

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

* 金戸 俊道 (東京電力ホールディングス)
木村 達人 (東電設計)
山下 恭平 (東京電力ホールディングス)
増子 雅洋 (東電設計)

2019年12月2日

背景

海洋レーダ

陸上の基地局から海面に向けて短波帯の電波を照射，波浪による後方散乱波を受信。
海表面の視線方向流速を計測可能。

2011年東北地方太平洋沖地震，2012年スマトラ島沖地震で津波を捉えることに成功

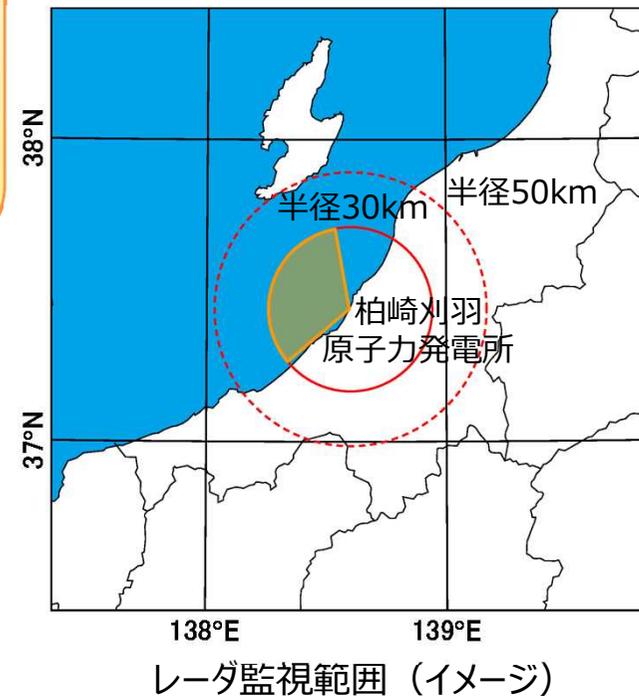
福島第一事故時に津波監視手段がなかった反省を踏まえ、柏崎刈羽原子力発電所では、海洋レーダを設置し津波を監視。



