

新たな海岸防災・減災対策決定プロセスと 津波規模と生起頻度の関係の定量化手法

安田 誠 宏*

New decision process of coastal disaster prevention and reduction measures
and quantification method of tsunami scale and occurrence frequency relation

Tomohiro YASUDA

1. はじめに

東日本大震災から5年、復興まちづくりが進む被災地において、まちづくりの外形を与える防潮堤について、改めてそのまちづくりや景観、生業等への影響について議論がなされている。住民合意のもと、発展的なまちづくりをしていくためには、防護施設設定の在り方について、津波防災・減災とまちづくりの双方の視点を生かした統合的な施策が必要である。

2011年3月の東日本大震災を受けて、土木学会では「津波特定テーマ委員会」を設置し、今次津波の科学的な位置づけを整理し、さらに今後の津波災害に備えるべく、津波規模の指標を導入した。2011年9月の報告会では、数十年から百数十年に1度の津波を対象とし、人命及び資産を守るレベルとして「津波レベル1 (L1)」, また、これをはるかに上回り、構造物対策の適用限界を超過する津波に対して、人命を守るために必要な最大限の措置を行うレベルとして「津波レベル2 (L2)」の2つの津波レベルを提案した。L1 津波については基本的に構造物での防御を考え、またL2 津波に対しては避難を中心とした複合減災対策を推奨したが、あわせて現状では津波レベルの設定精度については技術的に限界があることも示した。

中央防災会議での同様の議論を基に、被災地ではL1津波を対象とした防潮堤の建設計画が進められてきた。しかし、L1による防潮堤高さの検討の一つの問題点として、どのように予測精度を向上させたにせよ、L1が津波外力のみにより決定され、基本的に防

護される地域の状況を考慮しないことが挙げられる。

現在、南海トラフの地震をはじめ、全国的に人口密度も高い地域で将来起こりうる震災への対策が急務となっているが、震災に対する減災には、1) 震災前に対処すべきハードおよびソフトの予備的対策(防災・減災対策) 2) 震災後の復旧・復興において行うべき政策の制度設計の事前実施(事前復興)が必要である。復興プロセスも含めて、東日本大震災における成功事例・問題事例を海岸工学および土木計画学の知見から整理し、その結果をもとに今後起こりうる津波災害に対する総合的減災計画を設計するための方法論の開発が喫緊の課題である。

津波対策に対する総合的減災計画の方法論開発上の具体的な検討課題を、1) 事前対策と2) 事後対応に区別すると、以下のようである。

- 1) 震災前に対処すべきこととして、津波の起こる規模・確率の予測、津波予測に対応した防潮堤整備や減災のための土地利用の見直しといった準備が必要である。例えば、「粘り強い構造」の防潮堤や、それによる浸水低減効果の評価、または高台移転を含む土地利用や街路整備などについても併せて検討することが必要である。また、これらハード対策だけでなく、「避難」行動を促す防災教育や、津波災害警戒区域の設定、移住促進政策などのソフト対策が必要である。
- 2) 震災後には、早期の人命救助、その後の復旧・復興の過程を効率よく行う必要がある。災害対応、復旧・復興という一連の過程を、時間制約の中で計画し、調整し、実施していくことは容易ではない。このためには、災害発生後のこれら一連の過程を、住民合意を形成しながら、円滑にかつ効率的に実施し

