世界に貢献する港湾空港技術

PARI

VOL.28

JULY 2017

Airport

Technology

Port

2 __ Front Line - 特集 -

半世紀にわたる積み重ねこそ強み！

過去の災害を教訓に
レベルアップする津波研究

6 __ Focus On 研究活動の最前線へ

地球惑星科学としての津波伝播計算
新たな計算手法を開発
遠地津波の予測精度向上へ

大規模波動地盤総合水路を用いた研究
津波の構造物や人への作用を
大縮尺実験で追究

8 __ Close Up 現場からの報告

～津波対策の最前線～
東北地方の港湾における復旧の道のり

10 __ Front People 研究者の広場 挑戦する研究者たち

観測網の新展開と観測データの有効活用で
津波防災をより高い次元へ！

14 __ CROSS LINE 国際交流レポート

スペインで行われた
欧州津波リスク評価・低減プロジェクト会議に出席

15 __ TOPICS

高橋重雄 顧問（元 港湾空港技術研究所理事長）が
日本人で初めてスペイン財団の「土木工学賞」を授賞

『港湾空港生産性向上技術センター』を設立

半世紀にわたる積み重ねこそ強み！

過去の災害を教訓に レベルアップする津波研究

世界的にみても、日本列島は津波の常襲地域。
2011 年の東日本大震災の津波（東北地方太平洋沖地震津波）が
いまだ大きな爪痕を残すなか、
次は南海トラフ巨大地震？ と、その危惧は年々高まっています。
将来起こりうる災害を軽減し、迅速に復旧復興させるためには
過去の災害を教訓にしたハード・ソフト両面での取り組みが不可欠。
港空研における津波研究の、これまでと今後を取材しました。

2011
東北地方太平洋沖地震津波
被災現地調査

2009
サモア諸島津波被災現地調査

海洋情報・津波研究領域
河合弘泰 領域長
（国際沿岸防災センター 副センター長併任）

きっかけは1960年のチリ津波

港空研には、その前身である運輸省港湾技術研究所（港研）として1962年に運輸省運輸技術研究所から独立する以前より、長きにわたって連綿と津波研究に取り組んできた歴史があります。

「構内検潮所で観測した1960年のチリ津波のデータも残っているんですよ」と、河合弘泰領域長。

このチリ津波をきっかけに港研では、長さ163mの津波水路や平面水槽を用い、防波堤による津波の低減効果の実験が開始されたといいます。さらに、1959年の伊勢湾台風の高潮計算のノウハウも生かして、津波の計算モデルの開発も。

「1983年に起きた日本海中部地震津波の際は、多くの行政機関の協力を得て、4次にわたる現地調査に。津波の遡上や港湾施設の被災について、速やかに港湾技研資料にまとめて発行したことは、当時、土木学会でも評判になりました。津波が大陸棚の遠浅の海を伝播する際に発生するソリトン分裂波についても、この津波で初めて確認。港湾技研資料にも記載されています」

港湾技研資料

その後も大きな災害が起こるたびに現地調査を行い、詳細な港湾技研資料・報告書を発行。これらの知見を生かすことで、数値計算や実験の手法をレベルアップさせてきた歴史があります。近地津波から遠地津波まで、単層長波モデルによる津波伝播計算の技術も確立。また、須崎港（高知県）や釜石港（岩手県）、奥尻港（北海道）の防波堤による津波の低減効果の実験を行い、設計の技術支援にも努めてきました。

「気象庁が20年ほど前にさまざまな震源を仮定して津波の予測計算を行い、それをデータベース化した際も、港空研が提供した津波計算モデルが使われたと先輩から聞いています」

海外の被災地域と連携し津波対策研究をリード

2004年のインド洋津波（スマトラ島沖地震津波）を契機に、津波防災研究センターを設立。2006年にジャワ島、2007年にソロモン諸島、2009年にサモア諸島と連発する海外の津波の被災調査を実施しました。地域の大学や行政機関との連携を深め、2006～2007年に行われた国際水路協会の津波対策の作業部会「PIANC MarCom WG53」では、港空研が事務局となり、報告書の作成も行っています。

津波防災研究センターは、2010年、アジア・太平洋諸国との連携強化や地震など他の沿岸災害も研究することを目的に発展的に改組され、アジア・太平洋沿岸防災研究センターに。

「2010年のチリ津波の際は、日本沿岸での津波の増幅特性を、GPS波浪計・海底設置型波浪計（海象計）、検潮井戸の組み合わせによってとらえています。このとき須崎港では、第1波の到達から4時間後にやってきた第5波がもっとも高く、津波のふるまいの複雑さを再認識しました」

三次元高潮津波シミュレータSTOCや、インバージョン手法による波源推定技術の開発もスタート。大規模波動地盤総合水路や三次元数値波動水槽CADMAS-SURFも活用し、フラップ式構

2004
インド洋津波被災状況

2006
ジャワ島津波被災状況

2007
ソロモン諸島津波被災現地調査

造物や直立浮上式防波堤など新しい津波対策施設の検討が始まったのもこの頃です。

2011年の東北津波を経て さらに進む技術開発

港空研における津波研究の起点というべき1960年のチリ津波からおよそ半世紀が経った2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震津波が発生。

「それまでの想定を超える津波に対して、残念ながら浸水被害は防げませんでしたが、長年の研究や現場での建設によって、津波を低減させるという防波堤の効果は発揮できました」

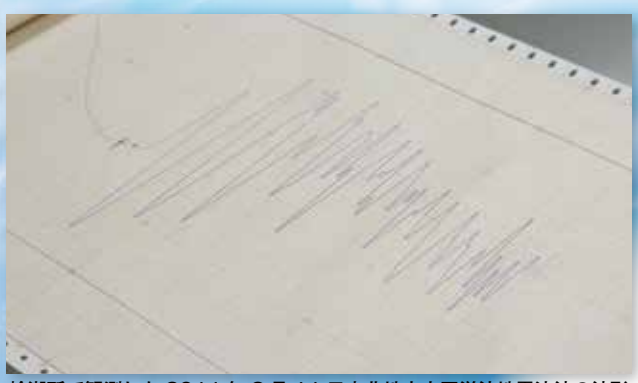
また、このときにGPS波浪計がとらえたデータは気象庁の津波警報の更新に役立ち、波形解析のジャーナル論文は、世界でも広く読まれることに。総力戦で対応した各港湾での防波堤等の被災調査のほか、波崎海洋研究施設（茨城県）周辺の海岸では、地形や底質粒径の変化の調査も行われました。

「また、スパコンも駆使し、STOC・CADMAS-SURF／3Dによる津波の伝播や構造物の変形を計算も。半世紀前には二次元の簡単な計算しかできなかったものが、三次元になり、しかも沖合で津波が発生して岸に伝播してきて構造物がどう壊れるかまでを、一気通貫で計算できるようになったわけです。正直、これほど早く技術が進むとは思いませんでしたね。数値計算に携わる研究者の努力はもちろんですが、現地データを直接手にとれるという港空研の強みがあってこその進歩だと思います」

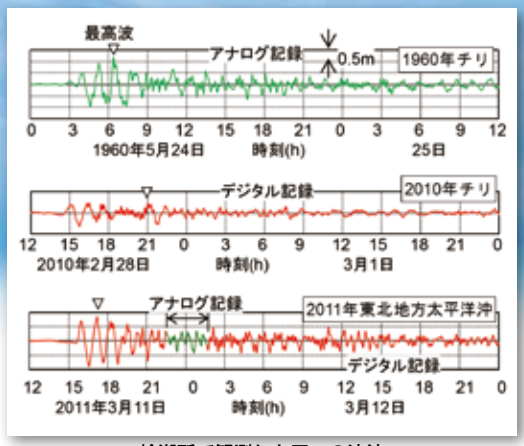
さらに、防波堤の〝粘り強い化〟を目指した実験で耐津波設計ガイドラインに寄与。2012年からはSATREPS（地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム）「津波に強い地域づくり技術の向上に関する研究」に取り組み、2014年にはチリ公共事業省とも研究協力協定を結びました。

