

伊豆・小笠原諸島の津波増幅特性

藤間 功司* ・後藤 智明**・林 建二郎***
重村 利幸****・首藤 伸夫*****

1. はじめに

従来、津波の設計外力の算定には既往最大値が用いられてきた。しかし、北海道南西沖地震では既往最大値を上回る津波が発生し、奥尻島などに大きな被害をもたらした。島が津波に対して弱い地形であることが確認された。

島における津波の特徴として、捕捉現象の存在が挙げられる。島に津波が捕捉されると、著しく津波が増幅されることがあり、しかも島内の一部に被害が集中する。島における津波設計外力の算定には、この条件を考慮しなければならない。

伊豆・小笠原諸島においても、大正関東や安政東海などの歴史大津波を含め、様々な津波に対する危険性を検討する必要がある。しかし、伊豆・小笠原諸島には津波痕跡値が少なく、また島のように屈折の効果が効く場合、既往の数値計算手法では津波水位予測の精度が低下する可能性がある。

そこで、まず水理実験との比較により島回りの津波に関する数値解と理論解の精度を検討する。次に理論解を用いて、個々の島の津波に対する危険度を評価する。

2. 数値解と理論解の精度の検討

水理実験は図-1 に示す平面水槽を用いて行なった。水槽中央部に勾配 $m=$ 約 $1/4$ の円錐形の島模型が設置してある。島模型に正弦波を入射させ、入射波高、入射波周期、そして島模型における遡上高分布を測定した。実験条件は表-1 に示す通りである。表において、 β は島の大きさと汀線近傍における波長との比に関係したパラメータであり、 $\beta=2\sqrt{\sigma^2 r_c/(gm)}$ 、 $\sigma=$ 角周波数、 $r_c=$ 島の海岸線の半径、 $m=$ 島の斜面勾配である。入射波高、入射波周期は、図-1 中に示した沖側計測点において容量線式波高形で計測した波形データから、有義波高、有義波周期として計算した。ただし、ゼロアップクロス法で定義

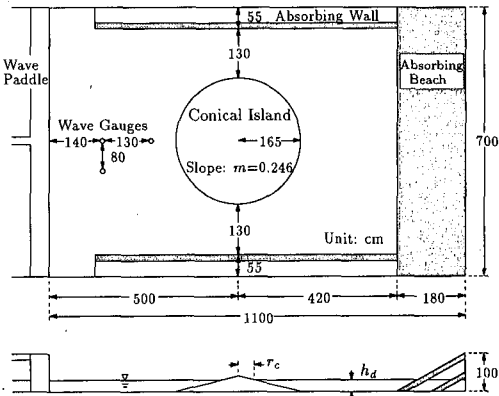


図-1 実験装置

表-1 実験条件

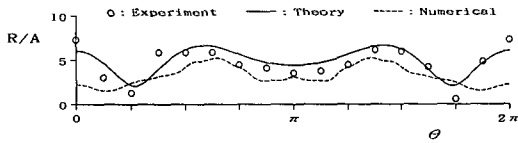
周期 T (s)	波高 H (cm)	水深 h_d (cm)	β
2.5	0.17	29.6	2.17
3.0	0.57	19.7	2.51
2.5	0.47	19.7	2.99
2.0	0.39	19.7	3.71

した各波の波高、周期にばらつきはほとんどなかった。遡上高は、島模型の中心から 22.5° 間隔で斜面上に目盛りを書き、目視により遡上地点の座標を読み取り、高さに換算することにより求めた。

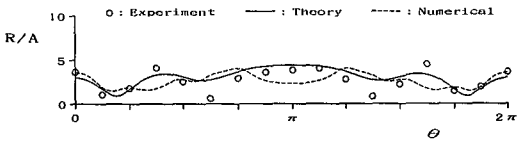
数値計算には、支配方程式に非線形長波理論を用い、リープフロッグ法により差分して解く、標準的な長波の計算手法を用いた。空間格子間隔は、 $\Delta x=10$ cm、 $\Delta y=10$ cm、計算時間間隔は $\Delta t=0.01$ s とした。境界条件は、造波板側では表-1 に示した入射波諸元を用いた強制入力とし、その他の壁面では自由透過とした。計算は静水時から開始し、定常状態になるまで継続した。

理論解析には、藤間・後藤 (1994) の解法を用いた。すなわち、円錐形の島回りにおける線形長波理論の厳密解を用い、水平床上の解と接続する方法である。得られた汀線水位の時間最大値により遡上高を評価する。この方法により、隠岐や奥尻島の津波痕跡高が良好に再現されることが示されている。

