



海洋レーダ観測による津波到来時の 伊勢湾の固有振動モードに関する考察

○渡久地 優¹⁾, 藤井 智史²⁾, 日向 博文³⁾

1. 琉球大学大学院 理工学研究科
2. 琉球大学 工学部電気電子工学科
3. 愛媛大学大学院 理工学研究科

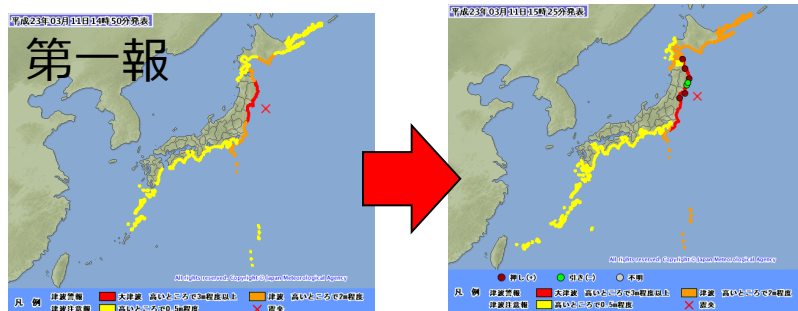
発表内容

- 研究背景
- 海洋レーダ、潮位観測の緒元
- 湾内振動の時間特性
 1. 視線方向流速・水位変動観測
 2. 流速変化の距離特性
 3. 湾内振動の時間・周波数特性
- 振動モード考察
 1. スペクトル推定(Background vs Tsunami)
 2. スペクトル比
 3. 増幅関数
- まとめと課題

研究背景

➤東北地方太平洋沖地震津波
(2011年3月11日14時46分)

日本・ハワイ・太平洋沿岸域に設
置された海洋レーダで観測



津波警報の上方修正

実際の津波観測の重要性

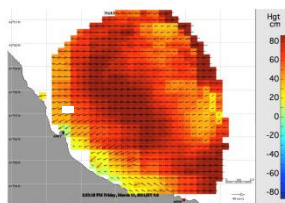
海洋レーダによる津波観測

- 詳細な流速分布
- 保守が容易

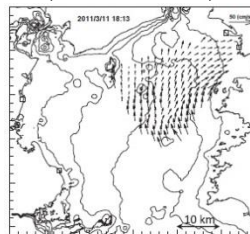


AMBI PETRO
<http://ambipetro.com.br/>

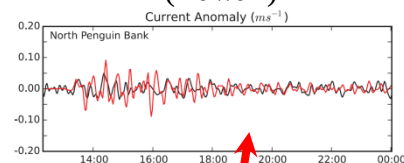
Lipa et al., 2011
(Hokkaido)



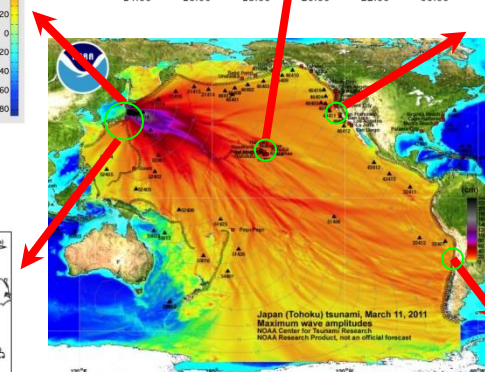
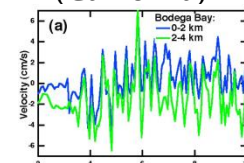
Hinata et al., 2012
(Kii Channel)



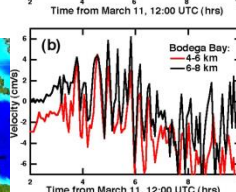
Benjamin et al., 2016
(Hawaii)



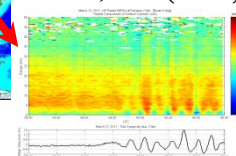
Lipa et al., 2011
(California)



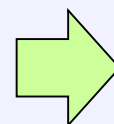
<http://nctr.pmel.noaa.gov>



Dzvonkovskaya
et al., 2011 (Chile)



海洋レーダによる津波観測の検証

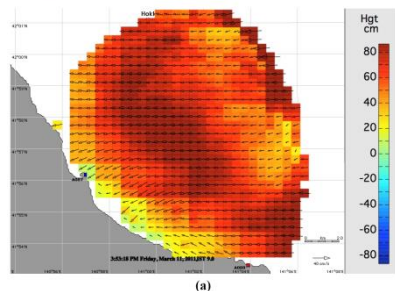


発展途上

研究背景

海洋レーダを用いた2011年東北津波の面的観測・副振動解析

Figure 2. The tsunami height superimposed on the total current velocity field measured by radars at Usujiri (blue dot) and Kinaoshi (red dot): (a) 11 March 2011, 15:53 JST; (b) 11 March 2011, 21:00 JST.



Lipa et al., (2011, Remote Sens.)

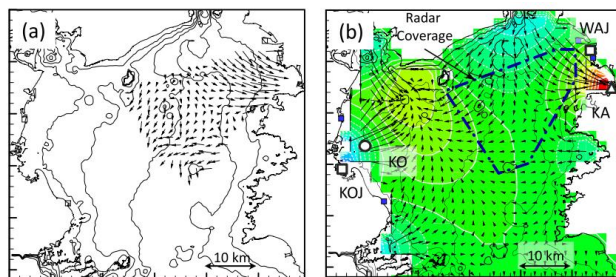


図-4 (a) 30-40分周期流速成分EOF第1モード。(b) Loomis (1973)の方法で求められた33.5分周期の副振動モード

日向ら (2012, 海講)

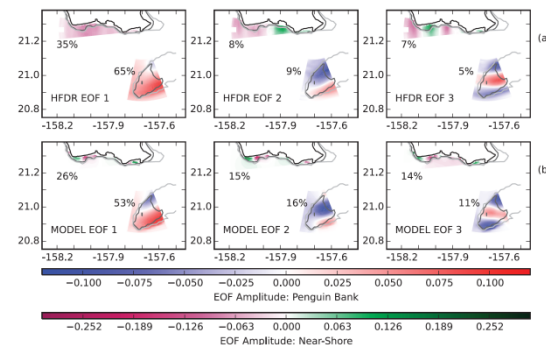
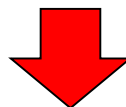


Figure 6. The first three EOF maps for (a) HFDR and (b) model data for the Penguin Bank area (508 grid points) and the nearshore area (595 grid points), with the percent variance for each mode. The EOFs are orthonormal and have not been scaled to reflect the number of grid points.

Benjamin et al., (2016, JGR)

- Lipa et al., (2011) : 合成流速・波高のスナップショット (ループアンテナ)
- 日向ら(2012) : 合成流速・副振動観測 (アレイアンテナ)
- Benjamin et al., (2016) : 視線方向流速を用いた陸棚での共振・沿岸でのエッジ波観測 (アレイアンテナ)



