

長周期波の観測と解析

—Mattioli の手法の適用性—

廣本文泰*・福手 勤**・鈴木慎也***・後藤 寿****

1. はじめに

外洋に面した堀込港湾などにおいては、気圧、風、潮流、波浪等の種々の変動に起因して発生した長周期波が外洋から侵入し、これが主因となって「副振動」と呼ばれる現象が生じることがある。この副振動現象によって港内に係留中の船舶の動揺による係留索の切断や荷役効率の低下、港口部等を航行中の船舶の操船への影響などの弊害がもたらされ、港湾計画の策定や港湾管理上配慮すべき事項となっている。

今日までに副振動およびその主因たる外洋の長周期波については、種々の研究が行なわれてきたが、未だ不明確な点も多く残されている。副振動については理論および数値解析モデルがいくつか提案されているが、現地観測データと比較した例はあまり多く見られない。このため、前報においては仙台新港、大船渡港、釜石・両石湾における現地観測データと、Jiin-Jen Lee の副振動解析手法の比較検討を行なった。本稿はこれに引き継ぎ、水深変化を考慮できる Mattioli の副振動解析手法と Lee の手法および現地観測データの比較検討を仙台新港、釜石・両石湾、鹿島港において実施した結果をとりまとめたものである。

2. Mattioli の副振動解析手法

基礎方程式は、線型の運動方程式、連続方程式に長波近似を行ない、次式における Helmholtz の方程式を用いる。

$$\nabla \cdot (h \nabla \eta) + \frac{\omega^2}{g} \eta = 0$$

ここで h : 水深, η : 水面変動, ω : 角周波数, g : 重力加速度

領域は、水位を解析的に求める領域 Ω_A と数値計算により求める Ω_N に分け、 Ω_A においては Lee の手法と同様、固境界に沿っての法線方向の変化は零、湾から無限遠においては湾の影響がないという条件で解析し、

Ω_A と Ω_N の境界で水位および水位勾配を等しいと置く。 Ω_N では領域を要素分割し、Green 関数を用いた積分方程式を Gauss の積分公式を用いて数値的に解析する。今回は線積分、面積分とも4点の積分点を用い、境界では線分の中央、各要素では重心位置で水位を求めた。

現在任意形状の湾の副振動解析法は Lee の手法、Olsen-Hwang の手法、井島の手法等があるが、Mattioli の手法は長波近似を用いており、ごく短周期の波に対する解析精度は問題があると考えられるものの、副振動として問題となる長周期波に対しては十分な精度を有すると考えられる。また、領域を平面的に要素分割して各要素の平均水深を与えれば計算が可能であり、データの作成等の実用面からは優れた解析手法であると考えられる。

3. 副振動の観測と数値解析の比較

3.1 仙台新港

(1) 観測条件

観測地点は、図-1 に示す港内3点、港口部1点、港外1点である。観測期間は1981年9月～1982年2月の6か月間である。

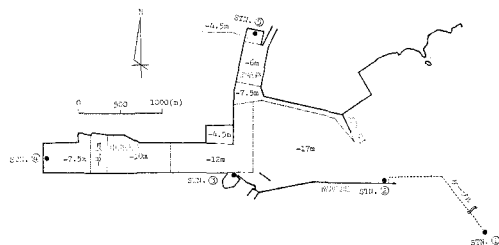


図-1 仙台新港観測位置図

(2) 観測結果

港内各測点における港外波高に対する月平均増幅率を図-2 に示す。月平均増幅率は日毎の増幅率をパワースペクトルの値で加重平均して求めている。月ごとの増幅率は若干変動しているが、共振周期についてはほとんど変化が無く、月平均増幅率をもって副振動特性を議論しても問題はないと考えられる。また、各測点における位相関係を表-1 に示す。

