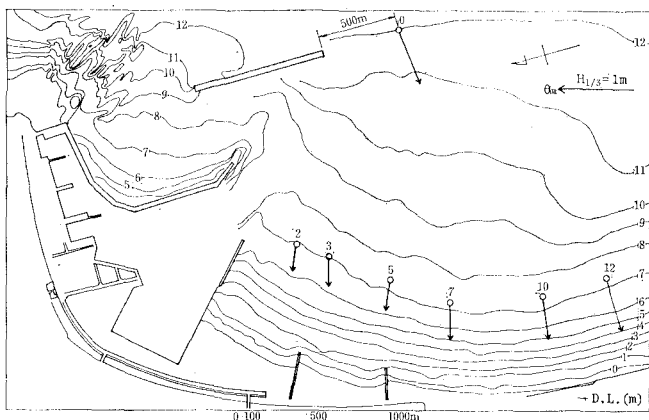


屈折・回折領域における波浪場の現地観測

磯部雅彦* ・ 泉宮尊司** ・ 堀川清司***
清水琢三****・ 大下哲則****・ 関本恒浩****

1. 序 論

緩勾配方程式が提案されて以来、波浪の屈折・回折の解析手法に関しては目ざましい進歩がある。著者の1人は、緩勾配方程式を直交曲線座標系上で放物型方程式に近似し、それを用いて不規則波の屈折・回折・碎波変形計算を行う手法を提案した¹⁾。しかし、多方向不規則波浪に対するその手法の有効性の検証はまだ行われていない。本研究では、屈折・回折領域において方向スペクトルを含む波浪の現地観測を行い、提案した手法に基づく数値計算結果との比較検討を行う。



図一 観測点配置図

2. 現地観測

(1) 観測装置および方法

現地観測は、図一に示す茨城県大洗港の沖防波堤の回折領域にて、1987年11月1日に行った。各地点での方向スペクトルを求めるため、以前²⁾と同様に同期された自記式の超音波波高計と電磁流速計を用いて同一地点の水面変動と底面付近の2成分水平流速を測定した。図中のNo. 0地点は入射波観測用の測定点であり、ここには1組の観測装置を終日設置した。当初は、この他に3組を移動させながら12地点での方向スペクトルを求める計画であった。しかし、1組が故障したこと、および移動に手間取ったことにより、2組の観測装置を2・3、5・7、10・12地点と順番に移動させることにより、合計6地点での観測を行った。

内蔵されたカセット磁気テープへの記録は、サンプリング間隔0.5sで1回につき2046個行われる。従って1回分の記録時間は1023s(17分3秒)であり、各地点とも2回分以上のデータが記録されるように観測装置の設置・移動を行った。

なお、観測前日には10m/s程度の東からの風が吹い

ていたが、当日は5m/s程度におさまった。このため、観測日の海象としては、波高の減少期にあたるやや変化の急なものとなった。

(2) 観測結果

カセット磁気テープに記録されたデータを、電子計算機によって処理した。特に流速データについては、内蔵コンパスの指示値に基いて、東西および南北方向にとった座標軸上での値に変換した。その際、磁北が真北に対し6.5°西回りの方向であることも考慮した。

得られた時系列データを検査したところ、No. 3, 5, および12で測定した装置のうち、流速計のデータに若干のノイズが混入していた。代表波向の決定等に重大な影響を及ぼす程度とは考えられないが、long-crestednessパラメータには相当影響するであろう。No. 2, 5および10で測定した組合せの方では、流速計の記録がときどき止まって再び動き出すという問題が起きた。しかし、水面波形と比較することによって実際の測定時間帯を推定したところ、ちょうど3分止まるなどしたことがわかり、時刻をずらすことにより、こちらも有効なデータと見なししてさしつかえないと判断した。

表一は観測期間中の波浪の統計諸量の平均値をとりまとめたものである。No. 0の地点については、標準偏差あるいは変動係数(=標準偏差/平均値)もあわせて示

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 新潟大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 埼玉大学教授 東京大学名誉教授

