

仮想津波観測実験に基づく海洋レーダによる リアルタイム津波検知手法の検討

○尾方 浩平¹, 門廻 充侍², 藤 良太郎^{1,3},
高橋 智幸⁴, 日向 博文¹

1 愛媛大学大学院 理工学研究科

2 東北大学 災害科学国際研究所

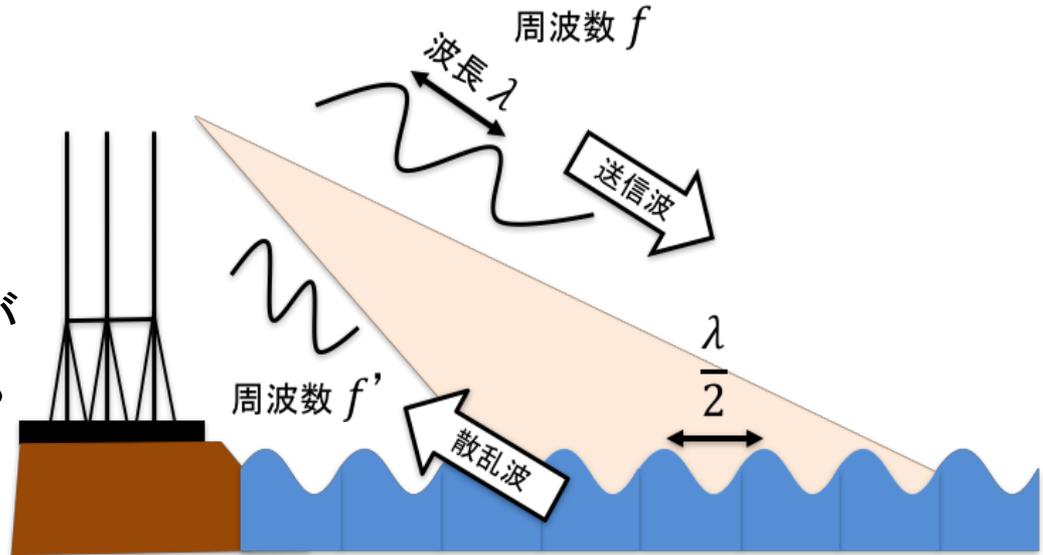
3 国際航業株式会社 環境保全部

4 関西大学 社会安全学部社会安全学科

[海洋レーダとは？]

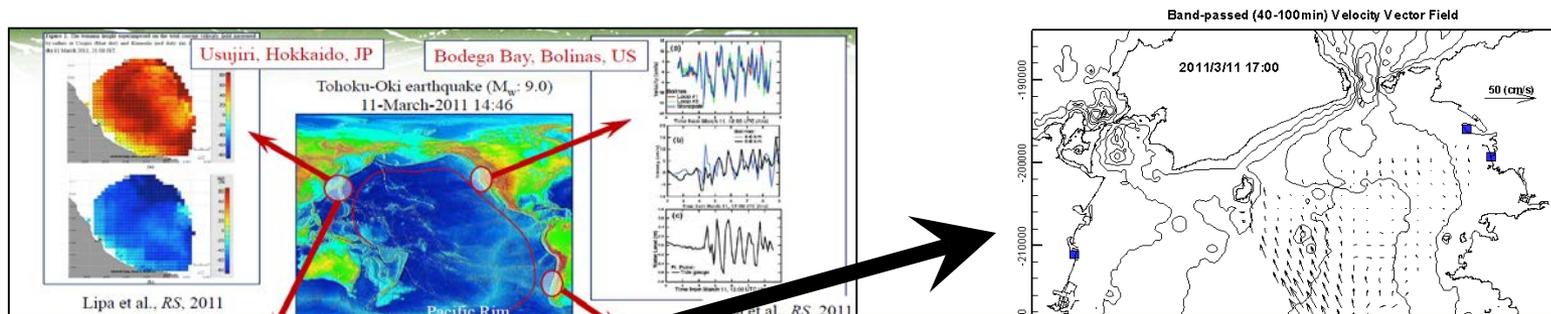
海の流れや波高を遠隔観測する
リモートセンシング機器

一方で、多くの研究者によって
海洋レーダの津波検知への応用が
数値的、理論的に議論されてきた。
(例えば Barrick, 1979)



[東日本大震災による津波]

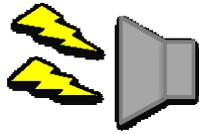
→日本、米国、ドイツ・チリの研究者が**津波流速変動を捉えることに初めて成功**
(Hinata et al, 2011, Lipa et al, 2011, Dzvonkovskaya et al, 2011)



海洋レーダを改良し、津波検知を可能とする
津波レーダの開発が行われている。

津波警報システム

第1報発令: 3分

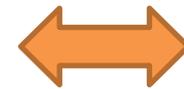


津波警報発令

津波警報の信頼性は地震波解析の精度に依存

M_w 8.0 を超える地震に対して過小評価する (門廻・高橋, 2015)

即時性



正確性

“津波検知”と“津波規模の実計測”
が重要！

[海洋レーダによる津波観測]

- Fuji and Hinata (2017)
 - レーダの観測した沖合の流速を用いて沿岸水位を計算し、津波警報への有効性を示した。

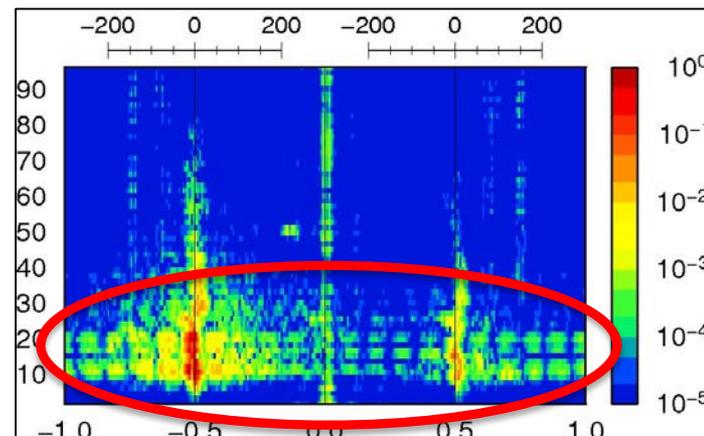
[リアルタイム津波検知手法]

- Lipa et al. (2012), Grilli et al. (2015), Guérin et al. (2018)

