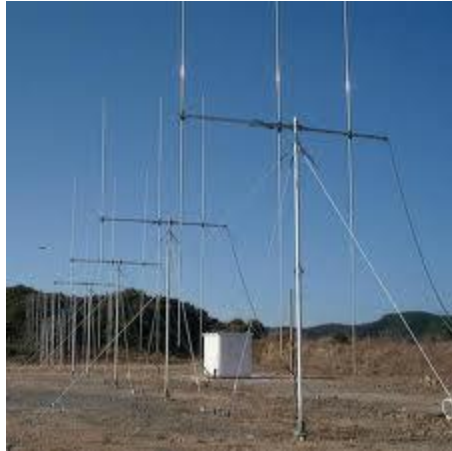




海洋レーダを利用した 津波波源逆推定に対する 影響要因の検討

○藤 良太郎¹⁾, 日向 博文¹⁾, 藤井 智史²⁾, 高橋 智幸³⁾

1) 国土技術政策総合研究所 沿岸域システム研究室

2) 琉球大学 工学部 電気電子工学科

3) 関西大学 社会安全学部 安全マネジメント学科

研究背景

[東日本大震災での問題]



救援活動の遅れ

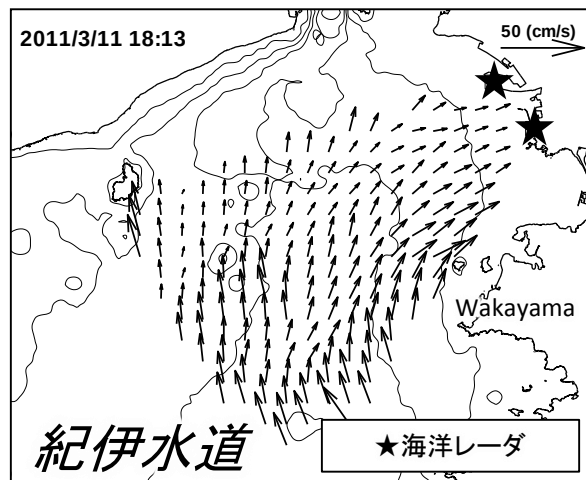
- 行政機関の深刻な被害
- 被災情報の収集に支障

→ 激甚被災箇所の把握遅れ

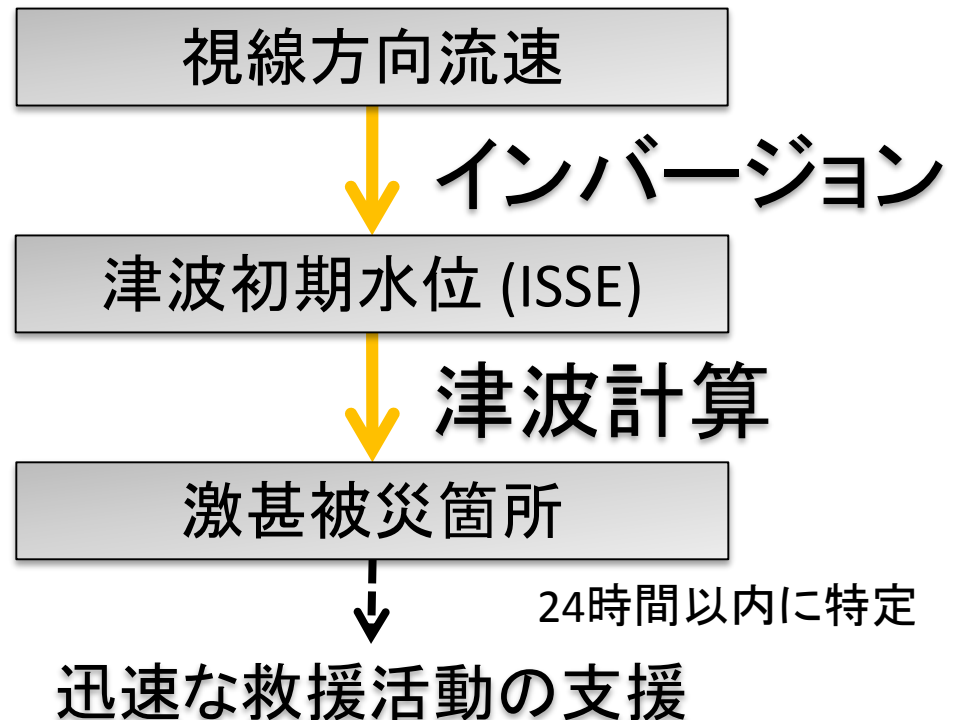
[研究の概要]

海洋レーダの特徴

- ・ 広域に面的計測, 大量データ



(Hinata et al., JSCE, 2012)



1. 目的

2. インバージョン手順

3. 推定精度への影響

- 観測時間(流速計算の積分時間)
- 設置位置(波源との位置関係)

4. LSM推定精度の向上方法

- 東北地方太平洋沖地震での数値実験

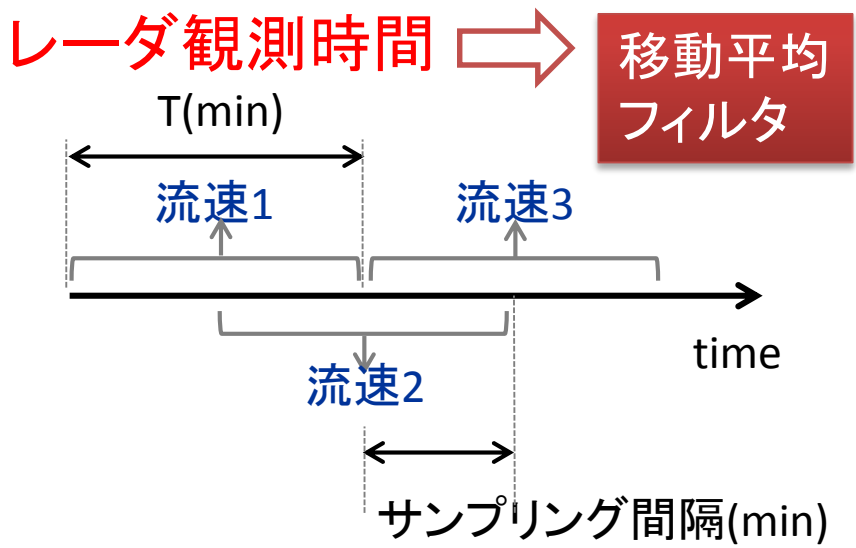
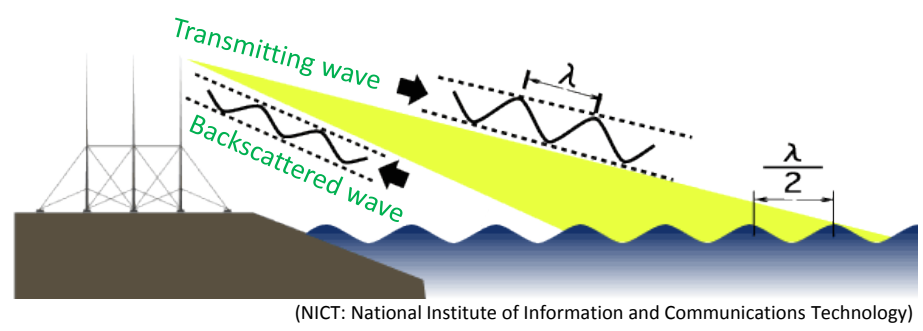
5. まとめ

目的

- ①流速計算のための観測時間
- ②配置（波源との位置関係）
- ③推定精度の向上

➡ 波源推定精度へ影響

南海トラフでの実用化に向けての基礎検討

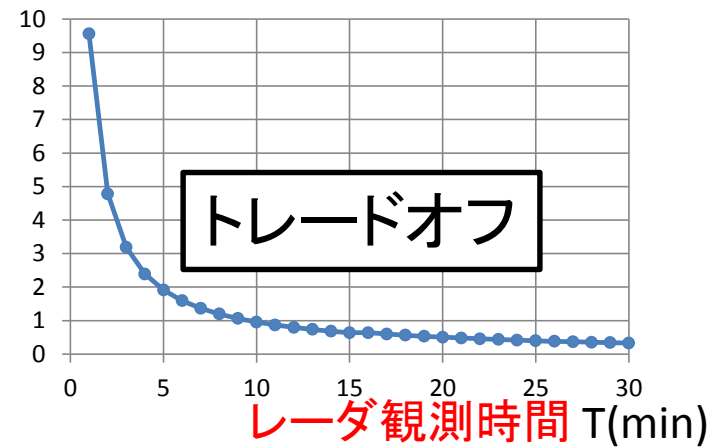


流速分解能

Δv (cm/sec)

