

資料2-1

tFISHの運用に向けての進捗状況

2018/2/21

気象庁

目次

- 2016年11月22日福島県沖の地震による津波を受けての改善
- 予測信頼度の判定指標の検討

2016年11月22日福島県沖の地震 による津波を受けての改善

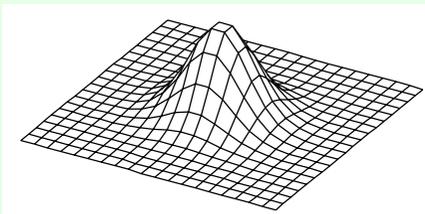
沖合津波波形逆解析に基づく津波即時予測手法

tsunami Forecasting based on Inversion for initial sea-Surface Height (tFISH)

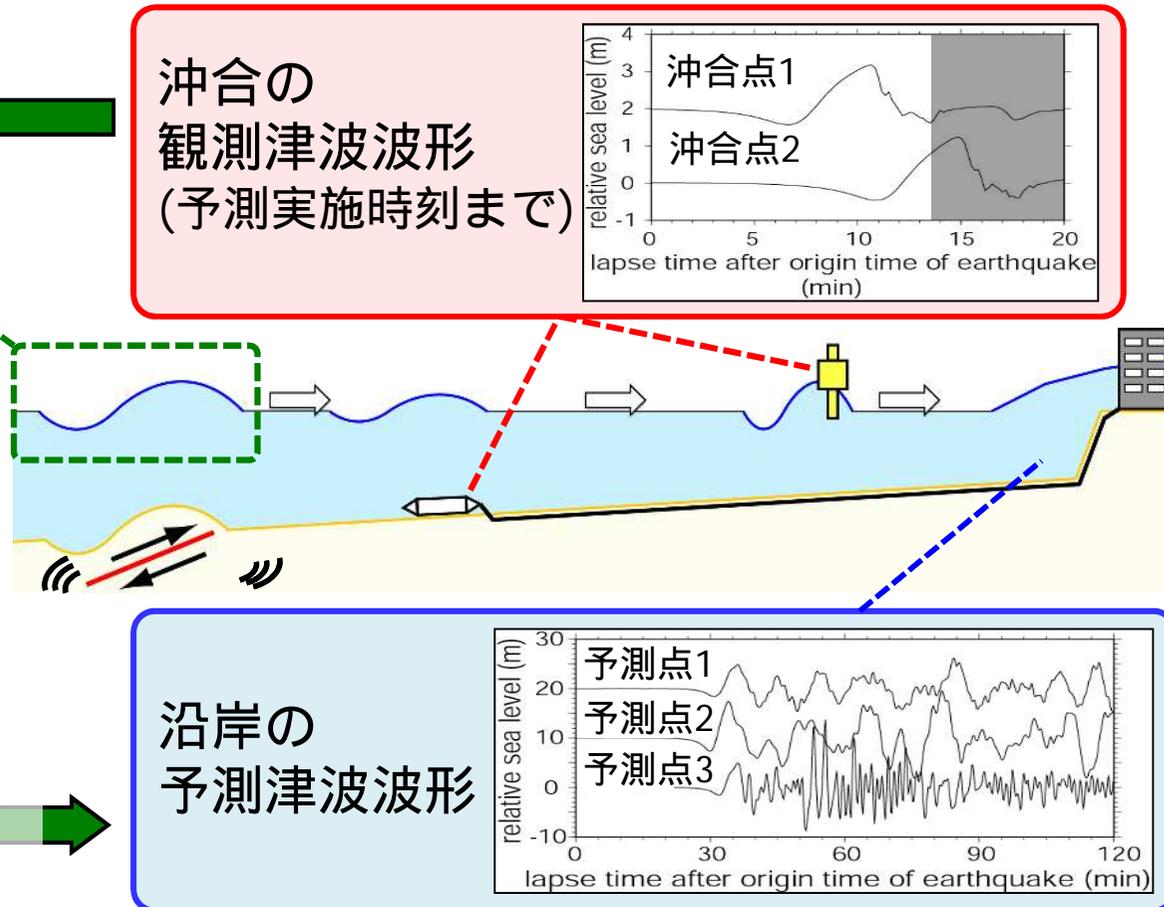
津波波形逆解析
による波源の推定



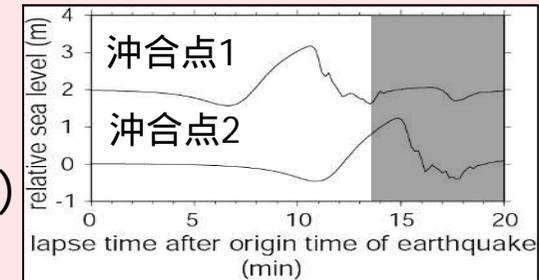
初期水位分布



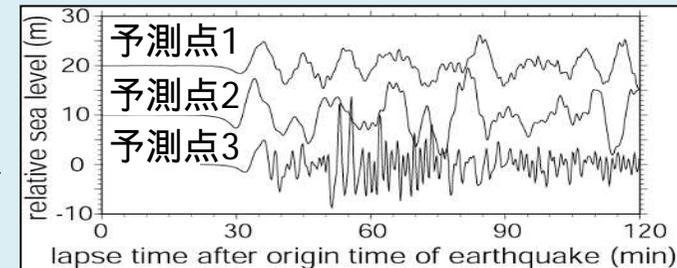
津波波形グリーン関数の
線形結合による予測波形
の合成



沖合の
観測津波波形
(予測実施時刻まで)



沿岸の
予測津波波形



- ✓ 断層解と地震Mは不要
- ✓ 震源時と震央位置を使用
- ✓ 逐次更新

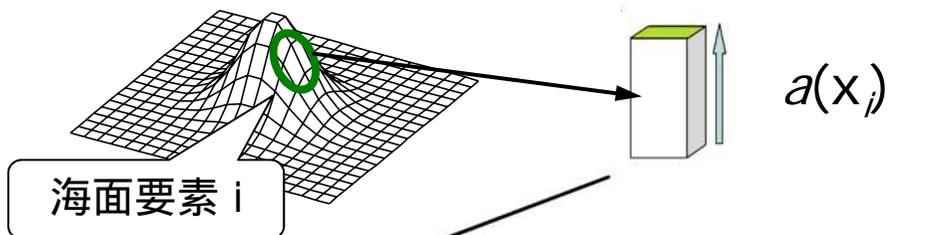
非プレート境界地震，津波地震
波源解の拘束に使用
時々刻々と観測データが増加

波形逆解析と予測波形合成

津波の線形モデル化

海面を小領域に分割

上下変位



海面要素 i

$a(x_i)$

各小領域からの津波波形

観測点 ($X = X_j$)
における津波波形

$G_{ij}(t) a(x_i)$

$f^{obs}(x_j, t)$

津波波形グリーン関数
(海面要素の単位変位への応答)

$$f^{obs}(\mathbf{x}_j; t) = \sum_i G_{ij}(t) a(\mathbf{x}_i)$$

波形逆解析

津波波形グリーン関数

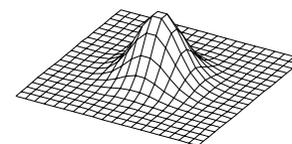
$$\begin{pmatrix} f^{obs}(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G(t) \\ \alpha S \\ \beta D \end{pmatrix} \mathbf{a}$$

沖合の観測
津波波形

初期水位
(未知量)

空間的に滑らか

震央付近の初期水位が大きい



初期水位分布 $\hat{\mathbf{a}}$ が求まる

予測波形合成

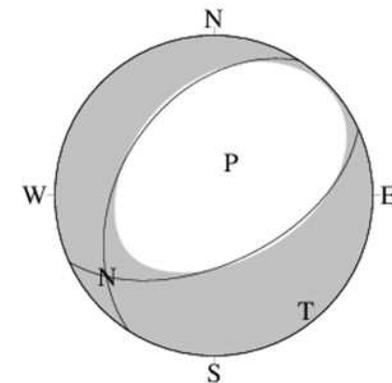
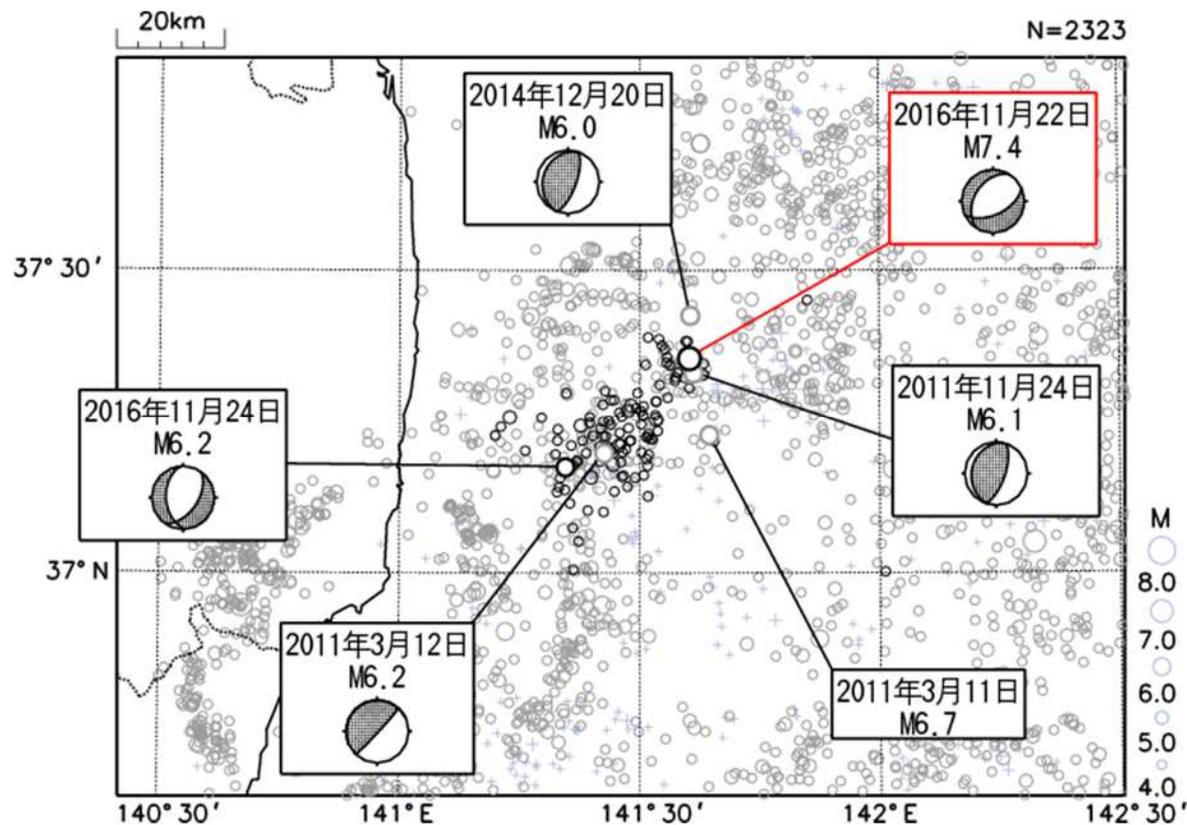
$$f^{pred}(\mathbf{x}_j; t) = \sum_i G_{ij}(t) \hat{a}(\mathbf{x}_i)$$

対象点の
予測津波波形

津波波形
グリーン関数

津波を観測した事例(11/22 福島県沖 Mj7.4)地震の概要

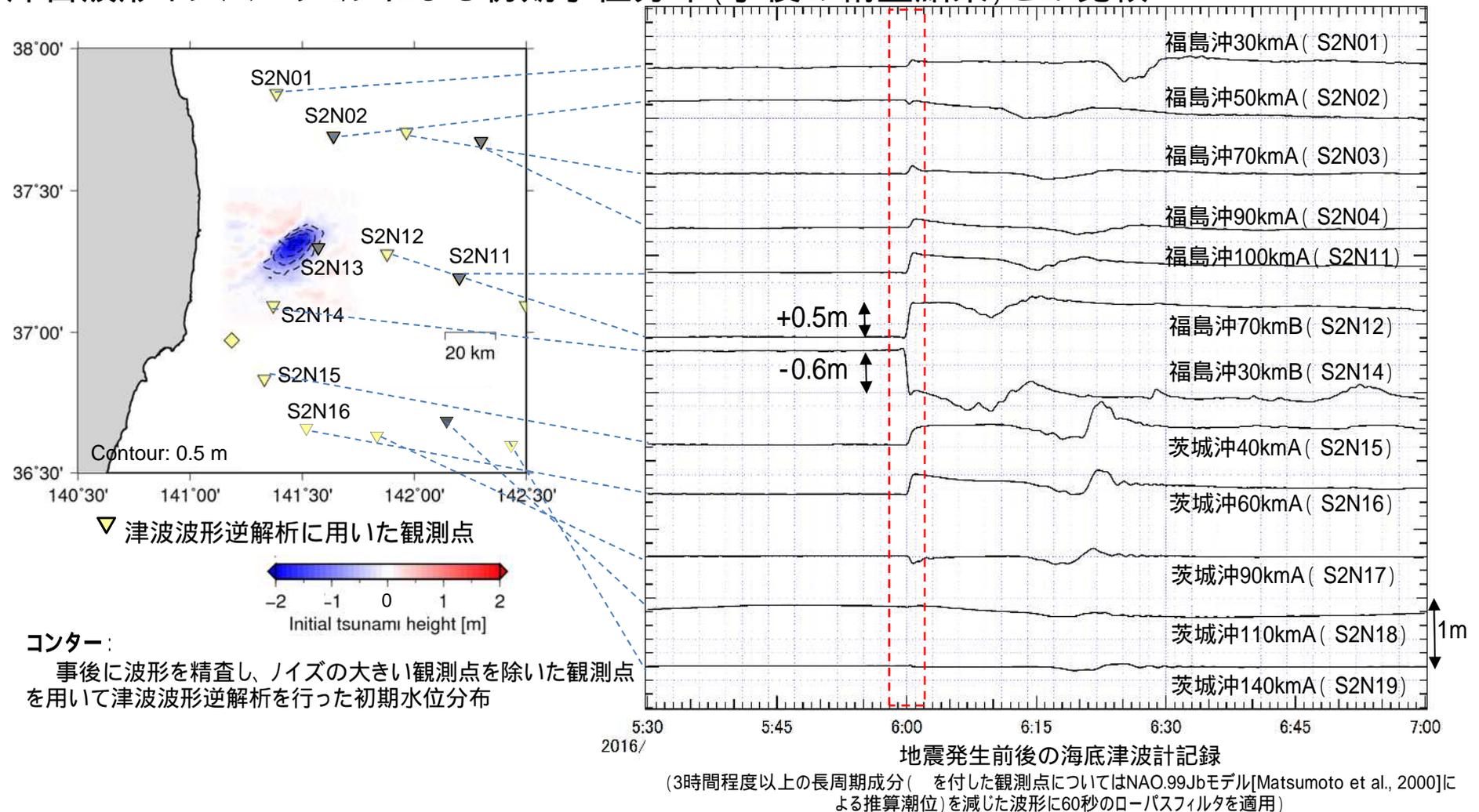
一元化震源					気象庁	防災科研	USGS
発生日時	緯度	経度	深さ	Mj	Mw、セントロイドの深さ		
2016年11月22日05時59分	37° 21.28'	141° 36.25'	25km	7.4	6.9、12km	7.0、11km	6.9、12km



