2009年3月の上甑島浦内湾における副振動の観測

SECONDARY UNDULATION OBSERVED IN URAUCHI BAY OF KAMIKOSHIKI ISLAND IN MARCH 2009

安田健二[1]・山城徹[2]・城本一義[3]・萩平裕樹[4]
Kenji YASUDA, Toru YAMASHIRO, Kazuyoshi JYOMOTO and Yuki HAGIHIRA

[1]鹿児島大学大学院　博士前期課程　理工学研究科（〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目21-40）
[2]正会員　博(理)　鹿児島大学大学院　理工学研究科（同上）
[3]正会員　鹿児島大学大学院　理工学研究科　技術部（同上）
[4]鹿児島大学工学部（同上）

This paper describes the characteristics of secondary undulation observed in Urauchi Bay of Kamikoshiki Island during March 1-15 in 2009. The observed secondary undulation in Urauchi Bay, which branches into two bays, was composed of the three modes with the periods of 24.5, 12.5 and 10.8 minutes, which we separated and characterized. This investigation shows that the first mode with the period of 24.5 minutes has a nodal point at the mouth of the bay, while the second mode with the period of 12.5 minutes has two nodal points at the junction and mouth of the bay. The third mode of the 10.8-minute period occurs in the interior of the bay and has a nodal point at the junction. Moreover, the secondary undulation is shown to be amplified efficiently according to the migration of atmospheric pressure disturbance.

Key Words : *Secondary undulation, Urauchi Bay, atmospheric pressure disturbance*

1．はじめに

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は副振動と呼ばれ，九州西岸域では冬から春先にかけて大きな副振動が頻繁に発生している[1)]．鹿児島県本土の西方約40kmにある甑島列島の1つ，上甑島浦内湾（**図-1**）でも，冬から春先にかけて全振幅100cmを超える副振動がしばしば観測され，2009年2月24日～25日に起きた副振動では最大全振幅が約300cmを記録した[2),3)]．このような大きな副振動によって，浦内湾およびその周辺では，家屋の床下浸水や係留中の小型漁船の転覆，マグロ養殖用イケスの破損などの被害が出ている[4),5)]．

上甑島浦内湾は2つに分岐する独特な湾形を有しているため（**図-1**），比較的単純な矩形湾と比較すると，副振動は複雑な振動モードを持つ．2008年10月に副振動の予備観測を実施し，浦内湾では，湾口部付近で節，2つの湾奥部で腹を持ち，湾全体で振動するモードと，2つの湾奥で腹，湾分岐部付近で節を持ち，湾奥部のみで振動するモードが存在することをみつけている[6)]．本論文では，大きな副振動の発生が予想される2009年3月に浦内湾で副振動の本観測を実施し，同湾で発生する副振動のモード特性の詳細を明らかにしている．また，大きな副振動と九州西方海域の気圧変動との関連を検討している．

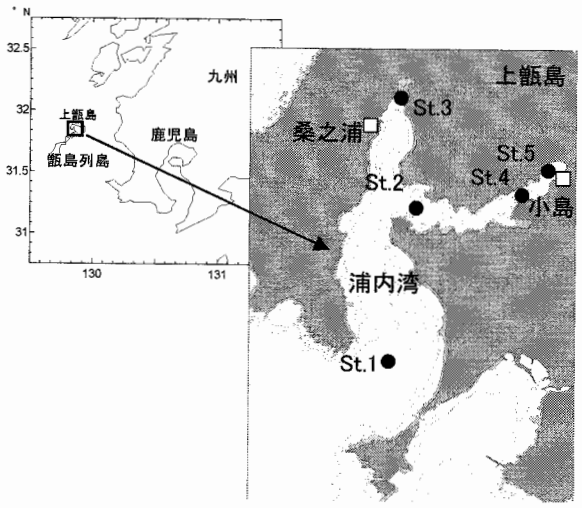

図-1 上甑島浦内湾の形状および測点St.1～5(●)と漁港(□)の位置

2．観測

2009年3月1日～15日に，湾口部の測点(St.1)と湾

分岐部の測点(St.2)，桑之浦側の湾奥部の測点(St.3)，小島側の湾奥部の測点(St.4)の4点に超音波流速計と水位計を設置し，さらに小島漁港の測点(St.5)に水位計と気圧計を設置し，副振動の観測を行った(**図-1**)．これらの測定は1分間隔で行っている．各測点の位置，水深，測定深度および測定項目の詳細を**表-1**に示す．St.1～5の水位データについては，St.5の気圧データを用いて，1013hPaを基準とした気圧補正（-1cm/hPa）を施した．その後，気圧補正したデータから61分の単純移動平均によって周期61分以下の変動成分を除去したものを作成し，気圧補正した元の資料から61分移動平均値を差し引いた残差を求め，これを解析した．流速データについては，湾軸に沿う流速成分，すなわちSt.1とSt.3では流速の北成分，St.2とSt.4では流速の東成分を研究の対象とし，水位と同様な手順で周期61分以下の変動成分の時系列を作成し，これを解析した．

