

tFISHの解析事例紹介

対馬弘晃
気象庁

目次

- 沖合津波波形逆解析による津波即時予測手法tFISH
 - 観測方程式
 - 観測波形から津波・海底永久変位成分を抽出する手順
- 適用事例
 - 2016年11月22日福島県沖地震(Mw 6.9)

津波警報のための津波予測手順 -- 近地津波の場合

地震発生

地震波データの活用
津波データの活用

約3分後 量的津波DB + 震源要素(位置 + M_j) + 過小評価判定

警報発表

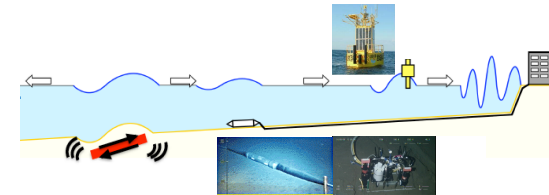
約8分後 量的津波DB + W-phase解 (M_w + 震源メカニズム)

警報更新

約15分後 量的津波DB + CMT解 (M_w + 震源メカニズム)

警報更新

⌋ 沖合津波データの監視
+ グリーンの法則による波高予測



この一連の予測手順に
沖合津波波形逆解析に基づく津波予測を
追加するための検討結果について報告する

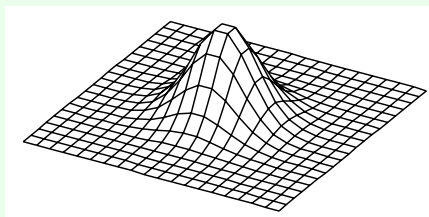
沖合津波波形逆解析に基づく津波即時予測手法

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



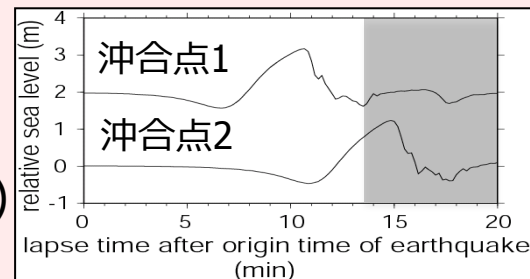
初期水位分布



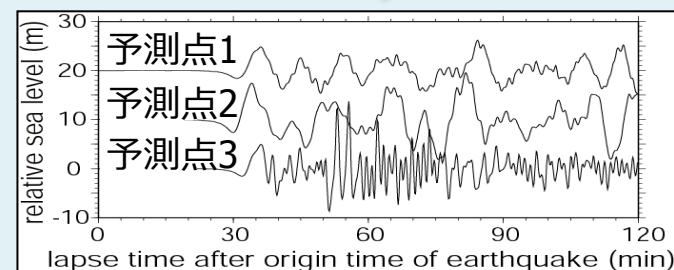
津波波形グリーン関数の
線形結合による予測波形
の合成



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

$a(\mathbf{x}_i)$

要素波源 i

各要素波源からの津波波形

$G_{ij}(t) a(\mathbf{x}_i)$

観測点 ($\mathbf{x} = \mathbf{x}_j$)
における津波波形

$f^{\text{obs}}(\mathbf{x}_j, t)$

津波波形グリーン関数
(海面要素の単位変位への応答)

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

波形逆解析

津波波形グリーン関数

沖合の観測
津波波形

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

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

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

対象点の
予測津波波形

津波波形
グリーン関数

津波波形グリーン関数の事前準備

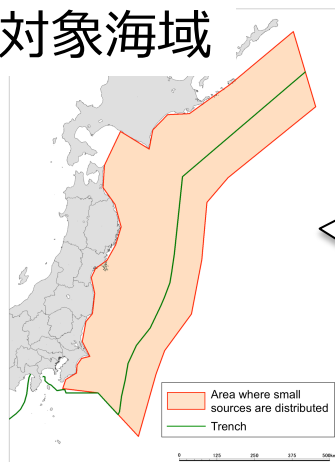
地震発生前に数値計算
& データベース化

(GPS波浪計) $G_{ij}(t) = G_{ij}^s(t)$

(海底水圧計) $G_{ij}(t) = G_{ij}^s(t) - D_i(\mathbf{x}_j; t)$

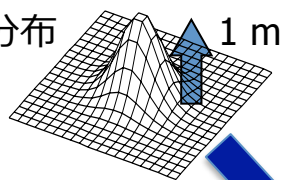
水面変化のグリーン関数の計算：流体方程式の差分計算

対象海域



要素波源

ガウス分布



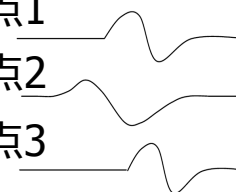
沖合・沿岸の
グリーン関数
(海面変化)

$$G_{ij}^s(t)$$

地点1

地点2

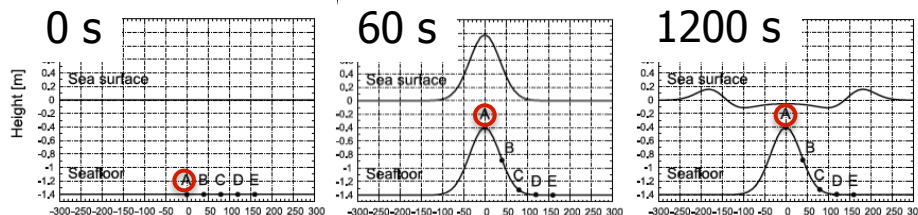
地点3



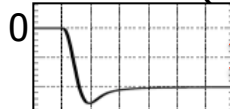
津波伝播の数値計算 (線形長波方程式を差分法で解く)

グリーン関数の補正：海面変化 → 海底圧力

[Tsushima *et al.*, 2012, JGR]



海底圧力(A)



