

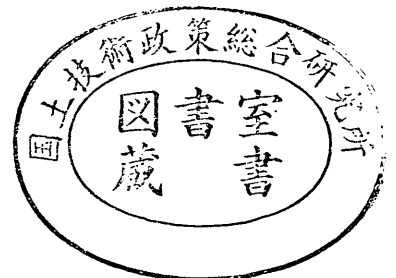
港湾技研資料

数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討

NO. 636 Dec. 1988

高 山 知 司
平 石 哲 也

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 現地における港内副振動現象	4
2. 1 過去の副振動現象の観測例	4
2. 2 長崎港における現地観測	11
2. 3 敦賀港における現地観測	17
3. 副振動の数値計算法とその精度	23
3. 1 基礎方程式と計算条件	23
3. 2 計算結果と解析解との比較	28
3. 3 長崎港における適用性の検討	30
4. 広領域計算による港内副振動特性の検討	39
4. 1 広領域計算の必要性	39
4. 2 港内副振動特性とその増幅機構の検討	40
5. むすび	67
参考文献	69
記号表	70

Amplification Mechanism of Harbor Oscillation Derived From Field Observation And Numerical Simulation

Tomotsuka TAKAYAMA*

Tetsuya HIRAISHI**

Synopsis

Abnormal large oscillations with periods of 10 to 60 min sometimes happens in some Japanese large harbors like Nagasaki-Port in Kyusyu and Sendai-Port in Tohoku with a narrow entrance and long channel. The large harbor oscillations terminate ship loading and unloading works, break mooring ropes of fisher boats or cause overflows of sea water.

In the present paper, the amplifications and modes of harbor oscillations are investigated through field observation and numerical simulation for Nagasaki-port, Tsuruga-port (Fukui prefecture), Iida-harbor (Ishikawa prefecture) and Sendai-port. Simulation for long period waves like tunamis is applied to the computation for the harbor oscillation.

The following main conclusions are drawn :

(1) The validity of the numerical simulation has been confirmed by the comparison with theoretical amplification factors for rectangular and triangular harbors. The ratios of the simulated amplitude among observation points and simulated current velocities in Nagasaki-port agree with those of the observation.

(2) The numerical simulation indicates that the large harbor oscillations induced in the large harbors like Nagasaki-Port and Sendai-Port are mainly caused by the resonance to a seismic in a continental shelf outside the harbors and that the oscillations in the small harbors like Tsuruga-port and Iida-harbor do not depend on the natural oscillation in those but mainly on that in the wide sea area outside the harbor.

(3) The investigation of the oscillation modes in the harbor of interest only is not enough but the investigation in the wide sea area outside the harbor is necessary to clarify the amplification mechanism of harbor oscillation.

Key Words : Harbor oscillation, Field observation, Numerical simulation

* Chief of Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討

高山 知 司 *

平石 哲 也 **

要 旨

長崎港、仙台港のような、港口が狭く、奥行が長い港湾では、周期数十分程度の「港内副振動」とよばれる異常潮位変動が発生することがある。港内副振動が発生し、その振幅が大きくなると、護岸の越流、港湾荷役の停止、係留索の切断による船舶の漂流、等の被害が生じる。したがって、港湾計画の策定時においては、港湾副振動に対する検討が必要である。

本研究では、既存の副振動観測データと今回新たに観測して得られたデータを基にして、港内副振動の特性を検討した。次に、数値計算によって、現地で観測される副振動の増幅機構を明らかにした。本研究で用いた数値計算法は、長波近似と差分法を用いるもので、複雑な地形を持つ不等水深の港湾における副振動の振幅、および振動モードを求めることができる。

本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 長崎港の現地観測データを用いて、数値計算の検証を行ったところ、港内波高比、振動モード、港内流速等の計算値は実測値とよく一致し、本数値計算法の現地における適用性が高いことがわかった。
- 2) 水深200m以浅の陸棚域も含めた広領域計算で、長崎港、仙台港、飯田港（石川県）、敦賀港の副振動特性を検討した結果、長崎港、仙台港のような港内水域の面積が大きい港湾では、陸棚での副振動との共振によって、陸棚と港内で2段に増幅された、振幅の大きい港内の副振動が発生することが確認できた。一方、飯田港、敦賀港のような比較的小さな港湾で発生する顕著な副振動は、陸棚あるいは、港湾をその中に含む飯田湾のような小湾の副振動によって生じており、港湾と陸棚の共振は起こらない。

キーワード：港内副振動、長周期波、現地観測、数値計算

1. まえがき

長崎港、仙台港、鹿島港のように港口が狭く、奥行が長い港湾では、周期数十分程度の異常潮位が発生することがあり、港内副振動と呼ばれている。港内副振動が発生すると、その振幅が大きい場合には、小型船舶の係留索が切断され漂流したり、港内の荷役作業が中断されるとともに、護岸から越流する等の被害が生じる。港内副振動が顕著な港湾としては、長崎港が有名で、過去に、副振動によって港湾施設、船舶等に大きな被害が生じている。¹⁾このような港内副振動は我国だけでなく、諸外国の港湾においても発生し、大きな被害を与えている。

それらの諸事例は、文献²⁾にまとめられている。

港内副振動は、外海から進入する長周期波の周期と、港内あるいは、湾内の水面振動の固有周期が近い場合に、共振現象によって増幅されるために発生すると考えられている。近年では、マリナー等の整備が進められており、このような小型船舶用の港湾では、副振動が発生した場合には、その振幅が小さくとも、レジャーボート等の操船が困難になると考えられる。したがって、従来にも増して、港内副振動対策は、港湾整備の際の大きな課題である。

運輸省港湾局でも、港内副振動問題に対する関心は大きく、各港湾建設局で、管内港湾における港内副振動の

* 水工部 波浪研究室室長

** 水工部 主任研究官（浮体運動解析担当）

現地調査が行われている。³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾また地方公共団体においても、管理している港湾の副振動現象について調査を実施している。これらの調査および観測資料から、各港の副振動の周期や振幅がある程度明らかになっている。本研究では、これらの観測データと、独自の観測により得られたデータを基に港内副振動の種々の特性を系統的にまとめることと、現地で観測されるような副振動がどのような機構で増幅されるのかを数値計算で解明することを目的とした。

そこで、本研究ではまず、既往の調査資料をもとに、副振動による港湾施設、船舶等の被害状況および副振動の実態をまとめた。対象とした港湾は、長崎港、仙台港および飯田港（石川県）である。次に、副振動の現地観測を行って、現地における副振動の振幅、周期、湾の固有周期との関係を詳細に検討した。対象とした港湾は、長崎港および敦賀港（福井県）である。なお、このうち、長崎港における現地観測データは、運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所が昭和59年度に収集したものであり、本研究では、観測データを再整理して、副振動のスペクトル解析等を行った。敦賀港では、今回、独自に観測と解析を行った。

現地観測から副振動の実体を明らかにした後、本研究では、差分法を用いた数値計算によって、副振動の増幅機構を検討することにした。そこで、長方形湾、矩形湾および三角形湾における共振スペクトルについて、合田が求めた解析解⁸⁾⁹⁾と、計算結果を比較して数値計算法の検証を行った。さらに、長崎湾における副振動の観測結果と、計算結果を比較して、数値計算法の現地での適用性を調べた。

最後に、大陸棚を計算領域に含んだ広領域における計算を行って、各港湾における副振動がどのような機構で増幅されているのかを検討した。対象とした港湾は、長崎港、敦賀港、飯田港、仙台港である。

2. 現地における港内副振動現象

2.1 過去の副振動現象の観測例

(1) 長崎港

図-1は、長崎港の平面地形を示す。長崎港は港口を西に向かって開き、北東方向に細長く伸びる長方形の港で、港口部が約1km、港長は約7kmである。水深は、北部で10~20m、南部で20~40mである。長崎港の副振動現象は、古くから、“アビキ”と地元では呼ばれている。長崎港では振幅が20cm前後のアビキは常時生じており、振幅が1mを越すものが年1~2回生じる、と言われて¹⁾いる。¹⁾このアビキの発生によって、船舶の操船困難・

係留索の切断等の被害が生じている。

図-1の松ヶ枝にある長崎検潮所における潮位記録を用いて、昭和36~56年間に生じたアビキについて整理した報告書¹⁾によれば、次のようなことがわかっている。振幅40cm以上のアビキは、1年間に平均して40数回発生し、その周期を調べると、35分のものが卓越している。また、アビキの継続時間は3~5時間が多く、2日以上にわたる例も少数ながら存在している。月別の発生度数

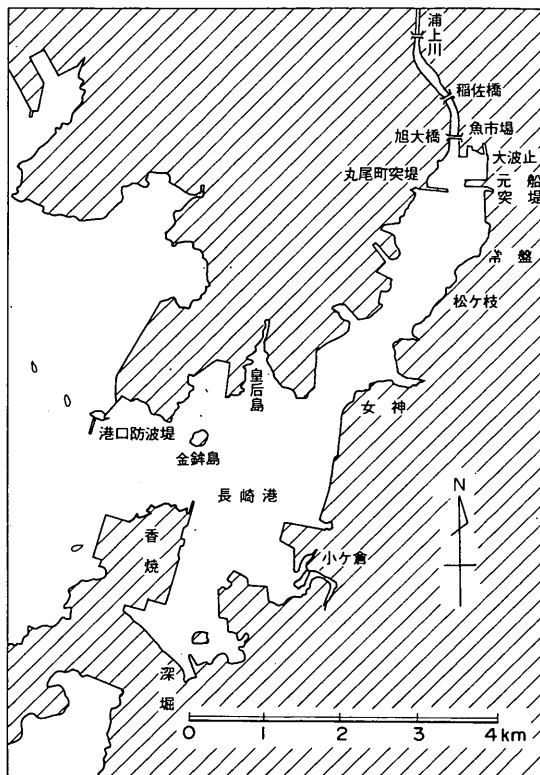


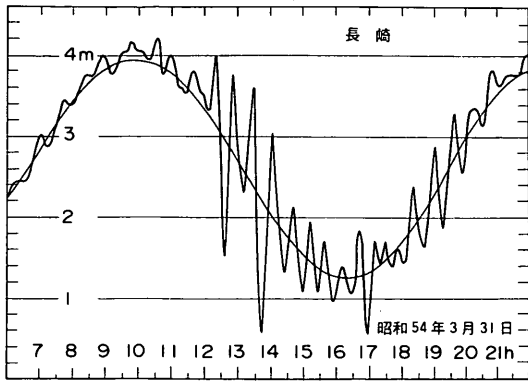
図-1 長崎港平面地形図

を調べると、夏期の7~9月には極端に少なく、冬期1~3月に多く発生している。

長崎海洋気象台が、松ヶ枝の検潮所で観測を開始してから最大のアビキは、昭和54年3月31日に発生している。

¹⁰⁾このときの検潮記録を図-2に示す。図の太線が実測潮位、細実線が推算潮位を示す。最大振幅は2.78mであるが、港奥ではさらに大きく、4.70m程度であったと推測されている。¹⁰⁾

このアビキによって、長崎港内では、津波のように押し寄せてきた高波によって3人が波にのまれ、その内1人が亡くなった。また、港奥の魚市場の岸壁に係留中の44tの漁船が、係留ロープが切断したために漂流して浦



昭和54年3月31日の観測史上最大のアビキの長崎検潮所(松ヶ枝)における潮位記録(推算潮位、満潮9h56m—395cm、干潮16h19m—125。ただし、潮位表基準面は潮高より121cm差し引いた値)

図-2 最大のアビキ観測記録¹⁾

上河口の稲佐橋に激突して大破浸水するなどの被害が生じた。¹⁾

(2) 飯田港

能登半島先端部に近くに位置する飯田港(石川県珠洲市)では、昭和49年度に改修事業が完了し、現在の港形ができ上がった頃から、台風、冬期風浪および低気圧通過時に、防波堤先端部から港内にかけて数十cmの水位差を伴う渦が発生するようになった。日本海中部地震で発

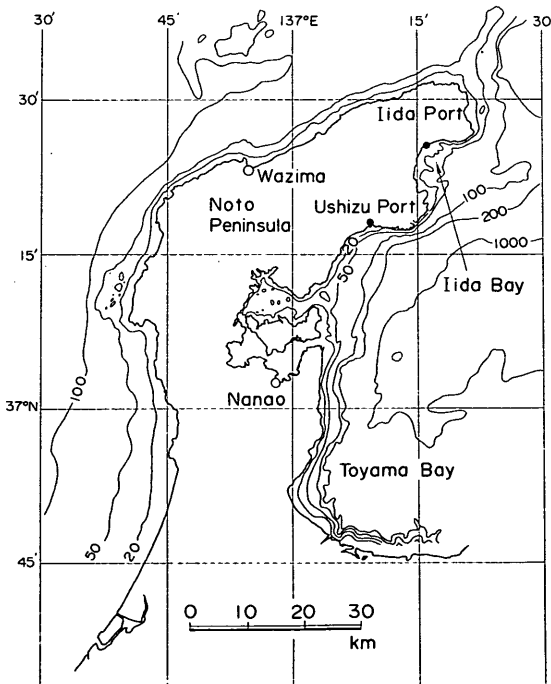


図-3 飯田港の位置と周辺地形

生した津波が港内へ進入したときには、港内に大きな渦が発生しており、¹¹⁾飯田港における渦の発生も津波のような長周期波の流入によって起こったものと考えられる。飯田港における港内副振動に関する調査資料は石川県土木部によってまとめられている。^{*}

以下に、上述の調査資料の概要をとりまとめる。

図-3は、飯田港の位置を示した図である。表-1は、昭和53年に渦が発生した日と当日の気象条件をまとめたものである。このなかで、番号1で示した昭和53年2月27日の渦は、3月1日まで継続して生じ、係留中の漁船数隻に被害を与えた。この期間の渦現象に関しては詳細

表-1 渦発生時の気象条件

番号	発生年月日	最大潮位	最大風速		最大瞬間風速	
			風向	風速	風向	風速
1	S 53. 2. 27	46 ^{cm}	W SW	11.5 ^m	S W	23.5 ^m
2	S 53. 10. 29	66	S W	11.9	S W	26.1
3	S 53. 11. 29	90	S W	15.0	S W	18.8
4	S 53. 12. 4	65	W SW	14.9	W. SW	20.5

な記録がまとめられている。それらの記録を以下に示す。

図-4は、昭和53年3月1日7:00の飯田港内における渦の状況を目視観測によって記録したものである。図中の矢印が渦発生時の流況を示し、港外から流速の大きい流れが流入し、港奥の④点および⑤点では大きな水位差を伴う循環が発生している。また③で示した防波堤および④の棧橋先端部では流速の速い流れが往復し、防波堤および棧橋先端部ではなく離によって渦が発生している。写真-1(1)および(2)は④および③の先端部での渦を撮影したものである。日本海中部地震津波のときに秋田港、深浦港で見られた渦¹¹⁾の状況と類似しており、比較的周期の短い長周期波によって起こされたことが推測できる。③の波除堤の根元のE. 1およびE. 2点では目視により潮位が観測された。E. 1点の水位が最高になったとき、E. 2点の潮位は最低になり、逆にE. 2点の水位が上がったときには、E. 1点の水位が下がったようである。図中の数字は、E. 1点およびE. 2点で同時に測定された工事基準面を0とした潮位であり、E. 1点で+1.10mのときE. 2点では+0.20m、E. 1点で+0.30mのときE. 2点で+1.00mであった。両点の水位差は最高で0.7~0.9m程度となる。

* 「石川県異常潮位について(飯田港)、昭和53年」としてまとめられた資料で、石川県土木部より提供を受けた。

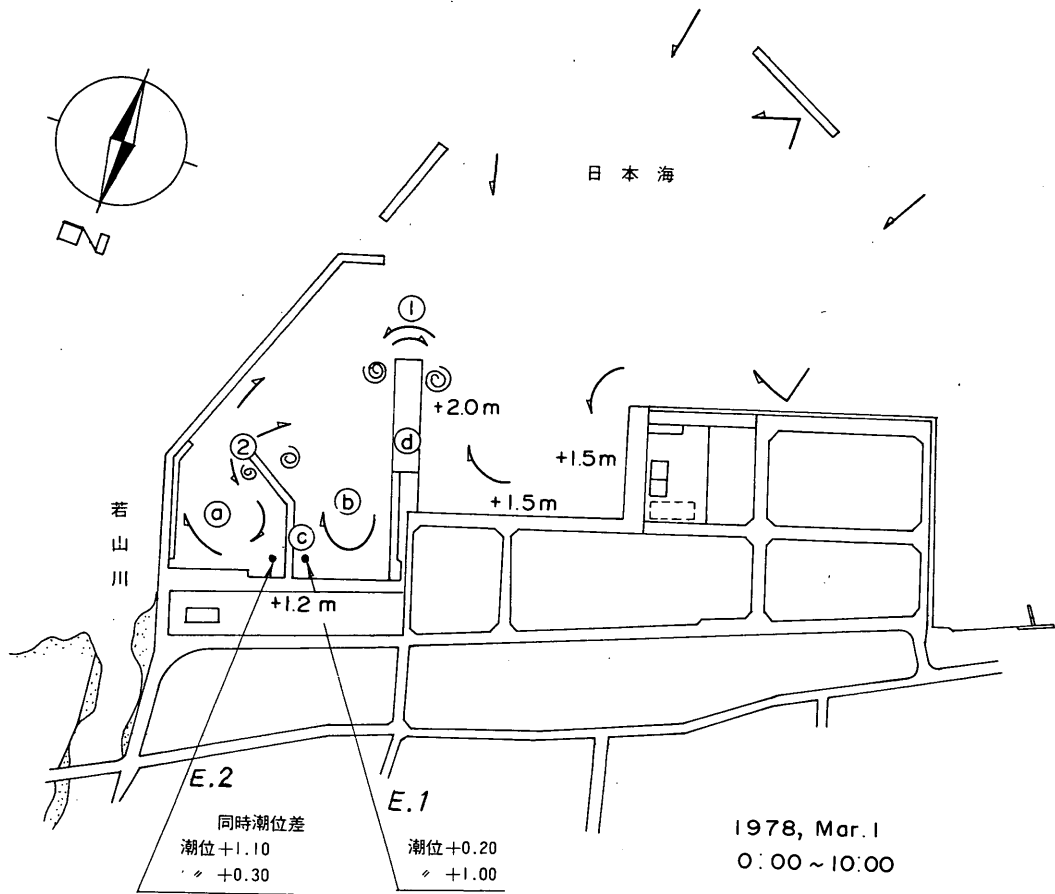
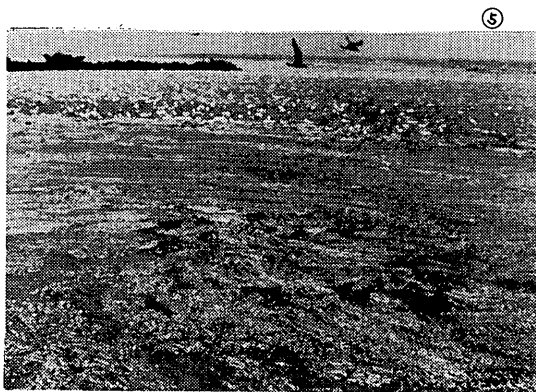
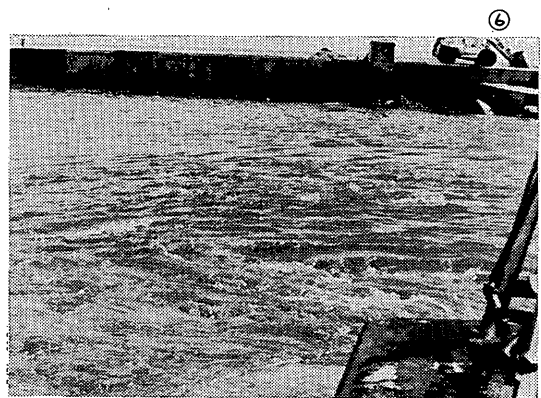


図-4 渦発生状況の目視観測結果



(1) ①先端部

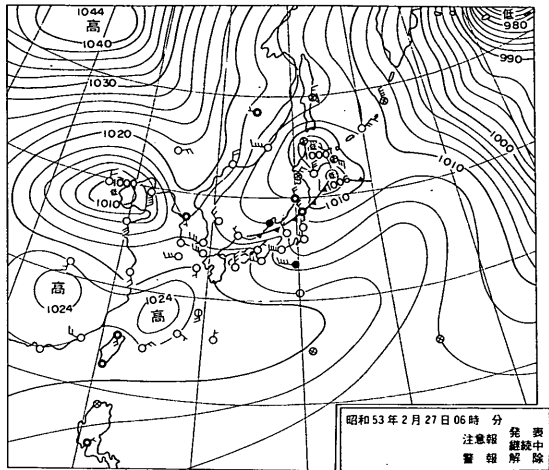


(2) ②先端部

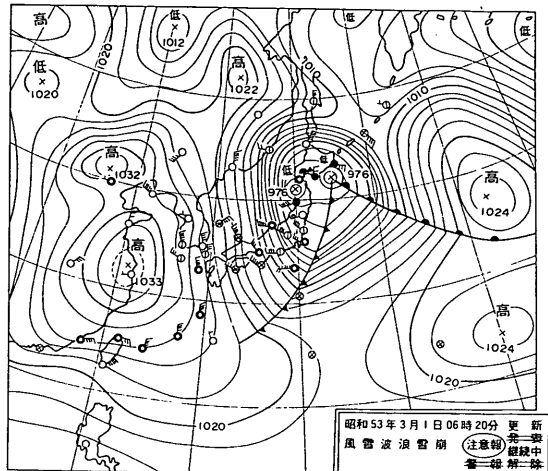
写真-1 飯田港における渦の様子

図-5は、昭和53年2月27日～3月2日の天気図を示す。2月27日に中国の青島半島付近にあった低気圧は、

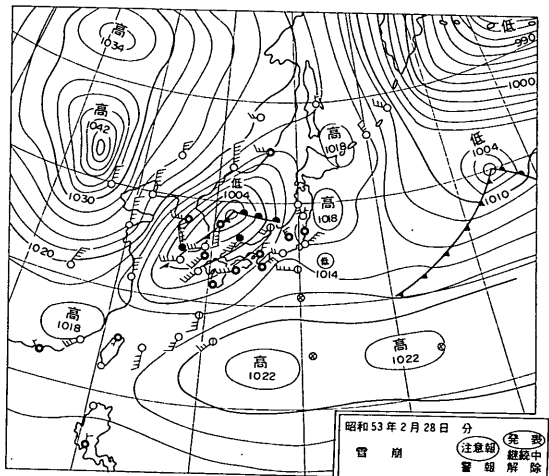
発達しながら東へ進み、日本海で横切って3月1日には太平洋岸へ抜けている。この低気圧の通過により日本海



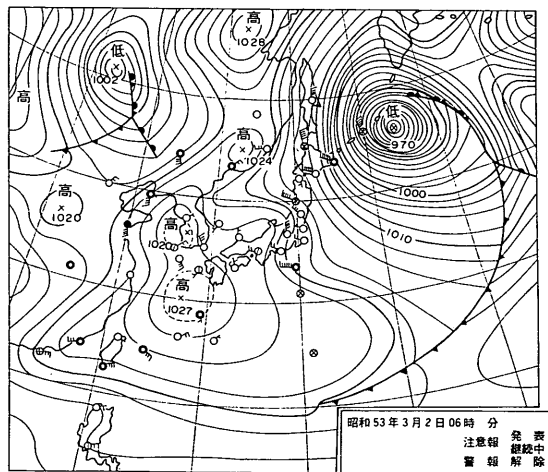
(1)



(3)



(2)



(4)

図-5 渦発生時の天気図

沿岸部では風が強まり、金沢気象台から強風波浪雪崩注意報が発令されている。3月1日に低気圧が日本海上を通過したのちに、渦の発生が盛んになっている。したがって、飯田港の副振動は、低気圧の通過により気圧低下が

起こり外洋で微小振幅長波が生じたことが起因して発生した可能性が考えられる。

図-6は、2月27日～3月2日の飯田港の検潮所で観測された潮位記録である。図中“渦発生”の記録はある

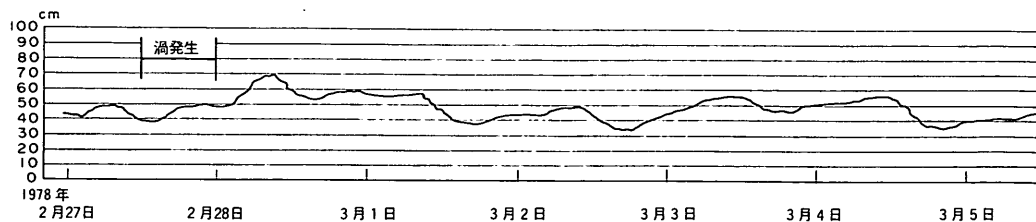


図-6 飯田港の検潮記録

が短周期の潮位変動はあらわれていない。図からわかるように、飯田港検潮所の記録紙の巻き取り速度が2.5mm/hと非常に遅く、副振動のように周期が1時間以下の潮位変動は記録されなかったと考えられる。

飯田港の西方に、宇出津港がある。前出の資料では、宇出津港でも飯田港に渦が発生したのと同時刻に港内に

異常潮位が発生した、と記録されている。表-2は、宇出津港内の岸壁で目視により観測された昭和53年2月28日～3月1日の毎正時の間の1時間内の最高潮位と最低潮位をまとめたものである。表中の記録から1時間以内に7～30cm程度の潮位変動が生じていることがわかる。天文潮位の変動は1時間に数cm以内であるので、このよ

表-2 宇出津港異常潮位整理表

時 日	単位: cm																								最高 位	最低 位	観測 時間	最高 位	最低 位
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24					
2月 28	11	13	19	26	29	19	19	30	28	25	22	20	23	26	35	42	49	40	54	62	64	43	38	30	20.40	64			
4	6	11	16	20	14	16	23	22	18	13	13	16	17	23	29	33	30	40	42	25	20	22	15	0.00	4				
3月 1	37	27	29	33	34	40	41	41	39	41	45	40	42	36	37	以下 欠測								10:50	45				
9	12	10	14	25	24	24	28	26	18	12	8	10	10	12										11:10	8				

うな大きな潮位変動は港内における長周期波の発生によるものと考えられる。宇出津港検潮所の潮位計の応答は良好で、当時の潮位変動を明確に記録している。図-7は、宇出津港検潮所の昭和53年2月28日～3月1日の潮位記録を示す。図の上段に太実線で潮位記録を示す。細実線は推算天文潮位である。実潮位から推算潮位を差し引いた副振動成分を、図の下段に示す。2月28日3:00～16:00は副振動の振幅は5cm程度であるが、2月28日23:00～3月1日2:00の振幅は大きく、15～18cm程度である。その周期は短く、1時間内に5～6個の峰が出現することから、10分程度と推測される。図-8は、副振動成分のスペクトルを求めたもので、11分程度に顕著

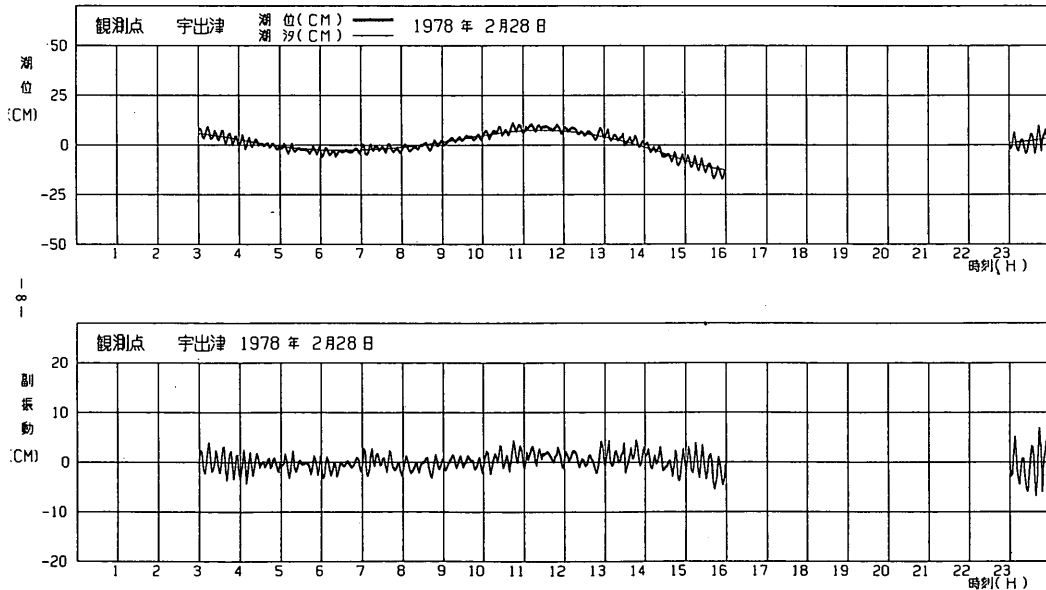
なピークを持っている。

飯田港における副振動周期は明らかではないけれども、比較的短い周期をもつ長周期波によって港内渦が発生することから、宇出津港と同様に周期10分程度の副振動が生じたものと思われる。

なお、副振動振幅の求め方およびスペクトル計算法は、2、2および2、3で示す。

(3) 仙台港

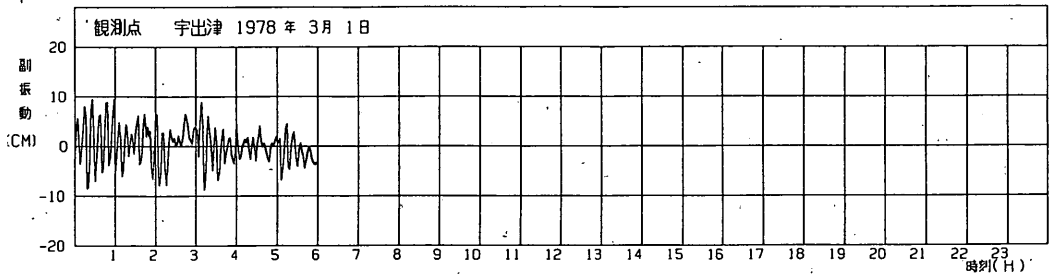
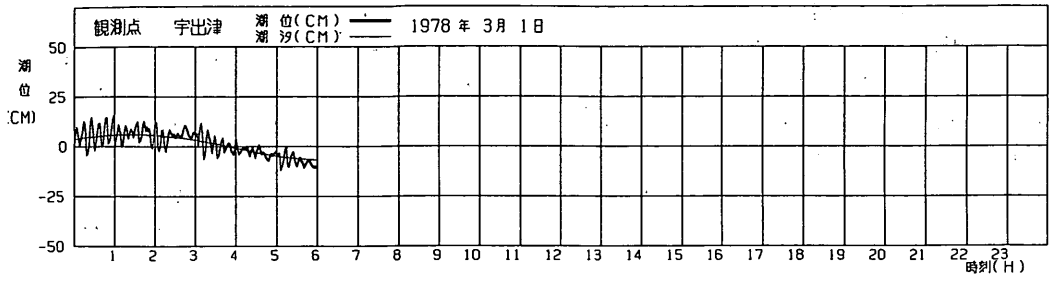
運輸省第二港湾建設局管内の東北、北関東地方太平洋岸には、鹿島港、仙台新港のような堀り込み型式の港湾あるいは、大船渡湾、釜石湾などのリアス式の湾が多く点在する。いずれも港口が狭く、細長い長方形の港湾で



※ 潮位の基準 (0cm) は、記録紙の0.0の線より、-25.5 (cm)

(1) 1978年2月28日

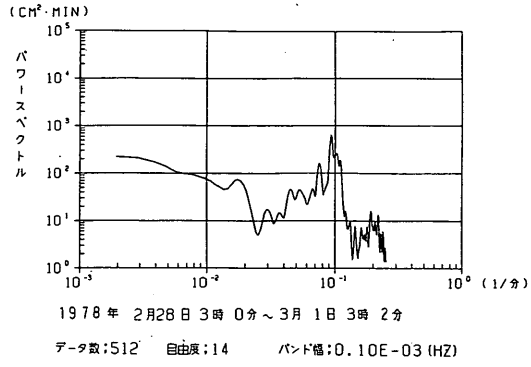
図-7 宇出津港の潮位および副振動の記録



※ 潮位の基準 (0 cm) は、記録紙の 0.0 の線より、-25.0 (cm)

(2) 1978年3月1日

図一七 宇出津港の潮位および副振動の記録

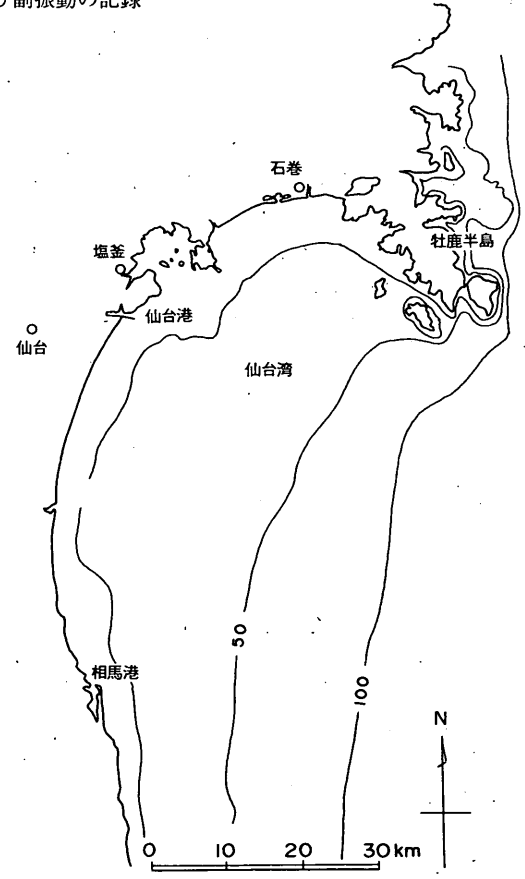


図一八 宇出津港の副振動スペクトル

あり、外海の擾乱との共振によって港内副振動が発生しやすい形状を示している。

これらの港湾における副振動現象については、第二港湾建設局が現地観測を行い、その特性を明らかにしている。⁴⁾⁵⁾⁶⁾ここでは、それらの代表例として仙台新港における観測例を示す。

図一九は、仙台新港の周辺地形図である。仙台新港が位置する宮城県の海岸は牡鹿半島から相馬港にかけて大きな弧を描いており、湾口の広い大きな湾を形成している。仙台新港は弧の中央部に、くさびを打ち込むように、掘込み港湾として建設されている。



図一九 仙台港周辺の地形

仙台新港における現地観測は、1981年9月より1982年2月まで行われた。図-10は、仙台新港における潮位測定点を示した図である。STN.1は既設の超音波式波高計設置点で、測定データを0.01 Hz以上の周波数成分をカットするローパスフィルターを通して、港外の副振動を観測した。ST.2～5には長周期波計²⁰⁾を取り付けて港

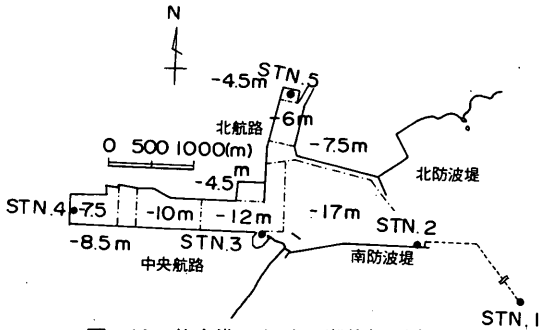


図-10 仙台港における潮位観測点⁴⁾

内の副振動を観測した。

図-11は、観測された副振動波形の一例で、潮位変動から、潮汐成分を差し引いて副振動成分のみを示している。H₁～H₅は、それぞれSTN.1～5の副振動波形を示し、STN.4では振幅40cmにもなる大きな副振動が生じたことがわかる。表-3は、港奥のSTN.4での副振動が顕著になった時間を選んでまとめた観測期間中の代表ケースで、各ケース共6時間の観測データをまとめた。このなかでケース6～14における観測された副振動の“増幅率”を図-12に示す。

ここでの“増幅率”は、港内の副振動振幅の港外の副振動振幅に対する比で、ある周期をもった港外の微小振幅長波の振幅が、港内でどの程度大きくなるかを示した

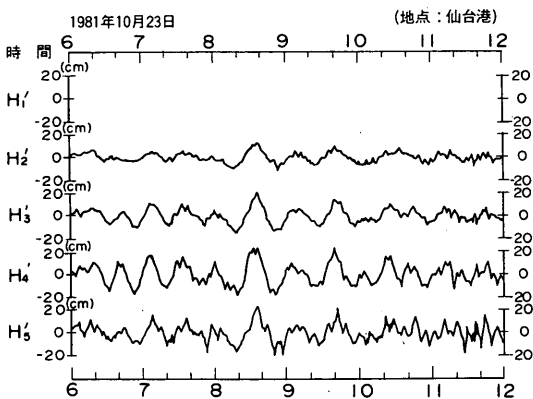


図-11 仙台港の副振動波形⁴⁾

表-3 仙台港における副振動代表ケース

年	月	No.	日	時
S. 56	9	1	12日	12時～18時
		2	30日	18時～24時
10		3	2日	0時～6時
		4	5日	3時～9時
		5	23日	6時～12時
11		6	3日	2時～8時
		7	9日	6時～12時
		8	27日	18時～24時
12		9	10日	0時～6時
		10	20日	0時～6時
		11	30日	9時～15時
S. 57	2	12	4日	18時～24時
		13	12日	9時～15時
		14	28日	0時～6時

