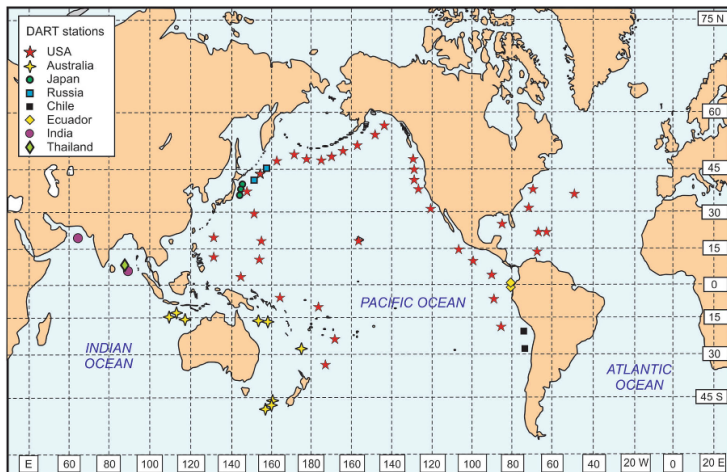


稠密海底津波観測網時代の 津波即時予測研究

前田拓人

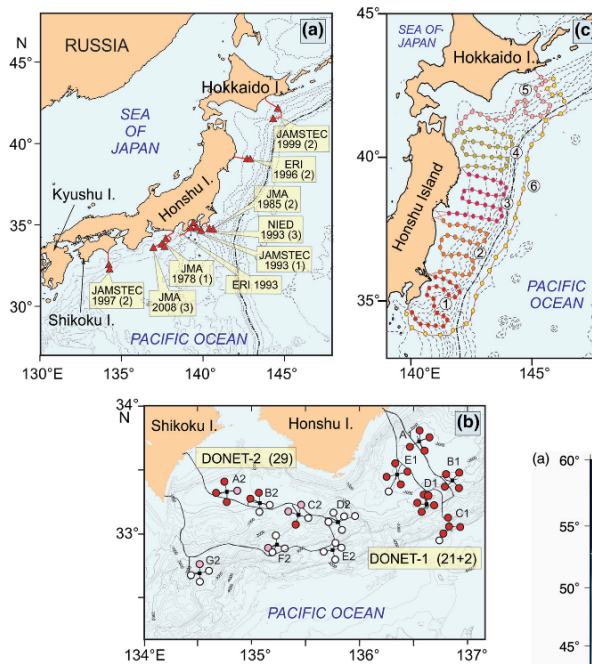
東京大学地震研究所

海底観測網の拡大と津波予測

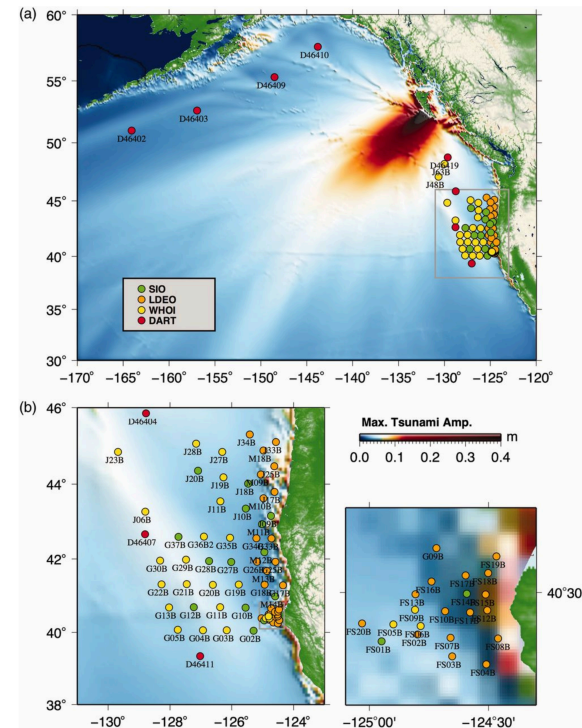


(Rabinovich and Eblé, 2015)

