

現場観測データに基づく甬島浦内湾の 副振動特性について

鹿児島大学 教授

山城 徹

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014 年 8 月

現場観測データに基づく甕島浦内湾の副振動特性について

On characteristics of secondary undulation in Urauchi Bay of Koshiki Islands using *in situ* observational data

山城 徹

Toru YAMASHIRO

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振幅の大きい副振動がしばしば発生している¹⁾。長崎湾で発生する振幅の大きい副振動は別名「あびき」とも呼ばれ、1979年3月31日の「あびき」は長崎検潮所で最大全振幅279cmを記録した(図-1)^{2),3)}。1988年3月16日には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⁾。最大全振幅が100cmを超える大きな副振動は、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、振幅の大きい副振動は九州西岸域から南西諸島の広い範囲で同時に発生することが多い。例えば、2004年2月29日～3月1日の場合は、九州南岸の油津、大泊、枕崎、九州西岸の長崎、佐世保、厳原、薩南諸島の種子島、南西諸島の中之島において副振動が発生し、特に枕崎と大泊ではそれぞれ160cm、143cmの最大全振幅が観測された(表-1)¹⁾。2009年2月24日～25日の場合は、2004年2月29日～3月1日のときよりもさらに振幅の大きい副振動が広範囲で発生し、長崎では157cm、熊本県天草では160cm、上甕島浦内湾では290cm、枕崎では141cmの最大全振幅が報告された(表-2)⁵⁾。

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)}、⁶⁾や台風

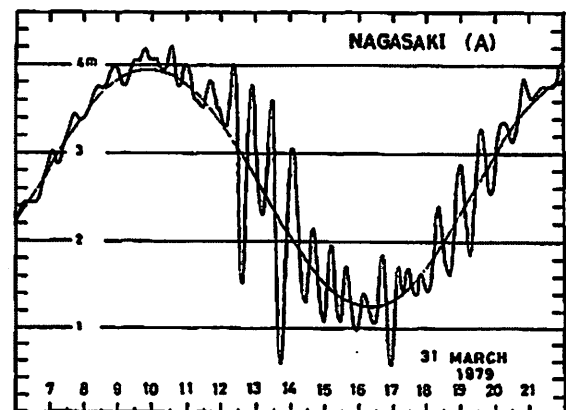


図-1 1979年3月31日に長崎県検潮所で測定された水位変動²⁾

表-1 2004年2月29日～3月1日に発生した副振動の周期と最大全振幅¹⁾

地点	起時	周期	最大全振幅 (cm)
下関	2004/3/1 5:01	101	21
門司	2004/3/1 6:08	143	17
博多	2004/3/1 10:19	128	57
佐世保	2004/3/1 0:33	90	57
長崎	2004/3/1 0:58	35	137
口之津	2004/3/1 1:22	47	20
対馬	2004/3/1 2:22	11	23
厳原	2004/3/1 1:03	13	48
福江	2004/3/1 2:16	20	48
日向白浜	2004/3/1 4:33	32	39
油津	2004/3/1 1:11	22	100
鹿児島	2004/3/1 1:00	31	53
枕崎	2004/3/1 0:51	20	160
大泊	2004/3/1 0:47	11	143
西之表	2004/3/1 0:37	16	115
種子島	2004/3/1 1:31	12	100
中之島	2004/2/29 23:51	6	97
名瀬	2004/2/29 23:54	16	62
奄美	2004/3/1 0:29	18	72

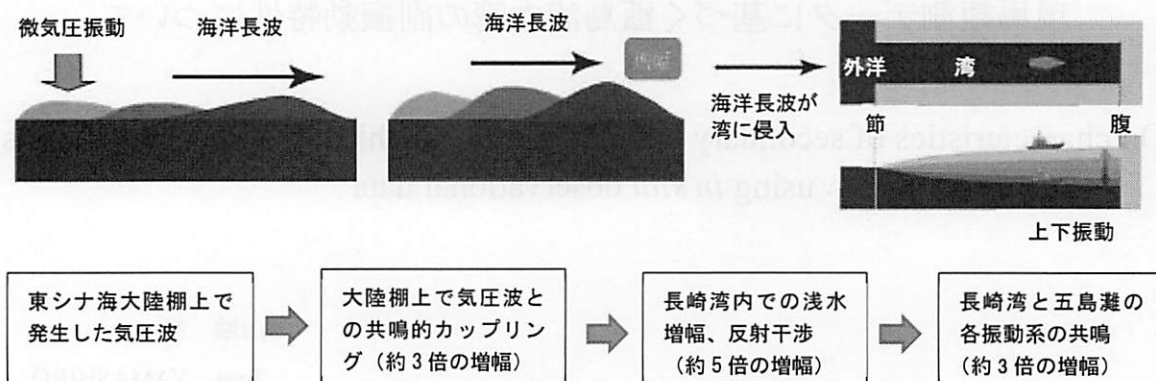


図-2 東シナ海における副振動発生の様式図（長崎地方気象台 HP から）

11.7)が指摘されている。微気圧振動による副振動の発生については、例えば、Hibiya and Kajiura⁶⁾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」は東シナ海上を約110km/hで東進する振幅3hPaの微気圧波によって引き起こされたことを数値実験から示している。また、その発生過程については、大陸棚上での気圧波との共鳴的カップリングによる海洋長波の増幅（約3倍）、長崎湾内での地形的な増幅効果と反射・干渉による増幅（約5倍）、長崎湾の固有振動系と五島灘領域の振動系との共鳴による増幅（約3倍）など数段階の増幅効果が関連していることを指摘している（図-2）。台風による副振動の発生については、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っている。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、鹿児島県本土西方40kmにある甬島列島3島の1つ、上甬島の南西に位置し、南に開く湾口を通して東シナ海につながっている（図-3）。この湾は荒天時には避泊地として利用されるほどの静穏な海域である一方で、冬から春先にかけては周期数分から数10分、最大全振幅100cm以上の大きな副振動が頻繁に発生する海域であることも古くから知られていた。2004年3

表-2 2009年2月24～25日に発生した副振動の周期と最大全振幅⁵⁾

地点	起時	周期	最大全振幅 (cm)
長崎	2009/2/24 23:34	29	157
福江	2009/2/24 23:19	19	81
油津	2009/2/25 4:14	23	75
甬島	2009/2/25 8:30 ～8:40	14	290
天草下島	2009/2/25 9:10	10	160
枕崎	2009/2/24 23:27	12	141
種子島	2009/2/25 2:07	14	85
中之島	2009/2/25 9:46	5	153
名瀬	2009/2/25 3:18	19	82
奄美	2009/2/25 2:45	15	78

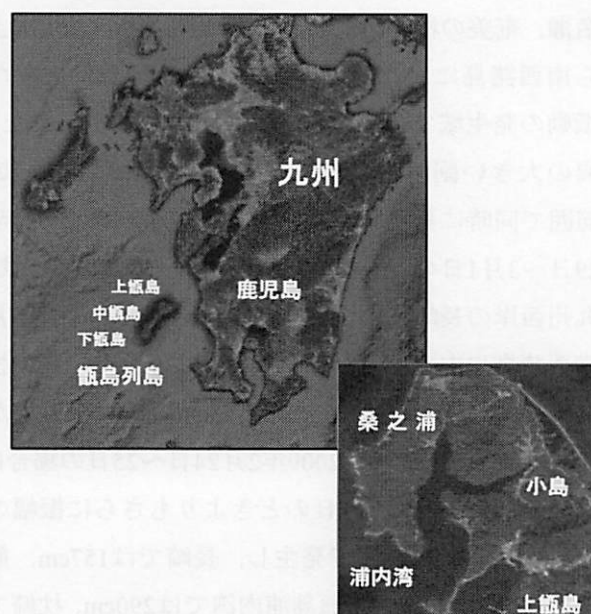
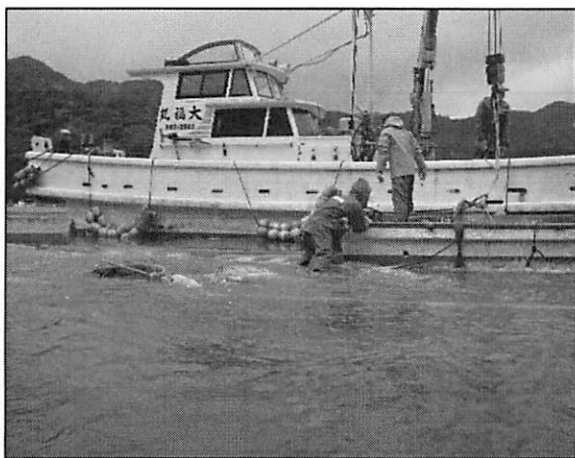
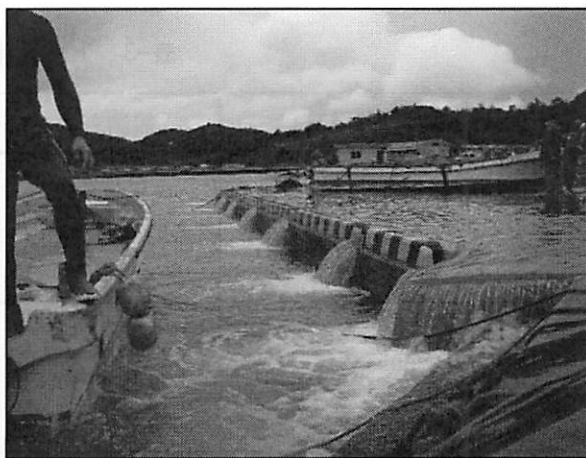