ものである。具体的には、図-11に示した副振動波形のスペクトルを求め、港外のSTN.1に対する港内測点STN.2～5のエネルギー比の平方根を計算した。すなわち、“増幅率” α_i ($i=2\sim5$) は次式で計算できる。

$$\alpha_i(f) = \sqrt{S_i(f)/S_1(f)} \quad (i=2\sim5) \quad (1)$$

ここに、 f : 周波数

$S_i(f)$ ($i=2\sim5$): STN.2～5における副振動スペクトルのエネルギー密度

$S_1(f)$: STN.1における副振動スペクトルのエネルギー密度

図-12はそれぞれSTN.2～5の増幅率を示し、実線は1981年11月のケース6、7、8の平均値、破線は、1981年12月のケース9、10、11の平均値および一点鎖線は、1982年2月のケース12、13、14の平均値である。仙台新港の中央航路奥のST.4では、23分程度で、増幅率は最大となっている。その他、18分、15分、5.5分程度にピークをもつ。観測期間ごとの計算結果を比較すると、1981年11月は、同年の12月、1982年2月の増幅率に比べて少し大きい、ピーク周期は一致しており、観測期間が異なっても港内の増幅率はあまり変化しないものと考えられる。

北航路奥のSTN.5では、STN.2と同様に、23分で顕著なピークをもつが、15分、10分、7分程度にもピークを持つ。仙台新港の振動モードをMattioliの手法で調べた結果⁶⁾によると、仙台新港における振動モードは、港

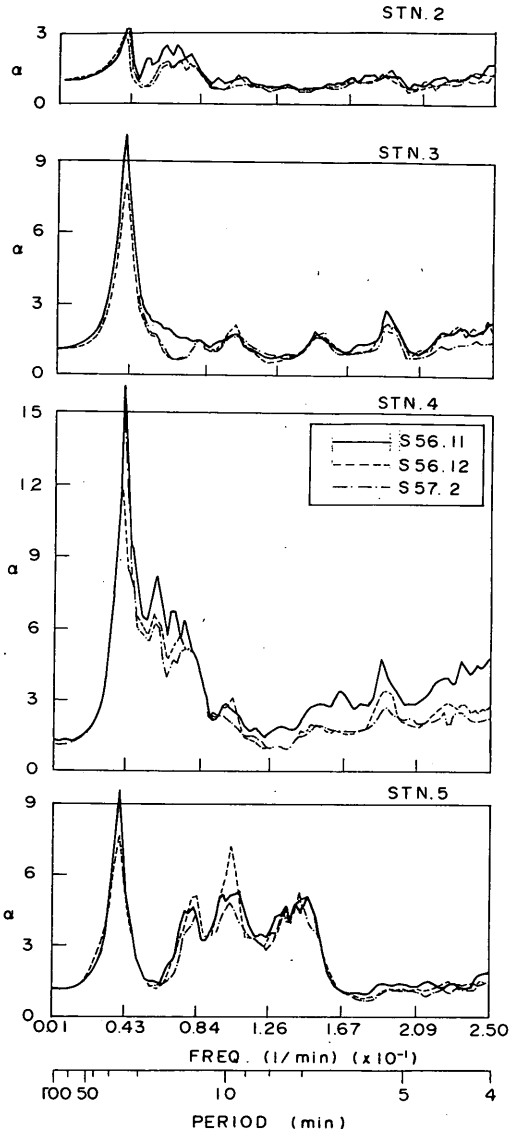


図-12 仙台港内の増幅率⁴⁾

口の STN.2 付近を節、中央航路奥の ST.4 を腹とする 1 次モードの固有振動周期が 25 分、2 次モードの固有振動周期が 13 分、3 次モードの固有振動周期が 5.5 分である。北航路奥の ST.5 では、中央航路との接点付近を節として、航路奥を腹とする 1 次モードの振動周期 6.5 分でも、大きな振動が生じる。

したがって、ST.4 の実測増幅率にみられる 23 分、15 分、5.5 分のピークは、それぞれ中央航路の 1 次、2 次、および 3 次の固有振動によって生じたものと考えられている。ST.5 における 23 分、15 分のピークは、中央航路の振動が大きく影響することによって生じ、7 分のピーク

は、北航路独自の固有振動によって生ずると考えられている。ST.4 における 18 分、および ST.5 における 10 分のピークに相当する固有振動モードは計算では現れてはいないが、現地では、港内で 18 分、10 分の周期を持つ振動モードが生じているものと推測されている。

2. 2 長崎港における現地観測

長崎港の副振動の、2.1 で示した過去の観測では、その観測点が少く、増幅率などの解析ができない。そこで、運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所は、港内 4 点に簡易検潮所を、港外の伊王島に長周期波高計²⁾を、港内の 3 地点に 2 方向流速形を設置して長崎港の副振動を観測した。^{3), 13)}ここでは、その観測内容の概要を示すとともに、観測データの解析を行って、長崎港の副振動特性を検討した。

(1) 観測地点と観測期間

図-13 は、長崎港における現地観測地点を示す。図中の×印の No. 1 伊王島 (Ioujima) には長周期波高計を取り付け、港外の潮位変動を調べた。図中の○印の、No. 2 香焼 (Kouyagi)、No. 3 深堀 (Fukahori)、No. 4 小ヶ倉 (Kogakura) および No. 5 丸尾 (Maruo) には、簡易検潮所を設置して港内の潮位変動を求めた。

表-4 は、各観測地点の記録方式と観測期間を示したものである。表に示すように、No. 1 ~ No. 5 の潮位変動は、1984 年 1 月 8 日 ~ 3 月 31 日の間、連続してアナログチャート上に記録されている。

図中の三角印は、2 成分の水平流速を測定するために電磁流速形を設置した点で、No. 1 舵掛 (Kajikake)、No. 2 女神 (Megami)、No. 3 係船 (Keisen) である。各点において東西方向 (E-成分、E 方向を正) および南北方向 (N-成分、N 方向を正) の 2 方向の流速成分を測定し、2 分間隔にサンプリングを行ってデジタル値として記録した。流速の観測期間は、1984 年 3 月 1 日 ~ 3 月 31 日である。

観測期間中、丸尾地点の潮位記録のうち、副振動が顕著になった日の記録を副振動解析期間として 10 ケース抽出した。表-5 は、この 10 ケースを示したものである。流速記録については、潮位記録と同一期間の観測データについて解析を行った。流速データの解析を行ったのは、表-5 のケース 6 ~ 10 である。

(2) 副振動の解析方法

アナログチャートに記録された潮位記録は、デジタイザーを用いて 2 分間隔で読み取り、デジタルの時系列に整理した。そして、全デジタルデータに関して、60 分間の移動平均を 2 回行って、潮汐成分を計算した。i 番目の潮汐成分の値 η_i は次式で計算できる。

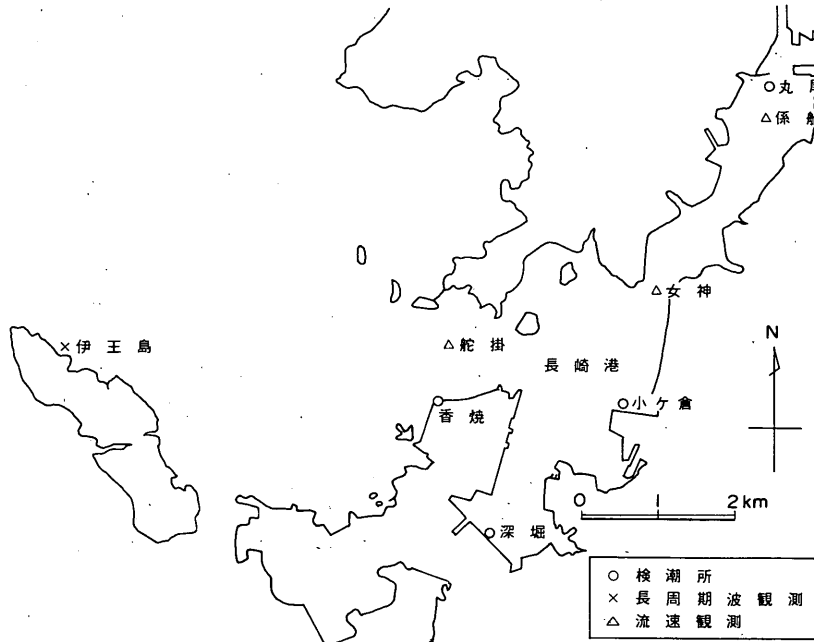


図-13 長崎港における現地観測地点

表-4 記録方式と観測期間

地点No	地点名	記録方式	観測記録期間
1	伊王島	長周期波アナログチャート	昭和59年1月8日 3月31日
2	香焼	潮位アナログチャート	
3	深堀		
4	小ヶ倉		
5	丸尾		
1	舩掛	流向流速デジタル記録	昭和59年3月1日
2	女神		3月31日
3	係船		

表-5 長崎港における副振動の代表ケース

ケースNO	抽出ケースの日時
1	1月12日0時~12日24時
2	1月18日0時~18日24時
3	1月19日0時~19日24時
4	1月30日0時~31日24時
5	2月1日0時~2日24時
6	3月13日0時~13日24時
7	3月15日0時~15日24時
8	3月18日0時~19日24時
9	3月26日0時~26日24時
10	3月27日0時~28日24時

$$\bar{\eta}_i = \frac{1}{L^2} \left\{ \sum_{K=1}^{L-1} K \cdot \eta_{i-L+K} + L \cdot \eta_i + \sum_{K=1}^{L-1} K \cdot \eta_{i+L-K} \right\} \quad (2)$$

ここに、 η_i : 潮位記録

$\bar{\eta}_i$: 潮位のなかの潮汐成分

L : 移動平均を行うデータ個数
(本計算では、 $L=30$)

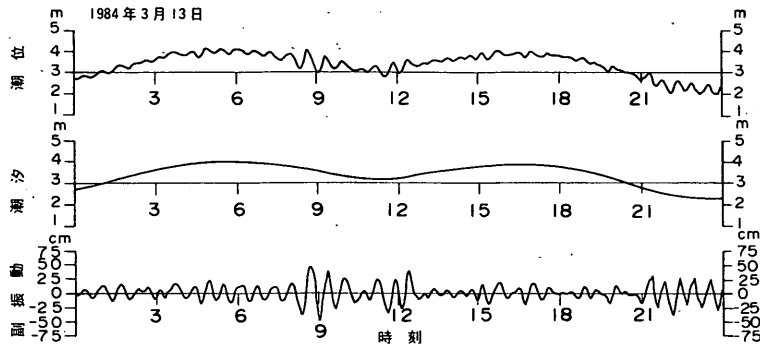
副振動成分 η' は、次式で計算した。

$$\eta'_i = \eta_i - \bar{\eta}_i \quad (3)$$

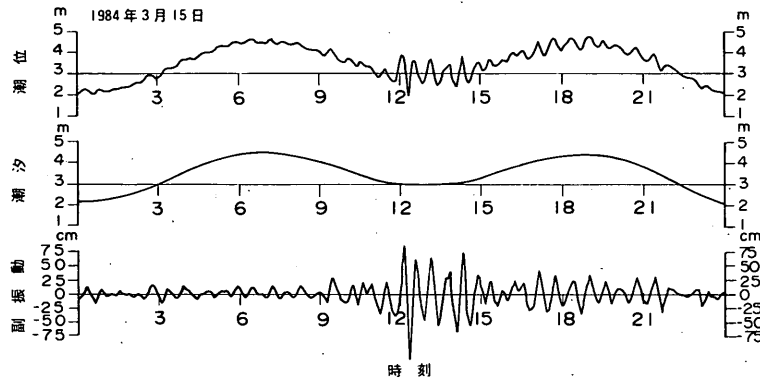
図-14は、上記の手法で求めた副振動の経時変化の一例で、丸尾におけるケース6および7の副振動を示した。図-14(1)および(2)がそれぞれケース6(1984年3月13日)およびケース7(1984年3月15日)の副振動

を示す。各図において上段が潮位記録、中段が移動平均を行って求めた潮位記録である。潮汐記録は滑らかな曲線を示し、2回の移動平均によって副振動成分が除去できることがわかる。下段は副振動成分を示す。副振動の波形記録を見ると大きな振幅の波は、数波連続して発生しており、大きな振動は数時間継続して発生することがわかる。

そして、副振動の波形記録について、通常の風波と同



(1)



(2)

図-14. 長崎港の潮位と副振動の経時変化

様にゼロアップクロス法によって一波ごとの波高および周期を定義した。

表-6は、丸尾における波高40cm以上の波*について、周期別に出現回数を示したもので、30~39分の周期を持つ波の頻度が高く、全体の約70%を占めている。観測期間中の最大波は、3月15日11:58~12:28に発生し、波高208cm、周期30分であった。他の測定点でもほぼ同時に最大波が発生した。表-7は、伊王島~丸尾の最高

波の波高と周期の一覧表である。最大波の周期 T_{max} は、30~46分と場所によって少し異なる。しかし、その差は16分以内であるので、各点の最高波は、同一の波であると考えられる。すなわち、伊王島で23cmであった長周期波が、港口の香焼で34cmとなり、港内で増幅されて、深掘および丸尾で、それぞれ85cmおよび208cmとなったことが推測できる。

表-6 副振動の周期別出現回数

周期別・波高出現回数
 検潮所：丸尾
 観測期間：1982年1月1日~1982年4月30日

波高 周期 (cm) (分)	40- 49	50- 59	60- 69	70- 79	80- 89	90- 99	100- 109	110- 119	120- 129	130-
20-29	5	4		1						10
30-39	40	21	10	8	1	2	2	1	1	87
40-49	33	14	4	2				1		55
50-59	3	2	3				1	1		10
60-69	2	1	1							4

*ゼロアップクロス法で定義された副振動の各波を“波”と呼ぶことにする。

表一七 最高波の波高と周期

1982年3月15日			H_{max}	T_{max}
			cm	min
伊	王	島	23	34
香		焼	34	46
深		堀	85	42
小	ヶ	倉	66	36
丸		尾	208	30

(3) 副振動のスペクトルと波高比

表一五の中から、副振動現象が顕著な期間として、丸尾における波高20cm以下の副振動の発生回数が少ない期間を選定しスペクトル解析を行った。表一八に、スペクトル解析を行った期間と、その間の波数、波高20cm以下の波の出現頻度を示す。解析に用いた2分間隔のデジタルデータ数は、ケース2および7では1024個、その他のケースでは512個である。スペクトルの自由度は、種々変化させて試算した結果、スペクトルのピーク周波数が明瞭に判別できるように14を採用した。ウィンドウは、コヒーレンスが±1の範囲に収まる Parzen のウィンドウ¹⁴⁾を用いた。

さらに、港外および港口の副振動成分が港内においてどのように増幅するかを検討するために、港口部と港内の2地点間のコヒーレンスおよびフェイズを次式で計算した。

$$Coh_{ij}^2(f) = \frac{Co_{0ij}^2(f) + Q_{0ij}^2(f)}{S_i(f) \cdot S_j(f)} \quad (4)$$

$$\varphi_{ij}(f) = \tan^{-1} \left(\frac{Q_{0ij}(f)}{Co_{0ij}(f)} \right) \quad (5)$$

ここに、 f ; 周波数

$Coh_{ij}(f)$; i および j 点間のコヒーレンス

$S_i(f)$; i 点の副振動の周波数スペクトル

$S_j(f)$; j 点の副振動の周波数スペクトル

$Co_{ij}(f)$; i および j 点間のコ・スペクトル

$Q_{0ij}(f)$; i および j 点間のクオドラチャ・スペクトル

$\varphi_{ij}(f)$; i および j 点間のフェイズ

である。

$Co_{ij}(f)$ および $Q_{0ij}(f)$ はそれぞれ、 i と j 点のクロススペクトル $\Phi_{ij}(f)$ の実部および虚部に相当する。

コヒーレンスは、2地点間の相互相関を示しており、1に近い値であれば2地点が同一モードの振動を行っている。フェイズは2地点間の位相差を示し、2地点の振動が同一位相であれば、フェイズは0°となり、逆位相であれば±180°に近い値をとる。

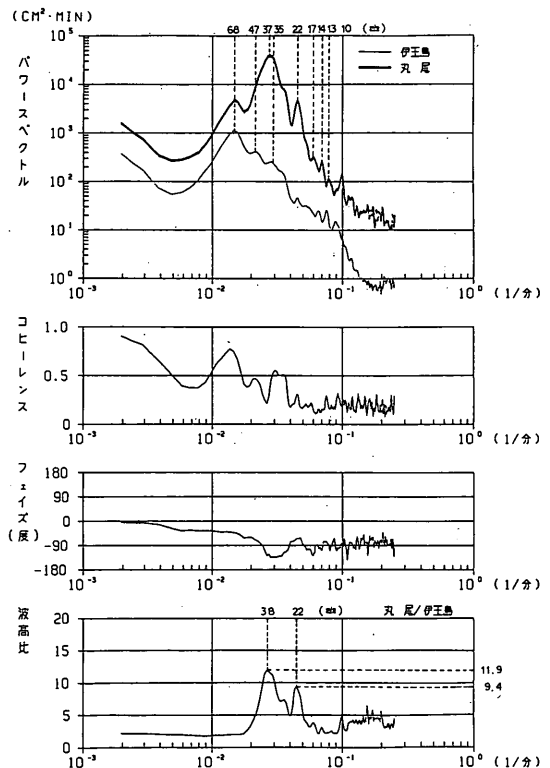
次に、港内の副振動の増幅率を検討するために、港内 i 点と港外 j 点のエネルギー比の平方根として“波高比”を定義した。波高比 $\alpha_{ij}(f)$ は次式で計算した。

$$\alpha_{ij}(f) = \sqrt{\frac{S_i(f)}{S_j(f)}} \quad (6)$$

なお、式(6)は、式(1)と同じものである。

ここでは波高比を計算する組み合わせとして、以下に示す組み合わせを選んでいる。左側が(6)式では j 点、右側が(6)式では i 点に相当する。

- a) 伊王島 ——— 香焼, 深堀, 小ヶ倉, 丸尾
- b) 香焼 ——— 深堀, 小ヶ倉, 丸尾
- c) 深堀 ——— 丸尾



図一五 副振動スペクトル解析結果の一例 (丸尾/伊王島)

表-8 副振動スペクトル解析期間

ケースNo.	解析期間 月 日 時 分 ~ 月 日 時 分	波数	波高20cm以下 出現頻度(%)	Hmax (cm)	Tmax (min)
1.	1. 12. 0. 0 ~ 1. 12. 17. 2	29	41	62	40
2.	1. 18. 0. 0 ~ 1. 19. 10. 6	60	28	85	36
3.	1. 30. 16. 0 ~ 1. 31. 9. 2	30	17	86	30
4.	2. 1. 18. 0 ~ 2. 2. 11. 2	28	25	74	36
5.	3. 13. 0. 0 ~ 3. 13. 17. 2	29	17	101	40
6.	3. 15. 5. 0 ~ 3. 15. 22. 2	31	13	208	30
7.	3. 18. 12. 0 ~ 3. 19. 22. 6	56	16	112	36
8.	3. 26. 5. 0 ~ 3. 26. 22. 2	29	28	47	40
9.	3. 27. 16. 0 ~ 3. 28. 9. 2	30	10	55	34

表-8に示した9ケースについて、a), b), c)の8組のコヒーレンス、フェイズおよび波高比を求めたところ、ケース間の差違が小さかったので、9ケースの平均をとった。図-15は、全観測データの平均値として求められた副振動のパワースペクトル、コヒーレンス、フェイズおよび波高比の一例で、伊王島—丸尾の組み合わせについて示した。

図-15の一段目は、伊王島および丸尾の副振動のパワースペクトルを示す。丸尾では、37分、22分にピークが生じており、丸尾における副振動は周期37分のものが卓越して出現していることがわかる。伊王島での副振動のピークは丸尾より長く、68分である。また、伊王島のエネルギーレベルは丸尾より低く、副振動の振幅が小さいことがわかる。2段目は、伊王島と丸尾の副振動の相互相関を示すコヒーレンスを示す。伊王島のスペクトルがピークを示す周期64分でのコヒーレンスの値は0.8程度で1に近いので、周期64分の振動は、伊王島と丸尾を含む広範囲の振動系によるものと推測される。周期37分では、コヒーレンスは極少となり、0.2程度で小さいので、この振動は、丸尾を含む長崎港内だけで生じている可能

性が高い。

3段目は、伊王島と丸尾のフェイズを示す。コヒーレンスの高い64分でのフェイズは、 -40° 程度であるので、この振動モードでは、伊王島と丸尾の副振動は、同位相に近い振動を示していることになる。4段目の波高比では、周期38分のときピークを示し、その値は11.9である。周期64分の波高比は2程度で小さい。

以上のコヒーレンス、フェイズ、波高比の検討から、周期64分の振動モードは、伊王島と丸尾のコヒーレンスが高く、同位相で波高比が小さいことから伊王島より沖で節をもち、長崎港を腹とする振動モードであると推測できる。また、伊王島—丸尾の波高比が大きいこと、他の組み合わせでは、周期37分での波高比がこれほど大きくなかったことから、周期37分~38分の固有振動モードは、伊王島を節、丸尾を腹とするようなモードであることが推測される。

五島列島に位置する福江港内の検潮所で観測された潮位記録についても、1984年1月30日、31日、1984年3月15、18日に副振動現象が顕著に現れたので解析を行った。図-16は、3月15日における福江港内の潮位記録および

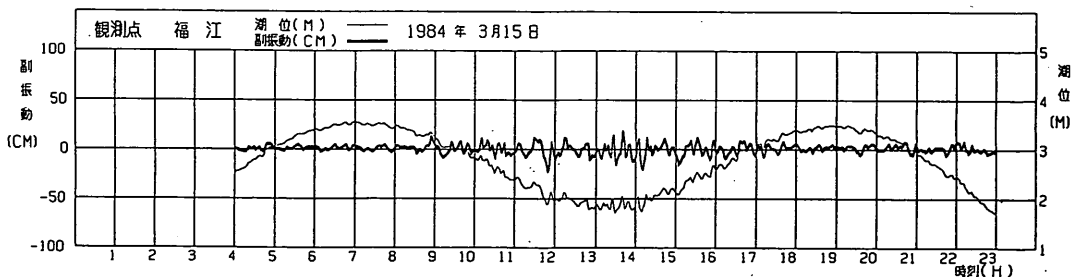


図-16 福江港の潮位と副振動の記録

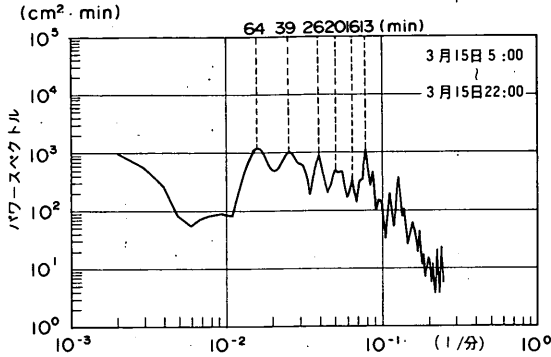


図-17 福江港の副振動スペクトル

副振動波形を示す。副振動は、10:00~17:00に大きなものが継続し、最大波高は、40cm程度であった。図-17は、3月15日5:00~22:00のデータをスペクトル解析した結果を示す。福江港内の副振動では、64分、39分、26分、20分、16分、13分の振動が卓越して生じる。このなかで64分および39分の周期は、伊王島および丸尾のピーク周期と一致しており、38~39分以上の振動は、五島灘全体を振動系とする固有振動による振動であると推測できる。

伊王島-丸尾以外の組合せの波高比等を検討した結果、長崎港で副振動を生ずる可能性がある振動モードは表-9のようにまとめることができる。

(4) 長崎港内における流速変動

1. 舵掛、2. 女神および3. 係船で観測された2分間隔のデジタル流速データについては、調和分解を行って、周期72分以上の振動成分を取り除くことにより、副振動による流速変動を求めた。

図-18は、丸尾の副振動が最大となった1984年3月15日における副振動による流速変動の時系列を示す。図において(E-成分)は、東西方向の流速を示し、東向が正である。(N-成分)は、南北方向で北向が正である。

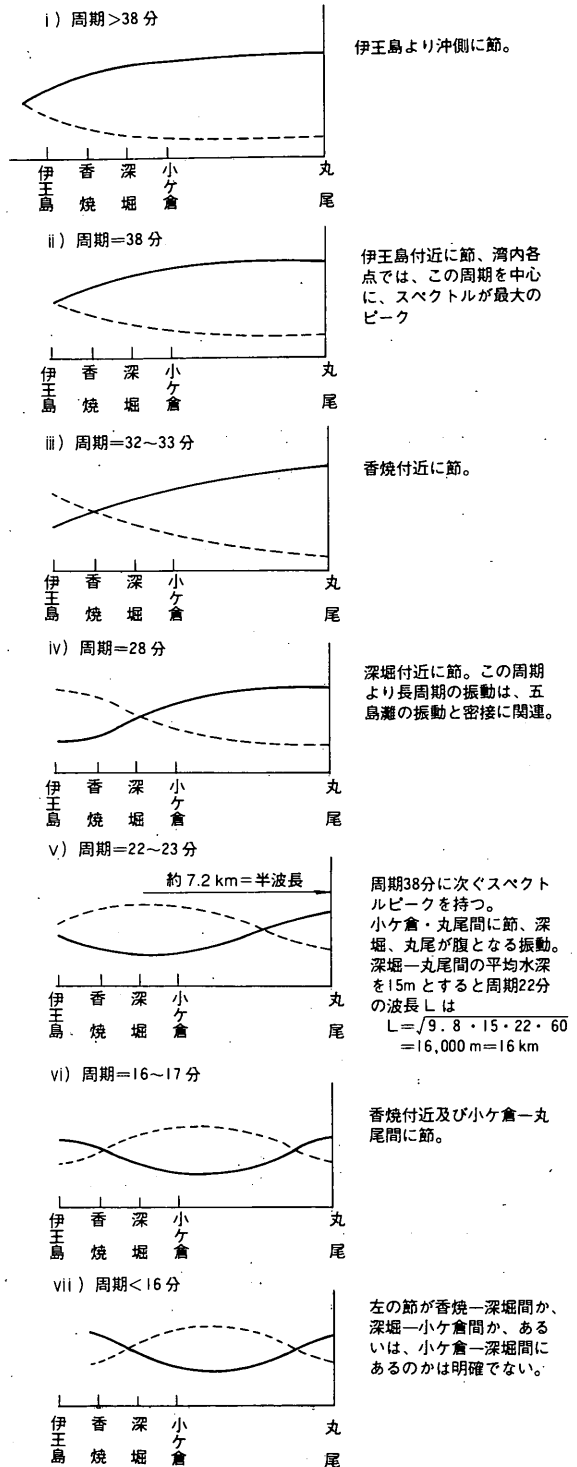
港口に近い1. 舵掛では港口が西に向いているので、E-成分が卓越し、最大流速はほぼ東西方向に40cm/sであった。2. 女神は、長崎港のほぼ中央部の、水路幅が最も狭くなった地点に位置するため、最も流速が速い。

図-18の流速の変化図では、40cm/s以上の値は描かれていないので、デジタル値から読み取ったところ、最大流速は約100cm/sであった。3. 係船では水路幅が広がっているため、E-成分、N-成分とも、その値は大きくなっている。最大流速は約60cm/sであった。

以上のように、副振動によって最大で100cm/s程度の速い流れが港内で生じ、この流れによって、船舶の漂

流等の被害が生じることがわかる。

表-9 長崎港における振動モード



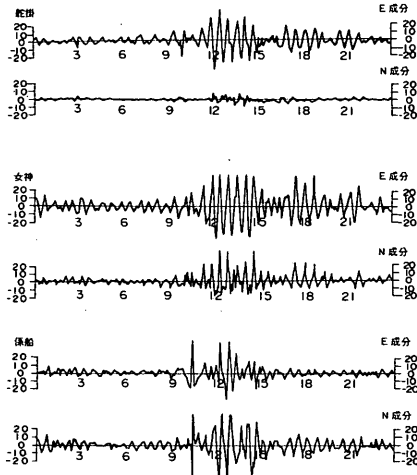


図-18 長崎港内の副振動による流速変動

2. 3 敦賀港における現地観測

(1) 観測地点と観測日時

日本海側の若狭湾に面した敦賀港においても顕著な港内副振動が生じることがある。*

図-19は、敦賀港の位置関係図を示す。図-19に示すように敦賀港は、湾口を北に開いた南北約10kmの敦賀湾の最奥に位置する。また、敦賀湾は、湾口を北に開いた、東西約50kmの若狭湾の東端に位置する。若狭湾沿岸はリアス式海岸で敦賀湾の他に、小沢湾、舞鶴湾、宮津湾等の小さな湾が点在する。図-20は敦賀港の地形図である。

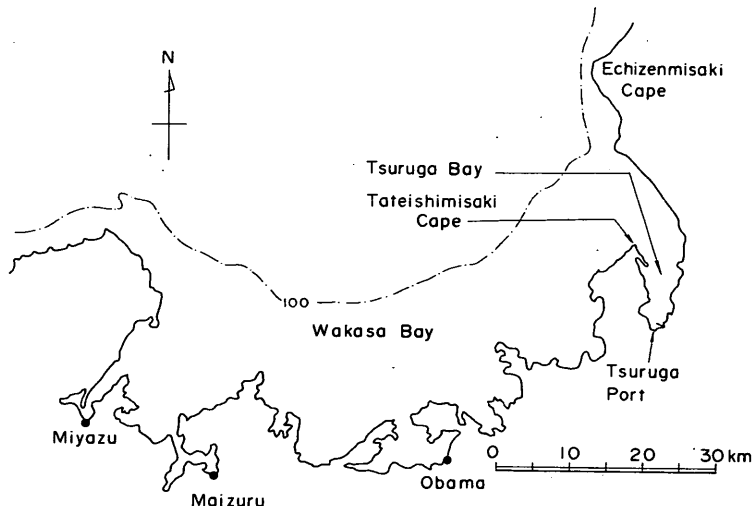


図-19 敦賀港の位置と周辺地形

図中の点 A は、敦賀港検潮所の位置を示し、潮位変動がアナログチャートに記録されている。点 B では、運輸省第一港湾建設局が超音波式流速計 (U.S.W.) を設置し、2 時間おきに20分間波浪観測を行っている。

敦賀港における副振動の現地観測は、既設の検潮所および U.S.W. を用いて行った。まず検潮所で観測された潮位記録のなかで、1985年8月～10月のものを収集し、副振動が顕著なものを抽出して解析を行った。表-10に副振動の解析を行った期間を示す。ケース1～5がこの間の解析ケースである。ケース1～5の解析によって、敦賀港内で副振動が発生し、20時間以上も継続することが確認できたので、敦賀港内で副振動による異常潮位の発生が目視によって観測されたときに、点 B の U.S.W. で数時間連続して波高観測を行ってアナログチャート紙に記録をした。表-10のケース6、7が、潮位記録と同時に波高解析を行ったケースである。ただし、ケース6では、設定法を過って、波高の連続記録を得ることができなかった。ケース7の () は、波高観測期間を示す。

アナログチャート紙上に記録された潮位記録と波高記録は、2. 2で述べた手法と同一の手法で解析した。

図-21は、敦賀港で観測された副振動記録の一例である。図-21(1)は、ケース6の1986年3月29日0:00～24:00の記録で、上段に潮位変動の記録、下段に、副振動波形を示す。3月29日の副振動の最高波は、4:30～5:30に発生しており、両振幅は約60cmである。3月29日の副振動の振幅は大きく、両振幅が20cm以上の水位振動が

*敦賀港において、副振動が発生していることは、第一港湾建設局敦賀港工事事務所工事課西田一彦技官によって、初めて指摘された。(1985)

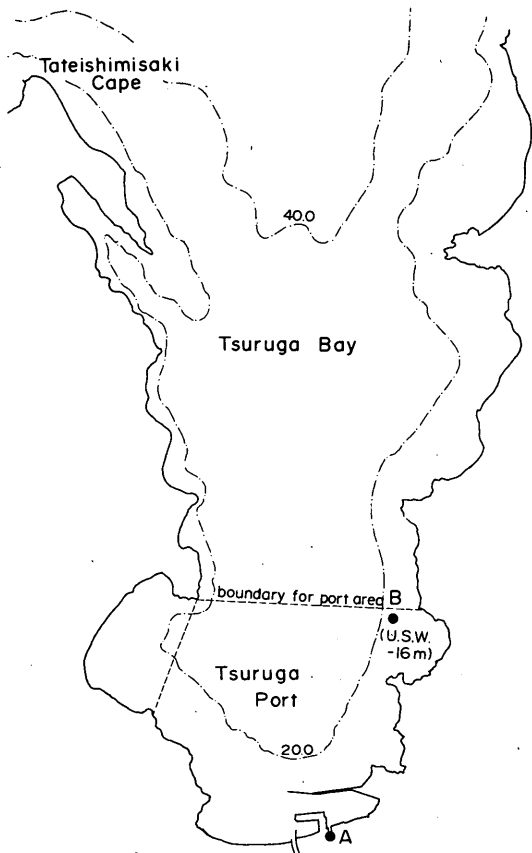


図-20 敦賀港における現地観測地点

表-10 敦賀港における現地観測期間

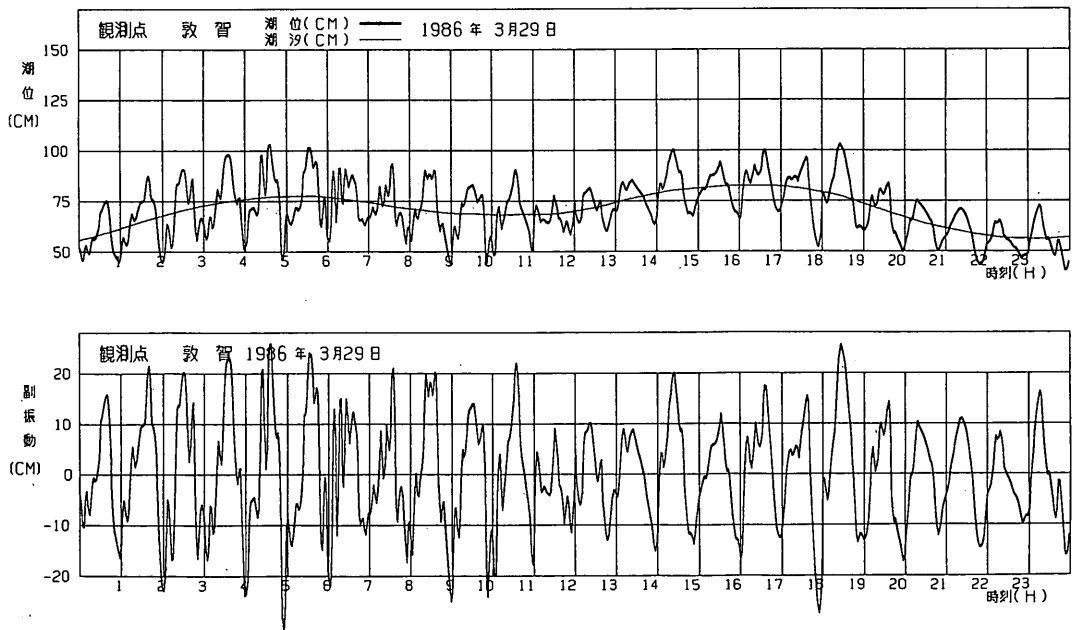
case	観測期間
1	1985年 8月30日 0:00～8月31日 12:00
2	1985年 9月24日 0:00～9月25日 24:00
3	1985年 9月29日 0:00～9月29日 24:00
4	1985年 10月13日 0:00～10月14日 24:00
5	1985年 10月17日 6:00～10月18日 24:00
6	1986年 3月28日 12:00～3月29日 24:00
7	1987年 1月19日 2:00～1月19日 23:00 (1月19日 10:20～14:10)

一日中続いたことがわかる。

図-21(2)は、ケース7の1987年1月19日2:00～23:00の記録で、副振動の振幅はケース6に比べると小さく、10～30cm程度である。図-21(3)は、同日の沖合の波高計の波形記録を示す。波高計による観測時間は、10:20～14:10の約4時間である。図-21(2)からわかるように、10:20～14:10の期間は、副振動の振幅が相対的に小さくなっており、顕著なものは生じていない。したがって、港外における副振動成分を調べるための観測期間としては、もう少し、副振動の振幅が大きくなった期間の方が適切である。

