

方向スペクトルの現地観測

鹿島 遼一*・丸山 康樹*

1. はじめに

波向は周期、波高と比べると計測が容易でなく、最近に到るまで誤差の多い目視観測が広く行なわれて来た。しかし、近年海岸構造物の設計に波の方向スペクトルの概念が採り入れられるようになり、比較的浅い水深における方向スペクトルの特性把握が重要な問題となってきた。

方向スペクトルの測定方法としては種々の方式が用いられているが、精度と簡便さを兼ね備えた測定方式はあまり無いようである。本研究は可搬型の水圧式波高計と電磁流速計の組合せおよび波高計アレーの2方式による比較的簡便な方向スペクトル観測方法を検討し、現地調査に応用した結果を報告するものである。

2. 基礎的検討

2.1 水理実験による検討

方向スペクトルの測定法としては波高計アレーを用いる方法が比較的簡便である。浅海では波はほとんど沖側の半平面から入射するので、直線アレーが適当と思われる。この場合、波高計間の最小間隔 D を測定対象となる最小波長の $1/2$ 以下に設定し、しかも波高計間のベクトル距離をできるだけ広く分布させることが望ましい¹⁾。現地海岸では波高計間隔を変えて最適配置を検討することはなかなか困難で、数値的に発生させた波を用いる方法²⁾もあるが、ここでは不規則波を用いた水理実験により検討することにした。

図-1 に容量式波高計4台による波高計アレーを示した。各波高計間の距離は $D, 3D, 2D$ ³⁾ とした。造波機の不規則波入力情報は Bretschneider・光易型周波数スペクトルとし、造波板角度は固定であるが、不規則波が斜面（現地海岸の模型で勾配約 $1/70$ の単純斜面に近い）を進行する段階で、周期による屈折程度の相違から方向分散性を多少有することになる。

波高計最小間隔 D の決定は 図-2 のように、スペクトルピーク値 S_p の $1/n$ のスペクトル密度に対応する

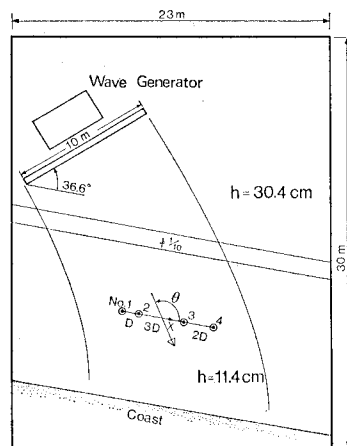


図-1 実験方法

高周波側の周波数を $f_{1/n}$ (カット周波数と呼ぶ)、対応する波長を $L_{1/n}$ とし、次式のようにした。

$$D=0.5L_{1/n} \dots \dots \dots (1)$$

D を表-1 のように、5 種類 (CASE 1~5) 選び、実験を行った。ただし、波高計の設置水深は 11.4 cm である。また、この点での $H_{1/3}, T_{1/3}$ はそれぞれ 2.5 cm, 1.06 s である。

取得したデータをチェックするために、各ケースに対する周波数スペクトルの同一性、またケースごとに波高

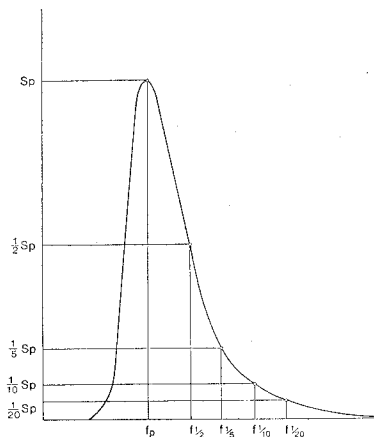


図-2 スペクトルピークとカット周波数の関係

* 正会員 工修 (財) 電力中央研究所 土木技術研究所 環境水理部
海岸水理研究室

表—1 実験 ケース

CASE	カット周波数 (Hz)	波 長* (cm)	間 隔 D (cm)
1	$f_1=0.86$	約 120	60
2	$f_{1/2}=1.17$	" 80	40
3	$f_{1/5}=1.45$	" 60	30
4	$f_{1/10}=1.64$	" 50	25
5	$f_{1/20}=1.91$	" 40	20

