

4. 津波遡上即時予測手法の検証

4.1 シナリオ選別アルゴリズム

本研究資料で提案する津波遡上即時予測手法は、地震が発生した際に観測される津波波形と津波シナリオバンク内に登録されている各シナリオの沖合での津波波形を比較し、観測波形をよく説明するシナリオを選別してそのシナリオの浸水深分布を予測結果として出力する、データベース検索型の予測手法である。シナリオの検索アルゴリズムには、Yamamoto *et al.* (2016)によるMulti-index法を用いる。

4.1.1 Multi-index 法によるシナリオ選別

Multi-index 法は、沖合にある津波観測網において観測された水圧変化の時系列波形と、予め計算して津波シナリオバンクに登録されている水圧変化の時系列波形を比較し、2波形の類似度を定量的に評価することにより、沖合において津波の似ているシナリオを選別する手法である。2波形の類似度合いの評価には相関係数と2種類の Variance Reduction を用い、性質の異なる3つの指標を選別条件として用いることで、津波の位置や規模が近い適切なシナリオを選別する。

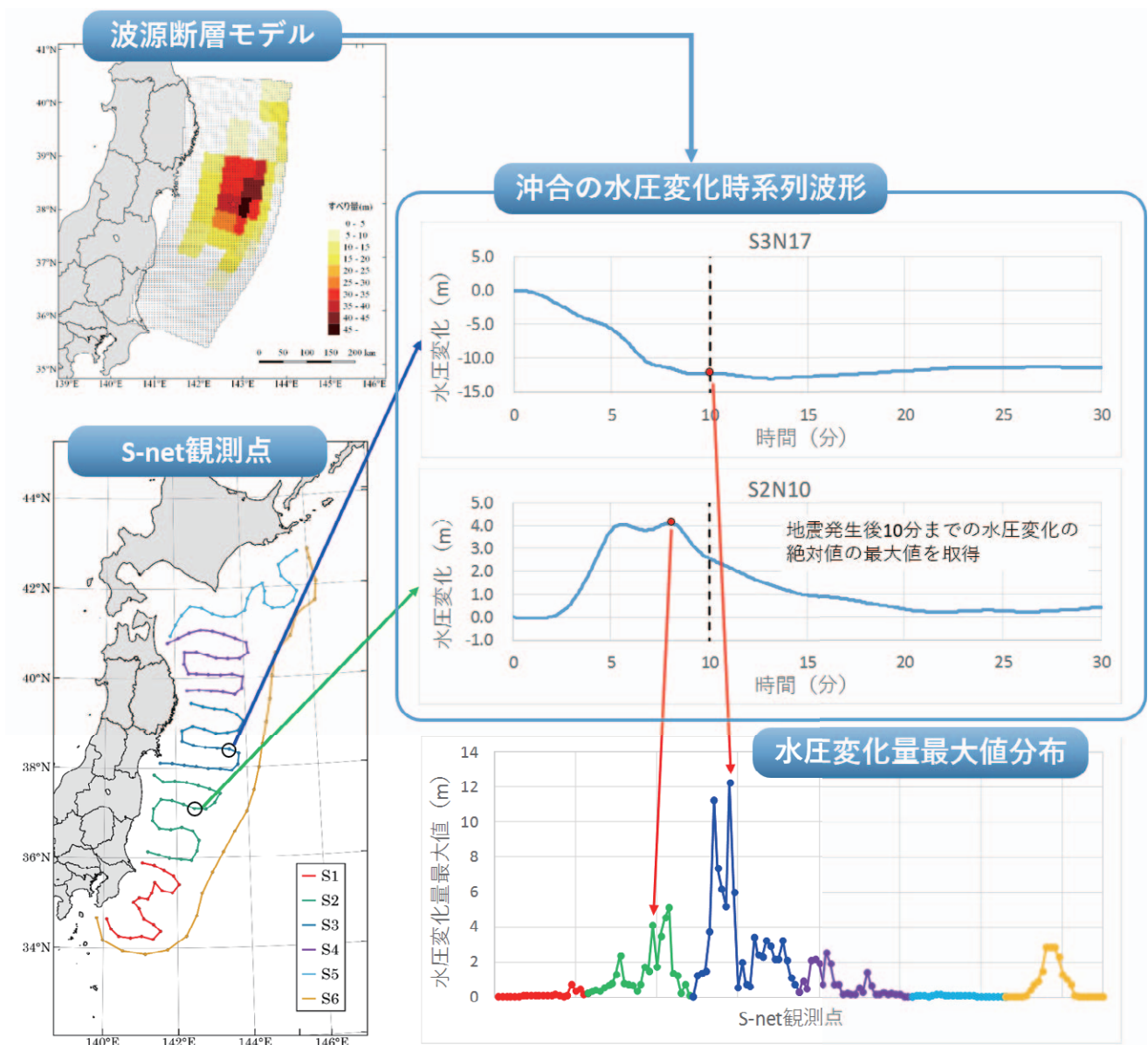


図 4.1-1 S-net 観測点における水圧変化量最大値を求める例 ($t=10$ 分)

相関係数と Variance Reduction を算出する際に、観測波形と計算波形をそのまま用いると、良く類似している波形であっても位相のずれによって指標が低く算出されてしまい、沖合で類似したシナリオが妥当に選別されない問題がある。そこで Multi-index 法では、観測波形と計算波形の絶対値の最大値を比較する。以下では、観測または計算される水圧から平均海面における水圧を減じた水圧変化の絶対値の最大値を「水圧変化量最大値」と呼び、地震発生から時間が経過した後に r_i 位置にある i 番目の観測機器によって得られる水圧変化量最大値を観測値 $O(r_i, t)$ 、予め計算によって得られる水圧変化量最大値を計算値 $C(r_i, t)$ と記す。水圧変化量最大値は地震発生から十分に時間が経過した後は一定値となり、波源域近傍では地震により生じた海底地形の永久変位の鉛直成分に概ね一致すると考えられる。水圧変化量最大値の分布を算出する例として、図 4.1-1 に地震発生から 10 分経過した後の水圧変化量最大値を求める手順を示す。

4.1.2 指標の定義

相関係数は以下のように定義される。

$$R(t) = \frac{\sum_{i=1}^n O(r_i, t) C(r_i, t)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n O^2(r_i, t)} \sqrt{\sum_{i=1}^n C^2(r_i, t)}} \quad (4-1)$$

ここで、は観測点の個数である。観測値 $O(r_i, t)$ と計算値 $C(r_i, t)$ を都度比較するため、相関係数 $R(t)$ は時間 t の関数となっている。相関係数 $R(t)$ は観測値 $O(r_i, t)$ と計算値 $C(r_i, t)$ の分布形状に強く依存するため、津波が生じている位置に感度があると期待される。ただし、2 波形の振幅が大きく異なっても分布形状が似ている場合には、相関係数 $R(t)$ は大きな値となってしまう。

Variance Reduction は、残差を基準量で規格化しその値を 1 から引いた量である。本手法では、観測値 $O(r_i, t)$ で規格化した $VRO(t)$ と計算値 $C(r_i, t)$ で規格化した $VRC(t)$ の 2 種類の Variance Reduction を用いる。それぞれ、次式で定義される。

$$VRO(t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O(r_i, t) - C(r_i, t))^2}{\sum_{i=1}^n O^2(r_i, t)} \quad (4-2)$$

$$VRC(t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O(r_i, t) - C(r_i, t))^2}{\sum_{i=1}^n C^2(r_i, t)} \quad (4-3)$$

いずれの量も、 $O(r_i, t)$ と $C(r_i, t)$ が完全に一致する場合には最大の 1 となる。 $VRO(t)$ は観測値 $O(r_i, t)$ で規格化しているため、観測値 $O(r_i, t)$ が計算値 $C(r_i, t)$ よりも小さい場合、すなわち過大評価の場合に値が小さくなる。逆に、 $VRC(t)$ は計算値 $C(r_i, t)$ で規格化しているため、計算値 $C(r_i, t)$ が観測値 $O(r_i, t)$ より小さい場合、すなわち過小評価の場合に値が小さくなる。このことから、 $VRO(t)$ は過大評価に、 $VRC(t)$ は過小評価に感度があり、2 種類の Variance Reduction を同時に用いることで、津波の規模を的確に推定できることが期待される。

以上のように異なる性質を持つ 3 つの指標を同時に選別条件として用いることで、位置と規模の両面から沖合の津波の類似度合いを評価し、適切な津波シナリオを選別可能であると期待できる。ただし、実際に津波の即時予測を行う観点では、複数個のシナリオが選別された際に、シナリオ群の順位付けが必要となることが考えられる。順位付けする指標の一例として、観測値 $O(r_i, t)$ と計算値 $C(r_i, t)$ の両方で規格化した Variance Reduction

$$VR(t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O(r_i, t) - C(r_i, t))^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n O^2(r_i, t)} \sqrt{\sum_{i=1}^n C^2(r_i, t)}} \quad (4-4)$$

が利用できる。

4.1.3 シナリオ選別の条件

Yamamoto *et al.* (2016) では、適切にシナリオを選別するための 3 つの指標の選別条件として、

$$\begin{aligned} R(t) &\geq 0.7 \\ VRO(t) &\geq 0.0 \\ VRC(t) &\geq 0.0 \end{aligned} \quad (4-5)$$

を適用してシナリオ選別の検討を行っており、この選別条件によって選別されたシナリオ群により、沿岸での津波高さを良く説明できることを示した。

(4-5) 式の選別条件を用いたシナリオ選別（以下、VR 選別と呼ぶ）の検証は 4.2 節、4.3 節に示す。

4.2 既往地震モデルの疑似観測シナリオによる検証

3.6.1 項で構築した即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域; 2.2.1.1 項)を対象とした津波シナリオバンクおよび 3.6.2 項で構築した概観予測対象地域(房総半島～根室半島の太平洋沿岸; 2.2.1.3 項)を対象とした津波シナリオバンクを用いて、既往地震を再現した疑似観測シナリオの最大相対水位分布を Multi-index 法によるシナリオ選別によって適切に予測出来るか検証を行った。

4.2.1 シナリオ選別の実施

まず、疑似観測シナリオを観測データとして、3.6 節の津波シナリオバンクを用いて 4.1.1 項の Multi-index 法によるシナリオ選別を行った。Multi-index 法によるシナリオ選別には S-net 観測点として 150 点全点を使用し、選別のタイミングは地震発生から 10 分とした。対象とする疑似観測シナリオは、表 4.2-1 に示した 10 地震の波源断層モデルであり、選別されたシナリオの最大相対水位が疑似観測シナリ

オの最大相対水位を良く予測できているかを調べた。ただし、概観予測対象地域を対象とした津波シナリオバンクは相模トラフに波源を設定していないため、関東地震は概観予測対象地域の津波シナリオバンクに対しては検証の対象外とした。

図 4.2-1 ～図 4.2-18 に、各疑似観測シナリオに対するシナリオ選別の結果として、概観予測対象地域を対象としたシナリオ選別結果と即時予測対象地域を対象としたシナリオ選別結果を示す。シナリオ選別結果の見方については、4.1 節を参照されたい。なお、各図の「g) 最大相対水位分布」のグラフに示されている赤色線(選別シナリオ平均)は、シナリオ選別された全てのシナリオの最大相対水位分布の算術平均である。最大相対水位分布の表示範囲は、概観予測対象地域を対象としたシナリオバンクでは房総半島から根室半島までの太平洋沿岸であり、即時予測対象地域を対象としたシナリオバンクでは千葉県九十九里・外房地域の沿岸である。

表 4.2-1 即時予測対象地域を対象としたシナリオバンクの検証を行った既往地震(○:実施)

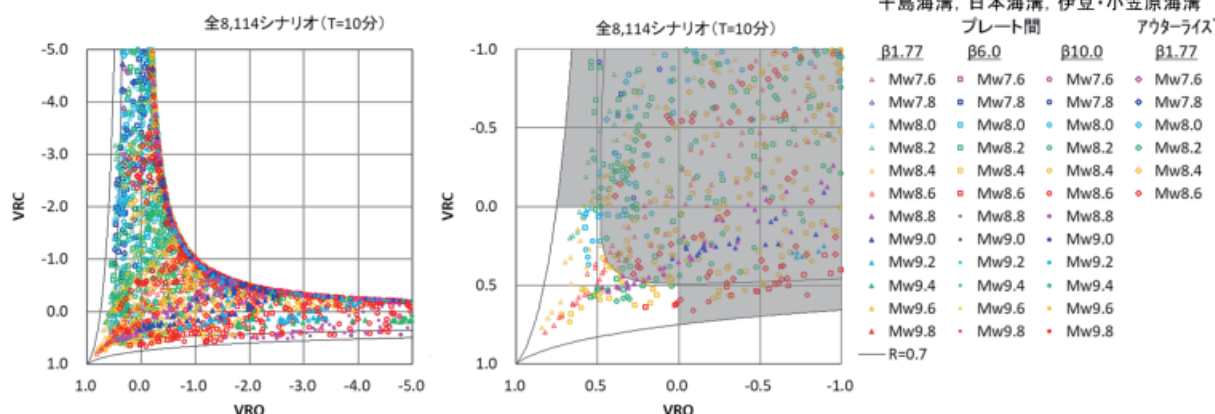
地震	断層モデル	津波シナリオバンクの対象地域	
		即時予測 対象地域 (千葉県九十九里・ 外房地域)	概観予測 対象地域 (房総半島～根室半 島の太平洋沿岸)
869 年貞観地震	菅原ほか(2011)	○	○
500 年間隔地震	中央防災会議(2005)	○	○
1677 年延宝房総沖地震	竹内ほか(2007)	○	○
1896 年明治三陸地震	Tanioka and Satake(1996)	○	○
1933 年昭和三陸地震	相田(1977)	○	○
1968 年十勝沖地震	Satake(1989)	○	○
2003 年十勝沖地震	Tanioka <i>et al.</i> (2004)	○	○
2011 年東北地方太平洋沖地震	内閣府(2012)	○	○
1703 年元禄地震	行谷ほか(2011)	○	—
1923 年大正関東地震	内閣府(2013)	○	—

4.2.1.1 869 年貞観地震

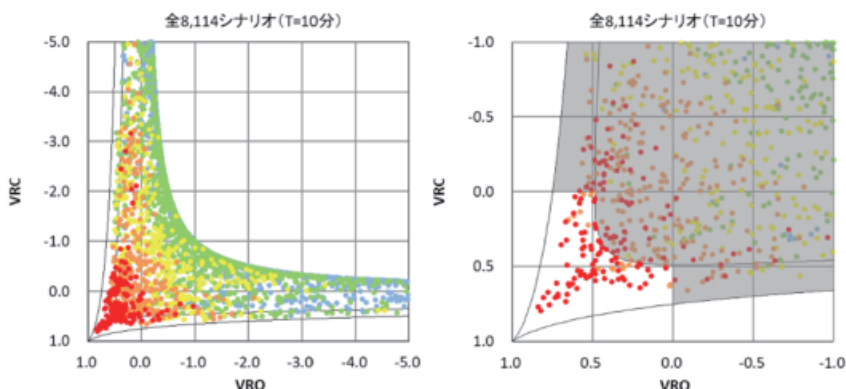
疑似観測シナリオである 869 年貞観地震 (菅原ほか, 2011) の波源断層モデルは, 図 4.2-2 a) に示すように矩形断層の一樣すべりモデルであり, $M_w 8.39$, M_0 -S 関係式の β は 2.15 である. そのため, 津波シナリオバンクの $\beta=1.77$, $M_w 8.4$ ないし $M_w 8.6$ のシナリオが比較的疑似観測シナリオと類似していると考えられ, 図 4.2-1 a) および図 4.2-2 c) に示す VRO-VRC プロットでもそのようなシナリオが多く選別

されている. 概観予測対象地域に対するシナリオ選別では, 図 4.2-1 d) に示すように選別シナリオの最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオを良く予測できており, $HVR=0.97$ である. 一方, 即時予測対象地域に対するシナリオ選別では, 図 4.2-2 f) に示すように選別シナリオの最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオと相対的な分布は類似しているものの, やや大きめの予測となっている.

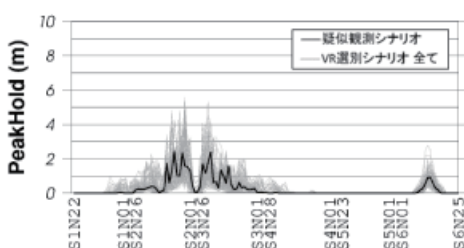
a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



b) VRO-VRC (HVR で色分け)



c) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



d) 最大相対水位分布

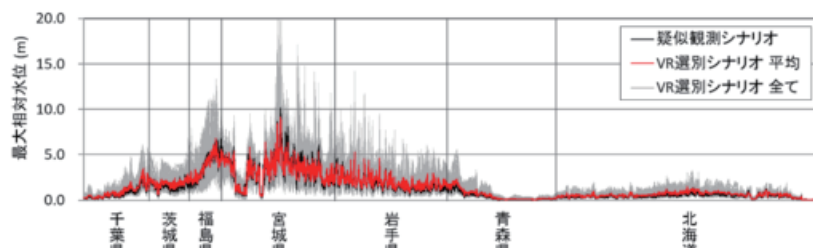
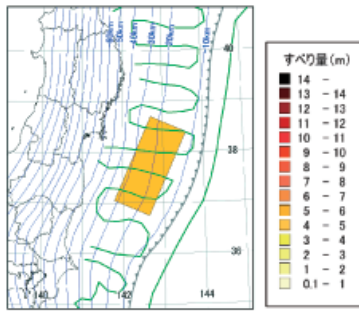
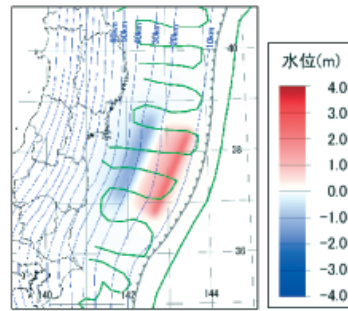


図 4.2-1 概観予測対象地域 (房総半島～根室半島の太平洋沿岸) に対するシナリオ選別結果 (t=10 分)
 疑似観測シナリオ: 869 年貞観地震, 菅原ほか (2011) モデル

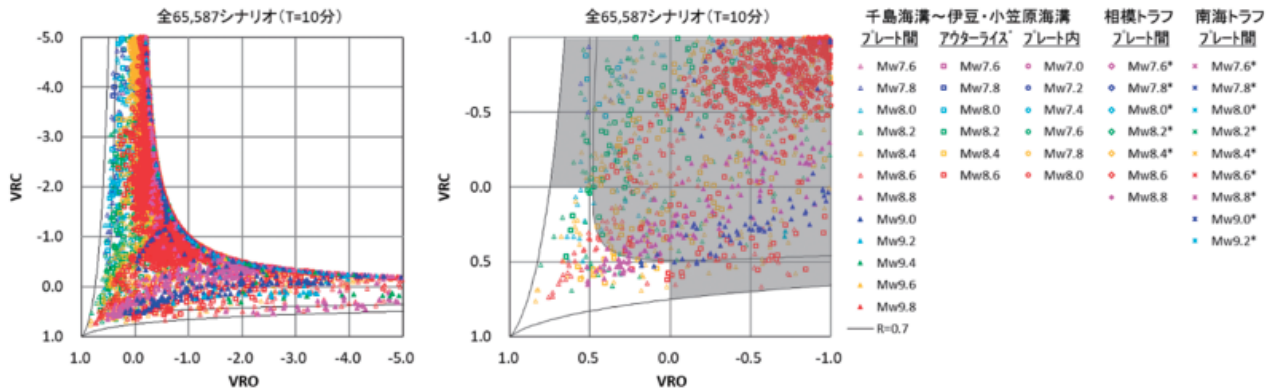
a) 断層すべり量分布



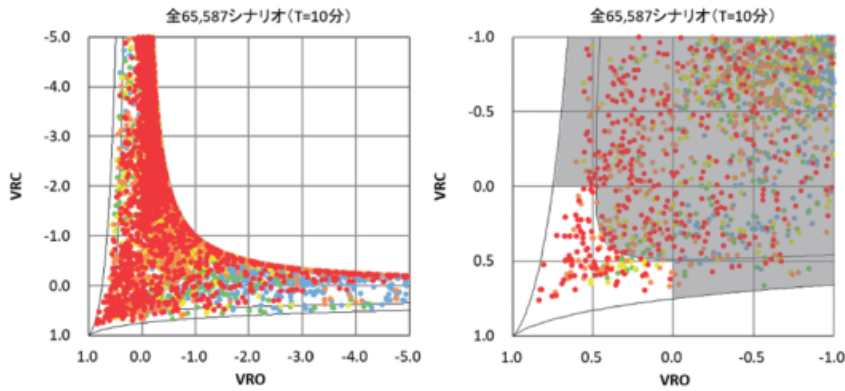
b) 初期水位分布



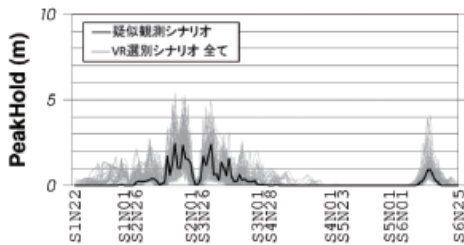
c) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



d) VRO-VRC (HVR で色分け)



e) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



f) 最大相対水位分布

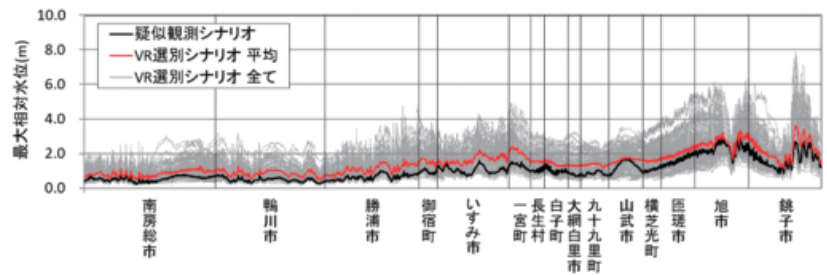


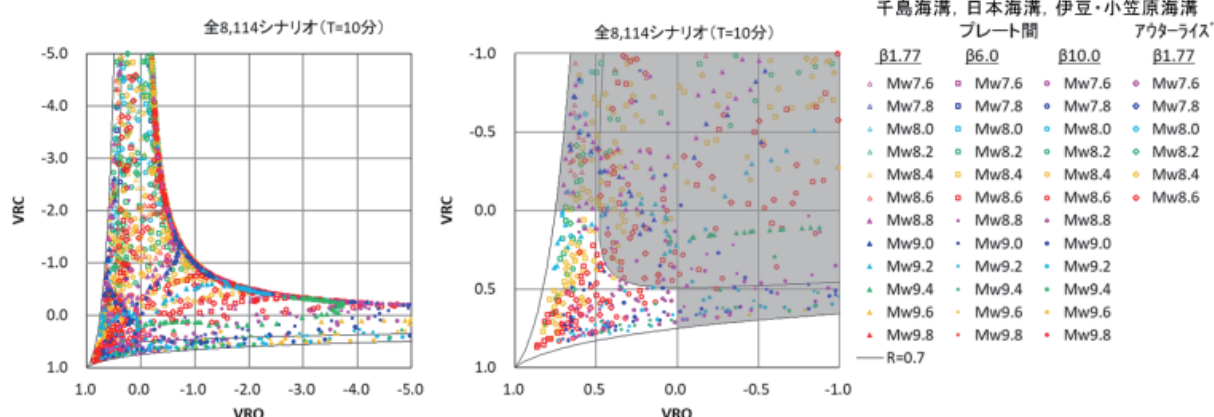
図 4.2-2 即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ: 869 年貞観地震, 菅原ほか(2011)モデル

4.2.1.2 500年間隔地震

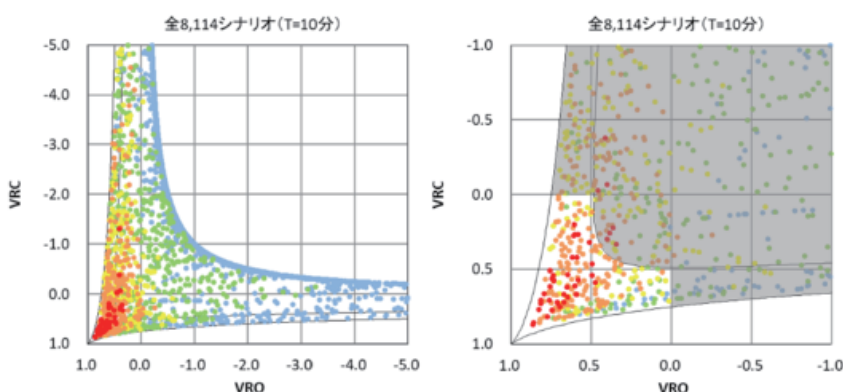
疑似観測シナリオである500年間隔地震(中央防災会議, 2005)の波源断層モデルは, 図4.2-4 a)に示すように不均質すべりモデルであり, $M_w 8.65$, M_0 -S 関係式の β は 1.90 である. 断層すべり分布としては十勝沖の海溝軸側での大きな断層すべりと根室側のやや深い領域での断層すべりが特徴的である. 断層すべり分布が複雑かつ局所的に大きなすべり域が存在するため, 図4.2-3 a)および図4.2-4 c)に示す VRO-VRC プロットでは, 幅広い M_w のプレー

ト間地震が選別されている. 概観予測対象地域に対するシナリオ選別では, 図4.2-3 d)に示すように波源の正面に位置する北海道東部沿岸では選別シナリオの最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオを良く予測できているものの, 本州沿岸や北海道胆振海岸では過大評価となっており, $HVR=0.81$ である. 即時予測対象地域に対するシナリオ選別でも, 図4.2-4 f)に示すように選別シナリオの最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオに対して過大な予測となっている.

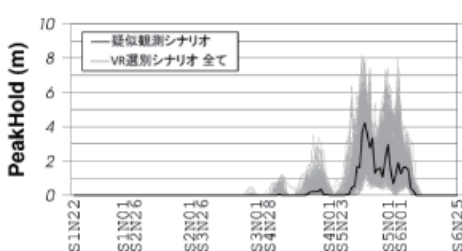
a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



b) VRO-VRC (HVR で色分け)



c) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



d) 最大相対水位分布

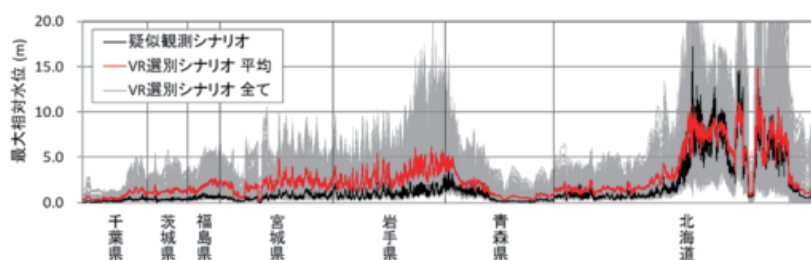
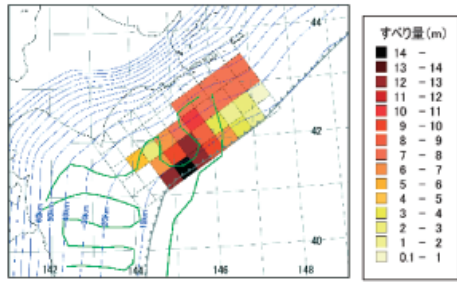
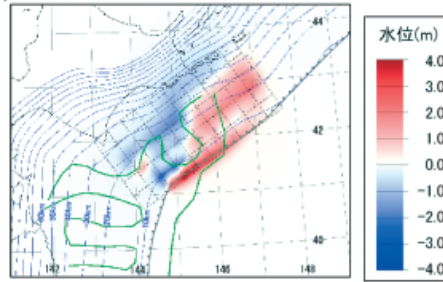


図 4.2-3 概観予測対象地域(房総半島～根室半島の太平洋沿岸)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ: 500 年間隔地震, 中央防災会議(2005)モデル

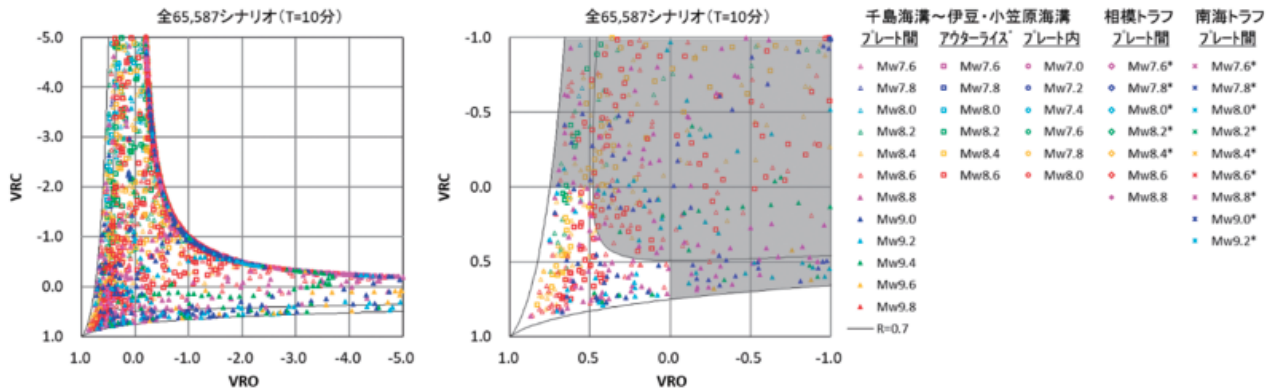
a) 断層すべり量分布



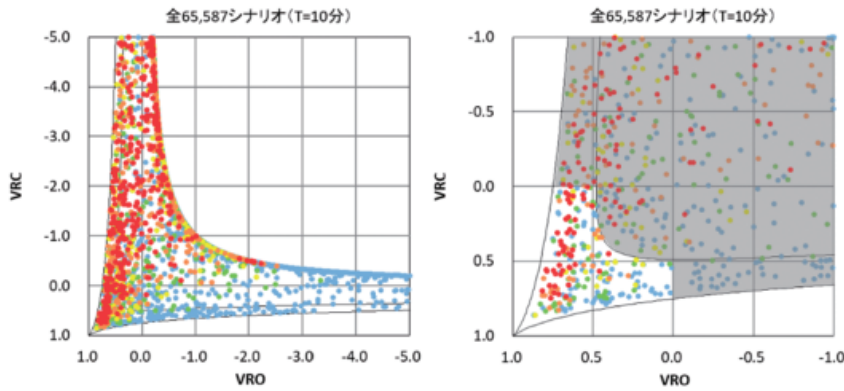
b) 初期水位分布



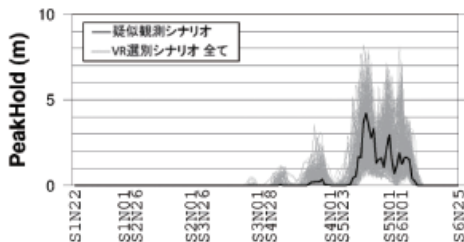
c) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



d) VRO-VRC (HVR で色分け)



e) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



f) 最大相対水位分布

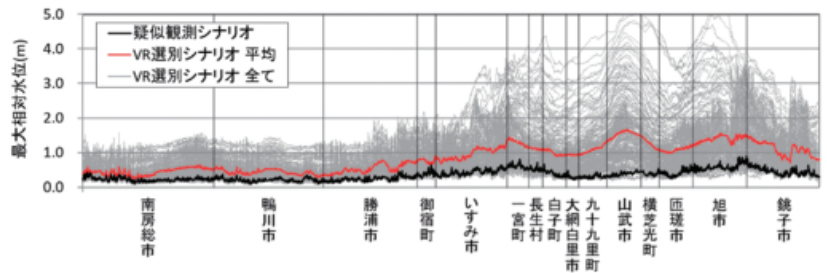


図 4.2-4 即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ：500 年間隔地震，中央防災会議(2005)モデル

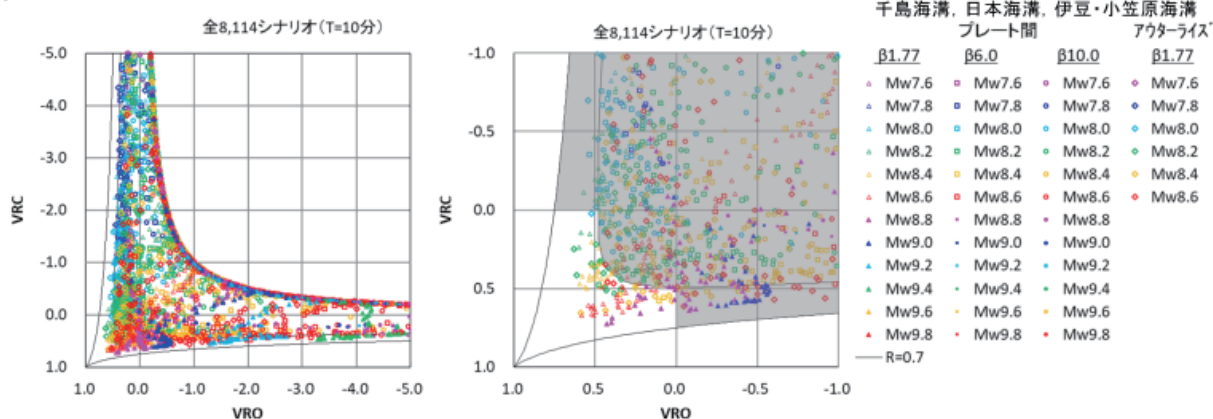
4.2.1.3 1677 年延宝房総沖地震

疑似観測シナリオである 1677 年延宝房総沖地震 (竹内ほか, 2007) の波源断層モデルは, 図 4.2-6 a) に示すように不均質すべりモデルであり, $M_w 8.41$, M_0 -S 関係式の β は 1.23 である. 房総沖の 10 m を超える断層すべりと茨城県沖の海溝軸まで達する断層すべりが特徴であり, そのために初期水位分布としては南北 2 つに分離している. 図 4.2-5 a) および図 4.2-6 c) に示す VRO-VRC プロットでは, 選別されたシナリオは多いものの, VRO・VRC とともに比較

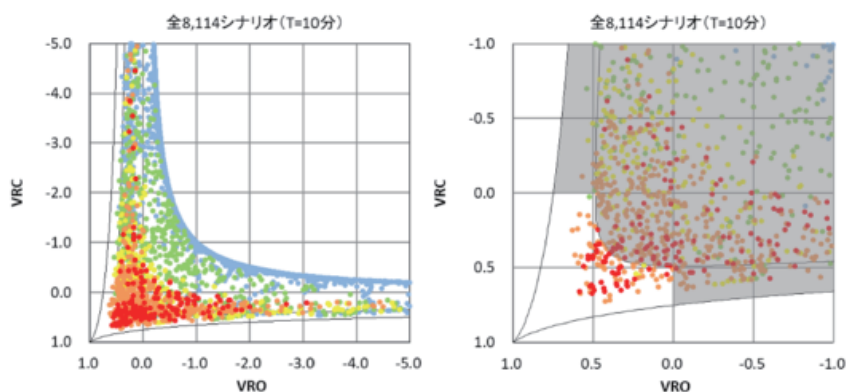
的小さく, シナリオバンクに疑似観測シナリオとよく似たシナリオが存在しないと考えられる. 概観予測対象地域に対するシナリオ選別では, 図 4.2-5 d) に示すように最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオを良く予測できているが, 波源に近い即時予測対象地域に対するシナリオ選別では, 図 4.2-6 f) に示すように選別シナリオの最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオに対して過小となっている.

なお, 4.4 節に二段階シナリオ選別の手法をこの疑似観測シナリオに適用した事例を示す.

