

小笠原諸島における東南海・南海地震の津波数値解析

本間基寛* ・ 鳴原良典** ・ 藤間功司***
松浦邦明**** ・ 齊藤勝也***** ・ 本橋昌志*****

本研究では、新しく開発した線形分散波理論の数値解析法を利用して、小笠原諸島を対象にした東南海・南海地震津波の数値解析から各島における津波の挙動特性を明らかにし、波数分散性の影響度、島湾内における浸水域の評価を行った。父島では津波が多方向から来襲するため複雑になり、波高も高くなる。一方、硫黄島において津波は四国海盆上を伝播するため分散効果が大きく影響する。波数分散効果により父島・母島周辺での最大水位について部分的な低下が見られたが、各島の湾内では支配方程式の違いによる水位差は小さい。各島湾内で遡上計算を実施したところ、父島・二見港周辺で約 7 m、母島・沖港周辺で約 5 m の遡上高となることがわかった。

1. はじめに

今世紀前半にも発生するとされている東南海・南海地震津波においては、小笠原諸島にもその影響が懸念されている。過去、駿河トラフから南海トラフにかけては 100～150 年間隔でマグニチュード 8 クラスの巨大地震が発生しており、津波による被害は関東から九州まで日本列島南岸地域の広範囲にわたっている。しかしながら、小笠原諸島では 18 世紀以前に発生した東南海、南海地震津波に関する資料はほとんど残っておらず、最も古い事例でも、羽鳥 (1985) による 1854 年安政東海地震津波に関する父島での記述があるのみである。また、津波の痕跡といったものも少ない。このことから、近い将来発生する可能性のある地震・津波に対して、小笠原諸島での津波の高さや浸水域を数値解析によって予測することは、防災対策上きわめて重要であるといえる。

そこで本研究では、東南海・南海地震が同時発生した場合の津波数値解析を実施し、小笠原諸島 (父島・母島) および火山列島 (硫黄島) における津波の影響について検討することを目的とする。各島での津波の到達時間や島周りでの最大波高の評価のみならず、海底地形の影響による津波の挙動特性や長距離伝播による波数分散性の必要性について議論する。そして最後に、父島・母島の湾内における津波浸水域の評価を行う。

2. 数値解析モデル

(1) 長距離伝播による波数分散効果

従来、日本近海で発生した津波 (近地津波) の数値解析には線形長波および非線形長波理論が適用されている。

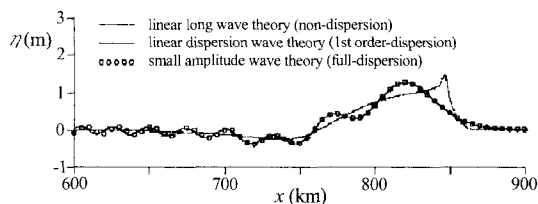


図-1 長距離伝播における支配方程式による波形の変化の違い (1 次元問題)

一方、アラスカやチリ、インドネシアなどの遠方で発生して日本まで伝播してくる津波 (遠地津波) の解析には分散波理論を適用しなければならない (後藤, 1988)。小笠原諸島は、東南海・南海地震津波の波源域から約 1000 km 離れており、通常の近地津波の伝播距離に比べて非常に長いものの、どの程度の距離の伝播なら支配方程式として分散波理論を適用すべきかという問題に対し今のところ明確な基準はない。島の湾内における津波浸水域を予測するには、最大波高のみならず津波の第 1 波および後続波の周期や波数を精度良く評価する必要がある。その際、波数分散性の効果の有無が結果に大きく影響する可能性がある。

そこでまず、水深 4000 m の水平床に対し、想定南海地震 (表-1 中、断層③) の波源短軸方向に 1 次元問題の津波数値解析を実施し、理論解との比較により分散効果について検討する。図-1 に、伝播距離 800 km 地点での水位の空間分布を示す。丸印が微小振幅表面波の Fourier 変換による数値解、実線は線形分散波理論の結果、破線は線形長波理論の結果である。図より、線形分散波理論の計算結果は分散効果による第 1 波の波高低下や位相遅れ、後続波列の形成といった波形変化が起こり、微小振幅表面波の波形に良好に一致していることがわかる。一方、線形長波理論は全周期の波速成分が等しく伝播するため、波形は変化せず、微小振幅表面波の波形と差が見られる。よって、東南海・南海地震津波波源

