

海底地すべりと活断層による津波の重畳を 考慮した津波検知・予測に関する検討



- * 寺岡 駿輔（東京電力ホールディングス）
- 金戸 俊道（東京電力ホールディングス）
- 木村 達人（東電設計）

2021年12月6日

単一の海洋レーダを用いた当社の津波予測

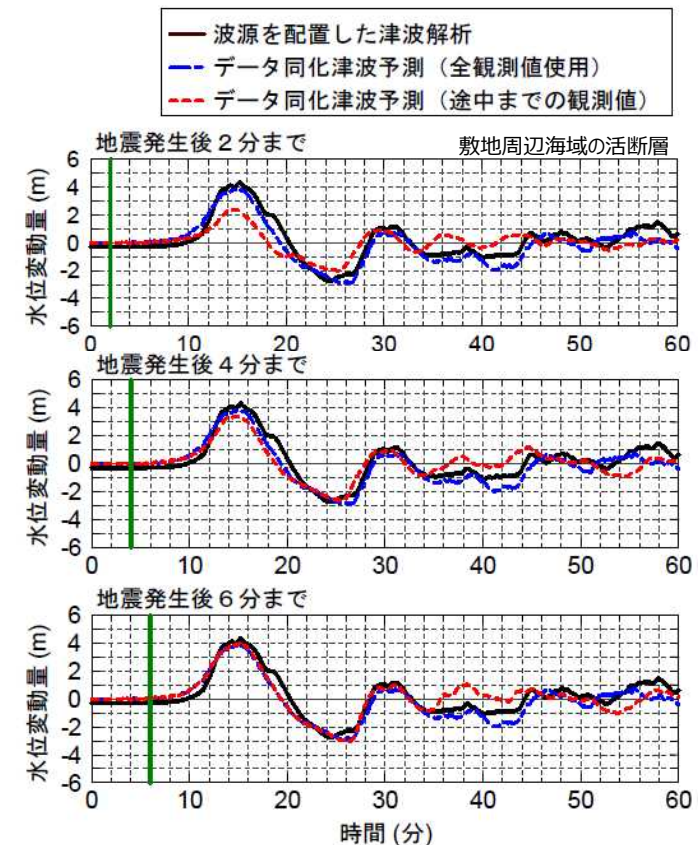
➤ 木村ほか(2018)では、**単一の海洋レーダで得られる視線方向の流速観測値のみ**から沿岸での津波水位波形を予測する手法について検討

※1 木村ほか(2018):海洋レーダ流速観測値を用いたデータ同化津波即時予測



レーダ諸元

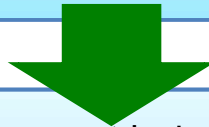
送信周波数	24.5MHz
観測距離	30km以上
観測方位	120°以上
距離分解能	1.5km以下
角度分解能	18°以下 (正面)
速度分解能	0.1m/s以下
更新間隔	約1分



木村ほか(2018)の同化時間の影響検討

地すべりによる津波

- 2018年インドネシアのスンダ海峡では火山活動により、山体崩壊に伴う津波が発生
- 地震を伴わなかったため、**津波警報が発令されず**、甚大な被害



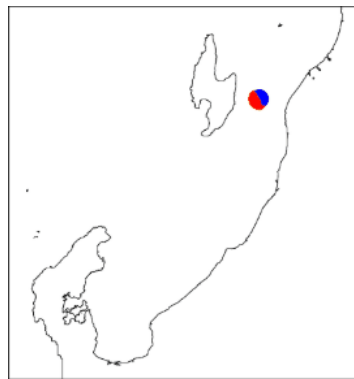
柏崎刈羽原子力発電所における海底地すべり津波評価手法

- **海底地すべりによる津波** に関する評価手法を提案 ※2
- **海底地すべりによる津波 + 活断層による津波** に関する評価手法を提案 ※3

柏崎刈羽原子力発電所において最大水位となる組み合わせを抽出

※2 金戸ほか(2020):海底地すべりによる津波の将来想定手法の提案,土木学会論文集B2 (海岸工学), 2020

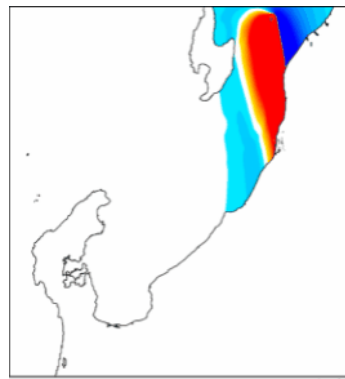
※3 金戸ほか(2021):海底地すべりと活断層による津波の重畳評価手法の提案,土木学会論文集B2 (海岸工学), 2021