海底圧力への寄与

海面変化

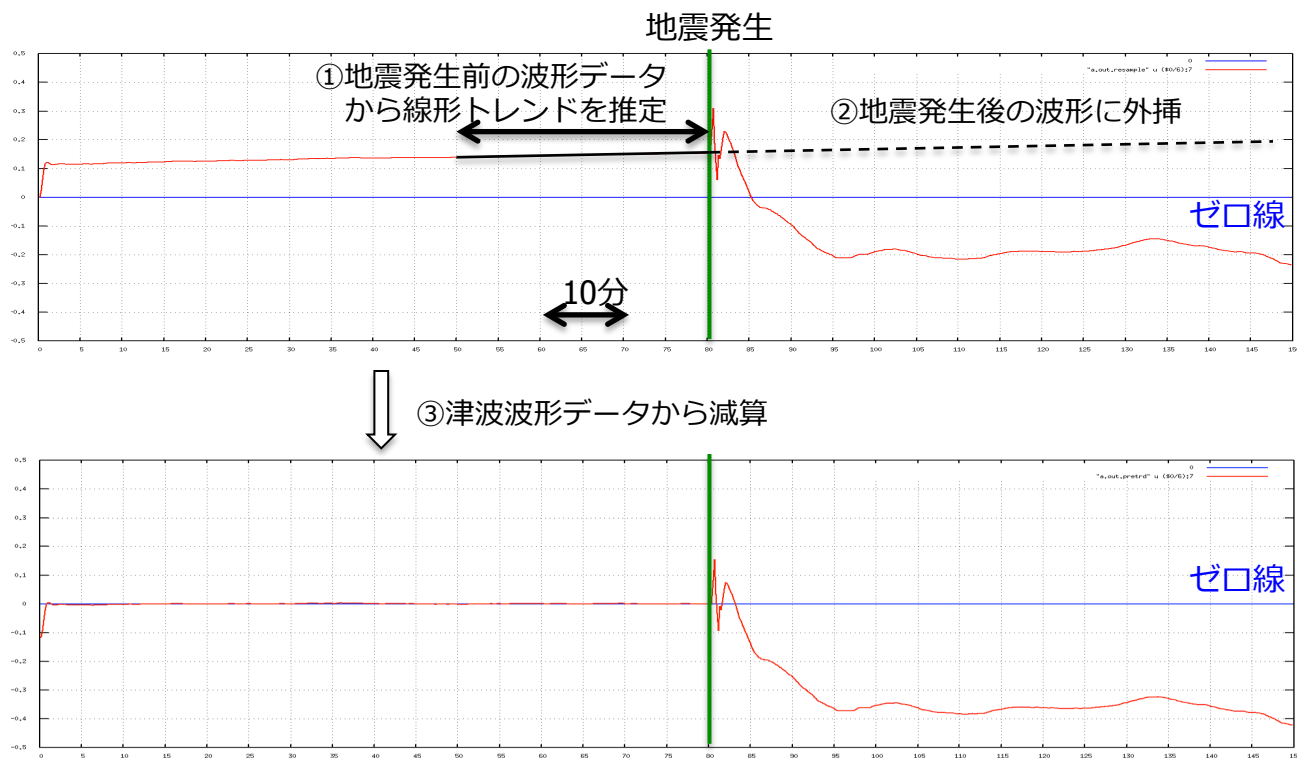
海底永久変位

$$G_{ij}^s(t)$$

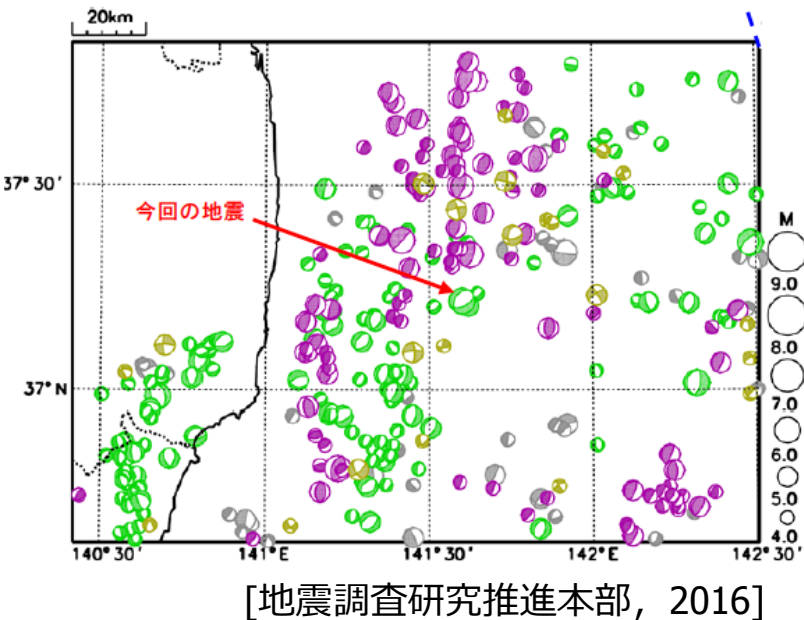
$$-D_i(\mathbf{x}_j; t)$$

津波成分と海底永久変位成分のリアルタイム自動抽出

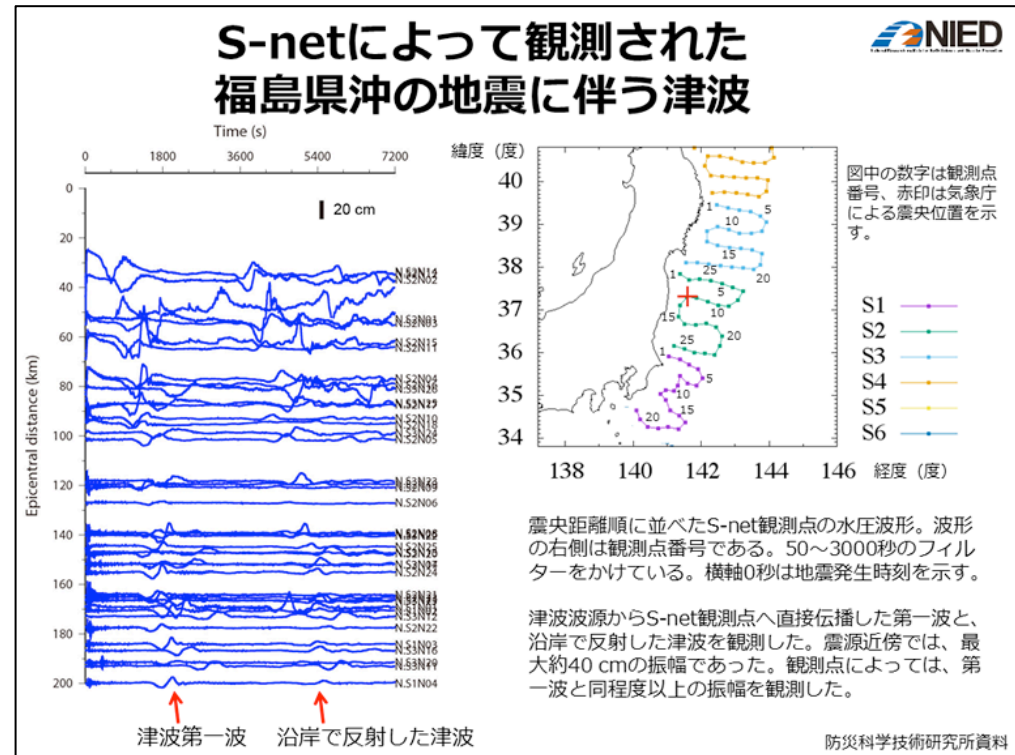
- 海洋潮汐成分の補正：NAO.99Jb [Matsumoto et al. 2000]
- 短周期成分の除去：60秒ローパスフィルタ [斎藤, 1978]
- リサンプリング：10秒
- ゼロ線補正：下図参照
- tFISH入力波形の切り出し



適用事例：2016年11月22日 福島県沖地震 (Mj7.4)



陸側プレート内浅部の
正断層地震



防災科学技術研究所ホームページ [2017/02/07時点]

tFISH：震源断層を仮定せず初期水位分布を推定して津波予測を行う
→ 原理的には非プレート境界地震であるこの地震にも適用可能

tFISH適用にあたっての2つの懸念事項

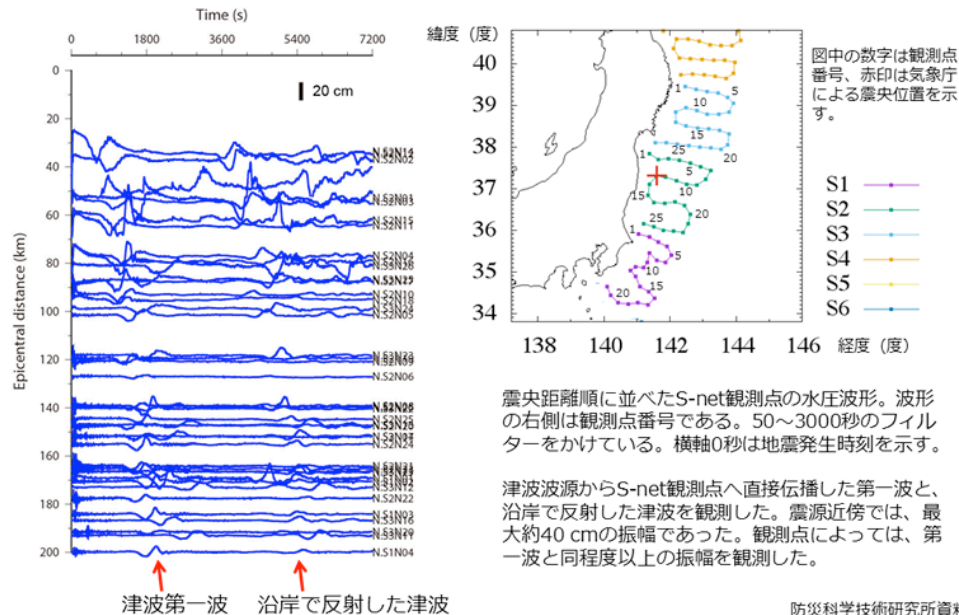
1. tFISHの要素波源サイズが波源域よりも大きい可能性

11/22地震の空間サイズ：断層長30 km, 幅15km (M7.0仮定)

tFISH要素波源の空間サイズ：一山全体で40 km (ガウス分布2 σ で一山と仮定)

