

長周期波の観測と解析について (1)

大村 哲夫*・福代 倫男**・蒔田 靖紀***・森谷 誠生****

1. はじめに

外洋に面した掘込港湾などにおいては、周辺の海底地形に応じた長周期波が、気圧、風、潮流、波浪等の種々に変動する外力によって誘発され、進入してくる。この長周期波が主因となり、さらに港内水面に作用する気圧、風圧等によって副振動が発生し、係留中の船舶の動揺、係留ロープの切断等の事態が生じ、荷役、停泊時の安全性が問題となっている。

今日までに、長周期波および副振動について、長崎港、鹿島港等において、検討が行われてきたが、未だ不明確な点も多い。これらの点を解明することは、難題ではあるが、今後の港湾整備を進める上で重大な課題である。

本文は、長周期波の現地観測を行い、その解析を通して、長周期波、および副振動のメカニズムを解明すると共に、Jiin-Jen Lee の副振動プログラムを用いて、副振動の数値解析を行なったものをまとめたものである。

2. 調査の概要

調査は、掘込港湾で、形状が比較的シンプルな、仙台新港(図-1を参照)を対象に、図-2に示すような流れ図に基づいて実施した。

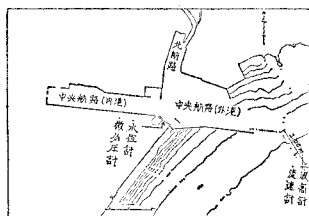


図-1 測器設置状況

(1) 経時変化図の作成

C.M.T. に収録された、港外水位、流速、港内水位、気圧に対して、注目する周期数分以上の長周期成分の変動、およびその平均値の推移を求め、これらを以下の手

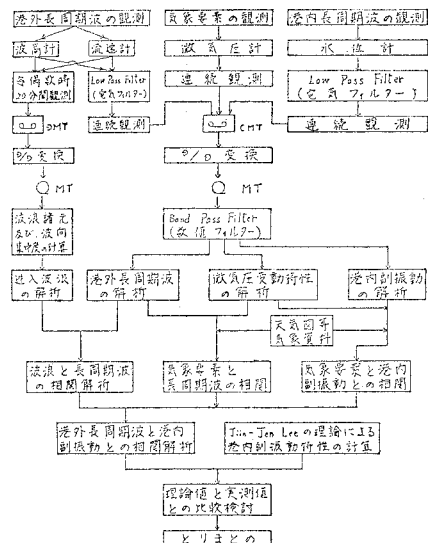


図-2 調査の流れ図

順で経時変化図としてとりまとめた。

- 1分サンプリングのデータ系列の作成
- 欠測データの内そう
- 長周期成分のデータ作成

(b) で得られたデータ系列に 61 分の移動平均をかけ、得られた移動平均値と、(b) で得られたデータ系列から偏差を求め、61 分以上の周期を持つ変動をカットする。

さらに、3 分の移動平均をかけることにより、3 分以内の周期を持つ変動がカットされ、数分から数時間までの長周期波成分が得られる。

(a)~(c) の手順で、経時変化図を作成し、さらに、これら各要素の経時変化にあわせて、当日午前 9 時の地上天気図を載せた。

作成した経時変化図の 1 例を 図-3 に示しておく。

(2) 長周期波の代表例

(1) で作成した経時変化図の中から、数時間にわたって、顕著な長周期波が見られる 15 ケースを抽出し、解析の対象とした。抽出にあたっては、以下の点に注目した。図-4 に 1 例を示しておく。

——注目点——

- 流速変動が顕著なもの。

* 正会員 国土庁計画調整局 特別調整課専門調査官
 ** 正会員 運輸省鉄道監督局 国有鉄道部 施設課 新幹線施設係長
 *** 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所
 **** 日本気象協会東京本部 調査部 主任技師

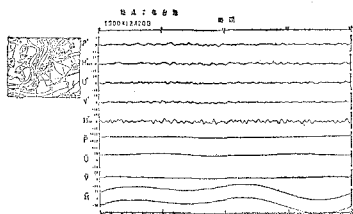


図-3 経時変化図

- (注) $P, \bar{P}$: 気圧の変動値, 平均値 (mb)
 $U, \bar{U}$: 流速東西成分の変動値, 平均値 (cm/sec)
 $V, \bar{V}$: 流速南北成分の変動値, 平均値 (cm/sec)
 H_{out} : 港外水位の変動値 (cm)
 H_{in} : 港内水位の変動値 (cm)
 H : 港内および港外水位の平均値 (cm)

