

12回 津波を知る

1. 津波とは

(1) 津波の定義：津波と波浪との違いは？

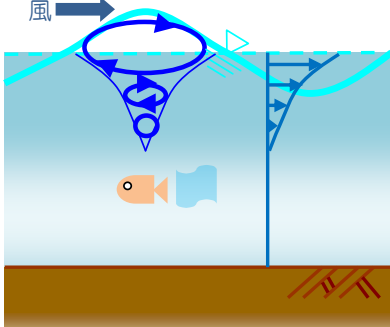
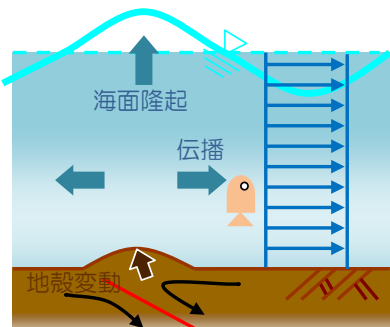
「津」とは元来、「岸」とか「港」を意味し、津波とは「津」に押し寄せてくる波を語源とする。すなわち、「津波」とは沖合での被害に比して「津」で大きな被害をもたらす「波」として、江戸時代初期頃から使われ始めたといわれている。現代用語としての津波の定義とは、地震（断層運動）、海底地すべり、海底火山噴火、陸域からの土砂・土石流の流入、隕石衝突、核実験等に起因する短時間に発生する比較的大規模な現象が挙げられ、風による波浪や台風等の気象に起因する高潮は含まれない。ちなみに、国際語として、tsunami が定着した経緯としては、英語圏で使われていた tidal wave や学協会等で使われていた seismic sea-wave より広義の意味を有していたためといえる。ただし、津波の大半は海底での断層運動による海底地殻変動に起因するものであり、本章ではこの浅い海底部での地震に起因する津波を対象とする。

表1 津波の定義

用語		定義
津波	tsunami	地震、海底地すべり、海底火山噴火、陸域からの土砂・土石流の流入、隕石衝突、核実験等に起因する短時間に発生する海洋波の総称であり、古くは高潮に対しても使われた記録があるが、現在用語としては、気象に起因する現象は含まない。
潮汐波,高潮	tidal wave	潮汐波とは、天体の潮汐力により天体の表面が上下する現象をいい、高潮とは、台風や低気圧により気圧の低下により生じる気圧差から吸い上げ効果での海面の上昇とその吹き寄せをいう。
地震性海洋波	seismic sea-wave	地震に起因して発現する海洋波に対する用語として使われることがあるが、あまり一般化していない。現象としては、既往の津波の多くは、この地震に起因する現象に相当する。

では、地震に起因した津波と風に起因した波浪とでは、波の性状において具体的にどのような相違があるのか？簡単に言うと、海上を吹く風によって引き起こされた波は海面部のみの運動であるのに対し、海底地殻での地震により引き起こされる運動は、海底地盤の隆起や陥没に伴う海水全体の運動となる。つまり、同じ波高の波浪と津波であっても、それらのもっている運動エネルギーとしては海面部だけの移動で深部における海水の移動の無い波浪に対し海底から海面までの海水全体移動となる津波とでは大きく異なることになる。

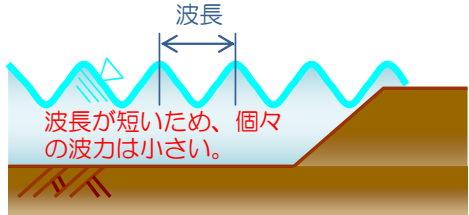
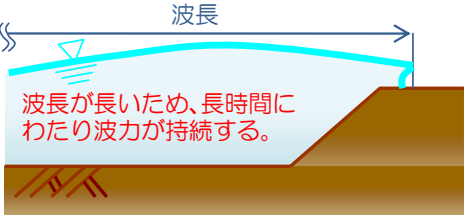
表2 波浪と津波の流れ分布による相違

区分	波浪	津波
概念図		
流れの分布	海面付近での風によって引き起こされる水粒子の運動は、水深が増すにつれて円軌道になって閉じる。	短時間での広範に及び地殻変動により、海底の上に存在する海水は、横方向へ逃げることなく、鉛直変形分の海面隆起となり、海中全体での伝播となる。
海水の移動	波の進行方向への海水の流動は発生しないため、波の運動量は小さい。	波の進行方向への海水全体の流動となるため、波の運動量は大きい。

これら海水の移動範囲の相違に加え、波浪と津波とでは、それらの波長の相違から伝播特性が大きく異なる。津波には周期や波長が長いといった特性がある。一般に、波浪の周期は長くても数十秒程度であり、波長も数百 m 程度である。一方、津波の周期は短くとも数分、長い場合には数時間になることもあり、波長も数百 km に及びこともある。なお、高潮や潮汐はいずれも津波とは要因が異なるが、波長としては津波と同様、長波の性質をもつ。

そのため、津波では波長の長さから押し波時には、海面自体が上昇した状態が続くため、内陸への津波浸水につながる。また、波長が長いということは、引き波時には陸上で高くなった水面から沖の低い水面に向かって戻る時間も長くなり、沖合数 km 流されることになる。

表3 津波と波浪の波長による相違

区分	波浪	津波
概念図	 波長が短いため、個々の波力は小さい。	 波長が長いため、長時間にわたり波力が持続する。
陸上遡上	波の波長が短いため、護岸高を超えて海水に浸かることがあっても、すぐに引くため、陸上の奥にまで遡上することはないといえる。	波の波長が長いため、一旦、陸上への遡上した津波は浸水し続ける状態となり、河川を数 km にわたり遡上することもある。

国土交通省設置のGPS波浪計と天文潮位を比較すると、津波と潮汐波との波高の相違がわかる。(図2は2011年の東北地方太平洋沖地震時での観測値)