種別	津波の観測状況
沖合津波観測点	最大0.4m程度
沿岸津波観測点	最大1.4m程度

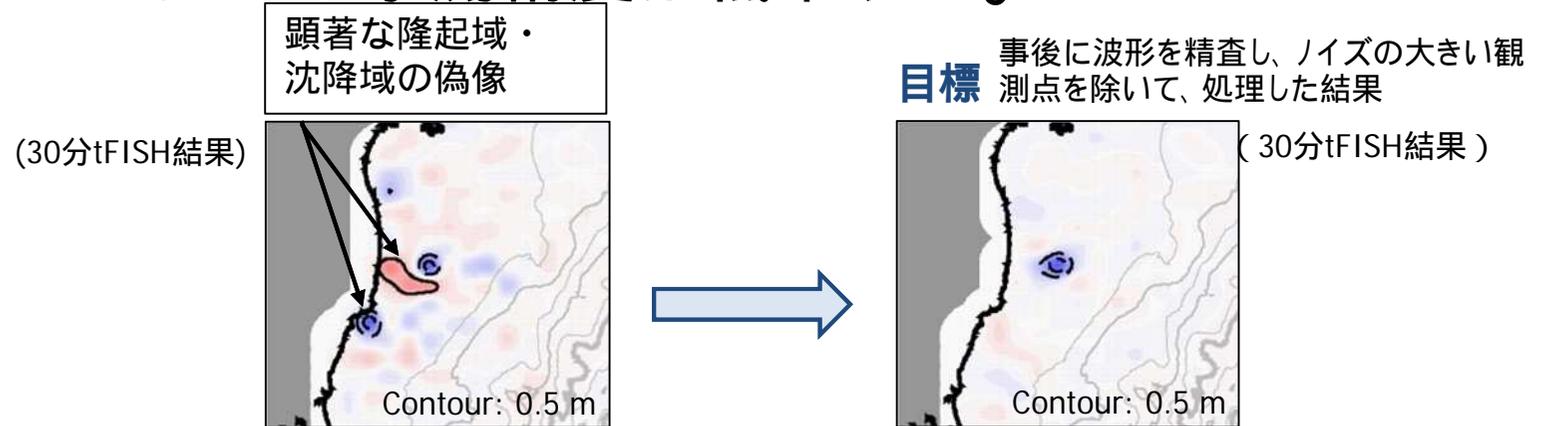
地震直後の沖合津波観測点の記録と地殻変動(鉛直変位)との関係

波源域周辺における地震前後の沖合津波観測点の記録と
 沖合波形インバージョンによる初期水位分布(事後の精査結果)との比較



・地震直後の水圧値のステップ的な変化は地震時の隆起沈降を反映したものではないと考えられる。現在のところ、原因は不明。

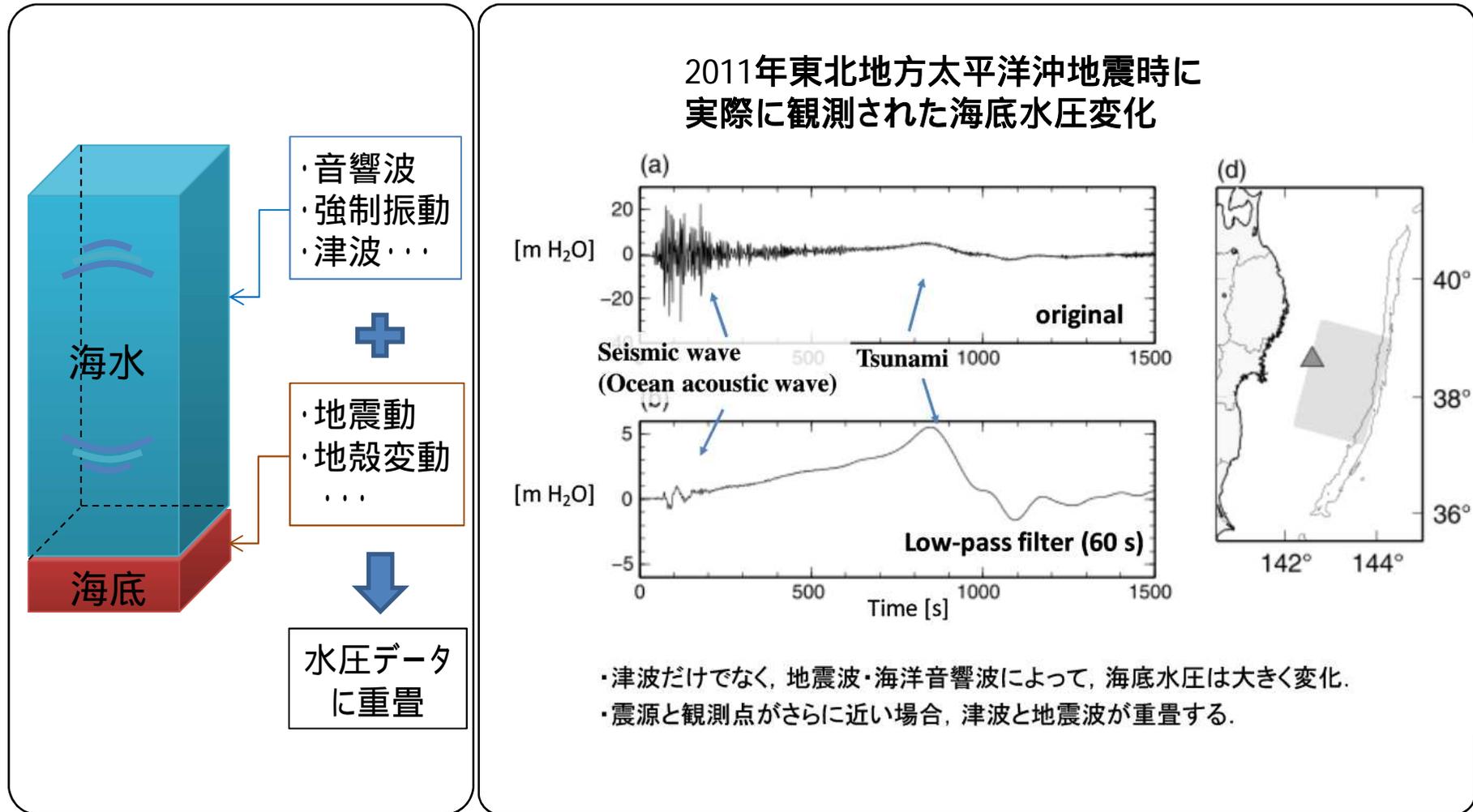
観測データに含まれる津波が偽波源として推定されることによる予測精度が低下する。



要素波源サイズが対象の津波波源よりも大きいことに起因して、場所によっては予測精度低下が生じる。

➡ マグニチュード7.0以上の地震を対象とすることを検討

地震時の海底津波計の波形



短周期成分である音響波、地震動等はカットオフ周期60秒のローパスフィルタである程度の低減が可能。

地震時の海底水圧計の波形パターン

気象庁一元化カタログ掲載のM5以上の地震について、地震時のS-net水圧記録に地殻変動ではないステップやトレンド等の地震時の波形パターンを調べたところ、以下の4パターンで網羅できることがわかった。

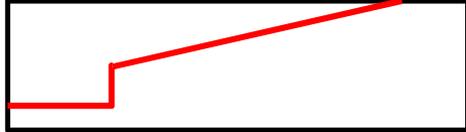
2016年1122日福島県沖地震での4パターンの例

天文潮汐補正後の波形

ローパスフィルター処理した波形

波形パターン

ステップ + 同符号で単調変化^m



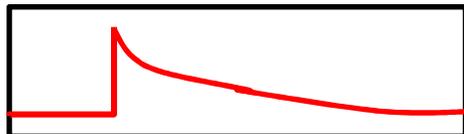
波形パターン

ステップ + 減衰 + ステップ残留^m



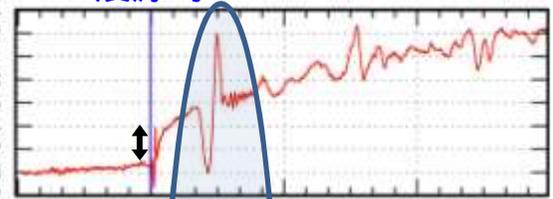
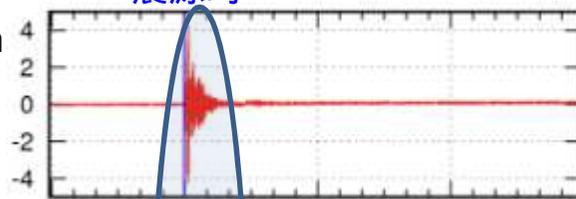
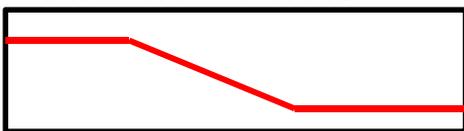
波形パターン

ステップ + 減衰



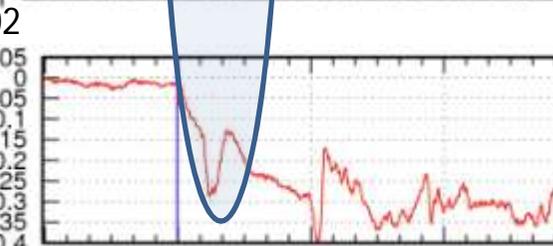
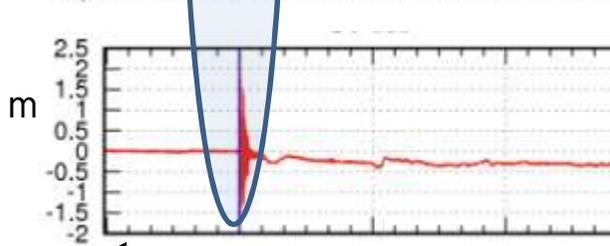
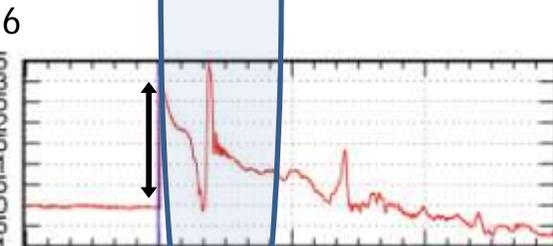
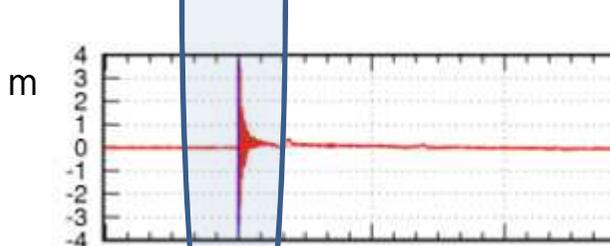
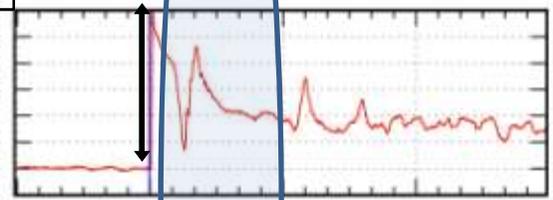
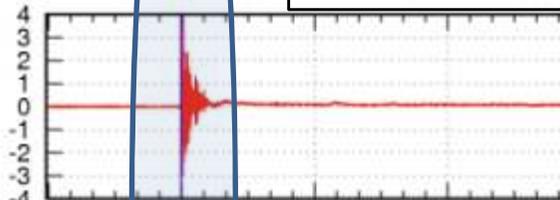
波形パターン

単調変化 + 変化停止



地震波等の短周期の波

津波

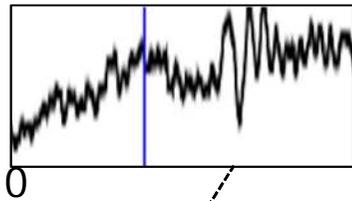


4時間

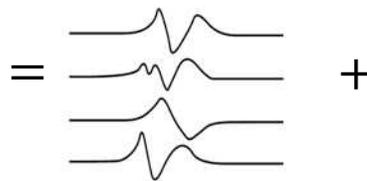
津波波形逆解析の改良: 津波・非津波の同時分離推定

観測方程式に
2つの項を追加

観測津波波形
データ
(震源時～現在)



