

# 第1回 地震と津波の基礎

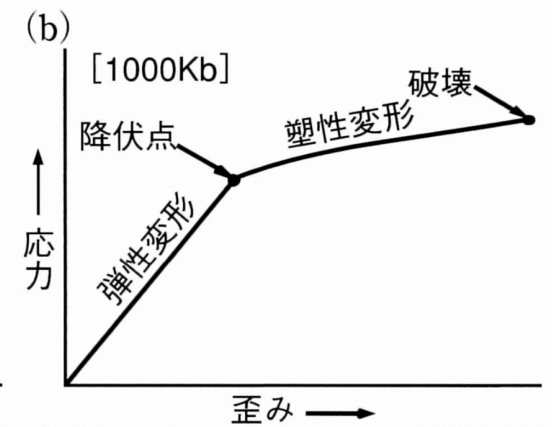
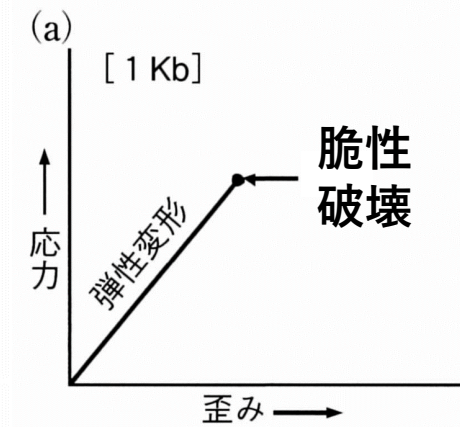
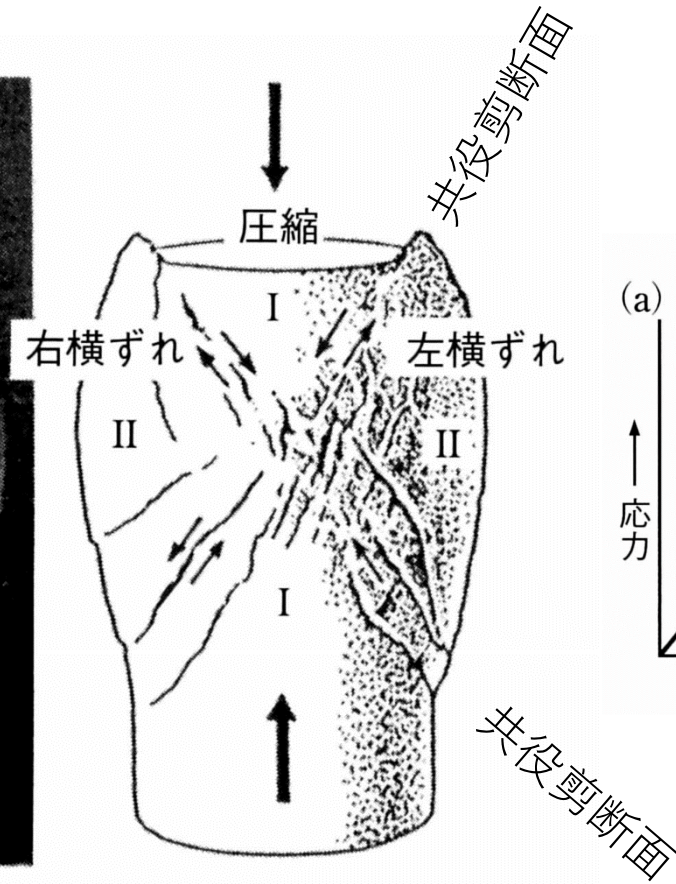
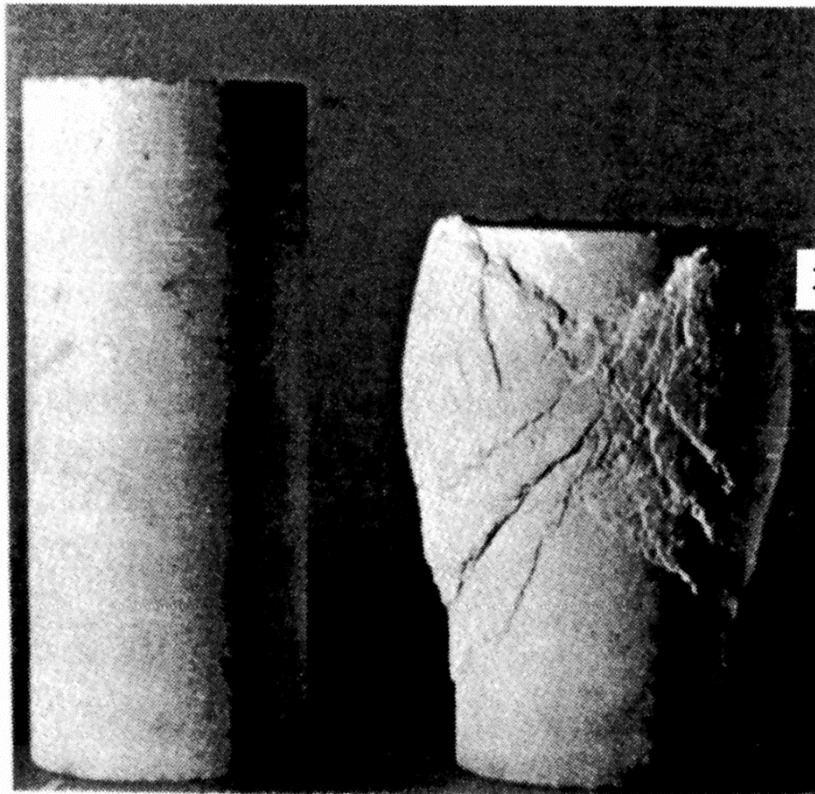
---

- 地震と地震動
- 津波
- 地殻変動

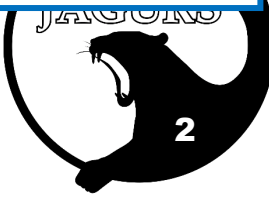
担当：馬場俊孝（徳島大学）



# 地震 = 地下の岩石の破壊

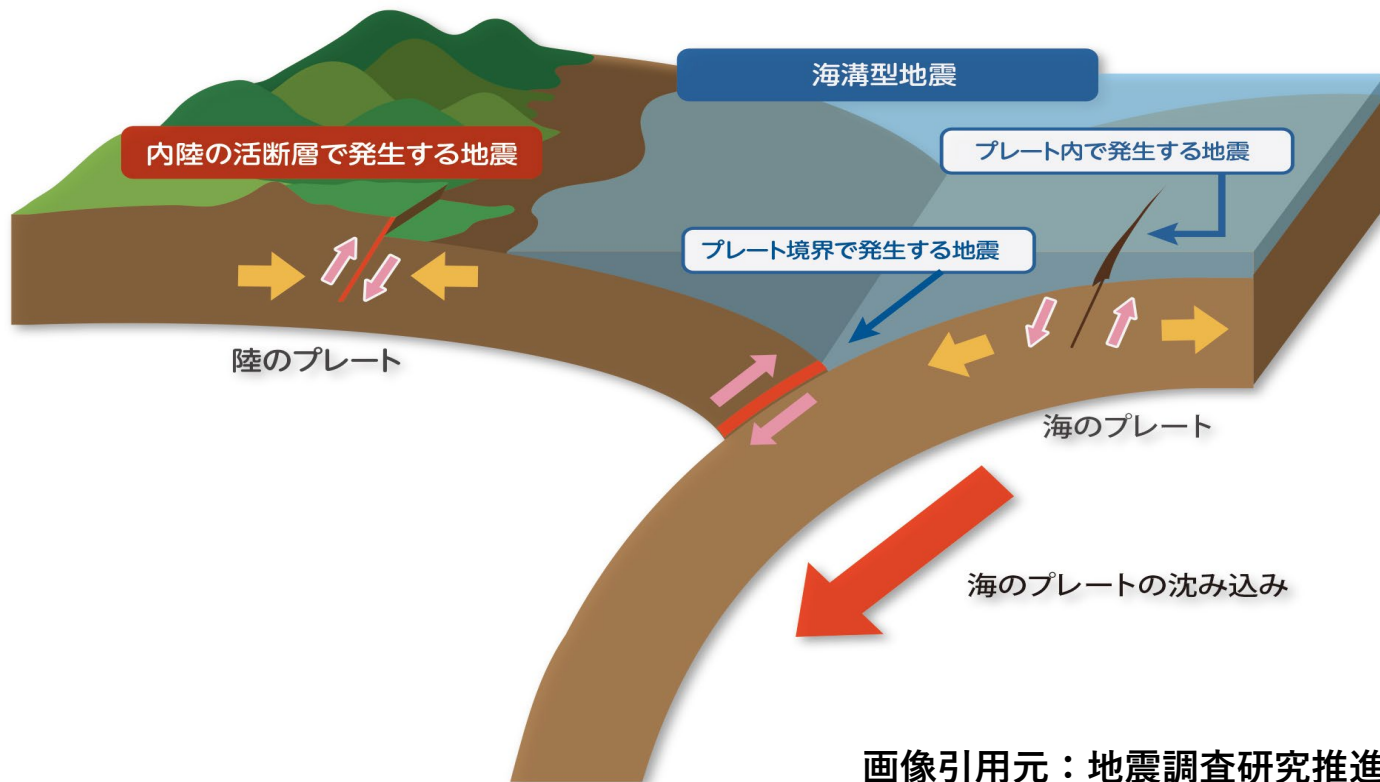


画像引用元： ???

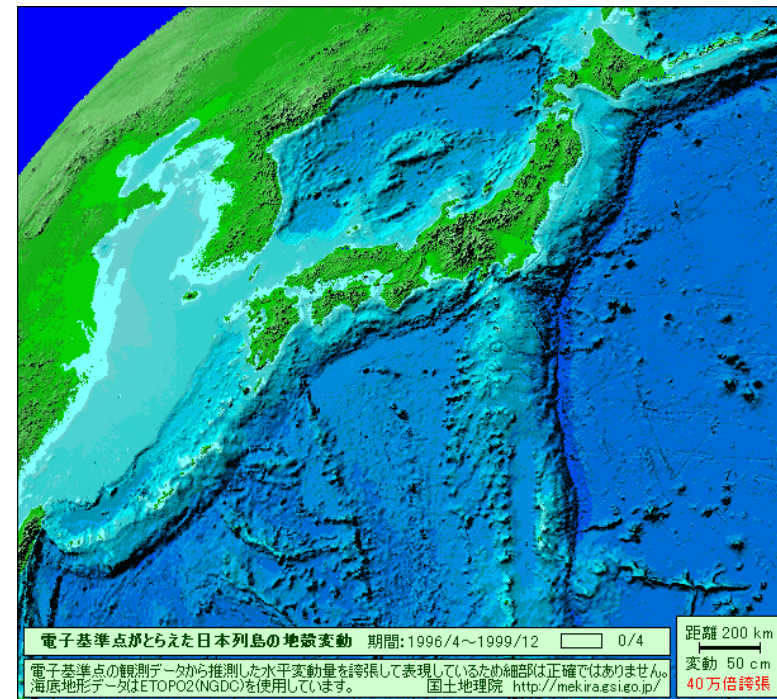


# プレート境界地震・プレート内地震

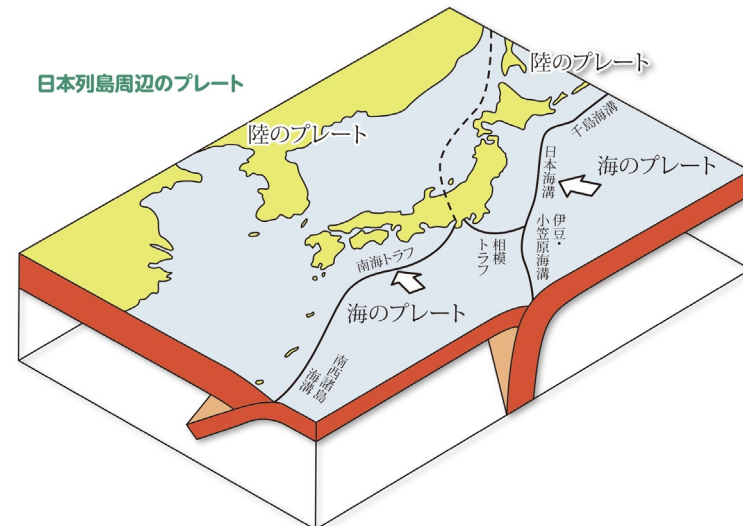
日本列島周辺で発生する地震のタイプ



画像引用元：地震調査研究推進本部HP

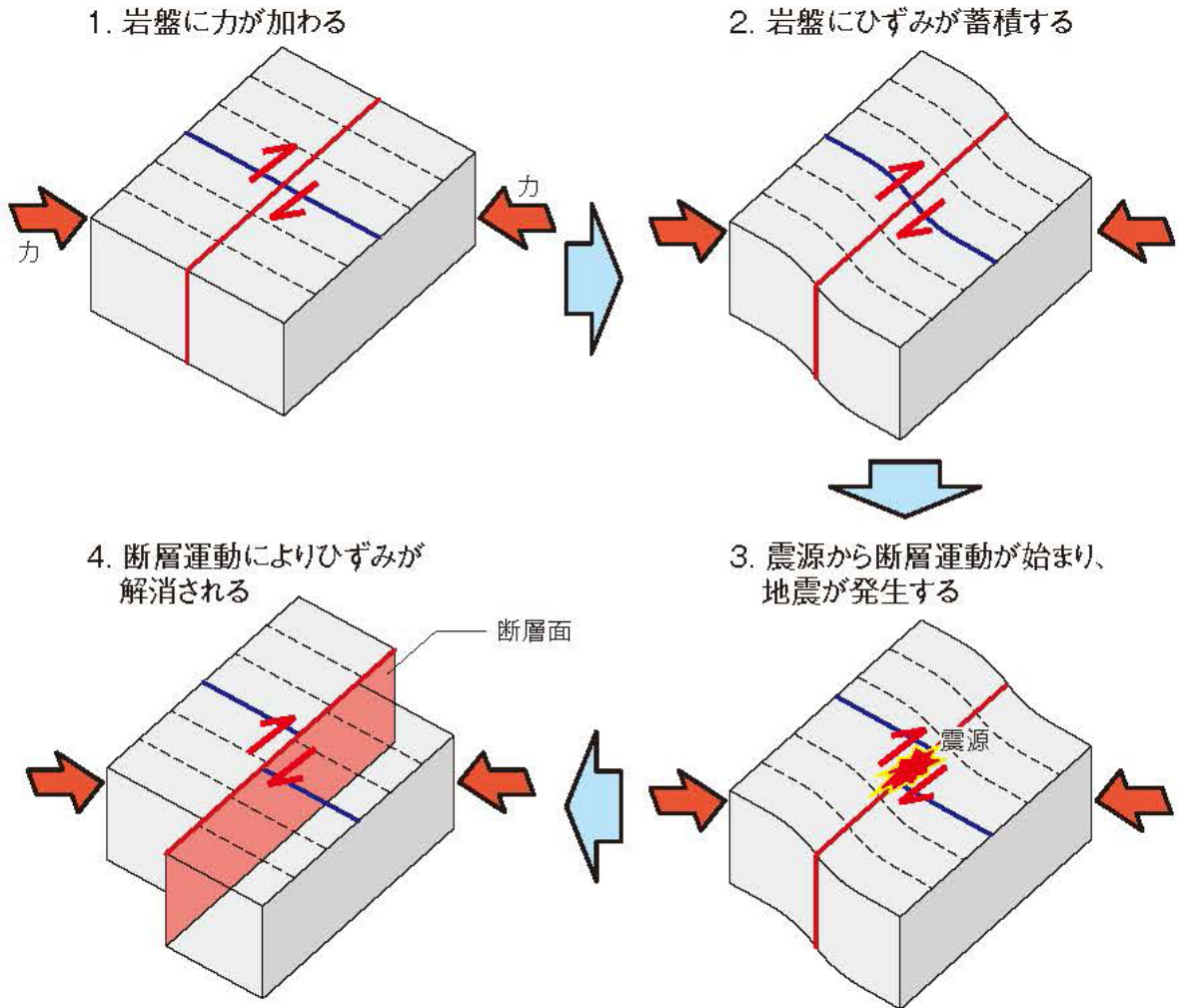


画像引用元：国土地理院HP





# 弾性反発論



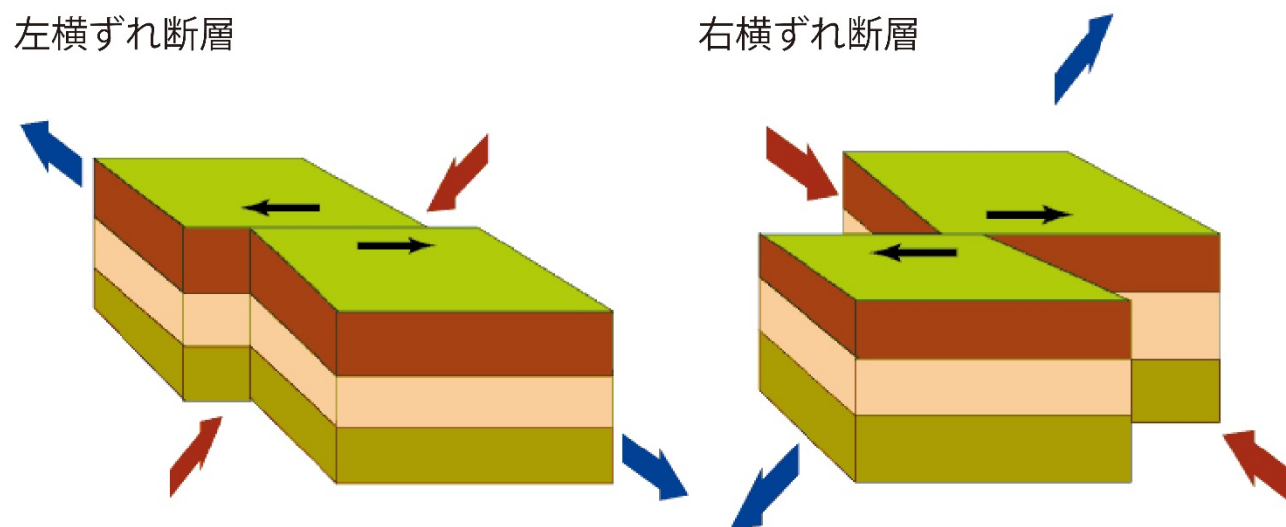
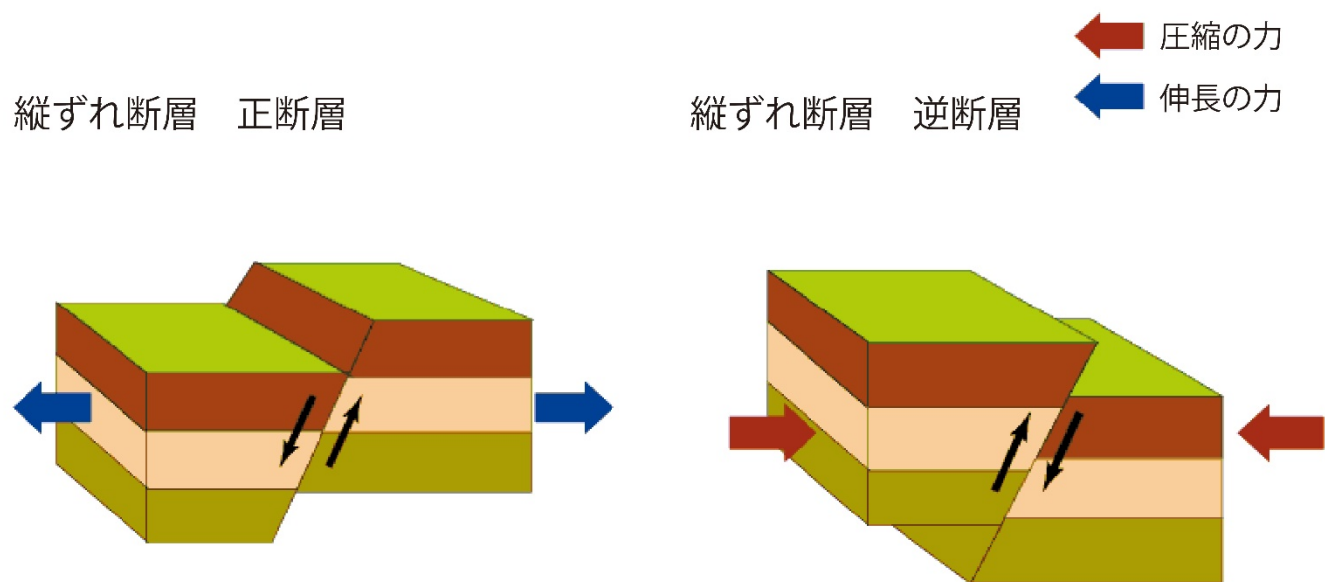
2016年熊本地震の地表地震断層



