# 津波の分裂現象を考慮した短時間予測手法の検討

Study on Fast Prediction Method Taking Account of Tsunami Fission Phenomena

伊藤一教<sup>1</sup> · 織田幸伸<sup>1</sup> · 高山百合子<sup>2</sup>

# Kazunori ITO, Yukinobu ODA and Yuriko TAKAYAMA

Since Tsunami simulation area is normally large, the simulation takes long computational time. The long CPU time hinders a development of real time Tsunami prediction based on the numerical simulation. This study examined a numerical simulation method to reduce computational time for Tsunami with fission waves. Ray channel method is applied to Tsunami simulation as a technique to shorten computational time and convert 2D simulation to 1D. Boussinesq model is put on the ray channel to estimate Tsunami propagation with fission waves. Applicability of the method was studied via numerical experiments and physical model tests.

# 1. はじめに

臨海施設や沿岸構造物への津波リスクの低減に向けた ソフト・ハードの対策は重要な課題である.

事前にハード対策を講じる場合,津波を精度良く予 測・評価する必要があり,津波の分裂波までを考慮する 研究が報告されている(原子力土木委員会 津波評価部 会,2007).また,津波発生時の予報に基づき避難行動 をとるようなソフト対策の場合には,1999年から警報, 注意報に加えて津波高さも提供されるようになった気象 庁「津波予報システム」による津波情報が活用できる. しかしながら,データベースを基本としたこのシステム は,地震発生後の調査などと比較すると差が生じている ことが指摘されており(今村,1998),津波予報技術の 高精度化は従来からの課題である.

そこで本研究では、分裂波を含む波形レベルの情報提 供は、取放水路施設のサージングなど応答問題にかかわ ってくる可能性があり、より詳細な津波情報の提供が対 策の選択肢を多様化し防災向上へ導くとの考えに基づ き、数値解析を基本とする津波予報の高速化について検 討した.津波予報では、地震発生時の断層挙動の判断解 析、津波の伝播解析に時間がかかるため、各要素技術に 必要な解析の高速化が求められる.ここでは分裂波を含 む津波伝播解析の計算負荷を低減する新たな手法につい て基礎検討を実施した.

## 2. 短時間予測手法

#### (1) 手法の説明

本研究は,広域の津波伝播を対象とするのではなく, 比較的近海で発生した津波が短時間で沿岸の臨海施設に





到達する場合を対象としている.具体的には以下の①か ら③の手順で津波伝播解析をすることで,計算時間の短 縮をはかるものである.①断層から沿岸域までを対象に 波向線法により津波の伝播経路を定義する.②対象地点 を挟む2本の波向線を水路と見立て海底地形を定義する. ③この水路を対象にブシネスク方程式を用いて一次元伝 播解析をする.

図-1は西日本太平洋沿岸を対象にした波向線の例であ る.例えば、対象地点をAとした場合、斜線で示した領 域を水路とし津波の一次元伝播解析を実施する.本手法 の考え方は安田ら(1987)の研究と同様であるが、安田 らは津波の時間波形を波向線に沿う動座標上で伝播解析 するのに対し、本論ではブシネスク方程式を用いて波向 線で囲まれる水路内の空間波形を対象に解析する点に相 違がある.

## (2) 本手法の長所と短所

本手法の長所は,計算領域を波向線で挟まれる水路に 限定することで計算時間の短縮をはかる点,分裂波を対 象とした細かい計算格子が採用できる点である.短所は, 周辺海域からの反射波・回折波の影響が考慮できないた め、津波第一波あるいは反射波・回折波の影響が小さい 時間帯までに適用が限定される点である.また,波向線 で挟まれる水路に一次元解析を適用するため、水深変化 は考慮されるが水路幅の影響を無視しているため、水路 幅の増減に起因して変化する津波高さを過大あるいは過 小は評価される点である.

しかし、津波発生時の対応において初動の重要性は明 白であり、第一波の分裂波を評価することは実務上有用 である.また、水路幅を無視した影響が顕著であれば Greenの公式を利用し補正することも考えられる.今後 の課題ではあるが、水路幅を考慮した一次元ブシネスク 方程式を導出することも短所解決の方策と考える.さら に、図-1の波向線16のように他の波向線と交差する場合、 一次元解析では限界がある.その場合には波向線15と19 で挟まれる水路を平面二次元解析する必要がある.それ であっても、対象を小領域に限定するので、広域を対象 にした解析よりは計算時間の短縮を図ることができる.

