

モルディブを対象としたインド洋津波の数値計算

鳴原良典¹・藤間功司²

¹正会員 博士(工) 防衛大学校 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
E-mail: fujima@nda.ac.jp

²正会員 工博 防衛大学校 建設環境工学科

本研究ではモルディブを対象としたインド洋津波の数値計算を実施する際の計算条件について検討し、その条件より線形分散波理論による津波数値計算を行い、観測データと比較した。以下に結果を示す。(1) インド洋津波の津波エネルギーは周期 25 分以上の長周期成分が多く含まれ、環礁での急な海底勾配を津波が伝播する場合、少なくとも 1 分の空間解像度が必要である。(2) 数値計算結果と各地点での検潮記録との比較から、Male' は良好な一致が見られたが、Gan や Hanimadhoo では 1 分格子の空間解像度では不十分であることがわかった。(3) 長距離伝播による波数分散効果について、モルディブでは効果が小さく Diego Garcia より遠方では考慮が必要である。

Key Words : *Tsunami, linear dispersive wave theory, Maldives*

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日 00:58 (UTC 時間) にスマトラ沖で起きた巨大地震は津波を発生させ、インド洋全域および周辺海域に伝播し、各国の沿岸に大きな被害をもたらした。特に、震源に近いインドネシアやタイだけでなく、波源から 1500km 離れたスリランカ、2000km 離れたモルディブ、そして 4000km 離れたアフリカ東部沿岸にまで被害を出した点において、1960 年チリ津波、1964 年アラスカ津波以来の大津波であるといえよう。

インド洋津波に関しては、これまでインド洋各地で観測された潮位記録や衛星画像、さらに現地調査による津波浸水高・津波遡上高など様々な物理データが整理・集約されているが、その中でも、モルディブや Diego Garcia におけるデータはインド洋津波の全体像を把握するために非常に重要であるといえる。これは、モルディブおよび Diego Garcia が津波波源とアフリカの中間に位置すること、また、津波が伝播する過程において、津波水位が受ける局所地形の影響が他の地域に比べても小さいことから、この地域で得られたデータが外洋を伝播する津波そのものを捉えていると考えられるためである¹⁾。

以上のような理由から、本研究ではインド洋津波においてモルディブおよびチャゴス諸島(Diego Garcia)に注目し、これらに対して伝播する津波を精度良く解析するための数値計算条件について考察を試みた。そ

表-1 設定断層パラメータ

No	N	E	d	θ	δ	λ	L	W	U
1	2.5	94.8	10	329	15	90	500	150	11
2	6.5	92.3	10	358	15	90	400	150	11

して、上記の検討によって得られた条件から線形分散波理論によるインド洋津波を対象とした数値計算を実施し、モルディブの検潮所で得られた実測データから計算の妥当性、現象の再現性および波数分散性の必要性について検討した。

2. 計算対象領域

図-1 に本研究の計算対象領域および津波初期波源の空間水位分布を示す。計算対象領域はインドネシアからモルディブまでの海域とする。図中の丸印は、潮位データが観測された位置を示しており、北側から Hanimadhoo, Male', Gan, そして Diego Garcia である。また、断層パラメータは越村²⁾の $M_w=9.0$ のモデルを基に表-1 の様に設定した。なお表中、 d : 断層深さ (km), θ : 走向 ($^\circ$), δ : 断層面傾斜角 ($^\circ$), λ : すべり角 ($^\circ$), L : 断層長さ (km), W : 断層幅 (km), U : すべり量 (m), である。