$$\Delta v = \frac{c}{2f} \frac{1}{T}$$

f : frequency
(24.515 MHz)
 c : radio wave velocity
 T : integration time



インバージョン手順

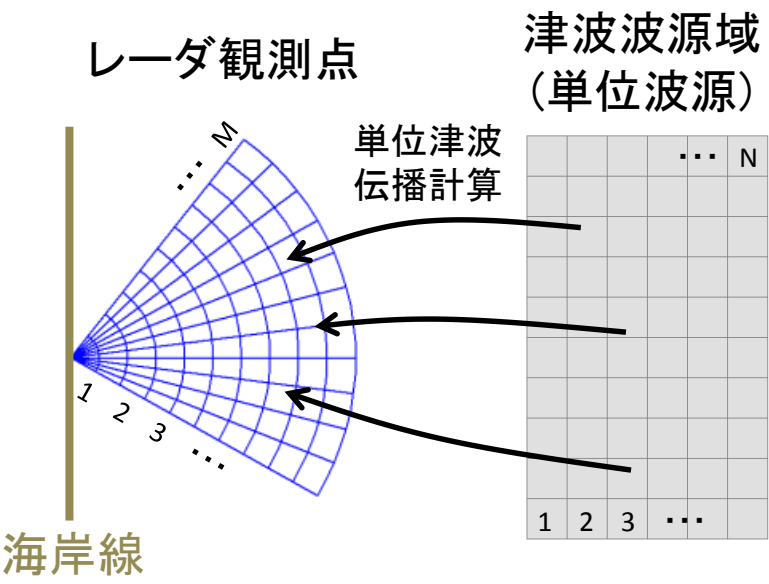
津波伝播 → 線形長波方程式

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} &= 0\end{aligned}$$

津波初期水位の推定 → 最小二乗法 (LSM)

$$E = \|v - Va\|^2 \rightarrow \frac{\partial E}{\partial a} = 0$$
$$v = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_T \end{pmatrix}, \quad a = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} \tilde{v}_{1,1} & \cdots & \tilde{v}_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{v}_{T,1} & \cdots & \tilde{v}_{T,N} \end{pmatrix}$$

v : 観測流速ベクトル
 a : 推定する津波初期水位
 V : 単位津波による流速マトリクス
(添え字) T : サンプル時間, N : 単位波源数

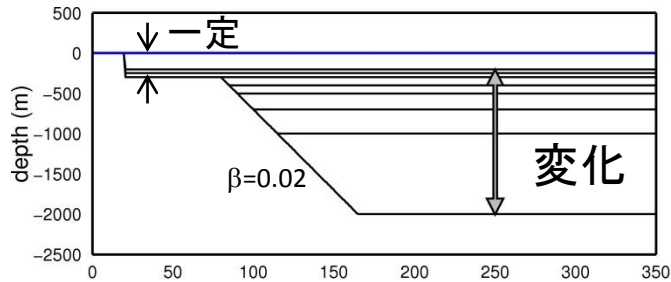


LSM数値解法

非定常反復解法 (Bi-CGSTAB法)

①観測時間の影響

実験条件



想定津波: 卓越周期8ケース

[レーダ諸元]

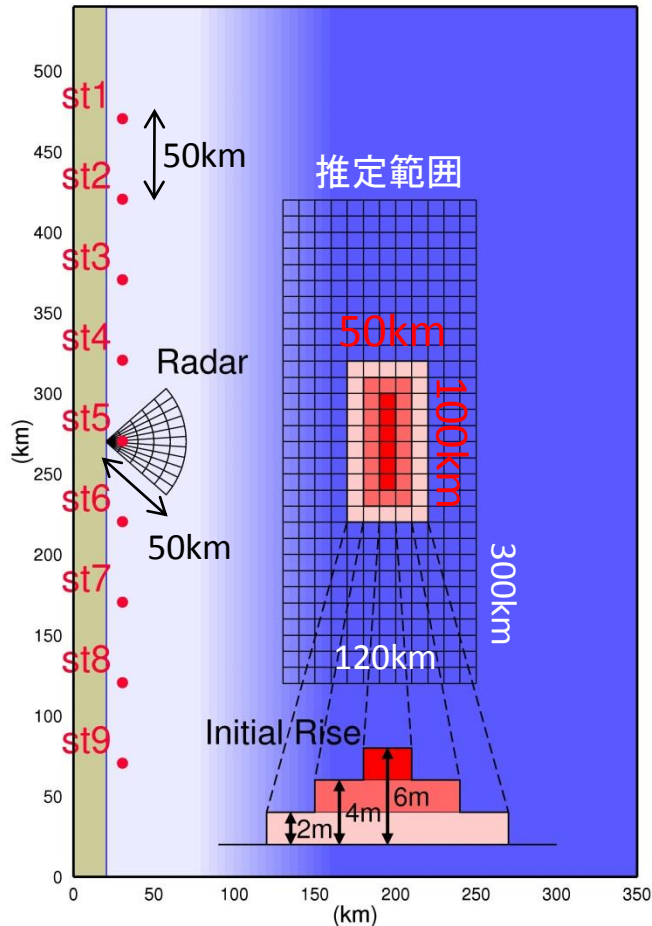
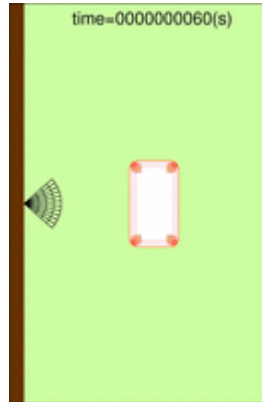
- 観測範囲: 50km, 90deg.
- 空間分解能: 1.5 km, 7.5deg.

[津波計算]

- 空間格子サイズ: 1 km
- 時間ステップ: 2 sec
- 初期水位: 50km × 100km
階段形状
破壊伝播: 非考慮

[インバージョン]

- 単位波源サイズ: 10 km
- 観測点: 256 (レーダ観測範囲内)
- サンプリング時間: 120 min



●: 波形検証点 (VR)

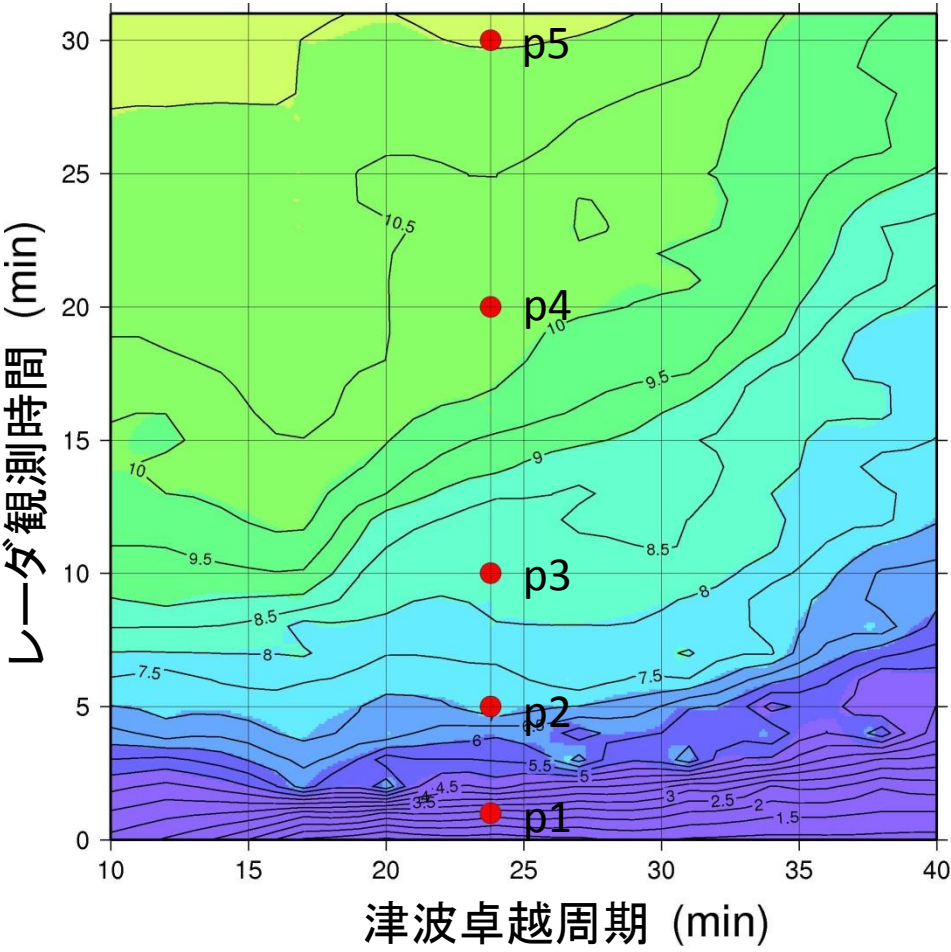
観測時間の影響

推定範囲のRMSE (%)