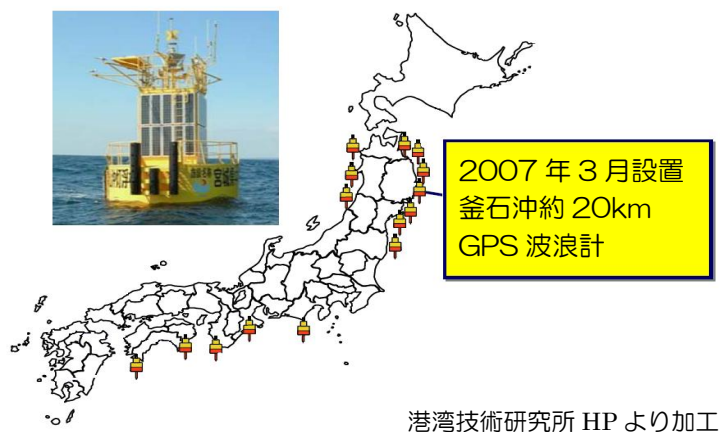


図1 GPS波浪計による潮位観測位置

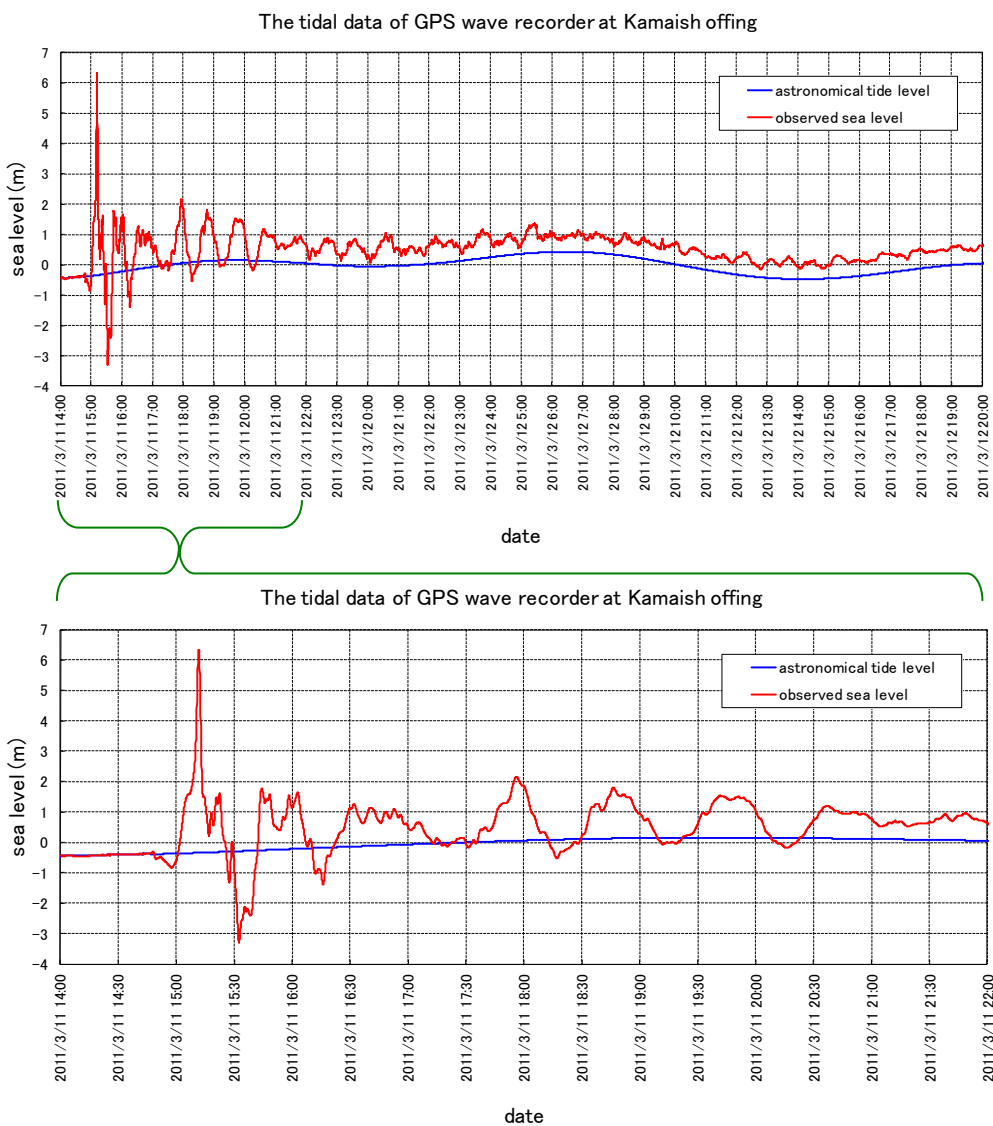


図2 GPS波浪計による津波時の潮位観測と天文潮位との関係

（2）津波の発生メカニズム：津波はどのように起こるのか？

地球表面は十数枚のプレートと呼ばれる厚さ数十 km の岩盤で覆われている。このプレートは地球中心部のコアの熱により温められ上昇し、地表で冷えて下降するマントル対流によりプレートそれぞれ異なる方向に年間数 cm 程度移動している。プレートがつくられる海嶺では、各プレート互いに離れる方向に移動している。移動した海洋プレートが大陸プレートの下に潜り込むトラフや海溝では、各プレートは互いに近づきあっている。そのため、プレート境界域では歪による変形が蓄積し、限界に達し歪んだ大陸プレート先端部が開放されて跳ね上がるときにプレート間地震が発生する。この浅い海底部での地殻変動が海水を大きく動かし津波を誘発する。

