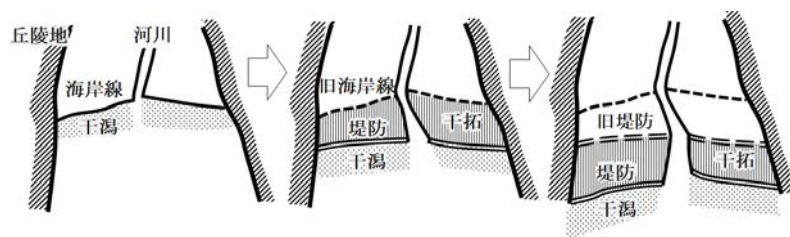


図-2 干拓地の進展

補強した堤防が築造されるようになった⁵⁾。有明海奥部の筑後川、伊勢湾奥部の庄内川などの現在の河口部から奥広くに新田が続いている状況を見ると、図-2に示すような干拓による陸化の進展が行われていたことがうかがわれる。例えば、江戸時代の名古屋では、熱田神宮（113年に創建）が南端に、名古屋城（1610年完成）が北西端にある舌状の熱田台地のうえに城下町が発展し、その西側の沖積平野に農耕地が主に広がっていた。その沖積平野の海岸に接する地域が新田開発のため干拓されている。そのなかの熱田前新田は1800年に着工し翌年に竣工した名古屋でも有数の広さの新田であるが、1855年の暴風雨で堤防が決壊した。藩は財政的な問題からこの地を放棄しようとしたが、地主総代らの私財により修復された⁶⁾という歴史がある。

埋立 海中に護岸を作りその背後に土砂等を投入することにより陸化する埋立は、1173年に平清盛により大輪田の泊の修築において行われたのが日本の最初であろうといわれている。それは港近くの塩樋山を切り崩した土砂により海岸を埋立てるとともに、港に侵入する波浪を防ぐために防波堤としての機能を有する人工島として築造された経ヶ島である⁷⁾。

江戸時代の江戸は東京湾奥を埋立てることにより発展した。その埋立は徳川家康が江戸に国替えになった1590年以降に本格的に始まった。1457年に築城された江戸城は武蔵野台地の東端にあり、その東に日比谷入江が迫っていた。家康が入城する前の江戸の城下町は多くの家臣や町人が暮らすには狭かったため、家康は城や城下町造りから始めたといわれている。その代表的な土木工事の一つが、城下町の拡張のための日比谷入江の埋立である。18世紀前半には江戸の町の人口が百万人であったといわれるように町は大きく発展し、増える人口に対応した居住地の拡大、さらに町から出るゴミの処分のための空間が必要であったことから沿岸部が埋立てられた⁸⁾。埋立技術としては、野中兼山によって高知県香南市に築港された日本で最初の掘り込み港湾（埋立港湾という説もある）といわれる手結港において、軟弱地盤の箇所には木材を敷き詰めたうえで石積護岸を築き、干潮時にも水深3mを確保したような技術が江戸時代初期1650年代にはあった⁹⁾。

2.2 太平洋戦争後の沿岸域の開発および利用

明治、大正時代にも沿岸部の干拓、埋立は行われたが、太平洋戦争後の工業化の進展に伴って沿岸部の埋立が急速に進展した。とくに、物流の要である港湾およびその周囲において埋立により広い土地が造成され、そこにエネルギー、石油精製、鉄鋼、石油化学、物流などに関連する社会経済を支える基盤施設が展開した。

港湾は、1950年5月31日に施行された港湾法によりその開発、利用及び管理の方法が定められ、港湾の整備を促進するための特定港湾施設整備事業が港湾整備促進法（1953年8月5日施行）に基づいて実施されてきている。この事業のなかに、臨港地区内における水面の埋立・盛土・整地などによる土地造成・整備が含まれている。さらに、1960年12月の国民所得倍增計画を背景に1961年4月1日に施行された港湾整備緊急措置法に基づいた第1次港湾整備5箇年計画などを通じて、インフラとしての港湾の整備が促進された。1962年の全国総合開発計画では、『太平洋に面した各地方の臨海部はわが国の重要な産業地帯を形成しており、また今後

においても工業開発地区等をはじめとして人口、産業の相当な集中、集積が予想されるが、この地域には高潮の被害をうけやすい低地帯が多いことにかんがみ、海岸保全事業を重点的に進めるものとする。』というように開発と合わせて高潮防災の推進が重要視されている。その後の第2次(1969年)から第5次(1998年)までの全国総合開発計画においても臨海部の開発・利用・保全および防災は掲げられている。全国総合開発計画につづく国土形成計画(全国計画)(2008年)および第2次国土形成計画(全国計画)(2015年)には臨海部の開発という文言はないが、臨海部も国土の一部として高度に利用し、防災を含めて維持管理するという方向性が示されている。海岸における防災に関しては、『津波、高潮、波浪その他海水又は地盤の変動による被害から海岸を防護し、もつて国土の保全に資することを目的』とした海岸法が1956年11月10日に施行されている。なお、1999年に改正された海岸法では、法の目的に、『海岸環境の整備と保全及び公衆の海岸の適正な利用』が時代の要請に合わせて加えられている。

戦後、臨海工業地帯が発展した東京湾、伊勢湾および大阪湾における埋立地面積の変化についてみると、1945年8月から1992年3月までに、東京湾では157km²(水域面積に対する比率14%; 全国の埋立地面積の26%)、伊勢湾では79km²(3%; 13%)、大阪湾では85km²(6%; 14%)と埋立地面積は増加¹⁰⁾しており、三大湾だけで全国の埋立地面積の半分以上を占めている。

埋立地の開発・利用目的は時代とともに変化してきている。戦後から高度経済成長期においては工業および物流の発展が主たる開発・利用の目的であったが、第1次(1973年)・第2次(1979年)オイルショックを背景にした重化学工業から機械産業などへの産業構造の転換、1983年のプラザ合意を背景にした輸出進展による国際化を通じて、臨海部の多様な利用が求められるようになってきている。1985年に策定された港湾の中長期政策「21世紀の港湾」では、物流・産業・生活の3つの空間を調和よく組み合わせ、全体として高度な機能を発揮できる総合的な空間の創造など目指した港湾整備が掲げられている。

3. 津波および高潮・高波による災害

図-3に1945年以降の自然災害による死者・行方不明者数の変化¹¹⁾、表-1に明治時代からの死者・行方不明者数が500人以上の自然災害を示す^{11), 12), 13)}。2011年および1995年にはそれぞれ東日本大震災、阪神・淡路大震災があったため死者・行方不明者数は突出しているが、それらを除くと1960年以降では年間の犠牲者数は1,000人未満であり、さらに1983年以降では500人以上の犠牲者がでた災害はない。また、500人以上の災害は、地震・津波、台風、あるいは大雨によって生じていることが特徴として挙げられる。以下にこれまでの災害とその災害からの教訓について概説する。

3.1 有明海における災害

有明海は、その南につながる島原湾を含むと主に南北に広がる延長約96km、平均水深約20mの湾である。このため、湾の西側を北上あるいは湾の北部を北東に進行する台風により高潮が何度も発生している。鎌倉時代にも台風により高潮が発生しており¹⁴⁾、高潮・高波の作用によって図-1(a)に示すような形式の堤防は容易に破堤し、干拓地は浸水されたと考えられる。1828年に襲来したシーボルト台風は、小西¹⁵⁾による推定経路を通れば有明海に厳しい高潮を起こしたと想像される。記録によると有明海北部沿岸を治めた佐賀藩において7千~1万人にも及ぶ犠牲者が発生しており¹⁵⁾、この犠牲者の多くは高潮によるものであろうと想像される。前出の杵島郡では1914年の高潮により堤防が大規模に被災し、それからの10年間に4回の高潮災害を受けた。そのときに採用された高潮対策は、堤防の強大化ではなく、前面における大規模干拓であった¹⁶⁾。この対策の選択理由には、前面に発達した干潟への対応、新たな干拓により既存干拓地の防護などが考えられる。

1991年台風19号のときには、有明海北部の若津(筑後川下流)において3.62mの潮位偏差が発生した。これは後述する伊勢湾台風時の潮位偏差3.45mよりも高かったが、幸い干潮の頃の発生であったので最高潮位はT.P.+2.36mであり¹⁷⁾、朔望平均満潮T.P.+2.97mよりも低かった。しかし、もし台風の襲来が約5時間早ければ

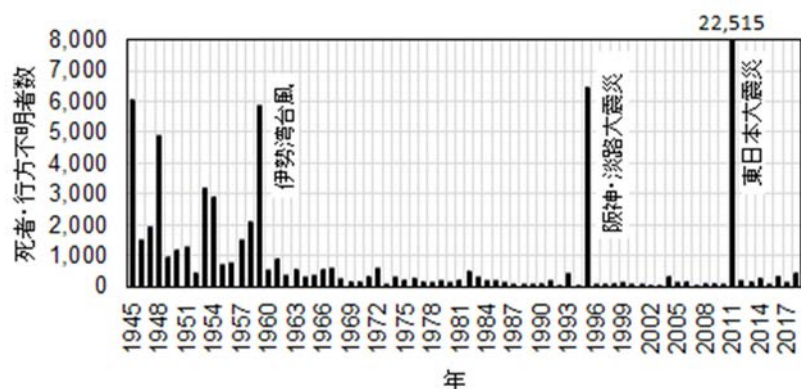


図-3 自然災害による死者・行方不明者数¹¹⁾

表-1 明治時代以降で500人以上の死者・行方不明者をだした自然災害^{11), 12), 13)}

年月日	災害	死者・行方不明者数(人)	年月日	災害	死者・行方不明者数(人)
1872.03.14	浜田地震(M7.1)	552	1945.01.13	三河地震(M6.8)	2,306
1889.08.19-20	紀伊豪雨	1500	1945.08.15	太平洋戦争終戦	310万余
1891.10.28	濃尾地震(M7.9)	7,273	1945.09.17-18	枕崎台風	3,756
1893.10.14	台風	2,044	1946.12.21	南海地震(M8.0)	1,443
1894.10.22	庄内地震(M7.0)	726	1947.09.14-15	カスリーン台風	1,930
1896.06.15	明治三陸地震(M7.1)	21,959	1948.06.28	福井地震(M7.1)	3,769
1910.08	明治43年大水害	1,349	1948.09.15-17	アイオン台風	838
1917.09.30-10.02	台風	1,300以上	1950.09.02-04	ジェーン台風	539
1921.09.25-26	台風	691	1951.10.13-15	ルース台風	943
1923.09.01	関東大震災(M7.9)	約105,000	1953.06.25-29	大雨(前線)	1,013
1927.03.07	北丹後地震(M7.5)	2,925	1953.07.16-24	南紀豪雨	1,124
1933.03.03	昭和三陸地震(M8.3)	3,064	1954.05.08	風害(低気圧)	670
1934.09.20-22	室戸台風	3,036	1954.09.25-27	洞爺丸台風	1,761
1938.06.28-07.05	豪雨(神戸大水害)	925	1957.07.25-28	諫早豪雨	722
1942.08.27	周防灘台風	1,158	1958.09.26-28	狩野川台風	1,269
1943.09.10	鳥取地震(M7.2)	1,083	1959.09.26-27	伊勢湾台風	5,098
1943.09.20	台風26号	970	1995.01.17	阪神・淡路大震災(M7.3)	6,437
1944.12.07	東南海地震(M7.9)	1,223	2011.03.11	東日本大震災(M9.0)	22,288

