

令和2年2月27日
津波予測技術に関する勉強会(第17回)

資料1-5

津波シナリオバンクにおける 波源断層モデル設定の検討

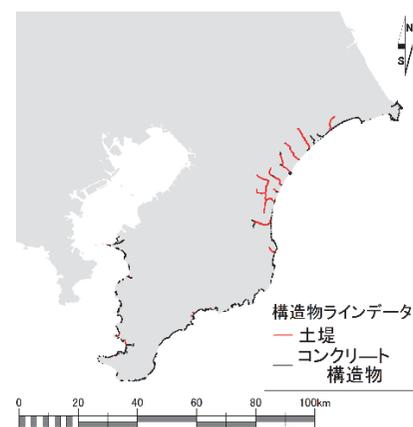
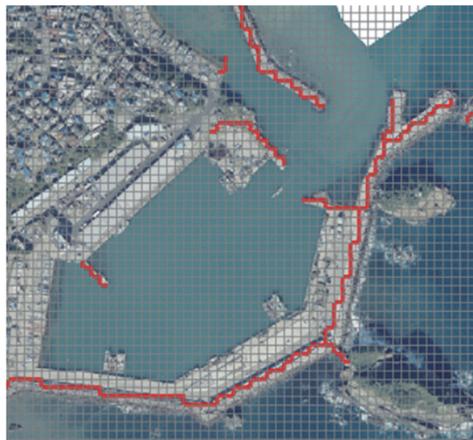
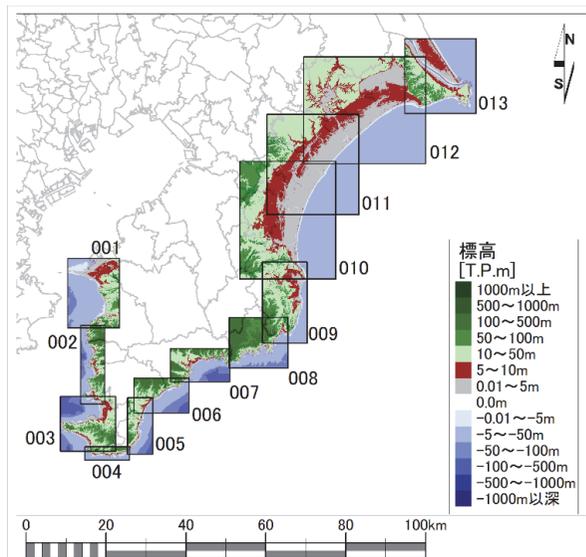
国立研究開発法人防災科学技術研究所
地震津波火山ネットワークセンター
鈴木亘

津波シナリオバンクについて

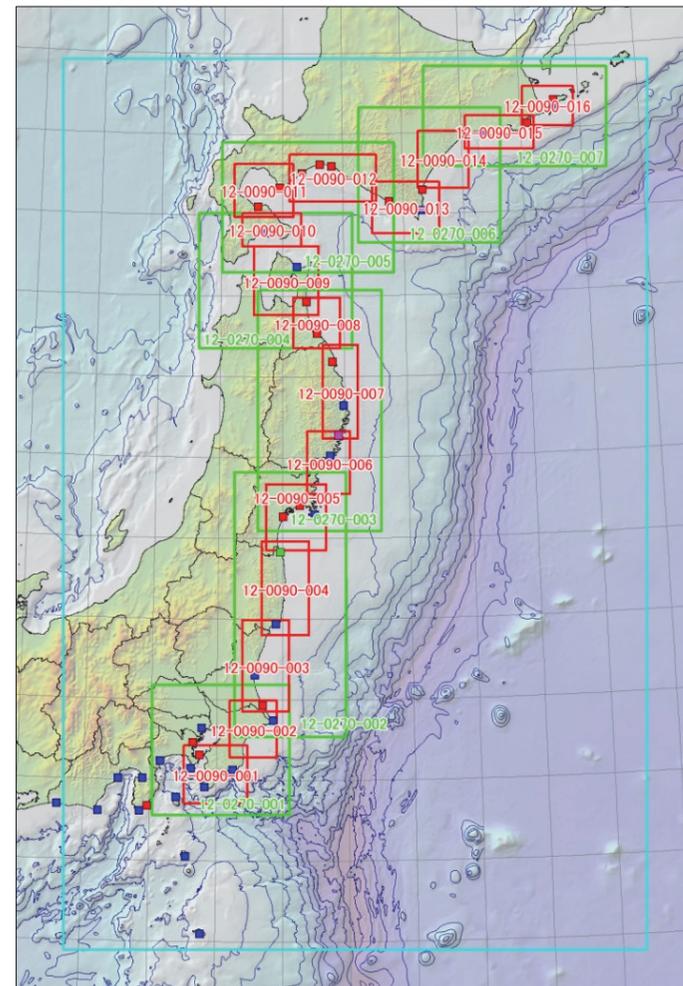
- 防災科学技術研究所（防災科研）では、日本海溝海底地震津波観測網（S-net）で観測された津波データ（海底水圧計データ）を用いて、津波遡上浸水までを対象とした即時予測技術の開発とその技術を実装したシステム構築を行ってきた。
- 津波遡上即時予測は千葉県より連携協力協定のもと詳細地形データを貸与いただいた九十九里・外房沿岸地域を対象としている。一方、千葉県から北海道までの東日本太平洋沿岸地域に対しては、やや粗い地形データを用いた概観的な予測・検証を行っている。
- 構築した予測システムでは、波源断層モデルを様々設定して津波計算を行い、得られたS-netでの水圧変動と予測対象地域での津波高・到達時刻等より構築した津波シナリオバンクを用いる。津波シナリオバンクよりMulti-index法（Yamamoto et al., 2016）を用いて観測されたS-net水圧変動にマッチするシナリオ（群）を選び出して予測を行う。
- 本発表では主として津波シナリオバンク構築における波源断層モデル設定の検討に関して紹介を行う。なお津波シナリオバンク構築に関する手順の詳細は、防災科学技術研究所研究資料（近貞・他, 2019）として取りまとめて、冊子体及びWeb上で公開を行っている。

地形モデル

詳細な遡上浸水予測のための地形モデル
(10mグリッド) と構造物データ



概観的な予測・検証のための地形モデル
(90mグリッド)