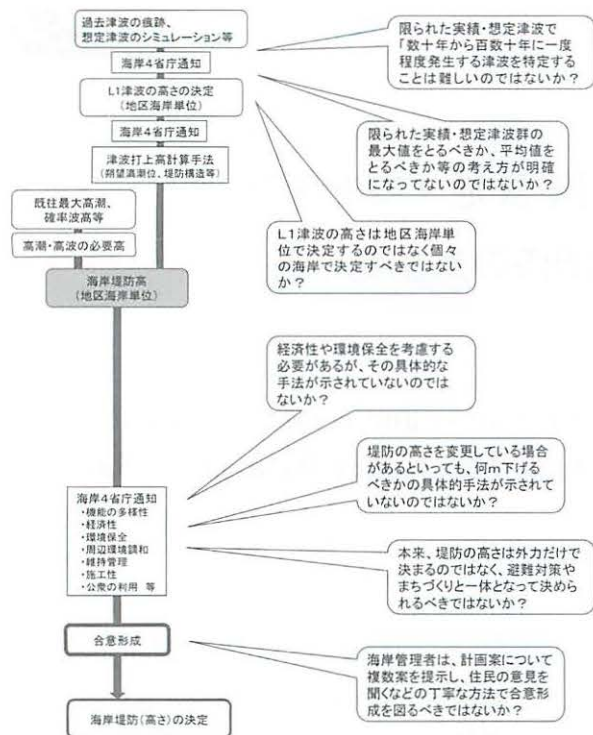


図1 現行の海岸防災・減災対策決定プロセスにおける課題

ていくことを可能とするような、事前の準備や制度の構築が必要である。

事前対策と事後対応は相互に関連している。東日本大震災被災地の従前の防潮堤および土地利用が1)の参考に、そして復旧・復興に入った現在までの取り組みが2)の参考になる。例を挙げると、2)について現在被災地では、防潮堤の施設規模について住民と行政で意見が一致せず、問題が生じている地域がある。東日本大震災の場合では、震災後すぐに防潮堤整備を復旧事業と位置付けて、発生頻度の高い津波(L1津波)に対しては完全に防御できる防潮堤高さが設定された。しかしながら、日常生活や漁業等の経済活動、観光資源としての景観や砂浜の利用を考えた場合には、高い防潮堤は障害となる場合があり、また、防潮堤の整備よりも、避難を円滑にするための幅の広い道路整備を望む住民の声も多い。地域の将来像を含めた総合的・長期的見地での議論がなされず、各担当部局がそれぞれ整備を進めたことが一因といえる(図1:現行の課題)。このことはまた、2)の事前復興が1)の防災・減災施策の考え方と不可分であることを示している。

ハード対策における現在の方法論では、防潮堤等の構造物の設計は、原則として既往最大主義をとっており、背後地の人口・資産の集積状況やその時間的変化、

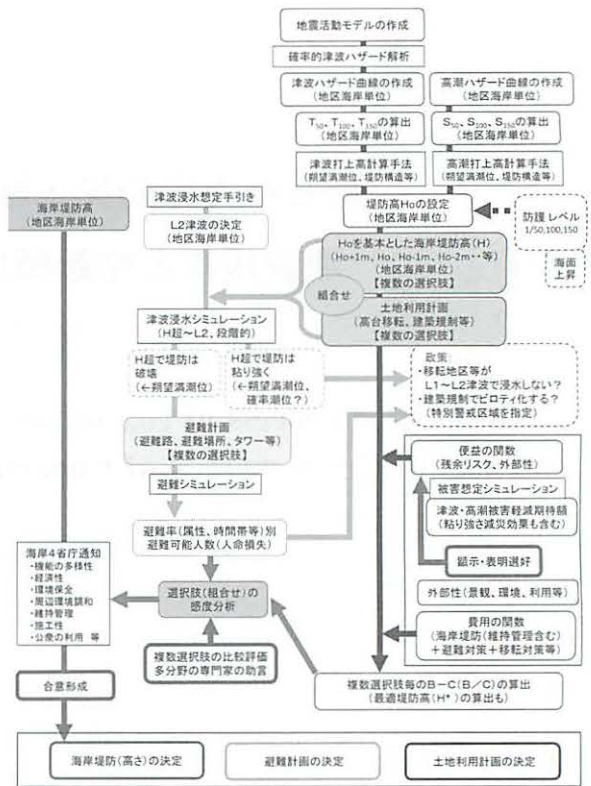


図2 海岸防災・減災対策決定プロセス(案)

土地利用誘導も含めた防災対策自体が地域の経済、環境に及ぼす影響等は考慮されていない。このため、人口や資産の集積が進んでいる大都市圏でも、背後地が森林や町地である場合にも、整備の目標は同程度の水準が設定され、また、整備による生業、景観、環境への副次的影響とそれによる背後地の時間変化も検討されていない。どの地域でも一律の防災基準を設定することは重要な観点であるが、地域の将来と国民合意を考えた場合には、施設整備によるリスク減少と投下コストの間の最適解が存在すると考えられる。

この評価のためには、あらゆる規模の外力とその発生頻度を予測し、施設規模に応じた長期被害の期待値と背後地域の変遷を計量化し、防護コストを含めた災害に関する長期総便益の最大化を評価の中核に据えた方法論の開発が有効である。長期便益の算定に当たっては、社会構造や地域の将来予測もその評価に取り込む必要があるが、これにより、地域固有の事情を反映した効率的な整備目標の設定が可能となる。

ソフト対策もハード対策の状況に依存してその効果は異なる。したがって、ハード・ソフト対策から構成される総合的な減災施策の効果を定量化し、計画や設計に反映することの重要性は論を待たない。リスク情報の提供や土地利用の規制・誘導、避難に役立つ施設整備や避難のためのソフト施策等の効果も合わせて分

