

波浪観測塔による波向解析手法の検討について

運輸省新潟調査設計事務所 井上 純一

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 二瓶 章

はじめに

運輸省第一港湾建設局では、大水深における波浪観測に対応するため水中浮体式波浪観測塔（以下「タワー」と言う）を開発し、酒田港（水深-45m）と伏木富山港（水深-45m）に設置し稼働中である。波向データは、港湾計画・防波堤法線計画及び設計に重要な情報であるが、設置・解析等に費用がかかることや波浪推算・風向等の代替方法で済ませるなどの理由で普及が進んでいないのが現状である。波向観測器においても、海象観測用レーダー（通称ミリ波レーダー）は、雨雪の影響やうねり性の波浪時には画像の状態が悪くなったり、写真解析時に読み取り誤差が生じやすい等の欠点がある。また、海底設置式では大水深になると伝達波が小さくなるため短周期や低波高のデータ取得が難しくなる。第12回海洋開発シンポジウムでは、新たな波向解析手法としてタワーの波高データと塔体傾斜角データから平均的波向を算定する統計的手法及びスペクトル手法の2つの手法について報告した。今回は、方向分散を有する不規則波中でのタワーの3次元実験で得られた卓越波向直角方向と卓越波向方向の動揺量の比から波浪の方向分散を示す指標（タワーの方向分散と呼ぶ）を求めることができると言う結果から、タワーの方向分散より波浪の方向分散を推定することの可能性を数値シミュレーションで検討した。

1. 応答解析プログラム

解析プログラムの作成に際しては次のような前提条件を設けた。

- ① 波の時系列データは、微小振幅平面波の重ね合わせとして表現し、各平面波の波向・周波数・振幅は方向スペクトルを用いて設定する。位相は一様乱数を発生させて設定する。
- ② タワーの構造は、円筒形の剛体モデルとしフローター等の付加物は等価な円筒に置き換える。タワー下端はピン結合とし、2自由度をもつものとする。
- ③ 流体力は、相対加速度を考慮し変位後の位置において各部材に作用する流体力を算出し、円筒軸方向に作用する流体力も考慮する。要素の没水・非没水を判断し、動的流体力・浮力を算定する。
- ④ New mark-Beta法を用い時間ステップ毎に運動方程式を満たすように、傾斜角に関して繰り返し計算を行う。

2. 再現性の確認

2-1 流体力係数

塔体構造モデルは酒田港タワー（図-2）を対象に実施し、タワーの運動応答特性に影響する流体力係数については下記の要領で選定する。

- ① 効力係数の横方向C_{DT}は、浮体式形状とレイノルズ数により定まり通常は0.5~2.0の値をとる。水中浮体式円柱構造物の動揺計算においては、このC_{DT}の設定が重要な問題となり0.5, 1.0, 1.5の3ケースで計算を行い、これと酒田港タワーの模型実験結果・観測値とを比較し選定する。抗力係数の軸方向C_{DL}については、参考となる文献・資料が少なく、その設定は難しいため、0.0, 0.05, 0.10の3ケースでパラメータスタディを行いその影響を調べ選定する。
- ② 質量力係数の横方向C_{MT}及び付加質量係数の横方向C_{AT}については、合田らの研究において、周期2.0~2.5秒より長い波に対してはC_{MT}=2.0, C_{AT}=1.0となることが報告されている。C_{MT}は、1.5, 2.0, 2.5よりC_{DL}同様に選定する。質量力係数の軸方向C_{ML}及び付加質量係数の軸方向C_{AL}は、その影響が少ないと考えられるので0.0とする。

