

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 課題番号 第71号
2. 研究課題名 日本周辺で発生する津波を対象とした環太平洋情報ネットワークの開発
3. 研究期間 平成19年度～平成21年度
4. 代表者及び研究代表者、分担研究者

代表者	河田 恵昭	関西大学社会安全学部・教授
研究代表者	河田 恵昭	関西大学社会安全学部・教授
分担研究者	高橋 智幸	関西大学社会安全学部・准教授
	越村 俊一	東北大学大学院工学研究科・准教授
	原田 賢治	埼玉大学大学院理工学研究科・助教
	鈴木 進吾	京都大学防災研究所・助教
	奥村 与志弘	財団法人ひょうご震災記念21世紀研究機構(人と防災未来センター)・主任研究員

5. 補助金交付総額 43,940,000円

6. 研究・技術開発の目的

2004年12月26日にインドネシア・スマトラ島北部沖で発生したマグニチュード9.0の巨大地震による津波は、近傍のインドネシアはもとよりインド洋全域に伝播し13カ国23万人以上の死者を数える史上最悪の津波災害となった。それまで、インド洋での津波発生とその伝播による沿岸での津波危険度のアセスメントは行われておらず、そのため、遠地津波として来襲したタイ・スリランカ・インド・モルディブ等に十分に危険性を知らせること、および各国で遠地津波に対する対応体制をたてることができなかった。同時に、その津波の広域性のため、直後における被害の全体像の把握は困難を極め、国際的な緊急支援はまず、どこで甚大な被害が発生しているかの把握から始めなければならなかった。

この災害において、国際的な枠組みの中での情報共有の重要性が再認識された。まず、インド洋沿岸各国を対象とした津波警報システムが整備されることとなった。しかし、数百年という津波発生の再現期間に対して、それをいかに維持していくかが課題となった。そして、国際社会やNGO、NPOによる被災地への援助とその調整が行われた。ここでは、各地における被害状況を把握し、その全体像の認識をステイクホルダー間で統一することが課題となった。世界各国へインド洋大津波の教訓を伝える活動も盛んになり、インド洋大津波で得られた経験と教訓を整理して体系的にまとめ他の地へ適用可能なものとして醸成し、継続的に伝えていくことも重要となった。さらに、近年のリモートセンシング技術の進展は、津波の発生・伝播途中の津波を捉え、迅速に被災地の衛星画像を撮ることを可能にしてきており、津波被災地把握技術とその実用化による緊急対応体制の高度化が見込めるようになってきた。

このインド洋津波以降、2006年にはインドネシア・ジャワ島のパンガンダランで、11月15日に千島列島沖で、2007年4月1日には南太平洋ソロモン諸島で、2009年9月29日(それぞれ日付は世界協定時)にはサモア諸島でといったように、毎年のように太平洋の沿岸各国

で津波が発生してきている。そして、2010年2月27日に南米チリで発生したマグニチュード8.8の巨大地震による津波は、翌日我が国にも到達し、浸水被害や水産養殖施設への被害を発生させた。

これらの流れとともに、現在整備されている津波警報のみならず、各国沿岸部において、事前対策のためには、まず津波災害のイメージを作る津波想定情報の充実、遠地津波に対してその情報の事前共有、緊急対応のためには、災害直後に得られる観測・衛星情報、各種メディアの情報の共有・総合化、復旧・復興のためには、過去に津波を経験した各国でとられたミティゲーションのための対策事例の共有等が重要になってきた。津波のリスクを事前評価し、その情報を、特に津波を経験していない国、情報インフラの整備が遅れている国へ、対策事例等の情報とともに十分に普及させ、被害軽減に資することが重要である。そのリーダーシップは、特に津波を多く経験し、その防災対策では先進国である我が国に求められている。

このような背景のなかで、本研究では、国際的な津波防災情報の共有・普及を行うネットワークの枠組みを提案し、それを構成する技術、沿岸各国で利用性を向上させる研究を行い、ネットワーク実現への第一歩として、我が国周辺で発生し太平洋各地へ伝播する津波に対する各国の防災のための情報を発信・共有するシステムを構築することを目指したものである。

具体的には、次の4点に着目して、研究開発を実施する。

第一に、日本周辺で発生する津波の太平洋全体への詳細な伝播シミュレーションを実施し、津波の指向性、伝播特性、および各国沿岸での津波高さを求め危険度を評価するとともに、津波高さだけでは評価しきれない人的・社会的影響について考察し、沿岸諸国の津波脆弱性を評価する。

近い将来に発生することが確実視されている東海・東南海・南海地震は同時に発生すればマグニチュードは8.6となり、この地震による津波は西日本太平洋側の広域にわたって来襲し甚大な被害を発生させる。この津波は同時に太平洋側へも伝播し、東アジアから大洋州へと伝播し被害をもたらすことが予測される。中央防災会議や地震調査研究推進本部で想定されている東南海・南海地震等の津波に加え、プレート境界面に遠地津波となりうる仮想断層を設定し、断層パラメーターを変えながら太平洋を伝播する津波のシミュレーションを行い、断層モデルと津波伝播特性との関係を明らかにする。

さらに、津波高さだけでは評価しきれない津波脆弱性について、各種想定津波に関する曝露人口を算出する。これは、特定の津波イベントに対して、そのイベント時に何メートルの津波に何人が曝されるかといった情報をまとめたものであり、その大小から脆弱性のある地域の抽出や、警戒すべきイベントを相対的に検討することが可能になる。

第二に、津波発災直後の警報や、マスコミにより繰り返される断片的な情報のみ得られる時間帯において、シミュレーション、空間情報分析、衛星画像分析等の情報を活用して、広大に分散する遠地津波の伝播先の中から、緊急対応調整を高度化するための情報として激甚被災地、特に被災地内の情報通信が途絶え孤立した地域等を迅速に特定する技術の開発を実施する。

津波を発生させる地震が発生すると、米国地質調査所（USGS）などが地震のメカニズムを解析し、CMT解として断層面に関するパラメーターを提供する。この断層パラメーターを

利用して、津波波源を設定することで、迅速に津波シミュレーションを開始することができる。シミュレーションが実施されると、各地での津波高さの分布が得られる。

この津波高さと、人口分布を重ね合わせて、空間情報分析を実施することによって、津波高さが大きくなった地域、人口が密集している地域を抽出することができる。その際には、その地域の家屋等のフラジリティ（津波高さに関する被害率）データから、被害を発生させる津波の高さを決定し、シミュレーション結果として得られた推定津波高さ分布から、被害を発生させる津波高さ以上になった地域を特定する。そして、その地域の中で人口密集地域を特定することによって、激甚被災地を広大な津波伝播先の中からある程度絞り込むことが可能になると考えられる。

さらに、把握した激甚被災地について、衛星画像を取得し、災害前後の衛星画像の画像解析を行って、比較することによって、推定であった激甚被災地を、確定させることが可能になり、より確実に被害状況を現場にいらなくても把握できるようになる。

第三に、上記2点の開発技術を、ユーザーが容易に利用できるウェブブラウジングを通じて提供する。2004年のインド洋大津波の際には、各国から津波の観測情報、推定情報等がインターネットを通じて提供されるなど、インターネットの普及とともにそれを利用した防災の可能性が見えてきた。またその際に地理情報システム（GIS）が活用され、各種のデータを地図に載せて分析することも行われた。ここでは、これらの技術を実用化させ、インターネットを通じて利用しやすいようにする研究開発を行う。

特に各国の事前対策のために、津波解析結果として得られた沿岸の脆弱性を地図情報として配信可能にし、ユーザーが持つ地域のローカルな情報と組み合わせて、対策の検討に資する情報を作成可能にする技術を開発する。この情報は事前に普及させることで、警報を受け取ったときに災害発生をイメージし、被害軽減対応につなげられるような防災教育コンテンツとしても有効であると考えられる。

緊急時においては、このシステムの情報に、観測情報や衛星画像等を重ね合わせて被災地の分析が可能であり、また、関係者間で災害の全体像の認識を統一する情報を共有可能にすることを目指す。また、このシステムを稼働させることで、ユーザーからの提供データをマネジメントし、事後の被災地推定に必要な各地の局所的な地形・家屋分布等のデータ等を充実させるデータベースシステムの構築を行う。

第四に、実際に利用される現地状況を踏まえ、そこにおいて地域特性を踏まえ事前対策や緊急時対応を行う際に必要な情報を得るために情報ネットワークから得られるデータの活用策を検討し、システムの現地適用をおこなう。

ここで重要となるのは、各国の津波災害に対する災害文化である。津波に関する知識や意識、津波防災対策に関する考えかた、津波防災対策の実行に関係する現地の文化などが情報の活かし方に重要になってくると考えられる。

そこで、本研究開発では、特に近年津波災害の被害を受けた国々の各地域において、その後どのような復興を実施したのか、その復興によって将来の津波災害はどの程度ミティゲートされているのか、その復興の背景にあった各国各地域の文化とは何かに着目して、被災地の復興状況調査を実施する。

また、研究開発期間中に太平洋沿岸域に発生した津波についても、必要に応じて現地調査を実施し、被害が発生した原因、人々がどのように考えて避難を実施したか、その後の

応急対応がどのように進められているかなどのデータを収集し、考察する。

これら4課題を連携・総合させて、研究開発を実施することによって、より実用的なネットワークシステムの開発を目指す。グローバル情報社会を積極的に利用し、各国における津波災害を研究し、その情報を充実させることによる減災へ向けて、情報の統合化を世界に先駆けて取り組む。そして、この成果は、我が国の国際貢献として、遠地津波、ひいては各国近地津波の被害を抑止・軽減する事前の対策を促進させ、緊急時においては、地域の災害対応や国際支援の調整を円滑化・高度化させる情報基盤整備を促進させると考えられる。同時に、我が国の社会に対しても、世界的なネットワークの中での生活・経済活動の継続性を支え、来るべき東南海・南海地震等広域巨大災害対応の高度化に関する技術の開発につながると考えられる。

7. 研究・技術開発の内容と成果

7.1. 日本周辺で発生する津波のシミュレーション

我が国周辺の日本海溝や南海トラフといったプレートの沈み込み帯においては、過去繰り返し巨大地震津波が発生してきた。

これらの巨大津波は我が国沿岸のみならず、太平洋を伝播し、南西太平洋諸国へ到達し、被害を発生させる危険性がある。これらの国々において、遠地津波の被害を抑止、軽減するためには、遠地津波の挙動、伝播特性に関する事前の分析とその情報の提供・共有が重要となる。しかし、現在のところ太平洋地域において、遠地津波の伝播特性を検討した研究は少なく、また、それらがまとまった情報として、各国で事前に入手可及な状態になっていない。

我が国では、東海・東南海・南海地震津波や日本海溝で発生する地震津波などの日本周辺で発生する津波の波源に関する研究が進んでおり、それらの津波のモデルも多く提案されている。これらの津波が太平洋沿岸各国にとってどの程度の危険性を持つかといった情報を提供しやすい状況にある。そこで、本研究課題では、日本周辺で発生する津波が太平洋をどのように伝播する特性があるのか、日本周辺で発生する津波のエネルギーが集中する地域を明らかにすることを目的に、数値シミュレーションによる研究を行った。

7.1.1. 対象領域と地点

数値シミュレーションの対象とした領域を図7.1-1に示す。領域は南緯5度、東経120度から北緯41度、東経180度までの範囲である。地形データは、GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) の1分間隔グリッドデータから抽出した、空間格子間隔1分のデータを使用した。陸上への遡上計算は行わず、海域の伝播計算のみとし、時間格子間隔4秒で津波の発生から12時間分のシミュレーションを行った。

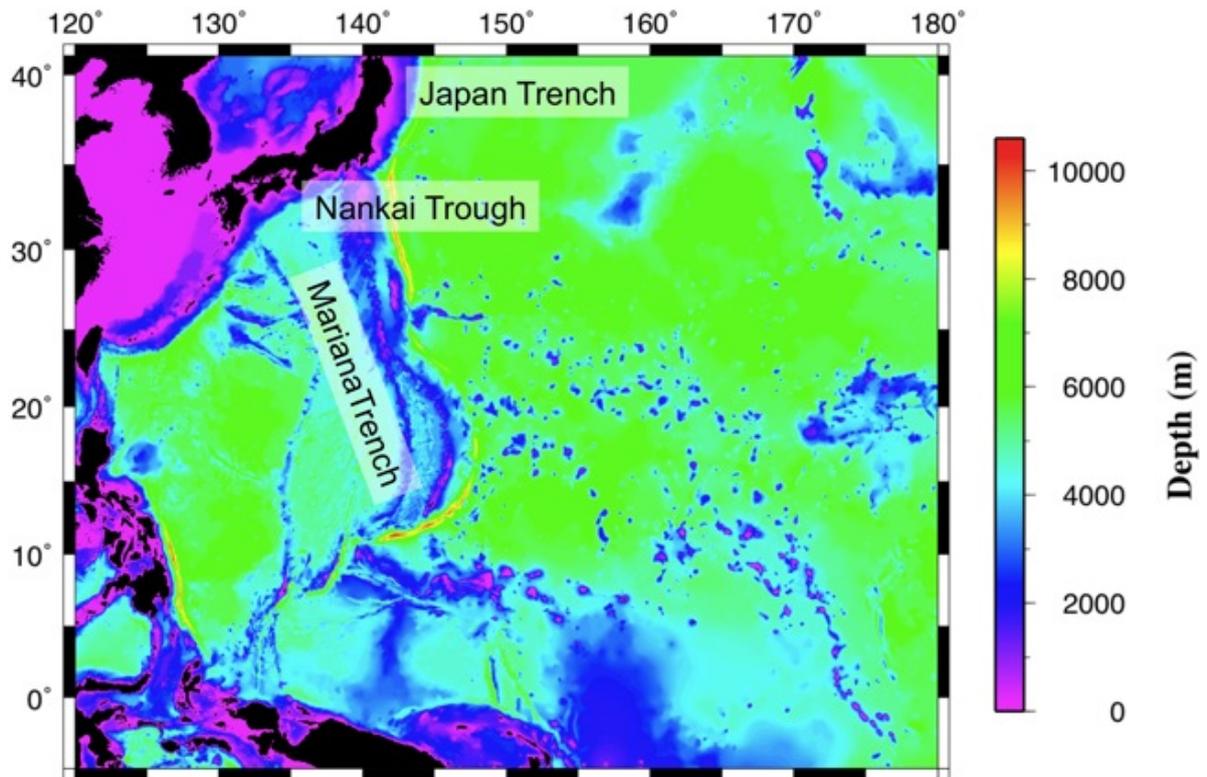


図 7.1-1 The Bathymetry in computational domain.

数値シミュレーションの支配方程式は次式で表される緯度経度座標系で記述した線形長波理論を用いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left(\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial N \cos \theta}{\partial \theta} \right) = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{g h}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = f N$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{g h}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} = -f M$$

ここで λ : 経度, θ : 緯度, R : 地球の半径, t : 時間, η : 水位, h : 水深, M と N : それぞれ λ 方向, θ 方向の流量フラックス, g : 重力加速度, f : コリオリ係数である。シミュレーションのための差分スキームには, スタッガード格子を使用したリープフロッグ法を使用した。

この計算により出力する結果は, 津波高分布, 最大流速分布, 到達時間, 最大水位の出現時刻, 各時間ステップでの水位分布, および図 7.1-2 に示す 24 地点における時系列波形である。波形出力地点は, まず, 各国, 各方面の人口の多い都市または経済活動の大きい

都市，12都市を指定した（図 7.1-2(a)）。さらに，本研究での計算領域内にある検潮所5地点，DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)ブイ7地点（図 7.1-2 (b)）を指定している。

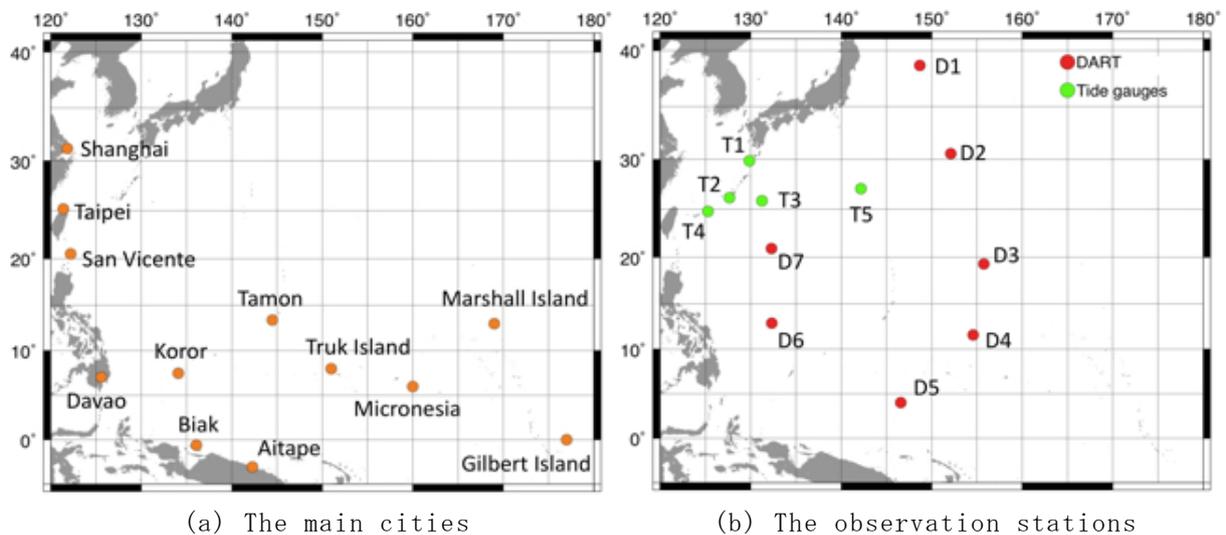


図 7.1-2 Output points of computation.

7.1.2. 津波波源の設定

シミュレーションの初期条件となる波源としては，三陸地震津波および東南海・南海地震津波を対象とし，中央防災会議により想定されている断層モデルを基準とした。そして，これらの断層モデルの想定の不確実性が存在すること，およびその不確実性が津波の伝播にどのように影響するかを調べる目的でこの断層モデルのパラメーターを変更したモデルを作成した。

本研究では，日本周辺で発生する津波が，太平洋に点在する国や地域のうち，どの国や地域へ高い津波となって到達するかが重要となる。このような津波の指向性は断層の走向や，滑り量分布に支配されると考えられる。断層の走向はプレート境界の走向であり，これに関する不確実性は小さい。そこで，断層面内の滑り量を変化させ，その違いによって津波の指向性がどのように変わるかを検討した。

図 7.1-3に三陸地震津波（M8.6）を想定した3つの初期波源モデルを示す。中央防災会議のモデル（Model S0）をもとに，その断層パラメーターを変更し，断層面の北半分の滑り量を大きくし，南半分の滑り量を小さくしたモデル（Model SN），および南半分の滑り量を大きくし，北半分の滑り量を小さくしたモデル（Model SS）を作成した。この断層パラメーターからMansinha & Smylie (1971)の方法によって海底の鉛直方向変位を計算し，それをそのまま海面の鉛直方向変位とし，津波シミュレーションの初期条件とした。図にはそれぞれのモデルで計算された海面の鉛直方向変位分布（初期水位分布）を示している。このように初期波源モデルを変えた場合に，これが津波の伝播する方向にどの程度影響するかを見る。

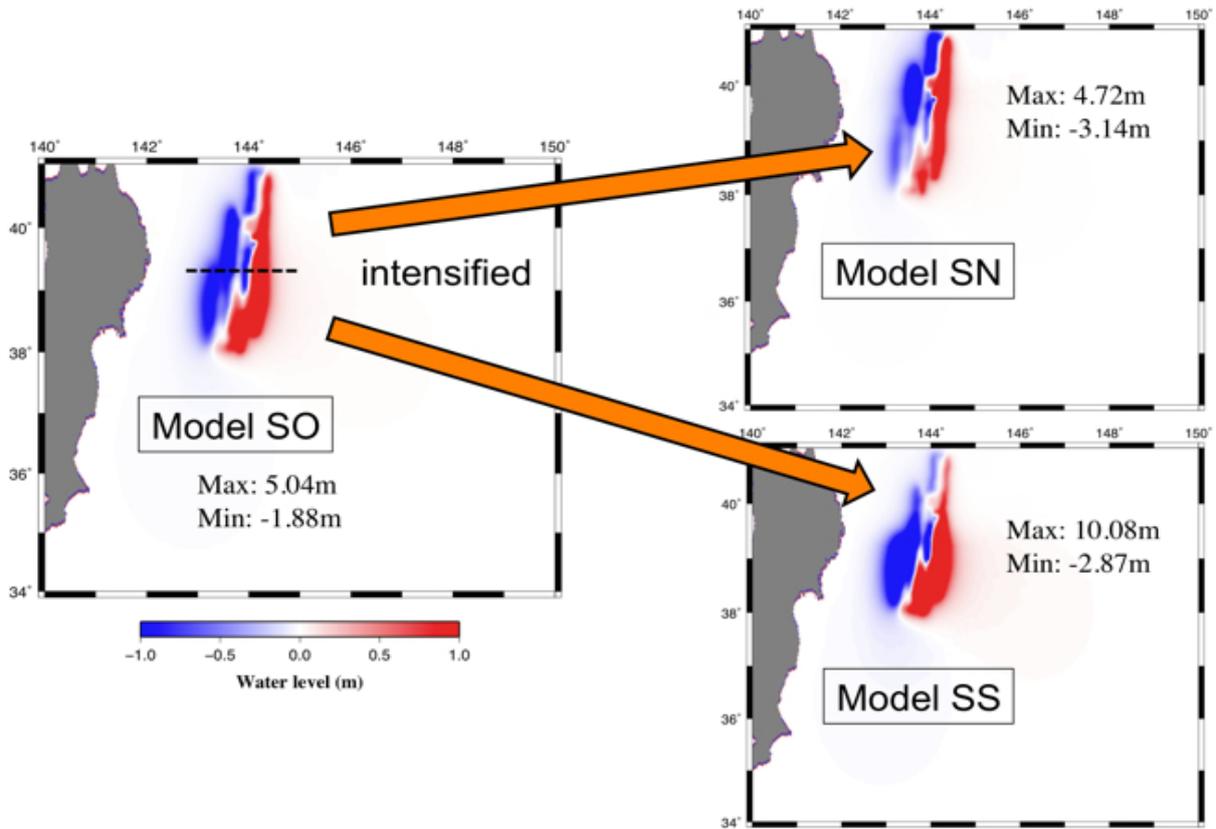


図 7.1-3 The tsunami sources of the Sanriku Earthquake Tsunami.

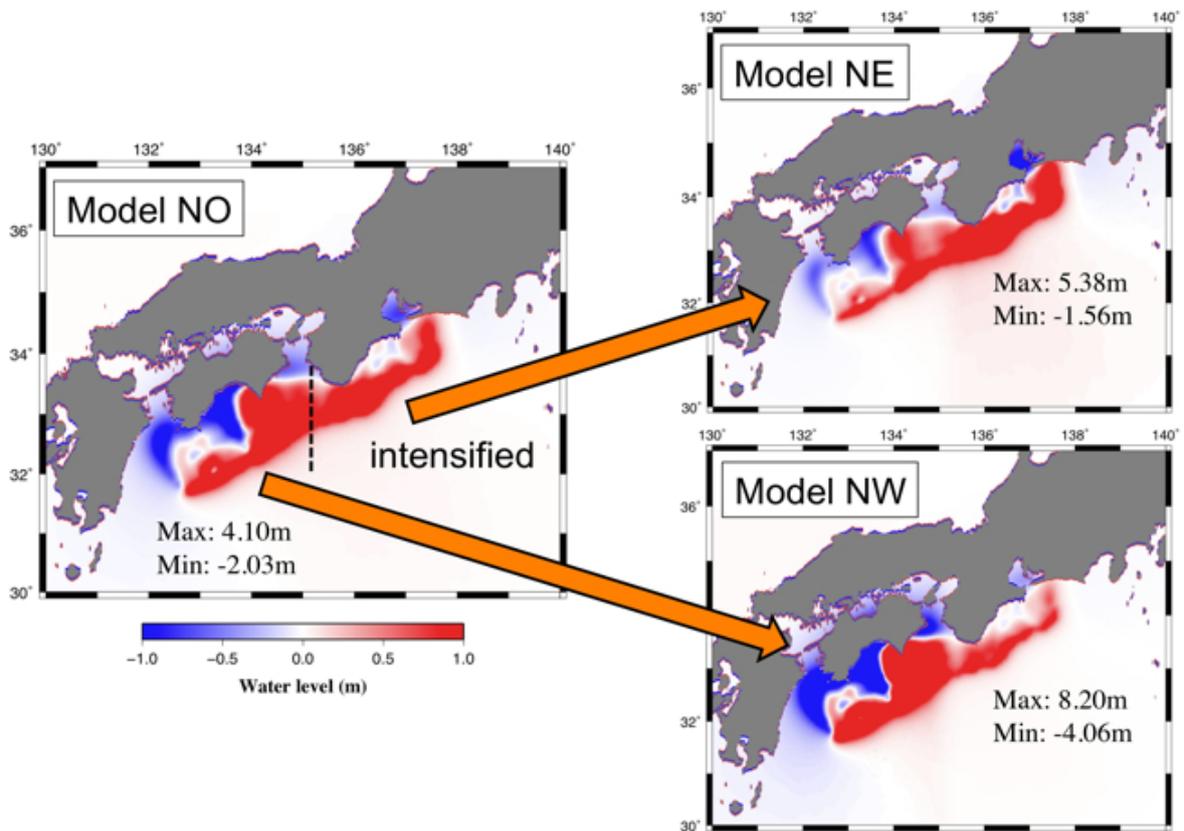


図 7.1-4 The tsunami sources of the Tonankai-Nankai Earthquake Tsunami.

同様にして、東南海・南海地震津波 (M8.5, Model N0) についても、断層面の東半分の滑り量を大きくし、西半分の滑り量を小さくしたモデル (Model NE)、断層面の西半分の滑り量を大きくし、東半分の滑り量を小さくしたモデル (Model NW) を作成した。図 7.1-4 にそれぞれのモデルで計算された海面の鉛直方向変位分布 (初期水位分布) を示す。

7.1.3. 計算結果

(1) 三陸地震津波の3モデル

三陸地震津波に関する3モデルについて、図 7.1-5に津波高 (最高水位) の分布を示す。三陸地震津波のエネルギーは太平洋北中部へ向かうものが支配的である。このエネルギーは天皇海山列の南部から、ミッドウェー諸島、ハワイ諸島へ向かう。また南太平洋、マーシャル諸島、ギルバート諸島、ツバル、サモア方面へ向かうエネルギーも見られる。Model SNでは、マーシャル諸島方面へ向かうエネルギーは減少し、天皇海山列南部からハワイ諸島へ向かうエネルギーが増大する。Model SSでは天皇海山列南部からハワイ諸島へ向かうエネルギー、その南方を抜け、キリバス方面へ向かうエネルギー、マーシャル諸島方面へ向かうエネルギーが増大する。

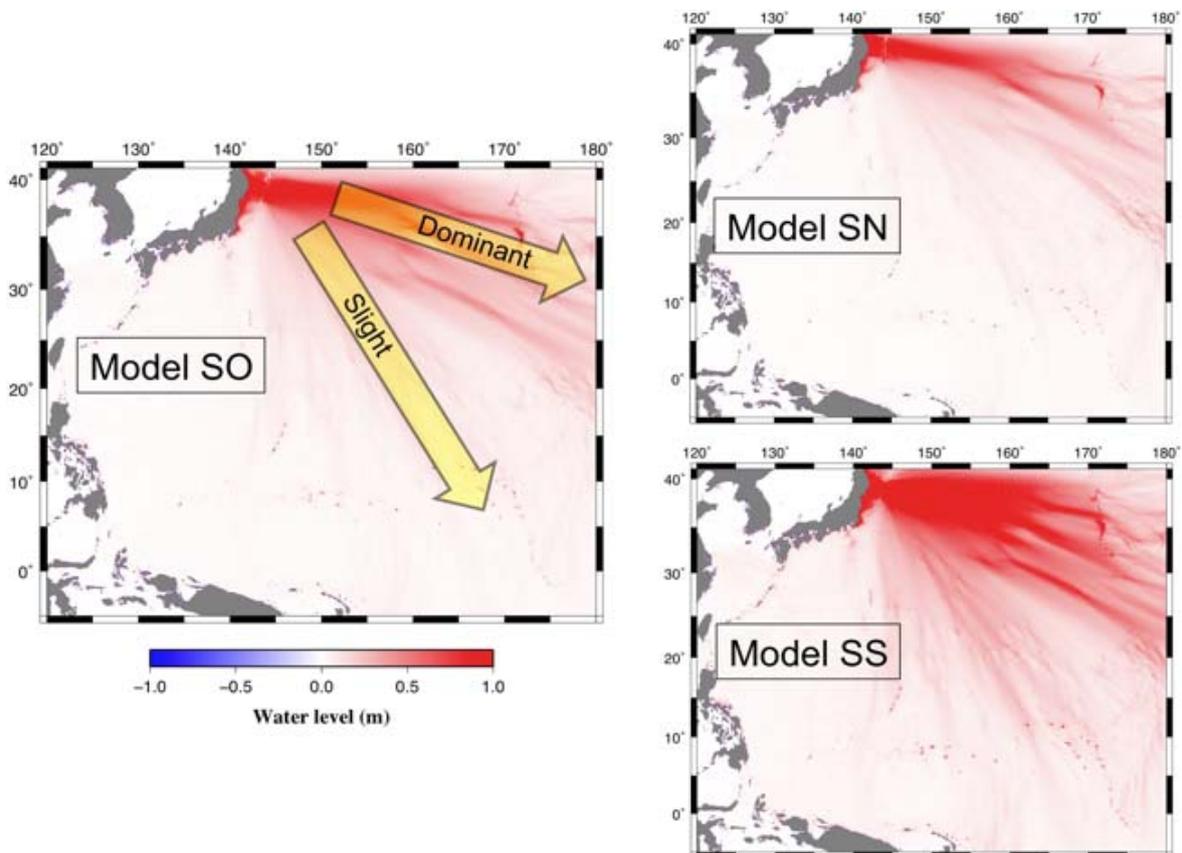


図 7.1-5 The computed tsunami energy distribution of models SO, SN and SE.