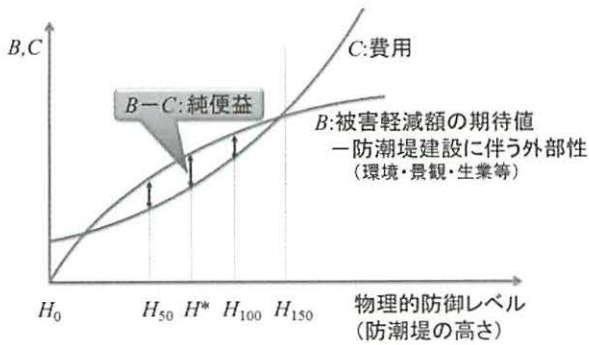


図3 防潮堤の高さとその便益と費用

析していくための方法論の開発が進められている。具体的には、1) 津波の規模と生起頻度との関係の定量化手法（津波ハザードモデル）についての把握とその利用可能性の検討、2) 減災のためのハード・ソフト施策の効果の定量化に対する都市均衡モデルの利用可能性の検討、3) 整備すべき防潮堤高の検討に必要な情報と考え方の整理について、検討していく必要がある。1)、2)、3)の知見を踏まえたうえで、現在の海岸防災・減災対策決定プロセスの課題を整理し、費用便益分析に基づく防潮堤整備高の設定方法などをはじめとした現在の政策決定とは異なるプロセスの政策導入を含む新たなプロセスが、土木学会減災アセスメント小委員会により提案されている（図2）。

図2では、純便益指標（B-C）を用いて津波防御レベルの設定を行うプロセスを導入している。これは、L1津波が数十年から百数十年と幅があることに着目すれば、例えば、西日本では再現期間50年程度（昭和南海級）、100年程度（安政南海級）、150年程度（宝永級）等の津波（物理的防御水準）を想定し、背後地の利用状況を考慮した上で、それぞれに対して経済的な照査を行い、効率性基準を満たす範囲内で最も望ましい防御水準を採択するという方法である。図3に示すように、横軸に防潮堤の高さをとり、縦軸にその便益と費用をとる。このとき、費用は防潮堤の高さとともに逓増する。一方、便益は防潮堤によって守られる生命、財産であり、これらは被害軽減額の期待値で表される。便益は、防潮堤の高さとともにその増加が一般に逓減する。このとき、純便益指標（B-C）を最大化する防潮堤の高さが効率的な高さとなる。

本稿では、津波の規模と生起頻度との関係の定量化手法について、最新の研究成果を紹介する。

2. 津波の規模と生起頻度との関係の定量化手法

まちづくりに配慮した津波防護施設というのは、これまでの海岸保全施設整備の観点からは大きく異なる

ものである。従来から海岸保全施設の整備レベルは、波浪や高潮、津波などの生起確率あるいは既往最大をベースに、ある一定の防護レベルを満たすよう物理的検討により設定されており、この中に後背地の社会的経済活動を包含するファクターはない。具体的な構造物の設計においては、利便性や環境について配慮されているものの、防護基準そのものについては、これらの要素や後背地の社会経済活動などは考慮されていない。一方で、沿岸市町村におけるまちの活性化は、海岸の利用形態や構造に大きく左右されるため、活性化を目的主体としたときの最適防護施設の姿は物理要因からのみでは決定できない。これらは、基本的に防護レベルが低く、社会要求に満たない場合にはそれほど大きな問題とはならないが、整備が進み防護レベルがある程度以上に上がれば、時として「防護レベルが過剰ではないか」という議論が生じてくるのはむしろ自然であると言えよう。

問題は、いかにして様々な社会要求と防護レベルとのバランスをとるか、という点であるが、これについて藤間・樋渡（2013）は「残余のリスク」という考え方をを用いて、背後地の土地利用状況に応じた最適津波防護施設高を求める方法について論じている。「残余のリスク」は、防護施設で守り切れない災害による期待損失のことであるが、期待損失を減らすことを便益ととらえれば、この考え方は防護施設の建設コストをマイナス要因とした純便益最大化と同等と考えられる。この視点に立って、便益をどのように査定するかを中心として議論されているが、便益評価の中には、津波の生起確率特性や社会資本蓄積の状況、避難・人命の考え方、対象期間における社会構造変化など、様々な要素があり、これらの変動や規制・インセンティブを通じた誘導などの要因を考えれば、極めて複雑な評価とならざるを得ない。これらを現実的な評価手法として社会実装するための議論や、住民合意のための情報伝達手段としてのツールの開発が望まれる。