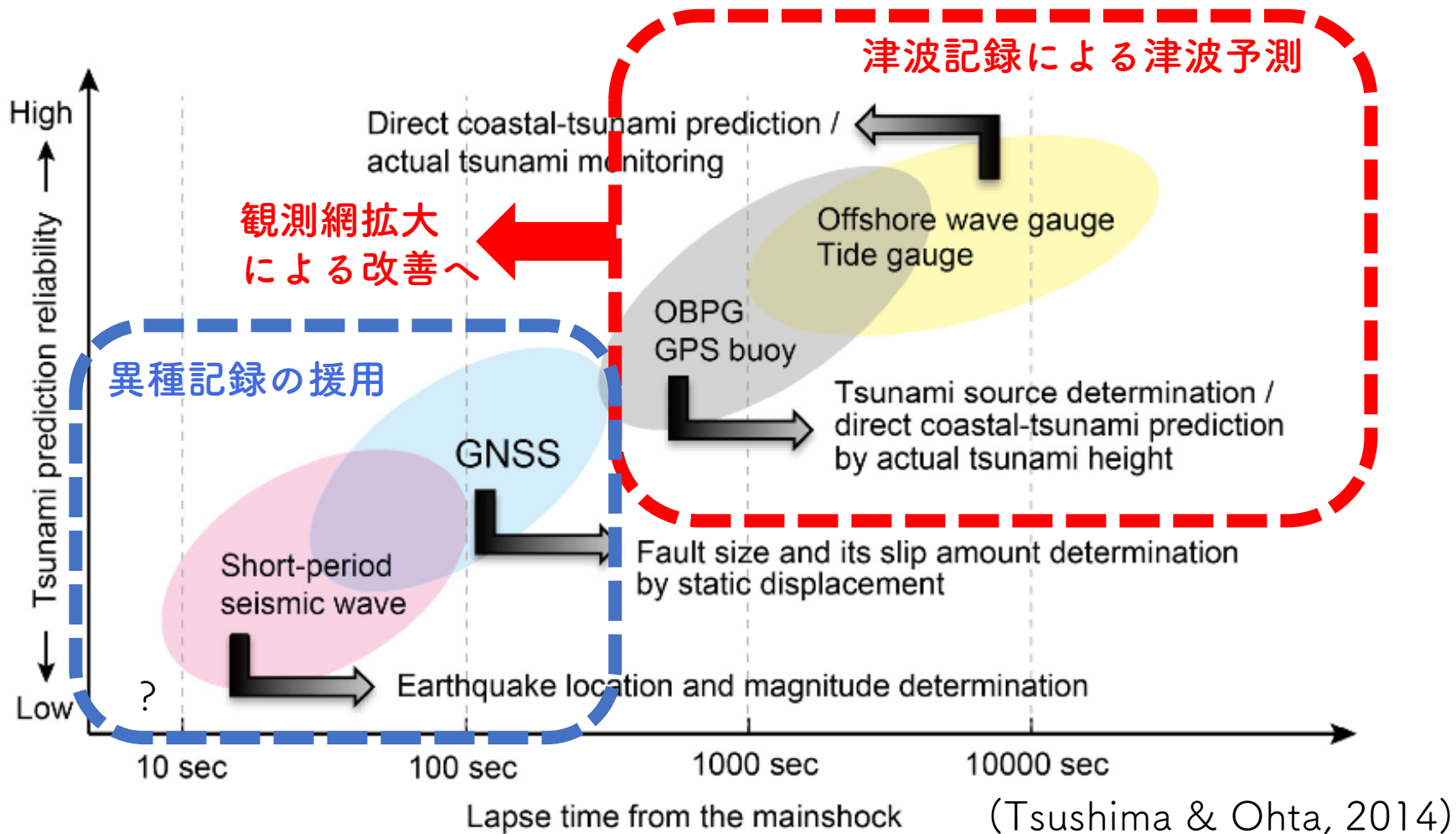
- 世界的な観測網の拡大
- 特に日本周辺における定常観測網の劇的な高密度化
- 津波発生の高速な検知と高精度な予測
 - その間にはトレードオフ



(Sheehan et al., 2015)



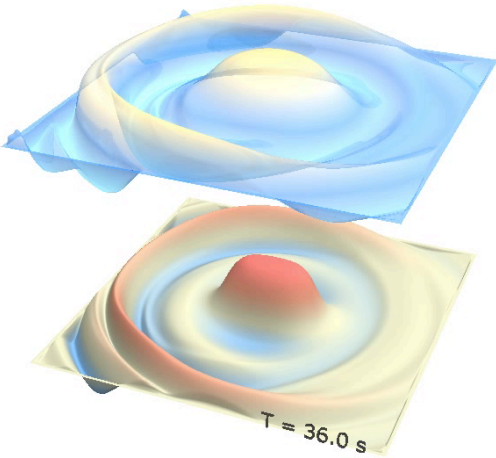
予測手法：精度と信頼性のトレードオフ



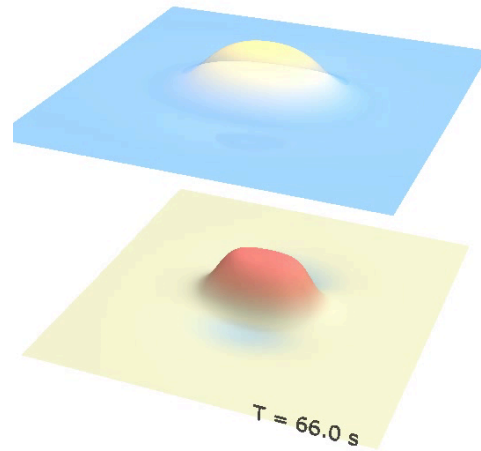
- 津波を使う津波予測は高信頼だが相対的に低速
 - 伝播速度の遅さ + 観測網の密度の低さ