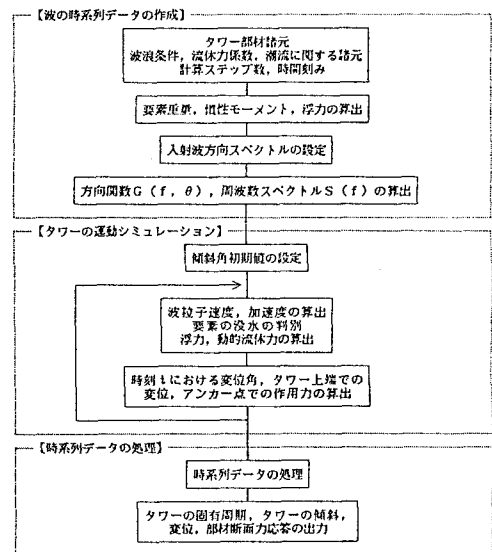


図-1 解析フロー図

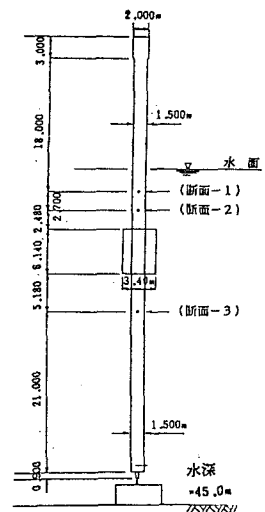


図-2 塔体構造モデル

2-2 傾斜角応答

① 波の周期～傾斜角応答

タワーの規則波中における傾斜角応答の周波数特性の計算結果を、図-3(1),(2)に示す。

図から解るように、動揺振幅はタワー自身の固有周期($T \approx 2.0\text{sec}$)付近で最大となり、横方向の抗力係数 C_{DT} を小さくすると動揺量は大きくなる。これは、 C_{DT} が減少すると減衰モーメントが小さくなるためであるが、波の周期が小さい場合にはその影響は小さく実際の波浪の卓越周期10sec付近においては、 C_{DT} の違いによるタワーの動揺量の差は非常に小さい。

図中には、酒田港タワーの規則波による模型実験結果を併せて示している。全体的によく合っていると考えられるが、実験値の傾向を見ると、周期が14secと20secの2ヶ所にピークがある。これに対し、計算値は一様に振幅量が増加し、タワーの固有周期である20sec付近以外ではピークを持たず、この点で実験値とは傾向が異なっている。その原因としてはタワーの横揺れの影響が考えられる。模型実験報告では、タワーの横揺れは周期と共に大きくなるが、設計波周期($T=14.2\text{sec}$)でも横揺れの割合($2x/2y$)は、0.1程度であり大きな影響は与えないとしている(合田らは、規則波中の場合には、タワーの相対動揺振幅が直径の2倍前後で横揺れが激しくなり、不規則波中では横揺れが出現しやすいと述べている)。

C_{DT} の設定は、実際の設計においては合田らが述べているように C_{DT} の測定値にばらつきが大きいこと、また C_{DT} の値は動揺の共振周期付近の振幅を定める重要な値であることなどを考慮すれば、 $C_{DT}=0.5\sim 1.0$ とした方が、安全側となる。ただし、タワー自体の応力及びユニバーサル・ジョイント部の検討と併せて考える必要がある。

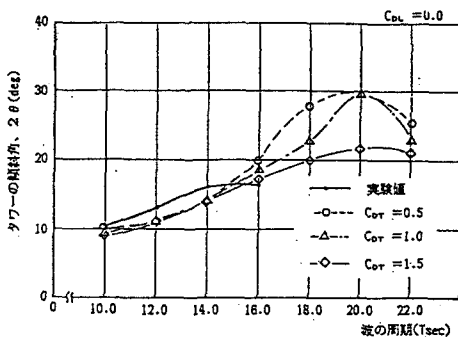


図-3(1) 傾斜角の周波数応答特性(波高5m)

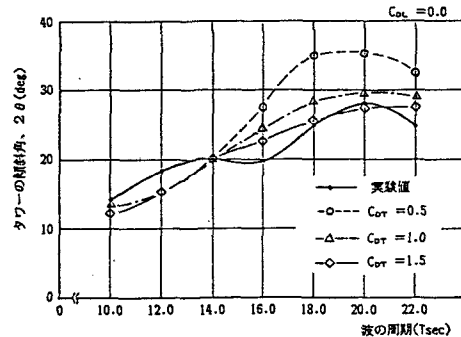


図-3(2) 傾斜角の周波数応答特性(波高7m)