本研究の目的

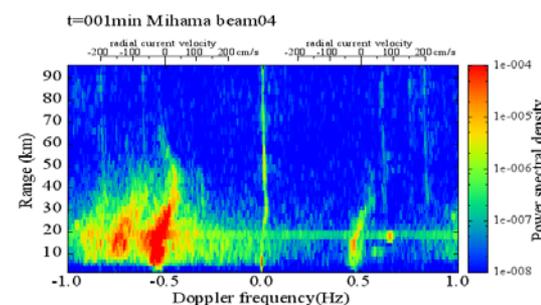
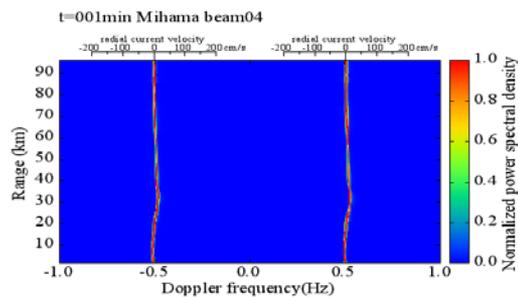
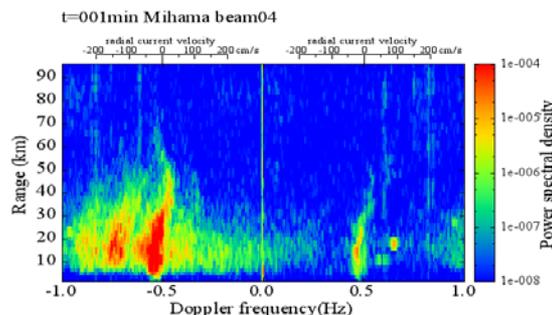
- ・ **背景ノイズ**による観測精度への影響が問題
 - 様々なノイズ状況下での性能検証が必要
 - 観測精度を統計的に評価

- ・ 観測された津波は2つのみ(気象津波は除く)



Fuji and Hinata (2017)

[仮想津波観測実験] (Gurgel et al., 2011)



海洋レーダによる観測受信信号

数値シミュレーションによる

仮想津波の観測データ

リアルタイム津波検知手法を統計的に評価

- 海洋短波レーダ観測
 - NJRC(長野)
 - 中心周波数
 - ビーム本数
 - 周波数掃引
 - 距離分解能
 - 観測期間

• 数値モデル

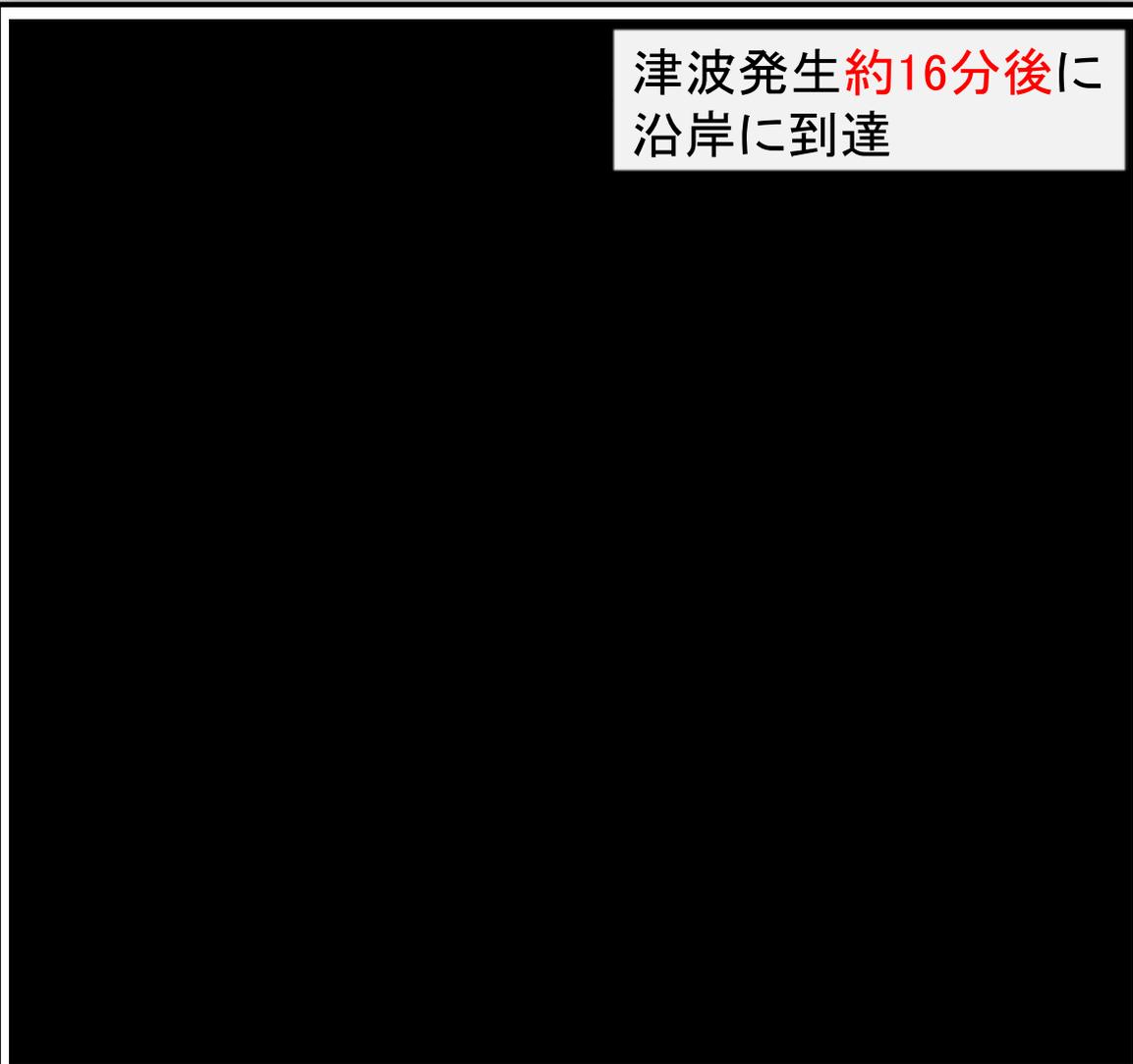
非線形長波方程式

$$\frac{dM}{dt} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{h} \right) + \dots$$

$$\frac{dN}{dt} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{h} \right) + \dots$$

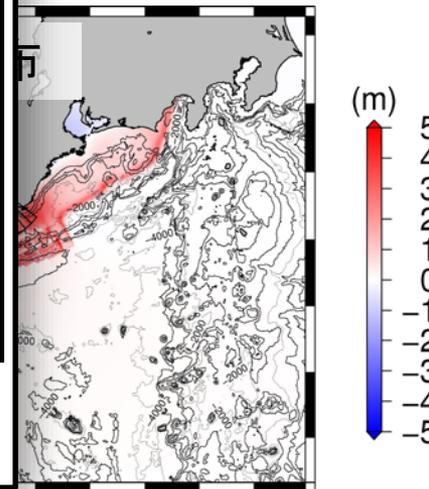
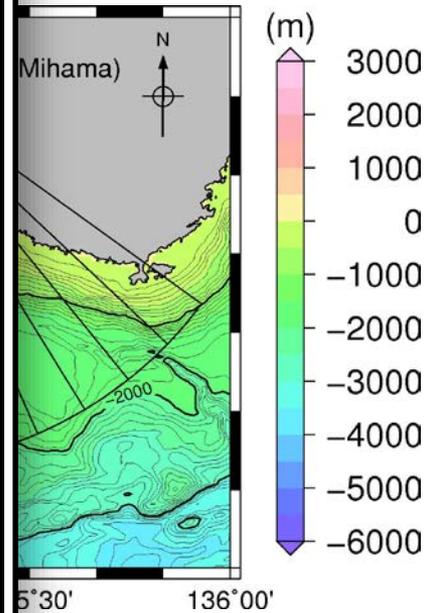
連続式