津波予測を津波で行うことの重要性

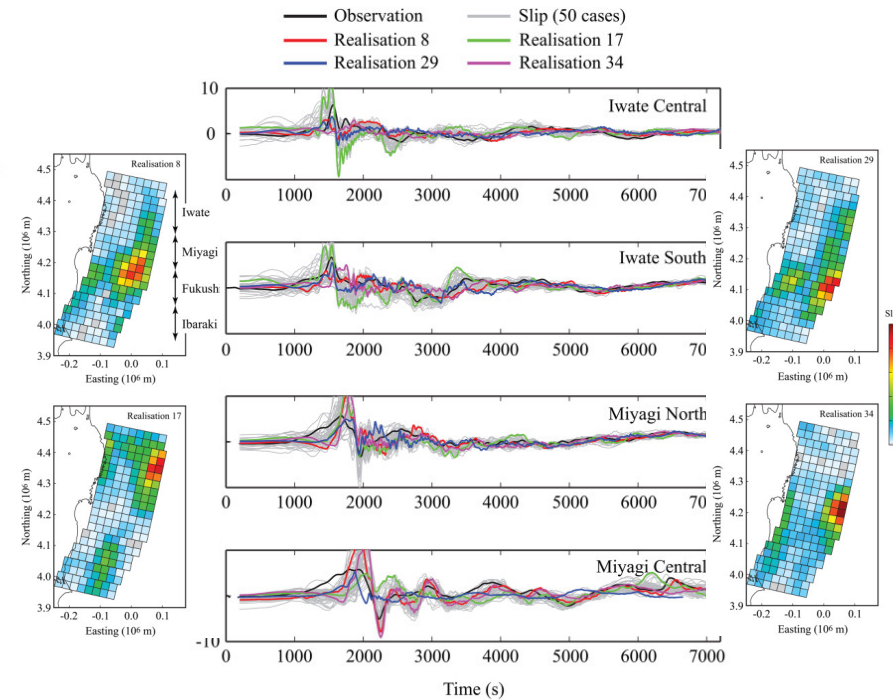
通常の断層運動



津波地震 (ゆっくりすべり)



すべり分布による津波のばらつき



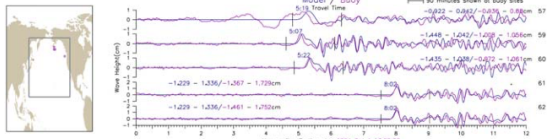
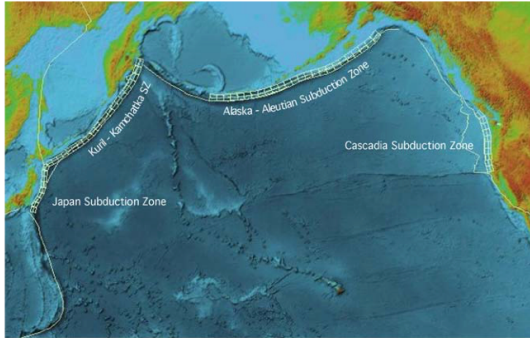
(Maeda & Furumura, 2013)

(Goda et al., 2014)

- 断層運動と地震波の生成の仮定そのものが不確実性を生む
 - 地震以外の津波生成：地滑り・隕石衝突・（気候）
- 同じ断層面でもすべり分布によって津波生成が大きく変わる

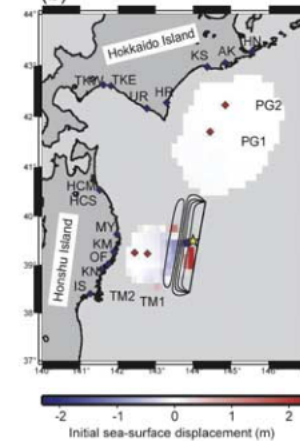
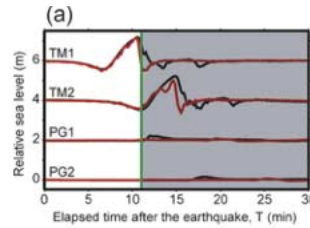
圧力計による津波即時予測のアプローチ

断層運動推定

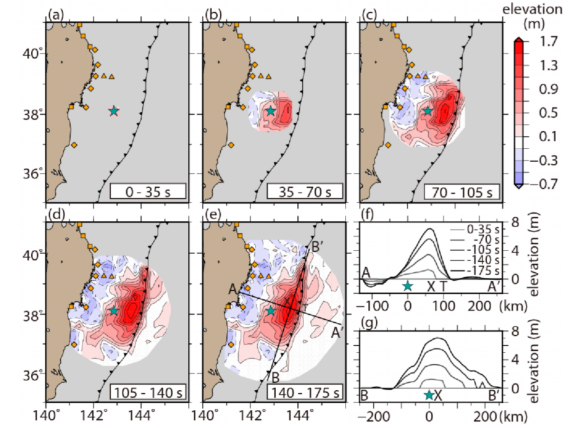


(Titov et al., 2005)

初期水位+地殻変動推定

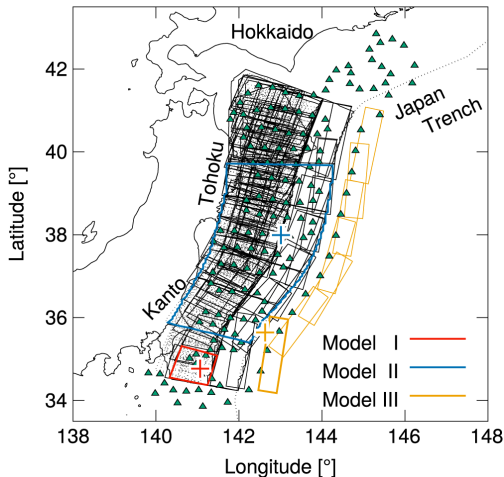


(Tsushima et al., 2009)



