

様々な形状の湾における湾水振動の数値解析

Numerical Analyses of Oscillations in Harbors of Various Shapes

柿沼太郎¹・豊福大志²・井上太介³

Taro KAKINUMA, Taishi TOYOFUKU and Taisuke INOUE

A numerical model based on nonlinear shallow-water equations is applied to study oscillations in harbors of different shapes represented in 'L'-type, triangle, 'I'-type with different width, 'I'-type with a narrow strait, and 'C'-type. The second mode shows a higher amplification ratio at the head of an L-type harbor as its bending position is nearer to the harbor mouth. As a narrow strait is located nearer to the mouth of an I-type harbor, amplification ratios of the first and second modes at the harbor head are lower and higher, respectively. A C-type harbor shows rather complicated amplification ratios because the phase difference between waves propagating through two harbor mouths depends on the position inside the harbor. Harbor oscillations in I-type harbors where the still water depth is distributed are also simulated.

1. 序論

長周期波が湾内に入射すると、湾形に固有の数十分とといった一定周期で海面が上下する湾水振動が生じる。湾水振動は、船舶の停泊や荷役を妨げる可能性があり、港湾の計画・設計に際し、その特性を考慮する必要がある。

一方、2009年2月24日～26日には、九州地方の広範囲で湾水振動を伴う顕著な潮位変動が発生し、鹿児島県と熊本県では、船舶の転覆・沈没及び家屋の床上・床下浸水が発生した。このような被害を防ぐためにも、長周期波の入射に対する湾の応答特性を把握しておく必要がある。

これまで、湾水振動に関して、線形理論や水理実験等に基づく研究がなされてきた。例えば、前者の研究として合田（1963）、Hwang・Tuck（1970）及び酒井・山本（1976）が、後者の研究として、堀川・西村（1967）が挙げられる。また、数値モデルを適用した研究としては、例えば、Derunら（2003）がある。これらの研究により、I型、L型、T型、Y型、F型や三角形といった、種々の平面形を有するモデル湾の応答特性が調べられている。

ところで、実存する湾は、その平面形状や静水深の分布が複雑であることが多い。従って、水理実験や数値解析によって湾の応答特性が得られたとしても、その結果のみに基づいて、特性が現れる要因を特定することは、困難であると言わざるを得ない。例えば、白橋ら（2008）は、モデル湾を対象とした解析結果との比較により、上記の船舶転覆・床下浸水が発生した鹿児島県上甕島（かみこしきじま）の浦内湾が、T型湾に特有の振動モード

を有することを示した。しかしながら、減衰の遅い振動モードは、浦内湾とT型モデル湾で異なり、それぞれ、第1及び第2モードであって（柿沼ら、2009）、両湾でこうした違いが生じる理由は、現時点で明らかにされていない。この解析例のように、多くの要因が影響する、実存湾の複雑な振動特性を理解するためには、実存湾とモデル湾が示す振動特性の類似点や相違点を押さえていくことが必要となる。様々なモデル湾が有する特性の一つ一つを把握しておくことが要求されるのである。

そこで、本研究では、様々な平面形状、そして、静水深分布を有する湾を対象とした数値実験を行ない、湾形の特徴が湾水振動にどのような影響を及ぼすのかを調べる。湾水振動の非線形性を考慮するため、非線形浅水方程式系に基づく数値モデルを適用する。対象とする湾は、静水深が様なI型湾、L型湾、三角形湾、狭窄部を有する湾、複数の湾口を有するC型湾、そして、湾長方向、または、湾幅方向に静水深の異なるI型湾とし、規則波が入射する場合の各湾の応答特性に関して検討する。

2. 数値解析の方法

白橋ら（2008）の数値モデルを適用する。基礎方程式系は、次式のような非線形浅水方程式系である。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{(\eta + h)U\} + \frac{\partial}{\partial y} \{(\eta + h)V\} = 0 \quad \cdots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial(UV)}{\partial y} &= fV - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \frac{KU \sqrt{U^2 + V^2}}{\eta + h} \end{aligned} \quad \cdots (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(UV)}{\partial x} + \frac{\partial V^2}{\partial y} &= -fU - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \frac{KV \sqrt{U^2 + V^2}}{\eta + h} \end{aligned} \quad \cdots (3)$$

