

津波の大きさと被害

高橋智幸

たかはし ともゆき
関西大学社会安全学部(水災害)

「想定外」と言われる今回の津波災害。なぜ「想定外」となったのか。その直接の原因を解説する。また、どのように津波は来襲し、どのような被害が発生したのかを現地調査結果を踏まえて整理する。そして、これまでの津波防災の問題点を明らかにし、今後の改善点を示す。

「想定外」の原因と被害の概要

2011年3月11日14時46分頃に三陸沖を震源とするマグニチュード(M)9.0の地震が発生した。この地震は日本の観測史上最大であり、世界的にみても1960年チリ地震(M9.5)、1964年アラスカ地震(M9.2)、2004年スマトラ沖地震(M9.1)に次いで4番目に巨大な地震であった。

震源は北緯38度6.2分、東経142度51.6分、深さ24kmに位置し、震源域の長さは約450km、幅は約200km、すべり量は最大で20~30mに達したと考えられる¹。震央(震源の真上の地表上の点)と断層のすべり量分布を図1²に示す。震央は宮城県沖130km付近に位置しているが、大きなすべりは震央より東側の海溝付近で発生している。そして、その南北では岩手県および福島県に向かう方向に変動域が広がっており、南側では茨城県沖までに達している。このような海域での断層運動は海底面を変動させ、さらにはその上に乗って

いる海水を上下に動かす。これが津波の発生であり、この海面変動の分布を津波波源とよぶ。断層がずれた向きは鉛直方向でないため、海面の鉛直方向の変動である津波波源とは厳密に一致しないが、海面の高低の分布は図1に近い形状にあったと考えられる。

このように津波の初期条件は断層運動であるから、信頼性の高い津波被害想定を行うためには断層運動を正確に予測する必要がある。東北地方太平洋沖地震の発生以前、この地域は8個のセグメントに分割されており、それぞれが独立して地震を発生させると想定されていた(ただし、宮城県沖と三陸沖南部海溝寄りのセグメントは連動する可能性があると考えられていた)。したがって、津波の被害予測においても同様の規模の初期条件が想定されており、それにもとづく津波防災が実施されていた。しかし、実際には6個のセグメントが連動して地震を発生させており、これが「想定外」の直接の原因となった。

気象庁は地震発生から3分後に岩手県と宮城県、福島県に大津波警報、それ以外の太平洋沿岸に津波警報や注意報を発表している。そして、時間の経過とともに津波予報は切り替えられていき、約12時間半後には日本海側や瀬戸内海、沖縄地方を含めた日本全域にまで津波警報・注意報は拡大されている。各地に来襲した津波の高さは検潮所などで観測されているが、たとえば宮城県の石巻市鮎川では地震発生から34分後に3.3m以上、岩手県の釜石では35分後に4.1m以上、福島県の相馬では1時間4分後に7.3m以上となって

Magnitude and damage due to the tsunami

Tomoyuki TAKAHASHI

E-mail: tomot@kansai-u.ac.jp

URL: <http://www.hdl.ss.muse.kansai-u.ac.jp/>

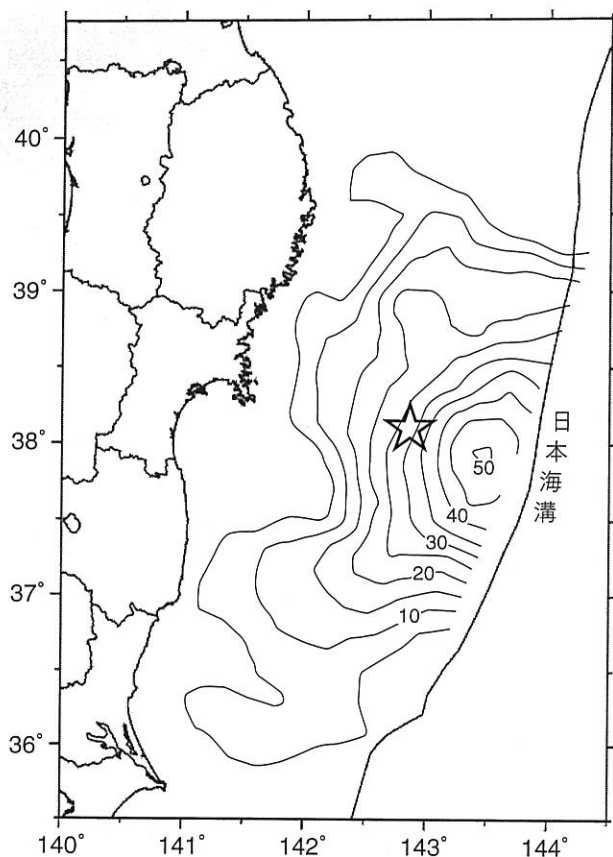


図1—震央、日本海溝、すべり量分布²
地震波の逆解析から求められた震源過程。☆印が震央の位置、等値線がすべり量(m)の大きさを表している。すべりは水平から12度上方へ傾いた方向に発生している。

