

# 海洋レーダを用いた津波観測と 機械学習による津波検知の検証

玉山 涼華<sup>(1)</sup>

藤 良太郎<sup>(1)(2)</sup>

日向 博文<sup>(1)</sup>

(1)愛媛大学大学院理工学研究科

(2)国際航業株式会社

# 研究背景

## 津波観測手法

- GPS波浪計や潮位計を用いた波高計測
- 海洋レーダを用いた流速計測・・・面的測定、保守が容易かつ安価

## 海洋レーダを用いた津波検知

- FHO法 (Ogata et al., 2018)・・・二点間相互相関係数による検知  
→谷口(2023)によるインドネシアのレーダ局への適用では、検知に要する時間が長くなり、避難時間が得られない可能性を指摘した
- 谷口(2023)・・・多点間相互相関係数による検知  
→相関係数の変動パターンを捉えることで、津波を検知できる可能性がある  
→データのパターンを認識する手法として**機械学習**が挙げられる

本研究の目的は、海洋レーダで観測された津波の特徴的な波動場から津波到来を検知する機械学習モデルを構築し、検知性能を検証すること

# 実験概要

## 実験1

- $u$ ,  $v$ 流速を取得し、時間内に津波が通過するシナリオを学習

→1-1 津波通過時刻の検知

→1-2 津波通過観測点の検知

## 実験2

- $u$ ,  $v$ 流速について、時間スライドデータを学習

→2-1 津波通過時刻の検知

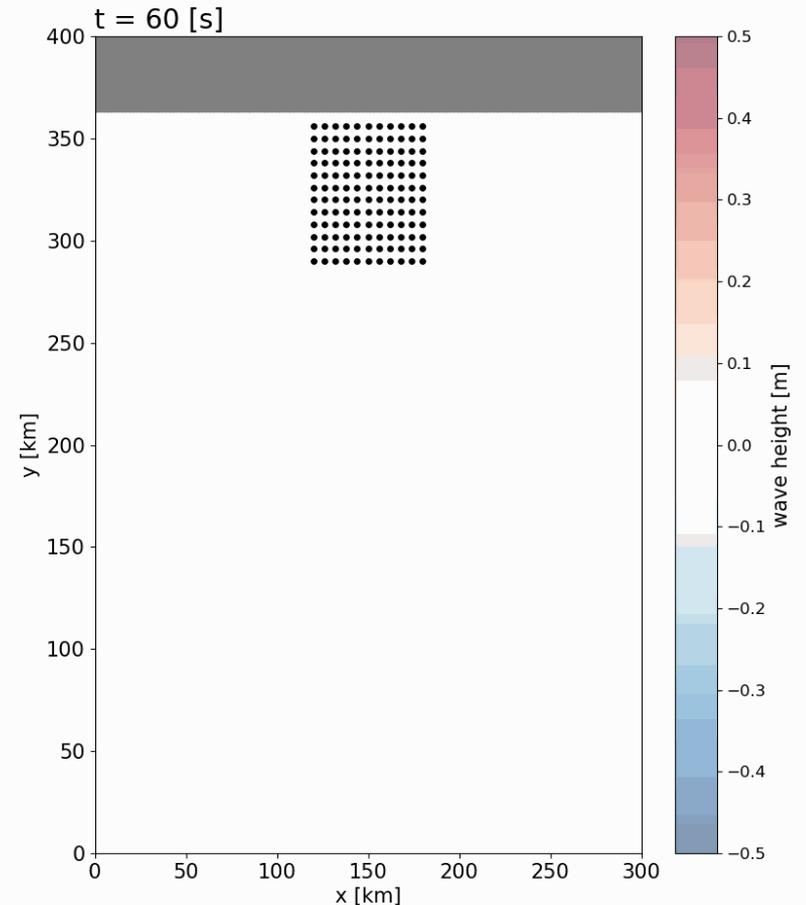
→2-2 津波通過観測点の検知

## 実験3

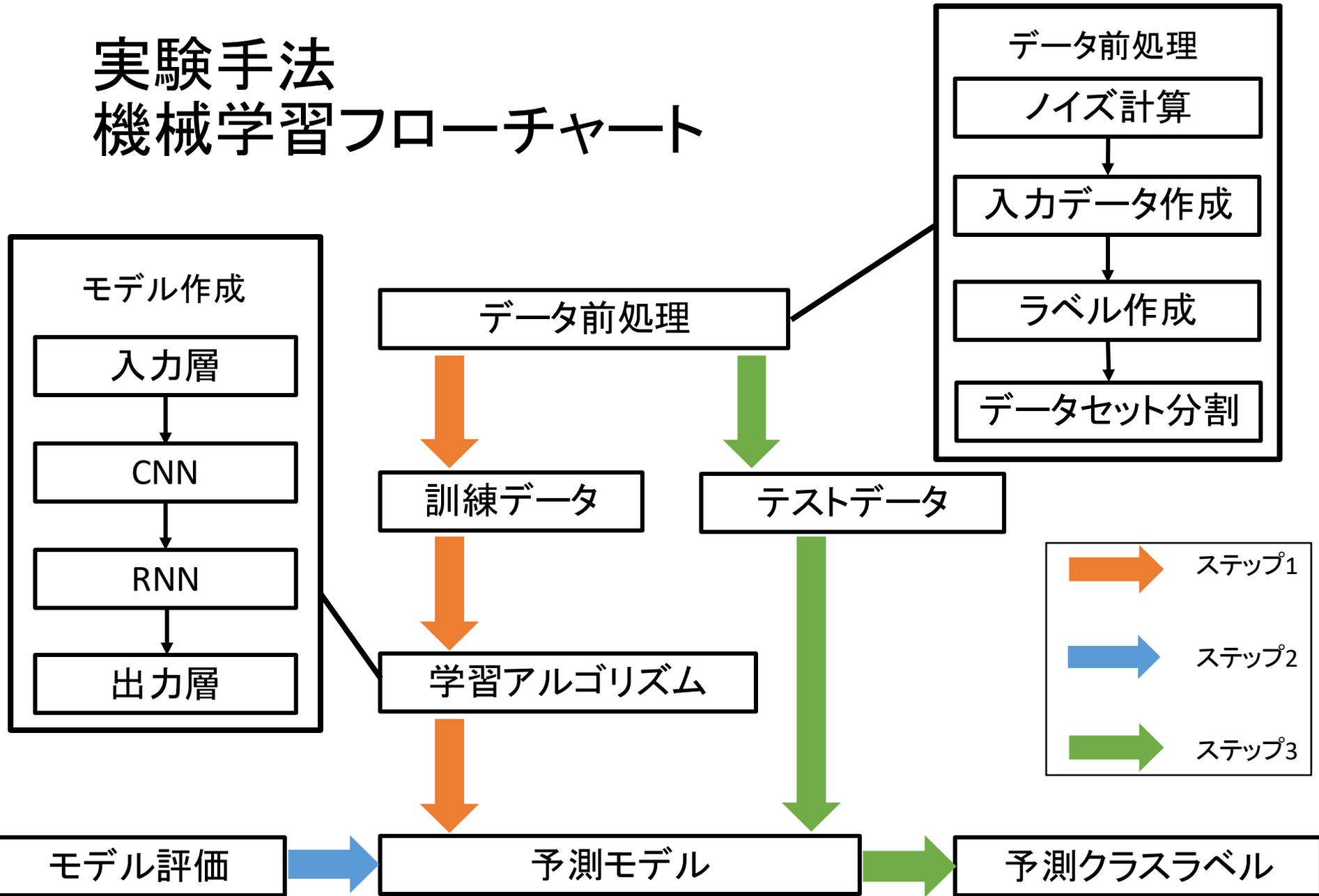
- 視線方向流速の時間スライドデータを学習

→3-1 津波通過時刻の検知

→3-2 津波通過観測点の検知



# 実験手法 機械学習フローチャート

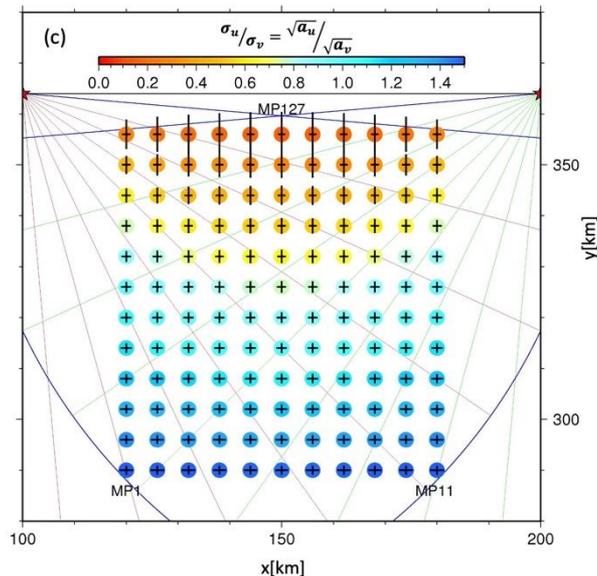


# 実験手法

## データ前処理 ノイズ計算

$\sigma_{r1} = \sigma_{r2} = \sigma_r$ としたときの観測誤差推定(Hinata et al., 2005)