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



津波先端部(●) $\Delta\eta > 0.0001$
 $\Delta\eta$: 数値計算による津波の水位勾配

D: 全水深, マニングの粗度係数 (n): 0.025



津波流速成分抽出方法

ノイズ成分

$$v_{vt}(b, m, t)$$

t=001min Mihama beam04

radial current velocity

radial current velocity

STEP①: 4大分潮(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)の調和定数を計算し、**潮流成分を予測**

STEP②: $v_{vt}(b, m, t)$ から潮流成分を取り除き、 $v_{res}(b, m, t)$ を計算

Detided velocity

予測した潮流成分

$$\begin{aligned} V(b, m, t) &= v_{vt}(b, m, t) - v_{tid}(b, m, t) \\ &= v_{res}(b, m, t) + v_{tsu}(b, m, t) + v_{err}(b, m, t) \end{aligned}$$

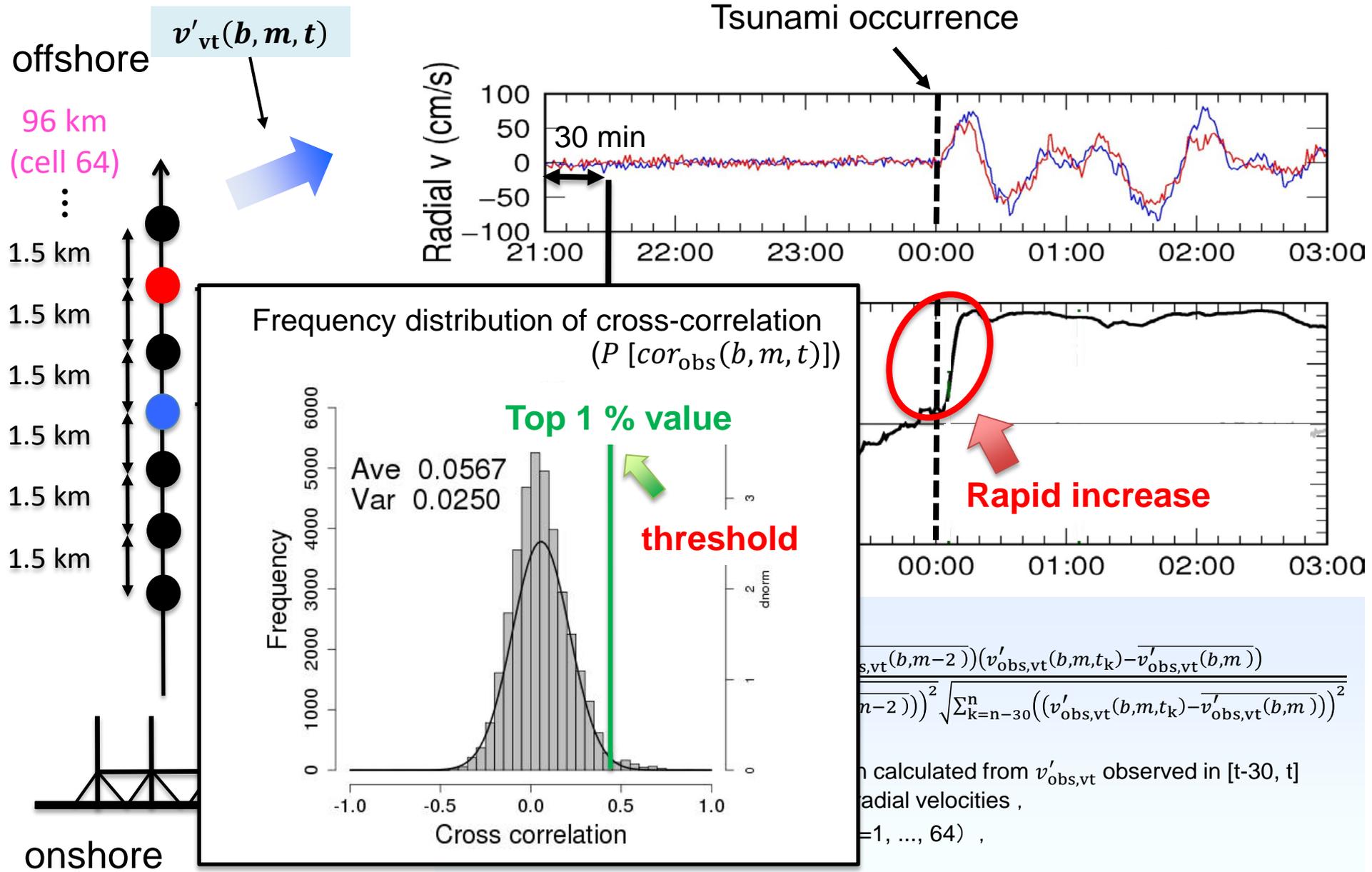
$v_{res}(b, m, t_0)$ は $v_{tsu}(b, m, t)$ よりも**周期が大きい**

$$\rightarrow v_{res}(b, m, t_0) \approx \bar{V}_0 = \frac{\sum_{t_0-60}^{t_0} V(b, m, t)}{60} \quad t_0 : \text{津波発生時刻}$$

