2011年東北地方太平洋沖地震津波による 茨城県・千葉県沿岸域における被害

Coastal Damages in Ibaraki and Chiba Prefectures due to 2011 Tohoku Pacific Ocean Tsunami

下園武範¹・高川智博²・田島芳満³・岡安章夫⁴・佐藤慎司⁵・劉 海江³

Takenori SHIMOZONO, Tomohiro TAKAGAWA, Yoshimitsu TAJIMA, Akio OKAYASU
Shinji SATO and Haijiang LIU

A post-tsunami survey was conducted to clarify impacts of the 2011 Tohoku Pacific Ocean tsunami on sandy coasts of Chiba and Ibaraki prefectures. The measured tsunami height varies from 4 to 8 m above the mean sea level at respective sites and shows a general tendency to slightly decrease southward. Analysis of tide data from nearby stations reveals that tsunami waves of same amplitude repeatedly attacked the coasts for several hours. A large portion of the coasts was protected from the tsunami by seawalls and/or high vegetated dunes while some areas without dunes or around river mouths were severely damaged by tsunami floods. Detailed damage analysis was carried out for some representative locations on the basis of high-resolution topography data.

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震は、我が国の観測史上最大のM9.0を記録した。その震源域は岩手県沖から茨城県沖までの南北500km、東西200kmの広範囲に及ぶと推定され、地震波の解析からは3つの異なる断層破壊（宮城県沖、宮城県沖合、茨城県北部沖）が連続して起きたことが示されている（東大地震研究所, 2011）。この本震および直後に起きたM7.0を超える余震に伴って大規模な津波が発生し、東北地方および関東地方太平洋沿岸部に甚大な被害をもたらした。

本研究では、茨城県および千葉県の砂浜海岸を対象として津波痕跡調査を実施し、これらの海岸に到達した津波高さの分布を調べた。また、調査結果および関連資料に基づいて、当該沿岸地域の浸水被害状況と被災メカニズムの分析を行った。

2. 来襲した津波について

(1) 調査概要

津波痕跡調査は、九十九里海岸（千葉県、太東～飯岡）および鹿島灘海岸（茨城県、波崎～大洗）の二つ砂浜海岸を対象として行った。図-1 (a) には対象地域の標高および周辺海域の水深、図-1 (b) には対象地域の河川流路を示している。二つの砂浜海岸は地形的に海岸砂丘を有

する点で共通するが、鹿島灘海岸には流入河川がほとんどないのに対し、九十九里海岸では小規模河川の河口部が多く、海岸砂丘陸側に低湿地が広がっている地域がある。また、海底地形については、九十九里海岸の方が鹿島灘海岸よりも水深20m以浅の浅海域が広く比較的遠浅な地形となっている。

現地調査は2011年3月15日、18日、19日に、対象海岸を南北に分けて二つのチームにより実施した。茨城県神栖市より北側ではVRS方式のRTK-GPS測量により、南側ではオートレベルにより痕跡高の計測を行った。後にオートレベルによる計測値は、計測時刻の潮位を差し引いて平均海面上（T.P.）の高さに補正することで、RTK-GPSによる結果と基準を合わせた。図-1 (b) に全計測点（計67点）を、遡上高・浸水高の計測別に示した。

(2) 津波高さの空間分布

図-1 (c) は計測された津波浸水高および遡上高を緯度方向にプロットしたものである。津波高さは津波到達時の潮位を基準に示すことが一般的であるが、後述の通り今回の津波は継続時間が長く、各所における最高津波高さが何波目の津波によるものか判然としないため、結果は平均海面（T.P.）上の値で示している。

対象地域の津波痕跡高さは概ね4～8mの間に分布しており、全体としてはより震源に近い北から南に向かって小さくなる傾向が認められる。津波痕跡高さが特に大きかったのは、鉾田市北部の海岸と銚子半島を挟んだ南北の海岸であり、場所によっては8mを越える遡上高さが計測されている。また、弓状の海岸線を有する九十九里海岸および鹿島灘海岸では、それぞれ中心部で高さが低くなる傾向が見られる。こうした全体的傾向から逸脱し

1 正会員	博(工)	東京海洋大学助教 海洋科学部
2 正会員	博(理)	東京大学大学院助教 工学系研究科
3 正会員	Ph.D	東京大学大学院准教授 工学系研究科
4 正会員	工博	東京海洋大学教授 海洋科学部
5 フェロー	工博	東京大学大学院教授 工学系研究科

図-1 計測対象地域の陸域・海域地形，計測点の位置および計測結果

た高さの分布は局所地形による効果の影響が大きいと考えられるが，今回の津波は波源が複数にわたり，各津波が重合するなど複雑な様相を呈していることから，図に示された結果のみから原因を求めることは難しい。