* 波高計設置水深 (11.4 cm) での値

計 4 台の周波数スペクトルの一様性を検討した。方向スペクトル測定場に入力する波浪は CASE 5 でほぼ一様性が満足され、他のケースではより大きな差異が認められた。

Panicker and Borgman (1970)⁴⁾ は 図—3 に示したような波高計の組から得られる co-spectrum $c(f)$ および quad-spectrum $q(f)$ と方向スペクトル $S(f, \theta)$ の有限フーリエ級数表示,

$$S(f, \theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \dots (2)$$

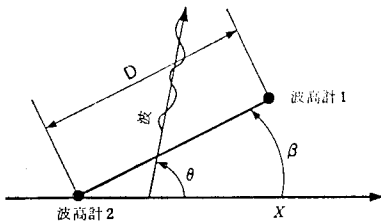
にあらわれる係数 a_n, b_n との関係を次式のように示した。

$$\left. \begin{aligned} c(f) &= \pi [a_0 A_0^* - (a_2 A_2^* + b_2 B_2^*) \\ &\quad + (a_4 A_4^* + b_4 B_4^*) - \dots] \\ q(f) &= \pi [(a_1 A_1^* + b_1 B_1^*) - (a_3 A_3^* + b_3 B_3^*) \\ &\quad + (a_5 A_5^* + b_5 B_5^*) - \dots] \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} A_n^* &= 2 \cos n\beta J_n(kD) \\ B_n^* &= 2 \sin n\beta J_n(kD) \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

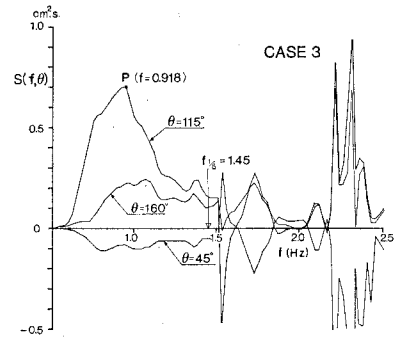
ここで, J_n は n 次ベッセル関数で k は波数である。また, β は 図—3 に示したように, X 軸と波高計対のなす



図—3 記号の説明

角である。X 軸上に配置した直線アレーでは $B_n^*=0$ となり, 方向スペクトルは $\cos$ 項だけで表現されることになる。

4 台の波高計では, 各周波数に対する係数 a_n, b_n を決定する方程式数は 13 個得られることになり, 方程式数より少ない項数 N までの級数展開を用いるときは最小自乗法により, 係数を決めればよい。また, $D=0$ に対する co-spectrum は場の一様性が良好でないので, 各波高計からの値の平均値を用いることにした。得られた

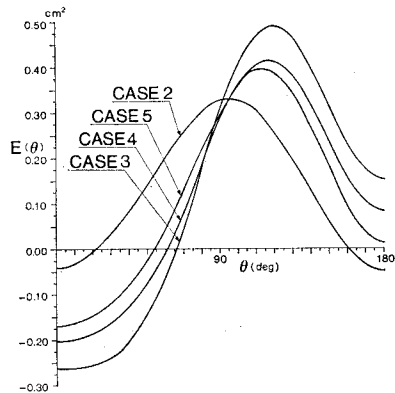


図—4 方向スペクトル $[S(f, \theta), \theta = \text{const}]$ の変化 (CASE 3)

スペクトルのスムージングには Panicker and Borgman (1974)⁵⁾ の係数を用いた。

CASE 3 の方向スペクトルの計算例を 図—4 に示した。図は角度 θ (X 軸から反時計方向) をパラメータとして, 周波数方向の $S(f, \theta)$ の変化を示したものである。ただし, 級数展開は第 5 項までとした。波高計間隔 D を決定するのに用いたカット周波数 $f_{1/n}$ を越えたところで, スペクトル値が急激に変化する。これは他の全てのケースで同様であった。CASE 1 ではカット周波数が周波数スペクトルのピーク周波数に一致するため, 方向スペクトルは異常な値を示した。