大潮の満潮に高潮が重なるので、有明海奥部の海岸保全施設の天端高T.P.+6.7～7.5m¹⁸⁾をぎりぎり超えないが、厳しい越波により災害につながった箇所が発生したと想像される。

3.2 東京湾における災害

東京湾（狭義）の開口部は三浦半島の観音崎と房総半島の富津岬とにより幅約7kmに狭められているため、太平洋から襲来する津波は東京湾の中には入りにくい。しかし、沿岸に防災構造物がまだ未整備の江戸時代には東京湾の中でも津波による被害が発生している。1703年12月31日に相模トラフで発生したマグニチュード8クラスの元禄地震による津波¹⁹⁾は、東京湾につながる浦賀水道の房総半島沿岸で平均海面上5～10m、三浦半島の間口で6～8mおよび浦賀で4.5mという高さであったが、東京の本所、両国、深川および品川では1.5～2mであった。これらすべての地域で浸水が発生し、横浜の野毛浦では3～4mの津波により多数の家屋が流出した。それから約150年後、1854年11月4日に熊野沖で発生したマグニチュード8クラスの安政東海地震のときにも津波は東京湾の中に伝播した。浦賀では3mの津波高であったが、東京湾奥部の浦安、江戸川区船堀、深川、日本橋浜町において1～2mの津波であった¹⁹⁾。

東京湾では、安政地震の翌年1856年(安政3年)、1917年(大正6年) および1949年(昭和24年)にも大きな高潮災

害が起こっている。安政3年台風は、当時の日記の天候記録に基づいた台風経路は、駿河湾を縦断したあと神奈川県西端をかすめ、東京都の奥多摩、埼玉県中部を北東に抜けている²⁰⁾。この経路は東京湾から離れている一方、東京湾に高い高潮を起こしたことから、台風は強く大きな台風であったと考えられる。この台風により東京湾に生じた高潮は、芝、品川、本所、深川などにおいて1m程度の浸水深になり、大小の船が転覆あるいは打ちあがったほか、隅田川の永代橋が漂流した船によって破壊された²¹⁾。

大正6年台風は、10月1日未明に駿河湾沿岸に上陸した後、東京湾を右手に見ながら関東地方を東北地方に向けて通過した。東京で最低気圧約950hPaが観測されたようにこの台風は強く、さらに進行速度が速かったので、東京湾奥部（江戸川堀江）において最大潮位偏差2.3mが発生した。これが大潮の満潮に重なったことから最高潮位T.P.+3.0mとなる高い潮位になった²²⁾。これにより深川、品川、葛西では甚大な浸水被害が発生し、全国で発生した1,324人の死者・行方不明者および4万3000戸余りの全壊家屋のうち563人および3,258戸は東京で発生し、そのなかでも葛西村では298人が犠牲になった²³⁾。

1949年の台風はキティ台風である。この台風は、1949年8月31日夜半に相模湾沿岸に上陸し、東京湾を右手に見ながら北上したことから、東京湾に高潮を発生させた。東京の霊岸島では最大潮位偏差1.4m、最高潮位T.P.+2.0m (A.P.+3.15m: A.P.はT.P.よりも1.134m下) を観測した²²⁾。大正6年台風のときと比べて最高潮位は低かったが、埋立地の江東デルタ地帯などにおいて浸水被害が発生した。

3.3 大阪湾における災害

大阪湾沿岸には、仁徳天皇（在位313～399年）が築いた茨田（まむた/まんだ）の堤や難波の堀江がある、茨田堤は淀川の洪水制御のためのものであり、難波の堀江は、上町台地の東側に当時広がっていた河内湖に北から淀川、南から大和川が流入することにより発生する洪水の制御や水運の利便性向上のために上町台地を開削して河内湖と台地の西側に広がる大阪湾とつなげた運河である。その後、この運河の途中には難波津と呼ばれる港湾施設が作られ、654年にはその近くの台地上に難波長塚豊碕宮（なにわのながらのとよさきのみや）が築かれた。河内湖は淀川や大和川が運ぶ土砂により縮小し、さらに干拓により陸化された。江戸時代には農地として開発されたが、明治時代以降工場やその従業員の住宅地に姿をかせ、さらに太平洋戦争後には重化学工業地帯へと発展した。

この大阪湾では、奈良時代の753年に上町台地の西側麓の集落で560人が亡くなったという記録がある²⁴⁾。さらに、戦前戦後にかけて室戸台風、ジェーン台風および第二室戸台風によって大きな高潮災害が発生している。室戸台風は、1934年9月21日、室戸岬の西の高知県奈半利町付近に911.9hPaの気圧で上陸した台風である。上陸後この台風は紀伊水道および大阪湾を右手に見ながら北上して兵庫県神戸市付近に再上陸した。この台風によって、大阪港で最高潮位T.P.+3.2m、最大潮位偏差3.1mの高潮が起きた（表-2）。この台風による死者・行方不明者は3,036人、全壊・半壊・流失家屋は合計92,323棟であった。ジェーン台風は、1950年9月3日に徳島県日和佐町付近に上陸した台風である。和歌山で961.6hPaの最低気圧を観測した。この台風による高潮は、大阪において最高潮位2.6m、最大潮位偏差2.4mとなった。全国における死者・行方不明者は534人、全壊・半壊・流失家屋は77,563棟であった。第二室戸台風は、1961年9月16日に室戸岬に上陸し、室戸台風と似た経路を通った。上陸したときに室戸岬で946.9hPaの気圧が観測された。この台風で大阪湾に生じられた高潮は、大阪で最高潮位2.8m、最大潮位偏差2.5mであった。死者・行方不明者は202人、全壊・半壊家屋は61,901棟であった。第二室戸台風のときには、後述する伊勢湾台風による甚大な人的被害の情報が大阪地域にも伝わっていたために、住民はいち早く避難した。このため高潮による犠牲者はいなかった（大阪府下で逃げ遅れた住民1人が高潮により溺死した報告がある²⁵⁾）。

大阪市における浸水面積は、室戸台風のときに49km²（市面積の26%）、ジェーン台風のときに56km²、そして第二室戸台風のときに31km²であった。大阪における最高潮位は室戸台風のときの方がジェーン台風のときよりも高いにもかかわらず、浸水面積が増えているのは地盤沈下の影響が大きいと言われている^{26), 27)}。一

方、ジェーン台風のときに比べて第二室戸台風のときの最高潮位は高いにもかかわらず、浸水面積は減少している。第二室戸台風のときにも地盤沈下はまだ継続していたが、ジェーン台風のあとに実施された高潮対策が減災効果をもたらしている。詳細は後述する。

3.4 伊勢湾における災害

(1) 1953年台風13号

1953年台風13号は、1953年9月24日15

時頃に紀伊半島潮岬付近に接近して17時頃に志摩半島を通過した後、図-4に示すように伊勢湾を横断し、三河湾を右手に見ながら進行したことから、とくに三河湾において高い高潮を発生させた。その時刻が満潮時刻に重なったために、台風経路の右側に位置する三河湾奥部の豊橋港では最高潮位3.36mとなり、既往最高値を約1.45m上回った。中島³⁰⁾によると、豊橋港の大潮時平均満潮位1.11mであるので、潮位偏差は2.3m程度かそれ以上あったと推察される。一方、台風経路の左側に位置する伊勢湾奥部の名古屋でも最高潮位2.33mが発生したが、既往最高値2.98mは超えていない³¹⁾。とくに高い高潮が発生した三河湾の北岸および東奥部における多くの場所で海岸堤防が破堤し、沿岸部が浸水された(図-5)。堤防の破堤に関しては伊勢湾台風のときの事例と合わせて後述する。

(2) 伊勢湾台風

伊勢湾台風(1959年台風15号)は、上陸する直前の1959年9月26日9:00に中心気圧925hPa、東側400km、西側300kmに平均風速25m/s以上の暴風域をもった勢力と大きさの台風であり、同日18:00頃に紀伊半島潮岬の西方15kmに上陸した。潮岬における観測最低気圧929.2hPaである。上陸後、時速60～70kmで伊勢湾を右手に見て紀伊半島を縦断した(図-4)。この台風によって伊勢湾奥部の名古屋では最高潮位T.P.+3.89m、最大潮位偏差3.45m(3.55mは速報値)を記録した。それまでの名古屋の最高潮位は1921年9月26日の台風のときの2.97mであったので、伊勢湾台風時の最高潮位はそれよりも約1m高い。三河湾奥部の豊橋でも最高潮位3.10mが記録されており、これは1953年台風13号時の最高潮位に匹敵している。名古屋における最大潮位偏差の再現期間は、約120～160年^{32),33)}であり、非常に高い潮位偏差であったがその再現期間は極めて長いというものでは

表-2 大阪府における台風被害

台風	室戸台風	ジェーン台風	第二室戸台風
日時	1934.9.21	1950.9.3	1961.9.16
最低気圧 ^{28), 29)}	954.4 hPa	970.3 hPa	937.3 hPa
最大風速 ^{28), 29)}	48.4 m/s	28.1 m/s	33.3 m/s
最高潮位 ^{28), 29)}	O.P.+4.50 m T.P.+3.20 m	O.P.+3.85 m T.P.+2.55 m	O.P.+4.12 m T.P.+2.82 m
最大潮位偏差 ²⁹⁾	2.92 m	2.37 m	2.45 m
死者・行方不明者 ^{28), 29)}	1,888 人	256人	32人
被害建物数 ²⁸⁾	30,042 棟	71,333 棟	24,742棟
大阪市浸水面積 ³⁰⁾	49 km ²	56 km ²	31 km ²
累積地盤沈下量 ²⁹⁾ (大阪市此花区西島)	基準とする	約120cm	約240cm

