

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

Study on the Evaluation of Tsunami Inundation in Real time with Database and its Accuracy

阿部郁男¹・今村文彦²

Ikuro ABE and Fumihiko IMAMURA

We propose the system to estimate the tsunami inundation in real time by collecting seismic and tsunami information and selecting suitable cases from all in the database, in which we assume possible faults model as scenario. In addition, the system includes the process to re-select suitable one by referring the tsunami observed data by GPS buoy. Some checkpoints that compared the height of the tsunami were determined for re-select. We propose a database for Kamaishi city of Sanriku Coast. And the 1896 Meiji Sanriku tsunami is used to discuss its accuracy of the tsunami heights and inundation area in each process for real time. As a result, we obtained a good accuracy of the result by using the system at the target area before tsunami arrival at the coast.

1. はじめに

我が国の津波警報システムは、事前に津波伝播の数値解析を行った結果をデータベースとして登録しておくことにより、地震発生後の僅か数分で、日本全国を66に分けた予報区ごとの津波の有無だけではなく、具体的な津波の高さと検潮所がある地域での津波到達時間が予測される世界最先端の警報システムとなっている（館畑，1998）。その中で、日本近海で地震・津波が発生してから、沿岸に津波が到達するまでの時間は僅か数分～数十分であり、この時間に得られる情報が限られているため、これらの情報を活用したリアルタイム津波予測の精度向上が課題である。一方、牛山・今村（2004）で報告されているように、津波発生時の避難意識の低下が社会的な課題であり、避難意識の高揚のためには、浸水範囲などの被害を具体的にイメージできる予測情報が必要であると考えられる。

そこで、本検討では、地震・津波が発生してから沿岸に津波の第一波または最大波が到達するまでに得られる情報を用いて、地域ごとの浸水範囲を予測する簡便な手法を提案し、その予測精度をケーススタディによって評価するものである。特に、近年では、沿岸に津波が到達する前に津波を観測できる津波観測網が沖合に整備されつつあるため、本検討では、これらの沖合津波観測によるリアルタイム津波予測の精度向上の効果について検討を実施する。

2. 対象地域

本検討における数値解析およびケーススタディの対象地域は東北地方の三陸海岸とする。三陸海岸には、国土交通省によりGPS波浪計が6基設置されているだけではなく、釜石市の沖合には2基の海底ケーブル式津波計が東京大学等の研究機関により共同設置され、運用されており、沖合での複数の観測機器を用いることによって、リアルタイム津波予測の精度向上を確認することができる地域である。このため、東南海、南海地域に設置され

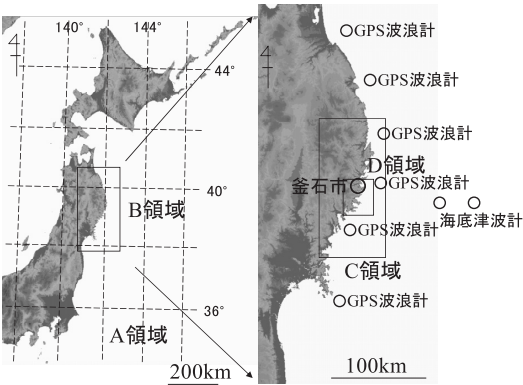


図-1 数値解析における領域設定条件と断層位置

表-1 領域設定の条件

領域名	メッシュサイズ	メッシュ数	方程式
A	1350m	1000×1350	線形長波／陸側完全反射／領域外自由透過
B	450m	420×840	
C	150m	540×960	
D	50m	660×840	非線形・浅水理論／陸側遡上／土地利用に合わせた粗度（小谷ら，1998）

