

新たな津波被害予測に関する研究

- 港湾空港技術研究所 津波防災研究センター 主席津波研究官 富田 孝史
国土技術政策総合研究所 沿岸防災研究室 室長 小田 勝也
港湾局 海岸・防災課 課長補佐 池田 直太

要旨

東海地震等による大津波が懸念され、津波対策が進められている中、2004年インド洋津波による広域浸水、津波破壊力、多種多様な津波漂流物の発生などを目の当たりにした。繰り返し津波被害を受けてきている我が国であるが、高度に発達した臨海工業地帯や商業地帯はこれまで大津波による被害を経験していない。そういった地域を含めて津波防災・減災をより高度に実現するためには、起こりうる被害を具体的に予測する必要がある。本研究では、津波被害を予測する技術について提案し、我が国さらに世界における今後の津波防災の向上を目指す。

1. はじめに

東海、東南海、南海地震などの将来の発生が懸念されている。これらの地震は、これまでの歴史にも示されているように大津波を発生させ、我が国沿岸の広い範囲に大きな被害を及ぼすことが想定されている。安心・安全な国土の確立に向けて、種々の津波対策が検討され、構築されつつある。そういった最中の2004年12月26日にスマトラ島沖で大地震が発生し、それに伴った津波がインド洋沿岸諸国を中心として歴史上最悪規模の災害をもたらした。本研究は、こういった被害からの教訓を活かして、津波被害をより一層軽減する手法を提案するものである。具体的には、構造物による津波低減効果、漂流物の影響などを考慮できる津波被害シミュレータを構築し、人の避難行動を含めて沿岸における津波防災手法を開発することが本研究の目的である。そのために本年度は、2004年インド洋津波による被災プロセスの解析、3次元非静水圧の数値モデルによる津波被害予測手法の検討、及び従来の津波ハザードマップにおける課題の整理を行う。

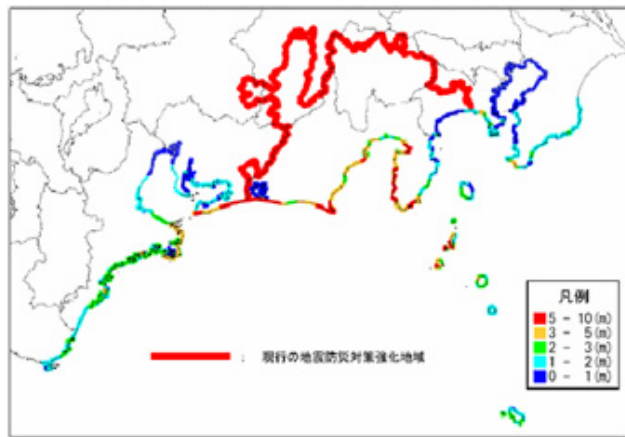
2. 我が国で想定される津波被害

我が国の周辺海域では、太平洋プレート、フィリピン海プレート、ユーラシアプレート及び北米プレートによるプレート沈み込み帯が形成されている。インド洋津波を発生させたスマトラ島沖地震と同様にプレート沈み込み帯では、歴史上繰り返し大きな地震が発生し、それに伴って津波も発生している。例えば、東海から南海にかけての太平洋沿岸では、1605年慶長地震津波（発生領域：駿河トラフから南海トラフ）、1707年宝永地震津波（駿河トラフから南海トラフ）、1854年安政東海地震津波及び南海地震（2つ合わせて駿河トラフから南海トラフ）、1944年東南海地震津波（南海トラフの紀伊半島沖合）、1946年南海地震（南海トラフの紀伊半島から四国沖）が発生している。

これまでに繰り返し起こった地震は将来も再び発生する可能性が高い。地震調査研究推

進本部によると、今後 30 及び 50 年間（2006 年 1 月 1 日を算定基準とする）に地震が発生する確率は、例えば、東南海地震（M8.1 前後）では 60%及び 90%程度、南海地震（M8.4 前後）では 50%及び 80～90%である。

このような地震や津波に対して、中央防災会議は、「東海地震に関する専門調査会」、「東南海・南海地震等に関する専門調査会」などを設置して、発生しうる地震や津波による被害を想定している。例えば、想定東海地震による沿岸の津波は局所的には 10m に達し（図－1）、津波による犠牲者は、水門の閉鎖等の有無、避難率および時刻によって人数が異なるが、約 200～2200 人と想定されている。特に被害が広域に渡ることが津波被害の特徴の一つである。