ここで、 U 及び V は、水平方向流速であり、 η 、 h 、 f 、 g 、

1 正会員 博(工) 鹿児島大学大学院准教授
理工学研究科 海洋土木工学専攻
2 九鉄工業株式会社
3 学生会員 鹿児島大学大学院
理工学研究科 海洋土木工学専攻

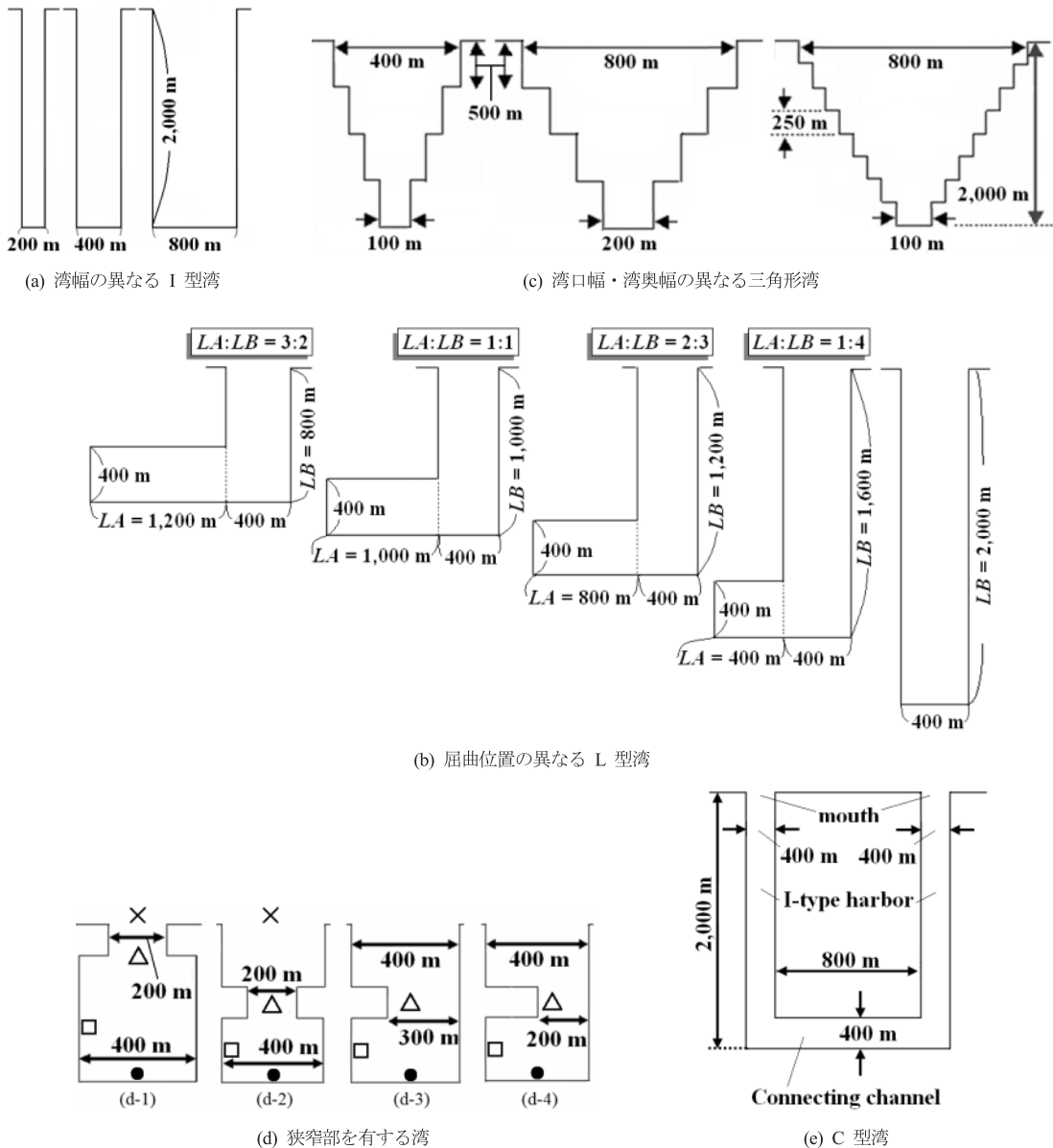


図-2 静水深が一樣である対象湾の湾形

第1及び第2モードの湾奥における R に対して影響をあまり及ぼさないが、湾口幅の違いによる影響は、両モードに対して顕著に現れている。

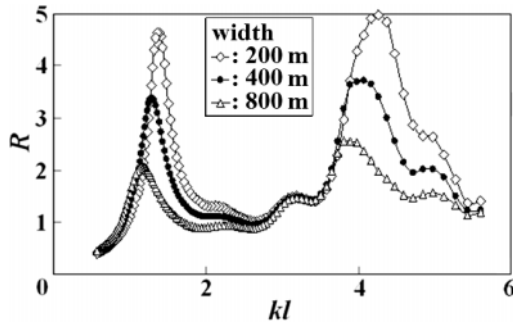
「(d) 狭窄部を有する湾」の各地点における波高増幅率 R を図-3 (d) に示す。狭窄部が湾口に近い (d-1) の湾では、湾奥における R が、(d-2) の湾よりも第1モードが低く、第2モードが高くなっている。