津波水位の予測ができないか。

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



目的

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システムを開発（木村ら，2018）

木村ら（2018）において津波予測のために与えられている視線方向流速は，津波数値シミュレーションで求められた値。実務への適用を想定し、以下について検討



①津波発生時に実際に観測される視線方向流速観測値の模擬（仮想津波観測値）

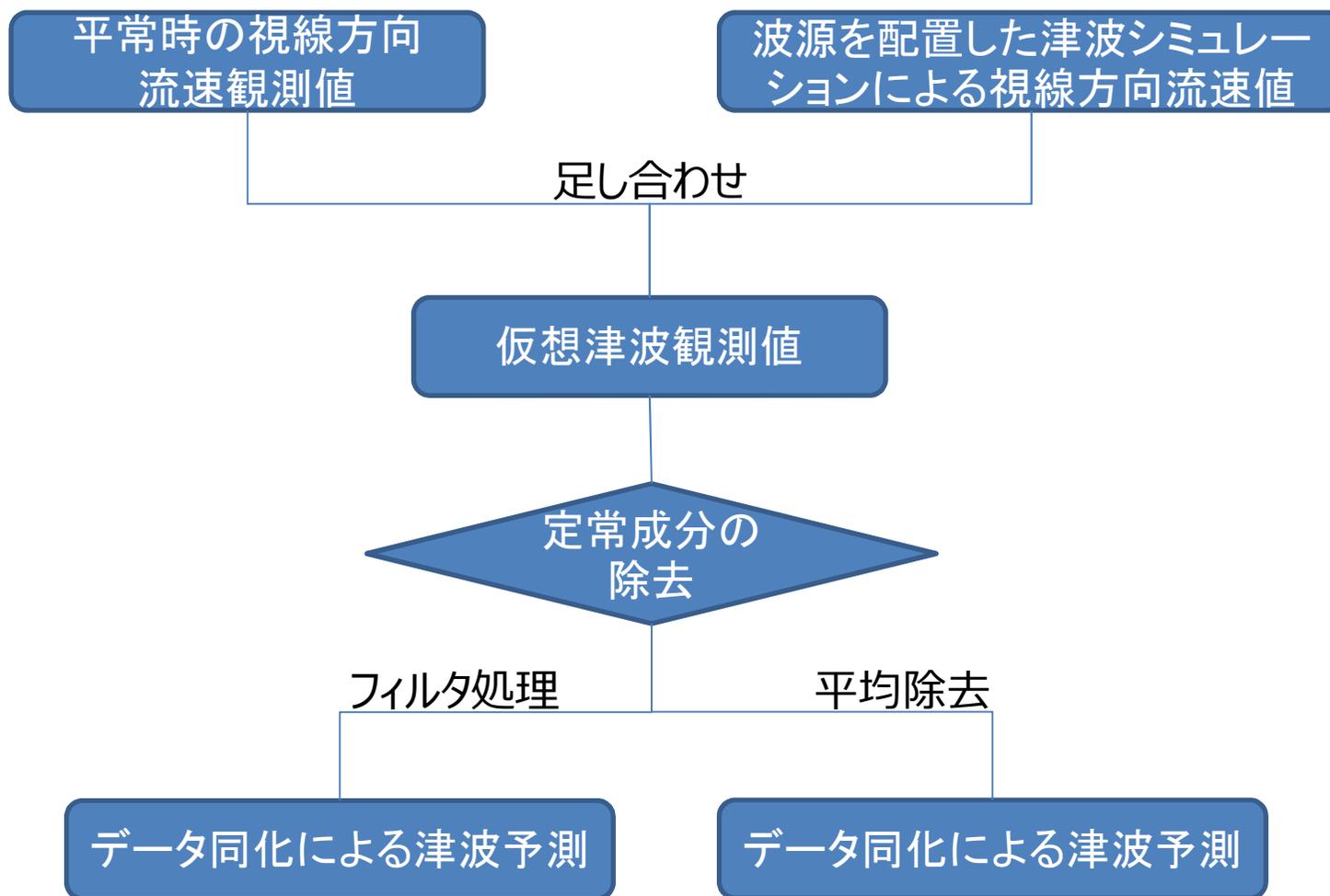
a. 海洋レーダによる平常時の視線方向流速観測値

+

b. 津波数値シミュレーションで得られた視線方向流速

②当該データを用いたデータ同化による津波予測の検証

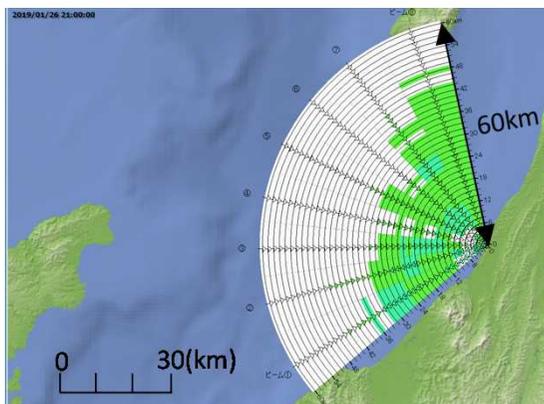
検討フロー



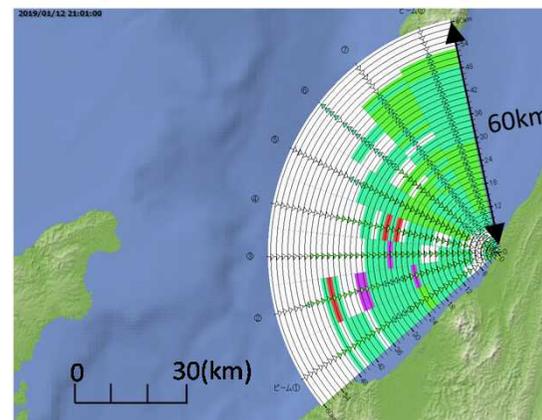
海洋レーダによる平常時の視線方向流速観測値

データ同化の入力条件としてより厳しい条件となることを期待して高波浪時の観測値を使用。
2019年1月のうち平均風速，最大風速，最大瞬間風速がほぼ最大値を示した1月26日の流速観測結果を用いた。

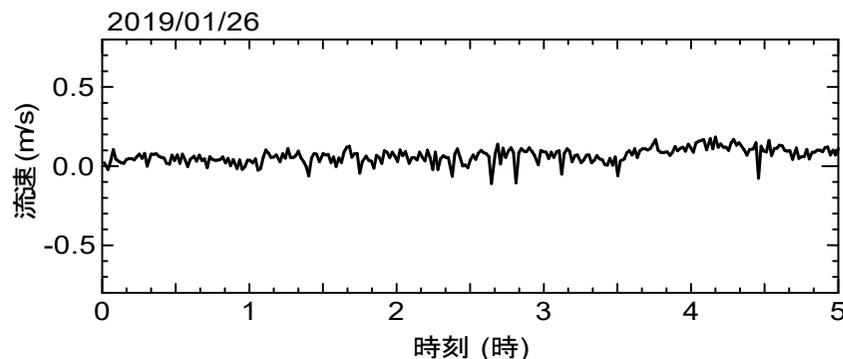
それぞれがほぼ最低値を示す1月12日と比較しておよそ3分の2程度の観測範囲となっており，波浪の影響によって観測値の取得率が低下している。



2019年1月26日0時



2019年1月12日0時



観測流速(2019/1/26, ビーム4, 距離18km地点)

