

# 防災工学

## 第11回

千葉大学 工学部 都市環境システムコース

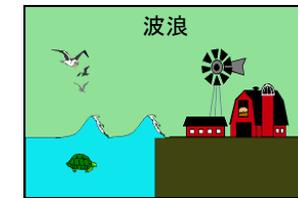
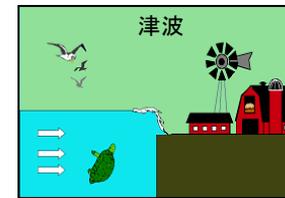
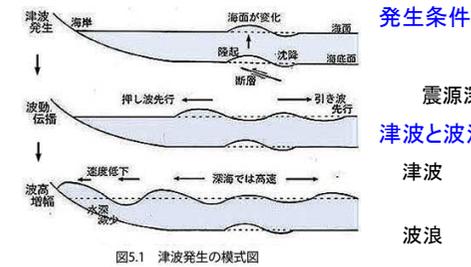
丸山 喜久

<http://ares.tu.chiba-u.jp/marulab/index.html>

[ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp](mailto:yमारुヤム@tu.chiba-u.ac.jp)

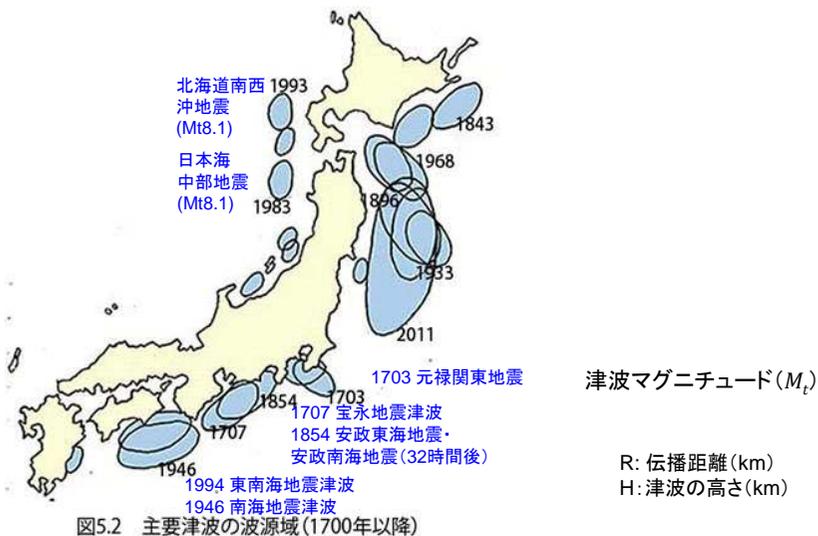
# 津波

海底地震にともなう、広範囲な海洋底の急激な上昇や沈降が原因となって海水に生じる波動



<http://www.okinawa-jma.go.jp/shigaki/tmanual/1syou.htm>

## 日本近海の津波波源域



## 津波の伝播理論

初期条件 地震による

理論方程式

深海域(外洋)

浅海域・遡上域

非圧縮性流体の鉛直2次元の線形長波理論式

質量保存則(連続の式)

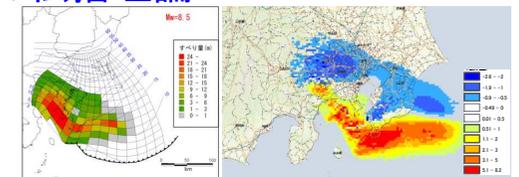
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

運動量保存則(運動の式)

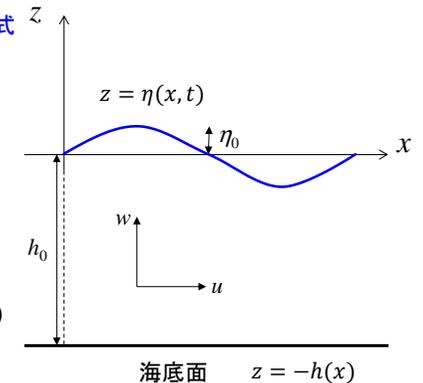
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

