

年間
特集

東日本大震災での巨大津波の 発生・被害実態と今後の災害 対応

今村 文彦¹

Generation of the huge tsunami caused by the 2011 Great East Japan Earthquake and its catastrophic damage, and future disaster response

Fumihiko IMAMURA¹

Abstract

Ten years have passed since the damage caused by the huge tsunami that occurred in the 2011 Great East Japan Earthquake, and the actual situation has been elucidated and future tsunami countermeasures are being discussed. First, regarding the tsunami generation mechanism, inverse analysis is performed using not only seismic motion and geodetic data but also tsunami waveforms, and characterization of the tsunami fault model has been proposed for future evaluation. At that time, the Japan Meteorological Agency announced a tsunami warning, but there were some issues to underestimate the tsunami heights. Therefore, research such as real-time observation and improvement of prediction technology is now being energetically conducted to solve this problem.

The behavior of the huge tsunami recorded in the photographs, videos, and survey data at that time and its damage were overwhelming. The multiple, complex and chained damage process related to tsunami is introduced and the classification of incentives and predisposing factors for tsunami disasters, which will be useful for future disaster countermeasures. In particular, this time, new disaster types such as topographic changes, tsunami fires, and “black tsunamis” are reported. In the future, it will be important to simulate and evaluate such tsunami-related disasters, and research is being conducted to overcome the problems of conventional methods by utilizing the data obtained in the 2011 tsunami. Immediately after the great earthquake, two levels of tsunami countermeasures and the “Tsunami Disaster Prevention Town Development Law” were proposed by the national government, and efforts are being made to reduce repeated disasters. Now, it is important to obtain a consensus on the safety level in advance so that it can be reflected in the preliminary reconstruction plan.

¹ 東北大学災害科学国際研究所
International Research Institute of Disaster Science
(IRIDeS), Tohoku University

キーワード：地震津波，発生メカニズム，複合災害，津波対策レベル

Key words: Earthquake tsunami, generation mechanism, multiple and complex disaster, levels of tsunami countermeasure

1. はじめに

巨大津波の挙動と引き起こされた被害は壮絶であった。歴史および近年の事例を文献や資料・映像を通じて見ても、これほどの大きなインパクトを与えた事例はない。最近では2004年スマトラ地震インド洋津波においても大きな犠牲と多大な被害を出したが、その多様性と複合性という視点においては、東日本大震災での原発事故や都市型津波災害の姿は異例であり、かつて人類が経験していないものであった。その発生から10年が経過し、その実態解明や今後の津波対策の提案につい

ては、多くの研究や取組がなされているが、今だ取組が継続され検討中のものも多い。その一部を著者が関係する活動を中心に紹介させていただくことが本文の目的である。

津波は深海から浅海を経由して沿岸域に達していた。図1に示された津波は、三陸沖合で発生し約20-30分後に三陸沿岸に、1時間後には仙台湾や福島県沿岸に回り込んで到達していることが分かる。過去において、複雑な海岸線形状を持つ三陸沿岸では波高増幅が見られた一方、仙台湾や福島県沿岸では直線状海岸であり、また石巻や東松

