

上甌島浦内湾で観測した副振動の特性について

CHARACTERISTICS OF SECONDARY UNDULATIONS IN URAUCHI BAY OF KAMIKOSHIKI ISLAND

山城徹¹・安田健二²・久保山知明³・城本一義⁴・柿沼太郎⁵・浅野敏之⁶
Toru YAMASHIRO, Kenji YASUDA, Tomoaki KUBOYAMA,
Kazuyoshi JYOMOTO, Taro KAKINUMA and Toshiyuki ASANO

¹博(理) 鹿児島大学大学院 理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目21-40)

²鹿児島大学大学院 博士前期課程 理工学研究科 (同上)

³鹿児島大学 工学部 (同上)

⁴正会員 鹿児島大学大学院 理工学研究科 技術部 (同上)

⁵正会員 博(工) 鹿児島大学大学院 理工学研究科 (同上)

⁶正会員 工博 鹿児島大学大学院 理工学研究科 (同上)

Characteristics of secondary undulations in Urauchi Bay of Kamikoshiki Island were examined using sea level and current velocity data during October 7-21 in 2008. The typical periods of seiches in Urauchi Bay, which branches into two bays, are 24.8-25.5 minutes and 7.2-12.6 minutes. The first mode with the periods of 24.8-25.5 minutes has a nodal point at the mouth of the bay, while the second mode with the periods of 7.2-12.6 minutes has a nodal point at the junction. These observed modes are shown to be similar to the calculated modes by Shirahashi et al. (2008). Moreover, it is found that the second mode as well as the first one is significant to the seiches in Urauchi Bay.

Key Words: *Secondary undulation, seiche, Urauchi Bay, Kamikoshiki Island*

1. はじめに

副振動は、海峡や湾、港湾などで起こる、周期数分から数10分の海水面の振動現象を言い、九州においては冬から春先にかけて大きな副振動がしばしば発生している¹⁾。特に、長崎湾の副振動は別名「あびき」とも呼ばれ、1979年3月31日に発生した「あびき」は長崎検潮所で最大全振幅279cmを記録した^{2),3)}。長崎湾では1988年3月16日にも1979年に次ぐ大きな「あびき」が発生し、このときの「あびき」は最大全振幅217cmを記録した⁴⁾。全振幅が100cmを超えるような大きな副振動は、北九州の下関、南九州の油津、大泊、枕崎、薩南諸島の種子島、西之表、南西諸島の中之島、名瀬、奄美の検潮所においても観測され、九州本土から南西諸島にかけての外海に面した地点は大きな副振動の発生域であることが報告されている¹⁾。また、大きな副振動は広い範囲で同時に発生することも多く、例えば、2004年2月29日～3月1日のときは、九州東岸の細島、油津、大泊、九州西岸の枕崎、阿久根、長崎、佐世保、厳原、薩南諸島の種子島、南西諸島の中之島で、大きな副振動が観測されている¹⁾。

副振動の発生原因としては、前線の通過、高気圧や低気圧の張り出しなどに伴う微気圧振動^{1)~}

^{3),5)}や台風^{1),6)}が指摘されている。微気圧振動による副振動については、例えば、Hibiya and Kajiura⁵⁾が、1979年3月31日に長崎湾で観測された最大全振幅279cmの「あびき」は振幅約3hPaの進行性の気圧波と長周期波の共鳴的カップリング、湾内での浅水増幅、湾水の共鳴作用に関連して発生していたことを数値実験によって示し、これらによる振幅の増幅率を定量的に導いている。台風による副振動については、例えば、志賀ら¹⁾が、2005年9月4日に種子島で観測された最大全振幅146cmの副振動と2004年9月7日に博多湾で観測された最大全振幅89cmの副振動の事例解析を行ない、前者は台風0514号によって生じた長周期波の伝播によって発生した副振動であり、後者は台風0418号による吹き寄せから開放されて発生した副振動であることを推察している。このように、九州本土から南西諸島で発生する副振動の特性や原因については、長崎湾で1979年3月31日に大きな「あびき」が発生して以降、さまざまな湾を対象にして研究がなされている。

浦内湾は甌島列島3島の1つ、上甌島に位置し、南に開く湾口を通して東シナ海につながっている(図-1)。浦内湾では、数分から数10分周期の副振動が頻繁に発生し、冬から春先にかけては副振動の全振幅が1mを超えることもある。2004年3月1日に九州