St.1～5の中で最も大きな副振動が観測された地点はSt.5であった．そこで，副振動の例として，3月2日12:00～3日12:00のSt.5で測定された周期61分以下の水位変動を**図-2**に示す．この図から，水位がおよそ10分，25分の周期で活発に変動し，全振幅20cm以上の振動が3月2日12:30～3日10:00の約22時間にわたって起きていたことがわかる．特に，3月2日19:43には，およそ10分の周期で全振幅115cmの大きな振動が発生していた．

3．観測された副振動の特性

(1) 発生していた副振動の周期

2009年3月1日12:00～12日21:03の水位データをスペクトル解析することによって，観測された副振動の周期を調べた．スペクトル解析は高速フーリエ変換法(FFT法)を用い，自由度は32とした．

St.1～5における水位変動のパワースペクトルを**図-3**に示す．観測期間中で最も大きな副振動が発生していた小島側湾奥部St.5の水位変動に注目すると，周期10～25分でエネルギーレベルが高く，特に周期24.5分と12.5分，10.8分でエネルギーピークがみられ[**図-3(e)**]，これらの周期の副振動が卓越していたことがわかる．図示はしないが，これらの卓越周期はSt.5の近くにあるSt.4で測定された流速のスペクトル結果でも確認されている．

他の測点の水位データに対して，周期24.5分と12.5分，10.8分のエネルギーレベルを調べると，周期24.5分については，St.5と同様にSt.1～4でもエネルギーピークがみられる[**図-3(a)～(d)**]．一方，周期12.5分については，St.1とSt.4でエネルギーピークがみられ[**図-3(a)，(d)**]，周期10.8分については，St.3とSt.4でエネルギーピークがみられる[**図-3(c)，(d)**]．これらの結果から，周期24.5分の副振動は湾全体で振動するモード，周期12.5分の副振動は湾口から湾分岐部を通って小島側の湾奥部で振動するモード，周期10.8分の副振動は湾奥部で振動するモードであることがわかる．

表-1　観測点の位置と測定深度

測点名	位置		水深(m)	測定水深(m)		測定項目
	緯度(°N)	経度(°E)		流速	水位	
St.1	31°50'10.1"	129°50'24.6"	32	31	23	流速・水位
St.2	31°51'15.0"	129°50'41.1"	29	28	19	流速・水位
St.3	31°52'2.8"	129°50'32.4"	5	4	4	流速・水位
St.4	31°51'21.0"	129°51'33.6"	12	11	11	流速・水位
St.5	31°51'31.3"	129°51'46.0"	5		4	水位・気圧

