# 甑島の分岐した湾で発生する長周期水位変動の数値解析

Numerical Simulation of Long-Period Oscillation in a Branching Bay of Koshiki Islands

白橋朋大1•柿沼太郎2•浅野敏之3•佐藤道郎4

Tomohiro SHIRAHASHI, Taro KAKINUMA, Toshiyuki ASANO and Michio SATO

In Urauchi Bay of Koshiki Islands, long-period oscillations are observed in early spring. These oscillations are called "Abiki" as is the case with Nagasaki Bay. In this study, numerical calculation of long-period oscillation has been performed by applying the nonlinear shallow-water equations to simulate the oscillation characteristics of Urauchi Bay, which branches into two bays. Numerical results are compared among various types of bays, including I-type, L-type, and T-type bays, the last of which resembles to Urauchi Bay in bay shape. Urauchi Bay shows the second-mode oscillation corresponding to that of T-type bays. The first-mode oscillation can be large especially in Kojima Fishing Port.

## 1. 序 論

鹿児島県甑島(こしきじま、図-1及び図-2参照)の浦内湾湾奥に位置する小島漁港では、毎年2~3月頃に、潮汐と異なる一定周期の潮位変動が現れ、これによる漁船の転覆被害も報告されている(志賀ら、2007)。図-3は、小島漁港において2004年2月に観測された水位変動の一例であり、周期約1,300 s、水位差約1.3 mの振動が見られる。この現象は、「あびき」と呼ばれ、長崎湾のあびき(富樫ら、1986)と同様、台風や低気圧、あるいは、移動する前線に伴う微気圧振動等に起因して外海に発生する長周期波が、湾内に入射して生ずる副振動の一種であると推測される。

ところで、浦内湾は、図-2に示すように2本に分岐した湾形を有しているため、複雑な湾水振動を示すと考えられ、湾内におけるあびきの発生機構も明らかでない。

そこで、本研究では、幾つかの湾形の「モデル地形」 及び浦内湾を含む「実地形」を対象として湾水振動の数値シミュレーションを行ない、甑島浦内湾の湾水振動特性に関して検討する。

#### 2. 基礎方程式と数値解析手法

基礎方程式系は、次に示す非線形浅水方程式系である。  $\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\eta + h) U \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\eta + h) V \right\} = 0 \tag{1}$ 

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^{2}}{\partial x} + \frac{\partial (UV)}{\partial y}$$

$$= fV - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_{h} \left( \frac{\partial^{2} U}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} U}{\partial y^{2}} \right) - \frac{KU \sqrt{U^{2} + V^{2}}}{\eta + h}$$
(2)

工博

3正会員

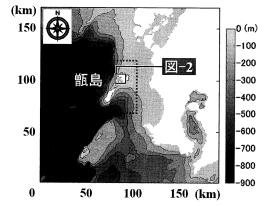


図-1 甑島周辺海域の水深

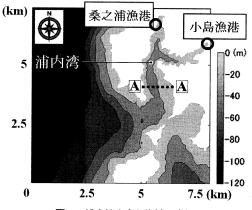


図-2 浦内湾を含む海域の水深

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial (UV)}{\partial x} + \frac{\partial V^{2}}{\partial y} 
= -fU - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_{h} \left( \frac{\partial^{2} V}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} V}{\partial y^{2}} \right) - \frac{KV \sqrt{U^{2} + V^{2}}}{\eta + h}$$
(3)

ここで、U及びVは、それぞれ、x及びy軸方向の水平方向流速であり、 $\eta$ 、h、f及びgは、それぞれ、水面変動、

<sup>1</sup>正会員修(工)

<sup>(</sup>株)日立システムアンドサービス

<sup>2</sup> 正 会 員 博(工)

<sup>4</sup> 正 会 員 工博

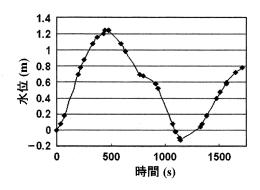


図-3 小島漁港における長周期水位変動の観測結果の一例

静水深,Coriolis 係数及び重力加速度である。また, $A_{\hbar}$ 及びKは,それぞれ,水平拡散係数及び海底摩擦係数である.

