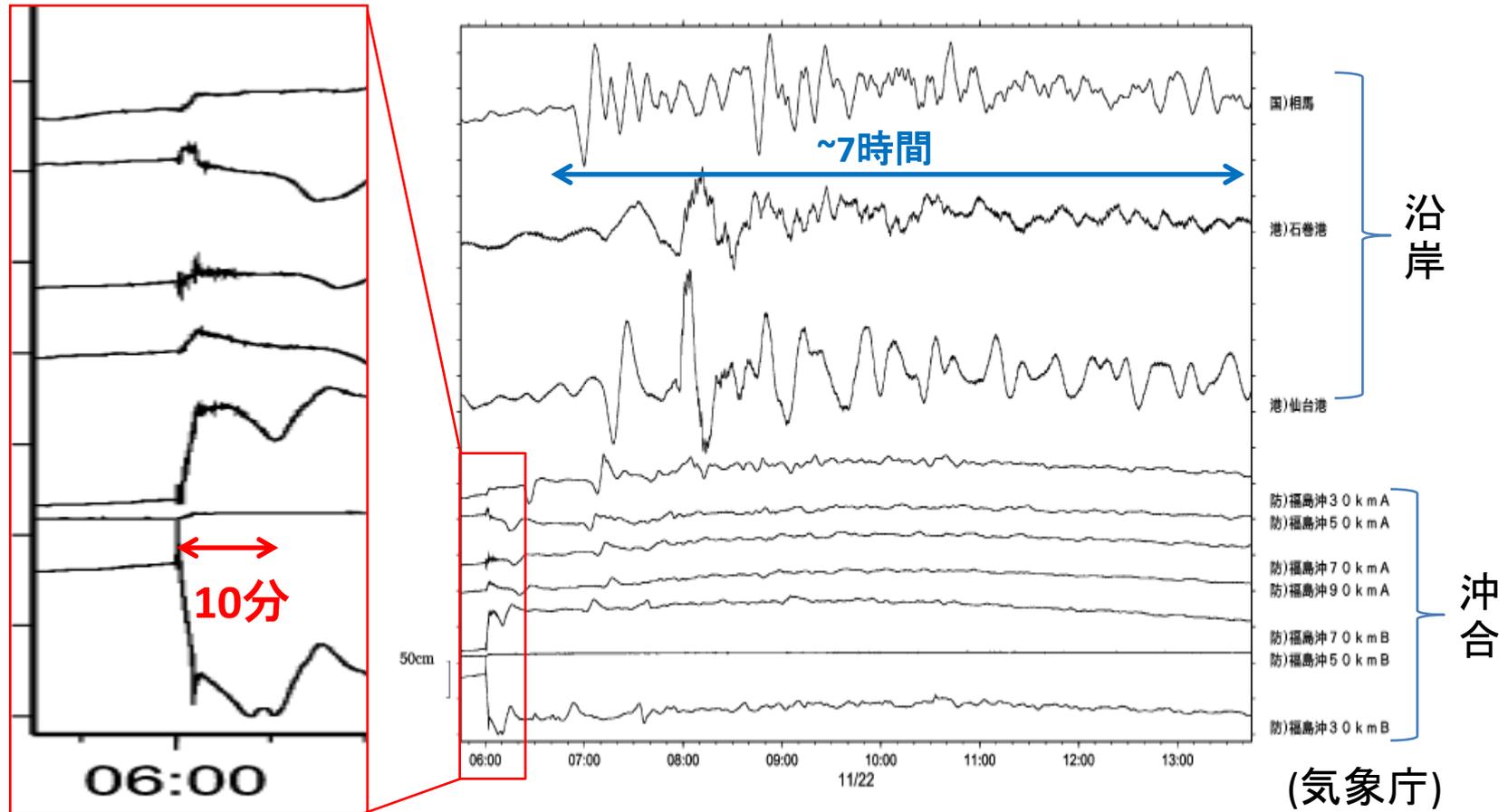


沖合津波観測点で観測される波形の特徴： 弾性体力学/流体力学からの理論予測

防災科学技術研究所 齊藤竜彦



海底水圧記録のリアルタイム監視(~波形冒頭部の解釈)は難しい

← 従来の津波の基礎理論(流体力学+長波近似)が想定しない様々な要因¹

Synthesizing ocean bottom pressure records including seismic wave and tsunami contributions:

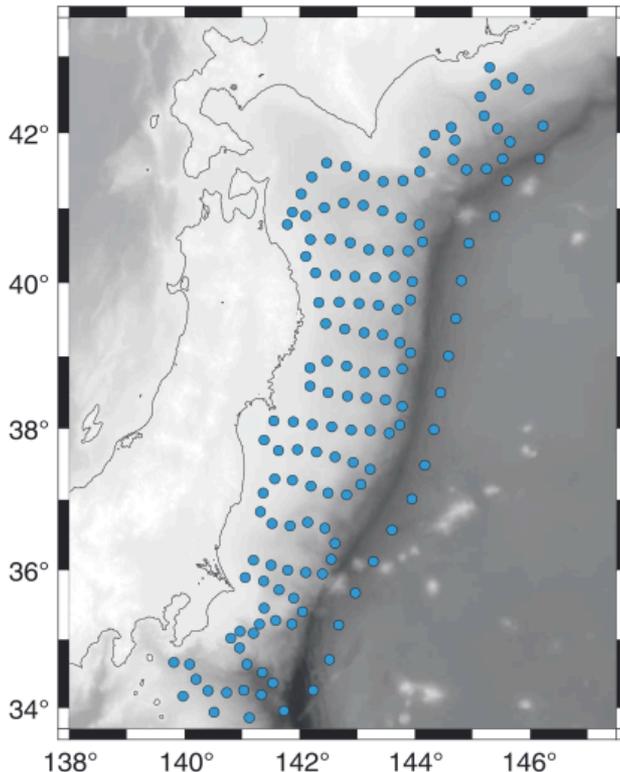
Toward realistic tests of monitoring systems

対馬さんとの共同研究

J. Geophys. Res. Solid Earth, 121, doi:10.1002/ 2016JB013195.

Tatsuhiko Saito (NIED) & Hiroaki Tsushima (Meteorological Research Institute)