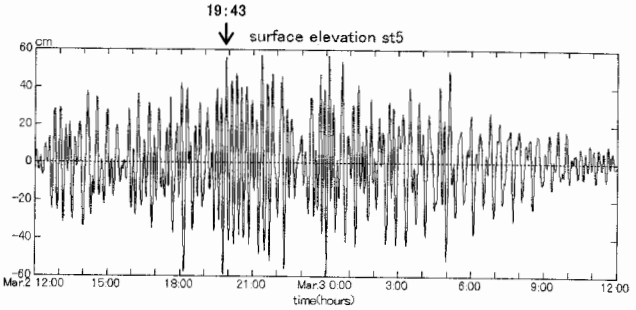

図-2　3月2日12:00～3日12:00のSt.5の周期61分以下の水位の時系列

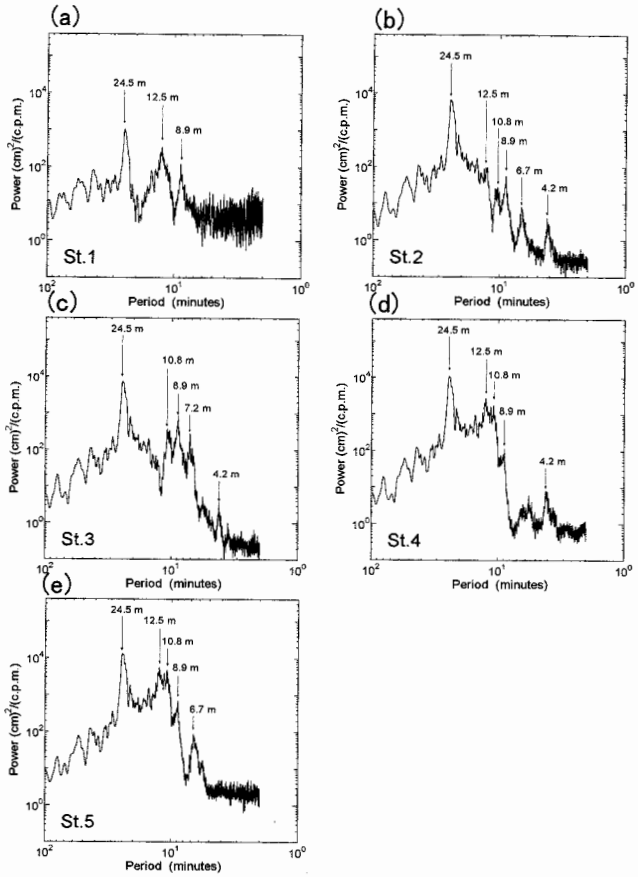

図-3　St.1～5の水位変動のスペクトル

(2) 周期24.5分，12.5分，10.8分をもつ副振動の空間特性

時系列データに対してWaveletスペクトル解析を行うと，ある時刻における任意の時間スケールの変動強度を求めることができる．St.5の水位データに

対して，Waveletスペクトル解析を行い，ここでは3月2日12:00～3日12:00の結果を**図-4**に示す．3月3日2:00～5:00（**図-4**中の期間A）では周期24.5分，3月2日19:40～22:00（**図-4**中の期間B）では周期12.5分，3月2日23:30～3日0:30(**図-4**中の期間C)では周期10.8分の副振動が卓越していたことがわかる．そこで，周期24.5分の副振動については期間Aの17～32分の周期帯のスペクトル，周期12.5分の副振動については期間Bの6～17分の周期帯のスペクトル，周期10.8分の副振動については期間Cの6～17分の周期帯のスペクトルを抽出し，それらの周期帯のみで信号を再合成し，振動の振幅と位相が測点間でどのような違いがあるかを調べることにした．

周期24.5分の副振動は全測点（St.1～5）でみられ，振動の振幅は湾口部から湾奥部に向かうに従って大きくなり，振動の位相は全測点で同じである[**図-5(a)**]．これらの結果は，**図-6(a)**に示すように，周期24.5分の副振動が桑之浦側および小島側両方の湾奥部で腹，湾口の沖合で節を持ち，湾全体で振動するモードであることを示している．さらに，湾口沖合の節の位置を調べるために，浦内湾を**図-7**に示す40の短冊に分割し，デファントの方法[7]を用いて，節の位置を算定することを試みた．小島側湾奥部の地点1[**図-6(a)**中の白丸，**図-8**]に振動の腹があるとして計算を行うと，地点40までに振動の節をみつけることができず，地点40から線形外挿した結果，地点40のさらに沖合約600mのところに節があると推測される[**図-6(a)**中の黒丸，**図-8**]．

周期12.5分の副振動は桑之浦側湾奥部St.3以外の測点でみられ，分岐部St.2の振動の振幅は湾口部St.1や湾奥部St.4，St.5よりも小さく，St.1の振動の位相はSt.2，St.4，St.5と逆である[**図5-(b)**]．これらの結果は，**図-6(b)**に示すように，周期12.5分の副振動が小島側湾奥部と湾口部付近の2箇所で腹，分岐部付近と湾口沖合の２箇所で節を持ち，湾口から湾分岐部を通って小島側の湾奥で振動するモードであることを示している．デファントの方法[7]を用いて，この振動の腹と節の位置を算定すると，小島側湾奥部の地点1と地点26の位置[**図-6(b)**中の白丸，**図-8**]に腹，湾分岐部の地点16と線形外挿から求めた地点40の沖合約2500mの位置に節があると考えられる[**図-6(b)**中の黒丸，**図-8**]．

