

回折領域における波浪場の現地観測

泉宮 尊司*・磯部 雅彦**・清水 琢三***・大下 哲則***

1. 序 論

波の回折現象は静穏海域の確保や漂砂制御等の問題に対して重要な要素となる。数値計算の結果¹⁾によれば、回折現象には波の不規則性、特に方向スペクトルの形状の影響が大きい。従って、現地においても波向を含めた観測を行なって回折特性を明らかにする必要がある。しかし、波向を含む計測システムが一般化されていないため、現在までのところ、詳細な観測がなされた例はない。わずかに、秋田港において入射波向を考慮して計算した回折領域での波高を観測値と比べた例があるにすぎない²⁾。ところで、最近、波高計と流速計の組み合わせによって精度よく方向スペクトルを推定するための式が導かれた^{3), 4)}。そこで、本研究においては、これに基づいて回折領域の波浪場を方向スペクトルも含めて観測し、不規則波に対する回折計算法の妥当性を検証する。

2. 現地観測およびデータ処理の方法

(1) 現地観測の方法

現地観測は、図-1 に示す茨城県大洗港の沖防波堤周辺にて、1985年8月28日に行なった。同一地点における水面変動と水平2成分水粒子速度の同時記録を得るために、同期された自記式の超音波波高計と電磁流速計（コンパス内蔵）を同一の架台（1m×2m）に取り付け、船上から海底に設置することにした。このような装置を4組使用したが、そのうち3組は図中 No. 0, 4 および 8 地点に終日設置し、残りの1組は No. 1, 2, 3, 5, 6, 7 の順に移動させて計測した。内蔵のカセット式デジタル磁気テープ装置の記録時間間隔は0.5sであり、2046個（約17分）のデータが1回の連続記録となる。そこで、各測点とも2回以上の記録が得られるように、移動を行なった。

測点 No. 0 は入射波の測定用である。測点 No. 1~4 および 4~8 は、目視による当日の波向に対し、それぞれほぼ直角および平行になるように決めた。これは、規

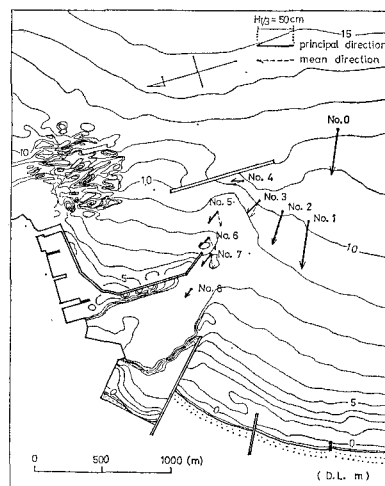


図-1 測定点配置図

則波と不規則波のいずれの計算結果が妥当であるかを検討するのが容易になるように、それらの差が明確になる測点配置とした結果である。

なお、観測当日の入射波浪は、波高が小さくうねり性のものであった。

(2) データ処理の方法

得られた波高計記録には、1ケース内で数個のノイズが含まれているものが見られたが、これらについては前後のデータから直線的に内挿した値で置きかえた。また2成分の流速記録は、コンパスの値を利用して、東西方向と南北方向に回転変換した。図-2 は、これらの処理を行なった後の記録の一部を示す。図中、 η は水面変動を表わし、 u および v は磁北から定めた東西（東向き正）および南北（北向き正）方向の流速を表わす。これを見ると特に No. 3~8 の水面変動に周期 2~3s 程度の細かな振動成分が含まれるが、これを図-3 に示すパワースペクトルで見ると、周波数 f が 0.3 Hz 程度の高周波数側でのピークとなって現われる。これは港内の船舶の航行に伴う航跡波に対応するものであり、回折現象を調べるには不都合な成分である。そこで、これと長周期波成分とを除去するため、図-4 に示すバンドパスフィル