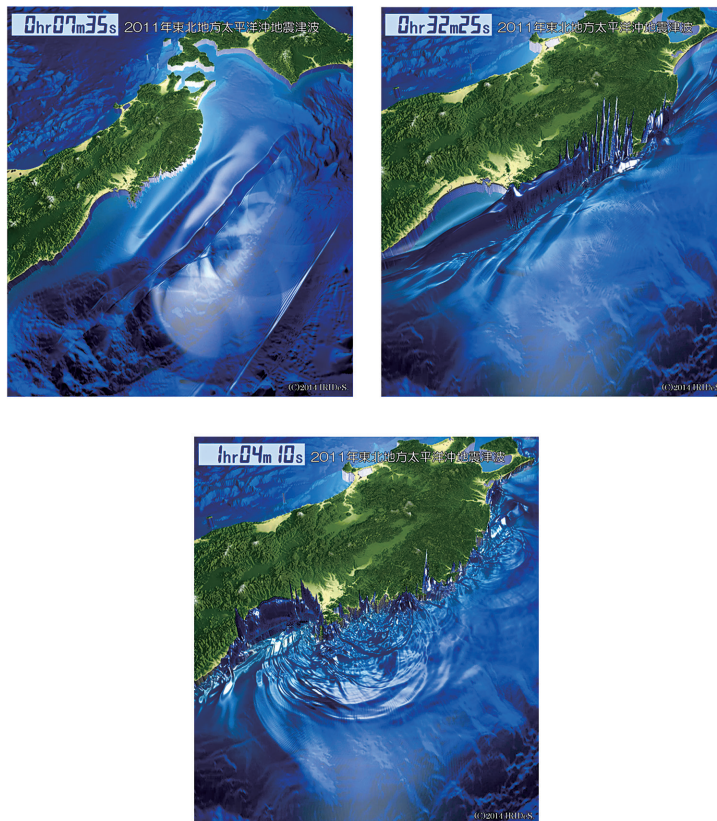


図1 津波の伝播過程の様子

島などは牡鹿半島の背後に位置していたため自然の堤防機能により、従来では大きな津波波高は記録されていなかった。しかし、東日本大震災(2011年東北地方太平洋沖地震)の場合には、津波の発生域が岩手県沖・宮城県沖・福島県沖さらには茨城県沖まで拡大したために、南側から直接に、巨大な津波がこの地域を襲ったことになる。さらに、そこで発生した津波が海面より津波の水位が上昇するとそれが押し波となって陸上または河川を遡上した。浅海域になるにつれ津波の伝播する速度は遅くなるが、一方で流速は増加する。そのために、破壊力が増し被害が増大することになる。特に仙台湾では、波が壁のようになって来襲する波状性段波が観測されて、一気に陸上に遡上していった。砂州や防潮堤を越えて陸上に遡上した津波もあるが、河川や運河に沿って浸入した津波もあり、様々な報告や映像からスピードを変えながら市街地などに来襲していたことが示された¹⁾。やがて、内陸への遡上が終わるとその後、逆に海域へ「戻り流れ」となって逆流した。陸上部での地形勾配が大きいと、重力の斜面分力も加わり戻り流れは加速されて、大きな流速が生じ海岸線な

どで浸食などが見られた。

東日本大震災での津波挙動(ハザード)に関しては、強震動の後に、リアルタイム観測波形や沿岸での津波痕跡データなどがあり、加えて現地調査により津波の浸水・冠水、浸食・堆積による地形変化、などの挙動も広く把握できたと考える。さらに、伴って発生した被害については、人的被害、家屋・建物被害、沿岸構造物・インフラ被害などに加えて、沖合での水産被害(養殖筏など)、船舶などの漂流・破壊、さらには、可燃物の流出と火災、道路・鉄道(車両も含む)など交通網への障害・被害、そして、原子力・火力発電所など施設への影響などが次々と報告され、その中には従来にない規模のものもあった。現在想定される複合的な津波被害のほとんどのパターンが発生したと考えられる。複合的なハザードによる連鎖的な被害は極めて複雑であり、図2に示されたような過程の理解と定量化が必要である。今後も災害は進化し続け、その発生から拡大の過程は連鎖により複雑化し甚大化していくと考えるため、東日本大震災で得られるこのような知見は非常に重要である。

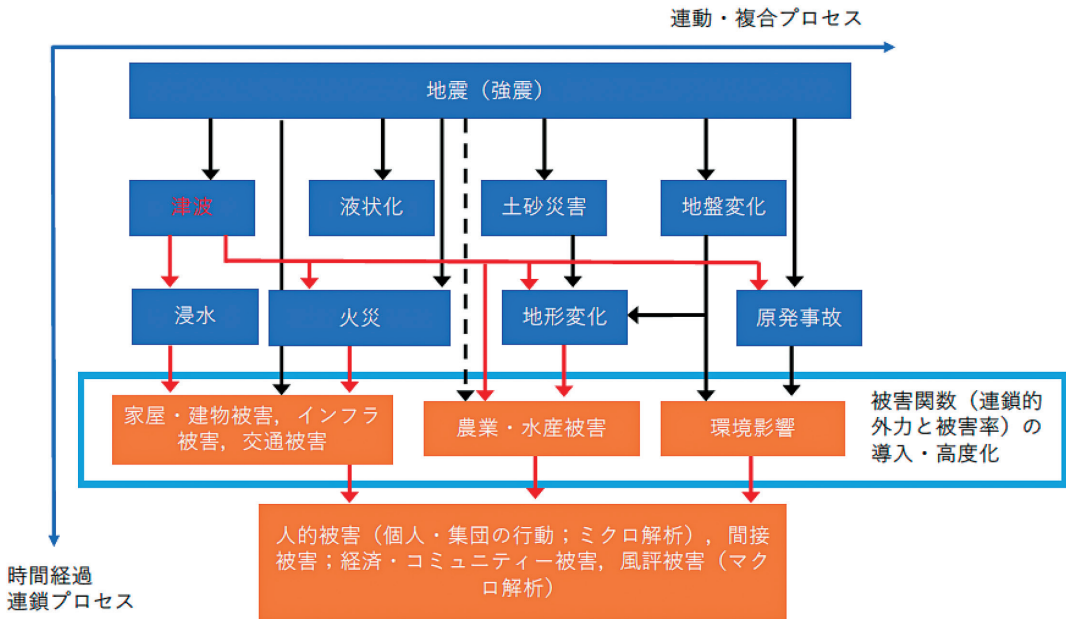


図2 複合災害(連鎖する過程)¹⁾

2. 津波の発生過程

2.1 津波の発生について

この巨大地震の震源は宮城県沖であり、事前に想定されていた地震（宮城県単独と連動）の僅か沖に位置していた。しかし、この地震の断層破壊は3分以上続き、始めは福島県・宮城県・岩手県沿岸を中心とした強震であったが、北は青森、南は茨城・千葉方向に強い揺れが広がった。現在の余震域は東北・関東地方での東日本太平洋沖の広範囲に至っており、この活動も継続され2021年2月13日の深夜に福島県沖でM7.3、3月20日夕方に宮城県沖でM6.9の余震が発生している。後者では津波注意報も発表されていた。

当時の主な断層活動の範囲は、南北約500 km 東西約200 km にわたると推定され、断層のすべり量は最大で30 m を超えたとされる。これによる海底変動が海面の変化をもたらし、巨大な津波が生じた。過去、この日本海溝沿いの地域は、三陸沖、宮城県沖、福島県沖、海溝沿い（沈み込み帯）、など個別地域でそれぞれ固有的な地震発生が発生し評価されていたが、今回、一気に連動し超巨大地震が発生したことになる。