全域で観測された副振動は浦内湾でも確認されており、この影響によって、上甌島の小島漁港(図-1)では、係留中の漁船5隻が転覆する被害が発生した⁷⁾。また、2009年2月24日～25日にも九州北部から南西諸島の奄美大島までの広い範囲で大きな副振動が発生し、上甌島では付近家屋8棟の床下浸水、小型漁船7隻の転覆、マグロ養殖用イケスの破損などの被害が出ており、このときの副振動の山から谷の高さは遡上の痕跡から3mに達していたことが報告されている^{8),9)}。このように、さまざまな被害をもたらすほどの大きな副振動が発生しているにも関わらず、水位記録がないため、浦内湾の副振動の特性は未だ明らかではない。

宇野木¹⁰⁾は約50検潮所の水位データを整理し、各港湾の副振動の周期を調べると共に、振動周期の頻度分布と地形の関係を検討している。志賀ら¹⁾も、九州から薩南諸島の検潮所で測定された水位の時系列にスペクトル解析を施すことによって、各港湾で発生した副振動の周期を調べている。このように、副振動の周期については、1つの検潮所の水位データを基にして検討できるが、副振動のモードについては、湾の内外で同時に水位を測定する必要があるため、東京湾や有明海のような複数の検潮所が設置されている湾を除くと、観測報告がほとんどない。

浦内湾は2つに分岐する独特な湾形を持つため、比較的単純な矩形湾と比べると、複雑なモードで副振動が発生していると考えられる。白橋ら¹¹⁾は浦内湾で発生する副振動の特性を明らかにするための数値シミュレーションを行ない、湾奥部で腹、湾口部付近で節を持つ振動モードの他に、2つの湾奥部で腹、湾分岐部と湾口部付近で節を持つ、2つに分岐する湾に特有な振動モードも卓越することを示した。ところが、浦内湾の副振動を詳細に観測した例がないため、この結果は未だ検証されていない。本研究では、浦内湾の湾口部から湾奥部で水位と流速の観測を実施し、2つに分岐する湾で発生する副振動の特性を調べると共に、これらの結果を白橋ら¹¹⁾の数値シミュレーションと比較検討した。

2. 観測結果

2008年10月7～21日の15日間、湾口部の測点(St. 1)、湾分岐部の測点(St. 2)、湾奥部の桑之浦側の測点(St. 3)と小島側の測点(St. 4)の4点に水圧センサーを内蔵した超音波流速計(3D-ACM, FSI社製)を設置した。さらに10月8日～21日の14日間、小島漁港の測点(St. 5)に水位計(HOBO-U20 Water level Logger 海水対応型, Onset社製)と水位データを気圧補正するための気圧計(HOBO-U20 Water level Logger 標準型, Onset社製)を設置し、浦内湾での副振動の観測を実施した(図-1)。観測期間中の流

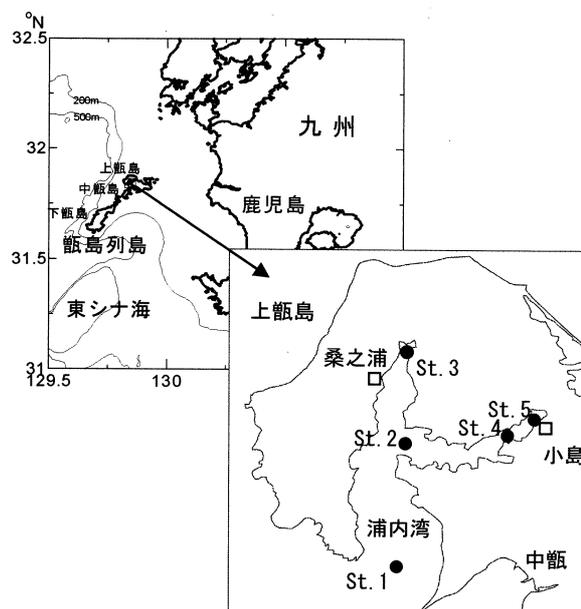


図-1 上甌島浦内湾の形状および測点St. 1～5(●)と漁港(□)の位置

表-1 観測点の位置と測定深度

測点名	位置		水深(m)	測定深度(m)	測定項目
	緯度(°N)	経度(°E)			
St.1	31° 50' 10.5"	129° 50' 26.2"	31	30	流速・水位
St.2	31° 51' 15.3"	129° 50' 39.5"	27	26	流速・水位
St.3	31° 52' 00.3"	129° 50' 32.0"	5	4	流速・水位
St.4	31° 51' 21.6"	129° 51' 33.0"	12	11	流速・水位
St.5	31° 51' 30.0"	129° 51' 49.0"			水位