* 正会員 工博 横浜国立大学助手 工学部建設学科

** 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

*** 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部

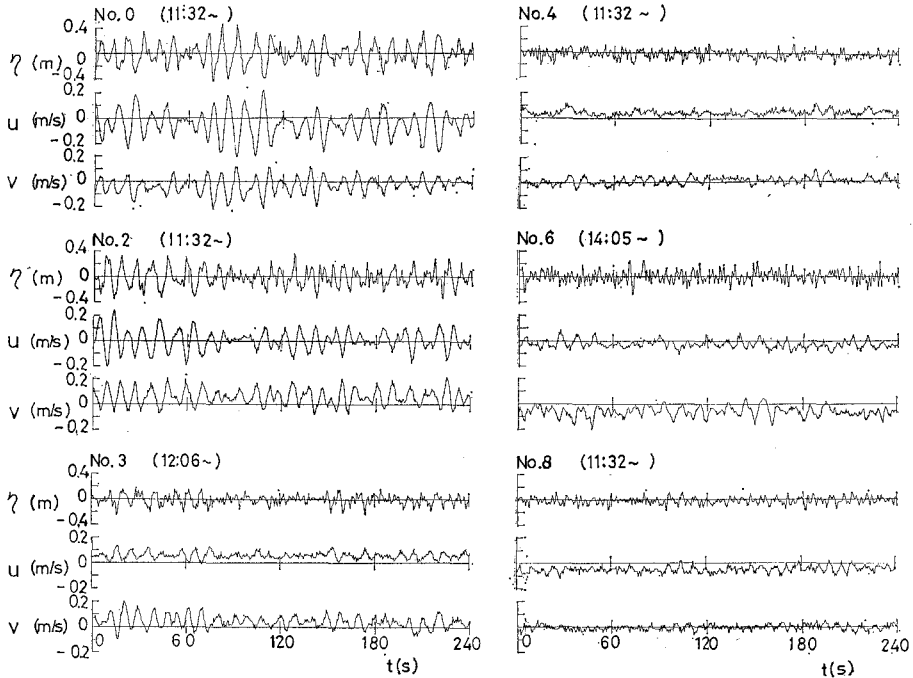


図-2 測定記録の一部

No. 8 (11:32~)

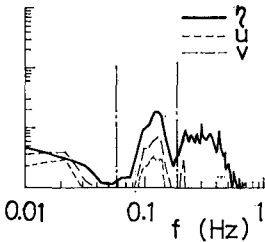


図-3 パワースペクトルの一例

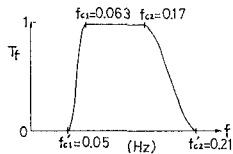


図-4 バンドパスフィルタ

ターを通してから時系列データの解析を行なうこととした。

3. 結果および考察

(1) 共分散法と波別解析法

表-1 は、共分散法および波別解析法によって得られる諸統計量の、すべてのケースに対する平均値および標準偏差（または変動係数）を示す。ここで、平均波向と主波向は、磁北が真北から反時計方向に 6° ずれていることを考慮した上で、真東からの反時計回りの角度を示してある。

まず、入射波浪の定常性について検討する。合田⁴⁾ は数値シミュレーションの結果から、同一のスペクトルに

対する有限長の波形記録から得られる有義波高や有義波周期などの統計量の変動係数 $\sigma(x)/\bar{x}$ が、記録中の波数 N_0 の平方根に逆比例することを見出した。そして

$$\sigma(x)/\bar{x} = \alpha / \sqrt{N_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

なる関係式中の α の値を、種々の統計量に対して求めている。ここでは $N_0=97$ あるから、これを使って比例定数を求め、合田の結果と比較した。その結果、 η_{rms} 、 $H_{1/3}$ 等の波高に関する統計量については、3~5 割大きく、波高相互間の比についてはほぼ同じ、また $T_{1/3}$ 等の周期や周期相互間の比については 2~3 割小さくなった。そして、カルデラ港で得られた観測結果の傾向と一致した。さらに、分散・共分散の変動係数については、著者ら⁵⁾ による理論値では数%という非常に小さな値となるが、実測結果はその 2 倍程度となっている。従って、厳密な意味で波浪場の定常性が保たれているとは言えない。しかし、実測による統計量の変動係数の絶対値が 0.1 以下であることから、回折係数の分布を考える際に、その時間変化を考慮する必要はないと考えられる。