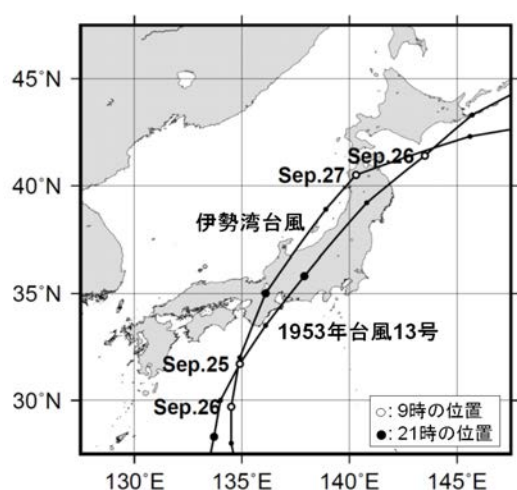


図-4 1953年台風13号および伊勢湾台風の経路

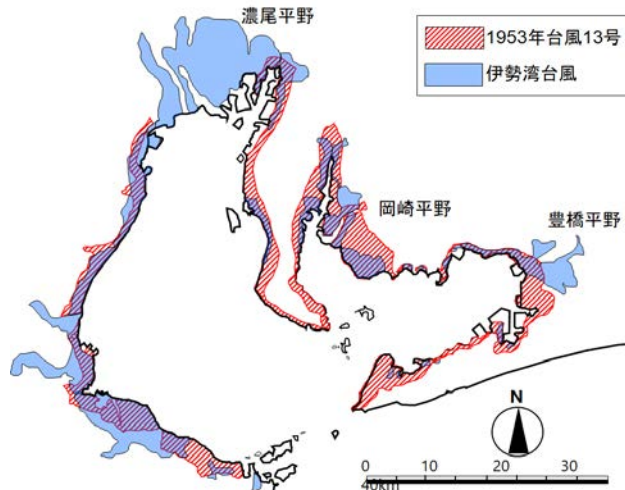


図-5 1953年台風13号および伊勢湾台風による浸水域(原図³⁴⁾に基づいて作図)

ない。この台風による被害は全国で死者4,697人、行方不明者401人、全壊住家40,838棟、半壊住家113,052棟であり、愛知県・三重県だけで全国の死者・行方不明者の約90%に相当する人が犠牲になり、その多くが高潮・高波による。経済的被害も前述のように甚大であった。

図-5に示されるように、1953年台風13号のときには岡崎平野や豊橋平野を主として三河湾のほぼ全沿岸部が浸水されたが、台風経路の左側に位置した伊勢湾奥部の濃尾平野のゼロメートル地帯での浸水域は限定的であった。しかし、この伊勢湾奥部の広い地域が伊勢湾台風のときに浸水し、海岸から約15km内陸にある津島市も浸水された。1953年の時に大きな被害にならなかったことが、伊勢湾台風時の濃尾平野における避難の遅れにつながったといわれている³⁵⁾。

強大な伊勢湾台風により生じられた高潮・高波の威力は強大であり、伊勢湾奥部にある海岸堤防および河川堤防は220か所30km以上で破堤して広い地域が浸水した¹⁾。ゼロメートル地帯の被災地では、満潮になるたびに破堤口から海水が流入した。全ての破堤口の仮締切りが終了したのは被災後53日後であり、伊勢湾奥部木曽川河口の左岸に広がる鍋田干拓地では湛水が解消されるまでに4か月以上を要した³⁶⁾。浸水により、海水がすぐに引いた地域以外では農作物の収穫が皆無となり、新田は砂浜化した。名古屋港一帯の臨海工業地帯における多くの工場では、それらが立地する土地が高かったので浸水しても数時間で浸水は解消された。しかし、地下や1階に多くあった電気設備などが浸水して修理を余儀なくされ、復旧に時間を要した³⁷⁾。電気設備などの浸水被害による復旧の長期化は1998年台風18号の高潮・高波で浸水した山口宇部空港、2019年台風21号の高潮・高波で浸水した六甲アイランド・コンテナターミナルでも生じている。

図-6は伊勢湾台風による堤防の被災例³⁸⁾を示しているが、台風13号のときに破堤した多くの堤防も、表法が石張りやコンクリート張りであっても天端や裏法は芝や粘土での被覆であった。すなわち、高い高潮とそれに乗じた高波が堤防を越流・越波することにより天端面や裏法面がまず洗堀され、それが進展して全体破壊につながっている。さらに、表面が石張り形式の場合では、波による吸出し作用で積石が離脱したものや、目地の隙間から内部の土砂が吸い出されたものに崩壊被害が出ている³¹⁾。一方、基礎の洗堀や捨石の流出を原因とした堤体崩壊は少なかった³⁰⁾。これらのことから、台風13号により被災した堤防の復旧断面には堤防全体をコンクリートで被覆する三面張り形式が採用された。その後の伊勢湾台風による高潮は伊勢湾奥部において既往最高潮位をこえる潮位を発生させ、それに高波も重なった。高潮・高波によって越波が厳しいと思われる地域であっても三面張りの堤防の被害は軽微であった³⁶⁾。この台風13号および伊勢湾台風の被災経験を通じて海岸堤防の一般的な形式は三面張りに確定した。

江戸時代初め頃から熱田湊（名古屋港の前身）と堀川（当時の名古屋における物流の要となる人工水路）とがつながる場所は木曽ヒノキの集積地として栄えていた。その背景から伊勢湾台風時も名古屋港（1877年開港）は木材集積に関する国内の主要な港湾であり、現在の名古屋港の北東奥部を中心に合計100万m²以上の面積の貯木場が点在し、それらに丸太として主に水面貯木されていた。その木材約33万3千t以上が伊勢湾台風の高潮によって流出し、名古屋市の港区など近隣の住宅地等に押し寄せて多くの人命や家屋に被害を発生させた。流出した木材は、知多半島、三重県沿岸に漂着し、遠く太平洋まで流れ出て、集材作業に1年以上を要した³⁹⁾。名古屋における貯木場からの木材流出は、1912年および1921年の台風時にも発生して

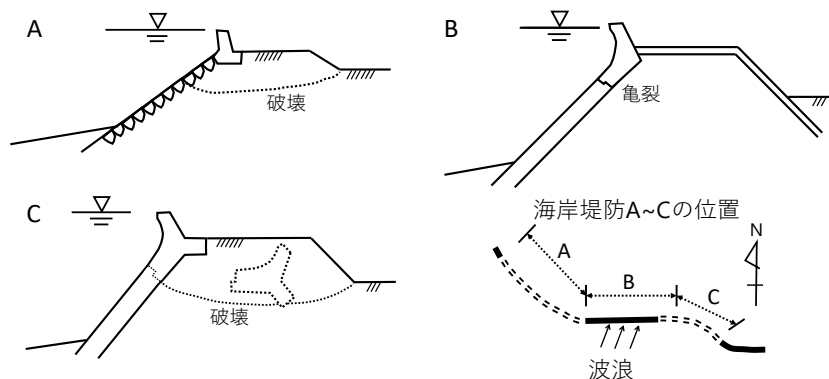


図-6 海岸堤防の被災状況（原図³⁸⁾に基づいて作成・加筆）

いた。それら災害の教訓から当時も堤防築造など対応策が取られていたが、伊勢湾台風による高潮はそれまでの既往最高潮位を上回ったことから、再び木材が流出した。当時の最大規模の8号地貯木場では、その南側にあった長さ1km、高さ4.8m、幅12mの護岸が高潮・高波によって跡形もなく削りとられ、貯木場の木材が全て流出した³⁹⁾。

3.5 津波災害

684年に南海トラフで大地震（白鳳地震）が起こった記述が日本書紀にあるように、津波災害は古くからある。地震は、その発生機構から、繰り返し発生するといわれるように、887年仁和地震、1096年永長東海地震、1099年康和南海地震、1361年正平東海地震および正平南海地震、1498年明応地震、1605年慶長地震、1707年宝永地震、1854年安政東海地震および安政南海地震、1944年東南海地震、および1946年南海地震が約90～260年の間隔で発生している。日本海溝沿いにおいても869年貞観地震をはじめとして、1611年慶長三陸地震、1677年延宝津波、1896年明治三陸地震、1933年昭和三陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震など、相模トラフ沿いでも1703年元禄地震および1923年関東地震が起こっている⁴⁰⁾。これらの地震はみな津波をともなっている。これからの地震地域における将来の地震発生の長期評価は「地震調査研究推進本部」(<https://www.jishin.go.jp/>)が行っている。本稿ではこれからの防災対策に大きな影響を及ぼす地震津波を取り上げる。

(1) 東北地方太平洋沖地震津波

東北地方太平洋沖地震は、2011年3月11日14:46頃、宮城県沖に震源をもつモーメントマグニチュード9.0の地震である。震源域は岩手県から茨城県の沖の長さ約450 km、幅約200 kmの広範囲に及び、そこで発生し沿岸に襲来した津波は、それまで東北地方の各自治体の地域防災計画における対象津波であった明治三陸地震津波や昭和三陸地震津波よりも高く、その対象津波に対応して整備されていた海岸堤防など防災構造物を乗り越えて広い地域を浸水した。国土地理院の推計によると、2011年津波により浸水域は6県64市の561 km²に及び、そのうち宮城県が58%、福島県が20%を占めている。自治体で最も広い浸水域は宮城県石巻市で73km²（市域の13%）であり、最も浸水域割合が高かったのは宮城県亘理町の48%（35km²）である。警視庁による2020年3月10日の発表によると、全国の死者・行方不明者は18,428人、全壊建物数は121,991戸であり、広く浸水された県において人的・物的被害が大きかった。

漂流物等 地震や津波で破壊された家屋等のがれき、自動車、船舶などが津波で流された。それらは、衝突によって構造物などを破損することに加え、道路や海面上あるいは海底面に堆積することによって被災後の救援・復旧作業を阻害し、さらに津波火災を引き起こすなど2次的にも大きな影響を及ぼした。仙台港では約2,000個のコンテナが流出し、船舶が通行する航路からコンテナなどを撤去する作業（531地点）が完了したのは地震発生から約10週間後の5月21日であった。なお、この港では、緊急物資などを運ぶための緊急輸送路および岸壁は早くに復旧され、3月17日には緊急物資を積んだ国土交通省の大型浚渫兼油回収船が入港し、翌18日は一般利用が可能になっている。オイル、水など大量の緊急支援物資を被災地に届けるための航路啓開、岸壁補修、道路啓開といった海上および陸上輸送の速やかな機能回復が求められた。

防波堤の被害 明治三陸地震津波、昭和三陸地震津波および1960年チリ地震津波で被災した釜石湾では、湾への津波の侵入を低減するために湾口部に釜石港湾口防波堤を建設することが1977年に計画され、2009年3月に完成していた。防波堤の設計では、明治および昭和の三陸地震津波を対象にした設計津波（津波高5.0m、港内外の水位差2.8m）と水深約60mの建設海域における設計波浪（波高13.5m、周期13s）の比較から、防波堤の断面は設計波により決定された⁴¹⁾。しかし、2011年津波は、防波堤天端上約7mに達する津波高12mで防波堤を越流した⁴²⁾。越流に伴う港内外の水位差により、図-7に示すように、開口部の直立部ケーソン66箇中の28箇（潜堤部分を除く）が津波力で押されて基礎マウンド上から滑落し、滑落したケーソンが抜けた箇所では津波の流れによりマウンドが洗掘されて21箇のケーソンが傾斜した⁴¹⁾。滑落・傾斜したケーソンは74%に

