

CTBT国際監視制度の地球科学への応用ー ハイドロフォンアレイによる水中音波観測

国立研究開発法人海洋研究開発機構
海域地震火山部門
地震津波予測研究開発センター
松本 浩幸

発表のアウトライン

■ CTBT IMS水中音波監視観測所

- CTBTとは？
- CTBT国際監視制度(IMS)について
- 水中音波監視観測所(HA)について

■ IMS水中音波データの科学利用

- 海底地震
- 海域火山噴火

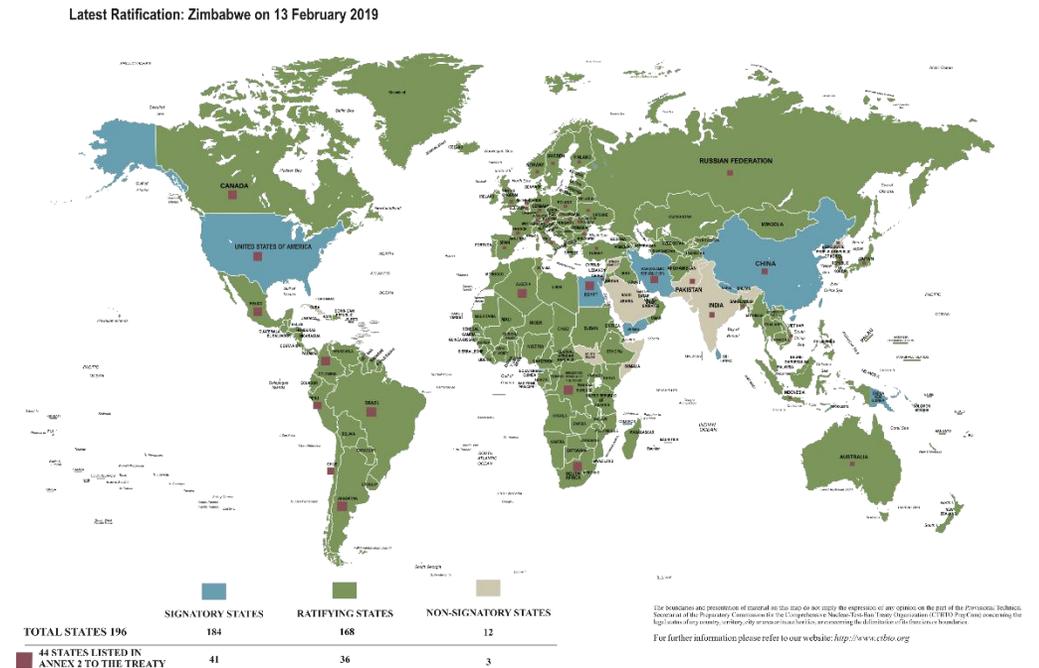
CTBTとは？

包括的核実験禁止条約 (CTBT: Comprehensive Nuclear Test-Ban-Treaty)

- 宇宙空間、大気圏内、水中、地下を含むあらゆる空間における核兵器の実験的爆発及び他の核爆発を禁止
- 1996年9月、国連総会において採択
- 条約の遵守を検証するために国際機関 (CTBTO) を設置

CTBT発効には特定の44か国すべての批准が必要

- 未批准国： 米国、中国、エジプト、イラン、イスラエル
- 未署名・未批准国： インド、パキスタン、北朝鮮



(CTBTO)

CTBTの検証手段

International Monitoring System

国際監視制度

337 facilities:

- Seismic
- Hydro-acoustic
- Infrasound
- Radionuclide, Noble gas, Laboratories

IDC & IMS



Consultation and Clarification

協議及び説明

Right to clarify matters indicating possible non-compliance



On-Site Inspection

現地査察

Conduct of on-site verification activities



Confidence Building Measures

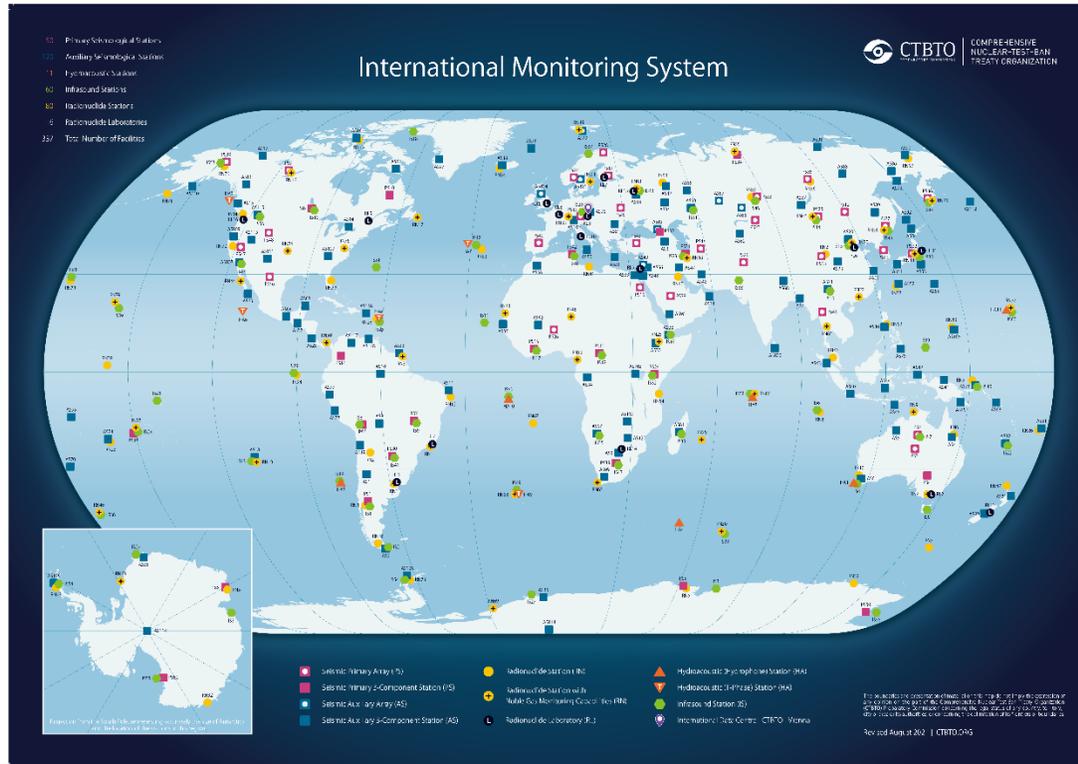
信頼の醸成

Large chemical Explosions:
Prevent misinterpretations and calibrate seismic IMS component



International Monitoring System (国際監視制度)

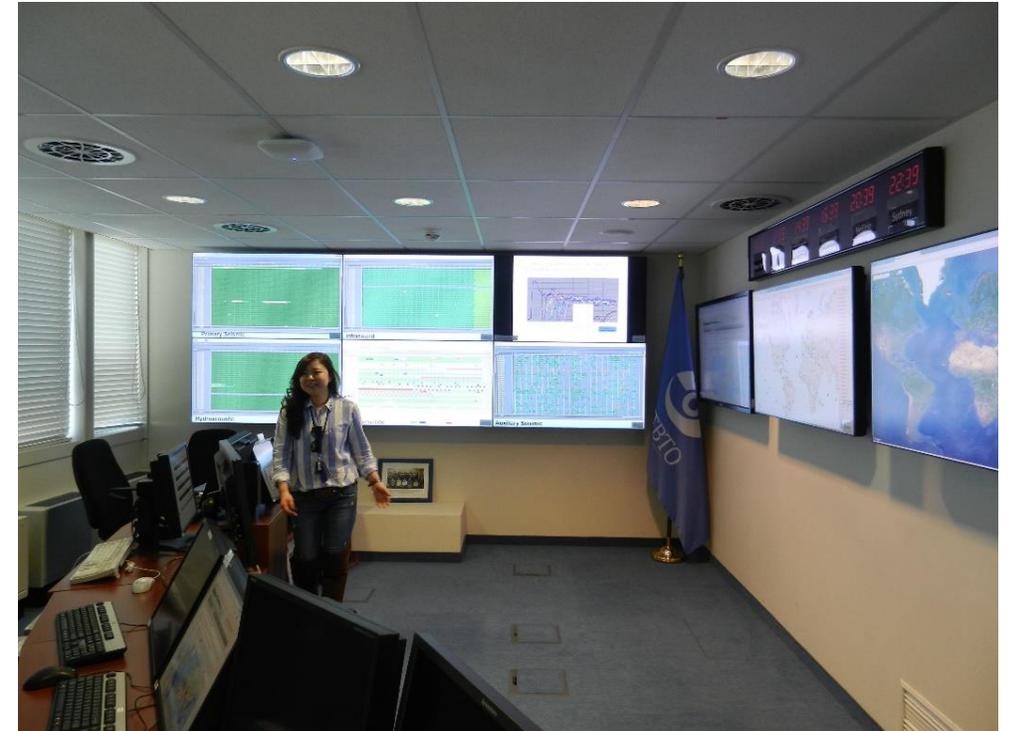
国際監視制度 (IMS)