**** 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部

されている。

まず, No. 0 地点における波浪データから入射波の特性について議論する. 平均流速は西向流速 $\bar{u}$, 南向流速 $\bar{v}$ とともに絶対値が 10 cm/s 以下であるから, 流れは弱いと言える. 入射有義波高 $H_{1/3}$ が 77 cm, 有義波周期 $T_{1/3}$ が 5.1 s であり, 波高は大きくないものの風波性の周期の短い波浪である. 平均波向 θ_m および主波向 θ_p のような代表波向で見ると, ほぼ沖防波堤に直角に波が入射したことになる. なお, 波向は西へ向かう場合を基準として, 南寄りを正としてある. 歪度 $\sqrt{\beta_1}$ は小さいので, 非線形性は弱い. long-crestedness パラメータ γ' および平均分散角 θ_x が大きく, 方向集中係数 γ' が小さいということは, 波向の分散性が高いことを示している³⁾. 種々の波高比のうち, 有義波高 $H_{1/3}$ と水面変動の自重平均平方根 η_{rms} との比は 3.74 と通常の観測値 3.8~3.9 よりもやや小さい. これは後に見るように, 周波数スペクトルのバンド幅が広いためであると考えられる. ピーク周波数 f_p と

有義波周期 $T_{1/3}$ との積は 0.86 となっているが, 通常の観測値 0.94 よりも小さい. これもバンド幅が広いためであろう.

次に, No. 2~12 における統計諸量の分布を見る. まず, η_{rms} や種々の代表波高は No. 2 から 12 に向かって徐々に増大しているが, これは回折の影響である. しかし, 増加の割合は, 規則波の回折図に見られるような急激なものではない. このことから, ここでの現象の解析には波の不規則性, 特に方向分散性を考慮する必要があることが示唆される. 各種の代表周期の分布について見ると, 特に有義波周期について, シャヘイ領域ほど周期が長くなる傾向がある. これも回折波の特徴の 1 つである. 平均波向 θ_m および主波向 θ_p はシャヘイ領域に入り込むほど負の側にずれている. そして, たとえば No. 2 で見た場合, 平均波向は防波堤先端と No. 2 を結ぶ方向にはほぼ一致している. しかし, 回折波の波向はこの線よりさらにシャヘイ領域側に寄ることや, 沖防波堤による回折

表—1 波浪の統計諸量

観測点番号	0	2	3	5	7	10	12	備 考
観測時間帯	12:00 ~17:24	12:01 ~13:38	12:17 ~14:17	14:41 ~15:18	15:08 ~15:42	16:22 ~17:19	16:16 ~17:07	
有効観測回数	18	5	7	2	2	3	3	
η_{rms} (cm)	20.6 [0.046]	9.7	10.3	11.7	13.4	15.2	16.0	水面変動 rms 値
$\bar{u}$ (cm/s)	-3.2 (1.8)	-2.9	-3.4	-3.4	-7.8	1.1	6.2	平均流速(西向)
$\bar{v}$ "	-9.2 (2.2)	0.7	2.5	0.8	2.9	-2.2	-3.4	" (南向)
H_{max} (cm)	125 [0.088]	56	63	64	83	84	95	最大波高
$H_{1/10}$ "	96 [0.058]	44	48	50	60	68	73	1/10 最大波高
$H_{1/3}$ "	77 [0.055]	36	38	41	48	56	59	有義波高
$\bar{H}$ "	50 [0.061]	23	24	26	31	36	38	平均波高
T_{rms} (s)	5.1 [0.131]	5.7	6.0	6.2	5.6	6.6	5.3	最大波周期
$T_{1/10}$ "	5.3 [0.057]	6.2	5.8	6.4	6.0	5.8	5.5	1/10 最大波周期
$T_{1/3}$ "	5.1 [0.027]	5.8	5.6	5.7	5.3	5.4	5.3	有義波周期
$\bar{T}$ "	4.0 [0.028]	4.2	4.0	3.8	3.8	4.0	3.9	平均周期
f_p (Hz)	0.168 [0.114]	0.154	0.141	0.114	0.124	0.125	0.167	ピーク周波数
$\sqrt{\beta_1}$	0.08 (0.074)	0.09	0.05	0.11	0.00	0.06	0.05	歪度
β_2	3.01 (0.126)	2.97	3.04	3.01	3.06	2.92	2.97	尖度
θ_m (deg)	5.5 (3.1)	-23.1	-15.1	-22.5	-15.3	-8.9	0.4	平均波向
θ_p "	-0.5 (4.8)	-24.8	-21.4	-21.7	-20.1	-8.9	-1.9	主波向
γ'	0.55 (0.04)	0.70	0.62*	0.71	0.59*	0.70	0.58*	方向集中係数
γ	0.66 (0.04)	0.50	0.67*	0.38	0.61*	0.40	0.59*	long-crestedness パラメータ
θ_x (deg)	45.2 (3.0)	32.6	42.1*	26.4	41.4*	27.9	41.2*	平均分散角
$H_{1/3}/\eta_{rms}$	3.74 (0.05)	3.69	3.66	3.50	3.61	3.65	3.67	
$H_{max}/H_{1/3}$	1.62 (0.12)	1.56	1.66	1.58	1.72	1.50	1.62	
$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.24 (0.02)	1.24	1.26	1.23	1.25	1.22	1.24	
$\bar{H}/H_{1/3}$	0.64 (0.01)	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	
$T_{max}/T_{1/3}$	1.00 (0.136)	0.99	1.07	1.09	1.06	1.23	1.00	
$T_{1/10}/T_{1/3}$	1.04 (0.057)	1.06	1.04	1.12	1.13	1.08	1.03	
$\bar{T}/T_{1/3}$	0.79 (0.020)	0.72	0.72	0.67	0.71	0.74	0.73	
$f_p T_{1/3}$	0.86 (0.091)	0.90	0.79	0.65	0.67	0.67	0.89	

