

潮位副振動の内湾での共鳴過程に関する数値解析

清水宗大・田中健路

広島工業大学環境学部地球環境学科

1. はじめに

潮位副振動とは、周期数分～2時間程度の潮汐周期よりも短い海面昇降である。潮位副振動の発生原因はさまざまである。地震津波も上述の周期帯と重なるが、地震津波と潮位副振動は区別する場合が多い。地震津波以外の要因として、海底地形などに起因する内部波によるもの、大気側から海面に加わる力の作用によるものなどが挙げられる。各地の港湾において、周期数分～1時間程度、全振幅数 cm 程度の微小な潮位副振動が観測され続けているが、ある気象条件や海底地形条件が重なると、全振幅 1.0 m 以上に達する顕著な副振動として観測される場合がある (Hibiya and Kajiura, 1982; 斎田・浅野 2011)。外洋では数 cm 程度の振幅の波が、数段階の共鳴効果を経て振幅が増大し、最終的には、湾内での共鳴効果により、大きな海面昇降が発生する。

潮位副振動の増幅過程に関して、従来の研究では、潮汐位相との関連性に着目した研究例は非常に少ない。その中で、山口ら(2014)は鹿児島県枕崎港で発生した潮位副振動について、下げ潮時の時間帯に副振動の全振幅がよりなる傾向にあることを指摘した。しかしながら、湾内の潮汐に伴う副振動の時間規模に対応する固有振動周期の変化などについて、数値実験によって考察を行った研究例はほとんど皆無である。

そこで、本研究では、単純な形状の湾を設定し、湾外から潮汐と副振動を与える海洋長波（以降、後者を単に副振動波と呼ぶこととする）を入射させ、副振動波の第1波の入射のタイミングと満潮・干潮・下げ5分などの潮汐位相との関係により、潮位副振動の増幅がどの程度となるかを明らかにすることを目的とし、数値計算を行った。

2. 計算概要

本研究では、水平2次元の非線形長波方程式を基礎方程式とした数値モデルを用いた。水平2方向(x,y)の層平均流速(U, V)、平均水深 H、基準水面に対する水面の変位（以降、水位と呼ぶ）ηとして、流速と水位の時間変化を求めるための方程式は、以下の通りに表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(H + \eta)U] + \frac{\partial}{\partial y}[(H + \eta)V] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} = fV - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \frac{C_d U \sqrt{U^2 + V^2}}{H + \eta} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial V^2}{\partial y} = -fU - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} + A_H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \frac{C_d V \sqrt{U^2 + V^2}}{H + \eta} \quad (3)$$

ただし、fはコリオリパラメータ、gは重力加速度、ρは海水密度、D=H+h、Paは海面気圧、AHは渦拡散係数、Cdは摩擦係数である。式(1)は質量保存則(連続の式)で、式(2),(3)がそれぞれ x, y 方向の運動方程式である。

図-1 に本研究の計算領域の概要を示す。湾の外側に岸沖方向 20km、海岸線方向 4km の入射波の伝

播領域を与え、水深 100m の外海から沿岸の浅海域へと進行し、水深 10m の湾内で副振動が増幅する過程を捉えた。格子点間隔は 50m とし、計算時間間隔は 0.3 秒とした。計算領域の沖側の境界において、岸沖方向の流速成分を以下の式で与えた。

$$u = \sqrt{\frac{g}{H}} \times \left\{ a_0 \sin\left(2\pi \times \frac{t}{T}\right) + a_1 \sin\left(2\pi \times \frac{(t - t_0)}{T_{sub}}\right) \right\} \quad (4)$$

簡単化のため、潮汐の周期 T は 12 時間とした。式(4)に示されている副振動波の開始時刻 t_0 、および周期 T_{sub} を解析対象となる湾の固有振動周期を踏まえて様々な与えて計算を行った。式(4)の振幅 a_0 は、湾内での潮汐振幅が 1.0 m (全振幅 2.0 m) となるように与え、副振動波の振幅 a_1 は a_0 の 0.10 倍の大きさ(全振幅 0.2m 相当)とした。なお、副振動波の数は 10 波とした。

