

不等水深の湾内副振動解析

吉田明徳*・北山 斉**・鈴木康正***・溝内俊一****

1. ま え が き

港湾内水面振動の理論解析については、従来より多くの解析法が示されているが、それら理論解の検証は、比較的単純な港湾形状についての水槽実験あるいは既存の解との比較によってなされる事が多い。しかし、数分～数十分の共振周期を有する副振動現象については、水槽実験による検証が困難な事もある、現地港湾の副振動に対するこれら理論解析法の適用性については、必ずしも明らかではない。また、実測データとの比較検討がなされた例¹⁾は少なく、しかもそれらは等水深の港湾を対象とした理論についてのみであって、不等水深の港湾における副振動を取り扱う理論について実測データにより適用性の検討を行った例は見あたらない。

本研究は、著者^{2),3)}らが示した「任意形状かつ不等水深の港湾内水面振動解析法」の、現地副振動現象への適用性を検討する目的で行ったもので、比較的複雑な平面形状と水深変化を有し、かつ副振動の振幅が特に大きく、しかもその発生回数が多いことで知られる長崎港を対象に理論解析を行い、等水深港湾の副振動解析法としてよく用いられる Lee⁵⁾の方法と比較検討を行うとともに、港内5か所の検潮所で得られた副振動記録のスペクトル解析を行って、理論解と実測データの比較検討を行ったものである。

2. 長崎港における副振動の理論解析

長崎港の平面形状を図-1に示す。港口幅は約1km、港口より湾奥の丸尾までがほぼ7km、深堀までがほぼ4kmの細長い2枝形をなしており、水深は港口近傍で40～45m、湾奥の丸尾および深堀近傍では10m程度である。図中に示す黒丸は港内に設けられている香焼、深堀、皇后、松ヶ枝、丸尾、の5か所の検潮所で、後述する副振動の実測データはこれらの検潮所において得られたものである。

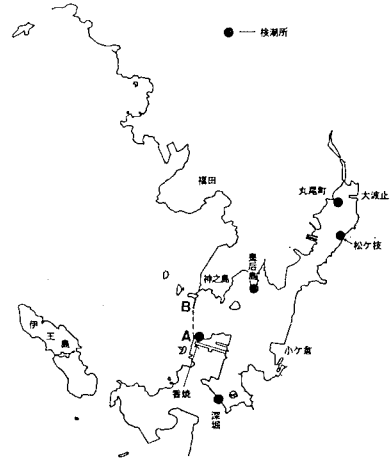


図-1 長崎港平面地形

(1) 計算モデル

理論解析は、著者らが示した「任意形状かつ不等水深の港湾内水面振動解析法」により行った。詳細は参考文献 2), 3) を参照されたい。長崎港の計算モデルの平面形状を示すと図-2のようで、港口は図-1に示すABに取り、現地平面形状における300m×300m程度以上の凸凹は忠実に近似したものである。なお湾奥には図-2中C, Dで示す丸尾と大波止の防波堤があるが、その開口幅は300m以下で比較的小さいため、計算モデルの平面形では防波堤開口部は閉じているものとし、水底地形については、現地港湾内の水深図をもとに、図-2中に示すような若干滑らかに近似した水深図を描き、これをもとに境界面の要素分割を行った。水面および水底面の要素分割の概略を示すと図-3のようで、水面上は111個、水底面上を115個に分割し、ここには示していないが、港口ABにおける外海との仮想境界面は、鉛直方向に1個水平方向8個に分割している。入射波の周期は4分から64分まで2分刻みの計算を行い、また港口に対する入射波の波向は、数分～数十分の長周期の入射波については、計算値において波向の影響はほとんどないことから⁴⁾、港口ABに対して垂直に入射するものとして計算を行った。

