

酒田港における水中浮体式観測塔による波向観測について

運輸省新潟調査設計事務所 岩谷 文方

運輸省新潟調査設計事務所 宮本 卓次郎

運輸省新潟調査設計事務所 宮井 真一郎

はじめに

運輸省第一港湾建設局では、大水深域における波浪観測を行うため、円筒状浮体による水中浮体式波浪観測装置（以下「タワー」と言う）を新たに開発し、酒田港沖合の水深45m位置に昭和61年 8月設置し、同年11月より試験観測を開始している。

このタワーの開発経緯等については、昨年度の第11回海洋開発シンポジウムにおいて既に報告したところである。これに引き続き、今回は試験観測によりほぼ2ヶ年分のデータが集積されたことから、このデータに基づくタワーの特性、解析手法の適用性等について報告することとする。とりわけこのタワーでは、タワーの波浪による傾斜運動より波向を求める方式としており、この波向解析手法の検討を中心として報告する。

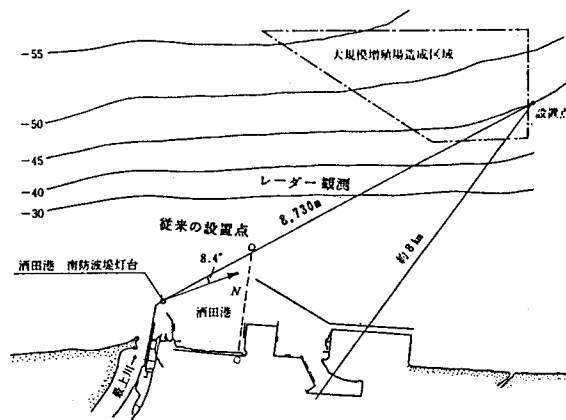


図-1 設置位置

1. タワーによる波浪観測の概要

タワーとは図-2に示すとおり、鋼製の円筒形浮体をユニバーサルジョイントを介して海底に設置したコンクリートシンカーに結合した構造物である。この構造物による波浪観測方式を以下に述べる。

(1) 波高・周期の観測

波高・周期は、塔体の側面に取り付けたステップ式波高計により海面水位を測定し、波高・周期を求める。

(2) 波向の観測

塔体は波浪中において、波力により海底のユニバーサルジョイント部を中心とした2自由度の傾斜運動を行う。この傾斜運動の方向は、波浪による水粒子運動の方向に合致するものと考えられることから、水平2方向の傾斜角を傾斜計で観測することにより波向を算出する。

なお、これらの観測データは無線テレメーターを介して陸上観測局へ送られている。

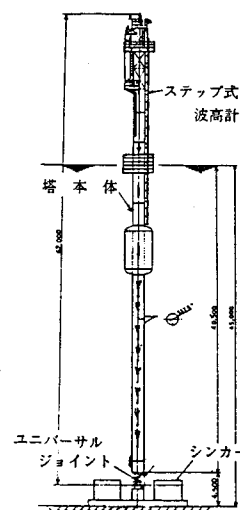


図-2 塔体構造

2. 観測データ

タワーによる観測データ（時系列）の一例及び、そのパワースペクトルを図-3、4に示す。

まず、水位変動（波高）の時系列データについては、ステップ式波高計の特性である離散化影響により、データサンプリング間隔（0.3 秒）の倍の周期変動が若干生じているが、絶対値としては解析上問題が無いものと考えられる。

次に、タワーの傾斜データについては概ね0.9 秒程度の短周期の変動が生じている。この周期はタワーの2次モード振動の周期に合致するもので、加速度計を用いてタワーの傾斜計測を行っているため2次モード振動の加速度影響を受けたものと考えられる。

即ち、振動の加速度の振幅は変位振幅と角速度の2乗の積となることから、変位振幅が小さくても短周期振動の場合には、加速度振幅が大きくなる。このため、タワーに固定した加速度計により計測したタワー傾斜に伴う重力加速度成分の変動から傾斜角度を求める方式では、タワーの2次モード振動による加速度の振動をも変位としてとらえてしまうこととなる。