また、狭窄部の湾幅が狭い (d-4) の湾の方が、(d-3) の湾よりも第2モードの湾奥における R が低くなっている。しかしながら、第1モードには、(d-3) と (d-4) の

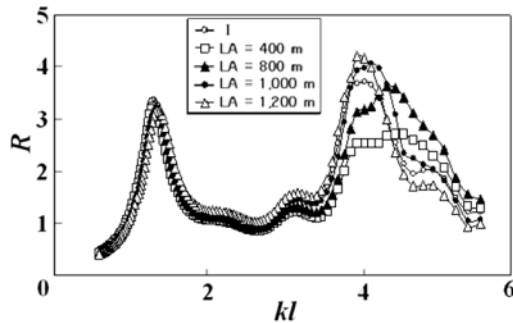
両者の湾にあまり違いがない。

なお、狭窄部の湾幅が更に狭い場合には、高周波の振動が発達する可能性がある。

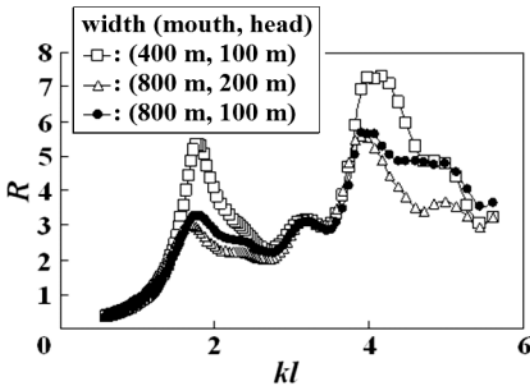
「(e) C型湾」の各地点における波高増幅率 R を図-3 (e) に示す。二つのI型湾部の湾奥、すなわち、これらを接続する矩形水路部の両端において、それぞれの湾口から入射した波の位相が逆位相に近い場合、I型湾単独の場合の湾奥における R （この値は、図-3 (b) において、I型湾の湾奥における R として示されている。）よりも、 R が低減している。