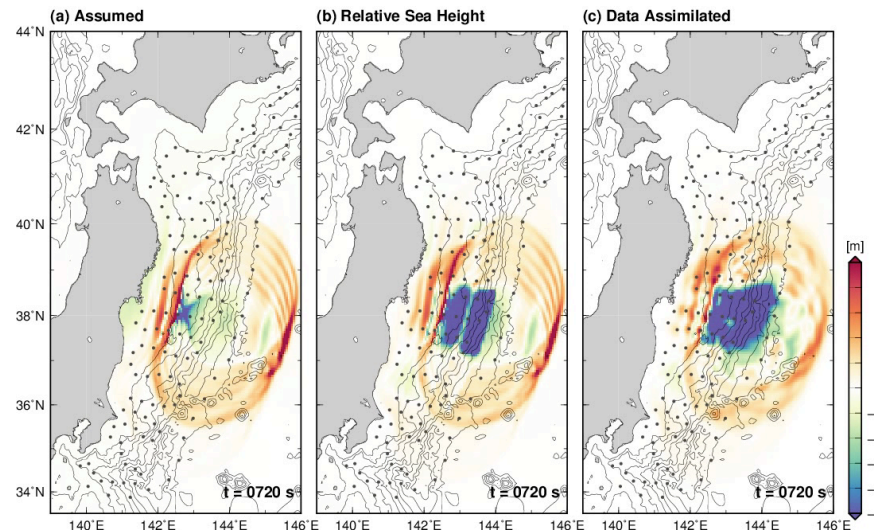
(高川・富田, 2012)

データベース



(Yamamoto et al., 2016)

現況波動場データ同化



(Maeda et al., 2015)

津波データ同化法

- #1) 数値シミュレーションによる津波予測

$$M_{n+1/2}^F \leftarrow M_{n-1/2}^F - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} \Delta t, N_{n+1/2}^F \leftarrow N_{n-1/2}^F - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} \Delta t$$

$$\eta_{n+1}^F \leftarrow \eta_n^A - \left(\frac{\partial M_{n+1/2}^F}{\partial x} + \frac{\partial N_{n+1/2}^F}{\partial y} \right) \Delta t$$

η : tsunami height; M, N : vertically-integrated velocity terms

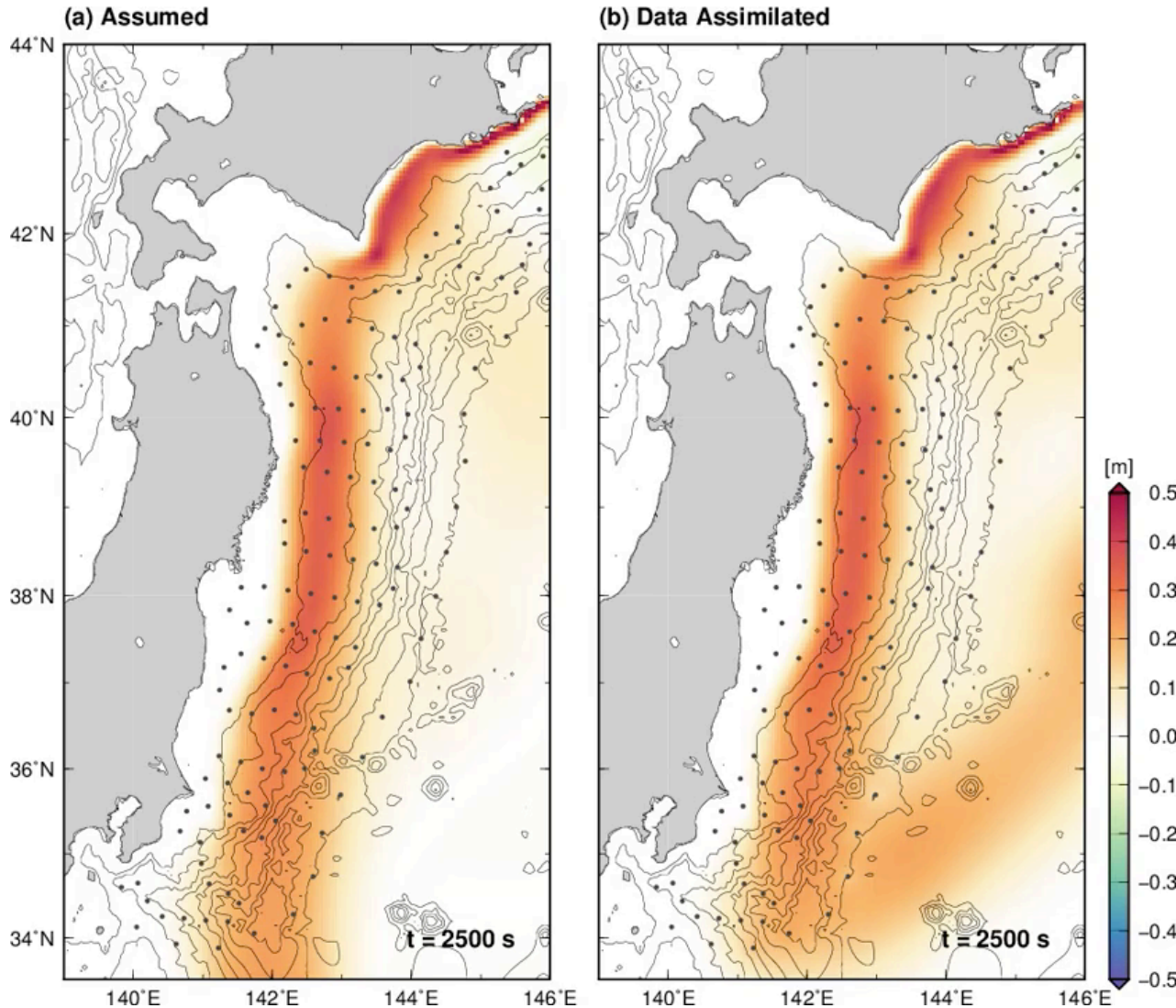
- #2) 観測記録と予測値との比較に基づく同化

$$\eta_{n+1}^A \leftarrow \eta_{n+1}^F + \sum_i W(x, y; x_{Si}, y_{Si}) [\eta_{n+1}^{\text{obs}}(x_{Si}, y_{Si}) - \eta_{n+1}^F(x_{Si}, y_{Si})]$$