想定海底地すべりによる津波

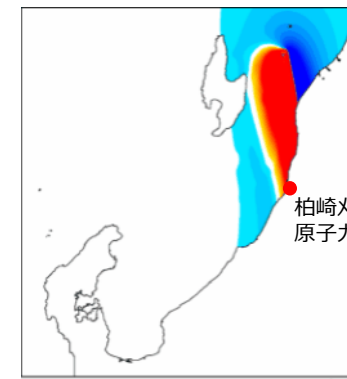
※1:金戸ほか(2020)で抽出

+



活断層による津波

=



重畳した津波

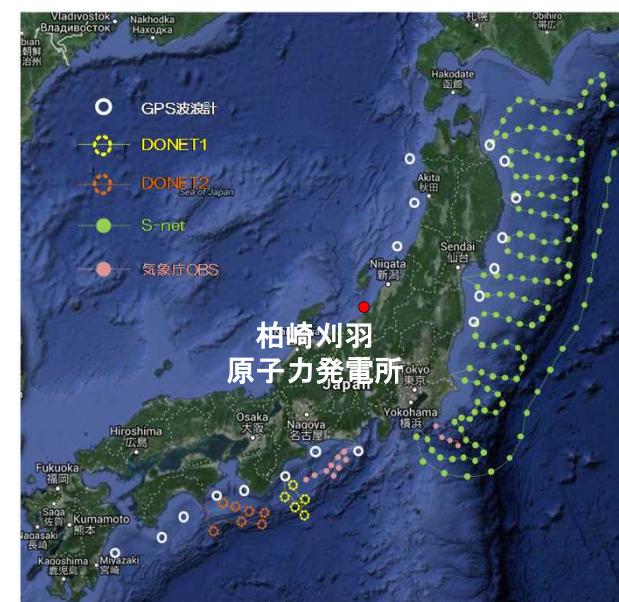
※2:金戸ほか(2021)で抽出

気象庁の津波警報

- 地震による津波を対象としており、海底地すべり津波発生時に**警報が発令されない可能性**
- 地震に伴って警報が出た場合でも、海底地すべりの重畳を想定していないため、**過小評価となる可能性**

当社の状況

- 日本海側には外部機関による津波観測設備がほとんどないことから、柏崎刈羽原子力発電所に海洋レーダを設置
- **警報のない津波を検知・予測できるか検討**



外部機関による津波観測地点

【今回の検討内容】

- 警報のない津波について、**第一波の検知**および**後続波の予測**が可能か。
- 検知・予測の結果、作業員退避の観点から**実務に適用可能か。**

モデル（シミュレーション）に観測値を取り込み、より真値に近い結果を予測する手法。
本検討では、計算負荷の観点から最適内挿法を使用する。

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{W}[\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}^b]$$

$\mathbf{x}^a$ ：推定値、 $\mathbf{x}^b$ ：予報値（シミュレーション結果）、 $\mathbf{y}$ ：観測値
 $\mathbf{W}$ ：重み行列、 $\mathbf{H}$ ：観測行列