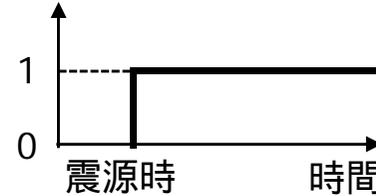
tFISH
Tsushima et al.
[2009, 2012JGR]
津波波形
グリーン関数
(津波成分 +
地殻変動成分)



本研究でtFISHに新規追加

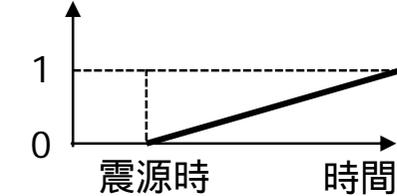
高川・富田
[2012海岸工学]

各津波計記録上で
震源時に生じる
単位オフセット項
(非地殻変動成分用)



本研究で新規追加

各津波計記録上で
単位の傾きを持つ
線形一次トレンド項
(非津波成分用)



$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}^{\text{obs}}(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}(t) & \mathbf{O}(t) & \mathbf{T}(t) \\ \alpha \mathbf{S} & 0 & 0 \\ \beta \mathbf{D} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha' \mathbf{D}_o & 0 \\ 0 & 0 & \beta' \mathbf{D}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{m} \\ \mathbf{m}_o \\ \mathbf{m}_T \end{bmatrix}$$

各要素波源での初期水位量

各津波計記録上で震源時に生じるオフセット

各津波計記録上の線形一次トレンド傾き

オフセット項・トレンド項に対するダンブ拘束

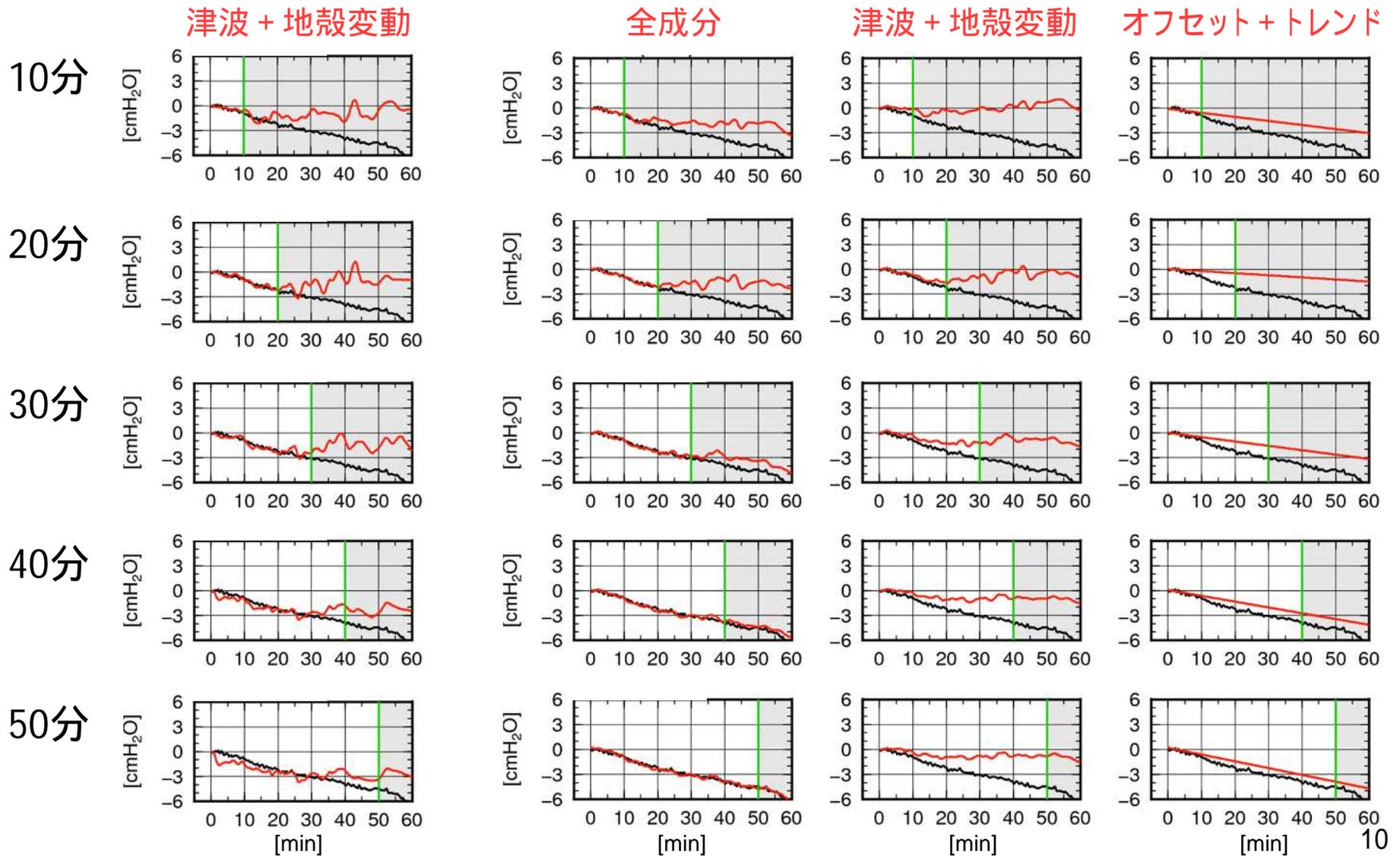
計算波形と観測波形の比較 (例1)

改良後のtFISHが津波成分と地殻変動とノイズ(地殻変動以外のオフセットノイズおよびトレンド)を適切に分離できているかを福島県沖の地震(2016年11月22日)による津波で検証。

S4N13 改良前tFISH

改良後tFISH

— 観測 — 計算



計算波形と観測波形の比較 (例2)

S2N02

改良前tFISH

改良後tFISH

— 観測 — 計算

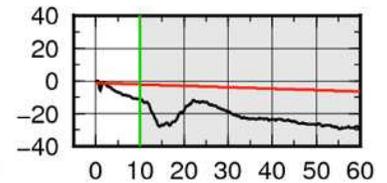
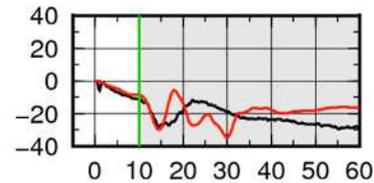
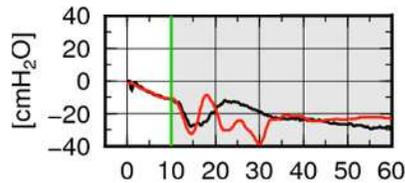
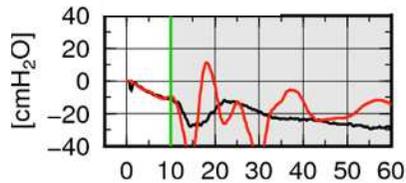
津波 + 地殻変動

全成分

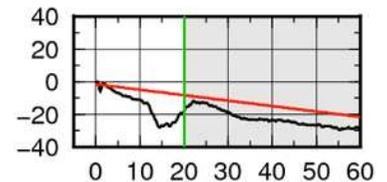
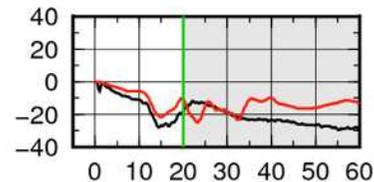
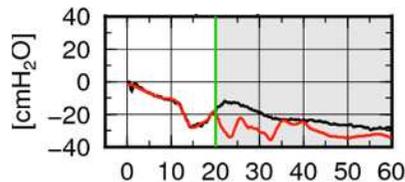
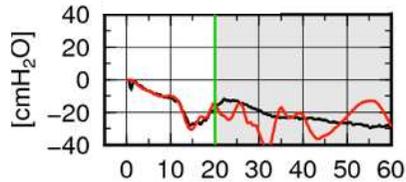
津波 + 地殻変動

オフセット + テレンド

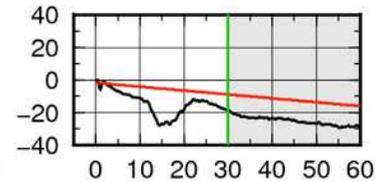
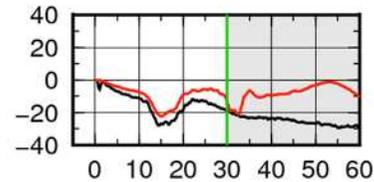
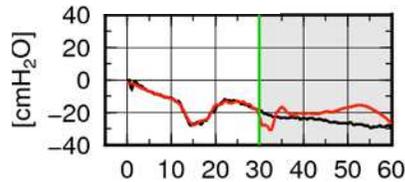
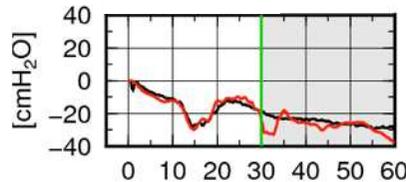
10分



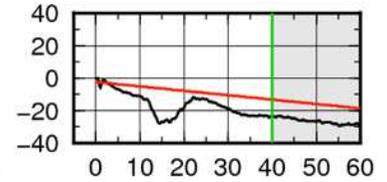
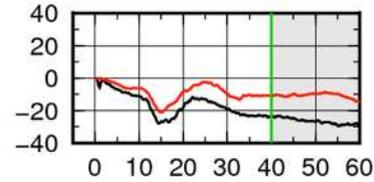
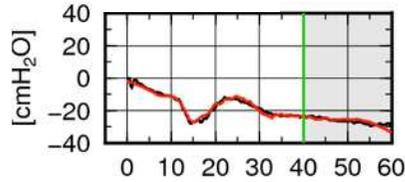
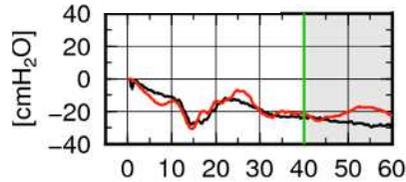
20分



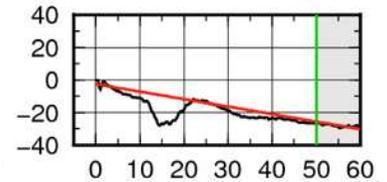
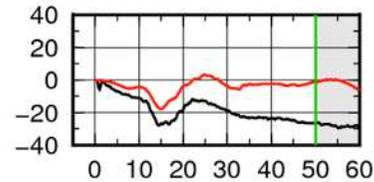
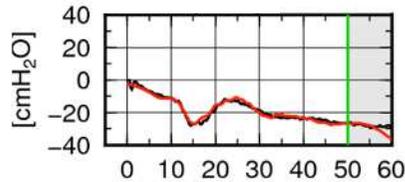
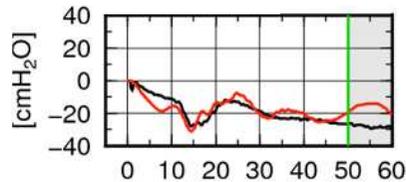
30分



40分



50分



計算波形と観測波形の比較 (例3)

S2N11

改良前tFISH

改良後tFISH

— 観測 — 計算

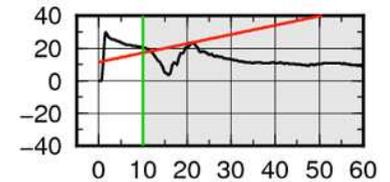
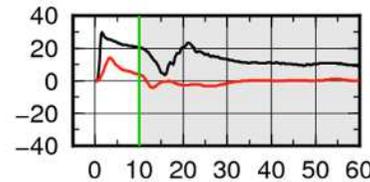
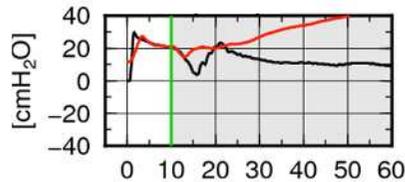
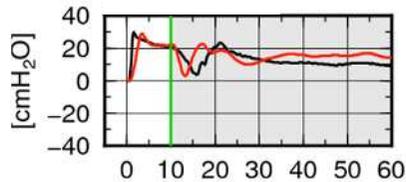
津波 + 地殻変動

全成分

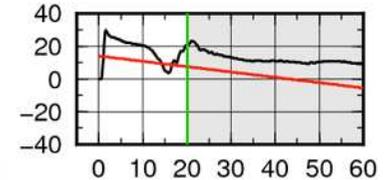
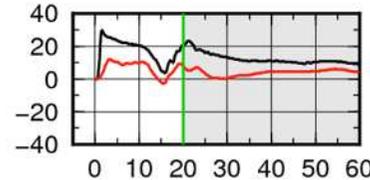
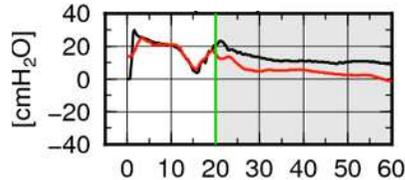
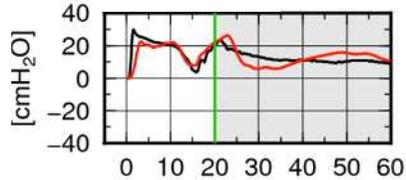
津波 + 地殻変動

オフセット + ティレンド

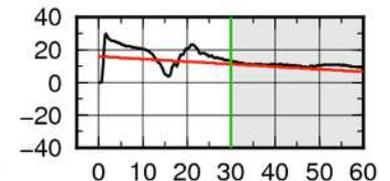
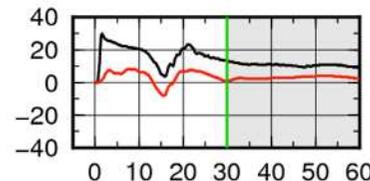
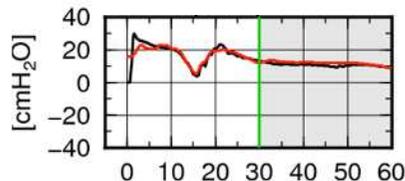
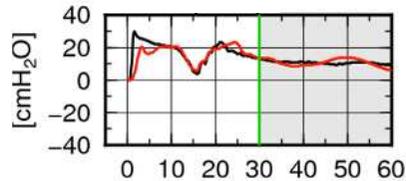
10分



