

酒田港における新構造形式による波浪観測について

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 宮井 真一郎
 (株)新潟鉄工所 三品 欽治

従来の波浪観測は水深20m程度の地点で行うことを標準としていたが、近年大水深地点における港湾構造物の建設計画等に伴い、より深い地点での正確な波浪データの取得が必要とされるようになってきている。今回、酒田港においては水中浮体式観測塔（以下、タワーと呼ぶ）によるデータ取得という新しい観測方式を採用した。本論文はこのタワーの設置の経緯とその観測方式の妥当性について検討したものである。

第1章 開発の目的と経緯

酒田港においては従来水深20m地点に超音波式波高計を設置し、波浪観測を行ってきたところであるが、防波堤の伸長工事に伴い、既設の波高計が反射波の影響を受けやすくなること、既設波高計のケーブルが防波堤の予定法線を横断していること等の問題を生じるに至っている。このため、既設波高計を早晚撤去、移設する必要があることから、今回水深45mの位置に新たに波浪観測施設を設置し、波浪観測の大水深化にも対応する事となった。

(図-1 参照)

このための波浪観測方式として、実績・可能性等を勘案し、表-1の4方式を比較、検討の対象とした。

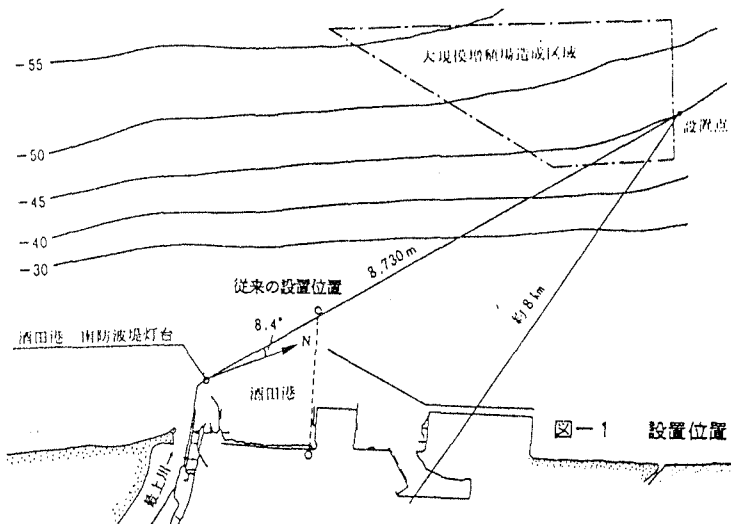


表-1 波浪観測方式の比較・検討

	① 海底ケーブル方式による 超音波波高計	② ブイ方式による 加速度波高計 (テレメータ送信)	③ タワー方式による 超音波波高計 (テレメータ送信)	④ タワー方式による ステップ式波高計 (テレメータ送信)
観測方式				

まず①の海底ケーブル方式については、実績も多いが、今回設置を行う海域が漁業権区域及び刺網区域になっており、海底ケーブルが網で引き摺られる事故の可能性が大きく、この対策としてもし仮にケーブルを数十cm程度埋設した場合にもケーブルの位置の確認が困難となり、将来の維持管理に支障を生じることとなる。

次に②のブイ方式については、設置水深100m以上の地点に適した構造物であり、今回のように設置水深が不十分である場合には、カタナリー係留特性から解析が困難となり、或いは浮遊範囲が過大となる問題がある。

また、③④のタワー方式については、水深40mの地点に設置した実績があり構造的には水深60mまでは対応可能といわれている。

波高計について見ると、③の超音波波高計においては、波高計は塔本体とのケーブル接続となり、水深が深いために波高計の維持管理に費用がかかる等の問題が生じる。

一方、④のステップ式波高計においては、波高計は塔本体と一体化しており、気泡等による異状記録を検出することが少ないため安定性が高く、阿賀沖における使用例でも電極部への海中付着物等による機能低下は見られず、良好な状態を保持しており、③と比較して維持管理が容易になると考えられる。

