

2021年度（第56回）
水工学に関する夏期研修会講義集

B コース

Lecture Notes of the
56th Summer Seminar on Hydraulic Engineering, 2021
Course B

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会
Committee on Hydrosience and Hydraulic Engineering,
Coastal Engineering Committee,
JSCE

2021年8月
August 2021

2021年度（第56回）

水工学に関する夏期研修会講義集

B コース(河川・水文コース)

総合テーマ：海岸災害対策におけるこれからの論点と適応技術

B-1	気候変動の地域影響予測と適応政策の在り方	高知工科大学 教授，副学長	那須 清吾 Seigo NASU
B-2	UAVを用いた海岸情報マッピング技術	高知工科大学 教授	佐藤 慎司 Shinji SATO
B-3	確率論的津波ハザード評価とその利活用	関東学院大学 准教授	福谷 陽 Yo FUKUTANI
B-4	高知港海岸における三重防護による地震・津波対策について	四国地方整備局高知港湾・ 空港整備事務所 所長	相澤 幹男 Mikio AIZAWA
B-5	高潮の基礎と防災の枠組み	高知工科大学 教授，学長	磯部 雅彦 Masahiko ISOBE
B-6	海岸河川防災計画における経済学的手法の適用：土木技術者Dupuitの分析を現在に活かす	東北大学 教授	河野 達仁 Tatsuhito KONO
B-7	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 Takashi TOMITA
B-8	分散性を考慮した津波伝播計算	徳島大学 教授	馬場 俊孝 Toshitaka BABA

気候変動の地域影響予測と適応政策の在り方

Regional Impact Prediction of Climate Change and Adaptation Policy

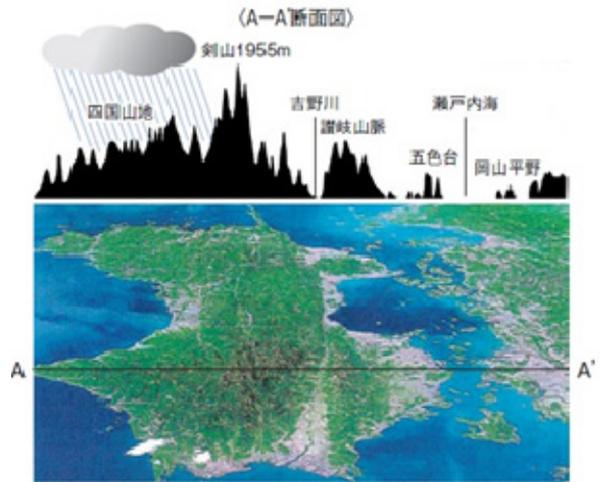
那 須 清 吾
Seigo NASU

1. はじめに

四国は特徴的な気候を有する。高知県を中心とする年間降雨量が3000mm/年を超える南部と1500/年以下にもなる北部である(図-1参照)。よって、四国は国内でも有数の水不足が多発する地域であり、洪水の危険度も高い。特に四国最大の河川である吉野川は、長期にわたって香川県や愛媛県など頻繁に渇水に見舞われる。高知県も年間降雨量は大きいですが、貯水施設は十分とは言えず同様に渇水の頻度は高い。この様な四国4県、特に吉野川流域の水資源政策および水防災政策の難しさは、この様な気候や水資源に関わる自然現象に加え、水利用の権利関係や社会経済に対する影響の複雑性にあり、地域、流域内での政策に関わる合意形成を困難にしている。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書によれば、大雨の頻度が増え、渇水の影響を受ける地域が拡大することが予測され、気候変動による降雨量や降雨パターンの変化が起きるとされている。四国はただでさえ厳しい水資源管理および防災政策を強いられており、気候変動が四国および吉野川の降雨パターンを変化させ、経済活動や生活用水としての利水のみならず、水環境や洪水調節機能にも大きな影響を与えることが懸念されている。気候変動が、利水、洪水、水環境にどのような影響を与えるかを評価し、水資源政策によってどのように気候変動に適応できるかを、定量的に把握することが喫緊の課題となっている。この様な多様で複雑な課題に取り組む為に様々な産学官の研究、政策立案などの活動が実施されてきた。