画像引用元：地震調査研究推進本部HP



# 逆断層・正断層・横ずれ断層



画像引用元：地震調査  
研究推進本部HP



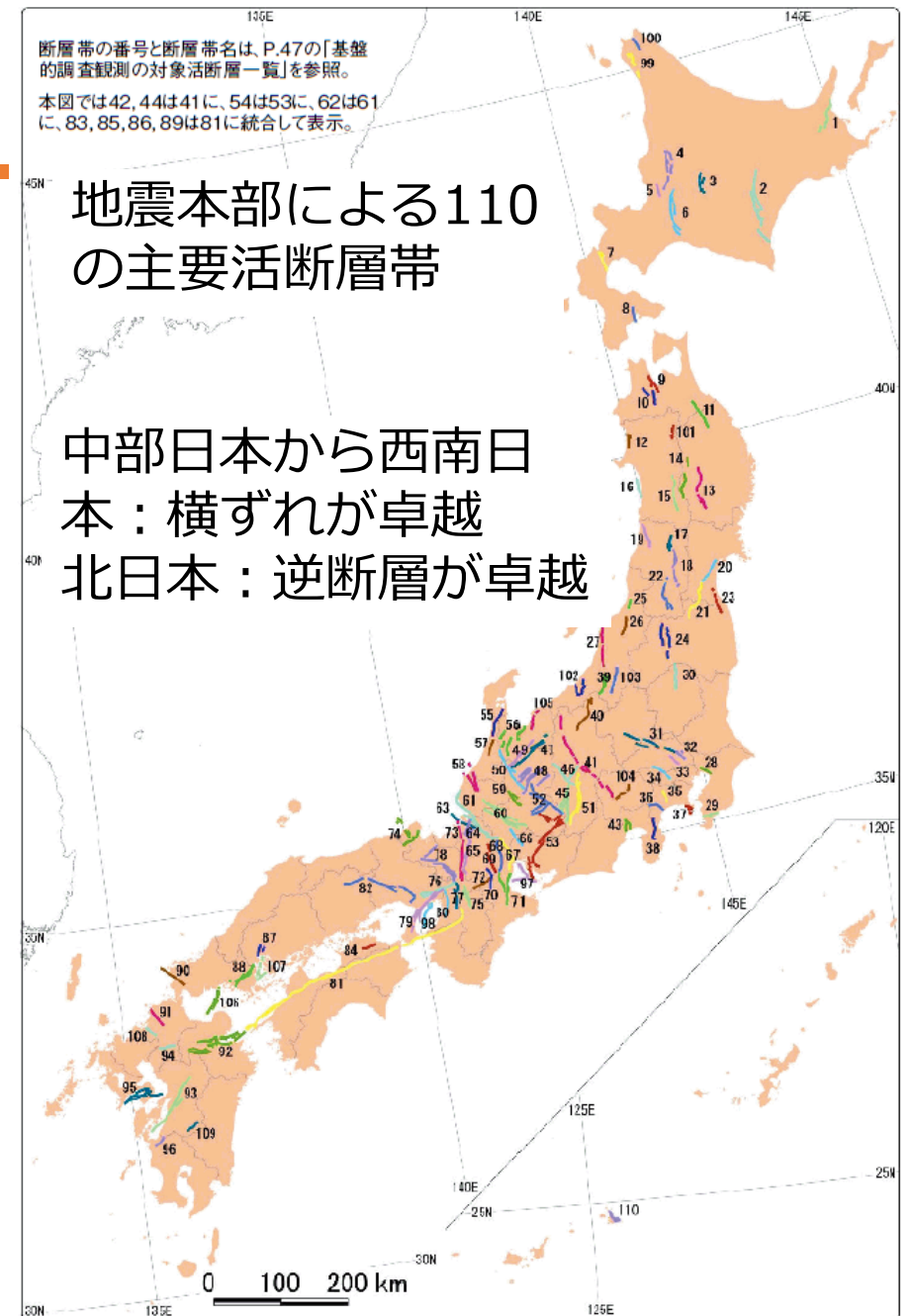
# 内陸型（活断層）地震 陸側のプレート内地震

## 【活断層とは】

- 数十万年前以降に繰り返し活動し、  
将来も活動すると考えられる断層
- 日本では2000以上発見
- 110の主要活断帯

## 【活断層の特徴】

- (1) 一定の時間をおいて、繰り返して活動する
- (2) いつも同じ向きにずれる
- (3) ずれの速さは断層ごとに大きく異なる
- (4) 活動間隔は極めて長い  
地震発生間隔は1000年から数万年
- (5) 長い断層ほど大地震を起こす

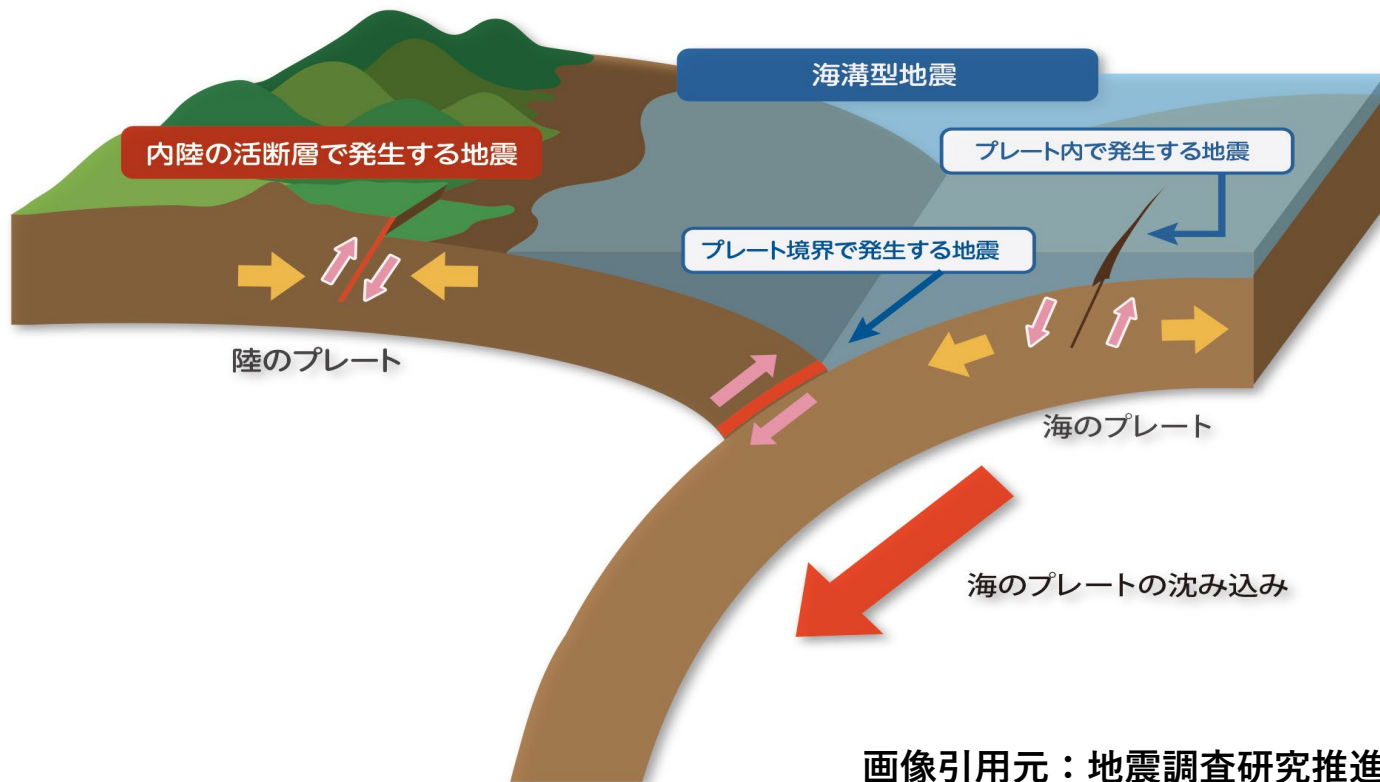


画像引用元：地震調査研究推進本部HP

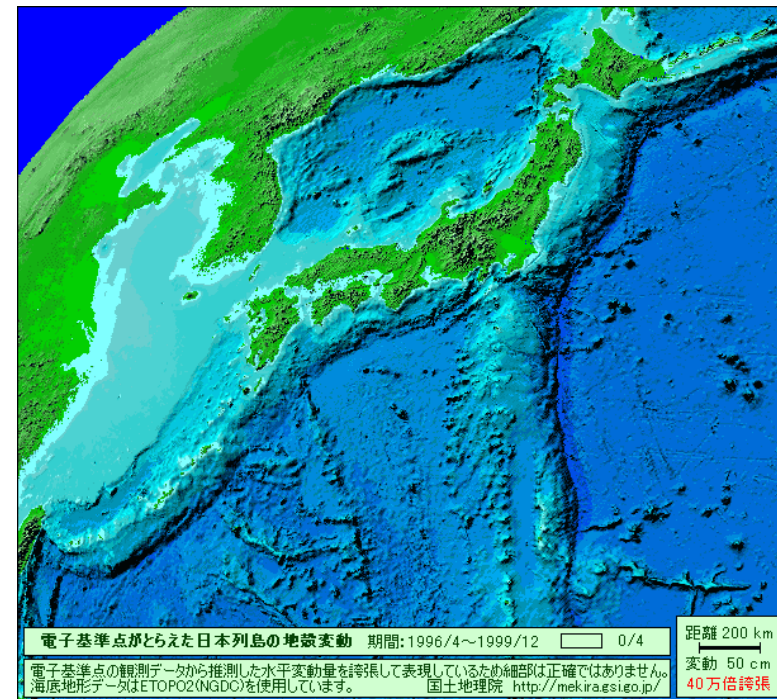


# プレート境界地震・プレート内地震

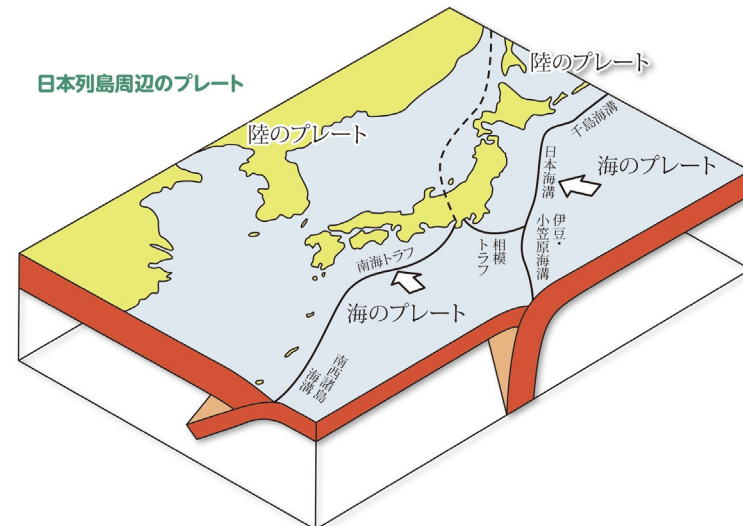
日本列島周辺で発生する地震のタイプ



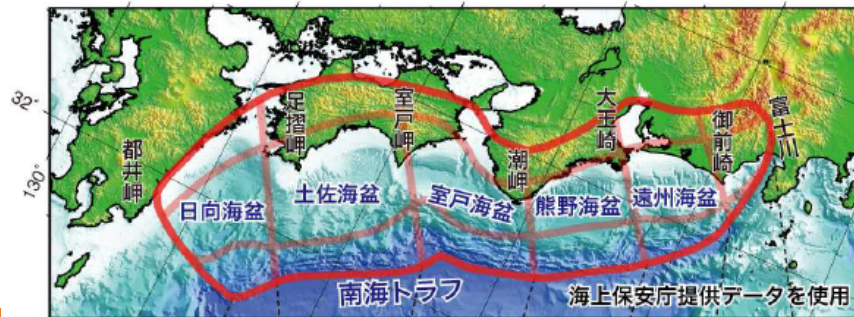
画像引用元：地震調査研究推進本部HP



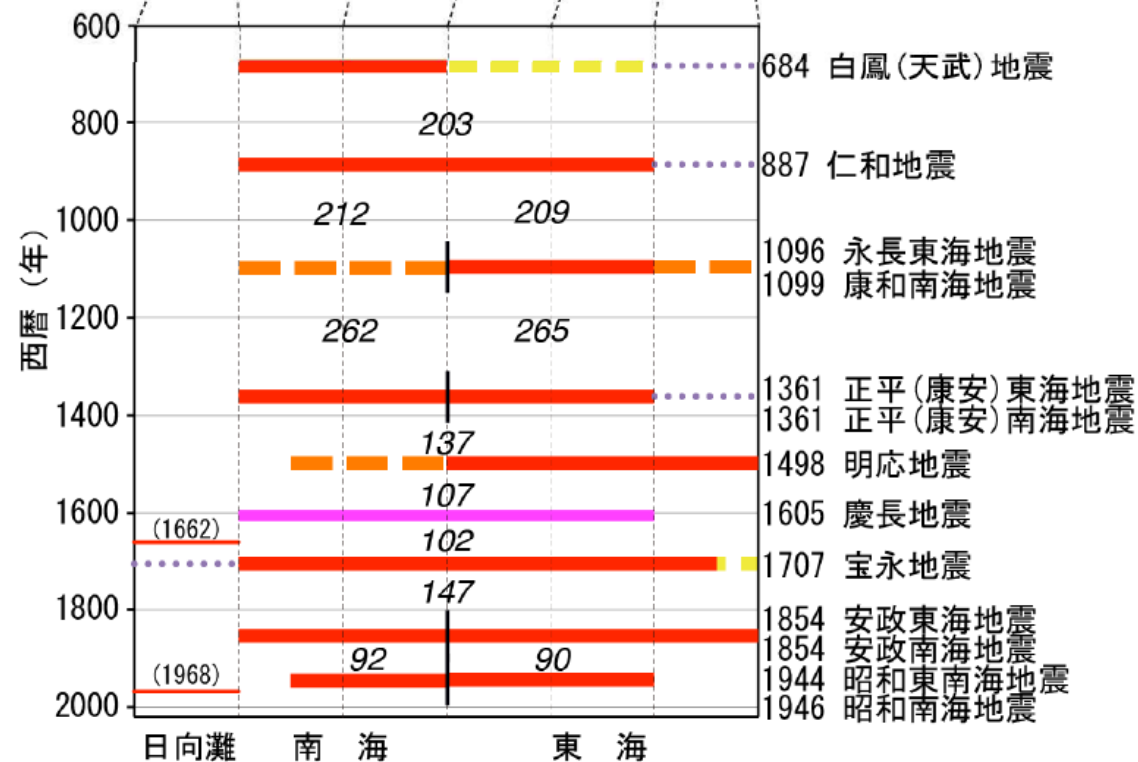
画像引用元：国土地理院HP



# 南海トラフ地震の歴史



- 100年から200年周期で繰り返しM8クラスの地震が発生している。
- 1707年には、東海・東南海・南海地震が同時に発生したこともある。
- 東海側の地震が先に発生することが多い。



- 確実な震源域
- 確実視されている震源域
- 可能性のある震源域
- ..... 説がある震源域
- 津波地震の可能性が高い地震
- 日向灘のプレート間地震(M7クラス)

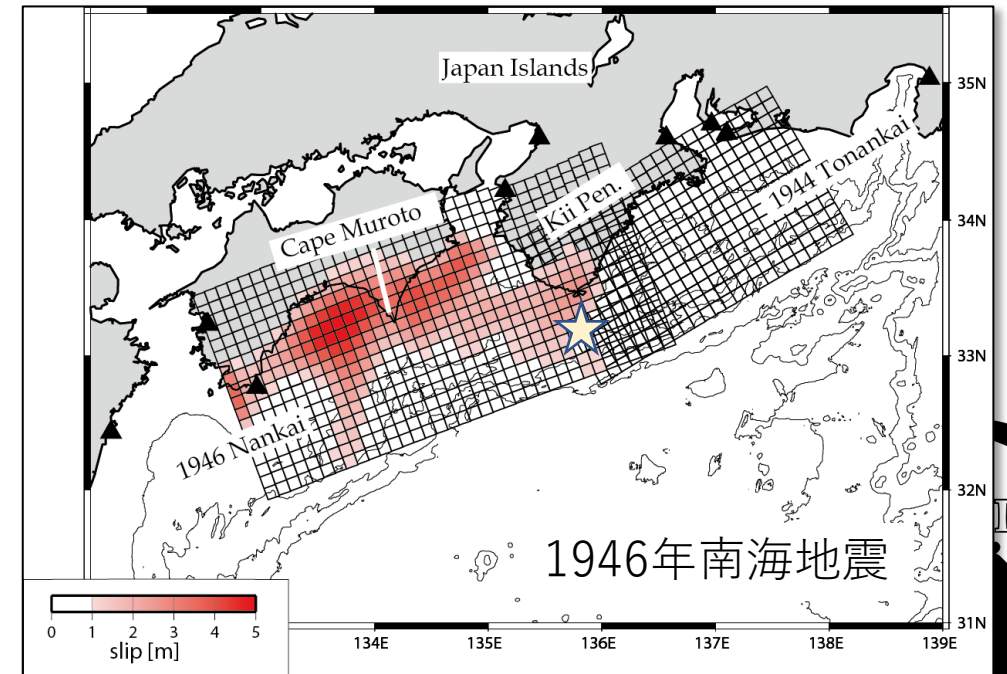
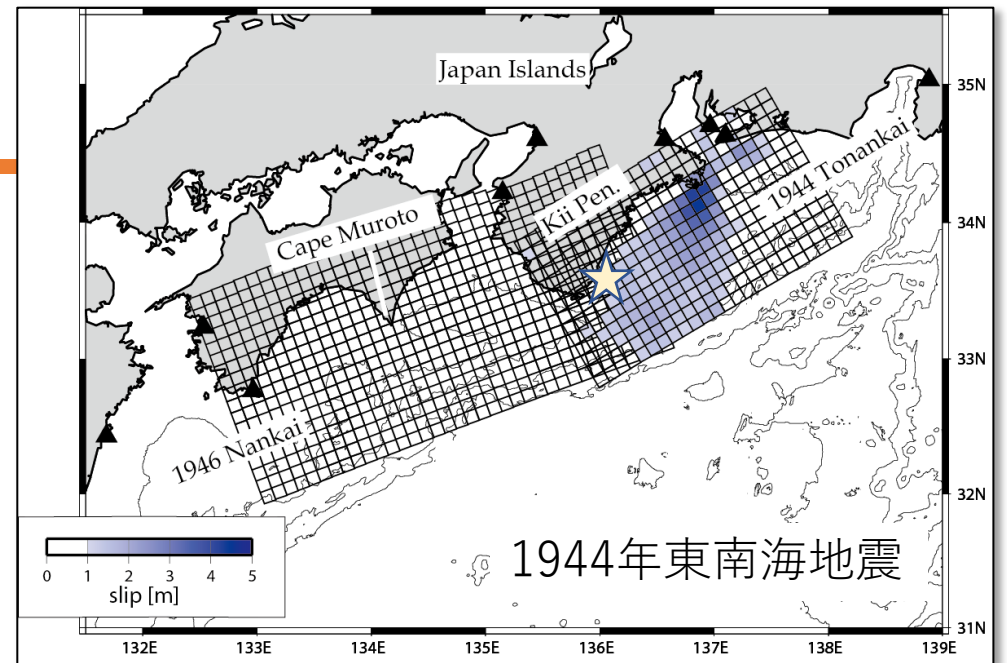
画像提供元：地震調査研究推進本部HP



