

## 地学の豆知識第 3 回 ～津波～

行竹洋平 (神奈川県温泉地学研究所)

### はじめに

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分、三陸沖を震源として国内観測史上最大のマグニチュード 9.0 の地震、東北地方太平洋沖地震が発生しました。この地震は、東日本沖で沈み込む太平洋プレートと本州弧側（陸側）のプレートとの境界で起こったプレート境界型の地震で、地震によって破壊された断層の領域（震源域）は三陸沖から茨城県沖まで長さ約 450km にもおよびました。

この地震により東日本の太平洋沿岸地域を中心に甚大な被害が発生し、2011 年 12 月 27 日時点での内閣府発表資料によると、15,844 名の方が亡くなられ、3,468 名方が未だ行方不明となっています。また、警察庁の調べによると、亡くなられた方の 9 割が溺死によるものでし

た。これは、地震の直後に、太平洋沿岸を中心に襲った巨大な津波によるものです。

今回は、東北地方太平洋沖地震による甚大な被害の原因となった津波について焦点を当て、その発生メカニズム、どうして津波の破壊力は大きいのか、神奈川県は過去にどのような津波被害にあったのかなどについて説明します。

### 津波の発生原因

津波が発生する原因は、海底（あるいは海面）に急激な上下変動が生じることです。海底に急激な上下変動を引き起こす原因の一つが、海域で発生する巨大地震です。その発生メカニズムを図 1 の模式図を使って説明します。東北地方太平洋沖の日本海溝では、太平洋プレート（海側

のプレート）が陸側のプレートの下に年間約 8 cm の速さで沈み込んでいます。図 1 (a) のようにプレート境界で巨大地震が発生する場所では、海側のプレートと陸側のプレートとの間が引っかかっている（固着している）と考えられています。固着している領域では沈み込む海側のプレートにつきあわされて、陸側のプレートも一緒に引き込まれ、その結果プレートの境界にどんどん歪が蓄積されていきます。この状態が、数百年から数千年間続きます。やがて、プレート境界が耐えきれなくなると、それまで蓄積されていた歪が一気に解放されます。海側のプレートに引きずり込まれていた陸側のプレートが元に戻り、プレートの境界面で巨大な地震が発生します（図 1(b)）。同時に、海底に急激な地殻

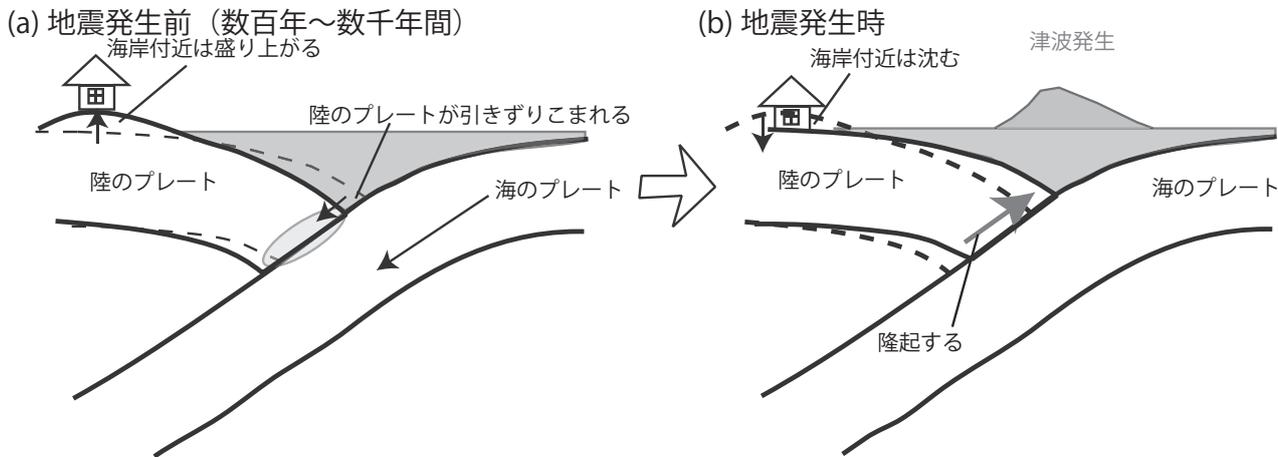


図 1 プレート境界型地震による津波の発生メカニズム。(a) 巨大地震が発生する前、数百年から数千年間の間のプレートの変形様式。(b) 地震発生時のプレートの急激な変動。