いる。「以上」とついているのは岩手県や宮城県、福島県の海岸付近では観測装置が振り切れており、最大波を記録できていないためである。すなわち観測できないほどの大津波が沿岸部に来襲しており、甚大な人的・物的被害を引き起こしたのである。8月11日現在で死者は1万5810人、行方不明者は4613人、負傷者は5896人にのぼっており、建物の被害は全壊が11万2975棟、半壊が14万5375棟、一部損壊が53万9899棟となっている。また、岩手県で2345人、宮城県で1万4082人、福島県で7万0858人の市民がまだ避難生活を強いられている³。

遠地津波に匹敵した近地津波

被災地の復興計画や防災計画、また他の地域における想定津波の再検討を行うためには、東北地方太平洋沖地震により引き起こされた津波(以下、

今次津波)の外力条件を定量的に明らかにしておくことが必要である。しかも、津波が高かった地域だけではなく、低かった地域も含めた広域の分布が重要となる。そこで、津波警報・注意報が解除された3月13日から、合同調査グループによる大規模な現地調査が実施された^{4,5}。ただし、岩手県や宮城県、福島県などの激甚被災地では救援・救出活動などの妨げになる恐れがあるため、被災直後の現地調査は自粛されている。合同調査グループには大学や研究機関、民間企業、行政などの64組織、299名が参加しており、所属する学会も土木学会や地震学会、地理学会、堆積学会、地質学会など多岐にわたっている。なお、調査結果は情報共有サイト(<http://www.coastal.jp/tjt/>)で一般に公開されており、本報告でも合同調査グループの公開データを使用した。

合同調査グループによる各地に來襲した今次津波の高さの分布を図2に示す。震源域に近い東北地方で津波は高くなっており、岩手県宮古市では39.7mが測定されている。東北地方から離れるにしたがい低くなる傾向を示すが、それでも北海道で5m強、関東地方で10m近くに達している。さらに遠方の四国地方でも3m、九州地方で1mを超える津波が來襲しており、今次津波の影響範囲がきわめて広域におよんでいることがわかる。

図2には、1960年チリ地震津波⁶も比較のためプロットしてある。1960年5月22日(現地時間)に南米のチリ沖でM9.5の超巨大地震が発生した。この地震により引き起こされた津波は約23時間かけて太平洋を伝播して日本に來襲している。チリ沖では津波のエネルギーは四方八方に広がるが、地球を半周して日本に近づくにつれて逆にエネルギーは集まり、死者142人という被害を発生させた。日本の沿岸から600km以上遠方から來襲する津波を遠地津波というが、太平洋を伝播する途中でその経路は広域に広がっているため、北海道から沖縄までの広い範囲に津波は來襲している。