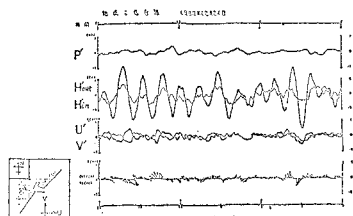


図-4 長周期波の代表例

- (b) 港外波の周期が, 港内での共振周期に近いもの。
 (c) 港内外の水位変動のうち両者の周期が比較的最長いもの。
 (d) 微気圧変動と港内水位変動が比較的对応しているもの。

以上より抽出した代表ケースをながめると, 全体的に次のような傾向が見られる。

- (a) 周期 20 分程度の水位変動では, 港内での増幅が大きい。
 (b) 周期 20 分以下の水位変動では, 港内外で必ずしも同位相を示さない。
 (c) 周期 1 時間近い水位変動では, 港内外で振幅は同程度であり, ほぼ同位相である。この時の流速変動は逆位相のものも, 同位相のものも見られる。
 (d) 気圧変動が頻繁に大きく起こっている場合には, 港内水位の変動も大きいことが多い。
 (e) 流速変動成分は, ほとんどが逆位相である。
 (f) 流速変動が小さくても港内水位変動が, 大きい場合が見られる。
 (g) 今回の観測期間中, 港内水位変動の振幅が最大となったのは 46 cm であったが, 多くは 10~15 cm 程度であった。
 (h) 気圧変動は大きくても振幅 1 mb 程度であった。

3. 港内および港外における長周期波の特性

(1) スペクトル解析の条件

港内, および港外水位の変動分 H_{in}, H_{out} の相関を見

るために, FFT 法 (高速フーリエ変換法) によるスペクトル解析を行い, 各パワースペクトル, および両者のコヒーレンス, フェイズを求めた。解析の対象としたのは, H_{in}, H_{out} が共に欠測でない 43 ケースである。

理論的な増幅率と比較する目的から, 各分割周波数に対する H_{in}, H_{out} のパワースペクトルの値の比の平方根を求めた。スペクトルの各ピークに対してスペクトル相当波高を求めて, 振幅の情報との方が望ましいだろうが, 今回は簡単に前者の方法で港内外の振幅比を示す指標とした。

(2) スペクトル解析結果

図-5 は解析によって求めた, パワースペクトル, および両者のコヒーレンス, フェイズの 1 例である。図示の「 P_{11} 」は港内における水位変動パワーを, 「 P_{22} 」は港

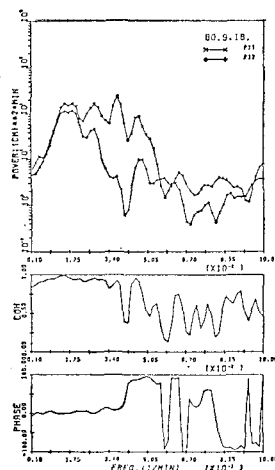


図-5 解析結果

外におけるパワーを示している。以下にそれらの特性を簡単に述べる。

a) 港内外のパワースペクトル

図-5 に見られるように, スペクトルには港内外とも複数個のピークが見られ, そのスペクトルパターンは, 日によって変動するが, 一般的な傾向として次の点があげられる。

- ① 周期 1 時間以上の長周期成分では, 港内外ともほぼ同程度のパワーを示し, これらの周期帯域では, 周期が短くなるにつれてパワーは増大する。
- ② 周期 15 分以上 1 時間以内の成分では, 港外に比べ港内のパワーの方が大きい。港内では, 周期 25 分弱から 40 分前後までに 2~3 個のスペクトルピークが見られる。一方港外では, 40 分前後と 20~25 分にピークが見られるが, 26~30 分付近でパワーが急に落ち込む傾向がある。港外で 20~25 分と見られるピークのパワーは, 40 分前後のピークのパワーに比べ 1/10 程度である。