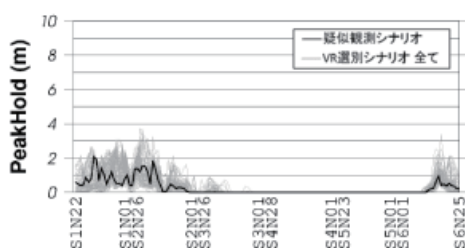
a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



b) VRO-VRC (HVR で色分け)



c) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



d) 最大相対水位分布

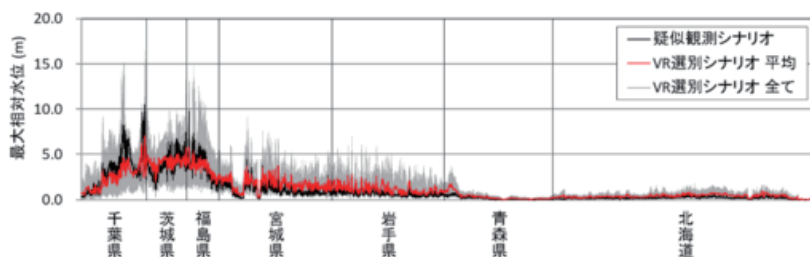
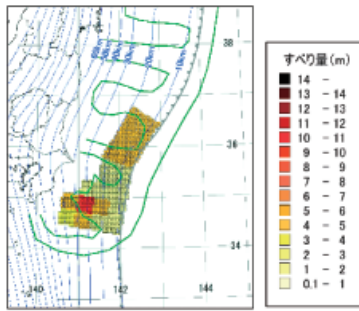
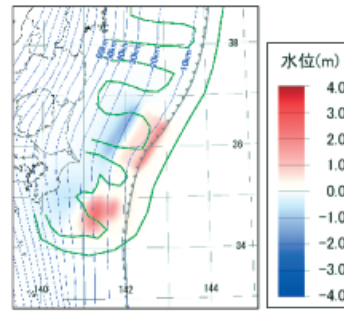


図 4.2-5 概観予測対象地域 (房総半島～根室半島の太平洋沿岸) に対するシナリオ選別結果 (t=10 分)
 疑似観測シナリオ: 1677 年延宝房総沖地震, 竹内ほか (2007) モデル

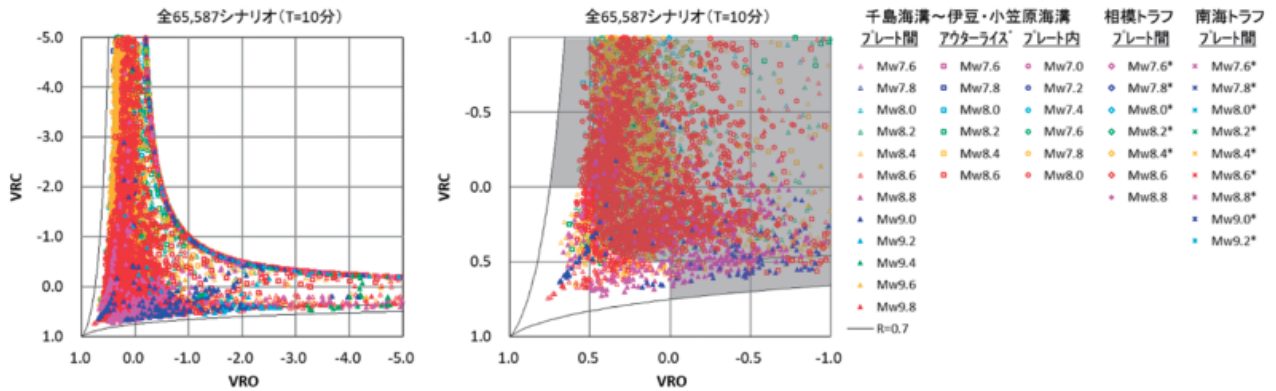
a) 断層すべり量分布



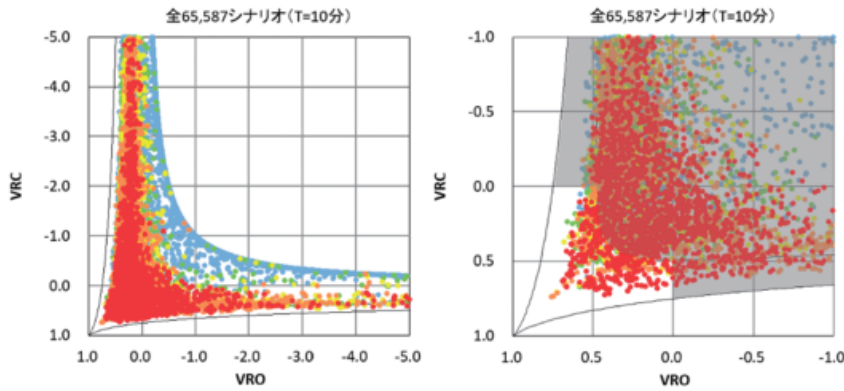
b) 初期水位分布



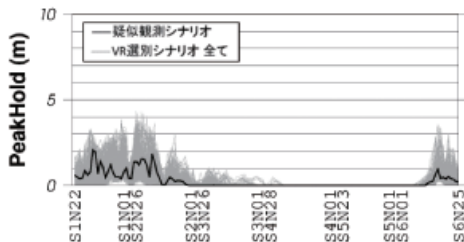
c) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



d) VRO-VRC (HVR で色分け)



e) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



f) 最大相対水位分布

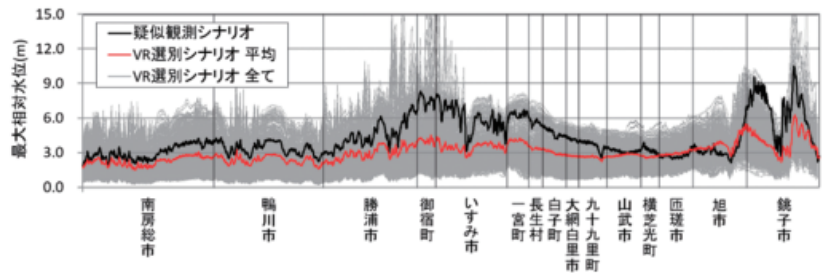


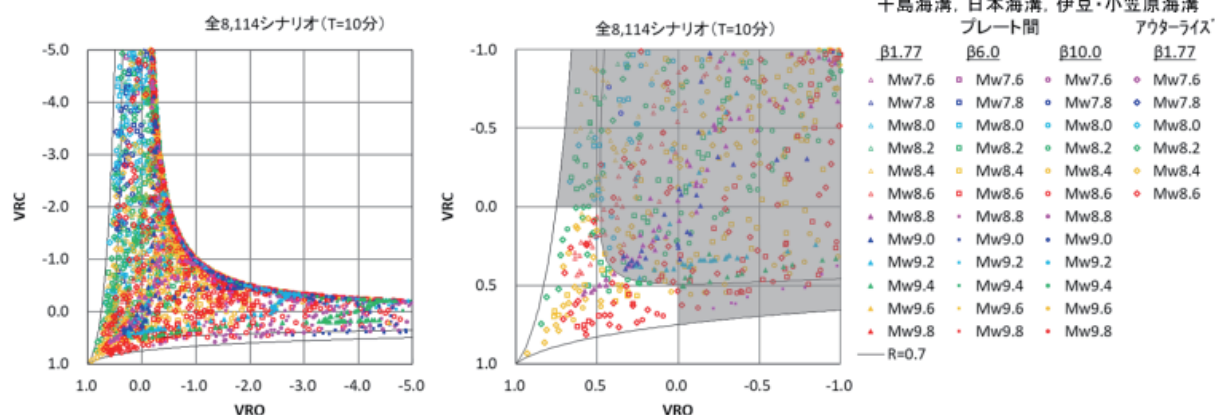
図 4.2-6 即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ: 1677 年延宝房総沖地震, 竹内ほか(2007)モデル

4.2.1.4 1896 年明治三陸地震

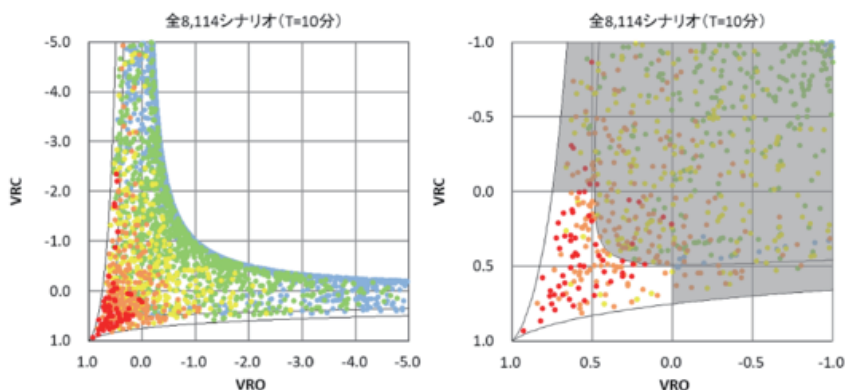
疑似観測シナリオである 1896 年明治三陸地震 (Tanioka and Satake, 1996) の波源断層モデルは、図 4.2-8 a) に示すように矩形断層の一樣すべりモデルであり、 $M_w 8.25$ 、 M_0 - S 関係式の β は 2.78 である。海溝軸付近に位置する波源断層モデルであるが、断層の傾斜角が 20 度と大きいため、津波シナリオバンクの $\beta=1.77$ 、 $M_w 8.4 \sim 8.8$ のプレート間地震のシナリオが多く選別されると共に、アウターライズの

地震も多数選別されている。概観予測対象地域に対するシナリオ選別では、図 4.2-7 d) に示すように選別シナリオの最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオを良く予測できており、 $HVR=0.93$ である。一方、即時予測対象地域に対するシナリオ選別では、図 4.2-8 f) に示すように選別シナリオの最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオと相対的な分布は類似しているものの、2 倍程度の過大な予測となっている。

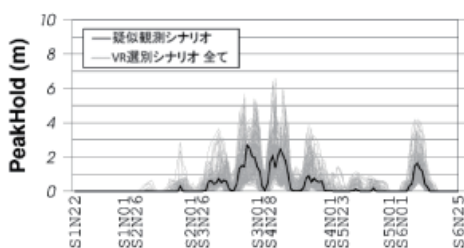
a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



b) VRO-VRC (HVR で色分け)



c) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



d) 最大相対水位分布

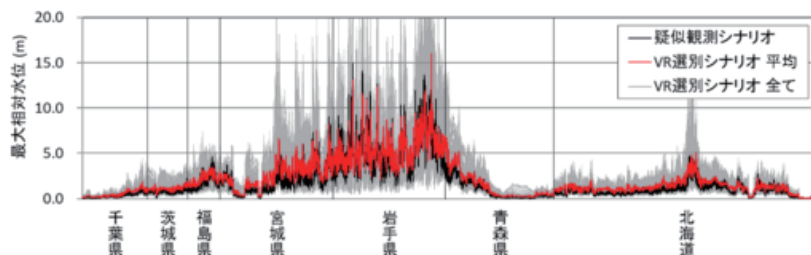
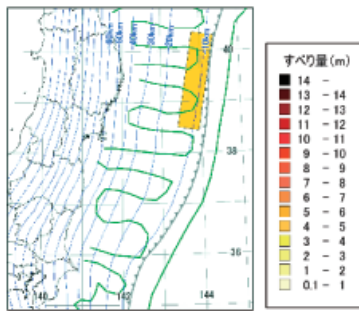
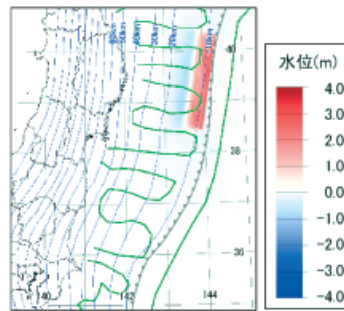


図 4.2-7 概観予測対象地域(房総半島～根室半島の太平洋沿岸)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
 疑似観測シナリオ: 1896 年明治三陸地震, Tanioka and Satake(1996)モデル

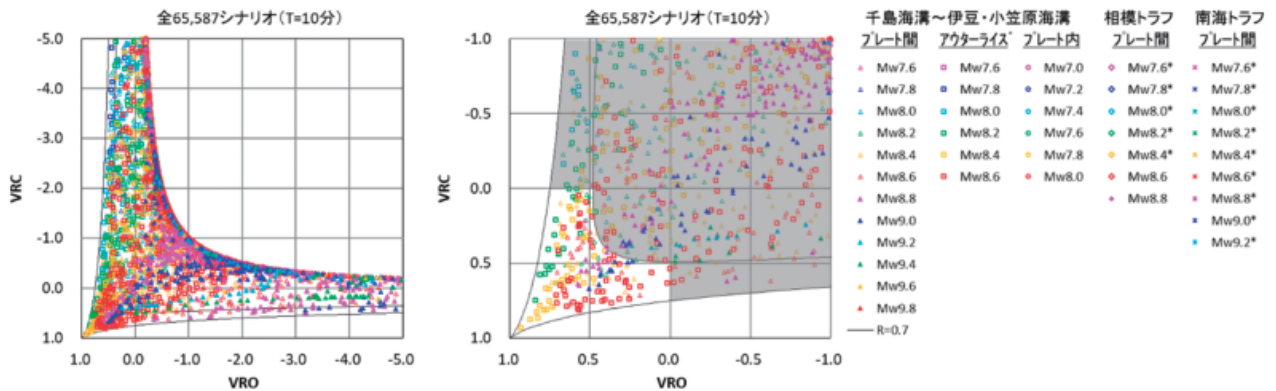
a) 断層すべり量分布



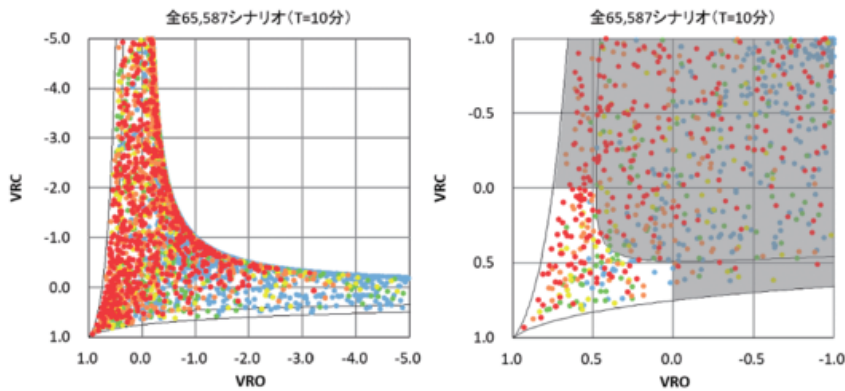
b) 初期水位分布



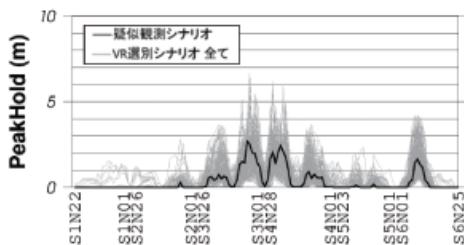
c) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



d) VRO-VRC (HVR で色分け)



e) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



f) 最大相対水位分布

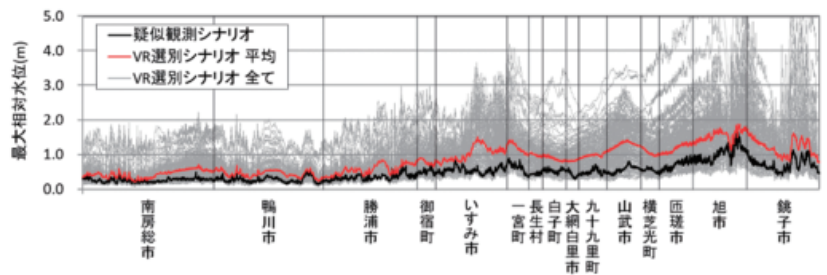


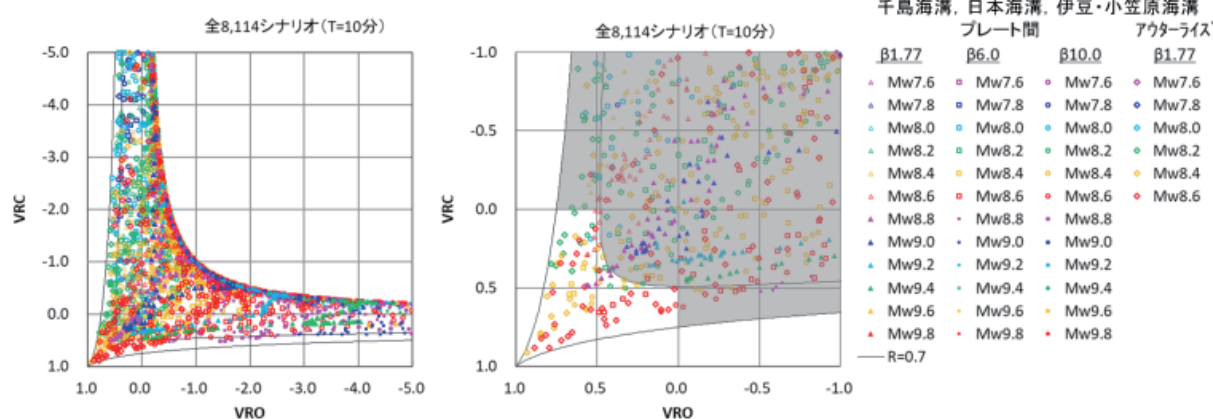
図 4.2-8 即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ：1896 年明治三陸地震，Tanioka and Satake (1996) モデル

4.2.1.5 1933 年昭和三陸地震

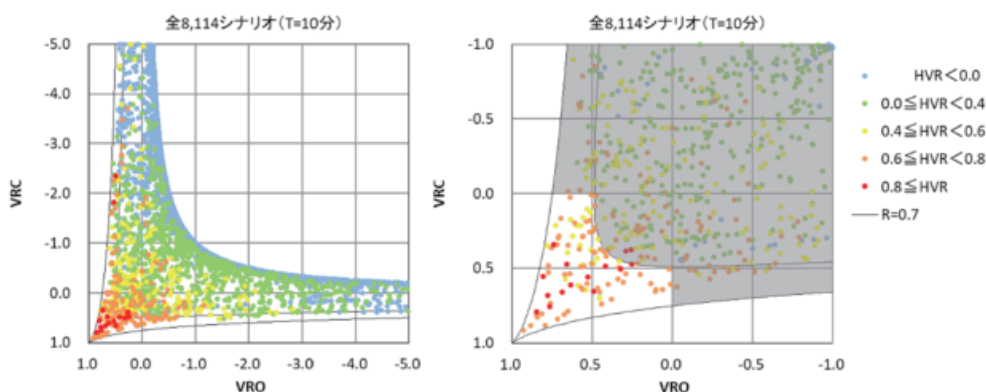
疑似観測シナリオである 1933 年昭和三陸地震 (相田, 1977) の波源断層モデルは, アウターライズに位置する正断層型の傾斜角 45 度のモデルであり, $M_w8.26$, M_0 -S 関係式の β は 3.43 である. β が大きいこと, 図 4.2-9 a) および図 4.2-10 c) に示す VRO-VRC プロットでは, アウターライズの地震の $M_w8.4$ および $M_w8.6$ のシナリオが多く選別されている. 概観予測対象地域に対するシナリオ選別では, 図 4.2-9 d) に示すように選別シナリオの最大相対水

位の平均分布は疑似観測シナリオを良く予測できているように見えるが, 局所的なピークは必ずしも再現出来ておらず $HVR=0.85$ である. 即時予測対象地域に対するシナリオ選別では, 図 4.2-10 f) に示すように選別シナリオの最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオと相対的な分布は類似しているものの, 2 倍程度の過大な予測となっている. なお, 最大相対水位の分布は, 1896 年明治三陸地震の予測結果と良く類似している.

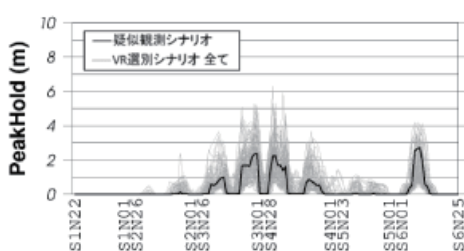
a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



b) VRO-VRC (HVR で色分け)



c) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



d) 最大相対水位分布

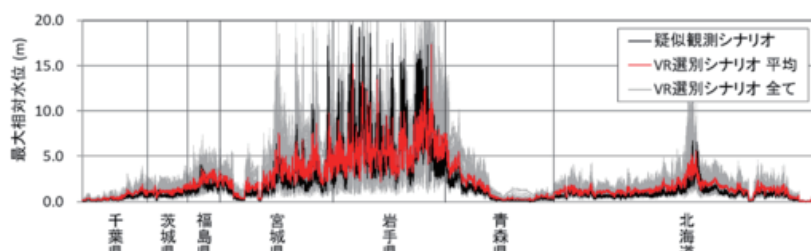
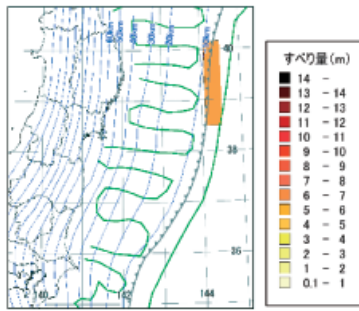
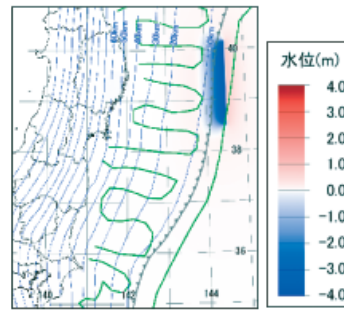


図 4.2-9 概観予測対象地域 (房総半島～根室半島の太平洋沿岸) に対するシナリオ選別結果 (t=10 分)
疑似観測シナリオ: 1933 年昭和三陸地震, 相田 (1977) モデル

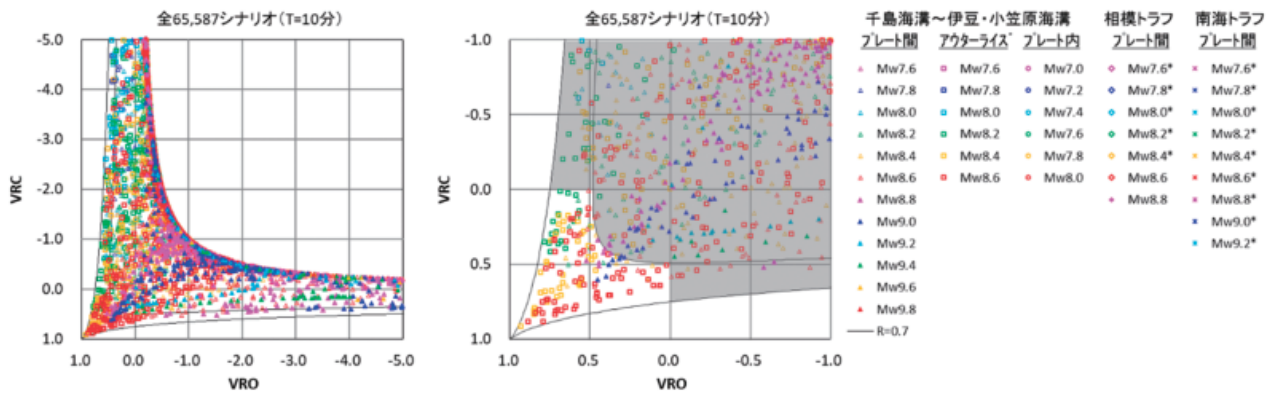
a) 断層すべり量分布



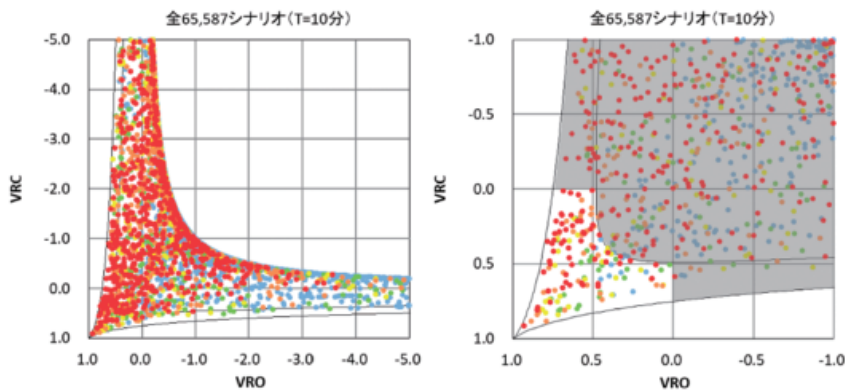
b) 初期水位分布



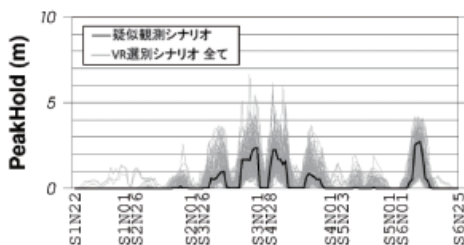
c) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



d) VRO-VRC (HVR で色分け)



e) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



f) 最大相対水位分布

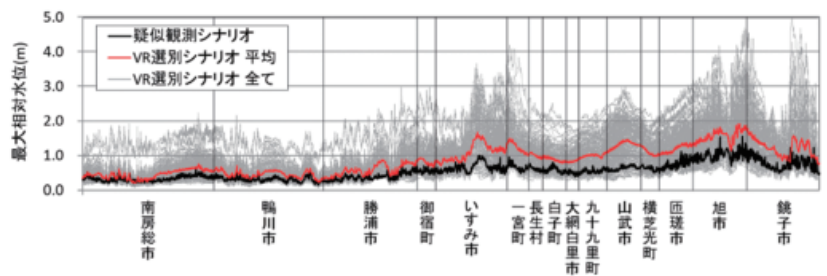


図 4.2-10 即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)

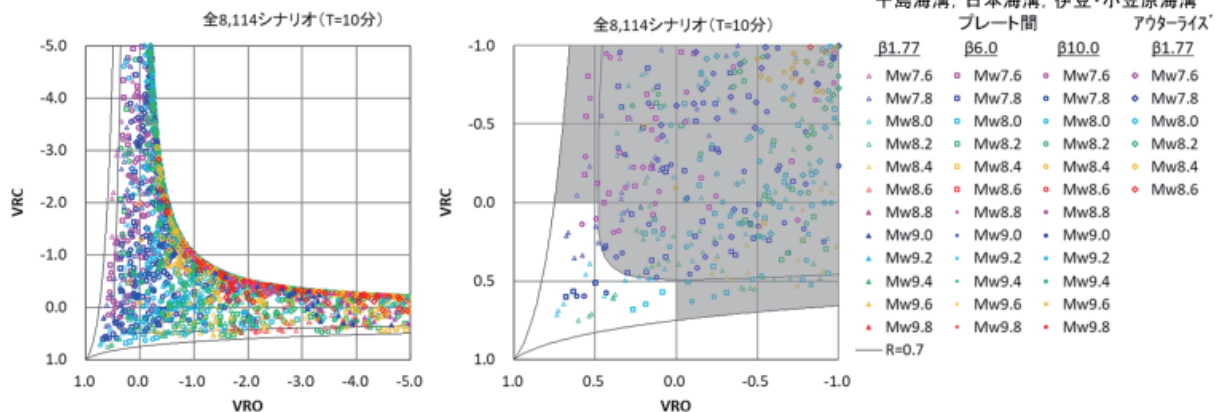
疑似観測シナリオ：1933 年昭和三陸地震，相田(1977)モデル

4.2.1.6 1968 年十勝沖地震

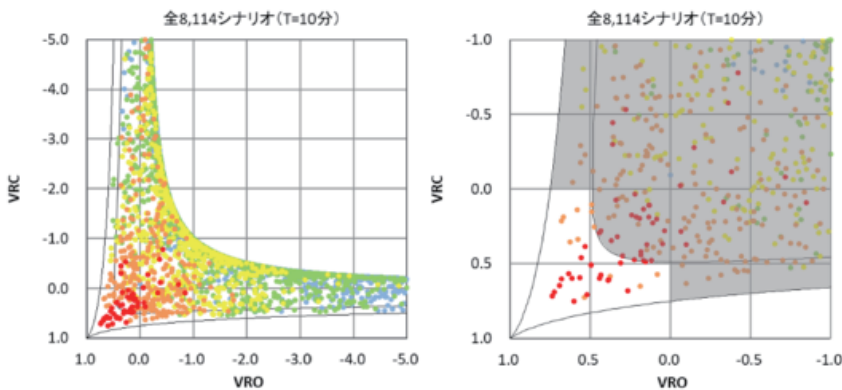
疑似観測シナリオである 1968 年十勝沖地震 (Satake, 1989) の波源断層モデルは、図 4.2-12 a) に示すように不均質すべりモデルである。Mw8.05, M_0 -S 関係式の β は 0.38 であり、 β が非常に小さい。また、断層の走向が海溝軸と並行でない点が特徴的であり、 $\beta=1.77$ で Mw7.8 ないし 8.0 のプレート間地震が多く選別されている。概観予測対象地域に対

するシナリオ選別では、図 4.2-11 d) に示すように最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオを良く予測できており、HVR=0.925 である。図 4.2-12 f) に示すように即時予測対象地域に対するシナリオ選別でも、選別シナリオの最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオを良く予測できており、HVR=0.936 である。

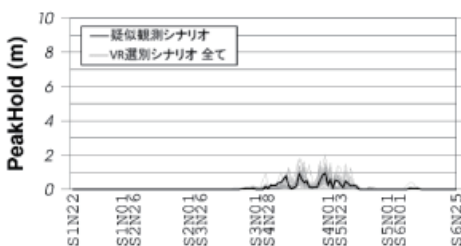
a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



b) VRO-VRC (HVR で色分け)



c) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



d) 最大相対水位分布

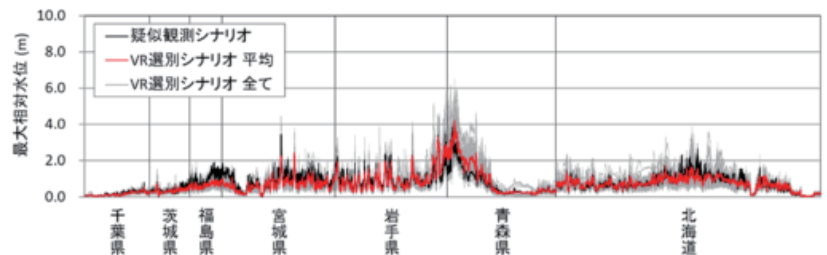


図 4.2-11 概観予測対象地域(房総半島～根室半島の太平洋沿岸)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ：1968 年十勝沖地震，Satake(1989)モデル

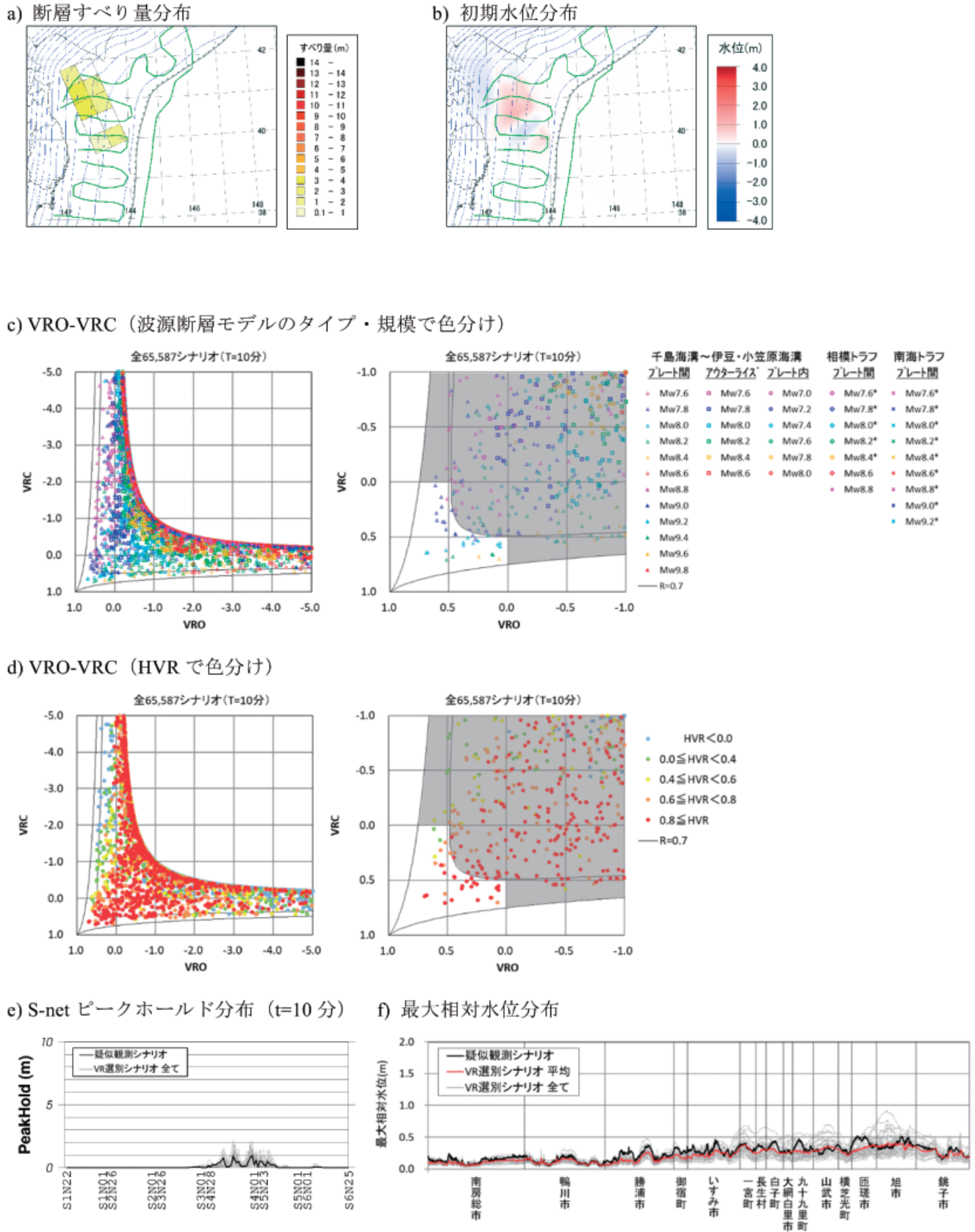


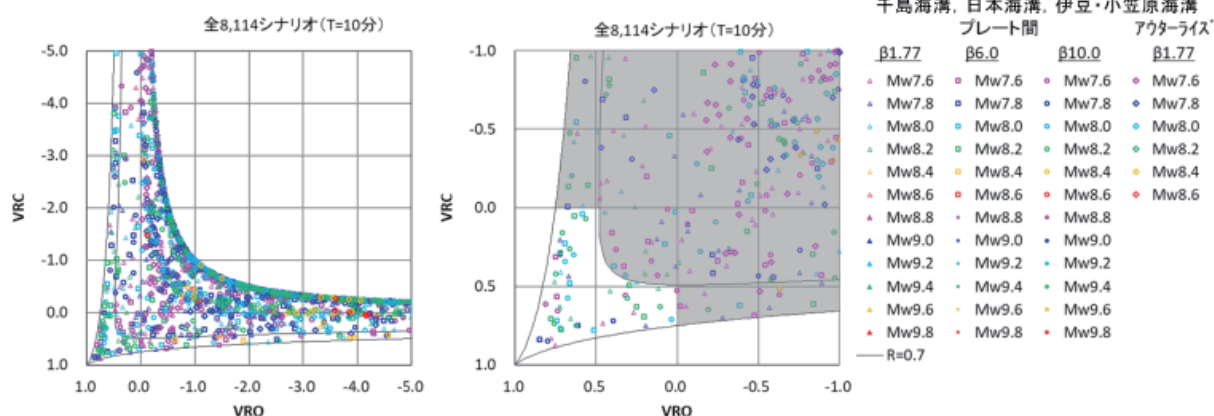
図 4.2-12 即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ: 1968 年十勝沖地震, Satake(1989)モデル

4.2.1.7 2003 年十勝沖地震

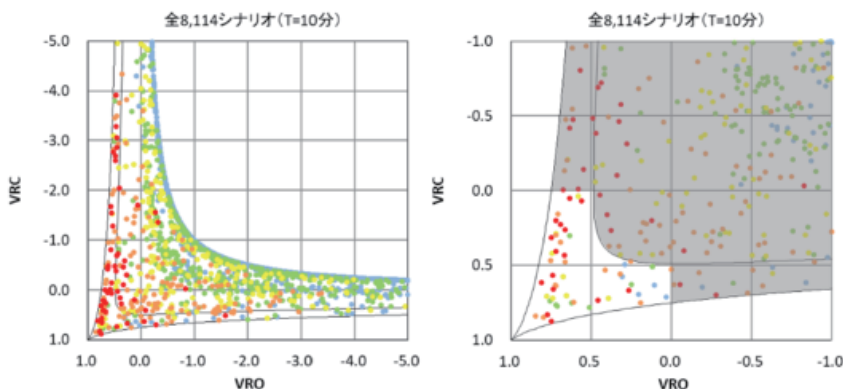
疑似観測シナリオである 2003 年十勝沖地震 (Tanioka *et al.*, 2004) の波源断層モデルは、図 4.2-14 a) に示すように不均質すべりモデルである。Mw7.85, M_0 -S 関係式の β は 0.16 であり、 β が非常に小さい。シナリオ選別数は本節でシナリオ選別を行った疑似観測シナリオの中でも比較的少ない (表 4.2-2 および表 4.2-3)。選別されているシナリオは、 $\beta=1.77$, 6.0 および 10.0 の Mw7.6 ~ 8.2 のプレート