図－1 想定東海地震による津波高さ（「東海地震に関する専門調査会」資料）

このように、津波による被害は、水門の閉鎖等の有無、避難率および時刻によって人数が異なるが、約 200～2200 人と想定されている。特に被害が広域に渡ることが津波被害の特徴の一つである。

3. 2004 年インド洋津波被害の特徴

2004 年 12 月 26 日にインドネシアのスマトラ島西方沖で発生した M9.3 の大地震により津波が引き起こされ、インドネシア、タイ、スリランカなどインド洋沿岸諸国において、22 万人以上が犠牲となる津波被害が発生した。この大災害により、津波被害というものを再認識させられた。以下に、2004 年インド洋津波被害の特徴をとりまとめる。

3. 1 広い浸水域と破壊力

インド洋津波では、沿岸の広い範囲が浸水した。とくに低地が内陸に広がっている地域では、海岸から数 km 離れた内陸にまで海水は到達した。写真－1 は、インドネシアのスマトラ島最北部のバンダアチェ市内の津波後の様子である。バンダアチェ市の海岸には 10 m を超える津波が来襲したことが被害調査によって判明している[1]。巨大な津波は堅牢な建物以外を破壊し、写真に示すような状況は海岸線から 2～3km 内陸まで続いた。写真－2 は、海岸線から 2.5km 離れた内陸にある高校の建物に残った水跡であり、その高さは地盤上 4.0～4.4m である。この周辺の地盤高さは海面上 1.3～1.6m であったことから[2]、低い平坦な沿岸部が広い範囲にわたり浸水した。



写真－1 バンダアチェにおける被害

一方、津波による浸水深が浅い場合は、どのような被害であろうか。写真－

3は、スリランカ南西部に位置するモラトゥワにおける津波被害の一例である。木造やレンガ造の建物が被災しながらも残存している。この周辺に來襲した津波の高さは、平均海面上約4mであるが、陸上の浸水深は0.8m程度であった[2]。陸上における水脈の高さが低かったため、木造建物であっても全壊を免れたと考えられる。このことは、津波を低減させることにより被害が著しく軽減する可能性があることを示唆している。



写真-2 海岸から2.5km内陸の浸水



写真-3 浸水深1m未満の地域の被害

3. 2 様々な漂流物

津波は、建物の破壊に伴う瓦礫、自動車、漁船、バージ、オイルタンクなど様々なものを押し流し、被害を拡大させた。写真-4はバンダアチェ市において元の係留地点から3km内陸まで打ち上げられた平底の発電船（長さ60m、幅20m）である。発電船の残された場所における津波の痕跡高さは地盤上3m程度であり、船の喫水とほぼ同程度である。すなわち、船底が地面に接地したところに止まったことになる。

また、多くの漁船なども流出した。例えば、スリランカ西海岸にあるベルワラ漁港では津波の第1波の引き波により漁港内に停泊していた漁船が港外に引き出され、その後の第2波の押し波により海岸に打ち寄せられるという被害が発生した。

流失したのは船舶ばかりでない。バンダアチェ市から40km程度東に離れたクルエンラヤの近郊では、直径17m及び高さ11mのオ



写真-4 内陸3kmまで打ち上げられた大型船舶



写真-5 オイルタンクの津波漂流

イルタンクが、ほぼ海岸線に沿って約 300m 押し流され町中に取り残された (写真-5)。流出したタンクは3つあり、それらの全てが空であった。現地調査からここには地上約5mの高さの津波が来襲したと推定している[2]。

スリランカでは、海岸から約 200m 内陸を走る列車が津波により押し流され 1000 名を超える人的被害が発生した。津波の第1波による浸水によって停車した列車に沿岸住民の一部が避難し、その後来襲した 5m の津波により客車が押し流された。

その他、多くの自動車なども押し流されている。

3. 3 地形の変形

津波は、構造物を破壊するだけでなく、地形を変化させた。バンダアチェでは津波による侵食が海岸線の形を大きく変えた。さらに、津波により建物の基礎が洗掘され、それにより構造物が被害を受けた例が各地で数多く見られた。写真-6はタイのバンタオ海岸における建物の基礎地盤の吸い出しおよび洗掘とそれに伴った土留め壁の沈下である。