入射境界では,反射吸収造波による無反射境界条件を導入し,反射波を領域外に透過させた.また,海域内に設けた境界は,放射境界とした.他方,陸域境界では,完全反射条件を仮定した.これらの境界条件のもとで式(1)~(3)を差分法によって解く数値解析プログラムを作成した.

### 3. 長方形湾を対象とした長周期水位変動の数値解析

数値モデルの検証のために、一様静水深の長方形湾における湾水振動の数値解析を行なった。長方形湾の湾長lは、3,000 m であり、湾幅は、600 m である。

入射境界において、周期 $T=100\sim1,500$ sの規則波を発生させた。各周期の入射波を10周期発生させたところ、いずれの場合にも、湾内の水面変動の波高及び平均水位が定常状態になった。このときの、長方形湾の湾奥中央における波高増幅率の計算結果を $\mathbf{20-4}$ に示す。本論文において、波高増幅率は、湾口における水面変動の波高Hに対する、対象地点における水面変動の波高Hの比k=H/Hで表わすものとする。

図-4より、第1モード(これは、湾長lと入射波波長Lの比がI/L=0.22の場合に現れる。)の周期と波高増幅率の、そして、第2及び第3モードの周期の計算結果が、線形解析解(合田、1963)とほぼ一致していることが確認できる。なお、長方形湾の第1モードよりも周期が短い第2及び第3モードの波高増幅率は、計算結果と線形解析解とにずれが見られる。本モデルの基礎方程式系である非線形浅水方程式系が分散項を含んでいないため、分散効果が非線形効果と同オーダ以上に現れる場合には、本モデルが波高を過大に評価する可能性のあることに留意しておく必要がある。

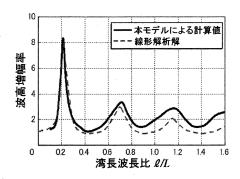


図-4 長方形湾の湾奥中央における波高増幅率の計算結果と 線形解析解(合田, 1963)の比較

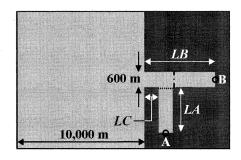


図-5 モデル湾の解析のための計算対象領域

#### 4. モデル湾を対象とした長周期水位変動の数値解析

2本に分岐した湾形を有する浦内湾を想定したモデル湾を対象として、湾内における長周期水位変動の数値シミュレーションを行なった。すなわち、図-5に示すように湾幅が一様で2本に分岐したT型湾に、様々な周期の規則波を入射させて解析を行なった。

図-5において、湾幅は、いずれの分岐湾も600 m であるとする。本研究では、LA、LB及びLCの値を変えて T型湾の湾形を図-6のように5種類に変化させ、波高増幅率の計算結果を比較する。

更に、T型湾と異なる湾形の湾も対象とする. 堀川・西村 (1967) は、水理実験を実施し、様々な湾形の湾に発生する湾水振動の特性を調べた. また、Derunら (2003) は、複雑な湾形を有する湾について、湾を幾つかの長方形湾に分割して湾水振動の解析を行なった. ここでは、図-5及び図-6に示す湾内の点線部と一点鎖線部のそれぞれに鉛直壁を設けることによって、I型湾(長方形湾)とL型湾を作成し、I型湾、L型湾、そして、T型湾を対象とした数値解析を行ない、湾の応答特性を比較する.