*	理修	(財)日本気象協会 調査部
**	正会員 博(工)	防衛大学校助手
		システム工学群建設環境工学科
***	正会員 工博	防衛大学校教授
		システム工学群建設環境工学科
****	水修	(財)日本気象協会 調査部
*****		(財)日本気象協会 調査部

域から小笠原諸島まで約1000 km 程度の伝播距離であっても分散性の考慮が必要であるといえる。以上から、本研究では外洋での津波伝播の支配方程式として線形分散波理論を採用する。

(2) 線形分散波理論の数値解析方法

平面2次元問題の線形分散波理論の数値解析方法に関して実地形に対して適用した例は、これまで岩瀬ら(1998)や嶋原ら(2004)等の数値モデルが提案されているが、本研究の計算対象領域である小笠原諸島は水深分布が数10 m から最深9000 m に及ぶため、従来のモデルでは安定した計算を行うのが難しい。一方 Fujima (2003, 2005) は、スキームの安定性の有利さから後藤ら(1988)による Leap-frog 陰解法が実用計算に適しているとしている。そこで以下、Leap-frog 陰解法によって解くことのできる新しい線形分散波理論の数値解析方法を提案する。

線形分散波理論式は以下のように表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = h \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} = h \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (3)$$

$$\phi = h \left(\alpha \frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \beta \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} + \gamma \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \delta \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

ここに、 η : 水位、 M, N : x, y 方向の線流量、 h : 静水深、 g : 重力加速度、 $\alpha \sim \delta$: 分散項の係数、である。なお、本研究で用いる分散項は Boussinesq 型 ($\alpha = \beta = 1/3, \gamma = \delta = 0$) とする。ここで、式(2)、(3)を式(4)に代入して M, N を消去することにより、以下の ϕ, η に関する Poisson 方程式を得ることができる。

$$\phi - \alpha h^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \beta h^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = gh^2 \left[(\gamma - \alpha) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + (\delta - \beta) \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right] \quad (5)$$

よって、式(4)から得られる ϕ の境界値から式(5)を解くことにより ϕ の空間分布を求め、式(2)、(3)右辺の分散項を計算する。式(5)で示される境界値問題に対し連立方程式を BiCGStab 法などの高速解法により解くことができるため、従来利用されてきた SOR 法に代表される逐次代入による反復法よりも収束が早く、かつ安定した計算が可能になる。以上の式をそれぞれ Staggered Leap-frog 法により差分化し、連続の式を陽的に解き、運動の式では Poisson 方程式(式(5))のみの陰的に解き、他の項は陽的に解く。

3. 数値解析の概要

想定東南海・南海地震 M8.7 (断層パラメータは表-1

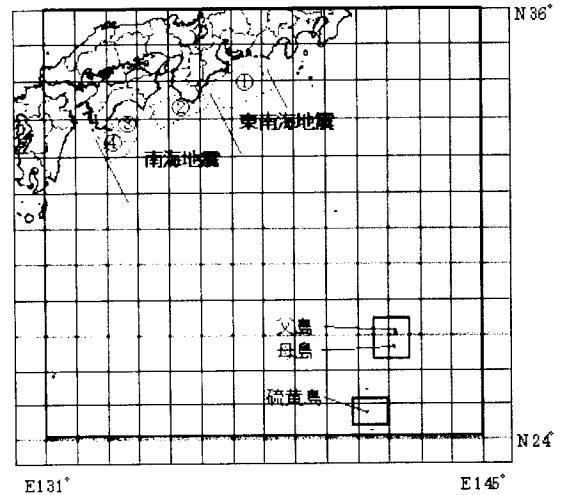


図-2 計算対象領域と想定東南海・南海地震の断層位置 (①～④の矩形)