観測行列 $\mathbf{H}$ は計算格子点における値（流量）から、
観測点で観測される値（視線方向流速）への変換行列。

重み行列 $\mathbf{W}$ は推定値 $\mathbf{x}^a$ の誤差分散が最小となるように決定
パラメータとして以下を与える必要がある。

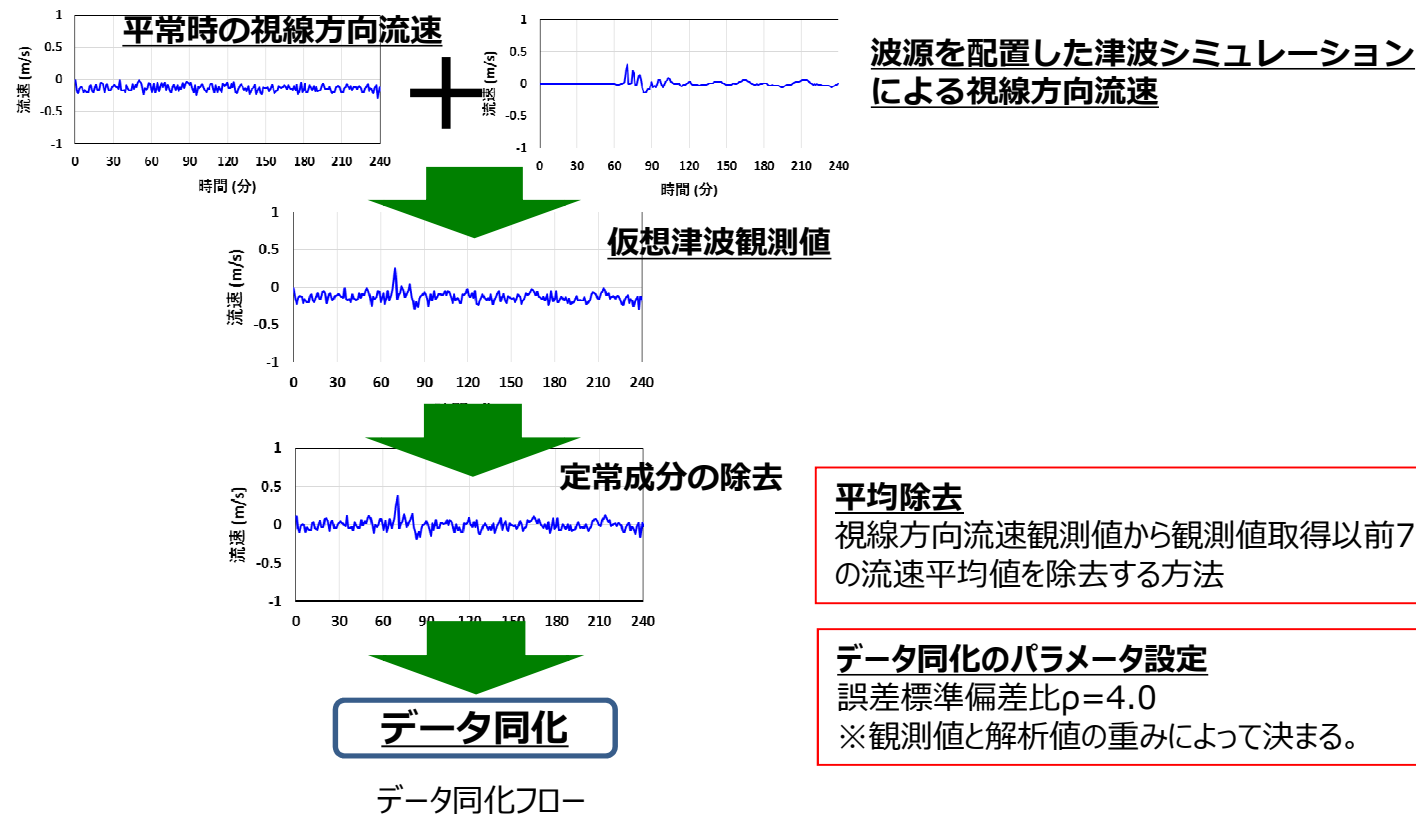
- ・背景誤差（シミュレーション誤差）の相関係数 μ^b
- ・観測誤差の相関係数 μ^o
- ・観測誤差と背景誤差の標準偏差比 ρ

本検討では、以下のように仮定した。

- ・ μ^b として距離をパラメータとしたガウス関数を採用 ※Maeda et al.と同様
- ・観測点間の観測誤差には相関がない ($\mu_{ij}^o = \delta_{ij}$) ※Maeda et al.と同様
- ・背景誤差特性距離 5km ※木村ほか(2018)
- ・観測誤差と背景誤差の標準偏差の比 ($\rho = 4.0$) ※金戸ほか(2019)