次に、全測点について、波高比および周期比を見ると、特に波高比の標準偏差がいずれも小さい。従って、回折係数を定義する際に、ある一種の代表波高、たとえば有義波高の比を用いてさしつかえないと言える。

平均波向 θ_m と主波向 θ_p とは No. 0, 1, 2 および 8 ではほぼ一致しているが、No. 3~7 では有意な差があり、またそこで long-crestedness パラメーター γ の値も大

表-1 波浪の統計諸量の平均値と標準偏差・変動係数

測点番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8
観測時間帯	9:15~7:08	10:41~10:58	11:15~11:49	12:06~12:57	9:32~16:21	13:14~13:48	14:05~14:40	15:14~15:31	10:58~15:48
有効観測回数	76	1	2	3	24	2	2	1	16
η'_{rms} (cm)	16.0 [0.085]	15.8	12.1 [0.025]	5.8 [0.008]	3.9 [0.107]	4.2 [0.012]	4.9 [0.072]	5.1	3.1 [0.087]
$\bar{u}$ (cm/s)	-2.2 (3.1)	-2.3	-0.5 (0.6)	3.9 (0.8)	0.5 (2.9)	-1.1 (1.0)	-3.4 (0.6)	1.5	-0.8 (0.5)
$\bar{v}$ "	0.6 (4.0)	1.3	7.0 (0.5)	4.2 (0.7)	-2.7 (2.7)	-3.9 (0.2)	-6.1 (0.4)	-0.7	-1.3 (2.2)
u'_{rms} "	9.0 [0.096]	10.5	7.1 [0.027]	2.2 [0.040]	1.3 [0.124]	2.0 [0.031]	2.6 [0.018]	2.7	1.3 [0.054]
v'_{rms} "	5.8 [0.079]	6.5	6.0 [0.010]	3.6 [0.062]	2.4 [0.102]	2.5 [0.039]	3.3 [0.028]	3.0	1.8 [0.056]
$\overline{\eta' u'}$ (cm ² /s)	-135.4(25.1)	-159.6	-83.3 (4.5)	-10.6 (0.8)	0.7 (0.5)	-3.9 (0.1)	-8.4 (1.6)	-9.8	-2.8 (0.4)
$\overline{\eta' v'}$ "	78.3 (13.5)	94.5	66.0 (3.1)	14.2 (1.7)	4.7 (1.5)	0.8 (0.3)	-0.7 (0.3)	2.8	4.6 (0.7)
$\overline{u' v'}$ (cm ² /s ²)	-41.2 (8.1)	-59.0	-38.1 (1.8)	-4.8 (0.7)	1.6 (0.3)	-2.2 (0.5)	-1.8 (0.2)	-1.4	-1.5 (0.2)
H_{max} (cm)	97 [0.116]	87	66 [0.092]	36 [0.116]	23 [0.142]	22 [0.002]	26 [0.091]	31	19 [0.114]
$H_{1/10}$ "	78 [0.093]	72	57 [0.024]	29 [0.018]	19 [0.107]	19 [0.011]	22 [0.064]	25	15 [0.100]
$H_{1/3}$ "	62 [0.088]	59	47 [0.014]	23 [0.026]	15 [0.105]	16 [0.019]	18 [0.057]	20	12 [0.089]
$\bar{H}$ "	40 [0.096]	39	30 [0.046]	15 [0.016]	10 [0.111]	10 [0.048]	12 [0.069]	13	8 [0.089]
T_{max} (s)	9.1 [0.079]	9.9	8.8 [0.010]	9.2 [0.084]	9.0 [0.101]	8.3 [0.006]	9.9 [0.175]	7.7	8.1 [0.071]
$T_{1/10}$ "	9.3 [0.042]	9.3	9.3 [0.006]	8.9 [0.024]	9.1 [0.037]	9.3 [0.064]	9.5 [0.020]	8.5	7.9 [0.036]
$T_{1/3}$ "	9.4 [0.033]	9.5	9.2 [0.022]	9.1 [0.023]	9.3 [0.033]	9.8 [0.019]	9.5 [0.005]	9.2	8.0 [0.027]
