

第4回 原子力耐震安全研究委員会

東北地方太平洋沖地震・津波の原因究明 と得られた知見

平成24年3月2日

新潟工科大学 原子力耐震・構造研究センター



独立行政法人 原子力安全基盤機構

1. はじめに

■背景と目的

- 平成23年3月11日の東北地方太平洋沖地震・津波に伴い福島第一原子力発電所が重大な事故に至った。
- このような事故を二度と起こしてはならないために、この経験から教訓をくみ取り今後の原子力発電所のさらなる安全性向上につなげていく必要がある。
- そのためにも、今回の地震・津波の発生メカニズム等を究明し、基準地震動や設計津波水位に係る震源・波源の設定方法に反映すべき知見を整理することを目的とする。
- また、既設原子力発電所の津波に係るクロスチェック解析を速やかに実施できるように関連するデータを整備して、耐震バックチェックに係る国の審議の加速・早期完了に備える。

■本研究の位置付けと最終成果目標

A. 東北地方太平洋沖地震津波の原因究明

- 今回の地震・津波の発生メカニズムの分析
- 既設原子力発電所の津波安全対策の有効性評価のためのデータ蓄積(各発電所の津波解析用地形モデル)

原子力安全・保安院の意見聴取会

地震・津波の解析結果の評価に関する意見聴取会

B. 基準地震動及び設計津波水位の評価方法の検討
(確率論的手法の導入)

C. 全国の原子力発電所への水平展開(知見反映)

新設・既設の原子力発電所のさらなる安全性向上

2. 東北地方太平洋沖地震津波の発生メカニズム分析

2.1 東北地震津波の特徴整理

2.2 東北地震津波の再現と波源特性の分析

2.3 原子力発電所間の津波高の相違に係る要因分析



福島第一原子力発電所に津波が来襲する様子
(平成23年3月11日東京電力撮影)

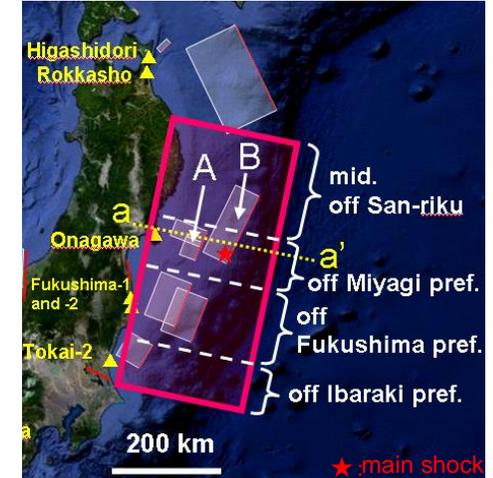


宮城県女川町の津波による被害
(平成23年11月30日撮影)

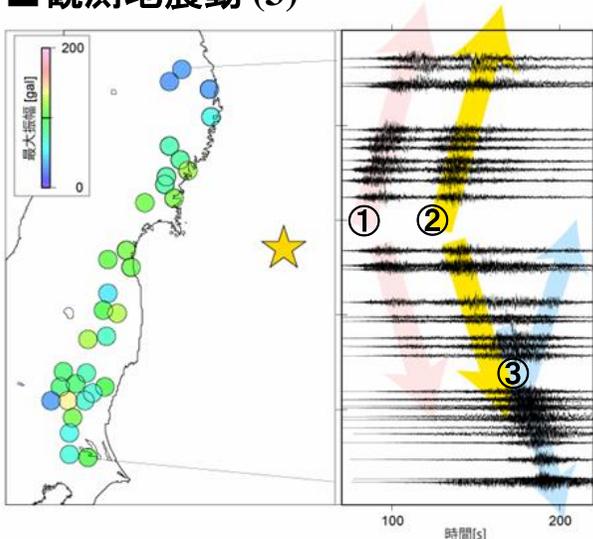
2.1 東北地震津波の特徴整理

- (1) 巨大な地震規模Mw9.0
- (2) 複数震源域の空間的連動
- (3) 観測地震動に見られる地震の時間差発生
- (4) 観測津波水位に見られる異なる性質の波の重なり
- (5) 日本海溝付近の大きなすべり量分布

■ 震源域 (1), (2)

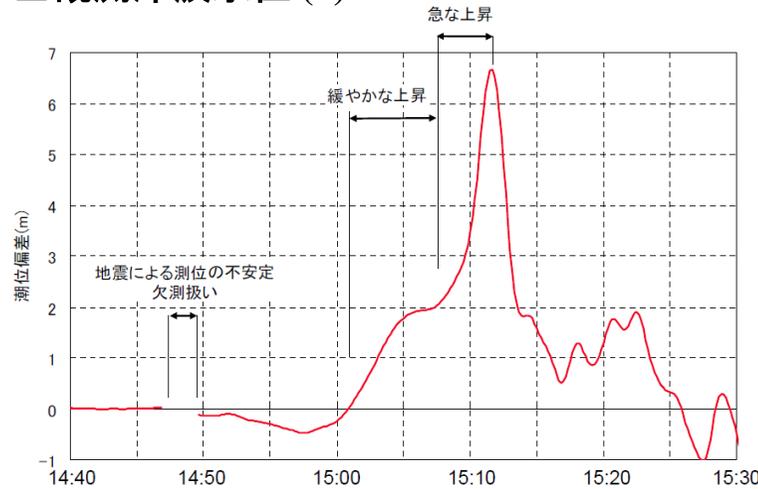


■ 観測地震動 (3)



引用元: 防災科学技術研究所

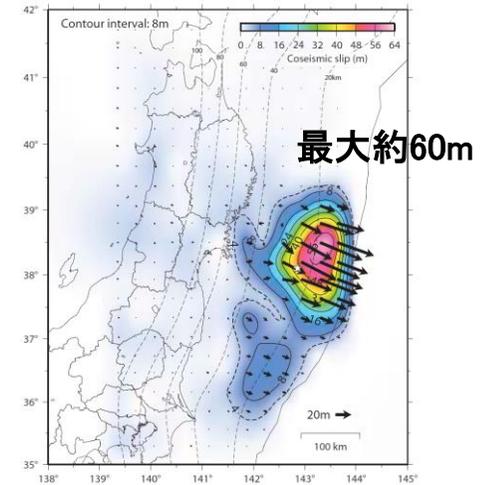
■ 観測津波水位 (4)



岩手県南部沖のGPS波浪計の記録(第一波)

引用元: 港湾空港技術研究所

■ すべり量分布 (5)



測地データから推定

引用元: 国土地理院・海上保安庁

2.2 東北地震津波の再現と波源特性の分析

(1) 前提条件

① 東北地震津波の特徴を考慮する。

- 1) 巨大な地震規模Mw9.0
- 2) 複数セグメントの連動
- 3) 観測地震動に見られる時間差発生
- 4) 観測津波水位に見られる異なる性質の波の重なり
- 5) 日本海溝付近の大きなすべり量分布

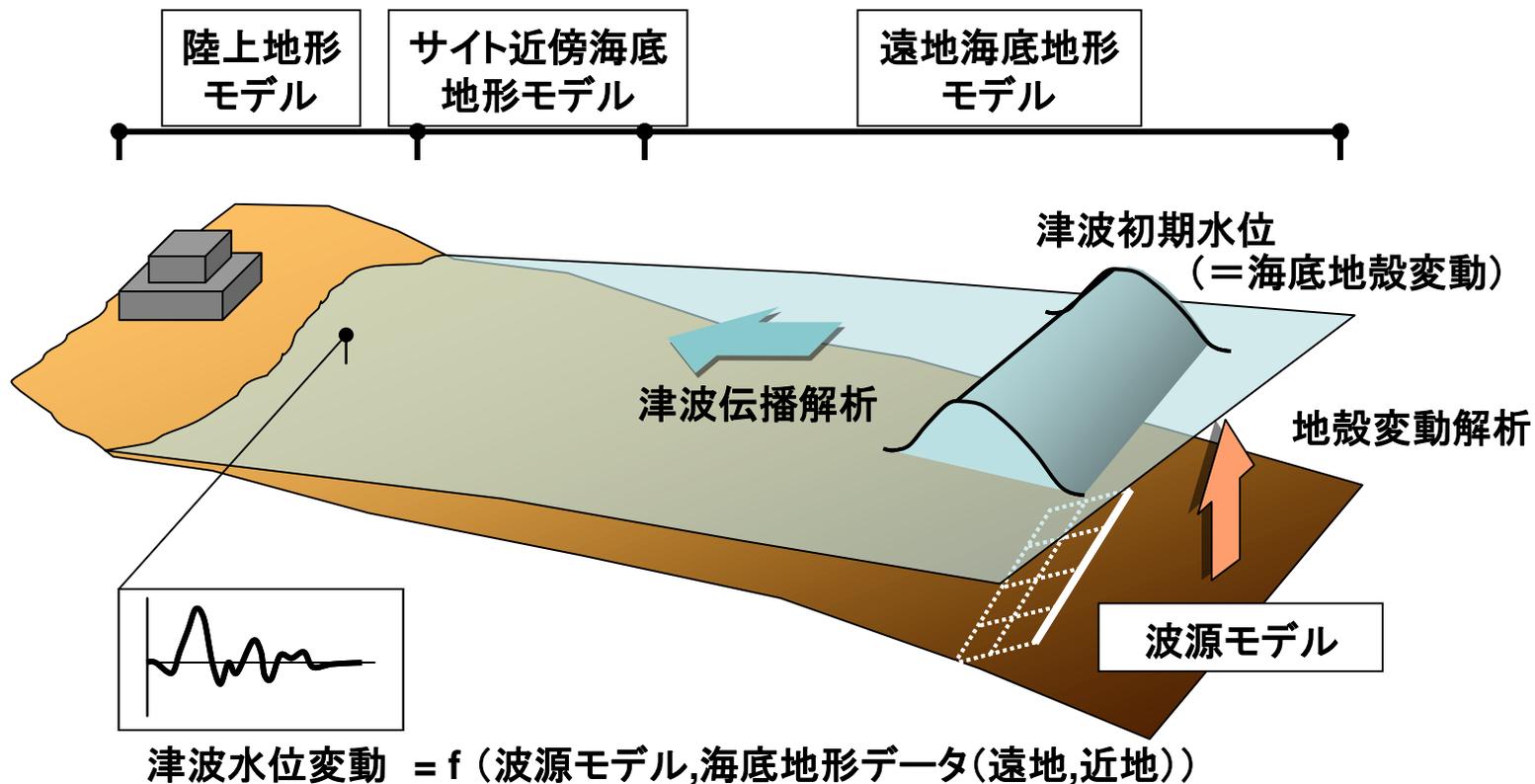
② 原子力サイト以外の広域の観測津波波形・痕跡高と、4つの原子力サイトにおける観測津波波形・痕跡高を**1つの波源モデル**で再現する。