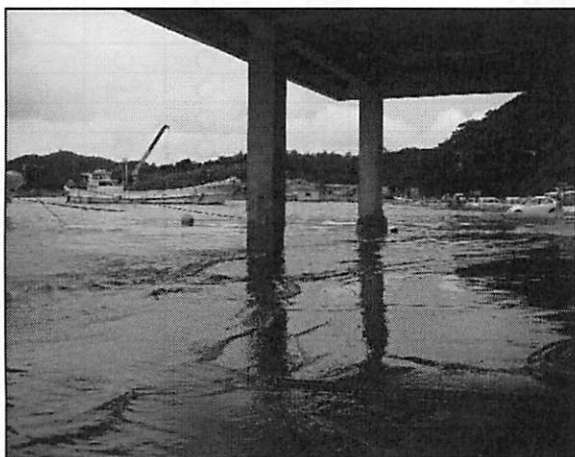
図-3 上甬島浦内湾の位置と湾の形状



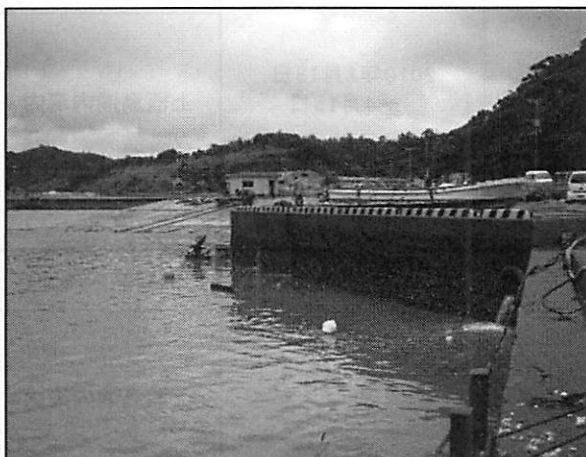
(1) 水位が岸壁よりも高くなったとき (8時30分)



(3) 水位が下がっているとき (8時35分)

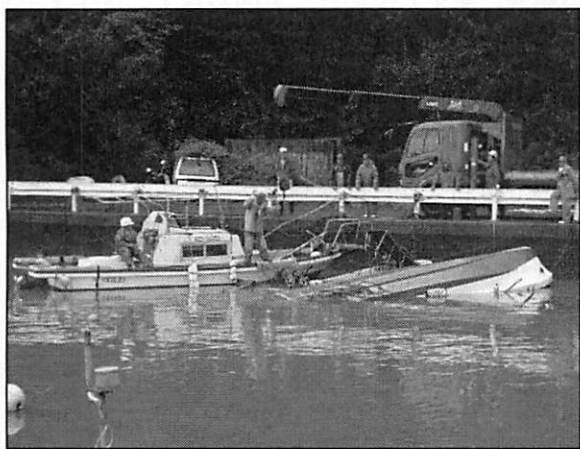


(2) ほぼ最高水位になったとき (8時33分)

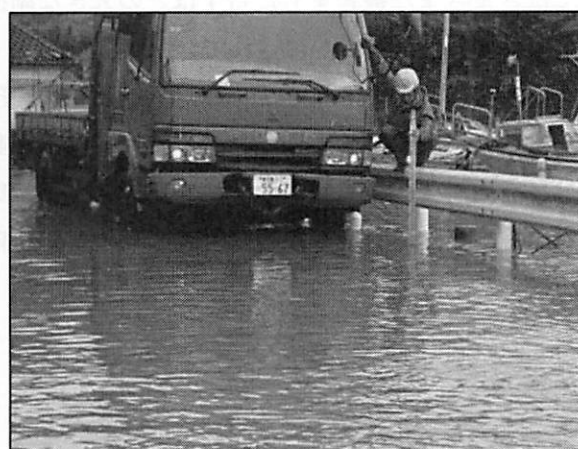


(4) ほぼ最低水位になったとき (8時40分)

写真-1 2009年2月25日に撮影された副振動 (薩摩川内市動画提供)



漁船の転覆



道路の冠水

写真-2 2009年2月25日の副振動による被害 (薩摩川内市写真提供)

月1日の副振動では、係留中の漁船5隻が転覆する被害を受けた⁸⁾。2009年2月24日～25日の場合には、遡上の痕跡から波高が290cmに達していたと推定される副振動が発生し(写真-1)、浦内湾の周辺家屋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多大な被害が発生した(写真-2)⁹⁾。このように、浦

表-3 上飯島浦内湾副振動観測

	観測年月日	観測海域	観測地点	測点名	観測項目		
					水位	流速	気圧
観測Ⅰ	2008年10月7日 ～10月21日	上飯島浦内湾内	湾口部	St.1	×	○	-
			湾分岐部	St.2	×	○	-
			湾奥部(桑之浦)	St.3	×	○	-
			湾奥部(小島)	St.4	×	○	-
			湾奥部(小島漁港)	St.5	○	-	○
観測Ⅱ	2009年3月1日 ～3月15日	上飯島浦内湾内	湾口部	St.1	○	○	-
			湾分岐部	St.2	○	○	-
			湾奥部(桑之浦)	St.3	○	○	-
			湾奥部(小島)	St.4	○	○	-
			湾奥部(小島漁港)	St.5	○	-	○
観測Ⅲ	2010年1月18日 ～4月15日	上飯島浦内湾冲合	冲合地点1	St.1	○	-	-
			冲合地点2	St.2	○	-	-
			冲合地点3	St.3	○	-	-
		上飯島浦内湾内	湾口部	St.4	○	-	-
			湾中央部(生簀設置点)	St.5	○	○	-
			湾分岐部	St.6	○	-	-
			湾奥部(桑之浦)	St.7	○	-	-
			湾奥部(小島)	St.8	○	○	-
			湾奥部(小島漁港)	St.9	○	-	○
		女島	東岸部	St.10	○	-	-
			女島灯台	St.10	-	-	○
観測Ⅳ	2012年2月10日 ～3月31日	上飯島浦内湾冲合	冲合地点1	St.1	○	-	-
			冲合地点2	St.2	○	-	-
		上飯島浦内湾内	湾口部	St.3	×	-	-
			湾中央部(生簀設置点)	St.4	○	○	-
			湾奥部(桑之浦)	St.5	○	-	-
			湾分岐部	St.6	○	-	-
			湾奥部(小島)	St.7	○	○	-
			湾奥部(小島漁港)	St.8	○	-	○
		女島	東岸部	St.9	○	-	-
			女島灯台	St.9	-	-	×

×:データ欠測, -:計測なし

内湾ではさまざまな被害をもたらすほどの大きな副振動が頻繁に発生していたにも関わらず、近年まで浦内湾の副振動の特性は明らかにされていなかった。

鹿児島大学では、2008～2012年にかけて浦内湾とその周辺海域で水位、流速、気圧の直接測定を実施し、浦内湾で発生する副振動の周期、モード特性、湾水振動等に伴う長周期波の増幅率について調査を行った。本講では、浦内湾での現場観測の方法を紹介し（第2章）、ついで観測された副振動の特性を紹介する（第3章、第4章）。最後に、浦内湾を含む九州西岸域の副振動発生予報に関する検討（第5章）を紹介する。

2. 観測

浦内湾で発生する副振動の特性を明らかにするために、著者は表-3の現場観測に参加した。ここで、観測Ⅲは薩摩川内市「飯島海域副振動被害防止調査業務」、観測Ⅳは科学研究費補助金「九州西岸で発生する潮位副振動(あびき)の予知と防災対策手法の開発」(基盤研究(B)、課題番号 23360217、研究代表者:浅野敏之)の一環として実施されたものである。観測ⅠとⅡでは、浦内湾で発生する副振動の周期とモード特性を明ら

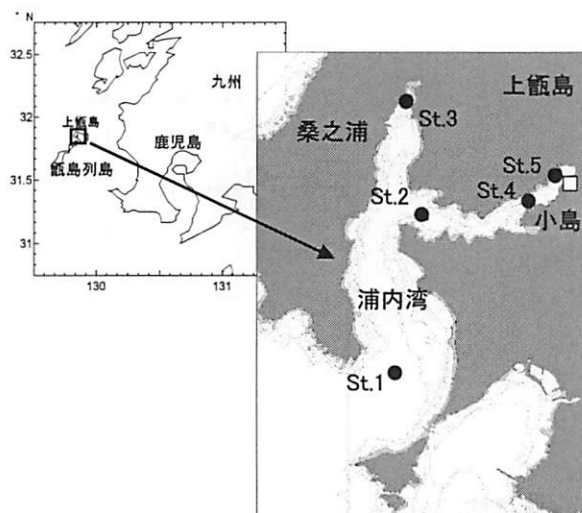


図-4 2009年3月1日～15日に実施した水位・流速(●)と気圧(□)の観測点¹⁰⁾



写真-3 浦内湾



3D-ACM
(St.1～4 で使用)



HOBO-U20 Water level Logger 標準型
(St.5 で使用)



COMPACT-TD
(St.1～4 で使用)

図-5 使用した観測器材
(FSI 社, JFE アドバンテック社, onset 社 HP から)

