

南海トラフ地震を対象とした津波の即時予測  
と浸水後の長期湛水に関する研究

徳島大学 先端技術科学教育部

知的力学システム工学専攻

建設創造システム工学コース

谷口 純一

## 目次

序論	3
第1部 津波データベースと津波観測網を利用した津波の即時予測	6
1章 津波データベースの作成	6
1.1 地震シナリオ群	6
1.2 津波計算	7
1.3 本章のまとめ	9
2章 津波データベース検索による沿岸津波高の予測	10
2.1 Multi-index method に基づくデータベース検索の方法	10
2.2 Multi-index method に基づくデータベース検索の検証	11
2.3 焼きなまし法による津波高予測のための観測点の選択	12
2.4 本章のまとめ	17
3章 回帰による沿岸津波高の予測	18
3.1 リッジ回帰による津波高の予測	18
3.2 ガウス過程による津波高の予測	19
3.3 本章のまとめ	21
4章 断層の破壊過程の想定の違いが津波高予測に及ぼす影響の検討	23
4.1 ライズタイムの想定が違う場合の予測	23
4.1.1 想定よりもライズタイムが長い地震の場合	24
4.1.2 想定よりもライズタイムが短い地震の場合	25
4.2 断層の破壊伝播を考慮した場合の予測	26
4.2.1 断層破壊開始点が東部にある場合	27
4.2.2 断層破壊開始点が中央部にある場合	31
4.2.3 断層破壊開始点が西部にある場合	35
4.3 本章のまとめ	39
5章 浸水深分布の即時予測	40
5.1 沖合津波高と浸水量の関係	40
5.2 浸水量と浸水深分布の関係	40
5.3 データベース検索による浸水深分布の予測	43
5.3.1 津波高予測のためのデータベース検索モデルでの浸水深分布の予測	43
5.3.2 予測対象地域の地殻変動量を考慮したデータベース検索	45
5.3.3 データベース検索による浸水深分布の予測に適した観測点の選択	47
5.4 本章のまとめ	54
第2部 徳島市沿岸部を対象とした津波の長期湛水シミュレーション	55
1章 過去の南海地震による徳島の長期湛水	55

1.1 昭和南海地震.....	55
1.2 安政南海地震.....	56
1.3 本章のまとめ.....	57
2 章 津波の流入・排水過程の計算方法.....	58
2.1 計算の全体像.....	58
2.2 堤外地の計算.....	58
2.3 堤内地の計算.....	59
2.3.1 地表面.....	59
2.3.2 排水路.....	59
2.3.3 下水路.....	60
2.3.4 排水ポンプ.....	60
2.4 本章のまとめ.....	60
3 章 津波の流入・排水のシミュレーション.....	61
3.1 徳島市川内地区.....	61
3.2 徳島市沖洲地区.....	66
3.3 本章のまとめ.....	71
4 章 高知県の津波の長期湛水の排水の検討方法との比較.....	72
4.1 高知県の長期湛水の検討方法.....	72
4.2 川内地区・沖洲地区への適用と本論文の手法との比較.....	72
4.3 本章のまとめ.....	74
結論.....	75
参考文献.....	79
謝辞.....	83

## 序論

2011年東北地方太平洋沖地震の津波は東北地方の沿岸部に甚大な被害を与えた。これをきっかけとして内閣府は、発生間隔が数十年から百数十年に一度程度の規模の地震・津波をレベル1、科学的に想定しうる最大規模の地震・津波をレベル2と定義し、レベル1の津波に対しては堤防などの海岸保全施設を整備して被害の低減を目指し、レベル2の津波に対しては住民避難を軸に命を守ることに主眼を置いた対策を講じることとした<sup>1)</sup>。2011年東日本大震災以降、その方針に従って国や地方自治体は事前対策を進めている。この対策は主に防波堤等の整備と迅速な避難の実施に集約されるが、それ以外にも2011年東北地方太平洋沖地震の際に露呈した課題があった。それらは津波の即時予測と長期湛水の問題である。

本研究の第1部では、津波の即時予測の高度化について取り組んだ。津波の即時予測は避難の要否の判断の重要な情報のひとつである。もちろん、沿岸で強い揺れを感じたらすぐに高台に避難するのは津波災害軽減の基本であるが、例えば避難行動が大変な老人や障害を抱えた人々にとっては最低限の避難行動で済ませられればそれが良く、その他の人にとっても特別な行動をとる必要がないのであればそれが望ましいだろう。また、津波の即時予測は行政にとっても重要な情報となる。地震発生時に津波被害が起こったすべての地域の被害状況を即座に把握することは難しいが、津波の即時予測が高精度で行えるのであれば、各地の被害状況の予測にも繋がり、救援活動などの対応の初動を正確に素早く行うことができる。さらに現在においても津波の収束の予測は技術的な課題があり、救助活動の開始と連動する津波警報の解除のタイミングは気象庁職員の経験に頼らざるを得ない側面もある。いずれにせよ、南海トラフ巨大地震発生が懸念される今日においては、高精度な津波予測の実現は喫緊の課題である。

2011年東北地方太平洋沖地震では、津波警報の第一報が過小評価だったことが問題点として挙げられた。これは当時の気象庁の津波予報のシステムに不十分な点があったことによる<sup>2)</sup>。気象庁は津波データベースを用いて津波の予測を行っている<sup>3,4)</sup>。津波データベースは、多数の地震シナリオであらかじめ津波の伝播計算をしておいたものであり、気象庁は地震発生時に震源の位置とマグニチュードからデータベース内の最も適したシナリオを選び、予測を行っていた。しかし、マグニチュードの即時予測に用いられる気象庁マグニチュードは東北地方太平洋沖地震のような巨大地震に対しては適切に評価できないため、その結果、津波予報も過小評価となってしまった。なお、現在はマグニチュードが8程度以上になると推察される場合は、地震が発生した海域で最も被害が大きくなるケースを予報の第一報として用いることで過小評価を避けるアルゴリズムを採用している<sup>5)</sup>。

このことを踏まえてより確かな予測システムを作る必要があるとされ、例えば、Koshimura et al.(2014)<sup>6)</sup>は地震発生後に陸上のGPS観測データから推定された断層モデルを用いて津波の波源を即時に推定し、スーパーコンピュータで津波の伝播・遡上計算を行うシステムを構

築した. このシステムを利用すると地震発生後 10 分程度で広範囲の浸水予測が可能である. この方法は高精度な予測が可能であるが, その計算結果を地方自治体などの防災対策機関にリアルタイムで転送しなければならない. 地震直後には通信網が途絶える可能性もあるため, 各自治体を持つような一般的なコンピュータで予測可能な簡便な方法も同時に用意しておいた方が望ましい.

気象庁のような津波データベースを利用した津波の即時予測は, 事前に準備するデータベースの構築には手間はかかるが, 即時的な計算コストはかからず, 結果の参照は容易である. しかし, 上述の理由でデータベースからシナリオを選ぶ方法を再検討する必要がある. 現在では, 沖合津波観測網として, 日本海溝付近には S-net<sup>7)</sup>, 南海トラフ付近には DONET<sup>8)</sup>と呼ばれる海底水圧計観測網の敷設が完了し, 海岸 20km 程度の沖合には NOWPHAS<sup>9)</sup>の GPS 波浪計もある (図-1). これらを用いれば津波に直接的に関係する海水の動きを見ることができ, 地震のマグニチュードの推定がなくともより確かな予測ができる可能性がある. 例えば, Takahashi et al.(2017)<sup>10)</sup>は, DONET の全観測点の津波波形の絶対値の最大値の平均が近いシナリオの中から最も津波高が高くなるものを選ぶことで過小評価がほとんど起こらない予測システムを構築した. この方法は各観測点のデータを平均することで津波の規模を特定しているが, 津波の空間分布に関する情報が欠落するという欠点がある. 一方で, Yamamoto et al.(2016)<sup>11)</sup>は, 沖合の全観測点のデータが類似しているシナリオをデータベースから選ぶ方法を提案した. この方法を用いると, 津波の規模のみでなく, 空間分布も似ているシナリオを選ぶことができる. 他に, Baba et al.(2014)<sup>12)</sup>や Igarashi et al.(2016)<sup>13)</sup>は, 津波データベースを基に観測波形と沿岸津波高の回帰モデルを作ることで津波高の予測を行う方法を試している. これらの方法は, 一度計算モデルが構築できれば, その後の予測は一般

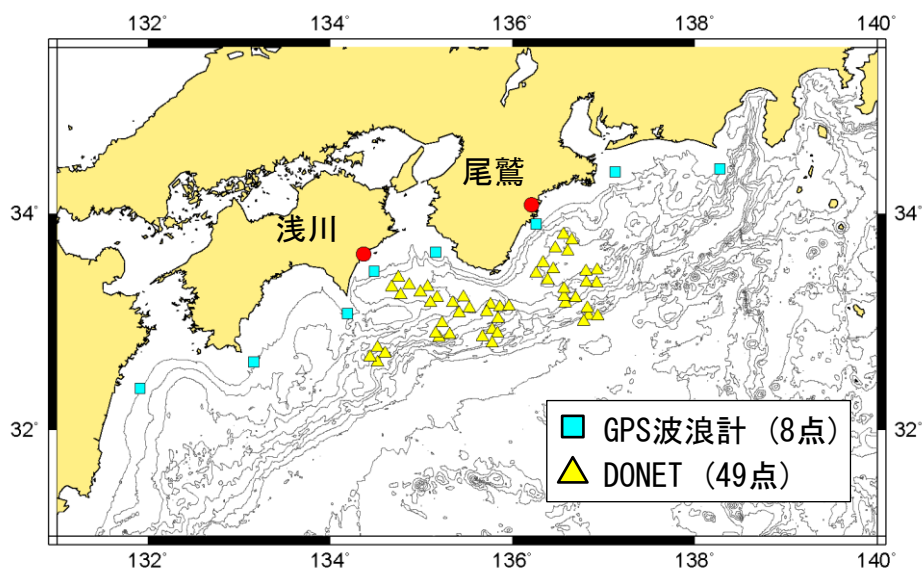


図-1 南海トラフ付近の津波観測点

的なコンピュータでも容易にできる点でも優れている。

本論文では、まず南海トラフを震源とする地震を対象として 3967 の地震シナリオについて、徳島県の浅川地区、三重県の尾鷲地区で遡上計算を行い津波データベースを構築した。そして、Yamamoto et al. (2016) に基づく津波データベース検索方法による予測の精度を確認した。その中で、観測点の偏在による悪影響を発見したため、この方法での予測に適した観測点の使い方を検討した。次に、回帰による予測をいくつか試み、それぞれの手法の精度を比較した。さらに、実際の被害に直結するのは沿岸部での津波高よりも浸水深の分布であるため、浸水深分布の即時予測についても取り組んだ。

第 2 部では津波襲来後の長期湛水の問題に取り組んだ。長期湛水は津波によって流入した海水が長期に渡り陸地に留まる現象で、あまり注目されていないが、海岸付近の低地かつ広域地殻変動による沈降と液状化の危険性が想定される地域であればどこでも発生する可能性がある。東北地方太平洋沖地震の際も、石巻市をはじめとする沿岸部で発生した<sup>14)</sup>。湛水した地域では災害発生後に迅速に実施することを求められる救助、捜索活動や物資輸送が難しくなるとともに、復旧作業の大きな障害となる。したがって、この現象を正確に把握できれば、例えば孤立する可能性のある避難所がわかり、どの程度の備蓄があれば良いかなどの検討もすることができる。また、堤防や排水ポンプの整備、もしくは被災後の排水ポンプ車の配置場所やそのルートなどの検討にも用いることができる。

過去の南海地震では、比較的規模の小さいとされる昭和南海地震でさえ高知市では大規模な長期湛水が発生した<sup>15)</sup>。これを踏まえて高知県は高知市については平成 25 年 3 月に、宿毛市については平成 27 年 3 月に長期湛水の対策を策定し<sup>16,17)</sup>、被害軽減に向けた取り組みを実施している。しかし、その他の地域では長期湛水のリスクについて十分な検討されていない。長期湛水は石巻や高知に限ったことではなく、大阪や名古屋のような沖積低地に広がる都市においても発生する恐れがある。

本論文では津波襲来後の長期湛水に関するひとつの研究事例として、徳島市の例を取り上げる。徳島市は南海トラフの震源域からやや離れており、南海地震に伴う地殻変動は高知市ほどではないが、それでも数 10cm から最大 80cm 程度沈降すると予想されている。さらに液状化により局所的な地盤沈下も発生する可能性があり、地殻変動と液状化で海面以下の高度になってしまう地区も発生すると考えられる。徳島市は、過去に繰り返し南海トラフ巨大地震の被害を被っており、その被害の様子を記載した古文書も豊富に存在する。そこで、まずこれらの古文書から過去の南海地震後の長期湛水の発生状況を調査する。それに続いて、徳島市川内地区、沖洲地区を対象として津波の流入・排水の過程の数値シミュレーションを実施する。その後、高知県の長期湛水の検討方法との比較を行う。

## 第1部 津波データベースと津波観測

### 網を利用した津波の即時予測

#### 1章 津波データベースの作成

津波データベースとは、多数の地震シナリオを仮定しその津波の伝播計算の結果を記録したものである。現在の気象庁の津波警報は、日本全国で多数の断層を仮定して構築されたデータベースを利用している。しかし、このデータベースで仮定している断層モデルは、一つの矩形で表現されており、滑り量も一様なモデルである。また、津波シミュレーションも詳細な津波高の予測を行うには十分な格子間隔では行っていないため、予測対象地点の近くの最大津波高から、グリーンの法則を用いて沿岸部の津波高の予測を行っている。しかし、一般に地震断層の滑り分布は不均一であり、矩形で表現されるような単純なものではない。またグリーンの法則は1次元で成り立つ法則であり、特に複雑な地形の場所には適用が難しい。

これらを踏まえて、本検討で作成する津波データベースの断層モデルは、多数の矩形断層からなる複雑な形で、滑りの不均一性も考慮されたものを利用する。さらに、津波シミュレーションは予測対象地域の遡上まで行った。

#### 1.1 地震シナリオ群

南海トラフは、長期的な観点で地震発生の可能性や、その震源域の形態等についてまとめられている<sup>18)</sup>。このなかでは、南海トラフ域全体は18のサブエリアに分割されており、こ

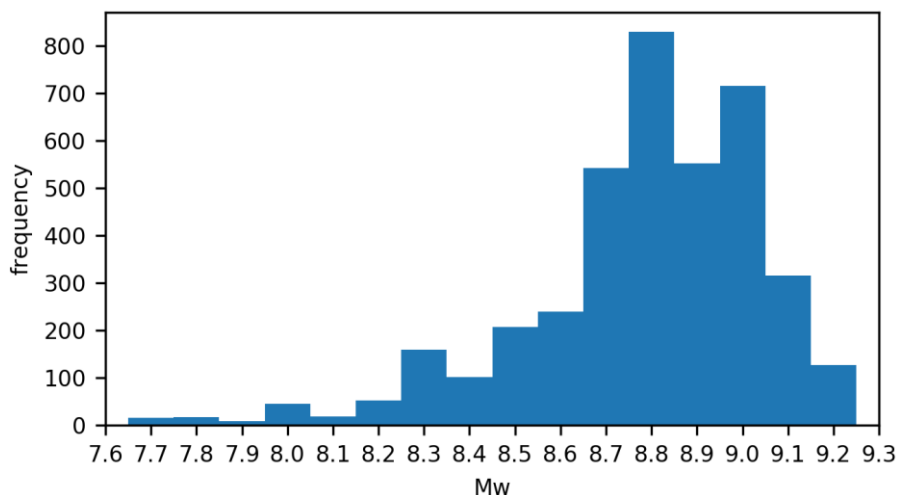


図-2 地震シナリオ群の Mw のヒストグラム

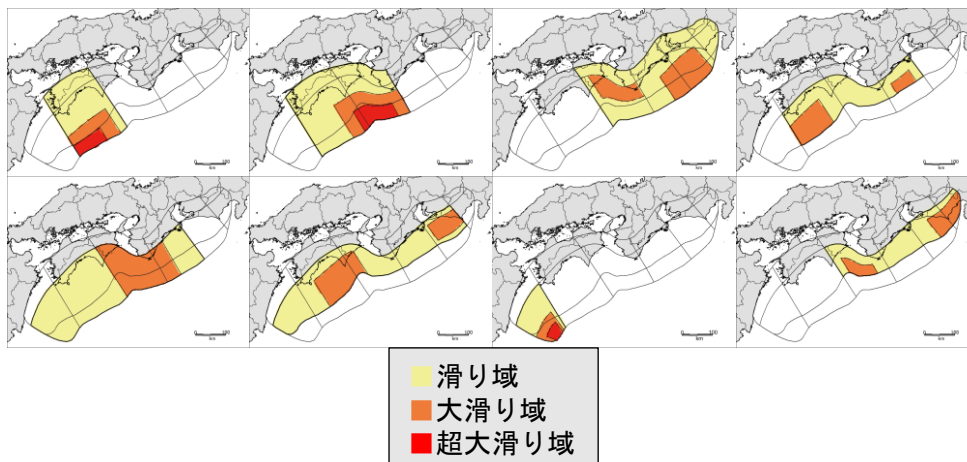


図-3 シナリオの一例

のサブエリアの組み合わせで 15 種類の震源域を考えている。これを基にして、Hirata et al.(2017)<sup>19)</sup>は 3967 の南海トラフ域の地震シナリオを作成した。これらは基本モデル群・拡張モデル群・再現モデル群からなる。基本モデル群は、前述の 15 種類の震源域をベースにして、津波レシピ<sup>20)</sup>にしたがって、滑り量が 2 倍、滑り域が全体の 30%となる大滑り域や、滑り量が 4 倍、滑り域が全体の 10%となる超大滑り域を様々なパターンで配置したものであり、拡張モデル群は、この 15 種類以外のサブエリアの組み合わせで 70 種類の震源域を考え、これに対して大滑り域、超大滑り域を同様の作業で配置したものである。また再現モデル群は、過去の南海トラフの地震の津波被害を再現する様なモデルである。本検討ではこの地震シナリオ群を用いる。図-2 はこの地震シナリオ群の Mw(モーメントマグニチュード)のヒストグラムであり、図-3 にシナリオの一例を示す。

## 1.2 津波計算

本論文ではこれらの地震断層モデルによって発生する津波について徳島県の浅川地区と三重県の尾鷲地区を対象として津波の遡上計算を実施した。

津波の計算に必要な初期水位分布の推定のため、断層パラメータからOkada (1985)<sup>21)</sup>の半無限均質弾性体モデルで海底での地殻変動量を計算した。その鉛直成分にTanioka and Satake (1996)<sup>22)</sup>の海底斜面の水平変位による寄与分を加え、それにKajiura (1963)<sup>23)</sup>のフィルタを施して津波の初期水位とした。ここで簡単のため断層の破壊伝播は考慮せず、ライズタイムは 60秒とした。

次に、非線形長波方程式で伝播・遡上を計算した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{R \sin \theta} \left[ \left( \frac{\partial M}{\partial \varphi} + \frac{\partial (N \sin \theta)}{\partial \theta} \right) \right] \quad (1)$$



$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{M^2}{d+h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{MN}{d+h} \right) = - \frac{g(d+h)}{R \sin \theta} \frac{\partial h}{\partial \varphi} - \frac{gn^2}{(d+h)^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{MN}{d+h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{N^2}{d+h} \right) = - \frac{g(d+h)}{R} \frac{\partial h}{\partial \theta} - \frac{gn^2}{(d+h)^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $t$ は時刻、 $R$ は地球半径、 $\varphi$ は経度、 $\theta$ は余緯度、 $M, N$ はそれぞれ経度、緯度方向の流量、 $d$ は水深、 $h$ は波高、 $g$ は重力加速度、 $n$ はマニング粗度係数である。この計算にはオープンソースである JAGURS<sup>24)</sup>を利用した。ここでは非線形長波方程式はスタッガード格子で離散化され、leap-frog 法で水位と流量の時間発展を求めている。表-1 に計算の諸条件を示す。

津波の計算に必要な地形データは陸域は国土地理院が公開している 5mDEM を利用した。場所によっては 5mDEM が存在しない部分があるが、そこは 10mDEM を利用した。海域は主に日本水路協会海底地形デジタルデータ M7000 シリーズから構築したが、遠洋で M7000 データが存在しない部分はグローバル地形データの GEBCO を補間処理して利用した。18 秒、6 秒、2 秒、2/3 秒、2/9 秒格子の 5 層の地形ネスティングを行った (図-4)。

表-1 計算の諸条件

計算時間	6 時間
計算間隔	0.12 秒
最小格子サイズ	2/9 秒
マニング粗度係数	0.025

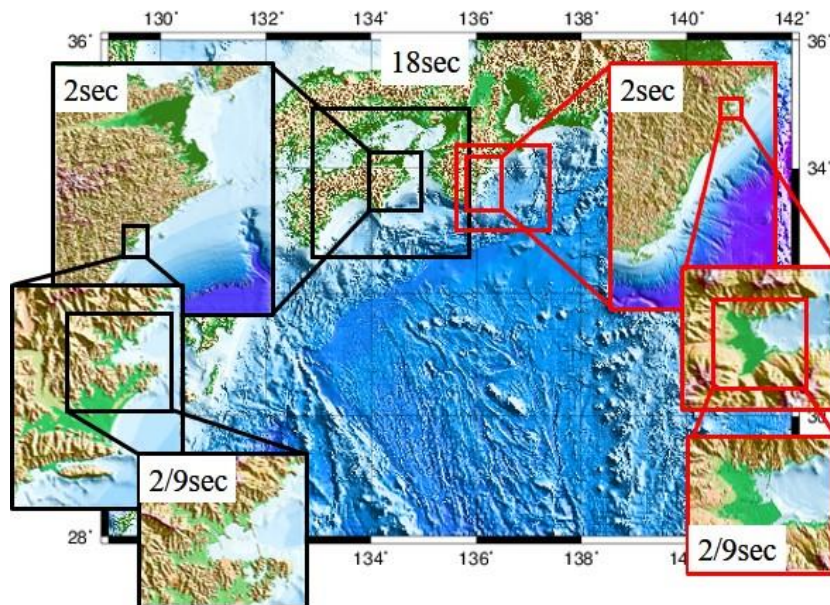


図-4 計算に使用した地形データ。18 秒、6 秒、2 秒、2/3 秒、2/9 秒格子の 5 層の地形ネスティングを行った

尾鷲湾，浅川湾内を予測対象地点として，この2点と沖合の津波観測点（図-1）での時系列水位変化を出力し，津波データベースを作成した．ここで，水圧計の時系列水位変化は地震による地殻変動量を考慮して波形を補正した．

### 1.3 本章のまとめ

本章では，南海トラフ地震を対象として津波データベースを構築した．対象地域は徳島県の浅川地区と三重県の尾鷲地区である．このデータベースの特徴は，①断層モデルの形状は多数の矩形断層で複雑な形を表現し，滑りの不均一性も考慮している点，②対象地域の遡上計算まで行っている点，③沖合の津波観測網の波形を保存している点，の3点が挙げられる．

## 2章 津波データベース検索による沿岸津波高の予測

### 2.1 Multi-index method に基づくデータベース検索の方法

気象庁では、地震発生時にその震源とマグニチュードからデータベース内のシナリオを1つ選択することによって予測を行っている。しかし、現在は多数の津波観測点があるため、これらで観測される津波の情報からデータベース検索を行った方が良い。そこで、Yamamoto et al. (2016) は、各観測点で観測された波形の絶対値の最大値を用いて、最も近い津波データベース内のシナリオを選ぶ手法を提案している(Multi-index method)。時系列波形ではなく絶対値の最大値という特徴量を用いるのは、時間方向の誤差の影響を小さくするためである。この方法では、以下の3つの指標を用いる。 $i$ 番目の観測点 $r_i$ で観測された津波高の絶対値の最大値を $O(r_i)$ 、津波データベース内のあるシナリオの津波高の絶対値の最大値を $C(r_i)$ とすると、

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n O(r_i)C(r_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n O^2(r_i)}\sqrt{\sum_{i=1}^n C^2(r_i)}} \quad (3)$$

ここで、 $n$ は観測点の数である。この式は観測されたイベント $O$ と、津波データベース内のあるシナリオ $C$ の2つのコサイン類似度であり、例えば $R = 1$ の時は、津波高の絶対値の最大値の分布が片方の定数倍となる。つまり、指標  $R$  を用いることで、規模は関係なく、全体的な津波の分布が近いシナリオを選ぶことができる。

そして、以下の二つの分散低減(variance reduction)を考えることで、津波の規模が近いもの考える。

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

$$VRC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O(r_i) - C(r_i))^2}{\sum_{i=1}^n C^2(r_i)} \quad (5)$$

この2つの指標はどちらも、観測されたイベント $O$ と津波データベース内のシナリオ $C$ が等しくなった時1となり、異なると小さくなっていく。Yamamoto et al. (2016) は、VRO, VRC が共にある閾値を超えるシナリオを選ぶことで、過大評価・過小評価をなくすることができるとしている。

本検討ではこの考え方を基に、入力に各観測点において地震発生後5分間で得られるであろう水位および水圧波形の最大値と最小値を用いる。絶対値の最大値ではなく最大値・最小値としたのは、地震発生直後に波形が増える方向・減る方向どちらに動くかという部分は地殻変動がどのようであったかを示しており、この情報も取り入れるためである。VRO, VRC の閾値は 0.9 を初期値として、閾値を超えるシナリオが存在しない場合は、この値を 0.8, 0.7 と 0.1 刻みで下げていく。この作業によって津波の規模が近いいくつかのシナリオを絞り込む。これらのシナリオのうち、津波の分布が最も似ているシナリオが沿岸部の被害を

よく表すと考え、本論文ではこの中でRが最大となるシナリオを1つ選択する。

## 2.2 Multi-index method に基づくデータベース検索の検証

Multi-index method に基づくデータベース検索方法の予測精度を検証するために LOOCV (leave-one out cross validation: 一個抜き交差検定) を行った。これは、データベース内のある1つの地震シナリオをデータベースから取り出して、その地震シナリオが発生したときに残ったデータベースでどのような予測を行うのかを検証するもので、この作業をすべてのシナリオについて行う。予測精度は正解値と予測値の RMSE (root mean square error: 2乗平均平方根誤差) で表した。結果を図-5 に示す。RMSE は、尾鷲、浅川ともに 1 m 以内であり、大きく予測が外れることは少ないようだが、この中で最も予測が外れた結果 (図-5 中の矢印) を図-6 に示す。この二つのシナリオは、全体的な断層の形は似ているものの、大滑り域が尾鷲沖で異なっており、浅川での予測は良い精度で行えているが、尾鷲での予測を大きく誤っている。このような適切ではないシナリオの選択は、観測点配置の不均一性によって起こると考えられる。図-1 に示すように尾鷲付近の観測点は、紀伊半島より西側の地域に比べて少ないため、紀伊半島より西側で津波高の分布が似ているシナリオを選びやすい傾向がある。したがって使える観測点すべてを利用しての予測は、観測点が比較的少ない地域にとってはあまり良いとは言えない。つまり、予測対象地点ごとに、予測に用いる観測点を変えなければならないと考えられる。また、ある地震が起こった時に最も近いシナリオを1つ選ぶという考え方は、全体的に似ているシナリオを選ぶということであるが、図-6 のよう

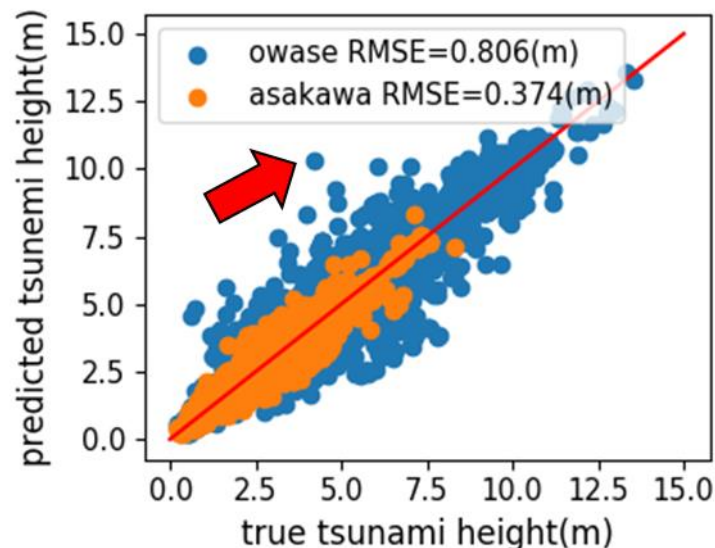


図-5 津波データベース検索による津波高予測の予測実験(LOOCV)の結果  
図中の矢印は、最も予測が外れたケース

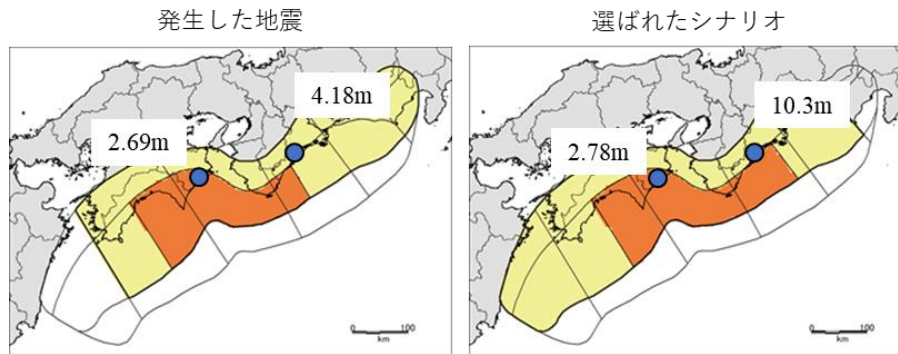


図-6 最も予測が外れたケース

左側の地震が発生した場合，右側のシナリオが選ばれる．

図内の数値は予測地点での最大津波高

に大滑り域の小さな違いで地域によっては大きく被害が変わることがあるということを考えると，予測対象地点ごとに異なるシナリオを選んだ方が精度の高い予測ができる可能性がある．

