

大阪湾内におけるリアルタイム津波予測 手法の検討

STUDY OF REAL-TIME TSUNAMI FORECAST METHOD IN OSAKA BAY

安田誠宏¹・高山知司²・川村健太³・間瀬 肇⁴

Tomohiro YASUDA, Tomotsuka TAKAYAMA, Kenta KAWAMURA and Hajime MASE

¹正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所 (〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄)

²フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄)

³京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄)

There is a little time to react until the tsunami arrival in each port in Osaka Bay in case of Nankai Earthquake occurrence. Therefore, it is possible to take precautions against the tsunami if appropriate tsunami information can be obtained. In this study, the real-time tsunami forecast system which can complement the forecast of the Meteorological Agency is examined. The real-time tsunami forecast method which is proposed in this research forecasts the tsunami that reaches in Osaka Bay 1 to 1.5 hours later by using the observed data outside the bay. The Shirahama Observation Tower in Tanabe Bay, Wakayama is considered as one of the offshore tsunami observation facilities. As a result of the examination, the accuracy of this method using the observed data was well and usefulness was confirmed.

Key Words : *Tsunami, real-time forecast, observed data, Osaka Bay, Tanabe Bay*

1. はじめに

震源域に海域を含む地震の場合には津波も同時に発生する。津波が来襲する地域では、地震被害に加えて津波被害も生じるため、その被害はさらに拡大する。2004年12月26日にスマトラ沖地震が発生し、地震と津波によって死者が30万人を超える甚大な被害が生じた。このような被害を軽減するためにも、津波予測システム構築の必要性は高いと言える。2005年1月に神戸で開催された国連防災会議とそれに関する専門会議においても、津波予警報システムの必要性と導入に向けての技術、精度的問題が議論され、インド洋における整備が決議された。さらに、ユネスコはインド洋だけでなく、大西洋、カリブ海、地中海へ導入する用意があると発表し、沿岸諸国に参加を呼び掛けている。

現在の気象庁の津波予報は、実際に津波を引き起こすすべり面が地震直後にわからない中で予測を行う方法であり、高い精度の予測は難しい。また、津波予報区は原則として府県単位(66予報区)とされており、沿岸地形の特性(V字湾や港湾形状)を考慮できるほど細分化されていない。東南海・南海地震における津波対策、特に、

避難誘導等のソフト対策については、和歌山県南部は気象庁の津波予報を受けて住民がいち早く安全な場所に避難せざるを得ず、そのため津波ハザードマップ等を各市町で整備している。他方で、和歌山下津港や大阪湾内の各港では、津波の到達まで時間が比較的にあるため、この間に的確な津波情報を得ることができれば、港湾管理者あるいは港湾事業者は諸対策を適切に講ずることが可能となる。そこで、気象庁の予報を補完する目的で、リアルタイム津波予測システムの検討を行う。

2. リアルタイム津波予測

(1) リアルタイム津波予測

本研究で提案するリアルタイム津波予測手法は、沖合や湾外での観測データを用いて、1~1.5時間後に湾内に到達する津波を予測するものである。沿岸の対象地点に到達する津波高の時系列変化を示すことができ、水位の平面分布を示すことができる。さらに、湾内の地形条件データを細かく、格子間隔を50~200mにすることにより、気象庁の予報区に比べて沿岸地形の特性を考慮した