周期10.8分の副振動の振幅は湾奥部St.3，St.4，St.5で大きく，St.3の振動の位相はSt.2と同じで，St.4，St.5とは逆である．これらの結果は，周期10.8分の副振動が，**図6-(c)**のように，桑之浦側と小島側両方の湾奥部で腹，湾分岐部St.2より少し小島側の位置で節を持ち，分岐する湾に特有な湾奥部だけで振動するモードであると考えられる．以後は便宜上，周期24.5分の副振動を第1モード，周期12.5分の副振動を第2モード，周期10.8分の副振動を第3モードと呼ぶ．

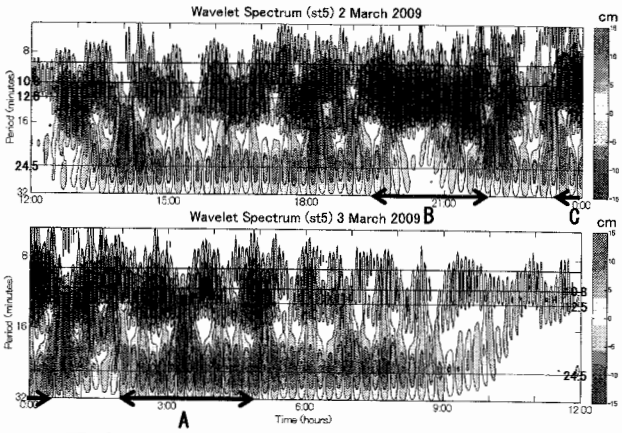

図-4　St.5の水位変動のWaveletスペクトル

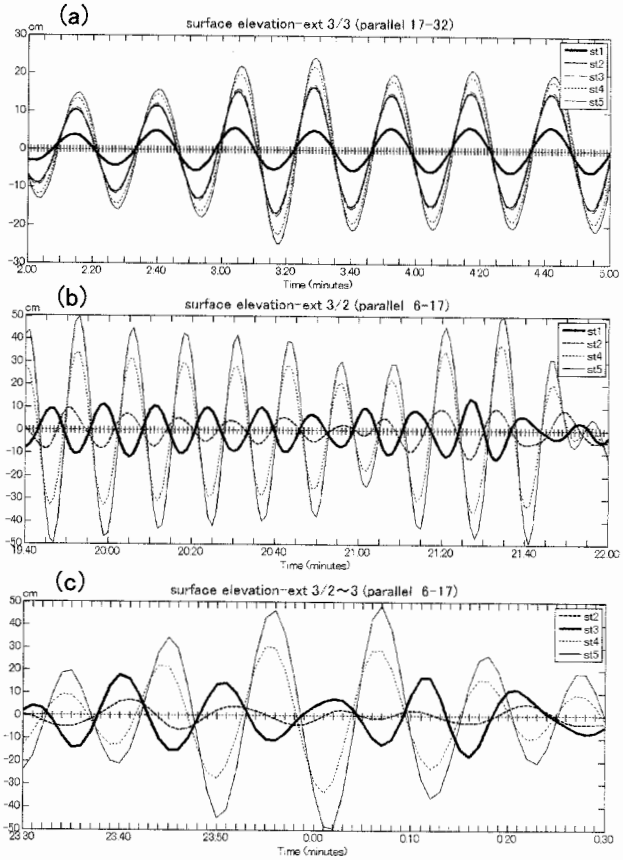

図-5　Waveletスペクトルから抽出した，各測点の周期24.5分(a)，12.5分(b)，10.8分(c)の水位変動

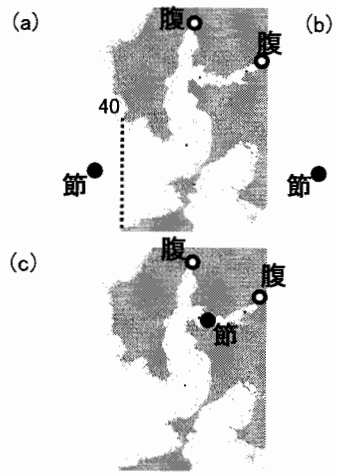

図-6　周期24.5分(a)，12.5分(b)，10.8分(c)の副振動のモードおよび各モードの腹と節の位置

(3) 観測された副振動への各振動モードの寄与

観測された大きな副振動がどのモードと関連して発生していたかを調べるために，St.5で測定された水位変動に対してWaveletスペクトルを求め，17～32分の周期帯で抽出したスペクトルから再合成した信号の振幅と6～17分の周期帯で抽出したスペクトルから再合成した信号の振幅を比較した．この場合，周期17～32分の信号の振幅は第1モード，周期6～17分の信号の振幅は第2モードと第3モードの合成とみなせる．第2モードと第3モードは周期が近いため，これらを完全に分離することはできなかった．