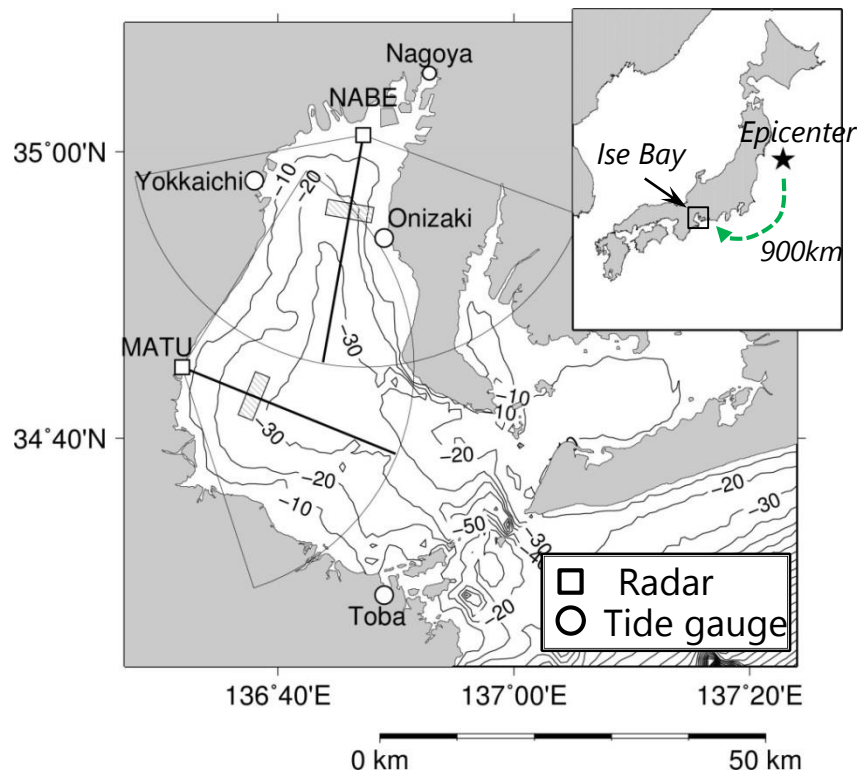
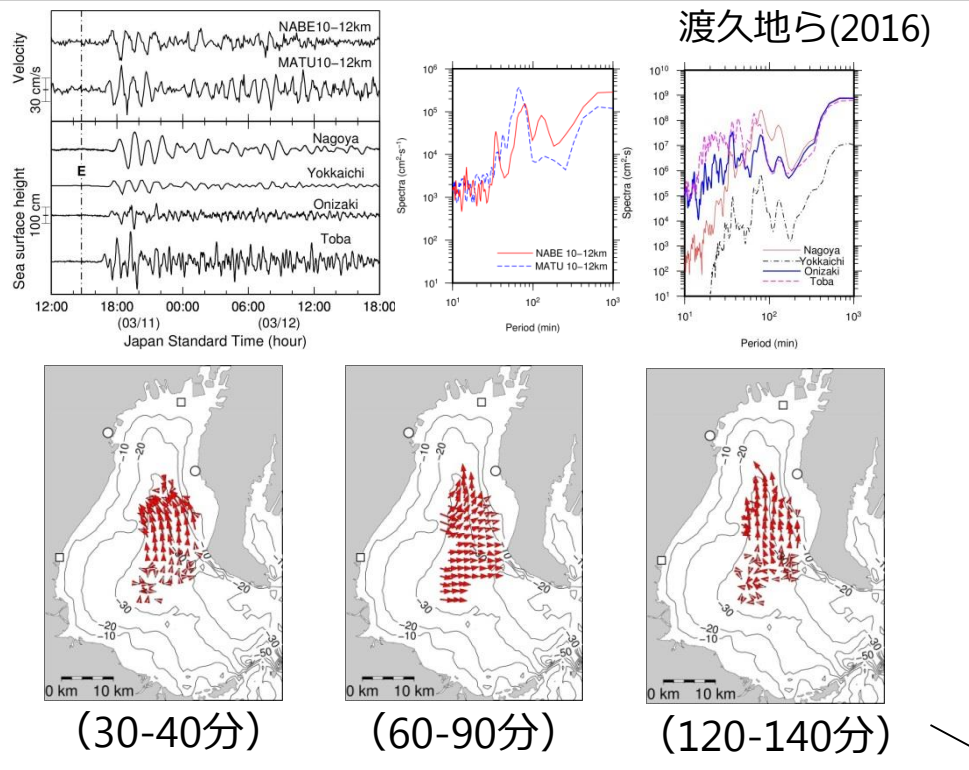
合成流速場を用いた**副振動解析** : 日向ら(2012)・アレイアンテナ型海洋レーダのみ

伊勢湾に設置されていた海洋レーダ (ループアンテナ) でも
津波の副振動を観測 (渡久地ら, 2016海講)

研究背景・目的

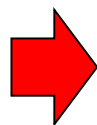
伊勢湾での津波到来・副振動観測

渡久地ら(2016)



湾内で三つの異なる周期帯の副振動を観測
より深い知見を得るには...

湾内で発生した副振動の物理的背景
は未検証



振動の時間変化・津波と湾の固有振動モードの関連を明らかにする

発表内容

- 研究背景
- 海洋レーダ、潮位観測の緒元
- 湾内振動の時間特性
 1. 視線方向流速・水位変動観測
 2. 流速変化の距離特性
 3. 湾内振動の時間・周波数特性
- 振動モード考察
 1. スペクトル推定(Background vs Tsunami)
 2. スペクトル比
 3. 増幅関数
- まとめと課題

観測緒元

海洋レーダ : SeaSonde(CODAR)

- 愛知県鍋田(NABE), 三重県津松坂(MATU)
(国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所によりデータ提供)
- 中心周波数: 24.515 MHz
- レーダ方式: FMICW
- 送信アンテナ: 垂直モノポールアンテナ
- 受信アンテナ: 垂直モノポール+クロスループアンテナ
- 距離分解能: 1.5 km
- 方位間隔: 5 deg.
- 時間分解能: 通常1時間⇒5分

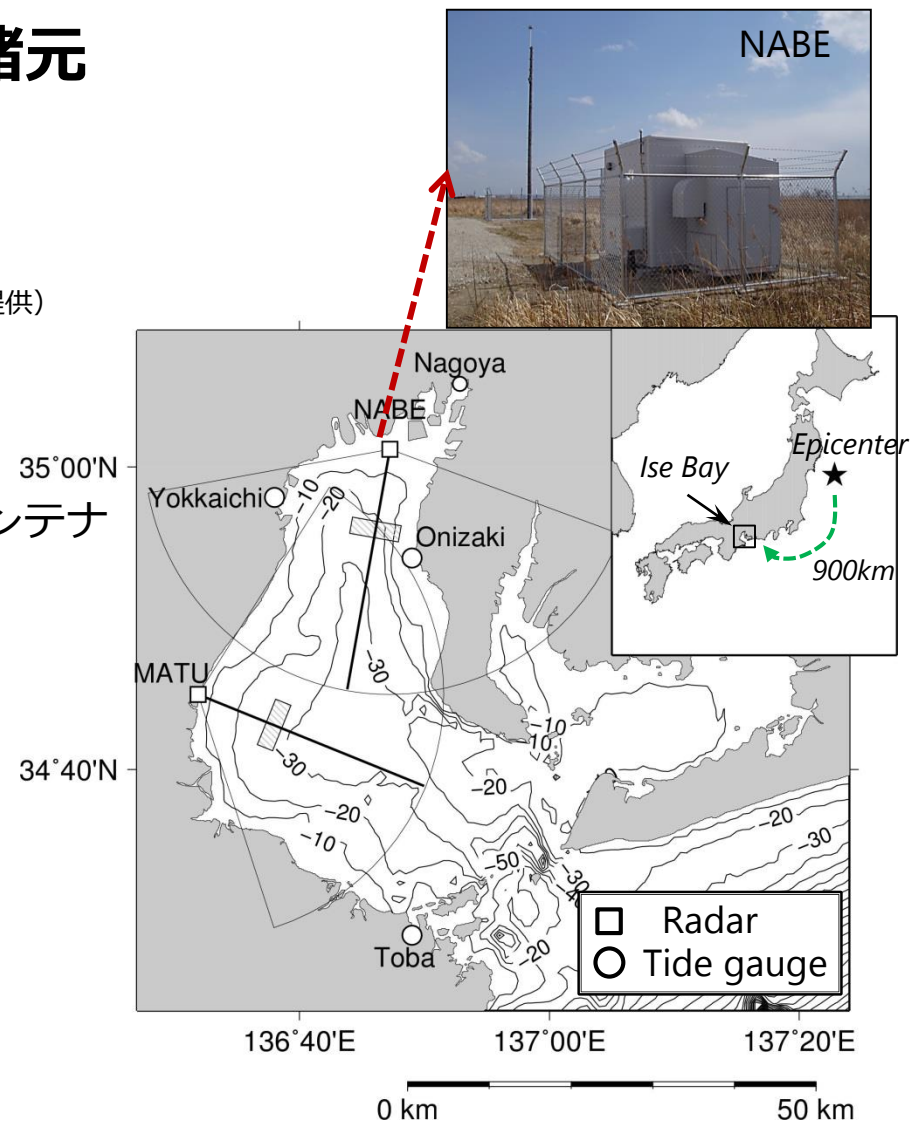
アレイアンテナ型と比較して...