東北地方太平洋沖地震は三陸沖130kmで発生したため、それに伴う津波も近地津波である。し

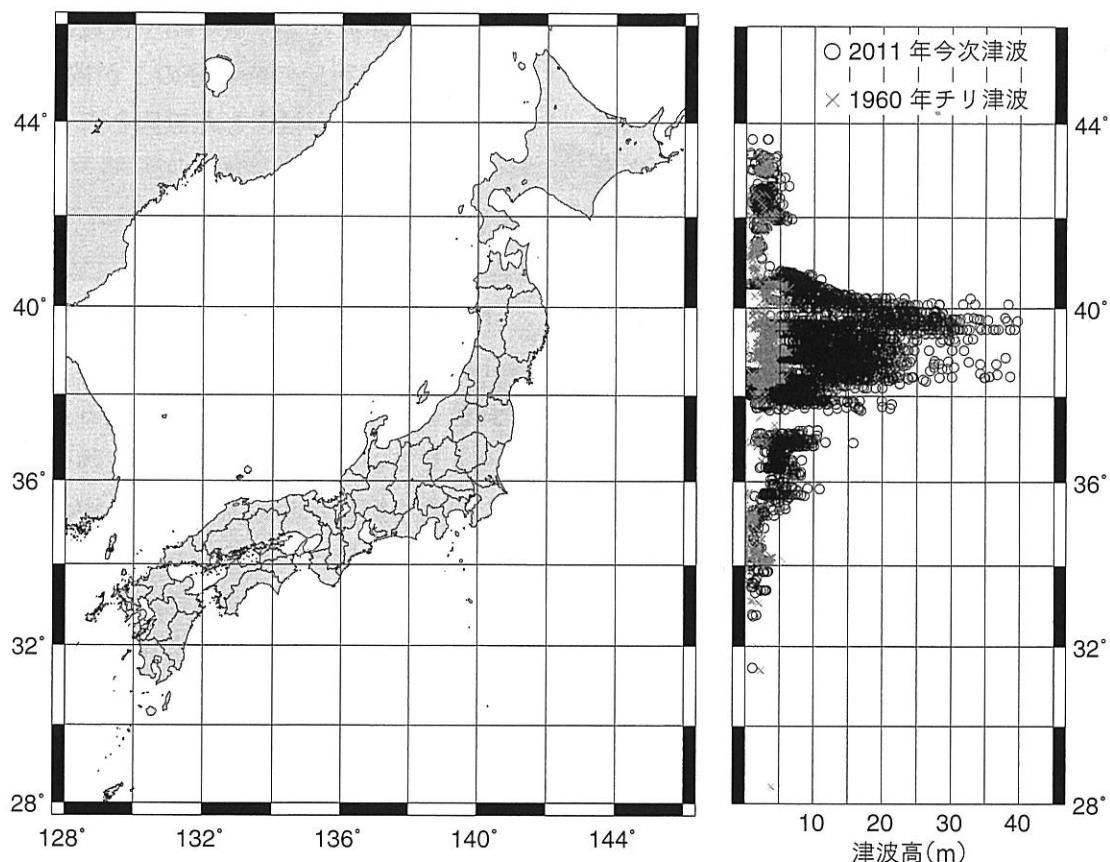


図2—日本全域での津波高の分布

各地に來襲した今次津波^{4,5}と1960年チリ地震津波⁶の高さの分布を比較している。前者は近地津波であるが、遠地津波に匹敵するほど日本全域に來襲している。また、今次津波は特に東北地方で高くなる分布を示している。

かし、その巨大さのため北海道から沖縄まで來襲しており、影響範囲は遠地津波に匹敵している。このことは今次津波がどれだけ巨大なものであったかを示している。

地形の影響を強く受けた津波分布

今次津波の影響範囲は日本全域におよんでいるが、東北地方には特に大きな津波が來襲している。太平洋側のいずれの県でも津波の高さは10 mに達しているが、さらに岩手県、宮城県、福島県の多くの地域では20 mを超えていた。

沿岸部に來襲する津波の高さ分布は一般的に外力条件と地形条件により決まる。外力条件としては沖合での津波波源が重要となるが、図1に示した断層のすべり量分布から推定されるように、最大の海面上昇は宮城県沖で生じている。また、津波は指向性が強く、楕円形で近似した場合の短軸方向により多くのエネルギーが伝播していく。

これは短軸方向のほうが長軸方向より距離が短く、波形勾配(海面の傾斜)が急になるためである。したがって、津波波源のみから推定すると、宮城県沖で最も津波が高くなる分布を示すと考えられる。しかし、実際の分布(図2)を見ると、津波が高かった地域はより北側に位置している。したがって、今次津波の高さの分布は地形条件の影響をより強く受けていることがわかる。

しかし、東北地方の太平洋沿岸では海岸線と日本海溝がほぼ平行に走っており、大局的には外洋での海底地形は比較的単純な構造となっている。よって、外洋よりもむしろ沿岸部の地形が津波高の分布に大きく関与していると考えられる。津波が高かった宮城県北部から岩手県にかけてはリアス式海岸が発達しているが、海岸線が複雑に入り組んでおり、湾奥に行くほど断面が小さくなる。よって、質量保存則からわかるように、湾に侵入してきた津波は奥に行くほど波高が増大する。

これらの地域は震源域が異なる既往津波(後述)

でも同様に高くなっており、浅海域での地形条件が津波の高さに大きく影響していることを示している。すなわち、今後発生が予想される津波の被害推定を正確に行うためには、浅海域の地形条件を精度よく再現することが重要となる。

東北地方の被害

東北地方を襲った巨大津波は甚大な人的・物的被害を引き起こした。死者・行方不明者は岩手県で6677人、宮城県で1万1714人、福島県で1961人となっており、3県のみで全体の99.7%を占めている。また、全壊・半壊した建物は岩手県で2万4606棟、宮城県で14万1435棟、福島県で5万7533棟となっており、全体の86.5%となっている³。