### 2.3 焼きなまし法による津波高予測のための観測点の選択

データベース検索で予測するために適した観測点を焼きなまし法によって選択する．焼きなまし法は最適化問題に用いられる手法である．以下に簡単な手順を示す．

- ① 初期解 $x$ を生成し，初期温度 $t$ を定める
- ② 以下の操作をループの終了条件を満たすまで繰り返す
  - a. 初期解の近傍解 $N(x)$ 内の解を一つランダムに選び $x'$ とする．
  - b. 解 $x$ の評価値(小さいほど良い)を $f(x)$ とあらわすとき， $\Delta = f(x') - f(x)$ とする．
  - c.  $\Delta \leq 0$  (改善解) なら確率 1 で， $\Delta > 0$  (改悪解) のときは確率 $e^{-\frac{\Delta}{t}}$ で解 $x$ から $x'$ に移動する
- ③ アルゴリズムの終了条件を満たしていない場合は， $t$ に冷却率をかけて温度を下げて，②に戻る

具体的には以下のように行った．

解は 57 個の観測点それぞれを使う(1)，使わない(0)の 2 値で表現し，初期解はランダムで生成した．近傍解は観測点の内 1 つを選び，それが 1 の時は 0 に，0 の時は 1 に変えるという形で定義した．評価値は，LOOCV の RMSE とした．また，冷却率は 0.95 とした．計算時間削減のため，Johnson et al.(1989)<sup>25)</sup>にしたがって，初期温度は初期解とそのすべての近傍解の評価を行い，改悪解の受理確率が 0.4 となるように設定し，ループの終了条件は近傍解の数だけ解の受理が行われた場合とした．近傍解の生成は毎回ランダムで行うのではな

く、近傍解のリストを作りそれをシャッフルした。解の受理が行われたとき、近傍解のリストは生成し直す。これは、すべての近傍解を見ることができるようにするためである。リストを一周しても解の受理が行われなかった場合は、近傍リストすべての遷移確率の大きさに応じたルーレット選択を行った。これは、ある程度温度が小さくなっても探索を続けるためである。アルゴリズムの終了条件は、冷却を 140 回行うまでとした。これは予備実験によって、十分に探索が終わったであろうという値である。

図-7 に反復の回数(上記アルゴリズムの 2 を行う回数)と、それまでの最も良い解の評価値を示す。浅川、尾鷲ともに 4 種類のシード値で計算を行った。尾鷲は 80 回、浅川は 100 回程度の反復数で最も良い解が得られている。より良い解が見つかる可能性もあるが、計算時間の都合上ここで打ち切った。

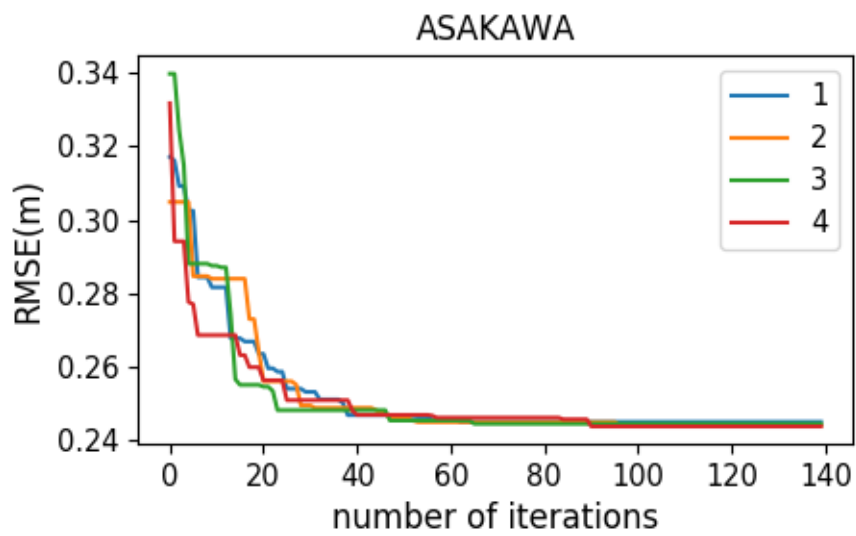
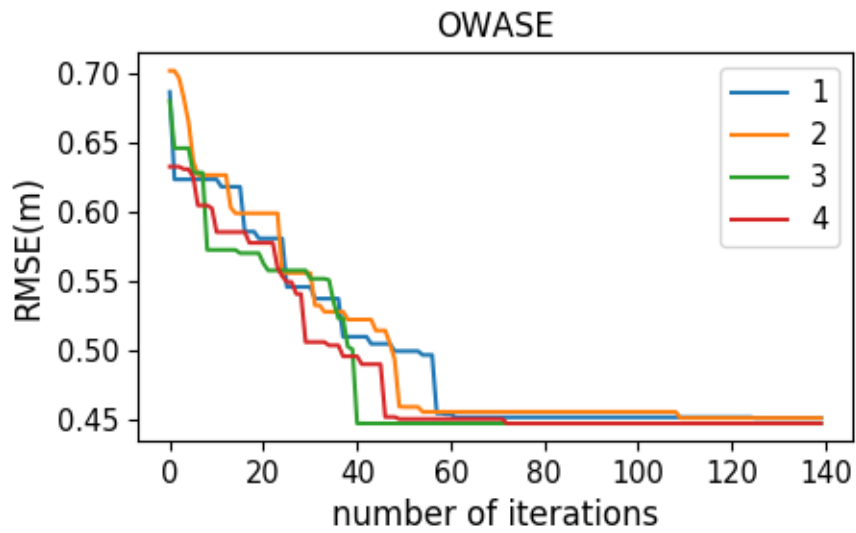


図-7 焼きなまし法による解の改善の様子.  
尾鷲, 浅川ともに4つのランダムシードで探索を行った.

図-8に焼きなまし法によって得られた最も良い解を示す。予測対象地点付近の観測点を中心に選ばれているが、遠方の点も選ばれた。これは基本的には予測対象地点付近の情報があれば良いが、断層が遠方でどのようなになっているのかという情報も必要であることを示唆している。なお、シード値によって異なる解が得られたが、予測対象地点周辺を中心に選ばれ遠方の点も選ばれるという傾向はどの解でも同じであった。またこの計算結果は、どの海域の情報か重要な重みを観測点の数で表現しているともいえるため、今回の解析のように観測点を使うか、使わないかの2値ではなく、各特徴量にかける重み係数を探すようなアルゴリズムにすると、より高い精度の予測モデルが構築できる可能性がある。

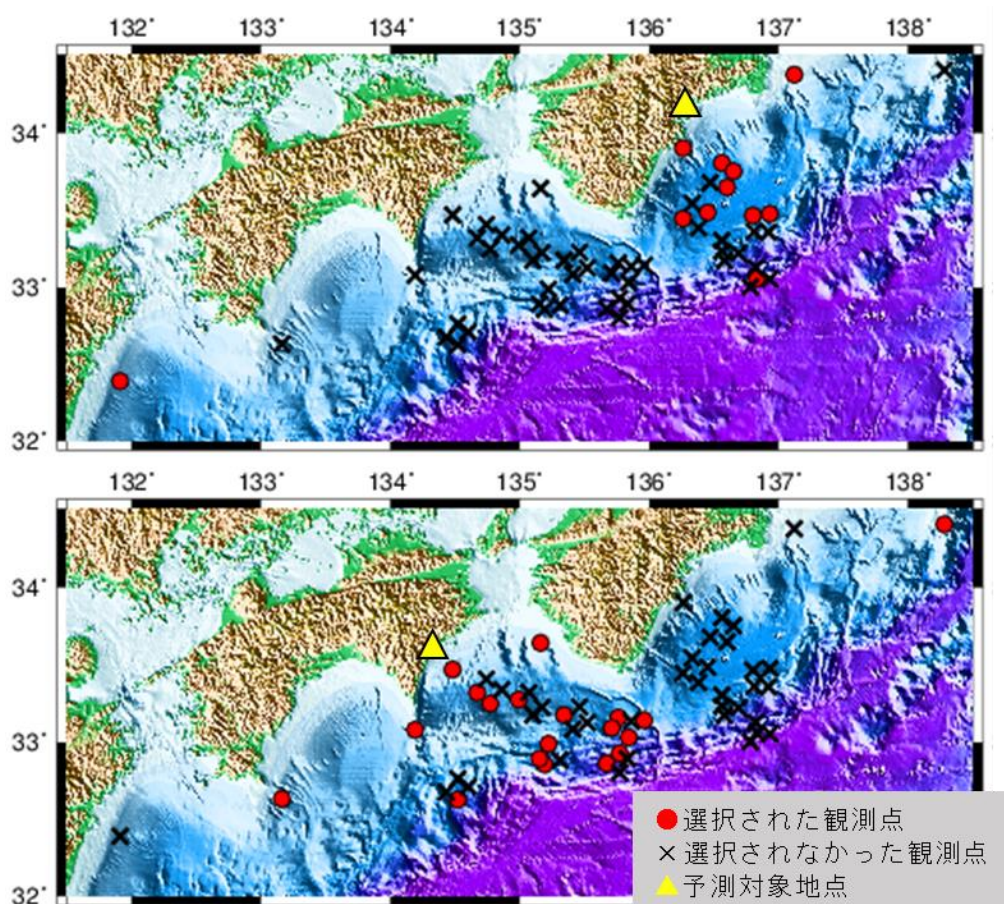


図-8 沖合観測網を用いたデータベース検索による津波高予測に用いるのに適した観測点

上段は尾鷲，下段は浅川の予測のための観測点を示している。



図-9は、焼きなまし法によって選ばれた観測点を用いた、データベース検索による津波高予測の LOOCV の結果である。RMSEは元の全観測点を用いた予測に対して、尾鷲では-44%、浅川では-35%となり、大幅に予測精度が上がった。図-10に、全観測点を用いた予測時に最も予測が外れた地震が起こった際に、尾鷲の予測のために選ばれた観測点のみを用いて予測を行ったときに選択されたシナリオを示す。尾鷲沖の大滑り域が似ているシナリオが選ばれた。これは予測地点付近の大滑り域の違いが津波高に大きな影響を与えていることを示している。なお、浅川の予測のために選ばれた観測点のみを用いて予測を行うと、図-6右のシナリオが選ばれた。このように、沖合観測網を用いたデータベース検索による津波高予測を行うには、予測地点ごとに予測に用いる観測点を変えて、さらに予測地点ごとに異なるシナリオを選ぶことを許すことによって、予測精度が向上する。

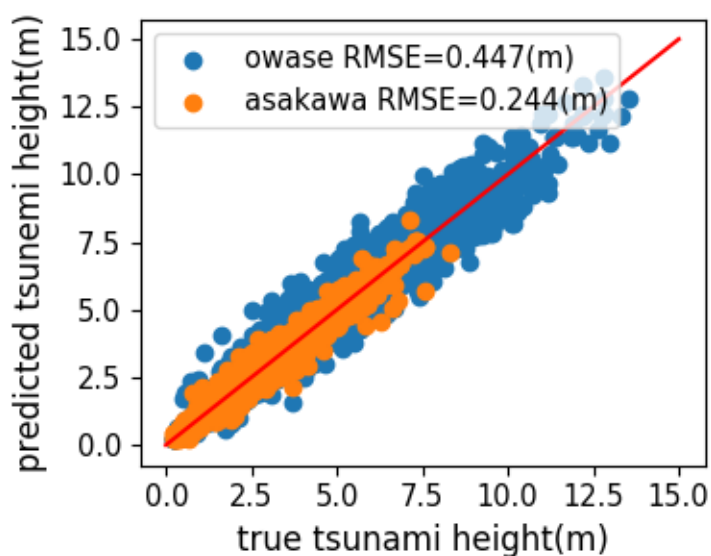


図-9 焼きなまし法によって選ばれた観測点のみを用いたデータベース検索による津波高予測の予測実験の結果。

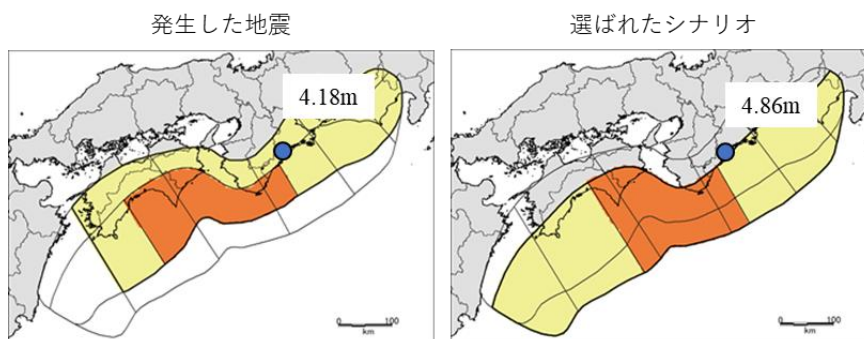


図-10 全観測点を用いた予測の際に最も予測が外れたケース(左)が発生したときに、尾鷲の予測のために選択された観測点のみを用いたときに選ばれるシナリオ(右) 図内の数値は尾鷲での最大津波高

## 2.4 本章のまとめ

本章では、Multi-index method に基づく津波データベースの検索手法の改良に取り組んだ。これまでの津波データベースを用いる検索方法では、地震が発生したら1つのシナリオを選ぶという考え方に基づいていた。しかし、この方法では予測対象地点付近の細かな現象の違いを捉えることができない。そこで、本論文では予測対象地点ごとに異なる地震シナリオを選択できるようにし、予測対象地点ごとに用いる観測点を選択することで精度の大幅な改善に成功した。各観測点でとれる波形のノイズを考慮していないため、ノイズを加味した波形を用いて同様の検討を行うと、最適な観測点の選択は変わってくると考えられるが、予測対象地域ごとに異なるシナリオを選ぶという考え方は重要であると考えられる。

### 3章 回帰による沿岸津波高の予測

この章では、津波データベースを用いて、各観測点でとれる波形と沿岸部に到達する最大の津波高の回帰モデルを作成する。

#### 3.1 リッジ回帰による津波高の予測

Baba et al. (2014) は、各観測点でとれる津波波形の絶対値の最大値の平均値と沿岸部の津波高には線形の関係性が見られるとしている。ここではそれに習い、各観測点でとれる津波波形の最大値と最小値の線形結合によって沿岸部の津波高を予測できると仮定する。リッジ回帰による津波高の予測式は、 $y$ を沿岸部の津波高、 $x_i$ を*i*番目の説明変数(各観測点での津波波形の最大値・最小値) とすると、以下の形で表せる。

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x_i + a_0 \quad (6)$$

ここで、 $n$ は説明変数の数である。

係数 $a_i$ は、誤差二乗和 (式(7)) を最小化するという条件で決定される。

$$E(\mathbf{a}) = \sum_{j=1}^N \left( y_j - \sum_{i=0}^n a_i x_{i,j} \right)^2 + \lambda \sum_{i=1}^n a_i^2 \quad (7)$$

ここで $x_{i,j}$ はシナリオ*i*の*j*番目の説明変数、 $\lambda$ は正則化項の強さを決める定数である。なお、正則化項は過学習を防ぐために導入する。式(7)を $\mathbf{a}$ で微分して0となるような $\mathbf{a}$ を求めればよいので、データベース内のシナリオ数を $N$ として、

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{N1} & \cdots & x_{Nn} \end{pmatrix}, \mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix}, \mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

と書くとき、

$$\mathbf{a} = (X^T X + \lambda I_n)^{-1} X^T \mathbf{y} \quad (9)$$

とすればリッジ回帰モデルを作ることができる。(  $I_n$ は $n \times n$ の単位行列)

本論文の津波データベースでリッジ回帰を行うのに適した正則化項の大きさ $\lambda$ をグリッドサーチで決定する。グリッドサーチは、ハイパーパラメータのチューニングの方法で、多数の等間隔な値に対して予測実験を行い、最も予測誤差が小さくなる値を見つけるものである。予測実験は10-FCV(10-folds cross validation: 10分割交差検定)で行った。これは、データベースを10分割し、そのうち9個のグループで予測モデルを作成し、残った1個のグループで予測実験を行うという操作をモデル作成用・予測実験用のデータを入れ替えながら10回行うことでデータセットすべてに対して予測実験を行うものである。結果を図-11に示す。尾鷲では $\lambda = 2.8$ 、浅川では $\lambda = 1.3$ の時、10-FCVのRMSEが最も小さくなった。このパラメ

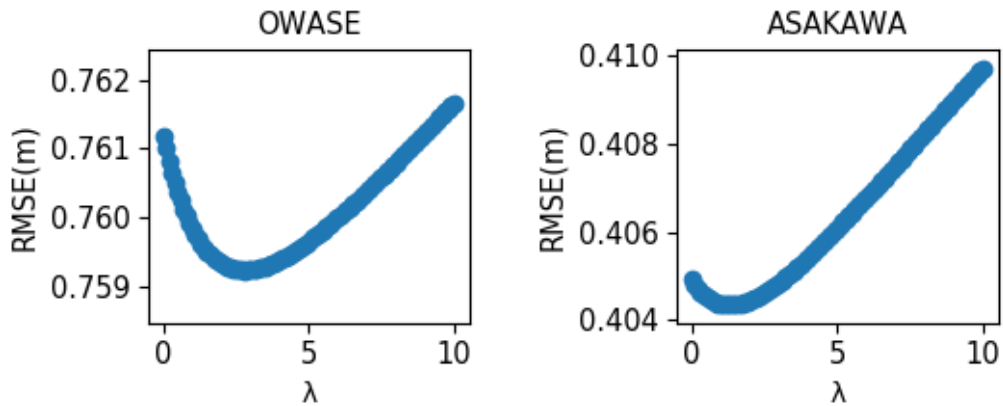


図-11 10分割交差検定による最適なλのグリッドサーチ

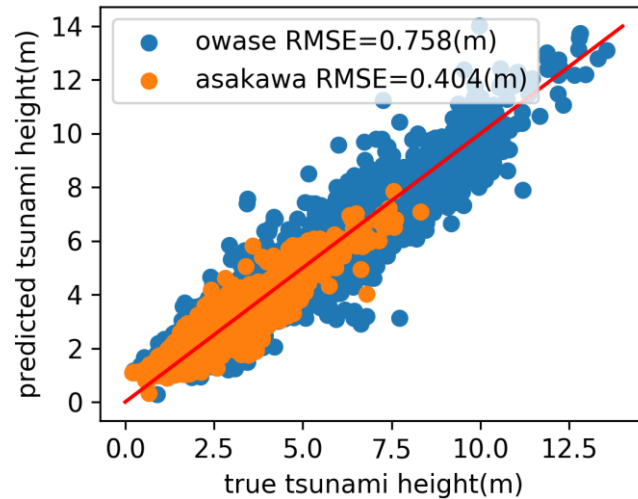


図-12 リッジ回帰による津波高予測の予測実験の結果

ータで LOOCV を行った結果を図-12 に示す。RMSE は改善した津波データベース検索に比べてやや大きい。

### 3.2 ガウス過程による津波高の予測

Igarashi et al. (2016) は、各観測点でとれる津波波形の絶対値の最大値を入力として、ガウス過程 (gaussian process) により高精度な津波高予測ができることを示した。ガウス過程は津波データベース内の各シナリオの間を滑らかに補間する手法であり、シナリオとシナリオの間の現象をうまく説明ができる可能性がある。具体的には以下の手順で行う。

ある地震  $n$  が発生した際に各観測点でとれる波形の最大値・最小値を  $\mathbf{x}(n) =$

$\{x_1(n), \dots, x_S(n)\}$ とするとき( $S$ は説明変数の数. 今回の問題では, 57 観測点の最大値と最小値なので 114), ある津波データベース内のシナリオ $m$ との類似度を表す関数(カーネル関数)を, ガウスカーネルを用いると以下の形で書ける.

$$k(\mathbf{x}(n), \mathbf{x}(m)) = \exp(-\beta|\mathbf{x}(n) - \mathbf{x}(m)|^2) \quad (10)$$

ここで,  $\beta$ はガウスカーネルの形を決定するハイパーパラメータである. この関数は,

$\mathbf{x}(n)$  と  $\mathbf{x}(m)$  が同じであれば最大値の 1 になり, 大きく異なれば 0 に近い値になる.

ガウス過程では, このカーネル関数を用いて以下の形で回帰する. ある地震 $n$ が発生した時の沿岸部での津波高の予測値を $y_n$ とすると,

$$y_n = \sum_{i=1}^N \alpha_i k(\mathbf{x}(n), \mathbf{x}(i)) \quad (11)$$

ここで,  $N$ は津波データベース内のシナリオ数,  $\alpha_i$ は係数である. つまりガウス過程は, 発生した地震イベントと津波データベース内の各シナリオとの類似度に応じた重み付けをし, それを足し合わせたモデルであるといえる. この $\alpha_i$ を求めるには, 誤差二乗和を最小にするという条件で解けばよい. しかし, ガウス過程は理論上無限次元の超曲面によるフィッティングをするものであり, 過学習を起こしやすい. そこで前述のリッジ回帰と同様に誤差二乗和に 2 次の正則化項を付与した関数である式(13)を最小化する問題として扱う.

$$K = \begin{pmatrix} k(\mathbf{x}(1), \mathbf{x}(1)) & k(\mathbf{x}(2), \mathbf{x}(1)) & \dots & k(\mathbf{x}(N), \mathbf{x}(1)) \\ k(\mathbf{x}(1), \mathbf{x}(2)) & k(\mathbf{x}(2), \mathbf{x}(2)) & \dots & k(\mathbf{x}(N), \mathbf{x}(2)) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k(\mathbf{x}(1), \mathbf{x}(N)) & k(\mathbf{x}(2), \mathbf{x}(N)) & \dots & k(\mathbf{x}(N), \mathbf{x}(N)) \end{pmatrix}, \mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix}, \boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{pmatrix} \quad (12)$$

とすると,

$$E(\boldsymbol{\alpha}) = (\mathbf{y} - K\boldsymbol{\alpha})^T (\mathbf{y} - K\boldsymbol{\alpha}) + \lambda \boldsymbol{\alpha}^T K \boldsymbol{\alpha} \quad (13)$$

ここで,  $\lambda$ は正則化項の大きさを決める係数である.  $E(\boldsymbol{\alpha})$ を $\boldsymbol{\alpha}$ について微分して 0 と置けばよいので, 以下の式で $\boldsymbol{\alpha}$ を求めることができる.

$$\boldsymbol{\alpha} = (K + \lambda I_n)^{-1} \mathbf{y} \quad (14)$$

ここで,  $I_n$ は $n \times n$ の単位行列である.

つまり, ガウス過程によるモデリングを行うには, カーネル関数を定める $\beta$ と正則化項の大きさ表す $\lambda$ , 2つのハイパーパラメータのチューニングが必要である. ハイパーパラメータのチューニングは Igarashi et al. (2016) にならって 10-FCV を行い, RMSE が小さくなる $\beta$ と $\lambda$ を求める. Igarashi et al. (2016) はグリッドサーチによって RMSE が最小となるパラメータを決定したが,  $\beta$ ,  $\lambda$ , RMSE の曲面は Igarashi et al. (2016) と同様に単峰性であるようなので, ここでは山登り法(近傍解のうち, 最も良い解に移動し, 改良解が見つからなくなるまでこの操作を繰り返す)によって RMSE が最小となる $\beta$ と $\lambda$ を求めた(表-2). このパラメータで, LOOCV を行った結果を図-13 に示す. 観測点の偏在の影響があるにも関わら

表-2 10 分割交差検定によって決定したガウス過程のパラメータ

	尾鷲	浅川
$\beta$	$1.779 \times 10^{-3}$	$1.845 \times 10^{-3}$
$\lambda$	$1.510 \times 10^{-3}$	$3.085 \times 10^{-3}$

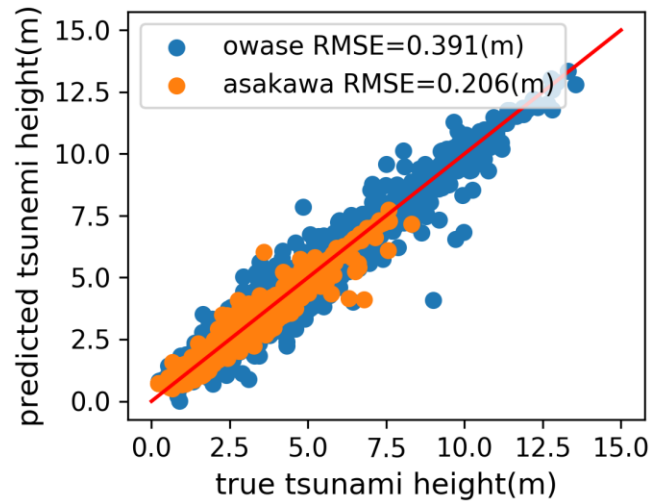


図-13 ガウス過程による津波高予測の予測実験の結果

ず、改善した津波データベース検索による予測よりも良い結果となった。2章と同様に焼きなまし法によって観測点の選択をすれば、より良いモデルを作ることができる可能性がある。

### 3.3 本章のまとめ

本章では、既往の研究にならってリッジ回帰やガウス過程による予測を試みた。図-14に2章・3章で検討した予測モデルの精度を示す。リッジ回帰の精度は比較的悪く、ガウス過程による予測は本論文で改善した津波データベース検索よりも良い結果となった。

ガウス過程は非常に高精度であるが問題点もある。それはデータベース内に近いシナリオが存在しなければ過小評価になりやすいという点である。したがって、ガウス過程のみを用いて予測を行うのではなく、同時に他の手法も併せて予測を行い、過小評価が起こっていないかを注意する必要がある。

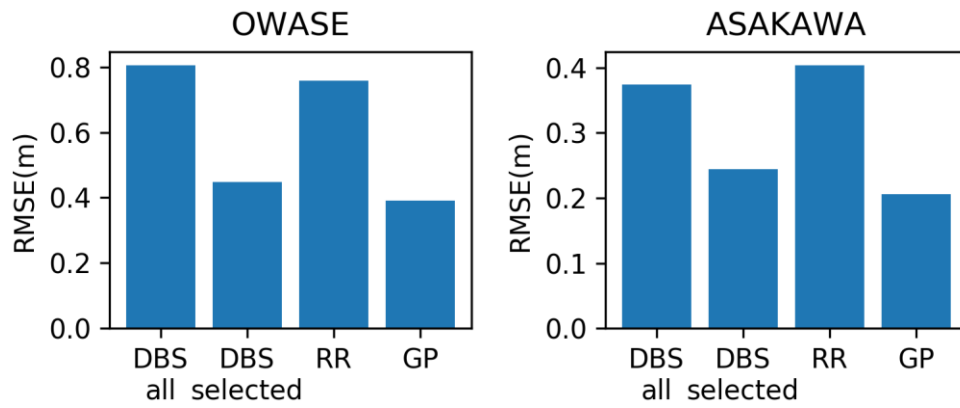


図-14 本論文で検討した津波高の即時予測モデルの精度の比較.

DBS-all は全観測点を用いたデータベース検索, DBS-selected は焼きなまし法で選択された観測点のみを用いたデータベース検索, RR はリッジ回帰, GP はガウス過程を示している.