「最近では津波シミュレータT-STOCのソースコードを公開。多くの方々にさまざまに活用していただくことで、津波防災を進められればと考えています」

港空研の検潮所（現状）



検潮所で観測した2011年3月11日東北地方太平洋沖地震津波の波形



検潮所で観測した三つの津波

GPS波浪計

沿岸防災を大きくとらえ その中で必要とされる研究を

現在は、既往の津波災害で顕在化した技術的な課題に取り組んでいるところ。

「STOC・CADMAS-SURFによって、津波による海水の動きやそれによる防波堤等の施設の変形、コンテナ・小型船・自動車などの漂流を計算できるようになりましたが、さらに計算精度と汎用性を高める必要があります」

例えば、津波の分散性や海水の圧縮性、地球の弾性を考慮した遠地津波伝播モデルの構築。GPS波浪計とHFレーダーで津波をとらえ、波源を推定して浸水を予測するモデルの実用化では、ノイズやエラーのある観測波形から、いかに微弱な津波をとらえるかが腕の見せどころとか。また、海底土砂の洗掘や、漂流物の火災も扱えるようになったといいます。

「ゆくゆくはこれらの技術を束ね、津波来襲時の意思決定を支援したいですね」

津波の被災調査だけでなく、数値計算による結果の吟味においても土地勘は重要。

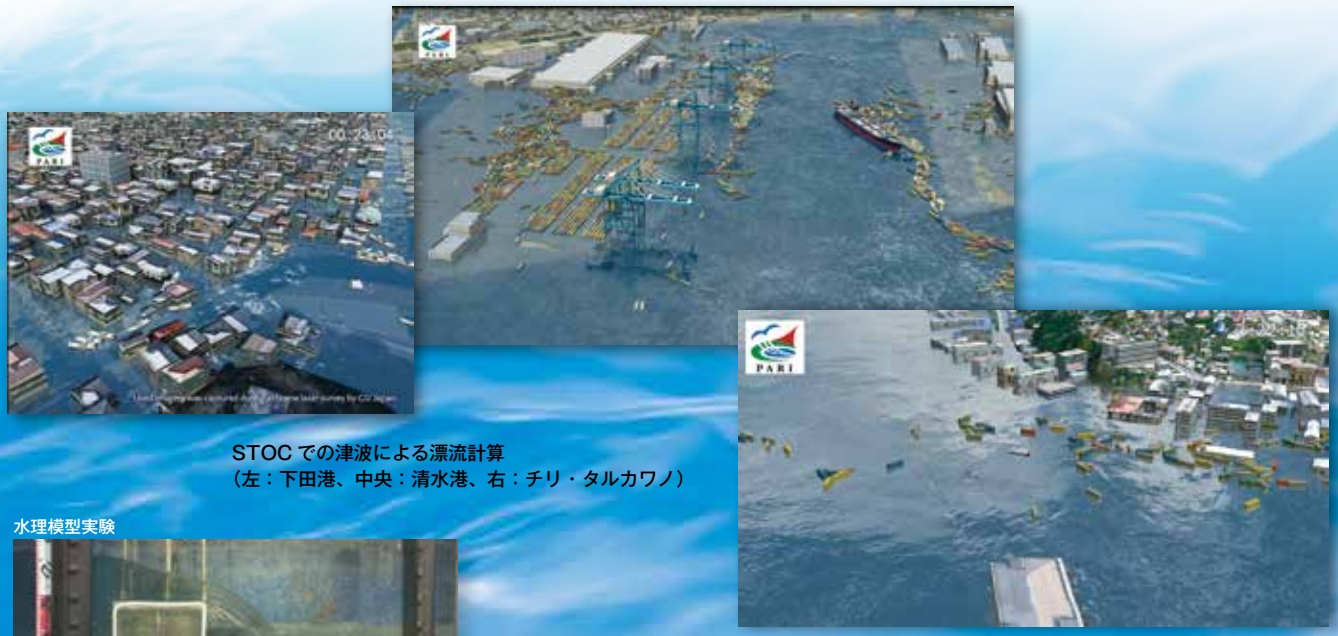
「若い研究者たちにも日頃から、過去の被災地や、今後被害が予測される地域を巡回させたいと考えています」

大規模水理模型実験、CADMAS－SURFなど格子法を用いる数値シミュレーションに次ぐ、第三のツールとして、粒子法モデルへの期待も。高精度化に取り組み、防波堤の越波・越流や、マウンド・地盤の局所洗掘の計算技術の開発を進めているところ。

「技術的な課題をコツコツと解いていくのが研究の基本的なスタンスですが、個人的には、津波イベントの実験や計算だけをやるのではなく、沿岸防災というものをもう少し大きくとらえ、どんな研究が必要かを考えていく必要があると思っています」

例えば、津波で構造物が壊れたままのときに台風が来るかもしれません。逆に、台風で壊れかかったところに津波が押し寄せる可能性も。港空研では既にそういった事態も想定し、設計潮位を超える津波・高潮時の風波による波力と越波・越流の実験を進めています。

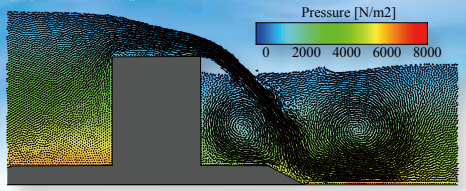
「ある一回の津波災害だけをみるのではなく、発災から復興が終わるまで、ライフタイムかあるいはそれ以上のスパンで、沿岸の防災・減災を考えてみたい。その間には気候変動もあれば、高齢化やAI（人工知能）の普及など、人間の営みにも変化があるでしょう。ちょっと話が大げさになりますけど、そういうことも頭の片隅におきながら、津波研究で何が必要かを考えていきたいですね」



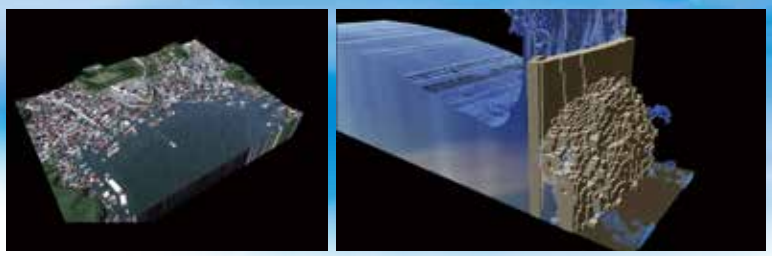
STOC での津波による漂流計算
（左：下田港、中央：清水港、右：チリ・タルカワノ）

水理模型実験

粒子法による数値シミュレーション



防波堤背後の洗掘



STOC・CADMAS-SURF による浸水や構造物の変形の計算

技術開発と現場支援に加え 津波防災の啓蒙も

港空研として、津波・波浪・高潮という海洋の研究分野の垣根を払い、沿岸防災という観点で情報交換しながら研究に取り組めるのは大きな強み。さらに、2016年4月に統合された三鷹の海技研（海上技術安全研究所）との研究チームごとの交流も、着実に増えているそうです。

