

CDIT

Coastal Development Institute of Technology

〈CDIT鼎談〉

地震と港湾・沿岸の防災 ～2010年チリ地震の教訓と課題～

今村 文彦 氏〔東北大学大学院工学研究科 附属災害制御研究センター教授〕

菅野 高弘 氏〔(独)港湾空港技術研究所 特別研究官〕

〈特集〉

チリ地震・津波による港湾・海岸の被害に関する合同調査団報告

高橋重雄・菅野高弘・富田孝史・有川太郎・辰巳大介・加島寛章〔(独)港湾空港技術研究所〕

村田進・松岡義博〔(財)沿岸技術研究センター〕 中村友昭〔名古屋大学 高等研究院〕



Vol.32



表紙写真

読者の皆様に機関誌「CDIT」の発信する情報を、よりダイレクトにお伝えするために、毎号で紹介する記事内容より写真等を一部抜粋・掲載しております。記事内容ともども毎号変化する表紙写真にもご注目ください。

○特集 チリ地震 Part1 (P10)

○特集
チリ地震
Part1 (P10)

○沿岸
レポート 1
(P22)

○鼎談 (P3)

3

CDIT鼎談

地震と港湾・沿岸の防災 ～2010年チリ地震の教訓と課題～

ゲスト

今村 文彦氏

東北大学大学院工学研究科 附属災害制御研究センター 教授

菅野 高弘氏

(独) 港湾空港技術研究所 特別研究官

10

特集 チリ地震 Part1

チリ地震・津波による港湾・海岸 の被害に関する合同調査団報告

高橋重雄・菅野高弘・富田孝史・有川太郎・
辰巳大介・加島寛章 (独) 港湾空港技術研究所

村田進・松岡義博 (財) 沿岸技術研究センター

中村友昭 名古屋大学 高等研究院

16

特集 チリ地震 Part2

GPS波浪計によるチリ津波の観測結果と数値計算

河合弘泰 (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部海象情報研究チーム

辰巳大介 (独) 港湾空港技術研究所 アジア・太平洋沿岸防災研究センター

18

寄稿

確率台風モデルを用いた高潮の出現特性の解析

河合 弘泰 (独) 港湾空港技術研究所

海洋・水工部海象情報研究チームリーダー

22

沿岸レポート1

第6回国際沿岸防災ワークショップの開催 (タイ：バンコク)とインド洋津波被災地の 現地調査報告

長澤 大次郎 (財) 沿岸技術研究センター 主任研究員

田代 徹 (財) 沿岸技術研究センター 主任研究員

26

沿岸レポート2

高潮・高波の観測、実験、追算に関する特別セミナー

(財) 沿岸技術研究センター

京大防災研究所沿岸災害研究分野

28

ONE POINT LECTURE

リモートセンシング

30

CDIT News

地震と港湾・沿岸の防災

～2010年チリ地震の教訓と課題～

CDIT鼎談
沿岸の未来を見据えて

今年2月27日にチリで起きた大地震によって、日本にも津波が押し寄せた。幸い、被害はそれほどではなかったが、新たな問題点も生じている。今回は現地チリの報告もまじえながら、我が国の港湾と沿岸に対して有効に生かす方法を、技術面や精神面から考えてみた。



今村 文彦氏

東北大学大学院工学研究科 附属災害制御研究センター 教授



菅野 高弘氏

(独)港湾空港技術研究所 特別研究官



小原 恒平

(財)沿岸技術研究センター 理事長

チリ地震津波の 特徴と被害実態

小原▽今年には前回のチリ地震からちょうど50年目にあたりますが、今年2月27日に再びチリで大地震が発生し、我が国にも津波の影響がありました。本日の鼎談では、今回のチリ地震を受けて現地調査をされました今村教授と菅野特別研究官をお迎えしまして、チリ津波の特徴と我が国の港湾・沿岸防災のあり方、といった視点でお話をお伺いして参りたいと思います。

最初に現地の被害状況や地震・津波の特徴などについてお話ししていただけますでしょうか。

菅野▽私は地震が専門ですので、現地では地震被害などを中心に調査を担当しました。今回の地震の特徴は、規模はマグニチュード8・8と大きいのですが、震源に近いコンセプションという町の地震動自体日本で創造していた程大きくなかったという印象でした。日本のようにたくさん地震計を置いていないので定かではないのですが、建物



津波の被害写真

的地盤が良かったのだらうと思いますが、構造物の被害はそんなに多くはなかったと考えようしいですか。

菅野▽広がりという点からはそうです。ただ局所的な地盤条件、かつて沼があった所や河川が走っていたような場所を埋め立てて造った施設は、液状化被害を受けていたことが確認されました。

海岸保全施設がない チリの沿岸部

小原▽チリの沿岸部は、日本でいう海岸保全施設、堤防や護岸はどのような整備状況でしょうか。

今村▽港を除いて、そういった施設はほとんどありません。一部、サンアントニオ港の住宅地で道路のための堤防があるくらいです。

小原▽海岸の保全施設はあまり多くないという点ですが、日本では地震が起こると海岸の保全施設が例えば液状化などでやられて、そこに津波が来る。複合災害の中でも最も因果関係がある形が起こり得ます。そこまでの状況ではなかったのでしょうか。

菅野▽実は私が現地へ行った主目的は、地震動と津波という複合災害の実態を調査することでしたが、幸いその発生は限定的でした。

小原▽チリにおける構造物の耐震性はどんな考え方なのでしょう。

菅野▽これは驚いたのですが、建築構造物には国際協力機構（JICA）のプロジェクト

クトで20年以上前から日本の技術が入っていて、非常に高い水準になっています。ただ、壊れた建物もかなりありました。基準はちゃんとしているのですが、配筋などのディテール、例えばフープ筋をきちんとラップさせていなかった、そういった被害です。

また港湾の設計基準ですが、国の統一した設計基準はありませんでした。チリが民主化し急速に発展する中で、国の予算が少なくということもあるでしょうが、施設の整備や運用は民間に全部任せるコンセッション方式が採用されています。おそらく請け負った企業が母国の基準を取り入れており、港ごとに整備水準も違います。

チリでは歴史的にスペインなどのヨーロッパの方が移民して来ているので、あまり地震が多くない国の基準を基に整備されているように思えました。建造物の耐震設計についてはよく判らないので、建築で考えている震度を港湾でも考えましよう、というくらいのレベルで整備されているようです。地盤が良かったことが幸いしたと思います。

小原▽津波に対する防護はいかがでしたか。

今村▽基本的にハードで守ろうという思想はないようです。人工的な堤防や防波堤は限定されていて、それは津波対策が主目的ではありません。一方、ソフト対応に関しては、警報システムはきちんとあります。特にチリはペルーなど周辺の中南米地域のどこで地震が起きても津波があり得ますので、そうした国との連携やハザードマップなども整備して地域で配布されており、コミュニティ

などの被害を見ると、幸いなことにそれほど大きな地震ではなかったらう、という印象です。勿論、部分的にはビルの崩壊なども起きているのでそれほど小さいわけではないですが、8・8という数字からすると震度が陸地に及ぼす影響は少なかつたのではないのでしょうか。

小原▽それは例えば震源域との距離、地盤の状況、断層のずれ方などが良い方に働いたということでしょうか。

菅野▽断層のずれ方とおそらく地盤の状況です。日本の沿岸は軟弱地盤が多いのですが、非常に地震動が増幅する特性があります。チリは急峻な山が海岸線まで迫っています。比較的硬い地盤の上に町が載っていますので、そういう意味で構造物を壊すような揺れ方はなかったらうと考えています。

小原▽津波発生メカニズムと被害に特徴的なものはありませんか。

今村▽前回（1960年）と比べてですが、共通部分は海溝での巨大地震によって起きた津波だということです。50年前の被害の様子はよくわかりませんが、津波の高さはある場所では30mを超えたと言われています。今回はマグニチュード8・8で3〜8mくらいです。この値は我々が調査に行く前に数値シミュレーションで予測していましたが、大体予想通りでした。ただ局所的には28mを超えていた所もありました。そういう点では課題も残っていますし、なぜそれほど高くなったかを究明する必要があります。

小原▽先ほど菅野さんからお話があったように、地震動そのものはマグニチュードに比べてそれほど大きくなかった。おそらく比較



レベルでは相当周知されていました。

ただ、今回は警報が遅れたほか、地域によっては注意報を流すことを中止した（津波なしという情報）というようなケースもあり、残念ながら警報システムが十分に働いたとは言えないようです。ただ、住民の方は2004年のスマトラ・インド洋津波を受けて、コミュニケーションの啓発活動をされています。避難訓練等もしていて、そこでは非常に迅速な避難が地震直後にできたということ。しかも、多くの方は第一波が来たあと高台にいた。

このように見えますと、課題はあるにせよ、ソフト対応はかなり良かったのではないのでしょうか。人的被害が500人を上回るという推定値はありますが、今回の地震と津波の規模からすれば最小限だったのではないかと思います。

小原▽いろいろなトレーニングや事前に訓練していた地元の方たちはうまく逃げられた方が多かった反面、これはスマトラのときも同じような話だったかもしれないですが、観光客や外から入ってこられた方が被害に遭う危険性が高かったのではと思います。情報伝達と言いますか日本という避難指示、避難勧告を観光客などにどうやって伝えるかは難しい気がしますがどう思われますか。

今村▽一つは情報伝達ですが、これに関しては必ずしも十分に機能しなかった。もう一つは沿岸部の一部には、日本と同じ津波避難の波のマークがあります。外来者に対して意識していて、「津波が来たら避難してください」というものは置いてありますが、具体的に「どこに」ということが地元の人以外にはあまり判らない。

今回の地震でも大きな地震動があったので、人々はたぶん津波の危険性も感じたと思いますが、そのあとの行動として、現地で聞いた話では、沿岸部へ見に行ってしまうって流された方もおられました。一方、高台に避難したけれども1〜2時間後に戻ってしまった被災した人もあったようです。最終的に、きちんと十分に対応するのは難しかったかなという感じです。

津波予報の精度について

小原▽その部分は日本にも通じる気がしますが、チリに大きな地震が起きて、ほぼ一昼夜かけて津波が日本に襲来してくる、という

情報は伝わっていたわけなのですが、日本国内でも避難の問題、予報の問題、いろいろな課題が浮き彫りになった気がします。

一番話題になったのは津波の注意報や警報が出てから実際に起きた時間、津波の高さです。現状の精度では仕方がないという観点もありますし、もう少し精度が良くなるのかといった意見もありました。今村先生のご専門のシミュレーションがベースになっていると思いますが、今回の注意報、警報、予測精度についてはどうお考えですか。

今村▽地震が発生した当時から我々も氣象庁と平行に独自に解析させていただいて、最終的にはほぼ同じ結果を得ました。到達時間は若干、早い感じ。南半球のときは米国のダートシステム(DART)という沖合ブイのデータがありますが、通った時間も波形も、それとほぼ一致しています。しかし、北半球でハワイを越えたあたりから、数値計算のほう若干早く、波形も少しずれてきました。

一方、日本沿岸での津波の推定値を見ると、予測値ではだいたい2mを超えて3m近い値が出ていました。実際にどうだったかというところ、低いところから高いところまでの全振幅は3mクラスが来ていました。我々のシミュレーションとほぼ同じでした。

しかし、氣象庁が定義している津波の高さは海面から上昇側の値なので、それはさすがに3mを超えることはありませんでした。2m弱くらいです。きちんとした定義の下でいえば、やはり過大評価のようです。

なお、津波のエネルギーは全振幅で決まりますが、それはだいたい合っていたといえます。

小原▽いまのお話の中で、高さ到達時刻の予測と実際の差は分析されていますか。

今村▽原因として一つは水深データ、もう一つは、津波は普通、長波なので長波近似ができて、波形がずれることで到達時間も変わります。水深データが正しいかはまだ検討しなければいけません。初期変位自体が徐々にずれてきたことがGPS波浪計にしっかりと記録されています。それとシミュレーションを比べると、若干早い。

菅野▽地球の裏側のチリ沿岸での断層からの津波の伝搬を計算して誤差が蓄積してくるので、技術者の立場から言うと、かなりいい精度ではないでしょうか。



今村▽誤差でいうと5%程度です。

機能を十分に発揮した 湾口防波堤

小原▽一昼夜かかつてきたものの累積誤差が5%というところ、工学的にいうと許される範囲かなという感じがします。ただ、工学的な分野とは別に行政的、社会的な問題がありますから、非常に悩ましいところかと思えます。どうしても情報を安全側に出さざるをえないところは、純粹な学問的な部分と少し違うのかな、という感じがします。

津波の高さや時間の問題以外に、何かお感じになったところがありますか。

今村▽流れの問題があると思います。50年前のチリ地震津波もまったく同じでしたが、津波の周期が長いので、波、水位変化というよりも流れが強い。今回、養殖とか東北を中心に水産被害がありました。そのことはまさに今回の特徴です。

津波は、普通の波浪においては波が行かないところもどんどん入ってしまいます。静穏な海域でも、津波の場合は逆に流れが強くなる。養殖関係の設備はそういうところに置いてるので被害に遭ってしまった。単純に「係留を強くすればいい」とは言えなくて、もう少し波長の長い大きな津波が来れば物理的に対応するのはなかなか難しい。いろいろな対策をしなければいけないと思います。

小原▽東北地方を中心に、港湾行政として大船渡港、釜石港でも湾口防波堤を整備し

てきましたが、今回幾つかの機関がその効果を検証しています。大船渡と釜石では、湾の形との関係で、シミュレーションした結果、相当程度高さや流れを抑えることが出来たようですが、そこまで行っていない部分もある。湾の特性、あるいは津波の工学的な特性との関係で変わりうるものと考えてよろしいですか。

今村▽はい。基本的に湾口防波堤は津波の中でもある周期にターゲットを置いていて、その周期成分が共振しないように構造設計してあります。チリの場合は1時間前後の周期があるので、それに対して津波の増幅を抑えることが主目的です。これに関しては、おそらくきちんと役割を果たしたと思います。

GPS波浪計が 津波情報を確実に補足

小原▽先ほど先生からお話がありました。いまGPS波浪計がかなりの分布で設置されています。気象庁もこのデータをお使いになって、システムに組み込んでいます。今回、非常に注目しているのは、先ほどのシミュレーションと観測データとの差も勿論あります。GPS波浪計で観測されてから沿岸部にどのくらいで到達したか。だいたい10〜15分のタイムラグがあります。私自身、これが非常に重要なポイントではないかと思っています。

私どもでは、特に地域の防災担当者の

方々にGPS波浪計も含めて、どういうふうに情報を伝達していったらいいかという作業をさせていただいています。今回、そのデータが取れたことは大変大きいと思います。これについては、いかがお考えでしょう。

今村▽私もその取り組みに協力させていただいているのですが、今回、きちんと津波そのもののデータが取れたことは大きいです。2月に起きて、3月に地元の協議会で報告させていただきましたが、メディアにも関心を持つていただきました。実態として本当に取れるかどうか、少し不安でしたが、期待していた精度で観測できている。これは非常に大きなことだと思います。

『GPS波浪計情報を どう活用するかが大事』 (小原理事長)

小原▽工学的な意味での精度向上もそうですが、一方で、実際にこれをどういう形で使っていけるか。データそのものと、取れた結果を防災担当者、地域の方々はどういうふうに伝えていくかということが大事になってくると思います。

今村▽工学的に情報を提供する側はGPS波浪計を使ったり、数値シミュレーションを使ったり、かなり精度は高くなっています。一方、高い精度の情報を住民にどう伝えるのか。高い精度の結果は、数値やグラフで表現されることが多く、これは一般的にはわかりにくい部分があります。現状では予測値、科学的な情報がそのままリスク情報、減災情報になっているわけはありません。

私が住民の一人だとすると、知りたいのはいまいる場所で「いつ、どこが危ない、どうしろ」という三つくらいを言っていただければありがたい。残念ながら、きめ細かい情報なのでそこまでいいない。そのギャップをどう埋めるの

GPS波浪計

カーナビにも用いられているGPSを利用し、大水深域での波浪・津波観測を可能とする観測システム。沖合10数〜20km程度、水深100〜700m程度の場所に設置したブイで観測するため、海岸に到達する十数分前に津波の襲来を知ることができる。





かが問題ですね。どういう情報を短い時間
にどのような出すかが大きな課題だと思
います。

小原▽これからはおそらく工学的なア
プローチと行政的といいますか、地域の方々が
どういった情報に対してどういう印象を持
たれるのが重要になると思います。いまま
ではなかったGPS波浪計でとりあえず「来
てるぞ」と、いうことが判るようになったわ
けですから。