この現象は事前に考慮しており、防振対策等を行っていたが、それでもなお振動影響が生じている。しかしながら、計測データの中で2次モード振動成分の大きさがタワー本来の傾斜成分に比べて相対的に小さいこと、2次モード振動周期が 0.9秒程度と安定していることから、データ解析上の支障は無いものと考えられる。

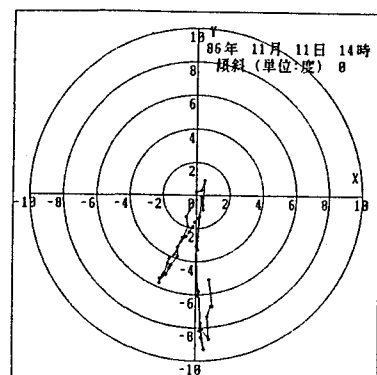
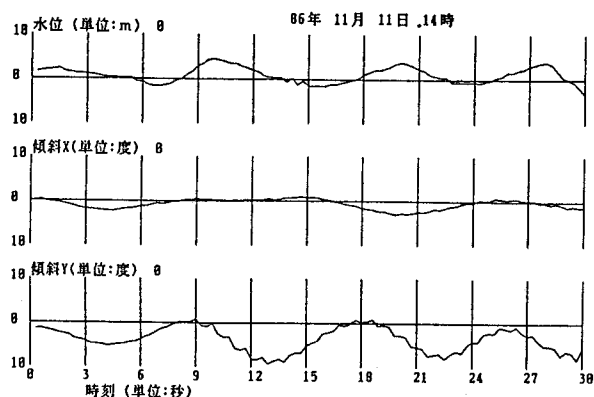


図-3 観測データの時系列

なお、参考までに、同様の時系列データについて、3点移動平均を行った結果を図-5に示す。

周期 0.9秒程度の振動に対し、データのサンプリング間隔が 0.3 秒であることから2次モード振動成分がほとんど消えタワーの変位の軌跡として妥当なものになっている。

3. 傾斜データによる波向解析

2. に示したような観測データから波向を求めるに当たり、統計的手法及びスペクトル解析手法の2つの手法を検討した。

3-1 統計的手法

タワーの傾斜運動の変動成分（以下「傾斜運動」と言う）が波浪による水粒子運動により生じるものであり、傾斜運動の卓越方向が波浪の卓越方向に合致するとの考え方にに基づき、傾斜変位データ（0.3秒間隔）の座標分布より統計的に求めようとする手法である。

即ち、平面に分布したデータについて、座標を回転させると X 座標及び Y 座標のそれぞれの値についての分散は座標の回転角度の関数となり、回転した X' 座標値の分散を最大としかつこれに対応する Y' 座標値の分散を最小とする回転角度が定められる。このときの X' 軸の方向を波向とする。

式の誘導は容易であるので、ここでは観測データの座標系からの波向（角度）の算定式のみ式（3-1）に示す。

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\overline{2xy}}{\overline{xx} - \overline{yy}} \right) \quad \dots\dots \text{式(3-1)}$$