向・流速と水位の測定は1分間隔で行なっている。各測点の位置および水深、測定深度、測定項目を表-1に示す。本研究で用いたデータはSt. 1～4の流向・流速とSt. 5の水位である。使用した流速計が深海用であった為に、内蔵された水圧センサーの感度が悪く、St. 1～4では有効な水位データを得ることができなかった。

St. 1～4で測定された流向・流速の散布図を図-2に示す。この図から、St. 1の流向[図-2(a)]とSt. 3の流向[図-2(c)]の頻度は南北方向に集中し、St. 2の流向[図-2(b)]とSt. 4の流向[図-2(d)]の頻度は東西方向に集中していることがわかる。そのため、流速変動の主軸方向は、St. 1で真北から時計回りに9.9°方向、St. 2で118.6°方向、St. 3で3.1°方向、St. 4で61.6°方向にあり、どの測点においても湾軸の方向とほぼ一致している。そこで、St. 1～3については、流速変動の主軸方向成分を解析することにした。St. 4で測定された流速については、東成分が負になる場合、北成分の頻度が0～5cm/sと-5～-10cm/sの2つの区間に集中し、このような頻度分布を起す原因を明らかにできなかった。そこで、湾軸方向がおおよそ東西方向であることから、St. 4の場合は、流速の東西成分を解析することにして、流速の東西成分を便宜上、主軸方向成分と呼ぶ。

St. 1~4の流速変動の主軸方向成分とSt. 5の水位変動の代表例として、10月14日の時系列を図-3に示す。但し、St. 1と3では北向きの流れ、St. 2と4では東向きの流れを示す場合の流速を正として図を描いている。St. 5の水位の時系列をみると、半日周期の潮汐成分以外に、数分~数10分周期の副振動をみつけることができる[図-3(e)]。特に10月14日の10時53分と14時09分には、全振幅50cmの副振動が発生している。St. 1~4の流速についても、St. 5の水位と同様に、副振動による数分~数10分周期の流速変動をみつけることができる[図-3(a)~(d)]。特に湾奥部のSt. 3と4では、副振動による流速変動の方が潮流によるものよりも顕著である。図示はしないが、副振動に関連した水位および流速変動は他の観測期間にも頻繁にみられ、浦内湾は副振動の発生しやすい湾であることが示唆されている。

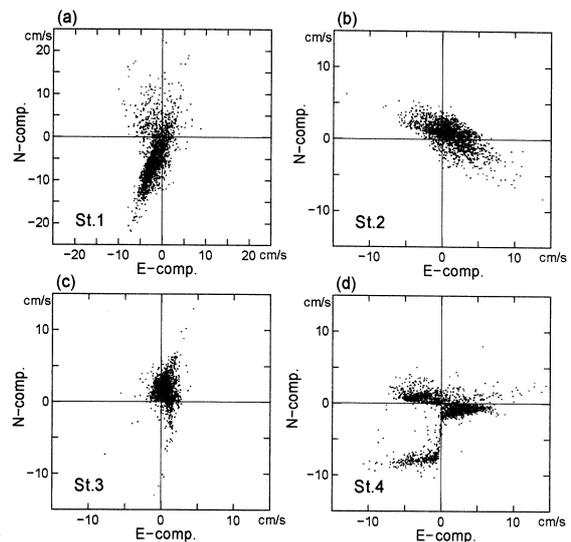


図-2 St. 1~4の流向・流速の散布図

3. 観測された副振動の周期とモード

St. 1~4の流速の主軸方向成分とSt. 5の水位の全期間のデータをスペクトル解析することによって、副振動の周期を調べた。スペクトル解析はFFT法を用い、自由度は32とした。

St. 1~5の周期2時間以下の変動成分のパワースペクトルを図-4に示す。湾口部St. 1の流速については、周期24.9分でエネルギーピークがみられる[図-4(a)]。一方、湾分岐部St. 2、湾奥部St. 3と4の流速については、周期24.8~25.5分の他に、周期7.2~12.6分でも同程度のエネルギーピークをみつけることができる[図-4(b)~(d)]。小島漁港のSt. 5で測定した水位については、St. 4の流速と同じ周期でエネルギーピークがみられる[図-4(e)]。また、図-4から、周期24.8~25.5分のエネルギーレベルは、湾口部から湾奥部のすべての測点で、ほぼ同じであるのに対し、周期7.2~12.6分のエネルギーレベルは、湾口部St. 1よりも湾内のSt. 2~4の方が明らかに高いことがわかる。これらの結果は、浦内湾では周期24.8~25.5分と周期7.2~12.6分の副振動が卓越し、前者が湾全体で起こる副振動で、後者が湾分岐部から湾奥部で顕著に起こる副振動であることを示している。以後、周期24.8~25.5分の副振動を第1モード、周期7.2~12.6分の副振動を第2モードと呼ぶ。