図—5 は方向スペクトルを周波数方向に積分した $E(\theta)$



図—5 各ケースの $E(\theta)$ の変化

を各ケースに対して示したもので, $E(\theta)$ は $f_{1/n}$ が大きくなるにしたがい CASE 5 の値に漸近する。この結果より, D は $1/10 \sim 1/20$ カット周波数に相当する波長の $1/2$ とすればよいことが判明した。

実際に現地で波高計アレーを設置する場合, 波高計間隔の測定誤差が生じやすい。そこで, 波高計間隔 D が D' として測定されたものと仮定する。

$$D' = D(1 - e) \dots (5)$$

このために, 真の入射角 θ が θ' となるとすると以下の関係式⁶⁾が成立する。

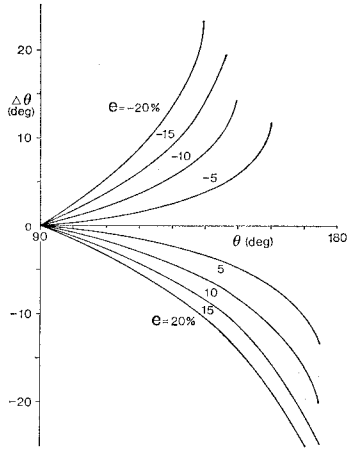


図-6 波高計間隔の測定誤差 e と入射角計算誤差 $\Delta\theta$ の関係

$$\theta' = 180 - \cos^{-1} \left(\frac{\cos(180 - \theta)}{1 - e} \right) \dots\dots\dots (6)$$

図-6は誤差 $\Delta\theta = \theta' - \theta$ をパラメータとして計算した結果で、直角 ($\theta = 90^\circ$) 方向から 20° ($\theta = 110^\circ$) 程度の入射波では、 $\pm 10\%$ の誤差 e で約 5° の角度誤差が生ずる。

2.2 阿字ヶ浦海岸における検討

以上の検討を踏まえ、水圧式波高計4台を用いて阿字ヶ浦海岸で基礎的な調査を行った。波高計設置水深は約7mで、当海岸の入射波の有義周期は約9~10secであり、hydraulic filterによる圧力減衰およびカット周波数を考慮して、 $D=10\text{m}$ とした。この時点では、水圧式波高計を較正する適当な測定器を用意しておらず、スペクトルの計算には圧力記録をそのまま用いた。

図-7に波高計3台および4台の出力を用いて、級数

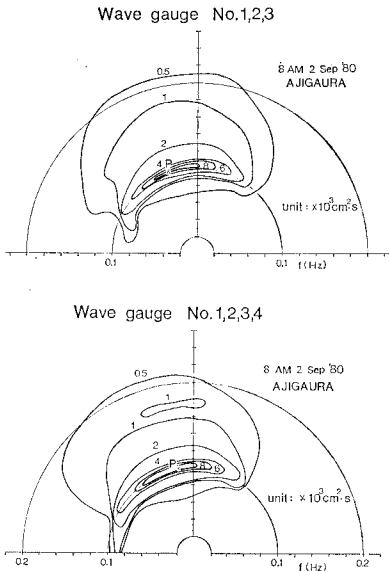


図-7 波高計台数の相違による方向スペクトルの比較

項 $N=5$ として得られた結果を示した。この結果には大差なく、 $N=5$ までで表現し得る方向分散に対しては波高計3台で十分安定した結果が得られることが判明した。この結果は $N=3$ としても同様であったが、 $N=5$ とした方が幾分方向集中性があらわれる程度の差は見られた。

3. 応用例

3.1 屈折角の測定

波の屈折変形は地形変化予測モデルにおいても重要な問題で^{7),8)}、近年方向スペクトルをもつ不規則波の屈折の取扱いについても議論されるようになってきた^{1),9)}。現地における屈折現象を把握することを念頭において、方向スペクトルの測定を試みた。