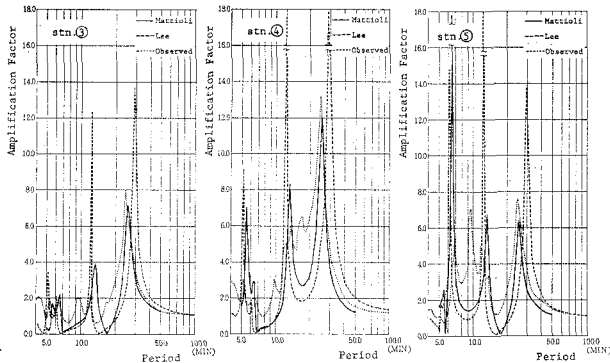
* 正会員 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所所長
 ** 正会員 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所次長
 *** 正会員 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所検査係長
 **** 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所運転技官

表一 港内水位変動の相互相関特性 (仙台新港)

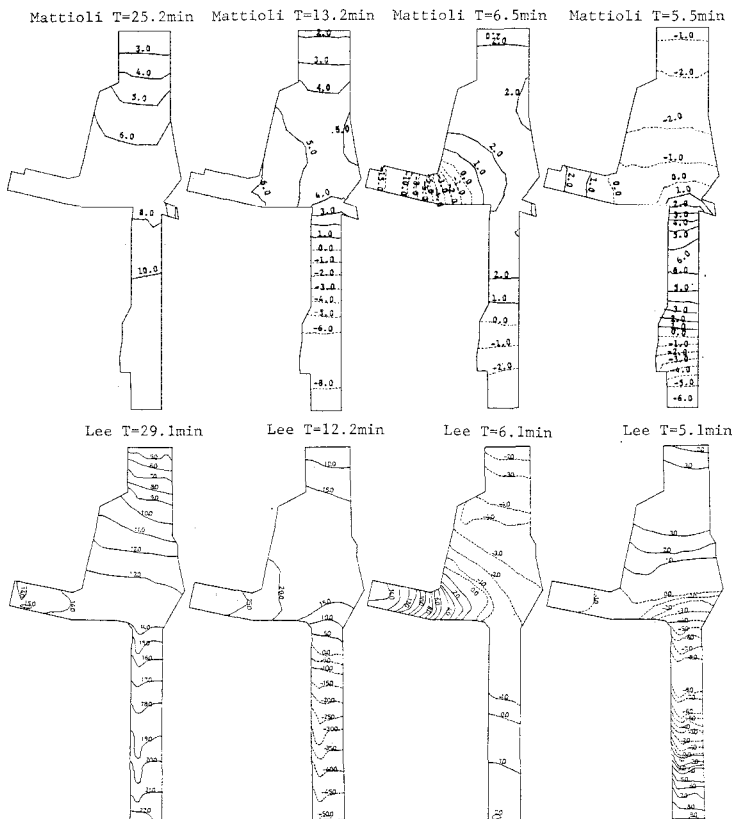
共振周期(分)	相互相関特性			
	stn.②-stn.④		stn.②-stn.⑤	
25.0	1.0	同位相	1.0	同位相
12.0	1.0	逆位相	0.8	同位相
6.5	0.8	90°	0.9	90°
5.5	0.8	90°	0.1	90°

(3) 観測値と数値計算結果の比較

仙台新港の共振モードを Mattioli の手法 (以下 M 法という) と Lee の手法 (以下 L 法という) で解析した



図一 応答曲線の観測値と計算値の比較 (仙台新港)



図一 仙台新港の共振モード図 (実線: 港外水位と同位相, 破線: 逆位相)

結果を図一3に、港内地点での応答曲線を図一2に示す。計算条件は、外洋波は港口に直角に入射するものとし、外洋の水深は M 法で 17m, L 法で 12.5m, 港内水深は M 法では実際的水深を, L 法では 12.5m とし、解析領域は M 法では内部領域を 95, 境界を 72 に分割し, L 法では境界を 96 に分割した。

観測による周期 25 分前後の共振周期は, M 法で 25.2 分, L 法で 29.1 分となり, 共振モードは港口から中央航路に沿う 1 次モードと考えられ, 各観測点の同位相関係と一致する。

観測による周期 12 分前後の共振周期は, M 法で 13.2 分, L 法で 12.2 分となり, 共振モードは港口から中央航路に沿う 2 次モードと考えられ, stn. ②, ⑤ と stn. ④ の逆位相関係と一致する。