4つの原子力サイト： 女川、福島第一、福島第二、東海第二

1つの波源モデルによる再現のメリット：

⇒ 共通の条件で、原子力サイト間の津波高の相違の比較・分析が可能。

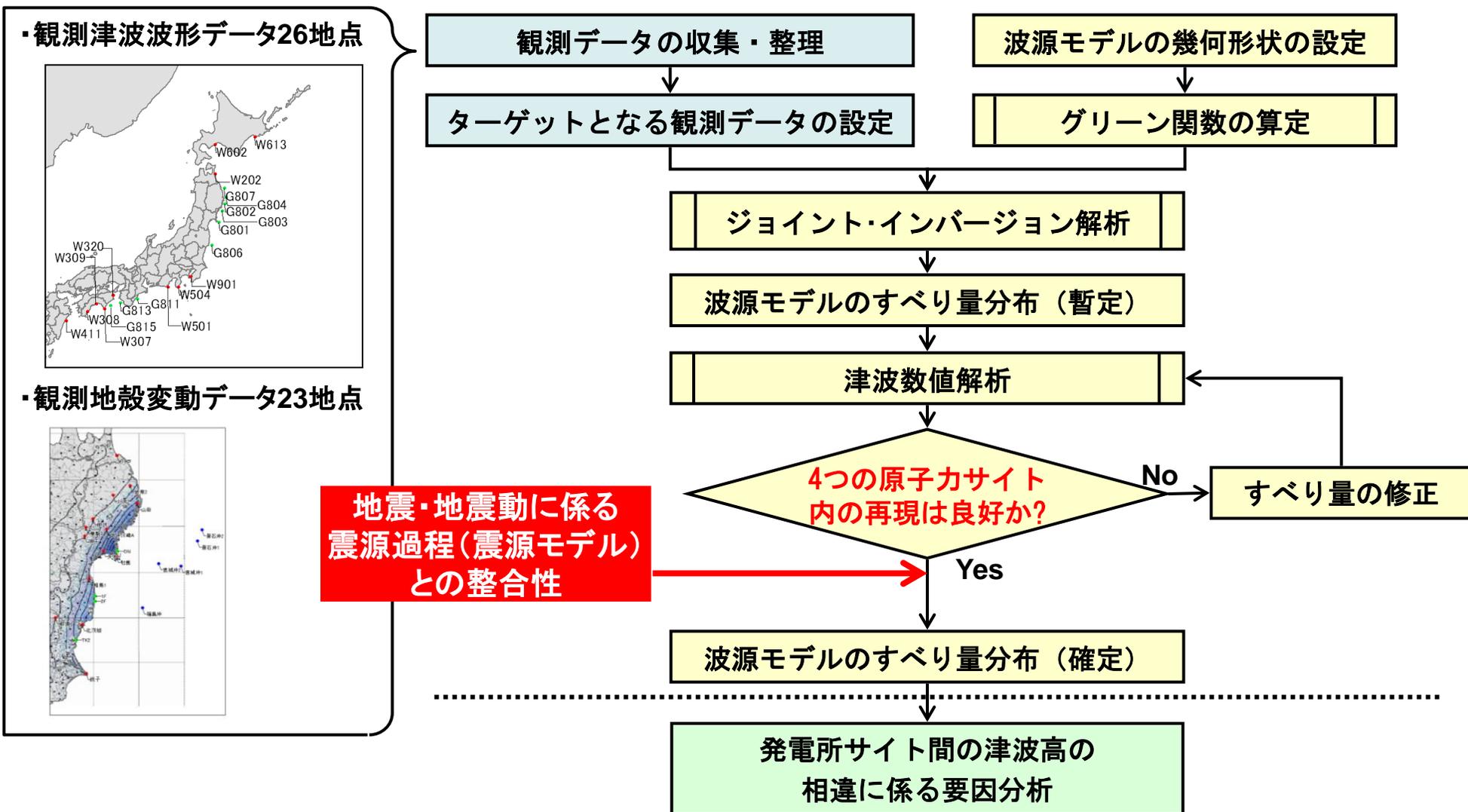
(2) 津波水位の評価手順



今回は、観測津波波形から波源モデルを求める。
⇒ インバージョン解析(逆解析)の実施

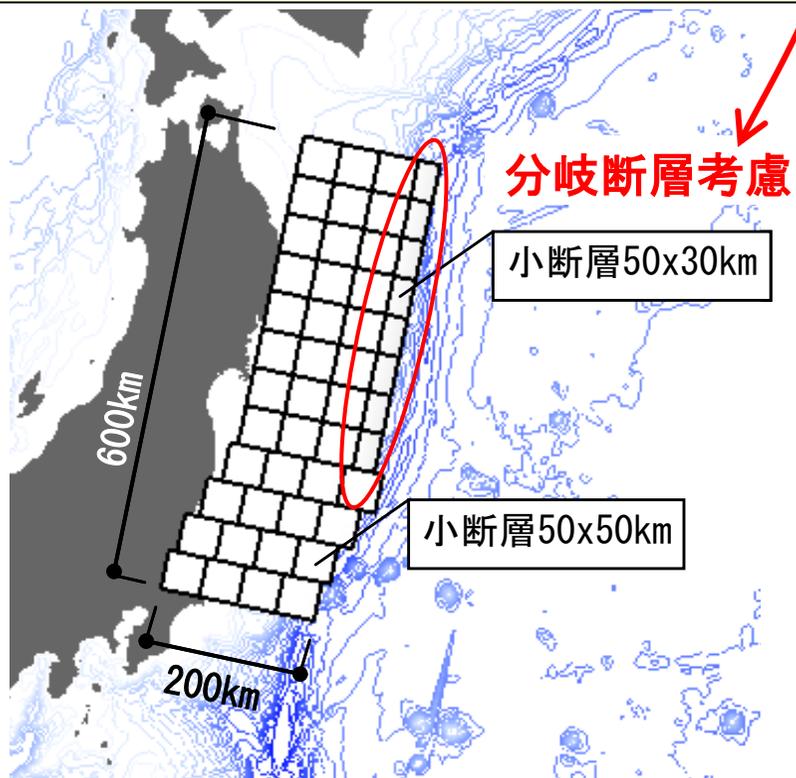
(3) 津波波源モデルの推定

① 推定手順

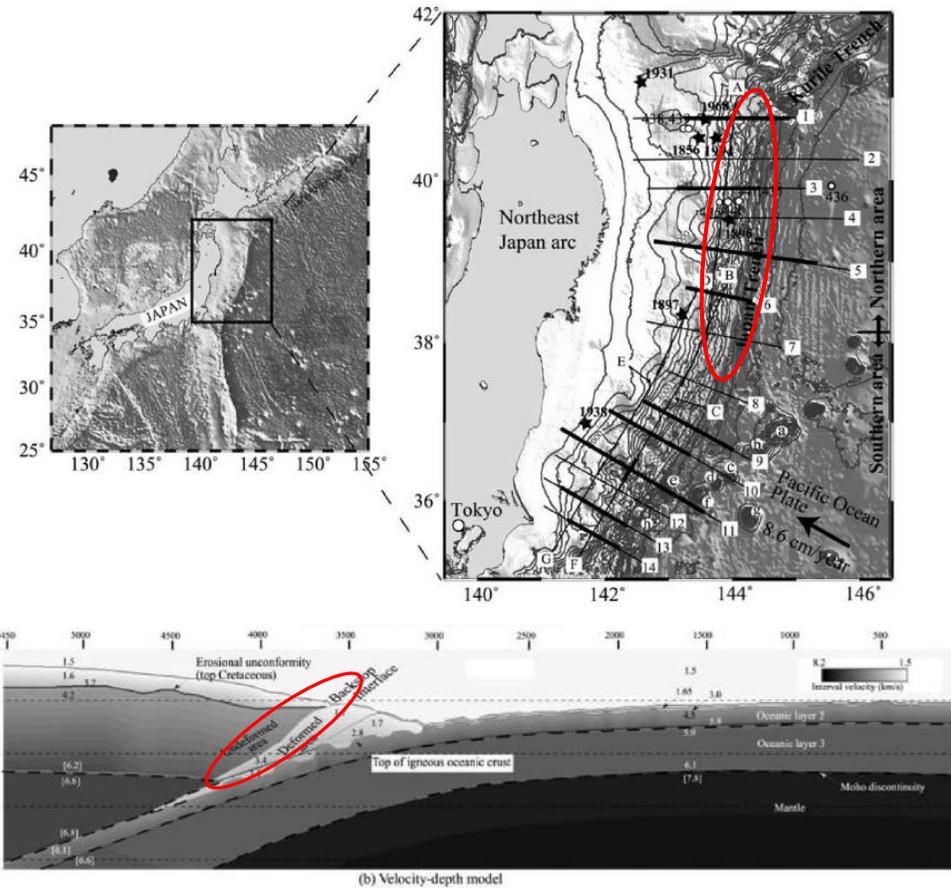
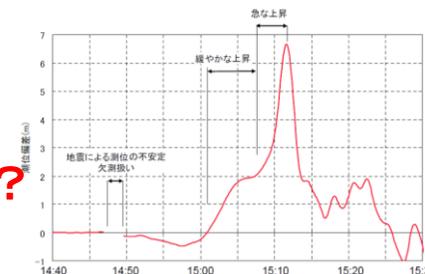


② 波源モデルの幾何形状の設定

- 全体領域 : 長さ 600km、断層幅 約200km
- 小断層 : 40個 (50x50km)、**8個 (50x30km)**
- 参照した波源モデル :
藤井・佐竹(2011)、東北大学モデル(2011)
- 日本海溝沿いの分岐断層を考慮
(Tsuru et al.2002参考)



短周期の波形はどこから？



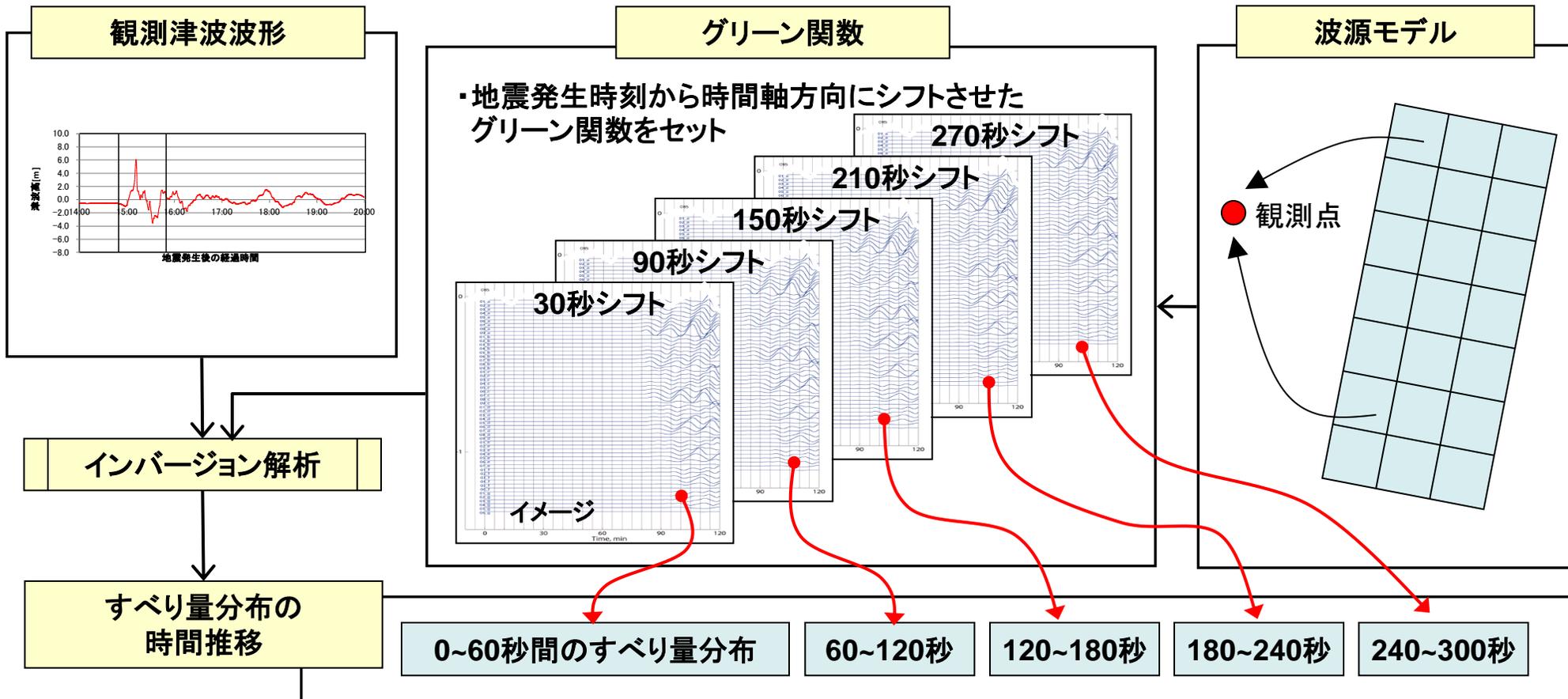
Tsuru et al. ;Along-arc structural variation of the plate boundary at the Japan Trench margin: Implication of interplate coupling , JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, vol. 107, 2002