今村▽確定で非常に信頼性の高いGPS波
浪計のような観測情報が、津波の到達前に
ある。これは大変重要です。

実はもう一つ意味がありまして、気象庁
の情報は地震データに基づいた予測値です。
もう一方で観測情報があると、一般の方に
とっては二重の情報になることになりまし
ます。通常、防災はワンボイスが良いと言われま
すが、行動を取るためには自分で納得しな
いと行動できませんので、信頼の高い追加情
報は不可欠です。

気象庁の情報の他に、少しでも付加的な

さらに信頼度
の高い情報が
あれば、より
適切な行動に
結びつきやす
い。

小原▽時間が
ない中で地域
の方に情報を
伝達し、「避

難してください」と呼びかけるのは最終的に
は市町村の方です。そういう方々に情報の
位置づけを十分に理解していただくと同
時に、どういう伝え方をすることが重要にな
ると思いますね。

実際に来たぞという情報を追いかけて伝
達し、さらにそれをどういうふう伝える
か。防災担当者が悩む部分もあるかもしれ
ません。その方たちが悩めば地域の方はも
と悩むというか、信頼できるものなのかど
うかということになってくる気がします。

GPS波浪計は工学的にはいい情報な
だけに、これを用いてワンボイス・プラスαの
部分をどういうふう伝えていくのか、今後
の大きなポイントになるのではないと思
います。

今村▽GPS波浪計を検討する中で、ま
さにそれが今後の大きな目標です。昨年から
ですがスキルアップ講習会ということで、行
政担当者の方にシミュレーション結果を見
ていただき、地域に、どのタイミングで何を出
せばいいのか、ということについて学習して
いただいているのですが、そういう場がない
と頭の中の理解だけでは難しい。

小原▽頭の中だけでは咄嗟の場合には出
きません。時間を追って、ここにこういう情
報が入ってきたときにどういうアクションを取
るかということは非常に大きな意味を持つ
ている。シンプルなかたちで伝えて、さらにそ
れを地域の方々に伝える。難しいのは、避難
しても来なかったじゃないか。来ないだろう
と思っただけで第2波、第3波で被害を受

けたということ、こういうことは往々にし
て起こります。

地域レベルでも BCPの導入を

菅野▽今回のチリ調査では、製鉄所にお
邪魔してヒアリングしました。製鉄所は事業
継続計画(BCP)をやっていて、津波だ
けではなくいろいろな災害、事故に備えてマ
ニュアルとか訓練もかなりされています。製
鉄所の中に限るとすごくシステムティックな
避難・復旧プランができています。これは
会社の経営にかかわることです。きちん
とやられていると思いますが、市民生活や
社会生活の中でもこうした意識が生まれ
れば素晴らしいものができるのではないと思
います。我々もそうですが、自分の財産が
どうなるか、生活がどうなるのかというこ
とと災害を結びつけられれば、自分を守る
ためにはこうしなければいけないと自律的
に動けるので

はないかと感
じました。

小原▽そう
いう意味で
は、日本でも
BCPは企業
レベル、役所レ
ベルではそれな
りに何となく
マニュアルに近

いものが出ていますが、地域レベルはあ
りないかもしれませんね。

今村▽この間、仙台市域を中心に「BCP
という言葉を知っていますか」ということを
中小企業にアンケートをしたら、実施
しておられたのは1/2割でした。

小原▽私はもつと少ないかと思ってい
ました(笑)。それは東北地域特有の意識の高さ
かもしれません。

今村▽また、「中身を知っている」は数字
は下がります。まだまだPR不足かなと
思ったのですが、何故か敷居が高いというイ
メージがあるようです。すごい計画を立て
て、これは大事だぞという方が多い。

小原▽最初はシンプルに考えておかないと。
最初から立派なものをつくっても、計画は
できたけれど実際にそれに沿って動けるかと





うかはまったく別ものの気がします。つくるだけでも大変だし、それを運用するのはもっと大変な気がします。

今村▽そうで

すね。いきなり詳細で細かくやってもその通りにはなかなか実行できない。

小原▽一足飛びに100%のものとはとても無理だと思えますから、順次、レベルアップをする。企業はビジネスモデルの中でできると思います。地域レベルの取り組みでは地域的な偏在もありますので、あまり意味をなさなくなる気がします。そういうものに対しての地域行政の役割も大きいのかなという印象があります。

今村▽地域におけるもう一つの大きな柱はリーダーの存在です。率先して声をかける、今回の避難のような時に、例えば率先して移動させる。引つ張っていくリーダーがいるかないかで安全へのポテンシャルはだいぶ違ってきます。

小原▽地震のときも津波のときも、ある種の危機管理だと思います。みんなのレベルが様に高ければいいですが、必ずしもそうではありません。情報の二元管理的なものもそうですし、精神的に不安定なときにリーダーの行動、発言はすごく大事な気がしま

す。

今村▽そうですね。菅野さんからチリの調査でのBCPの先端的な状況を紹介していただきましたが、私の現地調査でも、ある地域は観光客も含めていったん逃げました。そのあと第1波が来て、平穩になって、彼らの一部は津波解除を受けて戻ってしまつた。

ただ、地元の一人、たぶんリーダー的存在だと思えますが、彼は50年前のチリ地震津波を知っていて止めたそうです。そのときのキーワードが「万が一ということもあるから、もう少ししよう」。その一言で、地域の方々はどうししばらく高台にいた。本当にその1時間後、2時間後に最大波が来ました。タルカワノで聞いた話ですが、いまの話とつながります。万が一可能性があるときは、一歩安全側にとというのは基本かもしれません。

小原▽いまのお話は日本でも当然起こりうる気がします。あらゆる情報を使ってそういうことが大事だということを伝えていくことが重要だと思います。

『ある程度ハードで守ることが必要』

(菅野特別研究室)

小原▽今回の地震はあまり大きくなかつたとは言いながらも、日本の沿岸部は脆弱な地盤が多いですから、日本の方がはるかに危険性が高いわけです。チリからの教訓だけではなく、日本のハード的なもの、ソフト的

なものも含めてこれから考えなければならぬこと、もう一段ステップアップしようとか、こういう分野で何か考えていこうということはおありですか。

菅野▽チリの人口はそのほとんどがサンチャゴに集中していて、沿岸部に住んでいる方はあまり多くありません。翻って日本を見ると、沿岸部の比較的フラットなところに人口が集中しています。また主要なインフラも沿岸部に集まっています。脆弱地盤でしかも低地という悪条件の所にそういったものが密集している。チリではあの程度で済みましたが、日本ではかなり厳しい状況になるのではないかと、非常に怖いと考えています。

命を守るだけなら逃げればよいですが、日本の経済活動がほとんど沿岸部で成り立っていることを考えると、ある程度、ハードで守ることが必要です。ただ、お金がたくさんあるわけではないので限度はあるでしょうが、それとソフトのうまい組み合わせをすることが大事だと思います。

28mの津波から守る壁をつくるわけにはいかない。そういう意味でのソフトとハードが大事になります。これまで学問的には、地震動や地震で物が壊れる研究をしている人と津波の研究をしている人は近いようであり連携していませんでした。

私もスマートフォンで異なった分野の研究者と一緒に調査活動した経験から、津波の方と一緒に勉強するようになりました。ハードとソフトの両面検討に加えて、地震と津波の異なった専門家の連携が重要だと認識してい

ます。複合災害を含めて、私はやはり一定のハード面での備えは整える必要があると思います。

小原▽今村先生は、今回のチリ地震で何か気付かれたことはございますか。

『コンテナ等漂流物対策が重要』

(今村教授)

今村▽ハードの面は、菅野さんが仰つたとおり完璧な整備は無理ですが、最低限のハードは絶対に必要です。今回、チリ津波の調査をさせていただいて、堤防のあるなしによつて一方は100%守られましたが片方は全部破壊です。

もう一つは港湾での漂流物です。タルカワノ港のコンテナはほとんど動いてしまつて内陸や沖合に流れて行つた。そういう漂流物の抑止もハードの一部だと思います。莫大な予算ではないと思うので、2次的な災害、複合災害の一種だと思いますが、絶対抑止しなければいけないと思います。

小原▽漂流物対策については 手前味噌で





すが、当センターがこれまで行ってきた漂流物対策についての取り組みが少しずつご理解をいただくようになってきました。あまりがっちりした防衛施設ではなく、少しやわらかめの物、ロープみたいなものでとりあえず守る。流木やコンテナ、小さな船くらいなら押さえられると思いますが、最近そういう発想が少しずつ出てきて、いろいろな所で実現が図られつつあります。私も多少し関与していますから、漂流物対策のイメージが出てきたことは非常にいいことだと思います。

今村▽漂流物対策は、直接被害とともに復旧復興のためにも、その時間的なロスをだいぶ低減できるのではないかと思います。

『津波は怖い！』がチリで好評、今後出版協力

小原▽実は当センターも今回のチリ地震津波の調査に参加させて頂きました。工学的な部分は港空研の皆さんが担当し、我々は津波の本のスペイン語の簡易版を、大急ぎでつくって持っていました。現地ではこれが非常に喜ばれました。津波の本も、現地の大学とスペイン語版をつくらせて普及させようという合意がすぐできました。スペイン語バージョンにする一方、チリのローカルな話も入れるというアイデアもあるようです。一番ホットな話題です。出来上がりますと『TSUNAMI』本は日本語、英語、インドネシア語、韓国語に加えて5カ国語に

なります。

菅野▽今回の非常に早い対応というか、スペイン語に直して持つていった本は素晴らしいと思います。内容的に津波に関する世界最先端の知見を母国語で容易に読めるということ、現地での反応はすばらしいものでした。

小原▽余談ですが、チリの方も対日感情がすごくいい。両国の親善というだけではなく、我々も地震や津波についてはいろいろと経験しています。協力できることがあれば学問的にも協力していきたいと考えています。当センターは、比較的そういう意味での機動的対応が取りやすいということもあります。

「アジア・太平洋沿岸防災研究センター」発足、「大規模地震津波実験施設」完成

菅野▽港空研の宣伝をさせて頂いたと4月1日、それまでの津波防災研究センターをレベルアップして、「アジア・太平洋沿岸防災研究センター」にしました。アジア・太平洋を対象に、地震と津波の両方を扱う総合的なセンターを立ち上げたのです。新しい組織ですが、この分野で世界をリードする研究結果を出せるものと期待しています。

もう一つは世界初の「大規模地震津波実験施設」が、この3月港空研にできあがりしました。スマトラの地震の際、津波のご専

門の方と一緒に研究、調査していたときに、「地震と津波はどうしても切り離せない。両方をちゃんと一緒に検討すべきだ」ということが念頭にありました。甚大な被害を目の当たりにして、何とかしなければとの思いでこの新しい装置を考案し、使い方を猛特訓しているところです。50Gの遠心加速度場に造波装置・水路・振動台が設置されているため、実物大の規模としては造波装置から振動台まで500mの水路を想像していただければと思います。これを使って今回のチリの被災あるいは過去の被災なども実証し、これからハードとソフトと併せて対策をしていくものの検証にも使っていきたいと考えています。あと半年後には稼働できると思っています。この装置は国際的にも注目されています。今村先生とも協力しながら、うまい使い方をして皆さんのお役に立ちたいと考えています。

今村▽防災技術、科学技術の面で日本は最



大規模地震津波実験施設

先端を維持すべきだと思います。それが実際の防災に役立つ。実態を知ることが大事ですので、港空研での新しい施設には大変期待しています。その成果を国内外で一緒に

使つて社会に役立てることが重要だと思います。

小原▽港空研の波動水路の映像はたびたび映像でも紹介されていますが、大変インパクトがあります。今回の施設も本当に役立つものを創り出すための施設だと思います。いろいろなアピールもし、かつそれによって得られた結果が世に出ていければいいと思います。

また、各種の研究も大事ですが、その内容や成果を知っていただくことがこの分野は特に大事なのではないのかと思います。当センターでも本日の鼎談を初め、いろいろな形で沿岸防災に関わる情報発信を継続的に進めていきたいと思います。本日はお忙しいところ、ありがとうございます。



はじめに

2010年2月27日に発生したチリ地震・津波災害について、チリ国において港湾と海岸の被害を中心にした合同調査を行った。合同調査には、独立行政法人港湾空港技術研究所、財団法人沿岸技術研究センターおよび名古屋大学の9名が参加している。本報告はその調査結果の概要を報告するものである。

チリ共和国と地震津波

チリ(チリ共和国)は、日本から見ると地球の反対側の南半球にある国で、南北に4000km以上、東西に200km以下の細長い国である。面積は日本の2倍であるが人口は1640万人と少なく、そのうち600万人が首都のサンチャゴに集中している。サンチャゴは、南緯33度で福岡市と同じ緯度であり、チリ中部は地中海性気候に属し、乾燥した夏(12月~2月)と雨の多い冬(6月~8月)が特徴である。

日本と同様にプレート境界(ナスカプレートと南アメリカプレートの境界)である海溝(ペルー・チリ海溝)に沿った国であり、地震や津波が多い。過去200年間に、マグニチュード7.0以上の地震は71回発生しており、このうち13回の地震では、津波が発生して50名以上の死者を生じた。今回の地震の震源の近くにおいても、1835年、1928年、1939年と3回の大きな地震・津波が発生している。

1960年には今回の震源より南のバルデビア沖を震源とするマグニチュード9.5の巨大地震が発生し、甚大な被害

特集

チリ地震 Part1



チリ地震・津波による港湾・海岸の被害に関する合同調査団報告

高橋重雄・菅野高弘・富田孝史・有川太郎・辰巳大介・加島寛章 (独) 港湾空港技術研究所
村田進・松岡義博 (財) 沿岸技術研究センター 中村友昭 名古屋大学 高等研究院

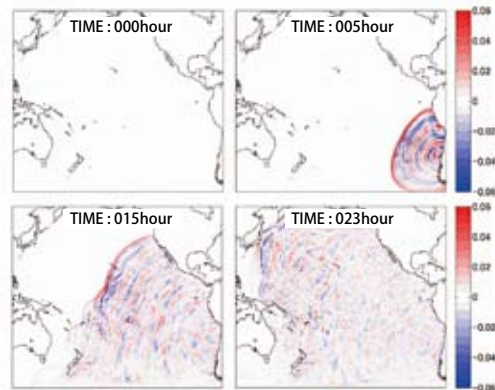
今回のチリ地震には当センターとともに(独) 港湾空港研究所と名古屋大学が現地直接进入して、合同調査に及んだ。ここではその報告をお伝える。

を受けている。このときの津波は、チリ沿岸はもちろん、米国や日本にも大きな被害をもたらした。遠地津波に対する警報システムの整備のきっかけとなっている。なお、1835年の地震は、ほぼ同じ場所を震源としている。『種の起源』を書いたチャールズ・ダーウィンが当時この地域を調査しており、『ヒューグル号航海記』にもコンセプションの地震・津波の被災状況が書かれている^{*1}。

2010チリ地震・津波の発生

2010年2月27日15時34分(現地では夜中の3時34分)チリ中部の太平洋沿岸でMw8.8(モーメントマグニチュード)の地震が発生した。震源の位置は、チリの首都サンチャゴの南西335km、コンセプションの北東105kmで、震源の深さは35kmであった。チリ中部沿岸部では、日本の震度で5強程度の強い揺れがあり、道路や建物などに被害が出ている。地震・津波発生当日の2月27日は、未明から午前中まで晴天だったようである。また、月が満ちており比較的明るかった。

地震の発生後、15時46分にはPTWC(太平洋津波警報センター)からチリおよびペルーに津波注意報が発令され、16時には気象庁が遠地津波に関する情報1号を発令している。チリ中部沿岸における潮位は、地震発生時の近くの4時頃に干潮(平均水面から約マイナス50cm)となり、10時頃に満潮(約プラス50cm)であった。図1は、この津波の発生・伝播を計算したものであり、17000kmをほぼ1日で日本沿岸に到達している。津波は、コンセ



0.15.23時間後の水位分布(m)断層パラメータは山中先生(名大)による

図1 津波の伝播計算結果

プシオンを中心にチリ中部に大きな被害をもたらすだけでなく、日本を含む太平洋沿岸に被害をもたらしている。この地震によって500名程度の死者が出ており、その多くが津波による死者といわれている。

調査までの経緯

地震の発生直後から、日本国内の多くの機関で日本へ来襲する津波への対応が行われており、港湾空港技術研究所でも情報収集と国土交通省の地方整備局との情報交換などを行っている。3月6日から8日には、地方整備局とともに日本国内の津波被害の調査も実施した。例えば、東北地方整備局と行った調査では、宮古湾で2mを越す津波の痕跡高さを確認している。

チリにおける地震・津波の調査は、チリだけでなく、欧米などの多くの機関が地震直後から迅速に実施している。港湾空港技術研究所でも地震直後から国土交通省と連絡をとり、チリの情報を集めて調査の準備

参考文献

*1 Darwin, Charles (1839), Narrative of the surveying voyages of His Majesty's Ships Adventure and Beagle between the years 1826 and 1836, describing their examination of the southern shores of South America, and the Beagle's circumnavigation of the globe. Journal and remarks. 1832-1836.