このような検討の経緯から④のタワーの方式によるステップ式波高計を採用することとした。次章でその構造の概要と波浪観測方式について述べる。

第2章 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、鋼製の円筒形浮体と海底に設置したコンクリートシンカーとをユニバーサルジョイントを介して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。

表-2 観測項目

観測項目	使用機器	使用台数	観測時間間隔	サンプリング時間
波高	ステップ式波高計	1	2時間毎(毎時偶数正時)	20分間(0.3 sec/回)
周期				
波向	非回転型レートジャイロ、フレキシブルサーボ加速度計	各2	・(・)	・(・)

これらの方式には以下に述べるような問題点等がある。

まず波高観測については、ステップ式波高計を取り付けた塔本体が波によって傾斜動揺することから、観測値と実際の波高とが一致しない可能性がある。

次に波向観測については、塔体の傾きは波から受ける抗力と慣性力との合力によるものであり、そのため波向との間に強い相関があると考えられる。これより主波高を求めようとするものであるが、一方では塔体には横揺れが存在し、この横揺れと波の方向分散度とをどのように対応づけるかが問題となる。

また方向スペクトルを求めるようとする場合には、通常は波高及び水平2方向の波動量が必要であるが、今回の観測方式では波動量と塔体の傾斜データに関する伝達関数が求められていないため、このままでは方向スペクトルが求められない。

以上の問題点について検討するために行った水理実験について次章で述べる。

なお、観測データはテレメーターで地上の監視局に送信し、監視局で処理を行う。

また、既設の超音波波高計による波高観測とミリ波データによる波向観測も引き続き行い、本方式による波浪観測データの検証に利用するものとする。

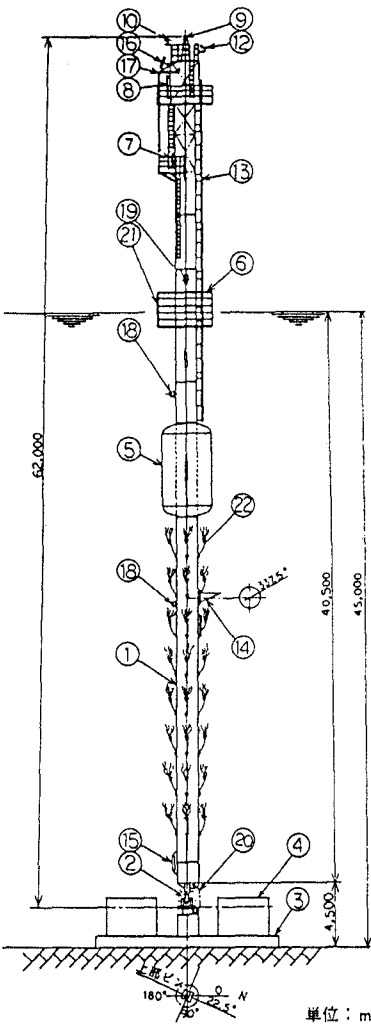


図-2 塔体構造

番号	品名	仕様	備考
1	塔本体	水中浮体式円筒型	
2	ユニバーサルジョイント	ピンジョイントリンク式	
3	シンカー	R、C	
4	ブロック	R、C	
5	浮体	水中浮体式	
6	防転装置	パイプおよびフエnder	
7	鋼製水密ハッチ	φ600(タマーズ)	
8	鋼製水密扉	600×1,400(タマーズ)	
9	標識灯	白色閃光	
10	空中鐘	ブラウンアンテナ	
11			
12	風向風速計	全方向0-60m/S	
13	波高計	ステップ式	
14	波向計	架台のみ取付	
15	防食板	Al合金電極	
16	太陽電池	シリコン素子	
17	揚荷装置	吊上能力50kg	手動
18	吊金具	鋼製	
19	変換用アイ	・	
20	補助電源装置		
21	防転材	ゴムフエnder	
22	人工海藻	ポリエチレン	