<http://www.ctbto.org/>

- 地震学的監視観測所 50 + 120
- 微気圧振動監視観測所 60
- 水中音波監視観測所 6 + 5
- 放射性核種監視観測所 80 + 60

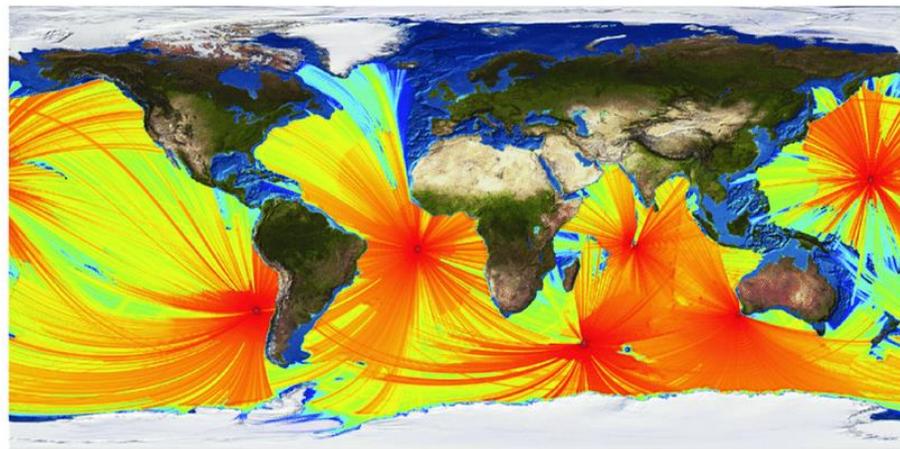
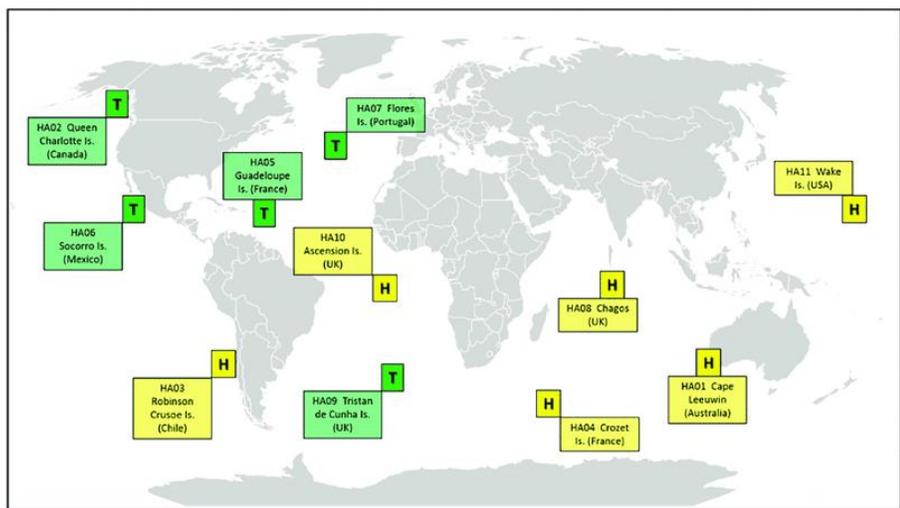
国際データセンター (IDC)



CTBT国際監視制度は、信頼性の高いグローバルな観測ネットワークとして、**科学目的・民生利用**でもその役割と効果が注目されている。

IMS Hydroacoustic (HA) Station (水中音波監視観測所)

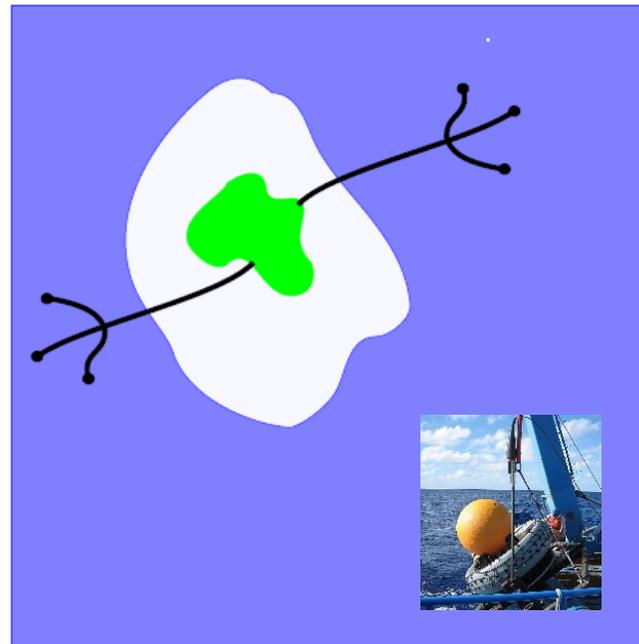
CTBT水中音波監視ネットワーク



Howe et al. (2015, *Front. Mar. Sci.*)

2種類のIMS水中音波監視観測所

● Hydrophone station



● T-phase station



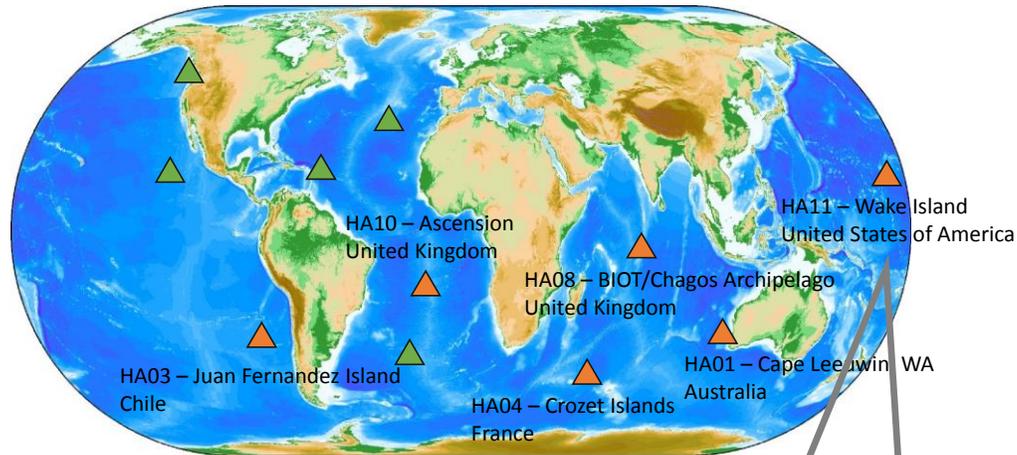
Courtesy of CTBTO

Hydroacoustic (*T*-phase) station :

- Up to 3 seismometers
- Either vertical or 3-component seismometers

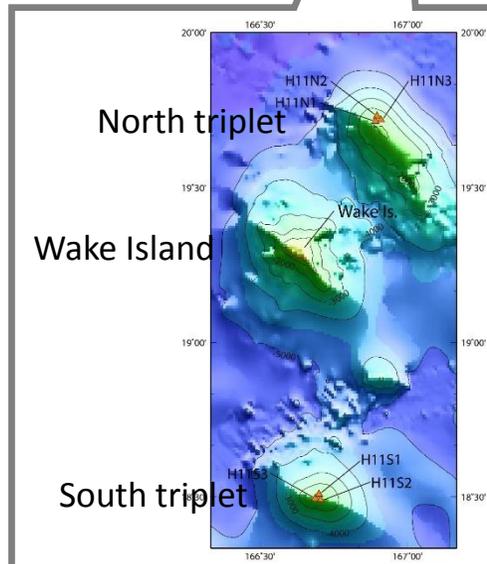
IMSハイドロフォン観測点

IMS水中音波(HA)ネットワーク

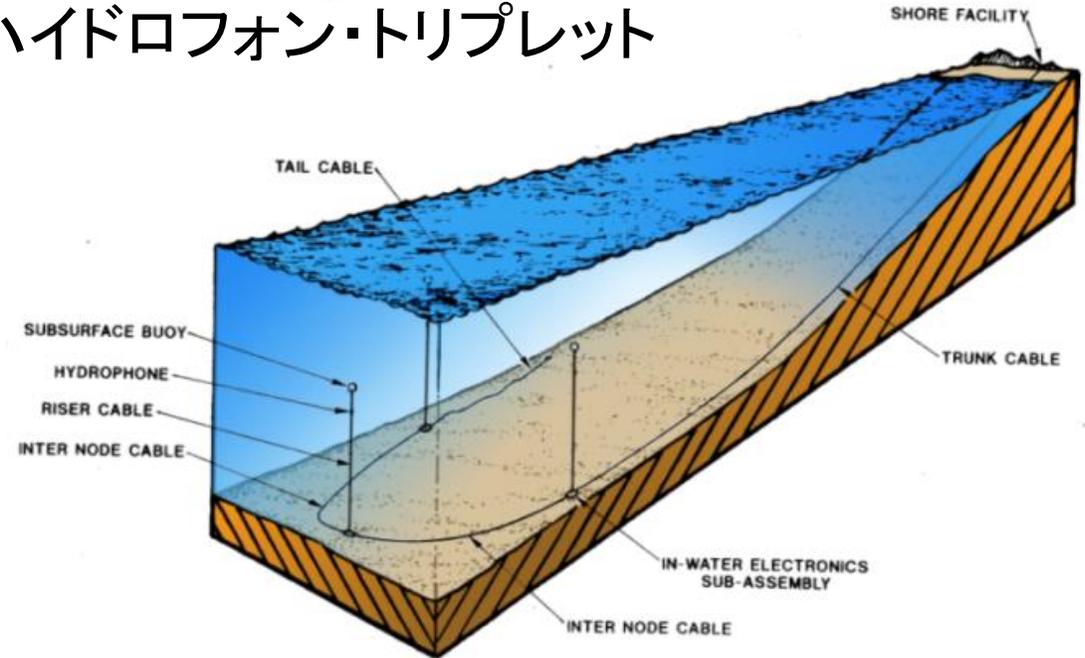


Underwater hydrophone stations / T-phase stations

HA11
(Wake Island, U.S. Territory)