3月2日18:00～24:00の間で観測された周期6～17分と周期17～32分の副振動を**図-9**に示す．3月2日19:43の副振動の全振幅は115cmであり，観測期間中最大であった．このときには，第1モードの振幅が15.0cm，第2モードと第3モードを合成した振幅が100.0cmであり（**表-2**），全振幅の約87%が第2モードと第3モードの合成で占められている．別の時期に起きた全振幅90cm以上の副振動についても，第2モードと第3モードを合成した振幅の方が第1モードのものよりも大きい（**表-2**）．すなわち，大きな副振動は主に第2モードあるいは第3モードによって発生していると言える．

4．副振動の発生と気圧変動の関連

冬から春先にかけて発生する大きな副振動は，前線の通過，高気圧や低気圧の東シナ海への張り出しなどに伴う気圧の急激な変化が起因していると指摘されている[1),8)～10)]．例えば，Hibiya and Kajiura[10)]は，1979年3月31日に長崎検潮所で観測された最大全振幅278cmの副振動が東シナ海をほぼ東向きに約110km/hで進行した振幅約3hPaの気圧波によって発生していたことを数値実験で示した．また，長周期波の増幅過程については，東シナ海大陸棚上における気圧波との共鳴的カップリングによる約3倍の増幅，長崎湾内での浅水増幅および反射干渉による約5倍の増幅，長崎湾と五島灘の各振動系の共鳴による約3倍の増幅など，数段階の増幅作用が関与していたことも示している．そこで，どのような気圧の急変化が大きな副振動の発生時期（**表-2**）に起きていたのか，また，気圧の急変化がどのような気象状況の下で発生していたかを調べることにした．ここでは，3月2日と3月6日に観測された副振動と気圧変化の関連を記述する．3月2日に関しては，副振動が浦内湾だけでなく九州の広い範囲で発生していたときの事例であり，3月6日に関しては，副振動が南九州に限って発生していたときの事例である．

(1) 3月2日の副振動の場合

3月2日の副振動は九州の広範囲で発生していたので，浦内湾St.5で観測された副振動と気圧の関連だけでなく，長崎検潮所で観測された副振動と五島列島福江の気圧の関連についても調べることにした．

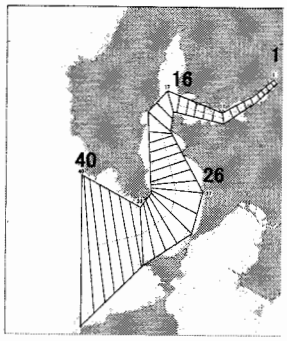

図-7 計算領域

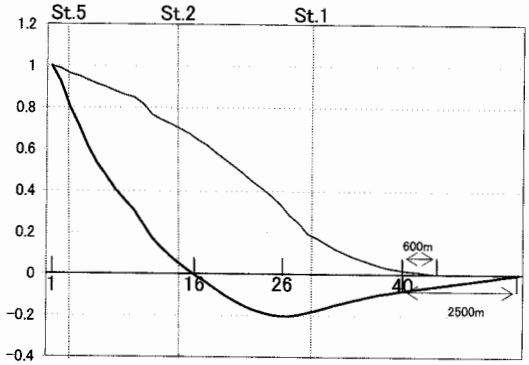

図-8 第1モード（細線）と第2モード（太線）の副振動の相対振幅の水平分布

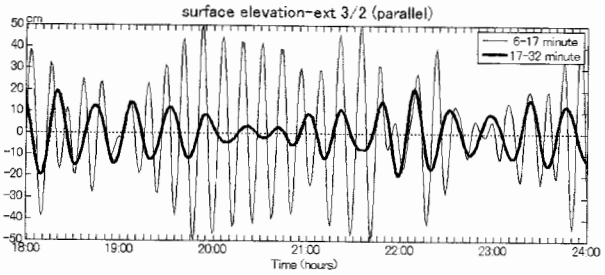

図-9 Waveletスペクトルから抽出した第1モードの振動（太線）および第2モードと第3モードを合成した振動（細線）の時系列

表-2 全振幅90cm以上を観測したときの第１モードの全振幅および第2モードと第3モードを合成した全振幅

時期		観測された全振幅	第1モードの全振幅	第2モードと第3モードを合成した全振幅
月 日	時 刻	cm	cm	cm
3月2日	19時43分	115.0	15.0	100.0
3月4日	4時21分	91.1	43.2	47.9
3月6日	4時00分	91.6	23.3	68.3
3月14日	0時49分	99.9	25.2	74.7