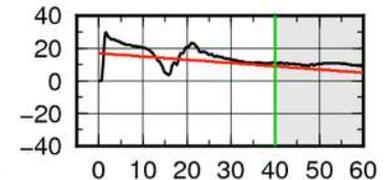
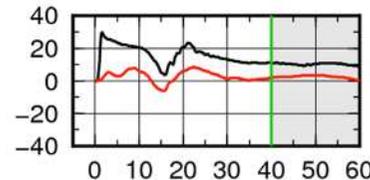
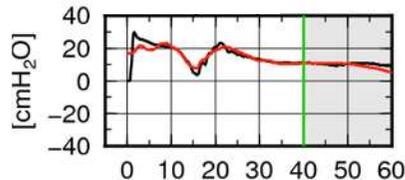
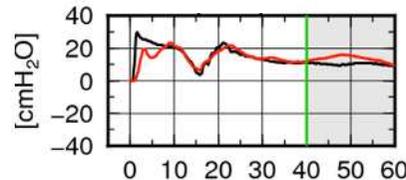
20分



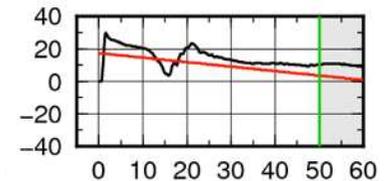
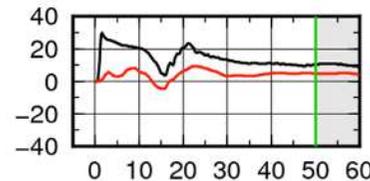
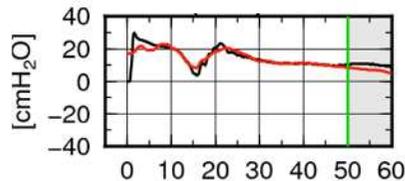
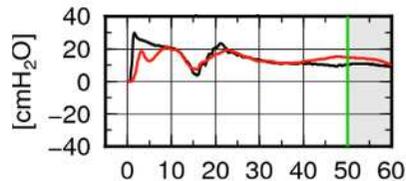
30分



40分



50分



[min]

[min]

[min]

[min]

計算波形と観測波形の比較 (例4)

S2N12 改良前tFISH

改良後tFISH

— 観測 — 計算

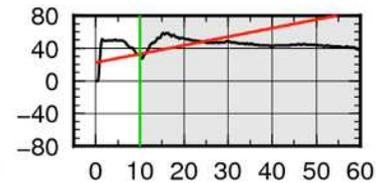
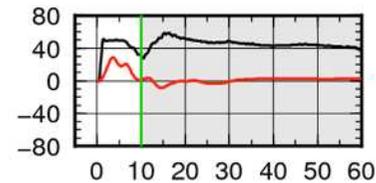
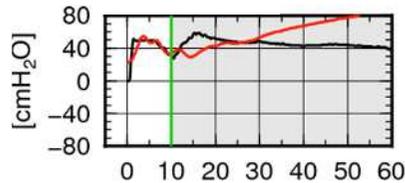
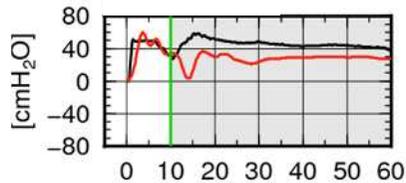
津波 + 地殻変動

全成分

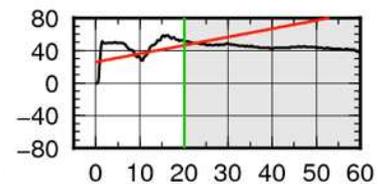
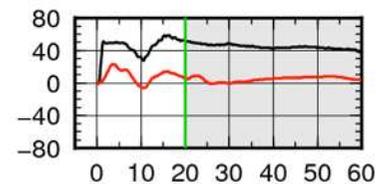
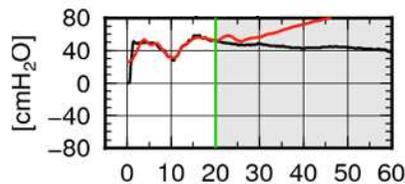
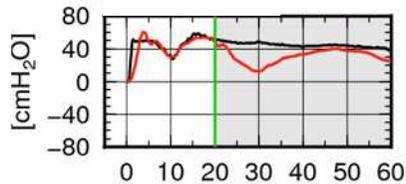
津波 + 地殻変動

オフセット + テンド

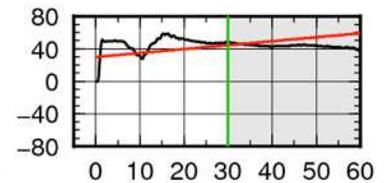
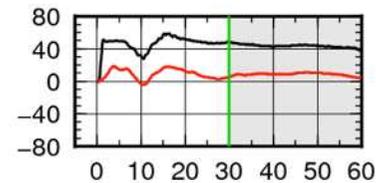
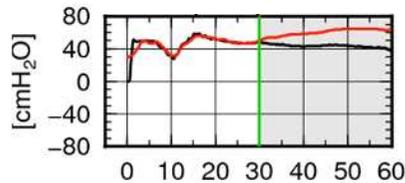
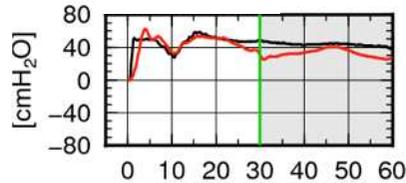
10分



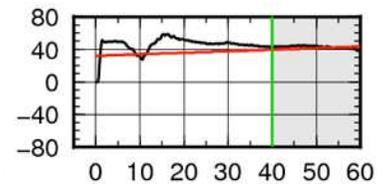
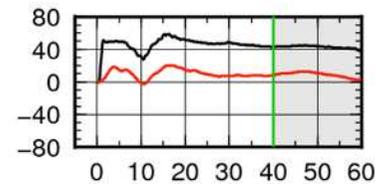
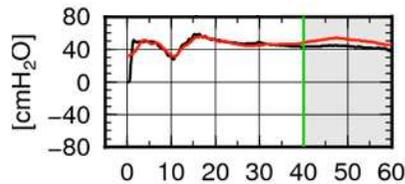
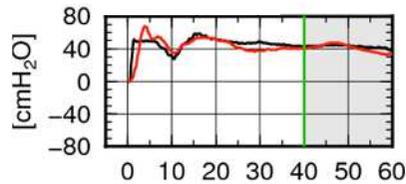
20分



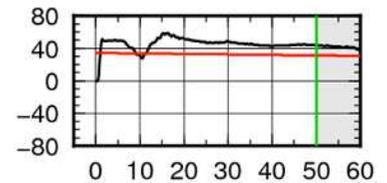
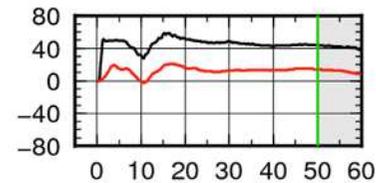
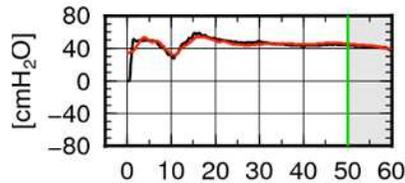
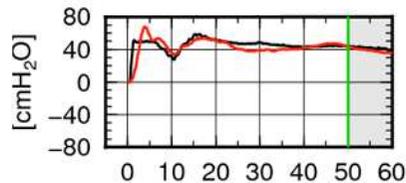
30分



40分



50分



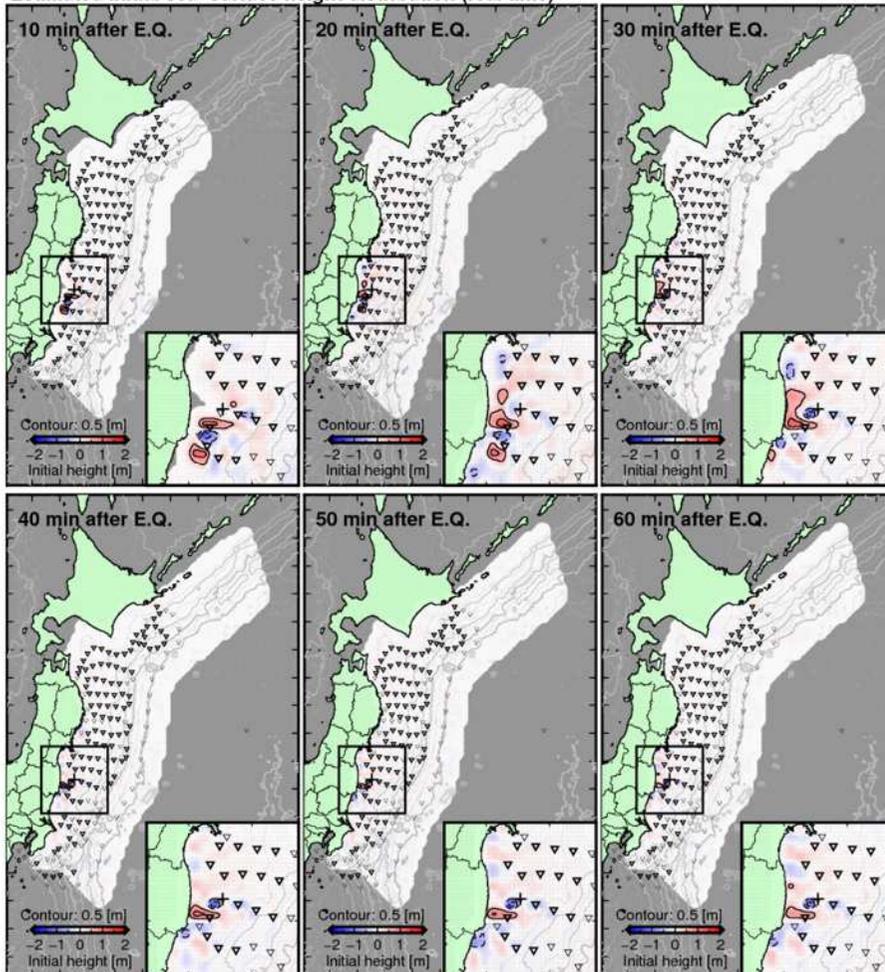
推定波源についての改良の効果

改良前tFISH

Event: 20161122.055947 Mj 7.4

Method: tFISH , trddp: N/A , Array: arr004.exclude-BS_VCM_S2N13_S6_badtide-common_GPSB , Stn. weight: all_x1

Estimated initial sea-surface height distribution (real time)

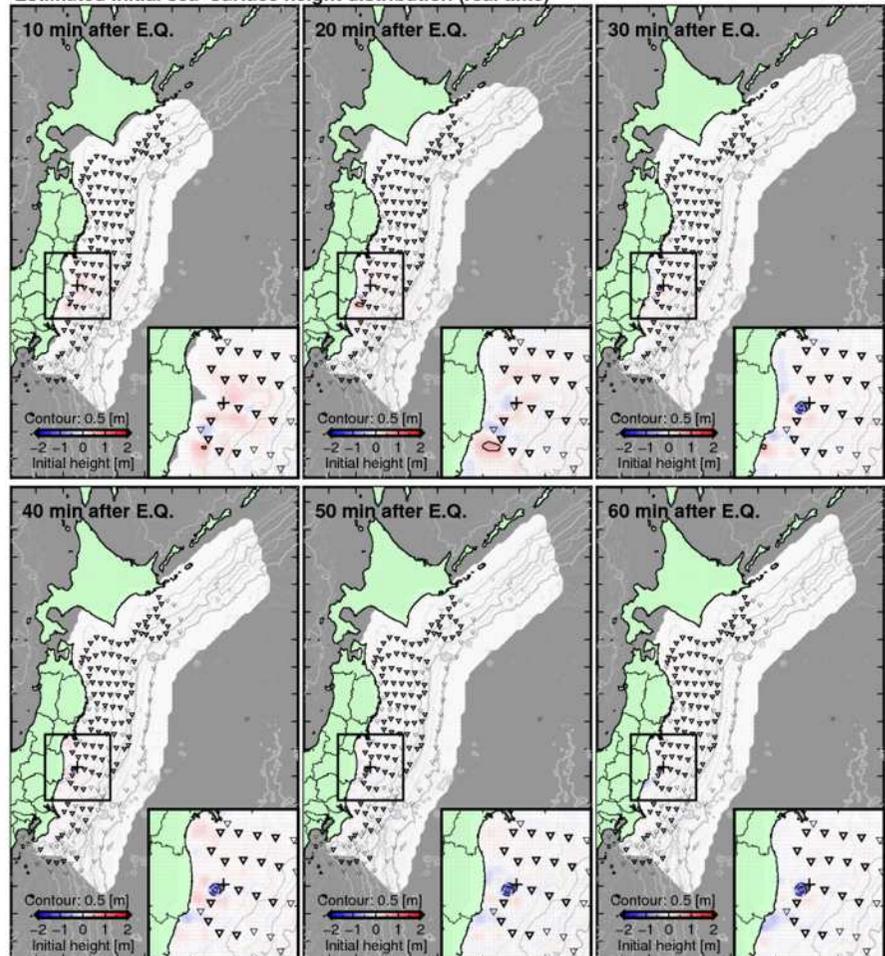


改良後tFISH

Event: 20161122.055947 Mj 7.4

Method: tFISH_ofs_trd , trddp: best_11to0_bndry40min , Array: arr004.exclude-BS_VCM_S2N13_S6_badtide-common_