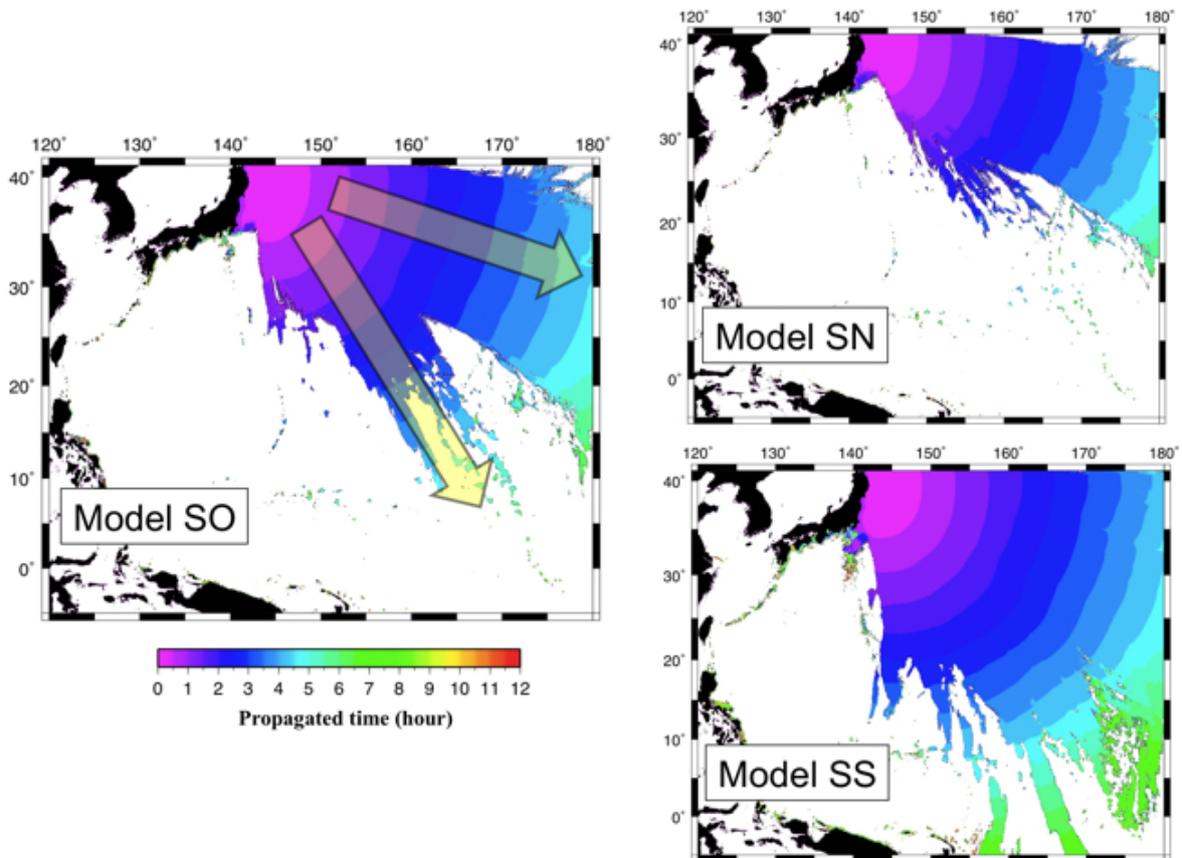


図 7.1-6 The computed propagation time distribution S0, SN and SE.

図 7.1-6に到達時刻の分布を示す。水位変動が10cmを超えないところについては、到達時刻を算出してない。この図からも各モデルによって、指向性が変化し、水位変動が10cmを超える海域が変化することが分かる。マリアナ諸島へは2～3時間、ミクロネシア連邦へは4～5時間程度、ハワイ諸島へは地震発生から5時間以降（計算領域外であるため詳細な到達時刻はこの計算では分からない）、マーシャル諸島へは4時間半程度、ギルバート諸島へは6時間半程度で津波の第一波が到達することが分かった。

図 7.1-7に主要都市の津波波形を示す。San VincenteやBiakといった西側の都市においては高い津波は来襲せず、被害を発生させることは無いと考えられる。一方で東側のミクロネシアやマーシャル諸島、ギルバート諸島では、数十センチの津波高さとなり、場所によってはこれより増大することが考えられ、詳細な解析をすべき地域であることが分かった。マーシャル諸島では第一波が最も大きく、後続波はそれより小さいが各波同程度の上下変動を繰り返す。ギルバート諸島では、最大波が第一波より1時間以上遅れて発生する。本研究で検討した3モデルの相違についてであるが、本研究で対象とした南太平洋の主要都市においては、その位相に違いはほとんど見られなく、振幅はModel SSが最も大きく、Model S0, Model SNの順に小さくなる。すなわち、大滑り量の領域が南部になるほど、南太平洋への指向性が強くなる。

図 7.1-8に検潮所やDARTブイなどの観測点の津波波形を示す。観測地点についても、同様に東側の観測地点においての計測値が大きくなることが分かる。観測点D1はこの地震に

よる津波が最も早く到達し、かつその第一波の通過が明瞭に観測される観測点である。また観測点D2の波形は、3モデルで津波の振幅に違いが出ており、南西太平洋へ伝播する指向性をもつ津波か否かを判断しうる観測点であると考えられる。これらD1, D2で観測された波形を用いて、あらかじめ指向性を変えて計算したシミュレーション結果をもとに、どの地域が危険になるかを特定することで、太平洋の多くの国々への津波警報発令の速度、精度向上につながると考えられる。また、このように指向性を変えてシミュレーションを実施することによって、どの地点で観測を強化すべきかといった検討が可能になるのである。

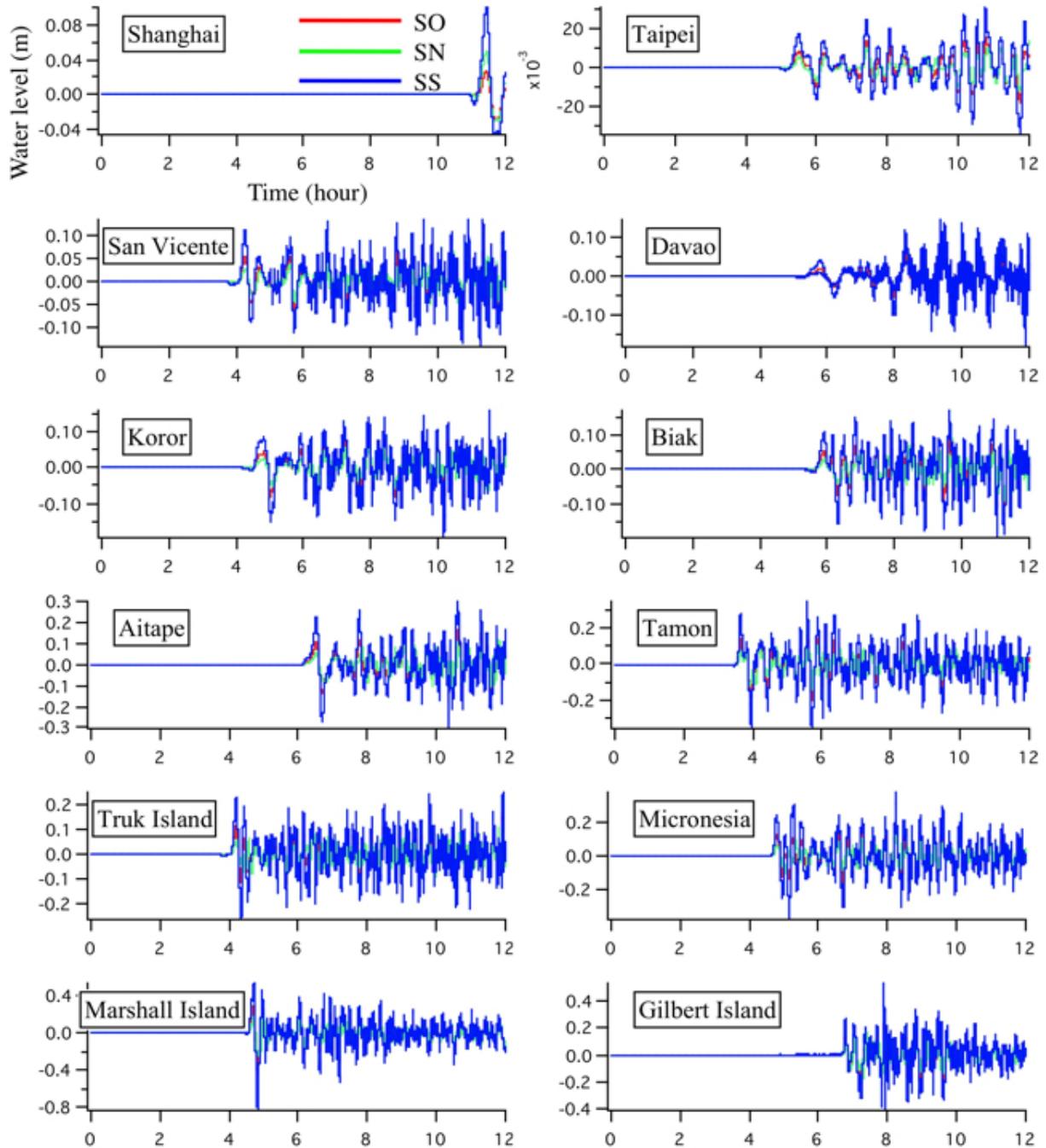


図 7.1-7 The time series of water level at each city by models SO, SN and SS.

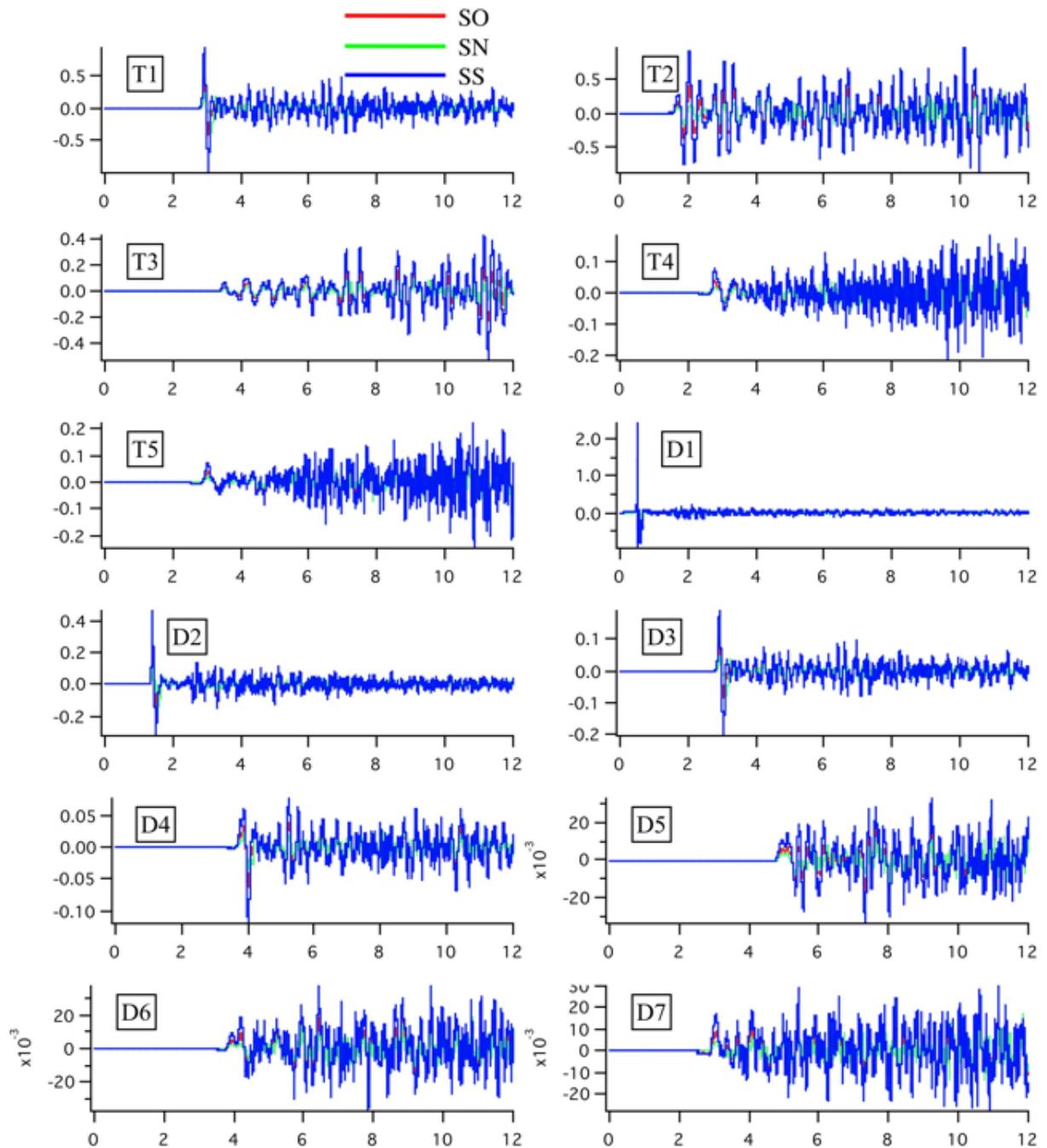


図 7.1-8 The time series of water level at observation stations by models SO, SN and SS.

(2) 東南海・南海地震津波

次に東南海・南海地震津波に関する3モデルについて、前節と同様に、図 7.1-9に津波のエネルギーとしての津波高の分布、図 7.1-10に津波第一波到達までの地震発生からの時間の分布、図 7.1-11に主要都市で出力した水位変動波形、図 7.1-12に検潮所やDARTブイなどの観測点での水位変動波形を示す。

図 7.1-9より、この津波によるエネルギーは、三陸地震津波よりも、多様な方向へ指向

する特性を持っていることがわかる。その中で、主要なエネルギーは伊豆-小笠原-マリアナ島弧、伊豆・小笠原海溝、マリアナ海溝に捕捉されて、南西太平洋へ向く。北マリアナ諸島のグアムでは1mの津波が来襲する。また、フィリピン南部やインドネシア、パプアニューギニア、パラオでも1m近い津波が来襲するところがある。トラック諸島やミクロネシアでは60cm程度、マーシャル諸島方面は小さいが40～50cm程度となっている。3モデルの違いについてであるが、東南海・南海地震のケースでは、Model NEやModel NWのように断層面内の滑り量に偏りを持たせ、初期水位の最大値や最小値を大きくすると、より遠くまでエネルギーを保って伝播する特性が見られた。

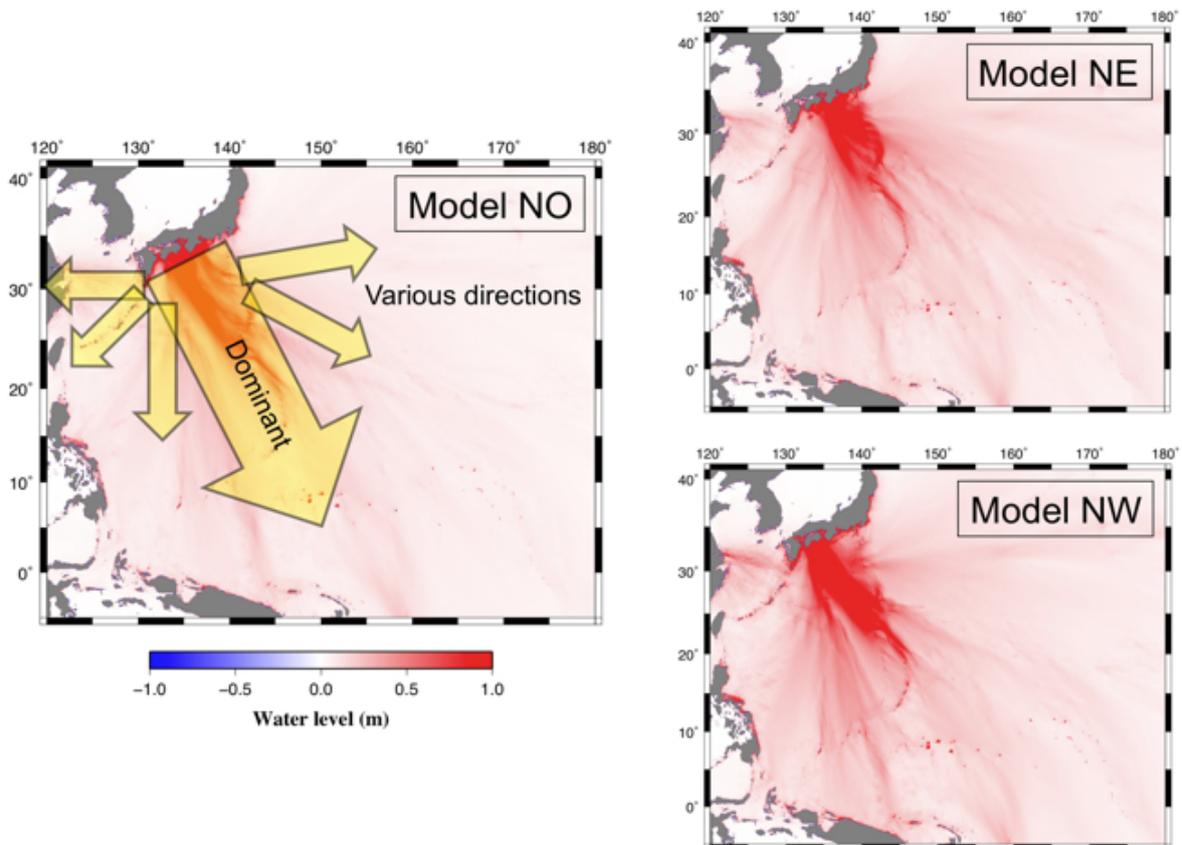


図 7.1-9 The computed tsunami energy distributions of models NO, NE and NW.

図 7.1-10より、グアムやパラオでは地震発生後3時間程度、フィリピン南部、トラック諸島へは4時間程度、インドネシア、パプアニューギニア、ミクロネシア、マーシャル諸島へは5時間程度、ギルバート諸島へは7時間程度で第一波が到達する。特に、津波到達までの時間が短いグアムやパラオでは注意が必要である。

図 7.1-11の主要都市の津波波形を見る。まずモデルによる波形の違いであるが、三陸地震津波よりも、モデルによる位相や振幅の違いが大きくなっている。台湾では高い津波は来襲しないと考えられる。上海では50cm近くの津波、モデルによっては1mを超える引き波が来襲し、港湾域では警戒する必要がある。フィリピン南部からパラオ、インドネシア、ニューギニアにおいては、大きな波が第一波から6時間程度遅れて来襲する。このような地域では長時間にわたる警戒が必要となり、住民が、第一波が小さかったからといって警

戒中に危険な行動をすることの無いよう、事前に周知しておくことが必要となる。

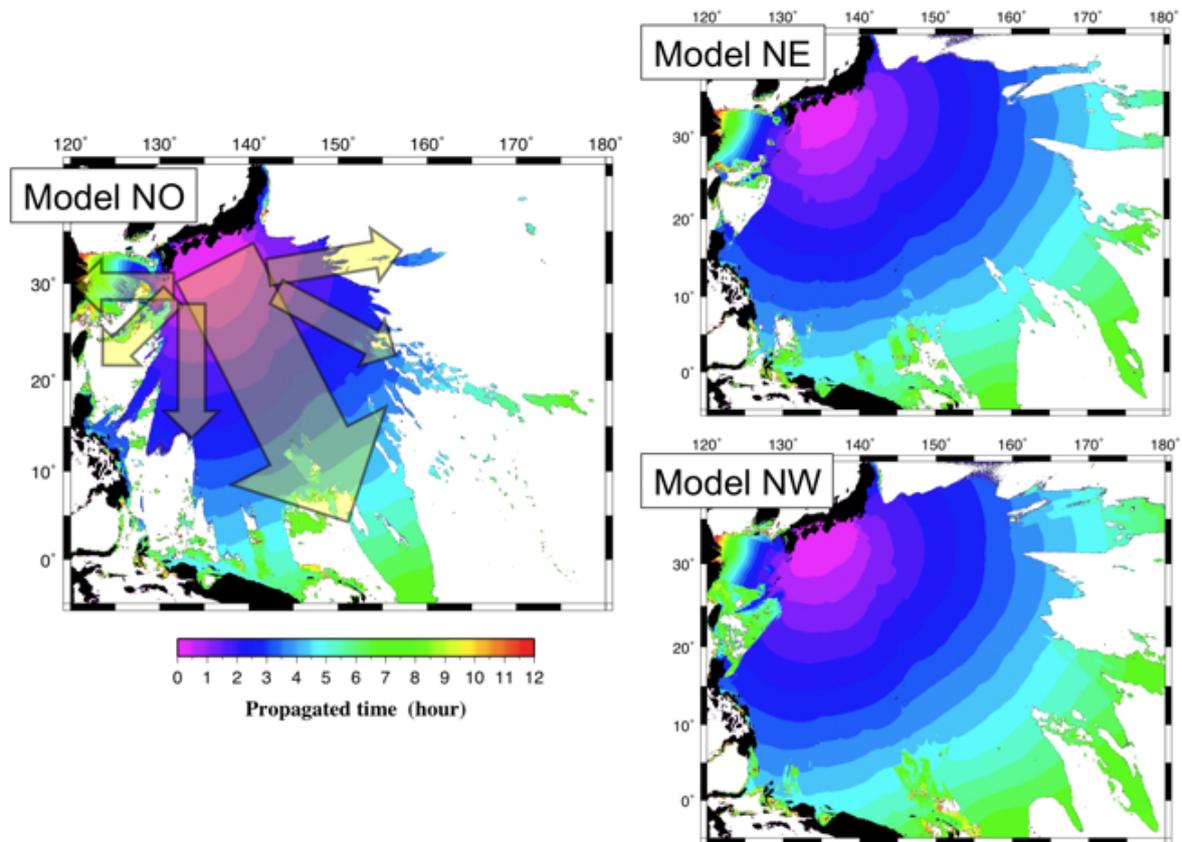


図 7.1-10 The computed propagation time distributions of models NO, NE and NW.

図 7.1-12の観測地点についてみる。T5の観測点が、この地震による津波を最も早く捉えるものと考えられる。また、図 7.1-2からも、T5の観測点は東南海・南海地震津波のエネルギーの主要な伝播方向に位置することがわかる。従って、地震発生後、まずT5で、津波のこの方向への伝播を観測することができ、特に北マリアナ諸島への警報を考える上で重要となると考えられる。またD2の観測点からD3、D4、D5の観測点に至る連続的な津波観測データを用いることで、パプアニューギニアなど南太平洋への津波警報発令の速度、精度向上を期待できると考えられる。D7の観測点とD6の観測点も同様であり、その観測データはフィリピン南部からパラオ、インドネシアなどへの警戒に利用できると考えられる。

(参考文献)

- Imamura, F. and Shuto, N., Numerical simulation of propagation of far-field tsunamis, Tohoku University, 11p., 1992
- Mansinha, L. and D. E. Smylie, 1971, The Displacement Fields of Inclined Faults, Bull. Seism. Soc. Amer., 61(5), pp.1433-1440.
- Monahan, D., GEBCO and Deep Water: data assembler, converter, interpreter and disseminator. Hydro International, 11(3), pp.7-9, 2007.

Meining, C., Stalin, S.E., Nakamura, A.I., Gonzalez, F. and Milburn, H.B, Technology developments in real-time tsunami measuring, monitoring and forecasting, OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE, 2, pp.1673-1679, 2005

中央防災会議日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会, 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会報告, 2006

中央防災会議東南海・南海地震等に関する専門調査会, 東南海、南海地震に関する報告, 2003

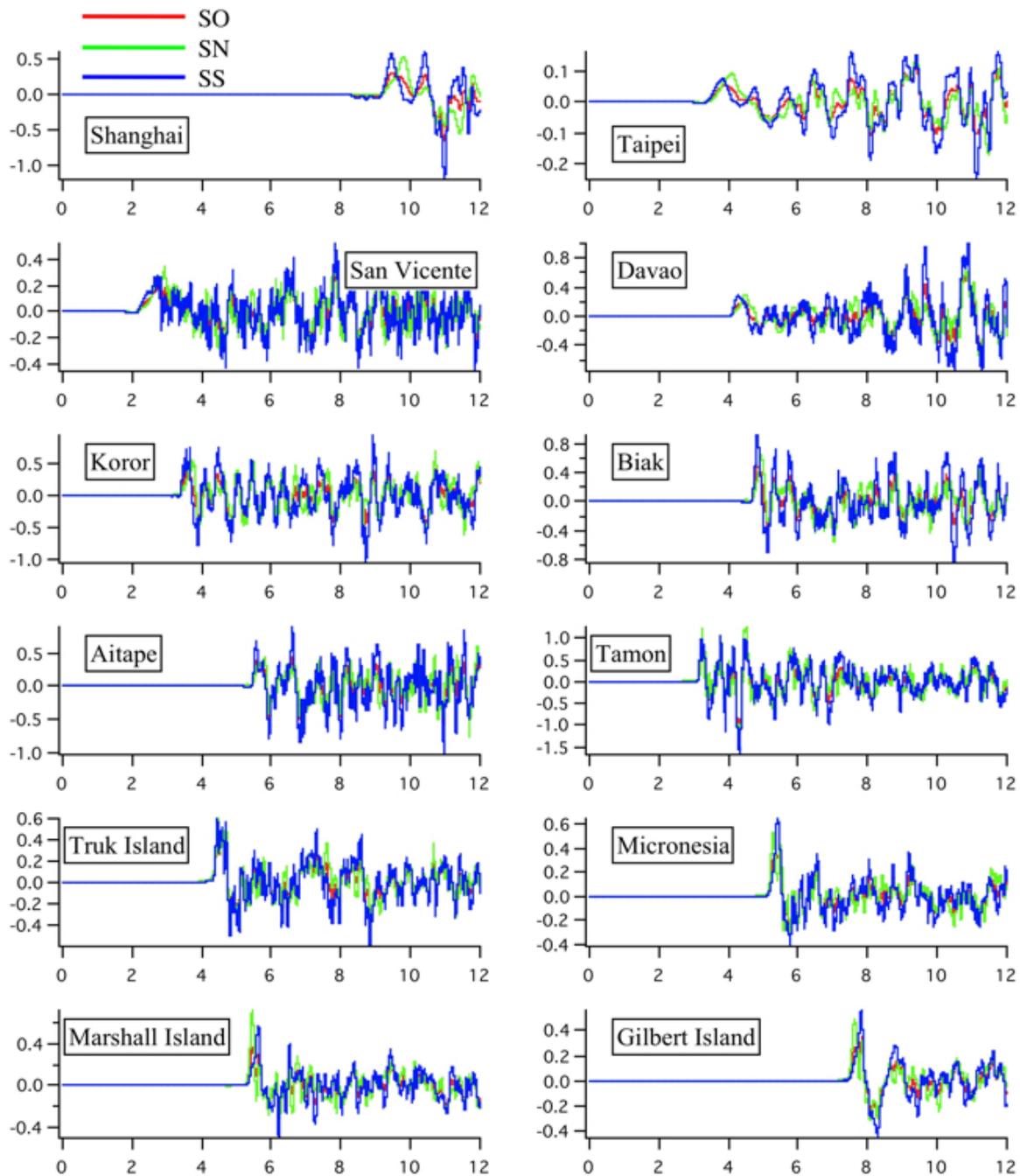


図 7.1-11 The time series of water level at each city by models NO, NE and NW.

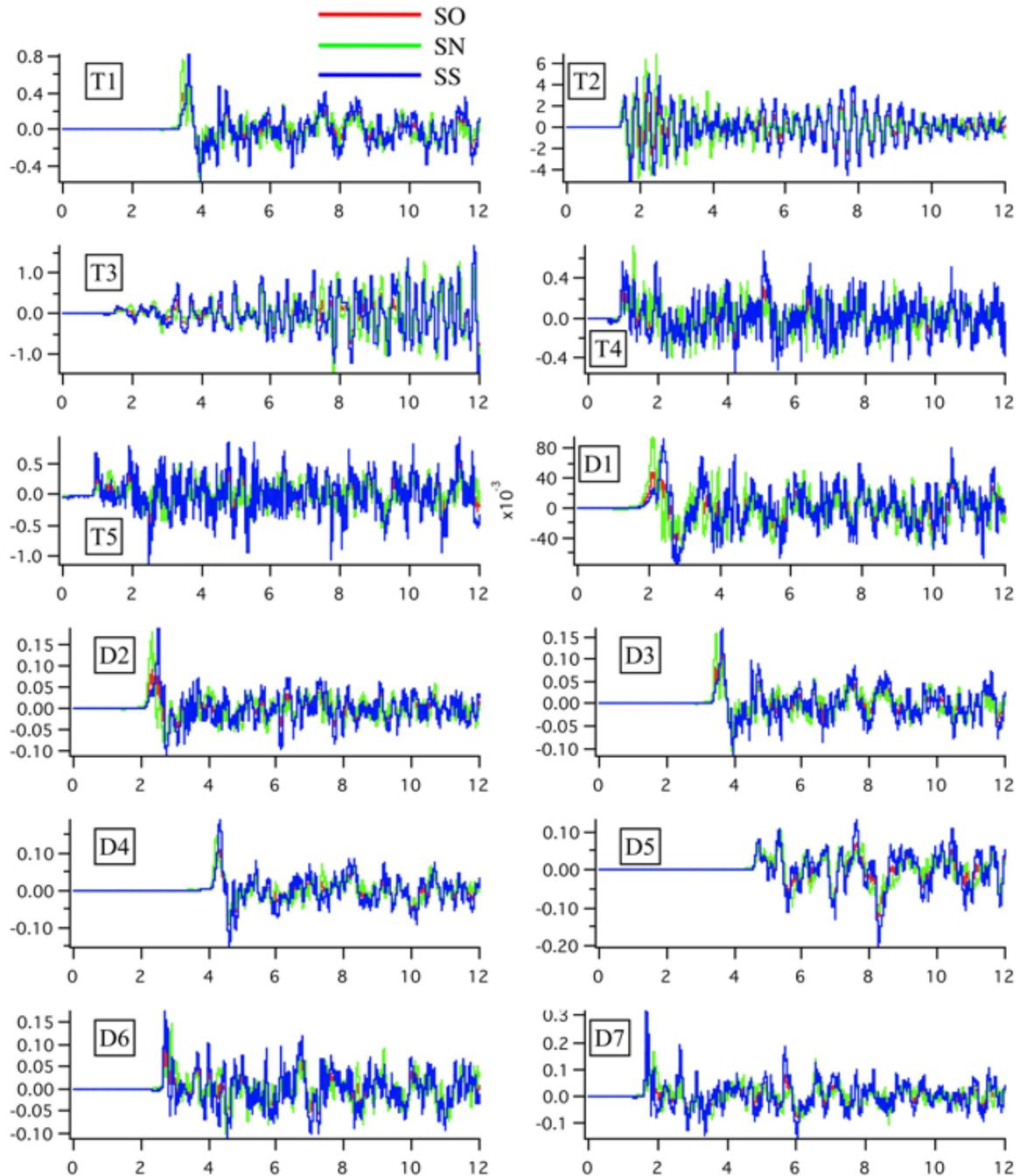


図 7.1-12 The time series of water level at observation stations by models N0, NE and NW.