1 正会員 博(工) 東北大学大学院工学研究科 研究員
2 正会員 工博 東北大学大学院工学研究科 教授

つつある沖合津波観測網の効果を検証するための先行検証の事例としても有効な場所であると考えている。数値解析における領域設定を図-1および表-1に示す。

3. リアルタイム津波浸水予測の手法

(1) リアルタイム津波浸水予測データベースの構築

日本近海で地震が発生した後、沿岸に津波が到達するまでは数分から数十分程度と僅かな時間であるため、谷岡ら (2004)、Tsushimaら (2009) のように津波観測データを用いて津波波源の初期水位分布を求め、そこから陸上遡上までを含めた津波数値解析を沿岸に津波が到達するまでに行うことは大変難しい。一方、気象庁の量的津波予報システムのようなデータベース型のシステムであれば、津波到達前に浸水予測を行える可能性がある。但し、データベース型のシステムの場合、データベース構築時の初期条件設定、およびリアルタイムで得られる地震・津波の観測情報を用いたデータベース選択方法の検討が必要である。今回の検討では、阿部・今村 (2009) により提案されているような地域ごとの特性を考慮した初期条件を設定した津波伝播および遡上解析を実施して3,600件のデータベースを構築した。

(2) データベースの選択手法

データベースに登録された推定値と実際に得られた結果を比較する方法については、以前よりニューラルネットワーク等の分野で研究が行われている。例えば、秋藤ら (1992) は、ループや分岐命令などのコンピュータプログラムの構成要素を属性として、プログラム同士の類似性をデータベースと比較する簡便な方法を提案している。この方法は、データベースの推定値と実際に得られた結果を比較する項目 (選択属性) による階層構造を作り、属性の一致・不一致により類似性を判定する方法であり、複雑な方程式を解く必要がなく、情報の集積とともに機械的かつ簡便にデータベースの選択を絞り込むことができる特徴を持つ。そこで、本検討におけるデータベースの選択に、この簡便な手法を適用した。但し、データベースの選択精度を高めるためには属性の検討が重要である。そこで本検討では、はじめにリアルタイム津波予測に必要な属性の検討を行った。

(3) データベースの選択属性の検討

沿岸への津波到達前に得られる情報は、地震の震源情報 (位置、深さ、マグニチュード) と沖合での津波観測情報である。これらの情報の中で、震源の位置は、津波波源の場所の推定に、マグニチュードは、津波の規模や波源域の広がりやを推定するのに必要である。震源の深さは、地震断層の上端深さを1km~25kmに変化させた場合でも地域の津波予測に与える影響が小さいことが阿部・今村 (2009) により報告されている。そこで、今回

の検討では、震源の位置とマグニチュードをデータベース選択の属性として設定し、震源の深さは属性に加えないこととした。

次に、沖合での津波観測情報については、第一波の高さや到達時間をデータベース選択の属性とするのではなく、津波の高さがどの程度に到達したかをチェックするポイントを設け、チェックポイントへの到達の有無をデータベース選択の属性とした。これは、宮城県沖地震 (連動型) のような複数の地震断層が連動するケースにおいて、第一波として小規模な津波が到達し、データベースから選択される予測値が過小評価となることを防ぐためである。図-2に釜石沖のGPS波浪計でのチェックポイントの例を示す。今回の検討では、0.5m単位に津波の到達を比較するチェックポイントを設けている。

また、エッジ波など後続波の影響によって、本来、選択されないケースが誤って選択されることがないように、図-3に示すように観測点からの逆伝播解析をデータベース構築時に実施し、波源から直接到達する津波到達限界時間をデータベース選択の属性として加えている。つまり、図-2の例では、地震断層によって直接励起された第一波の津波の高さは約3mであるが、ほかの地域からの反射波などが影響し、後続波では約4mとなることを示しており、このケースが4mの津波高さと誤って選択されることがないように直接波の到達限界時間をデータベース選択の属性に加え、直接波限界時間の後に出現するチェックポイントは後続波によるものと判断するようにした。図-3の例では、津波の波源域からの釜石沖のGPS