巨大地震による広域で複雑な断層破壊が海底の変位を生み、海面変動を伴って津波が発生していった。観測された地震や津波波形を利用した断層運動の推定²⁾が検討されているが、特徴としては、宮城県・福島県沖での海底変化（断層のすべり量）が大きいこと、しかも、日本海溝沿いの値が大きいことが示唆されている。深い海域で大きな海底変化が生じると、それだけ大きな規模の津波が発生する事になる。実際、各地で津波が観測されているが、図3に示されたように沖合の海域で6 m 程度（釜石、海底津波計）、沿岸で10 m 以上の規模が記録されている。

2.2 逆解析による波源モデルの推定

現在、地震動や測地のデータだけではなく津波波形を利用した断層運動の逆解析が行われており複雑な震源過程が推定されている。当時の多くの研究²⁻⁵⁾が行われているが、特徴としては、(1) 段階的に各セグメント（断層）で破壊が生じたこ

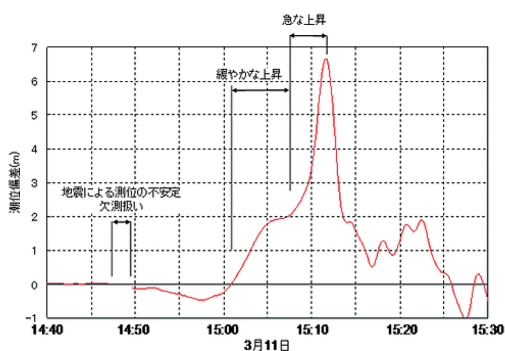


図3 釜石沖海底津波計 (TM2) で観測された津波波形 (東大・東北大による観測)

と、(2) 震源付近で初期の津波が発生しその後海溝沿いに移動していること、(3) 宮城県・福島県沖での海底変化（断層のすべり量）が大きいこと、しかも、(4) 日本海溝沿いの値が大きいことが示唆されている。

さらに、津波痕跡データも含んで津波波源モデル⁶⁾が検討され、地震発生から60秒前後で震源を中心とした宮城県沖、その後の15秒以降では、三陸沖北部などに移動していることが示された。今回の巨大地震が多段階の断層運動を伴って生じており、その結果としての津波も時間差破壊により発生し、動的なプロセスの重要性が示された⁷⁾。図4に示すように、地震発生から約1分後に宮城県沖で主要な断層すべりが生じるとともに岩手県沖の海溝軸に沿って地震発生から5分後までゆっくりとしたすべりが継続する断層モデルが推定された。しかも、岩手県北部沖では、地震動にはない断層すべりが顕著であり、地すべり性津波の可能性も含めて注目されている。

3. 津波警報の課題と今後の予測精度向上

3.1 当時の津波警報の課題

我が国の津波警報システムは1999年に量的警報システムに切り替えられ、短時間（3分程度）に、各地での津波の到達時間や波高を発表できる世界でもトップレベルのシステムである。当時も各地避難に充てられる時間を最大限確保するため、地震データに基づき迅速に発表し、第1報は地震発生後3分で発表（津波波高は、宮城6 m、岩手・

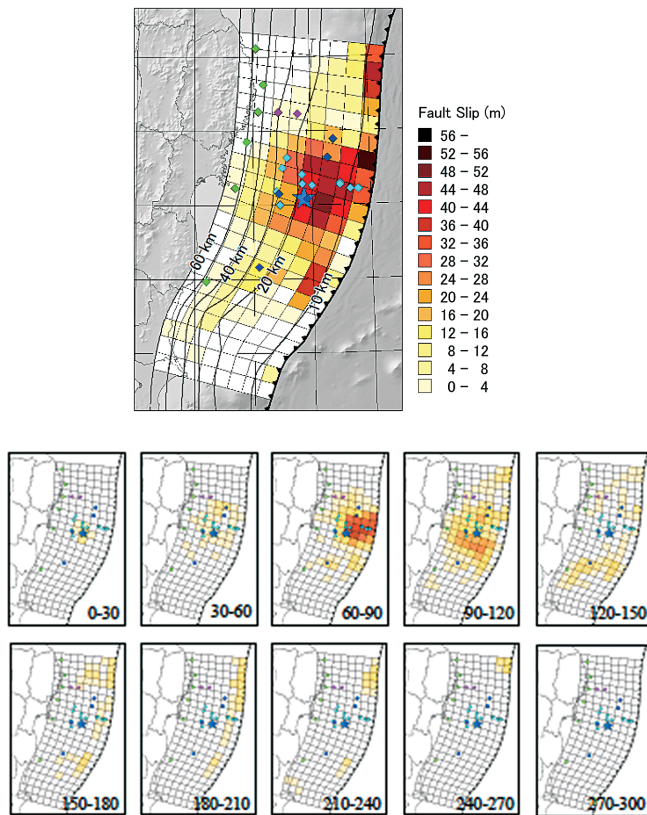


図4 逆解析により推定された津波波源モデル (最終変位量と30秒ごとの時間変位量)⁶⁾

福島3m)した。しかし、津波波高は実際の1/10程度の過少な評価であり、津波警報第1報では、技術的な限界から地震マグニチュードを7.9と過小評価したことが原因であった。その後、潮位計(172箇所,)GPS波浪計(港湾局)(12箇所,)海底水圧計(12箇所)を使って、速やかに津波監視を開始していた。その結果、地震発生後28分GPS波浪計データに基づき警報が更新され、より適切な警報に(最大10m以上との予想)なった。しかしながら、地震発生から28分後と時間を要した。これら当時の津波警報の課題は以下のように気象庁⁸⁾により整理されている：地震発生3分後に発表した津波警報第1報で推定した地震規模が過小評価となり、また、評価が過小である可能性を認識できなかった。また、過小評価の中で岩手県や福島県に発表した「予想される津波の高さ3m」