間地震だが、 β や Mw による選別数の違いが少ないのが特徴的である (表 4.2-5 および表 4.2-7)。概観予測対象地域に対するシナリオ選別では、図 4.2-13 d) に示すように最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオに対して全般的にやや過大評価である。図 4.2-14 f) に示すように即時予測対象地域に対するシナリオ選別でも、選別シナリオの最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオを比較的良く予測できているが、やや過大評価である。

a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



b) VRO-VRC (HVR で色分け)



c) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



d) 最大相対水位分布

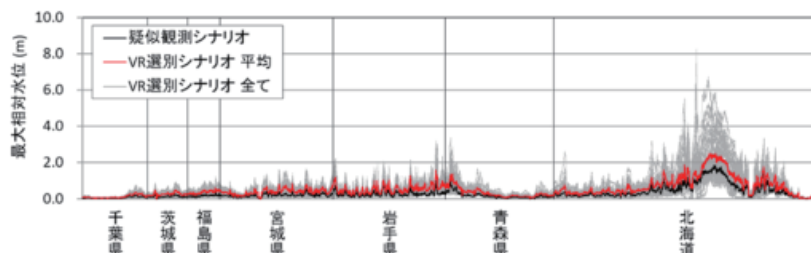
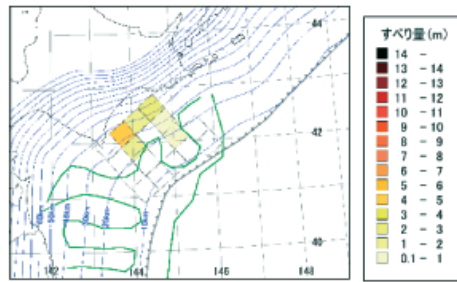
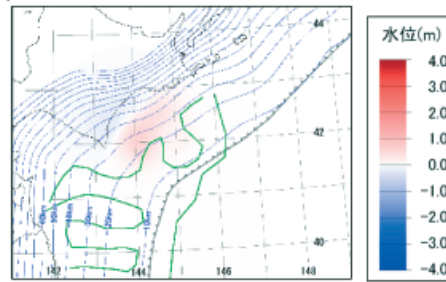


図 4.2-13 概観予測対象地域 (房総半島～根室半島の太平洋沿岸) に対するシナリオ選別結果 (t=10 分)
 疑似観測シナリオ: 2003 年十勝沖地震, Tanioka *et al.* (2004) モデル

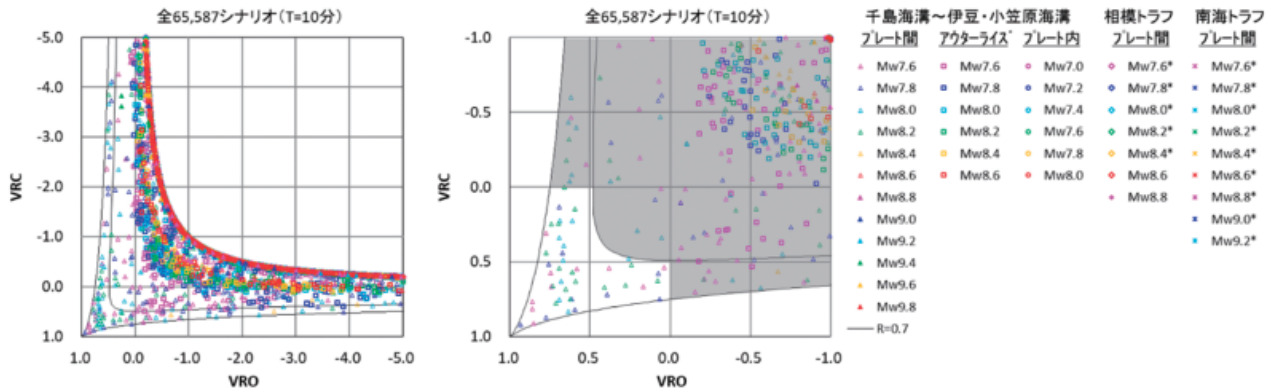
a) 断層すべり量分布



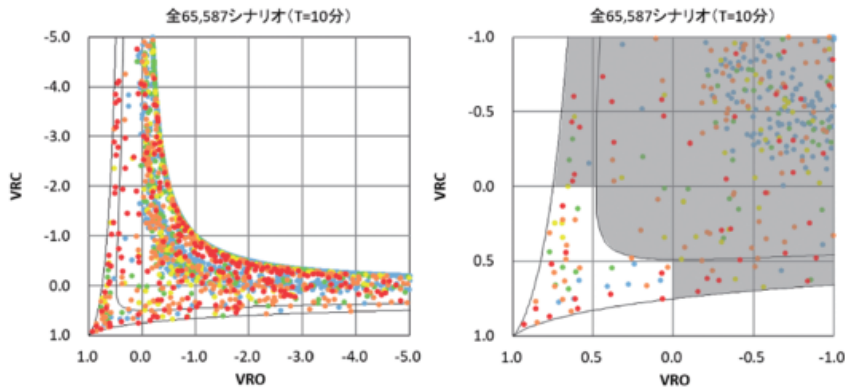
b) 初期水位分布



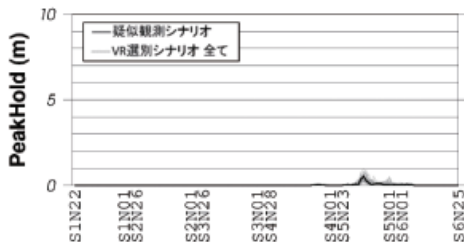
c) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



d) VRO-VRC (HVR で色分け)



e) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



f) 最大相対水位分布

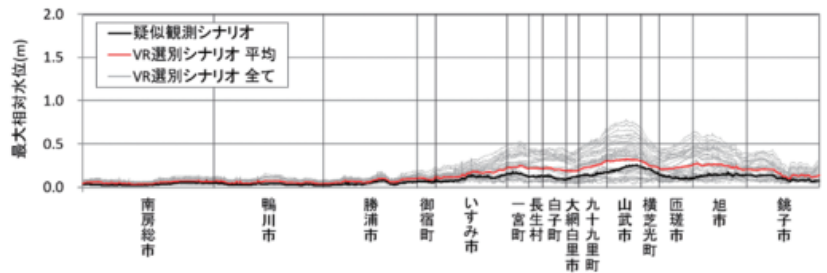


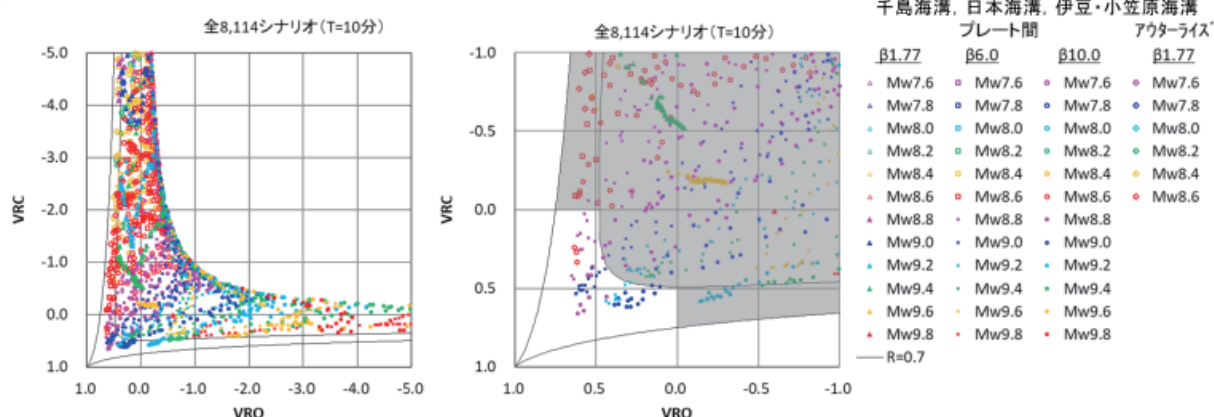
図 4.2-14 即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ: 2003 年十勝沖地震, Tanioka *et al.* (2004) モデル

4.2.1.8 2011 年東北地方太平洋沖地震

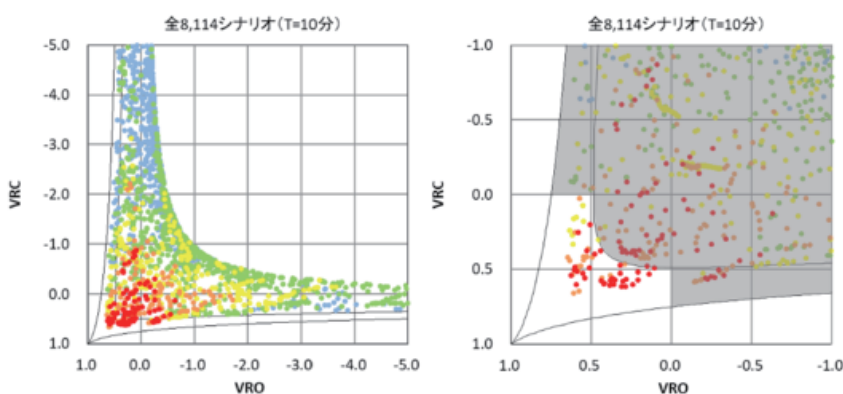
疑似観測シナリオである 2011 年東北地方太平洋沖地震(内閣府, 2012)の波源断層モデルは図 4.2-16 a) に示すように不均質すべりモデルであり, $M_w9.07$, M_0 -S 関係式の β は 1.23 である. すべり域の面積は広いものの, 大きな断層すべりが宮城県沖に集中しており, そこでは 40 m 以上の断層すべりを生じるモデルとなっている. そのため, 図 4.2-15 a) に示すように VR 選別されるシナリオは, $\beta=6.0$ または $\beta=10.0$ のプレート間地震となって

いる. 概観予測対象地域に対するシナリオ選別では, 図 4.2-15 d) に示すように最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオを良く予測できているが, 岩手県北部のピークについては過小評価となっている. この岩手県北部のピークは, 図 4.2-16 b) の初期水位分布で岩手県沖の海溝軸に沿ってみられる初期水位による. 即時予測対象地域に対するシナリオ選別では, 図 4.2-16 f) に示すように選別シナリオの最大相対水位の平均分布は疑似観測シナリオを良く予測しており, $HVR=0.98$ である.

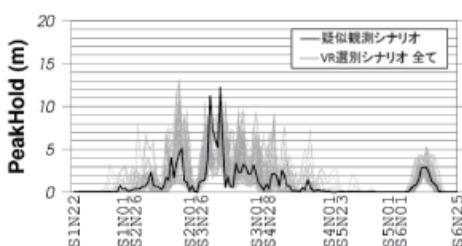
a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



b) VRO-VRC (HVR で色分け)



c) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



d) 最大相対水位分布

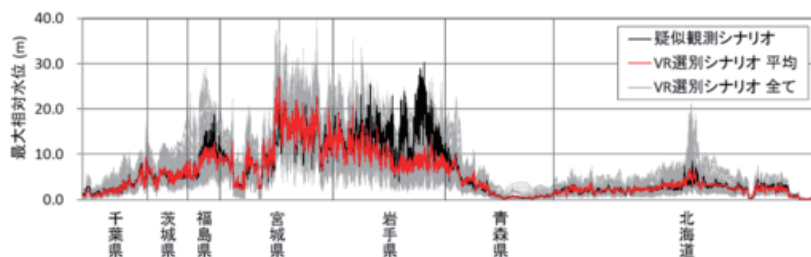
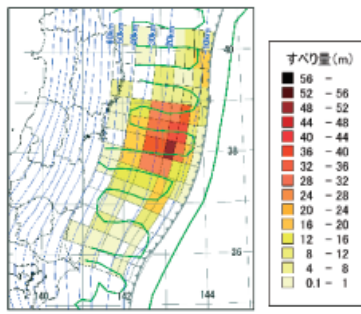
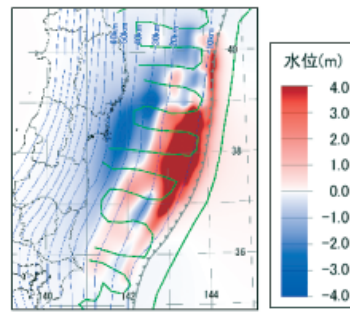


図 4.2-15 概観予測対象地域(房総半島～根室半島の太平洋沿岸)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ: 2011 年東北地方太平洋沖地震, 内閣府(2012)モデル

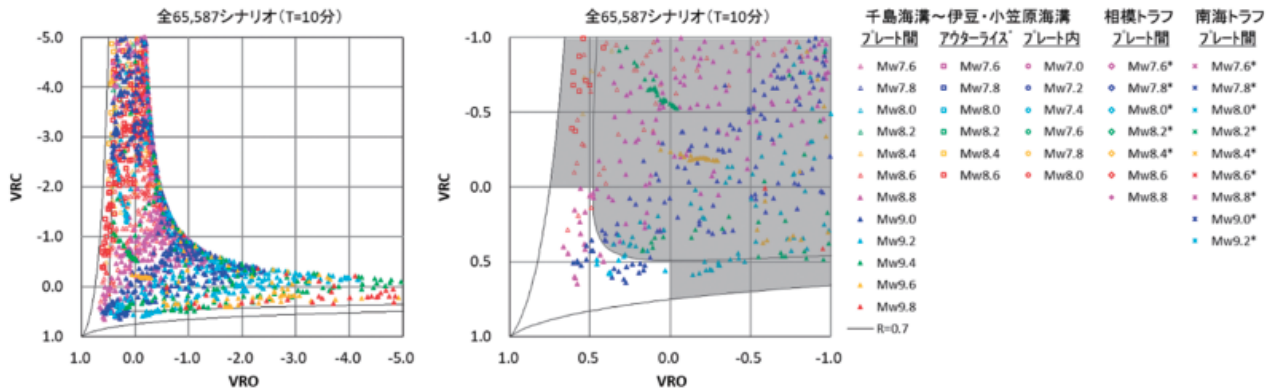
a) 断層すべり量分布



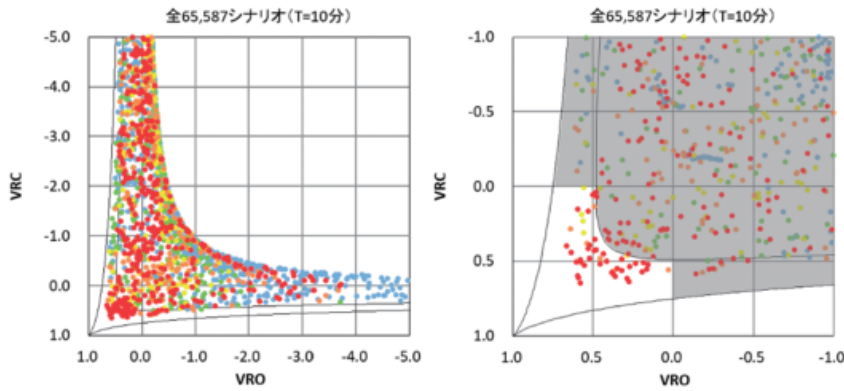
b) 初期水位分布



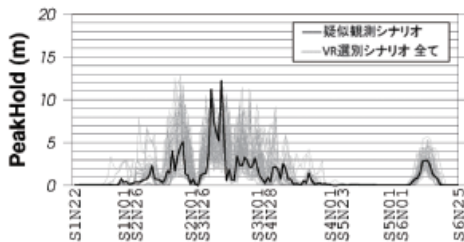
c) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



d) VRO-VRC (HVR で色分け)



e) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



f) 最大相対水位分布

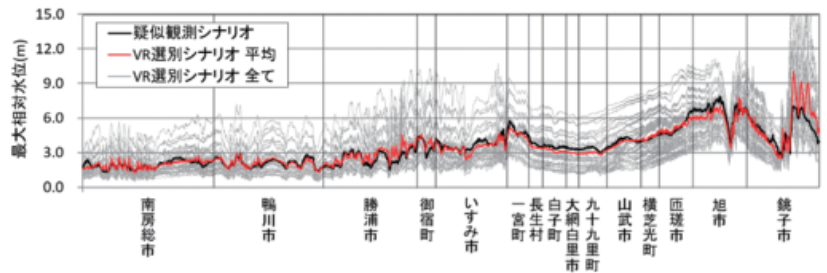


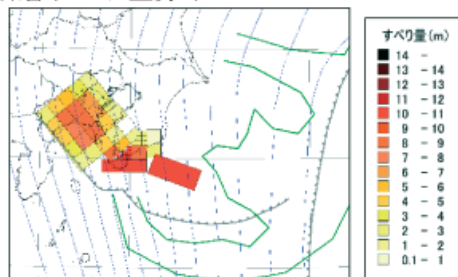
図 4.2-16 即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ: 2011 年東北地方太平洋沖地震, 内閣府(2012)モデル

4.2.1.9 1703 年元禄地震

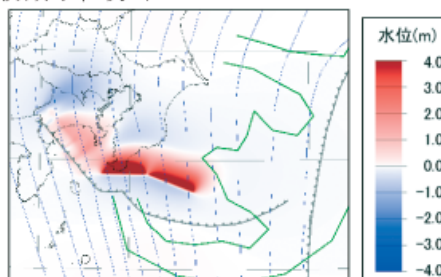
1703 年元禄地震(行谷ほか, 2011)を疑似観測シナ

リオとした場合の選別結果を図 4.2-17 に示す。鴨川市～山武市の範囲でやや過小評価となっている。

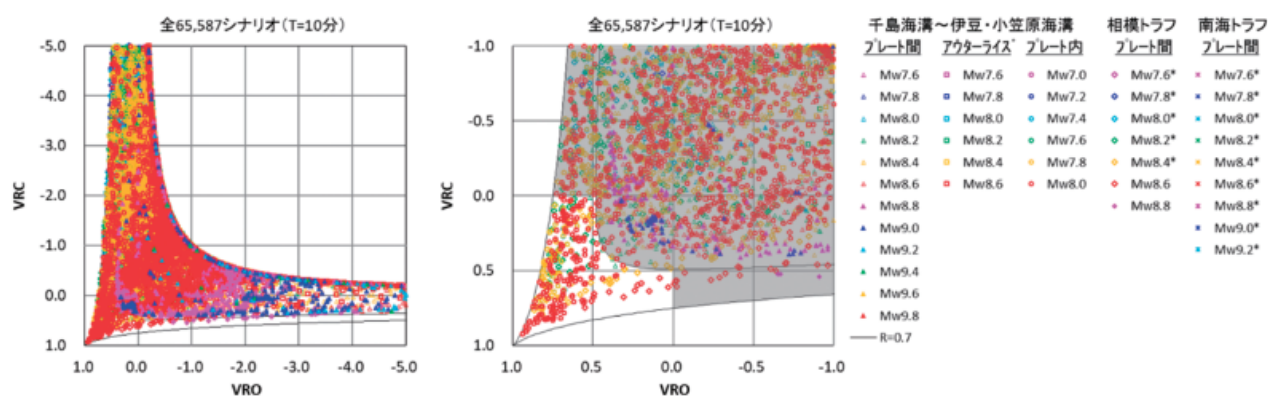
a) 断層すべり量分布



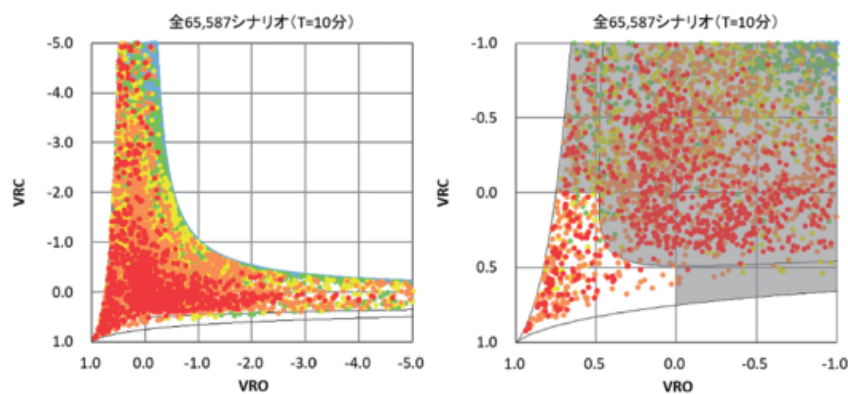
b) 初期水位分布



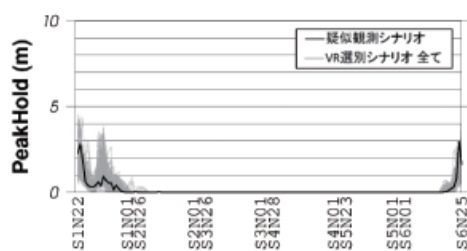
c) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



d) VRO-VRC (HVR で色分け)



e) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



f) 最大相対水位分布

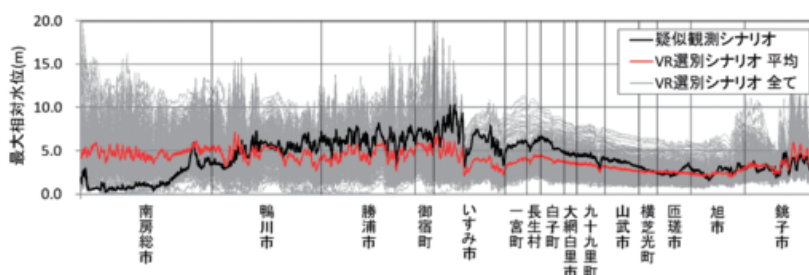


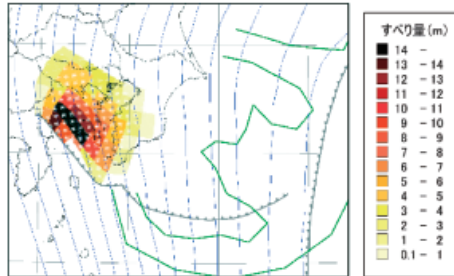
図 4.2-17 即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ: 1703 年元禄地震, 行谷ほか(2011)モデル

4.2.1.10 1923 年大正関東地震

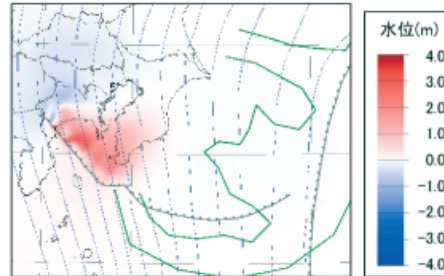
1923 年大正関東地震 (内閣府, 2013) を疑似観測

シナリオとした場合の選別結果を図 4.2-18 に示す。
いすみ市以西の範囲で過大評価となっている。

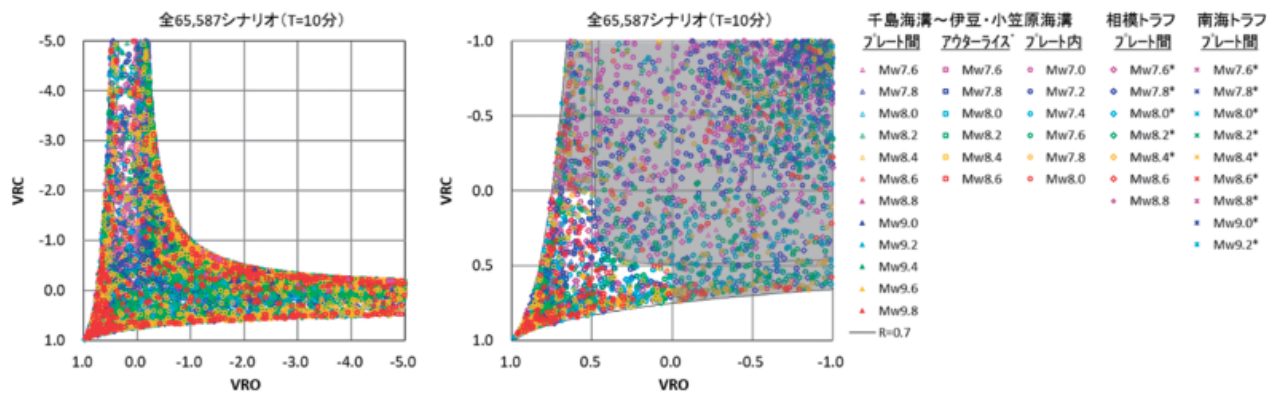
a) 断層すべり量分布



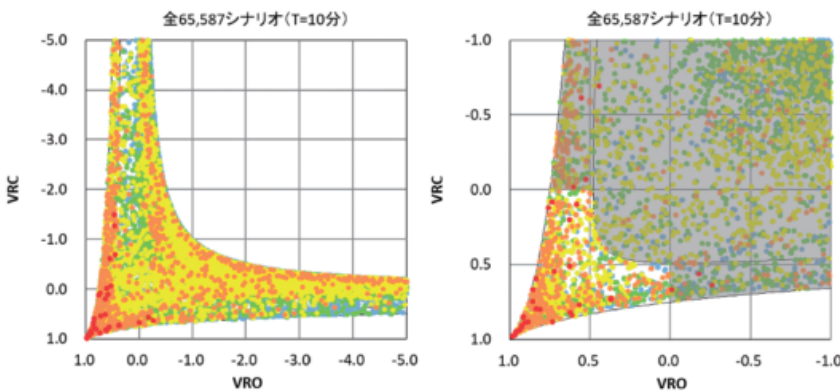
b) 初期水位分布



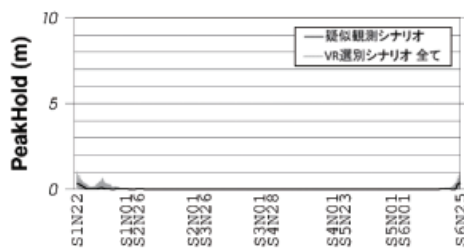
c) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



d) VRO-VRC (HVR で色分け)



e) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



f) 最大相対水位分布

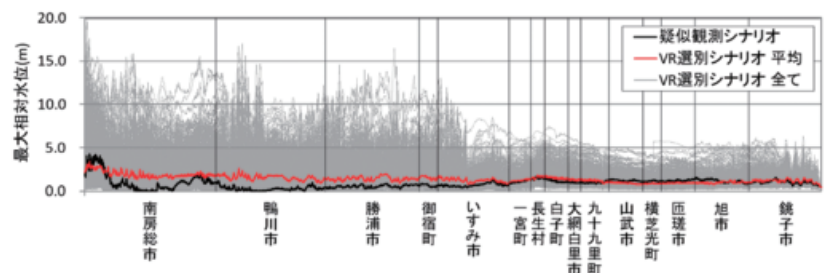


図 4.2-18 即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ: 1923 年大正関東地震, 内閣府(2013)モデル

4.2.2 シナリオ選別結果の概要

表 4.2-2 に即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)を対象とした津波シナリオバンクを用いたシナリオ選別結果として、各疑似観測シナリオに対する選別されたシナリオの数、VR の最大値および HVR を示す。選別されたシナリオの数は、最も少ない 1968 年十勝沖地震でも 31 シナリオであり、十分な数が選別されている。VR の最大値は 0.8 を上回っている疑似観測シナリオが多いが、1968 年十勝沖地震および 2011 年東北地方太平洋沖地震で 0.7 を下回っているものの 0.5 は越えている。1968 年十勝沖地震の疑似観測シナリオは断層の走向が海溝軸と並行ではない上に不均質すべりモデルであることから、シナリオバンク内に類似の断層モデルが含まれていないためと考えられる。また、2011 年東北地方太平洋沖地震は、断層すべりの空間的な不均質性が高いとともに 5 分間にわたって断層すべりが生じる波源断層モデルである。このような断層すべりを持つシナリオはシナリオバンク内に含まれていないため、VR の最大値が低いものと考えられる。HVR の値は、一番低い 500 年間隔地震(HVR=0.055)から一番高い 2011 年東北地方太平洋沖地震(HVR=0.983)までばらついている。この理由は、VR は S-net 観測網全体で算出しているのに対して、HVR は即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)のみで算出しているため、波源域におけるピークホールド値の再現性が高い場合でも、即時予測対象地域が波源域に面していない場合や波源域に対して狭い場合には、必ずしも適切な予測が出来ないためである。

表 4.2-3 に、概観予測対象地域を対象とした津波シナリオバンクを用いたシナリオ選別結果を示す。選別された津波シナリオの数は即時予測対象地域を対象とした場合(表 4.2-2)と類似している。ただし、即時予測対象地域の津波シナリオバンクは房総沖に位置する波源断層モデルが相対的に多かったのに対して、概観予測対象地域の津波シナリオバンクは S-net 観測網に均等にモデルを設定しているため、波源が房総沖に位置する 1677 年延宝房総沖地震の選別シナリオ数は大きく異なっている。VR の最大値も即時予測対象地域を対象としたシナリオ選別結果と大きく変わらない。しかし、HVR については、即時予測対象地域を対象としたシナリオ選別結果に対して大幅に改善しており、概ね HVR が 0.8 を上

回る結果となっている。これは、概観予測対象地域の範囲が房総半島～根室半島までの太平洋沿岸であり、波源域を含む範囲となっているためである。特に、1677 年延宝房総沖地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震のように波源断層モデルのすべり量分布が複雑であり、選別されたシナリオの VR の最大値がやや低い疑似観測シナリオに対しても HVR は 0.9 程度となっており、沿岸の最大相対水位を良く予測出来ている。このことは、本提案研究で採用した Multi-index 法による津波予測の方法が有効であることを示している。一方で、即時予測対象地域のように予測する地域が波源域よりも狭い場合には、前述のように最大相対水位分布を予測することは難しい場合があることから、何を予測値として抽出すべきか検討が必要である。また、2011 年東北地方太平洋沖地震については、概観予測対象地域に対する HVR は 0.886 と良い値を示しているものの、図 4.2-15 d)を見ると、岩手県北部の高い最大相対水位を再現出来ていない。この点を適切に予測できるようにすることも今後の課題である。

即時予測対象地域を対象としたシナリオ選別結果の参考として、表 4.2-4 および表 4.2-5 に津波シナリオバンクを構成する地震タイプおよび地震規模ごとのシナリオ選別数および VR の最大値を整理した。同様に、概観予測対象地域を対象としたシナリオ選別結果の参考として、表 4.2-6 および表 4.2-7 に津波シナリオバンクを構成する地震タイプおよび地震規模ごとにシナリオ選別数および VR 最大値を整理した。

表 4.2-2 各疑似観測シナリオに対する即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)の VR 選別結果
HVR は疑似観測シナリオの最大相対水位と VR 選別モデルの最大相対水位の平均から算出した。

疑似観測シナリオ	VR 選別数	VR 最大値	HVR
869 年貞観地震, 菅原ほか(2011)	124	0.803	0.880
500 年間隔地震, 中央防災会議(2005)	210	0.865	0.055
1677 年延宝房総沖地震, 竹内ほか(2007)	572	0.749	0.793
1896 年明治三陸地震, Tanioka and Satake(1996)	165	0.931	0.662
1933 年昭和三陸地震, 相田(1977)	146	0.922	0.734
1968 年十勝沖地震, Satake(1989)	31	0.670	0.936
2003 年十勝沖地震, Tanioka <i>et al.</i> (2004)	44	0.927	0.758
2011 年東北地方太平洋沖地震, 内閣府(2012)	46	0.612	0.983
1703 年元禄地震, 行谷ほか(2011)	463	0.930	0.804
1923 年大正関東地震, 内閣府(2013)	1,812	0.982	0.556

表 4.2-3 各疑似観測シナリオに対する概観予測対象地域(房総半島～根室半島の太平洋沿岸)の VR 選別結果
HVR は疑似観測シナリオの最大相対水位と VR 選別モデルの最大相対水位の平均から算出した。

疑似観測シナリオ	VR 選別数	VR 最大値	HVR
869 年貞観地震, 菅原ほか(2011)	91	0.809	0.974
500 年間隔地震, 中央防災会議(2005)	254	0.868	0.808
1677 年延宝房総沖地震, 竹内ほか(2007)	93	0.629	0.894
1896 年明治三陸地震, Tanioka and Satake(1996)	120	0.931	0.934
1933 年昭和三陸地震, 相田(1977)	92	0.922	0.846
1968 年十勝沖地震, Satake(1989)	31	0.725	0.925
2003 年十勝沖地震, Tanioka <i>et al.</i> (2004)	51	0.844	0.766
2011 年東北地方太平洋沖地震, 内閣府(2012)	61	0.637	0.886

表 4.2-4 各疑似観測シナリオに対する即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)の VR 選別結果一覧表: VR 最大値

869 年貞観地震, 菅原ほか (2011) モデル

Mw	VR最大値										
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝						プレート内		相模トラフ		南海トラフ
	プレート間			アウターライズ					プレート間		プレート間
	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=10.0$	$\beta=1.0$ 不均質	$\beta=1.77$ 回転なし	$\beta=1.77$ 45度回転	$\beta=2.0$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$
7.0							-4.72	-3.24			
7.2							-4.35	-1.43			
7.4							-2.82	-0.52			
7.6	-2.49	-1.11	-0.77		-1.76	-1.25	-1.71	-0.95	-2.89	-1.85	-413.49
7.8	-0.95	0.02	0.14		-0.56	-0.45	-0.92	-0.52	-1.89	-1.20	-245.37
8.0	0.02	0.51	0.57		0.07	0.09	-0.45	-0.34	-1.89	-1.02	-143.84
8.2	0.70	0.65	0.53		0.33	0.57			-1.27	-0.98	-83.40
8.4	0.80	0.62	0.57	0.43	0.55	0.59			-1.08	-0.98	-166.17
8.6	0.75	0.45	0.40	0.65	0.39	0.41			-1.05	-0.99	-110.66
8.8	0.52	-0.17	-0.71	0.59					-1.09	-1.05	-74.70
9.0	0.14	-0.90	-1.00	0.37					-1.15	-1.09	-32.26
9.2	-0.07	-0.99	-0.99								-41.56
9.4	-0.40	-1.07	-0.99								
9.6	-1.79	-1.05	-1.00								
9.8	-2.28	-4.93	-0.99								

1968 年十勝沖地震, Satake (1989) モデル

VR最大値											
Mw	千島海溝～伊豆・小笠原海溝					プレート内		相模トラフ		南海トラフ	
	プレート間			β=1.0 不均質	アウターライズ		β=2.0	β=6.0	プレート間		β=1.0
	β=1.77	β=6.0	β=10.0		β=1.77 回転なし	β=1.77 45度回転			β=1.77	β=6.0	
7.0							-1.96	-1.16			
7.2							-1.44	-1.00			
7.4							-1.07	-1.00			
7.6	0.12	0.27	0.36		0.01	-0.16	-1.00	-1.00	-1.08	-1.00	-150.00
7.8	0.49	0.48	0.47		-0.02	-0.04	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-88.79
8.0	0.67	0.41	0.35		-0.11	-0.13	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-51.75
8.2	0.63	0.10	0.01		-0.49	-0.51			-1.00	-1.00	-29.86
8.4	0.51	-0.16	-0.46	-1.00	-0.59	-0.58			-1.00	-1.00	-59.96
8.6	-0.26	-0.99	-0.90	-1.00	-0.74	-0.72			-1.42	-0.99	-39.75
8.8	-0.98	-1.02	-0.99	-1.00	-0.92	-0.95			-0.99	-0.99	-9.75
9.0	-0.83	-0.97	-0.97	-1.39							-20.36
9.2	-1.12	-1.00	-1.04								-14.82
9.4	-2.33	-1.21	-0.99								
9.6	-7.27	-1.15	-2.50								
9.8	-11.35	-15.02	-1.76								

500 年間隔地震, 中央防災会議 (2005) モデル

Mw	VR最大値										
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝					プレート内			相模トラフ		南海トラフ
	プレート間			アウターライズ	β=1.77 45度回転	β=2.0	β=6.0	プレート間		プレート間	
	β=1.77	β=6.0	β=10.0	β=1.0 不均質				β=1.77	β=6.0	β=1.77	
7.0											
7.2											
7.4											
7.6	-5.01	-1.88	-1.35		-3.21	-2.98	-2.96	-1.70	-4.48	-2.84	-603.70
7.8	-2.79	-0.63	-0.19		-1.37	-1.23	-1.98	-1.16	-2.83	-1.92	-358.57
8.0	-1.35	0.07	0.41		-0.27	-0.14	-1.22	-1.00	-2.46	-1.33	-210.25
8.2	-0.27	0.56	0.67		0.44	0.44			-1.89	-1.05	-122.56
8.4	0.11	0.78	0.79	-1.29	0.70	0.81			-1.50	-1.00	-243.15
8.6	0.43	0.85	0.81	-1.05	0.71	0.76			-1.46	-1.00	-162.24
8.8	0.60	0.77	0.88	-1.00					-1.00	-1.00	-109.85
9.0	0.52	0.77	0.47	-0.96							-84.26
9.2	0.60	0.77	0.47								-91.26
9.4	0.12	0.63	0.29								
9.6	-0.96	0.36	-0.01								
9.8	-1.92	-2.44	-1.16								
10.0	-3.96	-4.88	-2.32								

2003 年十勝沖地震, Tanioka *et al.* (2004) モデル

VR最大値											
Mw	千島海溝～伊豆・小笠原海溝						相模トラフ		南海トラフ		
	プレート間			アウターライズ		プレート内		プレート間		プレート間	
	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=10.0$	$\beta=1.0$ 不均質	$\beta=1.77$ 回転なし	$\beta=1.77$ 45度回転	$\beta=2.0$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$
7.0							-1.00	-0.99			
7.2							-0.99	-0.99			
7.4							-0.99	-0.99			
7.6	0.88	0.82	0.84		0.16	0.23	-0.99	-0.99	-0.99	-1.00	-46.30
7.8	0.93	0.83	0.73		-0.39	-0.36	-0.99	-0.99	-0.99	-1.00	-27.15
8.0	0.75	0.66	0.62		-0.49	-0.39	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99	-15.57
8.2	0.67	0.74	0.70		-0.52	-0.45			-0.99	-0.99	-9.75
8.4	-0.63	0.15	-0.35		-1.58	-0.53	-0.51		-1.74	-0.99	-15.13
8.6	-0.75	-0.76	-0.77		-2.48	-0.59	-0.60		-5.19	-1.99	-11.82
8.8	-0.74	-1.14	-0.99	-2.97					-12.23	-7.74	
9.0	-0.92	-1.12	-1.03	-3.06							-5.79
9.2	-1.52	-1.10	-0.98								-4.03
9.4	-11.98	-1.31	-0.86								
9.6	-28.60	-1.02	-0.93								
9.8	-38.88	-92.27	-0.99								