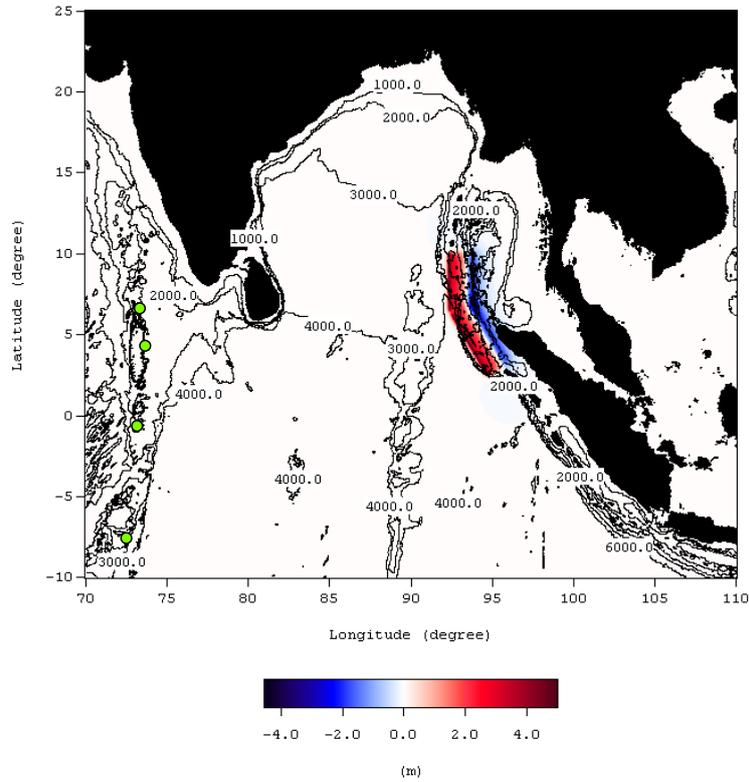


図-1 計算対象領域および津波初期水位分布

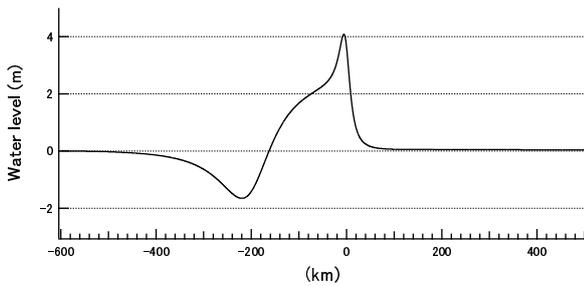


図-2 短軸方向の津波初期波形断面

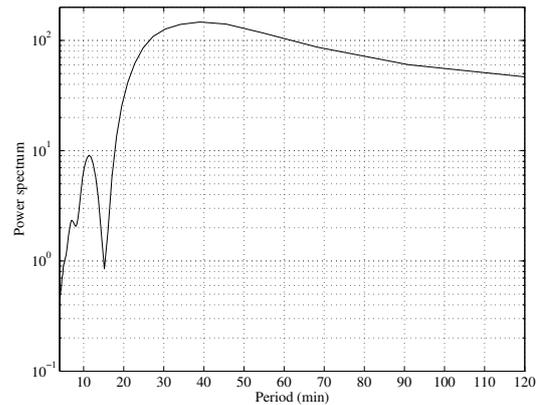


図-3 津波初期波形のパワースペクトル分布

3. 計算の格子間隔に関する検討

(1) 津波初期波形の周期成分特性

まず、津波の初期波形を構成する周期成分のスペクトル分布について調べる。図-2は前節で示した津波初期波形の短軸方向断面である。ここでは、平均水深2kmの波源付近で発生した津波が水深4kmの水平床上を2次元平面的に伝播すると仮定して、初期波形をGreenの法則により波長を $\sqrt{2}$ 倍、波高を0.84倍に補正している³⁾。

図-3に津波初期波形のパワースペクトル分布を示す。図から、パワースペクトルは周期25分以降に集中し、周期40分で卓越していることがわかる。ここでパワー

スペクトルの積分値を考え、ある周期成分以下の積分値が全体の積分値に対して含む割合を計算すると、周期30分以下では7.2%であるが、周期25分以下では2.8%、周期20分以下では0.4%となる。よって本研究の設定断層パラメータの初期波形では、周期25分以上の長周期成分が津波エネルギーの主要な部分を構成しており、一方で、周期20分以下の津波エネルギー成分の影響は非常に小さい可能性があることを示している。

表-2 急勾配斜面に入射する場合に設定可能な最大空間格子間隔

Model Case	Slope α	Period of incident wave T (min.)	Δx (km)
Male' and Gan	0.2	40	4.51
		30	2.54
		25	1.76
Hanimadhoo	0.1	40	2.26
		30	1.27
		25	0.88

(2) 急勾配地形を伝播する場合における最適空間格子間隔

スマトラ沖で発生した津波はインド洋を伝播してモルディブに至るが、その間は水深4000mほどの比較的単調な海底地形であるため、地形による津波変化への影響は小さいと思われる。しかしながら、モルディブは直径数十kmの環礁20以上が南北800kmにわたって並ぶ特殊な地形を成している、そして、環礁の内側の水深が50m程度であるのに対し、外洋側は10km離れば水深2000-3000mに達する急勾配である。したがって、環礁内にある潮位記録と計算結果を比較するには、環礁の急勾配地形による津波変形過程をできるだけ精度の良い条件で計算する必要があるといえる。