第3章 水理模型実験による事前検証

水理模型実験は2次元不規則造波水路（新潟調査設計事務所）及び3次元平面水槽（運輸省港湾技術研究所）で行った。また、実験縮尺は幾何縮尺1/50とし、フルードの相似則による歪なし縮尺とする。実験に用いた塔体模型は塩化ビニール製樹脂で実物の1/50の外形寸法の他に浮体動揺実験を行う上で重要視される重心位置や慣性モーメントの相似性についても考慮されている。

(1) 2次元不規則造波水路による実験

2次元不規則造波水路を図-3のように仕切板で仕切り、正水路を用いて実験を行った。本試験での入力波は表-3のとおりである。

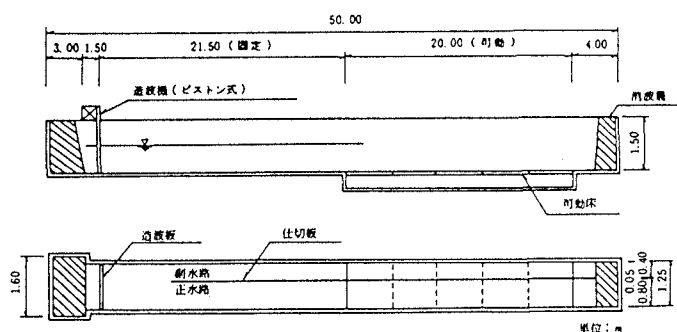


図-3 二次元水路の概略

表-3 実験波（現地量）

波の種類	波高 H (m)	周期 T (sec)
規則波	5.0	10.0, 12.0 (sec) 14.0, 16.0
	7.0	10.0, 12.0, 14.0 16.0, 18.0, 20.0 22.0
	10.0	12.0, 14.0, 16.0
不規則波	$H_{1/3} = 10.8$ (m) ($max = 19.5$)	$T_{1/3} = 14.2$ (sec)

1) 波高・周期と塔体の傾斜角・横揺れ

図-4は塔体動揺の周期特性を塔体の変動量と入射波高との比を縦軸にとり示したものである。これより規則波、不規則波とも周期20秒（塔体の固有振動数）付近までは周期が増加するとともに変動割合も増加し周期20秒をピークにそれ以降は減少するという傾向を示していることがわかる。

また、塔体の波向直角方向の横揺れは周期とともに大きくなるが設計波周期付近でも波向方向の塔体の動揺量の1/10程度であることがわかる。

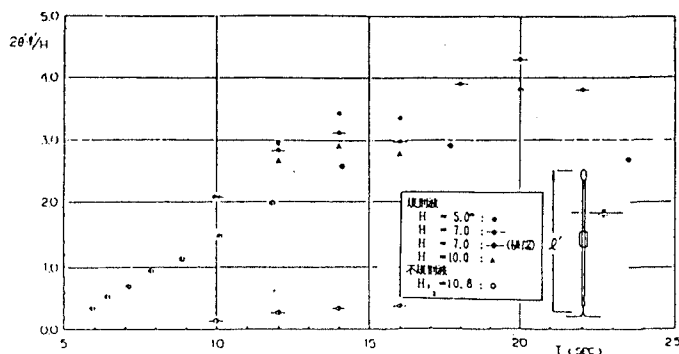


図-4 周期応答特性

2) 傾斜に対する波高の補正

塔体によって観測される波高記録の検討を行うために右図のような入力波形 η_0 、傾斜に対する補正を行った波形 η_1 、観測波形 ξ_0 の3者のあいだで比較を行った。図-5は周期 $T=14$ 秒に相当する規則波を作用させたときの3者を比較したものである。これを見ると η_1 、 ξ_0 とも波形の再現性が良いことがわかるが、波高を決定する波の山谷付近を見ると η_1 では η_0 よりも小さい値を示すことがわかる。このことは不規則波を作用させた場合の表-4をみても明らかである。