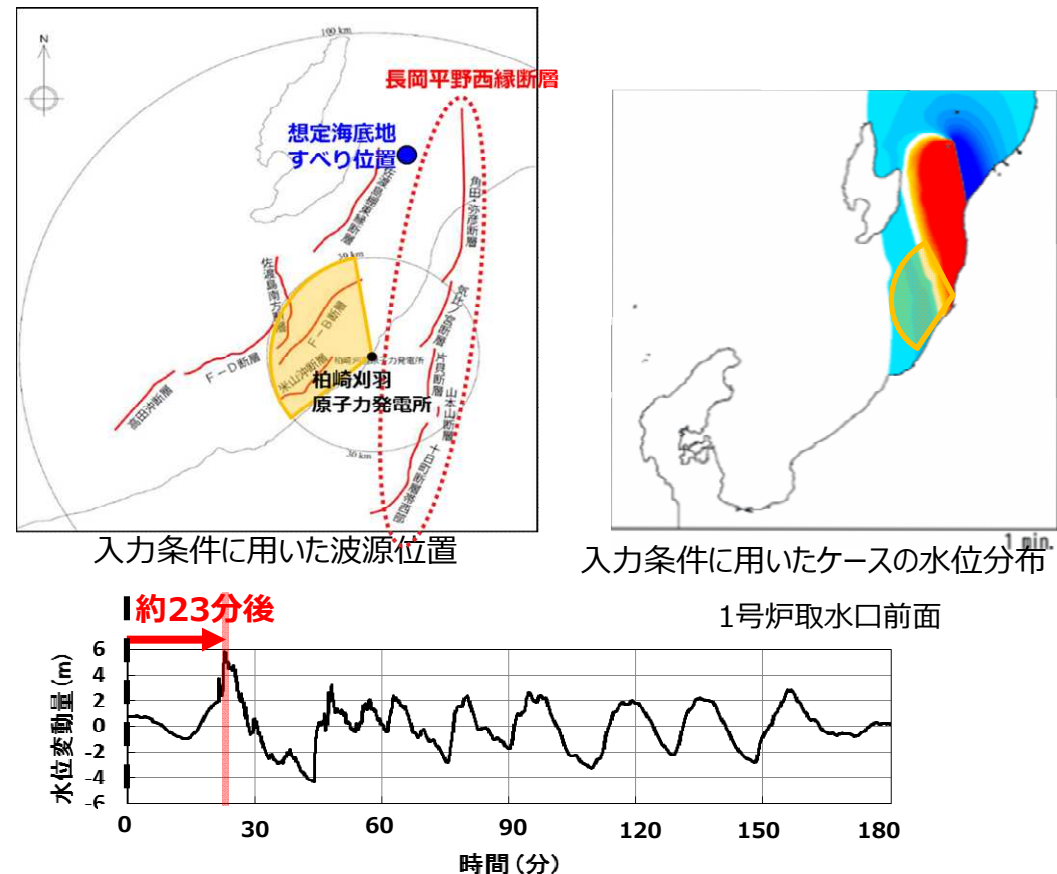
- 平常時に観測された実際の視線方向流速と波源を配置した津波シミュレーションによる視線方向流速を足し合わせた仮想津波観測値を用いたデータ同化を行い、観測値に含まれるノイズ除去について検討※4

※4 金戸ほか(2019): 柏崎刈羽原子力発電所に設置した単一の海洋レーダーによるデータ同化津波即時予測, 土木学会論文集B2(海岸工学)

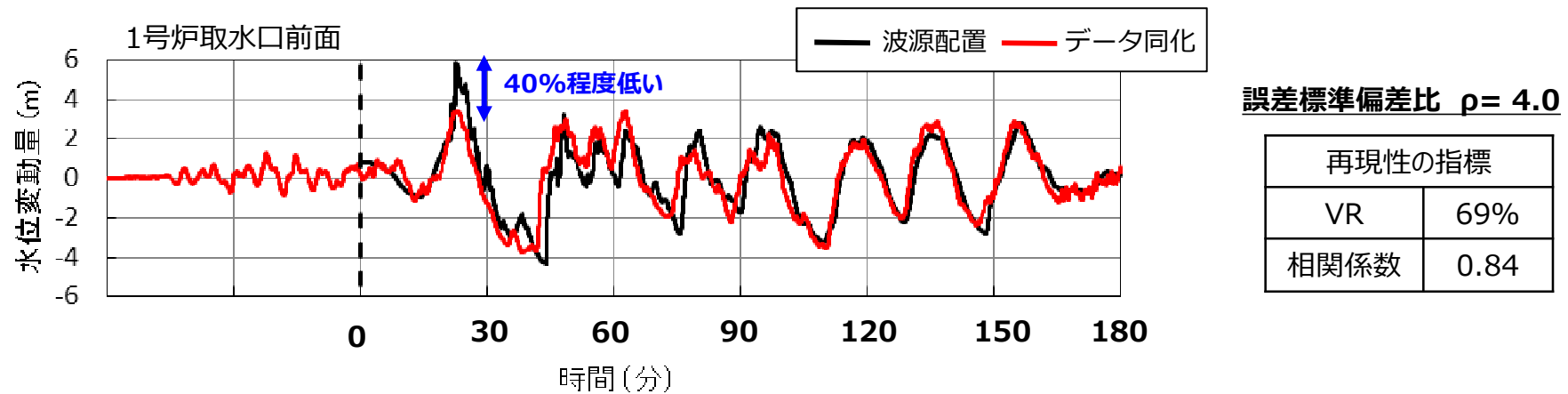


- 観測値のノイズの影響が大きいことから、解析値の重みを大きくし、誤差標準偏差比 $\rho=4.0$ に設定

- 想定海底地すべりと活断層はレーダ観測範囲の北側に位置し、**津波は北側から到来**
- 数値計算の結果、津波のピーク水位は地震発生後、**約23分後に発電所に到達**
- 第2波以降も一定程度の津波が**継続的に到来**



➤ 同化パラメータ (ρ=4.0) を用いて、データ同化の再現性について検討



$$\text{Variance Reduction(\%)} = \left\{ 1 - \frac{\sum_{j=1}^T (\eta_j - \hat{\eta}_j)^2}{\sum_{j=1}^T \eta_j^2} \right\} \times 100$$