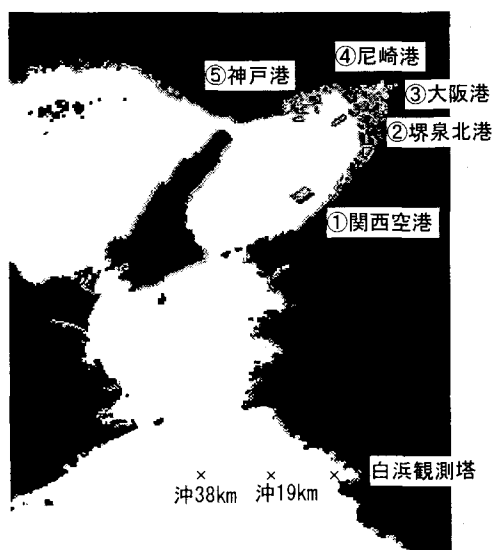


図-1 白浜観測塔と検討対象地点

結果を得ることができる。

沖合における津波観測としては、GPS津波計^{1),2)}が提案されており、大船渡沖、室戸沖において実証実験がなされ、有用性が確認されている。本研究では、田辺湾に設置されている白浜高潮観測塔を、津波観測施設のひとつとして考えることとする。図-1に、白浜観測塔と大阪湾沿岸部における検討対象地点の位置関係を示す。

(2) 想定津波

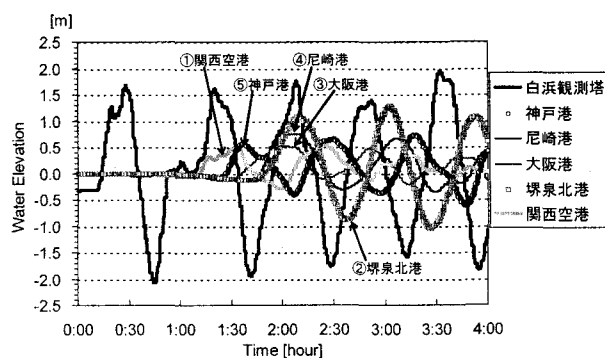
想定地震断層モデルには、Ando³⁾および相田⁴⁾モデルと、既往の研究成果⁵⁾によるアスペリティを考慮した断層モデルを用いる。まず、想定断層モデルを用いた津波計算を行い、その計算結果を蓄積する。断層モデルを用いて津波計算を行った後、観測塔で取得される津波波形と観測塔沖合の波形の相関を調べ、位相差と津波高の誤差を補正した変換データ作成方法を検討する。そして、変換したデータをリアルタイム予測計算における入力データとして用い、再び計算を行い、その精度を検証する。

3. 断層モデルによる津波計算結果

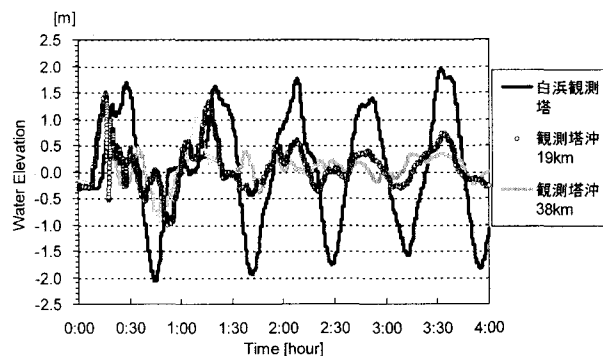
(1) Andoおよび相田モデル

図-2は、Andoモデルを用いた場合の、大阪湾内と白浜観測塔近辺における津波による水位変動の計算結果である。この図より、白浜観測塔には地震発生後10数分で、大阪湾内には1～1.5時間後に津波が到達することがわかる。Andoモデルでは白浜観測塔には約1.5m、大阪湾内には0.5～1.2mの津波が到達するという結果が得られた。

図-3に、相田モデルを用いた場合の水位変動の計算結果を同様に示す。相田モデルでは白浜観測塔には約1.5m、大阪湾内には0.6～1.5mの津波が到達しており、相田モデルの方が若干大きな津波が発生していることが分かる。