1677 年延宝房総沖地震, 竹内ほか (2007) モデル

Mw	VR最大値										
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝						プレート内		相模トラフ		南海トラフ
	プレート間			アウターライズ			プレート内		プレート間		プレート間
	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=10.0$	$\beta=1.0$ 不均質	$\beta=1.77$ 回転なし	$\beta=1.77$ 45度回転	$\beta=2.0$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$
7.0						-4.36	-2.11				
7.2						-2.74	-0.23				
7.4						-1.51	0.28				
7.6	-1.76	-0.47	-0.25		-1.32	-1.23	-0.47	0.12	-1.48	-0.58	-370.31
7.8	-0.64	0.02	0.10		-0.23	-0.24	0.09	0.28	-0.53	-0.10	-219.32
8.0	0.02	0.35	0.38		0.32	0.27	0.42	0.48	-0.25	0.17	-127.86
8.2	0.45	0.48	0.46		0.53	0.47			0.03	0.25	-72.96
8.4	0.54	0.39	0.19	0.58	0.62	0.45			0.28	0.22	-148.11
8.6	0.63	-0.01	-0.16	0.75	0.44	0.43			0.34	0.24	-93.24
8.8	0.60	-0.20	-0.14	0.60					-0.11	-0.96	
9.0	0.29	-0.14	-0.16	0.68							-50.39
9.2	-0.03	-0.15	-0.23								-36.21
9.4	-0.52	-0.35	-0.34								
9.6	-1.71	-0.28	-0.49								
9.8	-3.15	-6.01	-0.48								

2011 年東北地方太平洋沖地震, 内閣府 (2012) モデル

Mw	VR最大値										
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝						相模トラフ		南海トラフ		
	プレート間			アウターライズ			プレート内		プレート間		
	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=10.0$	$\beta=1.0$ 不均質	$\beta=1.77$ 回転なし	$\beta=1.77$ 45度回転	$\beta=2.0$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$
7.0							-25.21	-14.18			
7.2							-18.47	-6.82			
7.4							-12.22	-3.01			
7.6	-13.74	-7.50	-5.87		-10.21	-8.86	-8.41	-4.76	-12.48	-8.13	-999.00
7.8	-8.92	-4.41	-3.36		-6.97	-5.65	-5.65	-3.01	-8.35	-5.53	-911.35
8.0	-5.73	-2.51	-1.49		-3.59	-3.31	-3.52	-1.95	-7.06	-3.67	-534.91
8.2	-3.35	-1.08	-0.47		-1.84	-1.56			-5.44	-2.51	-312.36
8.4	-2.16	-0.26	0.17		-1.03	-0.53	-0.34		-3.22	-1.84	-619.39
8.6	-1.38	0.34	0.49	-1.98	0.16	0.26			-4.09	-1.43	-413.01
8.8	-0.71	0.55	0.81	-1.06					-1.17	-280.05	
9.0	-0.52	0.56	0.50	-0.41							-215.90
9.2	-0.40	0.49	0.34								-157.49
9.4	-0.11	0.31	0.09								
9.6	-0.08	0.00	-0.28								

1896 年明治三陸地震, Tanioka and Satake (1996) モデル

Mw	VR最大値									
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝					相模トラフ		南海トラフ		
	プレート間		アウターライズ		プレート内	プレート間		プレート間		プレート間

表 4.2-5 各疑似観測シナリオに対する即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)の VR 選別結果一覧表: VR 選別数

869 年貞観地震, 菅原ほか (2011) モデル

Mw	VR最大値										
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝								相模トラフ		南海トラフ
	プレート間			アウターライズ			プレート内		プレート間		プレート内
	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=10.0$	$\beta=1.0$ 不均質	$\beta=1.77$ 回転なし	$\beta=1.77$ 45度回転	$\beta=2.0$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$
7.0							0	0			
7.2							0	0			
7.4							0	0			
7.6	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
7.8	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
8.0	0	4	5		0	0	0	0	0	0	0
8.2	3	7	6		1	4			0	0	0
8.4	11	8	2		1	5	6		0	0	0
8.6	15	1	0	11	1	3			0	0	0
8.8	10	0	0	17					0	0	0
9.0	0	0	0	3					0	0	0
9.2	0	0	0								0
9.4	0	0	0								0
9.6	0	0	0								0
9.8	0	0	0								0
合計							124				

500 年間隔地震, 中央防災会議 (2005) モデル

Mw	VR最大値										
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝					プレート内		相模トラフプレート間		南海トラフプレート間	
	プレート間			アウターライズ				プレート間			
	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=10.0$	$\beta=1.0$ 不均質	$\beta=1.77$ 回転なし	$\beta=1.77$ 45度回転	$\beta=2.0$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$
7.0							0	0			
7.2							0	0			
7.4							0	0			
7.6	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
7.8	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
8.0	0	0	1		0	0	0	0	0	0	0
8.2	0	4	7		1	2			0	0	0
8.4	0	13	16	0	9	8			0	0	0
8.6	1	20	20	0	14	15			0	0	0
8.8	8	23	9	0					0	0	0
9.0	2	15	2	0					0	0	0
9.2	3	12	1								0
9.4	0	4	0								0
9.6	0	0	0								0
9.8	0	0	0								0
合計							210				

1677 年延宝房総沖地震, 竹内ほか (2007) モデル

Mw	VR最大値										
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝					相模トラフ				南海トラフ	
	プレート間			β=1.0 不均質	アウターライズ		プレート内		プレート間		プレート内
	β=1.77	β=6.0	β=10.0		β=1.77 回転なし	β=1.77 45度回転	β=2.0	β=6.0	β=1.77	β=6.0	
7.0							0	0			
7.2							0	0			
7.4							0	0			
7.6	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
7.8	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
8.0	0	1	1		1	0	82	72	0	0	0
8.2	6	7	2		8	5			0	0	0
8.4	44	3	0	72	9	13			0	0	0
8.6	46	0	0	82	2	3			0	0	0
8.8	23	0	0	61					0	0	0
9.0	0	0	0	29							0
9.2	0	0	0								0
9.4	0	0	0								
9.6	0	0	0								
9.8	0	0	0								
合計							572				

1896 年明治三陸地震, Tanioka and Satake (1996) モデル

Mw	VR最大値										
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝					相模トラフ				南海トラフ	
	プレート間			β=1.0 不均質	アウターライズ		プレート内		プレート間		β=1.77
	β=1.77	β=6.0	β=10.0		β=1.77 回転なし	β=1.77 45度回転	β=2.0	β=6.0	β=1.77	β=6.0	
7.0							0	0			
7.2							0	0			
7.4							0	0			
7.6	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
7.8	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
8.0	0	0	1		0	0	0	0	0	0	0
8.2	0	5	6		9	8			0	0	0
8.4	5	6	4	0	20	16			0	0	0
8.6	13	4	1	0	23	24			0	0	0
8.8	10	0	0	0					0	0	0
9.0	5	0	0	5							0
9.2	0	0	0								0
9.4	0	0	0								0
9.6	0	0	0								0
9.8	0	0	0								0
合計							165				

1933 年昭和三陸地震, 相田 (1977) モデル

Mw	VR最大値										
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝					相模トラフ			南海トラフ		
	プレート間			β=1.0 不均質	アウターライズ		プレート内		プレート間		プレート内
	β=1.77	β=6.0	β=10.0		β=1.77 回転なし	β=1.77 45度回転	β=2.0	β=6.0	β=1.77	β=6.0	β=1.77
7.0							0	0			
7.2							0	0			
7.4							0	0			
7.6	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
7.8	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
8.0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
8.2	0	3	3		8	8			0	0	0
8.4	0	5	4	0	20	19			0	0	0
8.6	6	2	1	0	28	27			0	0	0
8.8	7	0	0	0					0	0	
9.0	2	0	0	3							
9.2	0	0	0								0
9.4	0	0	0								
9.6	0	0	0								
9.8	0	0	0								
合計							146				

1968 年十勝沖地震, Satake (1989) モデル

		VR最大値									
Mw	千島海溝～伊豆・小笠原海溝								相模トラフ		南海トラフ
	プレート間			アウターライズ			プレート内		プレート間	プレート内	
	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=10.0$	$\beta=1.0$ 不均質	$\beta=1.77$ 回転なし	$\beta=1.77$ 45度回転	$\beta=2.0$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$
7.0							0	0			
7.2							0	0			
7.4							0	0			
7.6	0	0	1		0	0	0	0	0	0	0
7.8	6	4	3		0	0	0	0	0	0	0
8.0	7	3	1		0	0	0	0	0	0	0
8.2	4	0	0		0	0			0	0	0
8.4	2	0	0	0	0	0			0	0	0
8.6	0	0	0	0	0	0			0	0	0
8.8	0	0	0	0	0	0			0	0	0
9.0	0	0	0	0	0	0			0	0	0
9.2	0	0	0	0	0	0					0
9.4	0	0	0								0
9.6	0	0	0								0
9.8	0	0	0								0
合計							31				

2003 年十勝沖地震, Tanioka et al. (2004) モデル

Mw	VR最大値										
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝						相模トラフ		南海トラフ		
	プレート間			アウターライズ			プレート内		プレート間		
	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=10.0$	$\beta=1.0$ 不均質	$\beta=1.77$ 回転なし	$\beta=1.77$ 45度回転	$\beta=2.0$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$
7.0						0	0				
7.2						0	0				
7.4						0	0				
7.6	5	3	2		0	0	0	0	0	0	
7.8	4	3	3		0	0	0	0	0	0	
8.0	3	3	3		0	0	0	0	0	0	
8.2	3	6	6		0	0			0	0	
8.4	0	0	0	0	0	0			0	0	
8.6	0	0	0	0	0	0			0	0	
8.8	0	0	0	0	0	0			0	0	
9.0	0	0	0	0	0	0			0	0	
9.2	0	0	0	0	0	0					
9.4	0	0	0	0	0	0					
9.6	0	0	0	0	0	0					
9.8	0	0	0	0	0	0					
合計											

44

表 4.2-6 各疑似観測シナリオに対する概観予測対象地域（房総半島～根室半島の太平洋沿岸）の VR 選別結果一覧表：VR 最大値

869 年貞観地震，菅原ほか（2011）モデル

Mw	VR最大値			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	-2.42	-0.51	-0.26	-1.76
7.8	-0.92	-0.05	0.13	-0.56
8.0	-0.10	0.40	0.47	0.07
8.2	0.48	0.56	0.50	0.33
8.4	0.81	0.70	0.70	0.55
8.6	0.81	0.46	0.39	0.39
8.8	0.49	-0.14	-0.64	
9.0	0.20	-0.84	-1.05	
9.2	-0.08	-1.03	-1.27	
9.4	-0.41	-1.20	-1.65	
9.6	-1.79	-1.74	-2.12	
9.8	-3.29	-4.84	-4.31	

1968 年十勝沖地震，Satake（1989）モデル

Mw	VR最大値			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	-0.06	0.28	0.40	0.01
7.8	0.51	0.64	0.61	-0.02
8.0	0.72	0.52	0.36	-0.11
8.2	0.69	-0.02	-0.09	-0.49
8.4	0.18	-0.09	-0.04	-0.59
8.6	-0.23	-1.16	-1.38	-0.74
8.8	-0.97	-1.41	-2.05	
9.0	-0.79	-1.92	-2.75	
9.2	-1.15	-2.63	-3.82	
9.4	-2.37	-3.49	-5.18	
9.6	-7.29	-5.53	-6.68	
9.8	-11.40	-15.11	-6.37	

500 年間隔地震，中央防災会議（2005）モデル

Mw	VR最大値			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	-5.00	-1.91	-1.11	-3.22
7.8	-3.11	-0.58	-0.13	-1.37
8.0	-1.45	0.14	0.46	-0.27
8.2	-0.28	0.56	0.77	0.44
8.4	-0.04	0.80	0.79	0.70
8.6	0.34	0.87	0.78	0.71
8.8	0.41	0.77	0.68	
9.0	0.31	0.77	0.51	
9.2	0.61	0.79	0.48	
9.4	0.12	0.65	0.28	
9.6	-0.96	0.36	-0.07	
9.8	-1.93	-2.47	-1.43	

2003 年十勝沖地震，Tanioka *et al.*（2004）モデル

Mw	VR最大値			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	0.82	0.66	0.73	0.16
7.8	0.57	0.84	0.83	-0.39
8.0	0.68	0.73	0.74	-0.49
8.2	0.68	0.75	0.75	-0.53
8.4	-0.77	0.11	-0.15	-0.53
8.6	-1.19	-3.65	-4.61	-0.59
8.8	-1.80	-4.81	-7.29	
9.0	-2.55	-6.79	-9.74	
9.2	-4.16	-9.32	-13.31	
9.4	-12.05	-12.22	-17.79	
9.6	-26.67	-19.39	-22.70	
9.8	-39.68	-52.59	-1.70	

1677 年延宝房総沖地震，竹内ほか（2007）モデル

Mw	VR最大値			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	-1.75	-0.47	-0.24	-1.33
7.8	-0.64	0.00	0.09	-0.22
8.0	-0.01	0.30	0.33	0.32
8.2	0.45	0.48	0.46	0.53
8.4	0.54	0.39	0.18	0.62
8.6	0.63	-0.02	-0.22	0.44
8.8	0.60	-0.12	-0.13	
9.0	0.30	-0.15	-0.32	
9.2	-0.03	-0.22	-1.29	
9.4	-0.52	-0.44	-1.85	
9.6	-1.71	-1.05	-2.33	
9.8	-3.16	-6.05	-3.95	

2011 年東北地方太平洋沖地震，内閣府（2012）モデル

Mw	VR最大値			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	-13.70	-6.45	-5.03	-10.21
7.8	-8.91	-4.32	-2.84	-6.07
8.0	-5.67	-2.48	-1.50	-3.59
8.2	-3.29	-1.01	-0.46	-1.64
8.4	-2.15	-0.18	0.10	-0.53
8.6	-1.48	0.36	0.49	0.16
8.8	-0.74	0.55	0.64	
9.0	-0.85	0.58	0.51	
9.2	-0.39	0.52	0.31	
9.4	-0.11	0.32	0.11	
9.6	-0.08	0.03	-0.25	
9.8	-0.26	-0.08	-0.74	

1896 年明治三陸地震，Tanioka and Satake（1996）モデル

Mw	VR最大値			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	-3.16	-1.05	-0.63	-1.60
7.8	-1.49	-0.23	0.00	-0.39
8.0	-0.43	0.25	0.37	0.38
8.2	0.20	0.53	0.48	0.80
8.4	0.39	0.73	0.69	0.93
8.6	0.54	0.70	0.53	0.71
8.8	0.57	0.34	0.00	
9.0	0.36	-0.44	-0.95	
9.2	0.35	-0.98	-1.09	
9.4	0.29	-1.04	-1.34	
9.6	-1.10	-1.43	-1.69	
9.8	-2.32	-2.91	-3.45	

1933 年昭和三陸地震，相田（1977）モデル

Mw	VR最大値			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	-3.48	-1.11	-0.65	-1.92
7.8	-1.65	-0.33	-0.02	-0.67
8.0	-0.66	0.24	0.39	0.17
8.2	0.02	0.45	0.45	0.62
8.4	0.29	0.61	0.62	0.92
8.6	0.44	0.58	0.44	0.88
8.8	0.52	0.15	-0.09	
9.0	0.28	-0.55	-0.99	
9.2	0.27	-0.98	-1.07	
9.4	0.24	-1.02	-1.30	
9.6	-1.04	-1.37	-1.62	
9.8	-2.21	-2.78	-3.29	

表 4.2-7 各疑似観測シナリオに対する概観予測対象地域（房総半島～根室半島の太平洋沿岸）の VR 選別結果一覧表：VR 選別数

869 年貞観地震，菅原ほか（2011）モデル

Mw	VR選別数			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	0	0	0	0
7.8	0	0	0	0
8.0	0	5	5	0
8.2	4	8	5	1
8.4	13	11	4	5
8.6	18	2	0	1
8.8	9	0	0	
9.0	0	0	0	
9.2	0	0	0	
9.4	0	0	0	
9.6	0	0	0	
9.8	0	0	0	
合計	91			

1968 年十勝沖地震，Satake（1989）モデル

Mw	VR選別数			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	0	0	2	0
7.8	6	3	3	0
8.0	9	3	0	0
8.2	5	0	0	0
8.4	0	0	0	0
8.6	0	0	0	0
8.8	0	0	0	
9.0	0	0	0	
9.2	0	0	0	
9.4	0	0	0	
9.6	0	0	0	
9.8	0	0	0	
合計	31			

500 年間隔地震，中央防災会議（2005）モデル

Mw	VR選別数			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	0	0	0	0
7.8	0	0	0	0
8.0	0	0	1	0
8.2	0	5	9	1
8.4	0	14	21	9
8.6	0	30	24	14
8.8	3	36	18	
9.0	0	21	3	
9.2	10	21	3	
9.4	0	11	0	
9.6	0	0	0	
9.8	0	0	0	
合計	254			

2003 年十勝沖地震，Tanioka *et al.*（2004）モデル

Mw	VR選別数			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	4	2	4	0
7.8	3	2	3	0
8.0	3	5	5	0
8.2	5	7	8	0
8.4	0	0	0	0
8.6	0	0	0	0
8.8	0	0	0	
9.0	0	0	0	
9.2	0	0	0	
9.4	0	0	0	
9.6	0	0	0	
9.8	0	0	0	
合計	51			

1677 年延宝房総沖地震，竹内ほか（2007）モデル

Mw	VR選別数			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	0	0	0	0
7.8	0	0	0	0
8.0	0	0	0	1
8.2	3	4	1	8
8.4	22	3	0	9
8.6	28	0	0	2
8.8	12	0	0	
9.0	0	0	0	
9.2	0	0	0	
9.4	0	0	0	
9.6	0	0	0	
9.8	0	0	0	
合計	93			

2011 年東北地方太平洋沖地震，内閣府（2012）モデル

Mw	VR選別数			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	0	0	0	0
7.8	0	0	0	0
8.0	0	0	0	0
8.2	0	0	0	0
8.4	0	0	0	0
8.6	0	0	3	0
8.8	0	10	10	
9.0	0	15	13	
9.2	0	10	0	
9.4	0	0	0	
9.6	0	0	0	
9.8	0	0	0	
合計	61			

1896 年明治三陸地震，Tanioka and Satake（1996）モデル

Mw	VR選別数			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	0	0	0	0
7.8	0	0	0	0
8.0	0	0	1	0
8.2	0	5	9	9
8.4	2	10	7	20
8.6	17	6	3	23
8.8	8	0	0	
9.0	0	0	0	
9.2	0	0	0	
9.4	0	0	0	
9.6	0	0	0	
9.8	0	0	0	
合計	120			

1933 年昭和三陸地震，相田（1977）モデル

Mw	VR選別数			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta = 1.77$	$\beta = 6.0$	$\beta = 10.0$	$\beta = 1.77$
7.6	0	0	0	0
7.8	0	0	0	0
8.0	0	0	1	0
8.2	0	2	4	8
8.4	0	6	4	20
8.6	6	5	2	28
8.8	6	0	0	
9.0	0	0	0	
9.2	0	0	0	
9.4	0	0	0	
9.6	0	0	0	
9.8	0	0	0	
合計	92			

4.3 2016 年福島県沖の地震の観測データによる検証

2016 年(平成 28 年)11 月 22 日 5 時 59 分に福島県沖で発生した気象庁マグニチュード 7.4 の地震による津波に対して、津波シナリオバンクを用いた津波即時予測技術の適用性の検証を行った。

4.3.1 地震および津波の概要

2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の震源情報および F-net 解を図 4.3-1 に示す。地震は 2016 年 11 月 22 日の 05 時 59 分 46.9 秒に発生し、地震規模は Mw7.0 である。

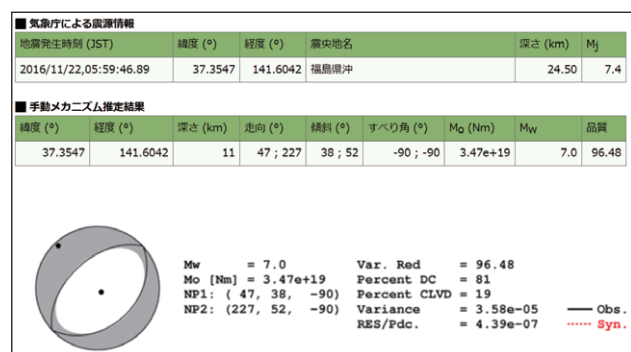


図 4.3-1 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の震源情報および F-net メカニズム解 (防災科学技術研究所 HP より引用)

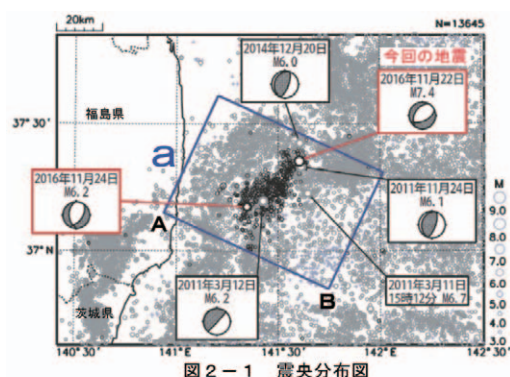


図 2-1 震央分布図 (1997 年 10 月 1 日～2016 年 11 月 30 日、深さ 0 ～ 70 km、M ≥ 3.0)
東北地方太平洋沖地震以前に発生した地震を○、東北地方太平洋沖地震発生以降に発生した地震を●、2016 年 11 月の地震を●で表示。
図中の震源規模は CMT 解

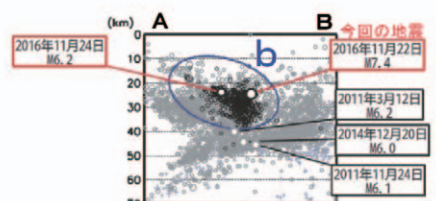


図 2-2 領域 a 内の断面図 (A-B 投影)
※領域 b 付近の浅い震源の深さ精度は十分でないと考えられる。

図 4.3-2 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の余震分布 (気象庁(2016)より引用)

メカニズム解は北東-南西方向の走向を持つ正断層を示している。図 4.3-2 に示す震源分布より、メカニズム解の 2 枚の節面のうち南東傾斜の断層面が震源断層であることが分かる。2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震では、宮城県の仙台港で 144 cm、福島県の相馬で 83 cm、岩手県の久慈港で 79 cm の津波を観測するなど、北海道から和歌山県にかけての太平洋沿岸および伊豆・小笠原諸島で津波が観測された。図 4.3-3 に、国内の津波観測施設で観測した津波の高さおよび主な津波観測施設で観測された津波波形を示す。

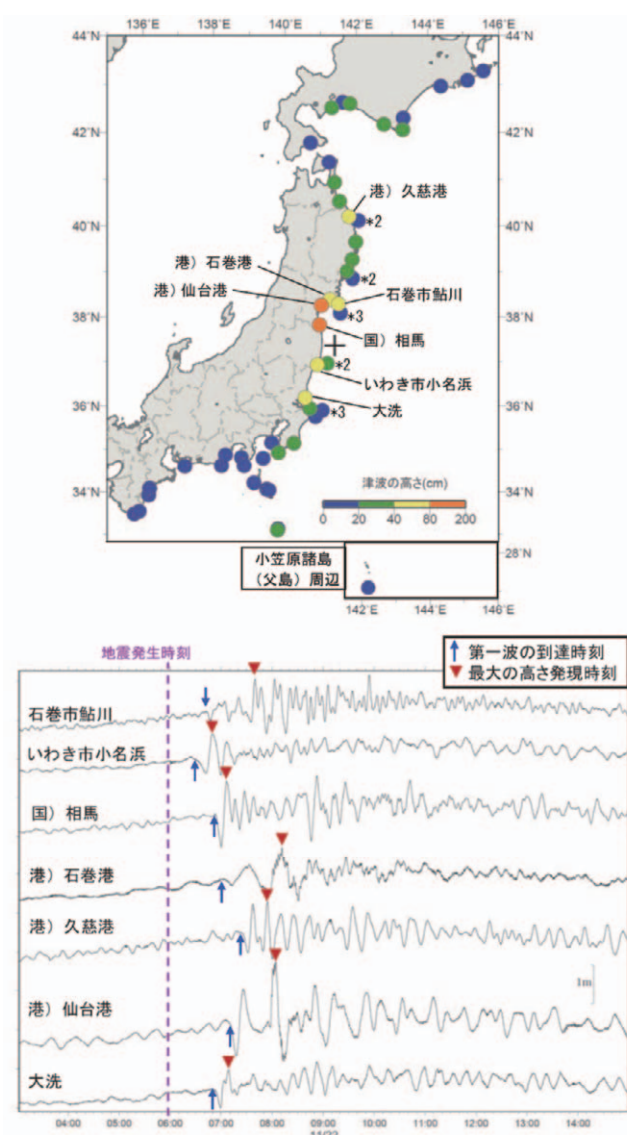


図 4.3-3 津波観測施設で観測した 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の津波の高さ (上図) および沿岸で観測された津波波形 (下図) (気象庁(2016)より引用)

4.3.2 観測波形の整理

波源断層モデルの検討を行うにあたり、2016年11月22日福島県沖の地震で観測された津波観測波形データを整理した。整理したデータは、S-net時刻歴波形と沿岸域の津波観測施設で観測された津波波形である。

4.3.2.1 S-net の観測波形

2016年11月22日福島県沖の地震では、観測が開始されていなかったS6ケーブルを除くS1～S5ケーブルの125観測点で水圧データが観測された。その観測データに対してノイズレベルの確認やランニングスペクトルに基づくデータ品質の確認を行い、最終的に以下の79観測点の観測データを検討に使用した。図4.3-4に解析に使用した各観測点の位置を示す。

S1N01, S1N02, S1N03, S1N05, S1N07,
S1N08, S1N11, S1N12, S1N15, S1N16,
S1N18, S1N19, S1N20, S1N22, S2N01,
S2N02, S2N03, S2N04, S2N05, S2N07,
S2N08, S2N10, S2N11, S2N12, S2N14,
S2N15, S2N16, S2N21, S2N23, S2N24,
S2N26, S3N01, S3N02, S3N03, S3N04,
S3N06, S3N08, S3N09, S3N11, S3N13,
S3N14, S3N15, S3N16, S3N21, S3N23,
S3N24, S3N25, S3N26, S4N01, S4N02,
S4N03, S4N04, S4N05, S4N06, S4N07,
S4N11, S4N12, S4N13, S4N14, S4N15,
S4N16, S4N17, S4N19, S4N20, S4N21,
S4N25, S4N26, S4N27, S4N28, S5N01,
S5N03, S5N11, S5N13, S5N14, S5N15,
S5N17, S5N18, S5N22, S5N23

解析に用いるため、各観測点の観測データに対して以下①～③の処理を行った。処理を行った波形データを図4.3-5に示す。

- ① 周期200秒のハイカットフィルターを適用し、短周期成分をカットした。フィルターには、齋藤(1978)のIIRフィルターを用いた。
- ② 地震時に水圧のステップが生じている観測点に対して、sigmoid関数をフィッティングしてステップを除去した。
- ③ 周期4,000秒のローカットフィルターを適用

し、潮汐などの長周期成分を除去した。フィルターには、齋藤(1978)のIIRフィルターを用いた。

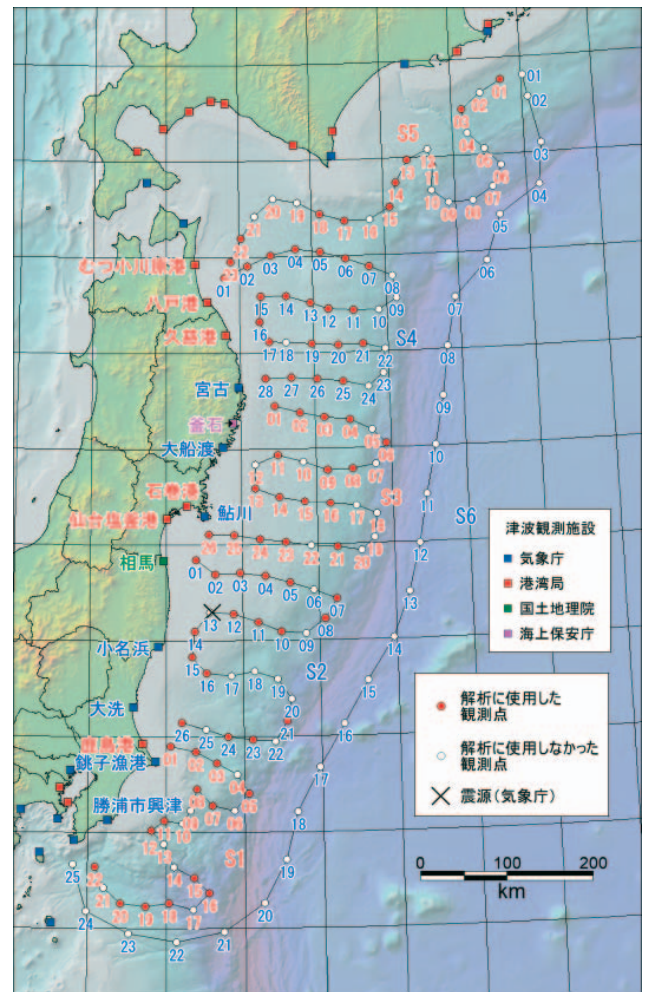


図4.3-4 解析に使用した S-net 観測点および沿岸観測施設

上記の処理を行った水圧データに対して、重力加速度を $9.8 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 、海水の密度を $1.03 \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ として、以下の変換係数により水圧 (Pa) から高さ (m) に変換した。

変換係数：

$$1/(1.03 \times 9.8 \times 10^3) = 0.00009907 \text{ (m/Pa)}$$

なお、津波シナリオバンクを用いたシナリオ選別には、以下のサンプリング間隔およびデータ期間に切り出したデータを用いた。

- ・サンプリング間隔：5.0 秒
- ・データ期間：2016年11月22日5時59分46.8秒(気象庁による地震発生日時)～6時59分46.8秒

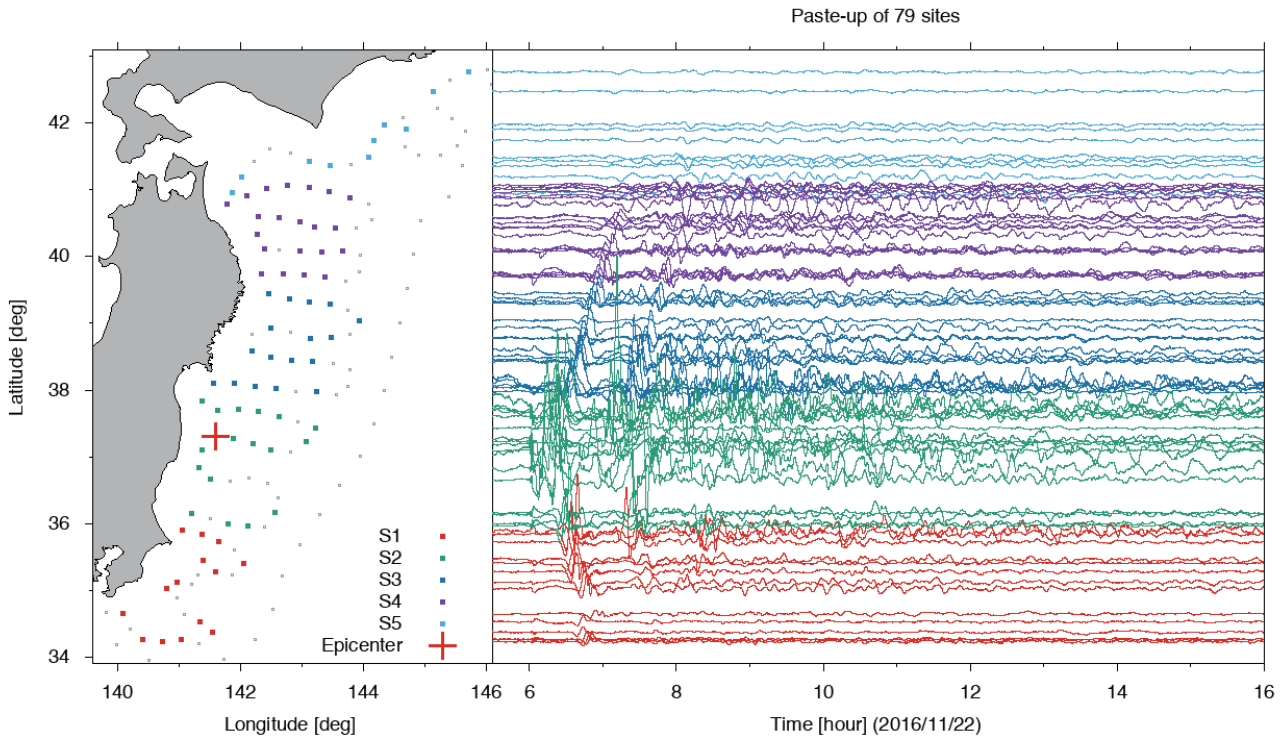


図 4.3-5 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の S-net 観測波形 (フィルター処理後)

4.3.2.2 沿岸域の津波観測施設の観測波形

沿岸域の観測波形としては、表 4.3-1 および図 4.3-4 に示す房総半島～下北半島の 16 観測地点の観測波形を用いた。

観測波形から潮汐成分等を取り除くため、提供を受けた観測データに対して以下の処理を行った。処理を行った観測波形を図 4.3-6 に示す。

- 気象庁、港湾局および国土地理院のデータについては、周期 1,800 秒のハイパスフィルターを掛けて潮汐を除去した。
- 海上保安庁のデータについては、提供データの「Sea Level (Observed)」から「Sea Level (Smoothed)」を差し引くことで潮汐を除去した。

表 4.3-1 解析に使用した津波観測施設

観測機関	観測地点
気象庁	布良，勝浦市興津， 銚子漁港，大洗，小名浜， 鮎川，大船渡，宮古
港湾局 (NOWPHAS)	鹿島港，仙台塩釜港，石巻港， 久慈港，八戸港，むつ小川原港
国土地理院	相馬
海上保安庁	釜石

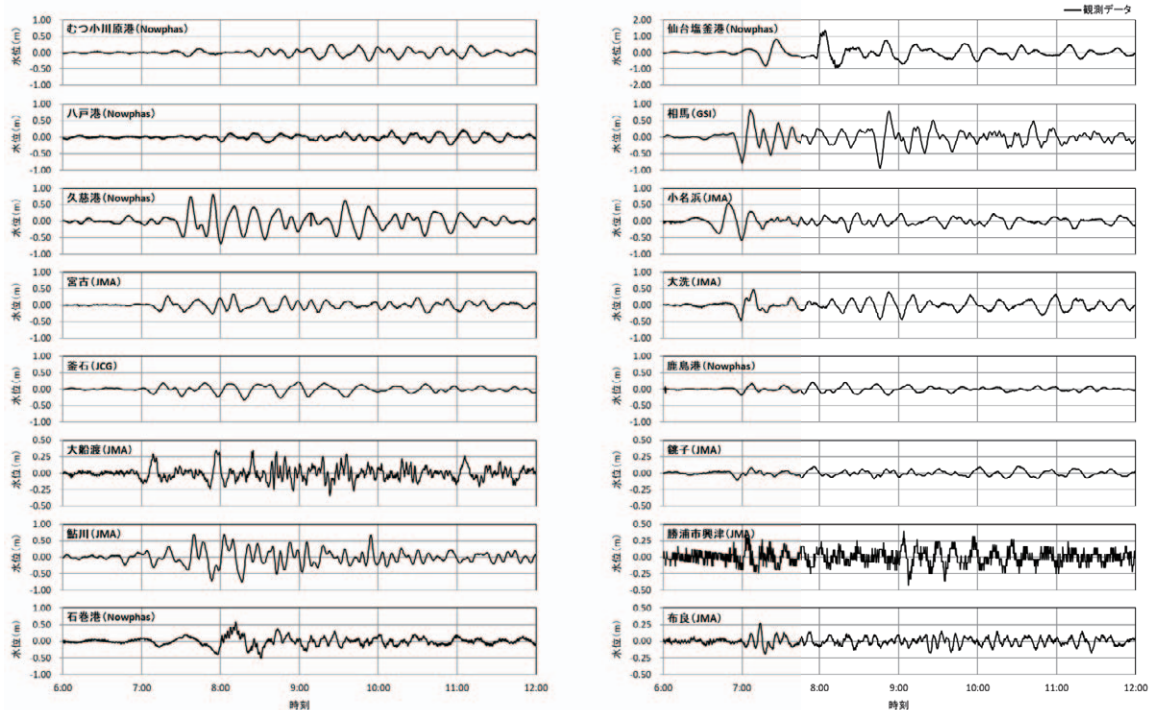


図 4.3-6 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の沿岸津波波形データ

4.3.3 再現モデルの検討

2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震について、S-net で観測された津波波形や沿岸の津波観測施設で観測された津波波形を再現できるような波源断層モデルをフォワードモデリングにより検討した。具体的には、波源断層モデルを仮定した上で、千葉県～青森県の太平洋沿岸を対象として最小 90 m 格子の沖合津波計算を実施して S-net および沿岸域の津波観測施設の観測波形と比較し、再現性の良いモデルを探した。また、沖合津波計算で再現性が良いモデルについては、最小 10 m 格子の地形モデルを用いて沿岸の津波観測施設の地点の津波波形計算を実施した。