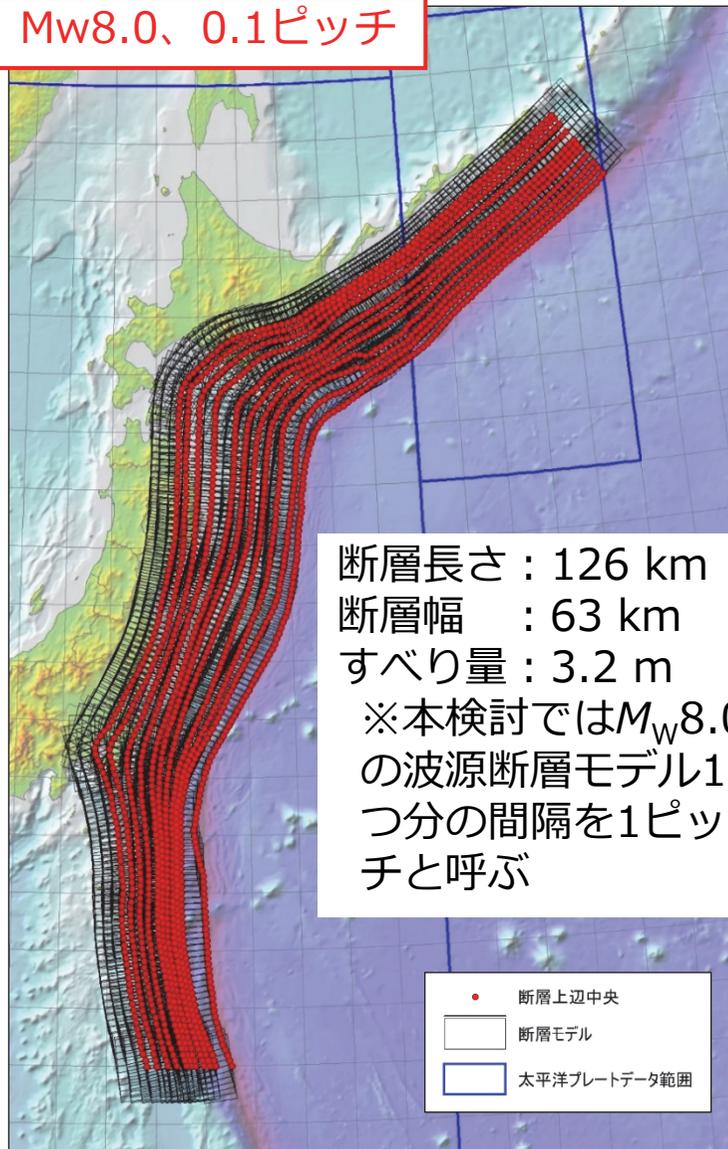
波源断層モデルの設定

- 津波シナリオバンクではプレート間地震（千島海溝～日本海溝～伊豆・小笠原海溝沿いの太平洋プレート上面、相模トラフ沿いのフィリピン海プレート上面、南海トラフ沿いのフィリピン海プレート上面）、日本海溝沿いのアウターライズ地震、予測地域周辺の浅いプレート内地震及び環太平洋の遠地地震を考慮した。本発表ではそのうち、発生頻度及び津波高の観点で最も重要な日本海溝沿いのプレート間地震に関する設定の検討について紹介する。
- プレート間地震の波源断層モデルは、モーメントマグニチュード M_W としての地震規模と等深度線に沿った断層の水平位置を一定間隔で設定した。
- 地震規模 M_0 ($=10^{1.5M_W+9.1}$) [Nm]と断層面積 S [m^2]のスケーリングを

$$M_0 = \beta \times 10^6 \times S^{3/2}$$
 と表す。
 藤原・他（2014）では日本周辺で津波を伴った既往地震の断層モデルを回帰して $\beta=1.77$ の値を得ている。このスケーリングに従う波源断層モデルを用いて波源断層モデル設定の間隔の検討を行った。なお、応力降下量を $\Delta\sigma=2.5M_0/S^{3/2}$ （菊地, 2003）の式で計算すると4.4 [MPa]程度となる。
- 断層すべり量は剛性率50 [GPa]として計算を行った。

設定間隔検討における計算条件

Mw8.0、0.1ピッチ



日本海溝沿いの M_w 7.6-8.4のプレート間地震を対象に、深さごとに走向方向一定間隔で敷き詰めた矩形の波源断層モデル群を設定し、千葉県九十九里・外房沿岸での沿岸波高分布の変化を評価した

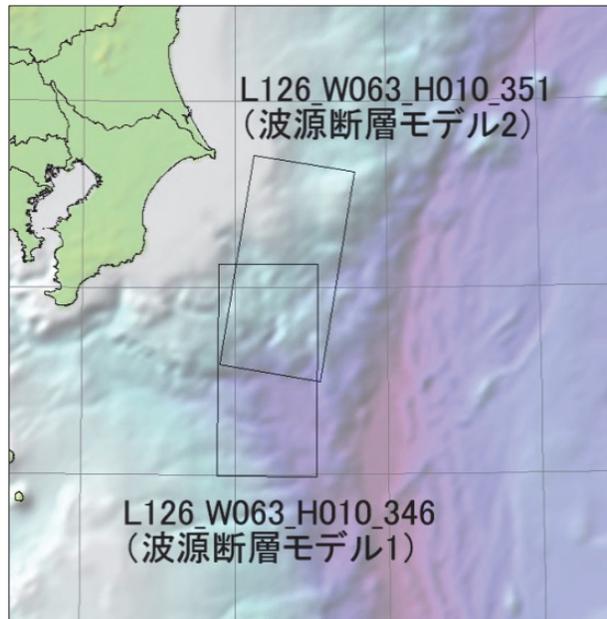
支配方程式	非線型長波理論
計算手法	Staggered-grid Leap-frogの差分法
地形モデル	2,430m、810m、270m、90mグリッドの4領域を1:3の割合で接続
境界条件	<ul style="list-style-type: none"> ・陸側：陸域への遡上を考慮 ・海側：完全無反射の透過境界
施設条件	構造物条件なし
計算時間	3時間
初期水位	海底地殻変動鉛直成分に地形傾斜による水平成分の寄与 (Tanioka & Satake, 1996) を付加したのち、水理フィルタ (Kajiura, 1963) を適用
潮位条件	T.P.+0.0m
粗度係数	一律0.025

沿岸波高分布一致度の指標

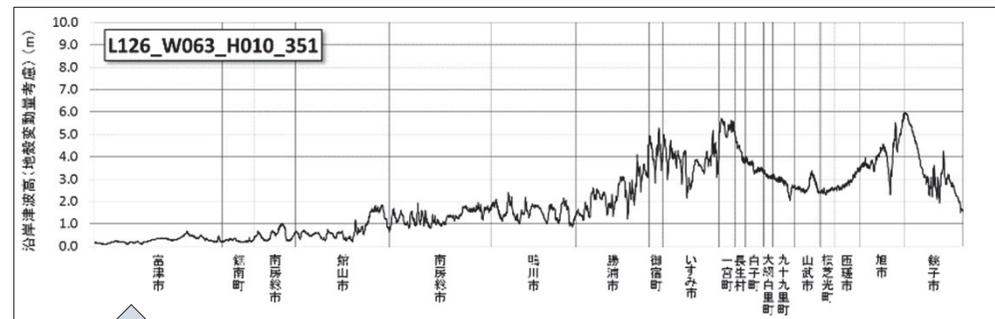
2つの波源断層モデルによる九十九里・外房沿岸での波高分布の一致度を Variance Reduction (HVR) を用いて評価する

$$HVR = 1 - \frac{\sum (H_{1i} - H_{2i})^2}{\sqrt{\sum H_{1i}^2} \sqrt{\sum H_{2i}^2}}$$

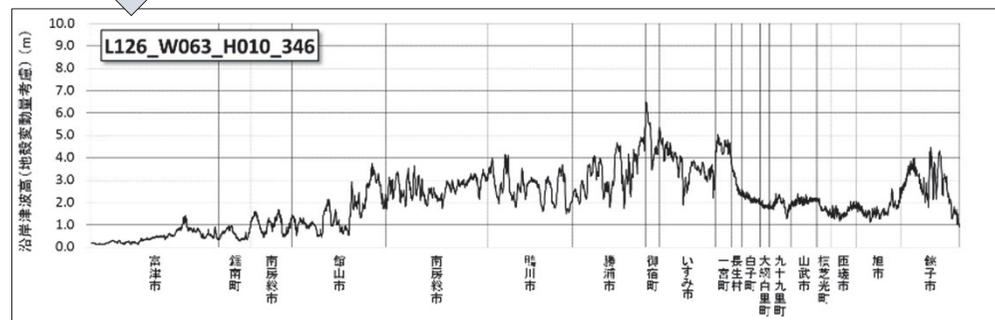
i は九十九里・外房沿岸での水位評価点



波源断層モデル2による沿岸分布 (H_{2i})