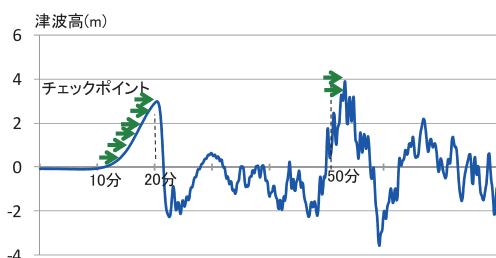


図-2 釜石沖のGPS波浪計での津波高さのチェックポイント

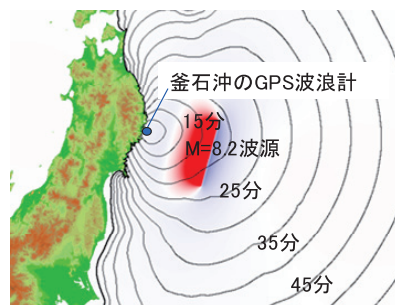


図-3 逆伝播解析による直接波到達限界時間の推定例

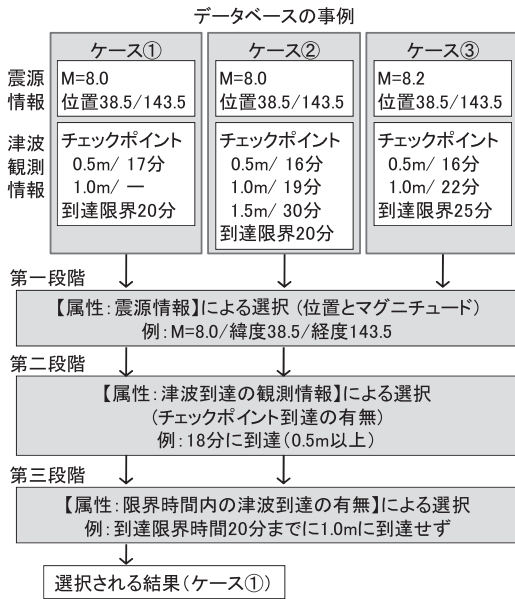


図-4 リアルタイム津波予測でのデータベース選択の流れ

波浪計までの到達時間が15分から25分の間であることが分かる。このため、この波源の例では25分以降に現れるチェックポイントは後続波によるものと判定して選択から外すこととした。

これまでに述べた手法によるリアルタイム津波予測でのデータベース選択の流れを図-4に示す。

図-4はデータベースとして3件のケースが登録された例である。第一段階として、地震発生直後に得られる震源情報から、マグニチュードと位置が適合するか否かを比較する。図-4の例では、観測により得られる震源情報のマグニチュードが8.0、位置が38.5度、143.5度であるため、ケース①とケース②がデータベースから選択される。ケース③はマグニチュードが適合しないためデータベースからは選択されない。次に、第二段階として、沖合での津波観測情報による選択が行われる。津波観測情報による選択では、0.5mごとに設定されたチェックポイントに津波が到達したか否かを比較し、実際に観測されたチェックポイントまで到達しないケースを選択から外してゆく。図-4の例では、18分後に0.5mのチェックポイントへの到達が確認されるので、0.5mのチェックポイントへ到達するケース①とケース②は両方とも適合する。最後に、第三段階として、ケースごとの到達限界時間内における津波到達の有無を比較する。図-4の例では、第二段階で選択されているケース①とケース②の到達限界時間は何れも20分である。しかし、ケース①は到達限界時間の20分までに到達するチェックポイントは0.5mであり観測結果と同じであるが、ケース②は到達限界時間

表-2 明治三陸地震・津波で想定するシナリオ

地震発生後の経過時間(分)	選択属性および津波の来襲状況	観測情報の内容	データベース検索数
3	震源情報 (マグニチュード、位置)	M8.0 39.6度、144.2度	201
12	釜石沖の海底ケーブル津波計1での津波観測	チェックポイント 3.0m	33
18	釜石沖の海底ケーブル津波計2での津波観測	チェックポイント 3.0m	9
27	釜石沖のGPS波浪計での津波観測	チェックポイント 4.0m	4
31～35	釜石市内の各地に第一波のピークが到達	—	—