周期24.8~25.5分の第1モードが卓越していた10月9日の流速の時系列と周期7.2~12.6分の第2モードが卓越していた10月14日の流速の時系列をそれぞれ、図-5と図-6に示す。これらの時系列については、移動平均法によって周期60分以上の変動成分が除去されている。図-5から、St. 3では周期24.8分以下の変動成分がみられる時期もあるが[図-5(c)]、全体的には湾口部から湾奥部のすべての測点で周期24.8

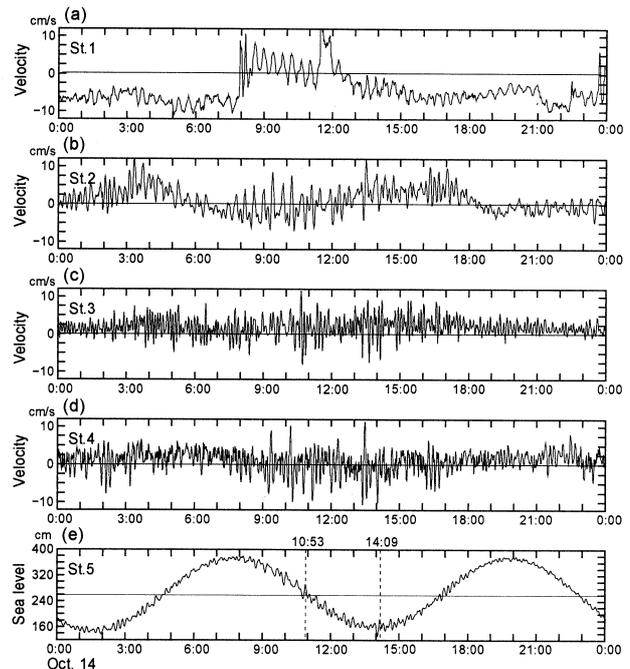


図-3 2008年10月14日のSt. 1~4の流速（主軸方向成分）とSt. 5の水位の時系列

~25.5分の変動成分が卓越していることがわかる。この変動成分の位相を調べると、St. 1と3で北向きの流れのときにSt. 2と4では東向きの流れであり(図-5中の点線部分)、St. 1と3で南向きの流れのときにSt. 2と4で西向きの流れである。すなわち、第1モードは湾全体でほぼ同位相の振動であり、矩形湾で生じる、湾奥で腹、湾口で節を持つ副振動と同じ流速変動を示している。一方、図-6から、周期7.2~12.6分の変動成分は湾分岐部から湾奥部で卓越していることがわかる。この変動成分の位相を調べると、St. 3で北向きの流れのときにSt. 2と4では西向の流れであり(図-6中の点線部分)、St. 3で南向きの流れのときにSt. 2と4では東向きの流れである。すなわち、第2モードは桑之浦側の湾奥部と小島側の湾奥

