

これからの津波防災のあり方

～ STI によるハードとソフト対策 ～

有川 太郎*1

2011年の東日本大震災において、内閣府では、津波対策としてハード施設のみには頼るのではなく、ハード・ソフトの両方の対策で、減災を目指すということを明確化し、とくに、堤防高さを超えるような津波に対しては、避難を柱とした対策を行うことを提言した。本稿では、これからの津波防災として、ハード・ソフト対策に焦点をあて、かつ、そのなかの堤防技術、浸水予測技術、そして避難支援技術についての経緯と近年の動向を記載した。そのうえで、ハード施設の高度化や、ドローンなどによるモニタリング情報を用いたリアルタイムの避難経路の提示などが今後の方向性として考えられることを示した。

キーワード：津波防災、未来像、避難支援

1. はじめに

2011年の東日本大震災において、内閣府では、津波対策としてハード施設のみには頼るのではなく、ハード・ソフトの両方の対策で、減災を目指すということを明確化し、とくに、堤防高さを超えるような津波に対しては、避難を柱とした対策を行うことを提言した。本稿では、それから10年経過し、対策がどのように具体化されてきたかを、とくに、堤防などのハード対策、予測技術、避難支援技術について、まとめた。また、これまでの津波対策の変遷を振り返り、将来の対策の一つの方向性を検討する。

2. 津波対策の変遷の概要

2.1 チリ地震津波以前

津波の対策の歴史は、首藤¹⁾が整理している。それによると、津波対策は、三期に分けられる。

第一期（～チリ津波以前頃まで）：過去の経験や実績に基づき、行われてきた。

第二期（～1987年頃まで）：第一期終わりごろから津波予報が開始された（1941年三陸沿岸を対象とした津波警報組織を発足、1952年に気象官署津波業務規程が実施されている²⁾）。第一期、二期ともに、主な対策手法は防災構造物による対策である。

第三期（1987年～）：ソフトとハード対策による総合的な対策。

このなかで、チリ津波以前の対策において、堤防対策と

しては、濱口梧陵が築いた土堤がある（図-1）。その高さの決め方は定かではないが、5m程度の高さがあると、ある程度の津波は防ぐことが可能である。当時の家屋の様子が背後に記載されているが、当時としては、相当に大きなものと感じる高さであったことがうかがい知れる。

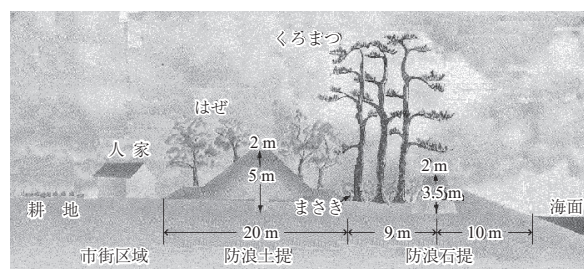


図-1 広村堤防横断面³⁾

2.2 チリ地震津波以後から東日本大震災まで

1960年のチリ地震津波によって、「昭和35年5月のチリ地震津波による災害を受けた地域における津波対策事業に関する特別措置法」が制定され⁴⁾、その結果、チリ津波の実績に基づいた津波高さに対する堤防が計画された。その法律が施行された経緯は紆余曲折あったようであるが、5メートル程度の高さであればチリ地震津波に対応できたことと、経済的、技術的にも構築できた時代背景によって、そのような整備水準になったことが分かる。

1983年3月に建設省河川局および水産庁が「津波常襲地域総合防災対策指針（案）」を出している⁵⁾。日本海中部地震が生じる2ヵ月程度前である。そこには対象とする津波として、「対象地域における明治以降の既往最大津波」とすると記載されている。そのため、津波対策としては、① 防災施設、② 防災地域計画、③ 防災体制の3分野にわけてとらえ、これら3分野の対策を総合的に機能させて津波防災を行う津波総合防災対策の考え方を取り入れている。

その後、この流れをうけて1997年に国土庁、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、消防庁といった関連7省庁で、「地域防災計画における津波対策強化の手引き」⁶⁾が合意された。ここには、「津