Goto and Shuto⁴⁾は、一定斜面勾配を遡上する波を計算する場合において、以下の関係を満足するように波先端の格子間隔を与えれば最大水位上昇量の誤差を5%以内で計算可能であるとしている。

$$\frac{\Delta x}{\alpha g T^2} < 4 \times 10^{-4} \quad (1)$$

ここで、 Δx : 空間格子間隔、 T : 周期、 α : 斜面勾配、である。ここではこの関係式を利用し、モデル地形としてMale'およびGanの海底勾配を $\alpha=1/5$ に、また、Hanimadhoo沖の海底勾配を $\alpha=1/10$ と仮定し、各入射波周期で取り得る最大空間格子間隔を求める。結果を表-2に示す。前項の結果をふまえると、Male'とGan沖から伝播してくる津波は空間格子を1分(約1.8km)以内に設定すれば、主要なエネルギー成分について誤差を最小に抑えることができる。

4. 数値計算諸条件および手法

インド洋津波は津波エネルギーが数千km離れた地域にまで到達したいわゆる遠地津波であるため、長距離伝播による波数分散性の影響を無視することができない。そのため使用する支配方程式は、以下に示す球

面座標系の線形 Boussinesq 方程式とする。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{c_0^2}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = \frac{h}{R \cos \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} + fN \quad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{c_0^2}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} = \frac{h}{R} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} - fM \quad (4)$$

$$\phi = \frac{h}{3R \cos \theta} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial \lambda \partial t} + \frac{\partial^2}{\partial \theta \partial t} (N \cos \theta) \right] \quad (5)$$

ここに R : 地球の半径、 λ , θ : 緯度、経度座標、 M , N : 各方向の線流量、 η : 水位、 h : 静水深、 g : 重力加速度、 c_0 : 線形長波の波速、 f : Coriolis 因子、である。数値計算手法は、Shigihara⁵⁾による2/3陰解法を極座標系に拡張して行った。

数値計算条件として、空間格子は前節での議論から領域全域を1分(約1.8km)とする。また、時間間隔は $\Delta t=3$ (s)、再現時間は8時間とした。境界条件としては、沖側への透過条件にはスポンジ層を設け、海岸線境界では完全反射とした。

5. 計算結果

(1) 津波の伝播状況

図-4は地震発生2.5時間後の津波の伝播状況である。線形分散波理論式による結果では分散効果による分散波列が生成しており、線形長波理論式による水位分布とは大きな違いが見られる。

北側の断層から発生した津波はスリランカに到達し、その後スリランカの裏側に回り込んで伝播した波がモルディブの北側(Hanimadhoo)に襲撃する。また、Male'に襲撃する波は、回折・屈折などの地形効果を受けずに北側の波源から伝播した波が直接到達する。一方、南側の断層によって生じた津波は、波源の短軸方向にあるチャゴス諸島に向かい伝播する様子が確認できる。また、Ganに襲撃する津波は南側の波源による津波の影響を直接受けていることが確認できた。

(2) 各地点での検潮記録と計算結果との比較

図-5に、モルディブおよびDiego Garciaにおける検潮記録と計算結果との水位時刻歴の比較を示す。なおSeenu環礁での検潮記録として、若築建設の杉田氏によるHithadhooで観測された水位データ⁶⁾も比較する。

全体的な傾向として計算結果が検潮記録よりも早く到達している。これは、潮位計が主に環礁内側に配置されている(Male'や若築建設の観測地点など)ことから、環礁の外を既に津波が到達していても潮位計が水位変動を捉えた時刻はそれより遅かった可能性があり、一方で数値計算で利用した地形データは環礁内での詳細な地形を再現できているとは言い難く、計算の方が

数分早く到達するのは妥当な結果であると考えられる。なお、例えば Male' では、South Male' 環礁と North Male' 環礁の間にある Vadhoo Channel において、潮位計で観測されるよりも数分早く津波が侵入していたことが現地調査から明らかになっている¹⁾。

次に各地点での水位変動について検討すると、Hanimadhoo 以外ではおおむね良好な一致を示している。Male' では押し・引きのみならず周期に関しても一致していることがわかる。Gan では第1波の後に比較的大きな振動が認められる。これは Seenu 環礁が他の環礁よりも小さいため、島による反射・散乱を特に考慮する必要があり、現在のような岸側の境界条件が完全反射では不十分である。今後、細かい格子で計算するだけでなく非線形性や陸上遡上も考慮した、より詳細な解析が必要であろう。Hanimadhoo の潮位記録によると、第1波以降も周期30分程度の波が繰り返し観測されており、計算ではこのような現象が再現できていない。これは、表-2でも示したように1分格子では計算精度が不十分であることや、スリランカでの地形変化による津波の変形を正確に再現できていないこと、北側断層に破壊速度を考慮する必要性などが挙げられ、今後の課題である。