Estimated initial sea-surface height distribution (real time)



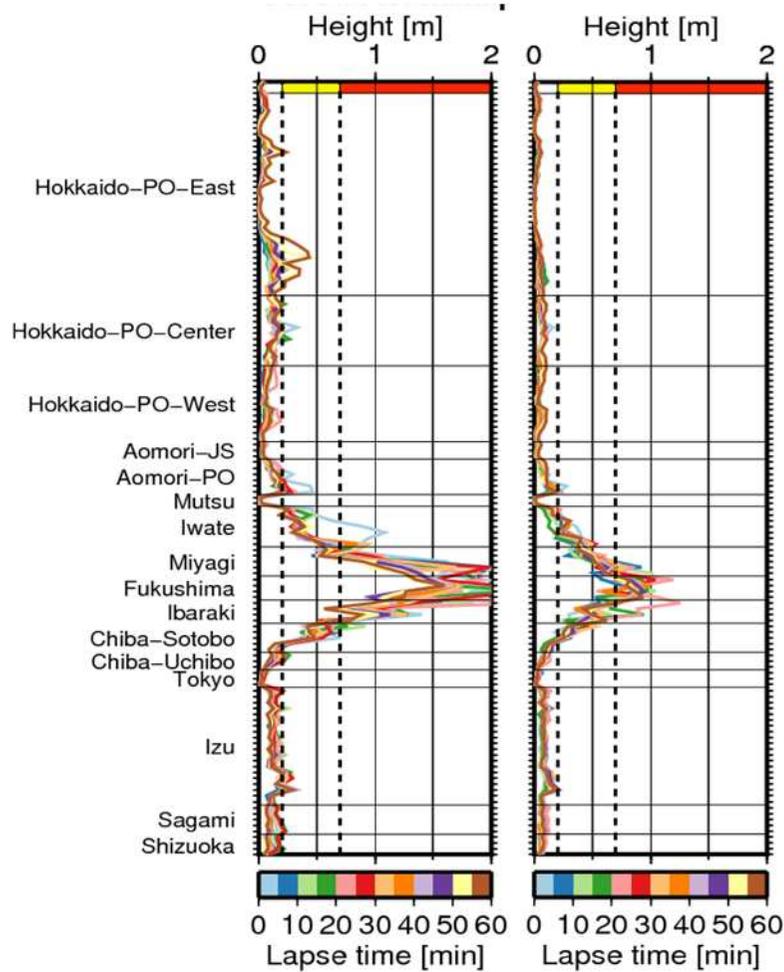
注) 背景ノイズが大きい観測点及び推算潮位が観測と一致しない観測点は除いて逆解析を実行

沿岸の津波予測についての改良の効果

沿岸での予測高さ

改良前

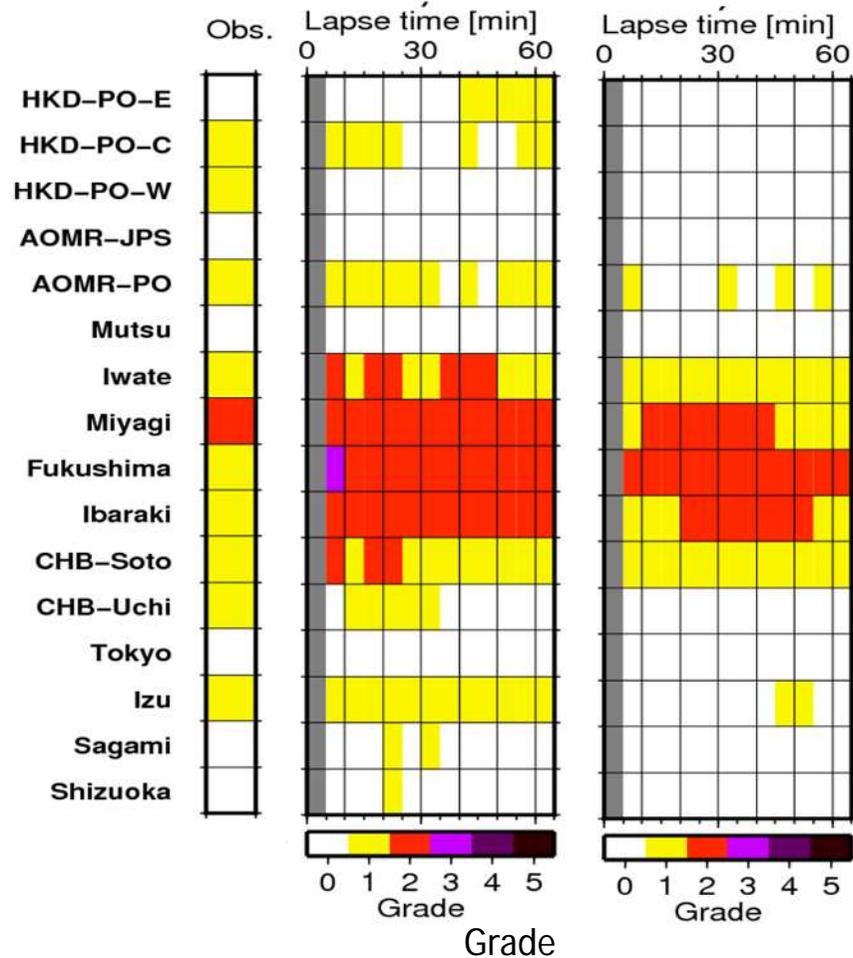
改良後



予報区毎の津波予報等

改良前

改良後



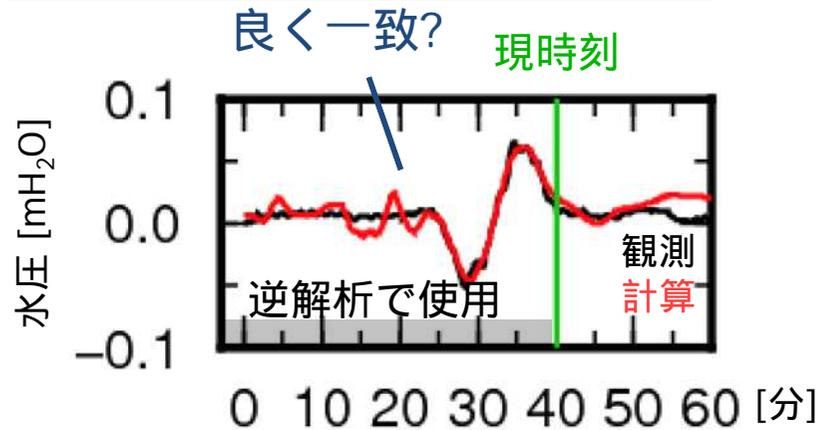
Obs.: 検潮所で観測された津波の高さの各予報区での最大値を津波予報、津波注意報等の高さに従って色分けしたもの

0	若干の海面変動または津波なし
1	津波注意報(1m)
2	津波警報(3m)
3	大津波警報(5m)
4	大津波警報(10m)
5	大津波警報(10m超)

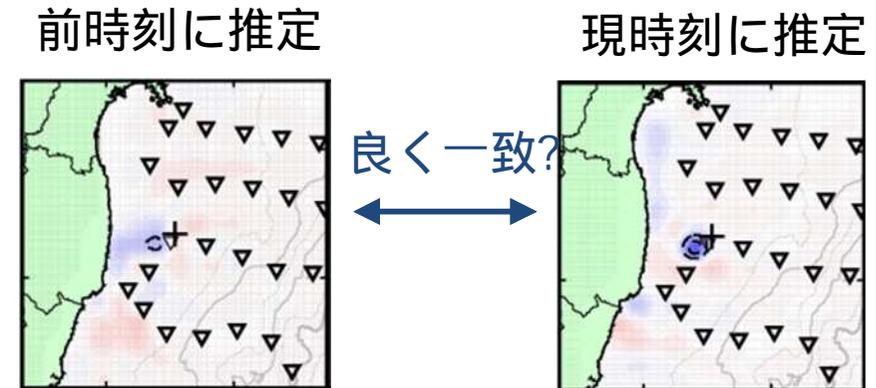
予測信頼度の判定指標の検討

予測信頼度の判定指標(案)

指標1) 沖合津波波形を使用



指標2) 推定した初期水位分布を使用



津波発生から時間が経過し、津波・地殻変動・その他を分離推定できるほど津波を多点で十分に観測すれば、推定される波源分布が安定することが期待できる

指標1) 波形逆解析で用いた観測波形と計算波形の一致度: VRO, VRC

- VRO: 観測波形(Obs.)の二乗和で規格化したVariance Reduction (過大予測時に低下)
- VRC: 計算波形(Cal.)の二乗和で規格化したVariance Reduction (過小予測時に低下)

指標2) 前時刻(10分前)に推定した初期水位空間分布との一致度: CCC, VRO, VRC

- CCC: 現時刻・前時刻に推定した初期水位分布の相互相関係数 (分布の空間パターンに感度)
- VRO: 現時刻に得た初期水位量の二乗和で規格化した初期水位分布のVR (過大予測時に低下)
- VRC: 前時刻に得た初期水位量の二乗和で規格化した初期水位分布のVR (過小予測時に低下)

閾値: 指標1は0.95以上でGOOD, 指標2は0.80以上でGOOD (案)

判定指標の検証のための対象地震

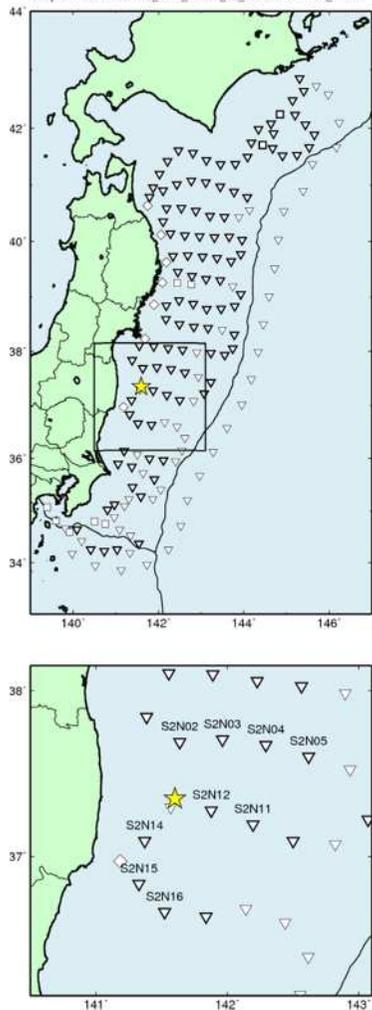
沿岸で津波が観測された地震（番号1，2）の他、沿岸で津波が観測されなかつたが、非地殻変動のオフセット等のノイズを生じた地震（番号3，4，5，6）について調査

番号	地震の発生日時	震央地名	緯度	経度	深さ	M _{JMA}	津波の有無	最大の高さ
1	2016/11/22 05:59:46.8	福島県沖	37°21.2'N	141°36.2'E	25km	M7.4	有り	144cm (仙台港 ²)
2	2016/09/23 09:14:31.3	関東東方沖	34°23.7'N	141°50.6'E	32km	M6.7	有り	0.2m ¹ (八丈島八重根)
3	2016/08/20 18:01:23.6	三陸沖	40°22.0'N	143°46.7'E	11km	M6.4	無し	
4	2016/08/21 00:58:03.2	三陸沖	40°22.0'N	143°41.2'E	12km	M6.2	無し	
5	2016/11/24 06:23:36.3	福島県沖	37°10.4'N	141°20.7'E	24km	M6.2	無し	
6	2016/11/12 06:43:00.7	宮城県沖	38°27.8'N	141°36.4'E	58km	M6.1	無し	

1：巨大津波観測計により観測されたことを示す（観測単位は0.1m）
2：仙台港は国土交通省港湾局所属の検潮所

1 . 2016/11/22 Mj 7.4 福島県沖

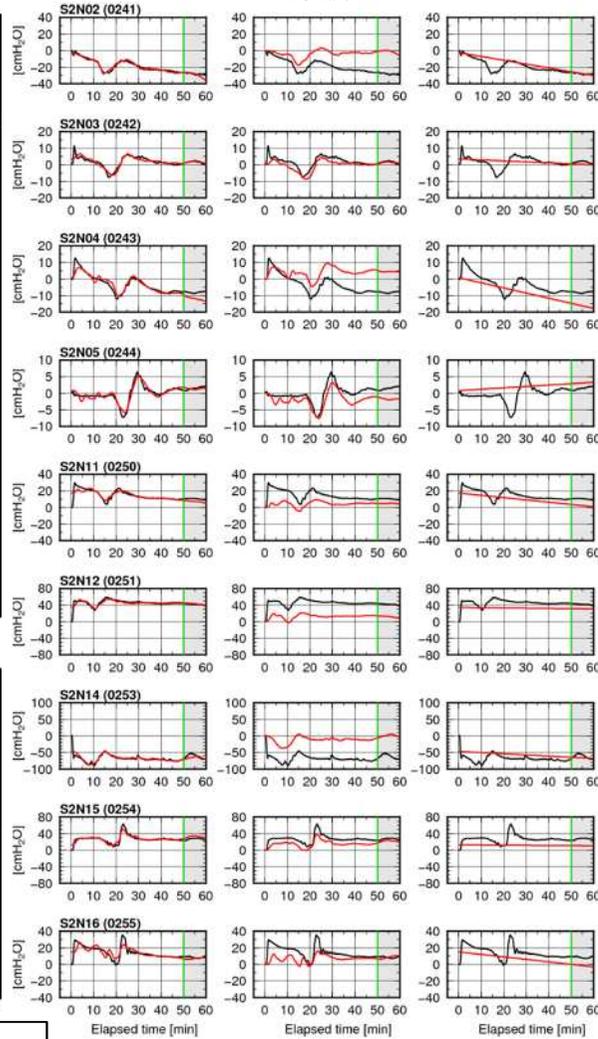
Event: 20161122.055947
 Array: arr004.exclude-BS_VCM_S2N13_S6_badtide-common_GPSB