表-1 設定断層パラメータ

Fault No	N (deg)	E (deg)	depth (km)	strike (deg)	dep (deg)	rake (deg)	slip (m)	length (km)	width (km)
①	33.9	138.13	3	245	24	113	6	150	100
②	33.41	136.15	10	250	20	124	5.6	150	70
③	33.4	134.57	1	220	20	90	7	140	80
④	32.33	133.57	1	240	20	90	13.9	60	80

参照) 発生時の小笠原諸島において実地形に対する平面2次元の津波数値解析を行い、線形分散波理論と線形長波理論による津波の伝播状況、島周辺の水位の時系列変化および最大水位を比較する。

図-2 に計算領域と想定東南海・南海地震断層位置を示す。図中外側の太線は1次領域、内側の太線は2次領域以降である。空間格子は1次領域を1600 m とし、以下父島、母島、硫黄島について、格子長を2分の1ずつ7次領域(25 m)まで細分化し領域接続を行った。なお、分散性は水深が大きいと寄与が大きく、長距離伝播する過程で少しずつ影響してくるため、浅海域(小笠原諸島近傍)の狭い領域で詳細計算を行う時には考慮する必要がないと考えられる。そこで、震源を含んだ外海領域(1次領域)のみ線形分散波理論を使用し、2次領域以降は線形長波理論式により計算を行った。なお、境界条件は岸側を完全反射とし、沖側では透過条件として計算対象領域の外側にスポンジ層を設けている。

4. 数値解析結果

(1) 津波の挙動特性

図-3 は地震発生から60分、90分、100分後の津波の伝播状況を示している。初期水面勾配は波源短軸方向が最も大きいため、津波の主要なエネルギーは波源短軸方向

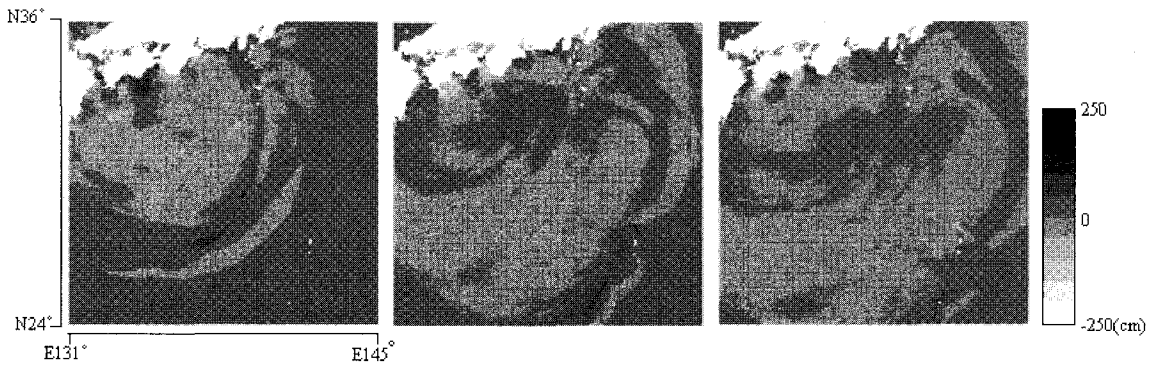


図-3 津波の伝播状況 (左から60, 90, 100分後)

の延長線上に位置する小笠原諸島、火山列島へ直接向かう。津波第1波は地震発生から約90分後に小笠原諸島に、約100分後に硫黄島にそれぞれ到達する。図-3から、父島では東南海から発生する波と南海から発生する波、北側の鯨島から屈折して反対側から回り込む波が同程度の時刻で来襲している。一方、硫黄島に代表される火山列島に対し、津波は波源から平坦な四国海盆上を直接伝播してくるため、海底地形の変化による津波波形への影響は比較的小さいと考えられる。

