

南海トラフの巨大地震モデル検討会
第 1 2 回会合

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の
津波断層モデルについて

平成 2 4 年 3 月 1 日

1. はじめに

本検討会では、中間とりまとめ（平成 23 年 12 月 27 日）の方針に従い、大きな断層すべりの領域等について、南海トラフで発生した過去の地震の断層モデルのみではなく、世界の海溝型巨大地震の断層モデル等の特徴を整理し、科学的知見に基づくあらゆる可能性を考慮した最大クラスの断層モデルの検討を進めています。

このうち、2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震については、沖合の津波観測データ、面的に調査された津波痕跡高、陸域及び海域での地殻変動量等、多くの科学的な観測データがあることから、断層モデルの特徴について詳細な解析を行うことが可能です。併せて、津波の陸域での浸水深や浸水域の調査結果との比較により津波推計手法の精度向上も図ることが可能なことから、東北地方太平洋沖地震に関する津波断層モデルとその津波高等について検討しました。

一方、東北地方太平洋沖地震による被災地域では、復旧・復興が本格化するなかで、今後の津波対策の計画の策定や避難経路等の避難計画の検討等において、津波襲来の概ねの状況を面的に把握しながら検討することができる津波断層モデルが望まれています。今回得られた津波断層モデルの検討成果は、南海トラフの津波断層モデルの検討及び津波推計手法の精度向上を目的として実施したものです。被災地域における津波対策等の検討の参考となると考えています。

2. 津波断層モデルの特徴

今回得られた津波断層モデルは、断層破壊が時間とともに進行し、宮城県から岩手県の海溝寄りの沖合で大きな断層すべり領域があるもので、断層すべりの大きな領域については地震波形等から解析された断層モデルと概ね同じ領域にあることが分かりました。

今回得られた津波断層モデルで推計した津波は、津波襲来の時間的推移も含め、沖合津波計で観測された特異で大きな津波波形、海岸での大きな津波や陸域の広い範囲への津波の浸水等、北海道から茨城県にかけての広い範囲で観測・調査された結果等と概ね一致しており、陸域での津波の浸水等の時間的推移については、一部地域での評価ですが、概ね合っていることが確認されました。また、津波断層モデルから推計される地殻変動についても、海岸域の沈降が見られるなど、観測結果等と概ね一致しています。

3. 提供資料

東北地方太平洋沖地震の津波断層モデルについて、以下の資料の提供が可能です。

(1) 津波断層モデル

津波観測波形、地殻変動データ、津波痕跡データから求めた津波断層モデル（断層すべり量分布、地殻変動量分布）。具体的内容は、次のとおりです。

断層面を 98 の小断層（走向方向 14×傾斜方向 7）に分割。それぞれの小断層の位置等と、地震発生からの①～⑤の時間ごとの小断層のすべり量。

①0～ 60 秒、② 60～120 秒、③120～180 秒、④180～240 秒、⑤240～300 秒

(2) 地殻変動量データ

(1) の断層パラメータから弾性理論により計算される鉛直方向の地殻変動量。地殻変動量は、(1) の各時間 (①～⑤) に対応。

(3) 津波断層モデルによる各地点の津波高

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる津波痕跡高 (統一データセット) の調査地点に対応する地点における、津波断層モデルによる津波高の推計値。

4. 活用にあたっての留意事項

今回得られた津波断層モデルは、東北地方太平洋沖地震による津波について、北海道から茨城県の広い領域について概ねの状況を再現できるものと考えています。しかし、このモデルは、各地域の局所的な津波の襲来状況を正確に再現したものではなく、地域によっては、津波高の推計値が、実際の津波痕跡高を下回るケースや、その逆のケースもあります。

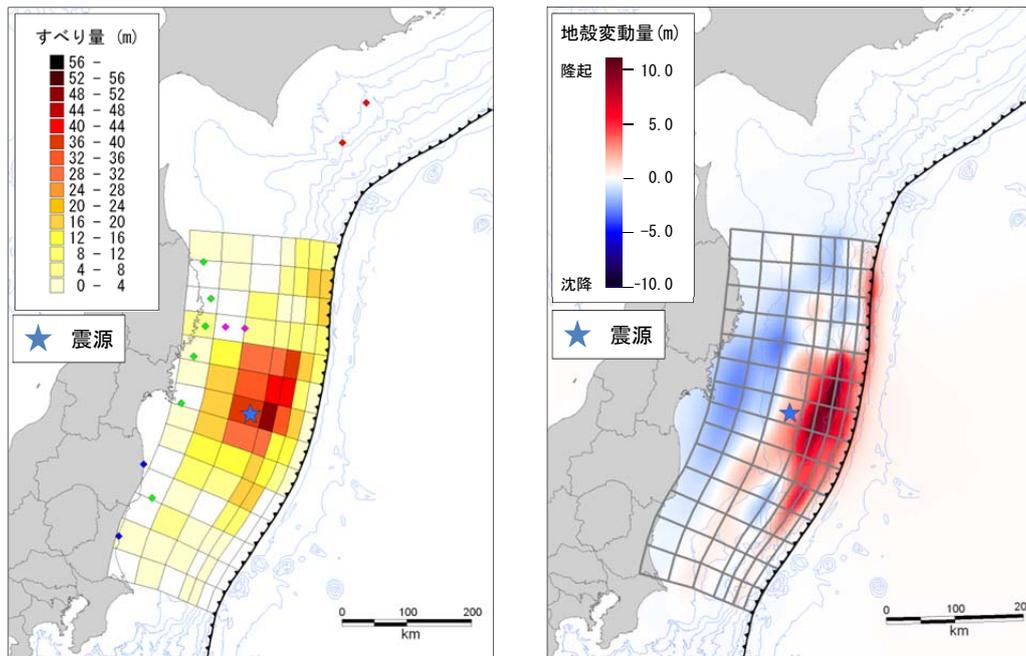
したがって、このモデルの活用にあたっては、これらのことに留意し、計画等の策定に利用する際には、各地域の詳細な地形データ等を用い、津波断層モデルについても、それぞれの目的に応じて適切に補正する必要があります。

5. 東北地方太平洋沖地震の津波断層モデル

(1) 東北地方太平洋沖地震の津波断層モデル (断層すべり量)

- ・宮城県から岩手県の間溝よりの沖合に大きな断層すべり量
- ・最大すべり量は約 50m
- ・地殻変動 (上下動) の最大隆起量は約 12m

最大沈降量は約 3m

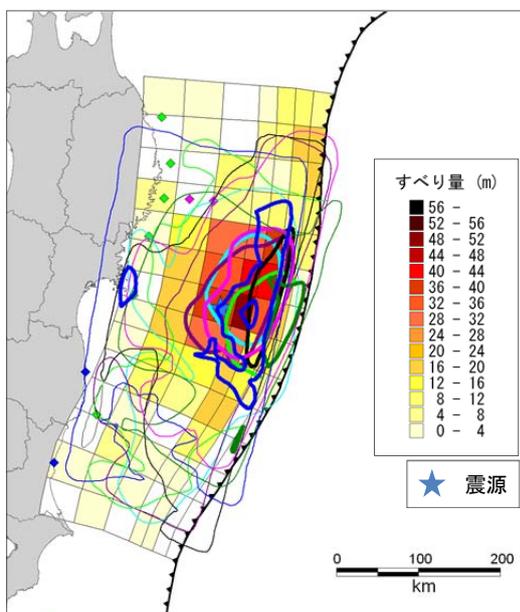


断層すべり量分布 (合計)

地殻変動量分布

図1 解析結果 (断層すべり量分布、地殻変動量分布)

(参考)



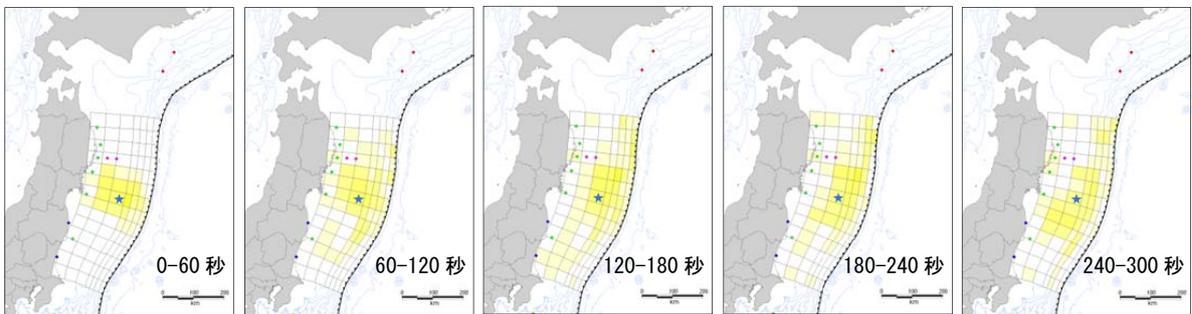
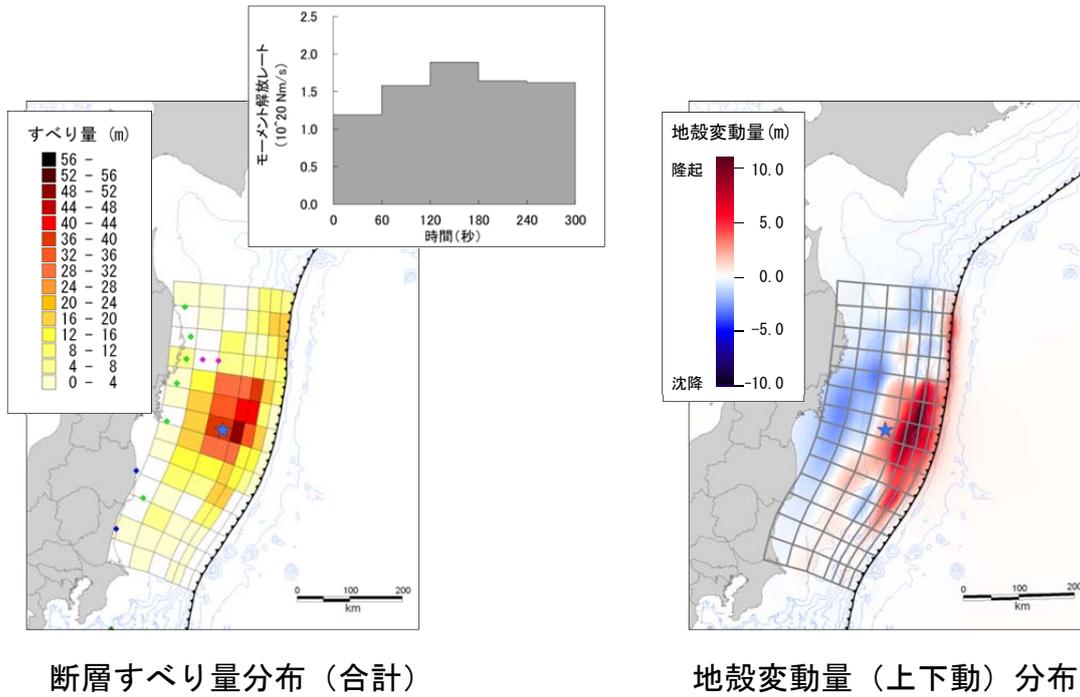
| 引用論文 | 最大すべり量 |
|--------------------------|--------|
| Ide et al. (2011) | 約30m |
| Lay et al. (2011) | 約63m |
| Lee et al. (2011) | 約50m |
| Suzuki et al. (2011) | 約48m |
| Yagi and Fukahata (2011) | 約50m |
| Yoshida et al. (2011) | 約38m |
| 国土地理院・海上保安庁(2011) | 約56m以上 |

※太線は最大すべり量の約 2/3 以上、細線はすべった全領域に相当するコンター。具体的な数値は以下の通り。

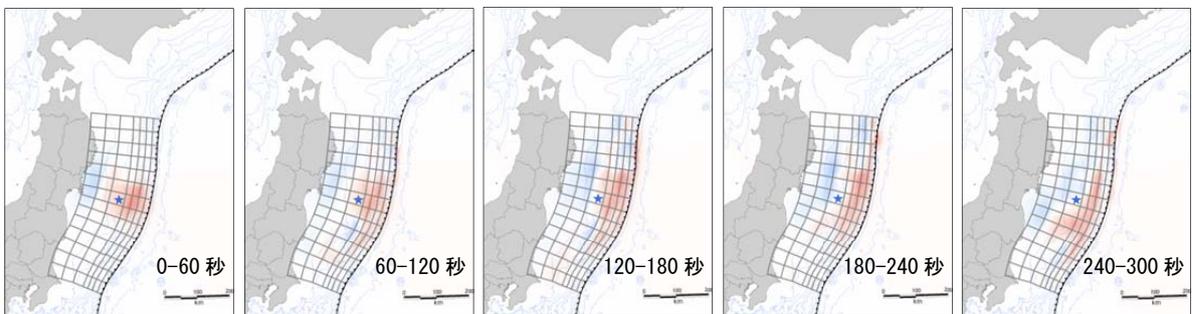
| 引用論文 | すべり量 |
|--------------------------|---------------|
| Ide et al. (2011) | 太線20m、細線4m |
| Lay et al. (2011) | 太線40m、細線5.65m |
| Lee et al. (2011) | 太線30m、細線5m |
| Suzuki et al. (2011) | 太線30m、細線5m |
| Yagi and Fukahata (2011) | 太線35m、細線5m |
| Yoshida et al. (2011) | 太線24m、細線4m |
| 国土地理院・海上保安庁(2011) | 太線40m、細線4m |