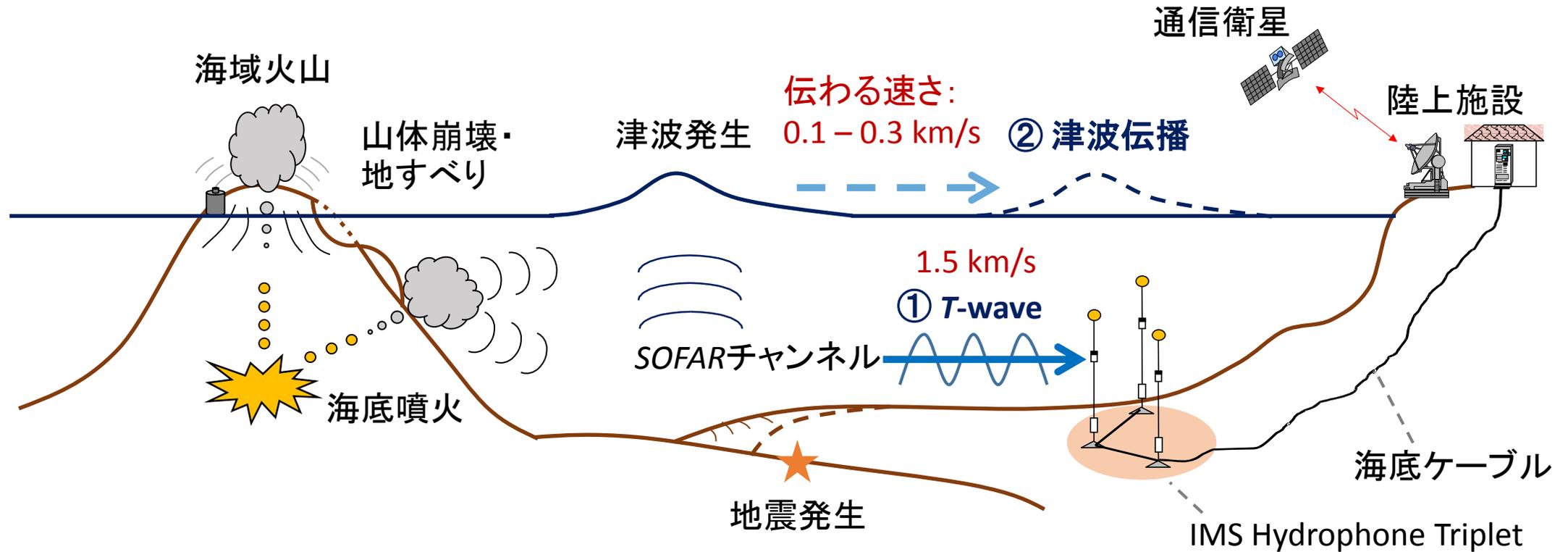
ハイドロフォン・トリプレット



- Low system noise: typical Urick low sea-state noise curve -10dB;
- Clipping limit 185 dB re mPa, no damage up to 215 dB re mPa;
- At least 24-bit resolution, with very low distortion and cross-talk;
- Sampling rate 250 Hz;
- Response flat in the band 1 – 100 Hz;
- Hydrophones floated near the axis of the SOFAR channel;
- Continuous data availability;
- At least 20 years life-time.

