

# 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——

山田 尚人\*・山本 修司\*\*・細川 泰広\*\*\*・後 藤 寿\*\*\*\*

## 1. 緒 言

外洋に面した掘込港湾や細長い湾などでは、「副振動」あるいは「セイシュ」と呼ばれる現象が生じることがあり、港湾の計画や管理の上で配慮すべき事柄となっている。これまで副振動およびその主因となる長周期波については種々の研究が行われてきているが、未だ不明確な点も多い。特に、副振動については、理論解析モデルがいくつか提案されているが、観測データと比較して現地港湾への適用性について検討した例は少ない。こうした観点から、前報<sup>1)</sup>では仙台新港の内外2地点で長周期波の観測を行って副振動特性を把握するとともに、Jiin-Jen Lee の副振動解析理論<sup>2)</sup>について検討を行った。しかし、港内の観測地点が1ヶ所であったため、振動モードについて十分な検討が行えなかった。このため、昭和56年度は港内地点と港口1地点に観測地点を増やして長周期波の観測を行うとともに、Lee の理論の適用性について検討を行った。さらに、大船渡港、釜石・両石湾についても、長周期波観測結果をもとに Lee の理論の検討を行った。

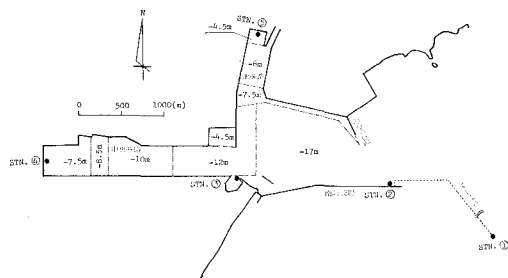
Lee の理論は、等水深湾という制約があるものの、適用上簡便であるため、その適用性および適用上の問題点を明らかにすることは、港湾計画や副振動対策を策定する上で意義あることと考えられる。

## 2. 長周期波の観測と Lee の理論の適用性の検討

### 2.1 仙台新港

#### (1) 現地観測の概要

観測地点は、図-1 に示すように港内3地点、港口1地点、港外1地点の計5地点である。観測計器は、港外の約2.7 km 沖に設置された超音波型波高計および港口を含む港内4地点に設置された水位計であり、これにローパスフィルターを通して周期200秒以上の長周期波を収



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 - ① |     | STN. ② - ⑤ |     | STN. ④ - ⑤ |     |
| 26~30    | 1.0        | 同位相 | 1.0        | 同位相 | 1.0        | 同位相 |
| 12~15    | 1.0        | 逆位相 | 0.8        | 同位相 | 0.8        | 逆位相 |
| 6~7      | 0.8        | 同位相 | 0.9        | 逆位相 | 0.8        | 同位相 |
| 5.5      | ~0.7       | ?   | ~0.7       | ?   | ~0.8       | ?   |

7~8分, 5.5分前後の4個の特徴的な振動モードが得られ, この時の各観測地点での水位変動の相互相関特性は表一に示すとおりである. 港内の副振動については, 次のように推察される.

#### a. 周期26~30分

STN. ②, ④, ⑤の間のコヒーレンスもほぼ1.0と極めて良好な値を示し, 各地点ともパワースペクトルにピークが認められる. パワースペクトルのレベルは, STN. ④, STN. ⑤, STN. ②の順で高くなり, 湾奥での増幅が大きいの. また, 3地点での位相差はほとんどなく, 港内で同位相を示している. このことから, 中央航路に沿った単節モードの振動を示しているものと考えられる.

#### b. 周期12~15分

この周期帯域では, コヒーレンスも比較的良好であり, STN. ②とSTN. ⑤で同位相, STN. ②とSTN. ④およびSTN. ④とSTN. ⑤で逆位相を示し, STN. ④のパワースペクトルが最も高い. このことから, 中央航路に沿った双節モードの振動を示しているものと考えられる.

#### c. 周期6~7分

この周期帯域のコヒーレンスも比較的良好であり, STN. ⑤のパワーレベルが最も高く, STN. ②とSTN. ⑤で逆位相, STN. ④とSTN. ⑤で同位相を示す場合が多い. このことから, この周期帯域は北航路に沿った双節モードの振動を示しているものと考えられる.