*1 Taro ARIKAWA

中央大学 理工学部
都市環境学科 教授

波総合防災対策は、当該沿岸地域において想定し得る最大規模の津波を対象とするものであるが、防災施設の整備水準としては、地域の実態と施設の効果を考慮して設定するとともに、防災まちづくり・防災体制と組み合わせて総合的に検討することとし、必ずしも対象津波に対応する水準をとるとは限らない」と記載されている。つまり、この時点から最大クラスの津波に対する防護は行わない方針であることがみてとれる。そして、2011年の東日本大震災が生じた。

2.3 東日本大震災以降

これまで整備水準が明確化されてこなかったものの、東日本大震災後は、「基本的に二つのレベルの津波を想定」し、「一つは、住民避難を柱として総合的防災対策を構築する上で想定する津波」であり、「発生頻度はきわめて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波」と「もう一つは、防波堤など構造物によって津波の内陸への侵入を防ぐ海岸保全施設などの建設を行ううえで想定する津波」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」とされている⁷⁾。

このように、津波対策は、一度は防護できると考えたものの、ある程度の高さ以上の堤防に対しては、防災施設で防ぐということが困難もしくは、合理的ではないと考えられてきた歴史があることが分かる。

3. 住民避難に対して

3.1 避難の実態

即時避難は、津波においては、非常に有効な対策であることはいうまでもないが、現実的には難しい。著者ら⁸⁾は、東日本大震災における津波の高さと死亡率の関係を検討し、避難開始時間と津波の来襲時間との比（無次元避難開始時間）は死亡率との相関があり（図-2）、また、堤防高さと津波高さの比（無次元堤防高）についても、堤防高さが津波高さの0.8倍程度であることで、被害者がほぼゼロになっていることを示した（図-3）。

他方、2017年のトルコにおける地中海沖地震津波では、地震発生直後に建物倒壊を心配し、オープンスペースに避難する意識が働き、海岸に逃げたという実態がある。これは、地中海域において、警報システムが脆弱であることや津波に対する教育がなされていないことが要因の一つと考えられている。

また、インドネシアにおけるクラカタウ火山噴火に伴う山体崩壊による津波時においては、火山噴火から津波到来まで30分程度はあったものの、津波を見てから逃げた人が大半であり、400名以上の人命が失われている。浸水地域においては、避難ビルも設置されており、津波教育が実施されていたものの、火山噴火による津波という特殊な状況において警報が作動しなかったことが大きな要因となる。

これらのことから、被害者を少なくするためには、津波の来襲時間の予測、適切な避難行動の開始、および適度な堤防による防護の組み合わせが重要であることが分かる。

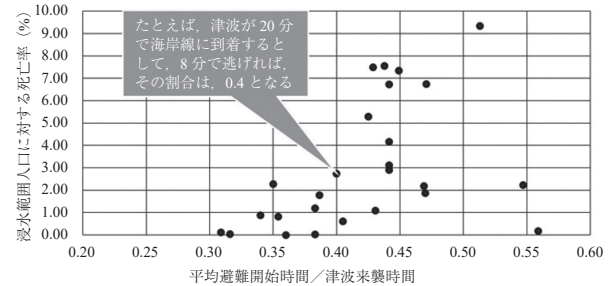


図-2 無次元避難開始時間と死亡率の関係

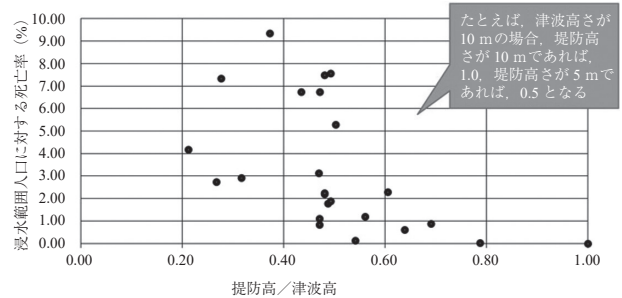


図-3 無次元堤防高と死亡率の関係

3.2 数値シミュレーションを活用した検討

津波避難支援について、1952年から警報システムの運用が始まり、それ以来ずっとその高精度化が行われてきた。一方で、近年では、数値シミュレーションを活用した避難行動予測に基づく検討も行われている。

たとえば、「大都市大震災軽減化特別プロジェクト（2002年 - 2007年）⁹⁾」（通称、大大特）では、災害を予測するシミュレータと、人の行動をモデル化したエージェントシミュレーションを用いて、予測と被害者救助などの災害対応戦略の最適化を目標とした。また、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の第1期（2014年 - 2018年）のなかで、津波遡上予測の技術開発が行われた¹⁰⁾。これは、適切な津波予測により避難行動を促すことで津波到来までの猶予時間を活用した被害軽減に資することを目指したものである。