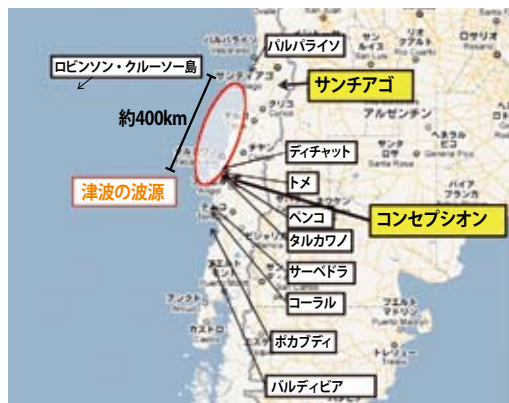


図2 チリ中部の地図

を進めていた。そうしたなかで日本の土木学会・建築学会・地震工学会・地盤工学会が3月末から現地調査を行うこととなり、慶応大学の北川教授、東北大学の今村教授等のご助力を得て、その調査に菅野特別研究官と有川主任研究官が参加することができた。この貴重な調査結果を踏まえて、さらに港湾・海岸の被害の調査を行うために、合同調査団を組織した。なお1960年のチリ地震津波のあとには、東京大学名誉教授の堀川先生が、現地を調査しており、今回もいろいろご指導を賜っている。

調査までの経緯

合同調査は、4月22日から5月2日に実施した。合同調査には、独立行政法人港湾空港技術研究所、財団法人沿岸技術研究センターおよび名古屋大学の9名が参加している。調査の主要な目的は以下の二つである。

1) 被害の実態を明らかにして将来の被害

予測技術の向上に資すること
2) チリと日本の津波減災技術の交流を推進すること

また、以下に調査行程を示す。調査は基本的に2つのグループに分けて実施しており、ロビンソン・クルーソー島を含むバルパライソからバルディビアまでのチリ中部全体における津波被害の概要調査と、コンセプションの近く、特にタルカワノ港周辺における詳細調査の二つからなる。図2に、チリ中部の地図を示す。コンセプションは、サンチャゴから南へ340kmほどに位置し、ロビンソン・クルーソー島は、サンチャゴ近くのバルパライソから670km西にある。バルディビアはサンチャゴから南750kmに位置し、1960年のチリ地震津波の震源に近いところである。

4月23日：国際協力機構（JICA）、日本大使館および公共事業省を訪問
24日～28日：コンセプション地方

（ディチャット、トメ、ペンコ、タルカワノ港およびウアチパト製鉄会社など）、ロビンソン・クルーソー島およびバルディビア地方を調査
28日午後：コンセプション大学でワークショップを実施
29日：バルパライソ大学等を訪問
30日：JICAおよび日本大使館を訪問

本調査は、国土交通省の支援のもとで行われたが、サンチャゴの日本大使館と国際協力機構の地球環境部とチリ支所などからも多大なご協力を賜っている。サンチャゴについた当日および最終日に訪問して、報告などを行っている。

写真1は、タルカワノ港での集合写真で



写真1 タルカワノ港での集合写真

に各調査地点では、チリ共和国の公共事業省や海軍などの政府機関や州などの自治体、民間会社などの多大なご協力をえており、比較的短期間ではあったが密度の濃い調査ができた。

各調査地点の状況 —タルカワノの被害—

コンセプション市は、チリの第2の都市といわれ、ビオビオ州の州都であり、コンセプション県に属している。1751年の地震・津波で現在のペンコにあった都市が内陸に移動したものとされている。タルカワノは、コンセプション県の一つの市であり、25万人が住む港湾都市であり、今回は入ることができなかったが海軍の港もある。図3に示すように、タルカワノは、北向きにコンセプション湾がありタルカワノ港が位置し、南側にはサンピセンテ湾があり、チリ唯一の一貫製鉄所のウチパト製鉄所がある。ディチャット、ペンコ、トメはコンセプション湾の東岸に位置している。



図3 コンセプション湾



写真2 タルカワノ港の被害

写真2はタルカワノ港の南の地区の被災直後の写真である。約680個のコンセプナーが第一波で陸側に流失し、引き波でその3割が海側に漂



写真3 タルカワノ港の船舶

流していった。一部は家屋などに衝突して二次災害を発生させている。この港では船舶の転覆や打ち上げも多く発生していた（写真3、4月27日撮影）。コンセプナーなど漂流物は、日本でも大きな問題となっており、さらに解析を進める予定である。なお、港や臨港地区の工場の早期復旧はこの地区の経済の復旧・復興にとって重要であることは言うまでもないが、なかなか進んでいないようである。

近くの海岸にあるウチパト製鉄所は、地盤高が5m以上のところにあり、津波被害は発生しなかった。この海岸は西側に面した海岸にあつて波も比較的高いため、護岸等も比較的高くなつていたことも津波被害がなかった一因であろう。一方、地震被害は甚大であった。詳細は調査結果のまとめ「地震による被害」で記載する。このような被害により、被災後2ヶ月後の4月27日に部分復旧した。

参考文献

※2 川島一彦・今村文彦(2010)：2010年チリ地震被害調査報告、土木学会誌、Vol.95, No.5, pp.30-33.

※3 堀川清司(1961)：チリ国その他における津波調査の概要、海岸、第28号, pp.1-5.

各調査地点の状況 —ディチャットの被害—



写真4 デイチャットへの津波の侵入

ディチャットは、その北北西に位置する湾口から沖合が見通せる海岸に沿って発展した避暑地である。このため、湾口から侵入した津波は直接的にディチャットに到達し、8〜9mの浸水深（津波来襲時の推定海面水位を基準とした浸水の高さ）を発生させた。写真4は、ディチャットに流れ込む津波である。町の中心部を横断するように流れる小河川の周囲は低平地になっており、この低平地に津波は流れ込んだと思われる。浸水深は海岸から約500m内陸に入った地点でも海岸付近と同様な高さであったので、この低平地では4mの浸水深になる場所もあり、そこではほとんどの建物は全壊であった。一方、海岸から約150mしか離れていないところであったも地盤が高いために浸水深が1m程度となった場所では建物に構造的に大きな被害は発生していなかった。

津波の第1波は地震から40〜50分で到達したようである。月明かりのなか白くなった丘陵地から見たそうである。最大の津波は第4波目で7時半頃に襲った。ディチャットは、1960年のチリ地震津波にも襲われた町である。このため、その時の被災を記憶している人も多く、そのため大地震のあとに直ぐ丘陵地に逃げた人が多い。しかし、当日は休暇シーズンの終

わりの土曜日であったことから観光客が多かった。そのような外来者に避難しない人やどこに避難したら良いのか分からない人が多かった。また、住民、観光客ともに車で逃げた人が少なからずおり道路渋滞を引き起こした。渋滞を避けようとした外来者の車は避難路が分からなくなり右往左往することにいったようである。車に乗ったまま津波にさらわれる人も目撃されている。いったん丘陵地に逃げた人のなかにも政府による津波警報の解除を知り、丘陵地を降りた人がいた。そのような人たちもその後襲った津波の犠牲になっている。その結果、政府発表によるとディチャットでは18人が犠牲になった。

各調査地点の状況 —ペンコの被害—

ペンコは、コンセプション湾岸にあり、東側に位置する。ここでは、朝5時頃に津波が護岸にぶつかる大きな音を聞いたという証言があった。しかし、それは護岸を越えなかったが、7時30分に最大波が来襲し、そのときには護岸を越え、ペンコの町中まで浸水した。浸水域の1側線を図4に示す。これを見るとわかる通り、護岸を越えると越えた高さと同じ高さで町中に浸水する。また、護岸よりも地盤は低いことが多いため、越えた津波は勢いよく流れてくることがなる。

浸水深は2・6m程度であったため、護岸背後の建物における被害はあったものの、それよりも奥の被害は、浸水被害であった。しかし、道路の中に対して、小舟が流れてきたり、車が水没して使用不可

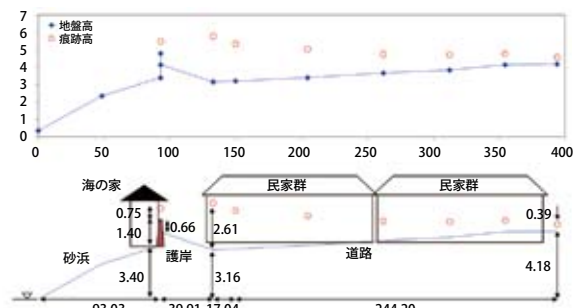


図4 ペンコの浸水深と地盤高

となったりしていた。

各調査地点の状況 —ロビンソン・クルーソー島の被害—

ロビンソン・クルーソー島はサンフェルナンド諸島にある火山島で、切り立った岩で囲まれており、住める所は、東に向いた小さな湾をもつサン・ファン・パウティス々だけであり、ここに600名ほどが住んでいる。

ロビンソン・クルーソー島では、証言によると津波は3度来襲したと言われている。1波目、2波目の津波高は大きくなかったが、3波目の津波高は10mを超え、大きな被害をもたらした。第3波目の来襲時刻は朝4:20頃（現地時刻）であり、1波目、2波目はその20分から10分前に来襲した。

測定した範囲における最大浸水深は7・



写真5 津波被災前と被災後の写真



写真6 瓦礫で埋め尽くされている海岸

6m、津波高（遡上高）としては、16・4mであった。写真5は、津波前と津波後の比較を行ったものである。写真で見てもわかるように海岸線から200m程度のところまでは、緩やかな登り勾配で、それより奥は、急な山の斜面へと続く。大きな建物を含めて平地にあった建物はほぼ全壊であった。栈橋は、大きな損傷はなすぐに使用可能となっていた。これは、津波がゆっくりと潮汐のようにあがったということが影響していると考えられる。写真6は、津波被災直後の様子である。木造の建物がほとんどであるため、多くの瓦礫で埋め尽くされていることがわかる。

調査結果のまとめ —地震による被害—

(1)地震動

今回の地震は、太平洋側のナスカプレートが大陸側の南アメリカプレートの下に沈み込んでいるプレート境界で発生したものであり、米国地質調査所の解析によるとMw8・8であった。チリ国内での全般的な地



写真8 タルカワノ港
ブロック積護岸の被災状況



写真9 タルカワノ港
矢板岸壁の被災状況



写真7 タルカワノ港
重力式岸壁の被災状況

震記録の特徴として、継続時間が60秒以上と長い、地震動の卓越周期は0・5秒以下のものが多く、比較的固い地盤であることが考えられる。このため、社会基盤施設の地震動による被災は比較的軽微であったものと思われる。ただし、旧河道や湖沼を砂で埋め立てた地盤など局所的に地震動が増幅されたために被災した施設も見られた。

(2) 港湾施設の被害

港湾においては、埋立地盤により形成されている重力式・矢板式の岸壁に被災が見られた。写真7の重力式岸壁は海側へ50cm程度移動し、背後工プロンが1m程度沈下しており、津波や潮位変動による裏埋土の吸出が発生している。但し、比較的耐震性の低いブロック積の護岸(写真8)にも大きな変状は無いことから、作用した地震動が大きいのとは考え難く、埋立柱材が粗粒土であるため液化化による大規模な崩壊も生じていない。写真9の矢板式岸壁の崩壊原因としては、老朽化の影響が大きいものと思われる。

当該栈橋は、地震動により被災しているが、その後に来襲した津波高が低く、かつ段波状に作用しなかったものと想定されることから、地震動と津波作用後の被災程度

一方、縦横橋式の岸壁(写真10①)は、護岸や汀線付近の地盤の海側への移動に伴う軽微な被災(写真10②)および斜杭の杭頭部(写真10③)に損傷が生じたが、修復作業が実施されつつあった。当該栈橋には荷役機械(アンローダー)が載っており、写真10④に示すように地震動により脱輪し、アンカーが床版を貫通していた。平成7年兵庫県南部地震において神戸港でガントリークレーンに大きな被災が発生しており、地震時に脚が浮上し脱輪した衝突痕がケーソン天端に確認されたが、幸い貫通した事例は無かった。当該栈橋の床版と神戸港のケーソン蓋コンクリートの差異に起因しているものと考えられる。港湾荷役機械については、免震や制震技術の導入により地震時の脚の浮上や脱輪を防止することが可能と考えられる。

巨大地震が発生した場合、伝播速度が早い(3000~6000m/s程度)地震動が施設に作用し、その後津波が来襲するため、地震動と津波の複合的な作用を検討する必要があり。今回の被災調査では、津波の作用が大きかったことから、明確に地震動と津波の複合作用に起因する被災状況を把握することは困難であった。しかし、サンアントニオ港における道路盛土の有無で、住宅地に無被災と全壊という事例からも、津波防護施設の地震時の健全性が被災程度に与える影響は少なくないものと考えられる。今後、被災調査結果を基に、模型実験・数値シミュレーションによる分析を実施していく必要があるものと考えられる。

(3) 港湾施設の運営と耐震設計

チリ共和国では、1980年代初頭から政府の民営化政策の実施により、主要道路、空港、港湾施設については、コンセッション方式による民営化が推進されている。同様に電力、通信、金融、製鉄、製糖、空輸、海運等についても民営化が終了している。港湾施設は、主にヨーロッパ資本のコンセッション構成企業による施設整備・運用がなされている。十分な資金調達に困難な国の経済状況において、コンセッション方式、すなわち、民間企業が港湾施設整備に投資を行い、建設した施設を一定期間運営する権利を公的部門から入手する契約方式の導入により近代的な港湾施設の建設、港湾オペレーションの民営化、貿易や港湾管理運営のIT化等が迅速に実施さ



写真10 製鉄会社専用縦横橋の被害状況

は、修復が可能なレベルにあったものと考えられる。

今回の調査で実施した公共事業省へのヒヤリングの結果、チリ共和国の港湾施設整備に関する国や公的機関の「設計基準」が存在しないことが確認され、コンセッション構成企業の判断により設計・施工されており、主に、コンセッション構成企業の母国の基準類を準用することが多いとのことである。地震・津波の多発地帯に位置するチリ共和国ではあるが、コンセッション構成企業の多くがヨーロッパ圏の企業であることから、耐震設計について、技術水準が必要十分であるか検証が必要であろう。港湾施設の耐震設計については、建築分野の「設計震度」を考慮しているとのことである。

(4) 復旧活動と港湾

日本においては、巨大災害時に港湾に期待される機能として、陸上交通の代替手段として緊急・救援物資輸送および重機や建設資材による内陸部被災地の復旧拠点が挙げられ、地域防災計画等で明確な位置付けがなされている。一方、今回の地震・津波において比較的軽微な被害施設であった港湾やコンセッション構成企業による迅速な復旧により機能を回復した港湾施設が、緊

求められる事項として、経済性のみではなく、安全性確保も重要であるが、コンセッション構成企業(多くは多国籍企業)による施設の建設・運営が進められるため、「利益の追求」が最優先されることになりがちである。どの様な施設整備・運営形態であるとしても、施設周辺の自然・経済および社会環境に適した港湾施設設計・施工および運営が求められるべきと考えられる。

今回の調査で実施した公共事業省へのヒヤリングの結果、チリ共和国の港湾施設整備に関する国や公的機関の「設計基準」が存在しないことが確認され、コンセッション構成企業の判断により設計・施工されており、主に、コンセッション構成企業の母国の基準類を準用することが多いとのことである。地震・津波の多発地帯に位置するチリ共和国ではあるが、コンセッション構成企業の多くがヨーロッパ圏の企業であることから、耐震設計について、技術水準が必要十分であるか検証が必要であろう。港湾施設の耐震設計については、建築分野の「設計震度」を考慮しているとのことである。

求められる事項として、経済性のみではなく、安全性確保も重要であるが、コンセッション構成企業(多くは多国籍企業)による施設の建設・運営が進められるため、「利益の追求」が最優先されることになりがちである。どの様な施設整備・運営形態であるとしても、施設周辺の自然・経済および社会環境に適した港湾施設設計・施工および運営が求められるべきと考えられる。

今回の調査で実施した公共事業省へのヒヤリングの結果、チリ共和国の港湾施設整備に関する国や公的機関の「設計基準」が存在しないことが確認され、コンセッション構成企業の判断により設計・施工されており、主に、コンセッション構成企業の母国の基準類を準用することが多いとのことである。地震・津波の多発地帯に位置するチリ共和国ではあるが、コンセッション構成企業の多くがヨーロッパ圏の企業であることから、耐震設計について、技術水準が必要十分であるか検証が必要であろう。港湾施設の耐震設計については、建築分野の「設計震度」を考慮しているとのことである。