7.2. 津波曝露人口の解析

沿岸部における津波被災規模は、単に来襲する津波の高さだけでは決まらない。遠地津波による津波被害の被災規模を推定するためには、津波高さの推計・把握に加え、その津波に曝される社会的条件を考慮することが必要である。

津波災害が社会に与える影響度や地域の津波災害に対する脆弱性を評価する一指標とし

て、沿岸部の津波に曝される人口を津波曝露人口PTE (Potential Tsunami Exposure) と定義し、それを算出する。

まず地域に來襲する津波の高さごとに、その高さの津波に曝される人口を整理する。PTEは考慮する地域ごとに次式により定義する。

$$PTE(i)_t = \sum_{j=1}^J P_{i,j}$$

これは、ある評価領域 i (国や州などの比較的広範囲な領域) において、ある津波高さ η に曝される人口指標で、海岸線に沿った評価単位 j (これは地域ごとでも単位面積でもよい) ごとに任意の津波高さ η に曝される人口の総和で表現したものである。

PTEは、たとえば人口統計データと沿岸部の津波高さとを関連づけ、GISによる分析を行うことによって集計する。海岸線に沿った津波高(又は津波浸水域)の分布と、海岸に面した評価単位内(または浸水域内)の人口 $P_{i,j}$ が既知であれば算出可能である。海岸沿いの津波高 η については、数値シミュレーションの結果を利用すればよい。

7.2.1. 2004年インド洋大津波の津波曝露人口

実際に2004年インド洋大津波の主要な被災国を対象に、2004年スマトラ島沖地震津波災害の津波曝露人口を計算した。各国の海域に面する標高30m以下の土地を30秒メッシュに分割した領域(900m四方)を評価単位としてGIS分析を行った。標高の抽出は、米国NASA(2000)が公開している、スペースシャトル飛行で得られた合成開口レーダー画像をDEM(Digital Elevation Model)に変換したSRTM(Shuttle Radar Topography Mission)データ(3秒メッシュ)を利用した。評価単位を30秒メッシュにした根拠は、人口統計データとの整合性を図るためである。PTE算出のための人口統計データは、米国Ork Ridge National Laboratory(2003)が公開しているLandScan 2003を採用した。LandScanとは、各国の県・州レベルの人口を、土地の傾斜、土地被覆、主要道からの距離、都市光が観測された頻度で、メッシュに按分することで得られたものである、図7.2-1にLandScan 2003(Ork Ridge National University, 2003)から得られた人口分布を示す。ただし現状では、特に開発途上国における統計データの精度検証が十分に行われておらず、利用に当たっては注意が必要である。

インド洋全体(13カ国)及び主要被災国(インドネシア、スリランカ、インド、タイ、)についてそれぞれ求めたPTEの累積値を図7.2-2に示す。図の横軸は津波高 η (m) で、縦軸は η (m) 以上の津波に曝される人口の累積PTEである。例えば、2m以上の津波に曝される人口は、インドネシアでおよそ24万5,000人であることが図より読み取れる。報告されている支社・行方不明者数はおよそ16万7,000人であり、死亡率を考慮すれば、オーダーとしては妥当であろう。

この結果から、沿岸各国での津波に対する脆弱性を評価することができる。例えば、CNNが公表した2005年2月現在のインド洋全体の津波死者・行方不明者数は297,046名である。

それと一致する人口に対応した津波高を図 7.2-2から読み取ると4.09mとなる。これは、すなわち、インド洋全体で考えた場合、4.09m以上の津波に曝された人口が死亡または行方不明になったと解釈できる。同様に、主要被災国の死者・行方不明者に一致するPTEに対応した津波高を図の値から読み取り、これを地域の津波脆弱性と定義すると、表 7.2-1のようになる。この値は、ある地域において死者が出る津波高の下限であると統計的に解釈できるから、小さくなるほど想定した津波に対して脆弱であると判定することができる。2004年のイベントに対してはインドネシアがもっとも脆弱であり、次いでスリランカ、インド、タイと、死者数に対応していることが分かる。

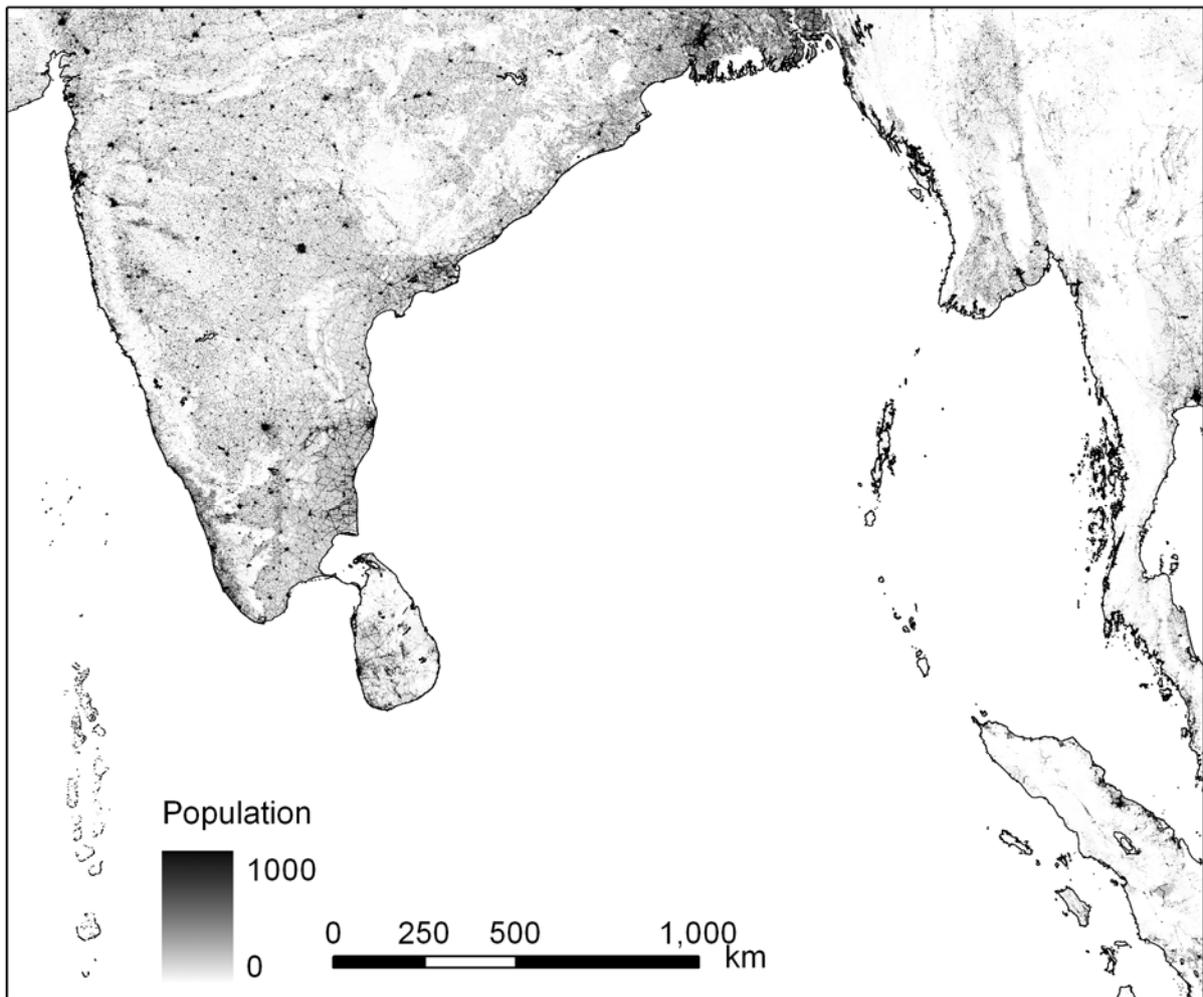


図 7.2-1 LandScanの人口分布.

(参考文献)

Ork Ridge National University(2003):Global ambient population 2003.
<http://www.nrn1.gov/sci/gist/landscan/landscan2003/>

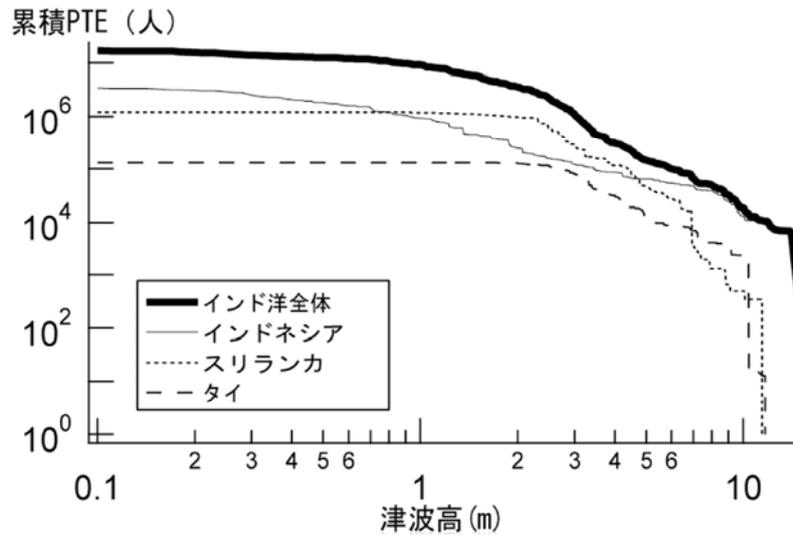


図 7.2-2 予測津波高さに対する津波曝露人口の集計結果.

表 7.2-1 スマトラ島沖地震津波における被災各国の脆弱性.

	インド洋全体	インドネシア	スリランカ	インド	タイ
死者・行方不明 (人)	297,046	236,169	35,672	16,416	8,388
脆弱性	4.09m	2.07m	5.38m	5.86m	5.92m

Potential Tsunami Hazard and Exposed Population The Tsunami of 01 April 2007 in the Vicinity of Solomon Sea

Disaster Control Research Center
School of Engineering, Tohoku Univ.

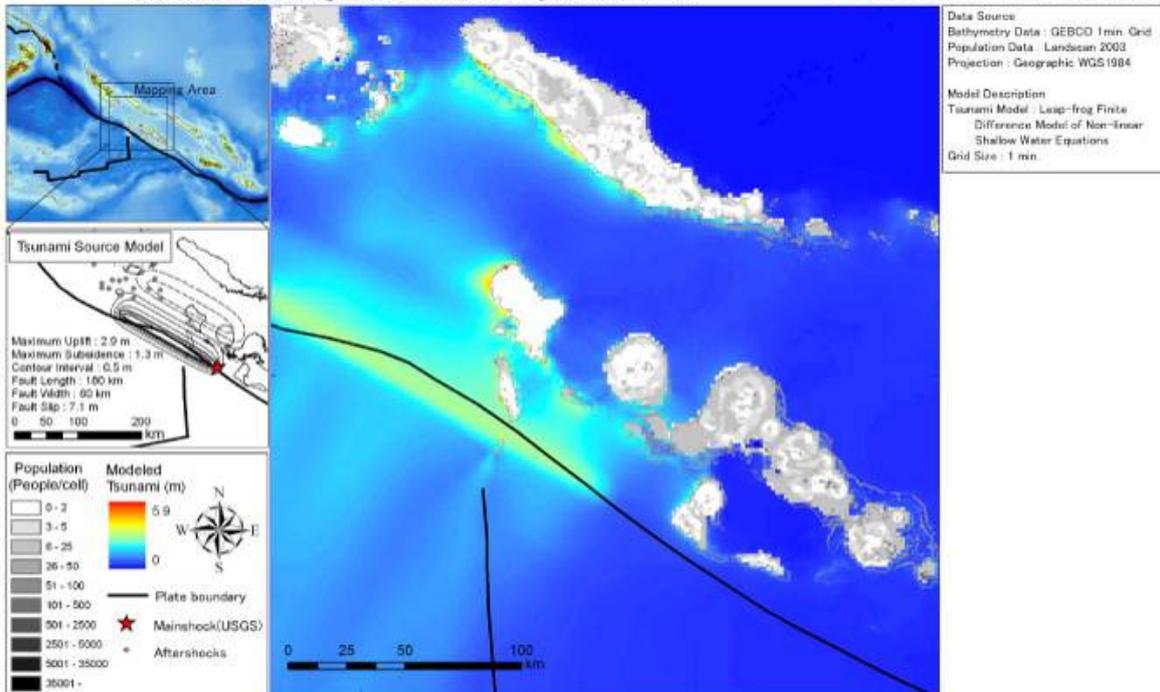


図 7.2-3 2007年ソロモン諸島沖地震津波による予想津波高と人口分布の関連

7.2.2. 2007年ソロモン諸島沖地震津波

図 7.2-3は2007年4月に発生したソロモン諸島沖地震津波の解析結果とLandScanデータをGIS上で表示したものである。沿岸の図のクレイ色の濃い部分が人口密度の高いと考えられる地域であり、Ghizo島、Choiseul島南部の海岸の津波高さ（推定値）との対応を考えられると人的被害の発生が想定される。実際、西村他（2007）の調査によると、Ghizo島で20名、Choiseul島で6名の津波による死者が報告された。

（参考文献）

西村裕一・谷岡勇市郎・中村有吾・都司嘉宣・行谷佑一・村田昌彦(2007):2007年ソロモン諸島地震津波の現地調査(C32-08)(演旨),日本地震学会講演予稿集秋季大会,2007,107,日本地震学会

7.2.3. 2010年チリ地震津波の曝露人口表示による被災地探索

2010年2月27日06:34(UTC)に、南米チリ沖を震源とするマグニチュード8.8(USGS)の巨大地震が発生した。地震発生から1週間以上が経過しても、被災地の状況は断片的にしか伝えられず、特に津波被害に関する情報が不足し、被害の全容解明が遅れている。ここでは、この津波の震源付近海域における即時的津波解析を実施し、予想される津波の被災地を津波数値計算と人口統計データとの統合分析により明らかにすることを目的とする。また、チリ沿岸部における現地調査を実施し、その結果を踏まえて、本研究で展開する被災地探索技術の意義について論ずる。

まず、地震発生後24時間を目処に得られる地震情報のみ(震源位置、マグニチュード、断層メカニズム、余震分布)を用いて非線形長波式による広域津波解析を実施する。海底地形データは、GEBCO 30秒メッシュのデータ(陸・海の統合地形データ)を使用する。次に、数値解析から得られた津波高予測値と全世界の人口統計データ(LandScan)をGIS上で統合処理し、津波に曝されている人口(津波曝露人口)を算出し、沿岸津波高との関連で被災地を探索する。ここで津波被災地として探索する基準は、既往の津波災害事例における津波高と建物被害率、死亡率の関係を考慮して決定する。

図 7.2-4に、予想津波高4m、人口1000人を目安として実施した被災地の探索結果を示す。

津波数値解析と人口統計データのGIS分析を統合して、2010年チリ地震津波の被災地を探索した。津波はTalcahuanoからValparaisoに至る1000km以上の海岸に襲来し、特にTalcahuano, Constitucion, Valparaiso周辺の都市で被害が甚大である可能性が高い。

津波被災地の目安を予想津波高4m以上、人口1000人以上として探索した。その結果、被災地の可能性が高い地域が14カ所見つかった。現在のところ、甚大な被害が報告されているのはValparaiso, Talcahuano, Conctitucionの3地域であるが、それ以外にも比較的小規模の集落が被災地、孤立している可能性があることが分かった。

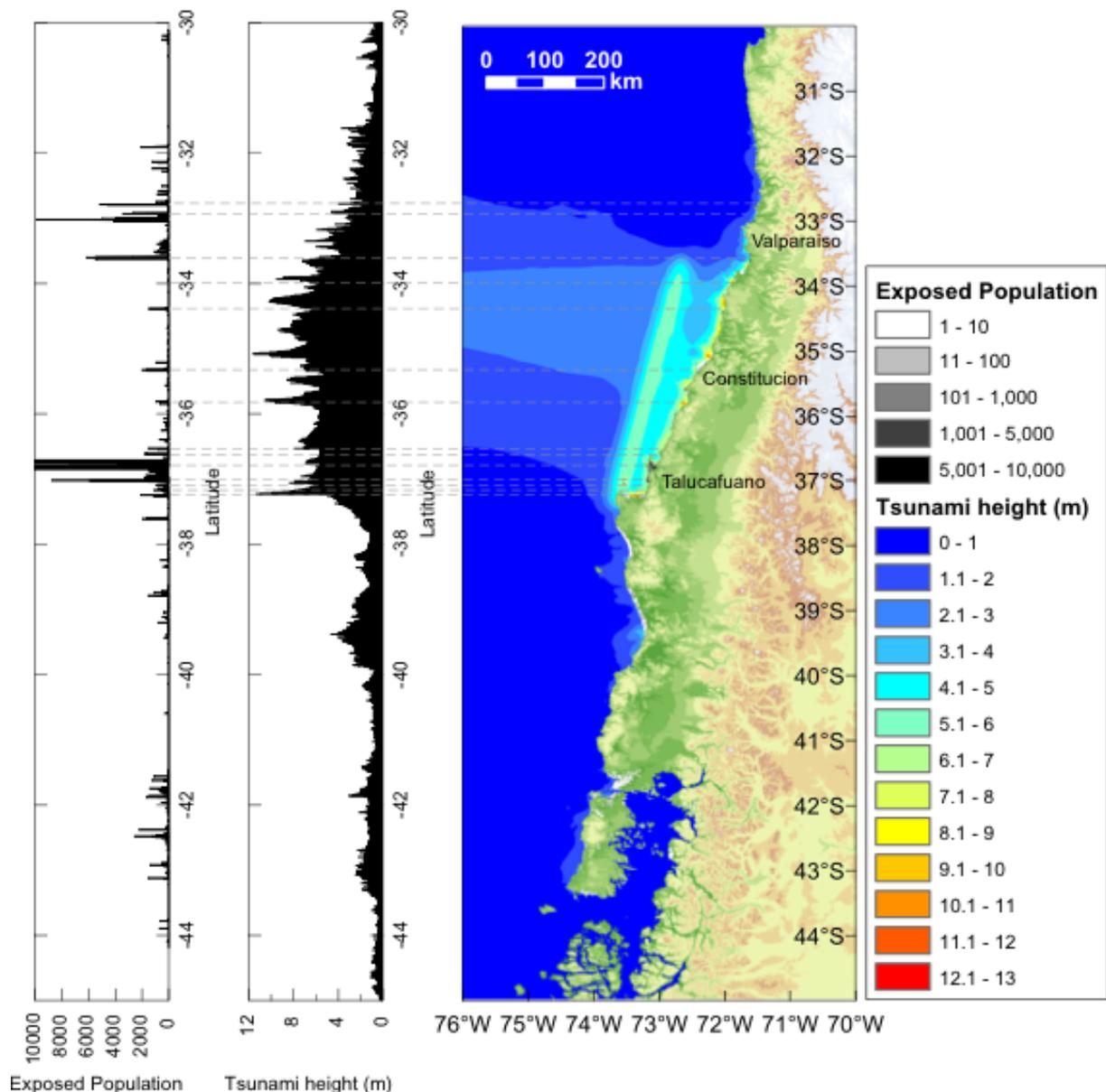


図 7.2-4 チリの予想津波高(右)と津波曝露人口(左)に基づく予想津波被災地の表示(灰色の点線が示す地点)

7.3. 迅速な被災地推定のための解析技術開発

2004年インド洋大津波災害では、津波がインド洋の12カ国に伝播し、その全体像の把握は困難を極めた。社会基盤施設や通信ネットワークへの被害、緊急対応体制の未確立といった問題により、被災した地域や国の特定、被害の全体像の把握に数ヶ月を要したことから、迅速な被災地推定技術の開発が重要な課題となった。しかし、広大な海域に広がる津波の場合、その全体像を把握することは容易ではない。一刻を争う緊急対応においては、限られた資機材と情報を活用して、いかに迅速に被災地を推定するかが問題となる。

近年のリモートセンシング技術と空間情報処理技術の飛躍的発展は、このような津波被災

災地の迅速な把握を高度化するものと考えられる。ここでは、津波の数値解析と、リモートセンシング、およびGIS技術を統合した迅速な被災地推定のための解析技術の開発をおこなった。

7.3.1. 迅速な津波被災地推定のための解析手法

図 7.3-1に本研究で提案する解析手法の流れを示す。本手法は4つの解析からなる。

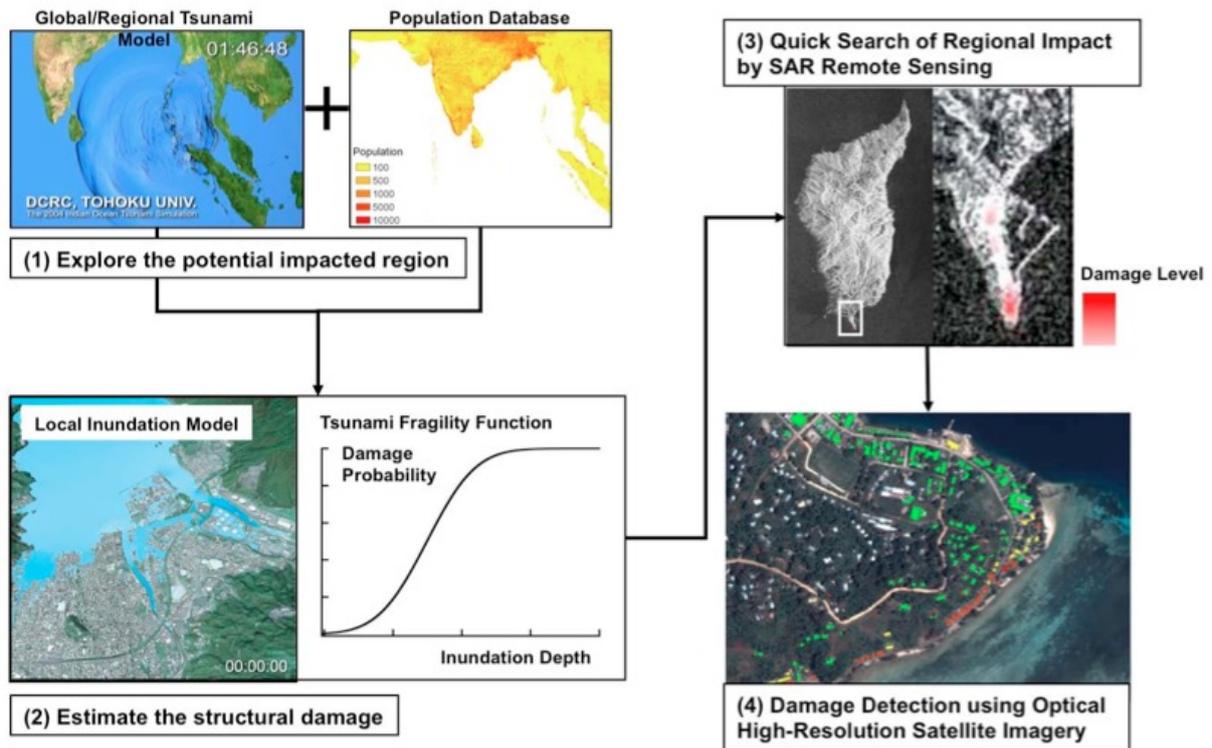


図 7.3-1 Structure of the present study

(1) 広域津波伝播解析と曝露人口解析を用いた被災可能性のある地域の抽出

津波伝播シミュレーションと地形データベースに基づき、広域および各地域において津波外力を推定する。各地域における津波数値解析は、地球座標系または直交座標系の浅水理論の有限差分解析法を用いる。数値解析の初期条件はOkada (1985) やMansinha & Smylie (1971) の方法で、地震発生後短時間で得られるUSGS(米国地質調査所)によるCMT(Centroid Moment Tensor) 解から海底の鉛直方向変位量を計算し、それを海面の鉛直方向変位量とする。

津波伝播シミュレーションによって得られた沿岸の津波高さと、人口分布、標高分布から、GISを使用して、津波曝露人口 (PTE) を算出する。

(2) 地域の被害量の推定

被災可能性のある地域が抽出されたら、次にその地域での津波浸水による被害量の推定を行う。ここでは、地域の局所的な地形データを用いた浸水解析と、浸水深から被害量を定量的に求めるための被害関数が必要になる。

図 7.3-2に2004年インド洋大津波による被害を受けたインドネシア・バンダアチェの建物被害調査と浸水深の関係から得られた建物被害関数の例を示す。この被害関数は、それぞれの浸水深や流速に対する被害発生確率として表している。この被害関数を用いることにより、各地での津波浸水の特性（浸水深や流速）、およびその地に存在する建物の量が分かれば、被害量を定量的に推定することができる。しかしながら、津波浸水特性の推定には、その地域の精細な地形データが必要であり、今後の整備が望まれる。

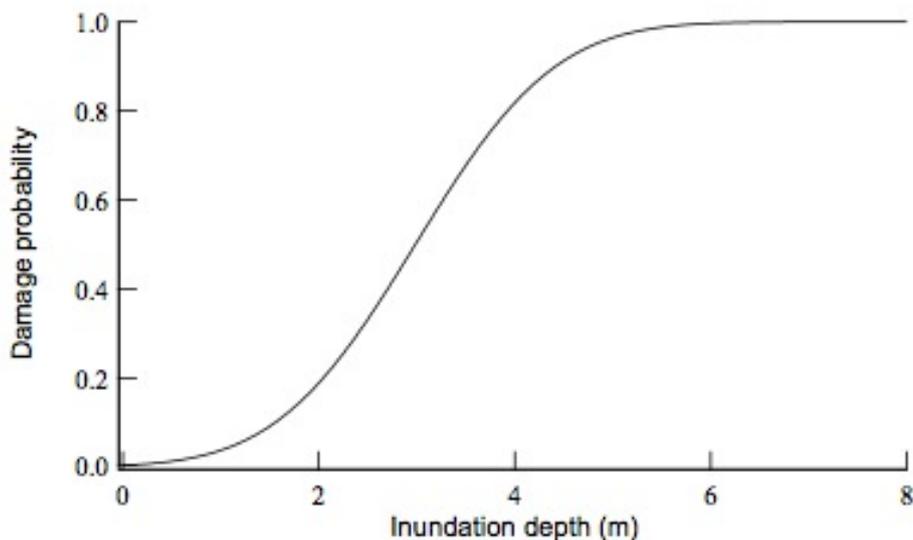


図 7.3-2 Fragility function for structural damage.

(3) SARリモートセンシングによる被災地の検索

上記手法により、被災地が「推定」された後は、推定された被災地に対してリモートセンシング技術を利用して被災箇所を「検出」するフェーズにうつる。被害を受けた場所を地域レベルで検出するには、昼夜や気象の影響を受けないSAR(Synthetic Aperture Rader, 合成開口レーダー)が有効である(Matsuoka & Yamazaki, 2002, and Matsuoka & Yamazaki, 2004)。SAR画像は、例えば家屋やビルなどの人工的構造物に対しては強い反射特性をもち、一方で空き地や被災した構造物に対しては比較的弱い反射および強い散乱特性を持つ。Matsuoka & Yamazaki (2002)は災害前後のSAR画像における後方散乱特性の違いに着目し、災害前後のSAR画像から被災域を判別する手法を開発した(図 7.3-3)。しかしながらSAR画像は建物の個々の被害を識別できるほどの空間分解能は有しておらず、被害が比較的狭いエリアに限られる場合は検出するのが困難になるなどの課題がある。

(4) 高解像度衛星可視画像を利用した津波被害検出

近年のリモートセンシング技術の進展は津波被災域の検出や建物被害の把握の可能性を広げている。商用衛星でもっとも高解像度の可視画像の解像度は、60~70cm(Digital Globe社QuickBird) または1m (GeoEye社IKONOS) となっている。2004年のスマトラ-アンダマン地震津波以降、これらの衛星が津波被災域を捉えており、緊急対応や復旧などの災害対応に活用されている。その例として、Vuら(2007)は衛星可視画像とデジタル標高データを組み合わせて津波被災域をマッピングする枠組みを開発、Miuraら(2006)は災害前後のIKONOS画像を利用して建物被害の可視化を行っている。

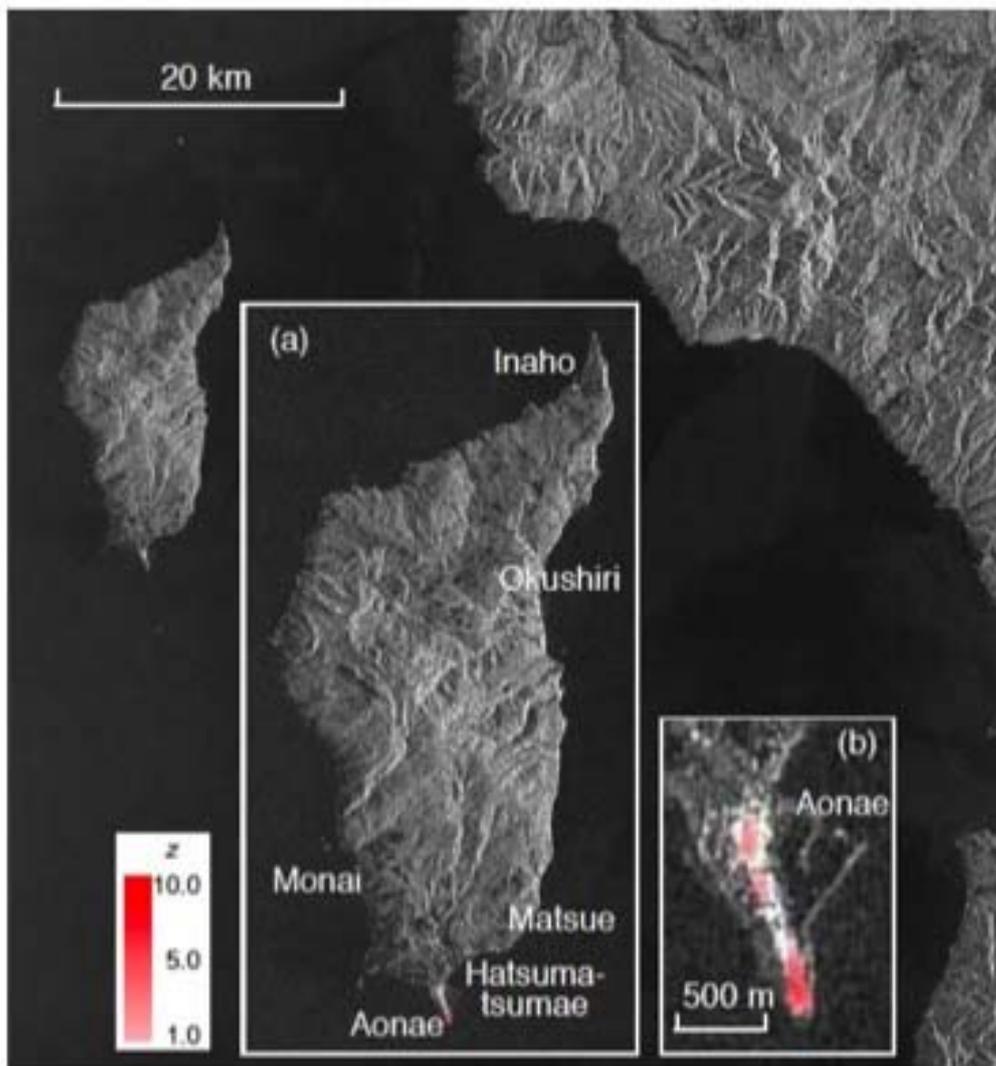


図 7.3-3 Tsunami impacted area detected by the analysis of SAR data (JERS: 1993/07/08 - 1993/08/21, Matsuoka & Yamazaki, 2002)

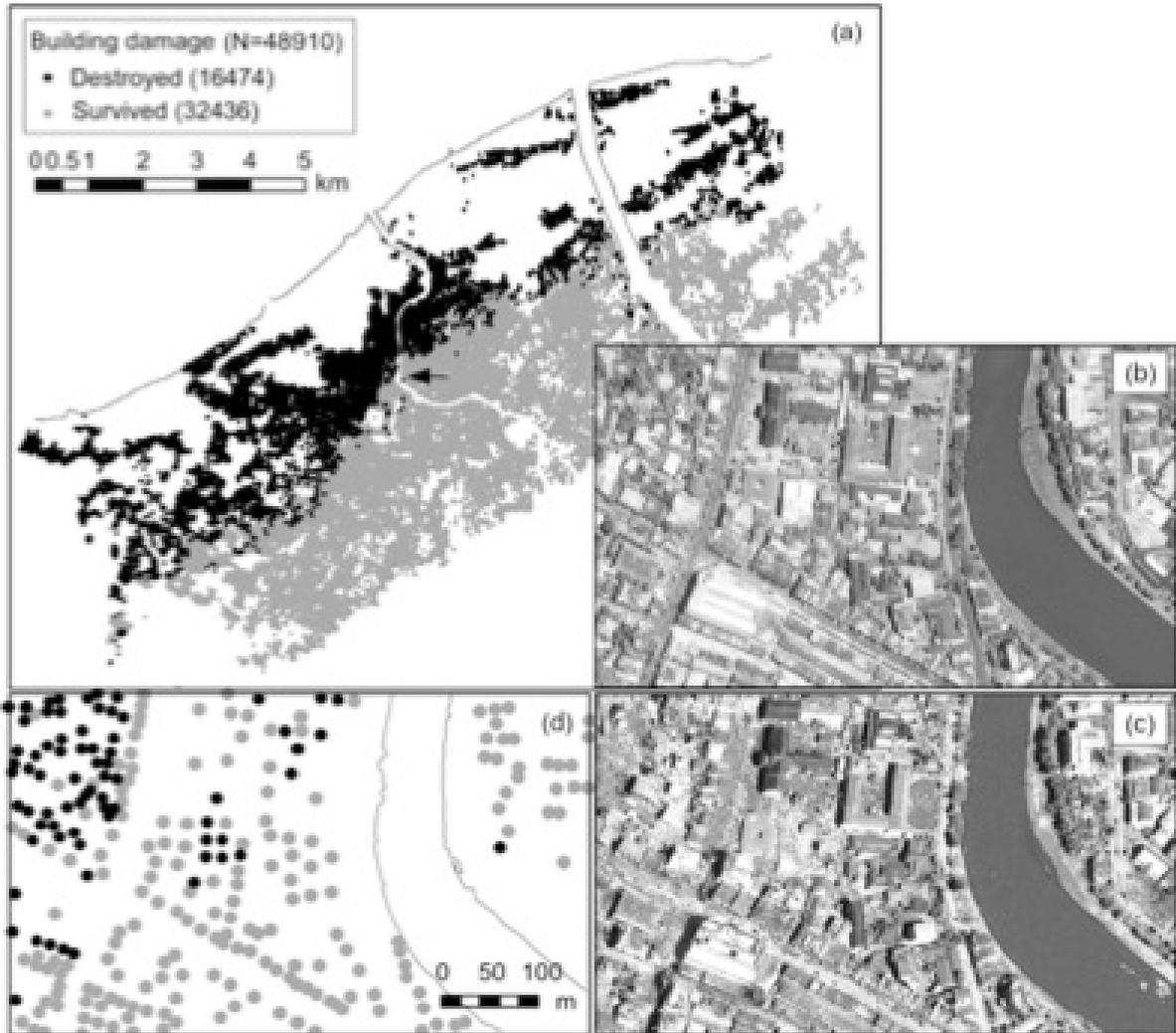


図 7.3-4 Spatial distribution of structural damage interpreted from the post-tsunami satellite imagery (IKONOS).

