

# リアルタイム津波浸水予測システムの研究と展望

## Views and Research about Tsunami Inundation Forecast System in Real-time

阿部 郁男 Abe Ikuo

2004年に発生したインドネシア・スマトラ島沖地震によるインド洋大津波、2010年2月に発生したチリ地震による津波など、世界各地では地震、津波災害が毎年のように相次いでいる。これまでに、日本でも多くの地震、津波災害を受けていて、地震・津波などの自然災害の被害軽減のための技術開発が進められてきた。その中の一つが津波シミュレーション技術である。津波シミュレーション技術は、東北大学で開発された技術であり、日本では気象庁により運用されている津波警報システムで活用されているだけではなく、インド洋大津波以降は被災した各国からの研修生を受け入れて技術移転が積極的に進められている。そのようななか、(株)日立東日本ソリューションズでは、長年取り組んできた科学技術計算分野でのシミュレーション技術等のノウハウをベースとした社会貢献と事業化を目指し、2002年度より東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センターとの共同研究を開始し、新たなリアルタイム津波浸水予測システムの研究開発に取り組んできた。本稿では、システム開発の過程と展望について述べる。

### 1. はじめに

(株)日立東日本ソリューションズ(日立 TO)が活動の拠点を置く東北、北海道地方は地震や津波災害の常襲地帯である。1896年に発生した明治三陸津波地震では標高38mの岬にまで津波が駆け上がり、東北地方の三陸海岸だけで2万を越える尊い命が失われる大惨事となった。それから37年後の1933年には昭和三陸地震による津波が再び三陸海岸に大きな被害を与えた。さらに、1983年には日本海中部地震、1993年には北海道南西沖地震の津波によって多くの尊い命が失われた。

このような津波による被害を少しでも減らすために、日本では1952年より津波警報システムが運用されている<sup>1)</sup>。津波警報システムは、いくつかの津波災害の度に改良され、1999年より津波シミュレーション技術をベースとした量的津波予報システムが運用されている。量的津波予報システムとは、日本全国を66に分けた予報区ごとに津波の高さ情報を発表できるシステムであり、緊急地震速報システムとの連携により、地震発生後、2-3

分で津波予報を発表できる世界最先端の警報システムとなっている。

このように、最先端の津波警報システムが運用されているが、津波警報が発表されても避難する人が少ないという「避難意識の低下」が最近の大きな社会的課題となっている<sup>2)</sup>。これは、津波の高さが湾や半島などの海岸付近の地形の影響を受け、場所によって大きく異なるという津波の実態と、津波警報や注意報はほぼ都道府県ごとの発表となっている予測の内容がかけ離れていることが一つの原因と考えられる。例えば、宮城県は津波予報としては一つの予報しか発表されないが、近い将来に高い確率で発生すると考えられている宮城県沖地震での津波の高さは、気仙沼市(旧本吉町)で10mにも達すると予想される一方で、仙台湾に面する地域では2~4m程度であると考えられている<sup>3)</sup>。この宮城県沖地震による津波の被害を最小限に食い止めるためにも、場所によって大きく異なる津波の高さの地域ごとの予測情報を提供し、より安全で確実な避難に結び付ける情報システムの

開発が必要である。

そこで、日立 TO では東北大学との共同研究により「リアルタイム津波浸水予測システム」の開発を目指した。世界最先端の津波警報システムのベースは東北大学で開発された津波シミュレーション技術である。そこに日立 TO が取り組んできた大規模数値解析などのシミュレーション技術を融合させ、新たな津波予測情報が提供できる世界最先端のシステム開発を進めている。リアルタイム津波浸水予測システムでは、ほぼ都道府県ごとの津波の高さ情報だけではなく、地域ごとの浸水範囲という具体的な予測情報を提供することを目指している。例えば、図 1 のように普段見慣れた地域の地図の上に津波による浸水範囲を重ね合わせることで、危機意識の高揚だけではなく、どこまで避難すればよいか、或いはいつまでに避難すれば安全かという具体的で避難に役立つ情報が提供できると考えている。

