

# 波と沿岸防災

## ～その課題と展望～

四面を海に囲まれた我が国において、「海」は国民の生活や産業に豊かな恵みを届けると同時に自然災害の脅威ももたらしています。沿岸における「海」からの災害は「波」によって引き起こされますが、その「波」には、風波による高波だけではなく津波、高潮、長周期波など様々な種類や捉え方があり、それらの特性に応じた効果的な対策を講じる必要があります。沿岸防災においては、そういった「波」にどのように対処していくのが常に求められてきました。

特集では、我が国の沿岸域に自然災害をもたらす津波や高潮、長周期波などの「波」に焦点をあて、その種類・特性を概観しつつ、「波」を切り口に今現在取り組まれている実効的な波への対策や研究等とその進捗状況・課題について一般の人にも分かりやすく紹介・解説します。

### 高波は強風によって起こる危険な波<sup>1)</sup>

「高波」は、主に低気圧の発達による強い風が原因で発生する高い波で、周期が15～20秒程度になるものもあり、気象庁では波浪注意報・警報の対象になる程度の高い波と定義しています。これに対して、「津波」や「高潮」は、周期が数十分から数時間と非常に長く、沿岸で砕けることなく陸地の奥深くまではい上がる性質を持つため、沿岸域が大規模に浸水することが多いです。

### 津波の発生メカニズムと沿岸への影響(図1)<sup>2)</sup>

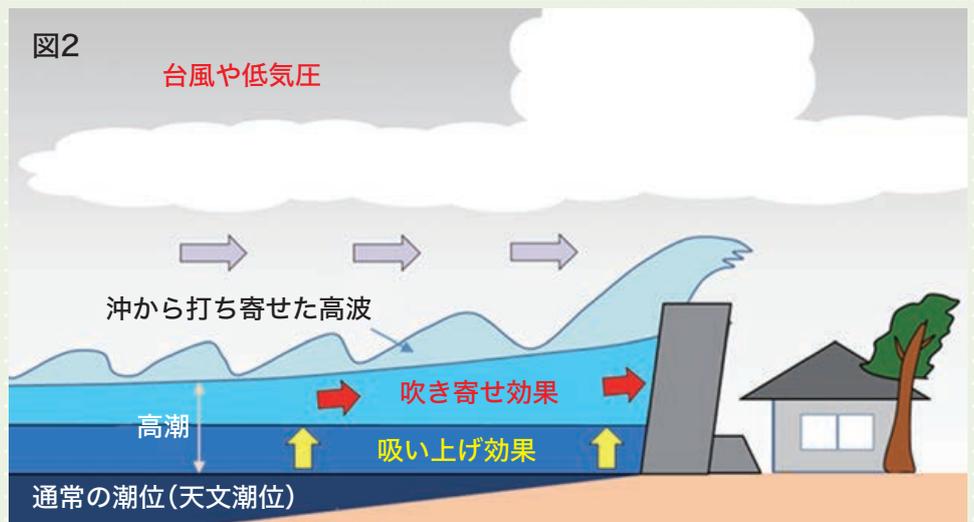
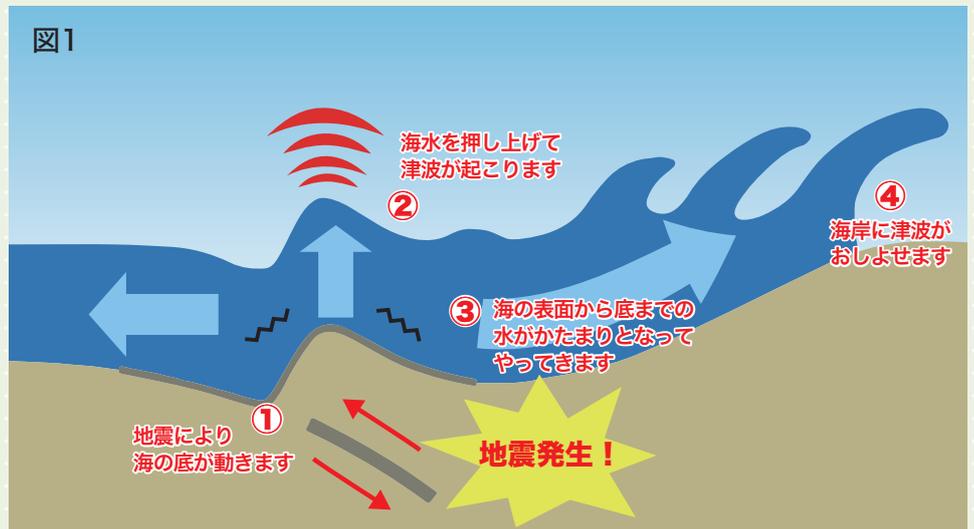
津波は、①地震により海底が隆起・沈降し⇒②海面が上昇・下降して⇒③海の底から表面までの海水が波を形づくり、⇒④大きな海水の塊となって沿岸に押し寄せるものです。

津波の高さは海岸付近の地形によって大きく変化します。岬の先端やV字型の湾の奥などの特殊な地形の場所では、波が集中して増幅するので、特に注意が必要です。

### 高潮の発生メカニズムと沿岸への影響(図2)<sup>3)</sup>

高潮は、台風や強い低気圧が通過するとき、①大気圧の低下に伴い、海水面が吸い上げられるとともに、②湾口から湾奥に向けた強風により、海水が吹き寄せられることにより、波というよりむしろ潮の満ち引きのように、湾内の潮位が全体的に上昇する現象です。

高潮が、満潮や高波と重なると、潮位がいっそう上昇し、普段は波が来ないようなところまで波が押し寄せることがあります。



1) 参考：総合情報誌「地域防災」No.33(2020年8月)、【論説】津波・高潮と沿岸防災(高知工科大学システム工学群 教授 佐藤 慎司)  
2) 気象庁HP <https://www.data.jma.go.jp/egev/data/tsunami/generation.html>, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/faq/faq26.html> を元に作成  
3) 出典：気象庁HP <https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/knowledge/tide/takashio.html>

