

## 様々な平面形状の浅瀬を有する島嶼に入射する津波の数値解析

柿沼 太郎\*・桑波田 純矢\*\*

### 1. 序 論

エーゲ海のサントリーニ島における火山噴火に伴う津波は、津波に関する最古の記録の一つと言われている<sup>1)</sup>。また、2018年12月に、インドネシアのスダ海峡に位置するアナク・クラカタウ島で活火山が噴火し、地盤の崩落により津波が発生したと報告されている<sup>2)</sup>。これらは、島嶼自体が津波の発生源となった事例である。一方、2004年12月のインド洋大津波は、島国であるスリランカやモルディブに到達したが、これは、遠方の海底地震に伴う巨大津波が、島嶼を襲った例である。

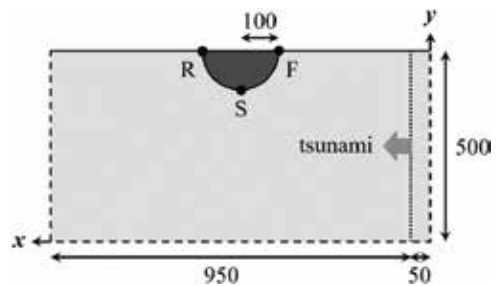
南北約 500 km にわたって連なる、鹿児島県の薩南諸島も、こうした津波に対して防災対策を進めておく必要がある。近年においても、2009年10月の奄美大島北東沖地震等に伴い、津波が島嶼に到達している<sup>3)</sup>。しかしながら、島嶼周辺の津波挙動に関しては、未解明な点が多い。島嶼は、津波を捕捉し、津波高さを増幅させる特性を有する<sup>4)</sup>。更に、島嶼周辺の海底地形は、複雑な様相を呈していることが多い。これまで、浅瀬を有する島嶼を含む島嶼周辺の線形波動場に関して、定常状態を対象とした理論的な研究がなされ<sup>4)</sup>、過渡的な波の挙動に対しても、円錐形状の島嶼周辺における理論解が導出され、実験値と比較されている<sup>5)</sup>。また、浅瀬が円錐側面の一部である島嶼周辺の津波に対して、線形浅水モデルを用いた数値解析も行なわれている<sup>6)</sup>。そこで、本研究では、島嶼周辺における津波挙動の基礎的研究として、与論島のようにサンゴ礁等の浅瀬を有する島嶼を対象とし、

島嶼のモデル地形に入射する津波の3次元数値解析を行ない、島嶼周辺の浅瀬が、津波の伝播過程にどのような影響を及ぼすのかを調べる。著者らは、第1報<sup>7)</sup>及び第2報<sup>8)</sup>において、浅瀬の外周が円形である場合を対象とし、3次元数値解析により、島嶼前面や島嶼背後での津波の挙動や、島嶼を回り込んで、入射して来た方向に伝播する津波の振る舞いを調べた。本報では、様々な平面形状の浅瀬を有する島嶼に入射する津波の数値解析を実施し、津波の伝播特性を調べる。

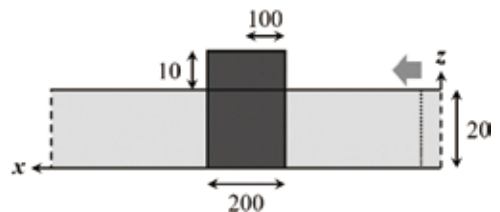
### 2. 数値解析の条件及び手法

図1～6に平面図と断面図を示すようなモデル地形を有する領域内の3次元流体運動を解析対象とする。

図1～6の平面図において、実線で示す  $y$



(a) 平面図



(b) 側面図

図1 「浅瀬なし」: 浅瀬のない島嶼(単位:m)

\*鹿児島大学学術研究院理工学域

\*\*鹿児島市建設局

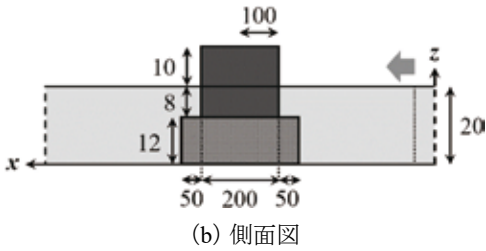
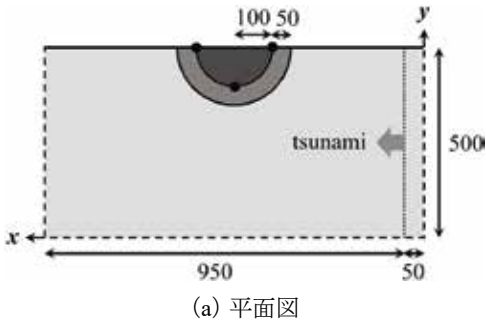