ここで、

$\overline{xx}$: X の分散値

$\overline{yy}$: Y の分散値

$\overline{xy}$: XY 共分散値

また、この手法による波向解析結果の一例を図-6に示す。

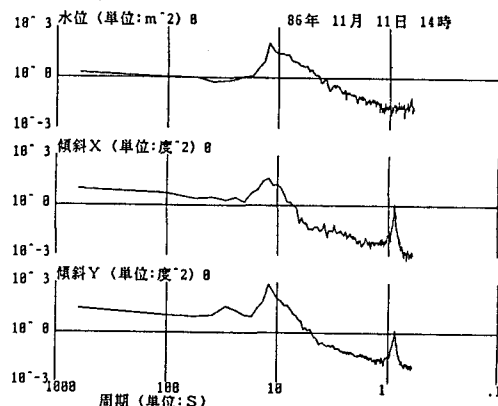


図-4 パワースペクトル

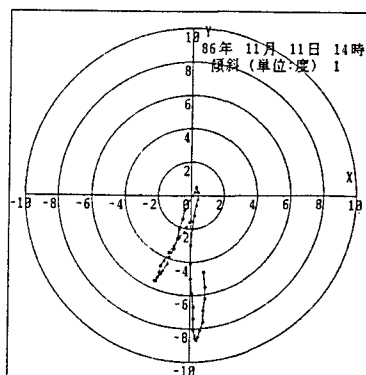


図-5 移動平均による時系列

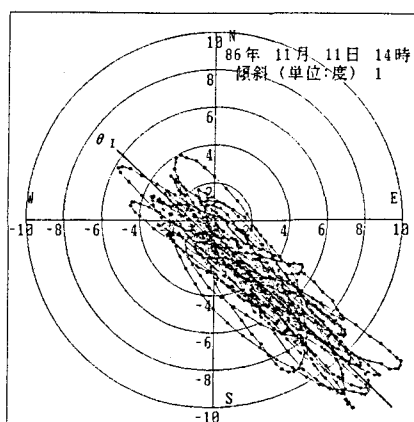


図-6 統計的手法による解析結果

3-2 スペクトル手法

3-1に示した統計的手法では、データの時系列性を考慮していなかった。そこで、データの時系列性を考慮するためスペクトル解析手法を用いた波向の解析を試みた。

即ち、2方向(X, Y)傾斜の時系列データをそれぞれフーリエ変換しパワースペクトルを求める際、同時に座標軸の回転を行うと、2方向(X', Y')のパワースペクトルは座標の回転角度の関数となる。そこで、ある周期に着目するとX'方向パワースペクトル値を最大とし、かつY'方向のパワースペクトル値を最小とする回転角度が定まる。

よって、この回転角度は周期の関数として算定されタワーの傾斜運動の周期成分毎の卓越方向を示すものとなる。

これと併せて、タワーにおいて同時に観測しているステップ式波高計による水位変動データのパワースペクトルを算定し、そのピーク値近傍の周期におけるタワー傾斜運動の卓越方向を波向とする。

タワー傾斜運動の周期成分毎の卓越方向の算定式の誘導は以下のとおりである。

2方向傾斜データを x_t, y_t とし、座標変換により、

$$\begin{aligned} x'_t &= x_t \cos \theta + y_t \sin \theta \\ y'_t &= -x_t \sin \theta + y_t \cos \theta \end{aligned} \quad \cdots \text{式(3-2)}$$

今、 $f_k(x_t) = x_{k1} + i x_{k2}$, $f_k(y_t) = y_{k1} + i y_{k2}$ とすると、 x'_t についてのフーリエ係数は、フーリエ変換の線形性より式(3-3)のとおりとなる。

$$\begin{aligned} f_k(x'_t) &= f_k(x_t) \cos \theta + f_k(y_t) \sin \theta \\ &= (x_{k1} \cos \theta + y_{k1} \sin \theta) + i(x_{k2} \cos \theta + y_{k2} \sin \theta) \quad \cdots \text{式(3-3)} \end{aligned}$$

よって、 x'_t のパワースペクトル $P_k(x'_t)$ は式(3-4)のとおりとなる。

$$\begin{aligned} P_k(x'_t) &= |f_k(x'_t)|^2 \\ &= (x_{k1} \cos \theta + y_{k1} \sin \theta)^2 + (x_{k2} \cos \theta + y_{k2} \sin \theta)^2 \\ &= A_k \cos^2 \theta + 2 B_k \cos \theta \sin \theta + C_k \sin^2 \theta \end{aligned}$$

ここで $A_k = x_{k1}^2 + x_{k2}^2 = P_k(x_t)$ 、 $C_k = y_{k1}^2 + y_{k2}^2 = P_k(y_t)$

$$B_k = x_{k1} x_{k2} + y_{k1} y_{k2} = \frac{1}{2} \{ P_k(x_t + y_t) - P_k(x_t) - P_k(y_t) \}$$

よって

$$\begin{aligned} P_k(x'_t) &= \frac{A_k + C_k}{2} + B_k \sin 2\theta + \frac{A_k - C_k}{2} \cos 2\theta \\ &= \frac{A_k + C_k}{2} + \gamma_k \cos(2\theta - \alpha_k) \quad \cdots \text{式(3-4)} \end{aligned}$$