求められる事項として、経済性のみではなく、安全性確保も重要であるが、コンセッション構成企業(多くは多国籍企業)による施設の建設・運営が進められるため、「利益の追求」が最優先されることになりがちである。どの様な施設整備・運営形態であるとしても、施設周辺の自然・経済および社会環境に適した港湾施設設計・施工および運営が求められるべきと考えられる。

今回の調査で実施した公共事業省へのヒヤリングの結果、チリ共和国の港湾施設整備に関する国や公的機関の「設計基準」が存在しないことが確認され、コンセッション構成企業の判断により設計・施工されており、主に、コンセッション構成企業の母国の基準類を準用することが多いとのことである。地震・津波の多発地帯に位置するチリ共和国ではあるが、コンセッション構成企業の多くがヨーロッパ圏の企業であることから、耐震設計について、技術水準が必要十分であるか検証が必要であろう。港湾施設の耐震設計については、建築分野の「設計震度」を考慮しているとのことである。

求められる事項として、経済性のみではなく、安全性確保も重要であるが、コンセッション構成企業(多くは多国籍企業)による施設の建設・運営が進められるため、「利益の追求」が最優先されることになりがちである。どの様な施設整備・運営形態であるとしても、施設周辺の自然・経済および社会環境に適した港湾施設設計・施工および運営が求められるべきと考えられる。

急・救援物資輸送等、被災住民へのサービ
スには用いられなかったようである。地域
防災計画の策定、国・自治体あるいは近隣
コミュニティとコンセンション構成企業
間の「災害時協力協定」の締結などのソフ
ト対策も有効な手段であると考えられる。
なお、今回の地震規模は、日本で想定され
ているユーラシアプレートの下にフィリピ
ン海プレートが沈み込むプレート境界で発
生の可能性が高まりつつある東海・東南
海・南海地震の連動発生と同様の規模であ
る。沿岸域の地盤が比較的硬いチリ共和国
に対して、日本では比較的軟弱な沿岸部の
低地や埋立地盤であることから、地震動の
増幅が想定される。これらの沿岸部に生活
基盤・経済基盤が多く立地していることも
あり、地震動と津波の複合作用に対する備
えを検討する必要があるものと考えられ
る。

調査結果のまとめ

―津波による被害―

(1) 津波痕跡高さ

計測した津波の痕跡高を、図5に示す。
タルカワノ周辺に関しては、拡大して枠内
にも記載した。陸上地形の影響を大きく受
ける遡上高(+)を除外し、浸水高(●)
のみに着目すると、ロビンソン・クルー
ソー島では6・2m〜15・0mの大きな
浸水高が確認された。チリ本土でも、タル
カワノで7・1m〜8・2m、ディチャツ
トで6・8m〜9・4mの大きな浸水高
である。一方、コラルなど、津波波源から
南方へ離れたバルデイビア周辺では、浸水
高が1・7m〜4・5mと小さかった。

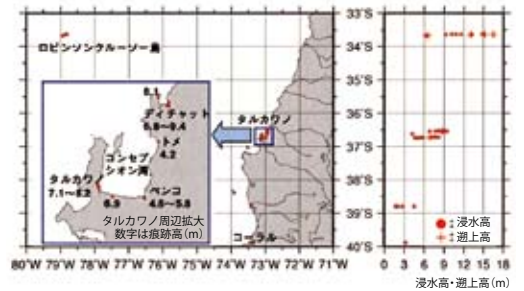


図5 津波の痕跡高の分布

なお、従来から言われているように、海
岸の地形によって津波の高さが大きく変わ
ることも確認されている。例えば、コンセ
プシオン湾の西側に位置するタルカワノと
比べて、湾の東側に位置するトメヤペンコ
では津波が小さかった。津波はコンセプシ
オン湾の真北からではなく、少し東寄りか
ら来襲したと推察される。また、最大の津
波は、必ずしも第1波ではなく、この津波
では3〜5波目に発生している。今後、数
値シミュレーションにより検討する予定で
ある。

(2) 避難と死者

沿岸部の人々のうち、揺れを感じたほと
んどの人々が地震の直後に避難したという
ことである。タルカワノでは、揺れを感じ
た直後に外に出て避難しようとしたが、地
面も割れて避難が大変であったようだ。し
かし、タルカワノより南の地区である、プ
アートサベードラやコラルでは、避難せ
ずに沿岸部に津波を見に来る人もいた。ロ
ビンソン・クルーソー島では地震の揺れは

感知されておらず、地震が午前3時34分
(現地時刻)のため、多くの人が睡眠して
いたようであるが、一部の人が気づいて周
囲に周知し避難した。この場所に警報が届
いたのは、津波が来る直前であったため、
機能していなかったと考えられる。

タルカワノの住民は、津波が3波来る
という言い伝えを守り、警報が解除されて
も家に戻ることはなかった。ただし、子供
たちの一部が家に戻っていったものの、大
きな津波が来て必死に逃げ戻ったとのこと
であった。タルカワノの住民に限らず、多
くの人は、避難した場所で数時間以上過
している。今回の津波では数時間後に最大
波が到達している地域が多く、その意味で
は、1波目が小さいと言って避難場所から
自主的に戻った方が少なくなかった日本は
見習うべきではないかと思われる。なお、
警報が1時間後に解除されたため、ディ
チャツトでは、十数名の方々が家に戻り、
それによって亡くなったとの話もあり、警
報の解除の難しさを痛感させられた。

図6はロビンソン・クルーソー島におけ
る浸水範囲と死亡した人が居た場所であ
る。ここで注目すべきは、浸水範囲の限界
に近いような場所でも多くの方が亡くなっ
ていることである。図中黄色の線は、道路を
示しており、早くに気づいた人でも道路
上を走るような形で逃げているため、真後ろ
に山や崖があっても、そこには行かないよ
うである。よって、その逃げる途中に津波
から逃げ切れずに巻き込まれた人も何名か
いるようである。巻き込まれた人は引き波
によって沖側に流され、おぼれてしまう。
助かった人たちの多くは沖側でボートによ



図6 ロビンソンクルーソー島における
死亡者の住居・年齢

(○のなかの数字、赤は女性、青は男性)と浸水範囲(青色)の関係

り救出されている。ここでは、160名が
逃げて16名が亡くなったため、10%の死亡
率となる。警報などが出され、避難が早く
から出来たディチャツトで住民と観光客合
わせて7000名程度のところで、死亡・
行方不明者を合わせて50名程度であった。
このなかには警報が解除されて戻った人も
含まれている。浸水深が5mを越え、内陸
600m程度までの家がほとんど流されて
いる状況を見るとロビンソン・クルー
ソー島と似た状況ではあるが、死亡率は
1%未満と低いことがわかり、避難の大切
さがよくわかる。

(3) 漂流物

津波による船舶、コンテナ等が漂流す
ることはこれまでも津波被害の一形態と
して懸念されており、漁船や台船の打ち上
げは2004年インド洋津波のときにも認
められた。しかし、今回のタルカワノ港に
おける680個のコンテナが漂流したのは
初めての被災経験である。コンテナ流
出はディチャツトでも発生しており、そこ



にあった14個が全て漂流し、周辺海岸に船舶と同様に漂着した。また、ディチャットでは自動車も流出しており、多くの車が前面の湾の中に沈没した。このような漂流物は、漂流した物に直接的な被害を及ぼすだけでなく、タルカワノ港で見られたように漂流コンテナが建物等に衝突して損傷を与えるなどの二次的な被害を発生させる。さらに、陸域に散乱し、水面に浮遊し、海底に沈没した漂流物は、被災後の早期復旧の支障になる。そのような漂流物の挙動を推定するために計算モデルが開発されつつあり、今回の被害を再現することでその精度検証を行っていく予定である。

チリとの技術協力

在サンチャゴ日本大使館、JICAチリ支所、チリ国公共事業省、コンセプション大学、バルパライソ大学、カトリカ大学などを訪問した際、津波防災に関する協力等についても、情報収集や今後の進め方の協議を行った。以下、その概要を述べる。

(1) 日本大使館及びJICAチリ支所

調査開始前の4月23日及び調査終了後の4月30日の両日に大使館を訪問し、林大使をはじめ大使館に調査計画や調査結果を報告した（JICA同席）。その際、コンセプション大学から津波に関する研究交流や技術協力が必要との意見があったことを説明した。また、大使のほうから書籍『TSUNAMI』や『津波は怖い！』スペイン語版の刊行についてのチリ側の感触につきご下問があったので、コンセプション大学が積極的であるとの報告をした。大使は本件に強い関心を寄せられ、カウンセラーパー

トとしてのチリ側政府機関は、公共事業省よりも教育省のほうがり関心を持つのは、とのお考えを示された。JICA支所は、これを踏まえ今後、コンセプション大学、教育省、公共事業省と接触を図るとの考えである。

(2) コンセプション大学

コンセプション大学は、今回の被災地域であるビオビオ地方の中心的な大学であり、今後の津波防災対策に高い関心をもっている。4月26日、コンセプション大学訪問の際、Dr・Samuel Hornarabai (Dept. of Geophysics) より大学の事業を統括するDr・Jose Sanchez Henriquez (Director de Docencia) を紹介された。主な協議結果は以下の通り。

@ 大学側は、『TSUNAMI』英語版『津波は怖い！』スペイン語版を活用し、啓発活動を推進することが今後の津波被害の減災を図る上で有用と高く評価した。そのため、早急に、チリの知見・経験を加味して両書のチリ版を作成することになった。また、大学側は、科学的な津波防災知識の重要性とその啓発活動の必要性を再認識したようであり、先ず大学の学生22000人をリーダーとして教育し、彼らを通じて啓発活動を展開したいとの考えである。更に、ハザードマップの作成について、行政がハザードマップを作るだけでなく、住民との協働によるブラッシュアップが重要だという説明に強い共感を示した。

チリ版の作成は、先ず『津波は怖い！』を早急に行い、その後『TSUNAMI』の作成に取り組み考えを示した。作成は他

大学や政府機関の協力も得ながら進めることである。

@ 大学側は、津波防災の啓発を目的として上記のチリ版を使用してワークショップやセミナーを開催する考えであり、日本側からも一週間程度講師の参加を求めたので、協力することを約した。セミナー、ワークショップは、津波災害に苦しむ他のラテンアメリカ諸国の参加も得て実施したいとの考えも示された。

@ 大学側は、海洋分野の主導的立場にあるコンセプション大学に津波の専門家がいなことに改めて問題を感じている。日本とチリの間の研究交流など幅広い分野の協力が必要との認識を共有し、その実現に向けて共同で努力することとなった。

なお、写真11は、4月28日に実施したコンセプション大学でワークショップの様子である。参加者は130名であり、日本の津波対策や研究の紹介、現地調査結果を日本側から行うとともに、チリ側からも現地調査の結果や研究の現状の報告があり、子供や一般市民への教育の問題も含めて多くの議論があった。



写真11 コンセプション大学でのワークショップ

(3) チリ国公共事業省

公共事業省では、港湾や空港における被害の実態について説明があり、今後の協力などについても議論した。公共事業省は、わが国の港湾空港技術研究所との間の協力の関係の展開を望んでいる。また、津波分析

(理解・減災・防止)の共同プロジェクトへの参加に関心を示しており、いかなる事業にも支援を惜しまないとのことであった。

(4) 今後の進め方

チリでは、日本と同様に津波災害の多発国であるが残念ながら津波防災技術は十分とは言えず、日本への期待が大きい。調査中には、コンセプション大学や公共事業省のほかにバルパライソ大学やカトリカ大学なども今後の津波防災に関する技術協力を推進していくことで一致した。

特に日本の津波防災技術をまとめた書籍『TSUNAMI』や一般市民への教育書『津波は怖い！』については、スペイン語版の作成について協力していくこととなった。チリも海洋情報部が中心になり、多くの津波啓発用の教材を作成し初等・中等教育の副読本として使用しているが、いずれも津波現象の知識にとどまり、それを活用した防災知識にまでは至っていない。そのことが、チリ版作成に熱意を示したことの背景にあると考えられる。わが国の津波防災技術は、先達の努力で積み上げられてきたものであり、特に阪神・淡路大震災以降は、防災対策が急速に高度化・体系化されており、研究交流や技術協力を進めることで、チリの減災に大きな効果をもたらすことが期待される。

謝辞

現地調査は、非常に多くの方々のご支援やご協力で可能となります。本調査の実施に当たっても、日本国内の各機関、そしてチリ共和国の多くの方々のお世話になりました。関係の方々にご場を借りて深く感謝の意を表します。

津波の観測

1970年以来、港湾局、東北〜九州の各地方整備局、北海道開発局、沖縄総合事務局、国土技術政策総合研究所、港湾空港技術研究所は協力して、NOWPHASにおける波浪・潮位等の観測・集中処理・解析を実施してきた。その長年蓄積されたデータには、台風・低気圧による高波はもちろん、1983年日本海中部地震津波や1993年北海道南西沖地震津波などの津波も含まれている。NOWPHASには時代とともに新しい観測機器や解析方法が導入されており、2010年2月には東北〜四国沿岸に11基のGPS波浪計を本格運用していた。

GPS波浪計とは、図1に示すように、チェーンで係留したブイの上下動をRTK-GPS技術によって1秒間隔で計測するものである。このデータに長さ120sの数値フィルタをかけて波浪成分を除去すると潮位が得られ、さらに天文潮位を差し引くと潮位偏差が得られる。^{※2} GPS波浪計の最大の特徴は、従来の加速度計を用いたブイ型波浪計と違って長い周期の海面変化を検出できることにある。

さて、このような状況の下、2010年2月28日午後11基のGPS波浪計がチリから到達した津波を捉えた。これまでGPS津波計・波浪計が単機で津波を観測した例はあるが、ネットワークとして初めてのことである。なお、これらのGPS波浪計は、低気圧で発生した有義波で2m、9s程度の波浪も同時に観測していた。図2は各地点で得られた潮位偏差を

特集
チリ地震 Part2



GPS波浪計によるチリ津波の観測結果と数値計算

河合弘泰

(独) 港湾空港技術研究所
海洋・水工部海象情報研究チーム

辰巳大介

(独) 港湾空港技術研究所
アジア・太平洋沿岸防災研究センター

※1 全国港湾海洋波浪情報網NOWPHASのGPS波浪計が2010年2月27日のチリ津波を捉えた。

港湾空港技術研究所はそのデータの解析と津波の数値計算に取り組んでおり、その概要を本稿で紹介したい。

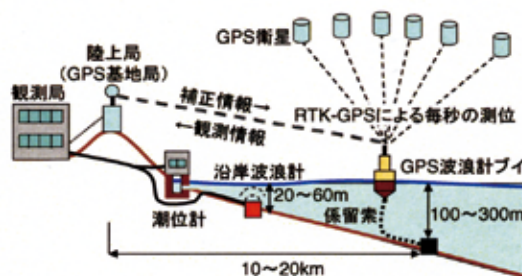


図1 ナウファスの観測機器

示す。津波は東北沿岸①〜⑦に14時過ぎ、中部〜四国沿岸⑧〜⑪には15時前後に到達した。津波の周期は、⑦福島県沖で90分程度である他は、概ね1時間程度である。38〜65km間隔で並ぶ①青森東岸沖〜⑥宮城中部沖において、第1波の峰はよく対応しているが、2波目以降は隣接地点でも対応が乱れており、津波の複雑な振る舞いが伺える。図中の▽印は最大波であり、設置水深の最も浅い①青森東岸沖では峰の高さが約0.3mに達した。⑩和歌山南西沖では第1波が最大波となったが、それ以外は2波目以降であった。第1波の到達から24時間過ぎた3月1日15時でも津波は完全には収束していない。