$g$ : 重力加速度,  $p$ : 圧力



分散波理論



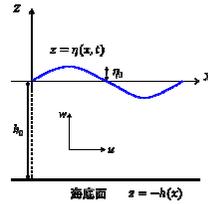
## 津波の伝播理論

境界条件

$z = \eta$  のとき (4) 水面の圧力(水圧)は0

$z = \eta$  のとき  $w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x}$  (5) 水面の水粒子は常に水面にとどまる

$z = -h$  のとき  $w = -u \frac{\partial h}{\partial x}$  (6) 海底の水粒子は常に海底にとどまる



今、波長が長く、水粒子の運動が重力加速度に比べて鉛直加速度が無視できる程度に小さく、水深に比べ波の振幅が小さい(弱非線形)ものとする。

$\frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$   $\frac{\partial w}{\partial t} = 0$  非線形項は無視

$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$  (1)'  $\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$  (2)'  $0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$  (3)'

$z = \eta$  のとき  $p = 0$  (4)'  $w = \frac{\partial \eta}{\partial t}$  (5)'  $z = -h$  のとき  $w = -u \frac{\partial h}{\partial x}$  (6)'

(3)'から 境界条件(4)をふまえると (7)

## 津波の伝播理論

(1)'より  $\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz + \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial w}{\partial z} dz = \frac{\partial u}{\partial x} [z]_{-h}^{\eta} + [w]_{-h}^{\eta} = 0$

(5)',(6)'より  $\eta \frac{\partial u}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} = 0$   $\eta = 0$  とすると (8)

(7)を(2)'に代入

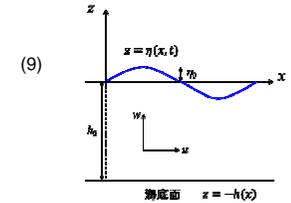
$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \{ \rho g (\eta - z) \}}{\partial x}$

海底面が水平 ( $h=h_0$ ) と仮定し, (8)を  $t$  で, (9)を  $x$  で偏微分すると

(10)

$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - C^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = 0$  1次元波動方程式 C:

∴ 水深50m以深での伝播速度



## 津波の伝播速度

太平洋の真中 ( $h_0 = 5,000\text{m}$ )

$C = \sqrt{9.8 \times 5000} = 220 \text{ m/s} = 800 \text{ km/h}$

沿岸部 ( $h_0 = 100\text{m}$ )