図 7.3-4は2004年スマトラ-アンダマン地震津波災害の発災前後のIKONOS衛星画像から検出された建物被害である。高解像度衛星画像を利用することで各戸別の被害が検出可能となっている。

7.3.2. 2007年ソロモン諸島地震津波への手法の適用

ここでは2007年4月1日(UTC)に発生したSolomon諸島沖地震津波を対象として本手法の適用を行う。この津波の被災地の一つであるSolomon諸島Ghizo島を撮影した高解像度衛星画像(QuickBird)を入手し、建物の被害状況を目視判読によって評価し、GIS上で被害の空間分布を把握した。

(1) 被災可能性のある地域の特定

Solomon諸島沖地震津波は2007年4月1日20:39 (UTC) にソロモン諸島沖で発生した (図 7.3-5)。まず, 津波数値解析を実施するにあたり, その初期条件として, USGSのCMT解から, 地殻変動量を計算した。断層面は余震分布と整合するように設定した。図 7.3-6に津波数値解析より推定された津波高分布とソロモン諸島沿岸の津波曝露人口分布を示す。

この結果, Choiseul島南岸とGizho島が被災可能性のある地域として抽出された。

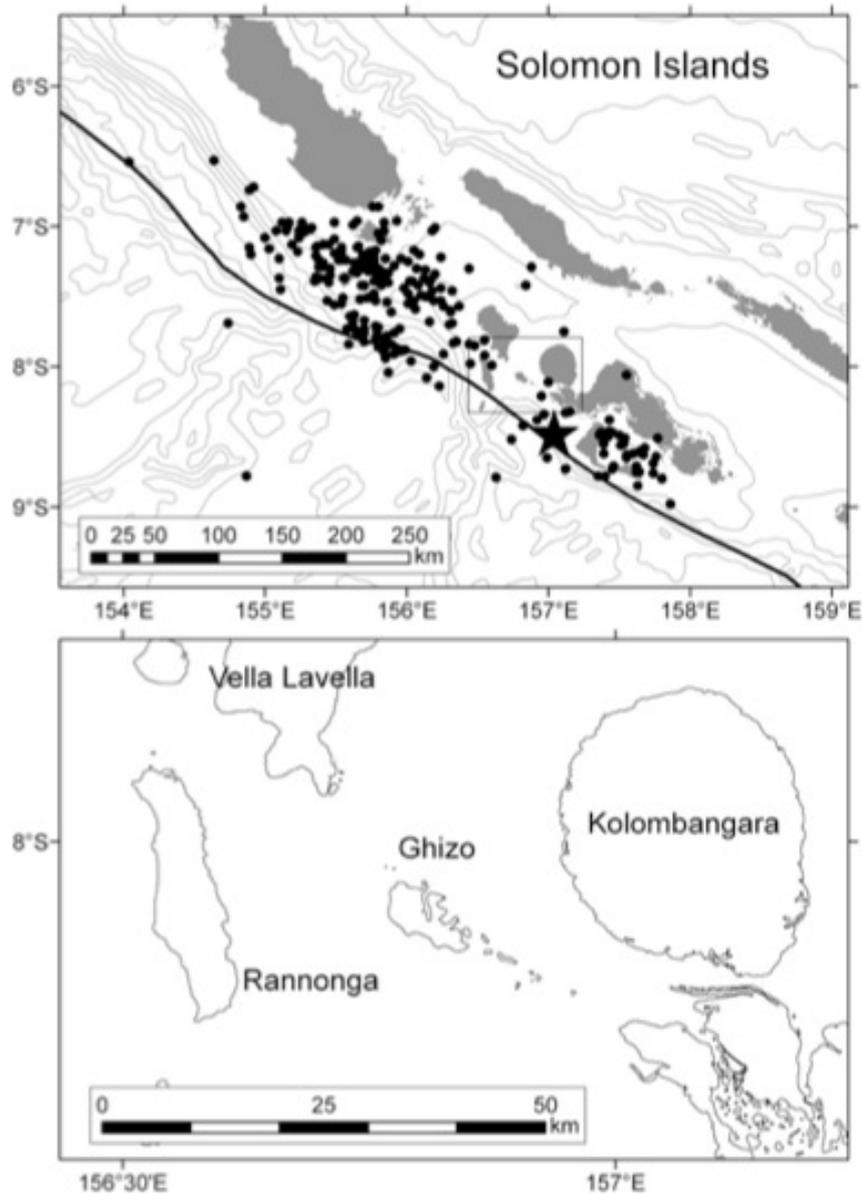


図 7.3-5 Study area of the 2007 Solomon earthquake tsunami.

(2) 衛星画像を用いた被害判読

QuickBird衛星は2001年に打ち上げられた商業観測衛星で, 可視域3バンドと近赤外域1

バンドのセンサーからなる。最高解像度はパンクロモートで0.61m, マルチスペクトルモードで2.44mである。今回使用したのは, 2003年9月23日と2007年4月5日にGhizo島周辺を撮影したQuick-Bird衛星画像で, パンクロ・マルチの2画像を合成したパンシャーフン画像(解像度:0.61m)である。4月5日の画像は津波被災から4日後に撮影されており, 被災直後の様子を示している。解析にあたり, 被害の大半が集中した島南部に集落を1つの領域として5つの解析領域(I-V)を設定した(図 7.3-7)。領域I-Vのそれぞれにおいて, 被災前後の画像を目視で比較し, Miura et al. (2005)を参考に, 流失・大破・中破・小破/無被害・不明の5段階で被害を評価した(図 7.3-8)。図 7.3-9に領域IIにおける判読結果を図示する。

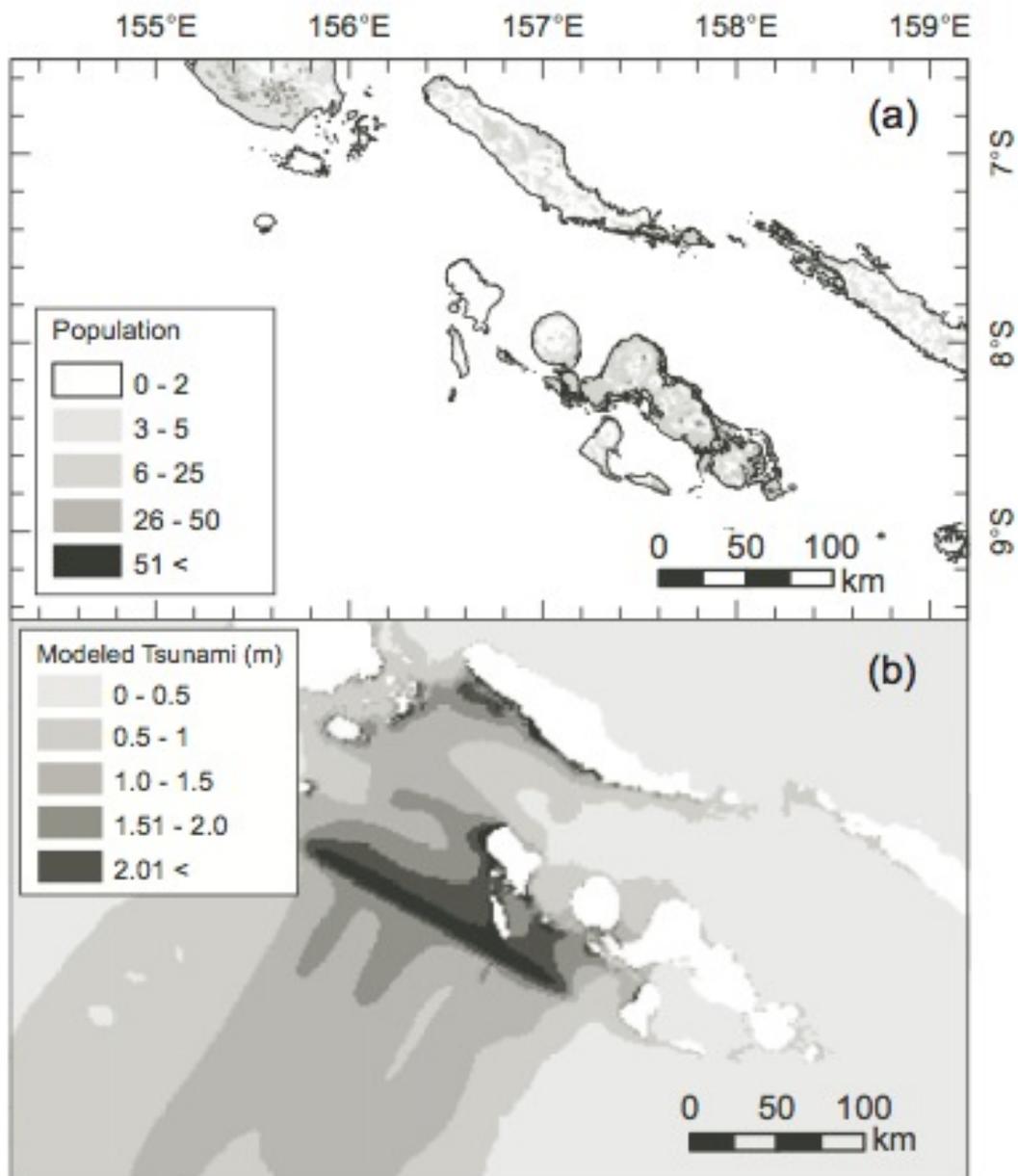


図 7.3-6 (a) Population density and (b) estimated tsunami height by the numerical model.

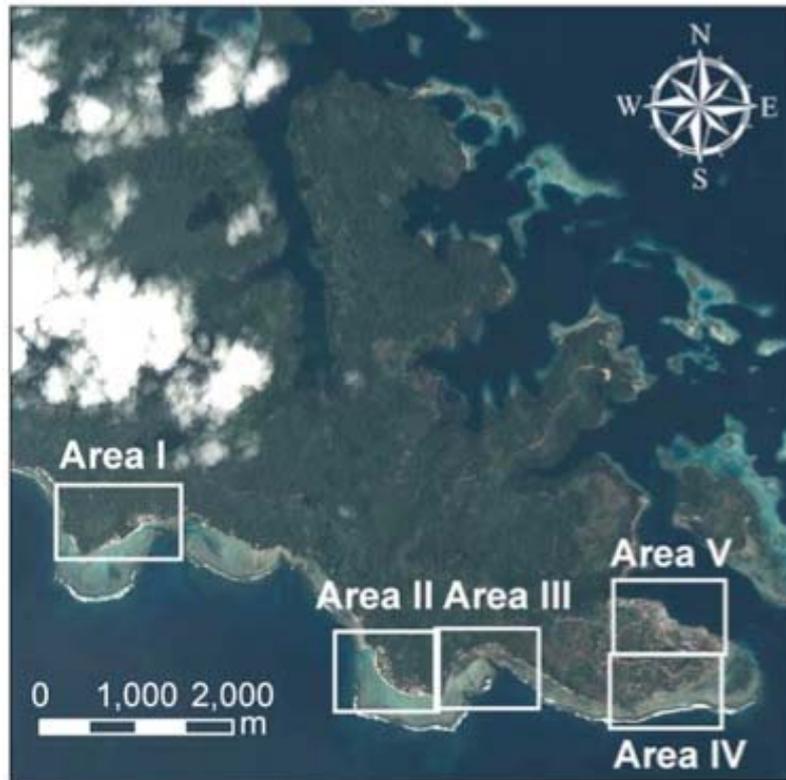


図 7.3-7 Post event satellite imagery of Ghizo island (Quick-Bird as of 5 April 2007).



図 7.3-8 Damage classification from pre and post event imageries.

(3) 津波浸水域の検出

衛星画像を注意深く観察すると、被災前後で植生が著しく変化した範囲（浸水域）とその境界線（津波遡上線）が明瞭に確認できる（図 7.3-10）。そこで、この植生の変化を利

用して、津波浸水域の検出を行った。

ここでは、発災前後のNDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 値を指標として用いた。まず、津波浸水域の境界線上にある100地点のNDVI値をサンプルデータとし、その平均値を求めた。その結果、図 7.3-11に示すように、津波遡上線上のNDVI値は0.340を平均として上下に0.05ほどのばらつきが見られた。

この値を閾値として、それ以下のNDVI値を持つピクセルを浸水域として抽出した。図 7.3-12に、領域IIでの抽出結果と現地調査時の遡上高調査点を重ねて示す。浸水域の抽出結果は実際の津波浸水域と整合している。

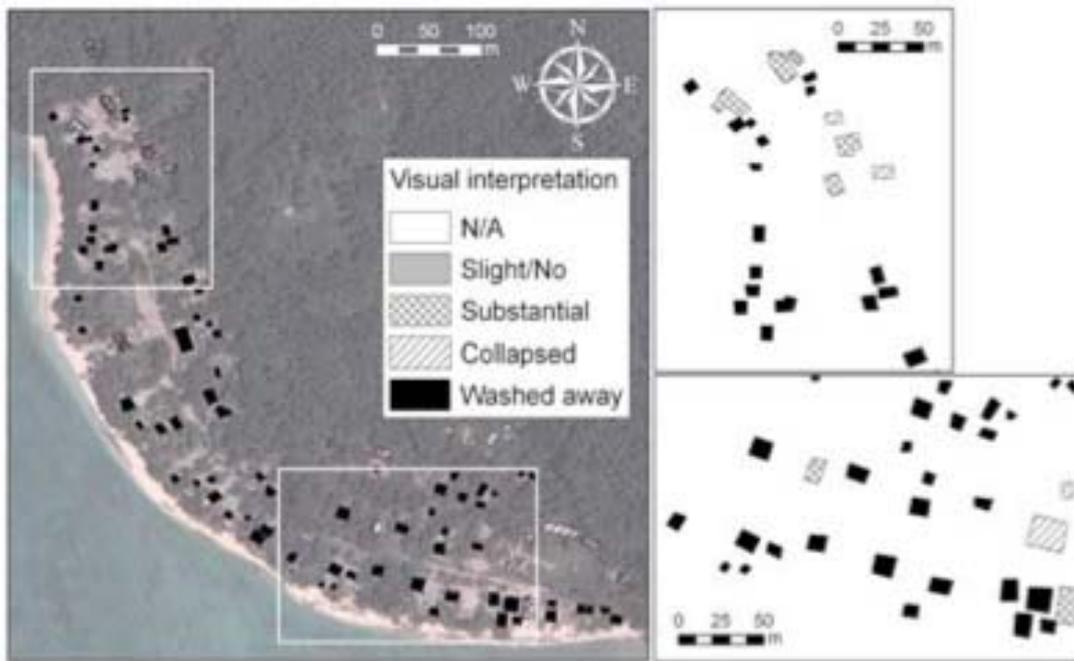


図 7.3-9 The result of visual damage interpretation (Area II).



図 7.3-10 Vegetation change found from pre and post event imageries.

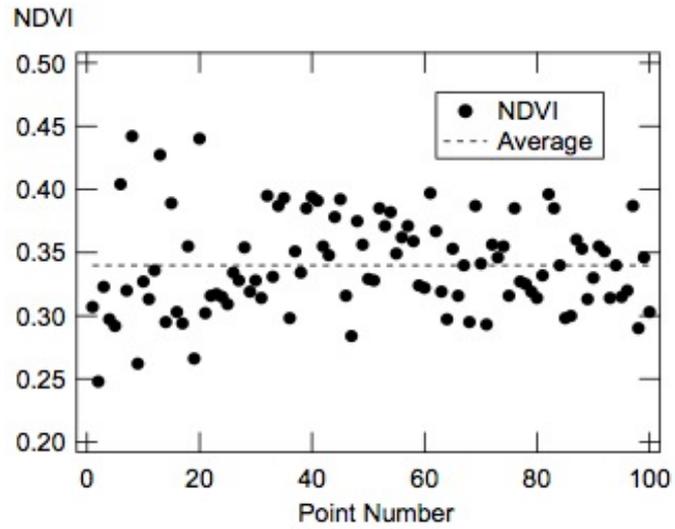


图 7.3-11 NDVI values calculated along the points on debris line (see Figure 10)

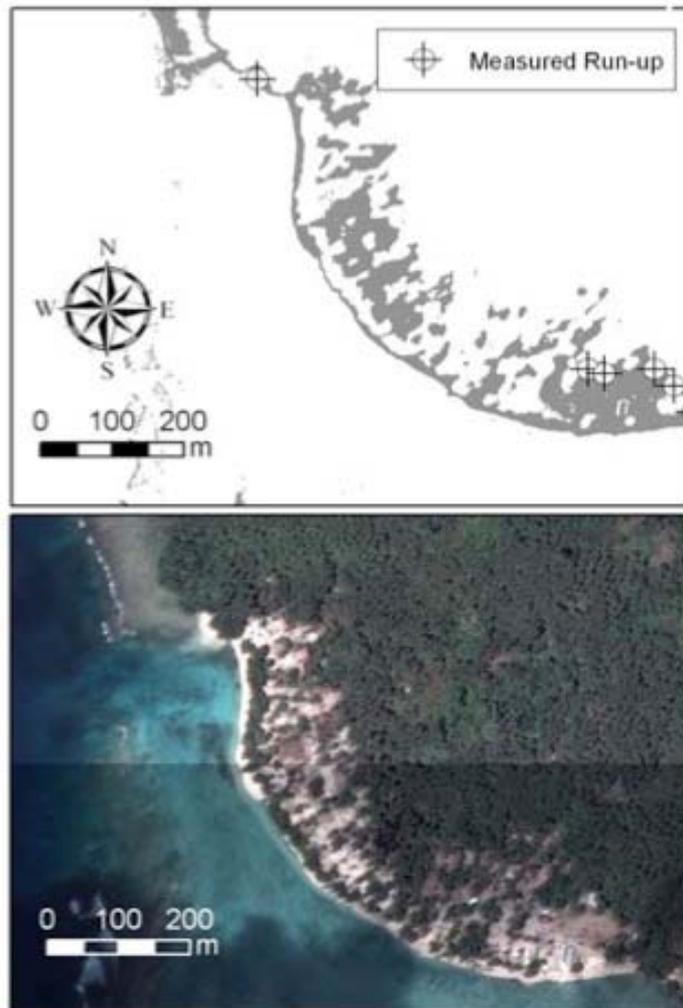


图 7.3-12 Extent of tsunami inundation zone estimated from the NDVI classification (Area II).

(4) 建物被害率の算出とフラジリティ関数の構築

衛星画像から判読した建物被害状況と浸水域から、各領域における浸水域内の建物被害率が求められる。表 7.3-1にその結果を示す。ここでは大破以上の被害を受けた建物を被害建物と定義し、浸水域内にある建物棟数、うち大破以上の被害を受けた建物数をそれぞれ N_0 、 N_D として、各領域の建物被害率 P_D を $P_D = N_D / N_0$ と定義している。

表 7.3-1 Structural damage probability obtained from the visual damage classification and NDVI analysis detecting the inundation zone.

Area	N_0	N_D	P_D	H_{max}
Area I	85	68	0.8	4.1
Area II	98	88	0.9	2.95
Area III	40	35	0.86	2.48
Area IV	62	44	0.71	1.88
Area V	134	2	0.01	1.09

N_0 : Number of structures within the inundation zone, N_D : Number of structures classified as G4 and G3, P_D : Damage probability, H_{max} : Measured maximum tsunami height (m) in each area

さらに、現地調査結果から得られた各領域での津波高と建物被害率の関係を示す被害関数を構築した。ここでは、既往の地震工学研究を援用し、次式で表される標準正規分布の累積分布関数への回帰分析を行って被害関数を求めた。

$$P_D = \Phi \left[\frac{x - \mu}{\sigma} \right]$$

ここで、 x は津波高さ、 μ は平均、 σ は分散である。得られた被害関数曲線を図 7.3-13に示す。

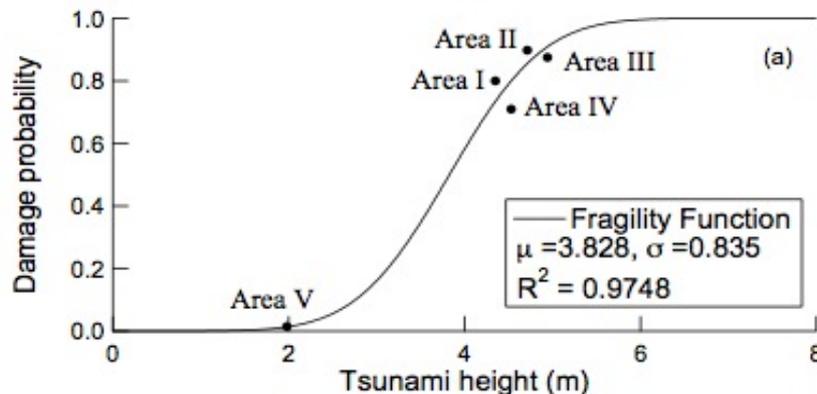


図 7.3-13 Fragility function of structural damage obtained from Ghizo island.

(参考文献)

- Dobson, J. E., E. A. Bright, P. R. Coleman, R. C. Durfee & B. A. Worley, 2000. "LandScan: A Global Population Data- base for Estimating Populations at Risk," Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 66, No. 7, 849-857.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie, 1971, The Displacement Fields of Inclined Faults, Bull. Seism. Soc. Amer., 61(5), pp.1433-1440.
- Matsuoka, M. & F. Yamazaki, 2002, Application of a methodology for detecting building-damage area to recent earth- quakes using satellite SAR intensity imageries and its validation, Journal of Architecture and Building Science No.558, 139-147 (in Japanese).
- Matsuoka, M. & F. Yamazaki, 2004, Use of Satellite SAR Intensity Imagery for Detecting Building Areas Damaged due to Earthquakes, Earthquake Spectra, EERI, Vol.20, No.3, 975-994.
- Miura, H., A. Wijeyewickrema & S. Inoue, 2006, Evaluation of tsunami damage in the eastern part of Sri Lanka due to the 2004 Sumatra earthquake using remote sensing technique, Proc. 8th National Conference on Earthquake Engineering, Paper No.8, NCEE, 856.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space, Bull. Seismol. Soc. Am., 75(4), pp. 1135-1154.
- U. S. Geological Survey, <http://earthquake.usgs.gov/>
- Vu, T. T., M. Matsuoka & F. Yamazaki, 2007, Dual-scale approach for detection of tsunami-affected areas using optical satellite images, International Journal of Remote Sensing, Vol. 28, Nos. 13-14, 2995-3011.

7.4. 情報システムの構築

7.4.1. 情報システムの概要

(1) システムの目的

本システムは将来予測される日本周辺海域で発生する巨大地震による遠地津波のシミュレーションを基に作成された津波情報と、その影響範囲や被害予測などを、インターネットを通じて広く環太平洋の研究者や行政、企業等に提供することを目的としている。

また提供を受けるユーザーが持つ、各地域・施設等の仔細な情報をシミュレーション結果とあわせることでより詳細な被害予測を行うことを目指すものである。

(2) システムの概要

本システムは、ユーザーからのデータのアップロードモジュール、サーバー上でのデータ解析モジュール、公開用モジュールの3つからなる。サーバーはArcGIS Serverのエンジ

ンを使ってデータの変換・解析・公開の処理を実行する。ユーザーはデータを直接サーバーにアップロードするか、手元で解析を進めGISのレイヤーにしたデータをサーバーにアップロードすることにより、そのデータを公開することができる。

7.4.2. データアップロードモジュール

この機能は、(a) 津波研究者からの津波解析データのアップロード、(b) 各地のユーザーからの局所的地形、家屋地図、人口、衛星画像等のデータのアップロード、(c) 津波観測施設の観測記録、被害写真、調査記録等のアップロードを受け、それらのデータに対してArcGISやGoogle Earth等で利用可能なデータ形式への変換などの処理を行う機能である。すべてのプロセスは自動的に行われる。

(1) 各種データのアップロード処理

(a) 津波解析データ

津波研究者からの津波解析データは、以下の6つのファイルを圧縮した1ファイルとしてアップロードされてくる。

- (1) 各出力時間ステップでの水位分布ファイル
- (2) 最高水位分布ファイル
- (3) 最高水位の発生時間分布ファイル
- (4) 最大流量フラックス分布ファイル
- (5) 最大流量フラックスの発生時間分布ファイル
- (6) 到達時間分布ファイル

これらのデータはASCII形式のメッシュファイルであり、そのフォーマットは次節のとおりである。アップロードされたファイルはサーバーのアップロード用エリアにまず格納される。このアップロード用エリアは外部プロセスが常時監視しており、ここに新しいデータが置かれると既定の処理を開始する。ここで行われる処理は下記のものである。

・データ蓄積

アップロードされたデータのインデックスを作成し、ディスク内にストアする。ストアされたデータは外部から参照・ダウンロードすることが可能である。

・データ変換

アップロードされるデータはASCII形式のデータなので、これを表示・解析するために必要なファイル形式にフォーマット変換を行う。具体的には、(1)各出力時間ステップでの水位分布ファイルから、可視化ソフトウェア「AVS」による自動処理によって、各時間ステップでの水位分布の可視画像を作成し、これをGoogle Earthで表示可能なKML形式で出力する。(2)最高水位分布ファイル、(3)最高水位の発生時間分布ファイル、(6)到達時間分布ファイルは、ArcGISで処理可能なGRID形式に変換し、またGoogle Earthで表示可能なKML形式で出力する。

(b) 地域データ

各地のユーザーからの局所的地形，家屋地図，人口，衛星画像等のデータは，ユーザー自身が持つArcGISソフトウェアを用いて作成し，表示方法を決めた上で，mxdファイルおよび表示に使用したデータをまとめてアップロードモジュールに送信する。

システムは，送信されたデータのインデックスを作成し，ディスク内にストアし管理する。これらの各地域の詳細なデータは，7.3.1で述べたように，地域の津波脆弱性の解析や，災害前の被害想定と対策の検討，災害後の被害推定等の基礎データとして重要になる。

(c) 緊急時データ

津波観測施設の観測記録，被害写真，調査記録等は，災害直後の対応において，重要なデータである。これらはGPS等による位置情報を付加したデータとして，サーバーにアップロードする。このようにすることで，サーバー上のGISエンジンでその位置にポイントをうち，他の情報と関連づけ，データのインデックスを作成し，ディスク内にストアし，管理する。

(2) 津波解析データの仕様

津波シミュレーションから出力される物理量を以下に示す。

水位

流量フラックス¹

流速²

到達時間

水位としては各出力時間ステップでの値および最大・最小値の空間分布データ，ならびに各出力地点での時系列データが出力される。流量フラックスとしては最大・最小値の空間分布データが出力される。流速としては各出力地点での時系列データが出力される。到達時間としては空間分布データが出力される。主に各出力時間ステップでの空間分布データはアニメーション作成用，その他の空間分布データは分布図作成用，時系列データは時間変化グラフ作成用に使用される。