変動が生じるため津波が発生します。

津波が発生する瞬間のメカニズムについて図2を用いて詳細に説明します。プレートの境界で巨大な地震が発生すると断層の破壊は図2のように海底付近まで達します。図2は逆断層型（断層のタイプについては、観測だより60号「地学の豆知識、第一回」をご覧ください）の変形が生じた場合です。逆断層型の地震が発生すると、上盤が隆起し下盤が沈降するという地殻変動が生じます。東北地方太平洋沖地震のようなプレート境界型の地震は逆断層型になります。東北地方太平洋沖地震の際には、海上保安庁により宮城沖約150kmに設置されていた海底地殻変動観測点で約3mの隆起が観測されました。こうした海底地殻変動により、図2のように海面が持ち上がる領域と、海面が下がる領域ができます。その後、変動した海面は元に戻ろうとし、図2の点線矢印のような水の流れができます。この水の流れが、四方八方に広がり、やがてそれが海岸に津波として押し寄せるのです。断層タイプが正断層型の場合、沈降する領域と隆起する領域の場所

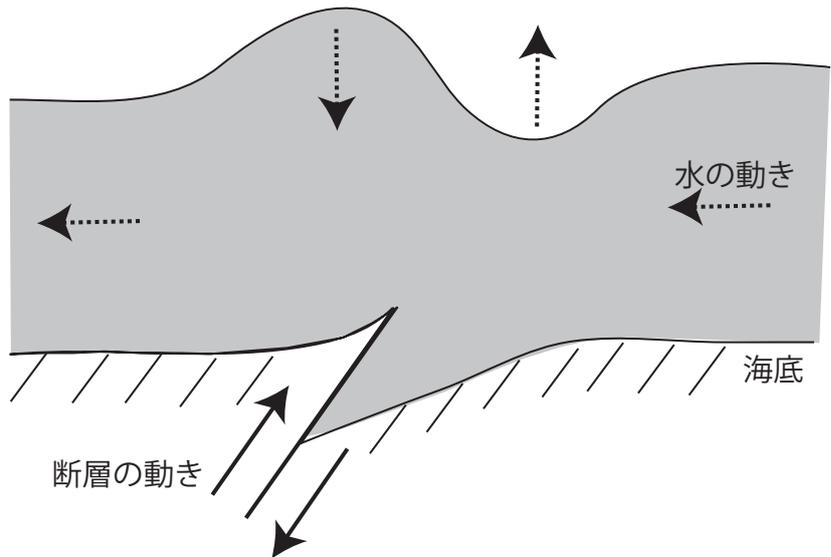


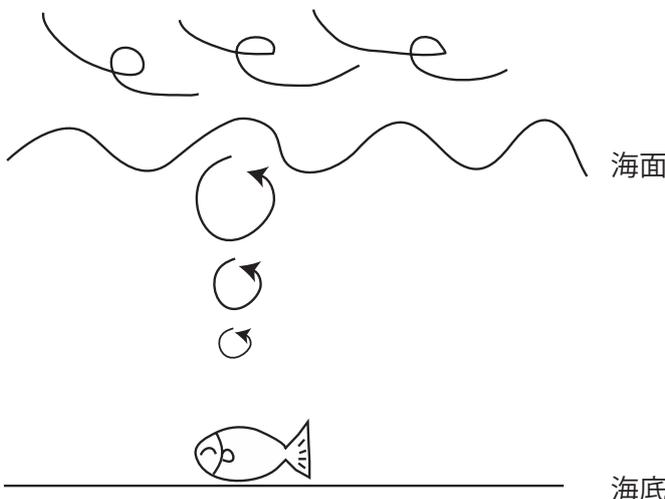
図2 海底下での断層運動（地震）による津波の発生メカニズム。

が反対となりますが、同様に津波が発生します。断層タイプが横ずれ断層型の場合、同じ規模の逆断層及び正断層型地震と比べて上下方向の地殻変動があまり生じないので、津波の規模は小さくなります。このように津波の規模は、断層のタイプによっても違ってきます。また、基本的には震源の位置が浅いほど（海底に近いほど）、海底での地殻変動が発生しやすくなるため、津波の規模も大きくなる傾向があります。さらに、海が深いと持ち上げられる海水

量が多くなるので津波も大きくなります。

津波を引き起こす海域での巨大地震は日本だけではなく、例えば南米チリ沖のナスカプレートが沈み込んでいる場所でもマグニチュード9クラスの地震が発生します。過去にそうした地震によって巨大な津波が発生し、それが太平洋を渡って日本に襲来して被害をもたらしたことがありました。1960（昭和35）年にチリ沖で発生したマグニチュード9.5の地震により、三陸海岸で最大6m