$$\begin{pmatrix} \sigma_{u,i}^o \\ \sigma_{v,i}^o \end{pmatrix}^2 = \frac{1}{\left[ \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_{n,i} \times \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_{n,i} \right] - \left[ \sum_{n=1}^N \sin \theta_{n,i} \cos \theta_{n,i} \right]^2} \times \begin{pmatrix} \sum_{n=1}^N \cos^2 \theta_{n,i} \\ \sum_{n=1}^N \sin^2 \theta_{n,i} \end{pmatrix} \times \sigma_r^2 \quad (N = 2)$$



### ・u, v流速の誤差

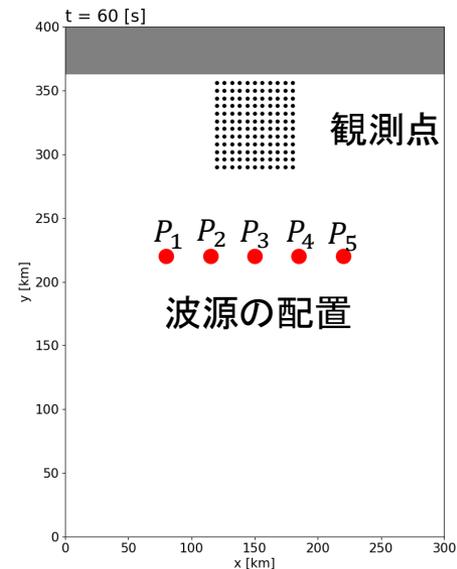
Sahana et al. (2024)に基づき、観測誤差を計算  
 →レーダのビーム交差角から求められる増幅率  
 と、レーダ周波数から計算される視線方向流速  
 の速度分解能 $\sigma_r=5$  cm/sより計算

### ・視線方向流速の誤差

$\sigma_r=5$  cm/sとして計算

# 実験手法

## データ前処理 入力データ作成



陸側

海側  
勾配0.005m

波源設定

配置: 5種類 (y=220km, x=80, 115, 150, 185, 220km)

波高: 5種類 (3, 4, 5, 6, 7m)

分布: 3種類 (60, 80, 100km)

$5 \times 5 \times 3 = 75$ シナリオ

津波+ノイズシナリオ、ノイズシナリオを作成

→  $75 \times 2 = 150$ シナリオ

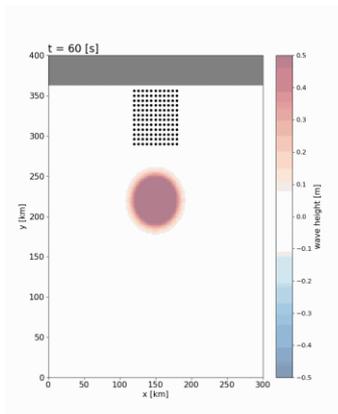
流速  $u, v$  を線形長波方程式より計算

線形長波方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial M}{\partial x} - \frac{\partial N}{\partial y}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y}$$



観測点  $n$  における流速を正規化

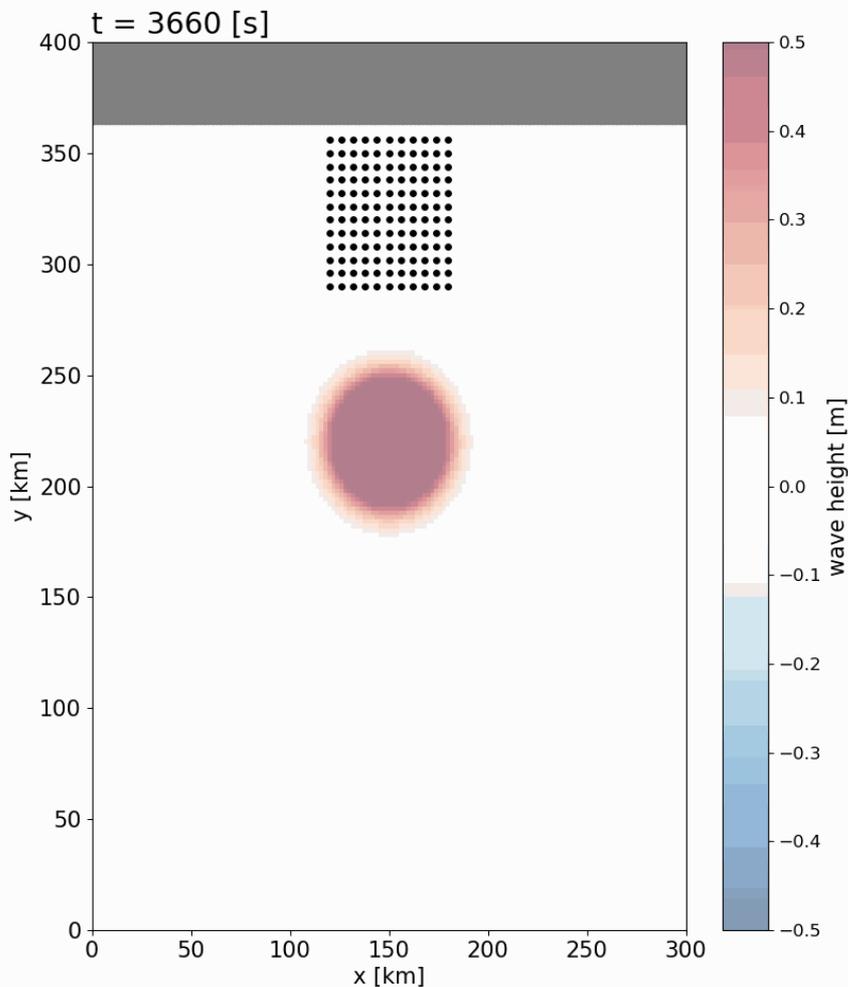
$$u_{std}^{(n)} = \frac{u^{(n)} - \mu_u}{\sigma_u} \quad v_{std}^{(n)} = \frac{v^{(n)} - \mu_v}{\sigma_v}$$