W : Optimum interpolation kernel

- 地震発生の有無に関わらず常時実行可能
 - 定常的なモニタリングに向けた手法

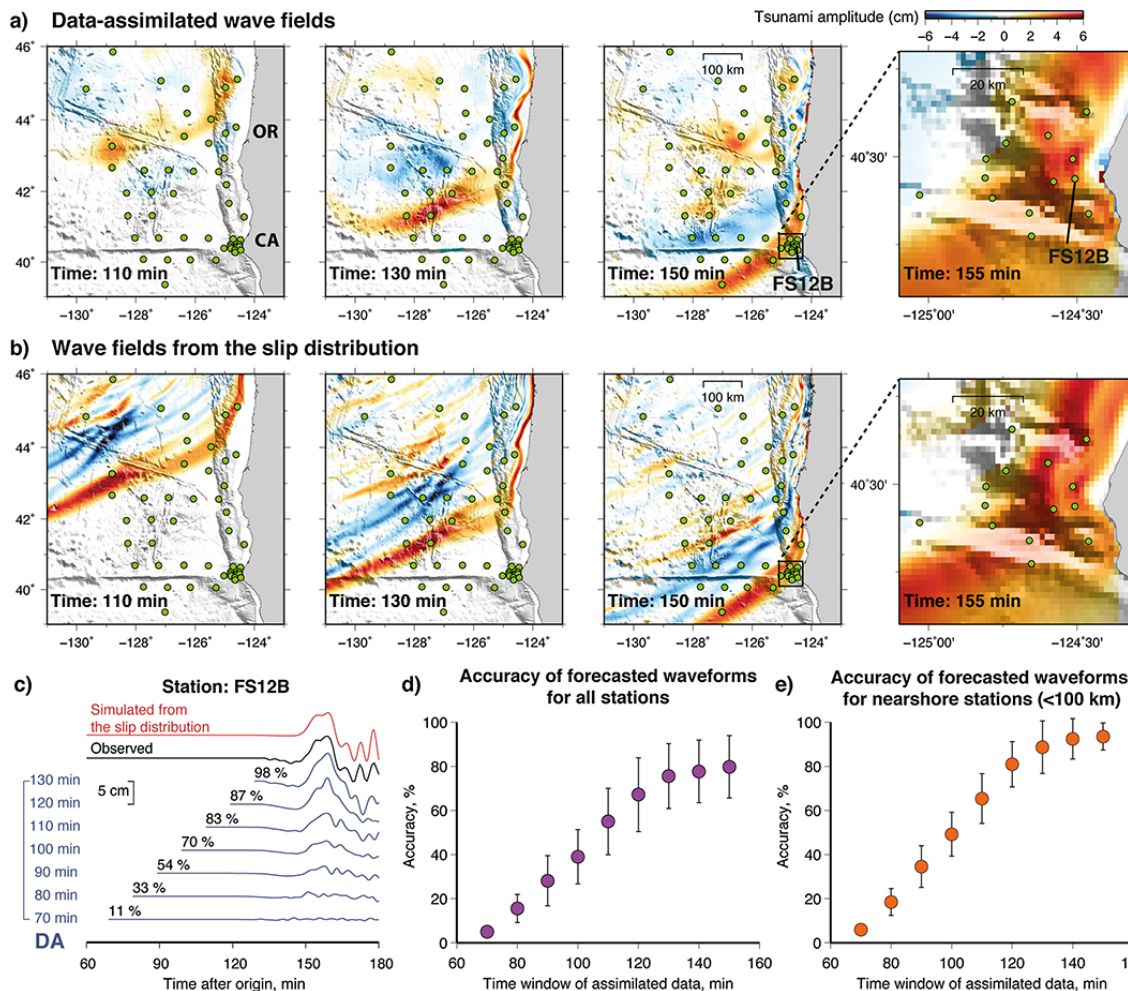
数値実験：遠方入射



- S-net観測点への平面波入射
- 観測点が予測値との差異として津波を自動検知
- 波面を逐次的に再構築
- 津波の海岸線到達までにほぼ完全な波動場を再現

(Maeda et al., 2015)