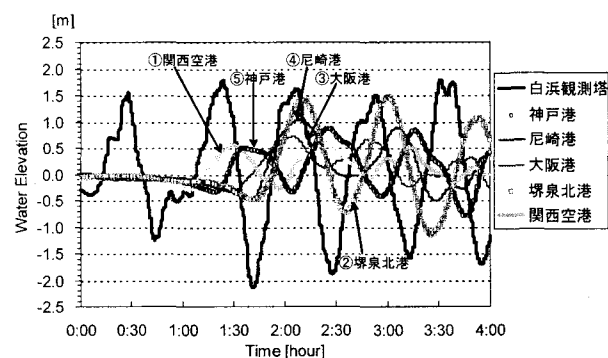


(a) 大阪湾内

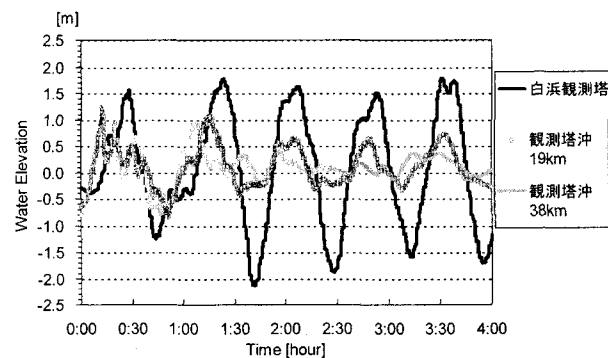


(b) 白浜観測塔近辺

図-2 断層モデルを用いた津波による水位変動 (Andoモデル)



(a) 大阪湾内



(b) 白浜観測塔近辺

図-3 断層モデルを用いた津波による水位変動 (相田モデル)

Andoモデルと相田モデルのいずれを用いても基本的に大きな違いは生じなかったため、以降のアスペリティを考慮した検討では、Andoモデルを基本モデルとして用いている。

(2) 規模のみ考慮したモデル

規模のみ考慮したモデルとは、Andoモデルおよび相田モデルの断層パラメータを、地震モーメントを地震調査研究推進本部地震調査委員会⁶⁾（以下、推本）モデルでの値と等しくなるように修正したモデルである。なお、地震モーメントは次式で定義される。

$$\begin{aligned} (\text{地震モーメント}) &= (\text{断層面積}) \times (\text{すべり量}) \\ &\quad \times (\text{剛性率}) \end{aligned} \quad (1)$$

剛性率は相田モデルよりも推本モデルの方が小さい。地震モーメントの定義より、同じ規模の地震であったとしても、剛性率の値を小さな値とすると、すべり量または断層面積は大きな値となる。すべり量および断層面積は津波初期波形に大きく影響するので、規模を考慮するにあたり、剛性率は推本モデルに合わせた。その上で、地震モーメントを推本モデルに一致させた。

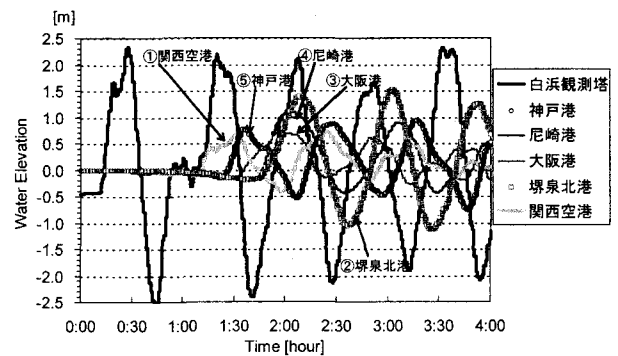
図-4に、規模のみ考慮したAndoモデルを用いた場合の、大阪湾内と白浜観測塔近辺における津波による水位変動の計算結果を示す。この図より、白浜観測塔には地震発生後10数分で、大阪湾内には1～1.5時間後に津波が到達することがわかる。白浜観測塔には約2.3m、大阪湾内には0.6～1.2mの津波が到達するという結果が得られた。

(3) 規模とアスペリティを考慮したモデル

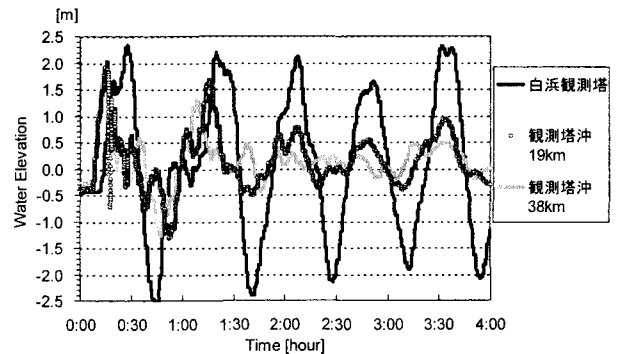
奥村ら⁵⁾は、推本が発表している想定地震のモデルを基本として、規模とアスペリティを考慮したモデルを考えている。アスペリティとは断層面上で強度の高い部分を意味し、常時では断層面へ働いているずり応力に抵抗している部分である。