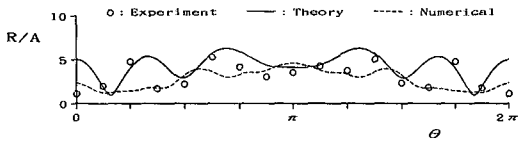
* 正会員 工博 防衛大学校助教授 土木工学教室
** 正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科
*** 正会員 Ph.D. 防衛大学校助教授 土木工学教室
**** 正会員 Dr.Eng. 防衛大学校教授 土木工学教室
***** 正会員 工博 東北大学教授 工学部附属災害制御研究センター



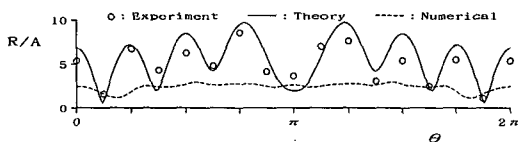
(a) $T=2.5$ s, $H=0.17$ cm, $h_d=29.6$ cm, $\beta=2.17$



(b) $T=3.0$ s, $H=0.57$ cm, $h_d=19.7$ cm, $\beta=2.51$



(c) $T=2.5$ s, $H=0.47$ cm, $h_d=19.7$ cm, $\beta=2.99$



(d) $T=2.0$ s, $H=0.39$ cm, $h_d=19.7$ cm, $\beta=3.71$

図-2 数値計算の精度の検討

汀線に沿った遡上高分布に関し、水理実験結果と数値計算結果、および理論解析結果の比較を図-2に示す。図中、遡上高は入射波振幅 $A(=H/2)$ で無次元化されている。また、 θ は波の進行方向をゼロとし、反時計回りに測った角度である。図-2(a), (b) は β が比較的小さい場合の結果で、数値解と理論解の両者とも実験結果をほぼ再現している。

しかし、 β が大きいケースにおいて、既往の数値計算手法では複雑な遡上高分布を再現できず、津波水位を過小評価してしまうことが分かる。この傾向は Liu ら (1994) の計算結果にも見られる。これは、佐山ら (1986) が示しているように、従来の津波数値計算手法で屈折の効果を十分に表現することが難しいためと考えられる。一般的に、格子間隔を小さくすれば数値解の精度は向上するが、捕捉された波の挙動を精度よく再現するには、かなりの格子数が必要になるであろう。それに対し、理論解はほぼ実験結果と一致しており、非線形性の影響が顕著にならない限り、精度よく島回りの津波の挙動を再現できると言える。

したがって、島回りのように屈折の効果が効く場合には、設計外力を数値計算結果のみから評価することは危険であり、理論解析を併用する必要があると結論できる。

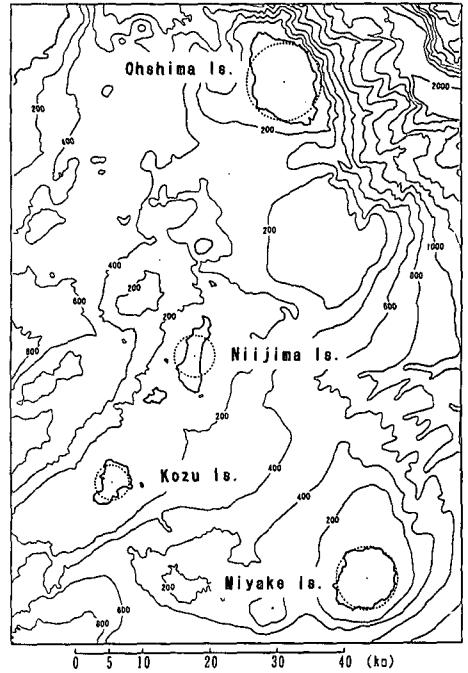


図-3 伊豆諸島の等水深線図

表-2 伊豆・小笠原諸島のパラメタ

	r_c (km)	h_d (m)	m
大島	5.5	300	0.075
新島	3	300	0.06
神津島	2.5	400	0.042
三宅島	4.5	400	0.073
御蔵島	2.5	1200	0.185
八丈島	4.5	500	0.059
父島	3	140	0.028
母島	4	100	0.05

理論解析では、局所地形の影響が取り込めない等の欠点もあるが、全体的な津波増幅率を簡単に算出できる。そこで、理論解析により、様々な津波周期に対する個々の島の波高増幅率や遡上高分布を算出し、どのような周期の津波が危険であるかを調べる。