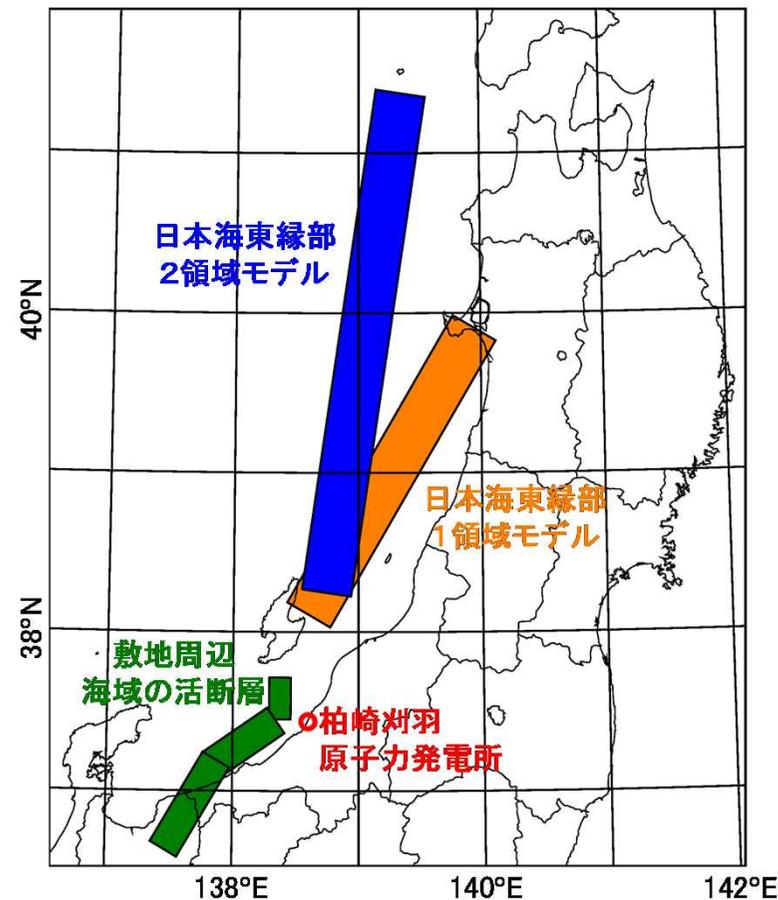
柏崎刈羽原子力発電所で想定する津波の概要

波源

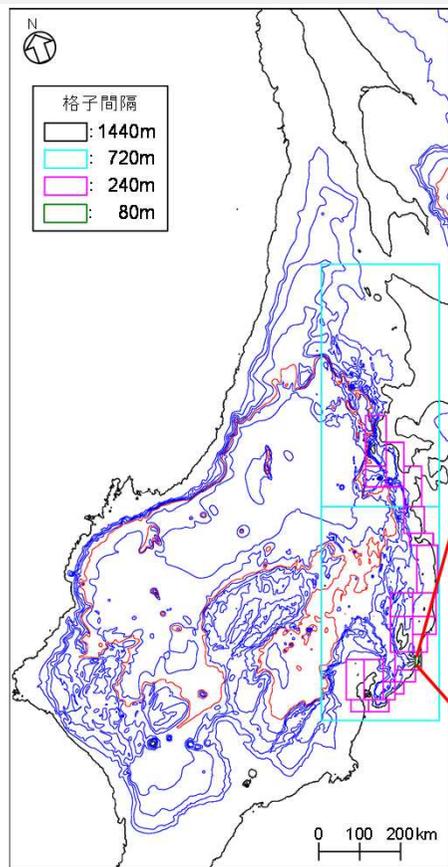
- ・敷地周辺海域の活断層 Mw8.0
- ・日本海東縁部 2領域モデル Mw8.6
- ・日本海東縁部 1領域モデル Mw8.4

観測点における視線方向流速の時刻歴を得る

波源	Mw	長さ (km)	幅 (km)	走向 (°)	上縁深さ (km)	傾斜角 (°)	すべり角 (°)	すべり量 (m)
海域の活断層	8.0	29.0	21.2	0.0	2.5	45.0	62.0	7.7
		55.0	26.2	55.0	2.5	35.0	96.0	7.7
		72.0	26.2	30.0	2.5	35.0	90.0	7.7
2領域モデル	8.6	350.0	40.0	188.0	5.0	30.0	100.0	22.3
1領域モデル	8.4	230.0	40.0	30.0	0.0	30.0	90.0	14.6

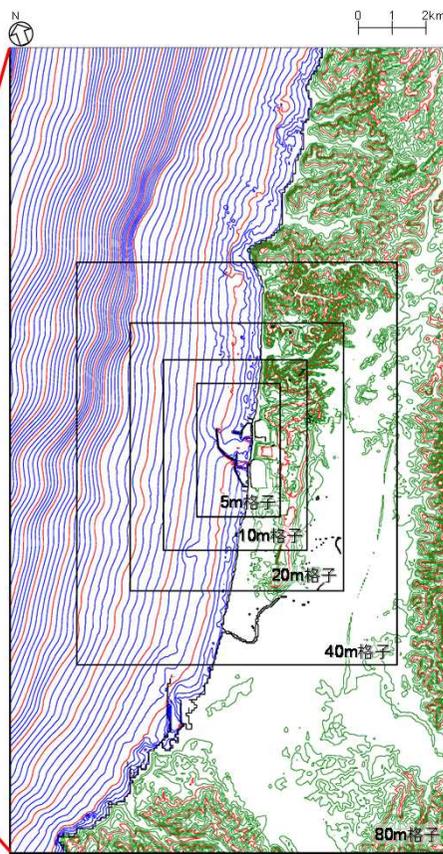


計算領域



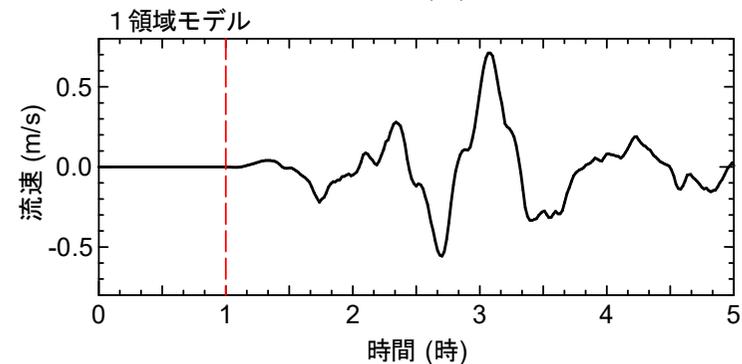
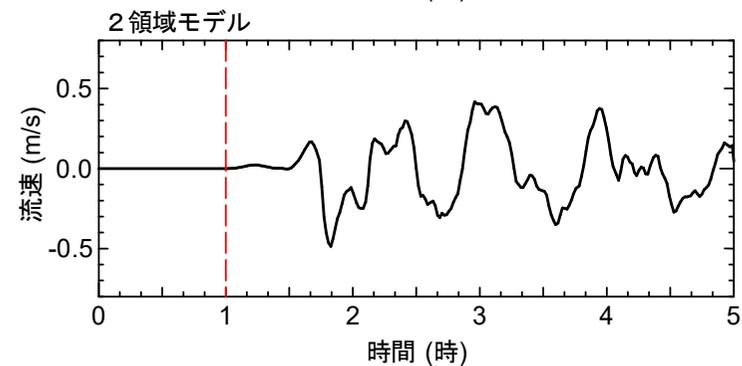
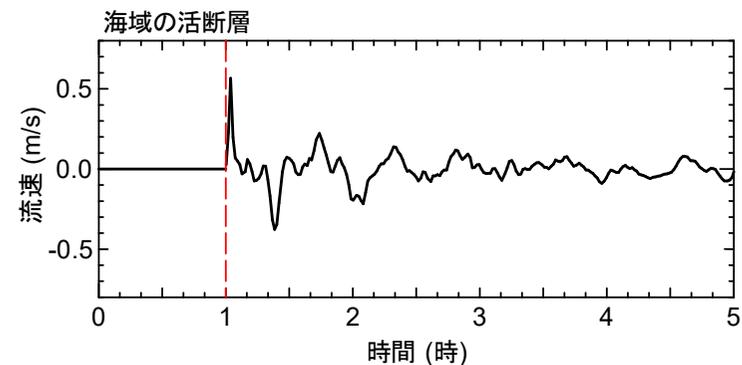
等深線500m間隔