図 2 「円形」：外周が円形の浅瀬を有する島嶼(単位:m)

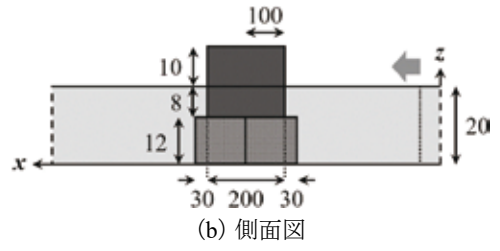
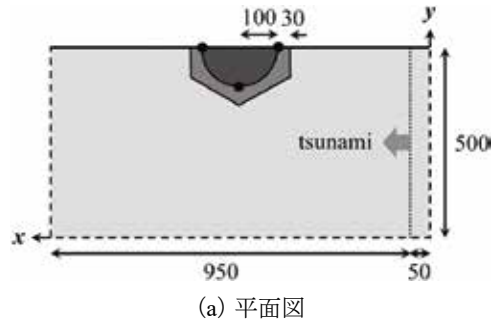


図 4 「正六角形 B」：外周が正六角形で前端が辺である浅瀬を有する島嶼(単位:m)

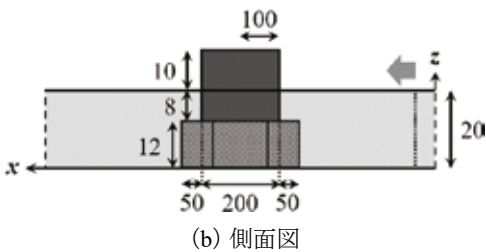
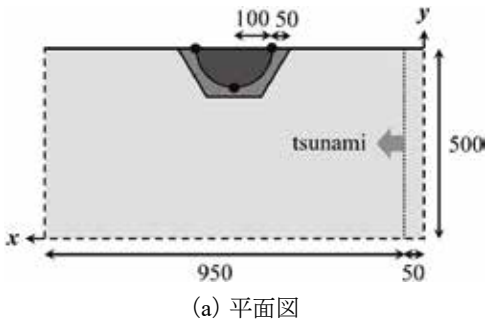


図 3 「正六角形 A」：外周が正六角形で前端が頂点である浅瀬を有する島嶼(単位:m)

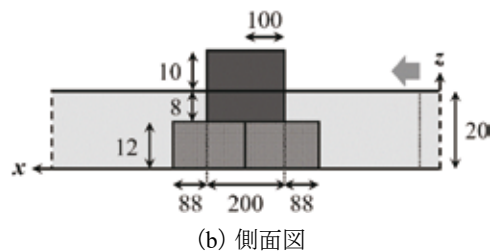
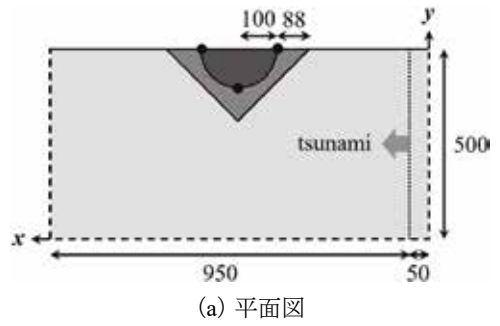


図 5 「正方形 A」：外周が正方形で前端が頂点である浅瀬を有する島嶼(単位:m)

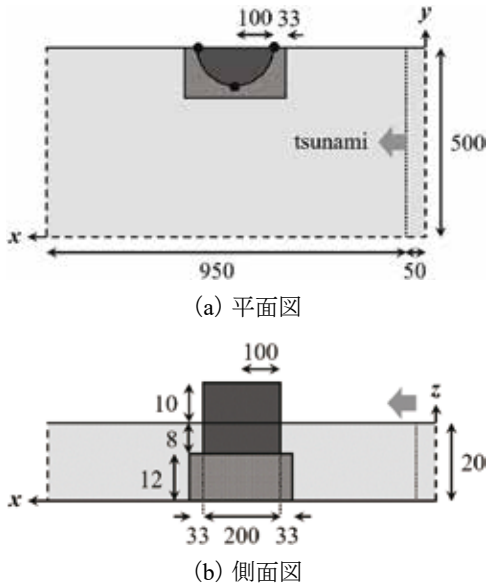


図 6 「正方形 B」：外周が正方形で前端が辺である浅瀬を有する島嶼(単位:m)