調査地点を図-8に示した。図中 P_1 点に3台の水圧

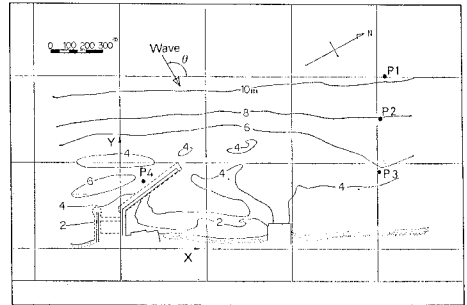


図-8 調査地点

式波高計アレー ($D=8\text{m}$)、1台の超音波式波高計を設置した。水深は約10mで、入射波の有義波高、周期はそれぞれ1m、5sec程度であった。図-9に水圧式波高計3台と超音波式波高計の出力から計算した周波数スペクトルを示した。両者の比較から水圧式波高計出力の水面変位への補正係数を周波数ごとに決定した。水圧式波

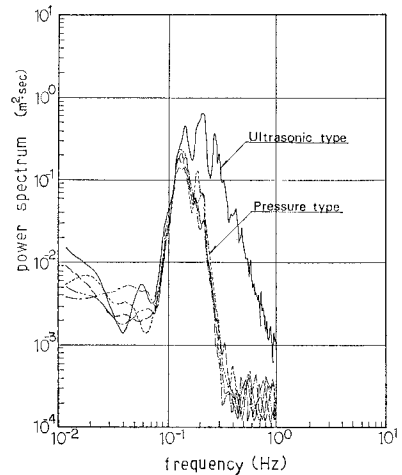


図-9 水圧式波高計と超音波式波高計の特性

高計のスペクトルをこれにより補正し、超音波式波高計からゼロアップクロス法で得た有義波と比較し、以下の関係式を得た。

$$H_{1/3} = 3.77\sqrt{m_0}, T_{1/3} = 1.26\sqrt{m_0/m_2} \dots \dots (7)$$

この関係は、スペクトルから有義波を求めるときに用いられている式¹⁾とほぼ等しく、水圧式波高計の補正方法が妥当であることが確かめられた。

また、P1点には波高計アレーの他に、水圧式波高計と電磁流速計各1台を配置し、方向スペクトル算出の2方式を比較することにした。結果を図-10、図-11に示した。ただし、後者の組合わせに対しては、Nagata (1964)¹⁰⁾の方法で解析した。スペクトルの集中度は波高計アレーの方が強く表われる傾向があるが、主方向に関しては両者とも良く一致する。

以上の調査と同時に、図-8のP3点にも水圧式波高計2台を設置し、方向スペクトルを観測した。また、車に搭載したX-bandレーダー¹¹⁾によっても波向を観測した。各方式より得られた波向を表-2に示す。表には、ピーク周波数に相当する波の位相差から直接計算した波向きも示してある。この調査時では、波の周期が短いために、X-bandレーダでは波峯が点状に観測され、正確な波向は決定することができなかった。表-2の結果

表-2 屈折角測定例

測定水深 (m)	解析方法	ピーク周波数 (Hz)	波向*
-10 m	Borgman 法	0.136	107
	永田 法	0.130	110
	X-band レーダー	—	90
	位相差法	0.136	112
-6 m	Borgman 法	0.165	97
	X-band レーダー	—	90
	位相差法	0.165	100

* X軸(汀線と平行)から反時計回りの角度

より、約10°の屈折角変化が得られ、各方式を適宜使用することにより、屈折現象の解明に役立つ情報が得られることが判る。

3.2 防波堤反射率の測定

港湾を建設した場合、反射波の周辺海岸への影響の評価は重要な問題である。しかし、現地の海の波は不規則波であるため、反射率の問題についてもその実態を詳しく調べる必要がある¹²⁾。

方向スペクトルを有する不規則波の反射特性を検討するために、成分波の重ね合わせ法による簡単な計算を行った。周波数スペクトルには Bretschneider・光易型を方向

関数には光易型を用いた。

図-12に CASE 1 (方向集中度 S_{max} を変えた場合)、CASE 2 (反射率を変えた場合)、CASE 3 (入射角を変えた場合)の計算例を示した。X/Lは防波堤からの距離を波長Lで無次元化した値である。この結果より、① S_{max} の変化は前面波高分布にあまり影響せず、② 反射率 r が小さいほど波高分布の谷の落ち込みが少ない平坦な分布となり、③入射角 θ (防波堤に