表-4 観測点の位置と測定深度¹⁰⁾

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

かにするために、水位、気圧、流速の直接測定を実施し

た。観測ⅠとⅡの測点位置はほぼ同じである。観測ⅢとⅣは主に九州西岸に伝播する長周期波の振幅増幅率と上甕島浦内湾における副振動の発生予報を検計することを目的としたものである。そのために、浦内湾内だけでなく湾口部沖合および甕島列島の140km西方にある長崎県男女群島女島における水位と気圧の測定も行っている。本講では、観測ⅡとⅣで実施した観測方法について紹介する。

2.1 2009年3月1日～3月15日に実施した観測（観測Ⅱ）

2009年3月1日～15日に、湾口部の測点(St.1)と分岐部の測点(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-4、写真-3)。各測点の位置、水深、測定深度および測定項目の詳細を表-4に示す。St.1～St.4の流速と水位はそれぞれ3D-ACM(FSI社製)とCOMPACT-TD(JFEアドバンテック社製)、St.5の水位と気圧はそれぞれHOBO-U20 Water level Logger 海水対応型(onset社製)とHOBO-U20 Water level Logger 標準型(onset社製)で測定した(図-5)。流速計3D-ACMは測定インターバル1秒、サンプル個数30、平均30秒、バーストインターバル1分、深度計COMPACT-TDと水位計HOBO-U20は測定インターバ



おもしに使った土嚢



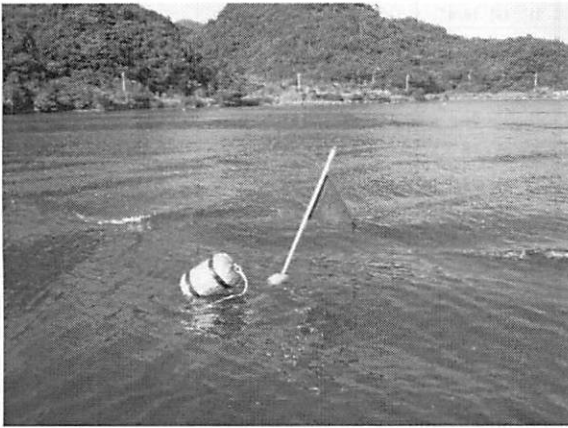
ダイバー



流速計の設置状況



流速計の回収作業



標識ブイの投入



作業船と回収した流速計

写真-4 係留系の設置・回収の様子（鹿児島大学 城本一義氏撮影）

2.2 2012年2月10日～3月31日に実施した観測（観測Ⅳ）

2012年2月10日～3月31日の約51日間、上甕島浦内湾の湾口部沖合(St.1, St.2), 湾口部(St.3), マグロ養殖用生簀(St.4), 桑之浦側湾奥部(St.5), 湾分岐部(St.6), 小島側湾奥部(St.7, St.8), 甕島西方約140kmにある女島(St.9)の計9点で、水位と流速および気圧の直接測定を実施した(図-7)。各測点の位置、水深、測定深度および測定項目の詳細を表-5に示す。

St.3, St.5～St.7の流速は3D-ACM(FSI社製), St.4はINFINITY-EM(JFEアドバンテック社製), St.1～St.2, St.9の水位はINFINITY-WH(JFEアドバンテック社製), St.4～St.8はCOMPACT-TD(JFEアドバンテック社製)で測定した(図-8)。観測予定日数やメモリー可能日数, 電池可能日数を考慮して, 流速計3D-ACMは測定インターバル1秒, サンプル数30, 平均30秒, バーストインターバル1分30秒, INFINITY-EMは測定インターバル1秒, サンプル数5, 平均5秒, バーストインターバル3分に設定した。深度計COMPACT-TDは測定インターバル1分, 波高計INFINITY-EMは風浪の影響を失くすために測定インターバル1秒, サンプル数15, 平均15秒, バーストインターバル1分に設定した。気圧計CVS-PTB110は測定インターバル1分に設定した。

浦内湾およびその周辺海域, 女島東岸において, St.3以外の測点では正常な水位データを取得できたが, St.3では測器が流され欠測となった。気圧データについては, 甕島のSt.8では正常なデータを取得できたが, 女島のSt.9では雨水が入って測器が故障し欠測となった。浦内湾及びその周辺海域の測点で用いた係留系を図-9に示す。INFINITY-EMの使用範囲が40mであるので, St.1とSt.2ではガラス球ブイと流速計を係留するフレームとの間に張った5mのナイロンクロスロープに取り付けることによって, 深度計を40m以浅に設置した。St.3では流速計係留フレームとロープをつなぐ角頭シャックルがはずれ, 深度計が流出した。

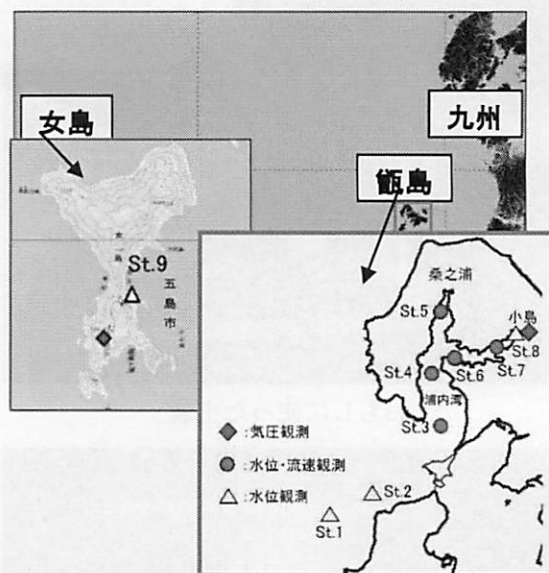


図-7 浦内湾と女島沿岸での水位, 流速, 気圧の観測点 (St.1～St.9) ¹⁾

表-5 観測点の位置と測定深度, 測定項目 ¹⁾

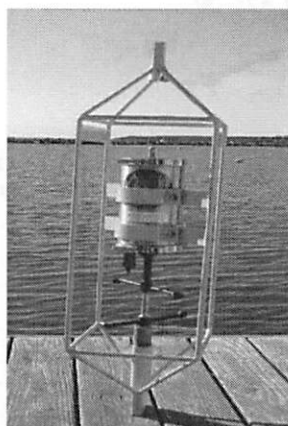
測点名	位置		水深 (m)	測定水深(m)		測定項目
	緯度 (N)	経度 (E)		流速	水位	
St.1	31° 48' 51.5"	129° 48' 30.84"	66	-	38	水位
St.2	31° 49' 16.4"	129° 49' 04.74"	60	-	37	水位
St.3	31° 50' 10.7"	129° 50' 21.54"	31	29	18.5	流速, 水位
St.4	31° 50' 55.7"	129° 50' 17.46"	27	26	21	流速, 水位
St.5	31° 51' 42.1"	129° 50' 32.64"	22	21	20.5	流速, 水位
St.6	31° 51' 19.3"	129° 50' 37.08"	28	27	21.5	流速, 水位
St.7	31° 51' 22.3"	129° 51' 32.94"	10	11	10.5	流速, 水位
St.8	31° 51' 29.6"	129° 51' 48.96"	2	-	2	水位, 気圧
St.9	31° 59' 37.0"	128° 21' 09.00"	7	-	7	水位
	31° 48' 51.5"	128° 21' 03.60"	-	-	-	気圧



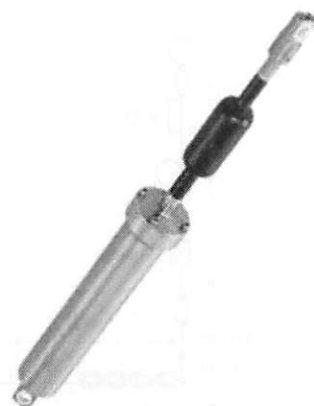
INFINITY-WH
(St.1, 2, 9 で使用)



COMPACT-TD
(St.3～8 で使用)



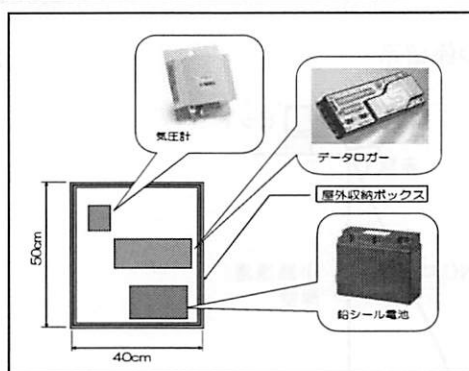
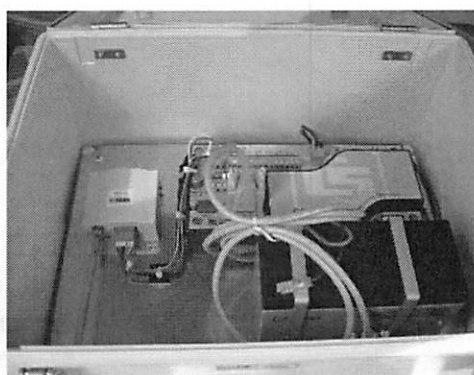
3D-ACM
(St.3, 5～7 で使用)



INFINITY-EM
(St.4 で使用)