= 500.0 m の境界を完全反射境界とし、対象領域の半分を計算対象としている。また、破線で示す、水域の他の境界には、Sommerfeld の放射条件を適用する。

図 1 ~ 6 に示す対象領域には、半径 100.0 m の円柱状の島嶼がある。図 1 に示す対象領域は、浅瀬のない円柱状の島嶼がある水域である。ここでは、この場合を「浅瀬なし」と呼ぶことにする。他方、図 2 ~ 6 に示す対象領域では、円柱状の島嶼の周辺に浅瀬がある。このうち、図 2 に示す対象領域にある浅瀬の形状は、外周が半径 150.0 m の円形である。この場合を「円形」と呼ぶ。なお、第 2 報<sup>8)</sup>では、浅瀬の外周が、島嶼の前後の方向に中心位置のずれた円形である場合を対象とした。ここで、島嶼の前後の方向は、津波の入射方向であり、津波の波源側を島嶼の前方とする。

また、図 3 及び図 4 に示す対象領域にある浅瀬の形状は、外周が半径 150.0 m の円に内接する正六角形である。このうち、図 3 に示す対象領域にある浅瀬の外周の正六角形は、前端が頂点となっている。この場合を「正六角形 A」と呼ぶことにする。これに対して、図 4 に示す対象領域にある浅瀬の外周の正六

角形は、前端が辺となっており、この場合を「正六角形 B」と呼ぶ。

そして、図 5 及び図 6 に示す対象領域にある浅瀬の形状は、外周が 1 辺 266.0 m の正方形である。このうち、図 5 に示す対象領域にある浅瀬の外周の正方形は、前端が頂点となっており、また、図 6 に示す対象領域にある浅瀬の外周の正方形は、前端が辺となっている。前者の場合を「正方形 A」、後者の場合を「正方形 B」と呼ぶ。

上記のいずれの場合においても、静水位を  $z = 0.0$  m とする。また、浅瀬上を除く水域の静水深は、 $h = 20.0$  m で一様とし、浅瀬上の静水深は、 $h = 8.0$  m で一様とする。簡単のために、底面摩擦の影響を無視し、島嶼陸域の浸水を考えない。

数値モデルとして、CADMAS-SURF/3D<sup>9), 10)</sup>を適用する。本モデルを用いた数値計算では、連続方程式、Navier-Stokes 方程式及び圧力に関する Poisson 方程式を流体運動の非線形性を考慮して 3 次元空間内で解く。水面位置の決定には、VOF (volume of fluid) 法を用いる。差分方程式には、一次風上差分を適用し、また、時間積分には、SMAC (simplified marker and cell) 法を用いる。計算格子間隔は、 $\Delta x = \Delta y = 2.5$  m 及び  $\Delta z = 0.5$  m とする。計算時間間隔は、CFL 条件を満足するよう自動的に決定する。そして、水域内の  $x = 50.0$  m の位置から、 $x$  軸の正の向きに与える入射波は、孤立波とし、その波高を  $y$  軸方向に一様に 1.9 m とする。なお、計算格子間隔を  $\Delta x = \Delta y = 5.0$  m 及び  $\Delta z = 1.0$  m とし、波高 1.9 m の孤立波を入射させたとき、上記の場合と比較して、伝播する孤立波の水面形に有意な違いのないことを確認した。

### 3. 浅瀬の存在が津波に与える影響

#### 3.1 島嶼の前端及び後端における水面変動

図 1 に示す浅瀬なしの場合と、図 2 に示す浅瀬の外周が円形である場合の、島嶼前端的地点 F ( $x = 400.0$  m,  $y = 500.0$  m) 及び島嶼後端的地点 R ( $x = 600.0$  m,  $y = 500.0$  m) に