3月2日の浦内湾と長崎湾の周期61分以下の水位変動を浦内湾と五島列島福江で観測された気圧変化と比較して，**図-10**に示す．最も興味深いことは，浦内湾St.5では以前から全振幅50cm程度の副振動が発生していたにも関わらず，19:49～20:09に約1.7hPaの気圧の急上昇が起きたときに，副振動の全振幅が115cmまで大きくなったことである[**図-10(a)**，**(b)**]．図示はしないが，他の測点の水位についても，St.5

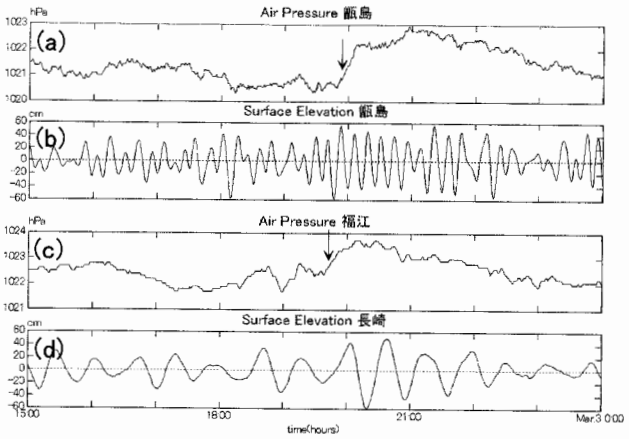

図-10 3月2日15:00～3月3日0:00における甑島の気圧変動(a)と副振動(b)および長崎の気圧変動(c)と副振動(d)

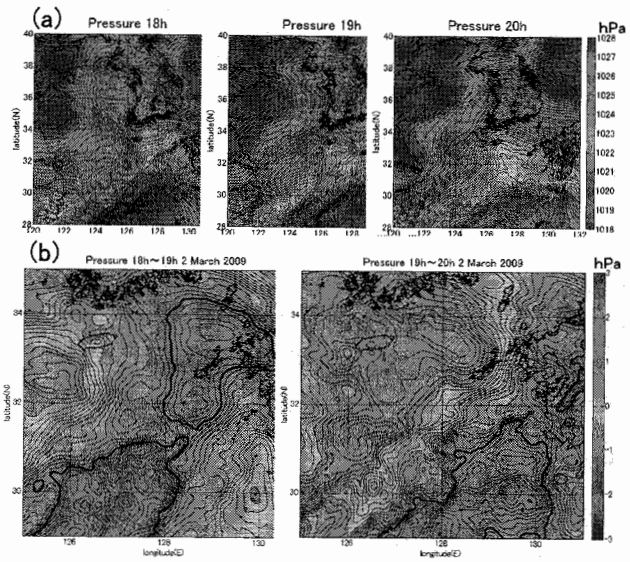

図-11 GPV予報値による3月2日18:00～20:00の地上気圧(a)とその気圧の時間変化(b)

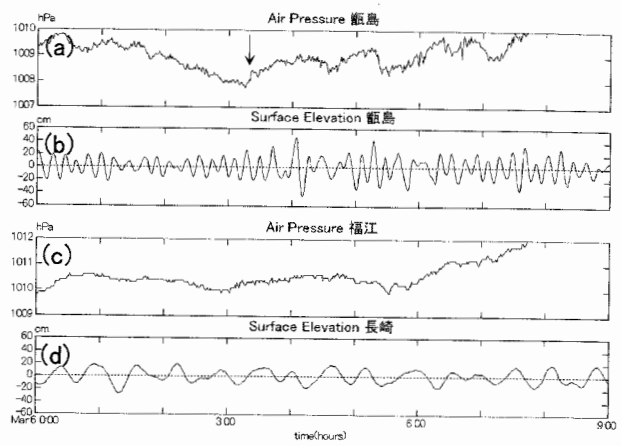

図-12 3月6日0:00～9:00における甑島の気圧変動(a)と副振動(b)および長崎の気圧変動(c)と副振動(d)