## 波浪



## 津波

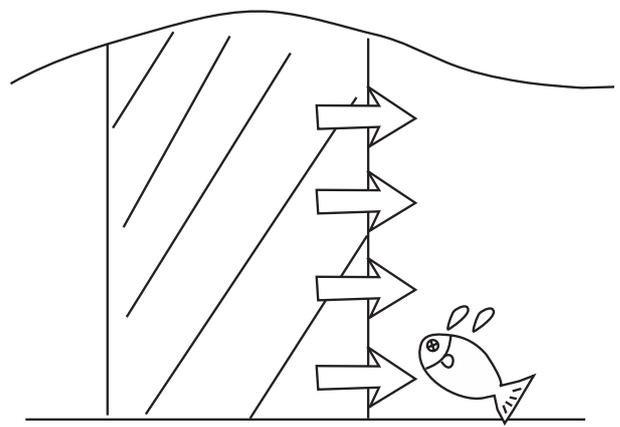


図3 波浪（左）と津波（右）に伴う海のなかの水の動き。左図では黒矢印、右図では白抜き矢印が水の動きを表します。

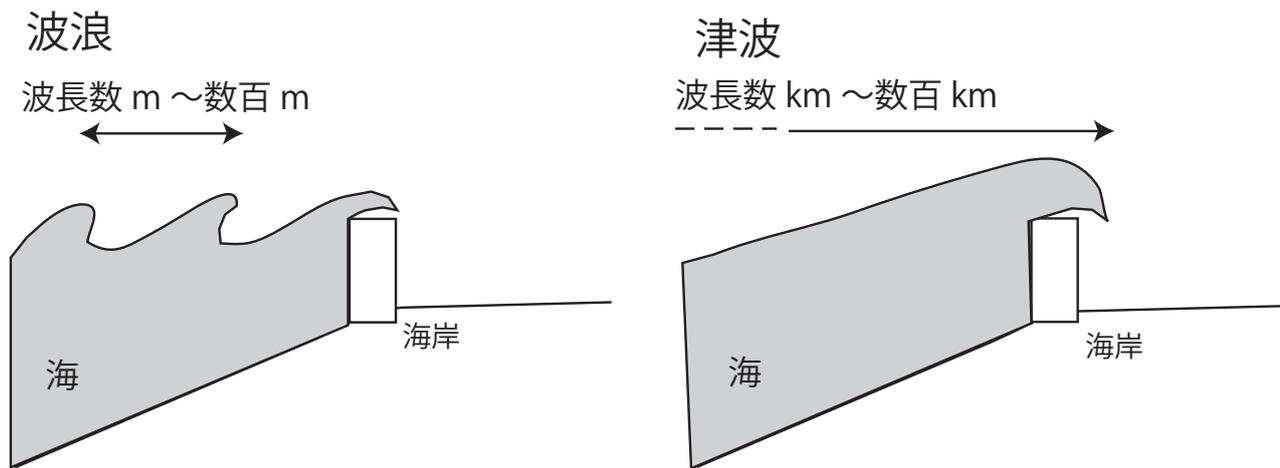


図4 波浪（左）と津波（右）との波長の違い。

の津波が襲来し、多数の方が亡くなられています。また、津波を引き起こす地震のなかには、津波は大きいのに地震による揺れ（地震動）は小さい地震もあります。この地震は、「津波地震」とよばれ、断層が通常の地震と比べてゆっくりと動くと考えられています。津波地震の例として、1896（明治29）年明治三陸地震があります。明治三陸地震の際には、それほど大きくない地震の揺れが長く続いた約30分後に、三陸地方に巨大な津波が襲来しました。この津波で亡くなられた方は、2万2千人に達したと言われています。

津波の発生メカニズムの本質は、海底に急激な上下変動が生じることなので、発生要因は地震だけではありません。例えば、海底火山の噴火、地滑りの土砂の海（あるいは湖）への流入、巨大隕石の落下によっても発生します。地滑りによって発生した津波の例としては、1792年に長崎県島原半島で発生した津波災害（島原大変肥後迷惑）があります。このときは、島原半島にある眉山（雲仙普賢岳の隣の山）が山体崩壊をおこし、大量の土砂が有明海に流れ込んだことによって、津波が発生して対岸の肥後天草（現在の熊本市）に押し寄せ、多数の死者が出ました。

### どうして津波は恐いのか？ 波浪との違い

東北地方太平洋沖地震が引き起こした津波により、多くの家や車が流されていく様子がテレビ等で報道されました。岩手県宮古市田老町にあった高さ10mの巨大な防潮堤も津波を食い止めることができず破壊されました（本号、「東北地方太平洋沖地震による沿岸部の津波被害調査」の写真7、8）。どうして津波にはこのような破壊力があるのでしょうか？ここでは、私たちが普段海岸で目にする「波浪」と比較しながら津波の破壊力の謎に迫ります。