3. 津波増幅特性の検討

まず、伊豆・小笠原諸島の各島に対し、海底地形図をもとに海岸線の半径 r_c 、平均勾配 m 、水平床部分の水深 h_d を求める。本論文で用いた各島のパラメタを表-2に示す。また図-3に、大島から三宅島までの海底地形図と、今回用いたモデルとの対比を示す。図中、点線がモデル化された海岸線を表す。

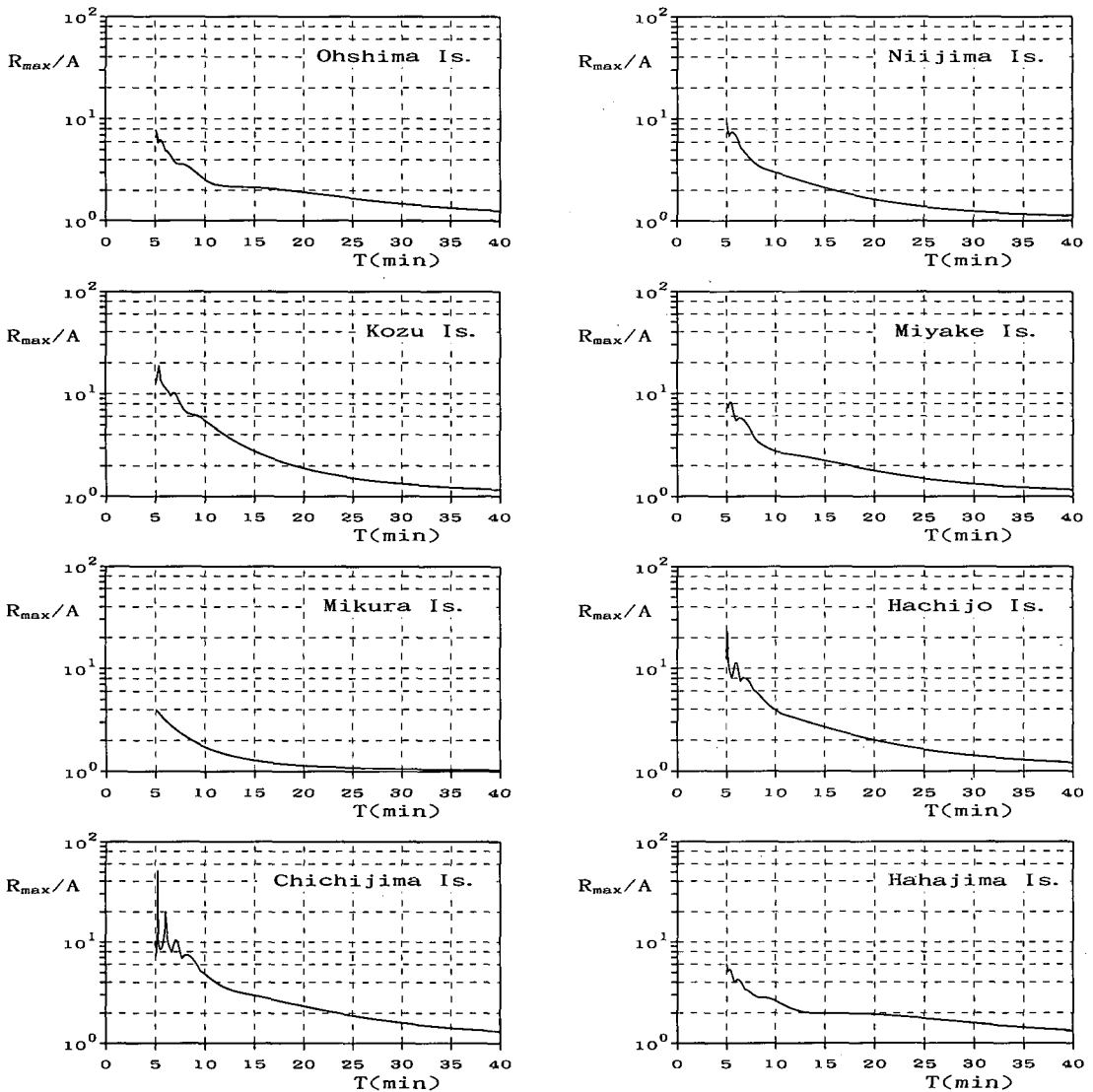


図-4 最大遡上高の周期特性

各島に対し理論解を適用し、周期 $T=5\sim40$ 分の津波に対する遡上高分布を求める。さらに汀線に沿った遡上高の最大値を最大遡上高 $R_{\max}$ とする。 $R_{\max}$ と周期の関係を図-4 に示す。図から、伊豆・小笠原諸島の最大遡上高の周期特性は以下の3つのパターンに分類される。

