

博 士 論 文

南海トラフ巨大地震下の岡山市に來襲する
津波の予測法および氾濫特性に関する検討

平成 30 年 3 月

工 代 健 太

岡山大学大学院 環境生命科学研究科

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 南海トラフ巨大地震と岡山市沿岸の津波想定	1
1.1.2 岡山市の津波に対する脆弱性	1
1.2 本研究の目的と概要	3
1.2.1 本研究の目的と研究内容	3
1.2.2 岡山市沿岸の津波挙動のリアルタイム予測法についての検討	3
1.2.3 岡山市の微地形を考慮した津波遡上解析	3
1.3 本論文の構成	4
参考文献	5
第2章 既往研究の経緯と本研究とのかかわり	6
2.1 津波のリアルタイム予測法についての既往研究の概要	6
2.2 岡山市の津波氾濫特性の検討についての既往研究の概要	8
参考文献	10
第3章 鳴門・明石海峡の波形を用いた岡山市沿岸の津波波形の予測法の検討	12
3.1 本章の概要	12
3.2 津波伝播解析の概要	13
3.2.1 計算範囲および解析格子	13
3.2.2 格子サイズ・海底地形の再現および境界条件	14
3.2.3 支配方程式および差分法	15
3.2.4 対象震源ケースと津波の再現方法	15
3.2.5 津波伝播計算の精度検証	16
3.3 岡山沿岸までの津波伝播ルート of の検討および簡易予測モデルの構想	17
3.3.1 岡山市沿岸までの津波伝播ルートについての検討	17

3.3.2	簡易予測モデルの構想	19
3.4	簡易予測モデル構築に関する各検討	20
3.4.1	各海峡部の津波波高と山田港の波高の相関の検討	20
3.4.2	各海峡部（外側）の津波が山田港に到達するまでの時間の検討	22
3.4.3	豊後水道からの津波による影響の検討	23
3.5	簡易予測モデルの適用および精度検証	25
3.6	潮汐場での簡易予測モデルの適用性の検討	28
3.6.1	津波と潮汐の同時解析	28
3.6.2	潮汐場における簡易予測モデルの適用方法および精度検証	29
3.7	まとめ	33
	参考文献	34
第4章	紀伊水道入口部の津波波形を用いた岡山市沿岸の津波ピークのリアルタイム予測法の検討	36
4.1	本章の概要	36
4.2	津波伝播解析の概要	37
4.3	簡易予測法の着想と方針	39
4.4	紀伊水道の津波挙動と波形抽出点の位置の選択	41
4.5	フーリエ解析とその適用方法	43
4.5.1	フーリエ解析の説明	43
4.5.2	フーリエ解析の適用方法	43
4.6	波高相関関係式の検討	45
4.6.1	地点間の波高相関関係の検討	45
4.6.2	数値実験による波高相関関係式の妥当性についての検討	51
4.7	山田港における振幅の基準の検討	53
4.7.1	振幅の基準の検討方針	53
4.7.2	波Ⅰの振幅の基準の検討	53
4.7.3	波Ⅱおよび波Ⅲの振幅の基準の検討	55
4.8	各海峡外側の津波到達時刻についての早期予測法の検討	57
4.9	簡易予測法の適用および予測精度の検証	59

4.9.1 簡易予測法の適用手順	59
4.9.2 予測精度の検証	60
4.10 潮汐場における簡易予測法の適用および精度検証	65
4.11 まとめ	68
参考文献	70
第5章 微地形を考慮した岡山市の津波氾濫特性の検討	71
5.1 本章の概要	71
5.2 岡山市の用水路の状況と特徴	73
5.3 用水路を考慮した津波氾濫解析	74
5.3.1 氾濫解析モデルおよび計算格子	74
5.3.2 地形データの作成および初期条件	74
5.3.3 震源ケースと津波の再現方法	75
5.3.4 計算ケース	75
5.3.5 解析結果	76
5.4 水路網の流れを1次元計算する手法の導入	79
5.4.1 本節の目標および概要	79
5.4.2 計算格子の作成方法	79
5.4.3 用水路網計算の概要	80
5.5 用水路および建物を考慮した津波氾濫解析	83
5.5.1 本節の概要	83
5.5.2 建物の再現方法	83
5.5.3 解析結果	84
5.6 まとめ	86
参考文献	87
第6章 結論	88
謝辞	90

第1章

序論

1.1 研究の背景

1.1.1 南海トラフ巨大地震と岡山市沿岸の津波想定

駿河湾から四国沖の海底に走る南海トラフでは、約100年から150年の周期で海底地震が繰り返し発生し、津波が日本列島の各地域を襲ってきた。1946年の紀伊半島沖を震源とする南海地震から今日に至るまでの約70年間、南海トラフでは大きな海底地震は起こっておらず、政府の地震調査委員会の想定では今後30年間で約70から80%の確率で次の巨大地震が発生すると想定されている。

2011年の東日本大震災以降、内閣府や各地方自治体は東海地震、東南海地震および南海地震の3連動地震（以下南海トラフ巨大地震）を想定し津波対策を進めている。2012年の内閣府の中央防災会議（以下中防災）では南海トラフ巨大地震を想定した津波シミュレーションを行い、西日本の各沿岸部に到達する津波波形や各地域における津波遡上状況を検討した。その結果、南海トラフ巨大地震が発生した場合、穏やかな瀬戸内海に面する岡山県岡山市にも2mから3m級の津波が数波に渡って押し寄せることが明らかになった。羽島ら¹⁾による既往の南海地震における瀬戸内海の津波高に関する調査においても、例えば1854年の安政南海道地震では岡山県沿岸に波高が2mから3mの津波が到来した可能性が指摘されている。以上から南海トラフ地震時にこのクラスの津波が岡山市を襲う可能性が十分に考えられる。

1.1.2 岡山市の津波に対する脆弱性

図1-1に岡山市南部の標高分布図を示す。ここから児島湾に面する岡山市の臨海地域は

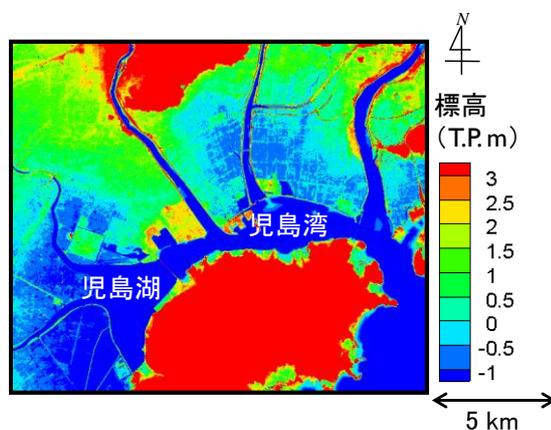


図 1-1 岡山市臨海部の標高分布図

海拔ゼロメートル地帯が広がっていることが分かる。さらに、臨海地域のほとんどの部分は地盤が軟弱な干拓地で占められており、岡山県危機管理課が公開している液状化危険度マップ（図 1-2）²⁾から液状化の危険性が非常に高い地域であることが分かる。図 1-3 に同岡山県危機管理課が公開している南海トラフ地震時の岡山市の津波浸水想定（2013 年）³⁾の結果を示す。津波の浸水が海岸から 5 km 以上におよび、臨海地域の広大な範囲が津波により水没することが予測されている。以上のように岡山市は津波災害に対して非常に脆弱な土地であり、南海トラフ地震時には甚大な津波被害が想定されている。

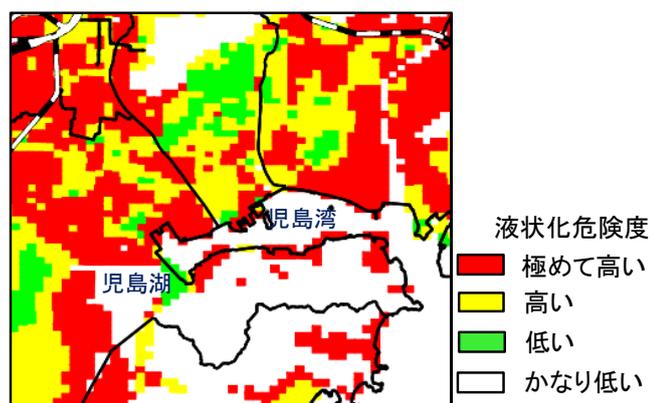


図 1-2 岡山市の液状化危険度分布²⁾

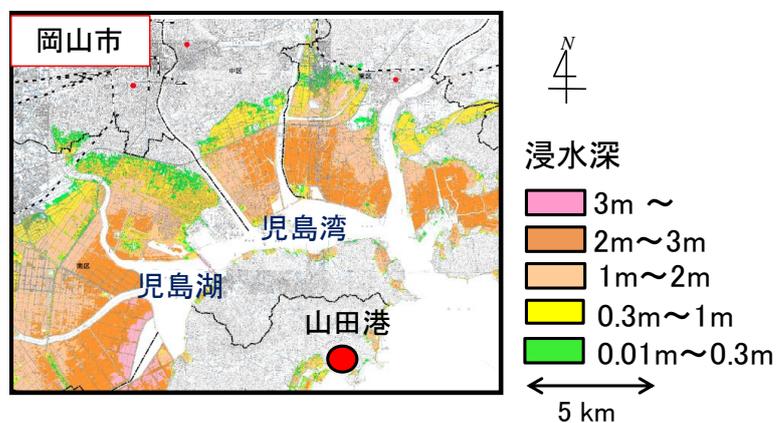


図 1-3 岡山市の津波浸水想定³⁾

1.2 本研究の目的と概要

1.2.1 本研究の目的と研究内容

本研究では今後の岡山市の津波対策に貢献するため、岡山市沿岸の津波挙動を簡易的にリアルタイム予測する手法の検討と岡山市の微地形を考慮した津波氾濫過程の検討を行う。1.2.1および1.2.2にそれぞれの研究内容について概要を示す。

1.2.2 岡山市沿岸の津波挙動のリアルタイム予測法についての検討

地震下において岡山市沿岸の津波の高さや到達時刻を正確に予測することは、津波氾濫が進む過程やその被害の大きさをあらかじめ見積もり、避難場所や避難継続時間など住民の津波避難の成否を分ける判断を臨機応変に行うために重要である。津波のリアルタイム予測法についての研究は数多くなされているが、現時点では瀬戸内海などの浅海域では十分な予測精度を保つことが困難であることが分かっている。そこで本研究では津波伝播解析の結果をもとに波源域から岡山市沿岸に至るまでの各海域間の波高の相関関係と津波到達時間差についての詳細な検討を行う。そして主にその結果を用いて波源に近い海域で観測された津波波形から岡山市沿岸の最大津波高および津波到達時刻を簡易的に予測する手法を構築する。

1.2.3 岡山市の微地形を考慮した津波遡上解析

津波避難経路や避難場所の検討を適切に行うためには、微地形の影響を考慮した津波氾濫解析により、津波氾濫過程を詳細に把握する必要がある。岡山市の土地の特徴として、網状に張り巡らされた用水路（以下用水路網）がある。特に臨海部から内陸部に向かって伸びる用水路も複数見られることから、南海トラフ地震時に用水路網を伝った津波が先に氾濫することで各地点の津波浸水開始時刻が大幅に早まり、津波の人的被害の深刻化を招く危険性が考えられる。岡山市の津波氾濫解析は工代ら⁴⁾、赤穂ら⁵⁾により行われているが、用水路網の影響は考慮されていない。そこで本研究では、用水路を考慮した岡山市の津波解析を行い、用水路が津波氾濫過程に与える影響を検討する。さらに、用水路に加え家屋や主要な道路の影響も考慮した津波氾濫解析を行い、岡山市における津波氾濫特性や今後の津波避難対策の方針について検討する。

1.3 本論文の構成

ここでは論文の構成について述べる。第1章では本研究の背景および概要について記している。第2章では津波のリアルタイム予測法および岡山市の微地形を考慮した津波氾濫解析についての既往研究の経緯と本研究とかわりについて説明する。第3章および第4章では津波のリアルタイム予測法に関する研究内容について説明する。第3章では波源域から岡山市に至るまでの津波の伝播経路について説明し、鳴門海峡および明石海峡の津波波形から山田港の津波波形を予測する手法についての検討内容を記す。第4章では両海峡部よりもさらに波源域に近い海域の津波挙動に着目し、紀伊水道入口の津波波形から山田港の津波ピークの水位および津波到達時刻をより早期に予測する手法についての検討内容を記す。第5章では微地形を考慮した津波氾濫解析についての研究内容について説明する。ここでは主に用水路網を考慮した津波氾濫解析結果をもとに用水路網が岡山市の津波氾濫過程に与える影響について説明する。さらに、用水路に加え建物の影響も考慮した津波解析結果をもとに岡山市の津波氾濫特性について説明する。第6章では本研究の主要な結論についてまとめる。

(参 考 文 献)

- 1) 羽島徳太郎：瀬戸内海・豊後水道沿岸における宝永（1707）・安政（1854）・昭和（1946）南海道津波の挙動，地震 2，第 41 卷，pp.215-221，1988.
- 2) 岡山県危機管理課，南海トラフ巨大地震による震度分布図・液状化危険度分布図について，URL: <http://www.pref.okayama.jp/page/308887.html>.
- 3) 岡山市，津波ハザードマップについて【平成 25 年 8 月作成】，URL:http://www.city.okayama.jp/soumu/bousai/bousai_00180.html.
- 4) 工代健太，吉田圭介，前野詩朗：南海トラフ巨大地震を想定した岡山市の津波遡上解析，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.70，No.2，pp.I_289-I_294，2014.
- 5) 赤穂良輔，前野詩朗，高橋巧武，工代健太，吉田圭介：市街地レイアウトを考慮した岡山市における津波到達前後の浸水範囲予測および避難時間の検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.72., No.2，pp.I_289-I_294，2016.

第2章

既往研究の経緯と本研究とのかかわり

2.1 津波のリアルタイム予測法についての既往研究の概要

本節では津波のリアルタイム予測法についての既往研究の経緯について説明し、本研究で検討する津波予測の手法についての新規性について述べる。

気象庁の津波予測は震源の位置と地震の規模から各沿岸の津波高を予測する¹⁾。この手法は地震波の情報を用いるため、速報性に優れており地震発生から数分程度で津波高の予測値を公表することができる。地震情報からの津波を予測する手法については阿部ら²⁾⁾によって高度化が検討されている。しかし、地震の情報のみから、津波の立ち上がりの状況を詳細にとらえることは難しく、予測値の誤差が大きくなることに欠点がある。

日本列島の沖合にはナウファスと呼ばれる GPS 波浪計と海底設置式波浪計からなる波浪観測システムが設けられており、2016年4月の時点で78か所において波浪の観測がなされている⁴⁾。2010年のチリ津波や2011年の東日本大震災による津波による各海域の水位変動も GPS 波浪計により捉えられている⁵⁾⁶⁾。特に東日本大震災の時には東北沖の GPS 波浪計により捉えられた津波の情報により気象庁の各沿岸の想定津波高の速報値が大幅に引き上げられた。このような背景から沖合で観測された津波の波形をもとに沿岸に到達する津波を高い精度でリアルタイム予測する手法の高度化が検討されている。

観測波形から沿岸への到達津波をリアルタイム予測する方法には、安田ら⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾、辰巳ら¹²⁾¹³⁾によって検討されているグリーン関数の重ね合わせの原理を用いる方法がある。この手法では小領域に分けた波源域の各部分と GPS 波浪計設置位置の水位変動量の相関関係をあらかじめデータ化し、地震時に沖合の GPS 波浪計で観測された津波波形から逆解析を行うことにより波源の初期水位の分布を推定する。さらに、各小領域と予測対象地点の水位変動量の相関関係を示すグリーン関数を用いて、波源の各部分で立ち上がった津波に起因する予測対象地点の経時的な水位変動を求め、各小領域の結果を足し合わせることで津波波形を予測する。安田ら⁸⁾は中防災が2003年に発表した東南海・南海地震が2連動で発生するケースの津波解析結果をもとに波源域を一辺が27kmの正方形の小領域に分割し、本手法の予測精度を検証した。その結果、紀伊半島沖の9地点に設置された GPS 波浪計のうち高知県室戸岬沖、和歌山県潮岬沖および浅川沖の3地点のデータを用いた場合に大阪湾の津波予測精度が比較的高く、1時間分の津波観測データから関空、大阪、神戸の各沿岸において地震発生から8時間後までの津波波形が高い精度で推定可能であることが示された。また安田ら¹⁰⁾は2011年の東日本太平洋沖地震の津波について本手法の適

用可能性を検討するため、東北沖の GPS 波浪計で観測された波形データから求めた三陸沿岸の 8 地域の津波高の予測値を観測値と比較した。ここでは予測対象地点ごとに適切に選択した 3 基の波浪計の 20 分間の観測波形を用いて各沿岸の第 1 波の津波高を正確に予測できることが示された。

上記の手法のもととなるグリーン関数の重ね合わせの原理が成り立つのは津波の非線形性が無視できる水深 50m 以上の海域である¹²⁾。また、津波が伝播する過程での陸域からの反射波の影響が大きくなればこの手法による沿岸域へ到達する津波波形の推定精度が落ちる。安田ら⁸⁾が東日本太平洋沖地震津波に本手法を適用した結果においても第 2 波以降の津波予測については誤差が大きく、観測データ長を 60 分まで長くとした場合も予測精度が改善されなかったことから実用化に向けての課題が示された。また、辰巳ら¹³⁾によっても同地震を対象とした予測精度の検証が行われており同様の結果が得られている。瀬戸内海はほとんどの部分で水深 50 m を下回っており、特に岡山が面する備讃瀬戸には多くの島が存在し、複雑な地形が見られることから、岡山沿岸に到達する津波波形を上記の方法で精度よく推定することは困難であると考えられる。さらに逆解析により波源域を高い精度で予測するために観測点を複数とる必要があり、使用する GPS 波浪計の位置についても検討を重ねる必要があることが指摘されている⁸⁾。また、波源域の小領域ごとに津波高の計算を行う必要があるため、津波予測に比較的多くの計算が必要になる。近年では GPS 波浪計の波形から逆解析で推定した波源を初期条件に GPU による高速計算を行い、沿岸の津波波形だけでなく陸域の津波氾濫過程までリアルタイム予測する手法が富田ら¹⁴⁾により開発されているが、計算機が地震時に作動しなかった場合にはリアルタイム予測に適用できない可能性がある。

本研究では波源域から岡山市沿岸にかけての津波の伝播経路と地点間の波高相関関係に着目し、適切に選択した 1 点の観測点から波源の位置に関係なく岡山市沿岸の津波挙動を簡便に早期予測できる津波予測法を構築する。さらに瀬戸内海は潮汐が卓越する海域であることも考慮し、潮汐場における予測精度の検証を行う。

2.2 岡山市の津波氾濫特性の検討についての既往研究の概要

本節では岡山市の津波氾濫特性についての既往研究の概要を示し、本研究の津波氾濫解析の新規性と方針について説明する。

工代ら¹⁵⁾は岡山市を対象に液状化による堤防沈下量や到達する津波の高さを変化させた数ケースの津波氾濫解析を行い、児島湾と旭川および吉井川の河口部から津波氾濫が起ることや数波に渡る津波により地震発生から11時間後にかけて浸水域や浸水深が増加することなど岡山市の津波氾濫過程の特徴を示した。しかし、この解析では土地利用の状況がマンニングの粗度係数により再現されており、建物や道路が遡上津波に与える影響を反映できていない。赤穂ら¹⁶⁾は建物群を半透過壁として表現した解析モデルを用いて、岡山市の建物および主要道路の影響を考慮した津波氾濫解析を行った。この解析では道路部を伝って遡上する津波の動きまで詳細に再現することができ、氾濫解析結果をもとに住宅区ごとに最寄りの避難場所までの避難時間の検討を実施した。その結果、岡山市の旭川と百間川に囲まれた地域では浸水によって避難時間が平均1.6倍、最大で28分増加することが明らかとなった¹⁶⁾。以上のように津波氾濫解析の結果を津波避難対策に生かすためには、津波氾濫に影響を与える微地形の影響を適切に反映した津波解析を行う必要がある。

岡山市の地形的な特徴として網状に張り巡らされた用水路網がある。用水路網が水災害の氾濫被害を大きくすることを示した近年の研究事例として、ミャンマーデルタ地帯の水路網を佐貫ら¹⁷⁾の水路モデルにより再現した高潮の解析を行い、水路網により高潮の浸水面積が拡大することを示した神原ら¹⁸⁾の研究があげられる。したがって、津波においても用水路を伝った津波が内陸部で先に氾濫することで津波被害の深刻化を招く可能性が考えられる。しかし、現在のところ津波の氾濫における用水路網の影響を検討した研究事例は全国的にみても少なく、上述の赤穂ら¹⁶⁾の氾濫解析においても用水路の影響は考慮されていない。そこで本研究では用水路網を再現した津波解析を行い、岡山市の津波氾濫過程に用水路網が与える影響について検討する。さらに用水路に加えて建物の影響も反映させた津波氾濫解析を実施する。岡山市では用水路網にそって家屋が立ち並んでいるため、用水路縁と建物縁の両方を計算格子の境界として設定することは困難である。建物の影響を簡便に再現する計算手法の1つとしてBP(Building Porosity)モデル¹⁹⁾が提案されている。これは街区の面積に占める建物の床面積以外の割合（以下空隙率）と抵抗係数により、建物の影響を氾濫解析の支配方程式に組み込む計算方法である¹⁹⁾。赤穂ら²⁰⁾は計算格子ごとに空隙率を与えることで街区内の建物の分布の影響も考慮したBP-L(Building Porosity-Localized)モデルの有用性について検討し、本モデルにより建物に沿って計算格子を作成した場合と同様に街区内の氾濫水の流れを再現できることを示した。また、今井ら²¹⁾は計算格子に占める建物部分の面積の割合（以下占有率）を求め、占有率が1の場合は建物を標高として与え、それ以外の場合は適切なマンニングの粗度係数を与えることにより、建物部

分をすべて標高として再現した場合とほとんど変わらない精度で氾濫解析ができることを数値実験により明らかにした。さらに、この手法を宝永地震の震源モデルを用いた高知県高知市の津波遡上解析に適用し、マニングの粗度係数のみで土地利用を再現した場合よりも道路部における氾濫津波の集中による水位上昇など局所的な津波の挙動を再現できることを示した。本研究では以上の解析手法を踏まえ用水路に加え建物の影響を簡便に組み込んだ津波氾濫解析を行い、岡山市の氾濫特性を詳細に検討する。

(参 考 文 献)

- 1) 気象庁 HP, URL:<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunami/ryoteki.html>
- 2) 阿部郁男, 今村文彦: 津波浸水予測データベースによるリアルタイム津波浸水予測の精度と評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.I_261-I_265, 2010.
- 3) 阿部郁男, 今村文彦: 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, 2012.
- 4) 全国港湾海洋波浪情報網 (国土交通省), URL:https://nowphas.mlit.go.jp/about_nowphas/
- 5) 河合弘泰, 佐藤真, 永井紀彦, 川口浩二: 東北～四国沿岸の GPS 波浪計ネットワークで捉えた 2010 年チリ津波, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.I_261-I_265, 2010.
- 6) 河合弘泰, 佐藤真, 川口浩二, 関克己: GPS 波浪計で捉えた平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_1291-I_1295, 2011.
- 7) 安田誠宏, 高山知司, 川村健太: 観測データを用いたグリーン関数重ね合わせ法によるリアルタイム津波波源域推定法, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.311-315, 2006.
- 8) 安田誠宏, 高山知司, 川村健太, 間瀬肇: 沖合観測情報を用いたインバージョン法によるリアルタイム津波予測, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.196-315, 2007.
- 9) 安田誠宏, 高山知司, 川村健太, 国田淳: 沖合観測情報を用いた逆解析手法によるリアルタイム津波予測, 京都大学防災研究所年報, 第 50 号 B, pp.515-525, 2007.
- 10) 安田誠宏, 藤井厚史, 森信人, 間瀬肇: 東北地方太平洋沖地震の津波に対するリアルタイム予測の可能性に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_321-I_325, 2012.
- 11) 安田誠宏, 藤井厚史, 間瀬肇, 森信人, 篠原雅尚, 酒井慎一: 震源過程と津波観測波形を用いたハイブリッド型リアルタイム津波予測法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_396-I_400, 2014.
- 12) 辰巳大介, 富田孝史: 震央位置を考慮したインバージョン手法によるリアルタイム津波予測, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.246-250, 2008.
- 13) 辰巳大介, 富田孝史: 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. I_34- I_47, 2013.
- 14) 富田孝史, 高川智博: 沖合津波観測データを利用したリアルタイム津波ハザードマップシステムの開発, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp. I_55-I_60, 2014.
- 15) 工代健太, 吉田圭介, 前野詩朗: 南海トラフ巨大地震を想定した岡山市の津波遡上解析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.I_289 - I_294, 2014.
- 16) 赤穂良輔, 前野詩朗, 高橋巧武, 工代健太, 吉田圭介: 市街地レイアウトを考慮した岡山市における津波到達前後の浸水範囲予測および避難時間の検討, 土木学会論文集

- B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp. I_289-I_294, 2016.
- 17) 佐貫宏, 渋尾欣弦, 李星愛, 吉村耕平, 田島芳満, 古米弘明, 佐藤慎司: 様々な氾濫因子を考慮した都市沿岸部の氾濫予測解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp. I_517-I_522, 2016.
 - 18) 神原雅宏, 田島芳満, 中村駿一郎, 下園武範: 水路網の発達したミャンマーデルタ地帯における大規模高潮ハザードの評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, pp. I_259-I_264, 2017.
 - 19) Schubert, J. E., and Sanders, B. F.: Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency, Adv. Water Resources, Vol.41, 49-64, 2012.
 - 20) 赤穂良輔, 前野詩朗, 小川俊, 吉田圭介: 都市氾濫解析に用いる建物群の空隙率の設定方法に関する実験的検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp. I_1525-I_1530, 2018.
 - 21) 今井健太郎, 今村文彦, 岩間俊二: 市街地における実用的な津波氾濫解析手法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp. I_311-I_315, 2013.