フォワードモデリングにより決定された波源断層モデルの断層パラメータを以下に示す。

端点緯度：37.2296°，端点経度：141.3611°，
端点深さ：3.1 km，走向：47 度，傾斜：38 度，
すべり角：-90°，長さ：25.4 km，幅：12.7 km，
すべり量：3.23 m，Mw7.08

走向および傾斜は F-net 解のパラメータを用いた。また、断層面積およびすべり量は、 M_0 -S 関係式において $\beta=9.0$ ，アスペクト比 2.0 として与えた。初期水位分布および沖合津波計算による最大水位分

布を図 4.3-7 に示す。また、沖合津波計算による最大相対水位分布を図 4.3-8 に、S-net 観測点および沿岸域の津波観測施設の観測波形を図 4.3-9 に示す。S-net 観測点の時刻歴波形は水位ではなく地震発生時を 0 とした全水深である。また、沿岸の津波観測施設の時刻歴波形は、設置地点付近の海岸構造物等の影響を受けていると考えられるため、それらを考慮して最小 10 m 格子で計算を実施した。S-net 観測点および沿岸の津波観測施設の地点における計算波形は観測波形をよく再現している。

なお、沿岸津波波形については、釜石および銚子の計算波形にのみ検潮井戸の応答特性を考慮した。Satake *et al.* (1988) は、検潮井戸の特性によって井戸外の水位と井戸内の水位の関係が (4-6) 式の関係にあることを導き、日本沿岸の 40 観測地点について検潮井戸の特性を調べている。

$$\frac{dh}{dt} = W \operatorname{sgn}(H - h) \sqrt{2g|H - h|} \quad (4-6)$$

ここで、

W : 井戸の応答特性を示すパラメータ

sgn : 符号関数

H : 井戸外の水位 (m)

h : 井戸内の水位 (m)

である。応答特性を表すパラメータ W が小さいほど、井戸外の水位に対して井戸内の水位応答が遅れることを示している。

Satake *et al.* (1988) では、表 4.3-1 に記載の 14 観測点のうち 6 観測点(久慈、宮古、釜石、大船渡、鮎川、銚子)の応答特性を調査している。各観測点の応答特性パラメータ W は次のとおりである。

- ・ 久慈 : $W > 5 \times 10^{-3}$
- ・ 宮古 : $W > 5 \times 10^{-3}$
- ・ 釜石 : $W = 8 \times 10^{-4}$
- ・ 大船渡 : $W > 5 \times 10^{-3}$
- ・ 鮎川 : $W > 5 \times 10^{-3}$
- ・ 銚子 : $W = 3.5 \times 10^{-4}$

応答特性パラメータ W は釜石と銚子で小さいが、それ以外の観測点では大きく、井戸内の水位は井戸外の水位をそのまま示していると見なせる。そのため、釜石と銚子に限って計算した津波波形に対して(4-6)式で井戸内の水位波形を算出した上で観測波形データと比較し、それによって観測波形をよく説明するようになることが確認された。

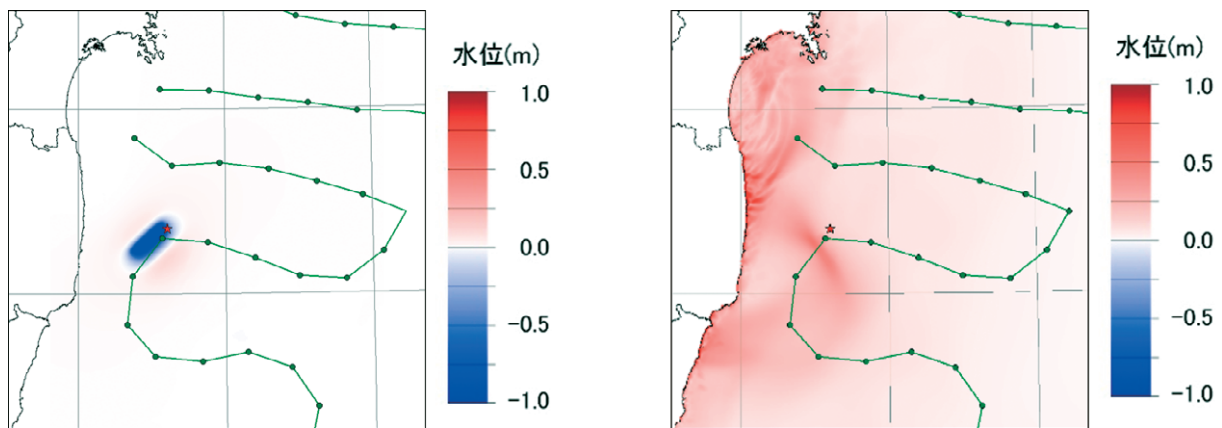


図 4.3-7 フォワードモデリングにより決定した 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の再現断層モデル
左：初期水位分布，右：最大水位分布

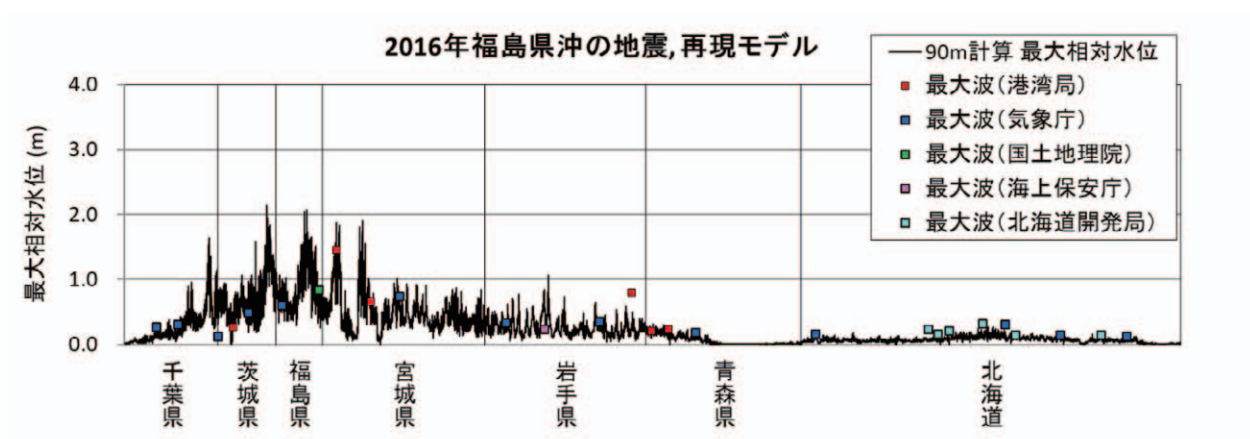
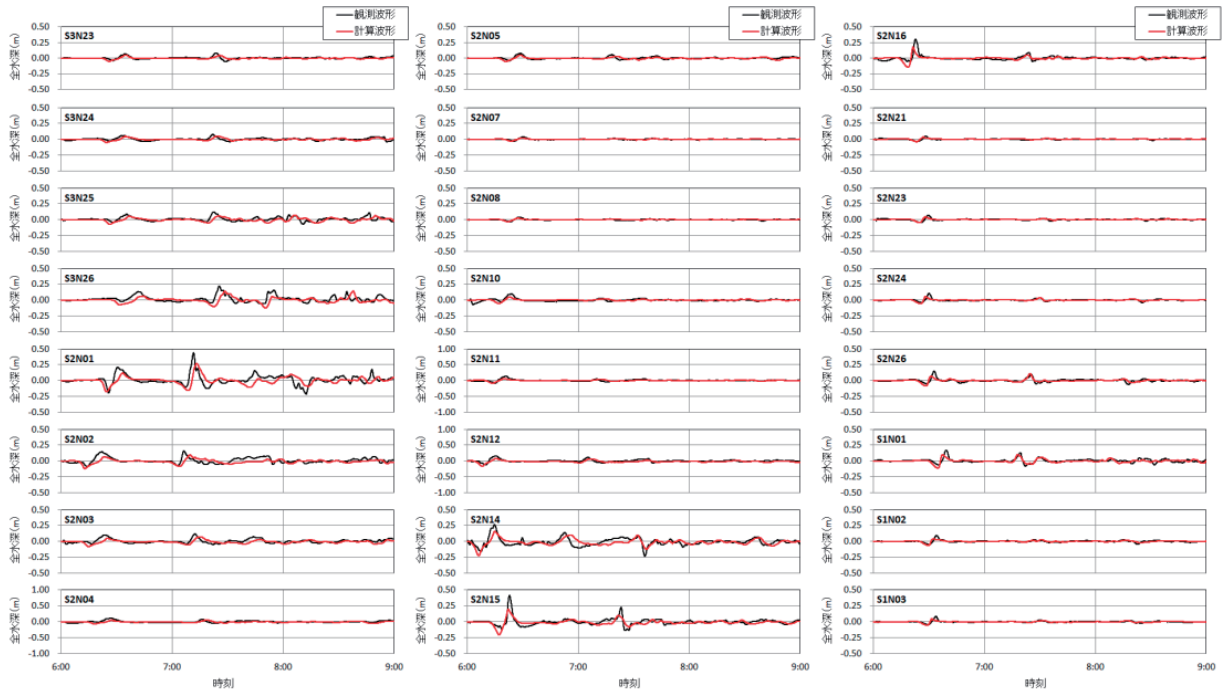
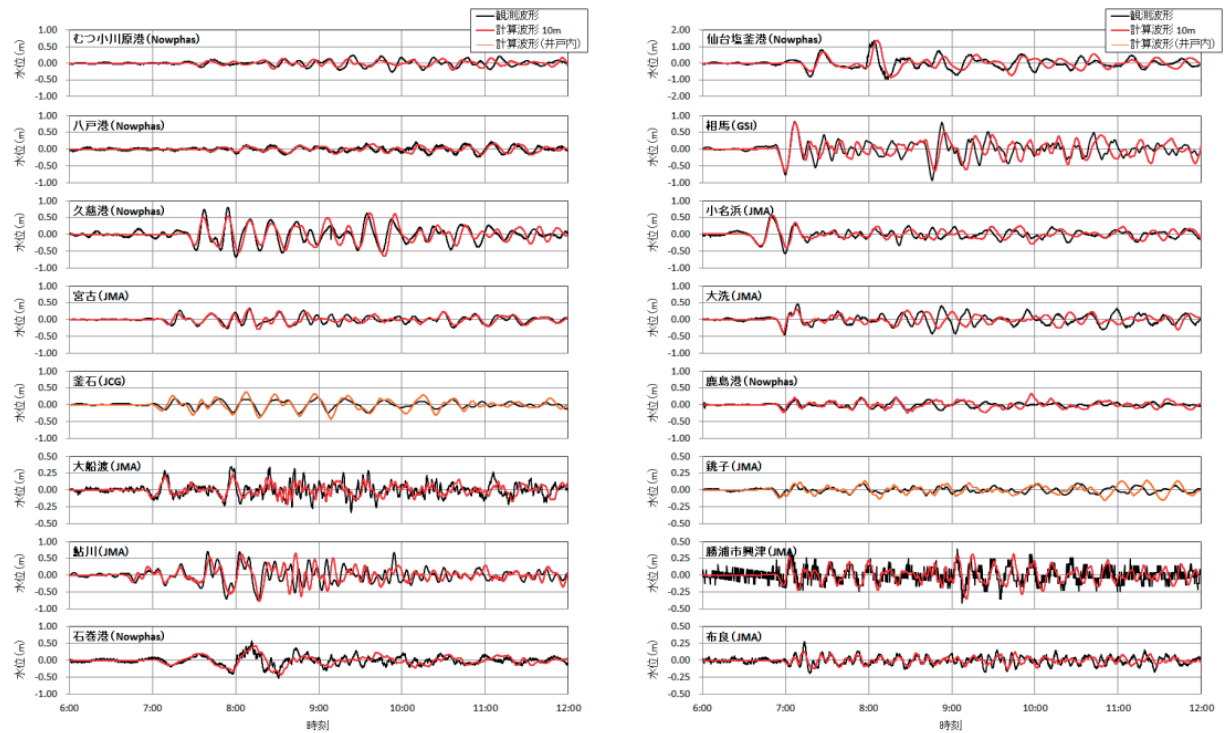


図 4.3-8 フォワードモデリングにより決定した 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の再現断層モデル
による津波伝播計算による最大相対水位分布および沿岸の津波観測施設の津波の高さ

津波浸水の即時予測を目的とした津波シナリオバンクの構築－近貞ほか



S-net 時刻歴波形



沿岸津波波形

図 4.3-9 フォワードモデリングにより決定した 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の再現断層モデル
S-net 時刻歴波形および沿岸津波波形(黒線：観測波形，赤線：計算波形，橙線：井戸内波形)

4.3.4 先行研究の断層モデルを用いた計算

Gusman *et al.* (2017) による 2016 年福島県沖地震の波源断層モデルを用いて計算を実施した。Gusman *et al.* (2017) のモデルは津波波形インバージョンによる不均質断層モデルである。ただし、S-net の観測波形は断層モデルの推定に使用されていない。図 4.3-10 に断層すべり量分布を示す。

初期水位分布および沖合津波計算による最大相対水位を図 4.3-11 に示す。また、沖合津波計算による沿岸の最大相対水位分布を図 4.3-12 に、S-net 観測点波形および沿岸津波波形を図 4.3-13 に示す。初期水位分布および最大相対水位分布は 4.3.3 項で設定した再現モデルと類似しているが、初期水位分布では南側に沈降域がより広がっている。S-net 観測点波形は、図 4.3-9 に示した再現断層モデルに比べてやや一致が悪いものの、全体的に良く再現出来ている。S2N14 の計算波形が観測波形とレベルがずれて

いるが、これは、再現モデルに比べて波源域がやや南側に広がり S2N14 観測点が沈降域となっているためである。

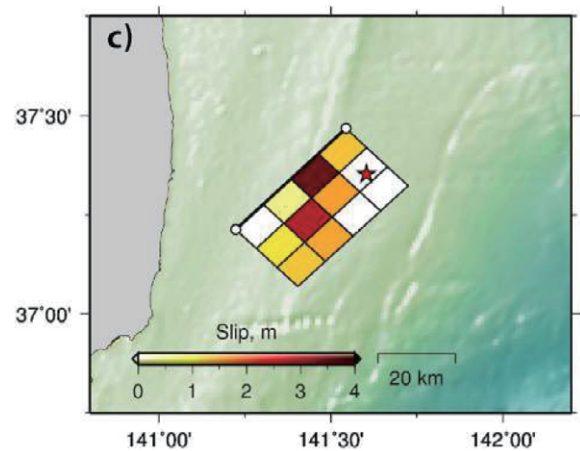


図 4.3-10 Gusman *et al.* (2017) の断層すべり量分布

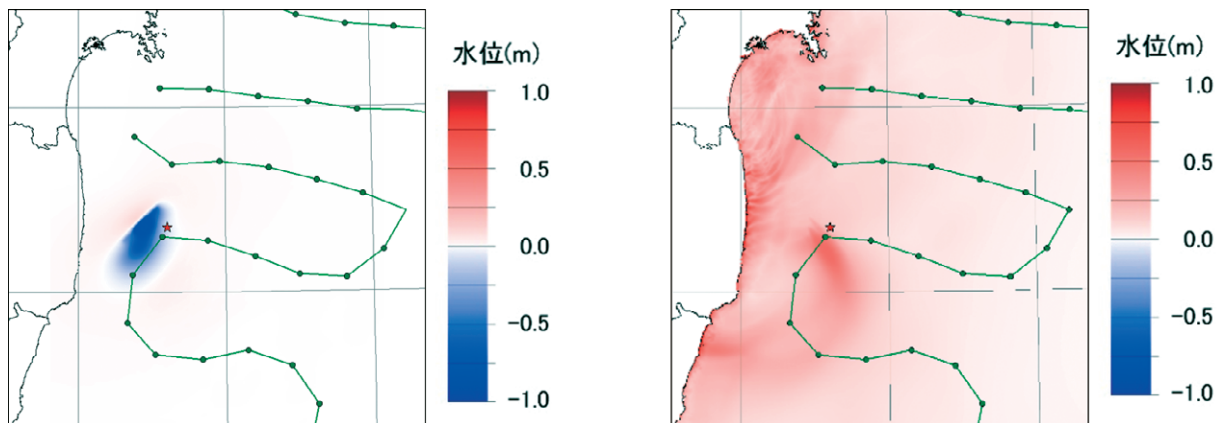


図 4.3-11 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の Gusman *et al.* (2017) による断層モデル
左：初期水位分布，右：最大水位分布

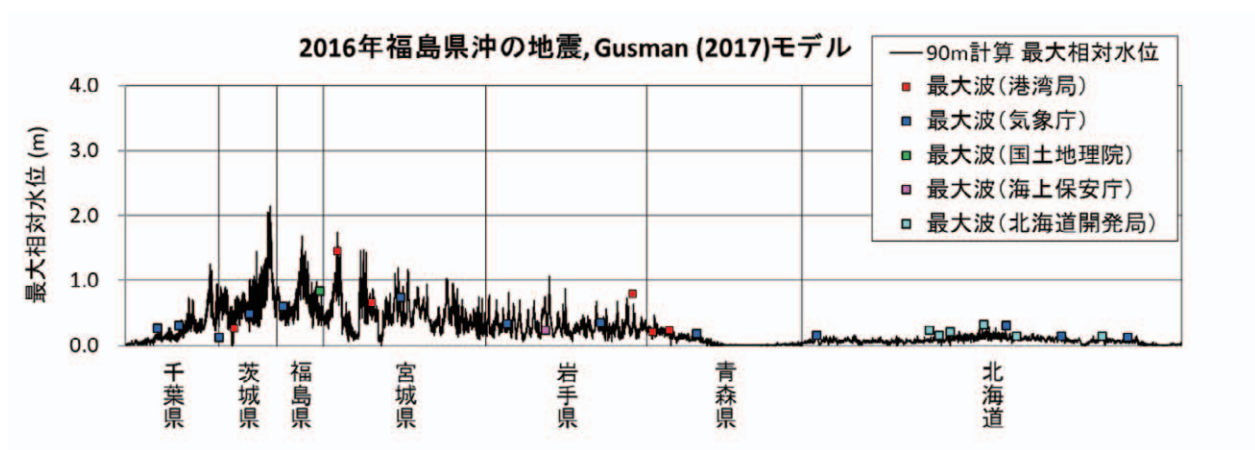
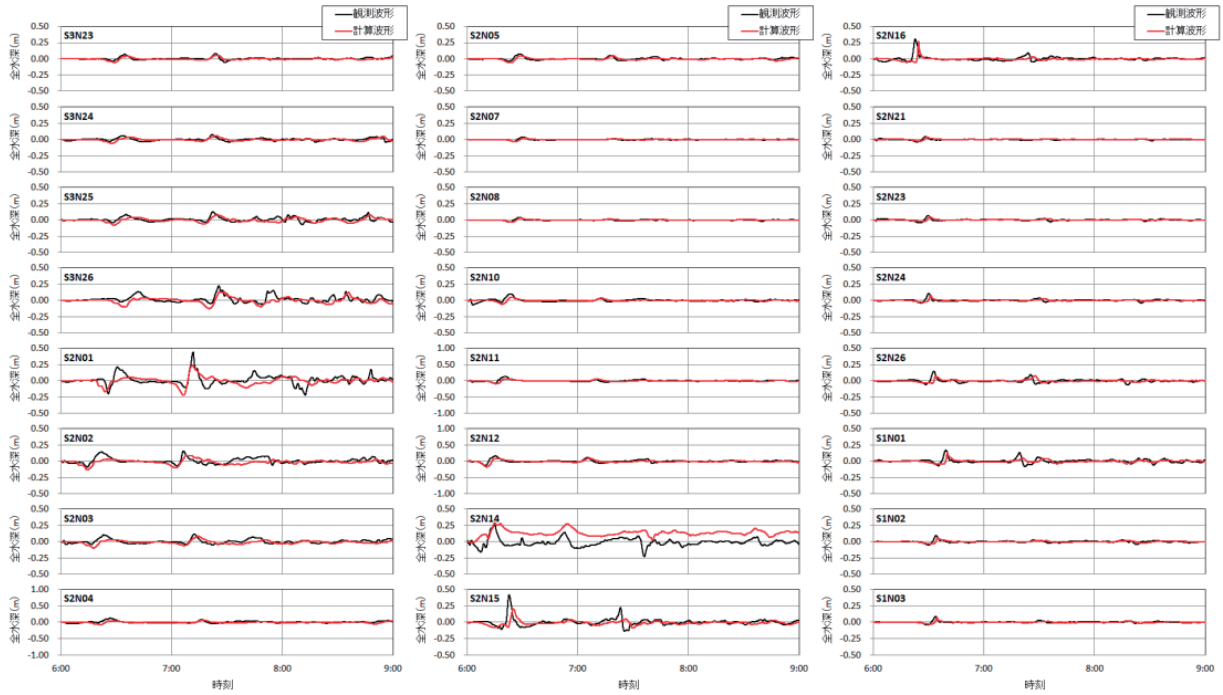
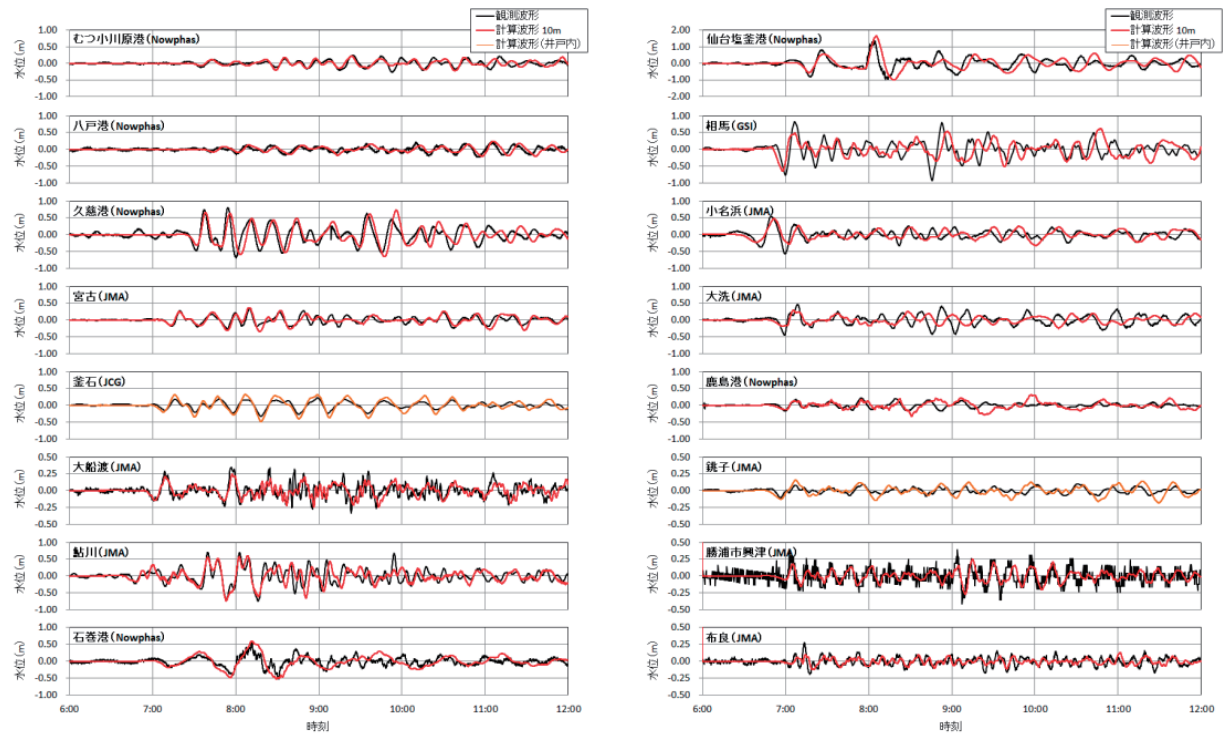


図 4.3-12 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の Gusman *et al.* (2017) による断層モデル
津波伝播計算による最大相対水位分布および沿岸の津波観測施設の津波の高さ

津波浸水の即時予測を目的とした津波シナリオバンクの構築－近貞ほか



S-net 時刻歴波形



沿岸津波波形

図 4.3-13 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の Gusman *et al.* (2017) による断層モデル S-net 時刻歴波形および沿岸津波波形(黒線：観測波形，赤線：計算波形)

4.3.5 観測データを用いたシナリオ選別

4.3.2 項で整理した 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の S-net 観測点の波形データを観測データとして、3.6.2 項で構築した即時予測対象地域を対象とした津波シナリオバンク(合計約 6 万 6 千シナリオ)および 3.6.3 項で構築した概観予測対象地域を対象とした津波シナリオバンク(合計約 8 千シナリオ)を用いて 4.1.1 項の Multi-index 法によるシナリオ選別を行った。Multi-index 法によるシナリオ選別に使用した観測点は 4.3.2 項に示した 79 観測点とし、選別のタイミングは地震発生から 10 分とした。なお、大陸プレートのプレート内地震のシナリオは、即時予測対象地域を対象とした津波シナリオバンクのみに含まれるが、その設定範囲は房総半島を中心とした範囲に限られているため、2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の震源域には設定されていない。

図 4.3-14 に即時予測対象地域を対象としたシナリオ選別結果を示す。選別されたシナリオ数は合計 7 シナリオであり、波源域が福島県沖となるプレート間地震が 5 シナリオ、大陸プレート内地震が 2 シナリオ選別されている。大陸プレート内地震は、上述のように 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の震源域には設定されていないが、設定されているシナリオの中で最も北側の北緯 37 度付近(茨城県と福島県の県境付近)の沖合に位置するシナリオが選別されている。

図 4.3-15 に概観予測対象地域を対象としたシナリオ選別結果を示す。選別されたシナリオは 5 シナリオであり、即時予測対象地域を対象としたシナリオ選別結果と同様に、波源域が福島県沖となるプレート間地震が選別されている。最大相対水位分布の平均分布は検潮記録の最大波高と大きな矛盾は見られない。しかし、4.3.3 項に示した再現モデルによる最大相対水位分布や 4.3.4 項に示した Gusman *et al.* (2017) による最大相対水位分布と比較すると、福島県や茨城県でのピークが出ておらず、高さも全体的に低く、予測が過小評価となっている可能性がある。このように最大相対水位が低くなる理由として、概観予測対象地域を対象とした津波シナリオに大陸プレート内地震のシナリオが含まれていないことが挙げられる。

大陸プレート内地震がシナリオとして選別されている即時予測対象地域を対象としたシナリオ選別結

果(図 4.3-14 d))を見ると、最大相対水位が高いシナリオが 2 シナリオ含まれていることがわかる。これらはいずれも大陸プレート内地震のシナリオである。これらのシナリオが加わることで、千葉県九十九里では最大相対水位が 0.4 ~ 0.5 m となっており、4.3.3 項に示した再現モデルの最大相対水位と整合的である。ただし、沿岸の津波観測施設で観測された津波の高さは観測点数が少なく、最大相対水位の予測が適切に予測できているか十分に確認ができない。そこで、4.3.3 項に示した再現モデルを疑似観測シナリオとした場合のシナリオ選別を実施した。図 4.3-16 および図 4.3-17 に再現モデルを疑似観測シナリオとした場合の即時予測対象地域を対象としたシナリオ選別結果および概観予測対象地域を対象としたシナリオ選別結果を示す。即時予測対象地域を対象としたシナリオ選別では、大陸プレート内地震のシナリオが選別されたことで、最大相対水位が疑似観測シナリオと同等の高さとなっている。ただし、旭市および銚子市のピークは再現出来ていない。一方、概観予測対象地域を対象としたシナリオ選別では、宮城県の最大相対水位のピークは表現しているものの千葉県から福島県にかけて全体的に過小な予測となっている。

Figure 10 consists of two scatter plots and a legend. The left plot is titled '全65,587シナリオ (T=10分)' and the right plot is titled '全65,587シナリオ (T=10分)'. Both plots show VRC on the y-axis (ranging from -5.0 to 1.0) and VRO on the x-axis (ranging from 1.0 to -5.0). The left plot has a shaded region in the upper right corner. The right plot has a shaded region in the upper left corner. The legend on the right lists various Mw values and their corresponding colors and shapes:

- 千島海溝～伊豆・小笠原海溝 プレート間: Mw7.6 (purple square), Mw7.8 (blue square), Mw8.0 (cyan square), Mw8.2 (green square), Mw8.4 (yellow square), Mw8.6 (red square), Mw8.8 (dark blue triangle), Mw9.0 (light blue triangle), Mw9.2 (cyan triangle), Mw9.4 (green triangle), Mw9.6 (yellow triangle), Mw9.8 (red triangle)
- アウターライズ プレート内: Mw7.6 (purple circle), Mw7.8 (blue circle), Mw8.0 (cyan circle), Mw8.2 (green circle), Mw8.4 (yellow circle), Mw8.6 (red circle), Mw8.8 (dark blue circle), Mw9.0 (light blue circle), Mw9.2 (cyan circle), Mw9.4 (green circle), Mw9.6 (yellow circle), Mw9.8 (red circle)
- 相模トラフ プレート間: Mw7.6* (purple square), Mw7.8* (blue square), Mw8.0* (cyan square), Mw8.2* (green square), Mw8.4* (yellow square), Mw8.6* (red square), Mw8.8* (dark blue triangle), Mw9.0* (light blue triangle), Mw9.2* (cyan triangle), Mw9.4* (green triangle), Mw9.6* (yellow triangle), Mw9.8* (red triangle)
- 南海トラフ プレート間: Mw7.6* (purple square), Mw7.8* (blue square), Mw8.0* (cyan square), Mw8.2* (green square), Mw8.4* (yellow square), Mw8.6* (red square), Mw8.8* (dark blue triangle), Mw9.0* (light blue triangle), Mw9.2* (cyan triangle), Mw9.4* (green triangle), Mw9.6* (yellow triangle), Mw9.8* (red triangle)

A note at the bottom right of the legend indicates 'R=0.7'.

★ 2016年福島県沖地震震源(気象庁)

● S-net

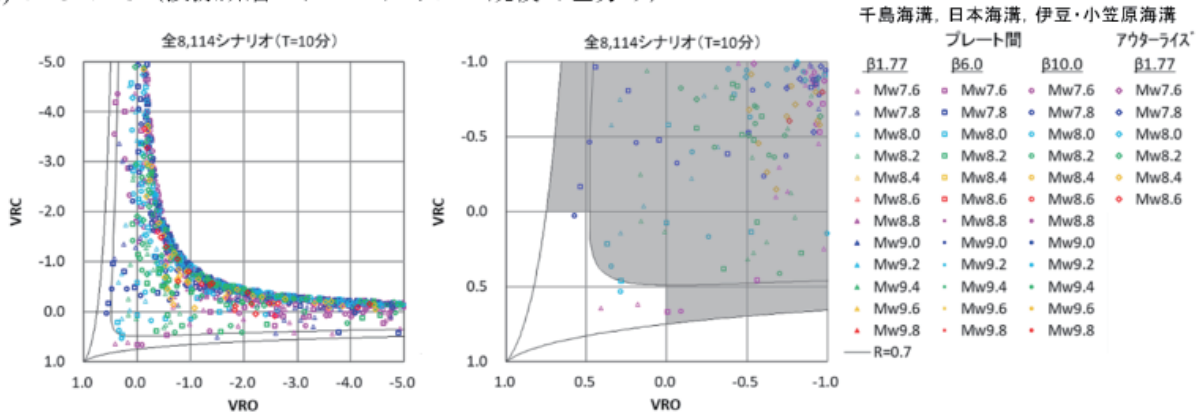
▭ 選別シナリオ

Figure 1 is a line graph showing the maximum relative water level (m) for the VR selection scenario. The y-axis represents the maximum relative water level in meters, ranging from 0.0 to 2.0. The x-axis lists various locations along the coast. Two data series are plotted: a red line representing the average (VR選別シナリオ 平均) and a grey line representing the total (VR選別シナリオ 全て). The average water level is generally low, fluctuating between 0.1 and 0.2 meters, with a notable peak of about 0.8 meters near Katsuragi City. The total water level shows much higher variability, with peaks reaching up to 1.8 meters, particularly around Katsuragi City and the area between Katsuragi and Katsuragi City.

