

# カルマンフィルタを用いた リアルタイム津波予警報に関する研究

小池信昭

和歌山工業高等専門学校助教授 環境都市工学科  
(〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77)  
E-mail:koikenob@wakayama-nct.ac.jp

最近発生したいくつかの大きな津波に対する住民の避難行動の対応の調査によると、住民は避難を開始するために何らかの情報がほしがっているようである。そのために津波警報をできるだけ早く出すことは重要である。現在、気象庁の数値予報というのがあるが、データベース化しているため警報が出るのは早い精度の点でかなりの誤差が報告されている。そこで、この精度を向上させるためにカルマンフィルタを用いた数値予報をここでは提案した。まだ、リアルタイム津波予警報という段階まで行かないが、ここで提案した方法を用いて発展していく予定である。

*Key Words : Times, italic, 10pt, 3-5 words, one blank line below ABSTRACT, indent if key words exceed one line*

## 1. はじめに

現在、気象庁による津波数値予報として出される情報は、まず、地震の断層モデルをいくつも想定して数値計算を行い、沿岸部での津波の予測値をあらかじめ求め、データベース化しておく。そして、実際に地震が起きた場合に、地震情報から断層モデルを予想して、あらかじめ想定しておいた断層モデルと照合し、さらに補間などを行って最適な津波の予測値が数値予報として出されることになっている。しかし、即時的な地震情報だけから得られる断層モデルの予測値は信頼性の点で不十分であり、特に地震に比べて津波が大きくなる津波地震などの場合には、断層モデルから予測した津波の予測値が大きすぎる懸念がある。したがって、沖合に設置した津波計の観測データなど地震以外の情報を加えることによって、断層モデルだけからの津波予測値を修正して、予測値の精度を向上する必要がある。ここでは、沖合に設置した津波計での観測データを利用することによって、沿岸部に来襲する津波の予測値の精度を向上させる方法の提案とその基礎的考察を行う。

実際、東南海・南海地震対策特別措置法などの防災対策により、津波計を設置するなど津波の観測体制も強化される気運が高まってきている。しかし、せっかく津波計が設置されてもそれを津波予警報の高さの予報に役立てる方法はまだ確立されていない

と言ってもよい。つまり、現在の技術では津波計で津波の有無の検知はできても、その観測データを積極的に利用して津波予測の精度を向上させるような研究はまだ確立されていないと言ってよい。そこで、ここでは津波計の観測データを利用して、カルマンフィルタを適用することによって、沿岸部に来襲する津波をリアルタイムに予測する方法を確立することを目的とする。

## 2. 研究の方法

(1) カルマンフィルタを利用した数値精度向上方法  
津波計での観測データを利用して予測値の精度を向上する方法として、状態空間モデルに基づいたカルマンフィルタを利用することにした。通常、津波の数値計算では、差分法のスタガードリーブフロッグ法が用いられているが、水位の計算ステップと流量フラックスの計算ステップが異なるためこのままでは状態空間モデルには適用できない。そこでリーブフロッグ法の差分精度は保持したまま、以下のように線形1次元問題の差分式を式(1)、(2)のように変形し、状態空間モデルに適用できるようにした。なお、ここでは計算機メモリの制限から1次元の伝播問題を考えていて、実際の予測に役立つ2次元の問題は今後の課題とする。

$$\eta_i^n = \eta_i^{n-1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( M_{i+\frac{1}{2}}^{n-1} - M_{i-\frac{1}{2}}^{n-1} \right) \quad (1)$$

$$M_{i+\frac{1}{2}}^n = \left( 1 - 2gh_{i+\frac{1}{2}} \left\{ \frac{\Delta t}{\Delta x} \right\}^2 \right) M_{i+\frac{1}{2}}^{n-1} - gh_{i+\frac{1}{2}} \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_{i+1}^{n-1} - \eta_i^{n-1}) + gh_{i+\frac{1}{2}} \left\{ \frac{\Delta t}{\Delta x} \right\}^2 (M_{i+\frac{3}{2}}^{n-1} + M_{i-\frac{1}{2}}^{n-1}) \quad (2)$$

このように変形すると、システムの状態を  $x_n = [\eta_i^n, M_{i+\frac{1}{2}}^n]^T$  とすれば、式(3)、(4)のような状態空間モデル<sup>1)</sup>で、津波計での観測データを考慮した差分法による津波数値計算が表せることになる。

$$x_n = F_n x_{n-1} + G_n v_n \quad (\text{システム方程式}) \quad (3)$$

$$y_n = H_n x_n + w_n \quad (\text{観測方程式}) \quad (4)$$

### 3. 三陸沖における計算例

次に、ある程度実際の場合を想定するため、図-1のように三陸地方の釜石沖の断面地形から1次元の水深データを作成した。計算時間間隔は5sec、計算格子間隔は2kmに設定した。津波計は、岸から20、40、60、80、100kmの位置に置くことにした。