$\mu_u$ :  $u$  の平均値  $\sigma_u$ :  $u$  の標準偏差  
 $\mu_v$ :  $v$  の平均値  $\sigma_v$ :  $v$  の標準偏差

$\eta$ : 波高  $M, N$ :  $x, y$  方向の流量  $g$ : 重力加速度  $D$ : 全水深

# 実験手法

## データ前処理 時刻ラベル作成



### 津波通過時刻の検知

#### 津波ラベル

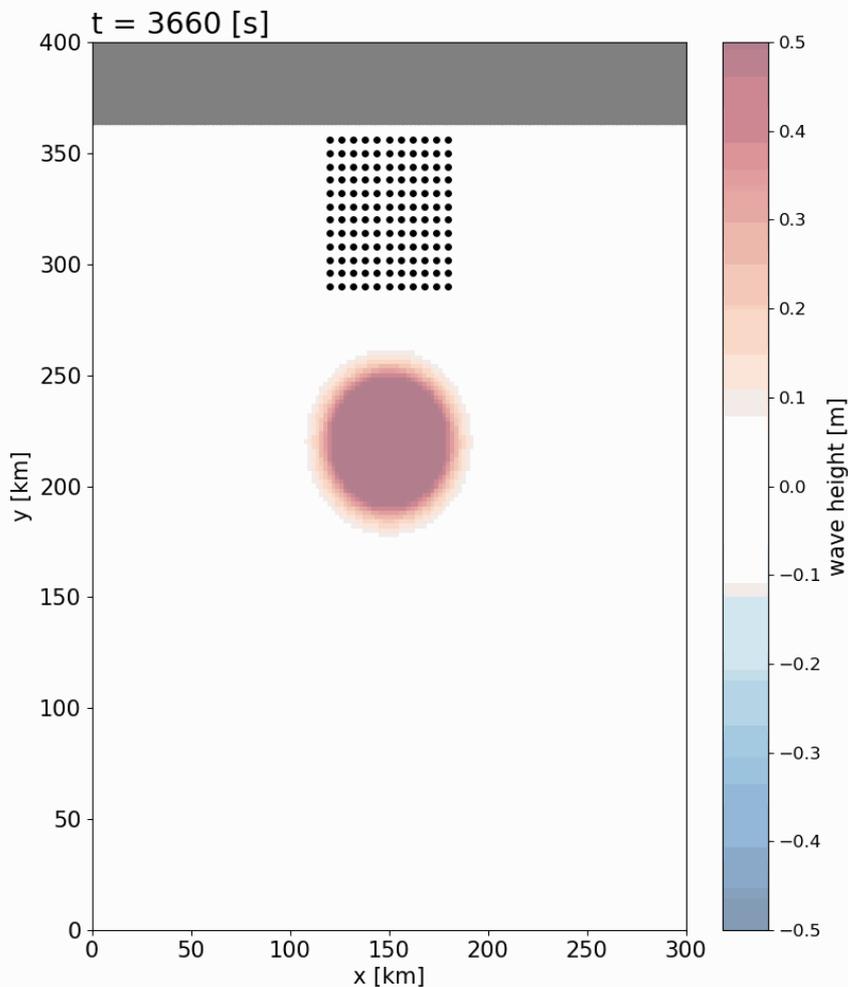
観測点においてノイズを含まない津波シミュレーション波高が初めて0.5m以上となった時刻から、陸側に最も近い観測点において波高が0.5m以上となった時刻までを津波ラベルと定義

#### 非津波ラベル

それ以外の時刻のデータ、およびノイズのみ入力したシミュレーションデータを非津波ラベルと定義

# 実験手法

## データ前処理 観測点ラベル作成



### 津波通過観測点の検知

#### 津波ラベル

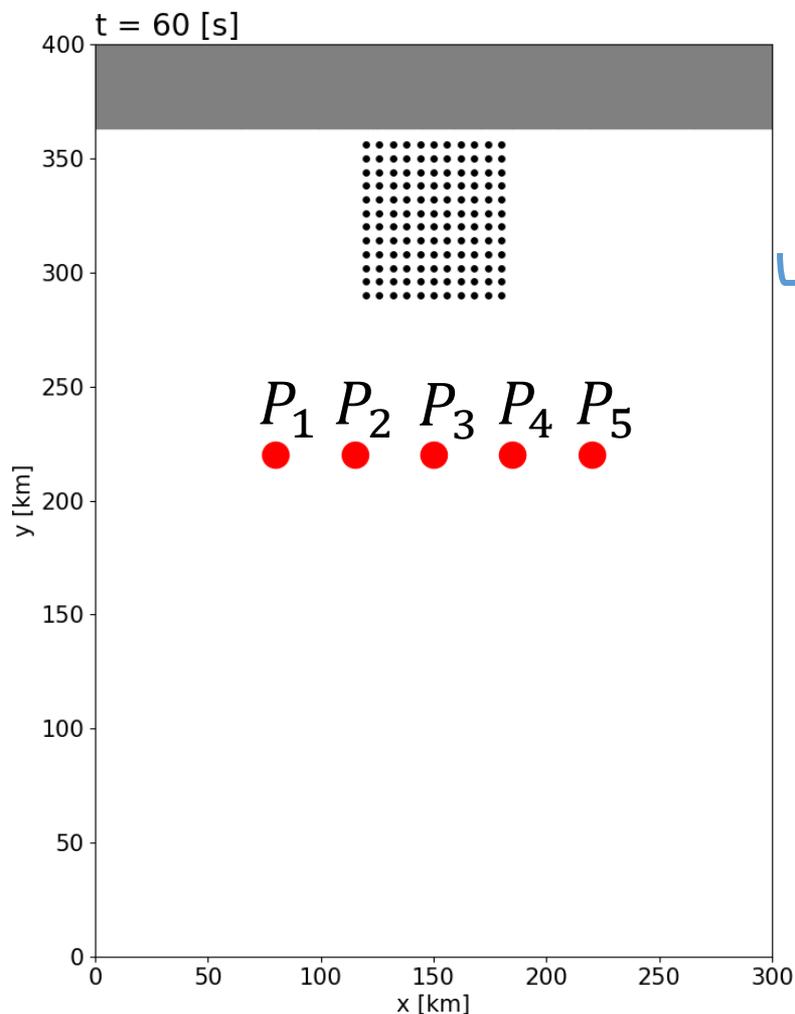
観測点においてノイズを含まない津波シミュレーション波高が0.5m以上となった観測点座標を津波ラベルと定義

#### 非津波ラベル

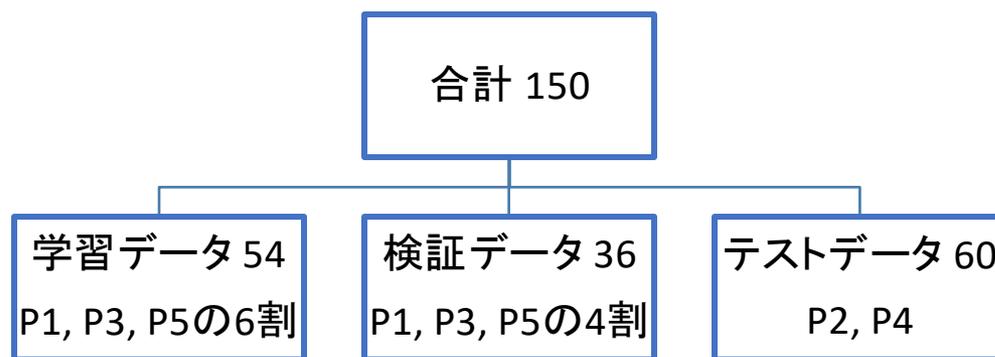
それ以外の観測点のデータ、およびノイズのみ入力したシミュレーションデータを非津波ラベルと定義

