

苫小牧西港における副振動特性について

小谷野喜二*・数 土 勉**・宮地陽輔***

1. ま え が き

苫小牧西港のように外洋に面した細長い水路を持つ掘込み港湾においては、港内に進入する長周期波のうち、港の固有振動周期と一致した周期を持つ波が港内で増幅される副振動と呼ばれる現象が誘発されやすい。副振動の振幅が大きい場合、係留中の船舶は動揺し、係留ロープの切断や船舶と構造物の接触等により荷役作業の障害などの問題が生じる。このため、港内の静穏度を評価する上で、副振動の特性を明らかにすることが非常に重要である。副振動については、従来よりいくつかの仮定のもとに行う理論計算手法が提案され、これにより共振モード、周期、増幅率等の応答特性を求めることが可能である。しかし、これらの値は必ずしも実測値とは一致せず、このため理論計算の妥当性及適用性、さらに差違が生ずる原因等に関する研究が進められている¹⁾。また、副振動を誘発する長周期波の発生原因や伝播機構等についても、いくつかの研究がある²⁾。

本報では、苫小牧西港の副振動特性を明らかにするために、共振モード等の応答特性を求める理論計算手法のうち Lee の手法³⁾と Mattioli の手法³⁾の2つを用いて、計算値による副振動特性について検討した。また、港内の数地点における水位観測より得られた実測による副振動特性と計算値とを比較することにより、上記理論計算手法の再現性等を確認した。さらに、副振動が顕著に現れている期間の天気図と気圧変化を調べることにより、気象条件との対応関係についても検討した。

2. 調査概要

水位の観測は、図-1 に示した6地点で行った。このうち St. 1~St. 5 には水圧式の水位計を設置し、検潮所では既設のフース型検潮儀を用いて、昭和60年12月5日から昭和61年2月17日までの約2か月半にわたり観測を行った。観測記録は、全地点とも記録紙にアナログデータとして記録する方式のもので、これからデジタイ

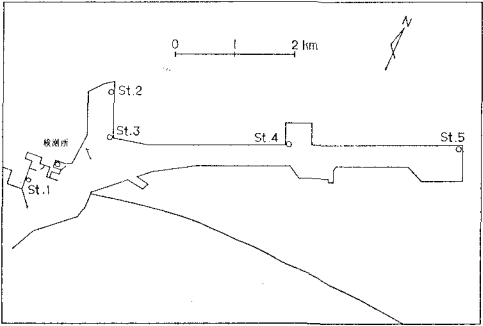


図-1 調査位置

表-1 解析期間

ケース	解 析 期 間
1	昭和60年12月 8日 4時~ 9日 6時
2	昭和60年12月 9日15時~10日17時
3	昭和60年12月21日13時~22日15時
4	昭和60年12月30日 9時~31日11時
5	昭和61年 1月 1日12時~ 2日14時
6	昭和61年 1月15日 3時~16日 5時
7	昭和61年 1月29日15時~30日17時

ザを用いて水位を読み取り、以後の解析を行った。なお、読み取り時間間隔は、St. 1~St. 5 については72秒、検潮記録については90秒とした。また、解析には観測期間中特に顕著な副振動が発生している期間を選び、各々26時間分のデータを用いて7ケースを対象とした。表-1にその期間を示す。気圧の観測は、検潮所付近で行い、円筒振動式気圧計により毎偶数正時の値を得た。

3. 副振動特性について

(1) 観測結果の解析

図-2 は、解析の対象とした7ケースのうちケース1について水位変動記録を示したものである。図を見ると、St. 5 において最大50cm程度の副振動が現れていることがわかる。この記録を用いてスペクトル解析を行うことにより副振動特性を検討した。スペクトル解析においてパワースペクトルはMEMにより、クロススベ