が避難の遅れに繋がった例があったと考えられる。特に、岩手県沿岸部では高さ5m以上の防潮堤が整備されていたからである。

3.2 リアルタイム観測と予測技術の向上

東日本大震災ではリアルタイム観測の重要性が再認識された。実際に地震等が発生した場合には、沖合観測のデータを活用すれば、沿岸に到達する前に津波を監視できるため、迅速な津波警報・注意報の更新や解除等の判断に有用な情報となる。現在、気象庁は、逆解析手法(tFISH)にも取り組み、リアルタイムで波源の推定精度を向上させるシステムの実用化を検討している。断層モデルを仮定しない手法でもあり、非地震性として地すべりや火山などに起因した津波に対しても適用できると考えられる。これに必要な観測網として、地震後

に防災科学技術研究所は、図5に示されたように地震計と水圧（津波）計が一体となった観測装置を海底ケーブルで接続し、これを日本海溝から千島海溝海域に至る東日本太平洋沖に設置し、リアルタイムに24時間連続で観測データの取得を開始している。観測装置は150カ所に設置し、ケーブル全長は約5,500 kmになる。海溝型地震や直後の津波を直接的に検知し、迅速かつ確実な情報伝達により被害の軽減や避難行動などの防災対策に貢献することが期待される⁹⁾。

さらに、沿岸及び沖合での津波の観測の強化に加えて観測データを活用したリアルタイムの津波予測技術の開発が進められている。最近の研究¹⁰⁾では、事前にスパコンなどを活用して得られる多数シナリオを想定した津波シミュレーションによる人工的な津波等の模擬観測データと予測地点での津波浸水波形の関係をAIに学習させておくことで、大地震発生時には、リアルタイムに得られる実観測データに基づき、AIが予測地点に到達する津波高と規模やその時刻時間の情報を含む津波浸水波形を即座に予測する方法を提案している。学習済みのAIが沖合の津波の観測情報等から、予測地点の津波の浸水波形を直接予測するため、津波波源推定のプロセスを省略できるほか、学習済みのAIによる予測は通常のPCでも十分高速に実行可能なため、現実的な津波防災に向けて実用性が高い成果と言える。

3.3 波源モデルの特性化—将来の予測に向けて

今後、巨大地震の際に津波をどのように推定し事前に評価するのか？特に超大すべり域が常に伴うのか？その場所はどこなのか？などの議論が活発に行われている。将来評価のためには、地震動などの断層モデルを参考にしつつも、プレート間地震による津波の波源域やすべり分布等の設定方法をルール化し、そこでの特性は保ちながらもある程度シンプル化する波源モデルが必要である。これは「特性化」と呼ばれており、東日本大震災における評価の問題点（過去のデータに基づく既往最大を中心にした考え）を解決し、不確実性も考慮しながら幅広く検討しながら確率的評価にも

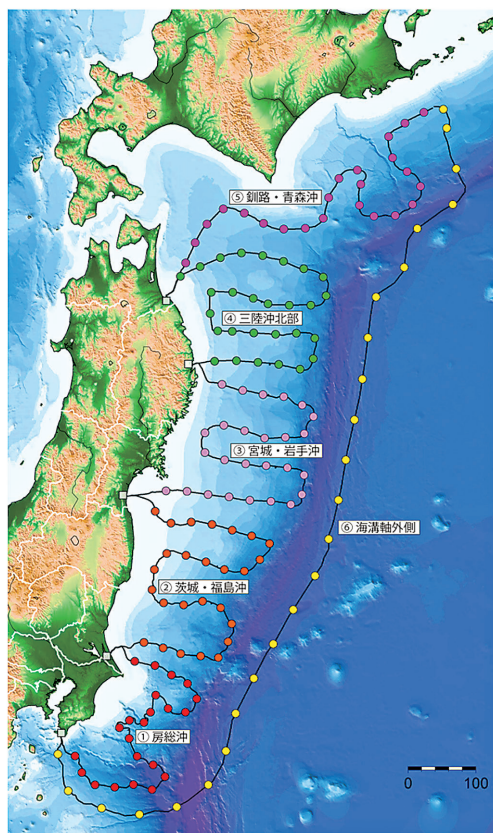


図5 防災科研による日本海溝海底地震津波観測網(S-net)の整備 <https://www.seafloor.bosai.go.jp/S-net/>

応用できる。現在、プレート間地震による津波の特性化波源モデルの構築が図られている^{11,12)}。特性化波源断層モデルの設定では、断層全体の形状や規模を示す巨視的波源断層特性および波源断層の不均質性を示す微視的波源断層特性という2つの特性を考慮して断層パラメータを与えることになる。図6に示したように大すべり・超大すべりの配置（位置）については、プレート構造などを考慮して、可能な範囲で選択することになる。場所などのパラメータ（破壊開始点やライズタイムなど）を変えた複数のケースを仮定すれば、確率的な津波高さの評価が実施可能となる。さらに、津波地震、アウターライズなどのケースも含めて適用範囲を拡げていくことになる。