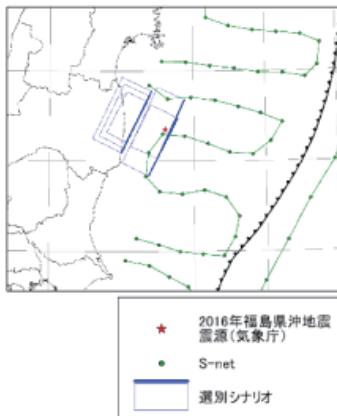
No.	中継文庫										
	千島通一伊豆・小笠原道雄				プレート内		相模トラフ		南相模トラフ		
	プレート間		アウターサイズ		プレート内		プレート間		プレート間		
	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=10.0$	$\beta=1.0$ 本海側	$\beta=1.77$ 副都心	$\beta=3.77$ 43度副都心	$\beta=2.0$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=1.77$
7.0							-0.01	-0.16			
7.2							-0.01	-0.34			
7.4							-0.02	-0.19			
7.6	0.49	0.55	0.54		-0.67	-0.64	-0.06	-0.53	-0.63	-0.68	-20.91
7.8	-0.40	0.32	0.15		-0.71	-0.60	-0.14	-0.19	-0.47	-0.55	-11.44
8.0	-1.65	0.35	0.15		-0.69	-0.56	0.54	-0.49	-0.56	-0.54	-9.11
8.2	-0.50	0.68	0.00		-0.44	-0.70		-0.10	-0.65	-0.61	-3.16
8.4	-1.07	-1.00	-0.88	-2.75	-0.39	-0.67			-5.37	-0.41	-7.66
8.6	-0.80	-0.95	-0.81	-5.14	-0.08	-0.61			-13.21	-0.17	-4.66
8.8	-1.14	-0.90	-0.82	-4.05						-29.29	-2.19
9.0	-1.57	-0.75	-0.85	-11.80							-1.82
9.2	-1.19	-0.62	-0.82								-1.19
9.4	-24.54	-0.59	-0.54								
9.6	-65.43	-0.65	-0.48								

[illegible]

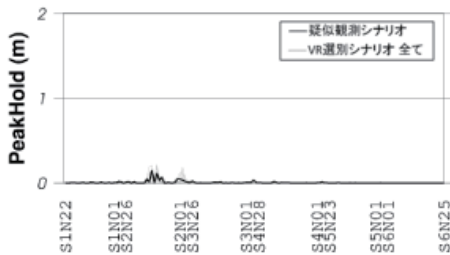
a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



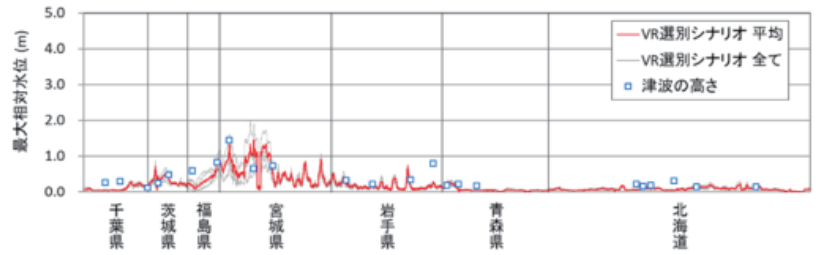
b) 選別シナリオ位置図



c) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



d) 最大相対水位分布



e) VR 最大値

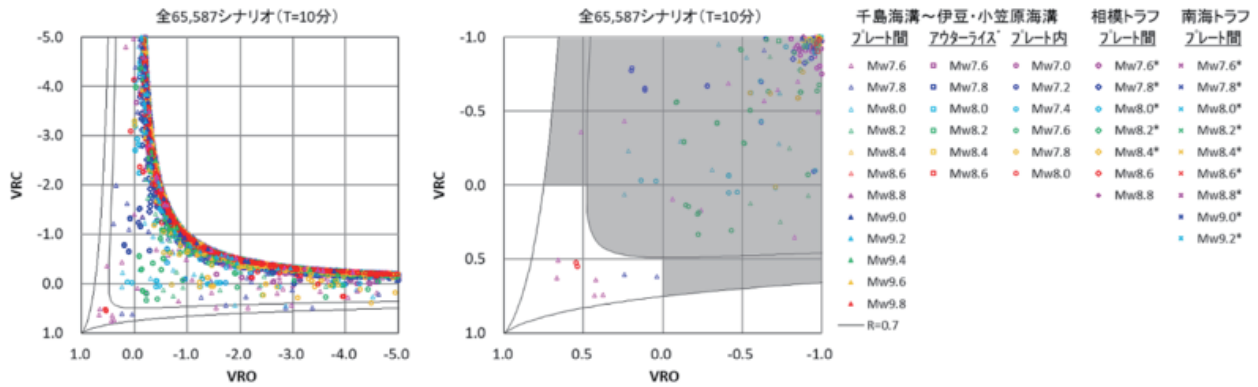
Mw	VR最大値			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=10.0$	$\beta=1.77$
7.6	0.54	0.42	0.39	-0.67
7.8	-0.09	0.27	0.36	-0.71
8.0	0.22	0.38	0.42	-0.68
8.2	0.11	0.09	0.00	-0.44
8.4	-1.91	-1.94	-3.07	-0.39
8.6	-2.49	-5.67	-5.67	-0.68
8.8	-3.99	-8.20	-10.90	
9.0	-5.41	-13.51	-20.98	
9.2	-9.13	-16.73	-22.02	
9.4	-33.59	-21.55	-30.76	
9.6	-65.46	-37.94	-38.91	
9.8	-85.77	-127.50	-0.93	

f) VR 選別数

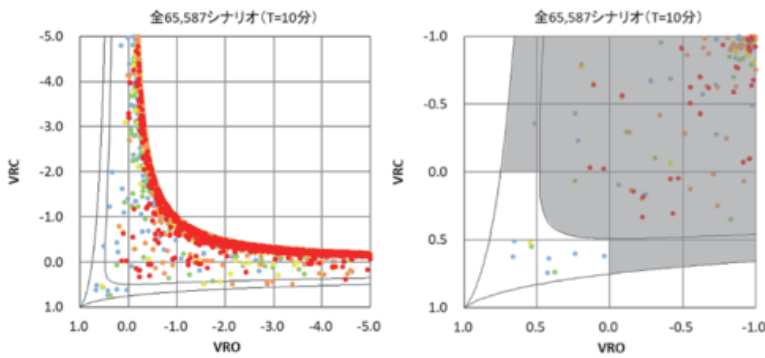
Mw	VR選別数			
	プレート間			アウターライズ
	$\beta=1.77$	$\beta=6.0$	$\beta=10.0$	$\beta=1.77$
7.6	2	0	0	0
7.8	0	0	1	0
8.0	0	1	1	0
8.2	0	0	0	0
8.4	0	0	0	0
8.6	0	0	0	0
8.8	0	0	0	
9.0	0	0	0	
9.2	0	0	0	
9.4	0	0	0	
9.6	0	0	0	
9.8	0	0	0	
合計	5			

図 4.3-15 概観予測対象地域に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
観測シナリオ: 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の観測波形

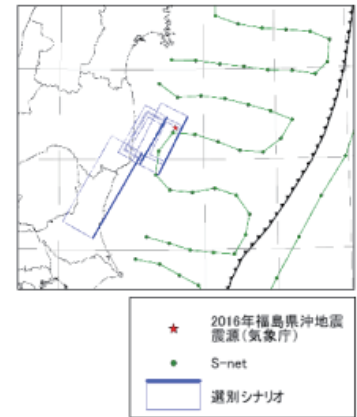
a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



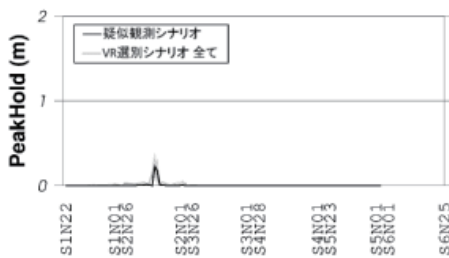
b) VRO-VRC (HVR で色分け)



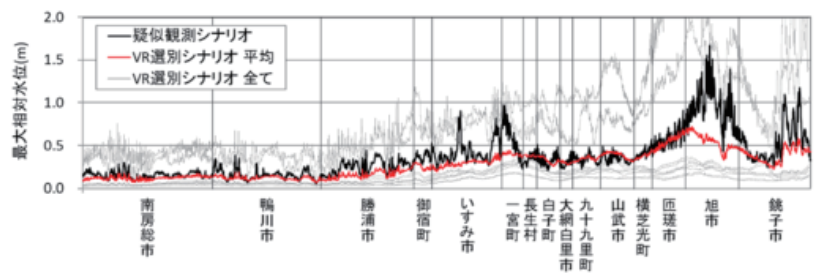
c) 選別シナリオ位置図



d) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



e) 最大相対水位分布



f) VR 最大値

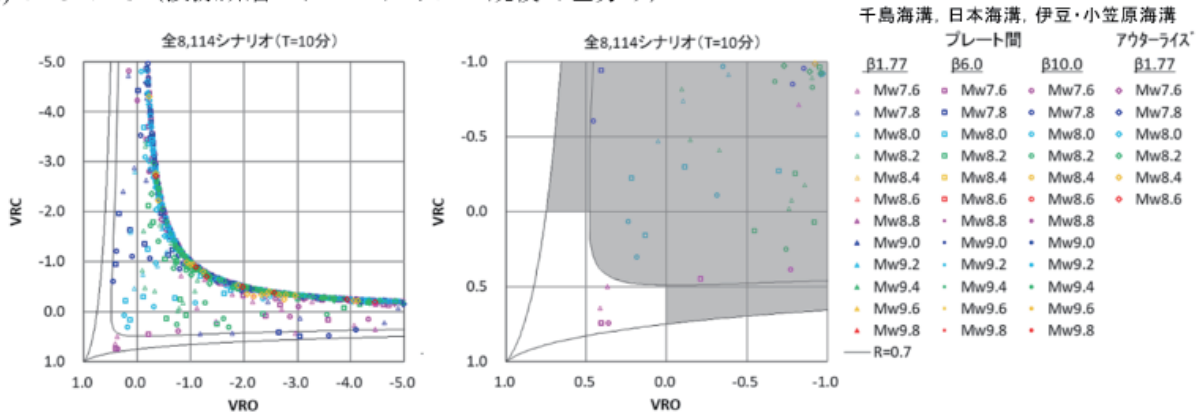
Mw	VR最大値									
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝					相模トラフ				
	プレート間	プレート内	プレート間	プレート内	プレート間	プレート間	プレート内	プレート間	プレート内	プレート間
7.0	β=1.77	β=8.0	β=10.0	β=1.77	β=8.0	β=1.77	β=8.0	β=1.77	β=8.0	β=1.77
7.2										
7.4										
7.6	0.94	0.92	0.93	-0.88	-0.93	0.93	-0.93	-0.93	-0.93	-19.23
7.8	-0.15	0.95	0.93	-0.95	-0.94	-0.93	-0.93	-0.93	-0.93	-19.23
8.0	-1.05	0.02	0.18	-0.94	-0.94	0.94	-0.94	-0.94	-0.94	-5.93
8.2	-1.81	-0.18	-0.14	-0.85	-0.94					-3.18
8.4	-1.95	-1.09	-1.00	-0.99	-0.95	-0.93				-1.17
8.6	-1.97	-1.00	-0.96	-0.99	-0.97	-0.93				-4.84
8.8	-1.11	-1.00	-1.02	-0.92	-0.97					-2.79
9.0	-1.47	-0.94	-0.93	-12.84						-2.02
9.2	-1.34	-0.92	-0.90							-1.40
9.4	-15.00	-0.90	-0.88							
9.6	-2.89	-0.85	-0.85							
9.8	-100.01	-14.18	-2.33							

g) VR 選別数

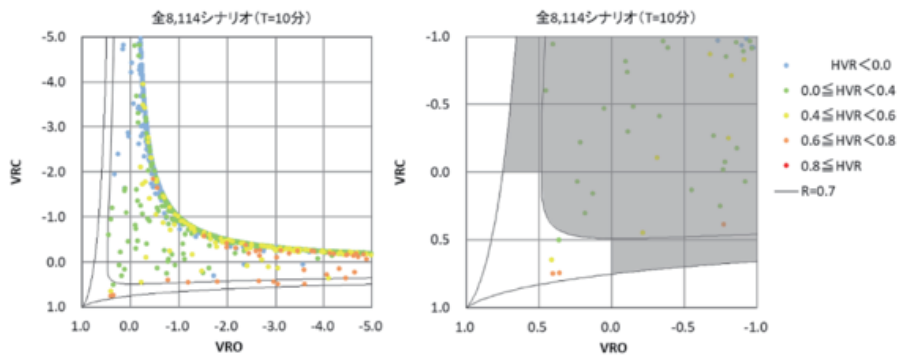
Mw	VR選別数									
	千島海溝～伊豆・小笠原海溝					相模トラフ				
	プレート間	プレート内	プレート間	プレート内	プレート間	プレート間	プレート内	プレート間	プレート内	プレート間
7.0	β=1.77	β=8.0	β=10.0	β=1.77	β=8.0	β=1.77	β=8.0	β=1.77	β=8.0	β=1.77
7.2										
7.4										
7.6	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0
7.8	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
8.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計										

図 4.3-16 即時予測対象地域に対するシナリオ選別結果(t=10 分)
疑似観測シナリオ：フォワードモデリングにより決定した 2016 年福島県沖の再現モデル

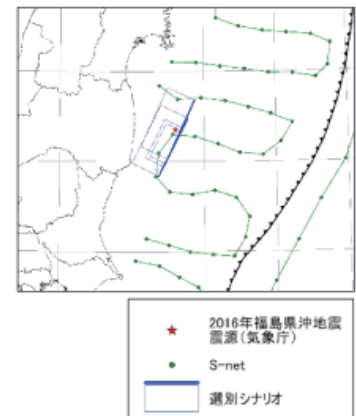
a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



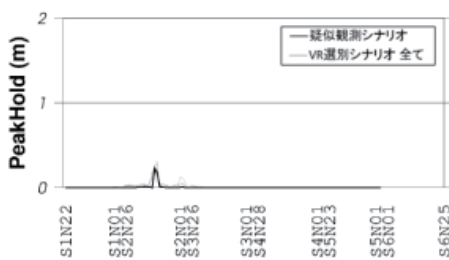
b) VRO-VRC (HVR で色分け)



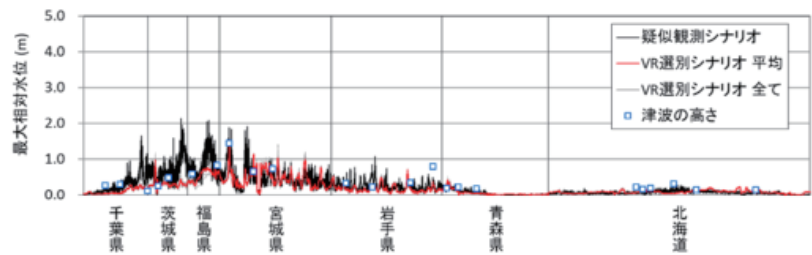
c) 選別シナリオ位置図



d) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



e) 最大相対水位分布



f) VR 最大値

Mw	VR最大値			
	プレート間	プレート間	プレート間	アウターライズ
7.6	0.54	0.61	0.59	-0.98
7.8	-0.10	-0.07	0.07	-0.95
8.0	-0.18	0.15	0.25	-0.94
8.2	-0.30	-0.16	-0.14	-0.85
8.4	-2.41	-2.76	-3.98	-0.95
8.6	-3.14	-7.10	-7.33	-0.97
8.8	-5.90	-10.13	-13.09	
9.0	-8.66	-19.47	-24.98	
9.2	-9.74	-23.20	-35.14	
9.4	-35.98	-29.35	-47.15	
9.6	-72.67	-41.54	-59.41	
9.8	-100.22	-141.81	-1.02	

g) VR 選別数

Mw	VR選別数			
	プレート間	プレート間	プレート間	アウターライズ
7.6	2	1	1	0
7.8	0	0	0	0
8.0	0	0	0	0
8.2	0	0	0	0
8.4	0	0	0	0
8.6	0	0	0	0
8.8	0	0	0	0
9.0	0	0	0	0
9.2	0	0	0	0
9.4	0	0	0	0
9.6	0	0	0	0
9.8	0	0	0	0
合計	4			

図 4.3-17 概観予測対象地域に対するシナリオ選別結果 (t=10 分)

疑似観測シナリオ: フォワードモデリングにより決定した 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の再現モデル

4.3.6 検証用津波シナリオによるシナリオ選別

本研究資料で構築した津波シナリオバンクでは大陸プレート内地震は房総沖に限定して設定を行った(3.3.5 項)ため、2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の観測データを対象にシナリオ選別を行った場合に適切なシナリオが選別されない(4.3.5 項)。本項では、大陸プレート内地震のシナリオを福島県沖に設定した場合に、2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震が適切にシナリオ選別されるか確認を行った。

4.3.6.1 検証用津波シナリオの設定

検証用の津波シナリオとして、福島県沖の陸寄り 1.0 度×1.0 度の範囲(北緯 36.8 ～ 37.8 度，東経 141.2 ～ 142.2 度)に、房総沖に設定した大陸プレート内地震と同様に 0.2 度間隔で波源断層モデルを設定した。図 4.3-18 に設定した断層上辺中央の位置を示す。断層は一樣すべりの矩形断層モデルであり、断層サイズおよび断層すべり量は、 $\beta = 2.00$ および 6.00 として M_0 -S 関係式より設定を行った。その際、剛性率は $\mu = 5.0 \times 10^{10}$ (N/m)とした。地震の規模は、 $M_w 7.0, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8, 8.0$ の 6 規模とし、全て一樣すべりの矩形断層モデルとした。断層の走向は、房総沖に設定した大陸プレート内地震と同様に、30 度間隔で 0 度～330 度まで 12 方向を設定した。参考として、福島県沖の海底地質構造を図 4.3-19 に示す。北北東－南南西の走向を持つ地質構造および構造線が発達している。以下に設定した福島県沖の大陸プレート内地震の断層パラメータを示す。

波源断層モデルの設定条件

- ・ M_0 -S 関係式の β : 2.0 および 6.0
- ・ 地震規模 : $M_w 7.0, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8, 8.0$
- ・ 設定範囲 : 福島県沖の 1.0 度×1.0 度の範囲
- ・ 断層配置間隔 : 緯度・経度ともに 0.2 度間隔 (合計 36 点)
- ・ 走向 : 0 ～ 330 度, 30 度間隔
- ・ 傾斜 : 45 度のみ
- ・ すべり角 : 90 度および -90 度 (=270 度)

設定した波源断層モデルは合計 10,368 モデルである。図 4.3-20 に例として、 $M_w 7.0$ ，走向 30 度の波源断層モデルを示す。

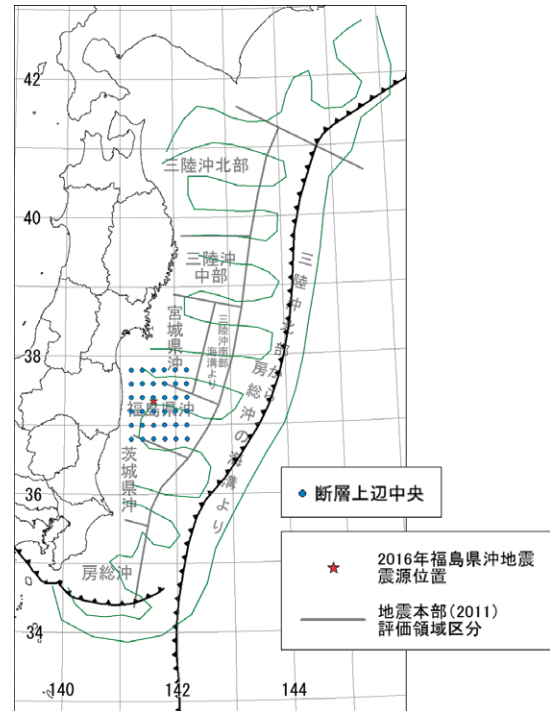


図 4.3-18 矩形断層モデルの断層上辺中央の位置(合計 36 地点)および 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の震央位置

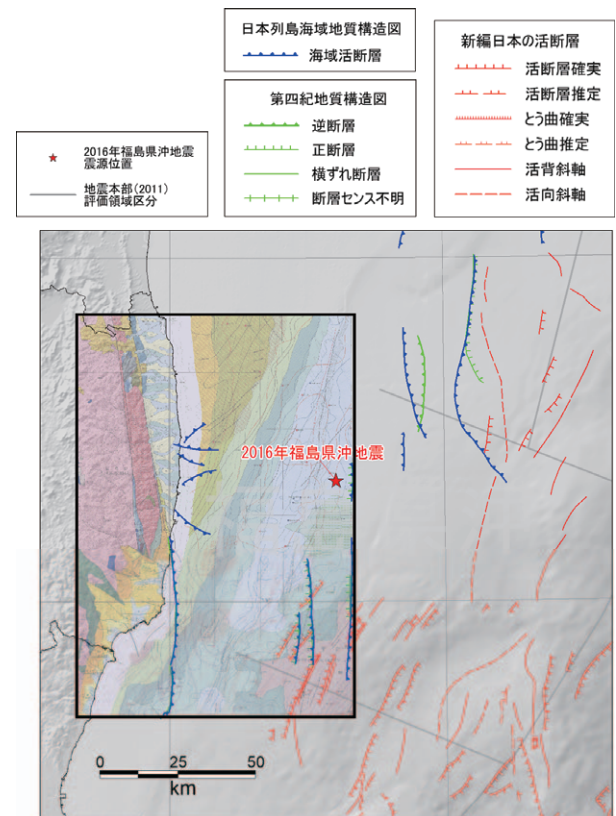


図 4.3-19 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の震源と「新編日本の活断層」, 「日本周辺海域の第四紀地質構造図」, 「日本列島海域地質構造図」の活構造および福島県沖の「1/20 万海洋地質図・海底地質図(黒枠線内)」の比較。各資料の出典は表 3.3-13 参照のこと。

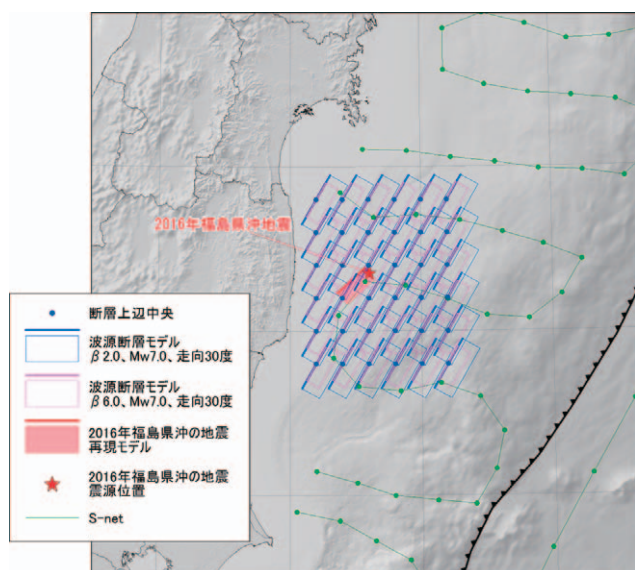


図 4.3-20 設定した波源断層モデルの例
Mw7.0, 走向 30 度, $\beta=2.0$ および 6.0 のモデルを示す。

4.3.6.2 S-net 観測点における津波波形の計算

S-net 観測点の津波波形を求めるための計算は、最小 810 m 格子で行った。また、後述のシナリオ選別によって選別されたシナリオに対しては、概観予測対象地域を対象とした最小 90 m 格子の計算を実施した。

4.3.6.3 シナリオ選別の実施

4.1.1 項の Multi-index 法により、設定した 10,368 モデルの網羅的な波源断層モデル群に対するシナリオ選別を実施した。観測データには 4.3.2 項で整理した 79 点(図 4.3-4)の S-net 観測点データを用いた。シナリオ選別を行うタイミングによって選別シナリオ数および VR の最大値がどのように変わるかを図 4.3-21 に示す。シナリオ選別数は $t=3$ 分未満のごく短い時間では大きいですが、 $t=3$ 分になると減少し、 $t=6$ 分まで少ない。 $t=7$ 分以降は時間に比例してシナリオ選別数が増えていき、 $t=30$ 分でも頭打ちはしていない。一方、VR 最大値は $t=4$ 分以降に時間とともに大きくなり $t=14$ 分以降は大きく変化していない。図 4.3-22 ~ 図 4.3-24 に、 $t=5$ 分、10 分および 20 分におけるシナリオ選別結果を示す。図 4.3-22 に示す $t=5$ 分では選別シナリオ数が少なく、沿岸の最大相対水位分布は観測値に比べて明らかに過大である。これは、 $t=5$ 分では S-net 観測点に水圧変化が生じやす

い地震規模の大きなシナリオが選択的に選別されているためと考えられる。一方、図 4.3-23 に示す $t=10$ 分では、適正な地震規模のシナリオが多数選別されており、沿岸の最大相対水位分布も適切に予測ができています。しかしながら、再現モデルから計算される最大相対水位分布(図 4.3-8)に比べると、全体的に凹凸の少ない最大相対水位分布となっており、茨城県や宮城県沿岸で見られる局所的な水位の高まりを予測することは出来ていない。この点は、図 4.3-24 に示す $t=20$ 分の結果でも同様である。図 4.3-7 の海域の最大水位分布からわかるように、再現モデルの局所的な水位の高まりは、断層の走向に依存した津波の指向性によって生じている。Multi-index 法では S-net 観測データのピークホールド分布が一定の範囲で類似したシナリオを選別し、各シナリオの最大相対水位の平均分布を予測値としているため、特定の指向性を持つシナリオのみを選別していない。そのため、Multi-index 法では全体的な水位分布を予測することは適しているが、波源特性の指向性によって大きく変化するような水位分布は予測が難しいと考えられる。

以上の検討結果から、福島県沖に大陸プレート内地震のシナリオ群を設定することで、Multi-index 法により地震発生から 10 分後の観測データを用いて 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の津波による全体的な水位分布を予測できることが分かった。

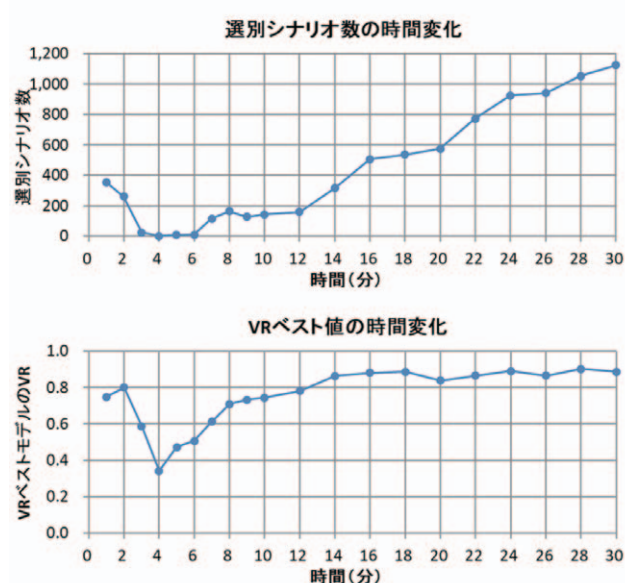
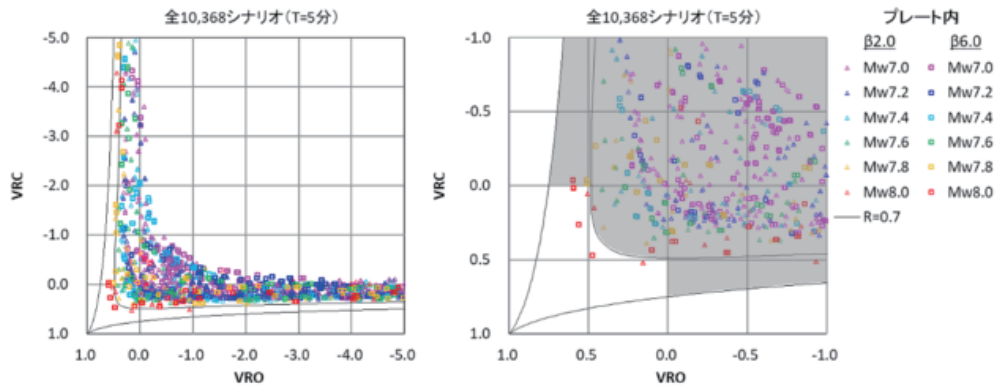
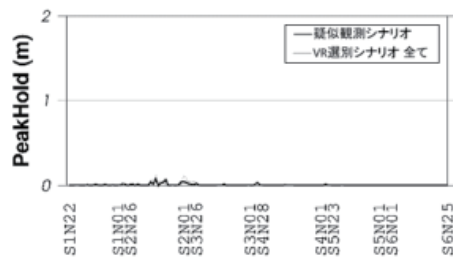


図 4.3-21 VR 選別されたシナリオ数の時間変化(上図)
および VR ベスト値の時間変化(下図)

a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



b) S-net ピークホールド分布 (t=5 分)



c) 最大相対水位分布

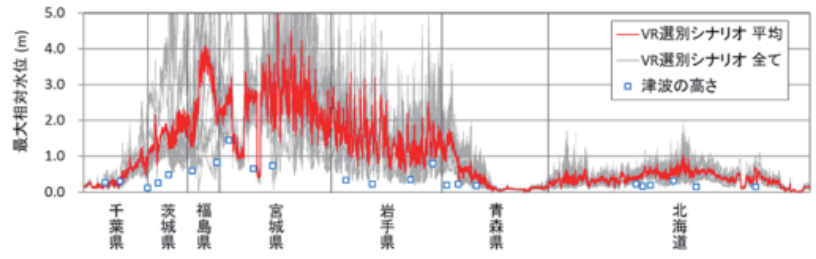
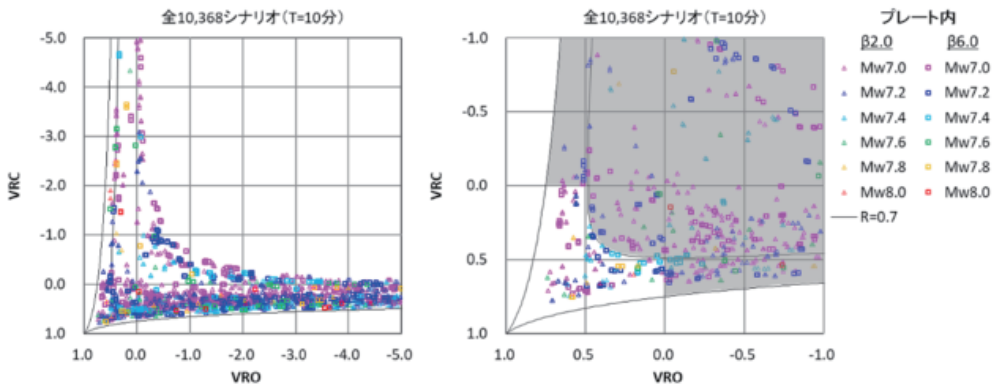
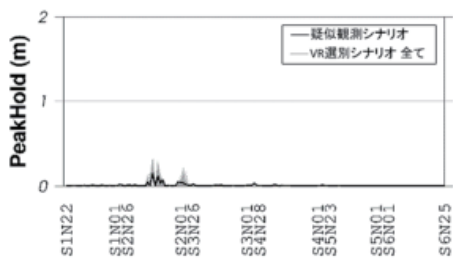


図 4.3-22 概観予測対象地域に対するシナリオ選別結果 (t=5 分)
 観測シナリオ：2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の観測波形

a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



b) S-net ピークホールド分布 (t=10 分)



c) 最大相対水位分布

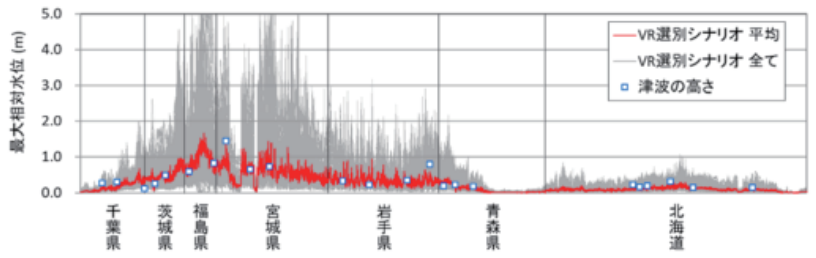
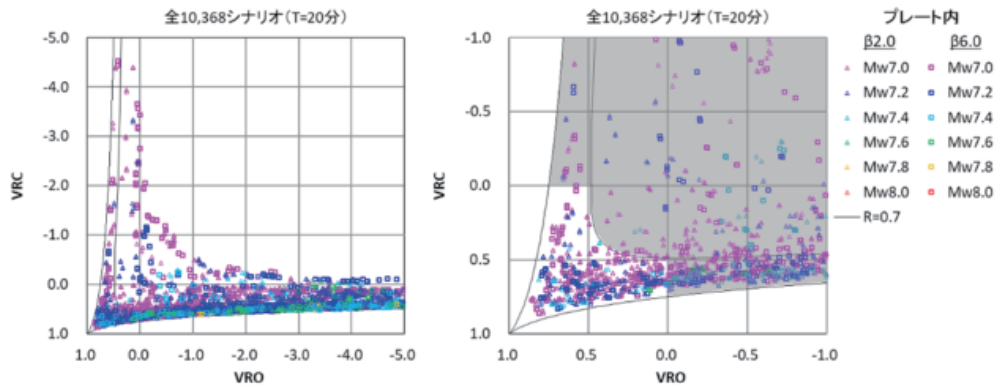
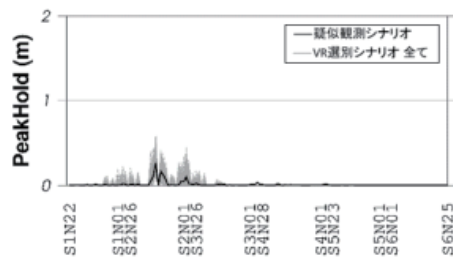


図 4.3-23 概観予測対象地域に対するシナリオ選別結果 (t=10 分)
 観測シナリオ：2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の観測波形

a) VRO-VRC (波源断層モデルのタイプ・規模で色分け)



b) S-net ピークホールド分布 (t=20 分)



c) 最大相対水位分布

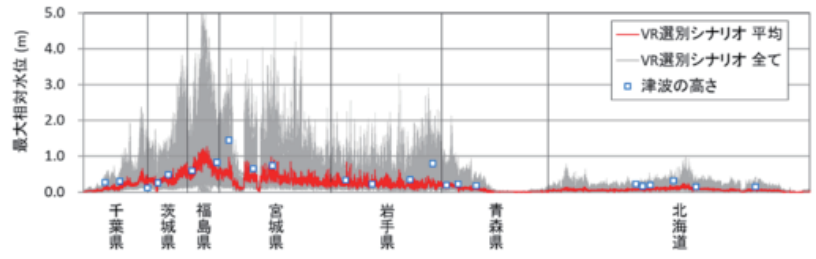


図 4.3-24 概観予測対象地域に対するシナリオ選別結果 (t=20 分)
観測シナリオ : 2016 年 11 月 22 日福島県沖の地震の観測波形

4.4 ニューラルネットワークを用いた二段階シナリオ選別

Multi-index 法によって沖合における津波波形を比較してシナリオ選別を行うことで、沿岸においても最大水位分布の類似したシナリオを選別することができる。一方で、選別されたシナリオ群には沿岸最大水位分布に大きなばらつきがあり、同様に浸水の結果にも大きなばらつきがある。予測結果に大きなばらつきが現れることの理由として、Multi-index 法で用いられる3つの指標には予測する地域ごとに S-net 観測点の重み付けはされておらず、どこの地域を予測する際にも均等重みとなっていることが挙げられる。予測する地域に対して近くに配置された観測点における水圧変動は、予測する地域における沿岸の水位や浸水深に対して相関が高く、距離が離れるほど相関が低くなることが予想される。

このような地域別の観測点毎の相関の高さを考慮した予測方法として、沖合の水圧変化最大値を説明変数(入力)とし陸域の浸水深を目的変数(出力)とした回帰分析を検討した。回帰分析の方法には様々な手法があるが、津波の遡上・浸水の過程の複雑さを考慮して、多層のニューラルネットワーク(以下、NN)による回帰分析を行うこととした。また、Multi-index 法により選別されたシナリオ群の浸水深分布と NN による回帰モデルから推定される浸水深分布とを比較し、浸水深分布の類似度の高さによって Multi-index 法によって選別されたシナリオを順位付けして絞り込む、二段階の選別方法について検討した。図 4.4-1 に二段階シナリオ選別の流れを示す。

4.4.1 ニューラルネットワークによる回帰

図 4.4-2 に NN による浸水深予測モデルの概念図を示す。ニューラルネットワークは信号を加工する人工ニューロンを複数繋いで構成されるモデルである。入力層、隠れ層、出力層の3種類の層から構成され、層と層の間にはニューロン間の繋がりやの強さを示す重みがある。各層を X_i と置くと、層間の関係は次の漸化式で表される。

$$X_{i+1} = f(W_i X_i + B_i) \quad (4-7)$$

ここで、 W_i は重み行列、 B_i はバイアスベクトルと呼ばれ、出力層における誤差を最小化するように

W_i, B_i の値を最適化する。 f は活性化関数と呼ばれ、様々な関数実装されている。

4.4.1.1 入力データ

NN 回帰モデルの学習のための入力データは津波シナリオバンクに登録されている沖合津波計算と陸域浸水計算の結果を用いる。説明変数は Multi-index 法で指標を算出するとき(4.1 節)と同様に、S-net 観測点における水圧変化量最大値とする。本検討では、地震発生後の時刻 $T=10$ 分における水圧変化量最大値を用いることとし、全ての S-net 観測点で水圧変化量最大値が 5 cm を下回るシナリオは対象外とした。目的変数は構造物条件 BC2 の陸域浸水計算の結果における、4.4.1.4 項で設定した陸域の評価地点における最大浸水深とした。

ここで、実際に S-net 観測点で観測される水圧データは、津波以外の様々なノイズの影響を受けている。本研究資料では、ノイズの影響を除去するために水圧時系列波形に対し 120 秒から 1,800 秒までのバンドパスフィルタをかけ、水圧変化量最大値を求めた。

NN 回帰の学習に用いたシナリオは、津波シナリオバンクに登録されているシナリオの内、

- ・ 日本—千島海溝 $\beta 1.77$: 768 シナリオ
- ・ 日本—千島海溝 $\beta 6.00$: 1,614 シナリオ
- ・ 相模トラフ $\beta 1.77$: 194 シナリオ
- ・ 相模トラフ $\beta 6.00$: 526 シナリオ
- ・ 大陸プレート内地震 $\beta 2.00$: 157 シナリオ

の合計 3,259 シナリオである。

4.4.1.2 活性化関数

NN による回帰では、活性化関数に様々な関数が用いられる。沖合での津波高さと陸域での浸水深の関係は、沖合津波高さがある程度以下の場合には浸水が生じず、沖合津波高さがある程度高くなると沖合津波高さに応じて浸水深も大きくなるといった、不連続な関数で表すことが適していると考えられる。そこで、本研究資料では活性化関数に ReLU (Rectified Linea Unit) と呼ばれる不連続な関数を用いる。ReLU は次式で定義される。

$$f(x) = \max(0, x) \quad (4-8)$$

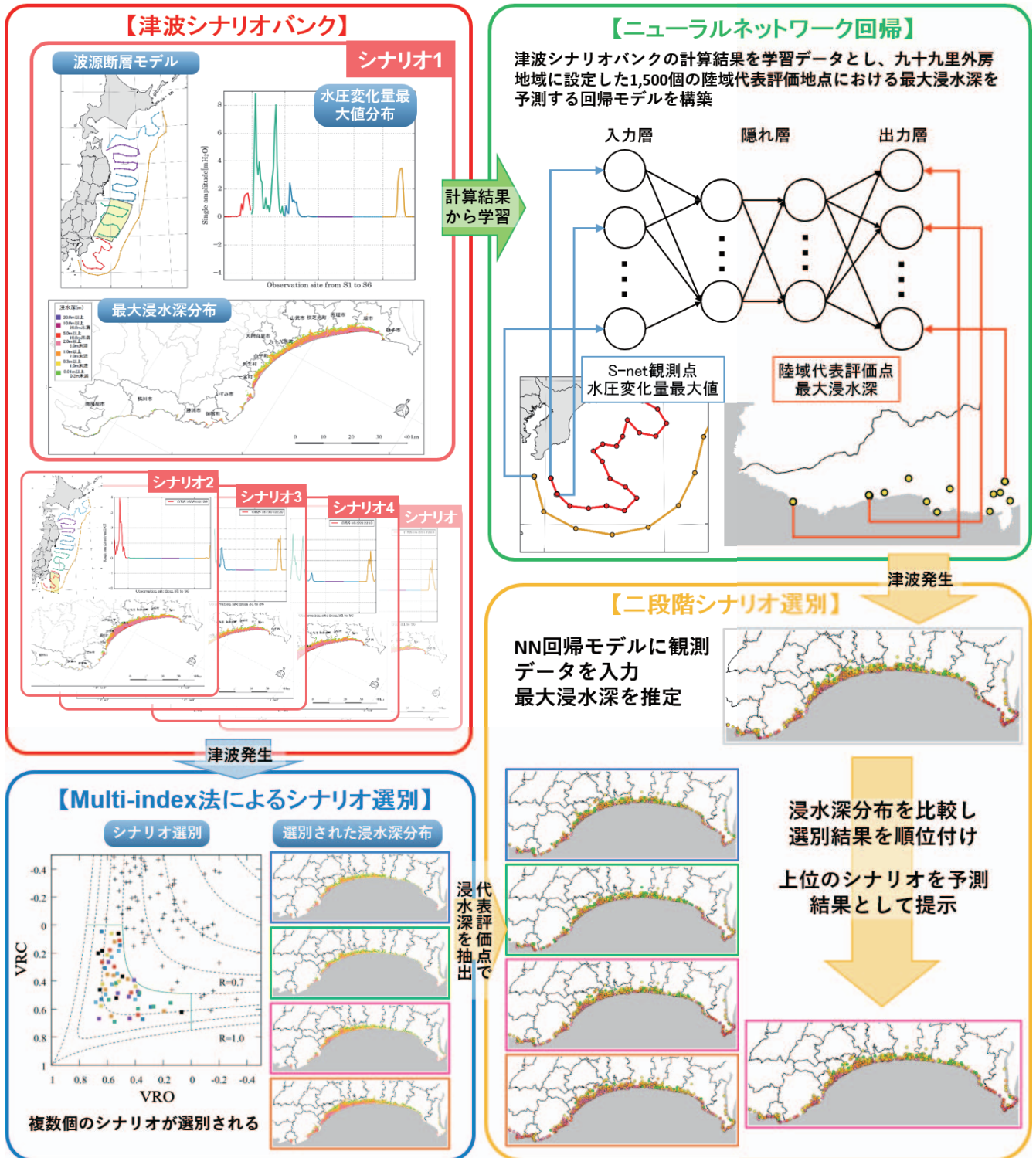


図 4.4-1 ニューラルネットワーク回帰と Multi-index 法による二段階シナリオ選別の流れ.