()内は標準偏差, []内は変動係数, *: ノイズの混入により信頼性低い

の影響を受けずに南側から直接進入する波の成分があるはずであることを考えると、観測された波向角は小さい。方向集中度係数 γ' , long-crestedness パラメータ γ および平均分散角 θ_e については, No. 3, 7, 12 を測定した方の流速計に含まれるノイズの影響で, これらの点での値の信頼度は低い。そこで, No. 2, 5 および 10 を見ると, No. 5 で方向集中度が極大となっている。さらに, 種々の波高比のうち, $H_{1/3}/\gamma_{rms}$ は No. 0 地点に比べてもさら

に小さくなっている。

図-2 は観測時間帯に No. 0 で測定された有義波高 $H_{1/3}$, 有義波周期 $T_{1/3}$, 平均波向 θ_m および long-crestedness パラメータ γ の経時変化を表すものである。前日からの風がおさまったため, 波高は減少する傾向にある。有義波周期や long-crestedness パラメータでは変化の傾向が明らかではない。また, 平均波向にはばらつきが見られる。

図-3 は No. 0 地点における周波数スペクトルの一例を示すものである。 η は水面変動, u は東西方向流速, v は南北方向流速を表すが, いずれもスペクトルのピークが明らかでなく, ある周波数範囲に同程度の密度でパワーが存在していると言える。

周波数スペクトル密度が高い周波数帯において, EMLM⁴⁾ を用いて方向スペクトルを計算し, 等密度線を示したものが図-4 である。横軸には波向 θ , 縦軸には周波数 f がとっており, 等密度線は方向スペクトルの値について $\Delta S = 0.02 (\text{m}^2/\text{Hz} \cdot \text{rad})$ ごとに引かれている。No. 0 地点のものを見ると, 周波数が 0.09 Hz 付近と 0.15 Hz 付近では波向が異なり, 前者では北寄り, 後者では南寄りに向かって進行している。これを No. 10 で見た場合, 低周波数側のピークは No. 0 とほぼ等しい波向に見られるのに対し, 高周波数側では負の側, すなわち南寄りから北寄りに向かう側にずれていることがわかる。No. 2 でも同様であるが, 0.2 Hz 程度では正の波向がピークとなる。

