

# 2022年トンガ噴火に伴う 津波の数値計算

---

2022年6月27日（月） 13:40～ 14:10

馬場俊孝（徳島大）



# 目次

---

- はじめに：2022年トンガ噴火と観測された津波
- 非地震性津波の発生の仕組み
- 本研究の目的
- 解析手法
  - 三角波による気圧波の近似
  - 平面2次元モデル（非線形長波式）による津波の計算
- 計算結果
  - 日本の検潮記録との比較
- 途中経過としてのまとめ



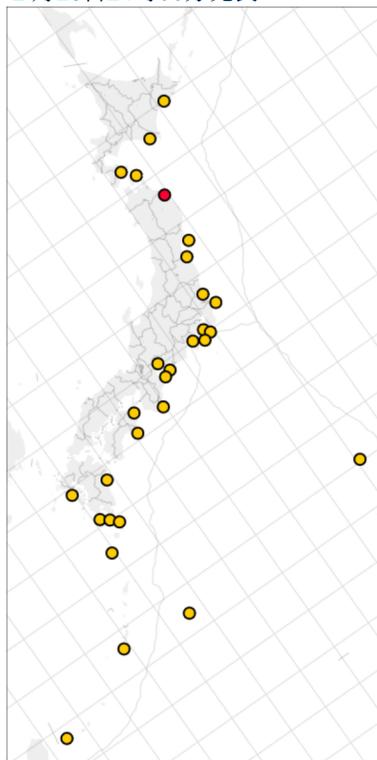
# 不可解な津波が観測された

1月16日14時00分発表

## 津波観測状況

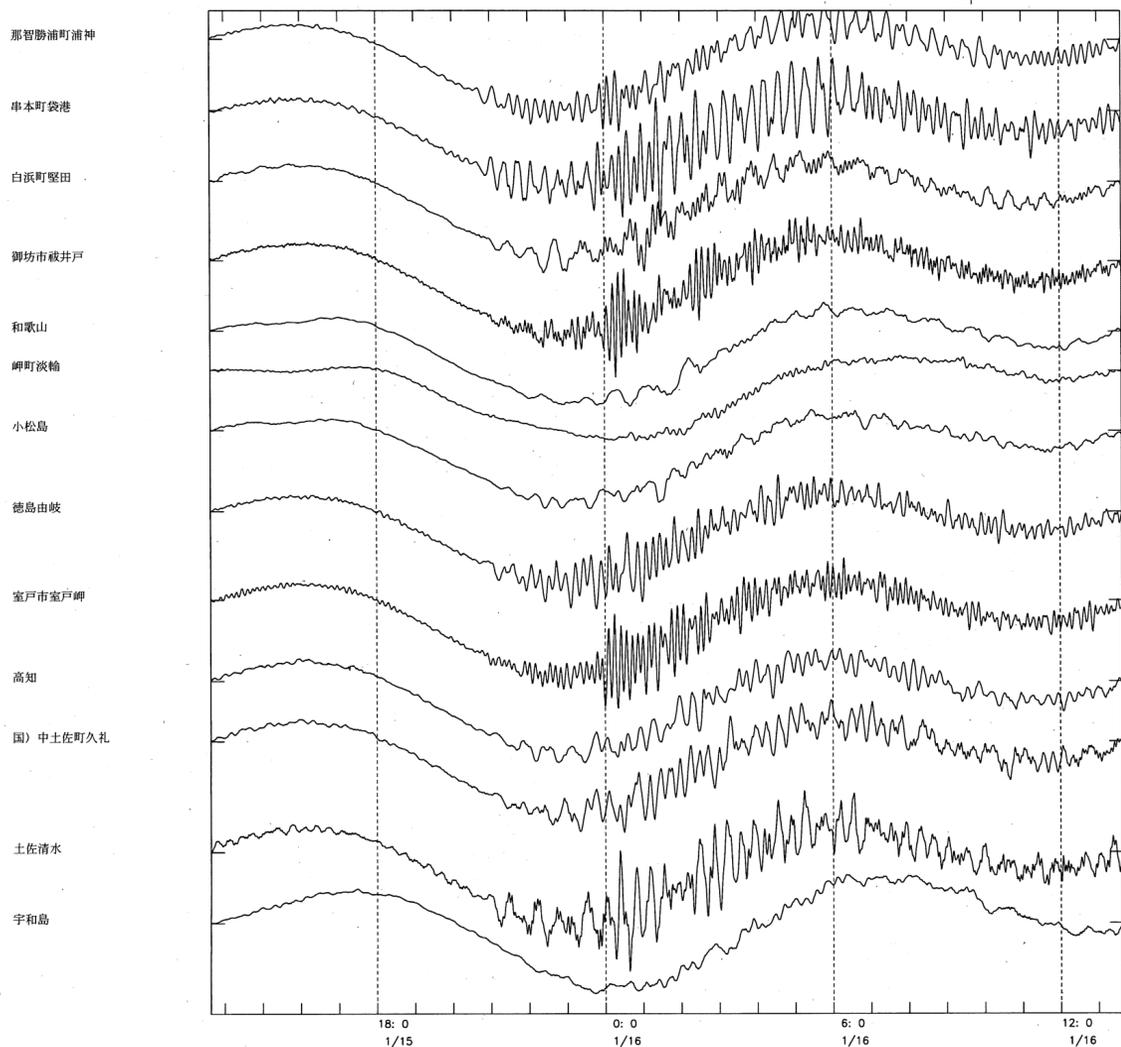
### 【主な観測点の観測値】

観測点名	該当予報区名	第一波到達時刻	向き	これまでの最大波	高さ
釧路	北海道太平洋沿岸東部	15日20:52	押し	16日03:20	0.5m
浦河	北海道太平洋沿岸中部	15日21:43	引き	16日05:15	0.7m
函館	北海道太平洋沿岸西部	--	--	16日02:40	0.3m
むつ市関根浜	青森県太平洋沿岸	15日21:28	引き	16日02:55	0.3m
久慈港	岩手県	15日20:57	押し	16日02:26	1.1m
石巻市鮎川	宮城県	15日20:53	押し	16日02:11	0.7m
相馬	福島県	15日21:19	押し	16日09:30	0.5m
大洗	茨城県	15日20:42	押し	16日03:48	0.6m
銚子	千葉県九十九里・外房	15日20:39	押し	16日04:00	0.3m
館山市布良	千葉県内房	--	--	16日05:25	0.5m
伊豆大島岡田	伊豆諸島	15日20:19	引き	15日21:58	0.2m
父島二見	小笠原諸島	15日19:58	引き	15日22:52	0.9m
三浦市三崎漁港	相模湾・三浦半島	--	--	16日03:01	0.4m
沼津市内浦	静岡県	15日20:56	押し	16日00:06	0.4m
田原市赤羽根	愛知県外海	15日20:51	押し	16日01:15	0.6m
名古屋	伊勢・三河湾	--	--	16日03:07	0.2m
鳥羽	三重県南部	15日21:04	押し	16日01:45	0.6m
那智勝浦町浦神	和歌山県	15日20:34	押し	16日00:18	0.5m
小松島	徳島県	15日21:15	押し	16日05:26	0.2m
室戸市室戸岬	高知県	15日20:54	引き	16日00:15	0.8m
長崎	長崎県西方	--	--	16日06:04	0.3m
日向市細島	宮崎県	15日20:55	押し	15日23:47	0.3m
南大隅町大泊	鹿児島県東部	15日21:08	押し	16日01:18	0.7m
種子島西之表	種子島・屋久島地方	15日21:15	引き	16日01:39	0.5m
中之島	奄美群島・トカラ列島	15日21:05	引き	16日00:47	0.5m
枕崎	鹿児島県西部	--	--	16日01:52	0.6m
那覇	沖縄本島地方	15日20:59	引き	15日23:33	0.2m
南大東漁港	大東島地方	15日21:36	押し	15日23:12	0.2m
与那国島久部良	宮古島・八重山地方	--	--	16日03:05	0.2m



大阪管区 (太平洋)