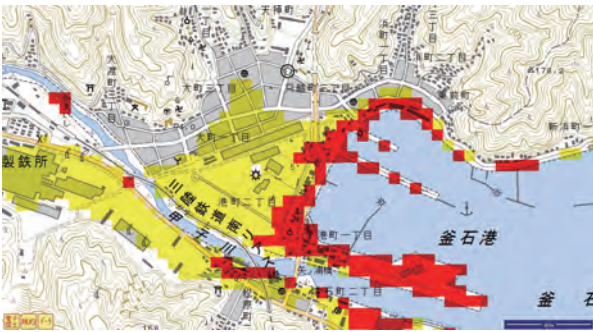


図 1 地図に津波の浸水範囲の予測を重ねた例

## 2. 津波警報とシミュレーション技術

津波シミュレーションでは、標高や水深という地形の状況を一定の間隔（格子）で区切った地形データを作成し、格子上で水位と格子間での水の流量の計算を繰り返すことによって行われる Leap-frog 法<sup>4)</sup>がよく利用されている（図 2）。

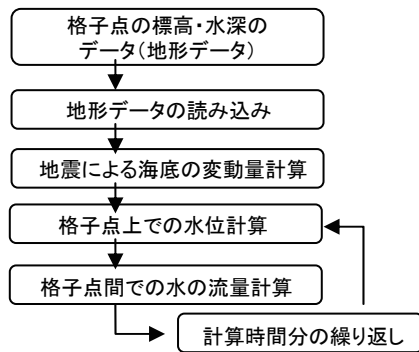


図 2 津波シミュレーションの流れ

この津波シミュレーションを行う場合、まず初めに、地震発生時の海底の変動量を計算し、津波シミュレーションの初期値として与える必要がある。この海底の変動量は、図 3 に示すような地震断層パラメータを入力することにより数秒程度で求めることができる。しかし、これらの地震断層パラメータのすべてを地震発生直後に得ることは大変難しい。そこで、気象庁により運用されている量的津波予報システムでは、地震断層パラメータを過去の経験則により推定した津波シミュレーションをあらかじめ行い、その結果をデータベースとして蓄えている。

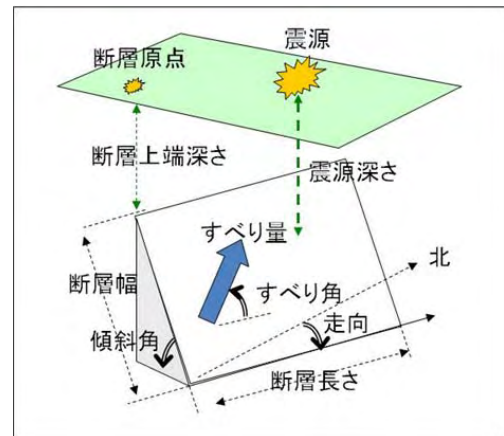


図 3 津波シミュレーションに必要な地震断層パラメータ

図 4 は 2009 年 7 月 19 日に発生した福島県沖地震で発生した津波のシミュレーションの結果と実際の観測値を比較したものである（観測値は東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センターからの提供）。現在の津波シミュレーション技術では、精度の良い地震断層パラメータを得ることができれば、図 4 のように、わずか 1cm の津波をシミュレーションにより再現することは可能である。しかし、地震発生から沿岸に津波が到達するまでは数分～数十分程度の時間しかないため、この時間内にすべての地震断層パラメータを求めることは難しい。一方、津波の被害を食い止めるためには、避難などの迅速な対応が必要である。そのため、量的津波予報システムでは、地震断層パラメータを推定した津波シミュレーションがあらかじめ行われている。