まず、平成18年度に「四国水問題研究会」が発足し、これが起点となって課題構造の解明と政策合意に向けた動きが始まった。そののち、平成22年度に文部科学省が立ち上げた「気候変動適応研究推進プログラム(RECCA)」(四国水問題研究会・最終提言書より抜粋)において、高知工科大学・東京大学らの研究グループが「気候変動下における四国の水資源政策決定支援シ

■自然特性が大きく異なる瀬戸内側と太平洋側



■年間降水量の分布図

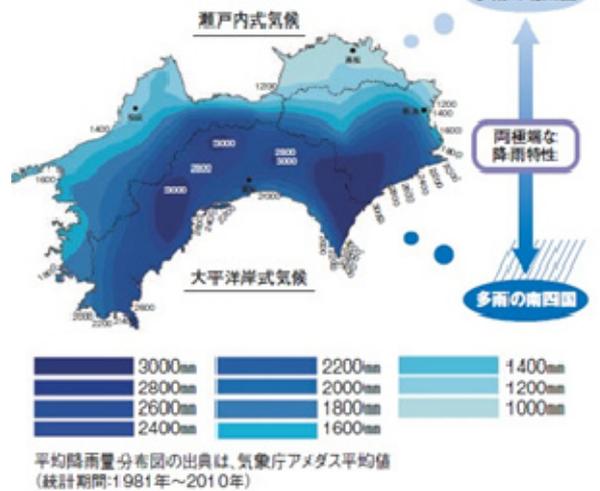


図-1 四国の気候特性

(四国水問題研究会・最終提言書より抜粋)

において、高知工科大学・東京大学らの研究グループが「気候変動下における四国の水資源政策決定支援シ

UAVを用いた海岸情報マッピング技術

Coastal Zone Mapping by using UAV

佐藤 慎司
Shinji SATO

1. はじめに

わが国では河川からの流出土砂が多く、海岸を構成する材料が砂と礫の混合物であることが多い。また特に河口周辺の砂礫海岸では、河川からの流出土砂の減少や沿岸構造物の建設などの影響を受けて、深刻な海岸侵食が問題となっているところが多い。砂礫海岸では、地形変化とともに海岸表層の底質が複雑に変動するため、海浜過程の理解は十分でない。

砂礫海岸の複雑な挙動を把握することは、さまざまな手法で試みられているが（例えば、佐藤ら、2007；宇多ら、2014；裴川ら、2012）、砂礫が分布する広い範囲の底質構成や波浪・潮汐の履歴に影響されるなど、底質粒径が均質な海岸の海浜過程に比べて極めて複雑であり、これを理解するためには、一定程度の広い領域を対象として、高頻度の観測を継続することが必要である。このような広範囲・高頻度の海岸調査は、近年普及が進んだUAVを用いて比較的容易に実現できるようになってきた（例えば、Matsuba・Sato, 2018；五嶋・佐藤, 2017；柴田ら, 2019）。

ここでは、高知海岸の砂礫海岸を対象としてUAVを用いて著者らが実施した最近の研究に基づいて、海浜過程を解明するうえで、UAVによる調査が有用であることを示す。高知海岸は図-1に示すように、西側に仁淀川流砂系、東側に物部川流砂系の砂礫浜で構成される長さ約20 kmの海岸である。2019年度には、仁淀川河口砂州付近で砂礫海浜の変動調査（佐藤ら、2020a）と岸沖方向のトレンチ調査（佐藤ら、2020b）を実施した。2020年度には物部川河口と種崎海岸のほぼ中間の離岸堤背後の砂礫浜で、カスプのダイナミクスに関する高頻度調査（佐藤ら、2021a）と沿岸方向のトレンチ調査（佐藤ら、2021b）を実施した。本稿では、海岸調査におけるUAVの活用を焦点を当てて、それぞれの調査事例を紹介する。