表4 プレート収束帯での地震種別

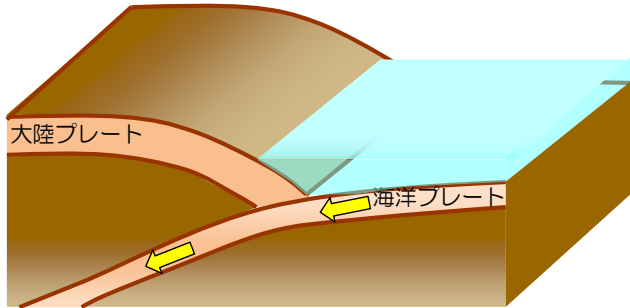
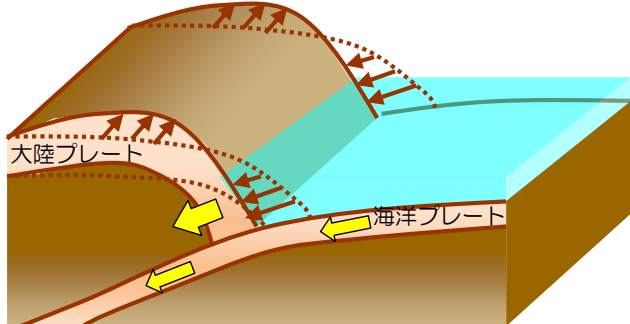
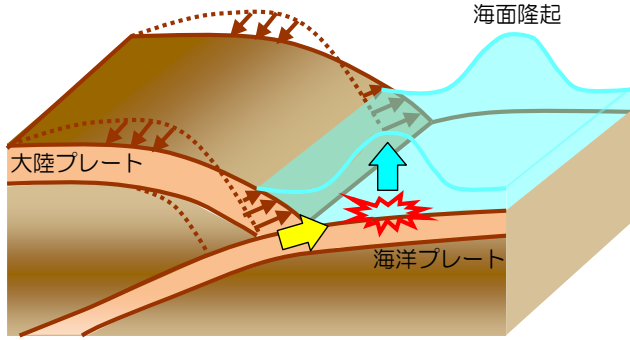
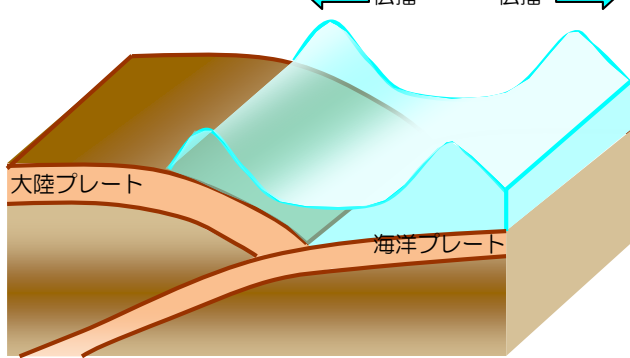
区分	特徴	概念図
プレート間地震	プレート境界で発現する地震であり、津波を伴う。	
海洋プレート内地震	沈み込む海洋プレート内部での断層運動に起因した地震	
大陸プレート内地震	大陸プレートの表層地殻内部の断層運動により発現する地震	

津波は、このような浅海底での地震に起因して、海底地殻変動に伴う地殻上の海水への衝撃波により引き起こされる長周期の波として説明される。

津波の規模にもよるが、津波を発生させるような海底での地殻変動は、水平スケールで十数～数百 km と広範囲であり、かつ数十秒程度の比較的短時間の変位である。一方、その時の海水の運動は静水圧に近く緩やかな状態であり、また地殻変動範囲が広いことから、その上の海水は横方向に拡散する間もなく拘束され、海底地殻の鉛直変位はほとんど失われることなく、そのまま鉛直方向への海水の移動のエネルギーに変わる。その結果、まず、海底地殻変動分布と同様な海水面分布が発生することになる。この津波波源からの擾乱を初期条件として海面が変動し、周囲に伝播していく。これが津波発生メカニズムである。つまり、津波は、海底での体積変化のエネルギーが消散せず、海面に伝わらないような深い震源や、横ずれの卓越した鉛直変位の小さな断層運動であれば、津波の規模は地震の大きさとは相関

しないといえる。

表5 津波の発生メカニズム

過程	概念図	解説
<p>海洋プレートの沈み込み過程</p>		<p>地震前の段階、大陸プレートに比して思い海洋プレートが沈み込んでいく。</p>
<p>大陸プレートの歪み蓄積過程</p>		<p>海洋プレートが大陸プレートの先端を押し込むことにより、歪みが蓄積していく。</p>
<p>地震発生～海面隆起過程</p>		<p>歪が限界に達すると、アスペリティが外れて、大陸プレートの先端が跳ね上がり、プレートの境界に沿って断層が形成される。これが津波の初期波源となる。このとき、津波の初期流速はゼロである。</p>
<p>津波伝播過程</p>		<p>海面の隆起による位置エネルギーが運動エネルギーに変わり、津波が伝播していく。</p>

(3) 津波地震：地震を感じなくても津波は発生する？

体に感じられない地震に対して津波が発生することはあるのか？答えはYESである。一般に津波地震とは、マグニチュードが小さい割に大きな津波を発生させる地震のことをいう。場合によっては、感じられない程度の地震動に対し津波が発生することもある。

前述のプレートの歪変形成の速度は2~3km/sec程度であるが、図1に示すプレート境界のアスペリティを挟んでより深い部分では振動を伴わない定常的なスロースリップにより沈み込む。一方、アスペリティより浅い部分では、堆積物が沈み込みからゆっくりとした挙動となる。そのため、同じプレートでも滑動現象の速度はそれぞれ異なるといえる。津波地震は時間をかけた大きな地殻変位により、有感となる単周期の地震動を伴うことなく津波を発生させる。