そして、アジア・太平洋沿岸防災研究センターは、2017年4月、国際沿岸防災センターに。アジア・太平洋地域という枠を超え、さらなる活躍が求められています。

「港空研の活動というのは、とにかく幅広い。地道な観測データの処理から、大規模な実験、高度な数値計算まで。机上での検討から、現場での防波堤の設計への技術的支援、海外の被災現場の調査も行います。現場で建設に携わる人たちと話し、大学の先生方とも学会で競い合わなければいけない。そこが醍醐味。また、技術開発と現場支援にとどまらず、市民への啓蒙活動も、われわれの一つの大きな使命なのです」

論文を書き、学会で発表するだけでは不十分という考え。さまざまな実験や数値計算結果を分かりやすい動画にまとめるなど、政策決定者から一般市民まで、幅広い層に見てもらうことも視野に。

「津波の恐ろしさや備えの重要性を伝える〝教育〟の役割も果たしていきたいですね」

地球惑星科学としての津波伝播計算

新たな計算手法を開発 遠地津波の予測精度向上へ

従来の数値計算モデルによる遠地津波の到達時間の予測には単純な誤差とはいえない15分のずれがありました。この問題解決のために考慮したのは地殻・マントルの変形や、海水の圧縮性などの影響。新たな計算プログラムを開発し、遠地津波の研究に取り組む、海洋情報・津波研究領域 津波高潮研究グループの髙川智博グループ長に取材しました。

２０１０年のチリ地震の際、地球の裏側からやってきた津波は、予測よりも15分ほど遅れて日本の沿岸に到達。２０１１年の東日本大震災の津波がチリに伝わったのも、同様に予測より遅かったといいます。

「この二度の大津波を、ＧＰＳ波浪計をはじめ最新の観測装置でとらえることができた、それが大きなきっかけに。データを解析することで、従来の計算方法だとずれてしまうこと、そしてそのずれには一定の傾向があることがわかったんです」と髙川グループ長。

このずれの原因が何なのかを検討した結果、思い当たったのが、数値計算をしやすくするために行っていた近似。

「流体の計算をする際、通常は非圧縮といって、水がつぶれたり膨らんだりしないという近似をします。その近似を行わずに、海水の圧縮性を考慮して計算したほうが、より精度よく計算できることがわかりました」

もう一つ、海底面が変形しないものとしていた近似も取り払うことに。

「津波の波長は10kmとか１００kmとか、長いのが特徴です。それに対し、海の水深というのは太平洋でも４km程度。ごく薄い水の層の重さが海底面にはたらくことになります。その変化は、やはり海底から深さ10kmとか１００kmとか、それくらい深いところにも影響をおよぼすんですよ。つまり、厚さ４kmの海水の下には６kmくらいの海洋地殻があって、さらにその下にマントルという岩石の層があるのですが、そういったところも少し変形する。その影響をちゃんと計算に入れたほうがよりよく再現できることが、最新のデータをもとに明らかになってきたわけです」

第1波のみならず 後続波まで精度よく予測

この「海水の圧縮性」「地殻・マントルの弾性変形」に加え、「地球の自己重力」の影響も考慮。これら3つの効果を平面2次元の津波伝播計算に直接取り込む計算プログラムを開発。これによって、波源から最短時間で到達する直接波の波形だけでなく、多様な海底地形による屈折・回折・反射などを経て到達する後続波形まで、精度よく予測できるようになるといいます。

「第1波が何分後に来るといった予測情報はもちろん大事ですが、遠地津波の場合、第2波、第3波など後ろの波が最大になることも。太平洋上の多様なコースを通って来た津波が、最後に日本に到達するときどう重なるかということが重要なんです。いろいろな方向から来る波に対して、その重なり具合まで、新しいモデルで計算できるようになってきた。それが、この数年での大きな進歩ですね。今後はより詳細な海底地形を考慮可能なモデルを構築し、後続波の予測精度を高めていきたい」

港湾の活用という意味では、津波がいつ来るかだけでなく、いつ収束するかという情報も重要に。長時間にわたる予測が可能になれば、警報解除のタイミングの判断も適切にできるようになると考えられます。こういった研究成果は、いずれ気象庁の予報業務に活用されるような形に。また、24時間の防災体制を整えている自治体などに技術提供するという方向でも、実用化が検討されています。

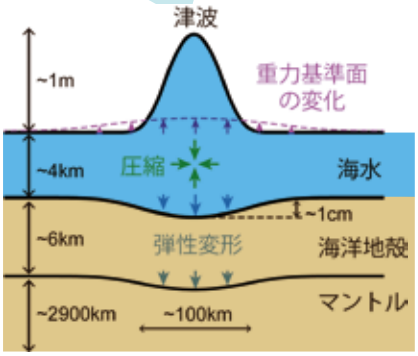
誤差の範囲も予測する技術で “常に当たる”情報を

一方で、津波が到達する前に浸水域を予測する、リアルタイム津波ハザードマップの研究開発も。グーグルアースの画面にシミュレーションの結果を重ね、例えば津波が川を遡上していく様子などもリアルに“見える化”。

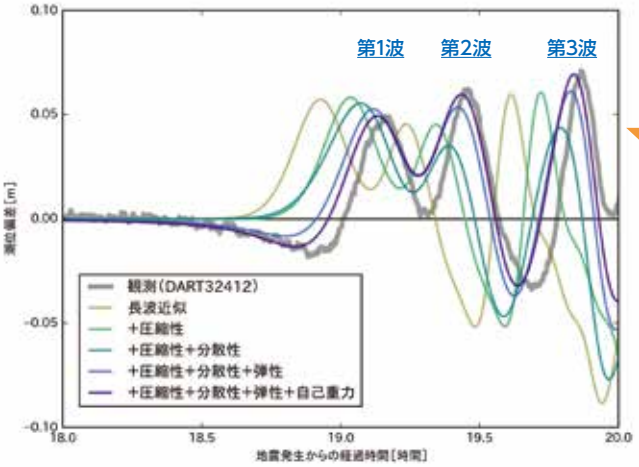
「現在、河川の水門を閉めるか否か、さらにいつ閉め、いつ開けるのかの判断に活用したいという引き合いをいただいているんです。一度水門を閉めてしまうと内水氾濫の危険もあり、できる限り閉めたくないというのが河川側の事情。誤差の問題もあって、避難の情報に使うには難しい面もあるかと思いますが、こういった合理的な判断が求められる場では、新しい予測技術による時間的にも空間的にもきめ細やかな情報が、有効に活用いただけるのではないかと考えています」

予測計算に誤差はつきもの。その誤差がどれくらいあるのかということもまた、今後は重要な情報に。

「例えば10ｍの津波が来ると予測して、７ｍだったらはずれたという印象が残ります。でも10ｍ±４ｍというように誤差も含めた情報が出せれば、７ｍの津波もそのレンジに入り、受け手の印象が変わります。情報の信頼性を維持できるように、±を含めて提示できるような予測技術の開発にも取り組んでいるところです」



開発した津波シミュレーションモデルで新たに考慮した津波伝播に伴う物理現象



新開発モデルによる遠地津波波形の予測精度の向上

2011年東北地方太平洋沖地震津波を地球の裏側（ペルー沖）で捉えた観測波形と新開発の津波伝播シミュレーション波形の比較図。
海水の圧縮性、波の分散性、固体地球の弾性、地球の自己重力などさまざまな効果を加味することで、引き波からはじまる波形が再現され、第1波のピークのみならず、第2波、第3波の波高や到達時刻の予測精度が向上している

海洋情報・津波研究領域
津波高潮研究グループ
髙川智博 グループ長

大規模波動地盤総合水路を用いた研究

津波の構造物や人への作用を大縮尺実験で追究

東日本大震災を経て、港空研での研究成果をもとに2013年に発行された防波堤の耐津波設計ガイドライン。その後も、数多くの実験や研究が進んでいます。大規模波動地盤総合水路で津波を模した孤立波を起こし、流される人の挙動や、構造物に作用する衝撃砕波力の解明に挑む海洋研究領域 耐波研究グループの鈴木高二朗グループ長に取材しました。

