



# 津波シミュレーションを用いた 海洋レーダによる伊勢湾での津波観測の検証

○渡久地 優<sup>1)</sup>, 藤井 智史<sup>2)</sup>, 日向 博文<sup>3)</sup>

1. 琉球大学大学院 理工学研究科
2. 琉球大学 工学部 電子情報通信コース
3. 愛媛大学大学院 理工学研究科

## 研究背景 これまでの海洋レーダ津波観測について

### 海洋レーダを用いた津波の検知・観測

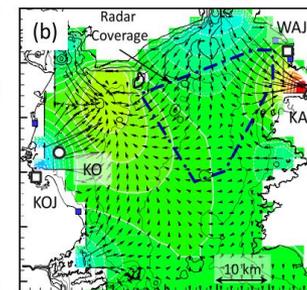
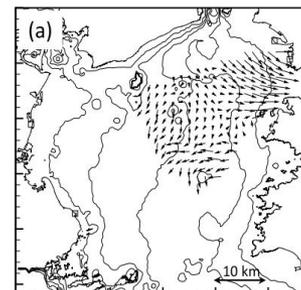
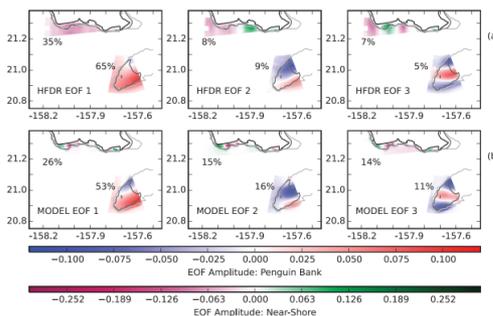
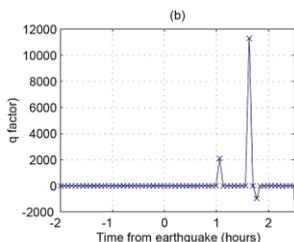
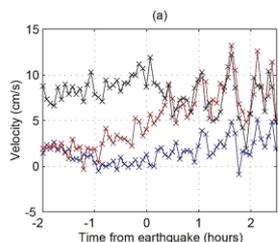


Figure 6. The first three EOF maps for (a) HFDR and (b) model data for the Penguin Bank area (158 grid points) and the nearshore area (195 grid points), with the percent variance for each mode. The EOFs are orthonormal and have not been scaled to reflect the number of grid points.

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。

Lipa et al., (2012, Remote Sens.)

Benjamin et al., (2016, JGR)

日向ら (2012, 海講)

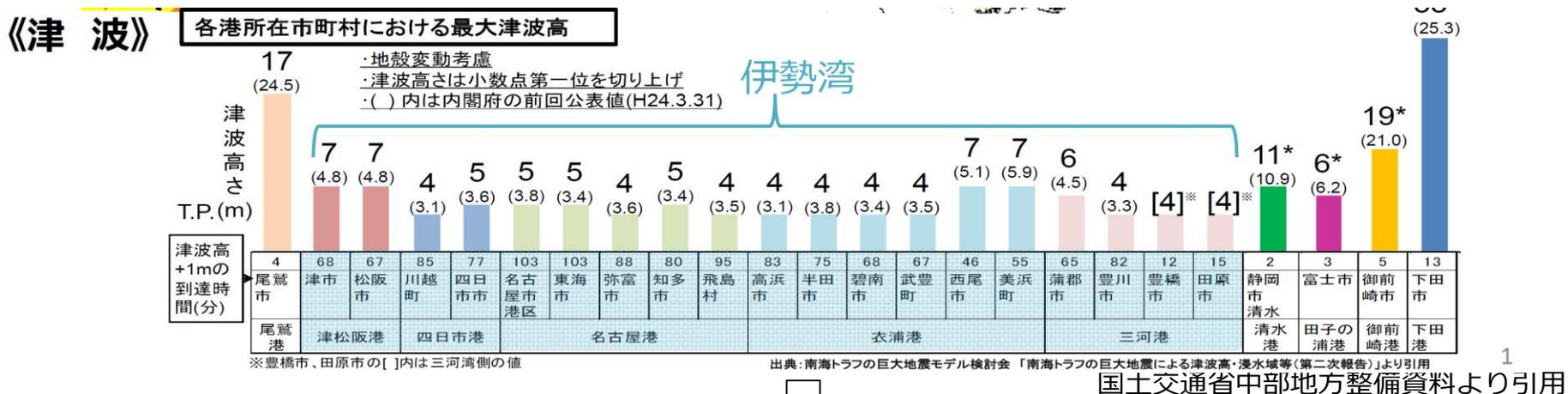
- 津波到来の検知 : Lipa et al. (2011,2012); Hinata et al. (2011); Dzvonkovskaya et al. (2011)
- 津波の面的 (副振動) 観測・モデル津波による比較 : Benjamin et al., (2016)  
⇒ 視線方向流速成分のみ
- 合成流速を用いた津波の面的 (副振動) 観測の検証 : 日向ら(2012), 渡久地ら(2016)  
⇒ 副振動の定性的な比較のみ



視線方向流速を用いた津波・副振動観測の検証 : ○  
合成流速を用いた津波・副振動観測の検証 : △

## 研究背景 伊勢湾における津波挙動把握の重要性

南海トラフ巨大地震による伊勢湾における最大津波：4~7m（内閣府）  
副振動による振動継続の可能性



津波防災のために：湾内における津波・副振動挙動の把握が必要。

### 目的

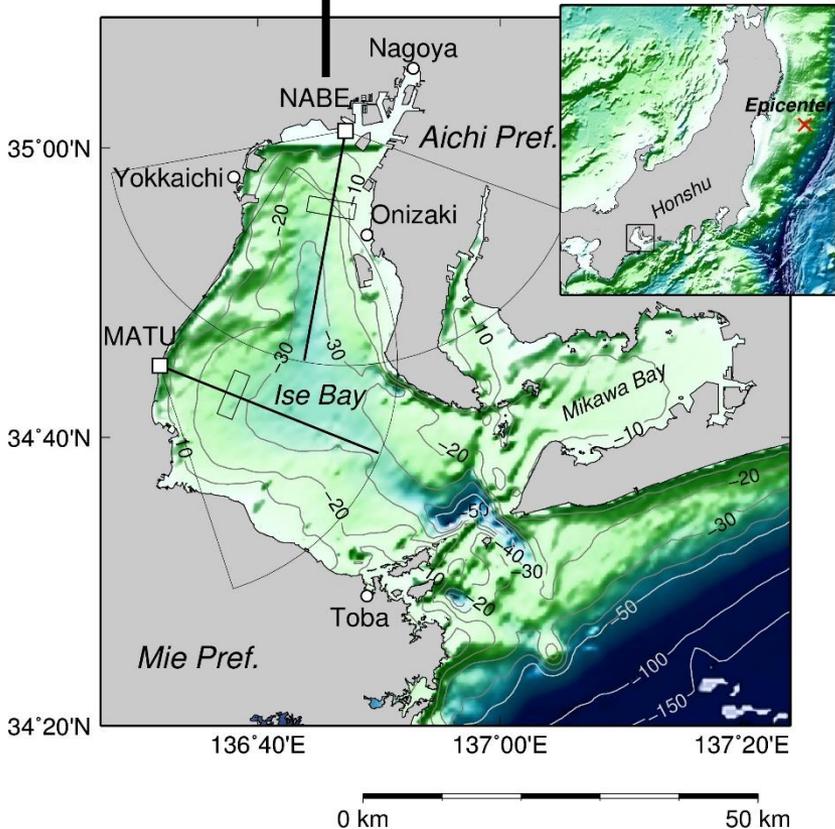
海洋レーダで得られた2011年東北津波の観測データ+津波シミュレーションをもとに、湾内での副振動の構造を明らかにする