# 実験手法

## データ前処理 データセット分割

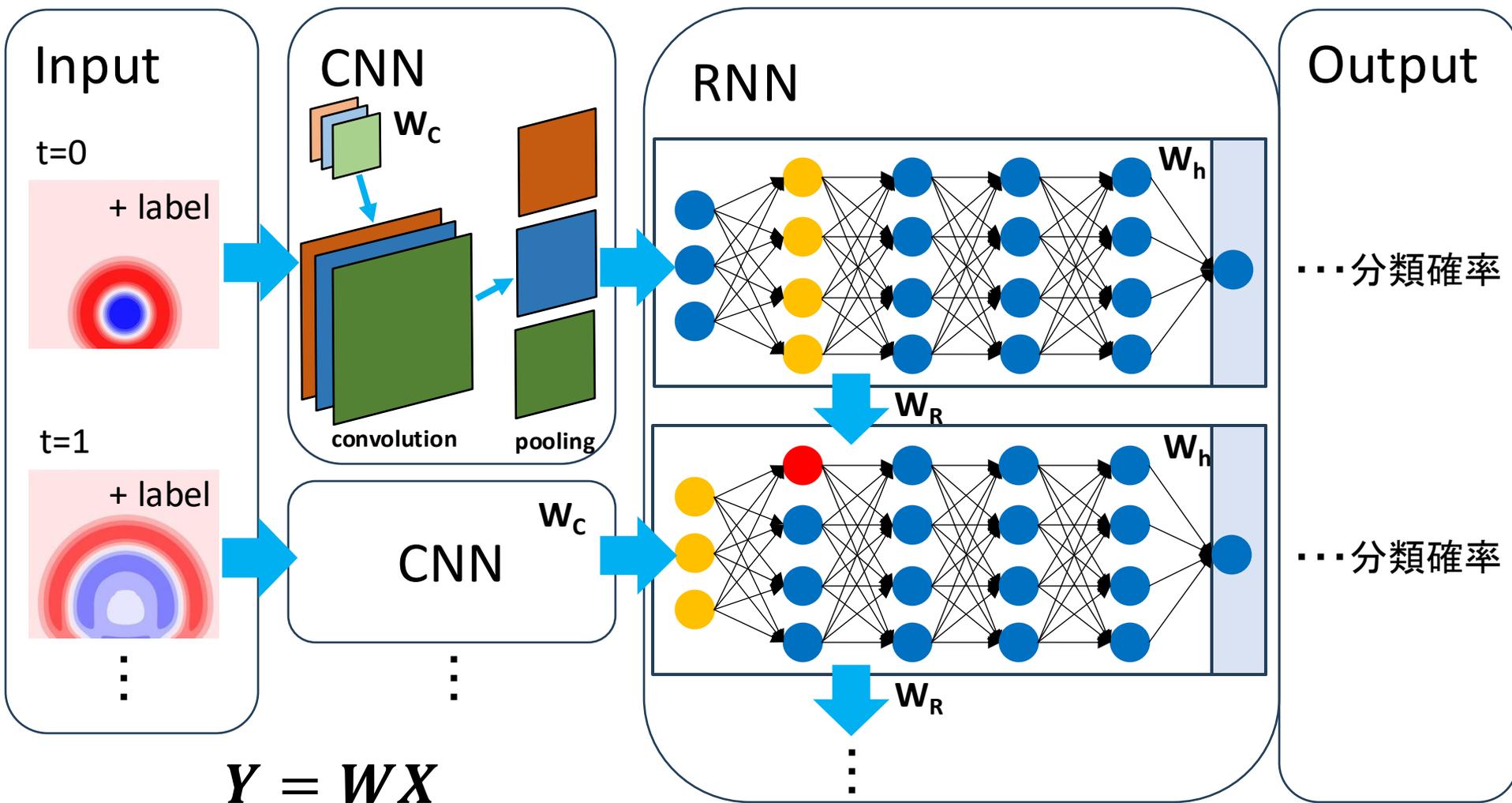


配置: 5種類 ( $y=220\text{km}$ ,  $x=80, 115, 150, 185, 220\text{km}$ )  
波高: 5種類 (3, 4, 5, 6, 7m)  
分布: 3種類 (60, 80, 100km)  
入力: 2種類 (津波+ノイズ, ノイズ)