20分までに到達するチェックポイントは1.0mであり、後続波と思われる成分も観測されている。図-4の例のように、到達限界時間の20分までに観測された結果が1.0mに到達しない場合、ケース②は選択から外され、最終的にはケース①が選択されることとなる。

4. 明治三陸地震・津波による予測精度の検証

(1) 津波高さの予測精度

1896年の明治三陸地震は陸上での震度が2～3程度と地震の揺れが小さいにも関わらず、38mもの高さにまで遡上する巨大な津波が発生した「津波地震」として知られている。この明治三陸地震では、中央防災会議（2004）により地震断層のすべり量の不均一性が考慮された津波波源モデルが提案されている。今回の検討では、この波源モデルを利用した津波伝播および陸上遡上の数値解析を実施した結果を真値として、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を検証した。なお、地震発生直後に得られる震源情報として、震源の位置はUSGS（アメリカ地質調査所）のデータベースの値、マグニチュードは国土交通省（2006）で想定されているM8.0を推定する。中央防災会議のモデルではMw8.6と設定されているが、明治三陸地震津波は津波地震であり、初期に得られるマグニチュードが小さいと推定されるためM8.0を初期値として利用する。このケーススタディで想定される情報の流れを表-2に示す。

震源情報によるデータベースの検索においては、初期に得られる震源情報の精度を考慮してマグニチュードに0.2の幅を持たせた検索を行った。また、明治三陸地震・津波のケースのように、初期のマグニチュードが過小に見積もられることを考慮し、震源情報によって選択されたデータだけでは津波観測情報と一致しない場合に、一段階マグニチュードの大きいケースまでを検索対象に含めることとした。このような処理の結果、図-5に示す釜石市内の地域ごとに津波高さと浸水範囲を求め、真値と

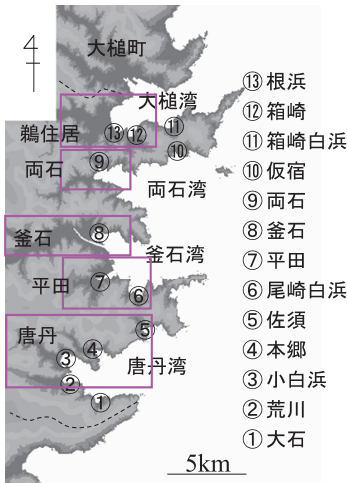


図-5 釜石市内で津波高さと浸水範囲を求めた地域

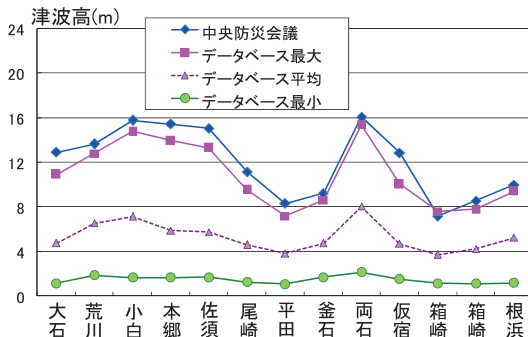


図-6 震源情報により選択される津波高さの状況

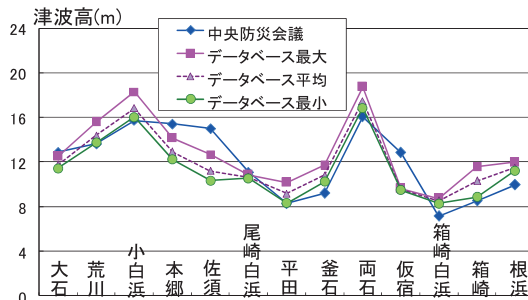


図-7 沖合での津波観測により選択される津波高さの状況

の比較を行った。津波の高さについては、震源情報によりデータベースから選択される津波高さを図-6に、その後、釜石沖のGPS波浪計での観測によって最終的に選択される津波高さを図-7に示した。

津波高さについては、震源情報および津波観測情報によってデータベースから選択される地域ごとの最大値、平均値および最小値を示している。震源情報によるデータベースに選択においては、初期情報の精度を考慮して