まず見せてもらったのが、等身大の人形が波に巻かれる実験映像。大規模波動地盤総合水路で起こした高さ30㎝の津波ながら、ブロックの後ろに生じた渦に持続的に巻かれながら流される過程はショッキングです。

「立っている人が津波で倒される実験をこれまで行っていましたが、津波に巻き込まれた場合に、どのように流されるのかという検討は行っていませんでした。

人形が波に巻かれる実験映像

東日本大震災では、津波による渦に巻き込まれて水面に浮上するのが困難だった人が多くいたようです。そこで、現在、海洋環境情報研究グループの井上徹教グループ長を代表として、医師の栗栖茜さんと、JAMSTECの研究者の菅寿美さん、小栗一将さんと共同で、津波で人が流される状態の研究を始めているところ。地形の段差や構造物、あるいは車があったときに、その背後で人がどのように津波で流されるのかを調べようとしています」

現在行っているのはライフジャケット着用時の実験。すると、まったく渦に巻き込まれずに、水の表面を流れていくのだとか。

「まずは溺死を防がないといけないので、ライフジャケットはかなり有効だと思います。ただ、三陸に来襲した津波は10m以上。そのとき水中で何が起きていたのかはわかりません。実験は実規模縮尺で高さ30㎝の津波を起こして行ってきましたが、今後、小さい縮尺の実験により、10mの津波ではどのようになるのかを試していこうと考えています」

ライフジャケットは簡易なものならホームセンターなどでも入手できるので、津波の心配がある地域では、ぜひヘルメットとともに、1人1着備えておきたいところ。

「実は海水浴のときも、ライフジャケットはおすすめです。ぷかーっと浮いて、泳ぎがうまくなったようで楽しいですよ。遊びを兼ねて、用意しても良いのではないかと思います」

海洋研究領域
耐波研究グループ
鈴木高二朗 グループ長

構造物に衝突する津波の波力現象を解明

大規模波動地盤総合水路においては、数分の1～実規模という大縮尺で「津波の衝突による波力」の実験も。津波が直立壁などの構造物に衝突し、轟音とともに飛沫が打ち上がる、その条件や、波力との関係を探るのが目的です。

「直立壁模型に孤立波を作用させ、造波板のストローク（動く距離）を変えることで砕波位置をずらしながら、津波による衝撃砕波力を計測しています。その結果、ワグナータイプとバグノルドタイプという津波波力の現象があることが新たに明らかになり、飛沫の打ち上げ高と波圧が、これらのタイプによって変化することがわかってきました」

ワグナータイプとは、波が空気を巻き込まずにそのまま直立壁にぶつかる現象。一方、バグノルドタイプは少し前から波が砕け、空気を巻き込みながら当たる現象。もともとは台風のときの風波の波力の研究で明らかにされたものです。

「ワグナータイプは極めて限られた条件でしか発生しませんが、波力が非常に大きい。バグノルドタイプはというと、ワグナータイプよりも波力は小さいですが、津波そのものが大きくなると、波力も飛沫も巨大になります。津波は砕波しても、なかなかエネルギーがなくならず、巨大な力が構造物に作用するのです」

大規模波動地盤総合水路におけるバグノルドタイプの実験状況

防波堤の耐波設計に貢献 越流による波力も検討

これらは津波の先端部分の現象。その後に続いて来襲する津波の本体部分も問題で、「津波の越流による波力」の実験も欠かせません。波が砕けてぶつかる力と、水位を上げながら堤防を乗り越えるときの力、どちらも大きく、その両方に耐えられる構造物にする必要があるからです。

2013年9月、防波堤の耐波設計ガイドラインが発行され、全国で防波堤の設計が進んできました。現在、ケーソンの背後に腹付工を設置するという方法で補強工事が進められています。

「東日本大震災以前は、こんな大きな津波が来ることを想定して構造物を設計していなかったので、そもそも防波堤を乗り越えた場合の津波の力を算定する式がなかったんですよ。震災後、港空研でいろいろな実験が行われて、新たな設計公式が提案され、それが、ガイドラインの一部になっています」

ただ、残された課題もあるそうで、例えば洗掘問題。青森・八戸港の八太郎防波堤は、越流した波で背後が削られ、崩れました。また、現地の防波堤の形状は複雑で、場所ごとの波力の複雑な変化なども検討されていないといいます。

「越流は津波だけでなく、高潮によっても起こります。高潮の場合は高波と複合するので、その力はかなり大きくなる。このときの波力も調べています。津波と高潮、両方に対応できるよう、今後も研究に取り組んでいきます」

～津波対策の最前線～

東北地方の港湾における復旧の道のり

東北地方太平洋沖地震津波で大きな被害を受けた釜石港の防波堤復旧工事現場を訪ね、大災害から６年を経た現状を取材しました。

２０１１年３月11日の東北地方太平洋沖地震津波により、東北地方太平洋沿岸の港湾は大きな被害を受けました。港空研の調査団は３月16日から現地入りして被害状況を調査し、その後の復旧に技術的な支援をしてきました。

今回は港空研の海洋情報・津波研究領域・河合弘泰領域長らがまず国土交通省 東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所（仙台技調）を訪ね、地本敏雄所長に復旧工事の進捗状況についてお話を伺いました。

復旧第１号となった八戸港

本誌９号と15号で復旧工事を取材した青森県八戸港は、２０１１年の秋口から復旧工事が本格化し、２０１３年３月にケーソン被災総延長１４２８ｍの据付が完了、同年９月には災害復旧事業が完了し、被災港湾の復旧第１号となりました。

「かなりの部分が被災しましたが、早期に復旧できたのは調査が素早く行われたことに加え、当時東洋一と呼ばれていた『むつ小川原港のケーソンヤード』が使用可能だったことが大きな要因だと思います。防波堤の復旧においては、ケーソン製作期間をいかに短縮できるかが重要です」（地本所長）

湾口防波堤が全壊した岩手県大船渡港は、２０１７年３月に復旧工事が完了。福島県相馬港は２０１５年１月に岸壁の復旧が完了、翌年３月に沖防波堤の全１４２函のケーソン据付が完了しており、残りの上部工の嵩上げや前面の消波工を今年度に完了する予定となっています。

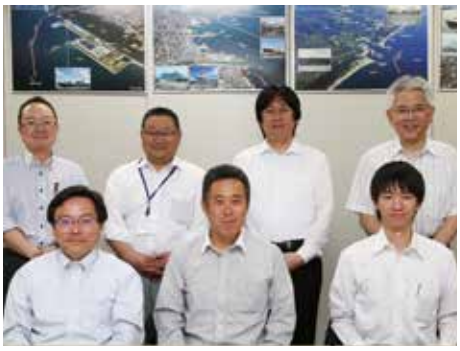
港空研との綿密な連携で早期復旧を実現

「震災後の私たち事務所の優先事項は設計業務です。それは被災の状況やデータがないとできないので、まずは被災状況調査を行いました。一つの港で、複数の施設が被災している場合には各現場事務所や地域の方と話し合い、どこから復旧させるか優先順位を決めて進めていきました。例えば八戸港の場合は、フェリーやコンテナ船などを安全に着岸・荷役させるために必要な静穏水域をつくり出す防波堤が無い状態だったので、まずは仮設堤として壊れた防波堤の前面に消波ブロックを設置しました。これは、地元の要請に応じて、どのようにすれば効果的か、どこからやっていけばいいかなど、さまざまな設計の検討を重ねた結果です」（地本所長）