最後に、分散効果による結果への影響について検討する。モルディブの各地点では分散性による短周期成分の遅れが見られるものの、第1波峰の減衰は小さく、線形長波理論による結果と大きな差は見られない。一方、Diego Garcia では約30%ほど減衰していることがわかる。これは、この地点が波源の短軸方向に直接面していることや、伝播経路上での水深が大きかったことが理由として挙げられる。ゆえに、インド洋津波における分散性は、モルディブではそれほど重要ではなく、Diego Garcia やアフリカなどさらに遠方の地域を検討する場合は考慮する必要があると考えられる。

6. おわりに

本報告ではモルディブを対象としたインド洋津波の数値計算を実施する際の計算条件について考察し、それによる線形分散波理論式を利用した津波数値計算を行い、潮位記録などの実測データと比較を行った。インド洋津波の津波エネルギーは25分以上の長周期波成分が多くを占めており、環礁での急な海底勾配を津波が伝播する場合、少なくとも1分(1.8km)の空間解像度が必要であることがわかった。数値計算結果と検潮記録を比較すると、Male' では良好に一致していたが、Gan や Hanimadhoo では1分格子では地形の解像度が不十分であり、今後、より詳細なデータを利用した計算が必要である。また、長距離伝播による波数分散効果

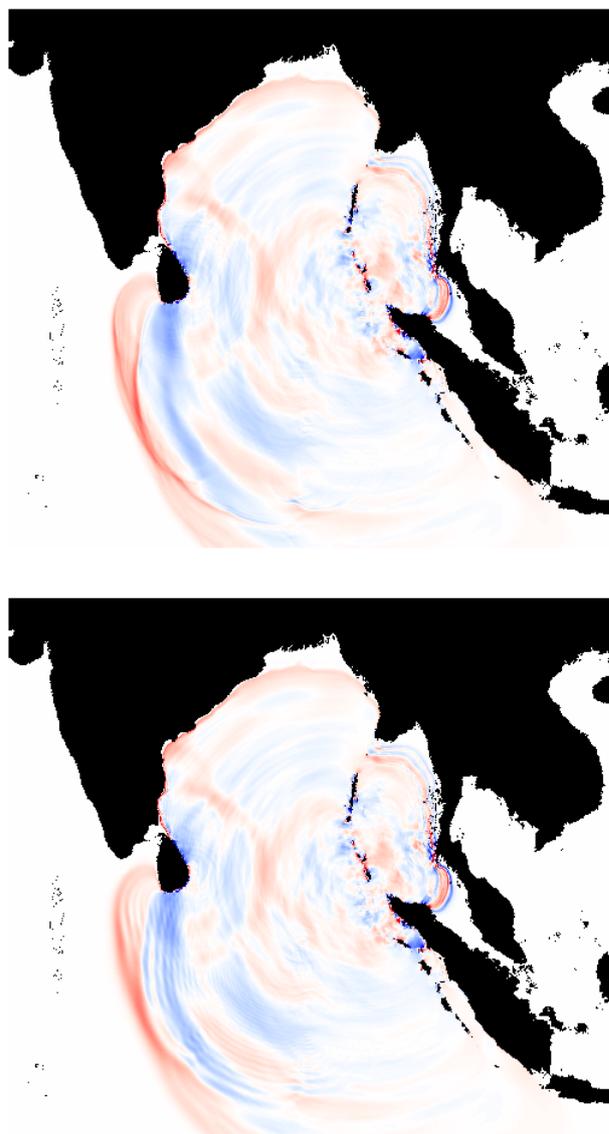


図-4 発生2.5時間後の津波伝播(上:線形長波理論式,下:線形分散波理論式)

について、モルディブでは効果が小さく、Diego Garcia より遠方では考慮する必要があることがわかった。

参考文献

- 1) 藤間功司, 嶋原良典, 富田孝史, 本多和彦, 信岡尚道, 越村俊一, 藤井裕之, 半沢稔, 辰巳正弘, 折下定夫, 大谷英夫: モルディブにおけるインド洋津波の現地調査, 海岸工学論文集, 第52巻, 2005(印刷中)。
- 2) <http://www.dri.ne.jp/koshimuras/sumatra/>
- 3) 後藤智明, 今村文彦, 首藤伸夫: 遠地津波の数値計算に関する研究 その1 支配方程式と差分格子間隔, 地震, 第2輯, 第41巻, pp.515-526, 1988.
- 4) Goto, C. and Shuto, N.: Numerical simulation of tsunami propagation and run-up, Tsunamis: Their Science and Engineering, pp.439-451, 1983.
- 5) Shigihara, Y., Fujima, K., Homma, M. and Saito, K.: Numerical method of linear dispersive equation for the practical problems: APAC2005, 2005(印刷中)。
- 6) K. Fujima, T. Tomita, K. Honda, Y. Shigihara, H.