全成分

地殻変動
+ 津波

オフセット
+トレンド



黒線: 観測波形 赤線: 計算波形

星印: 震央

逆三角印: S-net

四角印: 従来ケーブル

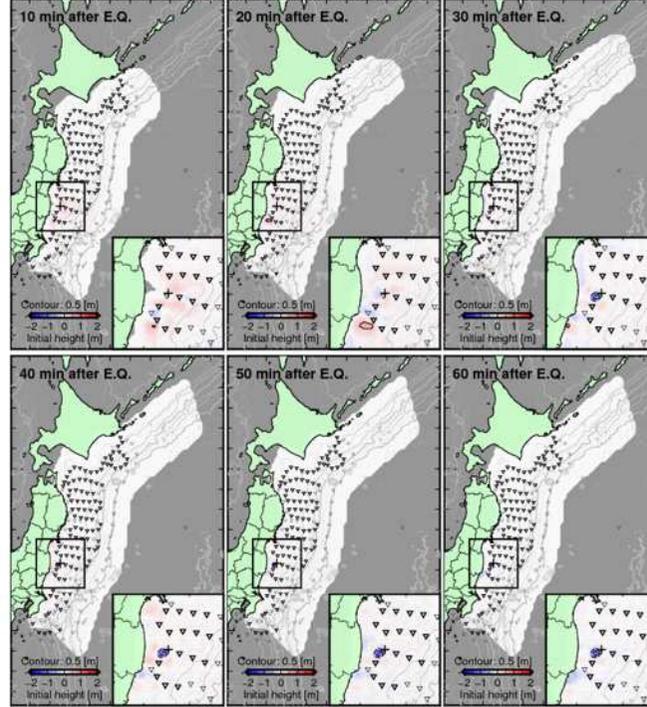
ひし形印: GPS波浪計

注) 印が太線の観測点をtFISHに使用

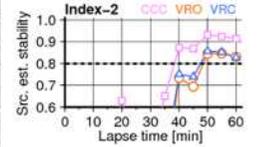
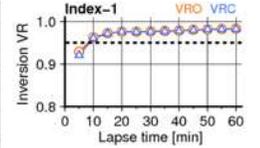
Event: 20161122.055947 Mj 7.4

Method: tFISH_ofs_trd , trddp: best_t100_bndry40min , Array: arr004.exclude-BS_VCM_S2N13_S6_badtide-common_GPSB , Stn. weight: all_x1

Estimated initial sea-surface height distribution (real time)

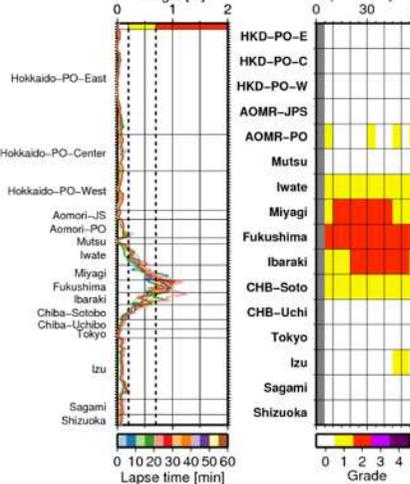


Reliability of prediction (real-time evaluation)

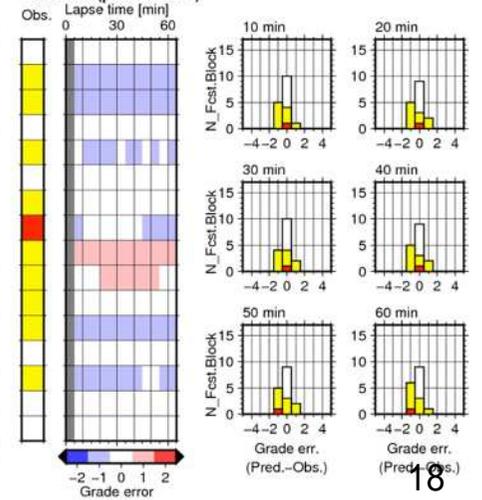


Time	Index-1	Index-2
05 min.	BAD	NaN
10 min.	GOOD	NaN
15 min.	GOOD	BAD
20 min.	GOOD	BAD
25 min.	GOOD	BAD
30 min.	GOOD	BAD
35 min.	GOOD	BAD
40 min.	GOOD	BAD
45 min.	GOOD	BAD
50 min.	GOOD	GOOD
55 min.	GOOD	GOOD
60min.	GOOD	GOOD

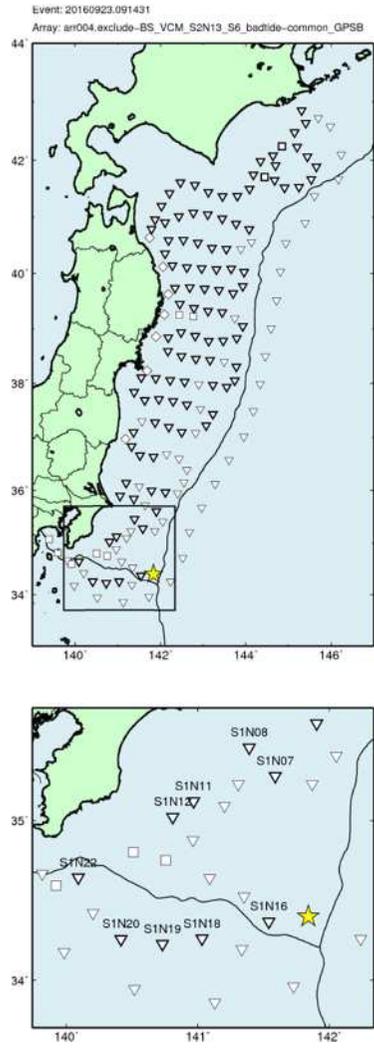
Coastal tsunami prediction (real time)



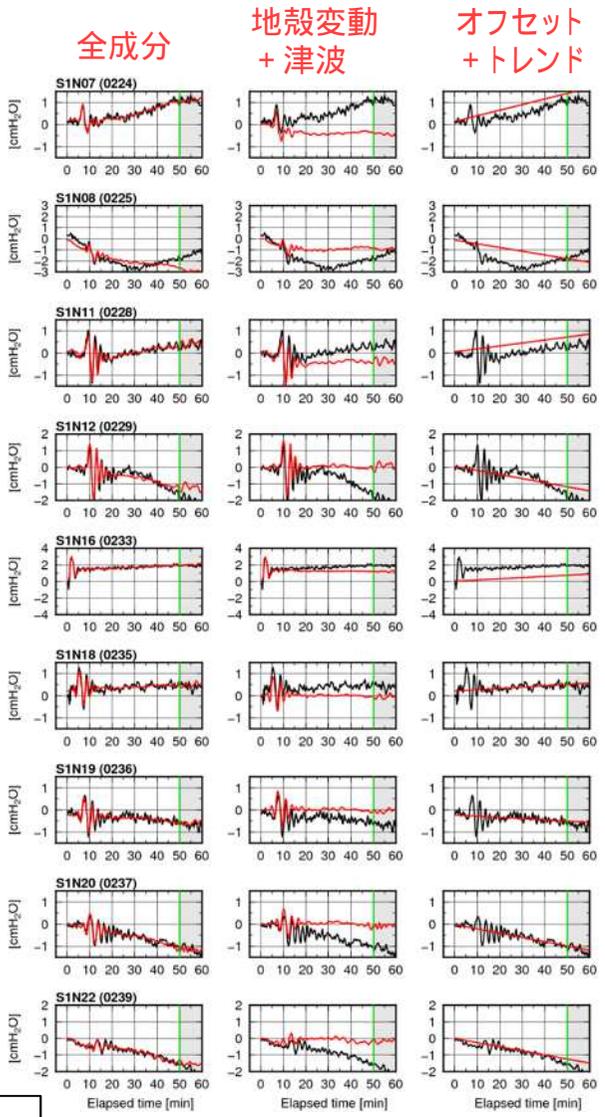
Evaluation (post-tsunami)



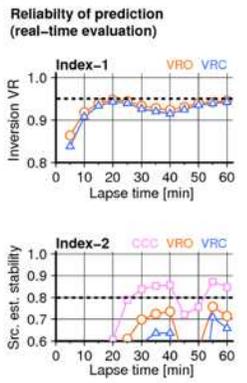
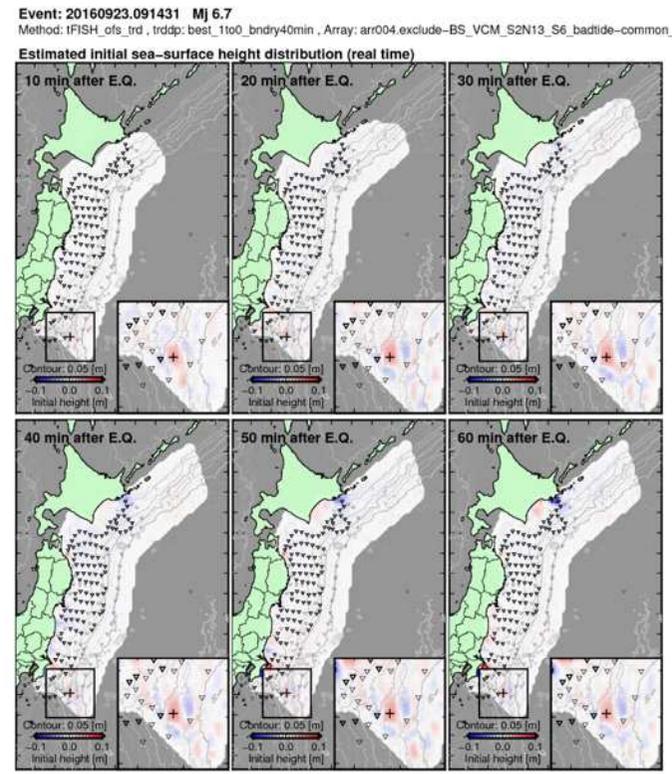
2 . 2016/09/23 Mj 6.7 関東東方沖



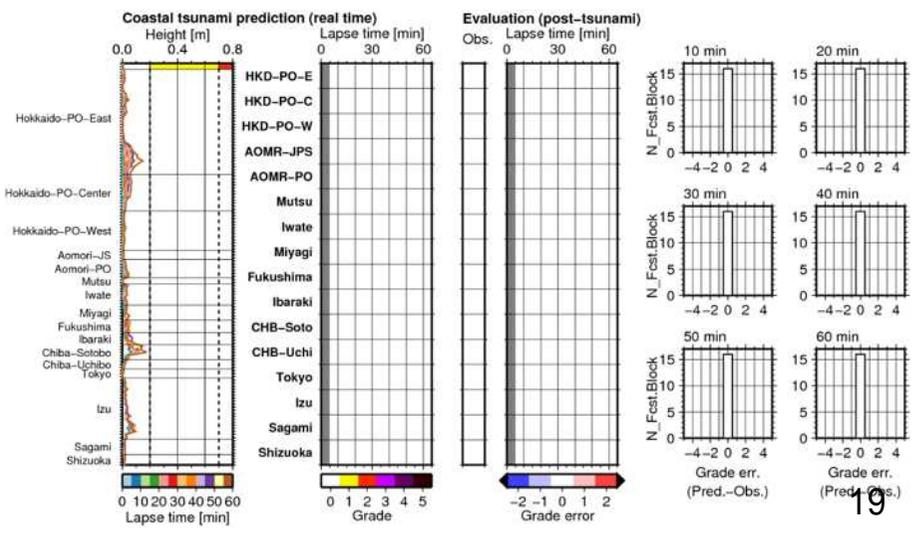
星印:震央
 逆三角印:S-net
 四角印:従来ケーブル
 ひし形印:GPS波浪計
 (注)印が太線の観測点をtFISHに使用

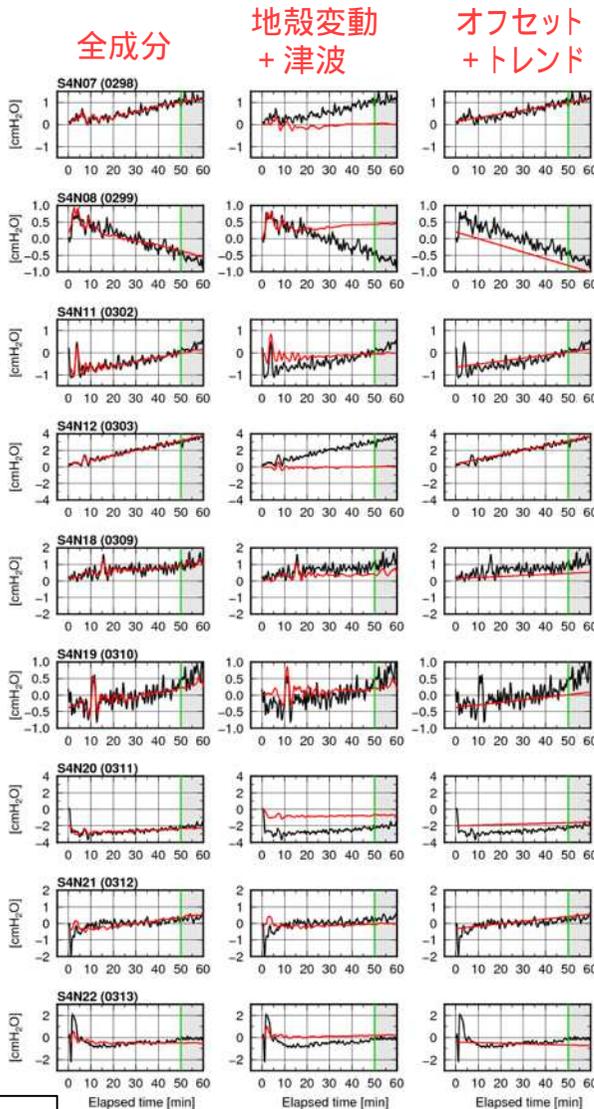
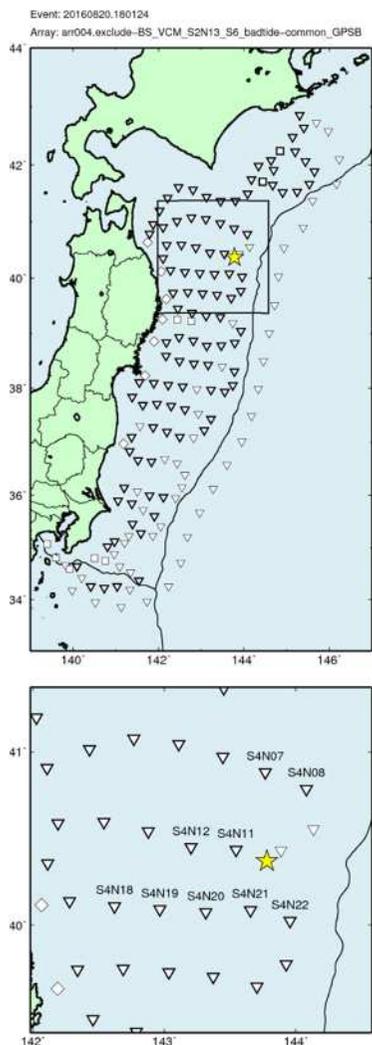