アスペリティの規模が大きなモデルとして2つのケースが考えられる。ケース1は、アスペリティの大きさを震源断層の面積の約30%とする平均的なケースであり、ケース2は、ケース1より小さめに設定したケースである。Andoモデルにおける2枚断層の傾斜角は20°と25°になっているため、ここでは断層の傾斜角を断層全体で20°にしたモデルと25°にしたモデルの2種類を考えた。ただし、自由度が高くなりすぎないように、傾斜角を全断層で揃えている。以上のように、合計4通りのケースがあるが、本論文では津波の規模が最も大きくなった、ケース1、25°の場合のみについて考察する。

図-5は、推本と同じ西側アスペリティの規模が大きい場合の、大阪湾内と白浜観測塔近辺における津波による水位変動の計算結果である。この図より、白浜観測塔には地震発生後10数分で、大阪湾内には1～1.5時間後に津波が到達することがわかる。白浜観測塔には約1.7m、

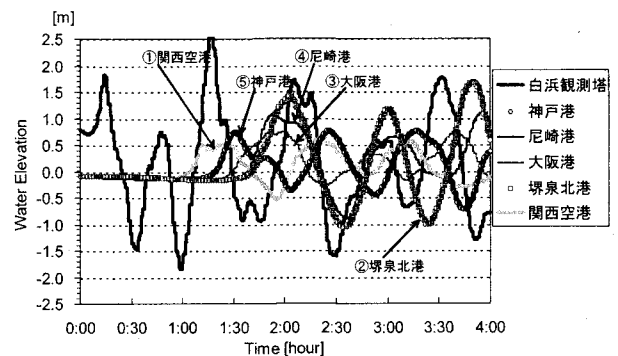


(a) 大阪湾内

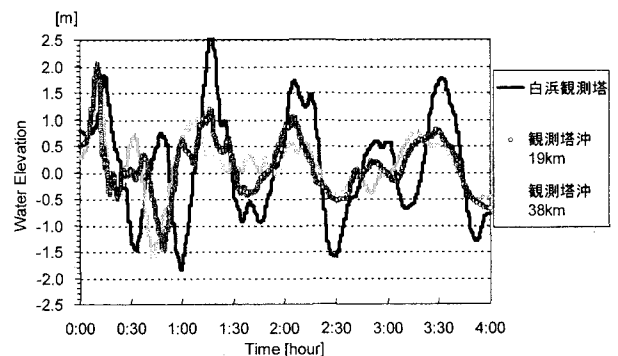


(b) 白浜観測塔近辺

図-4 断層モデルを用いた津波による水位変動
(規模を考慮したAndoモデル)



(a) 大阪湾内



(b) 白浜観測塔近辺

図-5 断層モデルを用いた津波による水位変動
(西側アスペリティの規模大、ケース1、25°)

大阪湾内には0.5～1.7mの津波が到達するという結果が得られた。

(4) 規模とアスペリティと形状を考慮したモデル

推本モデルの形状は、断層の南端が深さ10km、そして北端が深さ30kmである。奥村ら⁵⁾は、推本が想定している震源域を、アスペリティが1つずつ含まれるように3枚の矩形断層に分け、それら3枚ともが断層の南端が深さ10km、北端が深さ30kmに収まるようにモデル化している。また、中央・東側アスペリティの長さはこの矩形断層の長さと同じにしている。いずれの矩形断層も南端と北端が固定されるため、傾斜角は自動的に決まる。

