

高潮・高波災害の軽減のための 技術開発の進展



河合 弘泰

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
港湾空港技術研究所 特別研究主幹

1. はじめに

日本では、1959年の伊勢湾台風による高潮災害をきっかけに、満潮に伊勢湾台風級の高潮偏差が重なった潮位あるいは既往最高潮位を防護目標に掲げ、各地の海岸に堤防や護岸を築いてきた。そのおかげで数百人の死者を伴う大災害はなくなったが、1999年に八代海や周防灘、2004年に瀬戸内海などの沿岸で想定を超える高潮による災害は続いた。一方、アメリカでは2005年にニューオリンズのゼロメートル地帯、2012年にはニューヨークの地下街が浸水し、フィリピンでは2013年に中心気圧が895hPaの台風が直撃した。「このような台風が日本に来るかも知れない、災害を最小限にしたい」という思いは、本誌2017年1月号の記事¹⁾にも綴られている。

あれから5年が経つが、その間にも実に様々なことが起きた。2018年には神戸港の埠頭や関西空港、2019年には横浜市の工業団地が、高潮や越波により浸水した。国土交通省の委員会は、「高潮浸水想定区域図作成の手引き」を更新し、「港湾の堤外地等における高潮リスク低減方策ガイドライン」、「港湾等に襲撃する想定を超えた高潮・高波・暴風対策検討委員会最終とりまとめ」、「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方」など方針を打ち出した。2018年の「港湾の技術上の基準・同解説」の改訂では、「うねり性波浪」を考慮した確率沖波の記述が加わった。全国の地方整備局等は、近年の波浪を踏まえた設計沖波の再点検を実施した。さらに、気候変動に関する政府間パネルIPCCは海洋・雪氷圏特別報告書や第6次報告書の一部を公開し、気候変動に対する信憑性は高まり、適応策は待たなしの状況になった。

本稿では、このような情勢の下で当研究所が取り組んできた研究のいくつかを紹介したい。また、当研究所の技術情報誌^{2), 3)}も併せてご覧いただきたい。

2. 高潮・高波のメカニズムや出現特性の解明

(1) 50年の伝統を有する波浪観測データの定常解析

当研究所は長年にわたり、国土交通省の全国港湾海洋波浪情報網NOWPHASで取得したデータの統計解析を担当してきた。その年報は港湾空港技術研究所資料として発刊し、最新の2019年版には60地点(水深4~55m)の沿岸波浪計と18地点(水深87~407m)のGPS波浪計を掲載している。沿岸波浪計は最も早い地点で1970年から始まり、既に50年、防波堤の設計供用年数に匹敵する歴史を有している。GPS波浪計も2008年から始まった。

表1は、2019年までに各機器、各海域で観測した最大の有義波である。太平洋はもちろん日本海でも10mを軽く超え、歴史の長い沿岸波浪計でも2010年代が並ぶ結果となった。この表の他、神戸でも2018年の台風21号で4.72m、第二海堡でも2019年の台風15号で3.27mを記録し、それぞれの地点で既往最大値を更新した。

表1 既往最大の有義波高

機器	海域	地点	波高, 周期	観測年
沿岸 波浪計	太平洋	潮岬	14.90m, 14.9s	2018
	日本海	秋田	12.22m, 14.5s	2012
		鹿児島	5.25m, 7.0s	2015
GPS 波浪計	太平洋	静岡御前崎沖	15.84m, 15.4s	2014
	日本海	山形県沖	12.40m, 14.1s	2012

また、波浪の方向スペクトルの解析法も、短時間の演算で安定した解が得られるように改良し、これまで苦手としてきた「うねり性波浪」への適用性を高める取り組みもした。

(2) 標準形だけではない波浪スペクトルの解析

NOWPHASの現行の定常解析では、周波数・方向スペクト

ルのピークにあたる波向を主波向と定義してきた。ところが、実際のスペクトルは、標準形(ブレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトル、光易型の方向関数)とよばれる一山のシンプルでスマートな形状とは限らない。近傍の台風や低気圧で生じた風波に加え、遠方から伝播するうねりが、それも一方向からだけとは限らず、混在していて、複雑な形状になっているときもある。