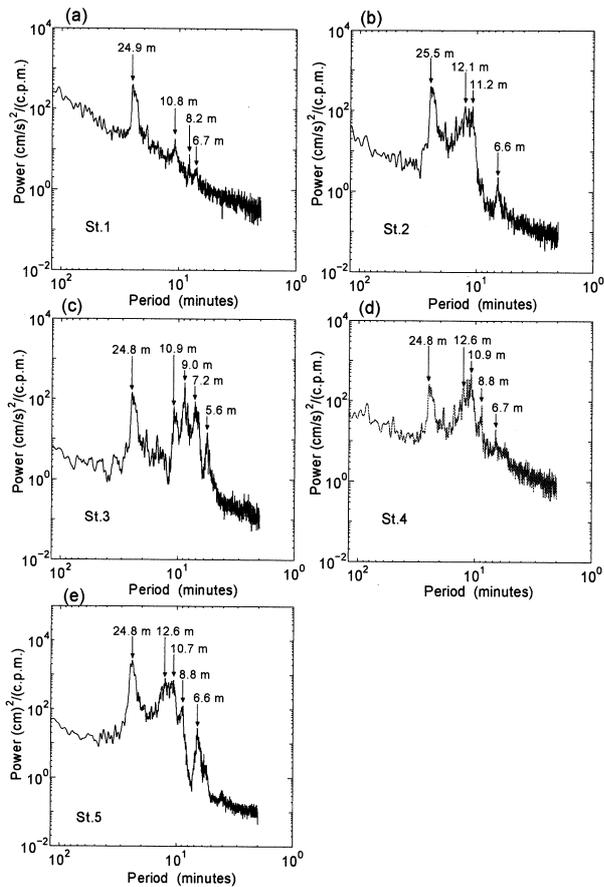


図-4 St. 1~4の流速変動（主軸方向成分）と St. 5の水位変動のスペクトル

部ではほぼ逆位相の振動であり、矩形湖で生じる、両端で腹、中央で節を持つ副振動と同様な流速変動を示している。このように、浦内湾では、湾奥部で腹、湾口部で節を持つ第1モードだけでなく、2つの湾奥部で腹、湾分岐部付近で節を持つ第2モードも卓越している。

4. 観測された副振動の変動特性

図-5と図-6でみられた2つのモードの副振動の振幅は時期によって変化している。このような非定常的な現象の変動特性を調べるには、ある時刻における任意の時間スケールの変動の強度(Waveletスペクトル)を求めることのできるWaveletスペクトル解析が有効である。そこで、移動平均法で求めた周期60分以上の変動成分を元のデータから除いた残差の時系列にWaveletスペクトル解析を施すことにした。St. 5で測定された水位のWaveletスペクトルを図-7に示す。図は、変動の強度(Waveletスペクトル)が相対的に強いところは黒く、弱いところは白くなるように描かれている。およそ8~32分の周期帯で変動の強度が相対的に強く、特に、第1モードの周期(24.8~25.5分)と第2モードの周期(7.2~12.6分)の

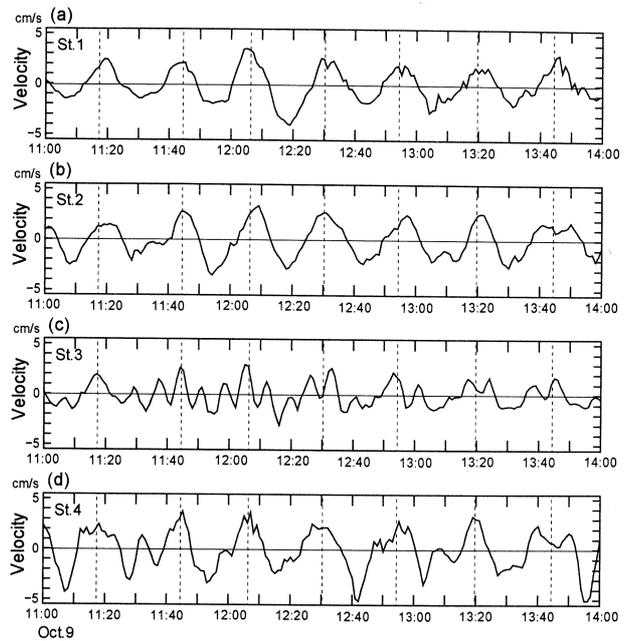


図-5 2008年10月9日11:00~14:00にSt. 1~4で測定された周期60分以下の流速成分の時系列

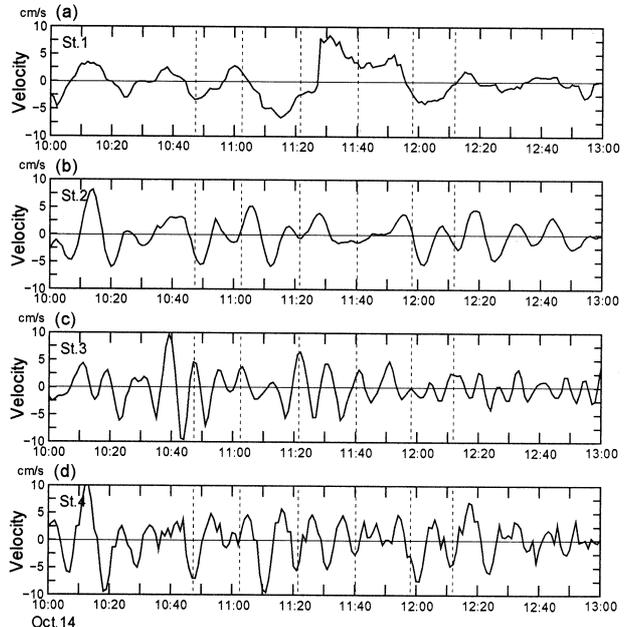


図-6 2008年10月14日10:00~13:00にSt. 1~4で測定された周期60分以下の流速成分の時系列

付近で強度の強い部分(黒色の部分)が頻繁に出現し、10月11~12日、14日、17日では強度の強い状態が半日以上続いていることがわかる。

10月11~12日、14日、17日に発生した副振動に対する第1モードと第2モードの寄与を調べるために、図-7のWaveletスペクトルから、周期17~30分の変動の平均強度と周期7~17分の変動の平均強度を計算し、これらと比較した。10月11~12日、14日、17日のいずれの時期においても、周期7~17分の変動の強度[図-8(a)]が周期17~30分のもの[図-8(b)]よりも強い。すなわち、小島漁港で観測された副振動は、主に第2モードに起因していたと言える。