第3章

鳴門・明石海峡の波形を用いた岡山市沿岸の津波波形の予測法の検討

3.1 本章の概要

南海トラフ巨大地震発生時には岡山市においても甚大な津波被害が想定されており、住民の避難のために地震時に沿岸に到達する津波挙動を早期に精度良く予測する必要がある。しかし、前章で述べたとおり、安田ら¹⁾や辰巳ら²⁾により検討されてきた津波予測法は瀬戸内海のように水深が50m以下の浅い海域では高い予測精度を得ることができない。さらに既往の津波予測手法では、予測精度を高めるために沖合に複数の観測点を設ける必要があることや予測のための計算量が多くなることなど簡便性にも課題がある。以上を踏まえ、本章では南海トラフ地震下の岡山市の津波対策に資することを目的として、地震発生時に岡山市沿岸に到達する津波挙動を簡便に早期予測する手法の検討を行う。

岡山市の地理的な位置や既往の研究で示された瀬戸内海の津波伝播経路から鳴門海峡と明石海峡の2つの海峡から瀬戸内海に入ってくる津波が岡山市沿岸を襲うことが考えられる。そこで、波源域からの津波伝播解析を行い、各海峡経由の津波が岡山市沿岸に到達するタイミングと津波が経由する地点間の波高の相関関係を明らかにする。そして、その結果をもとに両海峡で得られた津波波形から岡山沿岸に到達する津波波形を簡易的に予測する津波予測モデル（以下簡易予測モデル）を構築し、予測精度の検証を行う。さらに、岡山市が面する備讃瀬戸は大潮日には2mを超える干満差が観測されるなど潮汐の影響が大きい海域である。したがって、南海トラフ地震が発生する時刻によって、潮汐により岡山沿岸の最大津波高が大きく異なることが考えられる。そこで、潮汐と津波の同時解析の結果をもとに潮汐場における本予測モデルの適用可能性についても検討する。

3.2 津波伝播解析の概要

3.2.1 計算範囲および解析格子

図 3-1 に示す黄色線と日本列島で囲まれた海域で波源から岡山市沿岸に至るまでの津波の伝播解析を行う。また、瀬戸内地域の拡大図を図 3-2 に示す。南海トラフ沿いで発生した津波の伝播挙動を可能な限り広範囲で再現するため、南側の計算境界を波源域から 600km から 700km 南に離れた海域に設定した。また、計算範囲の北側には周防灘から大阪湾までの瀬戸内海全体が含まれるように範囲を設定した。

解析格子として三角形の非構造格子を用いた。非構造格子は複雑な海岸線や建物縁に沿って格子を作成できるため、地形の再現性に優れており、既往の研究の津波解析においても用いられている。例えば、小松ら³⁾は有限体積法を用いた津波解析における三角形の非構造格子の適用性を検討するため、2004 年のインド洋大津波の伝播解析およびバンダアチェの津波遡上計算を非構造格子流動モデルである FVCOM を用いて行った。その結果、バンダアチェに到達する津波波形および市街地の津波遡上範囲とも実測値や現地調査に近い結果が得られた。特に建物縁に沿って計算格子を切り、建物に標高を与えることで市街地を再現した範囲では浸水範囲や浸水深について観測値との比較から高い整合性が得られた。また、赤穂ら⁴⁾は岩手県釜石市の建物や道路などの詳細な市街地レイアウトを三角形格子により再現し、2011 年の東日本大震災の津波解析を行った。この解析においても、現地観測による記録や津波遡上時のビデオ写真との比較から、釜石市の最大津波高や氾濫過程を高い精度で再現できていることが示された。以上の点を考慮して、本研究では複雑な海岸線を有する瀬戸内海の津波を精度良く解析するため、地形の再現性に優れた三角形の非構造格子を採用した。

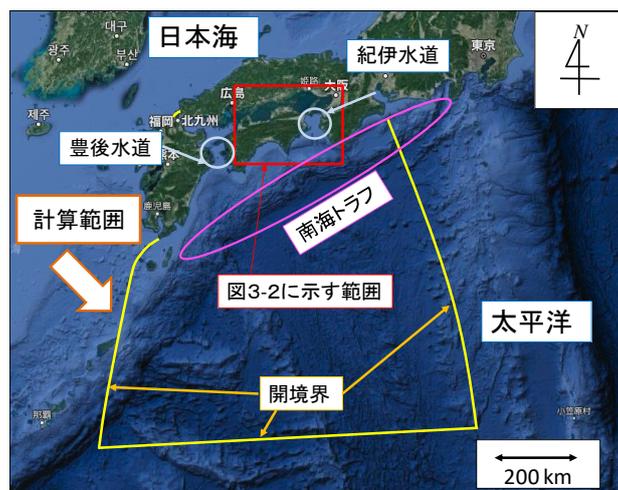


図 3-1 計算範囲と計算境界の設定

3.2.2 格子サイズ・海底地形の再現および境界条件

解析格子サイズについて説明する．長谷川ら⁵⁾は，津波解析において波高の相対誤差が0.1以下に保つためには，津波一波長あたり少なくとも20個以上の格子数が含まれるように格子の大きさを設定する必要があることを示した．このことを勘案し，地点ごとに下記のとおり格子サイズの設定を行った．太平洋，各水道（紀伊水道と豊後水道），瀬戸内海では，解析格子の3角形の一辺の長さがそれぞれ3kmから10km，400mから3km，400mから2kmになるように設定した．また，岡山市沿岸の児島湾では約30mに設定した．図3-2の左上に岡山近海のメッシュ図を示す．なお，計算格子数および節点数はそれぞれ422,295個，221,872個である．

次に海底地形の再現方法について説明する．地形の標高データは中防災の標高データ（2012年公開）を元データとして用いた．太平洋域では810mごと，瀬戸内海と紀伊水道および豊後水道を中心とする四国周辺の海域では270mごとに得られた標高データを用い，各三角形格子の重心から最も近い測点のデータの値を各々の要素に内挿した．ここで得られた標高分布を図3-2にコンターで示している．特に日本列島の100から200km沖から陸域にかけて海底の標高が急激に高くなっている様子や標高の変化が激しい瀬戸内海の複雑な海底地形が再現できていることが分かる．また，海域のマニングの粗度係数を中防災の解析と同様に0.025⁶⁾を採用した．

最後に計算境界の設定方法について述べる．図3-1に示すように計算範囲の各境界のうち外海との境界では，計算範囲から津波が出ていく際，津波が計算領域の境界で反射することを防ぐため，開境界に設定した．また，本解析は陸域への津波遡上は考慮していない

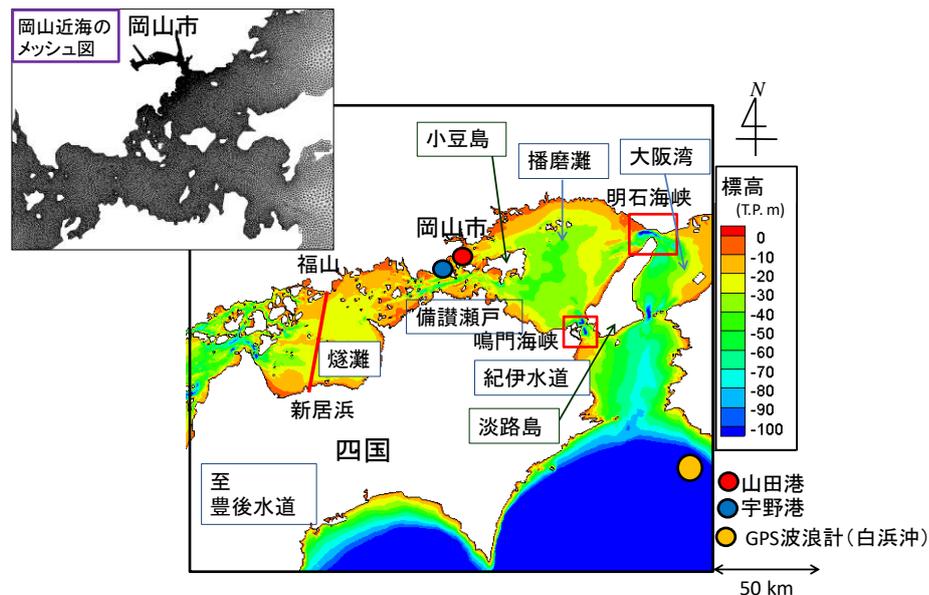


図 3-2 瀬戸内地域の地名および瀬戸内海の標高分布

ため、日本列島や瀬戸内海の島々などの海岸線を計算範囲の境界とした。そして、この境界を流速と圧力勾配がともにゼロとなる閉境界に設定した。

3.2.3 支配方程式および差分法

本研究では支配方程式として下に示す2次元の浅水流方程式（連続式，運動方程式）を支配方程式として使用した。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{S} = 0 \quad (3.1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh \left(-\frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \right) \\ -gh \left(-\frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \right) \end{pmatrix}$$

x と y は日本直角座標系（第5系）における x 座標と y 座標をそれぞれ示す。ここに、 \mathbf{U} ：保存量ベクトル， \mathbf{E} ：東西方向の流束ベクトル， \mathbf{F} ：南北方向の流束ベクトル， \mathbf{S} ：発生項および消滅項ベクトルである。また、それぞれの式に含まれる各記号について、 t ：時間， g ：重力加速度， z_b ：標高， h ：水深， u ： x 方向（東西方向）の流速， v ： y 方向（南北方向）の流速， n ：マンニングの粗度係数である。

タイムステップは次式で示される CFL 条件を十分に満足するように 0.05 秒に合わせた。

$$\Delta t = \frac{Cr\Delta L}{\sqrt{u^2 + v^2} + \sqrt{gh}} \quad (3.2)$$

ここに、 Δt ：微小時間増分量， ΔL ：隣接するメッシュとの重心間の距離， g ：重力加速度， u ： x 方向（東西方向）の流速， v ： y 方向（南北方向）の流速， Cr ：クーラン数である。

各三角形メッシュの3つの境界において、FDS法⁷⁾を適用し、津波解析を実施した。

3.2.4 対象震源ケースと津波の再現方法

本章では中防災の11の震源ケース（Case1～Case11）⁸⁾のうち、山田港（図3-2の赤丸印）に最も大きな津波の到達が想定されている Case4（四国沖に大すべり面を設定したケース）を検討の対象とした。

地震発生時の津波の立ち上がりの再現方法について説明する。初期条件は中防災の津波シミュレーションと同様に全計算領域の初期水位を2012年の山田港の最高水位（気象庁観測）である T.P.1.29m に合わせた。そして、地震発生時の地盤の隆起による波源域における津波の立ち上がりと瀬戸内海側での地盤の沈降を再現するため、中防災が公開している

10秒ごとの地盤変動量のデータを順次海底の標高に与えた。地盤変動量のデータは810メートルごとに得られたものであり、標高の内挿と同様に各三角形格子の重心から最も近い位置でのデータをそれぞれの計算格子に適用した。

図3-3はCase4の津波の立ち上がりが終了する地震発生時から260秒後の水位分布図を示している。四国の太平洋沖を中心に津波の立ち上がりが見られ、最大水位はT.P. 6m近くに達しており、最大約5m程度上昇していることが分かる。その一方で瀬戸内側では地盤沈下に伴う水位の低下が起きていることが分かる。

3.2.5 津波伝播計算の精度検証

図3-4は津波再現計算で得られた山田港の津波波形（青線）を同ケースの中防災の解析の結果（赤線）と比較したものである。中防災のものと比較して、本解析の結果は波高が若干小さくなっているがこれは両解析の地形データの解像度の違いによるものであると考えられる。しかし、山田港で得られた各津波の周期や到達の時間帯は中防災の解析で得られた津波波形とほぼ一致しており、波源域から瀬戸内海にいたる津波伝播の挙動を中防災の解析と同様に再現できていると考えられる。

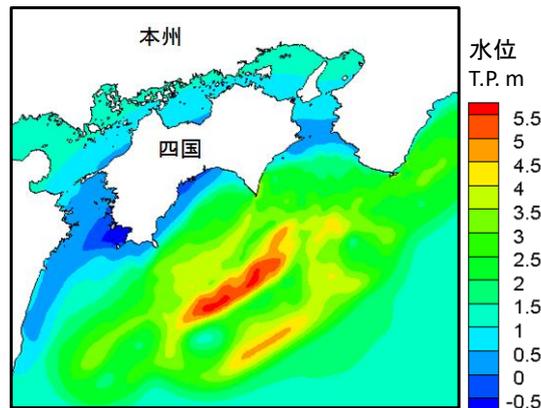


図 3-3 津波の立ち上がり終了時の水位分布図 (Case4)

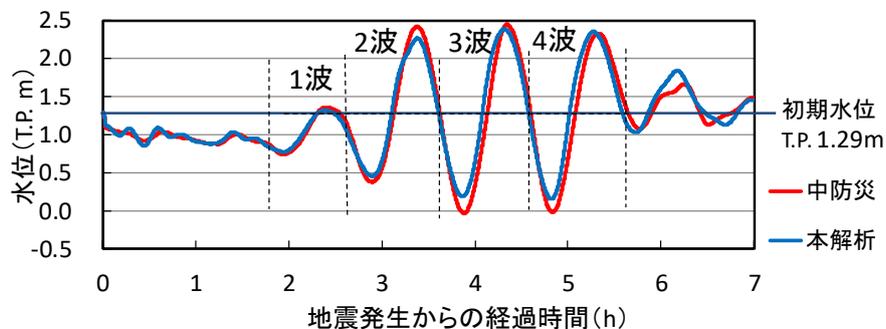


図 3-4 岡山県山田港の津波波形 (Case4)

3.3 岡山沿岸までの津波伝播ルートの検討および簡易予測モデルの構想

3.3.1 岡山市沿岸までの津波伝播ルートについての検討

波源域から岡山市沿岸までの津波の伝播経路について検討する。吉田ら⁹⁾は南海地震発生時の瀬戸内海域の津波伝播挙動について検討するために、1854年の安政南海地震津波を想定した相田の断層モデルを用いて、南海地震津波の数値解析を行った。この解析結果から、本州の南側の波源域で発生した津波は東側の紀伊水道と西側の豊後水道からそれぞれ瀬戸内海に伝播し、地震発生から220分後に広島県福山と愛媛県新居浜を結ぶライン上(図3-2の赤線)で合流することが分かった。以上から岡山市沿岸を含む備讃瀬戸の海域では、紀伊水道側から鳴門海峡と明石海峡を経由して瀬戸内海に侵入した津波の影響を主に受けることが考えられる。図3-5は上記の津波再現計算で和歌山県白浜沖のGPS波浪計設置地点(図3-2の黄色の丸)において得られた津波波形である。図3-4の山田港の波形と比較すると各波の周期が共に50分から60分であることから、岡山沿岸に打ち寄せる津波が紀伊水道経由のものであると推察される。

吉田ら⁹⁾の検討事項を踏まえて、図3-5に示す紀伊水道の波①から波④の津波が、それぞれの海峡を通り山田港に到達する各津波に影響しているのかについて把握するために、鳴門海峡と明石海峡のいずれか一方を封鎖したうえで初期水位をT.P.1.29 mに合わせた津波解析を行った。図3-6に示す鳴門海峡と明石海峡の拡大図を用いて封鎖方法について説明する。この図に示すように封鎖する方の海峡を挟むように2本の開境界を図に示す

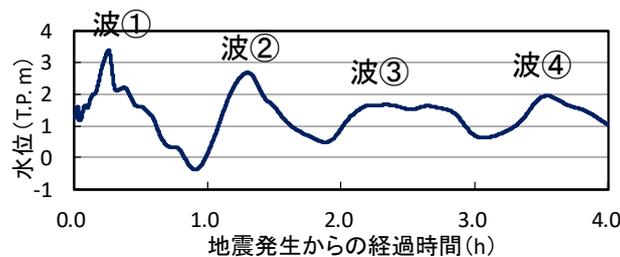


図 3-5 GPS 波浪計（白浜沖）の設置位置の波形



図 3-6 鳴門海峡と明石海峡の拡大図

ように設定し、海峡の外海側の境界で瀬戸内海に入ってくる津波を計算範囲外に流出させ、播磨灘側への津波の侵入を防止した。なおこの解析では西側の燧灘からの津波の影響は一端無視するため、上記の吉田ら⁷⁾の研究で東西の津波の合流する箇所として示された広島県福山と愛媛県新居浜を結ぶラインの両側にも海峡部同様に2本の開境界を設定した。

図3-7は鳴門海峡のみ津波を通した場合と明石海峡のみ津波を通した場合の山田港の津波波形を両海峡を封鎖しない解析で得られた元々の波形と横軸を示したものである。封鎖後と封鎖前の波形を比較すると山田港の第1波は鳴門海峡を経由した波①であることが分かる。さらに波高が比較的大きな第2波から第4波は鳴門経由の波②から波④の津波と明石経由のそれぞれ一つ前の津波が播磨灘から備讃瀬戸において重なりあい波高が増幅したものであることが分かる。以上に関して、表3-1は山田港の各波に対応する海峡部の波

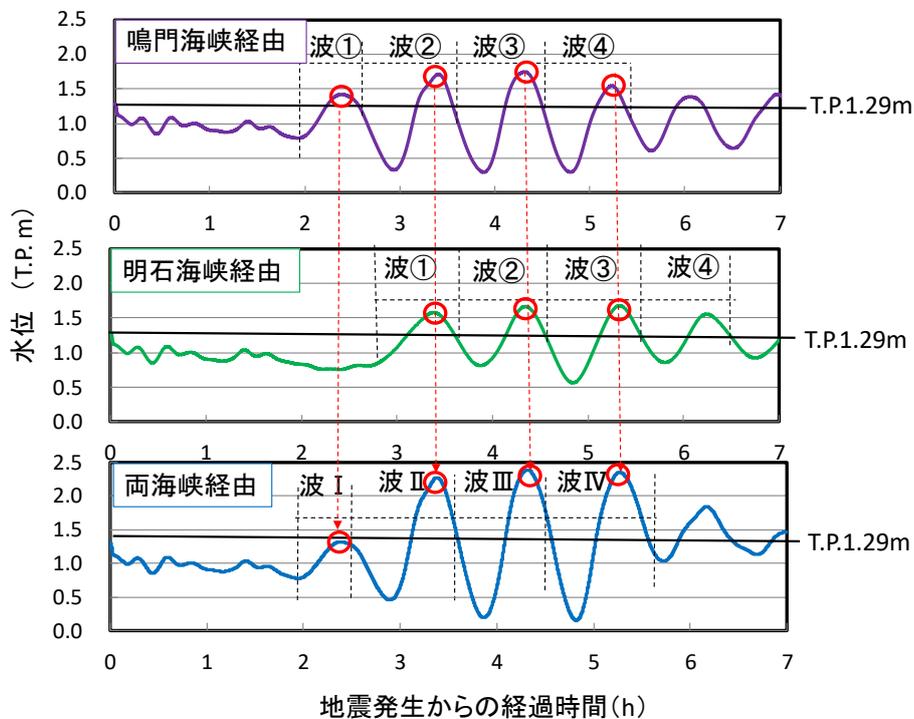


図 3-7 鳴門海峡と明石海峡の津波の重畳

表 3-1 重なり合う各海峡経由の津波と山田港の津波の対応

紀伊水道の津波	伝播するルート		山田港の津波
波①	鳴門経由	→	波Ⅰ
波①	明石経由	→	波Ⅱ
波②	鳴門経由	→	波Ⅱ
波②	明石経由	→	波Ⅲ
波③	鳴門経由	→	波Ⅲ
波③	明石経由	→	波Ⅳ
波④	鳴門経由	→	波Ⅳ

についてまとめたものである。以降海峡からの波とそれらが重なった山田港の波を区別するため、後者を波Ⅰ～波Ⅳと表す。ここで、岡山市の近海で津波の重畳が起こる原因について考察する。吉田ら⁹⁾の研究では明石海峡と鳴門海峡の津波到達時間差は約40分程度であることが報告されており、紀伊水道の津波周期より20分程度短い。ここから、明石海峡からの津波が鳴門海峡からの次の津波よりも約20分早く播磨灘に侵入することが考えられる。図3-2より明石海峡が鳴門海峡よりも東西方向に約30km東にある。またこの図の海底の標高を示すコンターから明石海峡の東側の水深が約30から40mであることを考慮すると、(3.3)に示す長波理論による波速の近似式より明石海峡から岡山方面に進む津波の波速が時速約60から70kmであると考えられる。

$$C = \sqrt{gh} \quad (3.3)$$

ここに、 C ：波速， g ：重力加速度， h ：水深である。

以上から鳴門海峡から次の津波が入る時点で明石海峡から侵入した津波が鳴門海峡とほぼ同経度の位置に達していると考えられる。したがって、明石海峡経由の津波と鳴門海峡経由の一つ後の津波の重畳が播磨灘から岡山市近海の海域で生じたと考えられる。以上から、南海トラフ地震時に鳴門海峡と明石海峡の津波が重なり波高が増幅した津波が数波にわたり打ち寄せることで、波源域から離れた岡山市にも大きな津波被害がもたらされることが明らかとなった。

3.3.2 簡易予測モデルの構想

上で述べた瀬戸内海を伝播する津波の挙動の検討から、南海トラフ地震発生時に鳴門海峡および明石海峡の津波が岡山市を襲うことが分かった。このことから、各海峡を通過する時点の津波の大きさと岡山市沿岸部に到達する時点の津波の大きさに相関性があることが考えられる。そこで、各海峡と岡山市沿岸について、津波の大きさの相関関係と津波到達時間差に着目すれば、津波が各海峡を通過した時点で、海峡部の波形を岡山市沿岸における各海峡経由の津波波形に変換し、岡山市沿岸に打ち寄せる経時的な津波波形を予測することができると考えられる。ここで図3-7において、山田港において、波Ⅱから波Ⅳの波高は重なりあうそれぞれの海峡からの津波の波高の和にほぼ等しいことが分かる。そこで、それぞれの海峡を経由した津波の予測波形を適切に設定した水位をベースとして足し合わせることで、各海峡からの津波が重なり増幅した山田港の津波波形を予測することができると考えられる。以上の簡易予測モデルの構築にあたり、主に各海峡部の津波波高と山田港の波高の相関関係式の検討、各海峡部と岡山市沿岸の津波到達時間差の検討を行った。さらに、豊後水道側からの津波が岡山市沿岸の水位変動に与える影響についても検討し、簡易予測モデルに組み込む手法を考案した。次節では、これらの検討内容について具体的に説明する。

3.4 簡易予測モデル構築に関する各検討

3.4.1 各海峡部の津波波高と山田港の波高の相関の検討

本節では、鳴門海峡と明石海峡の津波波形から岡山市沿岸の津波波形を予測するために、各海峡部の津波の波高とそれぞれの海峡を經由した津波の山田港での波高の相関関係について検討する。ここで波高はそれぞれの地点において、初期水位を基準にゼロダウンクロス法で取った各津波の最高水位と最低水位の差と定義する。

各海峡とも外海側（以下外側，図 3-6 の赤点）と瀬戸内側（以下内側，図 3-6 の青点）において、内側と外側の海峡の幅がおおよそ同じになる場所を波形抽出点に選択した。図 3-8 および図 3-9 にそれぞれ津波伝播解析で得られた各海峡の外側と内側の津波波高を示す。各地点とも波の周期が約 50 分から 60 分程度であり、岡山市沿岸部の津波の周期と一致していることが確認できる。一方で、津波波高を各海峡の外側と内側で比較すると、海峡部の通過に伴い津波のエネルギーが大幅に減少する¹⁰⁾ため、両海峡とも外側よりも内側の波高が小さく、特に海峡部の幅が狭い鳴門海峡では津波波高が海峡の外側と内側で大きく異なることが分かる。以上のことを踏まえ、海峡部外側の波形から岡山市沿岸の津波波形を予測することを目的に、各海峡の外側の波高 H_{out} と内側の波高 H_{in} の相関関係と各海峡の内側 H_{in} と山田港到達時の波高の相関関係についてそれぞれ検討を行う。

次に波高相関関係の検討方法および手順について説明する。ここで波高の相関関係を適切に検討するためには、さまざまな大きさの津波でデータをとる必要がある。平石ら¹¹⁾は、南海地震の津波予測計算に適用する地震断層モデルの適切な決定方法に関する検討を行

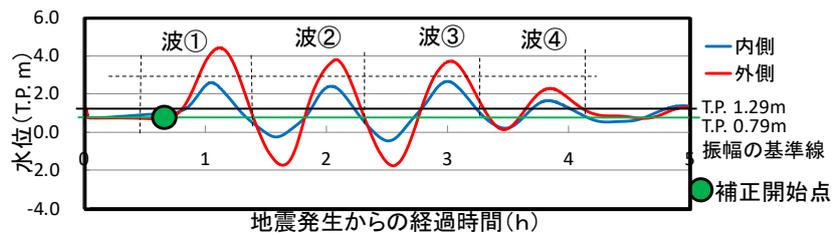


図 3-8 鳴門海峡の津波波形

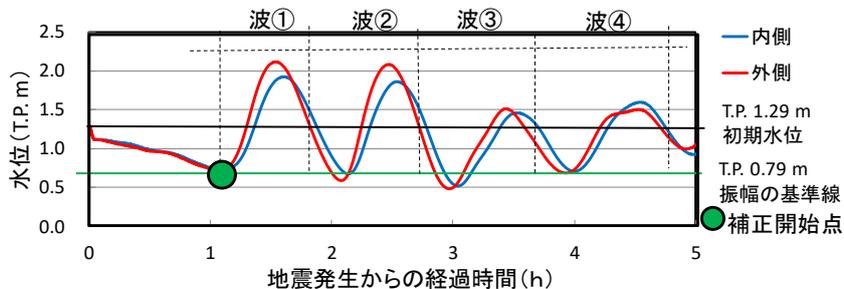


図 3-9 明石海峡の津波波形

い、地震発生時の断層のすべり量と紀伊水道を伝播する津波の波高の間に比例関係があることを示した。以上を踏まえて、検討に使用する波のサンプルを波高が小さいものから大きいものまでそろえるため、すべり量を 0.8 倍および 1.2 倍に設定したケースにおいても前節で説明した鳴門と明石の一方を封鎖した解析を実施した。これらの解析は、3.2 で説明した初期の波源の立ち上がりの再現計算において、初期水位変動量の元データの値にそれぞれ 0.8 および 1.2 を乗じた値を海底の標高に与えることで実施した。そして、3つの波源ケースの波①から波④（計 12 波）について、各海峡の外側と内側の波高との比（ H_{in}/H_{out} ，以下波高比 1（ R_1 ））と各海峡の内側の波高とそれぞれの海峡を經由した津波の山田港到達時の波高との比（山田港到達時の波高/ H_{in} ，以下波高比 2（ R_2 ））をそれぞれ求めた。

図 3-10 および図 3-11 は鳴門及び明石海峡経由の 12 波について、それぞれ各海峡の外側での津波波高を横軸に、波高比 1 を縦軸にプロットしたものである。これらの図からデータが取得できた範囲で横軸を説明変数 H_{out} ，縦軸を目的変数 R_1 とした近似式が最小二乗法によりそれぞれ、 $R_1 = -0.02H_{out} + 0.62$ （鳴門海峡側）、 $R_1 = -0.27H_{out} + 1.23$ （明石海峡側）で表されることが分かる。

図 3-12 および図 3-13 は各海峡経由の 12 波について、それぞれ各海峡の内側の波高を横軸に、波高比 2 を縦軸に同様にプロットしたものである。これらの図から、内側の波高の大きさによらず両海峡とも波高比 2 の値は波ごとにほぼ等しい値となっており、全体的に後から瀬戸内海に入る波の方が大きい値をとる傾向があることが分かる。例えば明石

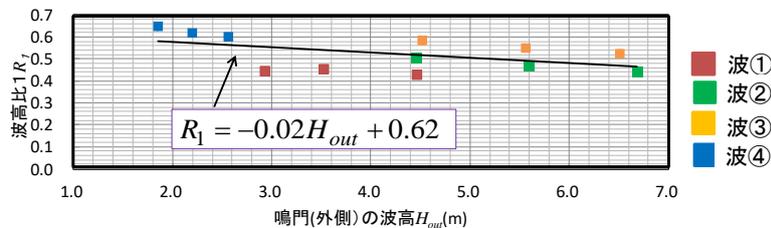


図 3-10 鳴門海峡の外側の波高と波高比 1 との相関関係式

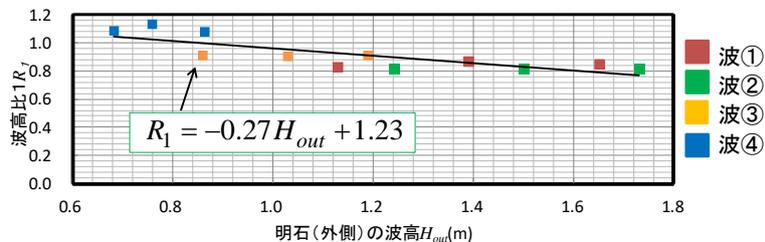


図 3-11 明石海峡の外側の波高と波高比 1 との相関関係式

海峡を經由する波③ではすべり量を変えた3つの結果を比べると海峡の内側の波高はいずれも波高比が約1.2程度になっているが、海峡の内側の波高がほぼ等しい波①および波②よりも波高比が高くなっている。宮本ら¹²⁾は太平洋側から瀬戸内海に進む津波の周期と瀬戸内の津波波高の増幅の関係性について検討し、播磨灘では津波の周期が約1時間の場合に最も津波が増幅することを示した。本解析では4波とも周期が約1時間であることから、播磨灘から備讃瀬戸東部にかけて津波の共振が時間の経過とともに進んだことが後から瀬戸内海に侵入した津波の波高比2が大きくなった原因の1つとして考えられる。以上から波高比2は海峡内側の波高よりも津波の順番によってほぼ一定に決まることが分かる。以上より各波について3つの波高比の平均値(図3-12と図3-13中の数字)をそれぞれの波の波高比2の値とした。

3.4.2 各海峡部(外側)の津波が山田港に到達するまでの時間の検討

式(3.3)で示したとおり、津波の波速は伝播域の水深に依存するが、図3-2に示す海底の標高分布から、各海峡から岡山市にかけて広がる播磨灘のほとんどの部分で水深が30mから50mあり、瀬戸内海の津波の波高と比較して十分に大きいことが分かる。したがって、波の波高による水深の変化は到達時間差に大きく影響しないと考えられる。そこで、各海峡部の外側と山田港の津波到達時間差の検討ではそれぞれの海峡部のみ津波を通した解析のうちすべり量が1.0倍のケースの結果を用いて行った。表3-2は波①から波④について、各海峡の外側でピークが得られた時刻と山田港にそのピークが到達した時刻から

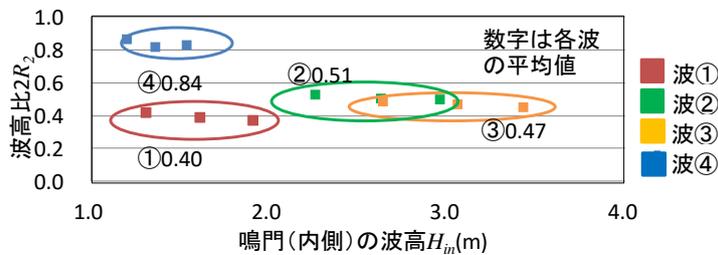


図3-12 鳴門海峡の内側の波高と波高比2との関係

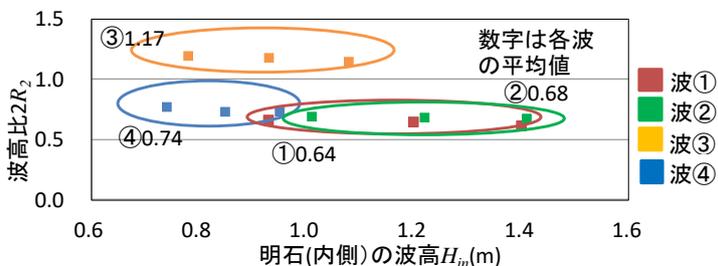


図3-13 明石海峡の内側の波高と波高比2との関係

求めた各地点間のピークの到達時間差を示したものである。ここから各海峡（外側）からの津波の到達時間は波によらずほぼ一定になっていることが分かる。以上のことを踏まえ、経由する海峡ごとに各波の平均をとり、鳴門海峡および明石海峡の外側から山田港までの津波到達時間差をそれぞれ 1.32 時間、1.85 時間とする。

表 3-2 海峡外側と山田港の津波到達時間差

波番号	①	②	③	④	平均
鳴門からの到達時間(h)	1.34	1.31	1.25	1.39	1.32
明石からの到達時間(h)	1.81	1.85	1.89	×	1.85

3.4.3 豊後水道からの津波による影響の検討

前述のとおり、岡山市沿岸では東側の紀伊水道から到達する津波の影響が卓越するが、西側の豊後水道からの津波の影響についても検討を行う必要がある。そこで、東西の津波が合流する燧灘の中央部（図 3-2 の赤線）を 2 本の開境界によって分断し、西側からの津波が燧灘中央部から東側に伝播するのを防いだ解析を行った。そして、燧灘を分断しない元々の津波解析の結果と岡山市沿岸の経時的な水位分布の変化を比較することで豊後水道側からの津波が岡山市沿岸の水位にどの時刻からどの程度影響をおよぼすのかについて検討した。

図 3-14 は瀬戸内海横断面上において、両方の解析の各時刻の水位分布と 2 つの解析の水位差を示したものである。吉田ら⁹⁾の解析において、地震発生から 160 分後に豊後水道側から入ってきた津波が燧灘の西側に達することが示されている。そこで、水位分布に着目すると本解析においても地震発生 160 分後から燧灘西部で水位上昇が見られ、豊後水道側からの津波の影響であると考えられる。また、地震発生から 160 分後と 280 分後との結果の比較から、時間が経過するごとに、西側からの水位上昇が燧灘の中央部に向かって進んでいる様子が見受けられる。次に水位差の結果から、2 つの解析の水位差が見られる海域が燧灘中央部から時刻ごとに東西両方向に広がり、地震発生 280 分後に山田港近海にも達することが分かる。また、この時刻における水位差のグラフをみると、岡山市近海から燧灘中央部にかけて値がほぼ線形に上昇していることが分かる。さらに、360 分後には豊後水道側の津波の影響がさらに東側まで達し、山田港近海の水位差が約 0.32 m まで拡大していることが分かる。以上から、280 分後から 360 分後の 80 分間で豊後水道側からの津波により、山田港の水位が一次関数的に 0.32 cm 上昇するととらえ、簡易予測モデルにおいて考慮する。