2.1 ランダムフェーズモデル

近年、津波シミュレーション手法は大きく進歩してきており、海洋を伝播する津波の計算精度への信頼性は高くなっている。津波被害評価における困難な課題は、将来、津波を発生させる可能性のある地震の特性を予測することであり、特に、すべり分布が津波特性に大きな影響を与える。地震特性に関連する不確実性は大きく、不確実性の評価は過去の地震の科学的事象を基に、起こりうる多数のシナリオを考慮しなければならない。東日本大震災以降、Goda et al. (2014) は、東北地方太平洋沖地震を対象に、多数のすべり分布を

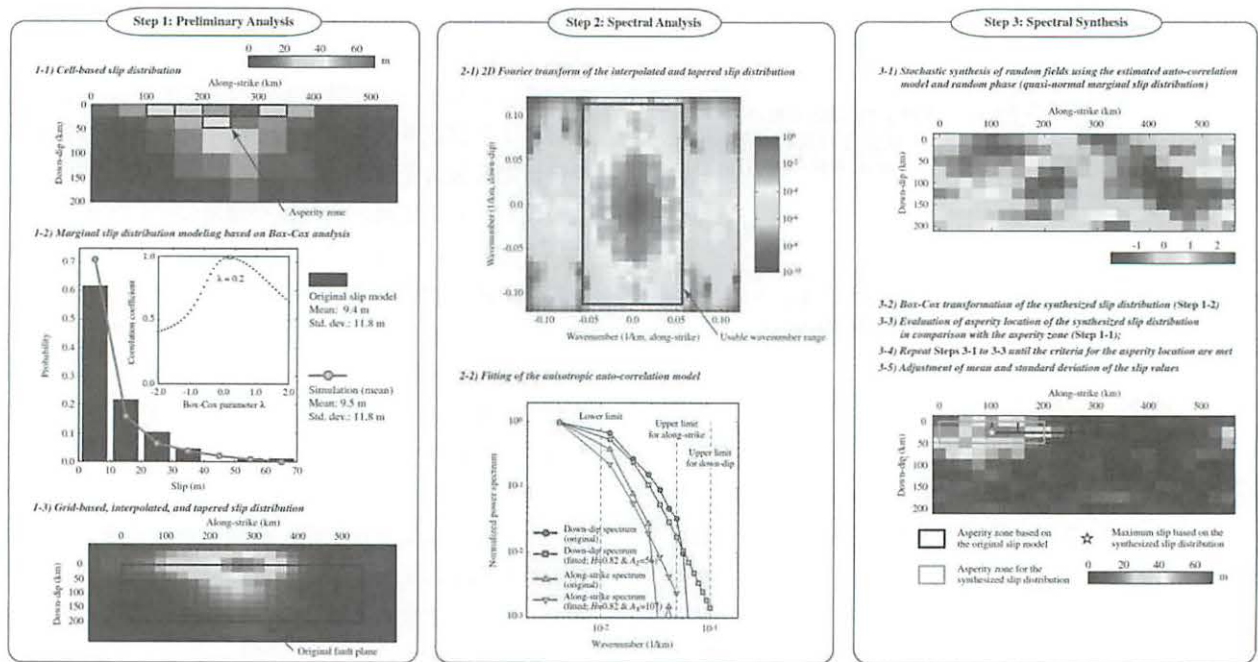


図4 ランダムフェーズ確率すべり分布モデルの解析フロー (STEP1:予備解析, STEP2:スペクトル解析, STEP3:スペクトル合成)

確率的に生成するランダムフェーズモデルを開発した。確率すべり分布の生成には、空間相関性をパワースペクトルで表現するという Mai and Beroza (2002) による確率的手法を基にしている。確率津波モデルは、沈み込み地震を想定した津波シミュレーションを多数行うことに有用である。東北地方太平洋沖地震を対象に推定されたインバージョンすべり分布はいくつかあるが、そのうちの11モデルを検討対象としている。ここで、インバージョンすべり分布とは、観測された地震波形の逆解析を行うことで推定された断層面のすべり分布、あるいは地震により生じた津波の観測波形から逆解析することにより推定された断層面のすべり分布のことである。