なお、逆解析（インバージョン手法）により、

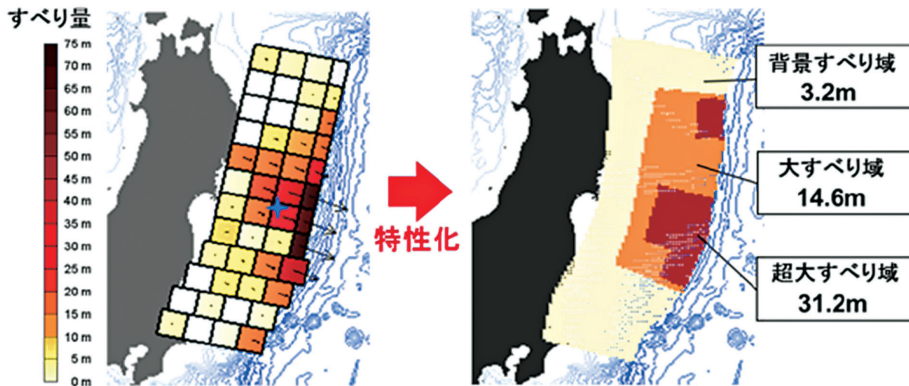


図6 津波波源の特性化について¹⁾

地震動、測地に加えて、津波そのものを活用し断層モデル（または、直接に海面変動）の推定を行う中、本来であればそれぞれのモデルが一致するはずであるが差違が指摘されている。個々の事象の再現であれば大きな課題とはならないと思われるが、一定の断層モデルの下に地震動、地盤変動そして津波などを予測や評価する際には、避けては通れない課題も残っている。

4. 沿岸域での巨大津波の実態 一挙動と被害像

4.1 被害の概要

津波については地域により2つの姿があった。1つはリアス式海岸を有している三陸沿岸で最大遡上が40 mを超えるような規模であり、過去の慶長、明治や昭和三陸沖地震津波とほぼ同じような浸水範囲であった。ここでは、押し波だけでなく引き波の破壊力も甚大になっている。もう1つは、直線状海岸を持つ仙台平野より南側の低平地での津波であり、浸水範囲が広く最大規模としては15 m程度の津波高さが残されている。この津波規模は2011年以前に評価されていた宮城県沖地震津波（連動）の想定を遥かに上回り、防潮堤を越えた津波の浸水範囲も10倍以上になり、広域な範囲で長期間の浸水が見られた。大規模および長期間の浸水、沿岸構造物や建物などの被害、漂流物（瓦礫、船舶、車両、タンクなど）による被害拡大、大規模火災（津波火災）などがあった（写



写真1 宮古市で記録された「黒い津波」の来襲状況（宮古市役所提供）



写真2 船舶および火災による被害（気仙沼市）（著者撮影）

真1, 2, 3参照)。仙台市沿岸部では、伊達政宗の時代から植林されてきた防潮林が整備され、以前から津波等の被害低減の効果が期待されたが、今回の津波の破壊力は大きく、多くの場所で根こそぎにたおされるなど大被害を受けた。

当時の写真や動画で記録された巨大津波の挙動およびその被害は壮絶であった。特に被害の様相は我々の想像を超えて甚大であり複雑であるが、誘因・素因などにより分類ができ、これにより今後の効果的な対策や対応に役立つものとする。津波は海水そのものであるが、その関連した被害像は多様であり、場所によりその様相が異なる。一般に、誘因は災害(被害や影響)を引き起こす自然力(ハザードなどの外力)を示し、素因は地形・地盤条件など地球表面の性質にかかわる自然素因と人口・建物・施設など人間・社会にかかわる社会的素因とに分類される。表1にまとめたように津波の場合に、誘因は浸水・冠水、流れ・波力になり、素因は海底・陸上地形、土地利用形態、防護施設などがある。この表には大震災で報告され



写真3 南三陸町での沿岸での土砂移動(主に浸食)。陸地の多くが消滅し、復旧・復興にも時間を要した(著者撮影)

た代表的な影響・被害などもまとめている。海水の浸水による被害は過去の事例にも見られたが、流れ破壊力が増すことによる漂流物発生と被害や地形変化などは規模が大きい津波ほど顕著になっている。

直接被害は、災害誘因によって直接的にもたらされた被害である。死者・負傷者といった人的被害、家屋倒壊、社会基盤施設被害といった物的被害がこれにあたる。内閣府によれば直接被害(人的被害を除く)の経済被害は約16.9兆円に及ぶ。一方、間接被害とは、直接被害によって社会・組織の持つ機能が失われることによって生じる被害であり、ここでは含まれていない。内閣府は間接被害についての新たな推計は公表していないが、関西社会経済研究所¹³⁾は震災によるGDPの減少額を6兆円と推計している。

4.2 新しい津波被害像

過去に報告が無かった津波被害像としては「黒い津波」がある。この大震災では、写真1にあるような黒い津波の映像が残され、関連した建物被害や健康被害などが報告され、特に、沿岸都市部で顕著に見られた。海底に堆積された泥や砂などが津波により巻き上げられ、泥流となって陸域に流れ込んだためである。黒い津波の場合には、泥の混入による粘性が生まれ波先端の勾配が大きくなることによる波力の増加、さらには、泥水を飲み込んでしまったために気管を閉塞させる、あるいは、乾燥した後の粉塵の混入(吸引)による津波肺などが、連鎖して生じたと考えられる。今後も発生の可能性のある津波災害像であり、対策が求められている。