数値解析では、3.の計算と同様に計算対象領域の左辺を入射境界とし、振幅が0.1mで周期が100~2,000sの範囲内の様々な周期の規則波を発生させた。海域の上

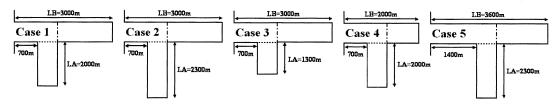


図-6 各モデル湾の湾形

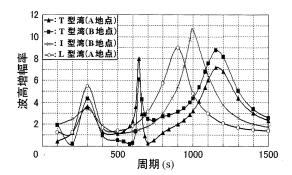


図-7 Case 1の各モデル湾における湾奥中央の波高増幅率 (*LA* = 2,000 m, *LB* = 3,000 m, *LC* = 700 m)

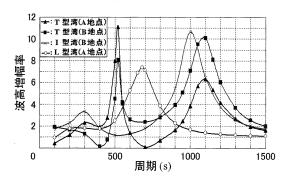


図-9 Case 3の各モデル湾における湾奥中央の波高増幅率  $(LA=1,300 \text{ m},\ LB=3,000 \text{ m},\ LC=700 \text{ m})$ 

辺及び下辺は,放射境界とした.静水深は,全海域において20~mで一様である.計算格子間隔及び計算時間間隔をそれぞれ $\Delta x = \Delta y = 100~m$ 及び $\Delta t = 0.5~s$ とした.

LCの値が700 m で等しい,Case 1(LA = 2,000 m,LB = 3,000 m),Case 2(LA = 2,300 m,LB = 3,000 m),Case 3(LA = 1,300 m,LB = 3,000 m)及び Case 4(LA = LB = 2,000 m)の各場合の,図-5の湾奥中央地点 A,または,B における波高増幅率をそれぞれ図-7~10に示す.対象としたすべての場合において,T 型湾には,I 型湾や L 型湾と異なる特有の固有周期が存在し,これが T 型湾の第2モードの周期となる.その固有周期は,400~700 s の間で見られ,その周期では,湾奥中央における波高増幅率が4~12となっている.

湾長LBが等しい Case 1~3 (図-7~9) において、桑

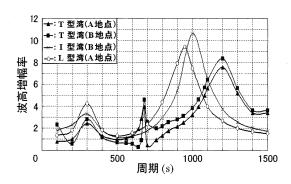
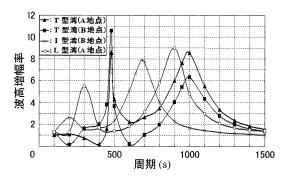


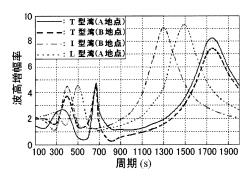
図-8 Case 2の各モデル湾における湾奥中央の波高増幅率  $(LA=2,300 \text{ m},\ LB=3,000 \text{ m},\ LC=700 \text{ m})$ 



**図-10** Case 4の各モデル湾における湾奥中央の波高増幅率 (*LA=LB=*2,000 m, *LC=*700 m)

之浦漁港がある分岐湾(図-2参照)の湾奥の B 地点では,第1モードの波高増幅率 $k_1$  が第2モードの波高増幅率 $k_2$  よりも高く,LAが短い程, $k_1$  、 $k_2$  とも高くなる。なお,桑之浦漁港は,湾奥の B 地点から外れて,やや沖側に位置している。一方,小島漁港が位置する湾奥の A 地点では,LAが短い程, $k_1$  が低く, $k_2$  が高くなり,Case 1及び Case 3では, $k_2$  が $k_1$  よりも高い。 $k_1$  は,いずれの場合においても B 地点の方が高いが, $k_2$  は,Case 1及び Case 3で A 地点の方が高い。また,LAが短い程,第1,第2モードとも,固有周期が短くなる。

Case 1では、湾長の構成比が浦内湾に近い値に設定されているため、浦内湾の水深や湾幅といった湾形に関する量が一様であると近似できるならば、各分岐湾間の波高の比率が、Case 1に類似した傾向を示すと考えられる.