### 今回の発表

観測データと津波シミュレーションの比較。副振動の励起について

## 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.
- 解析時間分解能: 5分

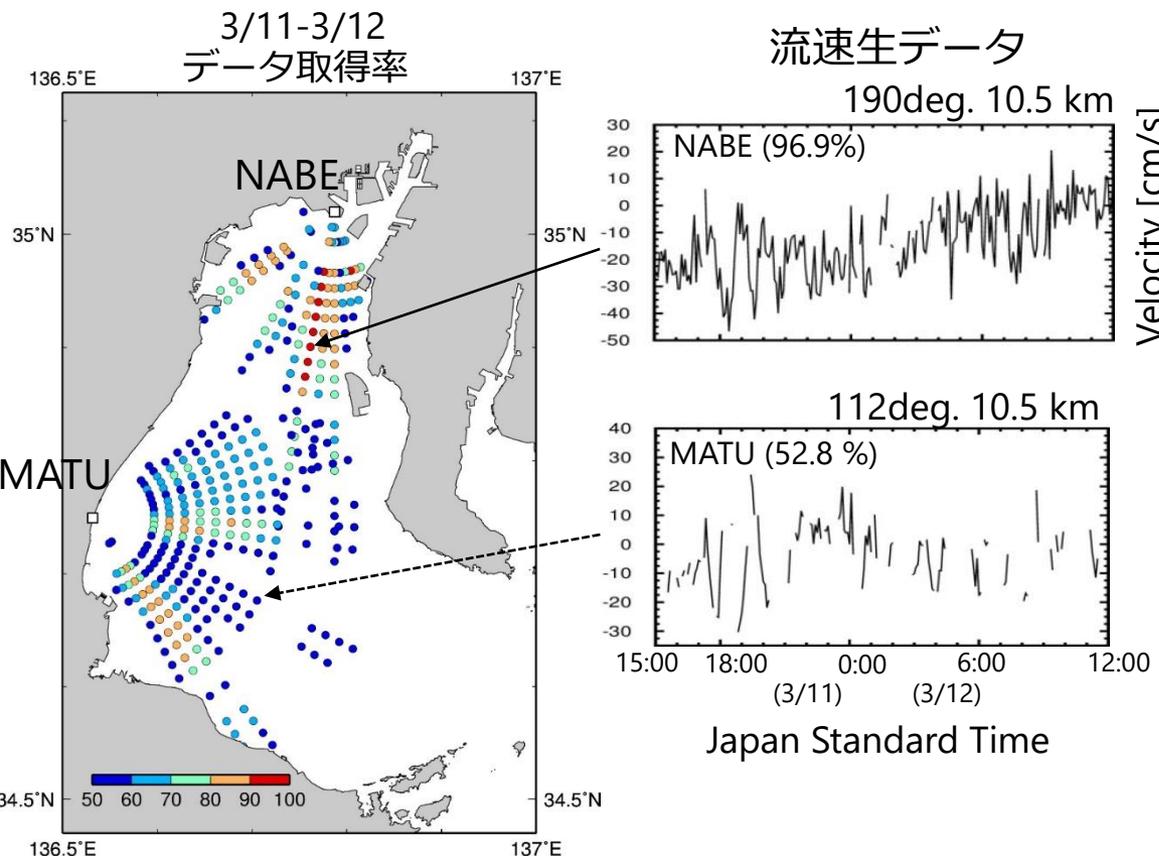
アレイアンテナ型と比較して...

- 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

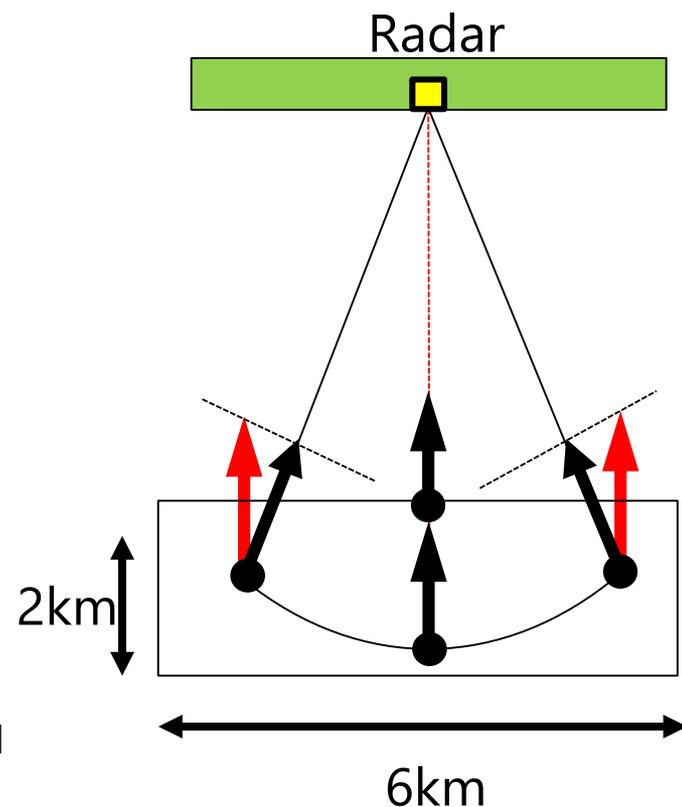
### 沿岸潮位計

- Nagoya, Onizaki, Toba: 1分間隔
- Yokkaichi: 10分間隔

## 観測緒元



視線方向流速解析：  
特定ビーム方向で空間平均



短時間（5分）観測ではSN比の低下のため、欠測・ノイズが増加



対象ビームに沿った流速成分を矩形領域で平均化求める。

(合成流速算出の際は取得率50%以上の点を線形補間で解析に使用)

黒：観測視線方向流速  
赤：投影流速

## 津波シミュレーションの概要①

モデル：COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) (Liu et al, 1998)

基礎方程式：線形/非線形浅水方程式（極座標系）

計算方法：Staggered格子を用いたLeap-frog法

計算時間刻み：1sec

出力時間刻み：1min

断層モデル：藤井・佐竹ver. 8

初期水位：Okada(1985)の方法

境界条件：完全反射（陸側）、放射（沖側）

基礎方程式：線形/非線形の浅水方程式（極座標系）

連続の式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial M}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (N \cos \varphi) \right\} = 0$$



運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{M^2}{D} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{MN}{D} \right\} + \frac{gD}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fN + F_x = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{NM^2}{D} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{N^2}{D} \right\} + \frac{gD}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fM + F_y = 0$$

$$f = \Omega \sin \varphi \quad F_x = \frac{gn^2}{D^{7/3}} M(M^2 + N^2)^{1/2} \quad F_y = \frac{gn^2}{D^{7/3}} N(M^2 + N^2)^{1/2}$$

- $\eta$  : 水位
- $g$  : 重力加速度
- $M$  : X(W-E)方向の流量フラックス
- $N$  : Y(S-N)方向の流量フラックス
- $n$  : マニングの係数
- $\varphi$  : 経度
- $\psi$  : 緯度
- $D$  : 全水深
- $R$  : 地球の半径
- $f$  : コリオリ係数
- $n$  : マニングの粗度係数
- $F_x$  : X方向の摩擦
- $F_y$  : Y方向の摩擦

## 津波シミュレーションの概要②

3段階のネスティングを行う

伊勢湾の検証に使用

領域1：線形  
(2.0 arcmin~3.2km)

領域2：非線形  
(1.0 arcmin~1.6km)