3.3 津波浸水データベースを活用した避難支援

坂田ら¹¹⁾は、津波浸水シミュレーションのデータベースを用いて、津波に遭遇しない避難経路を求め、避難時にその経路を利用することで、ケーススタディの条件では、最大でおよそ10%程度死亡率を減少させることができるとした。

具体的には、図-4のように、事前に数多くの波源を想定した津波浸水計算を実施し、そのデータベースを構築し、地震が発生したら、そのデータベースの中から、近い津波予測計算を選び、その津波に対して、最短経路で避難場所まで行く経路を基本としながら、津波に遭遇しにくい避難経路を選ぶようにするというものである。これは、避難開始時間によって選択する経路が変化し、より安全に避難できる選択肢を提示することを目標とする。

● データベース構築・津波予測
津波襲上を即時予測するためにあらかじめ計算した結果をデータベースに登録し、津波発生時には地震情報とシナリオを比較し選別することで津波の襲上を即時予測することを可能にしている。



図 - 4 避難支援システムの概要

4. これからの津波防災のあり方

本論文のタイトルにもなっているが、これからの津波防災のあり方について、最後に議論を行う。

ここでは、津波対策として考えられるものは数多くあるが、そのなかで、堤防を中心としたハード施設の強化、浸水予測技術の高精度化、そして避難を誘導する仕組みの高度化の3つについて将来像を検討する。

4.1 堤防に関する技術（ハード技術）

津波から防護する堤防について、「粘り強い堤防」というキーワードが2011年以降頻りに用いられ、10年後の現在、その考え方は、かなり定着したように感じる。堤防の破壊に関する研究は、さまざまな形で進展していると感じるものの、どの部分がどのように破壊されるかということを確認に予測することはいまだに難しい。NISTEPの第11回科学技術予測調査S&T Foresight 2019 総合報告書¹²⁾によると、8【自然災害に関する先進的観測・予測技術】では、予測と観測を合せ、破堤を事前に察知する技術は2028年までに完成することが期待される。

一方で、フラップゲート等可動式堤防が、より充実し、適切なタイミングで、適切に防護するということが可能となるまちづくりにも期待がかかる。有川ら¹³⁾は、可動式堤防による防護効果を検討する計算手法を提案しており、このような手法を用いて、経済的評価が可能となれば、防波堤のように湾口部に配置し、効率的に背後域を防護できる可能性もあると考えられる。

4.2 浸水予測技術

(1) 津波伝播計算の黎明期

津波の数値解析の経緯については、後藤¹⁴⁾に分かりやすくまとめられている。それによると、Ueno¹⁵⁾による1960年のチリ津波の計算が、津波の数値計算としては、初めてのようである。そこでは浅水長波方程式を用いて、太平洋全域を対象としてチリから日本までの計算を行っており、格子サイズは5度（最大で約550 km）で行われていた。Uenoの結論として、津波の到達時間は比較的良く一致し、また津波の高さが日本やハワイで高かった理由を明らかにしたとしている。一方で、論文の図から推測すると、全格子数は900格子程度の計算領域だと思われるが、

津波のエネルギーの発散や収束まで計算するには、当時の計算機では力不足だったとも述べている。

(2) 近年の津波伝播計算

近年の津波数値解析の傾向は、首藤¹⁶⁾に記載されている。当時から今日に至るまで、津波数値解析のもっとも重要な目標は沿岸に到達する津波の高さを精度良く、かつ、早く計算することである。今村ら¹⁷⁾では、アラスカ沖地震津波の解析を5分の格子（最大で約9 km）を用いた。

1965年と比べるとおよそ3600倍の格子数である。Babaら¹⁸⁾は、京コンピュータを用い、約1000億格子数の計算を行っている。それによると、およそ80000ノード数を用いて、実時間にして80秒程度の計算を、20秒の計算時間でできるとしている。これは、日本の西日本沿岸部全体を約2メートルの格子サイズで計算している。このままの速度でコンピュータが進化し続けると、20年から30年後には、最新の計算機を用いて約 10^{16} 個つまり、1京個の格子数を用いた計算が可能となるだろう（図-5）。