**図-11** Case 5の各モデル湾における湾奥中央の波高増幅率 (*LA*=2,300 m, *LB*=3,600 m, *LC*=1,400 m)

Case 1において、第1及び第2モードの固有周期は、それぞれ、約1,150 s 及び640 s であり、小島漁港の位置する A 地点において、 $k_1 = 7.2$ 及び $k_2 = 8.0$ である。そして、第2モード周辺の周期を持つ入射波によって、小島漁港のある分岐湾の湾水振動が、桑之浦漁港のある分岐湾の湾水振動が、桑之浦漁港のある分岐湾の湾水振動よりも大きな振幅を示すことがわかる。

更に、LAが等しい Case 1(図-7)と Case 4(図-10)を比較すると、LBの長い Case 1では、 $k_1$  及び $k_2$  の高い地点が、それぞれ、B 地点及び A 地点であるが、LBの短い Case 4では、逆転し、 $k_1$  及び $k_2$  の高い地点が、それぞれ、A 地点及び B 地点となる。

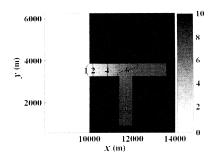
なお、図-7~10より、T 型湾の第1モードは、L 型湾やI 型湾に比べて周期が長くなることがわかる.

また、図-6の Case 5 (LA=2,300 m, LB=3,600 m, LC=1,400 m) では、LCが Case 1の2倍と長く、また、LAとLBの長さも共に Case 1より長い。しかしながら、LA/LB=0.64であり、この湾長比は、Case 1の約0.67及び浦内湾の約0.65に近い値である。Case 5の各湾において、図-5の湾奥中央地点 A、または、B で現れる波高増幅率を図-11に示す。この場合、T 型湾の第1及び第2モードの周期は、それぞれ、約1,750 s 及び670 s である。これら両者のモードの波高増幅率の、湾内における分布をそれぞれ図-12(a)及び(b)に示す。第1モードでは、湾口部付近のみに節があるが、第2モードでは、湾口部及び湾の分岐点付近の2箇所に節が生じる。

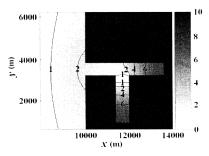
#### 5. 浦内湾を対象とした長周期水位変動の数値解析

浦内湾を含む海域の水深を海上保安庁水路部の海図から、 $50\sim100~{\rm m}$  メッシュで読み取り、 ${\bf Z}$  - ${\bf Z}$  に示す ${\bf 8}$ , ${\bf 100}~{\rm m}$  ×7,350  ${\bf m}$  の領域を対象として解析を行なった.

東シナ海から長周期波が入射すると仮定し、図-2の左端を入射境界として、様々な周期の規則波を入射させた。 湾内に入射する長周期波の正確な入射波高を得るため、 図-2に破線で示した A-A 断面に放射境界を設け、この



(a) 第1モード (T=1,750s)



(b) 第2モード (T=670s)

図-12 Case 5の T 型湾における第1及び第2モードの波高増 幅率の分布

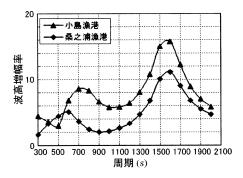


図-13 小島漁港と桑之浦漁港における波高増幅率

断面における反射波成分を除外した。この A-A 断面を 湾口として,A-A 断面における水面変動の波高 $H_i$  に対 する波高増幅率を求めることとする。

湾奥の小島漁港(図-5の T 型湾の A 地点に相当する。)の波高増幅率と,他方の分岐湾の湾奥(同 B 地点)から外れた場所に位置する桑之浦漁港の波高増幅率を図-13に示す.小島漁港の第1及び第2モードの周期Tは,それぞれ,約1,560 s 及び700 s である.また,T = 800 s のとき,小島漁港と桑之浦漁港の波高増幅率の比が最大になる.図-13の実地形の浦内湾の結果と,図-7~11のモデル湾の結果とで,第1及び第2モードの周期を比較すると,浦内湾の周期は,第2モードは,Case 1,2,または,

Case 5に近い値を示し、一方、第1モードは、Case  $1\sim4$  と Case 5の間の値を示している。浦内湾とモデル湾で、各モードが現れる入射波周期にこうした違いが生じる原因として、1) モデル湾におけるLCの設定の妥当性、2) 実地形の湾の水深と湾幅が、湾奥に向かって徐々に減少すること、そして、3) 湾形の微細な凹凸や、I型湾とL型湾に見られるような湾曲の影響が挙げられる。