狭くて大波高の初期水位分布(真値)を
広くて小波高の初期水位分布として表現してしまう恐れがある

2. 観測データに含まれる非津波成分・非地殻変動成分の影響



tFISH :
津波成分と地殻変動成分を考慮



それ以外の成分が入力されると
偽の津波波源が求まってしまい
予測精度が低下する恐れがある

沖合津波波形を活用した「正解」の波源の把握

tFISH
ではない

津波・地殻変動成分のみを
手動抽出した沖合津波波形
データを用いて逆解析

データ範囲：地震後5-60分
要素波源サイズ：**tFISHの1/5**

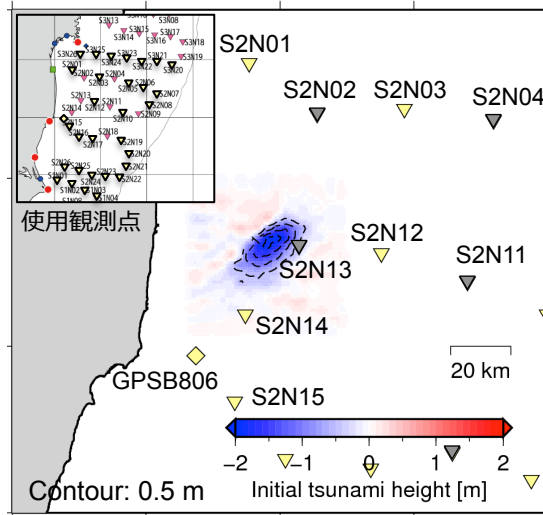
求めた初期水位分布から
非線形津波計算

地形分解能：最高50 m
海岸構造物：考慮



S-netデータ等の活用により
沿岸津波波形を正確に再現
できる津波波源を推定可能に

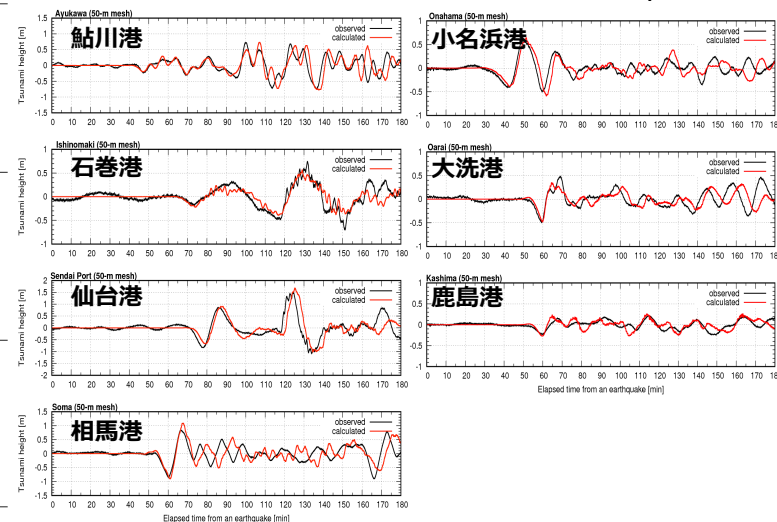
S-net等の沖合津波波形から
推定した初期水位分布



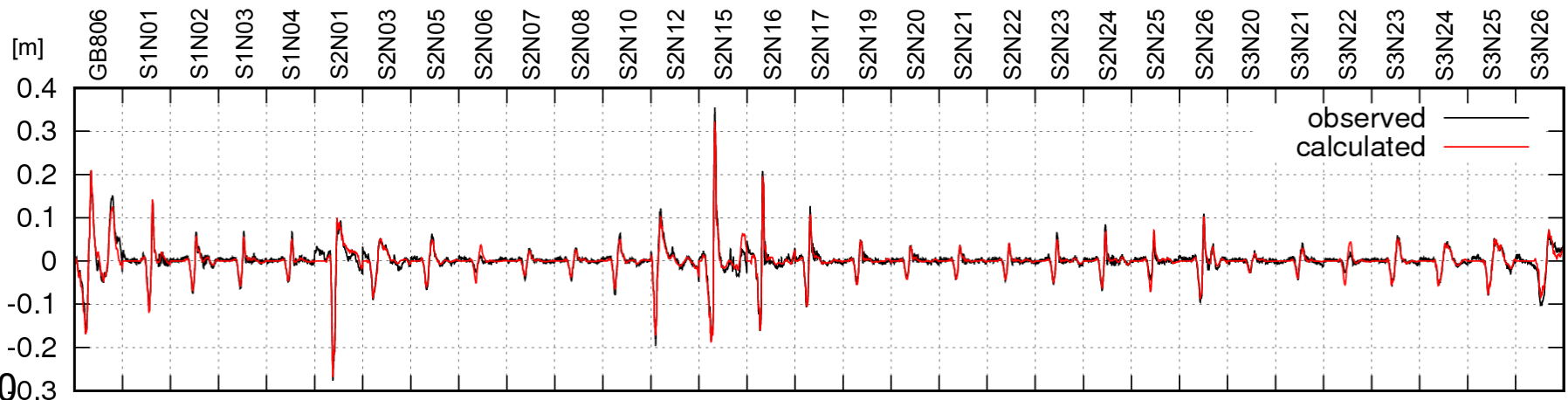
最大隆起量：0.4 m / 最大沈降量：-2.3 m

推定した初期水位分布による
沿岸潮位観測点の津波波形

観測 / 計算



波形逆解析における波形比較 地震発生後5分～60分の観測波形を逆解析に使用



要素波源サイズ・配置 → tFISH使用版に

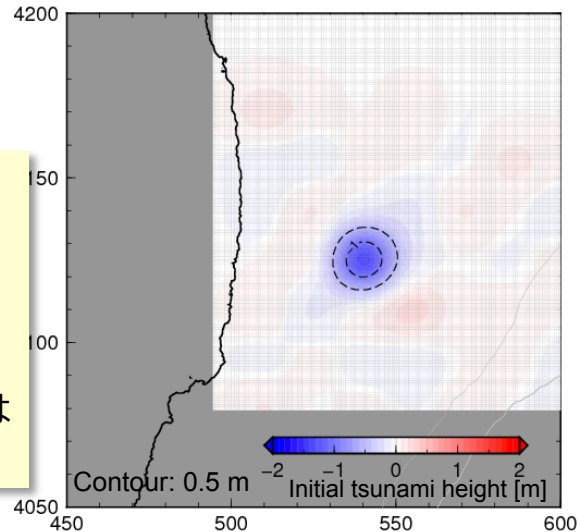
要素波源以外は
tFISHではない

沿岸潮位波形：
細かい要素波源使用時と
同程度に再現可能

S-netの短周期津波成分：
波形逆解析においても
十分に説明できていない
(観測点名を**太文字**で表示)