# 震源過程

## キーワード

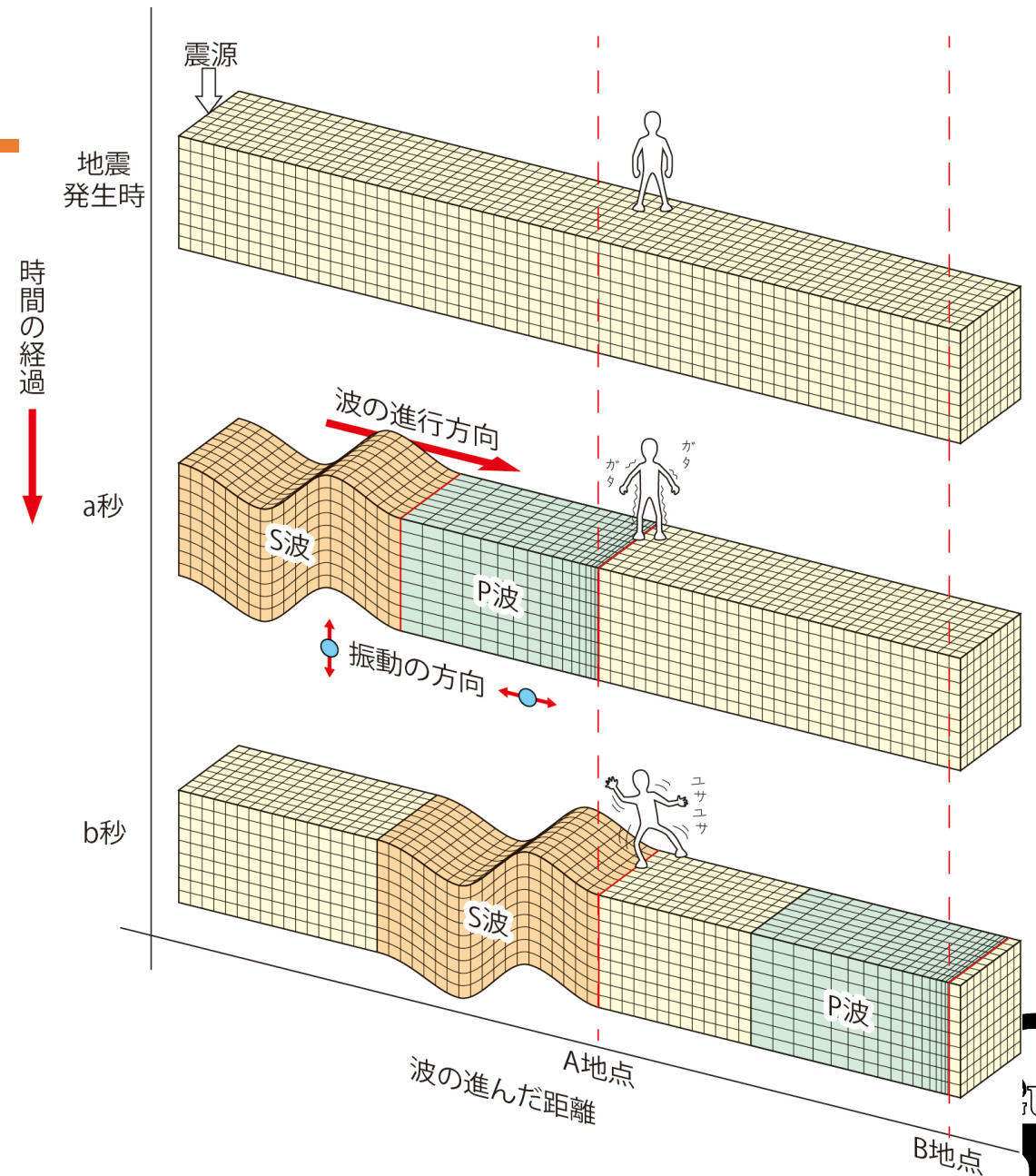
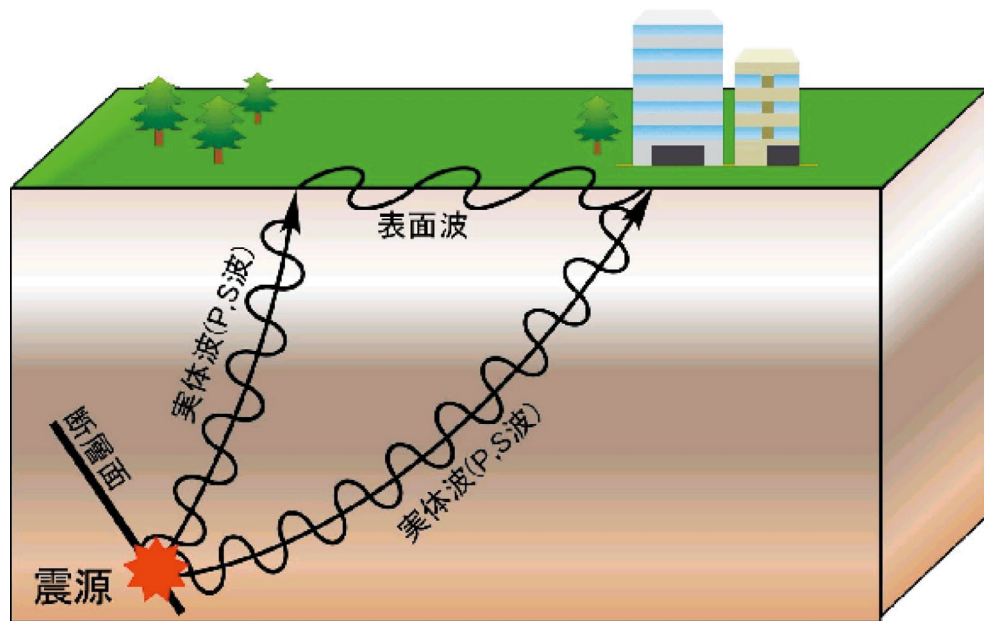
- 震源
- 震央
- 破壊伝播速度 (2~3km/s)
- すべり速度 (2~3m/s)
- すべり量分布
- アスペリティ (すべり量が大きい領域)
- 震源域



画像引用元 : Baba et al. (2005)

# 地震波の種類


- 実体波 P波 (約6km/s)  
S波 (約3km/s)
- 表面波 ラブ波, レイリー波





# 震度階級表

## 日本（気象庁）の震度階級表

<p><b>0</b></p>  <p>【震度0】 人は揺れを感じない。</p>	<p><b>1</b></p>  <p>【震度1】 屋内で静かにしている人の中には、揺れをわずかに感じる人がいる。</p>	<p><b>2</b></p>  <p>【震度2】 屋内で静かにしている人の大半が、揺れを感じる。</p>	<p><b>3</b></p>  <p>【震度3】 屋内にいる人のほとんどが、揺れを感じる。</p>
<p><b>4</b></p>  <p>【震度4】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●ほとんどの人が驚く。</li> <li>●電灯などのつり下げ物は大きく揺れる。</li> <li>●座りの悪い置物が、倒れることがある。</li> </ul>	<p><b>6弱</b></p>  <p>【震度6弱】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●立っていることが困難になる。</li> <li>●固定していない家具の大半が移動し、倒れるものもある。ドアが開かなくなることがある。</li> <li>●壁のタイルや窓ガラスが破損、落下することがある。</li> <li>●耐震性の低い木造建物は、瓦が落下したり、建物が傾いたりすることがある。倒れるものもある。</li> </ul> <p>耐震性が高い      耐震性が低い</p>		
<p><b>5弱</b></p>  <p>【震度5弱】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●大半の人が、恐怖を覚え、物につかまりたいと感じる。</li> <li>●棚にある食器類や本が落ちることがある。</li> <li>●固定していない家具が移動することがあり、不安定なものは倒れることがある。</li> </ul>	<p><b>6強</b></p>  <p>【震度6強】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●はわないと動くことができない飛ばされることもある。</li> <li>●固定していない家具のほとんどが移動し、倒れるものが多くなる。</li> <li>●耐震性の低い木造建物は、傾くものや、倒れるものが多くなる。</li> <li>●大きな地割れが生じたり、大規模な地すべりや山体の崩壊が発生することがある。</li> </ul> <p>耐震性が高い      耐震性が低い</p>		
<p><b>5強</b></p>  <p>【震度5強】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●物につかまらなると歩くことが難しい。</li> <li>●棚にある食器類や本で落ちるものが多くなる。</li> <li>●固定していない家具が倒れることがある。</li> <li>●補強されていないブロック塀が崩れることがある。</li> </ul>	<p><b>7</b></p>  <p>【震度7】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●耐震性の低い木造建物は、傾くものや、倒れるものがさらに多くなる。</li> <li>●耐震性の高い木造建物でも、まれに傾くことがある。</li> <li>●耐震性の低い鉄筋コンクリート造の建物では、倒れるものが増える。</li> </ul> <p>耐震性が高い      耐震性が低い</p>		

画像引用元：気象庁HP

## 世界で多く利用されている震度階級表 (改正メルカリ震度階級)

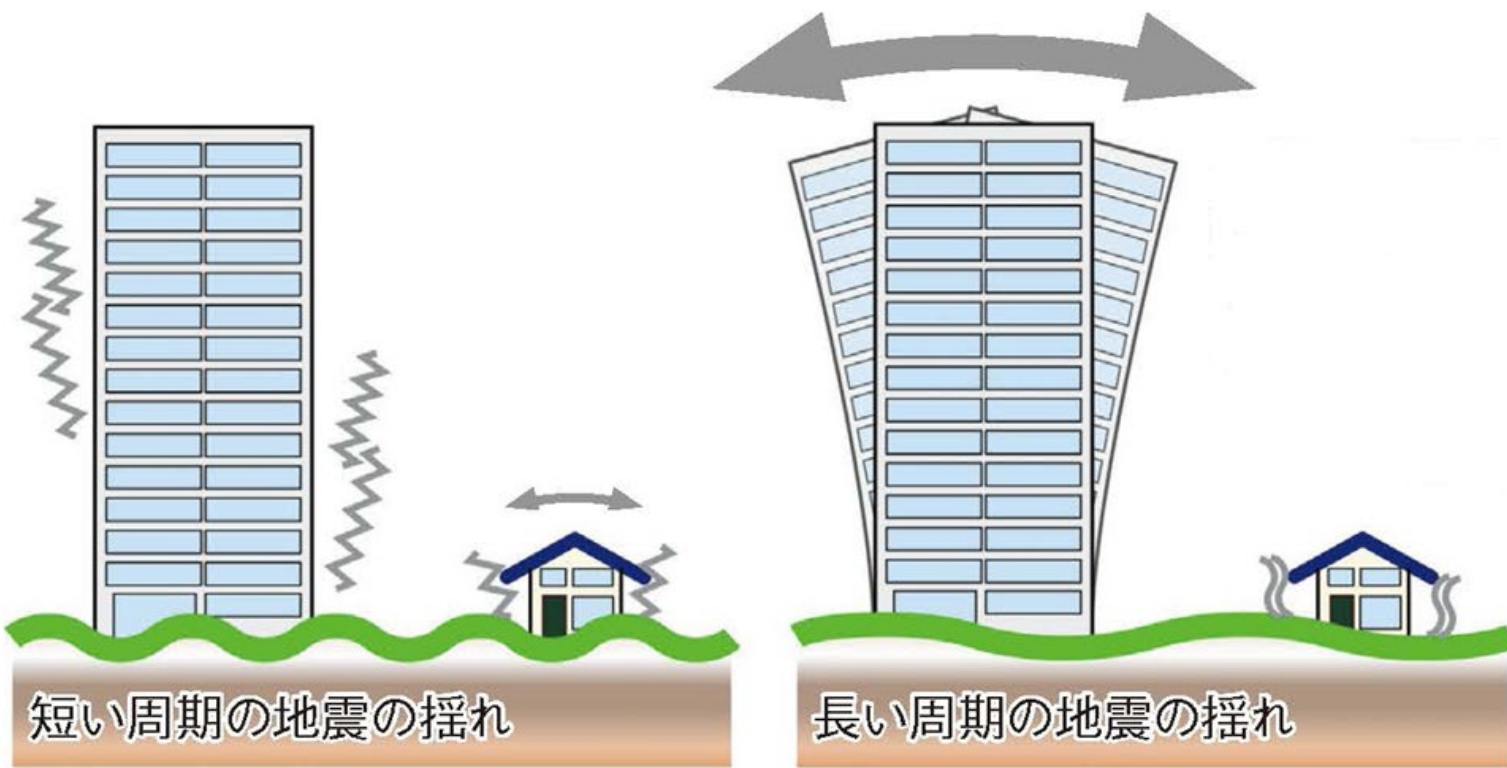
<b>I. Not felt</b>	Not felt except by very few under especially favorable conditions.
<b>II. Weak</b>	Felt only by a few people at rest, especially on upper floors of buildings.
<b>III. Weak</b>	Felt quite noticeably by people indoors, especially on upper floors of buildings. Many people do not recognize it as an earthquake. Standing motor cars may rock slightly. Vibrations similar to the passing of a truck. Duration estimated.
<b>IV. Light</b>	Felt indoors by many, outdoors by few during the day. At night, some awakened. Dishes, windows, doors disturbed; walls make cracking sound. Sensation like heavy truck striking building. Standing motor cars rocked noticeably.
<b>V. Moderate</b>	Felt by nearly everyone; many awakened. Some dishes, windows broken. Unstable objects overturned. <i>Pendulum clocks</i> may stop.
<b>VI. Strong</b>	Felt by all, many frightened. Some heavy furniture moved; a few instances of fallen plaster. Damage slight.
<b>VII. Very strong</b>	Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; damage considerable in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken.
<b>VIII. Severe</b>	Damage slight in specially designed structures; considerable damage in ordinary substantial buildings with partial collapse. Damage great in poorly built structures. Fall of chimneys, factory stacks, columns, monuments, walls. Heavy furniture overturned.
<b>IX. Violent</b>	Damage considerable in specially designed structures; well-designed frame structures thrown out of plumb. Damage great in substantial buildings, with partial collapse. Buildings shifted off foundations. Liquefaction.
<b>X. Extreme</b>	Some well-built wooden structures destroyed; most masonry and frame structures destroyed with foundations. Rails bent.
<b>XI. Extreme</b>	Few, if any, (masonry) structures remain standing. Bridges destroyed. Broad fissures in ground. Underground pipe lines completely out of service. Earth slumps and land slips in soft ground. Rails bent greatly.
<b>XII. Extreme</b>	Damage total. Waves seen on ground surfaces. Lines of sight and level distorted. Objects thrown upward into the air.



# 長周期地震動

周期の長いゆっくりとした揺れ（地震動）

東北地方太平洋沖地震や南海トラフ地震のような規模の大きい地震に伴いやすい  
高層ビルが共振し、建物が大きく揺れる恐れ



長周期地震動階級表（気象庁）

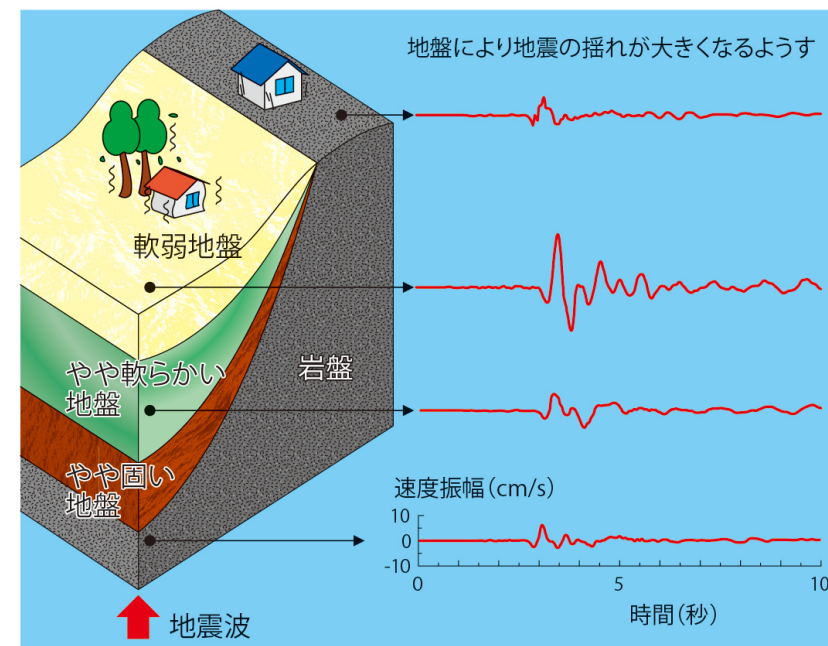
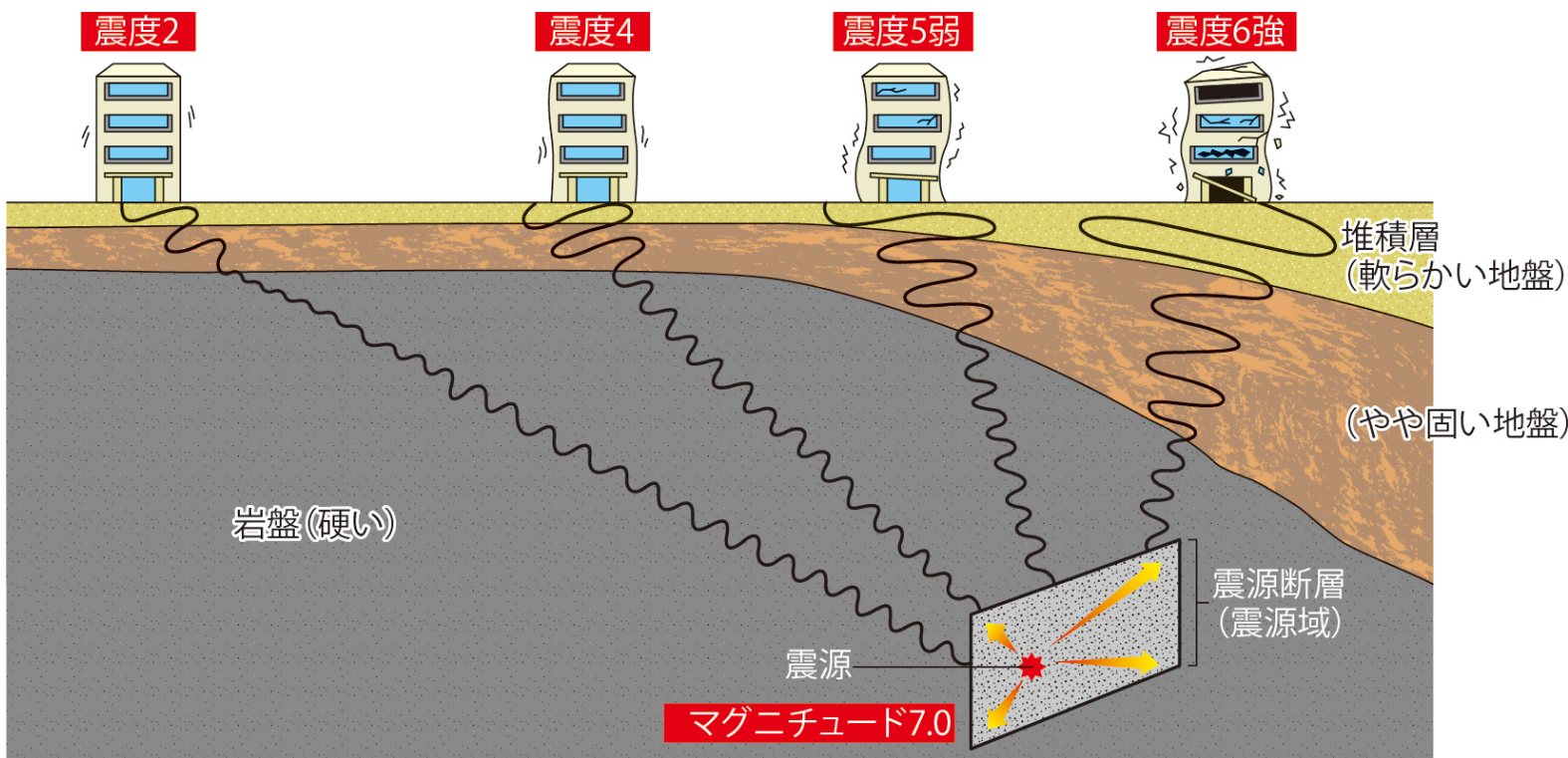
長周期地震動階級の凡例：■ 階級1 ■ 階級2 ■ 階級3 ■ 階級4