3. 4 構造物などによる津波破壊力の低減

インド洋津波では、被害の大きさだけでなく、沿岸の構造物や植生によって津波が低減され背後地の被害が軽減した事例も報告されている。例えば、写真-7は、バンダアチェ市で見つけられた道路盛土背後の被災建物である。写真の左側から高さ 10m の津波が押し寄せた場所であるが、盛土の陰に隠れた建物の1階部分は柱だけでなく壁も残った。近隣の建物は土台を残すのみで何も残っていない状態であったことから、盛土のようなものが津波被害を軽減できることを示唆している。

また、港湾背後においても津波の被害が軽減された例がある。写真-8はスリランカのベルワラ漁港の航空写真と被災後の1月6日に撮影した漁港背後の集落である。津波の痕跡高さを調査したところ、漁港内の津波高さは 2.4m、隣接する漁港外の海岸では 4.8m であった。この漁港背後で津波によって引き起こされた陸上浸水深は 1m 以下になり、このため他の場所では破壊されたレンガ造りの建物も破壊されなかった。この津波低減は、漁



写真-6 基礎地盤の洗掘



写真-7 盛土による津波被害の軽減



写真-8 漁港背後の津波被害の軽減

港の防波堤や護岸によるものと考えられる。

4. 求められる津波対策

我々は、このインド洋津波災害から、広範囲にかつ内陸深くまで浸水することがあること、そして構造物に対する津波破壊力、津波によって発生した種々の漂流物とその影響を再認識させられた。その一方で、沿岸の構造物や植生などによって津波の破壊力を低減できること明らかになった。より高度な津波被害の防止・軽減対策を構築するためには、地域の特徴を考慮しながら起こりうる被害を具体的に予測する必要がある。我が国では、繰り返し津波被害を経験し、最近でも1993年北海道南西沖地震津波、1983年日本海中部地震津波によって大きな災害を被っている。しかし、高度に開発された臨海工業地帯や商業地帯に大津波が来襲した経験は無く、津波によって起こりうる被害を具体的に予測する必要がある。

4. 1 ハザードマップ

現状の津波の被害予測は、地域に来襲する津波、それによる浸水域、浸水深、津波到達時間などを歴史津波の解析や津波シミュレーションによって行う。その結果を地図上に示したものが津波ハザードマップであり、各地で整備が進められている。図-2は、その一例であり、想定津波によって浸水される地域、陸上における津波到達時刻等が示されている。さらに避難所や避難路を示すことにより防災地図としての役割を持つ。また、こういったハザードマップを作成することにより、必要な対策も見えてくる。例えば、避難所の配置計画、避難路の設定、津波防護施設の整備計画など、具体的な検討が可能になる。津波ハザードマップの作成や利用に関して、2004年4月に内閣府（防災担当）、農林水産省農村振興局、農林水産省水産庁、国土交通省河川局及び国土交通省港湾局の監修の下に「津波・高潮ハザードマップ・マニュアル」（沿岸開発技術研究センター）が発刊されている。