* 正 会 員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科

** 学生会員 工修 九州大学大学院水工土木学科

*** 正 会 員 工修 第四港湾建設局下関調査設計事務所次長

**** 正 会 員 第四港湾建設局下関調査設計事務所調査課長

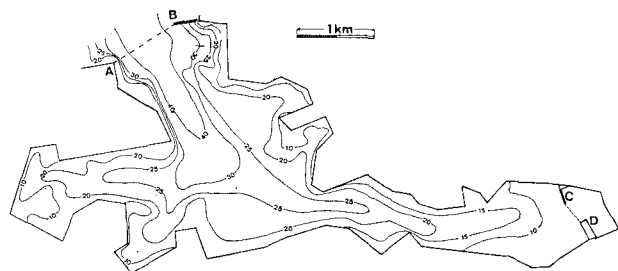


図-2 長崎港計算モデルの平面形と水底地形

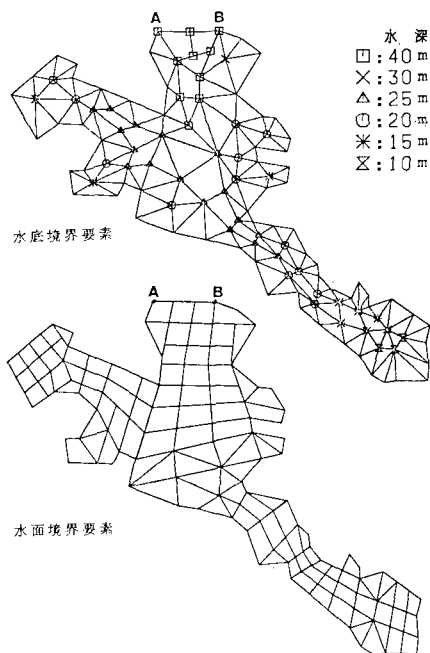


図-3 水面および水底面境界要素

理論解は、図-3 に示す各要素上のポテンシャル関数 ϕ の値として得られ、入射波の振幅の2倍（重複波の振幅）に対する湾内の水面振動の振幅との比で定義した増幅率（ $\bar{A}$ で表わす）は、水面における各境界要素上のポテンシャル関数値 $\phi(j)$ によって次式で与えられる。

$$\bar{A} = |\phi(j)/2| \quad (j=1, 2, \dots, 115)$$

上式でポテンシャル関数 ϕ は、流体運動の速度ポテンシャルの場所的な変動を表わす無次元の関数である。

(2) 理論解析結果

計算結果を増幅率 $\bar{A}$ について示すと、丸尾、深堀、香焼では図-4、松ヶ枝および皇后では図-5に示すように、図-5 中の実線と破線は後述する Lee の方法による丸尾と深堀での増幅率である。これより、長崎港における副振動の共振モードとしては、周期35分の第1次モード、19分の第2次モード、および10分の第3次モードがあり、特に35分近傍の第1次モードにおいて、湾奥の丸尾および松ヶ枝における増幅率が著しく大きな

っている。これは「長崎港では周期35分の副振動が著しく多い」との現地の報告⁶⁾と一致する結果を与えるものである。それぞれの共振周期における水面振動のモードを見るため、理論解において各検潮所に対応する境界要素上の ϕ の値と、それより求めた入射波に対する位相を表-1に示している。第1次の共振周期35分では各地点とも同位相で、これは港口外に node をもち、湾奥の丸尾を loop とする単節の振動モードであるこ