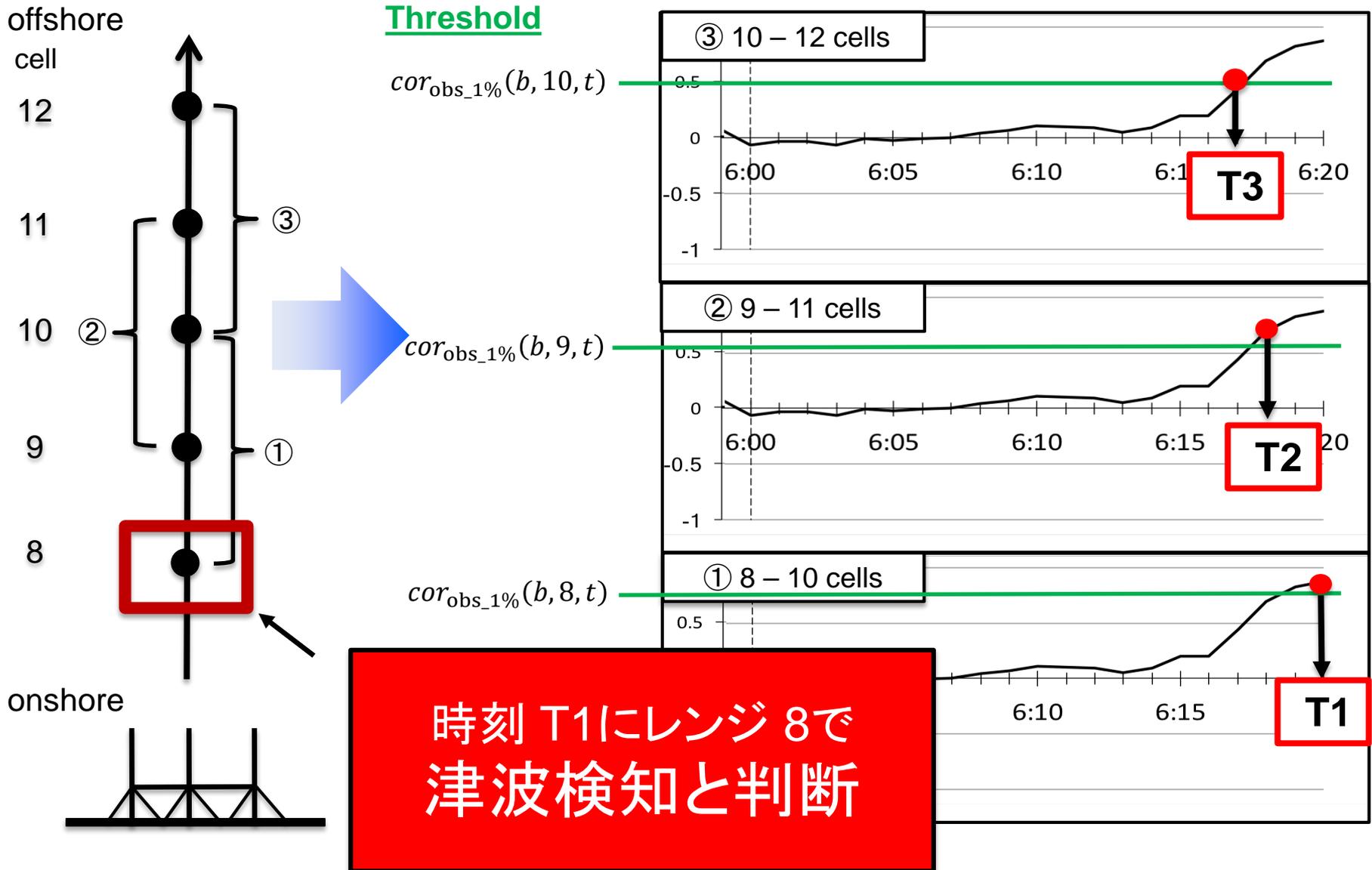
STEP③: \bar{V}_0 を用いて**津波流速成分を抽出**する

$$v'_{vt}(b, m, t) = V(b, m, t) - \bar{V}_0 \approx v_{tsu}(b, m, t) + v_{err}(b, m, t)$$

リアルタイム津波検知手法



津波検知判定方法



抽出した津波流速成分の比較

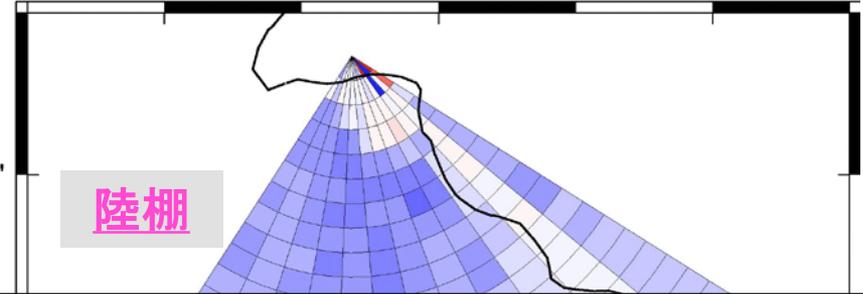
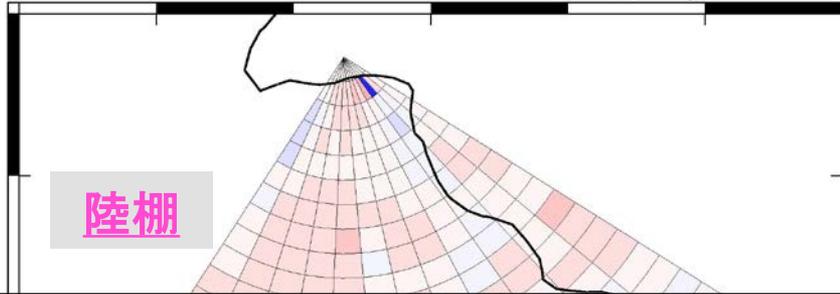
津波発生時刻：2014年2月1日6:00

Present method

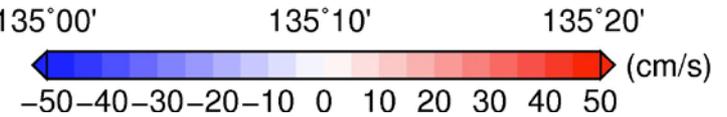
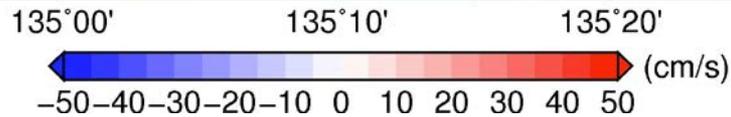
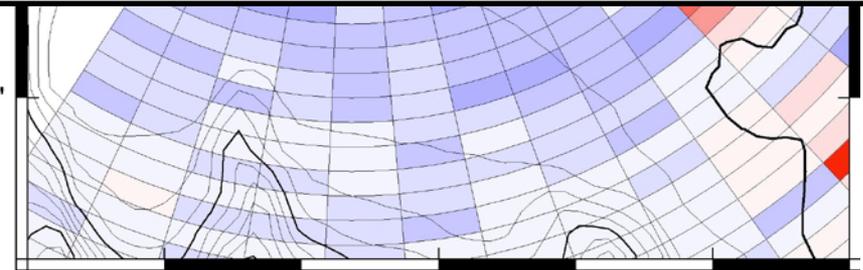
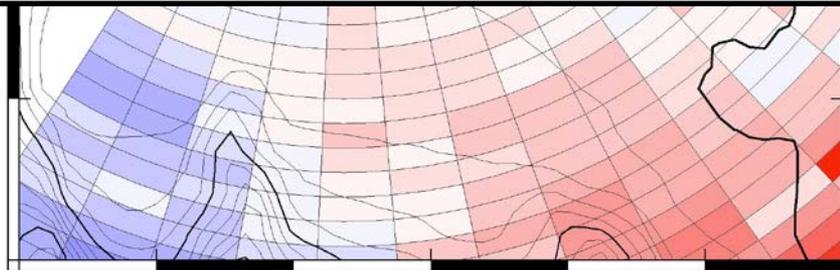
FH method

0 (min) [elapsed time]

0 (min) [elapsed time]