③ すべりの空間的・時間的な不均一性の考慮

実現象：複数の震源域が空間的に、時間差をもって連動した。

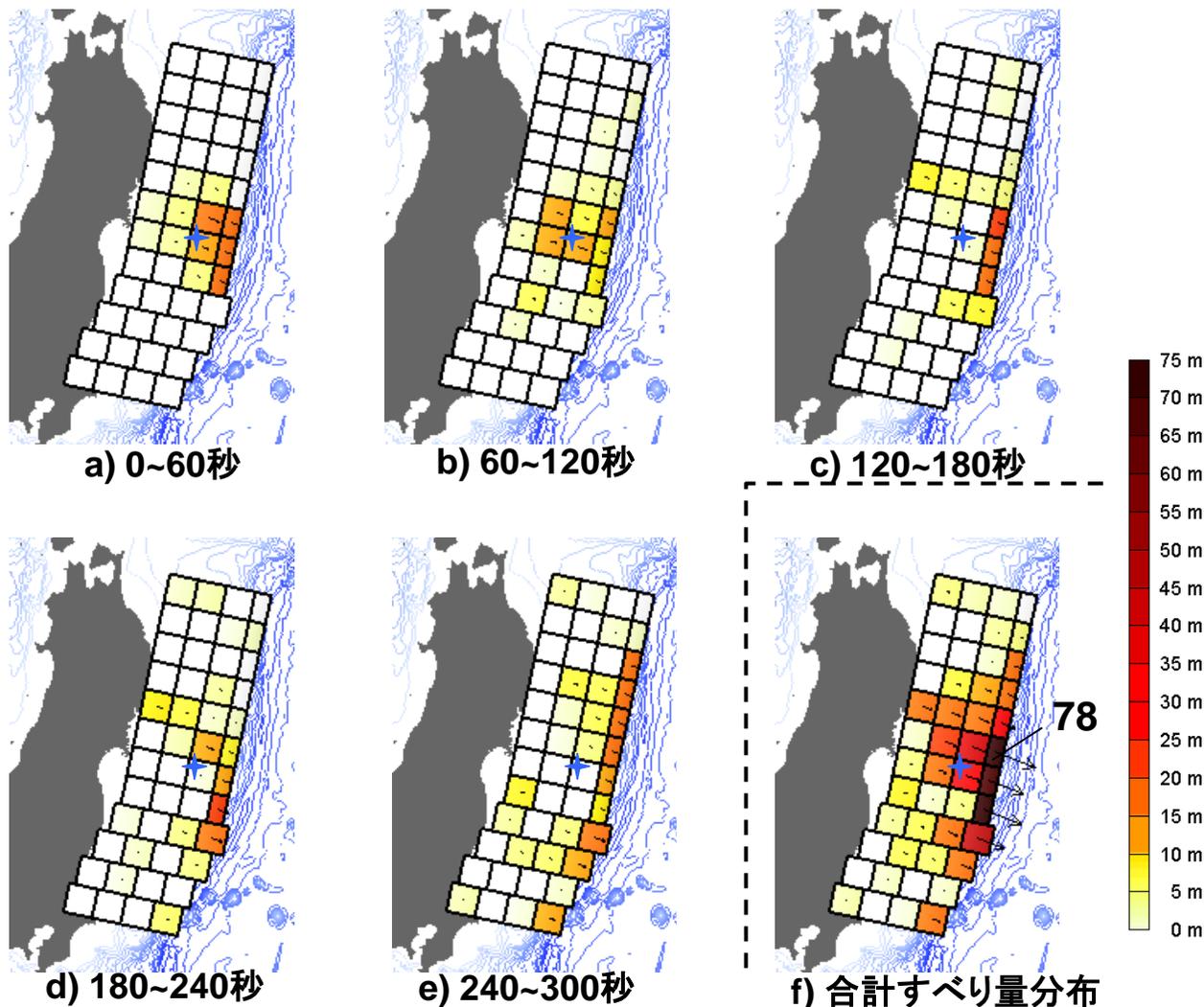


波源のモデル化：小断層ごとに破壊開始時間と継続時間を考慮できるようにし、すべり量分布の時間推移を表現する。



④ 波源モデルのすべり量分布の推定結果

広域の観測津波波形及び4つの原子力サイトの再現性を確認した波源モデル



小断層ごとの破壊開始時間の違いをパラメータとして取入れたことにより、プレートのすべり量分布の時間推移を得た。

すべりは破壊開始点から拡がり、次いでやや深い方に拡がった後、主に海溝沿いの浅い部分に移行し、継続する結果となった。

最大すべり量は78m

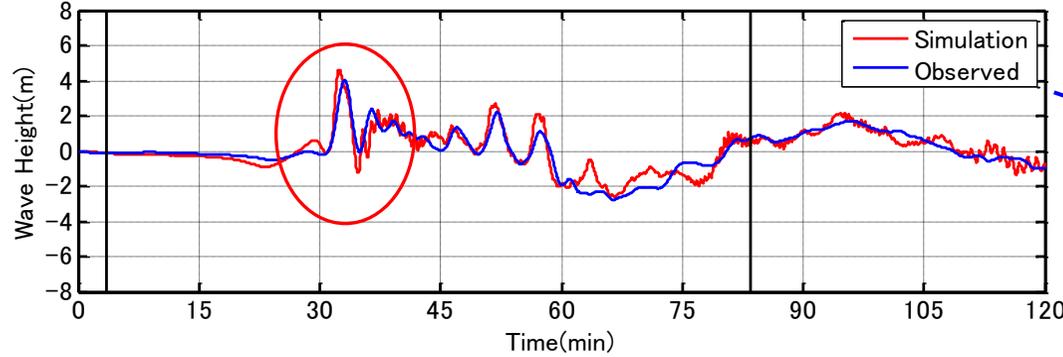
Mwは9.1である。

これらの結果は、地震・地震動に係る震源モデルの推定結果とほぼ一致する。

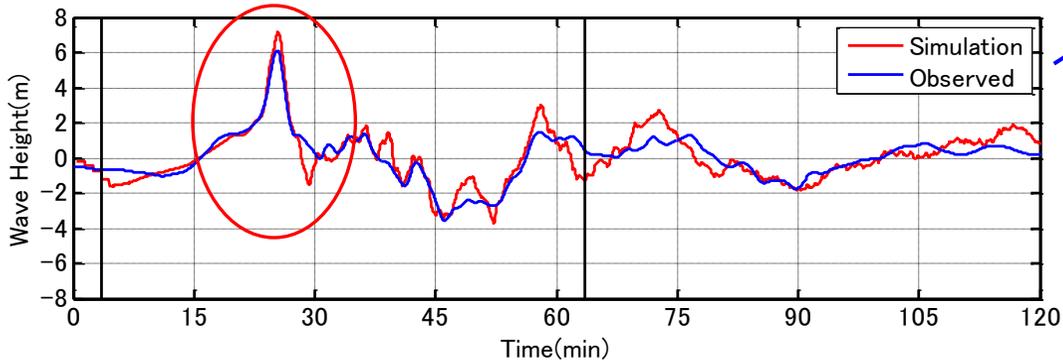
(4) 推定波源モデルを用いた津波の再現結果

① GPS波浪計による観測津波波形の再現

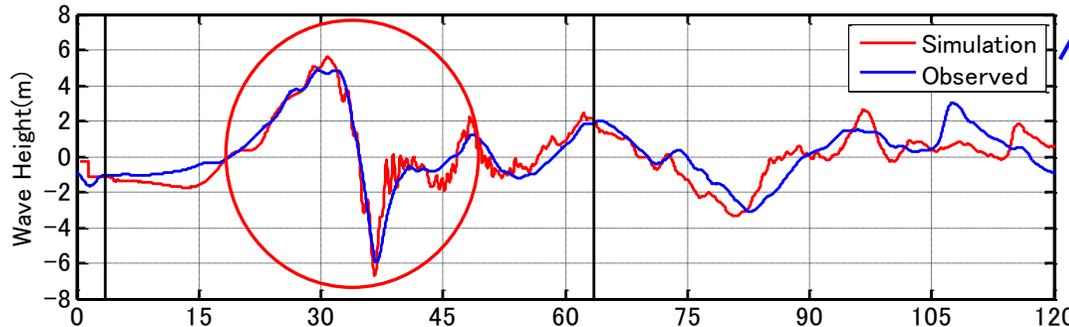
岩手北部沖
G807



岩手南部沖
G802

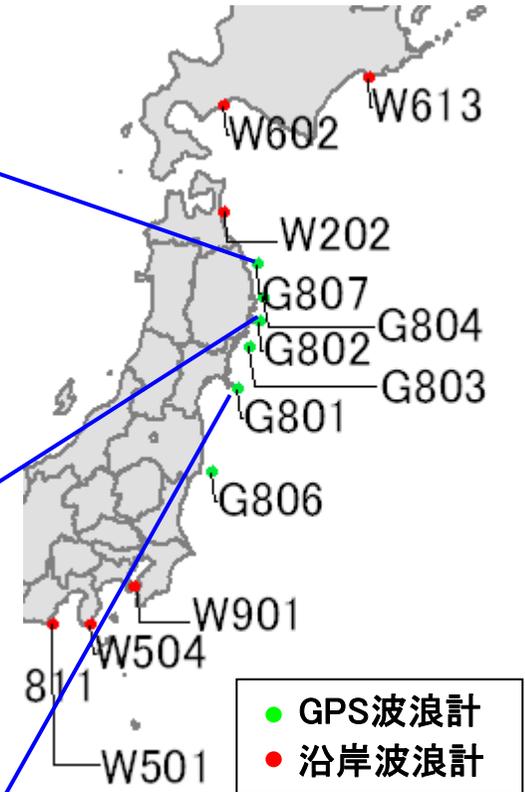


宮城中部沖
G801



地震発生からの経過時間 (分)