図2 地震波形解析および地殻変動解析による断層すべり量分布との比較

(2) 東北地方太平洋沖地震の津波断層モデル（断層すべり量分布の時間変化に伴う地殻変動量（上下動）分布の時間変化）



断層すべり量分布（60 秒間隔）



地殻変動量（上下動）分布（60 秒間隔）

図3 解析結果（断層すべり量分布の時間変化、地殻変動量（上下動）分布の時間変化）

(3) 東北地方太平洋沖地震の津波断層モデル（断層すべり量の時間変化の断面図、地殻変動量（上下動）の時間変化の断面図）

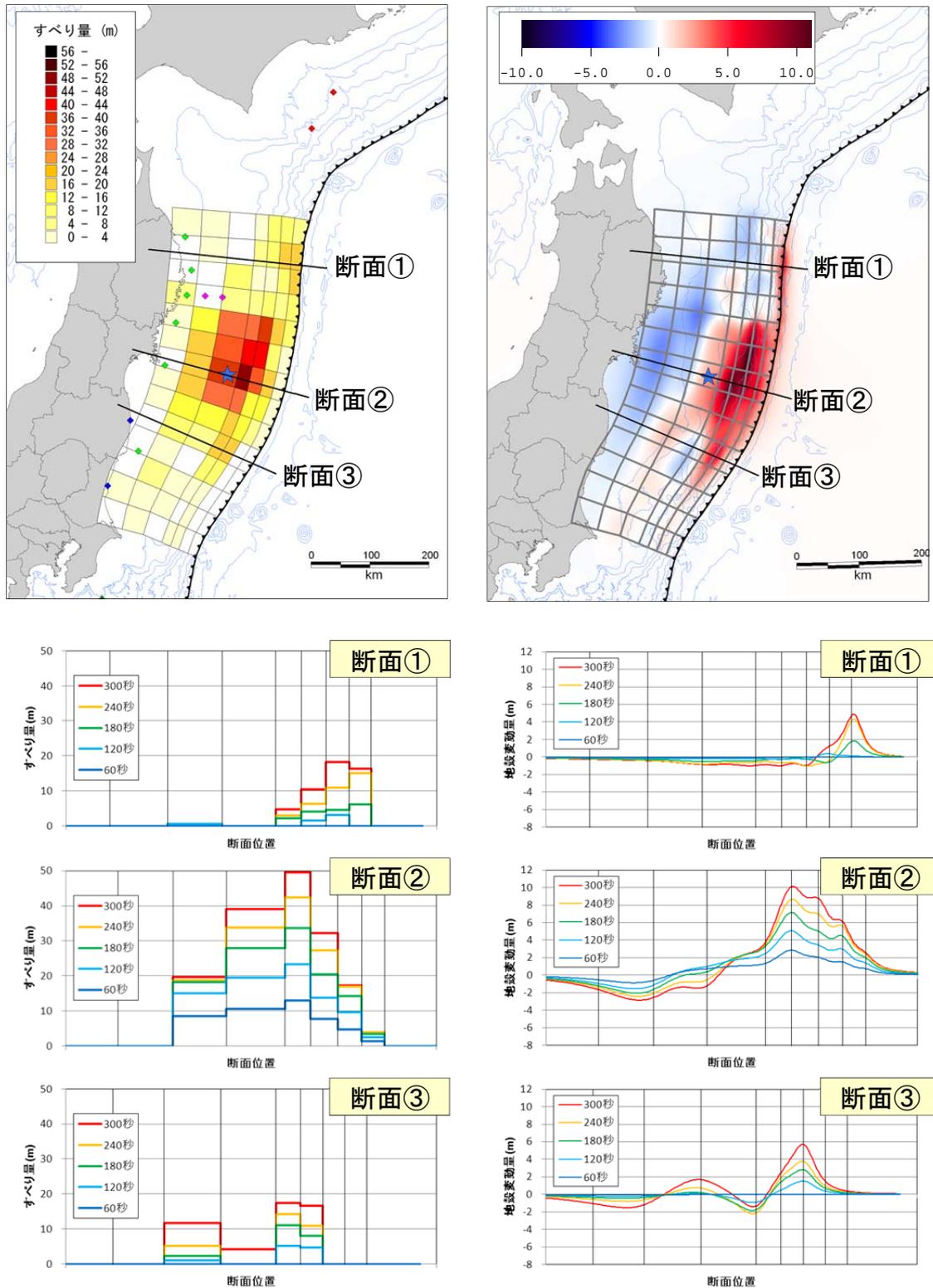


図4 断層すべり量および地殻変動量（上下動）の時間変化の断面図

(4) 東北地方太平洋沖地震の津波断層モデル（津波の計算波形と観測波形の比較）

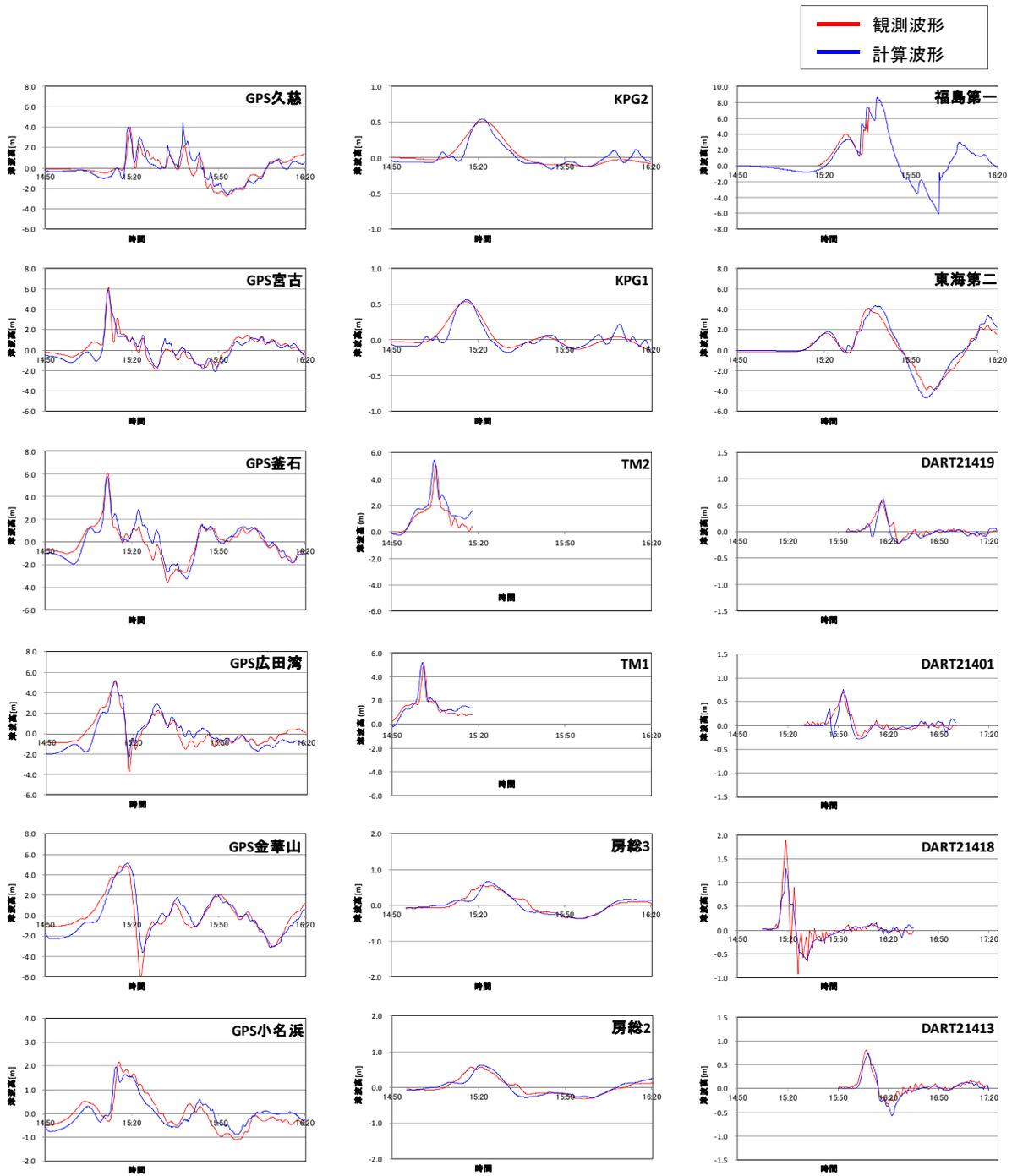
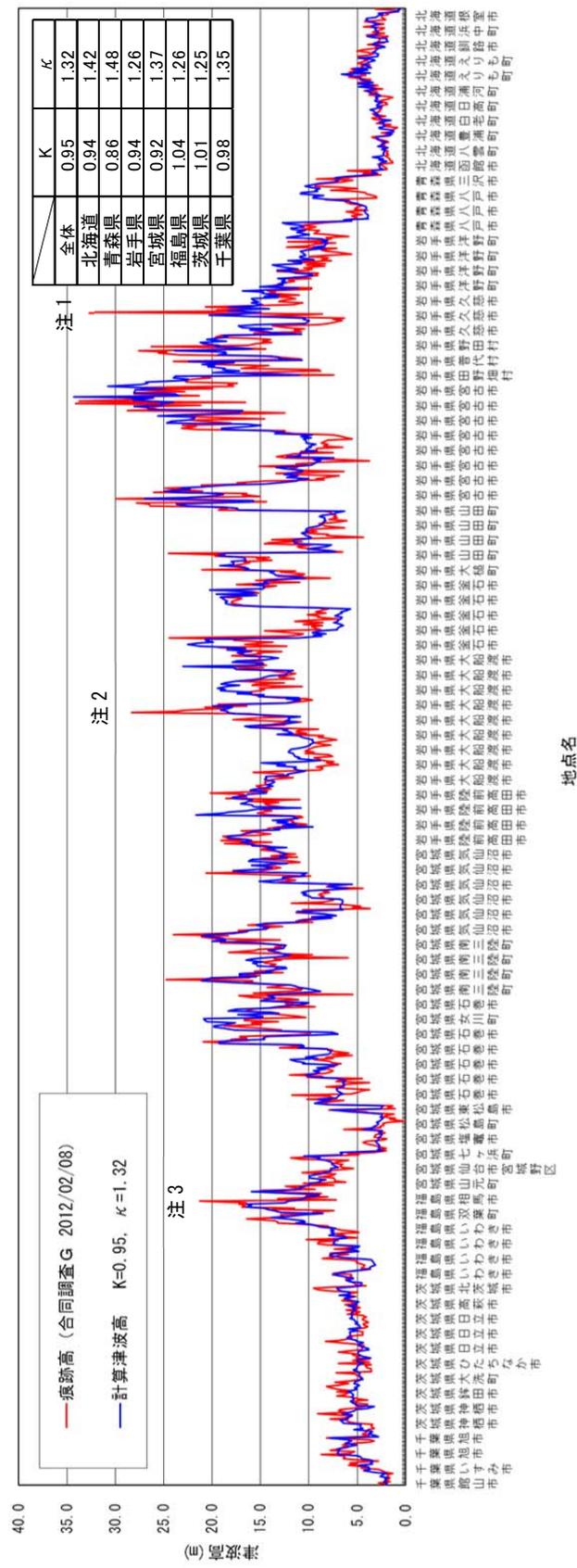


図5 津波の計算波形と観測波形の比較

(5) 東北地方太平洋沖地震の津波断層モデル (津波痕跡高の比較)



K, κ は相田 (1978) による津波高一致度の指標
 K : 津波高の大きさの一致程度であり、値が 1 に近いほど一致が良い
 κ : 津波高の分布の一致程度であり、値が 1 に近いほど一致が良い

注 1. 久慈 : 調査記録において、300m離れた同じ海岸では 16.72mであり、地形による局所的な波高の増幅と考えられる
 注 2. 大船渡 : 調査記録に、スブラッシュの影響による可能性あり、との記述あり
 注 3. 相馬 : 調査記録に、海辺の山肌、との記述あり