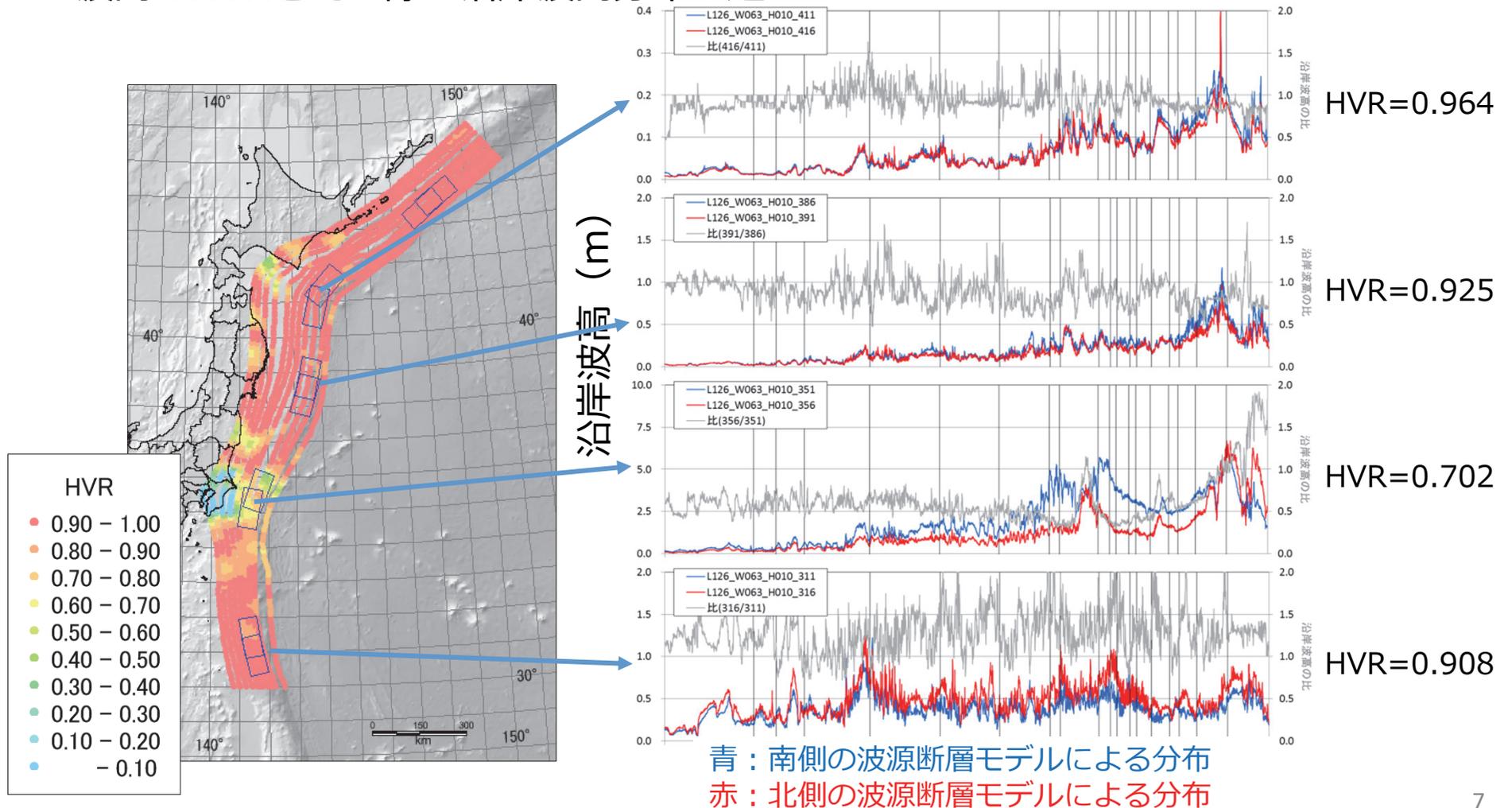
波源断層モデル1による沿岸分布 (H_{1i})