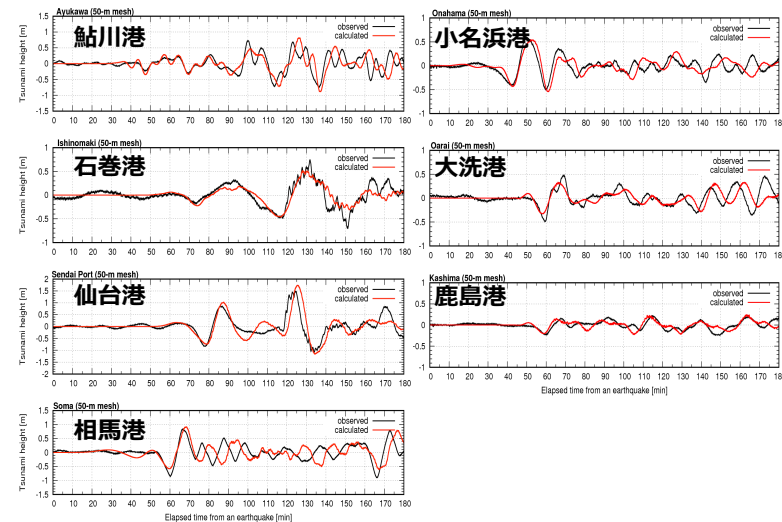
※細かい要素波源サイズでは
説明できていた

S-net等の沖合津波波形から
推定した初期水位分布

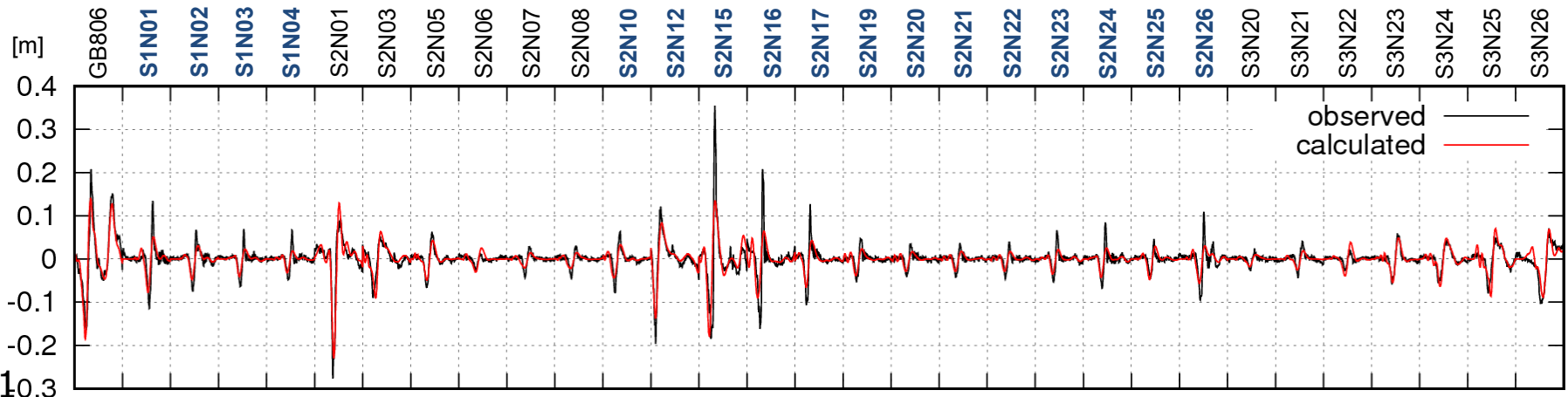


推定した初期水位分布による
沿岸潮位観測点の津波波形

観測 / 計算



波形逆解析における波形比較 地震発生後5分～60分の観測波形を逆解析に使用



最大津波高分布の比較 (3時間積分)

要素波源サイズ：
tFISHの1/5

要素波源サイズ：
tFISHと同じ

細かい要素波源
非等方で指向性が強い

tFISH要素波源
等方で指向性が弱い



場所によっては
岸波高を過小評価する
恐れがある

波源形状が偏長
→ 指向性が強い

波源形状が等方
→ 指向性が弱い

-0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6
最大波高 [m]

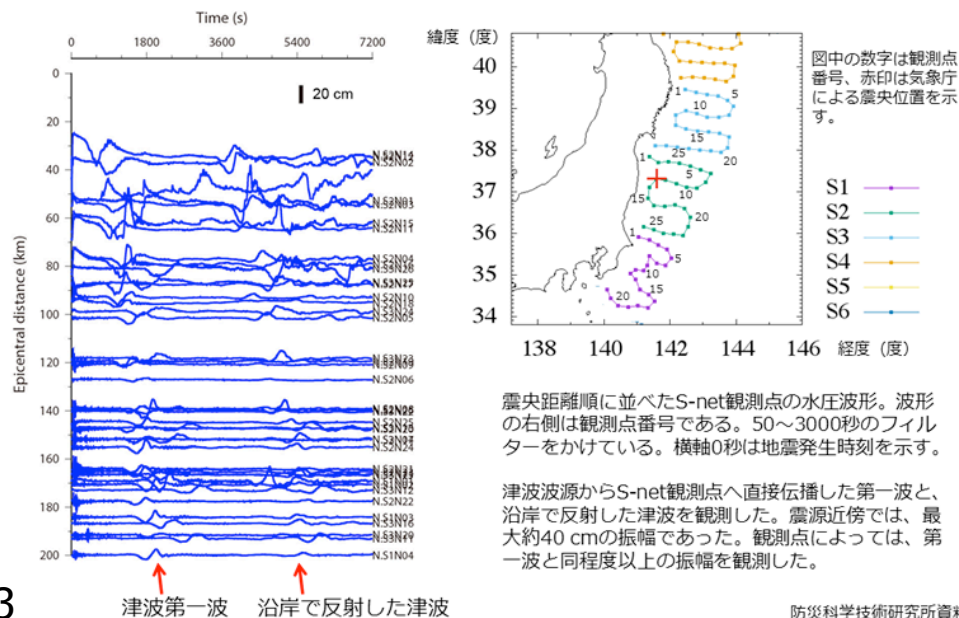
ここまでのまとめ

1. tFISHの要素波源サイズが波源域よりも大きい可能性

- ・ tFISH要素波源を用いた場合も、より細かい要素波源を用いた場合と同程度に沿岸潮位観測点の観測波形を再現できた
- ・ tFISH要素波源よりも空間サイズの小さい津波に対しては、岸の場所によっては波高を過小評価する恐れがある

→ 現行のtFISH要素波源でも津波予測に効果が見込まれる。
当面は現行の要素波源を使用(サイズ変更等は今後の課題)