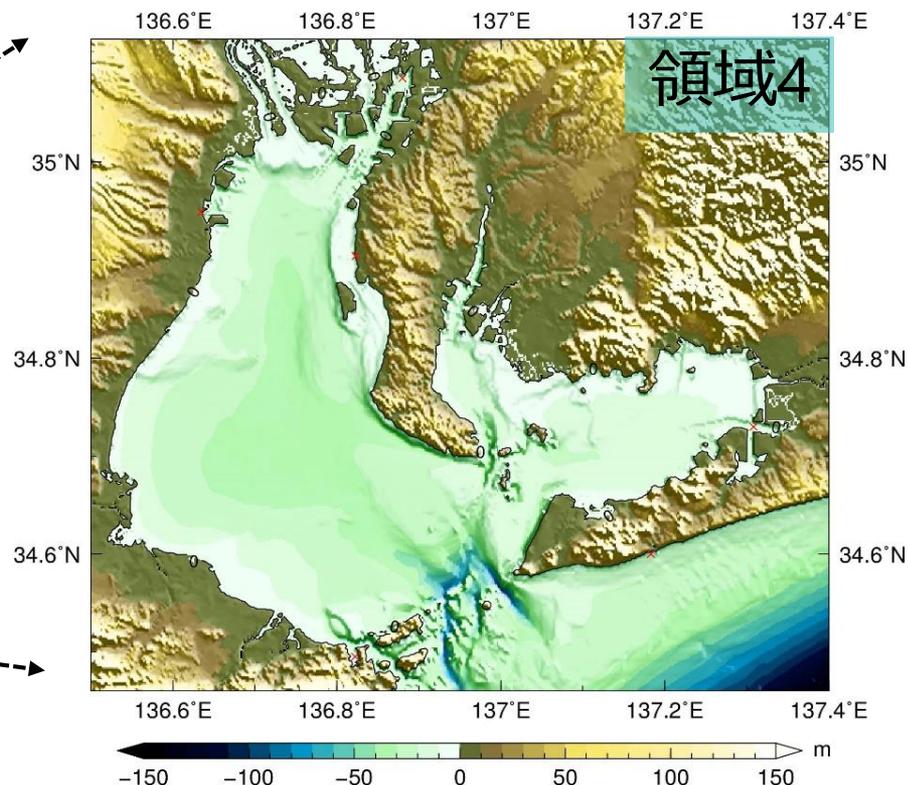
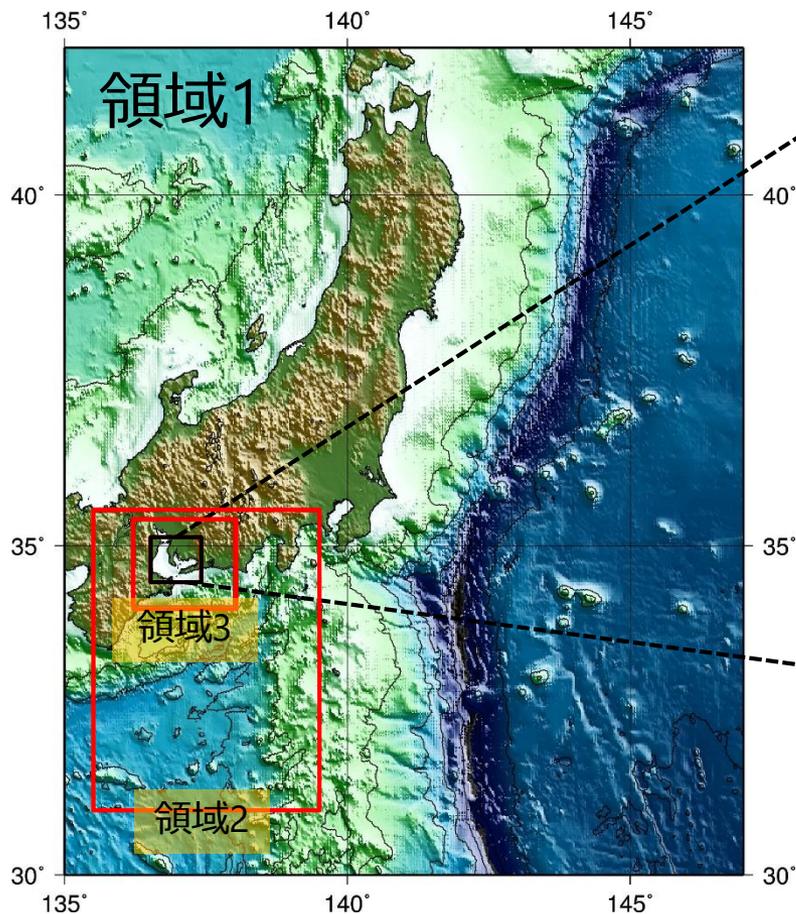
領域3：非線形  
(0.5 arcmin~800m)

領域4：非線形  
(0.125 arcmin~200m)

1/2

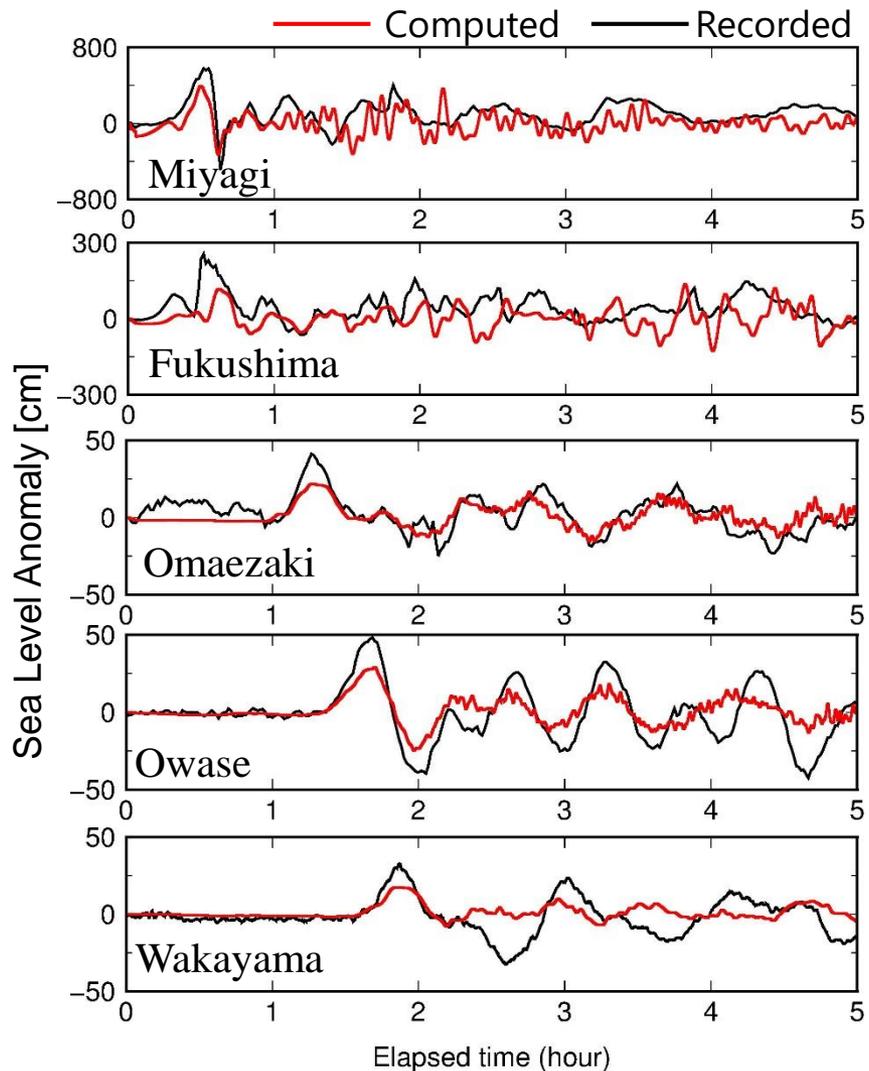
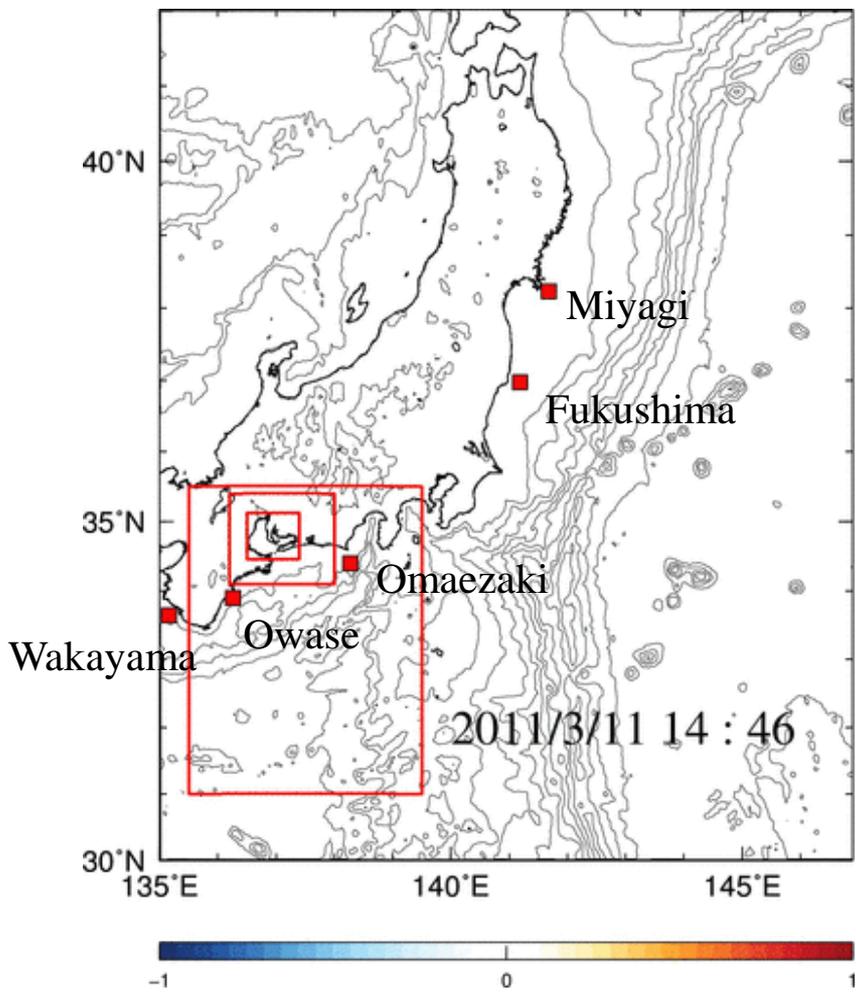
1/2