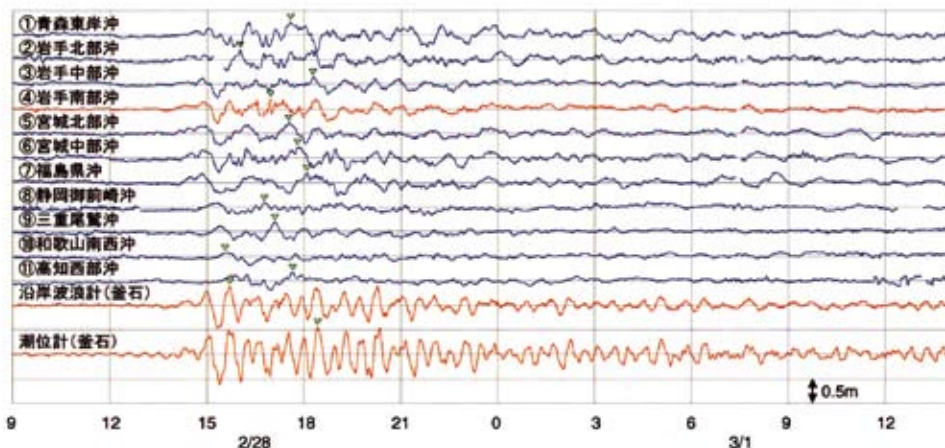


図2 東北〜四国沿岸で得られた潮位偏差

※4 によって、GPS波浪計と沿岸波浪計で30分以上の成分、沿岸波浪計と潮位計で10分前後と20分前後の成分の増幅が確認された。この沿岸波浪計と潮位計の増幅は、2003年十勝沖地震津波、2005年宮城県沖地震津波、2006年千島列島地震津波のときにも見られた。



チリ津波の伝播の様子を把握するために数値計算を実施した。使用した計算モデルは、港湾空港技術研究所が開発した「高潮津波シミュレータ (STOC)」^{※5} であり、計算領域が広いため球面座標系を使用した。計算ケースは、太平洋全域を対象とした広い領域と、チリ沿岸のみを対象とした狭い領域の2種類である。太平洋全域の計算ケースでは、空間格子サイズを5分(約9 km)、時間ステップを10秒に定め、地震発生から36時間後までを再現対象とした。一方、チリ沿岸のみの計算ケースでは、空間格子サイズを15秒(約450 m)、時間ステップを1秒に定め、地震発生から5時間後までを再現対象とした。標高・水深データは、30秒(約900 m)間隔のGEBCOを使用し、チリ沿岸のみの計算ケースでは陸上への遡上まで考慮した。断層モデルは、地震波を解析したNGY地震

津波の数値計算

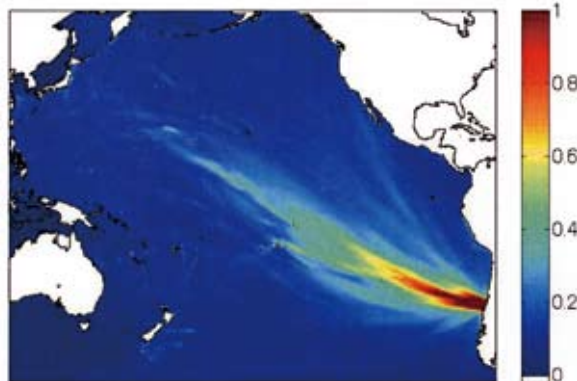


図3 最大津波高(単位:m)の計算結果

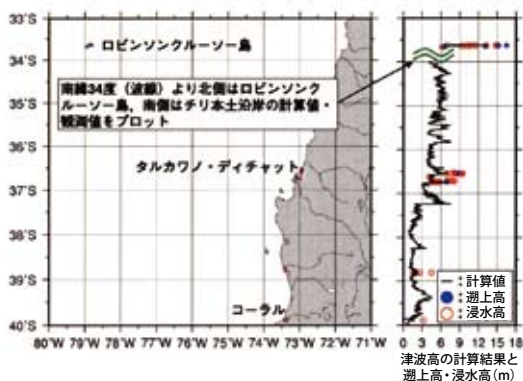


図4 チリ沿岸における津波高の計算結果と計測した遡上高・浸水高の比較

学ノートNo.25を参考に決定した。^{※7} 図3は、最大津波高の計算結果である。震源に近いチリ沿岸で津波高が大きい他、断層の長軸は北北東に進んでいるため、長軸に直交する西北西へ津波のエネルギーが集中している。日本沿岸では、三陸から房総の太平洋沿岸で津波高が大きかった。図4は、チリ沿岸における最大津波高の計算結果と、現地調査で計測した遡上高・浸水高を比較した結果である。南緯34度(波線)より北側はロビンソンクルーソー島、南側はチリ本土沿岸の計算値・観測値をプロットした。南緯34度から37度の海岸線で津波高が大きく、これより南側では津波高が低減する点や、ロビンソンクルーソー島で津波高が増大する点において、計算値は観測値の傾向を再現できた。地震発生から40分後の水位分布(図5)を見ると、ロビンソンクルーソー島の東側の浅場で津波が収れん・増幅しており、これがロビンソンクルーソー島の大きな津波高の要因で

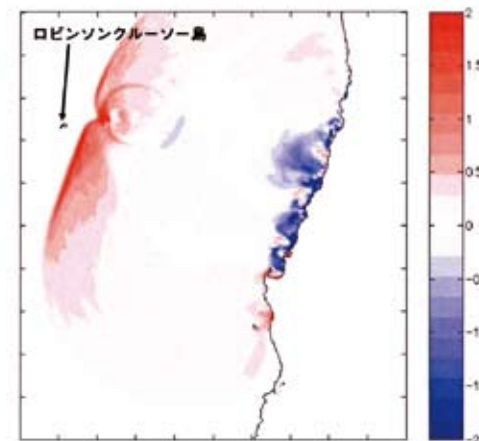


図5 地震発生40分後の水位分布(単位:m)の計算結果

あると考えられる。図6は、宮城中部沖と三重尾鷲沖のGPS波浪計において、計算結果と観測波形を比較した図である。津波到達時刻は20分30分早い。津波の第1波を中心に津波到達から2時間後程度までは、観測波形を再現できた。計算された水位と流速を調べると、津波到達からしばらくは両者の位相が一致したが、やがて両者の位相はずれを生じ、水位分布が沿岸付近でまだらになった。すなわち、始めは進行波型の波が伝播したが、津波到達から長時間経過すると、エッジ波が生じたと考えられる。空間格子サイズが粗く沿岸地形を十分に考慮していないため、沿岸におけるエッジ波などの反射波の影響が卓越すると、計算値は観測値を十分に再現できなかった。計算結果と観測値はある程度一致したが、観測値をより高い精度で再現するために、初期水位分布の見直しや詳細な標高・水深データの利用が必要である。

参考文献

- ※1 国土交通省港湾局・独立行政法人港湾空港技術研究所：チリ中部沿岸で発生した地震による津波のGPS波浪計による観測結果について、<http://www.pari.go.jp/information/news/h21d/p0312/p0312.html>、2010年3月12日掲載。
- ※2 清水勝義・永井紀彦・李在炯・泉裕明・岩崎幸夫・藤田孝(2006)：沖合水面変動記録を用いた津波成分即時抽出法に関する研究、海洋開発論文集、第22巻、pp.523-528。
- ※3 加藤照之・寺田幸博・松岡幸文・田美津雄(2003)：実海域におけるGPS波浪計・津波計の性能確認実験、海洋開発論文集、Vol.19、pp.839-844。
- ※4 清水勝義・佐々木誠・永井紀彦(2007)：平成18年(2006年)千島列島の地震津波の観測結果、港空研資料、No.1162、83p。
- ※5 富田孝史・柿沼太郎(2005)：海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用、港空研報告、第44巻第2号、pp.83-98。
- ※6 British Oceanographic Data Center: General Bathymetric Chart of the Oceans, <http://www.gebco.net/>。
- ※7 名古屋大学地震火山・防災研究センター(山中佳子准教授)：NGY地震学ノートNo.25、http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2010/NGY25.html。

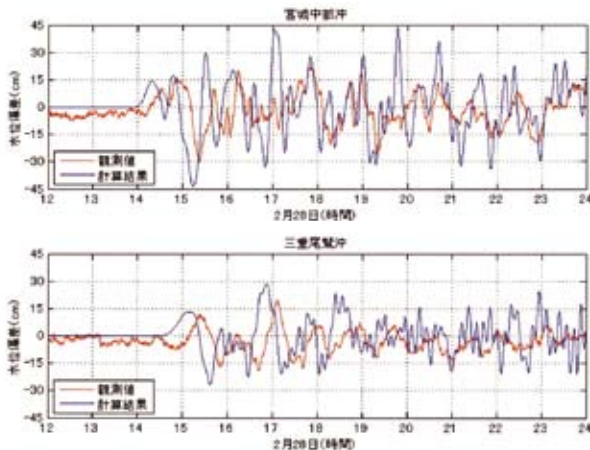


図6 宮城中部沖(上)と三重尾鷲沖(下)における計算結果と観測値の比較

海象外力の発生確率

毎年夏になると「今年は強い台風が来るのか」という質問をしばしば受ける。2007年の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第四次報告書によると、地球の平均海面は既に上昇を始めており、これから台風を含む熱帯低気圧が勢力を増す可能性も高い。顕著な高潮・高波が押し寄せれば、防波堤や護岸が壊れ、後背地が浸水することもある。それが今年なのか数十年先なのか予測するすべはなく、「滅多に起きないだろう」と楽観的な気持ちのまま晩秋を迎えることが多い。

ところが、高潮・高波ばかりに気をとられてみると、足元をすくわれかねない。使用中の高潮対策施設には、1959年の伊勢湾台風の大災害を教訓に整備され、今ではすっかり老朽化したものもある。「コンクリートの寿命は50年」と気楽に言えなくなつた。施設の耐力の評価、もう少し大きく言えばライフサイクルマネージメント(LCM)が不可欠である。さらにもう一つ、かつての高度経済成長期になつた悩みもある。それは、公共事業費の削減で維持補修・改良予算を十分に確保できなくなったことである。安易な「横並び」も苦しくなつた。

「限られた予算でいかに効果を發揮させるか」というアセットマネジメントの必要性が叫ばれるようになって久しい。海岸保全施設の長寿命化計画を策定する際にも、前述の三重苦に付き合つて行かざるを得ない。いざ維持補修・改良費用と想定される被害額とのバランス(B/C)を本格的に

寄稿



確率台風モデルを用いた高潮の出現特性の解析

河合 弘泰 (独) 港湾空港技術研究所
海洋・水工部海象情報研究チームリーダー

伊勢湾台風から半世紀が過ぎて海岸の施設が老朽化した今、地球温暖化による海象外力と海岸保全施設の耐力を把握することが必要である。

検討しようものなら、海象外力と施設の耐力の両方を確率分布として把握したくなる。本稿ではその一歩として、伊勢湾台風級の高潮や既往最高潮位が何年に一度の確率であるかを考えてみたい。

伊勢湾台風の教訓を生かした設計

1959年の伊勢湾台風による高潮災害を教訓に、東京湾、伊勢湾、瀬戸内海など高潮の顕著な内湾では一般に、①朔望平均満潮位などの満潮位に、伊勢湾台風級の強さの台風で生じる潮位偏差を加えた潮位②既往最高の潮位、の何れかに基づいて高潮対策施設の計画高潮位を定めてきた。

例えば名古屋港では、台風期平均満潮位に伊勢湾台風による潮位偏差3.5mを加えた。東京湾に対しては、1917年の大正6年台風や1949年のキティ台風を参考に幾つかの危険なコースを設定し、そこを伊勢湾台風級の台風が走つた場合の高潮を推算した。その結果、東京港では最大で2.08mの潮位偏差が得られ、台風条件設定や高潮推算の不確定性を踏まえて3mにした。朔望平均満潮位にこの3mを加えたものが現在も使われている計画高潮位である。大阪港でも、朔望平均満潮位に、伊勢湾台風級の台風が室戸台風のコースを通つた場合の潮位偏差3.0mを加えた。施設の天端は、計画高潮位で設計波の打ち上げ(あるいは越波)を十分に防げる高さに定めた。

このような設計に基づいた高潮対策施設が各地で築造され、伊勢湾台風級の台風が高潮を見計らつて上陸することもなかった

おかげで、しばらくは大規模な高潮災害のない時代が続いた。**高潮災害は忘れた頃にやってくる?**

伊勢湾台風から40年経つた1999年、台風18号によって八代海では3mを超える潮位偏差が、大潮の満潮が迫る時間帯に生じた。その結果、熊本県不知火町(現在の宇城市)の沿岸では、海水が船だまりの堤防を越流し、住宅地が浸水するところもあった。写真1に示す屋根の痕跡がそれを物語っている。その数時間後には周防灘でも2m以上の潮位偏差が生じた。写真2の護岸では、消波ブロックで被覆した区間の端でパラペットが倒壊した。確かにこのような箇所は波力の集中を受けやすい。ただし、パラペットの断面を注意深く見ると、何度も嵩上げした形跡があり、木や竹が埋め殺しにされている。表面のモルタルは剥げ、雑草も生えていた。



写真1 屋根まで浸水した家屋

2004年には10個の台風が日本に上陸した。瀬戸内海の沿岸では、台風のため幹線国道が冠水する、ある台風で壊れた海岸や港湾の施設が復旧の間もなく次の台風でさらに壊される、という状況も見られた。台風16号によって高松では、既往最高潮位が更新されるとともに、市街地の広範囲が浸水した。

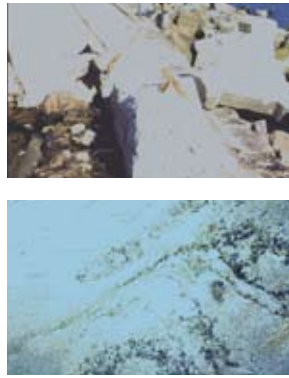


写真2 護岸の破壊

「減多にない」を定量化したい

伊勢湾台風級の潮位偏差は減多に生じない。それが満潮と同時生起することを仮定した計画高潮位は、なおさらである。既往最高潮位も、何年前からの記録に基づいたものなのかは知らないが、少なくとも頻繁に起きるものではないだろう。我々は普段、このように自分を安心させている。

しかし、前述のように、潮位が計画高潮位を超えることもある。そもそも計画高潮位とは、防災の一つの目標であって、この世に発生し得る極限の事象ではない。また、その事象を知り得たとしても、それに対抗する施設の整備には膨大な建設費が必要であり、環境や日常の利用にも支障が出て、現実的ではないだろう。だから、何らかの出現確率（あるいは再現期間）をもつて妥協するのである。

では、どうすれば計画高潮位の再現期間を求められるのだろうか。真っ先に思い切るのが検潮記録の統計解析である。検潮所は日本各地に設置されており、その観測データを用いて工事基準面や期望平均満潮位を求めてきた。ところが、潮位の極値を求めるといふ観点で言うと、多くの検潮所の歴史はまだまだ浅い。また、観測装置の故障やメンテナンス、古い記録の喪失など諸般の事情によって、一部の高潮記録が欠けているとも限らない。

高潮推算によって検潮記録の抜けを補ってはどうか。もっと思い切って、気象庁が漏れなく整理している1951年以降の全ての台風について高潮を推算し、念のため検潮記録で推算値を補正する、という手も

ある。これで何とかかなりそうな気もするが、実はこれでも台風のパターンは限られている。例えば、伊勢湾台風は含まれているが、計画高潮位の設定で候補にした伊勢湾台風が東西にずれた台風は含まれていない。中途半端な感じがする。

台風のモンテカルロシミュレーション

確率台風モデルとは、図1に示すように、過去の台風の属性値（中心位置、中心気圧、最大風速半径など）の統計に基づいて、様々なコースや強度の台風をモンテカルロ法で与えるものである。気象の物理方程式を直接計算するものではないが、これを擬似する巧みな力ラクリを組み立てたものである。

本稿で紹介する確率台風モデル^{*}は、一年間を台風特性に応じた5つの季節（6〜7

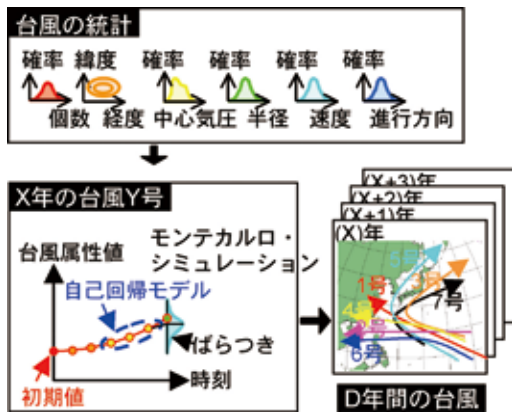


図1 確率台風モデルの概念

月、8月、9月、10月、その他）に分けている。まず、各年の各季節に発生する台風の個数を、統計に基づくポアソン分布で決める。多い年もあれば、少ない年もある。次に、個々の台風の初期条件として発生時の属性値を、やはり確率分布に従う乱数で与える。そして、その緯度・経度において、台風がどの方向に進みやすいか、発達しやすいのか減衰しやすいのか、という確率分布に基づき、1時間後の属性値を与える。この操作を繰り返すことで、台風は北上しながら発達し、やがて減衰に転じる。このとき、1時間毎に独立した乱数を用いるのではなく、数時間前までの変化が継続しやすいように自己回帰モデルでサジ加減をし、各台風個性を持たせる。例えば、北上する台風が1時間ごとに急加速と急減速を繰り返すことは、まずあり得ない。低緯度で急に発達してすぐに消える短気な台風もあれば、気長な大器晩成型の台風もあるだろう。