波浪は海域で吹いている風によって生じる海面の現象です。風が強い日などは波浪の高さが数mになることもあります。さて、「1mの波（波浪）なんて普段よく海で目にしているし、1mくらいの津波なら心配ない」と考えるのは大変危険です。実際、津波による浸水深（用語の意味は後ほど説明します）が1mを超えたら、木造家屋は損失を受け、車も流されてしまいます。波浪と津波は、本質的に全く異なるものなのです。その違いを次に述べます。

図3は波浪と津波それぞれについて海の中での水の流れを示したものです。波浪の場合、海上の風によっ

て発生するため、主な水の流れはあくまでも海の表面近傍に限られます。台風などの強風により海面で高い波（波浪）があっても、水深が深くなると海底ではほとんど水の流れはありません。そのため、海がしけているときでも、海底付近にいる魚は平気に泳いでいられます（図3）。一方津波の場合、海の水全体が持ち上げられて（あるいは下げられて）発生するため、図3の右図のように海面から海底まで水が壁のようになって移動します。そのため、海底に泳いでいた魚も津波と一緒に流されることになります。

もう一つは、波浪と津波の波長の違いがあります。波長とは波の山と山との間の距離のことを意味します。波浪の場合、波長は数mからせいぜい数百mです（図4）。一つの波の山が来てもすぐに引いてしまいます。一方、津波の場合、波長はそれよりずっと長く数km～数百kmに達します。沖合から幅数kmの水の壁が一気に海岸に押し寄せてくることをイメージしてみると、そのエネルギーの大きさが想像できます。波浪の場合、波長が短いため波が押し寄せてもすぐに引き、かつ水の流れが表面近傍に限られるので、一つ一つの波によって加