第1のグループは新島・神津島・八丈島・父島である。この4島では周期が短くなるにしたがって $R_{\max}$ が大きくなり、周期5～10分に共振周期が存在する。例として、神津島における周期5分、10分、20分の津波に対する遡上高分布を図-5に示す。周期20分の場合、波長が島よりもはるかに長く、島の前面と背面でほとんど遡上高が変わらない。周期10分では、遡上高が周期20分の場合の2倍以上に増幅している。周期5分の場合、島と津波の

共振現象により周期20分に比べ6倍以上の遡上高となる地域が出現する。図-6は神津島に対し、共振周期に近い周期5.5分の津波が入射したときの空間最大水位分布図である。図中のコンターの値は入射波振幅で無次元化しており、点線のコンターが0.5、実線のコンターが1, 2, 4, 6, …を表す。共振時には、海岸線に沿った方向にも、岸沖方向にも水位勾配が急で、数値計算でこの様子を再現するには非常に細かい格子を用いなければならないことが予測される。

第2のグループは大島・三宅島・母島である。この3島では周期20分までは第1グループと同様、 $R_{\max}$ が増大する。しかし周期10～20分で $R_{\max}$ はほぼ横ばいとなり、周期が10分より短くなると再び増大を始める。第2

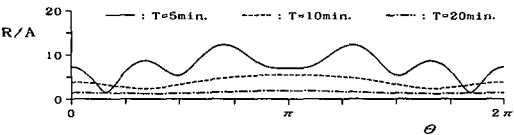


図-5 神津島の遡上高分布

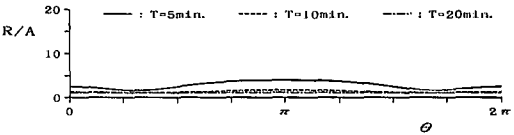


図-9 御蔵島の遡上高分布

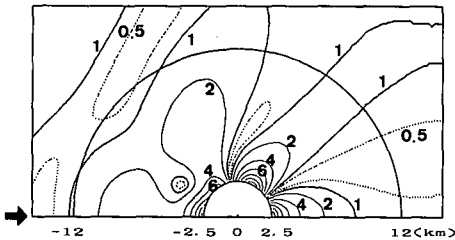


図-6 神津島の空間最大水位分布 (T=5.5分)

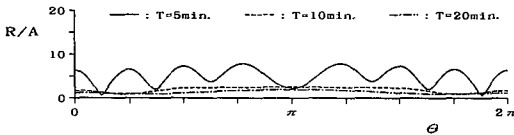


図-7 大島の遡上高分布

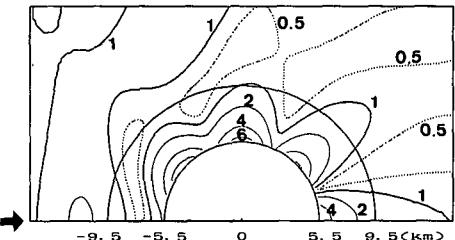


図-8 大島の空間最大水位分布 (T=5分)

表-3 伊豆・小笠原諸島の津波増幅率 (R_{max}/A)

	$T=5\sim10$ 分	$T=10\sim20$ 分	$T=20\sim40$ 分
大島	7.8	2.5	1.9
新島	8 (9.5)	3.0	1.6
神津島	14 (18.9)	5.5	1.9
三宅島	8.3	2.8	1.8
御蔵島	4.0	1.7	1.1
八丈島	10 (23.4)	3.9	2.0
父島	9 (51.9)	4.8	2.3
母島	6.1	2.6	1.9

表-4 伊豆・小笠原諸島の津波増幅率 (R_{max}/R_l)

	$T=5\sim10$ 分	$T=10\sim20$ 分	$T=20\sim40$ 分
大島	1.6	0.9	0.9
新島	1.6 (1.9)	1.0	0.7
神津島	2.3 (3.0)	1.1	0.7
三宅島	1.7	0.9	0.8
御蔵島	1.0	0.7	0.5
八丈島	2.0 (4.0)	1.0	0.8
父島	1.9 (9.0)	1.0	0.9
母島	1.4	1.1	0.9

のグループも周期5～10分の間に共振周期をもつが、その R_{max} は第1グループほど大きくない。例として、大島における周期5分、10分、20分の津波に対する遡上高分布を図-7に示す。周期10分と周期20分の遡上高分布はほとんど同じであるが、周期5分で神津島と同じ様な分布形が現れる。ただし、波高増幅率は神津島より小さい。図-8は大島に対し周期5分の津波が来襲したときの最大水位の空間分布である。