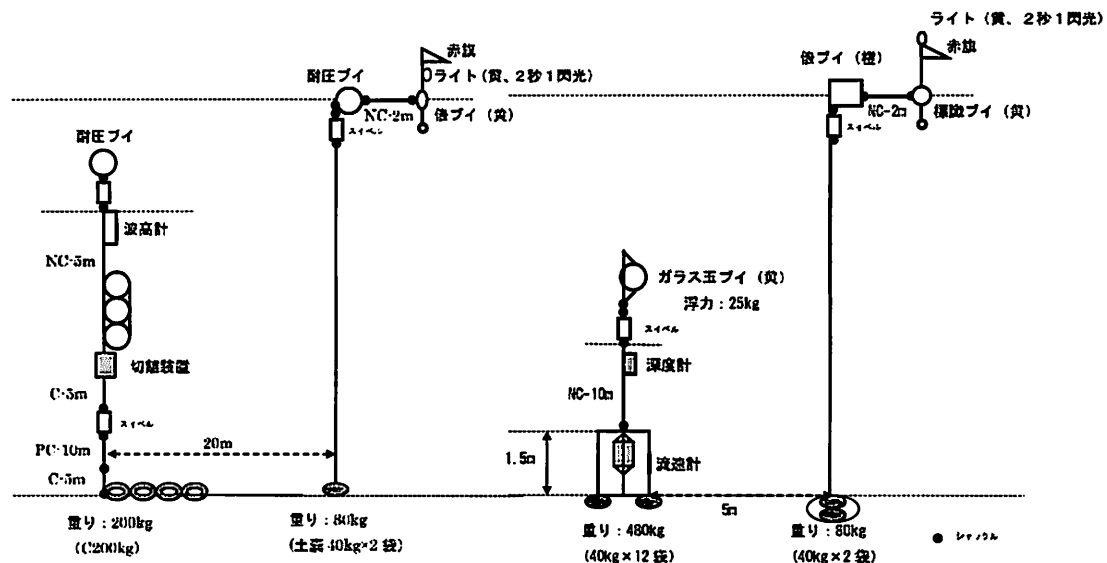


CVS-PTB110
(St.8, 9 で使用)



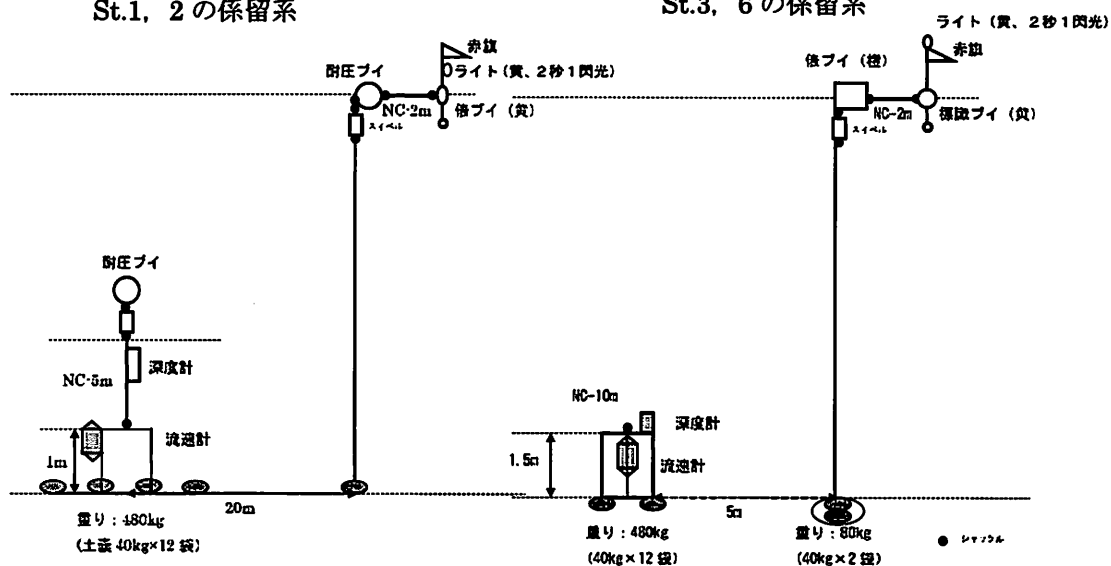
CVS-PTB110 の中身 ¹²⁾

図-8 使用した観測器材 (FSI 社, JFE アドバンテック社, クリオテック社 HP から)



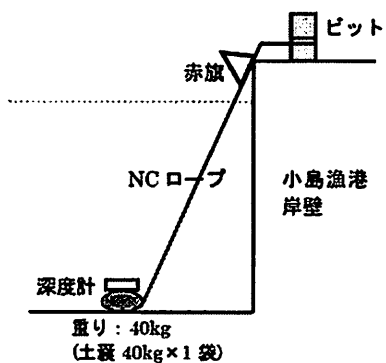
St.1, 2 の係留系

St.3, 6 の係留系



St.4 の係留系

St.5, 7 の係留系



St.8 の係留系

図-9 浦内湾の流速計・水位計の係留系

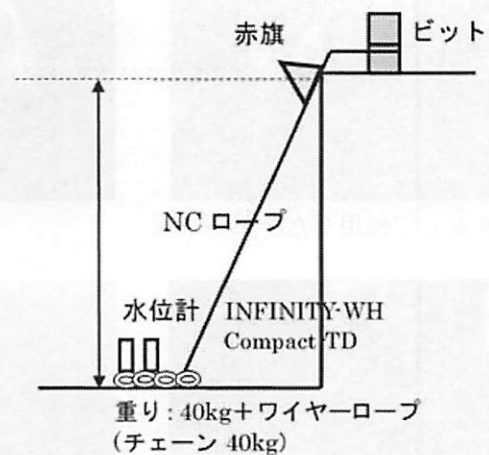
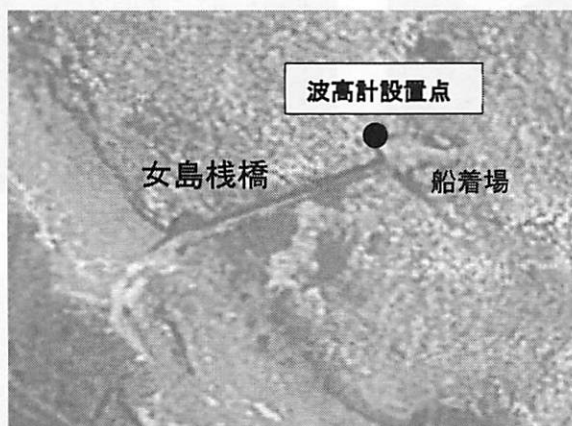
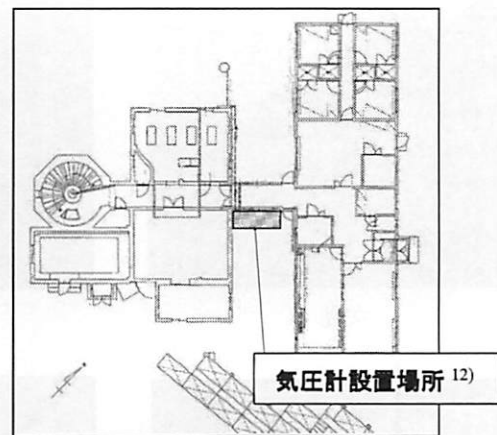
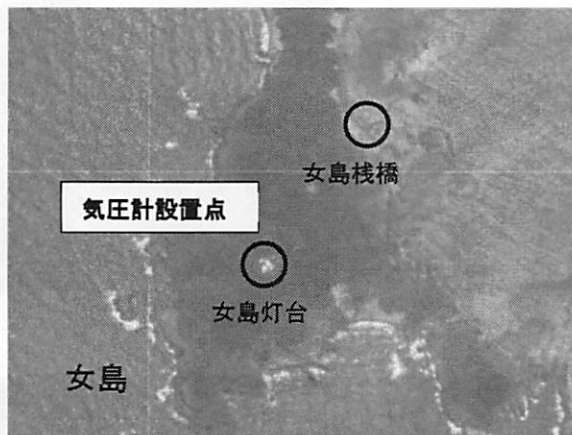
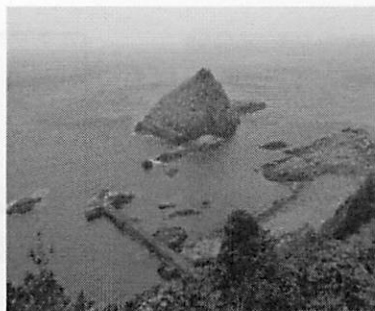


図-10 女島の流速計・水位計設置点と係留系

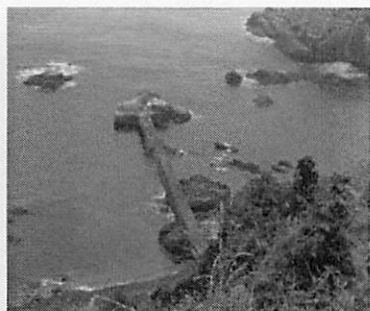
女島では水位計と気圧計をそれぞれ船着場ビットと灯台敷地に設置するために（図-10）、五島市教育委員会に対しては天然記念物男女群島現状変更許可，長崎海上保安部に対しては国有財産使用許可を取り，長崎市で船をチャーターして女島に渡った。水位計と気圧計を設置したときの様子と回収したときの様子をそれぞれ写真-5と写真-6に示す。水位計の係留系については，回収時にチェーンとワイヤーロープをつなぐ角頭シャックルのピンがはずれ，ナイロンクロスロープからチェーンが離れていた。水位計を取り付けたチェーンは幸いにもそのまま海底にあったので，船長が潜ってチェーンとロープと結び直し，無事に水位計を回収できた。気圧計は設置した場所にあったが，チューブが引っ張り出され，チューブ側の蓋の留め具がはずれ，箱の中には雨水が溜まっていた。鳥獣によって留め具ははずされたと思うが，今までこのような苦い経験がなく鳥獣対策を取る必要があることまで考えが及んでいなかった。