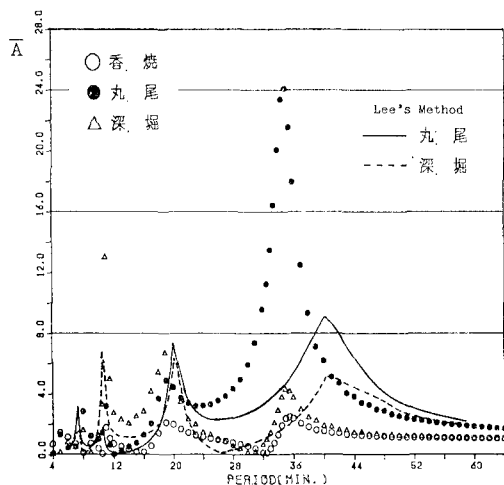


図-4 増幅率

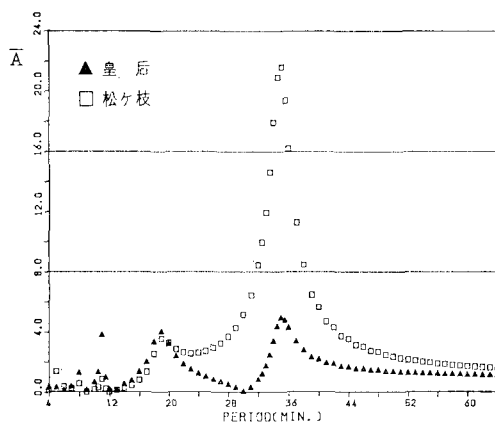


図-5 増幅率

とを示し、第2次の共振周期19分では、湾奥の丸尾と深堀との位相差がちょうど 180° で、この場合は丸尾と深堀間に1つの node をもつ単節の振動モードであることを示している。10分の共振周期では、深堀と皇后間でちょうど位相が 180° ずれており、深堀と皇后が loop でその間に1つの node をもつ単節の振動モードであることがわかる。また、湾奥の丸尾および松ヶ枝と、港口近くの香焼とがほぼ同位相であって、これより、丸尾と

表-1 共振モードにおけるポテンシャル関数値と水面振動の位相

地 点	1 次モード (35 分)			2 次モード (19 分)			3 次モード (10 分)		
	ϕ		Phase	ϕ		Phase	ϕ		Phase
	Real	Imag.		Real	Imag.		Real	Imag.	
香 焼	0.56	4.71	83.2°	1.25	4.01	72.8°	0.73	-0.28	-21.0°
深 堀	1.02	8.56	83.2°	3.99	12.82	72.7°	2.32	-0.90	-21.2°
皇 后	1.16	9.79	83.2°	23.84	7.67	17.8°	-1.21	0.47	158.8°
松ヶ枝	5.09	42.90	83.2°	-2.09	-6.73	-72.7°	0.28	-0.11	-21.4°
丸 尾	5.67	47.80	83.2°	-2.09	-9.33	-72.7°	1.82	-0.70	-21.0°

皇后で loop を取り, 丸尾・皇后間と香焼・皇后間に node をもつ双節の振動モードもあることが示される。

(3) Lee の方法による解との比較

Lee は水深一定の仮定のもとで, 任意の平面形状を有する港湾内の水面振動の解析法を示している。そこで, 著者らの方法による解と Lee の方法による解との比較検討を行って, 両者の相違について調べてみた。ただし, Lee の方法による解は, 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所の委託により, 財団法人日本気象協会福岡本部で解析されたものである⁷⁾。計算に用いられたモデルは平均水深を 18 m に取り, 港口位置および平面形状は図-2 に示す形状とほぼ同じであるが, 湾奥の丸尾と大波止の防波堤がないものとして, 防波堤背後の奥行 400 m 程度の領域を含めて解析している。したがって比較のため, 著者らの方法においても, 湾奥の領域を含めた計算を行ったが, その結果は前述の結果に較べ, 第 1 次の共振周期が 36 分と 1 分程度大きくなり, そのときの増幅率が湾奥の丸尾と松ヶ枝において 2.0 程度大きくなるぐらいで差はなく, 著者らの方法による解は前述の結果についてのみ示している。

図-4 に示す Lee の方法による解では, 第 1 次の共振周期は 40 分で, 著者らの方法による解の 36 分と較べ, 4 分程大きく現われている。赤松⁶⁾がまとめた統計資料によれば, 長崎港の過去 1961 から 1979 年までの 19 年間の副振動記録におけるその平均周期と発生回数は, 35 分周期がほぼ 170 回と卓越しており, 40 分周期ではほぼ 25 回で一段と少なくなる。これらの資料から見て, 最も問題となる第 1 次モードの共振周期に関しては, 水深変化を考慮する著者らの方法の方が, Lee の方法に比べより精度よい推定値を与えうる。増幅率について見ると, 深堀, 丸尾とも, 第 2, 第 3 次モードにおいて, 両者に著しい差はないが, 第 1 次モードでは, 湾奥の丸尾において, Lee の方法では増幅率 9.0, 著者らの方法では 24.0 と著しく異なっている。深堀においては, 第 1 次モードにおいても両者の増幅率はほぼ同じ値を取ることを考えると, 水深変化の影響は, 湾の奥行が比較的大きく, 湾奥に行くにしたがって徐々に湾幅が狭く, かつ水深が浅くなるような形状を有する港湾の湾奥地点の増