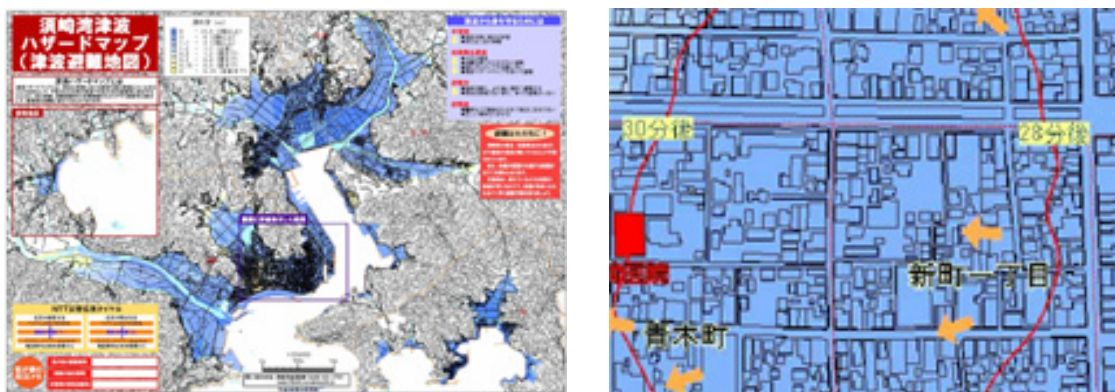


図-2 ハザードマップの一例（左図：表面、右図：裏面の一部）

4. 2 動的ハザードマップ

4. 2. 1 被害の具体的な予測

ハザードマップで対象とする津波は、その地域に来襲し得る最大級のものであるのが一般的である。こういった巨大津波を構造物で完全に防ぎ止めることは困難である。津波に

よる浸水を完全に防ぐためには来襲する津波高さの2倍近くの高い壁が必要で、現状における海岸の利用や環境を考えるとそういった構造物の建設は難しい。しかし、構造物による津波エネルギーを低減させることができ、それにより被害が軽減することはインド洋津波被害でも認められた。さらに、内陸部への津波の到達時刻を遅らせ避難を支援する効果も持つ。したがって、津波による防護構造物の被害の有無に合わせて構造物による津波低減効果を評価し、津波による被害想定をして、ハードとソフトを有効に組み合わせた総合的な津波対策を講じることが、地域の防災力を高めることにつながる。

では、防災対策の確立に向けてどのような被害を想定すれば良いのであろうか。既存のハザードマップにも示されるように現状の数値計算技術によって海岸に来襲する津波高さや到達時刻の予測は可能である。さらに、どの程度浸水するのもある程度想定できる[3]。浸水深が予想できれば、首藤[4]などによって既往の被害事例などに基づいてまとめられた津波被害と津波高さの関係から、被害の様相は概ね推定できる。しかし、インド洋津波が内陸に侵入する過程や様々なものを押し流しながら町中を流れる様子のビデオ映像などを見ると、津波の高さや浸水深だけでなく流速や波力についても推定し、より高度な防災・減災対策を検討する必要があると思われる。例えば、列車が被災したスリランカのカハワでは、海岸の砂浜背後の2m程度の高さの砂丘を頂点として内陸に向けて1~2%の下り勾配斜面となっていた。津波氾濫及ぼす下り勾配斜面の影響を模型実験で調べた結果[5]、5%の下り勾配斜面は平坦地に比べて津波の水粒子速度は1.5倍、津波力は2倍程度になることがわかった。下り勾配斜面では重力の影響により水流は加速され、それに伴って流体力も増大することは明白であるが、今後このようなデータを積み上げ、被害予測の精度を向上させ、多種多様に高度に利用されている地域の被害を数値計算などによって具体的に予測し、それを防ぐための防災力を高めることが大切である。

4. 2. 2 津波被害シミュレーションと動的ハザードマップ

津波の流れや流体力を推定するための数値計算技術は進歩している。例えば、1993年北海道南西沖地震津波の奥尻島における遡上を精度高く計算するためには3次元数値モデルが必要なこと[6]、防波堤開口部潜堤周りの津波による流れに関する模型実験結果は3次元数値モデルによってよく再現できること[7]が既往の研究によって明らかにされている。3次元モデルのような数値モデルを使えば、津波による浸水だけでなく、流速や流体力が計算可能になる。そういった物理量の他に漂流物を含めて具体的な被害を想定できるようにする努力が行われている。例えば、図-3は、港湾空港技術研究所で開発してきている非静水圧3次元数値モデルを含んだ高潮津波シミュレータ STOC[8]を使って、護岸により防護された仮想臨海部を流れる津波を数値計算したものである。こういった計算を、建物などの構造物が多数存在する実地形上において実施し、津波による構造物の損傷を含めて臨海部で複雑な挙動を示す津波を極力正確に予測する研究を国土交通省と協力して実施している。津波力を含む津波のダイナミックな挙動を市民等にわかりやすく表示する動的ハザードマップ(図-4)により、避難システムの構築および住民への避難行動に向けた知識の普及に活かそうと考えている。

建物などの存在を考慮して津波計算を実施するためには、建物データを含む詳細な地形

データが必要である。そういったデータを取得する技術も進歩しており、現在、航空レーザー測量を使えば、2m 程度の空間解像度の地形データが得られる。このような詳細な地形データを使った津波被害の想定が行われ始めている。