Courtesy of CTBTO

地震および海域火山活動にともなう水中音波の発生

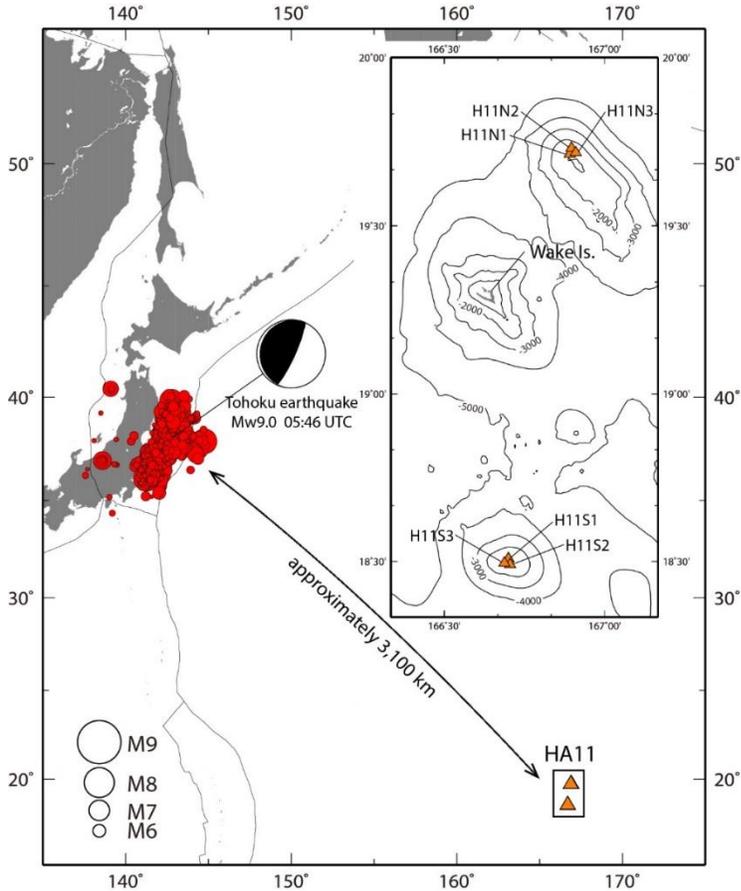


- 2011年東北地方太平洋沖地震
- 2018年硫黄島の火山活動

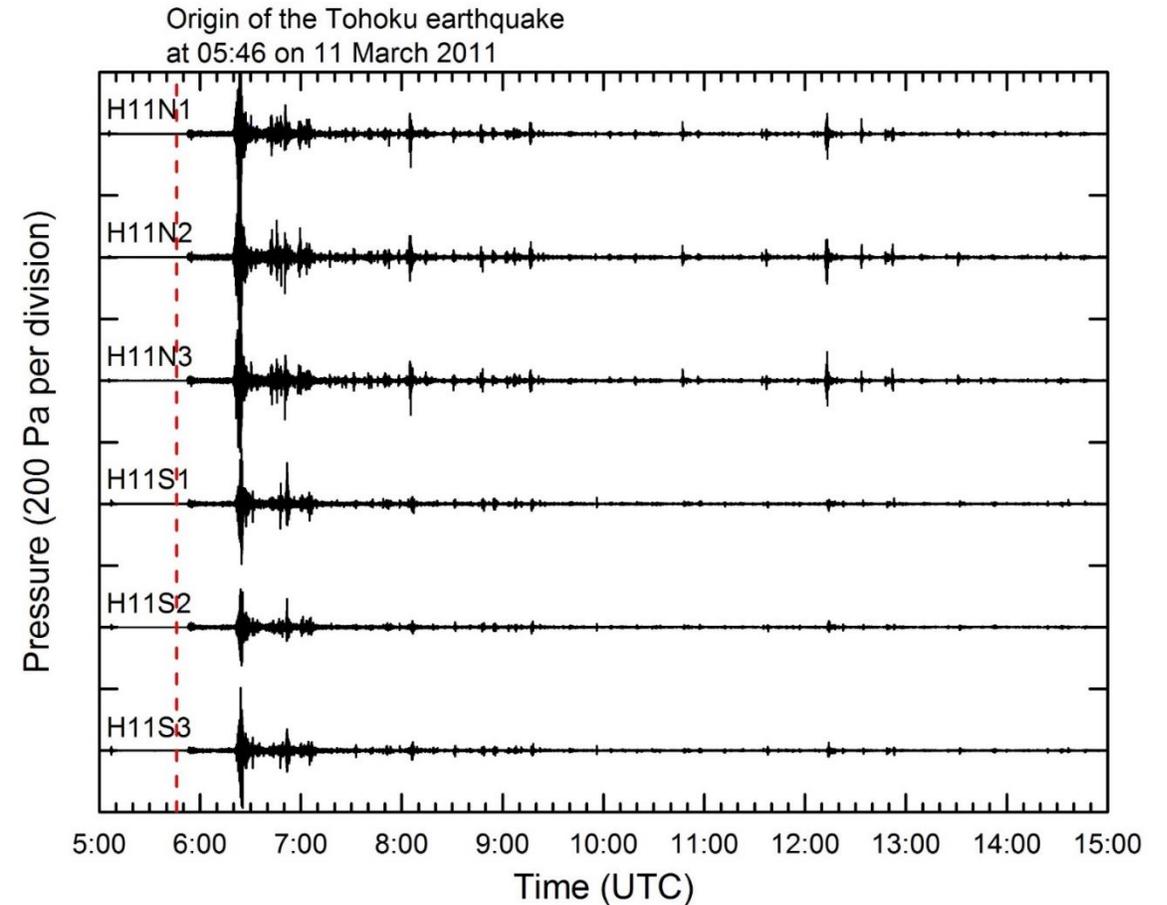
HA11 (Wake Island) のハイドロフォンデータ解析

2011年東北地方太平洋沖地震

Location of HA11 Wake Island



Raw Data of HA11 Hydroacoustic Station



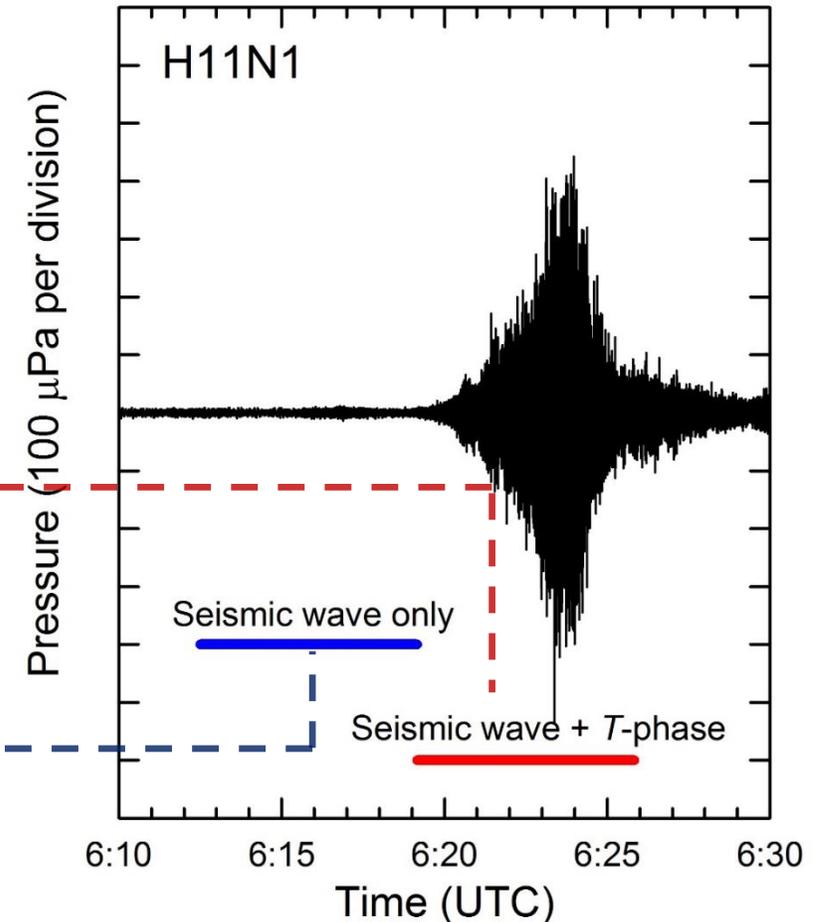
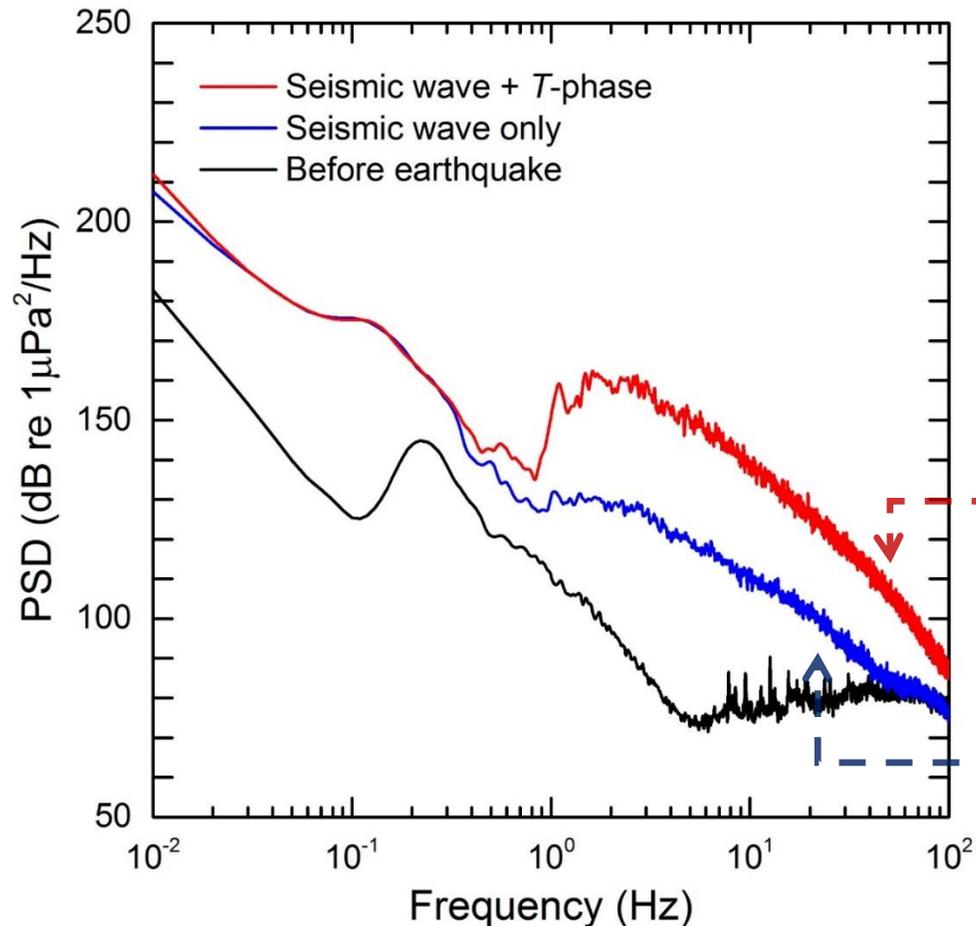
2011年東北地方太平洋沖地震のときに、震源から約3,100kmのところにある米国領Wake島(HA11)の観測データを精査。

Wake島の北側と南側にHydrophone Tripletがあるので、合計6観測点でデータが取得できた。

Analysis of *T*-phase Signals

PSDs of H11N1 after Amplitude Correction

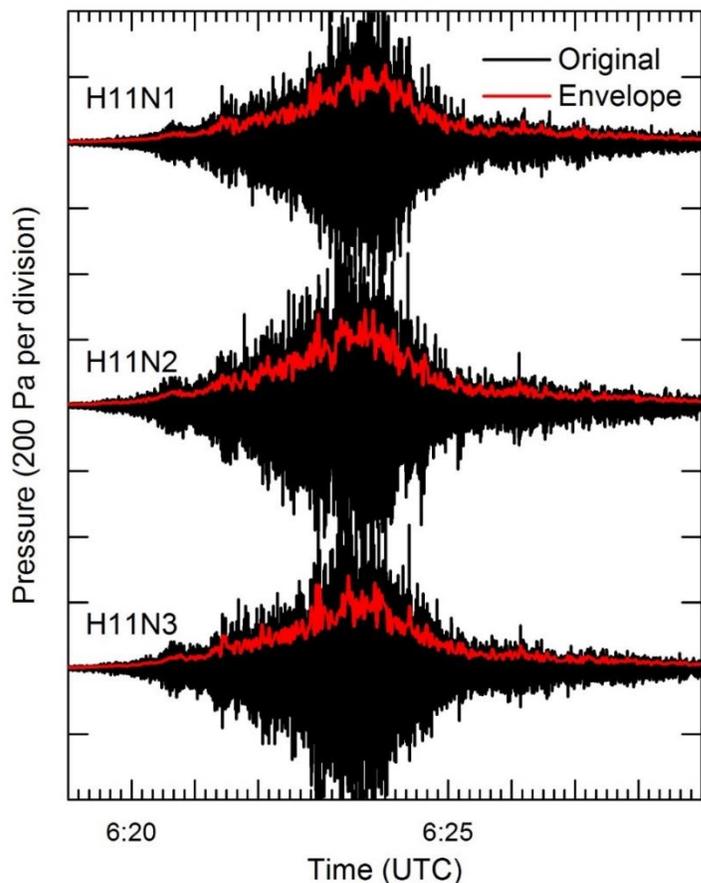
Raw data of H11N1



平常時(黒線)、地震波到達時(青線)、*T*-phase到達時(赤線)の周波数成分を分析すると、*T*-phaseは1Hz以上に卓越周波数をもつことがわかる。

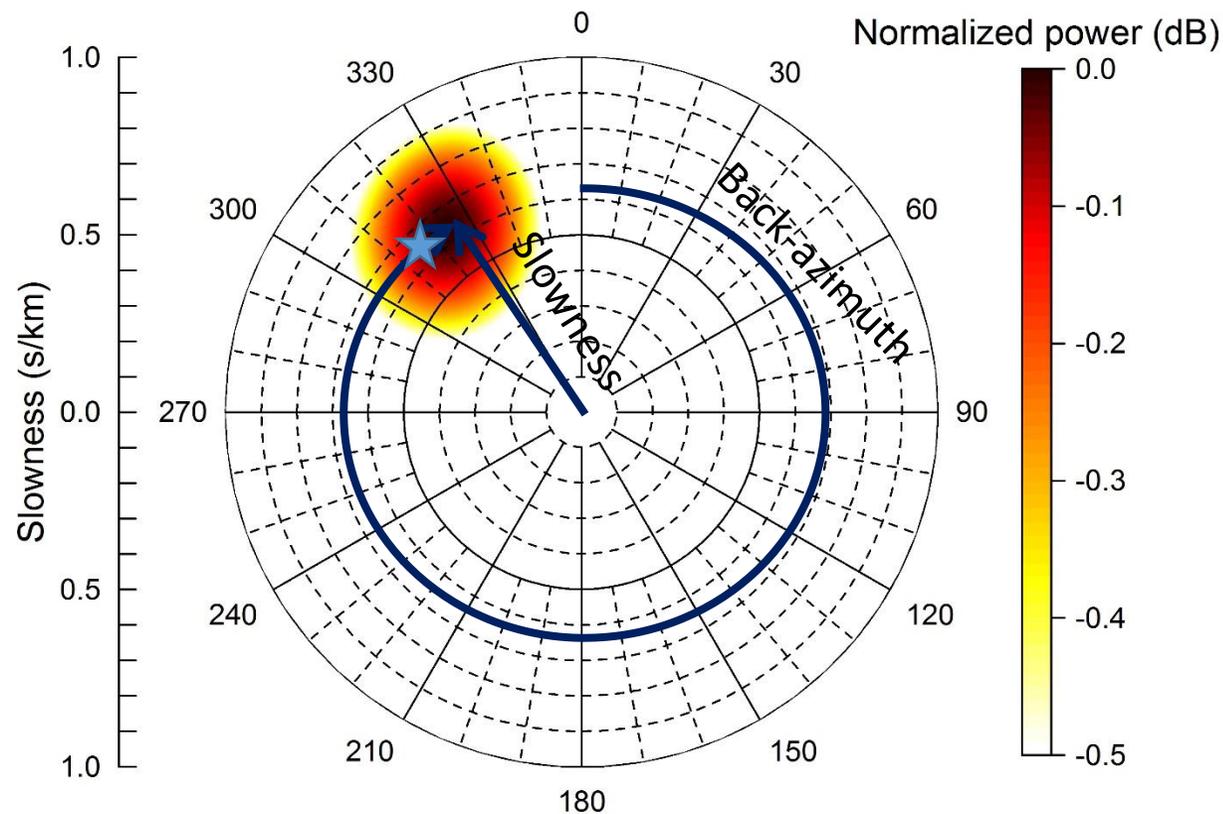
Array Analysis Result of HA11 North Triplet

Waveforms of HA11 North Triplet



観測点間距離がT-phaseの波長よりも大きいため、空間エイリアシングを起こさないように、エンベロープを計算した後に、F-K解析を実行。

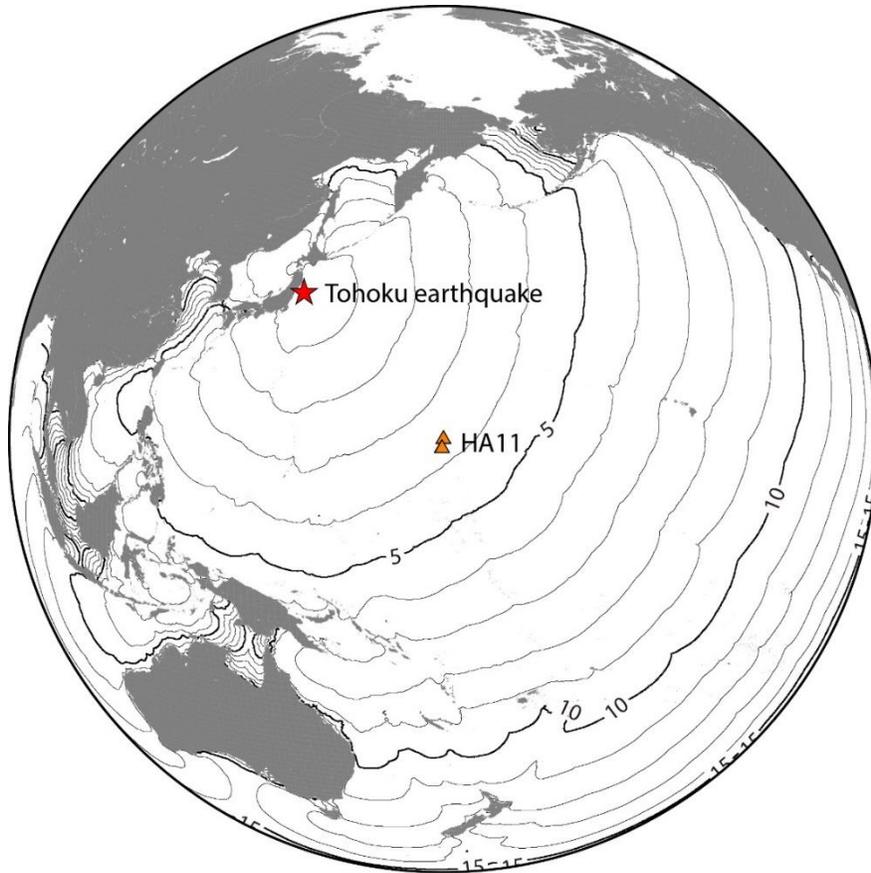
DOA of T-phase from HA11 Northern Triplet