本手法 → 津波流速の過小評価が抑制されている



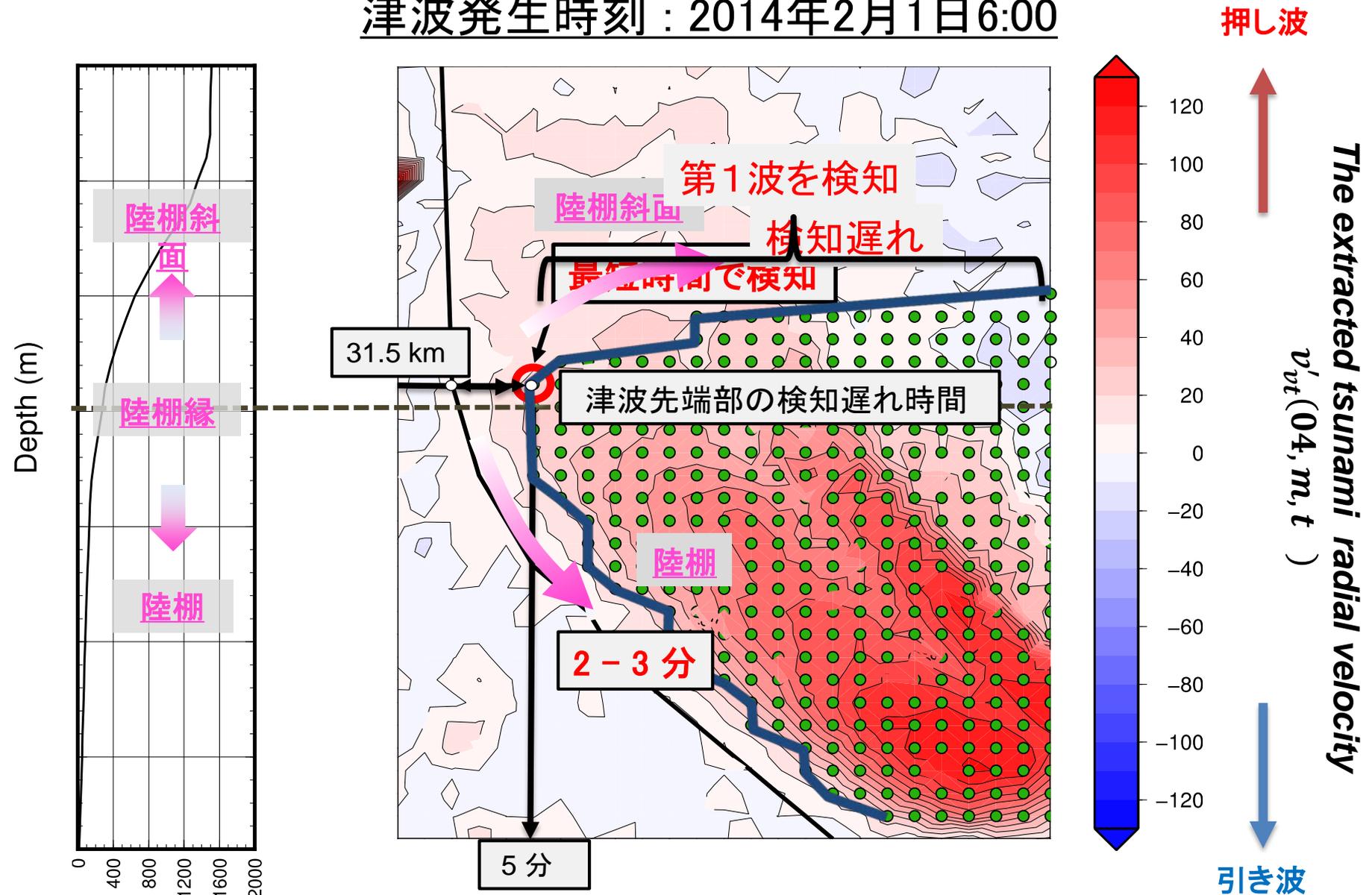
$v'_{vt}(b, m, t) - v_{tsu}(b, m, t)$

過小評価

過大評価

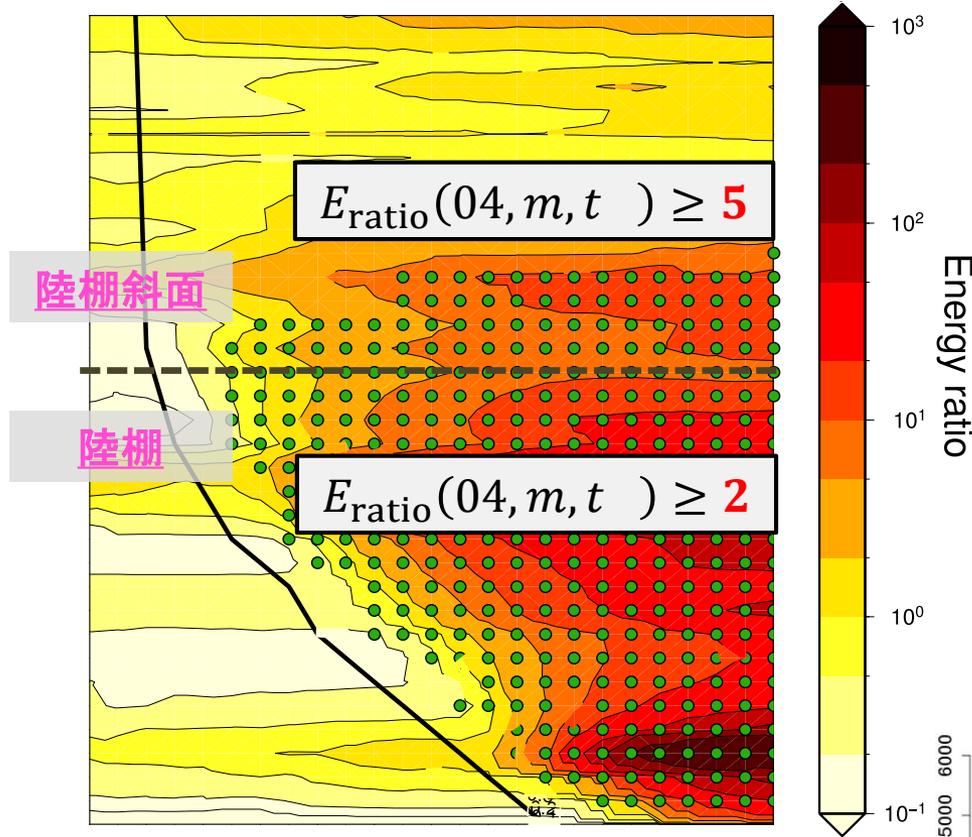
リアルタイム津波検知結果(04ビーム)

津波発生時刻：2014年2月1日6:00



相互相関係数と運動エネルギー比の関係

津波発生時刻：2014年2月1日6:00



相互相関係数と運動エネルギー比の関係性

(Fuji and Hinata, 2017)