観測による周期 7 分前後の共振周期は, M 法で 6.5 分, L 法で 6.1 分となり, 共振モードは M 法では北航路のみの 1 次モード, L 法では港口から北航路に沿う 2 次モードと考えられ両者は若干異なるが, stn. ④ と ⑤ の同位相関係は両者とも一致する。

観測による周期 5 分前後の共振周期は, M 法で 5.5 分, L 法で 5.1 分となり, 共振モードは分岐点以西の中央航路のみの 2 次モードと考えられ, stn. ④ と ⑤ の逆位相関係と一致する。

以上のように, 共振周期および共振モードに関しては M 法, L 法ともかなりよく観測値を説明しているが, 増幅率は必ずしもうまく対応していない。また, M 法と L 法を比較すると, 1 次の共振周期は L 法が長周期になり, 2 次以上の共振周期は L 法が短周期になる。これは, 高次モードでは水深が浅い部分の影響が考慮されねばならないが, L 法では一様水深とするため波速は全域で一様となり, 水深が浅い部分の波速を過大評価しているためであろう。また, 共振モードの評価においても, 水深の深い部分は M 法と比し L 法は振動しやすくなり両法で差違が生じる場合がある。

3.2 釜石・両石湾

(1) 観測条件

観測地点は図一4に示す湾内 6 地点である。観測期間は 1973 年 11 月～1974 年 1 月の 2 か月間と 1974 年 8 月～10 月までの 2 か月間であり,

各期間ごとに釜石を含む3点1組で波高の同時観測を行なった。

(2) 観測結果

釜石・両石湾では湾外の波高観測がないため増幅率は得られず、各測点のパワースペクトルのピーク周期を整理したものを表-2に、釜石と各測点の相互相関特性を表-

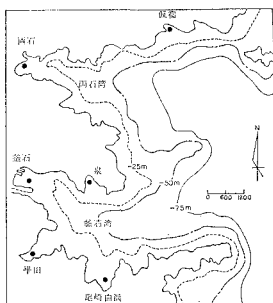


図-4 釜石・両石湾観測位置図

3に示す。湾内測点における卓越周期が必ずしも湾内共振周期と一致するとは限らないが、傾向を把握するため両者を同一と考えて議論を進めていく。

(3) 観測値と数値計算結果の比較

釜石・両石湾の共振モードをM法、L法で解析した結果を図-5に、湾内測点における共振周期を表-2に示す。計算条件は、外洋波は湾口に直角に入射するものとし、外洋の水深はM法で110m、L法で48m、湾内水深はM法では実際の水深を、L法では48m、解析領域はM法では内部領域を113、境界72をに分割し、L法では境界を145に分割した。

観測による24~36分の共振周期は、M法で24分、L法で29.3分となり、共振モードは両湾全体の1次モードと考えられ、各観測点の同位関係と一致する。

釜石、両石、仮宿の観測による16~18分の共振周期は、M法で18.7分、L法で15.6分となり、共振モードは釜石-両石間の一次の横振動モードと考えられ、釜石湾内の釜石、白浜、平田、泉と両石湾内の両石、仮宿の逆位相関係と一致する。

釜石、両石、仮宿の観測による11~12分の共振周期

表-2 観測値の卓越周期と計算値の共振周期の比較(釜石・両石湾)

観測点	ケース	振動周期 (分)				
釜石	観測値	1	32.0	16.0	9.6	6.4
		2	24.0			6.0 4.2
		3	18.0	11.1		6.3 5.0
	計算値	M法	24.0	18.8	12.0 9.2 7.8	5.6 5.2
		L法	29.3	15.6	7.8	6.0 5.1
白浜	観測値	1	32.0		9.6	6.4
	計算値	M法	24.0	18.8 15.5	9.2 7.8	5.7 5.2
		L法	31.0	16.0		6.0 5.0
平田	観測値	2	24.0		8.0	5.8
	計算値	M法	23.0	18.8	12.3	7.8 5.6 5.2
		L法	29.5	15.8	9.0	5.0
泉	観測値	1	32.0		8.0	6.4
	計算値	M法	24.0	18.8	12.8	9.2 7.8 6.7 5.6 5.2
		L法	30.0	15.1		
両石	観測値	2	16.0		8.0	
		3	28.8	16.0 12.0		6.5 5.3
	計算値	M法	25.0	18.6	12.2	8.0 7.2 6.5 5.3
		L法	30.5	15.5	9.0	7.0 5.2
	観測値	3	36.0	16.0	11.1	6.3 5.3
仮宿	計算値	M法	26.3	18.6	11.7	7.8 6.5 5.6 5.2
		L法	34.0	15.5	7.2	