$\bar{T}$ "	8.9 [0.029]	8.8	8.8 [0.013]	8.7 [0.005]	8.6 [0.038]	8.6 [0.016]	8.7 [0.021]	8.8	7.7 [0.043]
f_p (Hz)	0.106 [0.064]	0.099	0.101[0.005]	0.101[0.015]	0.103[0.132]	0.099[0.014]	0.105[0.033]	0.092	0.135[0.125]
$\sqrt{\beta_1}$	0.021 (0.041)	0.004	0.029(0.024)	-0.016(0.017)	-0.008(0.040)	0.010(0.005)	-0.022(0.014)	0.049	-0.015(0.049)
β_2	2.941 (0.216)	2.725	2.868(0.319)	3.104(0.227)	2.923(0.252)	2.699(0.109)	2.579(0.049)	2.873	3.003(0.287)
θ_m (deg)	155.9 (1.8)	155.4	147.6 (0.2)	133.0 (2.9)	88.8 (4.9)	175.1 (3.9)	190.8 (2.6)	169.8	128.1 (3.0)
θ_p "	155.9 (1.8)	156.0	146.6 (0.5)	121.0 (0.9)	76.8 (2.7)	125.6 (6.0)	118.3 (4.7)	125.1	128.7 (2.2)
γ'	0.90 (0.02)	0.95	0.95 (0.01)	0.71 (0.03)	0.45 (0.07)	0.29 (0.01)	0.41 (0.05)	0.49	0.77 (0.05)
γ	0.31 (0.03)	0.24	0.23 (0.01)	0.42 (0.04)	0.43 (0.04)	0.59 (0.04)	0.73 (0.01)	0.82	0.44 (0.06)
θ_k (deg)	18.1 (1.8)	13.6	13.3 (0.8)	30.6 (3.3)	44.5 (6.6)	68.4 (0.9)	62.5 (3.3)	55.0	27.5 (3.9)
$H_{1/3}/\eta'_{rms}$	3.877 (0.066)	3.764	3.873(0.038)	3.901(0.054)	3.853(0.074)	3.786(0.002)	3.797(0.084)	3.947	3.848(0.111)
$H_{max}/H_{1/3}$	1.557 (0.146)	1.467	1.422(0.150)	1.579(0.208)	1.522(0.126)	1.422(0.026)	1.404(0.048)	1.539	1.633(0.113)
$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.256 (0.044)	1.218	1.225(0.046)	1.285(0.040)	1.252(0.044)	1.181(0.009)	1.191(0.010)	1.244	1.264(0.034)
$\bar{H}/H_{1/3}$	0.645 (0.018)	0.661	0.650(0.020)	0.643(0.015)	0.652(0.019)	0.659(0.021)	0.663(0.011)	0.649	0.647(0.019)
$T_{max}/T_{1/3}$	0.976 (0.080)	1.046	0.956(0.030)	1.015(0.108)	0.964(0.104)	0.847(0.010)	1.045(0.178)	0.837	1.015(0.073)
$T_{1/10}/T_{1/3}$	0.993 (0.034)	0.981	1.002(0.016)	0.975(0.013)	0.975(0.040)	0.946(0.043)	1.000(0.025)	0.923	0.981(0.027)
$\bar{T}/T_{1/3}$	0.947 (0.030)	0.928	0.954(0.033)	0.950(0.017)	0.926(0.036)	0.876(0.030)	0.922(0.015)	0.960	0.960(0.029)
$f_p T_{1/3}$	0.995 (0.054)	0.940	0.929(0.016)	0.917(0.018)	0.968(0.107)	0.966(0.005)	0.993(0.027)	0.840	1.082(0.147)