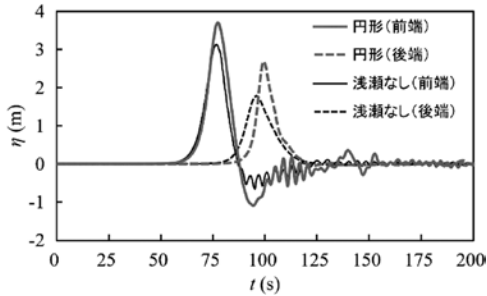


図7 図1に示す浅瀬なしの場合及び図2に示す円形の場合に対する島嶼前端 F 及び島嶼後端 R における水面変動

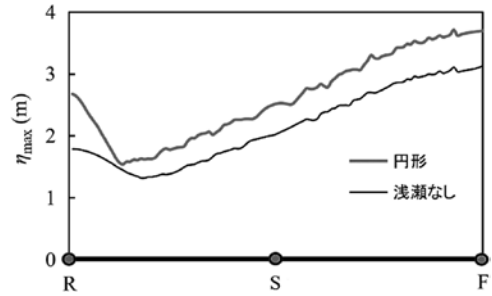


図8 図1に示す浅瀬なしの場合及び図2に示す円形の場合に対する島嶼外縁に沿った最大水位の分布

における水面変動  $\eta$  の数値解析結果を図7に示す。ここで、島嶼前端 F 及び島嶼後端 R の位置を図1に示している。

島嶼の前端、後端ともに、浅瀬を有する地形の場合の方が、最大水位が大きい。これは、浅瀬上における津波の浅水変形に伴う波高の増加によるものである。図2に示す、浅瀬の外周が円形である場合、各地点における水面変動の最大値、すなわち、津波高さは、島嶼前端 F において、浅瀬のない場合より 0.56 m 高く、島嶼後端 R において、浅瀬のない場合より 0.89 m 高い。

また、 $t = 140.0$  s において、水面変動のピークが見られるが、これは、島嶼の左右を通過した津波の一部が、島嶼を回り込んで島嶼背後で重合し、その後、津波の一部が、島嶼前方に伝播して、島嶼前端 F 付近で再び重合したことを示している。

### 3.2 島嶼外縁における最大水位

図1に示す浅瀬なしの場合と、図2に示す円形の場合に対する、島嶼外縁に沿った最大水位  $\eta_{\max}$  の分布を図8に示す。ここで、横軸の右端を島嶼前端の地点 F、中央を島嶼側方の地点 S、そして、左端を島嶼後端の地点 R としている。

この場合、浅瀬のある場合の方が、島嶼外縁の全域にわたって最大水位が大きい。また、いずれの場合も、島嶼背後で津波が重合し、島嶼の後端 R 付近で最大水位が増加する。そして、浅瀬のある場合、島嶼の左右を通過

した比較的津波高さの大きな津波が島嶼背後で重合するため、島嶼後端 R における津波高さが、浅瀬のない場合より大きい。ただし、島嶼前後端の最大水位比  $r = (\text{島嶼後端 R における最大水位}) / (\text{島嶼前端 F における最大水位})$  は、浅瀬のない場合、 $r \approx 0.57$ 、浅瀬のある場合、 $r \approx 0.72$  であり、浅瀬のある場合の方が大きい。これは、後者の場合、島嶼背後にも浅瀬があり、浅瀬上で津波が重合しているためである。

### 3.3 島嶼の前端及び後端における津波到達時刻

図1に示す浅瀬なしの場合と、図2に示す円形の場合に対する、島嶼前端 F 及び島嶼後端 R における津波到達時刻を表1に示す。ここで、各地点における津波到達時刻は、その地点で水位が変化し始めた時刻とする。

浅瀬の外周が円形である場合と、浅瀬がない場合の、津波到達時刻の差は、島嶼前端 F で 1.7 s、島嶼後端 R で 8.4 s となっており、いずれの地点においても、浅瀬がある場合の方が津波の到達が遅い。これは、水深が浅い浅瀬上で津波の位相速度が低減し、津波の到達時刻が遅くなるからである。