確率すべり分布を生成するために、インバージョンすべり分布に対する空間的相関性を利用する。波数スペクトル解析を行うことで、すべり量の空間的相関性を一般化する。このインバージョンすべり分布に対して二次元フーリエ変換を行い、走行方向の波数 (x) と傾斜方向の波数 (z) のパワースペクトル分布に変換する。中心から放射状にパワースペクトルの平均値をとった周方向平均それぞれに対して、波数とパワースペクトルの関係をプロットし、このスペクトル勾配に対して線形回帰分析を行う。線形回帰分析時の傾きとハースト指数(空間相関性を表すパラメータの一つ)の関係式、周方向平均の理論式を用い、曲線に最も合致するようなハースト指数 H と相関長 A_x 、 A_z の組

み合わせを模索して決定する。また、周方向平均の理論式に関して、様々な理論式のモデルが存在するが、描いた曲線に最も合致するとしてフォンカルマンモデルの周方向平均の理論式を採用した。一方で、インバージョンすべり分布が最も正規分布に近づく時を考える。あるデータを正規分布に近づけるときには、一般的に Box-Cox 変換が用いられる。変換前と変換後のすべり分布を比較し、最も相関係数が1に近づくときの値を、Box-Cox 変換のパラメータ λ として定める。

波数スペクトル解析手法を用いることで、空間相関性を表す3つのパラメータ、すなわちハースト指数 H 、相関長 A_x 、 A_z を求めることができる。そのパラメータを用いてフォンカルマンモデルのパワースペクトルの理論値(絶対値)を算出し、位相をランダムに変化させ、複素領域でのフーリエ変換の値を算出する。これをすべての波数領域に適切に拡張し、逆フーリエ変換から空間領域のすべり量を得る。その後、逆 Box-Cox 変換を行い、非正規化する。すべり量の平均値と標準偏差を元のインバージョンすべり分布の統計値に合わせる操作や、アスペリティ領域を設定する操作が可能である。これら一連の方法を、図4に示す。

さらに、Goda et al. (2015) は、得られた確率津波モデルを用いて、東北地方沿岸部における津波浸水計算をし(図5) その結果と建物(被害)分布データ(国土交通省, 2011)、フラジリティカーブ (Suppasri et al., 2013) を用いることで、確率的津波リスクマップ

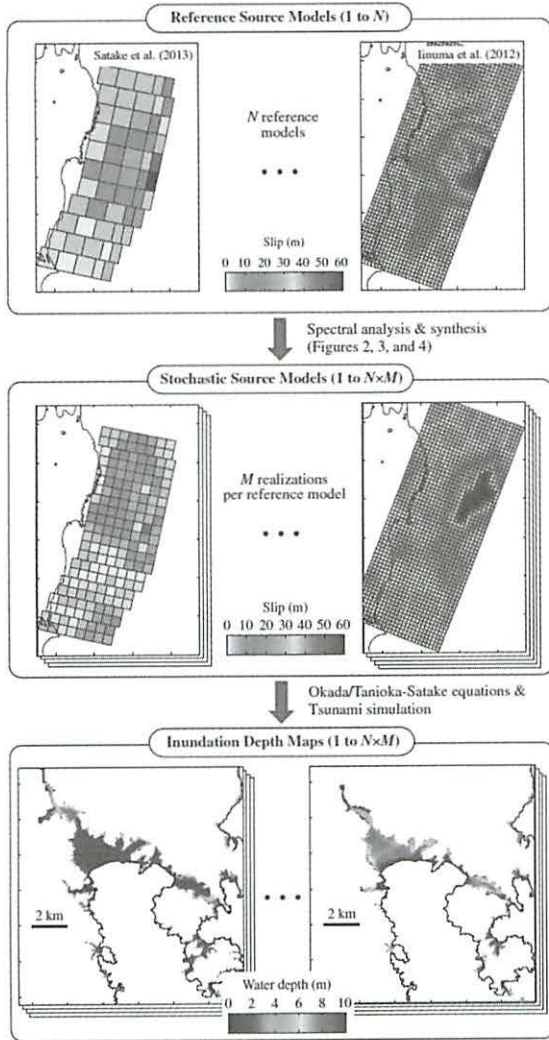


図5 確率津波モデルを用いた確率すべり分布の生成とそれを用いた津波浸水計算

を求めている (図6)。確率的津波リスクマップは、津波に対する建物の被害確率の空間分布を示すことができ、起こり得る特定の津波シナリオに対してだけでなく、建物の津波抵抗力の不確実性まで示すことができる。確率論的津波リスクマップとリスクカーブの両方が、地形の影響、津波波源との近さ、および建物の特性 (材料の種類と階数) の影響を受けることが示された。確率的津波リスク評価において異なるインバージョンすべり分布モデルを用いることは、予測不確実性の評価に重要であるといえる。現在の限られた地震学の知識では、沈み込み帯における巨大地震の予測不確実性は大きいので、ある特定のシナリオに基づいて津波避難と減災施策をすることは危険であり、確率的評価が望ましいと考える。