日本海全域
東西：約1,100km
南北：約2,100km



等深線2m間隔，等高線10m間隔

非線形長波理論
80m以下の計算格子は
遡上境界条件



数値シミュレーションによる視線方向流速の一例
(ビーム4, 距離18km地点)

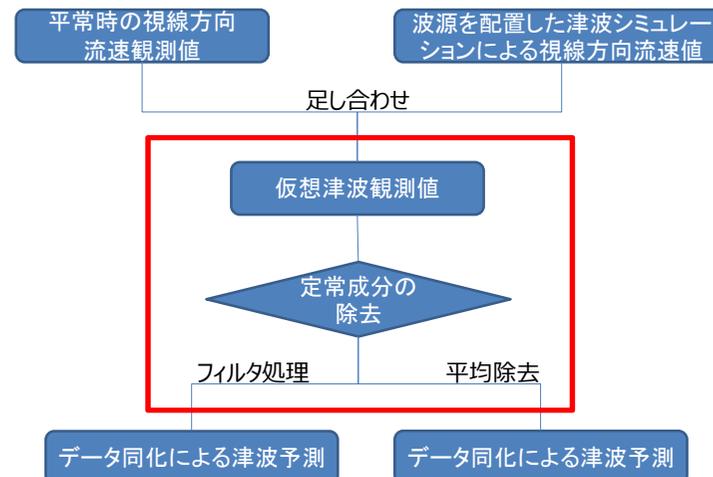
仮想津波観測値と定常成分の除去

観測値には、データ同化津波予測に用いる非線形長波方程式で再現することができない定常的な流速成分（例えば、吹層流等）が含まれていると考えられ、そのままではデータ同化による予測ができなかった。

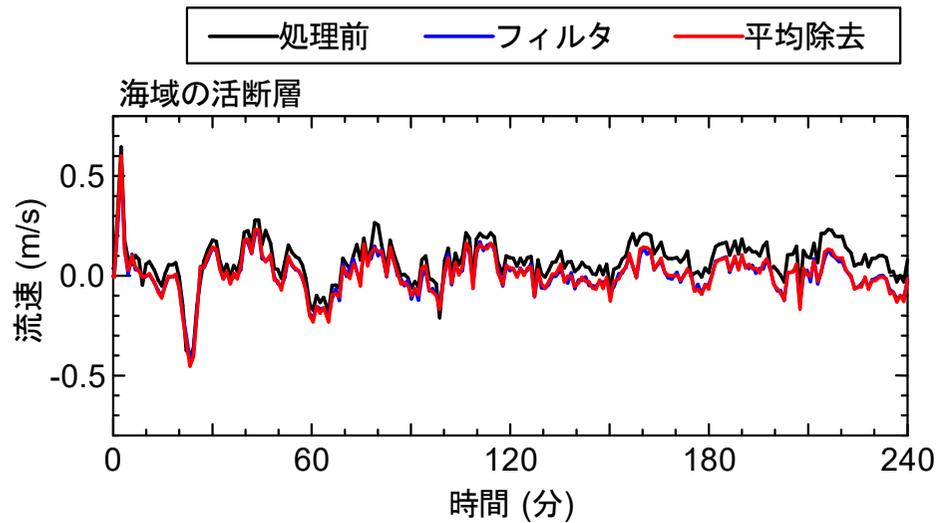


これらの成分の除去のため、以下の二つの方法を検討。

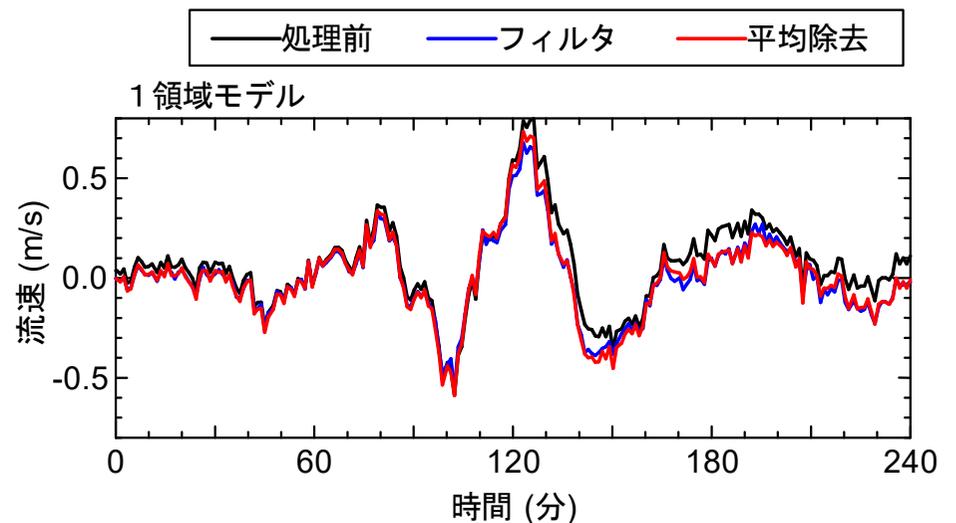
- (1) 視線方向流速観測値を周波数成分に分解し、津波による卓越周波数以外の成分をフィルタで除去する方法（150秒以下と80分以上をカット）
- (2) 視線方向流速観測値から観測値取得以前70分の流速平均値を除去する方法