港空研は被災直後に現地入りし、仙台技調をベースに調査を行いました。

「港空研は仙台技調に、被災情報の提供や被災地の案内をしていただきました。逆に技調から『あの辺りを見に行ってほしい』という要請を受けて調査に行くこともありました。調査後は技調に状況を報告し、それを受けた技調から『こういう壊れ方をしていて、これを復旧するには新しい技術や知見が必要なので実験してほしい』という要請をいただくなど、復旧に向けてずっとキャッチボールをしてきましたね」（河合領域長）

「設計業務をするにあたって港空研での実験結果を設計に反映させるなど、港空研や国総研にかなりサポートしていただきました。スムーズな復旧のためにはこの連携が欠かせなかったと思います」（地本所長）



仙台技調の皆さん
【写真後列右から】
所長 地本敏雄さん、先任建設管理官（設計担当）佐藤真さん、調査課調査課長 鮎貝基和さん、設計室 先任建設管理官 福尾原悟さん

港空研職員
【写真前列右から】
海洋研究領域 耐波研究グループ 堀井一樹 依頼研修員、鈴木高二朗 グループ長、河合弘泰 領域長

ギネス認定された釜石港湾口防波堤の現在

今回の取材では岩手県釜石港の復旧工事現場も訪ねました。釜石港は岩手県沿岸部に位置する天然の良港ですが、津波被害からの防護と広大な静穏水域による新たな事業展開に寄与することを目的として1978年から湾口防波堤事業に着手し、31年の歳月をかけて2008年度に完成しました。

また、湾口防波堤の建設地点は世界の港湾構造物建設史上例を見ない大水深（水深63m）であり、「世界一深い場所に建設した防波堤」として2010年にギネス世界記録に認定され、その模様は本誌1号でもご紹介しました。

東日本大震災津波で湾口防波堤も被災しましたが、港空研の被災直後の現地調査や数値シミュレーションにより、湾口防波堤の津波減災効果が明らかになっています。

現在の復旧状況などについて、国土交通省 東北地方整備局 釜石港湾事務所 小澤敬二所長と荒川圭企画調整課長にお話を伺いました。

「釜石港は昨年8月に深部工区のケーソン据付が完了し、12月には灯台の設置も完了しました。今年度は、最終年度として残るケーソン10函の据付と上部コンクリートの打設を行う予定です」（小澤所長）

「復旧にあたっては、港空研の全面的な協力を得て最大クラスの津波に対しても粘り強く効果を発揮する構造を採用しています」（荒川課長）

復旧事業で課題となったのが、深部工区だけでも30函と多くのケーソンを早期に製作しなければならないことでした。しかし、資材不足に加え、製作ヤード不足などの制約が生じたため、以下の対策が講じられました。

①基礎マウンドを被災前に比べて盛り増しすることでケーソンを従来よりも1回り小さくし、製作日数を短縮

②ケーソン製作の一部を遠隔地で同時に製作し、デッキバージ船に載せて釜石港に回航することで製作日数を短縮

③ハイブリッド構造のケーソンを採用することで1函当りの延長を最大化することを可能とし、ケーソン製作・据付日数を短縮

「建設工事が集中していたため建設機械や人員の確保が大変で、なかでも一番苦労したのは、基礎捨石を地元で調達することでした」（小澤所長）

最後に、地元を代表して本誌1号にもご登場いただいた釜石市長の野田武則さんにもお話を伺いました。

「完全に津波を防げたわけではありませんが、この防波堤のおかげで津波高の低減や防潮堤を越える時間を遅くするなどの効果がありました。市民の皆さんからも、防波堤がなければもっと被害が大きくなっていたかもしれないという声があり、震災直後からできるだけ早く復旧してほしいとお願いしてきました。また当時の釜石港湾事務所の村上明宏所長の決断も忘れてはいけないと思っています。港湾事務所では避難者を受け入れていましたが、被災直後は釜石がどんな状況かを外部に流すことができませんでした。そんななか避難者の氏名などを外部に発信したのが村上所長だったのです。事務所で避難者を受け入れる決断をした根拠は、釜石港沖に設置していたGPS波浪計の観測データや湾口防波堤があることでした。これらのことから、事務所の2階までは津波は来ないということを判断したそうです。知識や普段の研究の成果が非常に重要であるということを実感しました。この復旧工事が無事に完成することを期待しています」

釜石港湾口防波堤北堤の被災状況
（2012年8月撮影）

ケーソン製作現場
（泉作業基地）

復旧が進む釜石港湾口防波堤北堤

釜石港湾事務所の皆さん
【写真左から】企画調整課 事業計画係長 伊藤尚斗さん、企画調整課長 荒川圭さん、所長 小澤敬二さん

野田武則 釜石市長

観測網の新展開と観測データの有効活用で津波防災をより高い次元へ！

Front People

～研究者の広場　挑戦する研究者たち～

世界トップレベルを誇る日本の津波防災。それでも、
東日本大震災の甚大な津波被害を免れることはできませんでした。
何が足りなかったのかを徹底的に調べ、改善していく、
そのことを共通の使命と考える5人の研究者が集結！
新たな津波観測技術や、観測データを最大限に生かすための取り組みなど
津波防災の現状と展望を語り合っていただきました。

津波の観測データが防災情報の信頼性を高める

高橋　東日本大震災後に出てきた数ある課題のなかで、とくにこのメンバーに共通するのは防災情報。観測データの活用ということですね。その一つに津波警報がある。日本の津波警報は世界有数のもので、地震発生後3分後には発表されます。東日本大震災のときも、気象庁の津波警報システムによって、3分で大津波警報が出ました。でも残念ながら、予想された津波の高さが違った。第2報で引き上げられましたが、やっぱり重要なのは第1報。その改善が課題となりました。第2報で切り替わったのは、釜石沖のGPS波浪計が実際に津波を観測したから。地震の観測データをもとに出された第1報との違いが明らかになり、情報が修正されたわけです。それまでおもに研究で使われていた津波の観測データでしたが、実際に防災に役立つということが、あの一件で示されたといっていい。以来、実際に起きた津波を測って情報の信頼性を上げていこうという研究が、多方面で進められているんです。

対馬　地震の波は津波に比べ、伝わってくるのがすごく速い。だから、津波警報の早期発表のためには、地震のデータはやはりとても有効なんです。東日本大震災のとき第1報で出した過小評価の教訓を受けて、現在はそれをカバーするような、地震データを使った方法が開発され、既に気象庁で運用が始まっています。なので、まったく同じことが起きたとしても、当時のような過小評価にはもうなりません。でも、それだけで十分かといえばそうではなくて、やっぱり津波を予測するからには、津波の観測データを使おうと。さらに上を目指すという意味で、気象研究所でも取り組みが進んでいます。

髙川　GPS波浪計は、もともとは波浪を測るための観測装置でしたが、東日本大震災を受けて、津波観測への期待が高まりました。全国的に展開しているという意味では現在唯一の観測装置。重要度は増しているので、行政が観測網を維持発展させるモチベーションにつながるように、われわれ港空研としても技術開発に努め、こういった観測装置があればこんなに良い情報ができるということをアピールしたいですね。観測網が維持発展し、それが実際の津波防災・減災に役立つというところまで、技術的なサポートができればと考えています。

千田　観測データをどう活用するかというところが私の研究のおもなテーマです。津波のリアルタイム浸水予測だけでなく、次のステップとして、漂流物のリアルタイム予測まで進めていきたい。