## 4. 浅瀬の形状が津波に与える影響

### 4.1 島嶼の前端及び後端における水面変動

まず、図2に示す円形の場合と、図3に示す正六角形 A の場合に対する、島嶼前端

表 1 図1に示す浅瀬なしの場合及び図2に示す円形の場合に対する島嶼前端 F及び島嶼後端 Rにおける津波到達時刻  $\tau$

浅瀬の有無	島嶼前端 F における $\tau$	島嶼後端 R における $\tau$
浅瀬なし	30.6 s	51.3 s
円形	32.3 s	59.7 s

F 及び島嶼後端 R における水面変動  $\eta$  の数値解析結果を図 9 に示す。

円形の場合と正六角形 A の場合では、水面変動のピーク値に大きな違いが見られない。しかしながら、島嶼前端 F における第 2 のピーク、すなわち、島嶼背後を回り島嶼前方に伝播して来た津波が重畳して生じたピークは、正六角形 A の場合の方が、円形の場合よりも早い時刻に現れている。また、島嶼前端 F において  $93 \text{ s} < t < 134 \text{ s}$  に見られる高周波には、浅瀬外周の形状の違いが現れており、正六角形 A の場合に、比較的大きな波高の高周波が、円形の場合よりも先に現れている。

次に、図 2 に示す円形の場合と、図 4 に示す正六角形 B の場合に対する、島嶼前端 F 及び島嶼後端 R における水面変動  $\eta$  の数値解析結果を図 10 に示す。

前端が辺である正六角形 B の場合、円形の場合よりも水面変動のピーク値がやや低減している。また、島嶼前端 F において、正六角形 B の場合には、円形及び正六角形 A の場合に見られた第 1 のピーク後の顕著な高周波が認められない。

また、図 2 に示す円形の場合と、図 5 に示す正方形 A の場合に対する、島嶼前端 F 及び島嶼後端 R における水面変動  $\eta$  の数値解析結果を図 11 に示す。

正方形 A の場合、島嶼前端 F において、第 1 のピークの値が円形の場合よりも大きくなっており、また、第 1 のピーク後の高周波の最大波高が、円形の場合より大きくなっている。これは、浅瀬上に伝播する際に屈折した津波のエネルギーが、島嶼前端付近に集中するためであると考えられる。

そして、図 2 に示す円形の場合と、図 6 に

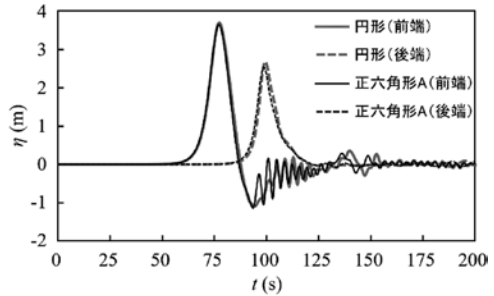


図 9 図2に示す円形の場合及び図3に示す正六角形 A の場合に対する島嶼前端 F 及び島嶼後端 R における水面変動

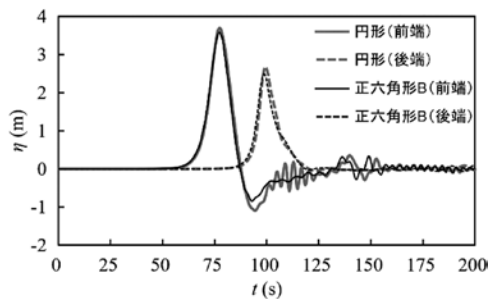


図 10 図 2 に示す円形の場合及び図 4 に示す正六角形 B の場合に対する島嶼前端 F 及び島嶼後端 R における水面変動

示す正方形 B の場合に対する、島嶼前端 F 及び島嶼後端 R における水面変動  $\eta$  の数値解析結果を図 12 に示す。

正方形 B の場合、島嶼後端 R において、水面変動のピーク値が円形の場合よりも低くなっている。これは、正方形 B の場合、浅瀬の面積が、島嶼の側方から後方の間で大きくなり、津波が島嶼後方に通過して、津波のエネルギーが島嶼後端に集中しにくくなっているためであると考えられる。また、正方形 B の場合にも、正方形 A の場合と同様に、第 1 のピーク後の高周波の最大波高が大きくなっているが、正方形 B の場合には、高周波の最大水位がより高くなっている。