○アンテナの小型化 ○全方位同時観測
×短時間観測では精度低下

沿岸水位計

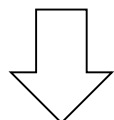
- Nagoya, Onizaki, Toba: 1min (再サンプリング).
- Yokkaichi: 10min

(Nagoya, Toba : 気象庁, Yokkaichi : 四日市港管理組合, Onizaki : 国土地理院によるデータ提供)



観測緒元

通常の海洋観測
流速算出時間：**1時間**



津波の周期~60分
時間分解能の向上



観測精度低下
(トレードオフ)

受信信号のSN比の低下



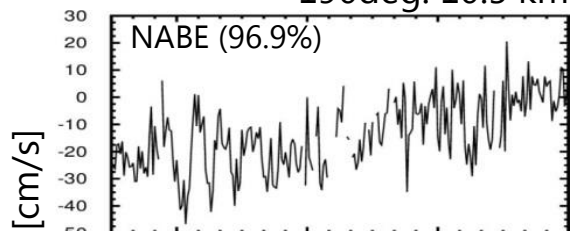
流速のノイズ・欠測点の増加

受信スペクトルデータを再解析、
時間分解能を**5分**間隔へ

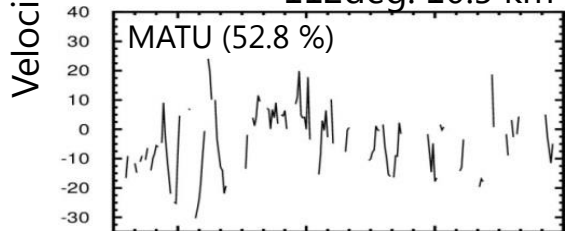
➤ 3/11-3/12のデータ取得率50%以上の観測点

流速生データ

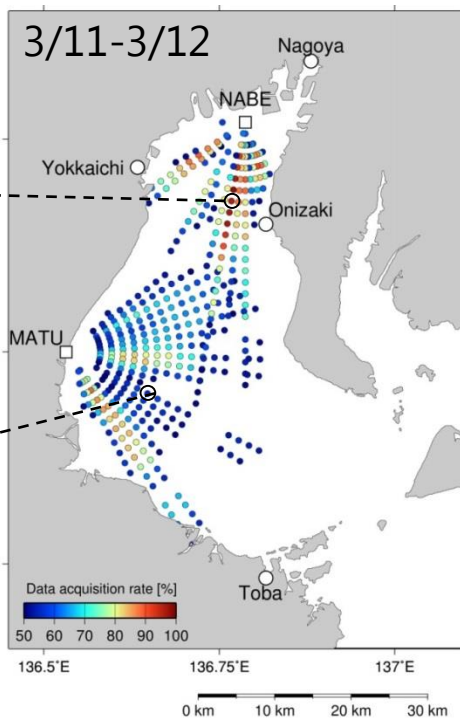
190deg. 10.5 km



112deg. 10.5 km

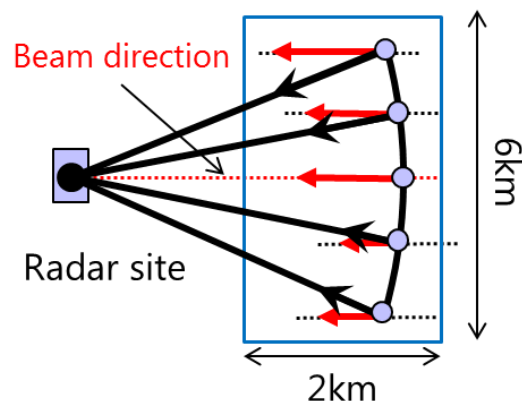


Japan Standard Time



視線方向流速解析⇒空間補間

Lipa et al. (2011)の方法を拡張



合成流速解析⇒取得率50%以上
線形補間

発表内容

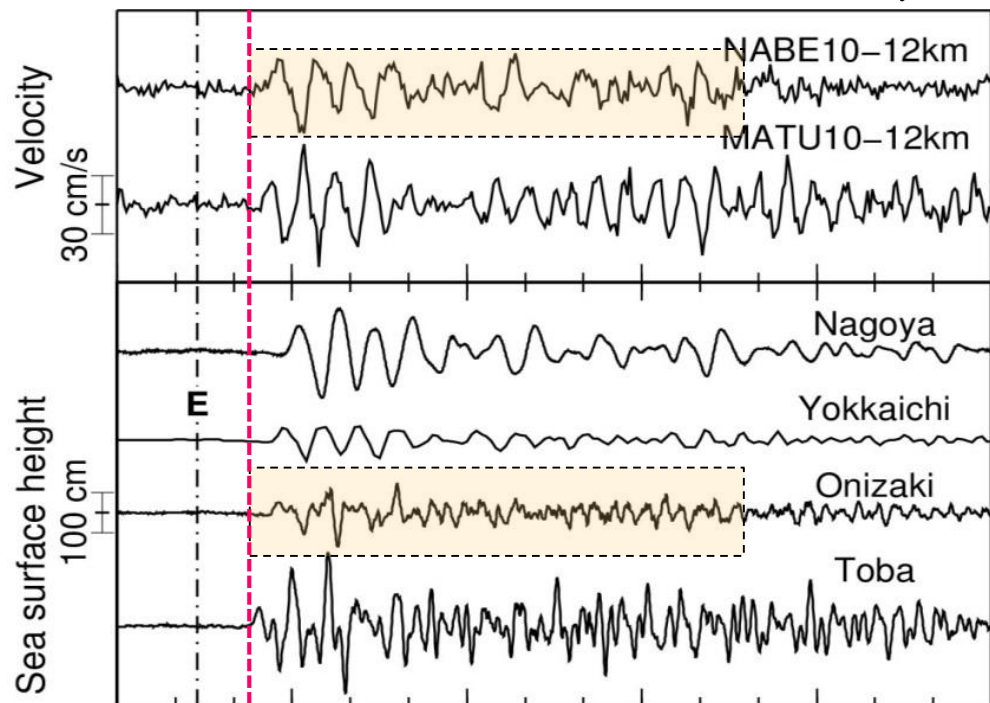
- 研究背景
- 海洋レーダ、潮位観測の緒元
- 湾内振動の時間特性
 1. 視線方向流速・水位変動観測
 2. 流速変化の距離特性
 3. 湾内振動の時間・周波数特性
- 振動モード考察
 1. スペクトル推定(Background vs Tsunami)
 2. スペクトル比
 3. 増幅関数
- まとめと課題

地震発生時刻

(14:46) ↓

津波成分のみ抽出; ~240min

24時間以上継続



津波到来

(16:45)