F-K解析は、 0.65s/km ($=1.5\text{km/s}$)の信号が北西方向から到来していることを示唆しており、T-phaseの到来方向を高精度に推定できた。

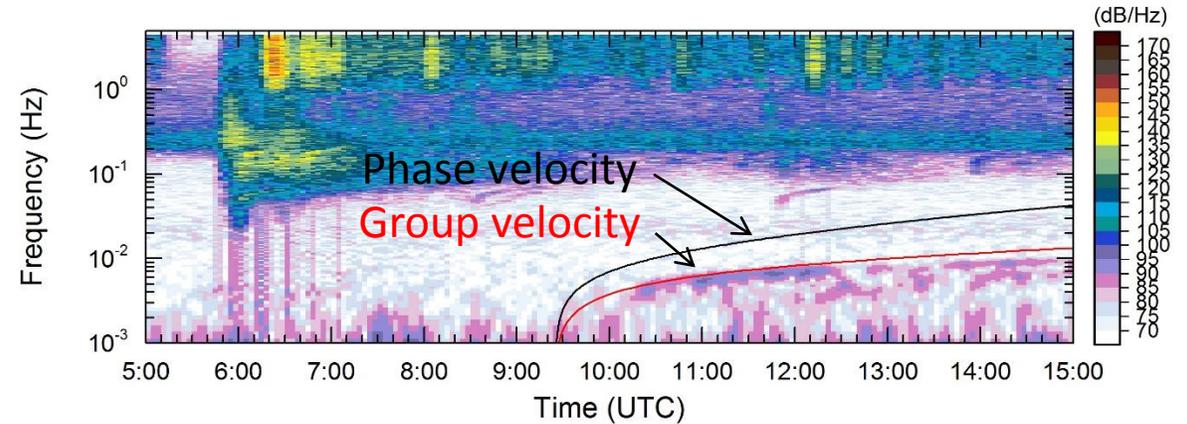
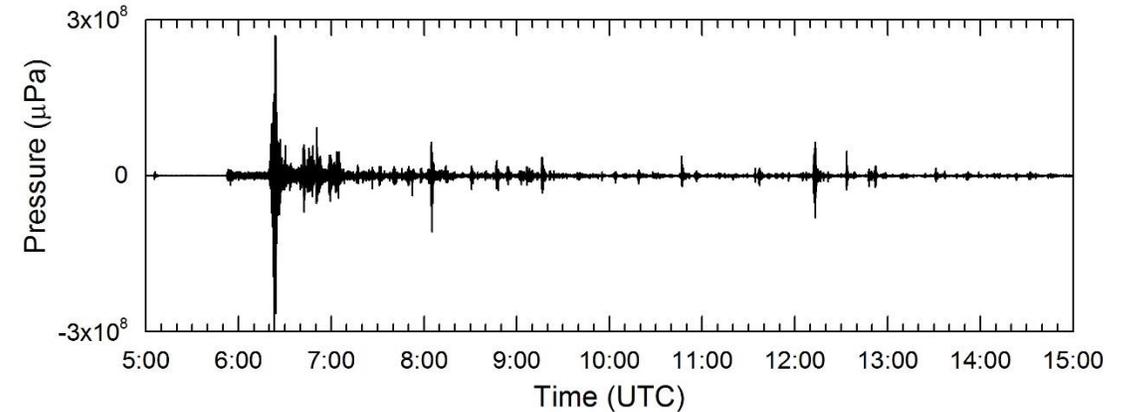
Tsunami Detection by IMS Hydroacoustic Station

Computed Tsunami Travel Time



津波計算によれば、地震発生から3時間45分後に、津波はHA11に到達する。

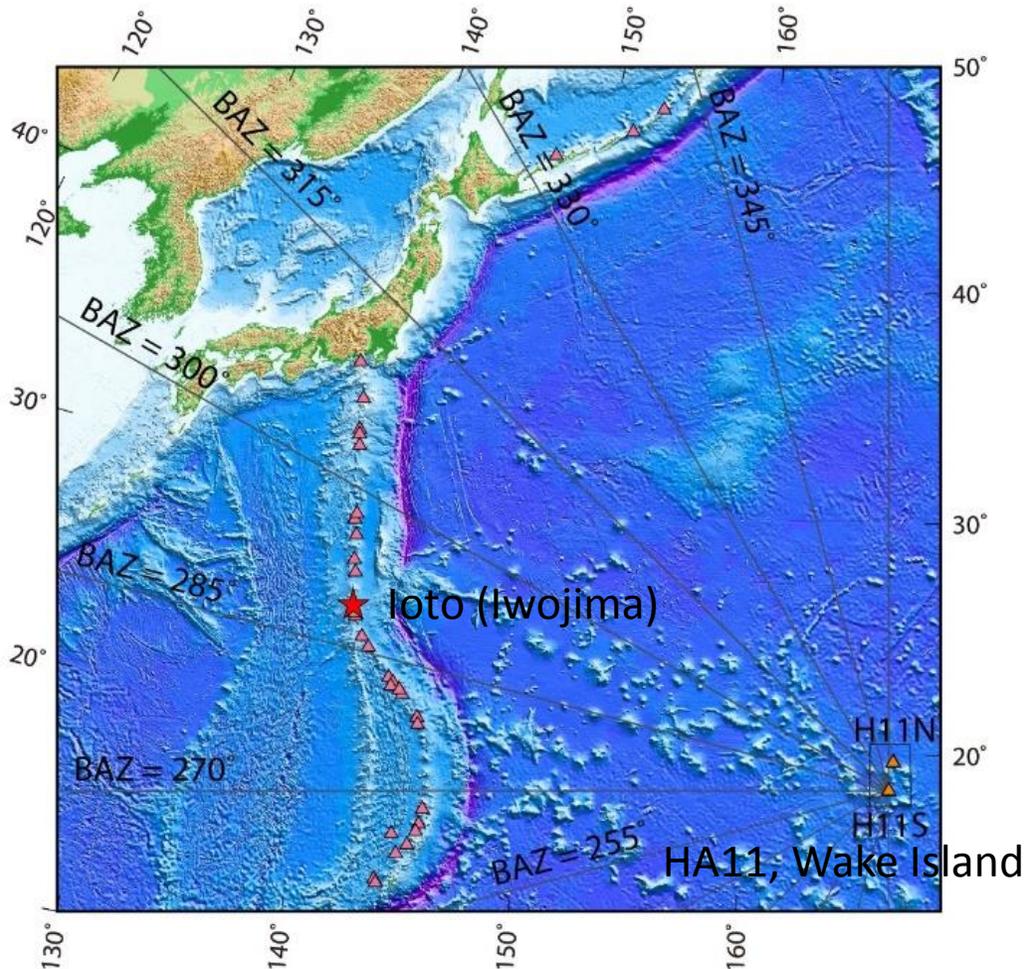
Spectrogram of HA11N1



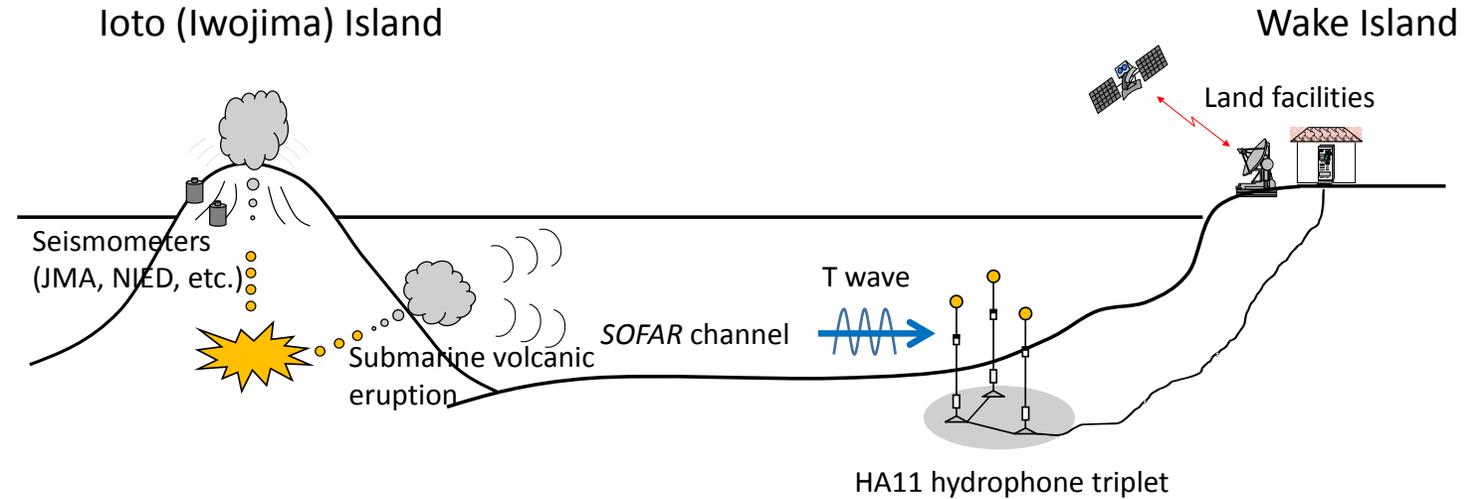
津波の分散曲線(赤線)とハイドロフォンの信号が一致しており、ハイドロフォンで津波を検知することを確認した。