弾性体力学/流体力学に基づき、波形冒頭部を解釈



震源域内での基盤的津波観測

より迅速, より信頼性の高い津波即時予測に期待

震源域内観測記録の難しさ

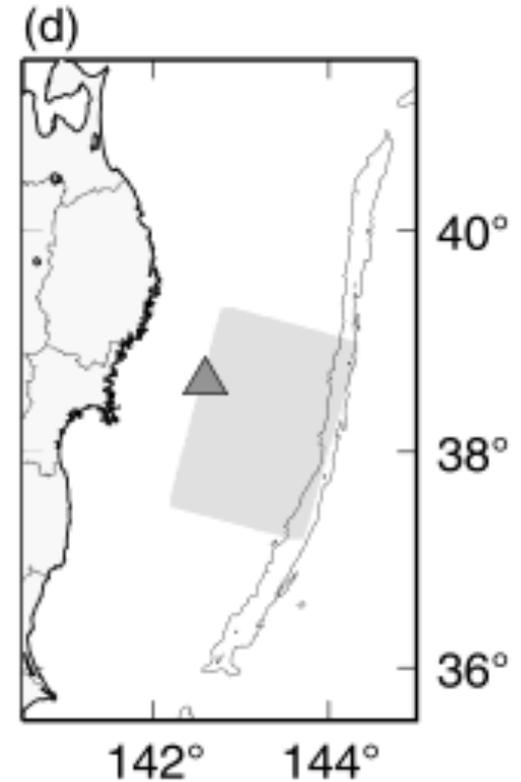
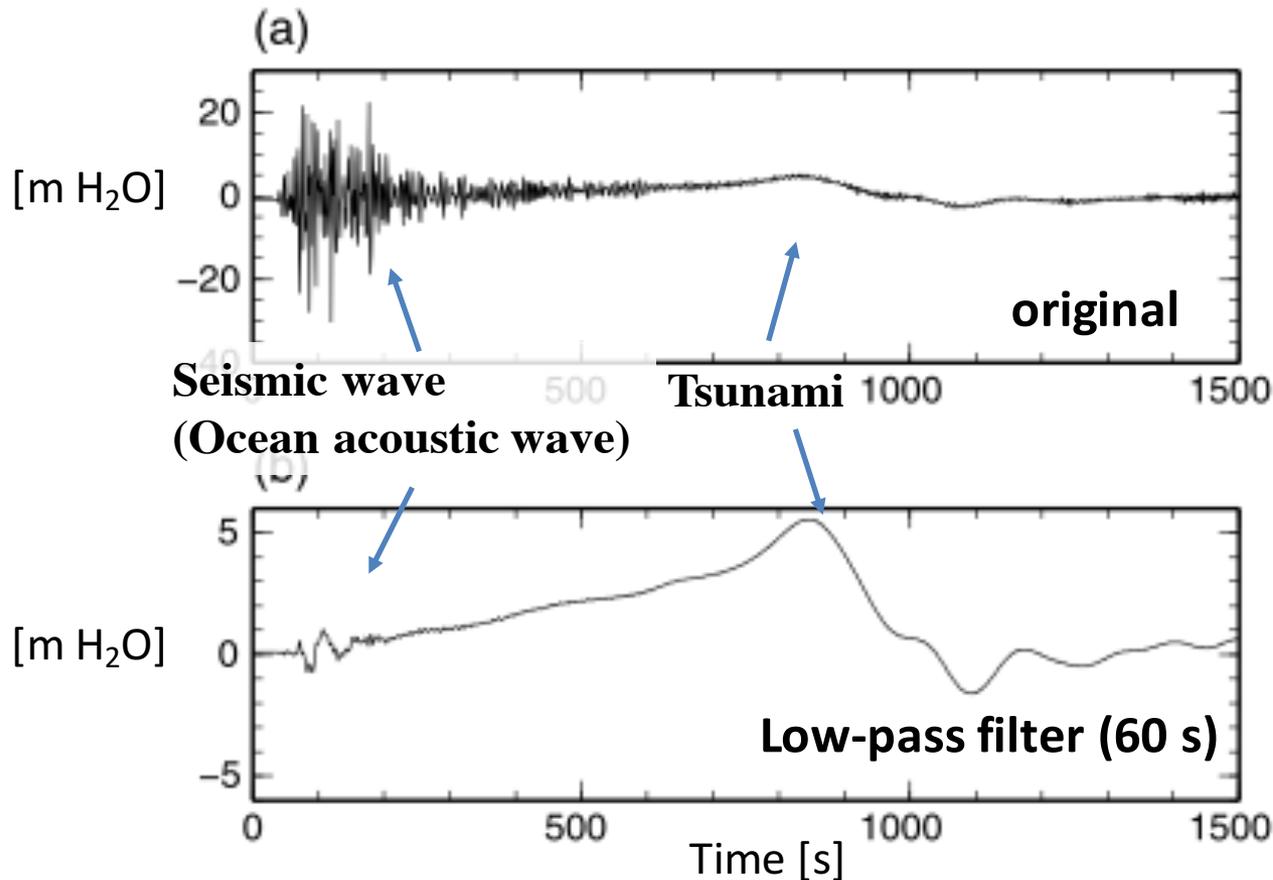
地震波が津波と同時に存在する.

どのような記録が期待されるか(理論合成)?

現在のモニタリングシステムはどう反応するか?

システムの性能そのものより, システムの性能を正確に理解することが重要.

2011東北地震時に実際に観測された海底水圧変化

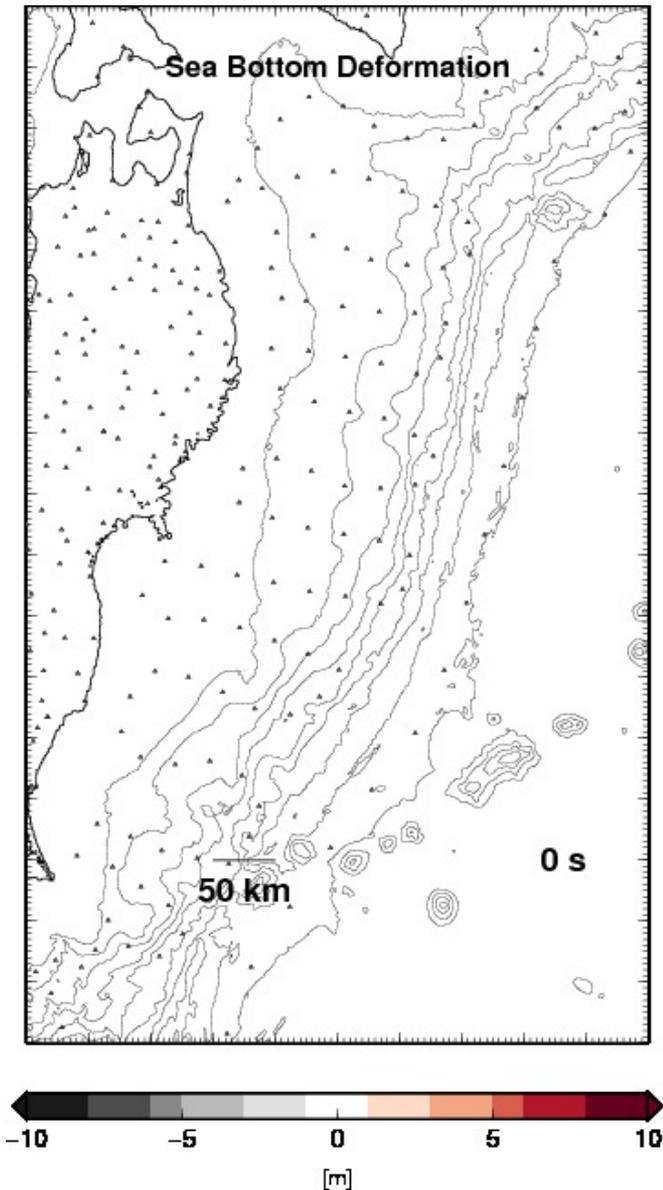


- ・津波だけでなく、地震波・海洋音響波によって、海底水圧は大きく変化.
- ・震源と観測点がさらに近い場合、津波と地震波が重畳する.