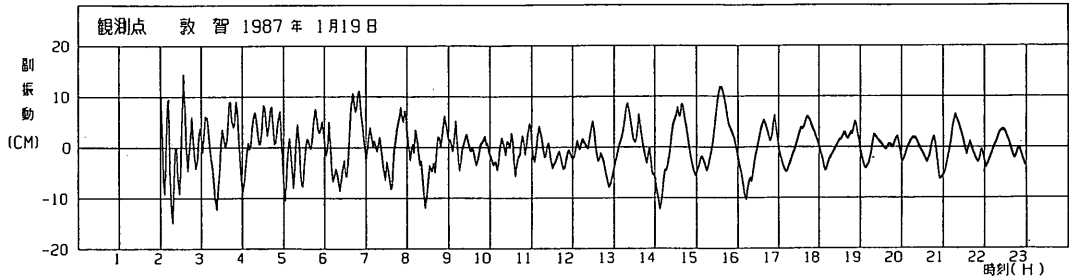
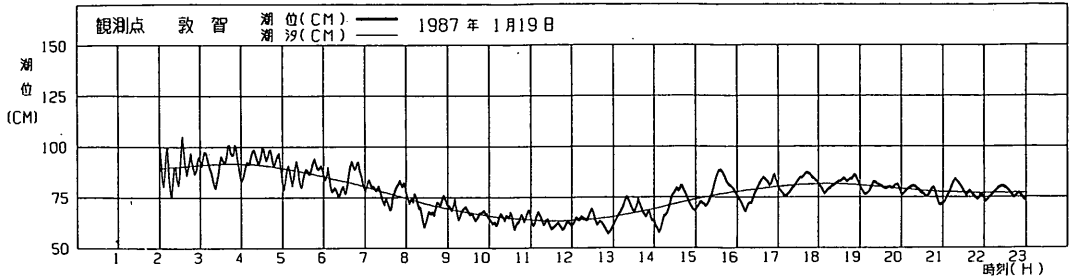
(2) 敦賀港内の副振動

表-11は、表-10の観測期間中に観測された港内の副振動の波高、周期の一覧表である。波数の合計は529波であるが、波高15cm以下の小さなものが370波で全体の

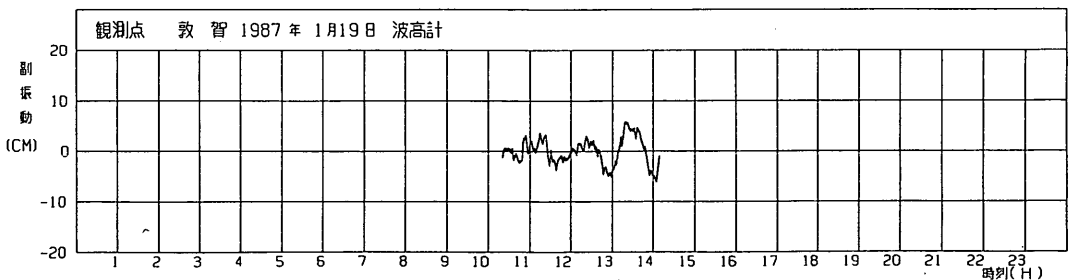
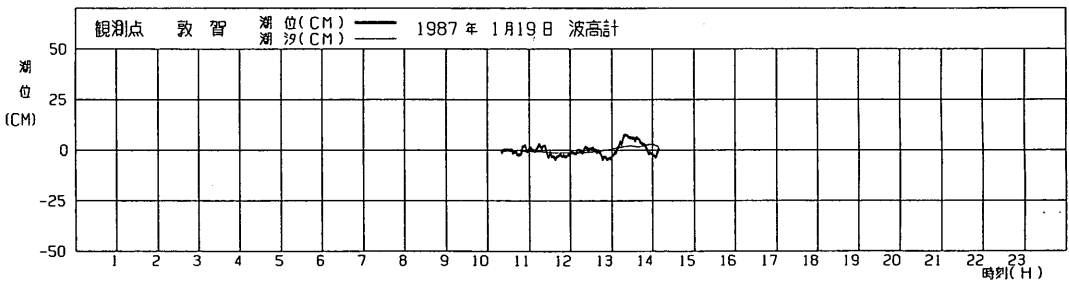


(1) 1986年 3月29日

図-21 敦賀港の潮位と副振動の記録



(2) 1987年1月29日



(3) 1987年1月19日, 波高計

図-21 敦賀港の潮位と副振動の記録

70%を占めている。最高波高は、1986年3月29日の56cmで、周期は約60分であった。

図-22は、副振動波高の頻度分布図である。図中の細実線は Rayleigh 分布を示す。広瀬ら²⁰⁾の田子ノ浦港での長周期波の観測によると、長周期波の波高分布は Rayleigh 分布に従うことが指摘されている。図-21をみると、敦賀港における副振動の波高分布もほぼ Rayleigh

分布に従うことが推測できる。

図-23(1)~(7)は、観測された副振動のスペクトルを示し、それぞれ、表-10のケース1~7に相当する。スペクトル解析方法は、2. 2と同一である。

スペクトルのピークが出現する周期は、各ケース間で大きな差を生ぜず、各ケースとも60~64分程度の長周期の顕著なピークをもつ。次に、30~33分程度、20~23分、

表-11 敦賀港における副振動の波高と周期

周期 (分)	波高 (cm)	~ 5	~10	~15	~20	~25	~30	~35	~40	~45	~50	~55	~60	~65	~70	70~	計
~ 5		3	33	24	19	11	8	9	1	1	1						110
~10			12	21	28	23	17	8	10	6	4	3	2	3	3	2	142
~15			6	13	22	20	15	8	6	7	5	6	2	4	3	1	118
~20			2	11	5	10	7	7	5	6	3	2	6	6	1		71
~25			1	7	2	2	5	5	3	3	2	3	1	5	3	2	44
~30				2	1		3	5	1	1	1	4	1	3	1	1	24
~35				2			2	1	1		1			1	1		9
~40										1	1	1	2	1			6
~45														1	1		2
~50										1			1				2
~55																	
~60														1			1
計		3	54	80	77	66	57	43	27	26	18	19	15	25	13	6	529

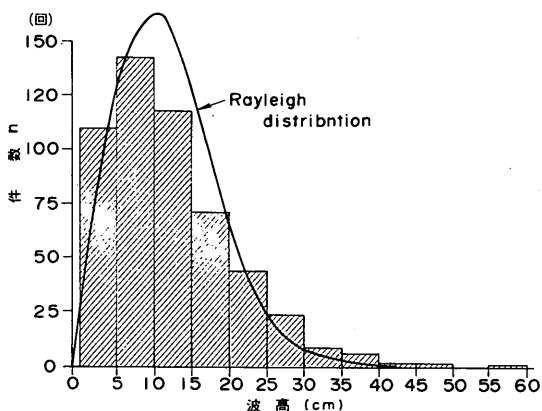
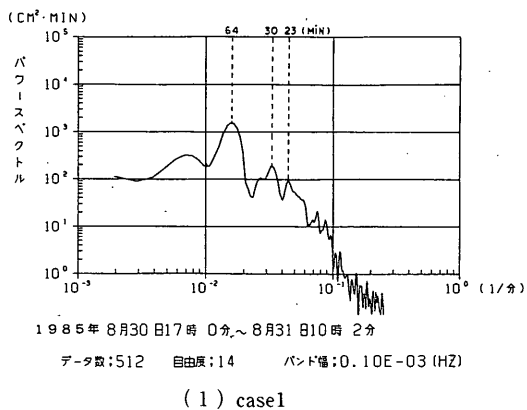


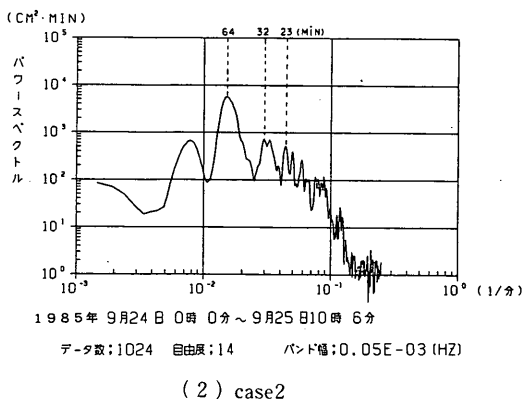
図-22 副振動波高の頻度分布

12~13分にピークを持つ。ただし、短周期側では、分解能が高くなって、ピークが多数出現してくるので、極大値を限定することがむずかしく、12~13分のピーク周期は少しずれる可能性がある。

図-23(8)は、ケース7において、潮位記録および沖の波形記録から波高比を求めた結果を示した図である。同時記録の解析期間が約4時間で短いので、解析データ数は128とし、自由度は8とした。第1段のスペクトル図における潮位記録のスペクトルは、同一ケースであるけれども、図-23(7)と若干異なる。これは解析した期間すなわちデータ数が異なるためである。図-23(7)の潮位記録のスペクトルは、32分にピークをもつが、解析データ数が異なるので、図-23(8)のスペクトル形では32分で

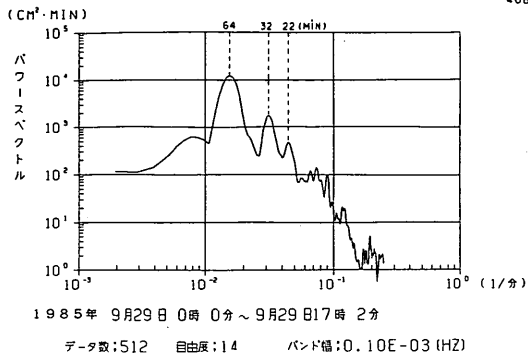


(1) case1

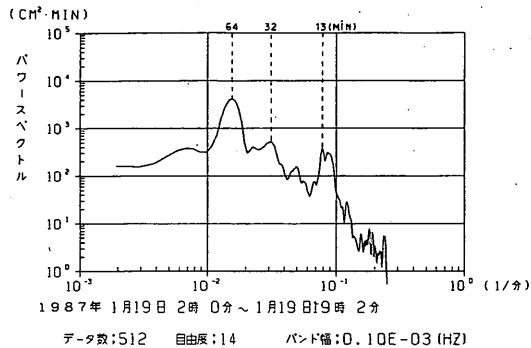


(2) case2

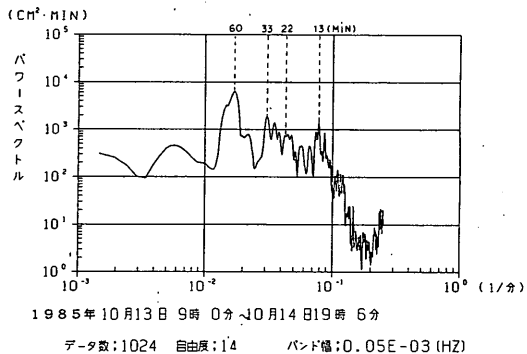
図-23 敦賀港の副振動スペクトル



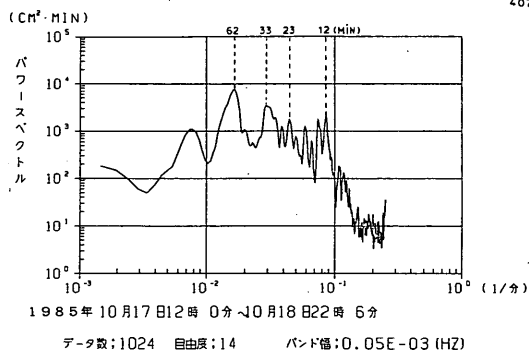
(3) case3



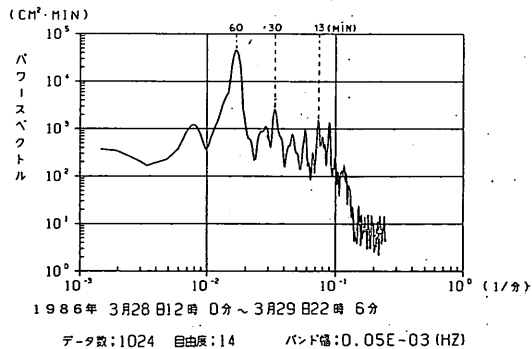
(7) case7



(4) case4



(5) case5



(6) case6

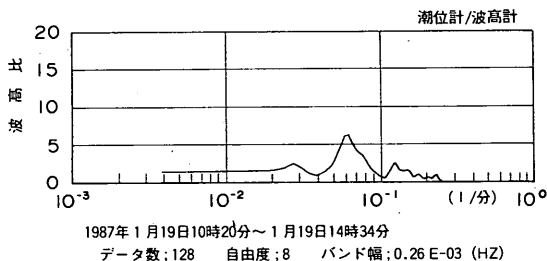
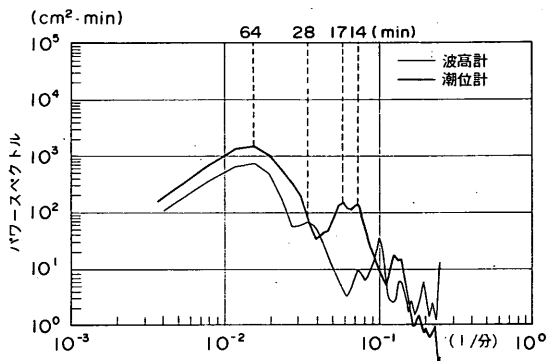


図-23(8) 潮位観測点と波高観測点の波高比

ピークは現れてはいない。他のピーク周期である64分、13~14分は両者とも一致する。

細実線で示した波高記録に含まれる副振動のスペクトルは、64分に顕著なピークを持ち、28分にも低いピークをもつ。10分にもピークを示すが、データのサンプリング間隔が2分であり、自由度も低く、短周期側ではスペクトル密度の変動が激しいので、信頼性が低い。

下段は、潮位計およびU.S.W.設置点間の波高比を示す。周期60分程度の波高比は1に近く、この周期では、両点を含む敦賀湾の潮位が一様に変動していることが推測できる。波高比は13~15分程度で最大値となり、6程度である。したがって、この周期の固有振動は、敦賀湾内で振幅が増幅されるようなモードを持つものと考えられる。

図-24は、若狭湾および敦賀港内で発生する可能性のある固有振動モードを示した図である。line.1は若狭湾全体を振動系とする湾セイシュの固有振動モードを示し、line.1の両端付近が腹となる。若狭湾の平均水深を80mとすると、line.1の長さは、約75kmなので、line.1に沿った振動の1次モードの固有周期 T_{011} は、約90分、2次モードの固有周期 T_{012} は、45分である。なお、計算式は、 $T_{011} = 2l/\sqrt{gh}$ 、 $T_{012} = l/\sqrt{gh}$ を用いた。ここで、 h は湾の水深、 g は重力加速度、 l は、line.1の長さ、すなわち、湾の幅である。line.0は、若狭湾の口を節、奥を腹とする振動モードを示し、津波のような長周期が外洋から陸棚域に直角に浸入してきた場合には、このモードの棚セイシュが起こる場合がある。line.0上の固有振動周期 T_{001} は $T_{001} = 4l'/\sqrt{gh}$ で計算できる。line.0の長さ l' を、約35kmとすれば、 $T_{001} \approx 80$ 分となる。

line.2は敦賀湾だけを振動系とする固有振動を示し、湾口部が節、湾奥の敦賀港が腹となる。平均水深を35mとすると、このモードの固有周期は、1次 T_{021} が45分、2次 T_{022} が15分である。実際の振動モードはより複雑で、節および腹の位置も大きくずれている可能性がある。

図-23においてみられた長周期側のピーク周期64分は、line.1上における T_{011} と T_{012} の平均値となっている。若狭湾における振動系は、line.1だけでなく、図-24の破線で示したline.1'に沿った振動として発生する可能性もある。line.1'に沿った固有振動モードの1次周期は70分であり、図-22におけるピーク周期の1つである64分とはほぼ一致する。ただし、この現地観測結果だけでは、若狭湾の湾セイシュが生じているかどうかは明らかでは

なく、敦賀港の振動と、湾セイシュの関係については、4. で考察する。

図-23(1)~(7)において示された、30~33分程度の振動は、敦賀湾の固有周期45分とは、ずれている。しかし、節の位置が湾内へより深く入っている可能性もあり、その場合には、敦賀湾の固有振動周期は33分に近づくので、30~33分の振動は、敦賀湾の固有振動である可能性が高い。

図-23(8)において、波高比が最大となった周期13~17分の振動周期は、 T_{022} に近い。したがって、敦賀港における周期13~17分の副振動は、敦賀湾全体を振動系とする2次の固有振動か、あるいは、敦賀湾内のある海域における固有振動に起因すると推測できる。

図-25は、観測期間中副振動が最大となった1986年3月28、29日前後および潮位と波高の同時観測を行った1987年1月19日前後の天気図¹⁵⁾を示す。

1986年3月28日~29日には、東シナ海中部に発生した低気圧が、発達しながら西日本を横断して関東沖へ抜けている。図-25(2)をみると、1987年1月16日に黄海上にあった低気圧が17日には発達しながら東へ進み、17~18日にかけて北日本を横断して北海道東方海上へ抜けている。このことから、シナ海方面で発生した低気圧が発達しながら東へ進み、日本を横断して、太平洋側へ抜ける場合には、敦賀港で顕著な副振動が発生する可能性が高い、と思われる。他の観測期間における天気図においても同様な気象変化が見られた。なお、1987年1月19日には、低気圧は千島列島付近へ去ってしまっているので、1月19日は振動が減衰しつつある期間と思われる、1月17

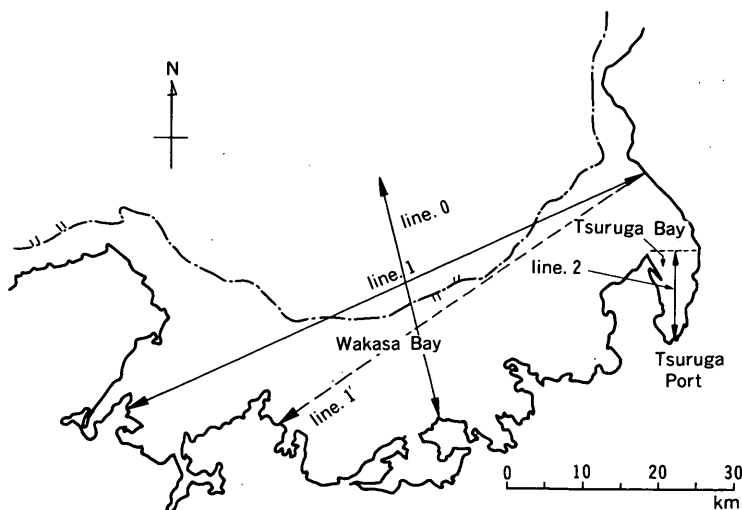
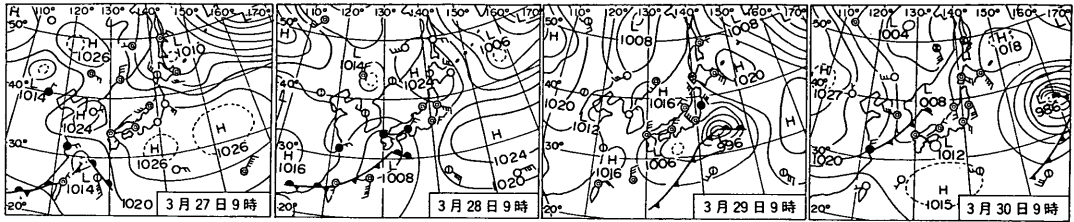


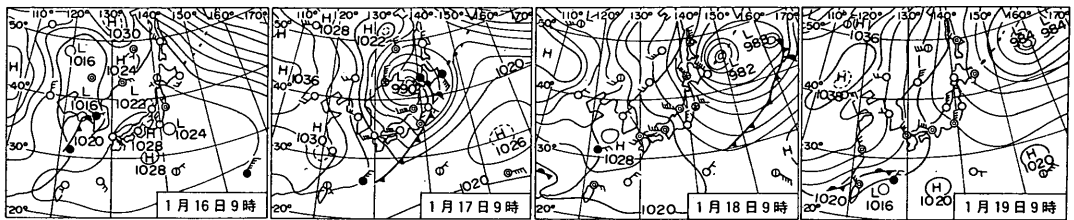
図-24 若狭湾および敦賀港の固有振動モード

日～18日に観測を行えば、さらに大きな副振動が観測できたものと思われる。しかし、観測ケースが少ないので、

低気圧の通過が必ず副振動の発生要因になっているとは、断言できない。



(1) 1986年3月27日～30日



(2) 1987年1月16日～19日

図-25 敦賀港における副振動発生時の天気図¹⁵⁾

3. 副振動の数値計算法とその精度

港内副振動解析については、長方形や扇形のような単純な形状の港湾に対する理論解が最初に提案された。⁸⁾

⁹⁾このような解析法では、複雑な形状の湾内の振動を求めることができないので、グリーン関数を用いた解析方法が開発された。^{16), 17)}以上の手法は、一様水深の場合にしか適用できないので、水深が変化する湾でも解析ができるように改良された。^{18), 19), 20)}

このような解析法とは別に、津波の数値計算で広く用いられている長波近似した運動方程式を差分法で解く手法が試みられている。²¹⁾日比谷・梶浦²²⁾は、後者の手法を拡張して、気圧低下による水面変動を初期条件として、数値計算する方法を示している。

グリーン関数を応用した方法では、不等水深の場合には、水深方向にも要素分割する必要があり、一般に計算時間が長くなる。また、港内の防波堤および離島堤等の線境界を取り扱う場合には、要素分割がかなり複雑になる。

これに対して、長波近似と差分法を用いた計算法は、格子で地形を表すので、複雑な地形を表すときには、かなり格子幅を小さく必要があるが、港内の離岸堤、防波

堤等の線境界が容易に計算でき、港口でのエネルギー損失、底面摩擦を容易に導入できる。また、港湾地形が埋立によって変化した場合でも、簡単に計算条件を変更することができ、実用的な手法である。

しかし、日比谷・梶浦の手法では、初期条件として気圧変化による水面変化を用いているので、非常に広大な計算領域を必要とする。気圧低下によって生じた水面変化から長周期波が発生し、沿岸域へ伝播してくると、波速が低気圧の進行速度より速いので、大陸棚上では自由進行波となる。そこで、本資料では、自由進行長波が計算領域の開境界から進入してくるものとして、長波近似と差分法を用いて数値計算を行った。

3.1 基礎方程式と計算条件

副振動は長周期波によって起こされるので、津波の数値計算法^{23), 24), 25)}と同様に長波近似された運動方程式を用いて計算することができる。

(1) 基礎方程式

図-26に示すように、 x 軸、 y 軸が水平面上に、 z 軸が静水面上を原点として鉛直上方が正となるように座標系を取る。長波近似された運動方程式はコリオリ力および海底摩擦によるエネルギー損失項を無視すると次式で示される。

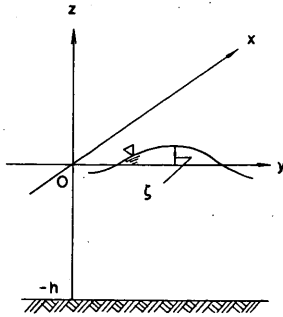


図-26 計算座標系

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y}$$

ここで、 u および v は、それぞれ x および y 方向の水粒子速度、 ζ は静水面からの水面変動量、 g は重力加速度である。式(7)を海底から水面まで積分すると次式が求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} &= -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} &= -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで、 q_x 、 q_y はそれぞれ x 方向、 y 方向への単位幅当たりの流量を示し、 h は水深である。流量の連続式は q_x および q_y を用いて次のように表される。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (9)$$

式(8)および(9)が本計算の基礎方程式である。式(8)および(9)を x および y に関する微分は中間差分、 t に関する微分は前進差分を用いて差分近似式で表すと次式のようにになる。

$$\frac{q_{x,i,j}^{t+\Delta t} - q_{x,i,j}^t}{\Delta t} = -g \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta s} \times \left(\frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2} + \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right)$$

$$\frac{q_{y,i,j}^{t+\Delta t} - q_{y,i,j}^t}{\Delta t} = -g \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \zeta_{i,j-1}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta s}$$

$$\times \left(\frac{h_{i,j} + h_{i,j-1}}{2} + \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \zeta_{i,j-1}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \zeta_{i,j}^{t-\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} = -\frac{1}{\Delta s} \left[(q_{x,i+1,j}^t - q_{x,i,j}^t) + (q_{y,i,j+1}^t - q_{y,i,j}^t) \right] \quad (11)$$

ここに、 i および j はそれぞれ x 方向、 y 方向の差分格子列番号を示し、 Δt は計算時間間隔、 Δs は差分格子間隔を表す。差分計算の安定条件から Δt および Δs は全計算領域において次の関係を満足しなければならない。

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} > \sqrt{2g h_{\max}} \quad (12)$$

ここで、 h_{\max} は領域中の最大水深である。図-27は差分格子の配列を示したもので、図中、 \square および \circ 印はそれぞれ $q_{x,i,j}$ 、 $q_{y,i,j}$ および $h_{i,j}$ を計算する格子点の位置を示している。

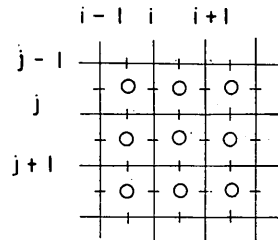


図-27 差分格子配列の構造

(2) 細分化領域の計算

沿岸部の複雑な地形を格子でより精度良く近似できるように、本計算モデルでは、一部の領域中の格子間隔を $1/2$ ずつ小さくできるようになっている。たとえば、外海の格子間隔が1000mのときは、第1段階の細分化によって格子間隔は500mに、第2段階の細分化によって250mになる。外海の格子間隔を Δs_0 とすると、第 n 段階の細分化領域の格子間隔は次式のようにになる。

$$\Delta s_n = \frac{\Delta s_0}{2^n} \quad (13)$$

したがって、 Δs の異なる2つの領域の境界で式(10)、(11)の差分式を使うときには補間によって h あるいは q の

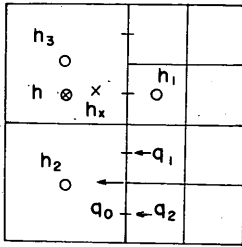


図-28 大格子と小格子の接続関係

値を推定する。図-28は補間方法の説明図である。まず、式(10)において q_r あるいは q_r を求めるには流量計算格子辺の両側の対称となる位置で水位 ζ を与えなければならない。すなわち、図-28の大小両メッシュの境界線上の流量を与えるためには、図中×点における水深および水位変動量を求めておかなければならない。水深と水位の2つ変動量を h で代表させると、×点の水位あるいは水深を h_x とすると、 h_x は図-28の h_1, h_2, h_3 を用いて補間によって求める。まず、図の×における h を、次式で計算する。

$$h = \frac{1}{4} (3h_3 + h_2) \quad (14)$$

この h と h_1 によって h_x は次式で計算できる。

$$h_x = \frac{1}{3} (h_1 + h) \\ = \frac{1}{2} h_3 + \frac{1}{2} h_2 + \frac{1}{3} h_1 \quad (15)$$

次に式(8)において水位変動量 ζ を求めるには ζ の計算点を含む格子の4辺を横切る線流量が必要である。図-28に示す h_2 のように、小メッシュに接続する大メッシュの水位を計算する場合、小メッシュに接していない3辺の線流量は大メッシュ領域内の計算で求まっている。小メッシュに接した境界格子辺における線流量 q_0 は小メッシュ領域で計算された線流量 q_1 および q_2 から次のように求まる。

$$q_0 = \frac{q_1 + q_2}{2} \quad (16)$$

(3) 港口部のエネルギー損失項の導入

津波が防波堤開口部を通過して港内に入ってくるような場合には、開口部において港口部損失と呼ばれるエネルギー損失が生じるものと推測される。さらに水深が浅

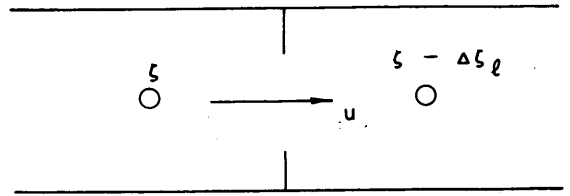


図-29 開口部の模式図

い港内では海底摩擦によってエネルギー損失が生じると思われる。

図-18のような開口部を考えた場合、港口部におけるエネルギー損失頭を $\Delta\zeta_l$ で表すと次式が成立する。²⁶⁾

$$\Delta\zeta_l = f_R \frac{u^2}{2g} \quad (17)$$

ここで f_R は港口部損失係数、 u は港口流速である。したがって港口部損失を考慮した x 成分の運動方程式は次式のように示される。

$$\frac{\Delta_x u}{\Delta t} = -g \frac{\Delta_x \zeta}{\Delta s} - g \frac{\Delta \zeta_0}{\Delta s} \\ = -g \frac{\Delta_x \zeta}{\Delta s} - \frac{f_R}{2\Delta s} u |u| \quad (18)$$

Δ_x は x 方向の微分を示す。式(10)を差分近似式で示すと次のようになる。

$$\frac{u^{t+\Delta t} - u^t}{\Delta t} = -g \frac{\zeta_{i,j} - \zeta_{i-1,j}}{\Delta s} \\ - f_R \frac{u^{t+\Delta t} |u^{t+\Delta t}|}{2\Delta s} \quad (19)$$

式(17)を鉛直方向に積分すれば q_r に対する差分近似された運動方程式が得られる。

$$q_{x,i,j}^{t+\Delta t} - q_{x,i,j}^t = -g\Delta t \left(\frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2} + \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right) \\ \times \left[\frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta s} + K_x(i,j) \right] \\ \times \left(\frac{q_{x,i,j}^{t+\Delta t} |q_{x,i,j}^{t+\Delta t}|}{2} + \frac{q_{x,i,j}^t |q_{x,i,j}^t|}{2} \right) \quad (20)$$

ここで、

$$K_x(i, j) = \frac{\Delta t \cdot f_R}{2g \cdot \Delta s \left(\frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2} + \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right)^2} \quad (21)$$

である。

式(20)を $q_{x,i,j}^{t+\Delta t}$ に関する2次方程式と考えると次式が導ける。

$$R_x(i, j) \geq 0;$$

$$q_{x,i,j}^{t+\Delta t} = \frac{1 - \sqrt{1 + 2K_x(i, j) \cdot R_x(i, j)}}{K_x(i, j)}$$

$$R_x(i, j) < 0;$$

$$q_{x,i,j}^{t+\Delta t} = \frac{-1 + \sqrt{1 - 2K_x(i, j) \cdot R_x(i, j)}}{K_x(i, j)} \quad (22)$$

ここで、

$$R_x(i, j) = g \frac{\Delta t}{\Delta s} \left(\frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2} + \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right) \times (\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}) + \frac{1}{2} K_x(i, j) \cdot q_{x,i,j}^t \cdot |q_{x,i,j}^t| - q_{x,i,j}^t \quad (23)$$

である。

港口部においては、式(7)の代わりに式(22)を運動方程式とすることによって港口部損失を考慮することができる。港口部損失係数は文献²⁶⁾に従って、 $f_R=1.5$ とした。y方向の流量 q についても同様の式が成立する。

(4) 海底摩擦損失項の導入

海底摩擦に対して Manning の低杭則が適用できるとすると、x方向の運動方程式は次式で表される。²⁷⁾

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gn^2}{(h+\zeta)^{\frac{4}{3}}} u |u| \quad (24)$$

ここで n は Manning の粗度係数で、 $n=0.025$ を用いた。

²⁷⁾ 港口部損失項を考えた時と同様に線流量 q は次式のように求まる。

$$S_x(i, j) < 0; q_{x,i,j}^{t+\Delta t} = \frac{-1 + \sqrt{1 - 2L_x(i, j) S_x(i, j)}}{L_x(i, j)}$$

$$S_x(i, j) \geq 0; q_{x,i,j}^{t+\Delta t} = \frac{1 - \sqrt{1 + 2L_x(i, j) S_x(i, j)}}{L_x(i, j)} \quad (25)$$

ここに、

$$L_x(i, j) = g \Delta t \frac{n^2}{\left(\frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2} + \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right)^{\frac{7}{3}}} \quad (26)$$

$$S_x(i, j) = g \Delta t \left(\frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2} + \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right) \times \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta s} + L_x(i, j) \frac{q_{x,i,j}^t |q_{x,i,j}^t|}{2} - q_{x,i,j}^t \quad (27)$$

である。 q についても同様の式が成立する。

海底摩擦損失を考慮する場合は、式(27)を用いて計算できる。防波堤開口部で港口部損失と海底摩擦損失を同時に考慮するために、港口部の格子辺を横切る q は次式で計算する。 q については、 q_r の場合と同様である。

$$S_x'(i, j) \geq 0; q_{x,i,j}^{t+\Delta t} = \frac{1 - \sqrt{1 + 2L_x'(i, j) S_x'(i, j)}}{L_x'(i, j)}$$

$$S_x'(i, j) < 0; q_{x,i,j}^{t+\Delta t} = \frac{-1 + \sqrt{1 - 2L_x'(i, j) S_x'(i, j)}}{L_x'(i, j)} \quad (28)$$

ここに、

$$S_x'(i, j) = g \frac{\Delta t}{\Delta s} \left(\frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2} + \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right) \times (\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}) + \frac{1}{2} L_x'(i, j) q_{x,i,j}^t |q_{x,i,j}^t| - q_{x,i,j}^t \quad (29)$$

$$L_x'(i, j) = g \Delta t \left(\frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2} + \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right) \times \left[\frac{n^2}{\left(\frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2} + \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right)^{\frac{10}{3}}} + \frac{f}{2g \Delta s} \frac{1}{\left(\frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2} + \frac{\zeta_{i,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \zeta_{i-1,j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right)^2} \right] \quad (30)$$

(5) 境界条件

図-30に本計算における境界条件の与え方をモデル化した図を示す。図中、ⓐが計算対象となる港で、沖側のy軸に平行な境界 lineB₁から、周期 T 、片振幅 a の微小振幅長波が、直角に入射するものとする。

図中の斜線でハッチングをした陸上部と格子網で示し

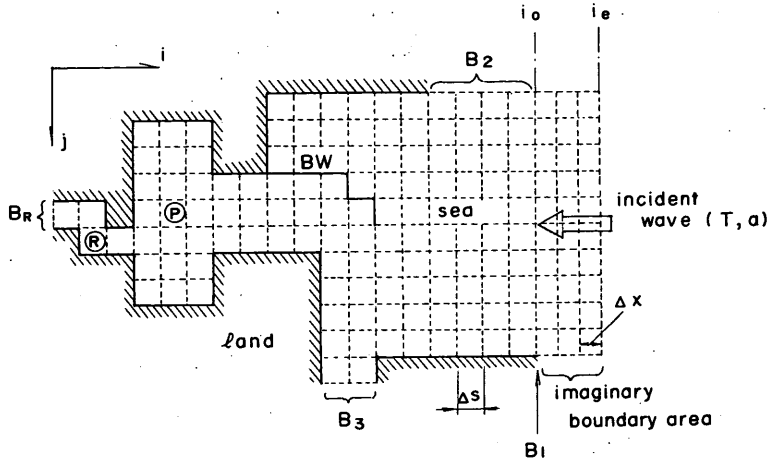


図-30 境界条件の与え方

た海との境界にあたる格子辺では、長波は完全反射するものとする。すなわち、

$$q_x = 0, \quad q_y = 0 \quad (31)$$

at sea-land boundary

図中の BW で示した実線は、防波堤等の線境界を示し線境界においては越流は生じず、水粒子速度は 0 とした。

$$q_x = 0, \quad q_y = 0 \quad (32)$$

at breakwater boundary

入射した微小振幅長波は、港内および港外の高陸境界と防波堤境界で反射されて、沖側境界 B_1 に戻る。ここで、反射波のエネルギーの一部が再反射され、港内に影響を及ぼすことのないよう B_1 には無反射性の境界を導入しなければならない。本計算では、谷本ら²⁸⁾が開発した仮想境界法を以下のようにして長波計算に導入した。

沖側境界 B_1 の境界線流量は、入射波と反射波によるものの和として与える。入射波の線流量は条件として与えるので既知であり、反射波の線流量は、沖側境界計算点と、たとえば Δx だけ離れた地点での線流量から、そこでの入射波による線流量を差し引いたものの伝播として求めることができる。

沖側境界 B_1 の外側に、図のように長さ 3 メッシュから成る幅 1 メッシュ毎の 1 次元水路状の仮想境界領域を設定する。仮想境界領域の水深は一定とし、沖側境界 B_1 における水深 h_B と等しい。格子間隔 Δx は次式で与える。

$$\Delta x = \sqrt{g \cdot h_B} \cdot \Delta t \quad (33)$$

このとき、仮想境界の最も沖側の格子辺 ($i=i_e$) における線流量のうち反射波による成分は次式で示される。

$$[q_{x, i_e, j}]_R = q_{x, i_e-1}^{t-\Delta t} + a\sqrt{gh_B} \cdot \sin\{k(i_e - i_0 - 1)\Delta x + \sigma(t - \Delta t)\} \quad (34)$$

入射波による成分は、

$$[q_{x, i_e, j}]_I = -a\sqrt{gh_B} \cdot \sin\{k(i_e - i_0)\Delta x + \sigma \cdot t\} \quad (35)$$

である。したがって、 $i=i_e$ における線流量は次式で計算できる。

$$q_{x, i_e, j}^t = [q_{x, i_e, j}]_R + [q_{x, i_e, j}]_I \quad (i = i_e) \quad (36)$$

ここで、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 $k = \sigma/\sqrt{gh_B}$ である。

$i_0 < i < i_e$ の仮想領域では、式(7)、(8)と同様に次式で流量と水位が計算できる。ただし、沖側境界での水位変動は水深に比べて非常に小さく無視できるものとしている。

$$\frac{q_{x, i, j}^{t+\Delta t} - q_{x, i, j}^t}{\Delta t} = -g \frac{\zeta_{i, j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \zeta_{i-1, j}^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta x} \cdot h_B \quad (i_0 < i < i_e) \quad (37)$$

$$\frac{\zeta_{i, j}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \zeta_{i, j}^{t-\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} = -\frac{1}{\Delta x} (q_{x, i+1, j}^t - q_{x, i, j}^t) \quad (i_0 < i < i_e) \quad (38)$$