② 波高～傾斜角応答

周期ごとの波高と傾斜角の関係を、図-4.(1)に示す。図中には、前項と同様に模型実験の結果を併せて示している。

実験結果・計算値とも、同じような傾向となっているが、波高が7m以下では、タワーの傾斜角と波高はほぼ比例関係にある。

図-4(2)に横方向抗力係数を一定($C_{DT}=1.0$)として軸方向抗力係数 C_{DL} を変化させた場合の波高とタワーの傾斜角の関係を示す。この図は周期 $T_s=12\text{sec}$ のものであるが、一般的に C_{DL} の違いによるタワーの傾斜角による影響は小さく、傾斜角については横方向抗力係数 C_{DT} が支配的である。

(C_{DT} による違い)

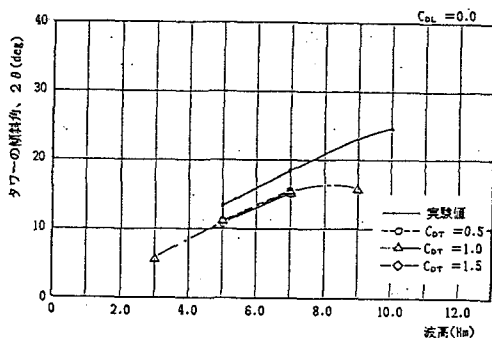


図-4(1) 波高～傾斜角応答(周期12秒)

(C_{DL} による違い)

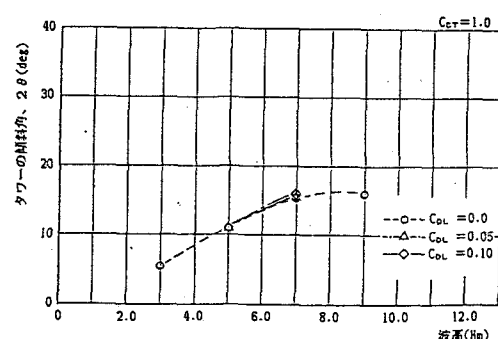


図-4(2) 波高～傾斜角応答(周期12秒)

2-3 断面力応答

① 波の周期～張力応答

図-5に波高5mのユニバーサル・ジョイント部に作用する初期張力と変動張力の周波数特性を示す。

初期張力は、自重と浮力の差であり、波高・周期にかかわらず一定である。また変動張力は初期張力に較べかなり小さく、軸方向の抗力係数の違いによる差は小さい。図を見ると、初期張力65.6tonに対し変動張力は2～10tonとなっている。図中には実験値を併せて示しているが、これから解るように軸方向の抗力係数C_{DL}を0.05～0.10とすることで応答値は大きくなるが、実験値との比較では、C_{DL}を0.0とした応答のほうがよく合っている。

② 波高～軸力応答

図-6に各断面における波高と軸力の関係を示す。(図-2参照)

これによると、断面-3(浮力タンクより下部で引張力が働く)では、抗力係数が小さいほうが軸力は若干大きくなるが、断面-1, 2では抗力係数による軸力の差はほとんどない。いずれにしても、タワーに働く軸力は波高の大小に較べ、さほど変化はない。これは、軸力はタワーの揺れによる変動成分の影響が小さく、静止状態の軸力が支配的であることを示している。

また、横方向、軸方向の抗力係数の違いによる軸力の差はほとんど見られないが、設計ではC_{DT}=0.5～1.0としたほうが安全側となる。これはタワーの振幅(傾斜角)と同じ傾向である。

2-4 質量力係数の影響

図-7に質量力係数C_{MT}を1.5～2.5の範囲で変化させた時の無次元化した傾斜角の周波数応答特性を示す。図には模型実験の値も併せて示している。

図より周期T_s=16sec以下については、C_{MT}が小さい方がタワーの傾斜角は大きくなり、波の周期とほぼ比例関係にあることが解る。またタワーの固有周期であるT=20sec前後は傾向が逆転し、C_{MT}が大きいほうが傾斜角が大きくなる。