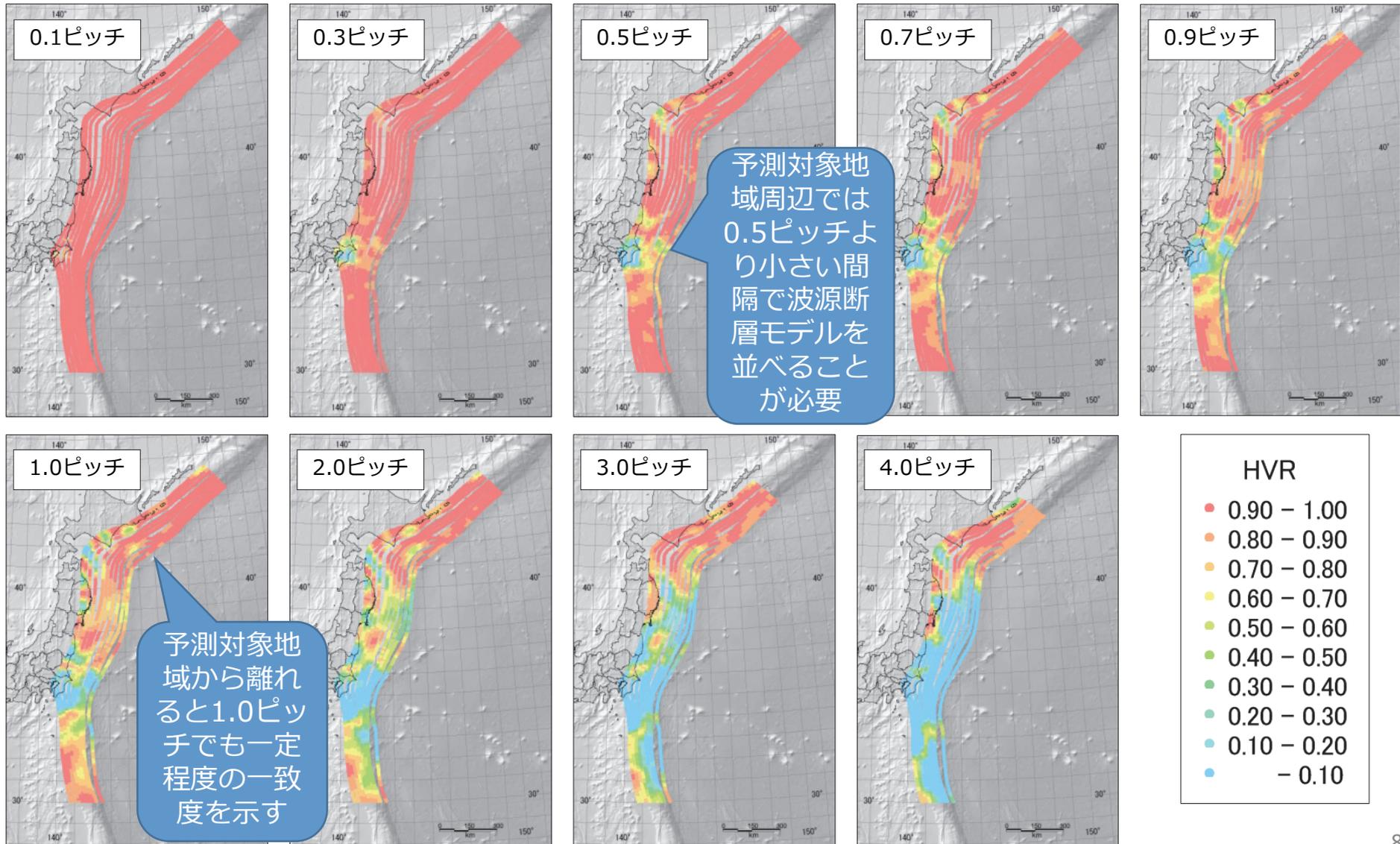
HVR=0.801

水平位置間隔の検討

M_w 8.0の波源断層モデルを0.5ピッチずらした時の千葉県九十九里・外房沿岸波高のHVRとその際の沿岸波高分布の違い



水平位置間隔の検討



水平位置間隔の検討

HVR>0.8とするピッチ幅で設定する

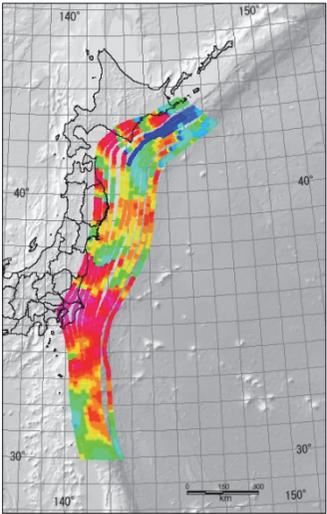
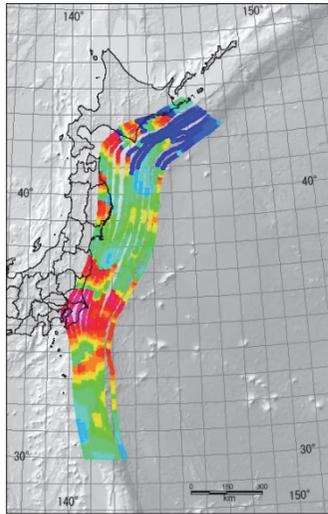
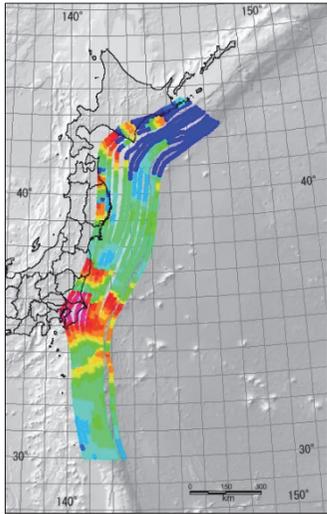
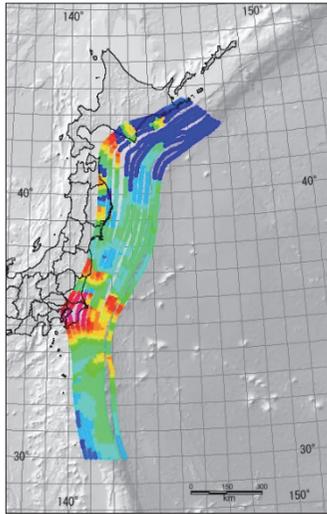
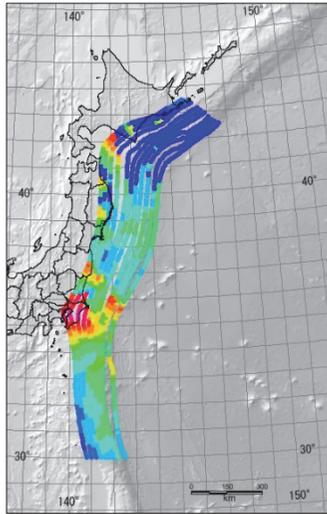
HVR>0.5

HVR>0.6

HVR>0.7

HVR>0.8

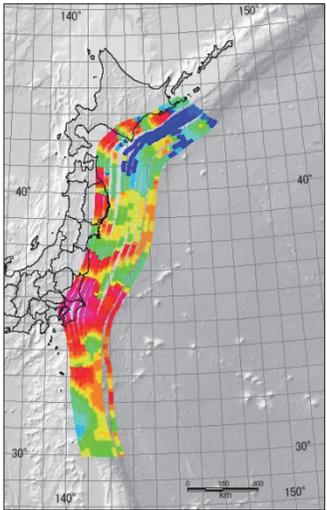
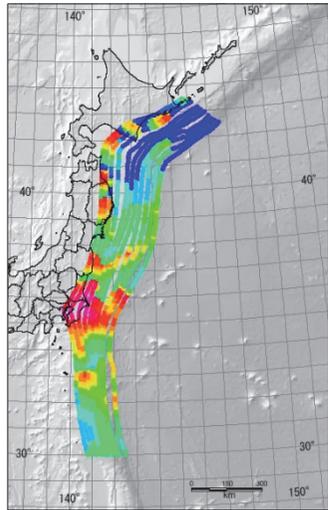
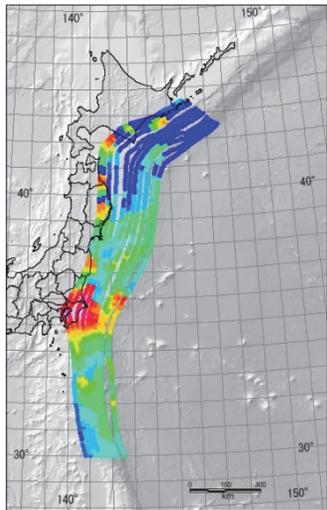
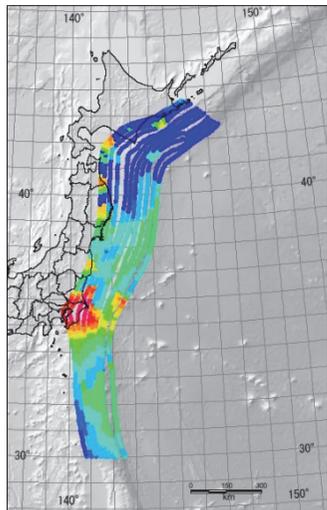
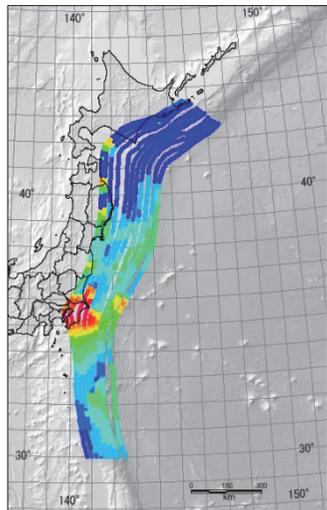
HVR>0.9