幅率に大きく現われると言える。

3. 実測データによる理論解の適用性の検討

港内 5 か所の検潮所における 1982 年 1 月から 4 月までの, ほぼ 4 か月間の検潮記録より, 顕著な副振動が生じているものを 5 ケース取り出してスペクトル解析を行い, 前述の理論解との比較を行って, 現地港湾における副振動に対する著者らの解析

法の適用性について検討した。

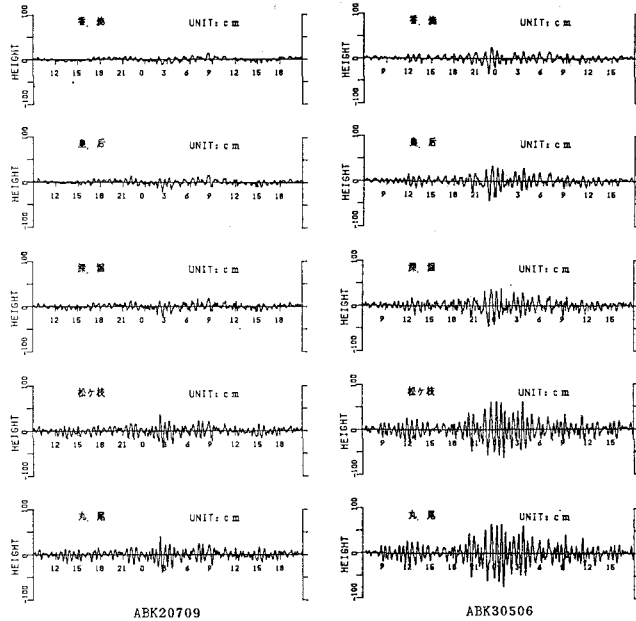
(1) 副振動データのスペクトル解析

スペクトル解析に用いた副振動データは, 検潮記録をデジタイザーを用いて 2 分間隔で読み取り, Lowpass filter を通して求めた潮汐成分を, 検潮記録のデジタルデータより差し引いて求めたもので, 5 ケースのうち 2 つを例として図-6 に示している。データ長は 36 時間で, 例えば図-6 の ABK 20709 は, 2 月 7 日 9 時からの 36 時間の各検潮所での副振動データであることを意味する。

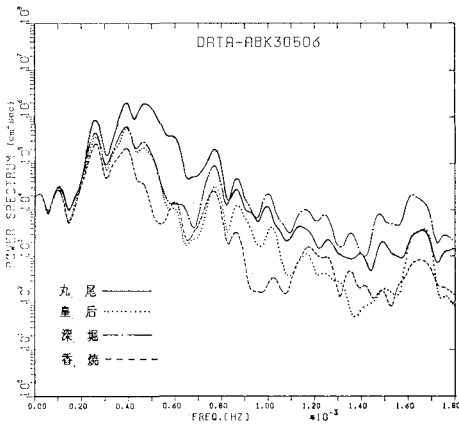
スペクトル解析は FFT 法により直接副振動データの生スペクトルを求め, スペクトルウィンドウによる平滑化を行って, 各検潮所におけるパワースペクトル $P_{ij}(f)$ を求めた。ただし, 添字の i, j は $i=1, 2, \dots, 5$ がデータ取得地点の香焼, 深堀, 皇后, 松ヶ枝, 丸尾を意味し, $j=1, 2, \dots, 5$ が, 5 ケースのデータを意味する。スペクトル解析の諸元を示すと次の様で, サンプル間隔 = 2 分, データ総数 = 1024, 解析区間 = 34.13 時間, 周波数分離能 (生スペクトル) = 0.82×10^{-5} Hz, カットオフ周波数 = 0.42×10^{-2} Hz, スペクトルウィンドウは Parzen のウィンドウを用い, その等価バンド幅は 0.6×10^{-4} Hz に取って平滑化を行った。したがって, パワースペクトルの自由度はほぼ 15, 変異係数はほぼ 0.37 で, 後述する理論解と実測データとの比較には, スペクトルの推定誤差をさらに小さくするため, 5 ケースの平均値 $\bar{P}_i(f) = \sum_{j=1}^5 P_{ij}(f)$ を用いた。 $\bar{P}_i(f)$ については, 変異係数は 0.16 程度となるが周波数分解能は 0.3×10^{-3} Hz 程度と悪くなる。スペクトルの推定誤差を悪化させずに分解能を良くするには, サンプル間隔をさらに小さく取る必要があるが, 現在用いられている検潮器(チャートスピード 2 cm/hr) では, 2 分間隔のサンプリングが限度で, さらに詳細な副振動現象の解析を行うには記録方法も含めた検討が必要であると思われる。スペクトル解析結果の例として, 図-7 にデータ ABK 30506 についてのパワースペクトルを示している。