上ったが、58%は健全にもしくは傾斜しながらもマウンド上に残って海面に頭を出していた。

大船渡港の湾口には、1960年チリ地震津波の津波災害を契機として、日本で初めて津波防波堤が建設された。設計対象津波はチリ地震津波の津波高6mであったが、それよりも強い力になる有義波高4.0m、有義波周期9.0sが設計条件であった⁴¹⁾。2011年津波はこの防波堤に高さ約12mで襲い、ほとんどのケーソンを押し流し、基礎マウンドを速い流れにより洗堀した⁴³⁾。

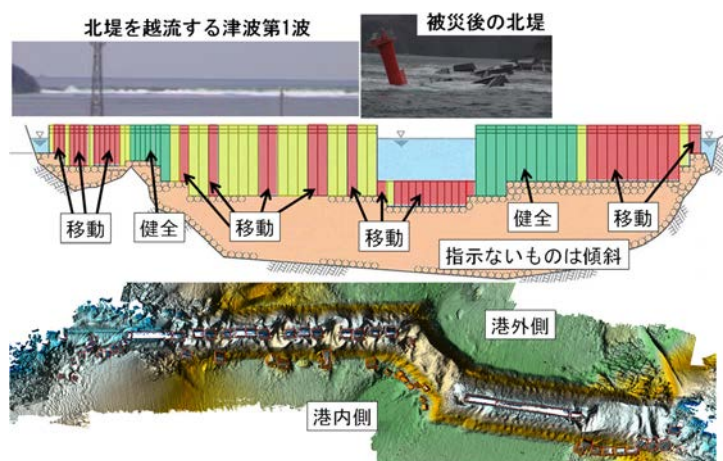


図-7 釜石港湾口防波堤の被災状況

津波防波堤でない一般の第1線防波堤も津波により損傷した。第1線防波堤には外洋からの高い波が直接的に作用するので設計波浪は高く、堤体も大きいのが一般的である。しかし、大きな被害を受けた八戸港の第1線防波堤の八太郎北防波堤ハネ部や相馬港の沖防波堤は消波ブロックによりケーソンに作用する波力を軽減させる消波ブロック被覆堤であり、ケーソン幅が比較的小さいものであった。これらのケーソンが津波の水平力により滑動した。また、八戸港の八太郎北防波堤中央部は上記のハネ部と同様に消波ブロック被覆堤であったが、別の機構により被災した。中央部の設計波浪は有義波高6.7m(周期12s)であり、ハネ部の5.09m(13s)よりも若干高いことに加え、この部分は建設当初消波工のない構造であったため、ケーソン幅がハネ部のものよりも広がった。このため2011年津波の波力によって滑動しなかった。しかし、防波堤を大きく越流した津波によって防波堤背後の基礎マウンドおよび海底地盤が洗堀され、ケーソンは支持力を失って転倒した⁴³⁾。洗堀は八戸港の中央第1防波堤および中央第2防波堤の堤頭部でも局所的に生じており、それにより堤頭函が転倒した。さらに、白銀北防波堤の堤頭函は津波作用時には大きな被害を受けなかったが、数日後に襲来した高波時に洗堀穴に落ち込む被害が発生した⁴⁴⁾。

堤防の被害 陸上の海岸堤防や胸壁にも2011年津波は大きな被害を及ぼした。1953年台風13号や伊勢湾台風による高潮・高波災害の経験から海岸堤防の形式は三面張りが基本であり、大規模な越流が生じないように天端高が設定されている。しかし、2011年津波は被災地の多くの海岸堤防を激しく越流し、裏法面を高速で下る津波が被覆工の下にある土砂を吸出すなどにより裏法面を損傷し、下り降りた水塊の衝突によって裏法尻の背後地盤が洗堀されるなどによって、三面張りの堤防であっても崩壊した。

護岸・胸壁・岸壁の被害 八戸港にある埋立護岸の隅角部では、津波流れによる海底地盤の洗堀が深さ12mに達するほど進行した結果、ケーソン3函が転倒する被害があった⁴⁴⁾。護岸や胸壁においては海からの津波の波力や越流のよる背後地盤の洗堀により陸側に倒壊するものがあっただけでなく、陸から海に津波が引くときの波力や越流による前面地盤の洗堀により海側に倒壊するものもあった。

相馬港では控え組杭の鋼矢板式岸壁が図-8に示すように倒壊した。被災原因としては、地震動による液状化などに起因してエプロンが破損し、高さ10mに達する津波の作用によってそこから埋土が吸い出されたことにより被害が拡大したこと⁴¹⁾、被災地点には液状化対策として控え組杭周辺に施工されていたグラベルドレーンなどを通じて高い津波による強制水圧が地



図-8 岸壁の被害例

盤の間隙水圧に作用して有効応力が低下して変形が大きくなったこと⁴⁵⁾が考えられている。いずれにしても津波の作用が岸壁の倒壊に寄与している。

防災情報 14:46頃に発生した地震に対して、気象庁は14:49に岩手県 (3m)、宮城県 (6m)、福島県 (3m)に津波警報 (大津波) を発表した。() 内の数値はその時に予想された津波高である。しかし、この警報は影響範囲および津波高を過小評価した。引き波現象として始まった津波は、15:10頃に水深約200mの三陸海岸沖に設置された複数のGPS波浪計により2mを超える水位上昇として検知され、さらに観測水位は上昇を続けた。この観測データを見て、気象庁は15:14に津波警報 (大津波) の範囲を青森県から千葉県にまでに広げるとともに宮城県で10m以上、岩手県と福島県に6mなどの予想津波高を発表した。津波に関する警報および注意報は、最初に発表されてから3月13日17:58に注意報が全ての予報区で解除されるまでに11回発表された。津波に関する警報を早く出すことはできたが、最初の発表で津波高さを過小評価したことが問題視された。また、地震と津波による発電所、送電機器などへの被害により電力の需給バランスが崩れ、広域停電が発生し、修正された津波に関する警報が住民まで届かなかったことも指摘されている。このような津波警報システムがうまく稼働しなかった課題に基づき、予報や発表の方法が改善されてきている。

(2) 北海道南西沖地震津波など地震発生から短い時間で沿岸に到達した津波

1993年7月12日22:17の発生したモーメントマグニチュード7.7の1993年北海道南西沖地震による津波は、奥尻島に死者・行方不明者198人 (全国では230人) になる大きな被害を及ぼした。震源は島から北方に約60 km離れているが、震源域が島の近くにまで広がっていたために、津波は地震発生後約4～5分という極めて短い時間で島に襲来した⁴⁶⁾。津波は島を屈折・回折して島の背後にも回り込み、震源域に面する島の西海岸ではT.P.+31.7m、北端の稲穂地区や南端の青苗地区でもそれぞれ約10m、約20m、震源域の反対側にある島の東海岸の初松前でも10mを超える遡上高が報告されている⁴⁷⁾。津波は、島の南端で分裂波に変形し、それが回折するときに波峰の屈曲部で波高が高くなったことが模型実験により示されている⁴⁸⁾。また、31.7mの遡上高は遡上地点の250m程度のポケットビーチにおけるV字状の海崖という局所的な地形特性の影響を受けており、その特性は静水圧近似を用いない3次元数値計算モデルにより再現することが可能であった⁴⁹⁾。

北海道南西沖地震のときには、今のように地震後3分を目標にして津波情報を発表するシステムは導入されておらず津波警報が間に合っていない状況において、津波から助かった人は地震による揺れが収まるか否かのうちに停電による暗闇の中で取るものもとらず高台へ逃げた人である⁴⁶⁾。

地震発生から短い時間で到達した津波は他にもある。2018年9月28日にインドネシア・スラウェシ島付近で起きたモーメントマグニチュード7.5の地震は、鉛直方向には大きな変位を生じない横ずれ断層であったが、地震に伴って発生した沿岸の陸や海底における地すべりを発生させた。そのため、沿岸には6 m を超える津波が襲来して大きな被害が発生した。地震発生から数分で津波の第1波が沿岸に到達している⁵⁰⁾。

4. 防災・減災対策

4.1 防護レベル

(1) 津波に対する防災ポリシー

一般的な海の波であれば、沿岸部におけるその波長は数十mオーダーであるので、消波ブロック等を波長の1/4程度並べることで波のエネルギーはある程度消散できるが、空間スケールの大きな津波や高潮にはその手法は適用できない。このため、津波や高潮による浸水を防除するためには津波や高潮よりも背の高い堤防、護岸などの構造物を臨海部に設置することが基本になっている。すなわち、沿岸の防災構造物の高さが浸水に対する防護レベルになる。

既往最大津波 津波に対する防災の基本的な考え方などを1998年にとりまとめた「地域防災計画における津波対策強化の手引き」⁵¹⁾では、防災計画で対象とする津波については、『過去に当該沿岸地域で発生し、

痕跡高などの津波情報を比較的精度良く、しかも数多く得られている津波の中から、既往最大の津波を選定し、それを基本とする。ただし、近年の地震観測研究結果等により津波を伴う地震の発生の可能性が指摘されているような沿岸地域については、別途現在の知見により想定し得る最大規模の地震津波を検討し、既往最大津波との比較検討を行った上で、常に安全側の発想から沿岸津波水位のより大きい方を対象津波として設定する』とされている。ただし、ここでの防災計画は単に浸水防除だけでなく、避難等ソフト対策も合わせた総合的な防災のための計画であるので、これは防災構造物の整備水準を規定するものではない。防災構造物の整備水準については、『想定被害の評価に基づき、地域ごとの整備の必要度を明らかに』し『地域の実態と防災効果に応じて定めるものとする』とされている。例えば、田老町（今の岩手県宮古市田老地区）の場合、そこに整備されたX字形の防潮堤は昭和三陸地震津波を対象にT.P.+10.0mの高さで整備されたが、当時の既往最大津波は明治三陸地震津波であった。なお、2011年津波は明治三陸地震津波よりも高く（市街地での最大浸水深16.6m⁵²⁾）、この防潮堤を乗り越えて防波堤の一部を破壊するとともに背後地を破壊を伴って浸水した。被災後に復旧された防潮堤の高さは、地域での協議を経て第1線堤（海側）では T.P.+14.7m、第2線堤（陸側）では原型復旧に設定されている。