ただし、確率台風モデルも万能ではなく、台風統計に基づいて構築された宿命を持っている。例えば、過去に頻繁に現れたタイプの表現は得意とするが、特異なものや、前例のない気象現象を伴うものは苦手である。また、伊勢湾台風を上回る強度に対しては、過去に現れた台風の数が少ないため、それなりの表現はできても統計的な信頼性は低くなる。「ある海水温と周辺気象場において台風がどこまで発達し得るのか」という問題は、今でも気象学会で議論が絶えない。

仮想的な潮位のデータベース

確率台風モデルで数百年間あるいは数千年間の台風を与え、各台風の高潮を計算すれば、仮想的な潮位のデータベースを構築できる。ただし、数百個あるいは数千個の台風を相手にするため、今のところ高潮推算には、図2に示すような、簡易なモデルを使わざるを得ない。関東〜九州沿岸を1・8 km格子とし、普及型のデスクトップPCで計算すると、1個につき1時間ほどかかる。

台風ボーガスを組み込んだ気象場を局地気象モデルで計算し、天文潮や波浪との相互作用を考慮して高精度に高潮を計算するモデルが構築され、1ケースに数日をかけて演算する。こういう時代は既にやって来

ている。例えば、図3に示すように、台風の高潮は経験的台風モデルで表されるような単純な分布ではなく、陸上地形の影響を受けている。そう遠くない将来には、このような高精度なモデルが確率台風モデルとカップリングされるか、あるいは確率台風モデルの代わりに局地気象モデルで初期値を変えた計算が行われるようになるだろう。

このような未来予想図はさておき、現在の実務的な技術や演算装置の性能の範囲でも精度を高める余地はある。過去の幾つかの台風に対して簡易なモデルと高精度なモデルによる推算値の相関解析をしておき、簡易なモデルで得られた推算値を補正して使うのである。

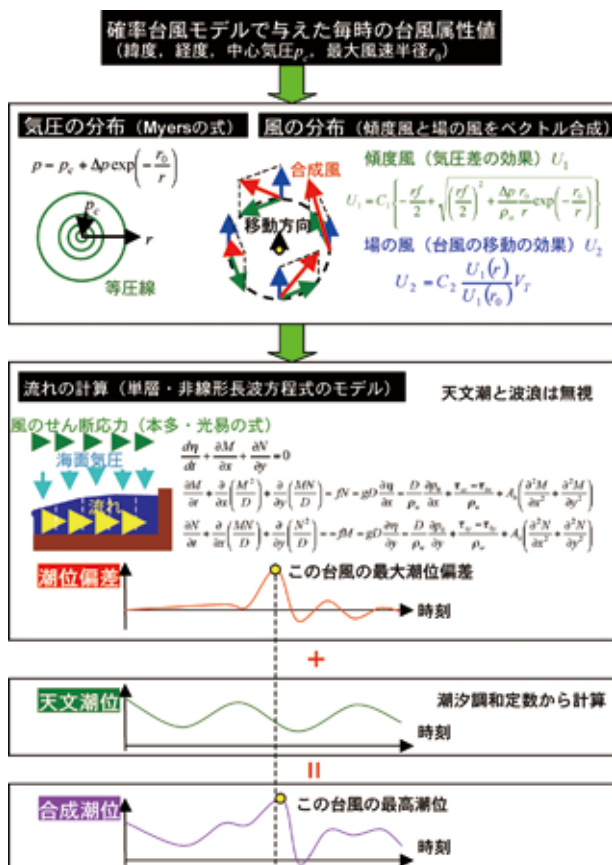


図2 簡易な推算モデル

計画高潮位の再現期間と他の設計外力とのバランス

前述した要領で実際に500年間の台風時の潮位データベースを作り、極値統計で100年確率の潮位偏差を求めた結果を図4に示す。九州〜関東地方の太平洋沿岸の内湾のほぼ全域で1m以上であり、伊勢湾、大阪湾、有明海の奥部では3mを超えるところもある。代表的な地点について潮位の極値分布を図5に示す。東京港、名古屋港、大阪港の計画高潮位はそれぞれDL+5.1m、5.9m、4.8m程度であり、その再現期間は名古屋港と大阪港では数百年、東京港では千年を上回ると推定される。ただし、これらの値は簡易なモデルで求めた結果であり、1000年と1000年の違いは明白だとしても、1000年と2000年くらいの差で優劣はつけられない。数百年、千年以

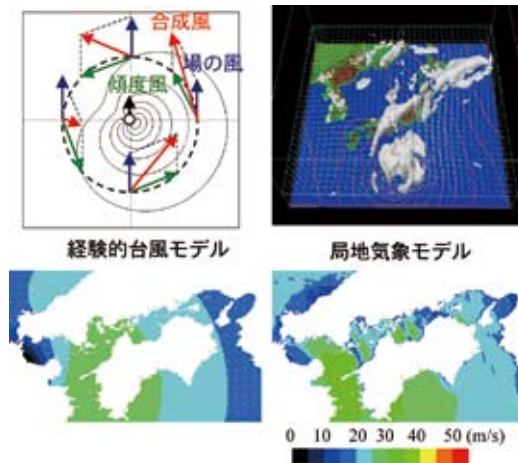


図3 経験的台風モデルと気象モデルによる風の分布

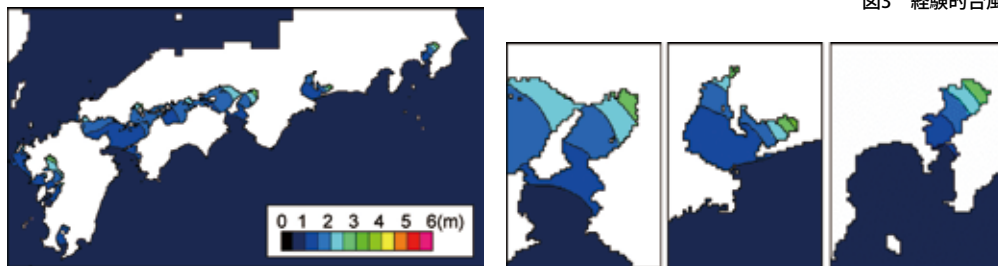


図4 100年確率高潮偏差の平面分布

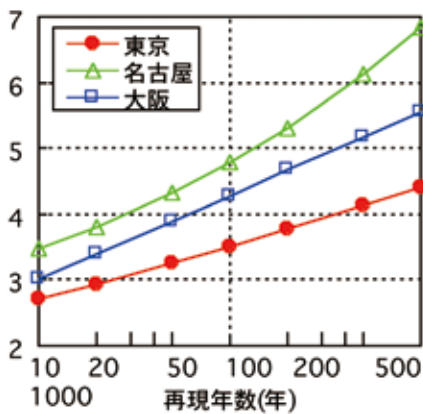


図5 潮位の極値分布

上とあえて曖昧な表現を使ったのは、こういう意図によるものである。ところで、オランダの高潮堤防が1250年または10000年確率の潮位に対して設計されていることは、有名な話である。東京港の再現期間はオランダに近く、名古屋港と大阪港はそれより一桁短いようである。

さて、確率台風モデルを用いた高潮計算によって、現行の計画高潮位の再現期間に具体的なイメージが湧いてきた。次に議論すべきことは、我々がその値に満足して良いかどうかである。土木技術者として真っ先に頭をよぎるのは、風、河川の洪水、波浪などの設計外力とのバランスであろう。こういった「横並び」も一つの判断材料にはなる。ついでにもっと原点に立ち返り、①ローンで購入したマイホームが高潮で水浸しになること、②倉庫や道路の浸水で商品の出荷が遅れて会社が信用を失墜し倒産すること、③家族の誰かが交通事故や犯罪に巻き込まれて死傷すること、など滅多にない事象をかき集め、遭遇確率や損害

額という天秤にかけてみる、というのはいかがだろうか。国民が払える税金という分銅も用意したい。広い視点で深く掘り下げた議論が必要である。

地球温暖化による台風特性の変化とその影響

本稿の冒頭の繰り返しになるが、IPCC第四次報告書によると、これから台風を含む熱帯低気圧の勢力が増す可能性は高い。ただし、北西太平洋や北大西洋など地域によって差があり、日本周辺に限った定量的な予測はまだ難しい。実は、これまでの気候予測モデルは、計算格子が粗く台風の構造の表現に限界があるため、過去の台風の再現計算をすると中心気圧が観測値より高めになる。将来気候の計算値は検証のしようがないが、現在気候と同様なハヤス(計算値の偏り)があると思われる。したがって、まず計算値に基づく統計値において現在気候と将来気候の差分を求め、これを現在気候の観測値に基づく統計値に加えることで、将来気候の正しい統計値を推定する必要がある。さらにもう一つ、たとえ気候予測モデルが完璧であったとしても、これからの温室効果ガスの排出量是我々の行動次第である。以上のような事情があるため、「将来、台風特性がこうなるから、高潮特性はこうなる」という説得力のある予測は難しく、「もし台風特性がこうなったら、高潮特性はこうなる」という感度分析の域は超えられない。

図6は、台風の強度(中心の気圧深度)が単純に10%増加した場合、台風の属性値の時間変化量の分布が北へ緯度で1.5

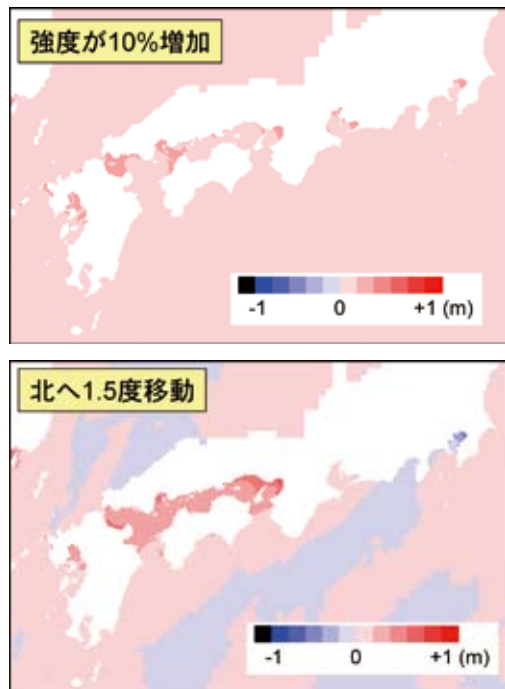


図6 台風の条件による潮位偏差の変化

度ずれた場合に、それぞれ100年確率の潮位偏差がどれだけ変化するかを試算した結果である。これらの図から確実に言えることは「現在気候で高潮が顕著な内湾の湾奥は、台風特性の変化の影響を敏感に受ける」ということである。台風特性の変化の仮定によっては、一部の海域で100年確率の潮位偏差が減少することもある。これを目ざとく見つけて一喜一憂するのではなく、台風特性の変化やその影響は複雑であると、ご理解いただきたい。IPCC第5次報告書に向けて、様々な気象研究機関から高精度な気候予測値が発表されることを期待している。そして、その知見を確率台風モデルにも導入していく必要があると考えている。

参考文献

- ※1 橋本典明・河合弘泰・松浦邦明(2005): 地球温暖化を考慮した将来の台風特性の解析と確率台風モデルへの導入、海岸工学論文集、第52巻、pp. 1221-1225。
- ※2 河合弘泰・橋本典明・山城 賢・安田誠宏(2009): 確率台風シミュレーションの風場モデルと将来の台風出現特性による確率高潮偏差の変化、海岸工学論文集、第57巻、pp. 1256-1260。
- ※3 河合弘泰(2010): 高潮数値計算技術の高精度化と気候変動に備えた防災への適用、港湾空港技術研究所資料、No. 1210。

はじめに

2004年12月26日、スマトラ沖地震により発生した大津波（インド洋津波）は、インド洋に面した国々に大きな被害をもたらした。インド洋津波から5年が経過した節目の開催である第6回国際沿岸防災ワークショップ（以下ワークショップ）では、これまでの津波防災技術の進展や技術開発、最新の研究成果や行政の施策が2日間に亘り討議された。

また、インド洋津波により大きな被害を受けたカオラック（パンガー県）、ピピ島（クラビ県）やプーケット島西海岸（プーケット県）を視察し、津波被災地の復興や津波避難施設等の整備状況、課題等の調査を実施した。

本稿では、それらの概要を報告する。

タイ政府等関係機関への訪問

ワークショップの前日、開催目的や講演内容を紹介するために、JICAタイ事務所、タイ国家災害警報センター（NUWC）および在タイ王国日本国大使館へ表敬訪問を行った。また同時に、書籍『TSUNAMI』および『津波は怖い』（日本語版／英語版）が紹介された。JICAタイ事務所では、書籍『TSUNAMI』や『津波は怖い！』について、タイにおける津波防災の知識の普及のために、タイ語版が出来れば活用したいとの意見があった。

タイ国家災害警報センターはインド洋津波後の2005年に設置され、津波など自然災害に対する情報収集や早期警報システムの運用を行う機関である。津波情報の収集では、太平洋津

沿岸レポート 1

国際



第6回国際沿岸防災ワークショップの開催（タイ：バンコク）とインド洋津波被災地の現地調査報告

（財）沿岸技術研究センター

主任研究員
長澤 大次郎

主任研究員
田代 徹

波センター（米国）、気象庁（日本）、アングマン海の津波観測用ブイ（タイ）などからの情報を収集・管理している。今回の訪問時には、情報管理センターで警報発令の演習を行っていた（写真1）。早期警報システムは、津波警報ワーニングタワーやラジオ、テレビ放送などで構成され、タイ沿岸の危険地帯に速やかに津波警報などの情報を伝達することだった。ワーニングタワーによる情報伝達では、サイレン・赤色灯や日本語を含む4ヶ国語で行っていることの紹介があった。

在タイ王国日本国大使館では、津波防災には国際的な情報や技術の交換と連携、それらの運

用が大切と考えているとのこと。ワークショップや書籍『TSUNAMI』などによる情報発信が積極的に行われていることは、正しい津波の知識を広める意味でも大変関心があるとのご意見があった。

今回の訪問では、津波防災に対する熱意を感じることが出来た。また、訪問した機関の皆様にはワークショップへのご参加を頂いた。



写真1 情報管理センターの様子
（タイ国家防災情報センター）

第6回国際沿岸防災ワークショップ

2009年12月1日、2日の二日間にわたり、バンコク市内のインターコンチネンタルホテルバンコクにおいてワークショップが開催された。講演ではインド洋周辺の各国や米国、日本の研究者、技術者、行政関係者（写真2）により「津波被災の進展」、「津波の観測と警報」、「津波被害の予測(1)(2)」、「タイにおける津波」および「津波被害の軽減対策」の津波に関する多様な6つのセッションで19講演が行われた。また特別セミナーとして「津波から生き延びるために」書籍『TSUNAMI』の紹介が村田参与および高山参与により行われた（写真3）。2日間に亘るワークショップを通じて156人の参加者が熱心に討議に加わった。



写真2 ワークショップの講演者

現地調査結果

現地調査は、カオラック（バンガー島）、ピ島（クラビ島）およびブーケット島の西海岸（ブーケット島）の被災地を中心として復興状況や施設の現状などを視察した。

カオラック (Khao Lak)

カオラックはブーケット国際空港から車で北に50分程度のバンガー島西海岸沿いに位置し、有名なダイビングスポットや海岸沿いのリゾートなど、近年開発が進んできた観光地である。

タイにおけるインド洋津波での被災者はカオラックを含むバンガー島西海岸に多く、被災した外国人や地元住民など死者・行方不明者は2000人に上るとも言われている。今回は海岸沿いの村が津波により消失し、今は公園として整備されているバンナムケン・津波記念公園や周辺にある津波の痕跡、津波後に整備された津波対策施設の状況を視察した。

①津波で運ばれた警備艇

カオラックに襲った津波の高さは10mにも及び、海岸から2・5kmまで達したといわれている。今でも海岸より1・5kmほど離れた丘の上に、津波により運ばれた警備艇（写真4）が残されている。警備艇の前には、被災状況を英語とタイ語で記した立て看板が設置され、ロープで甲板に上げられるようになっていた。また周囲は公園のように整地され、『TSUNAMI BOOK』（写真本、ビデオCD、ROM）が売店で販売されていた。今回は、ビデオCD、ROM（TB150/枚）のNO.1（カオラックでの津波）とNO.2（津波後のカオラック）