## 波と沿岸防災 ～波浪研究のいま～



森 信人

京都大学防災研究所  
気象・水象災害研究部門  
教授



神谷 昌文

国土交通省港湾局  
海岸・防災課長



平山 克也

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  
波浪研究グループ長



橋本 典明

一般財団法人  
沿岸技術研究センター  
参与  
九州大学名誉教授



宮崎 祥一(司会)

一般財団法人  
沿岸技術研究センター  
理事長

**司会(宮崎)**▷本日は海岸工学の第一線でご活躍されている森先生、橋本先生、平山グループ長の3人の研究者の方々、そして国土交通省で沿岸防災をご担当されている神谷課長にお集まりいただきました。お忙しい中、ありがとうございます。

本日の座談会のテーマは、波と沿岸防災です。四面を海に囲まれた我が国において、海は国民の生活や産業に豊かな恵みを届けると同時に、自然災害の脅威をもたらしています。沿岸における海からの災害は波によって引き起こされますが、その波には風波による高波だけではなく、津波、高潮、長周期波などさまざまな種類や捉え方があり、それらの特性に応じた効果的な対策を講じる必要があります。沿岸防災ではそういった波にどのように対処していくのかというのが常に求められてきました。

本座談会では、今回は特に「波」に焦点を当てまして、その特性を踏まえた実効的な防災対策、あるいはそのための調査研究を実施するという観点から、改めてそれぞれのお立場における波と沿岸防災に関しての問題意識ですとか、取り組みの状況を共有していただくとともに、今後の展望に向けて皆様でご議論をしていただければと思います。

まず、波の特性と沿岸防災に関わる問題認識とかその解決に向けた取り組みについて伺いたいと思いますが、森先生いかがでしょう。

### 1 波の発生原因として重要なのは 台風と冬の低気圧

**森**▷いくつかコメントしたいと思います。まず波浪については、日本の場合、台風と冬の低気圧が発生原因として非常に重要だということが挙げられます。特に台風は、太平洋沿岸だけではなく最近北の方に行くものもありますので、やはり台風と高波という組み合わせが非常に大事だと思っています。

その中で研究サイドとして注目しているトピックが二つあります。一つは、物理的な機構として、特に強い台風の目の周りではどの程度の高波が起きて、どういう特性があるかというのはまだわからないことが多いということです。観測データが圧倒的に不足していて、最も強い気圧低下が起きて風速が上がる中心周りのデータが無いために、波浪モデル開発が進まないということです。特に2018年以降、2

～3年続けて強い台風が日本に上陸したり接近したりしていますが、その中で波浪に関する被害がかなり顕著になっています。

解決方法として、外洋については風速30から40メートル毎秒より高いところで海面が風からどれくらいエネルギーを受けて発達するかというのが非常に重要なので、我々は気象庁ともリンクして、ここ3年間、漂流ブイを流し、できるだけ台風の近くでのデータを取るという取り組みをしています。現在約20基が太平洋にあります。これくらいのブイのボリュームがあると年に数個は台風の中心のデータが取れるようになってきて、モデル開発に使いたいと思っています。

二つ目は沿岸部の波の特性と防災です。特に2018年の台風21号(Jebi)と2019年の台風15号(Faxai)と19号(Hagibis)が大阪と東京の港湾エリアにかなり大きなダメージを与えたことは皆さんの記憶にも新しいと思います。この中で私が改めて認識したのは、内湾で急激に発達する風波の推定及びモデリングの知見というものがまだまだ不足していて、難しいということです。人工海岸、非常に鋭角な形の埋立地、沖防波堤があったりして、その周りでスペクトルモデルを使って解析すると、モデリング上かなり難しいところがあります。さらに、内湾で急激に発達する高波、そこから越波、越流量にどうもっていくかということまで、ワンクッション、ツークッションあるので、それをどういうふうに解決すればよいかを考え、取り組んでいるところです。

## 2 更新される既往最高潮位や既往最大有義波高

**神谷**▷森先生に、非常に貴重なご意見を頂いたと思います。国土交通省としても、平成30年台風第21号、令和元年房総半島台風・東日本台風及び令和4年台風第14号では、既往最高潮位や既往最大有義波高<sup>1)</sup>を更新するなど、近年台風の強大化が顕著となっており、これにどう対応していくかが大きな課題になっています。

一つの要因としては、やはり気候変動があるのではないかと捉えています。本日の座談会のメンバーでもあります森先生、橋本先生、平山グループ長にも委員として参画いただいている「港湾における気候変動適応策の実装に向けた技術検討委員会(委員長:磯部雅彦高知工科大学学長)」において、今まさに実装に向けご議論いただいているとこ

ろです。政府全体としても、パリ協定<sup>2)</sup>やIPCC<sup>3)</sup>の特別報告書を受けまして、令和3年の10月に気候変動適応計画<sup>4)</sup>を策定し、2050年のカーボンニュートラル<sup>5)</sup>に向けて、緩和策と適応策を車の両輪とした対応をいかに進めていくのかが大きな課題となっています。

特に港湾においては、多様な産業活動や国民生活を支える重要な物流産業の基盤であり、また生活の基盤ですので、この対応の方向性、どう取り組んでいくのかが、これからの港湾政策の重要な課題だと考えています。現在、交通政策審議会港湾分科会の防災部会<sup>6)</sup>の中でも、気候変動等を考慮した臨海部の強靱化のあり方についてご議論いただいているところです。

## 3 内湾で発達する波の予測は今後の研究課題

**平山**▷森先生のお話にもあったように、最近、沿岸域での高潮・高波災害が顕著になってきています。まだわからないことも多い中で一つわかったことですが、内湾でも波は結構発達するという点に関して、そういった計算技術がまだ十分ではないということを我々は思い知らされ、再認識させられました。また、港湾の浸水被害を考えた時に、その状況をきちんと計算して説明することが、実はまだできていません。高潮の計算はできて、それに越波が重なって浸水が起こるところまでを考慮した計算がなされていないために、港湾施設の設計もこれまで必ずしも十分ではなかった面があるのではないかと再認識し、そういったことへの対応がまだまだ研究課題として残されていることがわかりました。