多層防護レベル 田老地区における災害に例示されるように、2011年津波は東北地方沿岸のほとんどの地域において既往最大津波より高かった。地域防災計画における対象津波が既往最大を基本としていることから、災害は前述のように甚大なものになった。この災害の反省から、中央防災会議の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⁵³⁾は、『地震・津波の想定を行うにあたっては、あらゆる可能性を考慮した最大クラスの巨大な地震・津波を検討する必要がある』としたうえで、2つの津波レベルを想定する必要があると報告した。その一つは『住民避難を柱とした総合的な防災対策を構築するうえで想定する津波』（以下、L2津波という）であり、『発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波』である。もう一つは『海岸保全施設等の建設を行う上で想定する津波』であり、『最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波』（以下、L1津波という）である。これを受けて、2011年12月27日に一部施行（全部施行は2012年6月13日）された津波防災地域づくりに関する法律の第3条に規定される国土交通大臣が定める「津波防災地域づくりの推進に関する基本的な指針」では、①津波防災津波浸水想定にあつては最大クラスの津波を想定すること、②発生頻度の高い一定程度の津波高に対して海岸保全施設等の整備を進めるとともに、設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発を進めて整備を進めること、③浸水想定を踏まえてハード・ソフトの施策を総合的に組み合わせた多重防御を推進すること、が津波防災地域づくりを推進するための基本的な方向として示された。なお、L1津波は、土木学会⁵⁴⁾の「東日本大震災後における津波対策に関する現状認識と今後の課題」によると、数十年から百数十年に一度程度の頻度で襲来する津波である。

(2) 高潮に対する防災ポリシー

1949年キティ台風によって護岸等が決壊して高潮災害が発生した東京の江東デルタ地帯では、災害復旧と合わせてキティ台風級の高潮に対応した高さの護岸、防潮堤および水門の整備する第一次高潮対策事業を実施し、1956年に完了した⁵⁵⁾。ここで、前述したようにキティ台風時の最高潮位は大正6年台風のときよりも低いことに注意が必要である。整備途中にも年々進展している地盤沈下への対応のために施設のかさ上げを実施しなければならず、護岸のかさ上げも容易ではないことから、大正6年台風による高潮（A.P.+4.21m）に対応した高さの防潮堤により江東デルタ地帯を囲み守ための第二次高潮対策事業が1957年から始められた⁵⁵⁾。すなわち、太平洋戦争直後頃の東京では、既往最高の高潮に対応した防災構造物の整備が進められた。

戦後の大阪湾では、1950年ジェーン台風後の西大阪高潮対策事業計画などのように、既往最大の潮位偏差3.0m（934年室戸台風により発生）を年間朔望平均満潮位に相当するO.P.+2.0mに足し合わせた計画高潮位を設定した²⁷⁾。伊勢湾・三河湾では、1953年台風13号の高潮・高波災害からの復旧の記録³¹⁾によると、朔望平均満潮位に当該地域における既往最大の潮位偏差を加えたものを計画高潮位とし、それに想定される計画波高

を考慮して堤防等の高さが定められている。

戦後最大の人命損失につながった伊勢湾台風による高潮災害を経験して、伊勢湾では台風期平均満潮位に伊勢湾台風時の潮位偏差を加えたものを堤防等防災構造物の計画高潮位とすることが、閣議決定の下で関係省庁から構成された伊勢湾等高潮対策協議会において決定された¹⁾、⁵⁶⁾。例えば、名古屋における計画高潮位は、台風期平均満潮位 $T.P.+0.97m$ に潮位偏差 $3.55m$ （これは速報値であり、確定値は $3.45m$ ）を加えた $T.P.+4.52m$ が計画高潮位である。ここで、天文潮位に台風期朔望平均満潮位でなく台風期平均満潮位を使用していることに注意が必要である。参考文献⁵⁶⁾によると、原案の台風期朔望平均満潮位が台風期平均満潮位に修正されたようであり、名古屋を例にすると後者は前者よりも $0.25m$ 低い。

伊勢湾台風による災害は、既往最大の高潮に対応するように堤防等の整備を進めていた東京にも影響を及ぼし、伊勢湾台風級の台風による高潮（ $A.P.+5.10m$ ）に対応した東京高潮対策事業が計画され、1963年から実施された。対象範囲は第二次高潮対策事業で対象とした江東デルタ地帯から、羽田から旧江戸川にいたる海岸線および東京湾に注ぐ河川へと拡大され、防潮堤・護岸の整備総延長は $168.0km$ になった⁵⁵⁾。この長い延長距離のため、1978年3月末の時点で65%、2020年3月末で95%の整備が完了している。大阪では、1961年第二室戸台風による高潮災害のあとの1965年に高潮対策恒久計画が策定され、防潮堤等の計画高潮位は $O.P.+5.20m$ （ $T.P.+3.90m$ ）＝台風期朔望平均満潮位 $O.P.+2.20m$ ＋伊勢湾台風級の台風が室戸台風の経路を通ったときに生じる潮位偏差 $3.00m$ とされた。なお、実際の堤防高は計画潮位に計画波高を加えたものであり、さらに地盤地下 $0.3\sim 1.0m$ の影響を加味された²⁷⁾。

戦後毎年のように発生した台風災害そして1953年台風13号による災害を契機として海岸法が1956年5月に成立し、同年11月10日に施行された。参考文献⁵⁷⁾によると、海岸法の第14条の規定をうけて「海岸保全施設築造基準」が海岸四省庁（当時の建設省、運輸省、農林省および水産庁）により1958年12月に制定された。この最初の築造基準の規定は抽象的であったため、土木学会の「海岸保全施設設計便覧（昭和32年）」に基づいて1960年に「海岸保全施設築造基準解説」が策定された。伊勢湾台風の災害当時には既に上記のような海岸保全施設築造基準があったが、参考文献⁵⁶⁾によると、これを作成した関係省庁の間において、将来大災害が起こったときには基準の運用について協議することが申し合わされていて、伊勢湾台風直後から情報交換などを行ってきたが、伊勢湾等の高潮対策における海岸堤防等の築造の基本方針は正式機関により確立される必要があるとして伊勢湾等高潮対策協議会が設置された。現在も防潮堤等の性能照査には、既往最高潮位の実測値または朔望平均満潮位に推定最大潮位偏差を加えた推算値を設計高潮位とすることが多い。

2011年津波の災害からL2津波に対する津波防災が検討されるようになってきたことから、高潮に対する防災においても最大クラスの高潮を考慮するようになってきている。「高潮浸水想定区域図作成の手引き」⁵⁸⁾では、日本において考えうる最強・最大の台風（中心気圧に室戸台風、最大旋衡風速半径と移動速度に伊勢湾台風の諸元を使用することが基本）による気圧や風の時空間変化から、潮位偏差および波浪が計算される。高潮は台風経路に大きな影響を受けるので、既往台風の経路などを参考に対象地域に最も高い潮位偏差を発生させる経路を見出す必要がある。なお、潮位偏差に重ねられる天文潮位は朔望平均満潮位である。

4.2 ハード対策

(1) 防波堤

津波防波堤 釜石港には、明治三陸津波や昭和三陸津波と同規模の津波に対して臨海部を守るために混成堤形式の湾口防波堤と臨海部における天端高 $T.P.+4.0\sim 6.1m$ の防潮堤とによる2重の防護システムが整備されていた。それらの設計条件を超える2011年津波の作用によりそれらは破壊された。しかし、破壊された防波堤であっても、それを形成するケーソンの約半分はそれらの頭を海面上に出しており、港内への津波の流入を軽減させた。防波堤がない状態の数値計算結果と現地調査で測定された津波痕跡高および被災時に撮影

されたビデオ映像の結果と比較したところ、被災防波堤は海岸近傍の津波高13.7mを8.1mに、河川沿いの最大遡上高20.2mを10.0mに低減し、沿岸部の防潮堤を越流する時刻を6分遅らせた。被災しながらも完全に倒壊しなかった防波堤がこのような津波高の低減や浸水開始時刻の遅延をもたらしたことから、減災に貢献したと考えられている。このような減災効果

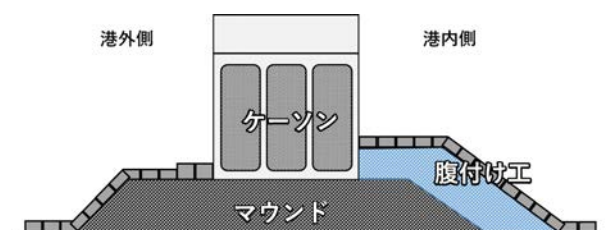


図-9 粘り強い防波堤の例: 腹付け工

は海岸堤防などでも認められている。設計対象の津波が作用しても瞬時に倒壊しない構造物が減災に寄与したことは、前述の「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」、「津波防災地域づくりの推進に関する基本的な指針」、「東日本大震災後における津波対策に関する現状認識と今後の課題」などにおいて、『粘り強く』施設の効果を発揮できる防災構造物の重要性として言及されている。

防波堤の粘り強い構造については、津波の越流によるケーソン背後の基礎マウンド洗堀による支持力低下を防ぐために、図-9に示すようにケーソン背後の基礎マウンドの高さを高めておくこと（腹付け工）やその他の手法が提案されている⁵⁹⁾。

高潮防波堤 伊勢湾台風を契機として見直された名古屋における防潮堤の計画高は7.50mであったが、通常時の荷役のために堤防高を低くすることが求められた。そのため、港内に侵入する高潮と波浪とともに低減し、防潮堤や将来の埋立地の天端高を下げるができる対策として高潮防波堤を12km沖合に建設することが計画され、1964年に完成した。港内への高潮・高波の侵入を低減するために防波堤開口部は航路部分のみの幅200mの主航路および幅50mの副航路である。この防波堤により潮位偏差を約0.5m、波高を0.6～1.0m低下させることができるので、防波堤内における堤防高は6.20mへと下げられた。その後の船舶の通行量の増加や大型化、および埋立の進捗により港内発生波の低減が期待されたことから、主航路および副航路の幅をそれぞれ350mおよび220mにする拡張が行われ現況に至っている。春日井ら⁶⁰⁾によると、現況の防波堤の効果は防潮堤内への越波流量は許容値以下の0.01～0.02m³/m/sであり、この程度の浸水であれば現状の排水機能により対応可能であると試算された。

(2) 海岸堤防および護岸

海岸堤防 海岸法や海岸保全施設築造基準が未整備であった1953年の台風13号では、高潮・高波が海岸堤防を越流・越波して、粘土や芝張りなどの被覆による天端や裏法面を洗堀したことから破堤につながった³¹⁾。このため復旧堤防の構造に、天端および裏法を含め堤防全体をコンクリートで被覆する三面張りが採用された。その後の1959年に伊勢湾台風が襲来したとき、越波が厳しいと思われる地域であっても三面張りの堤防の被害は軽微であった³⁸⁾ことから、海岸保全施設築造基準において海岸堤防の構造が三面張りに確定された。