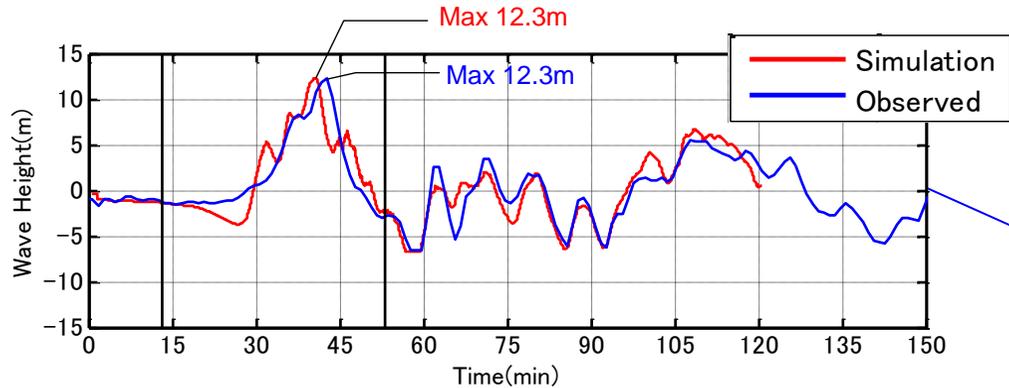
■ 観測地点



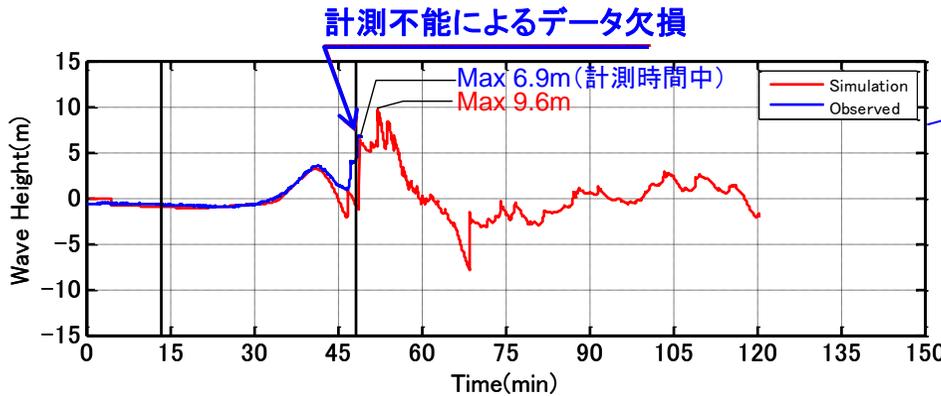
今回の観測津波波形の特徴である第一波の波形形状を良く再現している。

② 原子力発電所における観測津波波形の再現

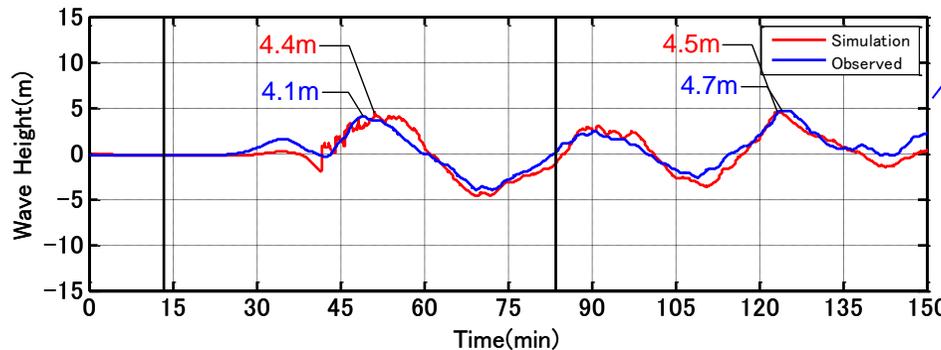
女川原子力
発電所



福島第一原子力
発電所



東海第二原子力
発電所

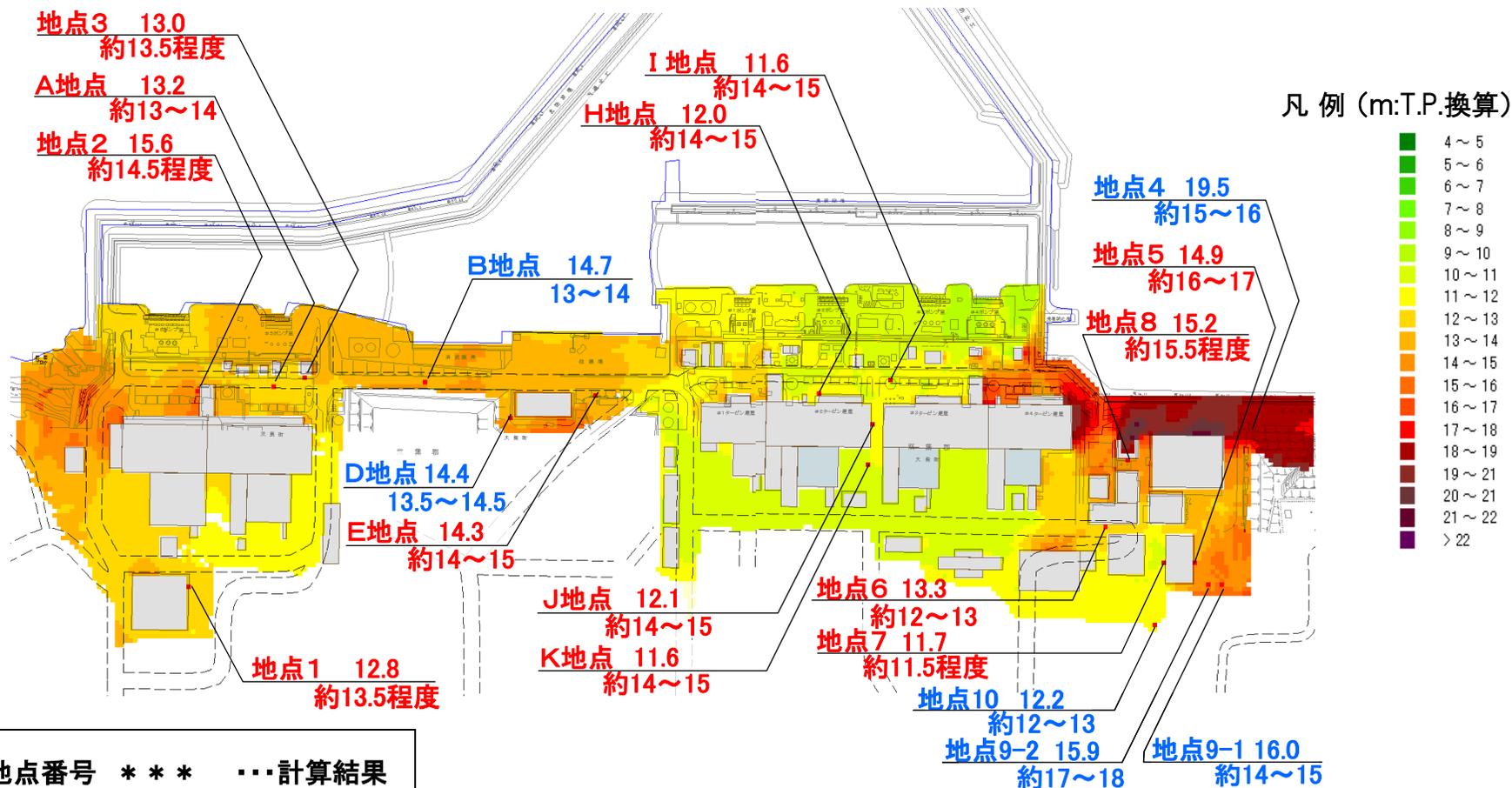


各原子力発電所の観測津波波形の形状を良く再現している。

地震発生からの経過時間 (分)

*福島第二では計測不能につき観測記録がない。

③ 福島第一原子力発電所の敷地内の津波痕跡の再現



解析結果 (T.P.±0m) に津波来襲時の潮位 (T.P.-0.32m) を考慮

幾何平均 $K=1.03$ 、幾何標準偏差 $\kappa=1.13$ (n=19点)

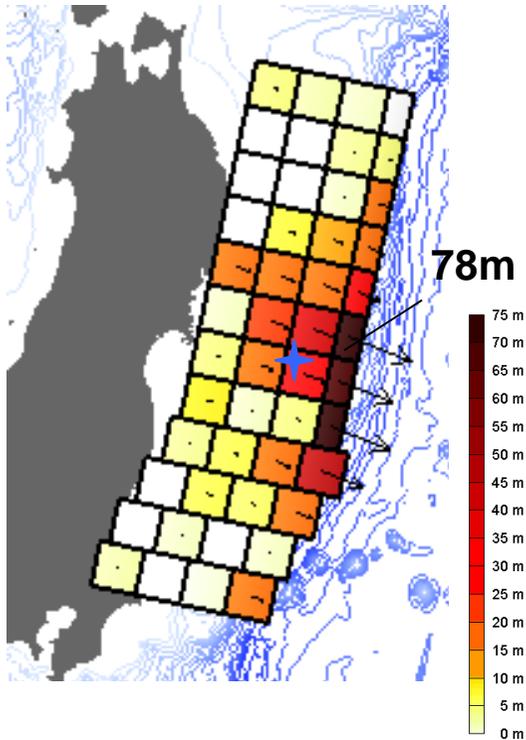
再現計算による津波高は、痕跡高を良好に再現している。

※ 赤数字は浸水高、青数字は遡上高
 ※ 数値はO.P.表示

(5) 津波波源と震源断層のモデルの比較

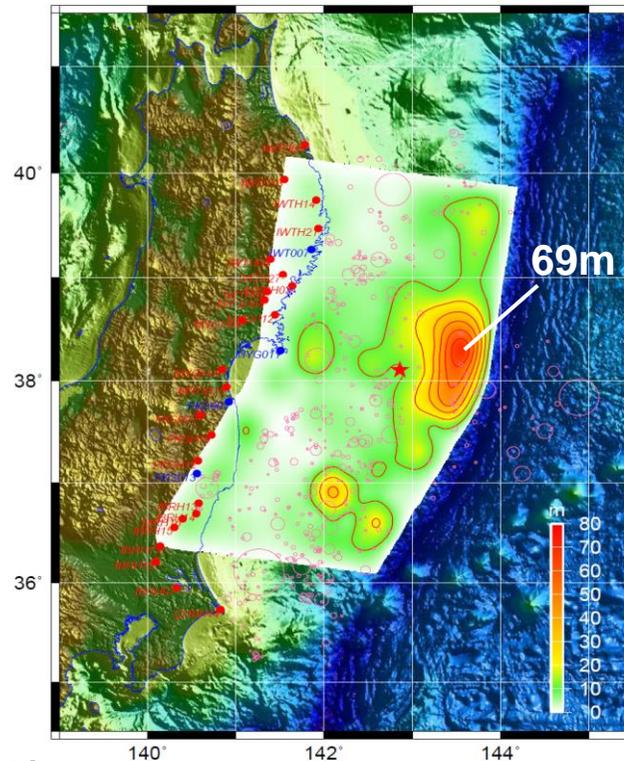
(1) 津波波源モデル

■ 観測津波波形ベース

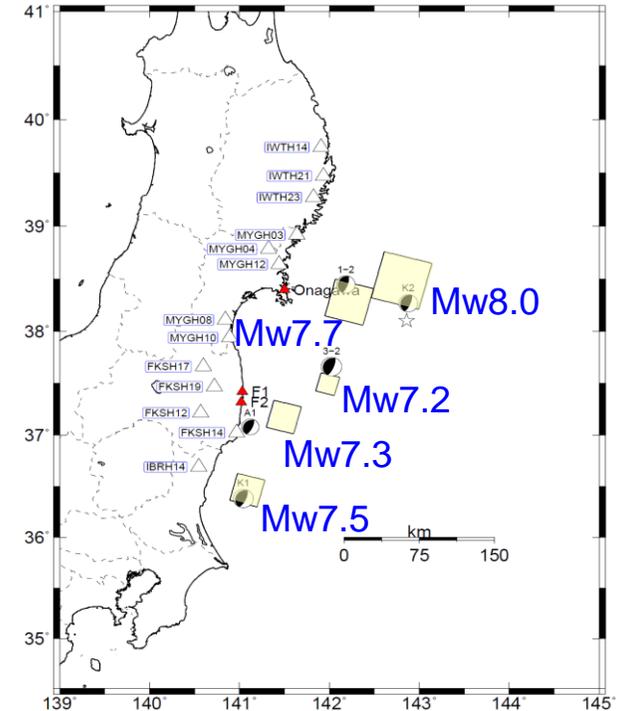


(2) 震源断層モデル

■ 長周期観測地震動ベース
(周期帯: 0.1~10秒)



■ 短周期観測地震動ベース
(周期帯: 10秒以上)

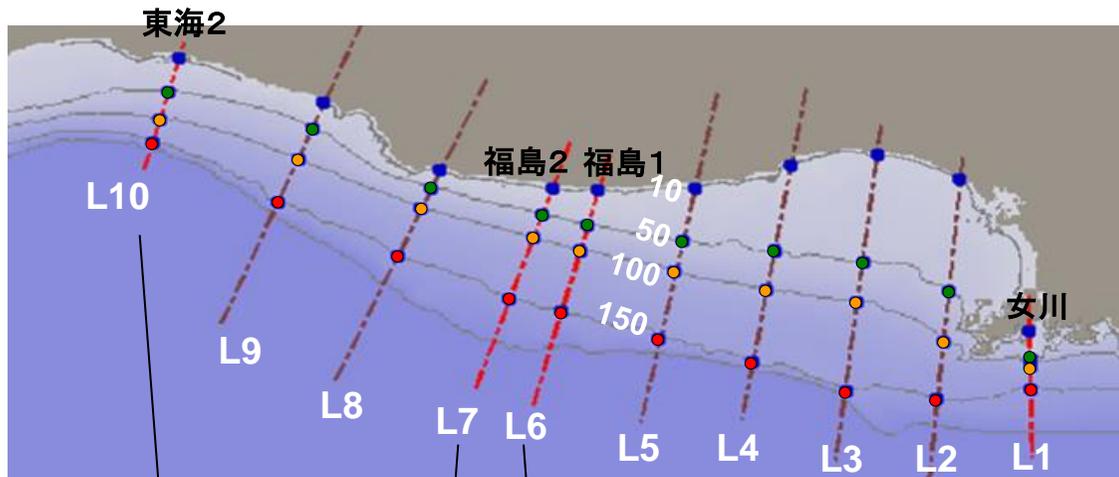


東北地方太平洋沖地震の場合では、

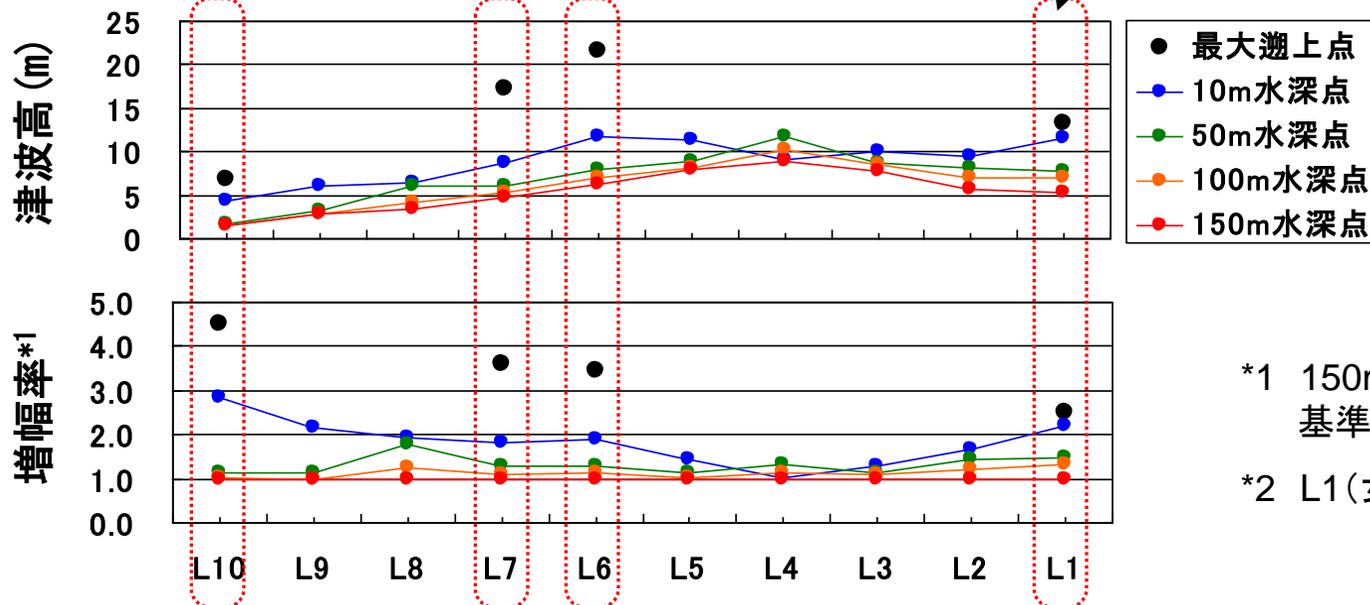
- 津波波源モデルと長周期観測地震動に基づく震源断層モデルでは、大きなすべりが日本海溝付近のプレート境界の浅い部分に集中している点において互いに整合する。
- 短周期観測地震動(強震動)を再現する震源断層モデルでは、強震動の生成領域がプレート境界のやや深い部分に位置し、上記2つのモデルと異なる。⇒ 強震動には東北沿岸に近い部分が支配的