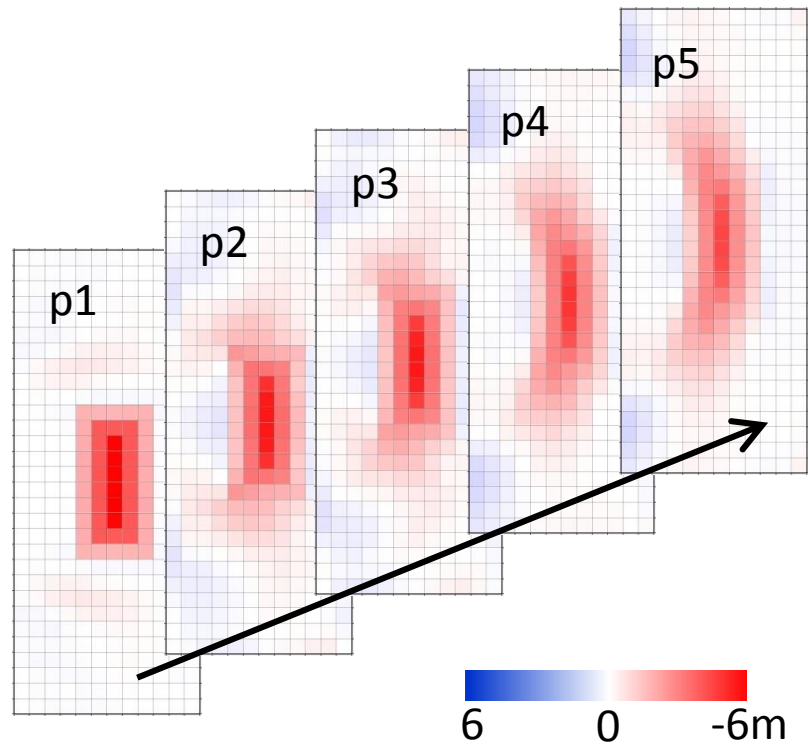
➤ 初期水位分布の空間誤差

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (a_i - \tilde{a}_i)^2 / N}$$

単位波源 i ($i = 1 \sim N$) における
 a_i : 観測初期水位, $\tilde{a}_i$: 予測初期水位

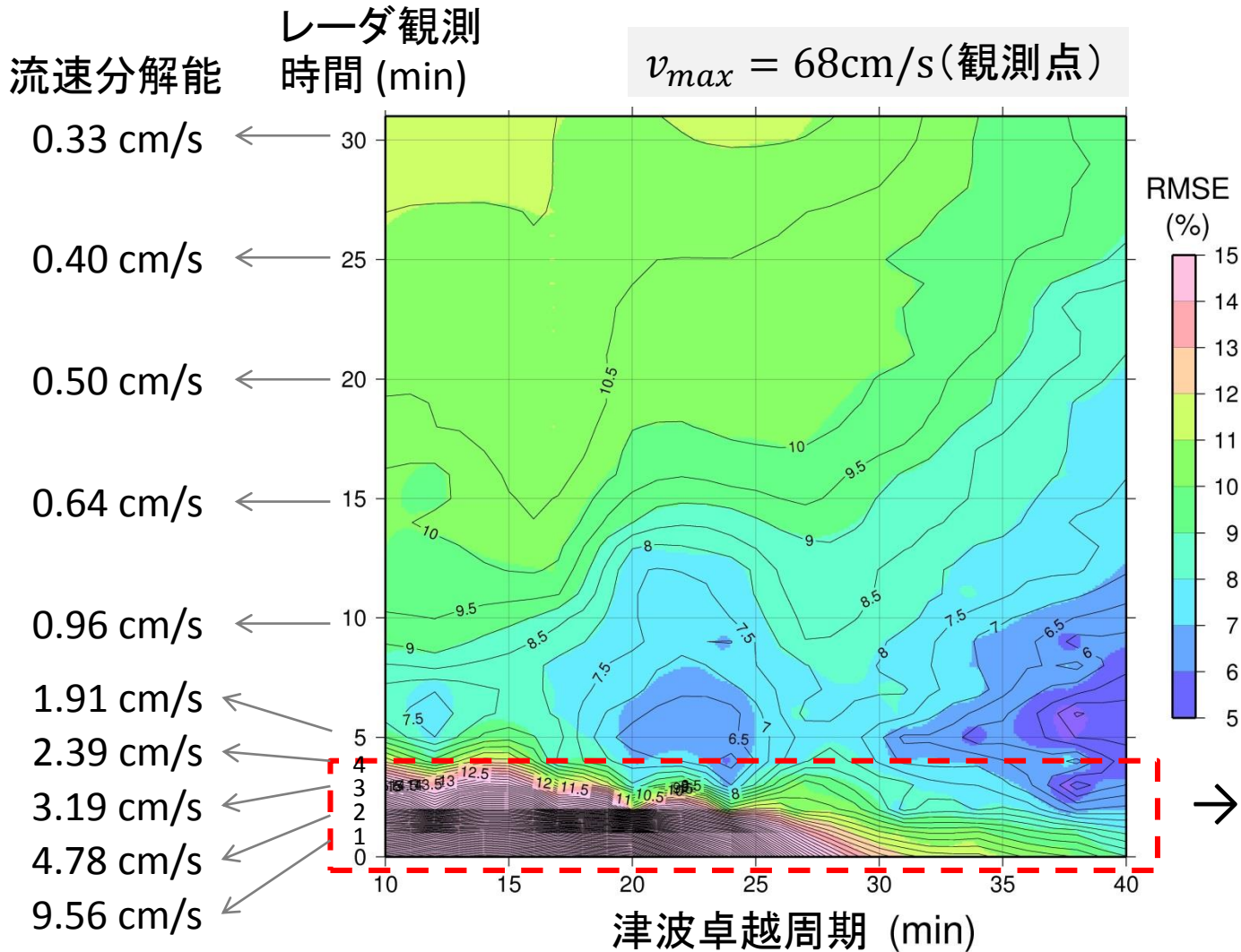


- 波源の輪郭→不鮮明
- 最大初期水位→過小



観測時間(流速分解能)の影響1

推定範囲のRMSE (%)



巨大津波では
 Δv は相対的に小さい



→流速分解能
が影響 $\frac{\Delta v}{v_{max}}$

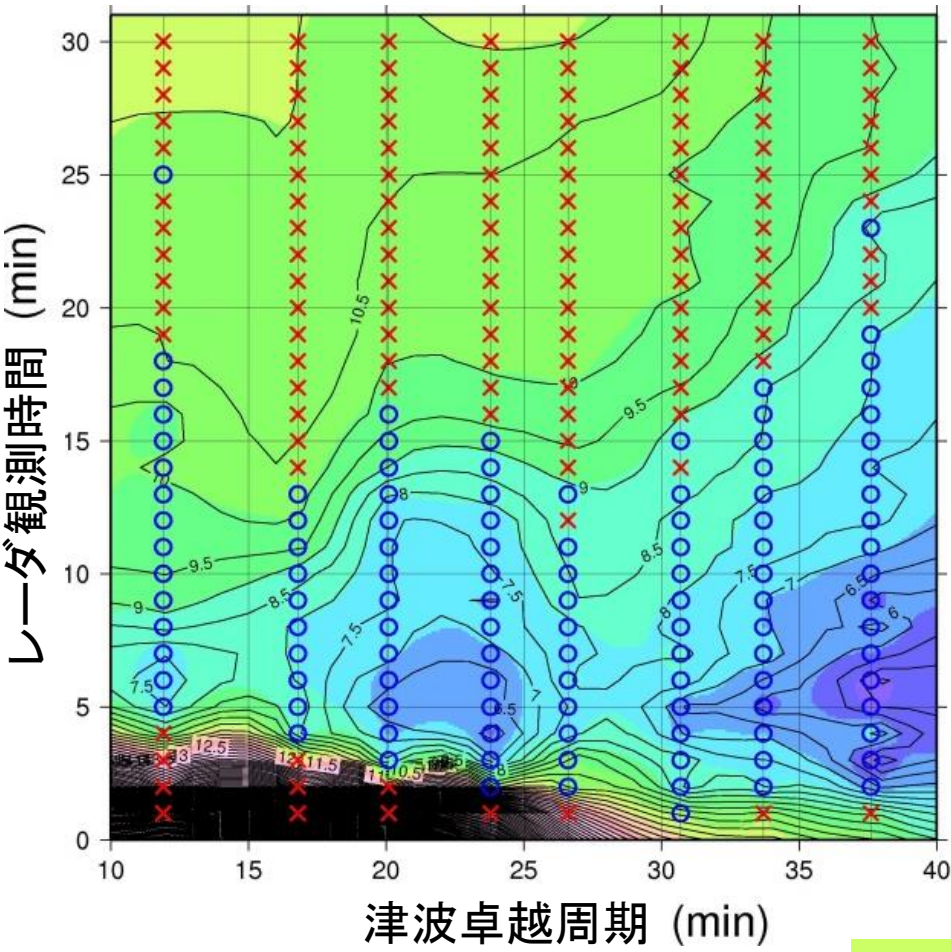
観測時間(流速分解能込)の影響2

沿岸検証点のVR (%)

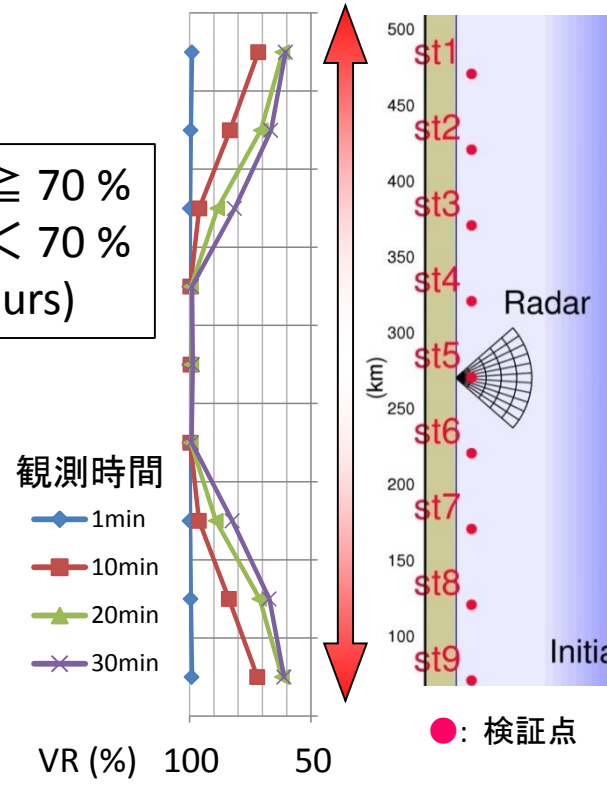
➤ 沿岸での時間波形の一致度

$$VR (%) = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^T (\eta_j - \tilde{\eta}_j)^2}{\sum_{j=1}^T \eta_j^2} \right) \times 100$$

時間 j ($j = 1 \sim T$) における
 η_j : 観測水位, $\tilde{\eta}_j$: 予測水位



○: VR ≥ 70 %
×: VR < 70 %
(6 hours)



レーダ1局でカバーできる範囲は??