2. 観測データに含まれる非津波成分・非地殻変動成分の影響



tFISH :
津波成分と地殻変動成分を考慮



それ以外の成分が入力されると
偽の津波波源が求まってしまい
予測精度が低下する恐れがある

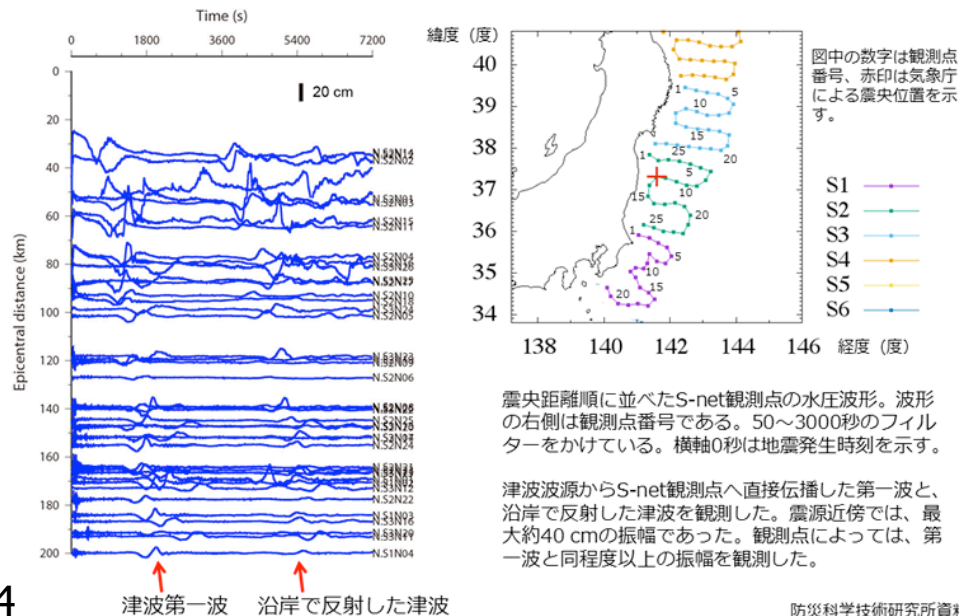
tFISH適用にあたっての2つの懸念事項

1. tFISHの要素波源サイズが波源域よりも大きい可能性

- ・ tFISH要素波源を用いた場合も、より細かい要素波源を用いた場合と同程度に沿岸潮位観測点の観測波形を再現できた
- ・ tFISH要素波源よりも空間サイズの小さい津波に対しては、岸の場所によっては波高を過小評価する恐れがある

→ 現行のtFISH要素波源でも津波予測に効果が見込まれるため、当面は現行の要素波源を使用(サイズ変更等は今後の課題)

2. 観測データに含まれる非津波成分・非地殻変動成分の影響

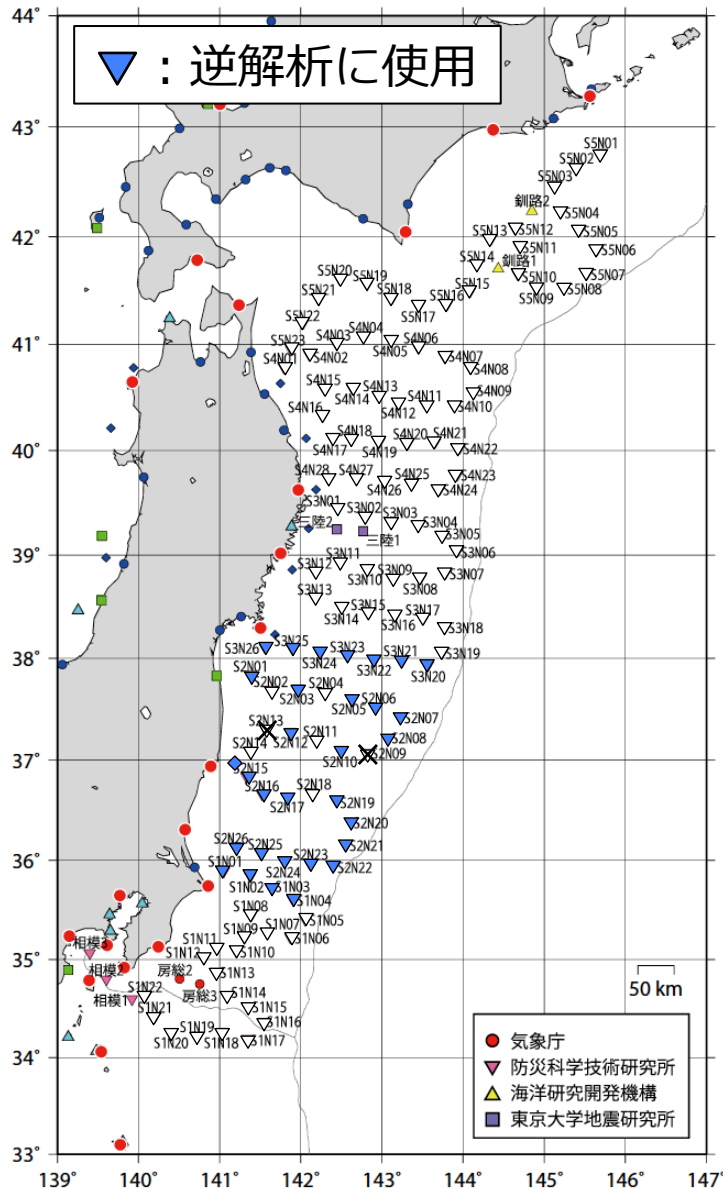


tFISH :
津波成分と地殻変動成分を考慮



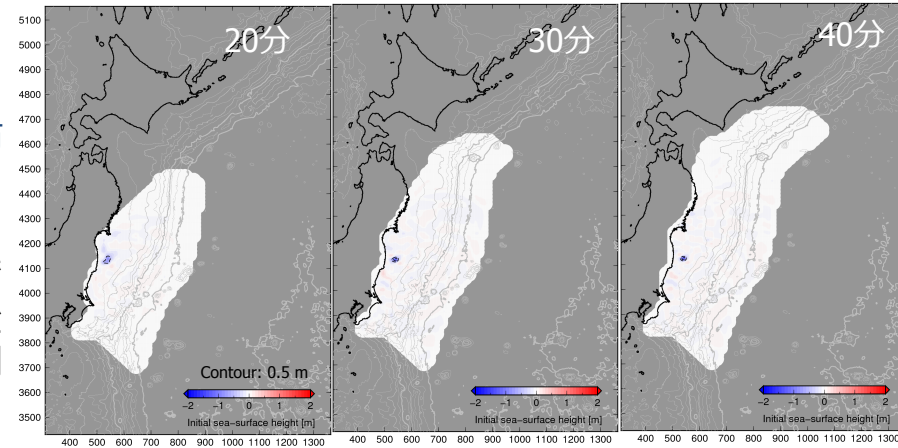
それ以外の成分が入力されると偽の津波波源が求まってしまい予測精度が低下する恐れがある

津波・地殻変動成分の抽出が完璧な場合(リアルタイム解析で目標にする解)