* 正会員 北海道開発局 苫小牧港湾建設事務所
** 正会員 北海道開発局 港湾部港湾計画課
*** 正会員 工修 北海道開発局 苫小牧港湾建設事務所

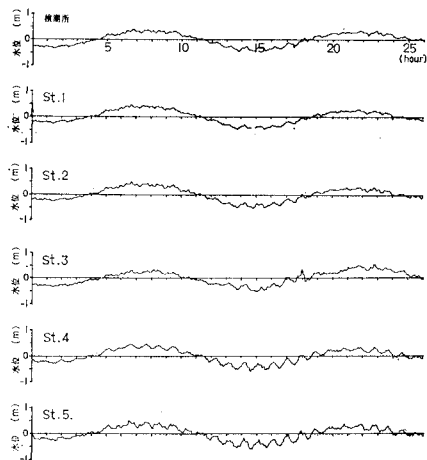


図-2 水位変動記録 (ケース1)

クトル (コヒーレンス, フェイズ) は FFT 法により求めた。図-3 は、1例としてケース1の St. 5 におけるパワースペクトル、St. 1 と 5 のコヒーレンス及びフェイズを示したものである。図には副振動と考えられる3つのスペクトルピークが現れている。他の地点、ケースにおいても、この周期範囲ではおおむね3つのピークが現れている。表-2 は、これら3つのピークについて地点ごとに周期と位相を、表-3 は、各ピークの平均的な位相関係を示したものである。表中の位相を示す記号で + と +、- と - は同位相、+ と - は逆位相であることを示す。

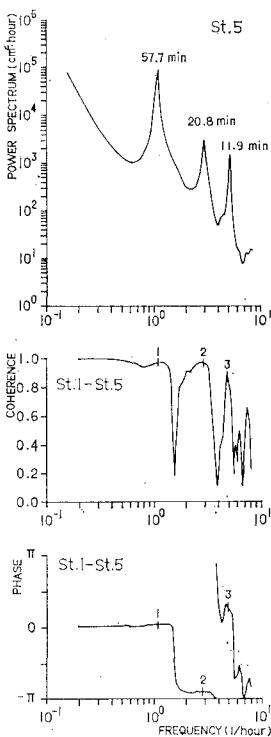


図-3 観測値の解析結果 (ケース1, St. 5)

これらの結果より、次のことがわかる。

① 苫小牧西港の副振動により3つの顕著なスペクトルピークが現れ、第1ピークは50~70分、第2ピークは20~22分、第3ピークは11~12分程度の周期を持つが、第1ピークはケースごとの変動が大きく、港口部で港奥部に比べて長めの周期が現れているケースがある。

② 第1ピークの振動は全ケースとも全地点で同位相であり、港奥部のパワースペクトルの方が大きいことから、港口を節とする単節モードと考えられる。第2ピー

表-2 観測値による共振周期

ピーク	ケース	共振周期 (分)											
		St. 1		観測所		St. 2		St. 3		St. 4		St. 5	
		周期	位相	周期	位相	周期	位相	周期	位相	周期	位相	周期	位相
1	1	57.7	+	57.7	+	57.7	+	57.7	+	55.6	+	57.7	+
	2	57.7	+	55.6	+	55.6	+	55.6	+	55.6	+	53.6	+
	3	70.9	+	70.9	+	70.9	+	62.4	+	70.9	+	67.8	+
	4	62.3	+	60.0	+	53.6	+	50.4	+	52.2	+	52.2	+
	5	67.8	+	67.8	+	53.6	+			50.4	+	50.4	+
	6	57.7	+	55.6	+	55.6	+	57.7	+	53.6	+	55.6	+
	7	60.0	+	55.6	+	55.6	+	57.7	+	53.6	+	55.6	+
2	1	21.0	+	20.8	+	20.8	+	20.5	+	22.0	-	20.8	-
	2	20.8	+	20.8	+	20.5	+	19.5	+		-	21.1	-
	3	21.7	+	21.4	+	21.1	+	21.3	+	22.0	+	21.4	-
	4	22.6	+	22.3	+	22.0	+	24.0	+	22.0	-	22.3	-
	5	21.1	+	21.1	+	20.8	+			21.1	-	21.1	-
	6	21.1	+	20.5	+	20.5	+	20.5	+	20.8	-	20.3	-
	7	21.1	+	20.8	+	21.7	+	20.5	+	21.1	-	20.8	-
3	1	12.3	+	11.8	+	11.7	+	12.6	+	11.9	-	11.9	+
	2	12.3	+	11.7	+	11.0	+	11.2	-	11.6	-	11.4	+
	3	12.0	+	11.8	+	11.7	+			11.8	+	11.5	+
	4	12.1	+	11.7	+	11.3	+	11.1	-	11.8	-	11.5	+
	5	12.0	+	11.7	+	11.4	+			11.7	-	11.6	+
	6	12.0	+	11.0	+	11.7	+	11.6	-	11.8	-	11.8	+
	7	12.3	+	11.8	+	11.1	+	11.8	+	11.7	-	11.7	+