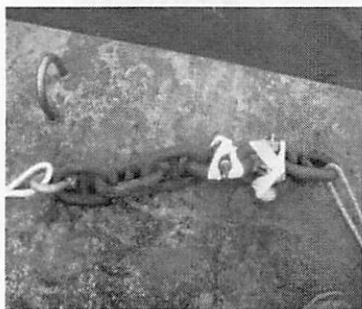
女島



女島栈橋



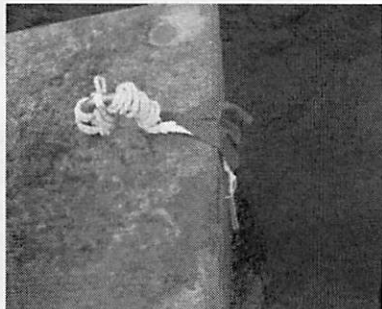
女島栈橋と船着場



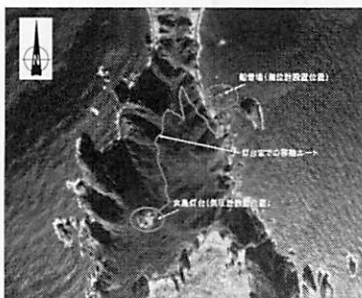
重りとして使用したチェーン



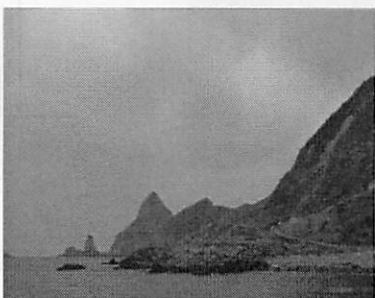
水位計



使用したビット



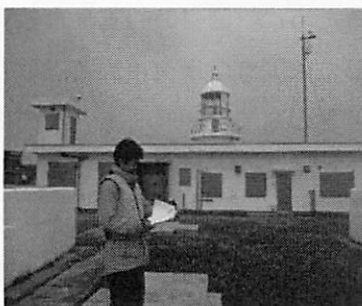
女島灯台までのルート



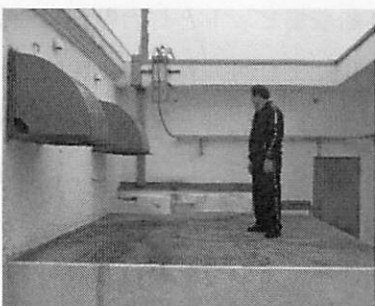
女島灯台までの道路



女島灯台



女島灯台

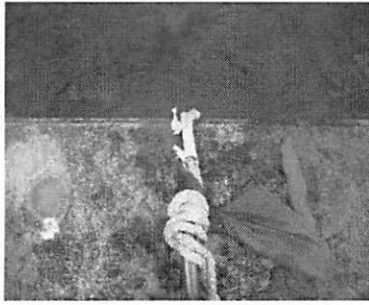


気圧計設置場所

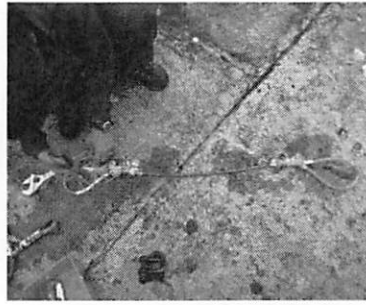


気圧計

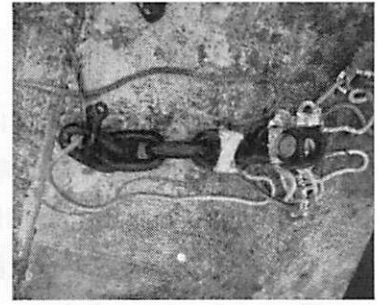
写真-5 女島の栈橋及び船着場，灯台と設置した水位計，気圧計の様子
(鹿児島大学 齋田倫範氏撮影)



ビットに結んだロープの様子



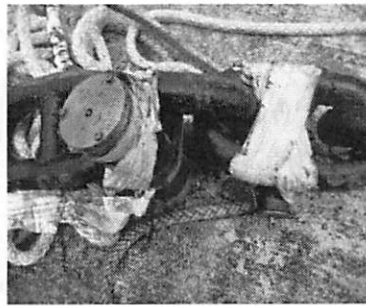
チェーンとロープの間の
ワイヤーの様子



ワイヤーとチェーンをつなぐ
シャックルのピンのはずれて
いた様子



ピンの外れたシャックルの様子



回収された水位計の様子



回収された水位計の様子



回収された気圧計



チューブが引っ張り出され、蓋の留め具が
はずれていた様子

写真-6 女島で回収された水位計、気圧計の様子（鹿児島大学 齋田倫範氏撮影）

3 観測Ⅱの結果を基にした浦内湾で発生する副振動の特性

2009年3月1日～15日の観測Ⅱについては、湾口部のSt.1と湾分岐部のSt.2、桑之浦側湾奥部のSt.3、小島側湾奥部のSt.4の4点に流速計と水位計を設置し、さらに小島漁港のSt.5に水位計と気圧計を設置し、1分間隔で測定した(図-4)。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を基準とする気圧補正(-1cm/hPa)を施した。浦内湾で発生する副振動の周期は60分以下であることは分かっていたので、単純移動平均法によって、気圧補正後のデータから周期61分以下の変動成分を除去したものを作成し、元の資料から61分移動平均値を差し引いた残差を求め、この残差の時系列データを解析することによって、副振動の周期と振動モードの特性を調べた。St.1～5の中で最も振幅の大きい副振動が測定されたSt.5における3月2日12:00～3日12:00の水位変動を図-11に示す。この図から、水位が約10分、20分間隔で上昇と下降を繰り返し、全振幅20cm以上の副振動が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では、全振幅が115cmに到達していた(図-11中の矢印)。

3-1 観測された副振動の周期

2009年3月1日12:00～12日21:03(16384分)の水位時系列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としている。St.1～5における水位変動のパワースペクトルを図-12に示す。観測期間中で最も大きな副振動が発生していた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-12(e)]、これらの周期の副振動が卓越していたことがわかる。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。

他の測点における水位の時系列データについても、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分では、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-12(a)～(d)]。一方、周期12.5分では、St.1とSt.4でエネルギーピークがみられ[図-12(a)、(d)]、周期10.8分は、St.3とSt.4でエネルギーピークがみられる[図-12(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

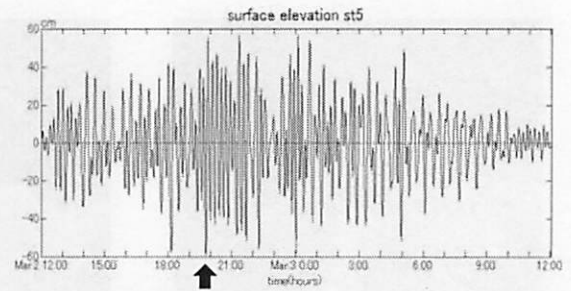


図-11 3月2日12:00～3日12:00のSt.5の周期61分以下の水位の時系列¹⁰⁾

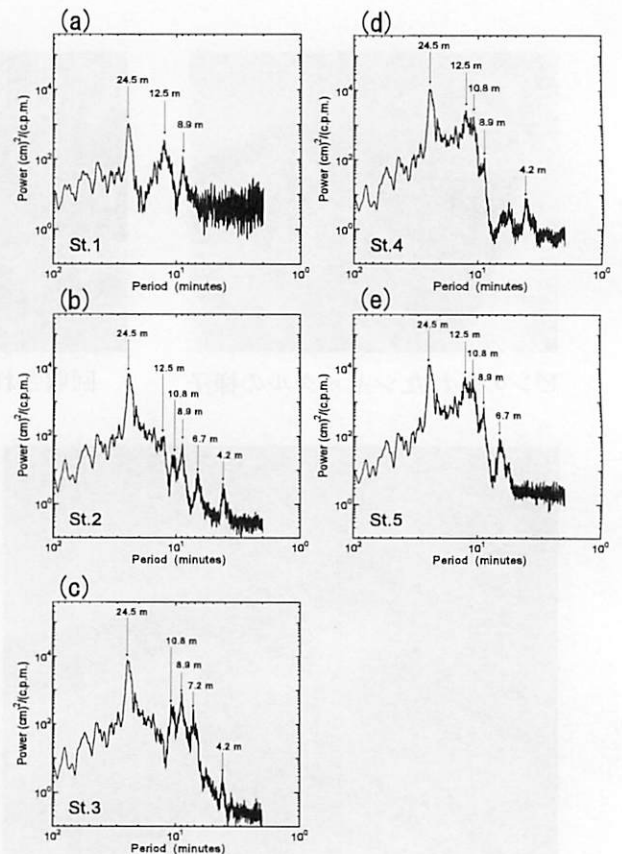


図-12 St.1～5の周期61分以下の水位変動のパワースペクトル¹⁰⁾

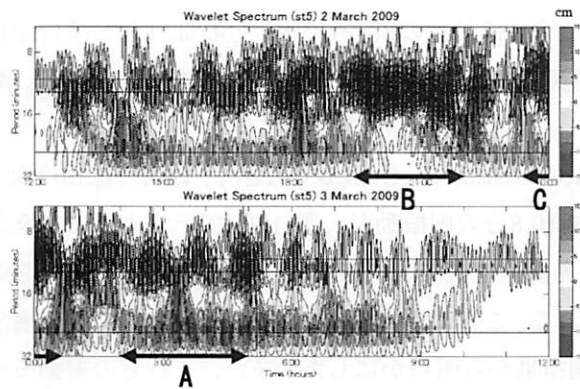


図-13 St.5 の水位変動の Wavelet スペクトル ¹⁰⁾

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分の副振動は小島と桑之浦の間の湾奥部で振動するモードであることがわかる。