(a) 空間分布データファイル

空間分布データとしては水位，流量フラックス³および到達時間の3種類⁴が出力対象となり，それぞれの派生データを含めると，以下の6ファイルが作成される。

(1) 各出力時間ステップでの水位分布ファイル

(2) 最高水位分布ファイル

(3) 最高水位の発生時間分布ファイル

¹ 流量フラックス＝流速×水深，線形長波理論を仮定，線流量ともいう。

² 流速＝流量フラックス÷水深，線形長波理論を仮定。

³ 東西方向成分と南北方向成分の合成値

⁴ ネットワーク経由で転送するファイル数を少なくするため，各出力時間ステップでの流速は出力しない。必要な場合は，流量フラックスと水深からサーバー側で計算する。

- (4) 最大流量フラックス分布ファイル
- (5) 最大流量フラックスの発生時間分布ファイル
- (6) 到達時間分布ファイル

最高解像度の場合¹，計算領域内の全格子の計算値が出力される。また，(1)では出力時間ステップ毎²でファイルが作成される。

(b) 時系列データファイル

時系列データとしては水位および流速の2種類³が出力対象となり，以下の2ファイルが作成される。

- (7) 水位時系列ファイル
- (8) 流速時系列ファイル

(c) ファイル名

ファイル名はデータ種別，物理量および派生種別から構成され，それぞれの項目はアンダーバーで接続される。各項目におけるフォーマットと記号を以下に示す。なお，半角英数字のみとする。

【データ種別】

フォーマット：A2

記号：空間分布(spatial distribution)はsd，時系列(time series)はts

【物理量】

フォーマット：A2

記号：水位(water level) zz

流量フラックス(discharge flux) mn

流速(velocity) uv

到達時間(arrival time) ar

【派生種別】

フォーマット：A3，A3_A2あるいはI5

記号：最大値(maximum value) max

最大値発生時間(appeared time of maximum value) max_at

出力時間(output time) 時間(秒)

上記のルールに従った(a)および(b)で示した各データファイルのファイル名を以下に示す。

¹ ネットワーク負荷を考慮すると，ファイル容量を小さくすることが望ましい。よって，鮮明なCGを作成するために必要な解像度を調べ，可能な限り間引きして出力することを検討する。

² ネットワーク負荷を考慮すると，ファイル数を少なくすることが望ましい。よって，アニメーションで津波の挙動をなめらかに再現するために必要な出力時間ステップ数を調べ，可能な限り間引きしてファイルを作成することを検討する。

³ ネットワーク経由で転送するファイル数を少なくするため，各出力時間ステップでの流量フラックスは出力しない。必要な場合は，流速と水深からサーバー側で計算する。

- (1) sd_zz_21600¹
- (2) sd_zz_max
- (3) sd_zz_max_at
- (4) sd_mn_max
- (5) sd_mn_max_at
- (6) sd_ar
- (7) ts_zz
- (8) ts_uv

(d) フォーマット

(1) 各出力時間ステップでの水位分布ファイル

1 行にX座標値（経度），Y座標値（緯度），水位（m）を，スペースまたはカンマで区切って入力，陸域等のNO DATA値は-99.9とする。

(2) 最高水位分布ファイル

1 行にX座標値（経度），Y座標値（緯度），水位（m）を，スペースまたはカンマで区切って入力，陸域等のNO DATA値は-99.9とする。

(3) 最高水位の発生時間分布ファイル

1 行にX座標値（経度），Y座標値（緯度），計算開始からの時刻を，スペースまたはカンマで区切って入力，NO DATA値は-99.0とする。

(4) 最大流量フラックス分布ファイル

1 行にX座標値（経度），Y座標値（緯度），流量フラックスを，スペースまたはカンマで区切って入力，陸域等のNO DATA値は-99.9とする。

(5) 最大流量フラックスの発生時間分布ファイル

1 行にX座標値（経度），Y座標値（緯度），計算開始からの時刻を，スペースまたはカンマで区切って入力，NO DATA値は-99.0とする。

(6) 到達時間分布ファイル

1 行にX座標値（経度），Y座標値（緯度），計算開始からの時刻を，スペースまたはカンマで区切って入力，NO DATA値は-99.0とする。

(e) その他

- ・ 全てアスキー形式とし，転送時に圧縮を行う。
- ・ 地球座標系の回転楕円体はWGS84を基本とし，グリッドはGEBCOデータのグリッドを基準グリッドとする。

7.4.3. サーバー上でのデータ解析モジュール

津波データの公開を受け，許可された研究者はその津波データと自身が持つローカルデータとを重ね合わせて解析することができる。解析は研究者がデータを所定のフォー

¹ 例として，計算開始から6時間（21,600秒）後の出力を示している。

マットでサーバー上にアップロードすることにより、自動的に行われる。

この処理は研究者がそれぞれ持つ、港湾やその近辺の詳細なデータと津波シミュレーションデータとを重ね合わせることで、より詳細な被災シミュレーションを可能とする。

研究者のアップロードしたデータは、それぞれ個々の研究者に割り当てられた領域に保存され、新しいシミュレーションデータがアップロードされた際、同じローカルデータで解析を行うのであれば、再度アップロードしなくてもサーバー上のデータを指定することで解析できる。この領域はそれぞれの研究者とサーバー管理者にのみアクセスが許可されるため、それ以外のユーザーからはアクセス不能である。

(1) 津波曝露領域分析

サーバー側では津波曝露領域の分析を実施する。研究者らにより、津波数値解析結果として、海域の津波高分布（最高水位分布）が作成され、サーバーに送信されると、サーバーは送信された最高水位分布データと、サーバー内の標高データベースを用いて、陸側の津波曝露領域を抽出する。

最高水位分布データは、海域のみで、海岸線までとなっているので、沿岸の水位を陸上部まで内挿し、これと地上標高データを組み合わせて仮想の海水面を作成する（図 7.4-1）。すなわち、陸域まで内挿した仮想海水面の高さデータと地上標高とを比較し、仮想海水面の高さより、標高が低いか否かを判定し、低い場合にそのメッシュを、津波曝露領域とする。沿岸の最高水位の内陸部への内挿法についてはいくつかの手法があり、どの手法を用いるのが適当か、その検討を行った。

ここではArcGIS Serverのエンジンで実施可能な、Point to Point Near解析、およびIDW解析を対象として、手法と内挿結果の比較検討を実施した。

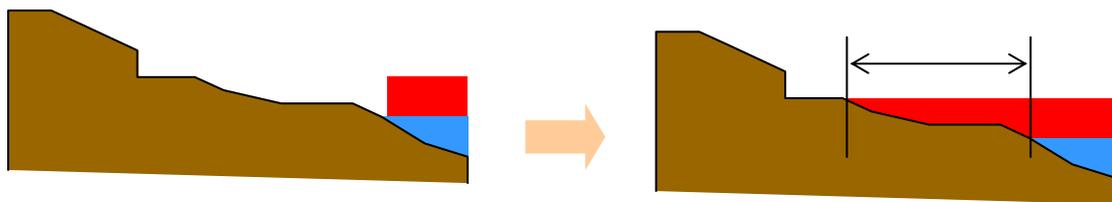


図 7.4-1 Detection of tsunami exposed area.

(a) Point to Point Near解析

海岸線から陸域に向かって指定したメッシュ数分のポイントデータを作成し、各ポイントデータに対して最近隣の津波高データの値を取り込む。図 7.4-2に沿岸から3メッシュ分（この場合90arc sec, 約2.7km）内陸へ、本手法により補間した結果を示す。海岸からどの程度の距離までのメッシュを指定するかは、沿岸の津波高さや、メッシュの大きさ、過去の遡上距離等から判断して設定する。この解析方法では内挿補間は行われず、最近隣の値が用いられることとなる。

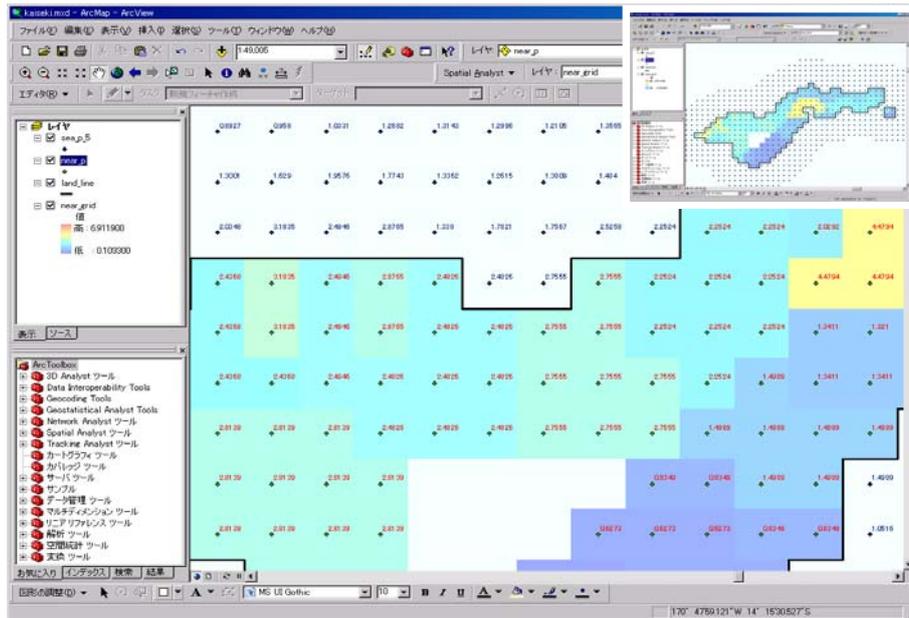


図 7.4-2 Result of Point to Point Near Analysis

(b) IDW解析

近隣のポイントデータを使い、そのポイントまでの距離に応じた重み付けして対称点の値を算出する方法。参照するポイントの点数やポイントを検索する半径などのパラメータを指定する。図 7.4-3にパラメータを変えて実施した内挿補間結果を示す。

これらの検討結果から、Point to Point Near解析が海面をそのまま陸上に延長する上で適しており、この解析手法を曝露領域解析に利用する。この手法によって陸上の津波曝露領域を解析・抽出する事で、これと人口データと重ねて解析し暴露人口や被害想定を行うことが可能となる。

(2) 津波曝露量分析

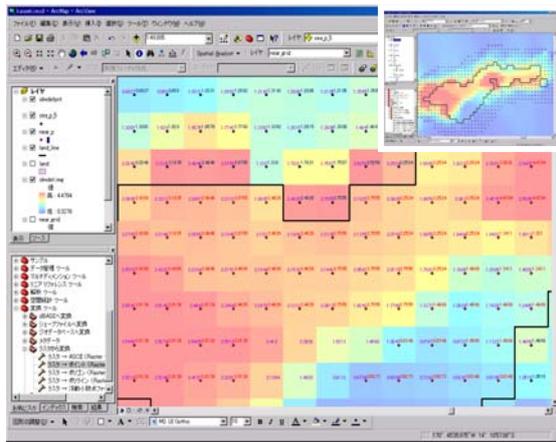
前節で津波曝露領域を設定すれば、その領域において、曝露人口や家屋数等の曝露量分析が可能になる。ここでは以下の手順で、曝露量の分析を行う。

まず、内挿された仮想海水面の高さデータを、ArcGISの空間結合機能によって、領域が重なるという条件式を設定して、人口分布データに結合し、結合データセットAを作成する。

次に、国あるいは地域等の領域ポリゴンデータを用いて、この領域ポリゴンの内部に重心が含まれるという条件式と、ArcGISの空間選択機能を用いて、結合データセットAから該当メッシュを選択し選択セットBを作成する。

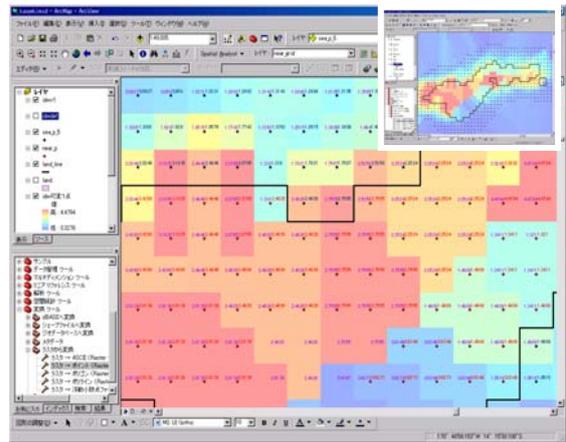
この選択セットBに対して、仮想海水面の高さを横軸、人口を縦軸としてヒストグラムを作成する統計処理を行う。

この手続きによって、国あるいは地域等に関して、それぞれの津波高に曝露される人口を計算することができる。



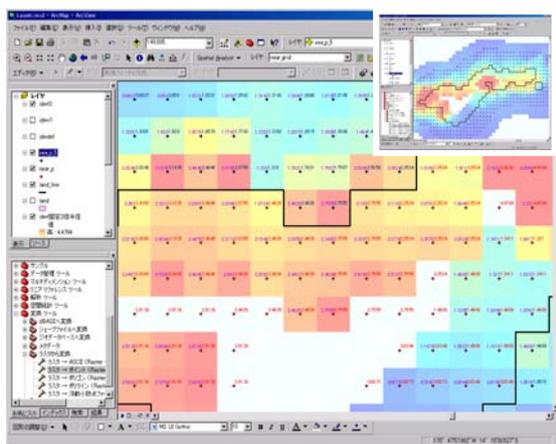
(a) IDW 半径可変, 12点

最近隣の12点を取得し、距離に応じた重み付けを行った上で値を確定。



(b) IDW 半径可変, 1点

最近隣の1点を参照。この場合、1点のみを使用するため距離に応じた重み付けは行われず、その1点の値がそのまま使用される。結果的には前述のNearと同じだが、検索開始の方向がNearと異なるため結果が異なる。



(c) IDW 半径固定

半径を固定し、その半径内に見つかった全ての点を使って距離に応じた重み付けをし、値を確定する。

図 7.4-3 Result of IDW analysis

一度結合データセットAを作成すれば、国・地域を変えて選択セットBの作成とその統計処理を行うことで、それぞれの国・地域の津波曝露人口の解析が可能である。

計算された、津波曝露人口は、そのまま表形式で、あるいは、プロットプログラムを介して図 7.2-2のような、グラフで表すことが可能である。

また、ユーザーがアップロードした、人口以外の家屋位置データや、重要施設位置データなどのデータも、位置情報が正しく設定してあれば、同様に解析することが可能であると考えられ、その実装を検討している。

(3) シミュレーションの可視化処理

テキスト形式で出力されるシミュレーションデータをわかりやすく，かつ容易に，迅速に可視化して，提供することは津波の理解に重要である。ここでは，サーバーに送信された津波シミュレーション結果を，2D，3Dで可視化し，Google Earthで表示可能な形式として保存するシステムを開発した。

可視化のエンジンとしては，AVS/Expressを使用した。処理の一連の流れを図 7.4-4に示す。まず，ユーザーはアップロード時に可視化の方法とそのパラメーター，およびデータを送信する。送信されたパラメーターからサーバーが処理パラメーターファイルを作成し，それを可視化実行バッチファイルに読み込ませてAVS/Expressの言語で書かれたプログラムを起動する。またデータは特定のディレクトリにスプールされ，AVS/Expressがこれを読み込んで可視化を実行する。可視化された画像はKML Exporterを介してKML/KMZファイルに出力される。本システムによって出力されたKML/KMZをGoogle Earth上で表示した例を図 7.4-5，図 7.4-6，図 7.4-7に示す。

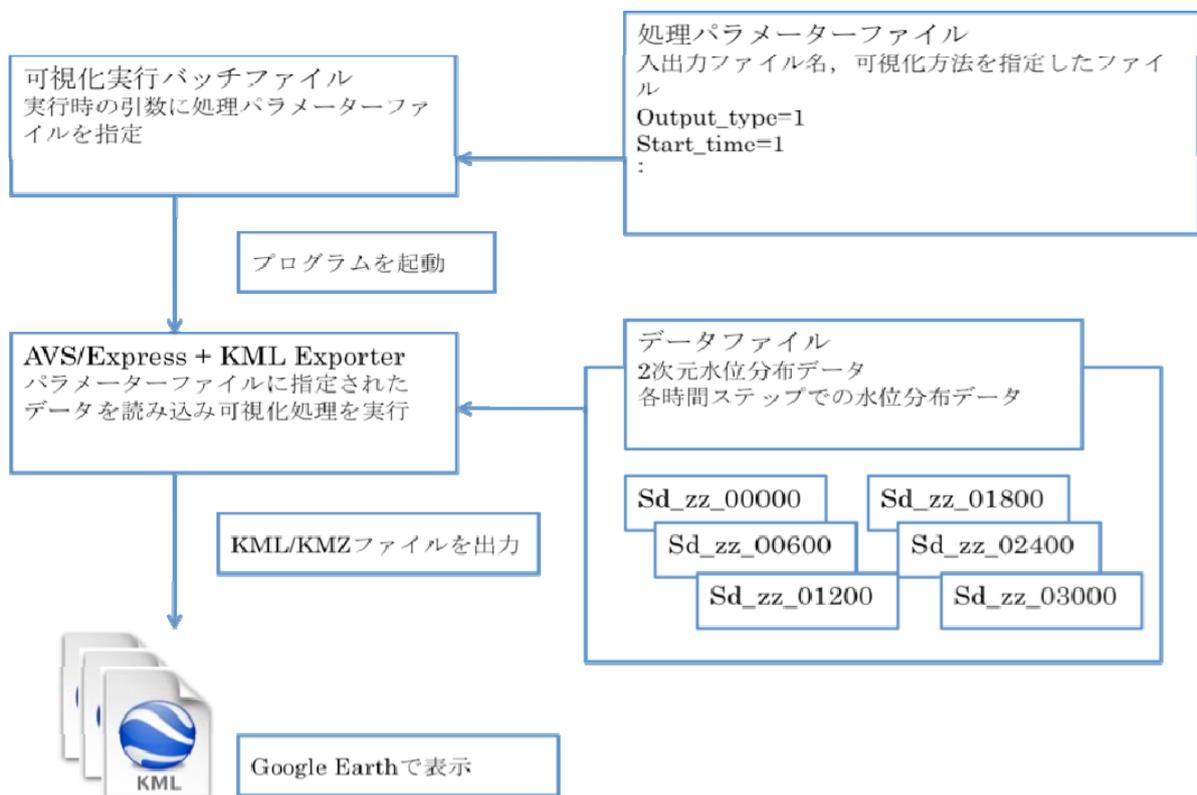


図 7.4-4 自動可視化処理の流れ

7.4.4. 公開モジュール

津波シミュレーションデータおよび解析データはデータ変換や解析処理を経てWebページ，あるいはGoogle Earthで利用可能なデータとして公開される。この間の処理はすべて自動的に行われ，研究者自ら作成する必要はない。

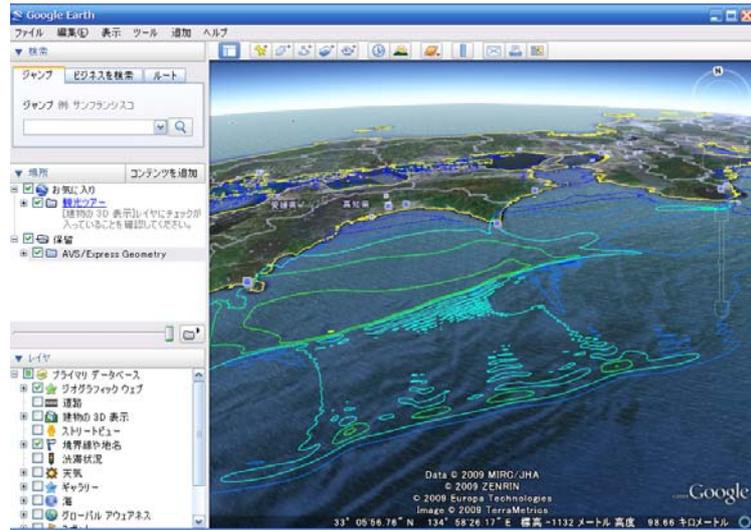


図 7.4-5 コンター図（水位や津波到達時刻等の可視化に利用可能）

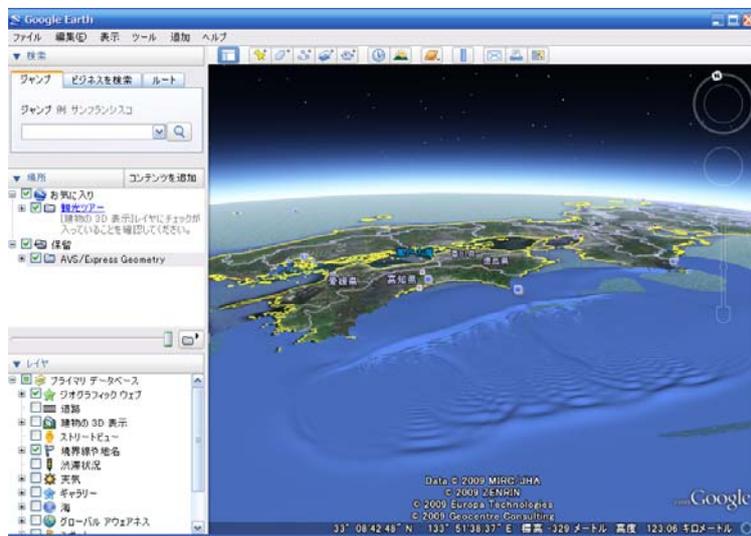


図 7.4-6 3D表示例

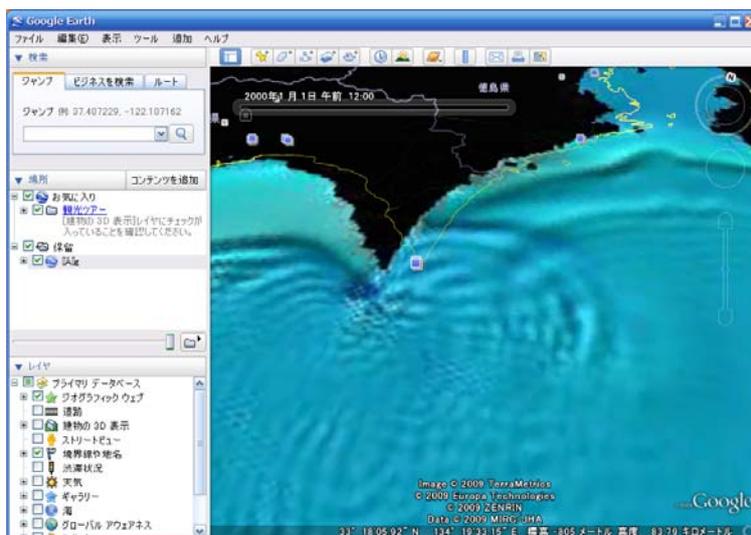


図 7.4-7 アニメーション表示例。上部スライダーで時刻を自由に指定可能。

(1) データ公開の流れ

プログラムによる津波情報の解析結果はテキストデータであるため、これをイメージデータとして表示するためのデータ変換が必要となる。また解析結果は海の範囲でのデータとなるため、たとえば陸域での曝露領域を抽出するためには、解析結果とDEMなど他の情報をあわせた解析を行う必要がある。

本システムでは、このデータ変換および追加解析の部分をサーバーサイドで行い、その結果を公開する方法と（サーバーサイドGIS処理方式）、研究者のローカルマシンでその処理を行い、その結果を送信することで公開することが可能となる方法（クライアントサイドGIS処理方式）の2つの方式をサポートしている。2つの方式でのデータ公開の流れを図7.4-8に示す。

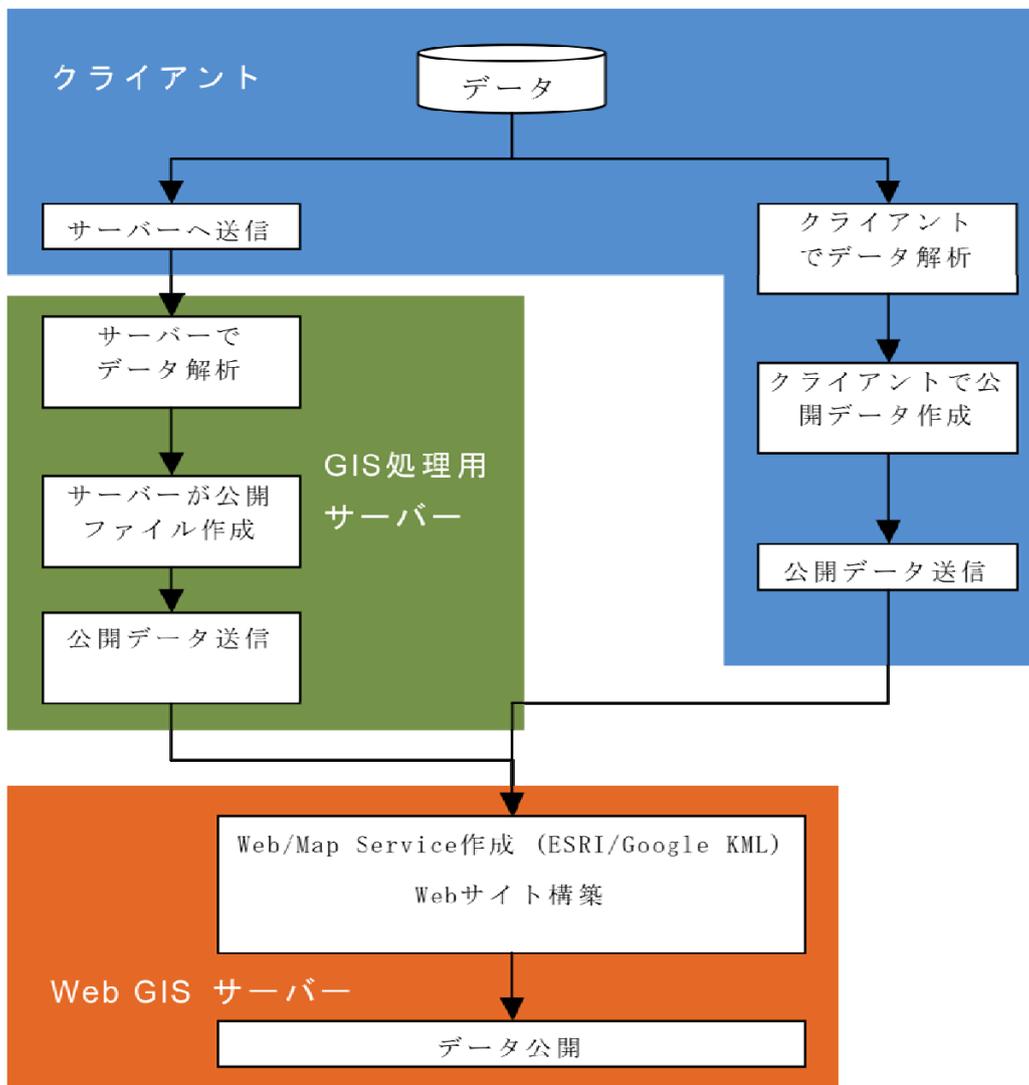


図 7.4-8 The flow chart of data publishing

また、サーバーによる公開形式については、（１）津波解析のケース、イベント、分析ごとに専用のWEB Siteを作成するWeb配信方式、（２）ArcGIS DesktopなどGISアプリケーションをクライアントとして、サーバーのデータに接続して利用する、Map Server配信方式、（３）Google Earth上に展開し、ユーザーのGoogle Earth上で表示するGoogle Earth配信方式の３つの異なった方法で同時に公開できるようにした。

これら一連の処理はArcGISサーバーを用いて実装されている。ArcGISサーバー以外の形式でアップロードされたデータはArcGISで読める形式に配信され、自動的にWebページの作成、Mapサービスの開始、KML化が実行される。また、ArcGISで作成した、ドキュメントファイル（mxdファイル。データの所在とその表現方法などが記載された定義ファイル）とデータをArcGISサーバーに送ることで、サービス化される。ArcGISサーバーはArcGIS Desktopから参照可能である。

（２）サーバーサイドGIS処理方式

研究者は解析結果（テキストファイル）をそのままサーバーに送信する。この時の送信先のサーバーはWeb GISサーバーではなく、専用のGIS処理を行うサーバーである。このサーバーではArcGISとそのカスタムアプリケーションが起動しており、送られてきた解析結果をデータ化し、あらかじめプログラム化されている複合解析処理を行う。

GIS処理を行うサーバーは、データ変換および解析処理後に地図表示のための装飾（色など）を定義したmxdファイルを作成し、それとデータをWeb GISサーバーに送信する。

この方式の利点は研究者の手元にGISソフトが無くても、その結果をサーバーに送ることによって追加の解析と公開が可能となるということである。反面、解析および表示に関する処理は全てサーバーサイドに用意されたものを使用することになるため、独自の解析や表示方法などを反映させることはできない。

（３）クライアントサイドGIS処理方式

研究者は解析結果を自身が持つArcGISソフトウェアを用いて更に解析し、表示方法を決めた上で、mxdファイルおよび表示に使用したデータをまとめてWEBサーバーに送信する。

この方式の利点は研究者の手元で解析処理を行うことができるため、追加のデータや、より精度の高い細かいデータを用いた解析が可能であるということ、表示方法も自由に設定できることなどがある。ただし、使う側にGISアプリケーションを扱う技能が必要となる。

（４）Web GISサーバーでの公開処理

データの公開に用いるArcGISサーバーはデータ公開に際して、サービスの作成や実行などマニュアルで行う必要がある。これはデータの公開に際して、サーバー側にだれか管理者を置いて、公開を要望するデータが送られてきた場合は手動でサービスの作成などを行う必要があること意味している。

本システムではWEBサーバーに監視プログラムとサービス構築プログラムを配し、外から投げ込まれたデータ（mxdファイルおよび実データ）を自動的に識別しサービスを構築する

ようになっている。これにより、サービスの作成を行うための管理者は不要となり、またサービスを開始するまでのタイムラグも抑えることが可能となる。

このユーザーによるデータの投込みと、それを感知してのサービスの自動作成の仕組みは本プロジェクトだけに限らずさまざまな用途での利用が可能で、データ利用・公開の促進につながると考えられる。

(5) システム開発例

上記のシステムの開発例を以下に示す。

(a) トップ画面

トップ画面では、ユーザーが、データをアップロードするか、データを閲覧するかを選択する。

(b) データアップロード

データアップロードを選択すると、あらかじめ登録されたユーザー以外のユーザーからのアップロードを制限するため、ユーザー認証の画面が表示される。

ユーザーが認証されると、津波数値解析結果（テキストデータ）の送信・管理、ユーザーが作成したGISデータの登録・管理、および津波数値解析結果の可視化のための設定ファイルの登録・管理のメニューが表示され（図 7.4-9）、それぞれの方法でシステムにデータを登録することができる。



図 7.4-9 アップロードや管理するデータ種別の選択画面

(c) データ閲覧

データ閲覧を選択すると、登録されている津波イベントから、表示するイベントを選択する画面が表示される。ここでは、7.1.3. (2) の東南海・南海地震津波を例に、図 7.4-10、図 7.4-11, 図 7.4-12, 図 7.4-13にデータの表示例を示す。

津波シミュレーション結果の表示ページでは、基盤レイヤーとして、水深データおよび、人口データを用いている。これらの基盤レイヤーの上に、津波数値シミュレーションの結果が表示される。

「コンテンツ」欄で表示するレイヤーを切り替えることが可能であり、また任意の位置をブックマークとして「結果」欄にブラウザで表示している間だけ一時的に保存することができる。メニューバーから、拡大・縮小、表示位置の移動、前の表示範囲に戻る、次の表示範囲に進む、任意の位置の部分的拡大表示、距離計測、概観図の表示などの機能を実行可能である。また、図に示されているように、任意の位置で、最大水位、最大水位の到達時間、初期水位、津波の到達時刻を数値で確認することができる。