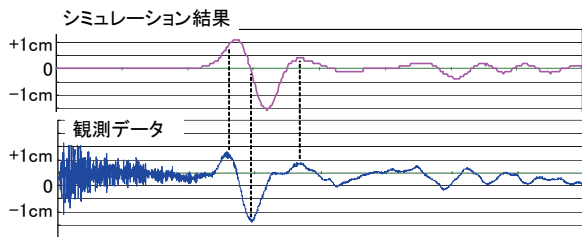


図 4 福島県沖地震での津波シミュレーションと観測データの比較



図 5 宮城県沖の GPS 波浪計

### 3. 沖合津波観測ネットワークの構築

これまで述べたように、津波シミュレーションの初期条件を決定する地震断層パラメータを推定することが津波予測においては重要である。しかし、津波は地震断層だけではなく海底地滑りや火山の噴火によっても発生することがある。具体的には、2007 年 3 月に発生した能登半島地震の際、地震断層によって発生した津波以外の津波が富山湾内で観測された例がある。能登半島地震での津波シミュレーションを行った結果、地震の強い揺れで富山湾の海底で地滑りが発生し、それによって津波が引き起こされた可能性があることが推定できた<sup>5)</sup>。つまり、津波警報などリアルタイムでの津波予測では、地震の観測だけではなく、発生した津波そのものを観測し、地震の観測による推定と合わせて津波予測の精度を高めることが最も重要である。

そこで、東北地方の沿岸域に GPS(Global Positioning System)波浪計による津波観測ネットワークを構築することが検討された。GPS 波浪計とは、GPS を搭載したブイを海上に浮かべ、GPS の位置を求めることで海面の変化（波浪、潮汐、津波）を観測する計測器である（図 5）。この検討に際し、東北地方の周辺で過去に発生した津波のシミュレーションを実施し、津波の第一波が沿岸に到達する前に津波を観測することができる場所を明らかにすることができた（図 6）。この結果により、国土交通省東北地方整備局によって 10 か所の GPS 波浪計が東北地方の沿岸に設置されることとなり、2007 年 3 月より設置がはじまり、2010 年度に設置が完了する見込みである。GPS 波浪計による沖合津波観測ネットワークの構築によって、1896 年に発生した明治三陸津波をはじめとする東北地方の太平洋沿岸で発生する津波に対して、沿岸到達より 10 分ほど前に、津波の規模を確認できることが期待されている<sup>6)</sup>。

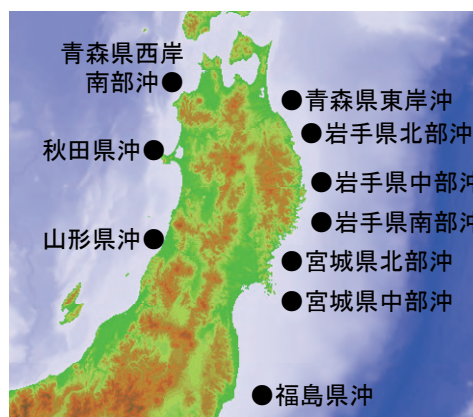


図 6 東北における沖合津波観測の配置

## 4. リアルタイム津波浸水予測システム

### 4.1 リアルタイム津波浸水予測システムの開発

沖合に GPS 波浪計が設置され、沿岸に津波が到達する前に発生した津波の規模を確認できるようになった。しかし、GPS 波浪計で観測される津波の高さは、GPS 波浪計が設置されている場所での津波の高さであり、沿岸での津波の高さや浸水範囲とは違うものである。沖合に設置された GPS 波浪計の効果を高めるためには、沖合での津波の高さを地域ごとの浸水範囲に置き換えるシステムが必要である。