(2) 理論解と実測データの比較

理論解を実測データによって検証する際の問題点として以下のことがあげられる。副振動の実測データは港湾



図—6 副振動データの例(長崎港)

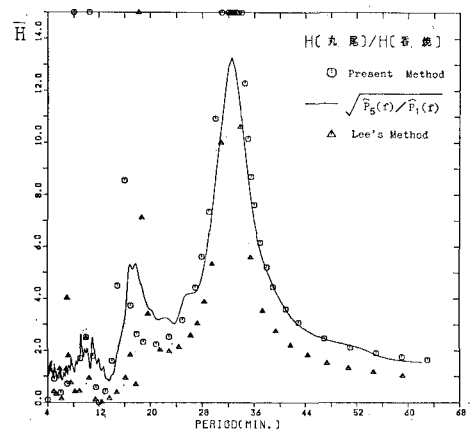


図—7 副振動のパワースペクトルの例 (ABK 30506)

内に設置した検潮器によって得られることが多いが、それらの検潮記録から入射波の振幅を抽出することは困難で、したがって入射波の振幅に対する湾内各点での水面振動の振幅の比として得られる理論解と、増幅率についての比較検証を直接行うことができない。また、港湾外に波高計を設置して入射波の波高を測定することも考えられるが、長崎港の副振動を引き起こす長周期波は、東支那海における気象の変動に伴って生じる気圧のジャンプ状の上・下降によって生じると考えられており、日比谷・梶浦ら⁸⁾の数値計算によれば、この長周期波の振幅は、気圧変動の生じた海洋上で 2 cm 程度、五島沖合の陸棚上で 12 cm 程度で、このような微小な振幅の長周期波を精度よく測定できるかは明らかでない。

したがって、今回は便宜上、港口に最も近い香焼にお

ける波高を基準に取り、他の 4 か所の検潮所における波高との比 ($\bar{H}$ で表わす) について比較を行うこととし、理論解から求めた各点の波高比 $\bar{A}_i/\bar{A}_1$ と、パワースペクトルより求めた波高比 $\sqrt{\bar{P}_i(f)/\bar{P}_1(f)}$ ($i=2, 3, \dots, 5$) について比較検討を行った。これらの結果を、丸尾および深堀について示すと 図—8、図—9 のようで、図中実線で示したのが、パワースペクトルより求めた波高比で、○で示したのが著者らの理論解(図—4)より求めた波高比である。図中、8 分、10 分、16 分、32 分近傍で、理論解より求めた波高比が、パワースペクトルより求めた波高比に較べて著しく大きくなっているのは、図—4 に見られるように、これらの周期において、香焼が node 位置に近く、 $\bar{A}_1 \approx 0$ となるためである。一方、パワースペクトル $\bar{P}_1(f)$ は χ^2 分布に従う確率変数であって、そ



図—8 波高比(実測値と理論解の比較)

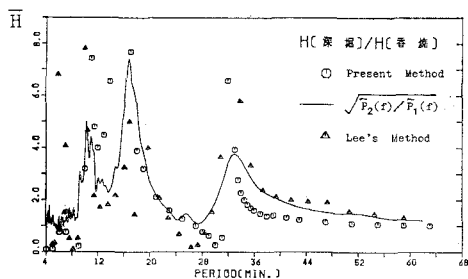


図-9 波高比 (実測値と理論解の比較)