η_j 観測水位 $\hat{\eta}_j$ 同化水位 ($j=1 \sim T$) 時刻

指標の目安

VR80%以上：かなり良い
VR50%程度：まあまあ良い

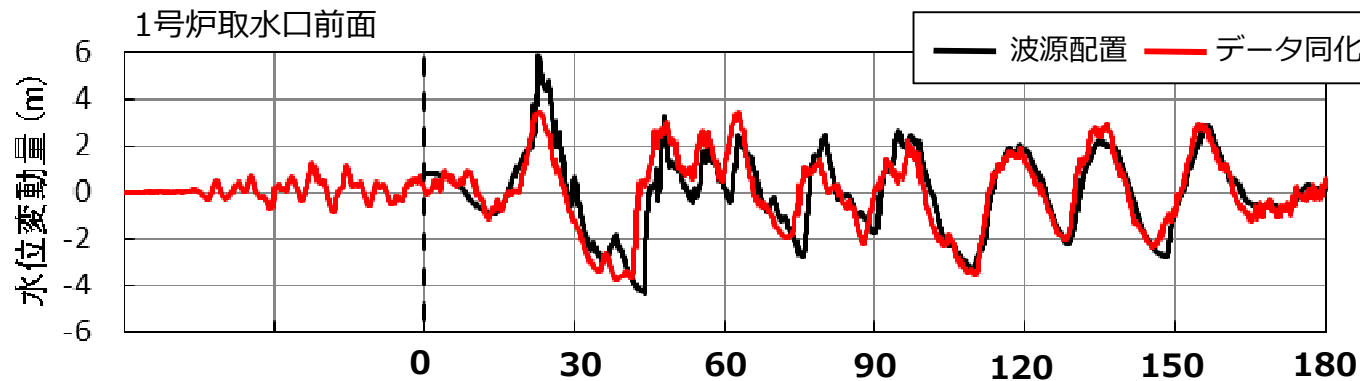
※防災科学技術研究所：波形解析による地震のメカニズム（オンライン）参照

- 波形全体の傾向は再現可能
- 第一波のピークが40%程度低い結果を示し、第一波ピークの再現性に課題
- 海底地すべりによる短周期の津波によって急激に水位・流速が変化したため、約1分間の同化間隔によるシミュレーションでは、水位・流速が適切に再現できなかったものと推測