(03/11) (03/12)
Japan Standard Time (hour)

$$\eta = U \sqrt{\frac{h}{g}}$$

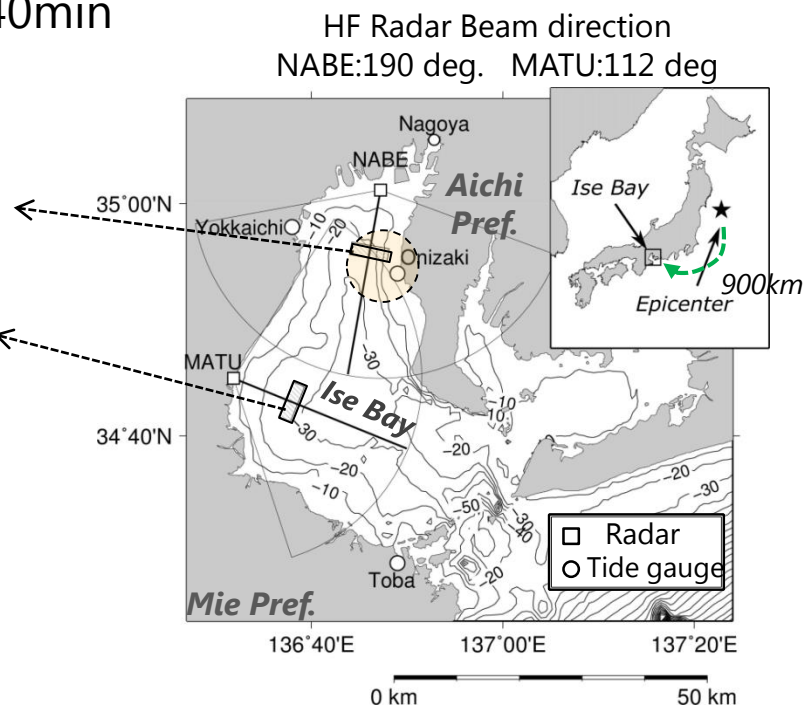
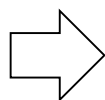
η : 水面変位

U : レーダ観測流速

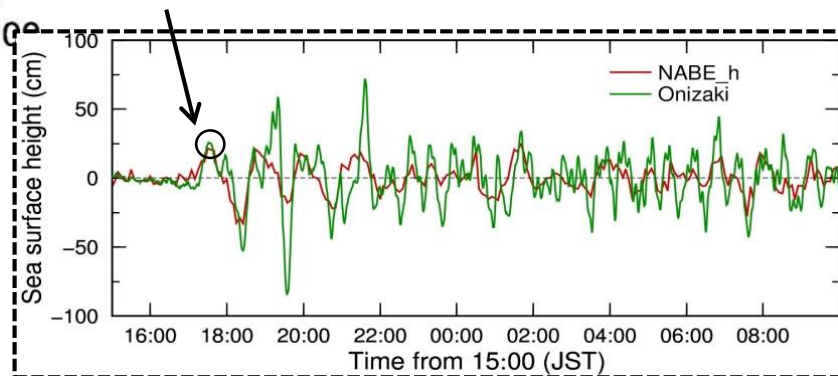
g : 重力加速度

h : 水深

NABE流速⇒水位変動



第一波 : 21cm(NABE) vs. 25cm(Onizaki)



NABE vs. Onizaki

流速距離特性

□ 湾内への津波の到来 ➡ 振動パターン時間変化

振動モード1

$T < 60$ [min]

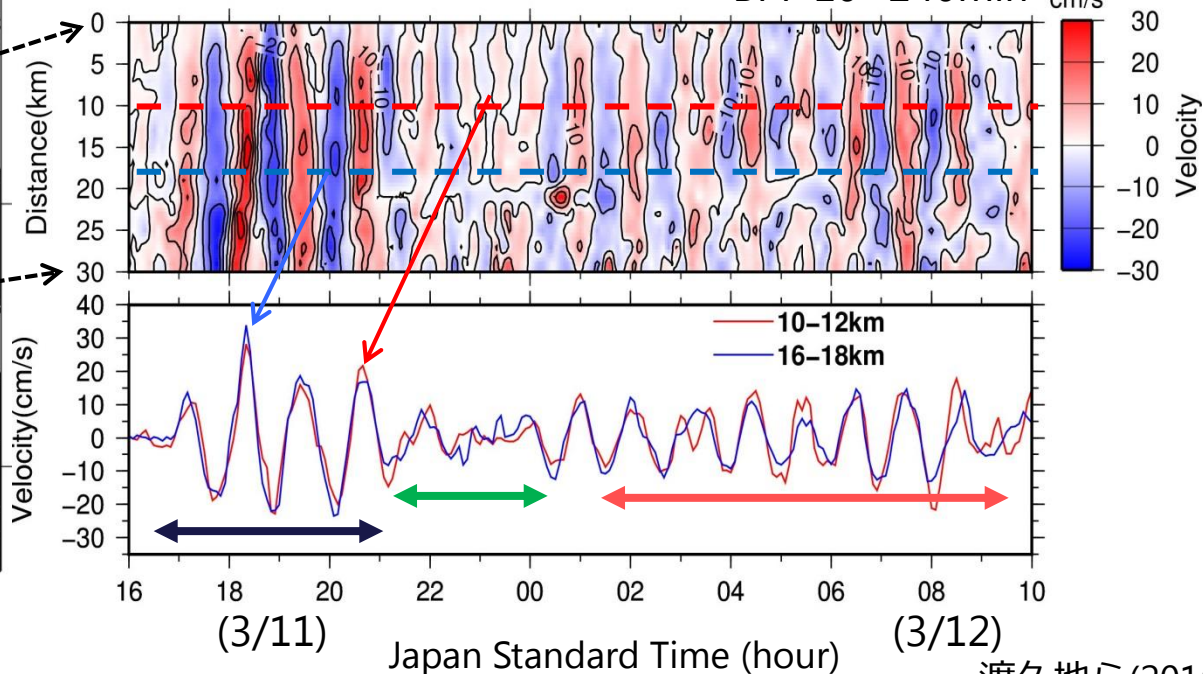
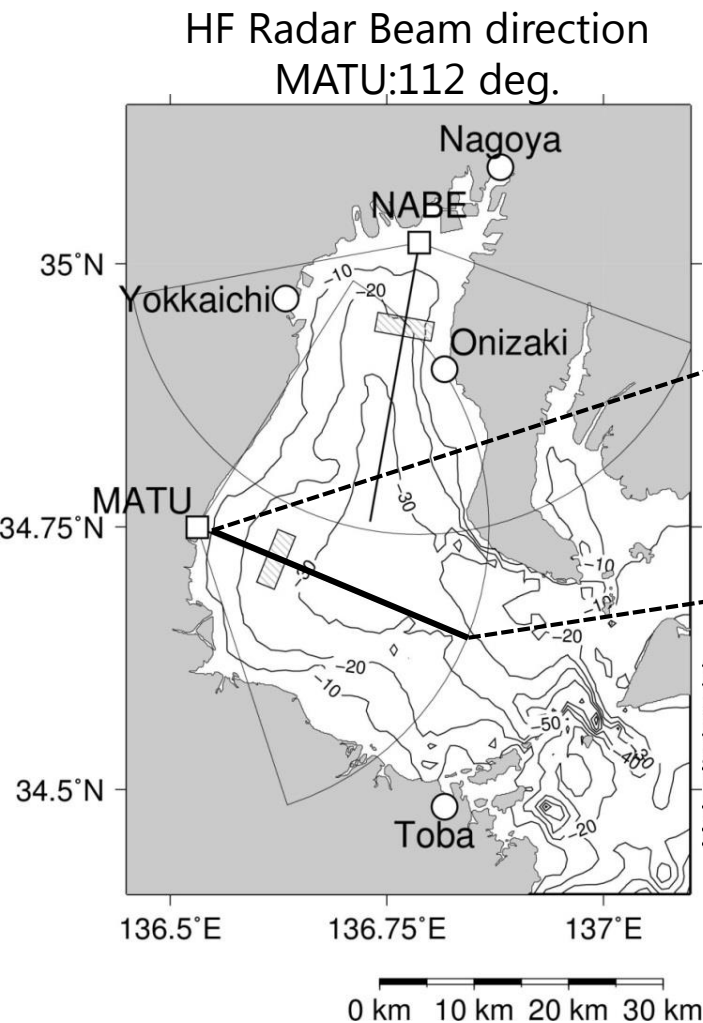
振動モード2