## 4章 断層の破壊過程の想定の違いが津波高予測に及ぼす影響の検討

本論文で構築した津波データベースでは、地震発生から 60 秒で地殻変動が完了するという条件で津波計算を行った。しかし実際の地震がこの想定通りに起こるという確証はない。様々な断層の破壊パターンを考えてデータベースを構築すればよいが、断層の破壊過程をモデル化するのは難しく、またそのパターンも無数に考えられる。そこで、この章では1章で構築したデータベースで破壊過程が想定とは異なる地震による津波に対してどの程度の精度で予測できるかについて検討する。検討する予測モデルは2章に示した、改善したデータベース検索、リッジ回帰、ガウス過程の3つである。

初めに想定とは異なるライズタイムによる津波を考え、次に断層の破壊伝播を考えた。なお、それぞれの検証に用いる入力波形は、新たに津波を計算し直すのが最も良いが、例えば松本ら(2004)<sup>26)</sup>は、ライズタイムが 100 秒の場合とライズタイムは 0 秒の場合の津波シミュレーションで得られる波形を比べると、位相はずれるが波形はほぼ変わらないとしている(ライズタイムが 500 秒と極端に遅くなると波形は変わってしまう)。そこで、現在のデータベースの波形を早める、遅らせる処理を加えて疑似的な津波シミュレーションの結果を生成した。

### 4.1 ライズタイムの想定が違う場合の予測

本論文で作成したデータベースの想定であるライズタイム 60 秒よりも早いもしくは遅いような地震が発生したときに、このデータベースを用いた予測モデルがどのような挙動を示すのかを確認する。まず津波データベースより、地震発生から 5 分後までの波形を用いて予測モデルを作成し(2章・3章で作成したモデル)、予測実験に用いる波形は、前述のとおりライズタイムを変えて新たに計算を行うことはせずに、地震発生から 4 分後まで、6 分後までの波形を用いることでライズタイムが想定よりも長い 120 秒の場合と、想定よりも短い 0 秒の場合の津波シミュレーションの結果を疑似的に再現する。なおこの予測実験も LOOCV で行った。つまり、津波データベースから一つシナリオを取り出して残った津波データベースから即時予測のモデルを作成し、取り出したシナリオの地震発生から 4 分または 6 分までの波形を用いて予測実験を行う。



#### 4.1.1 想定よりもライズタイムが長い地震の場合

ライズタイムがデータベースの想定よりも長い 120 秒の場合の検討として、地震発生から 4 分までの波形を用いて LOOCV を行った結果を図-15 にまとめる。全体的に過小評価となる傾向がある。これは、地殻変動が想定よりもゆっくりとしたものであるため、海水の移動がまだ十分に起こっておらず、入力となる各観測点の波形の最大値・最小値が全体的に小さくなり、アルゴリズムが津波の規模が比較的小さいものであると判断するためであると考えられる。データベース検索による予測が最も良い精度となった。

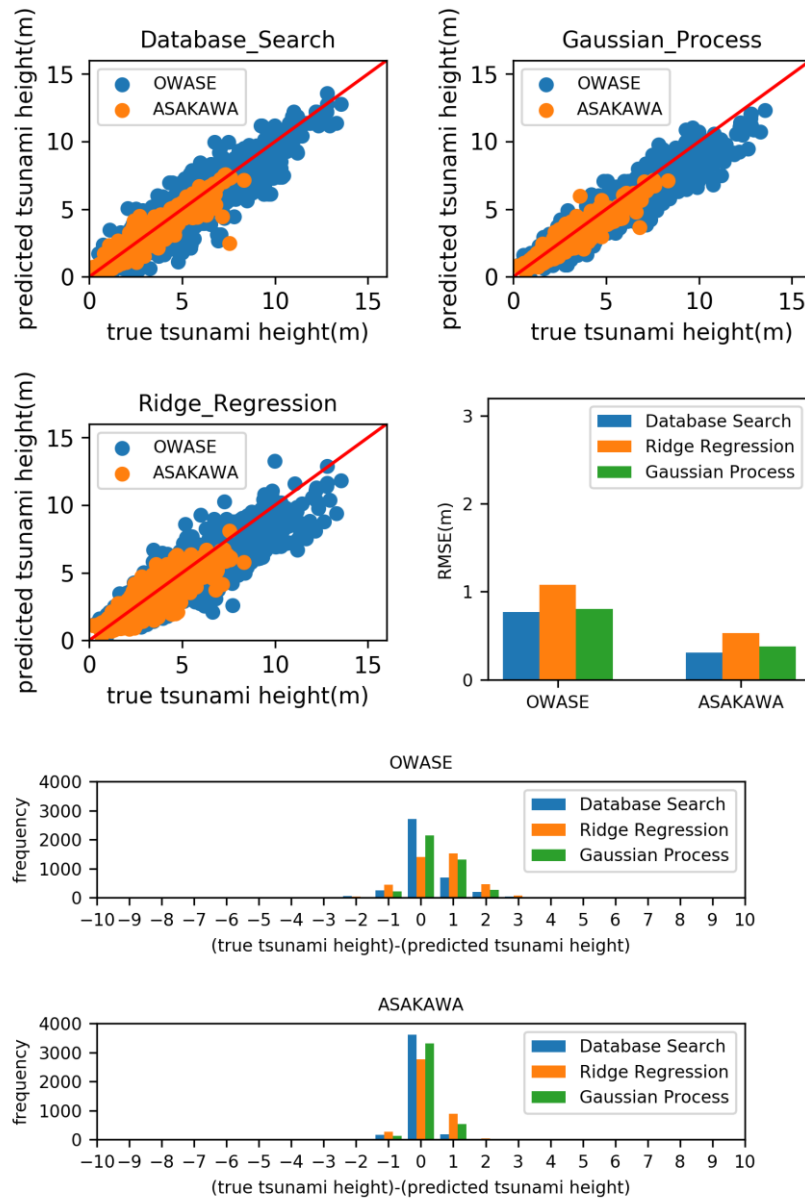


図-15 ライズタイムが想定よりも長い 120 秒の場合の津波高予測の予測実験の結果

#### 4.1.2 想定よりもライズタイムが短い地震の場合

同様にライズタイムがデータベースの想定よりも短い場合の波形として、地震発生から 6 分までの波形を用いて LOOCV を行った結果を図-16 にまとめる。全体的に過大評価となる傾向がある。これは、地殻変動が想定よりも早いため、5 分時点で想定よりもより多くの海水が移動しており、入力となる各観測点の最大値・最小値もより大きくなり、アルゴリズムが津波の規模が比較的大きなものであると判断するためであると考えられる。こちらもデータベース検索による予測が最も良い精度となった。

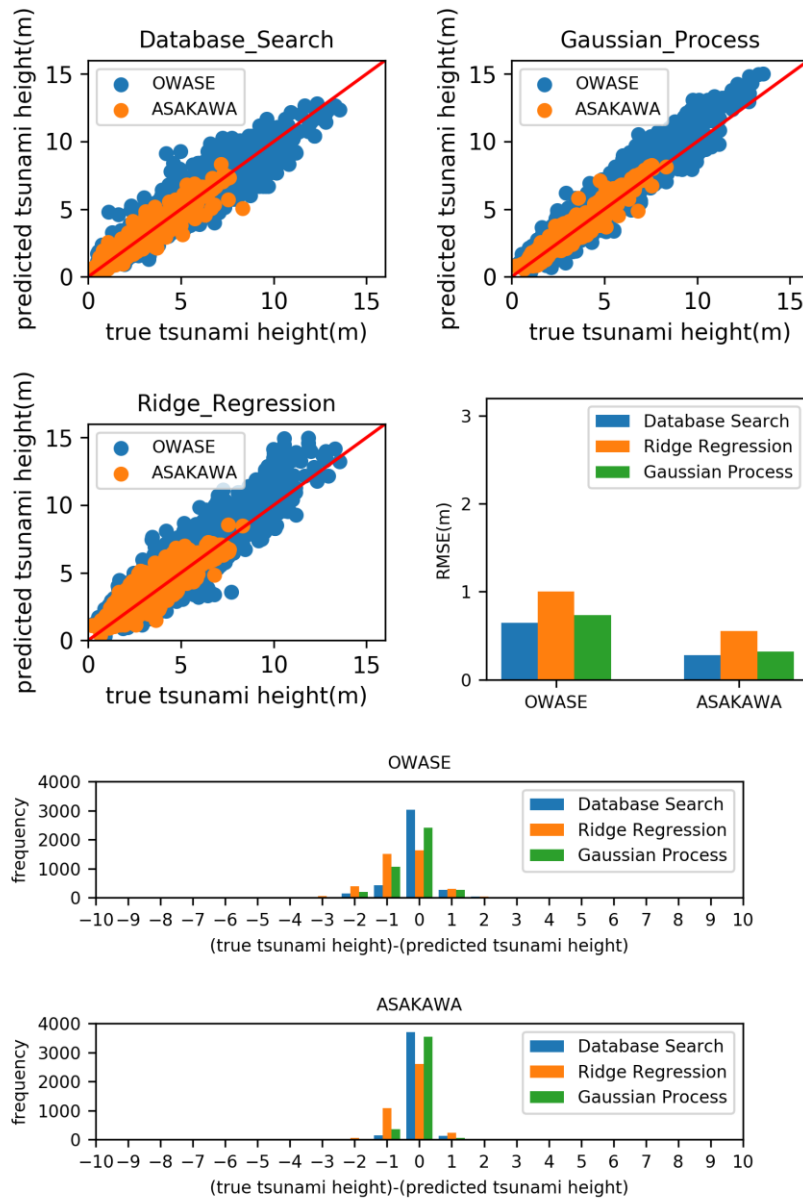


図-16 ライズタイムが想定よりも短い 0 秒の場合の津波高予測の予測実験の結果

## 4.2 断層の破壊伝播を考慮した場合の予測

ここまでは地震発生時の地殻変動が全域にわたって一様に変動する場合を考えたが、実際の地震はアスペリティから徐々に破壊が伝わっていくため、地殻変動も一様には起こらないと考えられる。破壊伝播を考慮するには、一般的には大きな滑り域を持つところに破壊の開始点を設定し、その破壊が徐々に広がっていくような地殻変動を考えて津波の計算を行うが、本論文では、前述のようにライズタイムの100秒程度の違いは波形には大きな影響を与えないことを加味して、破壊開始点から各観測点までの距離に応じて波形をずらすことで破壊伝播を考慮した津波シミュレーションの結果を疑似的に再現する。破壊開始点は、本来は大滑り域や超大滑り域に設定するべきだが、簡単のため南海トラフ域内の東部・中央部・西部の3か所に適当な破壊開始点を設定した(図-17)。破壊伝播速度は南海トラフの巨大地震モデル検討会は東北地方太平洋沖地震の解析結果から2.5km/sとしており、ここではその値を用いる。破壊開始点と観測点までの距離から、観測点の場所で破壊が開始する時間を計算し、その時間分だけ波形を遅らせ、さらにライズタイム分波形を遅らせることで破壊伝播を考慮した津波シミュレーションの結果を疑似的に再現した。ライズタイムは0秒、60秒、120秒の3パターンについて考えた。予測実験はこれもLOOCVで行う。

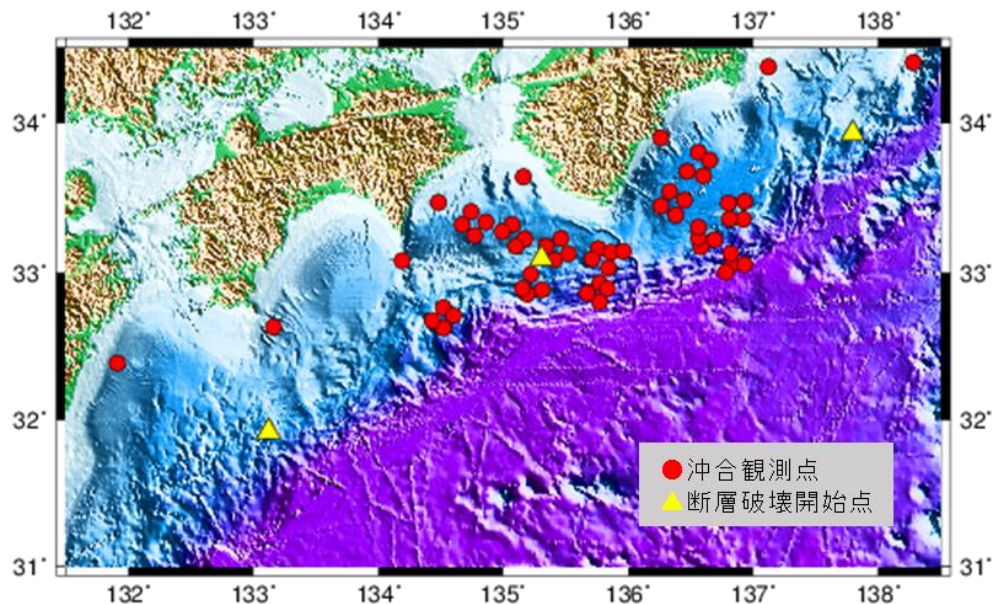


図-17 沖合観測網と設定した断層破壊開始点

#### 4.2.1 断層破壊開始点が東部にある場合

断層破壊開始点が東部にある場合の断層の破壊開始時間を図-18 に示す。60 秒程度で尾鷲付近、120 秒程度で浅川付近まで破壊が伝播する。破壊が伝わった時点からライズタイムの時間をかけてその部分の断層運動をもたらす地殻変動が発生する。LOOCV の結果を図-19～図-21 に示す。ライズタイム 0 秒・60 秒の結果は RMSE が 1m 以内となり比較的よい精度であるが、120 秒の場合は悪い結果となった。これは、破壊伝播を考慮したうえでライズタイムが 120 秒となると、データベースの想定よりも非常にゆっくりとした断層の運動となっていることが原因だと考えられる。なお、このような非常にゆっくりとした地震によって起こる津波は、一様に 60 秒で地殻変動が起こるようなモデルに比べて津波高は小さめになる傾向があるため、この検討のように計算結果を疑似的に再現すること自体が適切ではないといえるが、破壊過程の想定が大きく異なると予測が難しいことがわかった。

予測手法を比較すると、リッジ回帰による予測は精度が劣り、データベース検索とガウス過程は比較的良い精度だが、どちらの方が良い精度かについては場合ごとに異なるが、データベース検索の方が高精度の場合が多い結果となった。

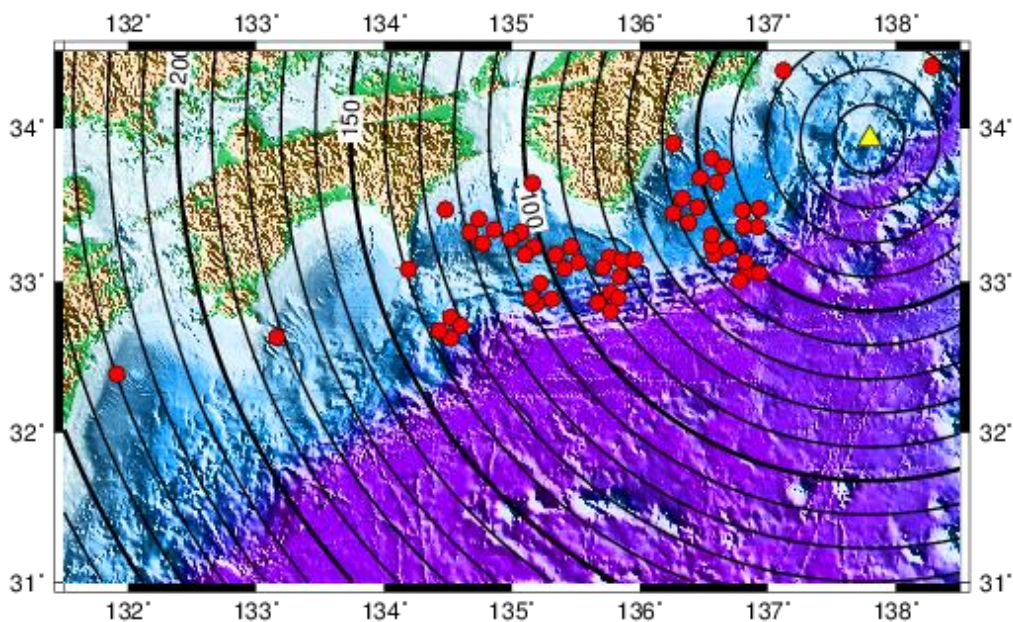


図-18 南海トラフ東部から破壊が開始したときの破壊開始時間  
コンター間隔は 10 秒。

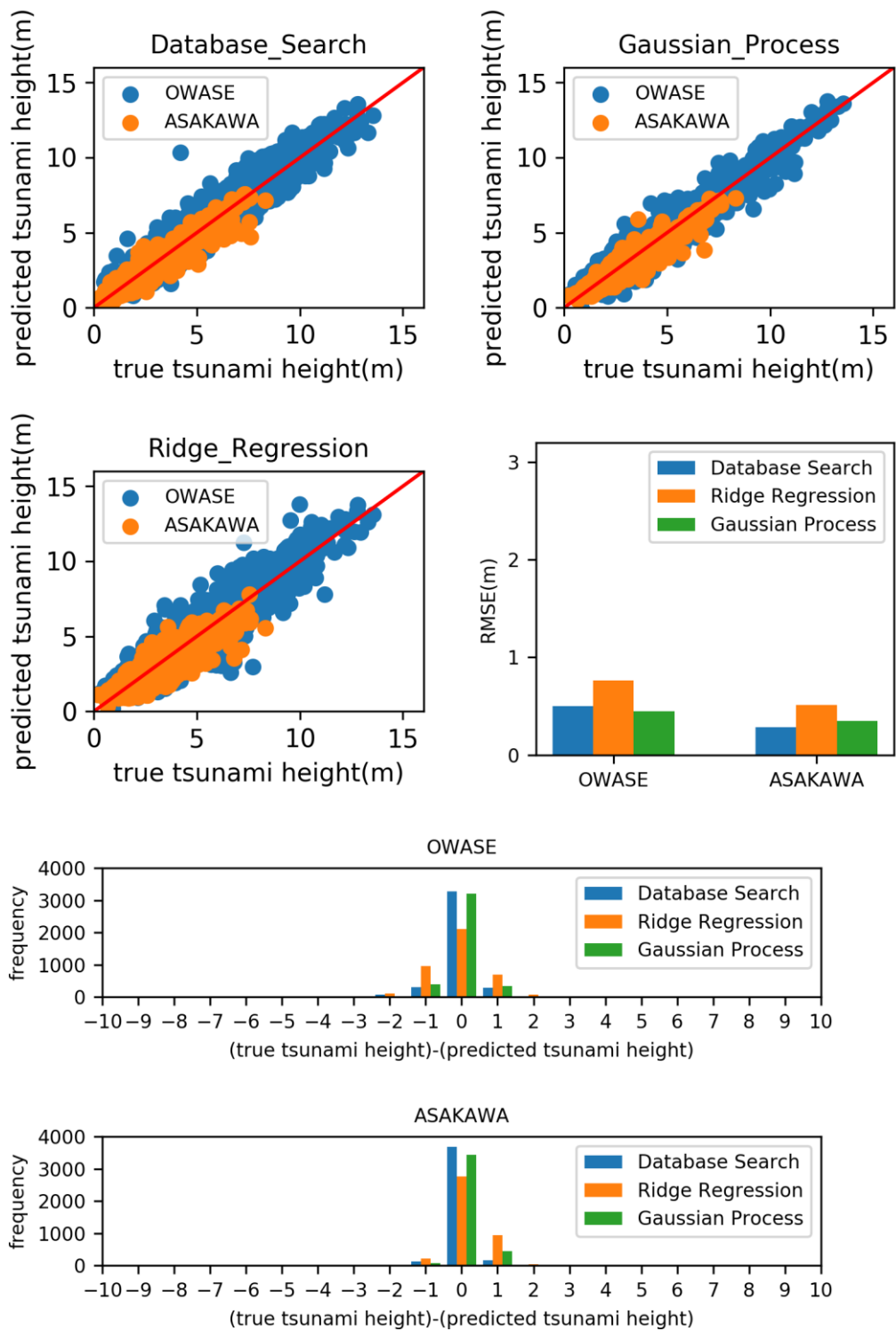


図-19 南海トラフ東部から破壊が始まり，ライズタイム 0 秒の場合の津波高予測の予測実験の結果

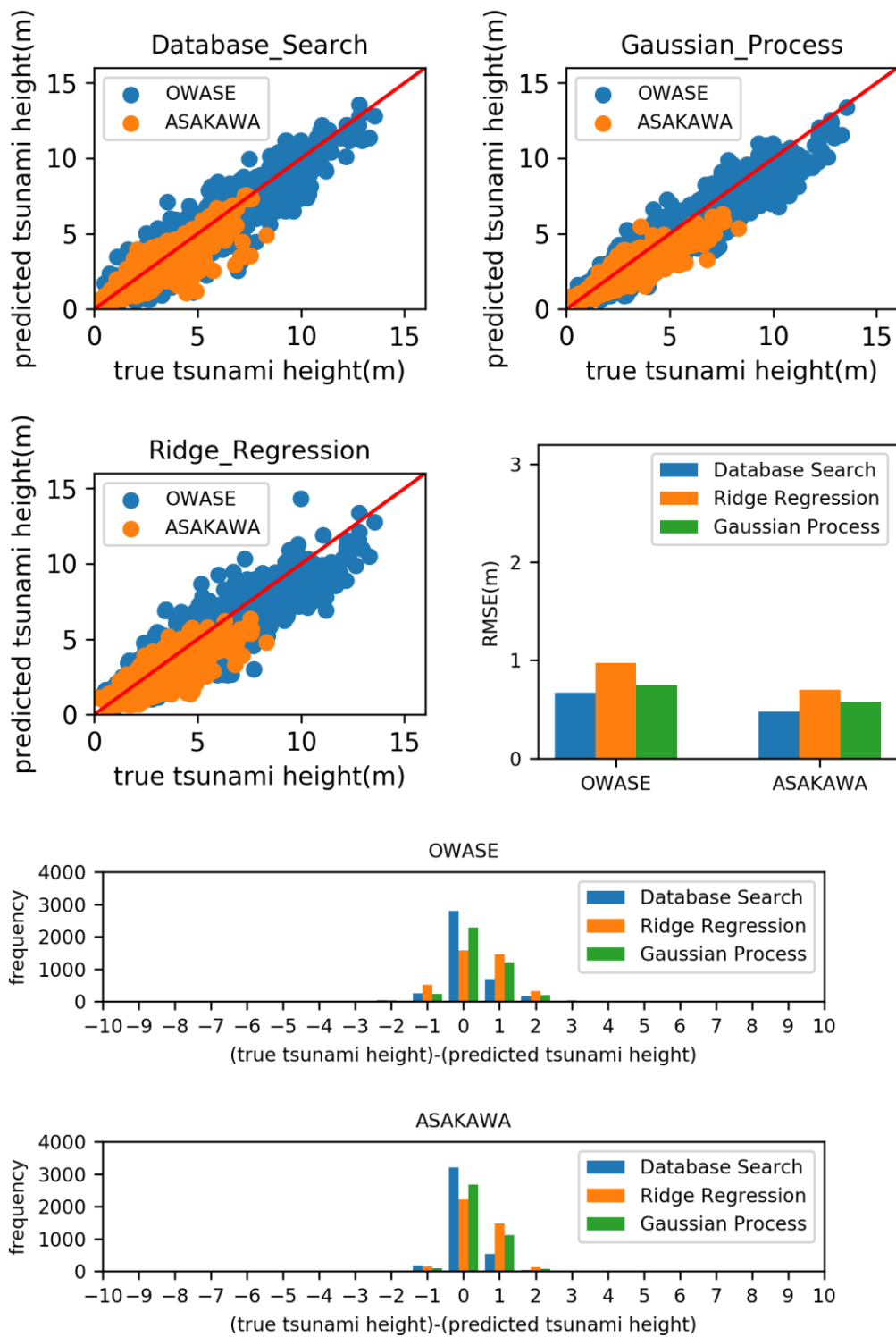


図-20 南海トラフ東部から破壊が始まり，ライズタイム 60 秒の場合の津波高予測の予測実験の結果

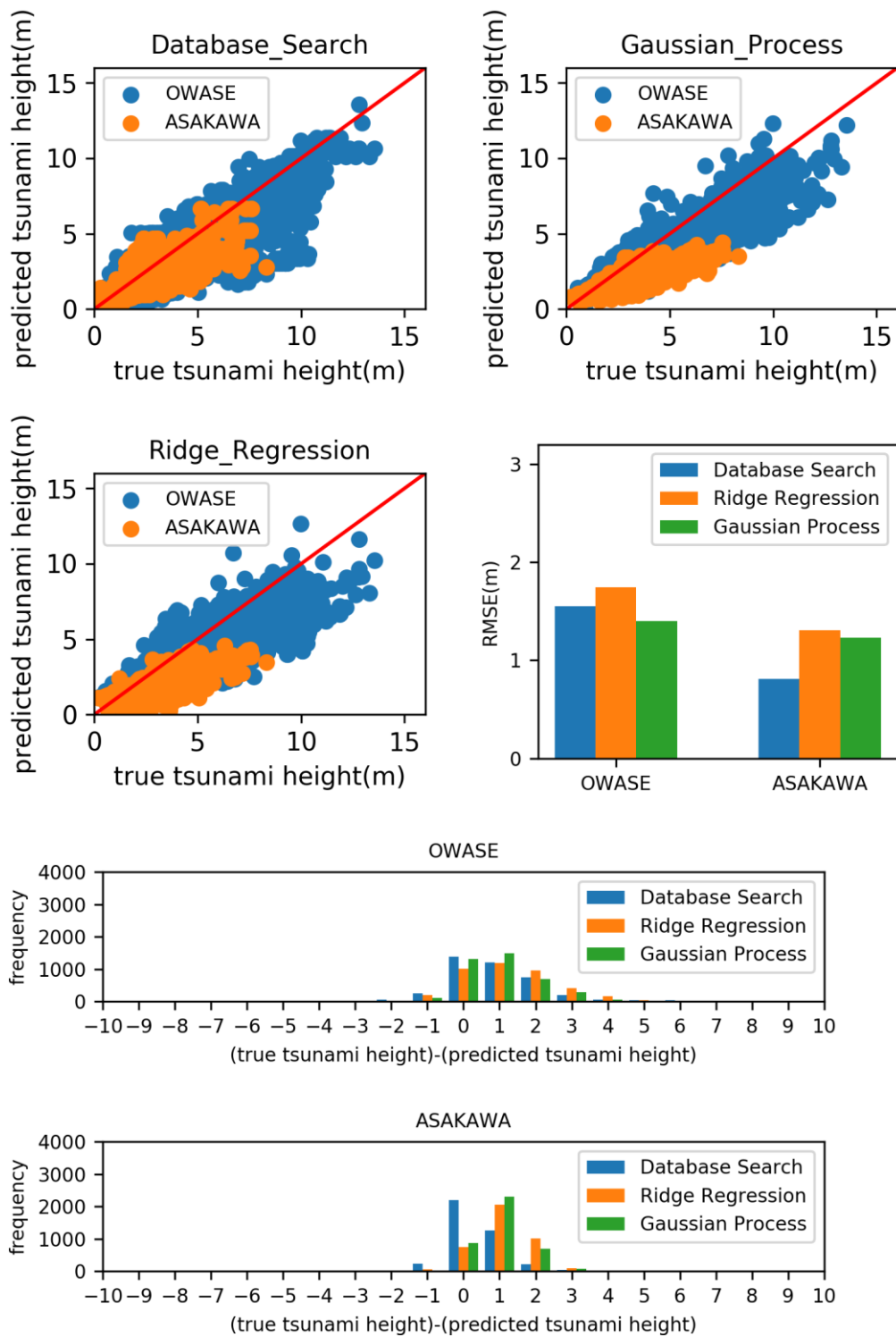


図-21 南海トラフ東部から破壊が始まり、ライズタイム 120 秒の場合の津波高予測の予測実験の結果

#### 4.2.2 断層破壊開始点が中央部にある場合

断層破壊開始点が中央部にある場合の断層の破壊開始時間を図-22 に示す。破壊開始からおよそ 60 秒で大体の観測点が存在する海域まで破壊が広がる。

LOOCV の結果を図-23～図-25 に示す。これも、破壊開始点が東部の場合と同様にライズタイム 0 秒・60 秒の結果は RMSE が 1m 以内となり良い精度であるが、120 秒の場合は悪い結果となった。

手法を比較するとこれも破壊開始点が東部の場合と同様にリッジ回帰が最も悪く、ガウス過程とデータベース検索は同程度であるが、データベース検索が良い精度となるパターンが多い。