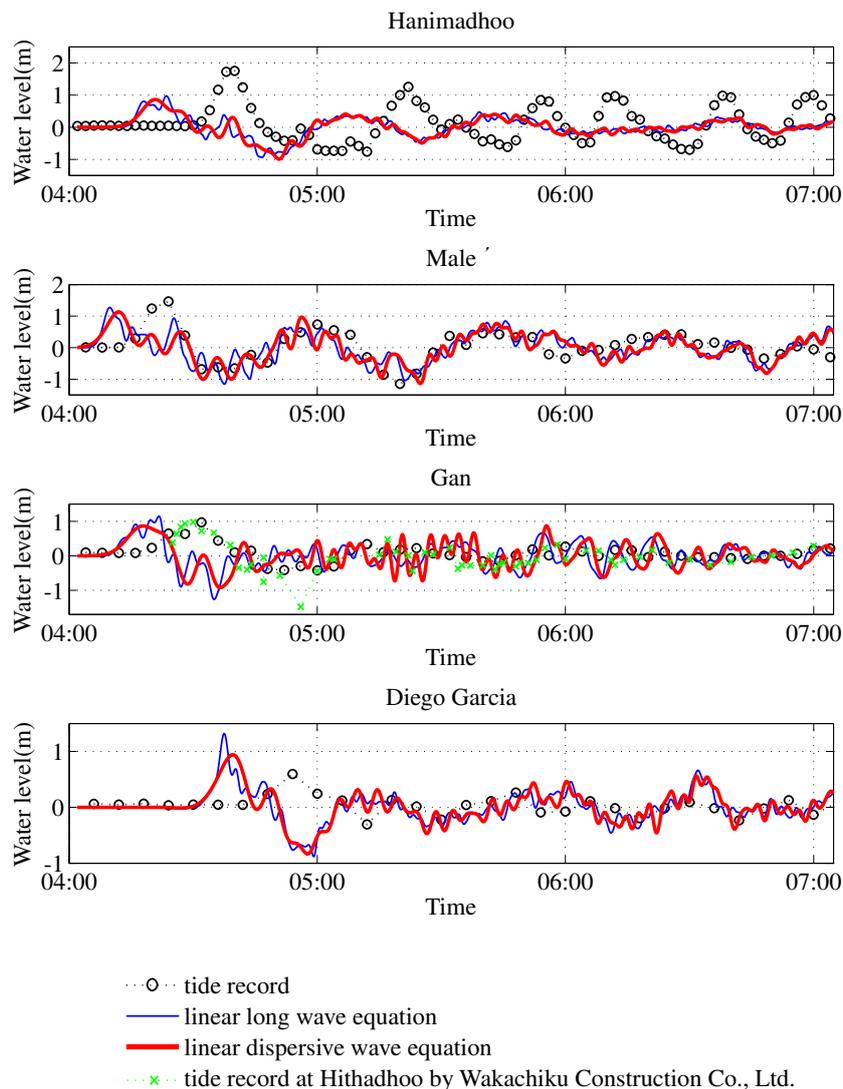


図-5 各地点における検潮記録と計算結果の比較 (横軸は UTC 時間)

Nobuoka, M. Hanzawa, H. Fujii, H. Ohtani, S. Orishimo, M. Tatsumi and S. Koshimura: Preliminary Report on the Survey Results of 26/12/2004 Indian Ocean Tsunami in the Maldives, 2005.

(2005. 6. 13 受付)

NUMERICAL MODELING OF INDIAN OCEAN TSUNAMI IN THE MALDIVES

Yoshinori SHIGIHARA and Koji FUJIMA

The numerical conditions when a numerical simulation of the Indian ocean tsunami in the Maldives is performed, are decided, and the results of the numerical simulation of linear dispersive wave equation are compared with tide records. The numerical simulation made the followings clear: (1) The tsunami energy contains longer period components preeminently, and 1 minute grid size is required for a simulation propagating to the atolls. (2) Numerical results agrees with tide records at Male', but Gan and Hanimadhoo are not enough. (3) The dispersion effect has to be considered far from Diego Garcia.