海底水圧記録の理論合成方法

- ・2段階 数値シミュレーション
 - STEP 1 線形地震波シミュレーション
 - STEP 2 非線形津波シミュレーション
- ・シミュレーション結果から、海底水圧記録を理論合成

ステップ: 線形地震波シミュレーション



断層パラメタ (矩形・一様滑り)

$L = 200 \text{ km}$, $W = 150 \text{ km}$

$D = 20 \text{ m}$

断層重心の深さ = 50.5 km ,

傾斜角 = 30 度 , すべり角 = 90 度

継続時間 = 30 s ,

破壊伝播速度 ∞

複数 D.C.型点震源

2層構造

海水層 ($V_p = 1.6 \text{ km/s}$, 4 km)

地殻 ($V_p = 7. \text{ km/s}$, $V_s = 4 \text{ km/s}$)

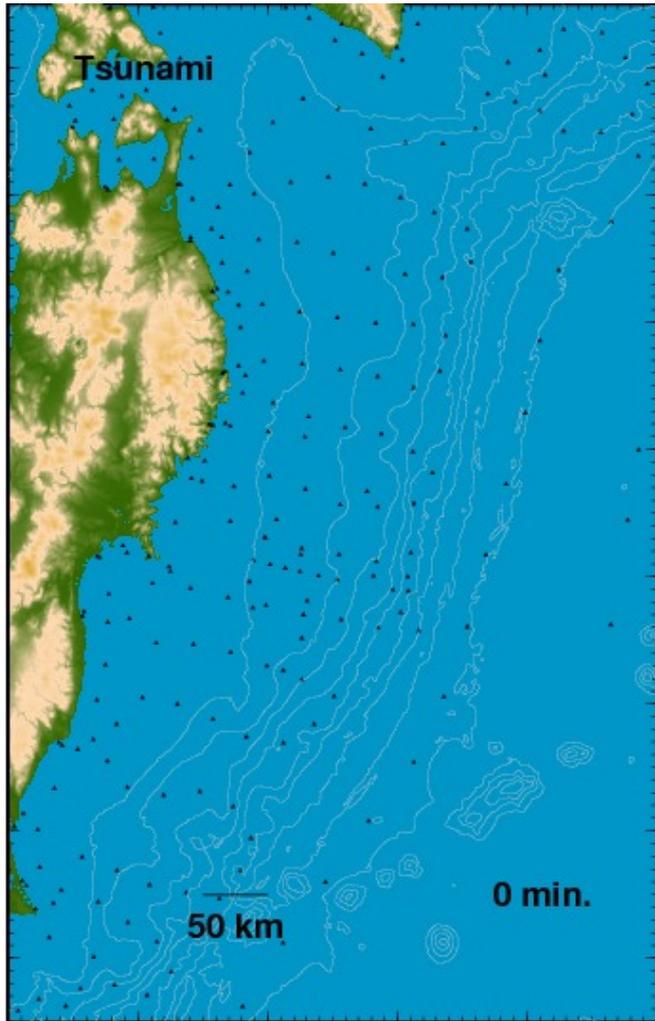
差分法による波動伝播計算

保存する計算結果

$\sigma_{zz}^{bot}(x, y, t)$: 海底の応力

$v_z^{bot}(x, y, t)$: 海底の上下速度成分

ステップ 2: 非線形長波方程式による津波計算



境界条件

$v_z^{bot}(x, y, t)$: 海底の上下速度成分

非線形長波方程式

差分法 (1 km グリッド間隔)

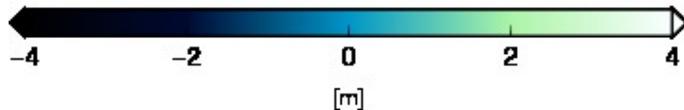
地形データ ETOPO 1

浸水有

保存する計算結果

$\eta(x, y, t)$: 海面上下変位

浸水データ 等

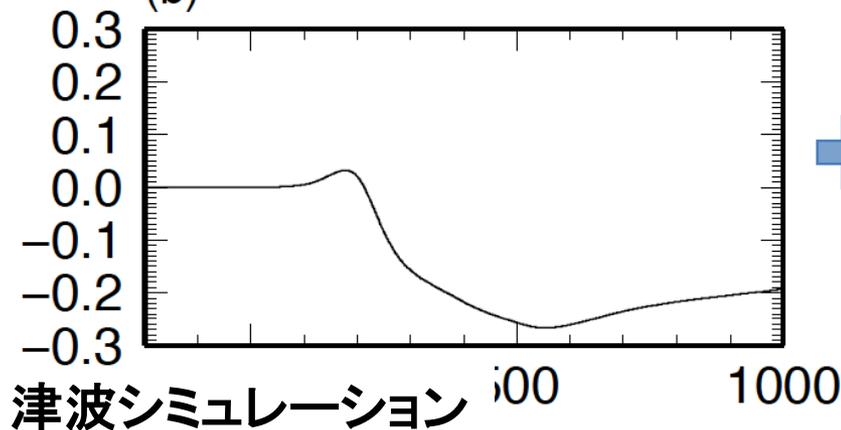


海底水圧計の記録合成

静的な圧力変化

$$p = \rho g(\eta - u_z^{\text{bot}})$$

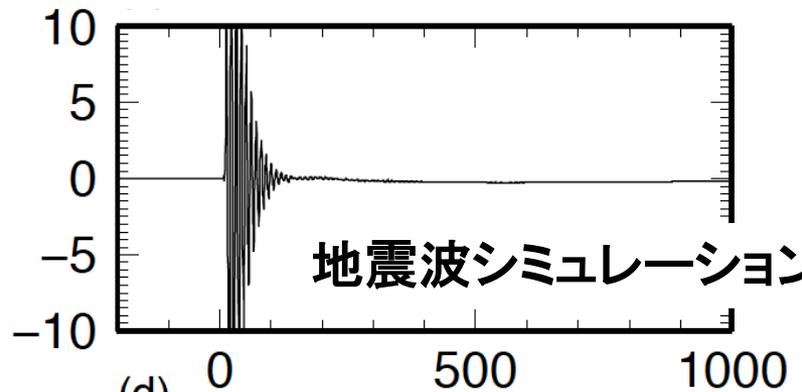
Pressure [mH₂O]



動的な圧力変化

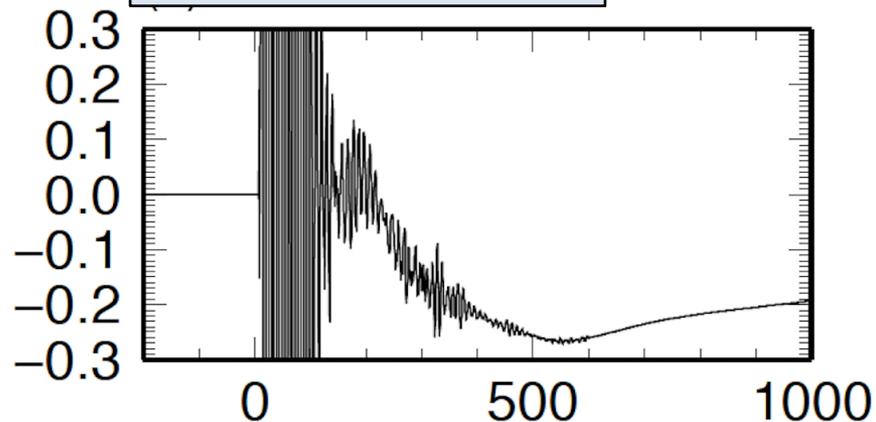
(海底における $-\sigma_{zz}$)

Pressure [mH₂O]



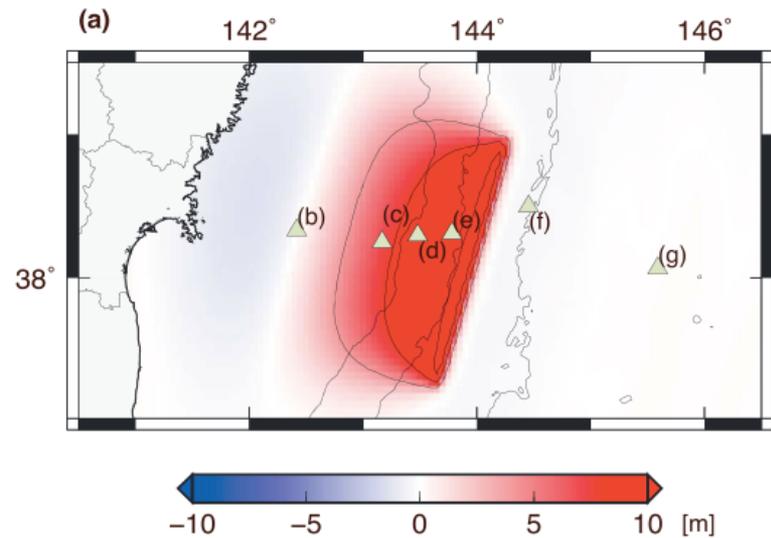
海底水圧記録

Pressure [mH₂O]