< 2022/ 1/15 13:38 -- 2022/ 1/16 13:38 >



EPOS-V [tghoe5tk02]16-Jan-22 13:44

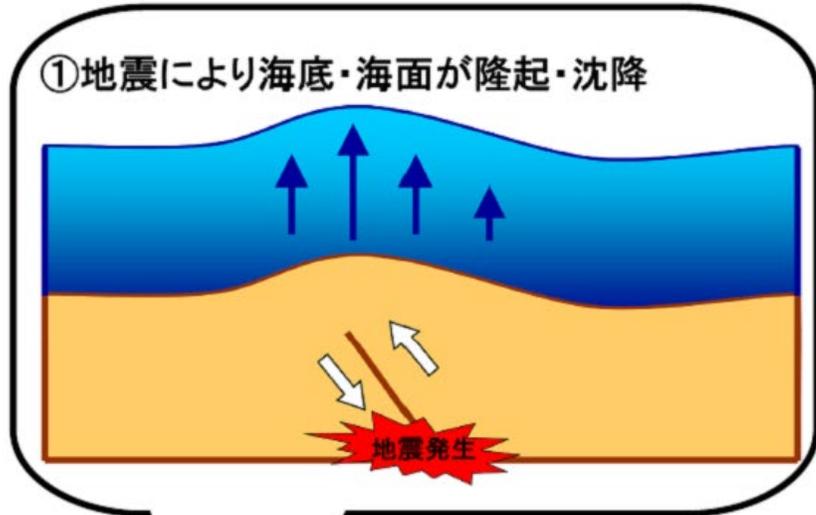


# 津波発生 of 仕組み

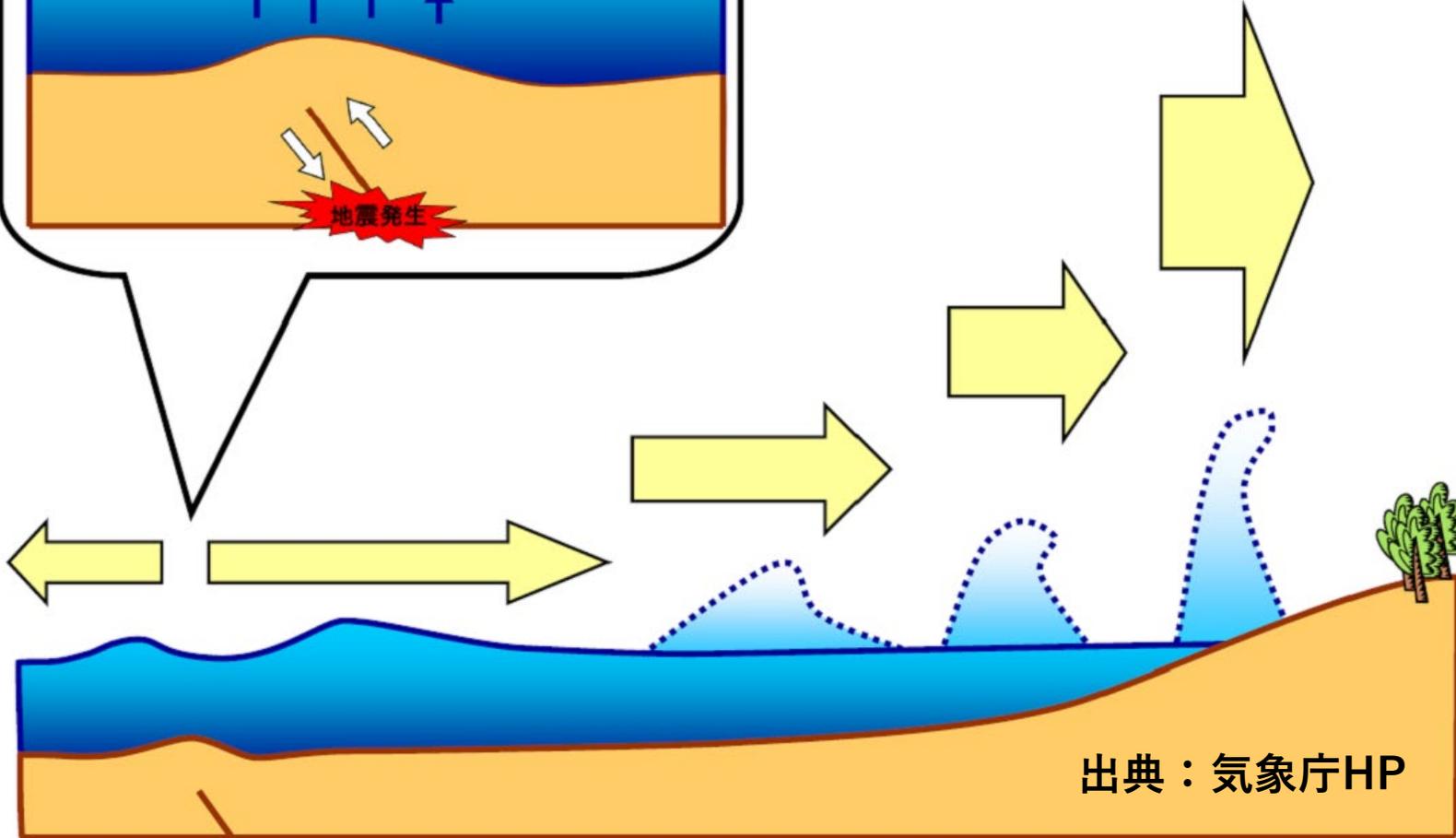
---



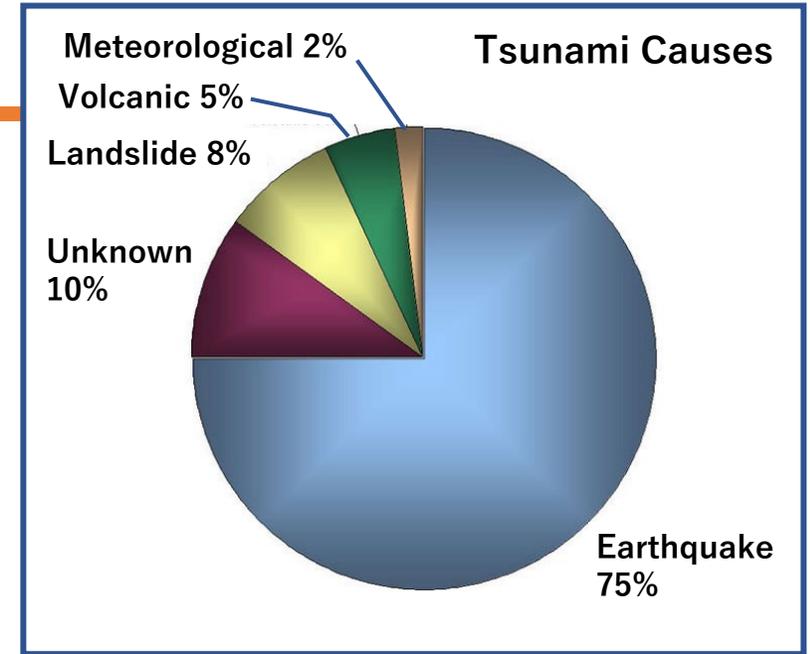
# 津波の発生



②海面変動が大きくなるとなり  
四方八方へ伝播 → 沿岸へ来襲



出典：気象庁HP



津波の伝播速度

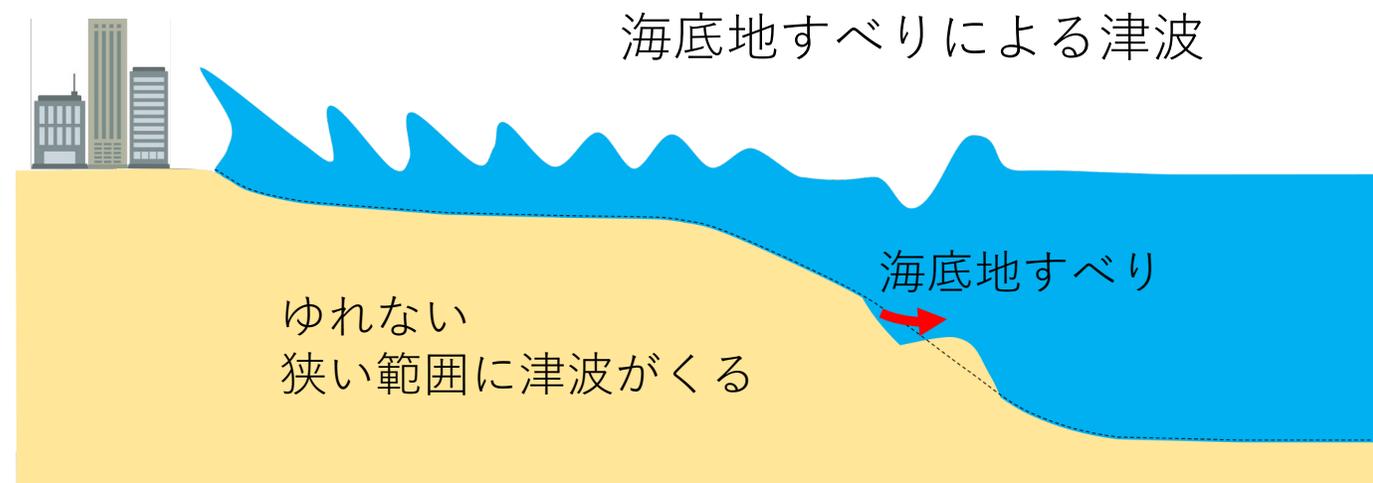
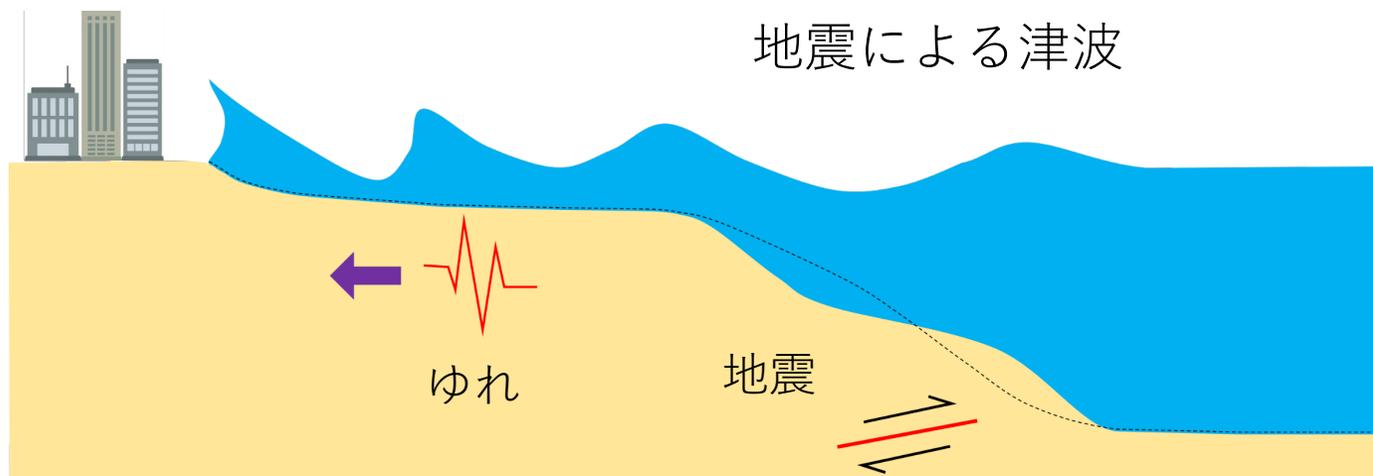
$$C = \sqrt{gH}$$

伝播速度  $\sqrt{gH}$  水深

重力加速度  $9.8\text{m/s}^2$

# 海底地すべり津波

括弧内の数字は最大津波高さ  
(もしくは最大遡上高)  
※は山体崩壊

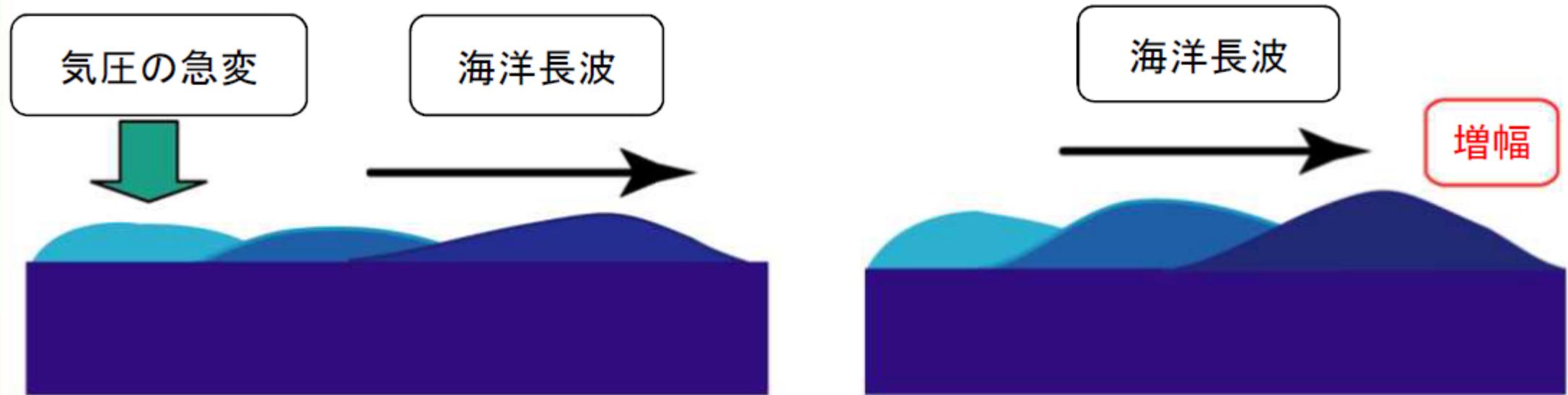


- 1741年 渡島大島の津波※ (15m)
- 1771年 八重山津波 (85m)
- 1792年 島原大変肥後迷惑※ (9m)
- 1946年 アリューシャン地震 (35m, M8.1)
- 1998年 パプアニューギニア地震 (15m, M7.1)
- 2009年 駿河湾沖の地震 (0.7m, M6.5)
- 2018年 インドネシアパルの地震 (11.3m, M7.5)

宮古諸島下地島の帯岩(→)。八重山地震の津波で打ち上げられたとされる。



# 気圧の変化で海水を上下させたっていい

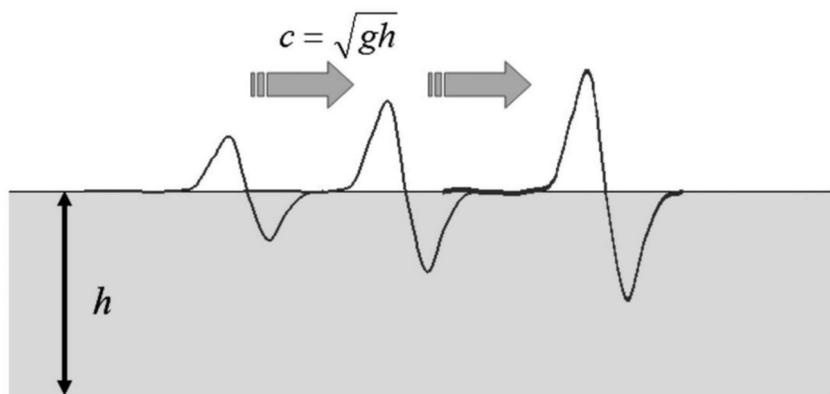
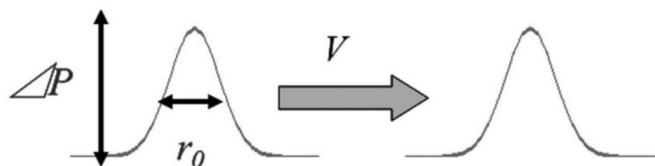


① 気圧の急変により  
海洋長波が発生

② 海洋長波が増幅  
しながら伝わる

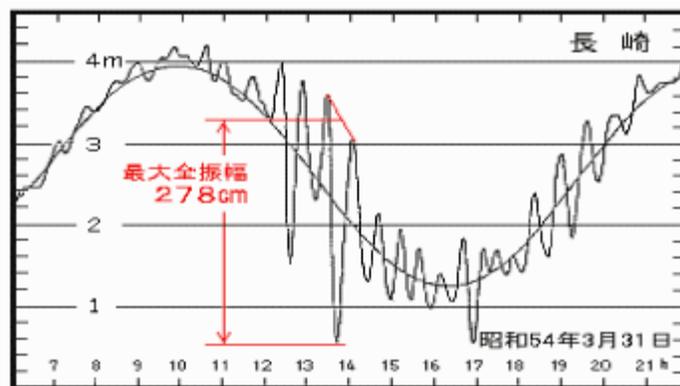
# 気象津波 (meteo-tsunami)

- ✓ 気圧擾乱 (低下)
- ✓ 海面が盛り上がり長波が励起
- ✓ 長波の移動速度と気圧擾乱の移動が一致すると
- ✓ 共鳴して長波の振幅が大きくなる
- ✓ 九州地方の「あびき」は気象津波



第1図 プラウドマン共鳴のイメージ。

高野(2014)



気象庁長崎検潮所(長崎市松ヶ枝町)で観測された過去最大のあびきの例



1988年(昭和63年)3月16日のあびきで、海水が浦上川を遡っている様子



# 本研究の目的

観測された大気圧変動を入力した津波シミュレーションで、日本の検潮所で記録された津波波形を再現できるか？

## 手順

- ① 観測された大気圧変動を三角波で近似
- ② ①をexplicitに津波シミュレーションに入力
- ③ 日本の検潮記録と比較

## 津波警報に必須な3要素

到着時間

最大水位

継続時間

# 解析手法

---



# 手順①：観測大気圧変動を三角波で近似

円環上の全音波エネルギーは保存されると仮定して

$$E = Lh \int_{R-c_s\Delta t_1}^{R+c_s\Delta t_2} \frac{\Delta p^2}{\rho_0 c_s^2} dr = \frac{Lh}{\rho_0 c_s} \int_{-\Delta t_1}^{\Delta t_2} \Delta p^2 dt = \text{const.}$$