表-3 港内水位変動の相互相関特性(釜石・両石湾)

共振周期(分)	釜石との相互相関特性							
	白浜	平田	泉	仮宿	両石	両石	両石	両石
2.9~3.2	1.0	同位相	1.0	同位相	1.0	同位相	1.0	同位相
1.6~1.8	0.9	同位相	1.0	同位相	0.5	逆位相	0.7	逆位相
9~11	0.8	90°	0.3	90°	0.1	逆位相	0.9	同位相
6~7	0.5	同位相	0.6	同位相	0.5	逆位相	0.2	逆位相
5~6	1.0	同位相	0.4	同位相	0.4	90°	0.1	同位相

は、M法で12分、L法で9分となり、共振モードは釜石湾、両石湾の独自の1次モードと考えられるが、L法では中央部も多少振動し、共振周期も両者でかなり異なる。

釜石、白浜の観測による9.6分の共振周期は、M法で9.2分となるがL法ではこのモードの共振は現れない。共振モードは釜石-白浜間の泉を節とする1次の

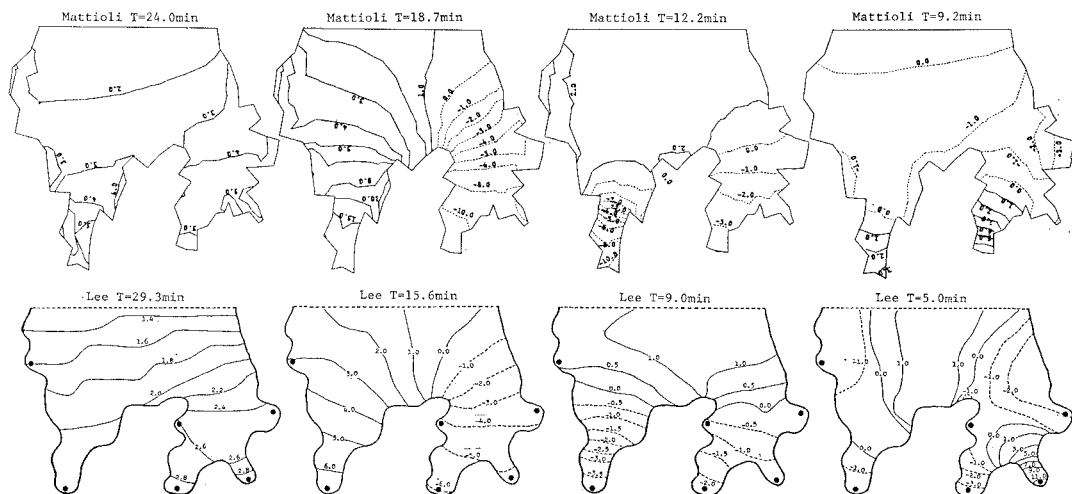


図-5 釜石・両石湾の共振モード図

横振動モードと考えられ、釜石、白浜の観測値のパワースペクトルピークがこの周期に存在するが泉ではゼロに近い値を示し、また、釜石と白浜が逆位相関係にあることと一致する。

9分より短周期の共振周期が観測値、M法、L法に現われており、高次あるいは局所的な共振を起こしていると考えられる。この帯域ではM法の方がL法より共振周期の個数が多く、増幅率も大きくなっている。

以上のように、観測値の厳密性は欠くものの、10分以上の長周期側についてはM法、L法とも観測値を説明する共振周期を与えているが、両法の間でかなりの差違があり、増幅率はM法がL法より大きくなっている。これは、釜石、両石湾の水深が湾口で100m前後、湾奥で10m以下と水深の差が大きいことに起因すると考えられる。また、周期9.6分に観測される振動はM法のみで現われ、より短周期側では共振周期の個数もL法は少ない。この原因は、湾口と湾奥を結ぶ線上に生じる低次の共振以外の水深が浅い部分の局所的な振動は、L法では波速を過大に評価するため生じにくくなっているためであろう。