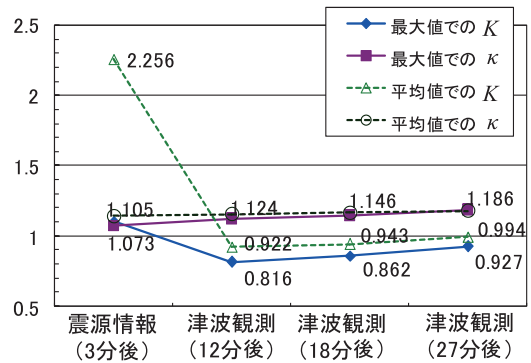


図-8 津波高さの予測精度の推移

条件に幅を持たせているため最大値と最小値の幅が大きくなる。しかし、その後には得られる沖合での津波観測情報によって選択される条件が絞り込まれ、最大値と最小値の差が小さくなる。つまり、震源情報による選択だけでは不確定要素の多い情報であったものが、沖合での津波観測情報による絞り込みによって不確定要素が排除され、予測精度を高めることができたと考える。

また、予測精度の検証については、相田 (1977) によって提案された幾何平均値 K および幾何標準偏差 κ を適用し、結果を図-8に示した。なお、幾何平均値 K および幾何標準偏差 κ については、式 (1) (2) が津波数値解析における良好な再現性の目安とされている (土木学会, 2002)。

$$0.95 < K < 1.05 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\kappa < 1.45 \quad \dots\dots\dots (2)$$

震源情報のみによる選択では、図-6に示すように条件の幅が広く K が良好な再現性の範囲内に収まらない。しかし、津波観測情報によるデータベース選択の絞り込みの結果、予測精度が改善され、データベースから選択された条件での平均値とした場合に、良好な再現性の範囲内に収まることが確認できた。

(2) 浸水範囲の予測精度

浸水予測の精度の評価について表-3に示す。浸水予測の評価についてはデータベースから選択されたケースの中で何れかのケースが一つでも“浸水”となる場合には浸水範囲とした。このため、データベースから選択されたデータが1ケースでも浸水すれば“浸水”となるので、図-6および図-7に示す津波高さの中では最大値の条件によって評価されることとなる。

表-3の中で、“一致”とは、真値でもデータベースから選択された条件でも浸水となるメッシュであり、“過小”は真値では浸水であるもののデータベースから選択された条件では浸水しない、“過大”は真値では浸水しないが

表-3 浸水範囲の予測精度の評価(浸水メッシュ数と相対誤差)

地区名		震源情報 3分後	津波観測 12分	津波観測 18分	津波観測 27分
鶴住居	一致	982 (99%)	994 (100%)	994 (100%)	994 (100%)
	過小	12 (1%)	0	0	0
	過大	19 (2%)	218 (22%)	210 (21%)	195 (20%)
両石	一致	285 (96%)	296 (100%)	296 (100%)	296 (100%)
	過小	11 (4%)	0	0	0
	過大	1 (0%)	70 (24%)	64 (22%)	39 (13%)
釜石	一致	794 (91%)	868 (100%)	868 (100%)	868 (100%)
	過小	74 (9%)	0	0	0
	過大	1(0%)	134 (15%)	131 (15%)	110 (13%)
平田	一致	345 (94%)	368 (100%)	368 (100%)	365 (99%)
	過小	23 (6%)	0	0	3 (1%)
	過大	0	46 (13%)	44 (12%)	35 (10%)
唐丹	一致	508 (91%)	556 (99%)	542 (97%)	524 (94%)
	過小	51 (9%)	3 (1%)	17 (3%)	35 (6%)
	過大	0	95 (17%)	74 (13%)	53 (9%)