#### 4.2 島嶼外縁における最大水位

図 2 に示す円形の場合、図 3 に示す正六角形 A の場合と、図 4 に示す正六角形 B の場

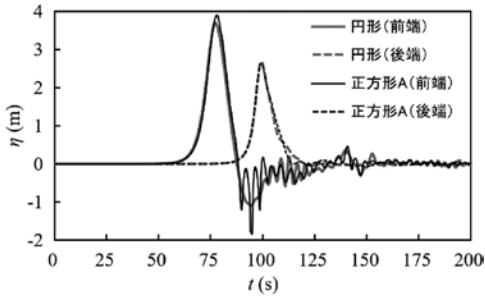


図 11 図2に示す円形の場合及び図5に示す正方形 A の場合に対する島嶼前端 F 及び島嶼後端 R における水面変動

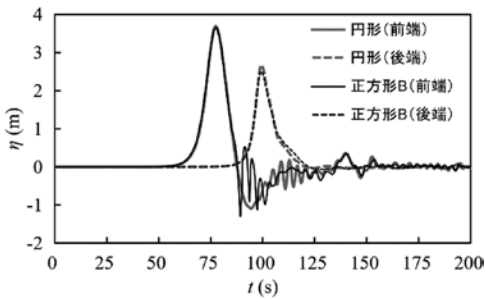


図 12 図2に示す円形の場合及び図6に示す正方形 B の場合に対する島嶼前端 F 及び島嶼後端 R における水面変動

合に対する，島嶼外縁に沿った最大水位  $\eta_{\max}$  の分布を図 13 に示す。

また，図 2 に示す円形の場合，図 5 に示す正方形 A の場合と，図 6 に示す正方形 B の場合に対する，島嶼外縁に沿った最大水位  $\eta_{\max}$  の分布を図 14 に示す。

図 13 より，正六角形 A 及び正六角形 B の場合には，円形の場合よりも概ね最大水位が低いことがわかる。他方，図 14 より，正方形 A 及び正方形 B の場合には，円形の場合と比較して，大きさの関係が場所によって変化することがわかる。すなわち，島嶼前端 F 付近の最大水位は，正方形 B の場合より円形の場合が大きく，円形の場合より正方形 A の場合が大きい。これに対して，島嶼側方の最大水位は，逆転して，概ね正方形 A の場合より円形の場合が大きく，円形の場合より正方形 B の場合が大きい。これは，正方形 B の場合において，比較的大きなエネルギー

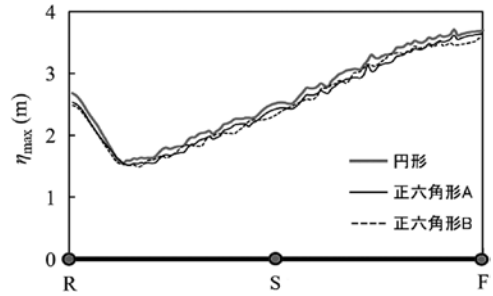


図 13 図2に示す円形，図3に示す正六角形 A 及び図4に示す正六角形 B の各場合に対する島嶼外縁に沿った最大水位の分布

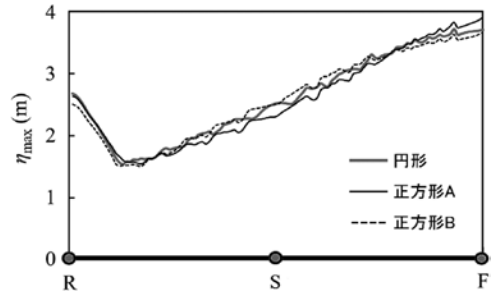


図 14 図2に示す円形，図5に示す正方形 A 及び図6に示す正方形 B の各場合に対する島嶼外縁に沿った最大水位の分布

の津波が，浅瀬前面で屈折せずに島嶼側方を通過したためであると考えられる。しかしながら，島嶼後端 R 付近の最大水位は，再び正方形 A の場合が正方形 B の場合より大きくなっており，正方形 A の場合に，反射や屈折によって，島嶼後端 R に津波のエネルギーがより集中しやすくなっていると言える。

#### 4.3 島嶼の前端及び後端における津波到達時刻

図 3～6 に示す，浅瀬の外周が正六角形，または，正方形である場合に対する津波到達時刻  $\tau$  と，図 2 に示す，浅瀬の外周が円形である場合に対する津波到達時刻  $\tau_{\text{circle}}$  の差  $\Delta\tau = \tau - \tau_{\text{circle}}$  の，島嶼前端 F 及び島嶼後端 R における値を表 2 に示す。

島嶼前端 F における津波の到達時刻は，正六角形 B が正六角形 A より早く，また，正

表 2 図 3～6の各場合に対する津波到達時刻  $\tau$  と図 2に示す円形の場合に対する津波到達時刻  $\tau_{\text{circle}}$  の差  $\Delta\tau = \tau - \tau_{\text{circle}}$  の島嶼前端 F 及び島嶼後端 R における値