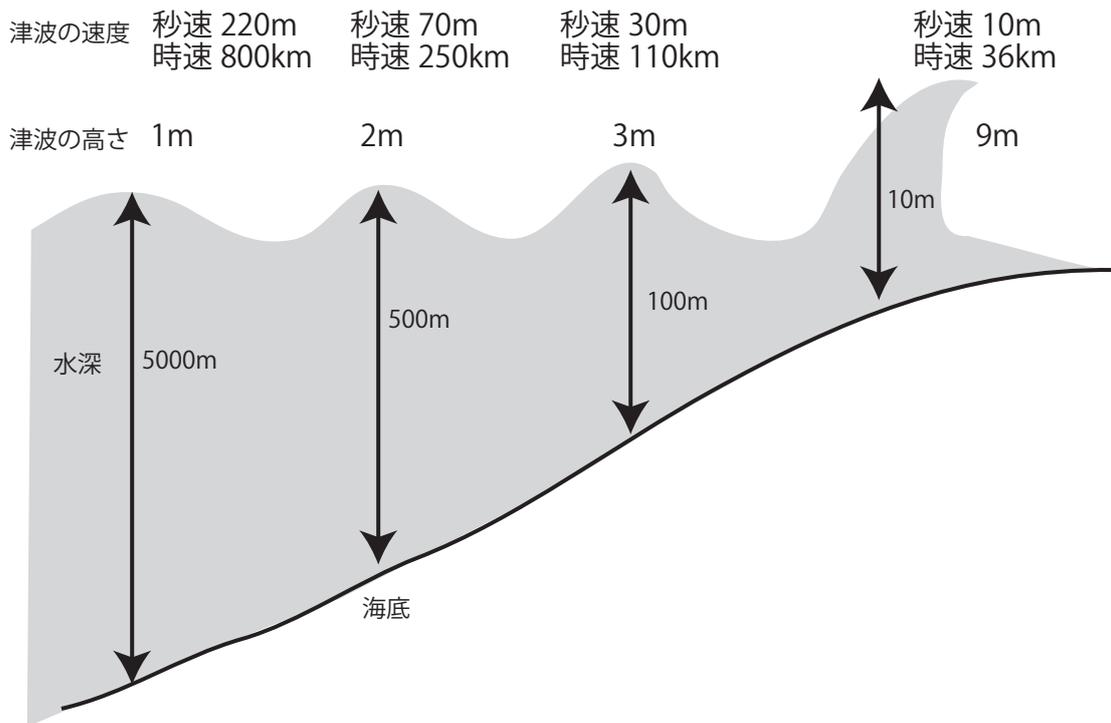


図5 水深による津波の伝播速度および高さの変化。

わるエネルギーは津波と比べてずいぶん小さいものです。

防潮堤がある場合でも、津波では水の壁がいっせいに押し寄せるため、防潮堤に行きあたった水が行き場所をもとめて海面を盛り上げることが起こります。波長が長いので後ろから（沖合から）どんどん水が押し寄せ、盛り上がった水は簡単に防潮堤を乗り越えてしまいます。この効果のため、高さ5mの津波を5m

の防潮堤で防ぐことはできないのです。また波長が長いので、一度防潮堤を乗り越えた津波はすぐに引くことはなく、大量の土砂、岩、車、家やがれきをまきこみながらどんどん内陸の奥深くまで押し寄せ、広範囲にわたって浸水域が広がります。逆に波が引く場合は、長時間にわたって水が沖合に流れ続けるため、陸上にあったものは海岸からずっと離れた沖合まで流されてしまいます。

津波は海の水が一体となって移動するため、例えその高さが50cm程度であっても大きなエネルギーがあります。高さ50cmの津波では内陸深くまで押し寄せることは少ないですが、もし人間が海の中にいれば立っていることさえできず流されてしまいます（深さ50cmの急流の大河のなかに立たされた場合を想像してみてください）。高さ50cm程度の津波が予想される場所では、