(3) 津波の時間変動特性

これらの海岸に到達した津波の時間特性を調べるため，近接する検潮所で得られた潮位記録を調べた。図-2には大洗，銚子および勝浦の検潮所で得られた検潮データに基づく津波波形と，予測天文潮位を示している。大洗と銚子の結果については気象庁速報資料から読み取り，勝浦の結果については国土地理院勝浦検潮所の検潮記録から予測天文潮位を差し引いて作成した。なお，横軸は地震発生時刻からの経過時間を表している。

大洗と銚子の津波波形は，一定の時間差を考慮すればよく一致しており，個々の波を対応づけることができる。したがって，両地点間に広がる鹿島灘海岸にはほぼ同波形の津波が到達したものと推定できるが，沿岸捕捉波の挙動は複雑であり，数値計算などでの確認が必要と考えられる。両地点とも，津波が地震発生後8時間程度経過するまで減衰することなく，同規模の波が複数回にわたって来襲していることが分かる。一方，太東岬より南の勝浦では第一波目が顕著に大きく，その後は比較的周期の短い変動が続いている。さらに南の気象庁布良検潮所においても勝浦と同様の波形が得られており，銚子～勝浦間で到達する津波波形に質的变化が起きていることを示している。これは勝浦沖で陸棚が急激に狭くなるため，沿岸捕捉波の挙動が変化することが原因の一つと推測される。

図-2 検潮データによる津波波形（実線）と予測潮位（破線）

天文潮位との関係では，地震発生時は各地点ともほぼ干潮時刻に相当し，大洗および銚子では次の満潮時刻を過ぎるまで大きな津波が繰り返し到達している。実質的な津波高さは，ゼロアップクロス法で定義した第3波目が最大となるが，天文潮位を合わせると満潮時刻付近に到達する波も同様に大きい。したがって，図-1に示した痕跡高がどの波によるものか確定することは難しい。

3. 九十九里海岸の浸水被害状況

九十九里海岸に来襲した津波の痕跡高さは，北端の旭市飯岡海岸では6～8mであったが，それ以外の地域では4～6mであった。千葉県では九十九里海岸に対して元禄地震津波（1703）による被害想定を行っていたが，現況の海岸堤防は高波・高潮を計画外力として設置されたものであり，それらの天端高は一部地域を除いて4.0mであ

図-3 九十九里海岸における浸水範囲概況と標高5m以上の土地範囲

った(千葉東沿岸海岸保全基本計画, 2003)。この天端高は、今回の津波に対して十分とは言えないが、九十九里海岸では旭市を除く広範囲に後浜砂丘が形成されている。また、保安林の海側には護岸や土堤が設置されている箇所もあり、砂丘や土堤の高さが十分にある大部分の海岸では、津波による後背地の浸水被害は軽微であった。

図-3には、九十九里海岸における浸水範囲概況と標高5.0m以上の土地範囲を示している。薄色で示した浸水範囲は、国土地理院(2011)が震災直後に撮影した航空写真を基に求めたものである。また、標高5m以上の部分は、国土交通省により整備された2mメッシュのLPデータ(地震前に測量)を基に抽出した。上述の通り、海岸に沿って5m以上の砂丘の存在が確認できるが、特に中小河川の河口部で砂丘が途切れている様子が読み取れる。比較的大規模な浸水もまた河口部に見られることから、浸水被害の大半は河道による砂丘開口部から津波が後背地に侵入したものであることが分かる。

以下では、浸水面積が最大となった木戸川河口周辺部、同じく河口に位置しながら浸水面積の小さかった新堀川河口部、そして人的・物的損害が最大であった旭市の飯岡海岸周辺の3地域を代表例として、被害状況や要因を詳述する。

図-4 木戸川河口周辺部の地形と調査結果 (I: 浸水深, R: 遡上高)

(1) 木戸川河口周辺

山武市の木戸川河口周辺の浸水被害は、河口から津波が侵入した典型的な例の一つである。図-4には、木戸川河口周辺部の地形と痕跡調査結果を示している。木戸川河口部は沼地が点在する低湿地帯であり、河道と沼地を分離する形で河川堤防が築かれている。この後背低地は5mを越える砂丘によって浜から隔てられているが、河道によってほぼ直角に砂丘が分断されていることが分かる。