学習データ→データの傾向を学習  
検証データ→パラメータを最適化  
テストデータ→モデルの評価

# 実験手法 モデル作成 CRNNモデル



$Y$ : 分類確率  $W$ : 重み  $X$ : 入力データ

# 実験概要

## 実験1

- $u$ ,  $v$ 流速を取得し、時間内に津波が通過するシナリオを学習

→1-1 津波通過時刻の検知

→1-2 津波通過観測点の検知

## 実験2

- $u$ ,  $v$ 流速について、時間スライドデータを学習

→2-1 津波通過時刻の検知

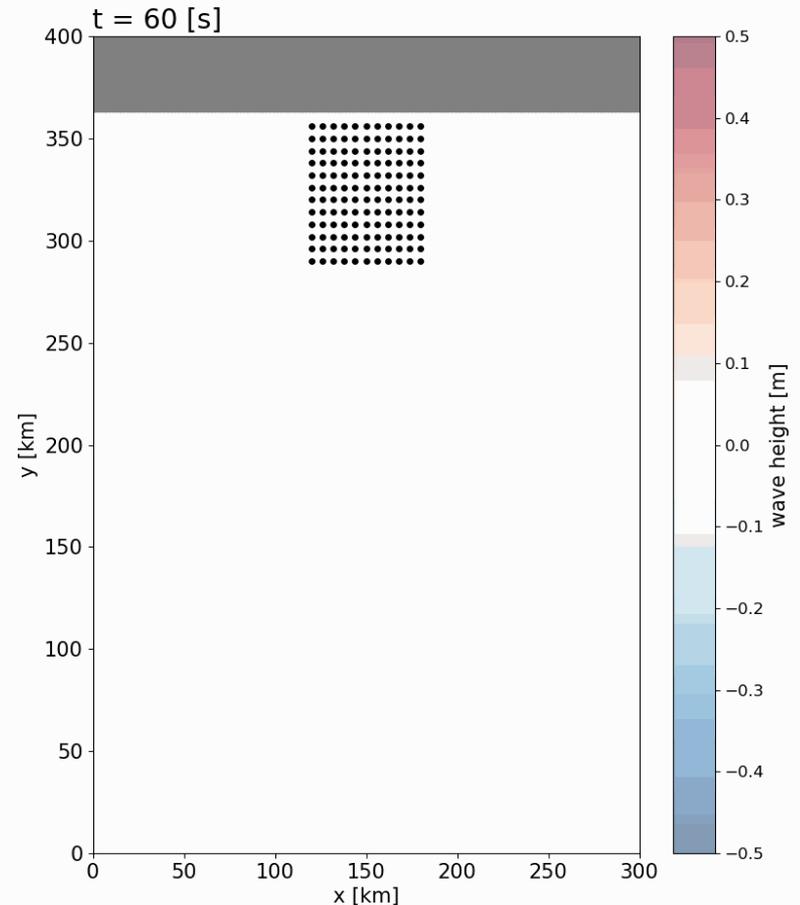
→2-2 津波通過観測点の検知

## 実験3

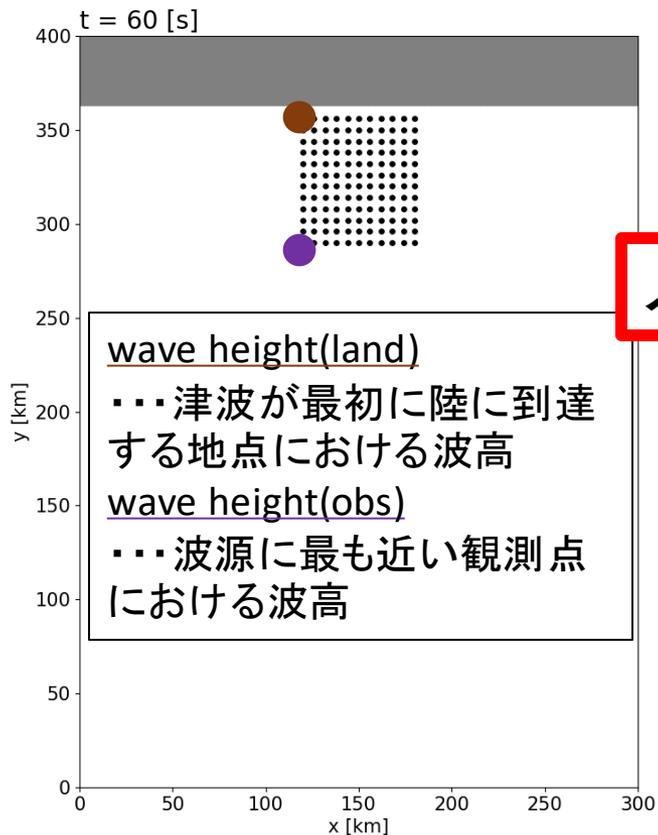
- 視線方向流速の時間スライドデータを学習

→3-1 津波通過時刻の検知

→3-2 津波通過観測点の検知



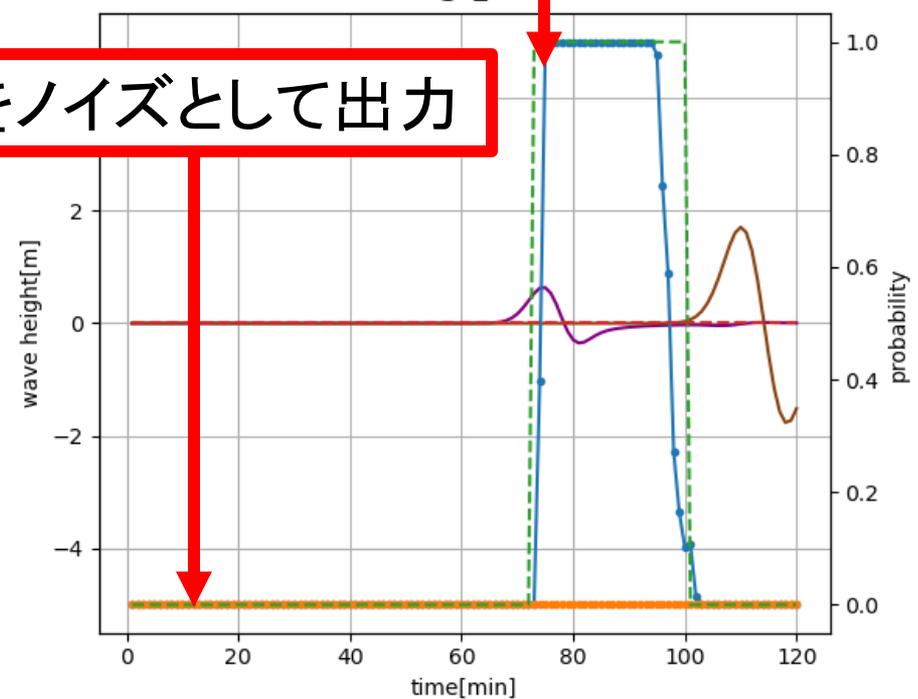
# 1-1 津波通過時刻の検知



観測点到達3分後津波検知

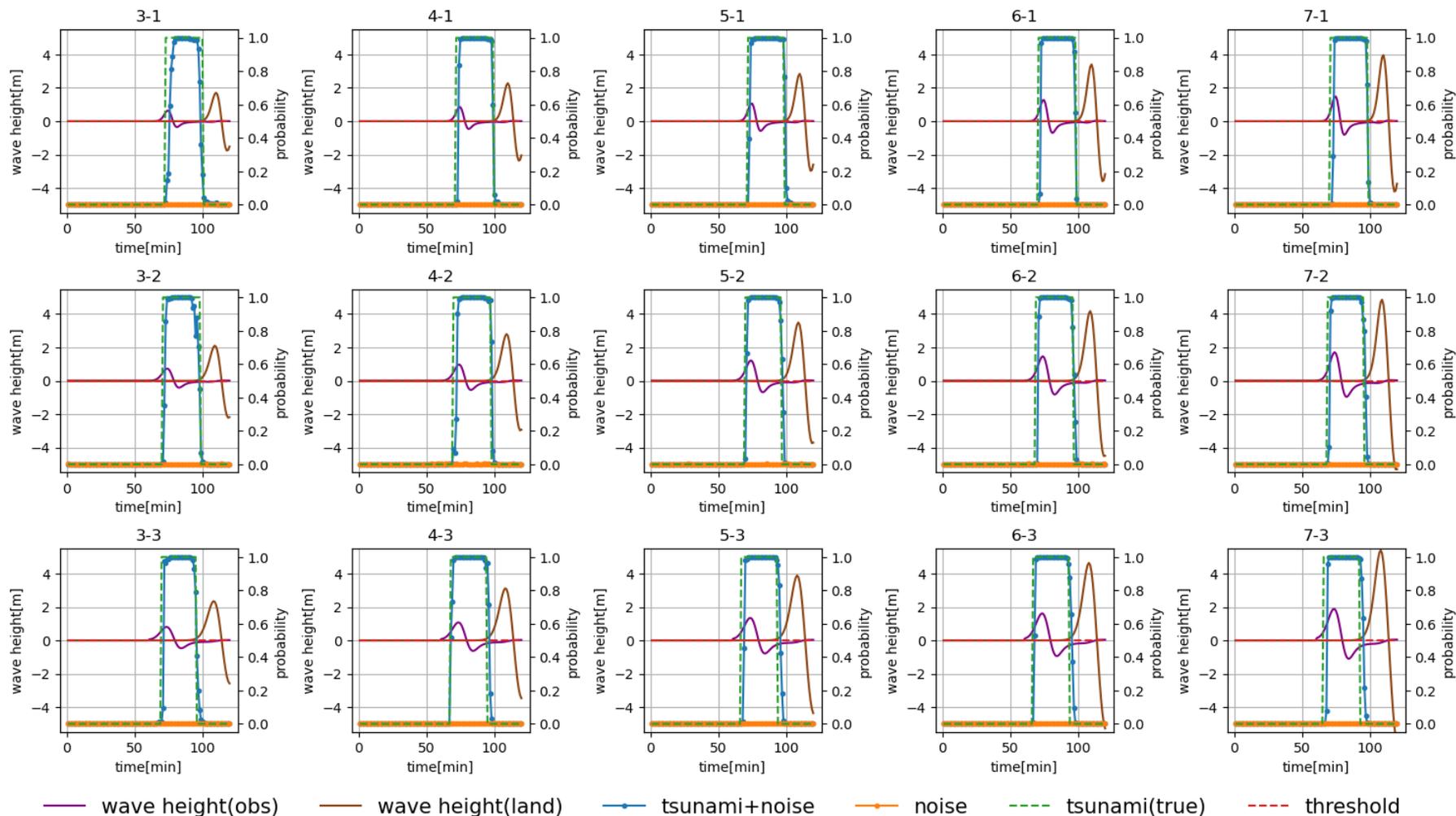
3-1: 3m, 60km波源  
 2-2: 2m, 80km波源  
 ... km波源