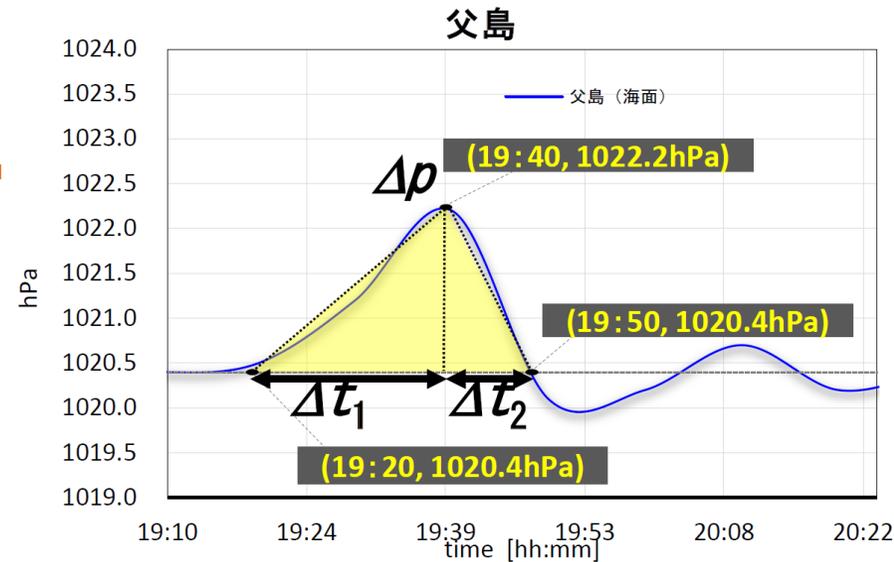
圧力変動部分を次のように三角形で仮定して、

$$\Delta p = \begin{cases} \Delta p_0(1+t/\Delta t_1) & \text{for } \Delta t_1 < t < 0 \\ \Delta p_0(1-t/\Delta t_2) & \text{for } 0 < t < \Delta t_2 \end{cases}$$

全音波エネルギーは

$$E = \frac{Lh\Delta p_0^2}{\rho_0 c_s} \left\{ \int_{-\Delta t_1}^0 \left(1 + \frac{t}{\Delta t_1}\right)^2 dt + \int_0^{\Delta t_2} \left(1 - \frac{t}{\Delta t_2}\right)^2 dt \right\}$$

$$= L \frac{h\Delta p_0^2}{3\rho_0 c_s} (\Delta t_1 + \Delta t_2) = L \frac{h\Delta p_0^2 \Delta t}{3\rho_0 c_s}$$



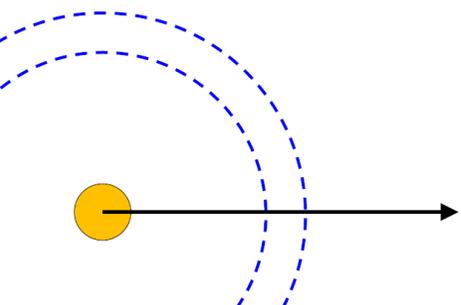
地球上の点震源（噴火点）と観測点の距離がR,  
Lは円環の長さ,  
Aは地球半径

$$L = 2\pi A \sin\left(\frac{R}{A}\right)$$

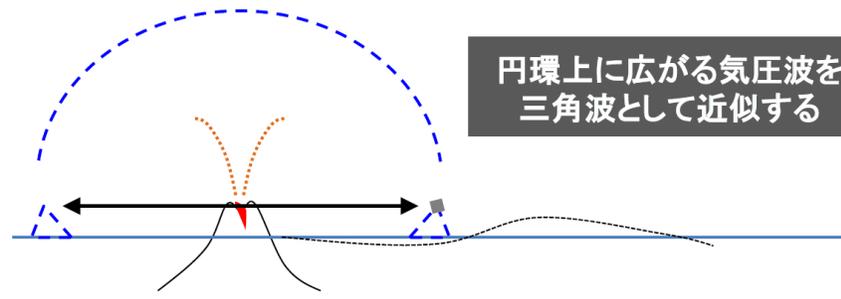
だから  $E = 2\pi A \sin\left(\frac{R}{A}\right) \frac{h\Delta p_0^2 \Delta t}{3\rho_0 c_s}$

よって  $\Delta p_0 = \sqrt{\frac{E3\rho_0 c_s}{2\pi A \sin\left(\frac{R}{A}\right) h\Delta t}}$

噴火点を上から見ると



観測地点



円環上に広がる気圧波を三角波として近似する

# 手順②: 津波シミュレーション

## 支配方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \left( \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \right)$$

$\eta$ : 水位,  $t$ : 時間,  
 $M, N$ :  $x, y$ 方向の線流量,  
 $D$ : 静水深,  
 $g$ : 重力加速度,  
 $\rho$ : 海水密度,  
 $p_{atm}$ : 大気圧力

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - BF$$

注:  $x$ 方向のみ

## 数値解法・条件など

スタaggerド格子・リーブフロッグ差分法

地形ネスティング有

(最小格子間隔20/9秒角~60m)

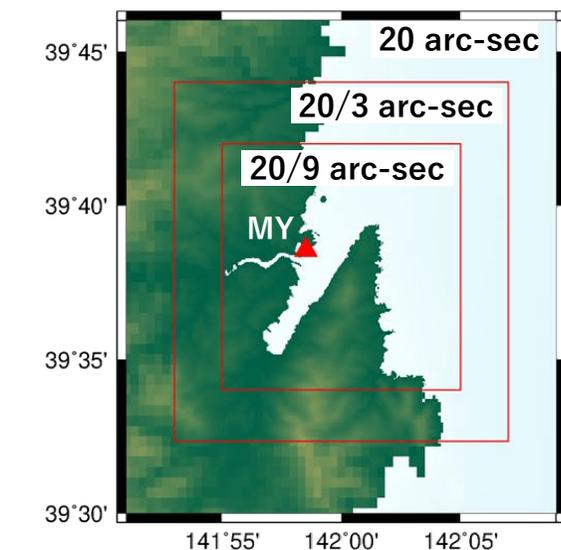
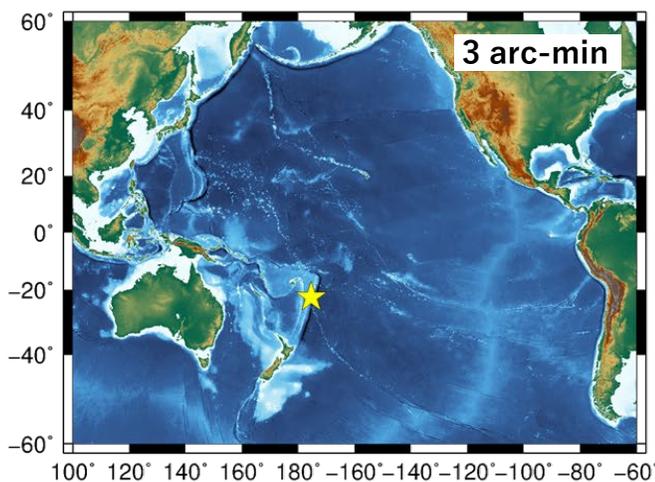
地形データはGEBCOとGtTM(Chikasada, 2021)

時間ステップ: 0.25s

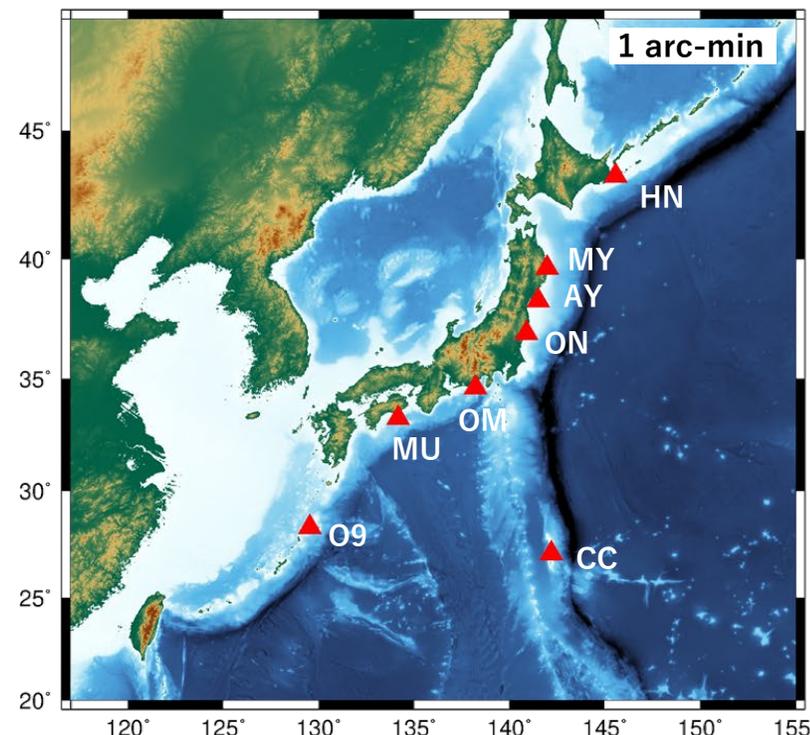
再現時間: 86400s (24時間)

沖側透過境界

大気圧擾乱を三角波で強制入力



## 地形ネスティング



▲ 津波波形の比較に用いた観測点 (気象庁)

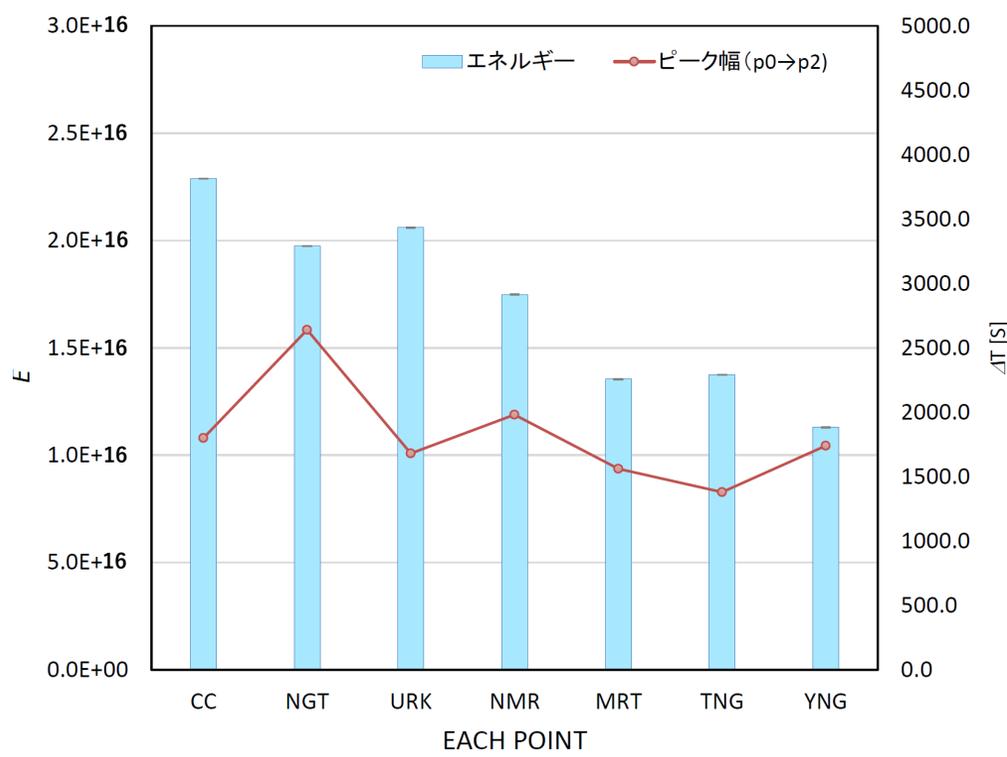
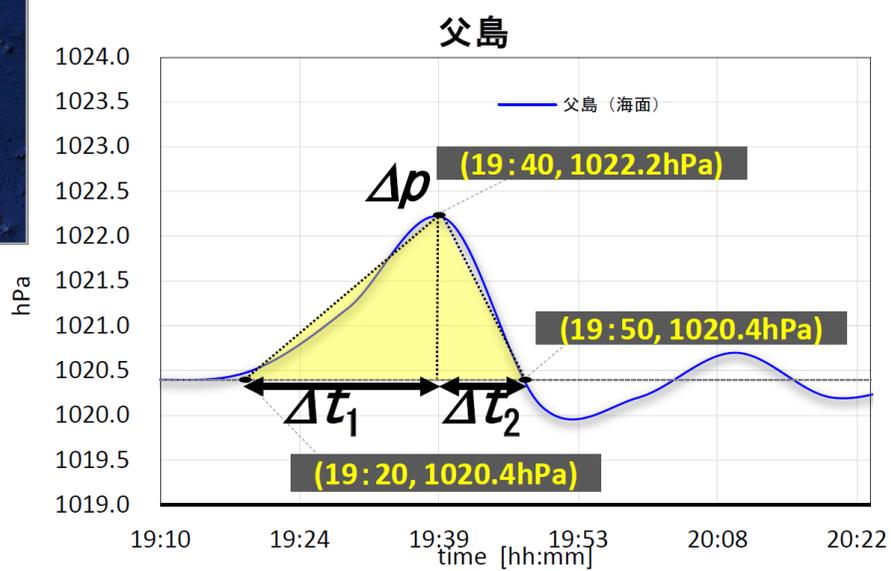
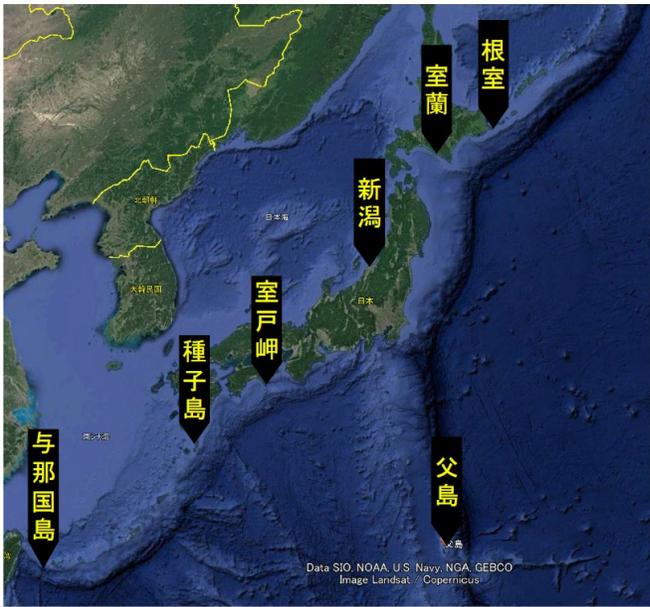
# 計算結果