## 3. 手法の妥当性検討

本手法の妥当性は,平面二次元解析と波向線を用いた 一次元解析の結果を比較し確かめた.波向線により水路 を定義する考え方の妥当性検証に着目しているので,解 析は計算負荷を低減するため非線形長波方程式を用いた.

検討は図-1に示す断層に変位を与え(相田, 1981), 各波向線で挟まれる水路R1~5(図-1参照)を対象に実施した.平面二次元解析と一次元解析で,解析格子間隔や時間ステップは同一とした.図-2は水路R1およびR4 の水深50m, 100m地点における水位変化を比較したものである.

図-2の結果より、いずれのケースも一次元解析の第一 波は平面二次元解析の結果よりやや大き目であるが、比 較的一致している.断層端部に近いR1の第一波は断層中 央部のR4に比べて、一次元解析の結果が過大評価されて いる.これは、断層端部は中央に比べて回折効果が顕著 になるためと考えられる.また、概ね時刻30分以降は周 辺海域からの反射波や回折波の影響が現れはじめるため 一次元解析と平面二次元解析の波形に大きな差異がある.

表-1は水路R1~R5の一次元解析結果に対しGreenの公 式を用いて,水路幅の影響を補正した結果である.対象 は水深50m,100m地点の第一波最高水位である.表-1中 の記号は以下のとおりである.ζが第一波最高水位,*Rw* は水路幅の増減比,ζ<sup>m</sup>は補正後の第一波最高水位を示す. *Er*は補正後の一次元解析結果から平面二次元解析結果を 差し引いた誤差である.添字<sub>1D,2D</sub>は一次元解析と平面二 次元解析を区別し,添字<sub>50,100</sub>が水深を区別する.

補正後の一次元解析と平面二次元解析の結果を比較す



表-1 Greenの公式による補正と誤差

	R1	R2	R3	R4	R5
ζ <sub>2D50</sub> [m]	1.72	2.85	2.15	2.02	1.29
ζ <sub>2D100</sub> [m]	1.37	1.61	1.47	1.30	1.14
$\zeta_{ID50}[m]$	3.33	3.91	2.60	2.33	2.54
ζ <sub>1D100</sub> [m]	2.43	2.41	2.10	1.52	2.13
$Rw_{50}$	1.34	1.38	1.95	1.16	1.22
<i>Rw</i> <sub>100</sub>	1.25	1.27	1.92	1.20	1.19
$\zeta^{m}_{1D50}$ [m]	2.88	3.33	1.86	2.16	2.30
$\zeta^{m}_{1D100}$ [m]	2.17	2.14	1.52	1.39	1.95
<i>Er</i> <sub>50</sub> [m]	1.16	0.48	-0.29	0.14	1.01
<i>Er</i> <sub>100</sub> [m]	0.80	0.53	0.05	0.09	0.81

ると,断層中央部に位置するR2,R3およびR4の誤差は 小さい.R4では波向線がかなり屈曲しているが,Green の公式により精度良く補正ができている.一方,断層の 端部に位置するR1やR5では,回折効果の影響により誤 差が大きい.

このことから,波向線で定義する水路が断層中央部に 位置する場合,Greenの公式による補正と組み合わせる ことで本手法が高い適用性を有することがわかった.た だし,回折効果に起因する断層端部を対象にする場合に は,適用性が低下する.

# 4. 分裂波の再現性検討と本手法の有用性

#### (1) 模型実験との比較

本手法は解析領域を限定することによる計算時間の短 縮だけでなく,津波第一波あるいは第二波を対象に分裂

	h0	h	А	Т	種別	間瀬ら(2007)
Run1	40cm	10cm	3cm	20s	押波	R-case2
Run2	40cm	10cm	3cm	30s	押波	R-case2
Run3	40cm	10cm	3cm	20s	引波	F-case2
Run4	50cm	20cm	3cm	20s	引波	F-case3

表-2 解析条件一覧表

波まで予測することを目的としている.津波分裂波の評価にはブシネスク方程式が適しており(佐藤,1995), ブシネスク方程式を用いて津波分裂波を検討した既往の 研究は多い.その中で,間瀬ら(2007)はデラウェア大 学が開発したFUNWAVE(Kirbyら1988, Weiら1995) とコーネル大学が開発したCOULWAVE(Lynettら2002a, 2002b)を用いて,分裂波の再現性について水理模型実 験と比較し検討し,両モデルとも押波から始まる第一波 の分裂波の再現が困難であることを報告した.