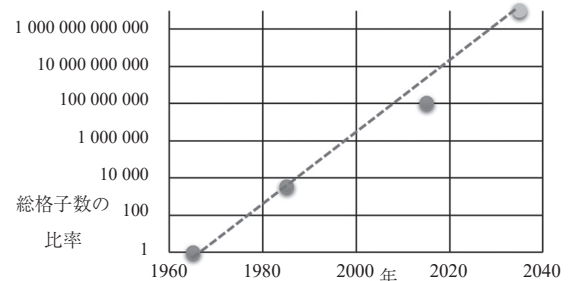


図 - 5 1965年を1としたときの計算格子数の推移（1965年は900格子数程度と仮定している）

(3) 浸水計算の予測技術

日本においては、1956年における海岸法の制定以降、沿岸部において、海岸堤防などの防護施設が建設された。そのため、浸水予報を行うためには、防護施設の取り扱いをどのようにするかが、その精度に大きく影響する。一方、防護施設には、海岸堤防、胸壁、防波堤などさまざまな構造形式があり、それらが、いつ、どのように倒壊するかを、正確に予測することは難しい。そこで、有川ら¹⁹⁾は、防護施設のフラジリティ（壊れやすさ）を用いて背後地の浸水計算を行う手法を提案しており、現地に適用し、確率評価を行う手法を提案した²⁰⁾。

他方、より精緻に計算する試みも行われている。有川ら²¹⁾では、平面2次元の伝播計算と3次元のナビエ-ストークス方程式による計算、さらには、構造物の変形計算を連成させ、津波の波源から浸水域までを構造物の倒壊も含めて一連で計算できる手法を開発した。また、データベースを用いて機械学習により、浸水開始時間を予測する手法の開発も始まっている²²⁾。

4.3 避難支援技術

津波警報の高度化については、観測網の充実を含め、粛々となされていくと考えられるが、一方で、避難の支援の仕組みについて、今後どのようなことが考えられるかについて、ここで最後に考えてみたい。

先の NISTEP の報告書¹²⁾において、モニタリングやセンシング技術が、今後も向上し続けることが分かる。

図 - 6 は、われわれのチームで RPD ハッカソン²³⁾に応募したコンセプト図である（これは、Michibiki 賞を獲得した）。ここでは、ドローンなどによるモニタリング情報を避難経路探索の条件に組み込み、リアルタイムに、より安全な避難経路を提示する仕組みとしている。そのために必要な技術はいくつもあるが、その課題を解決し、一人一人に適切な避難情報を送ることができる仕組みができあがっているのではないかと期待する。

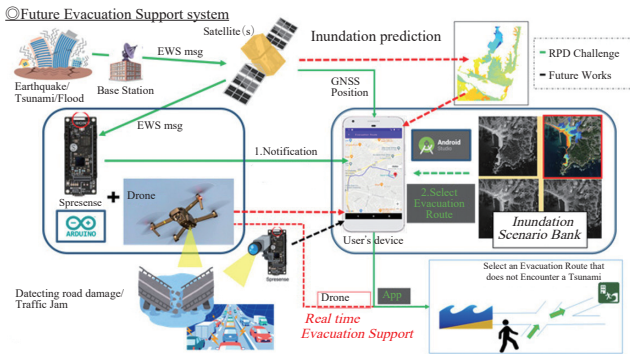


図 - 6 避難支援システムの将来像の例

5. おわりに

本稿では、これからの津波防災として、ハード・ソフト対策に焦点をあて、かつ、そのなかの堤防技術、浸水予測技術、そして避難支援技術についての経緯と近年の動向を記載した。表 - 1 は、それらをまとめてみたものである。IV 期としたところは、今後の期待も込められている。技術が向上し、適切に組み合わせていくことで、津波により人命が失われない社会を創造することが大切である。