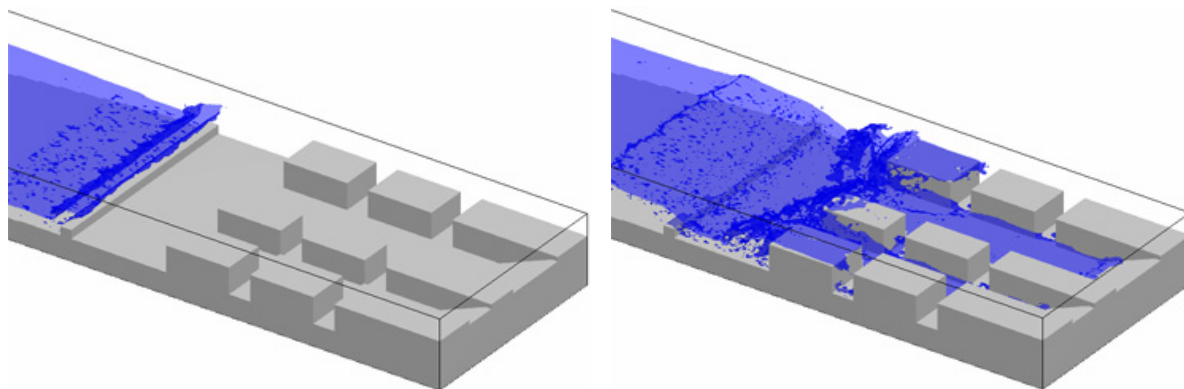


図-3 STOC による仮想臨海部における津波氾濫の計算例

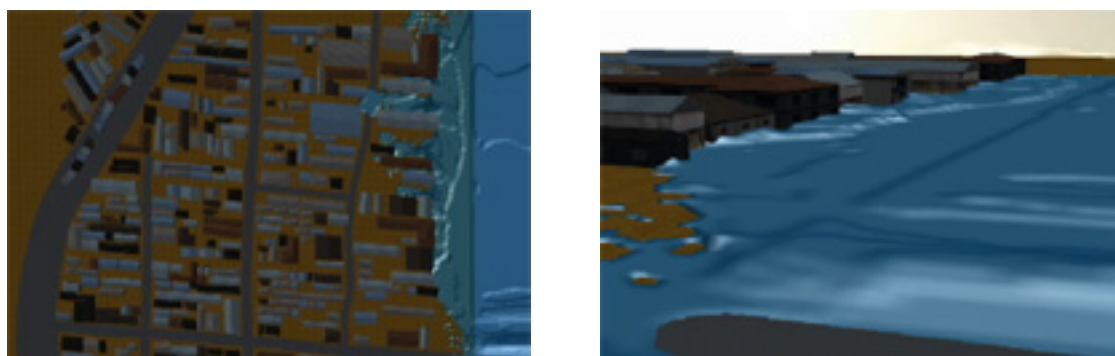


図-4 動的ハザードマップのイメージ

4. 3 動くハザードマップ

4. 3. 1 ハザードマップの課題

津波、高潮による被害を軽減する上で住民一人一人が、自らがどのような災害の危険性（津波・高潮のリスク）に曝されており、災害発生時にどのように避難するかなどを十分に認識していることが重要である。現在、住民自らの避難行動を支援する施策として避難場所の確保、情報掲示板・同報無線等の避難情報提供設備の整備に加え、津波・高潮ハザードマップの作成・活用が国土交通省等も支援しつつ進められている。しかし、地図上に各種の情報を記載したハザードマップには一定のシナリオに基づいて作成されることから利用者の災害イメージを固定化し、ハザードマップでは自分の家は浸水していないから自分は避難しないでも大丈夫であるといった思いこみを招き、逆に安心マップになりかねないという課題がある。また、津波に対する意識は十分にありながらも実際の避難に結びつかない理由として「自分の身には危険が及ばない」と思いこむ正常化の偏見があると指摘されており、ハザードマップの役割として正常化の偏見を打破することが求められている。作成過程や防災訓練などで避難ルートの確認等を行ってはいるものの、実際の避難時の行

動と結びつけにくいと等の課題も指摘されている。

4. 3. 2 リスクコミュニケーションと動くハザードマップ

実際の災害は、多様で災害の規模や被害の態様は事前の予測シナリオどおりではない。こうした中で実際に安全な避難行動をとるためには、様々な災害の様相や実際にどのように避難するかなどについて住民と行政や専門家が情報をキャッチボールしながら理解を深めるリスクコミュニケーションを進める必要がある。国土技術政策総合研究所では、ハザードマップの課題への対応やリスクコミュニケーション支援を目指して動くハザードマップの開発を進めている。表-1に現行のハザードマップと動くハザードマップの特徴を比較して示す。