表-3 地点間の位相関係

モード		St. 1	観測所		St. 2	St. 3		St. 4		St. 5
		A	B	D	C	E	F	G	H	I
単節	観測値	+	+	+	+			+		+
	計算値	+	+	+	+	+	+	+	+	+
双節	観測値	+	+	+	+	+		節		-
	計算値	+	+	+	+	+	+	節	-	-
3節	観測値	+	+	+		±		-		+
	計算値	+	+	+	+	節	-	-	節	+

クの振動は St. 4 のパワースペクトルが極端に小さく、この点を境に逆位相となっていることから、港口と St. 4 付近を節とする双節モードと考えられる。第3ピークの振動は St. 2 と 3 あるいは St. 3 と 4 の位相が逆になっていること、また St. 4 と 5 の位相が逆になっていることから、港口及び St. 3 付近、さらに St. 4 と 5 の間を節とする3節モードであると考えられる。

(2) 理論計算による副振動解析

Lee の手法と Mattioli の手法を用いた理論計算により、苫小牧西港における副振動特性について検討した。Lee の手法は、一定水深の任意の港形に対して、非回転、非圧縮の条件のもとに波動関数を導入し、微小振幅波理論により Helmholtz 方程式を解いて波動関数を求め、増幅率を計算するというものである。また、Mattioli の手法は、任意水深かつ任意の港形に対して、Lee の手法と同様の仮定のもとに長波近似によって2次元の

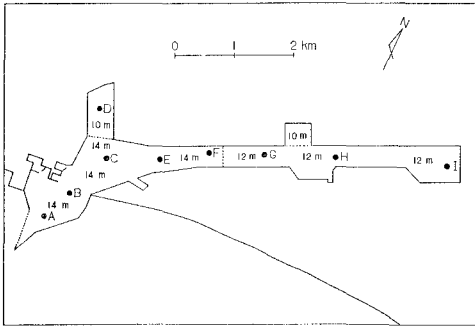


図-4 計算地点及び水深

Helmholz 方程式を解くというものである。

図-4 は、港内の水深及び実測値と比較するための増幅率計算地点 (A～I 地点) を示したものである。図に示したように、苫小牧西港港内は水路の中央付近から港口側が水深 14m、港奥側が水深 12m とステップ状になっている。このため、Lee の手法では水深を 12m と 14m の 2 ケース想定し、さらに実測水深を用いる Mattioli の手法の計 3 ケースについて計算した。なお、以下からは各ケースを L-12、L-14 (合わせて L)、M と略記する。表-4 に各ケースの計算条件を示す。

図-5 は、上記の 3 ケースのうち L-12 について、I 地点の応答特性を示したものである。図中には 3 つのピークまで示したが、増幅率の分布と位相関係を見ると各