ノイズをノイズとして出力



- ・津波ラベル  
観測点波高が初めて0.5m以上となった時刻から、陸側に近い観測点波高が0.5m以上となった時刻までのデータ
- ・非津波ラベル  
それ以外の時刻のデータ、およびノイズデータ

# 1-1 津波通過時刻の検知

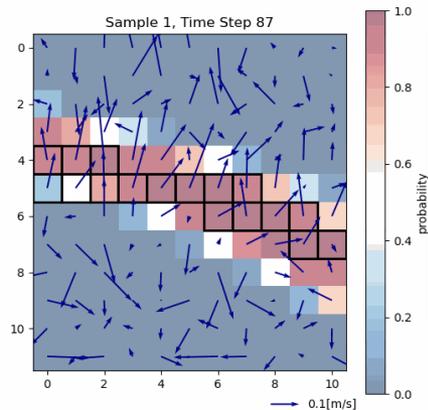


F値: 93.0%

# 1-2 津波通過観測点の検知

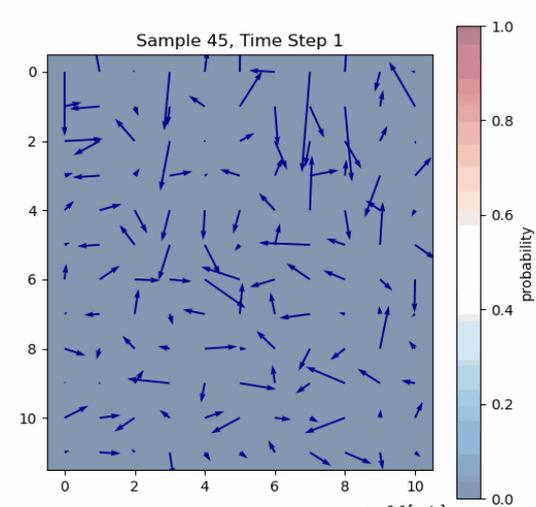
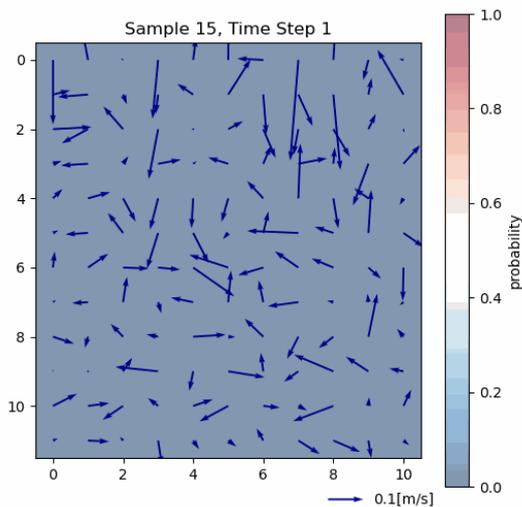
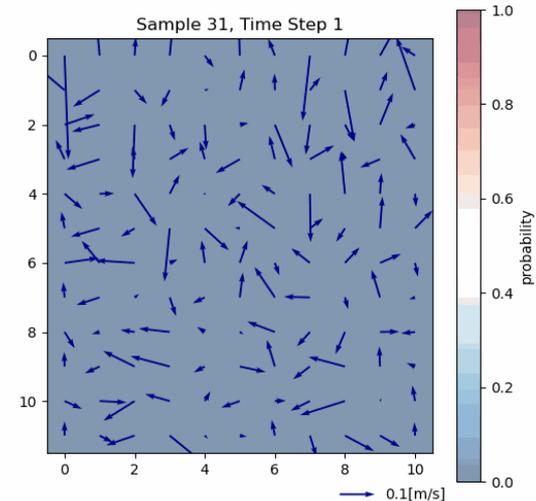
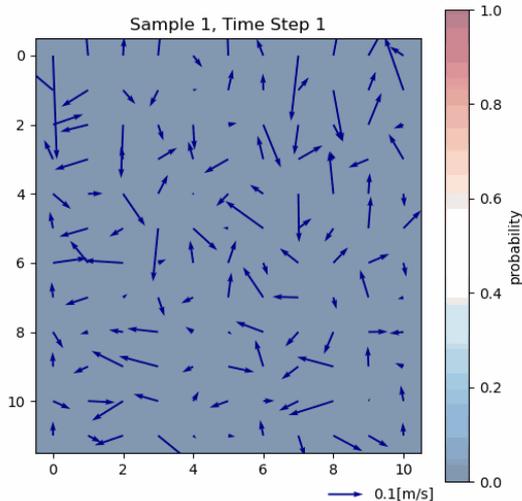
F値 : 86.4%

Sample1 : 3m, 60km津波+ノイズ  
Sample15 : 7m, 100km津波+ノイズ  
Sample31 : 3m, 60kmノイズ  
Sample45 : 7m, 100kmノイズ



黒の四角  
→津波ラベル(真値)