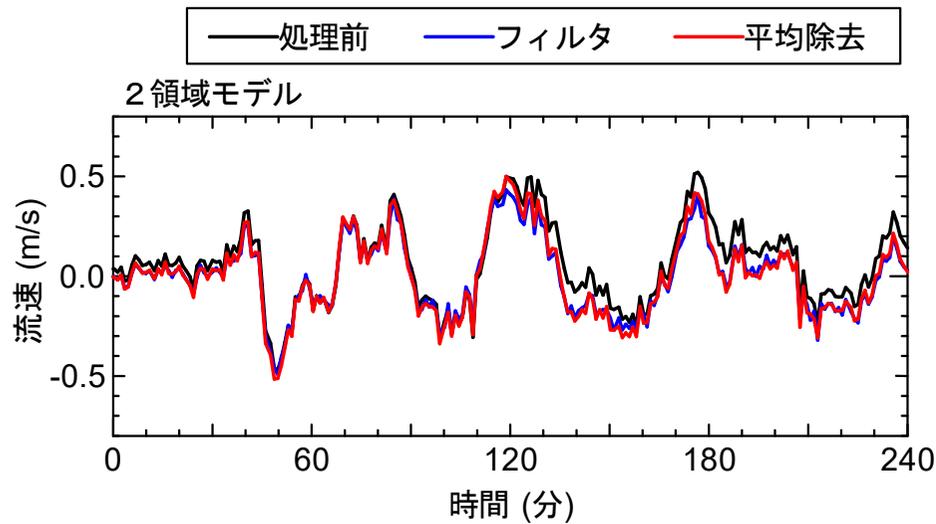
仮想津波観測値と定常成分の除去



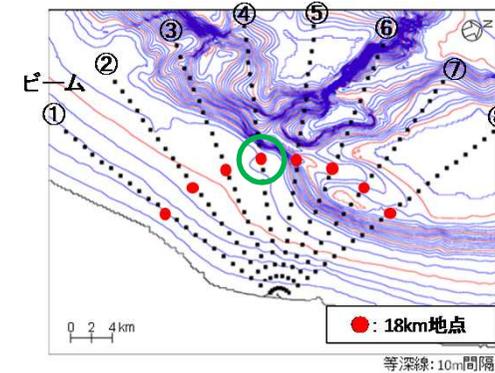
仮想津波観測値(海城の活断層, ビーム4, 距離18km地点)



仮想津波観測値(1領域モデル, ビーム4, 距離18km地点)



仮想津波観測値(2領域モデル, ビーム4, 距離18km地点)



データ同化

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。

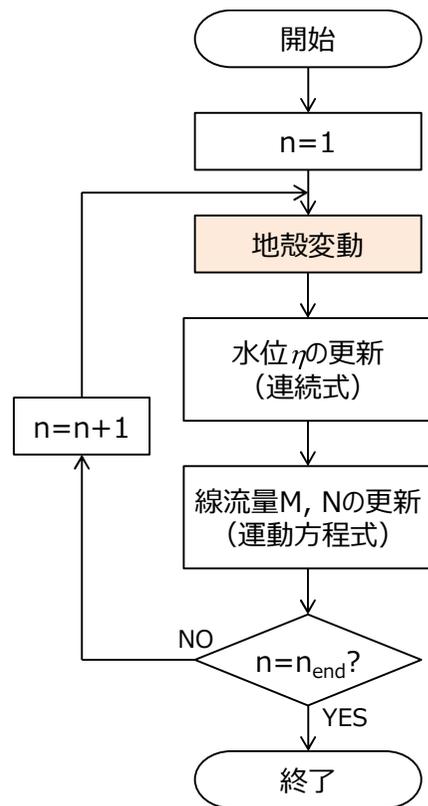
重み行列 \mathbf{W} は推定値 \mathbf{x}^a の誤差分散が最小となるように決定
パラメータとして以下を与える必要がある。