図-6は、形状を考慮した西側アスペリティの規模が大きい場合の、大阪湾内と白浜観測塔近辺における津波による水位変動の計算結果である。この図より、白浜観測塔には地震発生後10数分で、大阪湾内には1～1.5時間後に津波が到達することがわかる。白浜観測塔には約1.7m、大阪湾内には0.3～1.2mの津波が到達するという結果が得られた。

4. リアルタイム予測手法の検討

(1) 白浜観測塔と田辺湾沖における観測データを用いた場合の津波波形の比較

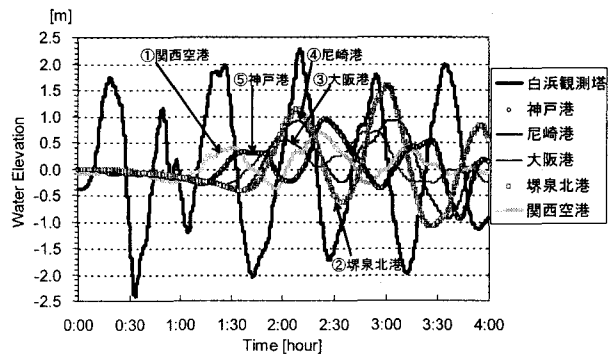
図-7は、Andoモデルでの白浜観測塔、観測塔沖19kmおよび38kmの津波計算結果の時系列データを入力データとして、再び計算を行った結果である。仮想観測点で得られるデータは点情報であるが、予測計算においては、観測データを同緯度における線情報として入力している。

この図より、いずれの観測点においても観測データを直接入力しただけでは、津波の予測精度は低く、入力データとして利用するためにはデータの変換が必要なのがわかる。また、観測塔沖19kmおよび38kmのデータを入力して計算した結果は、白浜観測塔のデータを入力して計算した結果よりも波形の一致は若干良い。しかしながら、現在の観測体制では地震発生直後に観測塔沖合のデータを取得することはできないため、本研究においては、現有施設である白浜観測塔における観測値を利用するためのデータ変換方法について検討することとした。白浜観測塔と観測塔沖のデータの相関性を考慮しつつ、変換データを作成し、これを入力データとして用いた。

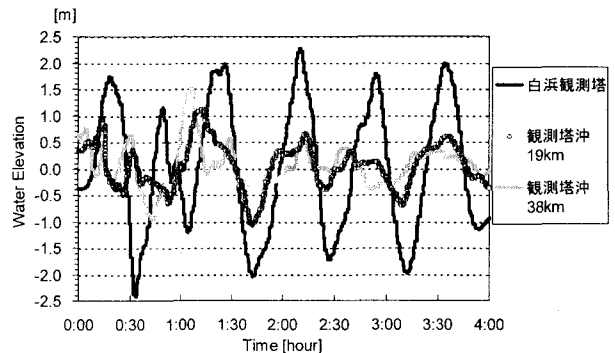
田辺湾沖合や紀伊水道にGPS津波計が設置されるなど、観測点が増え、観測体制が強化されれば予測精度はより向上すると思われるが、新たなGPS津波計をどこに設置すればよいかなどの検討については今後の課題である。

(2) 観測波形から入力データへの変換方法の検討

白浜観測塔で観測されたデータを入力データに変換する方法として、まず、観測データをsin波に変換する方法を考えた。最初に津波高が0.0mになる時刻を t_1 （初期段階での津波高がプラスの場合は $t_1=0$ とする）、その次



(a) 大阪湾内



(b) 白浜観測塔近辺

図-6 断層モデルを用いた津波による水位変動 (形状を考慮した西側アスペリティの規模大、ケース1)

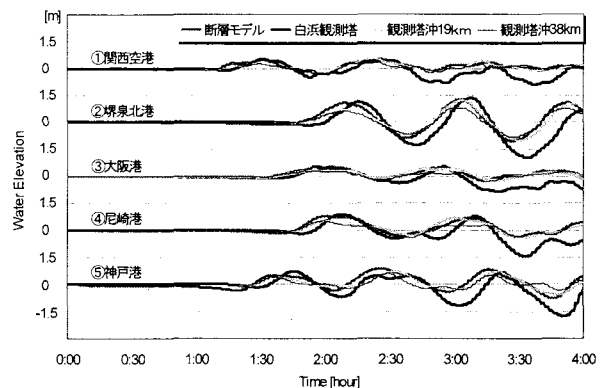


図-7 白浜観測塔および田辺湾沖での観測データを直接用いた場合の津波予測計算結果の比較 (Andoモデル)