三面張りの海岸堤防も、2011年津波が激しく越流したときに、裏法面を高速で下る津波が被覆工の下にある土砂を吸い出すなどにより裏法面を損傷し、裏法面を下り降りた水塊の衝突によって裏法尻の背後地盤が洗堀されるなどによって破堤した。それまでの三面張り形式では波当たりの厳しい表法面において厚い被覆工が施工されるなどの強化が行われていたが、津波が越流しても粘り強く容易に崩壊しないようにするために、天端や裏法面における被覆工を表法面と同等にすること、裏法尻の保護、天端と法肩を一体とした被覆工などが提案されている⁶¹⁾。

護岸・胸壁 護岸や胸壁においては、設計外力を超える津波が海側から作用することによって陸側に倒れこむなどの被害を受けただけでなく、陸上からの津波の引き波による陸から作用する流体力、施設を越流した水塊による海側地盤の洗堀などによっても倒壊した。このような被害を防止するためには、陸からの流体力、海側地盤の洗堀対策などを検討することも必要である。

(3) 水門・陸閘および津波高潮防災ステーション

高潮や津波が河川などを遡上することを阻止するために、水門を設置している河川などがある。例えば、明治三陸および昭和三陸地震津波により多くの村民が亡くなる被害があった岩手県普代村では、村の中心部を流れる普代川の下流部の谷間に普代水門を整備していた。2011年津波はこの水門を約2m越流したが、越流水による浸水域は村の中心部までには達しなく、住宅への浸水被害は発生しなかった。

水門の閉鎖は現地に人が赴いて操作されることがかつては多かったが、とくに津波時にそのような余裕がないことや現場操作者の安全のために自動化や遠隔操作化が図られている。普代水門も遠隔操作できるようになっていたが、地震によって停電したことから消防本部職員が手動操作により津波到達前に閉鎖した。

陸上の防潮堤にも人や物の出入りのために陸閘が取り付けられる。陸閘の閉鎖も人が現地に赴いて操作することが多く、近隣の企業などにその作業を委託していることが多い。しかし、近年では、水門と同様に遠隔操作化も進められている。さらに、陸閘の統廃合により陸閘をなくすことや常時閉鎖も進められている。

水門や陸閘を遠隔操作により閉鎖するためにシステムとして、津波高潮防災ステーションも整備されてきている。水門等の閉鎖するときには船、人、自動車などの往来を止める必要があるので、現地における人などを注意喚起するサイレンシステム、往来を監視するシステムなども併設される。

4.3 ソフト対策

(1) 高所居住および土地利用

高所居住 2011年津波の被災地では、防災集団移転促進事業などにより居住地区の高所移転が行われた。居住地区の高所移転は、1993年北海道南西沖地震津波で大きな被害が発生した奥尻島の青苗地区でも実施されている⁴⁶⁾。明治三陸津波および昭和三陸津波による大きな津波災害を教訓にして高地居住を実施していた唐丹本郷（岩手県釜石市）などでは東北地方太平洋沖地震津波の被害を受けなかったが、越喜来浦浜（岩手県大船渡市）などでは既往の津波災害を教訓として高地居住をしても2011年の津波が既往津波よりも高かったために被害が発生した⁶²⁾。さらに、一度高台に移転しても、生活の不便さあるいは新規居住者を受け入れが困難であることから再び低地に居住地などが発展したところでは浸水被害にあっている。

今のハザードマップ^{63), 58)}では、最大クラスの津波や最大クラスの台風による高潮に対して浸水想定をすることになっているので、ハザードマップにおける浸水限界を超えて浸水することは少ないと考えられるが、浸水計算を行うときに一般的に使用される非線形長波モデルに基づいた数値計算モデルは急傾斜地を遡上する津波やV字谷など局所的に複雑な地形における津波を精度高く計算できないことに留意が必要である。さらに、ハザードマップでは最大クラスの津波や高潮・高波を対象にするようになっているが、局所的に地域ハザードを評価すると、異なる津波（例えば異なる位置に大すべり域を設定するなど）、異なる高潮（異なる台風コースなど）によりさらに高い津波や高潮が起こることもある。

土地利用制限 建築基準法（1950年11月23日施行）に、住宅等の建築禁止や建築制限を課す災害危険区域を指定する制度が規定されている。伊勢湾台風により臨海部に大きな高潮・高波災害を被った名古屋市では、当時の浸水状況や利用状況に応じて臨海部を5つに区分し、各区分において建設可能な建物の構造制限を1961年から実施している（名古屋市臨海部防災区域建築条例）。その後の土地利用の需要の変化や高潮対策の進展を反映して区分は4つに見直されているが、例えば、臨海工業地として主に利用されている防潮堤の海側の埋立地域（第1種区域）では、木造の建築物を禁止し、建築物を建てる場合でも1階の床高をN.P.+4m以上（N.P.は名古屋港基準面であり、T.P.の下1.412m）としなければならないという制限が課されている⁶⁴⁾。

(2) 防災意識の向上、避難および情報

津波や高潮から命が助かるためには避難が肝要であり、気象庁からの津波警報などの情報が避難のために有用である。とくに短い時間で避難しなければならない津波の場合には、地域の住民や企業従業員が普段か

ら避難場所や避難経路を知っていることが大切であり、避難訓練への参加も非常事態における避難の成功に有効である。また、当該地域において過去にどのような、どんな規模で災害が起こったのかを知ることも災害意識の向上には大切である。このような防災意識の向上が自助や共助の実践には不可欠であり、その向上を図るためには防災教育の実施や災害からの教訓の伝承が重要である。東日本大震災の翌年2012年には、防災教育の実施が災害対策基本法に新たに盛り込まれている。

防潮堤など防災構造物の海側に多くの人が活動する地域がある。そういった地域は、ハザードマップで対象にした最大クラスよりも低い津波や高潮により浸水することから、迫りくるハザードに対する確かな情報がより一層重要である。そのためには沖合における観測情報を活用することが有効である。2011年津波のときには沖合に設置されたGPS波浪計により沿岸に到達する前の津波を検知し、それが気象庁による津波警報の修正に役立っている。さらに、海洋レーダによる沖合津波の観測についても技術が進展している⁶⁵⁾。さらに防潮堤の海側に平地が広がっているような港湾のような地域では、より一層速やかな避難が求められる。そのために避難情報を速やかに周知することや耐震性のある建物を緊急避難場所にすることなどの対策も重要である。図-10は清水港のコンテナターミナルに整備された津波避難施設付きの照明塔である。

暴風、高潮などの発生が予想されるときには、気象庁から暴風警報、高潮警報など、自治体から住民等に対して避難指示（2021年5月20日に避難勧告を廃止）、港湾では港長から港内船舶などに対して第一警戒体制（いわゆる避難の準備体制の構築）、第二警戒体制（いわゆる避難の実施）が発表される。さらに、2015年の水防法の改正にともなって、高潮・高波による災害を防除・軽減するための活動を行っている人々などに避難を促す「高潮はん濫危険情報」を発表する仕組みも進められている。これらの情報の発表・周知により、高潮・高波災害における人的被害は近年劇的に減っている。伊勢湾台風のときにも、名古屋気象台は台風が潮岬に上陸する9月26日18:00頃より約7時間前の11:15に暴風雨警報、高潮警報および波浪警報を、津地方気象台は8:00に暴風雨警報、11:30に高潮警報と波浪警報を発表したが、避難命令が発令されたのは名古屋市南部では20:00～20:30であり、既往最大潮位を超えた20:30頃とほぼ同じ頃であった。一方、6年前に台風13号で大きな高潮・高波災害を受けた知多半島の美浜、内海、武豊および西三河地域の碧南では16:30までに避難命令がでており、この4地区の犠牲者数は26人と少なかった³⁵⁾。最近、2015年関東・東北豪雨、2018年西日本豪雨、2019年東日本台風では河川氾濫に対する事前避難の重要性、さらに避難行動要支援者の避難の困難さが明らかになっており、これは高潮に対しても同様である。とくに高潮時には暴風になっていることが多いのでより早めの避難が重要である。

また、港湾における物流関係者からは、荷主などとの調整のために1日程度前には情報が欲しいと聞く。これに対応するためには、台風経路などの台風の予測精度を上げるのが肝要であるが、それと合わせて予測誤差を認識しつつ予測情報を積極的に使用する仕組みづくりも必要である。なお、気象庁は、2019年3月14日から台風の進路・経路を5日先まで、さらに2020年9月9日から24時間以内に台風が発達する見込みのある熱帯低気圧についても5日先まで予報するようになっている。

(3) 事業（業務）継続計画・タイムライン

災害から速やかに復旧するための事前計画である事業（業務）継続計画（BCP）は災害影響を軽減するために重要である。海上物流の要である港湾は、津波や高潮の作用あるいは河川から流入によってがれき、車両など漂流物がその陸域や水域に散乱すると使用できなくなる。実際、東北地方太平洋沖地震のとき、東北・関東地方の太平洋に面した重要港湾以上の港湾の水域



図-10 避難施設付き照明塔（静岡県清水港管理局提供）

が津波漂流物で埋め尽くされ、緊急物資などを積載した船舶が入港できなくなった。このような事態の発生は将来の津波や高潮災害においても想像できるので、津波や高潮の災害リスクのある港湾では、航路啓開作業が被災直後の重要な早期復旧業務の一つとして港湾BCPのなかに位置づけられている。BCPに定められた業務を実行できるようにするために、連絡体制の構築、連絡手段、作業手順などを具体的にまとめた手順書を作成することも推奨されている⁶⁶⁾。港湾の業務に必要な資源を分析することは港湾BCPを策定するときに重要であり、資源の依存関係から資源の重要度を分析すると、電力、通信、および物流に係る各機関の人々のつぎに岸壁、航路が続いた⁶⁷⁾。災害から人の命を守ること、ライフラインとしての電力や通信を速やかに回復することに加えて、大量の緊急物資を運ぶことができる海上輸送を早期に回復させるためには岸壁や航路をすぐに使用可能にすることが重要であることを示している。とくに地震のときには液状化、はらみだし等により岸壁が損傷する可能性があり、その復旧にはかなりの時間を要することから、震災後の速やかな物流機能の復旧のために耐震強化岸壁の整備が重要である。さらに港湾の中だけでなく、耐震強化岸壁からつながる道路などの復旧も合わせて行わなければ緊急物資を必要とするところまで届けることができない。

2018年台風21号による大阪、神戸における高潮・高波災害で起こったように、航路埋没だけでなく、浸水による電気施設の損傷、暴風による荷役機械の損傷なども発生する。例えば、台風21号のときに電気施設の浸水により稼働できなくなったガントリークレーンの復旧には14日かかり、暴風により走錨したタンカーの衝突により破損した関西空港連絡橋の完全復旧には216日、2019年台風15号のときに走錨した貨物船の衝突により破損した臨港道路橋梁部の供用再開には241日を要している。