もし、堤防の天端高^{てんぱだか}(堤防の上面の高さ)が同じであれば、より低い津波が来襲した地域のほうが被害は小さくなる。しかし、人的・物的被害の分布をみると、岩手県に比べて津波が低かった宮城県や福島県でも大きな被害が発生している。東北地方における堤防の天端高は、津波の被害を繰り返し受けてきた岩手県と宮城県北部では津波を想定して決められていたが、宮城県南部や福島県においては津波ではなく高潮や高波を基準として決められていた。また、宮城県北部で想定していた津波は1960年チリ地震津波であり、後述する三陸津波よりも低いものであった。実際には堤防の整備費用や海岸環境なども考慮されるため天端高は地域ごとに異なるが、概略としては福島県や宮城県で5m前後、岩手県で10m前後となっていた。

実際の浸水被害は堤防の天端高と来襲した津波の高さの関係により決まる。もちろん津波が堤防より低ければ市街地への浸水は防げるが、たとえ津波が堤防の天端高を超えたとしても、堤体が残っていれば大きな減勢効果が期待できる。しかし、今回は天端高を大きく超えた津波が来襲したため、堤防を越流した津波により裏法被覆^{うらのりひふく}(堤防の陸側の傾斜の表面)の破壊や法尻^{のりじり}(堤防の足元)の侵食が発生し、堤体土が流出して破堤に至っている例が多く見ら

れた。今次津波により岩手県や宮城県、福島県では海岸堤防や護岸の約3分の2が被災しており、人的・物的被害が拡大した原因となった。

遡上高と浸水高

津波の高さは一般的に遡上高と浸水高に分類される。前者は陸を遡上した津波が最も高い地点まで到達し、停止した時の高さである。後者は津波が遡上している途中の高さで、建物の壁などに残った浸水の痕跡から判断する。いずれも津波が発生しなかった場合の海面からの高さとして求められる。図3では、今次津波に関する現地調査結果を遡上高と浸水高に分けて示している。

地震による津波は主に位置エネルギーの状態が発生するが、伝播の途中では位置エネルギーと運動エネルギーの変換を繰り返す。浸水高は位置エネルギーと運動エネルギーの両者が混在した状態であり、遡上高は位置エネルギーのみになった状態である。したがって、一般的には遡上高のほうが浸水高よりも高くなり、図3においても全体的にはそのような傾向を示している。特に岩手県ではその傾向が強い。これは海岸付近が狭く、すぐ背後が山地になっているため、遡上した津波が短距離で駆け上がり、高い遡上高を記録しているためである。

しかし、宮城県では遡上高よりも浸水高のほうが高くなる地域が多くみられる。これは平野部を遡上する津波の特徴である。遡上の過程では地表面の摩擦や建物などの形状抵抗により運動エネルギーが減衰する。したがって、比較的平坦で遡上距離が長い場合は、エネルギー減衰が大きくなり、海岸付近での浸水高よりも遡上高のほうが低くなる場合がある。

岩手県と宮城県での遡上高の調査地点を図4に示すが、岩手県では海岸付近に集中しているのに比べて、宮城県では内陸部まで浸水範囲が広がっていることがわかる。海岸線の延長は岩手県が708km、宮城県が828km、福島県が167kmとリアス式海岸をもつ岩手県と宮城県で長くなって