- 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

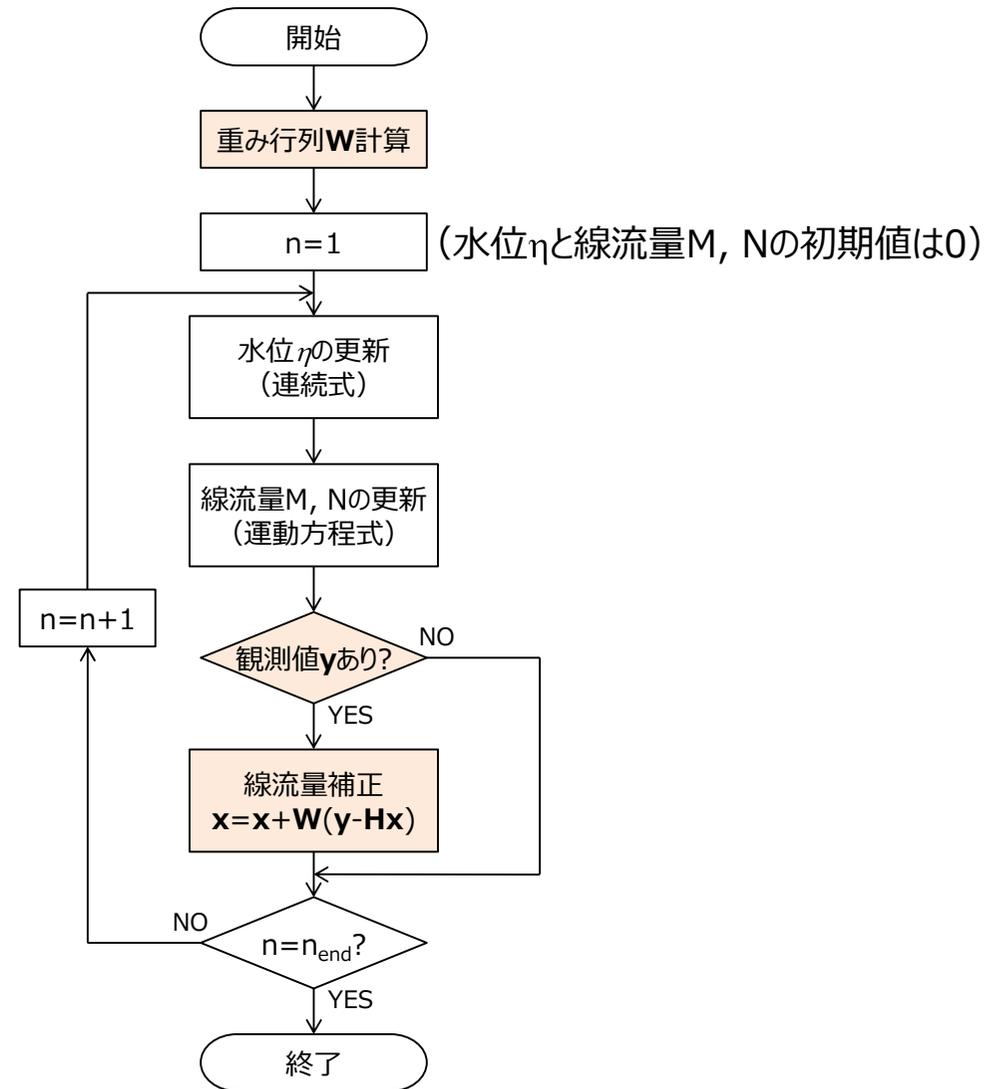
本検討では、以下のように仮定した。（Maeda et al.と同様）

- μ^b として距離をパラメータとしたガウス関数を採用
- 観測点間の観測誤差には相関がない（ $\mu_{ij}^o = \delta_{ij}$ ）
- 観測誤差と背景誤差の標準偏差の比（ $\rho = 4$ ）

フローチャート

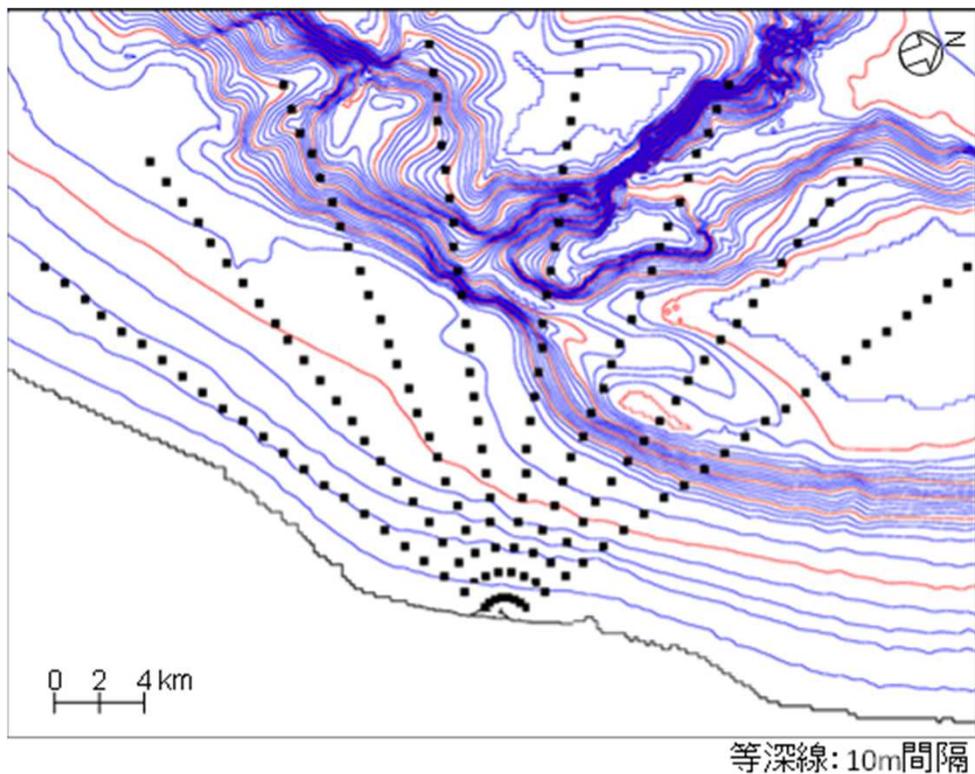


通常 of 津波解析



データ同化津波解析

計算領域（データ同化津波予測）



観測範囲近傍に限定
東西：43.2km
南北：57.6km

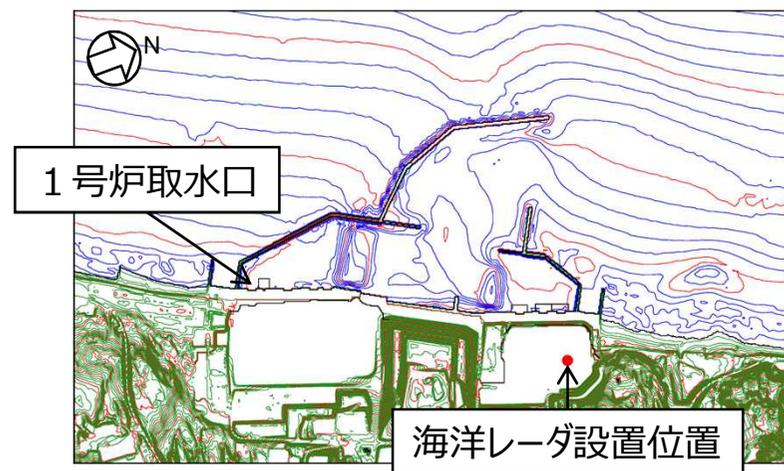
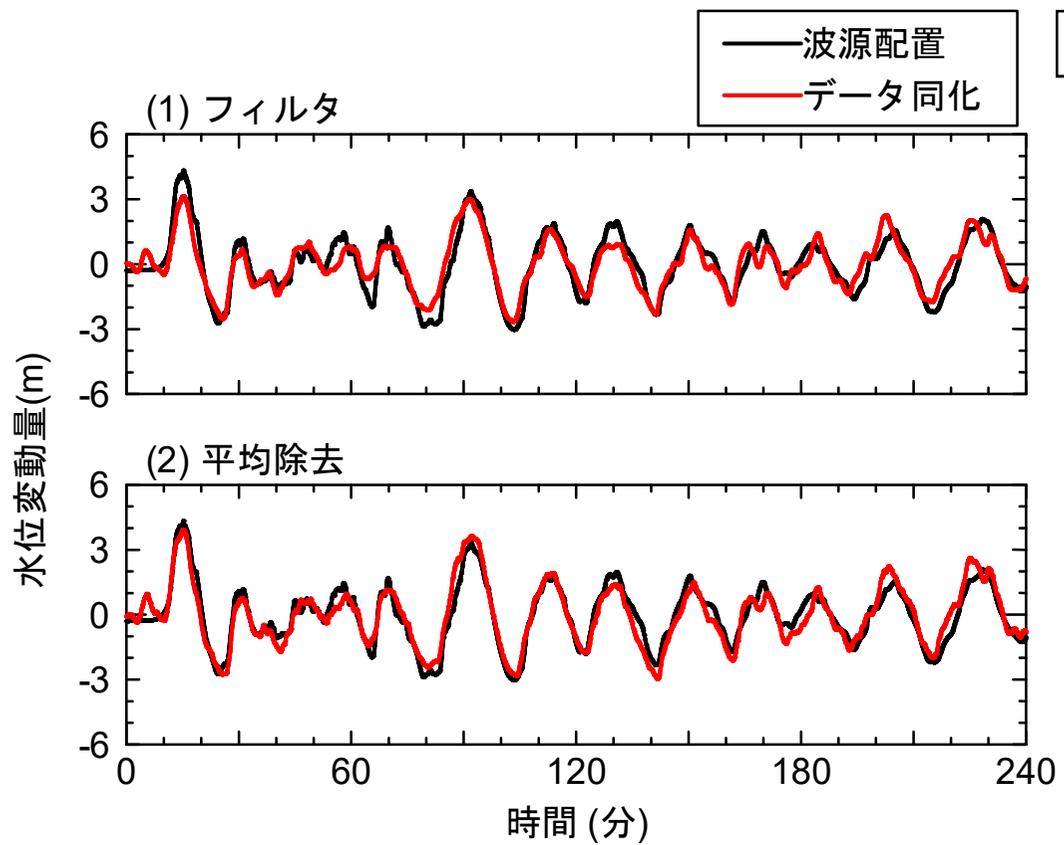
非線形長波理論
格子間隔240m→80m→40m→20m
→10m→5m
5m格子領域のみ遡上境界条件