$C = \sqrt{9.8 \times 100} = 31.3 \text{ m/s} = 100 \text{ km/h}$



2007年8月16日 ペルー・ピスコ地震



2007年8月16日 日本列島の津波の発生

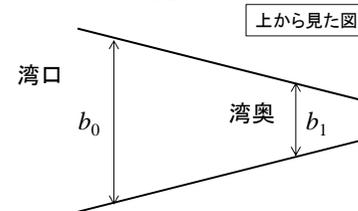
1 時間後

<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunami/generation.html> 7

## 津波の高さ

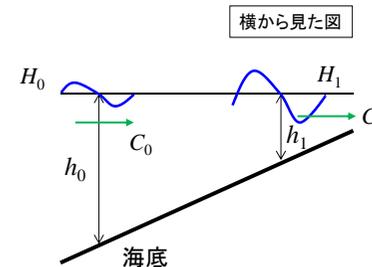
- 大洋では通常1m以下の高さ(沖合では船は感じない)
- 水深が浅くなると,

沿岸での津波高さ



グリーンの法則

$\frac{H_1}{H_0} =$



湾口の幅が1 km, 水深が50 m, 湾奥の幅は20 m, 水深は10 mとする。波高1.5 mの津波が来襲したとき, 湾奥での津波の高さはいくらか。

$\frac{H_1}{H_0} =$

$H_1 =$

# 1896年明治三陸地震津波

地震の規模に比べて不相応に大きな津波を励起する地震

プレート境界の未固結の堆積物により断層破壊が低速で進行

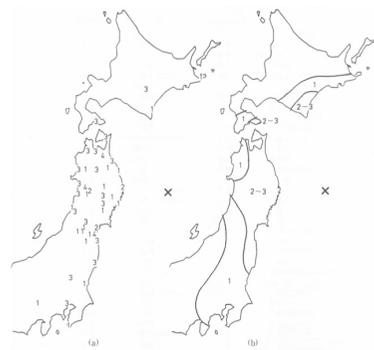


図2-7 明治三陸地震の震度分布図（『日本観測津波総覧』第2版101頁からの抜粋、右：中央気象台(1896年)、左：大森(1901年)のもの）

## 三陸津波誌

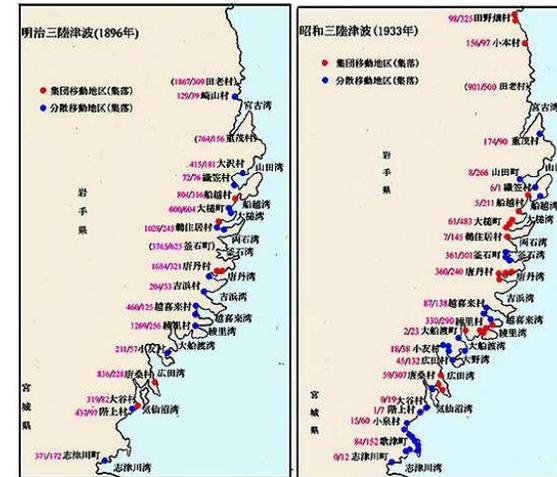
「午後七時頃地震があった。強くはなかったが震動時間が長かった。十数分過ぎてからまた微震があって、それが数回続いた。海岸では潮の引くべき時間でもないのに引き潮があった。それからまた潮がさし、しばらくたって8時20分頃海の方から轟然と大砲のような響きが聞こえた。しかし、人々は軍艦の演習くらいに思い、気に留める者もいなかった。まもなく、すごい音響とともに黒山のような波が耳をつんざくばかりに怒号し、一瞬の間に沿岸一帯あらゆる全てのものを流し去ってしまった。」

津波：最大38.2m  
死者：22,066人  
流失家屋：8,891戸

[http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1896\\_meiji\\_sanriku\\_jishintsunami/index.html](http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1896_meiji_sanriku_jishintsunami/index.html)

# 1933年昭和三陸地震津波

昭和8年3月3日午前2時31分 M8.1の巨大地震  
約30-50分後に高さ3-8m程度、最高28.7m規模の津波が三陸沿岸に襲来



死者：約3000人

明治三陸地震津波による高地移転は一部の集落や、個々の分散移転等限定的

集団移転を行った集落の犠牲者が少なかった

その後、原地に新たな家並みが復旧や新規居住者によってつられていたところが大部分

津波被災による三陸海岸集落の高地移転

[https://dil.bosai.go.jp/disaster/2011eq311/tsunami00\\_showa.html](https://dil.bosai.go.jp/disaster/2011eq311/tsunami00_showa.html)