図-1 高知海岸における各種調査地点

2. 河口付近海浜の漂砂機構

佐藤ら(2020a)は、仁淀川河口付近の砂礫海岸において、RTK-GNSSを装備したUAV (DJI社Phantom 4 RTK, 以下RTK-UAV) により海浜地形と表面砂礫の変動を記録した。河口導流堤を中心として沿岸方向約300m, 岸沖方向約80mの海浜領域上を二種類の高度(25mと38m)で飛行させたRTK-UAVにより、地形や砂礫粒径の

確率論的津波ハザード評価とその利活用

Probabilistic Tsunami Hazard Assessment and Its Application

福 谷 陽

Yo FUKUTANI

1. はじめに

津波ハザードの評価は、決定論的評価と確率論的評価の大きく二つに分類できる。決定論的評価では、対象地域に一定の影響があると考えられる津波波源を一つ設定し、それにより発生する津波の浸水深や流速等のハザードを数値計算により評価する。一方、確率論的評価は、対象地域に一定の影響があると考えられる津波波源を多数設定し、津波の発生・伝播・遡上の各段階で考え得る様々な不確定性を考慮し、対象地域での、ある特定期間における津波ハザードの規模とその発生確率の関係を評価する。これらの評価は、津波ハザードを評価する対象や目的によって使い分けることが重要である。後者は、一般的に、確率論的津波ハザード評価（PTHA: Probabilistic Tsunami Hazard Analysis）と呼ばれ、津波の発生・伝播・遡上の各段階で考え得る不確定性が多数存在するため、これに応じ、PTHAもこれまで、国内外で実に多くの評価手法が提案されてきた。本稿では、PTHAを対象とし、その手法や今後の課題等について概説することを目的とする。ただし、津波は海底地滑りや噴火に伴う山体崩壊、隕石衝突等によっても発生し得るが、本稿では、地震起因による津波の評価にのみ焦点を当てる。また近年では、津波に伴う土砂移動に起因する津波波高や流速の変化等が示唆されているが、このような現象も本稿の対象外とすることを補記しておく。

本稿では、まず、PTHAの基礎として、津波ハザード評価の基本的な流れと確率論的津波ハザード評価の歴史を簡単に紹介する（2章）。次いで、これまでに提案されている多くのPTHAのうち、近年の研究成果を中心に幾つかを紹介する（3章）。更に、これら確率論的評価結果の具体的な利活用方法を幾つかの事例を交えて紹介する（4章）。最後に、本稿をまとめる（5章）。

2. 確率論的津波ハザード評価の基礎

2.1 津波ハザード評価の基本的な流れ

地震に起因する陸上での津波ハザード（例えば、浸水深、流速、フルード数、流体力等）を評価するためには、津波波源モデルの設定、地盤変動解析、津波伝播解析、津波遡上解析を実施する必要がある（図2.1）。決定論的評価では、ある一つの津波波源（地震）を想定し、その地震が発生した時の地盤変動量を解析、それに伴う海面変動量（津波初期水位）を解析、そして、その津波初期水位を入力値として、主に非線形長波理論を用いて、津波伝播、津波遡上を評価することが基本となる。しかしながら、これら津波発生、伝播、遡上の一連の現象の解析には大きな不確定性を伴うため、確率論的評価が有効な手段となる。例えば、津波発生の過程では、地震の発生確率、地震断層の位置や形状（長さ、幅、深

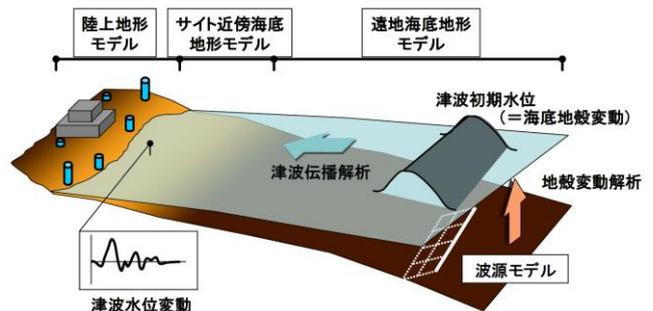


図2.1 津波伝播・遡上解析の概念図
(出典:原子力安全基盤機構(現:原子力規制庁),2014)