ここでは、デンマーク水理研究所の開発したブシネス クモデル(以下DHI Modelとする;DHI,2008,Sorensen ら、2004)を用い、押波2ケースと引波2ケースを対象 として、津波第一波の分裂波の再現性を検討した.解析 および実験条件を表-2に示す.なお、表中の沖側水深h0 および浅海域水深hは図-3(a)に示す.間瀬らの研究に おける実験ケースとの対応も表中に示した.解析条件は、 格子間隔10cm、計算時間間隔0.005sである.

図-3は、Run1の時系列波形である。DHI Modelの計算 結果は浅海域のWG4からWG9で第一波に発生した分裂 波を再現した.また、第二波に現れる分裂波も再現でき た. FUNWAVEとCOULWAVEとの差異は、図中の矢印 で示した第一波の分裂波の再現性である.他のモデルの 再現性については間瀬ら(2007)の論文を参照されたい. 各モデルの違いは、FUNWAVEおよびCOULWAVEは分 散性をO(u4) まで考慮し差分法で解いているのに対し、 DHI Model は分散性 $O(\mu^2)$  であるが有限要素法で解いて いる. また、遡上解析は、FUNWAVEとDHI Modelがス ロットモデルを, COULWAVEは線形外挿法を用いてい る. 第一波の分裂波の再現性がモデルにより異なる理由 を解明することは工学的に重要であるが、このように各 モデルにおいて特徴があるため、本論では明確な結論を 得るに至らなかった.この点については今後の課題と考 える.しかしながら、第一波の分裂波に着目した場合に、 DHI Modelの再現性が高いことは、今後のモデル開発に 有用な情報を得たものと考える.

次に,第一波,第二波の再現性を定量的に評価するため,図-4に示す最高水位 $\eta_m$ ,分裂波の波高 $H_F$ および分裂波の周期 $T_F$ を整理し,実験結果と計算結果を図-5に比較した.なお, $\eta_m$ は図-3(a)のWG5からWG9で計測された第一波と第二波を対象とした. $H_F$ および $T_F$ の評価は



図-4 最高水位 η<sub>m</sub>の比較

WG5からWG9で計測された第一波と第二波のうち分裂 波が明確なもののみを対象とした.

図-5 (a)の最高水位 $\eta_m$ について見ると、白色記号で プロットした第一波の最高水位は、実験値の方が計算値 より大きい傾向があり、全体的に計算結果は過小評価で あった.第二波について見ると、黒い記号の第二波は全 体的にばらつきが大きい.押波の第一波〇と△は、計算 値が実験値を過小評価しているものの右上りの傾向を示 した.一方、押波の第二波●と▲は、第一波に比べてば らつくものの、1対1の直線の周辺に分布した.次に、 図-5 (b)のH<sub>F</sub>に着目すると、全体的に右上りの傾向が あり計算値は実験値を定性的に再現した.第一波につい ては押波、引波にかかわらず1対1の直線を中心に分布 した.ただし、第二波のうち▲については、計算値が過 大評価になる傾向があった.さらに、図-5 (c)のT<sub>F</sub>も 全体的に右上りの傾向があり計算値は実験値を定性的に 再現したが、ばらつきが大きい結果となった.

ブシネスクモデルによる第一波の分裂波の再現性は, 定量的には十分ではないが,分裂波の有無は再現できて いる.このことは,津波予報を考えるとき分裂波の有無



だけでも情報提供できることを示しており有用性がある と考えられる.ただし、ここでの検討は限られた条件で あるため、定量的な再現性を含めて更なる検討が必要で ある.

#### (2) 解像度に関する検討

図-6は実験Runlを対象に,解析結果に及ぼす計算格子 の影響を調べた結果である. Δxが5cmと10cmの結果は 一致するが,25cmになると位相遅れが現れ精度低下が認 められる.実験水深0.1mを現地5m程度と想定すると, Δx 25cmは現地で12.5mとなり,分裂波を対象とした場 合には細かい格子が必要になることがわかる.このこと から,波向線で解析領域を限定し計算時間を短縮する効



果は大きい.

## (3) 本手法の有用性

本手法の短所は前述のとおり,津波の第一波を対象に 予報することにとどまる点である.第一波の津波高さが 十分小さければ,第二波以降の予測に注力すべきで本手 法の意義は薄れる.そこで,前出の実験結果から第一波 と第二波の最高水位ηmを抽出し図-7に比較した.図より, 第一波と第二波の関係は1対1の直線に載っており,第 一波が第二波に比べて極端に小さいようなことはない. 第一波が第二波と同等あるいはそれ以上となる条件等は 今後検討すべきであるが,この結果は津波予報の情報と して第一波に着目することに意義があることを示唆して いる.