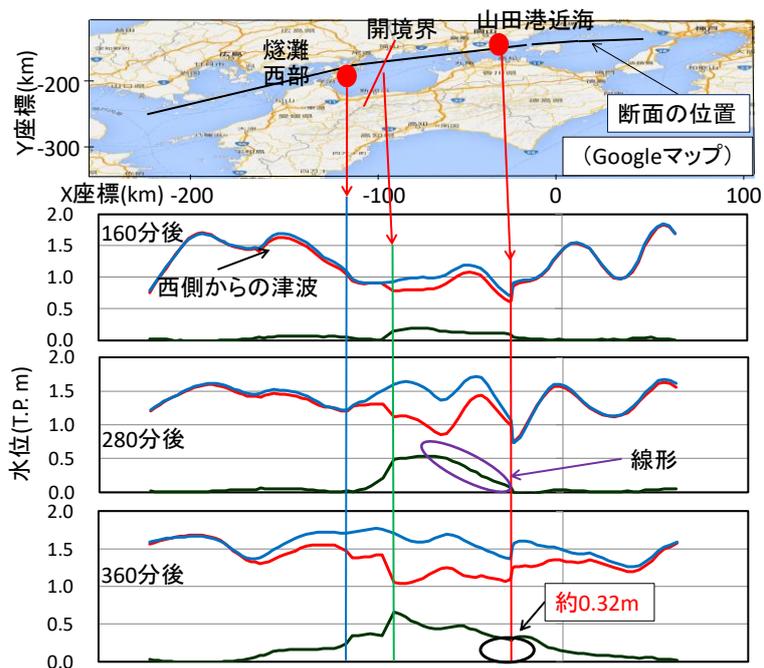


図 3-14 豊後水道側からの津波の影響

3.5 簡易予測モデルの適用および精度検証

本節では前節の検討事項を踏まえ、簡易予測モデルの適応方法について述べる。簡易予測モデルの手順は波高相関関係式による山田港到達時の波形への変換、山田港における両海峡経由の予測波形の足し合わせの2段階に大きく分けられる。以下、各段階について具体的な手順を説明する。

まず、それぞれの海峡部の波形を山田港到達時の各海峡経由の波形への変換する方法について説明する。各海峡の外側の波形（図 3-8、図 3-9）を見ると、両海峡ともそれぞれ波①が来る前の時点で地震発生時に波源域の北側で起こる地盤沈下の影響で水位が約 0.5 m 下がっていることが分かる。そこで、初期水位から 0.5 m を差し引いた T.P.0.79 m の線（図 3-8、図 3-9 の緑線）を津波の振幅の基準とし、両海峡の外側の津波波形（図 3-8、図 3-9 の赤線）から T.P. 0.79 m を差し引き図 3-15 に示す振幅のグラフを求めた。それぞれの海峡（外側）で各津波のピークが得られた時点で、その波高から、図 3-10 と図 3-11 で示した近似式により求めた波高比 1 と図 3-12 と図 3-13 に波ごとに示した波高比 2 を海峡外側の津波の振幅に掛け合わせた。さらに各海峡（外側）と山田港の到達時間差分をそれぞれの波形を横軸方向に平行移動させ、図 3-16 の上から 1 番目と 2 番目の図に示すように各海峡経由の山田港における津波波形を予測した。なお、各海峡（外側）の波形は波①による水位上昇が始まる時点（図 3-8、図 3-9 の補正開始点）から使用した。西側からの津波の影響も考慮するため、地震発生から 280 分後から 360 分後にかけて一次関数的に 0.32 m 水位が上昇するモデル（図 3-16 の上から 3 番目の図）を作成した。

次に山田港における両海峡経由の予測波形の足し合わせについて説明する。図 3-4 から山田港においても波 I が来る直前には地震時の地盤沈降の影響により初期水位から約 0.5 m の水位低下が起こっていることが分かる。そこで T.P. 0.79 m を津波の足し合わせの振幅の基準とし、図 3-16 の 3 つのグラフを時点ごとに足し合わせた。

図 3-17 は上記の方法で両海峡の波形から予測した山田港の波形（赤線）を 3.2.5 の津波再現計算で得た結果（青線）と比較したものである。ここで図中の予測開始点までは津波が山田港に到達していないため、水位は津波の足し合わせの振幅の基準の値である T.P. 0.79 m のまま表示している。この図から波 I の波高がやや過大評価されていることが分かる。図 3-10 をみると波高比 1 の近似式が波①のデータ（赤点）よりも上側を通っていることから、鳴門海峡から入ってくる波①の波高比 1 を過大評価したことが原因として考えられる。しかし、鳴門海峡と明石海峡を経由した津波が重なりあう波 II から波 IV の波高及び最大津波高はほぼ正確に再現できていることが分かる。

図 3-15 の鳴門海峡外側の振幅のグラフと図 3-16 の鳴門海峡経由の山田港の予測波高を比較すると鳴門海峡外側では山田港に津波のピークが到達する約 80 分前に各波のピークが観測され津波波高が得られることが分かる。また、この時点では岡山近海で重なり合う

1 つ前の津波の波形が明石海峡外側で既に得られているため、山田港の津波ピークを到達の約 80 分前に予測可能である。

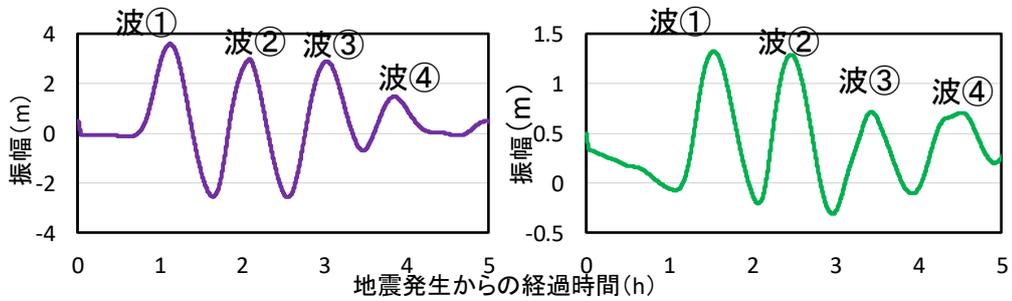


図 3-15 振幅のグラフ (左 鳴門海峡, 右 明石海峡)

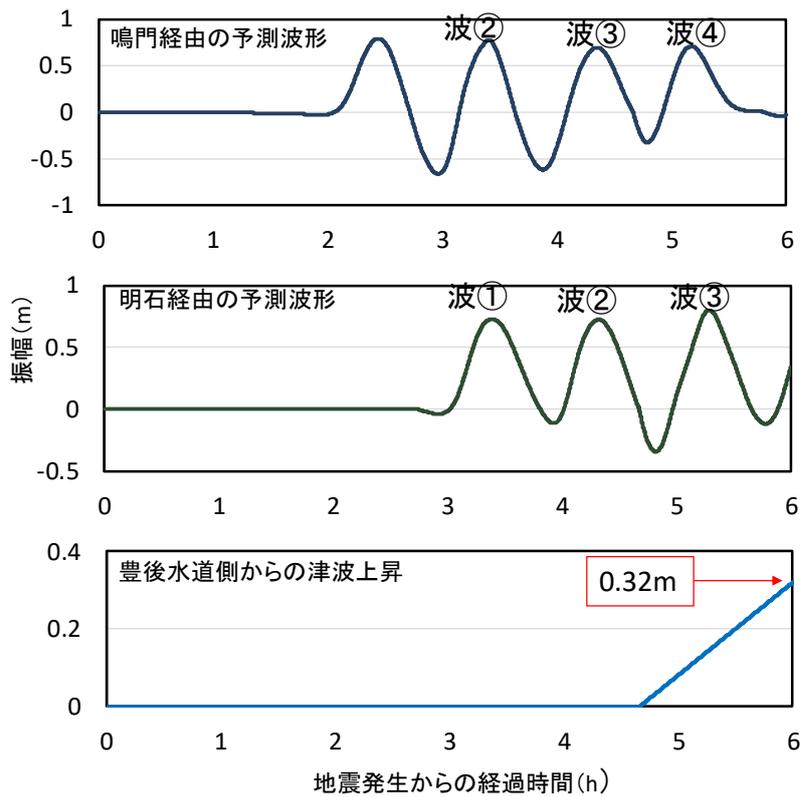


図 3-16 各海峡経由の山田港の予測波形

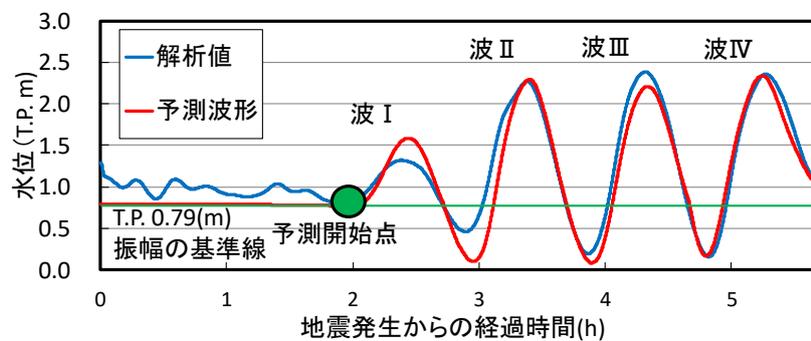


図 3-17 山田港の津波波形の予測

3.6 潮汐場での簡易予測モデルの適用性の検討

3.6.1 津波と潮汐の同時解析

本研究では2013年と2014年に岡山県宇野港（位置は図3-2の青丸印）の気象庁潮位観測における月最高潮位と月最低潮位の差が最も大きかった月の大潮日である13年1月14日の潮汐を再現した。さらにこの日に南海トラフ地震の発生を仮定して潮汐と津波の同時解析（以下潮汐-津波同時解析）を行った。

まず、潮汐の再現方法について図3-18を用いて説明する。数値解析では計算範囲に限りがあるため、海側の計算境界に各地点の経時的な潮位変動を境界条件として与えることで計算範囲内の潮汐を再現する。このため、計算範囲が広くなればなるほど計算領域内の潮汐の再現精度が低下する。白木ら¹³⁾は計算範囲の広さと瀬戸内海の潮汐の再現精度との関係性について検討を行い、本研究の計算範囲より広い範囲で解析を行った場合においても瀬戸内海の潮汐を高い精度で再現できることを示した。このことを踏まえて本研究では以下のように潮汐を再現した。計算範囲の南側境界を潮汐流入境界に設定した。そして、計算範囲の南端とほぼ同緯度に属する3島（那覇、南大東島、父島）の潮位観測値（気象庁公開）を用い、潮汐流入境界の内、赤色で示した部分では那覇と南大東島、緑色で示した部分には南大東島と父島のものを逆距離荷重法により補正した値を境界条件として与えた。なお、計算範囲の東側と西側の境界に潮位を与えた場合、波源域から計算範囲の外に出ていく津波との緩衝が起るため、これらの境界は開境界に設定した。図3-19は潮汐

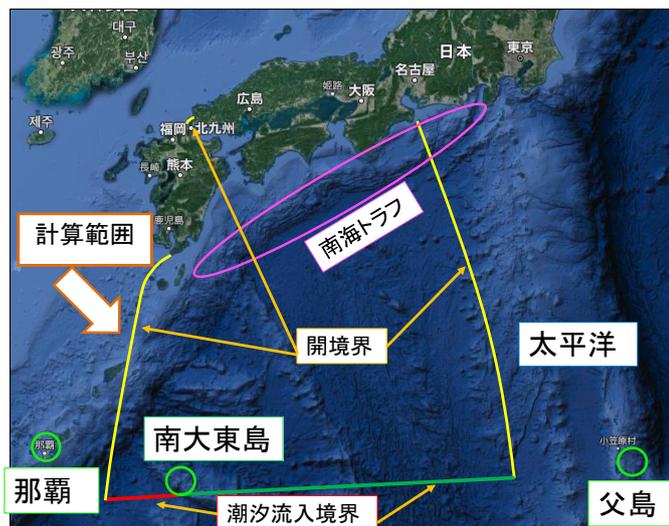


図3-18 潮汐の再現方法

再現計算により岡山県宇野港で得られた潮汐位相を観測データ（気象庁公開）と比較したものである。多少の位相のずれや潮位の違いはあるものの、潮位の時間的な変化や干満差は良好に再現できていることが分かる。

波高の高い波Ⅱから波Ⅳのいずれかのピーク到達が岡山沿岸の満潮時（13時）と重なる場合の4ケース（7時、8時、9時、10時の各時刻に地震発生を想定したケース）について、潮汐-津波同時解析を行った。この解析は潮汐のみの解析で得た各時刻の潮位分布を初期条件として、津波の立ち上がりを3.2.4で説明した方法で再現することで実施した。

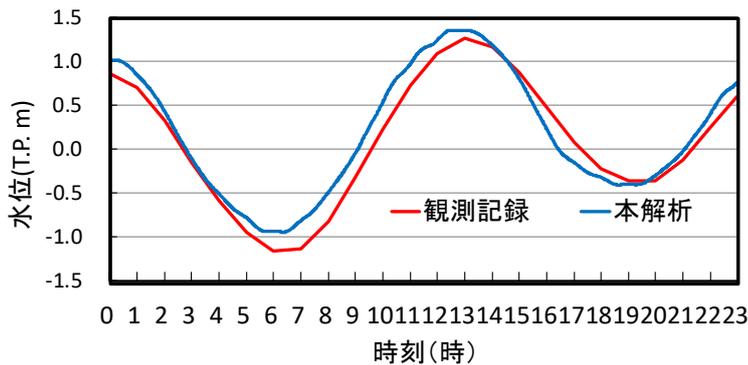


図 3-19 宇野港の潮位

3.6.2 潮汐場における簡易予測モデルの適用方法および精度検証

潮汐場における簡易予測モデルの適用方法について説明する。図 3-20 の上側のグラフは7時に地震発生を想定したケースを例として、潮汐-津波同時解析において鳴門および明石海峡の外側で得られた津波波形（赤線）と潮汐のみの再現計算で得られた潮位の時間的な変化（紺色の線）を示したものである。潮汐を考慮した場合も地震発生時の海底地盤沈降により瀬戸内海側の水位が0.5 m程度下がることを仮定し、両海峡外側における津波振幅の基準を時間ごとの潮位から0.5 mを差し引いた曲線（緑線）とした。各海峡の外側の津波波形（赤線）から緑線の値を差し引くことで潮汐による水位変動の影響を取り除き、図 3-20 の下側に示す津波の振幅のグラフを求める。このグラフにおいてピーク到達時の振幅の最大値とピーク到来前の引き波時の振幅の最小値との差を各津波の波高と定義する。その波高から図 3-10 と図 3-11 で示した近似式により求めた波高比1と図 3-12 と図 3-13 の波高比2を振幅のグラフに波ごとに掛け合わせた。さらに、各海峡部と山田港の津波の到達時間差は潮汐なしの場合と同一と仮定し、鳴門海峡経由の場合は1.32時間、明石海峡経由の場合は1.85時間分をそれぞれ横軸方向に平行移動させた。以上により求めた山田港における両海峡経由の津波の予測波形を潮汐再現計算で得た山田港の潮位から0.5 mを差し引いた曲線を基準に足し合わせた。また、豊後水道側からの津波の影響は潮汐場においても同じであると仮定して、図 3-16 に示した豊後水道側からの水位変動量モデルも足し合わせた。

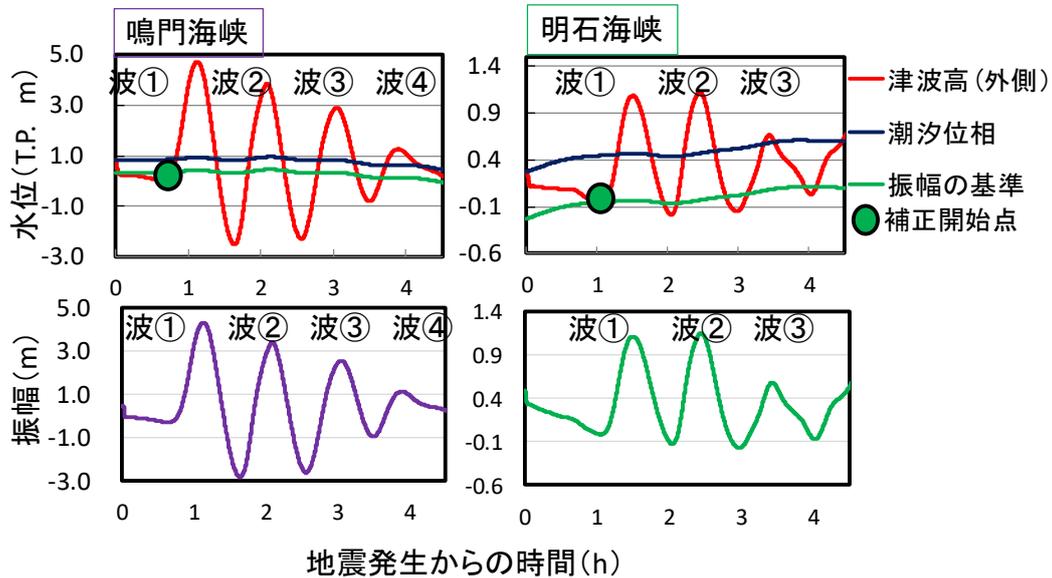


図3-20 潮汐場における各海峡外側の津波の抽出

図3-21は簡易予測モデルによって推定した山田港の津波波形を潮汐-津波同時解析で得た山田港の波形とともに4ケースについて示したものである。津波波形について解析値と予測値とを比較すると山田港の潮汐による水位変動が大きい時刻に到達した津波については全体的に波高が過大評価になっており、特に7時と8時に地震が発生したケースの波①および波②や10時に津波が発生した場合の波④についてはその傾向が顕著である。Leeら¹⁴⁾¹⁵⁾は瀬戸内海の潮汐が津波挙動に与える影響について検討し、潮汐が瀬戸内海のほとんどの沿岸部に到達する津波高を減衰させる傾向があることを示した。今回の簡易予測モデルは潮汐を考慮していない解析結果をもとに構築されているため、津波波高をやや過大に評価していることが考えられる。潮汐により、津波波高が減衰する原因の一つとして、海峡部の内側と外側で生じる潮位差に着目した。特に鳴門海峡は海峡幅が約1.3km¹⁶⁾と狭く、大潮時にはその潮位差が最大1.5 m程度¹⁶⁾に達することが報告されている。図3-22は潮汐-津波同時解析において各津波のピークが鳴門海峡の外側に到達した時刻に潮汐再現計算で得られた海峡の外側と内側の潮位差と波高比1(海峡の内側の波高/海峡の外側の波高)の関係を波ごとにプロットしたものである。このことから鳴門海峡の外側と内側の水位差が大きいほど波高比1の値が小さく海峡通過に伴う波高の減衰が大きくなる傾向が見られる。さらに図3-21に示す解析で求めた津波波形から山田港の波Iでは7時および8時に地震が発生した場合に津波波高(解析値)が比較的小さいが、図3-22からこれらに対応する鳴門経由の波①と波②もこれらの時刻に地震が発生した場合に波高比1が小さくなっているこ

と分かる。また同様に山田港の波Ⅳは10時に地震が発生した場合に波高が小さくなっているが、鳴門経由の波④ではこの時刻に地震が起こった場合に外側と内側の波高比1が小さくなっている。このことから、潮汐を考慮した場合、海峡部での潮位差の影響で津波の減衰が大きくなり、岡山沿岸の津波波高にも影響することが考えられる。しかし、いずれのケースとも満潮付近に到達時刻が重なる最大津波高が良好に一致している。また、各波のピークの到達時刻についてもほぼ正確に予測できている。以上から全体的に最大津波高や波高を過小評価することなく岡山市沿岸の津波波形を予測できていることから、潮汐を考慮した津波予測においても簡易予測モデルは有用であると考えられる。

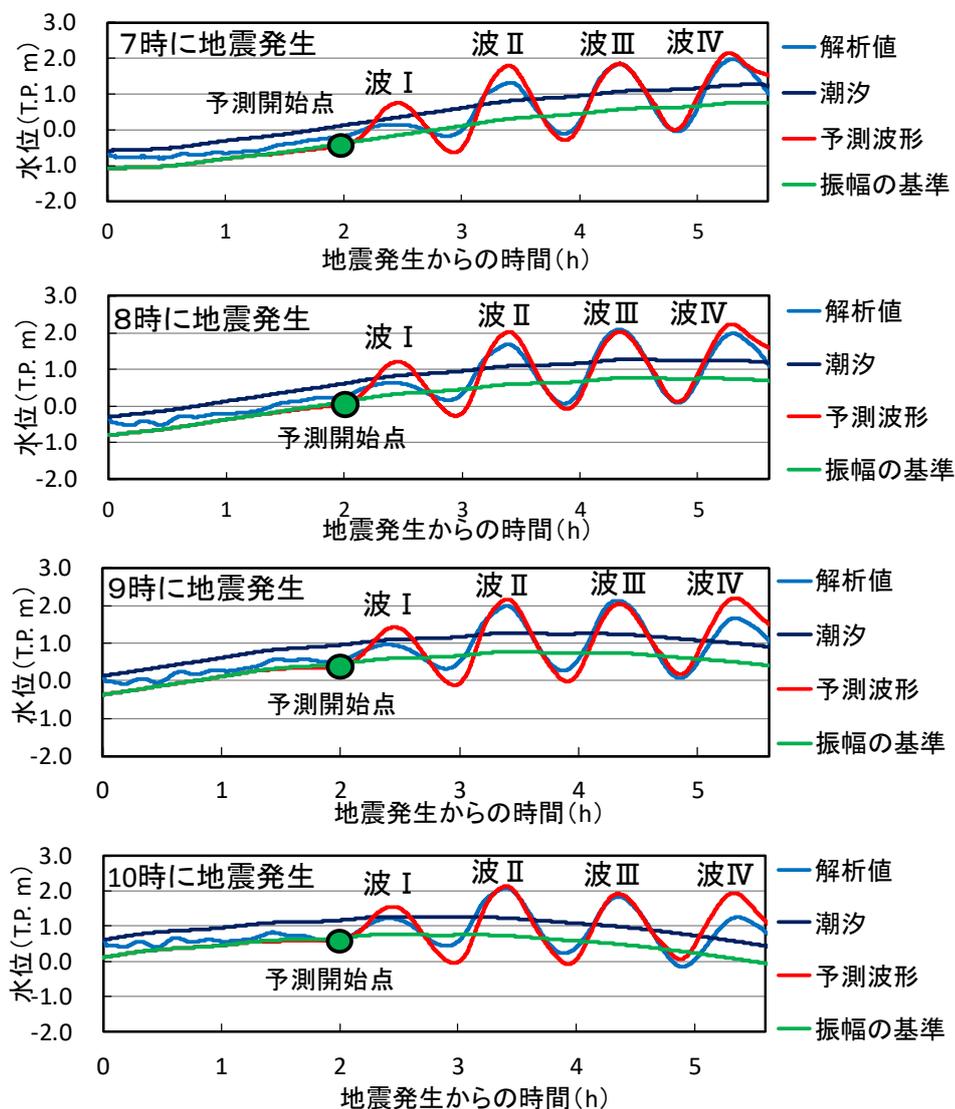


図 3-21 潮汐場における山田港の津波予測波形

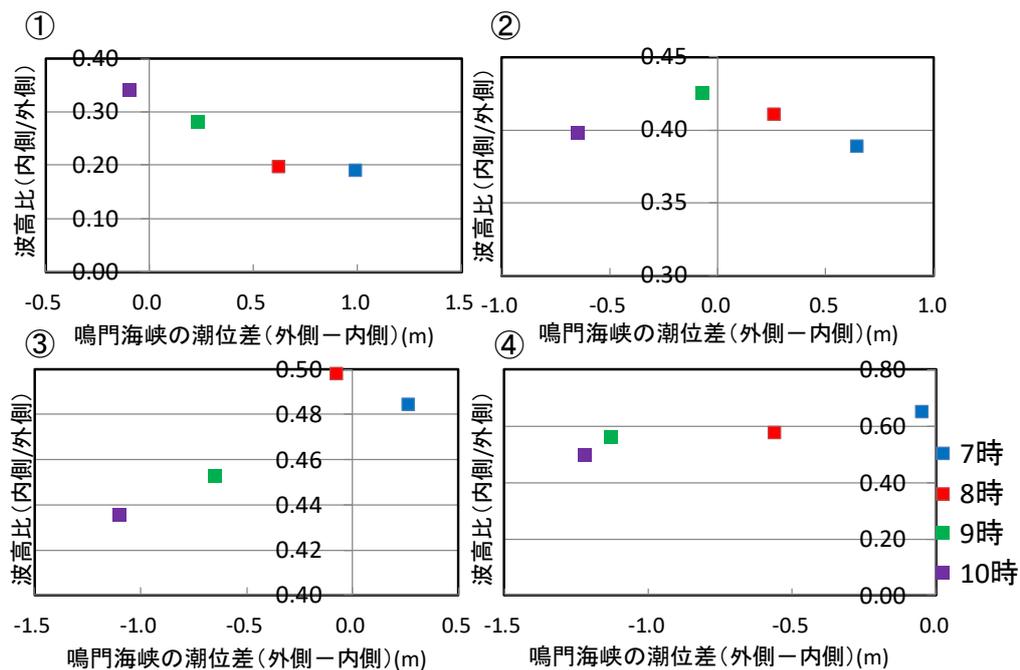


図 3-22 鳴門海峡の潮位差と波高比 1 の関係図

3.7 まとめ

本章では瀬戸内海の津波挙動について検討した既往の研究や波源を含む津波伝播解析結果をもとに、鳴門および明石海峡部の津波波形から岡山市沿岸に襲来する津波波形を津波到達前に予測する簡易予測モデルを検討した。本章の各検討により得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 瀬戸内海は東側の紀伊水道と西側の豊後水道を隔てて太平洋とつながるが、南海トラフ巨大地震発生時には紀伊水道から鳴門海峡と明石海峡を経由する津波が数波に渡って岡山市沿岸を襲う。さらに明石海峡を経由した津波と鳴門海峡を経由する1つ後の津波のピークが播磨灘から備讃瀬戸にかけての海域で重なり合うことにより岡山市に到達する津波波高が増幅する。
- 2) 南海トラフ巨大地震下において、波①から波④の各海峡部伝播時と岡山市沿岸到達時の津波波高に相関関係がある。海峡の外側の波高と波高比1（各海峡の内側の波高/外側の波高）の一次近似式によって再現できる。さらに波高比2（山田港の波高/各海峡の内側の波高）は海峡部の津波の波高の影響は少なく、到来する津波の順番ごとにほぼ一定の値となる。
- 3) 豊後水道側からの津波は岡山市沿岸に波Ⅳが到達する地震発生280分後から360分後にかけて岡山近海の潮位を約0.3 m上昇させる。このため、波Ⅳ以降の津波高の予測において豊後水道側の津波の影響も考慮する必要がある。
- 4) 地点間の波高の相関関係と津波到達時刻の差を考慮することで鳴門海峡および明石海峡の外側で観測された波形から各海峡を経由して山田港に到達する津波波形に変換できる。さらに2つの予測波形の足し合わせにより得られた波形から、各海峡からの津波の重畳により波高が増幅する波Ⅱから波Ⅳの最大津波高および波高がほぼ正確に予測できる。また、簡易予測モデルにより山田港の津波ピークは到達の約80分前に予測可能である。
- 5) 潮汐場においても各海峡における津波の抽出と山田港における予測波形の足し合わせの際に各地点の経時的な潮位変動を考慮することで簡易予測モデルを適用できる。

本章の検討を通して岡山市沿岸の津波挙動やその予測手法に関する大変貴重な研究成果が得られた。しかし、本章の簡易予測モデルでは津波の第1波が波源域から鳴門海峡に到達するまでに約1時間程度かかることから、地震発生から到達津波の情報を得るまでにある程度の時間を必要とする。さらに簡易予測モデルの検討は中防災の11のケースのうち、Case4のみを用いて行っているため、モデルの汎用性に課題が残る。以上を踏まえ次章では津波予測の早期化を目的とし、より波源域に近い海域から岡山市の津波予測を行う手法を検討する。また、津波予測モデルの汎用性の向上を目指し、複数の震源ケースの津波について予測精度の検証を行う。

(参 考 文 献)

- 1) 安田誠宏・高山知司・川村健太・間瀬肇：沖合観測情報を用いたインバージョン法によるリアルタイム津波予測，海岸工学論文集，第54巻，pp.196-200，2007.
- 2) 辰巳大介・富田孝史：震央位置を考慮したインバージョン法によるリアルタイム津波予測，海岸工学論文集，第55巻，pp.246-250，2008.
- 3) 小松雄二・佐々木淳・松丸亮：非構造格子モデルを用いたバンダアチェにおける2004年インド洋大津波の追算，土木学会論文集 B2（海岸工学）Vol. 66，No.1，pp.256-260，2010.
- 4) 赤穂良輔，石川忠晴，畠山峻一，小島崇，都丸真人，中村恭志：岩手県釜石市街地における2011年東北地方太平洋沖地震津波の氾濫解析，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71，No.1，pp.16-27，2015.
- 5) 長谷川賢一，鈴木孝夫，稲垣和男，首藤伸夫：津波の数値実験における格子間隔と時間積分間隔に関する研究，土木学会論文集，No.381/II-7，pp.111-120，1987.
- 6) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室，国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室：津波浸水想定の設定の手引き，Ver2.0，2012.
- 7) 重枝未玲，秋山壽一郎，浦勝，有田由高：非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面2次元洪水流数値モデル，水工学論文集，第45巻，pp.895-900，2001.
- 8) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）津波断層モデル編 一津波断層モデルと津波高・浸水域等について一，2012.
- 9) 吉田和郎，村上仁士，島田富美男，上月康則，大宅祥弘，大谷寛：瀬戸内海における津波の流速・津波高に及ぼす海峡・島の影響に関する一考察，海岸工学論文集，第50巻，pp.321-325，2003.
- 10) 吉田和郎，村上仁士，上月康則，大谷寛，宮本大輔：瀬戸内海への津波伝播に及ぼす紀淡・鳴門・豊予海峡の影響，海岸工学論文集，第51巻，pp.286-290，2004.
- 11) 平石哲也，柴木秀之，原崎恵太郎：想定南海地震津波における共振周期特性の重要性について，海岸工学論文集，第44巻，pp.286-290，1997.
- 12) 宮本大輔，村上仁士，上月康則，久保喬：瀬戸内海における津波挙動に及ぼす潮汐および入射波高，周期の影響，海岸工学論文集，第53巻，pp.261-265，2006.
- 13) 白木喜章，柴木秀之：全球潮汐計算を利用した日本沿岸の広域潮汐計算について，土木学会論文集 B2（海岸工学）Vol. 66，No.1，pp.226-230，2010.
- 14) Han Soo Lee, Tomohisa Shimoyama :Impacts of Tides on Tsunami Propagation in the Seto Inland Sea, Japan, Proceedings of 2013 IAHR World Congress,2013.