3-2. 周期24.5分、12.5分、10.8分をもつ副振動の空間特性

卓越する周期や振幅が時間とともに変動するような非定常な時系列の変動特性を調べるには、測定されたデータの時刻と周波数の情報を同時に捉えることのできるWaveletスペクトル解析が有効である。St.5の水位データに対してWaveletスペクトル解析を行い、3月2日12:00～3日12:00の結果を図-13に示す。3月3日2:00～5:00（図-13中の期間A）では周期24.5分、3月2日19:40～22:00（図-13中の期間B）では周期12.5分、3月2日23:30～3日0:30（図-13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、これらの周期帯で信号を再合成したものから、測点間での振幅と位相の違い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と大きくなり、位相は全測点で同じである〔図-14(a)〕。これらの結果は、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〔図-15(a)〕。但し、湾口部沖合での節の具体的な位置は不明である。

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の振幅は湾口部St.1や湾奥部

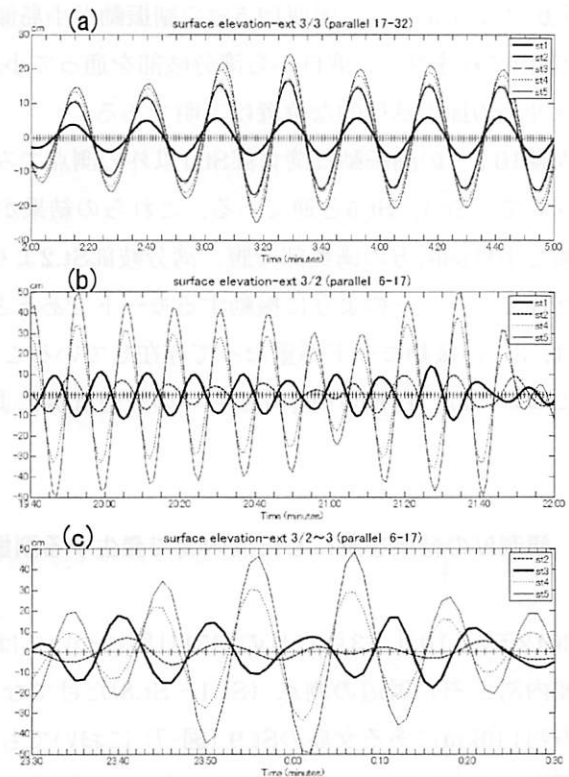


図-14 Wavelet スペクトルから抽出した、各測点の周期 24.5 分(a)、12.5 分(b)、10.8 分(c)の水位変動 ¹⁰⁾

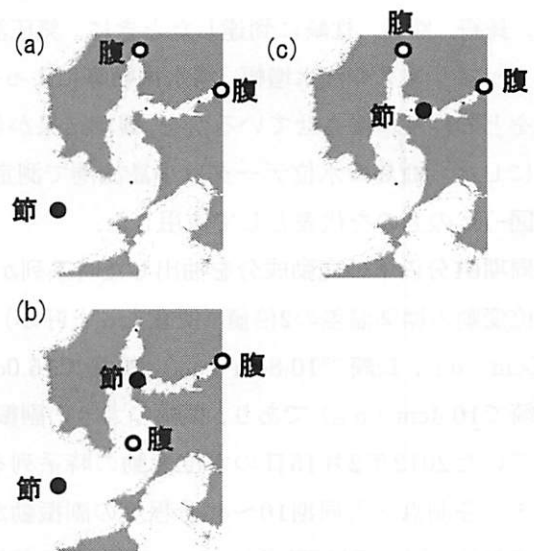


図-15 周期 24.5 分(a)、12.5 分(b)、10.8 分(c)の副振動のモードと各モードの腹と節の位置 ¹⁰⁾

St.4, St.5よりも小さい。また、St.1の位相はSt.2, St.4, St.5と逆である〔図14-(b)〕。これらの結果は、図-15(b)で示すように、周期12.5分の副振動が小島側湾奥部と湾口部付近の2箇所では腹、分岐部付近と湾口沖合の2箇所では節を持ち、湾口から湾分岐部を通し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。湾口部沖合の節の具体的な位置は不明である。

周期10.8分の副振動は湾口部St.1以外の測点でみられ、振幅はSt.3, St.4, St.5で大きく、St.3の位相はSt.2と同じで、St.4, St.5と逆である。これらの結果から、周期10.8分の副振動が、図-15(c)で示すように、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シーソーのように振動するモードであると考えられる。このように2つに分岐する浦内湾の小島漁港では、3つの振動モードが重なって存在していることを観測結果から明らかにした。また、これらの振動モードについては、白橋ら¹⁴⁾や片山ら¹⁵⁾の数値計算によって再現されている。

4. 観測Ⅳの結果を基にした浦内湾で発生する副振動の振幅増幅率について

2012年2月10日～3月31日の約51日間については、上甕島浦内湾とその周辺の測点 (St.1～St.8)だけでなく甕島西方約140kmにある女島のSt.9 (図-7) においても水位の時間連続測定を行うことができた。また、振幅の大きい副振動が頻繁に発生する福江、長崎、枕崎においては気象庁によって水位が時間連続測定されている (図-16)。そこで、東シナ海上を伝播する長周期波が女島を通過してから福江、長崎、甕島、枕崎に到達したときに、気圧波との共鳴的カップリングや浅水増幅、湾水振動等によって、その振幅をどの程度増幅させているかを、観測結果から調べることにした。甕島の水位データは小島漁港で測定したSt.8 (図-7) のものを代表として使用した。

周期61分以下の変動成分を抽出した時系列から求めた水位変動の標準偏差の2倍値 (便宜上 α と呼ぶ) は福江で4.0cm (α_f)、長崎で10.8cm (α_n)、甕島で15.0cm (α_k)、枕崎で10.4cm (α_m) であり、振幅の大きい副振動が発生していた2012年2月15日の水位変動の時系列を図-17に示す。各測点とも周期10～40分程度の副振動が1日中起きており、福江では7時前に40cm ($10\alpha_f$)、長崎では7時頃に119cm ($11\alpha_n$)、甕島では7時過ぎに139cm ($9.3\alpha_k$)、枕崎では7時前に90cm ($8.7\alpha_m$) の全振幅が観測された (図-17の矢印)。

各地点の副振動の周期を調べるために、2月15日の水位の時系列データに対してスペクトル解析を行った。スペクトル解析はFFT法を用い、自由度は16とした。福江では37.9分、15.5分、9.8分、長崎では37.9分、甕島では23.8分、10.5分、枕崎では16.3分、12.6分の周期

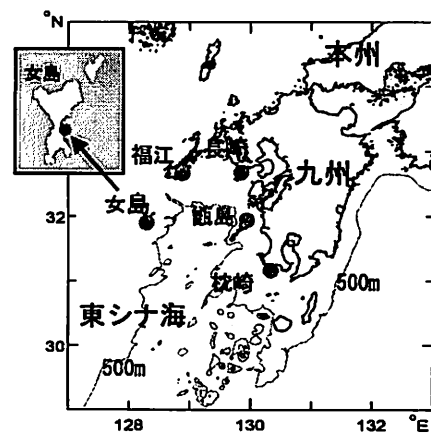


図-16 福江、長崎、枕崎の検潮所の位置 ¹³⁾

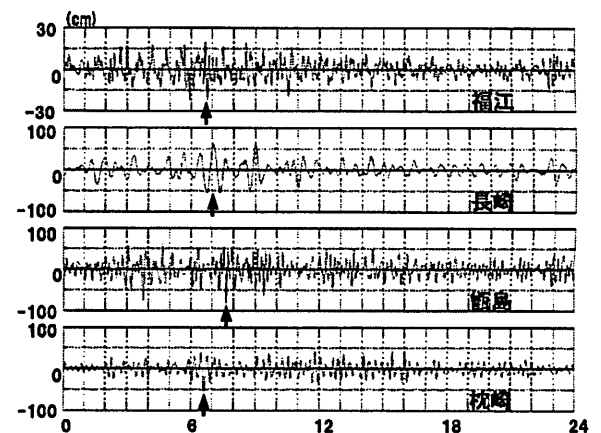


図-17 2012年2月15日の周期61分以下の水位変動 ¹³⁾

でエネルギーピークが存在し、これらの周期で副振動が発生していたことがわかる（図-18）。

2月15日のWaveletスペクトルを図-19に示す。福江では7時前に全振幅40cm、長崎では7時頃に全振幅119cm、甕島では7時過ぎに全振幅139cm、枕崎では7時前に全振幅90cmの副振動が起きていた（図-17の矢印）。そこで7時頃の変動パワーを調べてみると、福江では周期10分、長崎では周期38分、甕島では周期11分、枕崎では周期16分が赤色を示し、これらの周期の振動モードが卓越していたことがわかった。