長周期地震動階級	人の体感・行動	室内の状況	備考
長周期地震動階級1	室内にいたほとんどの人が揺れを感じる。驚く人もいる。	ブラインドなど吊り下げものが大きく揺れる。	—
長周期地震動階級2	室内で大きな揺れを感じ、物につかまりたいと感じる。物につかまらなると歩くことが難しいなど、行動に支障を感じる。	キャスター付き什器がわずかに動く。棚にある食器類、書棚の本が落ちることがある。	—
長周期地震動階級3	立っていることが困難になる。	キャスター付き什器が大きく動く。固定していない家具が移動することがあり、不安定なものは倒れることがある。	間仕切壁などにひび割れ・亀裂が入ることがある。
長周期地震動階級4	立っていることができず、はわないと動くことができない。揺れにほんろうされる。	キャスター付き什器が大きく動き、転倒するものがある。固定していない家具の大半が移動し、倒れるものもある。	間仕切壁などにひび割れ・亀裂が多くなる。

# 震度とマグニチュード

震度：ある地点での揺れの強さ。震源からの距離や地盤条件によって左右される。

マグニチュード：地震の破壊の大きさ。





# Quiz : 地震の規模(マグニチュード)は どうやって測る?

---

次の中から選べ

1. 地表で見えた断層の長さから測る
2. ずれの大きさから測る
3. 揺れの強さから測る
4. 発生した津波の大きさから測る

正解は、すべて



# いろいろなマグニチュード

リヒタースケール（1930年代 C.F. リヒター）

震源から100km離れた地点に置かれた当時の標準地震計で記録された地動の揺れの最大振幅をマイクロメートル（ $\mu\text{m}$ ）単位で表し、その常用対数により地震の大きさを定義した。

表面波マグニチュード

周期 20 秒付近の表面波の最大振幅から測る

※気象庁が決める気象庁マグニチュードも表面波マグニチュードの一種

実体波マグニチュード

実体波（P波・S波）の最大振幅から測る

津波マグニチュード

津波の最大振幅から測る

モーメントマグニチュード

断層面積とずれの量から測る



# モーメントマグニチュード ( $M_w$ )

断層の面積とずれの量から求められたマグニチュード

地震モーメント

$$M_0 = \mu SD \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

断層面積      ずれの量

剛性率：1m x 1mの断層を1m  
ずらすために必要な力 ~50GPa

$$\log_{10} M_0 = 1.5M_w + 9.1$$



# Quiz: $M_w$ が1大きくなると $M_o$ は どれだけ大きくなるか？

答え：およそ32倍

$$\log_{10} M_o = 1.5M_w + 9.1$$

$$M_w = 1 \text{ のとき} \quad \log_{10} M_{o,1} = 10.6 \quad M_{o,1} = 10^{10.6}$$

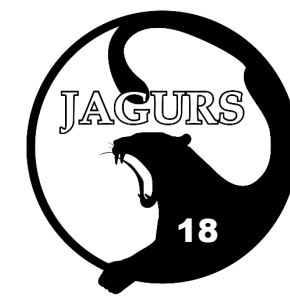
$$M_w = 2 \text{ のとき} \quad \log_{10} M_{o,2} = 12.1 \quad M_{o,2} = 10^{12.1}$$

$$\frac{M_{o,2}}{M_{o,1}} = \frac{10^{12.1}}{10^{10.6}} = 10^{1.5} = 31.6$$

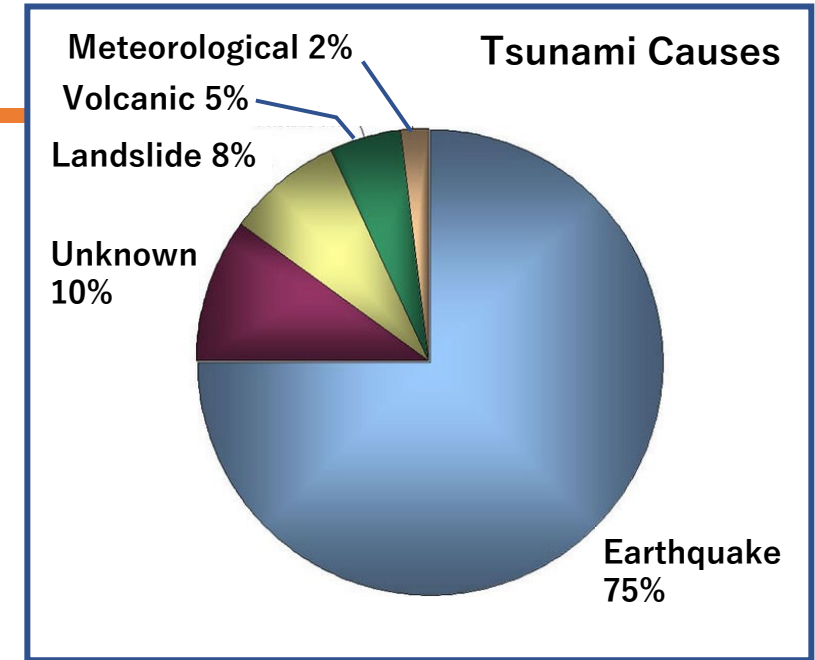
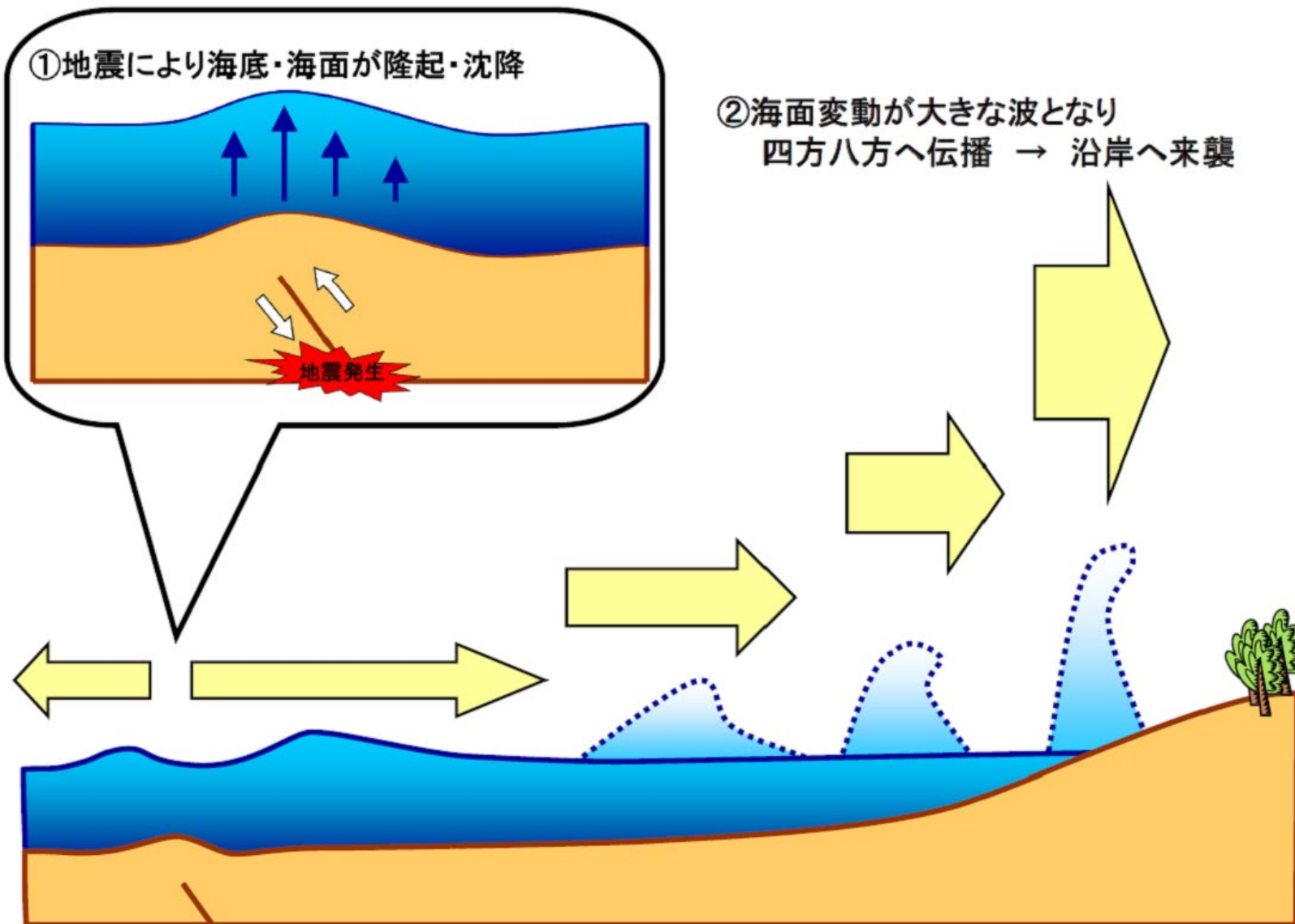


# 津波

---



# 津波の発生

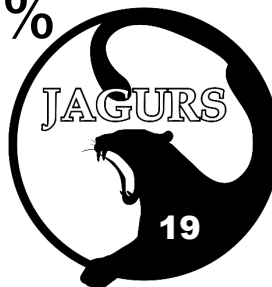


地震性津波 75%

非地震性津波 15%

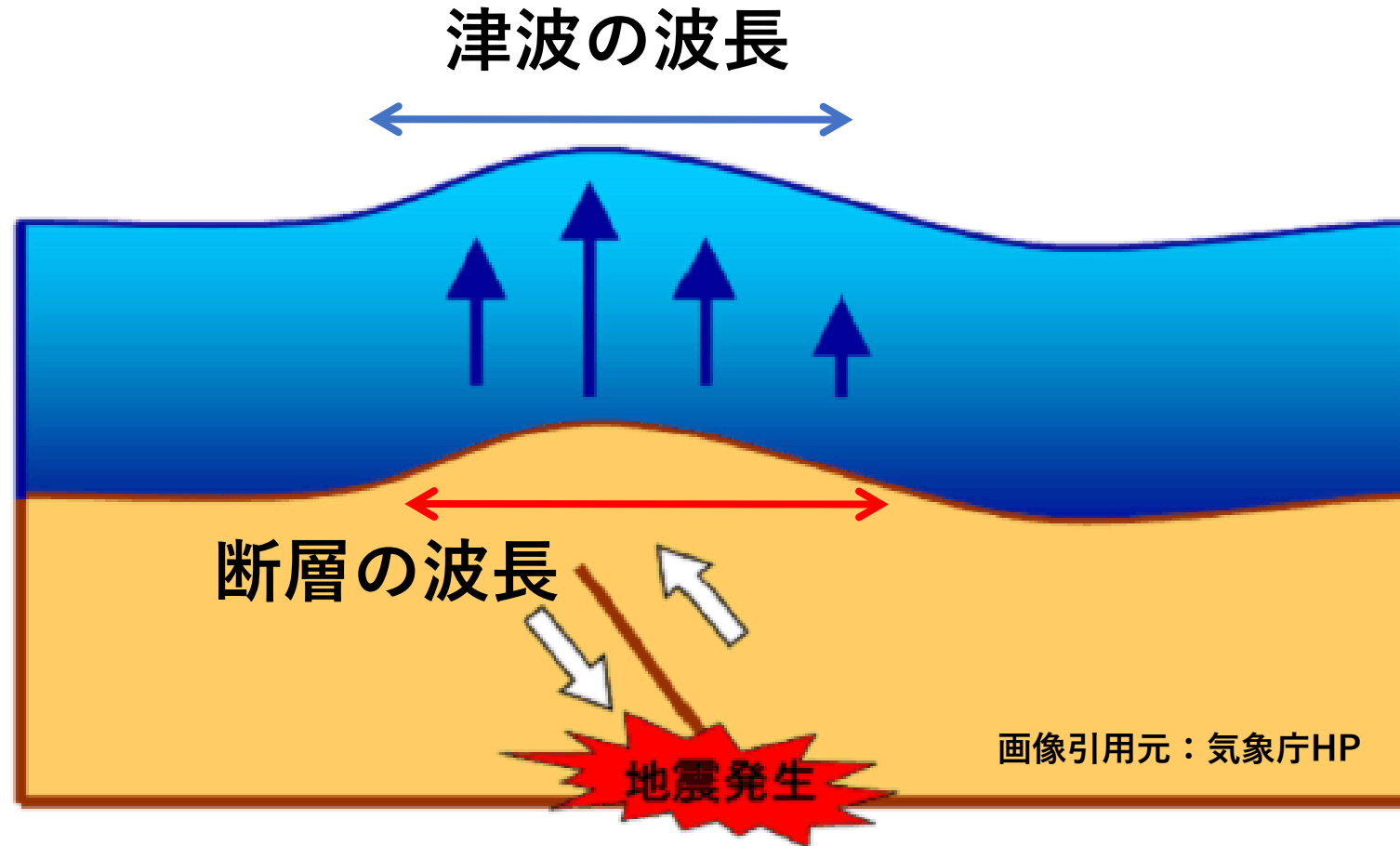
原因不明 10%

画像引用元：気象庁HP



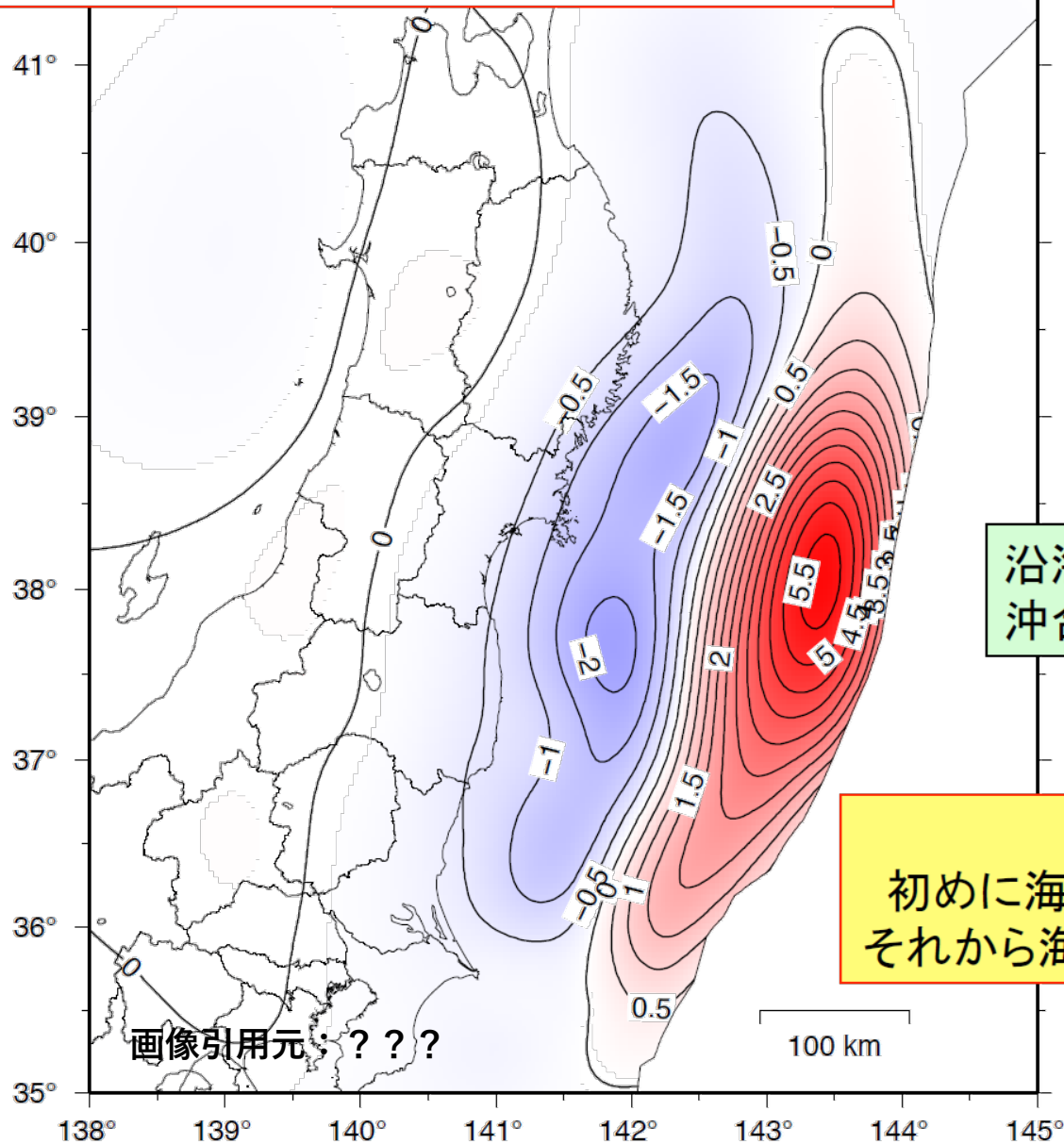


# 津波の波長 = 断層の波長



断層運動による海底の隆起・沈降が、ほぼそのままの形で海面の隆起・沈降を生じさせる。⇒ 津波の発生

# 東日本大震災での海底の隆起・沈降

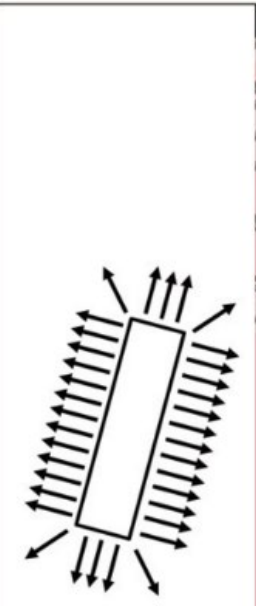


画像引用元： ???