- 15) Han Soo Lee:Impacts of Tides on Tsunami Propagation in the Seto Inland Sea, Japan, Proceedings of 2014 IAHR-APD,2014.
- 16) 淡路島 WEB, URL:<http://www.awaji-web.com>.

第4章

紀伊水道入口部の津波波形を用いた岡山市沿岸の津波ピークのリアルタイム予測法の検討

4.1 本章の概要

前章では岡山沿岸は紀伊水道から鳴門海峡と明石海峡を經由した津波の被害を受ける¹⁾ことを踏まえて、両海峡で得られた津波波形から岡山沿岸の津波波形を到達の約80分前に予測できることを示した。しかし、特に津波遡上被害の程度に大きな影響を与える津波ピーク水位や津波避難の成否に関わる津波ピーク到達時刻についての情報はより早い段階で住民に提供できることが津波防災上望ましい。そこで、本章では岡山市の津波対策のさらなる迅速化に資するために、両海峡より波源に近い海域で得られる津波波形から岡山沿岸の津波ピークを予測する手法を検討する。

両海峡から岡山市沿岸にかけての津波波形は周期が約60分の規則波に近い波形であるのに対し、紀伊水道以南の海域の津波波形は四国や紀伊半島からの反射波など様々な周期の波を含む不規則波となっている。そのため、前章のように観測波形から直接地点間の波高の相関関係や津波到達時間差を検討し、岡山岸の津波予測につなげることは困難であると考えられる。そこで瀬戸内海に伝わる約60分周期の津波の成分を紀伊水道以南の海域で得られた津波波形から抽出し、その波高やピーク到達時刻をもとに山田港に到達する津波ピークを予測する手法（以下簡易予測法）の構築を行う。また簡易予測法の汎用性についても検討するため、中防災が想定するすべての震源ケースにおいて精度の検証を行う。さらに前章と同様に潮汐場における予測法の適用可能性についても検証する。

4.2 津波伝播解析の概要

本章では震源ケースの違いが岡山市沿岸の津波挙動に与える影響についても考察し、汎用性の高い津波予測法を検討する。表 4-1 に示すように中防災が想定する南海トラフ巨大地震の震源ケースは全 11 ケースありであり、波源の位置が南海トラフに沿って変化する基本的な検討ケース（5 ケース）と分岐断層が生じる場合や波源が 2 か所に生じる場合を考慮した派生的な検討ケース（6 ケース）の 2 つに分かれる。そこで、すべての震源ケースについて前章と同様の津波伝播解析を行うため、図 4-1 に示すとおり南海トラフ全体を含むように解析範囲を前章のものより東側に拡張した。海域ごとのメッシュサイズの取り方については前章で述べた通りであり、全メッシュ数は、653,112 個、節点数は 339,170 個である。なお、図 4-2 には紀伊水道から燧灘にかけての計算範囲の拡大図を示す。

本章では主に基本的な検討ケースの解析結果を簡易予測法の検討に用い、派生的な検討ケースも含めた 11 ケースすべての解析結果を簡易予測法の精度検証に用いる。解析で得た各地点の波形について、本章においても紀伊水道の津波とそれらが重なった岡山県山田港の津波を区別するため、到達順に前者を波①から波③、後者を波 I から波 IV と表記する。なお、波は各地点において初期水位を基準にゼロダウンクロス法でとるものとする。本章では複数の波源について検討を行うが、説明に用いる各地点の津波波形図では波の区切り方やパラメータの取り方はすべて Case4 を基準に示す。

表 4-1 中央防災会議の震源ケース

ケース番号	震源の位置
Case1	駿河湾～紀伊半島沖に「大すべり域＋超大すべり」域を設定
Case2	紀伊半島沖に「大すべり域＋超大すべり域」を設定
Case3	紀伊半島沖～四国沖に「大すべり域＋超大すべり域」を設定
Case4	四国沖に「大すべり域＋超大すべり域」を設定
Case5	四国沖～九州沖に「大すべり域＋超大すべり域」を設定
Case6	駿河湾～紀伊半島沖に「大すべり域＋(超大すべり域、分岐断層)」を設定
Case7	紀伊半島沖に「大すべり域＋(超大すべり域、分岐断層)」を設定
Case8	駿河湾～愛知県東部沖と三重県南部沖～徳島県沖に「大すべり域＋超大すべり域」を2箇所設定
Case9	愛知県沖～三重県沖と室戸岬沖に「大すべり域＋超大すべり域」を2箇所設定
Case10	三重県南部沖～徳島県沖と足摺岬沖に「大すべり域＋超大すべり域」を2箇所設定
Case11	室戸岬沖と日向灘に「大すべり域＋超大すべり域」を2箇所設定

基本的な検討ケース(5ケース)
 派生的な検討ケース(6ケース)

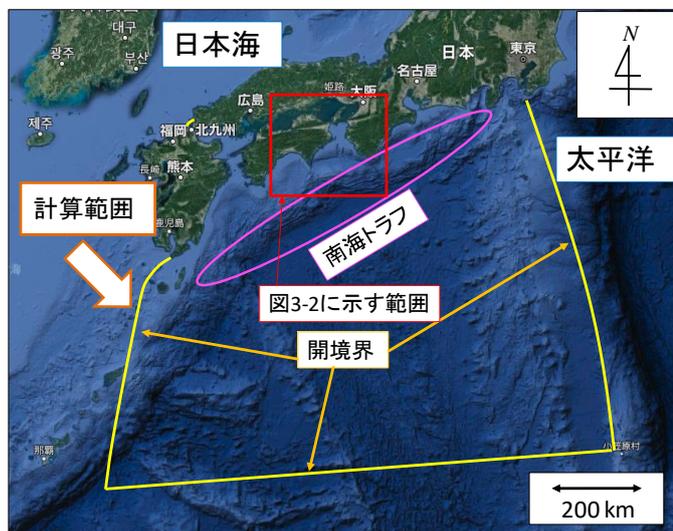


図 4-1 計算範囲と計算境界の設定

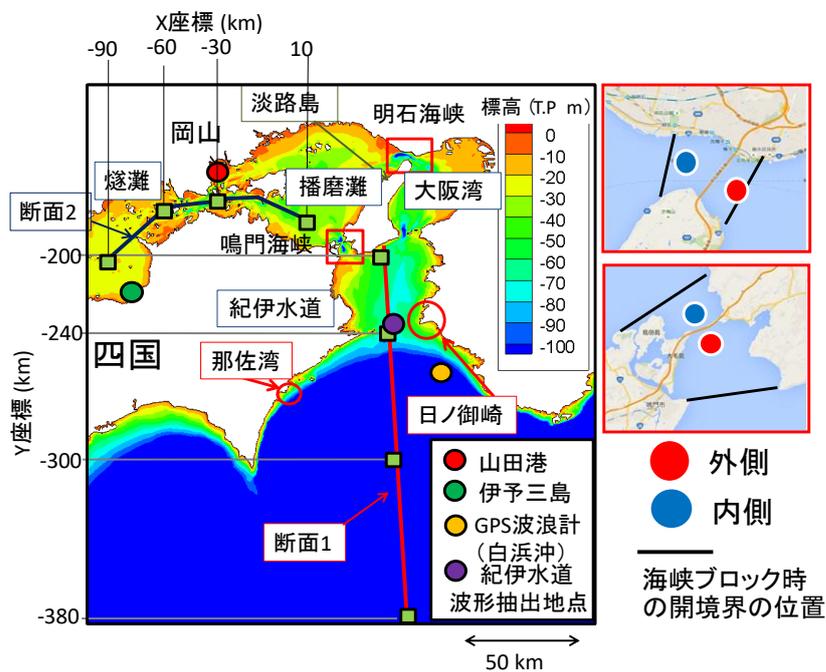


図 4-2 紀伊水道から瀬戸内海の主な地名および標高分布

4.3 簡易予測法の着想と方針

図4-3に基本的な検討5ケースの津波伝播解析で得られた山田港の津波波形を示す。いずれのケースも周期が約60分の規則波に近い波形が確認できる。また、ピーク到達時刻や各波のピーク水位と谷部の水位の平均値（以下振幅の基準）も波源の位置によらずほぼ一定となっていることが分かる。波高については震源ケースごとに差が見られるが、どのケースの波形も波II以降の津波波高が波Iよりも相対的に大きいことから、前章で示した鳴門海峡および明石海峡を経由した津波の重畳が波源の位置に関係なく岡山近海で起きていることが分かる。このことを踏まえ、山田港に到達する各海峡経由の津波の波高を海峡部より波源に近い海域で得られた津波波形から事前に予測できれば、どの震源ケースの津波においても津波のピーク水位やその到達時刻をより迅速に予測できると考えられる。

簡易予測法の方針について図4-4を用いて説明する。各海峡部から岡山近海にかけての津波波形が規則波に近い波であるのに対し紀伊水道以南の海域の津波は様々な周期の波成分が含まれる不規則波となっている。不規則波に含まれる波成分には四国や紀伊半島からの反射波等岡山方面に伝播しない波もあり、そのままの波高から前章と同様に地点間の波高比の検討を行うことは困難であると考えられる。そこで、紀伊水道で得られた波形から瀬戸内海方面に伝播する周期の規則波を抽出し、その波高から各海峡外側、さらには山田港の各海峡経由の津波の波高を予測する手法を検討する。そして、岡山近海で重なり合う各海峡経由の津波について、解析結果から別途検討した振幅の基準をベースにそれぞれの予測波高を半分ずつ足し合わせることで山田港の津波のピーク水位を推定する。また、山田港の津波ピーク到達時刻については、津波の伝播速度や経由する海域の固有振動周期などに着目し早期予測する手法を検討する。波IV以降のピークは燧灘側からの津波の影響を受けることが前章の検討により明らかになっている。そこで予測の対象波を波IIIまでとする。

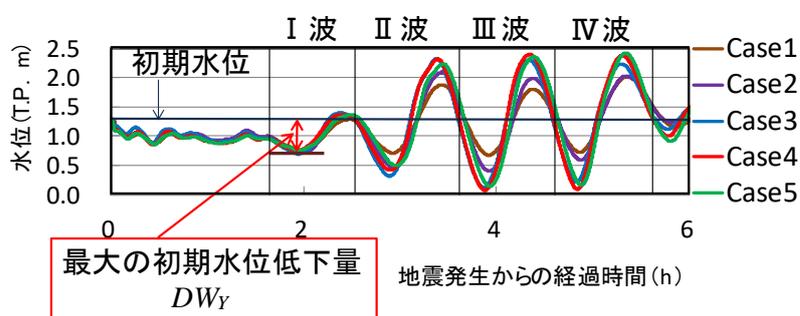


図4-3 山田港の津波波形（基本的な検討ケース5ケース）

なお、各海峡側の波高を山田港の津波波高に変換する手法は前章で検討しているため、本章では紀伊水道以南の海域で得られた波形から各海峡外側の津波波高を予測する手法を主に検討する。

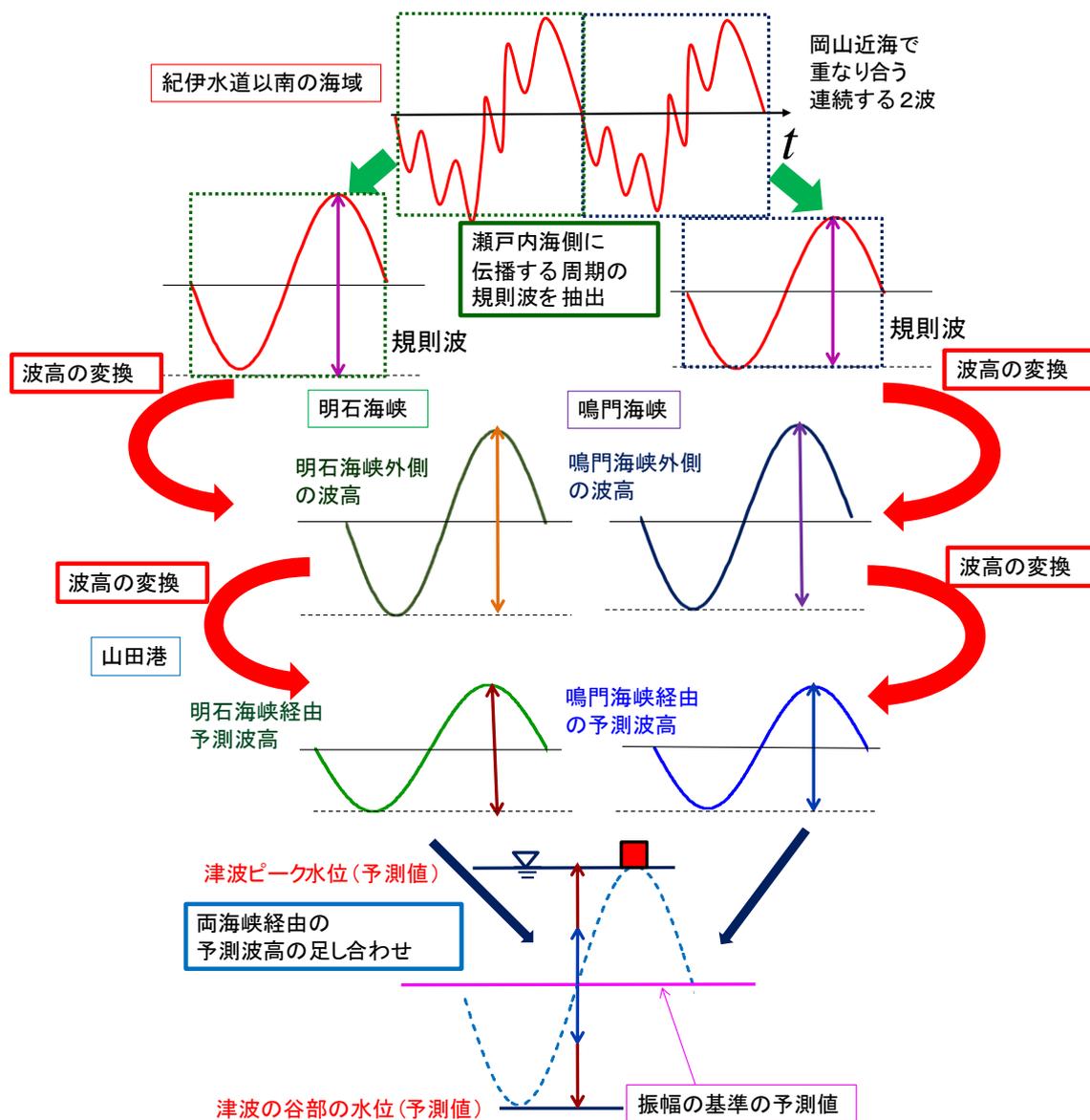


図 4-4 簡易予測法の概要

4.4 紀伊水道の津波挙動と波形抽出点の位置の選択

前章で示したとおり鳴門および明石海峡部から岡山市の海域の津波波形は周期が約 50 分から 60 分の規則波に近い波形になっている。そこで、各海峡（外側）から瀬戸内海側に伝播する津波挙動を正確に予測するためには、紀伊水道以南の海域のうち、瀬戸内側と同周期の津波が観測される海域に波形抽出点を設けることが望ましい。以上を踏まえ、波形抽出点の最適な位置について検討する。

まず、現時点で既にナウファスの GPS 波浪計が設置されている和歌山県白浜沖（位置は図 4-2 の黄色丸印）を波形抽出点の第 1 候補とした。図 4-5 の左側の図にこの地点で得られた波①の波形を示す。まず、震源ケースごとに波形が大きく異なることからこの地点の波形は波源の水位変動の分布の影響を強く受けていることが考えられる。また、比較的短周期の波が見られる。村上・高谷ら²⁾はカムチャッカ地震津波の観測記録からこの海域面する徳島県沿岸の那佐湾（図 3-2）の固有振動周期が瀬戸内側で見られる津波よりも短い約 21 分と 11 分程度であることを示している。さらに吉田ら³⁾は太平洋から瀬戸内海に伝播する津波挙動について数値解析により検討し、紀伊水道入口より南の外洋域では、那佐湾の固有振動周期とほぼ等しい約 25 分周期の波成分が卓越することを示している。和歌山県沿岸にも那佐湾と同規模の湾が多数存在することから、GPS 波浪計の位置の波形は沿岸の湾からの反射波の影響も受けていることが考えられる。以上の通り、白浜沖の GPS 波浪計が設置されている位置では周期が短い波が卓越し、初期水位を基準にとった津波の周期がケースごとに大きく異なることからこの地点からの津波予測は困難であると判断した。紀伊水道入口よりも北側の海域では瀬戸内側とほぼ同じ約 50 分周期の波成分が卓越することが吉田ら⁴⁾の検討により示されている。ここで、紀伊水道の津波挙動について詳

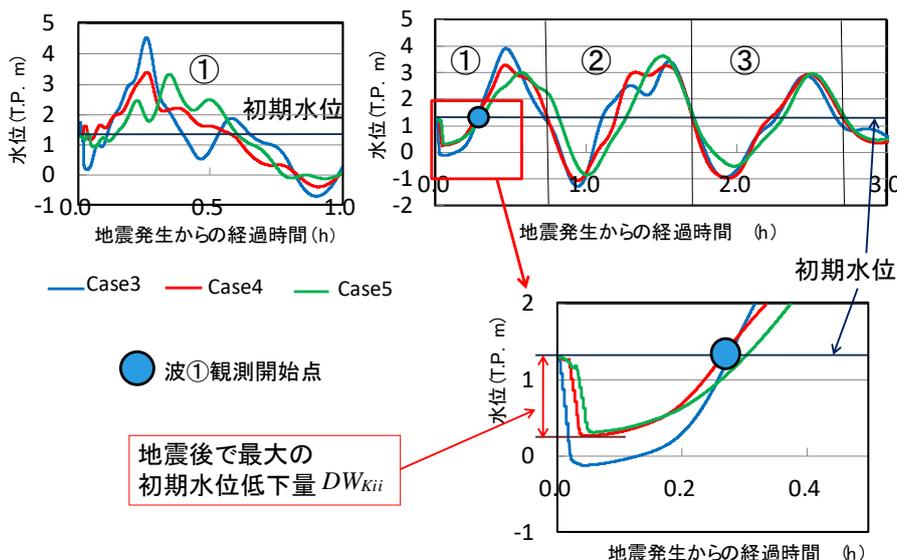


図 4-5 紀伊水道以南の海域の津波波形

細に検討する。図4-6はCase4を例に、断面1(図4-2)の各波到来時の水位分布を示す。この図のうち一番上の水位分布図から、波①は、そのピークが時間ごとに太平洋から紀伊水道を北上していることから、波源からの進行波であることが分かる。一方で、図4-6の2番目と3番目の図から、波②到来以降、波源から直接北進する進行波は見られず、紀伊水道の北端と入口を腹とするセイシュが発生していることが分かる。紀伊水道入口において波②と波③のピークがそれぞれ地震発生後の90分後と150分後にみられることから、セイシュの周期が紀伊水道の固有振動周期とほぼ同じ約60分周期であることが分かる。このためセイシュは紀伊水道内の津波の共振により生じたものと考えられる。鳴門海峡と大阪湾は、淡路島(図4-2)からの反射波の影響によりセイシュの腹となる紀伊水道の北端に接続しているため、その水位変動が進行波として岡山方面に伝わり、岡山市に数波にわたり津波が押し寄せることが考えられる。また、上記のとおり紀伊水道入口はセイシュのもう一方の腹となっており、ここで得られた経時的な波形からセイシュの波形を抽出できれば、前章と同様に波高比の関係から瀬戸内海に伝わる津波の大きさを予測できると考えられる。以上を踏まえ、紀伊水道入口の中央部付近(和歌山県日ノ御崎南端から西側に約15km(図4-2の紫色丸印))の津波波形を図4-5の右側に示す。各ケースの波形が比較的規則波に近い波形であり、初期水位を基準にゼロダウンクロス法を適用すると約60分周期の津波を抽出可能であると判断できる。以上からこの地点を波形抽出点に定めた。

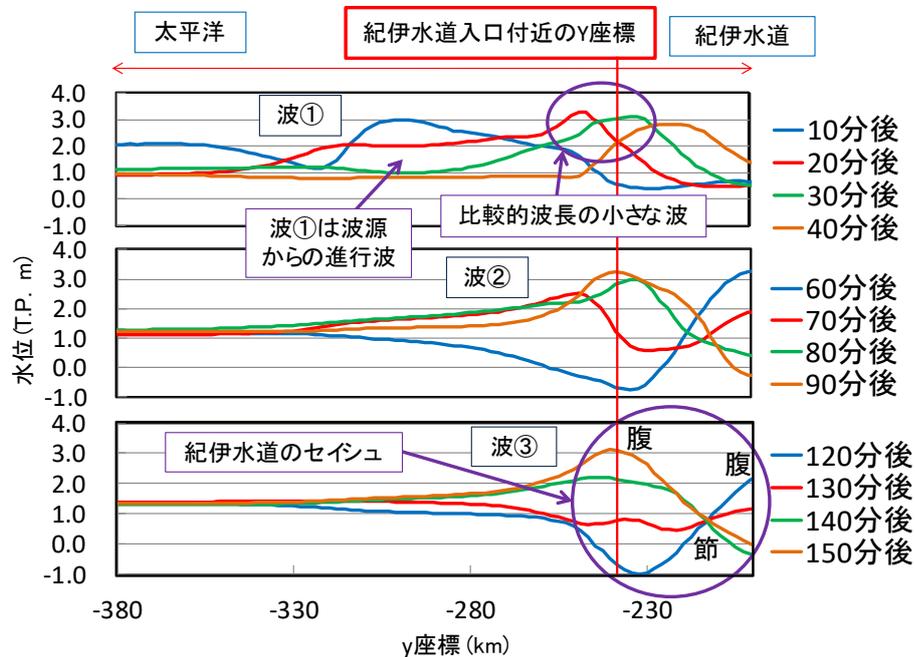


図4-6 紀伊水道の津波挙動

4.5 フーリエ解析とその適用方法

4.5.1 フーリエ解析の説明

フーリエ解析は不規則波の波形を異なる周期の規則波に分解するための数学的手法である。以下にフーリエ解析の式を示す。

$$f(t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right\} \quad (4.1)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \quad (n=1,2,3 \dots) \quad (4.2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \quad (n=1,2,3 \dots) \quad (4.3)$$

ここに、 t ：時間、 $f(t)$ ：分解前の波形、 T ：分解前の波の周期（データ長）、 n ：分解波の次数、 a_n ：各次数の分解波（余弦波）の波高、 b_n ：各次数の分解波（正弦波）の波高、 dt ：積分計算におけるデータの刻み幅

式(4.1)より元の波形はフーリエ解析により、次数ごとに周期が異なる余弦波と正弦波の成分に分解される。また、式(4.1)の右辺第2項は分解された n 次の波成分の周期が分解前の波形の周期を n で割った長さとなることを示している。さらにここから分解された波成分の周期の最大値は1次の波成分の周期であり、分解前の波の周期（データ長）と等しくなることが分かる。以降分解前の津波と等しい周期を持つ1次の正弦波を基本波と呼ぶ。また、各次数 n の余弦波と正弦波の波高はそれぞれ a_n 、 b_n と表記され、その値は式(4.2)および式(4.3)によりそれぞれ次数ごとに独立に求まる。

4.5.2 フーリエ解析の適用方法

図4-7はフーリエ解析の適用時点と適用範囲をCase4の波形を例に示したものである。地震発生後に最初に初期水位に戻る時点を波①観測開始点とし、初期水位を基準としたゼロダウクロス法により各波を取った。フーリエ解析は、各波について一周期分の波形データに適用する。ただし、波①については半周期分のデータしか得られていない。そこで、半周期分のデータを波①観測開始点に対して点対称になるように折り返すことで作成した一周期分のデータにフーリエ解析を適用した。GPS波浪計は1秒ごと⁴⁾に水位を計測することを踏まえ、波形データは1秒おきにとったものを用いた。したがって1回のフーリエ解析のデータ数は各波の周期の秒数と等しくなる。

紀伊水道では約50分周期の津波が卓越するが、約25分周期の津波も見られることが吉田ら³⁾により示されており、その波成分の影響の有無まで検討するため3次までの波成分まで考慮した。図4-8はCase4の波②を例に、波形抽出点で得た津波波形をフーリエ解析

により分解した波成分の波形を示したものである。この波ではもとの波の周期が約 1 時間であり、基本波の波高が他の波成分と比べて圧倒的に高くなっていることが分かる。ここから、紀伊水道の固有振動周期とほぼ等しくなっていることが分かる。しかしその一方で 2 次および 3 次の波成分の波高も約 0.6m 程度であり、この地点の波形に異なる周期の波が含まれていることが分かる。

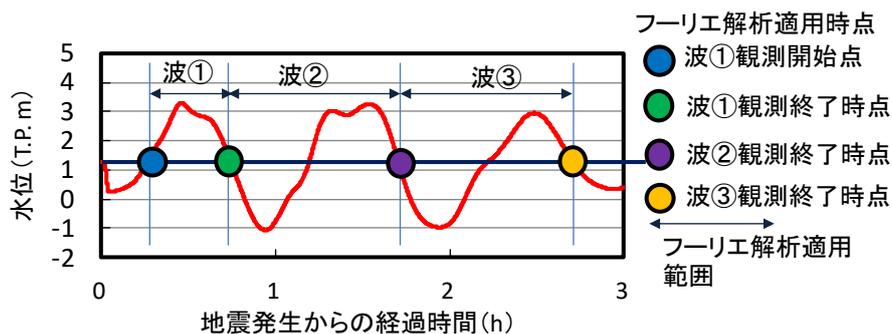


図 4-7 フーリエ解析の適用

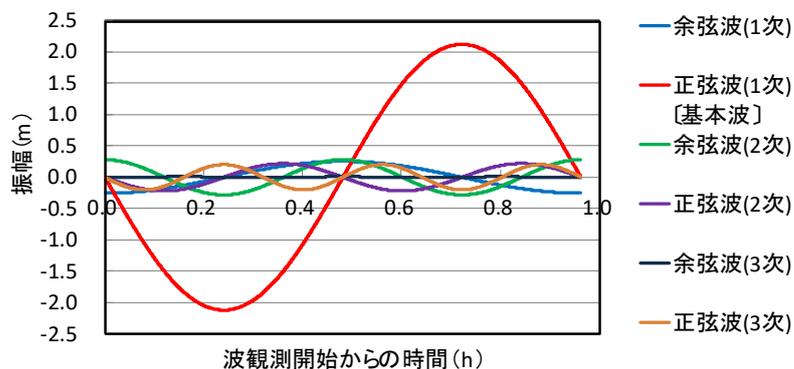


図 4-8 フーリエ解析による分解波 (Case4 の波②)

4.6 波高相関関係式の検討

4.6.1 地点間の波高相関関係の検討

図 4-9 は各海峡部の外側で得られた津波波形を示す。図 4-10 は Case4 の波②を例に、波形抽出点で得た津波波形をフーリエ解析により分解した波成分（図 4-8）のうち、次数 k の波成分までを足し合わせた波形（以下合成波（ k 次））（右側）を示しており、合成波（ k 次）の波形は以下に示す式（4.4）で求められる。

$$f_k(t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt + \sum_{n=1}^k \left\{ a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right\} \quad (4.4)$$

ここに、 t ：時間、 $f_k(t)$ ：合成波（ k 次）の波形、 T ：分解前の波の周期（データ長）、 n ：分解波の次数、 a_n ：各次数の分解波（余弦波）の波高、 b_n ：各次数の分解波（正弦波）の波高、 dt ：積分計算におけるデータの刻み幅