- ③ 周期 15 分以下 10 分までの成分では、港内外のパワーの大小は日によって異なる。

b) 港内外水位のコヒーレンス、フェイズ

一般に周期 30 分以上の周期帯域では、港内外の両地点におけるコヒーレンスは 1.0 に近く良好な相関を示し、しかも同位相となっている。周期 30 分付近で、コヒーレンスは一度急激に下り逆位相となる。これより高周波側では、コヒーレンスが数ヶ所で良好な値を取ると共に、位相も同位相から逆位相への変動が数ヶ所で見られる。

c) 港内外の振幅比

各分割周波数に対する港内水位変動、港外水位変動のパワーの比の平方根 ($\sqrt{P_{H'}/P_{H''}}$) を、5 日ごとに示した代表例を図-6 に示す。これは前述したように、港

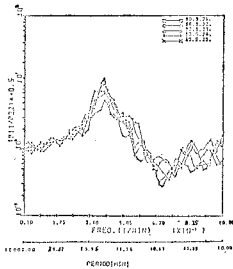


図-6 港内外の振幅比図

内外 2 点の波高比を示す指標と考えられる。これによる周期 1 時間以上の成分について波高比は、ほぼ 1.0 であるがコヒーレンスが急変する 30 分付近にかけてほぼ一様に増大して 10 倍程度にまで達している。一方それより短周期の 15 分付近までは、平均的に減少の傾向が見られるが、この間 20 分付近にピークが現われることもある。

また 15 分より短周期になると数ヶ所でピークが見られるが、平均的には両者の振幅は同程度、ないしは港外側が若干大きくなっている。

4. 仙台新港における副振動の特性

(1) 副振動の数値解析

a) Jiin-Jen Lee の副振動プログラムの理論

形状は任意で良いが、等深の湾を考える。流れは非回転であり非圧縮流体を仮定し、微小振幅波の理論による自由表面の条件を考慮し、波動関数を導入し増幅率、および流速を求めるプログラムである。

上記の条件によると、ラプラス方程式 $\nabla^2\Phi=0$ を満たす速度ポテンシャルは次のように表わされる。

$$\Phi(x, y, z; t) = \frac{1}{i\sigma} \times \frac{A_i g \cosh k(z+h)}{\cosh kh} f(x, y) e^{-i\sigma t}$$

ここで、 σ : 角周波数、 k : 波数、 h : 水深

A_i : 外洋から湾に進入する波の振幅

$f(x, y)$: $x-y$ 方向の速度ポテンシャルの変動を表わす二次元波動関数

$$i : \sqrt{-1}$$

この時、 $f(x, y)$ は次のヘルムホルツ方程式を満たす式とする。

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + K^2 f = 0$$

上式を以下の境界条件のもとに解く。

- (i) 固境界 (海岸線や湾の境界) に沿って $\frac{\partial f}{\partial n} = 0$

(ここで n は境界から外向きの法線方向である。)

- (ii) 湾から無限遠 ($\sqrt{x^2+y^2} \rightarrow \infty$) では、湾の影響が現われない。

また、対象とする領域を湾外、湾内に分け 図-7 に示すように境界を N 個 (湾口の p 個を含む) の直線に分割する。

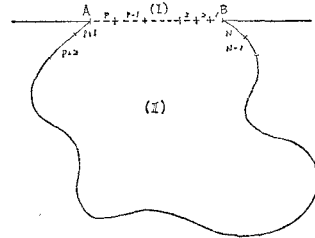


図-7 領域の分割図

これらの理論に基づき、仙台新港について下記の条件で、計算を行う。計算に使用した仙台新港のモデルを図-8 に示す。

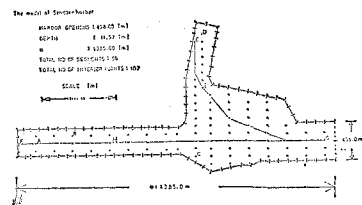


図-8 仙台新港モデル図

——適用条件——

- (i) 平均水深 $\bar{h}=11.52 \text{ m}$
- (ii) 特性長 $a=4385.0 \text{ m}$
- (iii) 境界分割数 $N=96$
- (iv) 湾口分割数 $p=2$
- (v) 波動関数を求めた湾内地点数 $q=107$

b) 仙台新港における副振動数値解析結果

解析結果のうち実際に水位計を設置し位置は、C 点 (図-8) に近いので、図-9 に C 点の応答曲線を示しておく。応答曲線の縦軸は増幅率 R を、横軸は 図-8 に示される湾の代表的長さ a と波数の積 ka なる波数 β