海洋レーダ設置位置を中心に

- ・距離：発電所～35km, 1.5km間隔
 - ・角度：120°, 15°間隔
- で観測点を配置

観測間隔は約1分, 速度分解能は0.1m/s

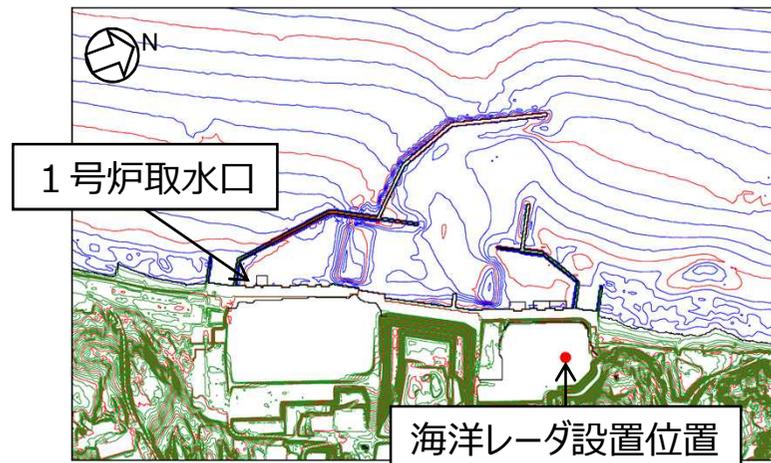
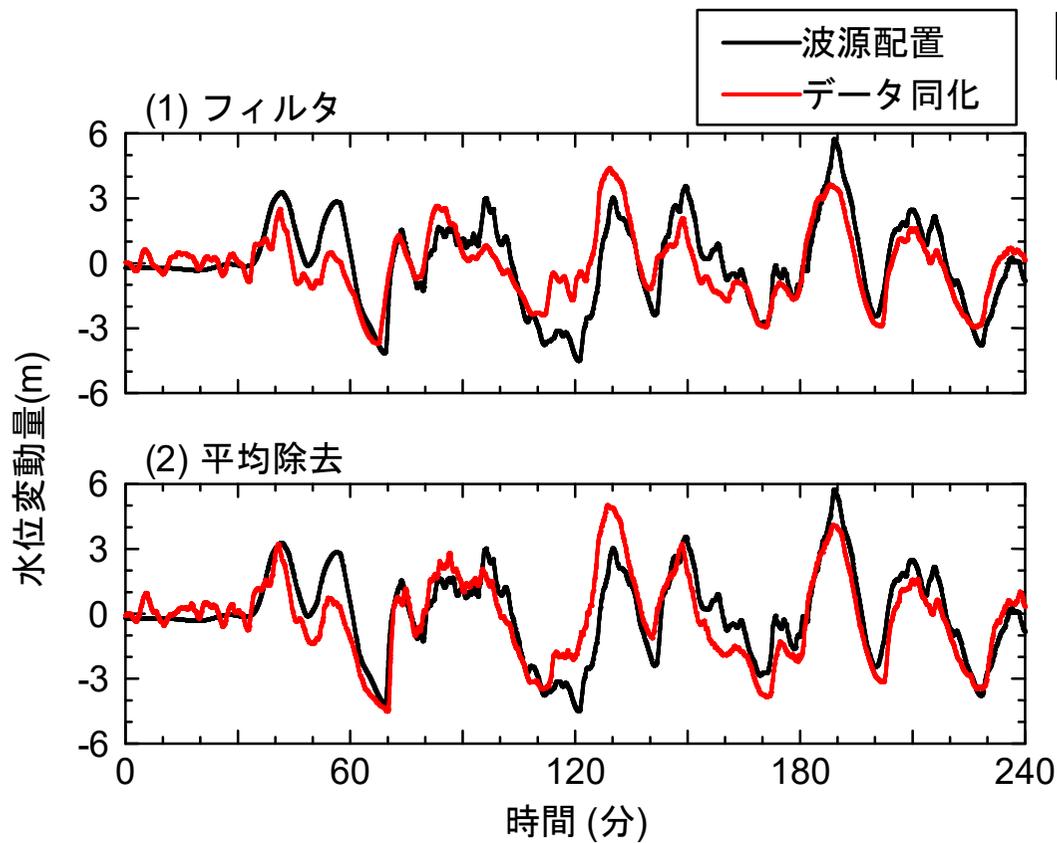
予測結果（海域の活断層）