三陸沖を選んだ理由は、地震断層が比較的陸地に平行に走っているため、1次元問題が扱いやすいと思われたためである。

また、図-2に今回の計算で用いた初期波形と釜石沖の海底地形の比較を示した。これを見れば、観測点の位置と計算精度との関係を考えるのに役に立つ。

### 4. 計算の結果と考察

#### (1) 津波計の数による数値予測精度の向上

図-3は、観測点が沖合の60kmの位置にある場合に、観測時間12分30秒のデータを用いて沿岸部での津波波形を予測したものである。これから、津波計が1つだけでは短時間の観測で正確な予測はできないが、沿岸部での観測データを加えて津波計を2つにすると津波予測の精度が飛躍的に向上することがわかる。また、これから津波到着前にリアルタイム予測が可能になることもわかる。

#### (2) 津波計の有無による数値予測精度の向上

図-4は1896年三陸地震津波の初期水位を用いて、現在行われている地震情報のみによる津波数値予報と、津波計の観測データを12分30秒用いた場合を比較したものであるが、これから津波計での観測情報を加えて予測した場合の方が、地震情報のみから推定するよりも、精度の高い予測をすることがわかる。これらの結果は、まだ1次元のも

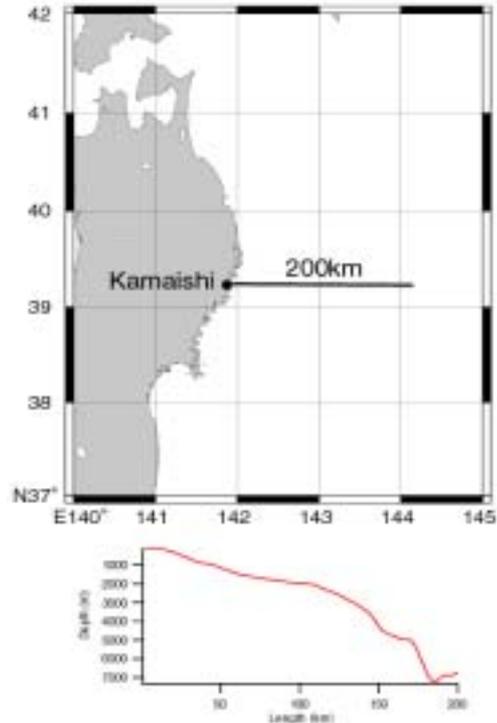


図-1 数値計算に用いた釜石沖の1次元直線と海底地形

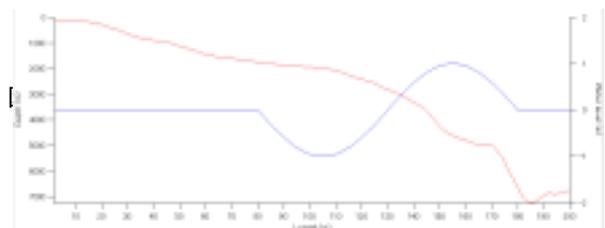


図-2 数値計算に用いた初期波形と釜石沖の海底地形

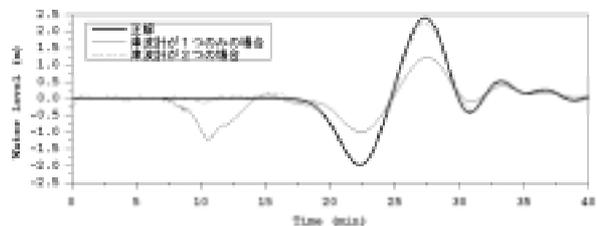


図-3 津波計の数による数値予測精度の向上

のであるのですが、すぐに実用化できるものではないが、今後2次元に拡張するなどして、将来津波計データを利用した数値予測の可能性があると云える。

### (3)津波計の位置による数値予測精度の比較

図-5は観測データの観測時間を12分30秒にした場合、津波計の位置によって沿岸部での予測値がどのように変化するか調べたものであるが、これから沖合60kmの地点が最もよい観測点となることがわかる。

なぜ、60kmの地点がもっとも数値予測精度がよくなったかについては、図-2の初期波形と海底地形の関係が大きく関わっていると思われる。観測時間を長くして観測点の位置について数値予測精度を調べたら、60kmから沿岸部に近い方の観測点でも数値予測精度が上がり始める。それは、数値予測精度を上げるに必要な情報が、それらの観測点にも届き始めるからと予想される。このあたりの数値精度向上のなぞを解決するのは、今後の課題としたい。

### (4)津波計のデータの観測時間による数値予測精度の比較

#### a)60km地点の場合

図-6は、観測点が沿岸部から60km地点にある場合の、データの観測時間による数値予測精度の比較を示したものである。これを見ると、60km地点では、700秒のデータの観測時間から、ほぼ正確な数値予測ができていくことがわかる。

#### b)40km地点の場合

図-7は、観測点が沿岸部から40km地点にある場合の、データの観測時間による数値予測精度の比較を示したものである。これを見ると、40km地点では、800秒のデータの観測時間から、ほぼ正確な数値予測ができていくことがわかる。これは、津波の伝播時間の影響で40km地点では、津波の情報が届くまで時間がかかったため、数値予測精度の改善が遅れたと考えることができる。