そこで、当研究所では、このようなスペクトルをキレイく求め、風向や波齢も手がかりにして複数の成分に分離(パーティション)する方法を開発した。また、観測値や推算値を用いて各成分の出現特性を調べた。図1は、ある地点において複数の成分に分離した例であり、各成分の波高(ゼロアップクロスによるものではなく、エネルギーの積分値から求めたもの) H_{m0} 、ピーク周期 T_{peak} 、ピーク波向 θ_{peak} の経時変化を示したものである。PT1~PT3の3成分に分離される時もあったが、ほとんどがPT1とPT2の2成分であった。同様な解析を日本沿岸の数地点で実施し、「日本海の北部では風波、太平洋ではうねりによる一山のスペクトルの現れる日が多く、日本海より太平洋の方がやや、二山やそれ以上のスペクトルが現われやすい」ことを定量的に示した。このような解析結果を波浪観測台帳でどう位置付け、設計の実務に応用するかが、今後の知恵の絞りどころである。

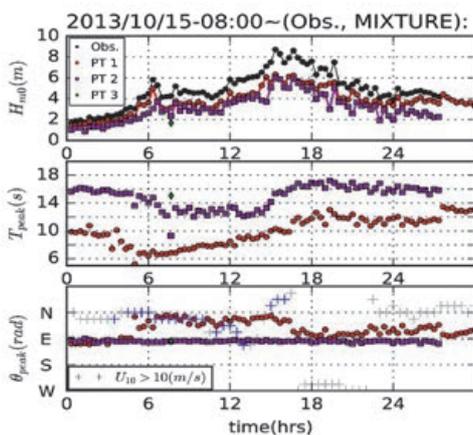


図1 波浪を複数の成分に分離した例

(3) 特殊な海域や現象を究める波浪推算

WAMなど第三世代の波浪推算モデルが設計の実務に広まって20年ほどが経つ。風のデータが天気図ベースから気象GPVに変わり、MM5、WRFなど局地気象モデルの発展も相まって、波浪推算の精度は格段に高くなった。

当研究所では、全国を約800m間隔の格子で、第三世代波浪推算モデルのWAMとWW3による2013~2015年の波浪推算値をもとに、両モデルの精度に有意な差がないことを確認

して、WW3による推算システムを構築した。これらのモデルが出力した有義波がGPS波浪計の観測とよく一致することも確認した。

しかしながら、既往モデルでは十分に再現できない海域や現象も残っている。その一つが、富山湾の寄り回り波である。ここでは、海底地形がリアス海岸のように鋭く起伏し、日本海から来た波浪がそこで入射波向や周期に敏感に複雑な屈折を見せるのである。既往モデルは、各周波数・波向のエネルギーの場所や時間による変化を計算するもので、個々の波の山や谷など波形までは考慮しないことから、位相平均モデルと呼ばれている。ところが、その海底地形の上では、ある波の山に、その近くを進んでいた山が向きを変えて、どこかで交差することも起きる。このような波の重なり合いがその場所の波高を大きく左右する。この現象は、位相の情報を持たない既往モデルで、単に波向の分割数を増やすだけでは再現できない。そこで、当研究所では、このような位相干渉を考慮できるモデルを試し、寄り回り波の再現にめどをつけた。

もう一つは東京湾である。横浜港沖に太平洋からうねりが到達し得ることは認識されていたが、実務でよく使う解像度が2km程度の計算ではそれを十分に再現できない。そこで、その解像度を約250mまで上げて海底地形をきめ細かく表現し、かつ海上風も高解像度の気象GPVを使うことで、このうねりの再現性を高めることができた。図2は、太平洋からのうねりの進入の道筋を示したもので、横浜港の数か所に到達している。