を購入した。広場では大勢の参加者によりマウンテンバイク大会も開催され、売店が立ち並ぶなど大変明るい印象を受け、津波による被災からの立ち直りを感じた。

②津波避難施設

カオラックの集落の近くには津波避難施設（写真5）が設置されており、津波発生時には数百人の収容が可能とのことであった。施設は鉄筋コンクリート造りで高さが5mほどの高床式、2階のフロアは300㎡程度の広さがあった。発電設備は階上に設置されていたが、燃料や物資搬入用エレベーターが電気設備も含めて地上付近にあった。このことは実際の運用時に故障や破損など問題を発生しやすいと思われた。また、周囲の木製手すりなどが脆くなっているが補修する予算がないとのことであった。施設の整備と同時に、緊急物資の備蓄や施設の維持管理など活用のため仔細な検討が必要であると感じた。

③津波ワーニングタワー

津波ワーニングタワー（津波警報システム）は海辺や集落などに設置され、タイ国家災害警報センターから発令された津波警報等を速やかに伝達するシステムである。

カオラックでは集落近辺の大型のタワー（写真6）や、小学校に設置されているタワーなど、要所に設置されている設備が確認できた。大型のタワーの2階部分は、通信機材が設置された管理室となっていたが、出入りする際の経路が外部はしごだけであり、昇降には苦労した。



写真3 書籍『TSUNAMI』の紹介



写真4 津波で運ばれた警備艇 (カオラック)



写真5 津波避難施設 (カオラック)



写真6 津波ワーニングタワー
(カオラック)

④ 仮設住宅

カオラックではインド洋津波により住居を失った住民のために、高床式の仮設住宅が設置された。被災当初は多くの住民が利用していたそうだが、視察した居住区には住民は見当たらなかった。現在は場所によって住み続けている人がいる程度とのことである。

⑤ パンナムケン・津波記念公園

パンナムケン村はバンガー島の西海岸、アンダマン海に突き出した半島状の地形の先端に位置していた。そのためインド洋津波により村全体が洗い流され、多数の死者・行方不明者が出た場所である。村があつた場所は現在、津波記念公園として美しく整備されているが、訪れている人はまばらだつた。駐車場から海辺の公園までの通路(写真7)は、津波災害のモニュメントであり、模様の中には亡くなった方ひとりひとりのネームプレートや顔写真、家族からの言葉などが埋め込まれている。長い通路を抜けるまでの間、たくさんの方に見られているようで、大変つらさを感じた。また、コンクリート壁の窓からのぞいているのは津波で押し流され、残されている漁船である。

津波記念公園の海辺(写真8)は、非常に美しく整備され、津波の被害を受けた痕跡は見当たらない。ただ、この場所全体が村であつたことを考えると、津波の恐ろしさを改めて感じる場所であつた。

また、海沿いを5分ほど歩くと、「TSUNAMI MEMORIAL GALLERY」がある(入場無料)。展示室には、津波による被災前後の写真や被災状況、救助や復旧に携わる人々の写真が展示さ



写真8 津波記念公園の海辺の様子
(カオラック)



写真7 津波記念公園のモニュメント
(カオラック)

れ、英語とタイ語で説明されていた。

ピビ島 (Phi Phi Island)

ピビ諸島はプーケット島から東に約45kmのアンダマン海に浮かぶ小さな島で、海が大変美しく、ダイビングで有名なリゾート地である。ピビ諸島の中でも最大で、唯一の有人島であるピビドン島(以下ピビ島)の中央部には、ロードラム湾とトンサイ湾の美しい砂浜に挟まれたトンポロ地形の平地がある。ここには宿泊施設や住民の居住区、飲食店、商店が立ち並び、人々が集う繁華街となっている。インド洋津波では、この平地部が約6mの高さの津波に押し流され、多くの人が被災した。

今回は、ピビ島の津波避難施設や避難経路の整備状況を視察した。

① 津波避難施設

ピビ島の津波避難施設は、島中央部のビーチから徒歩5分程度の平地部分に建設されている。中央の繁華街やホテルからも近く、津波来襲時には住民や観光客の避難に有効な施設である。しかし、外来者である我々がこの施設にたどり着くのは容易ではなかつた。施設の存在を知っていたので実物を確認しようとしたが、元の地図や道沿いの案内看板、誘導標識などには表示がなかつた。幾人もの住民に尋ねながら半ば迷いつつ、繁華街から20分程度要してようやく施設に到着した。

緊急時の利用を考えると、ピビ島内の案内看板への明示や誘導標識の整備などの必要性を痛感した。

ピビ島に整備されている津波避難施設はカオラックの施設と比較すると、柱や構造、フロア



写真9 津波避難施設
(ピビ島)

の広さ等大型の新しい施設であつた。

また、避難施設に隣接して津波ワーニングタワーが整備されていた。

② 津波避難経路

ピビ島では津波発生時の避難場所として、繁華街から約1kmはなれた小高い山の中腹の平地に避難サイトが設定されている。避難経路である繁華街の通路には、各所に誘導標識が整備されサイトへの方向と距離を示していた(写真10)。

実際に誘導標識に従って、繁華街を抜けて避難経路を歩き、避難サイトに行ってみた。やや上り加減の2m幅程度の避難経路の途中には、赤い花が咲き乱れる山すその広い公園があつた。その場所は被災時には多くの遺体が流れ着き、現在はお墓として整備されているとのこと。被災時と現在の風景のギャップに息を呑む



写真11 津波ワーニングタワー
(プーケット島 カロンビーチ)

沿いの津波避難サイト、避難経路の視察を行った。

として年間を通じ多くの観光客が集まること
有名な場所である。
インド洋津波はプー
ケット島の西海岸沿い
のビーチに5m前後の
高さで押し寄せ、多く
の観光客や住民、施設
を押し流し、大きな被
害を出した。

今回は、プーケット
タウンから西に15kmほ
どのカロンビーチから
西海岸沿いに北上し、
最も賑やかなパトン
ビーチからカマラビー
チ、スリンビーチなど、

沿道の各ビーチや道路

沿いの津波避難サイト、



写真10 誘導標識
(ビビ島)

思いだった。山肌に残る津波の痕跡を見ながら最後の階段を上りきり、標高差が50m程度の避難サイトに到着した。繁華街から避難サイトに到着まで徒歩で約30分を要した。

避難サイトは山の中腹であったが、目立った設備のようなものは整備されておらず、「津波避難サイト」との看板だけが設置されていた。

プーケット島西海岸 (Phuket)

プーケット島はタイで最大の島であり、美しいアンダマン海に面している。西海岸には砂浜の美しいビーチが所なり、風光明媚な観光地

カロンビーチでは、ビーチの中ほどに津波ワーニングタワー(写真11)が設置されており、事務所(平屋)にはタイの軍関係者が勤務していた。タイ国家災害警報センター訪問時の説明で、「タイの津波警報システムの運用は直接タイ政府が行っている。」とのことだったが、それを確認することができた。西海岸のビーチでは、海岸監視のサイレンと兼用のワーニングタワーもあると、現地ガイドからの説明があった。西海岸のビーチに設置されているワーニングタワーは、景観を配慮してか目立たないものが多く、調査したビーチすべてでの設置確認はできなかった。

ビーチ沿いの道路には津波避難サイトへの誘導標識(写真12)が随所に確認できた。

誘導先は、ビーチ背面の道路沿いにある小高い広場や、鉄筋コンクリート造の公共の建造物、寺院といった津波避難サイトに指定された場所であった。津波避難サイトは各ビーチや町々の周辺に設定され、サイトが看板で明示されているとともに誘導看板が周辺に整備されているのが確認できた。

おわりに

国際沿岸防災ワークショップが充実した内容で、2日間に亘り開催されたのは今回が初めてであり、インド洋地域における津波防災の関心の高さと、タイ側関係者の並々ならぬ熱意を示すものであった。また、インド洋津波から5年、津波に対する技術の進展や被災地の復興状況、またタイの被災地周辺での津波警報システムなど津波対策施設の整備・運用の進展を現地



写真12 誘導標識
(プーケット島 パトンビーチ)

調査により確認することができた。

タイにおけるインド洋津波は引き波から始まっており、そのことが津波知識を持たない人々の避難を遅らせた要因の一つとも聞く。人々が津波に対する正しい知識を持つていれば、人的被害はもつと抑えることができたと思いが強く残った。

日本はアジアにおける地震先進国とも言われているが、万一、津波に遭遇したら我々は大切な命を守るため、正しい行動が取れるだろうか。「TSUNAMI」の正しい知識が活かされるように、我が国のみならず被災国などに対する教育やセミナーなどソフト面での一層の必要性を感じた。

今回のワークショップおよび被災地の視察には、チュラロンコン大学(タイ)、国土交通省、港湾空港技術研究所、外務省、在タイ王国日本国大使館、JICAタイ事務所、タイ国家災害警報センターなどから多大なるご支援を頂いた。ここに記して心から感謝の意を表します。

はじめに

2005年、米国ミシシッピ州、ルイジアナ州に襲来したハリケーン・カトリーナが、両州に大きな被害をもたらしたことは記憶に新しい。2000年代以降、カトリーナに限らずハリケーン・リタ(2005年)、ハリケーン・アイク(2008年)等カテゴリー5に分類される大型ハリケーンが相次いで米国メキシコ湾岸に襲来し、被害を与えている。また、これらのハリケーンは、暴風雨のみならず高潮・高波による被害をもたらしている。

当セミナーでは、これら大型ハリケーンに伴う高潮・高波を分析し、今後の台風に係る減災対策に資するため、2009年12月22日、京都大学防災研究所沿岸災害研究分野と共同で、本セミナーを開催した。本稿は、本セミナーの講師のKuang-An Chang(テキサスA&M大学、京都大学客員教授)、Andrew Kennedy(ノールダム大学)両氏の講演概要である。

ハリケーン現象時における異常波浪の衝突と越波



講演者
Kuang-An Chang
Texas A&M University,
USA

カテゴリー5のハリケーンは再現期間1000年の事象であるが、2004年から2005年の1年間に、カテゴリー5のハリケーンが3つ(イワン、カトリーナ及びリタ)

沿岸リポート2

国際



高潮・高波の観測、実験、追算に関する特別セミナー

(財)沿岸技術研究センター
京大防災研究所沿岸災害研究分野

もメキシコ湾沿岸を襲った。

これらのハリケーンは、メキシコ湾にある190もの石油掘削プラットフォームに被害を与えた。ほとんどの被害はデッキへの越波によるものであった。カテゴリー5のハリケーンの風速は156mph(250km/h)以上であるが、越流時の水流速はどのくらいであろうか?これを明らかにするために可視化実験を行った。実験では、水位を抵抗線式波高計および可視化、流速をPIV^{※1}とBIV^{※2}の可視化によって測定するとともに、砕波し越流した水塊に含まれる気泡はFOR^{※3}法により計測した。ここで、BIVとFOR法は、講演者らが開発した方法

である。

主要な研究成果として、

- (1) PIV法とBIV法によってデッキ上の越流状況や流速が十分計測できること、
- (2) 構造物に波が衝突する直前の流速は波速より大きく、最大で波速の1.5倍になること、
- (3) 次元解析から求めた予測式は実験結果とよく一致すること、
- (4) 越流先端部における流速は波速の約1.2倍
- (5) 打ち上がり速度は約2.9倍となることを示した。

流速の模式図を図1に示す。

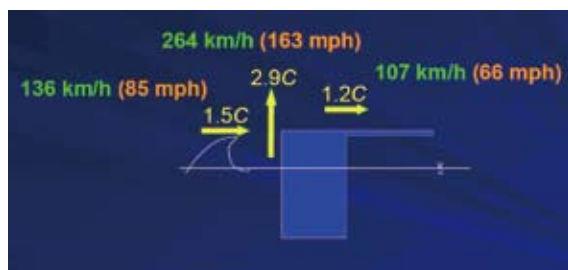


図1 流速の模式図

※1 PIV = Particle Image Velocimetry
※2 BIV = Bubble Image Velocimetry
※3 FOR = Fiber Optic Reflectometer



写真1 ハリケーン・アイクによる被害状況（上：被害前、下：被害後）

ハリケーン・アイク来襲時における
波浪と高潮の観測および被災の実態



講演者
Andrew Kennedy
University of Notre
Dame, USA

ハリケーン・アイクは、2008年9月にアフリカ西海岸で発生し、9月7日にカテゴリ3の強さでキューバ東部に上陸し、8日にキューバ西部に再上陸した。2回のキューバ上陸によってカテゴリ1まで勢力を落としたが、メキシコ湾に出てから再発達し、9月13日にはテキサス州のガルベスタンに上陸し、5m近い高潮をもたらした。講演の内容は以下のようであった。

- (1) 高潮の観測について、a) 観測ネットワーク、b) 水位分布、c) 前駆波
- (2) 波浪観測について、a) 波高の空間分布、b) 波浪スペクトル特性
- (3) 被害調査について、a) 地形調査、b) 建物高さとの被害の関係

解析には、コーパス・クリステイ（テキサス州）からレイジアナの境界までの8つの波高・潮位計に加えて、米国海洋大気庁の潮位計と米国地質調査所の波高計も利用した。ハリケーン・アイクは上陸約1日前に2・2mに達する高潮を伴い、大きな被害を与えた。この前駆波の発生原因については、2つの可能性が検討された。1つは、深海から陸棚上への質量輸送効果、他の1つはコリオリ力の影響である。コリ

オリ力とは地球のような回転体上に固定した座標系から見たときに流体に作用する力のうち座標系が回転していることによって生じる力で、座標系の回転角速度と流速の積に比例する力である。このコリオリ力を考慮した計算としない計算とを比較してコリオリ力の影響が大きいことを確認した。

波の観測から風速の大きい半円側では波はその地点の風速と平衡状態になっており、風速の小さい半円側では波は遠方から伝播してきた成分が支配的であった。台風上陸時点ではスペクトルは広帯域化していた。また、陸棚での減衰が無視できないことが示された。

被災調査から、波が大きい地域では、残存した建物数と標高には強い相関があった。しかし、波が小さい地域では、残存した建物数と標高にはあまり相関がなかった。また、建物の床高さが0・5m異なるだけで、被害が非常に異なることがわかった。被害状況の写真を写真1～2に示す。



写真2 高潮災害から生き残った一軒の家

Q & A



監修) 許斐俊充
日本ナショナルインスツルメンツ株式会社
プロダクト事業部 事業部長

リモートセンシングという言葉が最近聞く機会が増えてきています。これは簡単にいえば、対象となるものに直接触れずに、遠く離れたところから計測したり調査したりすることです。人工衛星を利用して地球表面の気象情報の取得や資源探査、地図作成のためのデータ取得を行っていることはよく知られています。

Q.1

リモートセンシングとはどういうものですか？

リモートセンシング (Remote Sensing) とは、文字通り離れたところにある対象に直接接触することなく、その形状や性質などの物理的な状態を、観測装置 (センサー) によって計測する技術です。よく知られているのは、人工衛星や航空機にセンサーを装着し、それによってたとえば地球上のあるデータを収集して、それを地上の基地局などに伝達するものです。地球観測衛星や気象衛星がもっともよく知られているでしょう。

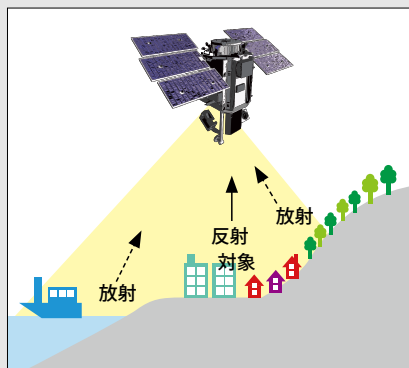


図1 リモートセンシングによるデータ収集

Q.2

リモートセンシングはどのような原理ですか？

すべての物体は、その性質に応じて電磁波を反射あるいは放射しています。それをセンサーによって受信し、人工衛星の場合は受信したデータをデジタル信号で地球上の基地局に転送します。地上では、受けたデータをコンピュータで処理したり補正するなどして、画像として利用されたりします。電磁波を使ったものは、ヒートアイランドやエルニーニョ現象を調べたり、あるいは大気の水蒸気分布を測定するなど、広い範囲で活用されています。以上は電磁波の中でも赤外線を使ったもの

ですが、可視光線を使ったものとしては、カメラやビデオなどを搭載したものがああります。これらは、人間にとっては分かりやすいのが特長です。ただし、夜間や雲に覆われたときには観測が難しくなるのはご承知の通りです。また、観測する側が何らかの信号 (音波など) を観測対象に送り、その信号が観測対象によって反射されて戻ってきたものを受信して対象の位置や性質を知る方法もあります。魚群探知機や潜水艦で使われているソナーなどは、音波を信号に使い、魚や相手の位置を知る装置です。