2018年硫黄島の火山活動

硫黄島とHA11の位置



IMS hydrophone triplet & volcanic eruption



硫黄島



(JMA)

約2,700 km

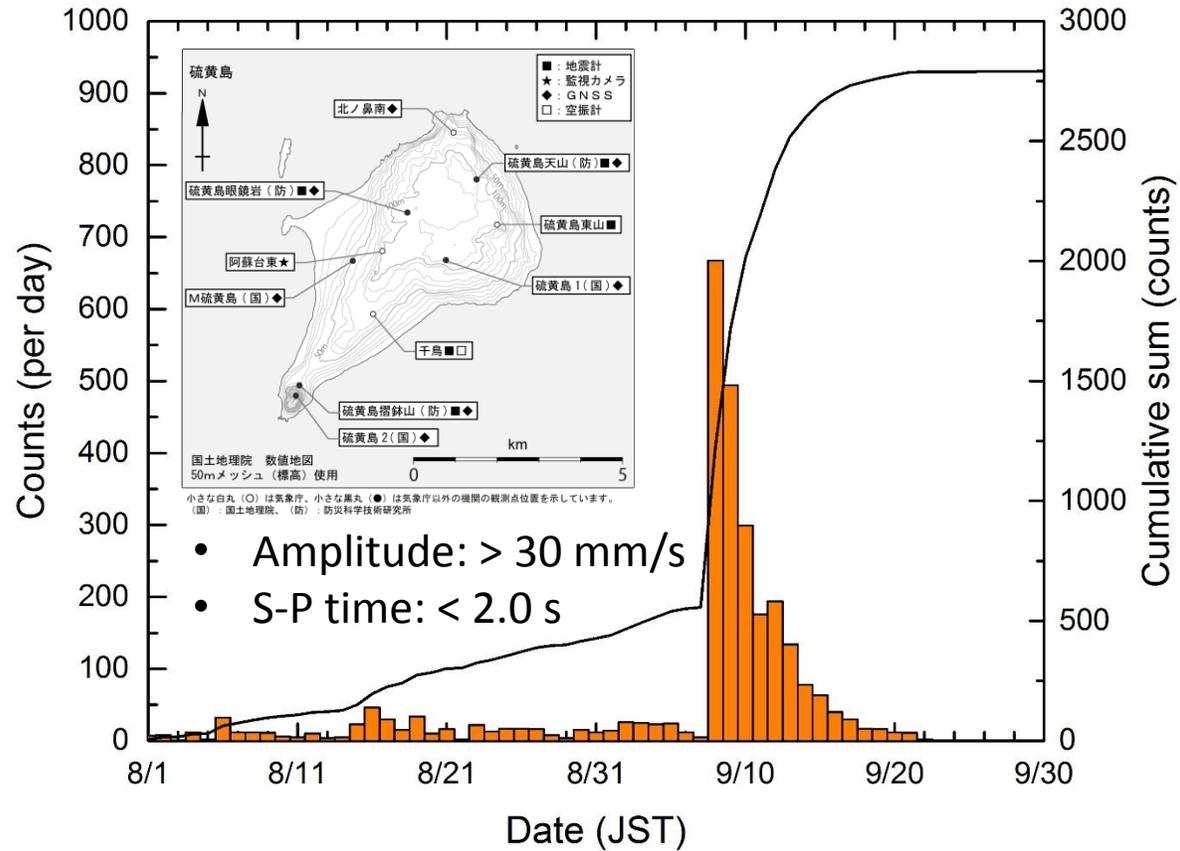
HA11, Wake Island



(CTBTO)

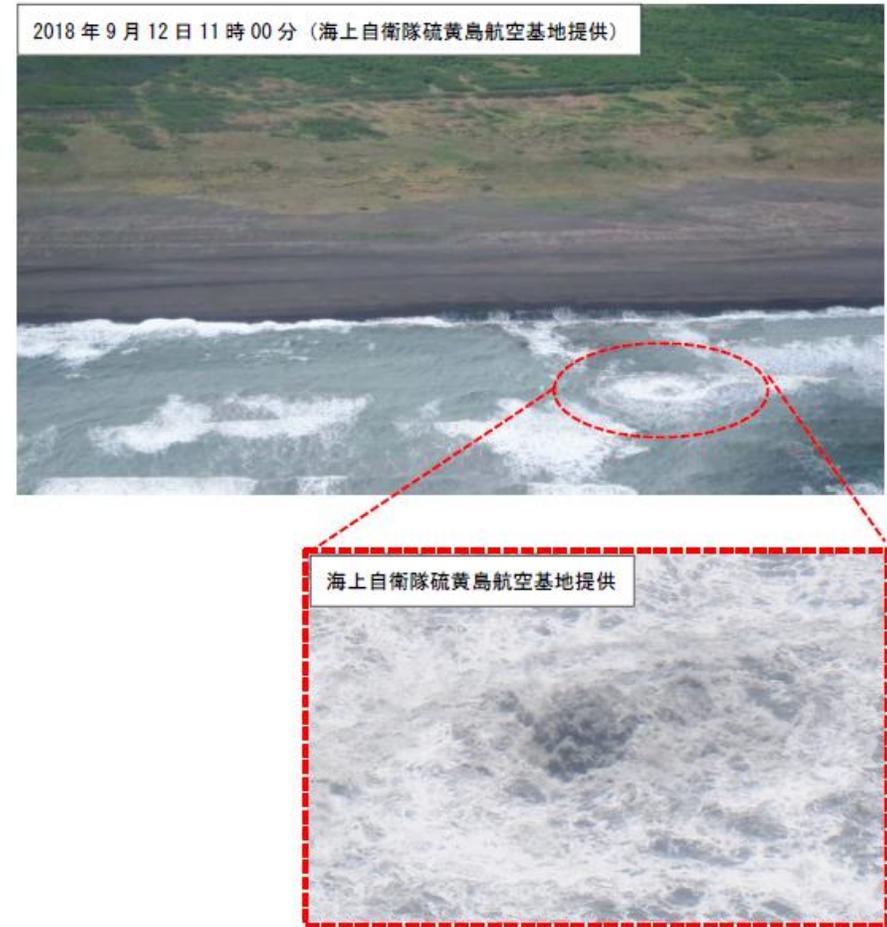
硫黄島の火山活動の報告

火山性地震



(気象庁データより作成)

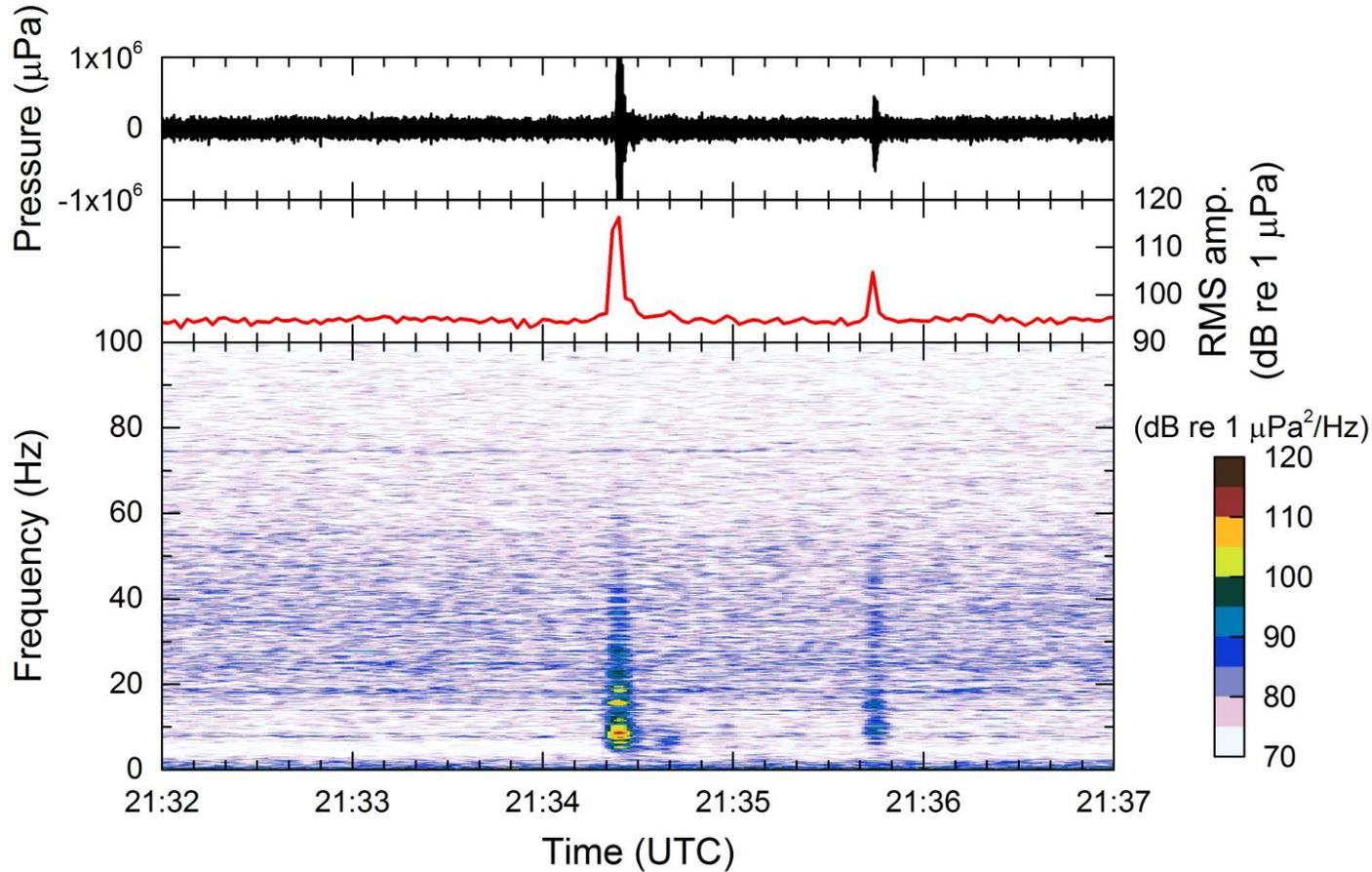
海底噴火の様子



(気象庁資料)