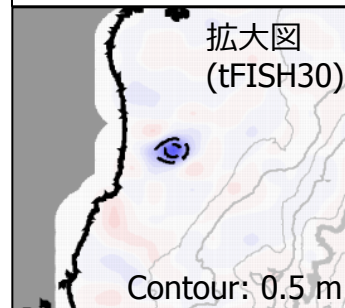
tFISHによる
初期水位分布
の推定値

表示時刻までの
観測波形を
逆解析に使用



非リアルタイム処理

地震発生後30分で
最終解とほぼ同じ

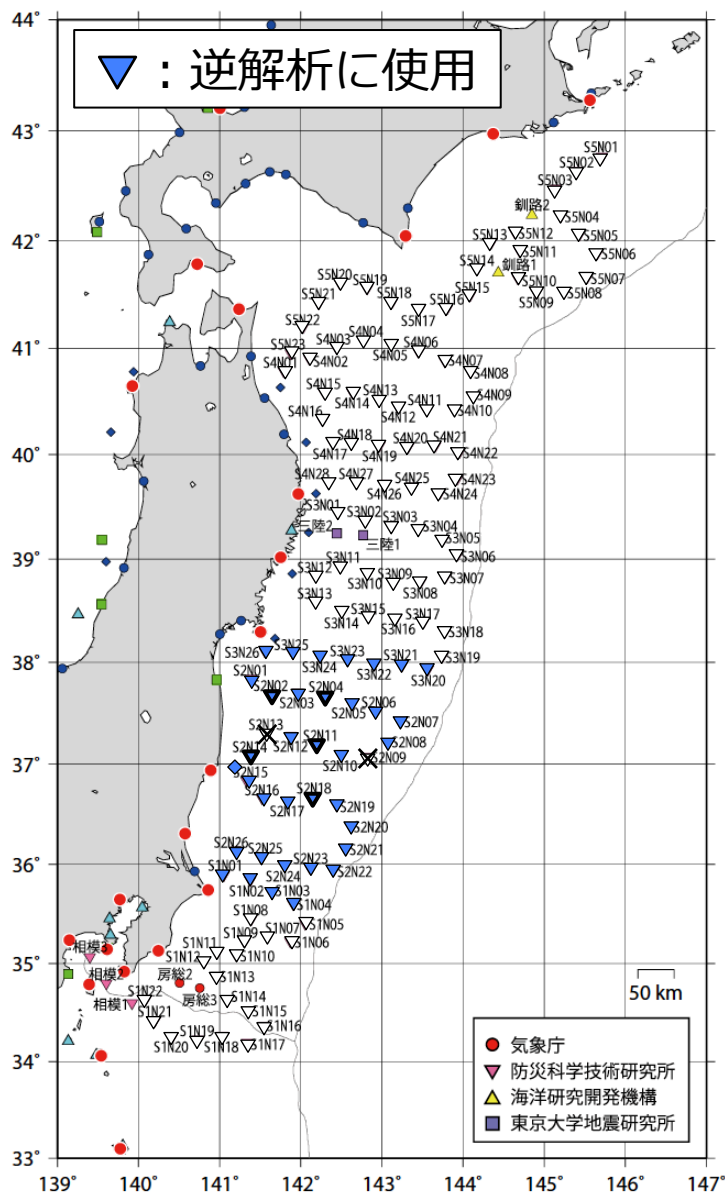


「正解」の推定時に用いた
観測波形データをtFISHに入力
＝津波・地殻変動成分を
完璧に抽出できた場合

30分間の観測データから
最終解に近い波源が推定される

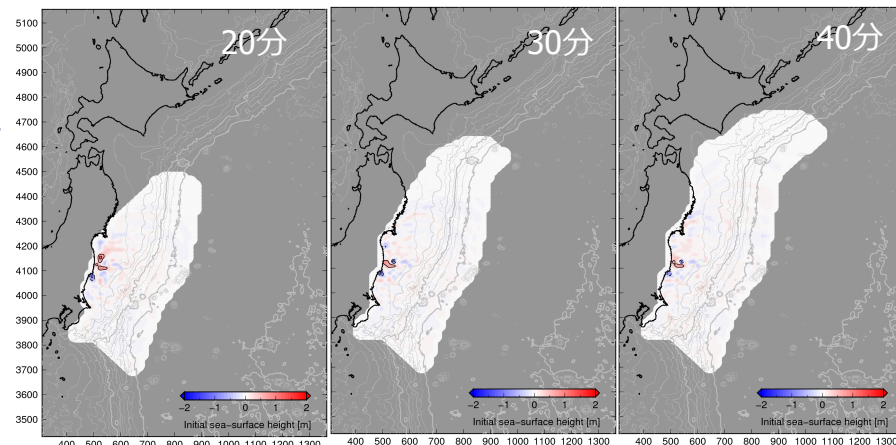
以降では、この解を到達目標として設定し、
リアルタイム自動解析によって
この解にどこまで近づけるかを検証する。