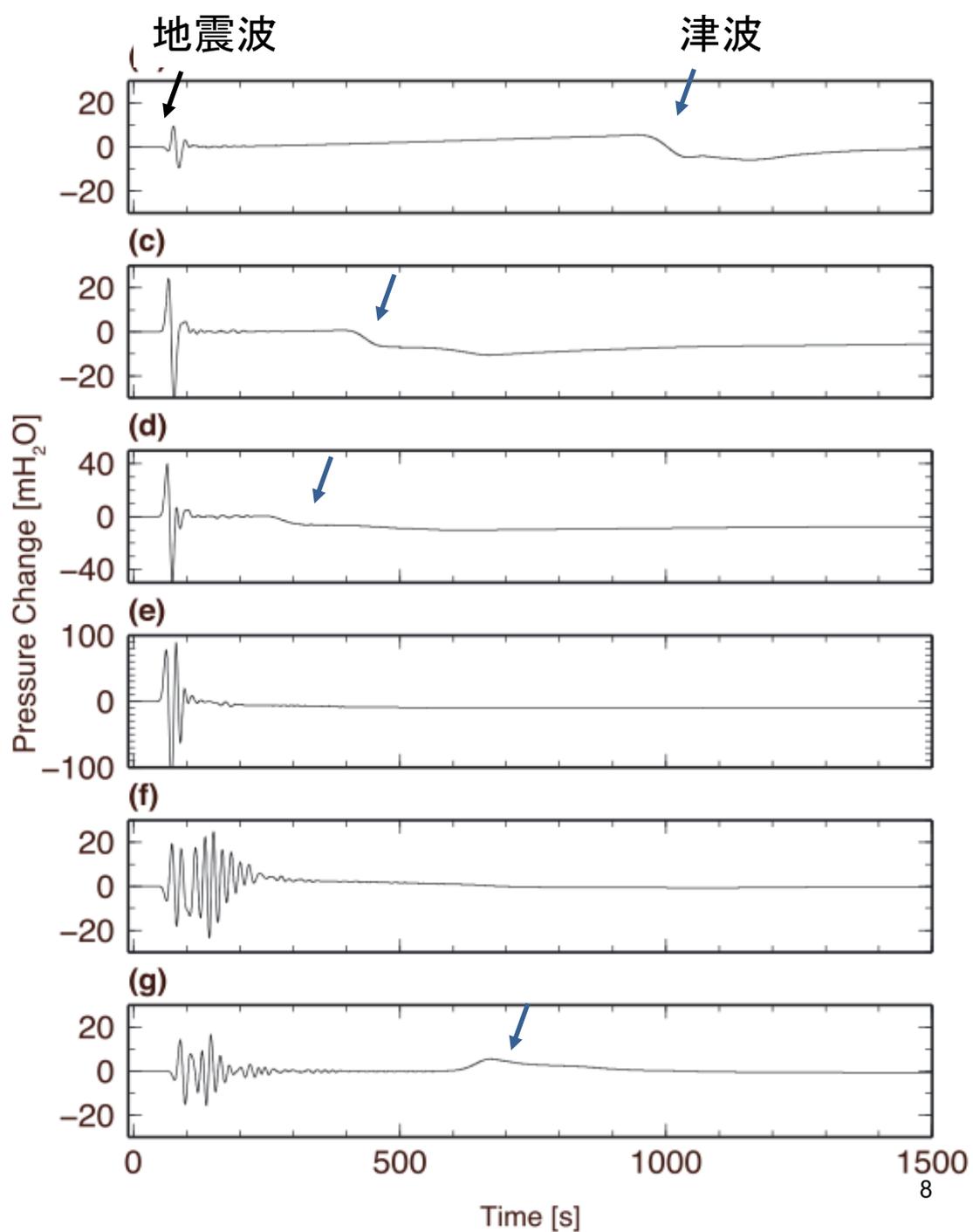


海底圧力変化をもたらす各要素を過不足無く取り入れる。

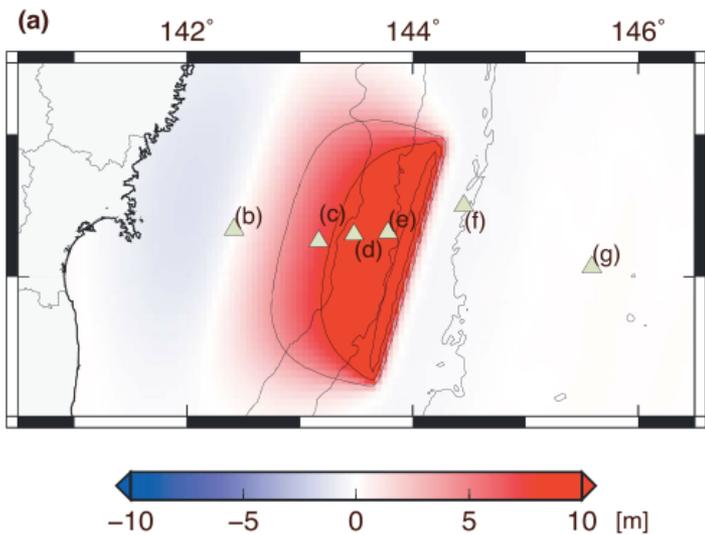
合成した海底水圧記録