大震災により被害拡大の要因の1つが火災であ

表1 津波被害の誘因、素因、影響・直接被害例

誘因	素因	影響・被害事例
浸水・冠水	海底・沿岸地形、可燃物、土地利用形態、防護レベル、避難意識	人的被害(主に溺死、凍死、津波肺)、海水植物枯、農業被害、津波火災の発生(電線・バッテリーなどによる発火)、環境・生態破壊
流れ・流速(掃流力)	沿岸地形、土砂・堆積物、漂流物、社会インフラ、土地利用形態	家屋・施設被害、インフラ被害建物・構造物への浸水・冠水、浸食・堆積(地形変化)、船舶・水産被害、環境・生態破壊

る、地震直後から東北・関東地方で深刻な市街地や工業地帯で火災が多数発生した。今回の震災における大規模火災は市街地のみならず沿岸地域およびコンビナート施設周辺においても顕著であった¹⁴⁾。気仙沼市鹿折地区では約11.4 ha が延焼しており、阪神・淡路大震災時における最大の延焼領域（水笠西公園地区、約9.7 ha）を超えた広大な延焼範囲となった。また市街地以外にも津波被災エリアから林野火災に延焼拡大したものが多々あり、地震後の火災の総延焼面積は、東日本大震災が卓越している¹⁵⁾。

5. 津波災害の予測向上に向けて

東日本大震災では、過去に経験のない規模の地震や津波が発生したが、当時の高密度観測データと現地での貴重な調査データが入手可能であり、未曾有のハザードと被害実態はかなり明らかになりつつある。その上で、ハザードからの外力との関係を推定し、被害程度との対応を示す被害関数を推定すれば、今後と同様な状況が生じる場合に対して被害の推算が可能となり、事前にそれぞれに対策を取ることで防災や減災の対策に貢献できることが期待される。現在、そのようなアプローチで内閣府の検討会（モデル検討会と対策検討ワーキング）などで審議され、南海トラフに加えて日本海溝・千島海溝での最大クラスをターゲットに対策が進められている。

通常、図7に示されたような被害は、直接と間接被害に大きく分類される。直接被害は、災害誘因によって直接的にもたらされた被害である。死者・負傷者といった人的被害、家屋倒壊、社会基盤施設被害といった物的被害がこれにあたる。一方、間接被害とは、直接被害によって社会・組織の持つ機能が失われることによって生じる被害であり、今回の大震災でも実態の把握は難しい。

ここで今後の津波被害軽減に向けては、大きく人的被害と経済被害（直接と間接）に分けて提言したい。前者については、被害関数など統計的な推定による正確な推定は難しく、発生時間帯、対象者の避難意識（開始時間）、安全な場所への移動方法と経路等の要因が複雑に存在しており、マ

ルチエージェント方法などのマイクロな手法を広域に適用するような方法が望ましい¹⁶⁾。一方で、後者の経済被害（直接）については、被害関数の高精度化と被害額への変換が重要であると考えられる。この10年間の研究の中で実施された被害関数の研究事例としては、過去のデータに基づいて統計的なデータに基づいて、外力として浸水深や波高に対してどのくらいの死亡率（犠牲者率）または家屋破壊率になるか、などの関係式が提案されている¹⁷⁻¹⁹⁾。特に、図8に示されたような建築構造や年数の違いによる関数の変化を考慮していけば、より正確な推定が可能となる、さらに、海域にも目を向け、船舶、海洋生態（アマモ場）、などの評価も行われている^{20,21)}。今回の震災でより詳細な調査等により実態が分かるようになると、外力としては、流速や流体力が追加されたり²²⁾、漂流物や津波火災などの要素も加わり複雑さが増してしまう状況も報告されている。広域で複合な災害に対しては、簡単ではない。津波来襲前の強震動や液状化の影響も考慮しなければならない。当に、複合型外力作用の中で、連鎖的な影響や被害が生じていたことになる（図2参照）。今後、さらなる解析が進み、このような場合においても、被害予測が可能になるような取組が不可欠でありその成果を期待している。