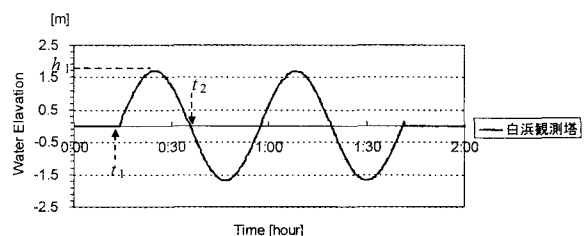


図-8 リアルタイム津波予測計算で入力する変換データの一例 (Andoモデル)

に津波高が0.0mになる時刻を t_2 とし、時刻 $t_1 \sim t_2$ の間での最大の津波高を h_1 とした。 $(t_1 - t_2)$ を2倍したものを周期とし、 h_1 を振幅として、変換データを作成した。図-8に入力する変換データの一例を示す。

変換データによる津波計算結果と断層モデルを用いた計算結果とを図-9のように比較すると、津波高に大きなずれがみられた。このずれを修正するために、入力データの変換方法を改良することとした。

(3) 入力データ変換方法の改良

新たな入力データを得るために改良した変換方法について説明する。

津波高がマイナスの部分における振幅は、変換データによる津波計算結果が断層モデルを用いた津波計算結果の約1.67倍となっている。また、2波目の振幅においても変換データによる津波計算結果が断層モデルを用いた結果の約1.67倍となっている。以上のことから、(2)で作成した変換データの津波高がマイナスの部分の振幅を0.6倍とし、2波目の振幅も0.6倍とした変換データを作成した。改良した変換入力データの例を図-10に示す。

変換方法を改良した結果、予測精度は向上した。次章で詳細に考察する。

5. リアルタイム津波予測計算結果

(1) Andoモデル

図-11は、Andoモデルによる白浜観測塔での計算結果を用いた大阪湾内における津波予測結果である。すなわち、白浜観測塔で観測されるはずの津波による水位変動データを変換し、これを入力値として再計算した結果である。図-2に示した断層モデルによる計算結果と比較している。図より、大阪湾内のいずれの地点においても、観測データを用いた津波波形と断層モデルの津波波形の一致はよく、予測精度は高いといえる。また、図-12のように、水位変動の平面分布の経時変化を示すこともでき、津波の伝播状況を見せることができる。

(2) 規模のみ考慮したモデル

図-13は、規模のみ考慮したAndoモデルの場合のリアルタイム津波予測結果と、図-4に示した断層モデルによる計算結果を比較したものである。図より、3時間後以降の再現性はやや低い、いずれの地点においても、観測データを用いた津波波形と断層モデルの津波波形の一致はよく、予測精度は高いといえる。

(3) 規模とアスペリティを考慮したモデル

図-14は、西側アスペリティの規模が大きい場合のリアルタイム津波予測結果と、図-5に示した断層モデルによる計算結果を比較したものである。図より、いずれの観測点でも、1波目の周期を若干短く予測している。そのため2波目の予測到達時刻が早くなってしまった。安