ここで

$$\gamma_k = \sqrt{B_k^2 + \left(\frac{A_k - C_k}{2} \right)^2}, \quad \alpha_k = \tan^{-1} \left(\frac{2 B_k}{A_k - C_k} \right)$$

よって、 T_k において、 $P_k(x'_t)$ を最大とする角度 θ_k は式(3-5)のとおりとなる。

$$\theta_k = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{P_k(x_t + y_t) - P_k(x_t) - P_k(y_t)}{P_k(x_t) - P_k(y_t)} \right\} \quad \cdots \text{式(3-5)}$$

この手法による波向解析例を、3-1で述べた統計的手法による波向解析結果と併せて、図-7に示す。

解析した全ての観測データについて、水位変動のパワースペクトルのピーク値を与える周期近傍におけるタワーの傾斜運動の卓越方向は統計的手法による波向とほぼ一致しており、いずれの手法を用いてもほぼ同様の結果を得ることが判明した。

これらの手法の妥当性については、次章以下で更に検討することとするが、少なくともこれら2つの手法がほぼ同様の結果を導くことが判明したことから、3-1で述べた統計的手法の方が計算が簡便で実用的であると言える。

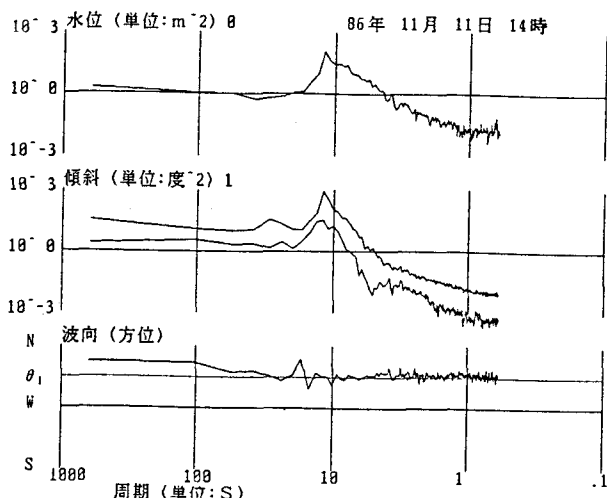


図-7 スペクトル手法解析結果

4. タワーの動揺応答特性

タワーで得られるデータは、あくまでその傾斜運動であり、これから波向を解析する前提は、3. で述べたとおり、傾斜運動の卓越方向が波浪の卓越方向と一致することである。このためには、タワーの応答特性が波高・周期に対して安定している必要がある。とりわけ、タワーの応答スペクトルの一時モード固有振動周期（16秒）近傍にある応答スペクトルのピーク値が、主たる波浪の周期の応答特性に比べて過大な場合には、3-1で述べた統計的手法の適用に問題を生じることとなる。

一方、3-2で述べたスペクトル手法による波向解析を行えば、傾斜運動をスペクトル解析した後に、水位変動のピーク周期近傍に着目して卓越方向を求めるので、先に述べたタワーの応答特性に係る問題は無いものと考えられる。また、統計的手法による結果とスペクトル手法による波向解析結果が、いまのところ全てのデータについて一致していることから、事実上この問題は無いものと考えられる。

このことを更に検討するため、観測データの中から異なる波高レベルの波浪条件を3ケース選定し、それぞれの応答特性を図-8に示す。

異なる波高レベルの波浪条件に対し、波高のパワースペクトルのピーク周期近傍において、タワーの応答スペクトルがほぼ一致している。

更に、応答スペクトルではタワーの固有周期にピークがあるものの、傾斜のパワースペクトルのピーク周期が波高のパワースペクトルのピーク周期に一致している。これらの結果として、タワーの傾斜運動の卓越方向が波浪の卓越方向に一致することとなる。

なお、今回解析したデータは有義波高（ $H_{1/3}$ ）が3m以上となった場合に限定されており、これ以下の波高レベルの波浪条件でのタワーによる波向観測の適用性については不明である。とりわけタワーの固有周期近傍において、波高レベルに係らず傾斜運動のパワースペクトル値が比較