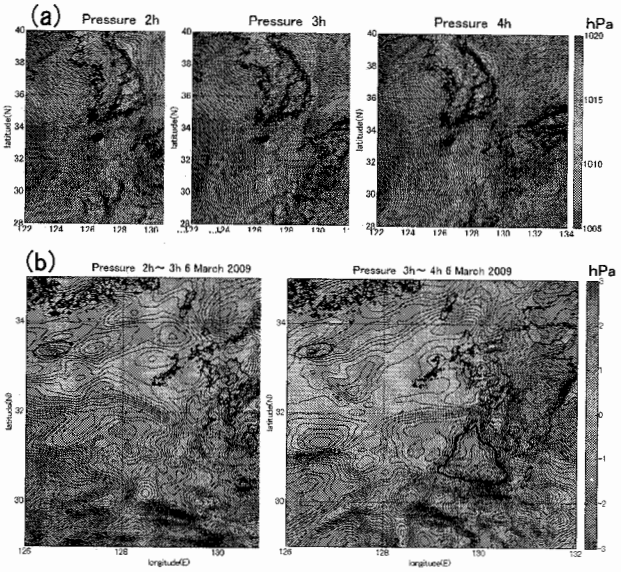

図-13 GPV予報値による3月6日2:00～4:00の地上気圧(a)とその気圧の時間変化(b)

とほぼ同時に，副振動の振幅が大きくなっている．同様なことは長崎湾でもみられ，福江で19:38～20:07に約1.3hPaの気圧の急上昇が起きた後に，長崎検潮所では全振幅109cmの副振動が観測されている[**図-10(c)**，**(d)**]．

この気圧の急上昇が発生した前後の九州西方海域の地上気圧を気象庁のGPV(Grid Point Values)予報値から調べると，18:00～20:00にかけて中国大陸と日本海に存在する2つの高気圧[**図-11(a)**の黒色部分]が急速に東シナ海に張り出してくる様子がわかる．そこで，気圧の時間変化をみつもると，1時間で1hPa以上の気圧上昇が起きた箇所[**図-11(b)**の太線内]が東シナ海を東方へ移動し，福江では19時頃，甑島では20時頃に到達していた．福江ではGPV予報値から推定された気圧上昇と実測された気圧上昇の間に少し時間のずれがあるが，甑島ではこれらの時間はほぼ一致している．したがって，甑島と福江で観測された気圧上昇は，東シナ海の広範囲にわたる高気圧の張り出しに伴って，発生したと考えられる．

(2) 3月6日の副振動の場合

浦内湾St.5では，3:15～3:45に約1.1hPaの気圧上昇があってから，副振動の全振幅が92cmまで大きくなっている[**図-12(a)**，**(b)**]．ところが，同時期の福江では顕著な気圧の急上昇がみられず，長崎湾の副振動の振幅はほとんど変化していない[**図-12(c)**，**(d)**]．すなわち，気圧の急上昇が起きた地点においてのみ，副振動の振幅が大きくなったことが示されている．

このときのGPV予報値から推定された地上気圧は典型的な西高東低型を示すとともに，南九州には前線を伴なう低気圧がある［**図-13(a)**の黒色部分］．この低気圧は，本州南方にあった高気圧によって，しばらくは南九州で停滞していたが，高気圧の移動に伴い九州の東側へ急に移動を始め，1hPa以上の気圧上昇［**図-13(b)**右図中の太線内]が南九州で発生した．したがって，甑島で観測された気圧の急上昇は，南九州に停滞していた低気圧の移動に伴って発生したものと考えられる．

5．検討

上甑島浦内湾において観測された大きな副振動の発生は気圧の急上昇と関連していたので，St.5で観測された気圧データにWaveletスペクトル解析を施し，副振動発生時における気圧の変動強度の特徴を詳細に調べることにした．3月2日と3月6日における周期128分以下の気圧の変動強度を周期61分以下の水位変動と比較して**図-14**に示す．