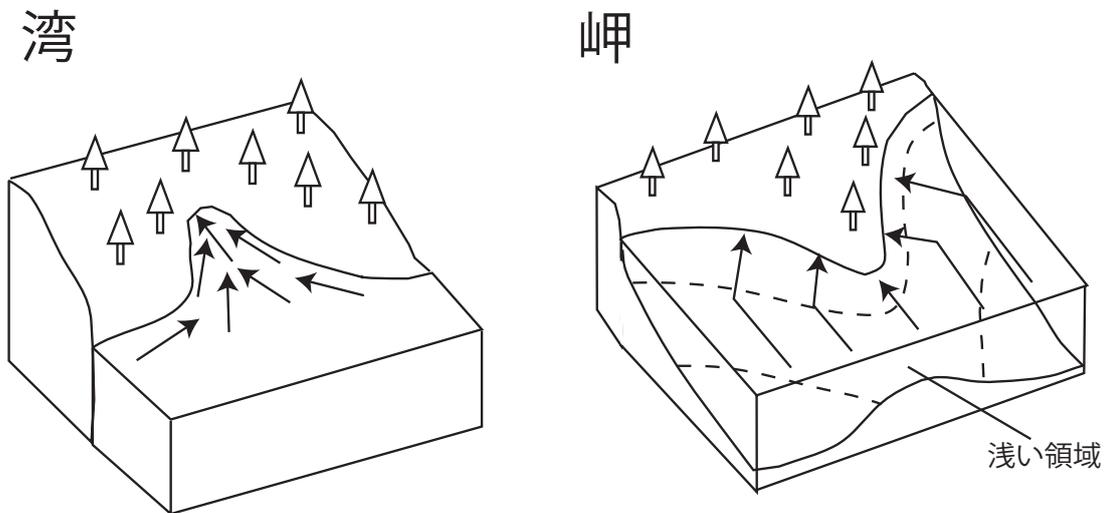


図6 海岸地形の効果による津波の増幅メカニズム。矢印は津波の進む経路を表します。

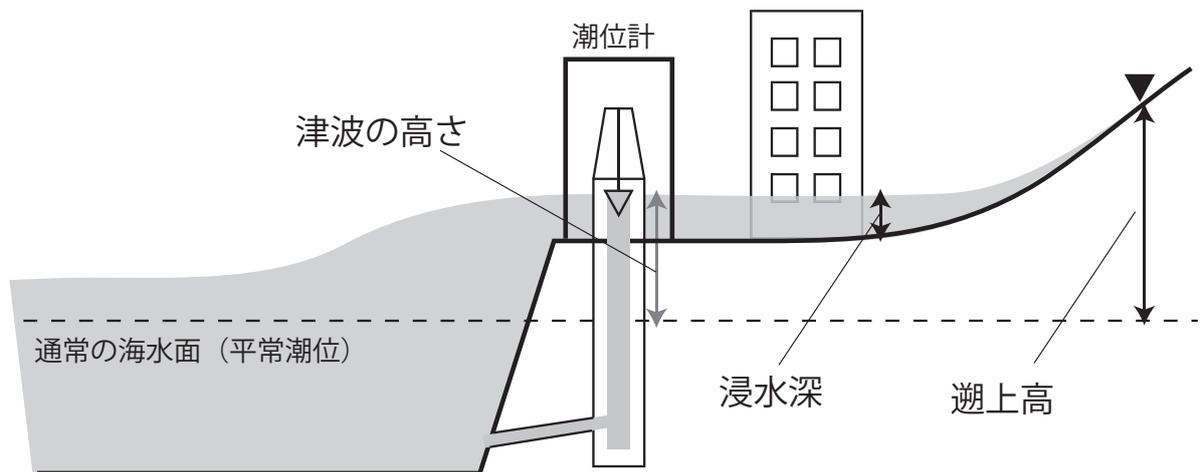


図7 津波の高さの定義。

気象庁により津波注意報が出されます。このとき高さ 50cm 程度だからと油断して、海水浴や、サーフィン、ダイビング、海釣りなどで海の中に入ることは大変危険です。前述のとおり津波は通常の波とは性質が全く異なるのです。