表-4 計算条件

手 法	Lee		Mattioli
ケース名	L-12	L-14	M
水 深	12m	14m	実 際 の 値
境界分割数	76		75
開口部分割数	2		
港内メッシュ数	79		
メッシュ間隔	218.66m		
港の特性長	7550.0m		
計算波数	$k = 0.00004 \sim 0.00094 (1/m)$ の 69 波数		

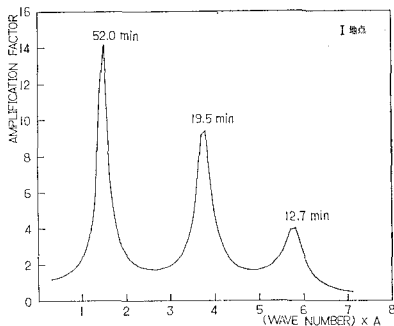


図-5 計算による応答特性 (L-12)

表-5 計算による共振周期

手 法	共 振 周 期 (分)		
	Lee		Mattioli
	水深 12m	水深 14m	
単 節	52.0	48.0	52.0
双 節	19.5	18.3	20.5
3 節	12.7	11.9	13.0

表-6 計算による増幅率

モード	手法	St.1		St.2		St.3		St.4		St.5
		A	B	D	C	E	F	G	H	I
単 節	L-12	1.0	1.5	2.2	2.1	3.0	3.5	4.1	4.8	5.7
	L-14	1.0	1.5	2.2	2.1	3.0	3.5	4.1	4.8	5.7
	M	1.0	1.6	2.1	2.1	2.8	3.1	3.6	4.2	4.7
双 節	L-12	1.0	1.7	2.3	2.0	1.9	1.5	0.9	1.3	3.9
	L-14	1.0	1.7	2.3	2.0	1.9	1.5	0.9	1.3	3.9
	M	1.0	1.6	2.3	2.0	1.8	1.3	0.8	1.2	3.6
3 節	L-12	1.0	1.7	2.3	1.8	0.1	1.2	1.8	0.8	2.1
	L-14	1.0	1.7	2.3	1.8	0.1	1.2	1.8	0.8	2.1
	M	1.0	1.6	2.5	1.6	0.2	1.3	1.8	0.8	2.4

々水路長手方向の単節、双節、3節モードの振動であることがわかる。表-5 に各モードの共振周期を、表-6 に各モードの増幅率を示す。地点間の位相関係は、表-3 の計算値の欄に示した。なお、増幅率はA地点を基準 (1.0) として示した。また、位相関係は各ケース同一である。表-3 中の記号は前記の通りである。これらの結果から各ケースを比較すると、次のことがわかる。

① 共振周期については、L-12 と L-14 では水深の大きい L-14 の方が波速を大きく見積るため短くなっているが、L-12 と M が近い値を示している。

② 増幅率については、いずれの手法でも高次モードになるに従い小さくなっている。また、L と M では M の方が若干増幅率が小さくなっている。この傾向は低次のモードほど顕著で、このため L の方が M より高次モードでの増幅率の低下が大きくなっている。

③ 各モードの腹と節の位置関係については、手法によらず一定である。

(3) 観測結果と理論計算の比較

共振周期については、単節モードの特に港口付近で 60～70 分と計算値の 50 数分と比べると長めの周期が現れているケースがある。しかし、双節モードでは M が観測値とよく一致し、3節モードでは L-14 がよく一致している。計算と実測の違いについては、計算の境界条件の相違などが考えられるが、双節、3節モードでの対応に対して単節モードでの共振周期が特に異なるため、港外を含むマクロスケールの振動について検討した。苫小牧海域は、海底地形が沖合 25～30 km にかけて陸棚を