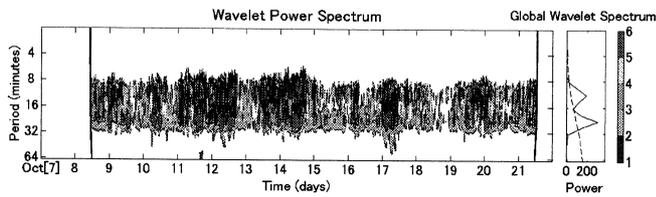


図-7 St. 5の水位のWaveletスペクトル

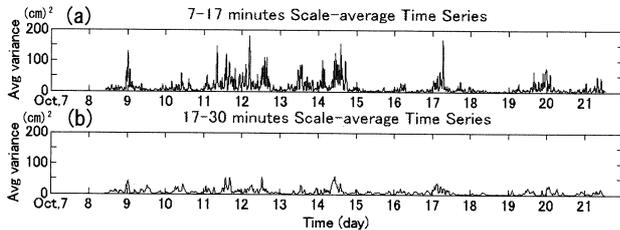


図-8 St. 5における周期7~17分(a)と周期17~30分(b)の水位変動の強度の時系列

湾奥部で第2モードの副振動が卓越する理由を明らかにするために、St. 1~4の流速の主軸方向成分についてWaveletスペクトルを求め、これらのスペクトルから周期17~30分の変動の平均強度と周期7~17分の変動の平均強度を計算した。これらの時系列をそれぞれ、図-9と図-10に示す。但し、図-9の場合は0~30 (cm/s)²、図-10の場合は0~100 (cm/s)²の範囲で描かれている。10月7日の副振動の場合、周期17~30分の変動の強度はSt. 1と2、4でほぼ同じであるが(図-9)、周期7~17分の変動の強度は測点によって異なり、St. 1で最も小さく、St. 2からSt. 4へ向かうに従って増加し、St. 4ではSt. 1の約5倍になっている(図-10)。そのため、St. 1では周期7~17分の強度が周期17~30分よりも小さいが、St. 4では周期7~17分の強度が周期17~30分よりもかなり大きくなっている。10月11~12日、14日、17日についても、周期17~30分の変動の強度はSt. 1と2、4でほぼ同じであるが(図-9)、周期7~17分の変動の強度はSt. 1よりもSt. 2と4で大きい(図-10)。これらの結果から、浦内湾のような形状では、湾水の共鳴作用による副振動の増幅率は第2モードが高く、湾奥部では第2モードが第1モードより卓越したと考える。

5. 検討

白橋ら¹¹⁾は、浦内湾で発生する副振動の特性を明らかにするため、非線形浅水方程式を基にした長周期水位変動の数値解析を行った。そして、外洋から浦内湾に入射する、振幅0.1mの規則波の周期をおよそ5~33.3分の範囲で様々に変化させた場合、周期26分と周期10~11.7分で波高増幅率が大きくなること(図-11)、周期26.7分のときは桑之浦漁港と小島漁港(図-1)の水面変動がほぼ同位相であり、周期