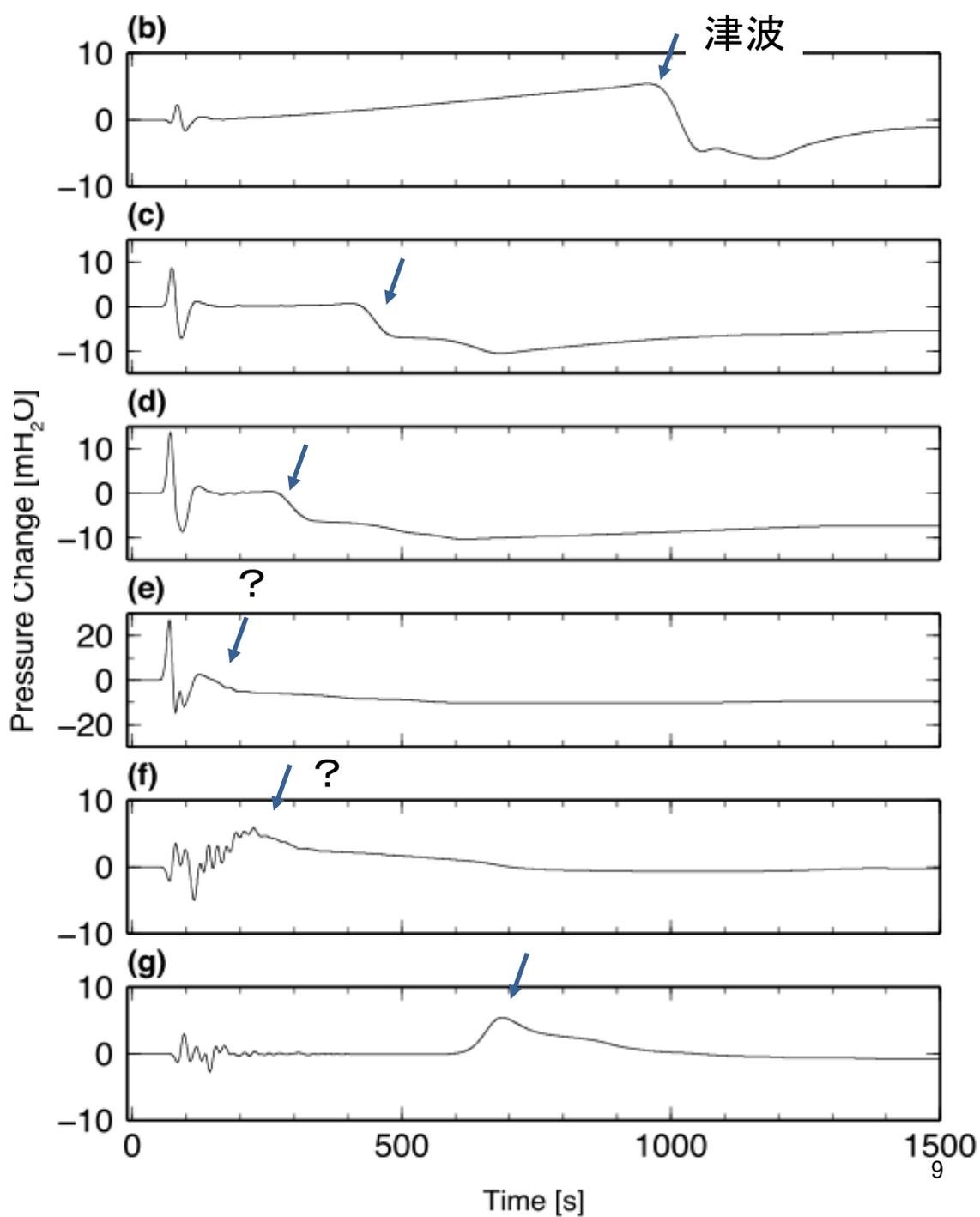
地震波による圧力変化
> 津波による圧力変化



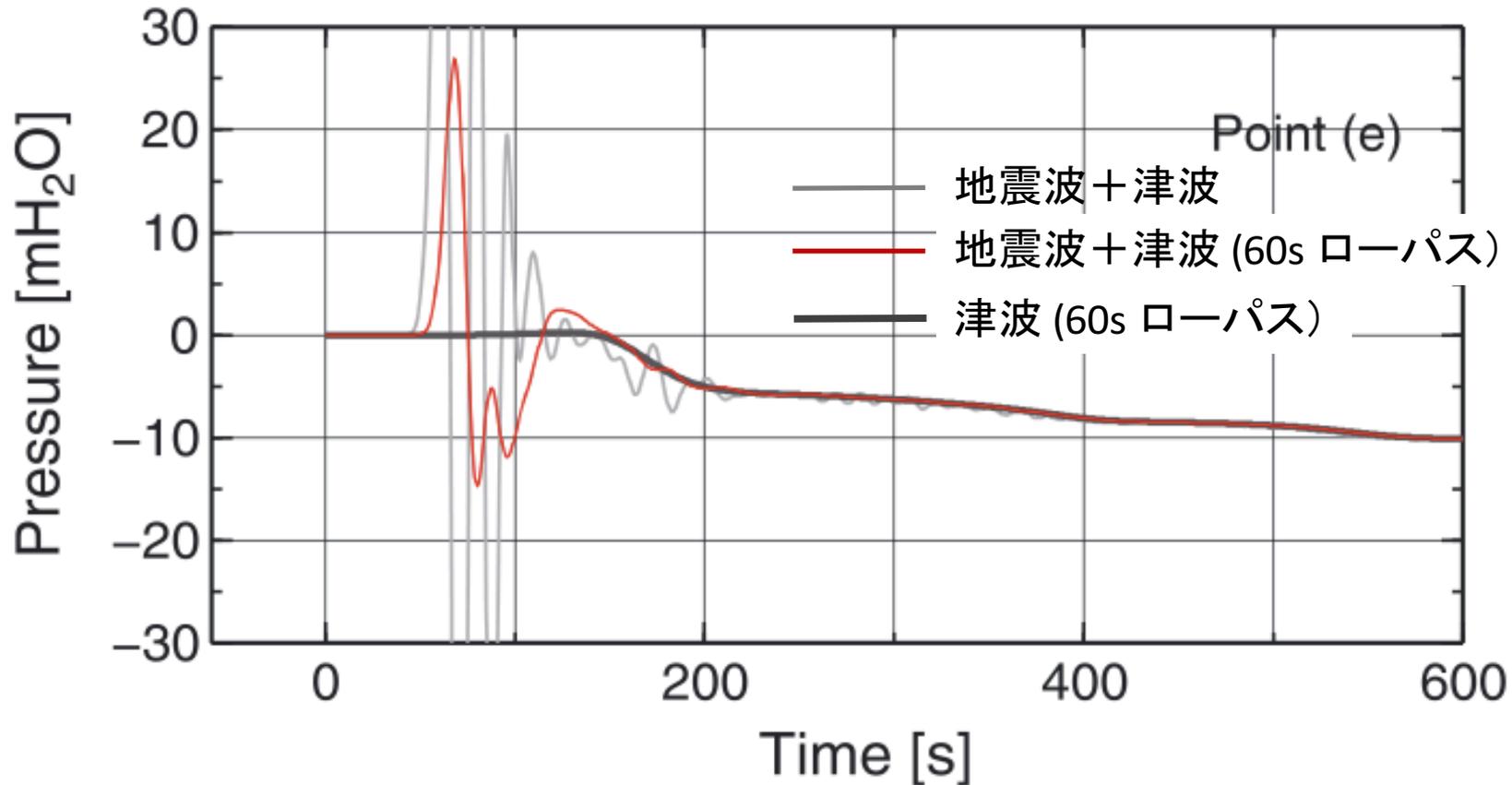
合成した海底水圧記録 (ローパス 60 s)