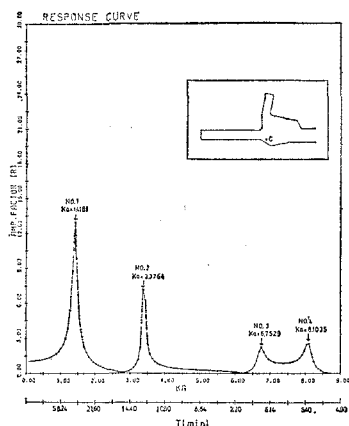


図-9 副振動数値解析結果

ラメータ (港の相対奥行) である。

地点 A, B, C, D (図-8) の応答計算結果, いずれの場合も4つのピークが見られる。ピーク位置は, D地点の No. 4 が若干異なる点を除くと, いずれの場合も周期 30.48, 12.80, 6.40, 5.33 分に見られる。C地点では, 両湾奥に比べピーク位置でも増幅率は小さいが, 両湾奥の応答曲線の特徴的なピークを示している。

次に応答曲線に現われた4つのピークに対応する進入波の波数に対して, 港内の振幅の水平分布を求めた結果より次のような事が考えられる。

- ① 周期 30.48 分の進入波に対しては, 湾口より 350 m 沖合に節を持つ単節モードの振動パターンを示し, F地点で増幅率は最大となり湾口に向かって単調に減少する。
- ② 周期 12.80 分の進入波に対しては, 湾の中央付近と湾口約 100 m 沖合に節が存在し, 水位はF地点で湾口と逆位相, E地点で同位相に変動する。増幅率はF地点で最大である。
- ③ 周期 6.80 分の進入波に対しては, H地点とI地点付近に1本ずつの節が存在する。水位変動は, 湾奥のE, F地点とも湾口と逆位相を示し, E地点で増幅率は最大となるが, F地点では湾口とほぼ同じ振幅を示す。
- ④ 周期 5.33 分の進入波に対しては, H地点, および湾の中央付近に1本ずつ, 湾口より約 100 m 沖合に1本の節が存在する。増幅率はF地点で最大となるが, E地点ではC地点より小さな値となる。

(2) 港内水位記録の解析

港内の長周期波成分 (H_m) を用いて, MEM (最大エントロピー法) によるスペクトル解析を行ない, その特性を調べた。

全日, および 6 時間ごとの港内における水位変動分 (H_m) のスペクトル図の 1 例を 図-10 に, データ長 1

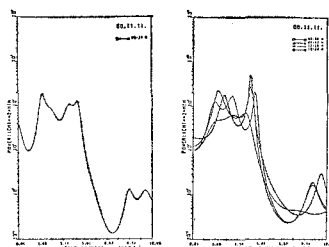


図-10 スペクトル図 (全日, 6 時間ごと)

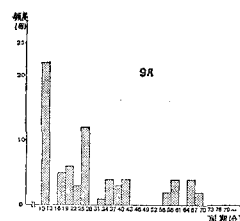


図-11 スペクトルピークの周期階級別度数分布図

日 ($N=1440$, $\Delta t=1$ 分) に対して行ったスペクトル図に表われる全てのピーク周期の頻度を統計した度数分布図を, 図-11 に示す。これらより以下の特性が明らかになった。

- ① パワースペクトルには複数個のピークが現われるが, 特に周期 12 分, 25 分, 60 分前後に顕著なピークを示す場合が多い。
- ② エネルギーレベルは, 周期 20~60 分の範囲で高く, 15 分付近で極小となるパターンを示すことが多い。
- ③ 6 時間ごとのスペクトルパターンは, かなり変動する場合が多く, 誘発された副振動は数時間で消長するようである。また 24 時間のデータを用いてスペクトルを求めても, 6 時間ごとに現われるピークを示す場合が多く, 1 日にわたる平均的なスペクトルパターンを見ることは可能であった。
- ④ スペクトルピークの周期階級別度数分布の形状は, 月による差があまり見られず, 周期 10~13 分, 25~28 分, 22~25 分, 58~61 分の出現回数が多く, 特に全ケースにわたる統計では, これらで 64% を占めた。