現手法：tFISH + 現行の津波・地殻変動成分の自動抽出手法

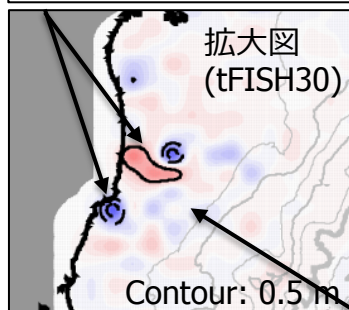


tFISHによる
初期水位分布
の推定値

表示時刻までの
観測波形を
逆解析に使用

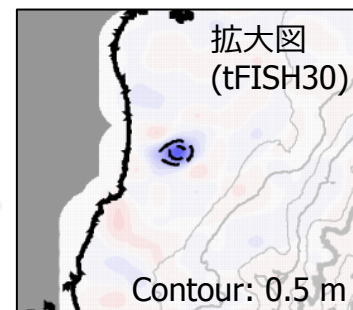


顕著な隆起域・
沈降域の偽像

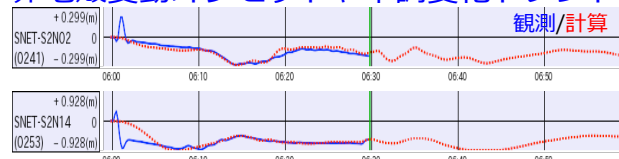


リアルタイムに適用
可能な方法を使って
近づけたい

目標



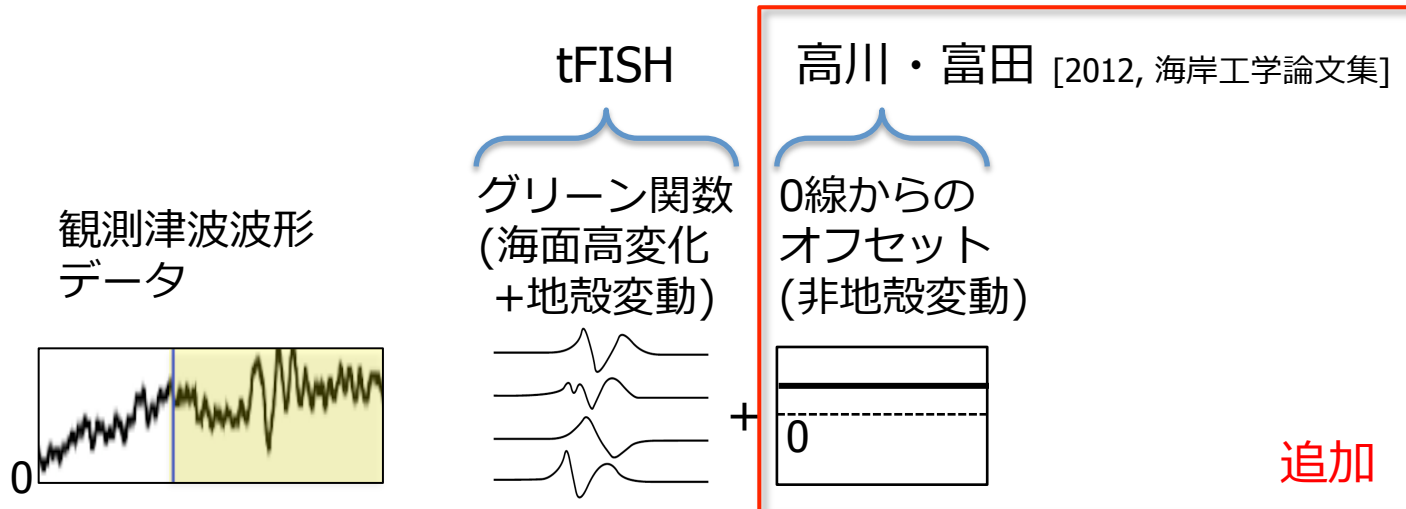
非地殻変動オフセットや単調変化トレンド



非津波成分を説明するために
偽像が求まる

観測方程式の改良 -- 初期水位と非地殻変動オフセットの同時推定

「観測される沖合津波波形は、津波と海底永久上下変位(地殻変動)と
それ以外のオフセット(非地殻変動)の線形結合で表現される」と仮定する

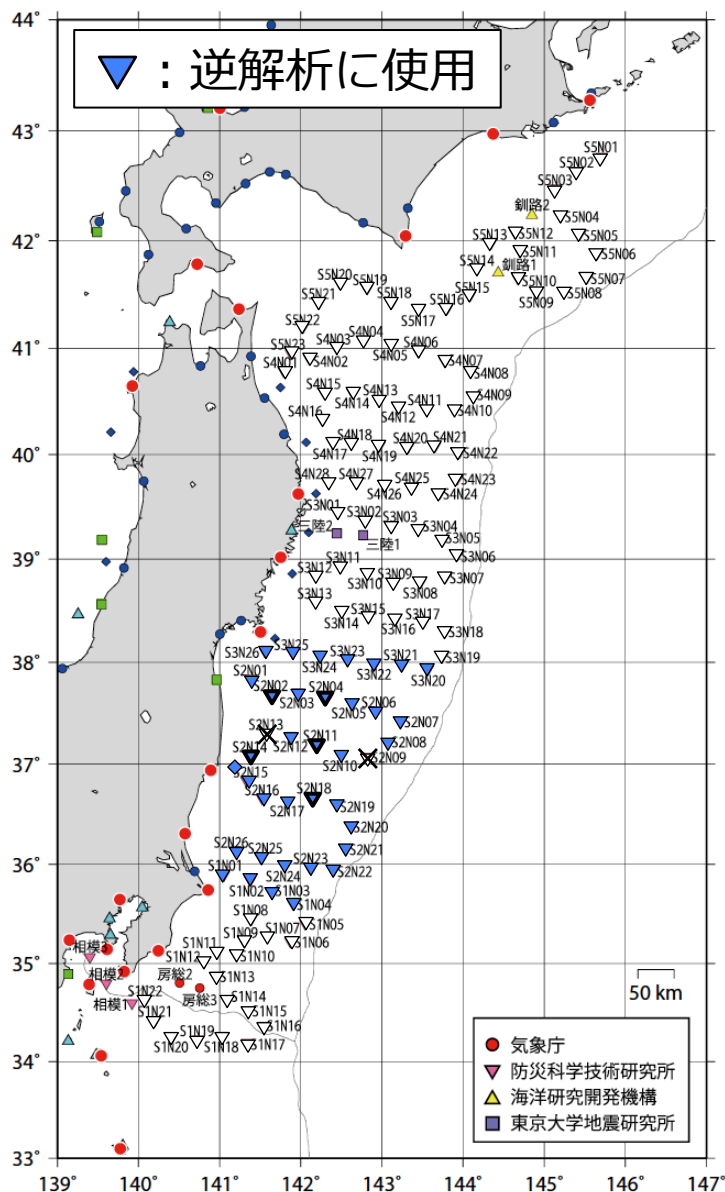


$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}^{\text{obs}}(t) \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}(t) & \mathbf{O}(t) \\ \mathbf{S} & \mathbf{0} \\ \mathbf{D} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{m} \\ \mathbf{m}_o \end{bmatrix}$$

初期水位分布

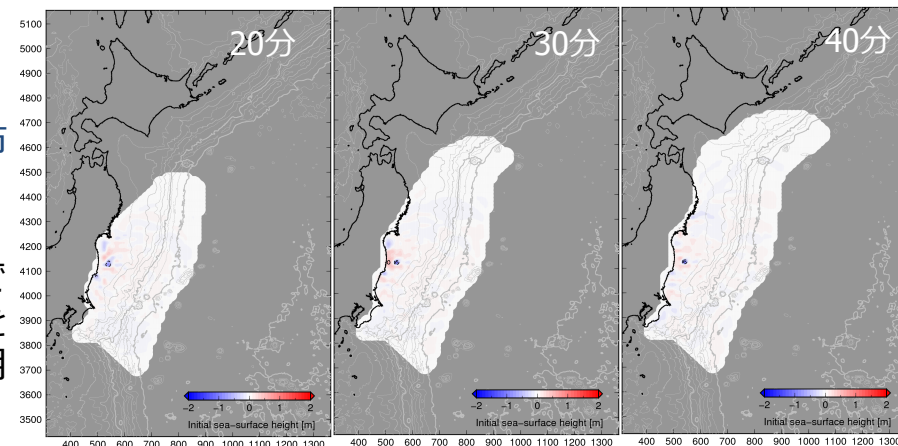
各津波計データに含まれる0線からのオフセット(非地殻変動)