高橋　防災の観点からすると、津波が高いか低いか以上に重要な情報は、実際の被害が大きいか小さいか。そこまでリアルタイムで予測できることが重要で、技術的にもそれは可能になってきています。東日本大震災の反省として挙げられるのは、津波が来る前だけでなく、実は来た後も重要だということ。あまりに被害の範囲が広く、救助に向かうリソースが限られる場合、激甚な被災地はどこなのかという情報がないと、効果的な災害対応ができないんですよ。実際に津波を観測することで信頼性の高い被災予測が得られれば、行政もトリアージで作戦が立てられます。観測とシミュレーションを連携させ、そんな被害予測までもっていく。日向先生といっしょに取り組んでいるのが、まさにそれなんです。

日向　津波の観測データを得るために、私が選択したのは海洋レーダー。陸上から電波を出し、その反射波から、沖合の津波の流速を面的に測るというもので、これで波高も推定することができます。数十km四方の面として測るのですが、その中でも波高に違いが出る。それが海底地形で屈折したりしながらやってくるわけですから、沿岸に到達する波高は一つではなく、場所によって全然違ってしまう。なので、沖合で捉えた津波がどういう波高分布で沿岸に到達するか予測するソフトを開発しようとしています。さらに、レーダーは測るのが流れなので、漂流物の予測にも使えるというメリットも。沖合で面的に流速を測り、津波の高さを予測して、津波が去った後の漂流物の移動も予測可能。そこがGPS波浪計などとの大きな違い。やってくるところから警報解除まで、ずっとデータを提供し続けることができるので、応用範囲が広いんですよ。

バーチャルでの観測で海洋レーダーの能力を証明

日向　サイエンスにしろエンジニアリングにしろ、技術って検証されるものなんです。それはデータがとれるから。でも、津波はそうはいかない。新しく開発した技術が本当に使えるものなのか、検証のしようがないんです。以前、津波のデータ

気象庁 気象研究所
地震津波研究部 第四研究室
主任研究官
対馬 弘晃 さん

港湾空港技術研究所
海洋情報・津波研究領域
津波高潮研究グループ
髙川 智博
グループ長

関西大学
社会安全学部
教授
高橋 智幸 さん

愛媛大学大学院
理工学研究科 生産環境工学専攻
環境建設工学コース
沿岸環境科学研究センター
環境動態解析部門
教授
日向 博文 さん

港湾空港技術研究所
海洋情報・津波研究領域
津波高潮研究グループ
千田 優
研究官

がとれるかと思って、高橋さんといっしょに和歌山にレーダーを設置したことがあります。4年半置いていました。遠地津波が数回あったものの、小さすぎて測れない。このままでは一発目のデータが東南海地震になってしまうぞということで、いろいろ工夫しまして。津波は数値シミュレーションで起こし、観測した電波にその情報をのせて、あたかもいま起こっているような、仮想津波観測実験というのをつくった。あらゆるシナリオの津波を、レーダーでバーチャルに測れるようにしたんです。時々刻々とレーダーの範囲に津波が屈折しながら近づいてくる様子を画面にも映せるので、発電所などに置いて、対応の検討や訓練に使えるようにできればと。海洋レーダーは1基3000万円ほど。ソフトも入れたらもっとかかります。でも、実際にこういうふうに測れるんだということを見ていただけたら、費用対効果がペイするかどうか、十分議論になるんじゃないかと思う。それだけのものをつくっているという自負はありますね。

高川　それくらいの値段でそういった情報が得られるなら、むしろお得だと思うのですが……。高橋先生が講演会などで提案されていましたが、日本沿岸にずらっと並べられたらいいんじゃないかと。

日向　さっきも言ったように、データがない。推定するしかない。津波もシナリオでしかない。それに対してどう準備するかというのがやはりポイント。いまある技術で、例えばこういったシナリオの津波が起きた場合、時間とともにどういう情報が出せるのかということを、ある程度どこかでまとめたほうがいいんじゃないでしょうか。みんなバラバラに走っている状態なので、そういう話を横断的にやってみる。そういったことは、いずれどこかでやりたいなと思います。

高橋　「防災省」をつくってほしいと提案しているんですけどね。日本みたいなところで一度大災害が起こると、すごく国力が落ちてしまうので。

日向　目の前の問題としては、どのドアをノックして、まず1台入れるか。どういう戦略でそれを広げていくか。

高川　自治体は気象庁の情報に基づいて対応すると決めているので、観測や予測の部分を担おうというところはなかなかないですね。

高橋　例外もあって、例えば和歌山県と三重県はDONET（※1）を活用して自前で津波予測を出しています。気象庁の津波情報は広範囲なので、ピンポイントの情報を得るには自分たちの責任でやるしかないと。職員を研究機関に送り込んで、みっちり訓練させたうえでの運用です。そういうことをやれる自治体って、すごく少ない。

日向　技術の普及と教育は、たぶんセットで考えないとだめですね。

高橋　われわれの研究グループには、自治体の人や、発電所を持っている電力会社にも入ってもらっています。開発者と使う側がいっしょになって開発している。さらに、導入後はユーザーに対しての訓練も考えていて。そこまでやらないと使ってもらえませんから。手間も時間もかかりますが、防災研究ってそういうものなのかなと思っています。

日向　日本で待っているのではなく、レーダーを世界中に置けば、どこかの津波に引っかかるはず。検証のチャンスを広げるために、そっちの展開も考えるべき。だから、日本で自治体や発電所といっしょに開発していく一方で、世界にも広めていきたい。その場合、受け入れてくれた国の人たちを呼んで、こちらで教育するということも必要になるでしょう。

津波の波源も視野に！ 海洋レーダーの可能性

日向　何百年、何千年に1回のものをずっと待っているわけですから、予算をどうするかという問題はシビア。何百年に1回しか利用しないのではなく、普段はこう使えるということが重要になります。圧倒的に日常利用のほうが長いですからね。その点、レーダーはけっこう便利で、流れを測っているので、環境や漁業にも使える。いま、防災と並行して漁業に使えるテクニックというのもつくっています。

高川　レーダーの情報を見ながら漁に出るとか効率化されていますよね。普段活用できていて、いざというとき役に立つ。両輪が揃っているなと感心しました。

対馬　海洋レーダーって、実際どれくらいの間隔で配置すれば最適なんですか？

日向　琉球大の藤井先生のご提案では70基で、南西諸島を含めて日本一周分でしょうか。

対馬　津波情報の予測実務に使えるようにするには、より具体的なシステムを検討する必要があると思います。実用化に向けて、私も協力したいと思います。

高橋　ぜひお願いします！

対馬　いっしょにできることがあるといいですね。

高橋　これだけ毎日のように津波のシミュレーションをしていますが、実際のところ誰も津波の波源を見たことがない。これを見られるとしたら、たぶん海洋レーダーだけなんですよ。

日向　ただ、いまの海洋レーダーでは波源はとらえられない。波源が遠いうえ、津波が発生した瞬間は流速が出ていないので、レーダーで測れないんです。それをなんとかしたい。通常はデータをものすごく処理して流速を出すのですが、オリジナルのデータを使えないかと。電波が行って帰ってきた以上、何らかの情報はあるはずなので、それを抽出しようとしています。

高橋　海洋レーダーの新たな使い方が開発できたら、世界で初めて津波そのものを見ることになる。これは絶対、日本がやるべきでしょう。それが実現したら、次は衛星。人工衛星に海洋レーダーで開発した波源推定アルゴリズムを載せる。周回軌道上で常に日本をとらえているためには、われわれの計算では6つ必要なんです。とりあえずの目標はそこ。津波衛星ができたら引退しようかと思っています（笑）

データ活用のプロを育てる 仕組みづくりを

対馬　まず喫緊の課題としては、DONETやS-net（※2）など、広範囲にわたっている津波観測網のデータを、うまく津波防災に活用していくということがあります。既に設置がほとんど終わって、データもどんどん上がってきている状況。まずそこをフィックスし、気象庁の業務でいま