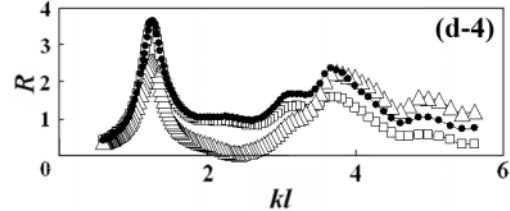
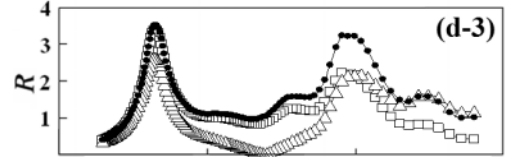
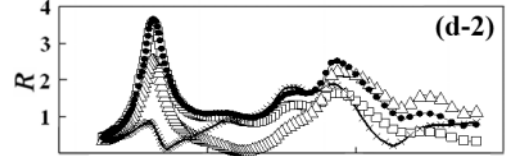
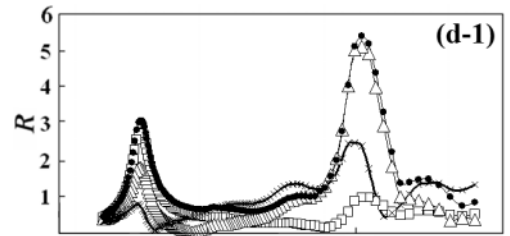
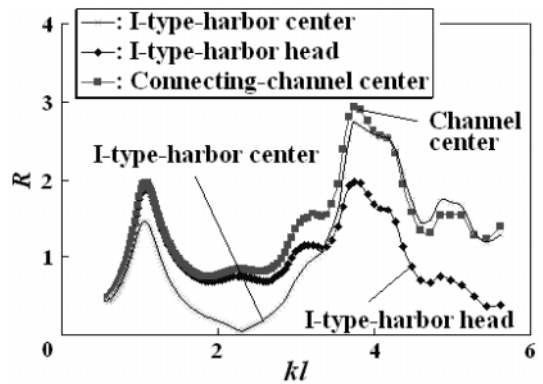
(a) 湾幅の異なる I 型湾の湾奥における波高増幅率



(b) 屈曲位置の異なる L 型湾の湾奥における波高増幅率



(c) 湾口幅・湾奥幅の異なる三角形湾の湾奥における波高増幅率

(d) 狭窄部を有する湾の波高増幅率 (プロットと同じ印を付した図-2(d)の各地点における波高増幅率 R を示している.)

(e) C 型湾

図-3 静水深が一樣である各湾の波高増幅率

ただし、各湾口から入射した波の位相差は、湾内の地点で異なり、I型湾部の中央付近と、二つのI型湾部の湾奥を接続する矩形水路部の中央地点とでは、第2モードの R が、二つのI型湾部の湾奥より高い値を示している。

5. 静水深が湾長方向に変化する湾の応答特性

静水深が湾長方向に変化する (f) 及び (g) の湾の、湾奥における波高増幅率 R の計算結果をそれぞれ図-4及

び図-5に示す。

「(f) 海底に峰や谷のあるI型湾」では、湾中央の静水深が10.5mと浅い、海底に峰のあるI型湾において、第1及び第2モードは、静水深が20mで一樣であるI型湾より低い波数で現れ、 $kl = 5.0$ で別のピークが顕著に現れる。他方、湾中央の静水深が29.5mと深い、海底に谷のあるI型湾においては、第1及び第2モードが、この一樣静水深のI型湾より高い波数で現れる。