$i=i_0$ における線流量は、そこで i 方向の格子間隔が変化することを考慮して次式で計算する。

$$q_{x, i_0, j}^t = q_{x, i_0, j}^{t-\frac{\Delta t}{2}} - q \cdot h_B \frac{\Delta t}{\Delta s} (\zeta_0^{t-\frac{\Delta t}{2}} - \zeta_{i_0, j}^{t-\frac{\Delta t}{2}}) \quad (i = i_0) \quad (39)$$

ここに、

$$\zeta_0^{t-\frac{\Delta t}{2}} = \zeta_{i_0, j}^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \frac{\Delta s - \Delta x}{2\Delta x} (\zeta_{i_0+1, j}^{t-\frac{\Delta t}{2}} - \zeta_{i_0, j}^{t-\frac{\Delta t}{2}}) \quad (40)$$

$t=0$ における計算開始時は、入射波の先端が $i=i_0$ に到達したときとし、初期条件として、仮想境界内の流量および水位を次のように与えた。

$$\zeta_{i, j}^{-\frac{\Delta t}{2}} = a \sin\left\{(i-i_0 + \frac{1}{2})k\Delta x - \frac{1}{2}\sigma\Delta t\right\} \quad (i_0 \leq i \leq i_e) \quad (41)$$

$$q_{x, i, j}^{t=0} = -a\sqrt{g \cdot h_B} \sin\left\{(i-i_0)k\Delta x\right\} \quad (i_0 \leq i \leq i_e) \quad (42)$$

図-30に示した x 軸に平行な側方境界 B_2 および B_3 においても、境界の外側には外海からの入射波による水面変動が存在する。しかし、通常副振動は3方が閉じられた港長の長い港湾で発生するため、計算領域においては B_2 、 B_3 のような側方境界のない場合が多い。存在しても、境界格子辺の数は、沖側境界における格子辺に比べて非常に少ない。したがって、 B_3 、 B_2 から入ってくる波が計算領域に及ぼす影響は無視できる。そこで、側方境界 B_2 、 B_3 の外側では静水面が続いているものとし、側方境界 B_2 、 B_3 では波は反射せず自由進行波になものとした。進行波の波速は $\sqrt{g(h+\zeta)}$ で表され、境界を横切る線流量は次式で計算した。

$$q_x, q_y = \pm \sqrt{g(h+\zeta)} \cdot \zeta^2 \quad (43)$$

ここで、境界のすぐ内側の格子における水位変動量が正のときは領域内から外海への流出、負のときは外海から領域内への流入となるように式(43)の符号を定めた。港湾④には、数条の河川が流入している。河口幅が小さく流量が少ない場合には、河川を無視して、計算領域を設定すればよい。河口幅が広く、水深も十分深い河川であれば、河川を水路とみなして計算する必要がある。河川

を水路として計算する場合には、水路長によって港湾の振動モードが変化するので、水路の長さおよび深さについて検討しておかねばならない。²⁰⁾本計算では、最小格子幅程度の河口幅を持つ港内流入河川は水深一定の長水路とみなして計算し、河口幅が最小格子幅の3/4程度になるところまで、水路を延長した。

図-30では、河川④を、4つの格子で表している。河川の再奥部の境界 B_R については、次の2種類の境界を考え、適用性を比較することにした。

- (I) model I: 河川境界 B_R において、長波は完全反射する。 $(q_r, q_e = 0)$
- (II) model II: 河川境界 B_R において、波は反射せず側方境界と同様に進行波となる。

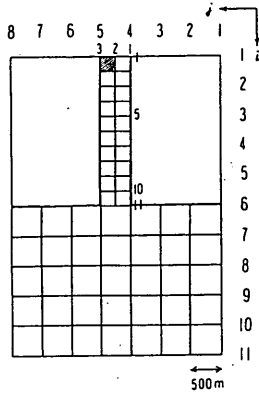
3. 2 計算結果と解析解の比較

Ippen and Goda⁹⁾ および合田⁸⁾ は、港内波高分布関数の速度ポテンシャルをフーリエ変換を用いて解析的に解いて、長方形、矩形、三角形港湾の副振動を求めている。図-31に、(1)長方形湾、(2)矩形湾、(3)三角形湾の地形を示す。

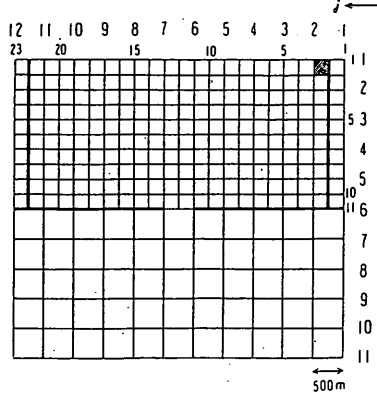
本数値計算では、図-31の格子地形で(1)長方形湾、(2)矩形湾、(3)三角形湾の地形を表現した。計算では港外の格子幅を500mとし、湾内の計算格子幅は細分化して、(1)(2)では250m、(3)では250mと125mとした。水深は、20mで一定とし、 i の下手側($i=11$)の格子辺を沖側境界とした。入射波の振幅は0.1mで一定とし、周期を1~20分に変化させた。湾の奥行は全ケース共、2500mである。

図-32は、図-31の(1)長方形、(2)矩形、(3)三角形湾において、湾奥のハッチングをした箇所の共振スペクトルを示した図である。共振スペクトルとは、ある周期をもつ入射波高が湾内でどれだけ増幅されるかを示した図で、横軸に湾の奥行と波長の比 l/L 、縦軸に振幅増幅率 M を示した。図-32(1)が長方形、(2)が矩形、(3)が三角形湾の場合を示し、図中、実線が解析解、丸印が計算値を示す。

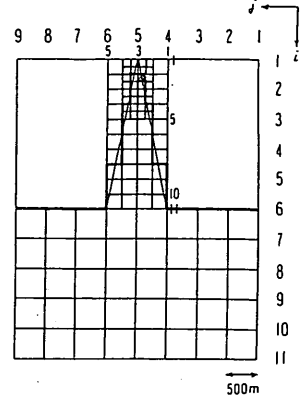
図-32(1)において、 $l/L < 1.5$ の範囲において、 M が極値となる共振点の位置は、解析解と計算結果ではよく一致している。共振点における増幅率は、解析解に比べると計算値は大きくなっている。たとえば、長周期側の第一共振点では、解析解が $M \approx 8$ 、計算値が $M \approx 13$ である。共振点の振幅が、計算値と解析解で異なるのは、一つには、解析解において、港口での平均水位を用いて、港外と港内を連続させているためである。共振点の値を除くと、第一共振点近傍における計算値と解析解は良く一致している。第二共振点付近でも、計算値と解析解は少し



(1) 長方形湾

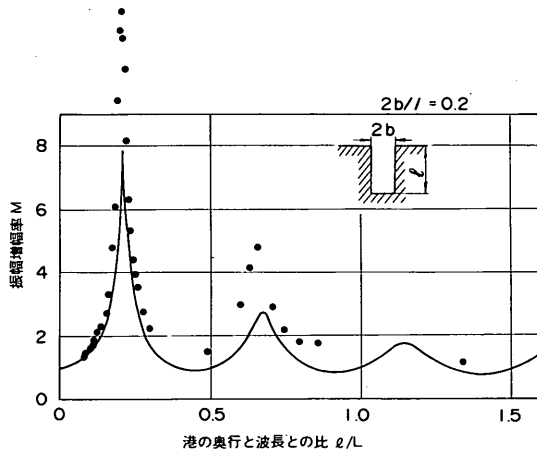


(2) 矩形湾

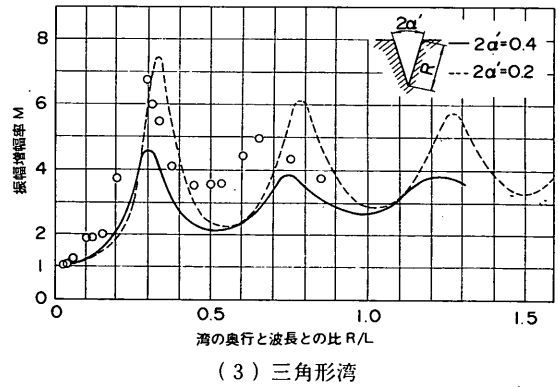


(3) 三角形湾

図-31 解析解との比較に用いた湾の形状

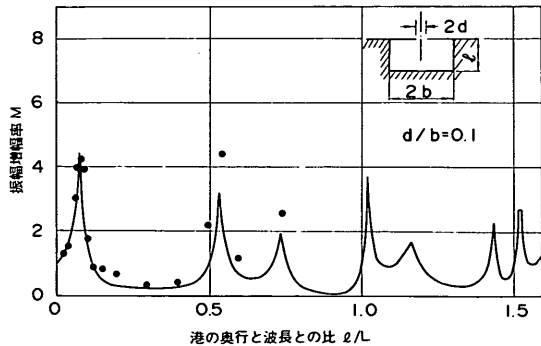


(1) 長方形湾



(3) 三角形湾

図-32 解析解と計算値の比較



(2) 矩形湾

ずれている。

図-32(2)では、 $l/L < 1.0$ において、共振点の位置はよく一致している。第1共振点における増幅率も、計算値と解析解はよく一致する。第二共振点および第三共振点付近では、解析解と計算値は若干異なる。図-32(1)および(2)において、短周期側の第2、3共振点付近で、計算値と解析解がずれるのは、計算では、格子内の平均値として水位を計算しており、解析解では、港口部の水位が一樣として解を求めているためと思われる。

図-32(3)では l の代わりに港内の最大辺の長さ R を用いた。計算結果は $2\alpha = 0.4$ に対する計算値である。第1共振点は一致するが、第二共振点は少しずれる。第

1 および第2共振点近傍の計算値と解析解を比べると、(1)および(2)の場合よりも、両者の差が大きい。破線は、 $2\alpha' = 0.2$ の解析解である。第1共振点の増幅率 M の計算値は、 $2\alpha' = 0.2$ の解析解より近い。三角形湾における計算精度が矩形湾、長方形湾に比べて落ちるのは、三角形地形を差分格子では正確に表すことができないからである。

以上のように、本数値計算法を用いた計算結果は、地形を正確に再現した場合には、解析解とほぼ一致し、港内の副振動を求める計算法として、適用性が高いことが判かった。とくに、(2)矩形湾において、 $l/L < 0.5$ の範囲では計算値と解析解は、ほぼ完全に一致した。 $l/L < 0.5$ のとき、波長 L は5000mであり、最大格子間隔500mの10倍である。したがって、波長 L の1/10以下の差分格子を用いると精度の高い解が得られるものと思われる。また、計算精度を上げるためには、最小格子間隔を小さくして、対象とする港湾の地形をできるだけ正確に表現する必要がある。

3. 3 長崎港における適用性の検討

(1) 計算条件

図-33は、長崎港における副振動の計算領域を示す。長崎港は、西に港口を開いているので、長崎港の西側に

沖側境界を設定した。図-33(1)では図の下辺が沖側境界に相当する。港外の沖波観測点であるP.1 伊王島を含むように外領域を設定し、最大格子幅は200mとした。なお、伊王島として示された領域は実際には狭水路によって伊王島と沖ノ島に分かれているが、計算では狭水路を無視した。長崎港内は格子を細分化して100m格子で地形を表現した。入射波の振幅 a は0.1mで一定で、周期 T を10~60分に変化させた。図-33(2)は、長崎港の計算地形と水深を示した図である。沖側境界の水深は、40~60m程度である。計算では、計算条件を単純化するために、沖側境界および仮想領域における水深 h_B は、沖側境界の平均水深50mと等しく一定とした。また、沖側境界で水深が非連続的にならないよう、計算領域において h_B 以上の水深を持つ地点の水深は、 h_B とした。

$T = 10$ 分、 $h_B = 50$ m とすると、波長 L は約13kmとなり、最大格子幅 $\Delta s_0 = 200$ mの56倍になる。したがって、3.2で示した $L < 10 \cdot \Delta s_0$ の条件を満たしている。

計算結果としては、湾内の代表点 (P.2 : 香焼, P.3 : 深堀, P.4 : 小ヶ倉, P.5 : 丸尾) における最大振幅を入射波振幅 a で除して求めた増幅率 A_i をまとめた。計算時間は、最長周期の入射を与えたときに、港奥の水位変動が定常となるまでとし、5時間とした。計算時間間隔

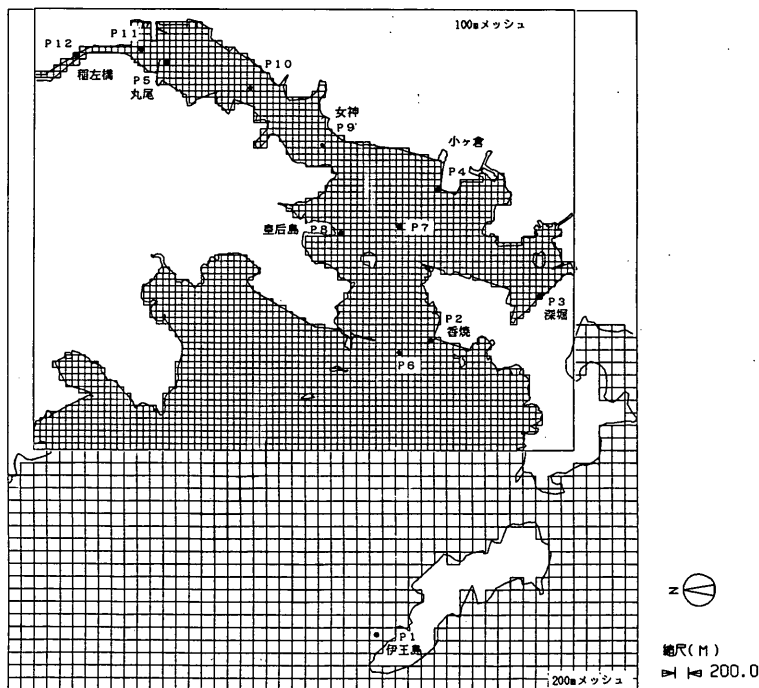


図-33(1) 長崎港の計算領域

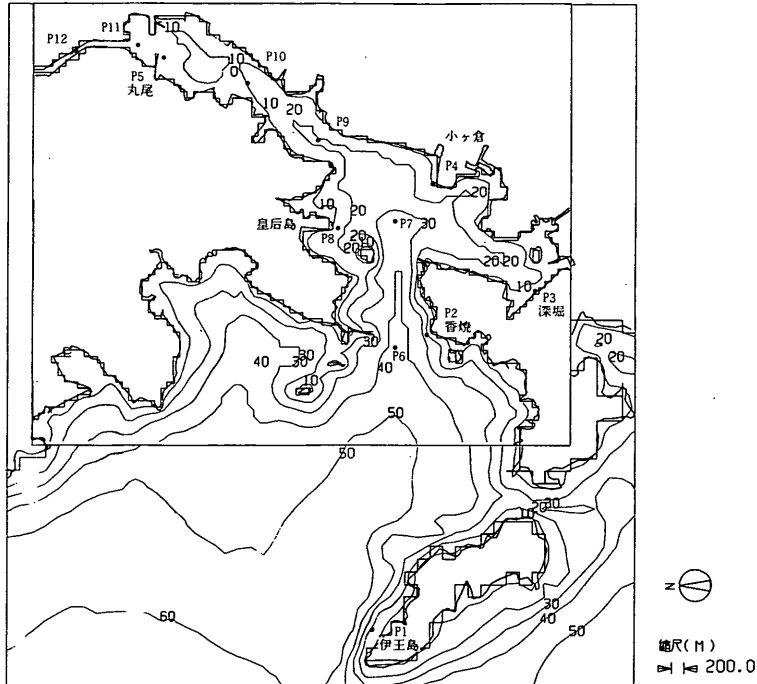


図-33(2) 長崎港の計算格子地形と水深

表-12 長崎港の潮位

	[m]	[m]
H. W. L.	T. P. +1.63	C. D. L. +3.30
M. S. L.	T. P. -0.07	C. D. L. +1.60
L. W. L.	T. P. -1.67	C. D. L. +0.0

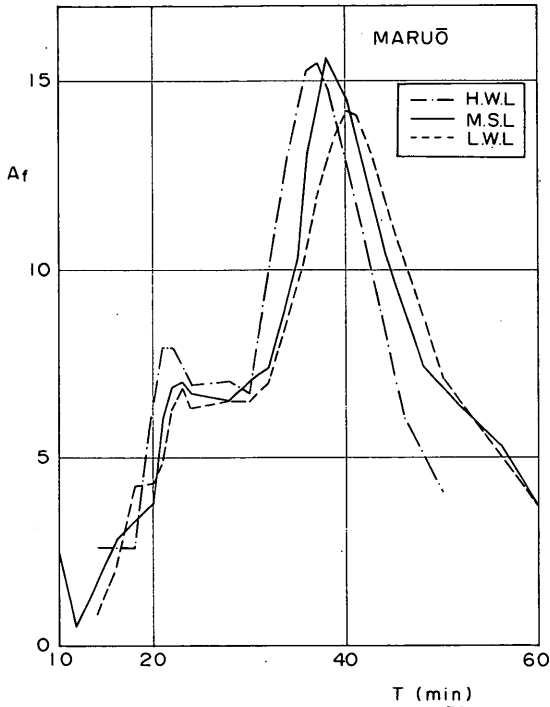
Δt は、0.05分である。

表-12は、長崎港の潮位を示したものである。H.W.L.とL.W.L.との差は、約3.3mあり非常に大きい。そこで、潮位差が湾内の増幅率に与える影響を調べるために、H.W.L.、M.S.L.およびL.W.L.の3つの潮位について計算を行った。

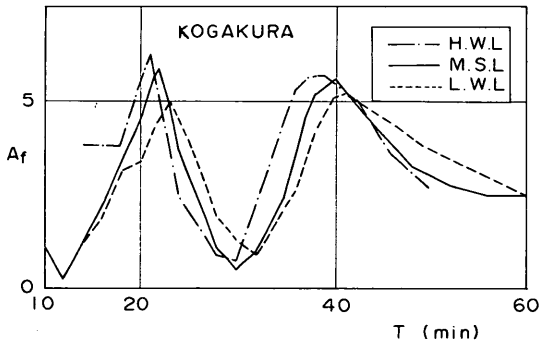
図-34は、(1)丸尾、(2)小ヶ倉における増幅率 A_r を示す。一点鎖線がH.W.L.、実線がM.S.L.、破線がL.W.L.の計算結果を示す。ただし、この計算では、河川奥の境界では波は完全反射するものとした model I を用いている。図-34(1)の丸尾の増幅率は、ピークを2つもつ。長周期側(第1ピーク)の周期は37~40分で、潮位が高くなると、ピーク周期は少し短くなる。 A_r の値は、

H.W.L.とM.S.L.ではほとんど変化していないが、L.W.L.では、3程度小さくなる。短周期側の第2ピークのピーク周期は、22~23分で、H.W.L.のとき最も短い。(2)の小ヶ倉においても、増幅率の計算結果には第1ピーク(長周期側)と第2ピーク(短周期側)の2つのピークが見られる。両ピークにおいて、H.W.L.のとき、ピーク周期は最も短くなり、L.W.L.のときには、それより2~3分長くなる。ピークでの増幅率の値(ピーク値)は、H.W.L.のときに最も長くなる。

以上の傾向をまとめると：1) 潮位が高くなるほど共振点は短くなる。2) 潮位が高いほどピーク値は大きい。ただし、H.W.L.とM.S.L.におけるピーク値の差は小さい。と言える。1)の現象は、潮位が上がると



(1) 丸尾



(2) 小ヶ倉

図-34 潮位による港内増幅率の変化

波速が早くなるので、港長が一定であれば、共振点が短くなる、と説明できる。2) は、L.W.L. の場合の方が海底摩擦の影響を受けやすいために生じるものと推測できる。したがって、L.W.L. による計算では増幅率を過少評価する危険性がある。また、観測結果は、全観測データの平均値としてまとめられており、観測時の潮位が一定ではない。そこで、H.W.L. と M.S.L. の計算結果に大きな差違は生じていない、ということも考慮して、副振動の数値計算における初期水位としては、M.S.L. を採用した。

次に、河川境界の差違が計算結果に及ぼす影響を検討

した。河川内の副振動による水位上昇量については、昭和53年3月に実測された例がある。1) 図-35(1)は、長崎港に流入する浦上川における観測点(大波上、長崎運送前、衛生公社前)を示す。計算では、図-35(1)の梁川橋までを計算領域とし、次の2つのモデルを考えた。

- (i) model I: 河川奥の境界を閉境界とし、河川奥での線流量 q は 0 である。
- (ii) model II: 河川奥の境界を開境界とし、河川奥での線流量 q は、式(43)の自由進行波の条件で与える。

図-35(2)は、河川内の副振動による水位上昇量を、大波止を 1 として表した図で、観測値は、昭和53年3月の最高水位を示した。このときの波の周期は松ヶ枝ではほぼ38分であったので、周期38分のときの、model I および model II の計算結果を実線および破線で示した。衛生公社前では観測値は、2.15になるが、model I の計算値が 1.3、model II が 0.9であり、観測値の方が大きく、計算値と観測値は一致しない。これは、実際には、斜面上の長波のはいりによる水位上昇が起こるために、河川内の水位が急激に上昇するのに対して、計算では、河川を一樣水深の狭水路としているので、波のはいりが考慮

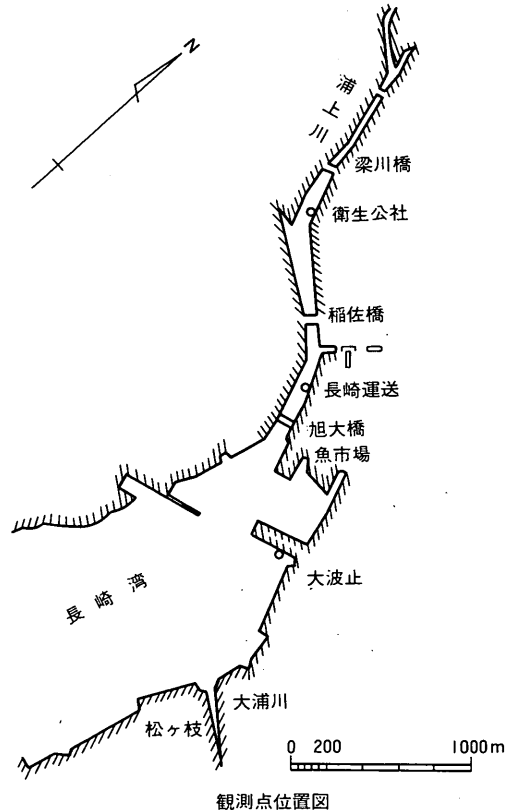


図-35 (1) 浦上川における水位観測点

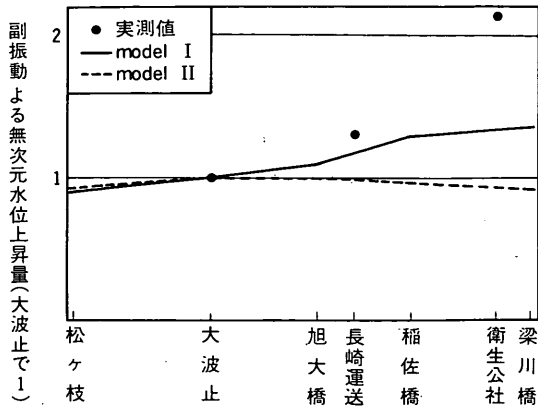


図-35 (2) 浦上川の水面上昇量

されていないためである。

model I と model II の結果を比較すると、model II では旭大橋付近すなわち河口部で水位が極大となるのに対して、model I では、奥へ行くにしたがって水位は上昇し、梁川橋の再奥部が極大点となる。

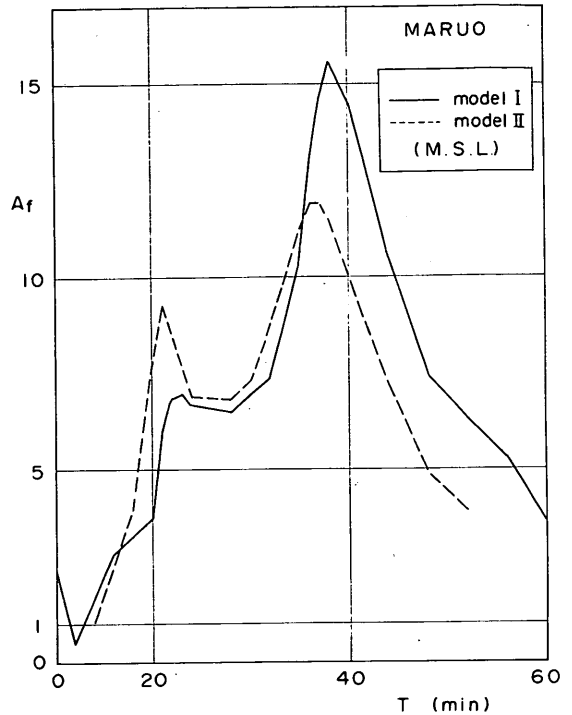
図-36は、河川奥の境界条件を完全反射とした model I (閉境界)、および進行波条件 (開境界) とした model II による計算結果の相違を示したもので、(1)丸尾、(2)深堀における増幅率 A_f を示す。実線が model I、破線が model II である。潮位は M.S.L. とした。図-36(1)の丸尾における第 1 ピークの周期は、model I が 38 分、model II が 36~37 分で約 1 分短い。第 2 ピークの周期は、model I が 23 分、model II が 21 分で、model II が約 2 分短い。model II のピーク周期が短くなるのは、河川奥が開いているために、港内の固有振動の腹の位置が河川最奥部より港内側の河口部へ移るために、振動系の長さが model I に比べて少し短くなるからではないかと推測できる。

図-36(2)深堀においても、model II のピーク周期は、model I より短くなっている。

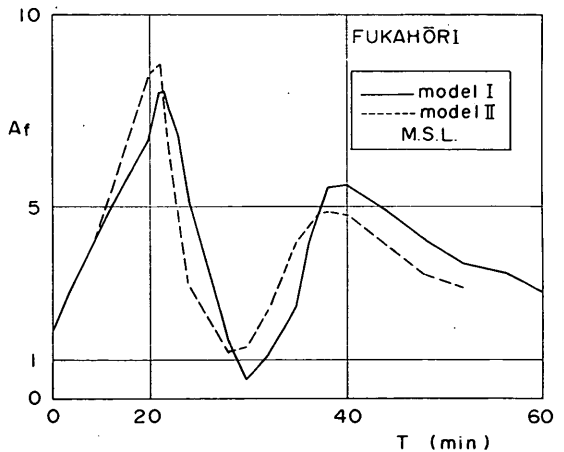
(1)および(2)の両ケースにおいて、第 1 ピークの値は、model I の方が model II より大きい。第 2 ピークの値は逆に model II が大きい。したがって、河川の奥を閉境界にすると水がせき止められるようになり、開境界にした場合よりも水位が上昇する場合もあるが、振動モードが変化することにより、逆に水位が減少する可能性もある。

図-36(1)および(2)の計算結果だけでは、model I と model II のどちらがより適用性が高いか明らかではないので、両モデルを用いて波高比を計算し、観測結果と比較して両モデルの適用性を比較することにした。

(2) 波高比の比較



(1) 丸尾



(2) 深堀

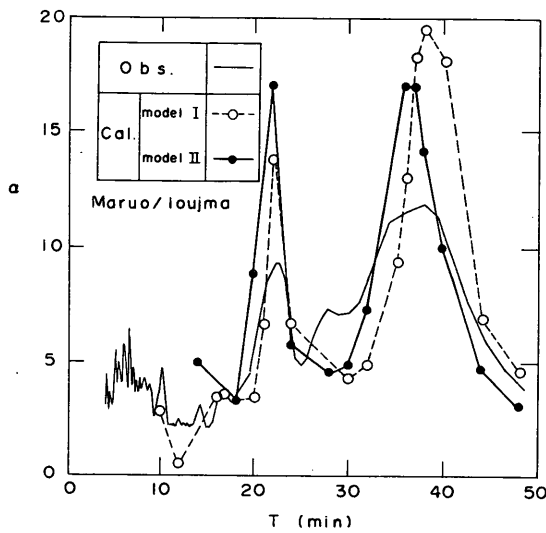
図-36 model I と model II の比較

図-37は、港外と港内の波高比 α を示した図である。計算では、たとえば(丸尾/伊王島)の波高比であれば、丸尾における増幅率を、伊王島における増幅率で除して求めた。図-37の実線は、2. 2で示した各観測点における副振動のスペクトルから求めた実測波高比である。図-37(1)~(5)はそれぞれ(丸尾/伊王島)、(深堀/伊王島)、(丸尾/香焼)、(深堀/香焼)、(丸尾/深堀)の組み

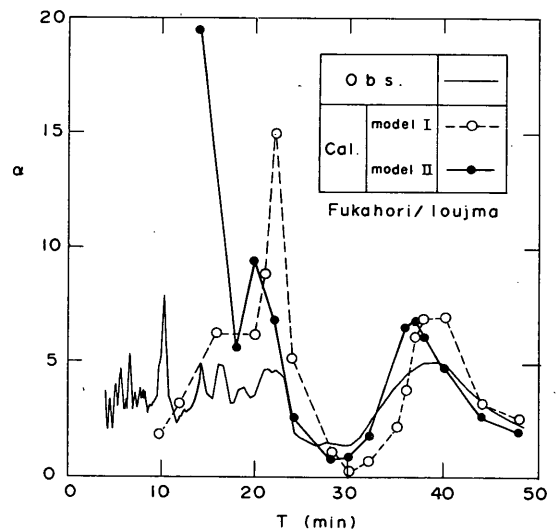
合わせについて求めた計算波高比と実測波高比である。各図において、白丸が model I, 黒丸が model II である。

(1) (丸尾/伊王島)の波高比をみると、実測波高比は、38, 22分でピークを示している。model I, model II 両モデルともピーク周期は、実測値とはほぼ一致している。ピークにおける波高比の値(ピーク値)は、両モデルとも計算値が実測値より1.3~2倍大きい。(2)(深堀/伊王島)の波高比において、実測値は、38分, 22分, 16分, 14分, 10分程度に顕著なピークをもつ。計算値も、model I ではほぼ38分と22分でピークを示すが、model II ではピーク周期はやや短くなり、37分と20分となった。しかし、model II では、24~32分における波高比が実測

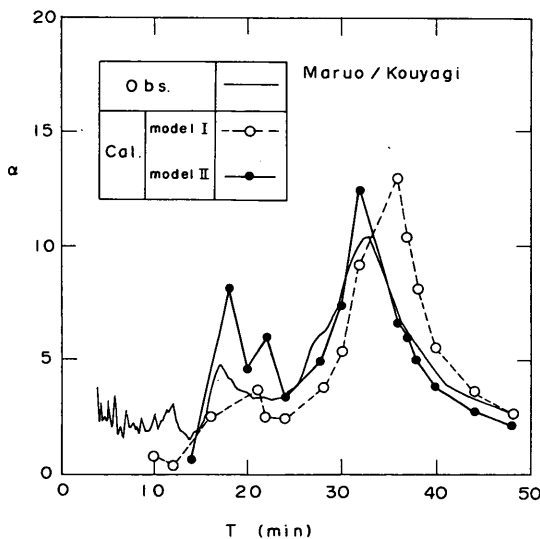
値とよく一致している。(3)(丸尾/香焼)においては、実測値には33分と、17分に顕著なピークが認められる。model I では、35分と20分にピークが現われ、実測値とは少しずれる。また、35分におけるピーク値が計算では25となり、実測値の2倍以上になる。model I の計算値は、32~33分, 22分および18分の3つのピークを持つ。しかし、25分~50分における波高比は実測値とはほぼ一致しており、ピーク値も、2程度高いだけである。(4)(深堀/香焼)の波高比をみると、実測値のピーク周期は、33分と17分である。model I の計算結果では、35分と20分にピークが現れ、ピーク周期は実測値より2~3分ずれる。model II においては、ピーク周期は、実測値には



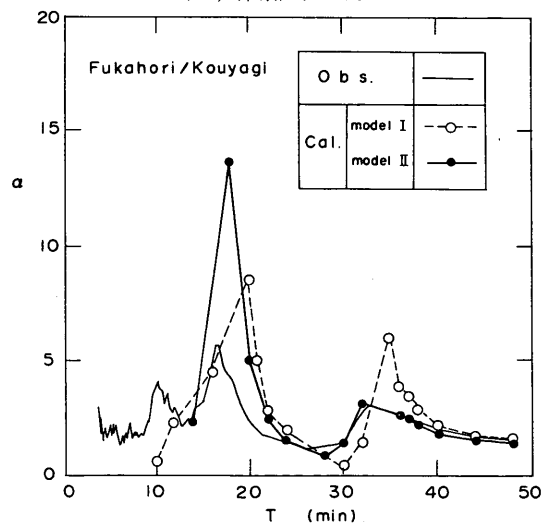
(1) 丸尾/伊王島



(2) 深堀/伊王島



(3) 丸尾/香焼



(4) 深堀/香焼

図-37 計算波高比と実測波高比の比較

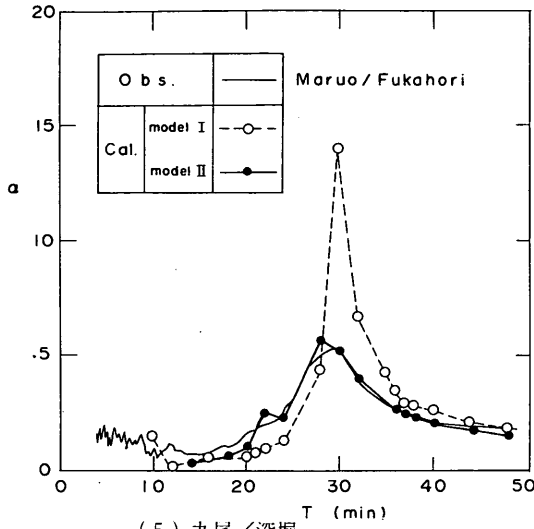


図-37 計算波高比と実測波高比の比較

ほぼ一致しており、24分～50分の範囲では、波高比の値が実測値に一致している。(5)の(丸尾/深堀)の波高比をみると、実測値では29分にピークが認められる。model Iのピーク周期は30分で実測値に非常に近いものの、ピークの値は、19で、実測値の約3倍である。model IIの計算値は、15～50分のはほぼ全点が実測値と一致し、ピーク周期、ピーク値とも実測値をよく表している。

以上のことから、港外の伊王島を基点とした波高比で比較すると、model I、model IIの両計算値とも、ピーク周期が実測値と2分程度ずれ、ピーク値も実測値より大きくなり、model Iとmodel IIに優劣はつけられない。港内の香焼、あるいは深堀を基準とした波高比では、model IIの計算値はピーク周期、ピーク値が実測値とはほぼ一致するだけでなく、25～50分の間では、波高比が実測波高比と一致する。しかし、model Iでは、ピーク周期が2～3分ずれ、ピーク値が過大になるケースが多かった。したがって、model Iに比べて、model IIの方が、適用性が高い。そこで、副振動の計算においては、model IIを用い、河川境界は開境界とした。

model IIの計算結果において、港外の伊王島を基点とした波高比で比較すると、実測値と少しずれる原因としては、基点とした伊王島が沖側の境界に非常に近いことが挙げられる。伊王島の観測点に相当する計算格子は沖側境界から数メッシュしか離れていないので、振幅はほとんど入射波振幅と等しくなってしまう。実際には、伊王島も長崎港の副振動の振動系に含まれており、伊王島での波高は、港外あるいは港内での振動により増幅され

ている場合も考えられる。したがって、伊王島を基点とした波高比を検討するためには、沖側境界を伊王島から遠く離すように、より広い領域での計算を行う必要がある。

図-38は、潮位をM.S.L.として、model IIを用いて計算した長崎港内の増幅率である。港内の丸尾、深堀、小ヶ倉では、周期37～38分、および20～21分にピークが生じる。図-39および40は、丸尾の水位が最大となったときの、水位分布を示した図で、増幅率がピークとなる周期21分と37分について、振幅0.1mの波を入射させたときのものである。

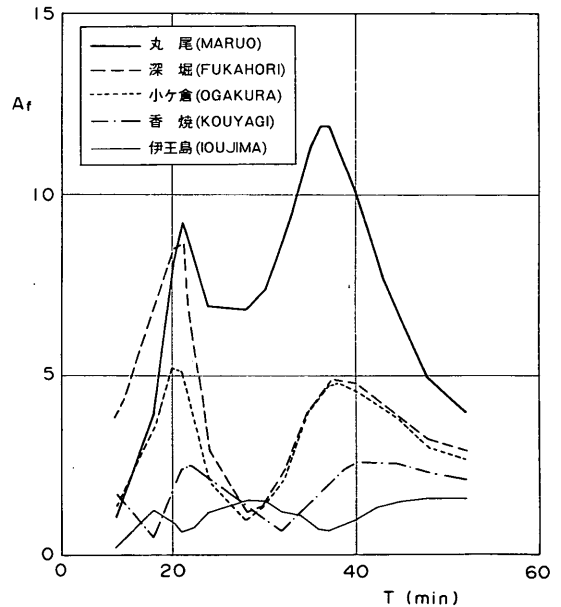


図-38 長崎港内の増幅率 (M.S.L., model II)