②設置位置（波源との位置関係）の影響

実験条件

想定津波:

- 卓越周期30.7分
- 観測時間1分

[レーダ諸元]

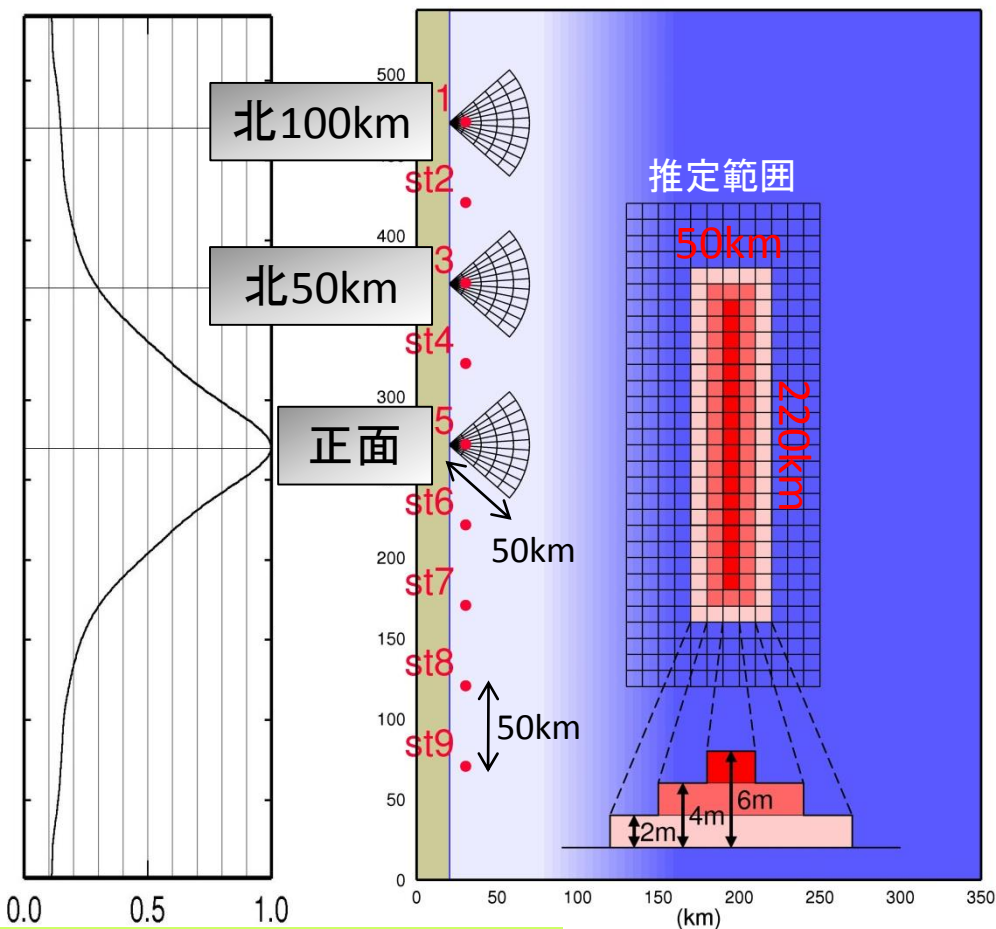
- 観測範囲: 50km, 90deg.
- 空間分解能: 1.5 km, 7.5deg.

[津波計算]

- 空間格子サイズ: 1 km
- 時間ステップ: 2 sec
- 初期水位: $50\text{km} \times 220\text{km}$
階段形状
破壊伝播: 非考慮

[インバージョン]

- 単位波源サイズ: 10 km
- 観測点: 256 (レーダ観測範囲内)
- サンプリング時間: 120 min



流速振幅2乗値
(2時間積分値, 最大値で規格化)

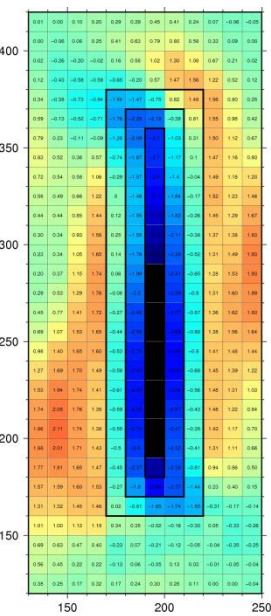
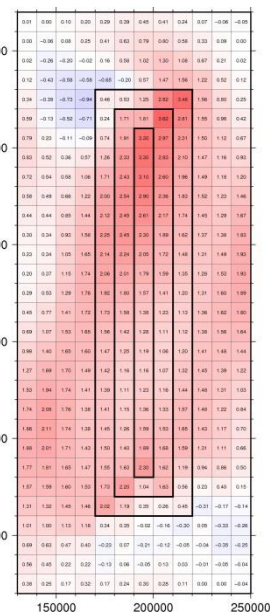
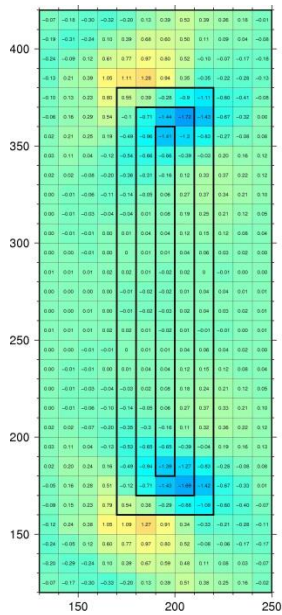
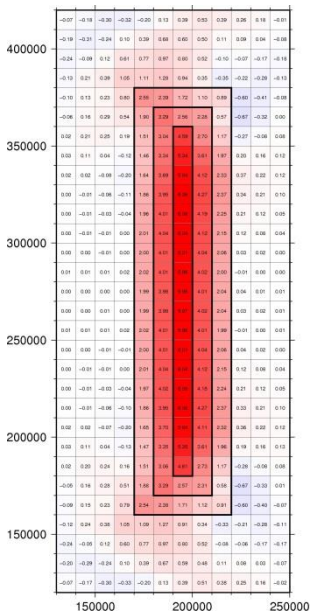
●: 波形検証点 (VR)

配置による影響1

単独配置の場合

北100km

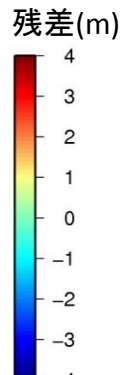
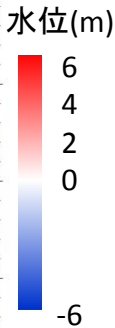
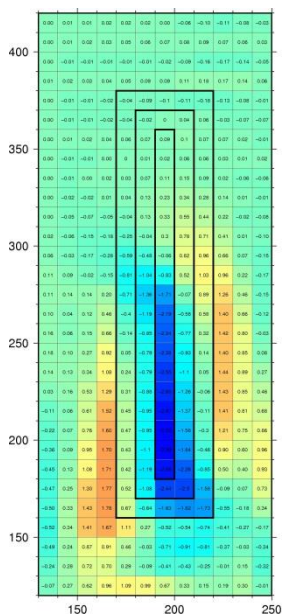
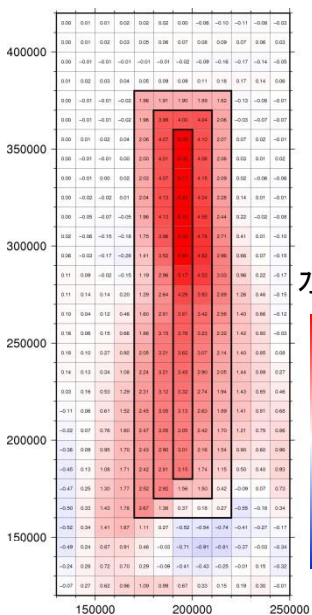
正面