Cross-correlation

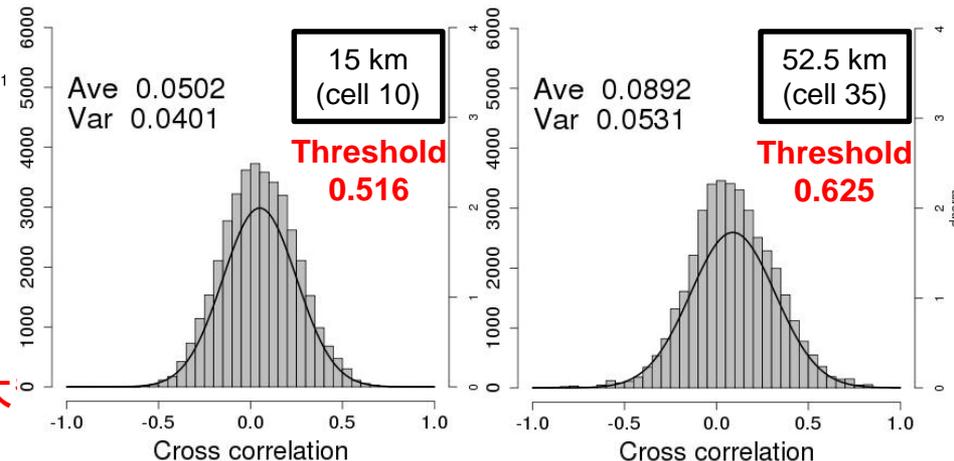
$$\begin{aligned} cor_{vt}(b, m, t_n) &\approx \frac{\sum_{k=n-30}^n v_{tsu}^2(b, m, t_k)}{\sum_{k=n-30}^n (v_{obs}^2(b, m, t_k) + v_{tsu}^2(b, m, t_k))} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{E_{ratio}(b, m, t_k)} + 1} \end{aligned}$$



Kinetic energy ratio **津波の運動エネルギー**

$$E_{ratio}(b, m, t_n) = \frac{\sum_{k=n-30}^n v_{tsu}^2(b, m, t_k)}{\sum_{k=n-30}^n v_{obs}^2(b, m, t_k)}$$

背景流の運動エネルギー



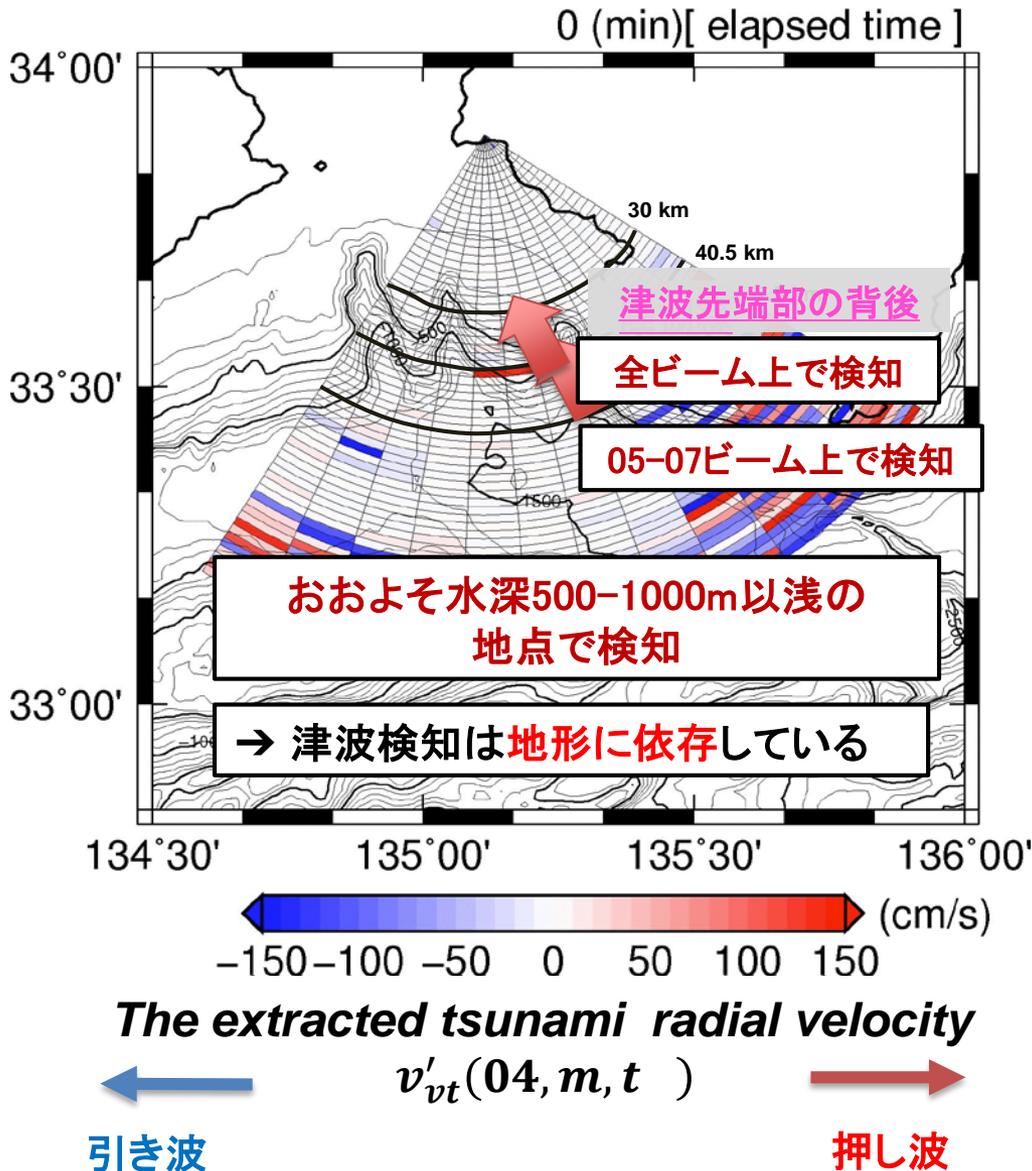
--- 陸棚縁

陸棚斜面上での検知遅れ

- ① 背景流に比べて津波流速が**相対的に小さい**
- ② 遠い地点では相関係数の頻度分布の**分散が大**

リアルタイム津波検知結果(面的検知)