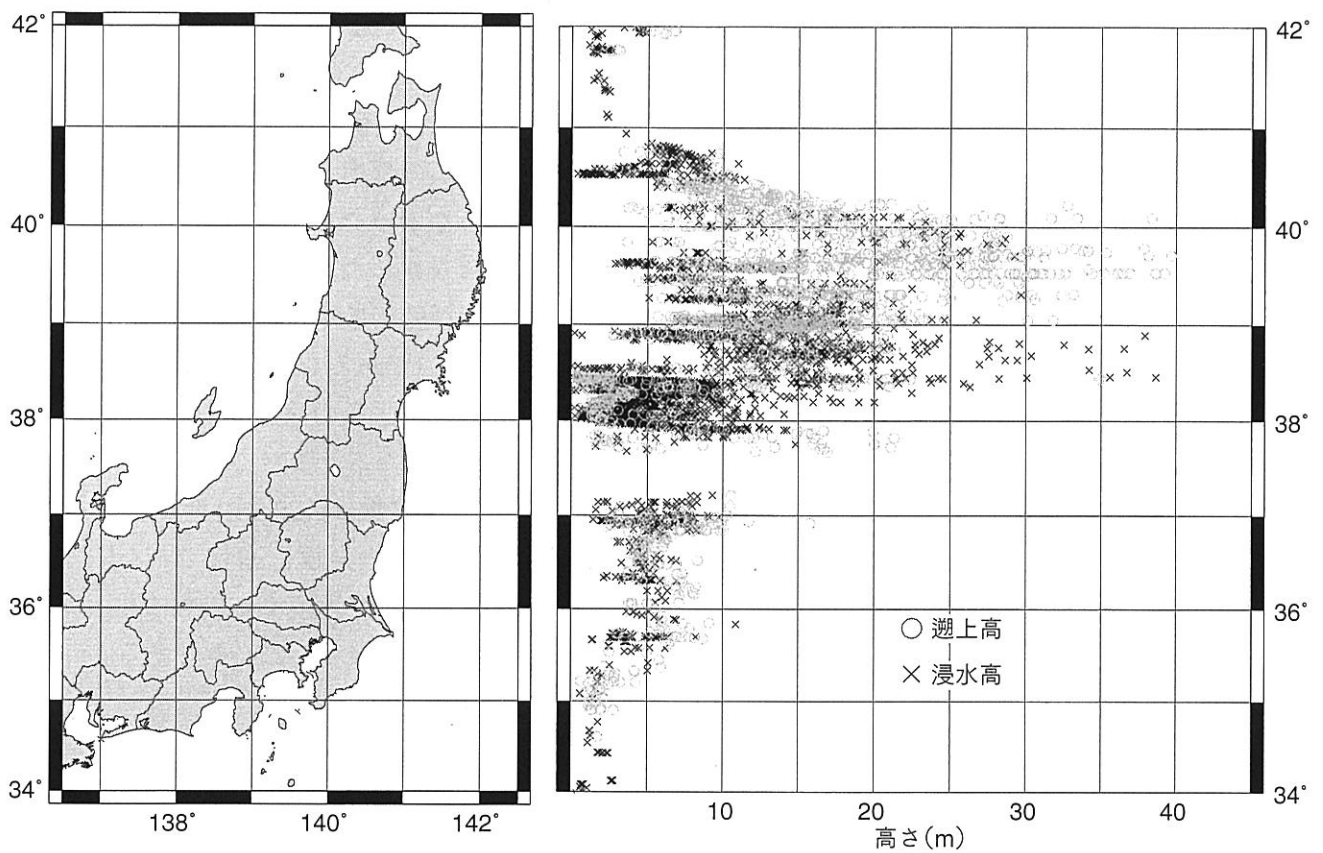


図3—遡上高と浸水高の比較

各地に來襲した今次津波を遡上高と浸水高に分けて示している^{4,5}。全体的には遡上高のほうが浸水高よりも高い傾向を示しているが、平野部では浸水高のほうが高くなる場合もある。

いる⁷。また、少しでも浸水が発生した市町村の総面積(浸水しない範囲も含む)は、岩手県で4946 km²、宮城県で2003 km²、福島県で2456 km²となっており、岩手県が最も広範囲に津波の影響を受けていることがわかる。しかし、航空写真から判読された実際の浸水面積は、岩手県で58 km²、宮城県で327 km²、福島県で112 km²であり⁸、平野部が発達している宮城県や福島県のほうが大きくなっている。すなわち、これらのデータも、平野部においては津波がより内陸部まで浸水して、人的・物的被害を拡大させたことを示している。

既往津波との比較

図5では、今次津波による高さを明治三陸津波および昭和三陸津波⁹と比較している。明治三陸津波は1896年6月15日(旧暦の5月5日)に発生したM8.2~8.5の地震により引き起こされたもので、津波の高さは38.2 mに達し、2万人以上

の死者を出している。地震動が小さかったにもかかわらず大きな津波が発生した津波地震とよばれる種類の地震であるが、これは海溝軸付近の浅部で断層がゆっくり動いたためと考えられ、今回の地震と共通する部分も多い。また、昭和三陸津波は1933年3月3日に発生したM8.1の地震により引き起こされたもので、津波の高さは28.7 mに達し、3000人以上の死者を出している。日本海溝付近で発生しているがプレート境界型の地震ではなく、太平洋プレート内部が破壊したアウターライズ地震とよばれる種類と考えられる。

いずれの三陸津波でも岩手県を中心に大きく、そこから離れるに従い急激に小さくなっており、今次津波に比べると明らかに影響範囲は狭い。高さについても、全体的に今次津波より低い。ただし、岩手県においては、明治三陸津波が今次津波に匹敵している地域が一部にあり、局所的な地形の影響を大きく受けていると考えられる。