## 5. 分裂波発生に関するケーススタディー

将来,津波のリアルタイム情報を本手法を用いた伝播 解析により提供することを想定したとき,水路長はでき るだけ短い方が計算効率は向上する.海底地形が分裂波 発生に関係していることは自明であるから,実際の地形 のどこで分裂波が発生するかを検討することで,どの程 度の水深以浅を対象にブシネスクモデルで解析したらよ いかを検討するためにケーススタディーをした.

津波条件は波高3m,周期140sの規則波とし,図-1に 示す水路R1からR5を対象に解析した.

いずれの場合も水深200m以深では分裂波は生じてい ない. 急勾配斜面の場合(R5),斜面部で分裂波は発生 せずに一様水深5mの浅海域で分裂波が発生している. 水深200m以深の波浪変形は浅水変形と前傾化にとどま



図-8 分裂波に及ぼす海底地形の影響

った.このことは、断層から対象地点までを細かい格子 を用いたブシネスクモデルで解析する必要は無く、ブシ ネスクモデルの適用範囲を絞り込むことが計算時間短縮 に寄与することを示唆している.つまり、対象地点毎に 異なる海底地形に合わせて分裂波の解析領域を最小化す ることで、分裂波を考慮して計算時間を短縮できること を示している.ここでは1ケースのみの検討であるため、 定性的な結果にとどまった.別途、津波条件を変化させ たケーススタディーを行い、波形勾配が小さい場合には 分裂波が発生しないことも確認している.これに関して は別の機会に詳しく報告する.

# 6. 結論

数値解析による津波予報の高速化を念頭におき,波向 線法とブシネスクモデルを組み合わせて,津波伝播解析 を一次元化する方法を検討した.波向線が断層中央に位 置する場合には,Greenの公式を用いた補正と組み合わ せることで適用性が向上することを示した.また,津波 第一波の分裂波を評価できるブシネスクモデルを検証し た.その結果,第一波の分裂波発生の有無は再現できる が,定量的には十分ではなく,定量的再現性は今後の課 題である.

謝辞:本研究に用いた水理模型実験結果は,京都大学防 災研究所において研究された成果である.貴重な実験デ ータを提供していただいた京都大学防災研究所沿岸防災 研究分野の間瀬肇教授には,心より感謝するとともに, 実験・研究に関わった諸氏に敬意を表します.

#### 参考文献

今村文彦 (1998):15年間における津波数値計算の発展と今後, 月刊海洋,号外,15 (津波研究の最前線), pp. 89-98.

- 相田 勇 (1981):南海道沖の津波の数値実験,地震研究所彙 報, Vol.56, pp. 713-730.
- 原子力土木委員会 津波評価部会 (2007):津波評価手法の高 精度化研究,土木学会論文集B, Vol.63, No.2, pp. 168-177.
- 佐藤慎司(1995):波の分裂と砕波を考慮した津波の数値計算, 第42回海岸工学論文集, pp. 377-380.
- 間瀬 肇・安田誠宏・加次淳一郎・高山知司・沖 和哉・中 平順一(2007):津波のソリトン分裂過程に関する実験結 果と数値解析結果との比較研究, 京都大学防災研究所年 報 第50号B, pp.505-513.
- 安田孝志・鵜飼亮行(1987):津波の伝播に伴う波形とスペク トルの変化,第34回海岸工学講演会論文集, pp. 187-191.
- DHI (2008) : MIKE21 Boussinesq Wave Module Scientific Documentation Edition2008.
- Kirby, J.T., G., Wei, Q., Chen, A.B., Kennedy and Dalrymple, R.A. (1988) : FUNWAVE 1.0, Fully nonlinear Bousinesq Wave Model Documentation and User's Manual, Res. Rep. No. CACR-98-06, Center for Appl. Coastal Res., Dept. of Civil Eng., Univ. of Delaware.
- Lynett, P.J. and P. L.-F, Liu (2002a): Modeling wave generation, evolution, and interaction with depth-integrated dispersive wave equations COULWAVE Code Manual, Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package.
- Lynett, P.J., T.-R, Wu and L.-F, Liu (2002b) : Modeling wave runup with depth-integrated equations, Coastal Engineering, Vol. 46, pp.89-107.
- Sorensen, O.R., H.A., Schaffer and L.S., Sorensen. (2004): Boussinesq-type modeling using unstructured finite element technique, Coastal Eng., 50, pp.181-198.
- Wei, G., J.T, Kirby, S. T., Grilli and R, Subramanya (1995) : A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. I : Highly nonlinear unsteady waves., J. Fuluid Mech., Cambridge, England, 294, pp. 71-92.