#### c)80km地点の場合

図-8は、観測点が沿岸部から80km地点にある場合の、データの観測時間による数値予測精度の比較を示したものである。これを見ると、80km地点では、ほぼ正確な数値予測ができるまで、約1000秒のデータの観測時間がかかっていることがわかる。80kmの観測地点は60kmや40km地点よりも、津波の初期波形に近いと考えられるのになぜ、正確な数値予測ができるまで時間がかかるのであろうか。その答えの1つとして、図-2の初期波形と観測点の位置が関係していると考えられる。つまり、80km地点は初期波形の中にあるので、ある程度データの観測時間が経たないと正確な数値予測ができないと考えられる。

これから、1つの結論として、津波計の置く位置は初期波形よりも沿岸部側にあった方が、正確な数値予測にかかるデータ観測時間が短くて済むと思われ。

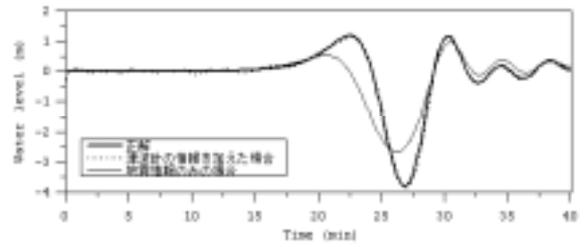


図-4 津波計の有無による数値予測精度の向上

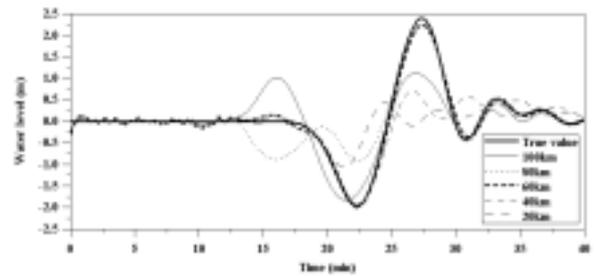


図-5 津波計の位置による数値予測精度の比較

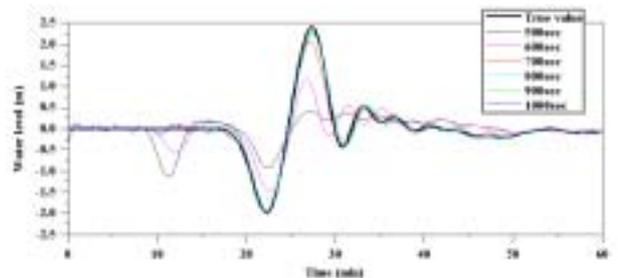


図-6 60km地点の観測点を用いた場合のデータの観測時間による数値計算精度の比較

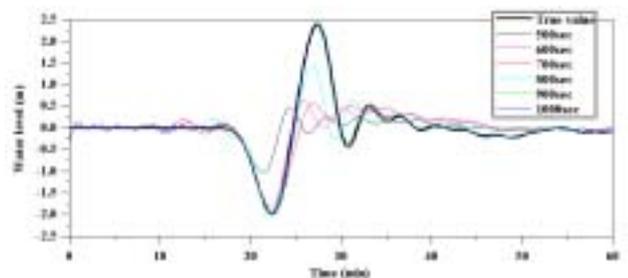


図-7 40km地点の観測点を用いた場合のデータの観測時間による数値計算精度の比較

#### 4. まとめと今後の課題

津波計の観測点1点のデータから、沿岸部の予測したい地点の数値予測をしていた前回の報告<sup>2)</sup>と比べると、ここでは予測したい地点の観測データを加えると、予測したい地点の数値予測精度が飛躍的に上がり、それにかかるデータの観測時間も非常に短くて済むことが明らかにされた。

しかし、なぜ沿岸部から60km地点で観測すると、他の地点に比べて数値予測精度が向上するかなど、初期波形と海底地形を考慮に入れた考察がまだできていない。これは今後の課題とする。

また、仮に数値予測にとっての最適観測点、アルゴリズムがわかったとしても、それらのデータ転送、処理などの時間を考えるとリアルタイム津波予測とするには、まだまだ越えなければならないハードルも多い。しかし、著者は次の東南海・南海地震が来ると言われる約30年後までには、これらの問題も解決できているので、この研究をこれからも継続したいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 片山 徹:新版応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, 2000.
- 2) 小池信昭:津波計における観測データを用いた数値予

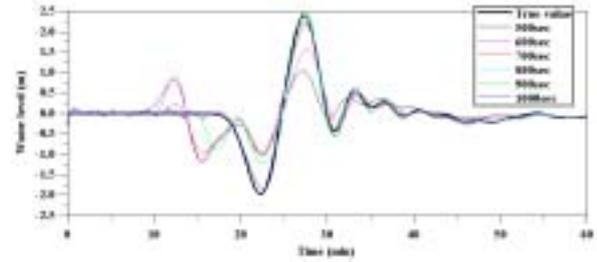


図-8 80km地点の観測点を用いた場合のデータの観測時間による数値計算精度の比較

測の精度向上に関する研究, 第21回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp.153-154, 2002.

(2003. 10. 10 受付)