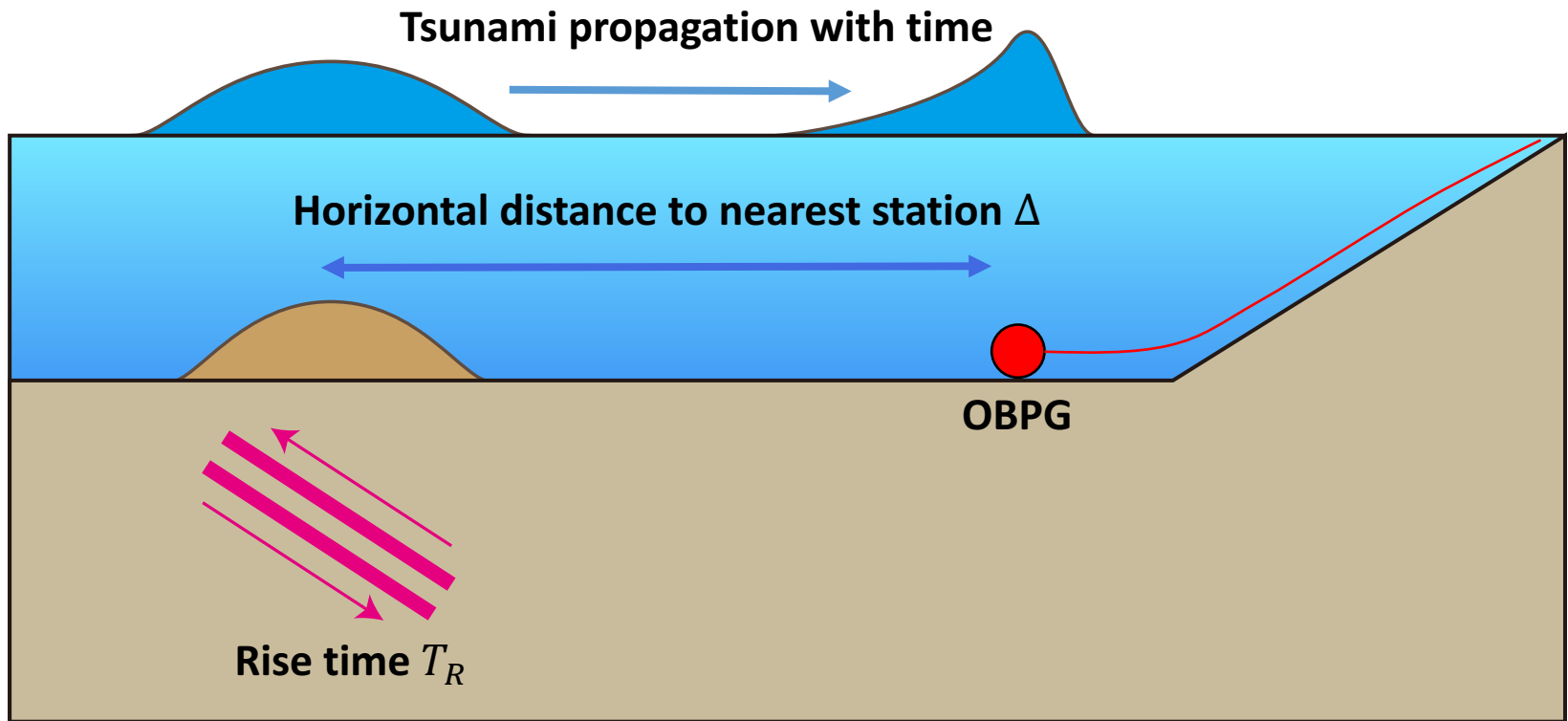
Postcasting: 2012 Haida Gwaii Earthquake



(Gusman et al., 2016)

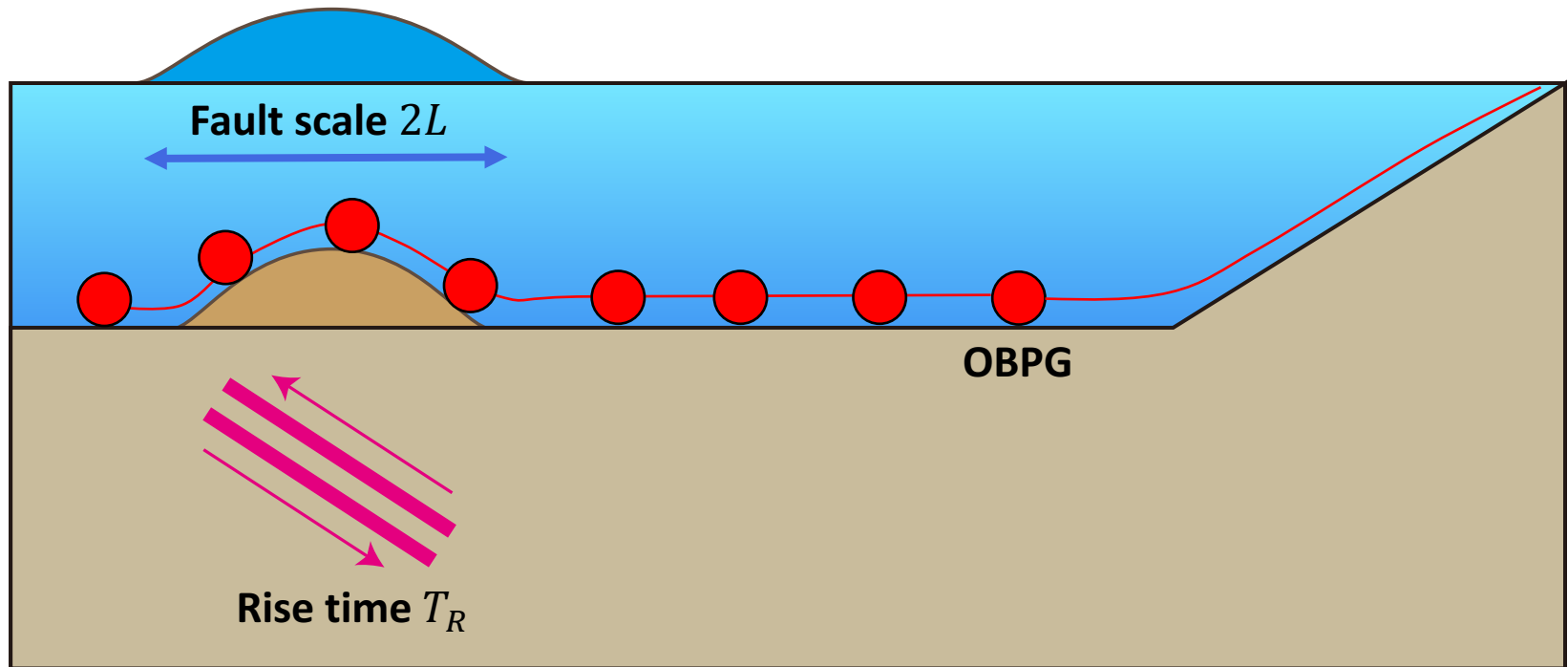
- 臨時観測網の記録を用いた予測実験
- 数理レベルでの手法再編による劇的な高速化も (Wang et al., 2017)