図 6 津波痕跡高の比較

(6) 東北地方太平洋沖地震の津波断層モデル（地殻変動との比較）

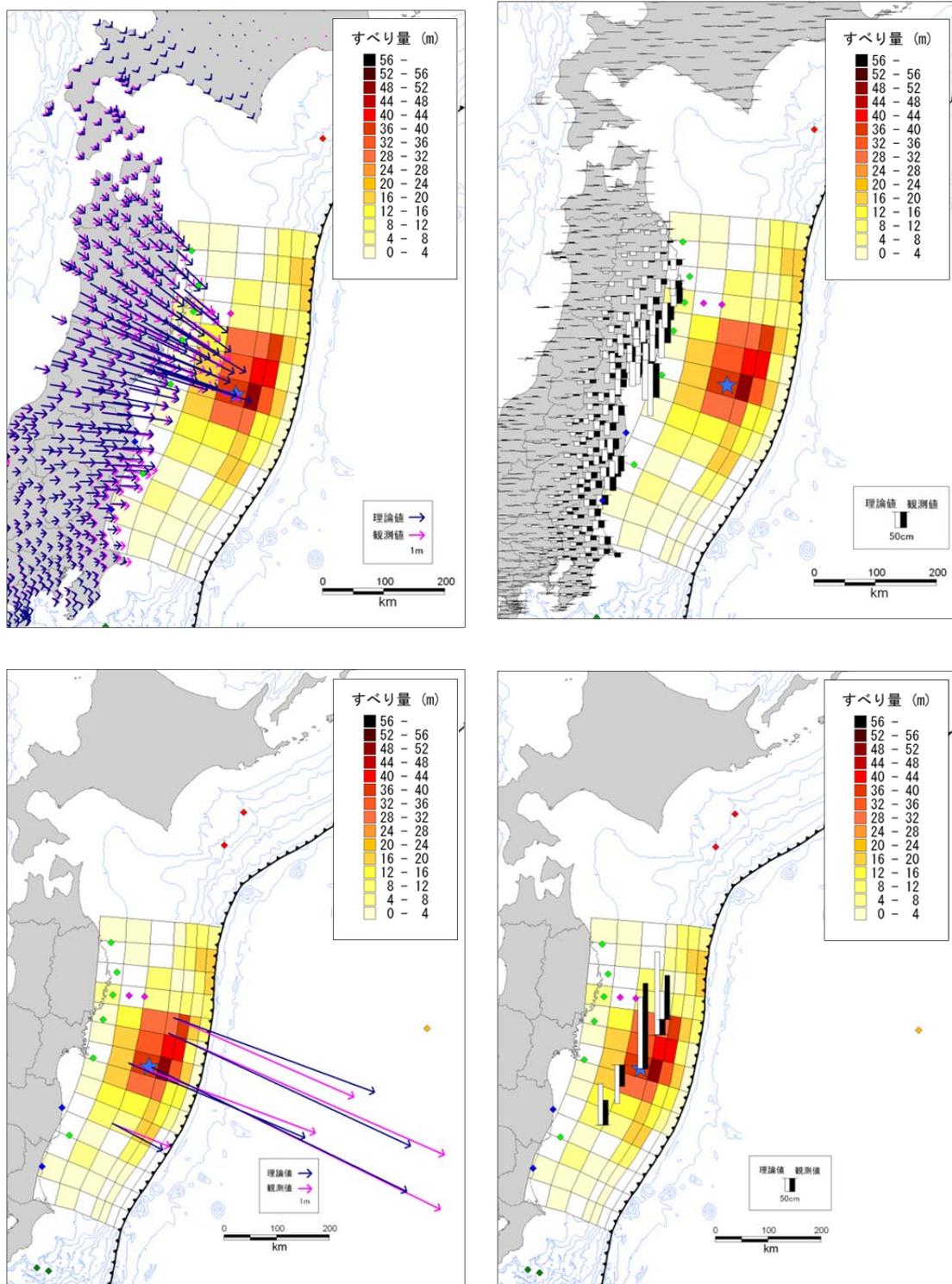


図7 地殻変動データの比較

(7) 津波浸水域等の比較

津波断層モデルをもとに10mメッシュの詳細な津波浸水計算を行い、モデルにより実際の津波の浸水範囲が再現出来ているか確認を行った。

津波浸水計算を行った地域を表1に、使用した基礎方程式及び計算条件を表2に示す。津波浸水計算の結果は図8～図21に示す。

気仙沼港および志津川湾（南三陸町）については、ビデオ映像から分析した観測データ（財団法人 河川情報センターより提供）との比較を行った（図12、図15）。さらに気仙沼港については、浸水経過図を示す（図13）。また、仙台市若林区および名取市について、林・越村（2011）によるビデオ解析による遡上速度推定結果と津波浸水計算による遡上速度の比較を行った（図18）。

なお、浸水域等の計算については、「堤防なし」とした場合の条件で行っているが、小名浜については「堤防あり」の条件での計算も行っている。

表1 津波浸水計算を行った地域

| 県 | 対象範囲 |
|-----|------------|
| 岩手県 | 田老町 |
| | 山田湾 |
| | 大船渡港 |
| 宮城県 | 気仙沼港 |
| | 志津川湾（南三陸町） |
| | 石巻港 |
| | 仙台平野 |
| 福島県 | 相馬市 |
| | 小名浜港 |

表2 津波浸水計算に使用した基礎方程式と計算条件

| 項目 | 基礎方程式および計算条件 |
|---------|--|
| 基礎方程式 | 浅水理論式（非線形長波式） |
| メッシュデータ | 岩手県、宮城県および福島県から提供を受けた津波浸水計算用メッシュデータを使用。沿岸域の最小メッシュサイズはいずれも10m×10m |
| 堤防条件 | 堤防なし ただし、小名浜は堤防ありの場合も計算を行った |
| 再現計算時間 | 地震発生から6時間 |

岩手県 田老町〔堤防なし〕

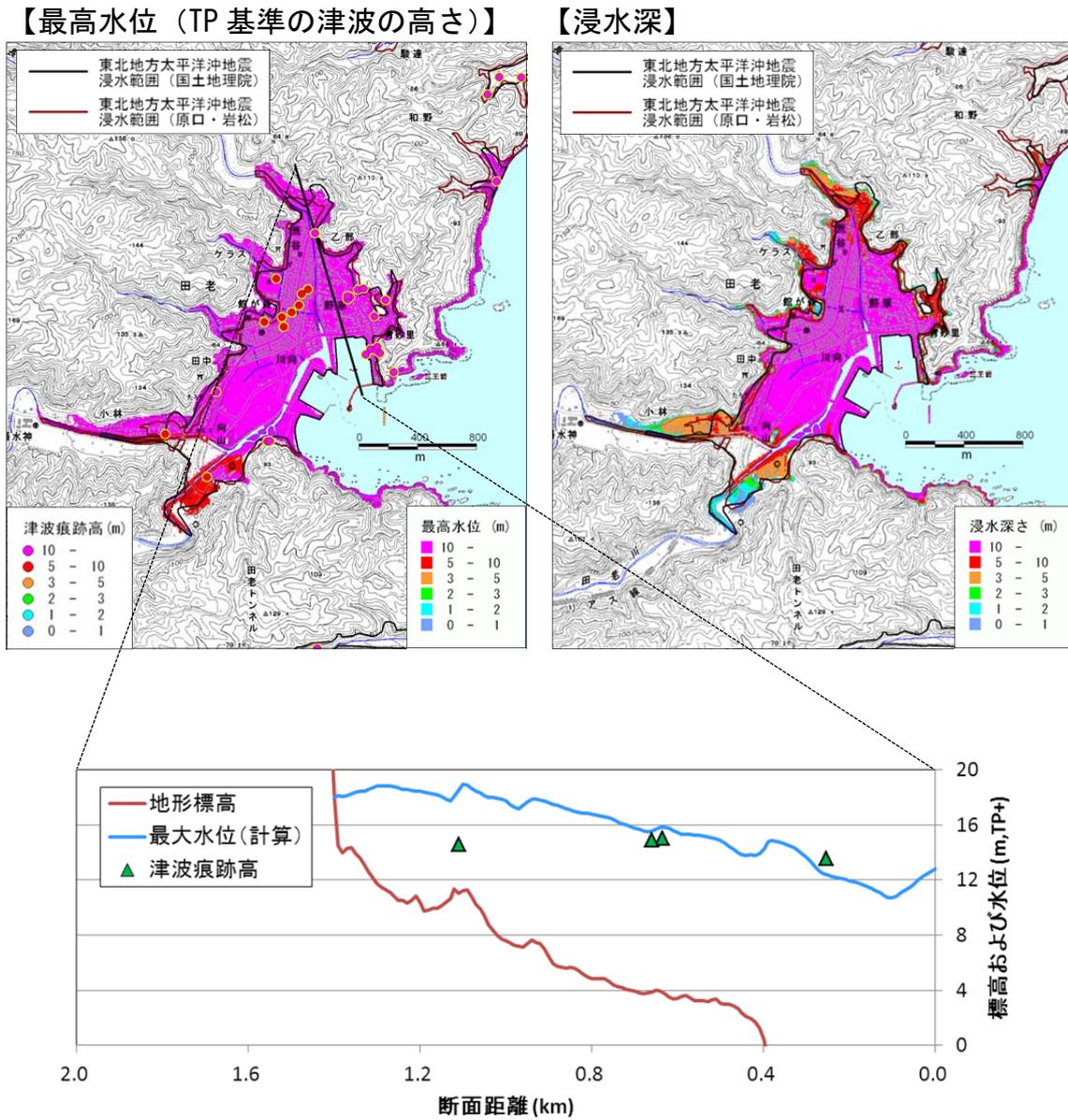


図8 浸水分布の比較（田老町、堤防なし）

岩手県 山田湾〔堤防なし〕

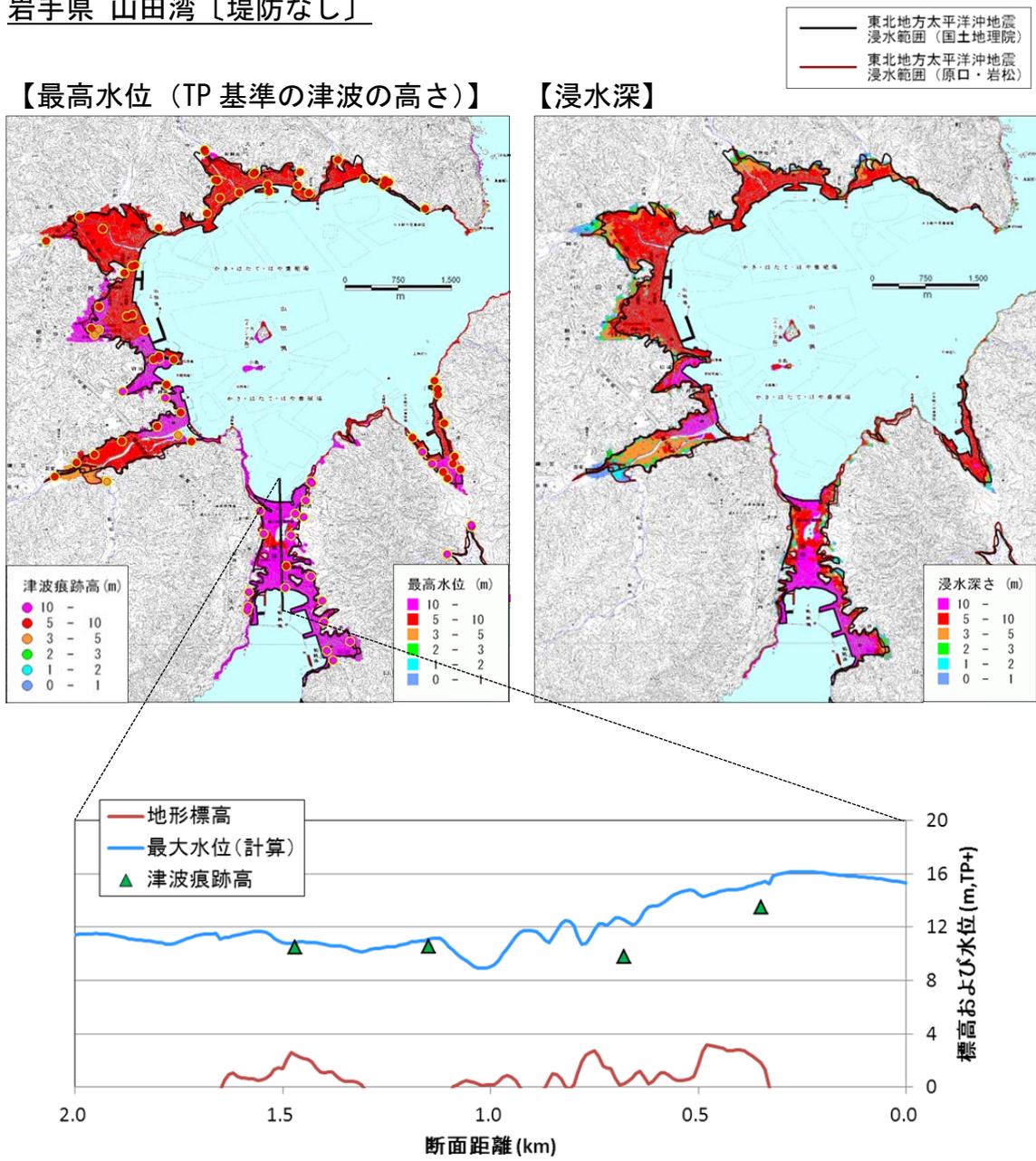
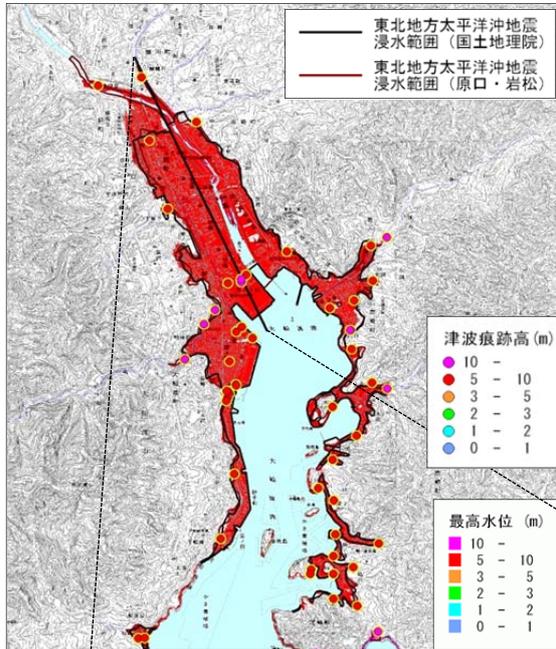