1/4 格子間隔比



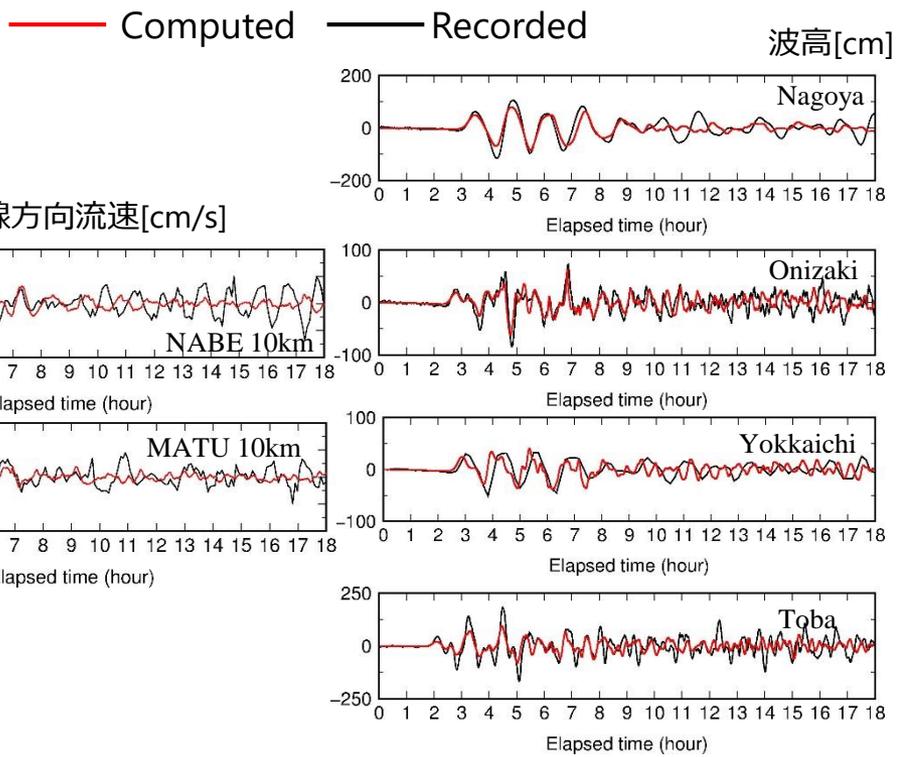
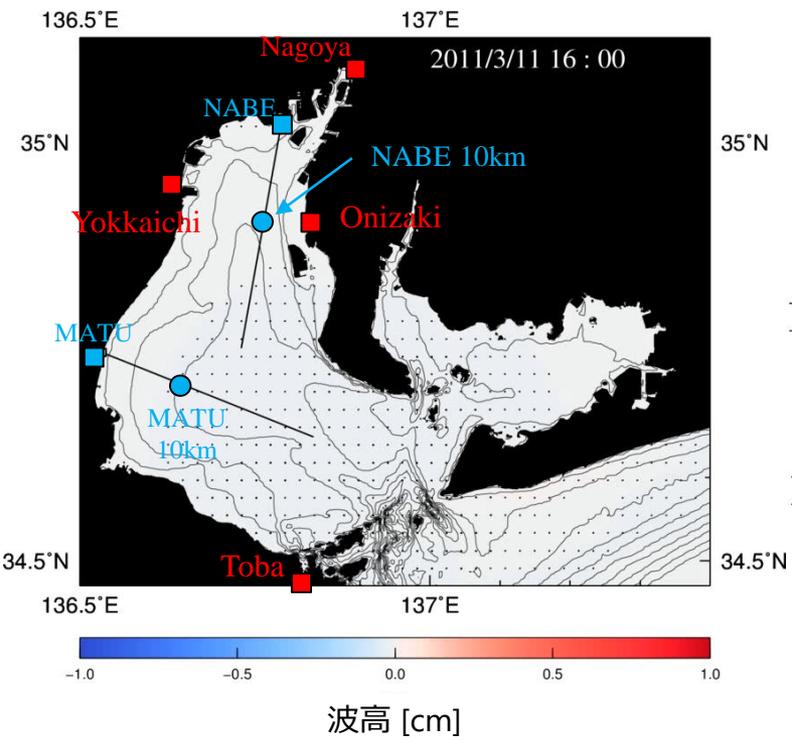
地形データ：ETOP, 内閣府提供データを使用