地震波が津波に重畳
どこから津波？
即時の判別難しい。



震源域内に設置された水圧計の合成記録



地震発生から～150秒の水圧変化は、地震波(断層運動)による寄与がほとんど。

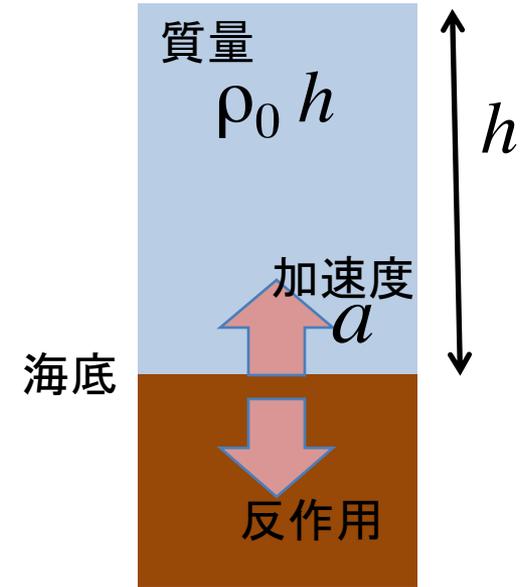
考察 地震波による水圧変化

海底の動き(低周波数地震波)による

$$\text{水圧変化} = \rho_0 h a$$

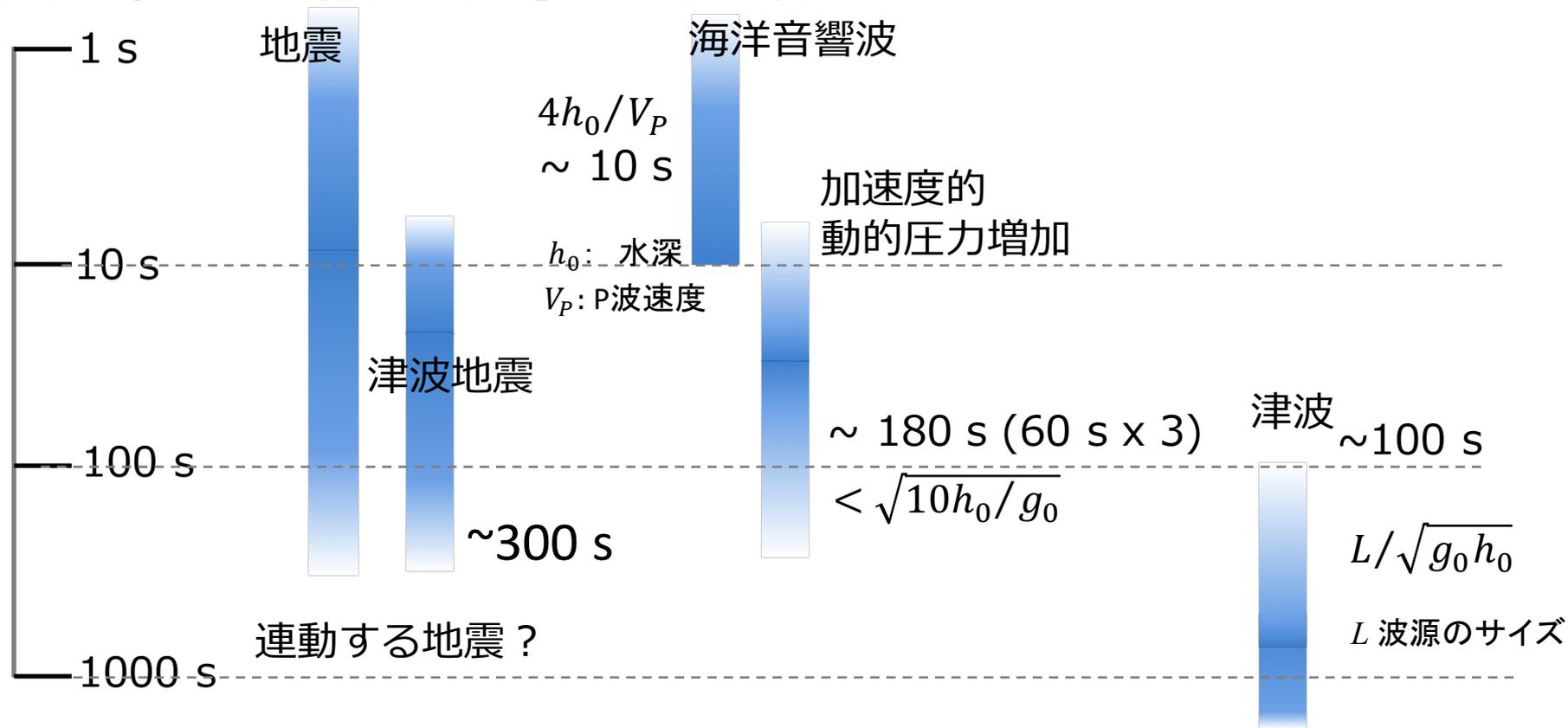
海水柱の(海底単位面積あたりの)質量 $\rho_0 h$

海水柱に加速度 a をあたえるために必要な(単位面積あたりの力) $\rho_0 h a$



震源直上では、地震断層と同じタイムスケールの変動現象

震源付近の変動現象の時定数 (変化が起こる時間の相場感)



- 地震断層運動の時定数 と 津波の時定数は, 大局的には異なる.
- しかし, ~100 s スケールでは, 地震・津波が混在する.

→ 水圧計による即時予測・自動解析は困難が伴う

- 巨大地震は, 震源過程に多様性が表れやすい (連動・津波地震など)

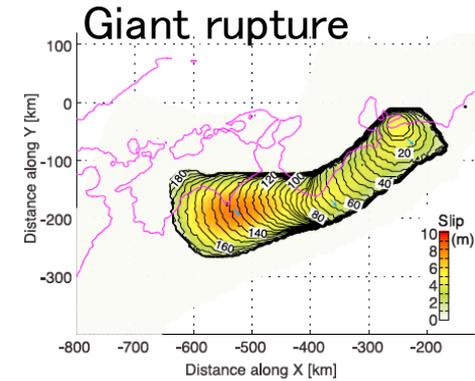
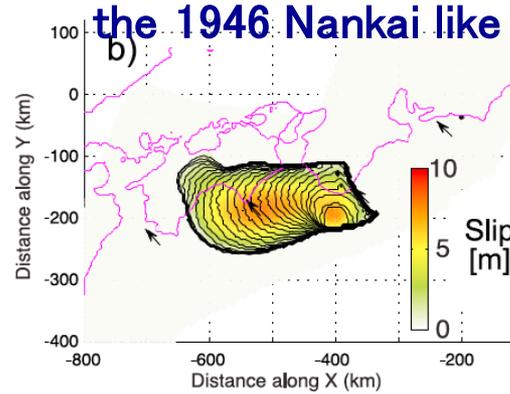
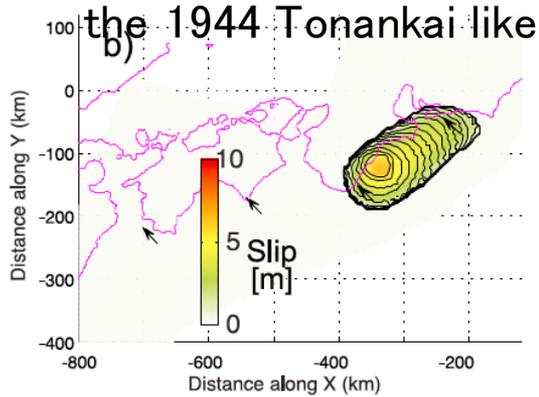
→ 時定数が地震により大きく異なる可能性.
多様性に対応するトレーニングが必要

今後 巨大地震発生メカニズムを利用したトレーニング

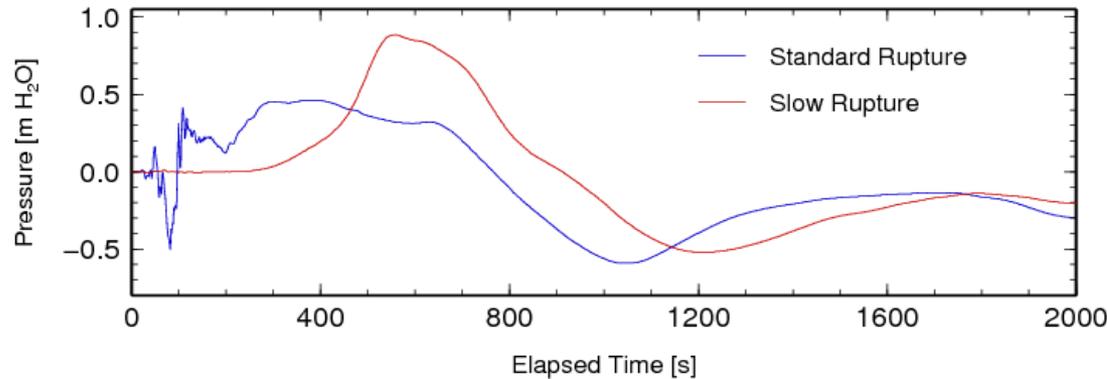
さまざまな地震発生シナリオを想定

Hok, Fukuyama et al. 2011 JGR

最新地震学の知見 (GEONET, 室内摩擦実験, 動力学破壊理論)



Fast Rupture



Slow Rupture (time x 4)

普通の巨大地震: 地震波成分が津波信号の抽出を邪魔する.

