

## 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 上席研究官 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 防災企画官 梅野 修一

### 要旨

津波は、海底や陸上の地形に応じてその特性を変化させる。さらに、建物などの構造物がその背後の津波被害を低減するように、被害も地域特性に依存する。したがって、その地域の特性を反映した津波及び津波被害予測を行うことによって一層効果的な防災対策を確立できる。特に、人的被害を防ぐためには避難が不可欠であり、緊急時に市民が避難を実行するためには、日頃の防災意識が重要である。防災意識の向上のためには、その地域に起こりうる津波被害のイメージを持っていることが大切である。本研究では、津波被害を具体的に予測する技術（動的ハザードマップ）、避難を具体的に検討する技術（動くハザードマップ）を提案し、今後の津波防災の向上を目指す。

### 1. はじめに

東海、東南海、南海地震などによる大規模な津波災害が想定され、安心・安全な国土の確立に向けて、種々の津波対策が構築されつつある。その最中の2004年12月26日にスマトラ島沖の大地震にともなったインド洋津波は、インド洋沿岸において22万人以上が犠牲になる歴史上最悪規模の災害をもたらした。その後発生した2006年7月17日のジャワ島における地震津波や2007年4月2日の太平洋上のソロモン諸島における地震津波は、それぞれ500名以上及び50名以上が犠牲なる被害をもたらした。

本研究は、こういった被害からの教訓を活かして、これから起こる津波被害を軽減する手法を提案するものである。具体的には、津波被害や人の避難行動を具体的に解析できる数値計算モデルを構築し、津波防災手法を開発することが本研究の目的である。

平成18年度においては、①2004年インド洋津波による被災プロセスの解析、②3次元非静水圧の数値モデルを含む津波被害予測モデル（STOC）の開発し、それを活用して津波ハザードを具体的に示す動的ハザードマップの開発、③防災対策のうち住民の避難の具体的な検討をコンピュータ上で行うことができる避難シミュレータ（動くハザードマップ）の開発を行った。

平成19年度では、①ジャワ島やソロモン諸島の地震津波による被災プロセスの解析、②動的ハザードマップの技術的な進展、③動くハザードマップの技術的な進展、④防災意識の向上のためのハザード・防災情報の普及方法の検討を行って、本研究をとりまとめる。

### 2. 近年の地震津波による被害概要

#### 2.1 2004年インド洋津波

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の大地震にとも

なったインド洋津波は、インドネシア、タイ、スリランカ、インド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を発生させた。この災害により、①沿岸の低平地では内陸深くまで浸水すること（写真-1）、②浸水深が 2m を越えるような津波は家屋などを破壊し、より高い津波は橋梁の流失、護岸の破壊などを発生させること、③オイルタンク、発電船、漁船、列車、自動車、建物破壊に伴った瓦礫など様々なものが津波より押し流されること（写真-2）、④侵食・堆積に伴う地形の変化が発生すること、⑤防波堤などの防護構造物、沿岸の盛土、沿岸の植生などがそれら背後の津波被害を軽減すること（写真-3）が再認識させられた。



写真-1: スマトラ島北部のバンダアチェにおける被害。海岸線から 2~3km の範囲は写真に示すように住居などが壊滅し、5km 離れた内陸まで海水が到達した。



写真-2: スリランカで被災した列車。津波の第 1 波目で列車に逃げ込んだ住民を含め 1000 名以上が津波の第 2 波目により犠牲になった。



写真-3: スリランカ、ベルワラ漁港における津波被害の軽減。防波堤などの港湾施設により津波が低減され、漁港では陸上 0.7m 程度の浸水深に抑えられ、背後の村落の壊滅的な破壊は免れた。左の写真中の数値は海面からの津波の痕跡高さである。

## 2.2 2006 年ジャワ島地震津波

2006 年 7 月 17 日、インドネシアのジャワ島南沖 200km で M7.7 の地震が発生した。それによる津波は、地震後 30 分~1 時間でジャワ島中部と西部の 200km 以上にわたる海岸

に来襲し、500名以上の死者を含む大きな災害を発生させた。地震の揺れは沿岸部で多少感じたようであるが大きな地震とは感じられず、また津波来襲前に津波警報は無かった。