Coast line

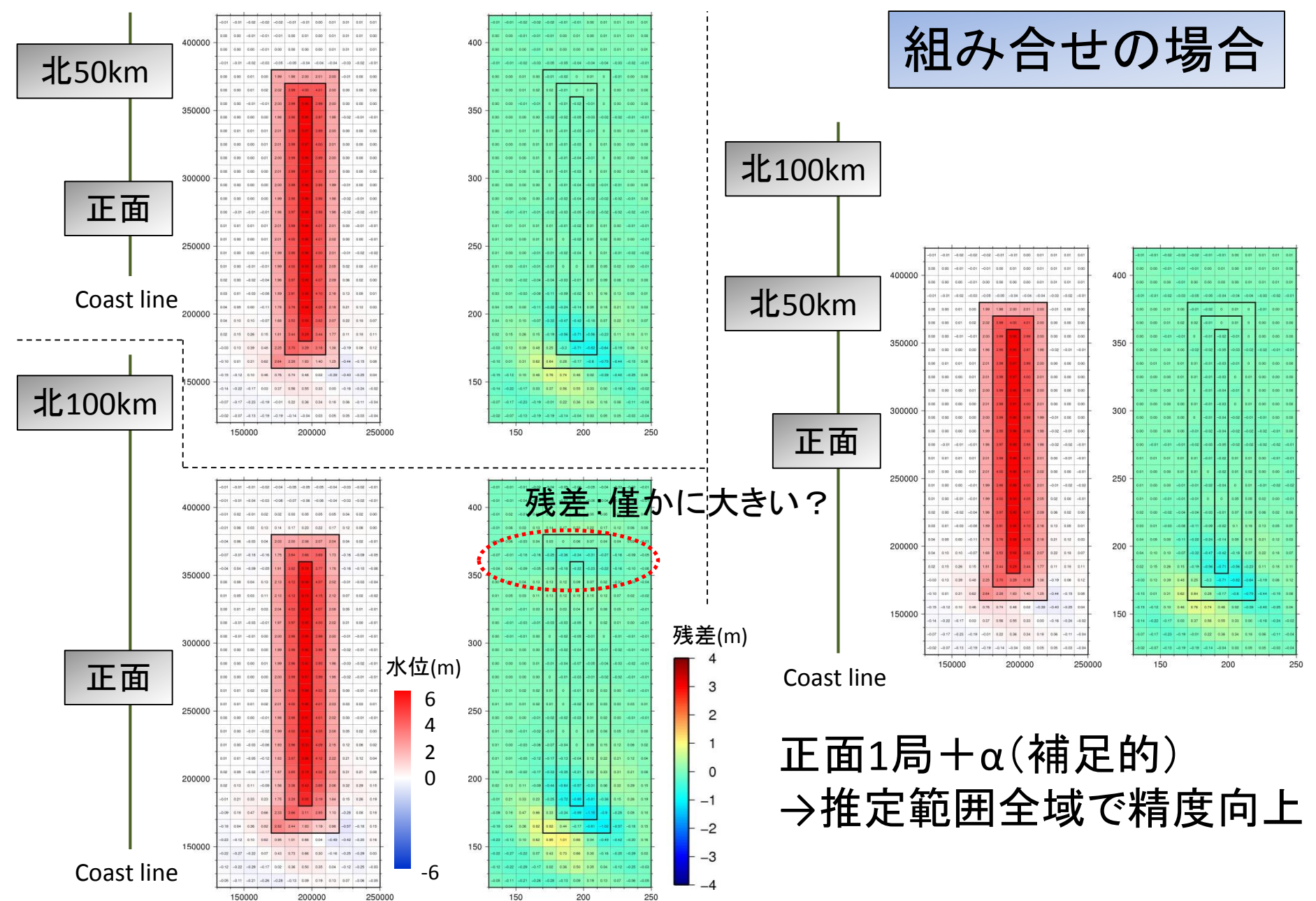
Coast line

北50km



流速スケール:
正面 > 北50km > 北100km

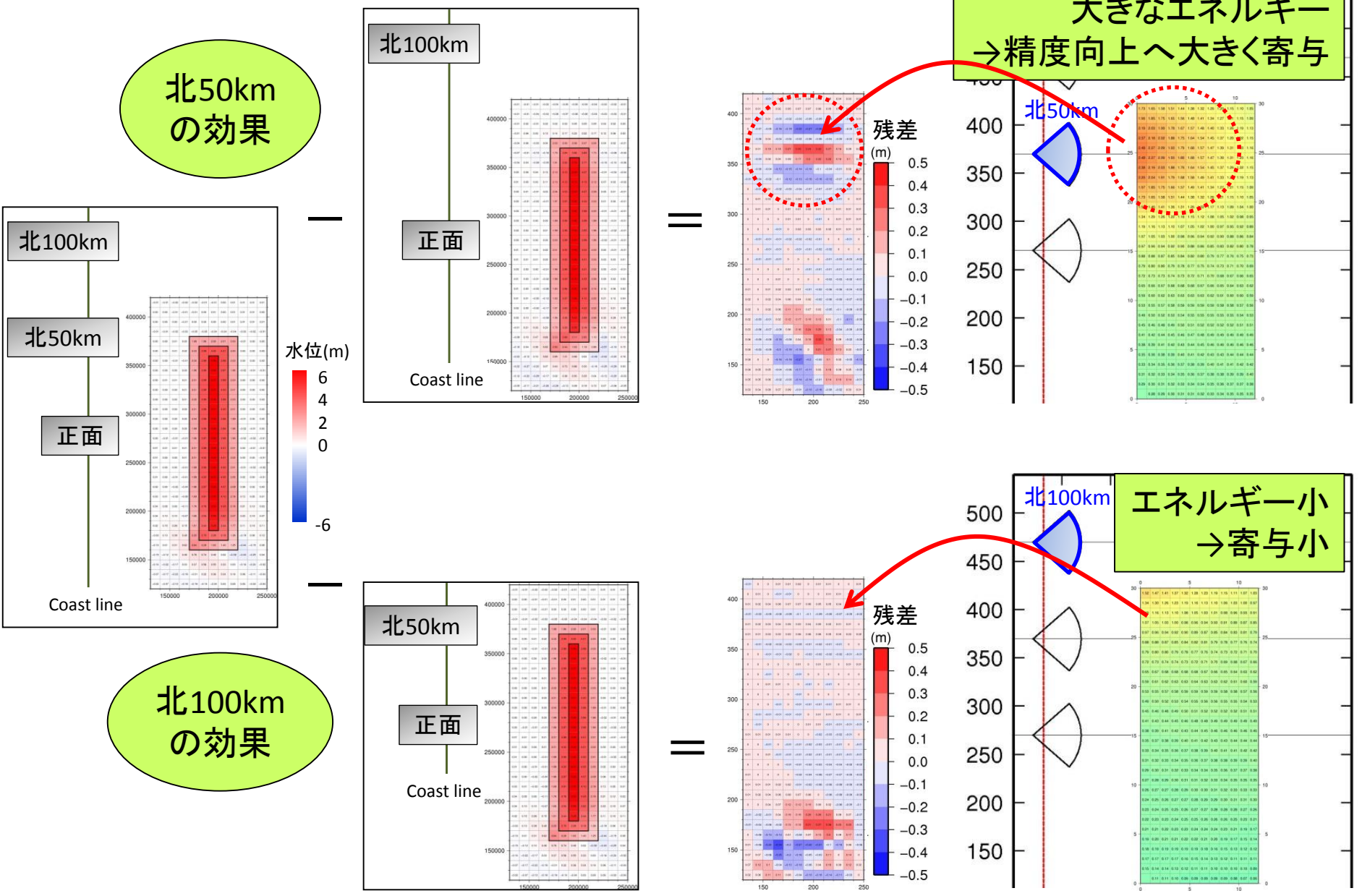
配置による影響2



正面1局+α(補足的)
→推定範囲全域で精度向上

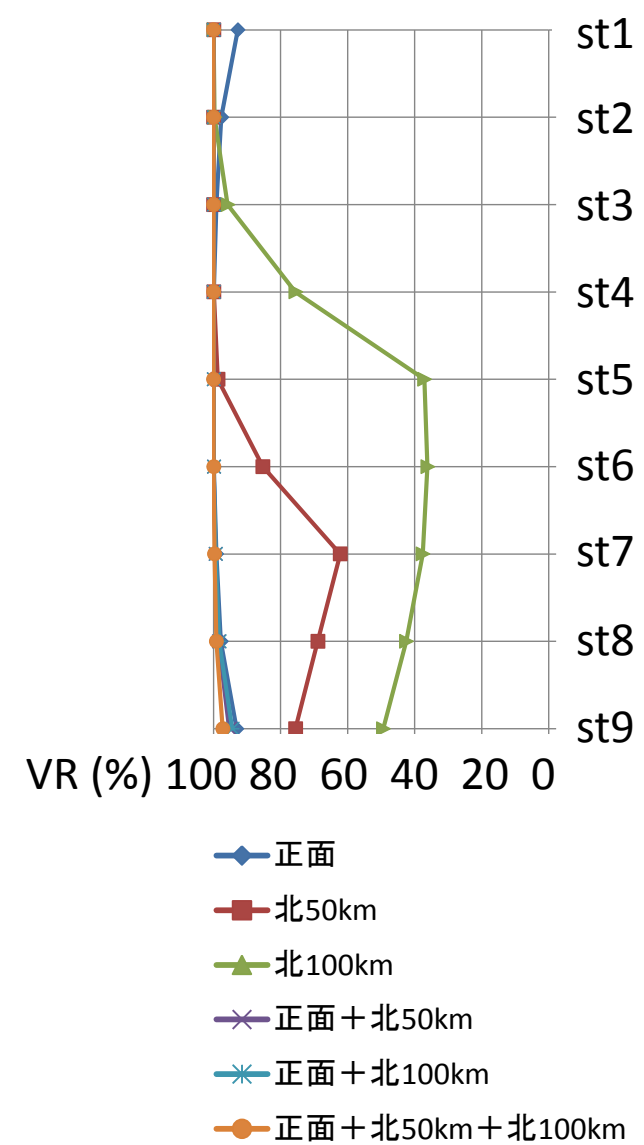
配置による影響3

単位津波のエネルギー分布

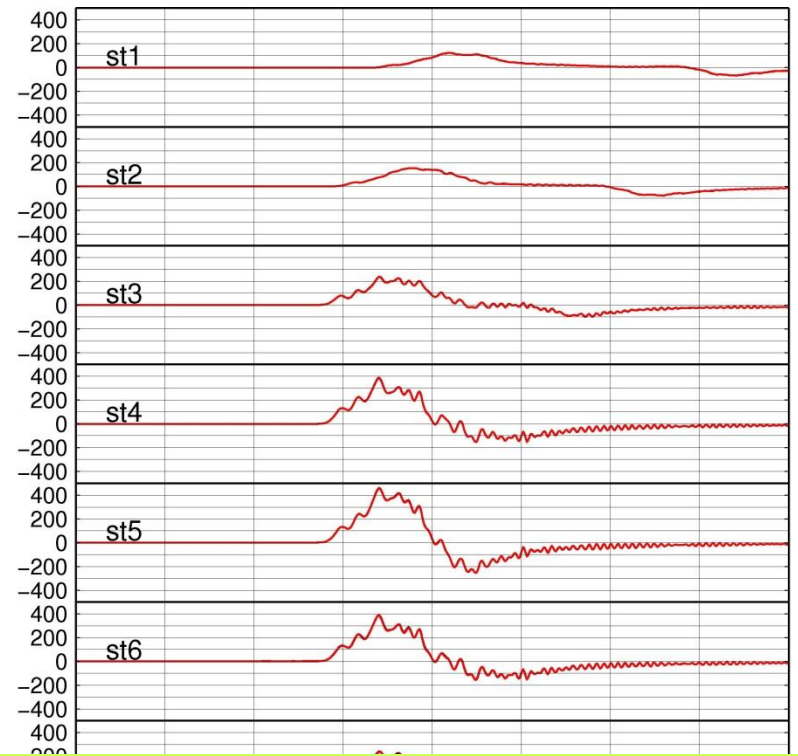


配置による影響4

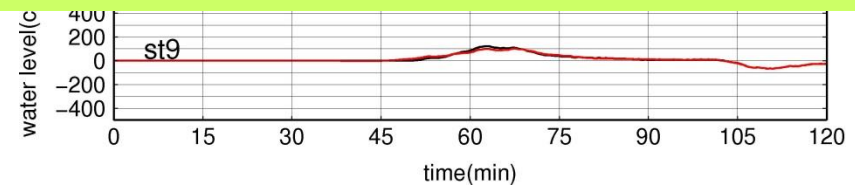
沿岸検証点のVR (%)



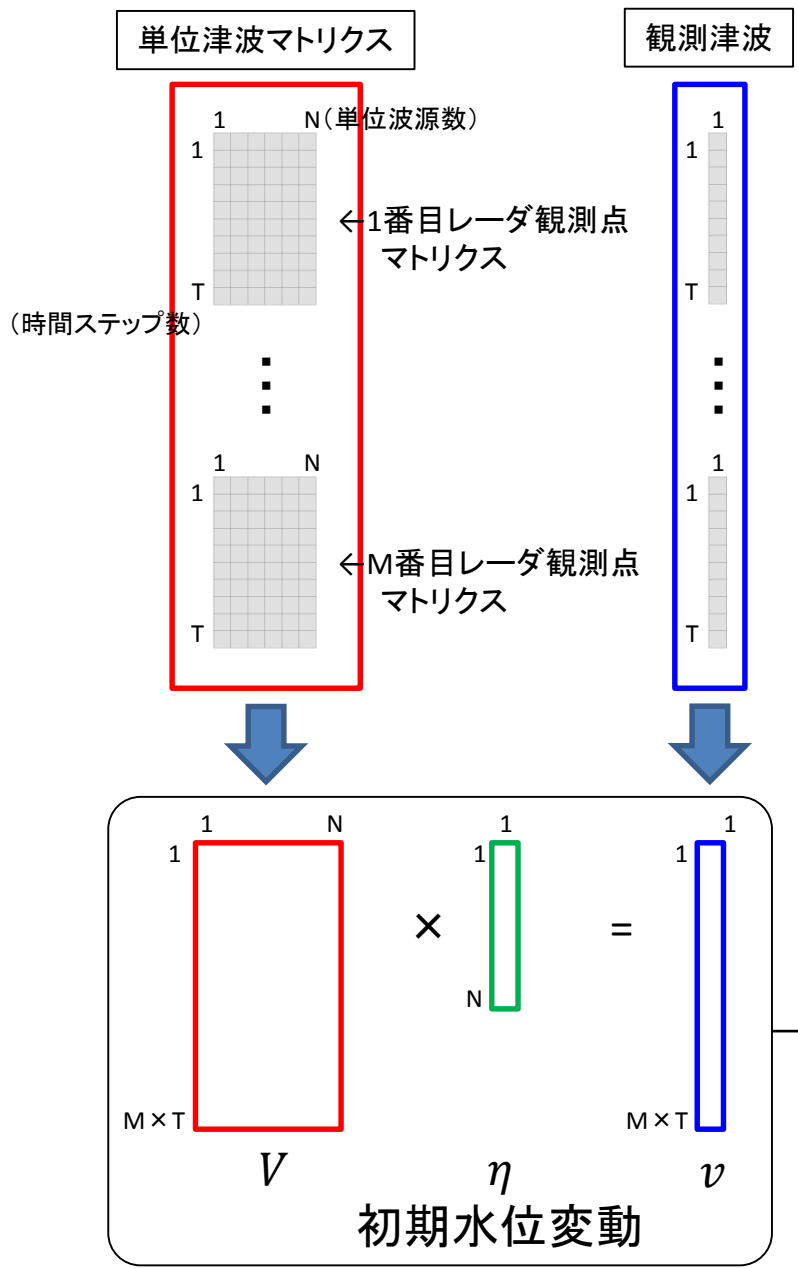