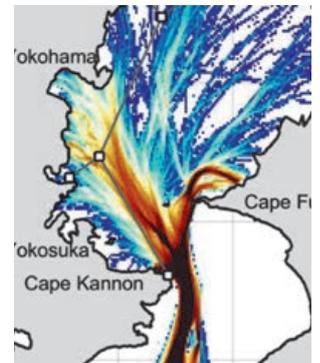


図2 東京湾に進入するうねりの波向線の解析

(4) オプションの充実を図る港内静穏度計算

当研究所がブシネスク方程式に基づく波浪変形計算モデルNOWT-PARIを開発して20年ほどが経つ。今ではすっかり港内静穏度計算の実務でおなじみのモデルになった。それは、沖合から来た波浪が港内をどう伝わるかを調べるもので、屈折、回折、反射、浅水変形、砕波などの現象を表現できる。ところが、現実の港に立って注意深く観察すると、船舶が航行すれば航跡波が立ち、たとえ防波堤が沖合からの波浪を完璧に防いだとしても、そこから岸壁までの水面が長ければ、そこで別の波(港内発生波)が起きる、ということに気がつく。また、物騒な話だが、地震や津波、高波によって防波堤が変形すれば、そ

の際間からも波浪が漏れて来て、緊急物資を積んだ船舶の荷役に影響が出るかも知れない。そこで、当研究所では、これらの現象も扱えるようにモデルの改良に取り組んだ。

航跡波については、ラジコン模型を水槽に走らせて航跡波を計測して分析を行った。そして、船がかき分ける横方向の流量や船型の違いを考慮して波源を与え、そこからの伝播や防波堤での反射を計算できるように、モデルを改良した。図3は、積貨重量トン数DWTが1,000トンの貨物船が出港する時の航跡波を計算した例であり、船舶の後方だけでなく前方にも波が発生し、それが港内に広く伝播する様子をうかがえる。

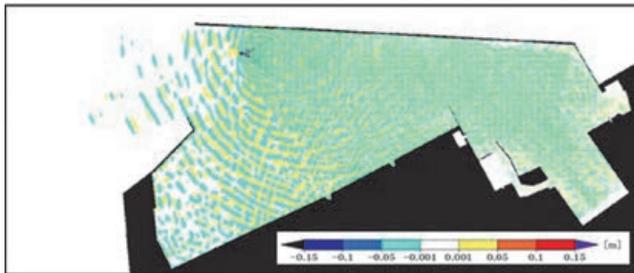


図3 港内における航跡波の伝播

港内発生波については、ブシネスク方程式に圧力項を加え、初期条件としてシーズ（微小な波）を与え、そこからの発達の再現に挑戦した。しかし、波が全くない状態から発達するプロセスは、スペクトル法の波浪推算モデルでも難しい問題である。

防波堤の変形については、その状態をイメージした、矩形と台形の断面を持つ潜堤を考え、その上を通過する波浪の再現に取り組んだ。ブシネスク方程式は「海底地形の変化が緩やか」という前提で導出されたものであり、階段のように水深が不連続な場所や、連続していても急な勾配では、計算が分散しやすい。これを境界処理法によって解決した。図4は、防波堤の先端部で未消波の2か所が変形して潜堤になったときに、港内の周期がどうなるかを、沖合からの周期に対する比として示している。潜堤によって波が分裂して周期が短くなる現象が表現されている。

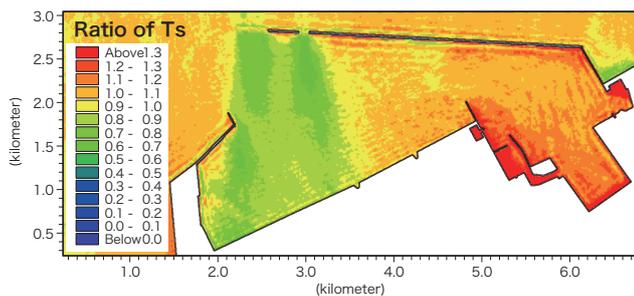


図4 変形した防波堤をもつ港内の周期の分布

さらに、2018年に神戸港の埠頭が高潮だけでなく波浪によっても浸水したことを踏まえ、岸壁の越波と埠頭の浸水も扱えるモデルへの改良にも取り組んでいる。護岸の越波は、基本的に陸から海への一方方向の水の動きを考え、その体積から浸水深を割り出せば良い。ところが、岸壁は、越波したその場から海に流れ出し、浸水が広がれば他の低いところからも流れ落ちる、という一筋縄でいかないところがある。図5は、高潮と高波の経時変化を考慮して埠頭の浸水を計算した例で、潮位のピーク時には越流と越波によって浸水が拡大し、波高のピーク時には越波による海水の流入とそれ以外の場所での流出が同時に生じる、という複雑な現象が再現されている。