そこで、震源の位置、マグニチュードという地震情報だけではなく、GPS 波浪計による沖合での津波観測情報にも対応したリアルタイム津波浸水予測システムの開発を行った。最近、計算機の性能が大幅に向上しているが、津波浸水予測シミュレーションには多くの計算機と時間が必要である。例えば、宮城県の沿岸全域を格子サイズ 50m の地形データで津波浸水予測シミュレーションを行おうとすると、3.0GHz 程度の CPU を利用した場合でも 20 時間程度の計算時間が必要である。津波の被害をより確実に食い止めるためには地震発生後すぐに情報を提供し、迅速な避難に結び付けることが重要である。そ

ここで、リアルタイム津波浸水予測システムの開発においては、地震・津波が発生した後、地震や津波の観測情報を入力してシミュレーションを開始するのではなく、図 7 に示すようにあらかじめ津波浸水予測シミュレーションを行い、それぞれの震源情報と沖合での津波観測との比較を行って予測情報を出すデータベースシステムとして構築した。今回のシステム開発では、東北大学大学院附属災害制御研究センターとの共同研究の過程で得られた、津波浸水予測シミュレーションにおける必要な初期条件の設定方法と、GPS 波浪計での津波観測データを利用したデータベース選択方法を採用し、3,600 の地震断層パラメータを設定した津波浸水予測シミュレーションを行った。津波浸水予測シミュレーションは、細かな地形を反映させるため 50m のメッシュデータを利用し、防潮堤や堤防などをシミュレーションに取り込んだ条件と、取り入れない条件の二通りでのシミュレーションを行い、結果として 7,200 件のデータを登録した。なお、リアルタイムで得られる数少ない地震観測情報および津波観測情報だけを利用して津波浸水予測データベースの選択を進め、予測精度を改善していく方法は、リアルタイム津波浸水予測システムとしては世界で初めてとなるシステムの実現である。今回、開発したリアルタイム津波浸水予測システムの画面を図 8 に示す。

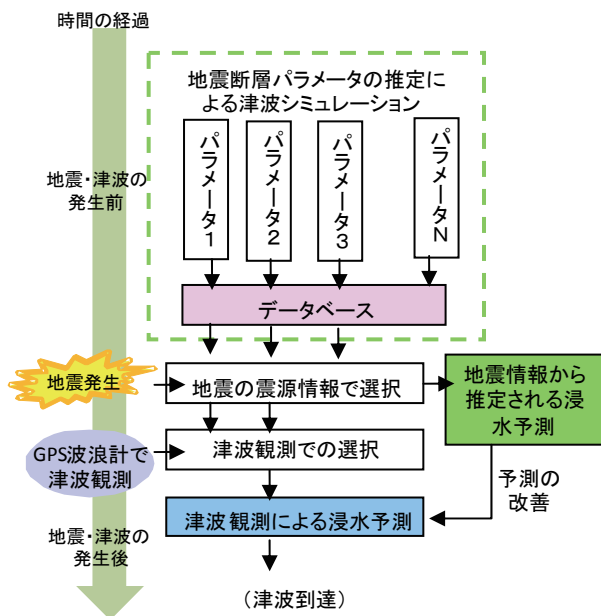


図 7 リアルタイム津波浸水予測システムの構成



図 8 リアルタイム津波浸水予測システムの画面例

リアルタイム津波浸水予測システムでは、国土地理院によって提供されている電子国土上に津波浸水予測図が重ね合わせて表示される。画面の右側には、地震の震源情報（位置、マグニチュード）、沖合に設置された GPS 波浪計での津波観測情報を選択するメニューを配置しており、これらのメニューを操作することで、その条件に一致する津波の浸水予測図が 1 分程度で表示される。ただし、このように地震や津波の観測データをメニューで選択する必要があるため、リアルタイムといっても完全に自動化されたシステムとはなっていない。

また、このシステムでは、簡単なメニュー操作で津波浸水予測図を表示できるので、地震・津波が発生した時だけではなく、日頃の防災訓練や防災教育などでも利用することができる。