全体的には破壊開始点が東部の場合より高精度であり、比較的予測が容易なパターンであると言える。

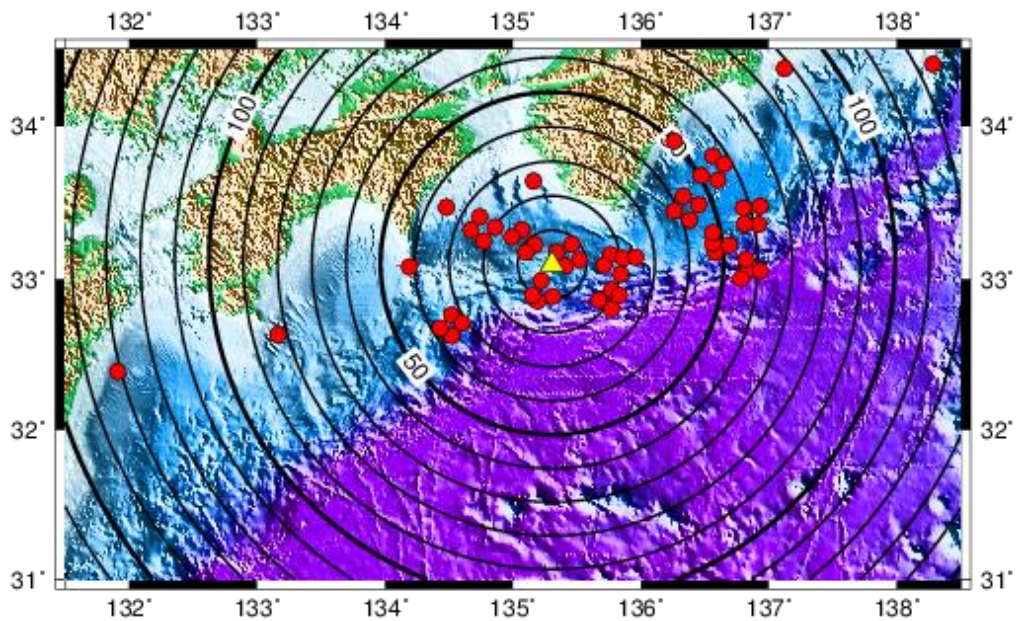


図-22 南海トラフ中央部から破壊が開始したときの破壊開始時間  
コンター間隔は 10 秒。



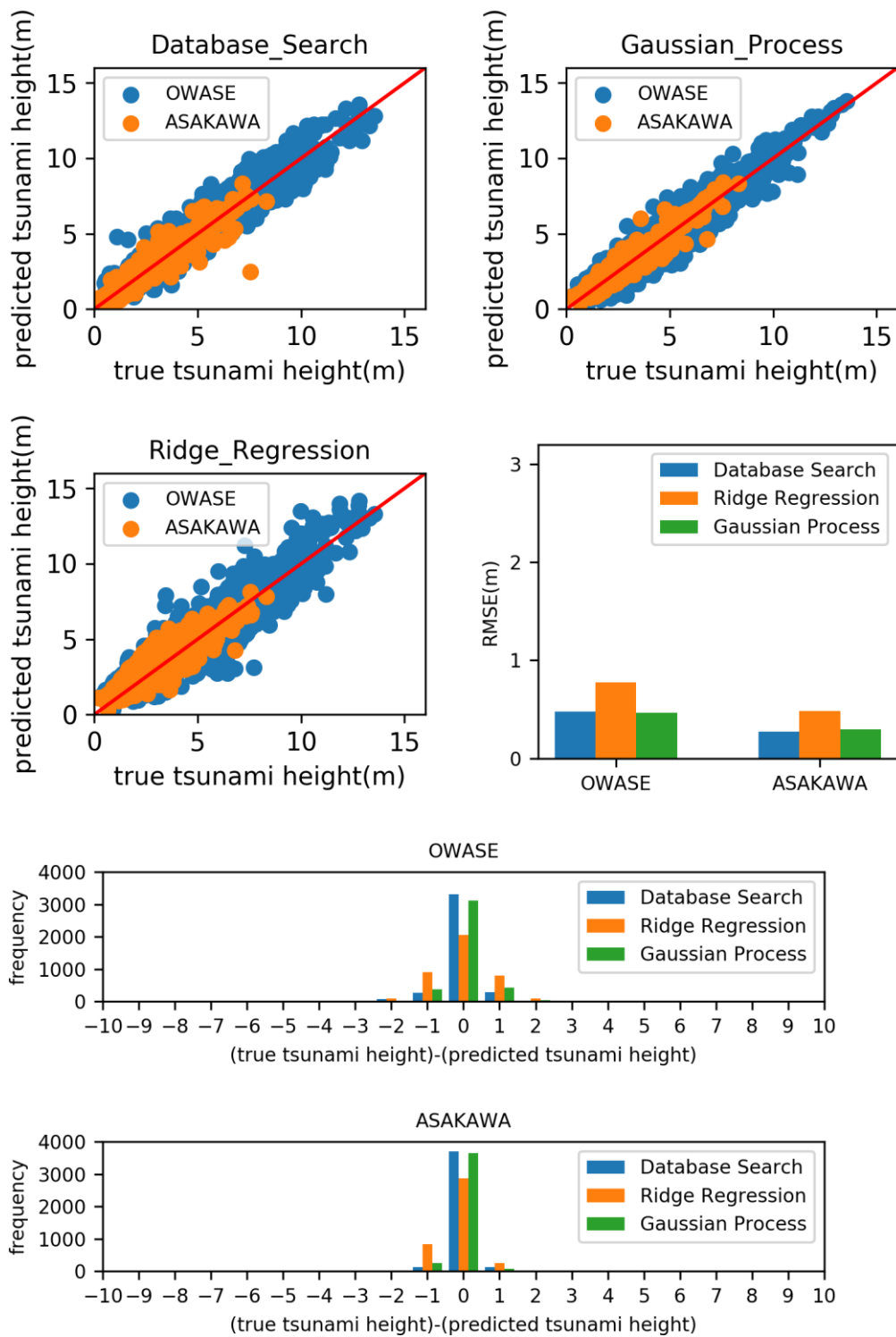


図-23 南海トラフ中央部から破壊が始まり，ライズタイム 0 秒の場合の津波高予測の予測実験の結果

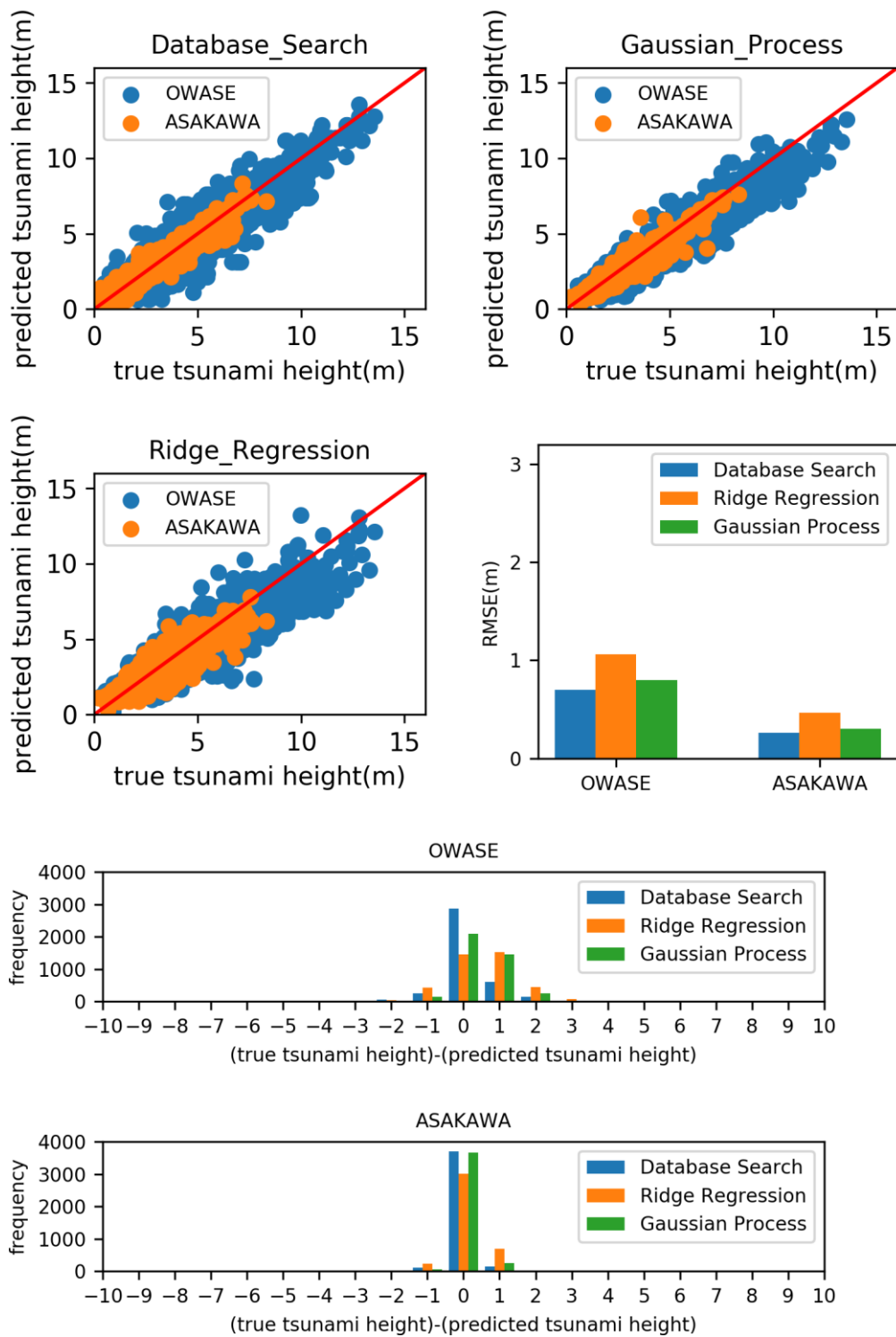


図-24 南海トラフ中央部から破壊が始まり，ライズタイム 60 秒の場合の津波高予測の予測実験の結果

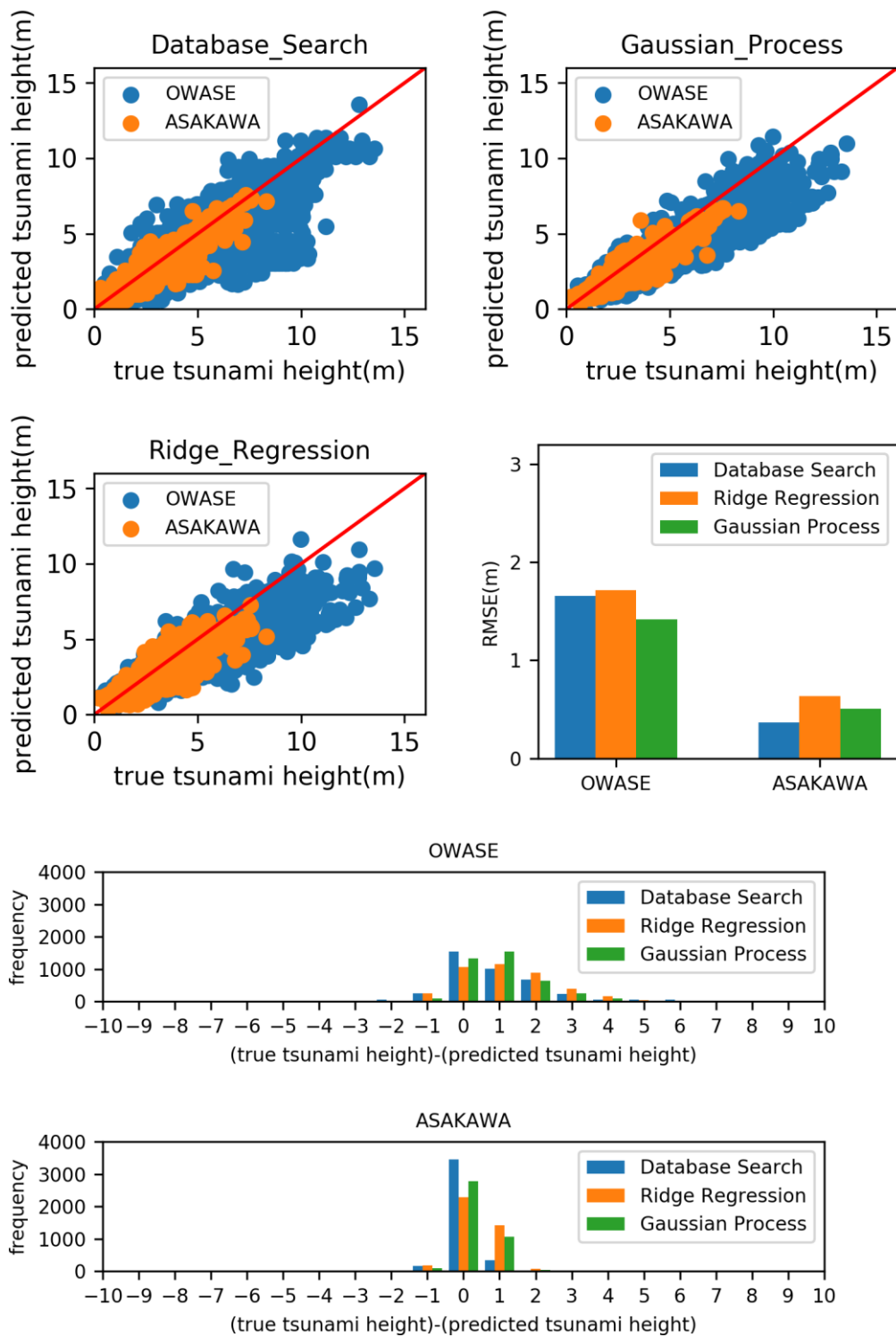


図-25 南海トラフ中央部から破壊が始まり，ライズタイム 120 秒の場合の津波高予測の予測実験の結果

#### 4.2.3 断層破壊開始点が西部にある場合

断層破壊開始点が西部にある場合の断層の破壊開始時間を図-26 に示す。破壊開始から 90 秒程度で浅川付近まで、尾鷲近郊には 150 秒程度で破壊が伝わる。

LOOCV の結果を図-27～図-29 に示す。断層破壊開始点が西部にある場合は、ほかの地点から断層破壊が開始した場合よりも全体的に予測精度が悪くなった。これは室戸岬より西側の観測点が極端に少ないことが原因の一つと考えられる。

各手法の精度を比べると、データベース検索とガウス過程が比較的良い精度だが、データベース検索の方が高精度となるケースが多い。

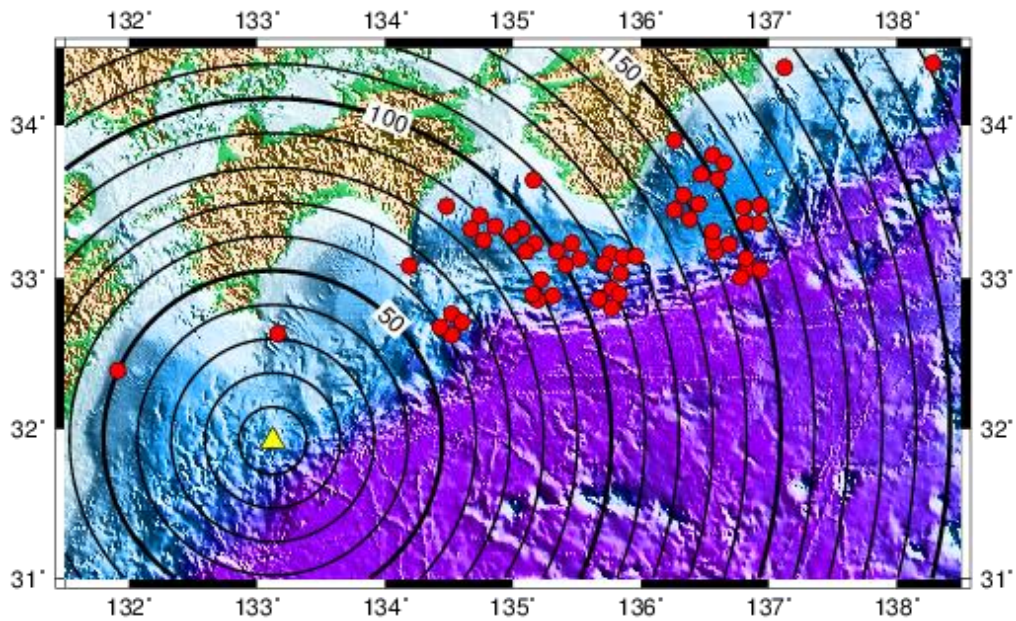


図-26 南海トラフ西部から破壊が開始したときの破壊開始時間。  
等高線の間隔は 10 秒。

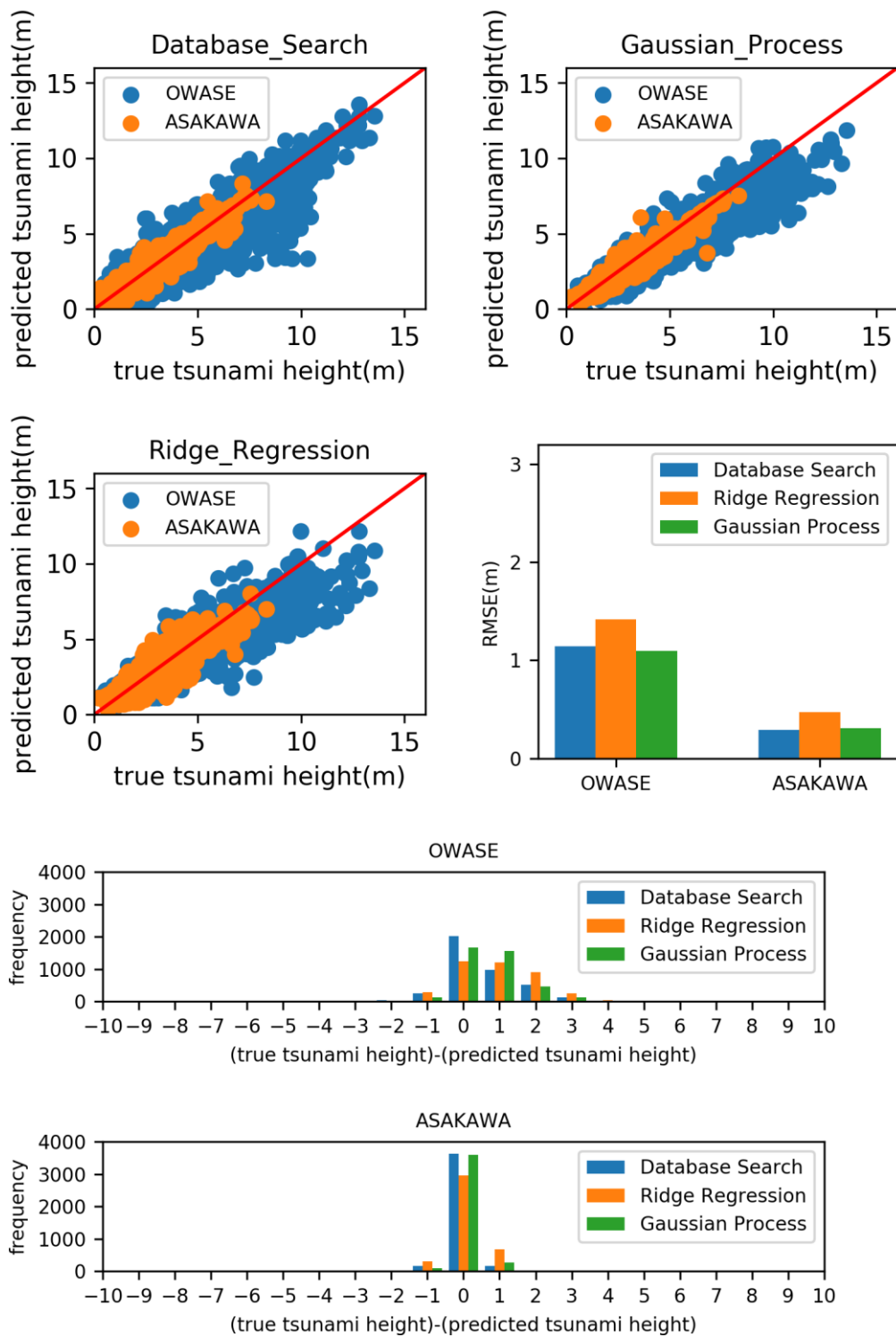


図-27 南海トラフ西部から破壊が始まり，ライズタイム 0 秒の場合の津波高予測の予測実験の結果

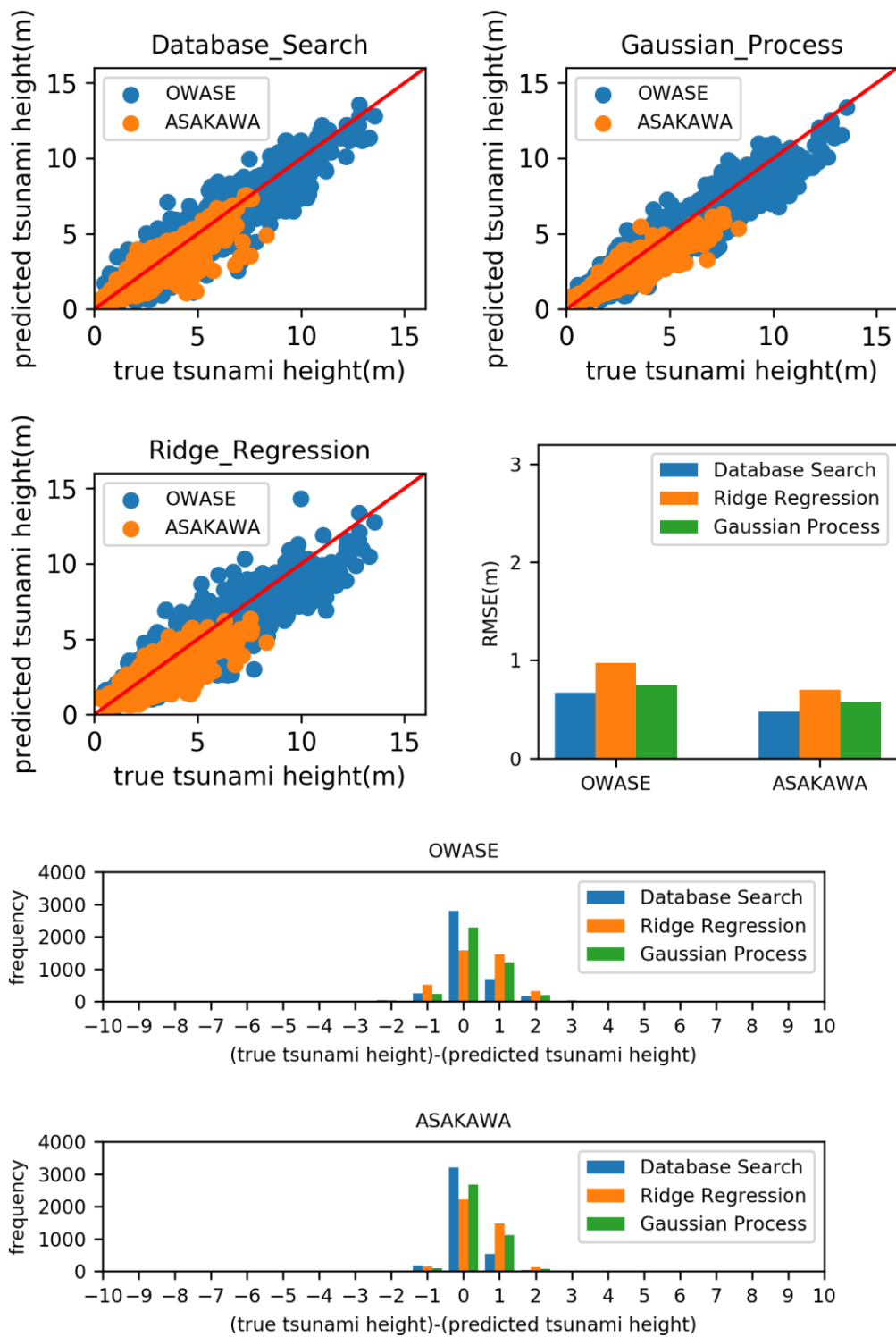


図-28 南海トラフ西部から破壊が始まり，ライズタイム 60 秒の場合の津波高予測の予測実験の結果

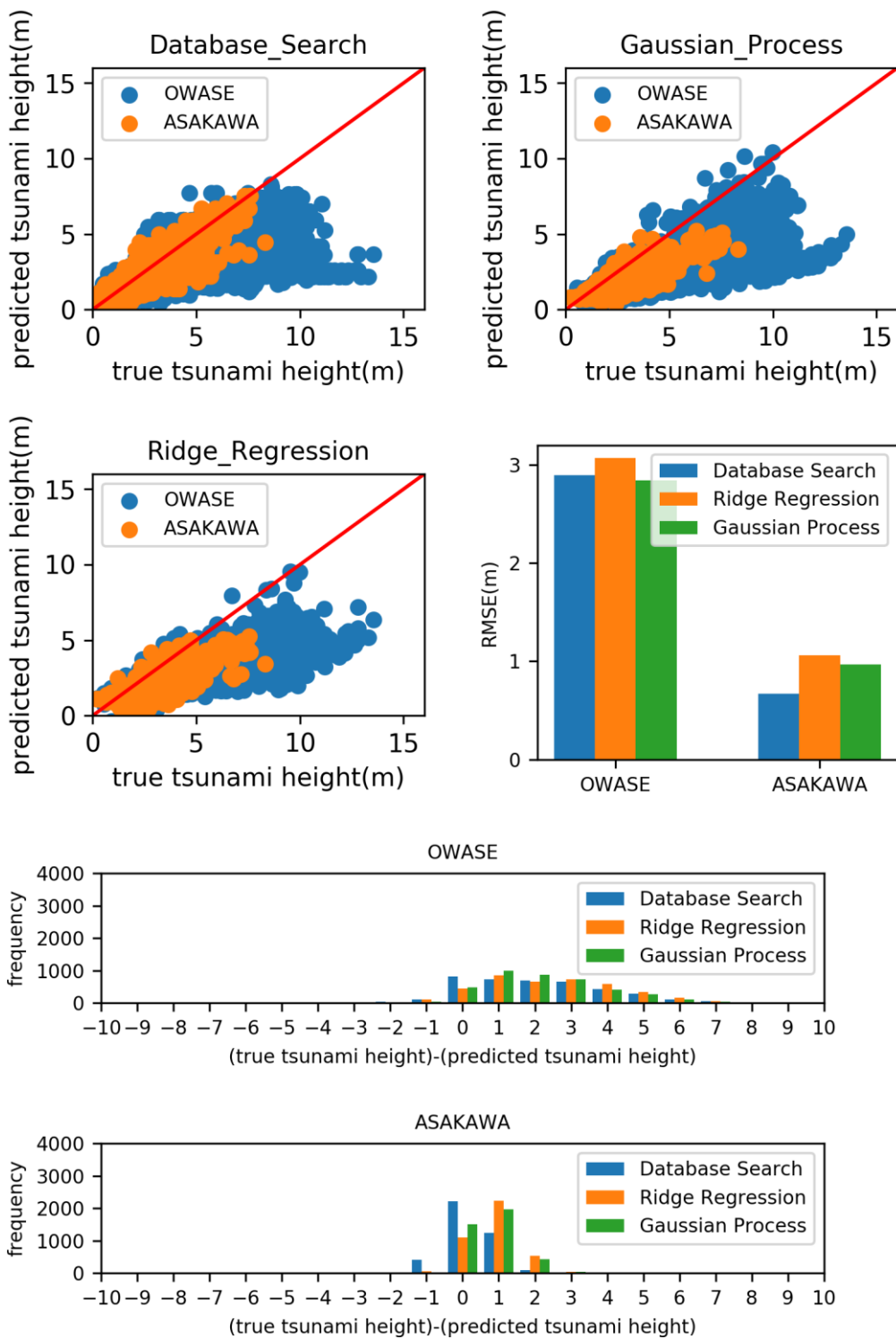


図-29 南海トラフ西部から破壊が始まり，ライズタイム 120 秒の場合の津波高予測の予測実験の結果

### 4.3 本章のまとめ

この章では断層の破壊過程が作成したデータベースの想定とは異なる地震が起こった際の津波高予測システムの挙動を調べた。なお検証に用いた、想定とは異なる破壊過程の地震による津波シミュレーションの結果はデータベース内の計算結果の波形を早める・遅らせる処理で生成したものである。

まず、ライズタイムが想定とは異なる場合について検証した。その結果、データベース検索による予測が最も高精度であり、ガウス過程もそれに準ずる精度であった。また、ライズタイムが想定よりも短い場合は全体的に過大評価、長い場合は全体的に過小評価の傾向が見られた。ハザードマップなどの作成には、危険側を考慮してライズタイム 0 秒で計算されることが多いが、データベースを利用する津波高予測システムを構築する際にライズタイム 0 秒で津波の計算を行ってそのまま予測モデルを作成すると、過小評価となりやすいことをこの結果は示しており、注意が必要である。過小評価を避けたければライズタイムを長めで計算する、もしくは地震発生 5 分で予測をするのならば、5 分よりも短い時間で波形で予測モデルを作るといった方法も考えられる。

次に、断層の破壊伝播を考慮した場合の検証を行った。破壊伝播の開始点が南海トラフの中央部にある場合はある程度の精度で予測が行えることが分かった。しかし、特に西側から破壊が開始した場合は、破壊開始地点周囲に観測点が少ないためか特に誤差が大きくなった。したがって、南海トラフの震源域全体に観測点を敷設するとより安定した予測ができる可能性がある。もしくは、現在の緊急地震速報では震源位置の推定は可能であるため、震源の位置に応じて予測モデルを作成すれば精度が向上する可能性がある。また、破壊伝播を考慮し、ライズタイムを 120 秒とした場合の予測は精度が悪かった。この場合は、津波データベースの想定よりも非常にゆっくりとした破壊過程であるため、津波シミュレーションの再現精度自体が悪い可能性が高いが、このような現象に対しては本論文の津波データベースを用いての予測は難しいといえる。

入力となる波形が想定通りのものである場合 (2 章・3 章) は、ガウス過程が最も高精度であったが、断層の破壊過程が想定とは異なる場合は、大きな差があるわけではないが、データベース検索の方がやや高精度となるケースが多かった。入力に多少の誤差 (観測誤差や、断層の破壊過程の想定の違い等) があつた場合、ガウス過程ではそのノイズを含んだ情報もすべて正しいとしてシナリオ間の補間をして予測を行う。しかし、データベース検索の場合は最も近いシナリオを選ぶという考え方であるため、多少のノイズがあつても近いシナリオは変わらない可能性がある。したがってデータベース検索の方がノイズに強い予測方法である可能性が高い。



## 5章 浸水深分布の即時予測

ここまでは、予測対象地域の沿岸部の最大津波高の即時予測について検討した。しかし、実際の被害に直結するのは津波高ではなく浸水深分布である。そこでこの章では浸水深の予測について検討する。正解の浸水深分布と予測の浸水深分布が合っているかどうかについては、全メッシュの浸水深の RMSE で判断する。なお、すべてのシナリオで浸水しないエリアについては計算対象外とした。

### 5.1 沖合津波高と浸水量の関係

まず津波高と浸水深の関係について調べる。図-30 は 1 章のデータベース内の各シナリオの尾鷲・浅川の沿岸部での最大津波高と浸水量(最大浸水深分布から求めた浸水した水の量)の散布図である。津波高と浸水量の間にはゆるやかな相関はあるものの、ばらつきも大きいことがわかる。したがって、完璧に沿岸部での津波高を予測できたとしても、実際の浸水深分布が完全に予測できるわけではない。つまり、浸水深分布の予測をするためにはこれまでとは異なる方法を考える必要がある。

### 5.2 浸水量と浸水深分布の関係

同じ浸水量のシナリオならば浸水深分布もほとんど同じとなるのであれば、2章・3章の方法で、予測の対象を沿岸部の最大津波高ではなく、浸水量として予測を行い、浸水量が最も近いデータベース内の計算結果を参照すればよい。そこで、同じ浸水量でも異なる浸水深分布となることがあるのかを確認する。ある浸水量に対して $\pm 5.0 \times 10^5 \text{ m}^3$  以内のシナリオ群を浸水量が近いグループとして、そのグループ内の任意の 2 つのシナリオの浸水深分布

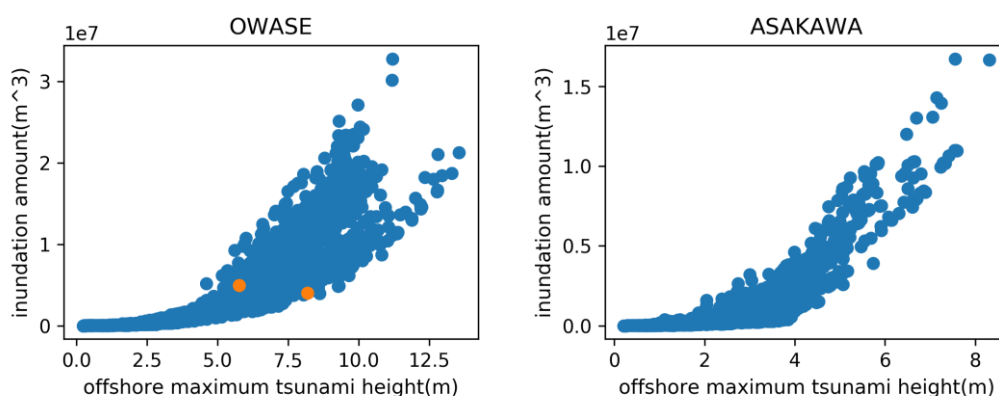


図-30 尾鷲・浅川の沿岸津波高と最大浸水量の散布図

尾鷲のオレンジ色の点は浸水深分布の比較をする 2 つのシナリオである

の RMSE を求め、これが最大となるペアを探す。このペアはつまり浸水量は近いが、最も浸水深分布が異なる 2 つということになる。

解析の結果、浸水量は同程度でも浸水深分布は異なることはよくあるということが分かった。一例として図-30 のオレンジ色で示した 2 つのシナリオの違いを図-31 に示す。上から順に断層モデル、尾鷲湾内の津波波形、浸水深分布を示している。尾鷲地区は平野部に多くの人住んでいるが、その平野部の中央を流れる中川の北側・南側で違いが見られた。南側には 5m 程度の海岸堤防が存在するため、その背後では津波高の高い方のシナリオで浸水深が大きくなった。一方で北側は津波のための堤防は存在せず、津波高の低い方のシナリオの方が浸水深が大きくなった。また河川を遡って、陸地の奥の方にまで遡上したのは津波高の低い方のシナリオであり、津波高が高いシナリオよりも広範囲で浸水した。この違いは、津波高と波長の違いが原因であると考えられる。津波高の低い方のシナリオは津波高は低くとも、津波高が高い方のシナリオに比べて波長は長い。波長が長い津波は一度に多くの水を運ぶため、津波堤防のない地域や河川からたくさん浸水したと考えられる。つまり、浸水深分布の予測には津波高のみではなく津波の波長の情報も必要であるといえる。

したがって、沖合津波高に代わって予測したい地域に侵入する水の量を予測したとしても浸水深分布の予測にはつながらないことが分かった。つまり、ガウス過程やリッジ回帰で浸水深分布の予測を行うなら、地形メッシュごとに予測モデルを作る必要がある。しかし、この方法はモデルの作成に労力がかかるため、ここからはデータベース検索によって浸水深分布を予測する方法を考える。