台風予測により事前の準備対応を実施することが可能な高潮に対しては、台風の襲来前の時間を含めて何時、誰が、何を実施するのかを時系列で事前に計画したタイムライン（港湾の場合にはフェーズ別高潮・暴風対応計画という）も重要になってきている。これは、2012年に米国のニューヨークなどに高潮による甚大な浸水被害を発生させたハリケーン・サンディが米国東海岸に襲来したときに、発災前の前段階において実施すべき対策を予め計画したタイムラインにしたがって各機関が行動したことにより、浸水は起こったもののその影響を軽減したことで知られている。サンディは10月28日20時にニューヨークの南方にあるニュージャージー州アトランティックシティ付近に上陸した。これに対して、例えば、ニューヨーク州では州知事が26日に緊急事態宣言を発表し、27日にはニューヨーク大都市圏において地下鉄、バスなどを運用する都市圏交通局MTAに公共交通機関の一時停止を指示し、28日19時までに公共交通による移動を終了させ、それ以降の地下鉄等の運行が一時停止された。MTAは市民の避難のためにバスを提供することや、低地にある車両基地の地下鉄車両を高地に退避させること、暴風雨に備えて自動券売機をシュリンク包装することなどを事前に実施してサンディの襲来に備えた。

日本では、2014年台風19号に備えるためにJR西日本が大都市圏では初めて計画運休を実施し、最近では各社において実施されている。計画運休を実施することにより、早期帰宅の促進、不要不急の外出の抑制、イベントの中止や早めの切り上げなど社会の防災・減災を向上させる波及効果もあった。

4.4 防災・減災上の課題

(1) 防災構造物における課題

地震による地盤沈下など 2011年津波を経験して津波や高潮に対する総合的な防災計画はL2クラスのハザード（L2津波など）を対象にする一方、L1クラスのハザード（L1津波など）に対して防潮堤などの防災構造物で対応するようになってきている。防潮堤などが整備される臨海部では地震動による液状化などによって地盤沈下することがあり、地盤沈下した場合にはL1津波でさえも防災構造物を越流してしまう。したがって、地震に対する構造物評価と地震による影響がある場合への対応が必要である。また、このような評価や

対応は高潮に対しても無視することができない。構造物の設計において津波と高潮の同時生起は一般的には考慮しないが、地震により大きく変状した防災構造物の復旧期間中に高潮・高波に遭遇する確率は高くなるからである。例えば、名古屋港の高潮防波堤は高潮だけでなく津波に対しても減災機能を有しているが、地震による液状化により2m程度沈下することが推定されたので、沈下しても津波を越流させない、そして伊勢台風クラスの高潮（いわゆるL1高潮）に対しても所定の機能を発揮できるように防波堤の上部コンクリートをかさ上げするとともに、かさ上げによる重量増加に耐えるようにケーソンの補強が行われた。また、2004年9月5日の紀伊半島南東沖地震のとき、串本で0.83m、室戸岬で0.41mの津波が観測された⁶⁸⁾あとの9月20日に台風23号が高知県土佐清水市付近に上陸し紀伊半島を横断した。地震や津波による防災構造物の被害はなく、その後の高潮などに影響はないが、室戸岬の周辺の海岸では高潮に乗じた高波災害が発生した。また、2019年10月12日19時前に伊豆半島に上陸し関東地方を横断した台風19号が東京で最大潮位偏差1.59m（12日21:27）、最高潮位1.61m（13日4:24）、千葉県布良で最大潮位偏差1.32m（12日19:38）、最高潮位1.53m（12日15:40）という高潮を発生させたときの12日18:22に千葉県鴨川市で震度4、船橋市、東京都千代田区、横浜市などで震度3となる地震が起きている。

気候変動影響への対応 気候変動の影響によって平均海水面が上昇すると、高潮・高波などに対する防潮堤などの天端高が相対的に不足する。したがって、平均海水位の上昇についてモニタリングを行って、既存構造物のかさ上げ時期などを見積もることが重要になる。平均海水面が上昇すると、海岸幅は減少し、また護岸等の前面水深が増すので、砕波が海岸堤防や護岸の近傍で生じるなど構造物への波浪の作用は厳しくなる。このため作用波浪の推定も重要になる。さらに、気候変動影響によって高波もこれまで以上に高くという予測もある。しかし、このような将来の現象には不確定性も含まれるので、モニタリングを行いつつ、確率的な評価も導入することによって影響を適切に評価できる仕組みが必要である。

地域の評価と構造物の重要度 構造物の設計では、a) 想定した作用に対して構造物内外の人命の安全性等を確保する(安全性)、b) 想定した作用に対して構造物の機能を適切に確保する(使用性)、c) 想定した作用に対して適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲で修復を行うことで継続的な使用を可能とする(修復性) という基本的な要求性能を確保することを基本にしている⁶⁹⁾。防災構造物では、その整備目的はその背後地域を守ることにあるので、背後地において甘受および受忍できる浸水深などの評価を行ってそれに必要な防災構造物を整備することも重要である。例えば、L1津波とL2津波の間にある規模の津波の作用によって防災構造物が破壊したことにより、背後地域に甚大な影響があるまたは長期的に影響が及ぶような場合には甘受および受忍できる影響を評価した結果を防災構造物の計画や設計に活かすことが考えられる。「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年版）」では、防波堤の要求性能に関する省令や告示の解釈において、背後に人口の集積地等が存在する『偶発対応施設の防波堤にあつては、・・・設計津波を超える規模の強さを有する津波等の作用を受けた場合であっても、減災効果の発揮や被災直後からの港内の静穏度を確保できるよう、可能な限り安定が保たれる構造上の工夫を施すこと』と記されており、地域の重要度に応じてL1津波を超える津波が作用しても構造物が大きく壊れないことを視野に入れている。

さらに、インフラ整備は長期間にわたることが多い。このためどこから防災構造物の整備を行うのか、あるいはかさ上げなどの改良を行うのかを決定する必要がある、そのときにも背後地域の重要度あるいは危険度が指標になるので、そのような指標づくりにも取り組む必要がある。

(2) 人間社会の脆弱性における課題

これからの日本が向かう人口減少・高齢化社会において、防災対策の三本柱である自助・共助・公助のいずれにも限界がある。図-11は厚生労働省の人口動態調査 (<https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/81-1.html>) における2011年人口動態統計(確定)で発表された東北地方太平洋沖地震・津波による年齢階級ごとの死亡者数から

算出した年齢範囲ごとの死者数の割合を示している。震災死者数のうち65歳以上の割合は56.7%であったというように、死者数における高齢者の割合は高い。さらに同じ年齢階級の全国人口に対する死者数の比において、15～64歳の比を1としたときに65歳以上の比は3.9、15歳未満の割合は0.5であった。すなわち、他の年齢階級に比べて高齢者が犠牲になるリスクは高い。このような災害実態から、人口減少・高齢化社会において高齢者の命を守る方法を考える必要がある。避難対策に係るマニュアル⁷⁰⁾などに記載される年齢階級別の徒歩避難速度は30歳代以降年齢階級が増えるほど遅くなることを考慮すると、浸水域およびその周辺における津波避難場所の配置、避難時間を稼ぐための防災構造物の整備の検討が必要になる。

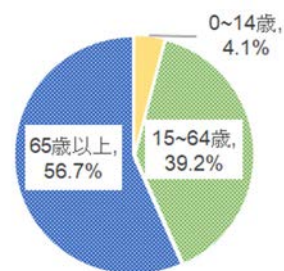


図-11 東日本大震災の時の年齢による死者数

また、「コンパクトシティ+ネットワーク」による国づくりでは、大都市よりもスケールの狭いコンパクトシティとそれらをつなぐネットワークの持続性、快適性などの評価に加えて、津波、高潮・高波などの災害リスク評価も不可欠である。地域のリスク評価には、ハザード評価だけでなく地域の安全性や脆弱性を評価する項目を総合したGNS⁷¹⁾などのリスク評価指標が提案されているが、使用する統計量等の関係から国単位あるいは都道府県単位での評価指標になっていることが少なくない。コンパクトシティに対応した指標づくりも必要になってくると考えられる。

5. おわりに

津波および高潮・高波は、日本列島が形作られたときからそこに住む人間の活動とは無関係に発生し、沿岸地域を浸水してきた。しかし、その浸水域を人間が利用することにより、浸水は単なる自然現象から災害を引き起こすハザードに変貌した。これまでに数多くの災害が発生し、多くの人命や財産が失われてきた。そのたびに再び同じような災害が起きないように先人たちはハード・ソフト両面にわたり防災・減災対策を発展させてきた。現代でも、防災対策を行っていた東北地方を中心として甚大な被害になった東日本大震災の教訓から、現在の知識のなかで想定しうる最大クラスのハザードに対して防災・減災を考えるようになってきている。しかし、我々の知識を超えたところで未知の現象が発生することは否定できない。

世界の主要な潮流として持続可能な開発があり、そのなかでは気候変動影響への適応も明示的に組み込まれている。すでに始まっている平均海面水位の上昇だけでなく、高潮・高波への適切な対応も地域の持続性に欠かすことはできない。日本のように地震・津波ハザードがある国や地域においてはそれらハザードも同様である。人間が滑動する空間としての地域を持続的にするためには、人間が持つ最も基礎的な要求の一つである安全を地域において確保することが不可欠である。

将来のハザードおよび災害を想定することは防災・減災対策を実行可能なものとするために不可欠であるが、科学時技術の発展により想定における未知の部分を既知に変え、不確定性も考慮し、さらに起こり得る災害について想像力を豊かにすることが大切である。とくに不確定性への対応では、それ考慮した地域のリスク評価に基づいて計画や対策を検討する必要がある。このような方向性にとって、デジタルツイン技術は防災・減災に係る計画や対策の効果の照査・検証をより高度にもたらしことが期待でき、Society 5.0が目指すサイバー空間とフィジカル空間を融合させたシステムにより作り出される人間社会はハード対策とソフト対策を有機的に結合させ、人的・物的被害をより一層軽減させる可能性がある。

本稿では日本を中心にこれまでの災害や防災・減災対策を紹介したが、世界には学ぶべき災害や対策が数多くある。さらに、日本の技術や協力により世界における防災・減災を進めることもこれまでと同様に続けていく必要がある。