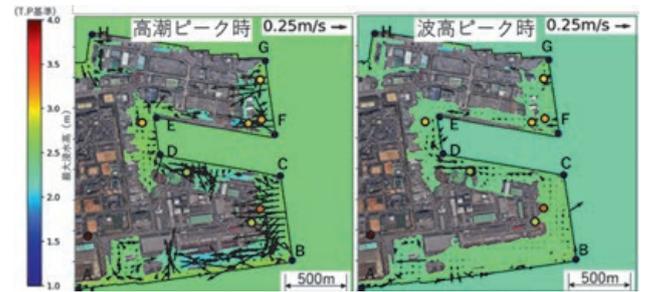


図5 高潮と高波による岸壁上の浸水高の分布

(5) 海洋モデルによる高潮の計算

「最大クラスの台風や低気圧の条件を適切に設定し、それに対する高潮を精度良く計算すること」は、近年の高潮研究のトレンドの一つである。過去の台風は、気象庁のベストトラック解析（中心の位置、気圧、最大風速などのリスト）が通り所の一つである。高潮推算モデルは、設計の実務では今も単層の非線形長波方程式に基づくものがよく使われているが、POM、FV-COMなど海洋モデルも広まりつつあり、当研究所もROMSを導入したところである。

まず、台風の条件については、当研究所でも、1951年以降の台風（温帯低気圧化後を含む）のパラメタを吟味した。その結果、北海道周辺の高緯度では、台風の既往最低より低い中心気圧で温帯低気圧が来襲していた。エマニュエルの理論に基づいて台風の発達限界となる中心気圧を計算し、悪条件がそろえば既往最低を下回る可能性も見えた。そして、台風の規模の指標である最大風速半径は、伊勢湾台風が75kmとされているが、2019年に東京湾を襲った15号は30km未満、19号は200km近いなど、台風によってまちまちであり、全体としては中心気圧が低いほど短くなる傾向があった。

ROMSを用いた高潮推算では、その台風15号の高潮の再現に取り組んだ。気象GPVはコンパクトな台風の中心付近の構造を十分に表現しておらず、風速のピークが低くなり、高潮の

推算値も小さくなった。さらなる精度の向上には、密度層の効果の考慮が必要なことも判明した。その一方で、最大クラスの台風による高潮浸水想定図の作成と同じ要領で、台風のコースを東西に平行移動させ、進行速度を伊勢湾台風の73km/hより遅くする計算もした。図6は外洋に面した地点の計算例であるが、台風の進行速度を波浪の群速度に近づけることで、波高が大きくなり、地形性の砕波で生じる海面上昇量（ウェーブ・セットアップ）も大きくなって、潮位偏差全体としては進行速度を抑えた方が大きくなった。

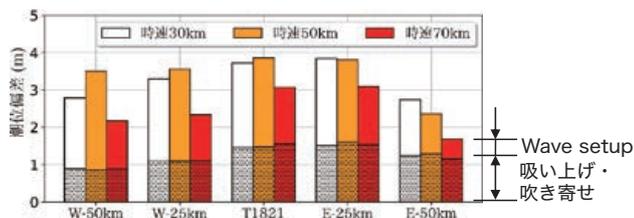


図6 風のコースと進行速度による高潮の変化とそれに含まれるウェーブ・セットアップ

3. 高潮・高波の災害を軽減する構造物の開発

(1) 設計を超える潮位で構造物に作用する波力

全国から防波堤、護岸など耐波構造物の被災の事例を収集し、その原因を分析すると、高潮で潮位が高くなったところに波浪が作用して倒壊に至ったケースは少なくない。

そこで、当研究所では、水路に護岸の模型を設置し、設計潮位より高い潮位を設定して波浪を入射させ、マウンドを透過して堤体の背後に作用する波力、マウンドからの堤内への浸水、堤体の天端を超える越波・越流量を計測した。そして、越波・越流量の簡易な推定法を提案した。ここでは、図7に示すように、風波、孤立波、越波越流時の風波がパラペットに作用する波力を砕波の状態（越流下での砕波、Bagnold型、Wagner型）に着目して整理し、鉄筋コンクリートの破壊状況から鉄筋の必要強度を明らかにした。