これは波高の大きな波においては波峰が尖る傾向にある一方で、波と塔体の動揺との間には位相差が存在するため波峰来襲時には塔体は既に傾斜しており、従って傾斜角による補正を行うとこの波峰をとらえられず、結果として得られる波高が小さめに出るためと考えられる。一方、波高の小さい波のときには補正を行った方が良い結果が得られるようだが、波高が小さい時には塔体の動揺も小さくなるため、補正の有無による差は余り大きなものとはならない。

波高の大きな波に対してのデータが最も必要であることを考えれば、補正を行わない観測データによって必要となる情報は得られると考えられる。

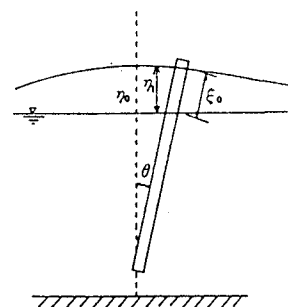


表-4 波高・周期の比較（不規則波）

	H_{max} (cm)	$H_{1/3}$ (cm)	$\bar{H}$ (cm)
η_0	43.6	26.4	17.9
ξ_0	40.5	26.6	17.6
η_1	39.9	25.3	17.0

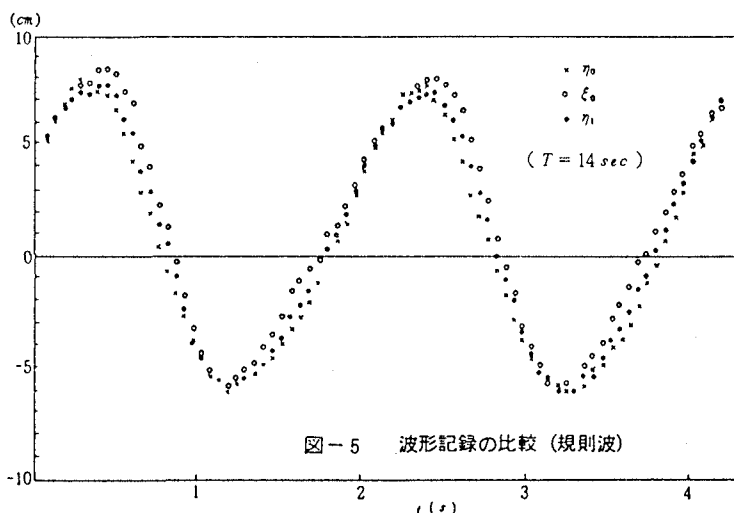


図-5 波形記録の比較（規則波）

(2) 3次元平面水槽による実験

(1) の2次元不規則造波水路による実験によってタワーによる波高測定の有意性は示されたが、この実験においては波のエネルギーの方向分散性が考慮されておらず、従って方向スペクトルを有する波を作用させたときにも同様なことが言えるかどうか検討しておく必要がある。

本実験は図-6に示すように36×24mの3次元平面水槽に幅30cmの造波板を30台設置して行った。

表-5 目標とした実験波の諸元

WAVE	H _{1/2} (cm)	T _{1/2} (s)	S _{max}
1	15	2.09	∞
2	15	2.09	75
3	15	2.09	10

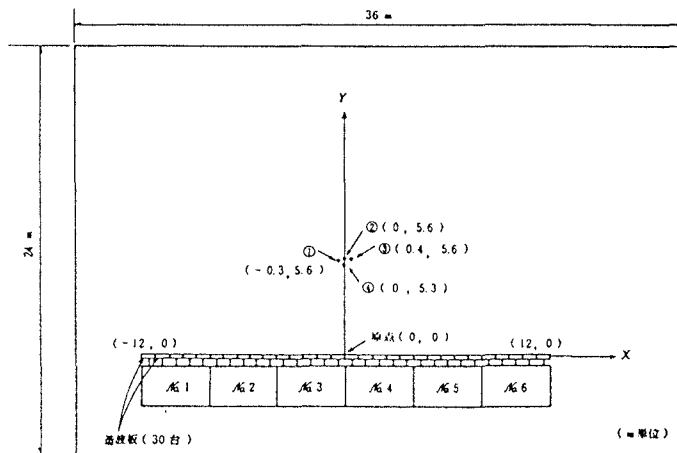


図-6 実験水槽および波高計の設置位置

1) 実験波の検定

図-6に示したように4地点に容量式波高計を設置し、波型の同時記録を得て方向スペクトルの測定を試みた。

図-7は②の波高計で得られた波の周波数スペクトルをプロットし、あわせて目標としたブレットシュナイダー光易型のスペクトルを太線で示したものである。これより周波数スペクトルの再現性が良いことがわかる。