以上のことにより, 沖防波堤によって入射波が回折し, 屈折効果も含んで波浪が変形する様子が定性的に明らかになった。ただし, 0.2 Hz 付近においては入射波向が南へ向かう方向に片寄っているため, 沖防波堤の北側から進入する波浪も無視できない。このことを考慮して, 次節では数値計算を行い, 結果を観測結果と比較・検討する。

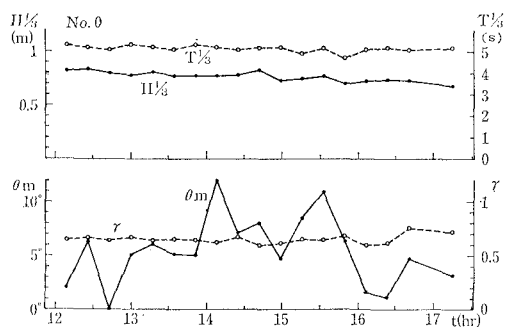


図-2 入射波浪の経時変化

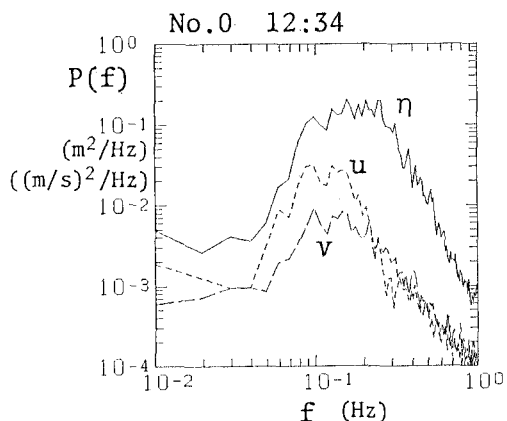


図-3 入射波浪の周波数スペクトル

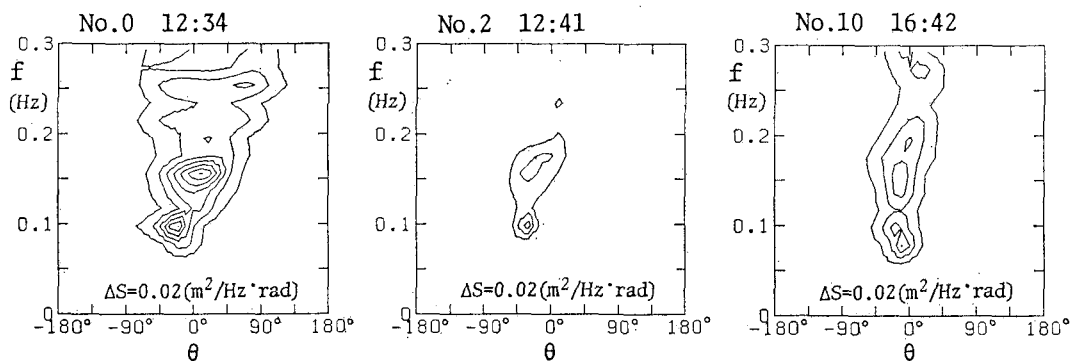


図-4 各地点における方向スペクトル

3. 数値計算

(1) 数値計算の方法

数値計算には、著者の1人が提案した、放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法¹⁾を利用した。ただし、ここで対象とする領域では砕波の影響はない。

まず、深浅測量図から100 m ピッチで海底の高さをD.L. 基準で読み取り、観測期間中の潮位をD.L. 1.0 m として水深を決定した。次に、放物型方程式に対する境界条件としては、沖防波堤と大洗港防波堤を折れ線で結んだ線上、および沖防波堤南側端部よりさらに2000 m 南へ下った地点を通り沖防波堤と直角な線上において、壁面境界条件あるいは開境界条件を与えた。