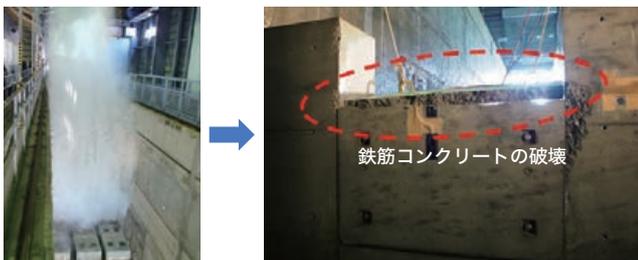


図7 パラペットに作用する波力の実験

(2) UAVと水路と数値計算を駆使した災害の分析

2018年の台風21号の高潮や波浪は、神戸港などの埠頭を

浸水させた。2019年の台風15号の波浪も、横浜港金沢地区の護岸を倒壊させ、背後の工業団地を浸水させるなど、多くの災害をもたらした。

そこで、当研究所は、陸上からの踏査に加え、UAVを飛ばして上空からもコンテナの散乱などの状況を把握した。また、護岸のパラペットが倒壊するプロセスを模型実験やCADMAS-SURFによる数値計算で再現を試みた。その結果、図8に示すように、護岸の前方にパラペットがある場合に比べて後方にある場合、越波流量は減っても衝撃的な波力の作用によって倒壊しやすいことが、改めて分かった。

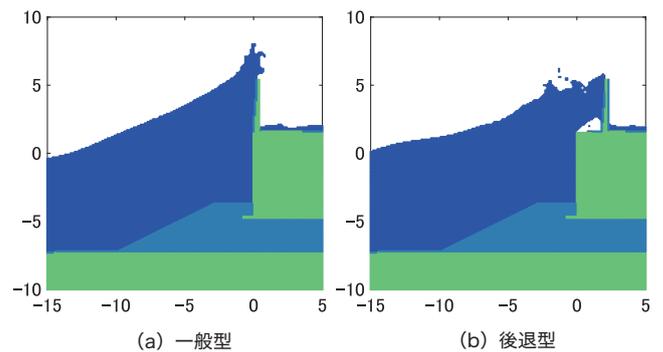


図8 パラペットに作用する波力の計算

さらに、災害後の応急対策として用いられる、土のうなど仮設工の越波に対する安定性の実験も行い、安定性の評価方法を提案した。

4. おわり

当研究所は、先に述べたように、沖合の波浪の観測や推算から、港内の波浪変形計算、最大クラスの台風の条件や高潮の推算、構造物に作用する波力まで幅広く、また、観測や現地調査、模型実験、数値計算という様々な手法を駆使して、研究を実施してきた。その成果は、学会での発表はもとより、本省・地方整備局の技術支援の後ろ盾にもなってきた。今後も、それぞれのパーツに磨きをかける一方で、想定を超える暴風・高潮・波浪に対する防災・減災技術、そして気候変動適応策に資する技術として、しっかり束ねていく必要がある。

【参考文献】

- 1) 下迫健一郎、高潮・高波災害の軽減のための技術開発の動向と展望、一般社団法人沿岸技術研究センター機関誌CDIT、2017年1月号、pp.14-15
- 2) 技術情報誌「PARI」Vol.34、2019年1月号
<https://www.pari.go.jp/event/publicity/pari/pari34.html>
- 3) 技術情報誌「PARI」Vol.43、2021年4月号
<https://www.pari.go.jp/event/publicity/pari/pari43.html>