東北地方では上記以外にも多くの津波が過去に

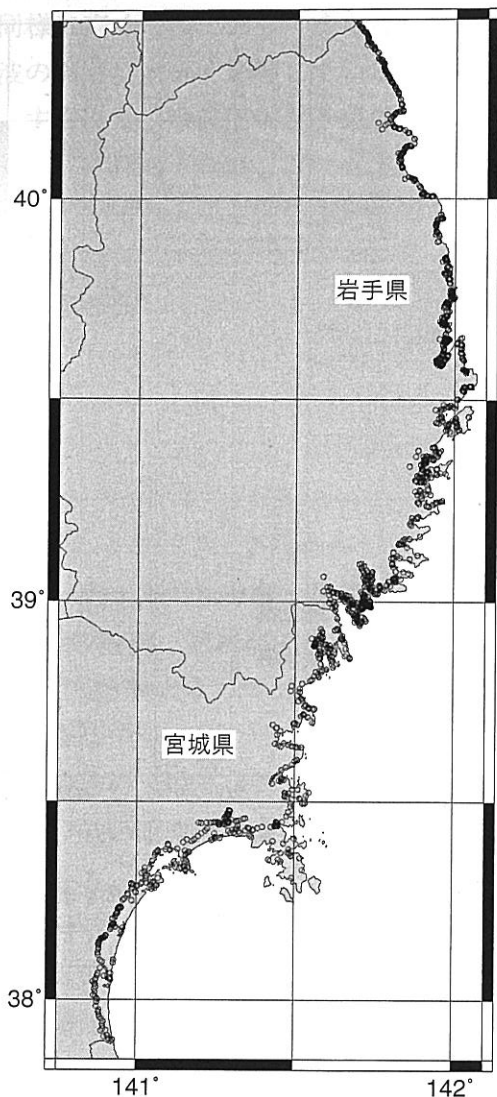


図4—遡上高の調査地点分布

今次津波による遡上高が調査で得られた地点の分布を示している^{4,5}。リアス式海岸が発達している岩手県と宮城県北部では海岸付近に集中しており、すぐ背後の山を駆け上がって止まっている。一方、平野が広がる宮城県南部では内陸部まで浸水している。

来襲しているが、今次津波とよく比較されるのが869年に発生した貞観津波である。この津波は平安時代に編纂された日本三代実録に記録されており、また宮城県や福島県では多くの伝承が残っている。近年では、津波堆積物の調査から、宮城県と福島県で明瞭な津波の痕跡が確認されている。津波堆積物とは、津波の遡上に伴い陸域に運ばれ堆積した砂などの層で、津波が来襲したことの物的証拠となる。貞観津波のものと思われる堆積物が宮城県と岩手県で発見されており、今次津波による堆積状況に近い⁶ため、今次津波は貞観津波の

再来ではないかという説もある。しかし、今次津波は岩手県にも来襲しているが、貞観津波によると思われる明瞭な堆積物は岩手県ではまだ発見されていない。この理由として、(1)貞観津波は岩手県に来襲しなかった、(2)来襲したが津波堆積物は形成されなかった、(3)津波堆積物は形成されているがまだ発見されていない、などが考えられる。もし、(1)であるなら今次津波は貞観津波以上の規模であり、その発生間隔は1000年を大きく超えることになる。また、現在発見されている貞観津波の堆積物はM8.4の地震により説明ができ⁹、今次津波の規模に達していない。このように今次津波をより理解するためにも、貞観津波に関する調査が今後さらに必要である。

これからの津波防災

今次津波の来襲メカニズムや被害が拡大した原因を調べることにより、これまでの津波防災における問題点が明らかになってきた。

もし仮に今次津波が貞観津波の再来であれば、その発生間隔は約1000年となる。そのような頻度で発生する津波に対して、堤防や護岸などの海岸保全施設のみで備えることは技術的に可能であっても、現実的には困難である。大規模のハードウェアをつくるためには相当広い敷地面積が必要であるし、構造物の寿命は約50年程度であるから、20回つくり直して1000年に一度の災害に備えることは財政的にも許されないであろう。土木学会や国土交通省、中央防災会議などでは2段階での津波想定が必要であると議論されている。たとえば、50年から150年程度の間隔で発生する津波については、海岸保全施設により市街地への浸水を防ぎ、市民の生命と財産を守る。しかし、それを超える津波が発生することは十分に考えられる。よって、そのような津波に対しては街づくりとして対応し、市民の生命だけは確実に守ることが必要となる。たとえば、浸水が想定される地域には、住宅を作らず公園などを整備することや海岸付近の道路は盛土して防波堤の効果を付加す