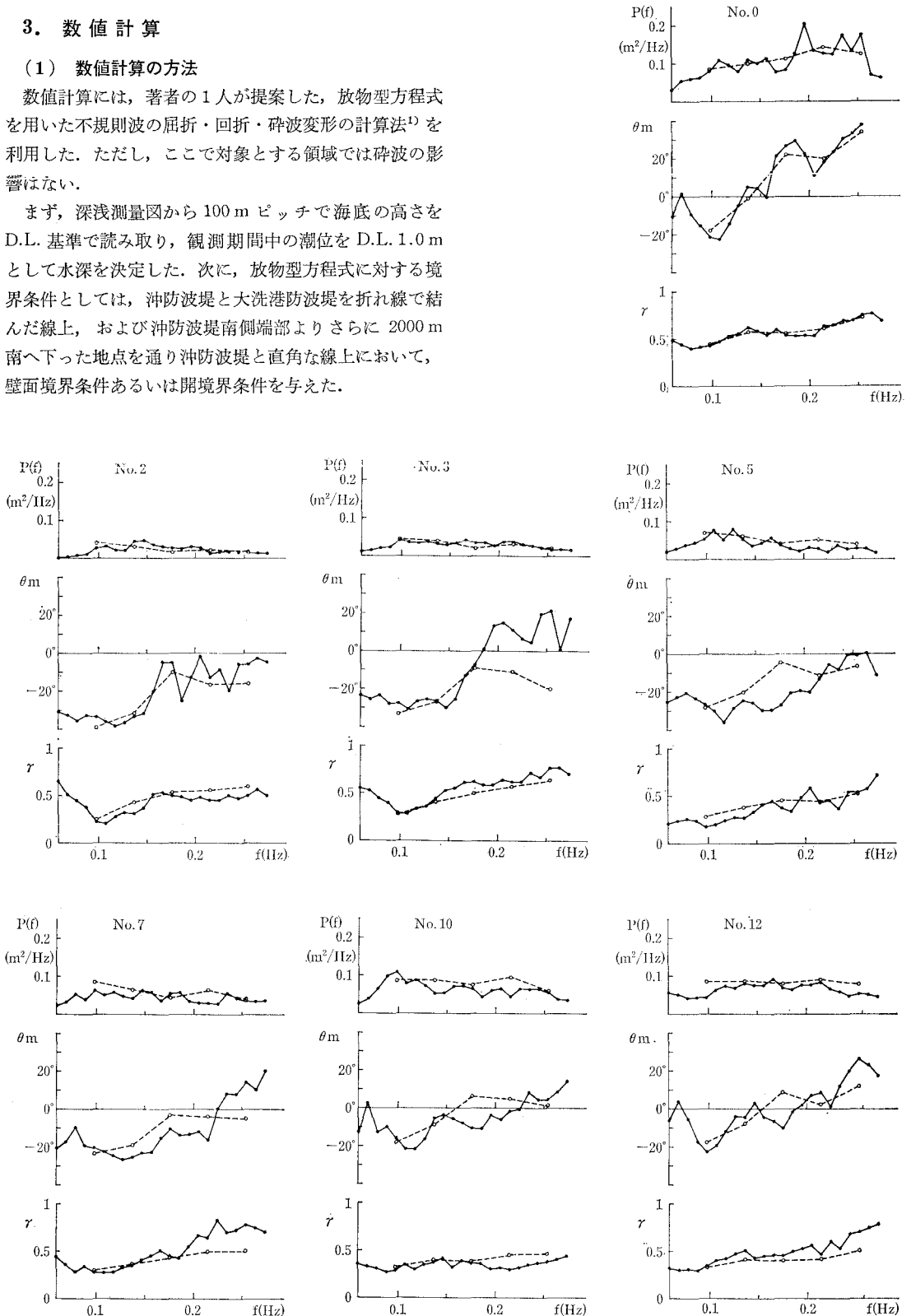


図-5 スペクトル密度・平均波向・long-crestedness パラメタの実測値と計算値との比較

表-2 波浪の統計諸量の実測値と計算値との比較

観測点番号	0	2	3	5	7	10	12	備 考
$H_{1/3}$ cal (cm)		30	33	42	46	53	54	有義波高
$H_{1/3}$ meas (m)	77	36	38	41	48	56	59	
(T_z/T_{20}) cal		1.11	1.11	1.07	1.08	1.04	1.02	周期比
$(T_{1/3}/T_{1/30})$ meas	1.00	1.13	1.09	1.10	1.03	1.04	1.04	
θ_m cal (deg)		-29.4	-24.7	-18.7	-15.1	-5.5	-3.8	平均波向
θ_m meas (m)	5.5	-23.1	-15.1	-22.5	-15.3	-8.9	0.4	
γ cal		0.42	0.41	0.39	0.39	0.42	0.43	long-crestedness パラメタ
γ meas	0.66	0.50	(0.67)	0.38	(0.61)	0.40	(0.59)	