図7 沿岸域（陸域と海域）での津波関連災害

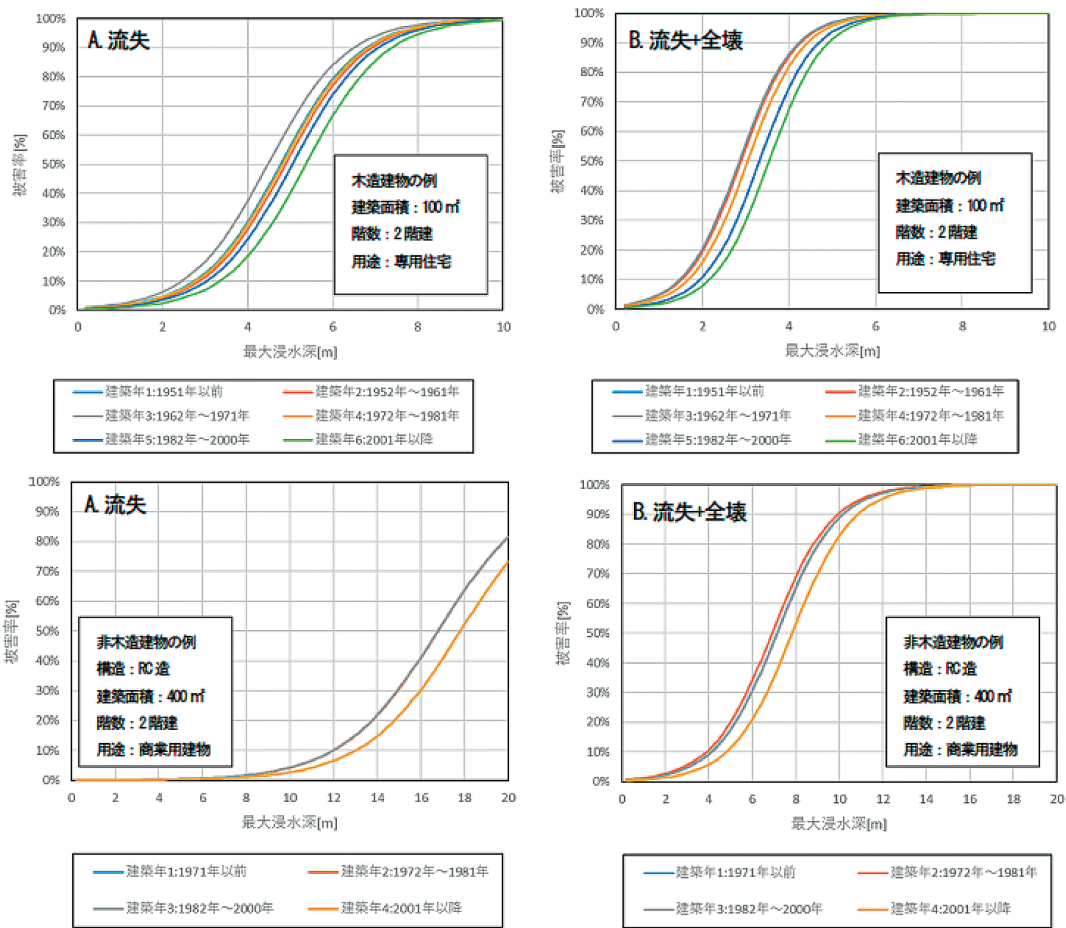


図8 建物年代の違いによる被害関数の変化¹⁹⁾

6. おわりに ー今後の津波防災に向けて

東日本大震災の被害を繰り返さないためには、ハード・ソフト対策に加えてまちづくりなどの総合対策が不可欠である。しかし、その役割の整理や体制の維持には多くの議論があった。そこでは、地震や津波などの(1)発生間隔・頻度および規模や(2)影響(被害)を考慮し、地域、集落ごとの個別の(3)生活条件・地形条件などから、安全レベルを設定し、防災・減災への対策の(4)効果および費用を評価して、地域での減災レベルを合意形成する必要があった。(1)ー(4)における個々の合理的な評価を下に、住民および行政の間で目標(レベル)を作り上げて行くかが、当時の復旧・復興の中での重要な第一歩であった。

中央防災会議(2011)などで合意した考えは以下の通りである。中規模以下の通常の災害に対しては、ハード対策で対応することが原則となる。この場合、社会基盤整備は新設のみでなく、既存の施設の有効活用や強度向上の視点も大切である。一方、巨大災害に対しては、先ず人命被害を最小とすることが災害対策上求められる。そのためには、社会基盤施設のみでなく、ソフト対策やまちづくりとの適切な組み合わせによってカバーする必要がある。つまり、大規模な外力を前提とするものの、影響の分散化(多重防衛)、人命被害の最小化、復旧・復興の迅速性、などを考慮した施設の整備・管理が求められる。

そこで、津波防災に関する2つの安全レベルが

提案された。発生間隔・頻度および規模を考慮して、外力レベルを想定する事が重要である。すべての人命を守ることを前提とし、主に海岸保全施設で対応する津波のレベルと海岸保全施設のみならずまちづくりと避難計画をあわせて対応する津波のレベルの二つを設定する必要がある認められていった。

✓レベル1：海岸線の津波防護レベル（海岸法2条・海岸保全計画・基本方針などに関連）、海岸保全施設の設計で用いる津波の高さのことで、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、

✓レベル2：地域の津波減災レベル（地域防災計画であり、津波対策法（災害対策基本法40条などに関連）

津波レベル1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。対象津波は、貞観津波クラスの巨大津波の発生頻度は500年から1000年に一度と考えられる。

さらに、2011年12月に、「人の命が第一」、「災害に上限はない」という考えのもと、「減災」の視点に立ち、最大クラスの津波を対象に「逃げる」ことを前提として、ハード・ソフト施策を組み合わせた「多重防御」の発想による津波災害に強い地域づくりを推進するため、「津波防災地域づくりに関する法律」（平成23年法律第123号）が成立した。同法に基づく津波防災地域づくりを推進するに当たっては、まず、国土交通大臣が定める基本指針に基づき、都道府県知事が津波防災地域づくりを実施するための基礎となる津波浸水想定（津波があった場合に想定される浸水区域及び水深）を設定する。その設定のために津波浸水シミュレーションを実施するに当たっては、東日本大震災の津波で見られたような海岸堤防、河川堤防等の破壊事例等を考慮し、最大クラスの津波が悪条件下において発生することを前提に算出することが求められている²³⁾。

このような津波に対する総合防災対策（復興の理念でもある）の基本が整理された。大震災直後では、これらの考え方の周知や理解、さらに、防

潮堤などの施設設計に関する合意などで時間を要した。今後は、未災地における事前の復興計画を丁寧に議論することが重要であり、発災直後での混乱時に議論するのではなく、平時に事前の備えとして、関係者と具体的な取組を始めておくことが必要である。南海トラフ地震・津波の影響地域の自治体等では、すでに始まっている地域もある。