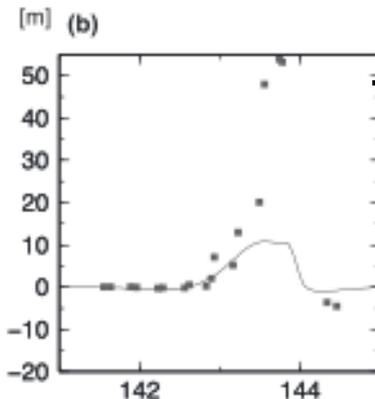
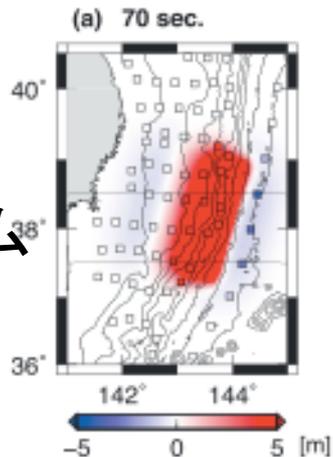
津波地震: 地震波形が普通と異なるためCMT解析難しくなる(?).

地震断層運動の時定数に依存して, 津波予測困難となる要因が変化. テストが必要 13

テスト その1

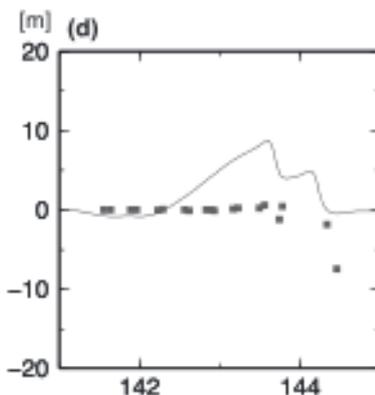
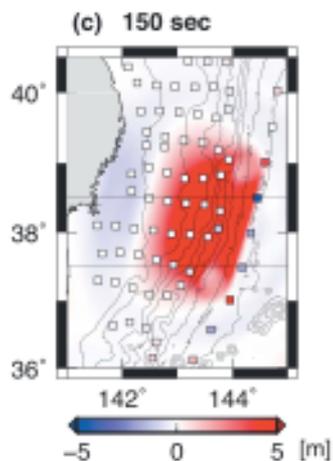
津波モニタリングシステム

海底水圧記録
ローパスフィルタ(60s)



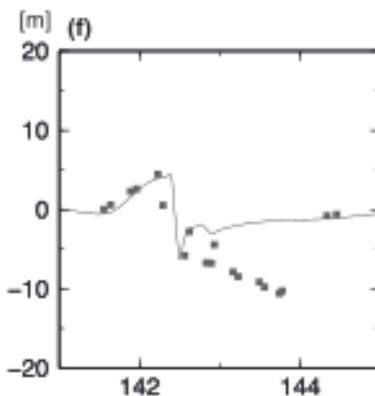
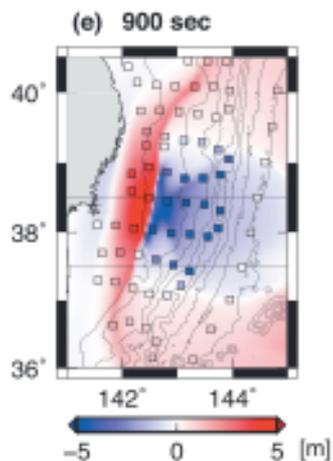
— 実際の海面変位
■ 推定した海面変位

動的成分(地震波)によって, 震源域に大きな圧力変化(本研究).