$T \sim 60-70$? [min]

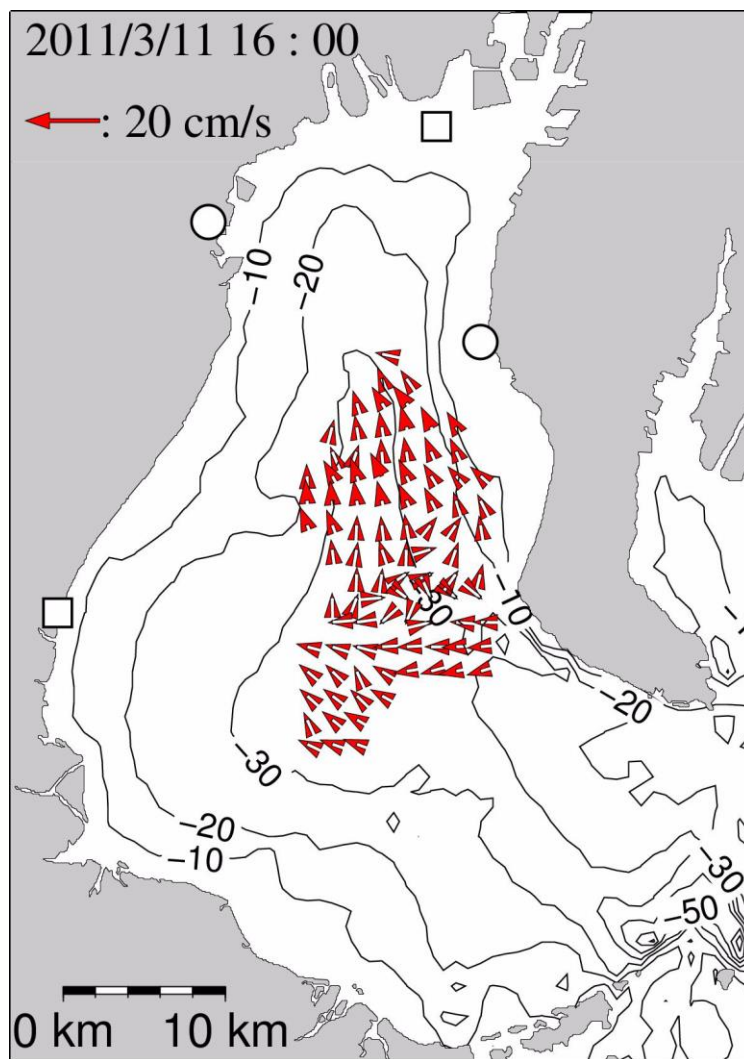
津波到来

$T \sim 60-70$ [min]

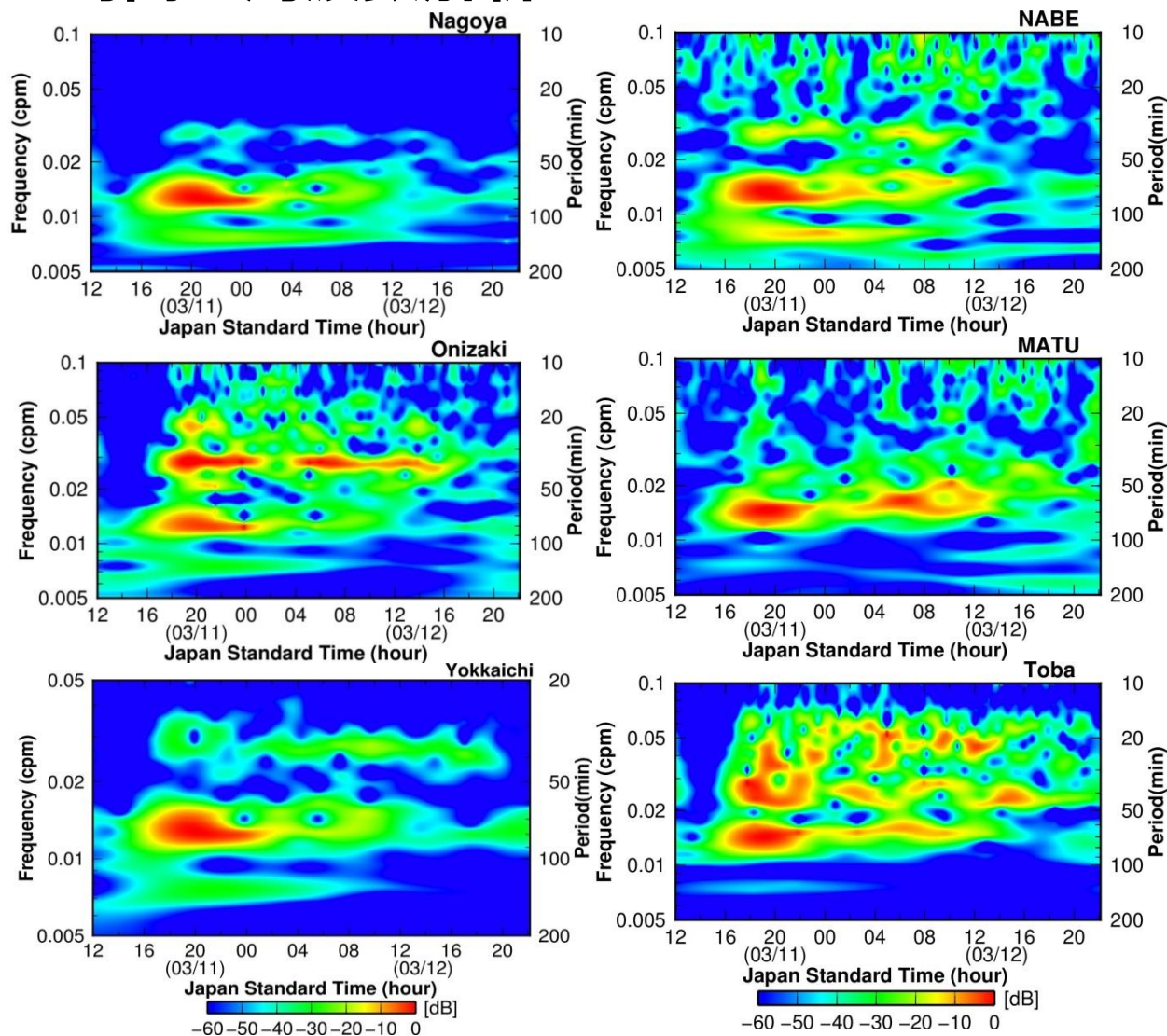
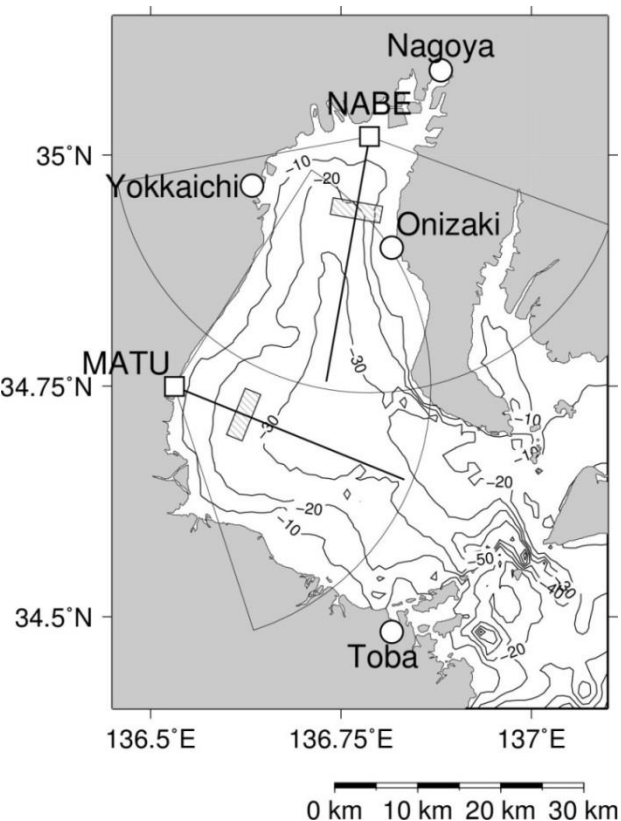
BPF 10~240min