2.3 原子力発電所間の津波高の相違に係る要因分析

① サイト近傍の水深変化に伴う波高増幅特性



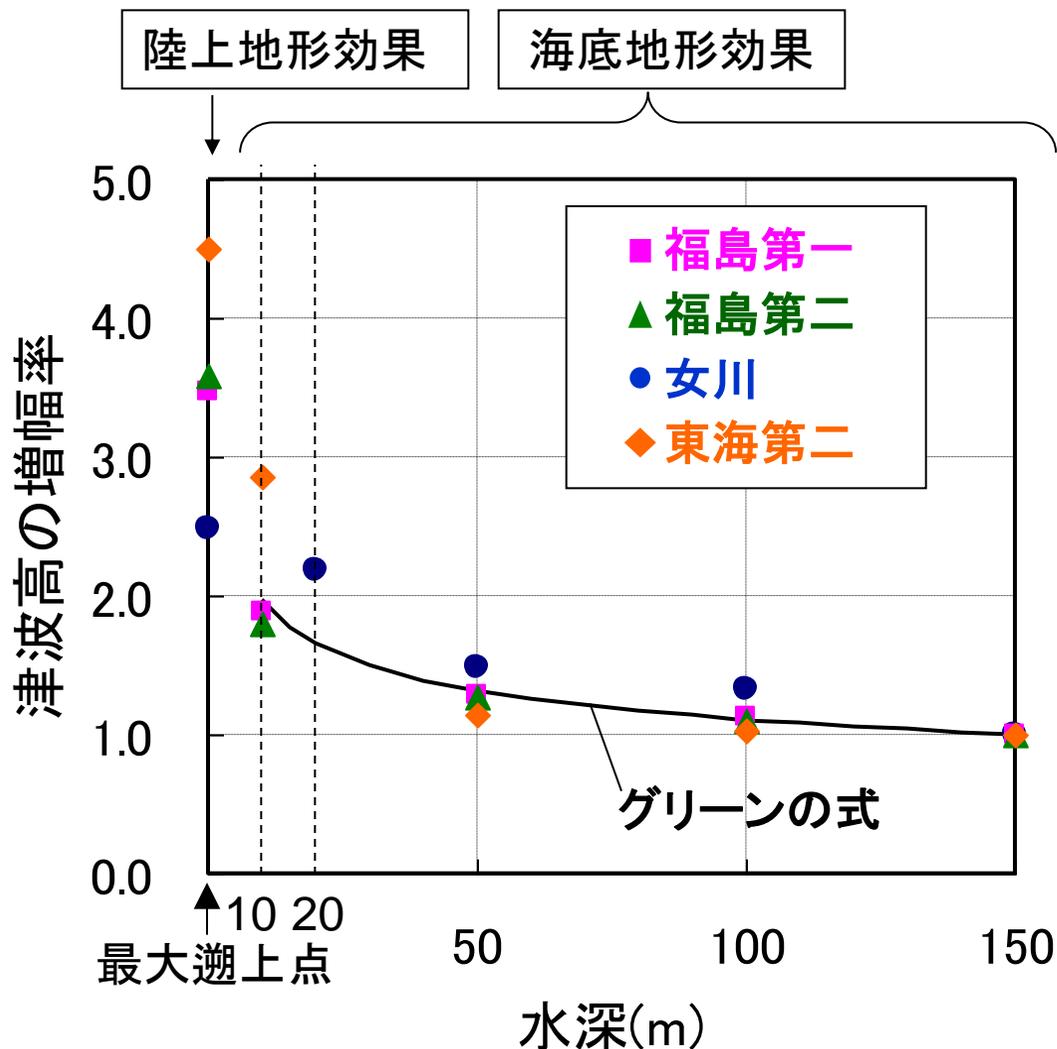
- 150m水深点の津波高は仙台平野の沖合 (L4) でピークを示し、南北に低くなる。
- 福島第一 (L6)、福島第二 (L7) の津波高の差は水深が浅くなるにつれて大きくなる。しかし、増幅率はほぼ等しい。
⇒ サイト近傍の地形の影響は小さい。
- 女川L1の津波高の増幅率が他のサイトより小さい？



*1 150m水深点の津波高で
基準化した増幅率

*2 L1(女川)のみ20m水深点

②津波高の増幅特性に及ぼす海底地形の効果



グリーンの式*1

$$Hh^{1/4} = const. \quad H: \text{波高}, h: \text{水深}$$

この式は、岸での反射を無視していること、屈折により波向線の間隔が変わらないことなどが条件

⇒ 理想的な(特異ではない)スロープ状の波高増幅を示す。

• 福島第一、福島第二の前面海域の波高増幅は、グリーンの式とほぼ一致する。

⇒ 特異な海底地形ではない。

• 東海第二の波高増幅は、10m水深点でグリーンの式から大きく外れている。

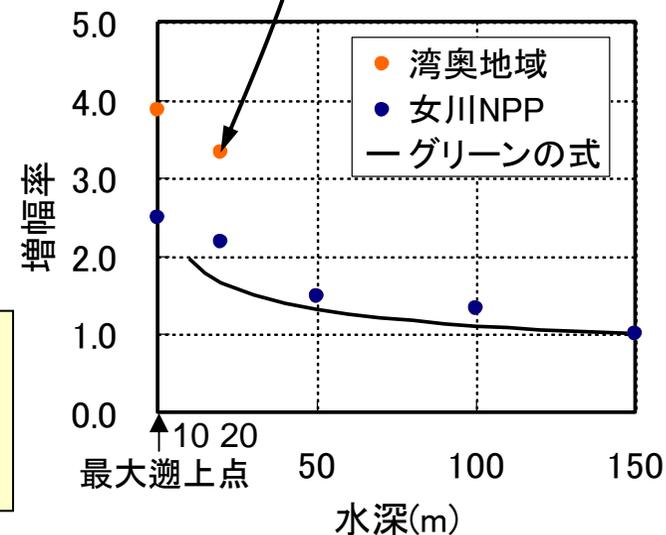
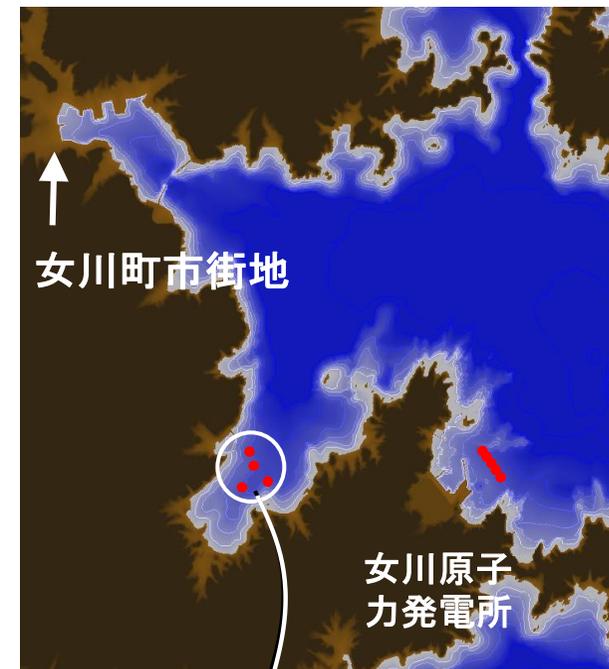
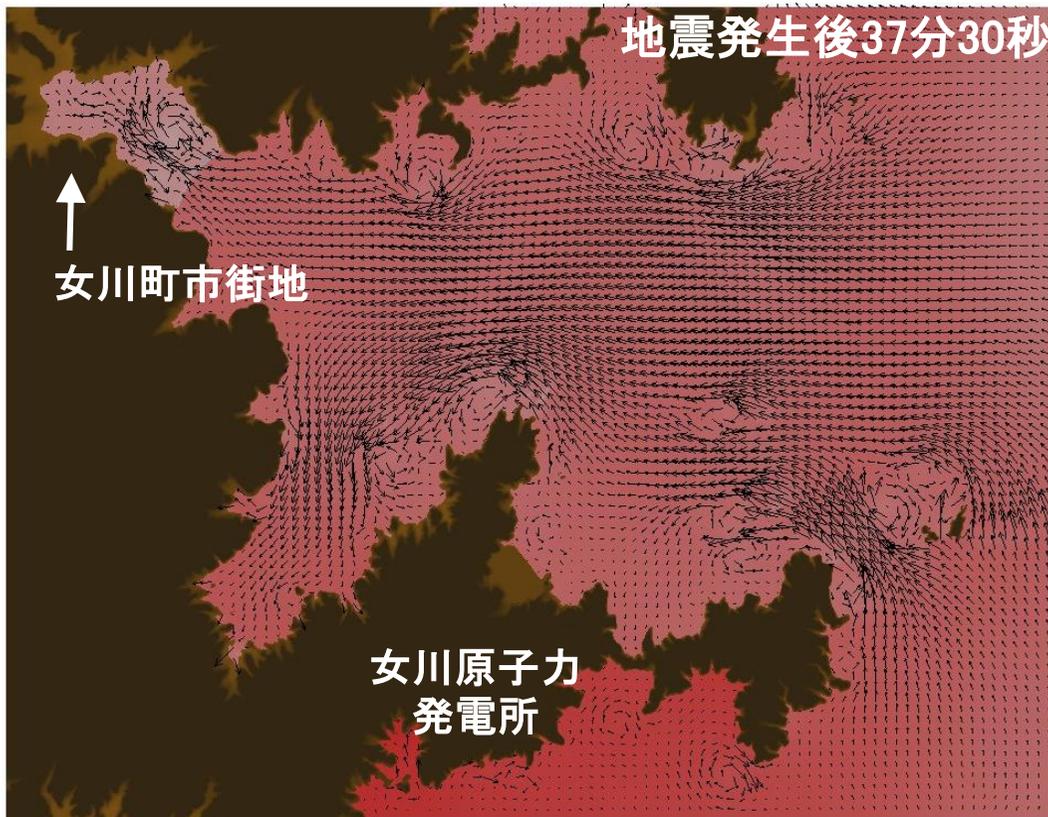
⇒ 沿岸での反射波の影響と考えられる。