#### 4.2 リアルタイム津波浸水予測システムの予測精度

リアルタイム津波浸水予測システムの予測精度を確認するため、1896 年に発生した明治三陸津波の再現モデル（シナリオ）を用いて、岩手県釜石市を対象とした検証を行った。1896 年の明治三陸津波の再現では、地震発生後 30 分過ぎに釜石市の各沿岸地域に津波が到達することとなる。検証の結果、地震発生後の 3 分後にマグニチュード 8.0 の震源情報が入手できた場合には 6%程度小さな予測結果が得られ、さらに 27 分後に沖合に設置された GPS 波浪計での津波観測情報を入手できた場合には 14%程度大きめに釜石市全域の浸水範囲を予測できる結果が得られた。ここで得られた予測結果は図 8 に示す画面例のようにシステム上に表示される。避難に役立つためのリアルタイム津波予測としては、少し大きめに結果が得られることが望ましいと考えられるため、実用上は十分な結果が得られたと考える。

## 5. リアルタイム津波浸水予測システムの展望

現在、行政機関や民間企業、地域において作成されている津波防災計画やハザードマップは、過去に発生した数例の津波を想定したものであったり、ほぼ都道府県ごとの単位で発表される津波警報、注意報に対応したものである。しかし、実際の津波は事前の想定通りに起こることは稀であり、事前に想定した内容と、実際に起きる現象が違うことによって被害が発生することになる。つまり、事前に行う想定を実態に近づけることができれば被害が発生する機会を確実に減らすことができると考えられる。

今回開発したリアルタイム津波浸水予測システムでは、様々なパターンを想定した津波浸水予測シミュレーションの結果をデータベースに登録しており、それらのデータを活用するための様々なツールを準備している。それらのツールを利用したリアルタイム津波浸水予測システムの展望について以下のように提案する。

### 5.1 津波防災マップ・ハザードマップの普及促進

津波に限らず、地震、洪水、土砂災害の防災マップやハザードマップは行政や地域の人々が災害の危険性を知り、対策を考えてもらうためのツールとして有効であり、内閣府や国土交通省などからも整備が呼びかけられている。しかし、このようなマップを作成するノウハウがないためにコンサルタント会社に業務委託を行う市町村が決して少なくはなく、財政に余裕のない市町村にはハザードマップの普及が進んでいないという課題がある。

一方、津波シミュレーションは大部分が「海の部分」の計算である。このため、特定の市町村を限定して行うよりも、複数の県を纏めるなど少し広域的に計算を行う方が効率的である。また、リアルタイム津波浸水予測システムでは、津波シミュレーションを行った結果を、インターネット上で容易に利用できる電子国土上に自動的に重ね合わせるツールを準備している。このため、財政に余裕がないためにハザードマップの作成を行っていない市町村においても複数の市町村で少しずつ分担しあうことにより、わずかな負担でハザードマップが作成できるメリットがあると考えている。そこで、今後は、中小の自治体であっても容易に津波防災のハザードマップ作りが行えるようなソリューションを、日立 TO として社会に提供できるような体制やメニューを構築していきたいと考える。

### 5.2 既存の防災情報システムとの連携

現在、多くの都道府県や市町村では、地震、洪水、土砂災害などの様々な防災情報システムが運用されており、開発元が異なるシステム同士の連携が難しくなっている。このような状況で、地震、津波、豪雨などが一緒に発生した場合には、複数のシステムを小人数の防災担当者が一度に操作することになるため大変効率が悪く、被害を減らすための情報収集やその後の予測、判断を効率的に行えないという課題がある。