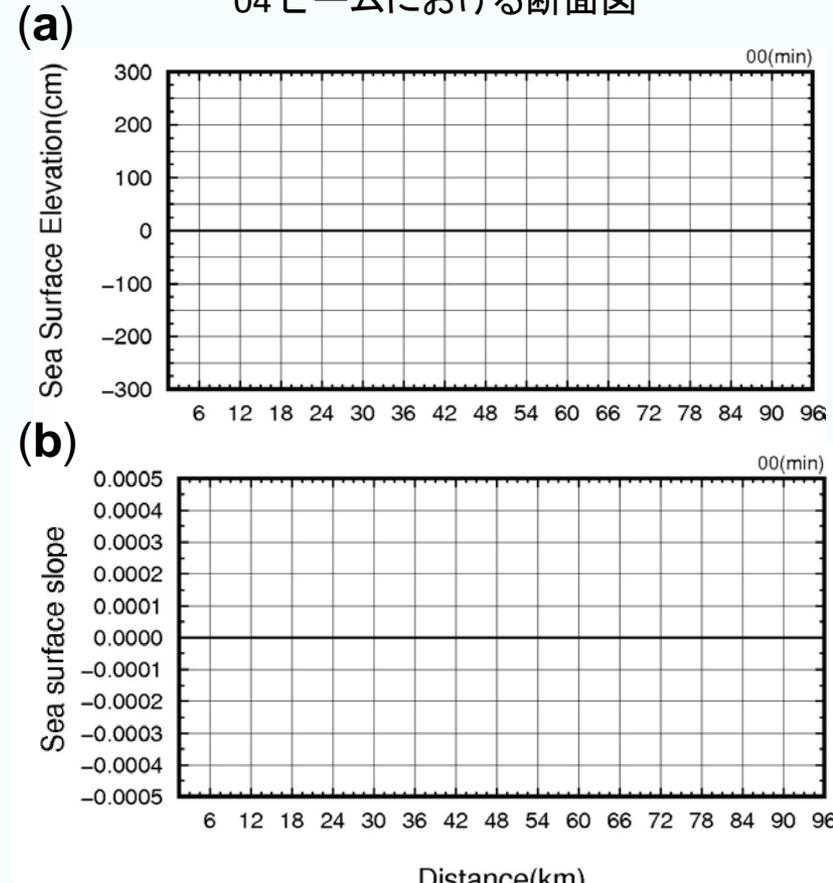
津波発生時刻：2014年2月1日6:00



wave-front (—) $\Delta\eta / \Delta l > 0.0001$

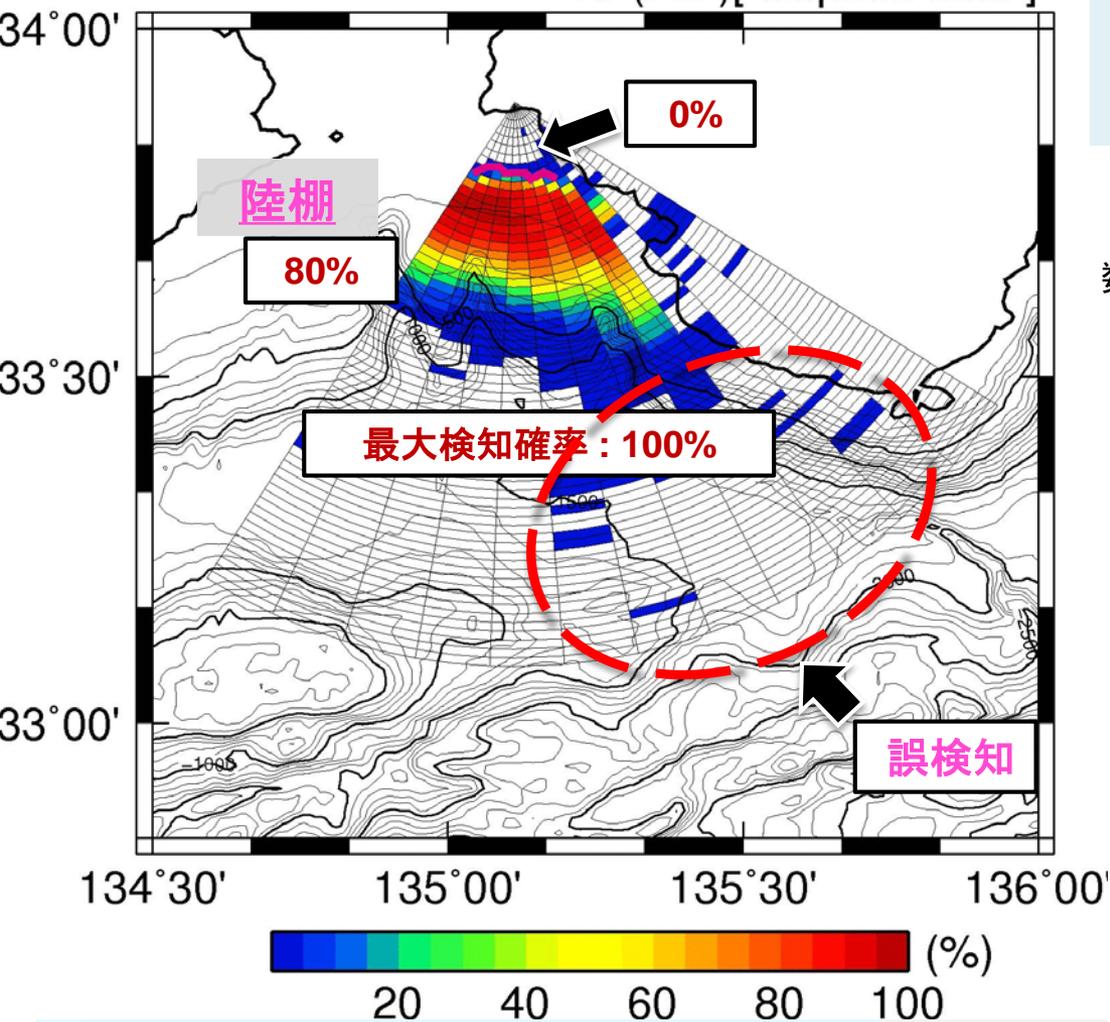
$\Delta\eta / \Delta l$: 数値計算による津波の水位勾配

数値計算による津波の(a)水位 η と(b)水位勾配 $\Delta\eta$ の04ビームにおける断面図



リアルタイム津波検知確率

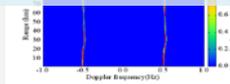
Detection probability
10 (min)[elapsed time]