η : 水面変動, u : 東向き流速, v : 北向き流速 (磁北基準), $-$: 平均値, $'$: 平均値からの偏差, rms : 自乗平均の平方根, H_{max} : 最大波高, $H_{1/10}$: 1/10最大波高, $H_{1/3}$: 有義波高, $\bar{H}$: 平均波高, T_{max} : 最大波周期, $T_{1/10}$: 1/10最大波周期, $T_{1/3}$: 有義波周期, $\bar{T}$: 平均周期, f_p : ピーク周波数, $\sqrt{\beta_1}$: 歪度, β_2 : 尖度, γ' : 方向集中度係数, γ : long-crestedness パラメーター, θ_k : 平均分散角, () 内は標準偏差, [] 内は変動係数 (=標準偏差/平均値) を表わす. * 印は 8月29日. その他は 8月28日.

きくなっている。これは 図-1 からわかるように, No. 3~7 では沖防波堤の北側から進入する波の成分が重なるためである。

(2) 方向スペクトル

波浪場の特性を詳細に把握するため, EMLM²⁾を用いて方向スペクトルを計算した。その結果が 図-5 に示されているが, 波が東に進行する場合を基準として, 反時計回りに波向角がとられている。No. 0, 2 および 8 は一方向波浪系であるが, No. 4, 6 は二方向波浪系となっている。ここで $\theta > 180^\circ$ となる防波堤北側から来る波に着目すると, 必ずしも防波堤先端からの回折波を示す波向になっておらず, 大洗港防波堤からの反射波である可能性もある。このようにこの成分波は現在のところ不確定な成分であるため, 以後, 回折現象を検討する際

には, この部分のエネルギーを除き, 南側からのみの回折波を対象とすることとする。

(3) 入射波の方向スペクトル形状

ここで, 回折計算を行なう際の入力条件となる入射波の方向スペクトル形状について検討する。図-6 は No. 0 地点での周波数スペクトルの 76 ケースにわたる平均値と次式で表わされる Bretschneider-光易型⁶⁾の周波数スペクトルとを比較したものである。

$$S(f) = 5 \left(\frac{E}{f_p} \right) \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^4 \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