正面+北50km+北100km
— 観測値
— 予測値



適切な配置
→ エネルギーレベルと推定精度の関係？
→ 対象範囲を南北に拡大した数値実験



LSM推定精度の向上1



$E = \|v - V\eta\|^2 \rightarrow \min \quad \frac{\partial E}{\partial \eta} = 0$

$E = \|v - V\eta\|^2 \times w(t) \rightarrow \min$

重み $w(t)$

レーダ観測点

重み小 重み大 重み小

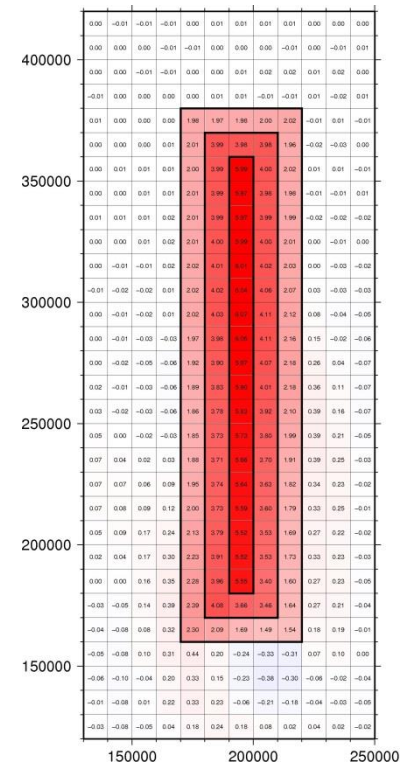
- 流速振幅の絶対値の大きさに応じた重みを考える

LSM推定精度の向上2

— 観測値
— 予測値(北50km)
— 予測値(北100km)