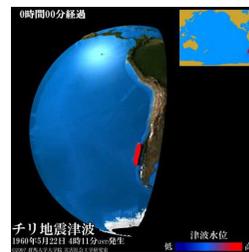
# 1960年チリ地震津波

南米プレートの下にナスカプレートが沈み込むチリ海溝で、Mw9.5の観測史上最大の地震が発生、津波は15時間後にハワイ、23時間後に日本に到達した。

1941年に三陸地方で始まっていた津波予報は、遠隔地津波に対する認識が甘かったため、最も早い予報でも津波到達後であった。

体感する地震がなく、気象庁の対応も遅れ、完全な不意打ちであった。

三陸地方沿岸で特に大きな被害  
死者・行方不明者：142人



<https://www.youtube.com/watch?v=Hidd6wAFnFo>

## 2010年チリ地震

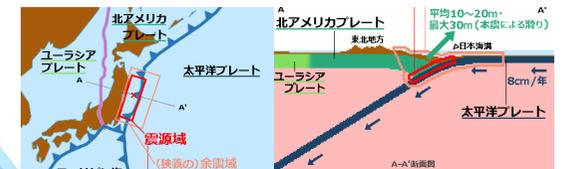
チリ中部沿岸 (Mw8.8) 死者：800人以上



日本でも大津波警報・津波警報・津波注意報が発令された

[http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1960\\_chile\\_jishintsunami/index.html](http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1960_chile_jishintsunami/index.html)

# 2011年東北地方太平洋沖地震

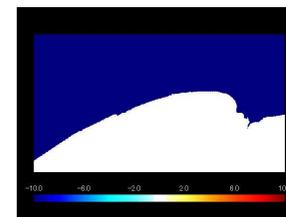


死者：19,689人

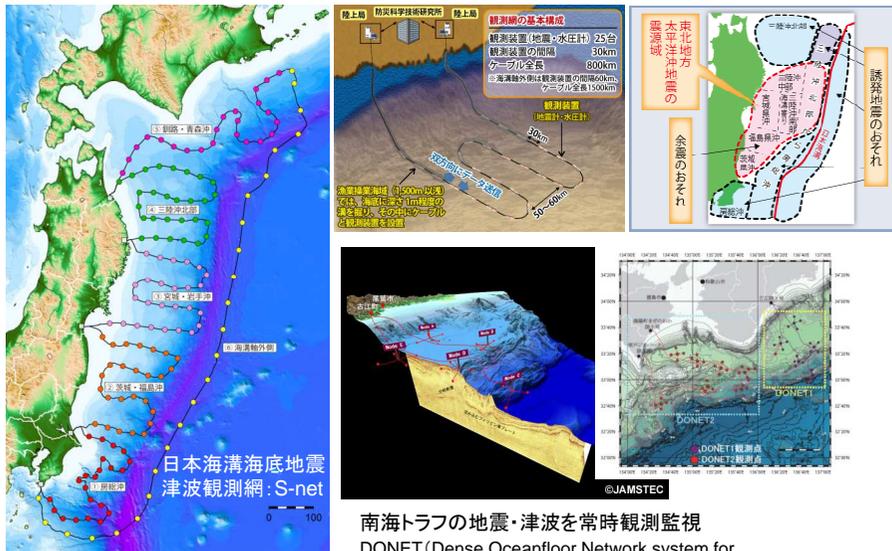
三陸海岸では、住民の津波への警戒意識は高い。約1年前のチリ地震と2日前の小規模な津波の実体験が油断を生み、避難を遅らせたという指摘もある。

[https://www.kahoku.co.jp/special/spe1168/20160315\\_03.html](https://www.kahoku.co.jp/special/spe1168/20160315_03.html)

## 千葉県旭市の津波被害



# 海底地震津波観測網



地震計と水圧計が一体となった観測装置を海底ケーブルで接続  
<http://www.seafloor.bosai.go.jp/S-net/>

南海トラフの地震・津波を常時観測監視  
 DONET (Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis)