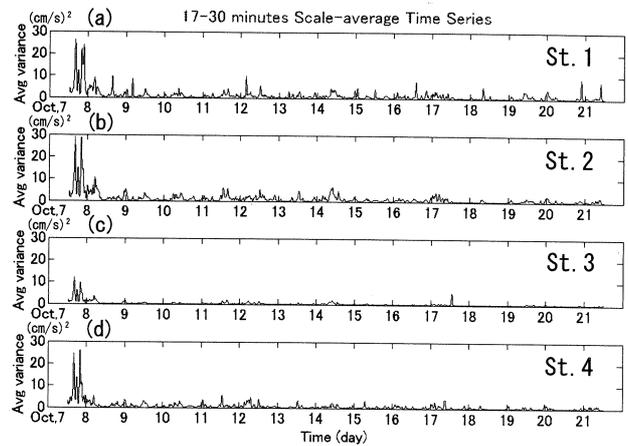


図-9 St. 1~4における周期17~30分の流速変動の強度の時系列

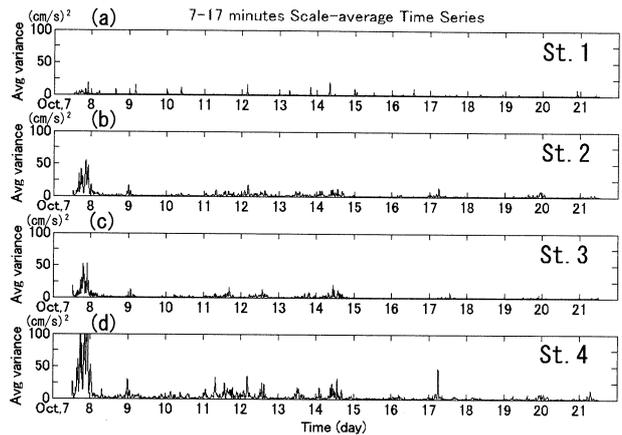


図-10 St. 1~4における周期7~17分の流速変動の強度の時系列

13.3分のときは桑之浦漁港と小島漁港の水面変動がほぼ逆位相であること(図-12)を示し、浦内湾では、湾奥部で腹、湾口部で節を持つ副振動の他に、2つの湾奥部で腹、湾分岐部と湾口部付近で節を持つ、分岐する湾に特有な副振動が発生することを指摘している。

また、第2モードの副振動について、波高の最も増幅する周期が桑之浦漁港では周期10分付近、小島漁港では周期11.7分付近にあり、2つの湾奥で副振動の卓越する周期が若干異なるという興味深い結果を示している(図-11)。そこで、周期7.2~12.6分に注目して、流速のスペクトルを詳細に調べると、桑之浦側の湾奥St. 3では周期7.2~9.0分のパワーレベルが周期10.7~12.6分のものよりも大きいのに対し、小島側の湾奥St. 4では逆に、後者が前者よりも大きく[図4-(c), (d)]、数値シミュレーションと同様な結果が観測によっても示されている。

このように、浦内湾で卓越する副振動の周期とモードについては、観測と数値シミュレーションの結果は良く一致している。ところが、湾水の共鳴作用による副振動の増幅率については、観測と数値シミュレーションで結果が異なり、流速の観測結果か

らは第2モードの増幅率が第1モードよりも大きいものに対し(図-9, 10), 数値シミュレーションの結果からは第1モードの増幅率が第2モードよりも大きいことが示されている(図-11).

6. 結論

水位と流速のデータを用いて, 上甌島浦内湾で発生する副振動の特性を調べた. 浦内湾は2つに分岐する湾形状を持つ. このような湾では, 2つのモードの副振動が卓越することを観測から明らかにした. 1つは湾奥部で腹, 湾口部で節を持ち, 湾全体で振動するモードであり, もう1つは, 2つの湾奥部で腹, 湾分岐部で節を持ち, 湾分岐部から湾奥部で振動するモードである. 湾全体で振動するモードの周期は24.8~25.5分であり, 湾分岐部から湾奥部で振動するモードの周期は7.2~12.6分である. モードの空間特性と周期については, 観測と数値解析の結果が一致し, 白橋ら¹¹⁾のモデルの妥当性を裏付けている.

浦内湾の湾奥部では第2モードの副振動が第1モードよりも卓越し, 第2モードの増幅率の高いことを明らかにした. そして, 浦内湾のように, 2つに分岐する湾で起きる副振動については, 第1モードのみならず第2モードも重要であることを示した.

湾水の共鳴作用による副振動の増幅については, 観測と数値シミュレーションの結果が一致しなかった. そこで, 2009年3月1~15日に図-1のSt. 1~5で水位を再度測定して, 湾内での第1モードと第2モードの副振動の波高増幅率を調べている. また, 浦内湾に入射する長周期波の特性を明らかにするために, 湾内外で水位の測定を実施する予定である. これらの観測結果と比較検討することで, 浦内湾で発生する副振動の解析モデルの精度を向上させ, 2004年, 2009年の大きな副振動の増幅メカニズムを明らかにしていきたい. そして, 大きな副振動を発生させる外力および地形条件を明らかにしていくことは, 特に九州西岸で同様な危険性をもつ港の防災にとって重要であると考えられる.

謝辞: 流速計および水位計の設置と回収にご協力を頂いた薩摩川内市役所産業建設課産業振興グループの中村朝平氏, 同市役所市民福祉課の馬場正弘氏並びに甌島漁協組合上甌支所の皆様に厚く感謝申し上げます.