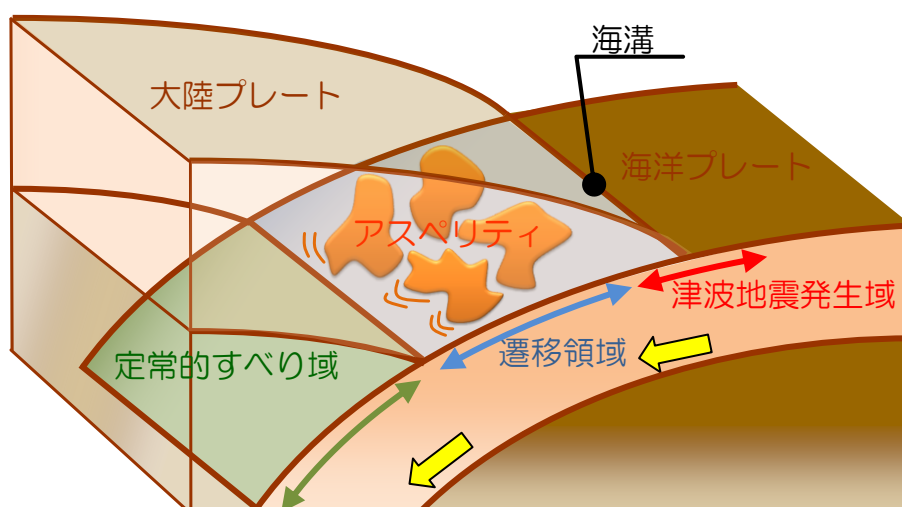


図3 津波地震及びスロースリップの発生域

(4) 津波の高さ：津波高と浸水深と何が違う？

気象庁で発表される「予想される津波の高さ」とは、図4で定義される海岸線における波の高さを表し平常潮位を基準とする。一方、浸水深とは地盤からの深さを表す。

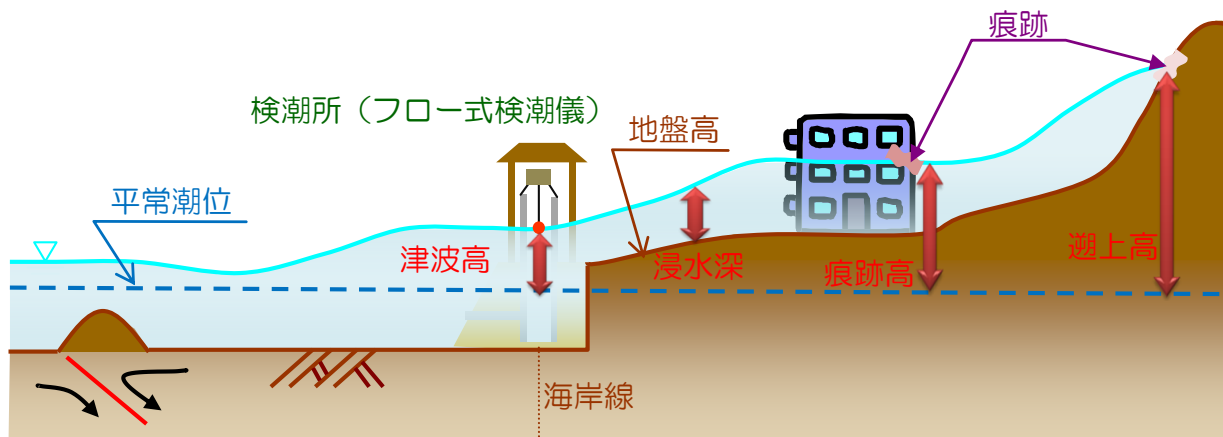


図4 津波の高さの定義

2. 津波の挙動

(1) 津波の速度：なぜ津波は地震の後から遅れてくるのか？

沿岸部で感じられる地震動に対して、津波が沿岸部に達するまでの時間は様々である。地震も津波もともに波であるが、この到達時間の相違は、それらの波の伝達速度に起因する。

岩盤を媒体とする地震動の伝播速度に比して、水を媒体とする津波の伝播速度は非常に遅いため、震源が陸より遠い場合には、津波は地震より遅れてやってくる。また、地震は距離減衰するのに対し、津波は長波であるため、ほとんど減衰することなく遠方にまで伝わる。さらに、津波の浅水変形から沿岸に近づくにつれ流速が小さくなり波高が高くなる性質があるため、後ろからの波が前の波に追い付くことにより、むしろ、沿岸部で増長する性質をもつ。

沖合での津波の伝播速度 $v = \sqrt{gH}$ (1)

ここに、 g ：重力加速度

H ：水深

沿岸での津波の伝播速度 $v = \sqrt{g(H+h)}$ (2)

ここに、 h ：波高

地震動の伝播速度 $v = \sqrt{G/\rho}$ (3)