図9 浸水分布の比較 (山田湾、堤防なし)

岩手県 大船渡港〔堤防なし〕

【最高水位（TP 基準の津波の高さ）】



【浸水深】

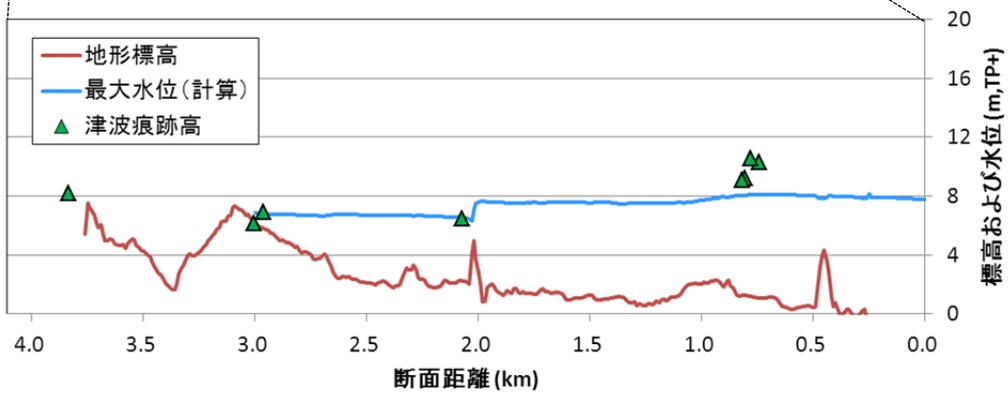
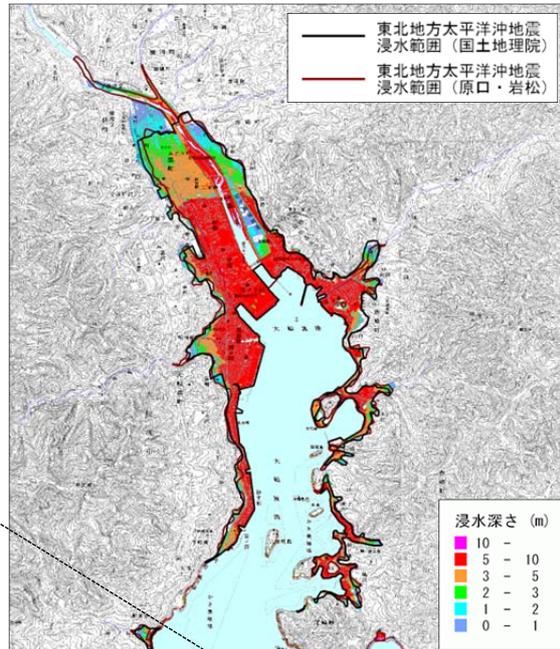


図 10 浸水分布の比較（岩手県大船渡港、堤防なし）

宮城県 気仙沼港〔堤防なし〕

【最高水位 (TP 基準の津波の高さ)】

【浸水深】

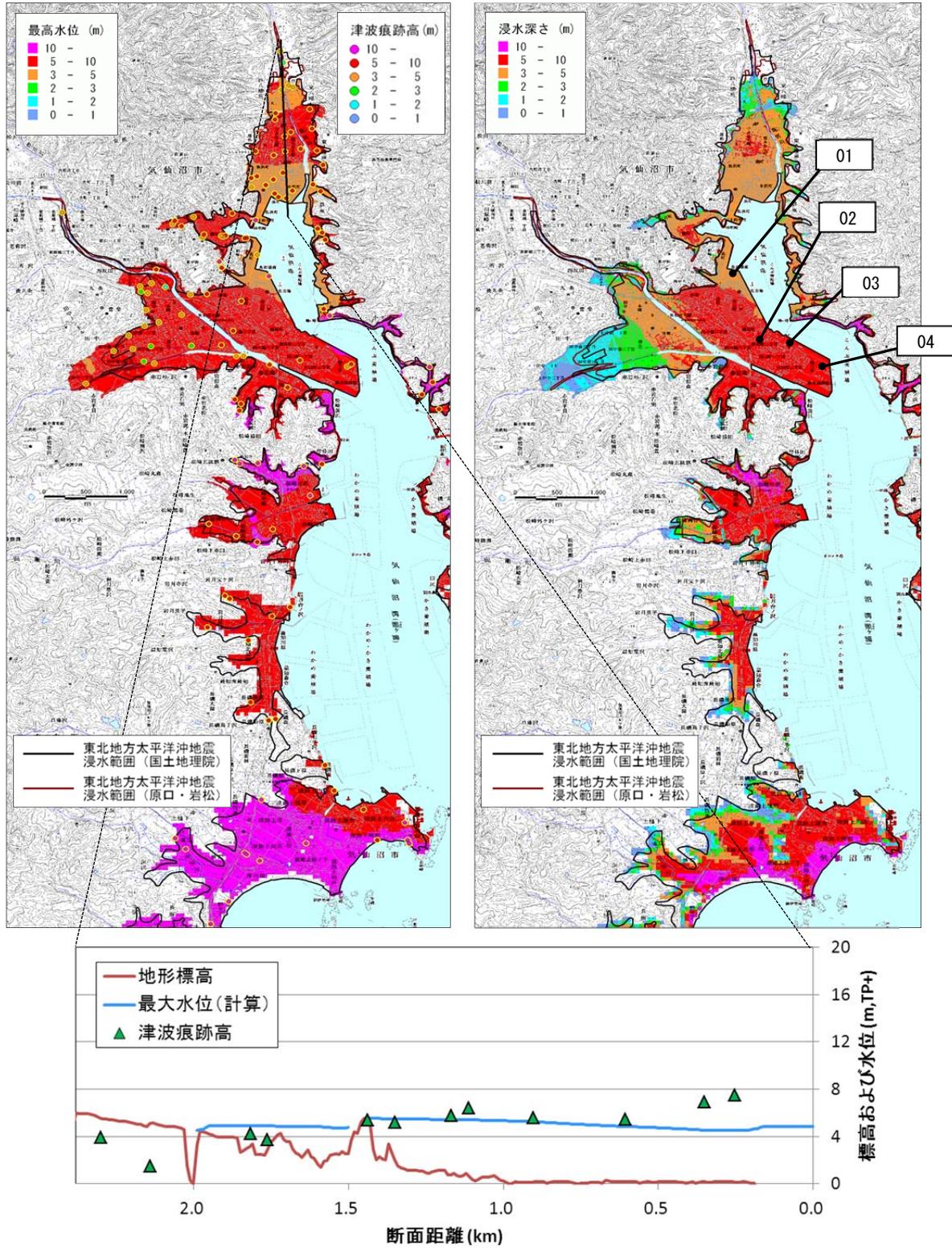
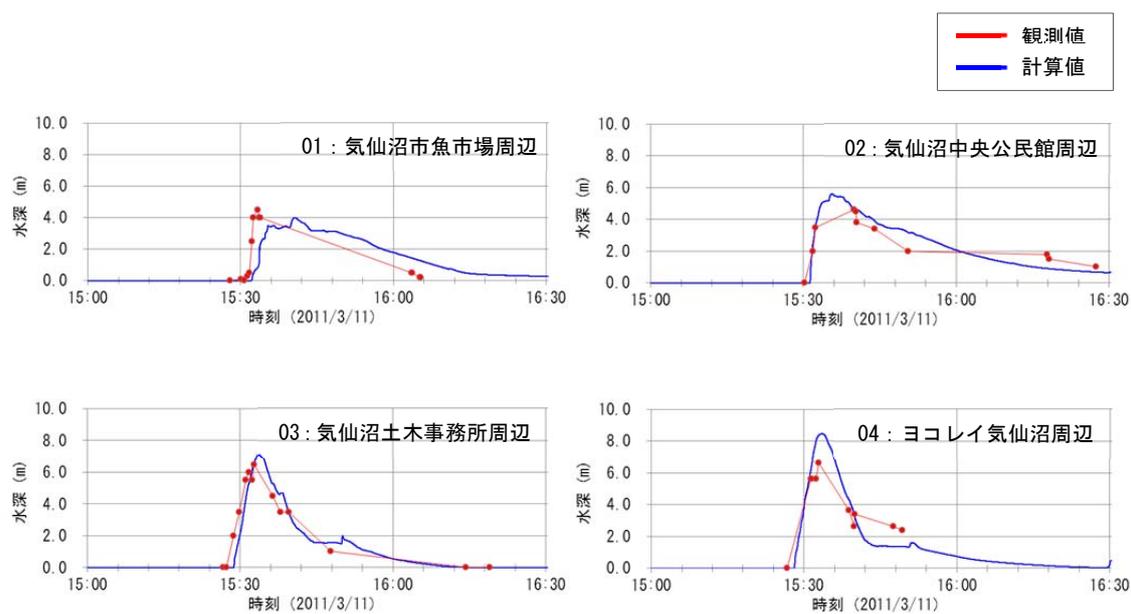


図 1 1 浸水分布の比較 (気仙沼港、堤防なし)



※観測データ（ビデオ映像からの分析）は（財）河川情報センターより提供

図 1 2 水深時系列の比較（気仙沼港、堤防なし）

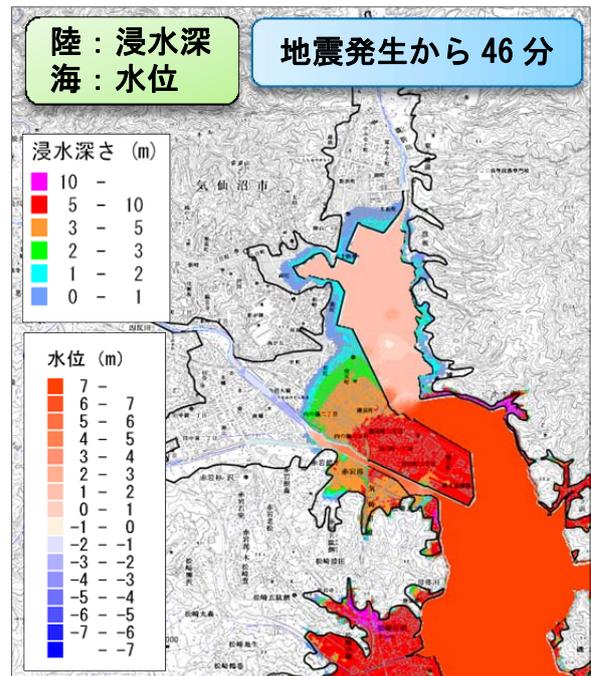
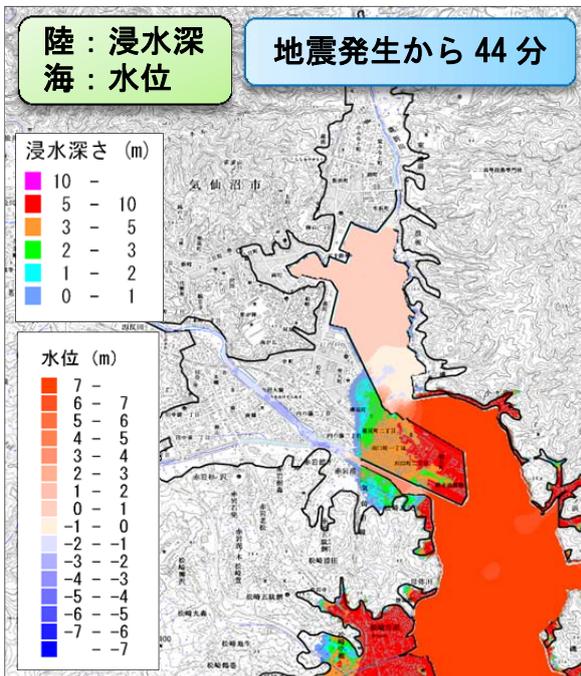
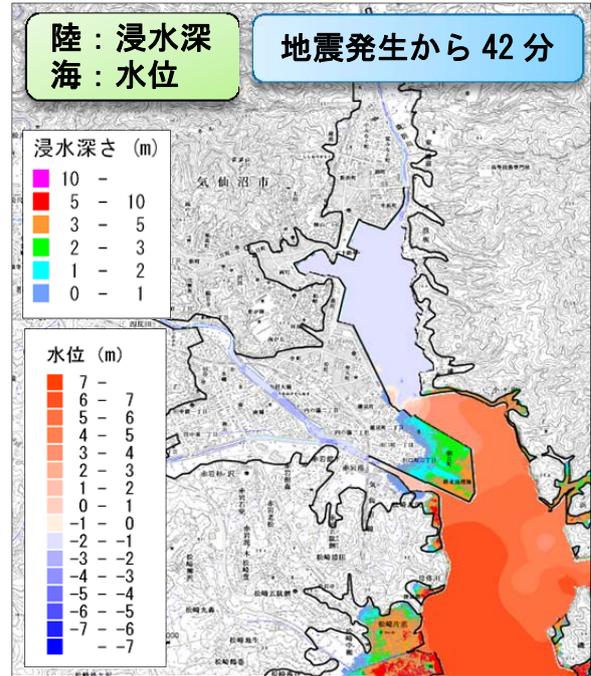
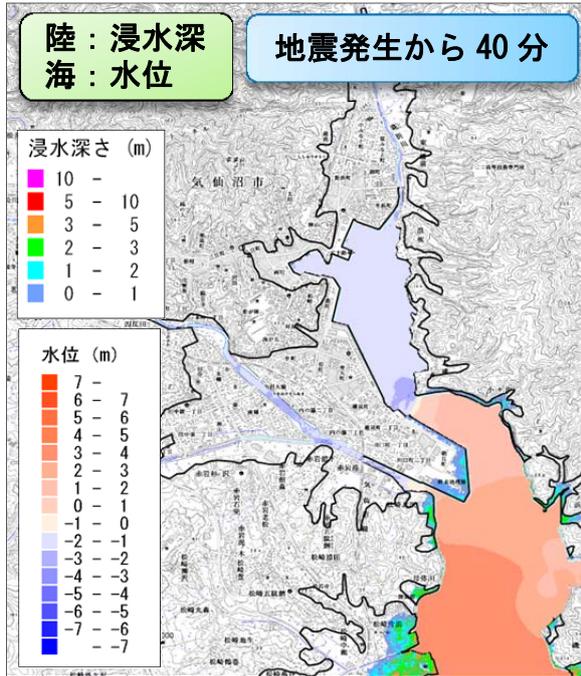