### 津波を増幅させるメカニズム

津波が海岸に近くなると津波の高さを増幅させるいくつかのメカニズムが働きます。こうした効果がさらに津波による被害を拡大させます。次に、そのメカニズムについて説明します。

まず一つ目の増幅のメカニズムは、水深によって津波の伝搬する速度が変わることにより起こります。図5に示したように津波は水深が深くなる程早く伝播する性質があります。例えば水深 5000m の場所では津波は時速 800km で伝搬します。これはジェット機が飛行する速度に相当します。水深が浅くなるほど津波の伝搬速度は遅くなり、水深 100m では伝播速度は時速 110km (高速道路での自動車の走行速度を超える速さ) になり、水深 10m の場所では伝搬速度は時速 36km まで減少します。水深が浅くなるほど津波の伝播速度は遅くなるので、津波が海岸に向かう過程で後ろ側の津

波が前の津波に追いついてくるとい現象が生じます。このとき後ろから追いついた津波が前の津波と重なるようなかたちになり、その結果津波はどんどん高さを増します。海底地形による増幅効果で、海岸からずっと離れた沖合で高さ 1m だった津波が、海岸のすぐ近くまでくると高さが 9m にまで増幅されることもあります。海岸近くでは津波の伝搬速度は遅くなりますが、それでも時速 36km (秒速 10m) あり、世界トップレベルの陸上短距離選手が 100m を走る速度に相当します。従って、津波がすぐ近くまできてから逃げたのでは手遅れなのです。津波が来る前に高台や津波避難ビルなど安全な場所に避難するということが非常に重要です。

もう一つの増幅のメカニズムは、海岸の地形による効果です。図6の左図に示したように、V字型に入り組んでいる湾では沖から押し寄せてきた津波が湾の奥に行くにしたがって集められ津波の高さが増幅されます。東北地方三陸海岸では、延長 200km にわたり海岸線が複雑に入り組むリアス式海岸が連続します。東北地方太平洋沖地震では、津波がこうした入り口が広く奥が狭い湾に入り込み高さが増幅されたことも、被害を拡大させた一因になりました。

た。さらに図6の右図に示したように、海岸線が凸に突き出た岬でも津波は増幅されます。岬の先端を沖に向かって延長したあたりでは海底が尾根地形をし、周辺よりも水深が浅くなっています。先ほど説明したように津波は水深が浅い場所ほどゆっくりと伝播するので、岬の先端に向かう津波は周りよりも遅く海岸に到達します。一方、岬の根元の水深が相対的に深い領域を伝播してきた津波はより早く到達し、図6右図の矢印のように屈折するので、結果として岬の先端付近に津波が集中するという現象が起こります。

### 津波の高さについて

津波の高さについては、その計測方法の違いなどによりいくつか定義があります。ここでは、津波の高さに関する用語について図7を用いて説明します。

地震が発生して海岸に津波が襲来した際、気象庁から各地の津波の高さが津波観測情報として発表されます。また、津波注意報や津波警報などが出された際には、予想される津波の高さが発表されます。ここの「津波の高さ」とは、図7に示したように津波がない場合の潮位 (平常潮位) から、津波によって上昇した海面の高さを表します。この値は

海岸に設置された潮位計により観測されます。一方、実際に津波が浸水した場所の地面から水面までの高さ（深さ）を「浸水深」と呼びます。さらに、津波が陸地を駆け上がり、最も高くなった地点の基準面からの高さを「遡上高」と呼びます。一般に遡上高は、気象庁から発表される「予想される津波の高さ」と同程度から、高い場合には4倍程度になることが知られています。東京大学地震研究所の調査によると、東北地方太平洋沖地震の津波の際、岩手県宮古市では遡上高が40m近くに及んだことが報告されています。