#### d. 周期5.5分前後

コヒーレンスはあまり良くないが, STN. ④のパワーレベルが高く, STN. ②とSTN. ④で同位相を示す場合もいくつか見られ, 中央航路に沿った振動系が示唆

される.

港内各地点での増幅率は, 港内外のパワースペクトルの比の平方根  $\sqrt{P_i(\sigma)/P_o(\sigma)}$  ( $P_i(\sigma)$ : 港内各地点でのパワースペクトル,  $P_o(\sigma)$ : 港外のパワースペクトル) で定義する. こうして得られた日毎の増幅率について, その特性をより明確にするために, その地点でのパワースペクトルで加重平均した月平均増幅率  $\bar{R}_i(\sigma)$  を用いた.

$$\bar{R}_i(\sigma) = \frac{\sum_{m=1}^M (P_{i,m}(\sigma) \sqrt{P_{i,m}(\sigma)/P_{1,m}(\sigma)})}{\sum_{m=1}^M P_{i,m}(\sigma)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに,  $P_{i,m}(\sigma)$ : STN. ④における  $m$  日目のパワースペクトル,  $M$ : 各月における欠測を除いた延べ日数である. 港内3地点における日平均増幅率を図一3に点線で示した.

### (3) 理論値と観測値の比較・検討

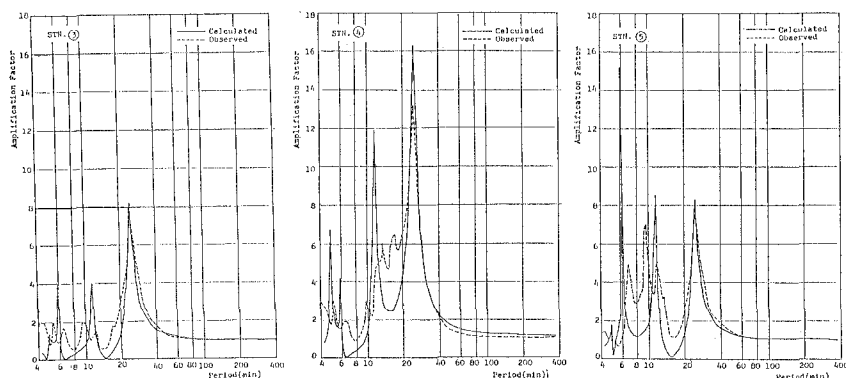
仙台新港の共振モードを Lee の理論で解析した結果を図一4に示す. また, 港内3地点での応答曲線を図一3に実線で示す. なお, 計算に用いた水深としては, 水面下の容積を水面積で除した平均水深  $\bar{h}=12.52$  m であり, 境界分割数  $N=97$ , 湾口分割数  $P=2$  である.

図一3より, 増幅率がピークを示す共振周期については, 両者若干のずれはあるものの良く一致していると言える. しかし, 増幅率については, 1次のピーク (周期24.5分) は良く一致しているものの, 全般に理論値の方が過大である. 次に, 仙台新港の共振モード特性について, 観測結果と理論計算結果をもとに検討を行う.

#### a. Mode-L<sub>1</sub>

これは, 中央航路に沿った単節モードの振動であり, Lee の理論では周期 24.5 分である. 港内地点間の相互相関解析で見られた周期 25~30 分程度での良好なコヒーレンス, 港内での同位相, STN. ④に向かってのエネルギーレベルの増大傾向はこの振動モードを示している. 月平均増幅率では周期 25 分付近の顕著な極大がこのモードに相当していると考えられる.