## 4 進化している波浪予測技術

**宮崎**▷ありがとうございます。今回のテーマ「波」、その現象や作用原理についての研究の動向や研究の目指す方向、重点的に取り組んだ方がいいと思われる分野としてはどういったことが挙げられるでしょうか。

**橋本**▷波浪の研究は非常に幅広く、森先生、平山さん、私はそれぞれ研究のテーマやアプローチが異なっています。波浪が沿岸に及ぼす影響を評価するためには、沖合での波浪の出現特性、さらに沿岸域や港内での波浪変形や構造物に及ぼす影響など様々な研究を実施する必要があります。

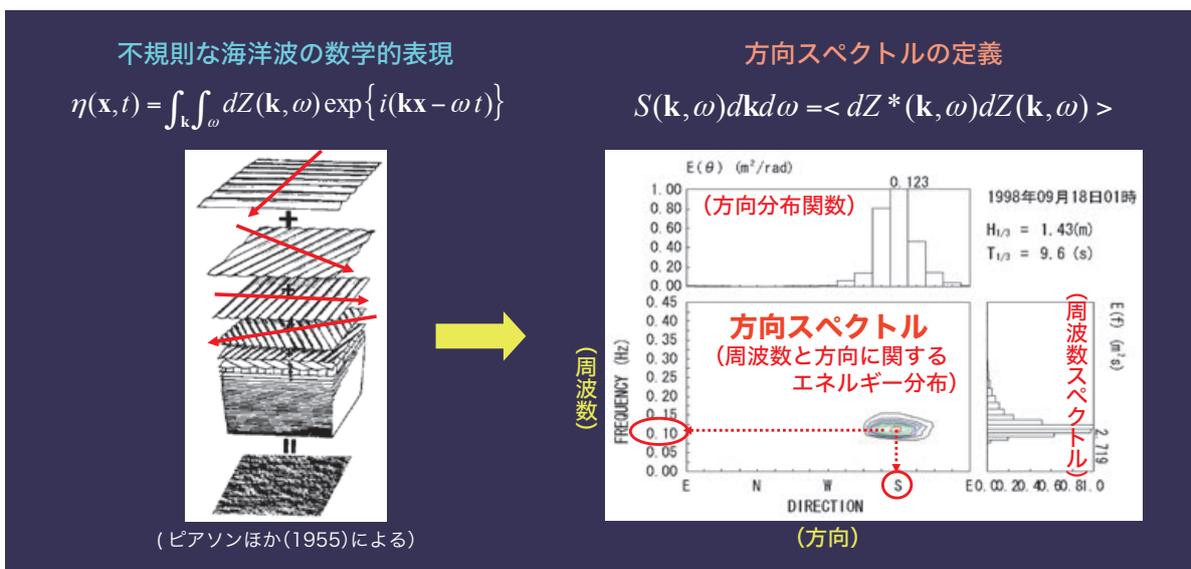
私は波浪観測と解析法の開発や波浪推算法の研究をしてきました。

波浪を扱う場合、水面の変動そのものを対象とする研究や、有義波高、有義波周期、波向といった波浪諸元を対象としてそれらの出現特性を調べる研究があります。さらに、波浪のエネルギーが周波数と方向に対してどのように分布しているかを示す方向スペクトル<sup>7)</sup>を対象とした研究もあります。有義波高、有義波周期などの波浪諸元に比べて、方向スペクトルはいまだに一般の技術者にはなかなか理解していただけないところもありますが、私自身は波浪の観測・解析・予測に関わる分野で方向スペクトルをベースにして長年研究してきました。この分野にも課題が幾つか残っています。例えば、我が国では方向スペクトルをベースとする第3世代波浪モデル<sup>8)</sup>が1990年代後半頃から利用されるようになり、波浪推算の精度は以前に比べて格段に向上しました。しかし、うねりの推算にはまだ改良すべき課題があり、さらに研究を進める必要があります。この課題を解決しようとする、観測データ、特に方向スペクトル情報が必要です。実はこの課題に限らず方向スペクトルの利活用に関する研究はこれからの取り組むべき課題だと思っています。例えば、方向スペクトル情報があれば港内静穏度解析などのより合理的な検討や、長周期波の出現特性のより高度な検討が可能になります。また、港内の係留船舶の動揺対策や荷役等の港湾実務などの日常的な港湾の管理・運営にも有用で高度な波浪情報の提供が可能になると思います。

## 5 波浪推算技術の進歩と設計体系

**平山**▷私は沿岸域の波の変形をテーマに長年研究を続けてきました。特に港湾空港技術研究所が所有している大型の平面水槽と波形の伝播変形を解く波動方程式を使って研究をしています。最近では、先ほどお話のあった東京湾や大阪湾で浸水被害が生じた高波による越波の再現に取り組んでいます。例えば大阪湾では、既往最大クラスの高潮が観測されたものの、幸いにも潮位が防潮堤を完全に越えてしまうことはほぼなかったのですが、それに伴う高波が越波することで港湾などの堤外地で浸水が生まれました。そういった現象の理解を深めるために平面水槽で模型実験をしたり、その再現計算を実施したりということを行っています。

その中で一つわかったことを挙げますと、例えば護岸設計で指標としている許容越波流量というものがありますが、これは岸壁設計ではそのまま通用しません。というのは、護岸の場合にはパラペット（波返し工）を越えた水はそこからすぐに海には戻らず、ある程度陸側に溜まるので、平均的な越波流量を想定できれば、護岸背後がどれくらい浸水するかがわかります。しかし、岸壁の場合にはパラペットがないので、越波した水の一部は波が引くタイミングでそのまま海に戻ってしまいます。ですから、例えば越波が継続するなかで浸水する状況が平衡状態にある場合には、時間平均越波流量としては結果的にゼロになるために、それ