データベースから選択された条件では浸水するメッシュ数である。表-3では浸水メッシュ数のほかにも、真値での浸水メッシュ数との割合も示した。

震源情報によるデータベース選択では、真値に対して91～99%の精度で浸水範囲（メッシュ数）を得られ、過小評価となるメッシュ数は1～9%である。また、沖合での津波観測情報によりデータベース選択を進めた結果、過小評価となるメッシュ数が、鶴住居、両石、釜石では0に、平田では6%から1%に、唐丹では9%から6%に改善された。一方、過大評価となるメッシュ数は、唐丹では一旦17%となるが最終的には9%に改善される。しかし、鶴住居では22%から大きく改善されない。改善の効果が地域ごとに異なる点については、今後、さらに検証する必要があると考える。

このように、浸水範囲の検証においては、データベースから選択された条件の中で最大値を対象としているため概観すると過大評価となる。また、震源情報による選択では、選択条件に幅を持たせたため、今回の検証のように選択条件の最大値が真値に近い場合には、震源情報による選択だけでも十分な精度が得られる結果となる。しかし、図-6の津波高さの状況が示すように平均値や最小値を扱った場合には大きく過小評価となることが考えられるため、データベースから選択される条件の扱いや表示方法については、さらに検討を進める必要がある。

5. 結論

対象地域の特性を考慮した津波伝播計算の初期条件を設定し、津波浸水予測のデータベースを構築した。さら

に、地震発生後、沿岸に津波が到達するまでに得られる震源情報および沖合での津波観測情報を利用してリアルタイムで津波浸水予測を行う簡便な手法を提案した。この手法は、選択属性として震源情報の位置およびマグニチュードと沖合での津波観測情報のみを利用する簡素な手法であるが、明治三陸地震・津波の再現モデルを用いたケーススタディに適用し、釜石市という限られた地域ではあるが、十分な精度が得られることを示すことができた。今後は、検討対象地域やケーススタディを広げることにより、提案した手法の有効性をさらに検証してゆく必要があると考える。

謝辞：今回の検討は、東北大学と気象庁との共同研究の一環として実施しました。検討に当たり、気象庁の津波予報に携わる多くの方々から、様々な情報やアドバイスを提供頂きました。また、東北大学大学院理学研究科の日野亮太准教授からご助言を頂きました。さらに、東北における津波防災情報連絡協議会の方々には、研究活動にご協力頂きました。ここに記して深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 相田 勇 (1977)：三陸沖の古い津波のシミュレーション，地震研究所彙報，Vol.52，pp.71-101.
- 秋藤俊介・辻 洋・阿部郁男・吉原郁夫・松尾 洋 (1992)：事例を用いたプログラムチューニング支援システム (5) - 評価 -，情報処理学会 第44回全国大会講演論文集 (2)，pp.2-55-56.
- 阿部郁男・今村文彦 (2009)：地域ごとのリアルタイム津波予測における初期条件の影響評価と設定，海岸工学論文集，第56巻 (1)，pp.336-340.
- 牛山素行・今村文彦 (2004)：2003年5月26日「三陸南地震」時の住民と防災情報，東北大学津波工学研究報告，第21号，pp.57-82.
- 国土交通省東北地方整備局，社団法人日本港湾協会 (2006)：「津波に強い東北の地域づくり検討調査」沖合津波観測情報を活用した津波減災対策検討調査報告書，pp.38-81.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998)：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp.356-360.
- 社団法人土木学会原子力土木委員会 津波評価部会 (2002)：原子力発電所の津波評価技術，pp.1-59.
- 館畑秀衛 (1998)：津波数値計算技術の津波予報への応用，月刊海洋号外総特集「津波研究の最前線」，No.15，pp.23-30.
- 谷岡勇市郎・平田賢治・日野亮太・金沢敏彦 (2004)：津波波形から推定した詳細な2003年十勝沖地震のすべり量分布，地震2，57，pp.75-81.
- 中央防災会議 (2004)：津波高さの推計，日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会 (第8回) 資料，pp.1-8.
- Tsushima,H., R.Hino, H.Fujimoto,T.Tanioka, and F.Imamura (2009): Near-field tsunami forecasting from cabled ocean bottom pressure data, Journal of Geophysical Research, - Ocean,114 (B06309) .