$M_W 8.0$

HVRを一定値以上にするために必要なピッチ幅

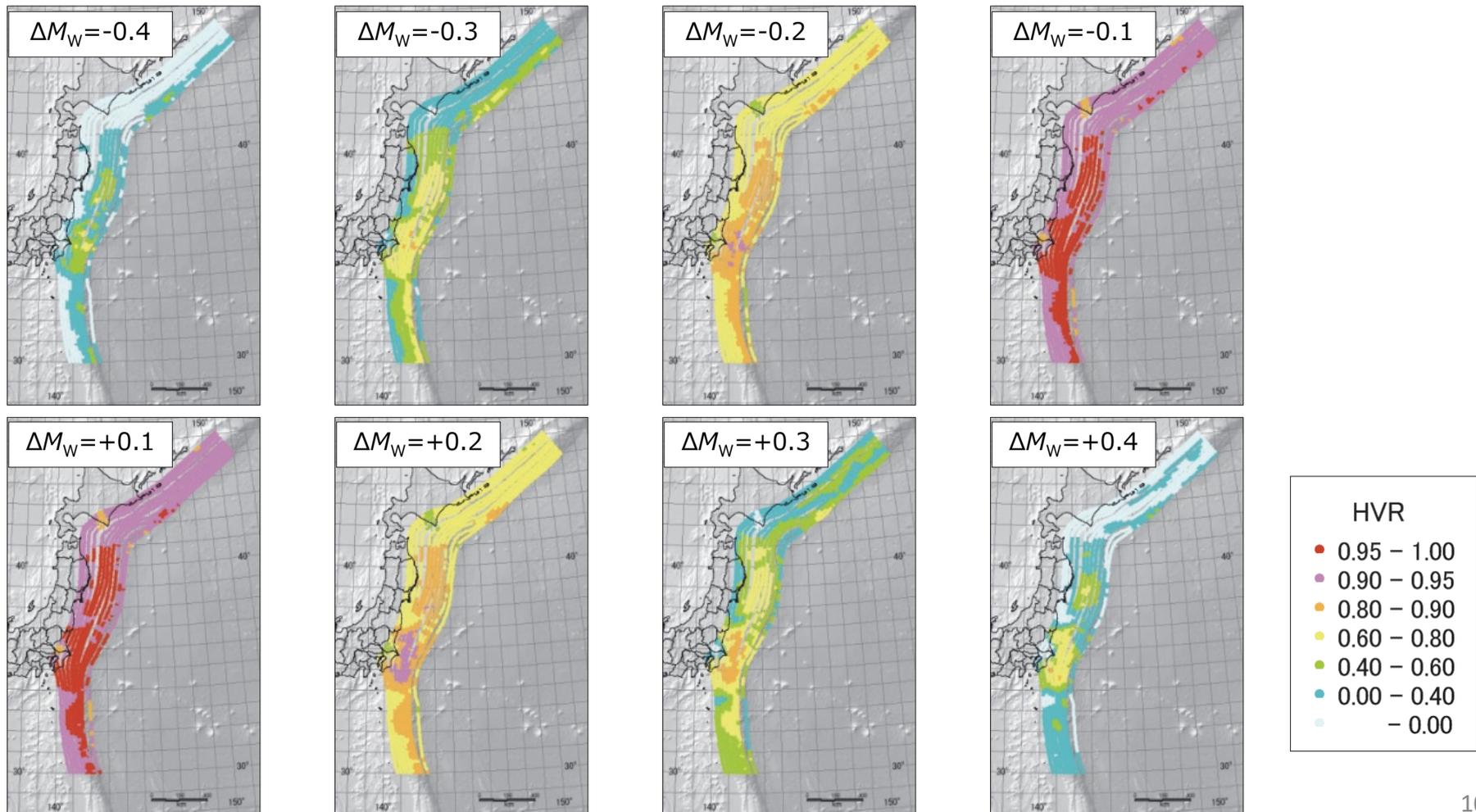
- 0.1 ピッチ未満
- 0.1 ピッチ
- 0.2 ピッチ
- 0.3 ピッチ
- 0.4 ピッチ
- 0.5 ピッチ
- 0.6 ピッチ
- 0.7 ピッチ
- 0.8 ピッチ
- 0.9 ピッチ
- 1.0 ピッチ
- 1.5 ピッチ
- 2.0 ピッチ
- 3.0 ピッチ
- 4.0 ピッチ



$M_W 8.4$

地震規模間隔の検討

M_W 8.0の波源断層モデルから地震規模を ΔM_W 変えた際の沿岸波高の変化をHVRで評価



地震規模間隔の検討

M_w 8.0の波源断層モデルについてHVRを一定値以上とするのに必要となる M_w 間隔

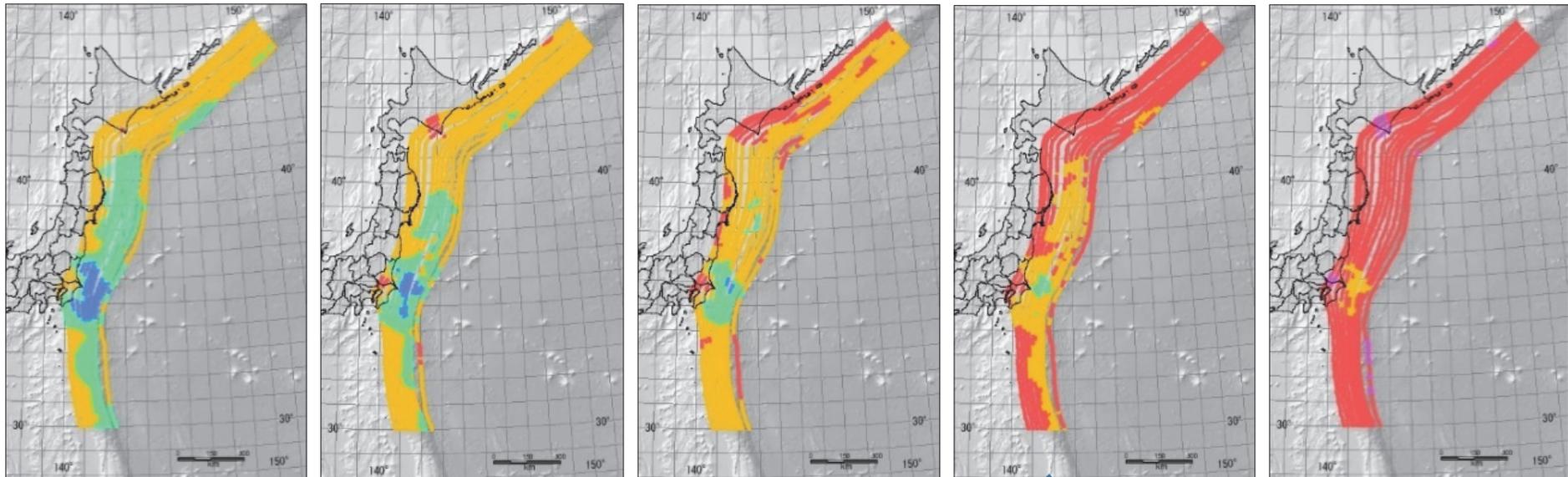
HVR>0.5

HVR>0.6

HVR>0.7

HVR>0.8

HVR>0.9



必要 M_w 幅
HVR > 0.8

- $\pm M_w$ 0.1未満
- $\pm M_w$ 0.1
- $\pm M_w$ 0.2
- $\pm M_w$ 0.3
- $\pm M_w$ 0.4

凡その領域についてHVR>0.8となる M_w 0.2間隔を採用する

断層すべりの不均質性への対応

- 断層面上のすべりは不均質であり、断層面全体のうちの一部にすべりの大きい領域が存在することがほとんどである。この不均質性を考慮した評価手法として地震調査研究推進本部地震調査委員会では「波源断層を特性化した津波の予測手法（津波レシピ）」を公表している。

- 津波レシピで提案されている特性化波源断層モデルは、背景領域、大すべり域、場合により超大すべり域から構成されるが、大すべり域の位置については何パターンも想定されうる。