### 神奈川での津波

ここでは過去に神奈川県を襲った津波について記述します。神奈川県は相模トラフからフィリピン海プレートが本州弧側のプレートの下に沈み込むという、特殊な地学的環境に位置しています。沈み込むフィリピン海プレートと本州弧側のプレートとの境界で、過去約200年に一度の頻度でマグニチュード8クラスの巨大地震が発生してきました。一番最近の巨大地震は、1923（大正12）年に発生した「大正関東地震」です。その前の巨大地震は、1703（元禄16）年に発生した「元禄地震」です。元禄地震より以前の巨大地震については、歴史記録が残っておらず、正確な発生時やその被害についてはよく分かっていません。

次に、神奈川県が1985（昭和60）年にまとめた「地震被害想定調査報告書（津波水害）」資料を参考に、元禄地震と大正関東地震の際の津波被害について述べます。

元禄地震に伴って発生した津波は伊豆下田付近から房総犬吠埼にいたる領域を襲い、房総海岸、相模湾沿岸、伊豆大島、八丈島等に大きな被害をもたらしました。神奈川県では、

鎌倉市材木座に高さ約8mの津波が押し寄せ、鎌倉市だけで死者・行方不明者が600人にのぼりました（但し、地震によって亡くなった人との区別はできていません）。それ以外にも、川崎から小田原にかけての相模湾沿岸の広い範囲で、高さ1m～6mの津波が押し寄せたことが記録に残っています。

大正関東地震に伴って発生した津波も、相模湾に面した広い領域を襲いました。鎌倉市由比ヶ浜では高さ約9mの津波が襲ったとの記録があります。また、江ノ島につながる橋も津波によって流されました。真鶴町では最大9mもの津波が襲ったといわれており、船舶の大部分が流出したそうです。元禄地震、大正関東地震ともに、津波だけではなく地震の揺れによる被害やその後の火災による被害が非常に大きく、津波だけでどれくらいの被害が生じたかについては、はっきりとは判別がついていません。また、これらの巨大地震は震源域が海域から陸域にかけて位置しているため、地震が発生して最初の津波が来るまで数分以内と推定されています。地震発生後、海岸付近にいる人たちが高台に避難するための時間が少ないのです。そのため、海岸付近については津波避難ビルの整備などが、早急に取り組むべき課題としてあります。

相模湾を震源とする巨大地震のほかに、神奈川に大きな津波をもたらした地震として、1498（明応7）年に発生した「明応地震」があります。この地震により紀伊半島から房総にかけての広い範囲で津波の被害があったことが歴史記録に残されています。神奈川では、鎌倉で大仏殿まで津波が達したという資料があり、鎌倉付近で過去最大級の津波を引き起こした地震と考えられています。この地震の震源域については

はっきりとは分かっていませんが、東海から西南日本にかけて沈み込むフィリピン海プレート境界周辺での巨大地震ではないかと考えられています。

東北地方太平洋沖地震による甚大な津波被害の発生をうけ、神奈川県では2011（平成23）年度に従来想定されていた津波の被害予測を見直す作業を行いました。2012（平成24）年2月の時点でその素案を神奈川県ホームページ（<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f360944/>）により閲覧することが可能になっています。

### おわりに

今回の「地学の豆知識」では、津波について説明をいたしました。最後に、津波から身を守るための心得を記しておきたいと思います。

- ・強い地震（震度4程度以上）を感じたとき、また弱い地震であっても長い時間ゆっくりとした揺れを感じたときは、直ちに海浜から離れて、急いで安全な場所に避難する。
- ・地震を感じなくても、津波警報が発表されたときには、急いで避難する。
- ・正しい情報をラジオ、テレビ、広報車、防災放送などを通じて入手する。
- ・津波注意報でも、海水浴や海釣りは行わない。
- ・津波は繰り返し襲ってくるので、警報、注意報が解除されるまで海には近づかない。

末筆となりましたが、東北地方太平洋沖地震で亡くなられた方々のご冥福と、被災地の一日も早い復興をお祈りいたします。