図-19を用いて各振動モードの卓越期間を調べると、女島では周期32～64分が1～11時、周期8～32分が2～12時、周期2～8分が6～14時の時間帯で、福江では周期32～64分が3～15時、周期8～32分が2～11時の時間帯で、長崎では周期32～64分が1～12時の時間帯、甕島では周期8～32分が3～14時の時間帯、枕崎では周期8～32分が2～23時の時間帯で変動パワーが大きかった。これらの結果から、福江、長崎、甕島、枕崎の水位観測点では副振動に関連する長周期波しか大きな変動パワーを持たないが、女島を通過するときまでは全ての周期の長周期波が同程度の変動パワーを持っていたことがわかった。さらに、周期8～64分の変動パワーは福江、長崎、甕島、枕崎の方が女島よりも明らかに大きく、女島を通過した長周期波が福江、長崎、甕島、枕崎の水位観測点に到達したときには変動パワーを増大させていたこともわかった。

女島では外洋に直接面した地点に水位計を設置したので（図-16）、この地点の水位の短周期変動は東シナ海を伝播する長周期波によるものと考えてよい。そこで、周期61分以下の水位変動パワーの半日平均値を基にして、女島に対する福江、長崎、甕島、枕崎の変動パワー比の平方根を計算することで、福江、長崎、甕島、枕崎で発生する副振動の増幅率を求めることにした。増幅率の計算は 10α 以上の最大全振幅が観測された場合について行った（表-6）。福江での増幅率は1.7～2.3、長崎は5.5～8.3、甕島は5.8～9.0、枕崎は7.0となり、平均すると福江、長崎、甕島、枕崎の増幅率はそれぞれ2.0、6.6、7.6、7.0である。これらの値は東シナ海上を東進する気圧波との共鳴的カップリングや浅水増幅、湾水振動等による効果をすべて含んだ結果である。齋田ら¹⁶⁾は上甕島浦内湾で発生する副振動の数値実験を行って、波高0.1～0.2m、周期12.5分の波が湾内に入射すると湾奥部で波高が5～10倍ほど

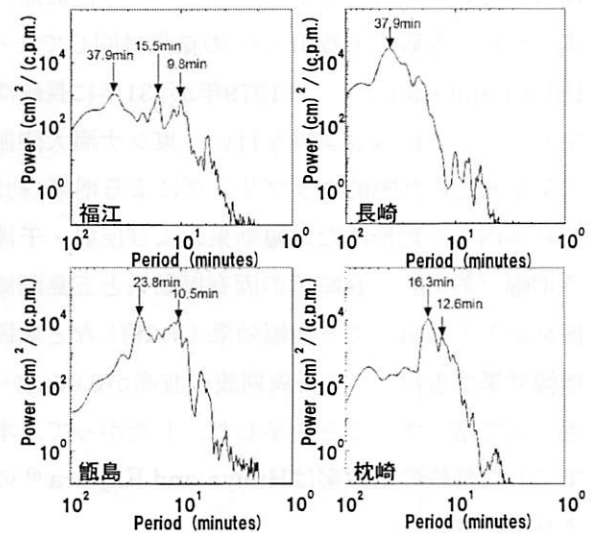


図-18 2012年2月15日の水位変動のパワースペクトル¹³⁾

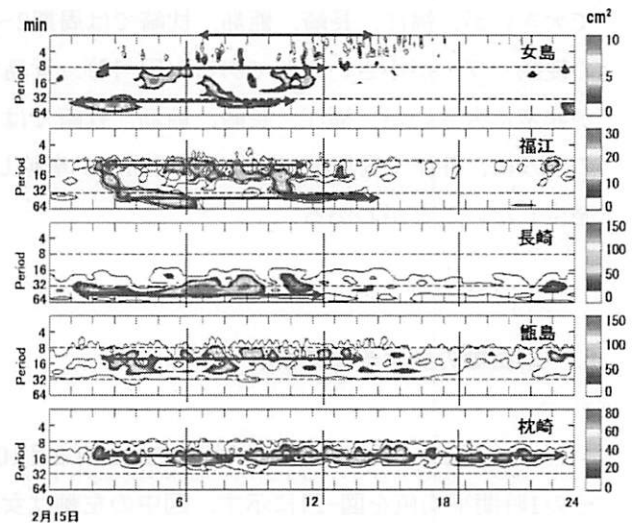


図-19 2012年2月15日の水位変動のWaveletパワースペクトル¹³⁾

表-6 福江、長崎、甕島、枕崎で発生した全振幅 10α 以上の副振動の増幅率¹³⁾

日時	福江	長崎	甕島	枕崎
2月15日午前	2.3	6.7		
2月22日午後			9.0	
2月25日午後		8.3		
3月2日午前	1.8	5.9	6.8	
3月5日午前		5.5		
3月5日午後	2.0		5.8	
3月6日午前	1.7		8.7	7.0

増大していることを示した。したがって、甕島の増幅率について本研究と齋田ら¹⁶⁾の結果は同じであった。Hibiya and Kajiura⁶⁾は1979年3月31年に長崎湾で発生したあびきの数値実験を行い、東シナ海大陸棚上での気圧波との共鳴のカップリングによる増幅(約3倍)、長崎湾内での地形的な増幅効果および反射・干渉による増幅(約5倍)、長崎湾の固有振動系と五島灘領域の振動系との共鳴による増幅効果(約3倍)など数段階の増幅効果が重なって、長周期波の波高が0.06mから3m近くまで増大することを示した。したがって、本研究で示した長崎の増幅率はHibiya and Kajiura⁶⁾の結果よりも小さい。

Waveletスペクトル結果のもう1つ興味深い事実は、女島では周期2～8分の変動パワーが2月15日6～12時で大きい、福江、長崎、甕島、枕崎では周期2～8分の変動パワーが小さいことである(図-19)。女島では3月16日16時～17日10時でも周期2～8分の変動パワーが非常に大きい、福江、長崎、甕島、枕崎ではこの周期帯の変動パワーは小さいままである(図-20)。このように、外洋で周期8分以下の長周期波が卓越しても、福江、長崎、甕島、枕崎では振幅の大きい副振動が発生しないことがわかる。

5. 副振動の発生予報の検討

女島、福江、長崎、甕島、枕崎で2012年2月10日～3月22日に観測された周期61分以下の水位の変動パワーの1時間平均値を図-21に示す。図中の左軸は女島、福江に対して、右軸は長崎、甕島、枕崎に対してである。最も興味深い事実は、女島での水位の変動パワーに関連して福江、長崎、甕島、枕崎での水位の変動パワーが増減する点である。すなわち、女島での変動パワーが大きくなると、他の地点の変動パワーも大きくなっている。女島の変動パワーの具体的な大きさに注目すると、特に10 cm²以上のパワーが長時間に渡って

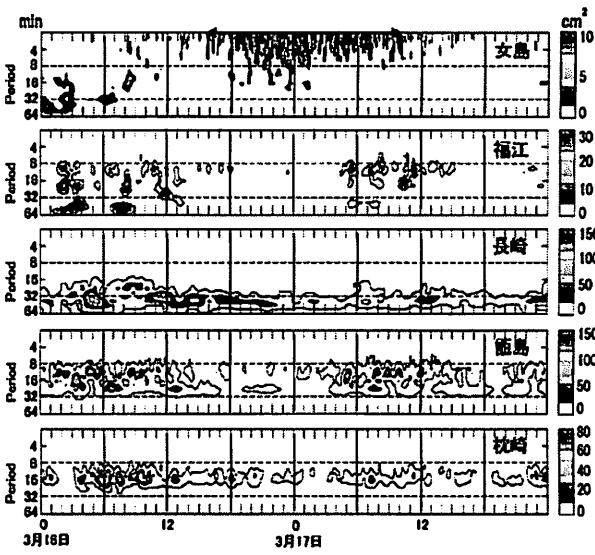


図-20 2012年3月16～17日の水位変動のWavelet パワースペクトル¹³⁾

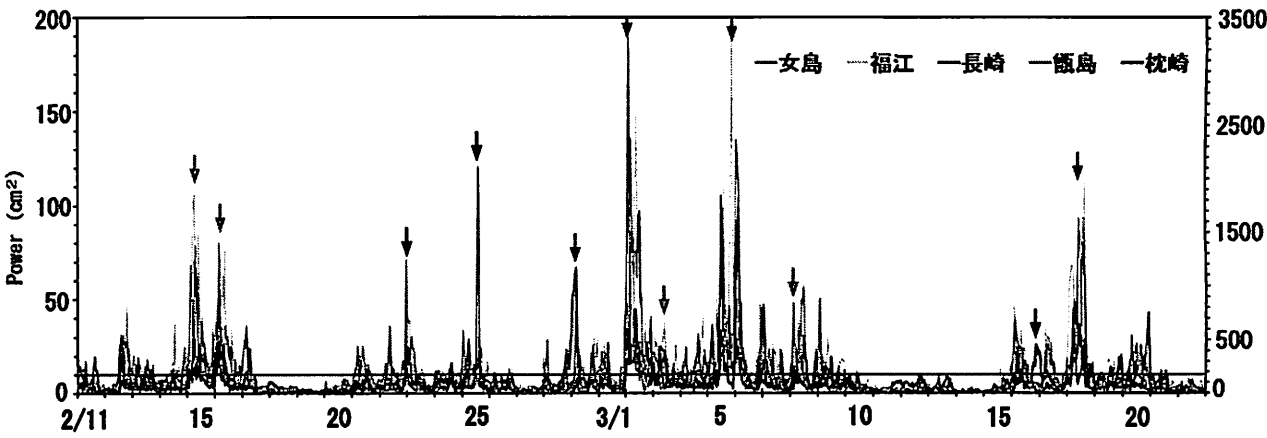


図-21 2012年2月11日～3月22日の水位変動パワーの1時間平均値(左軸:女島,福江,右軸:長崎,甕島,枕崎)¹³⁾

出現している2月25日、16日、3月2日、5～6日、8日、18日の場合には(図-21中の赤と緑の矢印)、福江、長崎、甬島、枕崎でも変動パワーが大きい。すなわち、振幅の大きい副振動が発生している。2月28～29日、3月16～17日(図-21中の青の矢印)を除くと、女島で 10 cm^2 以上の変動パワーが10時間以上継続する場合(図-21中の赤の矢印)、福江では $9.4\sim 12.5\alpha_f$ 、長崎では $8.8\sim 15.3\alpha_n$ 、甬島では $8.7\sim 13.0\alpha_k$ 、枕崎では $9.2\sim 13.3\alpha_m$ の全振幅をもつ副振動が継続期間中に発生している(表-7)。