### 計算結果① GPS波浪計



沖合ではおおまかに津波拳動を再現

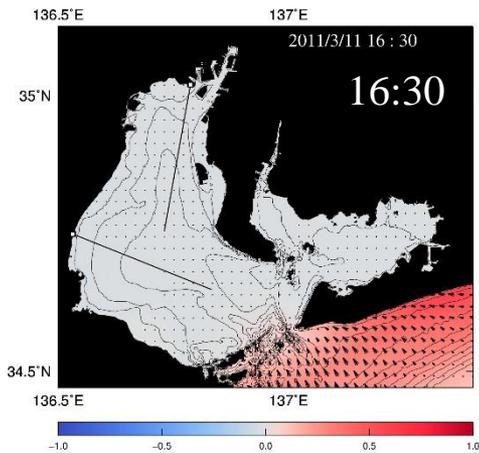
## 計算結果② 沿岸波高・流速



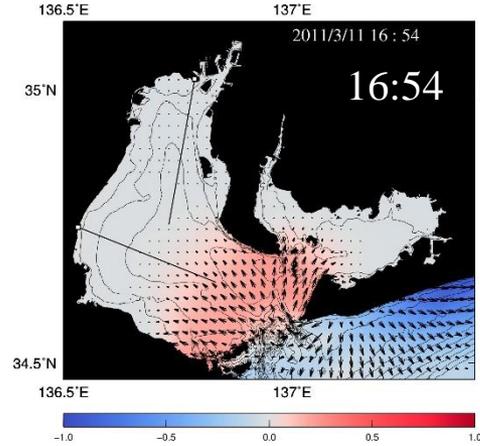
振幅が大きい4~5波まで（地震発生から8~9時間）は観測値とモデルが非常に良い一致  
 それ以降はモデルで過小評価（⇒**今後は防潮堤の考慮などが課題**）