不規則な海洋波と方向スペクトル  
 —方向スペクトル(周波数と方向に関する波浪のエネルギー分布)を等高線で表したのもの—



大型水槽における岸壁上の浸水実験

を基準に許容値を決めることができません。そこで、越波が生じる場所の浸水深に何かしら基準を設けて、岸壁の高さの設計ができないかという検討を始めたところです。

こういった波の変形を考える際に、まず基本になるのが沖波の条件です。まさに今のお話にありました方向スペクトルなども含みますが、特に港湾施設の設計では設計沖波が必要となります。この設計沖波は本来、波が変形する前の沖合の地点で与えられる必要があるため、物理的にいうと波長に比べ水深が十分深いところで設定することになります。ですが、実際の港湾の近傍でそんなに急に深くなる場所はそう多くはないので、なかなか理想通りにはいきません。ただ、それでも今までなんとかやってこられたのは、波浪推算の実用化の歩みによるところが大きいと思われます。波浪推算の技術は近年急速に進歩していますが、それでもごく最近までは海底地形を考えない深海モデルを用いた波浪推算が主流でした。この場合には、港湾の近傍でもモデル上は水深が十分深いとみなされるので、推算した結果をそのまま沖波とみなすことができました。一方、最近では擾乱時の波浪推算に海底地形による波の変形まで考慮できる浅海モデルが適用されるようになり、沿岸域での波浪推算の精度が上がってきています。

そうになると、観測値をはじめとした波浪の現象の再現という面では非常に良いのですが、港湾の近傍では変形がすでに始まった波が推算されるので、それをそのまま沖波として設定できないという問題があります。そういった場所では、港湾施設の設計沖波をどうやって決めるかという検討が非常に難しくなります。そこで、従来の深海モデルでなんとか決めてきた沖波は、本来の定義による沖波ではないという意味で、疑似沖波という言い方をしたり、浅海で推算された変形後の沖波は、もうこれは沖波とは言えないので、準沖波と呼んだりというように、新たな用語を定義

しながら、波浪推算の技術が進歩する中で従来の設計体系にどのようにすり合わせていくかという検討を併せて進めているところです。

## 6 気候変動には「変化」と「変動」がある

**森**▷橋本先生がおっしゃいましたが、波浪研究というのは裾野が広くて、私はどちらかというと、大量に計算してデータを使って気候学的に解析し、現象を理解するというをやってきました。気候変動には2種類ありまして、温暖化によってゆっくり変化していく、トレンドが変わる「変化」と、もう一つはinternal variability (内部変動性)、今年と来年とか、毎年現象が変わるという「変動」というものに分けられると思います。気候の変化・変動と波浪がどういうふうにリンクしているかを調べた中で、最近思っていることが一つあります。今の設計波は50年確率波<sup>9)</sup>がメインだと思いますが、それを不規則なシグナルの中からいかに極値統計<sup>10)</sup>等を使って推定するかということを実務上やられているかと思います。

一方で気候の自然変動をよく見ていると、不規則けれども構造というのがあって、特にENSO (エルニーニョ・南方振動)系<sup>11)</sup>とかアリューシャン低気圧<sup>12)</sup>と日本の東北の波浪などは意外にリンクしています。自然科学的には、不規則性の中にも構造が見られるので、そういうものが日本沿岸の波浪にどういうふうに繋がっていて、ひいては沿岸部の防災対策等にどうリンクしていくかということに非常に興味があります。

ちょっと話がずれつつありますが、やはり気候変動の影響をどういうふうに科学的に取り入れて、それが実務にどう生かされるかに興味を持っています。気候の変化だけではなくて変動も重要なので、両方を加味してどういうふうに日本の沿岸の防災対策につなげていくかというのは、今日皆さんからご意見をお聞きできればと思います。

## 7 「変化」と「変動」の重ね合わせを考える

**橋本**▷森先生の話に関連しますが、例えば台風の発生数には約30年の周期があることを示すデータがあります。また、気候変動の研究成果の一つとして、温暖化とは別に地球には約10数年周期で寒暖の変動があり、21世紀初め頃

から数年前までは気温上昇の停滞期、ハイエイタス<sup>13)</sup>があったことがわかっています。一方で、我々が極値統計で確率波を検討する際には、ある統計的な法則に則って50年に一回の頻度で発生する波高を推定するわけです。ところが、これまでの観測データをよく調べてみると、その事象を発生させる母集団の特性が実際には不変ではないわけです。今後は、変わりゆく地球環境の中で波浪の出現特性の変化や変動をどのようにきちんと設計体系の中に入れて行くのかを考えなければなりません。本当に難しい問題だと思います。我々の研究対象は、これまでに起こってきた事象だけではなく、将来の変化や変動も含めて考えていかなければならないということで、森先生と同じ意見です。

## 8 気候変動対策をどう実装していくか

**神谷**▷ 皆さんから非常に大事なご指摘をいただきました。気候変動もそれ以外の事象についてのご指摘もそうなんですけれども、新しい知見や研究、技術について、社会に対してどう実装していくかということが非常に大きな課題だと考えています。例えば、気候変動にともなう波浪の増大等に対して防波堤や防潮堤の構造をどうするかというような設計上の問題、海面上昇等によって物流エリアや産業エリアにおける浸水域等がどのように変わっていくのかというような利用上の影響、これらに対してどのような取り組みを進めるべきかというのが大きな点として出てくると思います。これらは、産業・物流・生活機能が集積する臨海部において特に大きな影響を与えるため、今後の政策を考える上で、しっかりと現実的な検討を深めていかなければいけないと認識しています。