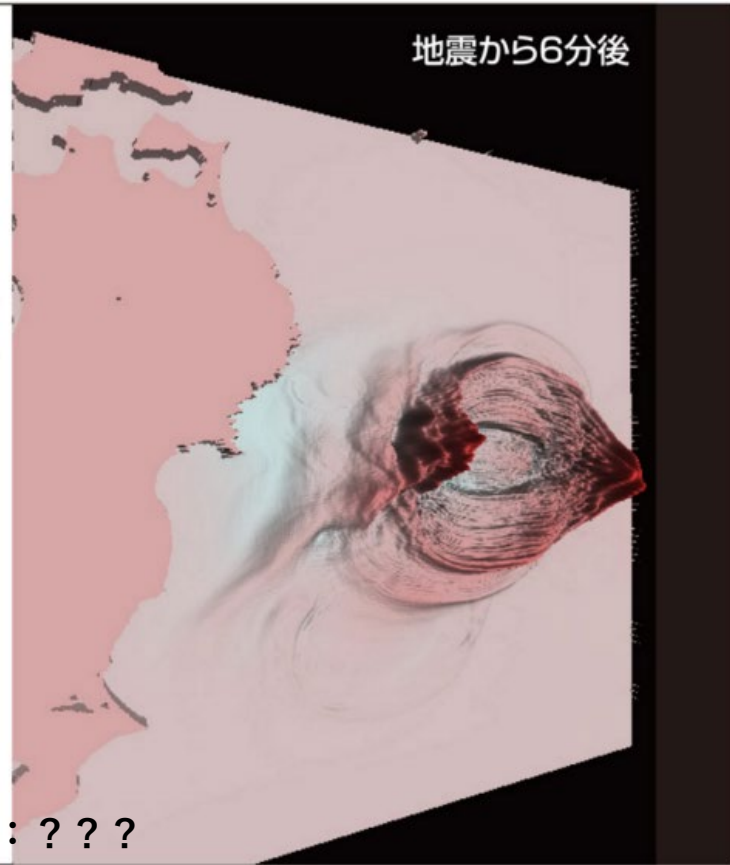
沿海で沈降(-2m)  
沖合で隆起(+5.5m)



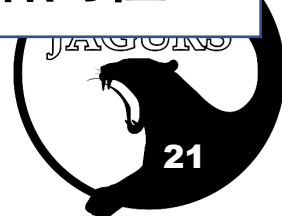
津波  
初めに海面が低下し(=引き波)、  
それから海面隆起(=押し波)が襲う



画像引用元： ???



断層の長軸の直交方向に  
大きな津波  
指向性



# Quiz : 津波と普通の波の違いは？

次の中から選べ

1. 流速
2. 密度
3. 波長
4. 温度



津波の原因：地震の断層運動  
津波の高さ：～10m以上



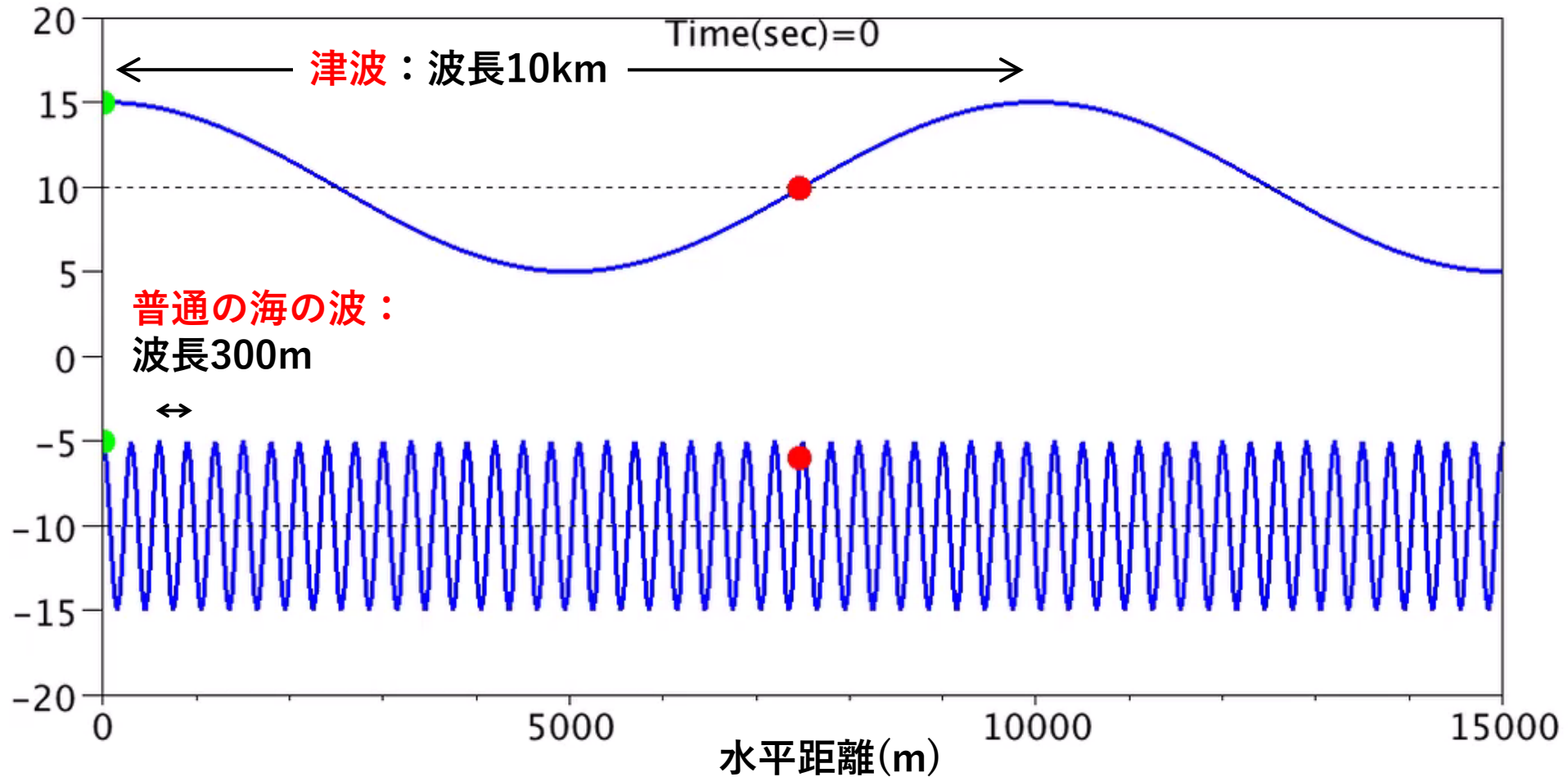
海の波の原因：風力  
海の波の高さ：～10m以上

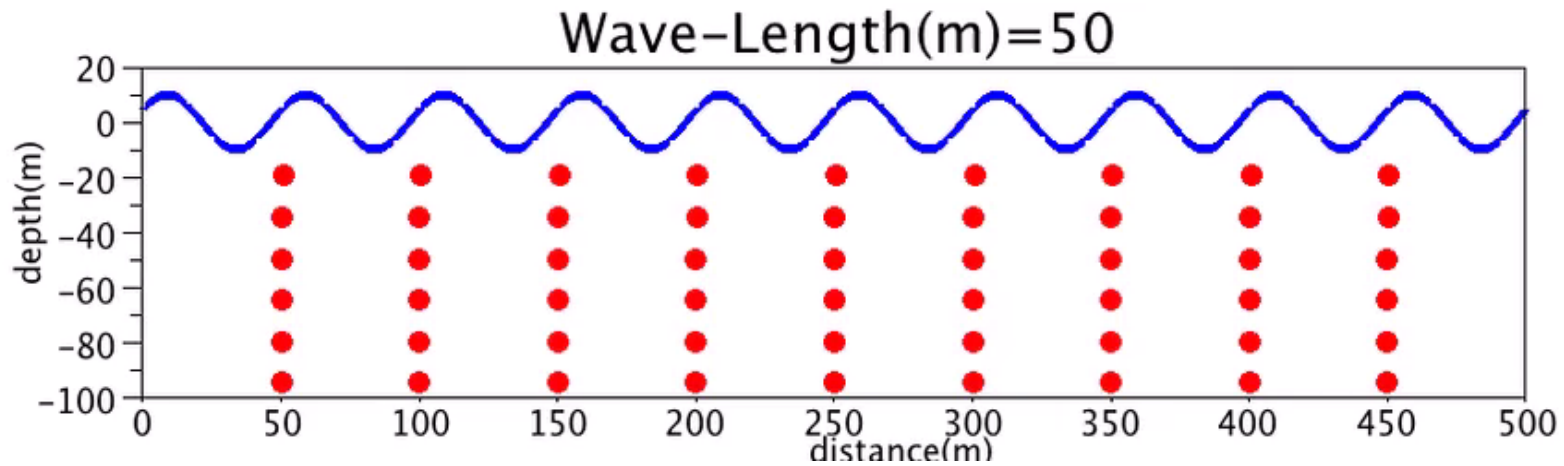
「津波」も「普通の波」も海水と言う流体の運動



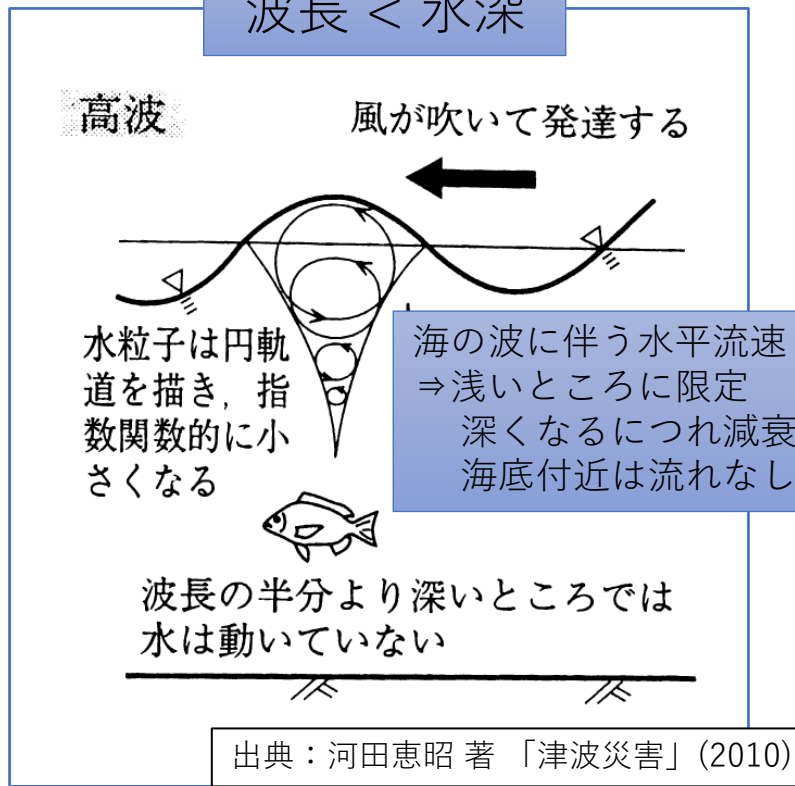
※ 「津波」は「普通の海の波」に比べて波長が圧倒的に長い

- 津波の波長 = 数km～数百km
- 海の波の波長 = 数m～数百m

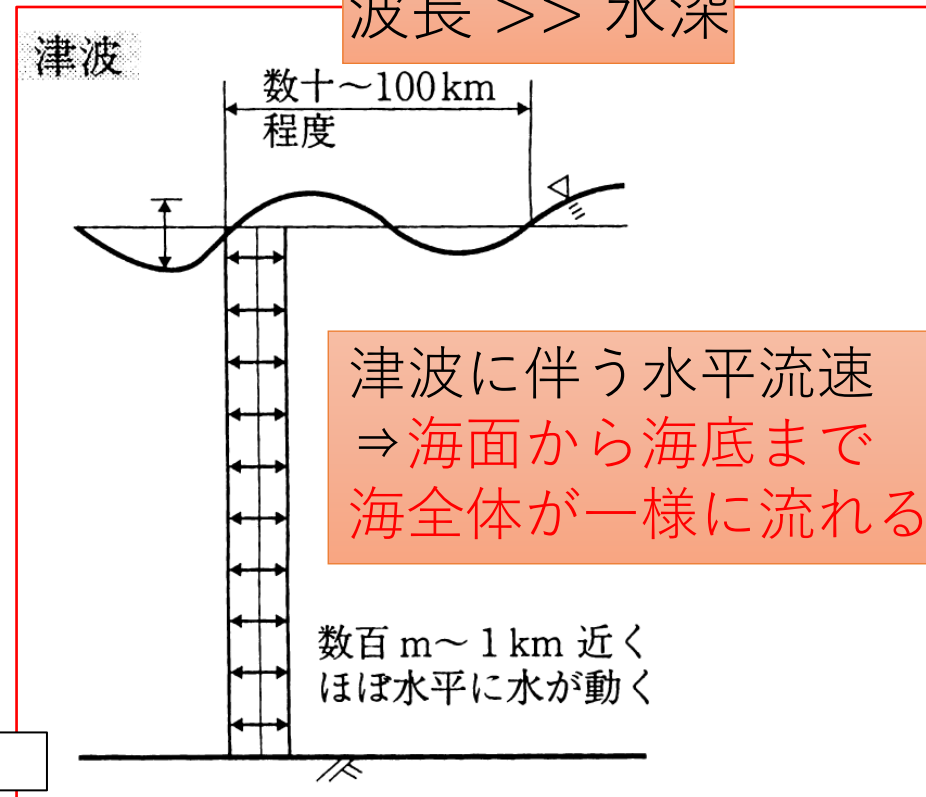




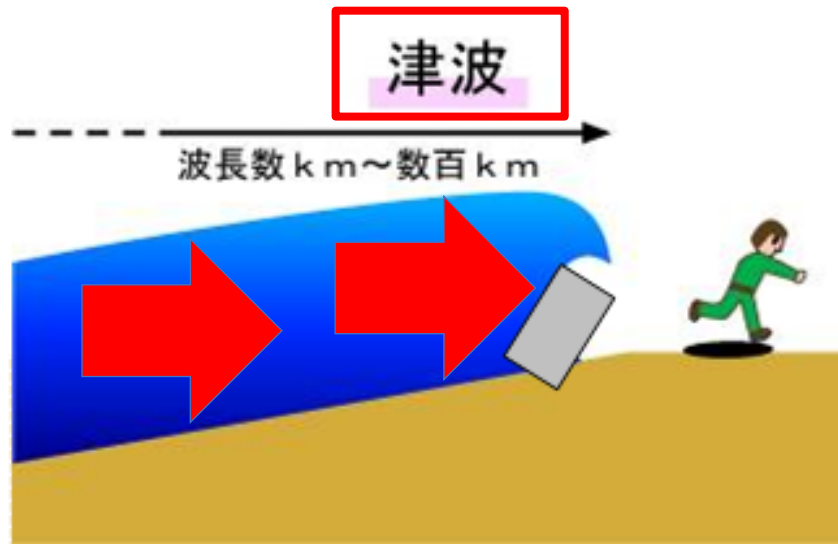
普通の海の波  
波長 < 水深



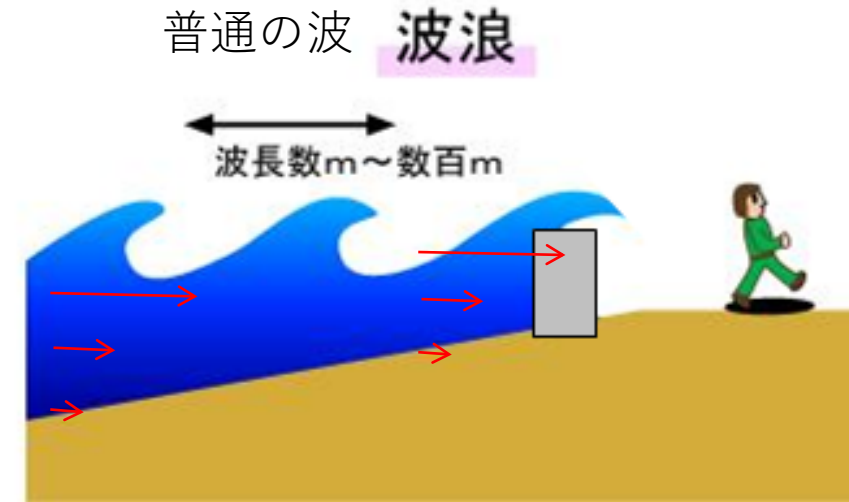
津波  
波長 >> 水深



津波は、空間スケールの非常に大きい（波長の長い）海面の盛り上がりだが、海面から海底まで強い流れを伴いながら、波の形を崩さずそのまま、沿岸に一気に押し寄せるため非常に大きな被害を及ぼす。



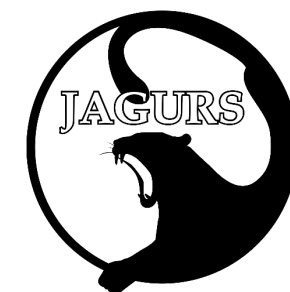
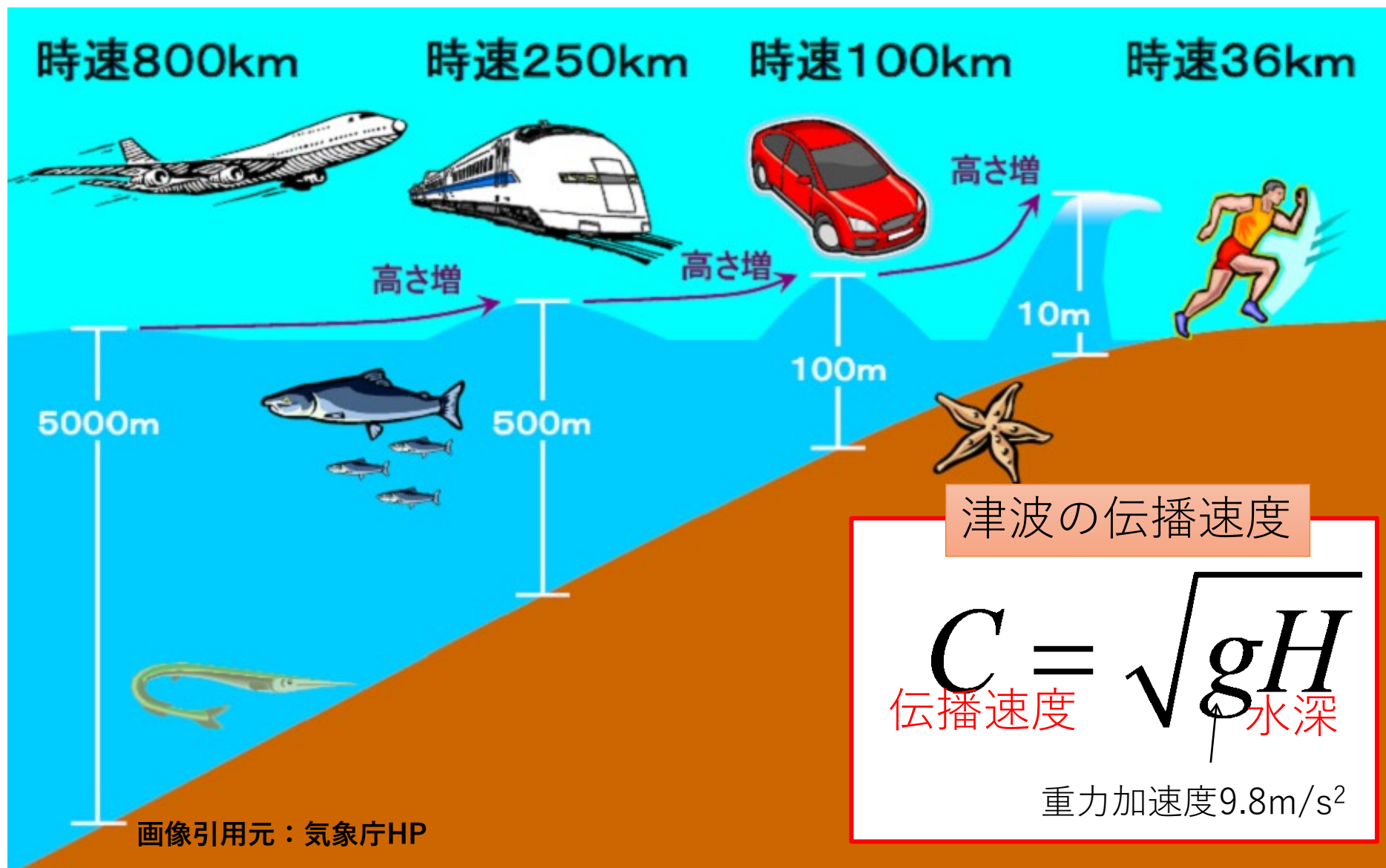
巨大な水の壁となって長時間力が加わる  
津波は、陸上のものを破壊しながら内陸まで一気に浸水する。