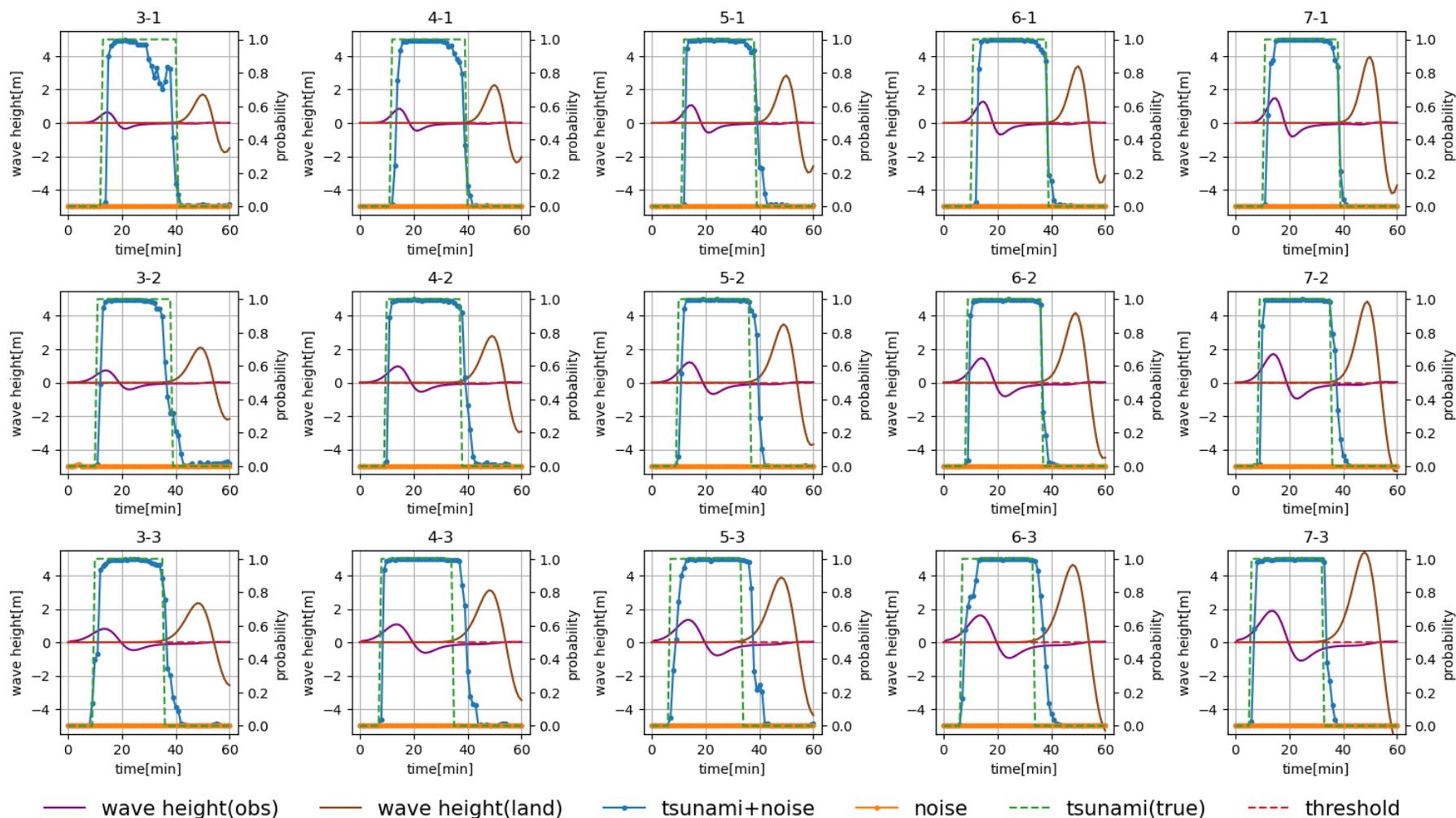
予測確率  
→赤:津波  
→青:非津波



・津波ラベル  
波高が0.5m以上となった観測点のデータ

・非津波ラベル  
それ以外の観測点データ、およびノイズデータ

# 2-1 津波通過時刻検知(リアルタイム)

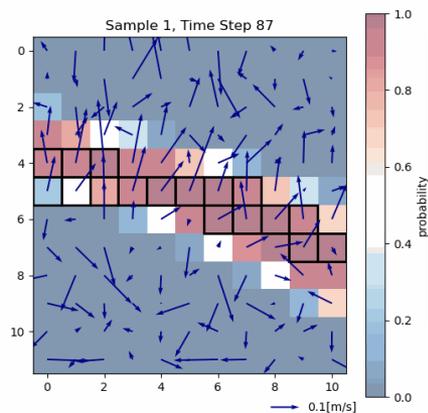


F値: 91.8%

## 2-2 津波通過観測点検知(リアルタイム)

F値: 82.5%

Sample1 : 3m, 60km津波+ノイズ  
Sample15 : 7m, 100km津波+ノイズ  
Sample31 : 3m, 60kmノイズ  
Sample45 : 7m, 100kmノイズ

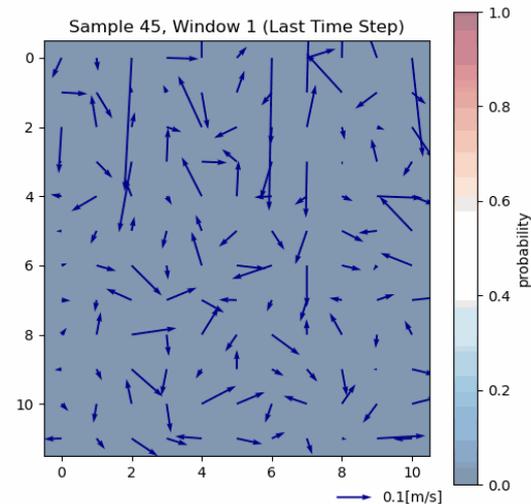
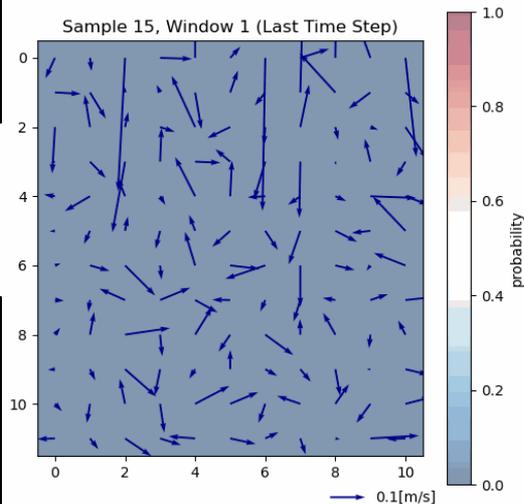
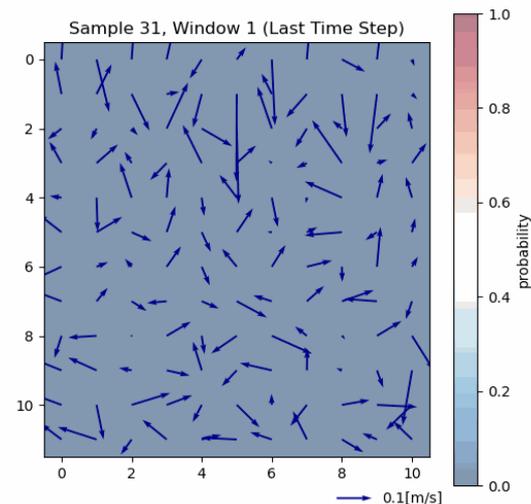
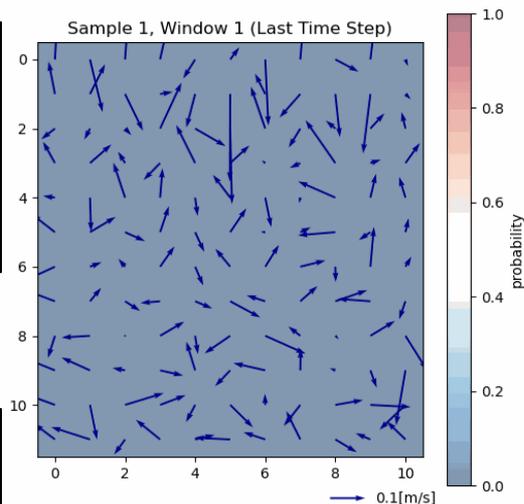


黒の四角  
→津波ラベル(真値)