図-39において港奥の水位が0.8～1.0mとなったとき、小ヶ倉と丸尾の中間点付近で水位は0となる。それより港外側の水位は負で、深堀で-0.6m、小ヶ倉～香焼間で-0.4～-0.6mである。それらの水域よりさらに港外側では水位は徐々に上昇し、伊王島付近で0となる。この水位分布図から周期21分の振動モードを考えると、丸尾に腹を、丸尾と小ヶ倉の間に節を持ち、深堀～香焼が再び腹になる振動モードが考えられる。このモードは、2.2の表-10で示された観測スペクトルおよび波高比から推定される振動モードの(V)に相当する。

図-40の周期37分の場合、丸尾の水位が1.2mとなったとき、長崎港内の水位は全域で正で、丸尾側が高く、香焼側が低い。そして、伊王島より若干港内側で水位は

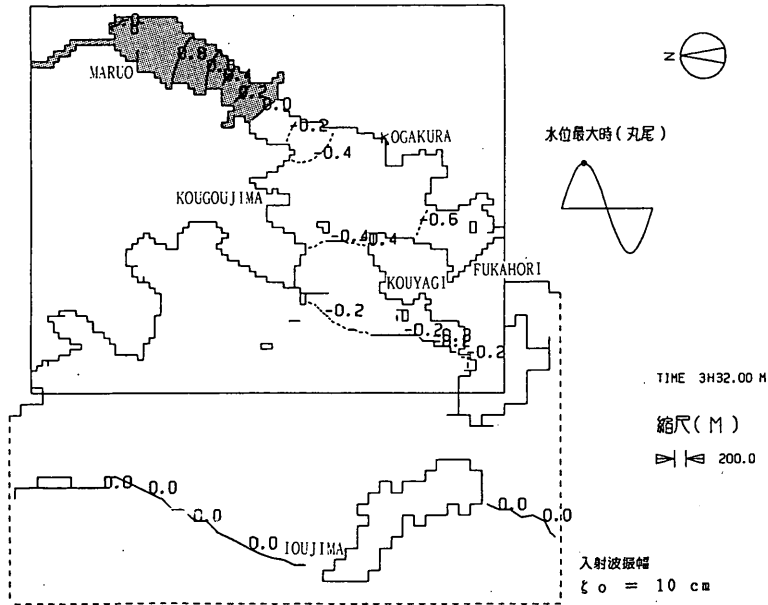


図-39 長崎港における港奥水位最大時の水位分布
(周期21分)

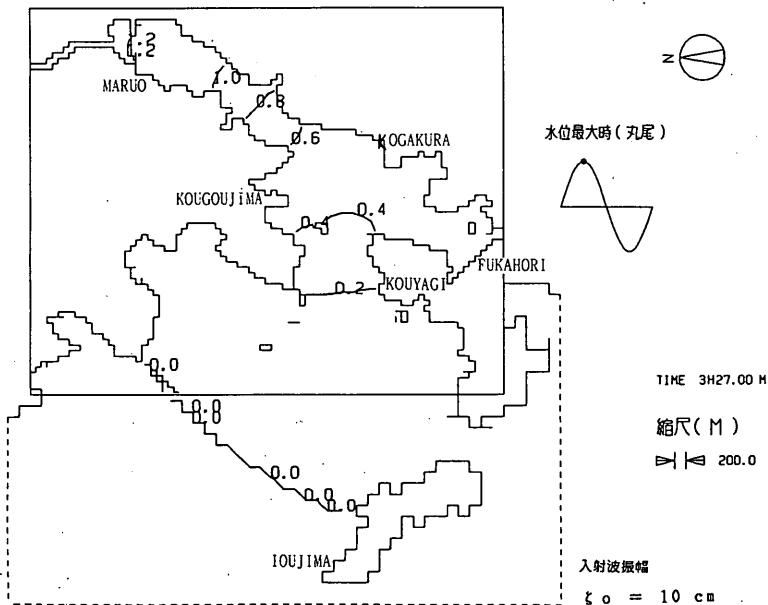


図-40 長崎港における港奥水位最大時の水位分布
(周期37分)

0となる。この振動モードは、丸尾付近で腹、伊王島より若干港内側で節を持つ。このモードは、表-10の、観測値で、スペクトルが最大となる(ii)のモードに相当する。図-40から判かるように、本計算法の計算結果から推

定した港内の振動モードとよく一致し、本計算法で港内の振動モードを求めることができることがわかった。

ところで、2. 2で示した長崎港内の副振動のスペク

トルには、周期60分以上にピークが生じていた。すなわち、長崎港および長崎湾には、周期が60分以上の振動モードが存在し、その節は伊王島より、さらに沖側にあるものと推測できた。本章での計算領域は、伊王島付近に沖側境界を設定しているため、伊王島より港内側に節が出現する比較的短周期の振動モードは計算できるが、伊王島よりさらに沖側に節を持つような長周期の振動モードは計算できない。そのような、長周期の振動モードを求めるためには、さらに広い領域を計算領域としなければならない。

(3) 流速の比較

実測流速値は、2.2に示した1984年1～3月の観測期間中、最大波高が記録された3月15日の、舵掛、女神係船における流速記録を用いた。表-13は、湾内の潮位観測点における最大波高の発生時、振幅、周期を示した

ものである。表-13の実測値は種々の周期の波が重なって形成されたものであるが、長崎港の増幅率は周期37～38分のとき極大となること、表中の周期の平均値が38.5分であることから、ここでは、実測値は、周期37～38分の伊王島を節とする1次モードの固有振動による波高を示しているものと仮定した。そこで、実測流速値と比較

表-13 観測期間中の副振動の最大振幅

地点	発生時分	片振幅(cm)	周期(分)
香焼	11:50~12:36	17	46
深堀	11:52~12:34	42.5	42
小ヶ倉	11:52~12:28	33	36
丸尾	11:58~12:28	104	30

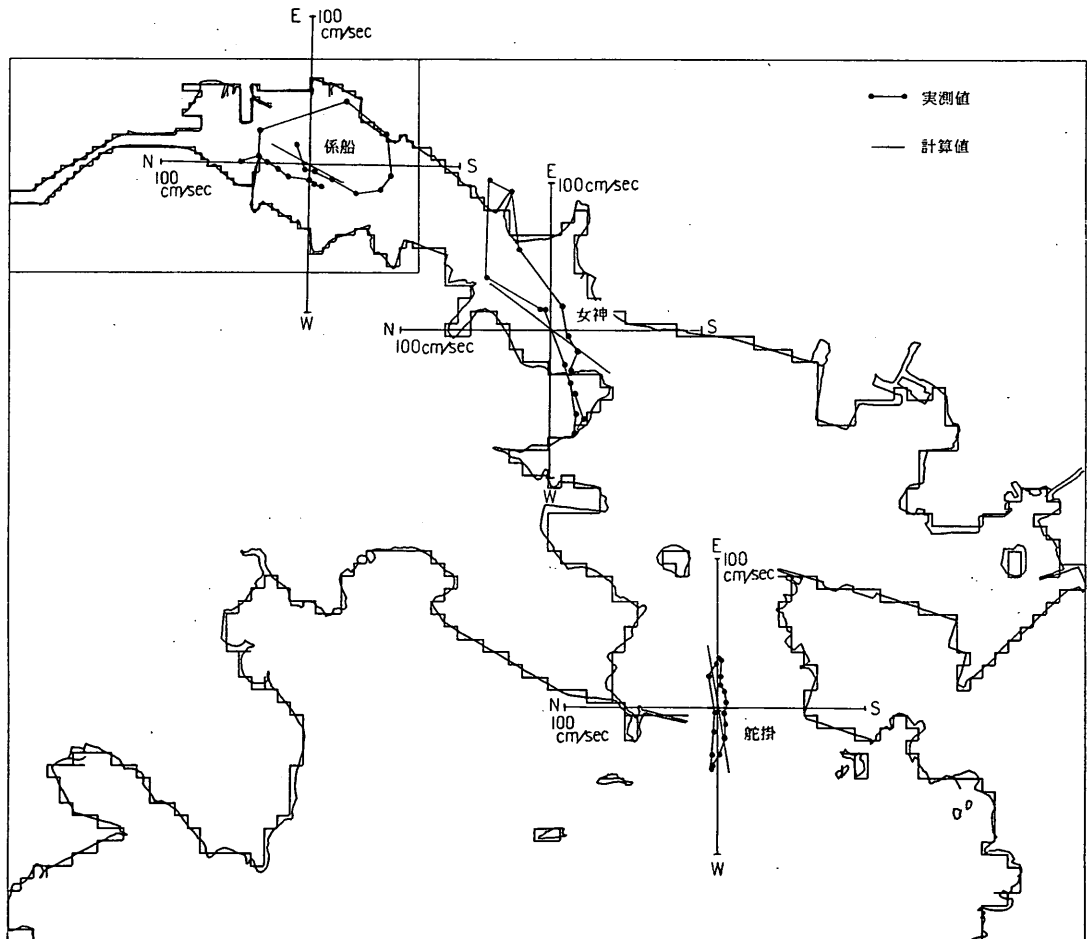


図-41 流速の実測値と計算値の比較

(係船 [keisen], 女神 [megami], 舵掛 [kajikake])

計算値周期37分

入射波振幅 $\zeta_0 = 8.3 \text{ cm}$

する計算流速値は、入射波周期 $T=37$ 分として計算した港内流速を用いることにした。

計算における入射振幅は0.1mであり、表-13の実測値と直接比較できない。そこで、次のように計算値を補正した。

まず、表-13の4地点での実測値の片振幅を、それぞれの点における周期37分の場合の増幅率で割って、平均することによって、実測入射波振幅 a' を求めた。表-14は、実測入射波振幅 a' の計算結果を示した表である。次に、計算入射波振幅 a と a' の比 a'/a を計算して、補正係数として舵掛、女神、係船の流速値に乗じた。

図-41は、実測流速値と補正した計算流速値の比較を示す。図-41において、計算値は1周期分のデータを1分間隔でプロットした。実測値は、表-13に示した最大振幅の発生時に近い時間の1周期分の流速を2分間隔でプロットしたものである。なお、計算では、湾奥における計算精度を上げるために、湾奥の実線で囲んだ領域は、格子間隔を50mとして計算した。

図-41において、3地点の流向の主方向は計算値と実測値ではよく一致している。流速の絶対値は、舵掛ではほぼ一致しているが、女神および係船においては、計算値の方が少し小さくなっている。また、実測値に現れている流向の主軸方向以外の変化が計算値には見られない。しかし、実測値がいろいろな周期の波が重なり合っ構成されていることを考慮すると、計算値は実測値をほぼ表現していると考えられる。

なお、表-14に示されるように、実測入射波振幅を推定すると、 $a'=8.3$ cmとなった。この値と比較すると、計算で用いた入射波振幅 $a=10$ cmは、入射波の振幅としてほぼ妥当な値であると言える。

表-14 実測入射波振幅の推定

地点	振幅実測値 a' (cm)	計算増幅率 Af	a'/Af (cm)
香焼	17	2.0	8.5
深堀	42.5	4.8	8.9
小ヶ倉	33	4.7	7.0
丸尾	104	11.9	8.7
平均(a')			8.3

計算値は、最小格子100mのもの

図-42および43は、それぞれ、周期21分および周期37分における湾奥の計算流況図を示す。図-42、43において、上段が、丸尾の水位上昇時、中段が、丸尾の水位最大時、下段が、丸尾の水位下降時、の流況図を示す。図-42、43において、丸尾の水位が上昇するときには、図の右手から大きな流速を持って、水が流入している。丸尾突堤と元船の棧橋間は水路が狭くなっているため、流速は増大している。一方、河川内では河川奥から河口へ流出が生じている。

丸尾の水位が上昇して最大となると、湾奥の流速は小さくなる。丸尾の水位が下降しはじめて、0にあると湾奥から流出する状況となり、丸尾突堤と元船棧橋間の水路では、湾奥の船だまりから湾外へ向けて、流速が強い流れが生じている。

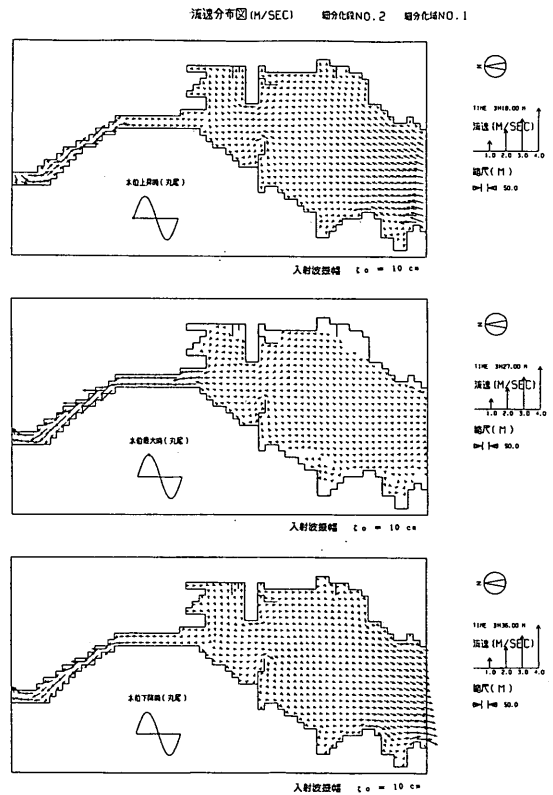
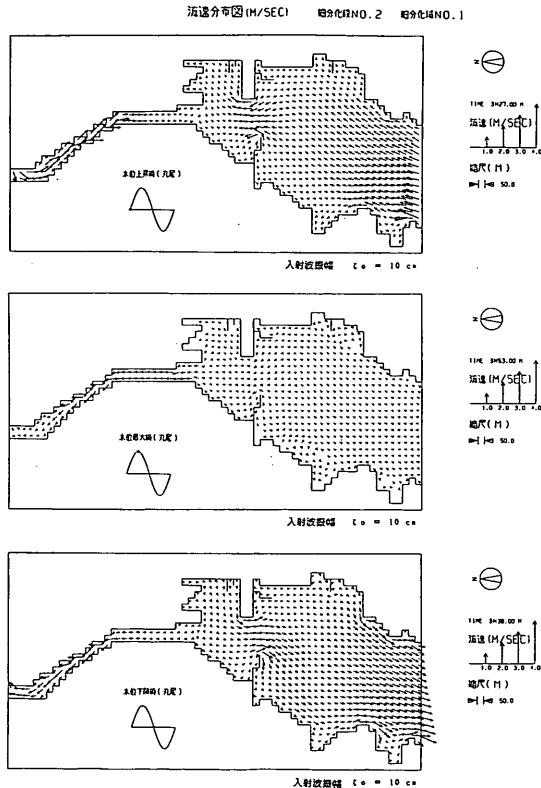


図-42 長崎港内最奥部の流況(周期21分)



図一43 長崎港内最奥部の流況（周期37分）

4. 広領域計算による港内副振動特性の検討

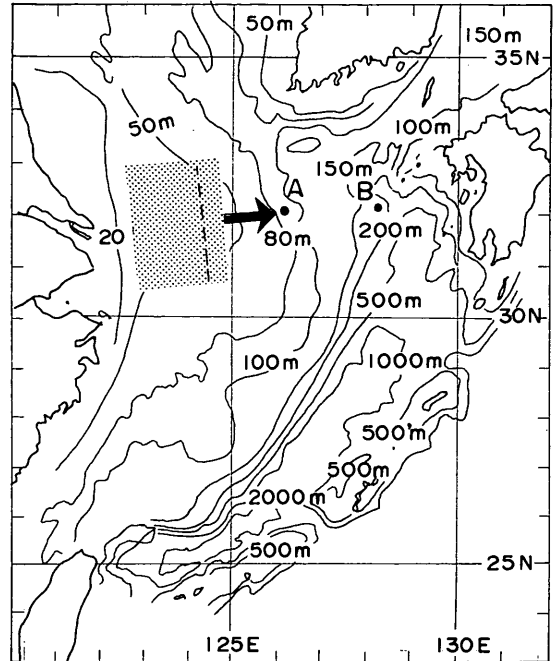
4.1 広領域計算の必要性

3. 3で示したような長崎湾のみを計算領域とした数値計算においては、次のような問題点が生じた。

- i) 沖側境界に近い伊王島を基準とした港内の波高比は実測波高比と一致しなかった。ピーク周期は、2～4分ずれて、ピーク値は実測値より大きくなった。
- ii) 伊王島付近に節を持つ周期37～38分の固有振動モードは計算で表すことができるけれども、周期60分以上の伊王島より沖側に節を持つような比較的長周期の固有振動モードは数値計算では求めることができなかった。

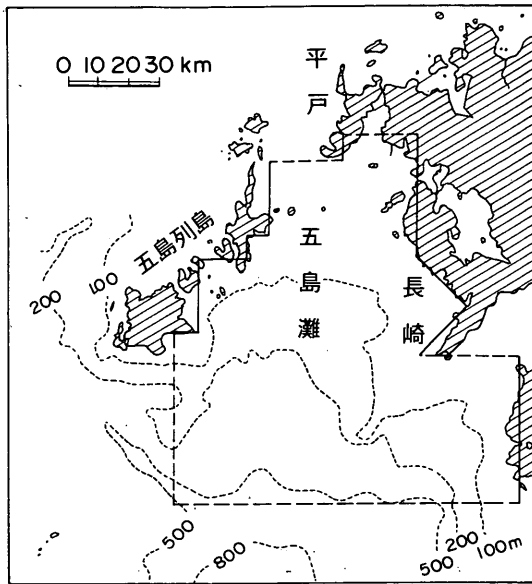
上記のような問題点を解決するこめには、長崎湾の沖に広がる五島灘、天草灘を含んだ広い領域を対象とした数値計算が必要である。

長崎港の副振動については、日比谷・梶浦²²⁾が図一44に示したような東シナ海全域を計算領域とした広領域を計算している。日比谷・梶浦は、低気圧によって発生し



図一44 低気圧によって起こされた水面変動を初期条件とする副振動計算領域²²⁾

た振幅3 mbの気圧波が中国大陸の東岸から東へ約113 km/hの速さで進むものとして計算を行った。それによると、中国大陸東岸で2 cm程度にすぎなかった長波が、図一44の右上に位置する五島灘にはほぼ南側から進入する。自由進行波となって五島灘に進入した長波は五島灘での振動を引き起こす。五島灘のように三方を島に挟まれた水深200 m程度の平坦な海域でも副振動が発達しやすく、この種の陸棚上の副振動も棚セイシュの一種と考えることができる。²⁾ 日比谷・梶浦は、五島灘の代表点での計算で求めた水位変動をスペクトル解析して五島灘での共振モードを計算している。図一45は、日比谷・梶浦が示した五島灘の振動モードを示したものである。図一45は、各モードの最大振幅を1として、五島灘の水位変動の振幅を示した図で、等値線は0.2間隔で引かれている。図中薄墨の部分が正の水位の部分、白地の部分が負の水位の部分を示す。図一45で示されるように、五島灘のセイシュは、ほぼ五島列島と長崎港を両端の腹とし、南北方向を軸として起きる。周期 $T=69.2$ minの振動は、五島列島と、長崎港付近に振動の腹を持ち、五島灘の中央部に1つの節線をもつ五島灘の1次モードの振動である。周期 $T=34.5$ minの振動は、五島列島と長崎港の間に2つの節線をもつ2次モードの振動である。周期 $T=23.6$ minの振動は、五島列島と長崎港の



間の3つの節線をもつ3次モードの振動である。

長崎港は湾口を五島灘に向かって広げており、また五島灘における棚セイシュの腹にはほぼ位置している。このため、五島灘の棚セイシュによって、容易に長崎港内へ長波のエネルギーが伝達されることになる。3. 3で示したように、長崎港だけを対象とした場合、湾口を節、港奥を腹とする1次モードの固有振動周期が37~38分、港奥の丸尾と深堀を共に腹とする振動周期が21~23分である。

計算条件等の違いにより、数分のずれは生じるが、長崎港の港口を節とする1次モードの振動周期は、五島灘の棚セイシュの2次モードの振動周期とほぼ等しく、長崎港内の丸尾と深堀を腹とする振動周期は五島灘の3次モードの振動周期にほぼ等しい。したがって、長崎港内の周期37~38分、および21~23分の固有振動は五島灘の棚セイシュの振動との共振によって大きく増幅されることになる。すなわち、長崎港内の副振動のスペクトルに

$T = 69.2 \text{ min}$

$T = 34.5 \text{ min}$

$T = 23.6 \text{ min}$

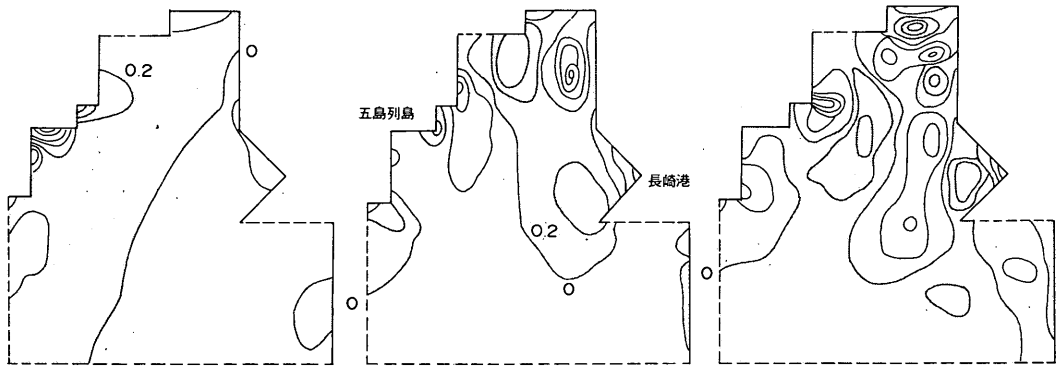


図-45 五島灘の振動モード

において、上記の2つの周期の振動エネルギーが顕著になるのは、五島灘の棚セイシュとの共振によって、港内の固有振動モードが増幅されるためと説明できる。また、長崎港内の副振動のスペクトルに見られる周期60分以上の振動は、五島灘で発生した棚セイシュによるものと考えられる。

このように、長崎港内で発生する顕著な副振動は、大陸棚である程度増幅された長波が、港内の共振によってさらに大きく増幅されるために発生する。逆に、大陸棚での棚セイシュと港内の振動モードが共振関係にない場合、港が棚セイシュの節線上に港口を持つ場合などは、港自体が固有振動モードを有していても、そのモードの振動は増幅されず、顕著な港内副振動は発生しないと推測できる。

以上のことから、港内副振動の特性を検討するためには、港内の振動モードを求めるだけでなく、港外の大陸棚における振動との共振関係を調べる必要がある。そこで、本研究では、3. 1に示した数値計算を用いて、棚セイシュの生じる大陸棚を計算領域とし、規則波を入射波とする広領域計算を行った。

日比谷・梶浦によれば、気圧波によって発生した長波は、五島灘には自由進行波として進入し、その進入方向は、等水深線とはほぼ直角である。また、その振幅は五島列島付近で5~10cmである。そこで、本計算では、沖側境界をなるべく等水深と平行になるように設定し、入射波の振幅 a は5cmで一定とした。

4. 2 港内副振動特性とその増幅機構の検討

(1) 長崎港

図-46は、長崎港の広領域計算の計算領域を示す。沖側境界は、五島列島と鹿児島県 甌 島列島とを結ぶ直線

とし、五島灘中部の200mの等水深線にほぼ平行になるように設定した。計算領域は、五島灘、天草灘、天草下島、上島および長崎半島を含む。

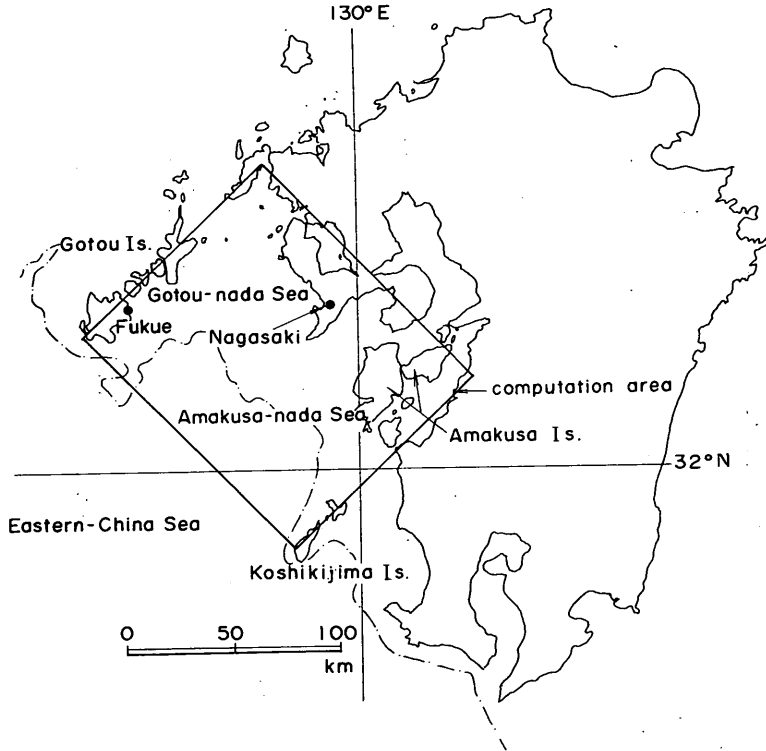


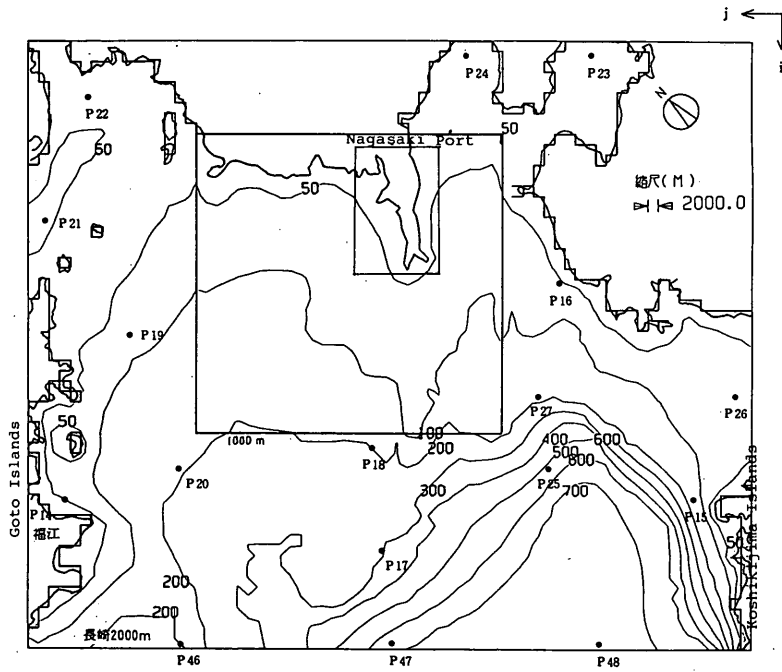
図-46 長崎港の広領域計算範囲

図-47(1)~(4)は、長崎港計算領域の計算格子地形と水深を示す。(1)は長崎港の全計算領域を示し、図の下手側が沖側境界になる。最大格子幅 Δs_0 は2000mとし、 Δt は、0.05 minとした。図-47(1)の陸上部から突出した半島が長崎半島で、半島の西側のつけ根に長崎港が位置する。長崎港および長崎半島周辺では格子を細分化して、地形を正確に表現した。図-47(1)の中央部の四角で示した領域は、格子幅を1000m、さらに500mに細分化した領域である。図-47(2)、(3)はそれぞれ、格子幅500m、および250mの計算領域を示す。図-47(4)は、長崎港内の計算地形を示し、格子幅は、125mである。港奥の浦上川の最奥部の境界は開境界とし、潮位はM.S.L.とした。入射波の振幅 a は前述したように5cmで一定とし、周期 T を4~80分で、2~4分毎に変化させて計算を行った。

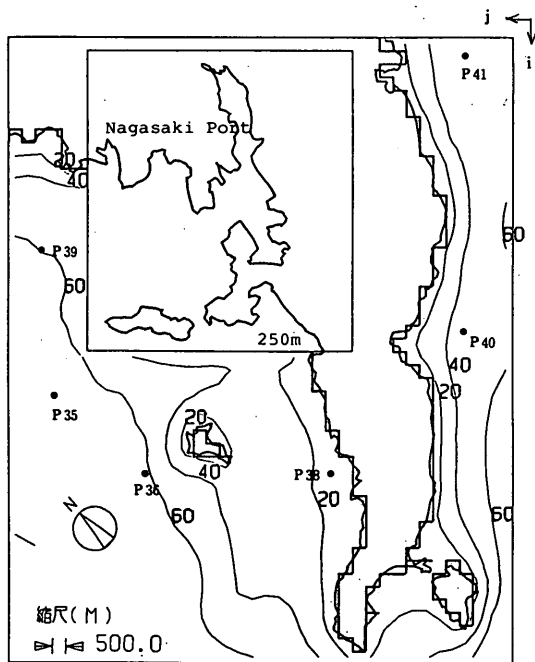
図-48は、長崎港内における増幅率を求めた代表点の位置を示す。P.1~P.9の中で、P.1~5はそれぞれ、伊

王島、香焼、深堀、小ヶ倉および丸尾の潮位観測点に相当する。

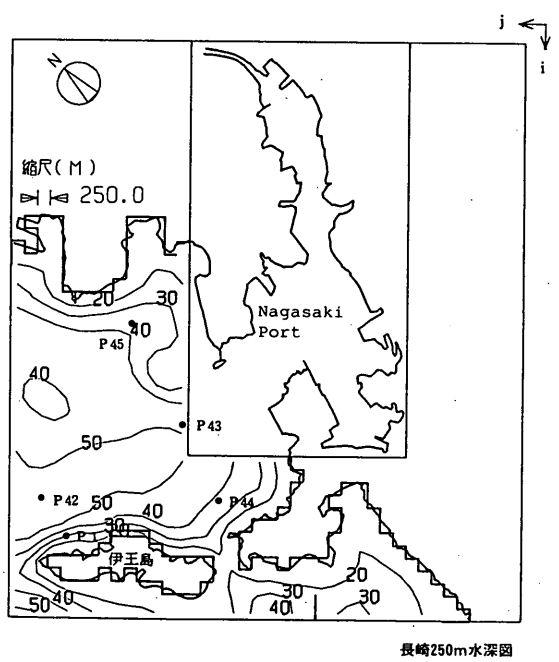
図-49(1)(2)は、港内の増幅率 A_T を示す。図-49(1)において、P.1(伊王島)での A_T の値は小さく10以下であり、 $T=24, 40-44, 70$ 分のところに低いピークをもつ。3つのピーク周期は、それぞれ、五島灘の固有振動の3次、2次、1次モードの振動周期に相当すると思われる。P.2(香焼)では、 A_T のピーク周期はP.1と同一で、24、40、70分である。24分の増幅率は、P.1における増幅率の約1.5倍、40分の増幅率は、約2倍となっているが、周期70分における増幅率はP.1とほぼ同じである。P.3(深堀)およびP.4(香焼)の増幅率 A_T は、 $T>28$ 分ではほぼ同一であり、両者共、 $T=16$ 分に短周期側のピークが生じている。 $T=24$ 分における A_T の値も、P.3では、12、P.4では9と比較的大きいものの、 $T=16$ 分における A_T の値が、周期24分での A_T より大きいので、ピーク



(1) 2000-1000m

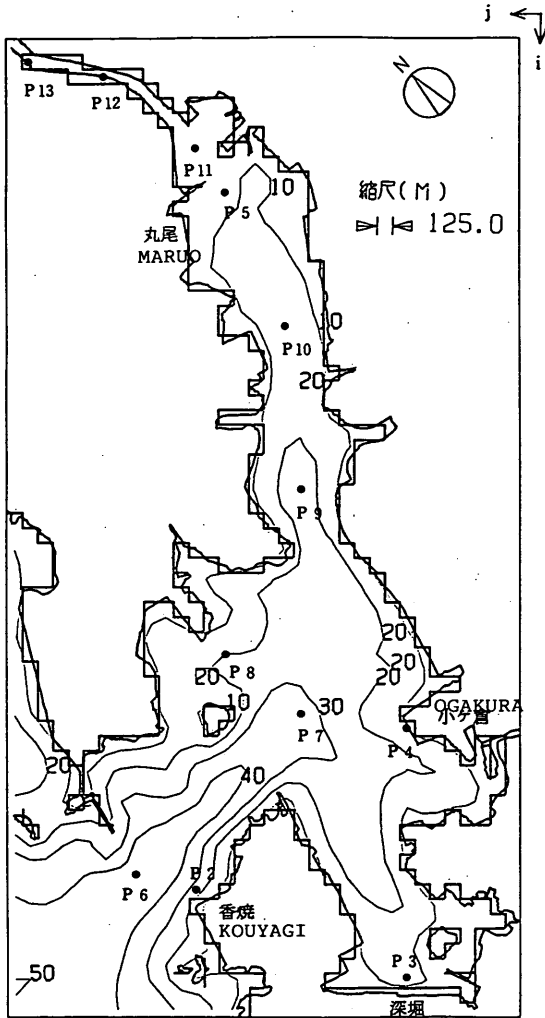


(2) 500m



(3) 250m

図-47 長崎港の広領域計算の格子地形と水深



(4) 125m
 図-47 長崎港の広領域計算の格子地形と水深

周期は16分になっている。P.5 (丸尾) では、 $T=24, 38, 65\sim70$ 分にピークが現れ、その値は非常に大きく、それぞれ、 $A_f=35, 52, 15$ である。

図-49(2)の水路中央部に並んだP.6, P.7 およびP.9の増幅率をみると、 $T=36\sim40$ 分のピークが顕著で、 A_f の値は、P.6, P.7, P.9の順に大きくなり、湾奥へ進む程、水位が上昇していくことがわかる。周期70分におけるピーク値はP.6,7,9ではそれほど変化していない。周期24分では、 A_f の値は、P.6,7,9ではほとんど変化せず、約10である。以上のことをまとめると、 $T=70$ 分では、港内の全域で同程度に水位が上昇しており、港内における水位差は小さい、と言える。したがって、周期70分の振動は、長崎港内の固有振動モードではなく、五島灘における振動によって生起されている。周期40分の A_f は港外のP.1では小さく、港奥に向かうにしたがって大き

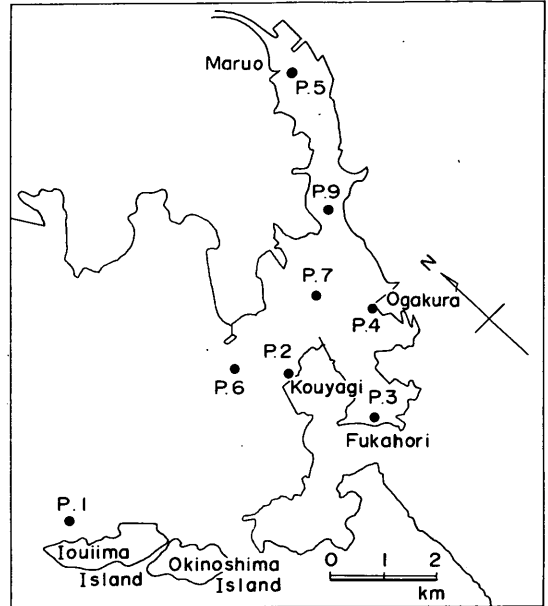
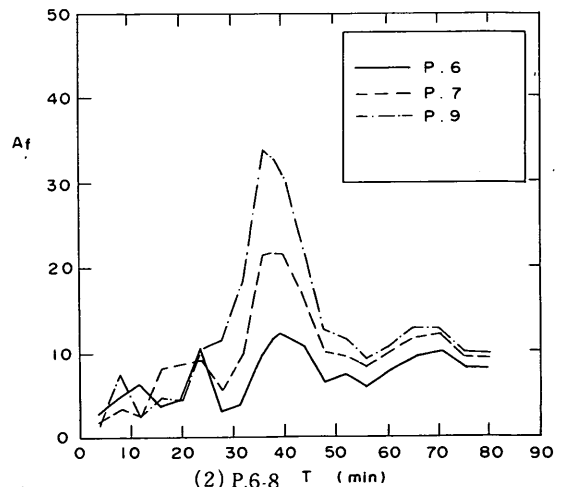
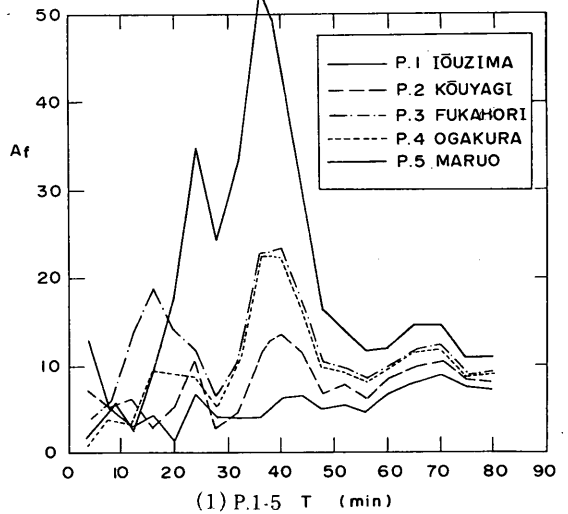


図-48 長崎港内の増幅率出力点



(2) P.6-8 T (min)
 図-49 長崎港内の増幅率

くなる。図-50は、周期24、40、70分における港内の代表点の A_f を抽出して示したものである。周期40分のときには、P.1において A_f は11であるが、P.5では5倍に増幅され53になっている。P.1~P.5の間で、 A_f が小さくなる節は見られない。したがって、周期40分の振動は、P.1~P.6付近を節、P.5を腹とする港内の1次モードの固有振動であり、港外の振動が共振によって増幅される。