- 同化間隔は海洋レーダの性能に依存し、現状の機器ではデータ取得間隔の短縮はできない。

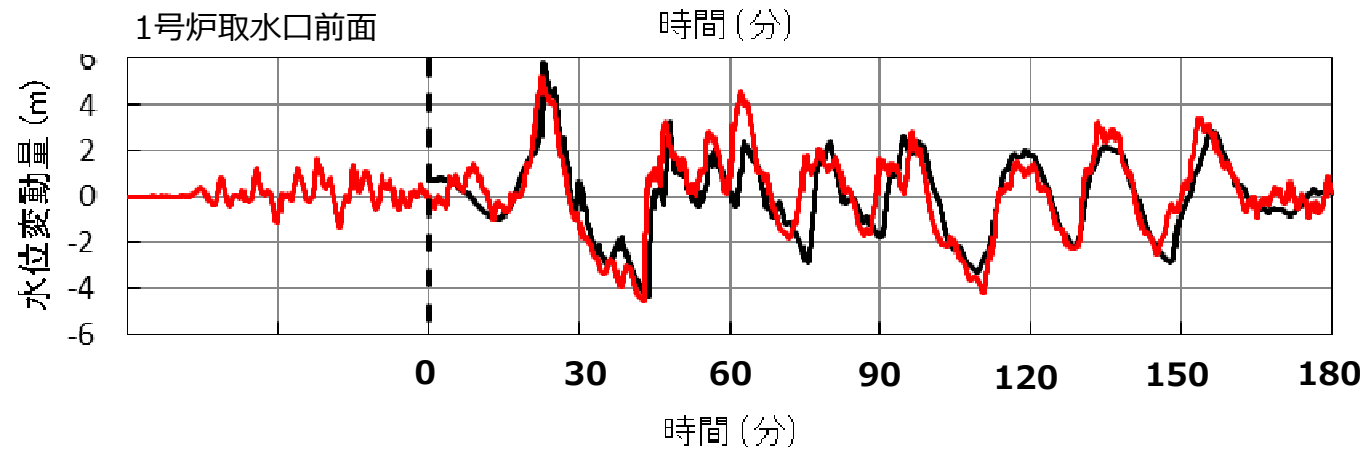


観測データの重みを従来より大きくすることで、再現性を改善できないか。



誤差標準偏差比 $\rho=4.0$

再現性の指標	
VR	69%
相関係数	0.84



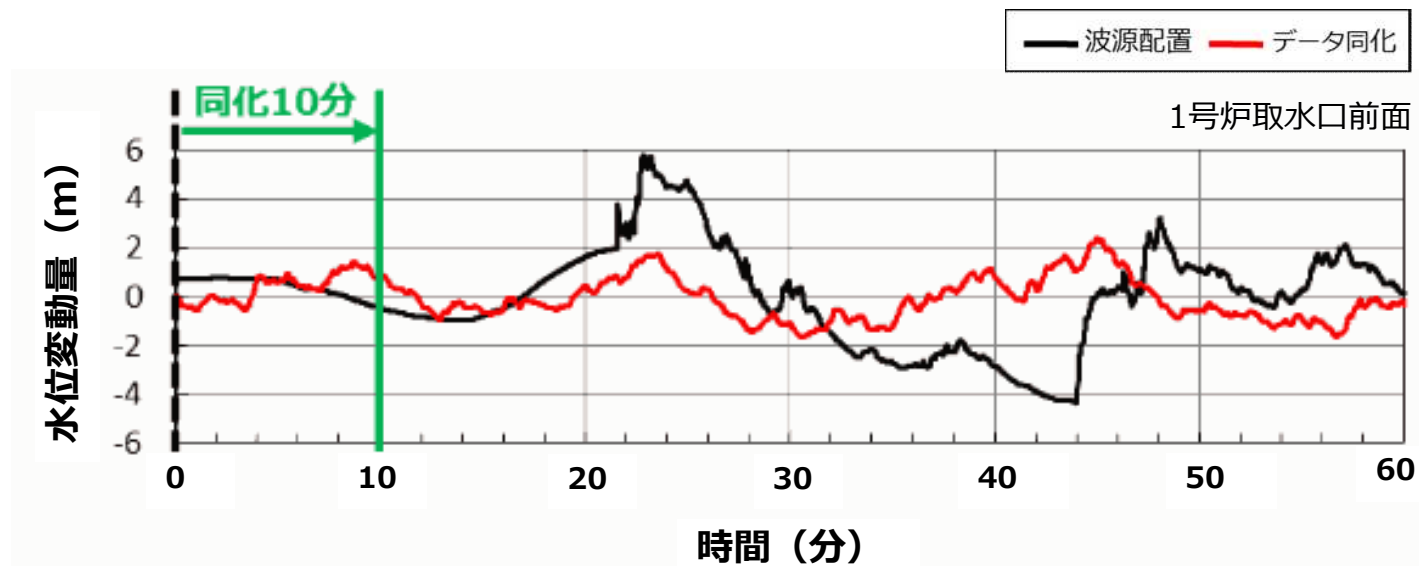
誤差標準偏差比 $\rho=2.0$