一方、図-8は波エネルギーの方向分布特性をEMLM法によって解析した結果を示したものである。これを見ると実験値の方向分散が理論値のそれよりも大きめになることがわかる。しかし、ここで得られた結果はEMLM法によって解析される方向分散がもともと実際の方向分散よりも大きめになることがその主な原因と考えられるため実験においてそれぞれの方向分散が再現されているとみなすこととした。

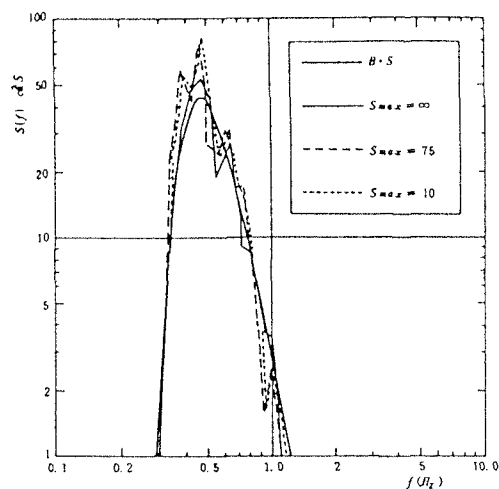


図-7 Na2波高計による実験波の周波数スペクトル

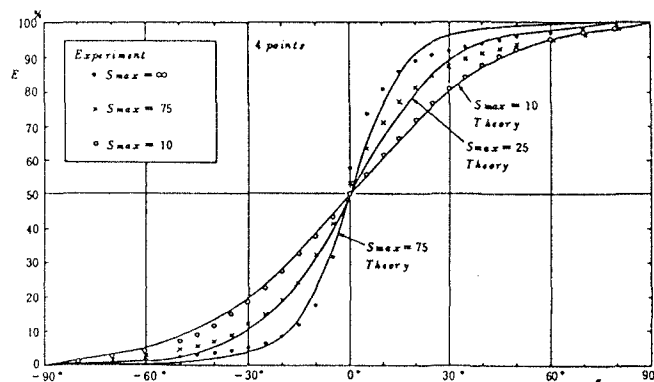


図-8 実験波の方向別全エネルギー分布 (4点の波形記録)

表-6 波高・周期の測定結果とタワーの動揺特性

WAVE	H _{1/2}	T _{1/2}	S _{max}	X	Y	$\frac{\sqrt{\eta_x^2}}{\sqrt{\eta_y^2}}$
	(cm)	(s)		$\sqrt{\eta_x^2}$ (cm)	$\sqrt{\eta_y^2}$ (cm)	
1-1	15.7	1.91	∞	3.0	11.5	0.26
	(15.7)	(1.92)				
1-2	15.7	1.97	75	2.9	11.5	0.25
	(15.1)	(1.94)				
2-1	16.5	2.09	75	4.3	11.9	0.36
	(16.0)	(2.07)				
2-2	16.5	1.97	75	4.5	11.7	0.39
	(16.1)	(2.00)				
3-1	16.9	2.05	10	6.4	11.2	0.57
	(16.7)	(2.03)				
3-2	16.8	2.03	10	6.3	11.3	0.56
	(16.2)	(2.02)				

2) 塔体による波高・周期

表-6はタワーによる波高・周期の測定結果と②の波高計による測定結果とを比較して示したものである。これより多方向の不規則波に対しても塔体側面で得られた波形データは実際の波の諸元とよく一致していることがわかる。