2011/3/11 16:00- 3/124:00
BPF60-90 min



時間・周波数解析



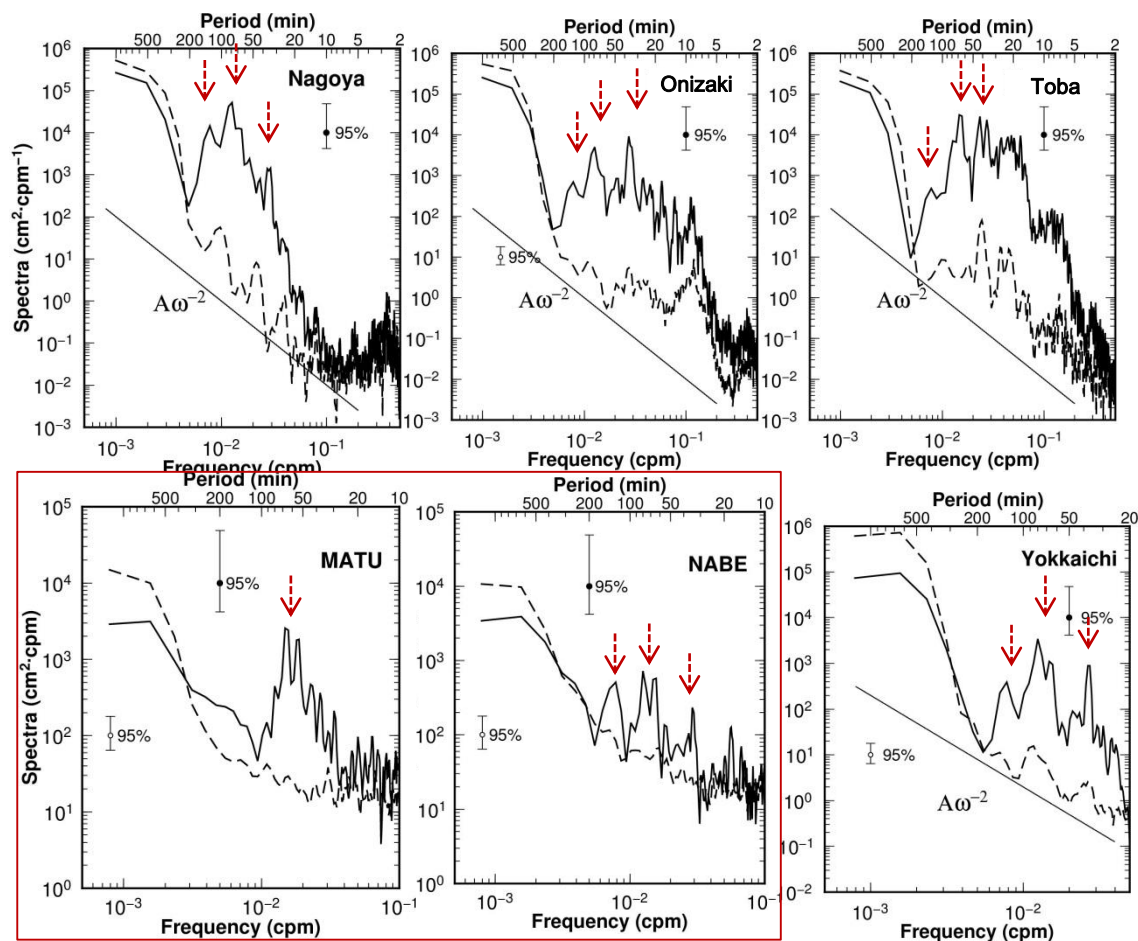
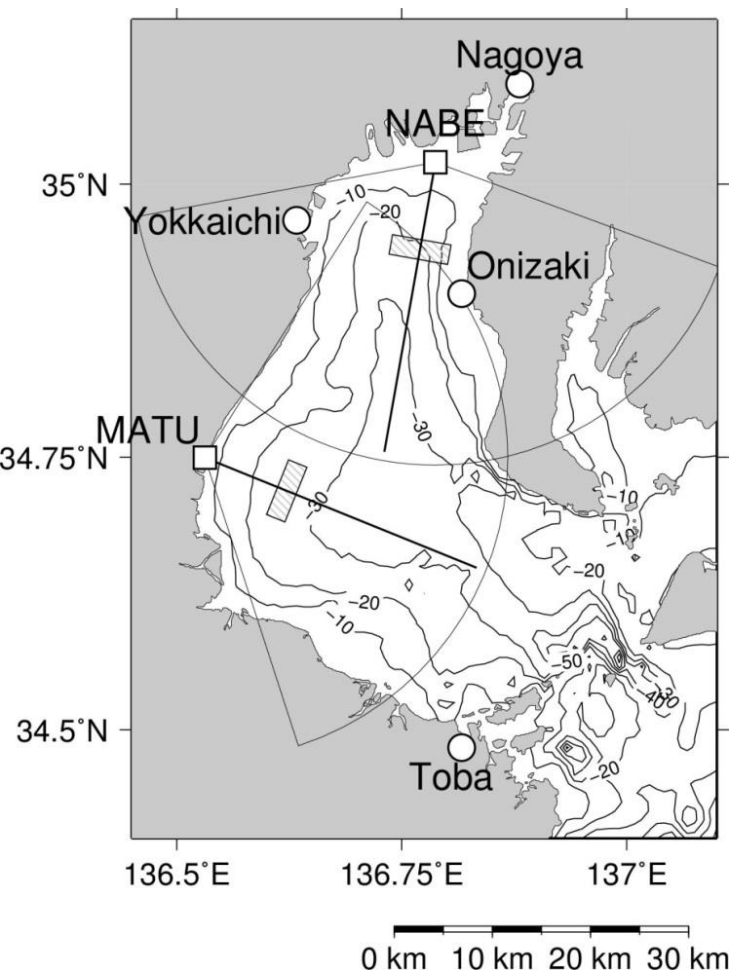
振動エネルギーの時間特性が各地点で異なる⇒増幅特性との関係は？

発表内容

- 研究背景
- 海洋レーダ、潮位観測の緒元
- 湾内振動の時間特性
 1. 視線方向流速・水位変動観測
 2. 流速変化の距離特性
 3. 湾内振動の時間・周波数特性
- 振動モード考察
 1. スペクトル推定(Background vs Tsunami)
 2. スペクトル比
 3. 増幅関数
- まとめと課題