• 女川の波高増幅は、グリーンの式から外れ、陸上遡上域での波高増幅が小さい。

⇒ サイト特有の地形効果が表れている。

③女川原子力発電所サイトの局所地形効果

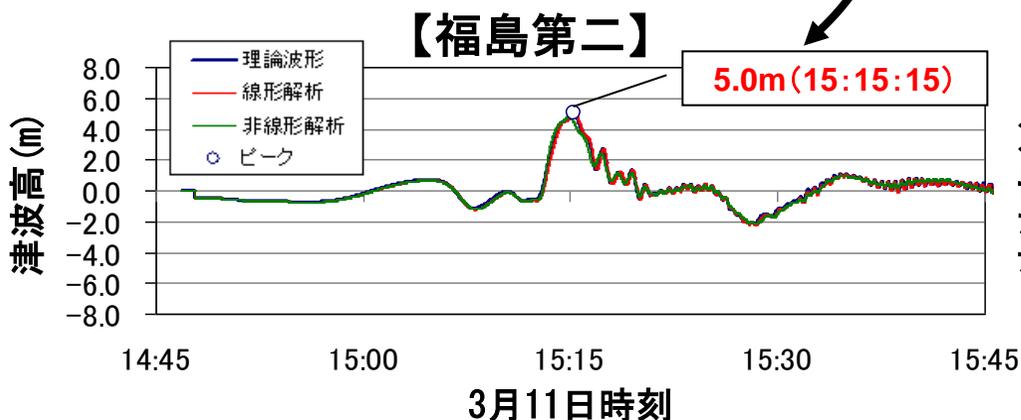
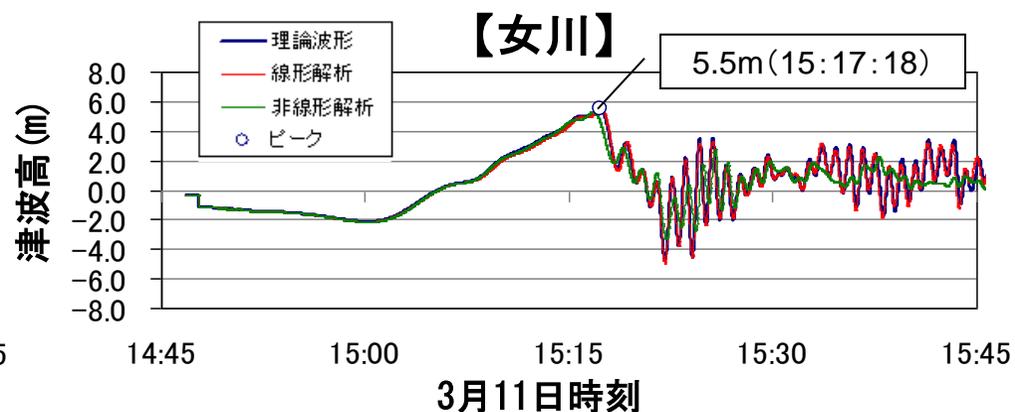
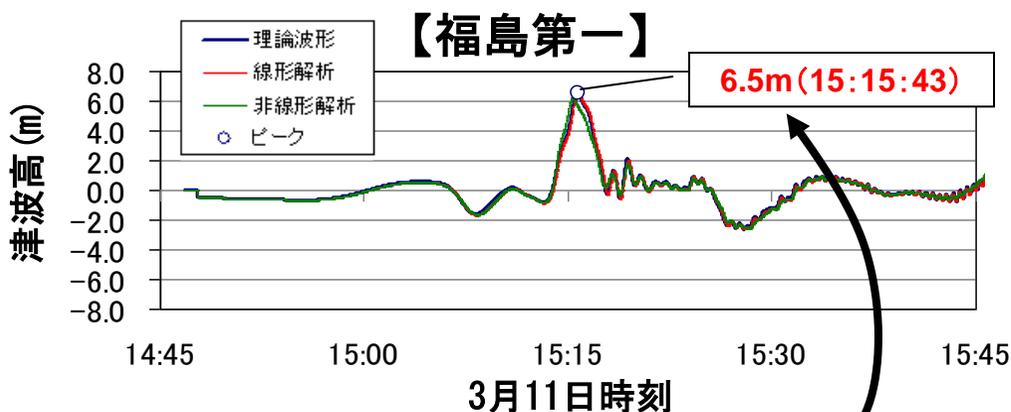
■最大水位発生時刻直前の津波の流況(流速ベクトル)



- ・津波の勢いは女川湾の湾奥に向かっていく。
- ・女川原子力発電所は湾口に位置し、津波の勢いがそれている。
⇒局所地形効果により津波高の増幅が抑えられた。

④ 150m水深点の津波高に及ぼす小断層の影響 (1/2)

■ 150m水深点における解析津波波形



- 各原子力サイトに影響を及ぼした小断層はどれ？
- 福島第一と福島第二の津波水位の差(1.5m)はどこから？

④ 150m水深点の津波高に及ぼす小断層の影響 (2/2)

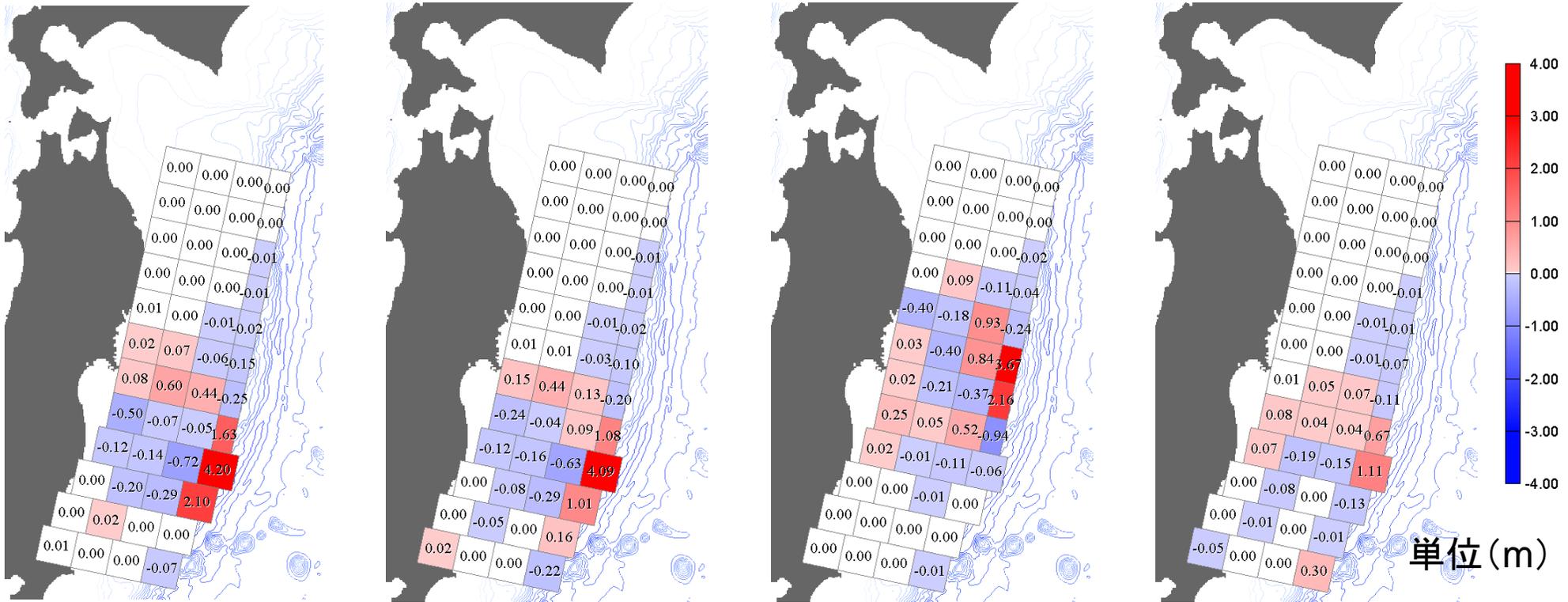
■ 150m水深点の最大水位に占める小断層ごとの津波水位

【福島第一】

【福島第二】

【女川】

【東海第二】

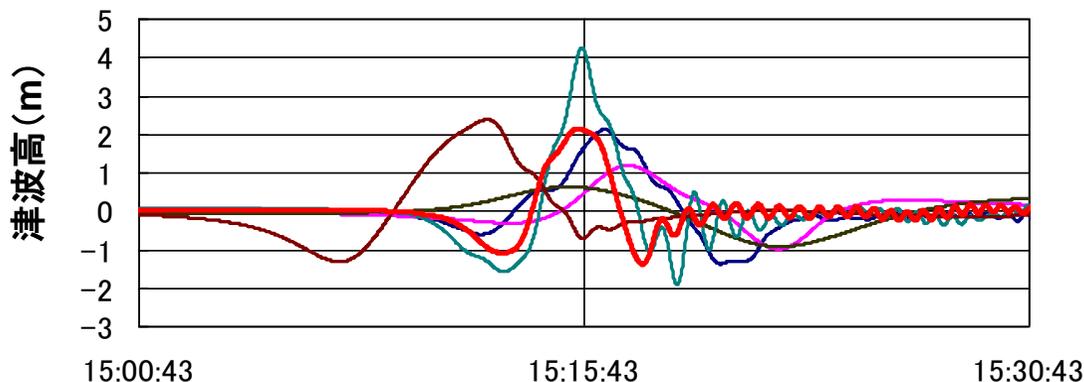


- 福島第一、福島第二では、福島沖の日本海溝付近の浅い部分の小断層の寄与が大きく、共通である。
 - 女川では、宮城北沖の日本海溝付近の浅い部分の小断層の寄与が大きい。
 - 東海第二では、福島沖の日本海溝付近の浅い部分の小断層の寄与が大きい。
- ⇒ サイト毎に大きな影響を及ぼす小断層の位置が異なる。

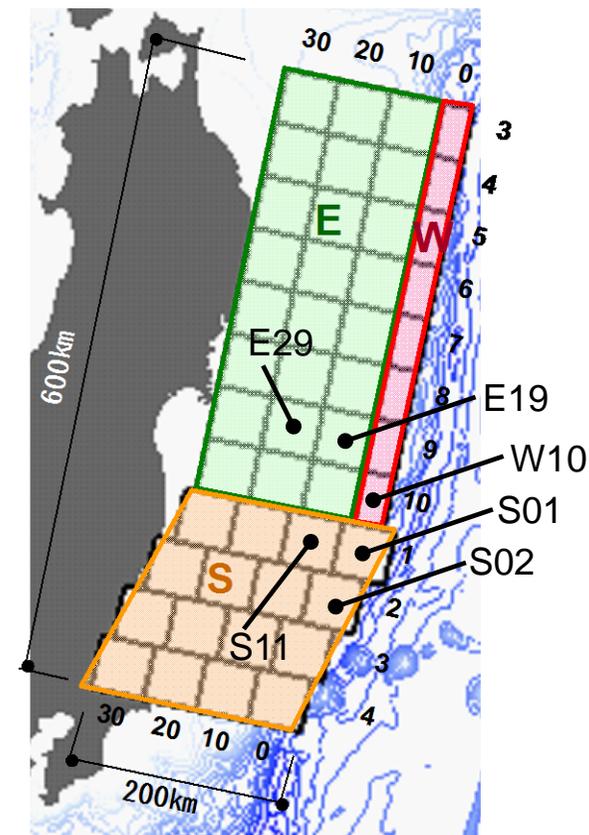
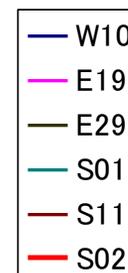
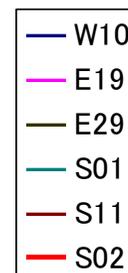
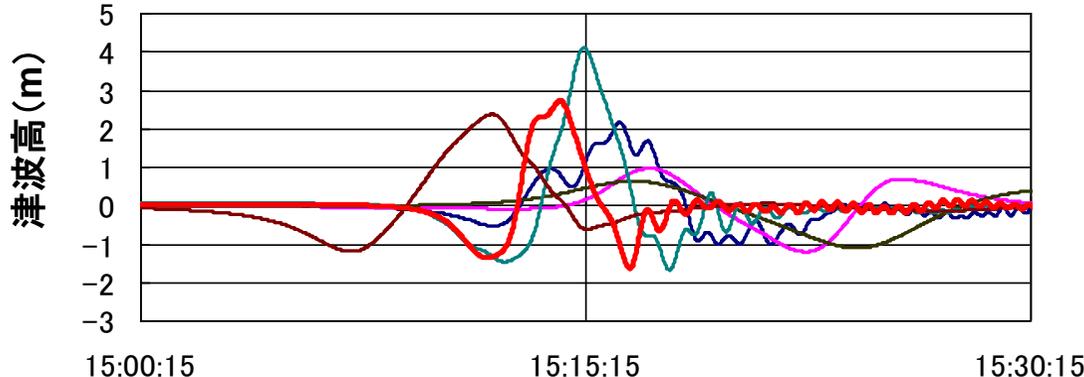
⑤ 福島第一と福島第二の津波高の相違に関する分析

■ 影響の大きい6つの小断層の解析波形

福島第一・150m水深点



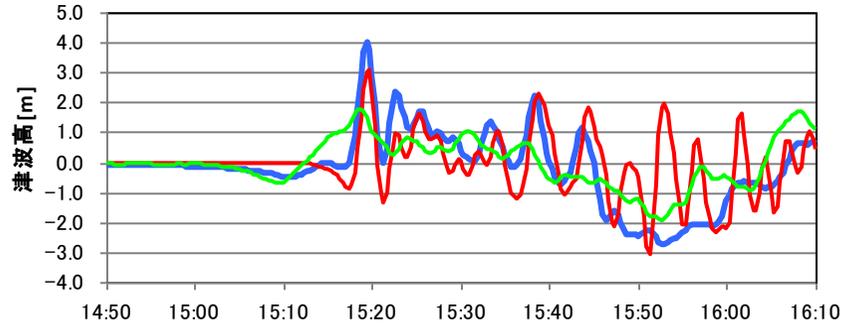
福島第二・150m水深点



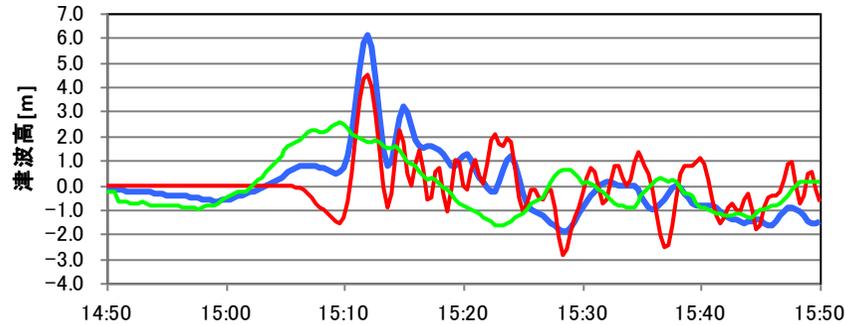
- 福島第一と福島第二の沖合150m水深点の最大水位は、小断層S01のピークと重なっている。
- 両者の最大水位の差(1.5m)は、主に小断層S01とS02、W10の波形の重なるタイミングにより差が生じた。