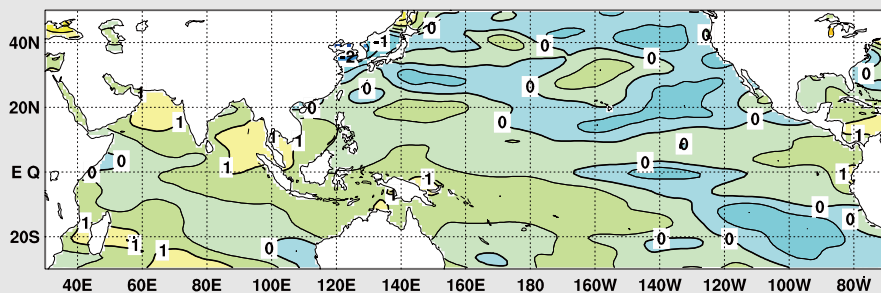
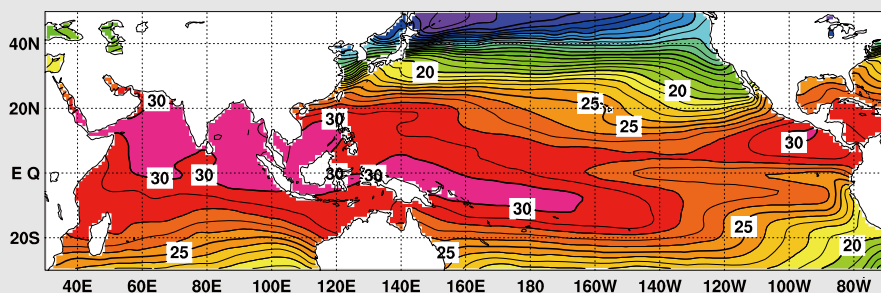


図2 2010年5月の海面水温図(上)及び年差図(下)
出展: エルニーニョ監視速報 No213 (気象庁 地球環境・海洋部)

NOWPHAS

NOWPHASとは、全国港湾海洋波浪情報網 (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS=ナウファス) の略称です。このネットワークは、2010年4月現在、全国72地点の波浪観測点、74の潮位観測点を有し、最大規模の観測網となっています。そのなかには11基のGPS波浪計も設置されています。(地図参照)

GPS波浪計については、以前本稿でも取り上げていますので詳しい説明は省きますが、本年2月27日に発生したチリ地震によって生じた津波のときには大活躍しました。

一般に津波の観測は沿岸付近に設置された潮位計で行われますが、これだと潮位計周辺の地形の影響を受けるために、反射などによる変形も複雑になり、高い精度の津波シミュレーションは困難です。

しかし、GPS波浪計は沖合の潮位変化についてもリアルタイムに計測できるため、津波が陸に到達する前の観測も可能です。

今回のチリ地震においても、発生した津波がどのように来襲したかなどの正確なデータを送ってきています。

なお、GPS波浪計の観測データについては、11基が気象庁にリアルタイムで転送されていて、津波情報に直接活用されています。津波の被害の多い東北地方の太平洋沿岸地域では、海溝型地震によって発生する津波に対して、気象庁の震源情報とあわせて、沿岸地域における津波の高さや浸水域を推定し、防災体制を支援するシステムの構築も進められています。

NOWPHASは、今後の津波防災へのさらなる活用が期待されています。

- ①青森東岸沖(水深 87m)
- ②岩手北部沖(125m)
- ③岩手中部沖(200m)
- ④岩手南部沖(204m)
- ⑤宮城北部沖(160m)
- ⑥宮城中部沖(144m)
- ⑦福島県沖(137m)
- ⑧静岡御前崎沖(120m)
- ⑨三重尾鷲沖(210m)
- ⑩和歌山南西沖(201m)
- ⑪高知西部沖(309m)



Q.3

リモートセンシングは、今後どのような分野での活躍が期待されていますか？

リモートセンシングは今後大きな可能性を秘めていると言われています。地球上の植生分布、火山活動、気象情報、海洋情報、災害把握など、リモートセンシングはさまざまな分野で使われていますが、今後はさらに、農業利用や資源探査などでの活用が期待されています。

なかでも注目されるのが農業分野でしょう。地球上の人口増加にともない、食糧需要の逼迫が言われていますが、作物の生育状況や収量推定、病虫害発生、成分品質、水分特性、土地生産力などのさまざまな情報が得られることによって、効率的な生産が可能になり、干ばつを未然に防ぐこともできるかもしれません。

北海道などではすでに取り入れられている

ようですから、今後はさらに利用が広がると考えられます。

海洋においては、地球温暖化による海面上昇や海面温度の計測、さらには高潮や津波防災にも役立つと考えられます。今後の研究が期待されます。



写真1 いちご畑で活躍するリモートセンシング

分類	項目
土地	土地利用、作物判別、作付面積、荒廃農地、浸食・崩落、融雪、冠水状況、災害状況
作物	生育状況、収量推定、成分品質、収穫期推定、病虫害発生、災害・被害
土壌・環境	腐植含量、水分特性、礫分布、土壌分類、熱環境、蒸発散、適地判定
総合	土地生産力、土地改良、圃場管理、生育管理、営農計画、災害・被害対策

表1 リモートセンシングの農業利用分野

Q.4

ところで、波浪観測においても人工衛星が活用されているようですが？

いわゆるリモートセンシングとは少し違いますが、沖合の波浪をGPSデータに基づき観測する「GPS波浪計」が整備されています。

GPS波浪計の波浪観測の仕組みについては「GPS波浪計によるチリ津波の観測結果と数値計算」(本誌16~17ページ)を参照していただくとして、ここでは特徴について述べます。

第一は、海底の地形の影響を受けることなく、しかも陸地から遠く離れた沖合に設置することができ、波浪の状況を精緻に測ることができます。

第二は、従来の加速度センサーによる波浪計と異なり、長周期の潮位変化をリアルタイムかつより正確に計測することが可能なので、津波が沿岸に到達する前に津波情報として利用できます。

人工衛星を利用した測位システムの利用により、津波防災が格段に進歩すると思われれます。



写真2 GPS波浪計の外観

沿岸の
津波防災を予防する

平成21年度下期 港湾関連民間技術の確認審査・評価事業の概要

(財)沿岸技術研究センターでは、民間業者の方々が開発された技術(港湾、航路、海岸等の開発、利用に資する技術)を評価する「港湾関連民間技術の確認審査・評価事業」を行っています。この事業は、申請いただいた技術をそれぞれの分野の専門家で構成される委員会にて客観的・中立的な立場から内容を確認し、評価させていただくものです。

当センターでは、こうした第三者機関の審査・評価過程を経ることにより、開発された技術の内容と開発過程で行われた性能試験結果に関する客観性が高まり、具体的な事業に適用しやすい環境が整うことを期待しています。

民間技術開発の重要性が高まるなか、この事業が、新しい様々な港湾関連技術の活用・普及と開発が進むための一助となることを祈念するものであります。

本事業は、今回で第16回の審査が終了いたしました。今後とも各社からのご応募をお待ちしております。

【評価技術について】

平成21年度下期の港湾関連民間技術の確認審査・評価事業において評価した技術は、新規技術3件および更新技術が1件です。

●新規技術

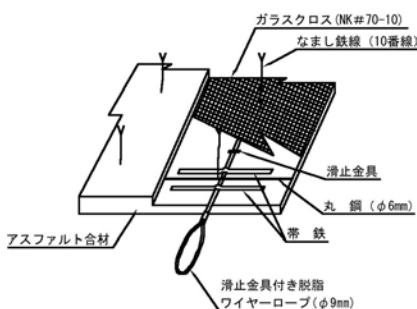
1. 摩擦増大用アスファルトマット「KAM」
評価依頼者：日本海上工事(株)
2. 自動潜水管理システム
評価依頼者：五洋建設(株)
3. ICタグによる水中転落者早期検知システム
評価依頼者：五洋建設(株)

●更新技術

建設発生土の大容量分級処理技術「ソイルセパレータ工法」
評価更新依頼者：東亜建設工業(株)、信幸建設(株)
以下に、新規技術3件を紹介します。

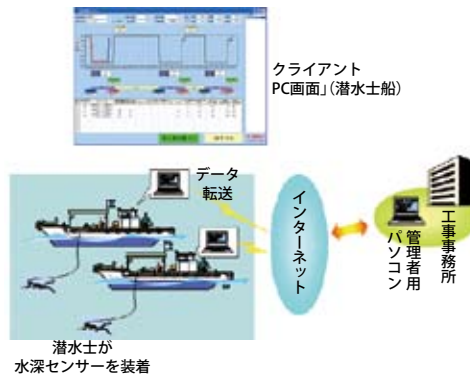
1. 摩擦増大用アスファルトマット「KAM」

摩擦増大用アスファルトマットの静止摩擦係数は、アスファルトマットが粘弾塑性体であるため、コンクリートと捨石の摩擦係数とは異なり、以下の①～④を複合したものです。①摩擦抵抗、②ほぞ効果によるせん断抵抗、③材料の弾塑性変形による抵抗、④アスファルト合材の付着抵抗。重力式構造物では捨石マウンド上に直接堤体を載せて外力に抵抗するものが大部分ですが、建設コスト縮減等のため、より経済的な工法の開発が期待されています。そこで、堤体の滑動抵抗を増大させることにより、堤体幅を小さく(重量を軽減)することができる建設資材の開発を行ったものです。以下に摩擦増大用アスファルトマットの構造例および摩擦増大用アスファルトマットの敷設状況を示します。



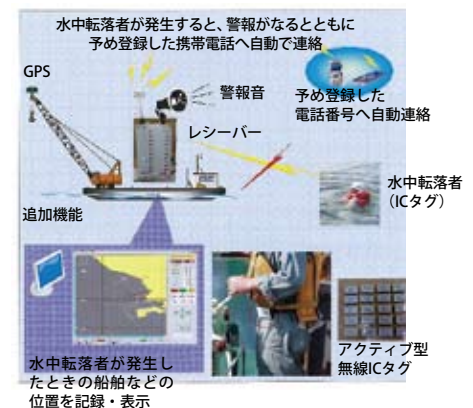
2. 自動潜水管理システム

自動潜水管理システムは、潜水士に水深センサーを装着させて、潜降開始から浮上までの一連の作業時間と潜水深度をパソコンで自動計測することで、潜水深度に応じた潜水時間、浮上方法とその時間、2回目以降の潜水時の浮上時間などを演算処理し、潜水士、船上の作業員、および遠隔地の安全管理者にアナウンスするものです。システムは、遠隔地に設置した管理者用サーバーパソコンと、潜水士船のクライアントパソコンで構成され、潜水管理画面は、潜水士船だけでなく、インターネットを経由して遠隔地でリアルタイムに監視することができます。以下にシステム概要図を示します。



3. ICタグによる水中転落者早期検知システム

本システムは、作業員が水中へ転落した際に、転落を検知・報知するものです。作業員はアクティブ型無線ICタグ(子機)を携帯し、作業船のブリッジ等にはレーザー(親機)を設置します。ICタグとレーザーは常時無線で通信を行いますが、作業員が水中に転落して通信が途絶えた場合、30秒程度で警報を発するとともに、あらかじめ登録した電話番号へ自動通知し、電子地図上に水中転落が発生したときの作業船の位置を表示します。以下にシステム概要図を示します。





第12回 国土技術開発賞の表彰式について

国土技術開発賞は、建設分野における技術開発者に対する研究開発意欲の高揚と建設技術水準の向上を図ることを目的として、建設分野における優れた新技術及びその開発に貢献された技術者を対象に表彰する事業です。本賞は、平成10年度に(財)国土技術研究センターにより「建設技術開発賞」と称して創設され(11年度から表彰を開始)、その後、平成13年1月の国土交通省発足を機に、「国土技術開発賞」と改称されるとともに、当センターとの共催で実施されており、今回で12回目となります。また、昨年度より、地域の発展に貢献する技術を顕彰するため、「地域貢献技術賞」が創設されました。この度、今年度の授賞が行われ、その結果は右記のとおりです。

また、当センターホームページ(<http://www.cdit.or.jp/>)もご覧下さい。

【最優秀賞】

●ベル工法

(株) エム・シー・エル・コーポレーション、川崎重工業(株)

【優秀賞】

●ジャケット式栈橋の長期防食システム

新日鉄エンジニアリング(株)、JFEエンジニアリング(株)

●非接触肉厚測定装置

(独) 港湾空港技術研究所

●IH式舗装撤去工法

(株) 竹中道路、グリーンアーム(株)

【入賞】

●油圧ハンマ騒音低減装置

東洋建設(株)

●T-R E S P O構法

大成建設(株)

●ナックル・ウォールおよびナックル・パイル

(株) 大林組

●マジックボールシステム

東京電力(株)、東亜建設工業(株)

【地域貢献技術賞】

●ロングスパン・ポケット式落石防護網工法

田中工業(株)、(株) 第一コンサルタンツ

●側溝上部改修工法

高橋土建(株)

※上記色文字は港湾関係技術

※応募書類の受付順

※会社名は応募者のみ記載、応募書類の記載順



『TSUNAMI』英語版・インドネシア語版、平成21年度土木学会出版文化賞受賞

(財) 沿岸技術研究センターは、津波に関する我が国の知見を広く世界に情報発信することを目的として、津波から生き延びるための知識等をまとめた『TSUNAMI』の出版事業に取り組んで参りました。これまで、日本語版の他、英語、インドネシア語、韓国語でも出版されており、海外においても我が国の津波に関する知識と対応策に係る知見の普及を進めております。今般、これらが評価され、(社)土木学会第96回通常総会において平成21年度土木学会出版文化賞が授与されました。

『TSUNAMI』につきましては、当センターホームページ(<http://www.cdit.or.jp/>)をご覧ください。

『津波は怖い!』

(独) 港湾空港技術研究所監修
沿岸技術研究センター編

(財) 沿岸技術研究センターは、人々が津波から生き延びるために必要な知識としての津波の性質やその対応策等をまとめた『TSUNAMI』を出版しております。より幅広い層の関心の向上を目指し、今般より読みやすい、分かりやすい読本『津波は怖い!』を出版いたしました。

概要、購入に関しますご案内を当センターホームページ(<http://www.cdit.or.jp/>)に掲載しております。

なお、本書は書店にて販売しております。



『海洋鋼構造物の防食技術』

～厳しい腐食と戦った防食技術者たちの20年間のノートから～『海洋鋼構造物の防食技術』編集委員会 編

本書には、海洋・港湾鋼構造物に使用されている有機被覆、ペトロラタム被覆、無機被覆、塗装被覆、電気防食の各種防食工法の防食効果や耐久性などを検証するために、年間を通じて厳しい腐食条件にある波崎海象観測栈橋の基礎鋼管杭を使用した20年以上にわたる長期の暴露試験から得られた多くの貴重な知見が、実例をあげて紹介されています。

なお、本書の購入に関するご案内は、技報堂出版までお問い合わせ下さい。

鋼管杭の防食法に関する研究グループ著○ 本体価格 3,000円(税別) B5判 並製・252頁
ISBN 978-4-7655-1763-8○ 出版社名 技報堂出版(株) (<http://gihodobooks.jp/>) 〒101-0051東京都千代田区神田神保町1-2-5E (03) 5217-0885 Fax(03)5217-0886○平成22年3月刊行中



「浚渫脱水処理土を活用した新しい環境負荷低減型海洋築堤工法の開発」、平成21年度地盤工学会地盤環境賞受賞

(財) 沿岸技術研究センターは、国土交通省九州地方整備局関門航路事務所、(株)日建設計シビルと共同で浚渫土砂を活用した築堤工法について、開発を進めて参りました。浚渫土砂の減容化、セメント系固化剤を使用しない環境負荷の少ない技術を確立したことが評価され、(社)地盤工学会第52回通常総会において、平成21年度地盤工学会地盤環境賞が授与されました。

当センターは、今後の誌面づくりに反映させるため、皆様のご意見ご感想をお待ちしております。詳細は当センターHPをご覧ください。

URL:<http://www.cdit.or.jp/>

【編集後記】

4月に着任して、初めてCDITの編集に携わりました。あっという間に時間のみが経ってしまったように感じておりますが、何とか皆様のお手許に「CDIT」第32号をお届けすることができました。まだまだ不慣れではありますが、今後ともよろしくお願ひします。また、「CDIT」に関しまして、忌憚のないご意見をお寄せ下さい。(TK)

CDIT

Coastal Development Institute of Technology

発行 財団法人 沿岸技術研究センター
〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16 住友半蔵門ビル6F
TEL. 03-3234-5861 FAX. 03-3234-5877
URL <http://www.cdit.or.jp/>
2010年7月29日発行