また、表-6においては波の主方向Yとその直角方向Xにおける塔体の揺れの分散及びその比も示している。これを見ると方向分散が大きくなるほど両者の比の値は大きくなっていくことから、これらの分散値を波の方向分散性とある程度対応づけることが可能であると考えられる。

第4章 観測データによる解析

前章までに述べたような比較、事前検証を経てタワーは昭和60年11月に設置されたが、それより取得した波浪観測データをもとにした解析を行い、波浪観測方式を再検討する。

波浪データの観測期間とその選定条件は表-7のとおりである。

表-7 観測データの概要

観測期間	60.11.1~61.2.19
選定条件	有義波高3m以上
データ取得数	197個

1) 波高・周期観測データに対する解析

図-9は有義波高 $H_{1/3}$ 、最大波高 H_{max} 等の波高の諸元に対する相関性をみたものである。これを見ると波高の諸元に対する相関性はよいことがわかる。また表-8は、これより得られる波高の諸元間の比の値と波高の分布としてレイリー分布を仮定した場合の値とを比較したものであるが、これもよく一致していることがわかる。更に表-9は、タワーによる波高・周期観測データと、その取得期間と同時期に行った既設の超音波波高計による波高・周期観測データとを比較したものであるが、よく一致したものとなっていることがわかる。これらのことより波高観測に対する信頼性が高いことがわかる。

表-8 波高の諸元の比較

波高諸元比	Rayleigh分布	データの分布 (相関係数)
$\bar{H} / H_{1/3}$	0.63	0.61 (0.99)
$H_{1/10} / H_{1/3}$	1.27	1.27 (0.98)
$H_{max} / H_{1/3}$	1.61	1.69 (0.80)

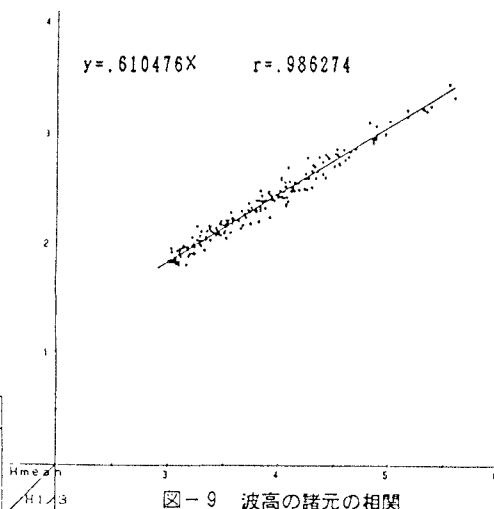


図-9 波高の諸元の相関

表-9 波高・周期分布表の比較

$T_{1/3}(s)$ $H_{1/3}(m)$	既設の超音波波高計						$T_{1/3}(s)$ $H_{1/3}(m)$	タワーのステップ式波高計					
	~7.0	~8.0	~9.0	~10.0	~11.0	合計(%)		~7.0	~8.0	~9.0	~10.0	~11.0	合計(%)
3.0~	22	59	14	6	1	102(41.5)	3.0~	6	45	1	2	1	71(36.0)
3.5~	1	31	37	3		72(29.3)	3.5~		21	24	3	2	50(25.4)
4.0~		5	32	7		44(17.9)	4.0~		4	34	7		45(22.8)
4.5~			13	7		20(8.1)	4.5~		1	11	10		22(11.2)
5.0~				6		6(2.4)	5.0~				6		6(3.1)
5.5~				2		2(0.8)	5.5~				3		3(1.5)
合計	23	95	96	31	1	246	合計	6	71	86	31	3	197
(%)	(9.3)	(38.6)	(39.0)	(12.6)	(0.4)		(%)	(3.1)	(36.0)	(43.7)	(15.7)	(1.5)	