表 - 1 津波対策のこれまでとこれから

	I 期 ～ 1960	II 期 ～ 1987	III 期 ～ 2011	IV 期
過去の経験・実績		津波予報・堤防対策	ソフト・ハードによる総合的な対策	モニタリング・センシング・AI を活用した対策
堤防技術	1854 広村堤防	1956 海岸法	2009 釜石湾口防波堤（世界最深）	・可動式堤防 (2018 neo RiSe ²⁴⁾)
浸水予測技術		1965 約 550 km の格子で太平洋全体を計算 (Ueno ¹⁵⁾)	1986 約 9 km の格子で太平洋全体を計算 (今村ら ¹⁷⁾)	・広域高精度伝播計算 (2016 1 000 億格子計算 (Baba et al. ¹⁸⁾) ・破壊予測計算 (2017 連成計算 (有川ら ²¹⁾)
避難支援技術		1952 警報システムの運用開始	2002 - 2007 大大特 ⁹⁾	・SIP 第一期 (2014 - 2019) ¹⁰⁾ ・個人に最適な避難支援システム

参考文献

1) 首藤伸夫：津波対策小史，津波工学研究報告，No.17，pp.1-19，2000。

2) 中央防災会議「災害教訓の継承に関する専門調査会」，1960 年チリ地震津波報告書，2010。

3) 気象庁：<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunami/inamura/p4.html>（閲覧日 2021.9.1）

4) 岩手県：チリ地震津波災害復興誌，1969。

5) 建設省河川局，水産庁：津波常襲地域総合防災対策指針（案），1983。

6) 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，1997

7) 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，2011

8) 有川太郎，野地 徹，平野弘晃，遠藤雅人：防護施設の津波避難に及ぼす影響に関する考察，土木学会論文集 B2（海岸工学），72 巻，2 号，pp.I_1561-I_1566，2016

9) 文部科学省，https://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/04031203.htm（閲覧日 2021.9.1）

10) 内閣府，<https://www.8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>（閲覧日 2021.9.1）

11) 坂田祐介，鈴木 亘，有川太郎，青井 真：津波シナリオバンクを用いた避難経路探索手法の検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），76 巻，2 号，pp.I_1249-I_1254，2020

12) 第 11 回科学技術予測調査 S&T Foresight 2019 総合報告書 [NISTEPREPORT No.183]

13) 有川太郎，河合航輝，徳永正吾，関 克己：隙間を有する可動式防波堤の高潮・津波に対する防衛性能の検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），75 巻，2 号，pp.I_805-I_810，2019

14) 後藤智明：津波数値計算，土木学会水工学に関する夏期研修会講義集，第 22 回，土木学会，pp.B.3.1-21，1986

15) T. Ueno：Numerical computation for the Chilean Earthquake Tsunami, Oceanogr., Mag., vol17., pp.87-94, 1965

16) 首藤伸夫：津波の数値計算，土木学会論文集，第 411 号 /II-12, pp.13-23, 1989

17) 今村文彦・後藤智明・首藤伸夫：1964 年アラスカ津波の外洋伝播，第 33 回海岸工学講演会論文集，pp.209-213, 1986

18) T. Baba et. al：Large-scale, high-speed tsunami prediction for the Great Nankai Trough Earthquake on the K computer, The International Journal of High Performance Computing Applications, Vol.30 (1) pp.71-84, 2016

19) 有川太郎，関 克己，下迫健一郎，高川智博，千田 優：フラジリティカーブによる防護施設の被災状況を考慮した津波浸水計算手法の開発，土木学会論文集 B2（海岸工学），73 巻，2 号，pp.I_337-I_342, 2017

20) 有川太郎，宮内俊晴，北野利一，福谷 陽，渡部真史：防護施設の脆弱性の違いによる背後地域の津波浸水確率への影響，土木学会論文集 B2（海岸工学），77 巻，2 号，2021，印刷中

21) 有川太郎，関 克己，大木裕貴，平野弘晃，千田 優，荒木和博，石井宏一，高川智博，下迫健一郎：階層型連成シミュレーションによる高精度津波遡上計算手法の開発，土木学会論文集 B2（海岸工学），73 巻，2 号，pp.I_325-I_330, 2017

22) 郡司混大・宮内俊晴・渡部真史・有川太郎：機械学習による津波到達時間予測に関する検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），77 巻，2 号，2021，印刷中

23) MGA Rapid Prototype Development (RPD) Challenge, MGA Hackathon 2020, <https://www.multignssasia.com/post/mga-rapid-prototype-development-rpd-challenge>（閲覧日 2021.9.1）

23) 日立造船 neo RiSe：<https://www.hitachizosen.co.jp/business/field/infrastructure/movable-seawall.html>（閲覧日 2021.9.1）

【2021 年 9 月 3 日受付】