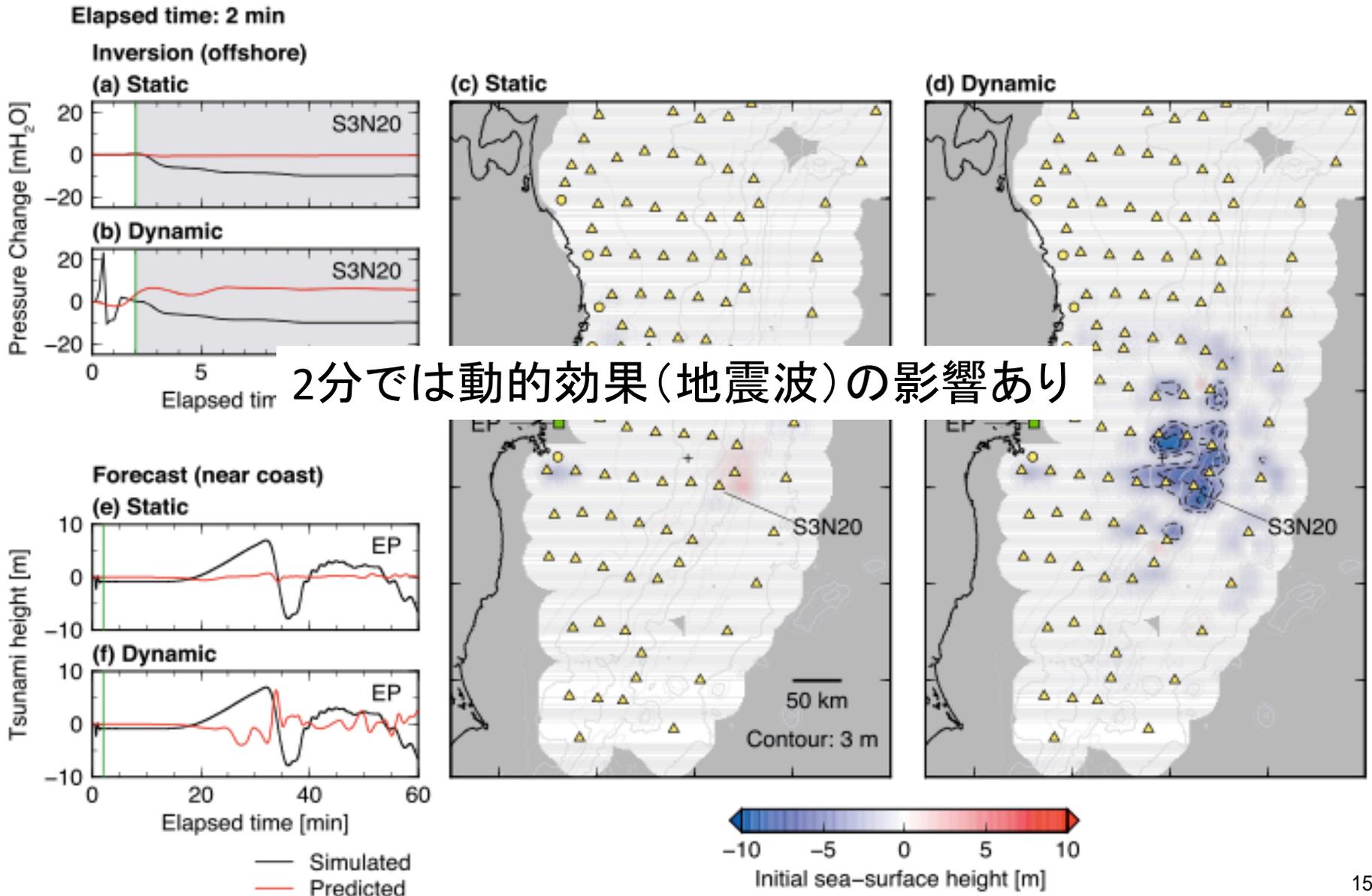


水深変化が無い場合、圧力変化を検出できない。

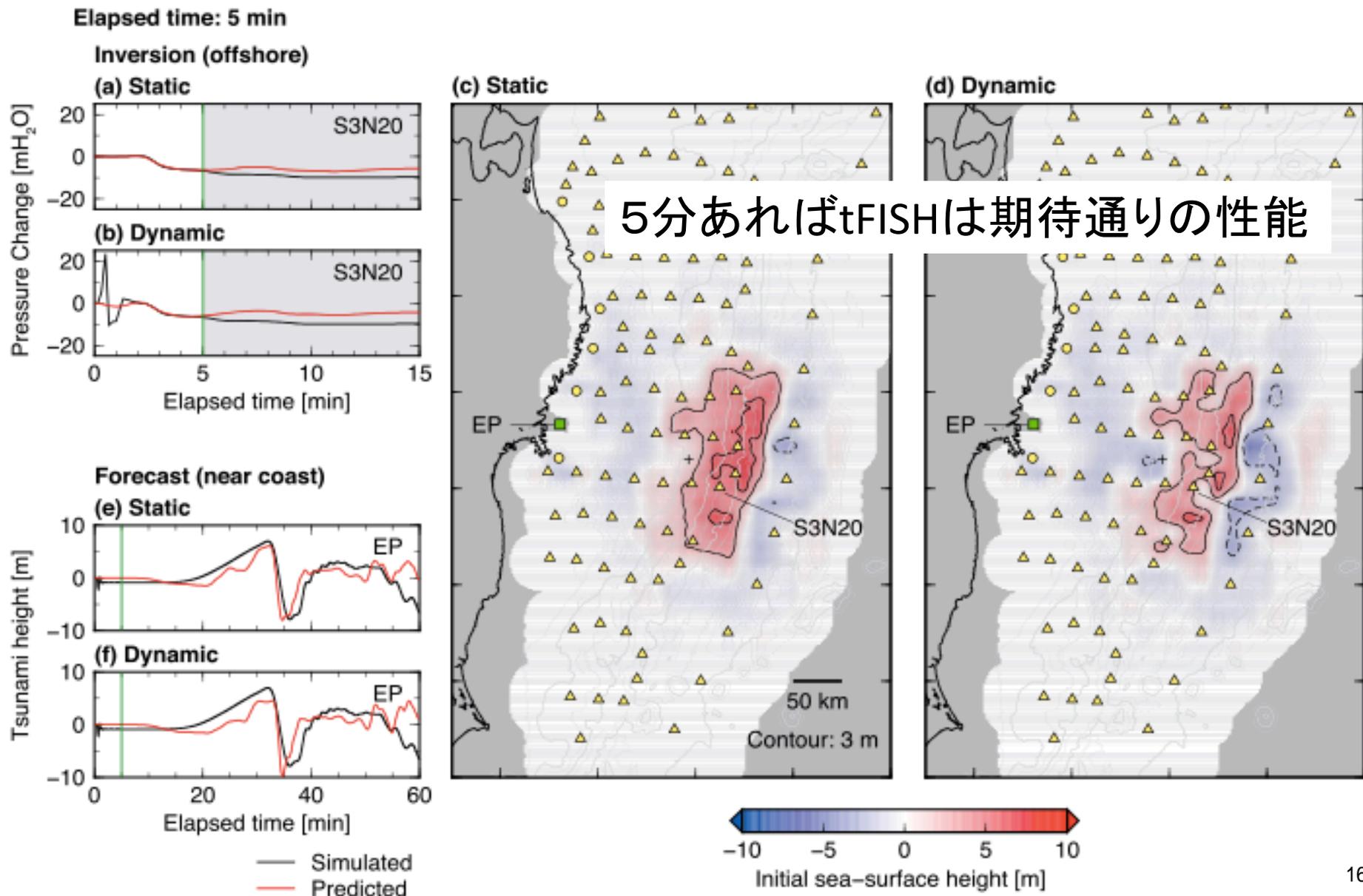
Tsushima et al. (2012)



合成記録を利用したtFISHのテスト



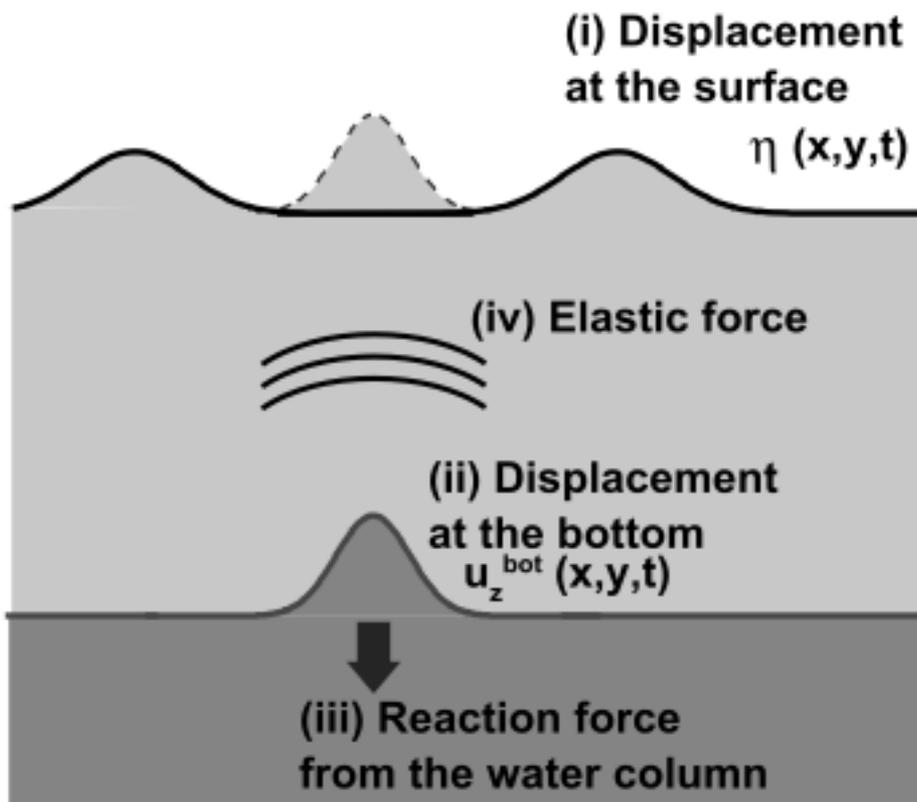
合成記録を利用したtFISHのテスト



まとめ

- ・海底水圧記録の冒頭部は、従来の津波理論(流体力学)で取り扱えないシグナルが存在.
- ・弾性体力学・流体力学によって、地震波と津波による水圧変化を理論的に計算.
- ・ $\sim 10\text{s}$ より短い周期($T < 4\text{h}/c$)は、海洋音響波が水圧記録に現れる. 単純なローパスで除去可能.
- ・ $\sim 100\text{s}$ スケールでは、地震波と津波が混在. 海底水圧記録の自動解析や監視状況下での解釈が困難となる要因.
- ・巨大地震の震源過程は多様性(幅広い時定数). 即時予測が困難となる要因も多様.
- ・地震学の成果(測地データ・応力データ・室内摩擦実験)に基づき、多様な巨大地震(連動・津波地震等)に対する模擬記録を作成可能.
 - 巨大地震発生に備えたトレーニングに利用可能.
 - ・モニタリングシステムの性能を正しく把握.
 - ・オペレーション(リアルタイム水圧記録での津波認定法)の実施.

津波発生時に海底に加わるさまざまな力



(i), (ii) 海面の上昇 η と海底隆起 u_z による水深変化

$$p_e = \rho_0 g_0 (\eta - u_z)$$

ρ_0 : 海水密度

(iii) 海底が海水を持ち上げるときの反作用

$$p_e = \rho_0 h a_z$$

h : 水深

a_z : 加速度

(iv) 海水・地殻の弾性力

$$p_e = \rho_0 c v_z$$

c : 海洋音響波の位相速度

v_z : 速度

重力に関する力(g_0) と それ以外の力

津波シミュレーション

地震波シミュレーション