参考文献

- 1) 志賀達, 市川真人, 楠元健一, 鈴木博樹: 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, 測候時報, 第74号特別号, pp. s139-162, 2007.
- 2) 赤松秀雄: 長崎港のセイシュ(あびき), 気象研究所研究報告, 第33巻, 第2号, pp. 95-115, 1982.
- 3) 小長俊二, 半沢洋一, 富山吉祐, 高浜聡: 長崎湾の“あびき”について, 海と空, 第65巻, 第4号,

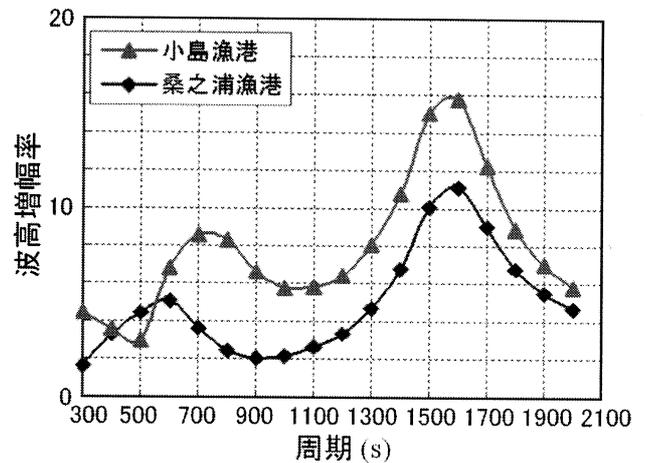


図-11 小島漁港と桑之浦漁港における波高増幅率 [白橋ほか¹¹⁾]

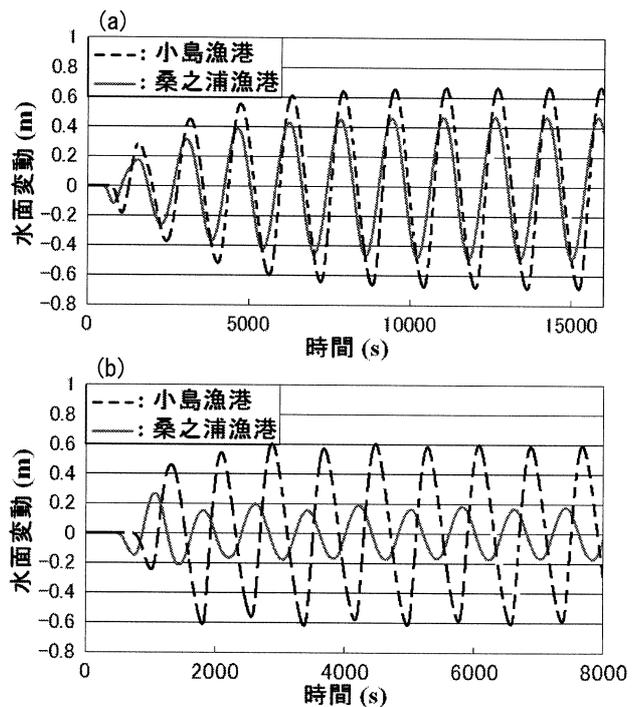


図-12 周期1600秒(a)と周期800秒(b)の小島漁港と桑之浦漁港における水面変動[白橋ほか¹¹⁾]

pp. 203-222, 1990.

- 4) 半沢洋一, 富山吉祐, 高浜聡, 小長俊二: 長崎湾の巨大アビキ, 沿岸海洋研究ノート, 第27巻, 第1号, pp. 31-37, 1989.
- 5) Hibiya, N and Kajiura K.: Origin of the ABIKI phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol.38, pp.172-182, 1982.
- 6) 小西達男: 2004年台風第22号による東京湾の高潮と副振動, 海と空, 第83巻, 第4号, pp. 141-150, 2008.
- 7) 南日本新聞: 2004年3月1日夕刊.
- 8) 南日本新聞: 2009年2月26日朝刊.
- 9) 長崎海洋气象台, 熊本地方气象台, 鹿児島地方气象台: 災害調査報告 - 平成21年(2009年)2月24日からの28日にかけて九州西岸を中心に発生した潮位の副振動に関する現地調査 -, 21p., 2009.
- 10) 宇野木早苗: 沿岸の海洋物理学, 672p., 東海大学出版会, 1993.
- 11) 白橋朋大, 柿沼太郎, 浅野敏之, 佐藤道郎: 甌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, 2008.