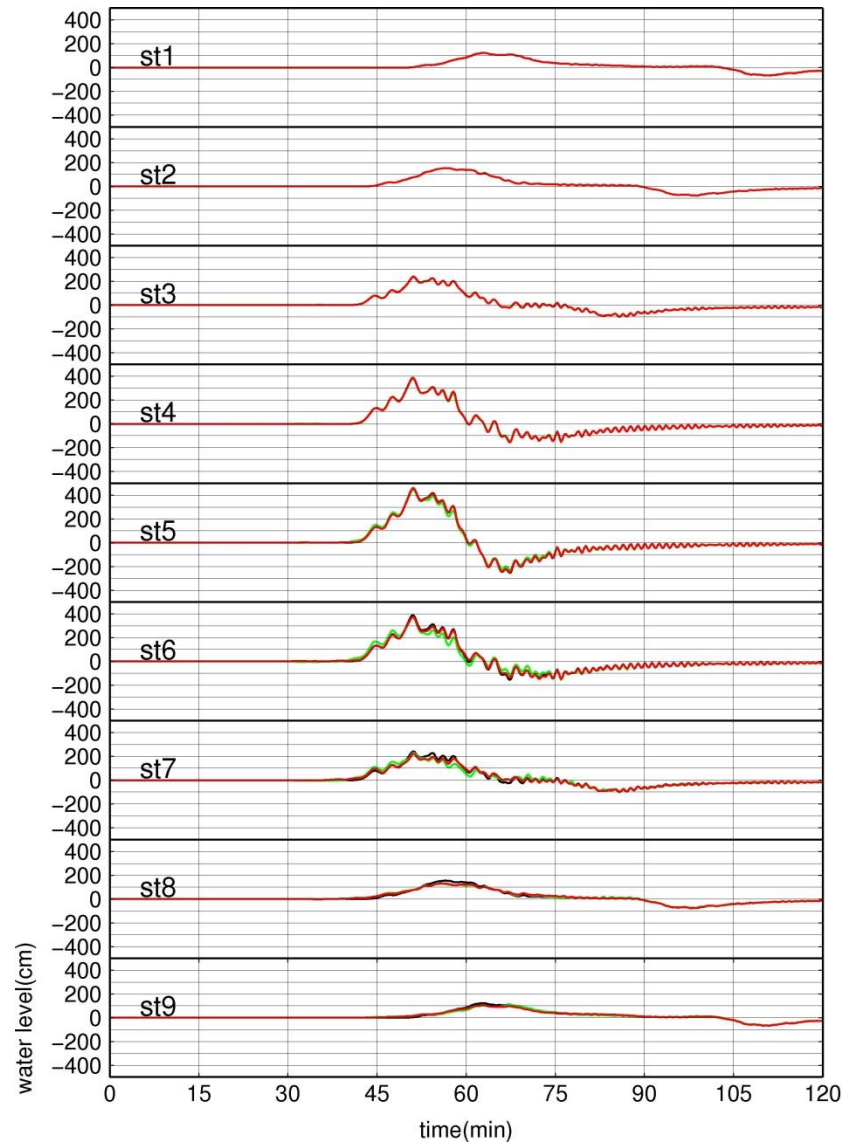
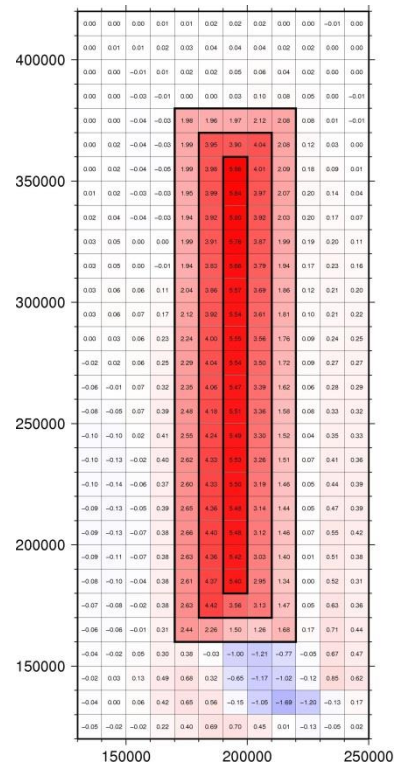
➤ 北50km

$w(t) = 10^3 \times |v(t)|$

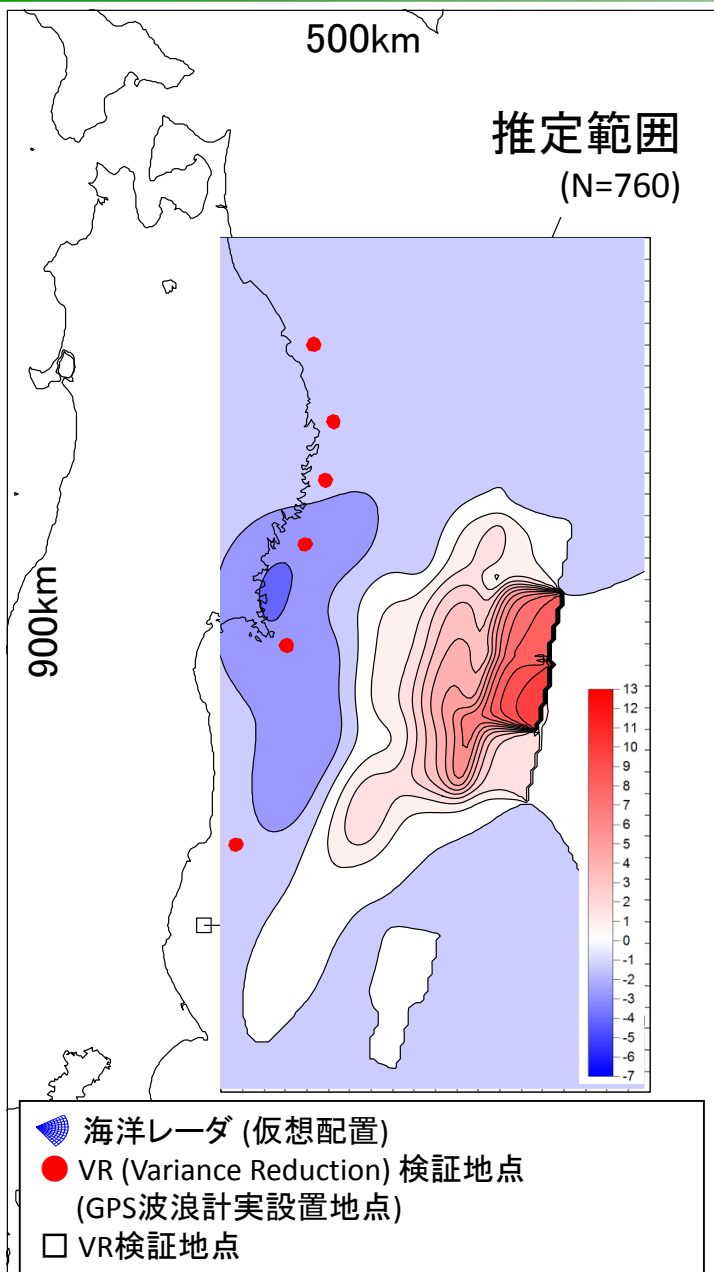


➤ 北100km

$w(t) = 10^4 \times |v(t)|$



数値実験(2011東北津波)



[津波計算]

- 空間格子サイズ: 1 km
- 時間ステップ: 2 sec
- 断層モデル: 藤井佐竹ver.4.2
(破壊伝播速度: 非考慮)

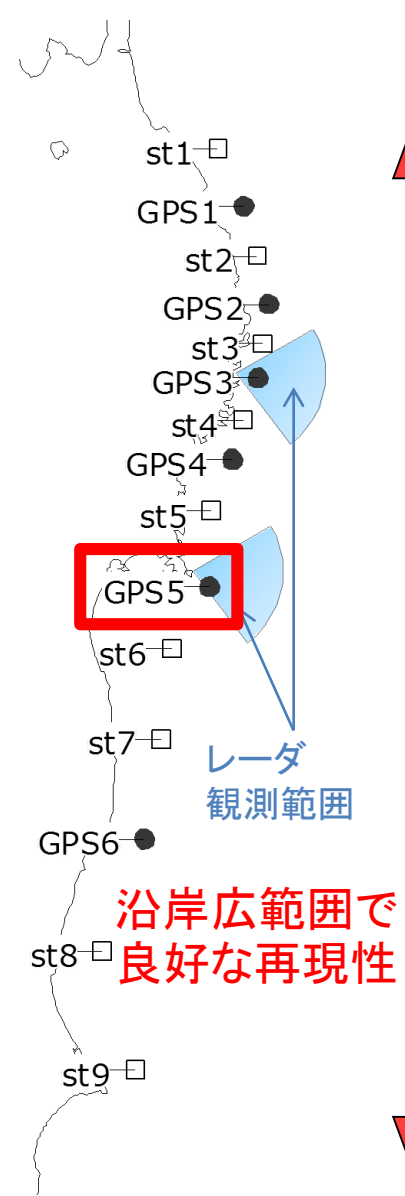
[インバージョン]