周期24分のとき、港奥のP.5の A_f は35である。P.3でも他点に比べると大きく11である。したがって周期24分で、P.5の A_f が大きくなるのは、P.5、P.3を腹とするような港内の固有振動が生じるためである。図-50において、周期24分における港内の A_f を比較すると、P.5では他点に比べて A_f が増大していることは明白であるが、P.9~P.3の間での変化は小さい。しかし、P.4で若干小さくなっているため、P.4付近が振動系の節となっていると思われる。腹の位置にあたるP.3での A_f が比較的小さくなっている原因としては、P.3前面の海域が狭水路とならず、幅の広い湾となっていることが考えられる。

図-49では、P.2、P.4において、周期16分のピークがみられた。港内の他の点では、周期16分で A_f が増大することはない。したがって、P.2、P.4を含む長崎港南端の小湾は、周期16分の固有振動モードを持つ。

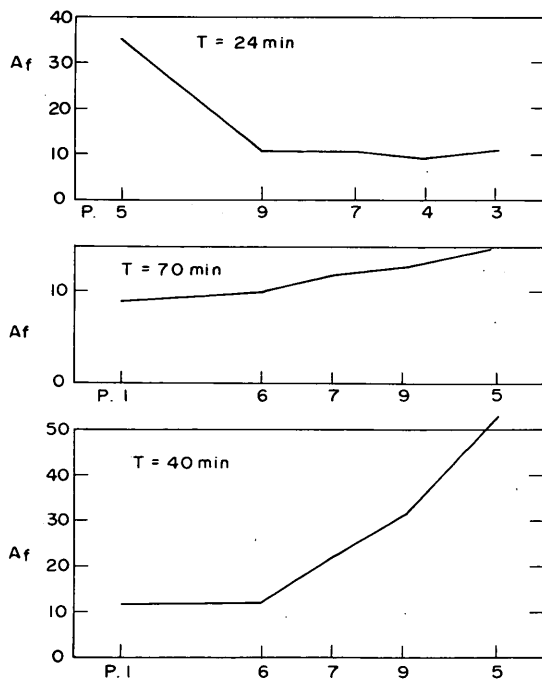


図-50 増幅率の場所的变化

図-51は、五島灘における代表点の位置を示す。図-52(1)~(3)は、五島灘の代表点における A_f を示したものである。(1)P.14(福江)、~P.22、(2)P.35~P.39、および(3)のP.34、P.31において、周期65~70分で、 A_f はピークをもち、その値は五島灘の東端のP.39で9、西端のP.14で10である。五島灘中央部のP.30では、周期60~70分でも A_f の値は小さく1程度である。したがって、五島灘は周期65~70分の棚セイシュの1次振動モードをもち、東端と西端が腹でP.30付近が節っている可能性がある。

P.1でピークが現れた周期40分前後については検討してみると、五島灘西部のP.14ではピークは見られず、P.14では周期32分に A_f の値が極値をとった。しかし、P.14に近い、P.19、20では、36~38分に低いピークが現れている。P.34、P.31でも40分に小さなピークが見られる。したがって、五島灘には周期36~40分程度の振動モードが存在することはわかるが、 A_f の値が小さいので、図-51だけでは、節の位置などはわからない。

P.1で、周期40分について顕著なピークが認められた周期24分について検討する。五島灘西端のP.14、東端のP.39では周期24分で A_f が増大しており、振動の腹となっていることがわかる。P.30、P.31、P.34でも A_f はピークをもつので、これらの点の位置でも腹となっている。P.35、P.37では A_f のピークは見られないので、P.35、P.37が節線となっている。これ以外の点では、節になっているかどうか判断できない。したがって、周期24分の棚セイシュの存在は認められるが、節、腹の数と位置は、図-51だけでは判断できない。

なお、P.14では、周期24分、65分以外に、周期32分、

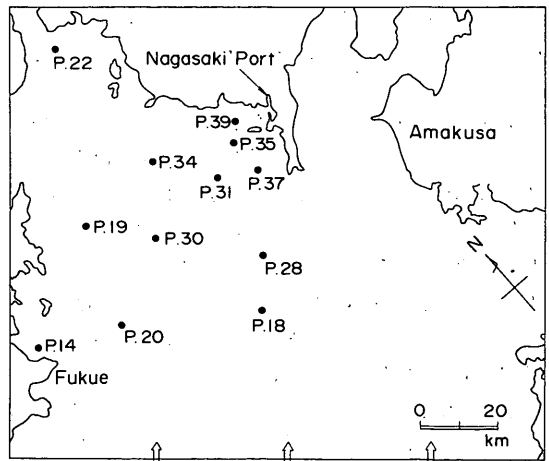
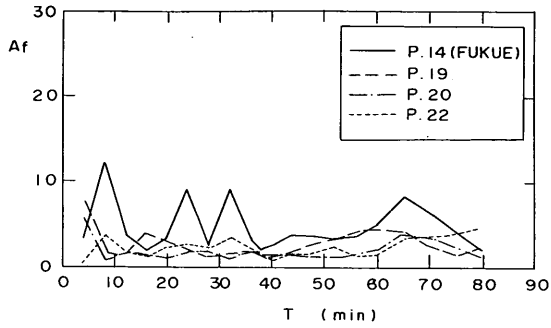
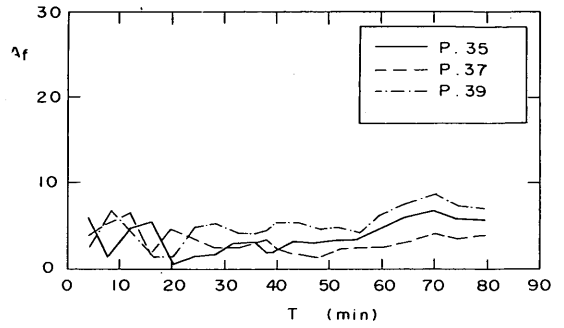


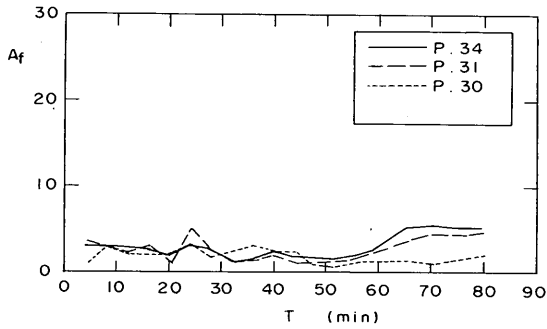
図-51 五島灘の増幅率出力点



(1) P. 14, 19, 20, 22



(2) P. 35, 37, 39

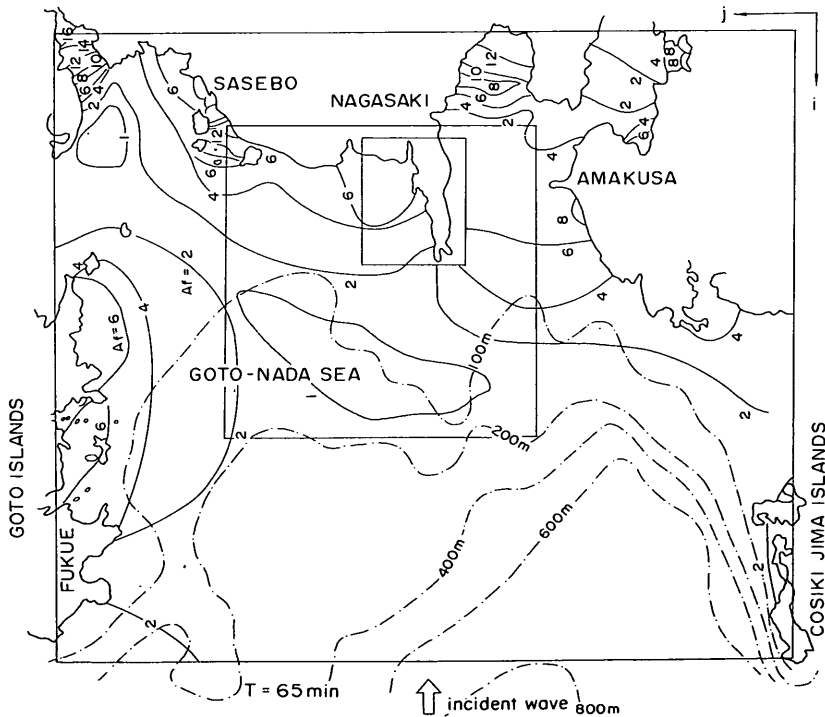


(3) P. 34, 31, 30

8分でもピークが認められる。P. 22でも同一周期でピークが認められる。他の点では、これらの周期にピークは生じていない。したがって、これらの周期の振動は、P. 22およびP. 14を両端とする振動系での振動と考えられる。

また、ピーク周期は、地点によって2～3分ずれており、これは、湾の地形が複雑で、地形によっては振動周期より少しずれたところで A_f が極大になるためと思われる。したがって、振動周期は2～3分の幅をもって考えた方がよい。

図一52 五島灘の増幅率



図一53 計算領域での増幅率の分布 (周期65分)

図-53は、周期65分における計算領域内の A_f 分布を示した図である。五島灘の西端の福江および長崎半島の西側の付け根付近では A_f は6以上になっている。増幅率が大きくなる原因の1つとしては波向線が集中し、グリーンの式にしたがって水位が上昇することが考えられる。五島灘においてもある程度グリーン公式に、したがって水位が上昇すると思われるが、図-53に見られる A_f

> 6以上の地域は広く、またグリーンの式だけでは、 $A_f > 6$ とならないと考えられる。五島灘の中央部では A_f が1以下に小さくなっているため、五島灘においては、棚セイシュが存在し、その1次振動モードの周期は65~70分で、五島列島と長崎湾が腹となり、両者の中間付近が節となっていることがわかる。

図-54(1), (2)は、周期36分としたときの(1)五島灘, (2)

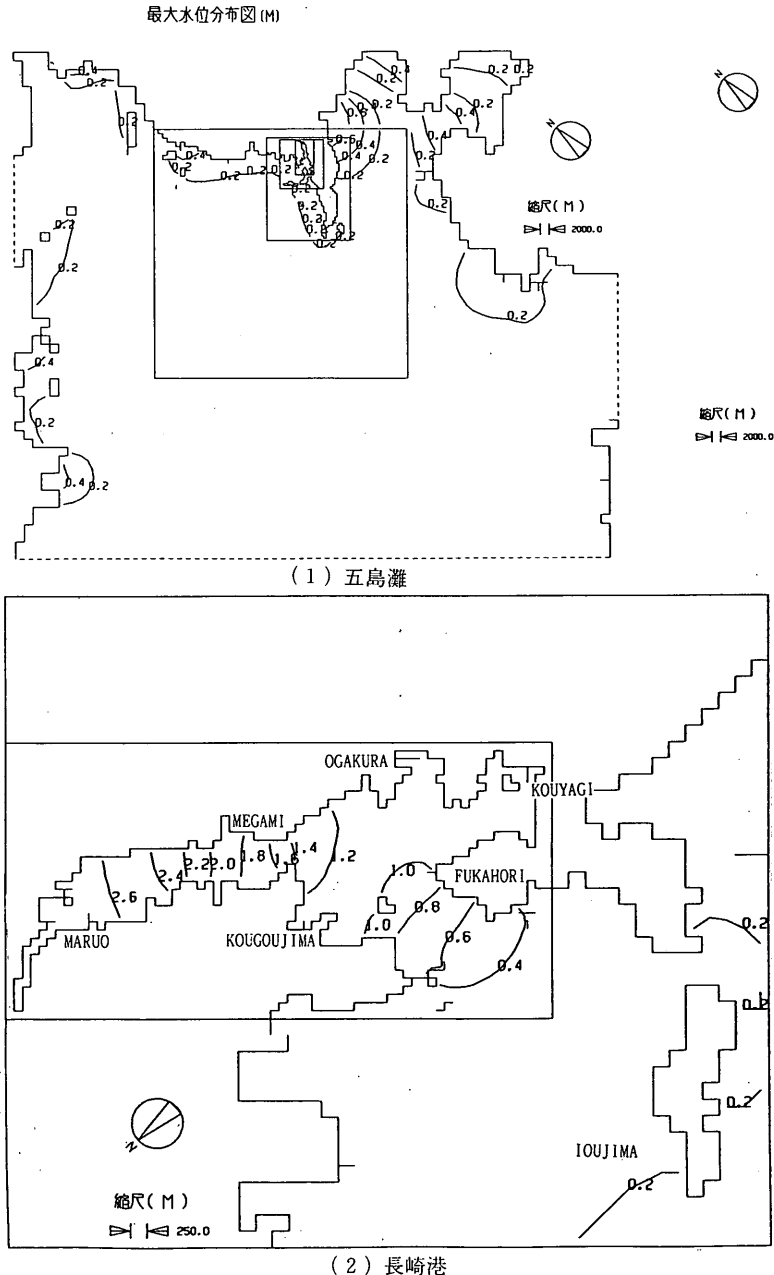


図-54 最大水位の分布 (周期36分)

長崎港における計算時間中の各点における最大水位の分布を示した図である。(1)五島灘では、長崎半島の西岸と五島列島沿岸の最大水位が高く、0.2m以上になっている。しかし、他の海域での水位が低く、0.2m以下であるため、等水位線も示されていないので、棚セイシュの振動モードについては明らかではない。(2)の長崎港内の分布図は、2.3で示した狭領域における計算結果とほ

ぼ同じである。湾奥での水位は、図-54(2)の場合、2.6mと非常に大きく、港口へ向かうにつれて低くなり、伊王島で0.2mである。したがって、港口の伊王島を節、港奥の丸尾を腹とする長崎港の1次振動モードが顕著に認められる。

図-55(1), (2)は、周期36分で、港奥の丸尾の水位が最大となったときの、五島灘および長崎港の同時刻における

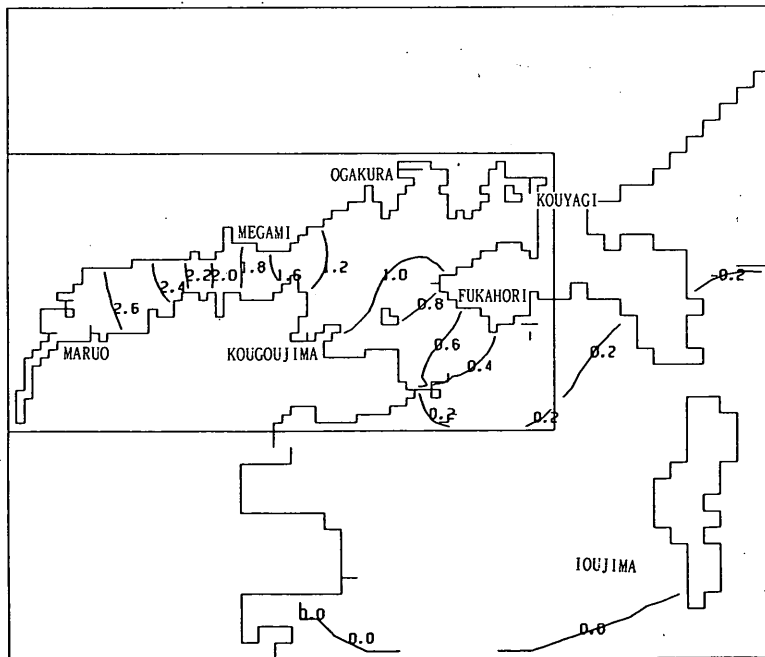
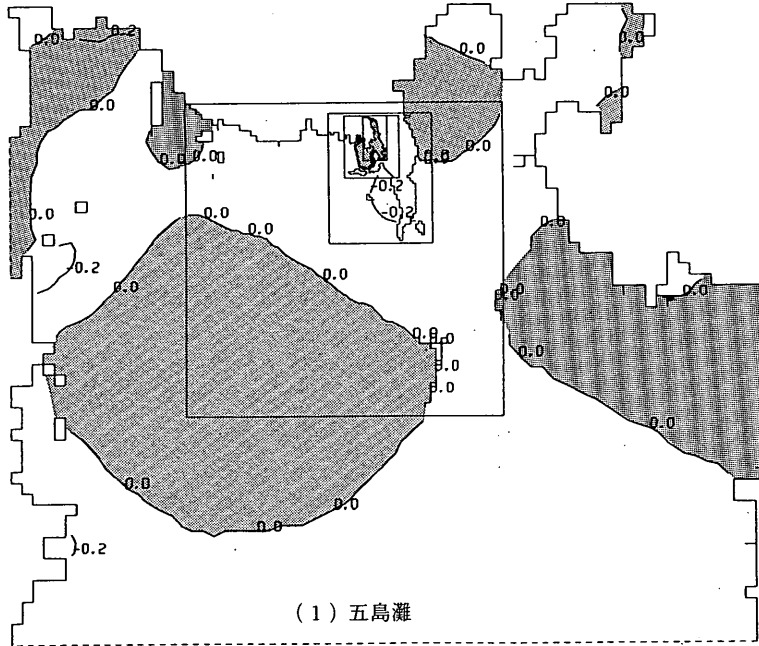


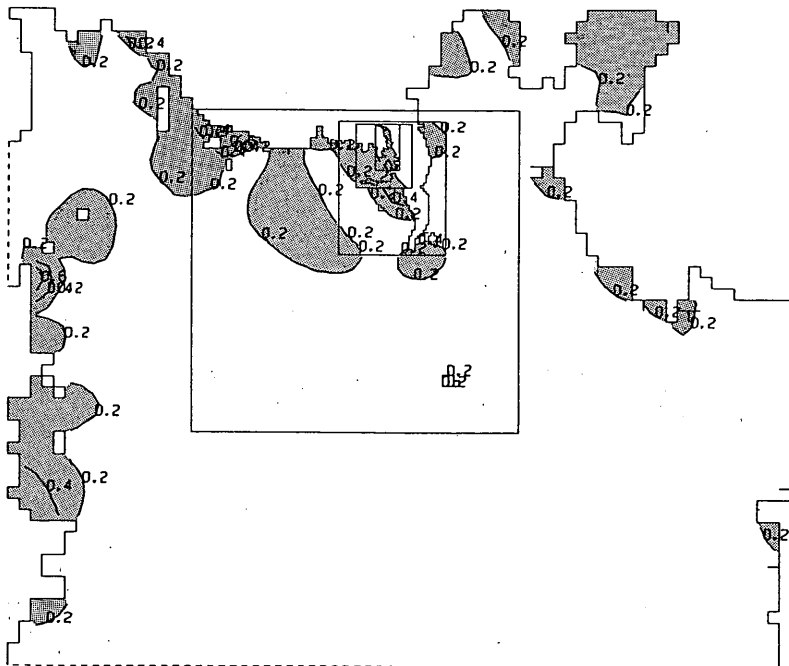
図-55 港奥水位最大時の計算水位の分布 (周期36分)

る水位分布図を示した図である。(1)の五島灘における水位分布図をみると、長崎側が正になったとき、五島灘の中央部は水位が負となっている。五島列島の福江では水位は正となるので、福江と長崎を結んだ線上の水位分布を考えると、正—0—負—0—正となり、両端が腹で、その途中に2ヶ所の節をもつ2次モード振動が生じていることがわかる。水位の振動モードを調べるためには、港内が最高水位となったときの同時刻における水位分布図を作成することが必要になる。図-55(2)は長崎港内の水位分布図で、図-54(2)の最大水位分布図と同じ分布形を示し、(2)からも、港内を腹、港口の伊王島を節とする1次振動モードが認められる。

図-56(1)、(2)は、周期24分における(1)五島灘、(2)長崎港の最大水位分布図を示す。図中、色を付けた部分は最大水位が0.2m以上になるところである。図-56(1)においては、長崎半島西部と、五島列島沿岸の水位が高く0.2m以上となっている。長崎半島西部の最大水位が0.2m以上の水域の沖側では、最大水位は、0.2mより小さくなるが、さらに沖合では再び0.2m以上になる。したがって、長崎—福江の線上での最大水位分布は、大—小—大—小—大となっているものの、0.2m以下の水位変動の様子が図-56(1)からはわからない。振動モードも明白にはわからない。図-56(2)の長崎港内では、丸尾付近の最

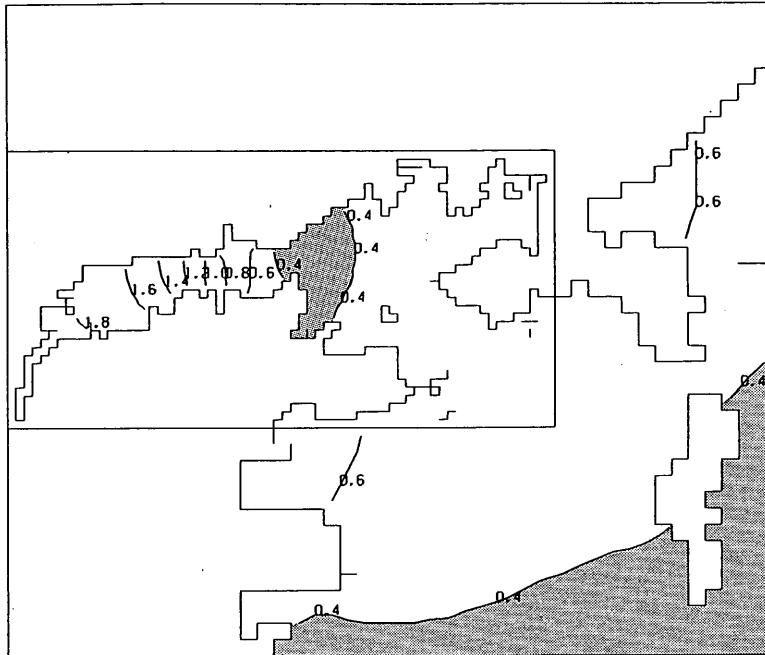
大水位は1.8mで、図の色を付けた付近の水位が0.4m以下になっている。これより港外側では水位は増大し、0.4—0.6m程度となっている。したがって、長崎港内の周期24分の振動モードは、港奥の丸尾付近を腹とし、図-56(2)の着色部分を節とする。もう一方の腹は、長崎港内南端の深堀付近に存在する。しかし、港外の伊王島から、香焼にかけての水位も、五島灘の振動によって高くなっており、その最高水位は、深堀における最高水位とほぼ等しい。したがって、深堀から伊王島にかけて最大水位がほぼ一様となり、腹の位置が水位分布だけからは明白に決めることが困難になっている。

図-57(1)および(2)は、周期24分において、港奥の水位が最大となったときの(1)五島灘、(2)長崎港の同時刻における水位分布を示す。(1)五島灘において、長崎港口部—五島のCN線上における水位を示すと、負—0—正—0—負—0—正となり、両端を腹、途中に節を3つ持つ3次の振動モードが認められる。(2)の長崎港内では、港奥が1.8mのとき、港奥の丸尾から小ヶ倉にかけて水位は下がっていき、水路幅が狭くなったところで0となる。この0の等水位線が頂度、振動の節にあたる。この線上より沖側では水位は負となり、深堀で-0.5m、香焼で-0.4m程度である。香焼より沖側では伊王島まで水位はほぼ一様で、0.4m程度である。伊王島より沖合では、



(1) 五島灘

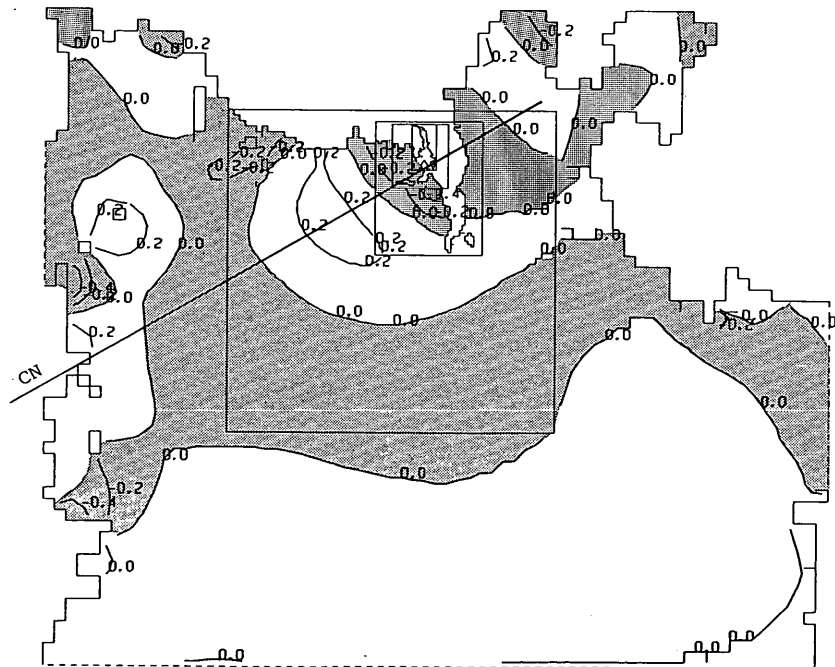
図-56 最大水位分布 (周期24分)



(2) 長崎港

(2) 長崎港

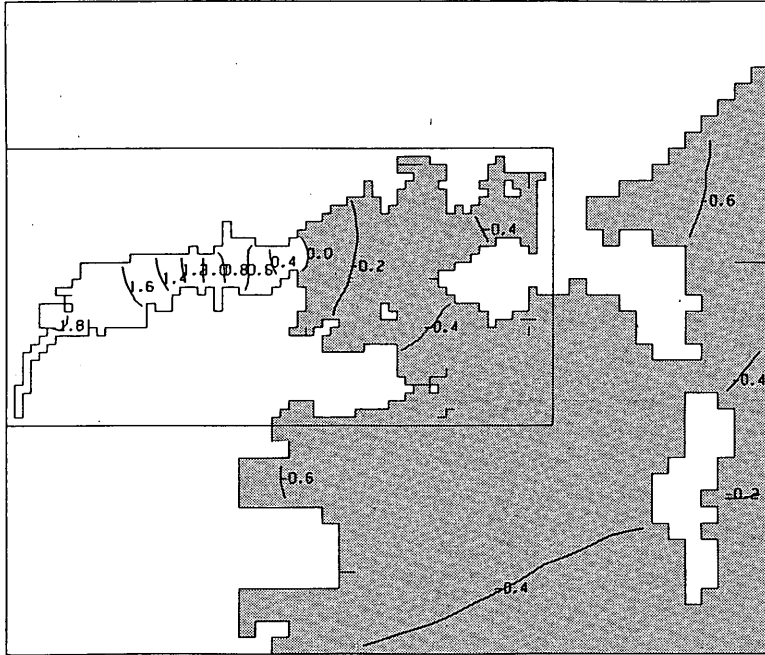
図-56 最大水位分布 (周期24分)



(1) 五島灘

図-57 港奥水位最大時の計算水位の分布 (周期24分)

(1)で示したように水位は徐々に上昇し、10km程度沖側で 0となる。すなわち、伊王島より港内側が、五島灘の棚
 セイシュの腹にあたり、振幅5cmの入射波が、振幅40cm
 程度まで増幅される。この振動が、長崎港の周期24分の



図一57 港奥水位最大時の計算水位の分布（周期24分）

(2) 長崎港

振動との共振を起こし、丸尾での最大水位が1.8mになる。言い替えば、五島灘の棚セイシュにより、五島灘の南方から進入した周期24分程度の長波の振幅は、8倍程度に増幅され、さらに、長崎港内の固有振動により、それが4～5倍に増幅される。このような2段にわたる増幅作用により、港内での A_1 は、周期24分で35程度大きくなるわけである。長崎港内の固有振動だけでは、港奥の増幅率 A_1 はそれ程大きくならない。

以上のように、港内副振動は、棚セイシュとの共振により2段にわたって増幅されることによって、港奥で大きな異常潮位を引き起こす。このような副振動の発生機構は、広領域計算によって、図一49のように代表点の増幅率を求めるだけでなく、同時刻の水位分布図等を求めて検討しなければならない。

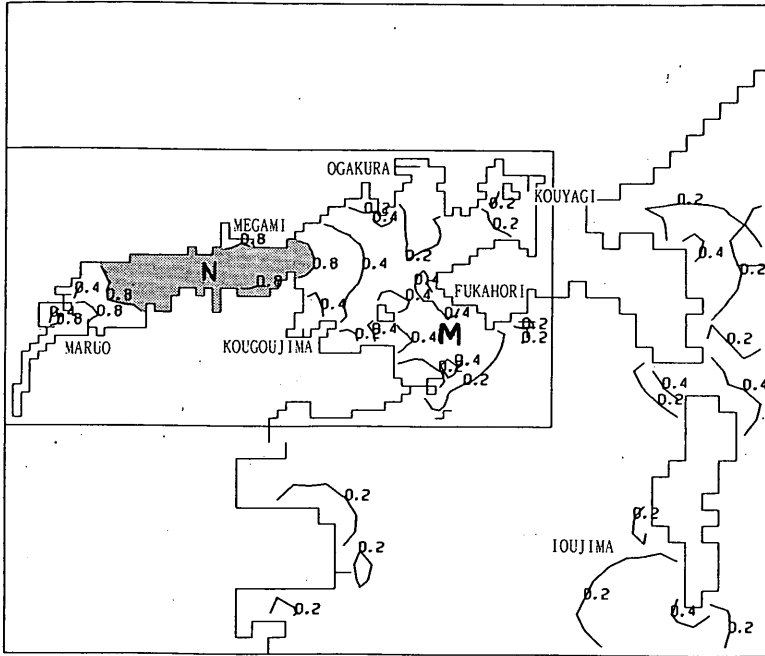
図一58(1), (2)は、副振動により、どのような流速が発生するかを検討した図である。(1), (2)は周期24分および周期36分の場合の、長崎港における最大流速分布を調べたものである。図の色をつけた部分は、最大流速が 0.8 m/s 以上になる部分である。(1)周期24分のとき、水路が狭くなり、かつ、振動の節にあたる㊸部分の流速が大きい。長崎港口の香焼付近では水路幅が狭くなっているにもかかわらず、最大流速は $0.2 \sim 0.4 \text{ m/s}$ 程度で小さ

い。これは、香焼付近は、周期24分の振動系に完全に含まれていないためである。周期24分の振動モードでは、香焼～伊王島間の水域で五島灘の棚セイシュの振動が、深堀～丸尾を振動系とする港内の固有振動系に伝達されていると考えられ、水域差がほとんど生じない。したがって、香焼付近の流速は㊸部分に比べると小さくなっている。すなわち、棚セイシュと港内振動が共振を起こすときには、接続海域の水面は一様に変動し、大きな水位差がついて、大きな流速が発生することはない。

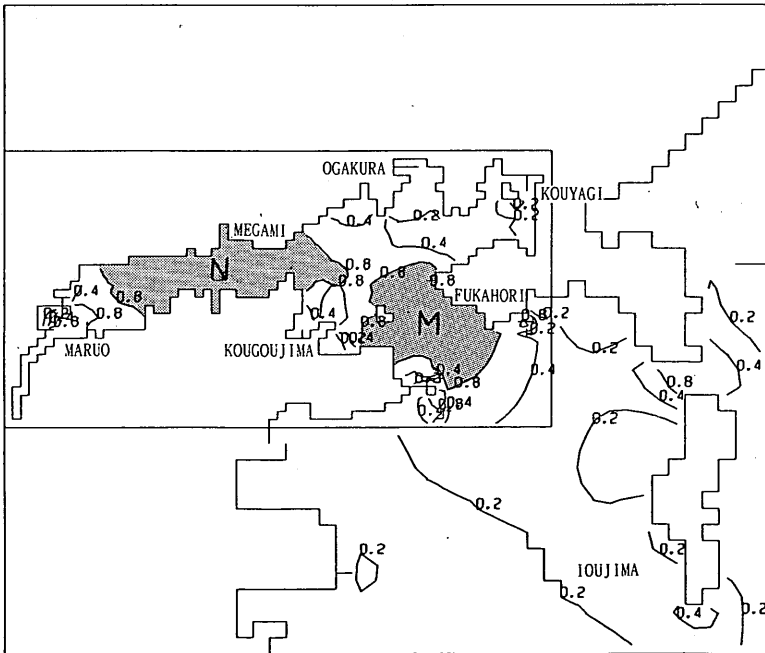
図一58(2)周期36分の場合には、長崎港内の振動系は、伊王島を節、丸尾を腹として振動するので、このような場合には、水路幅が狭くなっているところでは、すべて、流速が大きくなり㊸水域だけでなく、香焼に近い㊸水域でも、最大流速は 8 m/s 以上になっている。以上のように、振動系内に含まれる水域の中で、節に近いために、水面勾配が大きくなり、かつ水路幅が比較的狭くなっているところでは、大きな流速が発生する。

図一59(1)～(2)は、広領域計算で求めた波高比を、実測波高比と比較した図である。各組合せにおいて、丸印が計算値、実線が2.2で示した実測波高比を示す。

図一59において、丸尾と伊王島での水位の比では、実測波高比は2つの顕著なピークをもつ。計算波高比の



(1) 周期24分



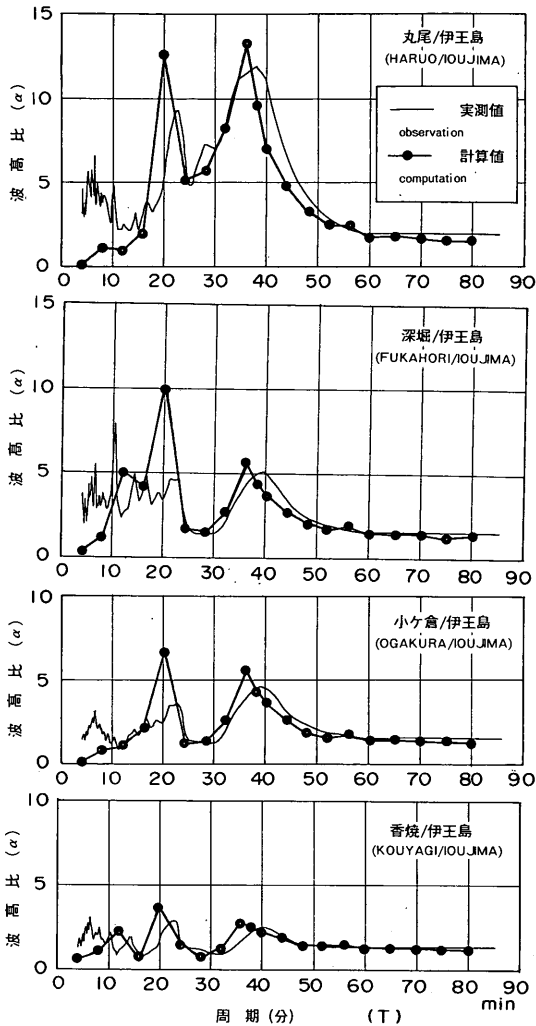
(2) 周期36分

図-58 港内の最大流速の分布

ピーク周期は、実測のピーク周期より1~2分程度短いが、波高比のピーク値は、計算値の方が2~4程度大きい。図-38で示した狭領域計算では、ピーク値の差が5

以上あったので、全体的なグラフの傾向は、広領域計算の方が、実測値によく一致する。

深堀と伊王島波高の比では、ピーク周期は2分程度短



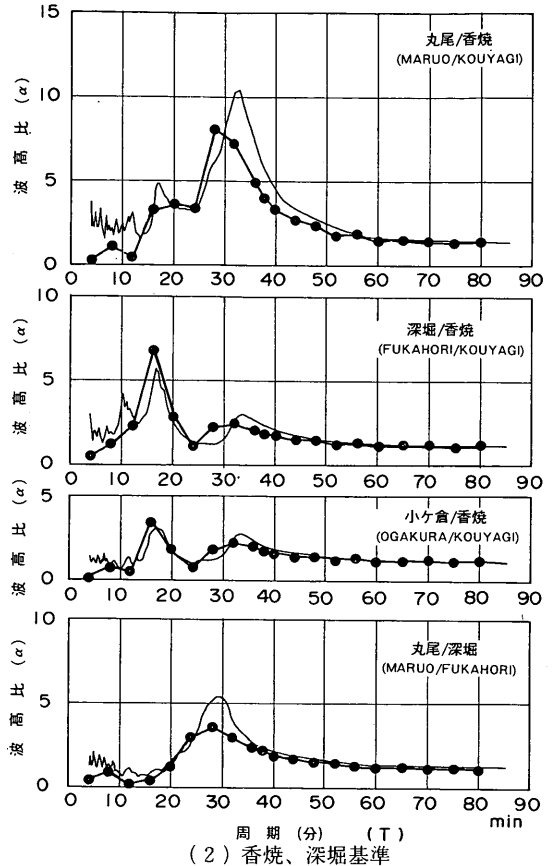
比と実測波高比の

図-59 計算波高比と実測波高比の比較

いが、長周期側の1次ピークでは、ピーク値はよく一致する。図-38の狭領域計算においては、周期16分で計算値の波高比が20にも大きくなったが、広領域計算では、周期16分でも、計算値と実測値はよく一致する。したがって、狭領域計算と比較すると、広領域計算の波高比は実測値とよりよく一致する。

伊王島を基点とした小ヶ倉と伊王島の波高比および、香焼と伊王島の波高比も、ピーク周期、ピーク値、全体的なグラフ形は、実測値とほぼ一致する。

狭領域の計算では、伊王島を基点とした計算波高比は実測波高比と比較すると、ピークの大きさがずれていた。しかし、図-59(1)で示した広領域計算における伊王島を基点とした計算波高比は、実測波高比をよく表している。