(4) 侵入波の波向の影響の検討

当湾では侵入波に対する観測データが無いため、数値計算(M法)により侵入波の波向が増幅特性に与える影響を検討した。計算条件は侵入波の波向を港口部法線に対し 0° 、 30° 、 60° の3ケースとし、その他の条件は(3)と同じとした。3ケースの周期9.2分、7.8分における共振モードを図-6に示す。共振周期は各ケースとも同じであったが、増幅率は10分より短周期になるとかなりの差が生じ、局所的な振動に対する波向の影響が大きいことが伺える。共振モードについては周期10分以上

は変化はないが、より短周期では、周期9.2分のように、波向が汀線に平行になるにつれ湾全体の横振動が誘起されるケースや、周期7.8分のように、波向によって振動が消滅するケースが見られる。この原因は、周期9.2分のモードは釜石、白浜沿いの横振動と考えられ、入射角が大きくなるほどこのモードの振動に与えられるエネルギーが大きくなるのに対し、周期7.8分のモードは平田、釜石と平田、白浜間のおのおのの一次の横振動が複合したモードと考えられ、入射角が 60° になると泉地区に入射する波の位相差が大きくなって増幅されなくなるものと考えられる。

以上のように、釜石・両石湾のように開口部が大きくしかも地形が複雑な湾においては、侵入波の波向の差異による湾の増幅特性が短周期側で変化することが分る。観測値をみると、同一地点でも観測時期の違いによって、ある周期にパワースペクトルのピークが現われる場合と現われない場合があり、侵入波の周波数特性の差違とともに、波向により湾の増幅特性が変化したことを伺わせる。

3.3 鹿島港

(1) 観測条件

観測地点は図-7に示す港内2地点、港外1地点である。観測期間は1975年1月の約20日間である。

(2) 観測結果

港内測定の港外波高に対する増幅率を図-8に、相互相関特性を表-4に示す。

(3) 観測値と数値計算結果の比較

鹿島港の港内地点での応答曲線を図-8に示す。計算条件は、外洋波は港口に直角に入射し、外洋の水深はM法で24m、L法で15m、港内水深はM法では実際の

の水深を、L法では15mとし、解析領域はM法では内部領域を87、境界を92に分割し、L法では境界を139に分割し、港口の位置が両法で若干異なる。

観測による50分の共振周期はM

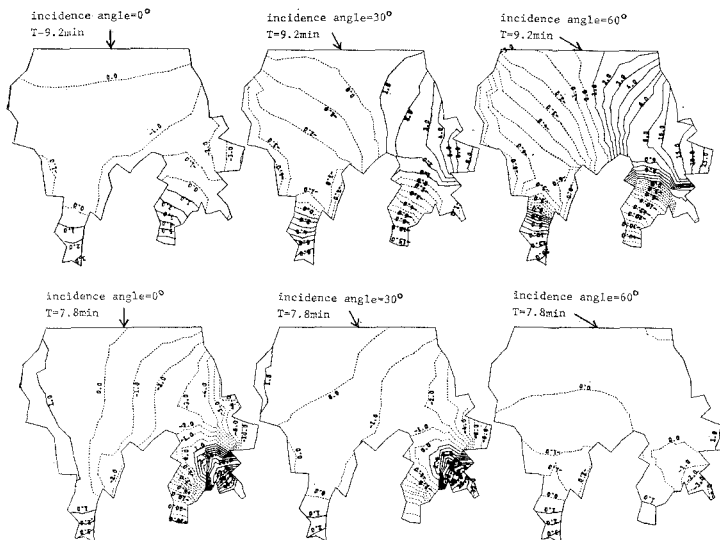


図-6 入射波向と共振モード(釜石・両石湾)