図-4は、父島および硫黄島の水深100 m地点で得られた水位の時系列(1次領域)であり、図中、線形長波計算と線形分散波計算の結果を示している。父島では、線形分散波による結果は線形長波に比べ分散効果による短周期成分の位相遅れが見られるものの、最大波高は同程度であり、支配方程式系による違いは小さい。一方、硫黄島では短周期成分の位相遅れとともに約40%程度の主峰の減衰が起こっており、分散効果が顕著に表れていることがわかる。また、図-5は父島と母島の間位置における線形分散波理論と線形長波理論の波高の時系列である。線形分散波理論では、線形長波理論に比べて第1波の波高が2/3程度に低下しているが、地震発生から約17時間後まで津波高の高い状態が続いており、従来のモデル(線形長波理論)よりも津波継続時間が長くなることがわかる。

(2) 各島周辺における津波高

図-6、図-7、図-8に父島周辺、母島周辺、硫黄島周辺における津波の最大水位分布を示す。線形長波計算と線形分散波計算の結果を比較すると、それぞれの島において最大水位について部分的な低下が見られ、分散性による影響が顕著に見られる。しかしながら、住民の居住区や市街地が集中している父島・二見湾内や母島・沖港では最大水位の差が小さい。そこで、湾内での時系列変化について調べた。

図-9に父島・二見湾内における津波高の時系列を示

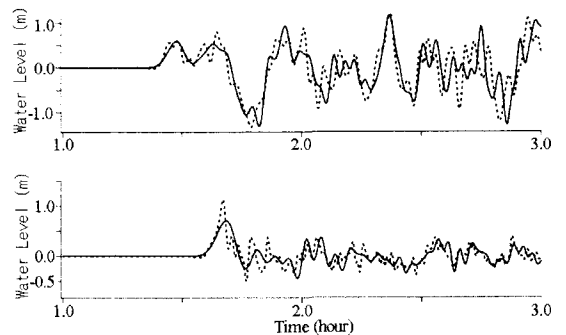


図-4 父島(上図)・硫黄島(下図)付近での水位の時系列 (破線：線形長波理論、実線：線形分散波理論)

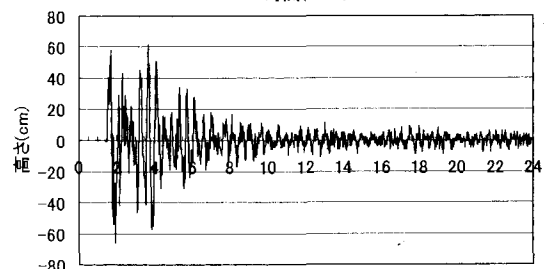
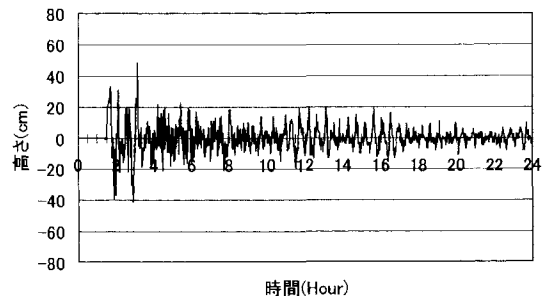


図-5 父島と母島の間地点における波高の時系列 (上：線形分散波理論 下：線形長波理論)

す。時間が経過するにつれ、線形分散波計算の方が比較的水位が高い状態を保っているものの、津波到達から数時間経過しても双方の結果とも水位が同程度の大きさで変動していることがわかる。これは津波のエネルギーが湾内で捕捉されるためであることが理由として挙げられる。以上により、大領域から線形長波理論、線形分散波理論のどちらの計算結果から接続しても、湾内では同程度の津波遡上高になることが予想される。