2.2 ロジックツリーモデル

Cornell (1968) は、地震による強震動を評価する

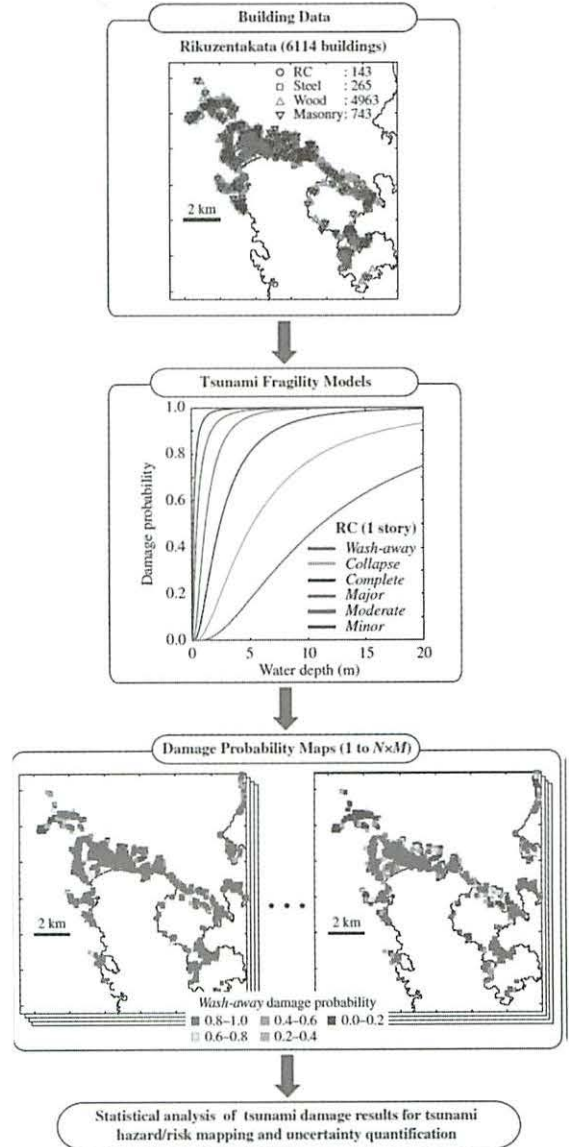


図6 建物分布とフラジリティカーブおよび浸水計算結果を用いた確率津波被害マップ

際に考慮すべき不確実性の種類を、認識論的不確実性と偶然的な不確実性へと分類した。以来、米国や日本国の原子力分野における確率論的強震動および津波評価の過程では、評価の不確実性を認識論的不確実性と偶然的な不確実性に分類して評価することが基本となっている。米国における原子力施設の確率論的地震動評価において採用されている United States Nuclear Regulatory Commission (2002) では、認識論的不確実性は科学的知識の欠如に起因するもので、データ量が増えれば将来的に減少させ得る不確実性であり、偶然的な不確実性は物理現象のランダム性に起因するもので、データ量には左右されず将来的にも減少不可能な不確実性である、と定義している。国内における原子力発電所を対象とした確率論的津波ハザード評価に関