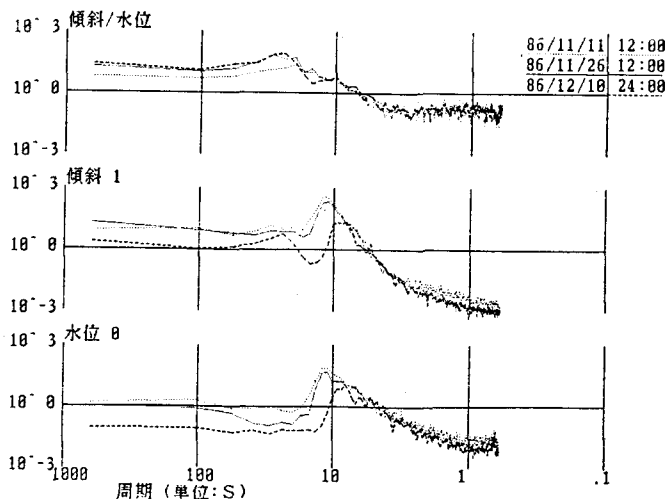


図-8 応答特性の比較

的安定した値を示しており、波高レベルが小さくなる程応答スペクトル値が大きくなる傾向にある。このことは、波高が小さくなるに従い、タワーの運動においてタワーの固有振動運動（自由運動）が支配的となることを示唆しているものと考えられ、波向観測の主眼が波浪にあることから実用上の支障は無いものの、ある波高以下の波浪に対しては、タワーによる波向解析が困難となることが予想される。

5. 他の波向観測手法との比較

タワーによる波向観測の有効性を検討するため、酒田港において同時に行っているミリ波レーダーによる波向観測結果との比較を行った。ミリ波レーダーによる観測値と、統計的手法を用いたタワーによる観測値の相関図を図-9に示す。なお、これらの観測地点が異なるため、相関図に対応した屈折計算結果を図-10に示す。

タワーによる観測値はミリ波レーダーによる観測値とよく一致しており、タワーによる波向観測が妥当なものと考えられる。

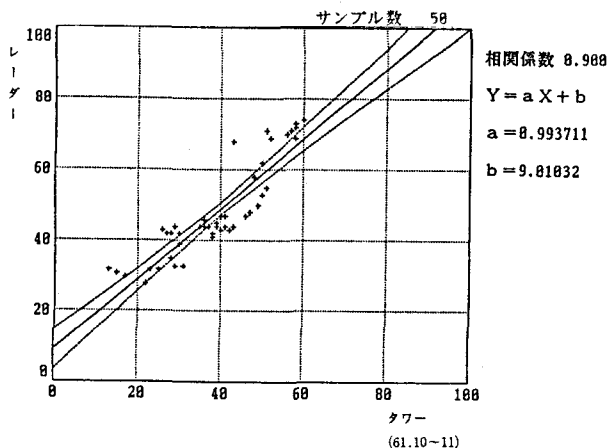


図-9 レーダーとタワーの比較

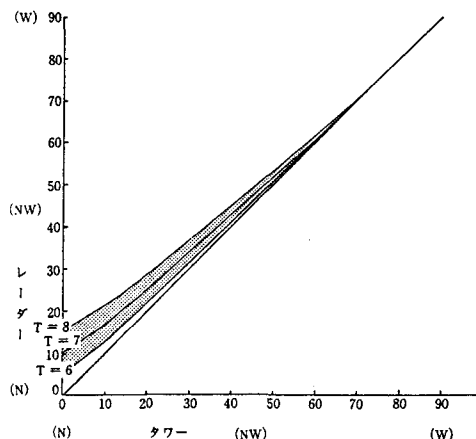


図-10 屈折計算結果

なお、現在波向観測にはミリ波レーダーと超音波式流向流速計（以下「CWD」と言う。）が多く用いられている。このCWDとタワーによる波向観測の関係をも検討する必要があるが、同時観測データが無いため、ここではミリ波レーダーとCWDとの観測値の関係から、タワーによる波向観測の有効性について考察することとする。