▶今回は良く再現できていた最初の9時間(~23:46)の現象を対象に解析

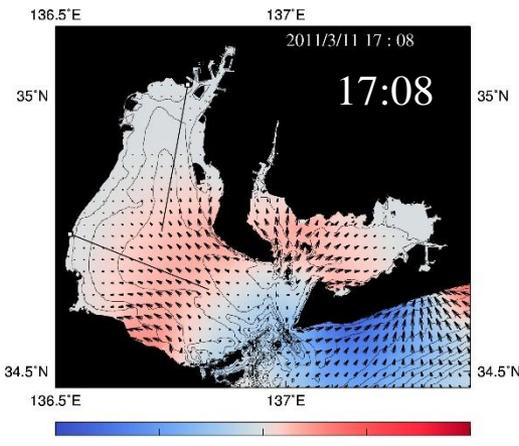
## 計算結果② 沿岸波高・流速



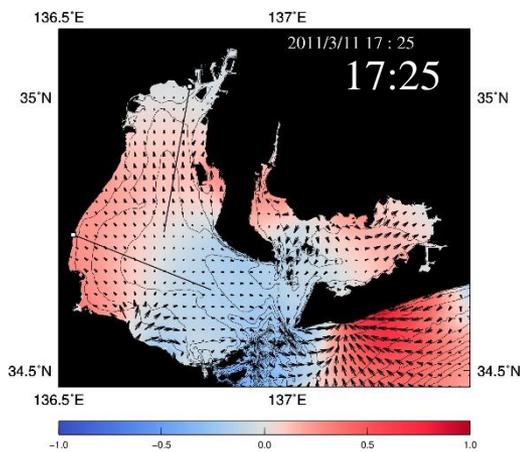
等深線に直行して津波が到来



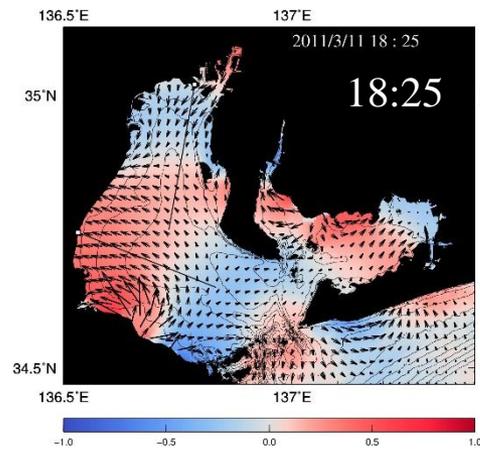
伊良湖水道を境界として湾内に放射状に入射



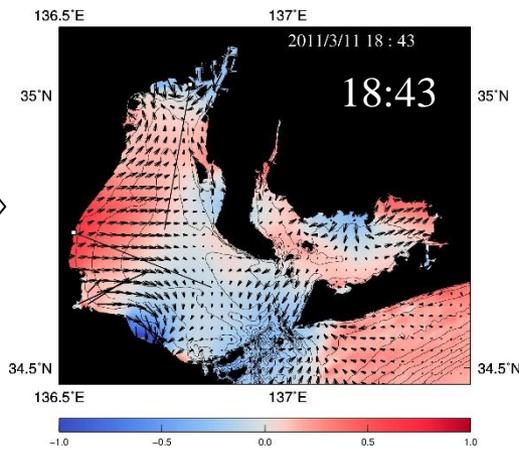
知多半島で分岐。伊勢湾・三河湾に伝搬



第二波：渥美半島沿いから伝搬

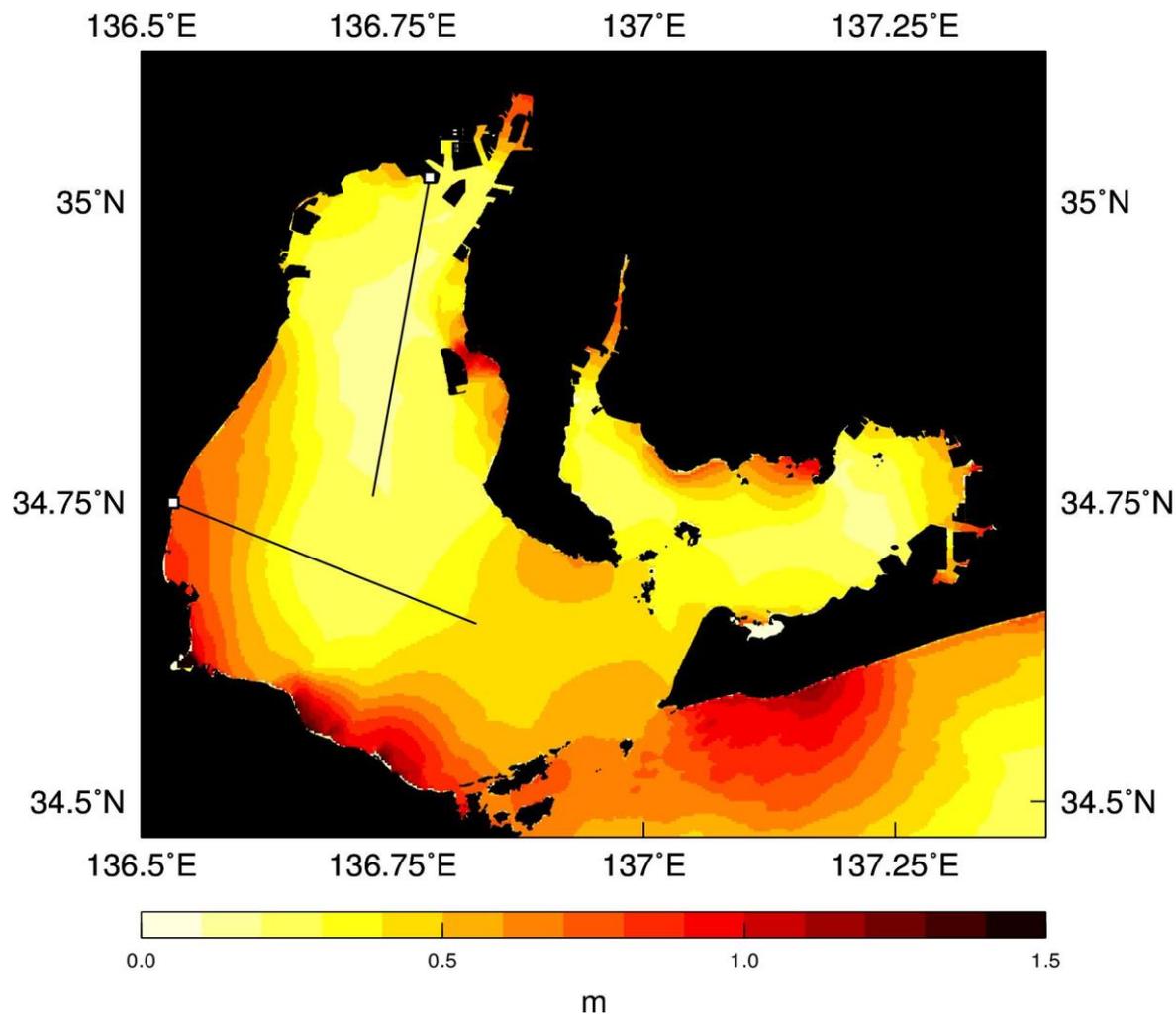


津松阪方向へ進行



反射波が湾奥・湾口（三河湾）方向へ進行

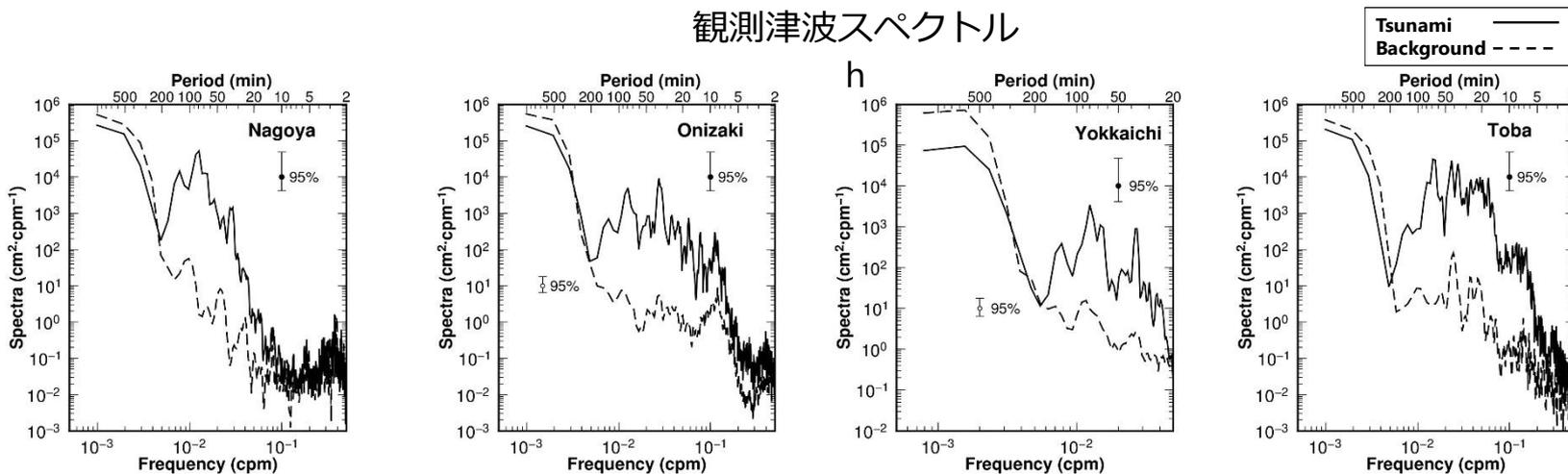
## 計算結果② 沿岸波高・流速 (最大波高~9h)



最大波高分布

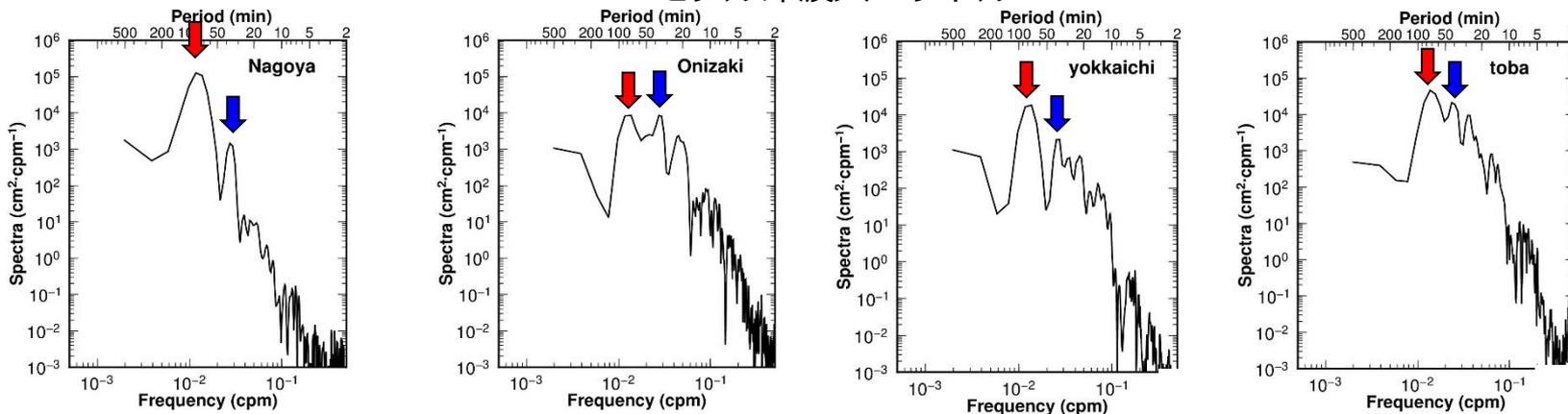
## 計算結果② 沿岸波高 (スペクトル)