#### b. Mode-L<sub>2</sub>



図一3 振幅増幅率の観測値と理論値の比較 (仙台新港)

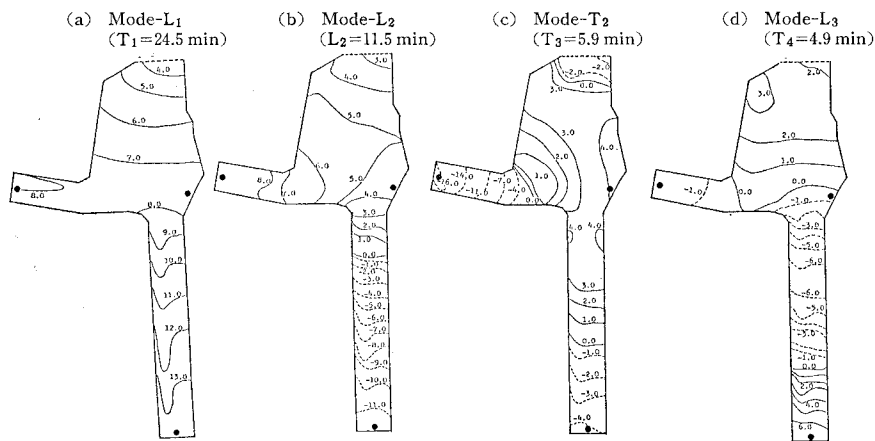


図-4 仙台新港の共振モード図(実線: 港外水位と同位相, 破線: 逆位相)

これは中央航路に沿った双節モードの振動であり, Lee の理論では周期 11.5 分である。港内地点間の相互相関解析で見られた周期 12~15 分程度の振動がこれに対応している。月平均増幅率での周期 13 分前後の極大がこの振動モードに相当すると考えられる。

#### c. Mode-T<sub>2</sub>

これは北航路に沿った双節モードの振動であり, Lee の理論では周期 5.9 分に相当する。港内地点間の相互相関解析で見られた周期 6~7 分の振動がこれに対応していると考えられる。月平均増幅率での周期 7 分前後の極大は, STN. ⑤で顕著で STN. ④であまり大きくないことからこのモードの振動を示していると考えられる。

#### d. Mode-L<sub>3</sub>

これは, 中央航路に沿った三節モードの振動であり, Lee の理論では周期 4.9 分に相当する。港内地点間の相互相関解析では明確な傾向は認められないが, STN. ④のエネルギーレベルが高く, STN. ②と STN. ④で同位相を示す場合がみられる周期 5 分前後がこれに相当しているものと考えられる。月平均増幅率で特に STN. ④に見られる周期 5 分前後の極大がこのモードに相当すると思われる。

以上のように, Lee の理論で計算される共振モードと観測結果は良く対応し, 等水深理論でも仙台新港での副振動の状況を良く説明できることが明らかになった。

## 2.2 釜石・両石湾

### (1) 現地観測の概要

釜石・両石湾はW字型の湾形をしており, 釜石湾はその中でまたいくつかの小さな入江に分かれている。このような形状の湾では種々の振動モードが考えられ, 図-5 に示すような 6 地点で長周期波の観測を行った。観測期間は, 1973 年 11 月上旬から 1974 年 1 月上旬までの 2 ヶ月間と, 1974 年 8 月上旬か

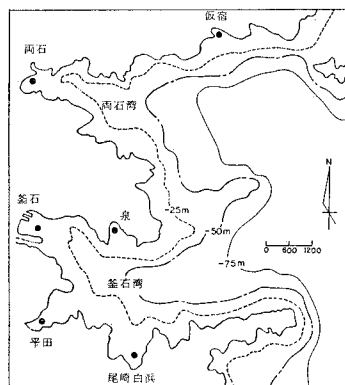


図-5 釜石・両石湾観測位置図

ら 10 月中旬までの約 2 ヶ月間であり, 各観測期間ごとに釜石を必ず含む 3 点 1 組の同時観測を行った。観測計器は, 水圧式波高計を使用し, これとローパスフィルターを組み合わせて周期 3 分以上の長周期波を収録した。

### (2) 理論値と観測値の比較検討

長周期変動が顕著に見られる代表ケースについて, スペクトル解析により共振周期および釜石と各観測地点の水位変動の相互相関特性を求めたものが表-2 である。この結果と図-6 に示す Lee の理論によるモード解析結果と合わせて, 釜石・両石湾の共振モードについて検討する。なお, 計算条件は,  $\bar{h}=48.0$  m,  $N=145$ ,  $P=$