波高増幅率の値は、波高 $H_i$  を求める場所にも依存するが、この場合、第2モードの小島漁港における波高増幅率は、約8.6であり、Case 1に近い値が算出されている。しかしながら、第1モードの小島漁港における波高増幅率は、約16.0であり、Case 1の約1.8倍の値となっている。これは、浦内湾とモデル湾で、水深や湾幅の場所的変化を含む湾形に違いがあるためであろう。

小島漁港における長周期水位変動の実測値としては、 図-3の観測結果の他、周期が 600~1,200 s で、水位差 の最大値が1 m 程度であるという、小島漁港組合による 報告がある。図-13に示した計算結果より、小島漁港で は、600 s 以上の周期を有する入射波に対して、5.5~ 16.0に達する高い波高増幅率が現れ得ることがわかる。

T=1,600 s 及び800 s のときの、小島漁港と桑之浦漁港の水面変動を $\mathbf{Z}$ -14に示す、小島漁港と桑之浦漁港の水面変動は、T=1,600 s でほぼ同位相となり、T=800 s で逆位相に近付く、前者が  $\mathbf{Z}$  型湾の第1モードの周期に相当し、後者が第2モード周辺の周期であることがわかる。

図-15に,入射波周期がT=800 s であるときの波高増幅率の分布を示す. 湾口部及び湾の分岐点付近の2箇所に,振動の節が形成されている.

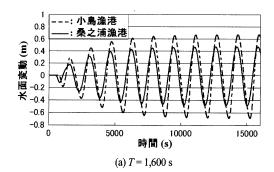
#### 6. 結 論

本研究では、2本に分岐した湾に発生する長周期水位変動について数値解析により検討した。浦内湾を想定してモデル化した T型湾は、I型湾やL型湾と異なる特有の固有周期を有し、浦内湾は、T型湾に特有の第2モードに相当する固有周期を有することが確かめられた。

一般に、桑之浦漁港よりも、漁船転覆被害のあった小島漁港に大きな水位変動が見られ、特に周期約1,560 sの第1モードで波高増幅率が最大となり小島漁港で約16.0となる。一方、周期約700 s の第2モードでは、小島漁港の波高増幅率が約8.6となる。

今後,より詳細な現地観測を実施し,ここで得られた 数値解析結果と比較して,あびきの発生原因をも考慮し た予測手法に関して検討していきたい.

謝辞: 鹿児島大学大学院理工学研究科の井上太介君には、 モデル湾を対象とした数値解析において、湾の作成及び 計算の実行にあたり御協力いただいた。謝意を表す.



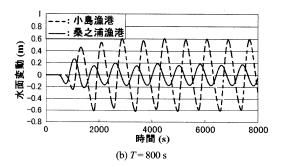


図-14 小島漁港及び桑之浦漁港における水面変動

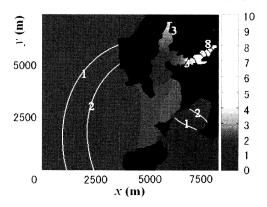


図-15 第2モード周辺の波高増幅率の分布 (T=800 s)

### 参考文献

合田良実 (1963): 長方形および扇形の港の副振動について-フーリエ変換を用いた解法-, 第10回海岸工学講演会講演集, pp. 53-58.

志賀 達・市川真人・楠元健一・鈴木博樹 (2007): 九州から薩南諸島で発生する潮位の副振動の統計的調査, 気象庁測候時報, 第74巻特別号, pp. S139-S162.

富樫宏由・中村武弘・新田喜浩(1986):長崎湾のアビキの有限 要素法による解析と河川遡上の現地観測,第33回海岸工学 講演会論文集,pp.80-84.

堀川清司・西村仁嗣(1967):枝分れのある湾の振動特性について,第14回海岸工学講演会講演集,pp.98-101.

Derun, A. B.・柿沼太郎・磯部雅彦(2003): 湾水振動の非線形数値モデルの開発と形状による港湾の応答特性変化について,海岸工学論文集,第50巻,pp. 231-235.