⑥ 浅部断層と深部断層の影響

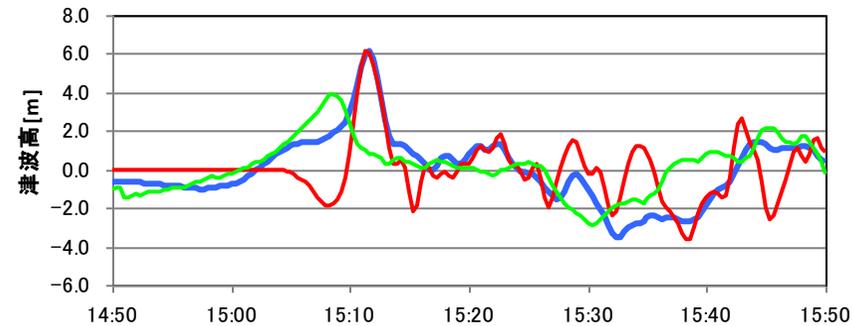
岩手北部沖
G807



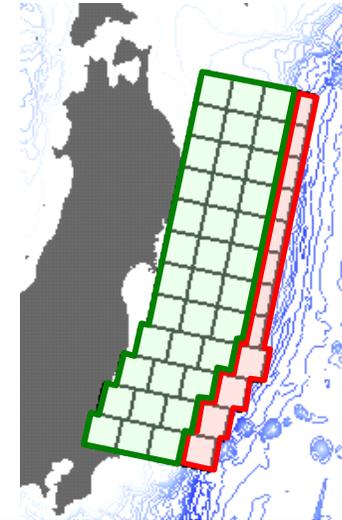
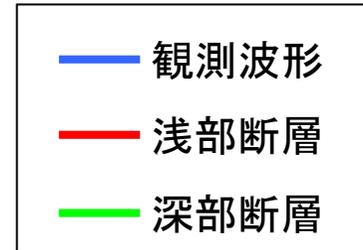
岩手中部沖
G804



岩手南部沖
G802



3月11日時刻



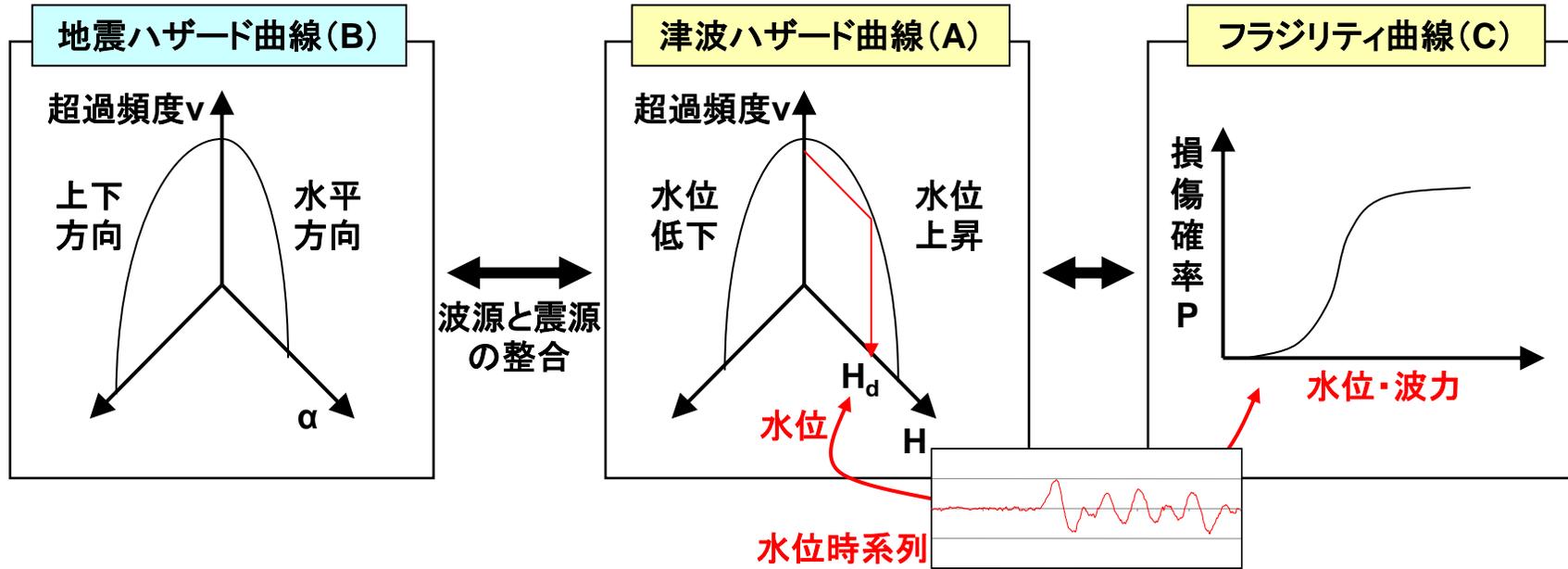
- 観測津波波形に見られた短周期波形の発生時間は、日本海溝付近の浅部断層による波形と一致した。(佐竹2011と同様な結果を得た。)
- 観測津波波形の最大振幅は、浅部断層による波形振幅と深部断層による波形振幅の和とほぼ一致した。

3. 基準地震動・基準津波の評価手法に係る今後の検討

今回の地震・津波の経験・知見を踏まえて、原子力発電所の安全評価における基準地震動及び基準津波の設定において、確率論的手法の積極的導入を提案していく。

確率論的津波ハザード評価に基づく基準津波策定手引き(案)の基本方針

- A) 基準津波は、不確実さをロジックツリーで考慮した確率論的津波ハザード評価(図A:津波水位Hとその超過頻度 v)に基づき決定する。
- B) 津波ハザード評価における波源モデルと地震ハザード評価(図B)における震源モデルとの整合性を考慮する。
- C) 津波ハザードでの津波水位は津波強度指標の代表値である。津波強度指標は機器・構造物のフラジリティ評価(図C)から決定される。例えば、波力や波形等がある。フラジリティ評価用津波を抽出する。
- D) 津波を伴う地震はプレート間地震とプレート内地震に大別されるが、本手引きでは、プレート間地震に伴う津波から着手し、東北地方太平洋沖地震津波の知見(すべり分布の空間的・時間的不均一さ等)を反映する。



4. まとめ

- 東北地方太平洋沖地震を対象に、津波の観点から求めた波源モデルと、地震動の観点から求めた震源断層モデルを比較して、共通点と相違点を整理した。
 - ✓ 津波波源モデルと長周期観測地震動に基づく震源断層モデルが整合し、共に大きなすべりがプレート境界の日本海溝付近に集中する結果となった。
 - ✓ 短周期の強震動を生成する領域は、プレート境界のやや深い部分が支配的であり、津波波源モデルと異なる傾向となった。また個々の地震規模はMw8クラスであった。
- 東北地方太平洋沖地震・津波では、原子力発電所間の津波高の相違には、すべり分布の空間的・時間的な不均一さが影響していることが分かった。
- 東北地方太平洋沖地震・津波の経験・知見を踏まえた「確率論的津波ハザード評価に基づく基準津波策定手引き(案)」を作成・提案し、全国の新設・既設の原子力発電所の更なる安全性向上に役立てていく。

2.2 今回の地震による地震動の再現と震源特性の分析

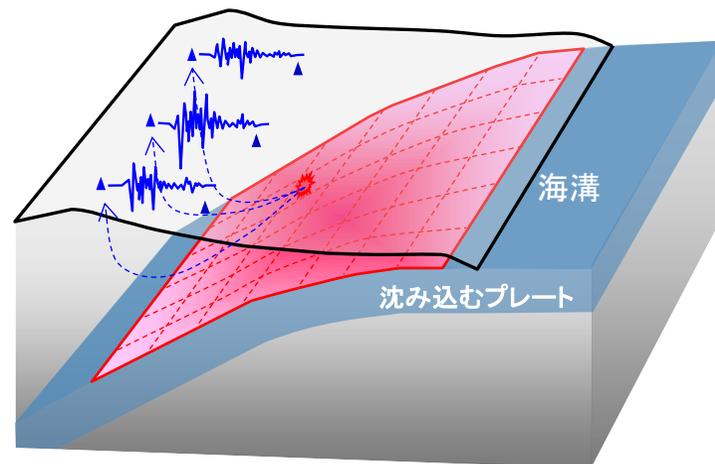
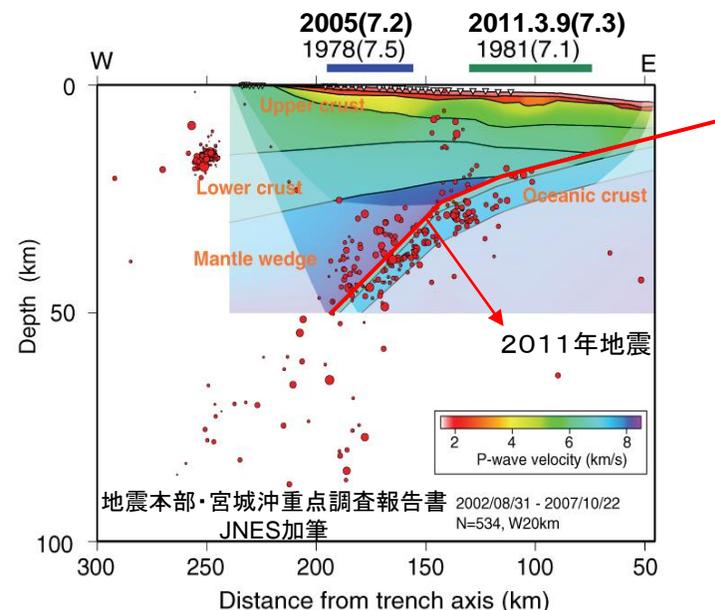
(1) 前提条件

1) 地殻及びプレート境界面の特徴を考慮し、震源断層モデルを設定。

- ① 日本海溝走向の不均質性
- ② 沈み込みプレートの傾斜角の不均質性
- ③ 日本列島の地殻構造の不均質性

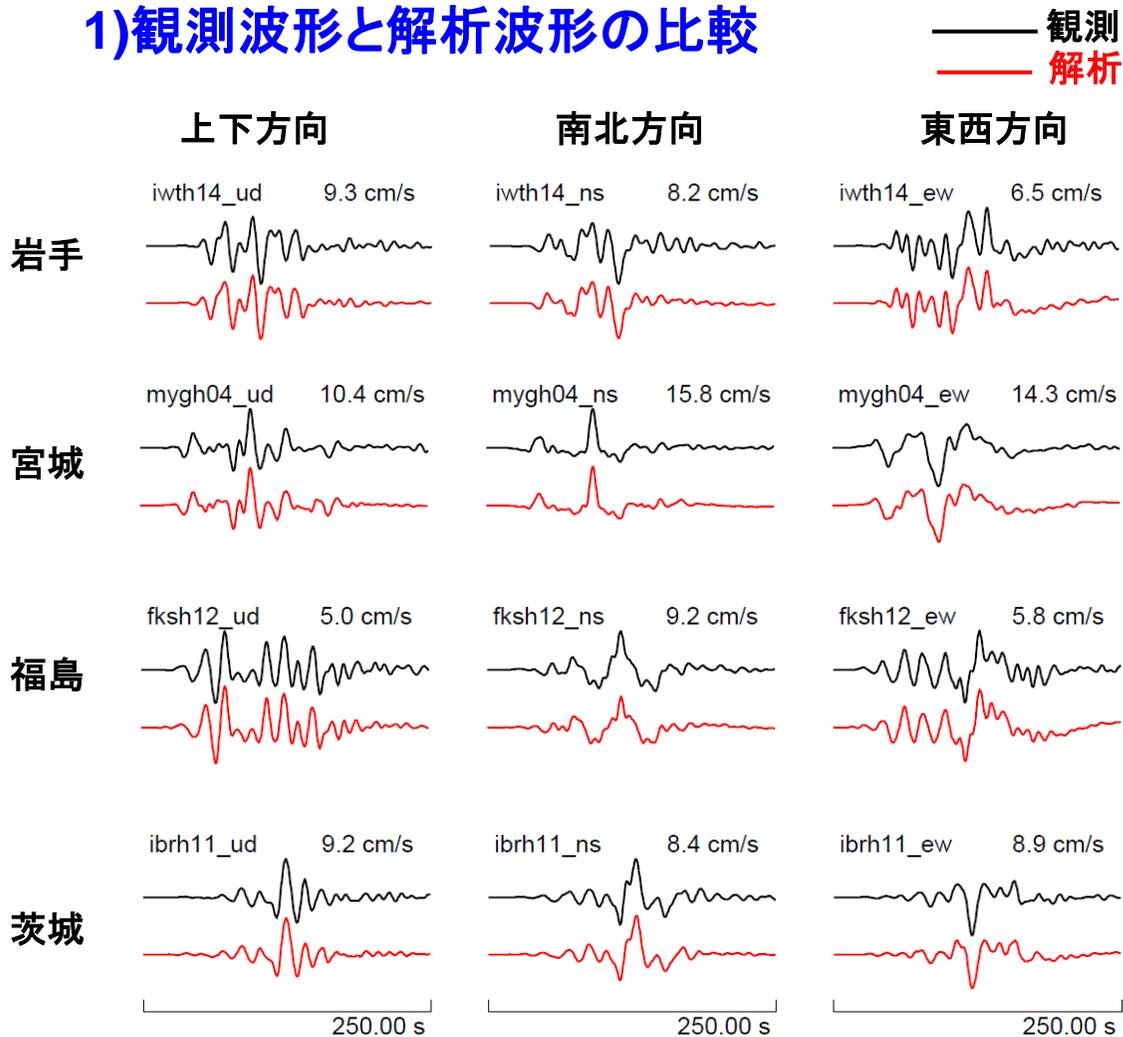
2) 強震動観測網で記録された長周期地震動と短周期地震動を用いて震源断層モデルを推定する。