再現性の指標	
VR	60%
相関係数	0.83

- データ同化における観測値の重みを従来より大きくすることで、再現性が改善

実務の適用のために以下の検討を実施

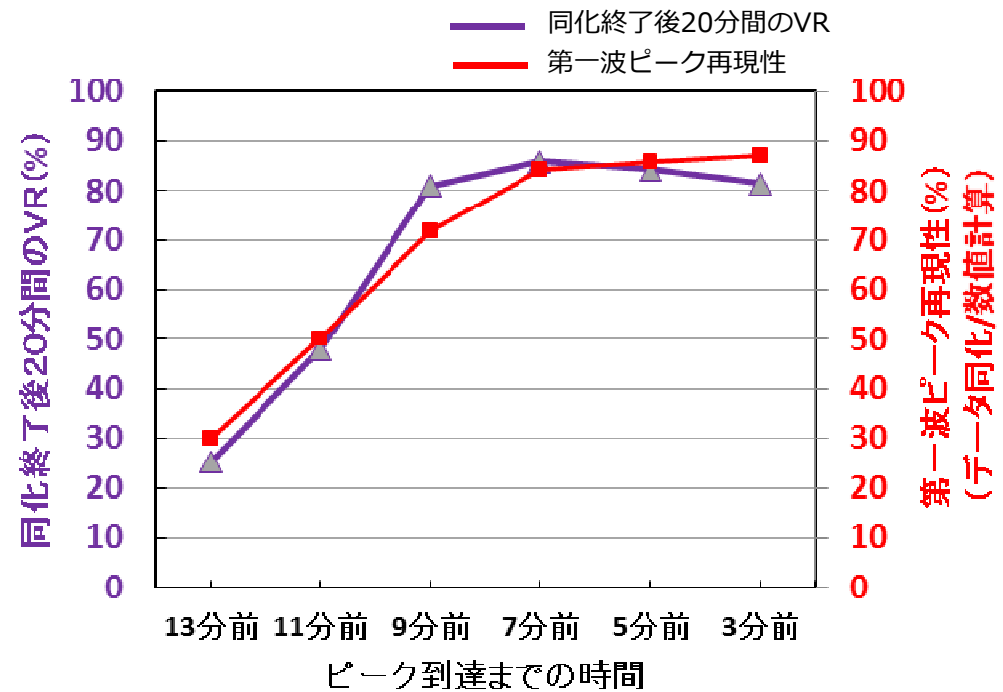
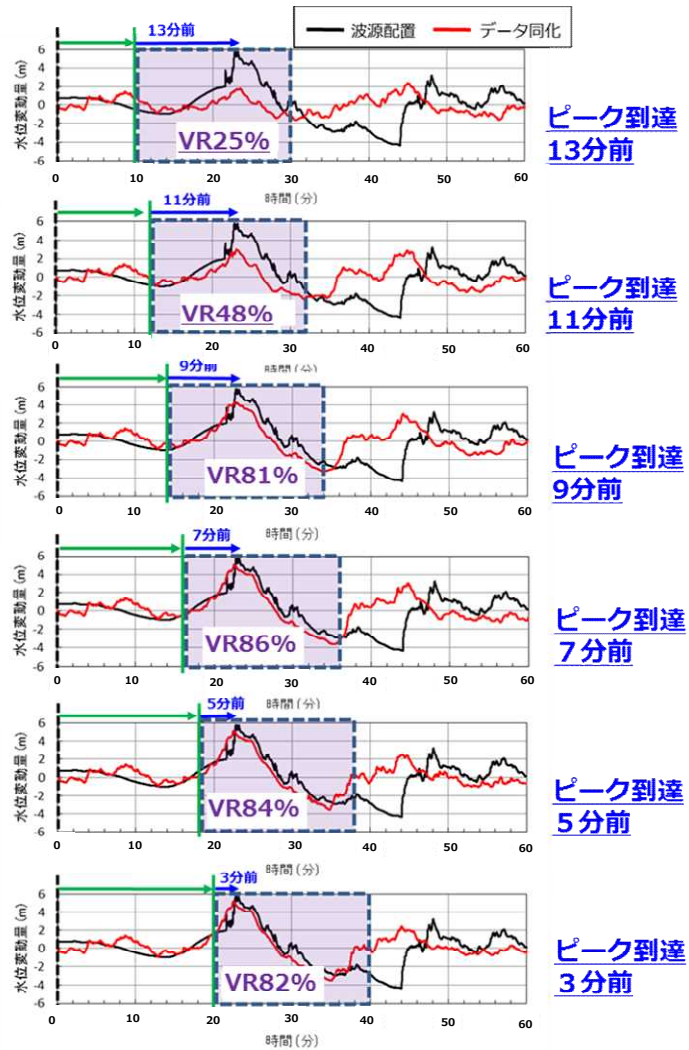
- 津波に対する退避行動をとるために第一波の検知が可能か。
- 第一波到達後の後続波の予測が可能か。