そこで、リアルタイム津波浸水予測システムは、単独の防災情報システムとして稼働するだけでなく、これらの既存の防災情報システムと容易に連携できるようなインターフェースを用意している。具体的には、地震発生条件（マグニチュードと震源の位置）や沖合で観測される津波の高さ情報を指定することにより、浸水の危険性がある場所の緯度経度情報や津波の高さ、到達時間などの情報をテキストデータとして出力する機能である。これらの情報を既存の防災情報システムに重ね合わせることによって、避難や水門操作などの防災対応の優先度、避難場所の安全性、早い段階で救助や救援が必要となる場所の判断を容易に実施できるようになると考えている。そこで、今後は、避難誘導から救助、救援および復旧をサポートする総合的な防災情報システムの一翼を担えるよう、日立 TO として具体的な連携モデルを提案していきたいと考える。

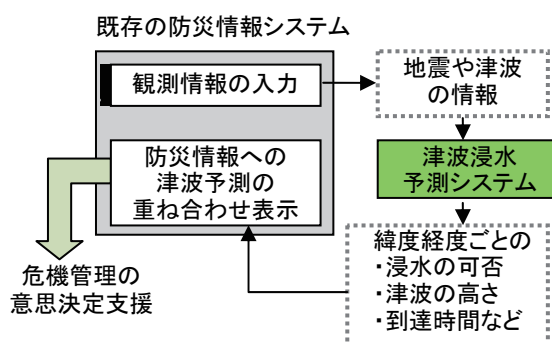


図9 リアルタイム津波浸水予測システムと既存の防災情報システムとの連携

### 5.3 事業継続計画や防災マニュアルの作成

地震・津波などの自然災害が相次いで発生しており、都道府県や市町村などの行政機関だけではなく、町内会などの地域社会、あるいは企業においても防災マニュアルや防災計画が作成されるようになってきている。これらの防災マニュアルに加え、最近では事業継続計画（BCP:

Business Continuity Plan) の作成が推奨され、企業だけではなく行政機関の取り組みも加速している。

これらの計画やマニュアル作成には、「何が起きるのか」というシナリオが重要であり、「何が起きるのか」を知らなければ「何をすべきか」を考えることができない。この「何が起きるのか」を知る情報として、現在、都道府県などの行政機関や一部のライフライン企業では地震・津波の被害想定調査などが行われている。しかし、これらの調査は、せいぜい数ケースの過去の津波を再現し、それに基づいて被害を想定したものがほとんどである。過去の津波とまったく同じ津波が発生し、津波の到達時間や高さ、浸水範囲が数ケースの想定されたシナリオ通りとなることは稀である。例えば、過去に 5m の津波が発生している地域で 5m の津波を想定して避難誘導などの様々な計画を立てたとしても、実際に発生した津波が 2m ならば過剰な対策であり、8m のならば被害が発生することになる。津波の被害を確実に食い止めるためには、地震の発生場所や規模、沖合で観測される津波の高さによって、津波の到達時間や浸水範囲にどのような特徴が表れるのかを知り、それらによる損害、対応策、被害抑止効果を考え、実行するべき防災対策を考える必要がある (図 10)。

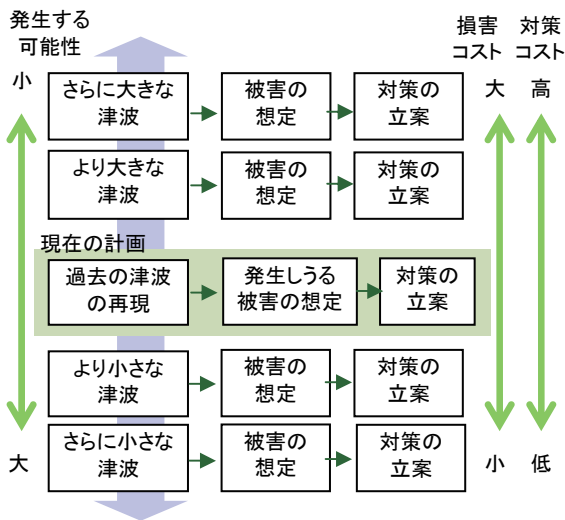


図 10 様々な想定による防災対策立案のイメージ

このように、津波の高さや到達時間、浸水範囲という情報は BCP や防災マニュアルなどの作成の最も基礎的な情報となる。それらの情報が与えられることにより、どのような被害が発生するのか、被害額がどれぐらいになるのか、被害を減らすための必要な対策とコスト、そして効果がどれぐらいになるのかを、これまで以上に精