図 1 3 (1) 浸水経過図 (気仙沼港、堤防なし)
陸域は浸水深、海域は水位で示されている

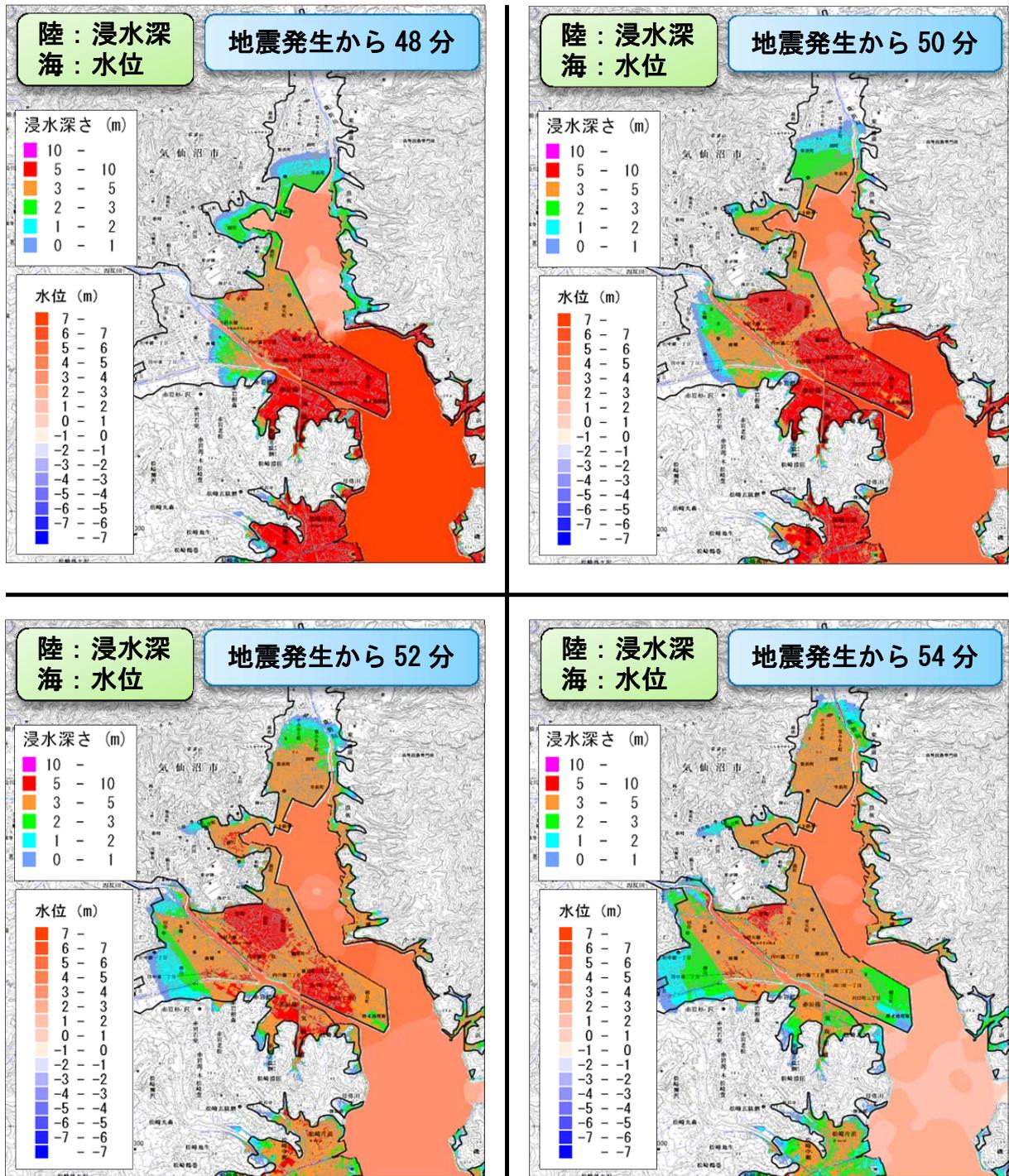


図 1 3 (2) 浸水経過図 (気仙沼港、堤防なし)
陸域は浸水深、海域は水位で示されている

宮城県 志津川湾（南三陸町）〔堤防なし〕

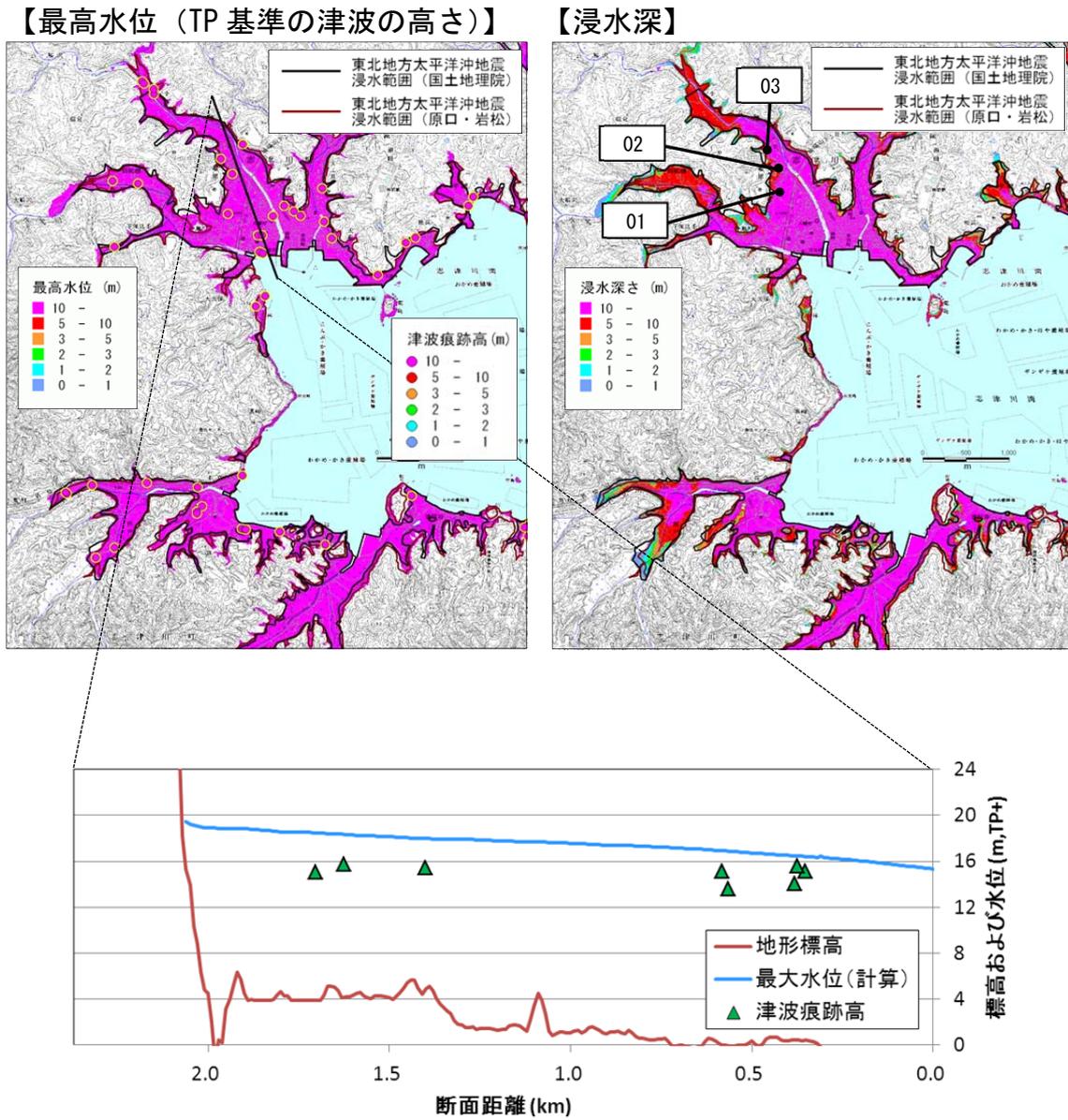
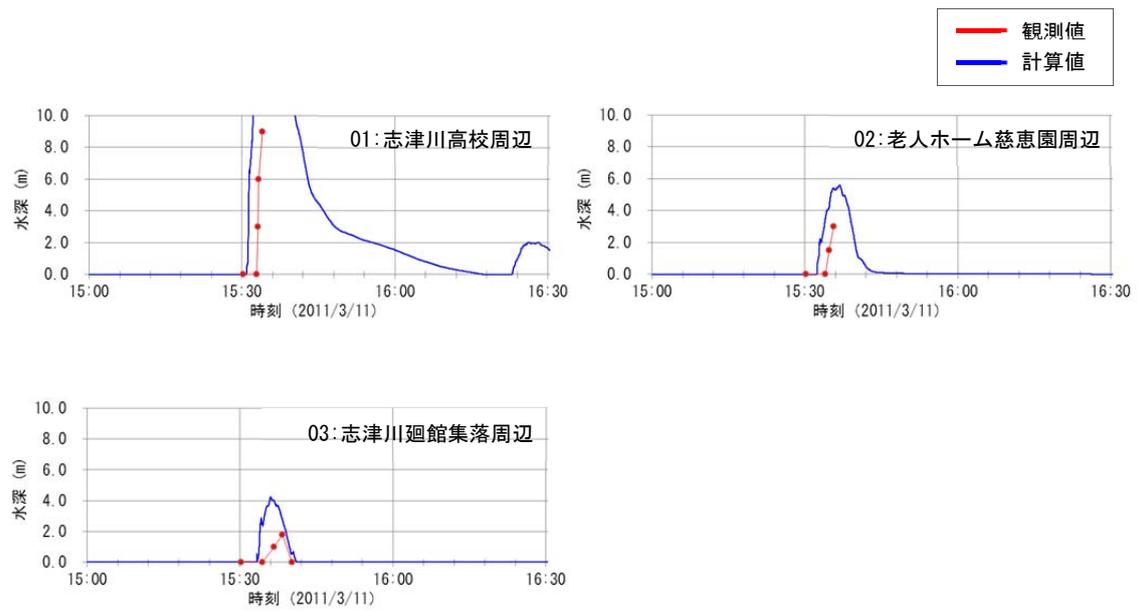