表-1 ハザードマップの特徴の比較

	現行のハザードマップ	「動くハザードマップ」
利用者	住民/行政	住民
媒体	主に紙面上	主に画面上(想定)
発災・避難の条件	固定的(災害イメージの固定化の可能性がある)	試行錯誤的に設定できる(災害イメージの固定化が起こりにくい)
活用する内容	・浸水範囲、避難場所及び主要な避難経路の確認等	・実際に避難が可能な経路を住民が自ら検討 ・避難場所が適切に配置されているか住民が自ら検討等
活用の時期	平常時(ワークショップ等) 災害時(避難時に携行等)	平常時(ワークショップ等)

動くハザードマップは、住民と行政担当者などがワークショップなどの場で利用することを想定し、図-5のイメージに示すように時々刻々変化する津波・高潮の浸水状況、地震による家屋倒壊・浸水・火災による避難経路閉塞などを考慮できる避難シミュレーターである。

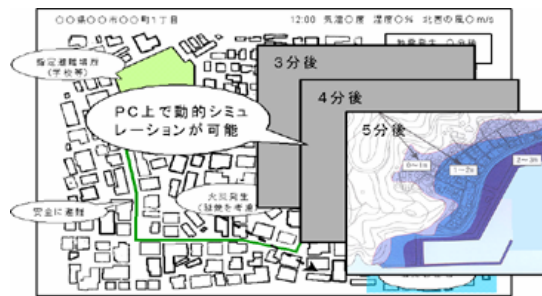


図-5 動くハザードマップのイメージ

住民にとっては、図-6のシステム構成と操作手順に示すように住民一人一人がそれぞれの避難開始場所・時刻、徒歩・車椅子などの避難方法、避難経路などを入力し、安全な避難が可能かどうか、最適な避難方法は何かなどを試行錯誤しながら体験でき、理解を深めることができる。行政にとっては、避難経路の整備や避難場所の確保方策の検討に役立てることができる。近隣の住民同士や町内会などで相互に助け合い、お年寄りや体の不自由な方などを助けて避難する方法は何かなどいわゆる互助のためのツールとしても活用できる。

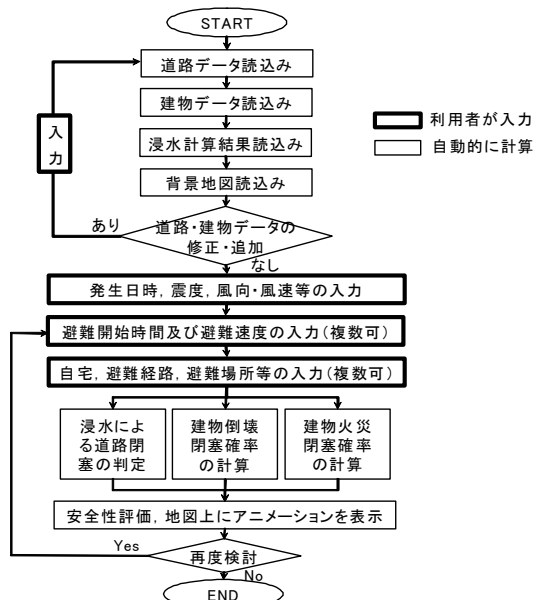


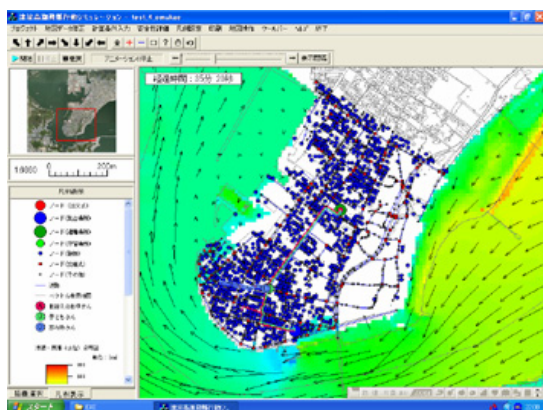
図-6 システム構成と操作手順

4. 3. 3 研究開発の現状と実用化に向けて

これまでに、動くハザードマップの要素モデルの開発はほぼ終了している。現在、地域の方々の参加を得て動くハザードマップを

試行し、より使いやすくするための改良を加えるなど実用化を目指した検討を進めている。具体的には、高知県高知市種崎地区を対象として高知県、高知市、四国地方整備局高知港湾空港整備事務所から各種データを提供して頂いて動くハザードマップを試作した（図－7）。試作した動くハザードマップを種崎地区津波防災検討会（写真－9）で説明し、地域住民の方々にも実際に操作して頂き、意見の集約などを進めているところである。今後、別シナリオの浸水ケースを追加して地域で試行するなどの取り組みを進めるほか、より実際に近い避難経路の状況や閉塞要因、避難行動をシステムに反映させるなどの改善を行う予定である。