また、上部メニューのSelect Eventをクリックすると、他の津波のケースを参照することができる。Potential Tsunami Exposureをクリックすると、その津波のケースに関する津波曝露人口の計算結果が表示される。Download KMLをクリックすると、Google Earthで表示するためのKMLファイルのダウンロードページへ移動する。

View with Google Earthをクリックし、データをGoogle Earthで表示した例を図 7.4-14に示す。

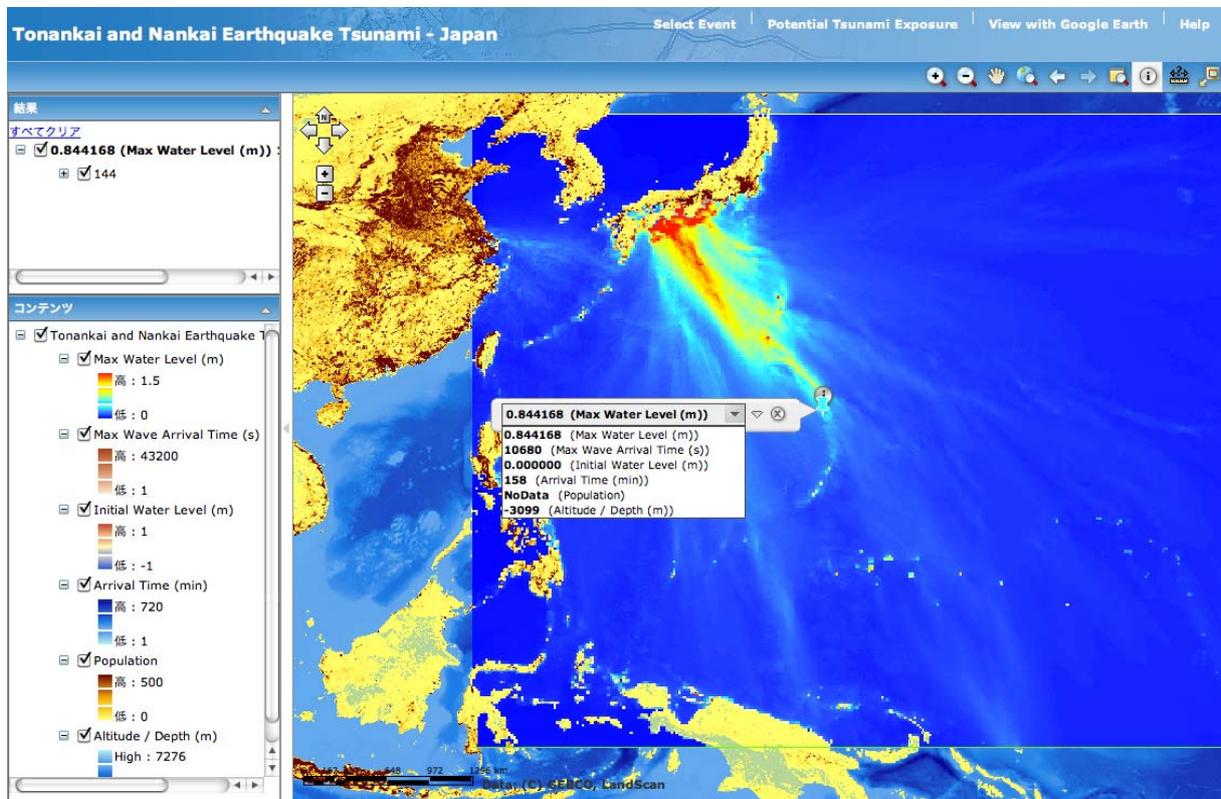


図 7.4-10 システムで、最大水位分布を表示した例

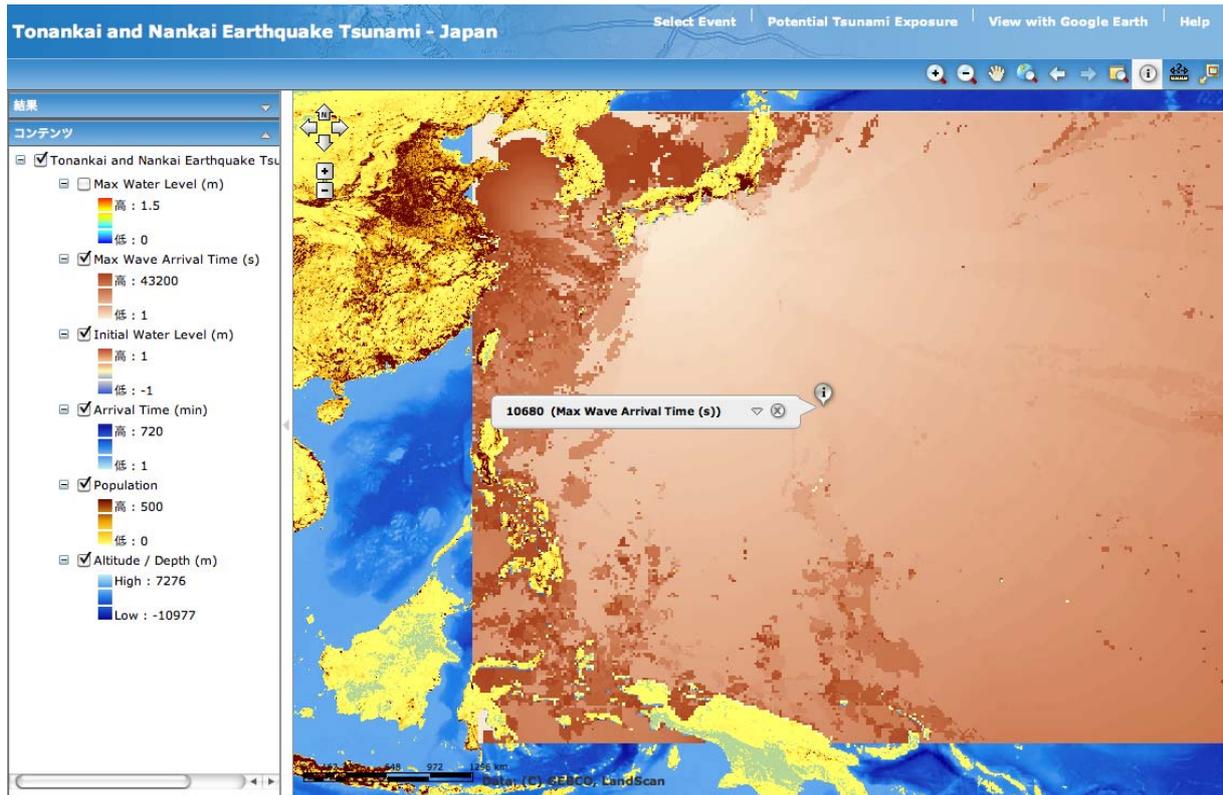


図 7.4-11 システムで最高水位の到達時刻を表示した例

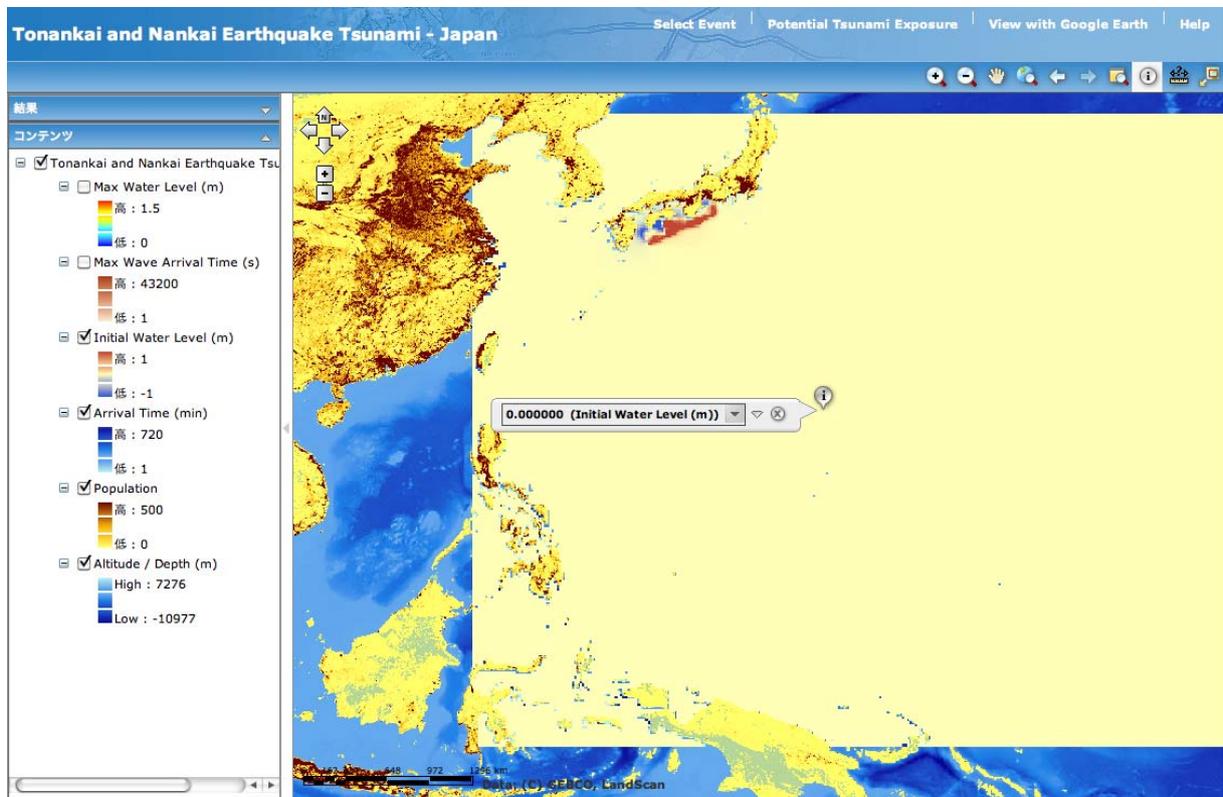


図 7.4-12 システムで初期水位を表示した例

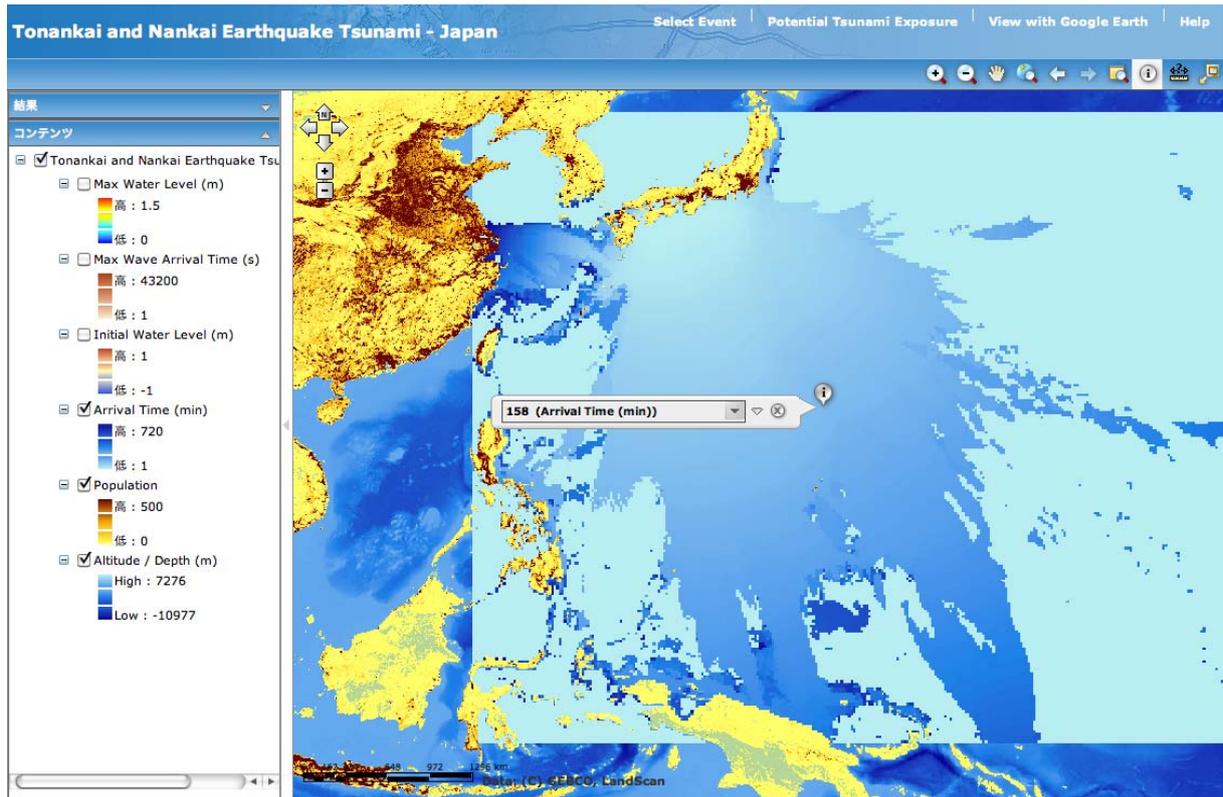


図 7.4-13 システムで、津波の到達時刻を表示した例

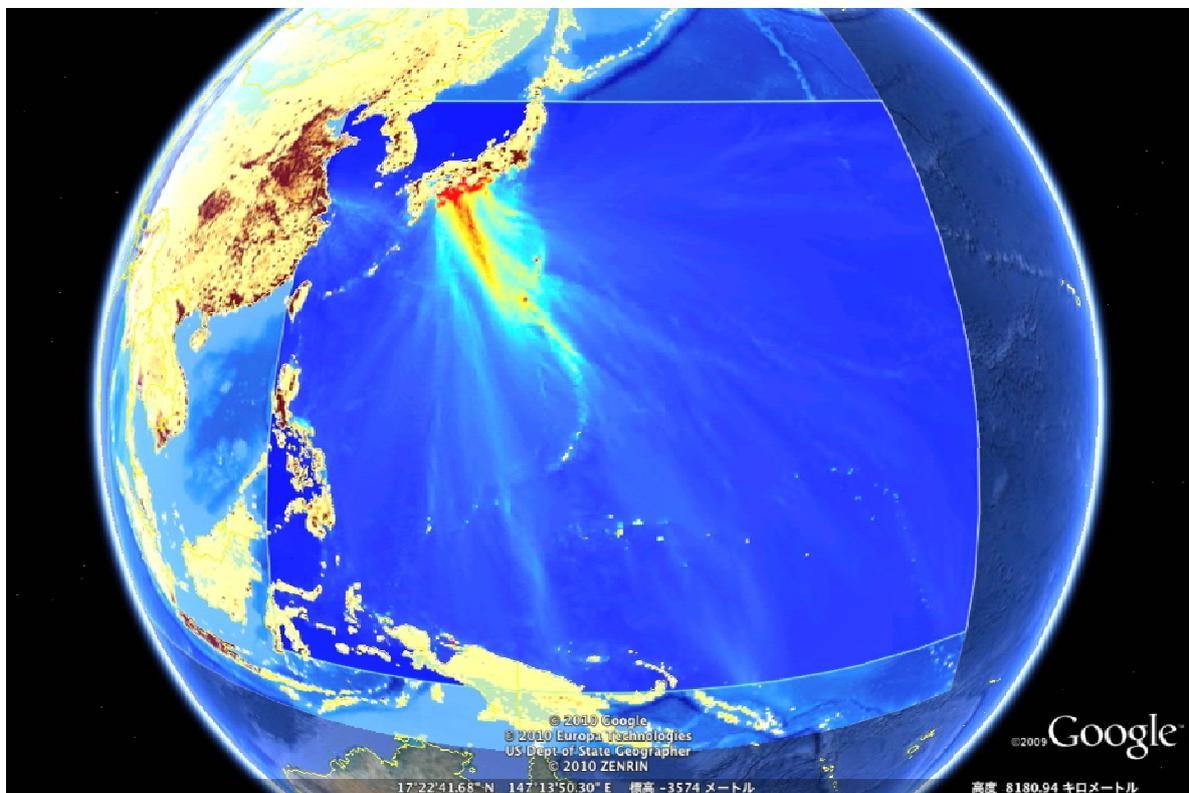


図 7.4-14 データをGoogle Earthで表示した例

7.5. 太平洋沿岸国の現地調査と適用性の検討

ここでは、まず10年以上前に津波災害を経験した地域の復興状況を調査し、それぞれの地域の復興に見るそれぞれの地域の災害文化について考察した。さらに、津波の来襲を事前に知らせるシステムや津波に関する知識を持たないにも拘わらず、津波の規模の割に比較的死亡率が低かった地域における住民の避難行動を調査し、その原因について地域性の観点から考察した。

7.5.1. 1992年フローレス島地震津波災害被災地調査

1992年12月12日フローレス島北部を震源とする地震が発生し、津波がフローレス島北部に来襲した。直後の現地調査報告(河田ら, 1993)によると、死者・行方不明者は2080人に及ぶ。インドネシア政府は、再び津波による被害を受ける恐れがあるとし、Maumere市の沿岸部とBabi島を居住禁止とした。そしてそれぞれの地域の生存者のために、移住地をNangahureとNangahaleに建設した。このMaumere市沿岸のWuring地区、Babi島、Nangahaleの復興状況の現地調査を2008年3月2日から8日にかけて実施した。

被災から16年が経過し、1400人中100人の犠牲者を出したWuringでは、パジャウと呼ばれる漂流民特有の杭上住宅が被災前と同じように海上に広がっていた(写真 7.5-1)。海上の住宅は竹でくまられた通路で行き来でき、被災後に生まれた子供達が、その通路から海に飛び込み、遊ぶ姿があった。また、電力も供給されており、市街値に電線や電柱を確認できたほか、屋内でテレビゲームをする青年の姿もあった。



写真 7.5-1 Wuringの杭上住宅



写真 7.5-2 Babi島被災地の現在の様子

1093人中263人の犠牲者を出したBabi島の現在の様子は、被災前にあったキリスト教徒の村とイスラム教徒の村とで全く異なっていた。以前キリスト教の村があった場所は草原となっていて、人間の生活の気配は一切感じられなかった一方で、以前イスラム教の村があった場所には、柵内でヤギが飼育されていたり、魚が天日干しされていたりするなど、人間の生活があった（写真 7.5-2）。以前イスラム教の村に住んでいたものの証言では、現在約80人がこの土地を仕事場として利用しているとのことだった。

Babi島の被災者向けに建設された移住地Nangahale村には、被災後に政府が建設したブロック作りの家屋で生活をする住民の姿があった。一方で、海岸沿いには住民自身で建設したと思われる高床式の木造住宅が多数並んでいた（写真 7.5-3）。また椰子の実を使った燃料作り、海水を使った塩作り、木材を使った造船など、様々な形で生計を立てている様子を確認できた。被災後、イスラム教、キリスト教の生存者830人がこの村へ移住し、住民の証言によると、現在約400世帯1600人程度まで人口が増加しているという。Boenら（2005）によると、急激な人口増加の背景にはMaumereなど、元Babi島民以外から人々が移り住んできていることがある。

これらの地域において住宅様式と住宅の建設の容易さは、居住禁止という津波対策を難航させている。Wring, Nangahale, Babi島のイスラム教の旧集落で見られた杭上住宅は、私財を低コストで調達できるため、比較的容易に再建できる。Nangahaleの漁師の証言では、海岸浸食の進行に対して、自分たちで杭上住宅を内陸側へ移動させたという。このことからこのような住宅の建設の容易さがうかがえる。また、Nangahaleにおいて、政府が用意したブロック作りの復興住宅に住まずに、自力で杭上住宅を建設したことからは、この杭上住宅様式への拘りがうかがえる。



写真 7.5-3 Nangahale村の住宅

Babi島に見られた居住地と仕事場の分離は、働く必要のない人々を安全な場所に移すことから、津波の減災に寄与すると考えられる。しかしながら、この対策は、津波に対する災害文化として根付かなければ、次第にこの災害の経験と教訓は風化し、再びこの地に居住するようになると考えられる。この居住地と仕事場の分離を確実に継続していく仕組みについて、さらなる調査と、注視していく必要がある。

(参考文献)

河田恵昭・他5名：1992年12月12日インドネシア・フローレス島地震による津波災害の特性とその教訓，自然災害科学，Vol.12，No.1，pp.63-71，1993.

Teddy Boen and Rohit Jigyasu：Cultural Consideration for Post Disaster Reconstruction Post-Tsunami Challenges，Asian Disaster Management News，Vol.11，No.2，pp.1-10，2005.

7.5.2. 1994年ジャワ東部地震津波災害被災地調査

1994年6月4日インドネシア・ジャワ島の東沖を震源とする地震が発生し、津波がジャワ島南部及びバリ島南西部に来襲した。直後の現地調査報告(今村ら，1995)によると、死者・行方不明者は238人に達し、Pancer村，Lampon村，Rajekwesi村の3村でそのうちの約9割を占めた。ここではPancer村とLampon村を対象に2008年3月2日から8日にかけて復興状況の調査を実施した。

40人の犠牲者を出したLampon村では、被災後新たに建設したと思われる建物を数棟確認

した。この村は、当時171棟合った住宅の半数以上が全壊か半壊となり、付近に移住地が建設されている。旧Lampon村にいた者は「生存者605人のうちの半数が移住地に移り、残りは旧Lampon村に残った」と話していたが、今回子供達の姿を確認できなかった点や、建物数の割に漁船が多かった点を踏まえると、旧Lampon村の居住者の数は証言ほど多くはなく、大多数はこの土地を仕事場として利用している可能性がある。これは、旧Lampon村の学校が被災したまま放置され、使えないこと、移住地から旧Lampon村の港へのアクセスが良好であることを踏まえても信頼できる。証言では、人口は調査時点で約900人に増加していた。

一方、121人の犠牲者を出したPancer村では、1994年の津波で壊滅的な被害の出た場所に建物は確認できなかった。この村では、当時996棟合った家屋の内704棟が半壊以上の被害を受け、全壊家屋は村の中心を走る道路の海側に集中していた。現在、Pancer村の住民は、住みやすいようにリフォームをしながら政府が建設した復興住宅と従来から存在した流出を免れた住宅とに定住している。住民によると、人口も被災前の3000人程度から4000人以上に増加している。津波により甚大な被害を受けた海岸沿いの地域には、被災後ヤシが植えられ、調査時点においてそれらは大きく成長しヤシ林となっていた（写真 7.5-4）



写真 7.5-4 Pancer村のヤシ林

1994年ジャワ東部地震津波災害被災地のLampon村では、1992年フローレス島地震津波災害被災地のBabi島と同様、居住地と仕事場の分離がなされていた。

また、Pancer村では被害の激しかった土地にヤシを植林することによって、この地への建物立地抑制となっていることが確認された。2004年インド洋大津波では、植生による津波被害の軽減効果が確認されている。1992年フローレス島地震津波災害において移住先となったNangahaleではヤシの実から燃料を作るといった生業作り効果も確認された。

インドネシアで多く生育するヤシは、建物立地抑制、津波被害軽減、生業とすることによる継続性の確保等、様々な津波減災効果が期待される。

(参考文献)

今村文彦・高橋智幸, 1994年ジャワ東部地震津波の調査概要, 自然災害科学, Vol.14, No.3, pp.213-218, 1995.

Finn Danielsen・他8名 : The Asian Tsunami: A Protective Role for Coastal Vegetation, Science, Vol.310, pp.643, 2005.

7.5.3. 1994年フィリピン・ミンドロ地震津波災害被災地調査

1994年11月15日フィリピン国ミンドロ島北部沖でマグニチュードMw7.1の地震が発生した(図7.5-1)。この地震によりオリエンタルミンドロ州北部、バタンガス州南部およびベルデ海峡の島々に2mを超える津波が来襲した。この災害による死者・行方不明者はオリエンタルミンドロ州北部に位置するパコ(Baco)町で41名、カラパン(Calapan)市で17名など計78名に達した。

地震後政府は、この津波により被災した地域への居住規制を行った。この規則により移住を余儀なくされた被災者は政府やNGOなどの支援を受けながら、新たな場所で生活を再建することになった。

2008年現在、地震発生から14年が経過しており、地震後に生まれた子供など当時の記憶を持たない住民が増加していることが予想される中、政府による復興施策も含めた当時の被災経験は、この地域にどのように根付いているのか、検証できる段階にある。

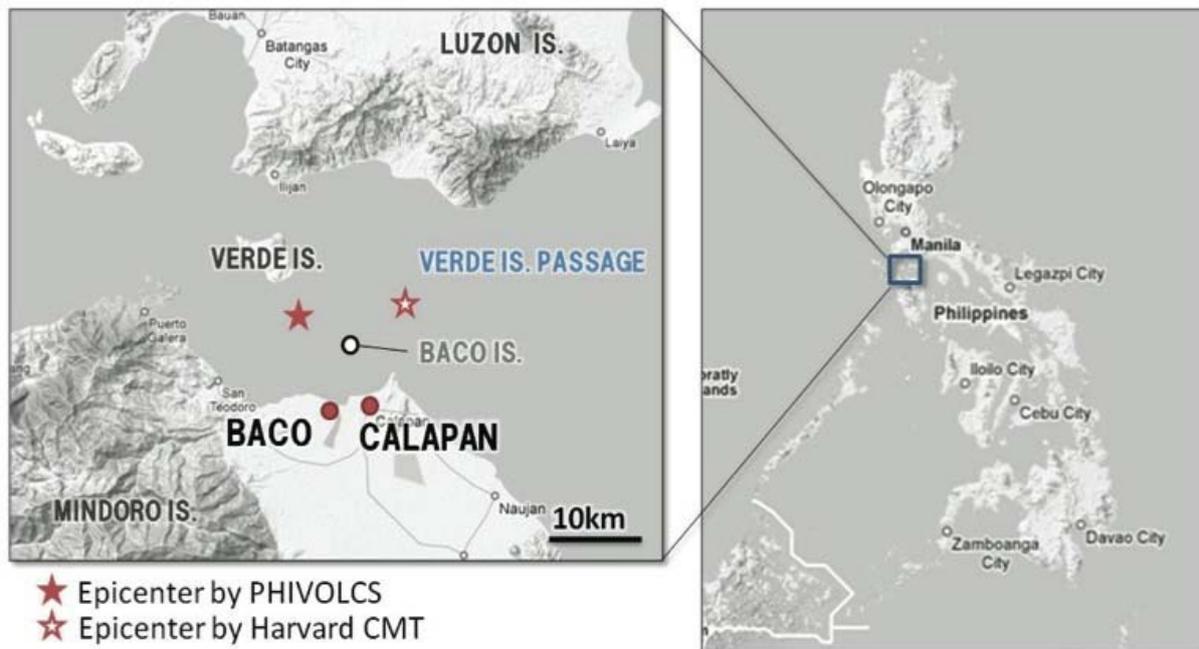


図 7.5-1 調査対象地域の位置関係

本報告は、被災者の生活再建や地域社会の復興状況、および、それらを支援した中央・地方政府などの活動の長期的効果の把握を主目的として、発災から14年が経過した時点で実施した現地調査の結果をまとめたものである。調査は、2008年11月18日から22日までの5日間、第2の犠牲者を出したCalapan市におけるWawa Barangay(ワワ・バランガイ;バランガイは同国における最小行政単位、以下、Brgyと略記)を対象に、被災者への聞き取り調査と被災地および移住地の現地視察を中心に実施した。なお、本研究の調査対象地域であるCalapan市におけるこの災害での全ての死者は、Wawa-brgyの住民である。

(1) 被害の概要

この災害における津波による犠牲者の割合は、全犠牲者の約6割であったと考えられている。被害をもたらした津波は、バコ島南西部で最大津波高さ7m、ミンドロ島北東部沿岸やルソン島南部でも最大津波高さ2~4mが観測された。発災直後の調査によって得られている津波高は図 7.5-2に示す通りである(Imamura et al., 1995; 今村ら, 1995)。この津波は、マグニチュードMw7.1の横ずれ断層の端付近で生じる地盤の隆起・沈降だけでは説明がつかない津波高が来襲していたため、ベルデ島による造波板作用も津波を発生させたとする解釈が提示されている。

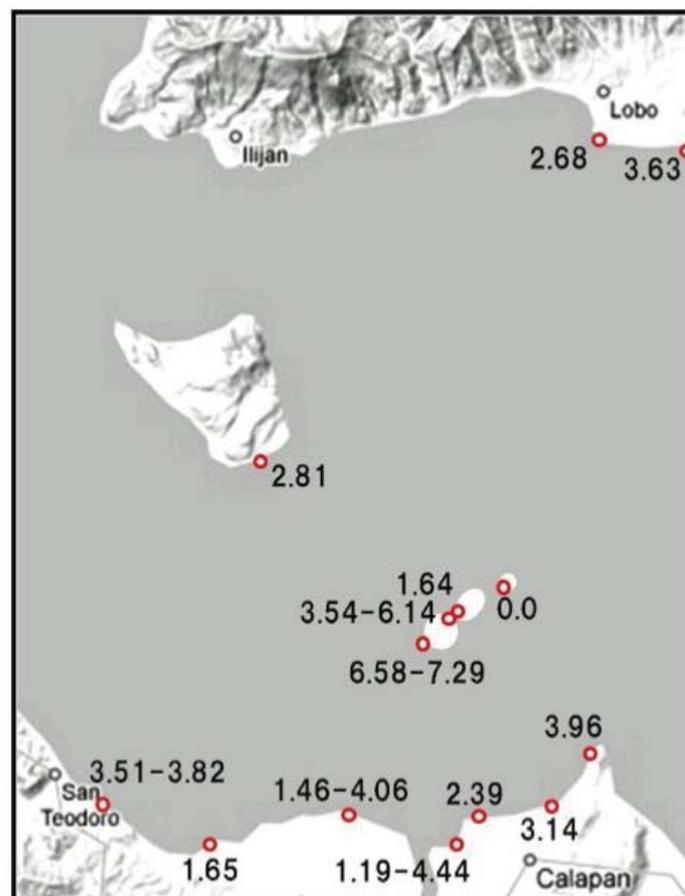


図 7.5-2 1994年ミンドロ津波の観測津波高

被害の特徴としては、死者・行方不明者78名のうち大半が子供であり、例えばCalapan市では17名のうちほぼ半数が10歳以下の子供であった。また、負傷者430名、全壊家屋1430棟、部分破壊家屋6036棟、そして、被災者の数は22452世帯にも達したとの記録が残されている（PHIVOLCS Quick Response Teams, 1994）。

(2) 移住政策の概要

居住規制がかけられたWawa-brgyへの現地調査の結果、移住施策に関して、被災前には1つのバランガイで生活していた住民が2つのグループに分かれて移住したという特徴がわかった。移住地の位置関係とグループの分かれ方については以下の通りである。一方は、元のバランガイがあった場所より数十メートル内陸に位置する土地で、本家を中心とする住民85世帯が移住し、New Wawa-brgyとして1つのバランガイを組織していた。この呼称は、被災前のバランガイ (Old Wawa-brgy) と区別するために便宜的に用いているものである。他方は、元のバランガイがあった場所から1kmほど離れたマハル・ナ・パンガラン・バランガイ (Mahal Na Pangalan-Brgy) 内のウバサン (Ubasan) と呼ばれる土地で、分家を中心とする住民36世帯が移住し、マハル・ナ・パンガラン・バランガイの住民として組み込まれる形となった。各地域の位置関係を図 7.5-3に示す。