ここに、 G ：岩盤の剛性率

ρ ：密度

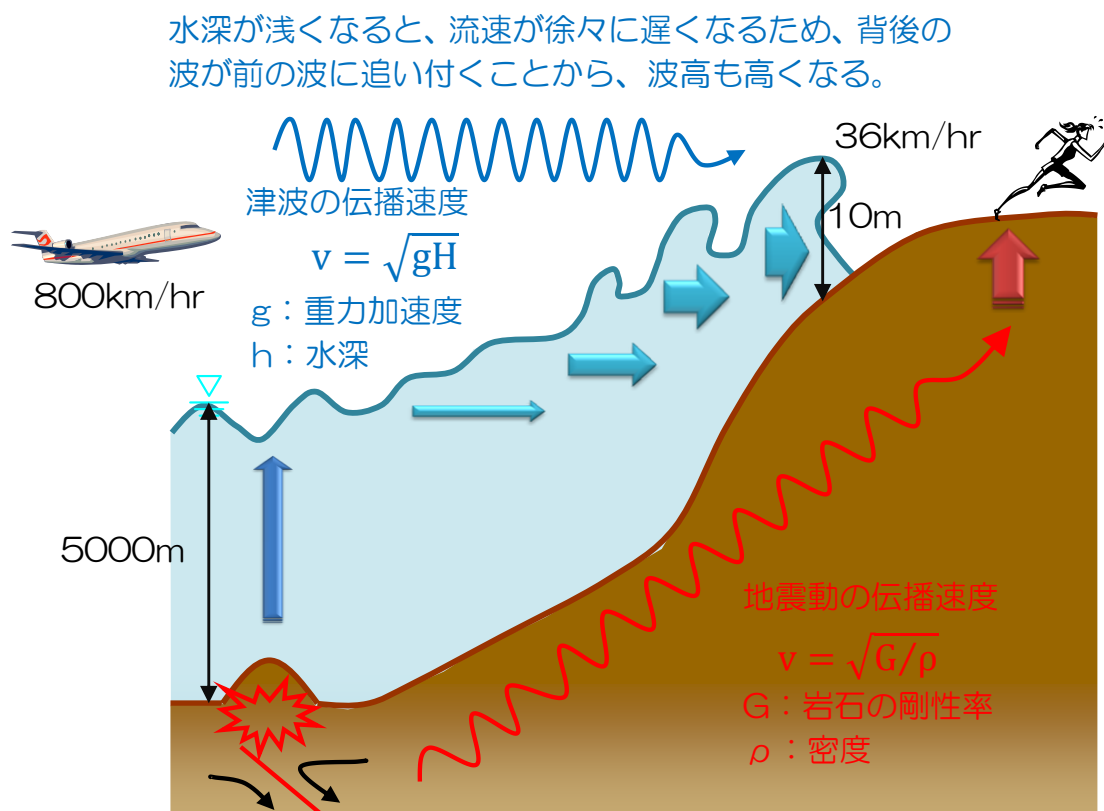


図5 津波の速度

(2) 津波の長波特性：なぜ遠地での津波が伝わるのか？

地震も津波も波として伝わるのに、遠く離れたチリ沿岸での地震は日本で感じられることがないが、津波は日本に到達することがある。いわゆる遠地津波といわれる現象がある。

津波波源は沿岸から長距離であるのかかわらず、津波は完全流体のごとく、わずかな減衰で伝播し沿岸に達する。津波は、海水への衝撃波により引き起こされる長周期の波である。波高 h と波長 L との比である相対水深 h/L により、長波及び浅海波、深海波に区分され、深海波では、波による水粒子の運動は水底まで達しないが、長波の場合には水面から水底までほぼ一様の運動となる。長波とは、水深に比して波高が小さい場合に、水粒子の鉛直加速度が重力加速度に比べ、十分に小さいという特徴の波である。波源付近では、水深に比べて波長が長く波は長波近似となり、海底から海面までの水平方向の水粒子の速度は一様であると考えてよい。つまり、速度勾配の無い深さ方向に一定分布であるため、水の粘性力がはたらかず、海底摩擦による津波のエネルギー損失が発生せず保存されるわけである。

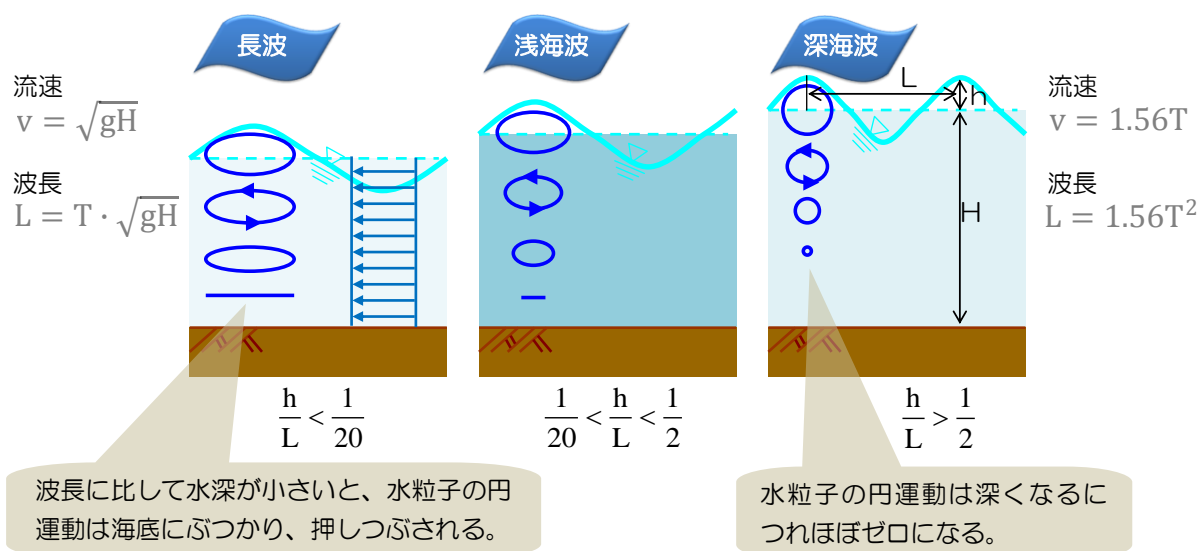


図6 波長の定義

(3) 津波の伝播特性：津波の方向はどんな過程で決まるのか？

水の貯まった容器の水面上でそっと指を触れると、波が起こって同心円状に伝わっていくことを観察できる。水平な底の容器の中では水深が一定であるため速度が一定であり、かつ水は均質なので流れの等方性からすべての方向に均等に波が伝わる。

では、津波の伝播の場合はどうか？津波の方向性は初期の水位分布及び海底地形、地球の自転に依存する。初期水位分布は海底地殻変動分布の影響を受け、地殻変動が局所的であれば、海面の初期水位分布も局所的となり、そこから擾乱する波も同心円状を呈する。一方、海底地殻変動はプレート収束帯のような線状となる。仮に非常に細長い波源を仮定すると、一次元伝播とみなすことができ、初期水位分布は津波として左右方向にそれぞれ 50%で伝わる。

表6 波源からの津波の伝播

区分	平坦な地形での点源からの伝播	細長い波源からの一次元伝播
概念図		
伝播特性	海面の初期水位分布は点状となり、擾乱は同心円状に伝わる。	海面の初期水位分布が線状となり、擾乱は各方向に50%で伝わる。

地球は球体であり24時間に一回転で自転している。遠洋からの津波の伝播の方向には、地球の曲率と自転によるコリオリカの影響を受ける。つまり、遠洋からの津波の伝播方向はコリオリカの分の伝播方向のズレが発現するのだ。

表7 コリオリカ

区分	北半球での南方向移動が受ける力	北半球で北方向移動が受ける力
概念図		
自転の影響	真南より西側にそれる。	真北より東側にそれる。

実際には、海底地殻変動は有限長であり、長方形または楕円で近似されるため、形状の長軸方向と短軸方向とに波が伝わり、長軸方向と短軸方向とで伝播する波の割合が異なる。また、陸地付近の海溝で発現する津波の場合には、沖合方向より陸方向に伝わる波の方が大きく、津波の伝播には指向性を有す特性がある。