黒線:観測波形 赤線:計算波形



Time	Index-1	Index-2
05 min.	BAD	NaN
10 min.	BAD	NaN
15 min.	BAD	BAD
20 min.	BAD	BAD
25 min.	BAD	BAD
30 min.	BAD	BAD
35 min.	BAD	BAD
40 min.	BAD	BAD
45 min.	BAD	BAD
50 min.	BAD	BAD
55 min.	BAD	BAD
60min.	BAD	BAD

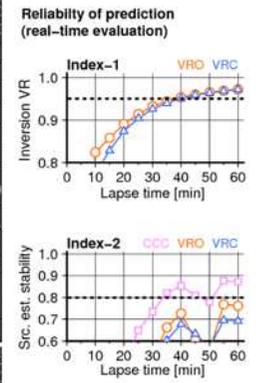
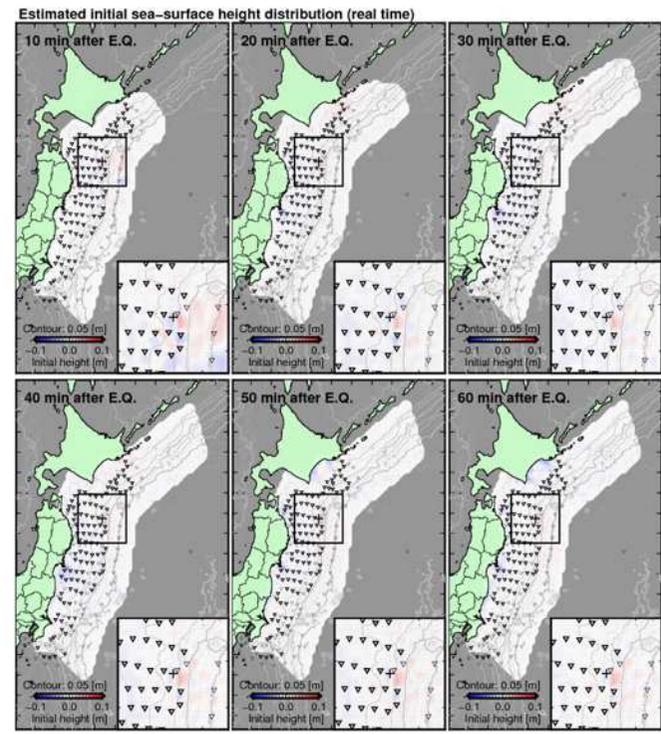




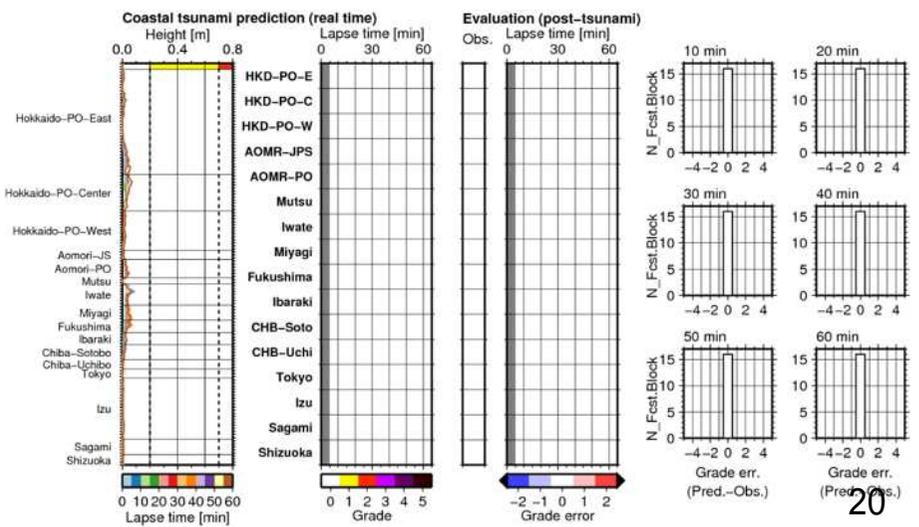
星印:震央
 逆三角印:S-net
 四角印:従来ケーブル
 ひし形印:GPS波浪計
 (注)印が太線の観測点をtFISHに使用

黒線:観測波形 赤線:計算波形

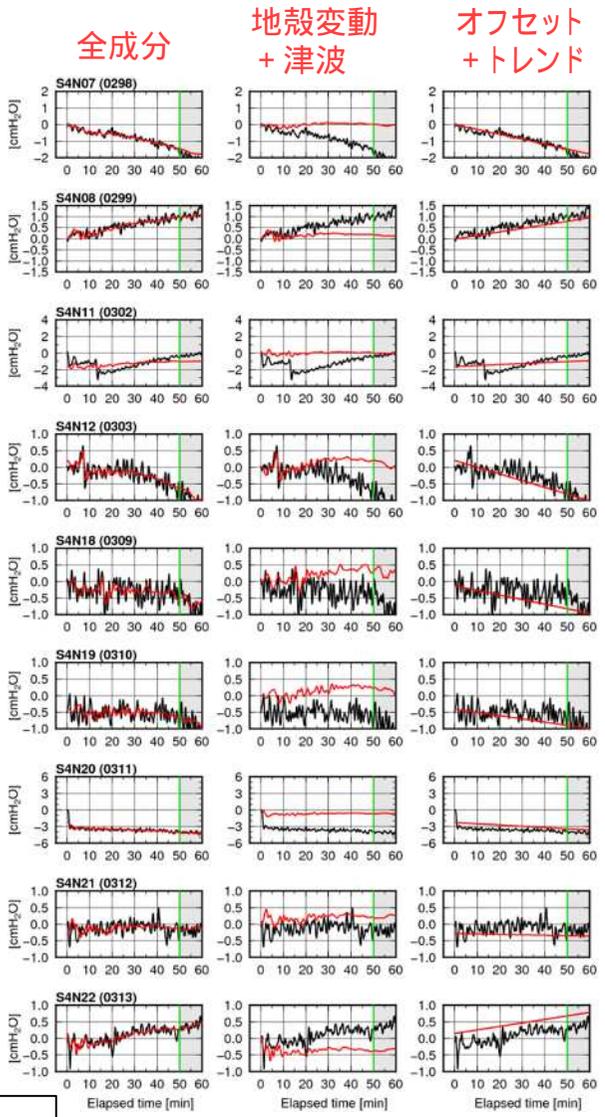
Event: 20160820.180124 Mj 6.4
 Method: tFISH_ofs_trd , trddp: best_1to0_bndry40min , Array: arr004.exclude-BS_VCM_S2N13_S6_badtide-common_GPSB , Stn. weight: all_x1



Time	Index-1	Index-2
05 min.	BAD	NaN
10 min.	BAD	NaN
15 min.	BAD	BAD
20 min.	BAD	BAD
25 min.	BAD	BAD
30 min.	BAD	BAD
35 min.	BAD	BAD
40 min.	GOOD	BAD
45 min.	GOOD	BAD
50 min.	GOOD	BAD
55 min.	GOOD	BAD
60 min.	GOOD	BAD

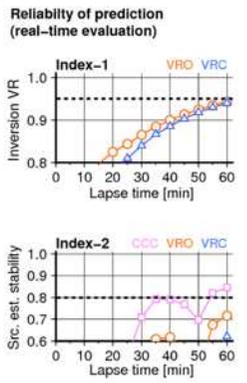
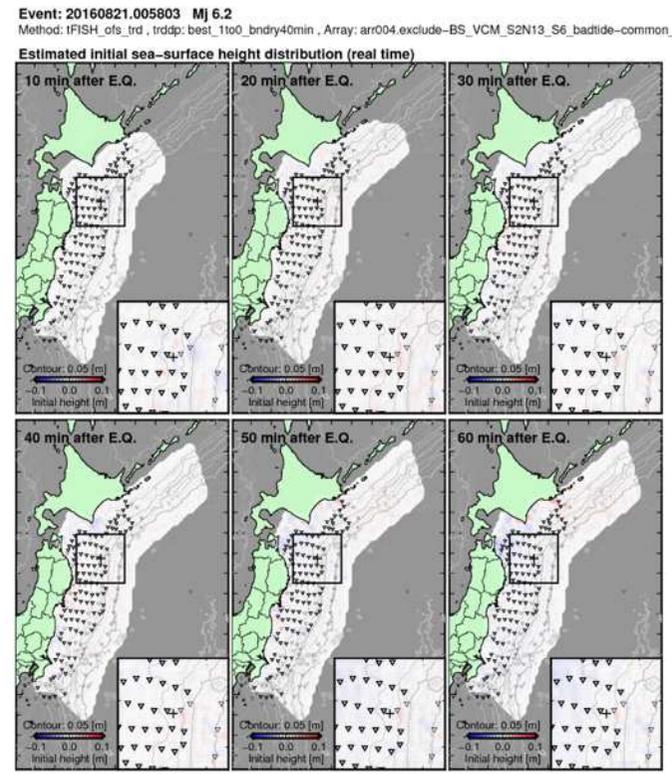


4 . 2016/08/21 Mj 6.2 三陸沖

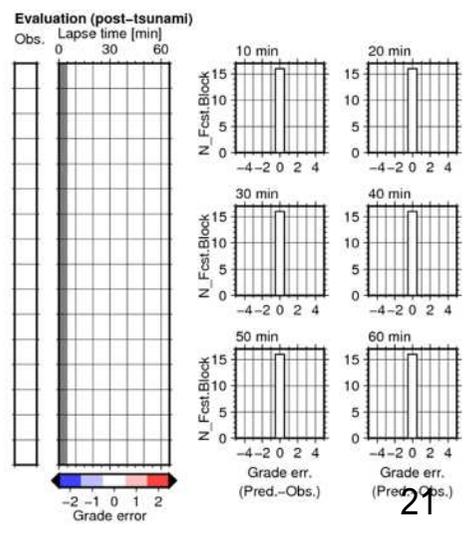
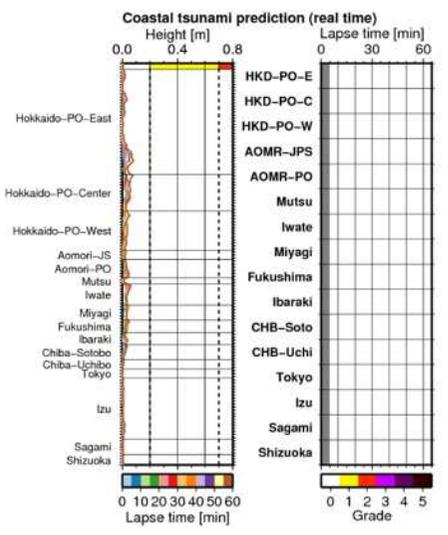


星印: 震央
 逆三角印: S-net
 四角印: 従来ケーブル
 ひし形印: GPS波浪計
 (注) 印が太線の観測点をtFISHに使用

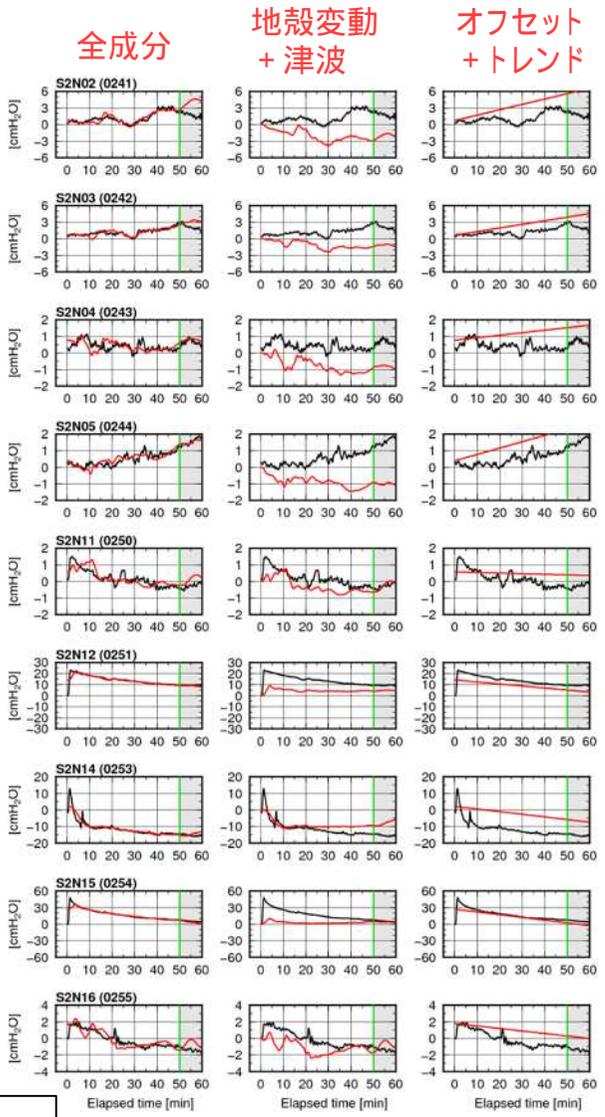
黒線: 観測波形 赤線: 計算波形



Time	Index-1	Index-2
05 min.	BAD	NaN
10 min.	BAD	NaN
15 min.	BAD	BAD
20 min.	BAD	BAD
25 min.	BAD	BAD
30 min.	BAD	BAD
35 min.	BAD	BAD
40 min.	BAD	BAD
45 min.	BAD	BAD
50 min.	BAD	BAD
55 min.	BAD	BAD
60 min.	BAD	BAD