- 観測点: 272
- 単位波源サイズ: 15 km
- サンプリング時間: 120 min

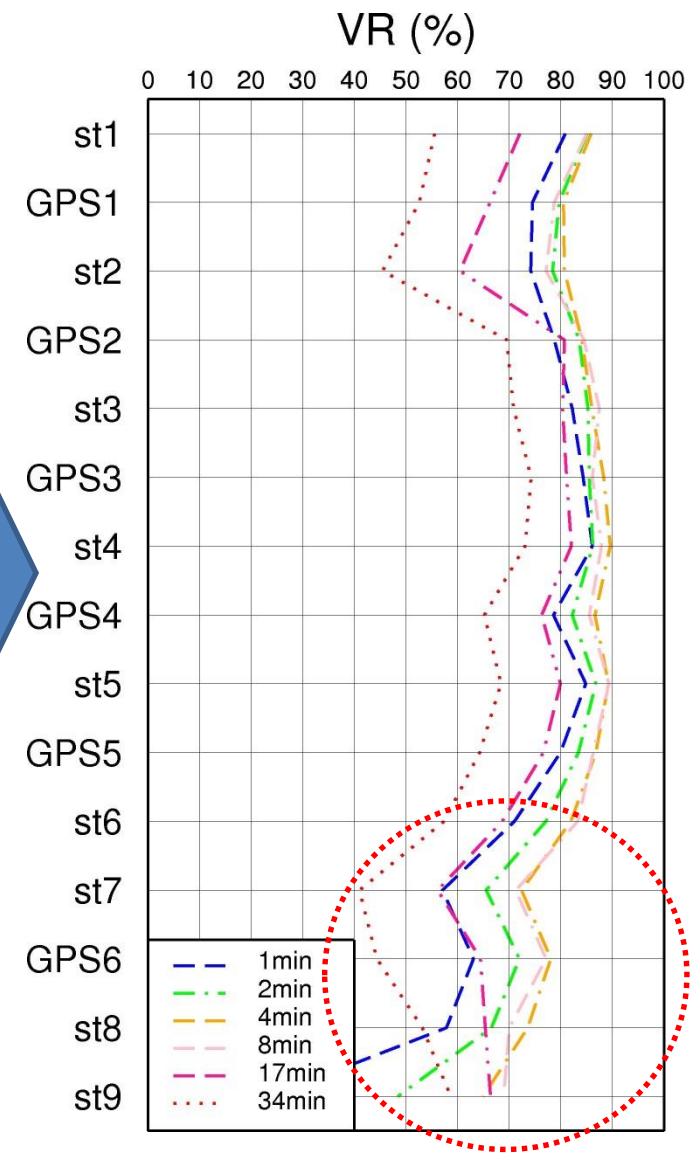
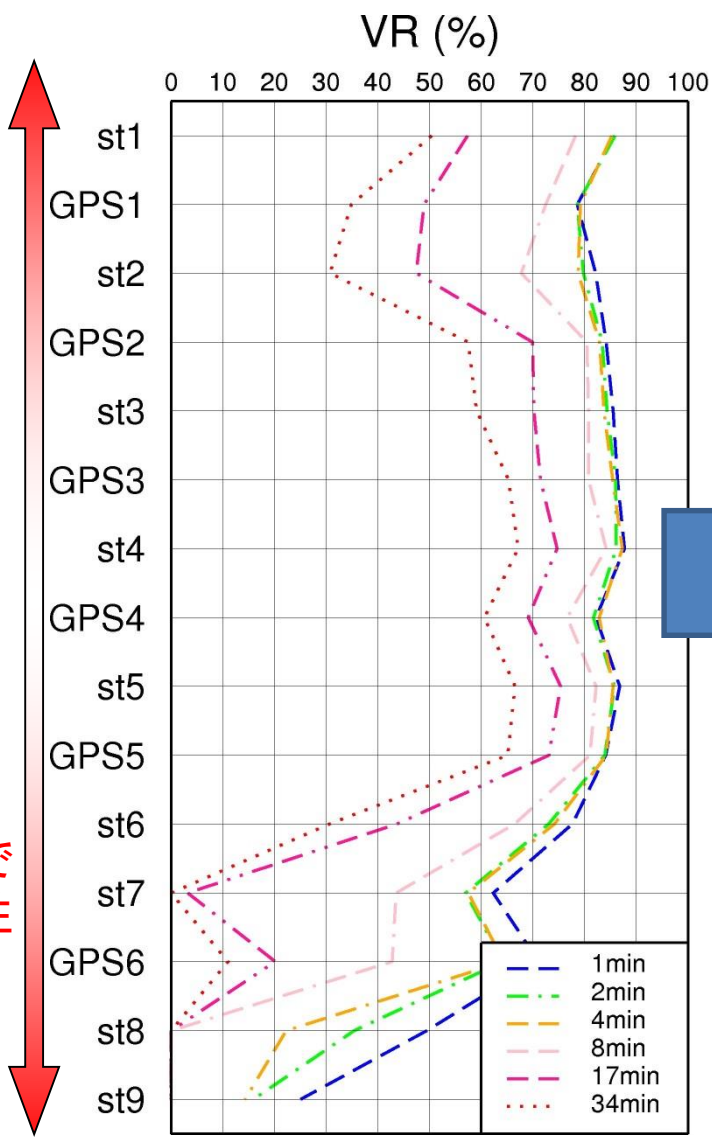
No	観測時間	流速分解能	サンプリング間隔
1	1 min	9.56 m/s	1 min
2	2 min	4.78 m/s	
3	4 min	2.39 m/s	
4	8 min	1.20 m/s	
5	17 min	0.60 m/s	
6	34 min	0.30 m/s	

➤ 卓越周期: 34 min (Hinata et al., JSCE, 2012)

推定結果(沿岸の時間波形)1

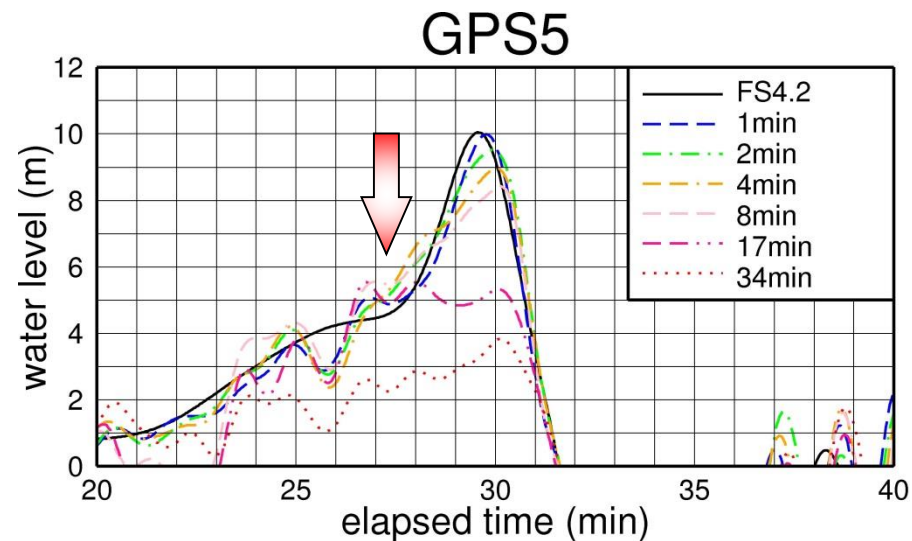
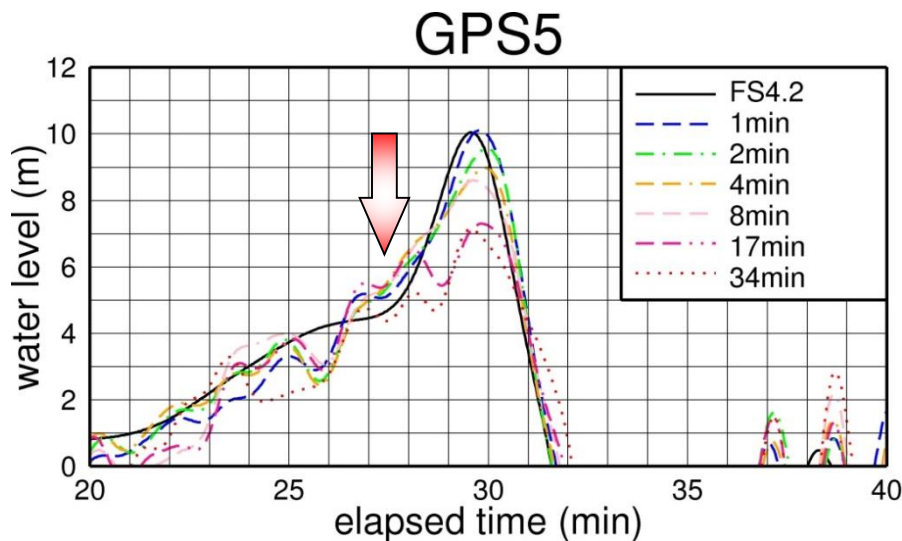


$$w(t) = 2 \times |v(t)|$$



推定結果(沿岸での時間波形)2

$$w(t) = 2 \times |v(t)|$$



- サンプル時間全体の重みづけ
- 観測時間長い→最大水位を過小評価する傾向は変わらない



→最大水位出現時刻の前後をターゲットとして重みづけ
(最大波の推定精度向上を期待)

●レーダ観測のメリット

- 観測範囲外(沿岸広範囲)における高い再現性

●観測時間の影響

- 観測時間長い→初期水位の平滑化
- 観測時間を短くとれば十分な推定精度を確保
- 流速分解能→最大流速に対する相対的な大きさが影響

●配置の影響

- 沿岸に到達するエネルギーの大きな箇所+ α の配置
- 到達エネルギーと推定精度の関係を明らかにする必要性

●LSM推定精度の向上

- 流速振幅の大きさに応じた重み→沿岸における時間波形の精度向上
- 重み係数の設定方法の検討