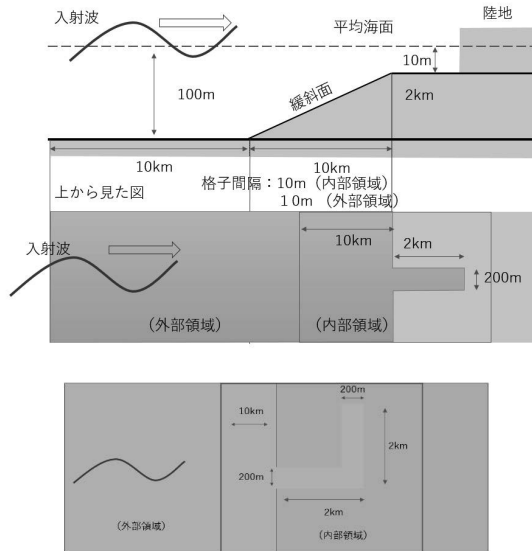


図-1 本研究の計算領域と湾の形状

計算開始から 2 潮汐分の 24 時間後までは潮汐のみの計算を行い、24 時間後から 36 時間後までの 3 潮汐目のサイクルの中で、副振動波の入射開始時刻を 30 分ずつずらして 24 パターンの計算を行い、4 潮汐、48 時間後までの計算を行った。湾の形状は、図-1 に示す、湾軸距離 2,000m、幅 200m の矩形湾および、L 字型湾の 2 通りを行った。いずれも湾内の平均水深を 10m で一定とした。平均水深条件下でのそれぞれの固有振動周期は 892 秒、1610 秒である。外側から入射する副振動波の周期の条件を矩形湾に対しては 600 秒～1200 秒の間で 10 秒ずつ周期を変化させて 61 パターン、L 字型湾に対しては 1500～1800 秒の 31 パターンを計算した。計算の実行回数は潮汐位相条件と周期条件を乗じたものとなり、矩形湾に対しては 1464 回、L 字型湾に対しては 744 回行った。

湾軸上の 100m 毎に時系列出力点を設け、各計算ステップ終了後の水位、流速などの物理量をテキストファイルに出力した。潮汐のみを与えた場合、副振動波のみを与えた場合もそれぞれ計算し、潮汐と副振動波の双方を与えた場合の湾内での副振動の増幅度を解析した。波の抽出はゼロアップクロス法を用いた。

3. 計算結果・考察

計算結果の例として、L 字型湾に対して周期 1640 秒の副振動波を 10 波与えたときの湾最奥部での

水位の変化を図-2に示す。同じ振幅、周期の副振動波を与えた場合に、第1波が上げ潮の時には、第4~5波目が最も振幅が大きくなり、その後、潮位の低下とともに減衰しているが、下げ潮7分位の時間帯に第1波が入射すると、全振幅1.0m以上を超える大きな副振動が6時間前後持続する。このことから、外から入射する副振動の周期、振幅が同じであっても、潮汐との関係により、短時間の増幅で止まるか、長時間振幅が大きい状態が持続するかが分かれてくることが明らかである。

図-3は矩形湾、L字型湾での副振動の最大全振幅、図-4に潮汐を無視したときの副振動と比べたときの最大全振幅の増幅率をそれぞれ示している。潮汐により海水面が上昇する上げ潮から満潮時では、固有振動周期よりも短い周期の副振動が入射すると湾内での振幅の増大が強まり、固有振動周期付近およびそれよりも長い周期の副振動は湾内で弱まる様子が現れている。また、下げ潮から干潮、にかけて副振動波が入射した場合は、長周期側の副振動波が入射した時に副振動がさらに強まる傾向