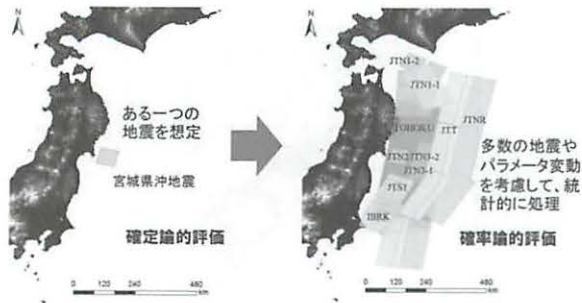


図7 確定論的評価と確率論的評価による想定地震領域

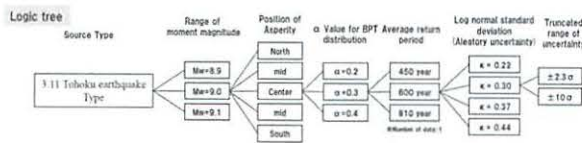


図8 東北地方太平洋沖地震を対象としたロジックツリー

する技術は、土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2002)(2015年現在、土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会)の「原子力発電所の津波評価技術」に端を発しており、ここでは、パラメータスタディという形で確率論的に津波ハザードを扱っている。その後、確率論的な津波評価手法に関する更なる調査研究が為され、土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2011)は、「確率論的津波ハザード解析の方法」を公表した。「確率論的津波ハザード解析の方法」では、基本的な津波ハザードの確率論的評価手法として Annaka et al. (2007) の評価手法を採用している。Annaka et al. (2007) は、津波ハザード評価に関わる不確実性を認識論的不確実性と偶然的な不確実性とに分類し、認識論的不確実性をロジックツリーにより評価し、偶然的な不確実性を津波波高の確率分布により評価するという手法を用いた。

福谷ら(2014)は、ロジックツリーを用いた確率論的津波ハザード評価の手法を応用し、陸上の地点における津波浸水深を確率論的に評価した後、津波による建物の脆弱性評価と結合させることで、特定の地点に立地する特定の建物が保有する津波リスクを定量的に評価している。津波リスクを定量的に評価することができれば、構造の違う建物や別地域に立地する建物のリスク量を客観的に比較することが可能であり、防災分野の多様な場面における客観的な判断の指標値として利用されることが期待される。

東日本大震災以前、宮城県では宮城県沖地震を想定地震として、被害想定と対策を行ってきた。津波ハザードを確率論的に評価するためには、多数の地震やパラ

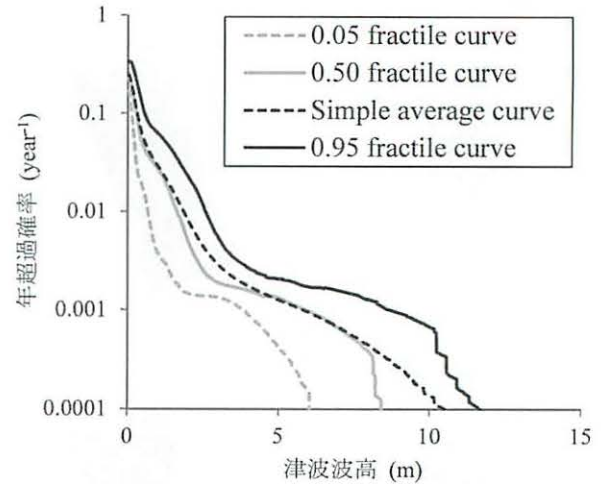


図9 ハザードカーブ(福島県相馬港沖、水深10m地点)

メータ変動を考慮する必要がある。そこで、防災科学技術研究所(2013)が公表する確率的地震動予測地図に用いられている日本海溝沿いの海溝型地震の発生領域から、図7に示す11領域を選定した。これらの断層領域を対象にロジックツリーを構築した(図8)。ロジックツリーの分岐として、(1) M_w 範囲、(2) 断層のアスペリティ位置、(3) 地震の平均発生間隔、(4) 波高のばらつき度(対数標準偏差)、(5) 対数標準偏差の打ち切りの5分岐を設定した。(1) M_w 範囲は、断層面積から決定した基準となる M_w から ± 0.1 の範囲で3通り、(2) 断層のアスペリティ位置については、断層の長さが150km以上の場合に、断層の中心と断層の両端付近にアスペリティが位置する3通り、(3) 平均発生間隔については、地震動の長期評価で決定された平均発生間隔に、信頼区間を考慮した3通り、(4) 波高のばらつき度(対数標準偏差)と(5) 対数標準偏差の両端の打ち切りの2項目の分岐に関しては、Annaka et al. (2007) に示されている分岐を踏襲した。

構築したロジックツリーの一分岐毎に、津波の数値計算で得られた最大波高とそれらのばらつき度(対数標準偏差)が決まるので、計算された最大波高を中央値として、対数標準偏差を適用して、超過確率分布を描くことで、各メッシュ点において1800本のハザードカーブが生成できる。全断層領域の各ハザードカーブを積算すると、95%フラクタル曲線、50%フラクタル曲線、5%フラクタル曲線、単純平均曲線が構築できる(図9)。

ハザードカーブと脆弱性カーブから、損害確率と年超過確率の関係で表される津波リスクカーブ(図10)を導いた指数関数で回帰分析を行う。回帰した指数関数を利用し、損害確率0.01刻みで、指数関数