同化時間ごとに变化する検知・予測精度

第一波の検知

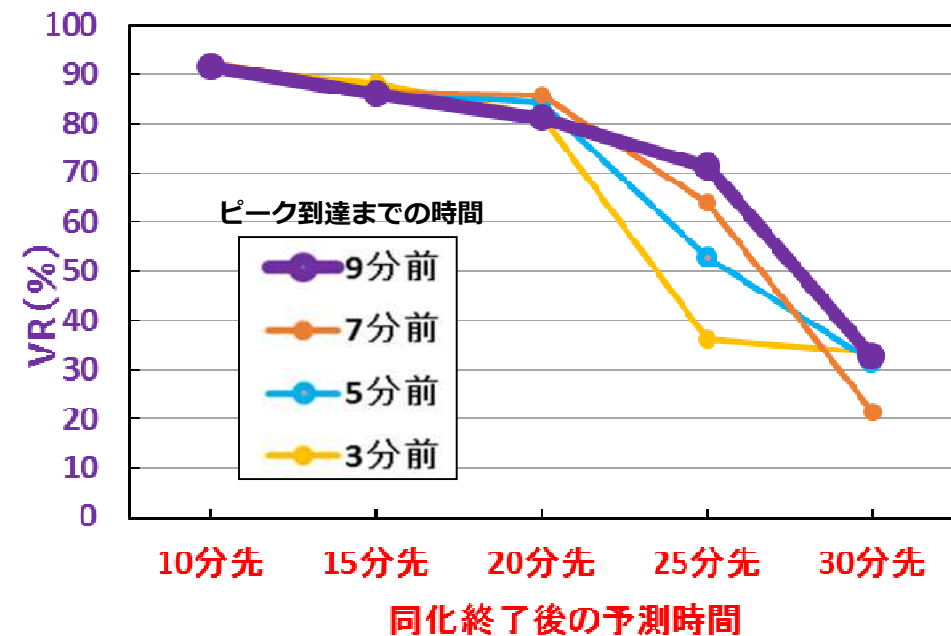
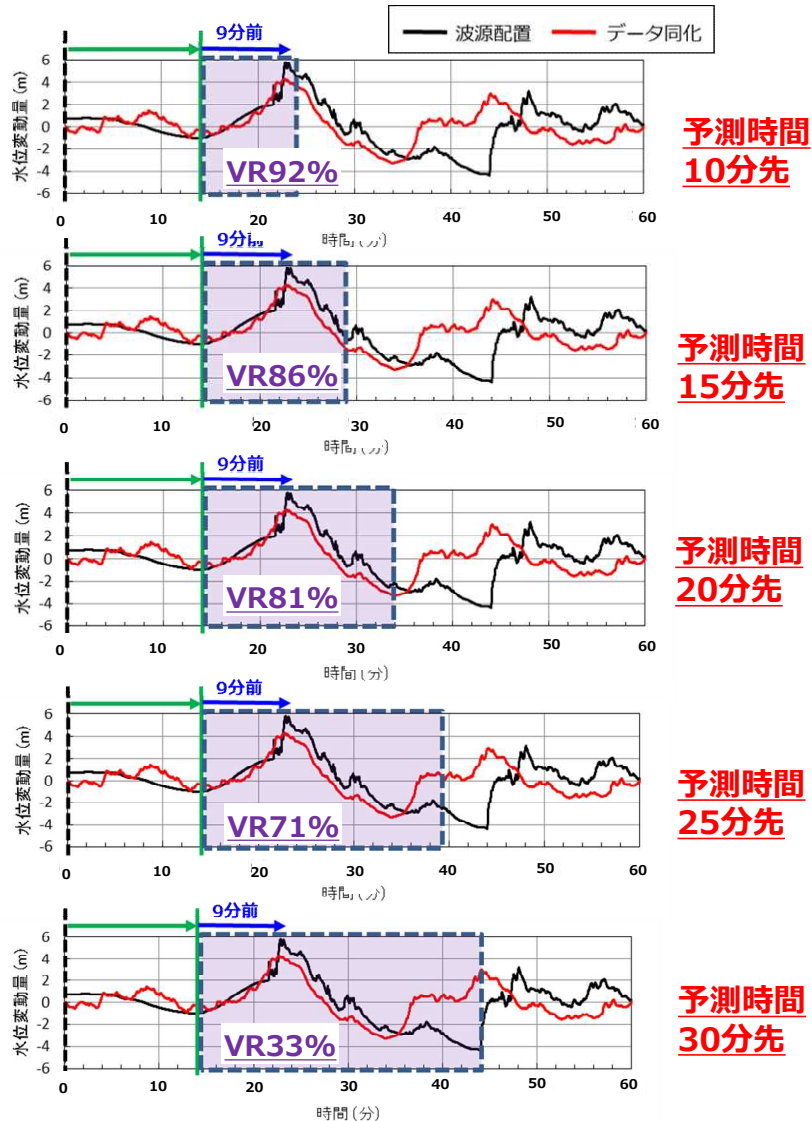
➤ 第一波を何分前に検知可能か検討



ピーク到達9分前まで同化すると、
 ・ 同化終了後20分間のVR80%以上
 ・ 第一波ピークの再現性も70%程度まで向上

➤ 本検討ケースでは、第一波の検知は9分前が目安

- 同化終了後、何分先まで予測可能であるか検討
- VR算出に用いる時間を変えて、予測精度を比較



- ・ V R 算出の時間を大きくすると再現性が低下
- ・ 同化を重ねた場合でも、予測可能な時間は20分先が目安

➤ 後続波を予測可能な時間は20分先までが目安

金戸ほか(2020・2021)を踏まえ、海底地すべりを伴う津波の視線方向流速をデータ同化に取り込んだ場合の津波の検知・予測の適用性を検討

■ 全体の再現性検討

データ同化における観測値の重みを従来より大きくすることで、海底地すべりによる短周期の津波を精度よく再現可能であることを確認した。

■ 検知・予測精度の検討

- ・ 第一波の検知

本検討ケースでは、第一波ピークを約9分前に検知可能

- ・ 後続波の予測

本検討ケースでは、20分程度先まで予測可能

■ 柏崎刈羽原子力発電所における作業員の退避行動について簡易なケーススタディを実施

- ・ データ同化による予測を用いることで、警報のない津波に対する避難行動に対しても時間的裕度を得られる可能性がある