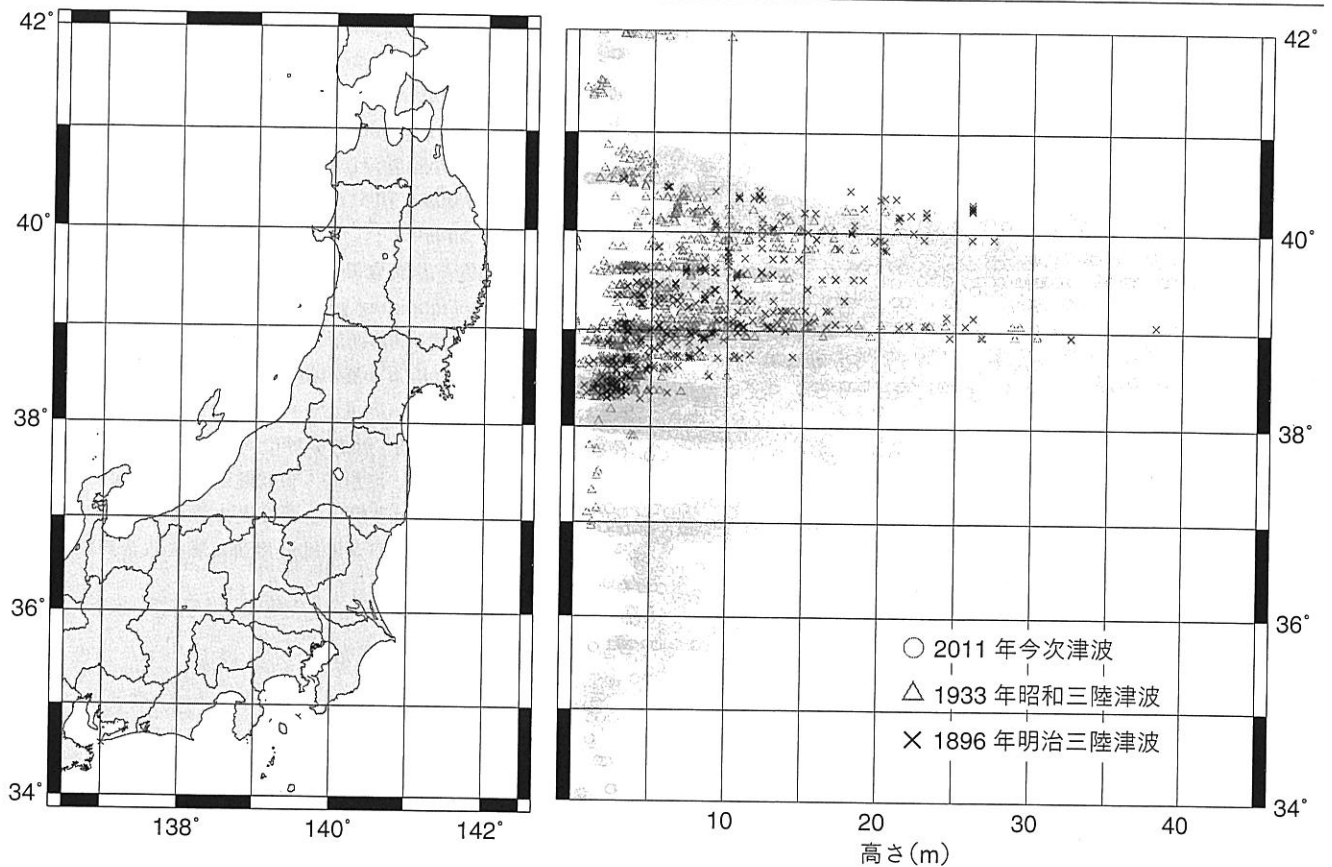


図5—既往津波との比較

各地に來襲した今次津波の高さ^{4,5}を1933年昭和三陸津波および1896年明治三陸津波⁶と比較している。いずれの三陸津波よりも今次津波は高く、また影響範囲が広い。ただし、岩手県の一部では明治三陸津波が今次津波に匹敵している地域もある。

るなど、総合的に街を設計していく。そして、市民が安全に避難できるように実際の避難計画を立て、それを確実に実施できるように適切な防災情報と防災教育を継続的に提供および実践していくことが重要となる。

それと同時に、堤防などは津波が越流したらすぐに全壊するのではなく、強度にある程度の余裕をもたせることが必要である。もちろん設計外力を大きく超える津波が来襲しても壊れない強度を構造物にもたせることは経済的に困難であるし、外力を想定する意味もなくなる。しかし、今回の津波災害では、設計外力を超えた津波に対しても全壊に至らなかった構造物が存在することから、これらのメカニズムを明らかにし、海岸保全施設にねばり強さをもたせることは可能であろう。

津波に強い街づくりをしていく上で防災情報は重要であるが、今次津波では地震の発生直後に発表された津波警報が過小評価となった。2004年インド洋津波でも同様のことが起こっており、現