---



# 全音波エネルギー計算結果

param.			父島	新潟	浦河	根室	室戸岬	種子島	与那国島
名称	変数	単位	CC	NGT	URK	NMR	MRT	TNG	YNG
エネルギー	E	[-]	2.288E+16	1.975E+16	2.061E+16	1.749E+16	1.353E+16	1.374E+16	1.129E+16
気圧変動	dp	[hPa]	1.800	1.300	1.650	1.400	1.400	1.500	1.200
気圧記録(基線)	p0	[hPa]	1020.400	1022.100	1016.150	1012.100	1021.800	1023.000	1021.500
気圧記録(ピーク)	p1	[hPa]	1022.200	1023.400	1017.800	1013.500	1023.200	1024.500	1022.700
ピーク幅(p0→p2)	dt	[s]	1800.000	2640.000	1680.000	1980.000	1560.000	1380.000	1740.000
ピーク幅(p0→p1)	dt1	[s]	1200.000	1440.000	1200.000	1200.000	1200.000	960.000	1380.000
ピーク幅(p1→p2)	dt2	[s]	600.000	1200.000	480.000	780.000	360.000	420.000	360.000
ピーク到達時間※	t	[s]	23400.000	27000.000	27600.000	27600.000	27000.000	27000.000	27600.000
噴火距離(平面)	Rs	[m]	8023158.000	9257490.000	9463212.000	9463212.000	9257490.000	9257490.000	9463212.000
噴火距離(球)	Rr	[m]	7503405.944	8464287.548	8616951.124	8616951.124	8464287.548	8464287.548	8616951.124
噴火距離(球)	Rr	[km]	7503.406	8464.288	8616.951	8616.951	8464.288	8464.288	8616.951

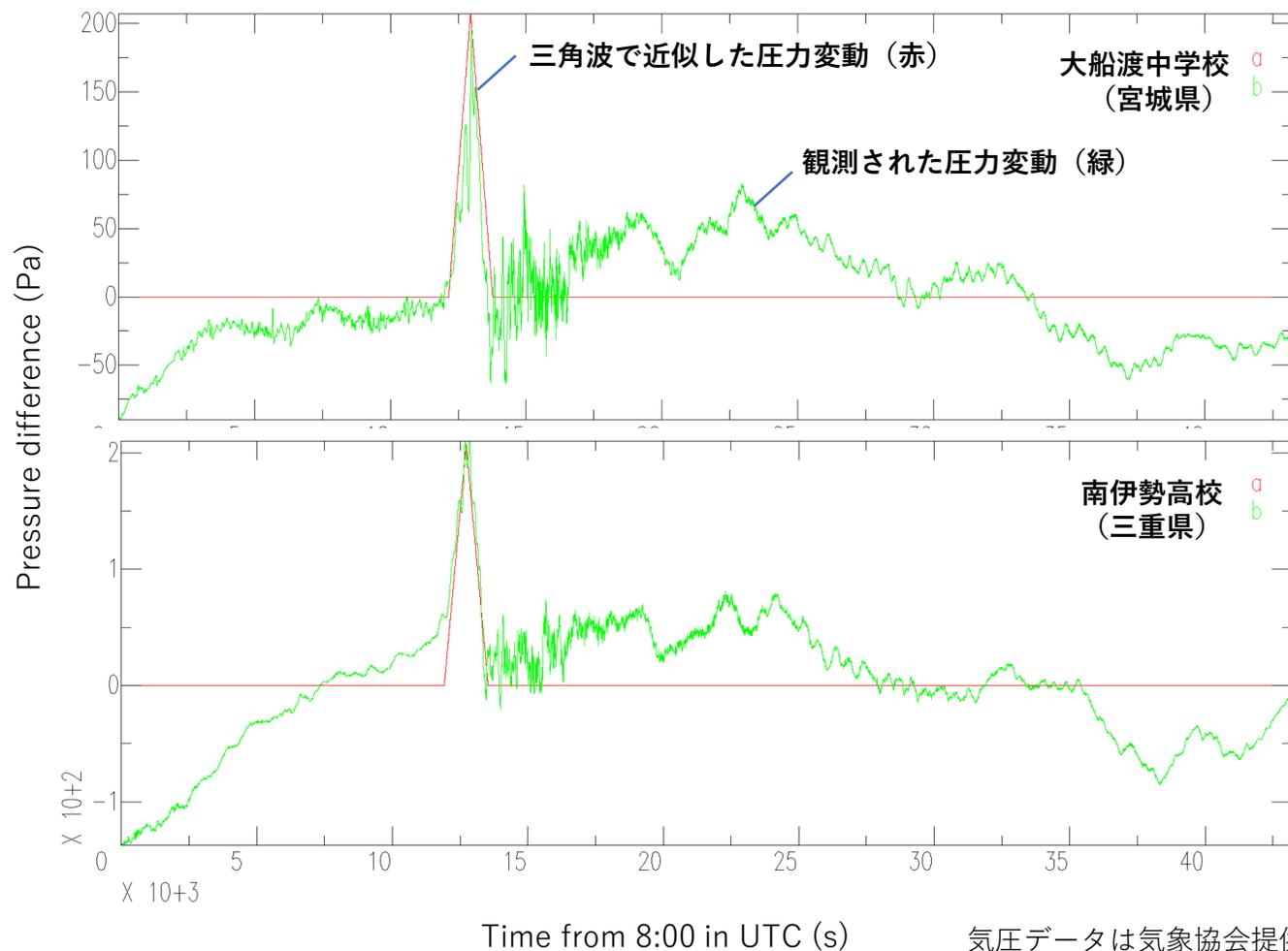


# 三角波で近似した気圧波

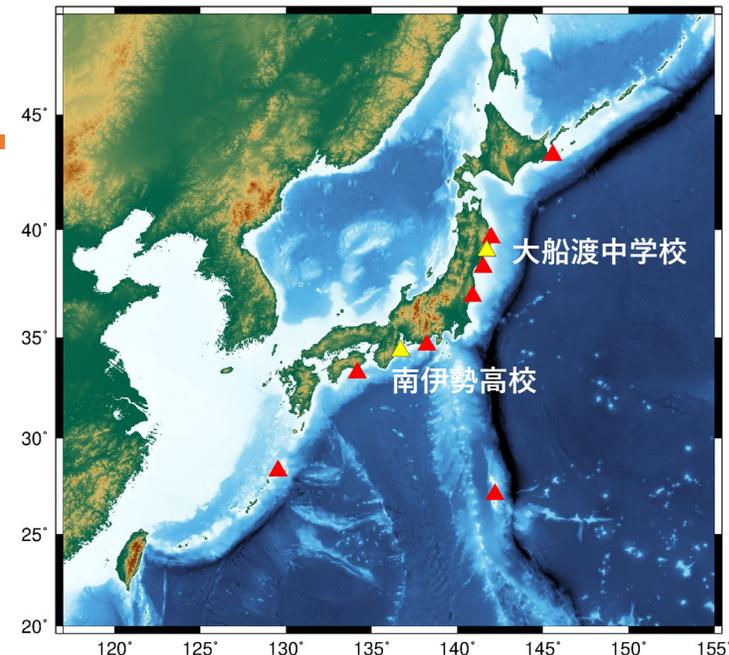
発生日時 2022/1/15 4:10 (UTC)

全音波エネルギー  $2.16 \times 10^{12}$  J 気圧波の移動速度 315 m/s

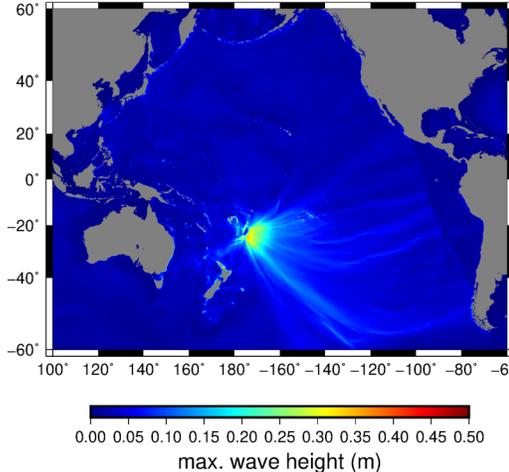
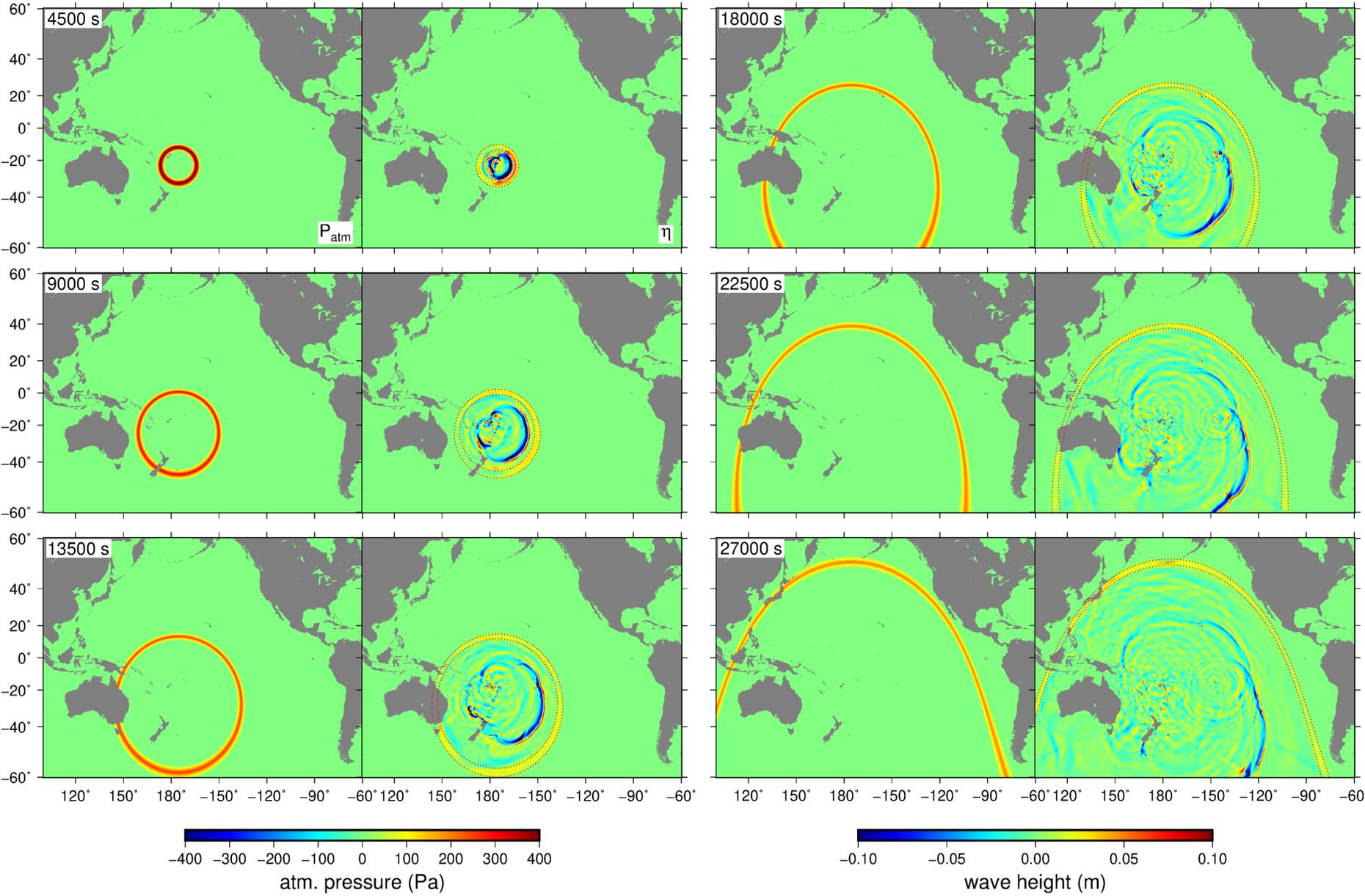
気圧波の幅 ( $\Delta t$ ) 1620 s