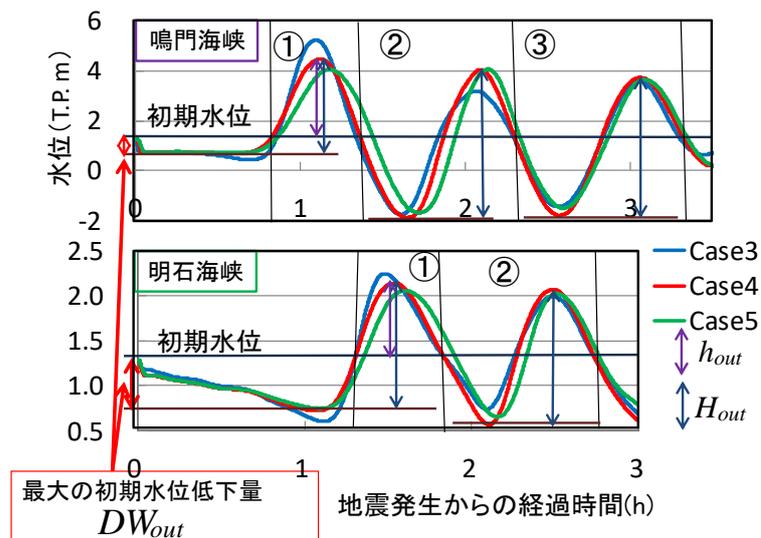


図 4-9 各海峡外側の波形

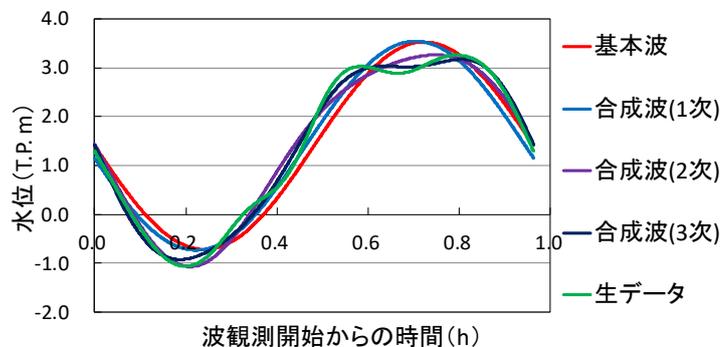


図 4-10 合成波の波形（Case4 の波②）

ここから高い次数まで足し合わせた合成波の波形ほどもともとの津波波形（図 4-9 の生データ）に近い形になっていることが分かる．この 5 種類の合成波（生データを含む）のうち、各海峡部外側の津波と波高の相関が高い波を検討した．この検討は、中防災の 5 つの基本的な検討ケースに、Case4 のすべり量を 0.8 倍および 1.2 倍に変化させた 2 ケースを加えた計 7 ケースをサンプルに行った．図 4-11 に相関関係を検討する紀伊水道の波と各海峡部の波の対応関係を矢印で示す．基本的に波ごとに相関関係を検討するが、前節で示した図 4-6 から波③は先に到達した波により紀伊水道内で引き起こされたセイシュであることから、波形抽出点の波②の波高と鳴門海峡の波③の波高の間に相関関係があることが考えられる．そこで波高予測のさらなる早期化を目指し、鳴門海峡の波③については紀伊水道の波②との相関関係を検討した．

図 4-12 はそれぞれの波について波形抽出地点の波高として用いた各合成波の波高と鳴門および明石海峡部外側の波高の相関係数の 2 乗値（以下 R^2 値）を比較したものである．鳴門海峡の波①の結果では合成波（2 次）との相関が最も高くなっているが、全体的に両海峡とも基本波および合成波（1 次）の R^2 値が高く、短い周期の波まで足し合わせた合成波ほど R^2 値が小さくなる傾向が見られる．つまり元々の不規則波の波高よりもそこから抽出した約 60 分周期の波成分の波高が各海峡部の波高と高い相関関係を持つことが分かる．以上から、不規則波に含まれる波成分のうち、紀伊水道の南北方向に生じる約 60 分周期のセイシュの成分が海峡部を経由し、岡山市沿岸に達することがこの結果からも分かる．そこで本研究では計算の簡便性も考慮し、図 4-13 に示す波形抽出点で得られた各波

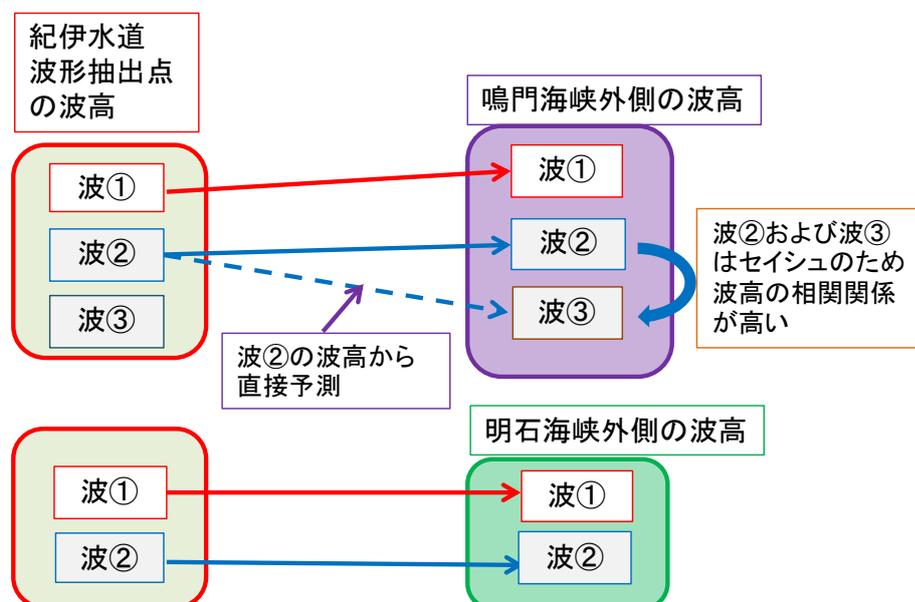


図 4-11 波高予測の概要

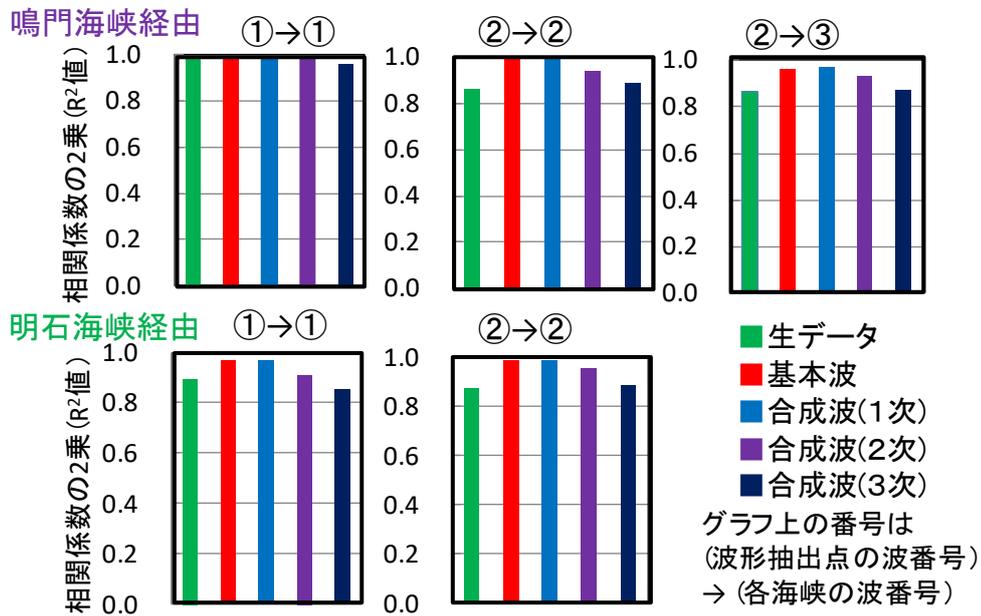


図 4-12 波高相関関係の比較

の基本波の波高 H_{Kii} と H_{out} との相関関係式を各海峡（外側）の波高の予測に用いる。図 4-13 から、7つのケースのデータがほとんど近似式に沿って並んでおり、震源ケースに関係なくこれらの式から各海峡外側の津波波高を予測できると考えられる。ただし、波①については、フーリエ解析で得られた波形抽出点の半波高 h_{Kii} と海峡部の半波高 h_{out} （図 4-9）の相関関係式を示しており、 H_{out} の予測値は上の相関関係式で求まる h_{out} の予測値と各海峡外側の初期水位低下量 DW_{out} （図 4-9）の予測値を足して求める。紀伊水道入口付近の地震発生時の水位低下量は他の海域と比較しても非常に大きく、その影響が北側に伝播し各海峡部の水位低下量に影響していることが考えられる。そこで波形抽出点と各海峡部の初期水位変動量の相関関係を詳細に検討するため、上記の7ケースに Case4 の初期水位変動量を 0.5 倍および 1.5 倍した 2 ケースを加えた 9 ケースの解析結果をサンプルに波形抽出点と各海峡の初期水位低下量（ DW_{Kii} と DW_{out} ）の相関関係式を求めた。なお図 4-5 と図 4-9 に示すように DW_{Kii} と DW_{out} は各地点における地震発生後から波①到達前の最大の水位低下量を指す。図 4-14 に相関関係式を示す。各ケースのデータの並びから、両者の間に高い相関関係があることが分かり、これらの式により DW_{Kii} から DW_{out} の予測値を求められることが分かる。表 4-2 に本節で構築した全ての相関関係式を示す。

図 4-15 は 11 の波源ケースにおいて、表 4-2 の各相関関係式を用いて算出した H_{out} の予測値を解析値と海峡ごとに比較したものである。ここからいずれの波も予測値が解析値とほぼ一致しており、高い精度で予測ができていることが分かる。

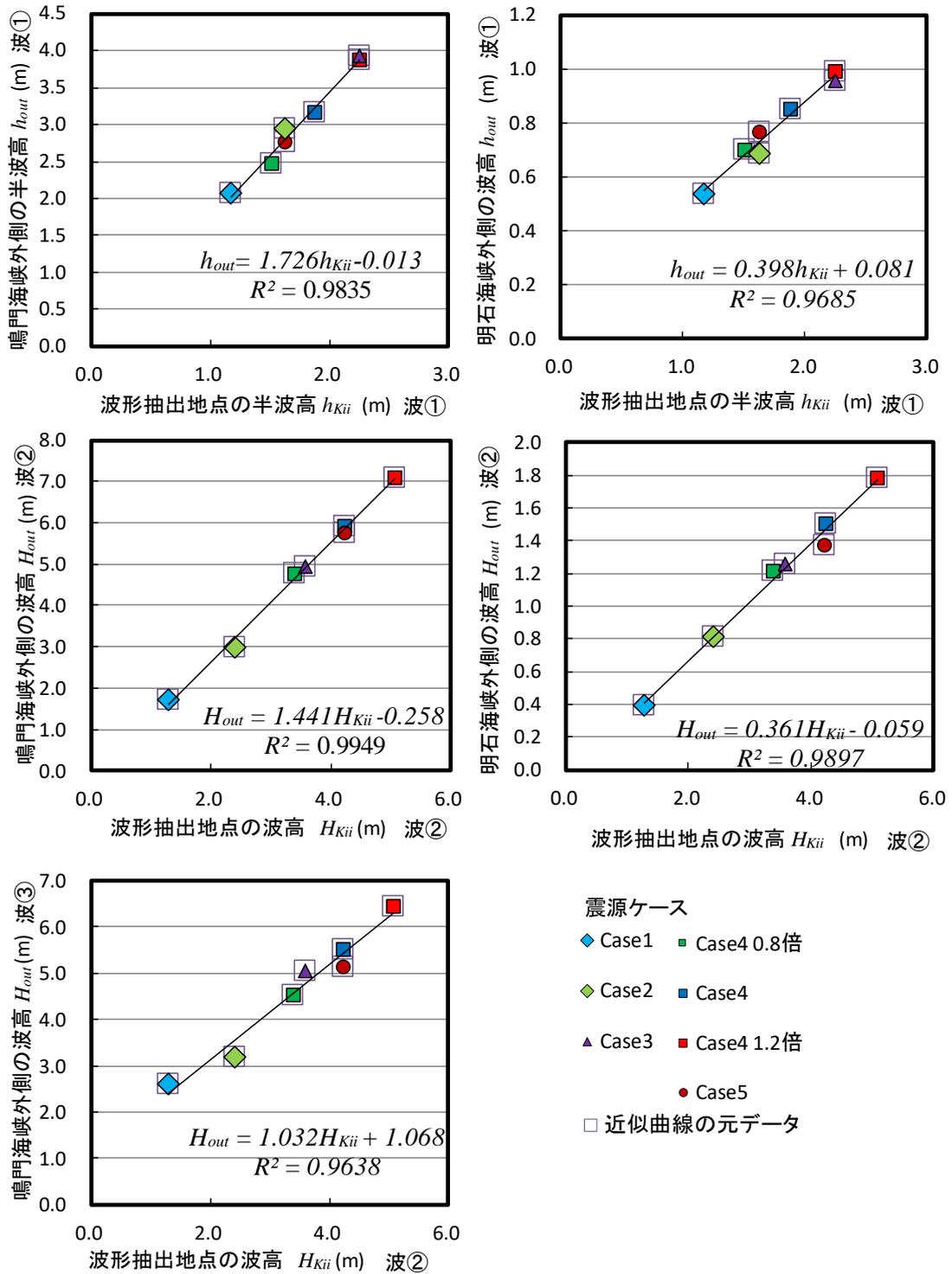


図 4-13 波形抽出点と海峡部外側の波高相関関係式

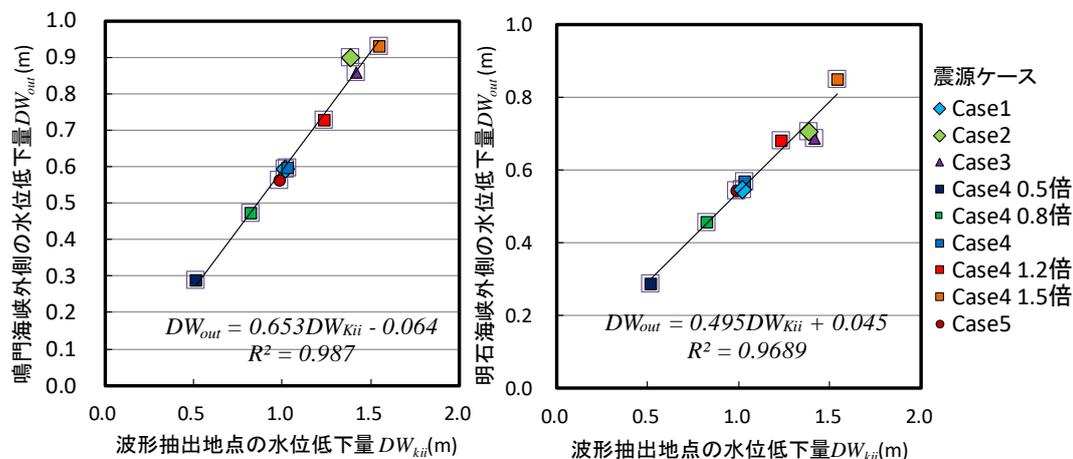


図 4-14 波形抽出点と海峡部外側の初期水位低下量の相関関係式

表 4-2 各相関関係式

経由する海峡	説明変数(m)	目的変数(m)	相関関係式	R^2 値
鳴門海峡	h_{Kii} (①)	h_{out} (①)	$h_{out} = 1.726H_{Kii} - 0.013$	0.9835
鳴門海峡	H_{Kii} (②)	H_{out} (②)	$H_{out} = 1.441H_{Kii} - 0.258$	0.9949
鳴門海峡	H_{Kii} (②)	H_{out} (③)	$H_{out} = 1.032H_{Kii} + 1.068$	0.9638
鳴門海峡	DW_{Kii}	DW_{out}	$DW_{out} = 0.653DW_{Kii} - 0.064$	0.9870
明石海峡	h_{Kii} (①)	h_{out} (①)	$h_{out} = 0.398H_{Kii} + 0.081$	0.9685
明石海峡	H_{Kii} (②)	H_{out} (②)	$H_{out} = 0.361H_{Kii} - 0.059$	0.9897
明石海峡	DW_{Kii}	DW_{out}	$DW_{out} = 0.495DW_{Kii} + 0.045$	0.9689

* 括弧内の数字は波番号 * 相関関係式の傾きと切片は小数第3位まで表示

各海峡外側の津波波形から山田港到達時の津波波高への換算は、Case4 の波源の初期水位変動量を 0.1 倍刻みに 0.5 倍から 1.5 倍にした 11 ケースの解析結果から前章と同手法で求めた図 4-16 に示す H_{out} と波高比 1 (各海峡の内側の波高 H_{in} / H_{out}) および H_{in} と波高比 2 (山田港到達時の津波波高/ H_{in}) の対数関数の相関関係式を用いて行う。

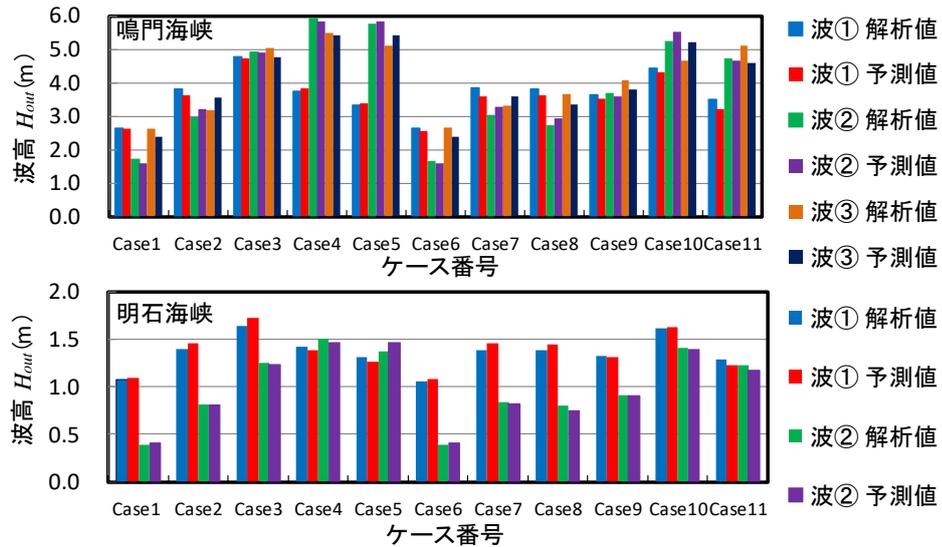


図 4-15 各海峡外側の波高予測精度

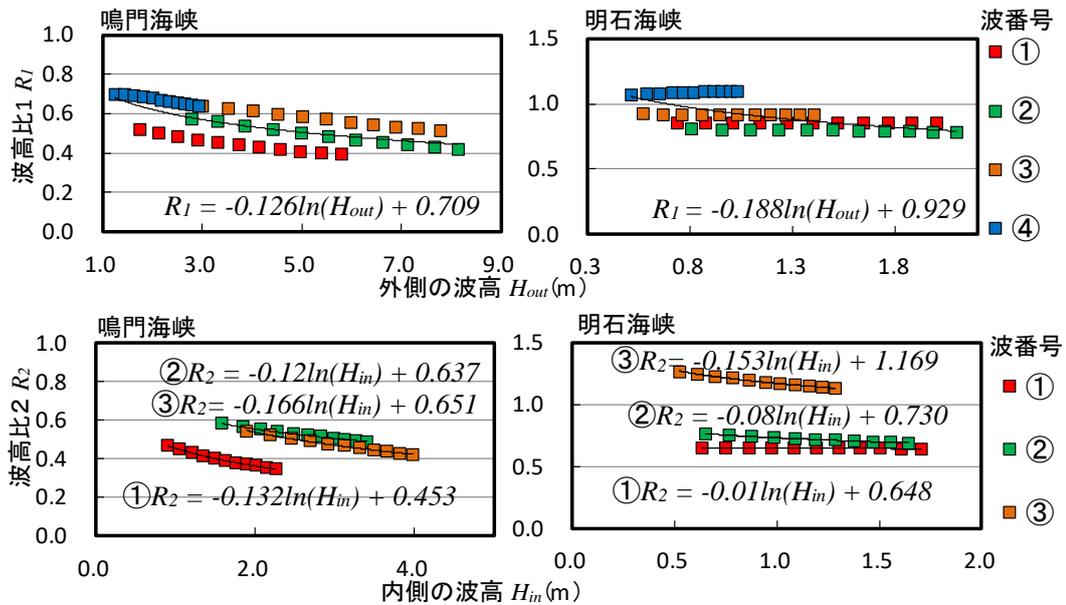


図 4-16 各海峡外側から山田港の波高の予測に用いる相関関係式

4.6.2 数値実験による波高相関関係式の妥当性についての検討

波形抽出点と各海峡部外側の波高相関関係式の妥当性について検証するため、吉田ら³⁾、宮本ら⁵⁾と同様に、伝播海域における津波波高の変化を検討する数値実験を行った。数値実験の概要について図4-17を用いて説明する。上側の地図に示す範囲において初期水位を津波解析と同様のT.P. 1.29 mに設定した。高知県室戸崎から約30km南に設定した正弦波流入境界から、波高2 m、周期が紀伊水道の津波とほぼ等しい50分、55分、60分の正弦波をそれぞれ1波のみ与えた。紀伊水道において固有振動により複数の波が生じたが、波形抽出点と両海峡外側で初期水位に対して上下の対称性が高かった第2波について、各地点でフーリエ解析を適用し基本波を抽出した。そして、各海峡部で得られた基本波の波高を波形抽出点の基本波の波高で除した波高比の値を求めた。この値を海峡ごとに図4-18に示す。鳴門海峡では1.3から1.4、明石海峡では0.3から0.4程度となっており、両海峡とも各周期の基本波成分の波高比が波②同士の相関関係式(表4-2)の傾きの値とほぼ一

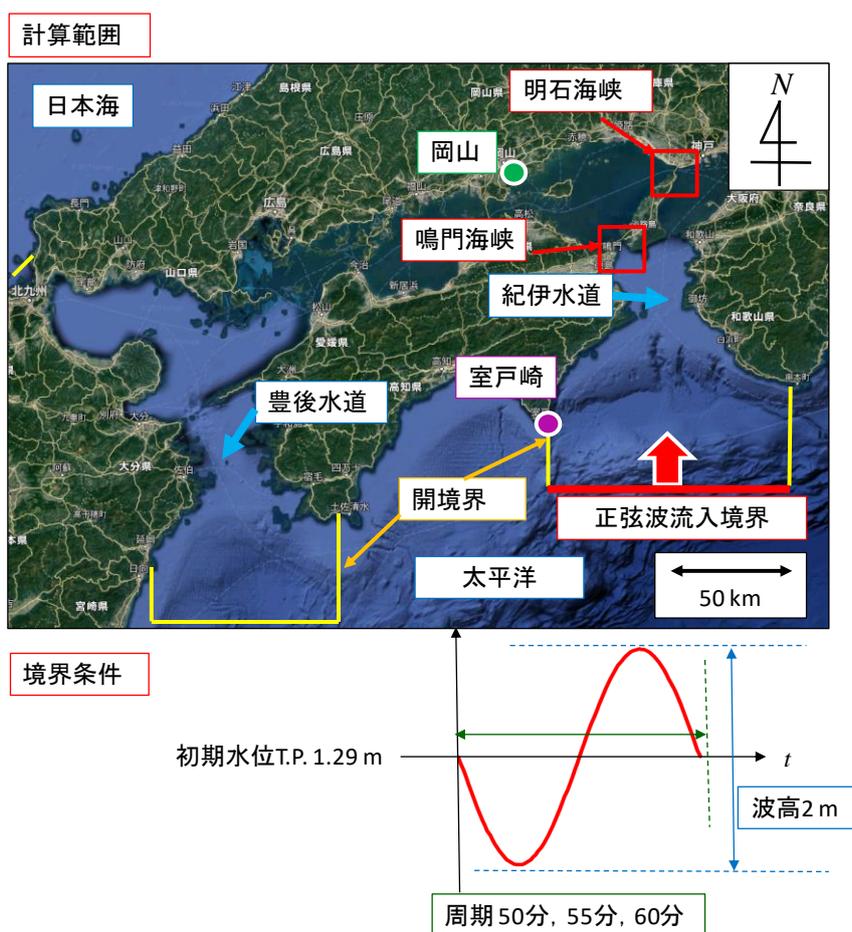


図 4-17 数値実験の概要

致している。このことから、波高相関関係式の傾きが紀伊水道から岡山方面に伝わる周期帯の津波について、波形抽出点から各海峡通過時に至る波高の変化を反映していることが分かり、本研究で検討した波高相関関係式の妥当性が示された。

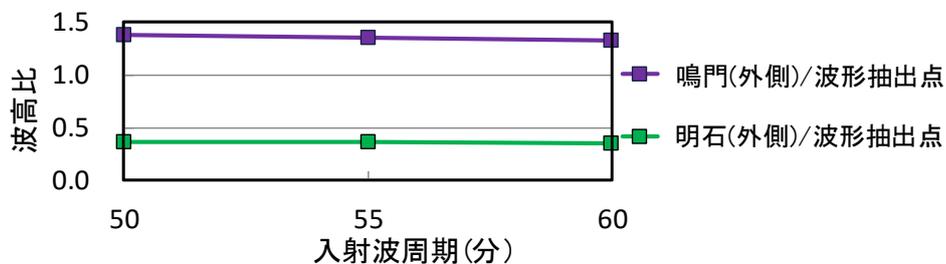


図 4-18 数値実験の結果

4.7 山田港における振幅の基準の検討

4.7.1 振幅の基準の検討方針

図4-3の5ケースの結果から、山田港の各波の振幅の基準は波Iのみ比較的低く、波II以降の波ものは初期水位とほぼ等しくなっていることが分かる。また、図4-19に示すCase4のすべり量をそれぞれ0.8倍、1.0倍、1.2倍したケースの山田港の津波波形から、波Iの振幅の基準は瀬戸内側の初期水位低下量が大きいケースほど低くなっているのに対し、波II以降の振幅の基準にはケース間における差がほとんどないことが分かる。ここから波Iが岡山沿岸に到達する地震発生から2時間後では、瀬戸内海の初期水位低下の影響が続いていることが分かる。そこで、以下の方針で各波の振幅の基準の設定方法を検討する。波Iの振幅の基準については、その値を波I到達前の水位の最小値（図4-3の DW_y 観測時の水位）と定義し、瀬戸内海に初期水位低下量の観測点を新たに設け、そこからリアルタイム予測する手法を検討する。波II以降の振幅の基準については各ケースの解析において山田港で得られた波形データをもとに予め設定する。

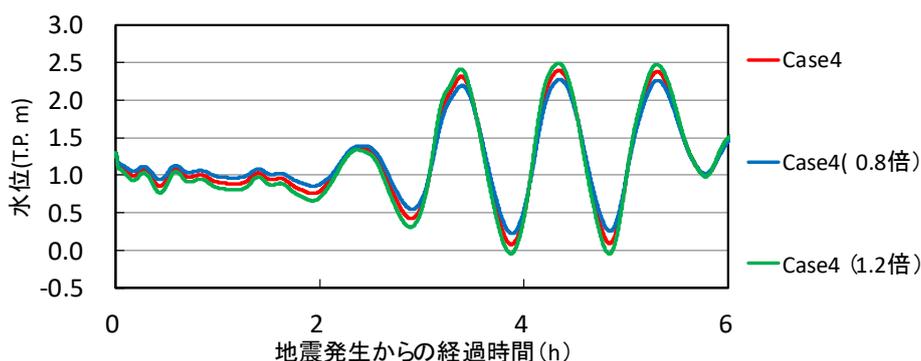


図4-19 すべり量を変化させたケースの山田港の波形

4.7.2 波Iの振幅の基準の検討

波Iの振幅の基準の予測法検討するにあたり、地震に伴う地盤沈降が瀬戸内海の水位に与える影響について検討する。Case4を例に地震による海底地盤の変動が終了した直後（地震発生から260秒後）の瀬戸内側の水位分布を図4-20に示す。ここから、瀬戸内海では南側ほど水位低下量が大きくなっていることが分かる。中防災が想定する南海トラフ巨大地震発生時の瀬戸内側の海底地盤沈降量の分布は11の各想定震源ケースともほぼ同じ分布となっており、岡山市近海の燧灘から播磨灘では気象庁の伊予三島の潮位観測所（図4-21の緑色丸印）付近の燧灘南東部の海域で最大になる。以上のことを踏まえ、燧灘の地盤沈降が瀬戸内海の水位に与える影響を経時的に検討する。図4-21はCase4を例に、時刻ごとに断面2（図4-2）上の水位分布を示したものである。ここから、燧灘側からの水位低下の

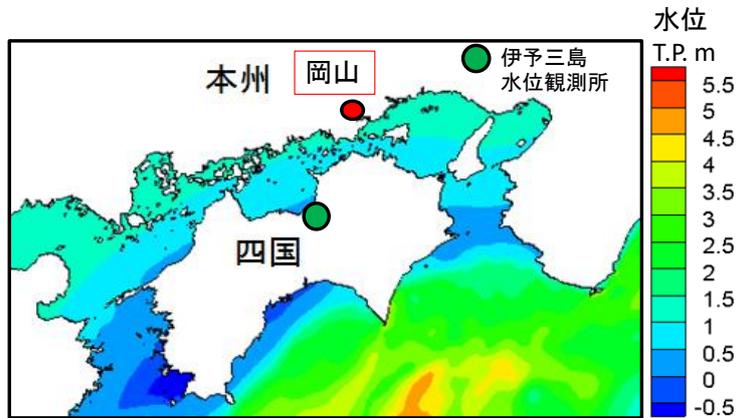


図 4-20 地盤沈降による初期水位低下の状況 (Case4 地震発生から 260 秒)

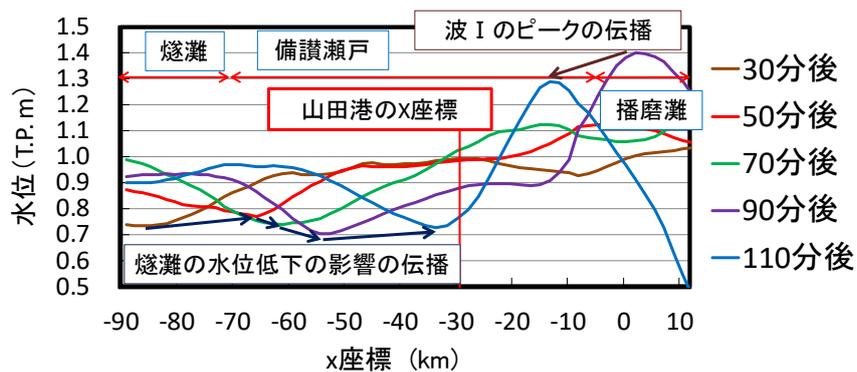


図 4-21 初期水位低下の影響の伝播

影響が岡山方面に伝播し、波 I 到来前の地震発生 110 分後に岡山近海の水位低下に影響していることが分かる。以上から山田港の初期水位低下量 DW_Y は紀伊水道側から入ってくる津波の引き波の影響に加え、燧灘側から伝わる水位低下の影響を考慮することでリアルタイム予測できると考えられる。燧灘側からの影響を検討するため、前章と同様に鳴門海峡と明石海峡の内外にそれぞれ 2 本の開境界を設け、紀伊水道から入ってくる津波をブロックした解析を実施した。この解析は Case4 のすべり量をそれぞれ 0.5 倍, 0.8 倍, 1.0 倍, 1.2 倍, 1.5 倍した 5 ケースにおいて行った。各ケースの解析で得られる山田港の時系列的な水位低下量のうち、両海峡をブロックしない場合に山田港の初期水位低下量の最大値 DW_Y が得られる時点の結果を DW_1 とした。さらに DW_Y と DW_1 の差を DW_2 とした。ここで、 DW_Y のうち DW_1 は燧灘側からの影響分、 DW_2 は紀伊水道側からの津波の引き波による影響分であると考えられる。図 4-22 に Case3 から Case5 の 3 ケースを例に伊予三島水位観測所の位置の水位変化を示す。この図からこの地点の初期水位低下量 DW_1 は地震発生