3月2日の場合，副振動の全振幅が12:30までは40cm以下と小さいが，それ以降については12:30～15:00，16:00～22:30，23:00～24:00の時間帯で40cm以上と大きい[**図-14(a)**]．一方，周期32～128分の気圧の変動強度は，約1.7hPaの気圧の急上昇が観測された時間帯（**図-10**中の19:49～20:09）を含め，10:30～15:00，18:00～22:00，23:00～24:00の時間帯で大きい（**図-14**中の黒色部分）．両者の強度の大きい時間帯は必ずしも一致している訳でないが，周期32～128分の気圧の変動強度が強い時間帯において副振動の全振幅が40cmを越える傾向にある．3月6日の場合も，周期32～128分の気圧の変動強度が大きい時間帯（3:00～10:00）で，副振動の全振幅が40cm以上を示している[**図-14(b)**]．これらの結果は，大きな副振動が発生していたときには，32～128分の周期帯で強い変動強度をもつ気圧擾乱がちょうど甑島を通過していたことを示している．すなわち，Hibiya and Kajiura[10]によって指摘されているように，気圧擾乱によって東シナ海で励起された長周期波が気圧擾乱と同じような進行速度で甑島まで伝播してきて，浦内湾の副振動を発達させている可能性を示唆している．

したがって，浦内湾の沖合いで水位と気圧の観測を実施し，浦内湾で発生する副振動に関連する長周期波と気圧擾乱をモニターすることが上甑島浦内湾での副振動の発生予報に有効かもしれない．

6．結論

水位と流速データを用いて，上甑島浦内湾で発生する副振動の特性を調べ，**図-6**に示すように，同湾では周期24.5分の第1モード，周期12.5分の第2モード，周期10.8分の第3モードの副振動が卓越していることを明らかにした．また，観測された大きな副振動は主に第2モードと第3モードで構成されていることが分かった．

観測された副振動と気圧変化の関係を調べ，浦内湾では全振幅100cm程度の副振動が，1.5hPa程度の気圧の急上昇に関連して，発生していることを示した．また，この気圧擾乱の要因として，東シナ海の広範囲にわたる高気圧の張り出しや低気圧の移動があることを示した．

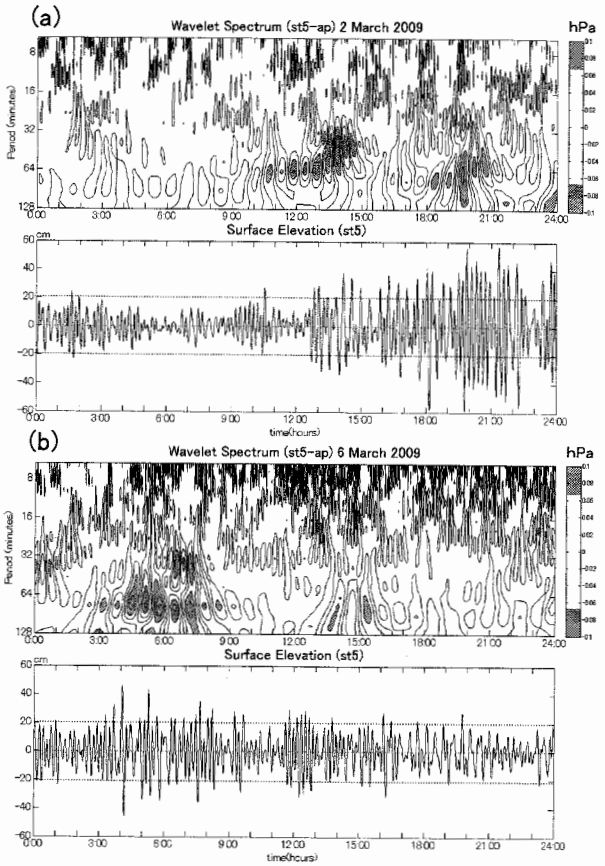

図-14　3月2日(a)と3月6日(b)のSt.5における気圧変動のWaveletスペクトル及び水位変動

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，並びに甑島漁協組合上甑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) 長崎海洋気象台，熊本地方気象台，鹿児島地方気象台：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.
3) 柿沼太郎，浅野敏之，井上大介，山城徹，安田健二：上甑島浦内湾における2009年2月潮位副振動の被害調査，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. B2-65，No. 1， pp. 1391-1395，2009.
4) 南日本新聞：2004年3月1日夕刊.
5) 南日本新聞：2009年2月26日朝刊.
6) 山城徹，安田健二，久保山知明，城本一義，柿沼太郎，浅野敏之：上甑島浦内湾で観測した副振動の特性について，海洋開発論文集，第25巻，pp. 1365-1370，2009.
7) 永田豊，彦坂繁雄，宮崎正衛：海洋物理Ⅲ，331p.，東海大学出版会，1971.
8) 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，pp. 203-222，1990.
9) 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.
10) 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.