参考文献

- 1) 今村文彦 (2020), 逆流する津波－河川津波のメカニズム・脅威と防災－, 成山堂書店.
- 2) 藤井雄士郎・佐竹健治 (2011): 2011, 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源, http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html (2021年5月31日)
- 3) 杉野英治ら (2013), 原子力サイトにおける2011東北地震津波の検証, 日本地震工学論文集, 第13巻, 第2号 (特集号), pp.2-21
- 4) 東北大モデル (2011), vers.1.1, 2011, 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施
- 5) Satake, K., et al. (2013), Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku Earthquake as inferred from tsunami waveform data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.103, pp. 1473-1492
- 6) 根本 信ら (2019), 2011年東北地方太平洋沖震の津波断層モデルの再検討－津波関連観測データをフル活用した推定－, 日本地震工学学会論文集 第19巻, 第2号
- 7) 今村文彦 (2015), 東北地方太平洋沖地震による巨大津波のメカニズムと被害予測, 地震ジャーナル, 地震予知振興会, No.60, 12月, pp.16-23.
- 8) 気象庁 (2011), 気象業務の評価に関する懇談会, 東北地方太平洋沖地震への気象庁の対応について (報告), 平成23年5月31日 <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/hyouka/kondankai/kondankai16/shiryou6.pdf> (2021年5月31日)
- 9) 今村文彦 (2021), 巨大津波の発生・伝播の過程と今後の対応, 地震学会広報誌「なるふる」, Vol.2, pp.4-5
- 10) Makinoshima, F. et al. (2021), Early Forecasting of Tsunami Inundation from Tsunami and Geodetic Observation Data with Convolutional Neural Networks, *Nature Communications*,

- vol.12, Article no.2253
- 11) 杉野英治ら (2014), プレート間地震による津波の特性化波源モデルの提案, 日本地震工学会論文集, 14 (5), 5_1-5_18
 - 12) 地震調査研究推進本部津波評価部会 (2015), 波源断層を特性化した津波の予測手法 (津波 レ シ ピ), https://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan_tsunami-recipe.pdf http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.1_111107.pdf (2021年5月31日)
 - 13) 関西社会経済研究所 (2011) 「東日本大震災による被害のマクロ経済に対する影響」『KISER Report』2011年4月12日
 - 14) 今津雄吾ら (2014), 東日本大震災で発生した津波火災における地形的影響の考察と津波火災危険度評価指標の提案, 自然災害科学, vol.33, No.2, pp.127-144
 - 15) 廣井 悠ら (2012), 東日本大震災における津波火災の調査概要, 地域安全学会論文集, No.18,
 - 16) 牧野嶋文泰ら (2018), 大規模避難シミュレーションによる臨海都市部の津波避難リスク分析と低減方策の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74巻2号 I_409-I_414
 - 17) Suppasri, A. et al. (2016), An analysis of fatality ratios and the factors that affected human fatalities in the 2011 Great East Japan tsunami, *Frontiers in Built Environment, Section Earthquake Engineering*
 - 18) Suppasri A. et al. (2019), Load-resistance analysis: an alternative approach to tsunami damage assessment applied to the 2011 Great East Japan tsunami, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 1807-1822
 - 19) 宮本 龍ら (2020), 建築年代を含めた建物津波被害の実態分析とそれを考慮した津波被害関数, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 76 (2), I_709-I_714
 - 20) Muhari, A. et al. (2015), Assessment of tsunami hazard in port and its impact on marine vessels from tsunami model and observed damage data, *Natural Hazards*, 78 (2), 1309-1328.10.1007/s11069-015-1772-0
 - 21) 木村裕行ら (2020), 東日本大震災におけるアマモ場の被害実態と津波外力との関係, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 76, 2, I_937, I_942
 - 22) Charvet, I. et al. (2015) Fragility estimations for Kesenuma City following the 2011 Great East Japan Tsunami based on maximum flow depths, velocities and debris impact, with evaluation of the ordinal model's predictive accuracy, *Natural hazards*, 79 (3), 2073-2099, 201
 - 23) 国土交通白書, 第1章 震災からの復興と国土交通行政の転換第3節 震災後における国土交通行政の転換, 平成24年 (2012) <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h23/hakusho/h24/html/n1131000.html> (2021年5月31日)

(投稿受理：令和3年6月1日)

要 旨

東日本大震災において発生した巨大津波による被害が生じてから10年が経過する中で、その実態解明が進められ今後の津波対策が議論されている。その概要について本文で紹介したい。まず、津波発生メカニズムについて、地震動や測地のデータだけではなく津波波形を利用し逆解析が行われ、将来の評価のために津波断層モデルの特性化が提案されている。当時、気象庁から津波警報が発表されたがいくつかの課題があり、現在ではこの解決のためにリアルタイム観測と予測技術の向上などの研究が精力的になされている。

当時の写真・動画、調査データで記録された巨大津波の挙動およびその被害は壮絶であった。津波に関連した複合的で連鎖的な被害過程や津波災害の誘因・素因の分類などを紹介し、今後の災害対策に役立てたい。特に、今回では、地形変化、津波火災、「黒い津波」など新しい災害像もあり、その実態を報告する。今後は、このような津波関連災害の予測や評価が重要であり、東日本大震災において得られたデータを活用して、従来方法の課題を克服するような研究が行われている。大震災の直後に、津波対策の2つのレベルや「津波防災まちづくり法」が国としても提案され、災害を繰り返さない取組が精力的に行われている。その際に、事前復興計画にも反映するためにも安全レベルの事前の合意形成が重要となっている。