## 9 設計体系の見直しをどう進めるか

**森**▷ 波浪にかかわる研究について、少し細かい話ですが一つコメントさせていただきます。先ほど平山さんからもありましたように、現在の設計体系は沖波を出してそれを何らかの公式で越波量なり波圧にもっていくという仕組みになっていると思います。この体系は私が知る限り、合田良實<sup>14)</sup>先生の世代で色々苦労されてまとめられたものです。

一方で、ここ15年20年でですけども、数値計算モデルが非常に発達してきました。橋本先生が言われたような方

向スペクトルの発展を解くモデルがあって、そこではどの周期でどの角度から波がくるかという細かい情報も得られますし、さらに平山さんたちのモデルのように、一つ一つの波の形の伝播を解いて、細かい変形、場合によっては越波流量まで計算できるようなモデルもあります。しかしそれらがいま一つ設計体系の中に活かされていないと感じていまして、そのあたりをそろそろ大幅にアップデートできる時期にあるのではないかと個人的に思っています。

**平山**▷ 森先生のご指摘されたとおり、波の変形に関する現在の設計体系は、(換算)沖波に対して整理された実験結果に基づく図表等の使い方も含めて、構築されています。一方、近年では数値計算モデルが非常に発達してきていますが、これまではどちらかというと、図表の適用範囲外となる条件では計算結果で対応しましょうとか、現在の設計体系に合わせる形での使われ方が多かったように思います。ですが、守備範囲の異なる数値計算モデルの連携が進む中で、これまでの設計体系に必ずしも縛られなくてもいいところもだんだんと出てきているのかもしれない。橋本先生からもご指摘があった通り、方向スペクトルという情報が今の設計では十分に活かしきれていないということもありますので、それを加味した時にどういった設計ができるのかということ、確かに考える時期にきているなと感じているところではあります。

一方で、我々の研究所は現場に近いというのも一つ大きな強みなのですが、やはり急激に変えすぎると現場は混乱してしまうということもあります。実際、現場ではこれまでの方法で設計されて機能している施設がたくさんありますので、そういったものとの整合を図りつつ、現場の理解を得ながら、より精緻なものに設計体系も含めて変えていくことを徐々に進めていく必要があると思っています。また、その繋ぎが非常に大事だとも思っています。今まさにその繋ぎをやる時期でもあるし、繋いだあとどこにもっていくかということを考える時期でもあるのかなと感じています。

## 10 波高、周期、方向だけではわからない現象

**橋本**▷ ナウファス (NOWPHAS)<sup>15)</sup>の波浪観測年報が港空研資料として出版されていた初期の頃は観測地点数が少なかったため各地点の気象擾乱の上位ケースの周波数スペクトル<sup>7)</sup>がその印刷物に掲載されていました。ところが

段々と地点数が増えてきて、印刷物に掲載することが困難になりました。現在閲覧可能な80年代初め頃の年報に掲載されている周波数スペクトルを見ると、長周期波がある擾乱時には発生しているのに、別の擾乱時には発生していないなど多様であることがわかります。有義波高や有義波周期だけでは擾乱時にいったい何が起きているのかは十分に把握できません。私は長周期波が含まれる擾乱時に、例えば越波災害などが激化しているのではないかと考えています。

森先生は以前、フリークウェーブ、一発大波<sup>16)</sup>の研究をされていましたが、フリークウェーブは方向集中度が高い方向スペクトルの発生時に波浪の非線形性により振幅の増幅率が增大して発生することを示されています。同様に沿岸域の長周期成分の増幅も波浪の非線形性に伴って発生しますが、方向スペクトルの集中度に依存して増幅率が大きく変化します。今のNOWPHASでは有義波高や有義波周期のような波浪諸元だけではなく、方向スペクトルも計算可能です。また、第3世代波浪モデルの推算では有義波高や有義波周期ではなく、実際には方向スペクトルを計算しています。方向スペクトルを港湾構造物の設計体系に今すぐ導入するのは困難かと思いますが、多様な波浪の特性をしっかりと理解してさらに技術を深化させて行くためには、方向スペクトル情報を利活用できる準備をして行く必要があろうと思っています。

## 11 方向スペクトルでリアルに再現

**宮崎**▷有義波高、有義波周期や波向といったパラメータではなく方向スペクトルを用いて解析すると予測の精度や再現性が高まるというお話を頂いたと思うのですが、目指すべき精度のオーダーはどのくらいのものなのでしょうか。

**橋本**▷方向スペクトルの必要性を研究者でない方々にお話しするのは、いつも難しく感じています。港湾施設の設計と利用に分けて説明すると、設計では50年に1度の発生確率の波浪条件を設定します。これは現実には起こっている事象ではなく想定です。そのような想定に方向スペクトルの情報を直接に活かせる段階に技術は進んでいません。でも被災時に、なぜ越波がこのような起こり方をしたのかとか、あるいは港内静穏度を考えた時に、なぜこのような荒れ方をしたのかなどの問題を検討する際には、想定ではなくリアルな現象を把握しなければなりません。このような



場合には、有義波高、有義波周期だけでは不十分で、方向スペクトルの方が現象そのものを理解しやすい。ですから必要な精度のオーダーということではなく、実際に発生した事象の理解という意味で、方向スペクトルは有用な情報だと言えると思います。

**宮崎**▷今の段階では設計のためというより、そういう現象を分析して説明するためには方向スペクトルがわかるのが一番良いということですね。

**橋本**▷そういうことです。そのようなことを理解してもらうためのハードルは非常に高く、現場の人と議論すると、「いや、そこまでは要らないよ」というふうに言われてしまうこともあります。

## 12 設計体系の中での方向スペクトル

**平山**▷橋本先生のご意見はまさにそのとおりだなと思って伺っていました。現象の再現をする上では、実は方向スペクトルを入れないとやはり合わないですね。NOWT-PARI<sup>17)</sup>という波の変形計算プログラムを開発して運用してきていますけれども、開発した当初の頃は実験場で起こすような綺麗な、といっても複雑ですけども、関数に従う多方向の波を造波して計算していました。でも、実現象を再現するためには、やはり様々な情報を含む方向スペクトルをそのまま入れないと合わないということで、今は波浪推算で得られる色々な形をした方向スペクトルを計算モデルにそのまま入力して、そこから波形を作って越波を再現する形に変わってきています。