()内は流速データのノイズ混入の影響が大と考えられる。

本研究の場合、入射波の条件の与え方には注意を要する。すなわち、まず周波数スペクトルの形状が標準スペクトルとして与えられるものと著しく異なること、また周波数によって代表的波向が異なることである。そこで、まず、周波数スペクトルについては、No. 0 で測定されたデータの18回分の平均値としての周波数スペクトルを用いることとした。さらに、各周波数について、平均波向 $\theta_m(f)$ 、および long-crestedness パラメタ $\gamma(f)$ の平均値を求め、 γ と 1 対 1 の関係にある光型型方向分布関数の指数 s を

$$s = \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{2} \right) + \sqrt{\frac{1}{\gamma^4} - \frac{3}{4}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

によって定めることにより、 θ_m と s から方向分布関数 $G(\theta)$ を

$$G(\theta) = g_s \left(\cos \frac{\theta - \theta_m}{2} \right)^{2s} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と与えた。ここに、 g_s は $G(\theta)$ の積分値を 1 とするための係数である。

実際の計算では、周期が短くて領域が広いために計算点数が 1000 近くにもなるので、計算時間が問題となる。そこで、0.098~0.254 Hz を 0.039 Hz きざみでとった 5 通りの周波数について、波向角を 10° きざみにした成分波の計算を行った。このとき、等深線は南北に対して約 30° ずれているので、 $-90^\circ < \theta < 60^\circ$ の範囲で計算を行い、それ以外の部分のエネルギーは No. 2~12 の領域に進入しないものとした。

なお、沖防波堤の北側から進入する波については別途同様な計算を行い、南側から進入する分とエネルギー的に加え合わせた。

(2) 計算結果

図-5 は計算結果と実測結果とを、エネルギー密度 $P(f)$ 、平均波向 $\theta_m(f)$ 、long-crestedness パラメタ $\gamma(f)$ について比較したものである。いずれの図も実線が実測値、砕線が計算値を示している。まず、No. 0 については、計算に使ったエネルギー密度、平均波向、および

long-crestedness パラメタと、それらの実測値とを比べたものであり、この程度の近似により入射波を単純化したことを示す。残りの図は各地点における計算値と実測値とを比較したものであるが、いずれのパラメタの一致も良好であると言える。

最終的に、全周波数を通じた代表値としての有義波高、周期比、平均波向、long-crestedness パラメタの計算値と実測値を比較したものが、表-2 である。高周波数側では流速振幅が 0 に近づくために波向が求められないので、計算から除外されている。計算で除外した高周波数側のエネルギーは、全体の 21% なので、計算された各地点でのエネルギーを $1/(1-0.21)$ 倍して補正したものの平方根を η_{rms} とした。さらに No. 0 地点における $H_{1/3}/\eta_{rms}$ の値である 3.74 を乗じて $H_{1/3cal}$ とした。また、周期比中の T_z は、 f に関する 0 次および 2 次のモーメント m_0 および m_2 より、 $T_z = \sqrt{m_0/m_2}$ から求められるものである。表から明らかのように、計算値と実測値との一致は良好である。

4. 結 論

屈折・回折領域における波浪場の現地観測を行い、放物型方程式を用いた計算結果と比較したところ、よい一致を示した。これにより、放物型方程式を用いた屈折・回折の計算法の妥当性が確かめられた。

参 考 文 献

- 1) 磯部雅彦：放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法，第 33 回海岸工学講演会論文集，pp. 134~138, 1986.
- 2) 泉宮尊司・磯部雅彦・清水琢三・天下哲則：回折領域における波浪場の現地観測，第 33 回海岸工学講演会論文集，pp. 129~133, 1986.
- 3) 堀川清司(編)：海岸環境工学，補章 A，東大出版会，582 p., 1985.
- 4) 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.