(2) 香焼、深堀基準

これは、広領域計算では、伊王島での増幅率が正確に計算できるためである。

図-59(2)は、港内の香焼、および深堀を基点とした計算波高比を示す。計算波高比は、実測波高比とよく一致している。すなわち、広領域計算は、狭領域計算で問題となった、伊王島を基準とした波高比においても、実測値とよく一致する結果を導くことができ、しかも、港内点を基準とした波高比も、実測値に非常によく一致する。

なお、10分より短い周期においては、いずれの組合せにおいても、計算波高比と実測波高比はよく一致しない。これは、短周期の振幅が非常に小さいため、波高比を求めると、わずかの観測および計算における誤差が大きな影響を及ぼすためである。

(2) 敦賀港

図-60は、敦賀港の計算領域を示した図である。図中、①で示した計算領域が敦賀港の計算領域である。幅約90km、奥行き約50kmで、ほぼ若狭湾全域を含む。若狭湾東端の越前岬と、西端の奥丹後半島を結び、200mの等水深線にはほぼ平行に沖側境界を設定した。

図-61は計算領域内の計算格子地形および水深を示

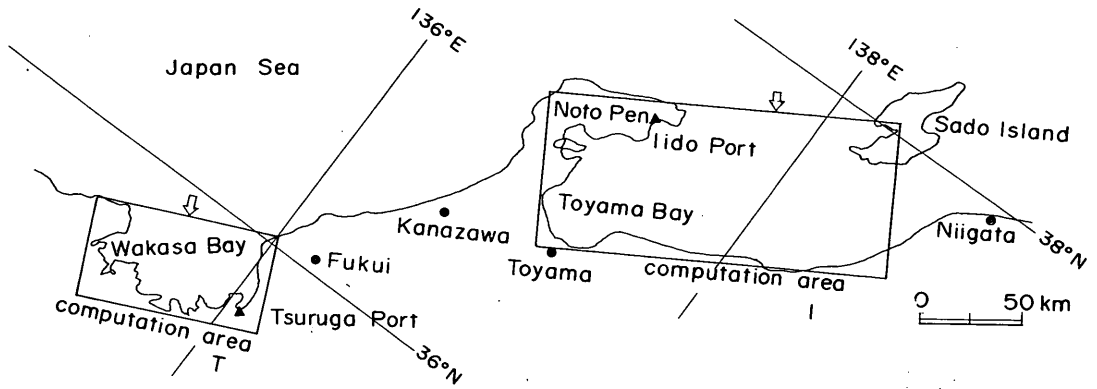
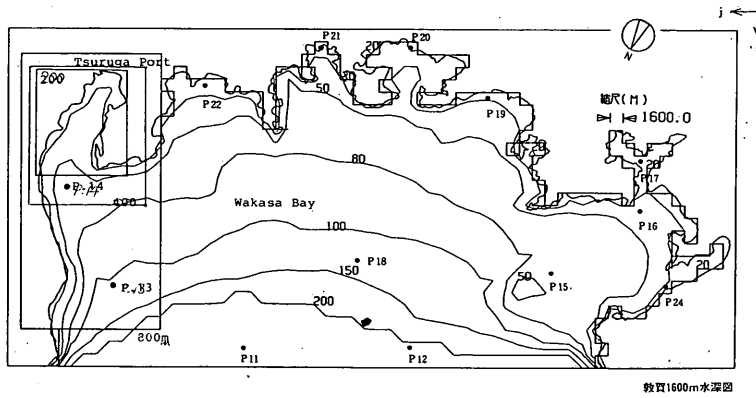
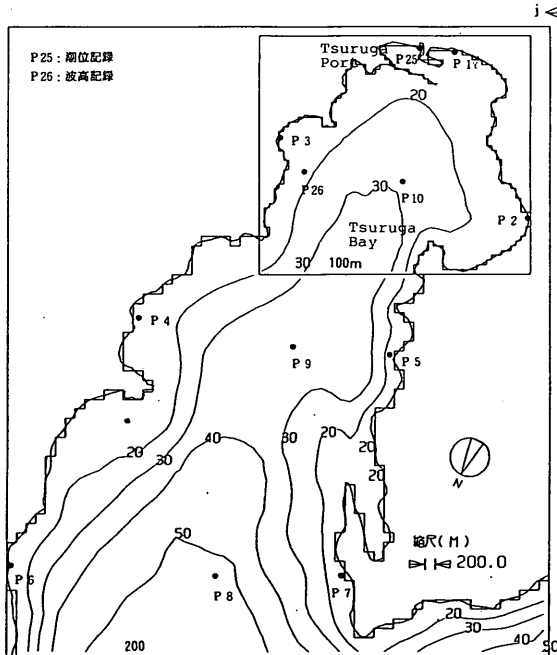


図-60 敦賀港および飯田港の広領域計算範囲



(1) 若狭湾



(2) 敦賀港

図-61 敦賀港の広領域計算範囲の地形と水深

す。最大格子幅 Δs_0 は、1600 m で、図-61(1)が格子幅1600, 800, 400, 200 m で表した比較的格子幅が広い場合の地形を示す。図-61(1)の下辺を沖側境界として、入射波振幅 $a = 5$ cm で5時間計算を行った。図-61(2)は、敦賀湾を、200 m と100 m の格子で再現した地形を示す。ここに、敦賀湾は、200 m 格子幅、敦賀港は、100 m 格子幅で表現した。図-61(2)において、P. 25で示した地点が敦賀港内の潮位観測点で、P. 26が波高観測点に相当する。なお、図-61は、沖側境界が図の下にくるように表しているの、北向は図の左斜め下方になる。

図-62は、図-61(2)に示した敦賀港の計算代表点における A_i を示した図である。敦賀港内の P. 1, P. 25では周期66分、32~34分、24分、16分にピークをもつ。そのピーク値は66分、32~34分では、それぞれ、約20、および13~15である。周期24分、16分においては、P. 25のピーク値は非常に大きく25以上になる。周期66分でのピーク値は、P. 1, 2, 25, 26でほぼ同一の値を示しているの、この周期では、敦賀湾内の水位がほぼ同一である。

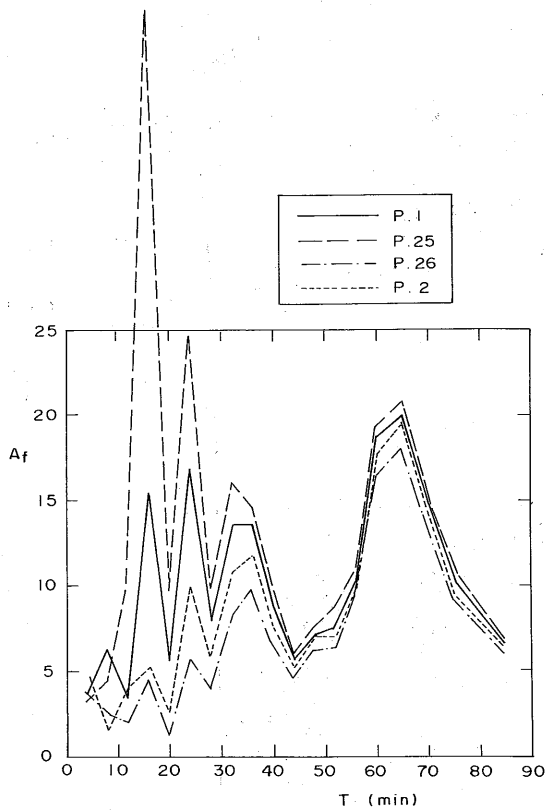


図-62 敦賀港内の増幅率

そのため、この周期の振動は若狭湾のセイシュによって発生していると推測できる。

図-63は、港外の波高計設置点 P.26 を基点とした潮位観測点 P.25 の波高比を示す。丸印が計算波高比、実線が実測波高比を示す。計算波高比と実線波高比のピーク周期は等しく全体的な形状はほぼ一致する。そのピーク値は、計算値が実測値の1.5倍程度になる。計算値と実測値が長崎港程一致しない原因としては、実測値のケース数が少なく、平均化されていない、潮位観測点が港奥の、河口付近にあり地形複雑で、100mの計算格子では地形を十分正確に再現できない、ことが考えられる。

次に、港内において A_f がピークとなった周期について水位分布を検討した。

図-64は、周期16分における(1)敦賀湾、(2)若狭湾の最大水位分布を示す。(1)敦賀湾では図の着色した部分が水位が0.2m以上である。したがって、敦賀湾内の振動系の軸は、ほぼC線上にあり、敦賀港を腹、湾口を節とし、1本の節線をもつ2次モードが認められる。(2)若狭湾の最大水位の分布図をみると、等水位線の形状が非常に複雑で、どのような振動系が発生しているか判断すること

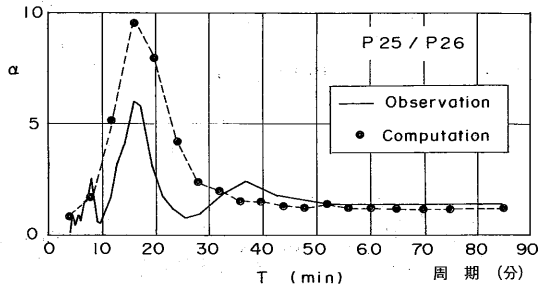
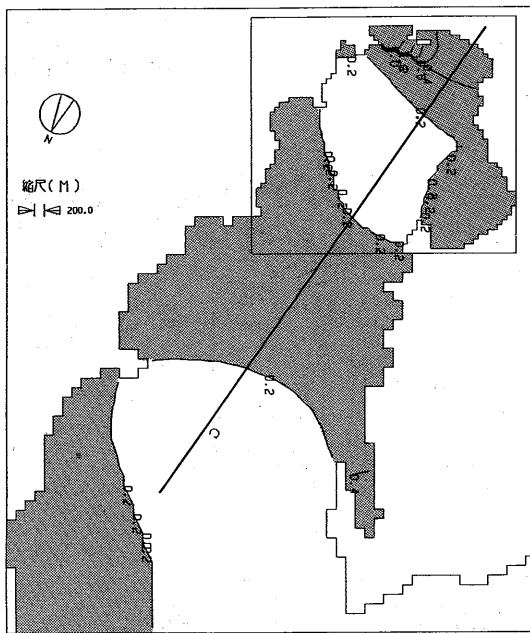
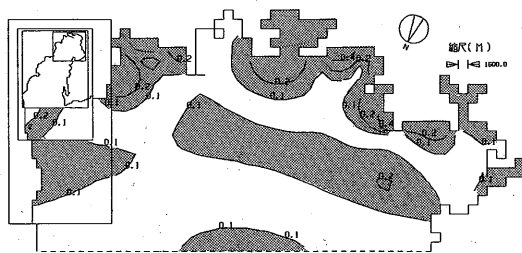


図-63 敦賀港内の波高比における計算値と実測値の比較



(1) 敦賀湾



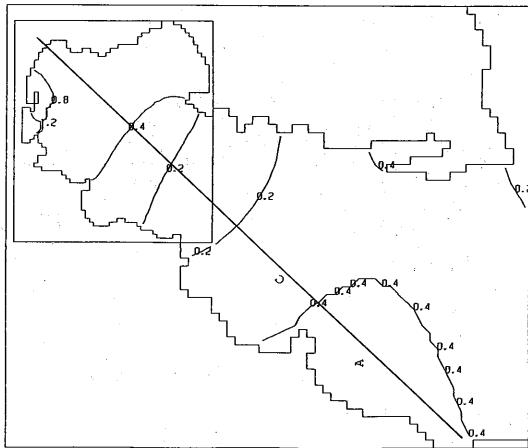
(2) 若狭湾

図-64 最大水位の分布 (周期16分)

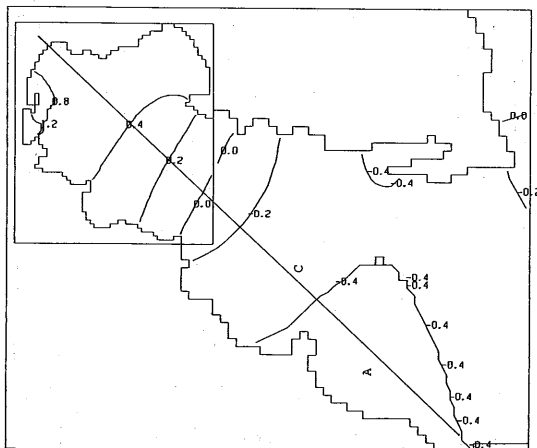
は困難である。これは、若狭湾沿岸には大小の湾、入江が点在し、それらがすべて振動モードをもつ上に、両端に2つの湾を含む振動系が容易に形成されるためである。しかし、この周期では、敦賀湾口での振幅は、0.1

～0.2m程度で、それほど大きくない。したがって、若狭湾内で増幅された長波が敦賀湾内でさらに大きく増幅されることはない。P. 26は、敦賀湾内での2次モードの振動の節にあたるため、P. 25/P. 26の波高比は、周期16分で極大になる。

図-65は、周期24分の敦賀湾内における(1)最大水位分布、(2)敦賀港内の水位が最高になったときの水位分布図を示す。(1)において、軸線Cの両端の水位が0.4m以上で大きく、水域Aと敦賀港が腹、両者の中間点近傍が節となる。ただし、軸線Cは、図-62の軸線Cとはずれる。(2)の水位分布図をみると、振動モードがさらに明らかで、敦賀港の水位が最高とき、水域Aの水位は逆に非常に低くなり、湾中央部の0の等水位線が振動の節に相当する。



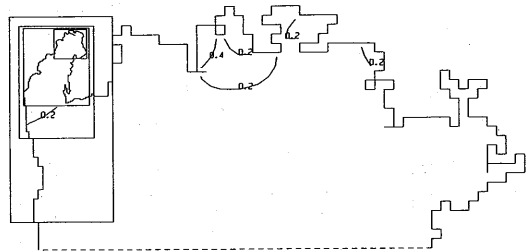
(1) 最大水位の分布



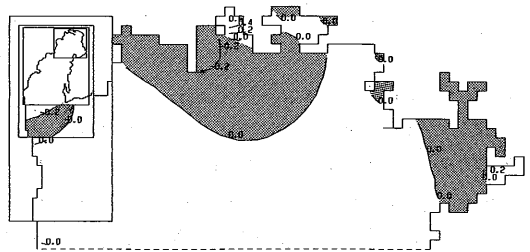
(2) 港奥水位最大時の水位分布

図-65 敦賀湾における水位 (周期24分)

図-66(1), (2)は、周期24分の若狭湾内における(1)最大水位分布、(2)敦賀湾内の水位が最高になったときの水位分布図である。(1)計算時間内の最高水位の分布図をみると、若狭湾内の中では、敦賀湾と中央部のA点の水位が高い。しかし、腹、節の位置等は明らかではない。(2)の同時刻水位分布図をみると、敦賀湾口が負のとき、水域Aの水位も負となっているものの、水域Aと敦賀湾は細い半島で区切られており、水域Aと敦賀湾を腹とする振動が生じる可能性は小さい。したがって、若狭湾に進入した長波は、浅水効果等によって沿岸部で波高は大きくなる場合はあるけれども、若狭湾内に周期24分のセイシュは起こしていない。したがって、若狭湾と敦賀湾の共振によって敦賀湾内の水位が大きく増幅されることはない。



(1) 最大水位の分布

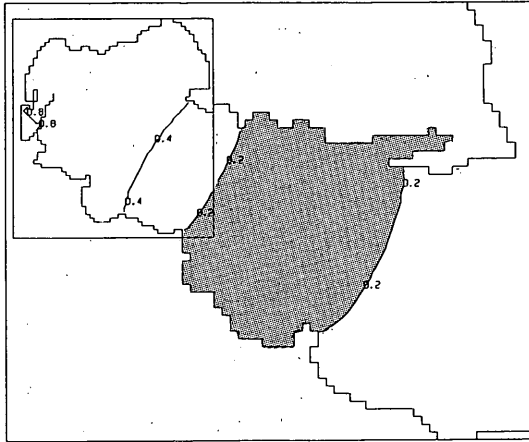


(2) 港奥水位最大時の水位分布

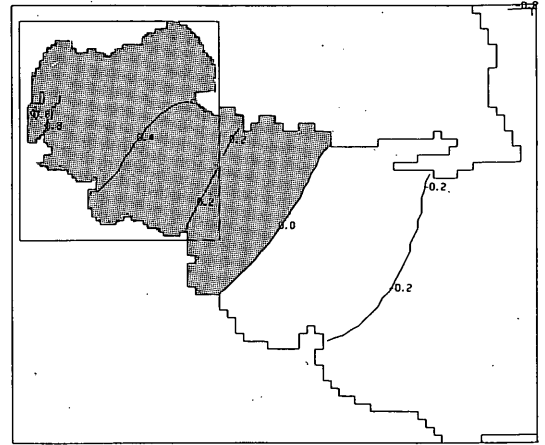
図-66 若狭湾における水位 (周期24分)

図-67は、周期32分における(1)最大水位分布、(2)湾奥が最高時の水位分布図である。(1)では、湾奥0.8mに対して、湾中央部が0.2m以下となっており、この振動は、湾口を節とする周期16分の振動と同一の振動系における1次振動と見なすことができる。(2)の水位分布図では、節の位置が明らかで、ほぼ0の等水位線近辺になる。

図-68(1),(2)は若狭湾における最大水位分布図および、港奥水位最高時の水位分布図であり、敦賀港以外では、(1)のA, Bの湾口部の水位が高く、どちらかが、敦賀港

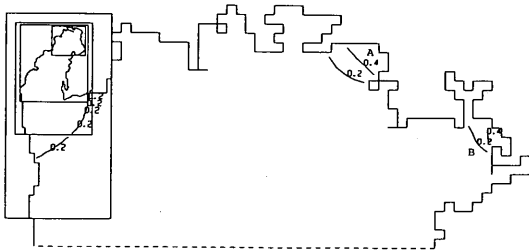


(1) 最大水位の分布

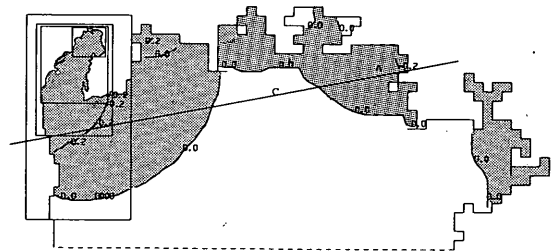


(2) 港奥水位最大時の水位分布

図-67 敦賀湾における水位 (周期32分)



(1) 最大水位の分布



(2) 港奥水位最大時の水位分布

図-68 若狭湾における水位 (周期32分)

と同一振動系に含まれるかどうかは、判断できない。敦賀湾口の最大水位は小さく、0.2m以下である。若狭湾内の水位分布をみると、敦賀湾口が負になったとき、A、Bの水位は共に負になっている。Bの湾は、少し距離がありすぎるので、A湾と敦賀湾を結ぶC線上の振動系が形成されている可能性があるが、明瞭ではない。若狭湾の場合、湾口が湾の奥行に比べて長いので、長周期波が進入した場合には、湾口を節、沿岸を腹とする陸棚セイシュを生じやすい。²⁾ただし、この陸棚セイシュの1次振動周期は2.で考察したように、80分以上で長いので、周期32分の長周期が進入したときに若狭湾でどのようなモードのセイシュが生じるのか明らかではない。

図-69は、周期65分における敦賀湾内の敦賀港最高時の水位分布図である。港奥の最高水位は、1.2m以上で、他のピーク周期における最高水位より大きい。

敦賀湾内の水位差は港奥の局所的に高水位となっているところを除けば、0.4m程度で小さく、この振動は若

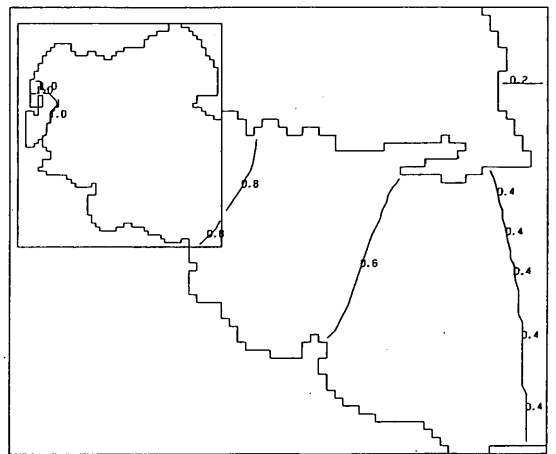


図-69 港奥水位最大時の敦賀湾の水位分布 (周期65分)

狭湾の振動によってのみ起こされている。

図-70は同一時刻の若狭湾の水位であるが、東端が正のとき、西端も正で、しかもその水位は、最高で0.6m以上である。途中、0の等水位線は、2つ存在するので、若狭湾全域を振動系とする2次モードの振動系が生じている可能性が高い。

以上のように、敦賀港の副振動も、敦賀湾内だけの振動モードで生じているわけではなく、若狭湾の振動と密接な関係にある。特に周期60分以上の振動は、若狭湾における振動がそのまま、敦賀港内に現われて生じている。

(3) 飯田港

図-60の①領域が飯田港広領域計算の計算領域を示す。①領域は、西端を能登半島、東端を佐渡ヶ島で囲まれ、五島灘と同様に棚セイシュの生じる可能性がある。沖側境界は、能登半島の先端と佐渡ヶ島を結ぶ直線として設定した。領域の西部は富山湾になる。富山湾は地理上では、能登半島の付け根付近の氷見から魚津までの海岸線で囲まれた湾を指す。ここでは、便宜上、飯田港も含めて、能登半島と新潟県、富山県に挟まれた能登半島先端と糸魚川を結んだ線より西側の海域をすべて富山湾として呼称する。

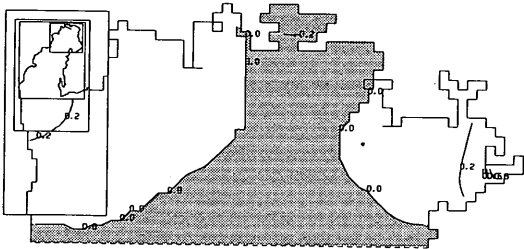


図-70 港奥水位最大時の若狭湾の水位分布 (周期65分)

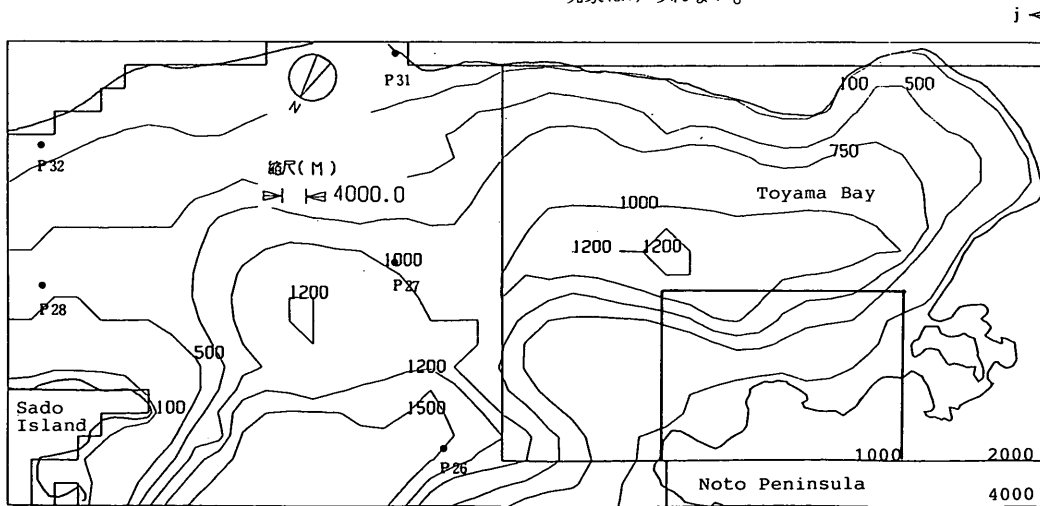
図-71(1)は、最大格子幅の計算領域と水深を示す。最大格子幅は4000mである。図-71(2)は、格子幅1000~500mの格子地形を示す。図-71(3)は、飯田港周辺の250m~62.5mの格子地形を示す。図-71(3)は、ほぼ飯田湾全域を含む。

図-72に飯田湾(飯田港を含む)内の代表点位置を示す。図-73は飯田湾の代表点における増幅率 A_i を示す。飯田港内の P.1, 4, 6 だけでなく、飯田湾中央部の P.8 においても、周期36分に顕著なピークが現れる。そのピーク値は約25と、他の周期における A_i と比べると非常に大きい。P.4, P.6 では他に、20分のピーク周期が現れている。港内の P.1 は、12分にも顕著なピークをもつ。飯田湾沿岸の P.9, P.10, P.13, P.12 においても、ピーク周期36分の A_i は大きく、25である。したがって、周期36分の振動系は飯田湾全体を腹とする富山湾の振動である可能性が大きい。P.10, 13, 12では、10分前後でも A_i は15以上と大きくなっており、この周期では、飯田港内に近い。P.4, P.6 で A_i が小さく、飯田湾の西部、東部で A_i が増大していることになる。

富山湾の A_i を調べると、図-71(1)に示した P.20 (宇出津) では、周期10分にピーク値が生じ、10である。このピーク周期は現地観測で得られた副振動スペクトルのピーク周期に一致する。飯田港の対岸、P.30, 29, 24 では、飯田港と同様に周期36分にピークが現れている。

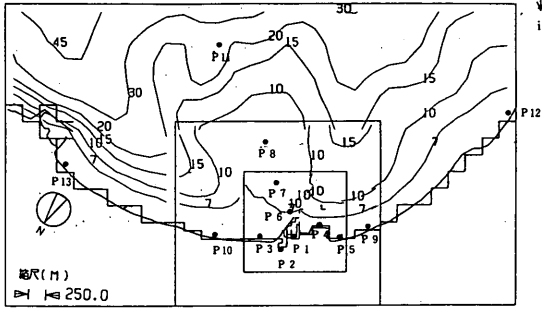
図-74~80は、飯田港内におけるピーク周期における最大水位および水位分布を示す。

図-74(1)は、最も顕著なピークを示す、周期36分の飯田湾内の最大水位分布図で、ほぼ南北方向に等水位線が走り、飯田湾および飯田港で局所的に増幅されるような現象はみられない。

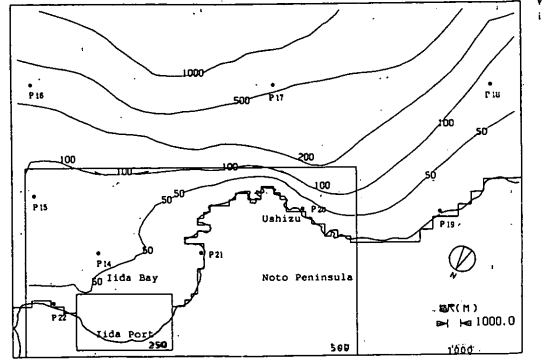


(1) 4000m, 2000m

図-71 飯田港計算領域の格子地形と水深

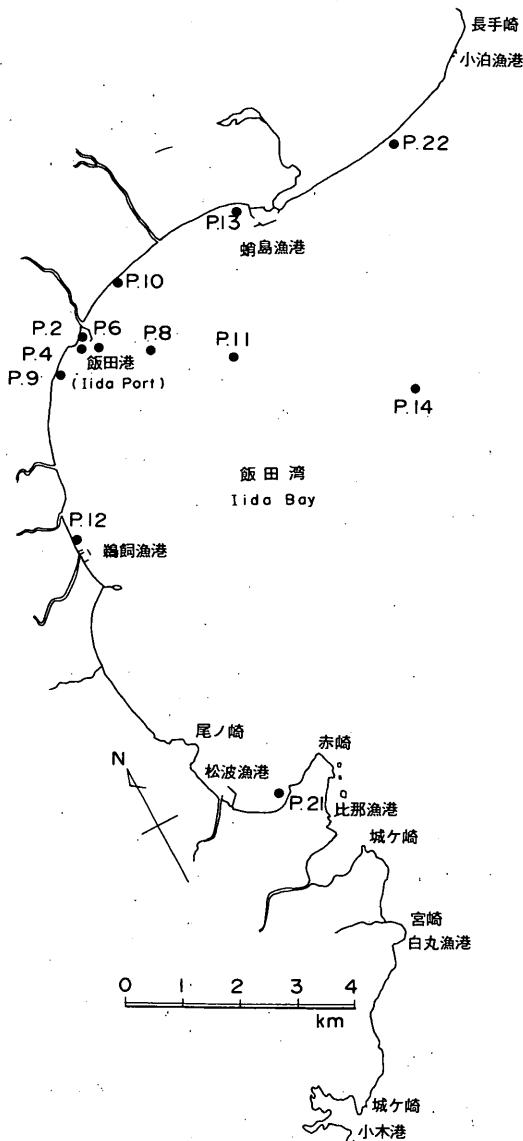


(2) 1000m, 500m

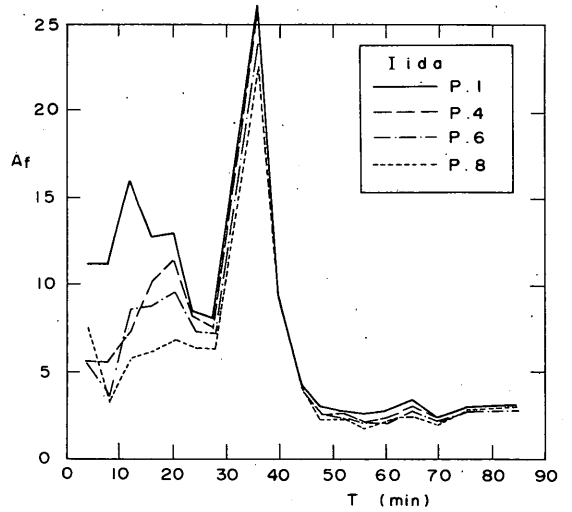


(3) 250m ~ 62.5m

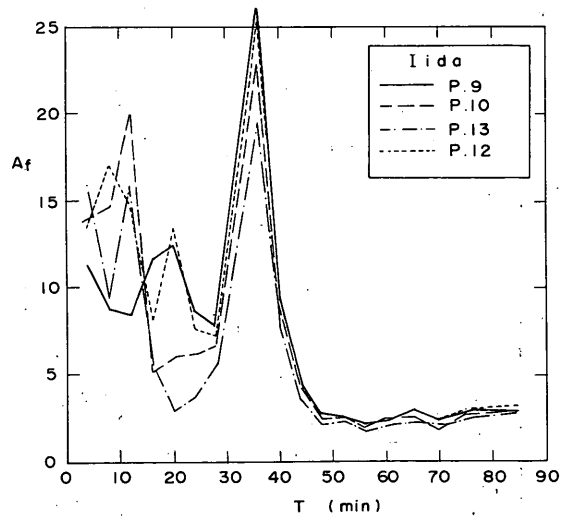
図一71 飯田港計算領域の格子地形と水深



図一72 飯田湾の増幅率出力点

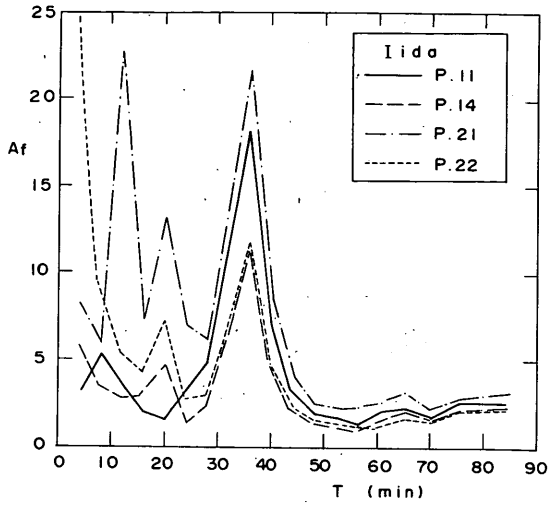


(1) P.1, 4, 6, 8



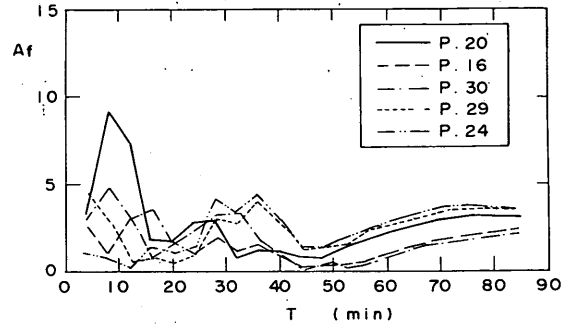
(2) P.9, 10, 12, 13

図一73 飯田港計算領域の増幅率



(3) P.11, 14, 21, 22

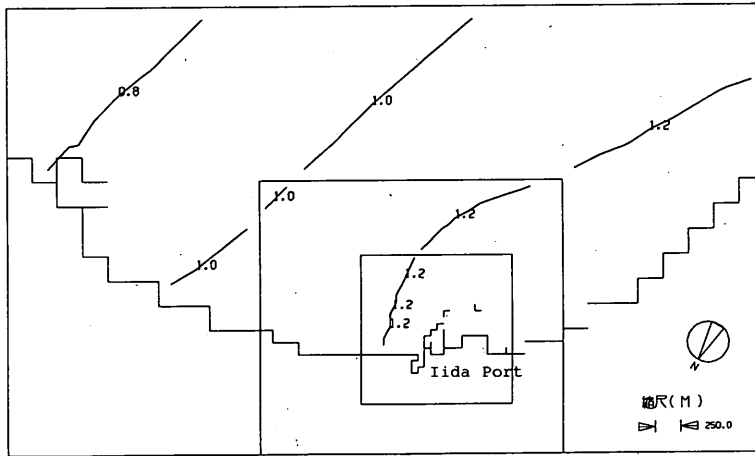
図-73 飯田港計算領域の増幅率



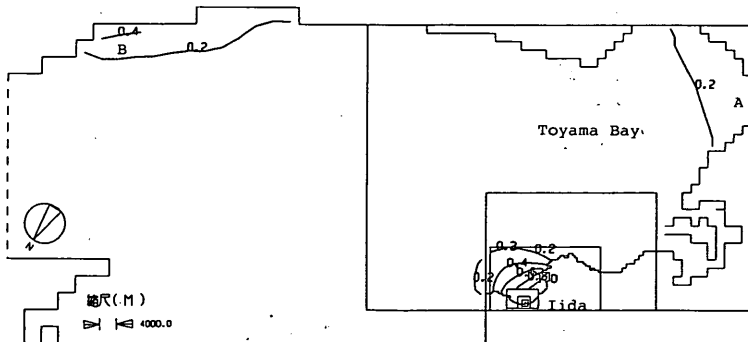
(4) P.16, 20, 24, 29, 30

図-73 飯田港計算領域の増幅率

図-74(2)は、富山湾の最大水位分布図である。飯田湾以外では、富山湾最奥部の A 点と、富山湾の外側の B 点で水位が大きくなっている。飯田港周辺の等水位線が東方へ張り出していることから、B 点と飯田湾を両端と



(1) 飯田湾



(2) 富山湾

図-74 最大水位の分布 (周期36分)

74(1)と同様に、飯田湾の水位が東に向かって一様に低下しており、飯田湾内で局所的に増幅される現象は認められない。飯田港内の水位は、0.6mで、周期36分のときの1/2である。

図-76(2)の富山湾における最大水位分布をみると、飯田湾以外に対岸の㊸点の水位が高い。

図-77は、飯田港内最高水位時の富山湾内の同時刻の水位分布図を示す。周期36分における振動系と同一振動系の振動と考えると、軸上の水位は、正-0-負-0-正-0-負-0-正となり、4次モードの振動となる。

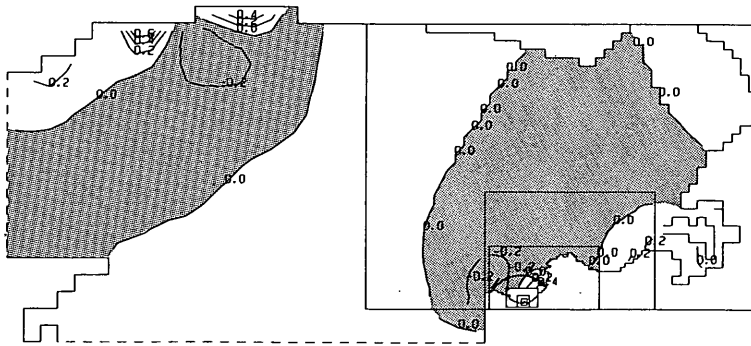


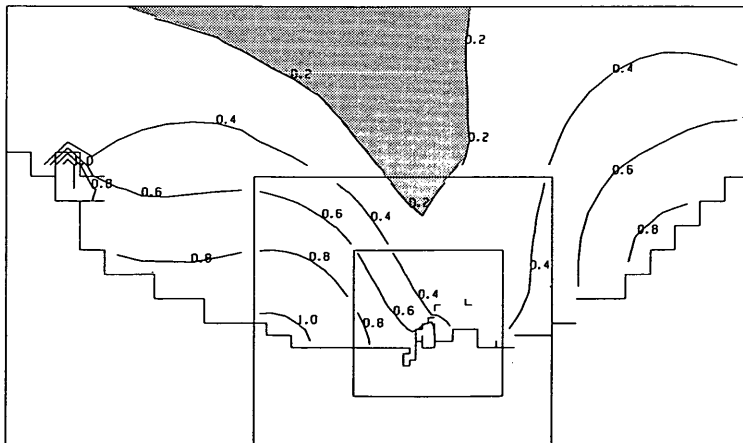
図-77 港奥水位最大時の富山湾の水位分布（周期20分）

図-78は、周期12分における(1)飯田湾の最大水位分布、(2)、飯田港最大水位時の水位分布図を示す。図-65(1)をみると、飯田港を中心とし、東西両側の水位が大きく、0.8~1.0mになっている。(2)をみると、東西の位相は180°ずれており、明らかに、飯田港に節をもつ、飯田湾の湾口より離れた奥に近い水域に生じる1次振動モードが認められる。この振動の腹は湾口にはないので、富山