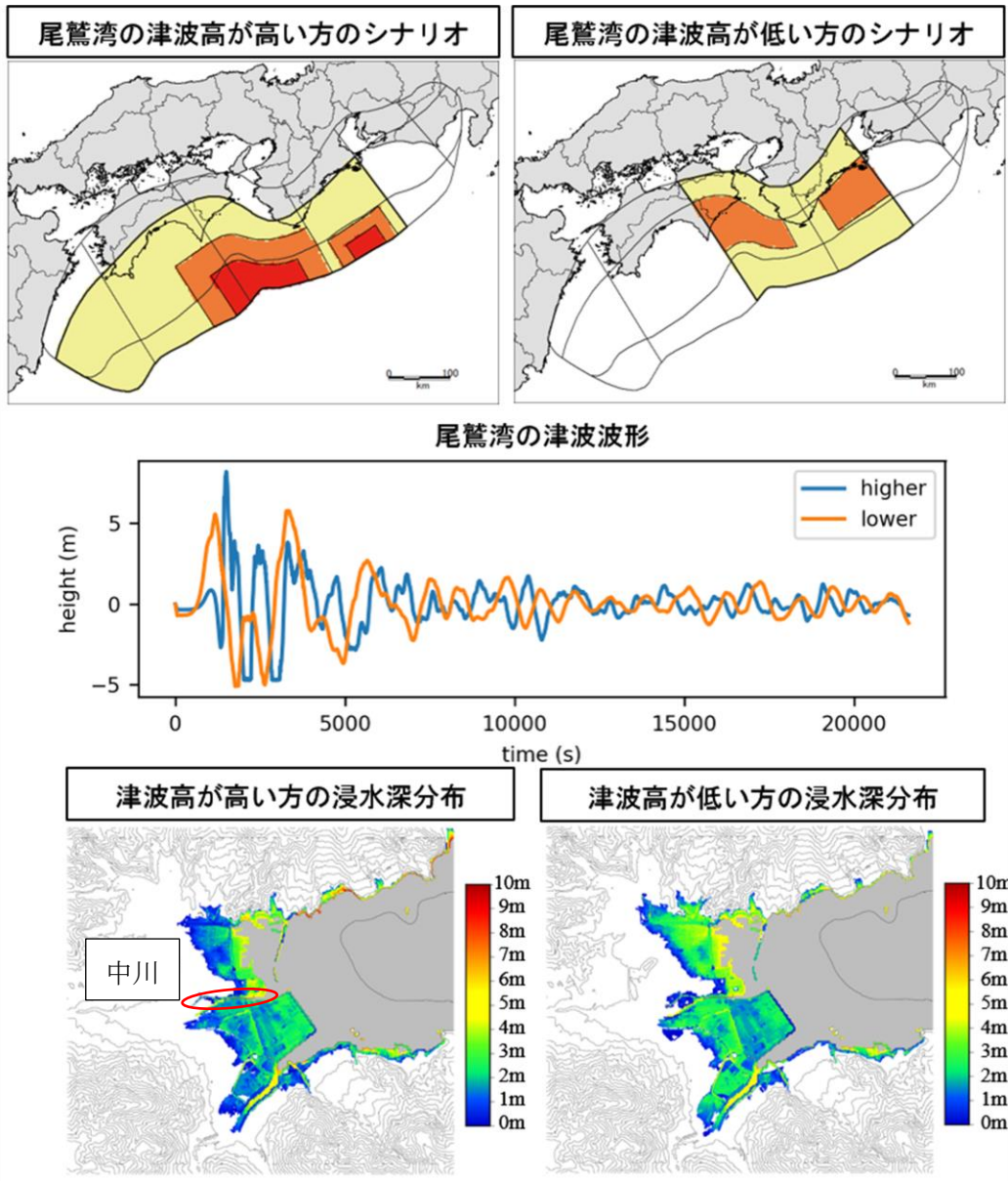


図-31 同程度の浸水量だが、浸水深分布が異なる2つのシナリオの比較

### 5.3 データベース検索による浸水深分布の予測

#### 5.3.1 津波高予測のためのデータベース検索モデルでの浸水深分布の予測

データベース検索による津波高の即時予測は、沖合の津波高分布が似ているシナリオを選ぶことによって行われているため、津波の波長についても近いシナリオが選ばれている可能性がある。したがって浸水深分布についても2章で作成したモデルで十分に予測ができているかもしれない。そこで浸水深分布のRMSEを誤差としてLOOCVを行った。結果を図-32に示す。横軸が津波高の予測誤差、縦軸が浸水深分布の予測誤差である。原点近くに多くの点が集中しているため、津波高の予測、浸水深分布の予測共にうまくいくケースが多いようだが、津波高予測の出来不出来にかかわらず浸水深分布の予測が上手くいっていないケースが見られる。例えば、図中の赤矢印に示したケースは、津波高予測は上手くいっているが、浸水深分布は大きく異なる。実際にどのような予測を行っているかを、図-33に示す。波形を比較すると、最大津波高はほぼ正確に予測できており、波形も第3波程度までは上手く予測できている。この2つのシナリオの大きな違いは地殻変動量である。地殻変動量は津波波形の初めの60秒の所に表れている。正解の津波波形を見ると、地震発生直後に大きな地盤沈下が発生しているが、予測された津波波形ではその量は少ない。結果として浸水深分布を比較すると大きく過小評価となっている。したがって、2章で作成した津波データベース検索方法では浸水深分布の予測は上手く行えないことが分かった。

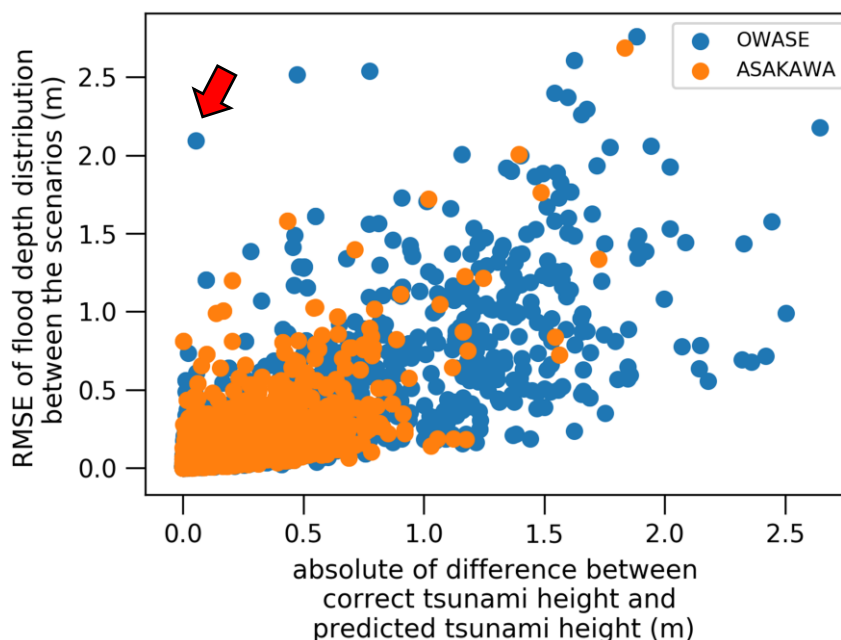
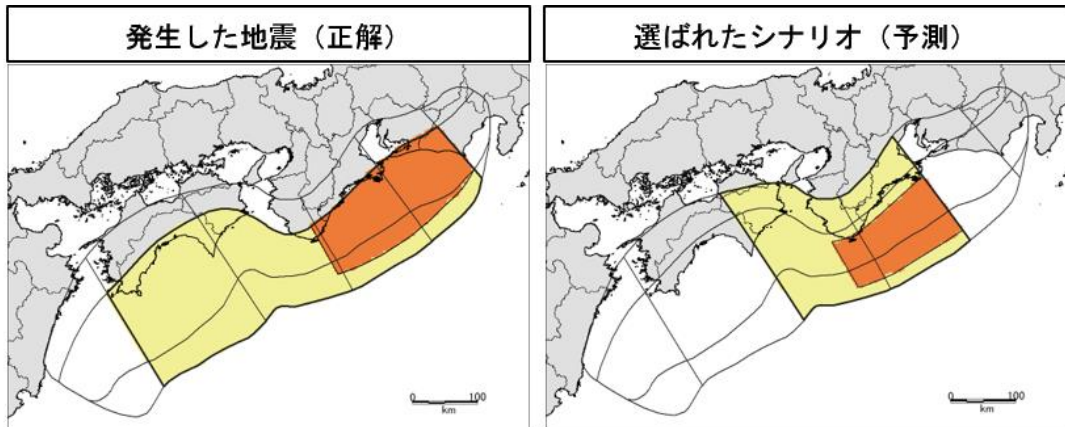
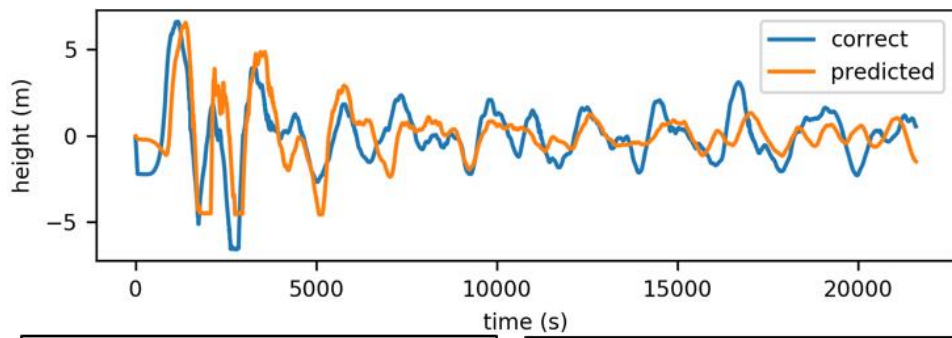


図-32 2章のモデルでのデータベース検索による  
津波高予測の誤差と浸水深分布の誤差



尾鷲湾の津波波形



正解の浸水深分布

予測された浸水深分布

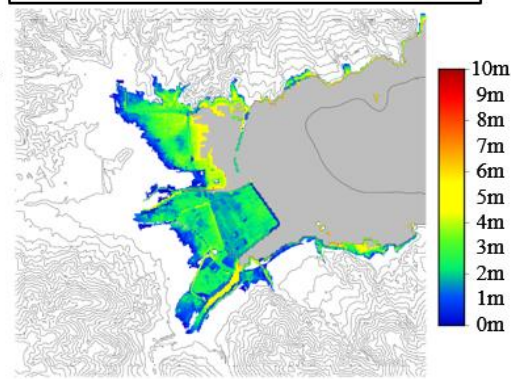
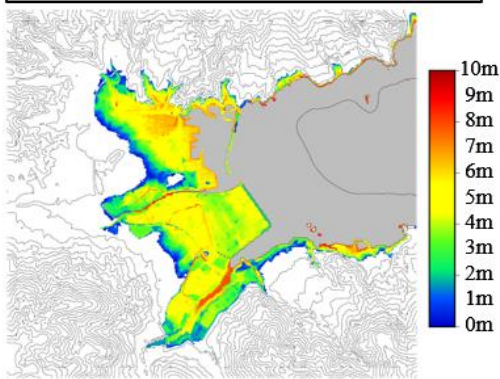


図-33 津波高予測は正確だが浸水深分布が大きく異なる例（図-32の赤矢印）

### 5.3.2 予測対象地域の地殻変動量を考慮したデータベース検索

ここまでで、浸水深分布の予測のためには津波高、津波の波長に加えて地殻変動量にも注意を払う必要があることが分かった。地殻変動については、日本全国に約 1300 点ある電子基準点の地震による地殻変動量を即時に推定するアルゴリズムはすでに開発されている<sup>27)</sup>。そこで、データベース検索をするときの情報として、各観測点でとれる波形の最大値・最小値に加えて、予測対象地点近くの電子基準点での地殻変動量を加える。この時、データベース検索に用いる津波の観測点が多数あるのに対して、地殻変動量  $d$  は 1 つのみであるため、地殻変動量が検索アルゴリズムに与える影響が非常に小さくなってしまう。そこで地殻変動量に定数をかけて補正する。

$$\hat{d} = \lambda d \quad (15)$$

ここで、 $\hat{d}$  は地殻変動量の補正值、 $\lambda$  は補正量を表す定数である。 $\lambda$  を変えながら、 $\hat{d}$  を 2.1 の検索アルゴリズムの  $O(r)$  や  $C(r)$  の中に追加し、誤差を正解と予測の浸水深分布の RMSE の、3967 シナリオの RMS (Root Mean Square: 二乗平均平方根) として予測実験を行い、最適な  $\lambda$  を探す (図-34)。複雑な曲線であるため、より細かな刻み幅でグリッドサーチを行えばより良い解が見つかる可能性もある。 $\lambda = 0$  のときは、5.3.1 の地殻変動量の情報を入れない場合のデータベース検索による予測であるため、地殻変動量を考慮することによって誤差が小さくなっていることが分かる。

最も良い  $\lambda$  で尾鷲の予測実験を LOOCV で行ったとき、最も誤差が大きくなったものを図-35 に示す。この二つのシナリオは地殻変動量も津波の波長も最大津波高もほとんど同じだが、浸水深分布は正解に比べて予測の方が全体的に大きくなっている。この違いは第二波の大きさの違いにある。したがって、より高精度な浸水深分布の予測を行うためには遠くのアスペリティによって引き起こされる津波も見ることが必要があり、予測に使用する観測点を選び直す必要がある。

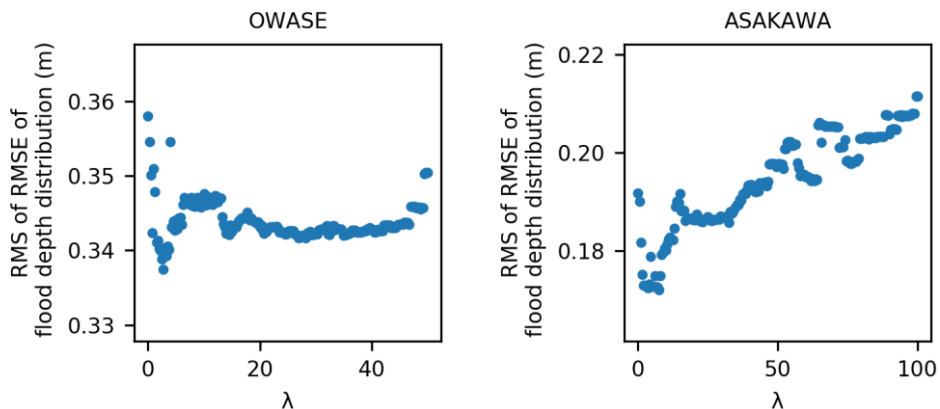


図-34  $\lambda$  のグリッドサーチの結果

縦軸は、一個抜き交差検定時の正解と予測の浸水深分布の RMSE の RMS

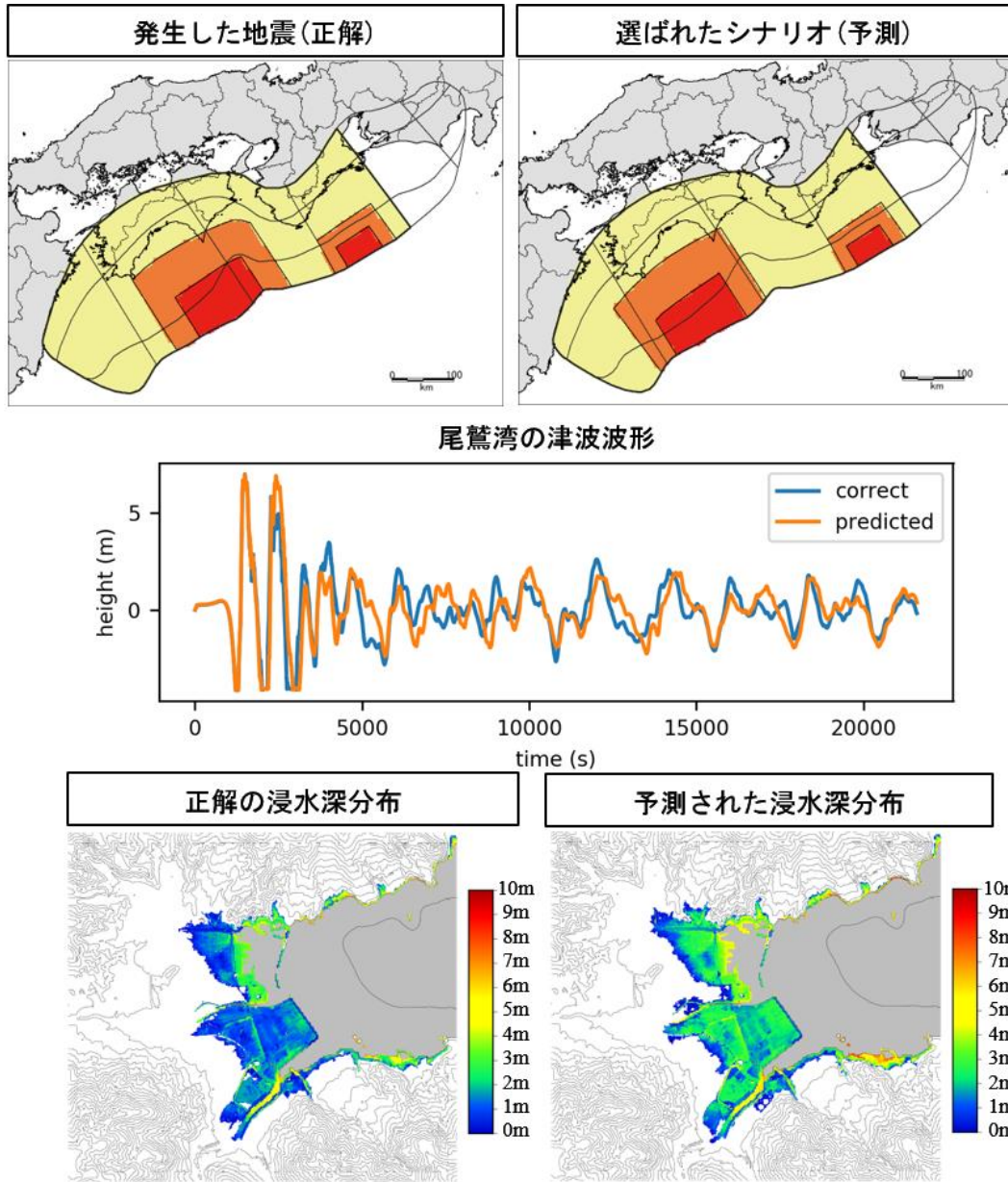


図-35 尾鷲の津波高予測のための観測点と電子基準点での地殻変動量を用いたデータベース検索の予測実験で最も結果が悪いケース

### 5.3.3 データベース検索による浸水深分布の予測に適した観測点の選択

2章で試みたデータベース検索に適した観測点の選択は、津波高予測のためのものであり、結果として予測対象地点付近の観測点選ばれた。しかし、ここまでの検討で浸水深分布の予測には断層モデル全体も見なければならぬことが分かった。そこで、2章と同様に焼きなまし法によって浸水深分布に適した観測点の選択を行う。その後、5.3.2の様に予測対象地点付近の電子基準点での地殻変動量を情報として加えて予測を行う。なお、焼きなまし法の際に電子基準点での地殻変動量も変数として加え、さらに各説明変数を使う・使わないの2値ではなくその重みを決めるとするのが最も良い方法だが、計算コストが爆発的に増えるため、ここではそのようには行わない。

まず、焼きなまし法による観測点の選択の結果を示す。図-36に焼きなまし法の解の収束の様子を示す。計算時間の都合上、2章のように複数のシード値での探索は行わなかった。より良い解が見つかる可能性もあるが今回も140回の反復で計算は打ち切った。図-37に選択された観測点を示す。図-8の津波高予想のための観測点に比べると、尾鷲については、尾鷲近郊の観測点の数は同じだが、西の遠方の観測点が1つ増えた。また、下段の浅川については、浅川付近の観測点が1点増え、西の遠方の観測点も増えた。つまり、どちらについても遠方の情報の比重がやや増えた結果となる。このように、津波高予測の観測点選択に比べて微細な変化により精度が向上したことから、各観測点の重みを考えるとより高精度なモデルを作ることができる可能性が高い。

次にこの観測点に予測対象地点の近くの電子基準点での地殻変動量を予測変数に加える。その際に5.3.2と同様にこの値を $\lambda$ 倍することを考え、最適な $\lambda$ はLOOCVの予測誤差が最も小さくなるものとする。グリッドサーチの結果を図-38に示す。尾鷲・浅川どちらについても地殻変動量を情報に加えることで精度が向上していることが伺える。

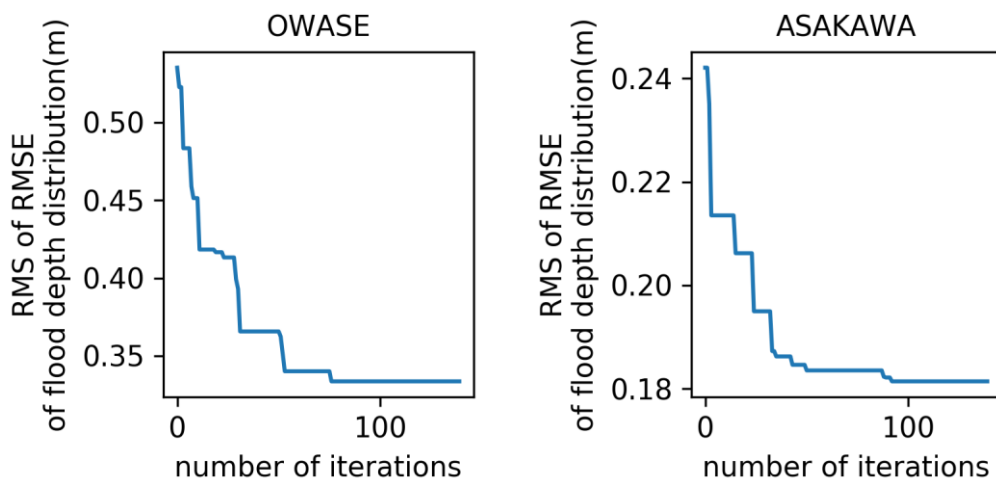


図-36 焼きなまし法による解の改善の様子。



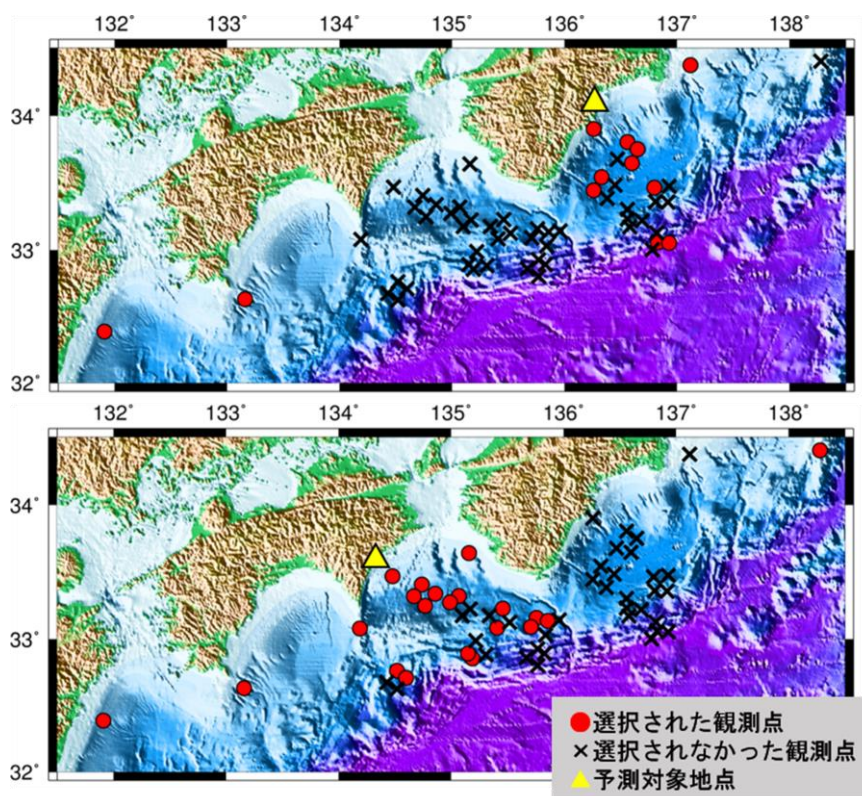


図-37 津波データベース検索による浸水深分布予測のために選択された観測点

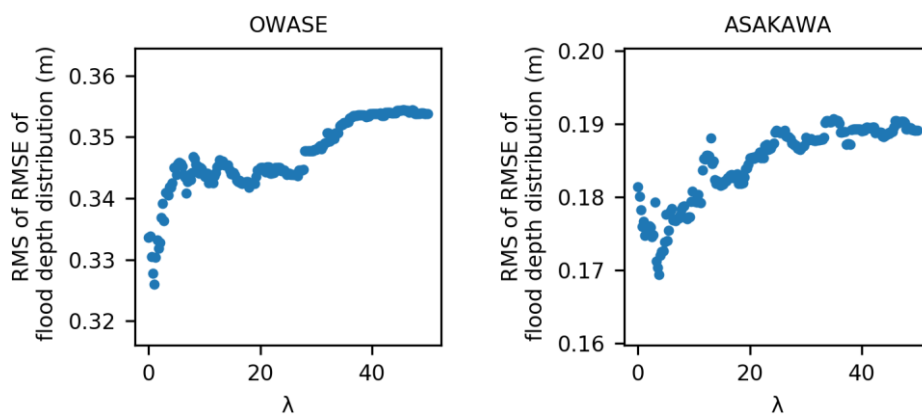


図-38 地殻変動量の補正量のグリッドサーチの結果

最後にこの方法による浸水深の予測がどの程度の精度で行えているかの確認する. 図-39は LOOCV を行ったときの浸水深分布の RMSE のヒストグラムである. 尾鷲・浅川ともに 0 に近い数字の所に大きな山があるが, この浸水深分布の RMSE という数字がどの程度の精度であるのかを直観的に理解するために, その一例を以下に示す.

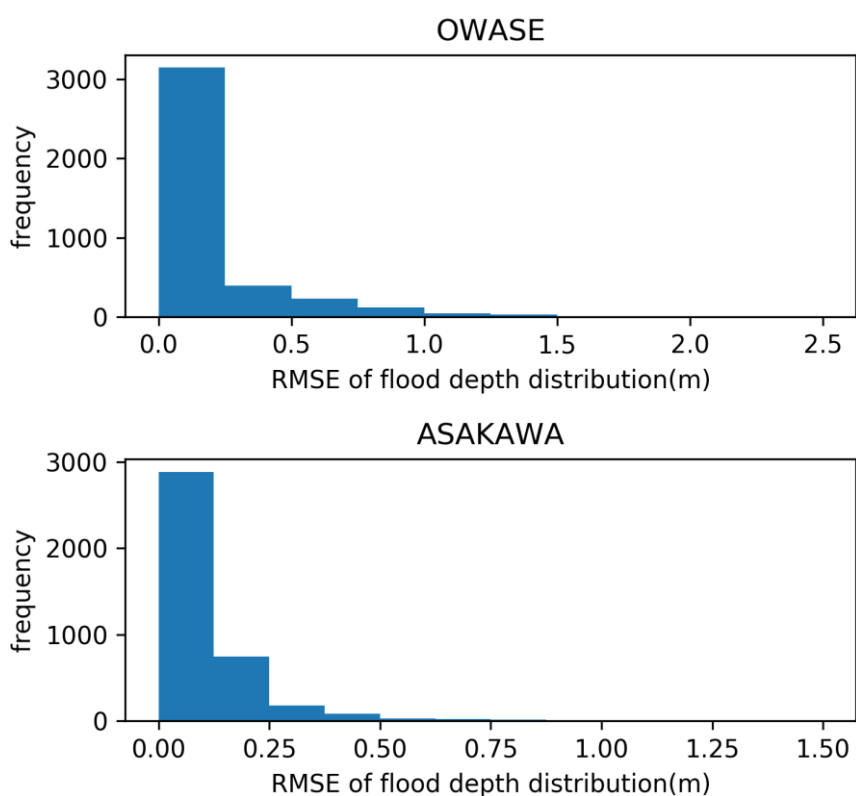


図-39 データベース検索による浸水深分布の予測の予測実験(LOOCV)による予測誤差のヒストグラム. 予測誤差は浸水深分布の RMSE で評価している.

尾鷲については(図-40),このときの浸水深分布のRMSEは約0.53mであり,全体の約90%はこれよりも高精度な予測ができた.尾鷲湾内の波形はほぼ完璧に再現できているが,やや予測値の波形の方が第一波・第二波ともに大きく,若干の過大評価となっているがよい精度で予測ができています.

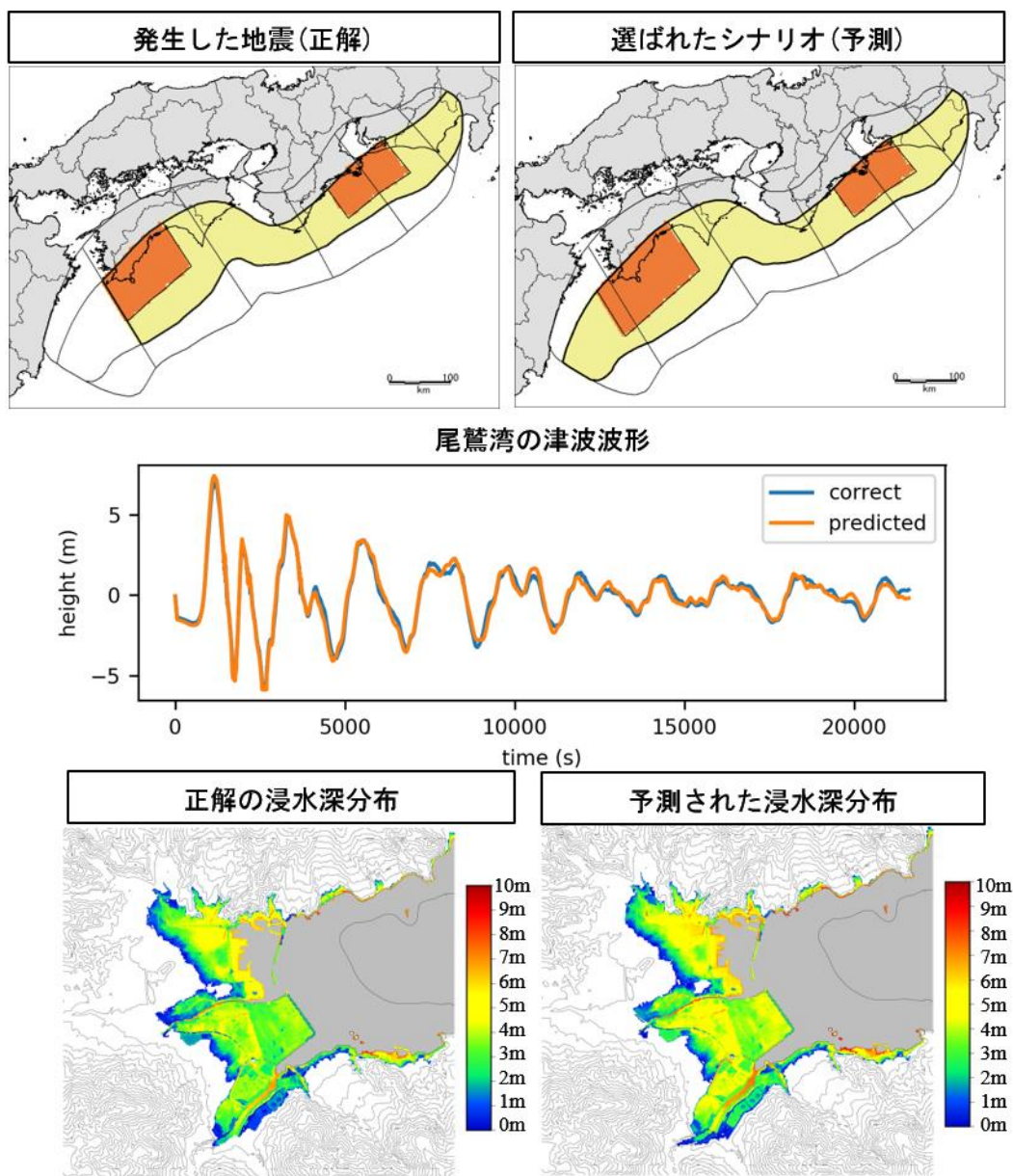


図-40 データベース検索による尾鷲の浸水深分布の予測実験(LOOCV)の結果の一例. この例の浸水深分布のRMSEは0.53mで,尾鷲での予測実験では約90%はこれよりも良い精度で予測ができる

浅川については (図-41), この図の浸水深分布の RMSE は約 0.52m であり, 全体の約 98% はこれよりも良い精度で予測ができた. 浅川湾内の波形は十分に予測できているようだが, 若干の過小評価となっている. しかし, 全体的な浸水箇所や浸水深はまずまずの精度で予測できている.