津波推定・予測に必要な時間の整理



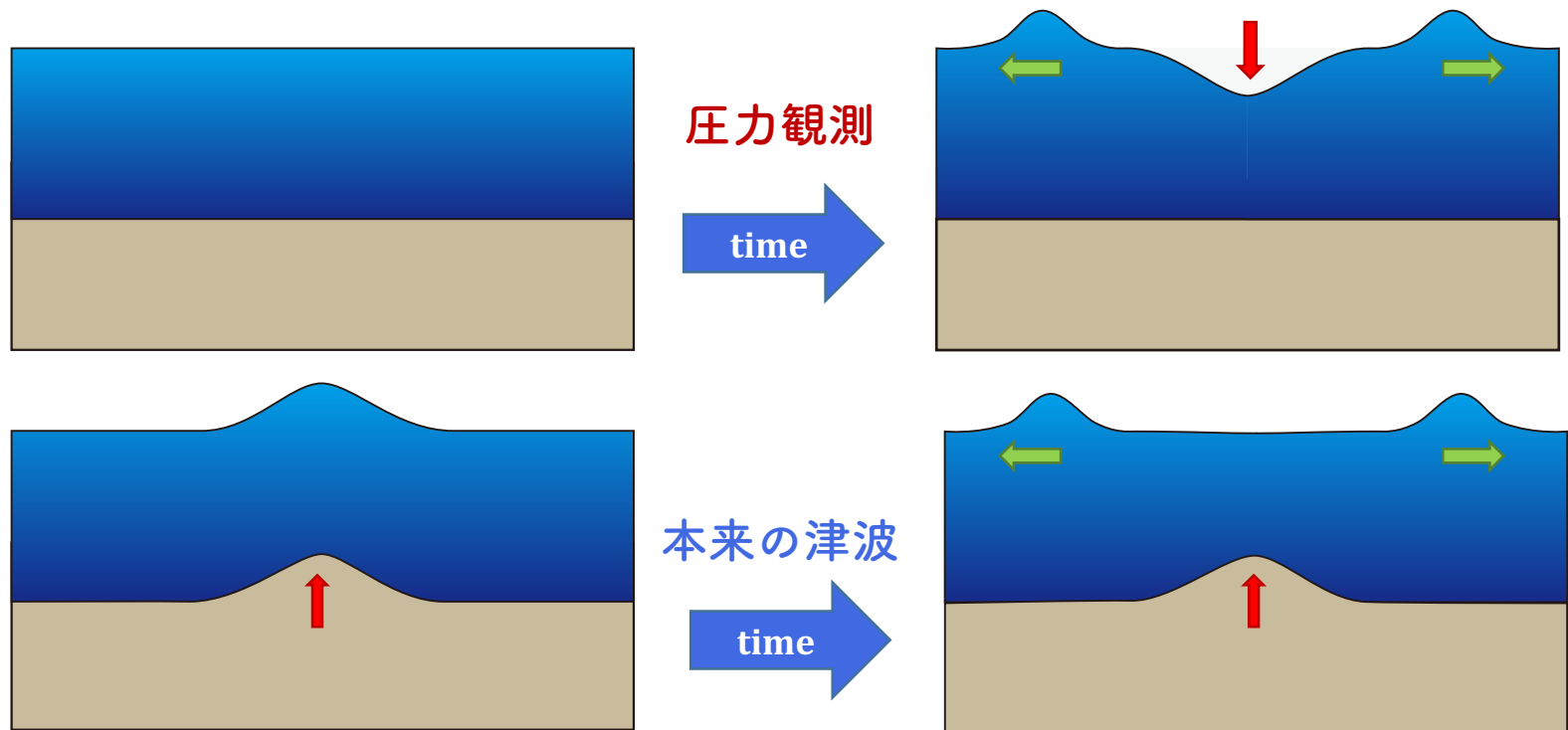
- 地震発生から予測までにかかる時間： $t^{p1} \sim T_R + \Delta/\bar{c} + \alpha$
- \bar{c} は平均津波平均速度（水深2000 mで ~ 140 m/s）
- α は予測計算のための計算時間
- 観測網への距離 Δ が予測時間を決める