緻に求めることができるようになってきている。

リアルタイム津波浸水予測システムでは、地震の規模や沖合での津波の規模の様々なパターンを想定した津波浸水予測が可能である。そこで、今後は、様々な被害を想定し、より確実に被害を食い止めるための BCP や防災マニュアル作りのための基礎データを、様々な地域の自治体や地域社会、さらには様々な業種、業態の企業に提供し、立地場所や業種、業態に応じた津波リスク軽減策を立案、実行できるようなデータの提供およびデータの活用のためのコンサルティング活動を、日立 TO として実践していきたいと考える。

## 6. おわりに

宮城県沖地震は近い将来に必ず発生すると言われている。また、日本国内をみると東南海・南海地震も発生する可能性が高まりつつあり、被害が想定される地域では地震・津波の防災対策が進められている。そのようななか、東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センターとの共同研究の過程で数多くの会議や研究会にも出席することができ、大学、官庁、自治体、ライフライン企業など幅広い人脈を構築することができ、さらには防災分野における社会的な課題やニーズも把握することができた。

今回、共同研究の成果として開発したリアルタイム津波浸水予測システムは、地震発生直後にも浸水範囲を表示できる世界でも初めての予測システムであり、日本国内だけではなく海外の津波被害の低減にも役立つものである。

一方、陸上への浸水被害が発生する津波はあまり起こらない。このため、システムの予測精度の検証についてはまだ十分と言えず、今後、対象地域や津波の想定をより広げることによって予測精度の検証を進めていくことが必要である。また、本稿では BCP や防災マニュアル作りへのリアルタイム津波浸水予測システムの利用を提案している。今後は、リアルタイム津波浸水予測システムが BCP や防災マニュアル作りにどのように活用できるか、具体的な事例を作成し訴求していくことが必要である。

以上の成果を踏まえて、今後は共同研究という形から日立 TO としての独自事業や日立グループと連携した事業化、さらには東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター内に今年度から新設される研究成果の普及促進を目的とした新たな組織と連携した事業化を推進し

めていく。

**参考文献**

- 1) 今村, 他: 我が国の津波警報システムの現状と高度化への試み—2006年千島列島沖地震津波と2008年福島県沖地震津波の事例—, 津波工学研究報告, 第26号, pp.97-111, (2009)
- 2) 牛山, 他: 2003年5月26日「三陸南地震」時の住民と防災情報, 津波工学研究報告, 第21号, pp.57-82, (2004)
- 3) 宮城県防災会議地震対策等専門部会: 宮城県地震被害想定調査に関する報告書, 211p, (2004)
- 4) 後藤: 津波数値計算, 後藤智明教授論文選集, pp.106-126, (2003)
- 5) Abe et al: Numerical simulation of the tsunami generated by the 2007 Noto Hanto Earthquake and implications for unusual tidal surges observed in Toyama Bay, Earth Planets Space, Vol.60, No.2, pp.133-138, (2008)
- 6) 国土交通省東北地方整備局, 他: 「津波に強い東北の地域づくり検討調査」沖合津波観測情報を活用した津波減災対策検討調査報告書, pp.38-81, (2006)
- 7) 阿部, 他: 津波浸水予測データベースによるリアルタイム津波予測の精度と評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学)

図4: 観測データは東北大学理学研究科地震・噴火予知研究観測センターより提供

図5: 提供: 国土交通省東北地方整備局



阿部 郁男                    1990年入社  
事業企画開発部  
防災分野における新規事業の創出  
i-abe@hitachi-to.co.jp