実験値において、周期が14secと20secの2ヶ所にピークがあり、一方、計算値は一樣に振幅量が増加し、タワーの固有周期である20sec付近以外ではピークを持たず、この点で実験値とは傾向が異なっているが、これは、2-2, ①の傾斜角応答で述べたようにタワー横揺れの影響と考えられる。

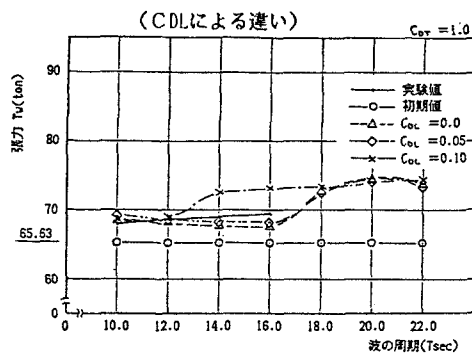


図-5 ユニバーサルジョイント部に作用する張力の周期応答特性(波高5m)

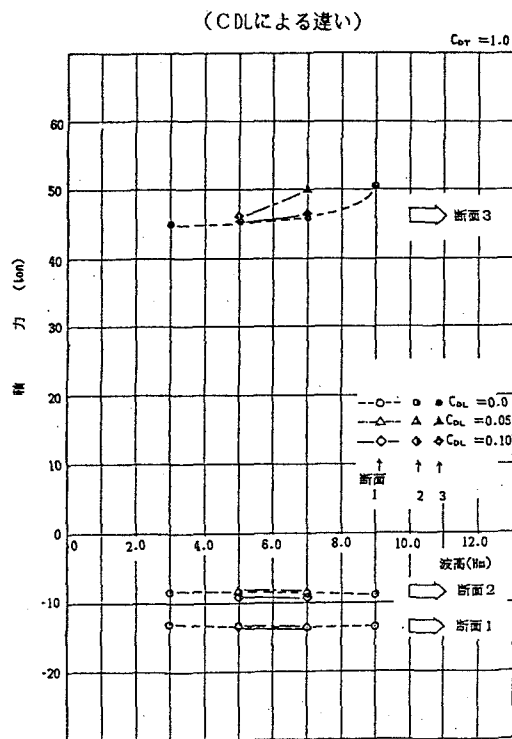


図-6 波高～軸力応答(周期12秒)

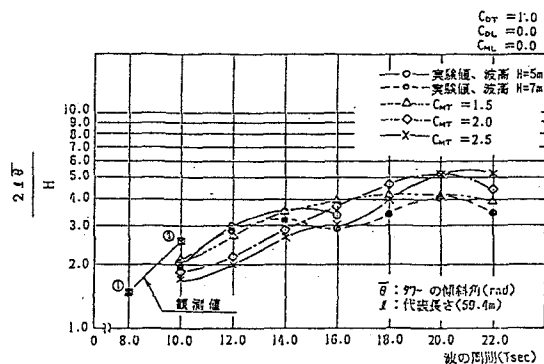


図-7 無次元化した傾斜角の周期応答特性(模型)
(実験波高14cm, 実波高7m)

2-5 一方向不規則波におけるCDTの影響

規則波における図-7と同様の整理をすると図-8のようになる。

同図には参考のため、規則波の結果および実物での観測値も併せて示してある。

観測値は表-1に示すとおりである。

表-1 酒田港波浪観測塔での観測値

観測値	観測日時	波高 H1/3(m)	周期 T1/3(sec)	傾斜角 AR(deg)
①	1986年11月10日20時	3.94	8.09	2.99
②	1986年1月14日14時	5.56	9.93	7.67

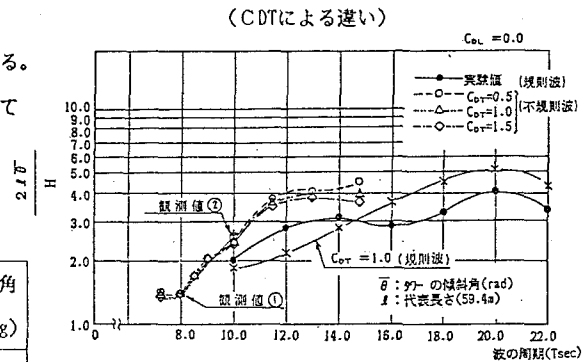


図-8 無次元化した傾斜角の周期応答特性

図に示すように不規則波の場合、抗力係数の違いによる動揺振幅量の差はほとんど無く、周期11sec まではほぼ同じ動揺量となっている。周期が11sec を超えると、規則波の場合の傾向と同様にCDTを小さくとした場合のほうがタワーの動揺量は大きくなっている。