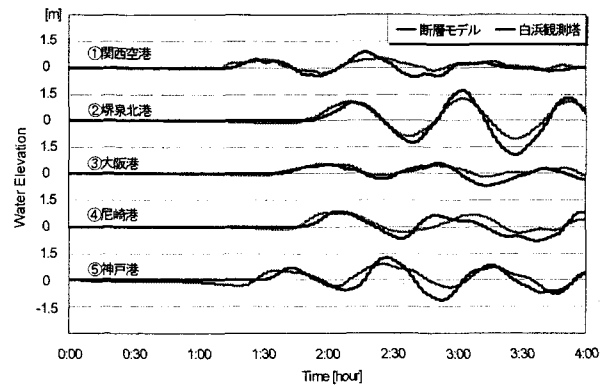


図-9 観測データをsin波で変換した場合の大阪湾内の水位変動計算結果（Andoモデル）

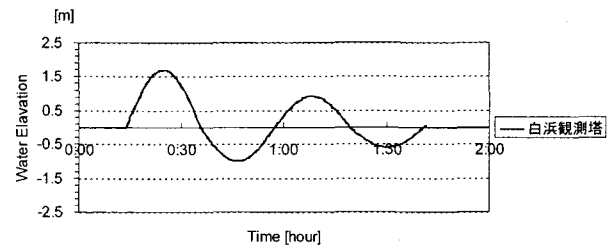


図-10 改良した変換方法による入力データ例（Andoモデル）

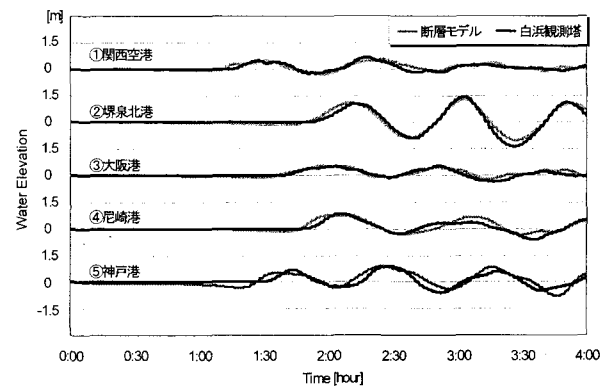


図-11 リアルタイム津波予測手法による大阪湾内の水位変動計算結果（Andoモデル）

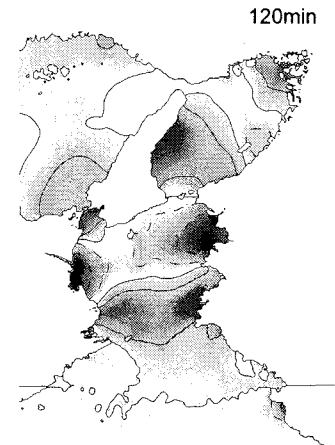


図-12 リアルタイム津波予測手法による2時間後の水位変動の平面分布（Andoモデル）

全側の予測のため大きな問題はないが、警報解除の判断材料に用いるためには、変換方法の見直しが必要である。一方、津波高については、神戸と関西は高い精度で再現できているが、それ以外の湾奥の各地点では若干小さくなっている。これは、湾内における津波の反射、屈折の影響が大きいためと考えられる。

(4) 規模とアスペリティと形状を考慮したモデル

図-15は、形状を考慮した西側アスペリティの規模が大きい場合のリアルタイム津波予測結果と、図-6に示した断層モデルによる計算結果を比較したものである。図より、1波目については、神戸と関西の再現性は良いが、それ以外ではやや小さい予測結果になっている。2波目については、いずれの地点でもリアルタイム予測結果の方が到達時刻の予測は早い、津波高の一致はよい。

6. おわりに

主要な結論をまとめると以下になる。

- 1) 断層モデルを用いた津波計算を行い、白浜観測塔での津波計算結果から、リアルタイム予測計算における入力データを作成する方法を考案した。
- 2) 観測データを入力データとして再計算を行うことにより、活断層の違いに依存しない予測計算結果が得られることを確認した。
- 3) 観測データを用いたリアルタイム津波予測は、神戸港、関西空港において精度の高い結果が得られた。
- 4) 一方、大阪湾奥の大阪港、尼崎港、堺泉北港では神戸港、関西空港に比べて精度がやや低くなった。湾奥で精度が低くなったのは、湾内における津波の反射、屈折の影響が大きいためと考えられる。