この標準スペクトルは風波に対するものであるため, 若干の差異が見られる。しかし, 回折係数に大きな差異をもたらすとは考えられないので, この標準形を入力周波

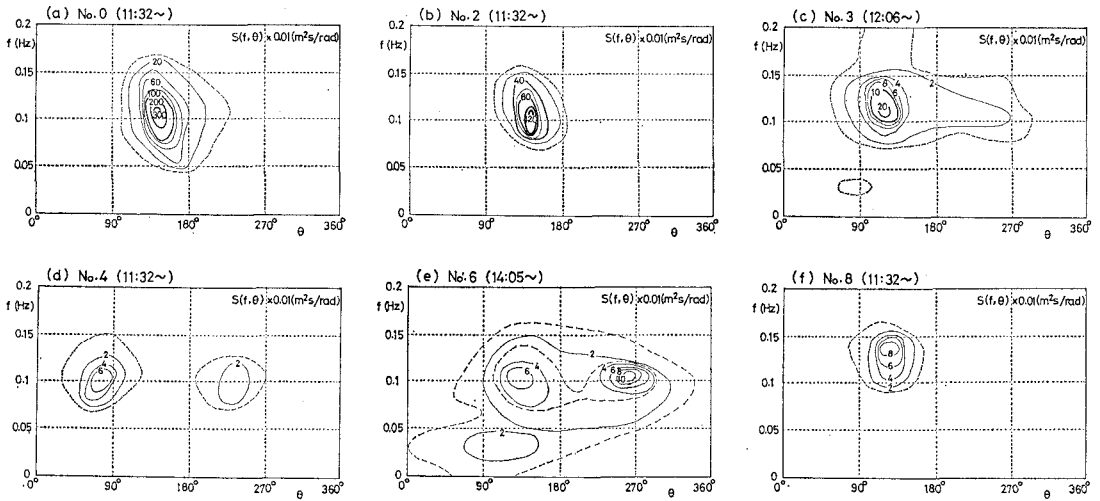


図-5 方向スペクトルの計算例

数スペクトルとした。

次に、方向関数 $G(\theta)$ は光易型方向関数

$$G(\theta) = g_s \cos^{2s}[(\theta - \theta_0)/2] \quad \dots\dots\dots (3)$$

を仮定した。ここに、 θ_0 は主波向、 g_s は $G(\theta)$ の積分値を1とするための定数であり、観測結果から s の値を与えることにする。まず、クロス・パワースペクトルから周波数ごとの long-crestedness パラメータ $\gamma(f)$ 、平均分散角 $\theta_s(f)$ および方向集中係数 $\gamma'(f)$ が定義される⁷⁾。たとえば、 P_u 、 P_v をパワースペクトル、 C_{uv} をクロススペクトルとして

$$\gamma(f) = \frac{[(P_u + P_v) - \sqrt{(P_u - P_v)^2 + C_{uv}^2}]^{1/2}}{[(P_u + P_v) + \sqrt{(P_u - P_v)^2 + C_{uv}^2}]^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。また、光易型方向関数を仮定すると、たとえば、

$$\gamma(f) = \sqrt{\frac{2s+1}{s^2+s+1}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となるので、これらの式から s を逆算することができる。その結果をそれぞれ s_f 、 s_s 、 s_f' として図示したものが図-7である。互いに有意な差が見られるが、数値シミュレーション結果から s_f の信頼度が高いので、これを用いることにする。ところで、風波に対する s の関数形は Mitsuyasu ら⁸⁾ によって与えられているが、うねりに対しては図-8 のようにピーク周波数付近での減少傾向が急激過ぎる。そこで、新たに、

$$s = \frac{s_{\max}}{1 + b \{\ln(f_p/f)\}^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

によって s の関数形を与えることにし、今回の場合は $s_{\max} = 29$ 、 $b = 10$ とした。この結果も図-8 に示されている。

(4) 回折計算の結果との比較

以上により、式 (2)、(3) および (6) を組み合わせた

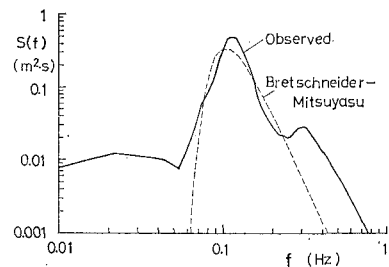
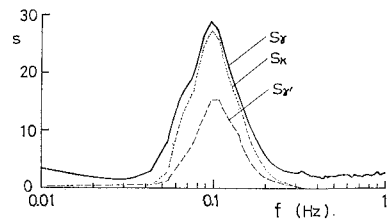
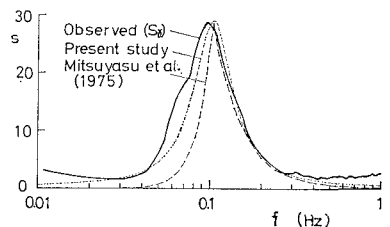