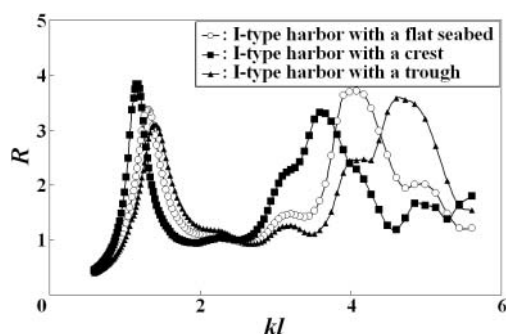


図-4 海底に峰や谷のあるI型湾の湾奥における波高増幅率

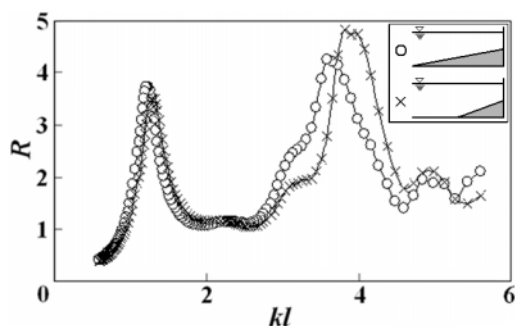


図-5 湾奥が浅いI型湾の湾奥における波高増幅率

また、この水平床を有するI型湾と比較して、湾奥における波高増幅率 R は、第1モードでは、海底に峰のあるI型湾が高く、海底に谷のあるI型湾が低いが、第2モードでは、両者の湾とも低くなっている。

「(g) 湾奥が浅いI型湾」では、一様勾配斜面の位置が湾中央～湾口の範囲に限られたI型湾の方が、一様勾配斜面が湾全域にわたるI型湾よりも、第2モードの湾奥における波高増幅率 R が高い。

6. 静水深が湾幅方向に変化する湾の応答特性

「(h) 海底勾配が湾幅方向に一様であるI型湾」の湾奥の左右の側壁における波高増幅率 R の計算結果を図-6に示す。両者の R とも、第1及び第2モードが現れる kl の値は、静水深が20mで一様であるI型湾とほぼ一致する。しかしながら、湾奥における第2モードの R は、静水深が浅い側で、水平床を有するI型湾より高い。

7. 結論

非線形浅水モデルを適用した数値解析を行ない、I型湾、L型湾、三角形湾、狭窄部を有する湾及びC型湾の、規則波に対する振動応答特性を調べた。

L型湾の屈曲位置が湾口に近いほど、第2モードの湾奥における波高増幅率が高くなる。C型湾のように湾口が複数存在する湾では、波高増幅率が、各湾口から入射する波の位相差に依存する。また、湾口と湾奥の静水深がそれぞれ等しいI型湾では、一様勾配斜面が湾中央～湾口にある場合の方が、一様勾配斜面が湾全域にわたる場合よりも、第2モードの湾奥における波高増幅率が高くなる。海底勾配が湾幅方向に一様であるI型湾の、湾奥における第2モードの波高増幅率は、水深が浅い側の側壁付近で、水平床を有する平均静水深の等しいI型湾

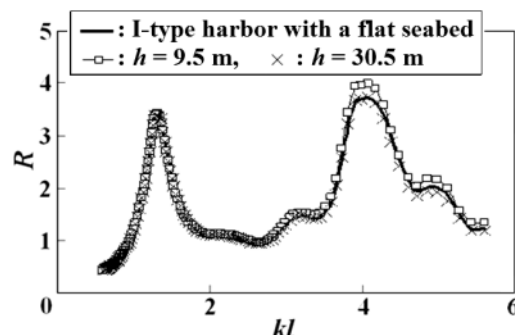


図-6 海底勾配が湾幅方向に一様であるI型湾の湾奥の左右の側壁における波高増幅率

より高くなる。

今後、こうした様々な湾水振動の発生機構に関して、Coriolisの効果も含めて、より詳細な検討を進めたい。

参考文献

- 柿沼太郎・浅野敏之・井上太介・山城 徹・安田健二 (2009) : 上甕島浦内湾における2009年2月潮位副振動被害調査, 海岸工学論文集, 第56巻, pp. 1391-1395.
- 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.
- 酒井哲郎・山本方人 (1976) : 水深および湾幅がともに減少する湾における長波の湾水振動, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 411-415.
- 白橋朋大・柿沼太郎・浅野敏之・佐藤道郎 (2008) : 甕島の分岐した湾で発生する長周期水位変動の数値解析, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 216-220.
- 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.
- Hwang, L-S. and E. O. Tuck (1970): On the oscillations of harbours of arbitrary shape. J. Fluid Mech., Vol. 42, pp. 447-464.