河道から侵入した津波は、河川堤防を破壊しながら両側に広がる低地に氾濫するとともに(写真-1)、河川堤防を越流する形で、海岸に平行に走る道路に沿って氾濫し、道路沿いの民家等を中心に床上浸水被害をもたらした。河口部に到達した津波の高さは海岸での計測結果から5-6mと推定される。したがって、河道以外にも砂丘が津波高さより低いところが見られ、そのような個所からも津波は砂丘を越流する形で後背地に侵入したものと考えられる。

(2) 新堀川河口周辺

匝瑳市の新堀川河口部では、河口に水門が設置されているため、浸水被害が小さく抑えられた。図-5には新堀川河口周辺部の地形と痕跡調査結果を示している。河口部の水門は、内水氾濫を防ぐ目的で設置された排水機場の一部である(写真-2)。河口部に来襲した津波の高さは海岸部での痕跡から5-6mであり、木戸川の場合とほぼ同

写真-1 木戸川河口部で破堤した河川堤防(右岸、緯度: 35.5775N, 経度: 140.4904E, 3月18日撮影)

図-5 新堀川河口周辺部の地形と調査結果 (I: 浸水高, R: 遡上高)

写真-2 新堀川排水機場の水門（匝瑳市，右岸，緯度：35.6445N，経度：140.5811E，3月19日撮影）

規模であった。水門の天端は、最大津波痕跡高よりも1m程度低かったため津波はゲートを越流したが、河道周辺の浸水深は小さく、近隣家屋の被害の多くは床下浸水にとどまった。木戸川に比べて河幅が狭く、堤内地の標高も高いため単純な比較はできないが、河口の水門が海水の流入を抑制し、一定の防護効果を発揮したことは間違いない。この事例は、今後の九十九里海岸における河口部の津波対策を行うにあたって、一つの方向性を示していると言える。

(3) 旭市飯岡海岸周辺

九十九里海岸で、人的・物的被害が最も甚大となったのは北端の旭市海岸部であった。図-6には、旭市飯岡海岸の地形と痕跡調査結果を示している。図中左側に位置する浜幅の広い飯岡海岸では、他の地域のように砂丘や保安林がなく、海と市街地を隔てるのは天端高4.5mの海岸堤防のみであった。調査結果からこの地域に襲った津波の高さは、九十九里海岸でも最も大きい6～7m程度であったと推定される。したがって、浜を遡上した津波は海岸堤防を乗り越えて市街地へと浸入・氾濫した結果、海岸道路に面した市街地では家屋流出などの甚大な被害が発生したものと考えられる。同じ旭市域でも、図中右側のように砂丘あるいは土堤の高さが十分にある場所では被害は軽微であり、これらの事例からも砂丘や土堤の高い防護効果を改めて確認することができる（写真-3）

図-6 飯岡海岸周辺部の地形と調査結果 (I: 浸水高 R: 遡上高)

写真-3 海岸堤防と砂丘による二重の防護（旭市中谷里海岸，緯度：35.6834N，経度：140.6447E，3月18日撮影）

4. 鹿島灘海岸の浸水被害状況

鹿島灘海岸に襲った津波の痕跡高さは、計測点の北端である那珂川河口部から南の銚子まで、一部の地域を除き、浸水高は5～6m程度、遡上高は5～8m程度とほぼ一定であった。しかし、浸水被害に関しては、地形や海岸防護設備の設置状況により、地域ごとにその特性が異なる。

(1) 波崎海岸

波崎海岸では、高さT.P. 8m程度の後浜砂丘が広く分布するのに対し、津波の遡上高は5～8m程度であり、一部の区間では後浜頂部を津波が乗り越えていたが、大規模な浸水には至っていない。一方、港湾施設では、波崎漁港で物揚げ場地盤の液状化と沈下による被害が大きく、鹿島港後背地では津波遡上高が5mに達し、コンテナや自動車の漂流が見られた。

(2) 鹿島港～大洗港

鹿島港～大洗港の区間はヘッドランドが整備された海岸である。この区間では標高30m程度の台地が海岸のすぐ近くまで分布しており、台地上の家屋には、地震動による被害はあったものの、津波による浸水被害は及ばなかった。一方で台地海側の低地に建てられた家屋には局所的な浸水被害がみられた。波崎海岸に比べ、こちらの区間は後浜の標高が低くなり、天端高さ5m程度の海岸護岸が設置されている。この地域の津波痕跡の標高は4

～6m程度であり、護岸が低くなっている区間などでは浸水被害が生じていた。第1波と第2波では浸水しなかったが、第3波で家屋の破壊と浸水が生じたという証言も得られた。