津波の痕跡調査から（辰巳ら、2007）、沿岸に来襲した津波の高さは3~5mであるが、岬状になっているところは波の屈折作用のために津波が収れんして6mにまで達した。一方、前面の大きな島に遮蔽されている海岸では痕跡高さは3m以下であった。

被災地では地盤の低い平地に多くの人々が住んでおり、地盤が低く津波高さが大きいところで死者の数が大きくなった。さらに、海岸で作業中の人々が犠牲になった地区もあった。

写真-4は、津波の高さは5.4mと高かったが、地盤高が4m以上あったため大きな被害に至らなかった地区のものである。一方、低い土地ではインド洋津波のように家屋等の破壊が認められた。



写真-4：地盤高が高かったため5mを越える津波でも床下浸水にとどまった地区である。

### 2.3 2007年ソロモン諸島地震津波

2007年4月2日、ソロモン諸島沖で発生したM8.1の地震による津波は早いところでは5分程度でソロモン諸島の西側の島々に来襲し、死者が50名以上にのぼる大きな被害を発生させた。ジャワ島地震とは異なり地震による大きな揺れを住民は感じており、地震による建物の破壊、地滑りなども発生している。

津波の痕跡調査によると、来襲津波の高さは3~5mであるが、局所的には最大9mの津波の遡上高も認められた。ジャワ島地震津波と同様に、この地震の場合でも、津波来襲前に津波警報は無かった。ただし、1000もの島からなる国であり、各島の住民まで情報を伝達するシステムが無いので、警報があったとしても、その有効性には疑問が残る。しかし、村全体が押し流されるような津波であったにもかかわらず（写真-5）、多くの人が津波か



写真-5：海に面した崖では5.6mまで津波は遡上し、海岸の村4mの津波が来襲したギゾ島南東海岸の被災状況。



写真-6：津波による流出から免れた高床式住居。高床の下の部分を津波が通り抜けたため流失を免れた。

ら避難することができた。住民の話によると、多くの人は津波を見てから避難を開始したようである。この避難成功は、村のすぐ背後に丘があり、短時間で高所に逃げることであったからである。また、ソロモン諸島の伝統的な住居形式である高床式住居が津波被害の軽減に寄与した。地震による損傷を免れた高床式住居は津波にも耐えて残った(写真-6)。ただし、高床式であっても壁部分に津波力がかかって押し流されたものもあった。家屋の破壊の原因には、津波の押し波の力の他、地震動、引き波および地盤の洗掘もある。

## 2.4 津波被害からの教訓

これらの地震津波被害からいくつもの教訓が得られたが、特につぎを指摘したい。

- 高い津波が来襲しても、地盤が高いところでは被害規模が小さいこと。すなわち、津波危険性(リスク)は、津波ハザードと地域の脆弱性の相乗による。このことから、津波防災・減災は、①津波ハザードを低下させること、②地域の脆弱性を低下させること、及び③ハザードと脆弱性をともに低下させることによって達成される。したがって、津波防災においては、津波ハザードおよび地域の脆弱性の評価を行って、地域特性に対応した効果的な対策を確立することが大切である。
- 津波の来襲を見ることにより避難したことから、津波被害を自分の問題としてとらえることができれば、避難行動が迅速に行われると考えられる。したがって、津波被害のイメージを住民が抱けるような工夫が必要である。

## 3. 津波被害予測手法(動的ハザードマップ)

### 3.1 津波計算のために必要なデータ

数値計算は、津波ハザードや津波に対する地域の脆弱性を評価するのに最適なツールである。津波の数値計算結果の精度は、水深や地形データの空間解像度に強く依存する。最近の我が国では、航空レーザー測量により、空間解像度が数mの地形データが入手できるようになってきており、測量データをさらに解析すれば陸上の建物などのデータも計算に取り入れることが可能である。これまでの津波計算では、建物の密集度に応じて津波の流れ難さ(粗度)を定め、建物による津波の反射などは考慮されていなかったが、これからは建物データを計算に組みこむことによって、建物に反射される津波、建物の背後に回り込む津波、道路を流れる津波などの計算が可能になってきている。