一方で、設計波を算定する際になかなかそれができないのは、極値統計解析で想定された50年に1度発生する波の波高、周期、波向に対して、さらにどういう方向スペク

トルを想定するのかといったところが、まだまだ知見がないというか、なかなかやりきれない部分ですね。その中でも、最低限、方向集中度というか、海域や波向によってうねり性が強いのかそれとも風波成分が多いのか、ということくらいまでは反映できるように検討してみようということで、今、少し始めたところです。本来であれば、例えば二方向波浪みたいなものもあるのかもしれませんが、方向スペクトルの形状にまで踏み込んだ設計はまだハードルが高く、しかし、そういった検討も将来的には必要だなと思っています。

それでも、何らかの設計沖波を仮定する方法は現在の数値計算技術を完全に活かしたことにはならないので、そういう意味では波の発生・発達から一貫通貫で構造の設計まで、それも何万回も計算をして確率的にどうなるというような検討がもしかしたら今後出てくるかもしれません。ただそこまで一気にには行けないので、一旦は沖波という形で値を決めて、それに対して設計するというやり方から徐々に移行していくというような感じかと思います。

なお余談ですが、現在の設計体系の中で方向スペクトルの重要性が最も顕著に現れるのは、波の回折だと思えます。港内静穏度を考える際に、波の一方方向性しか考えないと港内に全然波が回って行かないという状況が算定され、多方向性を考えた場合とは結果がかなり異なってしまいます。すなわち、岸壁前面での波の状況をかなり過小評価してしまう可能性があります。ですから、我々が色々な研修等でお話をする時は、地方整備局や港湾管理者の職員の方々に、方向集中度のパラメータをしっかりと設定して回折計算をしてくださいとお願いしています。

## 13 技術的根拠に基づいた取り組みが重要

**神谷**▷設計につきましても色々考えなければならないことがあると、あらためて感じたところです。お話がありました方向スペクトルのようなモデルの話もありますし、DX<sup>18)</sup>も進展しています。気候変動も含めてどのような体系で設計をしていくのがこれからの対策として有効なのかということも考えるべき課題だと思っています。

加えて、今、沿岸センターでは港湾工事のための波浪予測を行っていると思うんですけども、それを災害時においても使えないかといったことも、中長期的には重要な課題だと感じています。いずれにせよ、気候変動等による影

響は、公共セクターだけではなくて、臨海部全体にあまねく影響するようなものです。やはりきちんと技術的根拠に基づいた臨海部全体での政策的な取り組みがこれまで以上に重要になってきます。そういうことを考えた場合に、技術的な知見を持っている機関の役割というのは、より重要になってくると思っているところです。

## 14 日本と世界をどう繋ぐか

**森**▷気候変動の研究をここ15年くらいやっていますが、15年以上前はピュアな科学だったのが、今はかなり工学及び実務に近づいてきているというのが私の印象です。技術的知見を体系化してオールジャパンで考えていかなければならない段階にきており、神谷課長が言われたことはまさにその通りだなと思っています。

特に波浪について重要なのは、海面上昇と高潮と波浪はセットで考える必要があり、それをどういうふう to 気候変動の中の変化予想として入れていくかというのがこれからの一番近い所の課題ではないかと思っています。一方で波浪、特にうねりは太平洋全体から来ますし、台風は気候モデルがどういうふう to 予測するかにかかっています。ですので、日本だけを見ているのではなくて、世界のコミュニティがどういう予測を出している、日本のモデルはどのような予測で、その中で、例えば波浪の将来変化をどういうふうに取り入れていくかなど、結構広い視点からローカルまで落とし込む必要があるので、そこは非常にチャレンジングな課題だと思っています。特に今WMO（世界気象機関）<sup>19)</sup>でも波浪の将来予測などを取りまとめつつありますので、日本と世界をどういうふう to 繋ぐかというのが一つポイントかなと思います。

## 15 CDITには研究と実務の橋渡しを期待

**森**▷もう一つは気候科学は文部科学省とか環境省がこれまでリードしてきていますが、基本は研究にフォーカスしています。これらの科学的成果をどのように実務に結びつけていくか、繋げていくかというのはもうまさに沿岸センター、国交省の皆さんの役割です。そういう科学的知見を工学的あるいは社会科学的なところにどういうふう to 落とし込むかというのは、これから非常に重要ですし、頑張っ

ていただきたいと思います。

沿岸センターに期待することは、長期的には、新しい設計に向かって技術をリードしてほしいということが一つあります。短期的には、様々な観測データ、モデルで予測等も行われていますので、それらをどういうふうにとまめて、実務にもそして外部にも使いやすいデータ及び考え方として展開していくかということに非常に期待しています。最近よく使う言葉で、ビッグデータ<sup>20)</sup>、DX、デジタルツイン<sup>21)</sup>というのがあります。まさにこの波浪の予測、観測、モデル化というのはそれにマッチしますので、国交省と民間をつなぎながら沿岸センターには日本をリードして行っていただきたいと思っています。

## 16 新たな技術体系の確立に向けて

**橋本**▷ 合田先生を中心として体系化された我が国の港湾施設的设计体系が世界で高く評価されている理由の一つは、方向スペクトルの概念が初めから取り入れられていたからだと思っています。当時の港湾技術者にとっては、方向スペクトルの概念をいきなり取り入れることはまだ難しいということもあり、有義波高、有義波周期、波向を介して間接的に方向スペクトルの特性が導入されています。その当時にはまだ精度の良い方向スペクトル情報がない段階での体系化で、その点でも極めて先進的かつ優れたものだと思います。