以上の活用ができるようにしていくことが重要かと。

高川　個人的に気になっているのは、各種の観測網がバラバラに整備されているのに付随して、データもバラバラになっていること。例えば地震のデータはいろいろな機関がとっていますが、すべて一カ所に集約され、日本だけでなく世界中の研究者がそのデータにアクセスして自由に研究できるような形になっています。津波はこれができていない。海洋レーダーも含め、今後新たに設置されることになったら、ぜひオープンに使えるようにしていただいて、みんなで課題にあたっていくような体制になっていくのがベストだと思うんです。

日向　アメリカではNOAA（国立海洋大気庁）が音頭をとって、本土をほぼ一周、カナダのほうまで含めて観測網が整備されていますが、データはオープンです。それぞれの観測機器は大学などが置き、データベースはNOAAが管理。データを支障のない範囲でNOAAに上げることが、基本的なルールなんですよ。で、毎年NOAAが大学の人たちを集めてディスカッションしたり学生の教育をしたりも。こういう組織は日本にはありません。やっぱり、さっき高橋さんが言っていた「防災省」の設立に期待したいところ。それが実現したら、データ管理もそこで一括してできることになりますから。

高橋　われわれのように観測やシミュレーションのプロはいますが、そういうデータを防災に使うプロがいないというのも問題ですよね。われわれが自治体にデータをあげても、使いこなせる人がいない。3年ごとに移動するような体制でプロになれと言っても無理な話です。防災を本気でやろうと思う自治体は、防災官という形でプロを雇ってほしい。そういうふうに行政が仕組みを変えないと。あと、そういったプロをトレーニングする場も必要です。

日向　教育は絶対必要だと痛感します。

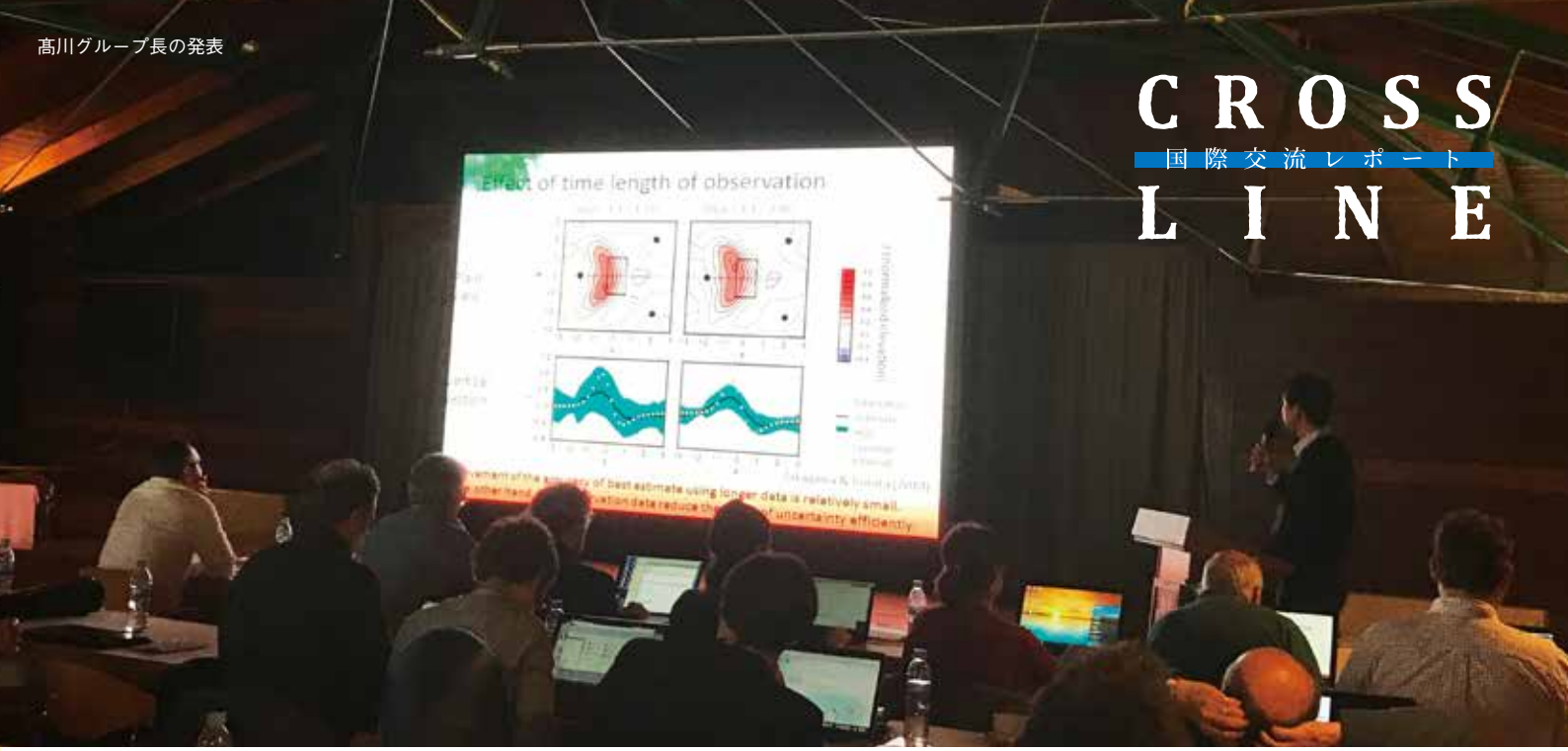
高橋　先ほども言いましたが、いいものをつくってそれを広めるためには、教育とかまで考えないと。ただ、やり続けようとするとけっこう大変。なぜかというと、たぶん研究として評価されない。ボランティアで研究者がどこまで続けられるかという心配があります。

高川　トレーニングすることが職責であるような雇用があればいいのですが。

高橋　例えば建設コンサルタントの新たな仕事として確立できるといいですよね。

日向　研究開発費みたいなものが大学なり研究機関に入るようなシステムも必要です。ボランティアベースは基本的にだめですよ。絶対に続かない。いま、レーダーに特化してですけど、そういうビジネスモデルみたいなものも、民間の方といっしょに検討しています。とにかく回すようにしないとね！

※1　海洋研究開発機構が構築し、防災科学研究所が運用管理する津波・防災観測監視システム。東南海地震の想定震源域に敷設されている。
※2　防災科学研究所が整備を進めている日本海溝海底地震津波観測網。



高川グループ長の発表

スペインで行われた欧州津波リスク評価・低減プロジェクト会議に出席

4月4～10日、スペイン・マヨルカ島で欧州津波リスク評価・低減プロジェクト（ASTARTE）会議が行われ、港空研から津波高潮研究グループの高川智博グループ長と、有川太郎客員研究官（中央大学教授）が出席しました。

有川客員研究官の発表

欧州津波リスク評価・低減プロジェクト（ASTARTE：Assessment, Strategy And Risk reduction for Tsunamis in Europe）は、EUの科学技術開発助成を受けた研究プロジェクトで、北大西洋と地中海沿岸地域を対象に津波リスクの評価や低減に関する研究を行っています。イタリア・スペイン・ドイツ・トルコ・ノルウェーなど欧州各国の研究機関が参加する巨大プロジェクトで、欧州以外では米国のNOAA（アメリカ海洋大気庁）などが外部アドバイザーとして参加。日本からは東京大学地震研究所と港空研の2機関が正式メンバーとして参加しています。

今回の会議は3日間行われ、最初の2日間は成果発表と討議、最終成果報告に関する議論が行われました。研究テーマは、音響探査や海底掘削、過去の津波に関する地質学的な研究、防護構造物の安定性や洗掘対策に関する研究など多岐にわたり、欧州地域を対象に近年の主要な津波研究のメニューを網羅しています。