形成している。そこで、この陸棚セイシュを対象とし、その単節モードの周期を計算した結果を示したのが表-7である。

これを見ると、ほぼ観測結果と一致していることがわかる。60~70分周期の長周期波の原因を明確にするためには、さらに港外での観測等も必要であるが、以上のことから苫小牧西港の共振周期は、長周期側から50数分、20分、12分の3つの顕著なモードが存在するものと考えられる。さらに、理論計算の適用性については、Mは水深を任意に与えられるだけ汎用性があるが、本港のように比較的単純形状で一定水深に近い場合には、浅めの水深を設定すれば、固有周期の算定に関しては、Lでもかなり再現性があるものと考えられる。

表-8 観測値による増幅率

ピーク	ケース	St.1	検測所	St.2	St.3	St.4	St.5
1	1	1.0	1.3	1.4	1.7	2.5	2.8
	2	1.0	1.3	1.5	1.4	2.5	2.6
	6	1.0	1.5	1.6	1.6	2.8	3.1
	7	1.0	1.3	1.4	1.4	2.2	2.7
2	1	1.0	1.3	1.7	1.5	0.3	1.8
	2	1.0	1.1	1.6	1.4	0.4	1.5
	6	1.0	1.3	2.0	1.5	0.6	1.8
	7	1.0	1.2	1.4	1.7	0.3	1.7
3	1	1.0	0.7	0.9	1.0	2.2	2.5
	2	1.0	0.4	0.8	0.4	1.3	1.4
	6	1.0	0.4	1.1	1.1	2.1	2.3
	7	1.0	0.8	1.2	1.9	1.6	1.7

増幅率は、今回は港外の水位観測を行っていないので St. 1 (A地点) を基準に示した。表-8は、観測値についてパワースペクトルの比の平方根を増幅率と定義して示したものである。ここでは、陸棚セイシュの現れていない4ケースの結果のみを示した。これと表-6を比較すると、どのモードでも計算値の方が大きめの値を示しており、この傾向は低次モードの方が大きく、またLの方が大きい。これは、計算上の境界条件や仮定が実際のものと異なること、さらに局所的なエネルギー損失があることなどが考えられるが、相対的な傾向はほぼ一致していると思われる。

共振モードについても、表-3に示したように計算値と観測値はよく一致し、3節モードの St. 3 と 4 の間の節の位置は計算によりE点付近であると推定することができる。本港のように細長い港湾では、3節モードま

表-7 陸棚セイシュの周期

方 向	SSW	S	SSE
平均水深 (m)	80	80	75
距 離 (km)	26	25	30
周 期 (分)	61.9	59.5	73.8

ではモードが明確なため L, M とも同位相を示しており、モードの推定に関しては両者とも有効であると考えられる。

4. 副振動の発生と気象条件について

宇野木²⁾は、外洋における長周期波の発生原因の1つとして微気圧変動を上げている。また、梶浦ら²⁾は、長崎港において微気圧変動による長周期波の発生を定量的に検討している。本報では、副振動が常に有意な大ききで発生しているわけではないことから、副振動ひいては長周期波の発生原因を明らかにするために、昭和60年度の検潮記録から顕著な副振動発生期間と天気図との比較を行った。合わせて、副振動の観測期間中の気圧変動との関係も検討した。

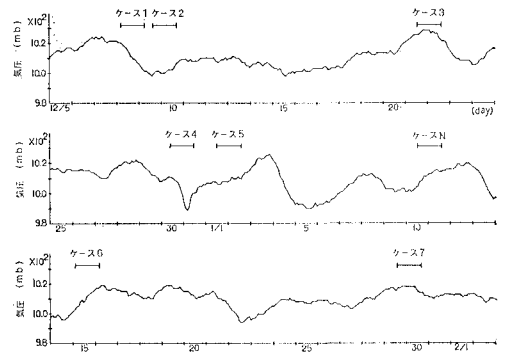


図-6 気圧変動

図-6は、観測期間中の気圧変動を示したものである。図中には解析の対象とした7ケースの期間も同時に示した。これを見ると、比較的顕著な副振動の発生した7ケースの時期は、気圧変動が極小を示している部分の前後が多いことがわかる。このことから、副振動の発生は低気圧の通過と対応しているものと考えられる。検潮記録による昭和60年度中の副振動の発生と天気図の比較によりそのことが特徴として明らかである。つまり、顕著な副振動の発生38回中、低気圧の通過を伴うものは28回であった。