tFISH&オフセット同時推定 + 現行の津波・地殻変動成分の自動抽出手法

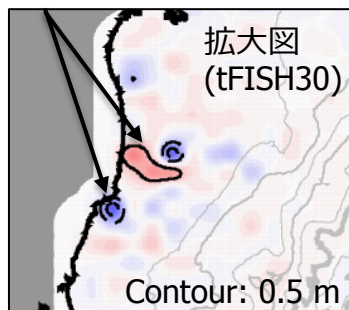


tFISHによる
初期水位分布
の推定値

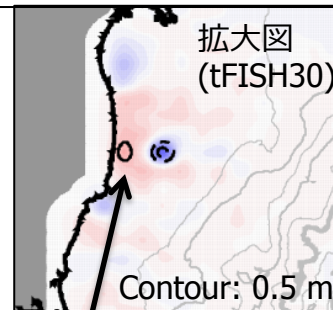
表示時刻までの
観測波形を
逆解析に使用



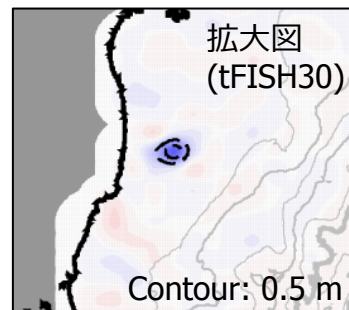
tFISHオリジナル



偽像が大幅に減少

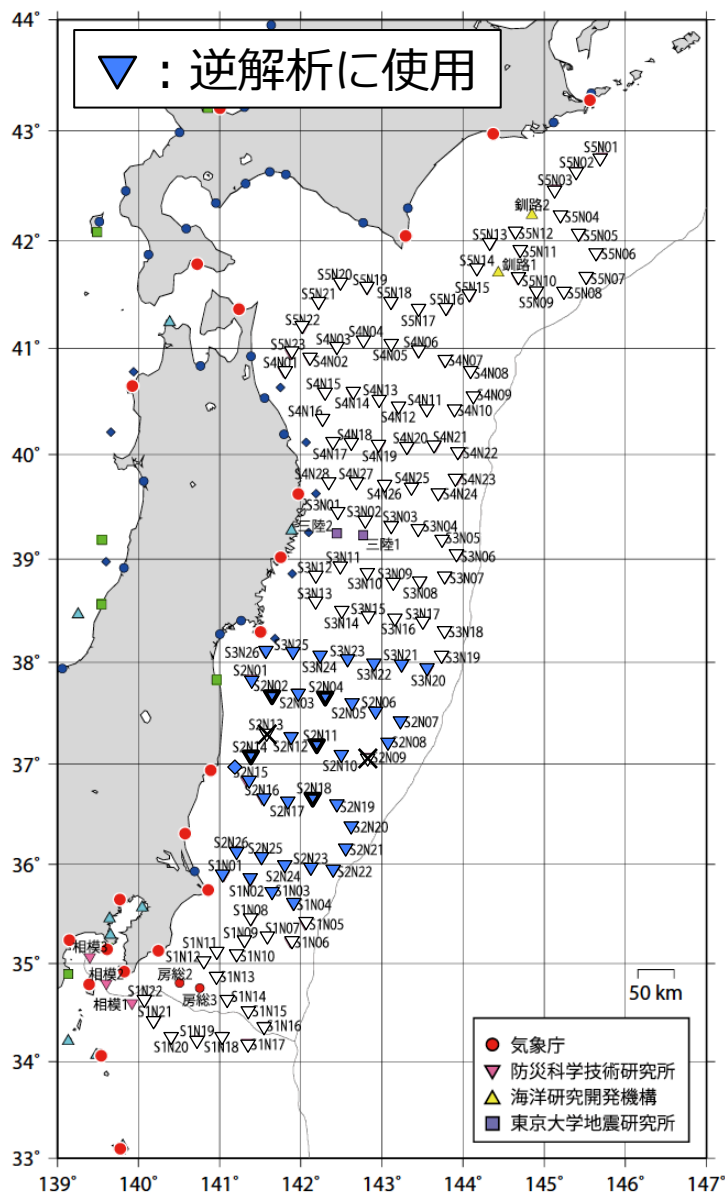


目標



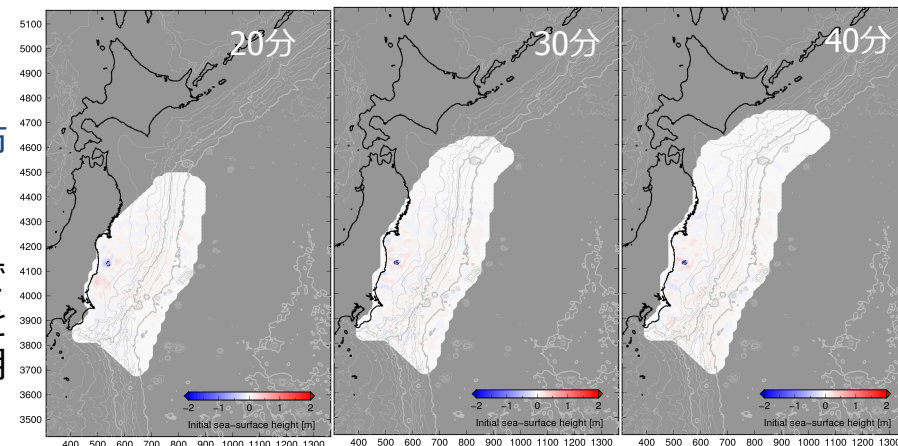
陸側隆起域が残存

tFISH&オフセット同時推定 + 現行の自動抽出手法&先頭データ不使用(5分)

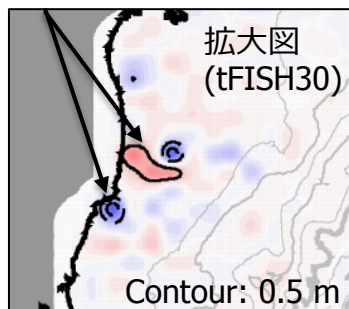


tFISHによる
初期水位分布
の推定値

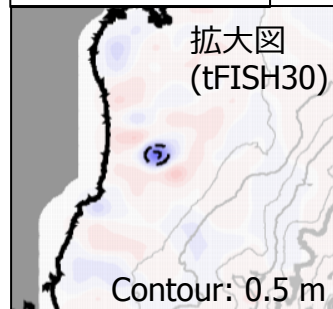
表示時刻までの
観測波形を
逆解析に使用



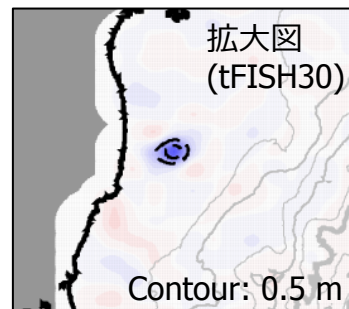
tFISHオリジナル



偽像が減少



目標

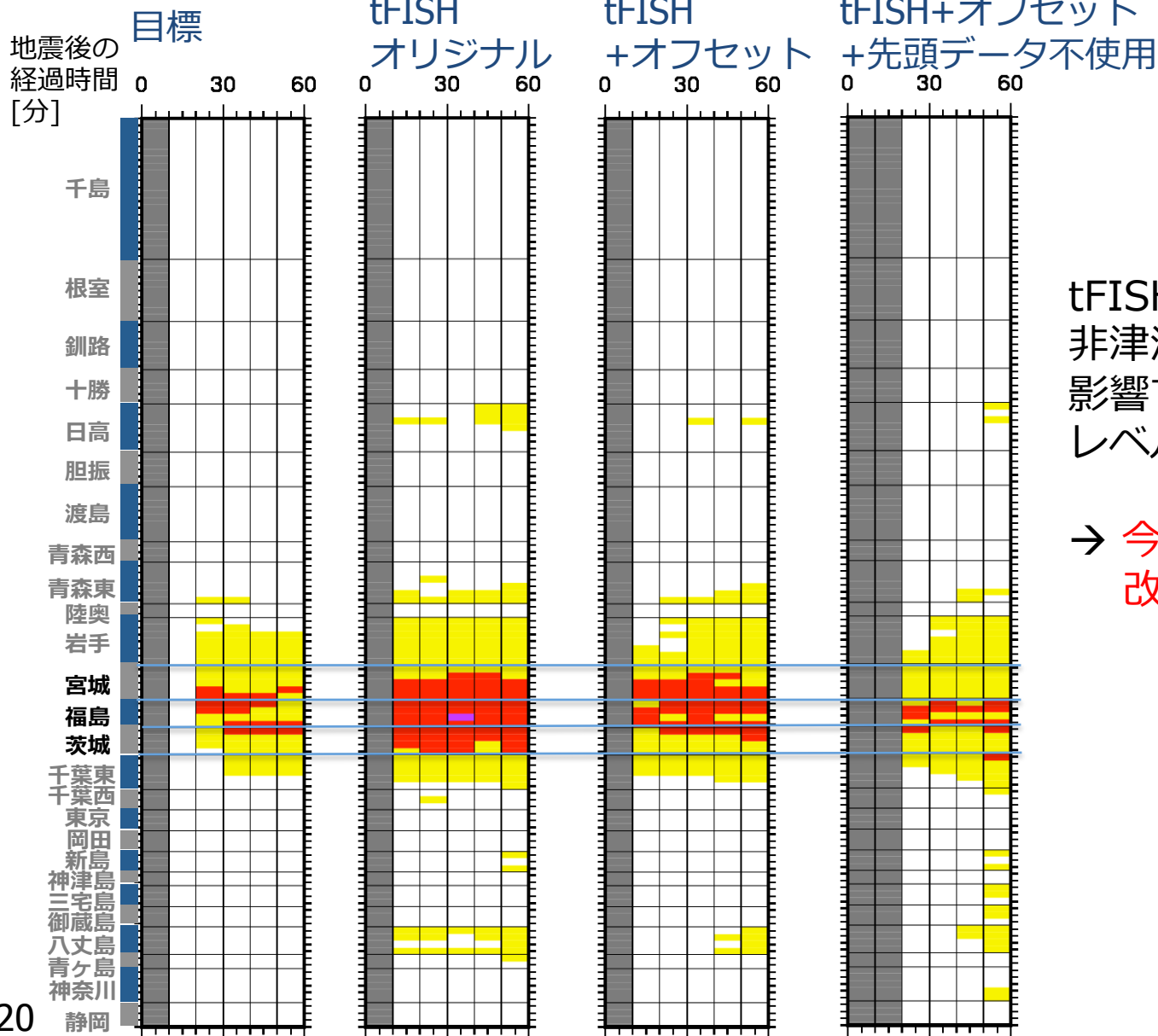


津波予報グレードによる評価

津波注意報

津波警報

大津波警報



tFISHオリジナルでは、
非津波・非地殻変動成分の
影響で福島県が大津波警報
レベルに達してしまう。

→ 今回の改良により
改善する傾向がみられた

まとめ

- S-net水圧データ等を用いたtFISH事例解析の1つとして，2016年11月22日福島県沖地震にtFISHを適用した
 - 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，岸の場所によっては予測精度低下が生じるものの，津波予測に対して一定の効果があることがわかった
 - 観測データに含まれる非津波成分が偽波源として推定されることに伴い，予測精度の低下がみられた
 - 先行研究の手法を導入する等のtFISHの改良により，非津波成分の影響を軽減することができ，予測精度の改善がみられた

今後の展望

- これまでと同様，解析事例の蓄積に努めるとともに，非津波成分への対応策の強化をはじめとする解析手法の高度化を継続する