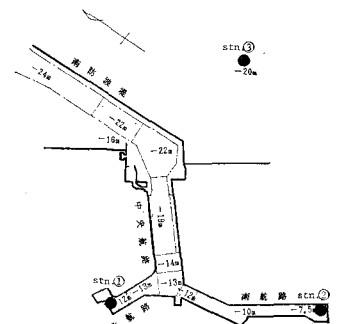


図-7 鹿島港観測位置図

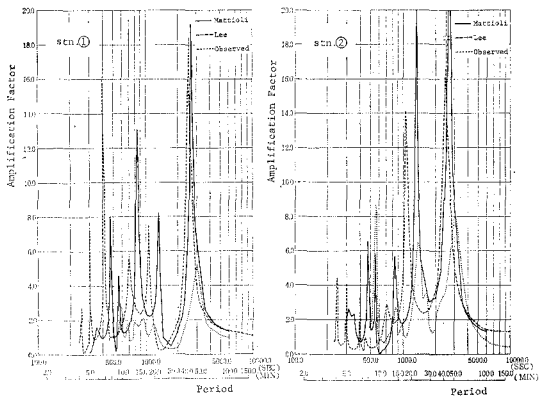


図-8 応答曲線の観測値と計算値の比較(鹿島港)

表-4 港内水位変動の相互相関特性
(鹿島港)

共振周期(分)	相互相関特性			
	stn. ③-stn. ①	stn. ①-stn. ②		
50.0	0.8 同位相	0.9 同位相		
22.5	0.1 逆位相	0.8 逆位相		
14.2	0.1 90°	0.8 逆位相		
9.2	0.1 同位相	0.5 同位相		

法で44.8分, L法で41.1分を示し, 共振モードは港口から南航路に沿う1次モードと考えられ, 各観測点の同位相関係と一致した。

観測による22分の共振周期はM法で22.2分, L法で17.8分であり, 共振モードは港口から南航路に沿う2次モードと考えられ, 港外と stn. ①, stn. ①と②の逆位相関係と一致した。

観測による14分の共振周期はM法で14分, L法で11.6分であり, 共振モードは港口から南航路に沿う3次モードと考えられ, 港外と stn. ①の90°の位相差, stn. ①と②の逆位相関係と一致した。

観測による9.2分の共振周期はM法で9.2分を示すが, L法では明確にみられない。共振モードは北航路と南航路に沿う2次の横振動モードと考えられ, stn. ①と②の同位相関係と一致した。

以上のように, 共振周期は観測値とM法が良く一致し, L法は短周期側に若干ずれており, 増幅率の相対的な大小関係も観測値とM法が良く一致した。また, 9.2分の横振動はL法では見られず, 港口部から中央航路に

かけての水深の評価の差によるものと考えられる。

4. 結 語

本稿では, 任意形状, 不等水深の湾の副振動を解析する Mattioli の手法の適用性について, 実際の港湾における観測結果および Lee の手法との比較を通じて検討してきた。この結果明らかになった主要な事項は以下のとおりである。

- 1) Mattioli の手法により, 共振周期はかなり高次のモードまで解析が可能であり, 増幅率は絶対値に誤差は生じるが, 各共振周期間の増幅率の相対的な大小関係は解析可能である。
- 2) Lee の手法により, 仙台新港のような水深変化が比較的小さい湾の共振周期の解析は可能であるが, 釜石・両石湾のように水深変化が大きい湾の一次より高次の共振周期の解析は誤差が大きく, 適用に際し問題がある。
- 3) 開口部が相対的に大きい湾における高次モードあるいは局所的な振動モードでは, 侵入波の波向によって副振動特性に変化が生じ, 極端な場合には共振現象が消滅する。

今後は観測データの蓄積をさらに進めるとともに, 数多くみられる複数の開口部を有する港湾の副振動解析手法について検討していく予定である。

最後に本稿作成にあたり, 貴重な御助言を頂いた運輸省港湾技術研究所 高山知司波浪研究室長に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大村哲夫・福代倫男・藤田靖紀・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, pp. 49~53, 1981.
- 2) 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, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 178~182, 1982.
- 3) J. J. Lee: Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, Jour. of Fluid Mech., Vol. 45, No. 2, pp. 375~394, 1971.
- 4) F. Mattioli: Wave-induced oscillations in harbours of variable depth, Computers and Fluids, Vol. 6, pp. 161~172, 1978.
- 5) F. Mattioli and S. Tinti: Wave-induced oscillations in large-mouthed harbours, NUOVO CIMENTO, Vol. 1C, N. 1, pp. 18~30, 1978.