従って不規則波による設計検討を行う場合にも、CDTを小さくとしたほうがタワーの傾斜角が大きくなり安全側となる。

観測値の値は、ほぼ不規則波の線上にのっており、不規則波による計算値と観測値はよく合っている。

2-6 設計計算に用いる流体力係数

(1) 抗力係数

タワーの傾斜角、断面力は、周期が15sec 以下について抗力係数の違いによる差はほとんど見られず、また実際の波の周期は波高が大きい場合には10sec 前後であることから、CDT= 0.5~1.0 とすれば良いと考えられる。計算上は、CDTを小さく設定することでタワーの傾斜角、断面力が若干大きくなる。

模型実験との比較で考えると、CDT=0.9 でほぼ無次元振幅の傾向が一致しており、数値的にも近いが一般に用いられているCDT=1.0 がこのタワーの場合には0.9 であると言い切れるほど顕著ではない。

不規則波の場合についても、CDTの違いによる動揺振幅の差はほとんど見られない。

また、軸方向抗力係数CDLはユニバーサル・ジョイントに作用する力を見ると、周期14sec 以下ではほぼ同じであり、14sec 以上についても10%程度の違いであることから、概ねCDL=0.0 として計算を行って良いと思われる。

(2) 質量力係数

質量力係数については、実験値との比較において全体的傾向はほぼ一致しており、CMT=2.0 程度とすることで実用上差し支えないものと考えられる。しかし、数値を特定することは難しく、速度ポテンシャル理論によって求められ、また設計で一般に用いられているCMT=2.0 の数値以外とするだけの根拠はない。

軸方向の値についてはその影響が小さいことから、CML=0.0 として計算して良いと考えられる。

(3) 流体力係数についてのまとめ

これまでに、流体力係数の違いによるタワーの周波数応答特性および軸力、曲げモーメント応答について比較検討を行ってきたが、結論として、タワーのように海底部にヒンジ結合を持ち、水中部に浮体のある直立円筒式構造物においても、固定式海洋構造物等の設計で一般に用いられている次のような流体力係数を用いて計算を行っても差し支えないものと考えられる。

表-2 流体力係数

名 称	横方向	軸方向
抗力係数	CDT=1.0	CDL=0.0
質量力係数	CMT=2.0	CML=0.0
付加質量係数	CAT=1.0	CAL=0.0

また、計算を行う際の注意点として、

① タワーの固有周期が波の周期に近い場合には、流体力係数の違いによる傾斜角、断面力の差が大きくなるため、慎重に選ぶ必要がある。

② タワーの途中にある浮力タンク部の底面の増加面積に作用する波力を考慮する。

の2点が特筆される。

3. タワーの運動シミュレーション

単峰型不規則波中におけるタワーの傾斜運動について数値シミュレーションを実施した。波浪条件及び計算ケースは下記の通りである。

(1) 波浪条件

波 高 : $H_s = 3.0\text{m}, 7.0\text{m}$
 周 期 : $T_s = 8\text{sec}, 10\text{sec}, 12\text{sec}$
 集中度パラメータ : $S_{\max} = 10, 25, 75$
 周波数スペクトル : Bretshneider-光易型
 方向スペクトル : 光易型

なお、表中の $H_s \cdot T_s$ は不規則波を有義波に換算した値である。

表-3 計算ケース

波 高 H_s (m)	周 期 T_s (sec)	集中度パラメータ $S_{\max}$		
		10	25	75
		計算ケース No.		
3.0	8.0	101 -1	101 -2	101 -3
	10.0	102 -1	102 -2	102 -3
	12.0	103 -1	103 -2	103 -3
7.0	8.0	104 -1	104 -2	104 -3
	10.0	105 -1	105 -2	105 -3
	12.0	106 -1	106 -2	106 -3