スペクトル推定

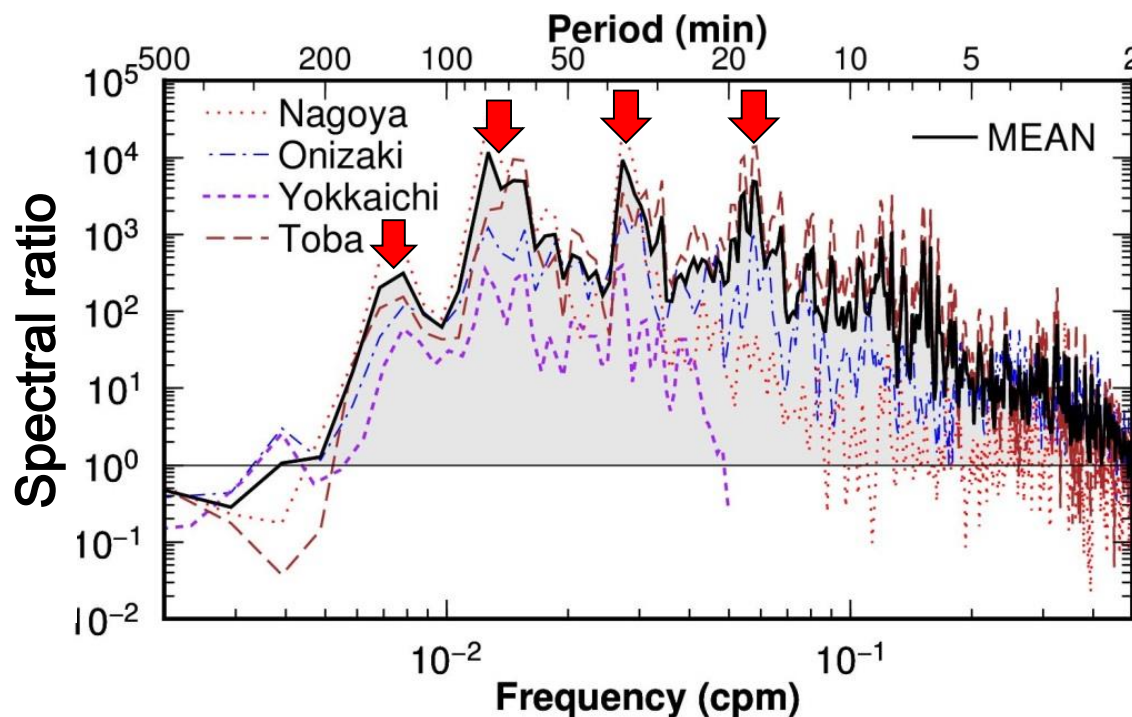
Tsunami ———
Background - - - -



スペクトル比⇒津波によって湾外から到来した周波数帯算出
Backgroundスペクトル増幅関数（増幅されやすさ）を算出

水位変動スペクトル比

$$R(\omega) = \frac{S_t(\omega)}{S_b(\omega)} = \frac{\text{津波到来時}}{\text{定常時}} \rightarrow \text{津波によって沖合から到来した成分}$$



MEAN: サンプル周波数の等しいNagoya, Onizaki, Tobaについて計算

卓越周期帯 : 16-19min, 30-40min, 60-90min, 120-140min

沖合から到来した成分

増幅関数

湾水振動の応答スペクトル $S_b(\omega) = H^2(\omega) S_0(\omega)$

$H(\omega)$: 増幅関数

$S_0(\omega)$: 外海からの入射波のパワースペクトル

(e.g., Rabinovich, 1997 ; 村上, 1982)

定常時の沖合での波のスペクトルは、周波数の2乗に比例して減少する(e.g., Rabinovich, 1997, 2009)