図 1 4 浸水分布の比較（宮城県志津川湾（南三陸町）、堤防なし）



※観測データ（ビデオ映像からの分析）は（財）河川情報センターより提供

図 1 5 水深時系列の比較（宮城県志津川湾（南三陸町））

宮城県 石巻港〔堤防なし〕

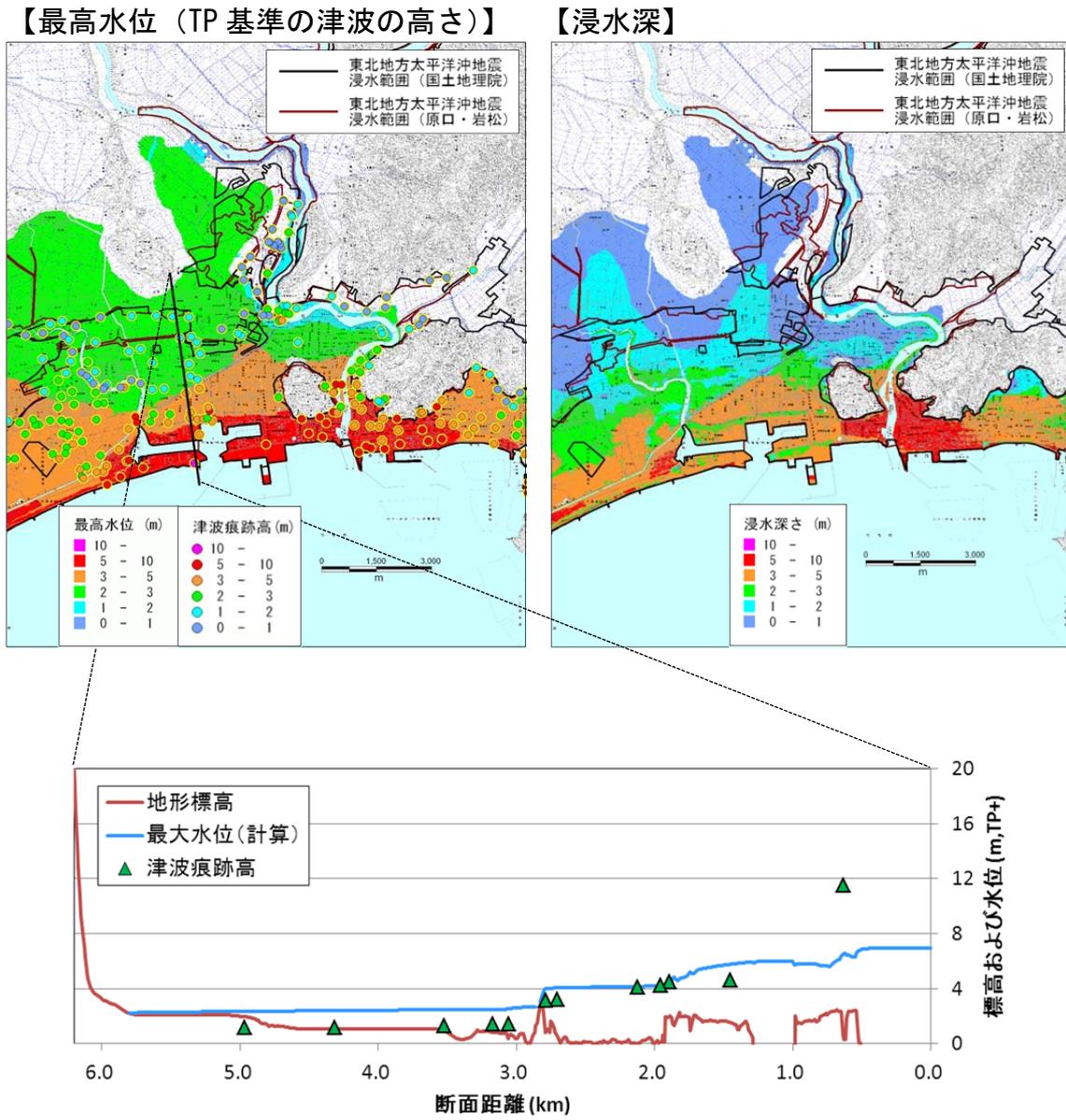


図 16 浸水分布の比較 (宮城県石巻、堤防なし)

宮城県 仙台平野〔堤防なし〕

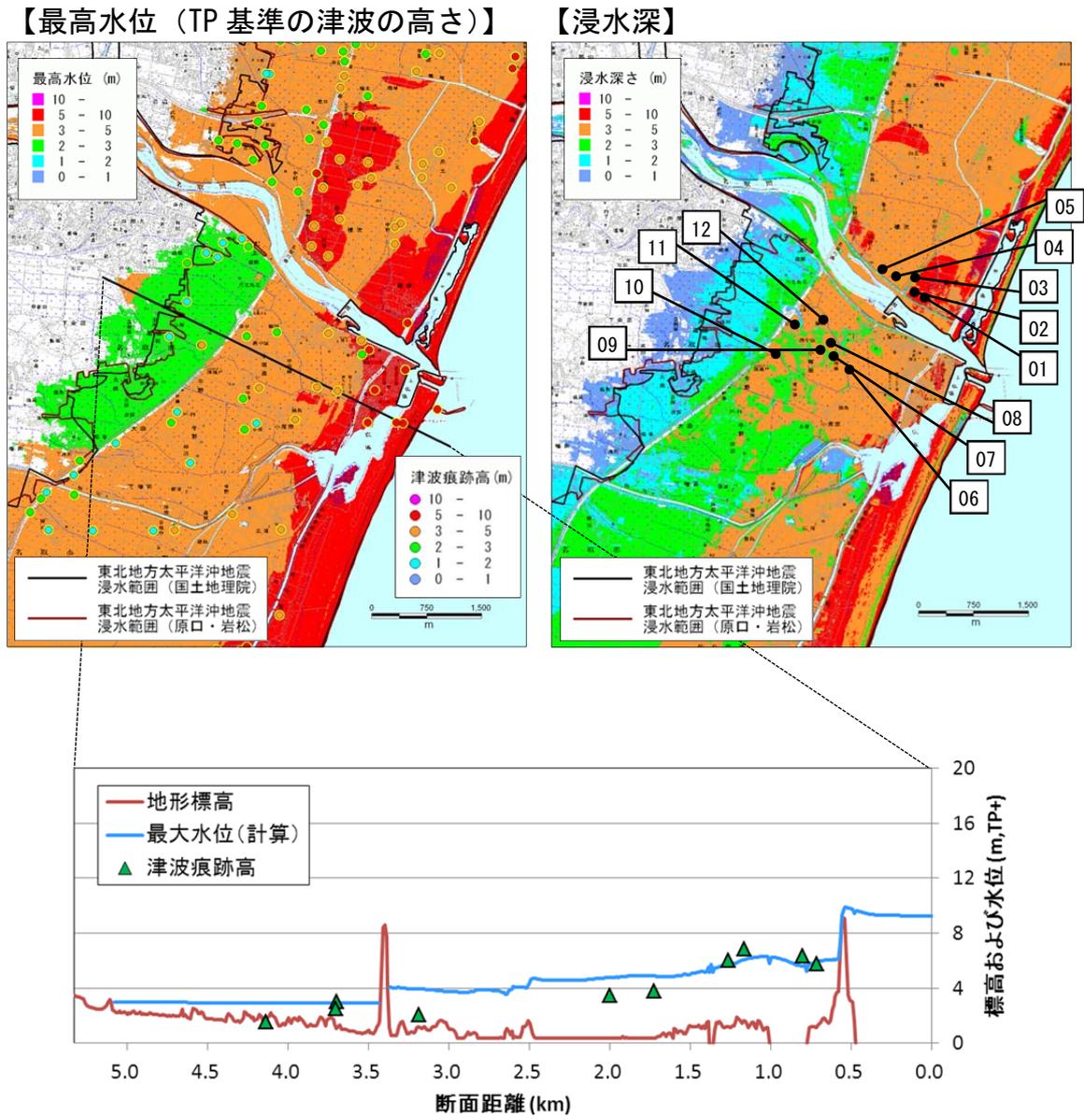


図 1 7 浸水分布の比較 (宮城県仙台平野、堤防なし)

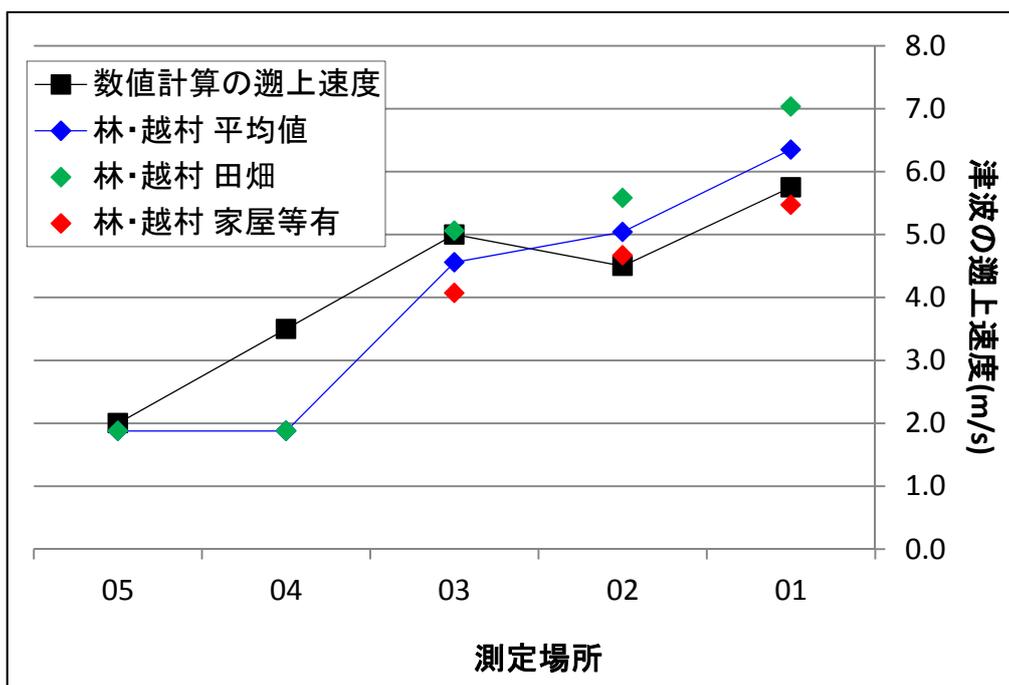


図 18 (1) ビデオ解析による遡上速度推定結果¹と数値計算結果の比較

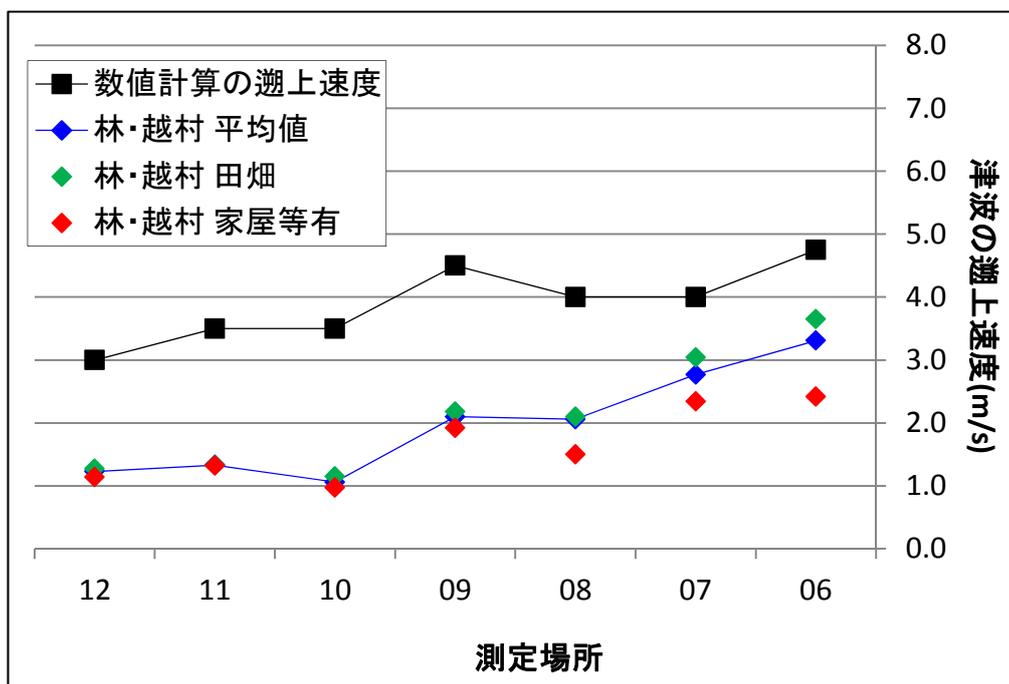


図 18 (2) ビデオ解析による遡上速度推定結果と数値計算結果の比較

¹ 林・越村 (2011) : 津波来襲時の映像解析による 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の流速推定 (暫定版)