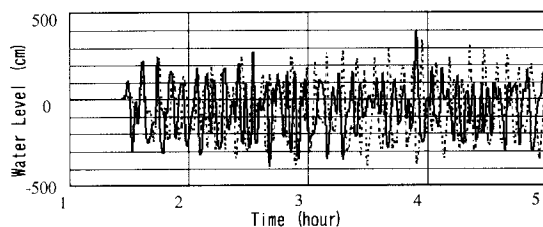


図-9 父島・二見湾内における水位の時刻歴
(破線：線形分散波理論，実線：線形長波理論)

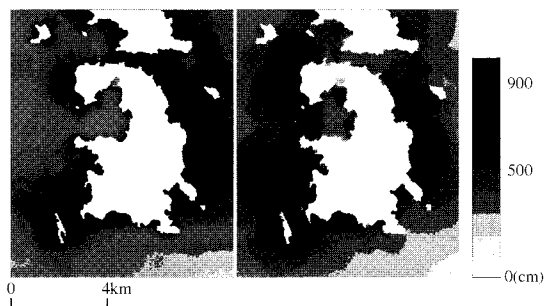


図-6 父島における最大水位分布図
(左図：線形長波理論，右図：線形分散波理論)

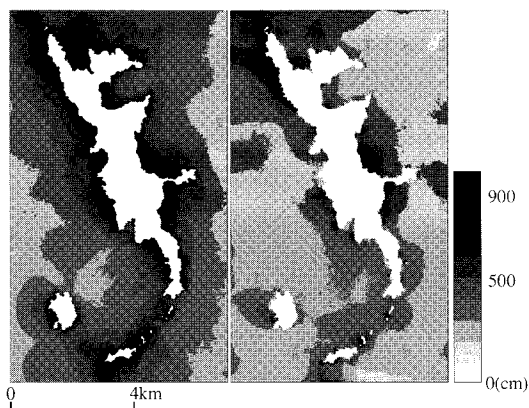


図-7 母島における最大水位分布図。
(左図：線形長波理論，右図：線形分散波理論)

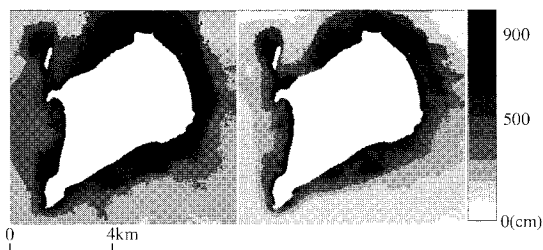


図-8 硫黄島における最大水位分布図。
(左図：線形長波理論，右図：線形分散波理論)