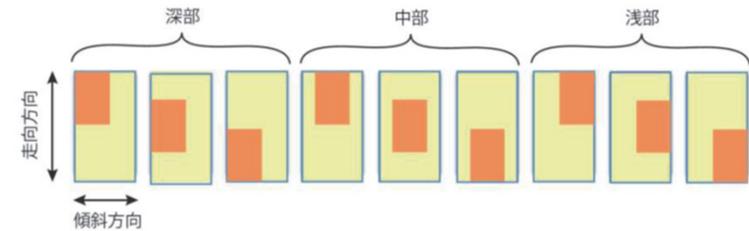


図5 大すべり域の設定例
(橙色が大すべり域、黄色が背景領域を表す)
津波レシピより

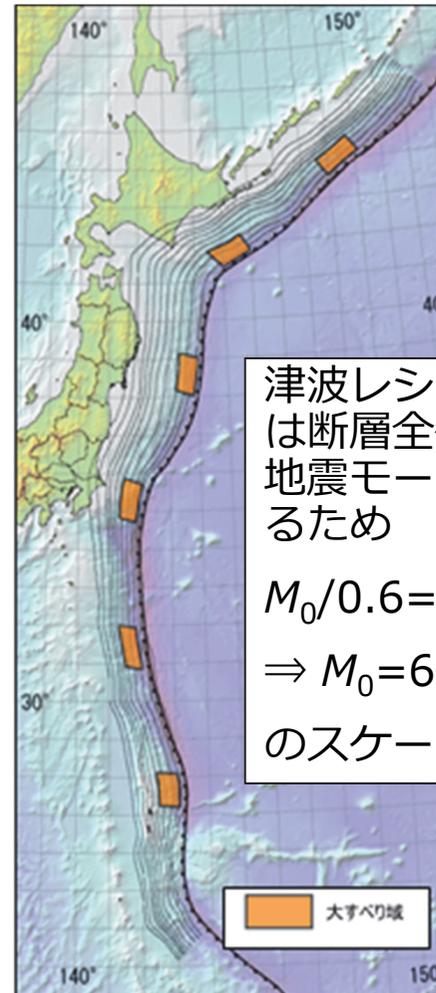
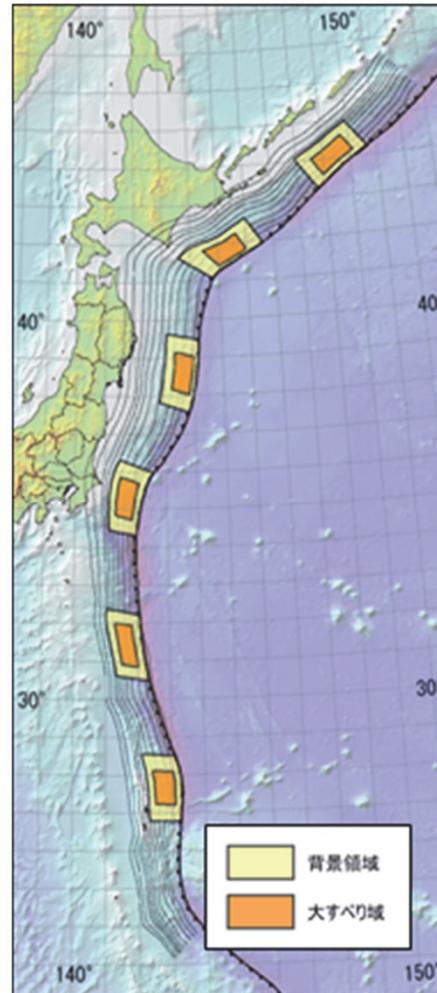
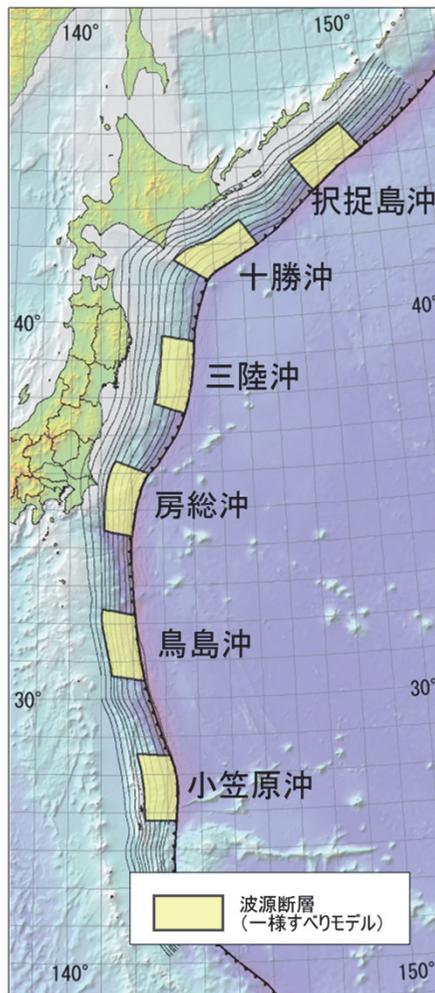
- 津波即時予測のための事前のシナリオ作成において、一つの断層面に対し様々なパターンの大すべり域及び超大すべり域を考慮するには膨大な計算が必要となるため、津波シナリオバンクでは大すべり域に相当するすべりが局在化した波源断層モデルを用いることで断層すべりの不均質性への対応を行った。

一様すべりと2段階すべりの比較

一様すべり
($\beta=1.77$)

2段階すべり (特性化
波源断層モデル相当)

一様すべり
(大すべり域相当)



検討した波源断層
モデルの位置
($M_w 8.4$)

津波レシピに従うと、大すべり域
は断層全体の30%の領域で60%の
地震モーメントを持つと設定され
るため

$$M_0/0.6 = 1.77 \times 10^6 \times (S/0.3)^{3/2}$$

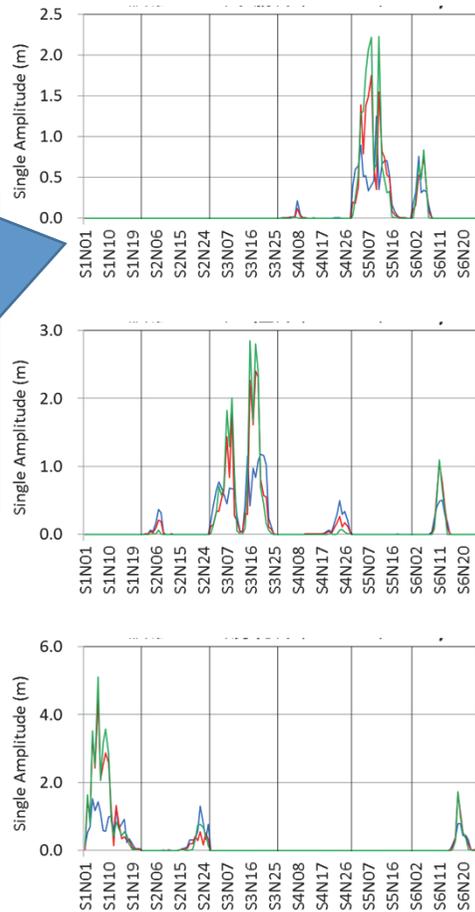
$$\Rightarrow M_0 = 6.46 \times 10^6 \times S^{3/2}$$