津波と高さが同じでも、波浪は波長が短い  
ため一つ一つの波により加わる力は小さく  
沿岸で砕け散る。

画像引用元：気象庁HP

# 津波の伝播速度





# グリーンンの公式 = 水深の4乗根に反比例して波高が増大

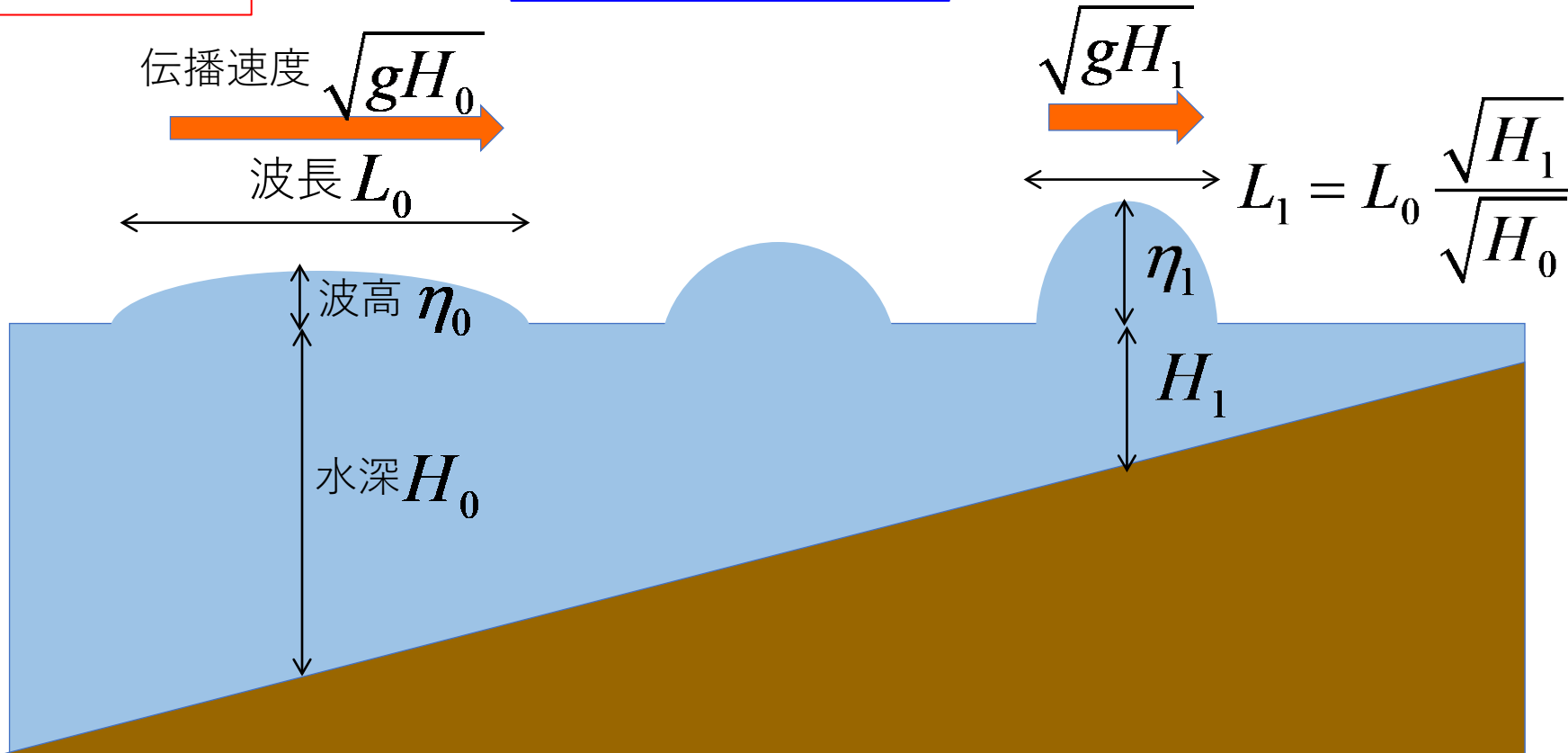
伝播速度に反比例して波長が変化

$$\frac{L_0}{\sqrt{gH_0}} = \frac{L_1}{\sqrt{gH_1}}$$

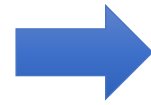
一波長分の津波エネルギーが保存

$$\eta_0^2 L_0 = \eta_1^2 L_1$$

$$\eta_1 = \eta_0 \sqrt[4]{\frac{H_0}{H_1}}$$

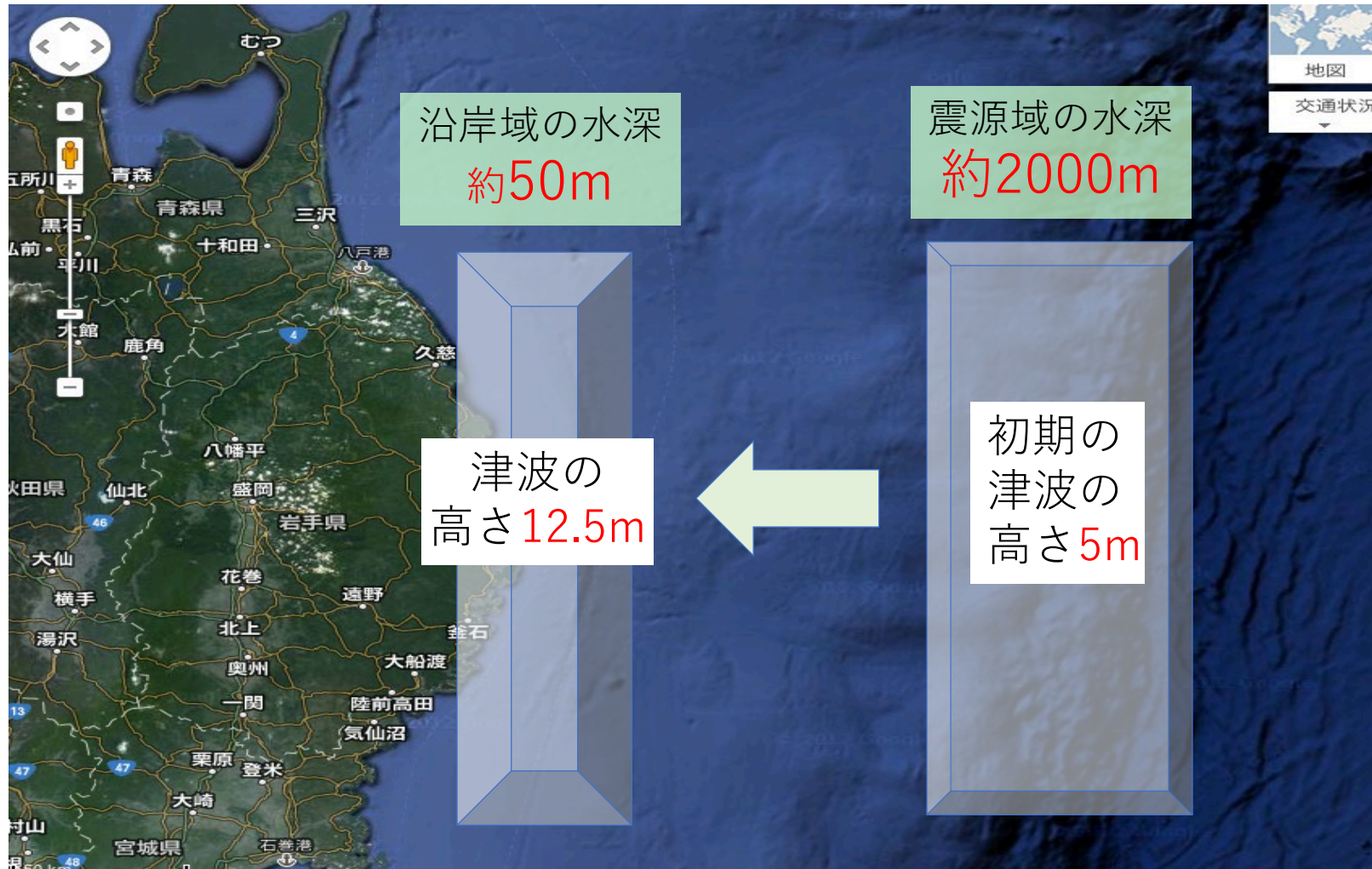


水深2000mの外洋で発生した津波  
が水深50mの沿岸域に到達すると



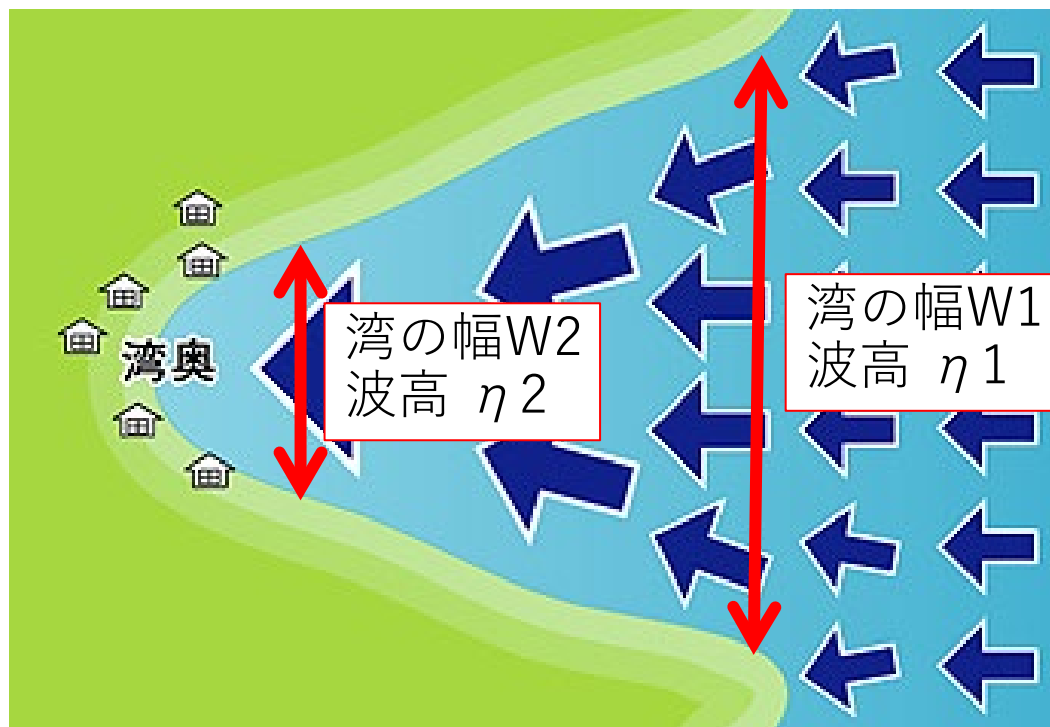
津波の高さは

$$\sqrt{\sqrt{\frac{2000m}{50m}}} \approx 2.5\text{倍に増幅}$$



# リアス式海岸での津波の増幅

湾の幅の平方根  
に反比例して波  
高が増大



エネルギー保存

$$\eta_1^2 W_1 = \eta_2^2 W_2$$

$$\eta_2 = \eta_1 \sqrt{\frac{W_1}{W_2}}$$

湾の幅が半分になると津波の波高は  $\sqrt{2} \approx 1.4$  倍に増幅する

# 遠地津波

日本の沿岸から600km以遠に発生した遠地地震による津波。その地点で地震波動を感じないような遠方の地震による津波（気象庁による）

## 1960年チリ地震津波

津波は15時間後にハワイ、23時間後に日本に到達

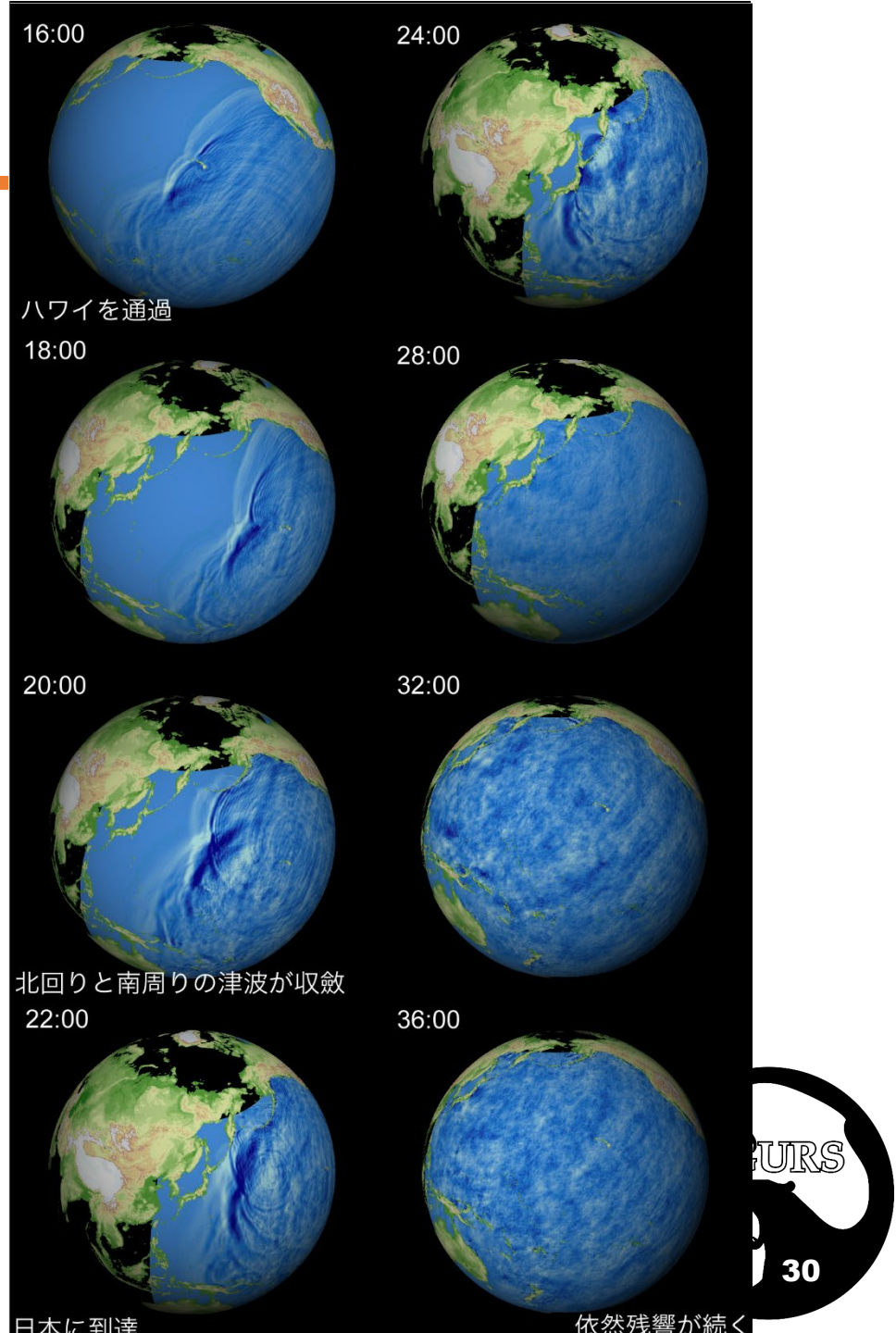
日本での波高は最大で6m

死者・行方不明者 142名

国際的連携の強化：警報システムの構築

沿岸構造物の整備

1960年チリ地震津波の数値シミュレーション（→）  
（内閣府，災害教訓の継承に関する専門調査会報告書：1960 チリ地震津波）





# 津波地震

地震の揺れは弱い（もしくは、ない）のに、  
大きな津波を発生させる地震

例 1：1896年明治三陸地震

陸上の震度は2か3程度

最大38.2m（遡上高）の大津波

例 2：1605年慶長南海地震

揺れによる被害の記録はない

大津波が襲来

発生メカニズム

ゆっくり地震

（断層がゆっくり壊れる）

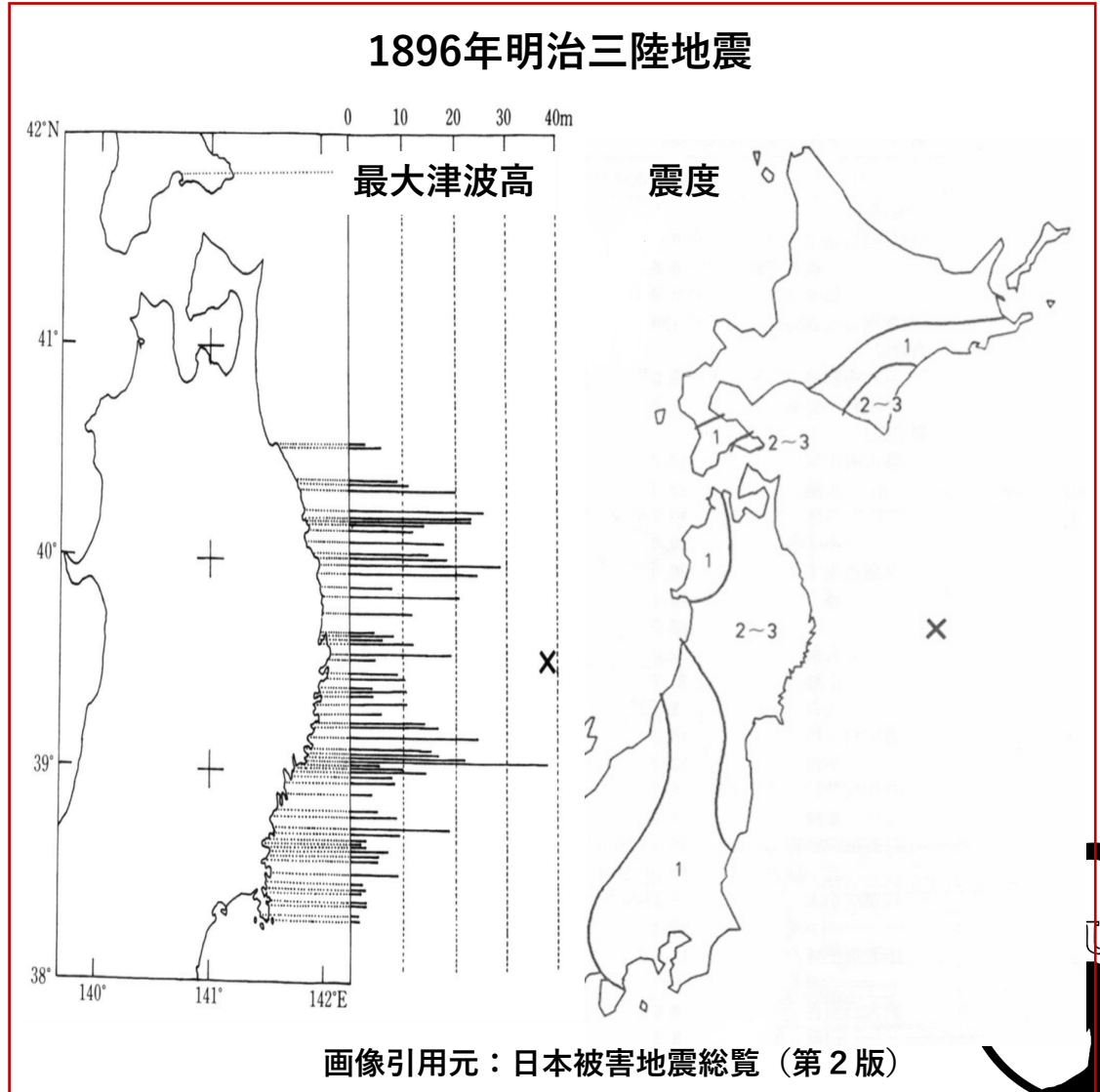
遠地津波

海底地すべり

津波を伴う地震のおよそ1割

（8例/114例）が津波地震

揺れたら逃げろが通用しない



# 津波の高さと被害

津波波高(m)	1	2	4	8	16	32
津波形態 緩斜面 急斜面	岸で盛上がる 速い潮汐	沖でも水の壁 第二波砕波 速い潮汐	先端の砕波が 増える	第一波巻き波砕波		
木造家屋	部分破壊	全面破壊				
石造家屋	持ちこたえる			全面破壊		
鉄・コン・ビル	持ちこたえる					全面破壊
漁船		被害発生	被害率50%	被害率100%		
防潮林	被害軽減 漂流物阻止 津波被害軽減		部分的被害 漂流物阻止	全面的被害 無効果		
養殖筏	被害発生					
沿岸集落		被害発生	被害率50%	被害率100%		