4. 波向分散解析手法の提案

4-1 統計値による方法

(1) 波の方向分散を表すパラメータの推定

水位および傾斜角の観測データの統計値から波の方向分散パラメータを推定する手法として、以下の推定式が有望と考えられる。

a. 波峰長パラメータ γ の推定式

波峰長パラメータ γ とタワーの方向分散 γ' の関係を有義波高 $H_s = 7\text{m}$ について、図-9に示す。

波峰長パラメータについては、タワーの傾斜角データから求めたタワーの方向分散 γ' を用いて、次式で推定される。

$$\gamma = a\gamma' + b \quad \text{または} \quad \gamma = a(\gamma')^n \quad \dots 1\text{式}$$

ここで、タワーの方向分散 γ' は $\text{Err}(\theta)$ の最大値と最小値の比である。

$$\gamma' = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} - \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} + \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}} \quad \dots 2\text{式}$$

b. 波の集中度パラメータ $S_{\max}$ の推定式

タワーの傾斜角2成分 ϕ , ψ の時系列から最大値 ($\phi_{\max}$, $\psi_{\max}$) を求め両者の比を用いて、次式で推定される。

$\psi_{\max}$ と波の集中度パラメータ $S_{\max}$ の関係を波高 $H_s = 7\text{m}$ $\phi_{\max}$ について図-10に示す。

$$S_{\max} = a \cdot \frac{\phi_{\max}}{\psi_{\max}} + b \quad \dots 3\text{式}$$

ここで係数 n , a , b は波高にほとんど影響されないものの有義波周期に対し何らかの依存が見受けられる。したがって、各式の定数の設定のためには前章での検討ケースだけでは不十分であると思われ、今後更に検討ケースを増やすことによって、よりの確な定数・推定式が得られるものと考えられる。

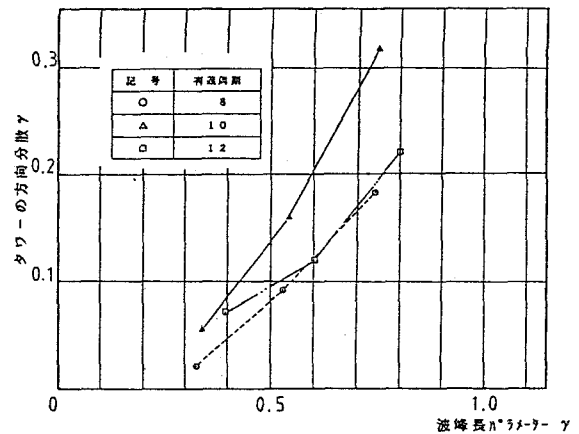


図-9 波峰長パラメータ γ とタワーの方向分散 γ' (波高 7m)

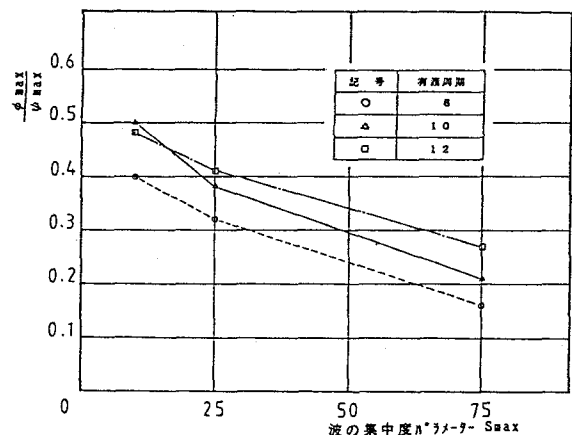


図-10 集中度パラメータ $S_{\max}$ とタワーの傾斜角比 (波高 7m)

4-2 共分散を用いた方向関数の解析手法

これまでに、水位変動及び水面の傾斜勾配等の共分散を求めることによって波の方向関数を推定する手法が提案されている。ここでは、タワーの傾斜角応答を用いて同様の手法で波の方向関数を推定することの可能性について数値シミュレーションにより検討する。