高川グループ長は、沖合観測データを用いたリアルタイム津波浸水予測技術について発表。発表後には予測誤差の提示の重要性を再認識したという意見や、予測誤差の算出法、画像処理演算装置を用いたプログラムの計算効率等に関する質問が寄せられました。有川客員研究官は、100kmスケールの波源域から1mスケールの沿岸構造物周辺の詳細な流れ場まで、一連として計算可能な連成モデルを紹介しました。ASTARTEプロジェクトでも詳細な三次元モデルを用いた検討はされていましたが、波源域から一気通貫で解けるモデルというのはインパクトがあったようで、リスクアセスメントにおいてもこうした三次元モデルをもっと活用すべきであるという意見も聞かれました。

最終日には現地調査が行われ、マヨルカ島の海岸沿いにみられる特徴的な分布を示す巨礫（きょれきぐん）群を観察。これらは津波による基盤岩の破壊や移動によって形成されたとする仮説が提示され、参加者の間でさまざまな議論もなされました。マヨルカ島では、1756年に内陸5km地点まで浸水し建造物が破壊されたという記述があり、これはアルジェリアでの地震による津波が原因の一つとして考えられています。この前年にはリスボン地震により、死者6万人前後（うち津波によるものが1万人程度）という大きな被害が出ています。このように比較的地震の少ない欧州でも、破壊的な津波災害が数百年の期間に複数起きていることが再認識されつつあり、出席者たちも認識を改める機会となったようです。

左から、有川客員研究官、高川グループ長、佐竹教授（東京大学地震研究所）

TOPICS

News

高橋重雄 顧問（元 港湾空港技術研究所理事長）が 日本人で初めてスペイン財団の「土木工学賞」を授賞

元 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所理事長の 高橋重雄 氏（現 港湾空港技術研究所顧問、（一財）沿岸技術研究センター理事長）が、スペインの「ホセ・エントレカナーレス・イバラ財団」より土木工学賞を授与されました。

これは、卓抜な津波の研究成果に基づき、海岸工学及び防災の分野における権威であるとともに、他の範となる著作を著したこと、また、港湾・空港運営の効率化に関する技術や工学的な研究開発の推進・発展を目的とした機関である港湾空港技術研究所において理事長を務めた功績を評価されたものです。

授賞式は、2017年3月13日にスペイン国王陛下のご臨席のもと、マドリード工科大学で開催されました。なお、本賞は2006年に創設されたもので、3年毎に1名、土木工学の発展に大きく貢献した専門家に贈られるものであり、日本人では史上初の受賞となります。

高橋重雄氏 経歴

1973年旧運輸省（現国土交通省）入省、港湾技術研究所研究官、1984年に波エネルギー研究室長、1988年に耐波研究室長、2001年に独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部長、その後、同研究主監、同津波防災研究センター長を経て、2011年に同理事長。2016年3月に理事長を退任。現在は港湾空港技術研究所顧問、（一財）沿岸技術研究センター理事長。海洋工学、海洋開発、沿岸防災等に関する多くの学会活動・研究活動を国内外問わず行うとともに、内閣府、気象庁等の防災関連の委員会等において公職も務めた。

Infomation

『港湾空港生産性向上技術センター』を設立

我が国が人口減少時代を迎えるなか、経済成長の実現に向け、国土交通省は、生産性革命に資する施策を強力かつ総合的に推進するため、2016年3月7日、「国土交通省生産性革命本部」を設置しました。

これを踏まえ、港湾空港技術研究所は、港湾及び空港に関する技術者・労働者の減少、老朽化インフラの増大、被災後の迅速な機能復旧等に所内横断的に対応するため、2017年4月1日に港湾及び空港の生産性向上を技術面で支援する「港湾空港生産性向上技術センター」を新たに設立し、活動を開始しました。

運営方針：①港湾・空港分野において、調査・施工等の省力化・安全性の向上、常時・非常時に亘る施設の点検技術の高度化等i-Constructionの推進に役立てる、また、物流・荷役作業の効率化・安全性向上を目指した調査研究・技術開発を行っていく。 ②社会のニーズを敏感に捉え、新しい時代に対応した港湾及び空港の整備・運営を技術面から支援する。

組織体制：総員13名でスタート（逐次、増強予定）、センター長1名（栗山善昭 所長）、副センター長2名、研究官10名(上席研究官・グループ長4名、主任研究官等6名)

PARI 世界に貢献する港湾空港技術
VOL.28 JULY 2017

もっとよく知ろう 港湾空港 ～海や空の豆知識～

津波に粘り強い防波堤

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震で多くの防護施設に被害が出たことは、皆さんの記憶にも残っていると思います。この地震での被害の多くは、津波が発生したことによるものであると言われています。一方で、釜石港湾口防波堤は、これまでの研究で、津波高4割、津波流速5割、遡上高5割を低減し、津波が防潮堤を越える時間を6分遅延させたとの結果が示されています。このように、防波堤には、津波の減災効果があることが確認されています。

この結果から、もしこの防波堤が、津波によって変形しても倒壊せず、少しでも防波堤としての機能を維持できれば、さらなる減災効果を発揮するのではないかという考えのもと「粘り強い防波堤」というものが検討されています。

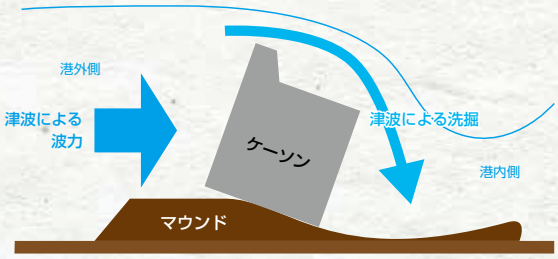
具体的にどのような構造が検討されているかというと、防波堤の港内側に「腹付工」と呼ばれる石を積む構造が一般的です。腹付工を設置することにより、津波来襲時の波力に対して、抵抗力として働き、より大きな津波にも耐えることが可能となります。また、津波が防波堤を越流することにより発生する、防波堤の港内側の洗掘に対しても、腹付工が洗掘されることにより、マウンドや現地盤が洗掘されるまでの時間を遅らせることができます。

このように粘り強い構造となることで、津波高や浸水高を抑制し、到達時間を遅らせることにより、多くの避難時間が確保でき、多くの人命を救う一助になるものと考えられます。

解説
海洋研究領域
耐波研究グループ
岡田克寛 研究官

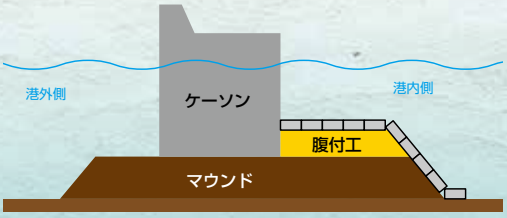
粘り強い防波堤の実験モデル

腹付工を設置していない防波堤



津波によりマウンドが洗掘され、ケーソンが倒壊

粘り強い防波堤のイメージ



腹付工を設置した防波堤

津波による波力、洗掘を腹付工により軽減

企画・発行　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　Port and Airport Research Institute（PARI）
〒239-0826　神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1　TEL:046-844-5040　FAX:046-844-5072　URL:http://www.pari.go.jp
編集・制作　（株）ホライゾン

本紙の定期送付・送付中止・送付先変更のご依頼、ご意見・ご感想などはこちらまで

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
Port and Airport Research Institute（PARI）
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1　TEL：046（844）5040　FAX：046（844）5072　URL：http://www.pari.go.jp

VEGETABLE OIL INK
グリーン購入法に基づいた
用紙を使用しています。