表-2 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 石                    | 平 田                    | 泉                      | 飯 沼     | 両 石     |  |
| 29~32    | 1.0 同位相                | 1.0 同位相                | 1.0 同位相                | 1.0 同位相 | 1.0 同位相 |  |
| 16~18    | 0.9 同位相                | 1.0 同位相                | 1.0 同位相                | 0.5 逆位相 | 0.7 逆位相 |  |
| 9~11     | 0.8 $\approx 90^\circ$ | 0.3 $\approx 90^\circ$ | 0.1 逆位相                | 0.9 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 | 0.4 逆位相 |  |
| 5~6      | 1.0 同位相                | 0.4 同位相                | 0.4 $\approx 90^\circ$ | 0.1 同位相 | 0.3 逆位相 |  |

20 である。

#### a. Mode-L<sub>1</sub>

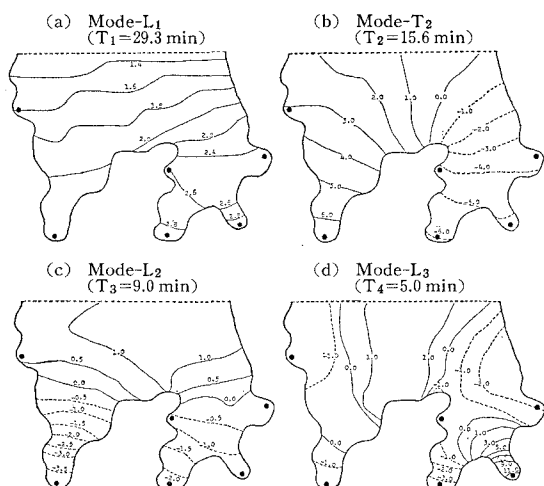


図-6 釜石・両石湾の共振モード図

これは、湾口が節となる単節モードの振動であり、Lee の理論では周期 29.3 分である。観測値に見られた周期 29~32 分の振動は、釜石とのコヒーレンスが良好で、しかも同位相であることからこのモードに対応していると考えられる。

#### b. Mode-T<sub>2</sub>

この振動モードは、2つの湾の境界を節とした双節モードの連成振動であり、Lee の理論では周期 15.6 分である。観測値に見られた周期 16~18 分の振動は、釜石と両石とともにパワースペクトルがピークを示しているとともにコヒーレンスが 1.0 に近く逆位相であることから、このモードに対応していると考えられる。このことは、釜石湾内の白浜、平田、泉でコヒーレンスが強く同位相であるのに対し、両石湾内の仮宿、両石で逆位相となっていることから明らかである。

#### c. Mode-L<sub>2</sub>

この振動モードは、湾口を節とした釜石湾と両石湾の双節モードであり、Lee の理論では周期 9.0 分である。観測値に見られた周期 9~11 分の振動は、釜石と両石でコヒーレンスが強く同位相であること、また釜石と白浜、釜石と仮宿でコヒーレンスが強くそれぞれ逆位相に近いことから、このモードに対応していると考えられる。

#### d. Mode-L<sub>3</sub>

この振動モードは、釜石湾内の釜石と平田を結ぶ軸に沿った双節モードの連成振動が生じているのが特徴であり、Lee の理論では周期 5.0 分である。観測からは周期 5~6 分の振動系が推定されるが、釜石と平田とのコヒーレンスが弱く、明確な結論は出せない。

港外での観測データがないため増幅率については検討できないものの、共振モード特性は Lee の理論で良く説明できるものと考えられる。

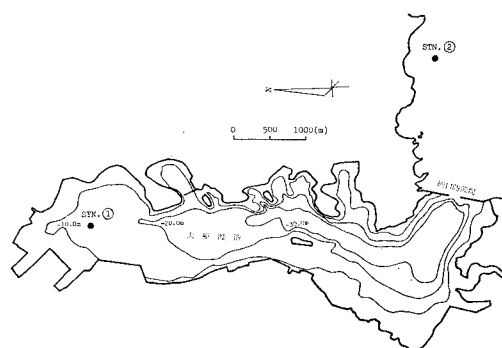


図-7 大船渡港観測位置図

## 2.3 大船渡港

### (1) 現地観測の概要

大船渡港では、昭和 41 年度に竣工した湾口防波堤の効果を把握するために、湾奥部と防波堤の外側に 1 基ずつ津波計が設置され、長周期波の観測が行われている(図-7)。観測計器は 2 基とも水圧式波高計であり、これにローパスフィルターを通して周期 200 秒以上の長周期波を収録した。