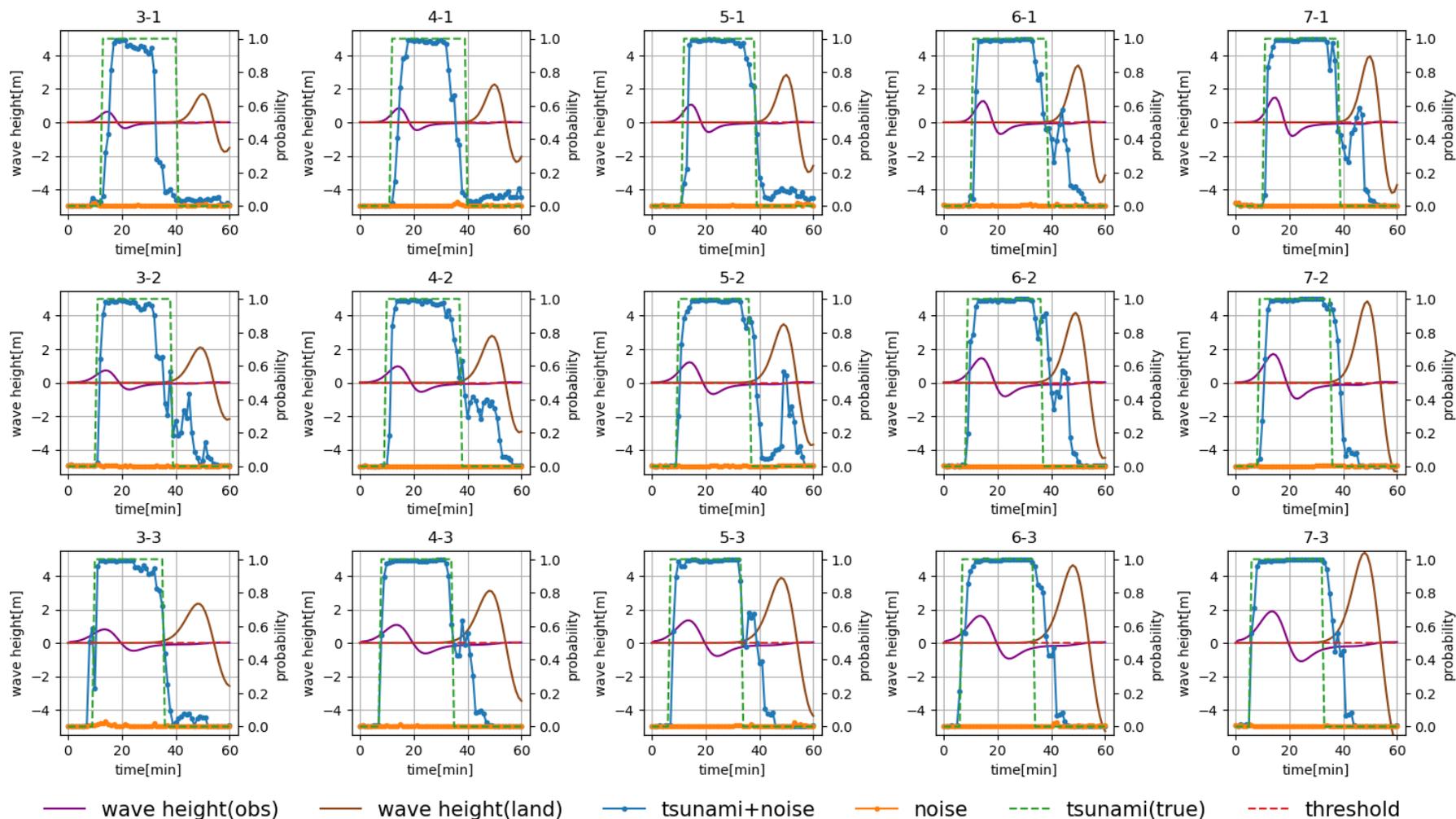
予測確率  
→赤: 津波  
→青: 非津波

・津波ラベル  
波高が0.5m以上となった観測点のデータ

・非津波ラベル  
それ以外の観測点データ、およびノイズデータ



# 3-1 津波通過時刻検知(リアルタイム)

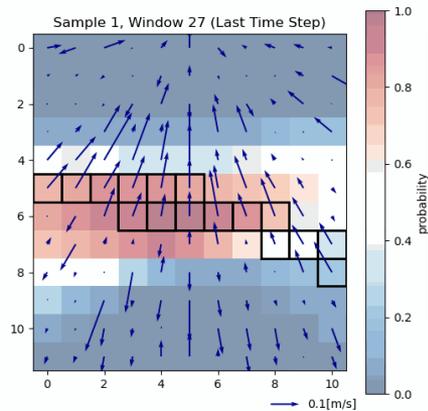


F値: 87.9%

# 3-2 津波通過観測点検知(リアルタイム)

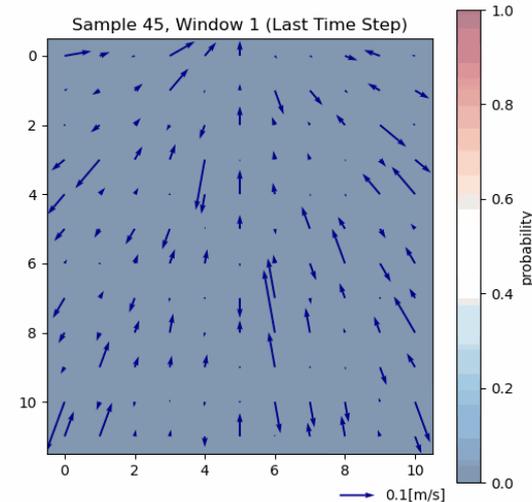
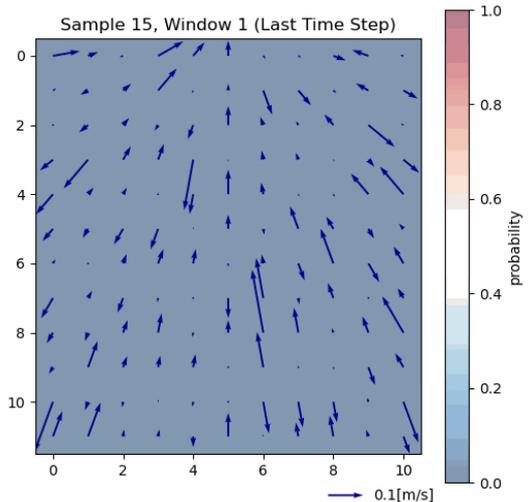
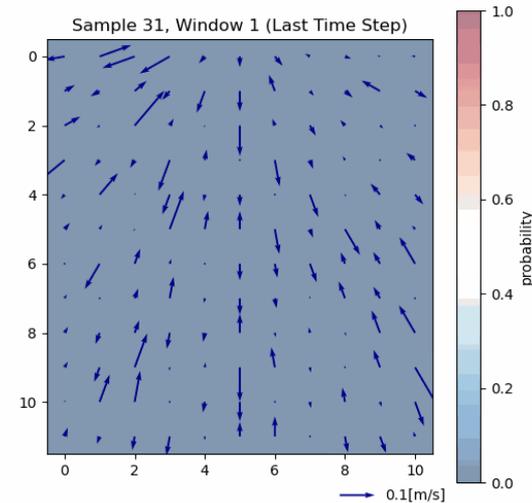
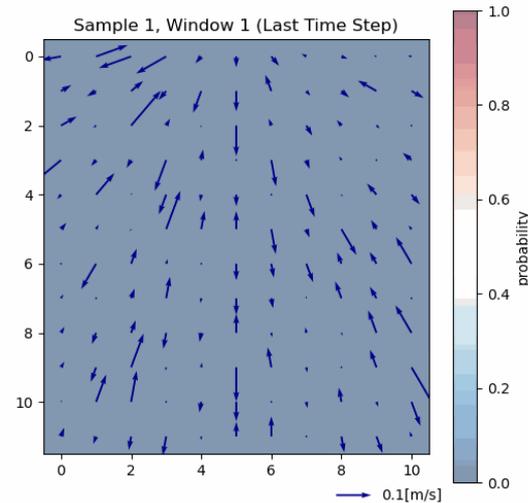
F値: 76.4%

Sample1 : 3m, 60km津波+ノイズ  
Sample15 : 7m, 100km津波+ノイズ  
Sample31 : 3m, 60kmノイズ  
Sample45 : 7m, 100kmノイズ



黒の四角  
→津波ラベル(真値)

予測確率  
→赤: 津波  
→青: 非津波



・津波ラベル  
波高が0.5m以上となった観測点のデータ

・非津波ラベル  
それ以外の観測点データ、およびノイズデータ

# まとめと今後の課題

## まとめ

- 実験2より、2局のレーダによって観測される流速を機械学習モデルに適用することで、リアルタイムに津波を検知できる可能性がある
- 実験3より、1局のレーダによって観測される視線方向流速を機械学習モデルに適用すると、時刻検知・観測点検知ともに2局流速使用時よりも検知性能が下がった
- 津波検知後の分類確率が不安定

## 今後の課題

- ノイズや観測点数を変更し、検知性能を検証する
- ラベル作成時に津波到達前後を同じ状態として定義しているため、分類ラベルを増やす
- 仮想津波観測実験データにモデルを適用する