また、本研究では、観測データを入力データとして再計算を行う際、波の指向性を考慮していない。今後は、波の指向性を考慮し、さらに波の反射、屈折効果をも考慮に入れた津波予測計算を検討する必要がある。さらに、今後のGPS津波計の新たな設置も視野に入れて、観測地点をいくつか設定することにより、より精度の高いリアルタイム津波予測をしていきたい。

最後に、本研究は、国土交通省近畿地方整備局「港湾における東南海・南海地震対策技術検討会」の一環として実施したことを明記する。

参考文献

- 1) 加藤照之，寺田幸博，木下正生，一色浩，横山昭：GPS津波計の開発，月刊海洋，号外，No. 15，pp. 38-42，1998。
- 2) 永井紀彦，小川英明，寺田幸博，加藤照之，久高将信：GPSブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測，海岸工学論文集，第50巻，pp. 1411-1415，2003。
- 3) Ando, M.: Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, *Tectonophysics*, Vol.27, pp.119-140, 1975.

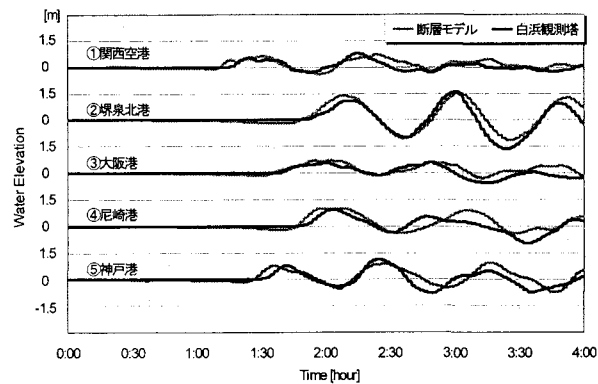


図-13 リアルタイム津波予測手法による大阪湾内の水位変動計算結果（規模を考慮したAndoモデル）

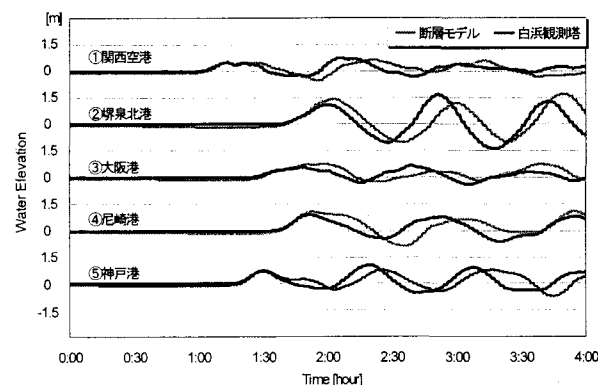


図-14 リアルタイム津波予測手法による大阪湾内の水位変動計算結果（西側アスペリティの規模大，ケース1，25°）

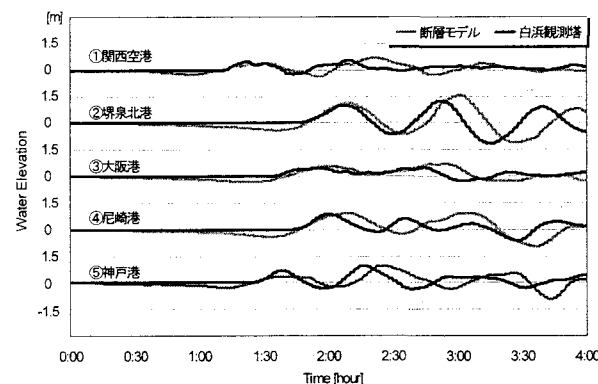


図-15 リアルタイム津波予測手法による大阪湾内の水位変動計算結果（形状を考慮した西側アスペリティの規模大，ケース1）

- 4) 相田 勇：南海道沖の津波の数値実験，東京大学地震研究所集報，Vol. 56，pp. 713-730，1981。
- 5) 奥村与志弘，高橋智幸，鈴木進吾，河田恵昭：アスペリティによる津波波源不均一性に関する一考察，津波工学研究報告，20，pp. 23-46，2003。
- 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：南海トラフの地震を想定した強振動評価手法について（中間報告），2001。