第3グループは御蔵島で、 R_{max} は第1、第2グループに比べて小さく、周期5～40分の間に共振周期をもたない。御蔵島の周期5分、10分、20分の津波に対する遡上高分布を図-9に示す。周期が短くなるほど遡上高が高くなる傾向は認められるが、分布形はそれほど複雑ではなく、捕捉の影響を顕著に受けていない。一般的に、 r_c が大きく、 m が小さいほど捕捉が起こりやすい。神津島と

御蔵島では r_c が同じだが、急勾配の御蔵島で波高の増幅が顕著でなく、緩勾配の神津島で捕捉による波高増幅が著しい。

次に、伊豆・小笠原諸島の津波増幅特性を示すため、津波の周期を5～10分、10～20分、20～40分に区分する。地震津波の場合、津波の波高と周期は地震の断層運動によって決まり、波高が大きければ周期も長くなる。周期20～40分は大正関東や安政東海など大津波の周期帯で、周期5～10分は中小規模の津波の周期帯と言うことができる。

それぞれの周期帯における R_{max}/A および R_{max}/R_l の最大値を津波増幅率と定義する。 R_l は m と h_d が同じ一様勾配斜面の遡上高である。 R_{max}/A は津波増幅率そのものを表し、 R_{max}/R_l は津波増幅率のうち、捕捉の効果の大きさに対応すると考えてよい。ただし、海底摩擦や局所地形の影響により、共振時の鋭いピークはかなり低減されると考えられるので、図-4に示した周期特性図か

らピーク部分をカットして津波増幅率を推定した。津波増幅率を求めた結果を表-3, 4 に示す。() 内に書かれた数値は, 上記の理由によりカットした共振時のピーク値である。

図-4 および表-3, 4 から, 以下の事項が分かる。

- (1) 伊豆・小笠原諸島では, 周期 20 分以上の大津波に対して捕捉による顕著な共振現象が起こらない。
- (2) 御蔵島では, 周期 5 分程度でも捕捉による共振現象が起きず, 津波が大きく増幅される可能性が低い。
- (3) 大島・新島・神津島・三宅島・八丈島・父島・母島では, 周期 5~10 分の中小規模の津波が捕捉され, 波高が増幅する。
- (4) 特に新島・神津島・八丈島・父島では, 周期 5~10 分の津波が共振現象により著しく増幅され, 周期 20~40 分の津波に比べて 5 倍以上の増幅率となる可能性がある。

したがって, 周期の短い中小規模の津波であっても, 大津波以上の被害を伊豆・小笠原諸島にもたらす危険性がある。津波防災の観点から, 大正関東や安政東海などの大津波以外に, 周期 5 分から 10 分程度の中小津波に対しても十分注意を払う必要がある。なお, 伊豆・小笠原諸島のように島が近接している場合は, 波向きによって隣の島に遮蔽され水位が増幅しないこともあるが, 逆に, 隣の島との干渉により波高が増幅される場合もあると予測されるため, 設計外力の算定には注意を要する。

4. 結 論

既往の津波数値計算方法では, 島に捕捉された津波の挙動を精度よく再現することが難しい。しかし, 伊豆・小笠原諸島では, 共振周期が 10 分以下であるため, 周期 20 分以上の大津波との顕著な共振が起きない。したがって, 巨大地震に対しては数値計算による検討が効果的である。

一方, 周期 10 分以下の中小規模の津波に対しては, 共振現象により著しい波高増幅が起こる可能性がある。特に新島・神津島・八丈島・父島などでは, 周期 5~10 分の津波が著しく増幅され, 周期 20~40 分の津波に比べて 5 倍以上の増幅率となる可能性がある。中小津波に対しても十分注意を払う必要があるであろう。

なお, 本研究を遂行するに当たり, 防衛大学校理工学研究科デデ・ユリアディ君 (現インドネシア海軍) の助力を得た。また本研究の一部は文部省科学研究費総合研究 A (代表者: 首藤伸夫) により行なわれた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 佐山順二・後藤智明・首藤伸夫 (1986): 屈折に関する津波数値計算の誤差, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 204-208.
- 藤間功司・後藤智明 (1994): 円錐形の島に捕捉された長波の特性, 土木学会論文集, No. 497/II-28, pp. 101-110.
- Liu, P. L.-F., Y.-S. Cho and K. Fujima (1994): Numerical solutions of three-dimensional run-up on a circular island, Proc. of the International Symposium on Waves—Physical and Numerical Modelling, pp. 1031-1040.