(1) 解析手法

手法は、タワーの加速度と水面変動のクロススペクトルから波の方向関数 $S(\omega, \theta)$ を求めるものである。

求めた方向関数を図-11に示す。なお、この図には比較のためLHM方法で水面変動、水面傾斜 (x, y) から推定した方向関数も併せて記している。

図からも解るように、計算結果は波向（この計算では0.0deg）付近で明らかなピークを持っている。また波向と直角方向では十分小さくなっている。このことから、 $-90 \sim +90 \text{deg}$ の範囲では比較的良く波のスペクトルを推定していると考えられる。

この範囲で一致していない原因としては、

①伝達関数の設定法

②波の方向スペクトルのフーリエ展開における項数打ち切りによる誤差

があげられる。

①については、クロススペクトルを求める際に用いたタワーの傾斜角時系列などはタワーの姿勢変化すなわち応答履歴の影響を考慮して数値シミュレーションを行っているのに対し、伝達関数を誘導する際には、直立したタワーに波が作用したときの応答すなわちタワーの運動を微小変位とし捉えていることを指している。

また、②については、波の方向スペクトルをフーリエ級数表示した際、第2項で打ち切っていることを指す。これは、 $\cos \theta$ 、 $\sin \theta$ に比例する伝達関数を持つ応答量（タワートップでの x 、 y 方向加速度）の相関関数をとるため止むを得ないことではあるが、これがこの方向関数の限界となっている。

方向関数を更に的確に表現するには、例えばARモデル（自己回帰モデル：Auto Regressive Model）に最尤度法（Maximum Likelihood Method）を用いる方法等が挙げられよう。

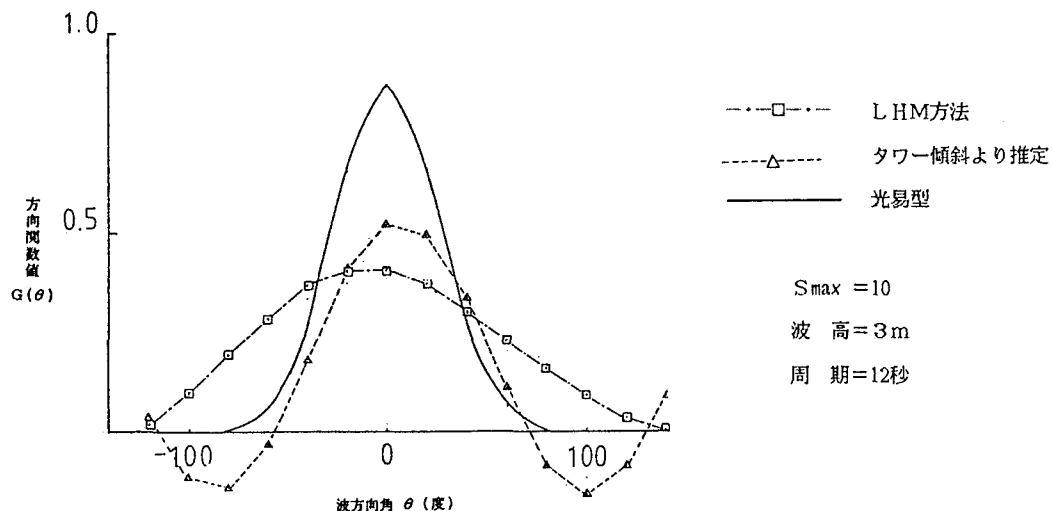


図-11 波の方向関数推定結果

<参考文献>

1. 「酒田港波浪観測塔設計計算書」、昭和61年 3月、運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所
2. 「昭和60年度酒田港波浪観測塔解析調査報告書」、昭和61年 3月、運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所／（株）新潟鉄工所
3. 「直立式円筒浮体の波浪中の動揺振幅に関する研究」、合田良美・鈴木康正・蜂須賀和吉、港湾技術研究所報告 Vol.17 No.4(1978.12)
4. 「波浪中の直立円柱浮体に働く流体力とその運動」、合田良美・鈴木康正・笹田正、港湾技術研究所報告 Vol.15 No.2(1976.6)