観測津波スペクトル



▶ 30-40分、60-90分、120-140分周期のスペクトルが卓越

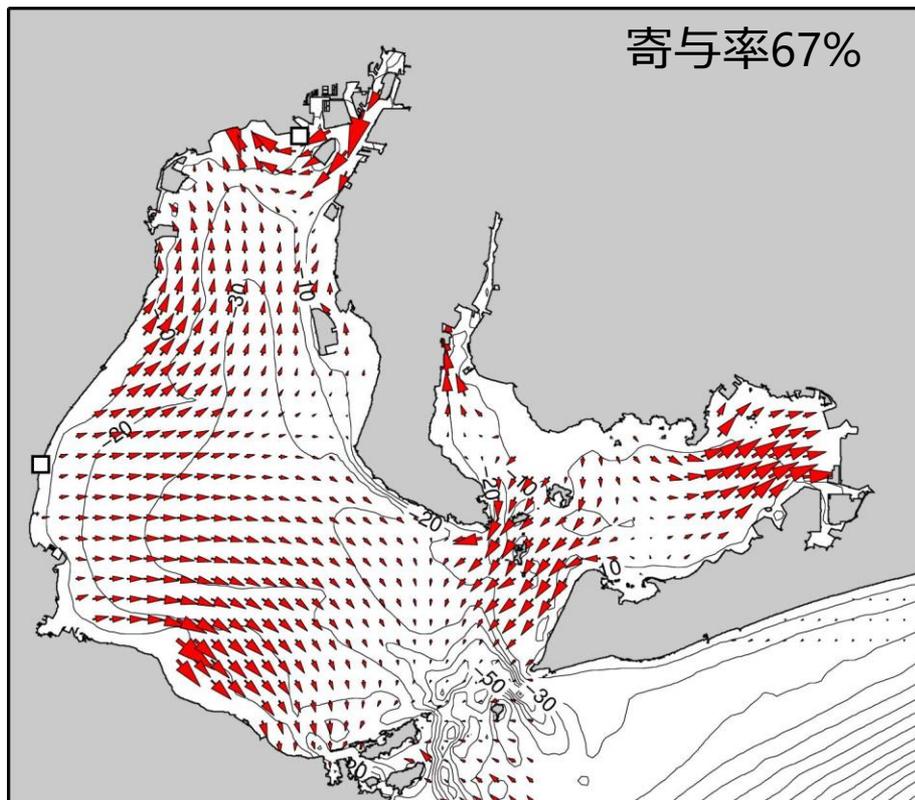
モデル津波スペクトル



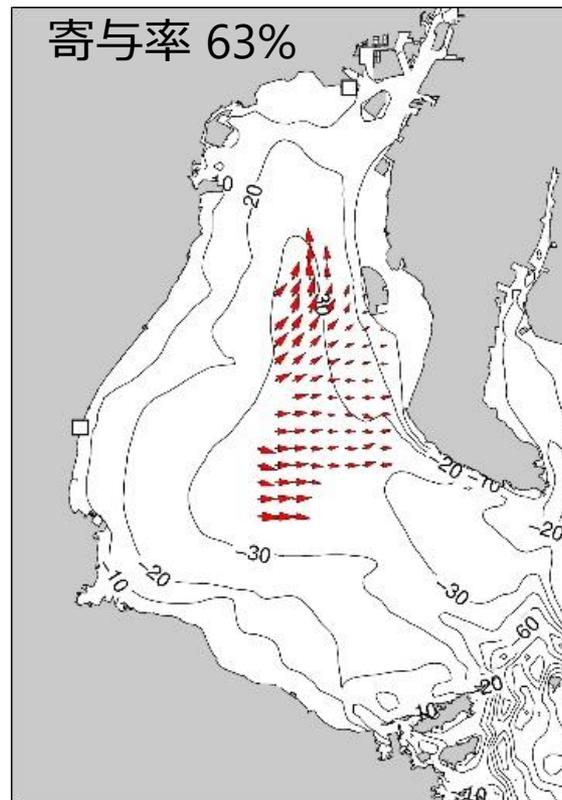
▶ 30-40分、60-90分周期のスペクトルが卓越

\*Yokkaichiを除いてサンプリング周期1分

### 計算結果③振動モード(60-90min)



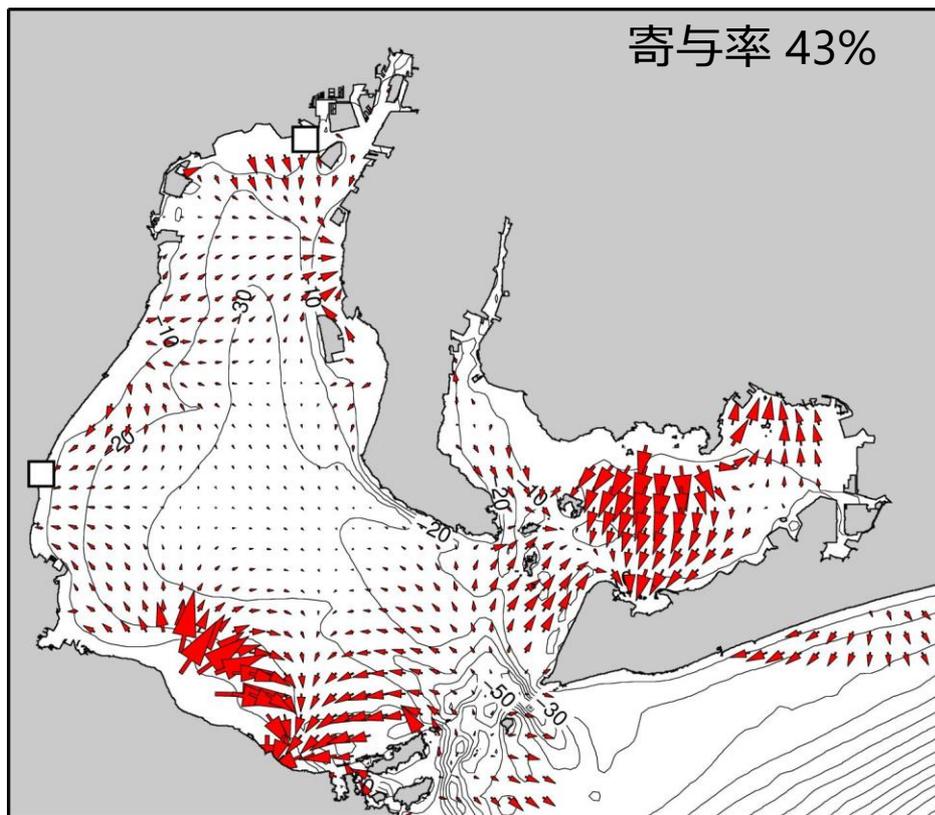
モデル津波EOF



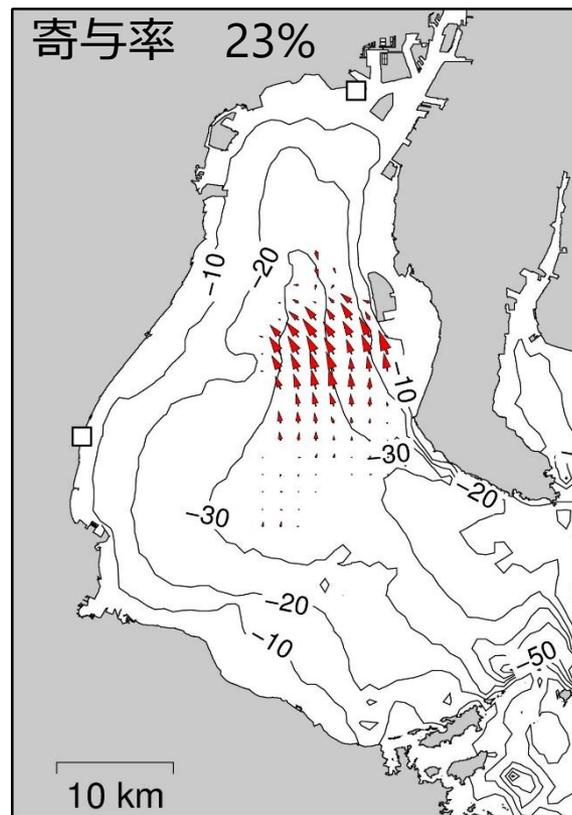
海洋レーダ観測流速EOF

▶海洋レーダで再現可能

### 計算結果③振動モード(30-40min)



モデル津波EOF

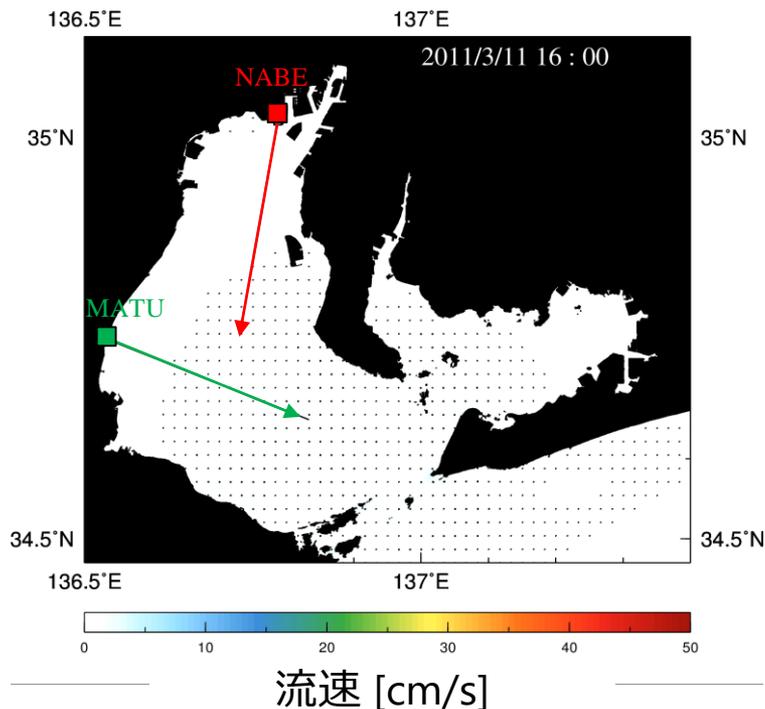


海洋レーダ観測流速EOF

▶この周期のモードは海洋レーダで再現**不可**

観測領域内に卓越した流速場が存在しないため?