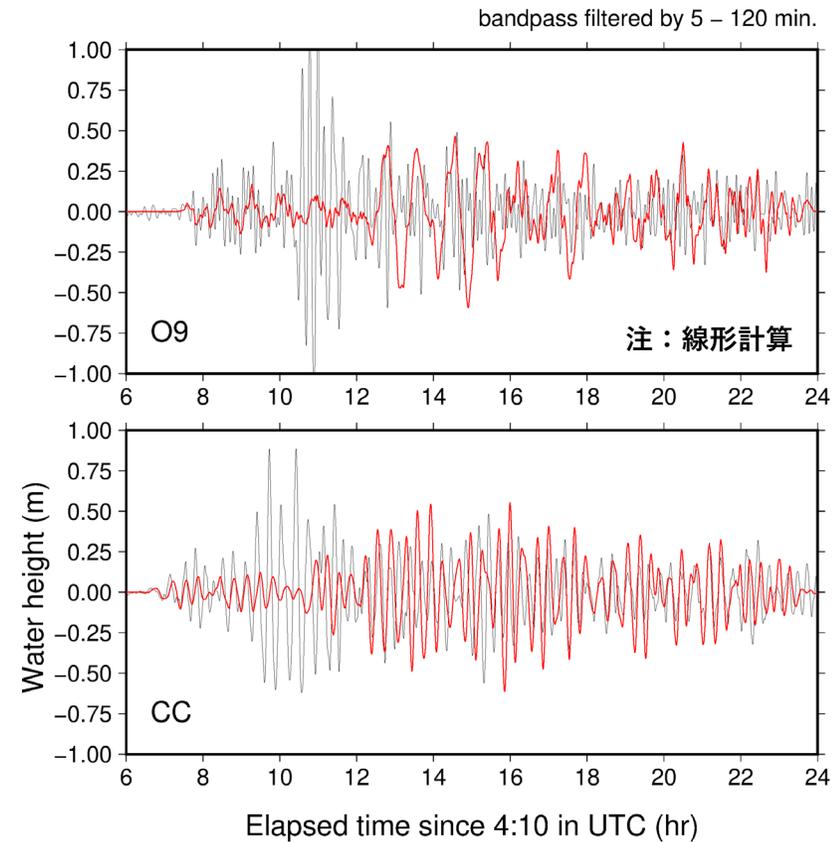
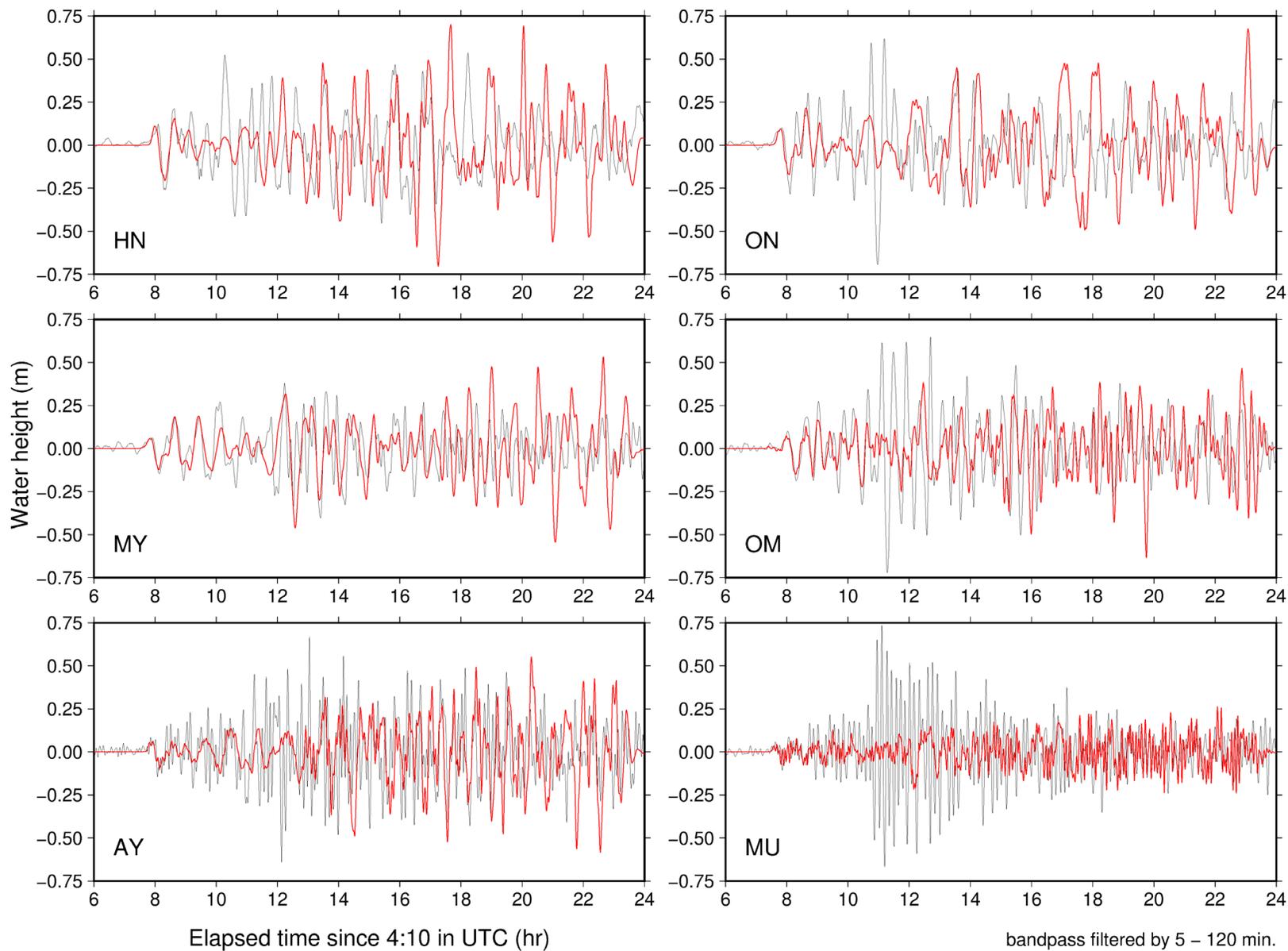
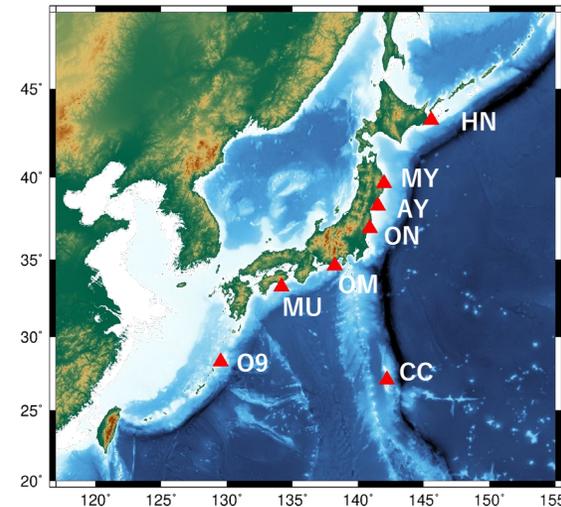
気圧データは気象協会提供



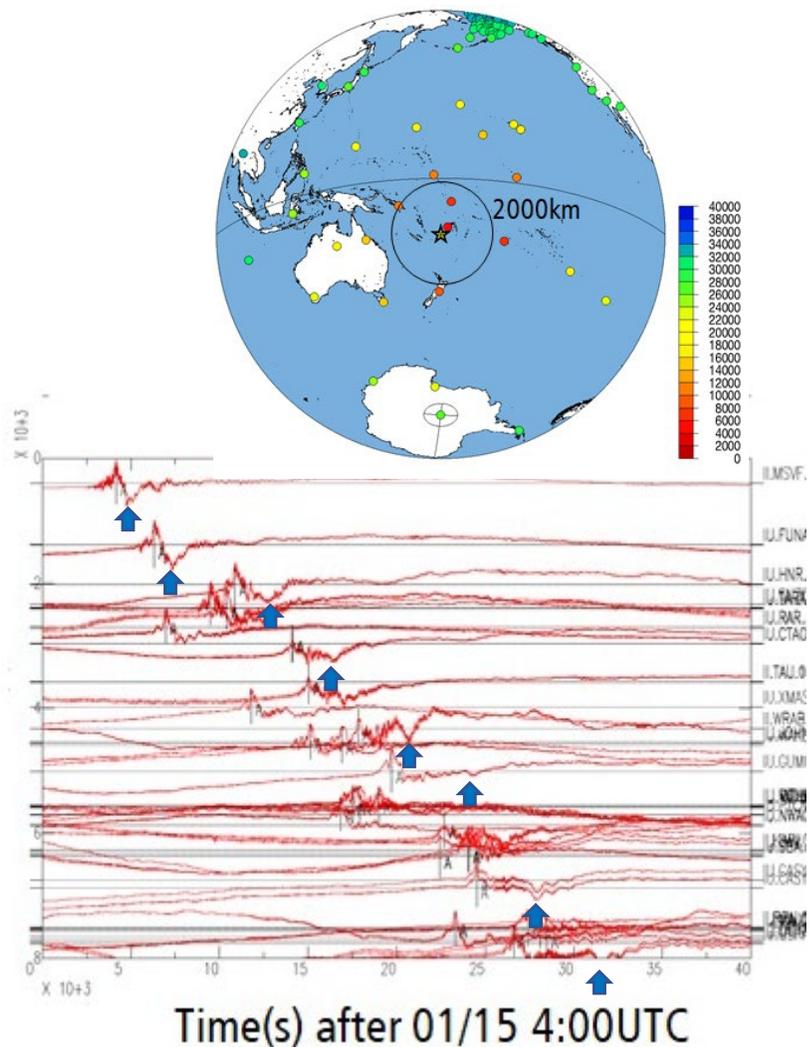
# 津波計算結果 (ラム波)



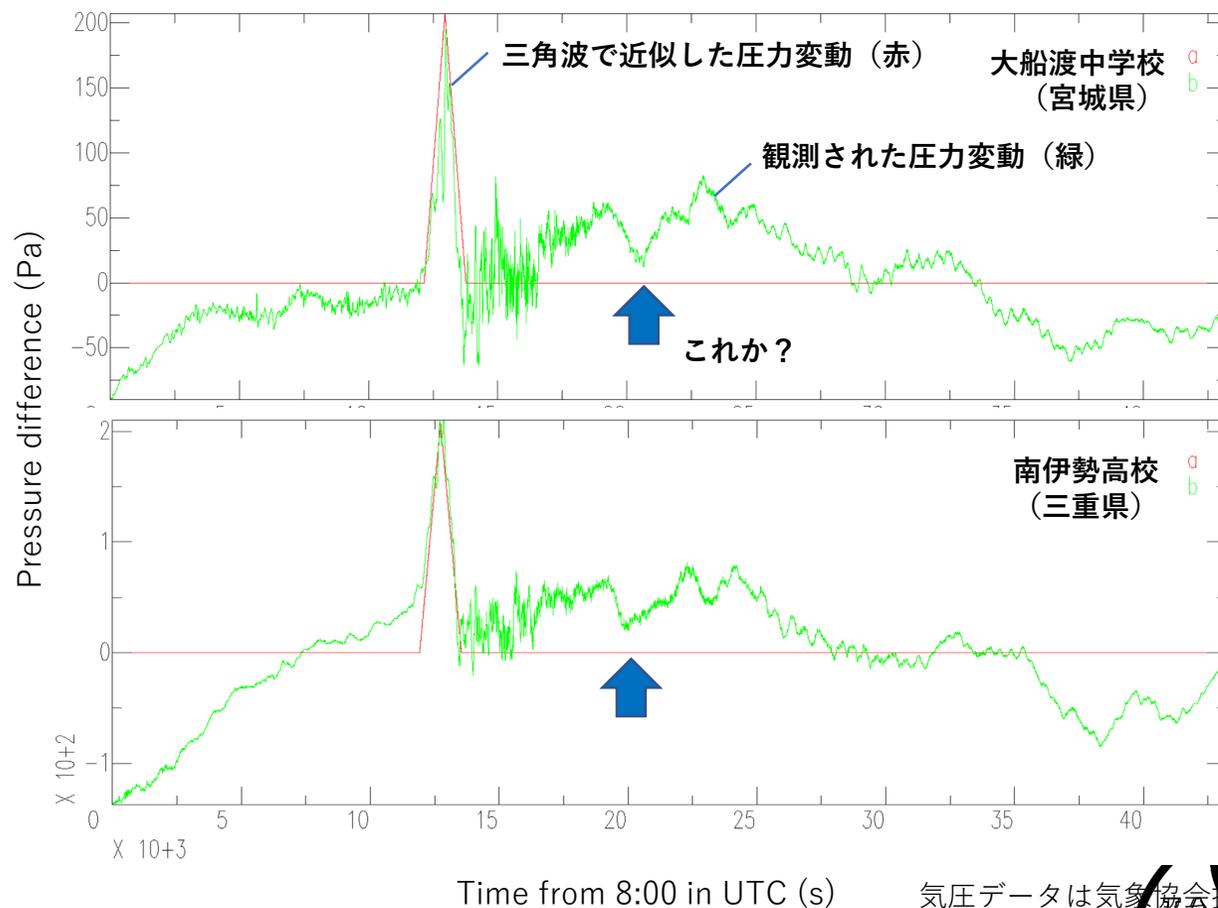
# 津波計算結果（ラム波）



# 別の波（大気重力波）も効いてる？



原図は山田・Ho (2022, HP)