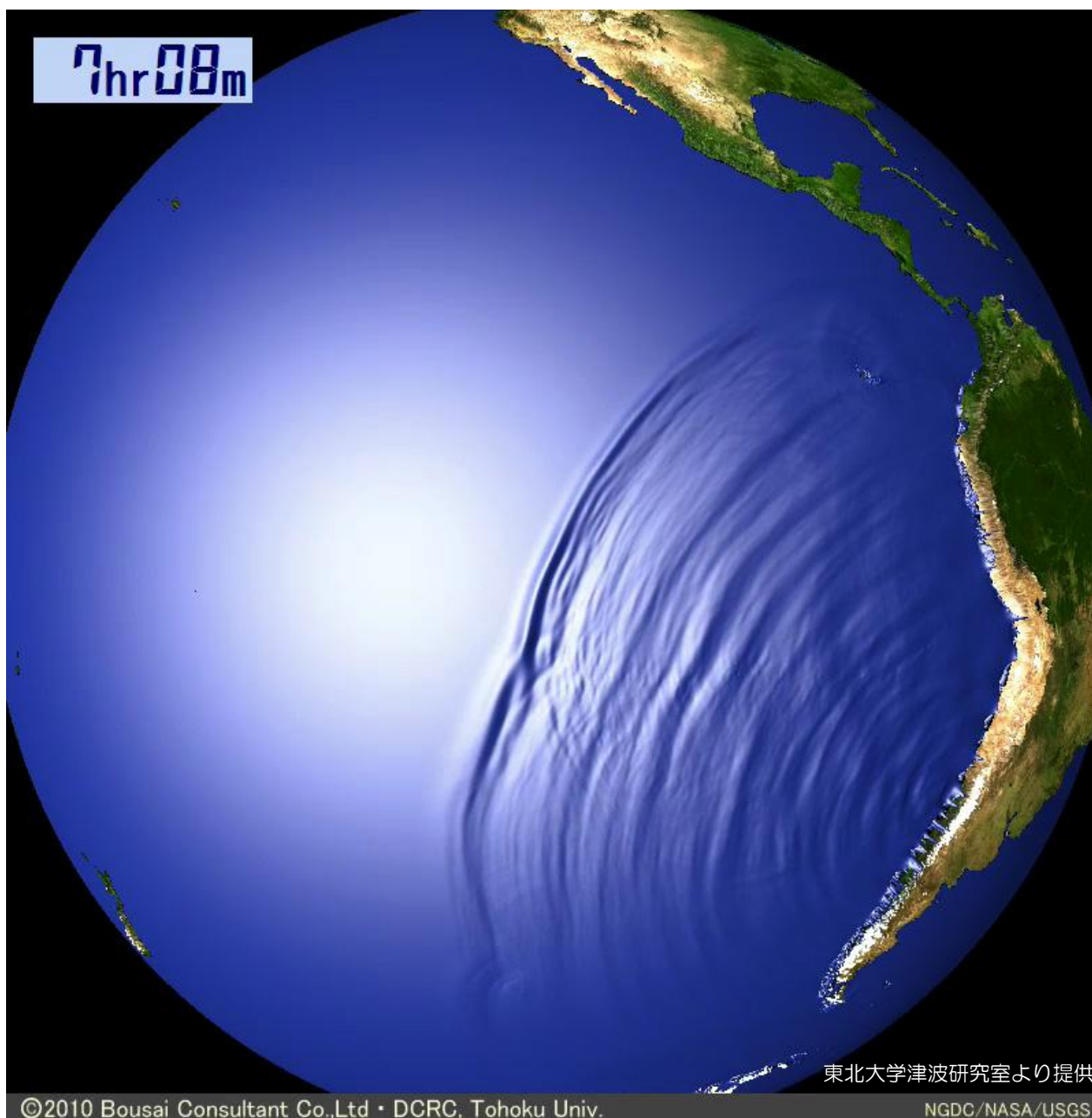


図7 太平洋広域を伝播する津波の数値シミュレーションによる再現のスナップショット

(4) 津波の変形特性：津波は変わり続ける？

先述の津波の発生メカニズムで示したように、津波は断層運動に起因した海面変動を初期条件とした現象である。広範で速い地殻変動に対し、直上の海水は横方向へ逃げきれず、近く変動の鉛直変形分だけ海面が隆起することになるので、一般に地殻変動量と初期海面変動量には相関があり同程度となる。断層のすべり量が数 m 程度であるから、初期海面変動量

も同程度のはずである。なぜ沿岸部での津波高と地殻変動量には相関がなく、沿岸部でときに十数 m もの高い波になって被害を及ぼすのか？津波はその伝播過程において変化しているのである。