一方で、近年、港湾・海岸の諸施設に想定外の被災事例が発生しているように思います。特に周期の長いうねり性波浪やそれに伴う大きな越波を主因とする被災が発生しています。これらは施設的设计段階での波浪条件の設定の際には必ずしも想定されていなかったことかと思っています。今後これらの被災に対応できる新たな技術を検討して、設計などの実務に取り入れて行くためには、災害を発生させた特異な海象を従来の波高・周期・波向の波浪諸元のみで検討するには限界があることから、波浪の本質的な構造を表す方向スペクトルに立ち返って検討することが必要かつ合理的かと思っています。現在では以前に比べて計算機やソフトウェアも著しく進化しました。そろそろ新しい技術体系への転換に向けた試みが始まって良いのではないかと思っています。また、森先生が言われたビックデータやデジタルツインの時代では、有義波高や有義波周期のような波浪情報からさらに進めて、リアルな波浪特性を評価でき

る方向スペクトルを利活用できるように変えていかなければならないと思っています。

## 17 既往データの再解析とデータベース化

**橋本**▷ 先ほども述べましたように、高精度で信頼性の高い方向スペクトル情報が利用可能になれば、様々な調査・研究において沿岸波浪の出現特性がより適切に検討可能になると思います。ついであるが、現在、港湾局等で実施している気候変動適応策に関する検討においても、方向スペクトル情報はこれまでの波高・周期・波向を用いた検討よりも高感度に波浪の出現特性の変化を把握することが可能です。特にうねりや波向の変化については従来の波高・周期・波向を用いた検討では精度良く変化を捉えることは困難であり、方向スペクトルの利用が合理的だと思います。

まずは既往データの方向スペクトルの再解析とデータベース化が必要です。そして、方向スペクトル情報を利活用できる環境の整備が必要です。そのためには、港湾に関わる様々な調査・研究や設計・施工および維持・管理等のあらゆる場面において方向スペクトル情報の利用を前提とした議論を沿岸センターが中心となり国、研究所、大学、民間企業など様々な分野の方々に加わっていただいで進められないかなと思っています。

長年に渡りNOWPHASで観測されてきた膨大なデータを用いて高精度な方向スペクトルを解析し、データベース化し、利活用できれば、NOWPHASの世界的な評価もさらに一段と高まるものと思っています。

## 18 日本と世界の波浪研究

**宮崎**▷ 森先生から日本と世界をどう繋ぐかというご指摘、そして橋本先生からは日本の設計体系が海外でも高く評価されているというお話をいただきました。世界で海岸工学のご研究をされている方もたくさんいらっしゃいますし、各国や地域によって求められるテーマも違ってくるのかもしれないませんが、日本の海岸工学は世界の中でどういう位置付けにあるのでしょうか。世界をリードしているのでしょうか。

**橋本**▷ すごく答えにくい質問です(笑)。研究レベルは研究テーマや研究者によってそれぞれですから。波浪の研究は、

今、日本では海岸工学分野の人が数多くいて、理学系の人  
は数少なくなっています。ところが欧米の波浪研究は、工  
学系の人よりもむしろ物理や数学など理学系の人たちも数  
多く頑張っています。実は森先生や私も参加している波浪  
予報モデルの国際ワークショップには欧米の理学系の方々  
が数多く参加されています。皆さん優秀な上に個人が単  
独で頑張るといよりも、チームでモデル開発を進めるの  
が非常に上手ですね。そういう意味で波浪予報モデルの分  
野は欧米が先行してしまい、日本が後からそれを導入して  
改良を進めている状況です。ちなみに世界初の第3世代波  
浪モデルは一昨年ノーベル賞を受賞したHasselmann<sup>22)</sup>が  
進めたプロジェクトで開発されたものです。一方で、港湾・  
海岸分野の様々な技術については、港空研などは現場の情  
報を持っていますから、欧米の研究者がかなわない分野も  
あり、昔から高い評価を得ています。

**宮崎**▷本日は波をテーマに大変貴重なお話をいただきました。  
CDITとしては、データをきちんと揃えて、誰にでも  
使えるような形にしていけないといけないということだと  
か、また新しい設計の考え方を広めていくような役割、そ  
れから技術的な知見を工学的な現場につなぐ橋渡しの役  
割を持っているというご指摘もいただきました。全くその  
通りだと思っています。今日いただいたご意見等も踏まえ  
まして、今後も調査研究活動に取り組んで参りたいと思  
います。引き続きのご指導をお願いしまして、本日の座談  
会はクローズとさせていただきます。どうもありが  
とうございました。



## 《用語説明》

### 1. 【有義波高】

ある地点で連続する波を1つずつ観測したとき、波高の高い  
方から順に全体の1/3の個数の波(例えば100個の波が観測  
された場合、高い方から33個の波)を選び、これらの波高  
および周期を平均したものをそれぞれ有義波高、有義波周期  
と呼び、その波高と周期を持つ仮想的な波を有義波と呼ぶ。

### 2. 【パリ協定】

「京都議定書」の後継となる国際協定で、フランス・パリで  
開催された第21回気候変動枠組条約締約国会議(COP21)  
において2015年12月に採択された、2020年以降の気候変  
動問題に関する国際的な枠組み。

### 3. 【IPCC】

気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel  
on Climate Change)の略称。世界気象機関(WMO)及び  
国連環境計画(UNEP)により1988年に設立された政府間  
組織で、各国政府の気候変動に関する政策に科学的な基礎  
を与えることを目的とする。

### 4. 【気候変動適応計画】

気候変動適応(気候変動の影響による被害の防止・軽減そ  
他生活の安定、社会・経済の健全な発展又は自然環境の保全  
を図ること)に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図  
るため、気候変動適応法第7条に基づき政府が策定する計画。

### 5. 【2050年のカーボンニュートラル】

2020年10月、政府は2050年までに温室効果ガスの排出を  
全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すこ  
とを宣言した。