2月28～29日と3月16～17日の場合(図-21中の青の矢印)も、女島で 10 cm^2 以上の水位の変動パワーが13時間継続した場合であるが、福江、長崎、甬島、枕崎で発生した副振動は全振幅が 10α を超えることはなかった。3月16～17日のWaveletスペクトルをみると(図-20)、女島では周期8分以下の変動が卓越していた。図示はしないが、2月28～29日も同じ結果であった。したがって、湾の固有周期よりも短い周期8分以下の長周期波が継続して伝播してきても、これらの湾では振幅の大きい副振動は起きないことがわかる。

2月22日、25日は女島で 10 cm^2 以上の変動パワーが1時間しか継続していなかったが、22日には甬島で全振幅 $10.5\alpha_k$ 、25日には長崎で全振幅 $12.5\alpha_n$ の副振動が観測された(図-21中の黒の矢印)。ところが、これら以外では、 10α 以上の全振幅の観測例は女島で 10 cm^2 以上の変動パワーが9時間以上継続していた4例だけであった(表-7)。したがって、2月22日、25日のケースもあるが、女島での水位のモニタリングは福江、長崎、甬島、枕崎で発生する振幅の大きい副振動の予報に有効であると考えられる。

2月15日と3月5～6日の福江、長崎、甬島、枕崎の周期61分以下の水位変動パワーの1時間平均値の時系列を女島のものと一緒にそれぞれ図-22、図-23に示す。図中の左軸は女島、右軸は福江、長崎、甬島、枕崎に

表-7 女島で変動パワーが 10 cm^2 以上を継続していた日時と継続時間および各地点における副振動の全振幅の α に対する比¹³⁾

日時	継続時間	継続期間中に発生した最大全振幅の α に対する比			
		福江	長崎	甬島	枕崎
2月15日 2～11時	9時間	10.4	11.0	9.3	8.0
2月16日 0～8時	8時間	7.4	7.7	9.1	6.2
2月28日 18時～29日 7時	13時間	5.2	7.7	4.0	3.4
3月2日 0～24時	24時間	12.5	15.3	11.3	7.5
3月3日 6～11時	5時間	6.7	3.9	4.8	6.3
3月5日 6時～6日 6時	24時間	12.4	11.1	13.0	13.3
3月8日 3～6時	3時間	4.7	3.9	6.3	4.5
3月16日 18時～17日 7時	13時間	6.8	3.0	5.1	3.2
3月18日 2～16時	14時間	9.4	8.8	8.7	9.2

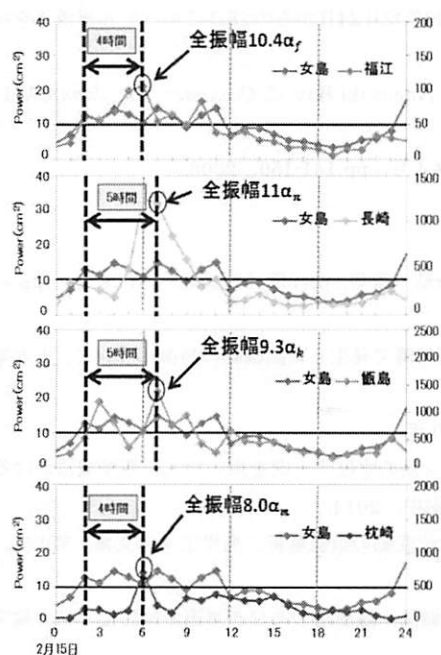


図-22 2012年2月15日の変動パワーの1時間平均値(左軸:女島,右軸:福江,長崎,甬島,枕崎)¹³⁾

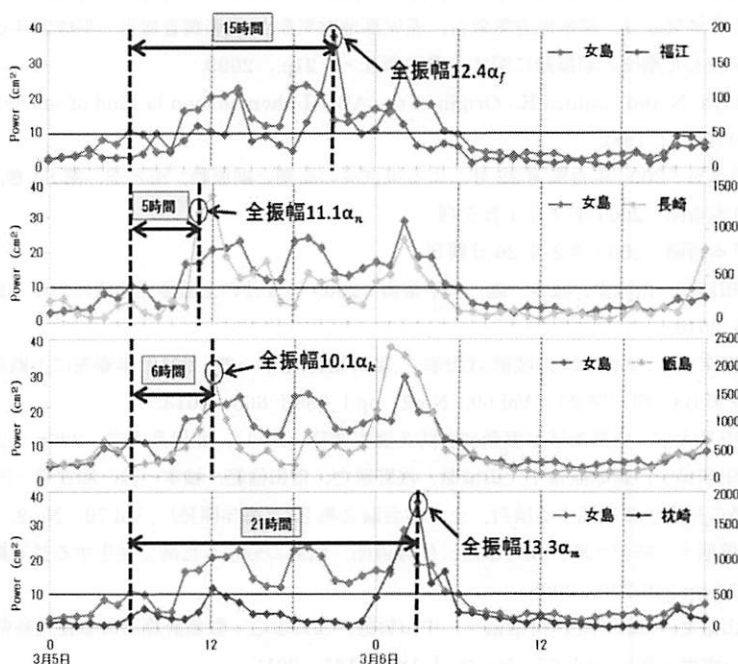


図-23 2012年3月5～6日の変動パワーの1時間平均値(左軸:女島,右軸:福江,長崎,甬島,枕崎)¹³⁾

対してである。2月15日の場合、女島で 10cm^2 以上の変動パワーが出現している2～11時では、長崎、甕島、枕崎の変動パワーも大きく、 10cm^2 以下になった12～23時では小さい。そして、女島での変動パワーが2時に 10cm^2 を超えてから、福江と枕崎では4時間後、長崎と甕島では5時間後に全振幅の大きい副振動が出現している。3月5～6日の場合も、女島の変動パワーが5日6時に 10cm^2 以上になってから福江では15時間後、長崎では5時間後、甕島では6時間後、枕崎では21時間後にその期間の最大全振幅が出現している。図示はしないが、3月2日、18日も同じような結果であった。したがって、女島で周期8～60分の変動パワーをモニターすることによって九州西岸で振幅の大きい副振動が発生する可能性の高いことを4～21時間前から予測できることを示唆した。

6. さいごに

本稿では、2009～2012年の冬から春先の期間に実施した水位、気圧、流速の観測方法及びこれらの観測結果を基にした鹿児島県上甕島浦内湾で発生する副振動の周期、振動モード、振幅増幅率などを紹介した。これらの特性については、数値実験でも再現されている。今後、副振動の防災情報の高度化に向けた予測モデルの開発が進むはずであるが、長崎県男女群島の女島での水位観測も九州西岸で発生する副振動の発生予報にはおおそ有効であることを紹介した。なお、本講の第3章、第4章、第5章の内容は参考文献 10)と13)の内容をまとめたものであることを付記する。

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, 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)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.
- 6) 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.
- 7)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.
- 8)南日本新聞: 2004年3月1日夕刊.
- 9)南日本新聞: 2009年2月26日朝刊.
- 10)安田健二, 山城徹, 城本一義, 萩平裕樹: 2009年3月の上甕島浦内湾における副振動の観測, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.843-848, 2010.
- 11)池田奈保子, 古木裕章, 山城徹, 浅野敏之, 齋田倫範, 城本一義: 2012年春先に上甕島浦内湾で発生した副振動の特徴について, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.I_658-I_663, 2013.
- 12)鹿児島大学: 甕島海域副振動被害防止調査業務 (21-1), 鹿児島大学, 226p., 2010年
- 13)池田奈保子, 新原亜希子, 山城徹, 浅野敏之, 齋田倫範, 城本一義, 加古真一郎: 女島の水位データを用いた九州西岸域における副振動の発生予報に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, 印刷中, 2014.
- 14)白橋朋大, 柿沼太郎, 浅野敏之, 佐藤道郎: 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, Vol.55, No.1, pp.216-220, 2008.
- 15)片山裕之, 加藤広之, 丹治裕一, 中山哲哉, 浅野敏之: 数値計算による鹿児島県上甕島小島漁港のあびき対策の検討土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, I_181-I_185, 2011.
- 16)齋田倫範, 浅野敏之, 松竹渉, 進藤祐介: 数値計算による上甕島浦内湾の副振動特性の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_156-I_160, 2013.