気圧データは気象協会提供



# 別の波（大気重力波）も効いてる？

## ① ラム波

発生日時 2022/1/15 4:10 (UTC)

全音波エネルギー  $2.16 \times 10^{12}$  J

気圧波の移動速度 315 m/s

気圧波の幅 ( $\Delta t$ ) 1620 s

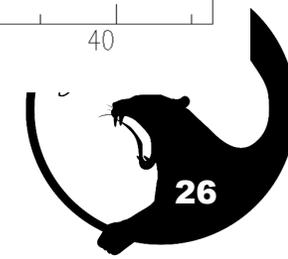
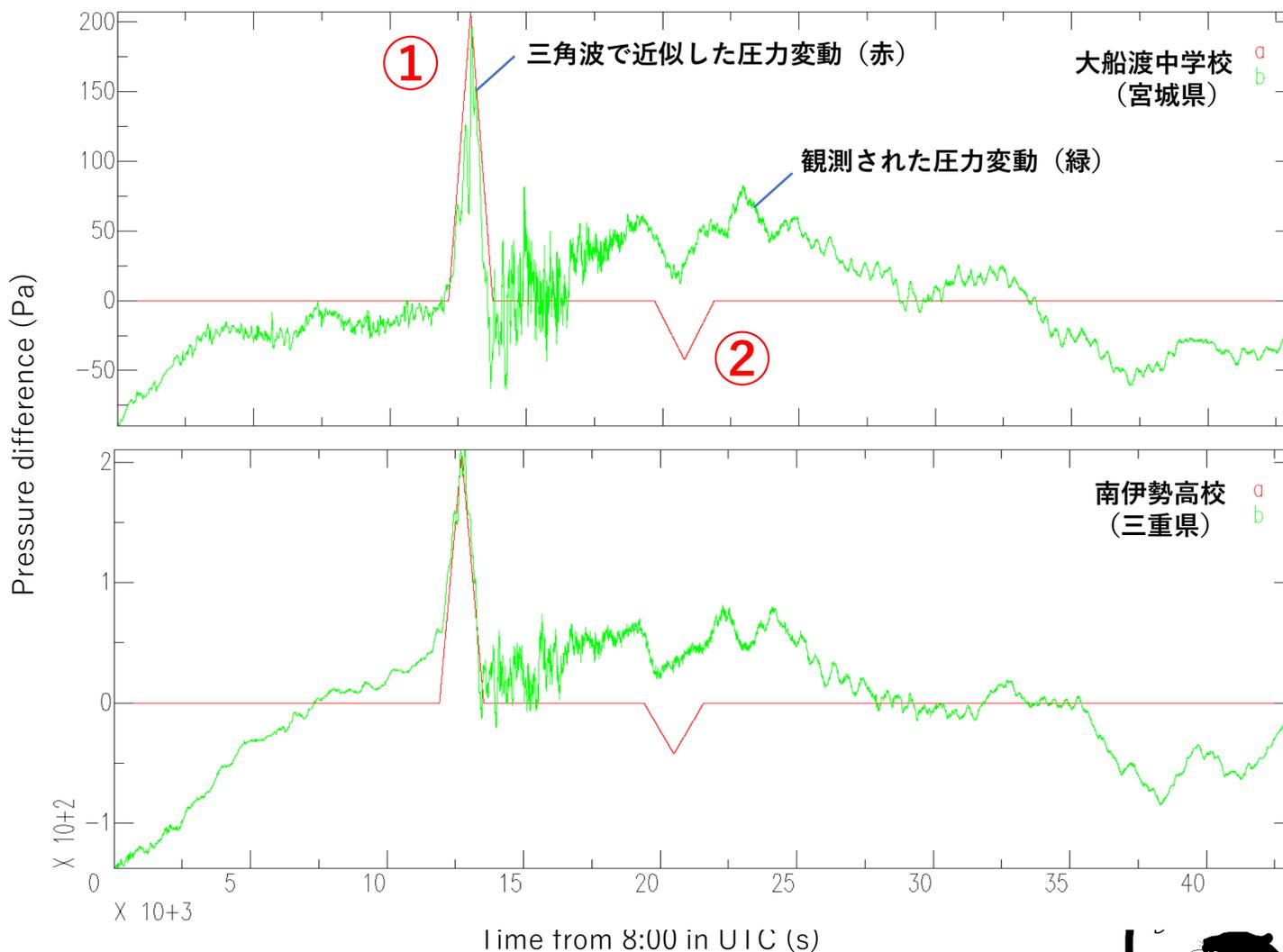
## ② 大気重力波A

発生日時 2022/1/15 4:10 (UTC)

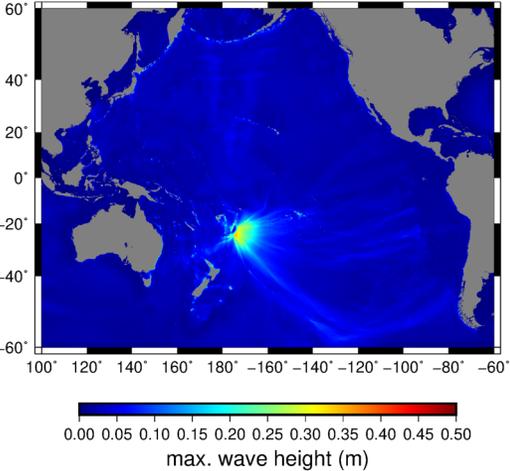
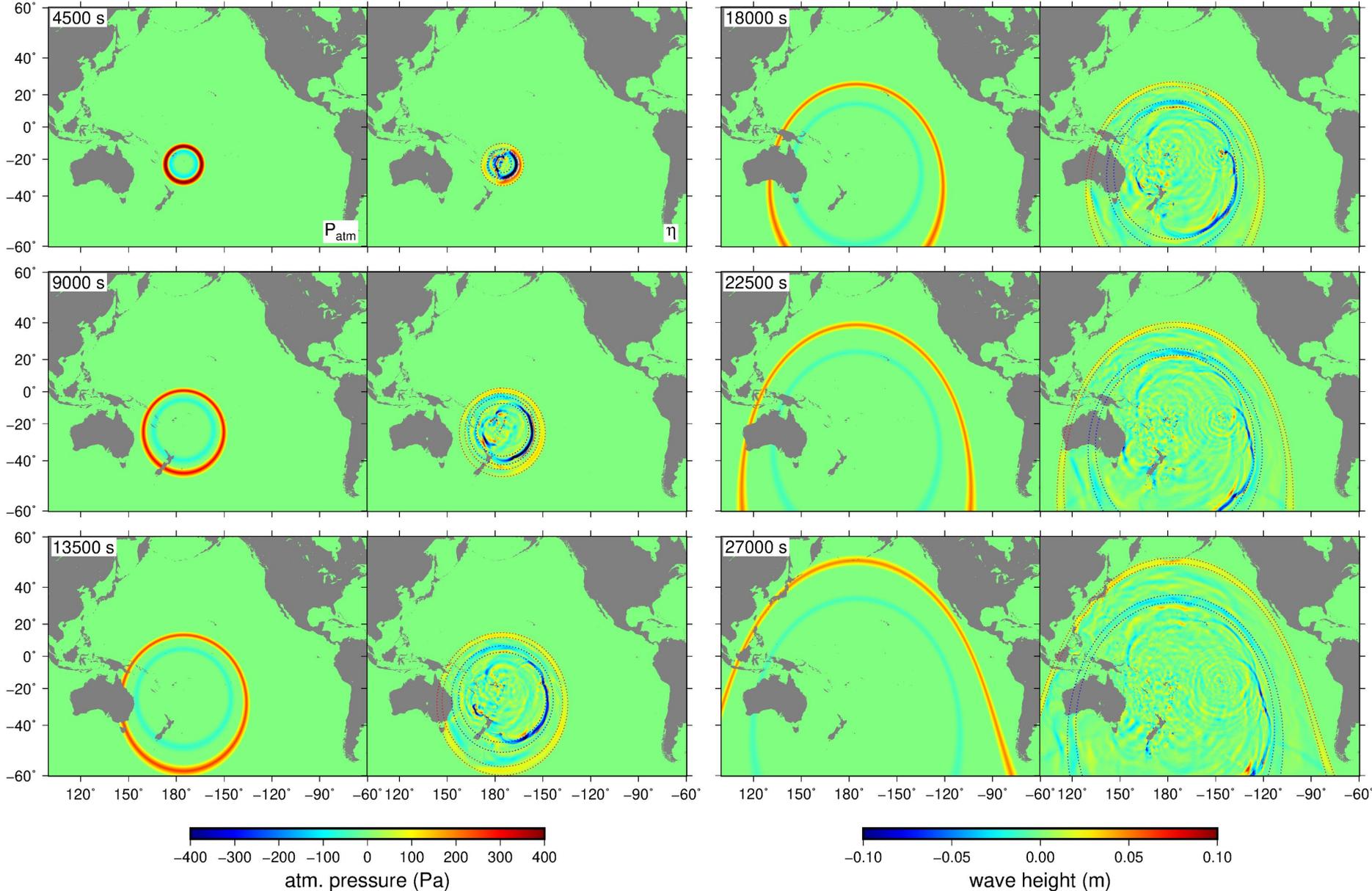
全音波エネルギー  $0.16 \times 10^{12}$  J