高知港海岸における三重防護による地震・津波対策について

Nankai Trough Earthquake and Tsunami Countermeasures by Triple Protection on the Coast of Kochi Port

相澤 幹 男
Mikio AIZAWA

1. はじめに

高知県では、過去に南海トラフを震源域とする地震・津波が繰り返し襲来しており、直近では、1946(昭和21)年12月に発生した昭和南海地震とそれに伴う津波によって甚大な被害を受けている。現在、政府機関の地震調査研究推進本部地震調査委員会は、南海トラフ地震について、マグニチュード8~9クラスの地震が今後30年以内に発生する確率を70~80%と予測している。

こうした切迫感の中、東日本大震災の教訓も踏まえつつ、人口・産業が集積する高知市沿岸の高知港海岸において、『三重防護』と称する地震・津波対策に国・県・市が連携して取り組んでいる。

本稿は、この『三重防護』のプロジェクトを紹介するとともに、事業課題等について考察するものである。

2. 事業概要

(1) 経緯

高知港は、土佐湾の中央部に位置し、浦戸湾内の内港と外洋に面する新港からなる重要港湾である(図-1)。高知港港湾区域の水際線のうち、岸壁等の港湾施設を除いた区間が高知港海岸である。



図-1 高知港の位置

海岸管理者である高知県は、過去の地震・津波や高潮等の被害を踏まえ、海岸堤防等の整備を進めてきた。しかし、2011(平成23)年に発生した東日本大震災を受けて、翌年に内閣府が、南海トラフを震源域とする地震及びそれに伴い発生する津波の被害想定を見直したことから、高知港における地震・津波対策についても見直す必要が生じた。

このため、高知県及び国土交通省四国地方整備局では、高知港における地震・津波対策の方向性として、『三重防護』が有効であるとの考え方をまとめるとともに、学識経験者等で構成する「高知港における地震

高潮の基礎と防災の枠組み

Fundamental Theories of Storm Surges and Framework of Disaster Reduction

磯部 雅彦

Masahiko Isobe

1. はじめに

(1) 高潮とは

高潮とは、低気圧、特に台風に伴う気象擾乱によって海水面が上昇する現象である。行政などにおいて高潮対策という時には、高潮による潮位上昇と高波浪が合わせて考えられる。気象擾乱の時間スケールが数時間から数日であることから、高潮の時間スケールもその程度で、通常は高潮位が1時間程度以上継続する。なお、台風は北西太平洋海域での呼び名であり、北インド洋・ベンガル湾海域ではサイクロン、北西大西洋・カリブ海・メキシコ湾海域ではハリケーンと呼ばれ、いずれもトロピカルサイクロンの一種となる。以下では、日本に馴染みのある台風という名称を使う。

実際に生じる海水位は、気象擾乱による水位上昇分である気象潮、すなわち高潮偏差が、満潮・干潮などの天文潮位に加わったものとなる。したがって、海水位が極めて高くなるのは、大きな高潮偏差と大潮の満潮が重なった場合である。高潮は、津波の遡上高が数十mにも達するのに比べれば小さいし、また、規模の不確実性も地震に比べれば小さいので、相対的には上限が設定しやすい。しかし、ひとたび高潮の浸水が始まると、時間スケールが長いために、陸上の奥まで浸入するので特に注意が必要である。また、高潮には高波浪が伴うので、海水が侵入しやすいとともに、破壊力が大きい。

本稿では、まず過去の高潮災害を概観し、高潮の発生メカニズムを説明する。続いて、高潮に関係する長波の基礎理論を紹介することにより、高潮を含む長波の基本的な特性が理解できるようにする。それを踏まえて、高潮の数値シミュレーションを概観し、それらを踏まえた将来の高潮対策について述べる。