しかし、副振動の発生は低気圧の通過のみで説明するには不十分であると考えられる。

図-7は、図-6に示したケースNでの St. 5 におけるパワースペクトルである。図には

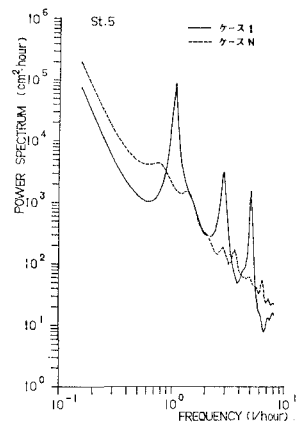


図-7 パワースペクトルの比較

ケース1の場合も同時に示したが、ケースNは低気圧の通過後でありながら明らかに顕著な副振動は発生していない。このことから単に低気圧の通過のみではなく、気象条件として気圧配置も考慮する必要があるものと考えられる。副振動の発生時期の気象状況の特徴をまとめると、次のようになる。

- ① 低気圧が日本海側を北上する。
- ② 低気圧が苫小牧沖を日本海側から太平洋側に横断する。
- ③ 低気圧が日本海側に停滞する。

これらの時の副振動の振幅については、①が最も大きく順に②、③となっている。また、頻度についても同じ順序となっている。これらのことから、副振動は比較的気象の変動が大きい時に発生しているものと考えられる。したがって、苫小牧西港においては、季節別には夏や冬よりも比較的天候の変動しやすい春や秋の方が副振動の発生が多いものと考えられる。

5. あとがき

本報では、苫小牧西港における副振動特性について検討してきた。この結果 Lee と Mattioli の理論計算は、共振周期と位相については再現性があることが確認された。しかし、増幅率については定量的に評価する上ではエネルギー損失等も考慮する必要があると考えられる。

また、副振動の発生と気象条件との関係をより確かなものにするためには、今後、より長期の観測が必要である。これにより、季節ごとの発生頻度等も明らかになる

ものと考えられる。さらに、港外の水位観測と合わせて微気圧変動等の気象要素も観測することにより、長周期波の発生から苫小牧西港までの伝播、変形等の機構を明らかにすることも必要である。これによって、港内への波の進入状況を明らかにし、計算へ適用することにより、計算方法の再現性が増すものと考えられる。

最後に、本研究中の現地観測及び数値解析を行うに当たっては、北日本港湾コンサルタントの桑原伸司氏の格別のご協力があったことを記して、深謝する。

参 考 文 献

- 1) たとえば、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. 138～142，1983。
- 2) たとえば、Hibiya, T. and K. Kajiura: Origin of the Abiki Phenomenon (a Kind of Seiche) in Nagasaki Bay, Jour. of Oceanogr. Soc. Japan, pp. 172～182, Vol. 38, 1982.
- 3) Lee, J. J.: Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, Jour. of Fluid Mech., Vol. 45, No. 2, pp. 375～394, 1971.
- 4) Mattioli, F. and S. Tinti: Wave-induced oscillations in large-mouthed harbours, IL NUOVO CIMENTO, Vol. 1C, No. 1, pp. 18～30, 1978.
- 5) Mattioli, F.: Wave-induced oscillations in harbours of variable depth, Computers and Fluids, Vol. 6, pp. 161～172, 1978.
- 6) 林 直樹・高橋秀彰・山本政光：外海における長周期波の観測，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 14～17，1978。
- 7) 宇野木早苗：港湾のセイシュと長周期波について，第6回海岸工学講演会講演集，pp. 1～11，1959。
- 8) 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所：苫小牧港港内副振動調査業務報告書，1986。