### 3.2 数値計算モデル

津波は、沿岸部の地形や水深ばかりでなく、津波の初期波形によっても大きく変化する。このため、想定地震による津波が引き起こす被害を予測するためには、大洋で発生する津波から計算する必要がある。大洋を伝播する津波を数値計算する場合には、既往の研究から明らかのように、水中の圧力が静水圧であるとする仮定は良い近似を与える。一方、構造物の近傍においては3次元的な流れ場が形成され、静水圧近似も適当でない場合がある。そこで、津波計算を効率的に行うためには、大洋を伝播する津波のための数値モデルと、構造物近傍における津波を解析するための3次元モデルを連携させる必要がある。

港湾空港技術研究所で開発している津波計算モデルSTOC（富田ら，2005）は，大洋を伝播する津波から建物などと干渉する津波までを一括して解析するために，3つのサブモデルを連成させたモデルである．大洋の津波の解析には，準3次元多層レベルモデルSTOC-MLを使う．これは，計算領域を鉛直方向に多層に分割し，各層で静水圧を仮定する．静水圧を仮定することにより圧力計算を行わないので，計算負荷は極めて少ない．一方，構造物の影響を受ける港湾域等における津波解析にはSTOC-ICを使用する．これは，3次元の非静水圧な流動を対象とする基礎方程式に基づいた3次元モデルであるが，水表面の位置の検出を簡便化して数十km<sup>2</sup>規模の拡がりをもつ臨海部を計算対象にできるようにした．構造物に作用する津波力を精度高く解析するモデルがSTOC-VFである．これはSTOC-ICと同じ基礎方程式を用いつつ，水表面の位置の検出をVOF法によって高精度に行うので，計算負荷は高くなるが津波の衝撃的な波力の解析等が可能である．ただし，本研究では，STOC-MLとSTOC-ICを接続させて，臨海都市等における被害推定を行った．

### 3.3 ハザード推定結果の表示法（動的ハザードマップ）

市民が津波災害のイメージを持つためには，計算結果をわかりやすく示すことが大切である．そこで，最悪規模の津波による浸水域などを示した従来のハザードマップに加え，道路を流れる津波などを動的に表示できる動的ハザードマップを検討した．

これまでの検討から，建物を障害物として計算上に組みこむことにより，建物による被害軽減効果が現れ，それが実際の被害と比較しても良い結果となったので，動的ハザードマップでは建物を障害物として取り扱うこととした．

図-1に従来型のハザードマップの例，図-2及び3に動的ハザードマップの幾つかの例を示す．計算では航空レーザー測量に基づいた空間解像度2mの地形及び建物データを使用し，図-1の右図に示す第7領域にSTOC-ICを，その他の第1～6領域にSTOC-MLを適用した．従来型のハザードマップでは，最終的な浸水域や最大浸水深を容易に把握できる．一方，動的ハザードマップでは，視点を3次的に自由に移動しながら，津波による水位，流速，波力などを可視化することにより，津波により生じる現象を視覚的に捉えることに配慮した．特に，建物データや3次元モデルを使用しているので，建物周辺の津波