真上に観測網があればいいのか？：圧力問題



- (確実な) 予測までにかかる時間： $t^{p2} \sim T_R + L/\bar{c} + \alpha$
- 地震直後は海底と海面がほぼ同期：圧力計で測定できない
- 津波が断層直上から離れるまでの時間が必要とされていた

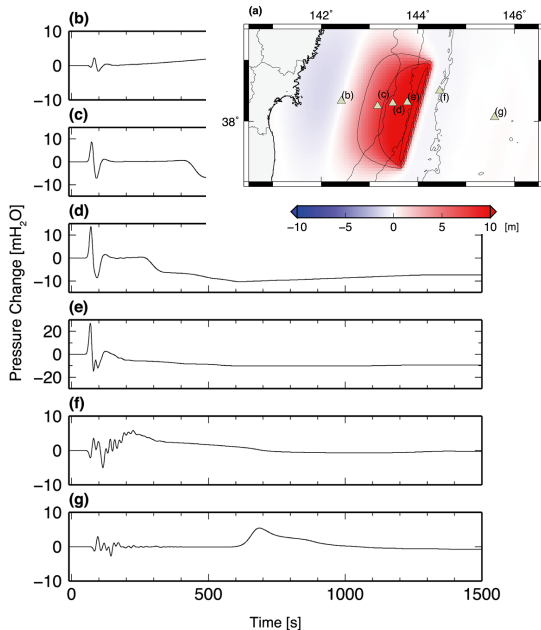
圧力問題とその克服への挑戦



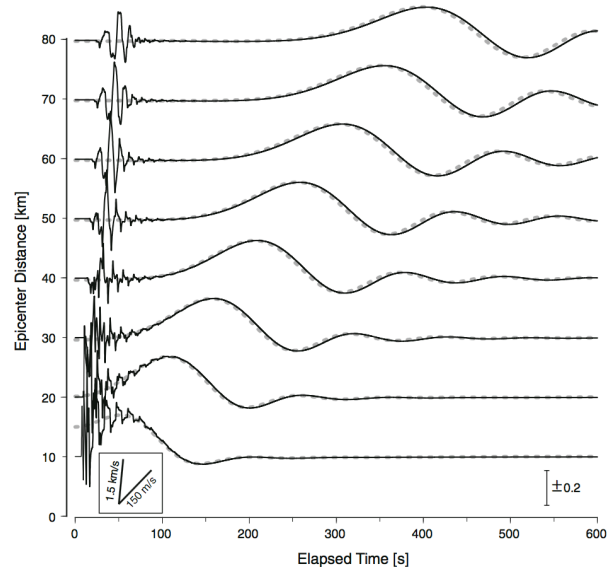
- 震源域の外でしか津波信号が（一見）観測できない
- 「**圧力による津波観測が地殻変動の影響を受ける**」こと自体を予測モデルに組み込むことで回避可能？
(Tsushima et al., 2012; Tanioka, 2015; Maeda, 2016)
- **原理的限界を見極めるための基礎研究がまだ必要**

地震波動と慣性力の影響

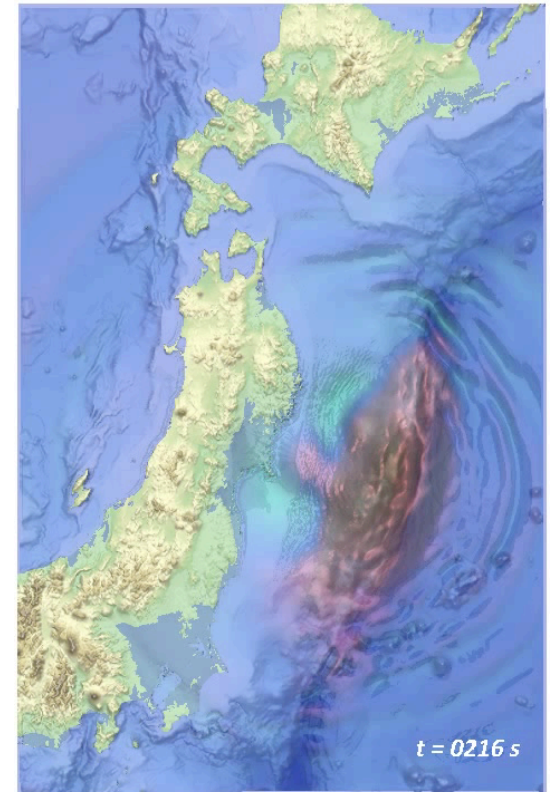
- 圧力記録はさらに地震波（海中音波）と海底運動による慣性力を含む
- 現実に現れるであろう複雑な記録をどう扱うか：まだこれからの課題
- 数値実験を行うための手法開発も



(Saito and Tsushima, 2016)



(Maeda and Furumura, 2013)



(Maeda et al., 2013)

まとめ

- 観測網の充実を契機とした様々な観測量・方法による津波即時予測手法の活発な国際研究開発競争
 - 観測高密度化による既存手法（初期値推定）のさらなる進展と稠密観測ならではのあらたな手法（データベース・データ同化）の新規開発
 - 稠密な観測網による圧力観測の重要性とその困難さ
 - 震源直上観測の理解と利活用のための基礎研究
- 大きく違う手法同士の相互比較の難しさ
 - 共通比較のできる基盤の構築と各手法特性の整理
 - 圧力観測記録のオープン化への強い期待
- 広い意味での計算高速化の重要性
 - 手法開発＋アルゴリズム改善＋高速計算機