気圧波の移動速度 244 m/s

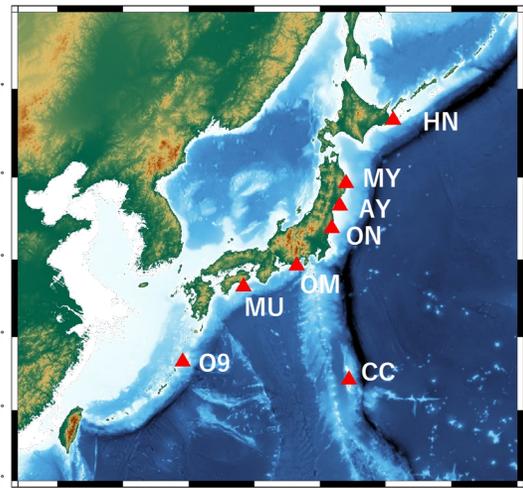
気圧波の幅 ( $\Delta t$ ) 2200 s



# 津波計算結果（ラム波 + 大気重力波）

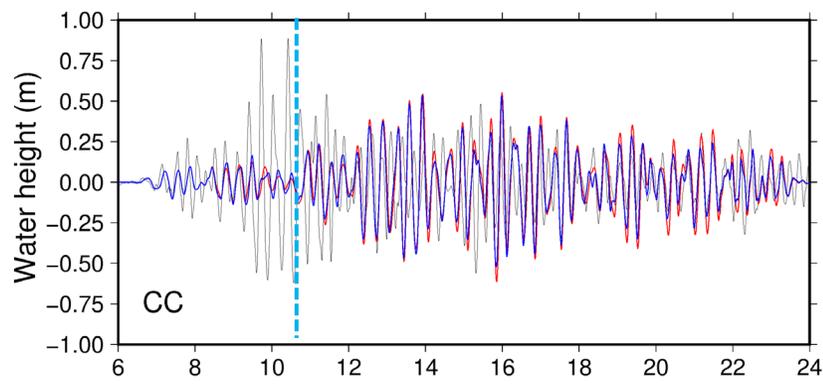
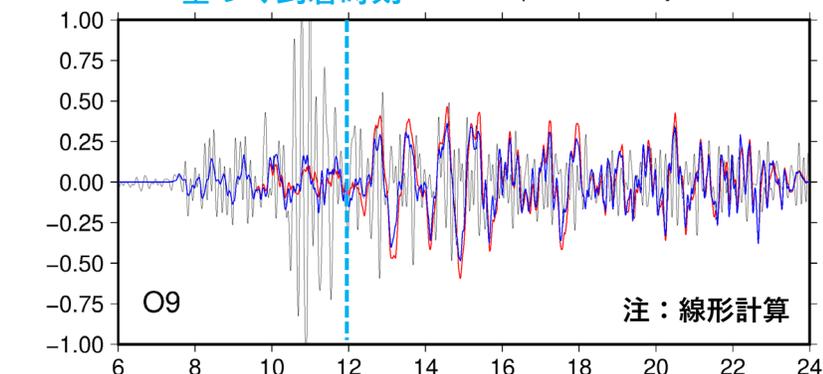
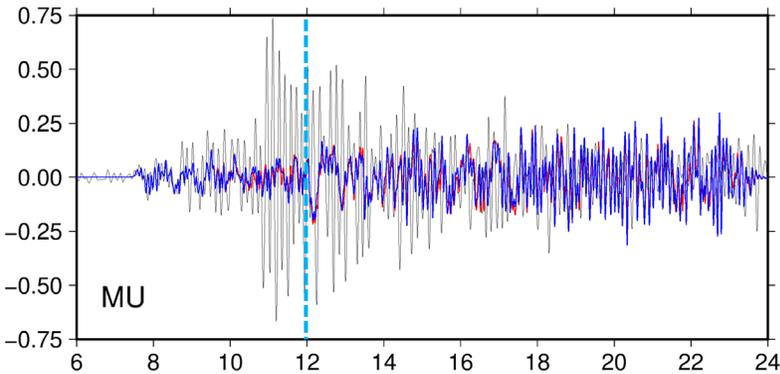
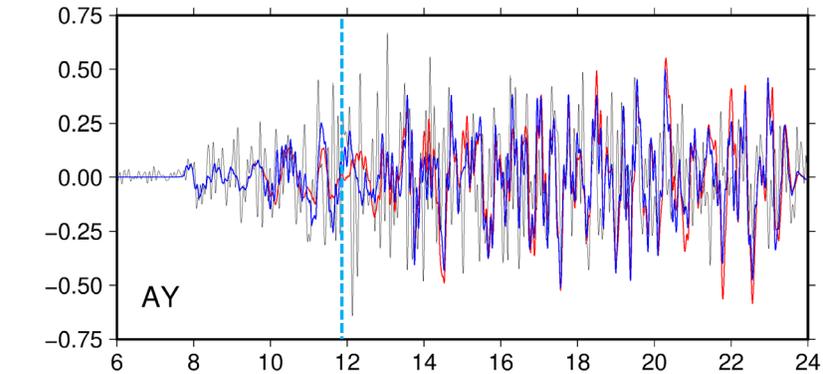
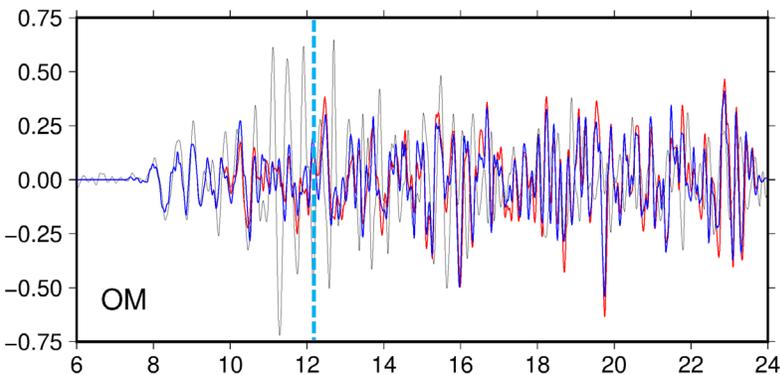
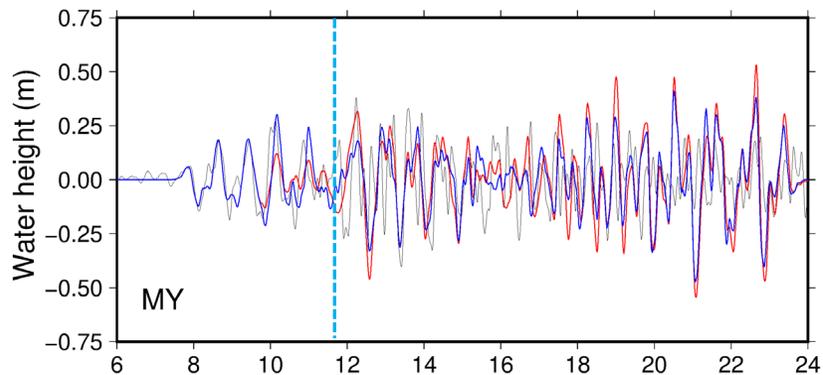
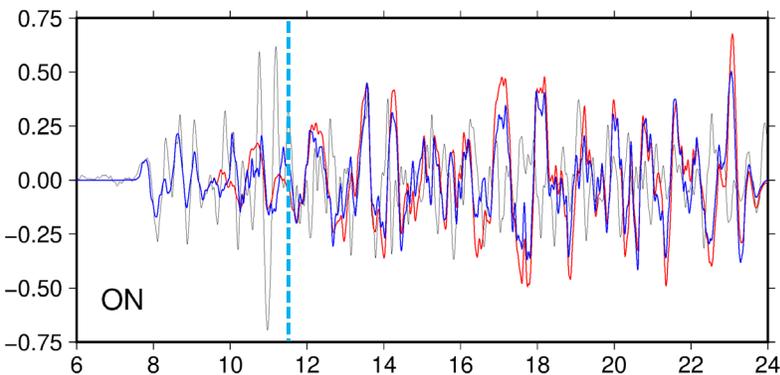
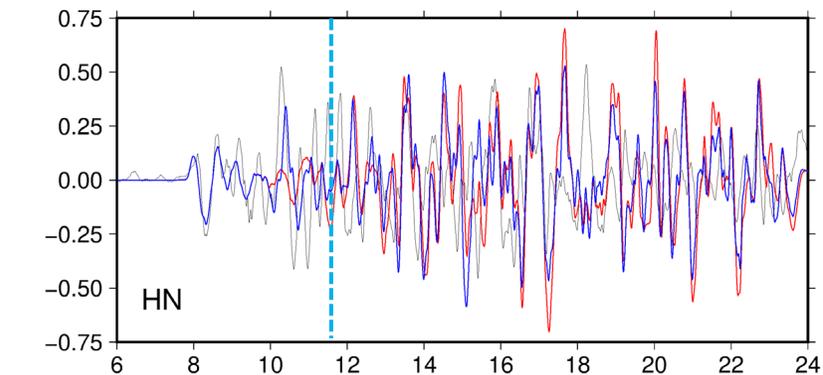


# 津波計算結果（ラム波 + 大気重力波）



観測  
 計算（ラム波）  
 計算（ラム波 +  
 大気重力波）

津波伝播速度に  
 基づく到着時刻  
 bandpass filtered by 5 - 120 min.

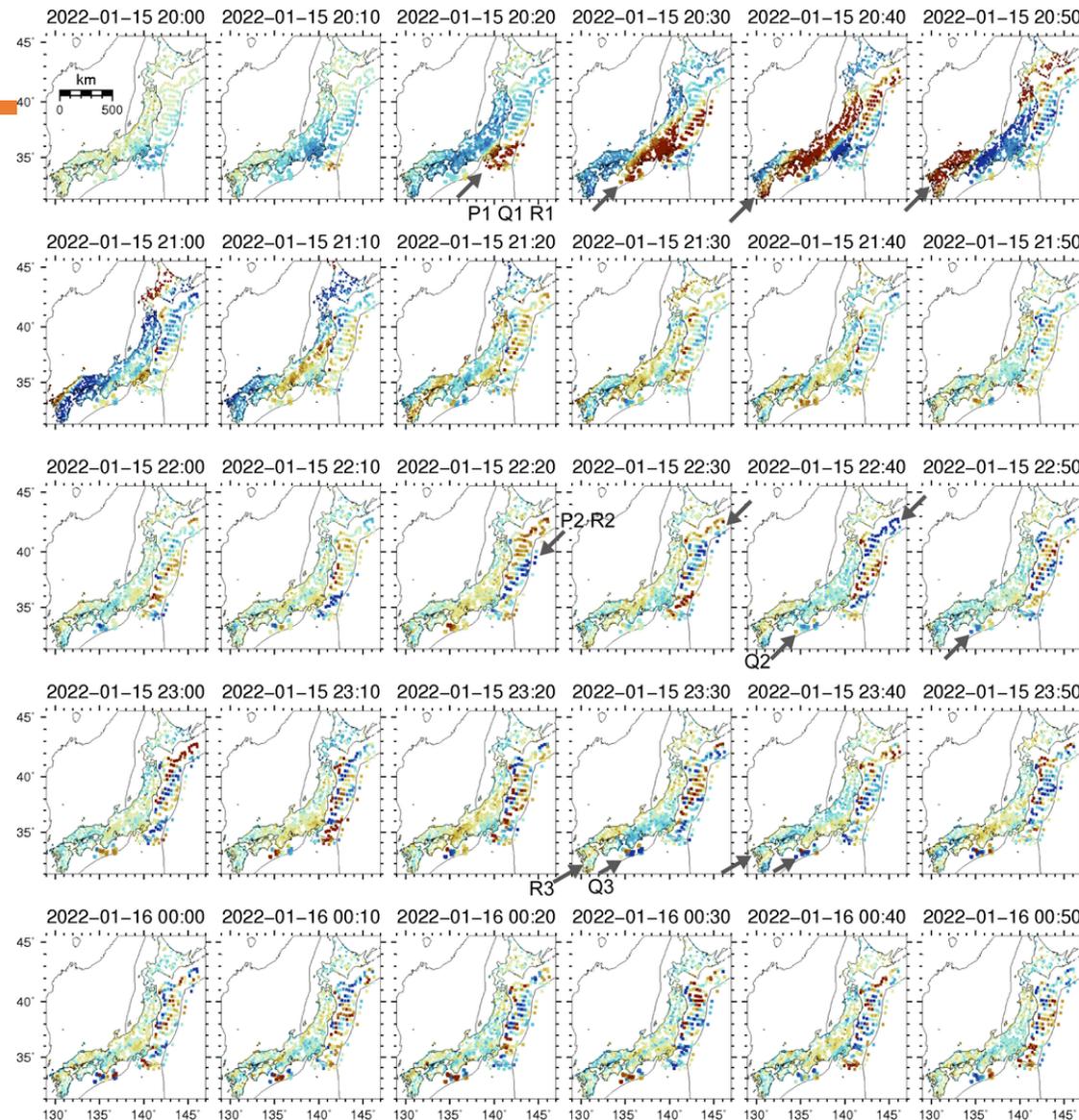
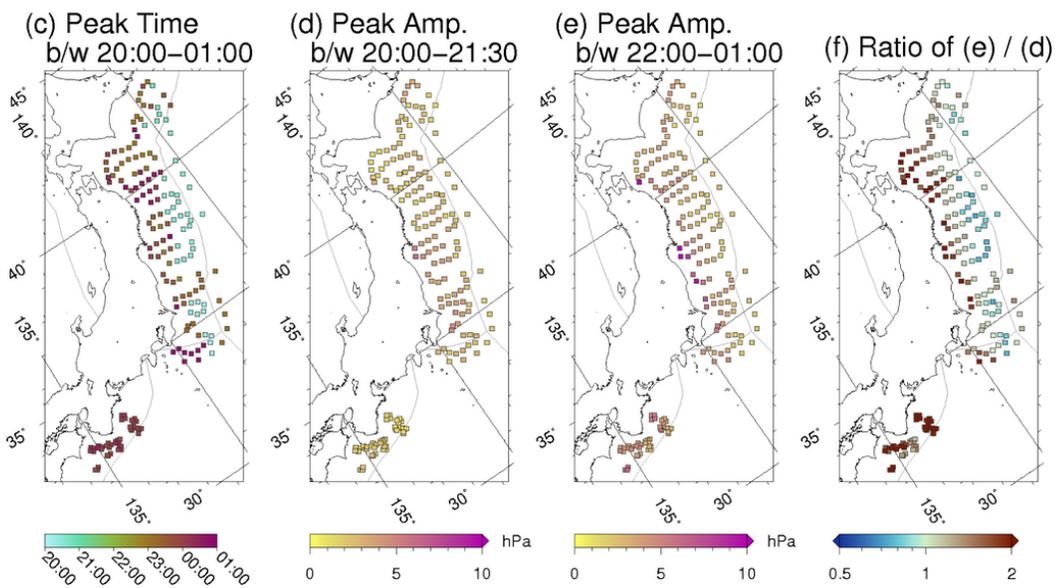
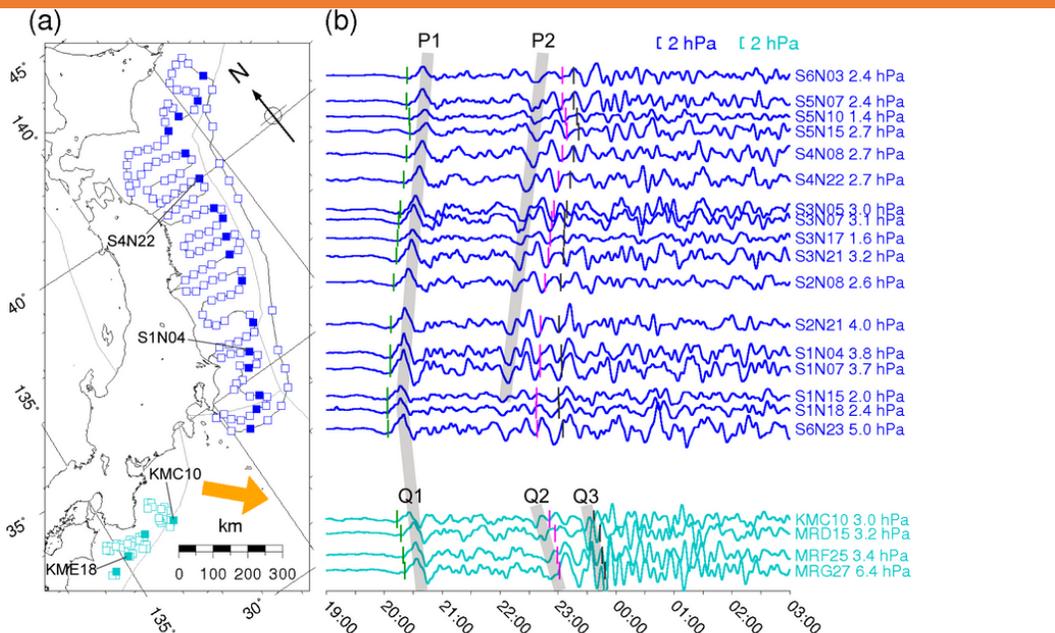


Elapsed time since 4:10 in UTC (hr)

bandpass filtered by 5 - 120 min.