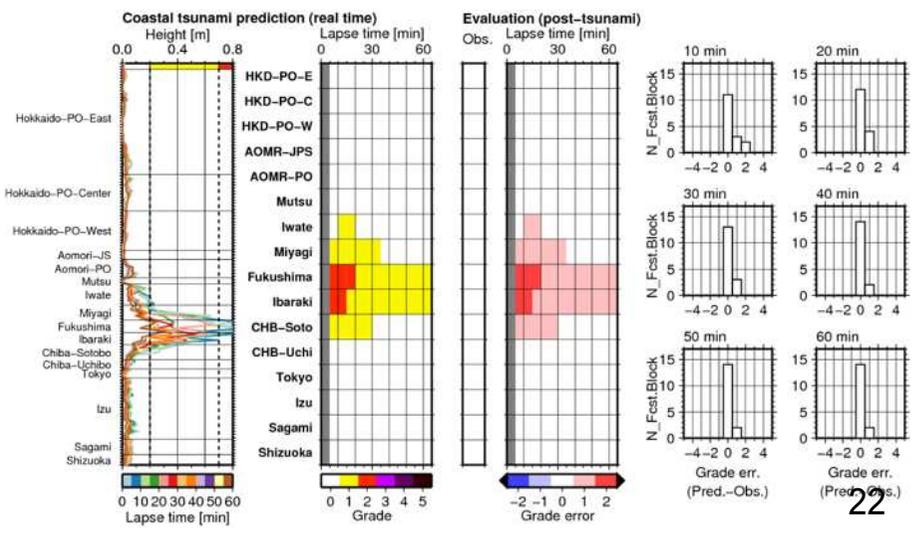
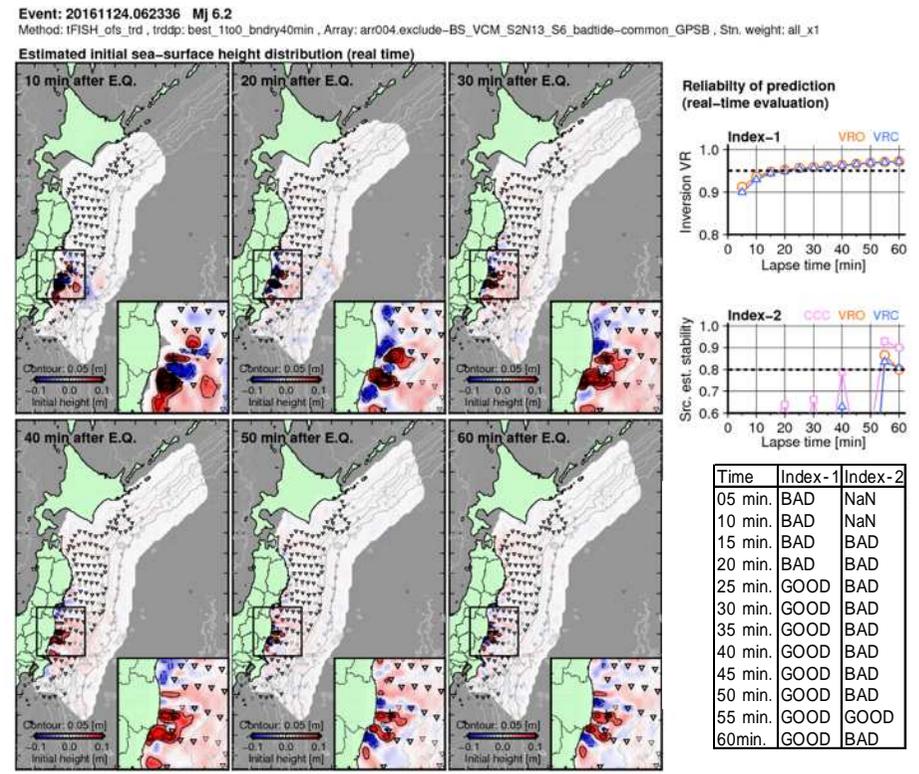


5 . 2016/11/24 Mj 6.2 福島県沖

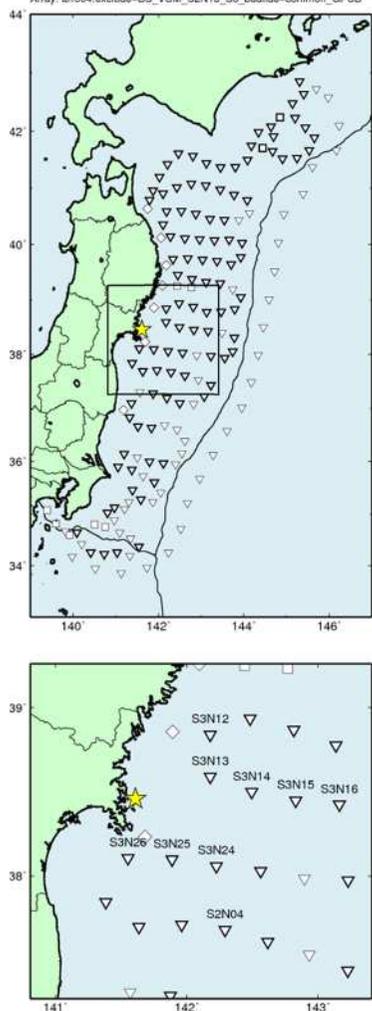


星印:震央
 逆三角印:S-net
 四角印:従来ケーブル
 ひし形印:GPS波浪計
 (注)印が太線の観測点をtFISHに使用

黒線:観測波形 赤線:計算波形



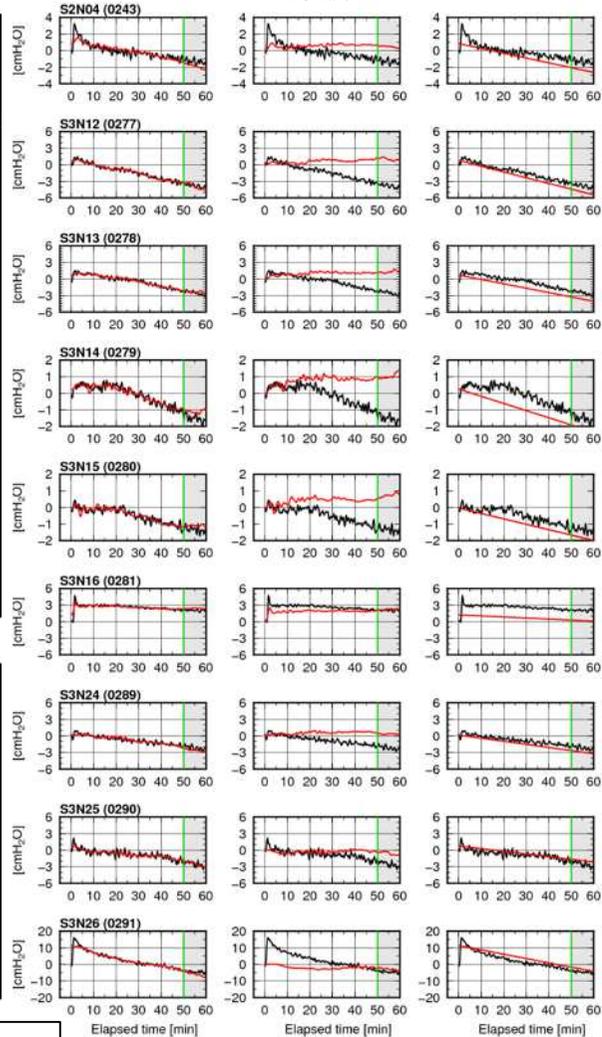
Event: 20161112.064301
 Array: arr004.exclude-BS_VCM_S2N13_S6_badtide-common_GPSB



全成分

地殻変動
+ 津波

オフセット
+トレンド



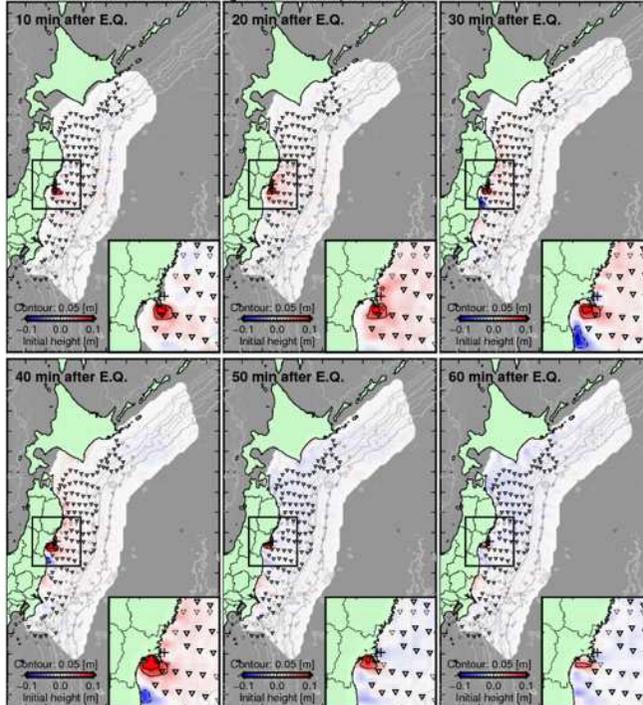
星印: 震央
 逆三角印: S-net
 四角印: 従来ケーブル
 ひし形印: GPS波浪計
 (注) 印が太線の観測点をtFISHに使用

黒線: 観測波形 赤線: 計算波形

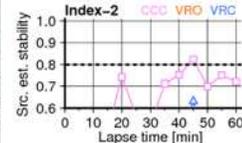
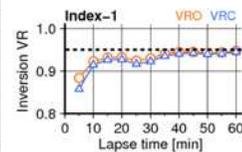
Event: 20161112.064301 Mj 6.1

Method: tFISH_ofs_trd , trddp: best_1to0_bndry40min , Array: arr004.exclude-BS_VCM_S2N13_S6_badtide-common_GPSB , Stn. weight: all_x1

Estimated initial sea-surface height distribution (real time)

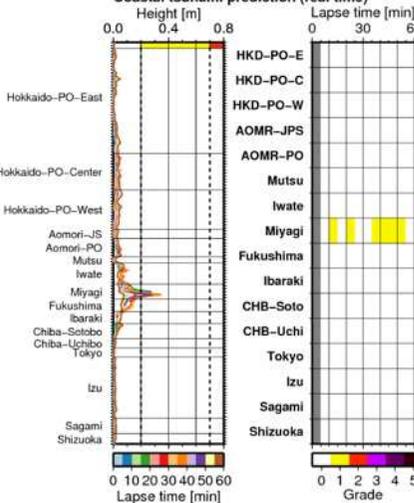


Reliability of prediction (real-time evaluation)

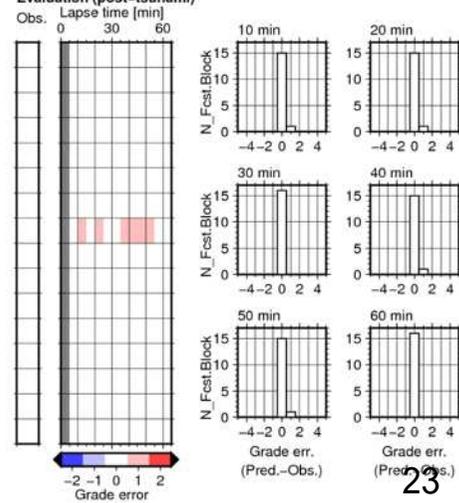


Time	Index-1	Index-2
05 min.	BAD	NaN
10 min.	BAD	NaN
15 min.	BAD	BAD
20 min.	BAD	BAD
25 min.	BAD	BAD
30 min.	BAD	BAD
35 min.	BAD	BAD
40 min.	BAD	BAD
45 min.	BAD	BAD
50 min.	BAD	BAD
55 min.	BAD	BAD
60min.	BAD	BAD

Coastal tsunami prediction (real time)



Evaluation (post-tsunami)



まとめ

- 2016年11月22日福島県沖の地震による津波を受けての改善
 - 非地殻変動によるオフセットやトレンドの影響については、推定するように改良し、津波波源の推定結果を改善
 - 要素波源サイズが対象の津波波源よりも大きいことに起因する誤差に対しては、対象とする地震のマグニチュードを7.0以上とすることで対応
- 波源推定結果の判定指標の検討
 - 観測波形と計算波形の一致度や前時刻(10分前)と現時刻に推定した初期水位空間分布との一致度
 - 他の指標も含め、検討を継続。