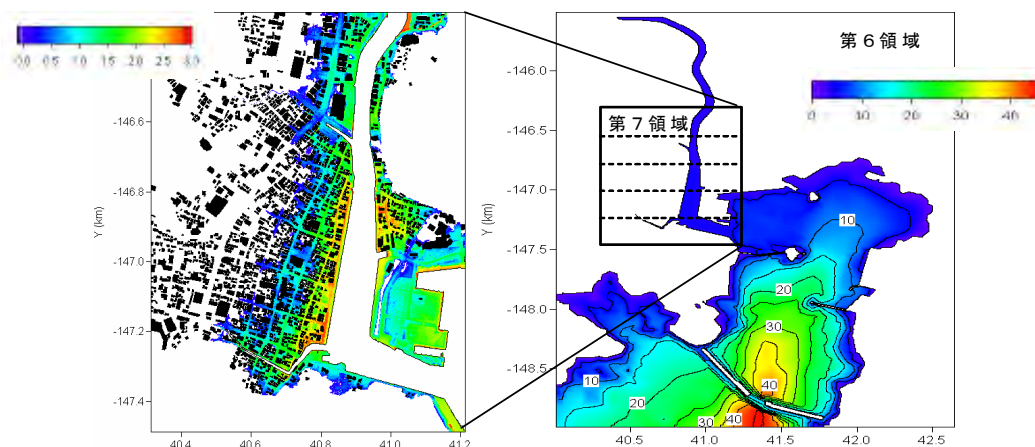


図-1：従来型のハザードマップ式の表示．左図：最大浸水深，右図：計算領域と水深．

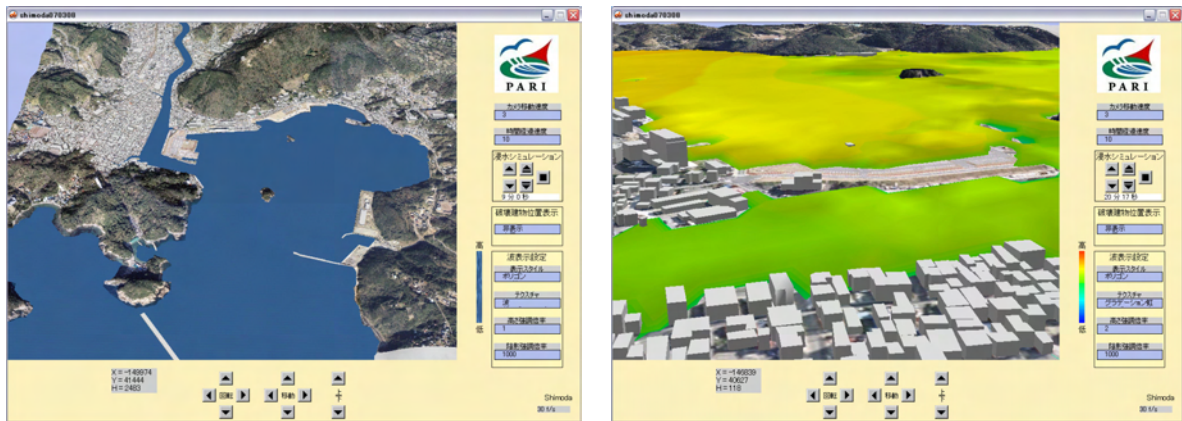


図-2：動的ハザードマップの表示例. 左上：遠景，右上：近景.

の浸水深だけでなく、流速や波力を計算でき、これらの物理量を使って建物の被害推定が可能である。図-3では、浸水深が1mを超えると床上浸水などによる被害が出ることから、その被害域を示したが、建物破壊につながる流速や波力の値を用いれば、建物の破壊被害も同様に示すことができる。

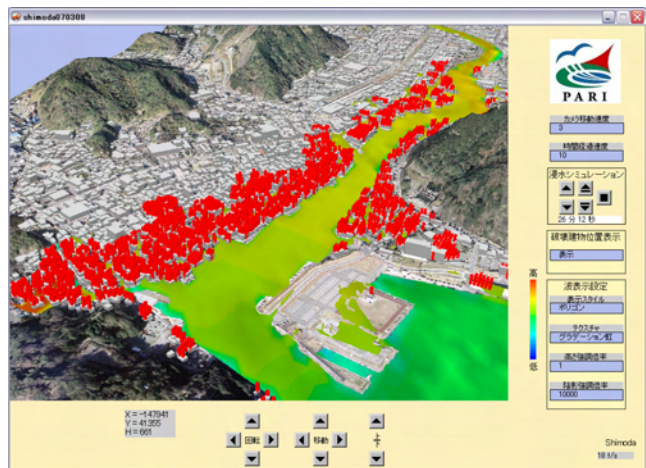


図-3：動的ハザードマップによる被害予測例.

図-4には、一連の津波浸水過程を動画として表示した例をスナップショットにて示す。このような表示により、津波によって街がどの様に浸水していくのかがよく理解できる。

この計算結果では津波の浸水深は2mよりも低く、その程度の浸水であれば建物の甚大な被害は多く発生しないので、図に示されるように津波は建物の間の道路などを流れていくものと推察される。



図-4：動的ハザードマップによる動画のスナップショット.