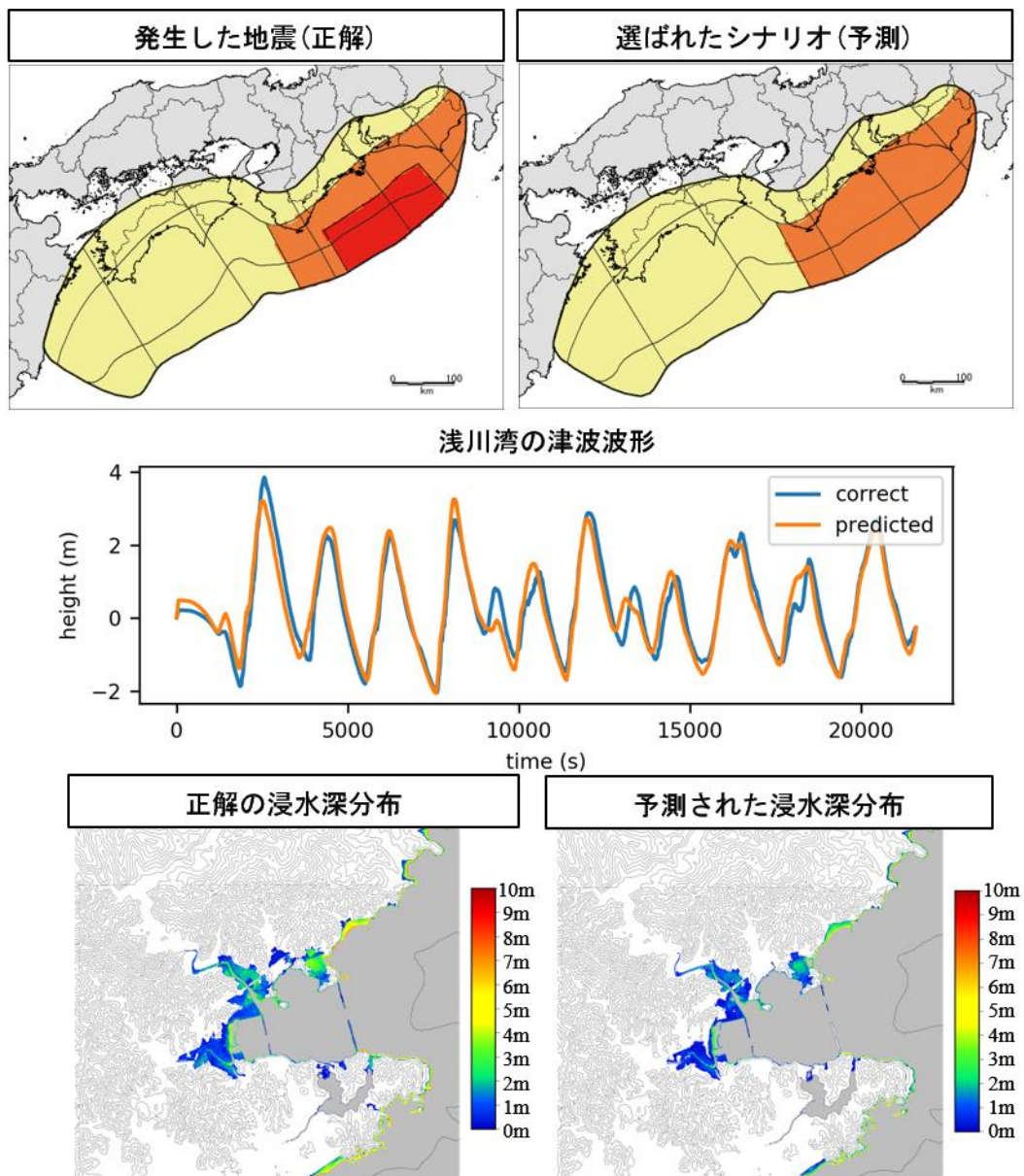


図-41 データベース検索による浅川の浸水深分布の予測実験(LOOCV)の結果の一例.  
この例の浸水深分布の RMSE は 0.52m で, 浅川での予測実験では約 98%はこれよりも良い精度で予測ができる

次に、最も予測精度が外れたケースを示す。

尾鷲で最も予測が外れたケース（図-42）は、大きく過大評価となった。原因は滑り域の違いであり、次の2点が影響したと考えられる。一つは超大滑り域が正解よりも東側に伸びている点であり、もう一つは大滑り域が正解よりも西側に広がっている点である。超大滑り域の東端の海域には観測点が少ないためこの情報を生かすには観測点の重みを決めるように焼きなまし法をすれば改善されるかもしれない。

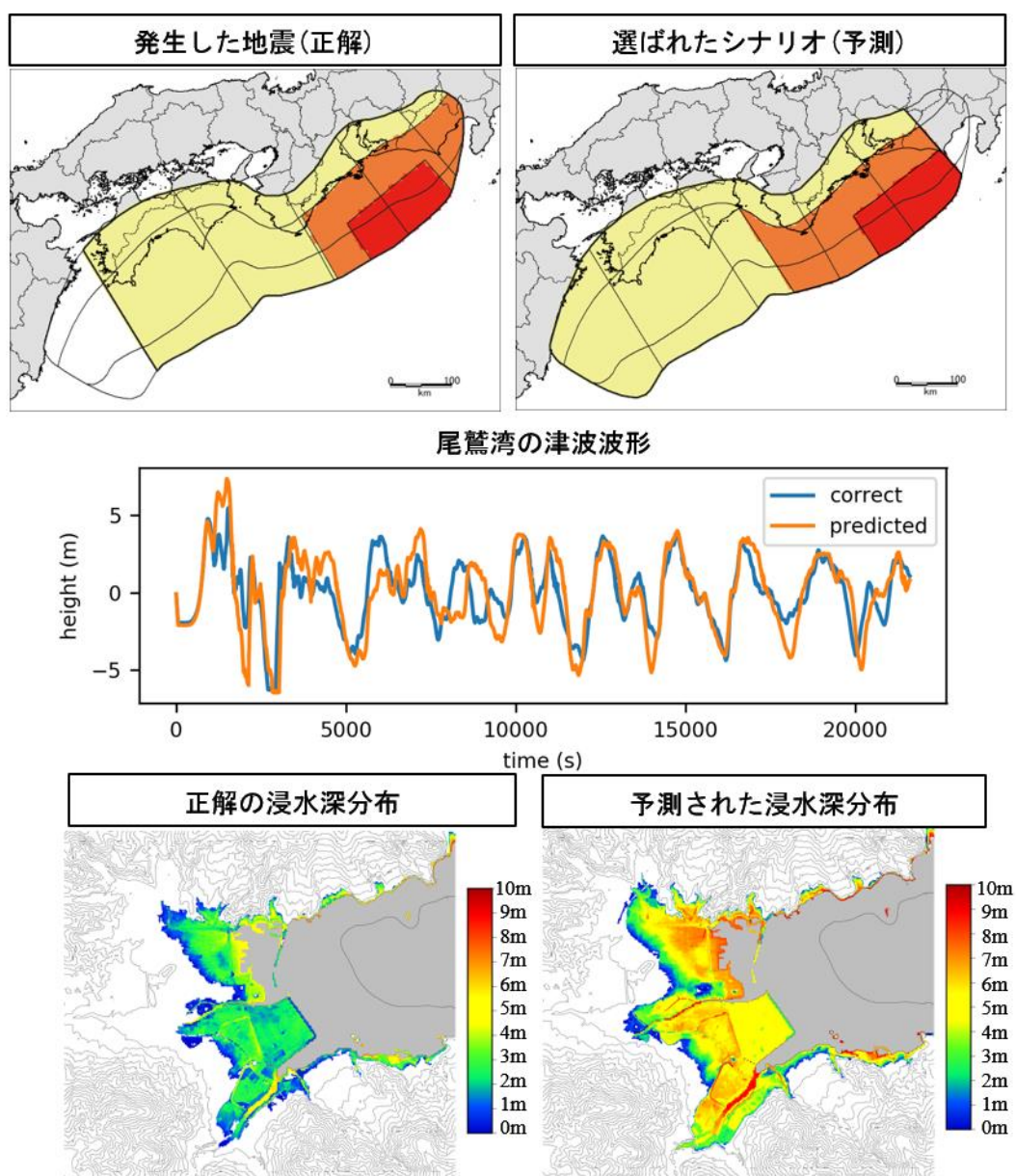


図-42 データベース検索による尾鷲の浸水深分布の予測実験(LOOCV)で一番精度が悪かったケース。このときの浸水深分布のRMSEは2.76mである。

浅川で最も予測が外れたケース（図-43）も大きく過大評価となった。これについても大きな違いとして超大滑り域の違いが挙げられ、正解のシナリオに比べて選ばれたシナリオの超大滑り域はより西側に広がっている。この付近にも現在は観測点が存在しないため、この方法での予測の限界かもしれない。

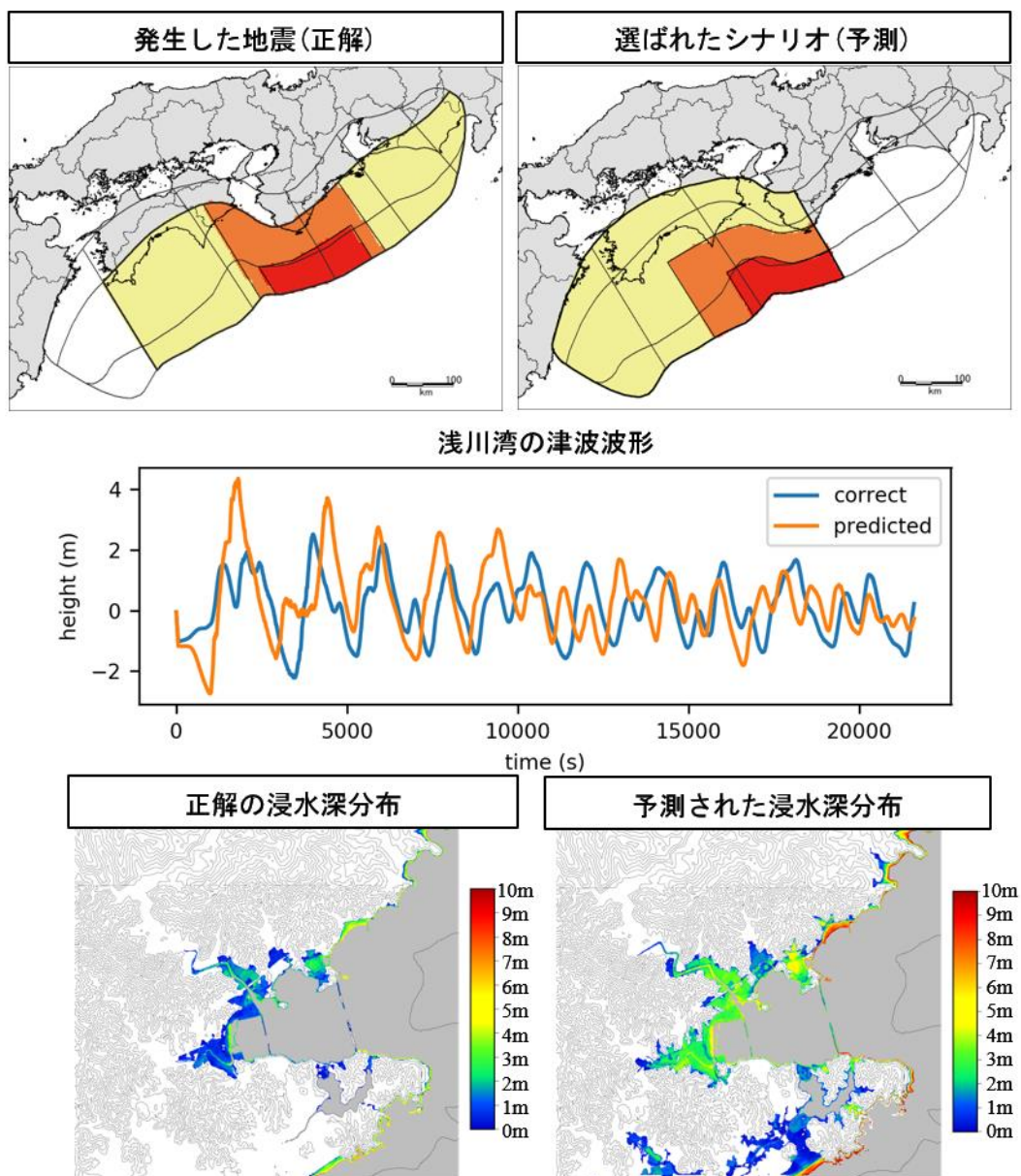


図-43 データベース検索による浅川の浸水深分布の予測実験(LOOCV)で一番精度が悪かったケース。このときの浸水深分布の RMSE は 1.65m である。

## 5.4 本章のまとめ

本章では浸水深分布の即時予測について取り組んだ。まず、これまで津波予報で注目されていた津波高と、実際の被害とより深い関係のある浸水深分布との関係を調べたところ、緩やかな相関しか見られないことが分かった。つまり、ガウス過程やリッジ回帰で浸水深分布の予測を行うのであれば、地形メッシュごとに予測モデルを作る必要がある。また、浸水深分布の予測には津波の波長も見る必要があることも分かった。

次に、データベース検索による浸水深分布の予測を試みた。データベース検索では、全観測点で波形の最大値と最小値が近いシナリオを選択するというアルゴリズムであるため、ここに津波の波長の情報が含まれていることが期待できる。浸水深分布予測のための観測点を 2 章と同様に焼きなまし法で選択すると、津波高予測のための観測点より若干遠方の情報を増やすような結果となった。さらに予測対象地点付近の電子基準点での地殻変動量もデータベース検索の情報として加えると、精度がさらに改善された。ほとんどのシナリオが精度よく予測できたが、観測点が少ないもしくは設置されていない海域での滑り域の違いを区別できないことが原因で予測が外れるケースも存在した。本論文では地震発生後 5 分までの波形での予測を試みたが、これよりも長い時間の波形を使うと、既設の観測点まで波が到達するため、観測点が少ない海域の情報も得られるようになるため、精度が改善されると考えられる。

したがって、沖合の津波観測点と予測対象地点の地殻変動量を用いて **Multi-index method** に基づく浸水深分布の予測を高精度で行うには、十分な量のシナリオと海域全体の観測点が必要であるといえる。

## 第2部 徳島市沿岸部を対象とした津

### 波の長期湛水シミュレーション

#### 1章 過去の南海地震による徳島の長期湛水

##### 1.1 昭和南海地震

昭和南海地震後にまとめられた報告書<sup>28)</sup>には、昭和南海地震の四国における地盤変動量がまとめられており、それによれば徳島県の沿岸部では、北島町で-0.262m、川内村で-0.296m、二軒屋で-0.2801m、小松島市で-0.3754m、立江で-0.2929m、福井村（現在の阿南市福井町）で-0.4687m、三岐田町（現在の美波町）で-0.3061m、牟岐町で-0.4077m、浅川で-0.4512m、宍喰町で-0.4692mと報告されている（図-44）。さらに津波によるものか、地盤が沈下した後の台風の襲来によるものかどうかは明らかでないが、徳島市二軒屋と小松島市見能林の海

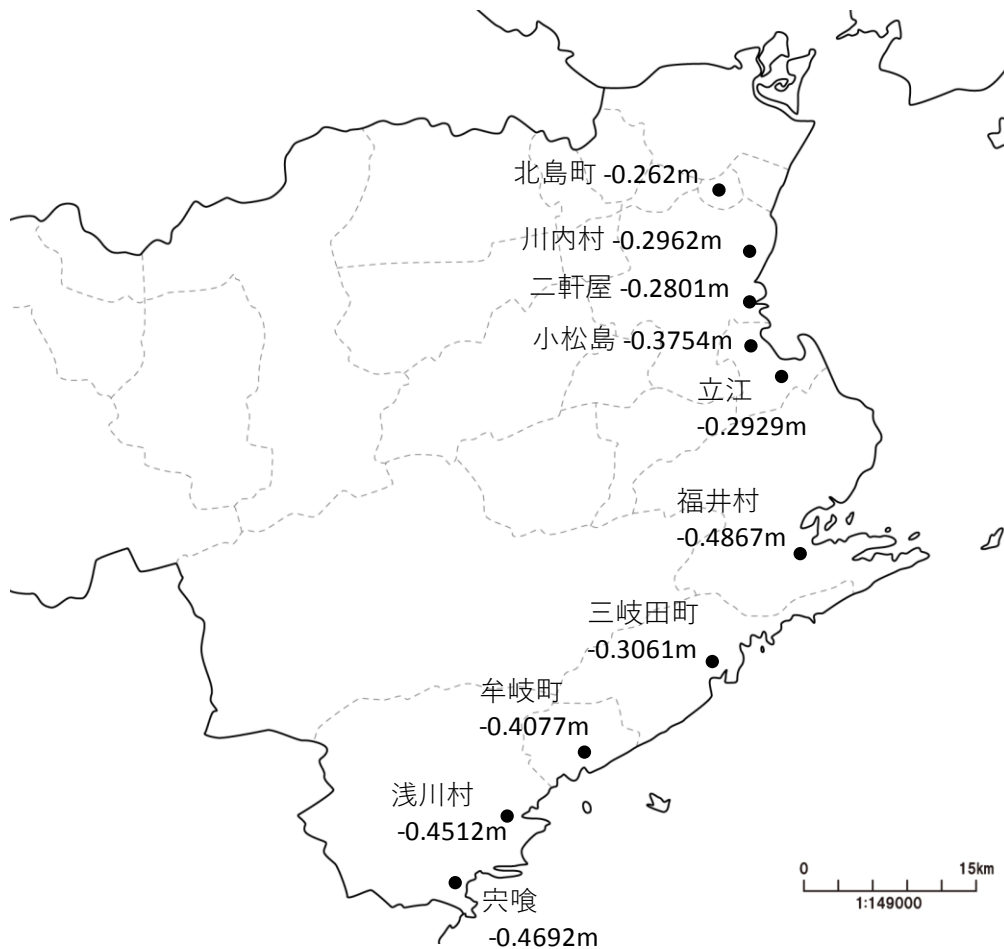


図-44 1946年昭和南海地震前後の地殻変動量



岸付近で海水が町中まで浸水し、滞留している様子が写真で掲載されている。いずれにしてもこれらの地域では南海地震により地盤の標高が海水面以下となってしまったものと理解できる。地震津波災害を後世に伝えるために建てられた石碑の中にも長期浸水の影響が確認できる<sup>29)</sup>。昭和南海地震で約0.3mの地盤の沈下が発生した小松島市立江町新開の八幡神社境内に農地災害復旧事業を後世に伝える『農地災害復旧碑』があり、「大地震に起因する地盤沈下により立江町の水田40町歩(約0.4km<sup>2</sup>)が、悪水の滞留ため不毛の地と化した。災害後、農地改良復旧事業として昭和27年3月に着工、総工費3,300万円の巨費を投じて昭和31年3月に竣工した」と刻まれている。また、小松島市赤石町の阿波赤石駅横の立江川排水機場敷地内に、地盤沈下が起き、そのために生じた塩水や雨水の冠水被害対策として行われた排水改良事業の碑が建てられている。これらからも地震による地盤の沈降により水害のリスクが高まったことが読み取れる。

## 1.2 安政南海地震

昭和南海地震のひとつ前の1854年12月24日の安政南海地震については、徳島県文書館所蔵の中財家文書『安政南海大地震有姿記』がある。これは板野郡大松村(現徳島市川内町)に住む近藤基之助が実際に見聞きしたことを書き残したもので、建物の倒壊や津波の情報に加えて、川内地区で長期湛水をうかがわせる記述があり、それらは次のようである。中喜来：水路が残らず埋まり排水が機能しなくなる。加賀須野村：往来・渡し場・三瀬は地震で土地が下がり毎月大潮になり時には建物の中まで浸水。中島浦：時々満ち潮の時は海水が流れ込んできた。沖島村：新田地帯は1,2尺～3尺(約30～90cm)程下がり潮が入り込み海のようになった地帯もあった。竹須賀村：堤が1尺(約30cm)下がり、平石用水、宮島用水



図-45 1854年安政南海地震後に長期湛水が発生したと推定される場所

が一緒になったようになり堤が池に落ちこんで堤の松が水没。平石村：その年の夏に沖の潮が高くなり窪地の悪水(排水)の流れが悪くなった。米津新田：新田中白海のようになった。また、11月15日（新暦の1855年1月3日）、助任八幡祭礼場の筋へ潮が満ちて入り込み、かけ馬を走らすことができなかった、とも記載されている。中財家文書で長期湛水が川内地区付近において発生したと読み取れる場所を地図上に示すと図-45のようになる。

### 1.3 本章のまとめ

本章では、過去の南海地震による徳島での長期湛水の被害を古文書により調査した。その結果、昭和南海地震・安政南海地震共に徳島県内の各所で長期湛水が発生したと思われる記述が見つかった。

## 2章 津波の流入・排水過程の計算方法

### 2.1 計算の全体像

津波の流入および排水過程の計算は、堤外と堤内を分けて行う。まず、通常の津波の計算により対象地域の堤外周辺での水位時系列を記録する。これを境界条件として堤内の計算を行う。津波の高さが堤防高を超えた場合、堤内に水を流入させる。堤内地では、地表面、排水路、下水路の三つの流れを考える。地表面では津波と同様の計算方法を採用するが、排水路やマンホールを設定したメッシュで地表面、排水路、下水路のそれぞれの間で水のやり取りを行う。最終的には排水路に存在する排水ポンプで領域外へ排水する。図-46はこの一連のシミュレーションの流れを示したものである。

### 2.2 堤外地の計算

堤外の津波の計算は浅水理論で行う。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{D} \right) \\ \quad = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{\frac{7}{3}}} q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y^2}{D} \right) \\ \quad = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{\frac{7}{3}}} q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \end{cases} \quad (17)$$

ここで、 $\eta$ は静水面からの水位変化、 $t$ は時間、 $q_x$ 、 $q_y$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 方向の流量、 $D$ は全水深、 $g$ は重力加速度、 $n$ はマンニング粗度係数である。

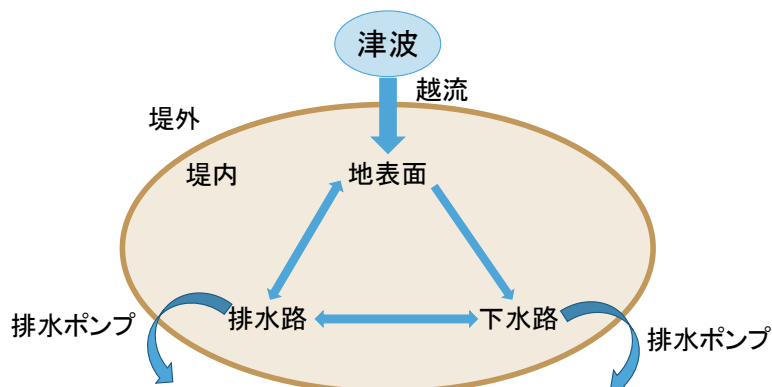


図-46 計算の全体像

## 2.3 堤内地の計算

堤内の計算には、AFREL (Application of Flood Risk Evaluation) を使用した。このソフトウェアは雨水等の排水の計算に利用されているものである。三好ら(2013)<sup>30)</sup>は、このソフトウェアを用いて徳島市上八万地区で台風による豪雨と、それに伴う河川氾濫が生じた際の再現計算を行っており、観測された10点の浸水位とシミュレーション結果の差はこれらの点についてはすべて0.10m以内に収まっていることを確認している。

本論文では河川氾濫のシミュレーションと同様に、津波波形を入力することによって津波による氾濫を表現する。津波が堤防の高さを超えた時、越流公式<sup>31), 32)</sup>によって(図-47)堤内地に流入させる。(y方向も同様である)

$$\begin{cases} h_2 < \frac{2}{3}h_1 \text{ のとき, } q = \pm 0.35h_1\sqrt{gh_1} \\ h_2 \geq \frac{2}{3}h_1 \text{ のとき, } q = \pm 0.91h_2\sqrt{g(h_1 - h_2)} \end{cases} \quad (18)$$

流入後の堤内地での地表面、排水路、下水路の各レイヤーの計算は以下のとおりである。

### 2.3.1 地表面

堤内地の流れは、前述の浅水理論で行うが、連続式が以下の形になる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = q_{CHAN} + q_{SEWER} \quad (19)$$

ここで、 $q_{CHAN}$ は排水路との流量のやり取り、 $q_{SEWER}$ は下水路との流量のやり取りを示している。

### 2.3.2 排水路

排水路は座標軸方向にのみ走っているものとみなし、メッシュの中心を通るものとする。排水路を設定したメッシュでは、越流公式によって地表面レイヤーと流量のやり取りをする(図-48)。計算は(17)式を利用する。なお、排水路内の流れは数値安定性向上のため(16)式の移流項を無視した形で行う。

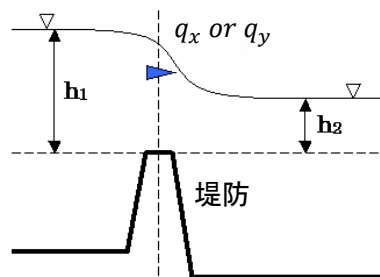


図-47 津波の堤内地流入時の流れ

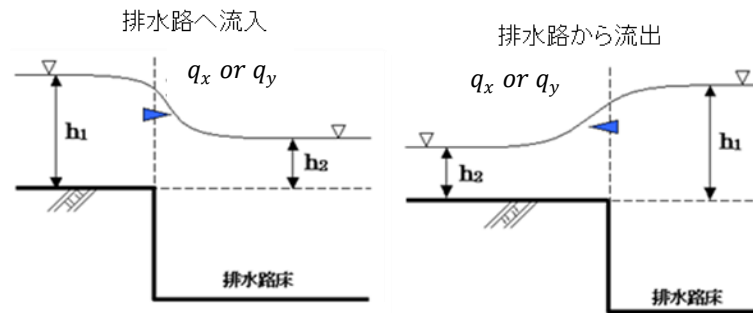


図-48 排水路と地表面の水のやり取り

### 2.3.3 下水路

下水路も排水路と同様に座標軸方向にのみ走っているものとみなし、メッシュ中心を通るものとする。地表面と下水路の水のやり取りは、マンホールを設定したメッシュで行う。下水路への流入には、次の越流公式を利用する。

$$q = \frac{2}{3} h \sqrt{\frac{2}{3} gh} \quad (20)$$

ここで、 $h$ はマンホールのあるメッシュの水深である。下水管路内の計算は数値安定性のためスロットモデルを採用した。

### 2.3.4 排水ポンプ

排水ポンプは設置したメッシュから指定先メッシュへ排水能力分だけ流量を移す形でモデル化している。

## 2.4 本章のまとめ

本章では、長期湛水のシミュレーションの方法を説明した。要約すると、内水氾濫の計算モデルに境界条件として堤防を越える津波の量を与えているものであり、内水の計算や津波の計算はどちらも既存の方法である。しかし、この2つの技術を組み合わせることで長期湛水というこれまでリスクの議論が難しかった現象についてシミュレーションを行うことができる。

### 3章 津波の流入・排水のシミュレーション

#### 3.1 徳島市川内地区

まず、古文書に過去の長期湛水の記述が多くみられた徳島市北部の川内地区を対象にシミュレーションを行う。川内地区は標高が低く、周囲に河川や海があるため、地区全体が堤防で囲まれている。現在の堤防の天端高は吉野川に面する南側は約 5m で、それ以外は約 2m である(図-49)。大規模な津波が襲来した場合は、川内地区の天端高の低い東側から浸水すると考えられる。この地区には雨水の排水を目的とした排水機場が 13ヶ所ある(図-50)。また、川内地区には排水路は存在するが下水路は存在しない。なお、地形データは南海トラフ

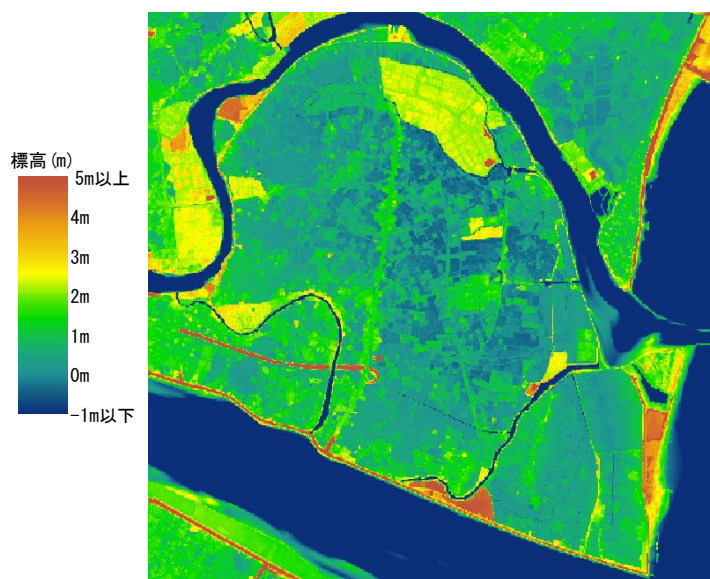


図-49 徳島市川内地区の地形

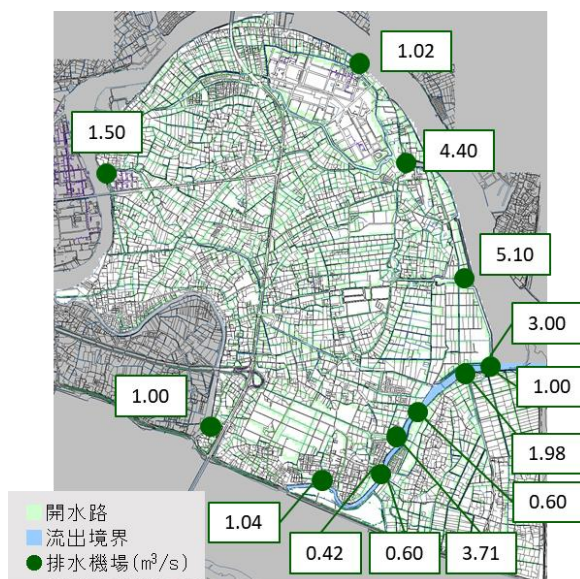


図-50 川内地区の排水モデル

の巨大地震モデル検討会<sup>33)</sup>が示した津波計算用の地形データの作成方法に合わせて徳島県が作成したもの(図-51), 下水路と排水機場は徳島市より頂いたデータ, 排水路は現地で測量したデータを用いた. 前述の手法で 1854 年安政南海地震<sup>34)</sup>と内閣府想定の場合 3<sup>33)</sup>の 2 つの津波による川内地区での浸水・排水の過程をシミュレーションした. 計算は 2 章で示したものを空間についてはスタガード格子を用いて陽的に, 時間については leap-frog 法で差分した. 津波の計算は JAGURS を使用し, 対象地域の地形の水平分解能を 10m として, 計算時間は地震発生から 12 時間, 計算ステップは 0.2 秒とした. 初期水位は, 安政南海地震については地殻変動を Okada (1985) の方法で計算し, これに Tanioka and Satake (1996) の海底斜面の水平変位による寄与分を加えて, これをライズタイム 60 秒で与えた. 内閣府想定の場合 3 は 10 秒ごとの破壊伝播を考慮した初期水位データを用いた.