参考文献

- 1) 吉川吉三: 伊勢湾高潮対策事業 (建設省直轄施行海岸) について, 第7回海岸工学講演会講演集, 289-303, 1960.
- 2) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate, [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)], 755 p., 2019.
- 3) 佐賀県耕地協会編: 佐賀県干拓史, 佐賀県耕地協会, 427-429, 1941.
- 4) 千手正美: 有明海沿岸の干拓地: 西日本における地域開発の地理学的研究 (総合科研中間報告), 地理科学, 7, 66-67, 1967.
- 5) 出口勝美: 干拓堤防の計画と設計 (II), 農業土木研究, 28(2), 98-103, 1960.
- 6) 梶川勇作: 尾張地方の近世の新田村, 金沢大学文学部地理学報告, 4, 13-27, 1988.
- 7) 川合一郎: 石橋五郎の歴史地理学と人文地理学, 歴史地理学, 52(4), 1-16, 2010.
- 8) 遠藤毅: 東京都臨海域における埋立地造成の歴史, 地学雑誌, 113(6), 785-801, 2004.
- 9) 市場嘉輝: 江戸初期の築港技術を示す港湾遺産「手結港 (内港)」, 土木遺産の香 第48回, Civil Engineering Consultant, 244, 58-61, 2009.
- 10) 国土交通省国土審議会: 第6回大都市圏制度調査専門委員会, 資料4 参考資料1 三大湾関係資料. [<https://www.mlit.go.jp/singikai/kokudosin/daitoshiken/daitoshiken.html>]
- 11) 内閣府: 令和2年版防災白書, 附属資料7 自然災害における死者・行方不明者数. [<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/index.html>]
- 12) 内閣府: 日本の災害対策, 内閣府政策統括官 (防災担当), 49 p., 2015.
- 13) 中央防災会議災害教訓の継承に関する専門調査会: 第1回専門調査会, 参考資料: 過去の災害一覧, 平成15年年7月31日開催, 2003. [<http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunokeishou/>]
- 14) 篠原謹爾: 有明海の高潮について, 第8回海岸工学講演会講演集, 57-60, 1961.
- 15) 小西達男: 1828 年シーボルト台風 (子年の大風) と高潮, 天気, 57(6), 383-398, 2010.
- 16) 矢野武彦: 有明海沿岸における干拓と海岸保全 有明干拓と有明海岸保全, 農業土木学会誌, 46(3), 188-191, 1978.
- 17) 小西達男: 1991 年台風第 19 号による有明海の高潮と高潮確率, 海と空, 84(4), 163-172, 2009.
- 18) 熊本県, 福岡県, 佐賀県, 長崎県: 有明海沿岸海岸保全基本計画, 平成27年12月, 表2.1 海岸保全施設整備の種類, 規模, 配置及び受益の地域, 2015.
- 19) 羽鳥徳太郎: 東京湾・浦賀水道沿岸の元禄関東 (1703), 安政東海 (1854) 津波とその他の津波の遡上状況, 歴史地震, 21, 37-45, 2006.
- 20) 平野淳平: 歴史イベントと気候との関わりをどう教えるか: 歴史気候学からの視点, 歴史と地理, 708, 9-17, 2017.
- 21) 坂崎貴俊, 加納靖之, 大邑潤三, 服部健太郎: 安政江戸台風 (1856) の被害と当時の気象場推定. 生存圏研究, 11, 64-70, 2015.
- 22) 宮崎正衛: 高潮の研究: その実例とメカニズム, 成山堂書店, 134 p., 2013.
- 23) 土屋信行: 東京東部低地 (ゼロメートル地帯) における水災害の歴史とその特性に関する研究 (I). 水利科学, 323, 63-77, 2012.
- 24) Tsuchiya, Y., Kawata, Y.: Historical study of changes in storm surge disasters in the Osaka area. Natural Disaster Science, 8(2), 1-18, 1986.
- 25) 渡辺一夫: 第2室戸台風と西大阪低地の住民—西大阪低地の災害調査から—, 水利科学, 40, 99-120, 1964.
- 26) 布施敏一郎: 台風と港湾海岸災害, 水利科学, 18, 67-78, 1961.
- 27) 高山知司: 日本における沿岸災害の歴史—高潮・高波災害を中心に—, 土木学会水工学シリーズ, 08-B-5, 14p, 2008.
- 28) 大阪府防災会議: 大阪区府地域防災計画関連資料集, 令和3年3月修正, 基本対策, 総則, 過去の災害記録, 2021. [https://www.pref.osaka.lg.jp/kikikanri/keikaku_higaisoutei/r3_3shiryō.html]
- 29) 大阪湾高潮対策協議会: 大阪湾高潮対策危機管理行動計画ガイドライン, 平成22年3月, pp. 2-4-2-6, 2010.
- 30) 大阪市港区役所: 大阪市港区防災計画, 災害に強いまちをめざして, 平成28年7月, 48 p., 2016.
- 31) 中島武: 台風13号による愛知・三重海岸災害の現状と対策, 第1回海岸工学研究発表会論文集, 113-129, 1954.
- 32) 山口正隆, 畑田佳男, 花山格章: 伊勢湾における高潮の極値推定, 海岸工学論文集, 42, 321-325, 1995.
- 33) 高橋重雄, 富田孝史, 河合弘泰: 沿岸防災施設の性能設計の基本的な考え方, 海岸工学論文集, 49, 931-935, 2002.
- 34) 伊勢湾再生推進会議: 伊勢湾再生行動計画(第2期), 平成29年6月, 93 p., 2017.
- 35) 安田孝志: 1959年9月26日伊勢湾台風(その2), ぼうさい, 48(11), 30-31, 2008.
- 36) 愛知県: 伊勢湾台風災害復興誌, 昭和39年10月, 499p., 1964.
- 37) 気象庁: 伊勢湾台風調査報告, 気象庁技術報告, 7, 427 p., 1961.
- 38) 鶴田千里, 合田良実: 伊勢湾台風による構造物の被害とその特性, 第7回海岸工学講演会講演集, 195-199, 1960.
- 39) 名古屋港史編集委員会: 名古屋港史, 港勢編, 名古屋港管理組合, 737 p., 1990.
- 40) 渡辺偉夫: 日本被害津波総覧 第2版, 東京大学出版会, 238p., 1998

- 41) 宮島正悟ら: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による港湾施設等被害報告, 国土技術政策総合研究所資料, 798, 3322p., 2015.
- 42) Tomita, T., Arikawa, T., Asai, T.: Damage in ports due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, *Journal of Disaster Research*, 8(4), 594-604, 2013.
- 43) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 平成25年9月 (平成27年12月一部改訂), 2015.
- 44) 富田孝史, 廉慶善, 熊谷兼太郎, 高川智博, 鈴木高二朗, 渡邊祐二, 齊藤節文, 佐藤正勝: 2011年東北地方太平洋沖地震津波による八戸港の被害. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 68(2), I_1371-I_1375, 2012.
- 45) 中垣規子, 小濱英司, 楠謙吾, 村上功一: 2011年東北地方太平洋沖地震における相馬港鋼矢板岸壁の被災要因に関する数値計算, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), 72(4), I_856-I_870, 2016.
- 46) 奥尻町: 北海道南西沖地震奥尻町記録書, 255 p., 1996.
- 47) 首藤伸夫, 松富英夫, 卯花政孝: 北海道南西沖地震津波の特徴と今後の問題, 海岸工学論文集, 41, 236-240, 1994.
- 48) 野口賢二, 佐藤慎司, 田中茂信: 北海道南西沖地震津波の奥尻島南端部における変形機構, 海岸工学論文集, 42, 371-375, 1995.
- 49) 米山望, 松山昌史, 田中寛好: 1993年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析, 土木学会論文集, 705, 139-150, 2002.
- 50) Heidarzadeh, M., Muhari, A., Wijanarto, A. B.: Insights on the source of the 28 September 2018 Sulawesi tsunami, Indonesia based on spectral analyses and numerical simulations. *Pure and Applied Geophysics*, 176(1), 25-43, 2019.
- 51) 国土庁, 農林水産省構造改善局, 農林水産省水産庁, 運輸省, 気象庁, 建設省, 消防庁: 地域防災計画における津波対策強化の手引き, 99p., 1998.
- 52) 宮古市東日本大震災記録編集委員会: 東日本大震災 宮古市の記録, 第1巻 (津波史編) 概要版, 113p., 2014.
- 53) 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: 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報告, 平成23年9月28日, 47p., 2011.
- 54) 土木学会: 東日本大震災後における津波対策に関する現状認識と今後の課題.
[<https://committees.jsce.or.jp/2011quake/node/171>]
- 55) 東京都江東治水事務所: 事業概要, 令和2年版, 50p., 2020.
- 56) 森学: 伊勢湾等高潮対策事業の計画基本方針, 農林土木研究, 28(2), 38-19, 1960.
- 57) 岸田弘之: 海岸管理の変遷から捉えた新しい海岸制度の実践と方向性, 国土技術政策総合研究所資料, 619, 304p., 2011.
- 58) 農林水産省農村振興局整備部防災課, 農林水産省水産庁漁港漁場整備部防災漁村課, 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課, 国土交通省水管理・国土保全局海岸室, 国土交通省港湾局海岸・防災課: 高潮浸水想定区域図作成の手引き Ver.2.00, 令和2年6月, 83p., 2020.
- 59) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 参考資料V 防波堤の粘り強い構造に資する民間企業等の技術, 2017.
- 60) 春日井康夫, 伊藤正人, 西村大司, 日置幸司, 大塚香, 柴木秀之: 伊勢湾の中核港湾における現状の高潮防護機能の検証と長期的な高潮災害リスクの解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 65(1), 1326-1330, 2009.
- 61) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部: 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討 (第2報), 国総研技術速報, 3, 21p., 2012.
- 62) 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: 第5回会合 参考資料1 今回の津波における高地移転等を行った地域の状況, 平成23年7月10日.
[<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/5/index.html>]
- 63) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室, 国技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室: 津波浸水想定の設定の手引き, Ver. 2.10, 2019年4月, 2019. [https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kaigan/tsunamishinsui_manual.pdf]
- 64) 名古屋市住宅都市局: 名古屋市臨海部防災区域建築条例の解説, 令和元年12月, 8 p., 2019.
- 65) 藤良太郎, 日向博文, 藤井智史, 永松宏, 小笠原勇, 伊藤浩之, 片岡智哉, 高橋智幸: 仮想津波観測実験に基づく海洋レーダ津波検知距離の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 71(2), I_337-I_342, 2015.
- 66) 国土交通省港湾局: 港湾の事業継続計画策定ガイドライン (改訂版), 令和2年5月, 39p., 2020.
- 67) 富田孝史, 若尾晃宏: 津波災害時の航路啓開計画における作業船量分析. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I_379-I_384, 2018.
- 68) 永井紀彦, 里見茂: 2004年東海道沖地震津波の観測結果, 港湾空港技術研究所資料, 1096, 22p., 2005.
- 69) 国土交通省: 土木・建築にかかる設計の基本, 31p., 2002. [https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/13/131021_.html]
- 70) 消防庁国民保護・防災部防災課: 津波避難対策推進マニュアル検討会報告書, 平成25年3月, 194p., 2013.
- 71) 菊本統, 下野勘智, 伊藤和也, 大里重人, 稲垣秀輝, 日下部治: 我が国の自然災害に対する統合的リスク指標, 土木学会論文集 F6 (安全問題), 73(1), 43-57, 2017.