(2) 過去の高潮災害

表-1には日本において画期をなす過去の高潮災害を示す。まず、大正6年の東京湾の高潮は、東京湾において歴史的な災害をもたらした。

昭和9年の室戸台風は、上陸時の中心気圧が過去の記録の中で最も低かった台風である。これは他の記録に比べて著しく低く、統計解析により現状の気候の下では千年に一度程度となるので、最大クラスの高潮を予測するモデル台風として使われている（農林水産省・国土交通省、2020）。

昭和28年の台風13号は伊勢湾から本州を縦断して広範囲に甚大な被害を及ぼした。これが契機となって、海岸法が制定され、海岸保全が組織的かつ大規模に行われるようになった。

昭和34年の伊勢湾台風は、記録上高潮偏差が最も大きく3.4mであり、天文潮を加えた最高潮位が3.9mに達した。死者・行方不明者数も5,000人を超えて過去最大である。海岸法の下で、これを契機に高潮対策の水準が上がり、基本的に現在まで引き継がれている。すなわち、被災した伊勢湾のみならず、東京湾および大阪湾におい

海岸河川防災計画における経済学手法の適用： 土木技術者Dupuitの分析を現在に活かす

Economics in Coastal and River Disaster Prevention: Application of the Economic Analyses of Civil Engineer Jules Dupuit

河野 達仁

Tatsuhito Kono

1. はじめに

平成8年に橋本首相が所信表明演説で「公共事業の投資効果を高め、その効率化を図る必要があり、公共事業の建設コストの低減対策、費用対効果分析の活用等を計画的に推進されたい。」と表明し、費用便益分析の実施が平成13年の「行政評価法」により義務付けされた。それを受けて、各省庁でインフラごとに費用便益分析手法のマニュアル整備がなされている。しかしながら、費用便益分析がベースとする経済学の考え方がインフラ整備の現場や土木工学研究に浸透しているわけではない。本稿では、海岸河川の水害対策に焦点を当てて経済学の利用方法とその価値について検討を行う。

水害対策に限らずインフラ整備の影響の範囲は空間的に限定されるため、異なる空間の住民に異なる影響を与える。また、仮に同じ影響を与えたとしても人によってその影響の評価が異なる。このような状況でも、創られるインフラはただひとつである。そのため、どのようなインフラを造るべきかを、社会全体に与える影響を評価しながら検討することが必要である。また、同じ構造物を造るにも現場ごとに状況が大きく異なる。そのため状況に応じて、建設方法のみならずインフラの水準や各種性能をその都度検討する必要がある。

このような状況依存の整備において有用なのは、科学的手続きである。すなわち科学的にインフラ整備の影響メカニズムを把握し、その状況にあった最適整備を演繹する方法が示されれば、プロセスにおいて議論が必要な場合でも明快に議論を進めることができる。インフラ整備の影響分析を科学的に行う研究は、経済学や社会心理学といった社会科学分野で数学や統計を用いて行われている¹。一方、インフラ整備や管理の現場では、科学を駆使するというよりは、マニュアルで画一的に計算する方法や法律による整備のルール化や公聴会による承認などが行われている。

実は、19世紀にインフラ整備や管理の社会経済的影響を科学的に捉えようとして学問的に大成功した土木技術者達がいた。彼らは、交通網の整備や公共事業の負担方法などの検討を通して現在の公共経済学や厚生経済学の基礎を作っている。その中でもパリの上下水道整備事業を指揮したJules Dupuit (1804 -1866) が第一人者としてあげられる。彼が開発した消費者余剰は、現在でもすべてのミクロ経済学の教科書に示されており、この概念がなければ厚生分析が不可能である。Dupuitは、公共事業の効用の測定を研究する中で消費者余剰の概念を生み出している。他にこの分野で同時期に活躍した学者として、ナヴィエ=ストークス方程式の開発者のNavier(1785-1836)がいる。DupuitもNavierもフランスのÉcole nationale des ponts et chaussées(訳：国立土木学校)の教授であった。この土木学校には、経済学の必要性を実感した土木エンジニアによってフランス全体で4番目の開講となる経済学講座が1847年に設置されている²。