### (2) 理論値と観測値の比較検討

今回解析の対象としたのは、1978 年~1981 年の観測データのうち、顕著な長周期振動が発生していると考えられる 5 ケースである。これらのケースについて、共振周期とそれに対応する港内外のコヒーレンス、位相関係を表-3 に示す。Lee の理論により大船渡港

表-3 港内外水位変動の相互相関特性(大船渡港)

| 共振周期 (分) | 相互相関特性  |     |
|----------|---------|-----|
| 40~46    | 0.3~0.6 | 同位相 |
| 15~17    | 0.4~0.8 | 逆位相 |
| 9~11     | 0.7~0.9 | 同位相 |

の共振モードを求めると図-8 に示すように 3 つの振動モードが得られる。なお、計算条件は  $\bar{h}=16.3\text{ m}$ ,  $N=149$ ,  $P=2$  である。観測結果と理論計算結果から大船渡港の共振モードは次のように考えられる。

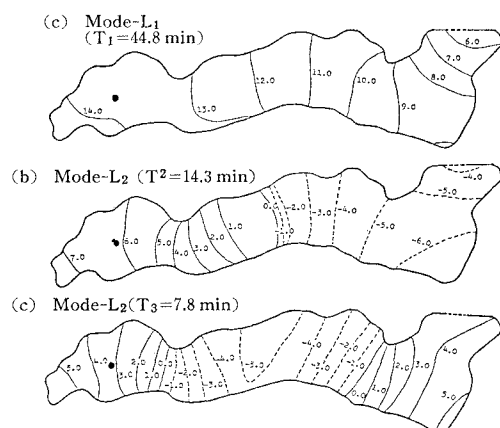


図-8 大船渡港の共振モード図

a. Mode- $L_1$ 

これは、湾軸に沿った単節モードの振動であり、Lee の理論では周期 44.8 分である。観測から得られた周期 40~46 分の振動は、港内のパワースペクトルが最大のピークを示し、コヒーレンスはあまり良くないものの同位相であることから、このモードに対応するものと考えられる。

b. Mode- $L_2$ 

これは、湾軸に沿った双節モードの振動であり、Lee の理論では 14.3 分である。観測から得られた周期 15~17 分の振動は、港内外で逆位相を示していることから、このモードに対応しているものと考えられる。

c. Mode- $L_3$ 

これは、湾軸に沿った三節モードの振動であり、Lee の理論では周期 7.8 分である。観測から得られた周期 9~11 分の振動は、港内外で同位相でコヒーレンスも比較的良好であることから、このモードに対応していると考えられる。

港内の観測が 1 地点でしか行われていないため明確な結論は出せないが、Lee の理論で大船渡港のモード特性を解析することができると考えられる。

## 3. 結 語

以上、本研究では任意形状ではあるが等水深である湾

の副振動を解析する Lee の理論の適用性について、現地港湾での長周期波観測結果に基づいて検討した。この結果明らかになった事柄をまとめると以下のようになる。

- (1) 湾内の水位変動の低次の共振モードは、Lee の理論で十分解析可能である。
- (2) 共振周期については、湾内を一定水深で計算するため数分程度ずれる。
- (3) 増幅率は、理論値が過大に出る傾向がある。これは、Lee の理論では湾口でのエネルギー損失、海底摩擦、砕波等が考慮されていないためであると考えられる。

等水深理論でも実際現象を良く説明できることが明らかになったが、今後は湾内の水深変化も考慮できる理論についても検討を行う予定である。

## 参 考 文 献

- 1) 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，pp. 49~53, 1981.
- 2) J. J. Lee: Wave-induced oscillations in harbors of arbitrary geometry, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 45, No. 2, pp. 375~394, 1971.