在の津波警報システムの限界を示している。現在は観測された地震波をもとに津波の大きさを推定しているが、今後は津波自体の観測体制を整備し、津波予報の改善を図っていく必要がある。

津波の発生頻度は低いため、歴史津波に関する調査がさらに重要となる。その有効な手法が津波堆積物であるが、含まれている情報を十分には活用できていない。たとえば、ある地点で津波堆積物が発見されれば、津波が到達していることは間違いはないが、そこが最高遡上地点とは限らない。津波が砂を運ぶためにはある程度の掃流力と乱れ強度が必要であるが、遡上限界付近ではいずれも小さくなるためである。今次津波による砂移動の調査では、遡上距離が2 kmを超える場合ではその7割程度で砂層の形成は止まっている¹⁰。また、長い年月を経てもその砂層が保持されるか、すなわち津波堆積物として保存されるかも重要であり、今次津波による堆積物の形成過程を今後も継続して調査する必要がある。

今次津波により多くの生命と財産が失われてしまった。そして、このような巨大津波は今後も発生するであろう。われわれは今次津波により被害が拡大したメカニズムを詳細に調べ、防災上の問題点を謙虚に反省し、今後の津波防災に反映させていく責任がある。

文献

- 1—気象庁:「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」について, 第 28 報, 1(2011)
- 2—Y. Yagi & Y. Fukahata: “Introduction of uncertainty of Green’s function into waveform inversion for seismic source processes”, *Geophys. J. Int.* (2011, accepted)
- 3—消防庁: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)について, 第 136 報, 4(2011)

4—The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group: “Nationwide Field Survey of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami”, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. B(2011, accepted)

5—東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ:「2011 年東北地方太平洋沖地震津波に関する合同現地調査の報告」, 津波工学研究報告(2011, 印刷中)

6—東北大学・原子力安全基盤機構: 津波痕跡データベース <http://tsunami3.civil.tohoku.ac.jp/>(2011 年 8 月 26 日)

7—国土交通省河川局: 海岸統計(2001)

8—国土地理院: 津波による浸水範囲の面積(概略値)について, 第 5 報, 1(2011)

9—佐竹健治・他:「石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション」, 活断層・古地震研究報告, 8, 71(2008)

10—後藤和久・他: 仙台平野を中心とする津波被害実態と堆積物調査報告, 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集, 57(2011)

特集東北地方太平洋沖地震の科学

噴火誘発

—東北地方太平洋沖地震は火山噴火を誘発するか

藤井敏嗣

ふじい としつぐ NPO 法人 環境防災総合政策研究機構 環境・防災研究所長, 東京大学名誉教授

Toshitsugu FUJII: Earthquake-induced volcanic eruptions: Does the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake induce future volcanic eruptions in Japan?

大地震の発生後, しばらくは余震や誘発地震が続く。地震発生によって震源域周辺で地殻内の応力場が変化するためであるが, 地殻内の応力状態の変化は地震を誘発するだけではない。地殻内に存在するマグマだまりに影響を及ぼし, 火山噴火を誘発することもある。

20 世紀最大級のフィリピン, ピナツボ火山の 1991 年 6 月の噴火は, 前年 1990 年 7 月 16 日のフィリピン地震(M7.8)に誘発されたと考えられている。富士山の宝永噴火(1707 年)も, その 49 日前に起こった東海・東南海・南海の 3 連動地震で

ある宝永地震(M8.6)に誘発されたと考えてよい。

地震が噴火を誘発するメカニズムとしては, 強震動によるマグマだまりでの発泡や圧縮ひずみの増加によるマグマのしぼり出し, 差応力の増加による岩脈貫入の誘発, マグマだまりの圧力減少によるマグマ発泡の促進などがある。このうち, 地震による地殻内応力の変化の程度からして, マグマ発泡の促進による噴火誘発がもっとも有力視されている。

マグマだまり周辺の応力変化によって, マグマだまりの圧力が減少すると, マグマ中に溶け

込んでいた二酸化炭素が気泡として分離する可能性が高い。二酸化炭素は水と違ってマグマ中の溶解度が低いので, わずかな減圧によっても過飽和となり発泡が生じやすいのである。このような発泡が起これば, マグマの密度は低下し, マグマだまりで密度的に中立状態にあったマグマが浮力を獲得し, 上昇を開始する。上昇すると減圧が生じるので発泡が促進され, さらに浮力を得るという正のフィードバックがかかり, 噴火にいたると考えられる。マグマの発泡がきっかけとなって上昇を始めるものの, 一般にマグマ中の二酸