湾の振動との共振関係は生じない。A₁の分布図から判断すると、P. 13とP. 21付近に腹が生じる。飯田港は、振動の節の位置にあたるため、非常に大きな流速をもつ流れが生じる。飯田港内P.6における最大流速を比較すると、周期36分のとき、 $u_{max}=0.35\text{m/s}$ 、周期20分のとき、 $u_{max}=0.43\text{m/s}$ 、周期12分のとき、 $u_{max}=0.96\text{m/s}$ であった。図-79は、飯田港周辺の流速ベクトル図を示す。(1)

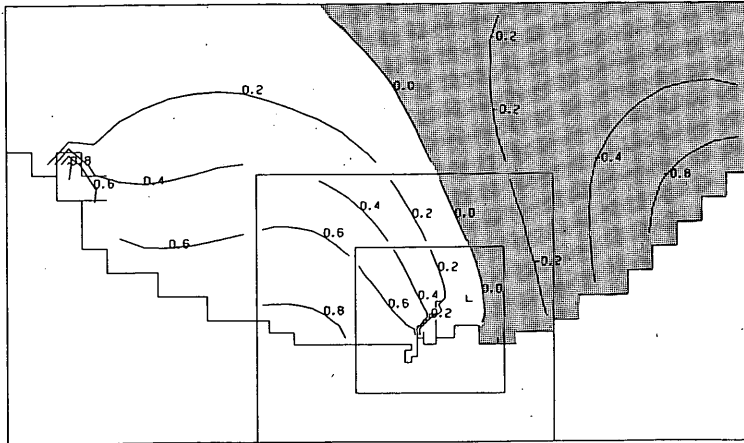
この振動の振幅は周期36分の富山湾の1次振動より小さく、最大で0.6m程度である。

湾の振動との共振関係は生じない。A₁の分布図から判断すると、P. 13とP. 21付近に腹が生じる。飯田港は、振動の節の位置にあたるため、非常に大きな流速をもつ流れが生じる。飯田港内P.6における最大流速を比較すると、周期36分のとき、 $u_{max}=0.35\text{m/s}$ 、周期20分のとき、 $u_{max}=0.43\text{m/s}$ 、周期12分のとき、 $u_{max}=0.96\text{m/s}$ であった。図-79は、飯田港周辺の流速ベクトル図を示す。(1)



(1) 最大水位の分布

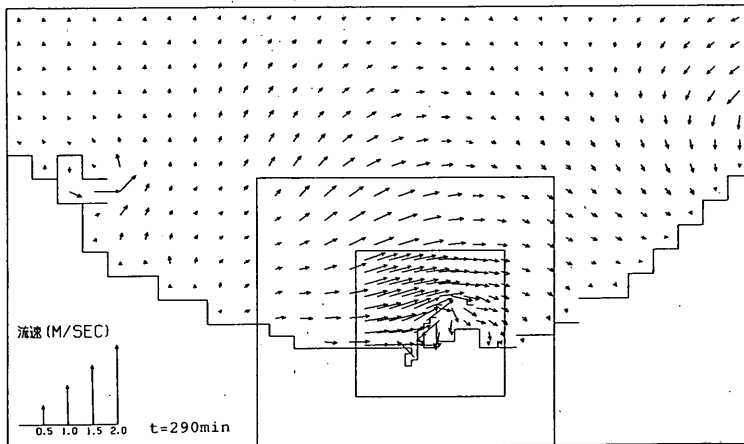
図-78 飯田湾における水位（周期12分）



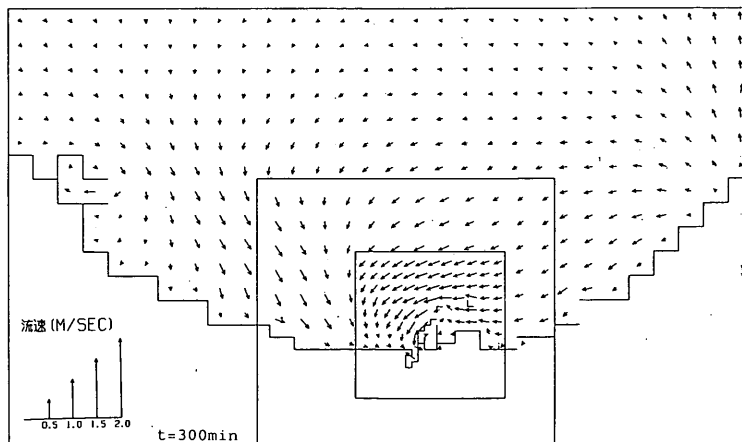
(2) 港奥水位最大時の水位分布

図-78 飯田湾における水位 (周期12分)

が湾の西側 (図では右側) の水位上昇時, (2)が東側の水位上昇時を示す。(1)では, 西向, (2)では, 東向の大きな



(1) 西側水位上昇時



(2) 東側水位上昇時

図-79 飯田湾の流況

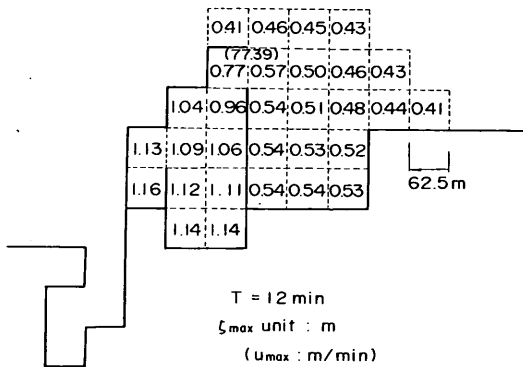


図-80 飯田港内の最大水位 (周期12分)

流れが飯田港周辺で生じている。飯田港の防波堤が、延長されたことにより、頂度流れをさえぎるような形になっているので、とくに西向のときに、防波堤先端から流れが港内へ回り込んでくる。この流入によって港内に渦が発生するものと思われる。

図-80は、港内の計算格子における最大水位の分布を

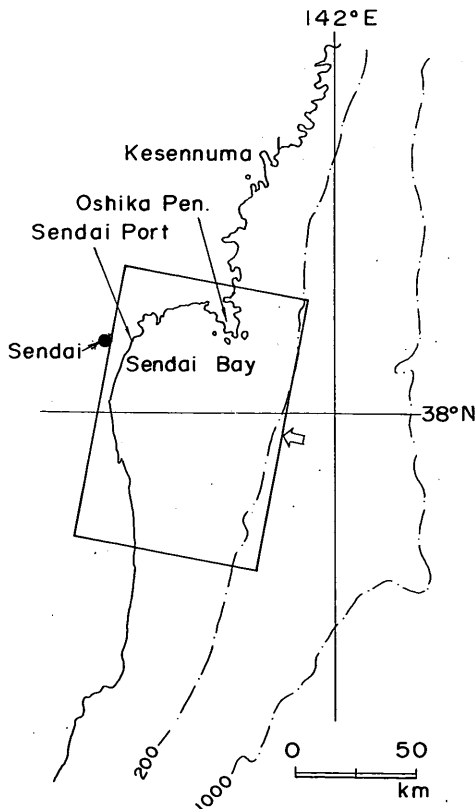


図-81 仙台港計算領域

示す。図の中央の栈橋の両端の水位変動は、計算値をみると同位相であったが、最大水位は異なり、50cm以上の差が生じている。この水位差により、栈橋先端では、流速が速くなり、はく離によって渦が発生するものと推測できる。ただし、本計算では、港の大きさに比較して計算格子幅が大きいために、港内の流況を精度よく求めることは困難であった。

以上のことをまとめると、飯田港では、周期12, 20, 36分程度の副振動が生じる可能性がある。ただし、それらの振動は生じるとすれば、飯田港内の固有振動によって生じているのではなく、富山湾あるいは、飯田湾のセイシュによる振動である。周期12分の飯田湾のセイシュが生じたときには、飯田港が振動の節となるので、大きな流速を持った流れが発生し、その一部は港内へ流入して、港内の栈橋両側面に水位差を生ぜしめ、渦を発生させると推測できる。

(4) 仙台港

図-81は仙台港の計算領域を示す。計算領域の幅は、約120km、長さ75kmで、仙台湾全域を含む。沖側境界は、水深200mの等水深線にほぼ平行である。最大計算格子幅は、4000mで、1/2ずつ細分化して、仙台港における最小格子幅は125mとした。図-82は、仙台港周辺の計

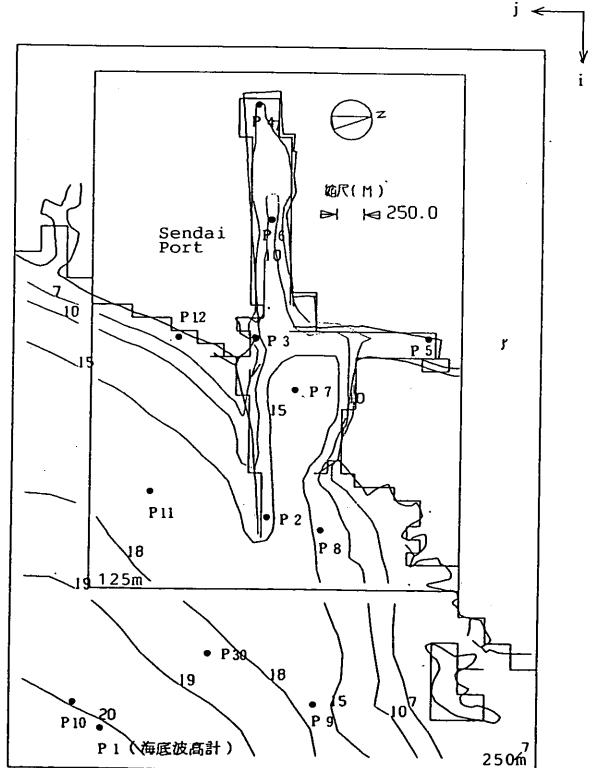


図-82 仙台港周辺の地形と水深

算格子地形と水深を示す。図-82のP.1~P.5は、2.1で示した仙台港の現地観測地点STN. 1~5と同一である。

図-83は、港内のP.1~P.5点における計算増幅率 A_f を示したものである。

$T=47\sim 52$ 分のとき、P.1~P.5の全点において、 A_f は、6~10程度のピーク値を持つ。港内全点の A_f が一様に上昇しているの、この周期の振動は港外の仙台湾の振動である可能性が高い。周期26~28分には、顕著なピークが見られ、P.1で $A_f=35$ になる。P.3、P.5では、 $A_f=20$ 程度である。しかし、港口部のP.2では $A_f=7$ と比較的小さく、港外のP.1では $A_f=2$ 以下で小さい。したがって、P.1付近を節として、港奥が腹となるような振動が生じている可能性がある。

$T=12$ 分では、P.1、P.5、P.3で $A_f > 5$ となっており、小さなピークが見られる。P.1では、 $A_f=2$ である。したがって、 $T=12$ 分も港内の固有振動周期になっている可能性がある。 $T=8$ 分でも、港内の A_f は5以上で、P.1比べると高いので、港内の固有振動が生じる可能性がある。

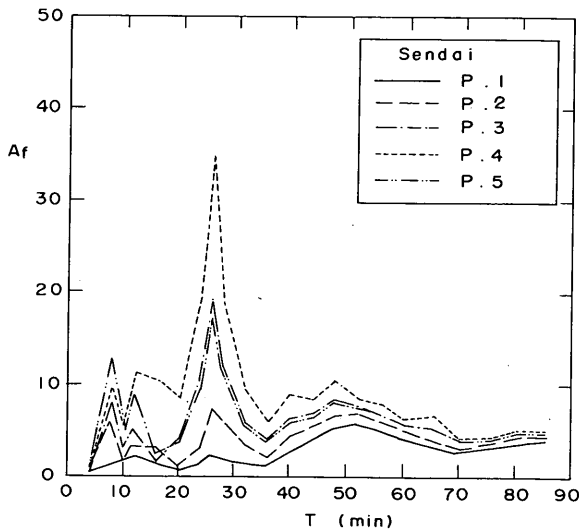


図-83 仙台港内の増幅率

図-84は、2.1で示した仙台港における実測波高比と、計算波高比を比較した図である。実線が実測値、⁵¹⁾白丸が計算値である。STN. 2/STN. 1では、 $1/T < 0.043$ の範囲では、実測値と計算値はよく一致する。 $0.043 < 1/T < 0.084$ の範囲では、ピーク周波数は一致するが、そのピーク値は少しずれる。 $1/T=1.26$ 付近では波高比 α は一致しない。STN. 3/STN. 1においても、

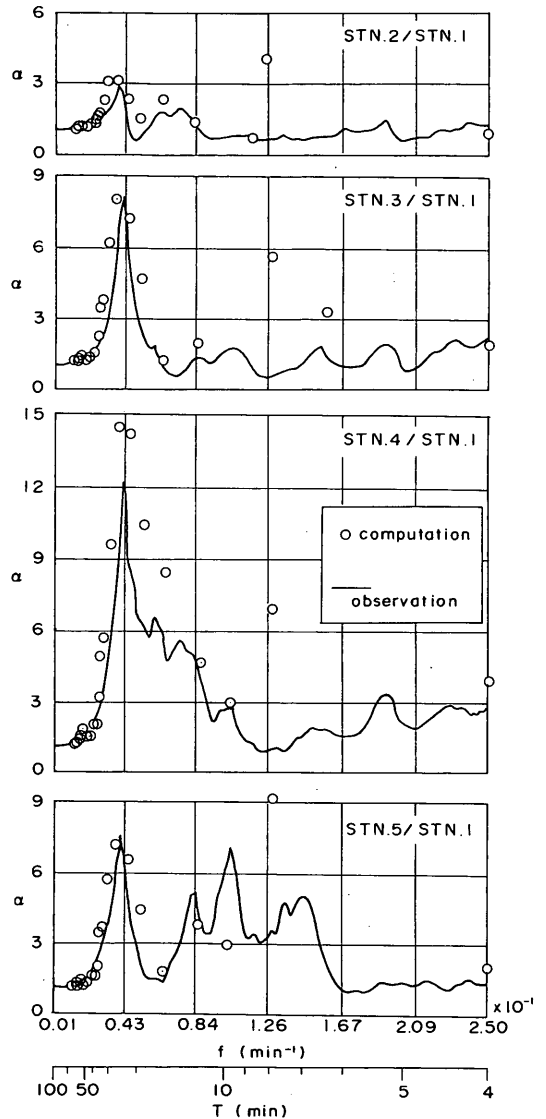


図-84 仙台港における実測波高比と計算波高比の比較

長周期側の1次ピーク近傍では、計算値と実測値は非常によく一致する。しかし、短周期側では一致度が悪くなる。STN. 4/STN. 1でも、1次ピークの値は少し計算値の方が大きくなるが、ピーク周波数は同一である。STN. 5/STN. 1では、 $1/T < 0.084$ まで計算値は実測値によく一致する。なお、1次ピークの周期は、25分である。

したがって、全体的に比較すると、計算値は、 $1/T < 0.043$ の範囲で実測値に非常によく一致する。 $0.043 < 1/T < 0.083$ の範囲でも、ピークの値は少し大きくなるが、ピーク周波数は一致するので、ほぼ一致していると

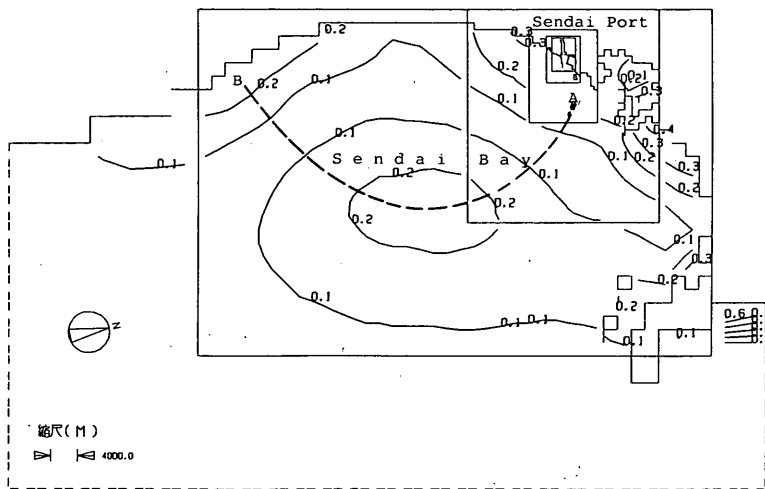
言える。したがって、数値計算によって仙台港の副振動の振幅および周期等は、精度よく求めることができる。

図-59で示した長崎港における計算値と実測値の比較図と、比べると、仙台港における方が、計算精度が少し高いようである。このことから、仙台港のように地形が比較的単純で、格子で表した地形と実際の地形がほぼ一致する港湾では、複雑な地形を持つ港湾に比較して、より精度の高い計算が可能であることがわかる。

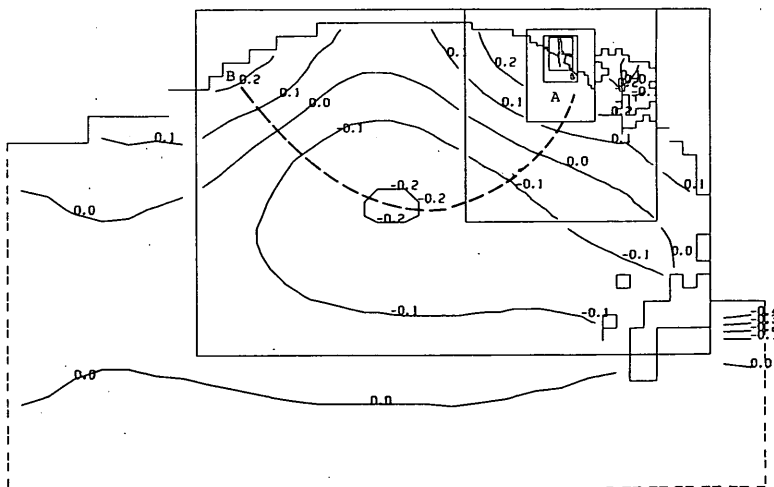
図-85(1)は、仙台港内で一様に水位が増大する周期52分における仙台湾の最大水位分布を示す。等水位線は同心円を描き、仙台湾中央部と、両端の④の松島付近、お

よび⑤で水位は0.2m以上になる。したがって、仙台港の北端の④、南端の⑤を腹とする仙台湾の固有振動モードが認められる。湾中央部にもう1つ腹を持つので、2次の振動モードになっている。本計算では、周期85分までしか計算しなかったけれども、仙台湾の1次振動モードが発生する可能性もあり、その周期は、100分程度になる。図-85(2)の水位分布図をみると、振動の様子が明らかで、仙台湾の北端と南端が正のとき、中央部は負である。振動系の軸は、図の一点鎖線のような孤状になると推定される。

周期52分では、仙台港内で波高比が大きくなることは



(1) 最大水位の分布

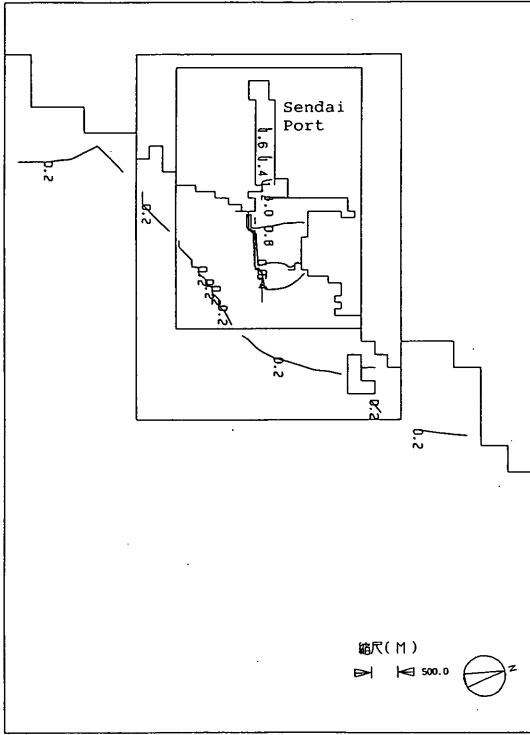


(2) 港奥水位最大時の水位分布

図-85 仙台湾における水位（周期52分）

ないので、仙台湾の2次振動の影響により仙台湾港内の水位も振動するが、港内で共振は生じない。

図-86は、仙台湾の周期26分における(1)最大水位分布図 (2)港奥が最高水位になったときの水位分布を示す。(1)の最大水位分布をみると、仙台湾の中央航路に沿って水位は増大し、最高で1.6m程度になる。港口のP.1付



(1) 最大水位の分布

図-86 仙台湾における水位 (周期26分)

近は、0.2mの等水位線が走っている。(2)の水位分布でも、(1)と同様に、港口の水位が低く、港内の水位が高い。港内では水位は負にはなっていない。したがって、仙台湾の1次振動モードの周期は26分で、図-86(2)の0の等水位線付近が節となる。P.1を基準とした波高比の1次ピーク周期は25分であり、1次振動の固有周期を示して

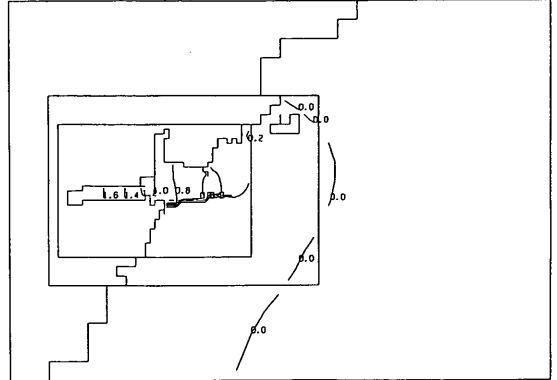
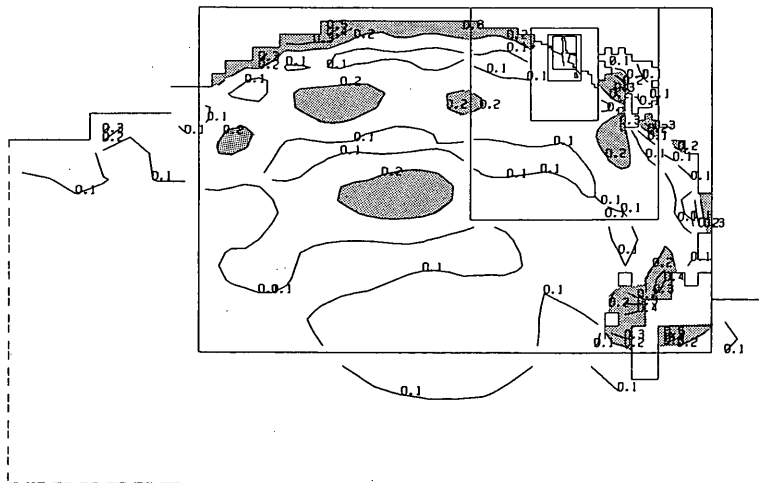


図-86 (2) 港奥水位最大時の水位分布

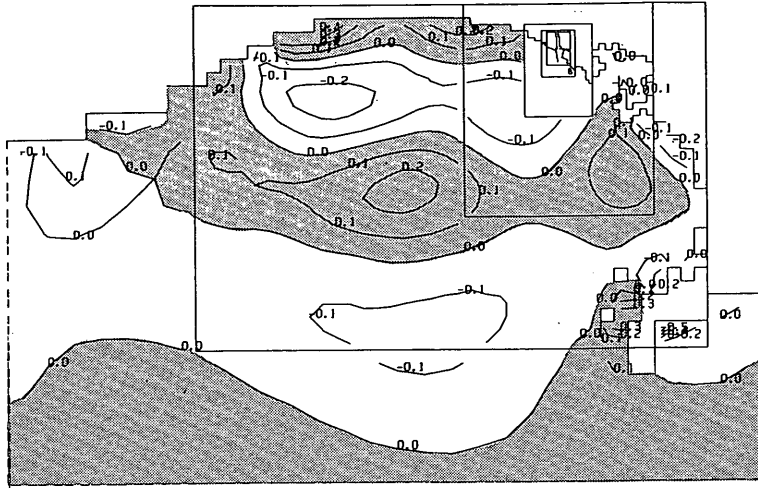
いたわけである。P.1は、節の位置に相当するので、計算および実測波高比は、周期25分で大きくなった。

図-87は、周期26分における仙台湾の(1)最大水位分布、(2)仙台湾最高水位時の仙台湾の水位分布図である。図-87(1)において、仙台湾の南端と北端を線で結び、線上の水位をみていくと、大-小-大-小-大-小-大-小-大となり、両端が腹で、間に4つの節をもつ、(2)をみると、図-87と同様な振動系を考えると、北から水位は、正-0-負-0-正-0-負-0-正となり、4つの節点をもつ。したがって、周期25~26分は、仙台湾の4次



(1) 最大水位の分布

図-87 仙台湾における水位 (周期26分)



(2) 港奥水位最大時の水位分布
 図-87 仙台湾における水位(周期26分)

の振動モードの固有周期に相当する。すなわち、周期25～26分の長周期波は、仙台湾の棚セイシュの4次モードの固有振動によって増幅される。仙台港は、その振動系の腹に位置し、また仙台港の1次振動周期が、同じく25～26分であるので、共振により、長周期波はさらに大きく増幅されて港内副振動を引き起こす。P.4/P.1の波高比が14、P.1の増幅率が2.5であるので、P.4の増幅率は、35と大きくなる。

なお、図-83にみられた周期8分の振動は、周期から判断して仙台港の2次モードの振動である。2次モードの振動であるので、周期26分の1次モードの振動に比較すると、P.4の波高比も1/4と小さくなっており、仙台港で顕著な副振動を生ぜしめる要因となっていない。周期12分では、図-84のSTN. 5/STN. 1において第2ピークが認められるので、北航路の固有振動周期が周期12分程度になっている。しかし、仙台湾の振動との共振関係が生じない。

5. むすび

本資料では、港内副振動現象に関する長崎港、敦賀港の現地観測データを解析して、その特性を検討した。次に、長周期波が入射する沖側境界に、無反射条件を導入して港内副振動を求める計算法を提案し、長崎港の狭領域計算結果と、現地観測データを比較して計算法の検証を行った。そして、広領域の数値計算によって、i) 長崎港、ii) 敦賀港 iii) 飯田港 iv) 仙台港の港内副振動特性について検討を行った。ここでは、得られた主な結果をまとめるとともに、今後の問題点と成果の活用について述べる。

副振動の現地観測データをまとめて、次のような結論を得た。

- 1) 飯田港のように、副振動によって港内に渦が発生することがある。副振動の主な周期は10分程度と予想される。
- 2) 敦賀港における観測期間中の最大波高は1986年3月29日に発生し、56cmで周期60分である。敦賀港の副振動のスペクトルは周期60～64分に顕著なピークを持ち、敦賀港では、周期約60分の副振動が卓越する。
- 3) 東シナ海方面で発生した低気圧が発達しながら東へ進み、日本を横断し、太平洋側へ抜ける場合に、敦賀港で顕著な副振動が発生する可能性がある。したがって、日本海において低気圧のために発生した微小振幅長波が副振動の発生要因となる。数値計算法の検証を行った結果は、以下の通りである。
- 4) 合田⁸⁾が示した長方形湾、矩形湾における増幅率の解析解と、計算値はよく一致した。三角形湾の場合、計算格子地形が実地形とずれるため、解析解より計算値は大きくなった。したがって計算精度を上げるためには、最小格子間隔を小さくして、対象とする港湾の地形をできるだけ正確に表現する必要がある。
- 5) 港内に流入河川がある場合は、河川奥を開境界とした方が、計算精度が上がる。
- 6) 長崎港の狭領域計算で求めた港内の波高比、および港内流速は実測値とほぼ一致し、本数値計算の適用性は高い。

広領域の数値計算によって検討した各港の副振動特性は次の通りである。

- 7) 長崎港内では、周期36～40分、周期22～24分の副振動が顕著に生じる。周期36～40分の副振動は、長崎港内の丸尾と港口の伊王島を両端する振動系の1次モードの振動が、五島灘における棚セイシュの2次モードの振動との共振によって増幅されるために顕著になる。周期22～24分の副振動は、港内と丸尾と深堀を両端とする振動系の1次モードの振動が、棚セイシュの3次モードの振動との共振によって増幅されて、顕著になる。
- 8) 敦賀港内で顕著に生じる60～65分の振動は、敦賀湾あるいは敦賀港の固有振動モードとは関係なく、若狭湾における大規模な湾水振動によって生じる。
- 9) 飯田港の副振動の周期は、36、20、12分が卓越する。周期36分の振動は富山湾全域のセイシュによって生じる。周期20分、12分のもは、飯田湾内の2種類の振動系の固有振動によって生じる。周期12分の振動では、飯田港が節となり、飯田港付近の流速が大きくなるために、港内に渦が発生すると推測できた。
- 10) 仙台港では周期25～26分の振動が卓越する。この振動は、仙台港の1次モードの振動が、仙台湾の2次モードの振動との共振によって増幅されるために、顕著になる。
- 11) 7)～10)から、港内副振動は2つのタイプに分けられる。1つは、港外の棚セイシュとの共振によって港内の振動モードが、増幅されて副振動となるタイプ、もう1つは、港内の固有振動モードに関係なく、港が位置する陸棚でのセイシュがそのまま港内まで伝播するタイプであり、通常、前者の方が港内の水位変動は大きくなる。厳密な意味で言えば、後者は港内の副振動ではなく、湾内副振動と言うべきであろう。

本数値計算では仙台港で検討したように、周期10分より短い振動の計算精度が低下した。飯田港、敦賀港のように比較的港内面積が小さい港の固有振動周期は10分より短いので、今後、小港湾の副振動を検討するときには、最小格子幅を、より適切に設定する必要がある。

現地観測において、今回は、2分間隔で潮位を読み取っ

たので、周期数分程度の振動は正確には求められなかった。小港湾で現地観測を行う際にはデータサンプリング間隔をもう少し短くする方がよい。

本計算は、正方形格子を用いて地形を表現しており、防波堤、突堤、埋立地等の港湾工事によって港湾地形が変化しても簡単に計算データを修正できる。したがって、将来地形における港内副振動の予測、港内副振動の対策工法の検討などに活用することができる。

本研究を行うにあたり、前九州大学教授井島武士先生、吉田明徳九州大学助教授、富樫宏由長崎大学教授から、副振動の数値計算法について有益な御教示を頂いた。長崎県臨界開発局からは、長崎港の副振動現象に関する資料提供を受けた。運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所からは、長崎港現地観測データを提供していただくとともに、現地観測データのまとめ方について御助言をいただいた。運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所からは、敦賀港の地形データをいただいた。第一港湾建設局敦賀港工事事務所西田一彦技官には、敦賀港の副振動現象を指摘していただくとともに、現地で観測データを収集していただいた。運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所からは、仙台港の観測データを提供していただいた。上記の諸氏、諸機関の関係者の皆様に深い感謝の意を表する。

(1988年9月30日受付)

参考文献

- 1) 西部海難防止協会：津波（長崎アビキ）対策調査報告書，1982.
- 2) 村上仁士：湾水振動，昭和47年度水工学に関する夏期研修会講義集，Bコース，1972.
- 3) 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所：長崎潮位観測記録整理解析調査報告書，1983.
- 4) 大村哲夫・福代倫男・蒔田靖紀・森谷誠生：長周期波の観測と解析について(1)，第28回海岸工学講演会論文集，1981，pp 49～53.
- 5) 山田尚人・山本修司・細川泰広・後藤 寿：長周期波の観測と解析について—副振動の観測とLeeの理論の適用性の検討—，第29回海岸工学講演会論文集，1982，pp 178～182.
- 6) 広本文泰・福手 勤・鈴木慎也・後藤 寿：長周期波の観測と解析—Mattioliの手法と適用性—，第30回海岸工学講演会論文集，1983，pp 138～142.
- 7) 吉田明德・北山 斉・鈴木康正・溝内俊一：不等水深の湾内副振動解析，第30回海岸工学講演会論文集，1983，pp 153～157.
- 8) 合田良美：長方形および扇型の港の副振動について—フーリエ変換を用いた一解法—，第10回海岸工学講演会論文集，1963，pp 53～58.
- 9) Ippen.A.T.and Goda Y.: Wave Induced Oscillations in Harbours : Solution of a Rectangular Harbour Connected to the Open Sea. *M.I.T. Hydrodynamics Laboratory. Report* No. 59, 1963.
- 10) 赤松英雄：長崎港の“あびき”の話，海の気象，Vol. 25, No. 5-6, 1980.
- 11) 谷本勝利 他9名：1983年日本海中部地震津波の実態と二、三の考察，港湾技研資料 No. 470, 1983, 229 p
- 12) 広瀬宗一・高橋智晴・菅原一見：駿河湾における長周期波の特性，港湾技研資料 No.451, 1983, 60 p.
- 13) 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所：長崎港副振動現象観測記録解析調査報告書，1984.
- 14) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1976，pp.147
- 15) 日本気象協会：気象 Vol. No. , 1978.
- 16) J.J.Lee : Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 45, No. 2, 1971, pp. 375～394.
- 17) J.J.Lee and F.Raichlen : Resonance in harbors of arbitrary shape. *Proc. of 12th Conf. on Coastal Eng.*, 1970, pp. 2163-2180.
- 18) F.Mattioli : Wave-Induced oscillations in harbours of variable depth. *Computers and Fluids*. Vol. 6, 1978, pp.161-172.
- 19) 井島武士・周宗仁：任意形状の港湾における波の振動問題，九州大学工学部集報，Vol. 48, No. 5, 1975.
- 20) 井島武士・吉田明德・永田修一・蘇 棋福：任意形状と水深の湾内水面波の分布に関する数値解析(1. 不透透境界面の場合)，九州大学工学部集報，Vol. 54, No. 2, 1981. pp. 79-86.
- 21) K.Olsen and L.Hwarg : Oscillations in a Bay of Arbitrary Shape and Variable Depth. *Journal of Geophysical Reseach*. Vol. 76, No. 21, 1971.
- 22) T. Hibiya and K. Kajiura : Origin of the Abiki Phenomenon (a Kind of Seiche) in Nagasaki Bay. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*. Vol. 38, 1982, pp. 172-182.
- 23) 相田 勇：1923年関東地震津波の数値計算，地震研究所い報，Vol. 48, 1970, pp. 73-86.
- 24) 高山知司・永井紀彦・平石哲也：東京湾の津波計算，港湾技研資料 No. 454, 1983, 100 p.
- 25) 高山知司・平石哲也：須崎湾における津波に関する水理模型実験，港湾技研資料 No. 549, 1983, 131 p.
- 26) 伊藤喜行・谷本勝利・木原 力：長周期波に対する防波堤の効果に関する計算（第2報），港湾技術研究所報告 Vol. 3, No. 7, 1964, pp. 25-30.
- 27) 岩佐義郎：水理学，朝倉土木工学講座 3，朝倉書店，1972，pp. 77-80.
- 28) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦：数値波動解析法による港内波高分布の計算，港湾技術研究所報告，Vol. 14, No. 3, pp. 35-57.
- 29) 富樫宏由・中村武弘・新田喜浩：長崎湾のアビキの有限要素法による解析と河川遡上の現地観測，第33回海岸工学講演会論文集，1986，pp. 80-84.

記号表

- a : 入射波の片振幅
 A_f : 港内増幅率
 $Co_{ij}(f)$: i, j 点間の副振動のコ・スペクトル
 $Coh_{ij}(f)$: i, j 点間の副振動のコヒーレンス
 f : 周波数
 f_R : 港口エネルギー損失係数
 g : 重力加速度
 k : 波数 ($2\pi/L$)
 h : 水深
 i : 地点および x 軸方向格子番号
 i_0 : 沖側境界格子辺番号
 i_c : 仮想計算領域の最も沖側の格子辺番号
 j : 地点および y 軸方向格子番号
 l : 湾の奥行
 L : 波長
 L' : 移動平均個数
 M : 港内振幅比 (合田⁸⁾)
 n : マニングの粗度係数
 t : 時間
 $Qo_{ij}(f)$: 副振動のクオドラチャスペクトル
 q_x, q_y : x 軸および y 軸方向の線流量
 R : 湾の最大の辺長
 $Si(f)$: i 点の副振動の周波数スペクトル
 T : 入射波の周期
 T_0 : 湾の固有振動周期
 u, v : x および y 方向の水粒子速度
 x, y, z : 座標系
 $\alpha' = R/L$
 $\alpha_{ij}(f)$: 波高比
 Δs : 計算格子幅
 Δt : 計算時間間隔
 Δx : 仮想領域における計算格子幅
 $\Delta \zeta_t$: 港口エネルギー損失
 ζ : 水位
 η_i : i 点の潮位
 $\bar{\eta}_i$: 天文潮位
 η_i : 潮位に含まれる副振動成分
 σ : 角周波数 ($2\pi/T$)
 $\varphi_{ij}(f)$: i, j 点間の副振動のフェイズ
 $\Phi_{ij}(f)$: i, j 点間の副振動のクロススペクトル

港湾技研資料 No. 636

1988・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.