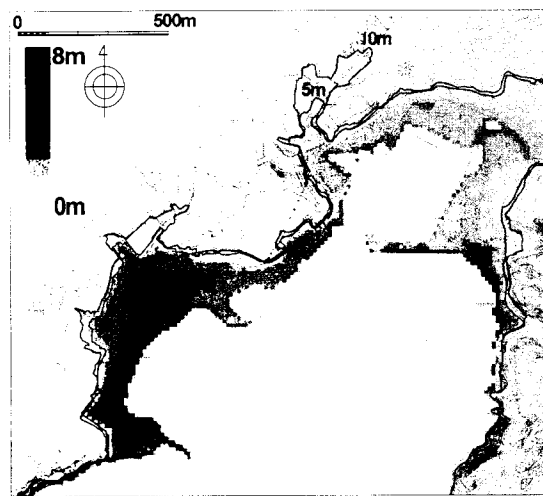


図-10 父島二見港周辺における最大遡上高

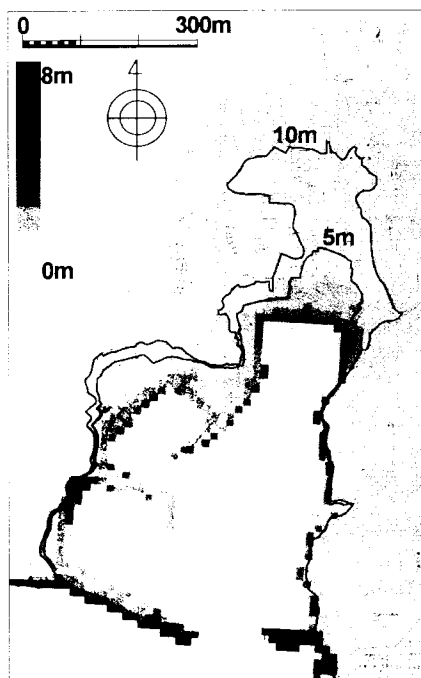


図-11 母島沖港周辺における最大遡上高

(3) 二見港、沖港での津波浸水予測図

父島・二見港、母島・沖港において遡上計算を行い、津波浸水予測図を作成した。前節の議論を踏まえ、1次領域から7次領域までは線形長波理論式とし、最も細かい8次領域（格子間隔12.5 m）では非線形長波理論式による遡上計算を行う。ここで、Manningの粗度係数は $n = 0.025$ とした。

父島二見港周辺及び母島沖港周辺における遡上計算の結果を図-10、図-11にそれぞれ示す。父島・二見港周辺では、大村地区（二見港西側）で最大約7 mの遡上高となる可能性があり、村役場、警察署、郵便局などがある大村の中心域で最も大きくなっている。一方、清瀬・奥村地区（二見港北側・東側）では、河川部分を除き3 m程度の遡上高となっているが、大村地区ほど大きくない。これは、防波堤の効果によって津波の進入が妨げられているためである。母島・沖港周辺では最大約5 mの遡上高となる可能性がある。防波堤の効果により、沖港入り口の防波堤の外側と内側で大きく異なっている。

5. 結 論

本研究は、東南海・南海地震津波の数値解析を実施し、小笠原諸島および火山列島における津波の影響について評価を行った。結論を以下に列挙する。

- 1) 新しい線形分散波理論の数値計算法を開発した。分散項からポテンシャル関数 ϕ を新たに定義することで ϕ と水位 η に関するPoisson方程式を導き、分散性について運動の式から独立した境界値問題として解くことができる。
- 2) 想定南海地震津波波源の一次元伝播問題について線形分散波理論の数値解が微小振幅表面波解に一致し、約1000 km程度の伝播距離であっても分散性の考慮が必要

であることを確認した。

3) 小笠原諸島に伝播する津波の挙動を明らかにした。父島では東南海から発生する波と南海から発生する波、北側の聳島から屈折して反対側から回り込む波が同程度の時刻で来襲するため津波の挙動は複雑になり、波高も高くなる。一方、硫黄島において、津波は波源から平坦な四国海盆上を伝播する。そのため地形効果の影響は小さく、島周辺では分散効果が津波の変形に大きく影響する。

4) 波数分散効果により、父島・母島周辺での最大水位について部分的な低下が見られたが、父島・二見湾内や母島・沖港では支配方程式の違いによる水位差は小さい。

5) 非線形長波理論式により各島湾内で遡上計算を実施したところ、父島・二見港周辺で約7 m、母島・沖港周辺で約5 mの遡上高となることがわかった。

参 考 文 献

- 岩瀬浩之, 見上敏文, 後藤智明(1998): 非線形分散波理論を用いた実用的な津波計算モデル, 土木学会論文集, No. 600/II-44, pp. 119-124.
- 後藤智明, 今村文彦, 首藤信夫(1988): 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.
- 後藤智明(2003): 2段階混合差分法を用いた線形分散波方程式の数値計算における打ち切り誤差, 津波工学研究報告第20号, pp. 13-22.
- 羽鳥徳太郎(1985): 小笠原父島における津波の挙動, 地震研究所彙報, 60, pp. 97-104. 鴨原良典, 今村文彦(2004): 非線形分散波理論の津波数値解析への適用性と新しい数値モデルの提案, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 246-250.
- Fujima, K and Goto, C. (2003) Truncation error of numerical simulation of linear dispersive wave theory. Proc. 2nd Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts, Makuhari, Japan.
- Fujima, K. (2005): Numerical simulation of dispersive wave theory, International Symposium on Tsunami Disaster Mitigation in Future, Kobe, Japan.