相関係数

定常成分の除去	1号炉取水口
フィルタ	0.91
平均除去	0.94

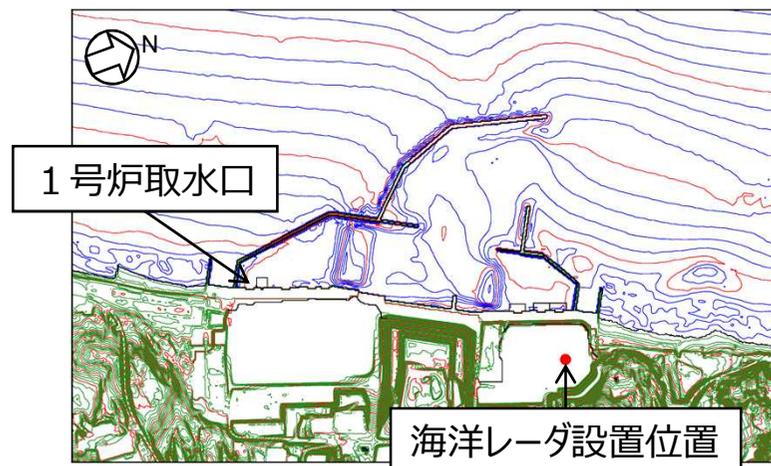
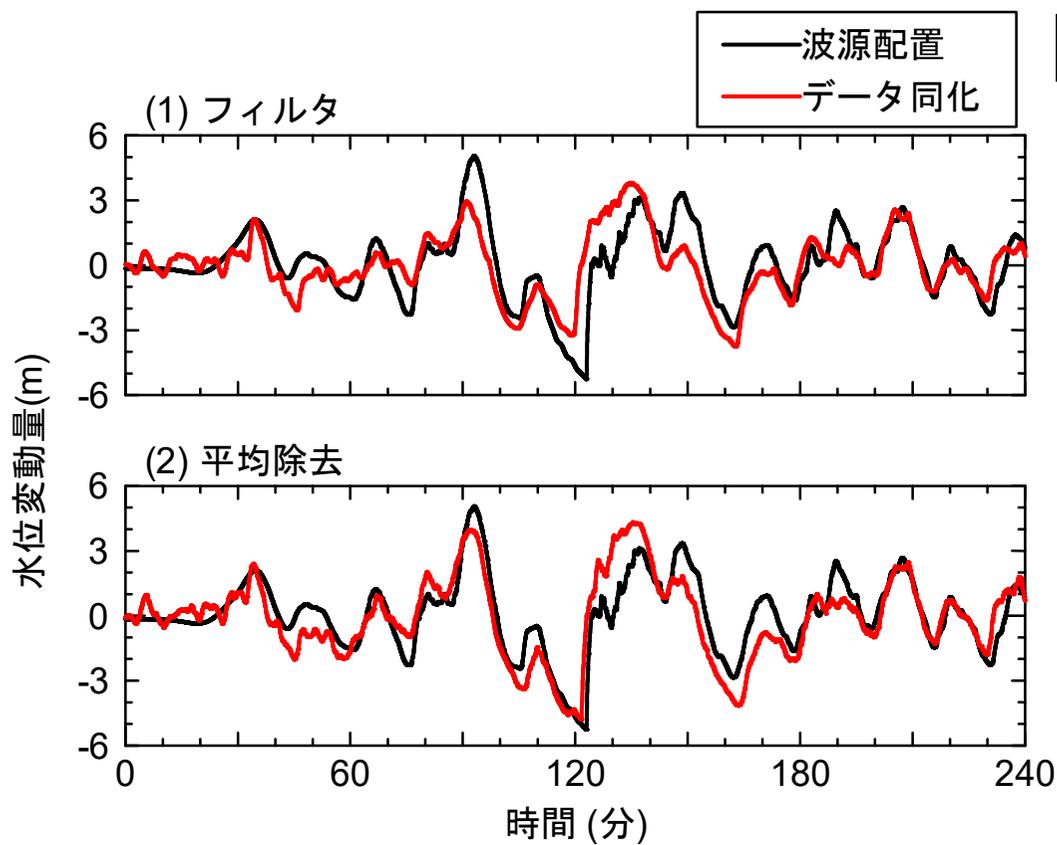
予測結果（日本海東縁部 2領域モデル）



相関係数

定常成分の除去	1号炉取水口
フィルタ	0.77
平均除去	0.83

予測結果（日本海東縁部 1領域モデル）



相関係数

定常成分の除去	1号炉取水口
フィルタ	0.71
平均除去	0.83

まとめ

- ・柏崎刈羽原子力発電所に設置された単一の海洋レーダから実際に得られた平常時の視線方向流速観測値に、津波数値シミュレーションで得られた視線方向流速を合成することで仮想津波観測値を作成
- ・仮想津波観測値から定常成分を除去し、当該データを用いたデータ同化による津波予測を実施

- ・第一波のみならず後続波についても精度良く予測可能
- ・データ取得率が低下する冬季の高波浪時でも精度良く予測できている
- ・2種類の定常成分の除去方法には大きな差はないものの、平均除去（観測値取得以前の一定時間の流速平均値を除去する方法）の方が予測精度がやや高かった。

今後の課題

- ・現状の計算時間は実時間の1/3程度
→ 並列化等により高速化を図る

- ・ノイズの影響
→ スパイクノイズ、船舶・航空機等によるノイズの除去
仮想津波観測実験（藤ら，海岸工学，2015）による検討