浅瀬の形状	島嶼前端 F における $\Delta\tau$	島嶼後端 R における $\Delta\tau$
正六角形 A	- 0.2 s	- 1.4 s
正六角形 B	- 0.5 s	- 1.3 s
正方形 A	+ 1.2 s	$\pm 0.0$ s
正方形 B	- 0.3 s	- 0.2 s

方形 B が正方形 A より早い。これは、島嶼前方において、島嶼の前後方向の浅瀬の幅に差があり、津波が浅瀬上に進行して位相速度が低減し始める時刻に違いがあるためである。一方、島嶼後端 R における津波の到達時刻は、正方形 B が正方形 A より早い、これに対して、正六角形 A が正六角形 B より僅かに早くなっている。これは、津波が浅瀬上を伝播する距離に違いがあるためであると考えられる。

## 5. 結 論

外周が円形、正六角形、または、正方形である浅瀬を有する島嶼のモデル地形に入射する津波の 3 次元数値解析を行ない、浅瀬の有無や形状が、津波の伝播過程に対してどのような影響を及ぼすのかを調べた。

浅瀬の有無に関して、外周が円形である浅瀬が島嶼の周囲にある場合、浅瀬上における津波の浅水変形に伴い波高が増加し、島嶼外縁に沿った最大水位が、浅瀬のない場合よりも大きくなった。そして、島嶼の左右を通過した津波の一部が、島嶼を回り込んで島嶼背後で重なり、その後、津波の一部が、島嶼前方に伝播して島嶼前端付近で再び重なった。

浅瀬の形状に関して、浅瀬の外周が正方形である場合の最大水位は、浅瀬前端が頂点の場合に、島嶼前端において、浅瀬が円形の場合よりも大きくなった。

また、島嶼前端において第 1 のピーク後に見られる高周波には、浅瀬外周の形状の違いが現れ、浅瀬の外周が正方形である場合の高

周波の波高は、浅瀬の外周が円形である場合よりも大きくなった。

そして、島嶼後端における津波の到達時刻は、浅瀬の外周が正方形である場合には、浅瀬前端が辺である場合の方が、浅瀬前端が頂点である場合よりも早く、一方、浅瀬の外周が正六角形である場合には、浅瀬前端が頂点である場合の方が、浅瀬前端が辺である場合よりも僅かに早くなった。

今後、浅瀬の面積や、浅瀬上の静水深といった、地形条件が異なる場合等を対象として、浅瀬の形状が津波高さや波向きに与える影響をより詳細に検討したい。

## 参考文献

- 1) 首藤伸夫：地中海の津波－主にソロヴィエフ他に基づいて－、津波工学研究報告、第 33 号、pp. 1-16, 2017.
- 2) Tappin, D., Grilli, S., Ward, S., Day, S., Grilli, A., Carey, S., Watt, S., Engwell, S., and Muslim, M.: The devastating eruption tsunami of Anak Krakatau – 22nd December 2018, Geophys. Res. Abs., Vol. 21, EGU, 2019.
- 3) 羽鳥徳太郎：2009 年 10 月 30 日奄美大島北東沖地震津波の波源域と津波規模、津波工学研究報告、第 28 号、pp. 1-3, 2011.
- 4) 藤間功司、後藤智明：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, 1994.
- 5) 藤間功司, Yuliadi, D., Briggs, M. J., 正村憲史, 重村利幸, 後藤智明：過渡的な入射波形をもつ津波の島への遡上、土木学会論文集、No. 586/II-42, pp. 105-115, 1998.
- 6) 藤間功司, 正村憲史, 林建二郎, 重村利幸, 後藤智明：Leap-frog 法を用いた島周辺の津波数値計算における格子間隔選定基準、土木学会論文集、No. 593/II-43, pp. 183-188, 1998.
- 7) 柿沼太郎, 久保達郎：浅瀬を有する島嶼に入射する津波の数値解析、津波工学研究報告、第 36 号、pp. 145-148, 2019.

- 
- 8) 柿沼太郎, 山口 翔: 浅瀬が存在する島嶼に入射する津波の 3 次元数値解析, 津波工学研究報告, 第 37 号, pp. 95-98, 2020.
- 9) 有川太郎, 山田文則, 秋山 実: 3 次元数値波動水槽における津波波力に対する適用性の検討, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 46-50, 2005.
- 10) 沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, 沿岸技術ライブラリー, No. 39, 235p., 2010.