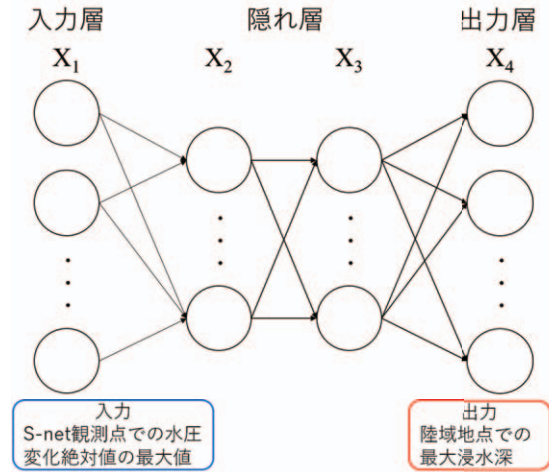


図 4.4-2 ニューラルネットワークによる浸水深予測モデルの概念図

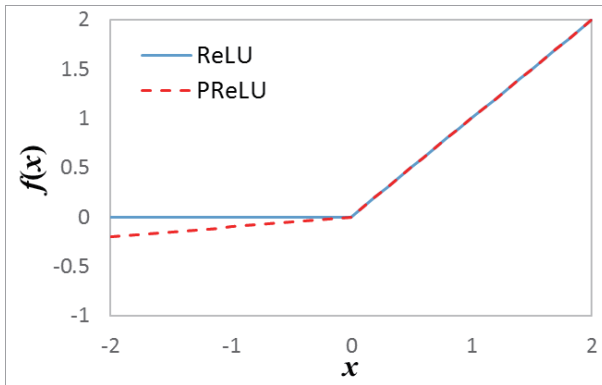


図 4.4-3 本研究で用いた活性化関数 ReLU と Parametric ReLU の概念図

ReLU の概念図 (図 4.4-3) を見て分かるように、ReLU は $x < 0$ で傾きが 0、 $x > 0$ で傾きが 1 の関数である。NN 回帰では、 $x < 0$ で勾配が消えてしまうために学習が不安定になる場合があり、この問題を解決するため $x < 0$ で小さな傾き α を持たせた活性化関数 Leaky ReLU が用いられる。Leaky ReLU は次式で表される。

$$f(x) = \max(\alpha x, x) \quad (4-9)$$

また、Leaky ReLU を改良した活性化関数として、傾き α も NN により学習されるパラメータとして最適化させることで精度を向上させる活性化関数 Parametric ReLU があり、本研究資料ではこれを採用した。

4.4.1.3 損失関数

NN では、推定の悪さを定義した関数 (損失関数)

を用いて、損失が最小となるようにパラメータを最適化する。損失関数には様々な種類があるが、本研究資料では回帰問題で一般的に用いられる二乗損失を用いた。 i 番目のデータの正解を t_i 、入力を x_i 、出力を $f(x_i)$ として次式で表される。

$$L(t, f(x_i)) = \sum_i (t_i - f(x_i))^2 \quad (4-10)$$

4.4.1.4 陸域評価地点の設定

NN での浸水深予測では複数の陸域地点の浸水深の回帰モデルを同時に作成することができる。ただし、例えば 1 つの市町村における浸水深分布を表現するにあたり、10 m 格子は数万～数十万個からなるため、全ての格子を評価対象とするのは計算負荷の問題から困難である。そこで、任意の地域の浸水深分布を少ない格子数で代表して表現するために、赤木ほか (2018) による浸水深に基づいた格子クラスタリングの方法を用いた。

NN 回帰による二段階シナリオ選別において、市町村ごとに個別に最適な津波シナリオを選別することを可能とするため、評価地点の選定は千葉県九十九里・外房地域の 15 市町村に対して独立に実施した。各市町村に対してクラスタ数 $K=100$ の格子クラスタリングを実施し、ひとつの市町村につき 100 点、千葉県九十九里・外房地域で合計 1,500 点の評価地点を選定した。

赤木ほか (2018) の格子クラスタリング手法に従い、NN 回帰の学習対象とする多数の津波シナリオから、ある 1 つの計算格子における浸水深の値を取り出したベクトルを 1 サンプルとし、格子クラスタリングの対象格子の数だけのサンプルを持つ入力データを構成した。格子クラスタリングの対象格子は、NN の学習対象となるシナリオ全体を通して一度でも浸水のあった 10 m 格子とした。浸水深の値が似通ったシナリオが多くあることに起因する入力データの偏りを防ぐため、前処理として主成分分析による次元削減を行った。主成分の次元は累積寄与率が 95% を越える最小の次元とした。次に、主成分空間で K-Means 法を実施し、計算格子を主成分が近い点をまとめたクラスタに分類した。主成分は入力したすべての津波シナリオの浸水深の低次元空間における表現であるため、同一のクラスタ内には多数の津波シナリオを通して近い浸水の振る舞いを示

す計算格子が含まれる。すなわち同じシナリオで同程度に浸水する格子同士が同一のクラスタに含まれるような分類を行った。

K-Means 法を実施した主成分空間において、クラスタ内の重心点に最も近い格子をクラスタ代表点とし、各クラスタの代表点を浸水深予測の評価地点とした。図 4.4-4 に格子クラスタリング結果の一例として、大網白里市における格子クラスタリング結果とクラスタ代表点の位置を示す(全てのクラスタ代表点の位置は、付録の 4.4_陸域評価地点(図集)を参照)。

4.4.2 予測精度の検証

以下では、NN による回帰モデルがどの程度の精度で浸水深分布を予測することができるのかを、津波シナリオバンクのデータを用いて検証する。

4.4.2.1 浸水深分布の比較方法

浸水深予測の回帰モデルにより得られた浸水深分布と実際の計算結果の浸水深分布(以下、正解と呼称する)を比較するための指標として、観測と計算の浸水深分布を比較する指標である浸水深の Variance Reduction (DVR) を用いた。

$$DVR = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (DO(r_i) - DC(r_i))^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n DO^2(r_i)} \sqrt{\sum_{i=1}^n DC^2(r_i)}} \quad (4-11)$$

ここで、 $DO(r_i)$ は i 番目の陸域評価地点での正解の浸水深、 $DC(r_i)$ は予測浸水深である。2つの浸水深分布が完全に一致しているとき DVR は最大値の 1 となる。浸水深分布の類似度合いの例として、図 4.4-5 に大網白里市周辺の範囲において DVR が 0.5~0.9 と算出されたシナリオの比較例を示す。ここでは、DVR が 0.5 以上の場合に浸水深分布が概ね似ている、DVR が 0.8 以上の場合に浸水深分布が良く似ているとし、DVR が 0.5 以上または 0.8 以上を評価の基準とした。

4.4.2.2 予測精度の検証方法

NN の学習においては、学習に用いたデータ(訓練データ)に対し損失関数が最小となるようにパラメータを最適化してモデルを作成するが、出来上がったモデルが未知のデータ(テストデータ)には適応できていない場合がある。これはモデルが複雑で自由度が高すぎる場合に、訓練データに対して過剰

に適合してしまうことで生じ、過学習と呼ばれる。

そこで、学習が適当に行われているかを検証する方法として、本研究資料では交差検証を行った。サンプルのシナリオ群 3,259 シナリオを概ね同じ数となるよう 10 個のグループに分割し、9 グループを訓練データとして学習を行い、残りの 1 グループをテストデータとして予測精度の検証をする。訓練データとテストデータの組合せを変えて 10 回の検証を行うことで、シナリオをテストデータに用いた。予測精度の検証は、全シナリオに対して DVR の値を求めて累積度数分布を求め、DVR が 0.5 以上または 0.8 以上となるシナリオの割合を調べた。

4.4.2.3 ハイパーパラメータの設定

NN にはネットワークの構造を定義するパラメータや NN の学習方法を定義するパラメータがあり、これらはハイパーパラメータと呼ばれる。より予測精度の高いモデルを構築するためには、ハイパーパラメータを適切に設定する必要がある。本検討では、ハイパーパラメータの値を表 4.4-1 のように設定した。

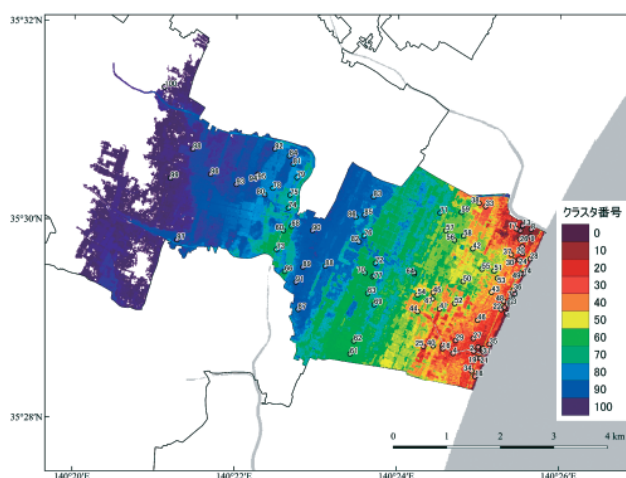


図 4.4-4 大網白里市における格子クラスタリング結果とクラスタ代表点の位置図

表 4.4-1 本検討で用いたハイパーパラメータの値

パラメータ名	値・手法
隠れ層の数	2 層
ノード数	2,000 個
学習率	Adam アルゴリズムで最適化
バッチサイズ	256
ドロップアウト係数	0.2

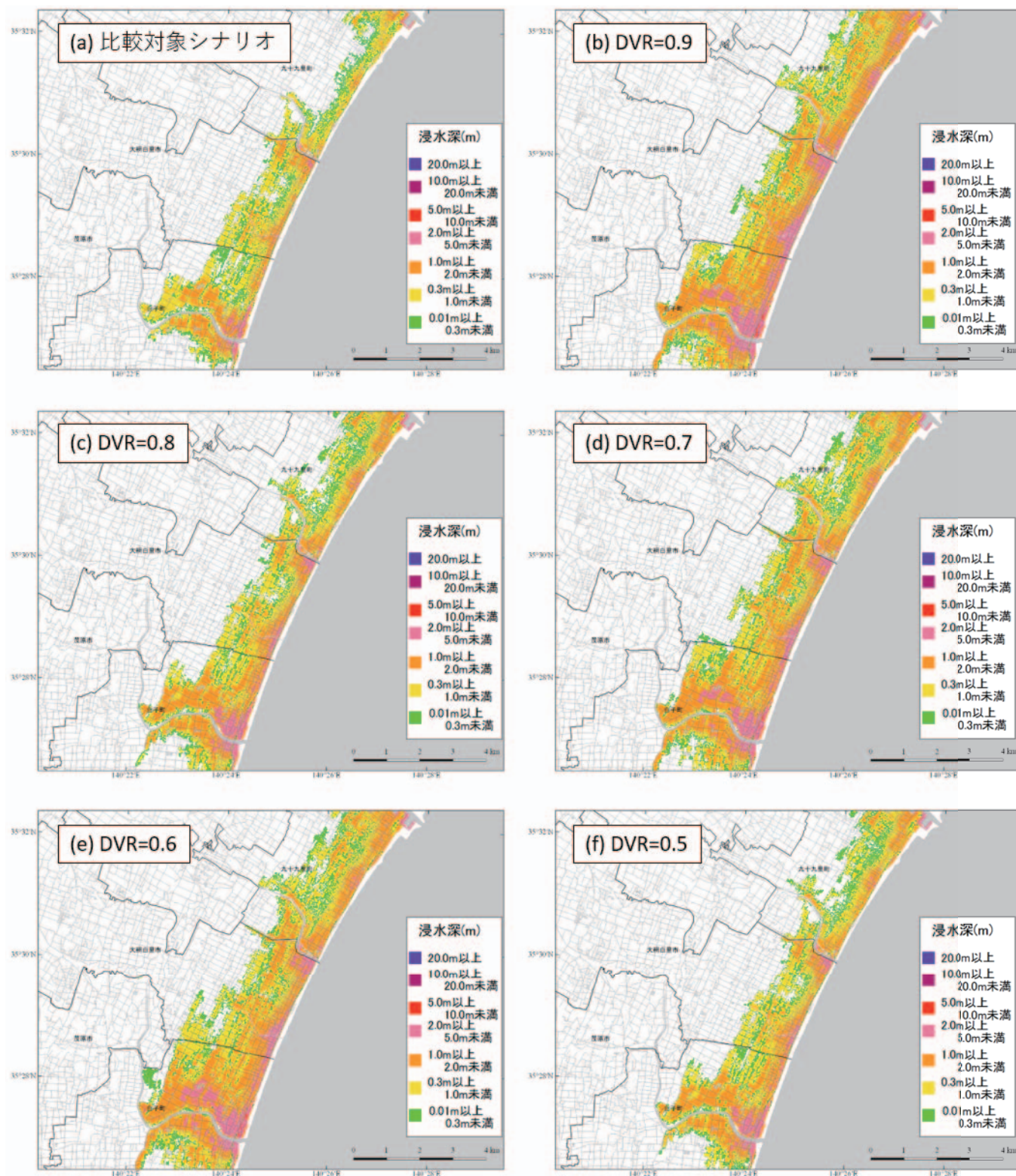


図 4.4-5 大網白里市周辺において比較対象のシナリオ(a)に対して、DVR の値がそれぞれ(b)0.9, (c)0.8, (d)0.7, (e)0.6, (f)0.5 となったシナリオの浸水深分布の比較

4.4.2.4 予測精度の検証結果

図 4.4-6 に交差検証におけるテストデータと訓練データの学習曲線を示す。500 回の学習毎にテストデータと訓練データにおける DVR が 0.5 以上または 0.8 以上となるシナリオの割合を求め、学習が進むにつれてこの割合がどのように変化するかを求めた。テストデータの結果は学習回数 10,000 回程度で上限に達しており、DVR が 0.5 以上となるシナリオの割合は約 84%，DVR が 0.8 以上となるシナリオの割合は約 79% が上限であった。この上限の値は、ハイパーパラメータの値や学習回数を変えても大きくは変化しなかった。

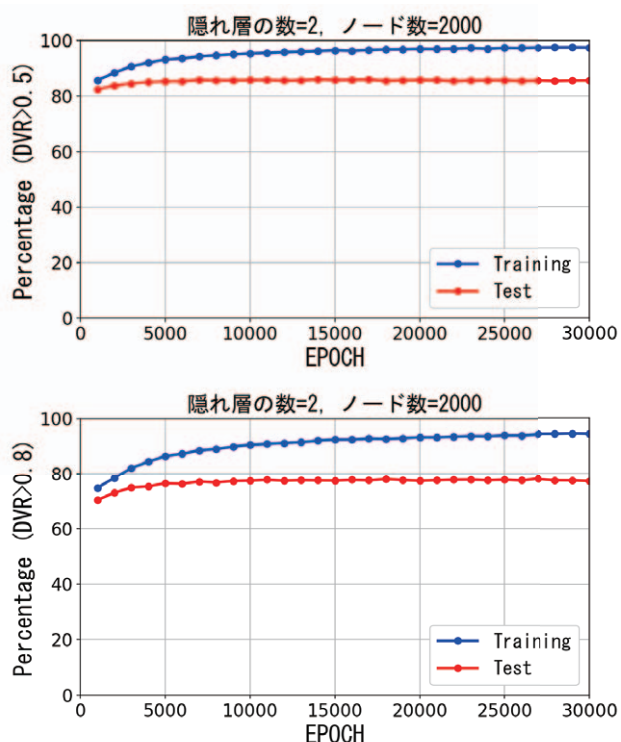


図 4.4-6 NN 回帰の交差検証におけるテストデータと訓練データの学習曲線。(上) DVR が 0.5 以上となるシナリオの割合、(下) DVR が 0.8 以上となるシナリオの割合

NN 回帰によって浸水深分布をうまく説明できないシナリオが 2 割程度存在することについて、その要因を調べるためシナリオの海域や β の値で区別した分類別に DVR の度数分布を求めた。図 4.4-7 にはシナリオ分類別の度数分布とシナリオ分類の 100% 積み上げ棒グラフを示す。DVR0.5 未満のシナリオは相模トラフや大陸プレート内地震のシナリオの割合が高く、DVR の値が小さくなるにつれて相模ト

ラフのシナリオの割合が大きくなる傾向が見られる。相模トラフの地震は S-net 観測点よりも陸側に震源域がある地震が多く、このような地震で生じる津波の浸水深を沖合の津波水位分布から推定するのが困難であることが原因と考えられる。予測精度の検証対象のシナリオを日本-千島海溝の地震に限定して学習曲線を求めると、DVR が 0.5 以上となるシナリオの割合は約 98%，DVR が 0.8 以上となるシナリオの割合は約 94% となった(図 4.4-8)。

以上の検討から、学習回数は 10,000 回程度で十分高い精度で浸水深の予測が可能な NN 回帰モデルが構築できることが分かった。図 4.4-9 には交差検証における陸域代表評価地点ごとの二乗平均平方誤差の分布を示す。二乗平均平方誤差の計算では、正解の浸水深と予測浸水深の両方で浸水していないシナリオを含めると、浸水頻度の低い地点では誤差が小さく見積もられるため、正解と予測のどちらか一方が 0 m 以上となったシナリオを対象とした。二乗平均平方誤差の分布は、浸水頻度が高く、浸水深が大きくなりやすい地点ほど大きい値になる傾向が見られ、平均値は 0.80 m、標準偏差は 0.28 m であった。

4.4.3 浸水深予測結果の例

4.4.2 項の交差検証におけるテストデータの浸水深予測結果の中から、高い DVR の得られたシナリオについて浸水深分布の例を示す。図 4.4-10 は Mw8.0 のシナリオの例、図 4.4-11 は Mw8.6 のシナリオの例、図 4.4-12 は Mw9.0 のシナリオの例である。DVR は規格化された指標であるため、規模が小さい地震では浸水深の差が小さくても DVR の値が大きくなり、にくい性質があり、規模が大きい地震では DVR が大きくても浸水深の差の大きい地点がある場合がある。

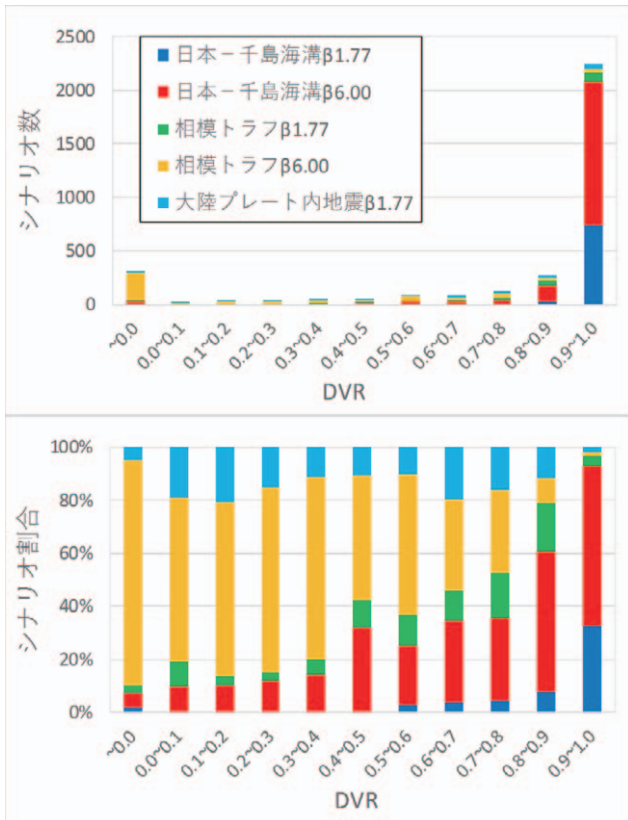


図 4.4-7 交差検証におけるテストデータの予測結果の分析。(上)シナリオの分類別の DVR の度数分布、(下)シナリオ分類の割合

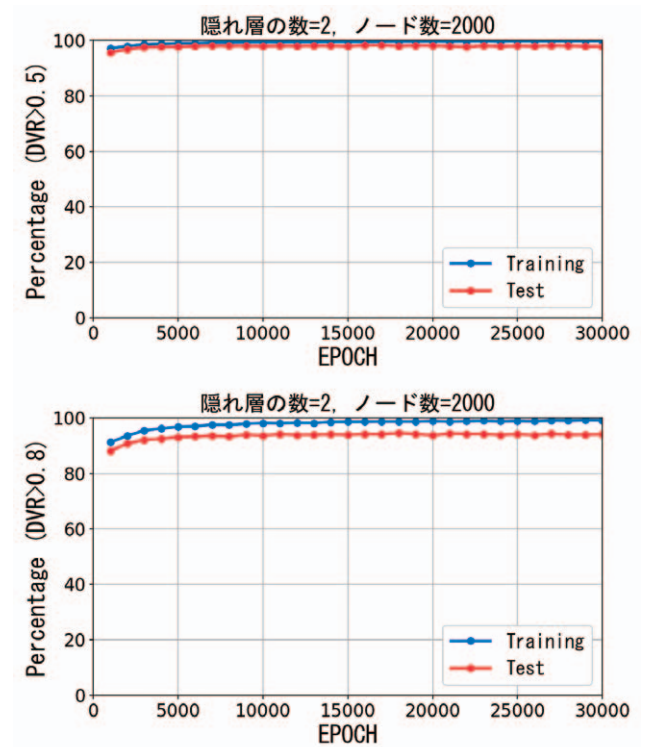


図 4.4-8 日本－千島海溝のシナリオに限定した場合の NN 回帰の交差検証におけるテストデータと訓練データの学習曲線。(上) DVR が 0.5 以上となるシナリオの割合、(下) DVR が 0.8 以上となるシナリオの割合

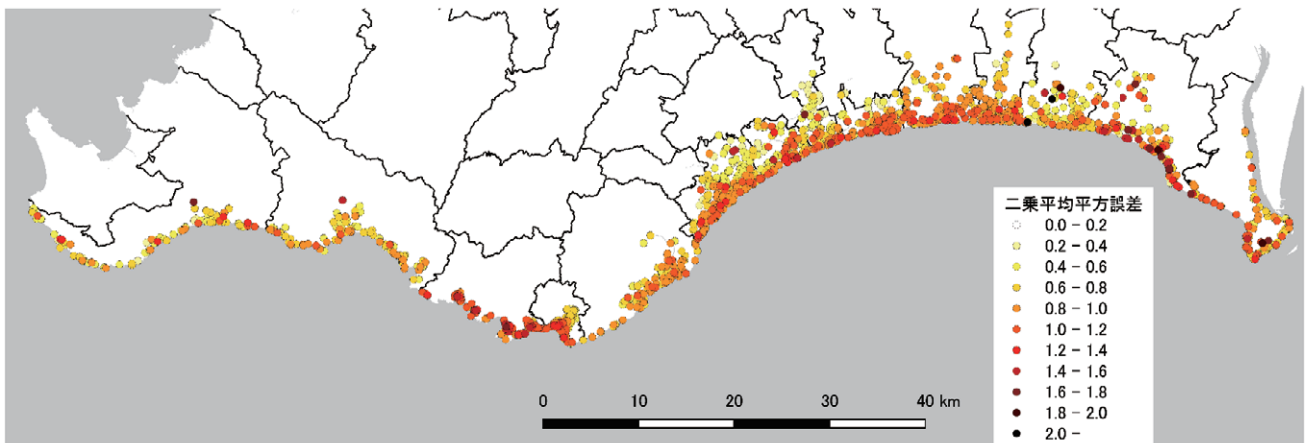


図 4.4-9 NN 回帰の交差検証における陸域代表評価地点での二乗平均平方誤差の分布。学習回数は 10,000 回とした。二乗平均平方誤差の計算は、正解(陸域浸水計算の計算結果)の浸水深と NN 回帰の予測浸水深のどちらかが 0 m 以上となったシナリオを対象とした。

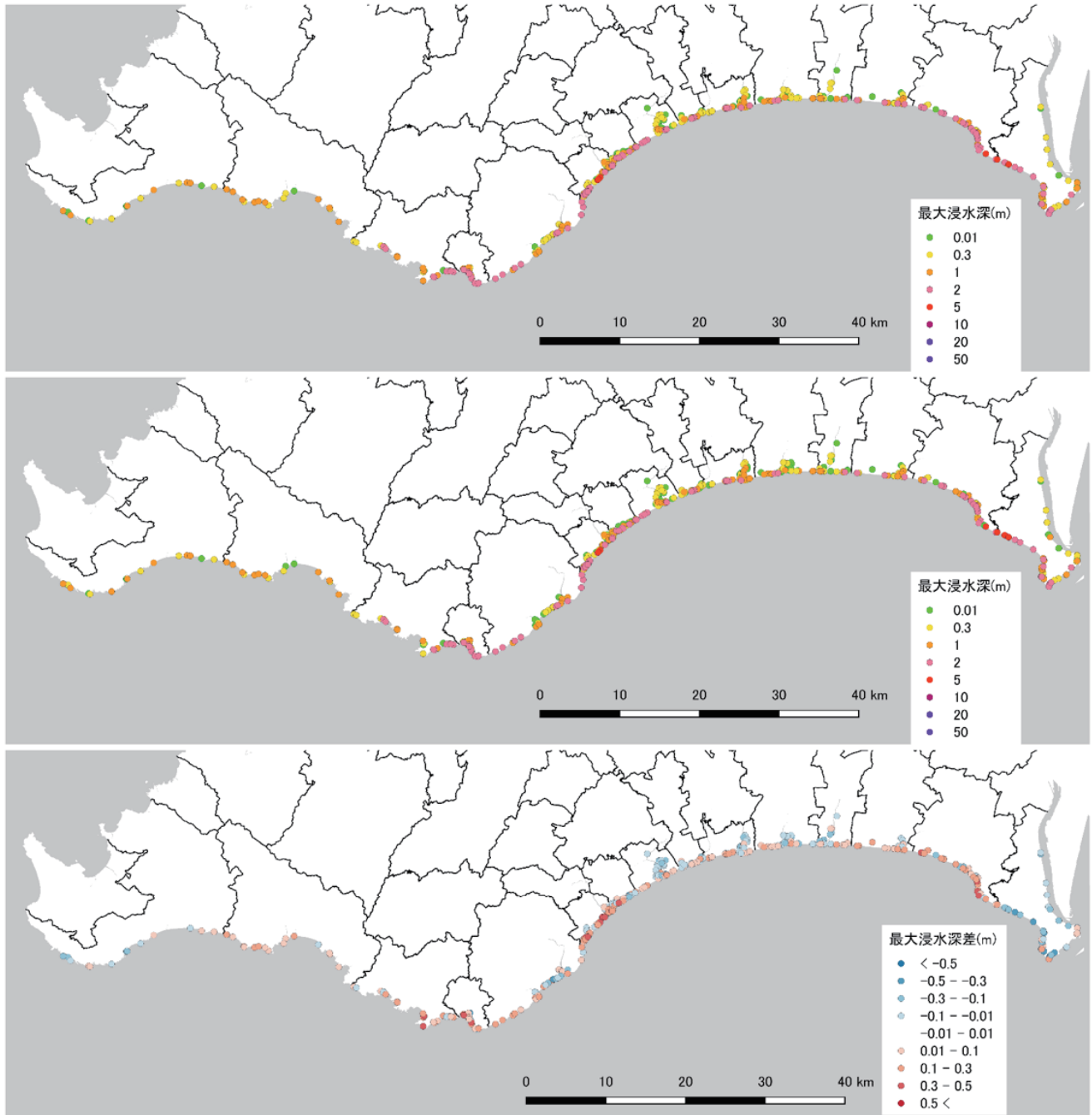


図 4.4-10 Mw8.0 のシナリオの陸域代表評価地点における浸水深分布. (上) 陸域浸水計算結果の浸水深, (中) NN 回帰による予測結果の浸水深, (下) 陸域浸水計算結果と NN 回帰による予測結果の浸水深の差. 陸域浸水計算結果と NN 回帰による予測結果の間の DVR は 0.993

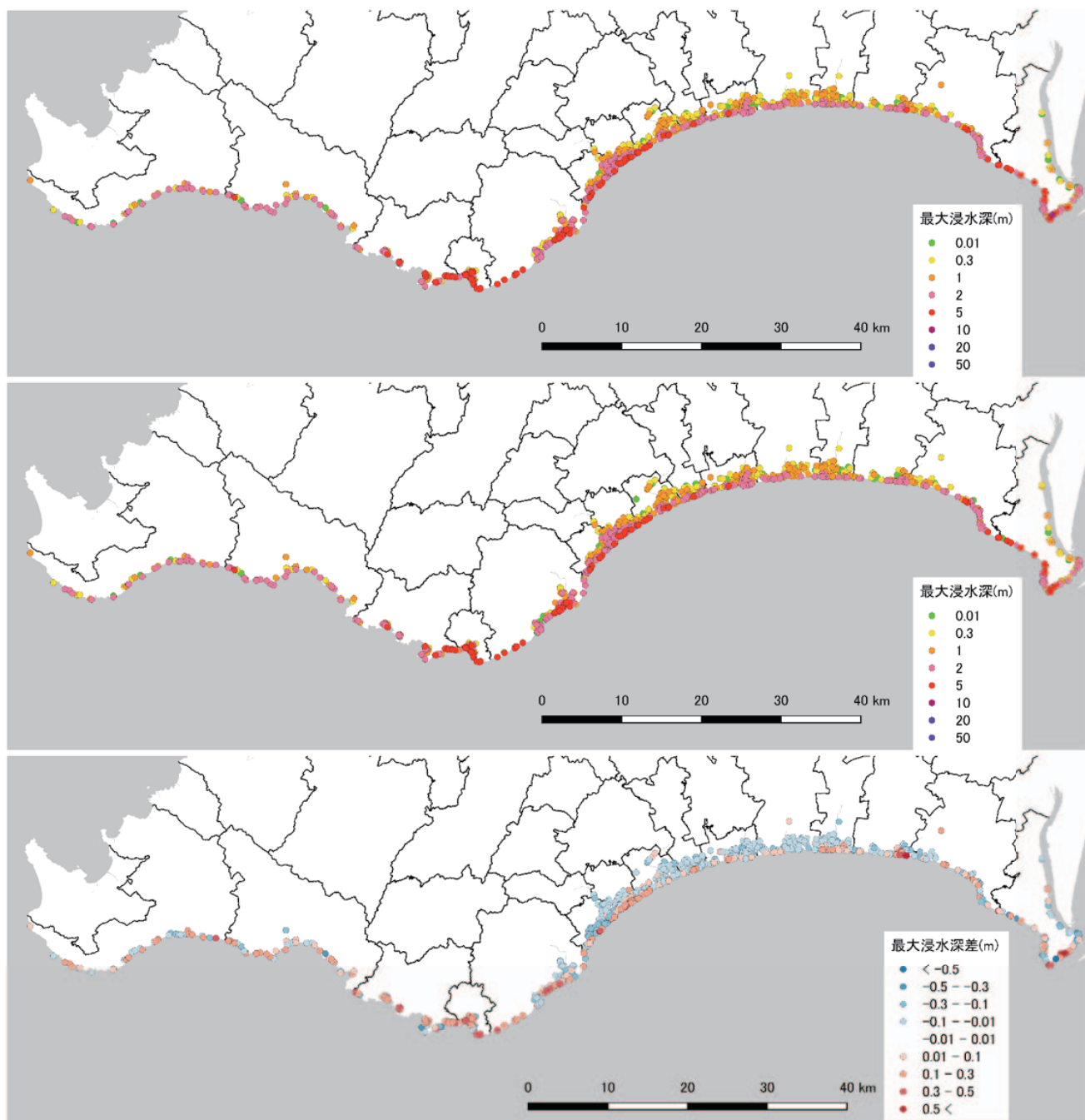


図 4.4-11 Mw8.6 のシナリオの陸域代表評価地点における浸水深分布．（上）陸域浸水計算結果の浸水深，（中）NN 回帰による予測結果の浸水深，（下）陸域浸水計算結果と NN 回帰による予測結果の浸水深の差．陸域浸水計算結果と NN 回帰による予測結果の間の DVR は 0.996

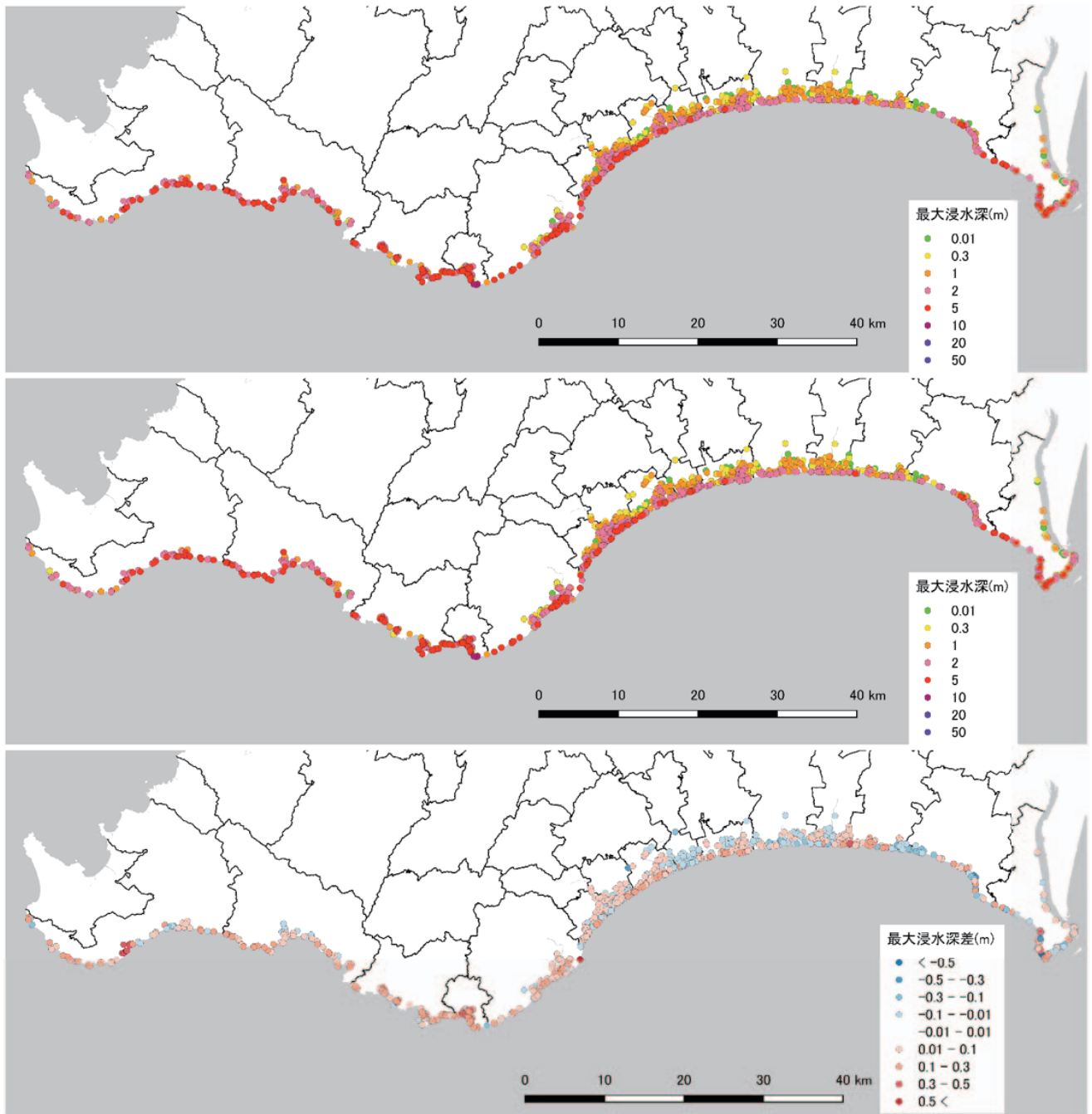


図 4.4-12 Mw9.0 のシナリオの陸域代表評価地点における浸水深分布．（上）陸域浸水計算結果の浸水深，（中）NN 回帰による予測結果の浸水深，（下）陸域浸水計算結果と NN 回帰による予測結果の浸水深の差．陸域浸水計算結果と NN 回帰による予測結果の間の DVR は 0.999