のスケージングで表現している

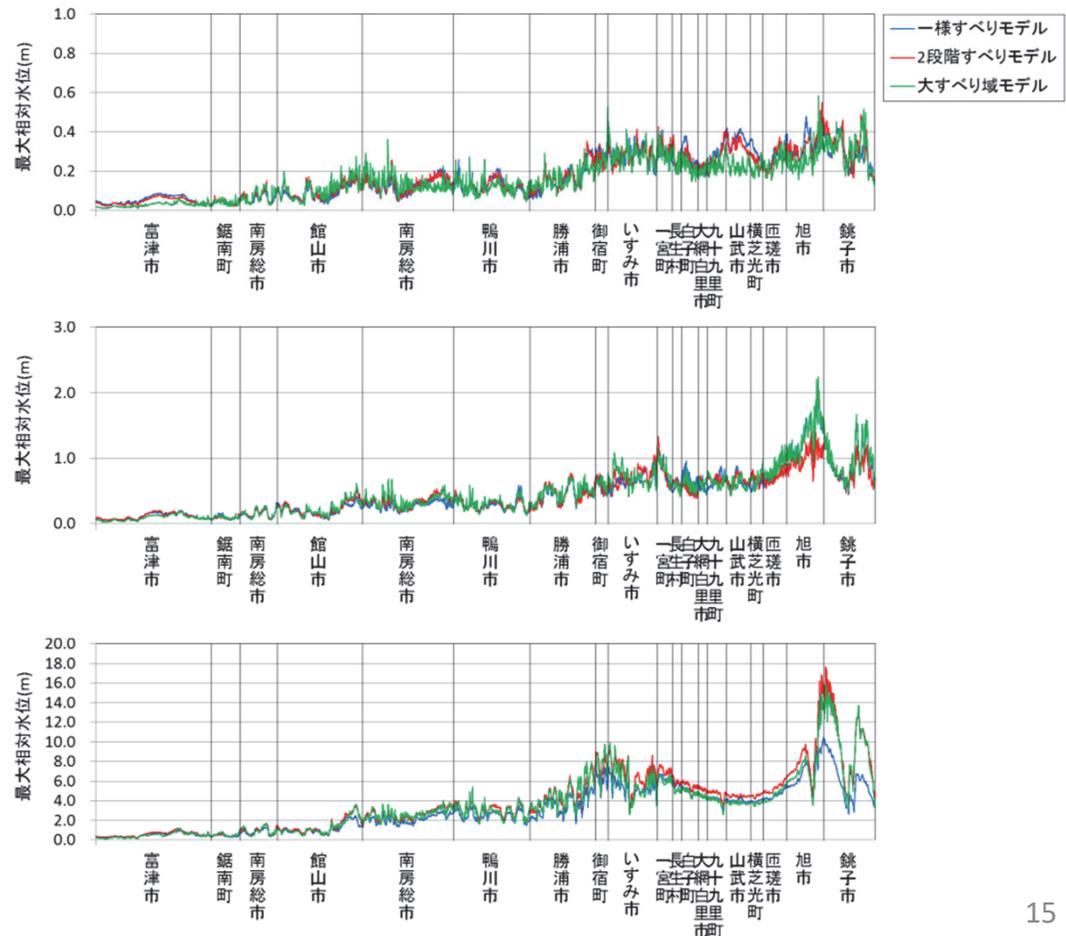
特性化波源断層モデルとの比較

- 2段階すべりモデルの沖合水圧データ及び沿岸波高分布は大すべり域相当の一様すべりモデルでよく再現できている

沖合水圧データ



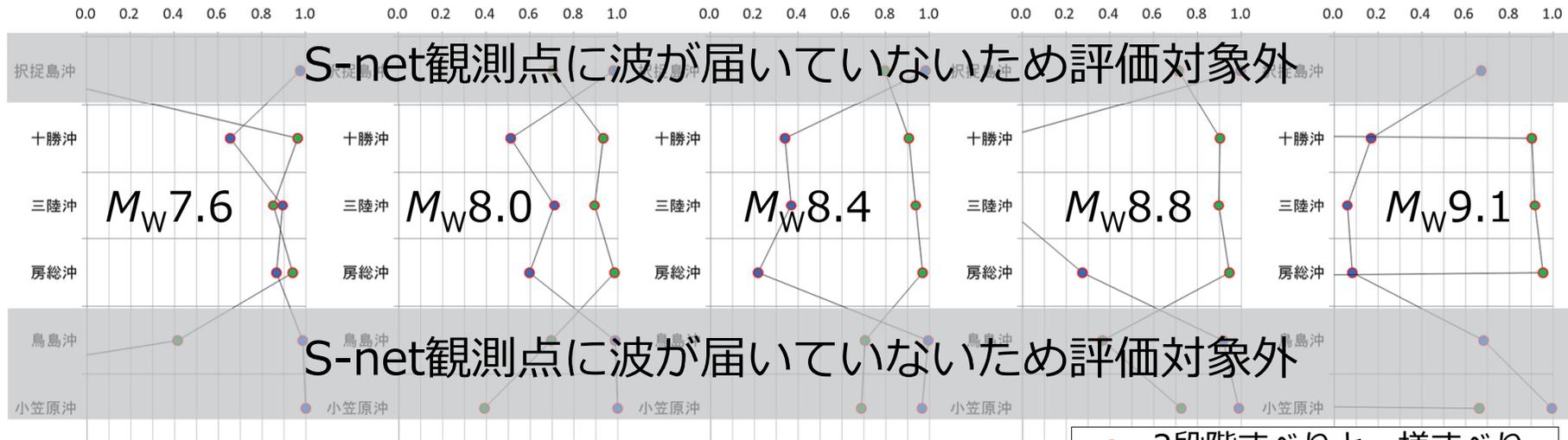
沿岸波高分布



予測システムで評価対象としているS-net水圧変動の絶対値の最大値(5分間のピークホールド値)を描画

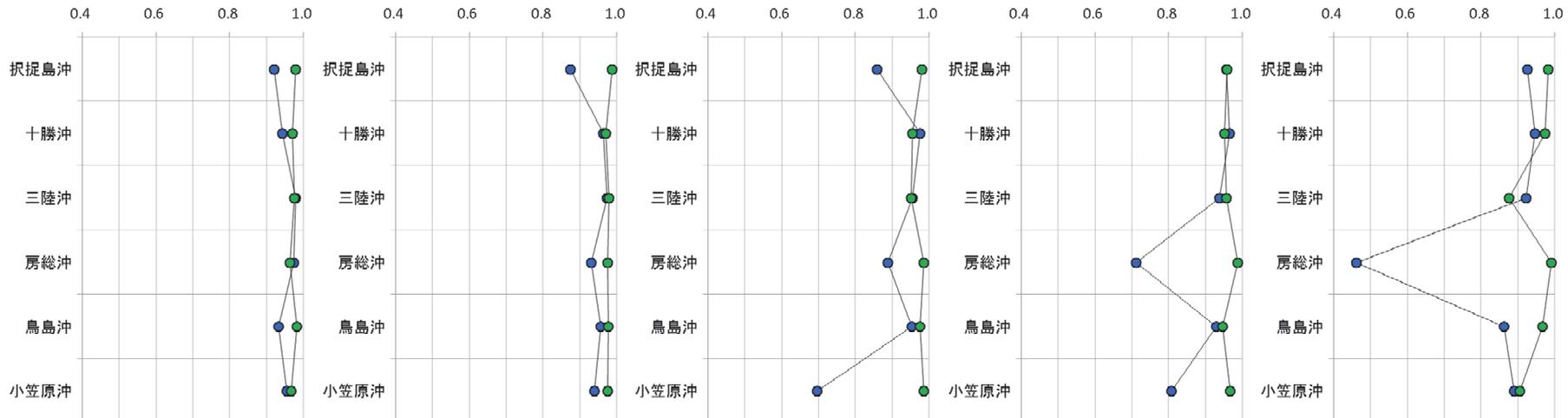
特性化波源断層モデルとの比較

沖合水圧データの一致度



沿岸波高の一致度

- 2段階すべりと一様すべり
- 2段階すべりと大すべり域



Multi-index法(沖合水圧データ評価)

津波シナリオバンクより、現在S-netにより観測されている水圧変動にマッチする（似ている）シナリオを選び出すために、異なる性質を持つ3つの指標を評価して、それら同時に閾値を満たすシナリオ（群）を選別する。