直後に得られることが分かる。そこで、5 ケースにおいて、 DW_I と DW_{Kii} 、 DW_{Kii} と DW_2 の相関関係式を検討した。図 4-23 に各式を示す。両式とも R^2 値が高く、2 つの地点の初期水位低下量から岡山市の波 I 到達前の初期水位低下量を求められることが考えられる。

図 4-24 は中防災の 11 ケースに、派生的な検討ケースのうち山田港の津波高が最大になる Case10 の初期水位変動量を 0.8 倍および 1.2 倍した 2 ケースを加えた 13 ケースについて、図 4-23 に示す各相関関係式により 2 地点の水位低下量からそれぞれ算出した DW_I と DW_2 の予測値の和をとり求めた DW_V の予測値を解析値と比較したものである。誤差は最大でも 0.05 m 程度となり、高精度で予測できていることが分かる。

4.7.3 波Ⅱおよび波Ⅲの振幅の基準の検討

4.7.1 で述べた通り、波Ⅱ、波Ⅲの振幅の基準は Case4 の初期水位変動量を 0.8 倍、1.2 倍にしたケースでも初期水位に漸近することが確認されている。さらに 4.3 で述べたとおり、震源ケースごとに大きな差がないことが分かっている。そこで、以下の手順で振幅の基準を求めた。各波について、図 4-3 に示す 5 ケースのピーク時の最大水位と引き波時の最低水位を計 10 点抽出した。そして、各波の平均的な水位を求めるため、10 点の水位からの差の 2 乗和が最小になる水位を求めた。波Ⅱ、波Ⅲの結果はそれぞれ T.P. 1.33 m, T.P. 1.23 m であり、初期水位の T.P. 1.29 m とほぼ等しくなっていることが分かる。以上から、これらの値を波Ⅱ、波Ⅲの振幅の基準にそれぞれ設定した。

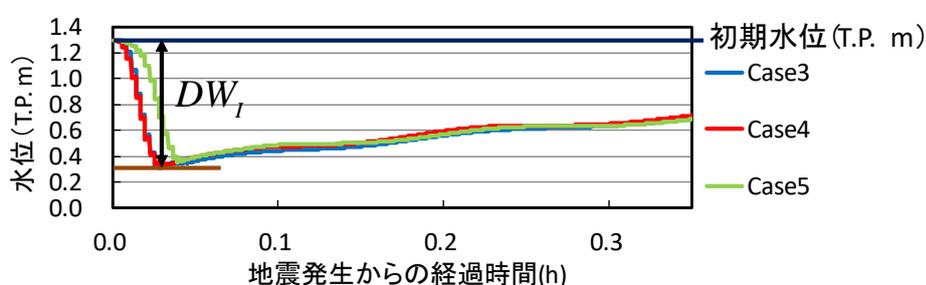


図 4-22 地震発生時の伊予三島水位観測所の水位変動

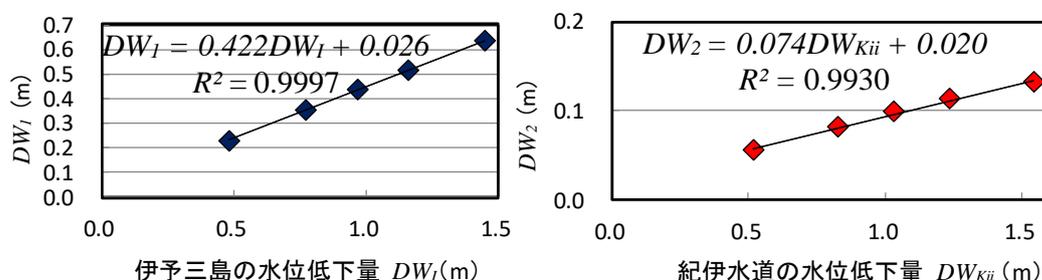


図 4-23 初期水位低下量の相関関係式

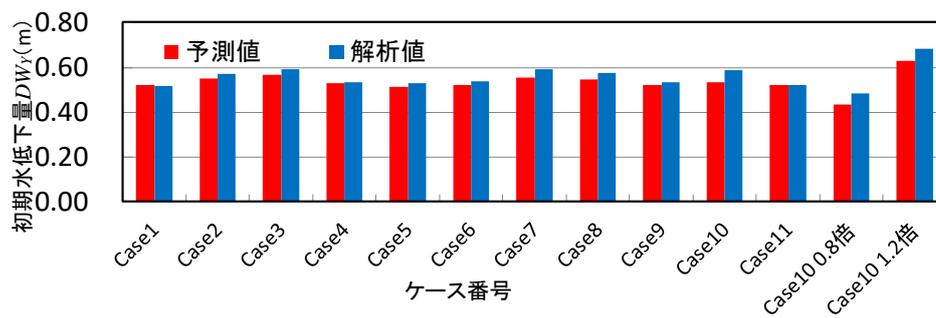


図 4-24 山田港の初期水位低下量の予測精度

4.8 各海峡外側の津波到達時刻についての早期予測法の検討

各海峡外側から山田港の到達時間差については前章により検討されているため、ここでは波形抽出点から各海峡外側の津波到達時刻の早期予測法について検討する。

まず、図4-25を用いて、各波の津波到達時刻予測の方針について説明する。図4-2に示す海底の標高分布から紀伊水道から大阪湾西側の水深は40mから80mであることが分かり、津波の伝播速度は津波の波高の違いによる影響をほとんど受けないことが考えられる。また、両海峡の波形から波②、波③の周期は海峡部の固有振動周期によりほぼ一定になっている。以上から紀伊水道波形抽出点の波①のピーク到達時刻と各海峡部外側における各波のピーク到達時刻の時間差は波源のケースによらずほぼ一定の値をとることが考えられる。したがって、波形抽出点で波①のピークが観測された時点で海峡外側さらには山田港の各津波到達時刻を早期に予測できる可能性がある。

以上を踏まえ波形抽出地点に波①のピークが到達する時刻と鳴門海峡および明石海峡の外側に各津波のピークが到達する時刻の差について検討を行う。ここで波形抽出地点の津波は海峡方面に伝播しない波成分も含む不規則波であるため、波高比の検討と同様に各海峡に伝播する波成分を抽出した上で上記の検討を行う必要がある。波①のフーリエ解析で得た5つの合成波（基本波および生データを含む）のうち、どのピーク時点を考えた場合に両海峡部の各波のピーク到達との時間差のばらつきが波源ケースの間で最小になるかについて検討した。図4-26は前節と同様の7つの波源ケースの解析結果をサンプルとして、波形抽出点で得た波①の各合成波のピーク時点と各海峡部の波①から波③のピーク

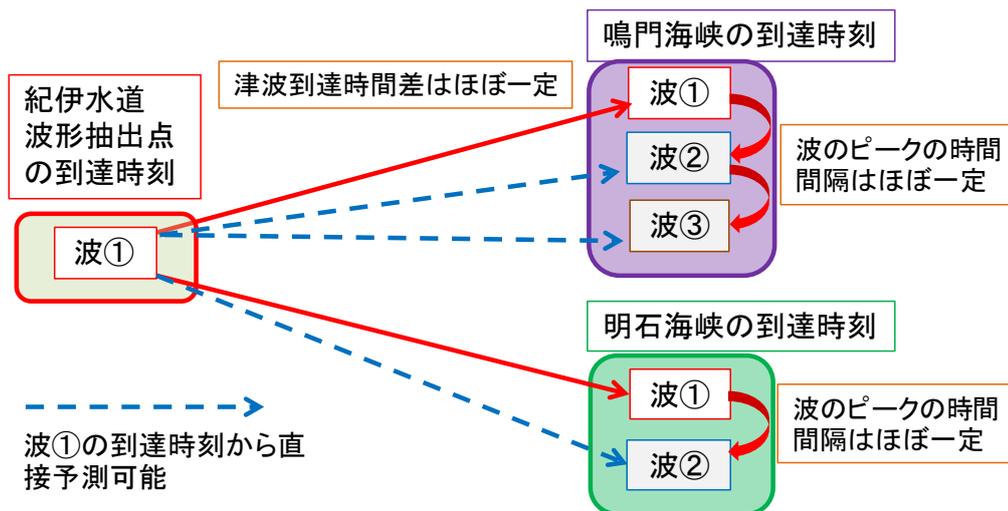


図4-25 津波到達時刻の予測の概要

到達時点の時間差の標準偏差を示したものである。各海峡部の波①とのピーク到達時間差の標準偏差は波形抽出点で合成波（2次）を選択した場合に最小になる。これは紀伊水道と隣接する鳴門海峡においてその傾向が顕著であることから、図4-6の一番上の図でも見られる比較的波長の小さな波成分が両海峡部の波①のピーク到達時間に影響しているためと考えられる。4.6で説明した波形抽出地点の各合成波と鳴門海峡（外側）の波高の相関関係を示す図4-12においても、鳴門海峡の波①の結果では波形抽出地点の合成波（2次）との R^2 値が最も大きくなっていることから、2次の波成分が鳴門海峡（外側）に影響していることがうかがえる。一方で各海峡部の波②、波③のピークとの到達時間差の標準偏差は基本波を選択した場合に最小になる。これは時間経過とともに紀伊水道の固有振動周期と周期がほぼ等しい波成分が卓越することが理由として考えられる。各波について上の標準偏差が最小になる合成波を選択した場合に、各海峡部とのピーク到達時間差の7ケースの平均値は鳴門海峡の波①から波③でそれぞれ0.62, 1.59, 2.55 (h)、明石海峡の波①、波②でそれぞれ1.04, 1.97 (h)（小数点第2位まで表示）である。

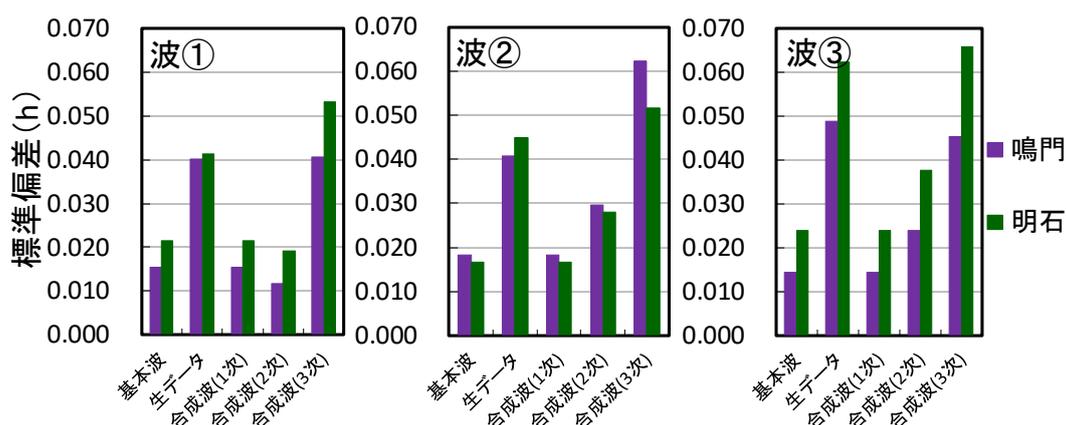


図 4-26 津波到達時間差の標準偏差

4.9 簡易予測法の適用および予測精度の検証

4.9.1 簡易予測法の適用手順

図4-27はCase4を例として紀伊水道入口付近と山田港の波形をもとに波Ⅰから波Ⅲの予測のタイミングを図示したものである。この図をもとに、前節までに検討した事柄を用い、波形抽出点から得られた津波波形から、山田港の津波ピーク水位およびその到達時間を求める過程を〔1〕 DW_{Kii} 観測時点（図4-27の青丸）、〔2〕波①観測終了時（図4-27の緑丸）、〔3〕波②観測終了時（図4-27の紫丸）の3つの時点に分け、時系列的に説明する。

〔1〕 DW_{Kii} 観測時点：表4-2の相関関係式を用い、波形抽出点と伊予三島の初期水位低下量から山田港の波Ⅰの振幅の基準を求める。また、紀伊水道の初期水位低下量から、鳴門および明石海峡の初期水位低下量を求める。

〔2〕波形抽出地点の波①観測終了時：波形抽出点で①が観測された時点でフーリエ解析を適応し、合成波（2次）のピーク時点と基本波のピーク時点をそれぞれ求める。前者に4.8で求めた海峡部の波①のピーク到達時間差の平均値を、後者に波②、波③のピーク到達時間差の平均値を足し合わせ、両海峡部の各波のピーク到達時間を推定する。次に鳴門海峡と明石海峡から山田港の津波ピーク到達時間差である1.32時間、1.85時間を加え、各海峡からの津波の山田港への到達時刻を予測する。ここで波Ⅱ、波Ⅲにおいて重なりあう各海峡経由の津波ピークの山田港の到達時刻差を中防災の11ケースで検討したところ、

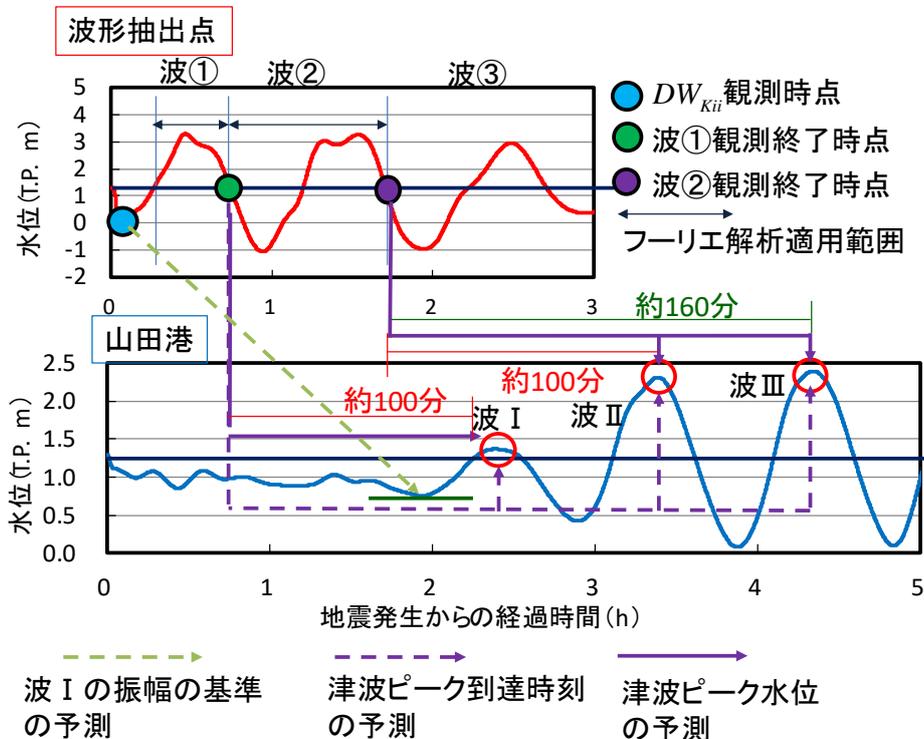


図4-27 山田港の津波予測のタイミング

最大でも約5分以内に収まっており、津波の周期と比較すると非常に小さい。そこで、海峡経由の波の推定ピーク到達時刻の平均値をとり、波Ⅱおよび波Ⅲのピーク到達時刻の予測値を求める。

表4-2の相関関係式から、基本波の半波高から各海峡部外側の波①の半波高を予測する。

[1] で求めた各海峡外側における初期水位低下量との和を波①の波高とする。各海峡（外側）の波高の予測値に図4-16の上側の図中に示す式より求めた波高比1を掛け合わせ、各海峡（内側）の波高の予測値を求める。同様に各海峡（内側）の波高の予測値に図4-16の下側の図中に示す式から求めた波高比2を掛け合わせ各海峡から山田港に到達する波①の波高の予測値を求める。鳴門海峡側からの波①の推定波高を[1]で求めた波Ⅰの振幅の基準に足し合わせ、波Ⅰのピーク水位を予測する。

[3] 波形抽出地点での波②観測終了時：波②にフーリエ解析を適応し、基本波の波高を求める。表4-2の各式を用いて、各海峡部外側の波②および波③の波高に変換する。波①の場合と同様に波高比1と波高比2を掛け合わせ、経由海峡ごとに山田港到達時の波高を予測する。最後に波Ⅱ、波Ⅲの振幅の基準に重なりあう各海峡経由の予測波高を半分ずつ足して、波Ⅱ、波Ⅲのピーク水位を予測する。

図4-27から第Ⅰ、Ⅱ波については到達の約100分前、第Ⅲ波については約160分前に予測できること分かる。

4.9.2 予測精度の検証

予測精度の検証を中防災の11の震源ケースに派生的な震源ケース（6ケース）のうち山田港で想定される津波波高が最も大きいCase10のすべり量を0.8倍、1.2倍に変化させた2ケースを加えた計13ケースについて行った。各ケースについて、波源からの津波伝播解析で得られた山田港の波形上に波形抽出点の波形から予測したピーク水位とその到達時点（赤点）およびそこから予測波高を差し引いた谷部の水位の予測値（緑線）をプロットしたものを図4-28に示す。各ケースとも解析で得られた津波波形の各波のピーク付近に赤点がプロットされていることが分かる。また、谷部の予測水位（緑線）との比較から、各波の予測波高も解析値とほぼ等しくなっていることが分かる。各波のピーク水位についての解析値と予測値の誤差について定量的に検討するため、山田港の津波ピーク水位の予測値から解析値を差し引いた差を図4-29に示す。ほとんどの波で誤差が0.15m程度以下になっていることが分かる。図4-30は各ケースにおいてそれぞれの波の山田港へのピーク到達時点の予測値が解析値と比較し何分早いかを示したものであり、誤差は最大でも3分半程度となっていることが分かる。以上から本章で検討した簡易予測法によりピーク水位およびピーク到達時刻ともにほぼ正確に予測できていることが分かる。

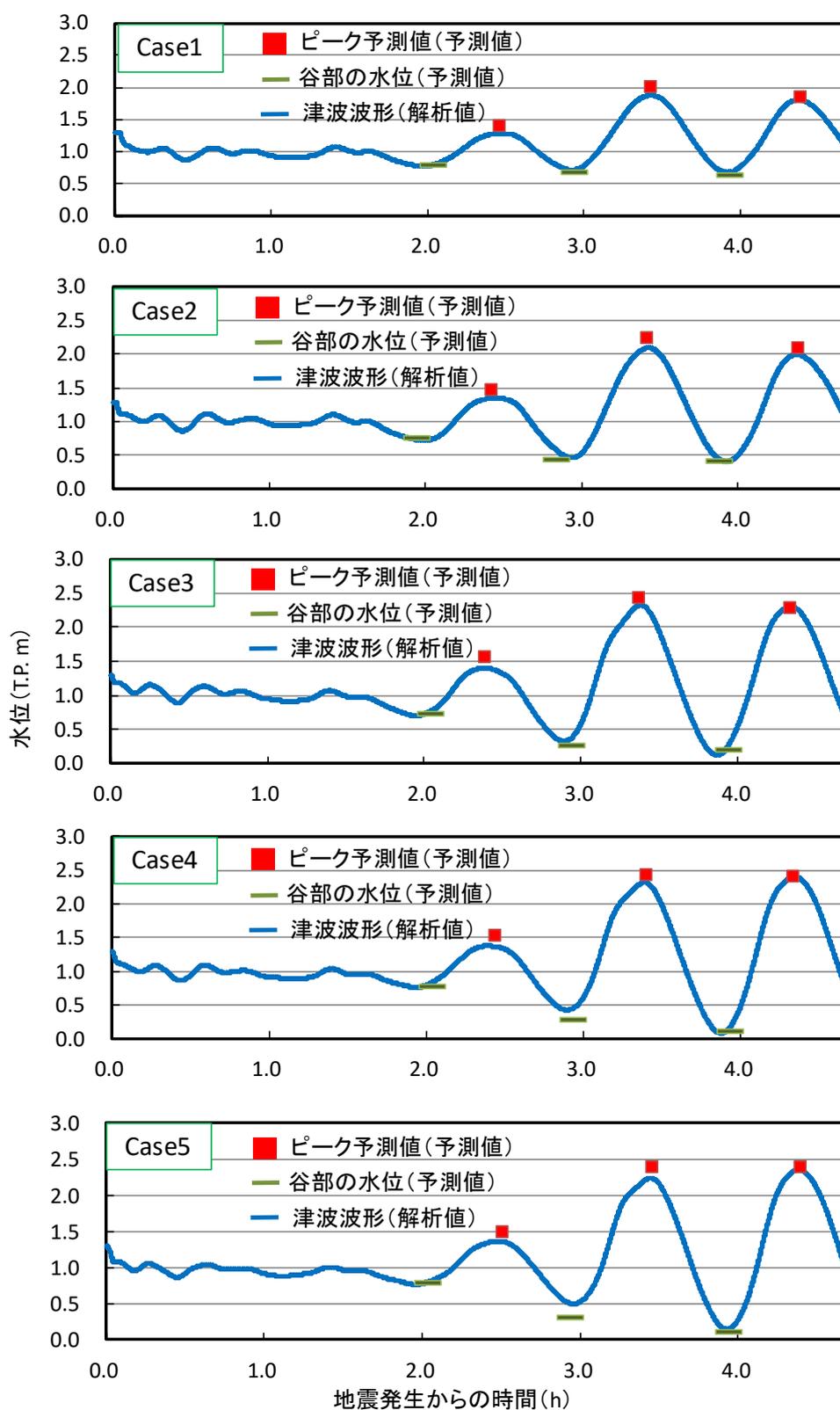


図 4-28 津波ピークの予測結果

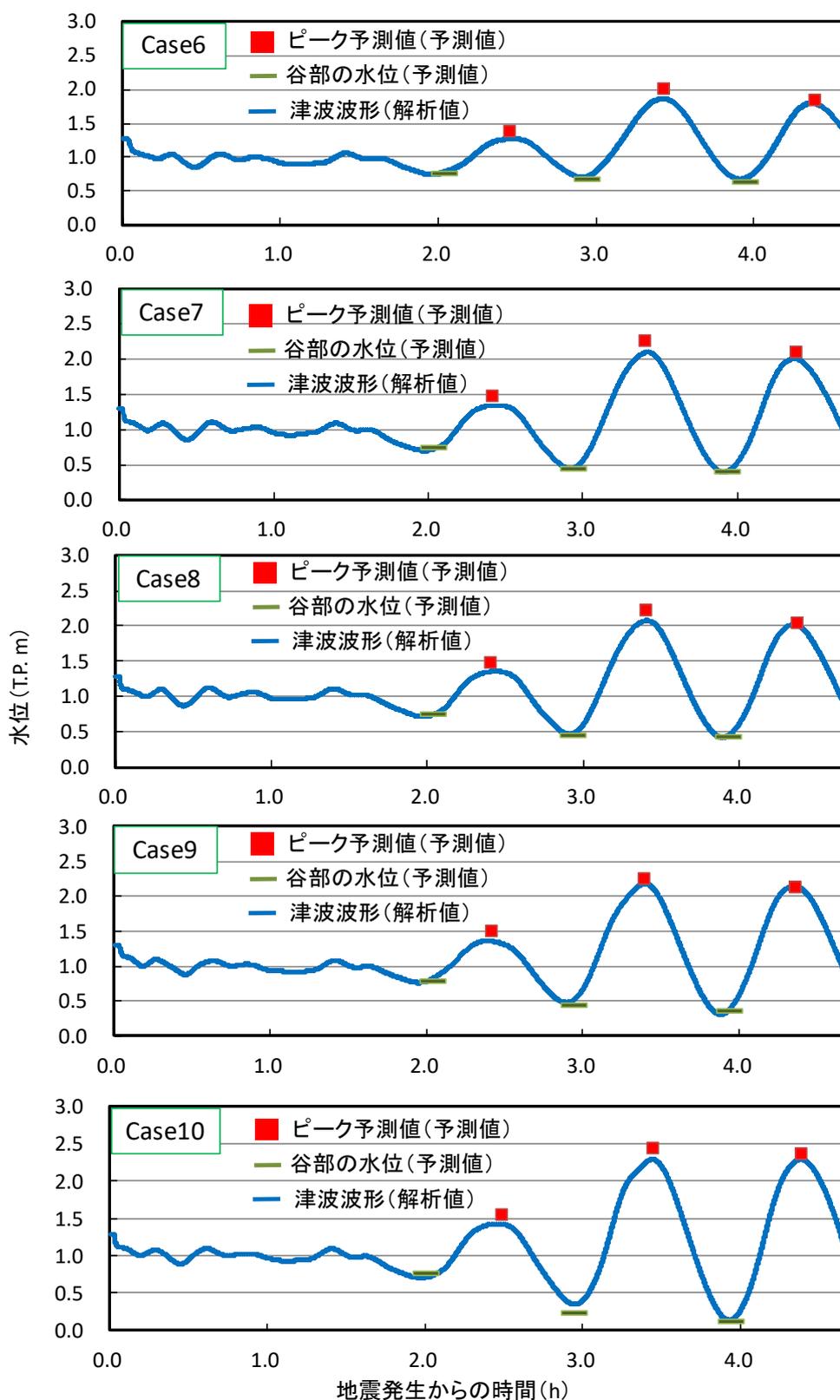


図 4-28 津波ピークの予測結果

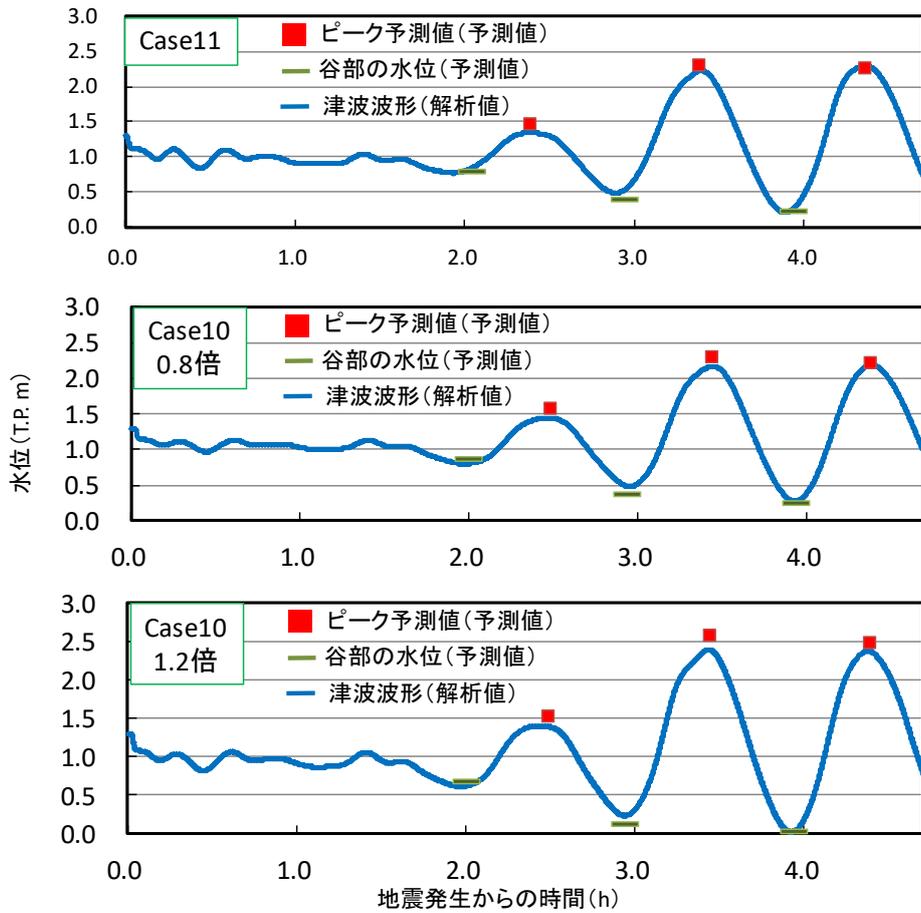


図 4-28 津波ピークの予測結果

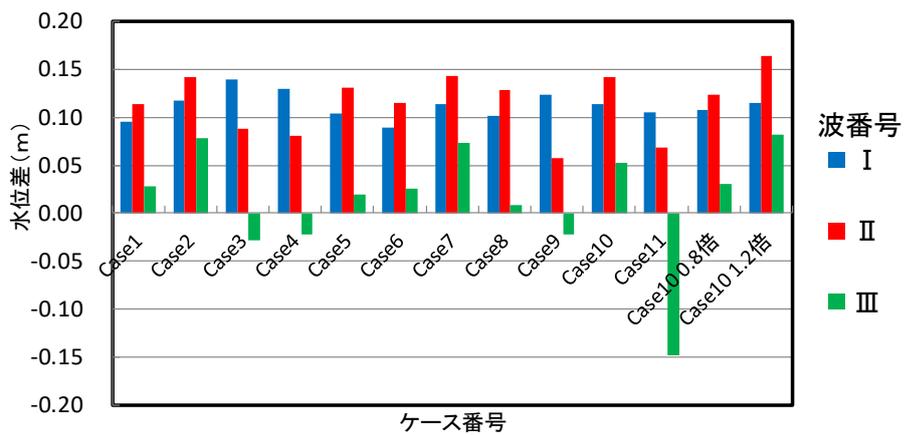


図 4-29 ピーク水位予測の誤差

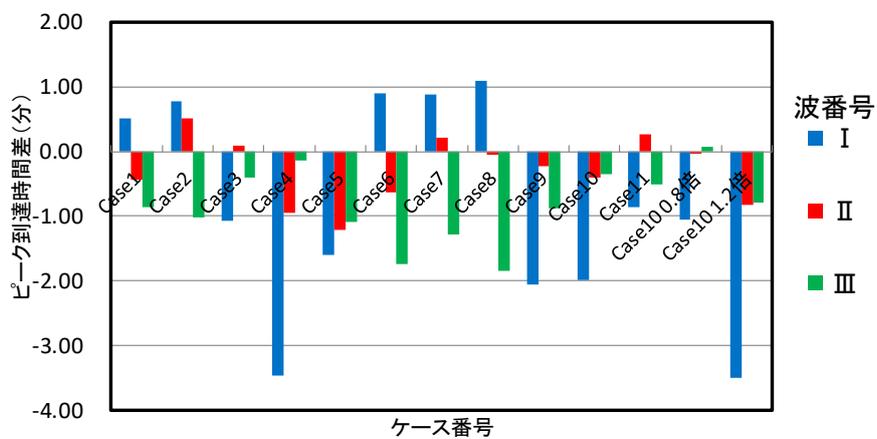


図 4-30 津波到達時刻の予測の誤差

4.10 潮汐場における簡易予測法の適用および精度検証

簡易予測法の実用化を目指し、潮汐場における適用可能性について検討する。前章と同様に比較的大きな干満差が岡山市近隣の宇野港で観測された大潮日（2013年1月14日）に南海トラフ地震の発生を仮定した潮汐-津波同時解析を実施した。潮汐と津波の再現方法は前章と同様であるが、図4-1に示す範囲で解析を行った。波源のケースは中防災の派生的な検討6ケースの内、岡山市の津波波高が最大となるCase10に設定した。解析は地震発生が宇野港の満潮（13時）のそれぞれ5時間前、4時間前および3時間前となる3ケース（以下CaseA, B, C）について実施した。