新潟港におけるミリ波レーダーとCWDの同時観測結果をを図-11、12に示す。CWD観測の場合水粒子の振動運動（2成分データ）から算定する主波向と、同時に観測している波高データをも考慮して（3成分データ）算定する平均波向の2つの解析手法に対応した波向が定義されているが、後者の方がミリ波レーダーの観測値とよく一致している。この理由は、水粒子運動が海底地形の影響を受ける場合には、水粒子運動だけを解析する主波向に海底地形影響が生じることにに対して、水粒子運動に波高データによる重みづけを行う平均波向の方が、海底地形影響等を受け難くなるものと考えられる。

一方、タワーによる波向観測では、傾斜データ（2成分データ）だけを用いた統計的手法による波向が、水位変動データも考慮した（3成分データ）スペクトル手法による波向とほぼ一致しており、なおかつミリ波レーダーによる波向ともよく一致している。

この理由として、CWDでは海底付近に設置したセンサーによりその位置の局所的な水粒子運動だけを計測することに対して、タワーでは局所的な水粒子運動を計測するのではなく、海底面から海面にかけての波浪外力の合力による傾斜運動が考えられる。すなわち、タワーでは波浪による水粒子運動の総体を計測していること、更にタワーは海底面にユニバーサルジョイントを介して固定されており、タワーの傾斜運動は海底面を中心とするモーメント外力の大きさに支配されることから、海面付近の水粒子運動の影響をより受けることとなり、波浪条件をより反映するものとなると考えられる。

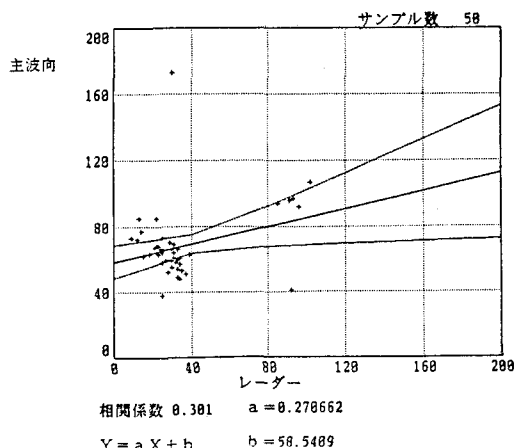


図-11 レーダーとCWD（主波向）の比較

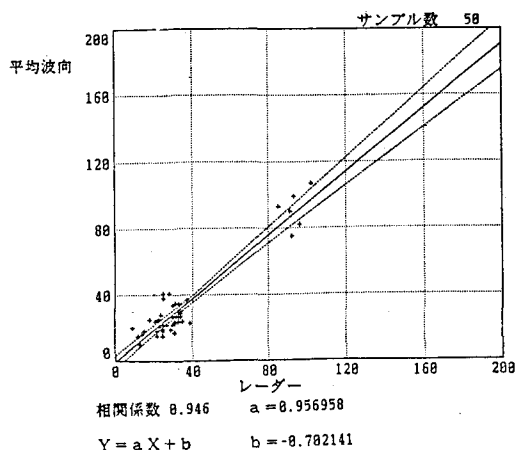


図-12 レーダーとCWD（平均波向）の比較

6. 結論

本論文で得られた結論は、以下のとおりである。

- 1) タワーによる波向観測は、既往の計測手法による観測結果との整合性もあり有効かつ妥当なものである。
- 2) タワーによる波向観測についてのデータ解析は、統計的手法及びスペクトル的手法を提案したが、当面は計算の簡便な統計的手法を用いて十分である。

また、本タワーによる波浪観測の今後の課題として、波浪の方向分散の解析手法の開発が残されており、このため、昭和62年度以降においてこの検討を行うこととしている。

< 参考文献 >

- 1) 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司：方向スペクトルの推定におけるMLMの拡張，第31回海岸工学講演会論文集，p173～177,1984
- 2) 橋本典明・小舟浩治：最大エントロピー原理（MEP）を用いた方向スペクトルの推定，港湾技術研究所報告，第24巻第 3号,1985
- 3) 小舟浩治：波向観測の現状について，昭和61年度港湾技術研究所講演会