#### 4. 防災対策への活用（動くハザードマップ）

##### 4.1 「逃げない住民」対策

平成18年11月15日及び平成19年1月13日に千島列島沖を震源とする大規模な地震が

発生した。北海道のオホーツク海沿岸から釧路支庁までの太平洋沿岸に津波警報が、それ以外の北海道太平洋沿岸を含む東日本の太平洋沿岸等の広範囲に津波注意報が発表された。これらの地域における住民の避難状況は、消防庁資料(2007)、防災白書(2007)によると、①11月15日に津波警報が発表された地域の避難率は、避難指示地区で74.2%、避難勧告地区で12.8%、②11月15日に津波注意報が発表された地域の避難率は、避難指示地区で0.4%、避難勧告地区で5.0%と低率、③1月13日に津波警報が発表された地域の避難率は8.7%、津波注意報が発表された地域の避難率は2.9%と、11月15日以上に低率であった。

避難指示が発令されても逃げない住民がこれだけ高率にのぼるという課題に対処することが津波対策に携わる行政・情報伝達にあたるマスコミ・関連する研究者に求められている。住民の津波自体に対する認識、津波避難に対する意識を理解し、「逃げない」という住民の心理的な機序に対応した避難促進方策の提案が必要である。

図-5に「逃げない住民」の行動様式を模式化して示す。これは、片田敏孝群馬大学教授とのディスカッションを通じて整理したものである。津波が発生した際に、避難指示、避難勧告が防災無線等により伝達される共に津波の危険性に関する情報がテレビ等を通じて流され、我が身に迫る危険性や避難の必要性が認識される。一方で自分だけは大丈夫、自分の身には危険は及ばないという正常化の偏見が働く。このような相矛盾する二律背反的な心理状態（認知的不協和）に置かれた人間は不協和を解消するように行動する。その結果、「逃げる住民」と「逃げない住民」が発生する。「逃げる住民」は逃げることによって二律背反を解消している。「逃げない住民」は、逃げてない自分を正当化する理由を求める。例えば、配布された紙のハザードマップだと自分の家は浸水していない、あるいは、浸水深が低いという「災害イメージの固定化」、これまでも津波警報・注意報は発表されたけど、何も無かった、今回も大丈夫に違いないという「オオカミ少年効果」などである。

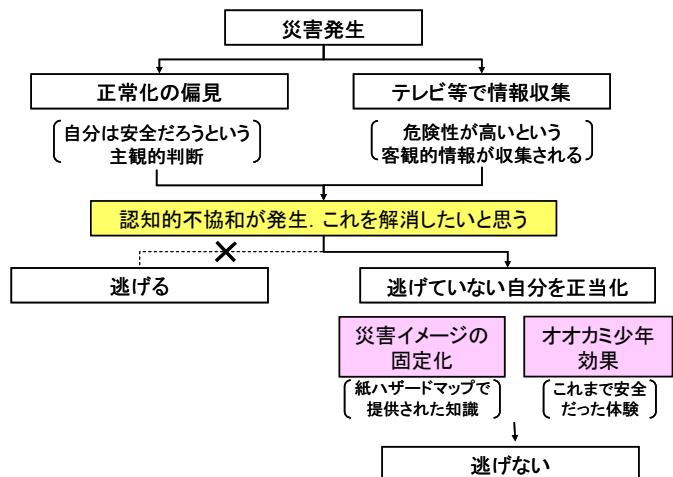


図-5：「逃げない住民」の行動様式モデル

#### 4.2 動くハザードマップの開発目的とシステムの特徴

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、逆に安心マップになりかねないという課題がある。また、正常化の偏見を打破し、ハザードマップや避難指示・勧告の情報を適切な避難行動に結びつける方策が求められている。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等の課題も指摘されている。このため、地域の特性に応じた取り組み

が進められている (Kumagai,2007)。

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ことが必要である。国総研では、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 (熊谷ら, 2006)。

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-6 のイメージに示すように時々刻々変化する津波の浸水状況、地震による家屋倒壊・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。住民にとっては、図-7 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。