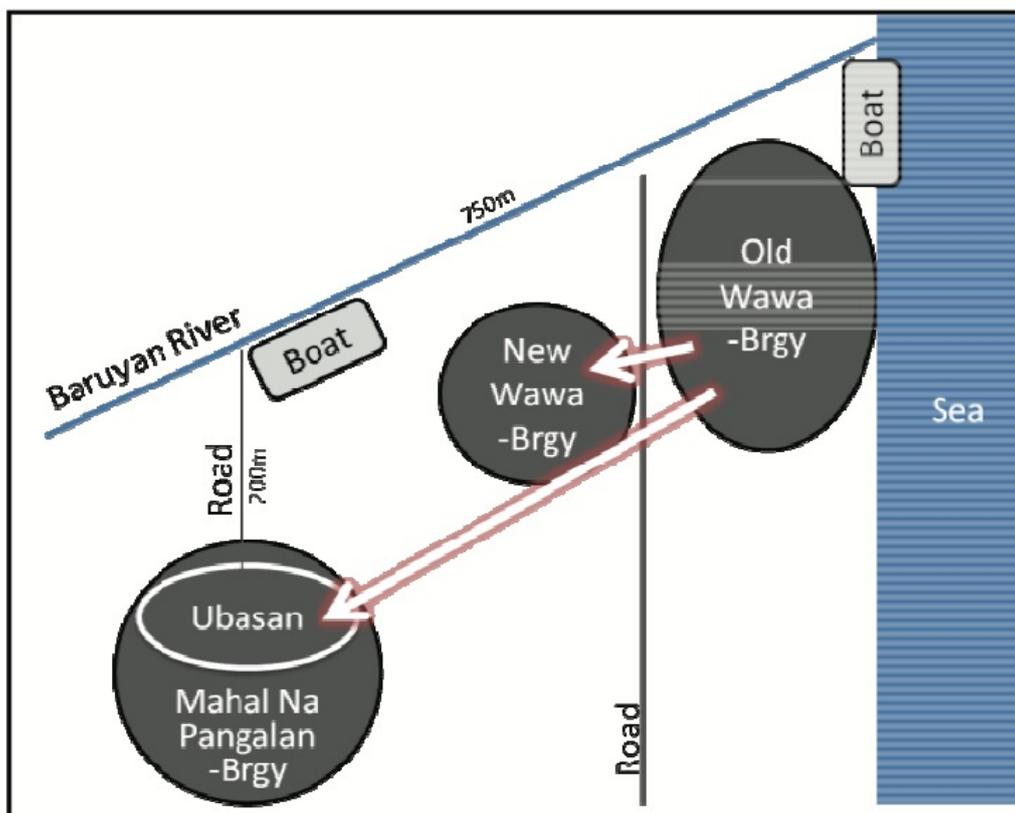


図 7.5-3 OldWawa, NewWawa, Ubasanの位置関係

(3) 被災地Old Wawaの現在の状況

被災から14年が経過した被災地Old Wawa-brgyの現状は、ブロック造の住宅や木造の倉庫、豚小屋が数棟並んでいる（写真 7.5-5）。ヒアリングによるとある家族は、居住規制に従わないと行政の支援が受けられないにも関わらず、銀行ローンを使い、住み慣れた場所に自力で住宅を再建したという。また、1994年の被災当時、妊娠しながらも津波から走って逃げきったという女性が、大きく成長した子供とともにその被災体験を語ってくれた。

現在、居住が禁止されているこの土地には20世帯が生活をしている。内訳は、被災後移住勧告に従わなかった2世帯と、一度は勧告に従いNew Wawaへ移ったが、その後Old Wawaへ戻った18世帯となっている。因みに、移住勧告に従わなかった2世帯は何れもWawaで身内を失った家族である。身内を失った家族は他に4世帯あり、彼らは皆Ubasanで生活している。

Old Wawaは現在も政府によって居住が禁止されてはいるが、現地調査により現状を確認すると住民の意思と財力次第で、そもそも移住政策に従わないもしくは一時的に従ったとしても時間の経過とともにこの地に住民が戻り住む結果となっていた。これは、戻る余地を住民に残してしまっただけと考えられる。その一因として、この土地での住宅再建を物理的に阻むものがなかったことが挙げられる。この点については、1994年6月4日にインドネシアのジャワ東部で発生した津波により121名の犠牲者を出したPancer村の事例との対比により考察が可能である。危険な土地として居住禁止にした土地を、空き地としたのかヤシ林として整備したのが居住規制施策が長期的に効果を持つことに影響したと考えられ、このことは教訓として今後の復興施策を考える上で考慮すべき事項である。

また、当時津波から逃げ切れたという経験を持つ住民が居住規制地域に戻り住んでいることから、津波は走って逃げれば助かるという過去の経験からの災害イメージの固定化がおこり、居住規制が守られなくなっていると考えられる。



写真 7.5-5 Old Wawaの町の様子

(4) 移住地New Wawaの現在の状況

New Wawa-brgyは、私有地だったものをNGOが購入した土地であり、被災後Old Wawaより85世帯が移住した。現在、部分的に舗装された道路に沿って、互いによく似たブロック造の復興家屋が整然と並んでいる(写真 7.5-6)。バランガイ長(公選されるバランガイの最高責任者)によると、これらの家屋は、被災後、家屋資材の提供を受け、被災者自身が作業を行い建設した家屋であるという。この地域において、家屋の再建を支えたのは、家屋資材と当面の食糧を支給した政府のDSWD(Department of Social Welfare and Development; 社会福祉開発省)および1世帯あたり64m²の土地を与えた前述のNGOの支援である。本移住地は、現在約100世帯にまで人口が増加している。一方で、前章で述べた通り、18世帯がOld Wawaに戻っている。

この移住地では、被災後「Food-for-Work」という生活支援策の適用を受けた点が注目される。すなわち、DSWDが実施したこの「Food-for-Work」という枠組みは、被災者に復興事業に関する仕事を与え、その対価に食糧を支給するというもので、被災者自身が事業に参加することで、彼らに主体性をもたせる狙いがある(2006年レイテ島大規模地滑り災害でもこの生活支援策「Food-for-work」は適用された⁶⁾)。しかし、移住地における復興家屋建設事業に対してこの生活支援策の枠組みを適用した今回のケースは、長期的には、被災者の定住を促す効果も期待されるという点にも注目すべきである。つまり、被災者が、自ら復興家屋を建設することで、家屋そのものに愛着がわき、定住を促す要因になると考えられるからである。被災後に与えられる家屋資材からは同じタイプの家屋しか建設できず、被災前と比較して再建した家屋は不便になる場合もあったと思われるが、被災から14年が経過した現在、被災者は復興家屋をそれぞれにとって住みやすいようにリフォームするなどして生活しており、こうした動きは多くの被災者が今の移住地で定住することを前提に、一層快適に過ごすことを考えて創意工夫をして生活をしていると解釈できる。



写真 7.5-6 New Wawaにおける家屋の様子

次に、居住地と仕事場へのアクセスが着目される。日々の生活の不便さは、短期的には我慢できても長期的にはその不便さを解消する方向へと作用する可能性がある。結論から言うと、これは比較的良好な地理条件となっている。New Wawaにおいて、このアクセス条件が重要であると考えられる職業は全住民の過半数を占める漁師である。漁師を除く、家政婦や三輪自動車のドライバーなどにとっては、この条件の重要性は低いと思われる。漁師は、移住地からボートを停泊させている場所まで徒歩5分で行ける(図 7.5-3)。住民は、14年前の移住によって、やや内陸に移動し不便になったものの、それは大部分の漁師にとって、Old Wawaに戻らせるほどの影響はなかったと考えられる。この移住に伴う居住地と仕事場へのアクセスの不便さについては、日本の三陸地方の高地移転の事例でも(中央防災会議, 2005), もとの低地に戻り住む要因の一つとしてあげられているが、New Wawaでは平地の河川近くの内陸への移住であり、道路や船着き場などの仕事や生活をするために必要な社会インフラの整備が行われたため、影響が少なかった。これらのように、移り住んだ先に定住させるための復興施策(社会基盤整備)を行うことが、移住施策を長期的に機能させる助けとなっていると考えられる。

(5) 移住地Ubasanの現在の状況

Ubasanは、元はバナナ林だったMahal Na Pangalan-Brgy 内の土地を、キリスト教の牧師が被災者に寄付したものであり、被災後36世帯が移住した。現在の状況は、New-Wawa-brgyと類似しており、互いに似たブロック造の家屋が並んでいたが、道路が全く舗装されていない点、庭に植物が豊富に植えられている点は特徴的である(写真 7.5-7)。Ubasanのバランガイ・カガワッド(Barangay Kagawad; バランガイの最高意思決定機関である評議会をバランガイ長とともに構成する評議員であり、定員は7人)によると、復興家屋建設の経緯は、New-Wawaと同様DSWDの支援の下、被災者が自ら建設をしたという。ただし、1世帯あたりに与えられた土地は96m²で、New-Wawaより32m²も広い。土地に余裕があることによって、庭に植物が植えられるなどより快適な住環境を生み出している。本移住地は、被災者でない世帯(8世帯)の移住も合わせて、現在72世帯にまで倍増している。UbasanからOld-Wawaに戻った被災者はいない。

まず、この移住地では、既存のコミュニティとの関係性が注目される。New-Wawaのように被災者だけで1つのコミュニティを組織するのではなく、既存のコミュニティに組み込まれる形の復興が行われた今回のようなケースでは、長期的な復興を考える上で、既存のコミュニティとの良好な関係性を構築することが重要である。インタビューに応じてくれたカガワッドによると、災害前からあったMahal Na Pangalan-Brgyの住民と、Ubasanの住民の関係は良好であるという。その根拠として、元の住民に影響のない、何も無い土地に移住地が建設されたことを挙げていた。しかし、この地に後からきた被災者は、比較的広い土地や家屋資材などの支援を受けており、当該バランガイで以前から住んでいた住民よりも充実した環境を享受している可能性もあり、こうした社会秩序の変化から両者に軋轢が生じている可能性も考えられる。こうした心理的影響については、今後、既存のコミュニティ側の住民に対するインタビューを実施するなどして、調査し検証する必要がある。



写真 7.5-7 Ubasanにおける家屋の様子

次に、New-Wawaと同様に、居住地と仕事場へのアクセスが着目される。結論から言うと、本移住地に関しても、比較的良好な地理条件となっている。Ubasanにおける生業の状況は、New-Wawaと同様で、このアクセス条件が重要であると考えられる漁師が全住民の過半数以上を占めており、その他には、家政婦やドライバー、大工などがいる。Ubasanからボートを停泊しているバルヤン（Baruyan）川の河川敷までは、約200mの距離である。そこから河口までは、さらに約750mあるが、船を使えばアクセスは良好であると言える（図 7.5-3）。New-Wawaの漁師ほどのアクセスの良さはないが、1km以上離れる New-Wawaの停泊地を利用するよりは利便性の高いアクセスの方法をとっていることが分かった。

また、被災後、行政からUbasanの被災者に発行されたという土地所有者証明書が注目される。援助によって手に入れた土地の所有権を行政から正式に得られることは、被災者にとって、その土地に住み続けられることを公的に保障されていることを意味する。そのため、少なからず、この証明書によって、被災者は安心して永住できるものと考えられる。New-Wawaでは、なぜかこの証明書が未だ被災者の元に届いていない。このことは、18世帯がOld-Wawaに戻ったNew-Wawaと、1世帯も戻っていないUbasanの違いの要因の一つになっている可能性がある。

（6）被災経験の伝承と防災教育

被災から14年が経過し、津波災害を経験していない子供たちの誕生や被災地外からの住民の流入によって、津波を被災することでこの地域に生まれた文化や被災体験そのものの継承が危惧される。そこで、被災経験の伝承や被災後に実施されるようになった防災教育などの取組について、Ubasanでヒアリング調査を実施した。

Ubasanでは、1994年の津波災害を知らない、津波を経験していない子供および被災地外からの住民に対し、被災者が当時の経験を伝えているという。結果として、何割の住民が、

当時の災害について、どの程度知っているのか、また、どのような機会に伝えているのかについてはより詳細な調査が必要である。そのような中、当時の被災経験を伝える機会となっているものとして、高等学校での防災教育がある。Calapan市では、94年の災害を契機に、高校生を対象に避難のための教材を作成し避難訓練を行っている(Evacuation Drill)。Ubasanの高校生は、学校でこの教材を使った防災教育を受けている。この教材は、地震を対象とした避難訓練を実施するためのものであるが、学んだことを家庭で共有することまで明記されている点は興味深い。子供への教育を地域全体に波及させる効果を期待できる取組として評価される。

こうした防災教育は、これから社会で活躍する若者が学校で習得できるという継続性が重要である。「フィリピンでは、行政のトップが変わると、計画が代わってしまい、長期的な取り組みが困難だ(JICA)」とする見方がある中、地方自治体が作成した教材を自治体を使うのではなく、政治的な動向に左右されにくい高校に配布し、学習させることで、この教材は防災教育を長期的に実施できる社会的な枠組みの中で活用されているといえる。防災教育などの防災対策は、地域への長期的な効果を十分に考慮して、実施される必要がある。例えば、津波危険地域への居住規制に関しても、実際にこの対策が機能を発揮するのは、直後ではなく、数十年や数百年後の次の津波来襲時であることを忘れてはいけない。その時まで、この規制が守られていなければ、何の意味もなさないといっても過言ではない。

(7) Baco島の現在の状況

Calapan市の北西に位置するバコ(Baco)島は、現在リゾート地開発のために住み込みで働いている労働者たちが生活をしている小島である(写真 7.5-8)。津波災害のあった94年当時も、この島で生活していたのはBaco町民やCalapan市民ではなく、現在とはまた別の労働者であった。ただし、雇用主はこの島の所有者で、現在と同じである。この島は、94年の津波災害では、南部で最大打ち上げ高7.29mを記録し、2名が死亡している。この地域は、生活をしている人々が被災地の市民ではないという特殊性を有しており、本調査では、被災した本地域のリゾート地開発の再開や労働者の安全性、および、リゾート地完成後の観光客の安全性について検討するため、建設作業を行っている労働者に対するヒアリング調査と現地視察を行った。

まず、被災前後の労働者間で津波災害の経験が伝えられていた点が注目される。被災前の労働者は、例外なくこの地に残っていない。仲間に死者を出すほどの被害を受け、被災後も継続して働く意思を持つものはいなかったものと考えられる。そこで雇用主は、被災後、新たに首都マニラで労働者を雇用し、Baco島でリゾート地開発に従事させている。そのため、94年の津波災害以降にこの島にやってきた労働者は、津波を経験していない。しかし、彼らは当時の津波災害で、島のどこまで津波が来襲したか、どの程度の被害が出たのかなどといった知識を持っていた。これには、雇用主が被災前後の労働者間で情報交換をする場を用意したという背景があった。目的は定かでないが、(1)仕事の引き継ぎのため、(2)新たに雇用した労働者の安全性を確保するためなどが考えられる。とはいえ、結果として、94年の津波に関する経験が伝わっている事実は、現在雇用されている労働者の安全性

と津波に強いリゾート地建設の観点から極めて重要であると考えられる。

次に、被災後に新たに建設された防潮堤が注目される（写真 7.5-9）。94年の津波の高さを基準に考えると決して十分な高さではないが、雇用主がリゾート地の利用者の安全性を考慮した可能性がある。今後、リゾート地が完成し観光客が訪れるようになった時、どれだけ災害に対する安全性が確保されるか現状では不透明だが、リゾート地の開発者の責任はもちろん、住民でない観光客の安全性に対するBaco町やCalapan市の対応に関しても今後注目していかなければならない。



写真 7.5-8 Baco島の作業小屋の様子



写真 7.5-9 Baco島の防潮堤

最後に、被災した労働者に対する行政支援について触れておきたい。確認はできていないが、彼らはCalapan市民と同等の土地や家屋資材などの支援は受けられなかったと予測される。そのような中、職務中に被災した場合の支援システムがフィリピン社会に存在するかどうか、もし存在するならば、本事例ではどのような支援が実施されたのか、今後調査を進めたい。

災害後に居住規制を受けた生存者が、10年を超える長期的な時間経過の後、従来の土地に居住するのか、移住地かまた別の土地に居住するのかについて影響を及ぼす要因としては、物理的な要因と心理的な要因に分けて考えることができる。物理的な要因とは、居住を規制されている土地に物理的に戻れるかどうかに関与する要因であり、今回の事例では、①従来の土地におけるスペース、②住宅建設コスト、③従来の土地におけるインフラ整備の3つの要因が確認できた。心理的な要因とは、移住を余儀なくされた被災者が従来の土地に戻りたいと強く思うかどうかに関与する要因であり、今回の事例では、①個別の被災経験、②仕事の種類、③居住地と仕事場へのアクセスの利便性、④移住先のコミュニティとの関係性、⑤土地所有権の5つの要因が確認できた(図 7.5-4)。

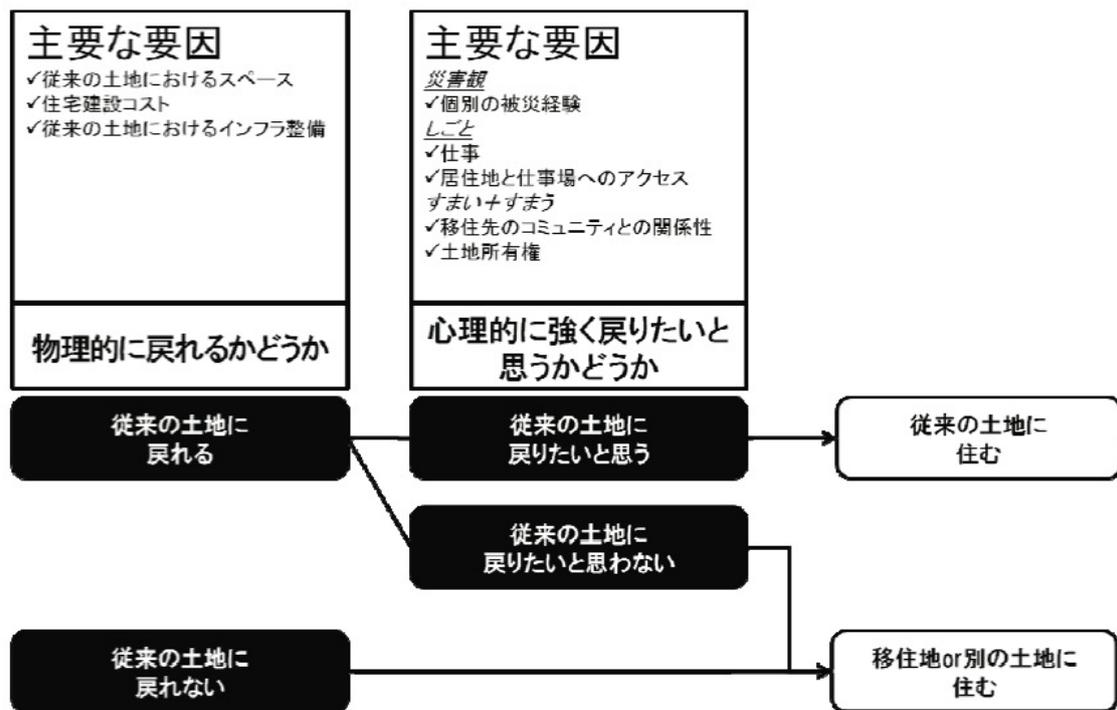


図 7.5-4 恒久的な居住規制を受けた被災者に対して長期的影響を及ぼす要因(移住地がある場合)

(参考文献)

Imamura, F., C. E. Synolakis, E. Gica, V. Titov, E. Listanco and H. J. Lee : Field Survey of the 1994 Mindoro Island, Philippines Tsunami, PAGEOPH, Vol.144, pp.875-890, 1995.

PHIVOLCS Quick Response Teams: 15 November 1994 Mindoro Earthquake Preliminary Report of Investigation, PHIVOLCS Special Report No.2, Department of Science and Technology, 1994.

今村文彦・Edison Gica・Ho Jun Lee・Costas Synolakis・Titov Vasily・Eddie Listanco・Seiichi Kawashima・Delfin Esplanada：1994年11月15日フィリピン・ミンドロ島地震津波の現地調査，津波工学研究報告，12，pp.19-23，1995.

奥村与志弘・高橋智幸・越村俊一・原田賢治・鈴木進吾・河田恵昭：インドネシアの災害文化に関する一考察－津波災害復興状況調査を踏まえて－，第27回日本自然災害学会年次学術講演会概要集，pp.83-84，2008.

中央防災会議，災害教訓の伝承に関する専門調査会，1896明治三陸津波報告書，p.165，2005.

矢守克也・横松宗太・奥村与志弘・阪本真由美・河田恵昭：2006年2月フィリピン・レイテ島地滑り災害からの生活再建と地域復興－第2次現地調査の結果に基づいて－京都大学防災研究所年報，第50号A，pp.153-160，2007.

7.5.4. 2009年サモア諸島地震津波災害被災地調査

2009年9月29日早朝(現地時間)サモア諸島沖を震源とするMw8.0の巨大地震が発生した。この地震に伴い発生した津波は，周辺諸国に到達し，サモア独立国，米領サモア，トンガの3国で合計190名以上の犠牲者を出した。本災害で注目すべきは，米領サモアにおける死亡率の低さである。詳細は後述するが，既往の津波災害から予測される死亡率(最悪ケース)と比較して，ある村ではその値が一桁も小さかった。このことは，同地域の死者・行方不明者数が合計35名であったことを踏まえると，同地域単独で最悪の場合350名以上が犠牲になっていた可能性があることを意味する。

我が国では，津波による人的被害を軽減するために災害情報の高度化や住民の津波に対する危機意識の向上を目指し，様々な取り組みを実施している。一方で，米領サモアでは，津波発生当時，津波の来襲を事前に知らせる体制がなかっただけでなく，住民のほぼ全員が津波に関する知識を持っていなかった。それにも拘わらず同地域の死亡率が低かった。著者らは，その原因を明らかにすることで，津波避難対策の新たな方向性を得ることができるのではないかと考えた。

本研究の目的は以下の2点である。第1に，米領サモアにおける津波来襲時の住民の避難行動特性を明らかにすること，第2に，日本における津波避難体制と対比させながら同地域の死亡率が比較的良かった原因を考察することである。

(1) 津波の被害と特徴

この地震は現地時間で2009年9月29日午前6時48分に発生した。震源はトンガ海溝付近のアウターライズで起きた正断層の地震であると考えられている(山中，2009)。米領サモアに到達した津波と被害については，高橋ら(2009)に詳しいが，以下に簡単に説明する。なお，本論文に登場する米領サモアの集落や験潮所などの位置関係は図7.5-5の通りである。

まず，米領サモアTutuila島の津波は，地震発生後約20分で第一波が南部沿岸に到達し，

その後、何波か来襲したことがPago Pago湾の験潮記録や住民の証言から確認されている(図 7.5-6)。津波高は、概ね4~6m程度である。

被害は、人的被害が35名発生している。FagatagoからPago Pagoまでの地域が同島中心地区であるが、今回最も大きな被害が発生している。次に大きかったのがLeoneで10名の犠牲が出た。建物被害は、南部沿岸を中心に流出・全壊などの大規模な被害が相次いだ。

なお、同海域で発生した過去の津波で大きなものは、1917年まで遡り、サモア独立国のUpolu島南部海岸に12mの津波が到達している(Tsunami Laboratory, 2009)。

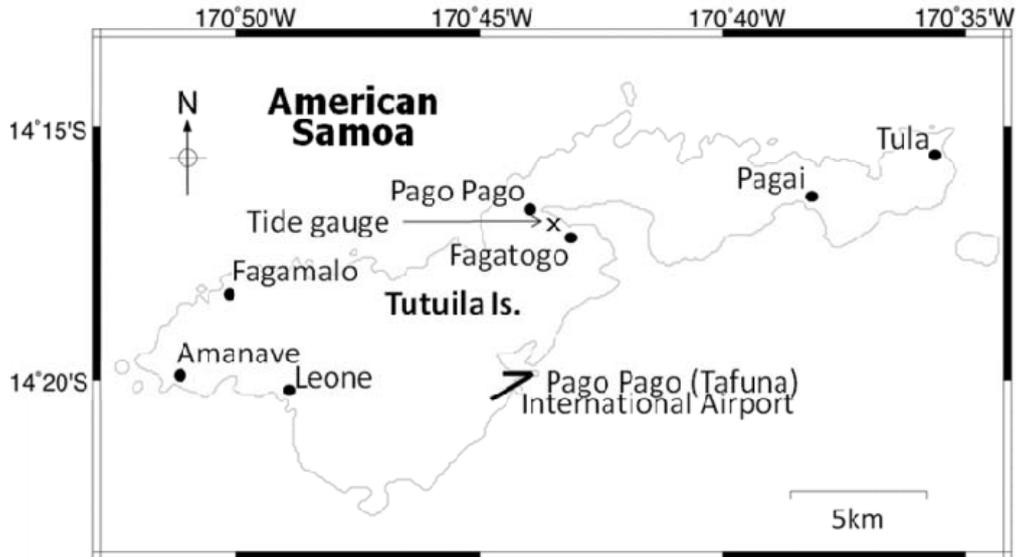


図 7.5-5 米領サモアTutuila島の地図.

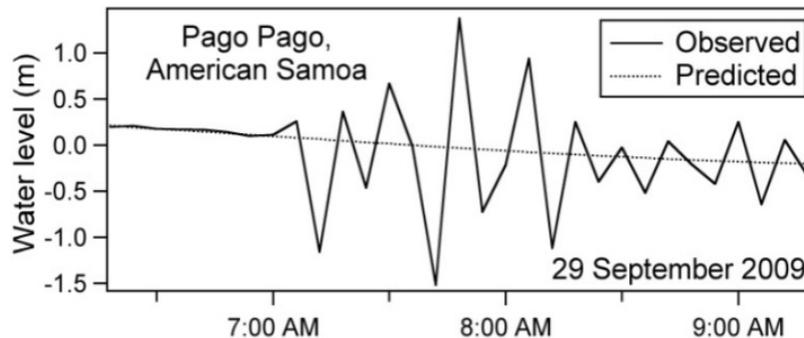


図 7.5-6 2009年9月29日のPago Pago湾の験潮記録 (NOAA, 2009) .