Elapsed time since 4:10 in UTC (hr)

# 海底水圧 & 大気圧データ



Kubo et al. (2022, preprint)

# 津波計算結果（ラム波 + 大気重力波 x 2）

## ① ラム波

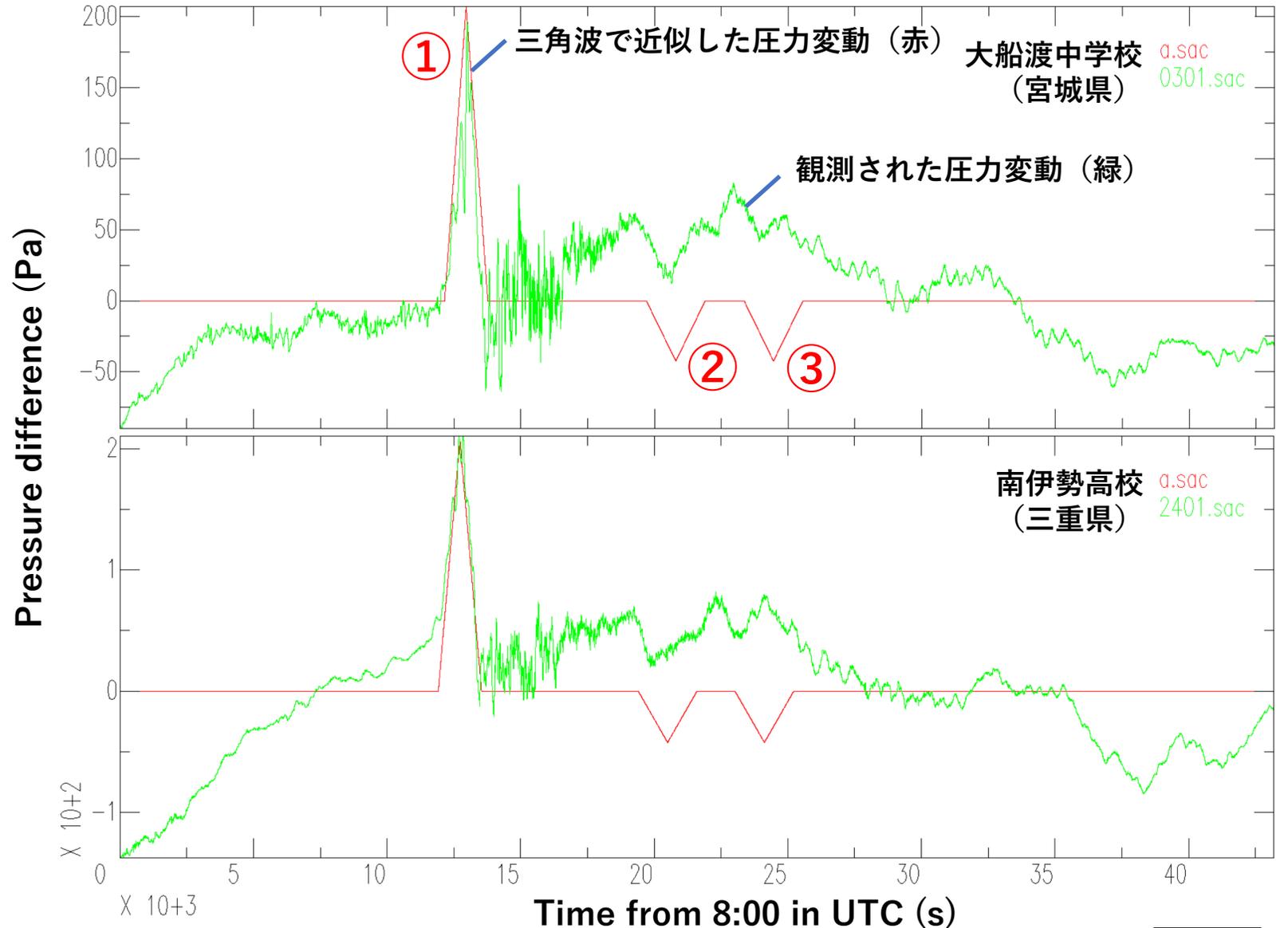
発生日時 2022/1/15 4:10 (UTC)  
全音波エネルギー  $2.16 \times 10^{12}$  J  
気圧波の移動速度 315 m/s  
気圧波の幅 ( $\Delta t$ ) 1620 s

## ② 大気重力波A

発生日時 2022/1/15 4:10 (UTC)  
全音波エネルギー  $0.16 \times 10^{12}$  J  
気圧波の移動速度 244 m/s  
気圧波の幅 ( $\Delta t$ ) 2200 s

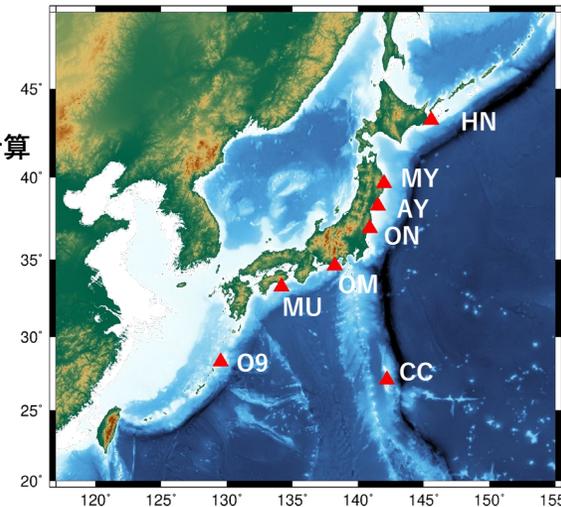
## ③ 大気重力波B

発生日時 2022/1/15 4:10 (UTC)  
全音波エネルギー  $0.16 \times 10^{12}$  J  
気圧波の移動速度 220 m/s  
気圧波の幅 ( $\Delta t$ ) 2200 s



# 津波計算結果（ラム波 + 大気重力波 x 2）

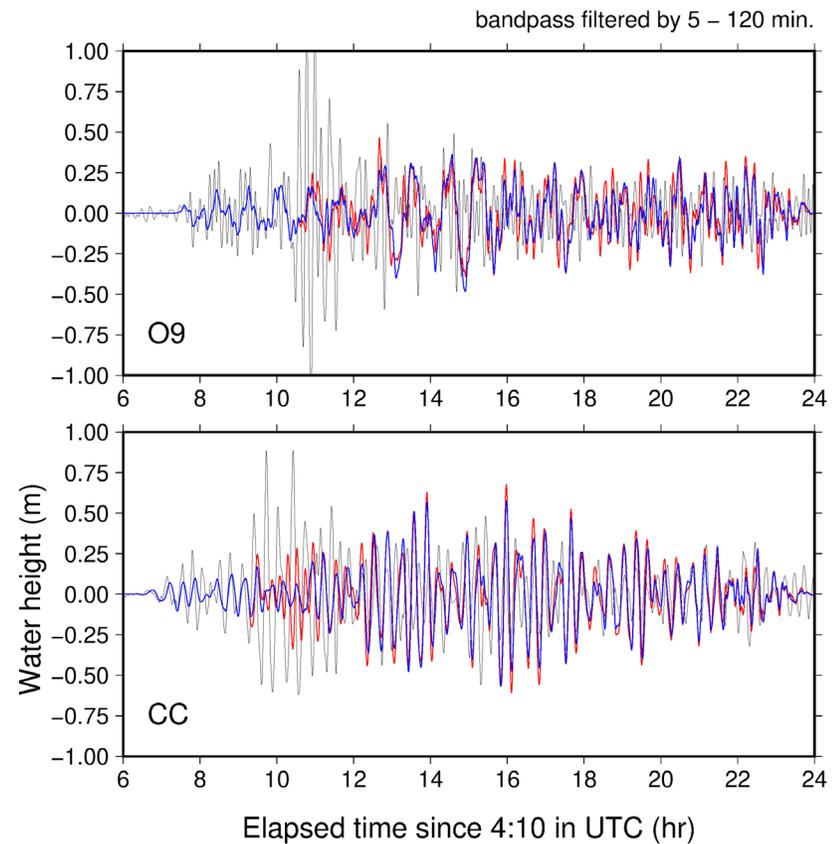
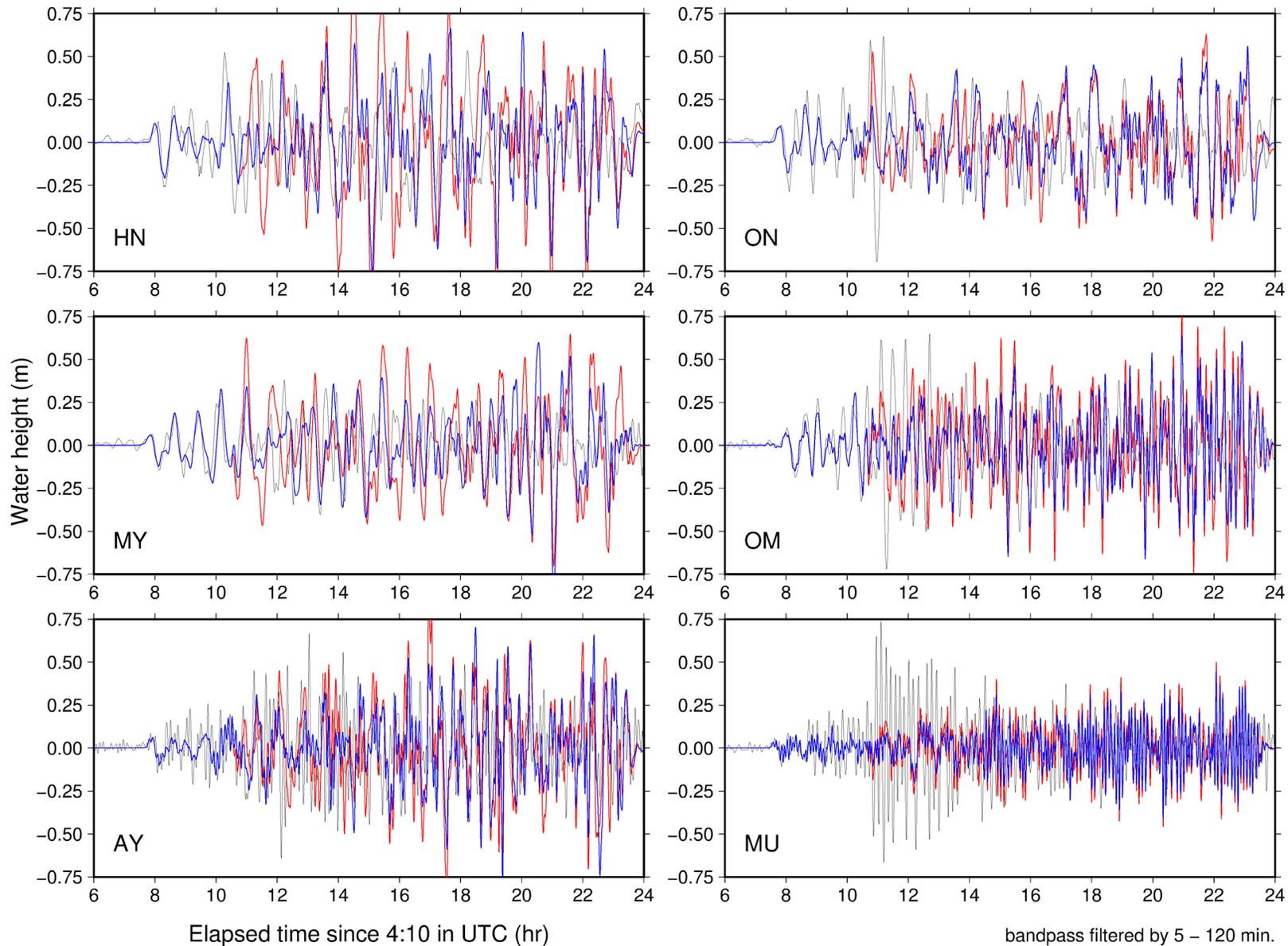
注：すべて線形計算



観測

計算（ラム波 + 大気重力波 x 2）

計算（ラム波 + 大気重力波）



# 途中報告としてのまとめ

- 三角波で気圧変動を近似してトンガ噴火に伴う津波計算を行い、日本の検潮記録と比較した。
- ラム波に加えて、大気重力波と思われる大気変動も考慮した。
- 津波到着時刻とはじめの2, 3サイクルの水位変動はある程度再現できた。
- 大気重力波の寄与は本検討では少しだった。
- 御前崎より南の観測点で顕著な11~12時間頃の振幅の大きな波は再現できなかった。
- 山体崩壊による津波があったとしても到達は大振幅の出現のあと。

## 課題

- 気圧変動モデルが単純すぎる？



おわり

---