福島県 相馬市〔堤防なし〕

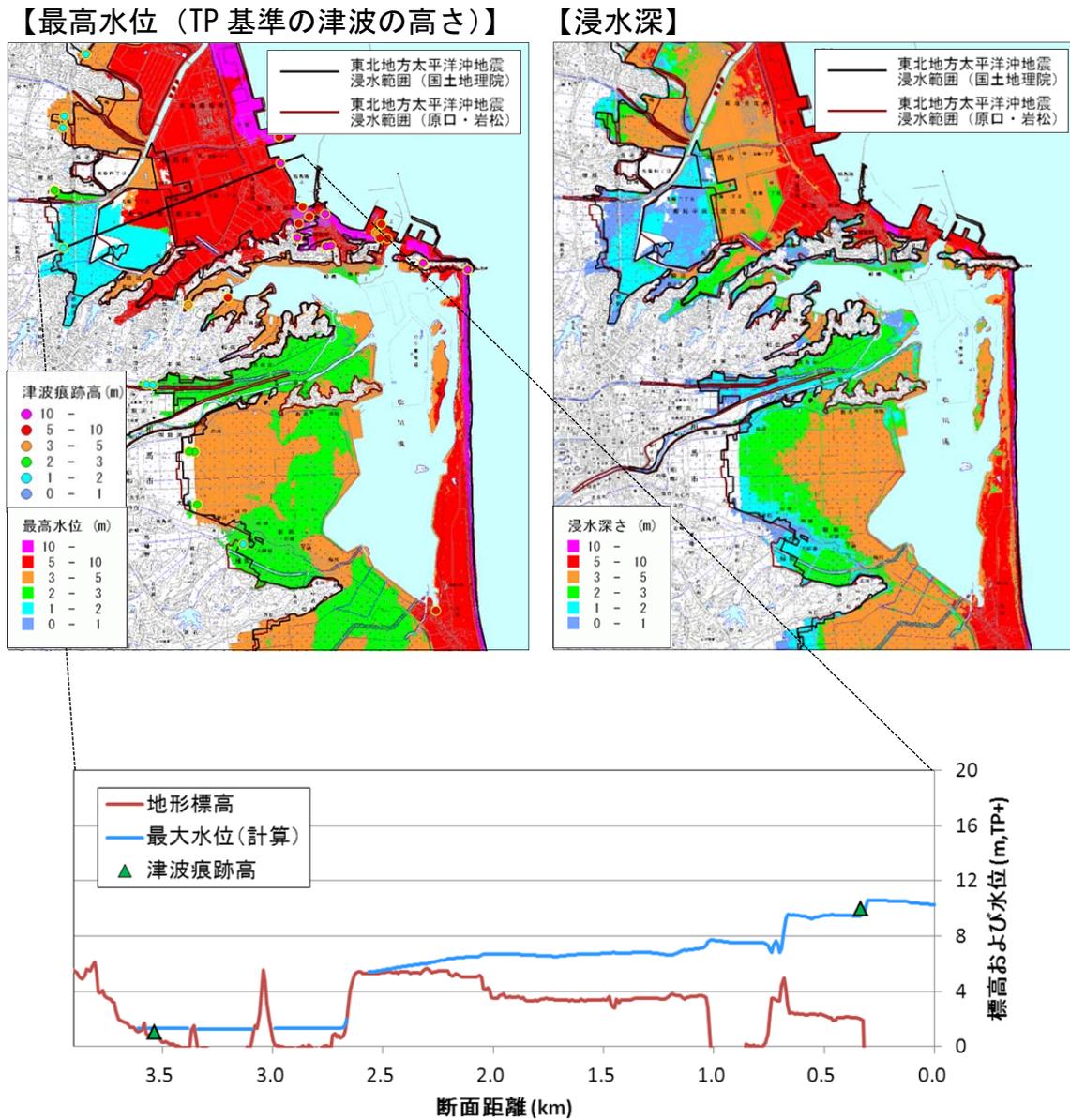


図 19 浸水分布の比較（福島県相馬市、堤防なし）

福島県小名浜港〔堤防なし〕

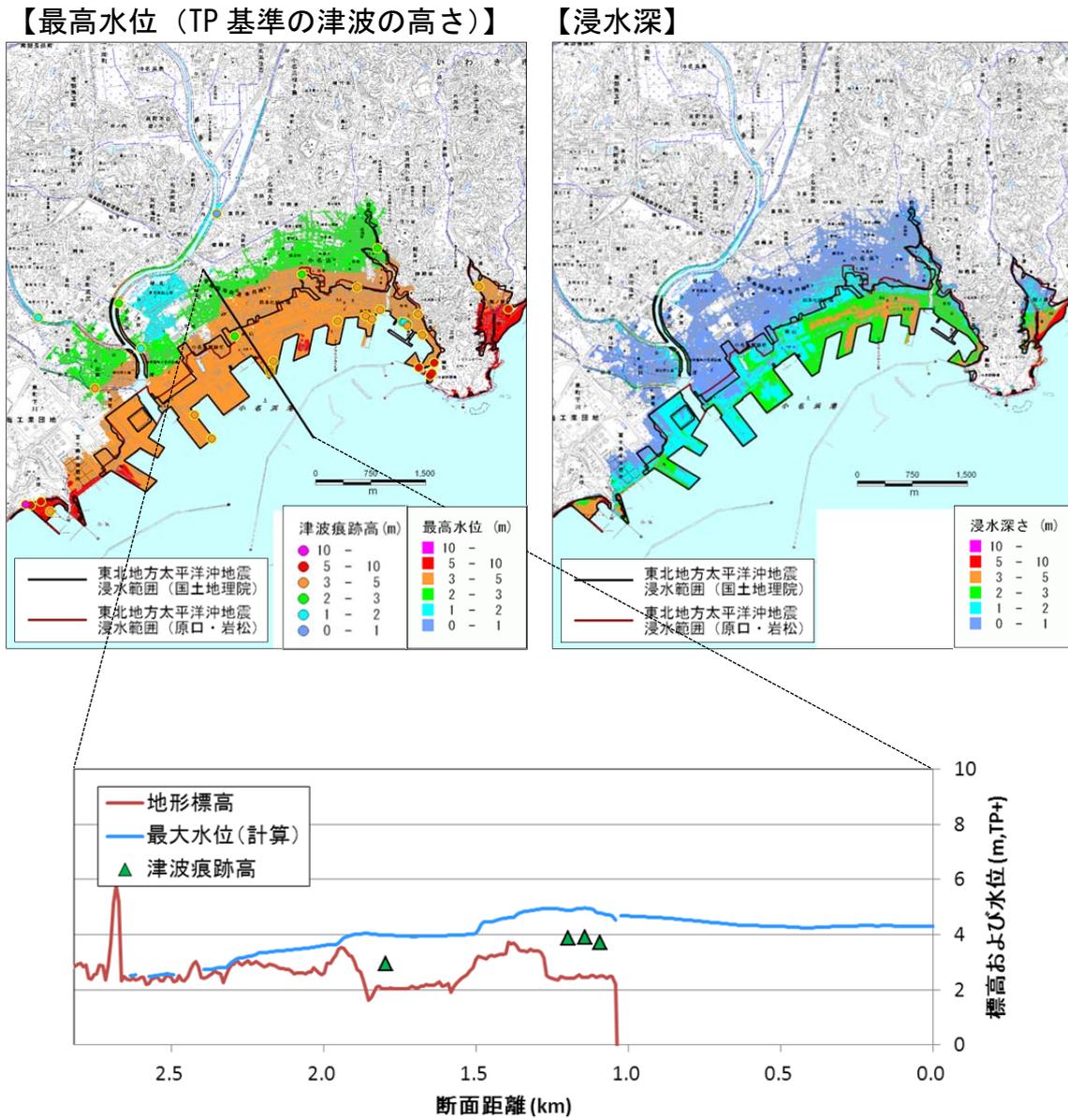


図 20 浸水分布の比較（福島県小名浜、堤防なし）

福島県小名浜港〔堤防あり〕

【最高水位（TP 基準の津波の高さ）】

【浸水深】

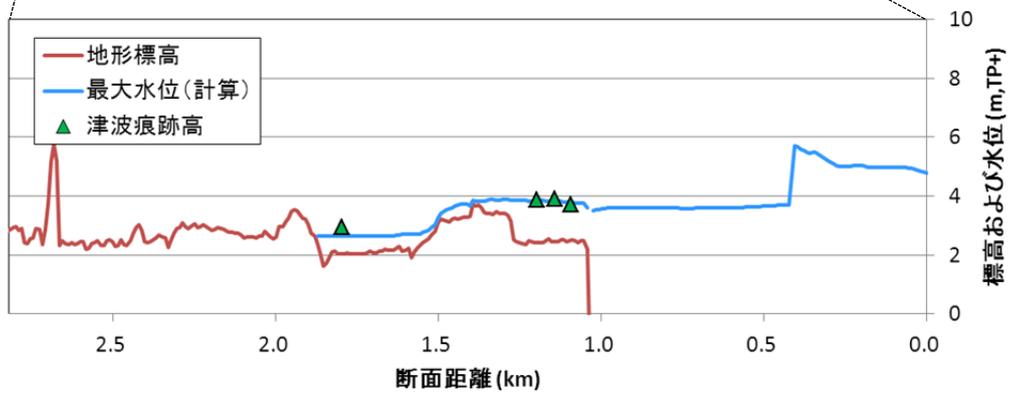
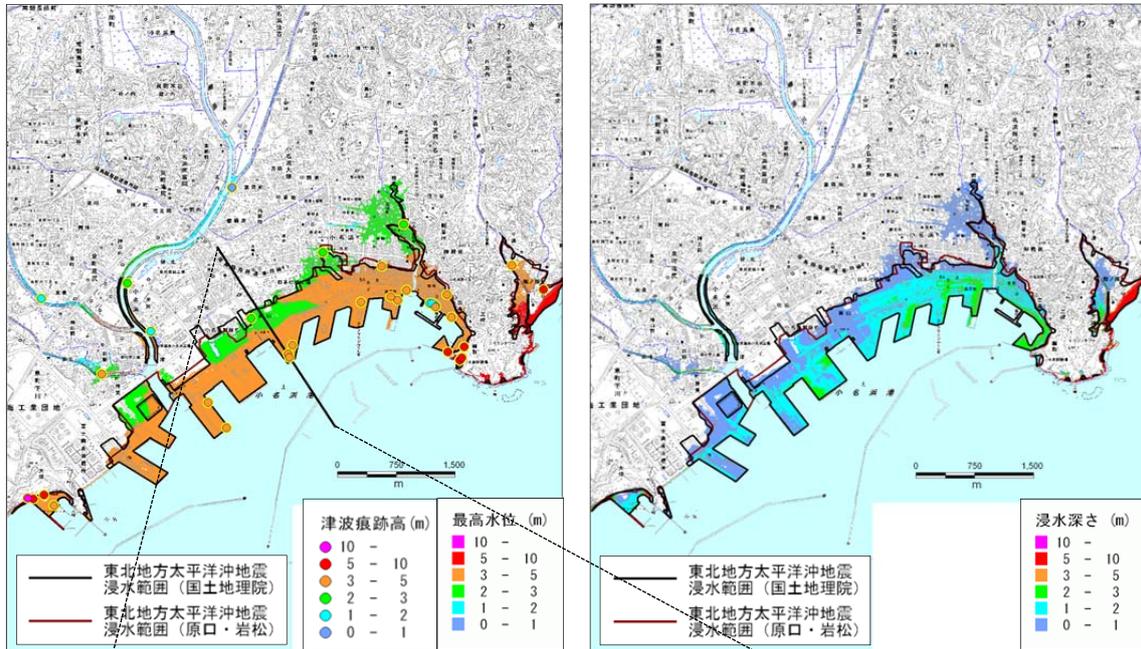


図 2 1 浸水分布の比較（福島県小名浜、堤防あり）

(参考資料) 津波断層モデルの解析に用いた資料

東北地方太平洋沖地震の津波断層モデルの解析は、沖合等の津波観測データ (18 地点)、陸域の地殻変動量データ (1328 地点)、海域の地殻変動量データ (5 地点)、及び面的に調査された津波痕跡高 (1027 地点) という多くの資料を基に、非線形最小二乗法による逆解析を実施し推定した。

この解析における津波波形等の計算は、陸域側から外洋側にメッシュサイズを大きくしていく方式で計算した。具体的には、50m、150m、450m、1,350m のメッシュで、津波襲来時の天文潮位を基準とし、その計算時間は地震発生から 3 時間とした。

解析に用いた資料を参考表 1 に示す。津波観測地点の位置を参考図 1 に、用いた地殻変動の観測点の位置を参考図 2 に示す。また、津波痕跡高データは「東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ」の調査を基に津波襲来時の天文潮位からの相対値による津波痕跡高を用いた