硫黄島の海底火山噴火の水中音波シグナル

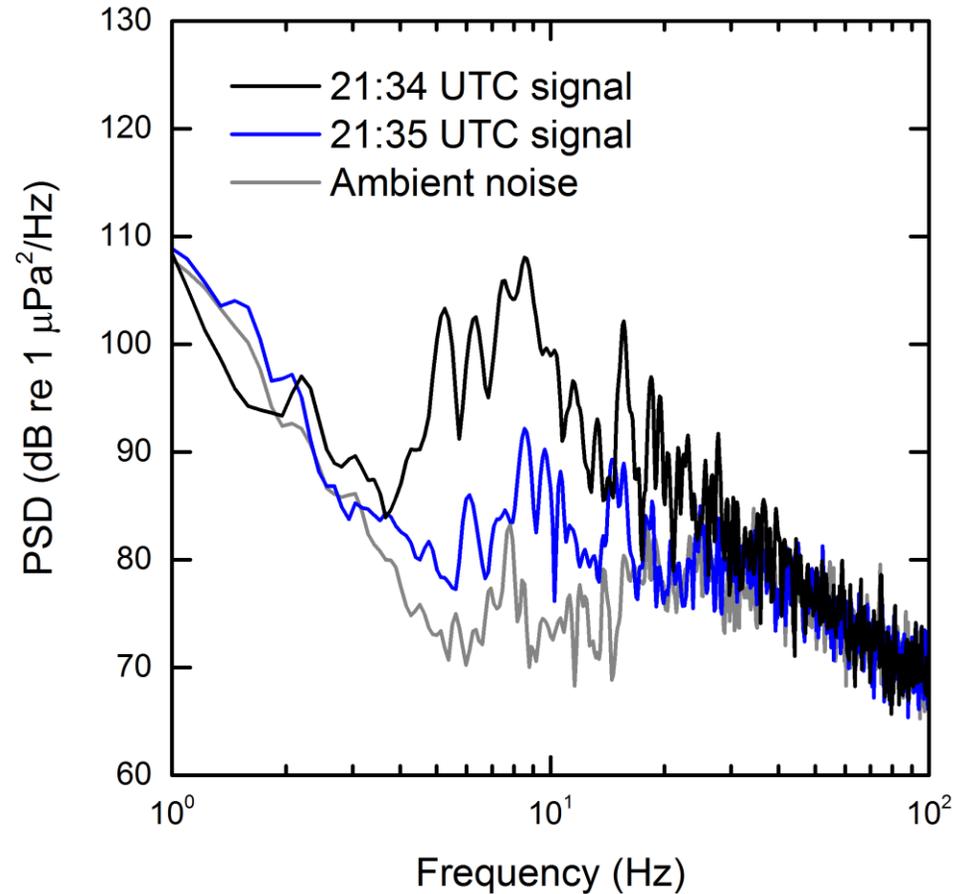
スペクトログラム



PSDは黒線

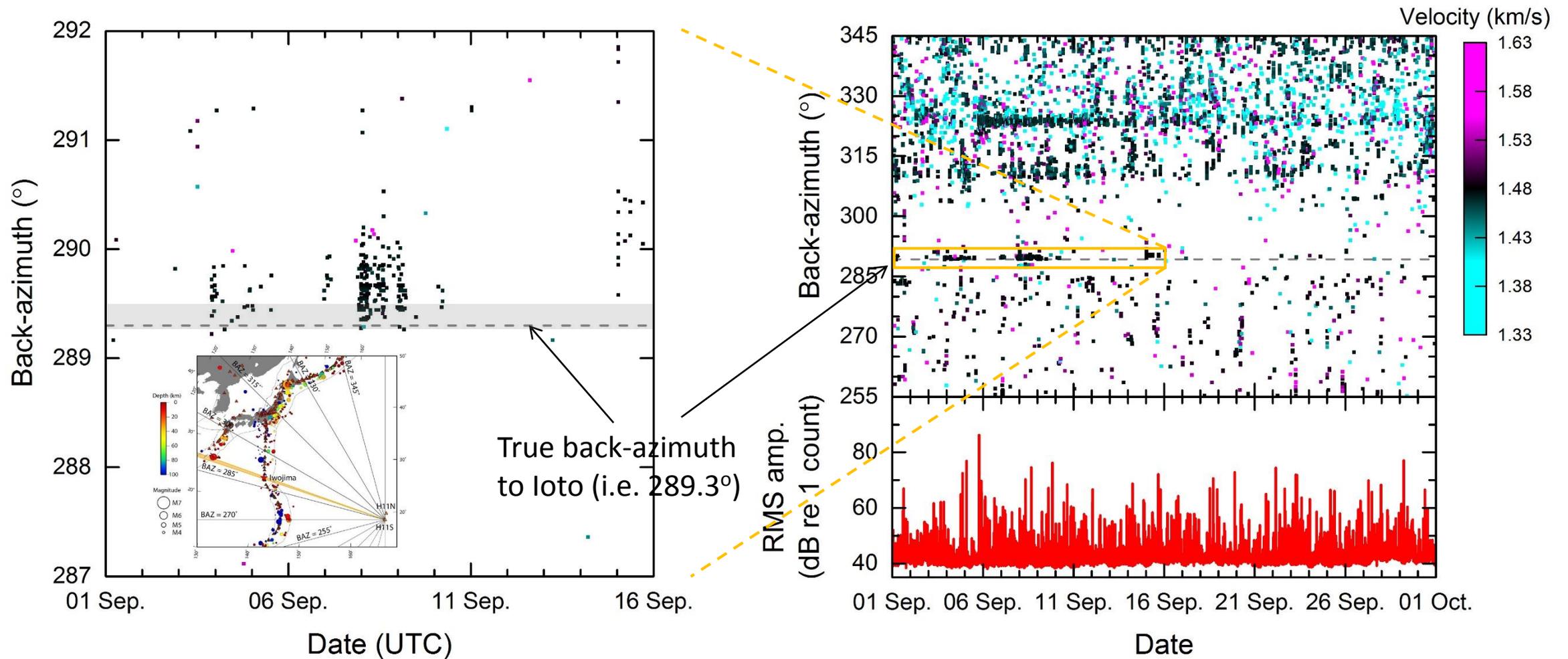
PSDは青線

パワースペクトル密度



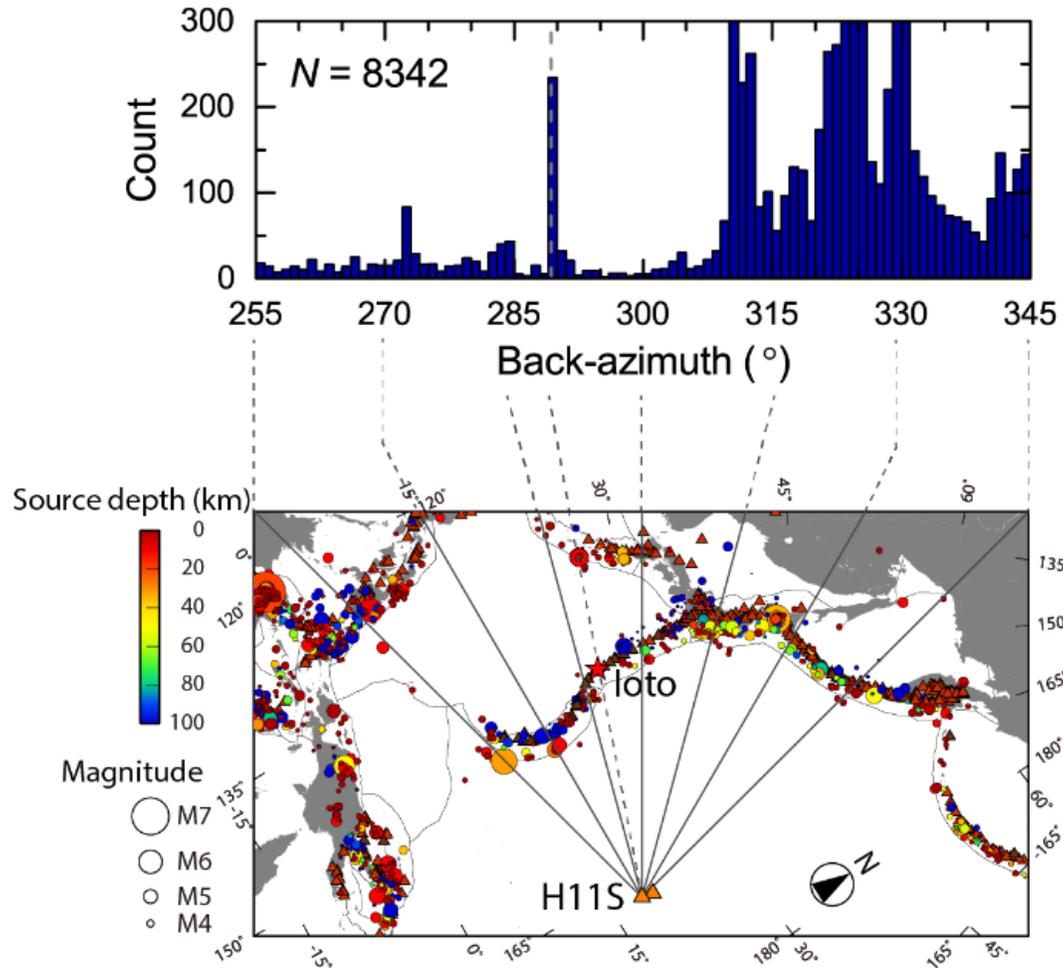
相互相関解析による信号到来方向の推定

H11Sの相互相関解析による検知シグナルの到来方向

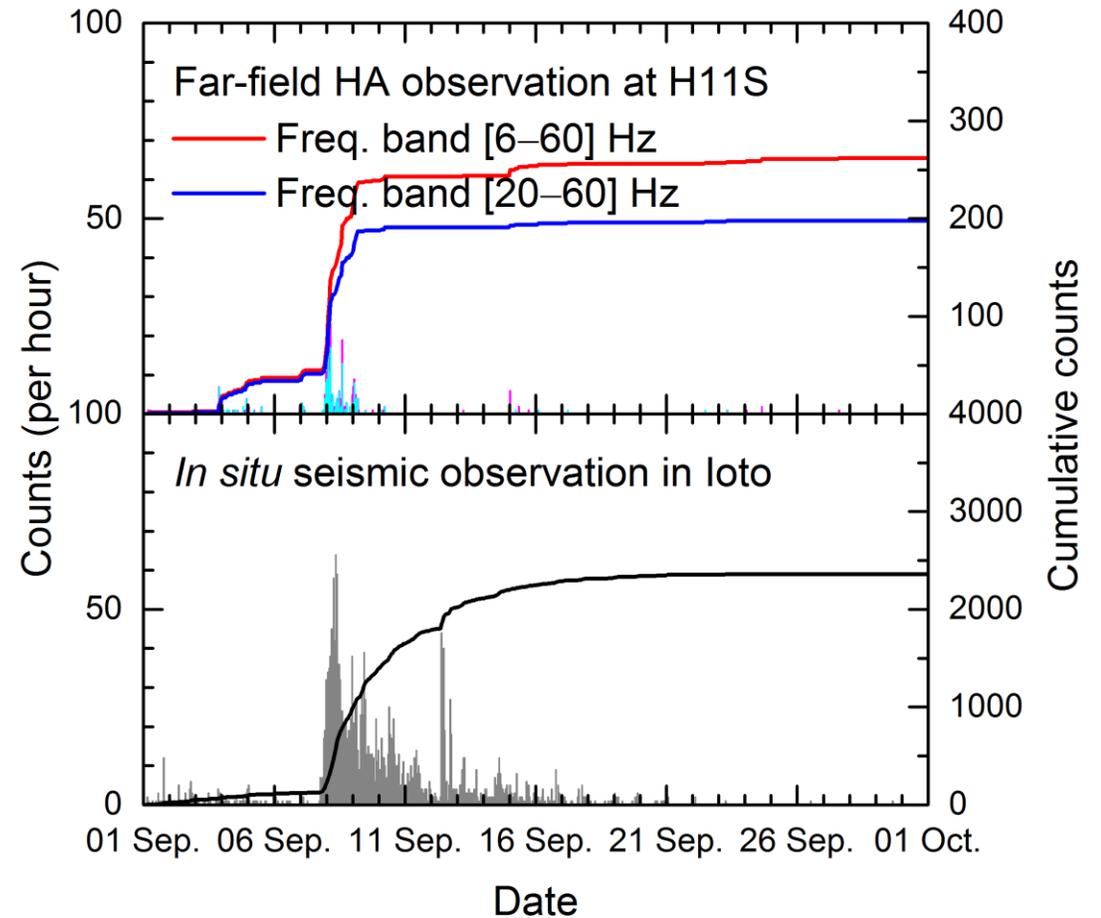


硫黄島の海底火山噴火の検知

検知シグナルのヒストグラム

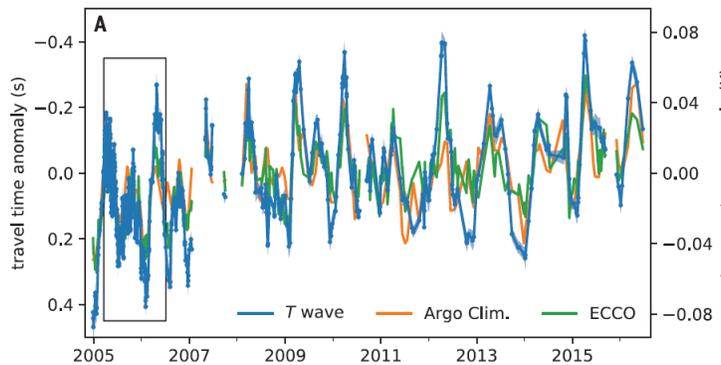
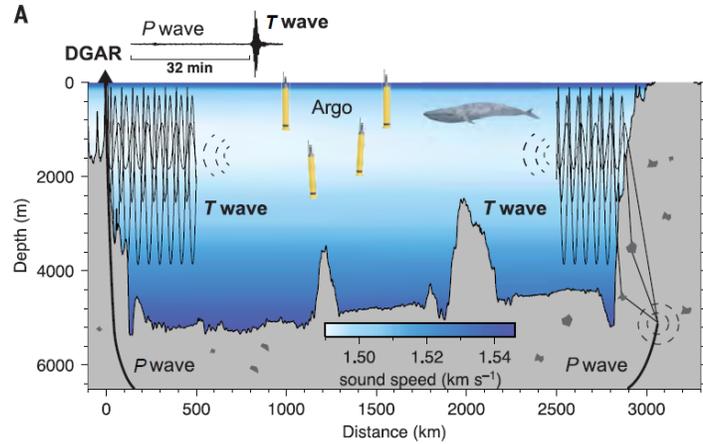


検知シグナル数の比較



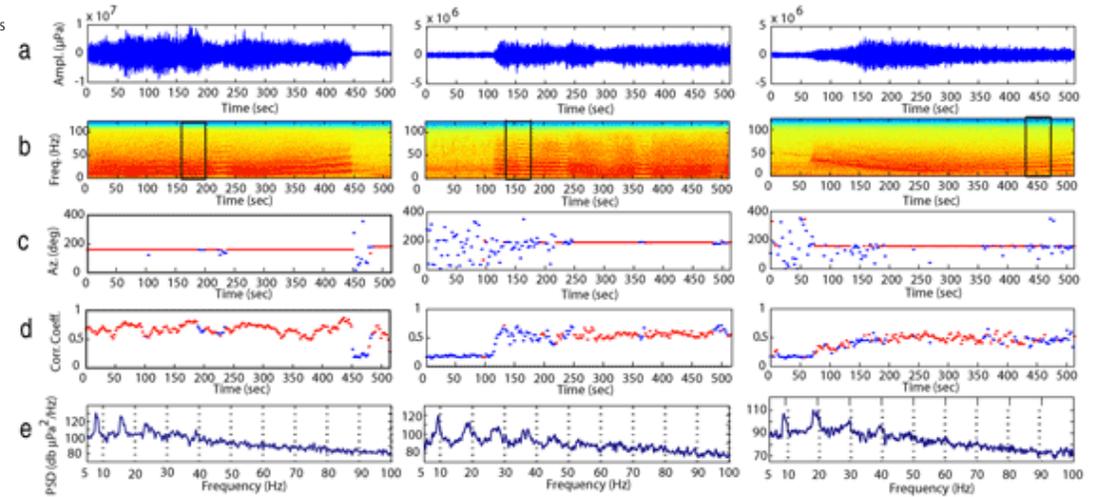
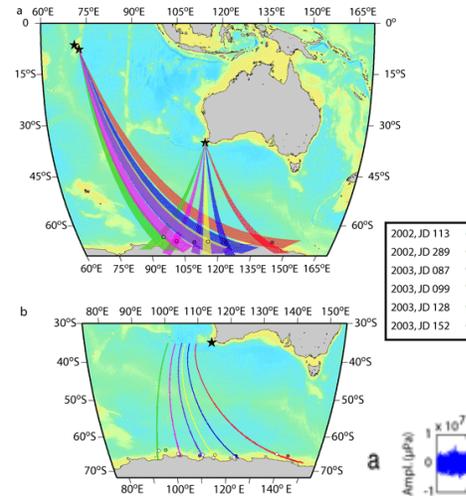
水中音波観測データの科学・民生利用

海水温の上昇



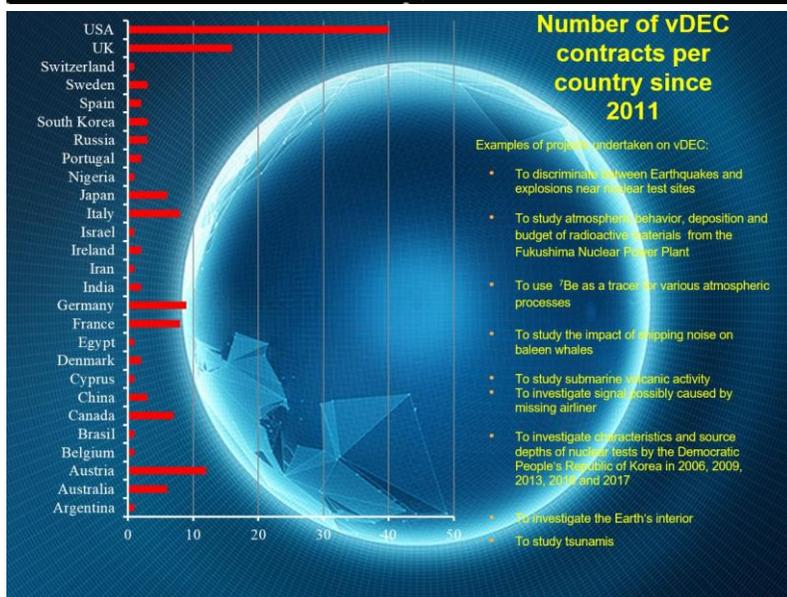
Wu et al. (2020, Science)

氷河(氷床)の移動



Chapp et al. (2005, Geochem. Geophys. Geosys.)

vDECによるIMSデータ公開



What is vDEC ?

- The virtual Data Exploitation Centre (vDEC) provides scientists and researchers from many different disciplines and from around the globe with access to International Monitoring System (IMS) data to conduct research and to publish new findings.
- vDEC is a zero-cost contract. It is a contract which does not contain any monetary remuneration between the parties for services or property, but contains legal requirements.
- Strong relationship between the scientific and technological community and the CTBTO helps to ensure that the IMS remains at the forefront of technological innovation and that no nuclear explosion goes undetected.

まとめ

- 水中音波 (T -wave または H -wave) は海水中の SOFAR チャンネル (水深 1,000 m 付近) を遠方 ($> 10,000$ km) まで伝播する。
- CTBT 国際監視制度の水中音波監視観測所 (HA: Hydroacoustic station) は、観測方法の違いにより 2 種類 (Hydrophone station と T -phase station) ある。
- IMS 水中音波 (ハイドロフォン) 監視観測所は、SOFAR チャンネルに 3 台のハイドロフォンを係留設置して、2 km 間隔のアレイ (トリプレット) で構成される。
- IMS 水中音波監視観測所に到来するシグナルをアレイ解析することで、シグナルの到来方向と伝播速度を推定できる。
- IMS 水中音波データは、海洋をフィールドとする地球科学 (生態系分野を含む) や民生への利活用が期待できる。