堤内の計算は, 地形の水平分解能を 25m, 計算ステップを 0.01 秒として計算を行った. 津

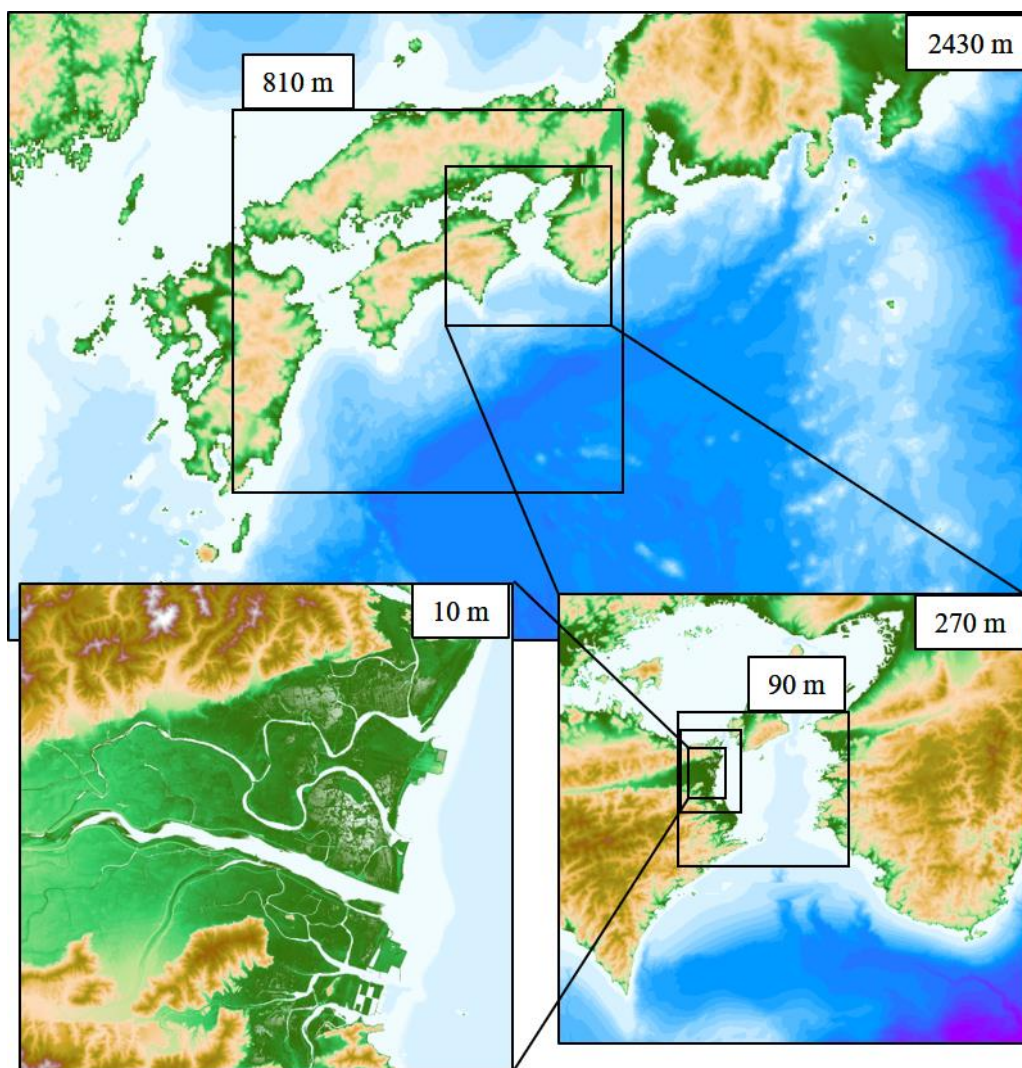


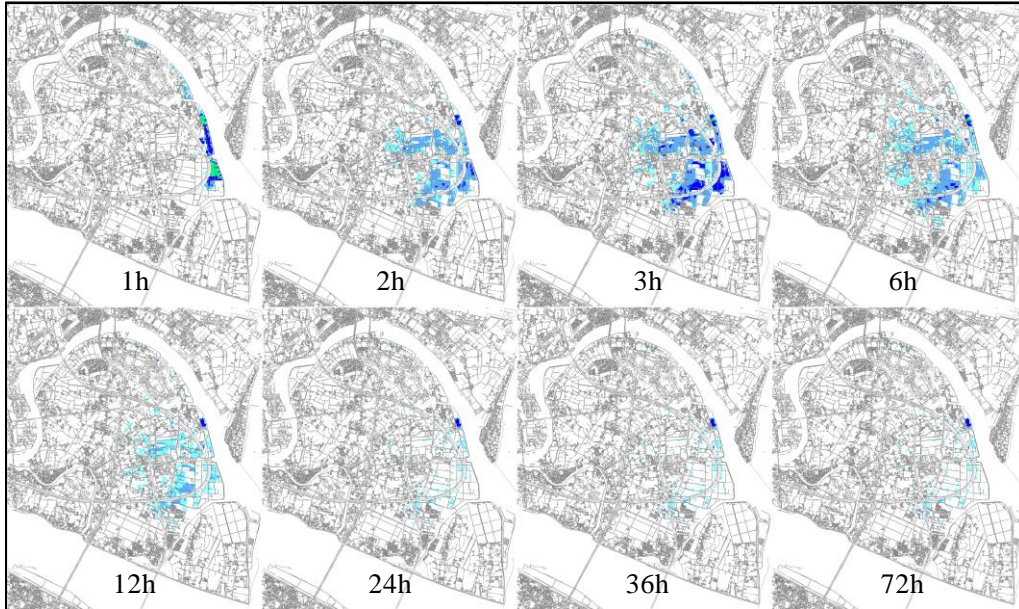
図-51 計算に使用した地形データ. 2430m・810m・270m・90m・30m・10mメッシュの6層の地形ネスティングをして計算を行った.

波のシミュレーションは 12 時間分、排水のシミュレーションは 72 時間分実施した。なお、潮汐の変動は考慮せず、潮位は過去 5 年の朔望平均満潮位である 92.1cm で固定して計算した。

計算結果を、湛水深分布の時系列について図-52 に、地域内の湛水量の時系列を図-53 に示す。1854 年の安政南海地震の場合（図-52，図-53 上段），津波は堤防を越えないものの地震発生約 1 時間後に東側の水路を通じて背後地域に浸水する。その後，盛土されている徳島自動車道をアンダーパスにより抜けつつ，より標高の低い地区中央部に向かって移動するが，排水機の働きにより徐々に排水が行われ，約 12 時間後にはほぼ排水が完了する。一方，内閣府ケース 3 の場合（図-52，図-53 下段）は，地震発生後 1 時間後に領域の北東側の広い範囲から堤防を越えて浸水し，地区中央部に広がっていく。最大の湛水深は 1m 強である。解析が終了した 72 時間後にもまだ湛水が認められる。古文書調査により 1854 年安政地震時には川内地区において長期湛水の発生をうかがわせる記述が多数確認されたものの，1854 年安政南海地震を波源とした長期湛水のシミュレーションでは地震発生から 12 時間後に排水が完了した。数値計算は必ずしも 1854 年の再現を目的としておらず，現在の地形で堤防，排水機を健全としていることから，両者の違いは堤防と排水機場による減災効果が出ていると理解できるかもしれない。しかし，液状化による地盤の沈下を考慮していないことなどの解析モデルの不完全さも関係していると考えられる。1854 年安政南海地震よりも規模が大きい内閣府の想定モデルを用いた検討では，大量の津波が陸地に流入するとともに，地殻変動による沈降量も大きいため，長期湛水が発生する可能性が高い。最終的に湛水する地域（図-52 右下）は図-45 の古文書調査を行った 1854 年に長期湛水が発生したと思われる場所と似た傾向を示しており，海岸付近は堤防の建設などにより地形が大きく変化しているが，川内地区の中央付近は安政地震の頃と同じような窪地地形のままであるとみられる。



安政南海地震



内閣府想定ケース 3

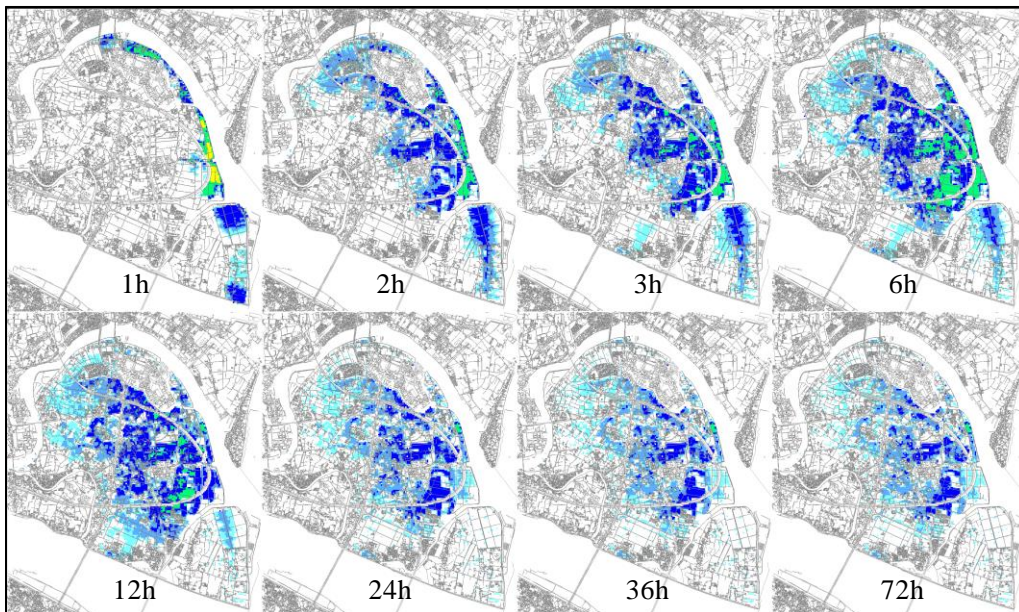


図-52 1854年安政南海地震モデル（上段）と内閣府ケース3（下段）のモデルから計算した川内地区の湛水深の時間変化

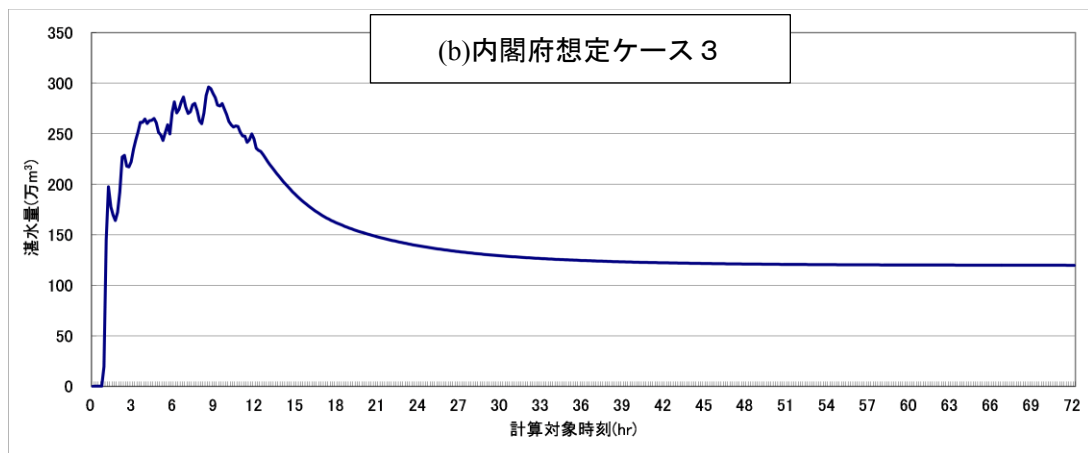
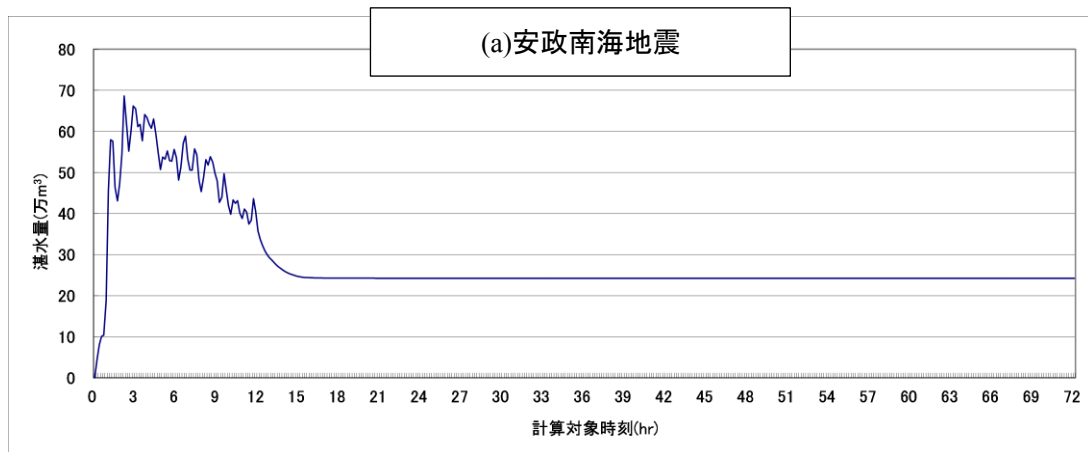


図-53 安政南海地震, 内閣府想定ケース3のモデルから計算した  
川内地区の湛水量の時間変化

### 3.2 徳島市沖洲地区

川内地区でのシミュレーションは、過去の被害と調和的な結果となった。そこで、同様な被害が起こる可能性がある徳島市沖洲地区を対象に同様の検討を行う。図-54は解析対象である徳島市沖洲地区である。この地域も標高が低く、周囲に河川や海があるため、全体を堤防で囲まれている。この堤防の高さは吉野川に面する北側と海側である東側は5m程度だが、南側と西側は2m程度であり、また南側には樋門が存在し、その先は船着き場になっており、その東側には堤防が存在しない。また、全体的にやや南側の標高が高く、北側が低くなっている。したがって南海トラフで地震、津波が発生すると、この地域では堤防が低い南側から水が入り、その後北側へ流れ、吉野川沿いの堤防周辺で水がとどまることが予想される。図-55は対象地域である徳島市沖洲地区の排水モデルである。図内の各数値は排水機場の排水能力を示している。

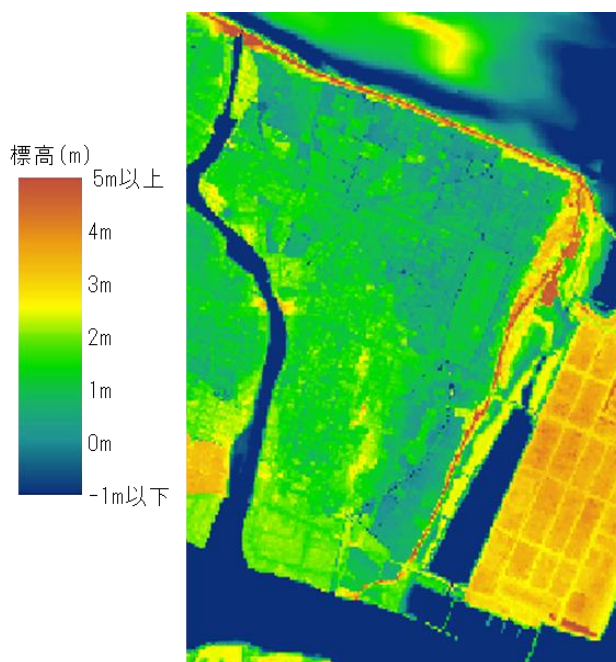


図-54 沖洲地区の地形

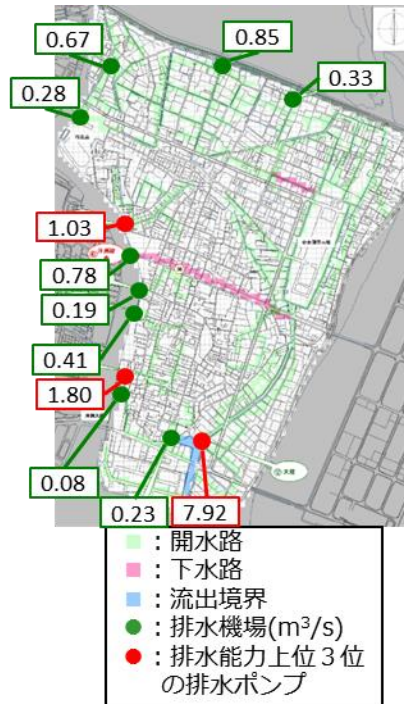
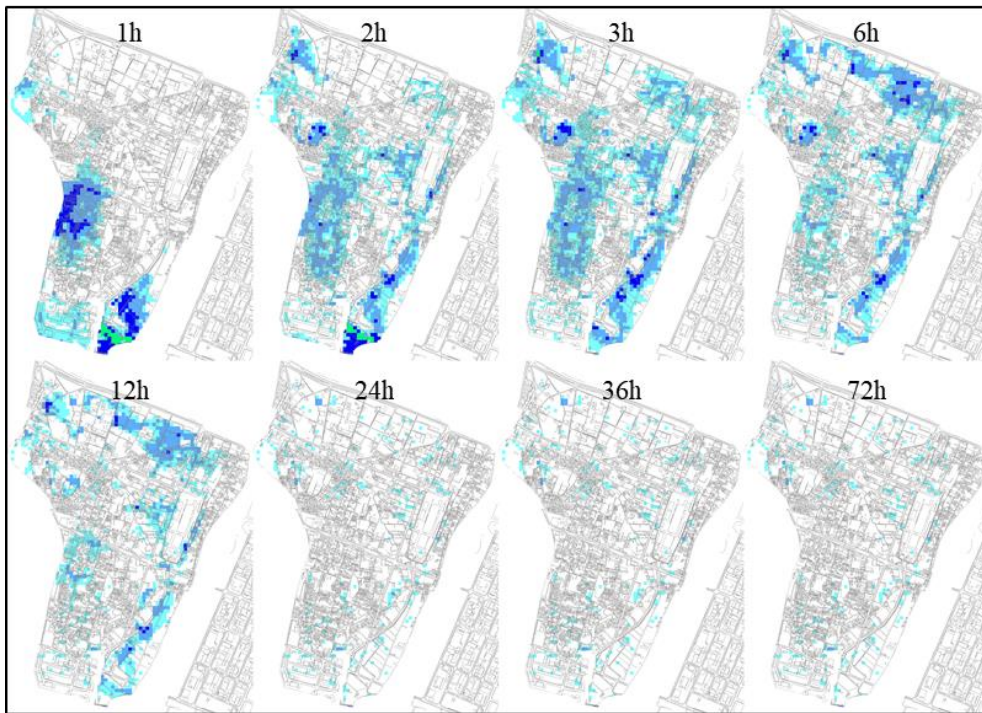


図-55 沖洲地区の排水モデル

まず、安政南海地震を入力とした場合の徳島市沖洲地区の排水のシミュレーション結果を示す。図-56は排水ポンプがすべて稼働する場合と、排水ポンプの排水能力が高いもの上位3つが停止した場合の津波による流入水の排水の様子で、図-57に地区内の湛水量の変化を示す。この地域では南海地震の場合、地震発生後約40分で津波の第一波が南東方向から到着する。その後、堤防の低い南側、西側から水が流入して、土地の低い北側へ流れていく様子が分かる。ポンプがすべて稼働すると仮定した場合は、排水能力の高いポンプは堤防の低い南側と西側にあるため、奥へ水が流れ込む前にいくらか排水でき、北側、東側の堤防沿いに溜まる水の量がポンプの一部が停止した場合より少なくなっている。すべてのポンプが稼働すると仮定した場合、約16時間で排水がほぼ完了するが、いくらかは窪地に溜り、現モデルでは排水できない。排水能力上位3つのポンプが稼働しないと仮定すると、排水完了まで約72時間かかる。上位3つのポンプが大きな仕事をしていることがわかる。

すべてのポンプが稼働



排水容量上位3つの排水ポンプ停止

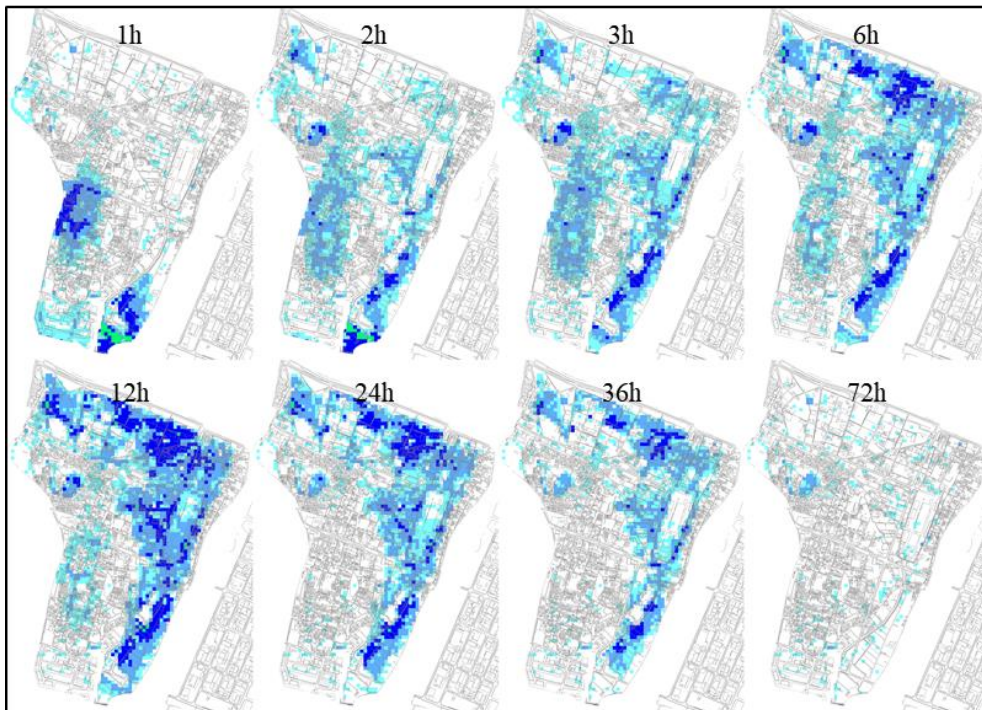


図-56 安政南海地震モデルから計算した当該地域での湛水深の時間変化  
上段はすべてのポンプが稼働するとした場合、下段は一部ポンプが停止する場合

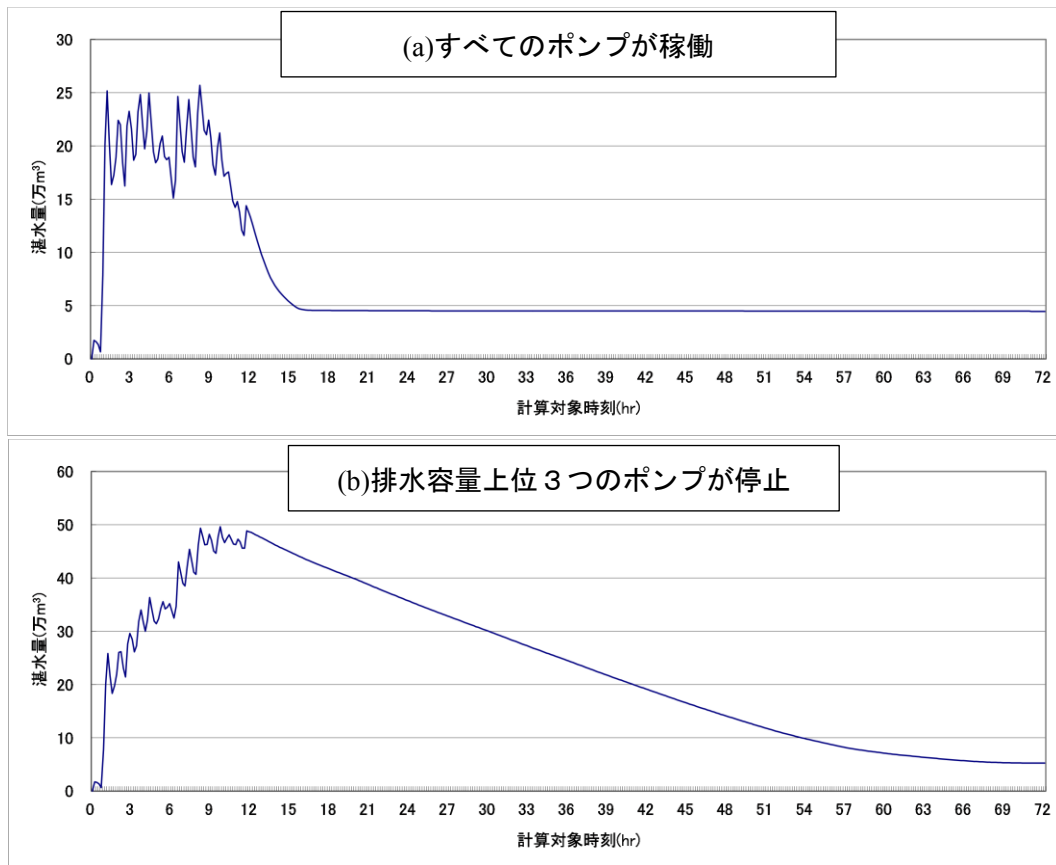


図-57 安政南海地震のモデルから計算した沖洲地区の湛水量の時間変化

次に、内閣府想定の場合3を入力とした場合の湛水深の変化を図-58、湛水量の変化を図-59に示す。地震発生1時間後には対象地域の南側から大規模な津波の浸水が確認でき、その後地域全域が浸水する。この地震は非常に規模が大きいため、地殻変動による沈降量が大きく、一部境界が朔望平均満潮位より低くなってしまい、津波の計算を終えた12時間後以降は排出した分だけ堤内に水が入ってくるといった結果となった、潮汐の変動を考慮していないため、実際にこのようなことが起こるとは言えないが、内閣府想定のような大きな地震が起こると、潮汐の変化に伴い大規模な湛水が起こる可能性があることを示唆している。