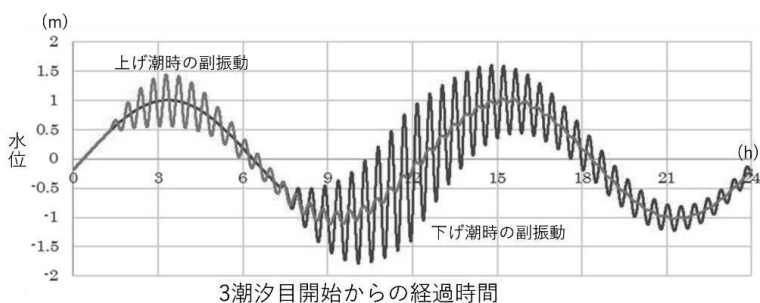


図-2 L字湾における周期 1640 秒の副振動波を与えた場合の湾最奥部での水位の変化

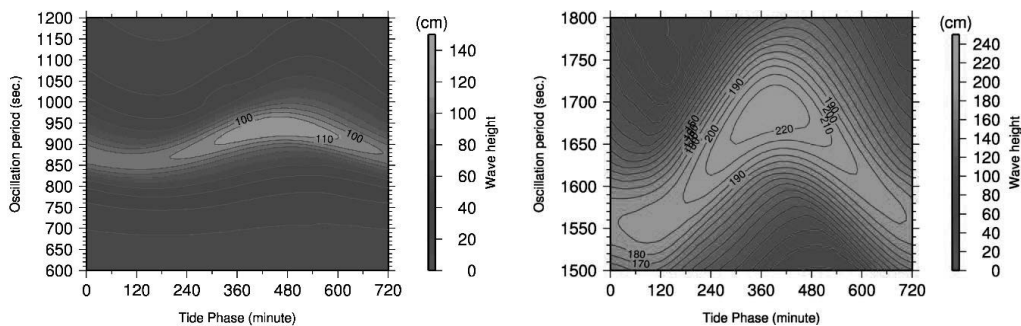


図-3 副振動の最大全振幅と副振動波の周期と潮汐との関係。左側は矩形湾、右側はL字型湾。

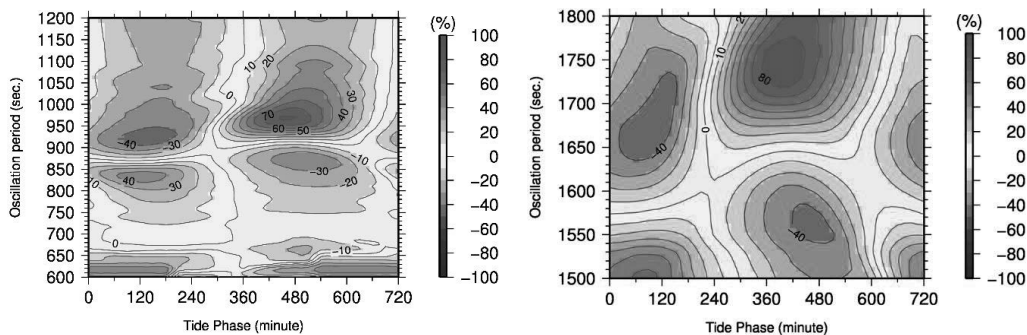


図-4 図-3の結果を潮汐位相による副振動の増幅・抑制率として表したものの。

が見られる。上げ潮時の増幅効果と比べると、下げ潮時の増幅効果が大きく、潮汐による効果は最大で1.8倍となる。図-3の各潮汐位相において副振動が極大となる周期付近では、入射波数と同じ第10波目に全振幅が最大となり、第1波目から10波目まで全振幅が単調増加にある一方、その周期帯から外れると、入射波の途中でうなりを伴いながら振幅が減少していく。

最大全振幅を記録した各計算での副振動について、入射副振動波に対する周期の伸縮の関係をまとめたものを図-5に示す。一般的には、固有振動周期よりも短周期側で湾内の振動周期の方が数10秒程度伸びる傾向にあるが、満潮時からの下げ潮時に入射した場合に、固有振動周期よりも長い周期で湾内での副振動の振幅がのびる傾向が顕著であり、潮汐サイクルによって副振動の増幅や伸縮が非対称な性質を持っていることを示唆している。

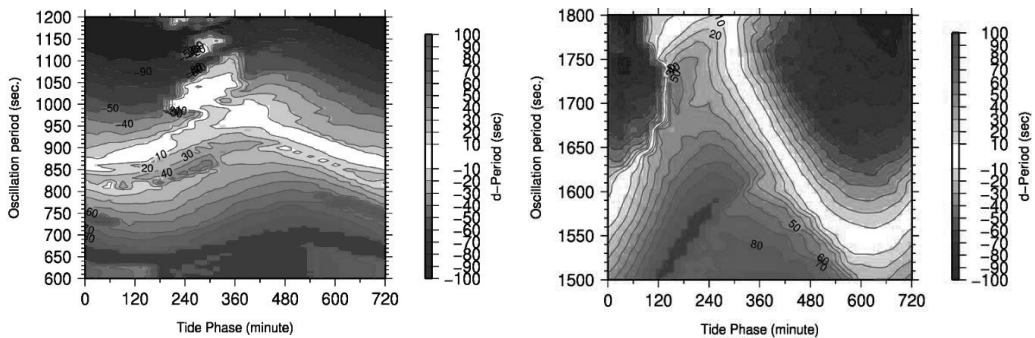


図-5 入射波の周期に対する内湾での最大波の周期の伸縮度。左側：矩形湾 右側：L字型湾

4. おわりに

これまで、潮位副振動の内湾での増幅過程について、潮汐による湾内の水位変化の影響をあまり考慮されて来なかった(斎田・浅野, 2011 など)が、本研究による数値解析を通じて、潮汐の関与の重要性が示された。潮汐規模の海水位の変化の効果は、上げ潮時・満潮時の条件と下げ潮時・干潮時の条件とでは非対称的で、最大全振幅に関しては、平均水面以下の下げ潮時に副振動波が入射すると湾内での増幅効果が最大となる。周期については、満潮からの下げ潮時で最大波の周期の伸びが顕著である。

今後は、より複雑な湾形状に関する解析や3次元計算による流速の鉛直構造の解析など、更に研究を進めていく予定である。

参考文献

Hibiya, T., Kajiura, K (1982) Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 38(3), 172-182.

斎田倫範, 浅野敏之 (2011) 東シナ海上の気象擾乱に起因する浦内湾における副振動の発生特性に関する数値解析, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)* Vol. 67, No. 2, I_171-I_175

山口龍太, 古賀貴之, 田中健路, 山田文彦 (2014) 九州西岸域における副振動の増幅要因に関する一考察 *土木学会論文集 B2 (海岸工学)* 70(2), I_131-I_135, 2014