- 相関係数：R
⇒水圧変動の位置に感度がある

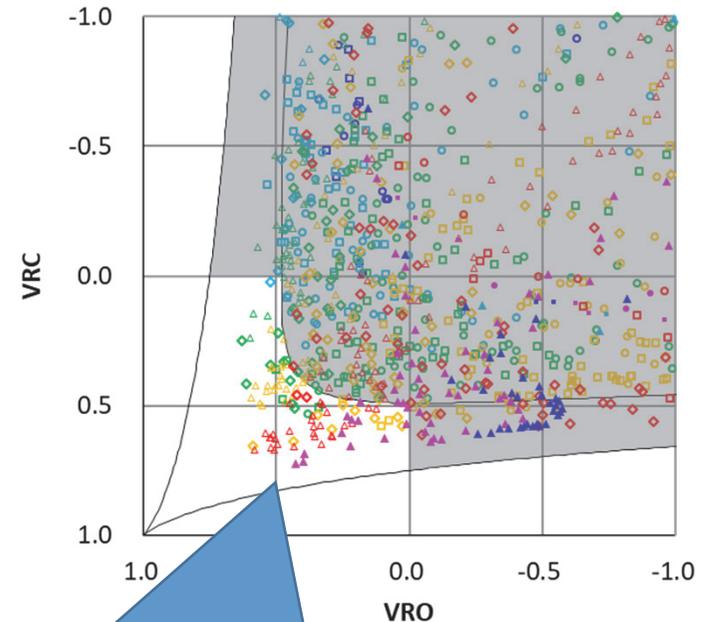
$$R(t) = \frac{\sum_{i=1}^n O(\mathbf{r}_i, t)C(\mathbf{r}_i, t)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n O^2(\mathbf{r}_i, t)}\sqrt{\sum_{i=1}^n C^2(\mathbf{r}_i, t)}}$$

- 観測データで正規化した Variance Reduction：VRO
⇒振幅の過大評価に感度がある

$$VRO(t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O(\mathbf{r}_i, t) - C(\mathbf{r}_i, t))^2}{\sum_{i=1}^n O^2(\mathbf{r}_i, t)}$$

- シナリオデータで正規化した Variance Reduction：VRC
⇒振幅の過小評価に感度がある

$$VRC(t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O(\mathbf{r}_i, t) - C(\mathbf{r}_i, t))^2}{\sum_{i=1}^n C^2(\mathbf{r}_i, t)}$$

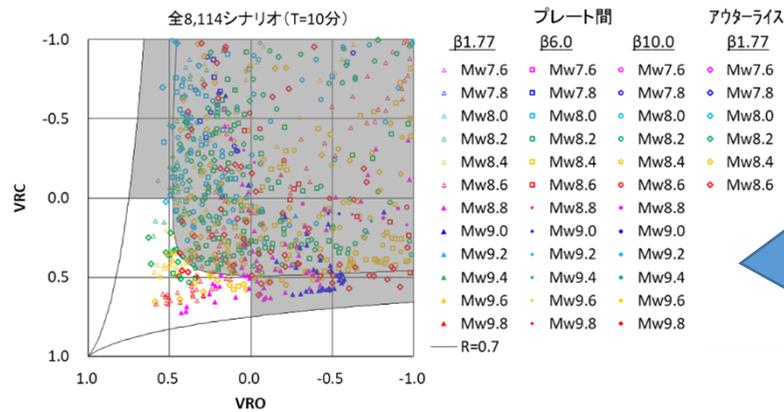
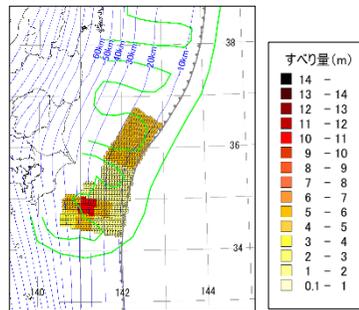


閾値 $R \geq 0.7$ 、 $VRO \geq 0$ 、 $VRC \geq 0$ として選別されたシナリオ群は白枠内に位置する

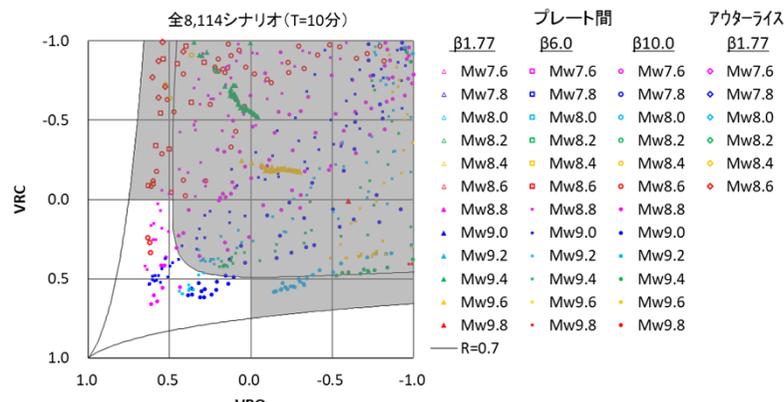
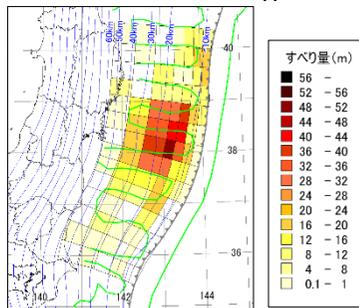
模擬データでの検証

断層全体の面積を回帰して得られた $\beta=1.77$ 、大すべり域のみに対応する $\beta=6.0$ 、さらにすべりが局所的に集中した $\beta=10.0$ の3つのスケーリングに従う波源断層モデルから、東日本太平洋沿岸の概観的な予測・検証のための設定に基づく津波シナリオバンクを生成。既往被害地震を模擬した検証データに対しMulti-index法での評価を行った。

1677年延宝房総沖地震
(竹内・他, 2007; M_w 8.5)



2011年東北地方太平洋沖地震
(内閣府, 2012; M_w 9.1)



延宝房総沖地震では $\beta=1.77$ の波源断層モデルがMulti-index法の閾値を満たす一方、東北地方太平洋沖地震では $\beta=6.0$ や 10.0 が閾値を満たす

⇒ 他の既往地震津波データでの検証も踏まえ、これらの3つのスケーリングに基づく一様すべりの波源断層モデルを設定

まとめ

- 本発表では、津波即時予測のための津波シナリオバンクの構築において必要となる波源断層モデルを効率的に網羅することを目的とした、2種類の検討について紹介した。
- 検討においては、比較的計算負荷の小さい最小90mグリッドの地形モデルを用いた沿岸波高分布を主に評価対象として用いた。
- 設定する波源断層モデル群の位置及び地震規模の適切な間隔の検討として、断層パラメーターを少しずつ変化させた場合の沿岸波高分布の変化をHVRで評価して空間的に可視化した。検討結果を踏まえて $HVR \geq 0.8$ となるように設定間隔を決定した。
- 断層すべりの不均質性を考慮するための検討として、複数のスケージングから設定したすべり一様な波源断層モデルと、2段階すべりの波源断層モデルや不均質波源断層モデルから計算した模擬津波データでの、沖合水圧データや沿岸波高の比較検証を行った。検討結果を踏まえて3つのスケージングを用いたすべり一様な波源断層モデルを設定し、断層面全体に平均的なすべりを有する場合から局所的に大きなすべりが集中する場合までをカバーすることとした。

参考文献

- 近貞・他 (2019): 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. 防災科学技術研究所研究資料 第430号, 169pp.
- 藤原・他 (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, 216pp.
- Kajiura (1963): The leading wave of a tsunami. Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo Vol.41, 535-571.
- 菊地 (2003): リアルタイム地震学. 東京大学出版会, 222pp.
- 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)
- 竹内・他 (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号, 53-59.
- Tanioka and Satake (1996): Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom. Geophys. Res. Lett. Vol.81, 941-950.
- Yamamoto et al. (2016): Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast. Earth Planets Space Vol.68, 128.