また、複数の浸水シナリオを簡易に作成できる手法の検討、動くハザードマップによって地域住民の方々の避難に対する意識がどのように変わったのかを計測・評価し、動くハザードマップに反映させる手法の検討も今後の重要な課題である。



図－7 動くハザードマップの画面



写真－9 種崎地区津波防災検討会

4. 4 リアルタイム被害予測

GPS 波浪計により沖合津波の観測に成功し[11]、国土交通省港湾局では GPS 波浪計を計画的に配備することとしている。港湾空港技術研究所では、こういった沖合で観測された津波データを数値計算と同化させて、津波被害を事前にあるいは発災後数時間以内に推定する技術開発を国土交通省、京都大学防災研究所や東北大学と協力して実施している。こういった技術は、被害の防止・軽減や救援・救難などに役立つと考えられる。

5. まとめ

インド洋津波被害直後の平成 17 年 3 月の津波対策検討委員会（国土交通省）による提言では、事前・事後にわたりハード整備とソフト対策を合わせて展開して被害最小化を目指すという考え方へ転換した対策を強力に推進することを今後の基本的方向としたうえで、被害の最小化に向けた国民及び各界各層の自覚と行動が不可欠とした。

国民及び各界各層の自覚を促すためには、津波被害の共通認識が必要であり、共通認識の下で地域の防災力を向上させる総合的なハード・ソフト対策を確立していくことが大切である。そのためには被害予測が重要となる。

本稿では、津波被害予測やハード・ソフト対策を充実させるための技術開発としてこれまでに取り組んできている、動的ハザードマップ、動くハザードマップ、リアルタイム津波被害予測などを紹介した。こういった個別技術を統合することでより一層進んだ津波被害予測技術が構築できる。ただし、現状においては計算機資源などの課題もあることから、必要に応じて各技術を選択あるいは統合できるように、各被害予測技術などの特徴、必要事項、活用方法などを解説した「新たなハザードマップ・マニュアル（仮称）」を平成 20 年度に取りまとめることを目標としている。

参考文献

- [1] 松富英夫・榊山勉他 (2005) : Banda Aceh と周辺における 2004 年インド洋津波と被害想定からみた課題, 海岸工学論文集, 52, pp.1366-1370.
- [2] 富田孝史・本多和彦・菅野高弘・有川太郎 (2005) : インド洋津波によるスリランカ, モルディブ, インドネシアの被害現地調査報告と数値解析, 港湾空港技術研究所資料, 1110, 36p.
- [3] 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998) : GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 45, pp.356-360.
- [4] 首藤伸夫 (1992) : 津波強度と被害, 津波工学研究報告, 9, pp.101-136.
- [5] 富田孝史, 有川太郎, 安田誠宏, 今村文彦, 河田恵昭 (2005) : インド洋大津波のスリランカ南西部における津波実態・被害調査報告, 海岸工学論文集, 52, pp.1406-1410
- [6] 米山 望・松山昌史・田中博好 (2002) : 1993年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析, 土木学会論文集, 705/II-59, pp.139-150.
- [7] Fujima, K., K. Masamura and C. Goto (2002) : Development of the 2D/3D Hybrid Model for Tsunami Numerical Simulation, Coastal Engineering Journal, 44(4), pp.373-397.
- [8] 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・津波シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, 44(2), 83-98.
- [9] 熊谷兼太郎・小田勝也・土方聡・奈良正 (2005) : 沿岸域における津波・高潮時の避難シミュレーター (動くハザードマップ) に関する研究, 第 35 回安全工学シンポジウム講演予稿集, pp.143-144.
- [10] 熊谷兼太郎・小田勝也・土方聡・岡秀行 (2006) : 津波時の避難シミュレーションシステム及びモデル地域における構築, 土木計画学研究・講演集, 33, CD-ROM.
- [11] 永井紀彦・里見茂 (2005) : 2004 年東海道沖地震津波の観測結果, 港湾空港技術研究所資料, 1096, 22p.