すべてのポンプが稼働

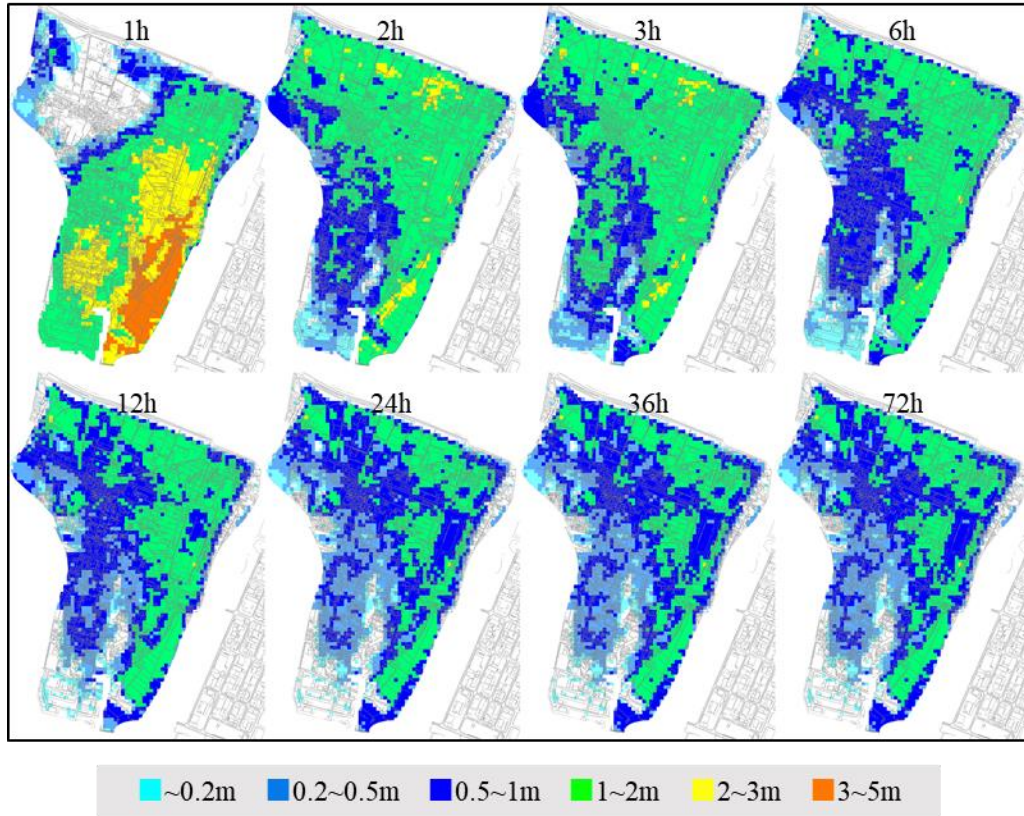


図-58 内閣府想定ケース3のモデルから計算した沖洲地区での湛水深の時間変化

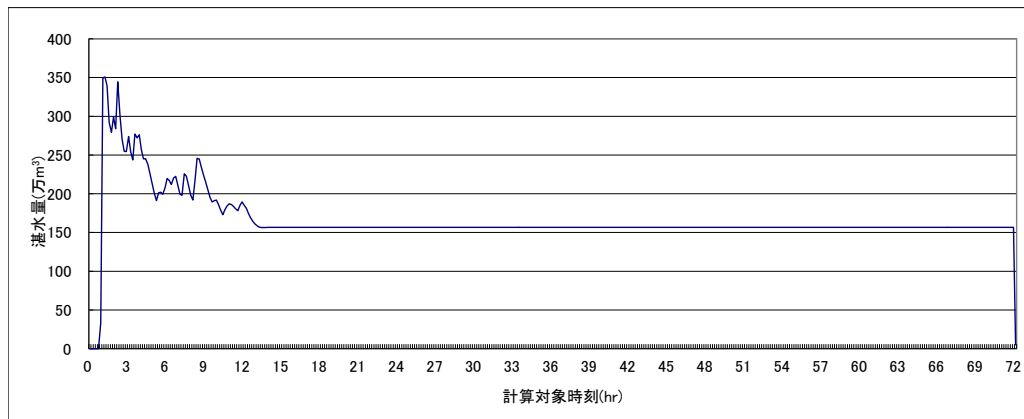


図-59 内閣府想定ケース3のモデルから計算した沖洲地区の湛水量の時間変化

### 3.3 本章のまとめ

本章では、まず徳島市川内地区で長期湛水のシミュレーションを行った。初めに安政南海地震を入力として計算を行った。古文書の時期の地形を再現することは難しいため、本論文では再現を目的とはせず、現在の堤防が存在する地形データで計算を行った結果、小さな被害で済んだ。これは現在の堤防や排水ポンプによる減災効果の大きさを示しているともいえる。一方で内閣府想定 of 巨大地震による津波を入力とすると、非常に広範囲で浸水し、被害が出た地域は古文書と調和的であった。同様のシミュレーションを徳島県沖洲地区で行うと、この地域でもある程度の湛水は起こることが分かった。特に、内閣府想定 of 地震による津波を入力とすると、一部境界が朔望平均満潮位よりも低くなってしまふことが分かり、長期湛水の高リスクが高い地域であることが分かった。



## 4章 高知県の津波の長期湛水の排水の検討方法との比較

### 4.1 高知県の長期湛水の検討方法

高知県は 2013 年に、高知市を対象として中央防災会議による 2003 年の M8.6 の南海トラフ地震が発生した際の長期湛水の対策を検討している。その中では、地震により堤防が壊れ、土地が平均海水位より低くなった土地が湛水することを想定し、その後堤防を直し排水ポンプを稼働させてどの程度の日数湛水するのかを算出している。その方法について以下に示す。

- ① 湛水量は地震による地殻変動後の標高が平均海水位より低くなる部分の体積で与える。
- ② 排水容量は解析地区に存在する排水ポンプ（またはポンプ車）が常に動くことを仮定している。なお、集水域は考えておらず、すべてのポンプが地区内の水を常に排水できるとしている。
- ③ 排水容量で湛水量を割ることによってどれだけの時間がかかるかを算出する。

この方法は簡易で使い勝手が良いが、②で集水域を設定しないというのは危険側の仮定であり、本論文の手法と比較をすることでどの程度の危険側になっているかを確認できる。また、①の湛水量については、堤防が壊れると仮定した場合はこの方法でも良いが、堤防が壊れない場合については十分に検討ができない。例えば規模の小さな津波ならば堤防を越えず被害は出ないが、大規模な津波の場合、標高が海面より高くても津波による被害が起こり得て、そのときは陸地に侵入した水は堤防が存在するがゆえに自然に排水されることはないため、長期湛水が発生する可能性がある。

### 4.2 川内地区・沖洲地区への適用と本論文の手法との比較

高知県の方法と本論文の方法による川内地区、沖洲地区の最大の湛水量と単位時間当たりの排水量を図-60 にまとめた。最大湛水量は、高知県の方法は湛水量の初期値（ここでは朔望平均満潮位よりも低い地域が湛水するとした）で、本論文の方法は排水シミュレーションの過程での最大の量(例えば図-53 等の最大値)であり、実際に堤内に入ってきた水の総量ではない。川内地区では、本論文の方法よりも高知県の検討方法の方が大幅に大きくなった。これは、川内地区の堤防による減災効果が大きいことを示唆しており、この地区で長期湛水への対策を考えるなら排水システムの整備よりも堤防の整備の方が効率的である可能性がある。また、川内地区と比べると比較的標高が高い沖洲地区では、内閣府想定ケース 3 の場合は本論文の方法の方が最大の湛水量は大きくなっているが、このケースは、流入した津波の内いくらかは堤防の内側で反射してそのまま堤外へ流れ出る水もあるため、この値で比較をすべきではない。約 15 時間後以降の定常状態となったときの値は高知県の方法による

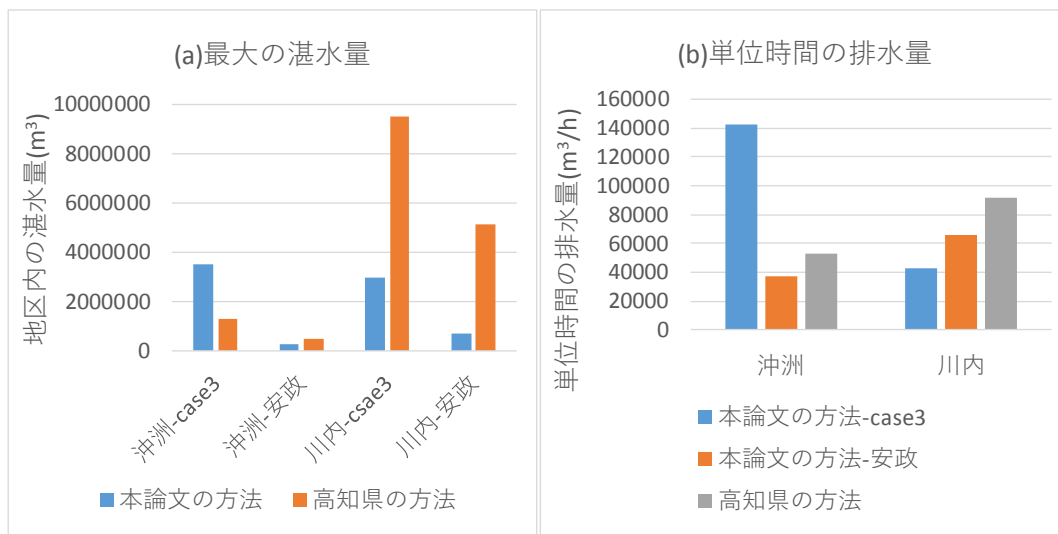


図-60 本論文の方法と高知県の方法による排水シミュレーションの最大湛水量と単位時間当たりの排水量の比較

予測と同様な値になっている。

単位時間当たりの平均排水量は、高知県の方法は、すべてのポンプの排水容量の和であり、本論文の方法は、地震発生後 12h 付近の最後に津波が流入したときから定常状態となるまでの平均的な排水量とした（直線の傾き）とした。ポンプ周辺の水が排水されきると、地区内には水があったとしてもそのポンプでは排水できなくなるため、沖洲地区のケース 3 を除くと高知県の方法の値の方がやや大きめの値となっており、高知県の方法は危険側の予測となっている。川内地区の単位時間当たりの排水量を比べると、ケース 3 の方が安政南海地震より小さい。これは、比較的大きな排水機が地区の北東部にあるが、ケース 3 の方が津波は地区の中央部まで入り込み、これらの排水機では排水できない地域に水が入ってしまうためであると考えられる。なお、沖洲地区ケース 3 の値が非常に大きいのは、流入した津波が北・東側の堤防で反射して南側の流出境界から流出しているためであり、ポンプによる排水量が大きくなっているわけではない。排水シミュレーションは高知県のような方法ではなく、ポンプの集水域を考量できる本論文の方法の方がより現実に近く、安全側の予測ができるといえる。

湛水量については、この 2 地区の例では高知県の方法の方が大きくなった。しかし、堤防が存在し標高が海面以下となる場所がないような地域でも、規模の大きな津波の場合は浸水する恐れがある。こういった場合は堤防が存在するがゆえに流入した水が排水路や排水ポンプなしに堤外へ出ていくことはなく、高知県の手法ではこういったリスクを評価することができない。復旧の計画を検討するには、堤防が壊れない場合の検討は湛水量は本論文のように津波シミュレーションを行って評価をし、堤防が壊れる場合の検討は高知県のような方法で評価をし、比較を行うことが望ましい。

### 4.3 本章のまとめ

本章では、高知県ですで行われた長期湛水のリスクの評価方法と本論文の手法との比較を行った。排水のシミュレーションについては高知県の方法では各排水ポンプの集水域を考えていないため、本論文の手法の方が良いといえる。排水開始前の湛水状態の想定については、どちらの手法も試す必要がある。高知県の方法は、堤防が壊れることを仮定した方法であるが、津波は平均海面以上の地域でも浸水する可能性があり、陸地の中にある窪地に水が溜まることも考えられるため、正確に湛水地域を想定するためには津波のシミュレーションも行う必要がある。

## 結論

本論文では、南海トラフの地震を対象として、まだ十分な議論がなされていない津波に関連する2つの事象について主に数値解析を用いて検討した。

第1部では、津波の即時予測精度向上について取り組んだ。まず、南海トラフ地震を対象とした3967シナリオの断層モデルを用いて、徳島県浅川地区、三重県尾鷲地区に襲来する津波をシミュレーションし、その結果を津波データベース化した。次にこのデータベースにMulti-index methodを適用して、沖合観測点すべてを使った予測実験を行ったところ、浅川に比べて尾鷲の予測精度が低いことが分かった。これは、沖合の津波観測点が尾鷲付近よりも浅川付近に多く存在するため、Multi-index methodにおけるシナリオ選択アルゴリズムにおいて、浅川付近の津波の特性が似ている津波シナリオが選ばれ易いことが原因であると考えられた。そこで、予測地点ごとに異なるシナリオを選ぶこと許すとともに、焼きなまし法で予測地点ごとに予測に用いるべき最適な観測点を選択した。焼きなまし法により選ばれた観測点は予測対象地点付近に多く位置したが、同時に遠方の観測点も選ばれた。この結果は、本手法による予測では予測対象地点付近の津波の観測に加えて、断層域の広がりに関する情報も必要であることを示唆している。この選ばれた観測点のみを使って予測実験を行ったところ、予測精度が大幅に改善した。つまり、沖合観測網を用いたデータベース検索による津波高予測を行う際には、予測対象地点ごとに異なる最適な観測点のセットを用いて、異なるシナリオを選ぶと予測精度が向上することが明らかになった。

また、沖合津波高の回帰による沿岸津波高の予測も試みた。リッジ回帰では、本論文で改善したデータベース検索より精度の悪い結果となった。一方でガウス過程では、より高精度な予測モデルを作ることができた。ただし、これらの手法のどれが良いのかは、利用する津波データベースに依存するため、他の地域に適用する際には、様々な方法を比較することが望ましいと考えられる。

次に、断層の破壊過程の想定の違いが本検討で作成した津波即時予測システムにどのような影響を与えるのかについて検討した。まずライズタイムの違いを考えた。想定(ライズタイム60秒)よりも長いライズタイムの地震が発生すると、全体的に過小評価となり、想定よりも短いライズタイムの地震が発生すると全体的に過大評価となることが分かった。津波の浸水深や到着時間のハザードマップを作成するときは危険側を考慮してライズタイム0秒で計算することが一般的である。しかし、津波予測のための津波データベースを作成する際にライズタイム0秒で計算し本論文のような予測モデルを適用すると、実際に起こる地震はライズタイム0秒よりもゆっくりとした現象になると考えられるので、全体的に過小評価になりやすいということになる。つまり、ライズタイムの評価は難しいが、ハザードマップを作成するときの危険側と本論文の予測モデルの危険側は異なる点は注意が必要である。また、破壊伝播を考慮した疑似的な計算結果に対しても検討を行った。その結果、デ

データベース検索による予測が最も断層の破壊過程の想定の違いの影響を受けにくいことが分かった。ガウス過程もそれに準ずる精度であった。破壊伝播を考慮し、ライズタイムを 120 秒とした場合の予測は非常に精度が悪かった。これは想定よりもゆっくりとした地震であるため、このような場合にも備えるにはデータベースにこのようなシナリオを追加することが望ましいと考えられる。しかしながら、このような特別なケースを除くと、RMSE で 1 m 未満での予測が可能であった。

沖合の津波高よりも浸水深分布の方が被害に直結するため、最後に浸水深分布の即時予測について検討した。まず、対象地域に浸水する総水量と沖合の津波高を比較した。この 2 つの値には緩やかな相関はあるものの、津波高が高くても浸水量は少ない場合などが見られたため、津波高を正確に予測できたとしても浸水深分布を正確に予測することは難しいとみられる。次に、対象地域に流入する浸水量がほぼ同じシナリオの浸水深分布を比較した。これは、浸水量が同じ時浸水深分布も同じになるのであれば、津波高に代わって浸水量を用いて、精度良い浸水深分布が得られると推察されたためである。しかし、ほぼ同じ浸水量でも浸水深分布は大きく異なるケースがあった。これらの結果は浸水深分布には津波高のみではなく、その津波の波長や予測地点での地殻変動量が大きく影響しているためであると考えられる。したがって、ガウス過程やリッジ回帰によって浸水深分布の予測モデルを作るならば、メッシュごとに予測モデルを作る必要があるといえる。

一方でデータベース検索であれば、一番近い浸水深分布を見つけることができるようにアルゴリズムを改良すればよい。そこで本論文では津波高予測のために最適な沖合観測点を選択したように、浸水深分布が近くなるようなシナリオを見つけることができる観測点の選択を行った。その結果、津波高予測のための観測点配置より若干遠方の情報を多めに使うように観測点が選択された。さらに、予測対象地点から最も近い電子基準点での地殻変動量もデータベース検索の情報として取り入れると精度がさらに向上した。しかし、観測点が存在しない海域の滑り域の違いを区別できずに予測に失敗するケースも見られた。本論文では地震発生から 5 分での予測を試みたが、これよりも長い時間の津波波形を用いて予測を行うと、観測点が存在しない海域で発生したの津波が既設の観測点に届き、そのような海域の情報を得ることができるため、津波警報の逐次更新を行えば精度は改善されると考えられる。

本論文で実施した解析から、浸水深分布の予測には十分な量のシナリオと、対象とする地震が発生しうる海域全体にわたる津波の観測網が必要であることが示唆される。津波データベースを用いた予測はデータベース検索や回帰による予測、どちらもデータベースに無い地震が発生した際には予測が困難であり、データベースの充実度は予測精度に直結する。したがって、対象とする地震の発生メカニズムの解明し、十分な量のシナリオを用意しておくことが重要である。

なお、本研究ではデータベース検索において、最適な観測点を選択したが、この方法は新たな観測網を作る際に、どこに観測点を置くべきかという問いに答えることができる。まず

観測網を設置したい海域全体に適当に多数の観測点を仮定し、予測システムを作りたいすべての地域について遡上計算を行い津波データベースを作る。そして、すべての予測地点に対して観測点選択のアルゴリズム適用する。そのときの評価関数は全予測対象地点での予測誤差として、予算から決まる観測点数を拘束条件として探索すればよい。

第2部では、南海トラフを震源とする地震が発生したときの徳島市川内地区、沖洲地区の長期湛水のシミュレーションを行った。

はじめに、古文書から徳島県での過去の長期湛水の被害について調査をした。その結果、昭和南海地震で徳島市や小松島市で長期湛水の被害があったことが分かった。また安政南海地震の時の川内地区での被害の様子が記載されていた。

次に、川内地区を対象として津波の遡上計算と、排水のシミュレーションを行った。その結果、M9クラスの地震に対しては、72時間経っても排水が完了されない可能性があることが分かった。また、その湛水箇所は過去の南海トラフ地震に関する古文書調査と調和的なものであった。徳島県沖洲地区においても同様の解析を実施した。安政南海地震を入力とした場合、ポンプがすべて稼働するとすると、約16時間、排水能力の高い上位3つのポンプが稼働しないとすると、約72時間排水完了までかかることが分かった。また、内閣府想定ケース3では、地殻変動量が大きく、南側の一部境界が朔望平均満潮位より低くなってしまい、常に水が流入する結果となった。

高知県の長期湛水の想定手法との比較も行った。高知県の手法は、地震によって堤防が破堤し、地殻変動により平均海面より標高が低くなった部分に海面と同じ高さまで水が入り、その後堤防を再構築して排水を行うという解析である。一方、本研究では津波が堤防を越えて流入するとすぐに排水路および排水ポンプで堤外へ排出されるという動的な解析である。このため、当然結果は異なってくるが、次に述べる興味深い知見が得られた。最大の湛水量を比較すると、川内地区では高知県の方法の方が危険側の予測になった。これは、川内地区は全体的に標高が低いためであり、本論文の手法では堤防は健全のままとしているので、この違いは堤防による減災効果をよく示している。一方で内閣府想定ケース3が起きた際の沖洲地区での結果は一部の境界の標高が満潮位よりも低くなったため、高知県の検討方法とほぼ同じになった。また、単位時間当たりの排水量を比べると、本検討の方が危険側の予測となった。これは高知県の方法では排水機場の集水域を考慮せず、常に排水性能最大の水量が排出されるためである。しかし、実際には排水が進むにつれて水域が減り、効果のある排水機場が減っていくことを考慮しなければならない。また、本稿の検討では現れなかったが、標高が海面より高い地域でも、大きな津波の場合は浸水する可能性があり、その際は堤内に湛水が発生すると考えられる。したがって、長期湛水が発生する場所やその湛水量については高知県の手法に合わせて本論文の検討も行い、排水過程については本検討の手法を用いることで、より多様なリスクに備えることができるといえる。

この解析モデルは長期湛水への対策を考える上で利用することができる。例えば、ハード

対策として排水機場の整備が挙げられるが、長期湛水対策を考えて排水機場を新設する場合はその場所や排水容量、操作盤などの浸水してはいけない設備の高さを決めることができる。また、本検討で用いた排水機場は雨水の排水用に整備されているものであり、これらを津波の長期湛水対策に用いるのであれば耐震化や、大量の土砂への対策等をする必要がある。これらを整備して長期湛水対策をするのであれば、その優先順位を考えることもできる。他に、排水ポンプ車の配置や、配置場所への経路などをあらかじめある程度考えておくことができるため、復旧へのタイムラインの策定にも用いることができる。また、ソフト対策としては、十分な備蓄をしておくことが挙げられるが、例えば今回の検討では、川内地区では内閣府想定のカース 3 の地震が起こった際には排水機場が稼働すると仮定しても地震発生後 3 日経っても水が抜けない可能性がある地域があることがわかった。したがって、こういった地域では 3 日以上孤立することを念頭に置いて食料や医療品などを備蓄しておく必要がある。

今後の課題として、潮位の変動を考慮することが挙げられる。これによって今回の内閣府想定のカース 3 を入力とした場合の沖洲の解析のようになるときに、潮位の変動に応じた堤内の水の流れをシミュレーションできるようになる。他に、瓦礫によって排水路や下水路が詰まってしまった場合の検討や、津波が下水路をさかのぼってマンホールから水があふれる現象も考える必要がある。

## 参考文献

1. 中央防災会議：南海トラフ地震防災対策推進基本計画，  
[http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/nankaitrough\\_keikaku.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/nankaitrough_keikaku.pdf), 参照 2017-10-18.
2. 中央防災会議: 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/pdf/houkoku.pdf>, 参照 2017-10-18
3. Tatehata, H., The new tsunami warning system of the Japan 49 Meteorological Agency, in Perspectives on Tsunami Hazard 50 Reduction, Observations, Theory and Planning, pp. 175-188, 51 1997 (also in Sci. Tsunami Hazards, Vol.16, pp. 39-49, 1997).
4. 気象庁：津波を予測する仕組み，  
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunami/ryoteki.html>, 参照 2017-10-18.
5. 気象庁: 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,  
[http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tsunami-kaizen/20tsunami\\_keihou\\_kaizen\\_all.pdf](http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tsunami-kaizen/20tsunami_keihou_kaizen_all.pdf), 参照 2017-10-18.
6. Koshimura, S., R. Hino, Y. Ohta, H. Kobayashi, A. Musa, and Y. Murashima: Real-time tsunami inundation forecasting and damage mapping towards enhancing tsunami disaster resiliency, American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, Abstracts, NH23B-05, 2014.
7. Kanazawa, T., K. Uehira, M. Mochizuki, T. Shinbo, H. Fujimoto, S. Noguchi, T. Kunugi, K. Shiomi, S. Aoi, T. Matsumoto, S. Sekiguchi, and Y. Okada, S-NET PROJECT, CABLED OBSERVATION NETWORK FOR EARTHQUAKES AND TSUNAMIS, SubOptic 2016, WE2B.3, 2016.
8. Kaneda, Y., K. Kawaguchi, E. Araki, A. Sakuma, H. Matsumoto, T. Nakamura, S. Kamiya, K. Ariyoshi, T. Baba, M. Ohori, and T. Hori, Dense Ocean floor Network for Earthquakes and Tsunamis (DONET) –Development and Data application for the mega thrust earthquakes around the Nankai Trough, American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, Abstracts, S53A-1453, 2009.
9. Nagai, T., Development and improvement of the Japanese coastal wave observation network (NOWPHAS), Journal of JSCE, No.609(VI-41), pp. 1-14, 1998 (in Japanese).
10. Takahashi, N., K. Imai, M. Ishibashi, K. Sueki, R. Obayashi, T. Tanabe, F. Tamazawa, T. Baba, and Y. Kaneda, Real-Time Tsunami Prediction System Using DONET, Journal of Disaster Research, Vol.12, No.4, pp 766- 774, 2014.
11. Yamamoto, N., S. Aoi, K. Hirata, W. Suzuki, T. Kunugi, and H. Nakamura: Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast, Earth, Planets and Space, Vol.68, No.1, id.128, 2016.
12. Baba, T., N. Takahashi, and Y. Kaneda: Near-field tsunami amplification factors in the Kii



- Peninsula Japan for Dense Oceanfloor Network for Earthquakes and Tsunami (DONET). *Marine Geophysical Research*, Vol.35, No.3, pp 319-325, 2014.
13. Igarashi, Y., T. Hori, S. Murata, K. Sato, T. Baba, and M. Okada: Maximum tsunami height prediction using pressure gauge data by Gaussian process at Owase in the Kii Peninsula, Japan, *Marine Geophysical Research*, Vol.37, No.4, pp361-370, 2016.
  14. 東北地方整備局：津波による湛水は92%解消しました～緊急排水対策は最終段階へ～, [http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/kisya/saigai/images/34655\\_1.pdf](http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/kisya/saigai/images/34655_1.pdf), 参照 2017-10-18.
  15. 三神厚, 辻野典子: 1946年昭和南海地震による高知市の河川堤防被害とその要因, *歴史地震*, Vol. 27, pp. 27-39, 2012
  16. 高知県：南海地震長期浸水対策検討結果, [http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/files/2015041500011/00\\_all.pdf](http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/files/2015041500011/00_all.pdf), 参照 2017-10-18
  17. 高知県：南海トラフ地震宿毛市長期浸水対策検討結果, <http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/010201/files/2015041500035/001.pdf>, 参照 2017-10-18
  18. 地震本部：南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）, [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou\\_pdf/nankai\\_2.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/nankai_2.pdf), 参照 2017-10-18
  19. Hirata, K., H. Fujiwara, H. Nakamura, M. Osada, T. Ohsumi, N. 99 Morikawa, S. Kawai, T. Maeda, H. Matsuyama, N. Toyama, T. 100 Kito, Y. Murashima, Y. Murata, T. Inouse, R. Saito, S. Akiyama, 101 M. Korenaga, Y. Abe, N. Hashimoto and T. Hakamata, Integrated 102 Probabilistic Tsunami Hazard Assessment against possible 103 tsunamis along Nankai Trough, Sagami Trough, and Japan Trench, 104 IASPEI Symposia, S23-P-11, 2017.
  20. 地震本部：津波評価, [http://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan\\_tsunami-recipe.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan_tsunami-recipe.pdf), 参照 2017-10-18
  21. Okada, Y., Surface deformation due to shear and tensile faults In a 116 half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 117 75, No. 4, pp. 1135-1154, 1985.
  22. Tanioka, Y. and K. Satake, Tsunami generation by horizontal 119 displacement of ocean bottom, *Geophysical Research Letters*, Vol. 120 23, No.8, pp 861-864, 1996.
  23. Kajiura, K., The leading wave of a tsunami, *Bulletin of the 122 Earthquake Research Institute*, Vol. 41, pp 535-571, 1963.
  24. Baba, T., N. Takahashi, Y. Kaneda, K. Ando, D. Matsuoka, and 124 T.Kato, Parallel implementation of dispersive tsunami wave 125 modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami, 126 *Pure and Applied Geophysics*, Vol.172, No.12, pp. 3455-3472, 127 2015.
  25. Johnson, D. S., C. R. Argon, L. A. McGeoch, C. Schevon, 129 Optimization by Simulated Annealing: An Experimental 130 Evaluation; Part I, Graph Partitioning, *Operations Research*, Vol 131 37, No. 6, pp 865-892, 1989.
  26. 松本浩幸, 三ヶ田均, 大町達夫, 井上修作, ゆっくりとした断層破壊による地震津波について, *海岸工学論文集*, Vol51, pp281-285, 2004

27. Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono and N. Umino: Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, Vol 117, B2, B02311, 2012.
28. 四国地方総合開発審議会: 四国地方地盤変動調査最終報告書—昭和二十一年十二月二十一日南海大地震当時及びその後に起こった四国地方地盤変動の実体, 1956.
29. 徳島県:南海地震を知る徳島県の地震・津波碑, [http://www.jishin.go.jp/main/bosai/kyoiku-shien/13tokushima/material/tksm\\_22\\_3.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/bosai/kyoiku-shien/13tokushima/material/tksm_22_3.pdf), 参照 2017-10-18.
30. 三好学, 田村隆雄, 安芸浩資, 藤田真人: 徳島市上八万地区における降雨量と内水氾濫による浸水被害との関係, *土木学会四国支部平成 25 年自然災害フォーラム論文集*, pp.69-77, 2013.
31. 本間仁: 低溢流堰堤の流量係数 (第 1 編), *土木学会誌*, Vol26, No.6, pp 635-645, 1940.
32. 本間仁: 低溢流堰堤の流量係数 (第 2 編), *土木学会誌*, Vol26, No.9, pp 849-862, 1940.
33. 内閣府: 南海トラフの巨大地震モデル検討会, <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>, 2012 参照 2017-10-18.
34. 相田勇: 南海道沖の津波の数値実験, *地震研究所彙報*, Vol. 56, pp. 713-730, 1981.

## 本研究に関する公表論文

### 【第1部】

Taniguchi, J., K. Tagawa, M. Yoshikawa, Y. Igarashi, T. Ohsumi, H. Fujiwara, T. Hori, M. Okada, T. Baba, Selection of Tsunami Observation Points Suitable for Database-Driven Prediction, Journal of Disaster Research, Vol13, pp 245-253, doi:10.20965/jdr.2018.p0245, 2018.

### 【第2部】

谷口純一, 馬場俊孝, 三好学, 安芸浩資, 徳島市を対象とした津波による流入水の堤外排水シミュレーション, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol72, p. I\_1525-I\_1530, 2016.

## 謝辞

本論文は著者が徳島大学大学院博士後期課程において行った研究の成果を取りまとめたものです。

徳島大学教授 馬場俊孝先生には指導教官として本論文の初期の段階から多くのご助言やご指導を賜りました。また、数多くの方々と巡り合う機会も与えて頂きました。ここに深く感謝の意を表します。同研究室の准教授 中田成智先生にも、本論文についてご指導やご助言を頂きました。深く感謝いたします。

徳島大学教授 中野晋先生には、ご多忙にもかかわらず本論文の主査を引き受けて頂き、審査を通して貴重なご意見を頂きました。深く感謝いたします。

徳島大学教授 武藤裕則先生には、ご多忙にもかかわらず本論文の副査を引き受けて頂き、審査を通して貴重なご意見を頂きました。深く感謝いたします。

東京大学教授 岡田真人先生、同研究室の五十嵐康彦博士、吉川真史氏には、機械学習の様々な手法についてご教授頂き、津波予測の方法について貴重な議論をさせて頂きました。深く感謝いたします。

防災科学技術研究所 山本直孝博士、海洋開発研究機構 堀高峰博士、気象庁気象研究所 対馬弘晃博士には、津波予測の手法や現状などについて貴重な議論、ご意見を賜りました。深く感謝いたします。

徳島大学准教授 永田裕一先生には、授業を通して最適化問題を解くための技術についてご指導頂きました。深く感謝いたします。

ニタコンサルタント株式会社の安芸浩資博士、三好学氏には、インターン生として受け入れて頂き、長期湛水シミュレーションの方法等について貴重なご意見を頂きました。深く感謝いたします。

東海大学教授 三神厚先生には、筆者に博士後期課程への進学を勧めて頂きました。博士後期課程での学びや経験は私にとって非常に大きなものとなりました。深く感謝いたします。

防災科学技術研究所には、津波データベースのもととなる地震シナリオ群をご提供頂きました。記して感謝いたします。

また、著者が在籍した地震工学研究室の卒業生ならびに在校生の方々、秘書の楠則子氏には有形無形のご援助を頂きました。深く感謝いたします。

最後に、著者を励まし支えてくれた家族に感謝の意を表します。