2) 波向観測データに対する解析

表-10は、タワーによる観測データと、その観測時刻と同時刻に行ったミリ波レーダーによる波向観測のデータとを比較したものであるが、波向観測に関しては必ずしも一致したものとはなっていないことがわかる。図-10は、ある観測時刻における塔体の変動の状況を表したものであるが、塔体の傾斜、動揺が必ずしもユニバーサルジョイント部の鉛直直上を通過して行われるとは限らないことを示しており、波力、潮流力、風力等の力により塔体はある程度傾いた状態を中心として動揺を行うことが想像される。このために表-10の波向の不一致が生じていると考えられ、方向分散に関しても特に有意な関係を見つけることは出来なかった。

表-10 波向観測データの比較

観測手法	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	不明	合計
レーダー			23	151	20		3	197
タワー	2	40	115	32	4	4		197

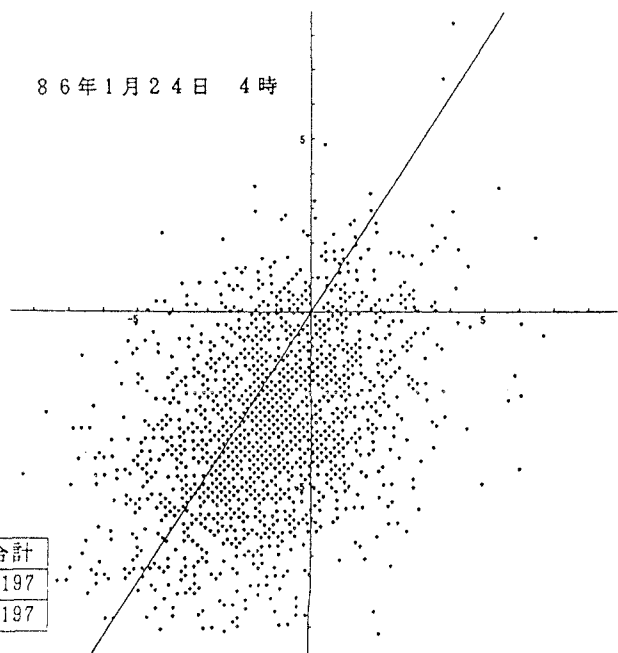


図-10 塔体変動の状況

第5章 波浪観測方式に関する今後の課題

タワーによる波浪観測方式に対する構造様式の比較、水理実験による事前検証、観測データによる解析によって得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) タワーの方式によるステップ式波高計の波高観測手法は、他の構造様式と比較して波高計は塔本体と一体化しており気泡による異常記録を検出することが少ないため安定性が高く、阿賀沖における使用例でも電極部への海中付着物等による機能低下は見られず良好な状態を維持しており、維持管理が容易になると考えられるとともに、水理実験・データ解析から検証されたように波高・周期の観測精度は工学的利用の範囲で十分に信頼性が高いものである。
- 2) 塔体の波浪中における傾斜運動の性状を利用して、塔体の傾斜方向を観測することにより波向を算出することが可能なものと考えられ、水理実験による結果からも波の主方向に対する横揺れ等の影響は軽微なものと考えていたが、観測データの解析結果をみると、実際の動揺では波力、潮流力、風力等の力の影響が無視できないと考えられる。
- 3) 方向スペクトルを求めようとする場合、通常は波高及び水平2方向の波動量が必要であるが、今回の観測方式では塔体の傾斜データに対する伝達関数が求められていないため、このままでは方向スペクトルが求められない。このために、水理実験において波の主方向とその直角方向における塔体動揺の分散比を波の方向分散性に対応づけられる数値として提案したが、観測データによる解析においては波の主方向の算定手法が不十分だったこともあってか特に有意な関係性を導くことができなかった。

また本論文では明らかにされず、今後の検討を要する課題は以下のとおりである。

- 1) 塔体の傾斜に対する波高観測値の補正手法には波高の大きさによる波浪の特性の違いや、塔体の動揺との位相差等に対しての検討の余地があると考えられる。
- 2) 塔体の傾斜・動揺状況の観測データと波向との間には強い相関性があると考えられることから、波向を算出する方法を検討していく必要があると思われる。
- 3) 塔体の傾斜データに対する伝達関数を求め、方向スペクトルを算出する手法について検討する必要がある。

< 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，p 173~177，1984
- 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