4.4.4 Multi-index 法との併用について

ここでは Multi-index 法と NN 回帰の併用による二段階シナリオ選別の方法について説明し、疑似観測シナリオを用いた適用事例を示す。

まず、地震発生から時間 T が経過した時点で S-net 観測点で得られる水圧変動データに基づいて、Multi-index 法によって複数個のシナリオを選別する。それと同時に、津波シナリオバンクのデータを学習データとして予め構築した NN 回帰モデルに対し水圧変動データを入力することで、陸域代表評価地点での最大浸水深を予測する。最後に、Multi-index 法により選別されたシナリオの陸域代表評価地点における最大浸水深と NN 回帰により予測した最大浸水深を比較し、得られた DVR の値により選別されたシナリオ群に順位付けを行い、DVR のしきい値を設定してシナリオ群を再選別する。

疑似観測シナリオを用いた適用事例として、1677 年延宝房総沖地震のモデル(竹内ほか, 2007)の計算結果を観測データとして、二段階シナリオ選別の手法を適用した。1677 年延宝房総沖地震のモデルの計算結果については 4.2 節に示す。本検討では、NN 回帰の学習データとして 4.4.1.1 項で説明した 3,259 個の全てのシナリオを用い、学習回数を 10,000 回として NN 回帰モデルを構築した。陸域代表評価地点における疑似観測シナリオの浸水深と NN 回帰によって予測された浸水深の比較を図 4.4-13 に示す。疑似観測シナリオと NN 回帰の浸水深の間の DVR は 0.839 であった。

Multi-index 法によるシナリオ選別では、210 個のシナリオがしきい値を満足し選別された。このうち、疑似観測シナリオとの DVR が 0.8 以上となったシナリオは 52 シナリオ (24.8%)、DVR が 0.5 以上となったシナリオは 141 シナリオ (67.1%) であった。選別されたシナリオについて陸域代表評価地点での浸水深の値を抽出し、NN 回帰によって予測された浸水深と比較して DVR を求めた。表 4.4-2 には、選別されたシナリオと NN 回帰による予測結果の間の DVR の大きい順に並べ、上位 80 シナリオの疑似観測シナリオとの DVR および Multi-index 法の各指標の値を示す。NN 回帰結果との DVR が最も高かったシナリオでは、疑似観測シナリオとの DVR が 0.838 であった。疑似観測シナリオの浸水深分布および NN 回帰結果との DVR が最も高かったシナ

リオの浸水深分布を図 4.4-14 に示す。

NN 回帰結果との DVR が 0.8 以上のシナリオは 76 個あり、そのうち疑似観測シナリオとの DVR が 0.8 以上となったシナリオは 34 個 (45.9%)、DVR が 0.5 以上となったシナリオは 76 個 (100%) であった。図 4.4-15 に示した NN 回帰結果との DVR と疑似観測シナリオとの DVR の分布図からも、両者には高い相関があることが認められる。NN 回帰結果との DVR を選別されたシナリオの順位付けのための指標とすることで、疑似観測シナリオの浸水深分布とよく似たシナリオを選別できていることが分かる。

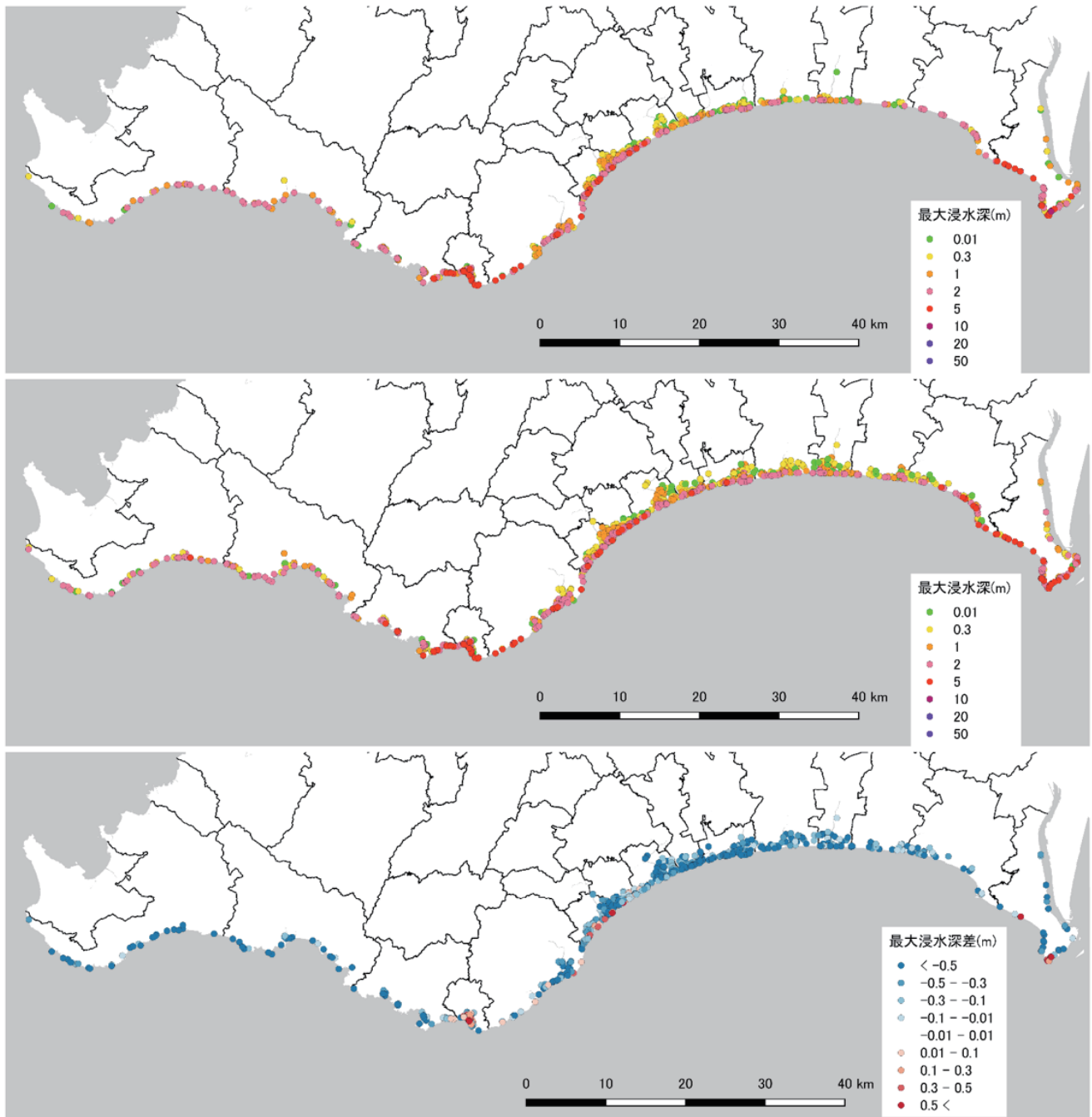


図 4.4-13 1677 年延宝房総沖地震のモデル(竹内ほか, 2007)を観測データとした場合の陸域浸水計算結果と NN 回帰の予測結果の比較。(上)疑似観測シナリオの陸域浸水計算結果の浸水深, (中) NN 回帰による予測結果の浸水深, (下)陸域浸水計算結果と NN 回帰による予測結果の浸水深の差。陸域浸水計算結果と NN 回帰による予測結果の間の DVR は 0.839

表 4.4-2 1677 年延宝房総沖地震のモデル (竹内ほか, 2007) の疑似観測シナリオを用いた二段階シナリオ選別における順位付けの結果. 各シナリオの浸水深分布と NN 回帰の予測値との DVR によって順位付けし上位 80 シナリオを示す. 赤色は NN 回帰の予測値との DVR が最大となったシナリオ, 青色は VR が最大となったシナリオ, 緑色は疑似観測シナリオとの DVR が最大となったシナリオを表す.

順位	DVR NN回帰 予測浸水深	DVR 疑似観測 シナリオ	R	VRO	VRC	VR
1	0.947	0.838	0.859	0.103	0.673	0.458
2	0.931	0.750	0.891	0.070	0.694	0.466
3	0.930	0.860	0.705	0.177	0.491	0.353
4	0.929	0.804	0.840	0.316	0.681	0.533
5	0.929	0.786	0.724	0.077	0.524	0.337
6	0.927	0.842	0.862	0.513	0.729	0.637
7	0.917	0.809	0.878	0.652	0.767	0.715
8	0.914	0.812	0.739	0.290	0.541	0.429
9	0.910	0.763	0.836	0.452	0.692	0.589
10	0.908	0.761	0.855	0.497	0.719	0.624
11	0.908	0.836	0.763	0.506	0.542	0.525
12	0.908	0.798	0.807	0.330	0.645	0.512
13	0.908	0.765	0.823	0.231	0.654	0.484
14	0.906	0.846	0.776	0.562	0.541	0.552
15	0.905	0.838	0.745	0.437	0.526	0.484
16	0.904	0.830	0.786	0.604	0.517	0.563
17	0.904	0.851	0.757	0.514	0.516	0.515
18	0.900	0.753	0.858	0.595	0.734	0.671
19	0.900	0.802	0.747	0.362	0.548	0.463
20	0.897	0.858	0.777	0.587	0.498	0.544
21	0.893	0.718	0.857	0.413	0.710	0.588
22	0.893	0.809	0.723	0.274	0.513	0.406
23	0.888	0.787	0.774	0.506	0.575	0.542
24	0.888	0.727	0.818	0.365	0.662	0.537
25	0.884	0.706	0.872	0.707	0.760	0.735
26	0.882	0.659	0.881	0.672	0.773	0.727
27	0.882	0.848	0.751	0.528	0.465	0.498
28	0.882	0.866	0.752	0.541	0.442	0.494
29	0.880	0.776	0.758	0.353	0.572	0.473
30	0.874	0.767	0.766	0.438	0.576	0.512
31	0.873	0.759	0.780	0.229	0.604	0.447
32	0.873	0.735	0.764	0.156	0.581	0.405
33	0.872	0.764	0.768	0.259	0.590	0.449
34	0.872	0.757	0.775	0.059	0.587	0.377
35	0.871	0.808	0.805	0.583	0.628	0.606
36	0.871	0.744	0.755	0.182	0.570	0.407
37	0.869	0.678	0.772	0.448	0.586	0.522
38	0.868	0.733	0.764	0.312	0.583	0.464
39	0.867	0.808	0.830	0.681	0.627	0.655
40	0.867	0.826	0.834	0.504	0.693	0.609
41	0.867	0.680	0.728	0.335	0.514	0.431
42	0.864	0.842	0.798	0.611	0.579	0.595
43	0.864	0.860	0.741	0.495	0.469	0.482
44	0.864	0.783	0.749	0.343	0.556	0.460
45	0.864	0.762	0.761	0.284	0.578	0.450
46	0.864	0.713	0.763	0.267	0.583	0.447
47	0.861	0.838	0.758	0.515	0.517	0.516
48	0.861	0.879	0.762	0.574	0.407	0.497
49	0.861	0.835	0.734	0.421	0.502	0.463
50	0.859	0.639	0.807	0.484	0.650	0.575
51	0.858	0.836	0.742	0.481	0.486	0.484
52	0.858	0.643	0.849	0.178	0.673	0.482
53	0.857	0.798	0.828	0.684	0.584	0.638
54	0.856	0.837	0.724	0.378	0.491	0.437
55	0.851	0.690	0.809	0.342	0.648	0.519
56	0.850	0.854	0.863	0.569	0.738	0.664
57	0.848	0.653	0.804	0.180	0.629	0.449
58	0.847	0.808	0.789	0.600	0.548	0.575
59	0.847	0.844	0.736	0.490	0.451	0.471
60	0.846	0.625	0.775	0.415	0.598	0.516
61	0.844	0.846	0.714	0.188	0.505	0.366
62	0.843	0.725	0.789	0.192	0.613	0.441
63	0.840	0.782	0.796	0.443	0.634	0.549
64	0.838	0.769	0.852	0.472	0.712	0.610
65	0.836	0.872	0.727	0.500	0.380	0.443
66	0.835	0.763	0.844	0.567	0.712	0.647
67	0.831	0.584	0.894	0.411	0.745	0.612
68	0.826	0.843	0.800	0.627	0.550	0.590
69	0.825	0.709	0.853	0.683	0.720	0.702
70	0.825	0.771	0.774	0.400	0.596	0.508
71	0.820	0.827	0.735	0.442	0.492	0.468
72	0.819	0.795	0.748	0.424	0.539	0.484
73	0.817	0.700	0.737	0.330	0.533	0.441
74	0.814	0.894	0.715	0.512	0.080	0.329
75	0.811	0.776	0.763	0.423	0.573	0.504
76	0.805	0.811	0.749	0.539	0.423	0.484
77	0.799	0.852	0.707	0.409	0.418	0.413
78	0.797	0.712	0.745	0.365	0.545	0.462
79	0.795	0.520	0.889	0.277	0.720	0.550
80	0.794	0.774	0.845	0.568	0.713	0.648

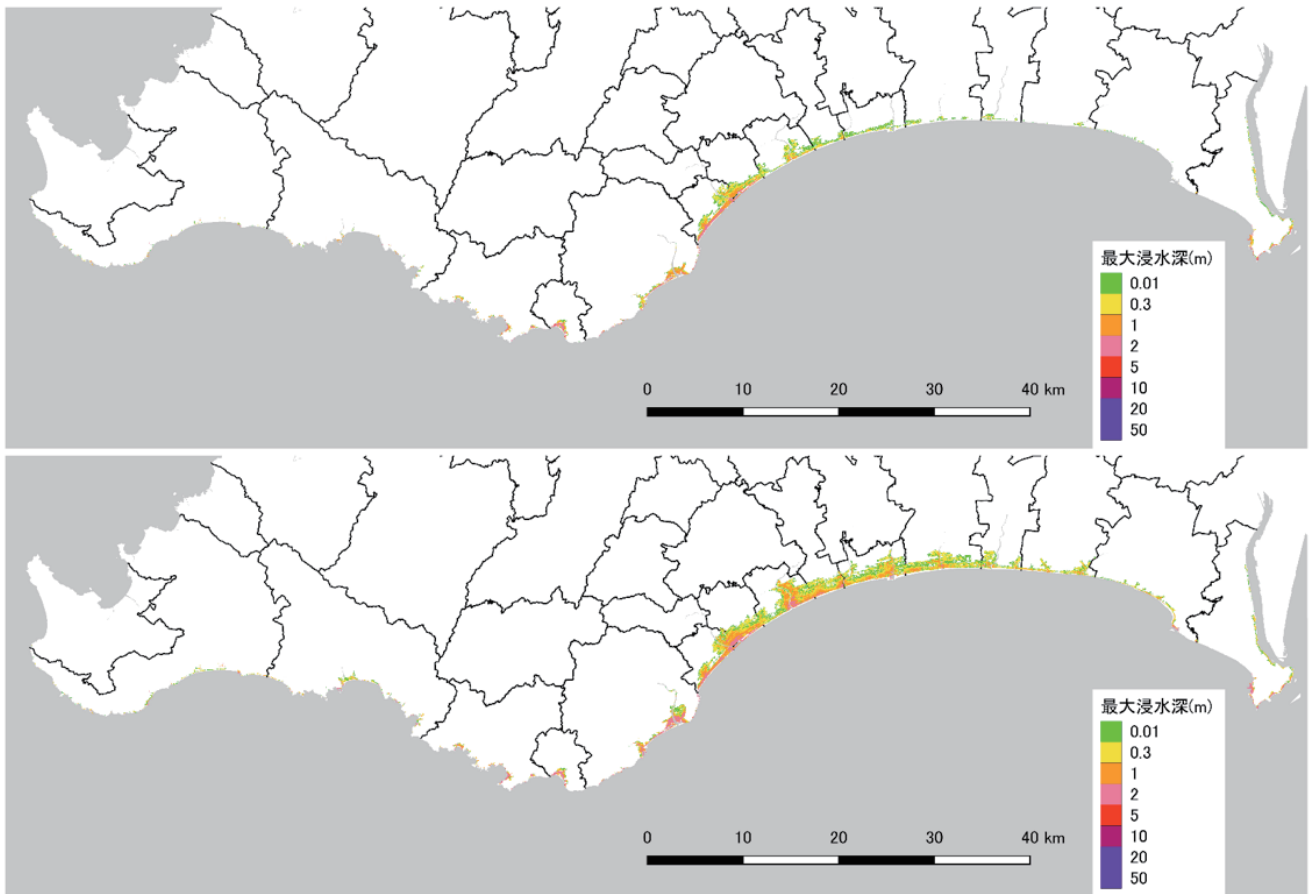


図 4.4-14 疑似観測シナリオの浸水深分布と NN 回帰予測結果との DVR が最も高いシナリオの浸水深分布の比較.
上: 1677 年延宝房総沖地震のモデル(竹内ほか, 2007), 下: NN 回帰予測結果との DVR が最も高くなっ
たシナリオ

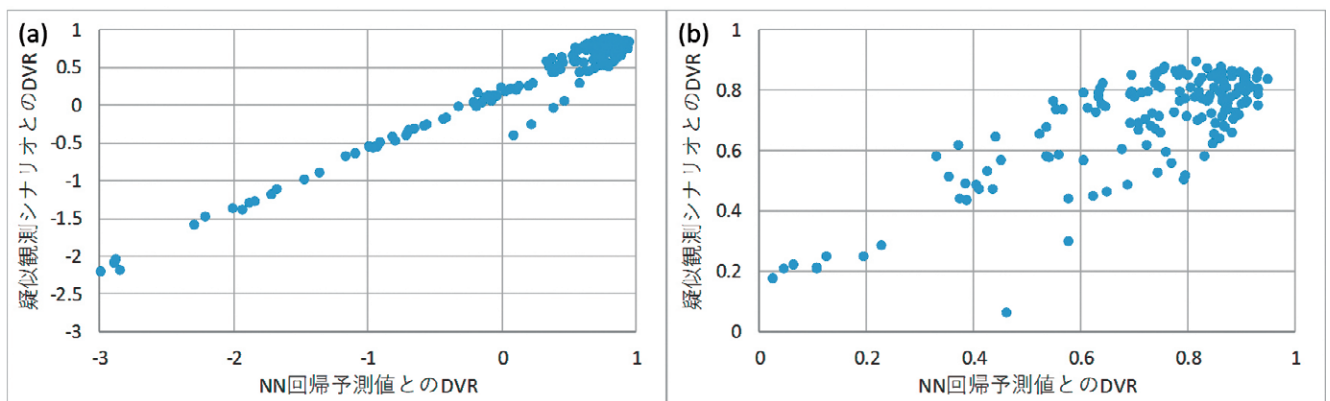


図 4.4-15 (a) NN 回帰の予測値との DVR と疑似観測シナリオとの DVR の関係, (b) (a) の拡大図

参考文献

- 1) Baba, T., N. Takahashi, and Y. Kaneda (2014) : Near-field tsunami amplification factors in the Kii Peninsula, Japan for Dense Oceanfloor Network for Earthquakes and Tsunamis (DONET), Marine Geophysical Research, Vol.35, pp.319-325.
- 2) Bird, P. (2003) : An updated digital model of plate boundaries, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, Vol.4 (3).
- 3) General Bathymetric Oceans the of Chart (2014) : GEBCO_2014 Grid - a global 30 arc-second interval grid.
(https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/)
- 4) Gica E., M. C. Spilane, V. V. Titov, C. D. Chamberlin, J. C. Newman (2008) : Development of the forecast propagation database for NOAA's Short-term Inundation Forecast for Tsunamis (SIFT), NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-139.
(<https://www.pmel.noaa.gov/pubs/PDF/gica2937/gica2937.pdf>)
- 5) Gusman A., K. Satake, M. Shinohara, S. Sakai, Y. Tanioka (2017) : Fault Slip Distribution of the 2016 Fukushima Earthquake Estimated from Tsunami Waveforms, *Pure and Applied Geophysics*, 174, 8, pp.2925-2943.
- 6) Heki, K., S. Miyazaki, H. Takahashi, M. Kasahara, F. Kimata, S. Miura, N. Vasilenco, A. Ivashchenko and K. An (1999) : The Amurian plate motion and current plate kinematics in Eastern Asia, *J. Geophys. Res.*, 104, 29147-29155.
- 7) IUGG/IOC Time Project (1997) : Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, IOC manuals and guides, No. 35, pp.122.
- 8) Kajiura, K. (1963) : The leading wave of a tsunami, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, Vol.41, pp.535-571.
- 9) Kanamori H. and D. L. Anderson (1975) : Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, 1073-1095.
- 10) Koketsu, K., H. Miyake, H. Fujiwara, and T. Hashimoto (2008) : Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map, *Proc. 14WCEE*, Paper No.S10-038.
([http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/dat/\(全国1次地下構造モデル\(暫定版\)\)](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/dat/(全国1次地下構造モデル(暫定版))))
- 11) Loveless, J.P. and B.J. Meade (2010) : Geodetic imaging of plate motions, slip rates, and partitioning of deformation in Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol.115, B02410.
(<https://doi.org/10.1029/2008JB006248>)
- 12) Maeda, T., T. Furumura, S. Sakai, and M. Shinohara (2011) : Significant tsunami observed at ocean-bottom pressure gauges during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets and Space*, 63, pp.803-808.
- 13) Miyazaki, S. and K. Heki (2001) : Crustal velocity field of Southwest Japan: subduction and arc-arc collision, *J. Geophys. Res.*, 106, 4305-4326.
- 14) Murotani, S., H. Miyake and K. Koketsu (2008) : Scaling of characterized slip models for plateboundary earthquakes, *Earth Planets Space*, 60, 987-991.
- 15) Murotani, S., S.Matsushima, T. Azuma, K. Irikura, and S. Kitagawa (2010) : Scaling relations of earthquakes on active mega-fault systems, Abstract of AGU fall meeting 2010, abstract id:S51A-1911.
- 16) Murotani, S., K. Satake, and Y. Fujii (2013) : Scaling relations of seismic moment, rupture area, average slip, and asperity size for M~9 subduction - zone earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5070-5074.
- 17) National Oceanic and Atmospheric Administration (2015) : ETOPO1.
(<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>)
- 18) National Oceanic and Atmospheric Administration (2018) : Global Tsunami Sources Map 1410 B.C. to A.D. 2017. (<https://ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml>)
- 19) Okada, Y. (1992) : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.82, No.2, pp.1018-1040.
- 20) Satake, K., M. Okada, and K. Abe (1988) : Tide gauge response to tsunami: Measurements at 40 tide gauge station in Japan, *J. Mar. Res.*, 46, pp.557-571.
- 21) Satake, K. (1989) : Inversion of Tsunami Waveforms for the Estimation of Heterogeneous Fault Motion of

- Large Submarine Earthquakes: The 1968 Tokachi-oki and 1983 Japan Sea Earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.94(B5), pp.5627-5636.
- 22) Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D.Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada (1999) : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismol. Res. Lett.*, 70, 59–80.
- 23) Strasser, F. O., M. C. Arango, and J. J. Bommer (2010) : Scaling of the Source Dimensions of Interface and Intraslab Subduction-zone Earthquakes with Moment Magnitude, *Seis. Res. Lett.*, Vol.81, No.6, pp.941-950.
- 24) Tanioka, Y. and K. Satake (1996a) : Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, *Geophysical Research Letters*, Vol.23(8), pp.861-864.
- 25) Tanioka, Y. and K. Satake (1996b) : Fault parameters of the 1896 Sanriku tsunami earthquake estimated from tsunami numerical modeling, *Geophysical Research Letters*, Vol.23(13), pp.1549-1552.
- 26) Tanioka, Y. and T. Seno (2001) : Sediment effect on tsunami generation of the 1896 Sanriku tsunami earthquake, *Geophysical Research Letters*, Vol.28, No.17, pp.3389-3392.
- 27) Tanioka, Y., K. Hirata, R. Hino, and T. Kazawa (2004) : Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from tsunami waveform inversion, *Earth, Planets, Space* Vol.56, pp.373–376.
- 28) Tsushima, H., R. Hino, Y. Tanioka, F. Imamura, and H. Fujimoto (2012) : Tsunami waveform inversion incorporating permanent seafloor deformation and its application to tsunami forecasting, *Journal of Geophysical Research*, Vol.117, B03311.
- 29) Tsushima, H., R. Hino, Y. Ohta, T. Iinuma, and S. Miura (2014) : tFISH/RAPiD: Rapid improvement of near-field tsunami forecasting based on offshore tsunami data by incorporating onshore GNSS data, *Geophysical Research Letters*, Vol.41, pp.3390-3397.
- 30) UNESCO ITIC (2018) : Tsunami Sources 1610 B.C. to A.D. 2017.
(http://itic.ioc-unesco.org/images/stories/awareness_and_education/map_posters/2017_tsu_poster_20180313_a2_low_res.pdf)
- 31) Hayes, G.P., Wald, D.J., and Johnson, R.L. (2012) : Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries, *J. Geophys. Res.* 117, B01302.
- 32) Yamamoto, N., S. Aoi, K. Hirata, W. Suzuki, T. Kunugi, and H. Nakamura (2016) : Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast, *Earth, Planets and Space*, 68(1), 128.
- 33) Yamanaka, Y. and K. Shimazaki (1990) : Scaling Relationship between the Number of Aftershocks and the Size of the Main Shock. *J. Phys. Earth*, 38, 305-324.
- 34) 相田勇 (1977) : 三陸沖の古い津波のシミュレーション, *東京大学地震研究所彙報*, Vol.52, pp.71-101.
- 35) 赤木翔・早川俊彦・青井真・前田宜浩・鈴木亘 (2018) : 津波シミュレーションデータを用いたクラスタリングによる津波浸水域の計算メッシュの分類とその活用の試み, *日本地球惑星連合 2018 年大会*, HDS10-P14.
- 36) 阿部郁男・今村文彦 (2012) : 東北太平洋沖地震における GPS 波浪計を利用したリアルタイム津波浸水予測の検証, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.68, No.2, pp.I_376-I_380.
- 37) 有川太郎・関克己・下迫健一郎・高川智博・千田優 (2017) : フラジリティカーブによる防護施設の被災状況を考慮した津波浸水計算手法の開発, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 73 巻 2 号, pp.I_337-I_342.
- 38) 海上保安庁 (2015) : 南海トラフ巨大地震の想定震源域で, 海底の詳細な動きを初めてとらえました～海底地殻変動観測の最新成果～.
(<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h27/k20150818/k150818-1.pdf>)
- 39) 活断層研究会 (1991) : 新編日本の活断層, *東京大学出版会*, pp.440.
- 40) 気象庁 (2012a) : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震調査報告, *気象庁技術報告*, 第 133 号, pp. 479.
(https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tsunami-kaizen/20tsunami_keiyou_kaizen_all.pdf)

- 41) 気象庁(2012b)：東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報の改善.
- 42) 気象庁(2016)：平成 28 年 11 月 地震・火山月報(防災編).
- 43) 気象庁：地震発生のしくみ.
(https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/jishin/about_eq.html)
- 44) 国土交通省(2012)：津波浸水想定の設定の手引き Ver. 2.00.
(http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/saigai/tsunami/shinsui_settei.pdf)
- 45) 国土地理院(2015)：基盤地図情報(数値標高モデル)5m メッシュ.
(<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>)
- 46) 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998)：GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法，土木学会海岸工学論文集，第 45 巻，pp. 356-360.
- 47) 斎藤正徳(1978)：漸化式デジタル・フィルターの自動設計，物理探査，31，240-263.
- 48) 佐藤良輔・阿部勝征・岡田義光・島崎邦彦・鈴木保典(1989)：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，pp. 390，1989(第 1 刷発行).
- 49) 工業技術院地質調査所(1999)：日本列島周辺海域の地質構造図，地質ニュース，1999 年 9 月号，No.541.
- 50) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター：1/20 万海洋地質図・海底地質図.
(<https://www.gsj.jp/Map/JP/marine-geology.html>)
- 51) 地震調査研究推進本部(2009)：日本の地震活動－被害地震から見た地域別の特徴－第 2 版，pp.458.
(https://www.jishin.go.jp/resource/seismicity_japan/)
- 52) 地震調査研究推進本部(2011)：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価(第二版)について.
(https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/sanriku_boso_4.pdf)
- 53) 菅原大助・今村文彦・松本秀明・後藤和久・箕浦幸治(2011)：地質学的データを用いた西暦 869 年貞観地震津波の復元について，自然災害科学，JJSNDS，29-4，pp.501-516.
- 54) 瀬野徹三(1995)：プレートテクトニクスの基礎，朝倉書店，pp.190.
- 55) 瀬野徹三(2003)：日本付近のプレートとその運動.
(http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/seno/Papers/seismo2003_plate.pdf)
- 56) 総務省地域力創造グループ地域情報政策室(2016)：全国地方公共団体コード 都道府県コード及び市区町村コード.
(<http://www.soumu.go.jp/denshijiti/code.html>)
- 57) 高山寛美(2008)：沖合と沿岸の津波の最大波高の統計的關係，気象研究所研究報告，第 59 巻，pp.83-95.
- 58) 竹内仁・藤良太郎・三村信男・今村文彦・佐竹健治・都司嘉宣・宝地兼次・松浦健郎(2007)：延宝房総沖地震津波の千葉県沿岸～福島県沿岸での痕跡高調査，歴史地震，第 22，pp.53-59.
- 59) 辰巳大介・富田孝史(2013)：即時的津波浸水予測手法の開発と適用，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69，No.1，pp.34-47.
- 60) 千葉県(2012a)：平成 23 年度県単海岸整備委託(九十九里浜沿岸津波対策検討)報告書.
- 61) 千葉県(2012b)：平成 23 年度東京湾内湾沿岸津波対策検討委託報告書.
- 62) 千葉県(2012c)：平成 23 年度内房・外房沿岸津波対策検討業務報告書.
- 63) 千葉県(2015a)：平成 26 年度海岸基盤整備委託(津波浸水想定検討)報告書.
- 64) 千葉県(2015b)：平成 25 年度海岸基盤整備委託(津波浸水想定検討)報告書.
- 65) 千葉県(2015c)：平成 26 年度海岸基盤整備委託(津波浸水想定業務)(銚子半島～九十九里浜ゾーン)調査報告書.
- 66) 中央防災会議(2005)：日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会，第 10 回会合，平成 17 年 6 月 22 日.
(http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/nihonkaiko_chisimajishin/index.html)
- 67) 中央防災会議(2006)：日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会.
(http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/nihonkaiko_chisimajishin/index.html)
- 68) 統計情報研究開発センター(2010)：人口世帯に関する統計(平成 22 年国勢調査).
(<http://www.sinfonica.or.jp/datalist/index.html>)

- 69) 統計情報研究開発センター (2009) : 企業活動に関する統計(平成 21 年経済センサス基礎調査). (<http://www.sinfonica.or.jp/datalist/index.html>)
- 70) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2012) : 痕跡調査結果. (<http://www.coastal.jp/tjt/>, 2012)
- 71) 徳山英一・本座栄一・木村政昭・倉本真一・芦寿一郎・岡村行信・荒戸裕之・伊藤康人・徐垣・日野亮太・野原壮・阿部寛信・坂井眞一・向山建二郎 (2001) : 日本周辺海域の中新世最末期以降の構造発達史 付図 日本周辺海域の第四紀地質構造図. 海洋調査技術, 13(1), 27-53.
- 72) 内閣府 (2012) : 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第 12 回会合). (<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/12/index.html>)
- 73) 内閣府 (2013) : 首都直下地震モデル検討会 首都の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書. (<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/>)
- 74) 行谷佑一・佐竹健治・穴倉正展 (2011) : 南関東沿岸の地殻上下変動から推定した 1703 年元禄関東地震と 1923 年大正関東地震の断層モデル, 活断層・古地震研究報告, No.11, pp.107-120.
- 75) 根本信・鬼頭直・長田正樹・平田賢治 (2015) : 2011 年東北地方太平洋沖地震における水平方向の地殻変動による津波の励起. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71 巻 2 号, pp.I_157-I_162.
- 76) 藤原広行・平田賢治・中村洋光・長田正樹・森川信之・河合伸一・大角恒雄・青井真・松山尚典・遠山信彦・鬼頭直・村嶋陽一・村田泰洋・井上拓也・斎藤龍・秋山伸一・是永眞理子・阿部雄太・橋本紀彦 (2014) : 日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第 400 号, pp. 216.
- 77) 防災科学技術研究所 (2014) : 平成 25 年度全国津波ハザード評価支援業務報告書.
- 78) 防災科学技術研究所 (2015) : 平成 26 年度全国津波ハザード評価支援業務報告書.
- 79) 山本直孝・青井真・平田賢治・鈴木亘・功刀卓・

中村洋光 (2015) : 沖合水圧記録を用いた津波即時予測手法の開発, 日本地震工学会年次大会梗概集, 11 巻, pp.4-35.

- 80) 渡辺偉夫 (1998) : 日本被害津波総覧[第 2 版], 東京大学出版会.

付録電子データ

- 1.2_ 観測点位置情報(表)
- 2.2_ 沿岸陸域地形モデル(図集)
- 2.2_ 津波シナリオバンクデータ規約集
- 2.2_ 領域情報(表)
- 3.3_ 設定した波源断層パラメータ
- 3.3_ 波源断層モデル画像(図集)
- 3.6_ 津波シナリオ(サンプルデータ)
- 4.4_ 陸域評価地点(図集)

謝辞

本研究は, 総合科学技術・イノベーション会議の SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人: JST)によって実施された. 地形モデルの構築においては, 千葉県より貸与いただいた地形モデルおよび粗度データ, 国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル 5 m メッシュ(標高), NOAA(アメリカ海洋大気庁)の ETOPO1, 中央防災会議の地形データ, General Bathymetric Chart of the Oceans の GEBCO_2014 Grid を使用した. 津波観測施設の津波波形データについては, 国土交通省港湾局によって観測され港湾空港技術研究所で処理されたもの, 気象庁, 国土地理院より提供いただいたもの, 海上保安庁の NEAR-GOOS で配布されているものを使用した. 構造物条件のうち, 津波の高さに応じて損傷率を考慮する場合の計算モデル構築においては, 中央大学の有川太郎氏および関克己氏にご協力頂いた. 津波シナリオバンクデータ規約集の作成においては, 三菱スペース・ソフトウェア株式会社の早川俊彦氏および平井雄一氏にご協力頂いた. 津波シナリオバンクの構築に際しては, SIP 防災の課題 1 津波予測技術運営委員会の委員の方々に多くのご助言を頂いた. ここに記して感謝申し上げる.

(2019 年 1 月 11 日原稿受付,
2019 年 1 月 15 日原稿受理)

要 旨

日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) などの稠密な沖合の海底水圧観測網によって得られる観測記録を用いて津波の浸水を即時に予測するための手法の開発を行った。この手法では、津波計算結果を用いて沖合の水圧変動と予測対象地域の沿岸水位分布、浸水深分布、到達時間を記録する津波シナリオバンク (Tsunami Scenario Bank; TSB) を予め用意する必要がある。理想的には、想定されるあらゆる地震による津波シナリオを登録すれば予測精度の向上が期待されるが、有限の時間と計算機資源では実現不可能である。そこで、本研究資料では、予測対象地域に対して効率的に津波シナリオバンクを構築するための手順を千葉県九十九里・外房地域を対象とした場合の実例とともに示した。ここでは網羅性を担保するため、南海トラフや伊豆・小笠原海溝のように遠方の波源断層モデルを設定しているが、予測対象地域での沿岸水位分布の変化が大きくなるよう連続性が担保されるように波源断層モデルを間引いて計算コストを圧縮した。さらに、まずは比較的計算コストの小さい最小 90 m 格子の沖合津波計算を実施することで、沿岸に到達する津波を予め評価した上で計算コストの大きい最小 10 m 格子の陸域浸水計算を実施するようにした。陸域浸水計算においては、構造物条件の違いが与える浸水深分布への影響の評価を行った。ここでは、安全よりの「構造物が損傷しない場合」と危険よりの「構造物の損傷が大きい場合」に加えて、最も確からしい「構造物の損傷率を考慮する場合」について陸域浸水計算を実施し評価した。一方、津波浸水即時予測システムを構築する際には、情報の受け手である利用者のニーズに応じて予測に用いる構造物条件を決定する必要がある。最後に、構築した津波シナリオバンクの妥当性と予測手法 (Multi-index 法) の検証のため既往津波を模擬データとして評価し、一定程度の精度が得られていることを確認した。また、多層ニューラルネットワーク回帰を Multi-index 法と併用することで予測精度を向上することが出来ることを確認した。

キーワード：津波、津波浸水即時予測、津波シナリオバンク、日本海溝海底地震津波観測網、戦略的イノベーション創造プログラム