### 6. 【交通政策審議会港湾分科会の防災部会】

2011年、港湾における津波対策のあり方に関する調査審議  
等を目的として、交通政策審議会令第7条に基づき港湾分  
科会の下に設置された部会。

### 7. 【周波数スペクトル・方向スペクトル】

海面を伝わる不規則な波浪は、周期(周波数)と伝播方向(波  
向)の異なる無数の成分波が重なり合って合成されたもの  
として表現できる。各成分波のエネルギーが周波数に対してど  
のように分布しているかを示したものを周波数スペクトル、  
各成分波のエネルギーが周波数及び波向きに対してどのよ  
うに分布しているかを示したものを方向スペクトルという。

### 8. 【第3世代波浪モデル】

風波の発達及び減衰の物理過程として、風によるエネル  
ギーの入力、非線型相互作用によるエネルギー輸送、砕波  
等に伴うエネルギーの消散の3つがある。このうち、非線  
型相互作用によるエネルギー輸送は、始めのうちは寄与が  
小さいとされ、考慮されず(第1世代波浪モデル)、その後

重要性が認識されても膨大な計算を要するために、簡単なパラメータで便宜的に表現されていた(第2世代波浪モデル)。しかし、計算機能力の向上と効率的な計算方法の登場により、非線型相互作用によるエネルギー輸送を計算することが可能になった。この種の波浪モデルを第3世代波浪モデルと呼ぶ。

#### 9. 【50年確率波】

施設の供用期間50年間の中で、平均的に1回発生すると予想される波高の高い波浪のこと。過去に発生した波高の高い波浪データを元に統計解析により求められる。一方、波浪データが十分に観測されている場合には、実測値を用いた設定が可能である。

#### 10. 【極値統計】

気象要素などの年最大値データを用いて、これまでに経験した現象やそれらを超える規模の現象がどのくらいの頻度(再現期間)で発生するかを合理的に推定しようとする統計。極値統計では、これまで外れ値と考えて母集団とは別のものとして扱って来た現象を、母集団の一部として扱うようになる可能性があることから、異常気象や極端気象を扱う場合に利用されている。

#### 11. 【ENSO (エルニーニョ・南方振動) 系】

El Niño-Southern Oscillationの略。大気ではインドネシア付近と南太平洋東部で海面の気圧がシーソーのように連動して変化し、海洋では赤道太平洋の海面水温や海流などが変動する、各々の相が数か月から数十か月の持続期間を持つ地球規模での自然現象の総称。大気に着目した場合には「南方振動」、海洋に着目した場合には「エルニーニョ現象」(もしくは、単に「エルニーニョ」と呼ぶ)。

#### 12. 【アリューシャン低気圧】

冬季のベーリング海からアリューシャン列島付近にほぼ定常的に発生し、大きく発達する低気圧。シベリア高気圧との間に西高東低型の気圧配置を形成し、北太平洋の広い範囲に北西季節風を吹かせ、黒潮などの海流や日本沿岸の水位にも影響を与える。

#### 13. 【ハイエイタス】

hiatus: 地球温暖化による気温上昇が一時的に停滞する現象。

#### 14. 【合田良寛】

ごうだ よしみ (1935-2012): 「合田式」として有名な波圧算定公式の確立など数々の偉大な業績を残した海岸工学・港湾工学の世界的権威。元港湾技術研究所(現港湾空港技術研究所)長、横浜国立大名誉教授。

#### 15. 【ナウファス (NOWPHAS)】

Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS (全国港湾海洋波浪情報網)。日本沿岸の波

の情報を各地に設置された観測機器からリアルタイムで情報を収集し、国土交通省、内閣府、港湾空港技術研究所が協力して管理・運営している日本沿岸における定常観測網。ナウファスで観測された波浪情報は「リアルタイムナウファス」というWebサイトを通じてリアルタイムに情報発信される。

#### 16. 【フリークウェーブ、一発大波】

通常、不規則な海洋の波の中には有義波高よりも高い波が含まれ、10波に1波は有義波高の1.3倍、100波に1波は1.6倍、1000波に1波は2倍に達すると言われる。この経験則を拡張すれば、数千あるいは数万波に1波は有義波高の数倍となることが考えられる。これを一発大波(いっばつおおなみ)または“フリークウェーブ”(Freak Wave)と呼ぶ。

#### 17. 【NOWT-PARI】

多様化する港湾設計の実務に対応するために開発された、波の非線形性と分散性を考慮できるブシネスク方程式と各種の境界処理法を用いて、現実の港内外で生じるさまざまな波浪変形を同時に、かつ高精度に算定できる計算モデル(ブシネスクモデル)のこと。

#### 18. 【DX】

Digital Transformation (デジタルトランスフォーメーション)の略称。データとデジタル技術を効果的に活用し提供ができるよう、ビジネスや組織の活動・内容・仕組みを戦略的、構造的に再構築していくこと。

#### 19. 【WMO (世界気象機関)】

World Meteorological Organization: 世界の気象業務の調整・標準化・改善や各国間の気象情報の効果的な交換を奨励することにより人類の活動に資するため、世界気象機関条約に基づき、1950年に設立された国連の専門機関の一つ。

#### 20. 【ビッグデータ】

一般的なデータ管理・処理ソフトウェアで扱うことが困難なほど巨大で複雑なデータの集合。単に量が多いだけでなく、様々な種類・形式が含まれる非構造化データ・非定型的データであり、さらに、日々膨大に生成・記録される時系列性・リアルタイム性のあるものを指すことが多い。

#### 21. 【デジタルツイン】

現実世界の物体や環境から収集したデータを使い、仮想空間上に全く同じ環境をあたかも双子のように再現する技術のこと。

#### 22. 【Hasselmann】

Klaus Ferdinand Hasselmann (クラウス・フェルディナンド・ハッセルマン、1931-) : ドイツの海洋・気象学者。2021年12月、地球温暖化などの予測手法、「気候モデル」の確立でノーベル物理学賞を受賞。