出典：首藤ほか（XXXX）



# 津波からの避難

---

基本は

**強く揺れたら、  
さっさと逃げる！**

です。

ルパン三世みたいに



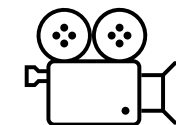
# ルパンのすごいところ

- 銭型警部が現れる前に現場から離れる
- 逃げる準備を，盗みに入る前に仕込んである。
  - 不二子ちゃん，  
車回しといてね
- 声をかけて逃げる
  - 次元，五右衛門いくぞ！
- 決して，現場に戻らない





# ハード対策①：津波避難タワー



ビデオ①：高知県佐喜浜町の津波避難シェルター



写真1：2009年建設の津波避難タワー



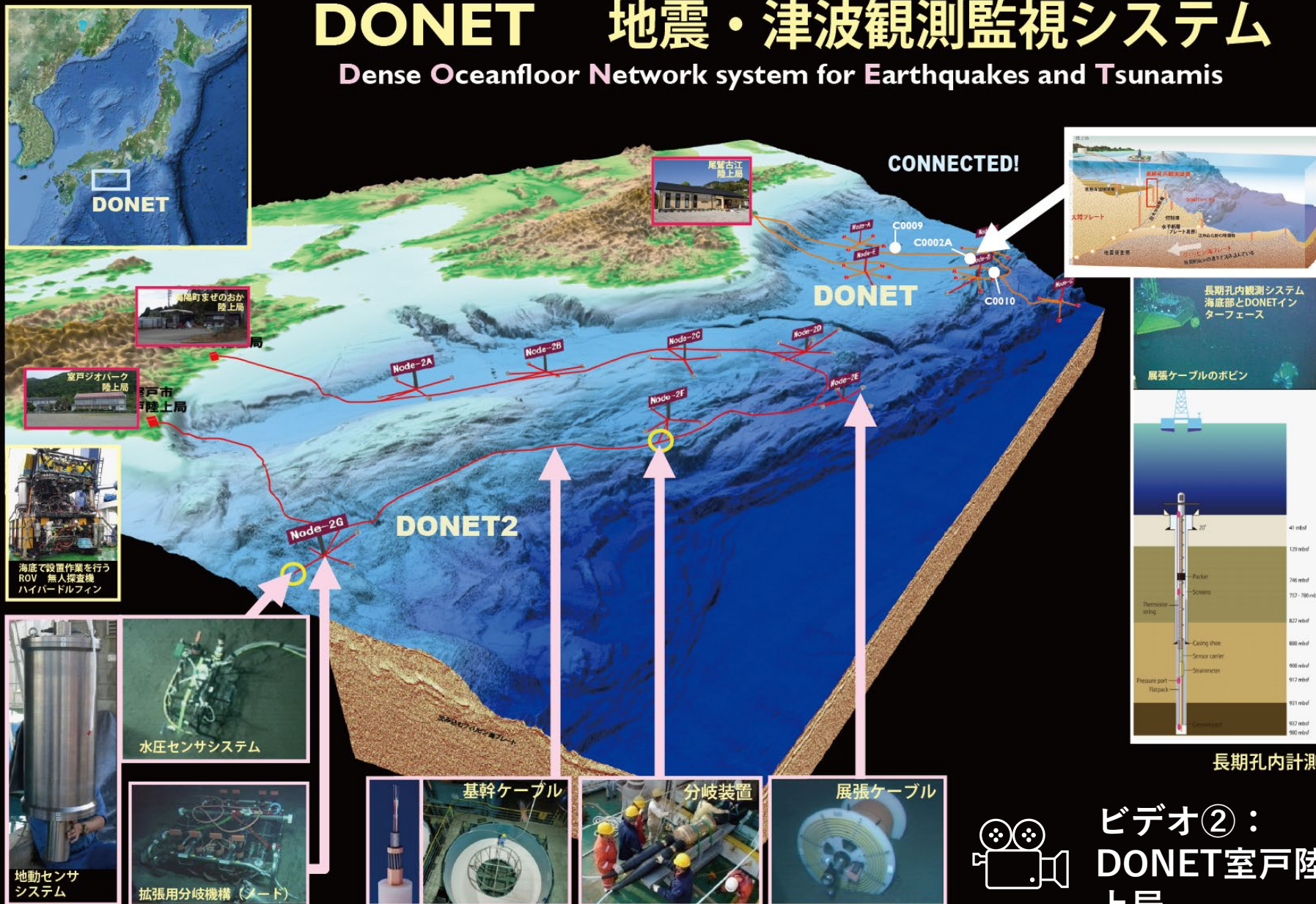
写真2：2015年建設の津波避難タワー



# ハード対策②： 地震津波観測監視システム

## DONET 地震・津波観測監視システム

Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis



ビデオ②：  
DONET室戸陸上局

# 地殻変動

---



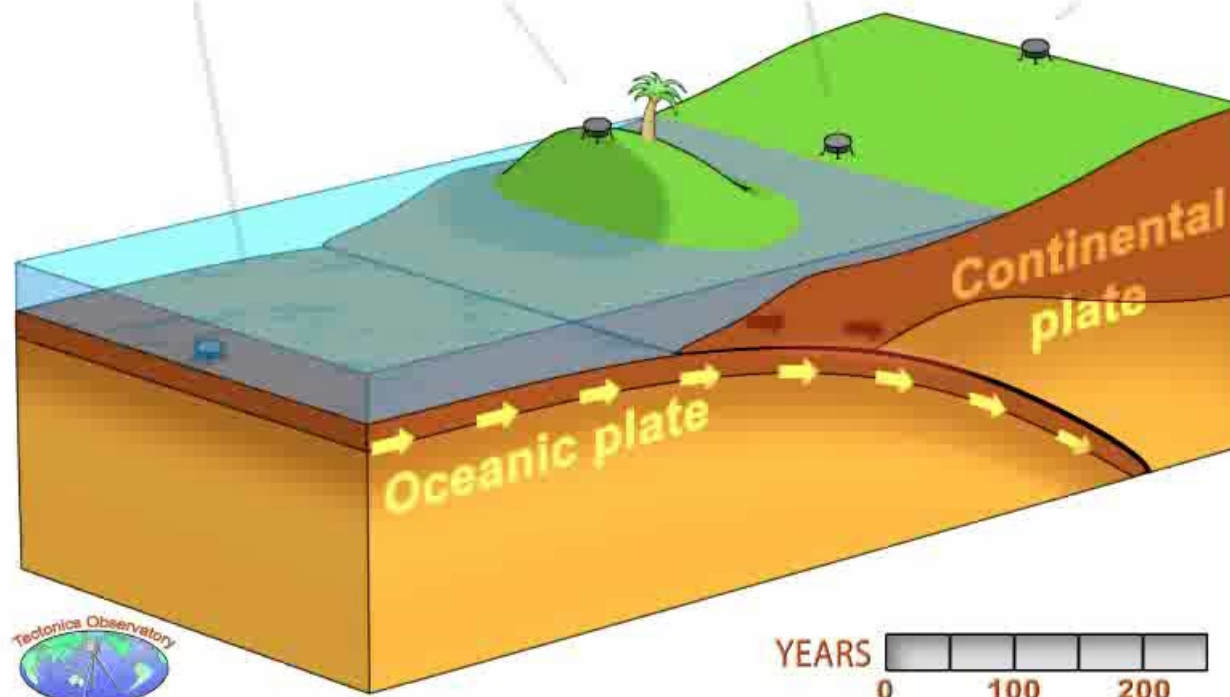
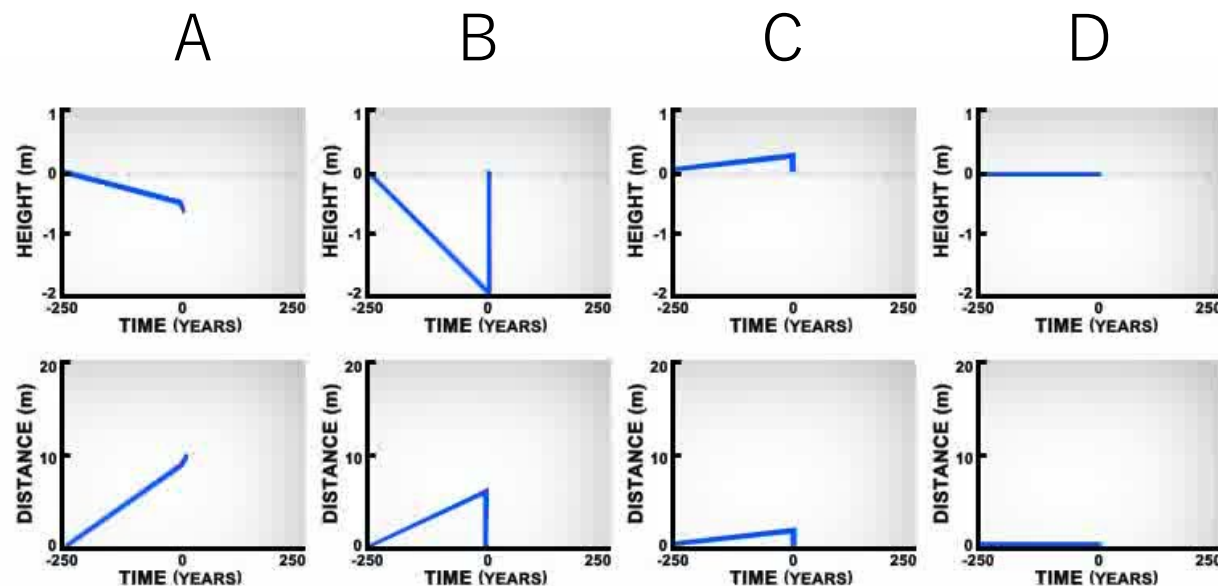
# プレート境界型地震のメカニズム

隆起・沈降パターン

	A	B	C	D
地震の前	↓	↓	↑	—
地震の時	↓	↑	↓	—

水平変動パターン

	A	B	C	D
地震の前	⇒	⇒	⇒	—
地震の時	⇒	⇐	⇐	—



画像引用元：カリフォルニア工科大HP



# 広域地殻変動

定常時

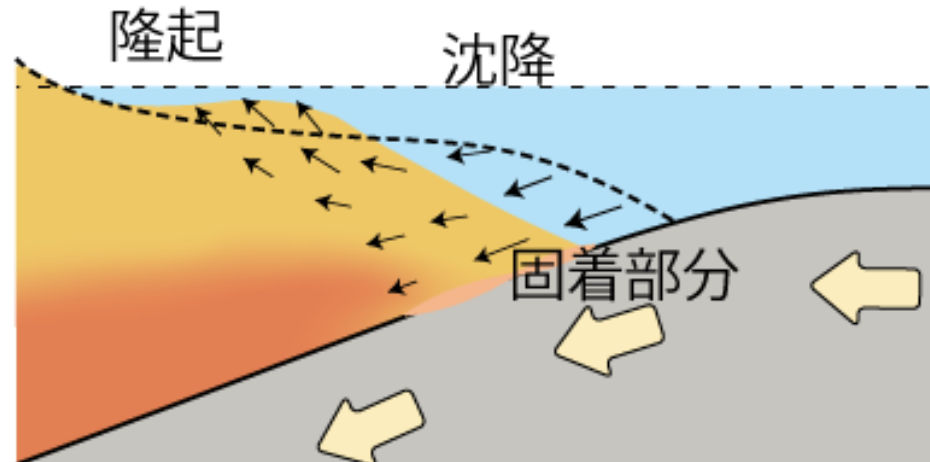
- 海底は沈降
- 海岸付近は隆起

地震時

- 海底は隆起
- 海岸付近は沈降

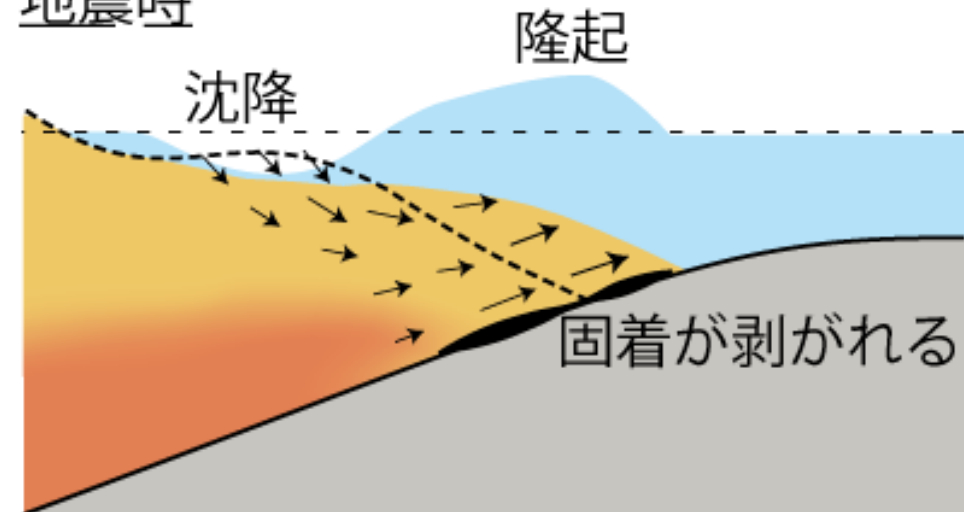


定常時



固着部分の上は沈降し、固着下端より内陸側は隆起する。

地震時



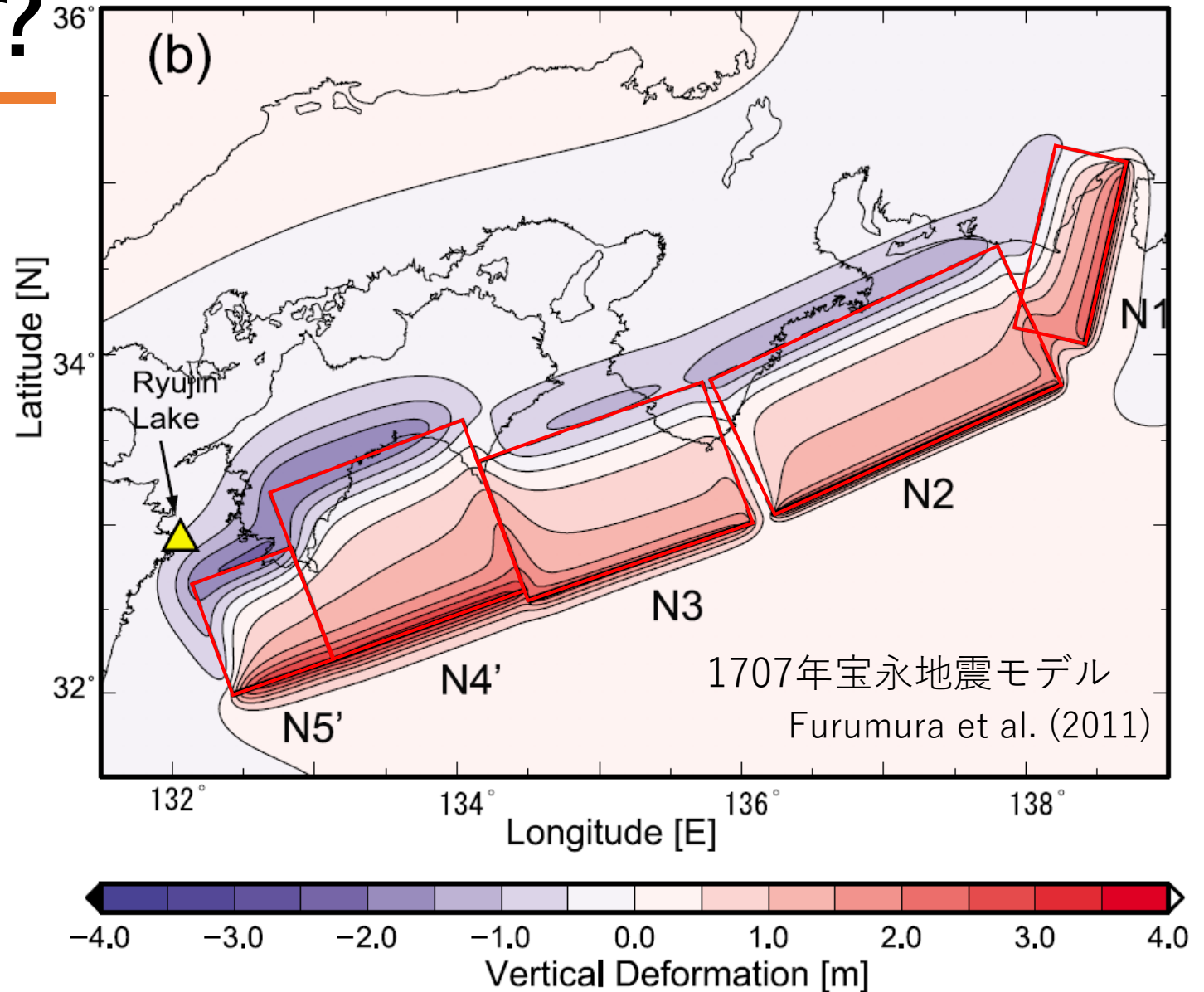
沈降と隆起が逆転し、海面は海底の隆起／沈降の分だけ上下する。固着域が陸から遠い場合には沈降に伴う引き波が最初に現れる。

画像引用元： ???