れより求めた波高比は理論解より求めた波高比のように著しく大きくなることはなく、これらの周期近傍における両者の比較はあまり意味がない。したがって $\bar{H} > 15.0$ となるような値は、図中ではすべて $\bar{H} = 15.0$ として示している。

図-8の丸尾について見ると、24分以下の比較的短い周期において、理論解と実測値には若干の差が生じているが、問題となる第1次共振モード近傍の30~40分において、両者は非常に良く一致している。図-9の深堀についても両者は良く一致しており、波高比に関しては、理論解は十分な精度で実際の現象を推定していると言える。図-8、図-9中△印で示したのは、図-3に示したLeeの方法による解を、波高比 $\bar{H}$ について示したもので、丸尾における第1次モード近傍で実測値に比べて小さく現われているが、全体としてはそれ程大きな差はなく、波高比に関しては、Leeの方法による解も比較的実測値と良く合う結果を与えると言える。

4. あとがき

以上の結果をまとめると次の様である。

- 1) 著者らが示した「任意形状かつ不等水深の港湾内水面振動解析法」による、長崎港を対象とした理論解析の結果、第1次の共振周期は35分を示し、これは「長崎港における副振動は35分周期が一段と卓越している」との現地の報告と一致する結果である。一方、一定水深を仮定するLeeの方法による解は、第1次の共振周期が4分程大きな値を与えている。
- 2) 湾の奥行きが長く、湾幅と水深が徐々に小さくなっている湾奥の丸尾において、Leeの方法による解は、著者らの方法による解に比べて、著しく小さい増幅率を与えている。これは、Leeの方法において、水深変化を考慮していないためと思われる。
- 3) 港内の検潮所で得られた、副振動データのスペク

トル解析を行い、香焼の波高を基準とした他の検潮所における波高比について、理論解とパワースペクトルより求めた値を比較した結果、両者は非常に良く一致し、理論解の適用性がある程度検証できたと考えられる。ただし、Leeの方法による解も、波高比については実測値と比較的良好一致する結果を与えている。

- 4) したがって、増幅率について、実測データによる理論解の適用性を厳密に検証するためには、入射波の波高を知る事が必要で、これについては今後検討を行う予定である。
- 5) 解析の対象となる港湾が、港口あるいは湾内に防波堤を有し、その開口幅が比較的小さい場合には前述の理論解析の結果をそのまま用いることはできず、開口部におけるエネルギー損失の効果を理論解析に取り込む必要がある。防波堤開口部におけるエネルギー損失の問題については村上ら⁹⁾の研究があるが、今後さらに実測データによる検討等が必要であると思われる。

最後に、本研究において、長崎海洋気象台から松ヶ枝の潮位記録およびその他の資料をお借りした、また、図面の作成にあたって、九州大学工学土木科技官牛房幸光氏の助力を得た、ここに記して感謝の意を表わす。

参考文献

- 1) 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、pp. 178~182, 1982.
- 2) 井島武士・吉田明徳・永田修一・蘇 期福：任意形状と水深の湾内水面波の分布に関する数値解析 (I. 不透過境界面の場合)、九州大学工学集報、第54巻、第2号、pp. 79~86, 1981.
- 3) Yoshida A. and T. Ijima: Resonance in harbors of arbitrary topography, Proc. of 5th International Conference on Boundary Elements in Engineering, 1983.
- 4) 第四港湾建設局下関調査設計事務所・山口県：副振動調査報告書、1982.
- 5) Lee, J. J.: Wave induced oscillations in harbours of arbitrary shape, Jour. Fluid Mech., Vol. 45, pp. 375~394, 1971.
- 6) 赤松英雄：長崎港のセイシュ (あびき)：気象研究所報告、第33巻、第2号、pp. 95~115, 1982.
- 7) 第四港湾建設局下関調査設計事務所・山口県：長崎港潮位観測記録整理解析調査、1983.
- 8) 日比谷紀之・梶浦欣二郎：長崎港におけるあびき現象の数値解析、日本海洋学会春季大会講演要旨集、1981.
- 9) 村上仁士・野口英二：湾口部のエネルギー損失を考慮した湾水振動の解析、土木学会論文報告集、第288号、1979年.