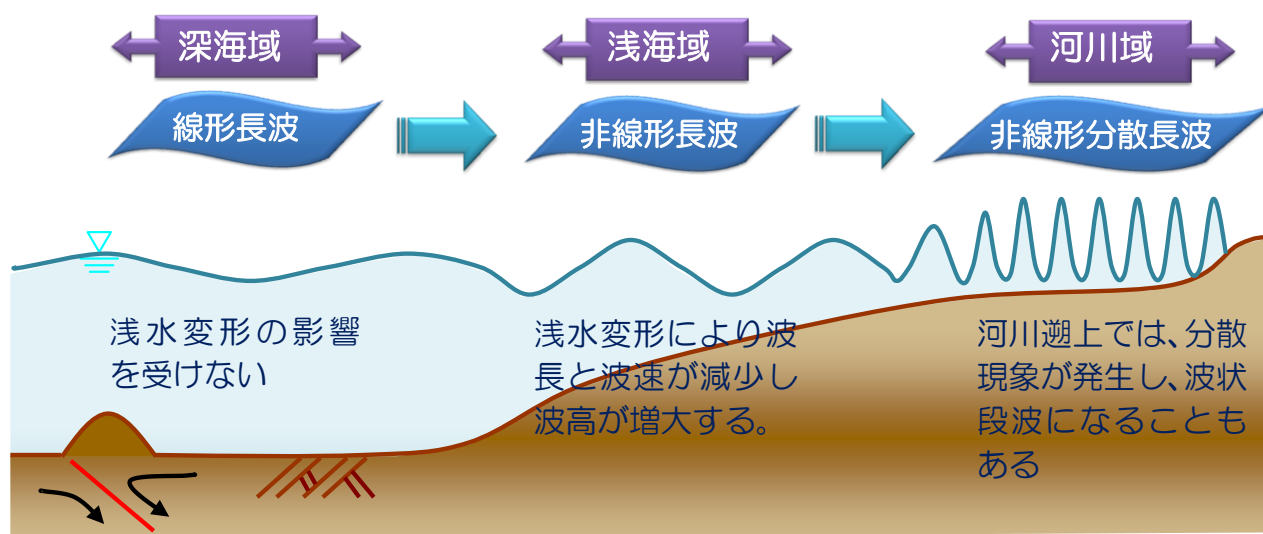


図 8 津波伝播過程における変形

沖合では津波は波高に比べて水深が深いことから、海底面の摩擦の影響を受けない線形長波で近似できる。津波が沿岸方向に進行するにつれて、津波が受ける海底面の影響は徐々に増し、その結果様々な現象が発生することになる。沿岸に近づき水深が減少すると、流速が小さくなり波高が大きくなる浅水変形が発現する。この浅水変形なる現象では単に波高が増すのみでなく、波形勾配が大きくなり波が前傾化や、波の水面波形の非対称性が強まるといった様々な現象があり、多くの研究者から長年にわたり、特性を解明する対象とされている。

表 9 津波の変形特性

変形種別	概要
浅水変形	水深の変化による波数、群速度の変化による波高、波長変化 波のエネルギーの散逸はなく、エネルギーは維持される。
屈折変形	水深変化に伴う波速及び波向・波高の変化 波のエネルギーの散逸はなく、エネルギーは維持される。
回折変形	遮蔽部への波の回り込み 波のエネルギー散逸はなく、エネルギーは維持される。
波高減衰	砕波による波高減衰 海底摩擦による波高減衰 波のエネルギー散逸による波高減衰

波長 L は流速 v と周期 T との積で表され、流速 v は水深に応じて小さくなるため、周期 T 不変の条件では沿岸に近づくと波長も短くなる。

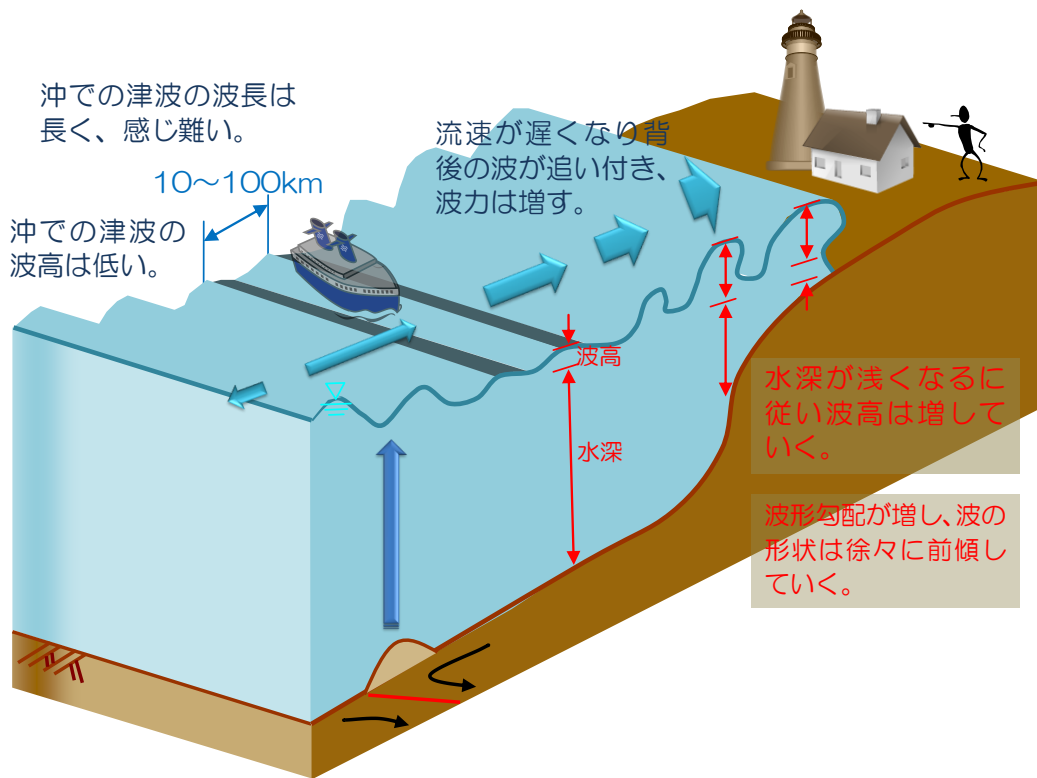


図9 浅水変形

浅水変形により沿岸で津波がどれだけ大きくなるかは、グリーンの法則から求めることができる。

$$h_2(H_2)^{\frac{1}{4}} = h_1(H_1)^{\frac{1}{4}} = h_0(H_0)^{\frac{1}{4}} = \text{const.} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 h_i : 波高
 H_i : 水深

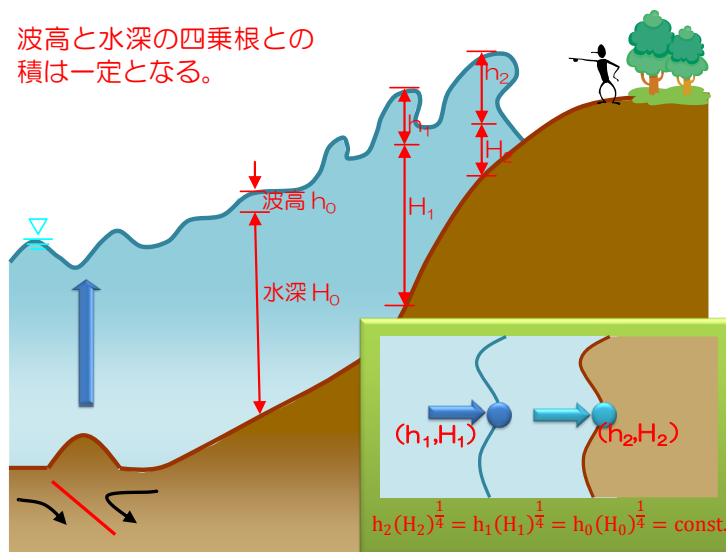


図10 グリーンの法則

津波の方向は、なぜ海岸線に向かって反れることなく進行し被害を及ぼすのか？表 8 に示すような海底地形が段状に変化している海洋での沿岸方向への津波の伝播を考えてみよう。津波の伝播速度は水深に依存するため、地形変化の影響から流速が変化することから、地形変化地点での流れには速度差が生じる。この速度差から、津波は水深が浅い方向に巻き込まれるように伝播する。つまり、津波の方向は海岸に向かう性質をもっているのだ。