# Quiz: 高知市での南海トラフ地震による最大の地殻変動量は？

次の中から選べ

1. 約2mの隆起
2. 約20cmの隆起
3. 約20cmの沈降
4. 約2mの沈降



# 昭和南海地震時の高知市の長期湛水

## 高知市街

昭和南海地震直後



現在



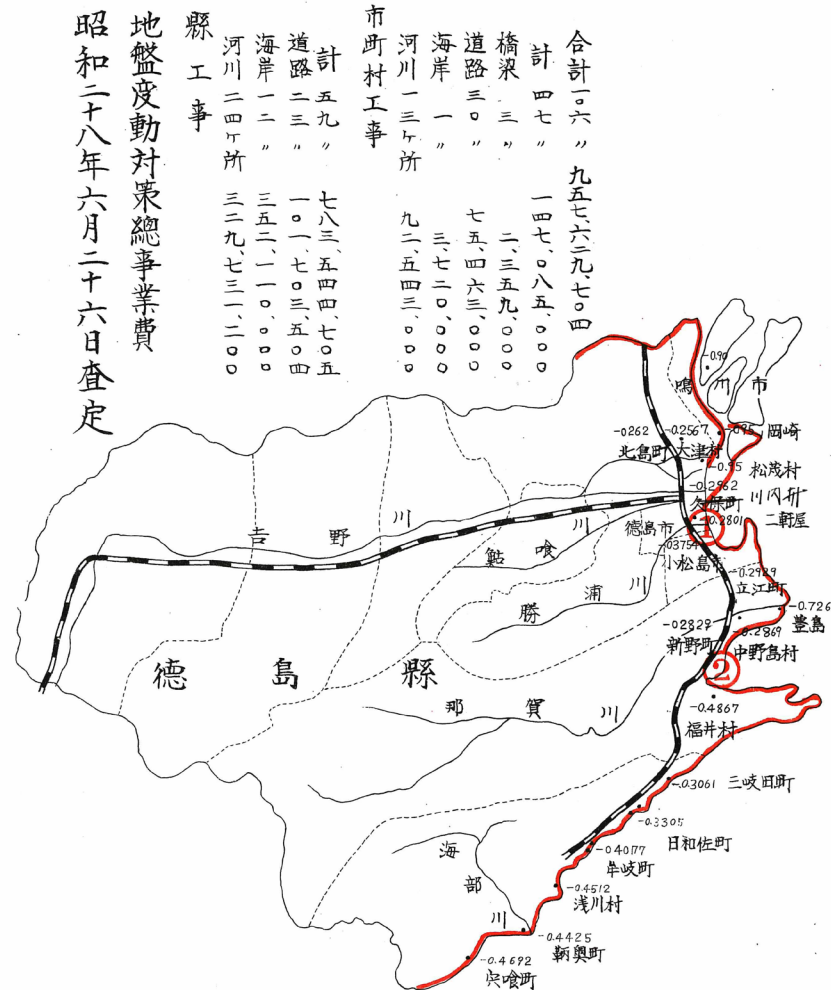
画像出典元：高知大学岡村研究室HP



# 徳島における地殻変動とその影響（昭和南海地震）

## 徳島でも数10センチの沈降

四国地方地盤調査最終報告書（1956）



備考  
地図の(-)数字は震災後沈下量を示す(一等水準点)



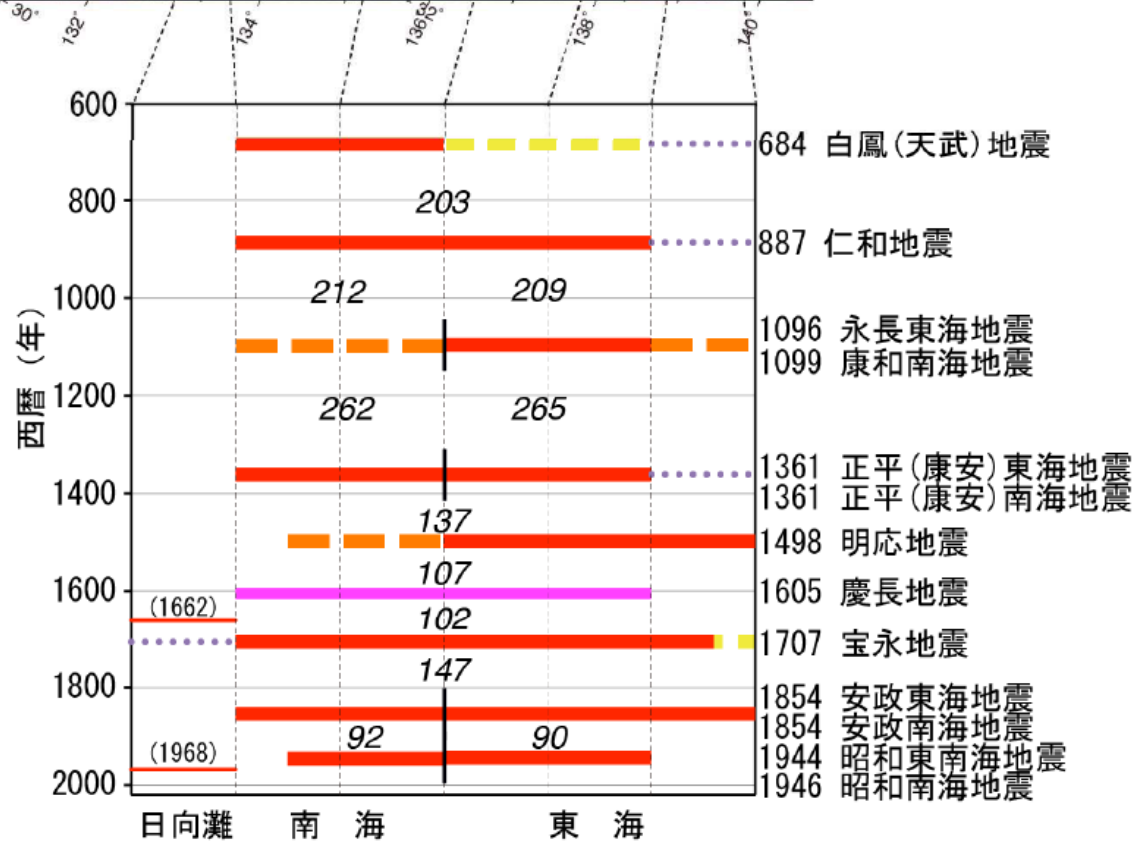
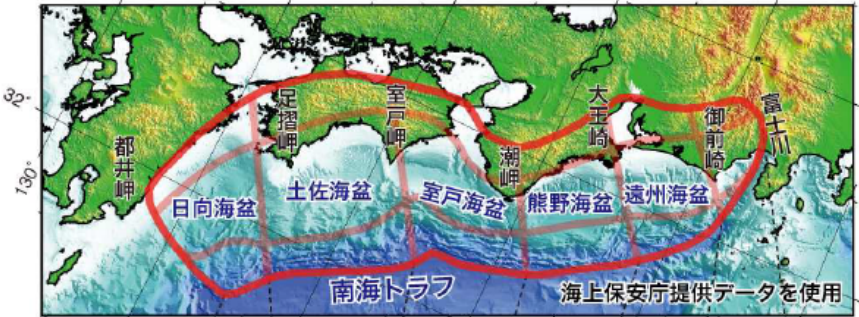
① 徳島市二軒屋附近



② 那賀郡見能林村大渦



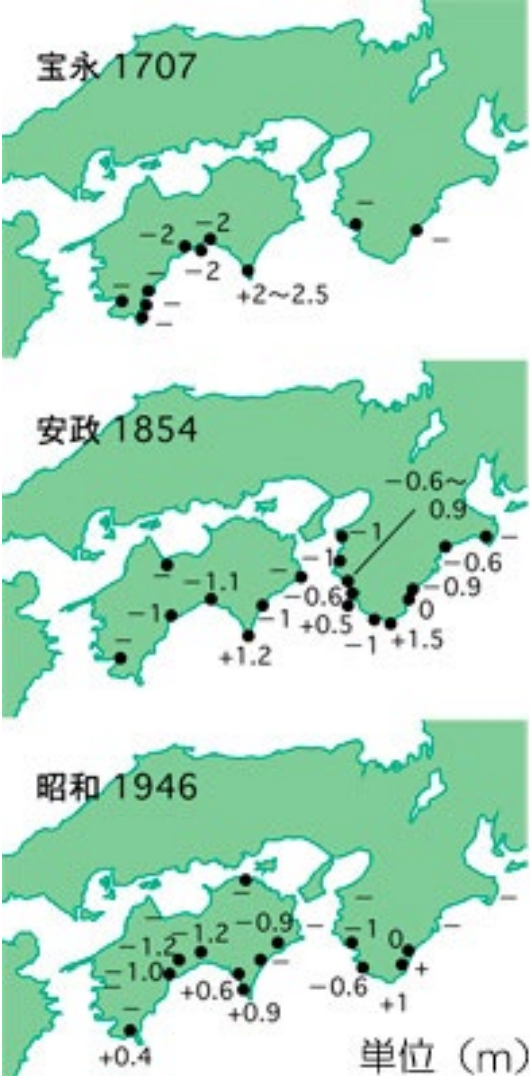
# 地殻変動の繰り返し



- 確実な震源域
- 確実視されている震源域
- 可能性のある震源域
- 説がある震源域
- 津波地震の可能性が高い地震
- 日向灘のプレート間地震(M7クラス)

画像提供元：地震調査研究推進本部HP

## 地殻変動



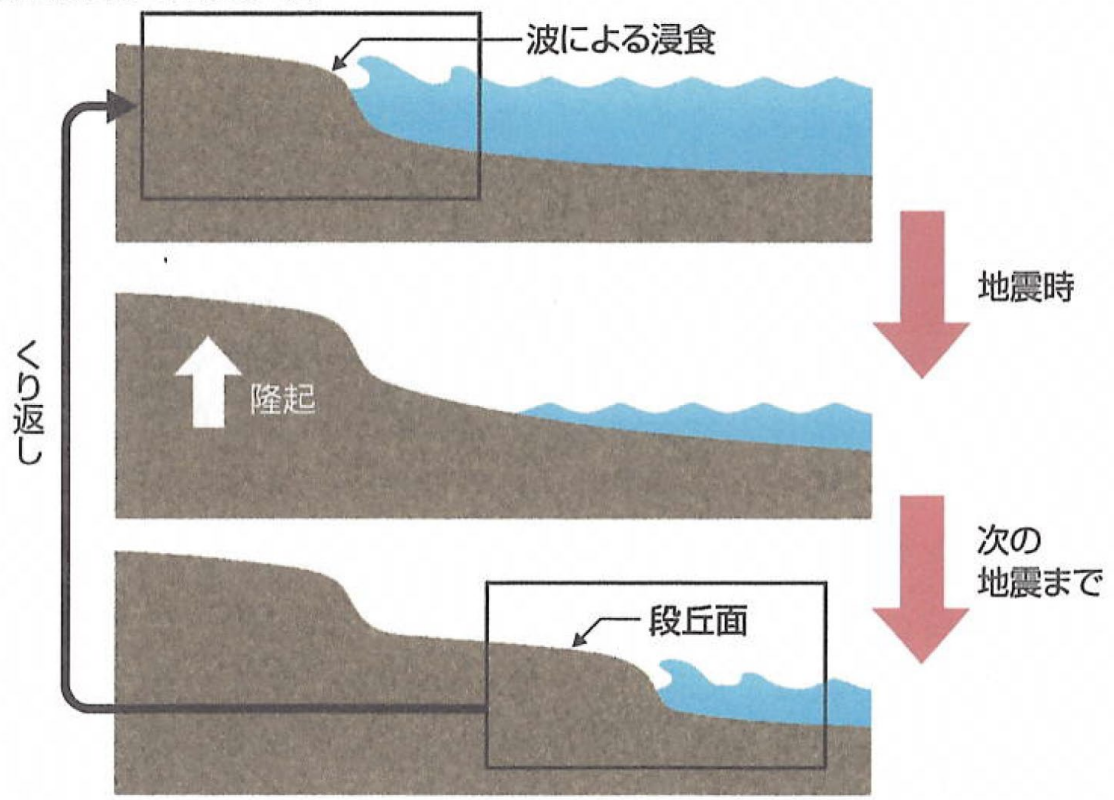
宇佐美 (1996)



# 地形に記録される過去の隆起

## 海岸段丘

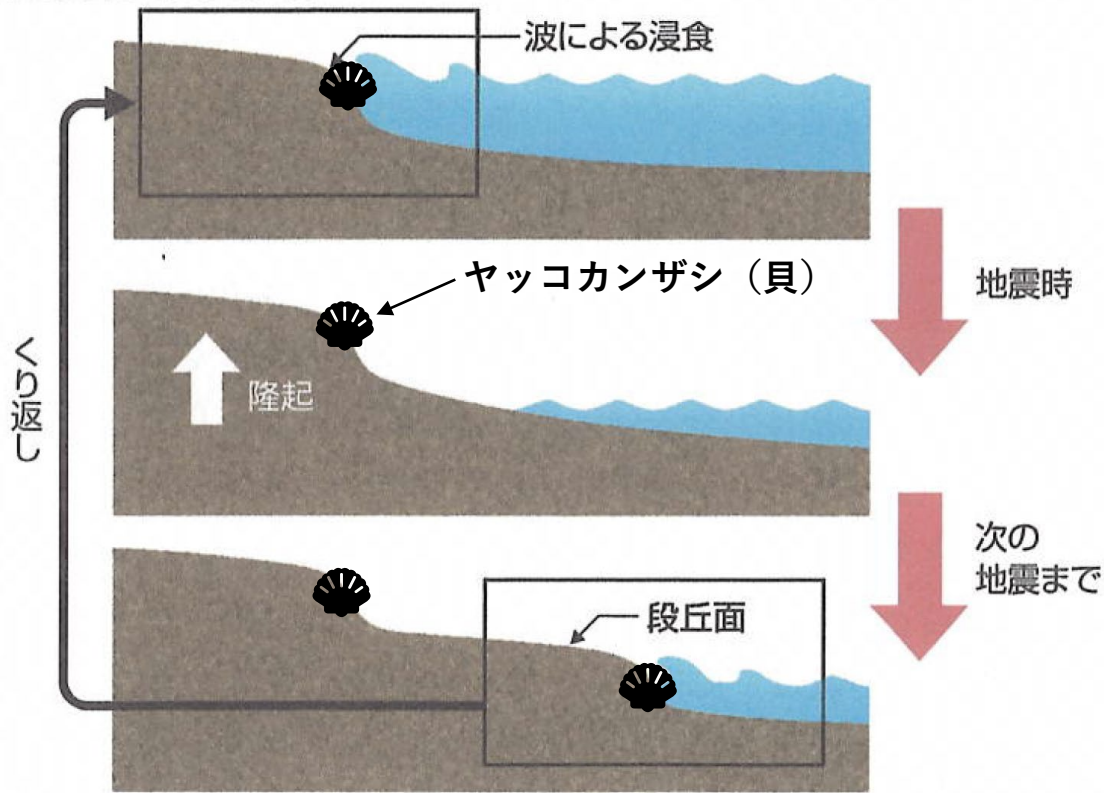
(a) 海岸段丘ができるしくみ



画像引用元：井出 (2017)

# 地形に記録される過去の隆起

(a) 海岸段丘ができるしくみ

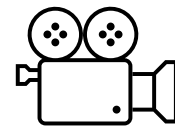
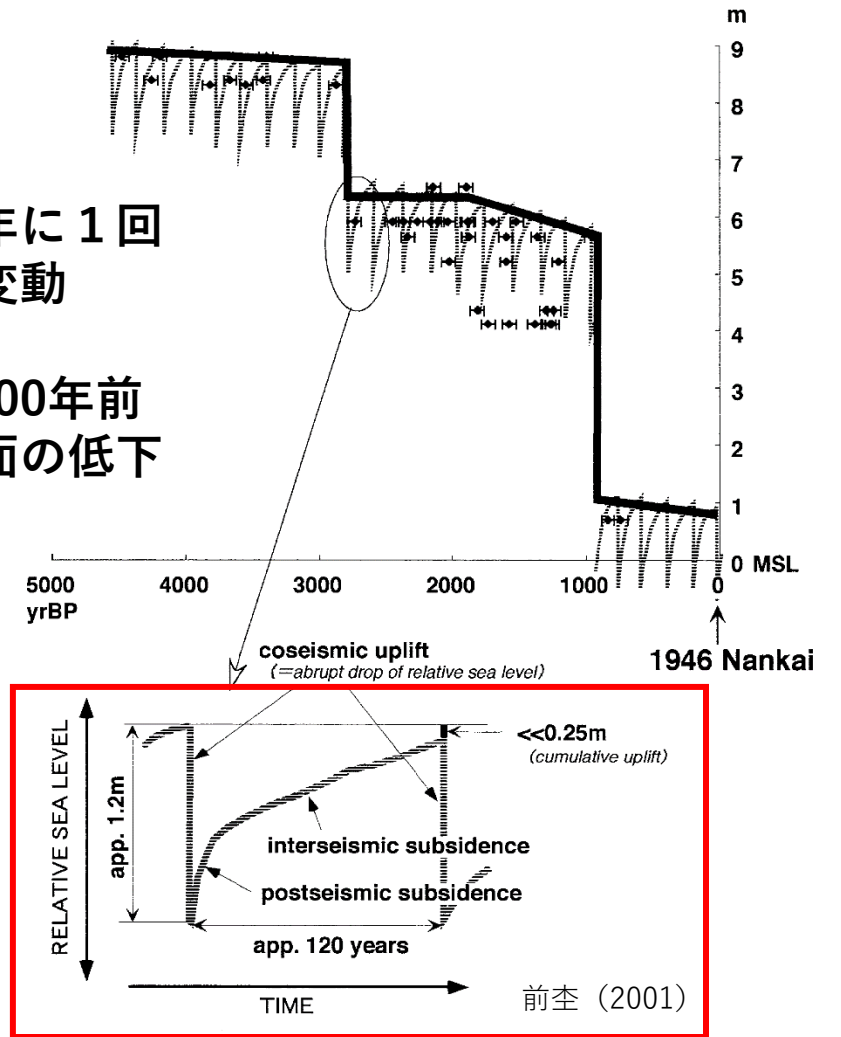


画像引用元：井出 (2017)

およそ100年に1回の繰り返しの変動

+

1000年前と2800年前の急激な海水面の低下



ビデオ③：室戸岬のヤッコカンザシの巣の痕跡

図 10 コアリングと AMS<sup>14</sup>C 年代から再検討された室戸岬の最近数千年間の相対的海水準変化からみた隆起モデル。横棒のついた●印はヤッコカンザシの採取高度と年代幅を示す。2800 yrsBP と 1000 yrsBP 頃に見られる急激な相対的海面の低下は、室戸半島の近くにある海底活断層の活動によるプレート内部地震による隆起を示すと考えられる。プレート境界地震による地盤の上下変動は、ノコギリ歯状の破線のように示されると推定される。



# きょうのまとめ

---

- 地震とは地下の岩盤の破壊である。
- 地震が発生すると地震動，津波，地殻変動が起きる。
- ゆれの種類はP波，S波，表面波，長周期地震動。
- マグニチュードが1大きくなると，エネルギーは32倍。
- 津波は波長が長い。だから威力が大きい。遠くまで伝わる。
- 津波対策はハードとソフトをバランスよく。
- 地殻変動によって土地が隆起したり，沈降したりする。
- 低地が地殻変動によって沈降すると長期湛水が起こる。





おしまい

---