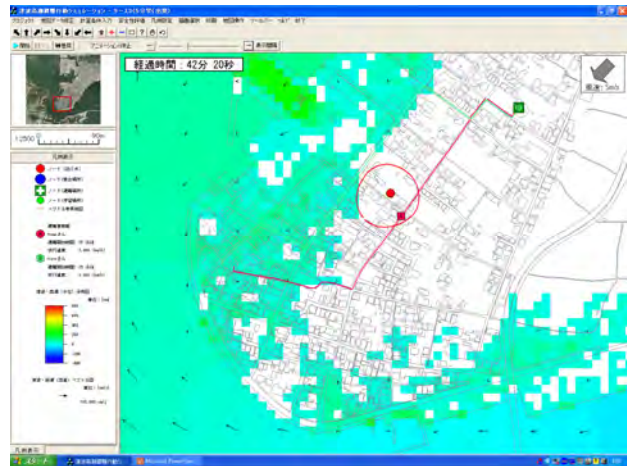


図-6：動くハザードマップの表示イメージ

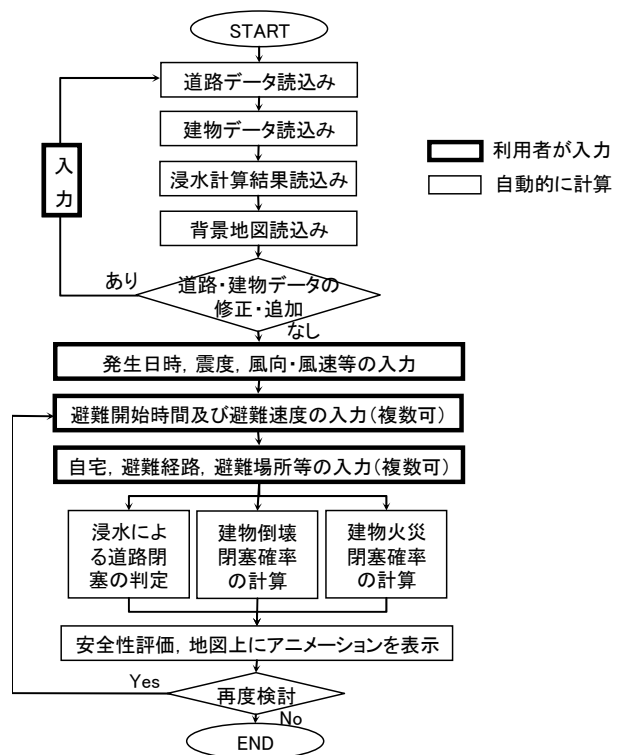


図-7：動くハザードマップのシステム構成と操作手順

### 4.3 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システム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、効果計測を行うなど実用化を目指した検討並びに普及促進のための取り組みを進めている。

具体的には、高知県高知市種崎地区を対象として表-1 に示す複数の浸水シナリオを動くハザードマップに導入した。今後、複数の浸水シナリオで動くハザードを試行するとともに住民を対象としたアンケート調査を行い、住民個人レベルの避難意思決定構造を分析し、システムに反映させる予定である。

市町村等の自治体が動くハザードマップを作成する上での障害として以下のような指



摘がある。①多額の費用を要するのではないか、②多様なデータが必要で高度なノウハウと多大な作業が必要ではないか、③紙のハザードマップ整備が先ず大事、「動くハザードマップ」は贅沢品ではないか、などである。国総研では、動くハザードマップを普及させるために動くハザードマップの作成を希望する自治体等に無償でシステムを提供するとともに技術的な助言・指導を行うこととしている。動くハザードマップを作成するために必要なデータは、①浸水計算データ、②道路・建物データ、③背景地図データである。このうち、浸水計算データ（地形データを含む。）は、紙のハザードマップを作成するためのデータを流用できる。道路・建物データは、市町村が保有している街路・道路、固定資産に関する台帳の情報が基本である。自治体によってはGIS上で電子化されている場合もありその場合にはより容易にデータ作成が可能である。背景地図データは、国土地理院の提供する地形図、商用衛星が撮影した衛星イメージあるいは住宅地図でいずれも容易に入手できる。国総研では、これらのデータの取得・作成方法を取りまとめた、「データ整備ガイドライン（仮称）」を提供する予定である。