表 8 津波の屈折

項目	津波の屈折	スネルの法則
概念図		
伝播特性	<p>水深変化部で津波の流速が変わるため、その流速差から水深が浅い方向に巻き込まれるように曲がりながら進む。</p>	<p>津波の入射角と屈折角との関係は、次式で表せる。</p> $\frac{v_1}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{\sin\theta_2} \dots\dots\dots (5)$

実際の等深線は図 11 のように海岸線に近づくにつれて複雑に変化するため、沿岸付近における津波の挙動には様々な変化が見られる。

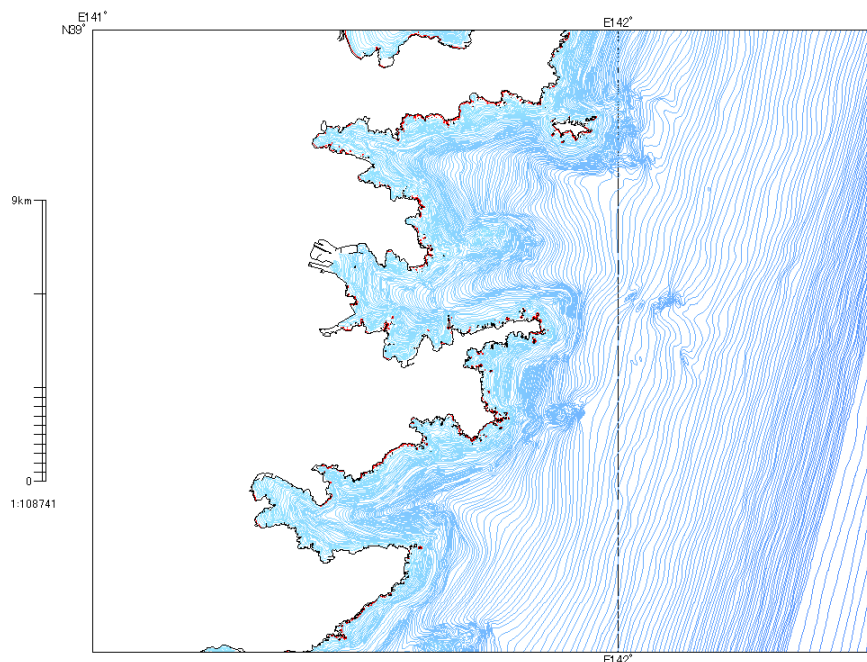


図 11 実際の等深線 (財)日本水路協会 M7000 シリーズ三陸沖)

典型的な津波の変化特性として、島や半島、岬等での津波のエネルギー集中の原因はこの津波の回折から説明できる。半島地形沿岸での海底傾斜から、等深線は半島を囲むような形状となり、津波の流向は地形突出部に向かう。更に、波向線間隔での津波のエネルギーは保存されるため、突出地形部で波向線の間隔が狭くなるに従い、水位は上昇する。

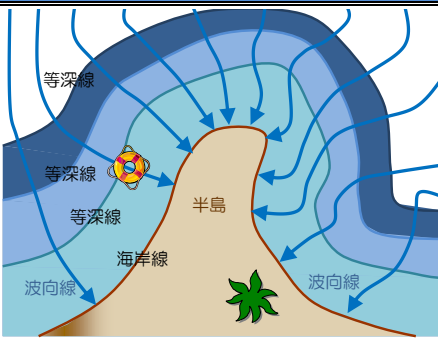
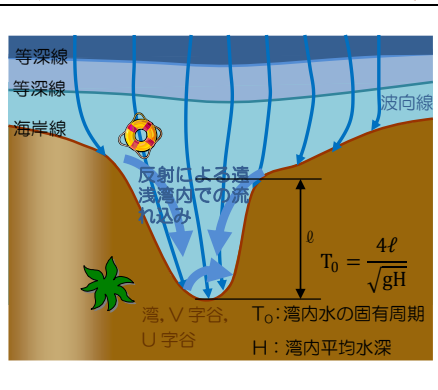
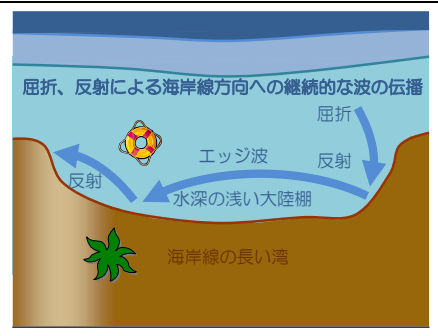
また、遠浅の湾やV字谷、U字谷地形では、囲まれた地形からその中で反射を繰り返すことから複雑な流れとなり、水位が上昇する傾向が確認されている。更に、湾横断幅より湾縦断方向の長さℓが大きい湾では(6)式で示される湾の長さで決まる固有周期 T_0 をもっている。津波の周期が湾形状から決まる湾内の固有周期と一致すると、共振により波高が高くなることがある。

$$T_0 = \frac{4\ell}{\sqrt{gH}} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、ℓ：湾の長さ

H：湾内平均水深

表9 沿岸付近における津波の変形特性

項目	概念図	津波の挙動
津波のエネルギー集中		<p>半島や岬のように、舌状に突き出した地形においては、海底地形が海岸に向かって徐々に小さくなるため、屈折により津波が集中する。</p>
湾地形での波高の上昇	 <p>湾、V字谷、U字谷 T_0: 湾内水の固有周期 H: 湾内平均水深</p>	<p>遠浅の湾地形では浅海域への流れ込んだ内は反射を繰り返した挙動となり、津波の周期が湾内水の固有周期と一致すると、波高が大きくなる。</p>
湾到達後の湾内での継続波としての挙動		<p>湾横断幅が湾縦断方向の長さより大きい凹地形湾では、陸で反射した津波が陸棚で捕捉されて沿岸方向への伝播となるエッジ波が発生することがある。</p>