さらに、実際に用いるデータは海岸での津波高に相当するものとして沿岸 200m 以内のものを採用した。その概念図を参考図 3 及び参考図 4 に示す。

なお、津波痕跡高と津波計算結果との合致度を示す指標は、相田 (1978) による幾何平均 K および幾何標準偏差 κ により求めた。 K 、 κ の式は以下のとおり。

$$\log K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log K_i$$

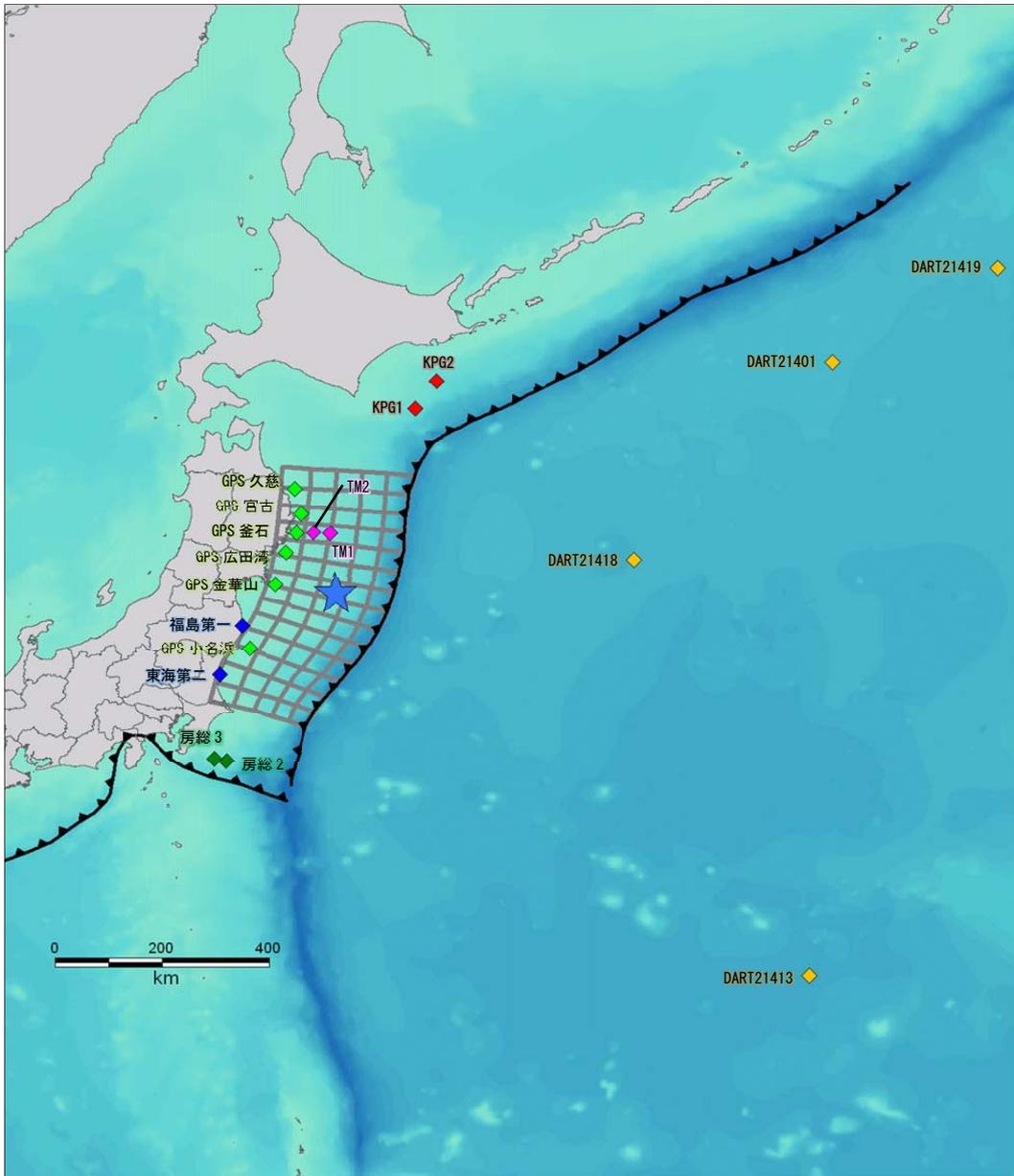
$$\log \kappa = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log K_i)^2 - (\log K)^2 \right\}^{1/2}$$

K_i : i 番目の痕跡地点における (痕跡高) / (津波高の予測値)

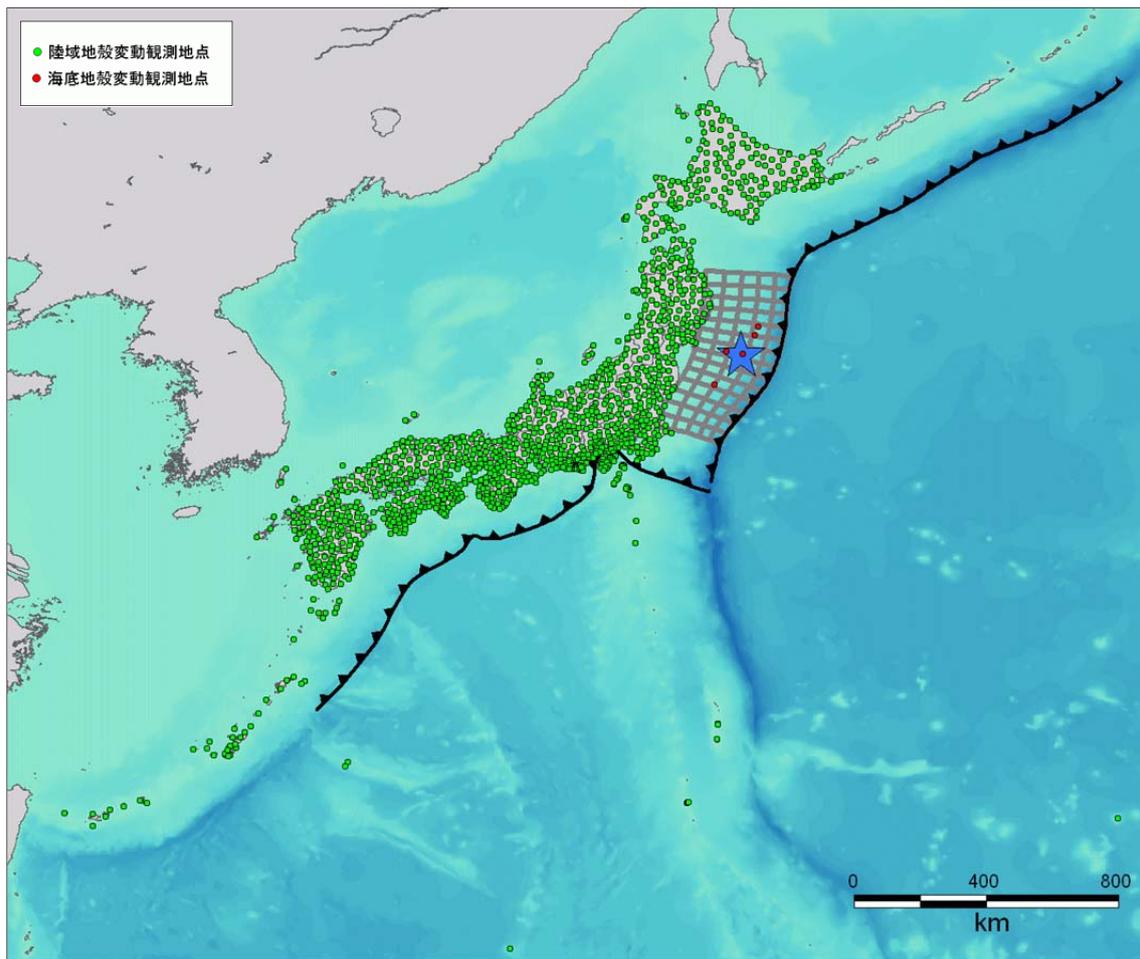
N : 痕跡地点数

参考表 1 解析に使用したターゲットデータ

| データ名 | 観測機関 | 使用 地点数 | サンプリ ング間隔 | 1 地点の データ数 |
|-------------------------|--|-----------|--------------|---------------|
| Nowphas GPS 波浪計 | 国土交通省港湾局 | 6 | 10 秒 | 540 |
| 釧路沖海底水圧計 (KPG1、KPG2) | 独立行政法人海洋研究 開発機構 (JAMSTEC) | 2 | 10 秒 | 540 |
| 釜石沖海底水圧計 (TM1、TM2) | 東京大学地震研究所 | 2 | 10 秒 | 169 |
| 房総沖海底水圧計 | 気象庁 | 2 | 10 秒 | 540 |
| 原子力発電所サイ ト波形 | 東京電力 (株)、 日本原子力発電 (株) | 2 | 10 秒 | 107 540 |
| DART | NOAA (米国海洋大気庁)、 FERHRI (ロシア極東地 域水文気象研究所) | 4 | 1 分 | 91 |
| 陸域地殻変動 | 国土地理院 | 1328 | — | 3 成分 |
| 海底地殻変動 | 海上保安庁 | 5 | — | 3 成分 |
| 津波痕跡高 (統一デ ータセット) | 東北地方太平洋沖地震 津波合同調査グループ | 1027 | — | 1 |



参考図 1 解析に使用した津波波形の観測地点の位置
 (Nowphas GPS 波浪計、釧路沖海底水圧計、釜石沖海底水圧計、
 房総沖海底水圧計、原子力発電所サイト波形、DART)



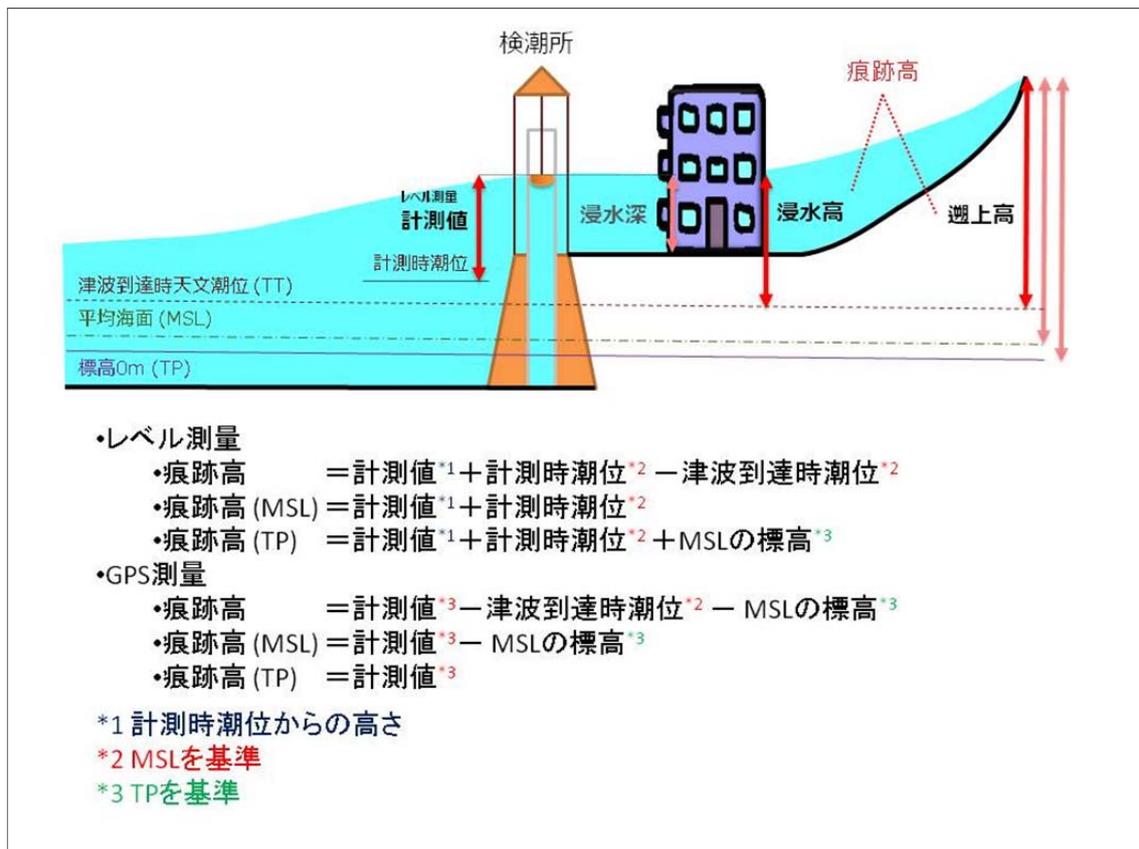
参考図 2 解析に使用した地殻変動データの観測地点の位置
(陸域および海底)

津波痕跡高データの使用方法

インバージョン解析に用いた津波痕跡高データは、「東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ」により計測された津波痕跡の調査結果をまとめたものである（リリース 20120208 版, <http://www.coastal.jp/ttjt/>）。

津波痕跡高は、以下の3種類でまとめられているが、津波のみによる高さを評価するため、津波高1（津波襲来時の天文潮位からの相対値）による痕跡高を用いた。

- 津波高1：津波襲来時の天文潮位からの相対値
- 津波高2：MSL 基準
- 津波高3：TP 基準



参考図3 解析に使用した津波痕跡高
 (東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ)

また、計測精度により信頼度A～Dの4種類によりまとめられている。ここでは津波高1のうち、信頼度A（信頼度大）による痕跡高のみを用いた。

以上の東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる公開データに対して、解析に用いるデータセットとして次のとおり整備した。

- ▶ 海岸からおおよそ 200mの範囲内の浸水高および遡上高を採用
- ▶ 地域ごとに痕跡高地点および海岸を含むような範囲枠を作成し、枠にその痕跡高を付与
- ▶ 複数の痕跡高が近接している場合には同じ枠に入れて平均値を痕跡高として整備



参考図4 解析に使用した津波痕跡高データの整備