(3) 実測値と理論値との比較検討

観測値のスペクトル解析結果に基づき, 周期 30 分程度以下の周期帯域について副振動数値解析結果との比較を行う。

仙台南港の形状特性から基本的な振動パターンとして, 図-8 の FG, EG に沿ったモードが考えられる。これらの共振モードの概念図を, 各方向ごとに 図-12 に示す。

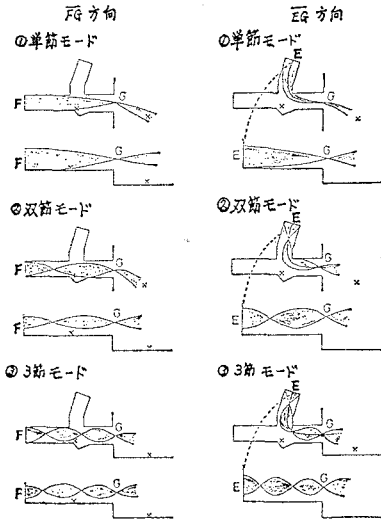


図-12 仙台南港共振モードの概念図

比較検討の結果をまとめると次のような事が言える。

(a) 理論的応答曲線に現われた第 1 のピーク ($T=30.48$ 分) は、仙台南港における $\overline{FG}$ 方向の単節モードの振動パターンを示している。FFT 法によるスペクトル解析に見られる周期 28 分前後のスペクトルピークは、この振動モードに対応していると考えられる。

(b) 一方、応答曲線に現われた第 2 のピーク ($T=12.80$ 分) は、 $\overline{FG}$ 方向の双節モードの振動パターンを示している。FFT 法、MEM 法の結果に現われた周期 10~12 分のピークは、この振動モードに対応していると考えられる。

(c) $\overline{FG}$ 方向の 3 節より高次のモード、 $\overline{EG}$ 方向の双節より高次のモードについては顕著ではない。特に $T=6.40$ 分に対しては、 $\overline{EG}$ 方向の双節モードを、 $T=5.33$ 分に対しては、 $\overline{FG}$ 方向の 3 節モードのパターンであるようだが、今回のスペクトル解析では、FFT 法、MEM 法共周期 10 分で成分波を打ち切っているため、これら

の特徴的なモードを逃している可能性がある。

以上のように、今回の実測結果は、仙台南港の固有振動として $\overline{FG}$ 方向の単節、および双節モードについて理論値と比較した際に、対応する進入波の周期が多少短周期側に寄っているとは言え、ほぼ妥当な対応を示していると結論できる。

5. おわりに

仙台南港の副振動特性について、今回の実測結果は中央航路方向の単節、および双節モードに対して理論値とほぼ妥当な対応を示していると考えられる。

しかし、さらに各振動モードの特徴的なパターンをおさえ応答曲線に見られる増幅率を定量的に議論するためには、港内の他の数点、および湾口で同様の観測を行う必要があるだろう。

また、港湾の副振動を誘発する長周期波をとらえるためには、港外の複数点での同時観測が望まれる。

さらに、長周期波の発生要因を把握するためには、微気圧変動のみならず、風向、風速等気象要素の広範囲にわたる同時観測、地上、および高層天気図の解析の必要があると考えられる。

今回の解析に基づき、以上の点を今後の課題とし、さらに解析を進めたいと考えています。

最後に、今回の観測、解析を進めるにあたって、東北工業大学、土木工学科の沼田 淳教授に御指導を頂いた。末尾ながら、感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 富永政英:「海洋波動」, pp. 494~500, 共立出版, 1976.
- 2) Jiin-Jen Lee: Wave induced oscillations in harbors of arbitrary shape, Jour. Fluid. Mech., Vol. 45, No. 2, pp. 375~394, 1969.
- 3) 運輸省第四港湾建設局: 長崎港の副振動, 1953.
- 4) 運輸省第二港湾建設局: 港内長周期波対策調査報告書, 1978.
- 5) 運輸省第二港湾建設局: 港内長周期波対策調査報告書, 1981.