解析結果をもとに簡易予測法を以下のように適用した。潮汐場において潮汐波の成分をとり除くために、波形抽出点および伊予三島水位観測所の2地点において、潮汐-津波同時解析で得た津波波形から潮汐のみの再現計算で得た同地点の潮位を時刻ごとに差し引くことにより、振幅のグラフを得た。図4-31にCaseAを例に波形抽出点における津波波形と振幅のグラフを示す。振幅のグラフをもとに、両地点の初期水位低下量 DW_{Kii} および DW_I を求めた。さらに、波形抽出点の振幅のグラフにゼロダウクロス法により、波①および波②をとり、各波観測終了時点にフーリエ解析を適用した。以降、前節と同様に波形抽出地点のデータから地点間の到達時刻の差や波高の相関関係式を用いて、山田港における波Ⅰから波Ⅲのピーク到達時刻と各海峡経由の波①から波③の予測波高を求めた。山田港の波Ⅰから波Ⅲのピーク水位の求め方も前節と同様であるが、潮汐を考慮するため予測波高を足し合わせる振幅の基準を以下のように設定した。波Ⅰの振幅の基準は伊予三島と波形抽出地点の水位低下量から予測した山田港の水位低下量を波Ⅰのピーク到達の予測時刻の山田港の潮位から差し引いた値とした。波Ⅱ、波Ⅲの振幅の基準は、4.7.3において潮汐を考慮しない場合の計算結果をもとに算出した各波の振幅の基準からその解析で与えた初期水位（T.P. 1.29 m）との差（波Ⅱ：0.04 m，波Ⅲ：-0.06 m）を各波の到達予測時刻の山田港の潮位に足し合わせた水位とした。図4-32は3ケースにおいて、解析で求めた山田港の津波波形（青線）上に津波ピークの予測値（赤点）をプロットしたものである。CaseAの波Ⅰ、波Ⅱのように潮汐による潮位（紺色の線）の変化が大きい時間帯に到来した津波では、津波ピーク水位の予測値が解析で求めた結果に対してやや過大評価になる傾向がある。潮汐による潮の流れが瀬戸内海を伝播する津波波高を減衰させることがLeeら⁶⁷⁾によって報告されている。特に瀬戸内海の潮位変動が大きい時刻では、鳴門海峡の外側と内側で生じる潮位差が瀬戸内側に伝わる津波波高を減衰させる可能性があることが前章の検討で示された。例えば、山田港の潮位の時間的な変化が大きい時刻に到達するCaseAの波Ⅰの波高は、到来が山田港の満潮時に重なるCaseCの結果と比較すると小さいことが分かる。以上から簡易予測法の波高相関関係式が潮汐を考慮しない解析結果をもとに構築されていることがピーク水位の予測値が解析値より高くなる原因であると考えられる。一

方で、山田港の満潮時頃に到来する津波ピークは、3 ケースともその水位と到達時刻がほぼ正確に予測できている。以上から、波形抽出点と山田港の時間ごとの潮位が事前に予測できれば、潮汐場においても簡易予測法が適用可能であることが分かった。

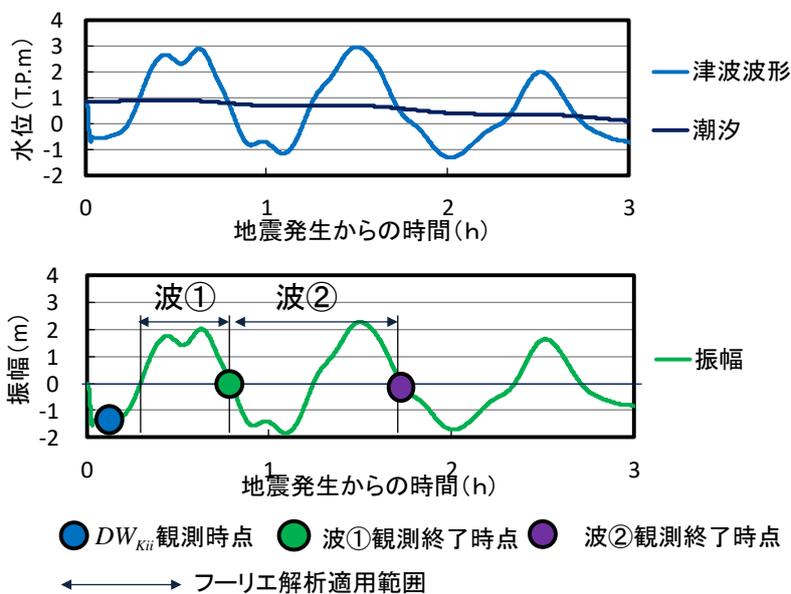


図 4-31 波形抽出地点の津波波形（上）と振幅のグラフ（下）（CaseA）

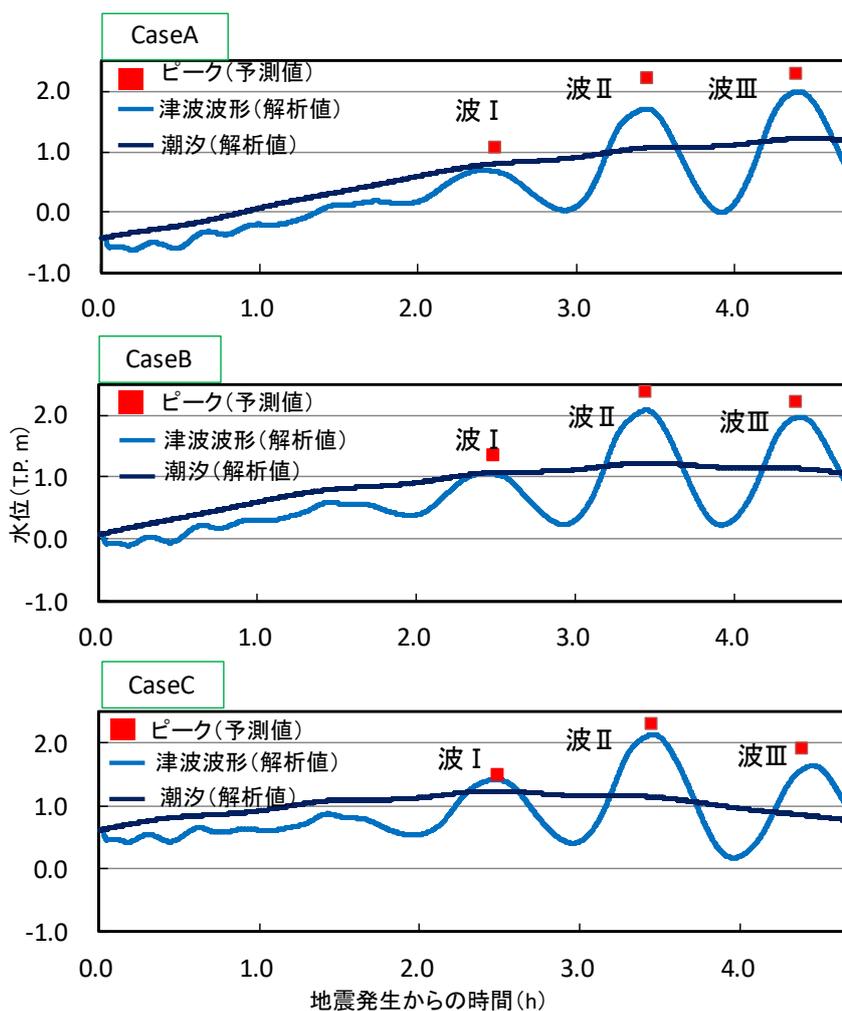


図 4-32 潮汐場における予測精度の検証結果

4.11 まとめ

本章では紀伊水道入口で得られた津波波形から岡山市沿岸に到達する津波ピーク水位および到達時刻を簡便に早期予測する簡易予測法を検討した。本章の各検討により得られた主な知見を以下に示す。

1) 南海トラフ地震下の岡山市沿岸の津波波形について、各波の到達時刻と振幅の基準は震源の位置によらずほぼ一定である。したがって、波源に近い海域から波高の予測ができれば津波ピーク水位を予測可能である。

2) 津波の共振により、紀伊水道では北側の淡路島と南側の水道入口を腹とする約 60 分周期のセイシュが発生する。このセイシュによる水位変動が紀伊水道の北端に接続する鳴門海峡と紀淡海峡を通して瀬戸内側に進行波として伝播する。このことが数波に渡る津波が岡山市沿岸を襲う原因である。

3) 紀伊水道入口の津波波形は陸側からの反射波などさまざまな周期の波が混在する不規則波となっている。しかし、初期水位を基準にゼロダウクロス法でとった各津波の波形にフーリエ解析を適用することにより、波源の位置に関わらず瀬戸内方面に伝播する約 60 分周期のセイシュの波成分（基本波）を抽出することが可能である。この波成分の波高と鳴門および明石海峡外側の津波波高の間に高い相関関係があり、紀伊水道入口の津波波形から各海峡外側の津波波高を予測可能である。さらに各海峡外側から山田港にかけての地点間の津波波高の比の掛け合わせにより各海峡経由の山田港到達時の津波波高の予測値を求めることができる。ここで重なり合う各海峡経由の予測値を別途検討した各波の振幅の基準に半分ずつ足し合わせるにより、山田港のピーク水位を予測可能である。

4) 紀伊水道入口の波②の基本波の波高から直接鳴門海峡の波③の波高が予測できることや紀伊水道入口の波①の到達時刻から波Ⅲまでの山田港到達時刻が予測できることなど紀伊水道における津波の共振に着目することで、山田港の津波波高やそのピーク到達時刻のリアルタイム予測の早期化を図ることができる。山田港の各波のピーク水位については、波形抽出地点における津波観測終了時と山田港への津波ピークの到達の時間差から、波Ⅰ、Ⅱでは到達の約 100 分前、波Ⅲでは約 160 分前にピーク水位の予測が可能となる。前章の各海峡部の波形からの予測では予測可能となる時刻が津波到達の 80 分前であるのに対し、大幅に予測の早期化が図られる。

5) 潮汐により紀伊水道から岡山近海にかけての津波自体の波高や伝播速度に大きな影響はないため、紀伊水道入口と山田港の潮汐による潮位変動をあらかじめ予測し、紀伊水道入口における津波の抽出と山田港における予測波高の足し合わせの際に潮汐の影響を適切に考慮することで、潮汐場においても山田港の津波ピーク水位と到達時刻の予測が可能である。

以上から、本章の検討により、波源の位置に関わらず紀伊水道入口で観測された津波波

第4章 紀伊水道入口部の津波波形を用いた岡山市沿岸の津波ピークのリアルタイム予測法の検討

形から山田港の津波ピーク水位および津波到達時刻を早期予測できることが示され、今後の岡山市の津波対策に貴重な成果が得られた。

(参 考 文 献)

- 1) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）津波断層モデル編 一津波断層モデルと津波高・浸水域等について一，2012.
- 2) 村上仁士，高谷博文：那佐湾の湾水振動特性，第32回年次学術講演会講演概要集（第2部），pp.63-64，1977.
- 3) 吉田和郎，村上仁士，島田富美男，上月康則，倉田健吾，一島洋：紀伊水道および豊後水道における津波の伝播・応答特性，海岸工学論文集，第49巻，pp.296-300，2002.
- 4) 宮本大輔，村上仁士，上月康則，久保喬：瀬戸内海における津波挙動に及ぼす潮汐および入射波高，周期の影響，海岸工学論文集，第53巻，pp.261-265，2006.
- 5) 鈴木史朗，宮島正悟：GPS 波浪計を活用した沖合波浪観測網の構築について，沿岸技術研究センター論文集，No.6，pp.39-42，2006
- 6) Han Soo Lee, Tomohisa Shimoyama :Impacts of Tides on Tsunami Propagation in the Seto Inland Sea, Japan, Proceedings of 2013 IAHR World Congress,2013.
- 7) Han Soo Lee:Impacts of Tides on Tsunami Propagation in the Seto Inland Sea, Japan, Proceedings of 2014 IAHR-APD,2014.

第5章

微地形を考慮した岡山市の津波氾濫特性の検討

5.1 本章の概要

岡山市南部の平野部の特徴として、網状に張り巡らされた灌漑用水路（以下用水路網）があげられる。2011年の東日本大震災発生時には、河川を遡上した津波が周りの地域の津波被害を拡大した事例が報告されている。例えば、下園ら³⁾は茨城県および千葉県沿岸の津波痕跡調査を実施し、特に九十九里浜にそそぐ木戸川河口周辺では河川から越流した津波が周囲の低地に氾濫することで深刻な津波被害をもたらしたことを明らかにした。宇多ら²⁾も千葉県の津波被害調査を行い、矢指川河口から流入した津波が河川の蛇行部で氾濫し、背後地の家屋を流出させるなどの被害をもたらされたことを報告している。同様に、用水路網を伝った津波が平野部で氾濫することで津波被害が深刻化することが十分に考えられる。しかし、岡山市にみられるような幅の狭い用水路網まで詳細に再現した津波解析を行った事例はほとんどない。岡山市では2章で説明したとおり赤穂ら³⁾により建物群の影響を考慮した津波氾濫解析が実施されたが、用水路網の影響は考慮されていない。以上を踏まえ、南海トラフ巨大地震発生時に岡山市の津波挙動に対する用水路網の影響を検討するため、**図5-1**に示す赤穂ら³⁾と同様の計算範囲において、用水路網を再現した津波遡上解析を実施する。用水路の再現は岡山市を対象とした既往の津波解析において、津波

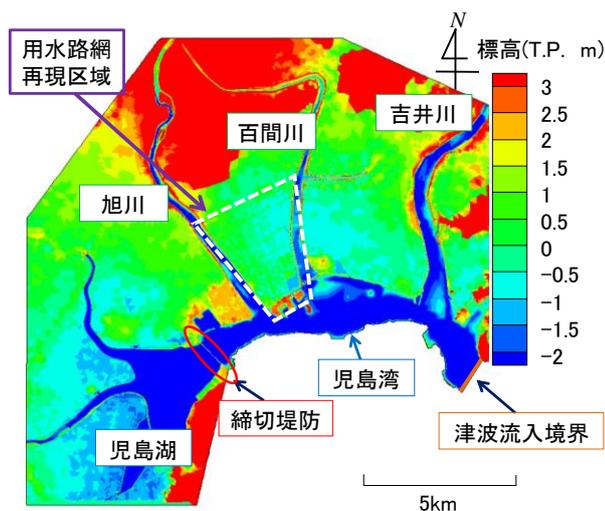


図5-1 計算範囲と計算境界の設定

の氾濫が比較的早期に進み、なおかつ臨海部に住宅密集地を有する旭川河口付近東西 4 km、南北 4 km の範囲（図 5-1 の白破線枠、以下用水路再現区域）において実施し、用水路網が津波遡上範囲や各地点の浸水深の時間的変化に与える影響について具体的に検討する。また、岡山市南部は広大な地域で用水路網が張り巡らされており、今後、より広い領域で用水路を再現した津波解析を行うことができるように、用水路網を一次元水路として取り扱うことで計算時間とメモリを節約できる手法を導入し、その有用性を検証する。さらに、用水路に加え家屋の影響も考慮した津波遡上解析を行い、岡山市における津波氾濫特性と今後の避難対策の方針について考察を行う。

5.2 岡山市の用水路の状況と特徴

図 5-2 は用水路網再現区域の航空写真と国土地理院提供の基盤地図情報の水涯線データをもとに再現した主要な用水路網を右側に示したものである。臨海部に住宅区が密集し、数本の用水路が海側から住宅区を貫くように北側に走っている様子が見える。図 5-3 は臨海部（図 5-2 の航空写真中の赤四角で囲まれた範囲）の航空写真と図中の撮影点で撮影した用水路の写真を示している。航空写真から、密集した住宅区の間を用水路網が通っていることが分かる。右側の写真からも用水路のすぐ近くに民家が立ち並んでいる様子が見える。また、岡山市の用水路網は幅が 5 から 6m 程度以下と比較的狭い河道となっている。さらに、岡山市の用水路は掘り込み河道であり、灌漑期には用水路の水位と用水路沿いの道路との標高差が 0.3 m 程度となっている。このような用水路網の特徴から、海側から流入した津波により、用水路の水位が上昇し氾濫が起こることが想定され、住民の避難活動に及ぼす影響はかなり大きいと考えられる。

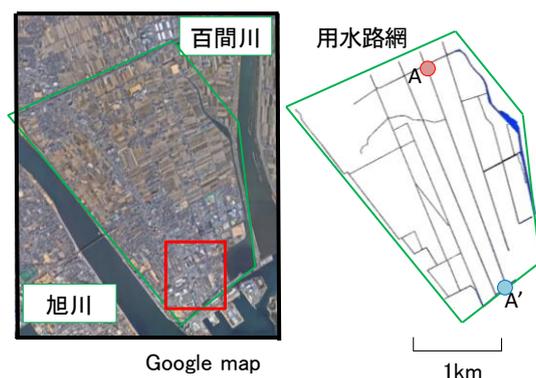


図 5-2 用水路再現区域の航空写真と再現した用水路網



図 5-3 臨海地区の航空写真と用水路の状況

5.3 用水路を考慮した津波氾濫解析

5.3.1 氾濫解析モデルおよび計算格子

三角形の非構造格子を解析範囲に設定し、3章と同様に2次元の浅水流方程式をFDS法で離散化して解くことにより、数値解析を実施した。なお、タイムステップは3章の式(3.2)で示したCFL条件を満たすため0.01に合わせた。なお、地盤高、水深、水位の定義点は各三角形格子の重心である。

用水路を再現するため、図5-4の左側の図に示すように、用水路の水涯線に沿うように、計算格子を作成した。臨海部用水路の水涯線の位置は国土地理院提供の基盤地図情報を用いた。また、用水路部の格子サイズは概ね用水路の幅に近い値に設定した。図5-4の右側に用水路再現区域の臨海部のメッシュ図を示す。他の計算領域の格子サイズは赤穂ら³⁾と同じ設定を行っており、計算範囲全体の格子数は1,197,474個である。なお、計算格子の作成には非構造格子作成用のソフトウェアであるSMSを用いた。

5.3.2 地形データの作成および初期条件

中防災提供の10mごとの標高およびマニングの粗度係数のデータを元データとして用い、各計算格子の重心に最も近い位置のデータを内挿し、地形を再現した。用水路再現区域の標高については、用水路周辺の標高をより正確に再現するために、国土地理院提供の5mごとの測量データを用い、同様の方法で再現した。児島湾および河川の初期水位は2012年の山田港における最高潮位であるT.P. 1.29mとした。一方、児島湖の水位は、通常約T.P. -0.5mになるように岡山県によって管理されており、初期水位もこの値に設定した。

次に、用水路の設定について説明する。用水路の河床高と水位に関する具体的なデータは得られていない。そこで、灌漑期の水路の水深がおおむね1mであることと水路沿いの道路脇の標高が国土地理院の標高データからT.P. -0.2m程度以上であり、さらに灌漑期の水路の水位との差が0.3m程度であることを踏まえ、水路の河床高と初期水位をそれぞれ一律にT.P. -1.5m, T.P. -0.5mに設定した。しかし、用水路近傍の地点には用水路沿いの道路や用水路の水位よりも標高が低くなっている場所があり、用水路に接する平野側の計算

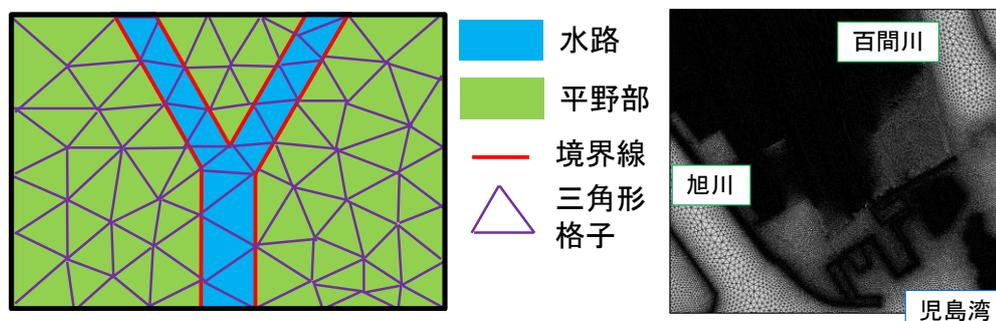


図5-4 計算格子作成方法の説明図（左）と臨海部のメッシュ図（右）

格子に用水路の初期水位より低い標高が内挿されている場合、初期状態から氾濫が起こる。そこで、用水路沿いの計算格子に内挿された標高が T.P. -0.2 未満の場合、その格子の標高を T.P. -0.2 m に補正した。また、水路部のマンニングの粗度係数はコンクリートで施工された水路の値として 0.015 を与えた。

5.3.3 震源ケースと津波の再現方法

本研究では中防災が公表する 11 の震源ケースのうち、児島湾口にある山田港に到達する推定津波高が最も大きい四国沖に大すべり域を設定した Case4 の震源ケースを対象に津波解析を行った。赤穂ら³⁾と同様に、波源域を含む広領域津波伝播解析により児島湾口で得られた水位を津波流入境界（図 5-1）に与えることで津波を再現した。図 5-5 に流入境界の入力波形を示す。なお、広領域津波伝播解析は海岸線を閉境界に設定し、児島湾奥まで再現した範囲で行っているため、この入力波形には陸側からの反射波の影響も含まれている。また、計算は波高が比較的高い第 2 波から第 4 波の 3 波到来後の地震発生 6 時間後まで行った。

5.3.4 計算ケース

用水路再現区域の標高分布を示した図 5-6 をもとに計算ケースについて説明する。図 5-6 から、旭川と百間川の両岸に堤防が築かれていることが分かり、その標高は T.P 3 m から 4 m 程度である。Case1 では津波浸水想定設定の手引きにしたがい、地震発生直後にすべて

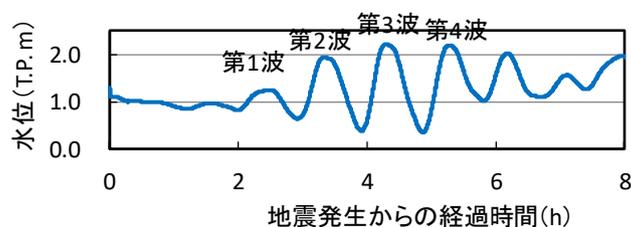


図 5-5 境界条件の津波波形

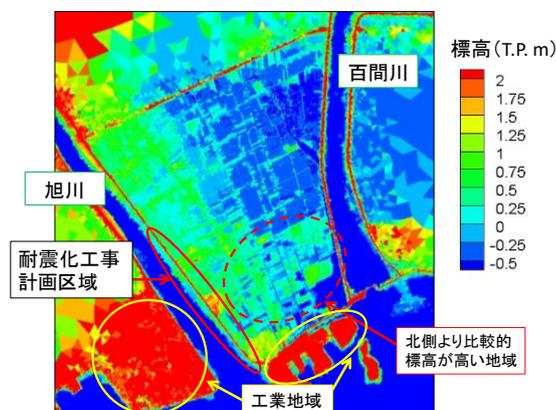


図 5-6 用水路再現区域の標高

の堤防が 75%沈下する条件で計算を行った。Case2 は国土交通省により進められている旭川左岸堤防の耐震化工事が 2017 年 9 月時点でほぼ完了していることから、図 5-6 に赤線で示した耐震化工事計画区域のみ堤防を沈下させずに行ったケースである。また、岡山県危機管理課が公開した液状化危険度マップ（図 1-2）⁴⁾によると、旭川左岸両岸付近に位置する工業地帯（図 5-6）は液状化危険性が非常に高い地域に分類されている。また、内閣府の南海トラフの巨大地震モデル検討会⁵⁾では、旭川河口付近の液状化による地盤沈下量が約 0.3m と推定されている。以上を踏まえ、工業地域の地盤高を 0.3m 引き下げて解析を実施した。

これらの 2 ケースについて用水路を再現した解析（以下用水路あり）と用水路を考慮せず全ての領域について土地利用の状況をマニングの粗度係数で再現した解析（以下用水路なし）を行い、両者の結果の比較から、用水路が遡上津波に与える影響を検討した。

5.3.5 解析結果

図 5-7 に各ケースの浸水深分布を地震発生から 20 分後、150 分後（第 1 波到達直前）、220 分後（第 2 波到達時）、340 分後（第 4 波到達時）について示す。Case1 の地震発生から 20 分後と 150 分後の結果から、堤防の沈下により、用水路の有無にかかわらず津波到達前の段階から海や河川からの氾濫が進んでいることが分かる。しかし、用水路がない場合には海岸と両側の河川から陸側に向かって浸水域が拡大しており、海岸や河川から離れた図中の赤丸で囲まれた地域では地震発生から 150 分後においても浸水が起きていない。一方で、用水路がある場合には、地震発生から 20 分後の段階でもその地域において用水路からの浸水が始まっていることが分かる。150 分後にはほとんどの部分が浸水し、両河川から離れていても浸水深が 0.4 から 0.6 m 程度に上っている。第 2 波到達時の地震発生 220 分後においては、用水路の有無にかかわらず、南部の浸水深分布には大きな差はみ

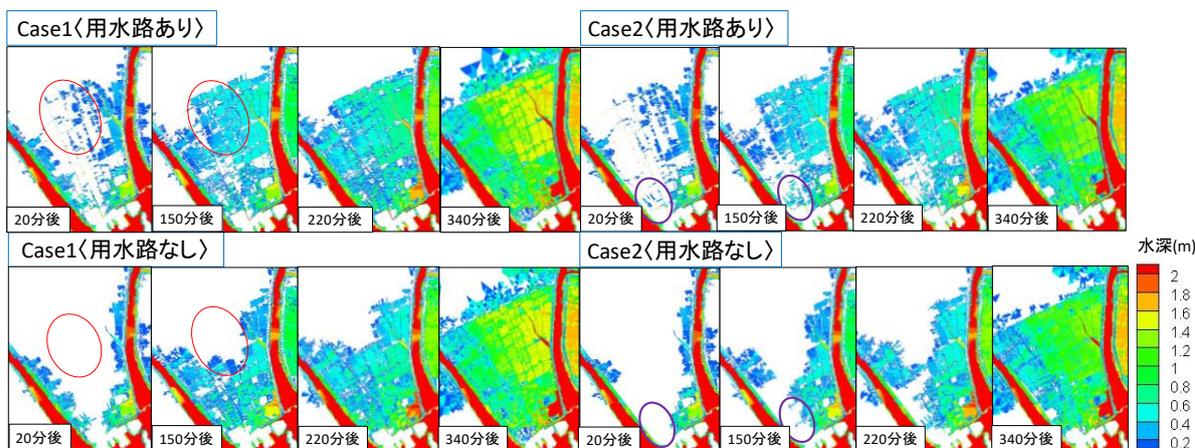


図 5-7 各ケースの解析結果

られないが、北側に向かうにつれて、浸水範囲、各浸水箇所の浸水深とも用水路がある場合の方が大きくなっている。また、第4波が到達した地震発生から340分後にも用水路ありの浸水域の方が少し北側まで広がり、浸水深も全体的にやや大きくなっている。図5-6から、用水路再現区域の標高との関係を検討すると、南側の標高が北側よりも比較的高くなっていることが分かる。このため用水路が無い場合は南側の地域で一時的に海側からの浸水がせき止められた状態になるが、用水路がある場合には、水路を伝って海側からの氾濫流が北進し、標高が比較的低い北側の地域の氾濫被害が早期化及び深刻化することが考えられる。また、図5-6から、平野部には用水路の初期水位として設定したT.P. -0.5 mより標高が低い地域もあることが分かり、用水路からの氾濫被害を受けやすい地形的特徴がうかがえる。340分後の結果から、用水路ありの方が氾濫水の量が若干多くなっていることが分かる。地震発生150分後を例に、用水路ありと用水路なしのケースについて児島湾に面する地域の水位分布を図5-8に示す。用水路ありのケースでは、上述のとおり氾濫水が用水路を伝って北側に抜けるため、この地域の水位が比較的低く、海側と陸側の水面勾配が大きくなっている。このため、用水路ありでは海から氾濫水が流入しやすくなっていたことが推察され、陸側の氾濫水の量が増えた原因として考えられる。