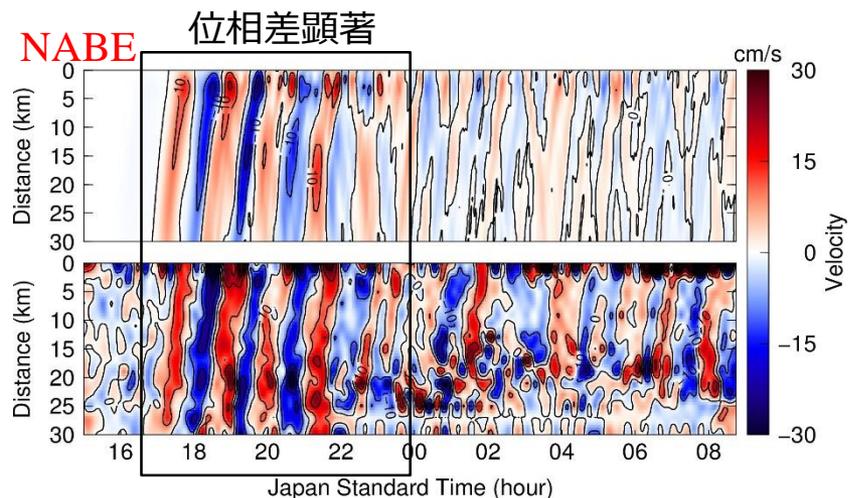
## 計算結果④時間距離特性



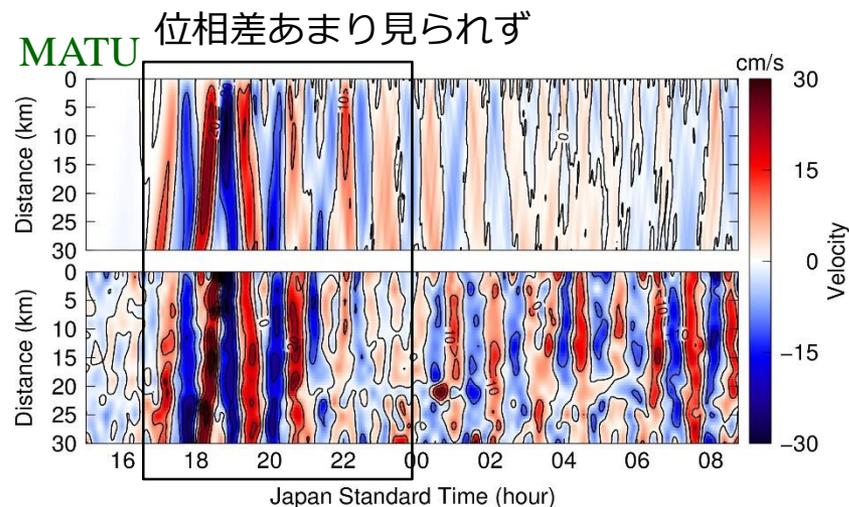
**NABE:**  
津波到来後に明瞭な位相差：進行波を観測

**MATU:**  
位相差はあまり見られず：津波到来後すぐに定在波（各距離同位相）が励起された？

⇒ エネルギー伝搬過程に着目して  
伝搬～増幅を検証



(上：モデル流速 下：観測流速 (～240min) )

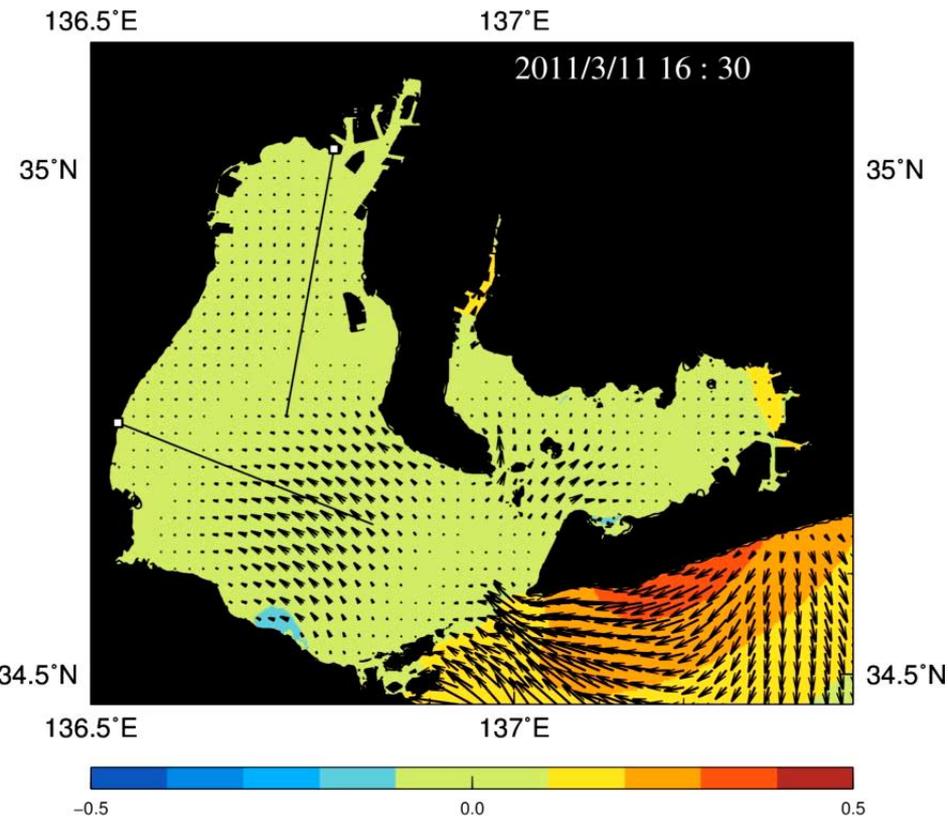


(上：モデル流速 下：観測流速 (～240min) )

# エネルギーフラックス

エネルギーの流入・伝搬から副振動を検証

▶エネルギーフラックスを計算



60-90分周期帯のエネルギーフラックス

エネルギーフラックス  $E = (E_x, E_y)$

$$E_x = \rho H u \left[ g \zeta + \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \right]$$

$$E_y = \rho H v \left[ g \zeta + \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \right]$$

ポテンシャルによる項

運動エネルギーによる項

- $\rho$  : 海水密度
- $u$  : u方向(W-E)流速成分
- $v$  : V方向(S-N)の流速成分
- $g$  : 重力加速度
- $\zeta$  : 波高
- $H$  : 全水深

- 湾口⇒津松阪方向⇒湾奥/湾口の経路でエネルギーの輸送が行われている
- 湾口ではエネルギーフラックスが一定の周期で振動：副振動の発生
- 湾奥ではエネルギーの反射があまりない：副振動が発達しない

## まとめと今後の方針

- 津波シミュレーションと海洋レーダ観測との比較
  - 再現性の高い津波発生9時間までを対象
  - 海洋レーダ視線方向流速（平均化）が良い一致
- 伊勢湾内副振動モード
  - 60-90分周期振動モードは海洋レーダ観測で再現可能
  - 30-40分周期振動モードは再現不可（観測領域に卓越した流速が存在しなかったため？）
- 副振動（60-90分）の励起について
  - 湾口付近では素早く励起。湾奥では反射波が少ないため励起しづらいことを観測とシミュレーションから確認
  - 今後の予定：摩擦によるエネルギー減衰・湾外へのエネルギーの散逸等を考慮して副振動の減衰過程を明らかにする
- 大湊局レーダ・三河湾VHFレーダを含めた解析