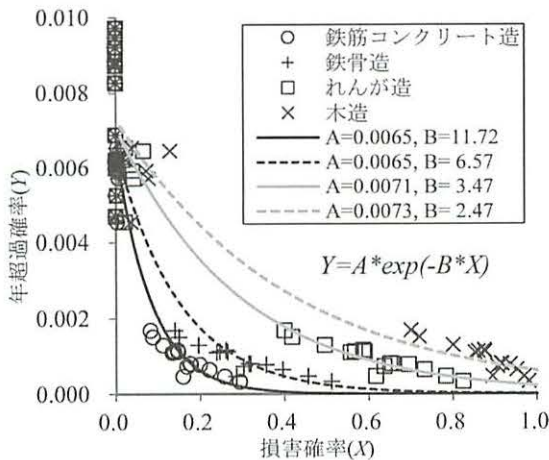


図10 各建物構造物のリスクカーブ

下方の面積を積分して求めた結果も示しており、この結果が、津波リスクの期待値であり、リスクの定量化の結果である。

津波リスクは、津波ハザード評価の情報や津波脆弱性評価の情報を個々に捉えていたのでは正しく理解できず、これらの情報を組み合わせて考えることで初めて理解できる。この手法は、国内外を問わず別地域にも応用可能であり、津波ハザードの大きさが相違する別地点に立地する建物が保有する津波リスクを定量的に評価して、比較・検討することが可能である。

3. おわりに

土木学会減災アセスメント小委員会では、リスク情報の提供や土地利用の規制・誘導、避難に役立つ施設整備や避難のためのソフト施策等の効果も合わせて分析していくための方法論の開発を進め、これらに関する学術研究・技術開発や諸制度の導入（災害事前アセスメントによる土地利用誘導など）を学際的・分野横断的に検討している。本稿では、現在の海岸防災・減災対策決定プロセスの課題を整理するとともに、費用便益分析に基づく防潮堤整備高の設定方法などをはじめとした、現在の政策決定とは異なるプロセスの政策導入についても検討し、提案された新たなプロセスを紹介した。さらに、津波の規模と生起頻度との関係の定量化手法（津波ハザードモデル）についての最先端研究の把握とその利用可能性の検討について詳しく紹介した。

参考文献

国土交通省 (2011) : 東日本大震災からの津波被災市街地復興手法検討調査のとりまとめについて、
<http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi-hukkou->

arkaibu.html.

日本原子力学会 (2012) : 原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準 : 2011, 139p.

平田賢治 ほか19名 (2014) : 日本全国を対象とした津波ハザード評価の取り組み, 日本地球惑星科学連合大会2014年大会, HDS28-04.

福谷 陽, Suppasri Anawat, 安倍 祥, 今村文彦 (2014) : 確率論的津波遡上評価と津波リスクの定量化, 土木学会論文集 B 2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.L_1381-L_1385.

藤間功司, 樋渡康子 (2013) : 津波防災施設の最適規模と残余リスクを明示する手法の提案, 土木学会論文集 A 1 (構造・地震工学), Vol.69, No.4, pp.L_345-L_357.

防災科学技術研究所 (2013) : 地震ハザードステーション確率論的地震動予測地図, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/JSHIS2/download.html>.

Annaka, T., K. Satake, T. Sakakiyama, K. Yanagisawa, N. Shuto (2007) : Logic-tree approach for probabilistic tsunami hazard analysis and its applications to the Japanese coasts, *Pure and Applied Geophysics*, Volume 164, Issue 2, pp 577-592, doi:10.1007/s00024-006-0174-3.

Goda, K., P. M. Mai, T. Yasuda, N. Mori (2014) : Sensitivity of Tsunami Wave Profile and Inundation Simulations to Earthquake Slip and Fault Geometry for the 2011 Tohoku Earthquake, *Earth Planets and Space*, pp.66-105, doi: 10.1186/1880-5981-66-105.

Goda, K., S. Li, N. Mori, T. Yasuda (2015) : Probabilistic Tsunami Damage Assessment Considering Stochastic Source Models: Application to the 2011 Tohoku Earthquake, *Coastal Eng Jour*, Vol. 57, No. 3, pp. 1550015-1-38, doi:10.1142/S0578563415500151.

Mai, P. M., Beroza, G.C. (2002) : A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip, *J. of Geophysical Res.*, 107, B11, 2308, doi:10.1029/2001JB000588.

Suppasri, A., Mas, E., Charvet, I., Gunasekera, R., Imai, K., Fukutani, Y., Abe, Y., Imamura, F. (2013) : Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami, *Natural Hazards*, 66, 2, pp.319-341, doi:10.1007/s11069-012-0487-8.