(2) 現地調査

2009年9月の津波来襲時の住民の避難行動を明らかにするため、米領サモア西部にあるAmanave村とLeone村の住民を対象に聞き取り調査を実施した。日程は2010年3月5日から11日のうちの4日間とし、インタビュー時間は1人あたり30分から1時間程度である。調査メンバーは、奥村与志弘(人と防災未来センター)と原田賢治(埼玉大学)の2名に、通訳(英語と現地語)として協力を得たサモア人女性Sina氏(20代)を加えた3名である。現地はまだ被災

から半年程度しか経過しておらず、次の点に留意した。すなわち、酋長への挨拶をまず行い、私たちの調査の意義を理解してもらうこと、可能な限り住民の紹介によって次の調査対象者へと調査を進めることである。聞き取りが困難な住民の場合は断念するつもりであったが、結果的にそのような事態は発生しなかった。

次に、聞き取り調査項目は、(1)避難を始めた時にいた場所、(2)避難を開始した時の状況、(3)移動方法、(4)避難場所の4つを用意した。また、本調査では聞き取り対象者の話に加え、家族など、当時の行動を把握している人物のそれについても併せて聞き取りを実施するという方法をとったため、人物の重複が起きないように、個人名、年齢、性別も質問項目とした。また、死者・行方不明者に関する情報、具体的には、遭難した場所、どのような人物であったのか、についても、酋長と一部の住民から聞き取り調査を行った。

また、本調査は位置情報を扱うため、調査出発前にGoogle Mapの衛星写真を利用して住宅や道路などが描かれた白地図を作成し、それを調査に活用した。

本章最後に、調査対象地について簡潔に説明を加えておきたい。AmanaveとLeoneはいずれも5mを超える津波が来襲しているが、死者・行方不明者の数には差があり、それぞれ0名と10名となっている。その差が何によるものなのか、米領サモアでの住民の避難行動特性を両村の比較から一層詳細に理解できることを期待して、両村を調査対象地として選択した。

(3) 住民の避難行動特性

AmanaveとLeoneの聞き取り人数は、それぞれ17名、15名、当時の行動を把握できたのは、それぞれ94名、77名である。住民によると、当時、地震の後、事前に津波の来襲を知らせる仕組みはなかった。また、津波に関する知識はなかった、と証言する住民が多かった。元教師の男性(約70)で、「地震の後、津波がくることを知っていた」と証言する住民もいたが、少なくとも本調査の限りそうした住民は少数であると推定される。多くの住民は、これまでに感じたことのない大きな地震による揺れに驚き、屋外に飛び出すのが、その後は日常に戻っている。友人の家を訪れ、庭でコーヒーを飲む女性(51)、自動車です仕事に向かう男性(43)、学校に行こうとバス停でバスを待つ男性(14)などの様子が平時と変わらない状況であったことを示唆している。

(a) 死亡率

第一波が到達した午前7時過ぎ、両集落では集落人口の半数程度の学生と仕事を持つ住民が既に集落外に出ていた。それを踏まえ、本研究では集落における滞留者人口(両集落とも約400名)を用いて死亡率を算出した。結果は、それぞれ0と0.025である。これらの人的被害特性を、既往の津波災害における津波の規模と死亡率の関係と比較するため、日本の事例に基づいて作成した河田(1997)の図に本ケースをプロットした(図 7.5-7)。その結果、Leoneの死亡率は、河田(1997)による上限値0.5に比べ桁小さいことが分かった。Amanaveは死亡率が0であるため、対数軸を用いたこの図にはプロットできない。

(b) 避難場所

両集落とも図 7.5-8中の矢印マークのあたりに住民の避難場所となった高台がある。居住地からのアクセスは良好で、多くの住民はいずれかの高台に避難している。但し、Leoneは集落の中心に低平地とラグーンがあり、Amanaveに比べるとやや居住地から高台まで距離がある。そのため、Leoneでは「2人の子供(3)(7)と妹(47)は先にいとこの家の2階に避難した。」という女性(52)の証言にあるように、縦への避難もいくつか確認できた。

(c) 避難トリガー

図 7.5-8は、何がきっかけで避難を開始したのかを避難を開始した場所と関連付けて地図上にプロットしたものである。実際には、避難開始の要因は複数あり、それらが関連しあっていると考えられる。そこで、当時の状況の語りから最も影響が大きいと著者らが考えた要因を1つ決めている。例えば、ある男性の証言「地震後、酋長に高台へ避難するように促され避難しようと思ったが、好奇心から海の異常を見てから避難した。」であれば、海の様子を見に行く行動も高台へ避難するプロセスと解釈し、避難トリガーは酋長の呼び掛けであるとした。

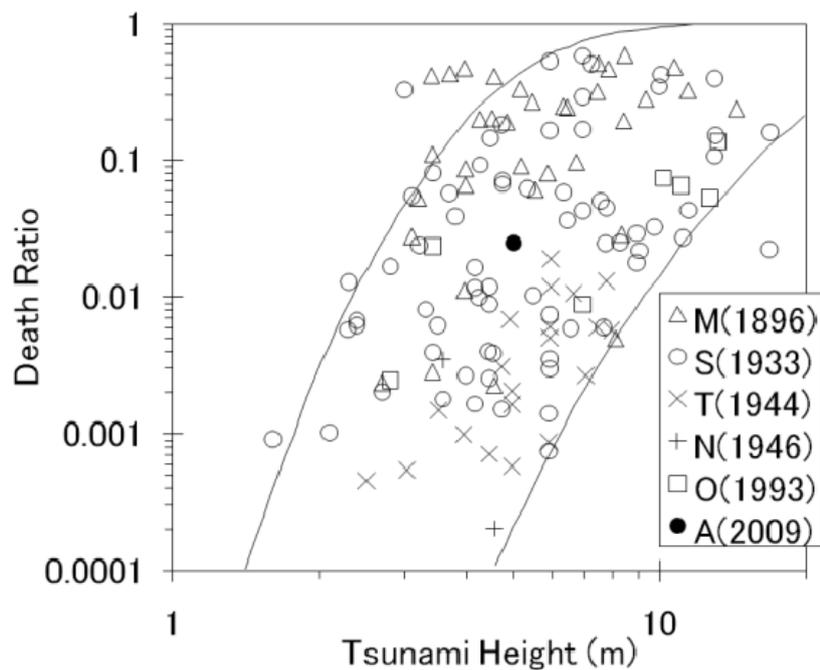
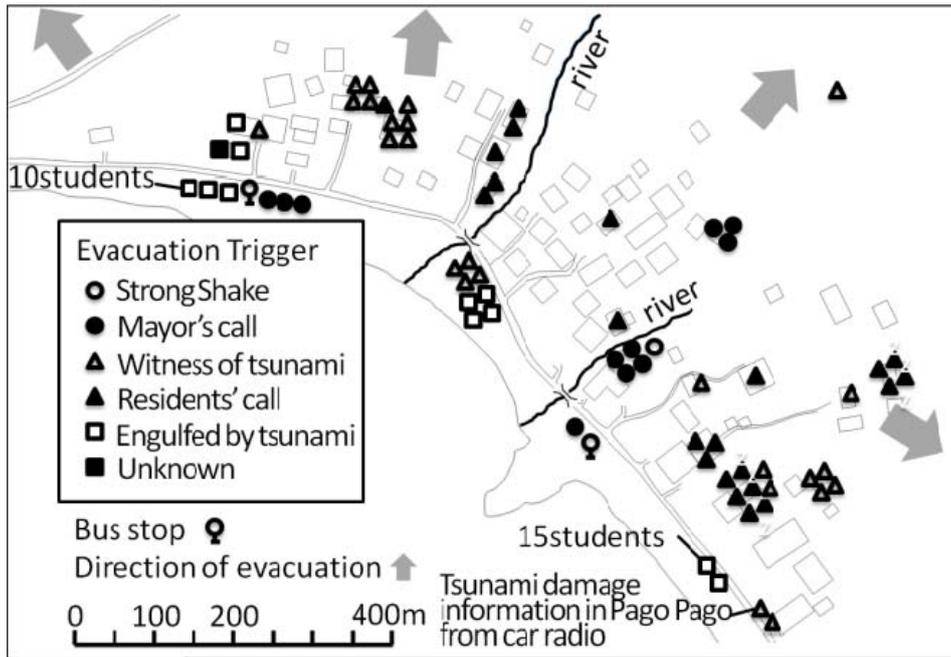
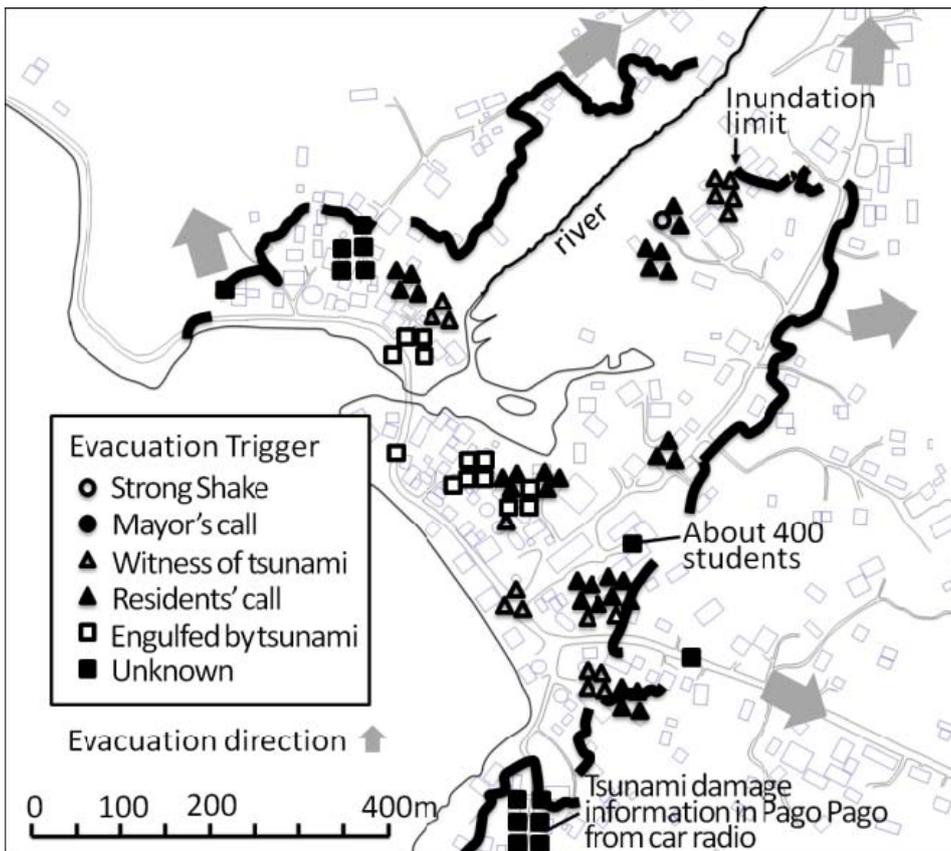


図 7.5-7 既往の津波災害における津波規模と死亡率の関係と Leone の人的被害特性の比較。M:1896年明治三陸, S:1933年昭和三陸, T:1944年昭和東南海, N:1946年昭和南海, O:1993年北海道南西沖, A:2009年サモア (Leone)。実線は河田(1997)が引いた上限と下限の線である。



(a) Amanave



(b) Leone

図 7.5-8 生存者の避難トリガーと避難開始地点の関係。なお、図中の浸水域はUSGS(2010)の調査結果である。

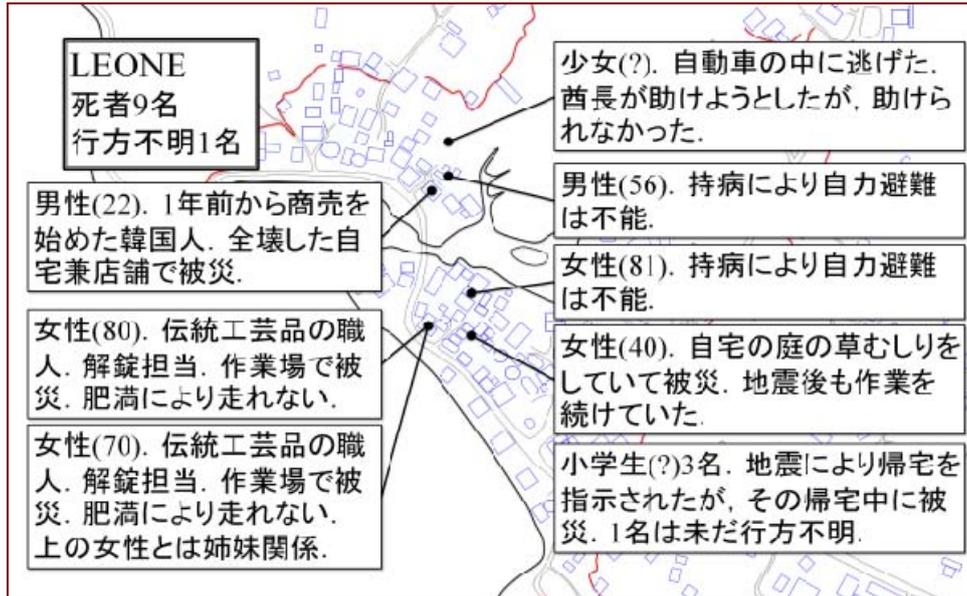


図 7.5-9 犠牲者の特徴と遭難場所の関係。

(d) 避難の方法

著者らが当時の行動を把握した住民のほとんどは、自分の足で避難している。しかし、自動車で避難をしたケースも3家族あった。そのうち2例は、自力避難ができない身内を抱えている。また、路線バスや偶然通過した自動車を利用して避難した住民もいた。詳細は後述する。

(e) 死者・行方不明者の特徴

Leoneの死者・行方不明者10名の特徴と遭難した場所について図 7.5-9にまとめた。持病や肥満により自力避難が困難であった住民が4名死亡している。また、帰宅途中の小学生が3名犠牲になっている。小学校で強い揺れを感じ、教師が児童に帰宅を指示したという。ある女性(56)によると家族の迎えがなければ帰宅できないが、家族を待たずに帰る子供もいる。犠牲になった児童はいずれもそうした子供であったと想像される。

(4) 「リアリティの共同構築」の視点で見た米領サモアにおける住民の避難行動特性

本章では、前章でまとめた住民の避難行動に関する調査結果を踏まえ、なぜ米領サモアで津波の規模の割に人的被害が軽微であったのか、その原因について考察する。

本題に入る前に、著者らが本章で考察をする際の視点について述べる。近年の日本において、住民避難による人的被害の軽減に関するテーマは、次のフレームワークで問題点や解決策が論じられることが多い。即ち、最もハザードに近い専門家(自治体職員を含む)が危険性を把握し、災害が迫っているというリアリティを構築する、そして、それを住民に伝達することによって、住民の避難を促す、というものである。例えば、住民に避難情報が伝わらなかったために犠牲が出た、住民の知識が乏しかったために犠牲が出た、などの指摘に代表される。

我が国の津波防災において、上記の専門家(行政など)と非専門家(市民など)という構図による住民避難に対する視点は、昭和27年の津波予警報システムの運用の開始と並行して、今から約60年前に用いられるようになり、平成11年の量的津波予警報システムに代表される技術の高度化に伴って確立されてきた。そして、それは2004年インド洋津波災害後の各国の津波予警報システムの導入に見られるように、我が国に限ったことではない。

しかし、事前に津波の到達を知らされる体制がなく、住民が津波に関する知識を持たなかった本イベントでは、同様のフレームワークを用いて死亡率が低かった要因を考察するのは困難である。そこで著者らは、視点を変えてこの被災地における住民の避難行動特性を考察したい。つまり、「リアリティの共同構築」という視点である。

これは、早期避難の問題に対するこれまでとは異なる解決方向性として、矢守(2009)が提唱している視点である。以下、矢守(2009)の表現を引用しながら、この視点について概説し、本題へと進みたい。

「リアリティの共同構築」とは、今何が起こりつつあるのかというリアリティ(多くの人々が抱いている現実味)を、地域住民、自治体職員、防災研究者などの社会を構成するさまざまな人びとが共同で構築しようとする姿勢である。「避難を要するような災害が迫っている」というリアリティを共同構築することが、住民の早期避難に繋がる。矢守(2009)は「津波でんでんこ」について、でんでんバラバラに率先避難を開始した人びとが、その姿勢を周囲にさらすことによって、「避難を要するような津波が迫っている」というリアリティを共同構築する機能を担っている、という従来とは異なる解釈をしている。

さて、著者らは、米領サモアのさまざまな地域住民が「避難を要するような事態が迫っている」というリアリティを早期に共同構築することで早期避難ができ、人的被害を軽減できた、という仮説を立て、そうした視点で前章の調査結果を考察したい。なお、本イベントでは「津波が迫っている」というリアリティは構築し得なかったと考へ「避難を要するような事態」との表現に留める。

(a) 津波の目撃

津波を直接目撃した住民が少なくなかった(図 7.5-8)。ある男性(19)は、「避難の呼びかけに応じなかったら、海を見るように言われた。すると、潮が引いていた。慌てて店舗を閉め、偶然通りがかった自動車に、一緒にいた2人の兄弟(18)(25)と友人(19)とともに相乗りして逃げた」と証言した。また別の夫婦(57)(51)は、「家の外にいて、波が来るのを見た。自動車では逃げられないと思い、子供(15)(23)と甥(31)を連れて走って逃げた。」という。

こうした海の異変や陸上での浸水の様子を複数の住民が直接目撃することで、それを正確に津波と理解したわけではないが、「その場には危険な事態だ」というリアリティが現地で構築され始めたと考えられる。なお、両集落は、幹線道路が遠浅の海と居住地の境界である海岸に沿って走っている。リアリティが構築される初期の段階において、水位の異変を目視で確かめやすい遠浅の海であったこと、海に近い幹線道路上にいる住民が多い時間帯であったことは好条件であったと考えられる。

(b) 率先避難者

「その場においては危険な事態である」という認識を持った津波の目撃者は、教会のベルを鳴らす、毎日夕方に開催している集会(サモア特有の壁のないゲストハウスで歌の練習などを行っている)の始まりを知らせる鐘を鳴らす、直接家族や友人に「逃げよう!」とcall(呼びかけ)する、などの行動をとっている。本研究では彼らをリアリティの共同構築による早期避難における「第一段階の集団」と位置づける。

彼らの行動に接した住民は、とにかく逃げる、自ら海の様子を確かめるなどの行動をとっている。こうした人びとを「第二段階の集団」と分類したい。第二段階の集団の数は多く、彼らの行動によって「その場においては危険な事態である」というリアリティは一層広がりを見せたと考えられる。そして、逃げている多くの住民を見て避難行動をとる集団(第三段階の集団)が生まれたと考えられる(図 7.5-10)。「数百人もの小学生たちが何かを叫びながら逃げていくのを見て、私たちも走って高台へ逃げた(乳児とその夫婦)」という行動などである。

第一段階、第二段階の集団による大規模な避難行動の流れは、率先避難者としての特徴を有する。率先避難者とは、地震発生後に隣近所に声をかけながら、とにかく早く避難を開始する人のことである。こうした避難者は、人数が多くなると「その場においては危険な事態である」というリアリティをより強固にするものと考えられる。日本においても、2004年紀伊半島沖地震津波で確認されている(片田, 2006)。

(c) 酋長の避難呼びかけ行動

「リアリティの共同構築」の視点で今回のイベントを解釈する上で、Amanave村の酋長(Mayor)(約60)の避難呼びかけ行動は無視できない。彼は「大きな地震があると、何かが起こる」ことを知っていたという。自治体とNOAAが年2回、全酋長を対象にマルチハザードの防災ワークショップを開催していたのである。彼は地震後、拡声器を持って住民に避難を呼びかけた。バス停で待っている10人程度の学生に対して、タイミングよく来た路線バスに乗るように指示し、バスの運転手には低地である本来のルートに進まず、高台である来た道を引き返すように指示したという。

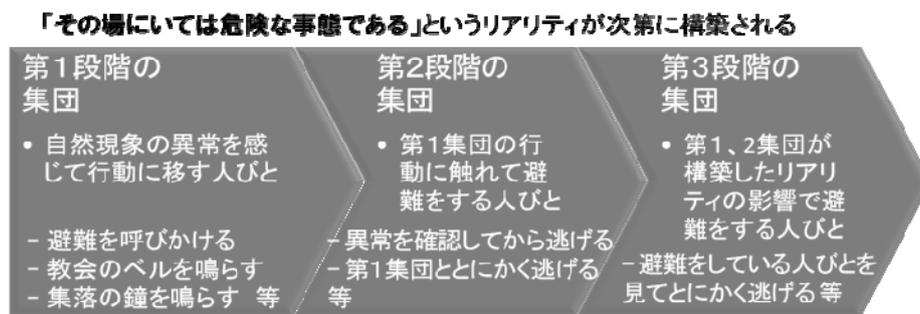


図 7.5-10 リアリティの共同構築による早期避難が行われるまでに生まれる3タイプの集団。

酋長が、拡声器を使い「Go up!」と叫んで回る様子や路線バスに引き返すように指示する言動(バスが引き返す様子も含めて)は、Amanave村において「災害が迫っている」というリアリティの構築の一助となった可能性がある。また、普段から人間関係がある住民へのメッセージであったことも、影響された住民が多かった要因であると考えられる。

(d) まとめ

ここまで「リアリティの共同構築」という視点で、Amanave村とLeone村の避難行動の特徴を考察してきた。確かに、住民の行動が「その場においては危険な事態である」というリアリティを構築し、それによって早期避難をした住民がいたと解釈できる。しかし、それだけで人的被害は軽減できない。ここでは、津波来襲特性と地理条件が良かったことを指摘しておかなければならない。すなわち、(Ⅰ)最大波に先攻して比較的小さな津波があり(図 7.5-6)、また(Ⅱ)高台が居住地から比較的近かった。

その上で、住民を(a)「リアリティの共同構築」による早期避難によって津波から逃れた住民、(b)最大波に先行する津波には飲まれたが最大波からは逃れた住民、(c)最大波に先行する津波で犠牲になった住民、に分類すると、今回の津波で犠牲になったのは、集団(c)のみであったため、津波の規模の割に死亡率が小さかったと解釈できる。

Leone村での10名の犠牲者は、(i)持病で自力避難不能、(ii)身体的特徴で自力避難不能、(iii)間違った避難行動のいずれかの要因で助からなかったと言える。サモアでは、肥満という身体的特徴が津波避難を困難にするケースが複数確認された。例えば、「体が大きくて、自力避難は困難であった。従兄弟と伯父の補助で避難できた。(女性、31)」などである。

最後に、「リアリティの共同構築」による住民の早期避難の効果の持続性について考察を加えておきたい。2010年2月27日のチリ沖地震津波では、2009年9月の津波イベントとは違い、津波警報がラジオやテレビから流れた。Leone村では多くの住民が同時に自動車で避難を開始したため、村の海岸に近い低平地の交差点で渋滞が発生した。メディアによるメッセージの中身は把握できていないが、「避難が必要な津波が迫っている」というリアリティが構築された結果として、上記の渋滞が発生したと考えられる。一方で、津波の様子をビデオで撮影し動画共有サイト「You Tube」に投稿しようとした若者(19)も現れた。前回の災害と大きく異なるのは、津波の経験と行政によるその後の教育により、住民それぞれに「次回の津波ではこう行動しよう」という先行判断が生成され得たということが大きい。上記の両者の行動の違いは、その先行判断の違いであると考えられる。「リアリティの共同構築」による住民の早期避難を持続的に期待するためには、この先行判断を適切なものにする取組みと、先行判断を覆すようなリアリティが構築される仕組みを考える必要がある。

(参考文献)

片田敏孝(2006): 災害調査とその成果に基づくSocial Co-learningのあり方に関する研究, 土木学会調査研究部門平成17年度重点研究課題(研究助成金)成果報告書, http://www.jsce.or.jp/committee/jyuten/files/H17j_04.pdf.

河田惠昭(1997)：大規模地震災害による人的被害の予測，自然災害科学，Vol.33，No.1，pp3-13.

高橋智幸・鈴木進吾・奥村与志弘(2009)：2009年9月29日サモア諸島沖地震津波に関する現地調査，自然災害科学，28-3，pp.259-268.

山中佳子(2009)：NGY地震学ノート No.22，
http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2009/NGY22.html，参照2010-05-19.

矢守克也(2009)：防災人間科学，東京大学出版会，284p.

NOAA Tides and Currents (2009)：<http://tidesandcurrents.noaa.gov/index.shtml>，参照2009-10-23.

Tsunami Laboratory (2009)：Historical Tsunami Database for the World Ocean，
<http://tsun.ssec.ru/nh/tsunami.php>，参照2010-05-19.

USGS (2010)：The Limit of Inundation of the September 29, 2009, Tsunami on Tutuila, American Samoa, U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1018, 31p.

8. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
Proc. of the 2nd International Symposium on Advances in Urban Safety, Evacuation Characteristic of Residents in the 29 September 2009 Samoa Islands Region Earthquake Tsunami and Changes after the Tsunami—Field Survey at American Samoa	2010	2nd International Symposium on Advances in Urban Safety	Okumura, Y., K. Harada and Y. Kawata
東北地域災害科学研究、46、建物回りの津波痕跡分布—2009年サモア地震津波を例に—	2010	自然災害研究協議会東北地区部会	松富英夫・原田賢治
3rd International Tsunami Field Symposium、Tsunami Hazard Mitigation by Using Coastal Forest on the field -Case Study of Iwanuma Natori Coast in Sendai Bay -	2010	3rd International Tsunami Field Symposium	Kentaro Imai, Kenji Harada, Fumihiko Imamura
3rd International Tsunami Field Symposium、Study on effective area by coastal forest with limited length against tsunami run up	2010	3rd International Tsunami Field Symposium	Kenji Harada, Keisuke Uchiyama, Yuto Matsumoto
Safety and Security Engineering, III、Tsunami Disaster Assessment in the Southwestern Pacific Countries due to Giant Earthquakes near Japan	2009	WIT Press	Takahashi, T., S. Koshimura, K. Harada, S. Suzuki, Y. Okumura and Y. Kawata
12th International Waste Management and Landfill Symposium、Estimation procedure for potential quantity of tsunami debris in the Tonankai earthquake	2009	12th International Waste Management and Landfill Symposium	Hirayama, N., Y. Kawata, S. Suzuki and K. Harada

地震工学論文集、30、1994 年フィリピン・ミンドロ地震津波災害における復興対策の長期的効果に関する研究	2009	土木学会	奥村与志弘・原田賢治・Edison Gica・高橋智幸・越村俊一・鈴木進吾・河田恵昭
自然災害科学、28-3、2009 年 9 月 29 日 サモア諸島沖地震津波に関する現地調査	2009	自然災害学会	高橋智幸・鈴木進吾・奥村与志弘
24th International. Tsunami Symposium、 Long-term Effects of Social Responses in the 1994 Mindoro Tsunami Disaster in Oriental Mindoro, Philippines	2009	24th International Tsunami Symposium	Okumura, Y., K. Harada, E. Gica, T. Takahashi, S. Koshimura, S. Suzuki, Y. Kawata
the 2009 AGU Fall Meeting、 Damages in American Samoa due to the 29 September 2009 Samoa Islands Region Earthquake Tsunami	2009	AGU	Okumura, Y., T. Takahashi, S. Suzuki
Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems、 Integrated approach to assess the impact of tsunami disaster	2009	Furuta, Frangopol & Shinozuka (eds), Taylor & Francis, London	Koshimura, S., M. Matsuoka and S. Kayaba
Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems、 An Evaluation Method of Tsunami Vulnerability in Metropolitan Area Considering the Functionality of Coastal Facilities	2009	Furuta, Frangopol & Shinozuka (eds), Taylor & Francis, London	Suzuki, S., S. Koshimura and Y. Kawata
海岸工学論文集、56、実地形における海岸林を利用した津波減勢策—仙台湾岩沼・名取海岸を例として—	2009	土木学会	今井健太郎・原田賢治・渡辺修・江刺拓司・島貫直樹・八木智義・今村文彦

海岸工学論文集、56、東海・東南海・南海地震時の小型船舶を利用した救助・支援活動に関する研究	2009	土木学会	大神俊治・鈴木進吾・河田恵昭
海岸工学論文集、56、津波増幅特性に及ぼす地震の規模の影響	2009	土木学会	奥村与志弘・河田恵昭
6th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society、Study on the plane effect of coastal forest against tsunami run-up	2009	Asia Oceania Geosciences Society	Kenji Harada, Nguyen B. Thuy
地域安全学会論文集、10、開発途上国の災害復旧・復興に対する国際支援事例研究(1)—インドネシアの津波・地震災害復旧・復興に関する考察—	2008	地域安全学会	阪本真由美・河田恵昭・奥村与志弘・矢守克也
第 27 回日本自然災害学会学術講演会、インドネシアの災害文化に関する一考察—津波災害復興状況調査を踏まえて—	2008	自然災害学会	奥村与志弘・高橋智幸・越村俊一・原田賢治・河田恵昭
自然災害科学、27-3、リモートセンシング技術を用いた新しい津波災害研究の展開	2008	自然災害学会	越村俊一
日本災害情報学会誌、6、GPS ブイによる沖合津波観測技術と津波予報への利活用	2009	災害情報学会	越村俊一
日本地震工学会大会 2008 梗概集、高解像度衛星画像を利用した津波被害の把握手法	2008	地震工学会	越村俊一・萱場真太郎
Geophysical Research Letter、35、Effect of the Emperor seamounts on trans-oceanic propagation of the 2006 Kuril Island earthquake tsunami	2008.1.24	土木学会	Koshimura, S., Y. Hayashi, K. Munemoto, and F. Imamura

自然災害科学、26-2、2007年4月ソロモン諸島地震・津波災害とその対応の社会的側面	2007	日本自然災害学会	鈴木進吾・牧紀男・古澤拓郎・林春男・河田恵昭
海岸工学論文集、54、後方散乱強度を指標とした遠距離海洋レーダによる津波検知に関する基礎的研究	2007	土木学会	高橋心平・高橋智幸・児島正一郎・小沼知弘
海岸工学論文集、54、2004年インド洋大津波が示した現在の津波警報システムの問題点	2007	土木学会	高橋智幸・小沼知弘
海岸工学論文集、54、2006年千島列島沖地震津波の伝播特性における天皇海山列の影響評価	2007	土木学会	越村俊一・宗本金吾・大家隆行・柳澤英明・阿部郁男・今村文彦
海岸工学論文集、54、津波来襲時の海上ハザードマップ作成要件の検討	2007	土木学会	大橋太郎・越村俊一・今村文彦
海岸工学論文集、54、津波防災施設計画への高精度地形モデルの利用と必要精度	2007	土木学会	村嶋陽一・今村文彦・越村俊一・中村茂・北沢良之・並川和敬
海岸工学論文集、54、2004年インド洋大津波におけるインドネシア・バンダアチェでのマングローブ林の潜在的減災効果	2007	土木学会	柳澤英明・越村俊一・宮城豊彦・大家隆行・今村文彦
海岸工学論文集、54、津波防災に対する住民・海岸利用者の意識と対策立案者の認識との相違に関する調査	2007	土木学会	岡安章夫・武若 聡・中野 晋・村上啓介・荒木進歩・森 信人・青木伸一・今村文彦・越村俊一・佐藤慎司

Proceedings of IUGG XXIV General Assembly, Study on the effect of coastal forest against tsunami, Case study on 2006 JAVA Tsunami around Pnagandaran, Indonesia	2007	IUGG	Kenji Harada, Aditya Riadi Gusman, Hamzah Latief, Yuichi Nishimura, Yoshiaki Kawata
日本自然災害学会学術講演会講演概要集、26、船舶の津波危険度評価にもとづく海域津波減災対策の検討	2007	日本自然災害学会	原田賢治
海岸工学論文集、54、要援護者対策も含めた総合的な津波避難対策の戦略計画の検討	2007	土木学会	原田賢治・田村圭子・山崎栄一・林春男・河田恵昭
海岸工学論文集、54、東南海・南海地震発生時の港湾機能を活用した緊急輸送戦略	2007	土木学会	河田恵昭・小鯛航太・鈴木進吾
第四紀研究、46、巨大津波災害の広域被害評価	2007	第四紀学会	越村俊一

9. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
なし				

10. 成果の実用化の見通し

これまで述べてきた成果の通り、環太平洋域における津波災害軽減のための情報ネットワーク構築のための基礎的研究が進んだ。

情報システムとしては、そのプロトタイプとも言うべきシステムが完成した。GISサーバーエンジンを使用し、ウェブブラウジングを通じた容易に情報を共有できる手法・システムを開発した。GISにより、位置情報をキーとして各種情報を有機的かつ柔軟に重ね合わせて解析することができるシステムができ、これによって津波研究者による津波の想定、危険度のアセスメント、地域の防災担当者や企業等による自分の地域の局所的データの登録、世界各国の局所的データの集約・充実とそれを利用した緊急時の被災地推定と災害対応の高度化を計ることが可能となりつつある。

事前の情報コンテンツとしては、まず我が国周辺で発生する津波のシミュレーションを実施し、その結果として津波伝播特性や各国への津波到達高さや到達時間が得られ、また

伝播経路中で伝播先への警報の精度を向上させるために重点的に観測すべき観測施設が明らかになった。そして、この津波のシミュレーション結果と人口分布を重ね合わせ、津波の高さに応じて、その津波に曝される人口、すなわち津波曝露人口を計算し、これをその津波による地域の脆弱性情報として提供できるようになった。これにより、各国ではどこで発生した津波に対して、どの地域で警戒すべきかといった情報が得られることになり、各地域では警戒すべき津波が分かることになる。

事後の情報コンテンツとしては、即時津波シミュレーションを実施し、津波曝露人口を計算して、推定激甚被災地という情報が提供できるようになる。また、推定激甚被災地に対してその事前と事後の衛星画像の画像解析を実施することによって浸水域の広さがわかり、過去の津波事例よりその地域のフラジリティカーブを設定し、事前に家屋数のデータを整備しておけば、迅速に被害を定量化することができる。

また、本システムの現地での利用性を検討するために、環太平洋各国の津波災害文化を把握することを目的に、現地調査が実施された。インドネシア、フィリピンでは過去に津波による被害を受けた地域の復興状況を調査し、その復興状況に影響していた原因を検討した。津波災害後、居住禁止措置がとられた地域がほとんどであったが、その持続性にはその地域の文化や生活様式、土地問題、政府の措置などの様々な要因が関係し、その土地土地での復興状況・津波に対する考え方があった。また、2009年サモア諸島地震津波の現地調査も実施した。

これら一連の成果から、環太平洋域における津波災害軽減のための情報ネットワークを構築していくための、要素技術がそろい、それらを組み合わせて推進するフレームワークが見えてきた。将来発生する津波によって、何万という犠牲者が出ないように、各国の情報を集約・共有して、まだ被災していない国々と地域に対しても、事前に警鐘を鳴らし、津波に対する知識や災害のイメージを普及させていくことが重要になる。各地で被害軽減策を効果的に進めるためには、さらにどのような情報が必要か、どのような情報が集約できるか、どのような手法を用いるべきかをさらに研究していく必要がある。

さらに、本研究開発によるネットワークを世界に提案し、その構築を図って、実用化していくためには、既存の警報システムや既存の防災組織のシステムとの接続性・親和性、および各地域や研究者によってことなる津波想定・被害想定・分析手法の標準化を考えていかなければならないだろう。地域にとって課題となっているのは津波災害だけではなく、さまざまな災害に対する対策もある。低頻度である津波のみに特化したシステムであっては、利用性は低いままである。必ず他のシステムと連携し、お互いにシステムの改善につながるようにしていくべきであろう。

11. その他

なし