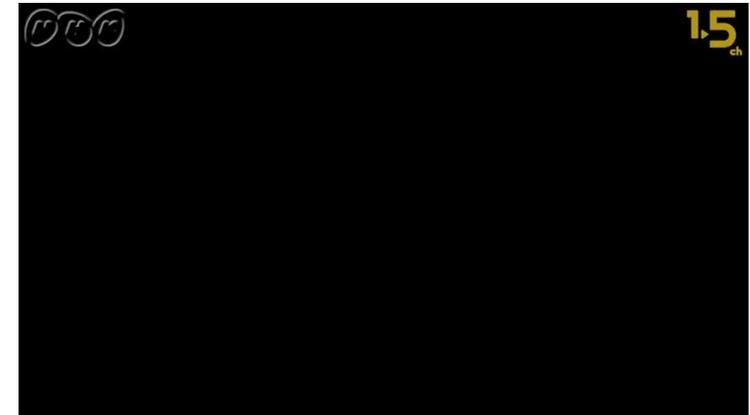
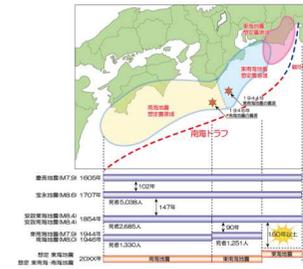
<https://www.jamstec.go.jp/donet/j/donet/>

# 南海トラフ巨大地震

周期:

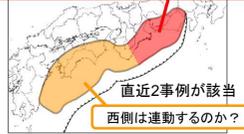
数年あるいは時間をおかずに地震が連動

昭和東南海→昭和南海: 2年後  
 安政東海→安政南海: 32時間後

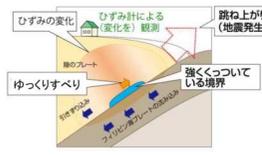


# 南海トラフ地震臨時情報

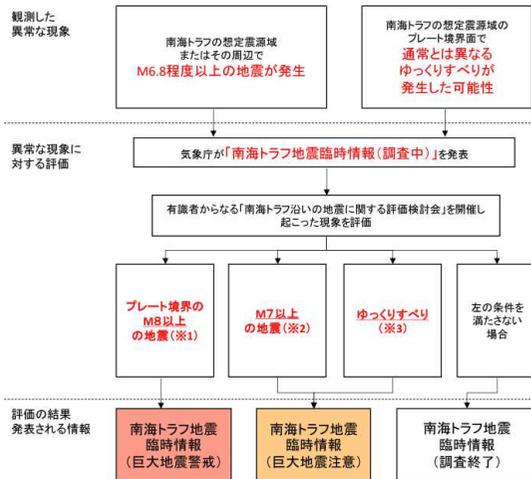
南海トラフ東側で大規模地震(M8クラス)が発生



南海トラフで地震(M7クラス)が発生

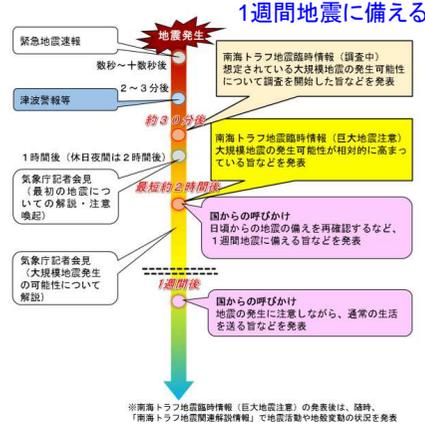
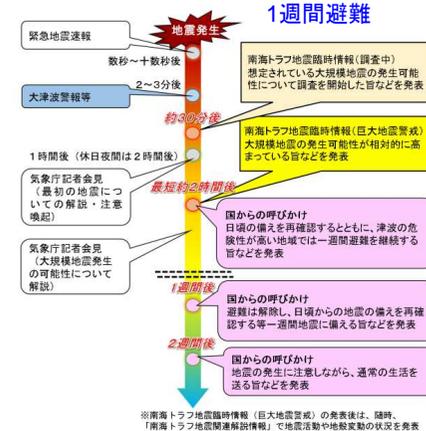


南海トラフでは前例なし



[http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/honbun\\_guideline.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/honbun_guideline.pdf) 15

# 南海トラフ地震臨時情報



[http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/honbun\\_guideline.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/honbun_guideline.pdf) 16