図-6 入射波浪のパワースペクトル

図-7 光易パラメータ s の確定値図-8 光易パラメータ s の関数近似

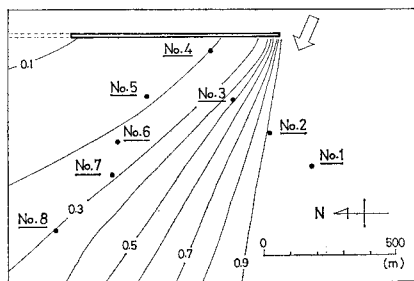


図-9 不規則波に対する回折係数の計算結果

表-2 波高および波向の計算結果と実測結果との比較

測点番号	1	2	3	4	5	6	7	8
$H_{1/3}/H_0$ 実測値	0.96	0.75	0.37	0.24	0.25	0.30	0.32	0.19
補正值	—	—	—	0.20	0.18	0.20	0.24	—
計算値(不規則波)	1.00	0.90	0.46	0.20	0.19	0.23	0.28	0.30
〃 (規則波)	1.08	1.08	0.31	0.17	0.13	0.12	0.14	0.12
〃 (不規則波*)	0.97	0.77	0.32	0.15	0.13	0.16	0.19	0.19
θ_m 実測値	155°	148°	133°	89°	175°	191°	170°	128°
補正值	—	—	—	87°	119°	123°	123°	—
計算値(不規則波)	156°	150°	131°	103°	112°	116°	122°	123°
〃 (規則波)	159°	159°	139°	104°	117°	123°	130°	131°
〃 (不規則波*)	164°	154°	133°	102°	112°	119°	123°	124°
r 実測値	0.24	0.23	0.42	0.43	0.59	0.73	0.82	0.44
補正值	—	—	—	0.61	0.66	0.65	0.66	—
計算値(不規則波)	0.31	0.24	0.15	0.04	0.10	0.12	0.14	0.14

* 入射角 $\theta_0=166^\circ$ として計算したもの。

方向スペクトル $S(f, \theta) = S(f)G(\theta)$ を用いて、放物型方程式による方法⁹⁾によって、北側に延びた半無限堤に対する不規則波の回折係数(有義波高比)を求めた。計算において、周波数は5分割、波向は9分割としている。

図-9は結果を図示したものであり、さらに表-2は測定点での実測値と計算値を比較したものである。表中の補正值とは、方向スペクトルから、 $\theta > 180^\circ$ となる沖防波堤北側からのエネルギーを取り除き、改めて波高や波向を定義した結果である。

まず波高について、不規則波による計算値と実測値または補正值とがかなりよく一致していることがわかる。ただし、No. 2, 3の波高には有意な差が見られるが、これはその付近の波高変化が著しい場所であるため、微小な位置の差でも波高が相当異なることが原因であろう。参考のため、波向を 10° 変化させて、入射角を $\theta_0=166^\circ$ とした計算結果が示されている。これだけの变化でも波高は有意に変化し、実測値にさらに近づく。なお、規則波の計算結果では、No. 5~8のようなしゃへい領域で計算値が過小となっている。

波向については、平均波向と主波向の計算結果が変わらないので、平均波向のみが示されているが、実測値または補正值とよく一致している。

long-crestedness パラメータについては、計算上回折領域では非常に小さくなるが、実際にはノイズや反射の影響でそれほど小さくならない。

4. ま と め

波高計と流速計の組み合わせにより、方向スペクトルも含む回折領域の波浪場の現地観測を行なった。種々の統計諸量により波浪場の特性を明らかにした。さらに、

数値計算結果との比較を行なった結果、不規則波を用いた重ね合わせ法による計算法の妥当性が確められた。なお、今回は静穏な波浪時での観測であったが、荒天時の観測を行なうことも重要である。その場合、入射波高が大きいために相対的精度が上がることを期待できる。

なお、現地観測に際しては、後藤武洋計画課長を始めとして茨城県三浜港湾事務所の方々に大変お世話になった。ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 合田良実・鈴木康正：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算，港湾技研資料，No. 230，pp. 1~45，1975。
- 2) 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，pp. 173~177，1984。
- 3) 小舟浩治・橋本典明：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，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 159~163，1985。
- 4) 合田良実：波浪の統計的性質に関する二、三の数値的検討，港湾技研報告，第24巻，第4号，pp. 65~102，1985。
- 5) 磯部雅彦・古市耕輔：不規則波に対する統計量の変動に関する理論的考察，第33回海岸工学講演会論文集，p. 161~165，1986。
- 6) 光易恒：風波のスペクトルの発達(2)，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 1~7，1970。
- 7) 堀川清司(編)：海岸環境工学，補章A，東大出版会，582p.，1985。
- 8) Mitsuyasu, H. et al.: Observations of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, J. Phys. Oceanogr., Vol. 5, pp. 750~760, 1975。
- 9) 磯部雅彦：放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・碎波変形の計算法，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 136~140，1986。