動くハザードマップは贅沢品ではないかとの意見に対しては、動くハザードマップは、「逃げない住民」を生み出さないための住民と行政とのリスクコミュニケーションの手段で、紙のハザードマップの弊害である災害イメージ固定化の解消に寄与すること、火災、ブロック塀の倒壊など実際の避難で問題となる詳細スケールのハザードまで表現でき、ハザードマップ作成のためのワークショップや避難経路確認の補助・代替手段としても有効であることを付言したい。紙のハザードマップと動くハザードマップを同時並行で作成することも住民の意識向上を図る上で効果的な方法であると考えられる。

## 5. ソフト防災対策への活用

### 5.1 災害イメージ力の向上

2006年11月と2007年1月の千島列島沖の地震では、全体の避難率は低かった。しかし、津波警報と避難指示とが共に発表され、津波の高い危険性が示された地区では避難率は74%以上と高かった。これは、津波の危険性が想像できるようになれば人は避難しようという気になることを示唆していると考えられる。

1993年北海道南西沖地震時の奥尻町でも避難率は高かった。この地震による津波が奥尻町に到達したのは地震発生後3～5分と非常に短い時間であったが、避難率は71.9%であった。この高い避難率の背景には、10年前の1983年日本海中部地震津波による被災経験がある。日本海中部地震津波は、地震発生から15分後に3～4mの高さで奥尻町を襲い、護岸を破壊して浸水被害をもたらし、2名が犠牲になった。この災害の記憶、すなわち災害のイメージが避難行動に結びついている。

表-1：浸水シナリオ（高知市種崎地区 動くハザードマップの試行例）

	東南海・南海 地震連動型	南海地震 単独型
防潮施設は健全 (閘門は開放)	①	④
防潮施設は健全 (閘門は閉鎖)	②	⑤
防潮施設が機能喪失	③	⑥

以上のことから、市民の避難促進には市民の災害イメージ力の向上が必要である。そのためには、被害イメージを具体的に示す動的ハザードマップは有効である。さらに、一つの計算結果の表示だけでは、災害イメージが固定化される危険性があるので、複数のシナリオに基づく計算結果の表示が大切であり、コンピュータ利用はそれを可能にする。実際、津波被害は、既往の津波浸水図に示されるような、その地域で想定される最悪規模の津波や既往最大の津波よりも小さな津波でも発生している。さらに、市民が生活する街における津波の挙動を具体的に示すことにより、災害のイメージ力の一層の向上が期待できる。

また、適切な避難の実行に際しては、動くハザードマップを使って、事前に避難の仕方を具体的に検討し、避難イメージを持っていることが重要な役割を果たす。

## 5.2 防災学習

市民個人の災害イメージ力が向上すれば、自己判断により避難をしないという危険性も発生するが、津波地震（地震規模から想定される津波よりも大きな津波を引き起こす地震で、現状の技術では津波予報が困難）があることを考えると、人命保護には避難は必須であり、このような津波に関する知識とともに、動的ハザードマップや動くハザードマップにより防災学習を行うことが大切である。

## 6. おわりに

これまでの津波浸水予測図や避難マップを更に進めた動的ハザードマップや動くハザードマップなどを使って、防災学習やリスクコミュニケーションを行って、少なくとも人命損失を防ぐ努力を行えるようになってきた。今後、我が国沿岸に来襲途上にある津波に対して即時的に沿岸の津波やそれによる被害を推定する技術、更にこれからやってくる少子高齢化の時代を考えると、避難しなくてもよいという情報を発信できるような技術も必要になって来るであろう。

### 参考資料

- 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 vol. 33(CD-ROM)
- 辰巳大介・藤間功司・Subandono Diposaptono・富田孝史・高橋重雄(2007)：2006年ジャワ島津波の現地被害調査報告，港湾空港技術研究所資料，No.1157，37p.
- 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，第44巻，第2号，pp.83-98.
- 内閣府(2007)：平成19年度 防災白書，内閣府ホームページ。
- 内閣府・消防庁(2007)：千島列島を震源とする地震による津波避難の状況と今後の対応について，内閣府ホームページ。
- Kumagai, K.(2007): Utilization and Promotion of Tsunami Hazard Map, Book of the abstract of the 3rd International Workshop on Disaster Prevention and Tsunami Hazard Map Seminar in Colombo, Sri Lanka, pp.55-57.