護岸の天端高と津波痕跡の標高がほぼ同じ地域では、護岸が浸水被害の低減に大きな役割を果たしたことが、建物の被害状況から推察された。海岸堤防自体も沈下、吸出し、ひび割れなどの被害を受けていたが、周辺道路の地割れなどの状況からみて、津波だけではなく地震動による破壊も多かったものと思われる。また、ヘッドランドの中には先端部の北東方向の一部が破壊されているのが見られた。ブロックの破断面が新しく、破壊された方が津波の来襲方向と一致することから、今回の津波による破壊と思われる。

ヘッドランドの北側は津波来襲の上手側にあたり、下手側に比べて遡上高がわずかながら高くなるなどの影響がみられたものの、浸水被害に対する明瞭な差異は認められなかった。また、銚田海岸から北部については北に行くほど徐々に遡上高が高くなる傾向があり、大洗の南では7～8mであった。

(3) 大洗港周辺

大洗港南部には浜幅が広い砂浜が分布しており、南側の海岸から港の内側に向かって北向きに徐々に津波の遡上高が減少する傾向が認められ、港内の痕跡高は4m程度であった(図-7)。これは、北側の突出した地形や港の防波堤による遮蔽効果によるものと考えられる。また、図-7に示した港の南のI22やI23地点付近では、傾倒した草など北向きの流れを示す流跡痕が多くみられた。これらが示す流れの方向は津波の来襲方向と逆の傾向を示し、浸水高の大きな港外から浸水高の小さい港内への流れが発生していたものと推察される。大洗港の港内部はこのように周辺に比べて浸水高が4m程度と低かったものの、低平な地形により港から500mほど奥まで浸水し、建物に大きな浸水被害が生じていた。大洗では、千葉県旭市飯岡地区と同様に、浜幅の広い砂浜が形成されている。そのため、一部の区域では海岸堤防の天端が低く、これらの区間で浸水被害が著しかった。

旭や大洗での事例は、通常の波浪に対する堤防天端高の決定法を津波に対して再検討する必要があることを示

す事例として貴重である。また、大洗港沖防波堤の遮蔽域南側から北側の氾濫域に向けて明確な流跡が見られたことから、侵食が進み護岸が整備された領域から、砂浜が発達した堆積域へと津波氾濫が集中する危険についても考慮する必要があると考えられる。

(4) 大洗～ひたちなか港南部

大洗からひたちなか港南部にかけては、一部を除き津波の痕跡高が5～7m程度であり、漁港背後の低地へ複数の漁船の打ち上げなど、甚大な被害が見られた。また那珂湊漁港や平磯港では浸水高が2～3m程度であり、概ね5～8mの浸水高を示す鹿島灘海岸全体の傾向から見て、局所的に浸水高が低くなっていたことが明らかになった。この原因については、いわき市から銚子に至る弓型の大地形や海岸線近傍の複雑な小地形の影響が考えられるが、波源域の地盤変動の不均一性の可能性もあり、今後詳細な検討が必要である。

5. まとめ

本研究の主要な結論は以下の通りである。

- (1) 九十九里海岸・鹿島灘海岸の沿岸の広い範囲で津波痕跡を確認した。痕跡高の沿岸分布は、北に行くほど高くなる傾向があり、波崎海岸と大竹海岸付近で極大となった。
- (2) 調査地の多くの区間では、高潮・高波を条件として設計された海岸堤防・護岸や土堤を含む砂丘後浜の高さが来襲した津波の高さと同程度であり、これらの施設や自然地形が津波の越流と浸水を軽減したものと推察された。
- (3) 河口などから侵入した津波は、背後の低地に甚大な浸水被害をもたらした。水門が設置されている河川では、ゲートの天端高が津波より低い場合でも浸水範囲が狭く浸水深も小さかった。
- (4) 浜幅の広い砂浜が形成されている地域では、海岸護岸などの天端高が低く設定されていたため、浸水被害が甚大となった。

痕跡高の沿岸分布と波源域、沿岸地形との関係を考察すること、河口部や浜幅の広い砂浜の津波対策を検討すること、などが今後の課題である。

参 考 文 献

- 気象庁：平成23年東北地方太平洋沖地震について（第14報）
 国土交通省河川局：海岸の3D電子地図
 国土地理院：浸水範囲概況図（オンライン），<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html>，参照2011-05-15。
 東京大学地震研究所：地震動分布から直接見る震源断層の破壊過程（オンライン），http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/#gmsource，参照2011-05-15。
 千葉県：千葉県沿岸海岸保全基本計画現況編（オンライン），<http://www.pref.chiba.lg.jp/kasei/keikaku/kendoseibi/higashimokuji/genkyou.html>，参照2011-05-15。

図-7 大洗港周辺の地形と調査結果（I：浸水高，R：遡上高）