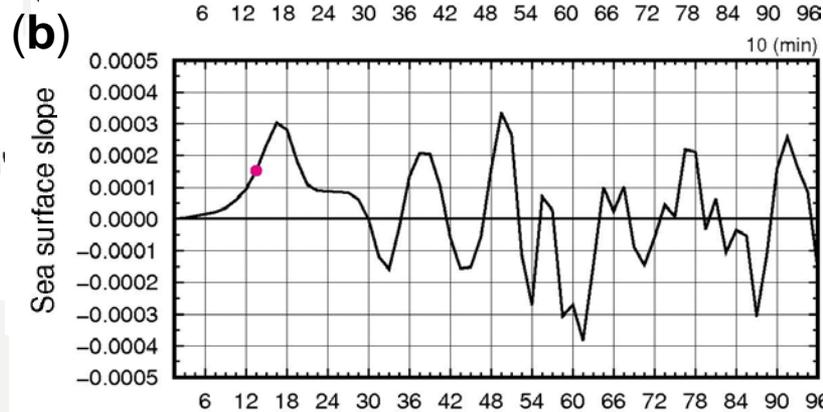
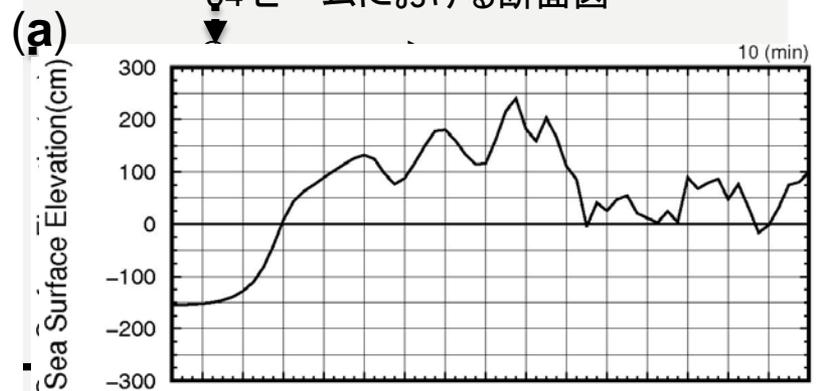
各ビームの各レンジにおいて津波検知確率を評価

津波を検知したシナリオ数

590 シナリオ



数値計算による津波の(a)水位 η と(b)水位勾配 $\Delta\eta$ の
04 ビームにおける断面図



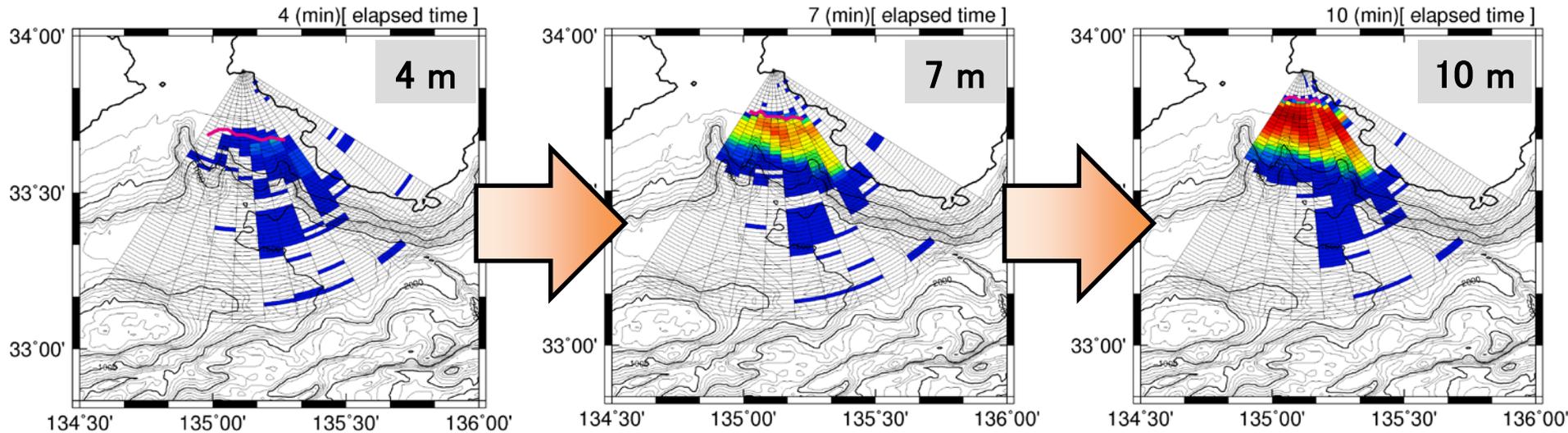
wave-front (—) $\Delta\eta / \Delta l > 0.0001$

$\Delta\eta / \Delta l$: 数値計算による津波の水位勾配

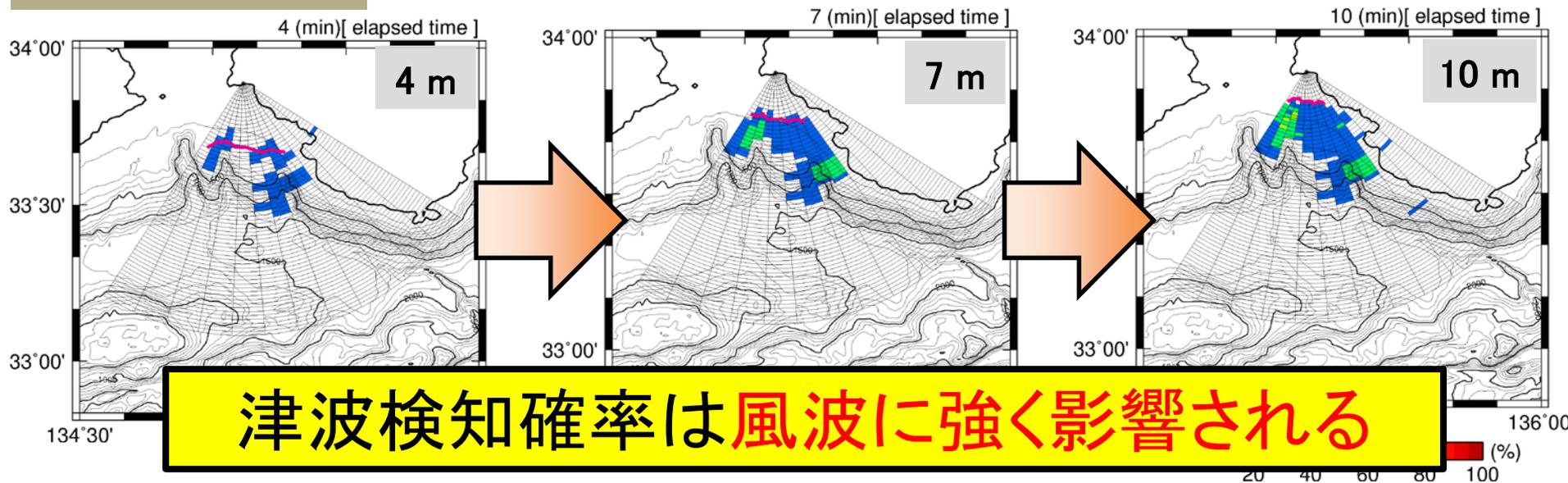
Distance(km)

風波による津波検知確率への影響

有義波高 $H_s \leq 1 \text{ m}$



$4 \text{ m} < \text{有義波高 } H_s$



津波検知確率は風波に強く影響される

(%)

仮想津波観測実験に基づいてリアルタイム津波検知手法を
統計的に評価した

→ 津波検知確率

津波発生4分後 : 最大検知確率 15%

津波発生7分後 : 最大検知確率 80%

津波発生10分後 : 最大検知確率 100%

→ 津波検知確率は風波に強く影響される

今後の展開

- 季節変化による観測精度への影響