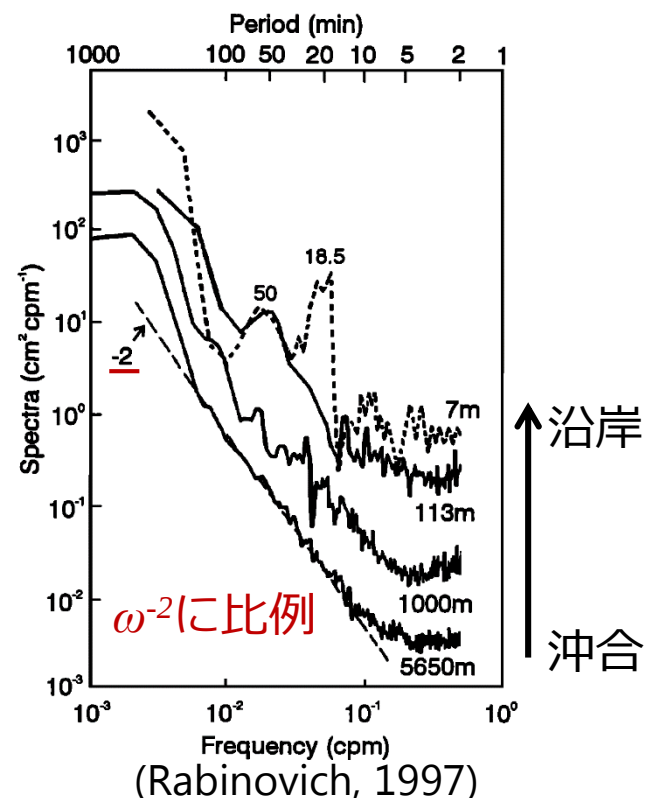
$$S_0(\omega) = A\omega^{-2}$$

$A = \text{const.}$ 沿岸域で

$A = 10^{-3} - 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{cpm}$

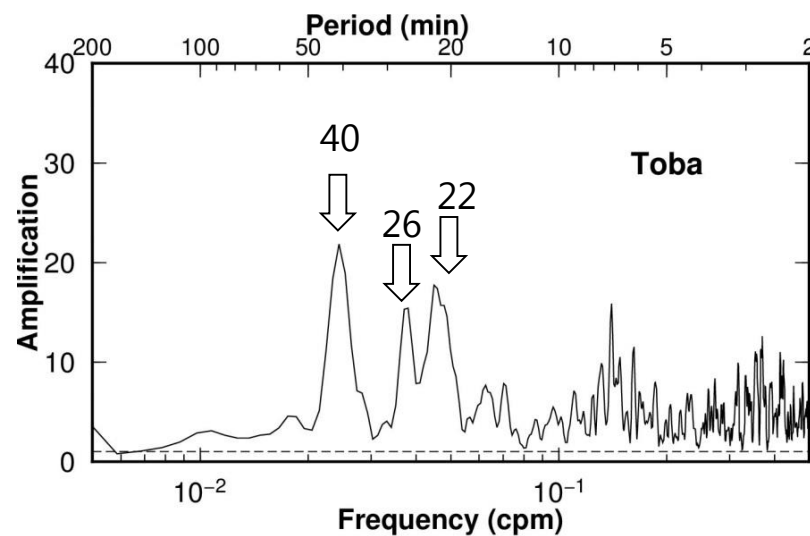
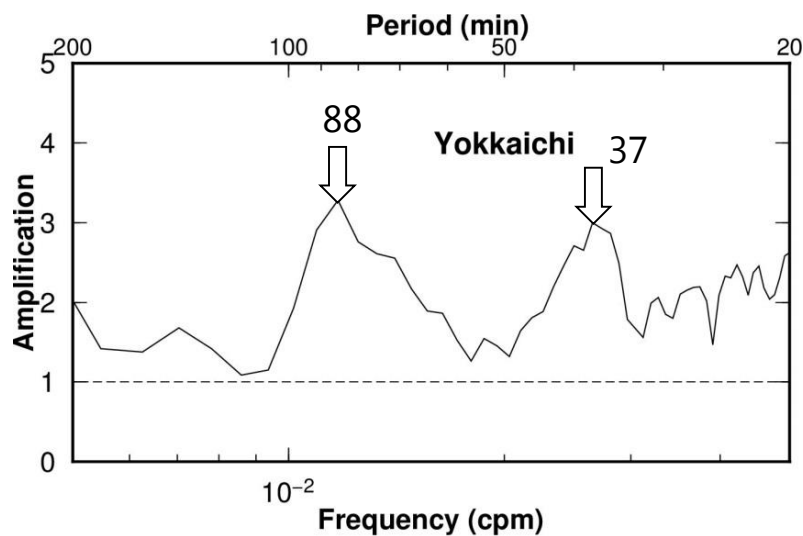
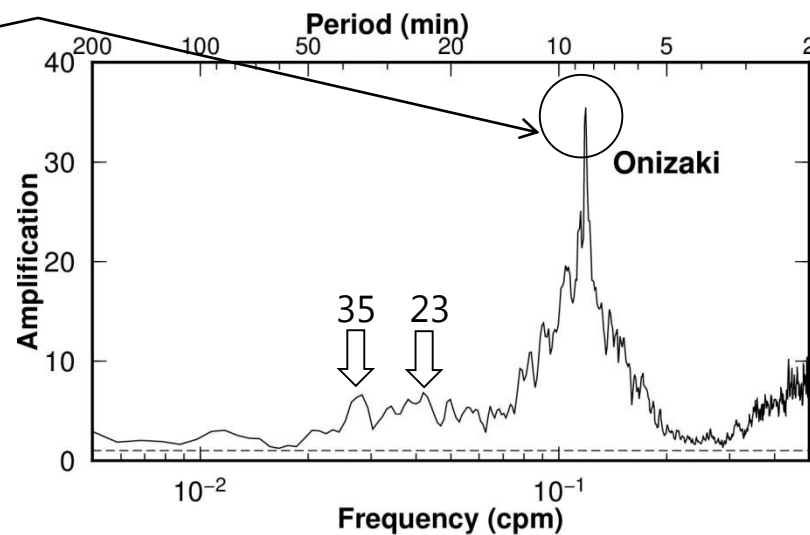
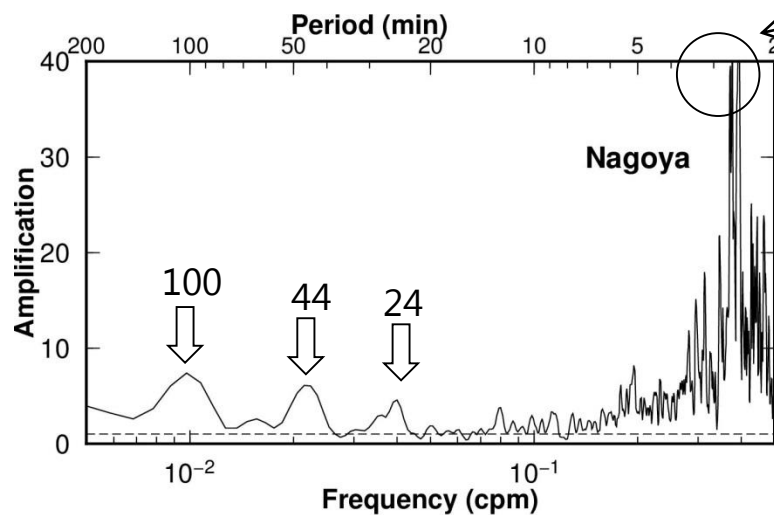
(e.g., Rabinovich, 1997)

$$H(\omega) = \left[\frac{S_b(\omega)}{A\omega^{-2}} \right]^{1/2} = \omega \left[\frac{S_b(\omega)}{A} \right]^{1/2}$$

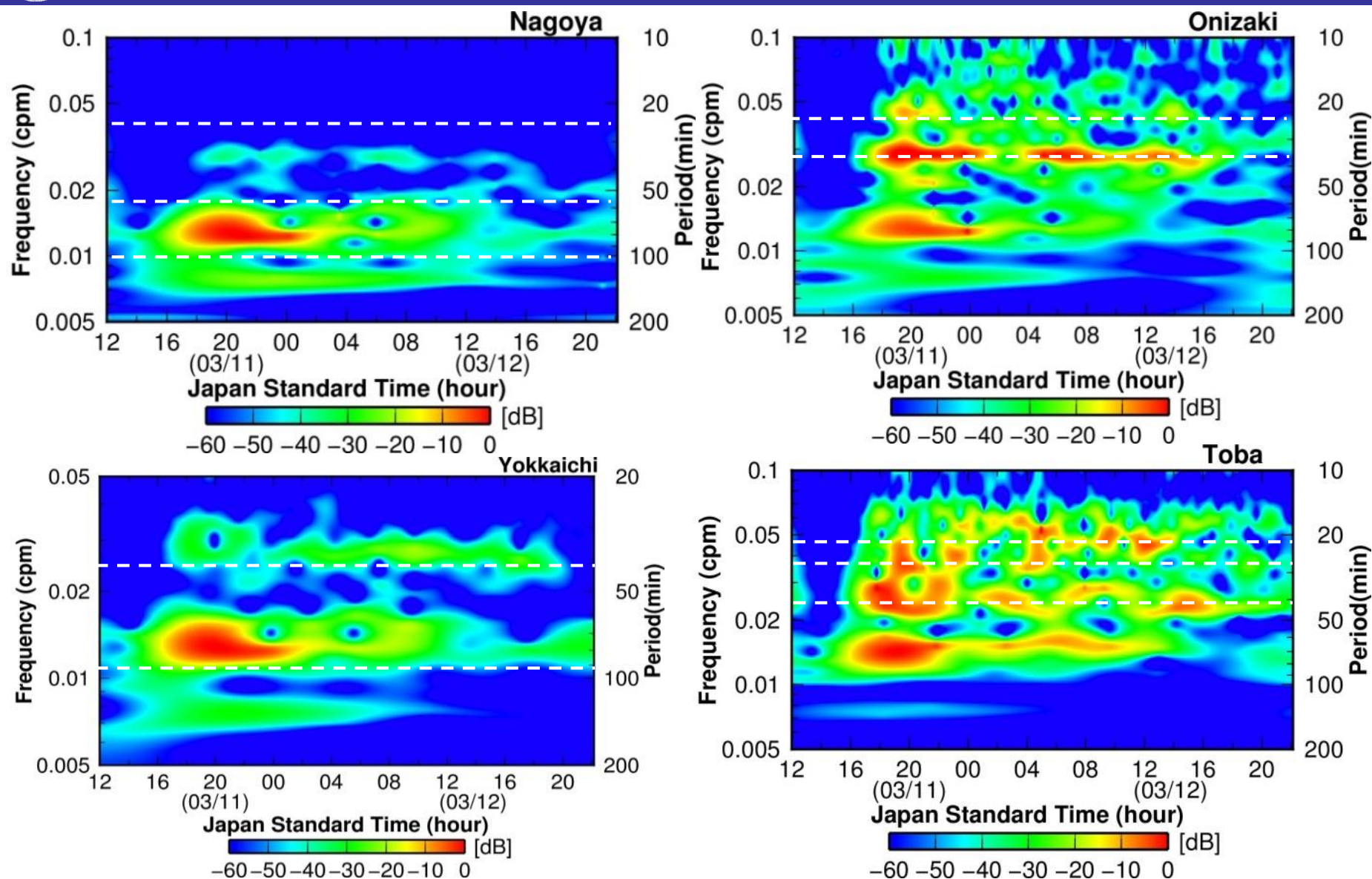


Backgroundのスペクトル⇒地形の増幅関数計算

?



時間周波数特性を用いて検証



津波周期と増幅周期の一致⇒振動継続

まとめと課題

- 湾内に到来した津波の継続・減衰、増幅特性に着目
- 津波イベント時に湾外から入射するエネルギー（スペクトル比）は湾内の多くの観測地点で振動観測
- 振動の継続・増幅・減衰は各観測地点の増幅特性に依存
⇒増幅関数よりもQ値（増幅の鋭さ）に依存？
⇒振動の「減衰→再開」は異なる経路からの津波の到来によるもの？
（共著・日向のコメント）
- 海洋レーダによる面的観測と各観測地点の関係性
- より詳細な検証のためシミュレーションとの比較が必要