分離して検討するメリットとして、
 ⇒長周期地震動は、震源破壊過程の全体像
 ⇒短周期地震動は、局所的な強震動生成領域
 をそれぞれ捉えることができる。

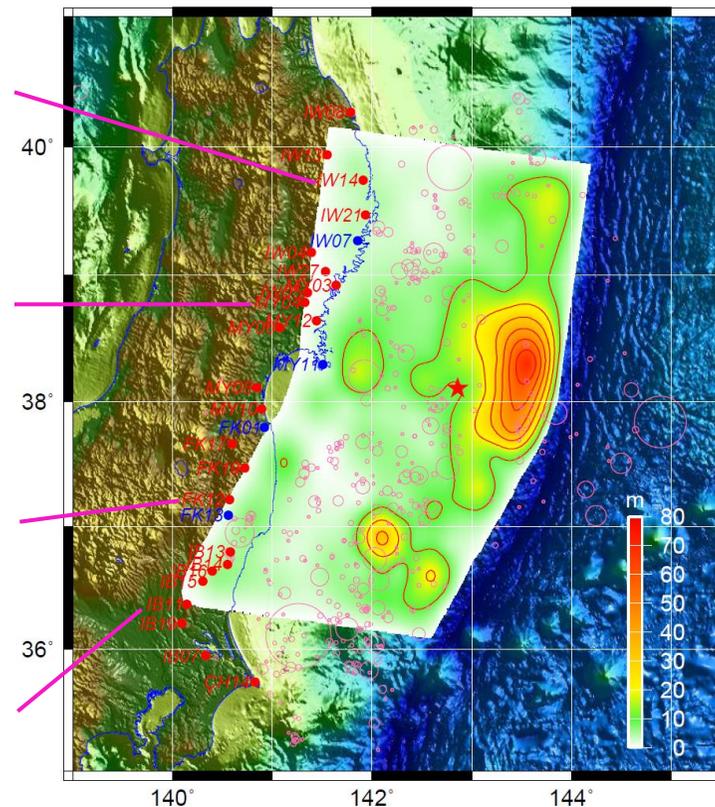


(2) 長周期観測地震動に基づく震源断層モデルの推定結果

1) 観測波形と解析波形の比較



震源断層モデルのすべり分布

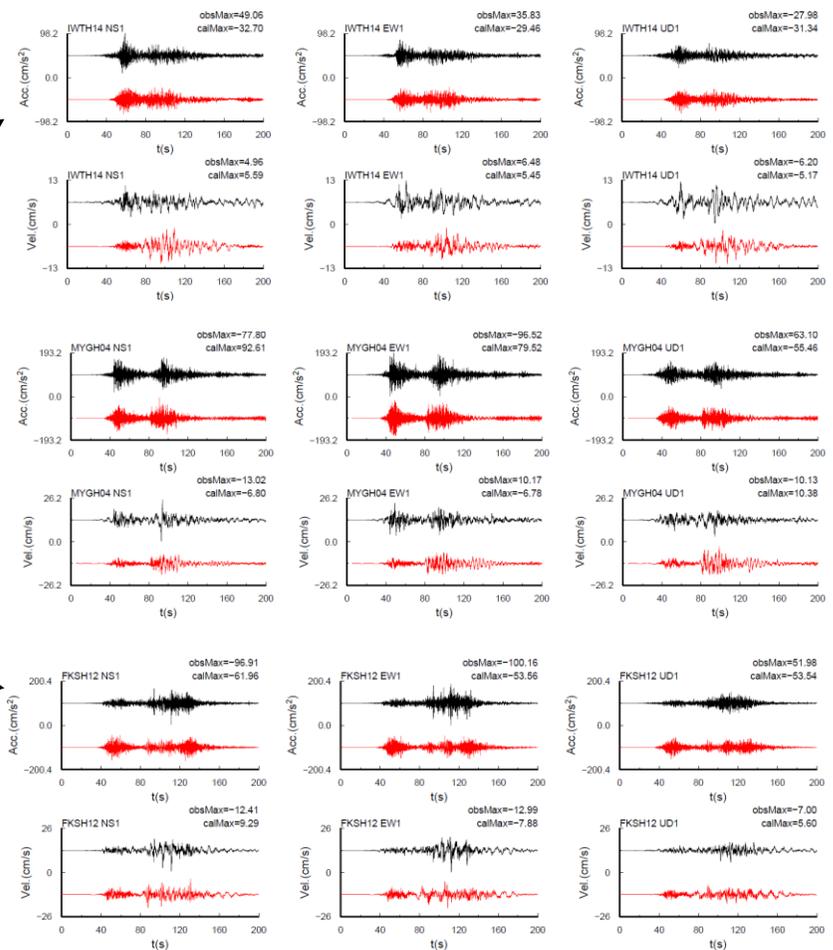
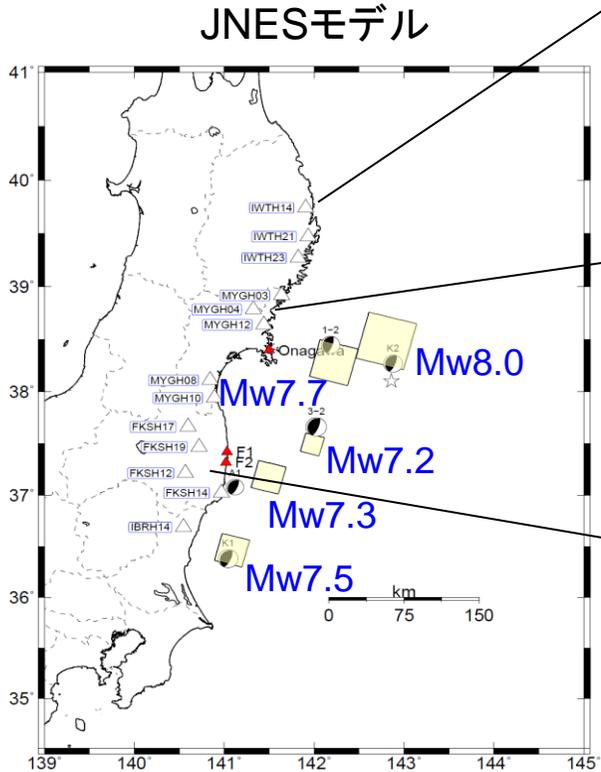


地震規模Mw9
破壊継続時間=150秒
最大すべり量=68.9m

- 観測波形と解析波形がよく一致している。
- 大きなすべりが日本海溝付近に集中している。最大すべり量は約70mである。

(3) 短周期観測地震動に基づく震源断層モデルの推定結果

観測と解析波形の比較



— 観測
— 解析

加速度

速度

加速度

速度

加速度

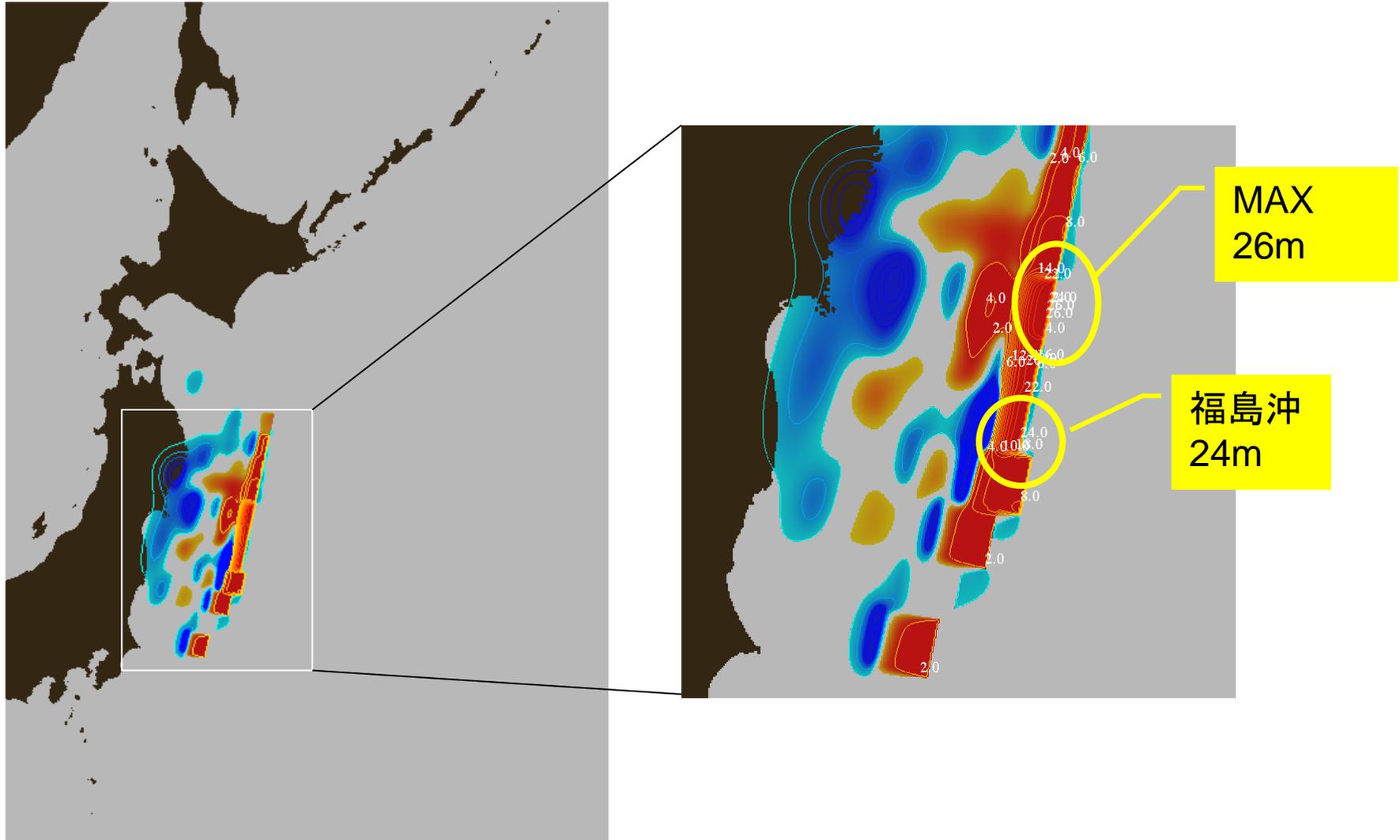
速度

- 日本海溝軸より陸側に近いプレート境界面にMw7.2~8.0の5つの強震動生成領域を有する震源断層モデルを設定した。
- この震源断層モデルによる解析波形は、東北沿岸部で観測された短周期地震動とほぼ同じレベルであった。

短周期・長周期地震動の周期帯

	短周期			長周期
本検討 (原子力発電所)	短周期 0.1～0.5秒	中間周期 0.5～2秒	長周期 2～10秒	10秒以上
地震調査委員会	～3秒			3秒以上 (超高層を再現可能なもの)
従来の定義 (理学、一般)	～1秒			1秒以上

JNESモデル(J18)の海底地盤変動量分布



*300秒の合計すべり量から計算される最終変位量