¹ インフラを対象に科学的な分析を行った研究の一部を集めた「インフラを科学する—波及効果のエビデンス」(柳川編, 2018)という題名の本もある。経済学者と土木計画学者の研究が紹介されている。

² ジュール デュピュイ著、栗田啓子訳 (2001)において栗田先生が書かれた解題パートの情報に基づく。また、Wikipediaによると、現在のÉcole nationale des ponts et chausséesは次のように紹介されている。フランスの理工系高度職業人養成のための高等教育機関で、グランゼコールのひとつ。最も歴史のある

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大規模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.esrij.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，-1(a)に示すように満潮

分散性を考慮した津波伝播計算

Dispersive Tsunami Wave Modeling

馬場 俊孝

Toshitaka BABA

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震（以降、2011年東北地震）は巨大津波を発生させ、東北地方沿岸部を中心に甚大な被害を与えた。内閣府は、2011年東北地震が発生した北側の北海道沖の千島海溝でも、東北地震と同規模の地震の危険性を指摘している。巨大な東北地震の断層すべりによる地殻内の応力擾乱を考えれば、なにも北側だけでなく、震源域周辺で津波を伴うような別の大地震がいつ発生してもおかしくない。特に震源域の東側の領域では、沈み込むプレート内で発生するアウターライズ地震が発生する可能性が高い。過去の事例では海溝型地震の1896年明治三陸地震（Ms7.2）の後、1933年にアウターライズ地震である昭和三陸地震（M8.1）が日本海溝の海溝軸よりも海側で発生した。1933年昭和三陸地震の津波は最大で28.7m、死者、行方不明者合わせておよそ3000人の被害を出した。海外の事例では千島海溝沖で2006年、2007年に発生した2つの地震が有名で、2006年のM8.3の海溝型地震の2か月後にM8.1のアウターライズ地震が発生している。

また、結論には至っていないが、2011年東北津波のうち岩手県周辺に襲来した部分は海底地すべりによって増幅したという説もある(Tappin et al., 2014)。これは地震波解析により求めた東北地震の断層運動と津波の初期波源域に違いが見られたためである。海底地すべりは、地震波をさほど出さず津波を励起するため、地震波を用いた解析では一般にそのソースを捉えることができない。この現象は、サイレント津波や非地震性津波などと呼ばれたりもする。この場合、津波避難の鉄則である「海岸で強い揺れを感じたらすぐ高台に避難」が通用しない。2018年にインドネシアで発生したクラカタウ火山の崩壊による非地震性津波では、海岸で開催していた音楽ライブ会場がまったく予期せぬ津波に飲み込まれる映像が残されている。

2011年東北津波以降、これらの津波にも対処できるように、日本海溝の海域では大規模な津波観測網の整備が行われた。日本海溝海底地震津波観測網（S-net）は、およそ150点の海底水圧計で津波を観測する。震源域直上で観測するため早期検知が可能で、また、地震波を介さない津波の直接観測であり非地震性津波にも対応可能である。同様の海底地震観測網は、近い将来、巨大地震が発生するとされる西南日本沖の海底にも整備中である（地震津波観測監視システム、DONET）。海底地震観測網を利用した津波予測手法の研究も精力的に実施されている。たとえば、Tsushima et al. (2014)によるtFISHは津波観測データを用いて津波波源を即時推定し、津波予測精度を向上させている。このアルゴリズムはすでに気象庁の津波警報に利用されている。その他にも、いくつかの新しい津波予測手法が提案されている（e.g. Maeda et al., 2015; Igarashi et al. 2016; Musa et al., 2018）。

これらの津波予測に利用される津波伝播、遡上計算の高度化も著しい。特に、近年目まぐるしい発展を遂げる計算機によるところが大きく、大規模かつ高速な津波計算が行われるようになってきている(Baba et al., 2016; Musa et al. 2018)。また、支配方程式も一般的な浅水波理論にとどまらず、目的により、土砂移動計算、分散波理論、三次元計算を利用するケースが増えてきている。本稿では、2章で著者が中心となって開発してきた分散波