本ケースの結果全体から、特に海岸や川から離れた地域において、用水路により津波到達前の浸水や津波氾濫の浸水開始時刻が早まり、浸水速度に大きく影響することが分かる。

Case2の結果においてもCase1と同様の傾向がみられる。以下本ケース結果の特徴的な点を挙げる。Case2では旭川左岸の堤防の耐震化の影響を考慮したため、(用水路なし)では地震発生後から150分までの時点で耐震化計画区域周辺の低内地(図5-7の紫丸の地域)に浸水は見られない。しかし、用水路ありではこの地域でも用水路網からの浸水が地震発生から20分後の段階で始まっていることが分かる。このことから、堤防の耐震化により旭川からの浸水を防ぐことができる地域であっても、用水路を通して海側からの氾濫の被害を受けることが分かる。また、地震発生から340分後では浸水面積に大きな差は見

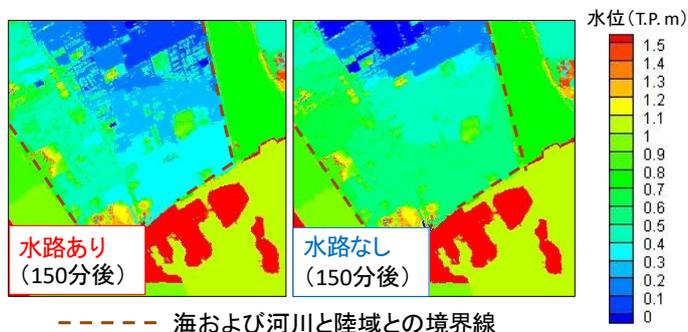


図5-8 臨海部の水位分布 (浸水していない部分は標高を表示)

られないが、百間川よりの広い範囲で（用水路あり）の方が浸水深が若干深くなっており、Case2 においても用水路からの氾濫により氾濫水全体のボリュームが大きくなっていることが分かる。

以上のことから、南海トラフ地震時に用水路が岡山市の津波氾濫過程に大きな影響を与え、津波被害を深刻化することが明らかとなった。

5.4 水路網の流れを1次元計算する手法の導入

5.4.1 本節の目標および概要

前節で示した通り、用水路網が津波氾濫過程に大きな影響を与えるため、岡山市のように用水路網が発達した地域では、用水路を考慮した津波氾濫予測を行い、津波避難計画などの津波対策を検討する必要がある。しかし、河道幅が狭い用水路の中まで2次元の浅水流計算を行った場合、用水路部やその近辺の格子サイズを小さくする必要があり、そのために、計算負荷が大きくなり、一度に解析できる範囲に限られる。そこで、今後より広い地域で用水路を再現した解析を行うため、計算負荷を軽減できる用水路網の再現および計算手法を検討した。川池ら⁶⁾および秋山ら⁷⁾は、豪雨時の内水氾濫に中小河川や下水道網が与える影響を少ない計算負荷で検討するため、中小河川や下水道網を一次元河道として計算し、平野部との水のやりとりの計算を本間の越流公式などで別途行う解析モデルを構築した。以上の既往研究を踏まえ、本研究では用水路内の流れを1次元計算で再現する方法を導入しその精度を検証した。

5.4.2 計算格子の作成方法

国土地理院提供の水涯線データより、用水路の位置を特定し、**図5-9**の左側に示すように、各用水路のほぼ中央部に平野部の計算格子の境界線を設定した。用水路の幅の大きさ等を勘案し、境界線を約10mから50mの間隔で分割し、境界線に沿うように平野部の計算格子を作成した。**図5-9**の右側に臨海地域のメッシュ図を示す。用水路内まで計算格子を切った**図5-5**のものと比較すると陸域の計算格子の密度が減少していることが分かる。計算領域全体の三角形格子の数は571,490個であり、用水路内も2次元計算を行う場合と比較し、約半分に軽減された。これに伴い、氾濫域の解析時間も約半分に短縮された。なお、用水路部の1次元計算は、分割された線分の間隔ごとに行い、水路部の計算格子数は全1,654個である。また、複数の水路が交わる点（以下合流点）は、全114個ある。

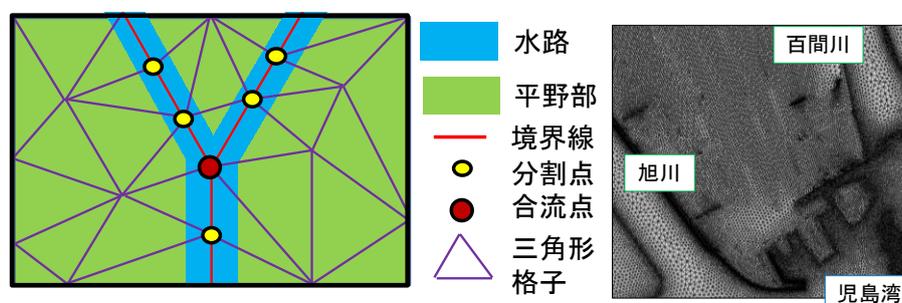


図5-9 用水路を一次元河道とする格子作成方法の説明図（左）およびメッシュ図（右）

5.4.3 用水路網計算の概要

岡山市の用水路では河道幅が変化する箇所が多くみられる。このような箇所においても正確に解析を行うため、水路の計算は、図5-10に示すように分割幅を高さ、2つの分割点の位置における用水路の幅をそれぞれ上辺、底辺とした台形の計算格子で行った。ここでは上底辺を計算境界とし、各境界で隣接する計算格子との流束の計算を行った。なお、上底辺の長さは各分割点を通る水路の境界線の法線と両側の水涯線との2つの交点間の距離を計算することにより求めた。

岡山市の用水路網では水路の合流部が多く存在し、合流部の流れを正確に計算することが水路網全体の津波挙動を再現するために必要である。秋山ら⁹⁾は下水道網の流れの解析において、合流部の流量と運動量を共に保存するため、合流部のみ2次元計算を行うネットワークスロットモデルを構築した。本モデルを2003年の九州豪雨災害による飯塚市街地の内水氾濫解析に適用し、氾濫過程を高い精度で再現した。本研究ではこの計算手法を用水路の合流部の計算に取り入れた。しかし、岡山市の用水路網では幅が大きく異なる複数の用水路が様々な角度で合流している場所が多く存在し、合流部の計算格子の形状を設定するのが困難である。そこで、本研究では以下のように簡便な計算格子の設定方法を行った。図5-11は、合流する水路が3本の場合を例として合流部の計算格子の設定方法を示している。まず、合流点を中心とし、合流する水路の幅のうち最大のものを半径とする円(図中の円C)と各水路の側岸との交点を求め、各交点をつなぐことで多角形の計算格

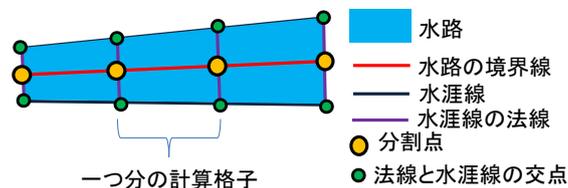


図5-10 用水路の計算格子

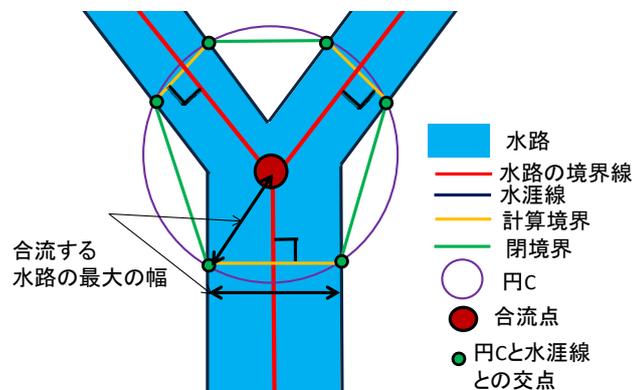


図5-11 用水路合流部の計算格子

子を設定する。水路に面する計算境界では、隣接する水路部の計算格子の1次元方向の流速を南北および東西の2方向に分解することで、2次元の浅水流計算を行った。水路と面していない緑線の境界では、側壁の抗力を近似的に考慮するため、境界上で圧力勾配と流速がともにゼロとなるように閉境界を設定した。平野部との水の交換は、用水路に接する左右の三角形格子との間で、各側岸の標高を天端高と見なし、以下に示す本間の越流公式を適用することで計算した。

$$\text{(完全越流 } h_2/h_1 < 2/3 \text{ の時)} \quad q = 0.35h_1\sqrt{2gh_1} \quad (5.1)$$

$$\text{(潜り越流 } h_2/h_1 \geq 2/3 \text{ の時)} \quad q = 0.91h_2\sqrt{2g(h_1-h_2)} \quad (5.2)$$

ここに、 q ：単位幅あたりの流量、 g ：重力加速度、 h_1 ：天端高から測った用水路側と平野側の水深のうち大きい方の値、 h_2 ：天端高から測った用水路側と平野側の水深のうち小さい方の値

ここで、用水路に沿って平野部の計算格子を作成することで、片側の平野から用水路への復流が用水路の水位を上昇させ、もう片側の平野で氾濫を引きおこす場合など左岸と右岸の平野部で水位差がある場合においても用水路近傍の氾濫水の挙動を簡便に解析できる。なお、平野部の地形データの内挿方法と水路の初期条件は5.3.2に記したとおりであり、水路に沿う計算格子の標高が T.P. -0.2 m よりも低い場合には、T.P. -0.2 m を天端高として本間の越流方程式を適用した。

図5-12は、Case1の水路がある場合の計算を上記の方法で実施した氾濫解析結果を前章と同じ時間帯において示したものである。地震発生から20分後の段階では用水路内も2次元解析した結果(図5-7のCase1(水路あり))と比較して、北部の用水路からの浸水が十分に再現できていないことが分かる。図5-13は、南から北に延びる用水路の一つ(図5-2のAA'の部分)を取り上げて、水路を1次元計算した場合(実線)と水路内も2次元計算した場合(破線)について経時的な水位断面図を示したものである。20分後の結果を見ると水路を1次元計算した場合は、北端付近の水位上昇が0.2m程度過小評価されており、この時点の氾濫が十分に再現できなかったことが考えられる。この理由として、用水路が完全に水没した後も、平野部との流れの計算を越流公式を用いて行っているため、氾濫水の流速が水路の流れに与える影響を十分に考慮できていないことが原因の一つとして考えられる。図5-12と図5-7(Caae1水路あり)について、津波の第1波が到来する地

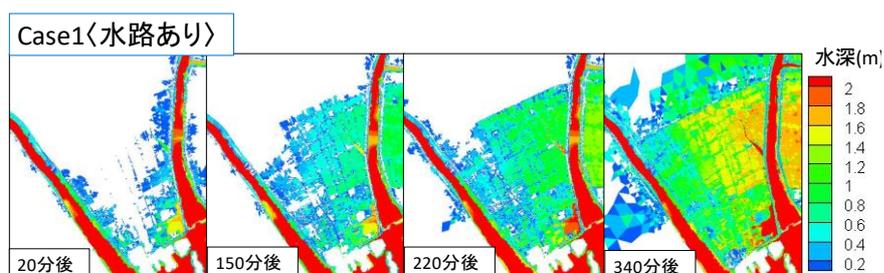


図5-12 用水路の再現および格子作成方法

震発生 150 分後以降の平野部の浸水状況の比較から、津波氾濫範囲及び浸水深の分布が両者ともほぼ一致している。さらに、地震発生 150 分後以降の各時刻について図 5-13 の水路内の水位断面図をみると、1D と 2D で、全体的な水位差が 0.2m 程度見られるものの、水面形と時間経過に伴う水位上昇量についてはおおむね一致している。以上から、本手法は用水路内まで 2 次元計算した場合と同様に津波氾濫に対する用水路網の影響を反映できることが分かる。

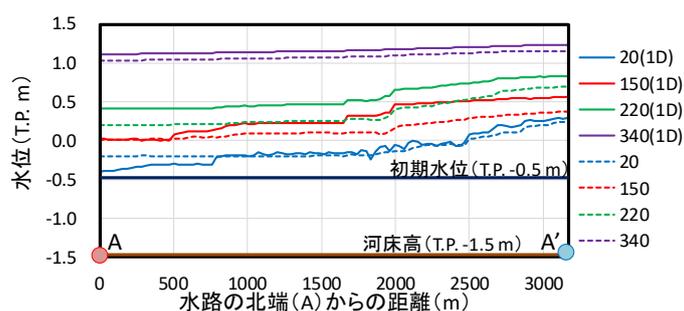


図 5-13 水路の水位断面図（図 5-2 の AA' 断面）

5.5 用水路および建物を考慮した津波氾濫解析

5.5.1 本節の概要

本章では岡山市の津波氾濫特性について検討するため、2章で説明した今井ら⁸⁾と同様の計算手法により、建物の影響を考慮した津波氾濫解析を実施する。以下5.5.2にBP-Lモデルの計算手法、5.5.3に解析条件を記す。さらに5.5.4に解析結果と岡山市の津波氾濫特性についての考察を記す。

5.5.2 建物の再現方法

本解析では用水路内も2次元計算を行うため、5.3の解析と同じ計算格子を用いる。また、各計算格子の面積のうち建物に被る部分の面積の割合（以下占有率）を求めた。建物の部分は国土基盤地図情報（国土地理院）の内、建物縁のデータをもとに特定した。図5-14に占有率の分布を示す。左側に示す航空写真と比較すると建物と主要道路の分布を占有率によりおおむね再現できていることが分かる。ここで占有率に応じて以下のように建物を再現した。ここで、占有率に応じて以下のとおり建物の影響を考慮した。占有率が1の計算格子では建物を地形して考慮した。ここでは家屋の高さを5mと近似し、該当する計算格子について元々内挿されている地表面の標高に5mを加えた。占有率が0より大きく1未満である計算格子には、市街地のマンニングの粗度係数である0.06を与えた。占有率が0である計算格子には空地のマンニングの粗度係数として0.025を与えた。ここで中防災の農地の粗度データは0.02が用いられていることを踏まえ、本解析においても農地では代わりに0.02を与えた。

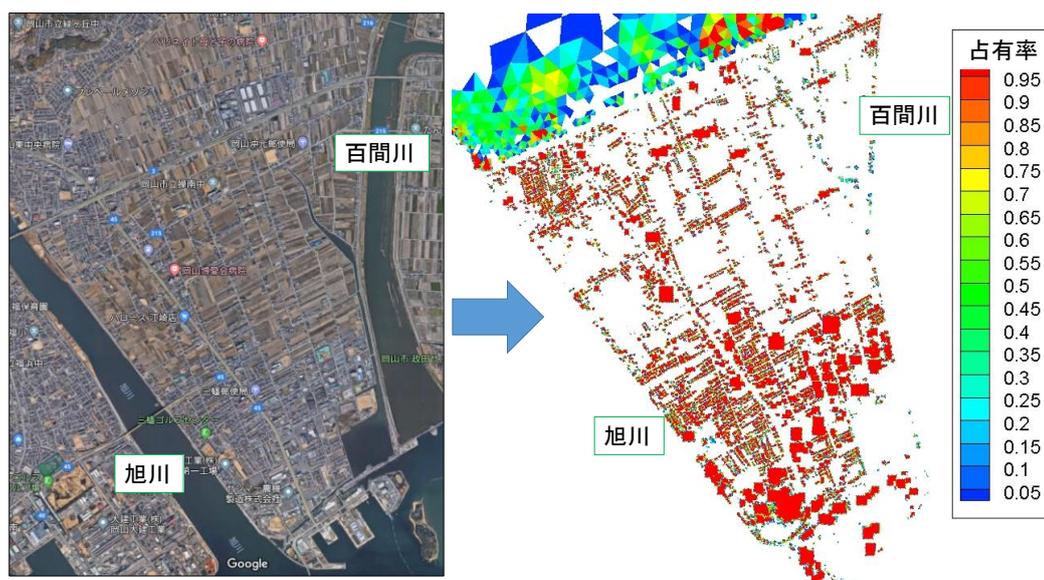


図 5-14 建物再現区域の航空写真（左）と占有率の分布（右）
（占有率が0の部分は白色で表示）

5.3のCase1(用水路あり)について、5.3と同様の初期条件および境界条件のもと津波解析を実施した。

5.5.3 解析結果

図5-15に地震発生後からの時刻ごとの浸水深分布図を示す。また、図5-16には住宅地が密集する臨海地域の浸水深分布を示している。図5-15から初期の浸水が始まる地震発生から20分後では用水路の影響により、海や川から離れた北部の地域から氾濫が進んでいることが分かる。また、図5-16から臨海地域においても用水路沿いでは用水路からの

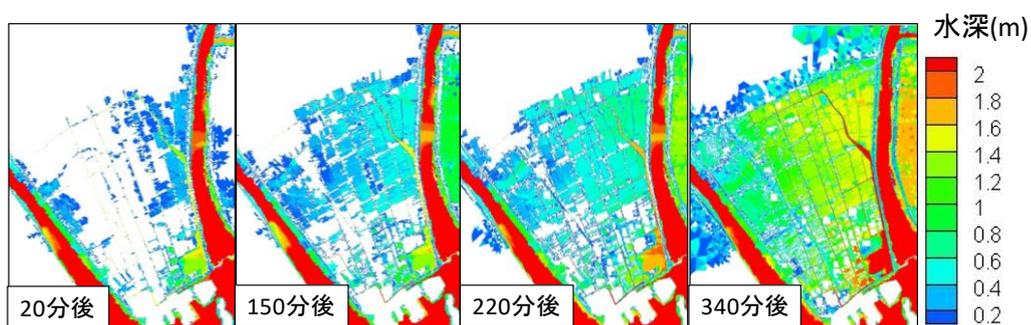


図 5-15 浸水深の分布図

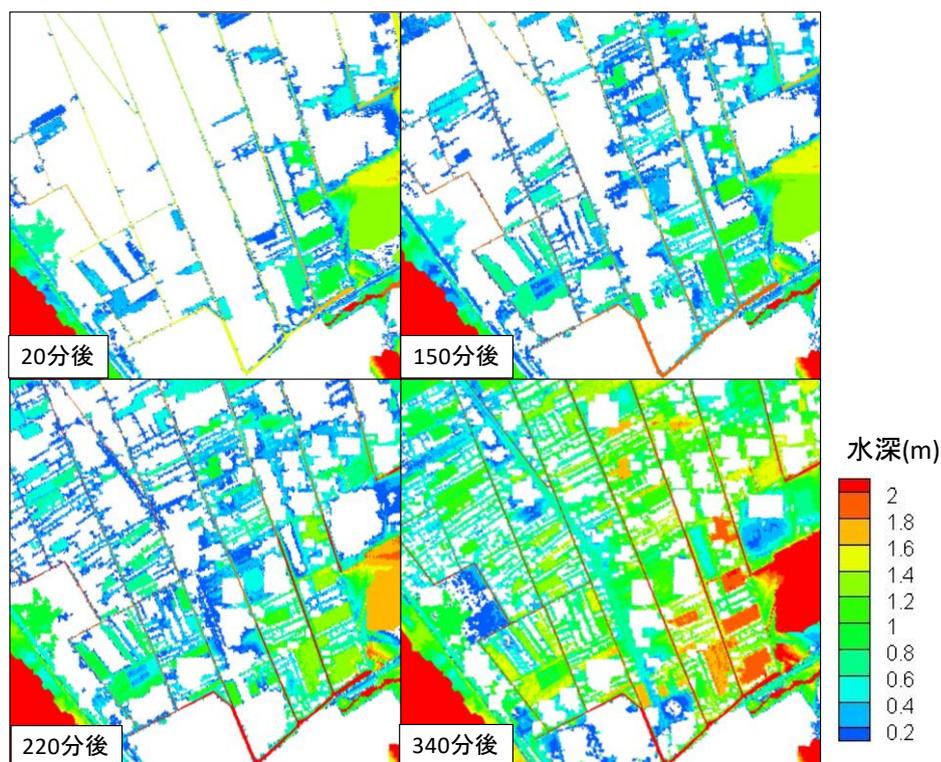


図 5-16 臨海地域の浸水深の分布図

浸水始まっているが分かる。さらに、図 5-15 の地震発生から 150 分後と 220 分後の図から、150 分後には用水路再現区域の北側の地域がほとんど浸水し、220 分後にかけて浸水深が増加している様子がうかがえる。一方で、図 5-16 の同時刻の図から臨海地域では用水路沿いから用水路から離れた地点に向かって浸水が進んでいる様子がうかがえる。220 分後の浸水分布と比較すると 150 分後では、建物がない部分がまだ完全に浸水していないことが分かる。以上から北側の地域の方が南部の臨海地域の住宅区内よりも比較的早く浸水が進むことが分かり、臨海地域に居住する住民は海岸から遠ざかる北方に避難するよりも用水路沿いから離れる方向に避難する方が氾濫に巻き込まれる可能性は低いと判断できる。そのため、各住宅区内、比較的標高が高く浸水開始時刻が遅い地点に津波避難ビルを設置することが用水路からの氾濫による人的被害を軽減するために有効であると考えられる。

地震発生から 340 分後には両図から後から来る津波の氾濫により浸水深がさらに増加していることが分かり、東側の地域や臨海地域では 1.5m を超える場所が見られる。このため、避難完了後、避難体制を長時間継続することが必要であることが分かる。

5.6 まとめ

本章では岡山市の用水路が南海トラフ地震時の津波氾濫に与える影響を数値解析により検討し、以下の知見を得た。

- 1) 用水路を伝った津波が先に氾濫することにより海岸や河川から比較的離れた地域の氾濫開始時刻が数時間早まるなど、用水路網が岡山市の津波氾濫過程を加速し、人的被害を深刻化する可能性がある。
- 2) 岡山市のように用水路網が発達した地域の津波氾濫予測にはその影響を考慮することが必要である

また、以上のことを踏まえ、今後より広い範囲で用水路を再現した解析を行うため、用水路を一次元河道として取り扱う手法の適用可能性を検討した。その結果、初期の氾濫の再現性を高めるため用水路と平野部間の流量計算手法にさらなる検討の余地があるが、用水路内の流れを1次元計算した場合も津波氾濫過程の解析結果に用水路の影響を反映できることが明らかとなった。

また、建物の影響も組み込んだ数値解析結果から岡山市の津波氾濫特性と津波避難対策の方針に関して以下の知見を得た。

- 3) 建物が密集する臨海地域よりも、比較的標高が低い北側の地域の浸水が早く進む。
- 4) 臨海地域では全体的に用水路沿いから用水路で囲まれる住宅区の中央に向かって浸水が進む。
- 5) 3)、4) から特に臨海地域では海岸から遠ざかる北方への避難は危険であり、住宅区ごとに津波避難ビルを設置することが有効な対策である。
- 6) 地震発生長時間かけて、後から到来する津波によって浸水深が上昇するため、避難体制を長時間継続する必要がある。

(参 考 文 献)

- 1) 下園武範, 高川智博, 田島芳満, 岡安章夫, 佐藤慎司, 劉海江: 2011年東北地方太平洋沖地震津波による茨木県・千葉県沿岸域における被害, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_296-I_300, 2011.
- 2) 宇田高明, 五十嵐竜行, 中橋正, 保田英明, 熊田貴之, 酒井和也, 清水達也: 流入小河川および海浜へのアクセス路からの津波侵入—九十九里浜の例—, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.2, pp.I_37-I_42, 2012.
- 3) 赤穂良輔, 前野詩朗, 高橋巧武, 工代健太, 吉田圭介: 市街地レイアウトを考慮した岡山市における津波到達前後の浸水範囲予測および避難時間の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp. I_289-I_294, 2016.
- 4) 岡山県危機管理課, 南海トラフ巨大地震による震度分布図・液状化危険度分布図について, URL: <http://www.pref.okayama.jp/page/308887.html>.
- 5) 内閣府, 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告) 強震断層モデル編—液状化可能性, 沈下量について—, 2012.
- 6) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 野口正人: 氾濫解析モデルの高度化, 水工学論文集, 第47巻, pp.919-924, 2003.
- 7) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 田邊武司: 下水道網を考慮した飯塚市街地の氾濫解析, 水工学論文集, 第53巻, pp.829-834, 2009.
- 8) 今井健太郎, 今村文彦, 岩間俊二: 市街地における実用的な津波氾濫解析手法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_311-I_315, 2013.

第6章

結論

本研究では南海トラフ地震を想定した岡山市の津波対策に資するため、地震下に岡山市沿岸の津波挙動を簡易的にリアルタイム予測する手法（以下簡易予測法）の構築および岡山市の微地形を考慮した氾濫解析による津波氾濫特性の検討を行った。本章では本研究で得られた主要な結論と今後の展望について述べる。

最初に3章および4章で説明した津波の簡易予測法について述べる。

3章では津波伝播解析の結果から波源域から岡山市にかけての津波の伝播経路および各経路を経た津波の岡山市沿岸への到達時刻について検討した結果、鳴門海峡と明石海峡から入ってきた津波のピークが播磨灘から備讃瀬戸にかけての海域で重なることで津波が増幅し、岡山市沿岸に波高2mを超える津波が打ち寄せることが明らかになった。さらに鳴門海峡と明石海峡部の津波の波高と各海峡を経由した岡山市の津波波高の間に高い相関関係があることが分かり、両海峡部で得られた津波波形から山田港の津波波形を到達の約80分前に予測できることが示された。

4章では海峡部よりもさらに波源に近い海域からの津波予測の可能性を検討するため、波源域から紀伊水道にかけての津波挙動を検討した。その結果、紀伊水道において津波の共振によるセイシュが生じることが岡山市に約60分周期の津波が数波に渡って押し寄せる原因であることが明らかとなった。さらに、紀伊水道以南の海域の津波波形は陸域からの反射波など様々な周期の波が混在する不規則波となっているが、紀伊水道入口で得られた津波波形からフーリエ解析を用いて抽出した約60分周期の規則波の波高が鳴門海峡と明石海峡通過時の津波波高と震源ケースによらず高い相関関係を持つことが示された。以上から紀伊水道入口の各津波の波形から、岡山市沿岸の津波ピーク水位を第1波、第2波では到達の約100分前に高い精度で予測できることが示された。さらに、紀伊水道入口の第2波の波高から直接山田港の第3波のピーク水位を到達の約160分前に予測できることや紀伊水道入口で第1波のピークが得られた時刻から岡山市沿岸の第3波までの到達時刻を予測可能であることなど紀伊水道のセイシュの挙動に着目することで津波予測を大幅に早期化できることが示された。また、瀬戸内海は潮汐が卓越する海域であることを踏まえ、潮汐場における簡易予測法の適用可能性について、潮汐と津波の同時解析の結果を用いて検討した。その結果、波形抽出地点と山田港の経時的な潮位変動をあらかじめ予測できれば、潮汐場においても簡易予測法により高い精度で津波ピークの予測が可能であることが示された。

本研究で検討した津波予測法が実用化した場合、紀伊水道入口の津波波形から、岡山市

に到達する津波高を比較的簡単な計算により予測することができる。そのため高度な計算機を持たない各自治体も利用が可能であり、津波避難を適切に行うために必要不可欠な情報を住民に提供できる。現在のところ本研究で波形抽出点として設定した海域には GPS 波浪計は設置されていないが、レーダー式波浪計を利用した津波観測など津波挙動を平面的にとらえる観測技術の高度化が進められており、簡易予測法の将来的な実用化が十分に期待できる。さらに海域ごとの海底地形の違いが津波挙動に与える影響を適切に考慮できれば、津波伝播海域でセイシュが発生する場合や2つの海峡からの津波の重畳により波高が増幅する場合の簡便な津波予測の方法として岡山市のみならず国内外の津波予測に本研究の検討事項が応用できる可能性がある。

次に5章で説明した岡山市の微地形を考慮した津波氾濫特性の検討について述べる。岡山市の用水路網が津波氾濫過程に与える影響を検討するため、用水路網を地形として再現した津波氾濫解析を行った。その結果、用水路により津波氾濫時刻が大幅に早期化し、津波の人的被害が深刻化する可能性があることが明らかになった。特に海や河川から離れた地域でその影響が顕著であり、用水路を考慮しない場合は地震発生から150分経過後に浸水がない地点においても用水路を考慮した場合は地震発生から20分後の時点で用水路を伝った海からの氾濫流により浸水が進むことが明らかとなった。また、建物の影響を加えた津波氾濫解析においても、用水路からの氾濫により臨海地域の住宅区よりも海から離れた地域が先に完全に浸水するなど住民の津波避難の方針を決めるうえでも貴重な研究成果が得られた。

現在、岡山市の津波ハザードマップは用水路を考慮していない解析結果をもとに作成されており、この研究成果は用水路の位置を踏まえた避難ルートや避難場所の再検討など岡山市の津波対策に貢献することができる。また、本研究では用水路網を一次元水路として取り扱うことにより、計算メモリや計算時間を節約し、より広い範囲で用水路網の影響を反映した津波氾濫解析を行うことができることが示された。今後、岡山市のより広い範囲の用水路を考慮し、津波氾濫過程を検討する予定である。また、本研究は岡山市のように用水路網が発達した地域の津波氾濫解析ではその影響を考慮する必要があることを初めて示し、国内外の今後の津波対策にとっても重要な知見が得られた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，3年間熱心にご指導くださいました前野詩朗教授，吉田圭介准教授ならびに赤穂良輔助教に心より感謝申し上げます．特に前野教授には研究面のみならず，就職など進路面についても親身にご指導をください，研究生生活を送る上で大きな心の支えになりました．改めてお礼を申し上げます．

環境生命科学研究科の西山哲教授にはお忙しい中，本論文の審査を行っていただきました．また，公聴会では適切なご指摘をくださいました．重ねて感謝申し上げます．

氾濫解析グループの高橋巧武君ならびに小川俊君をはじめ研究室の皆様のご協力があったおかげで本論文を仕上げることができましたこと本当にありがたく感じております．

最後に本研究を行うにあたり，国土交通省 中国地方整備局 岡山河川事務所から旭川河口部の堤防改修工事に関する情報をいただきました．ここに御礼申し上げます．