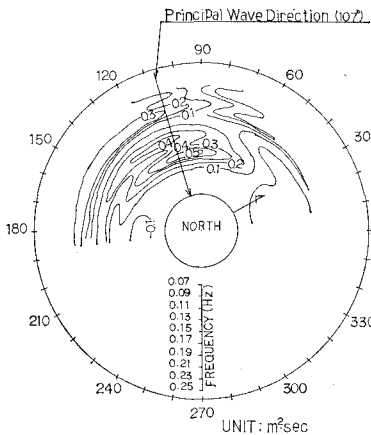


図-10 水圧式波高計3台による方向スペクトル

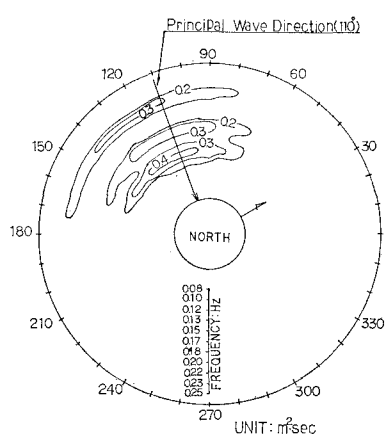


図-11 水圧式波高計と電磁流速計による方向スペクトル

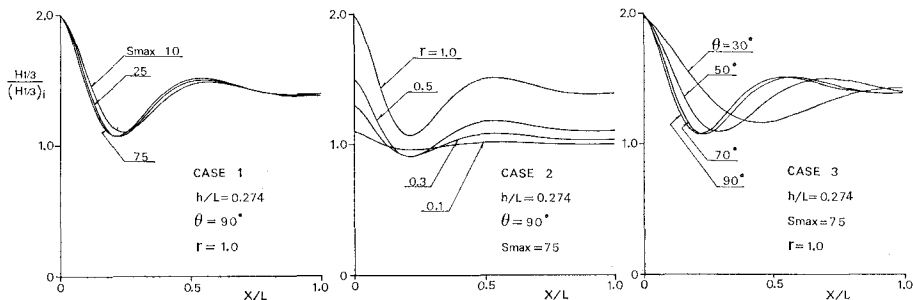


図-12 防波堤前面の波高分布計算例

対する角)が $50 \sim 90^\circ$ 程度であれば波高分布はあまり変化しないことがわかる。

波が防波堤に対して直角から $\pm 40^\circ$ の範囲で入射すれば波向は $S_{\max}$ とともに防波堤前面の波高分布にあまり影響しないので、前面波高分布を直接測定することにより、反射率を推定できる可能性がある。そこで、図-8のP4点に水圧式波高計6台を設置して測定した有義波高を $S_{\max}=75$ 、入射角 $\theta=90^\circ$ と仮定し、反射率を0.3~0.6に変化させて計算した結果とともに図-13に示

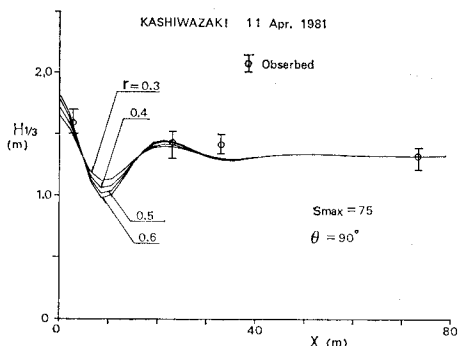


図-13 反射率 r をパラメータとした波高計算値と実測値の比較

した。ただし、 X は防波堤からの距離で実測値は測定期間中(1981年4月11日、2時間ごと4回)の平均値と最大・最小値を示した。残念ながら、波高の落ち込み部を想定して設置した波高計およびもう1台が故障し、この分布から反射率を推定することはできなかった。

次に、防波堤と直角方向に水圧式波高計4台を直線アレー状に設置し、さらに水圧式波高計と電磁流速計の組み合わせも設置して入射波・反射波が合成された方向スペクトルの測定を行った。波高計4台の方法では、サイド

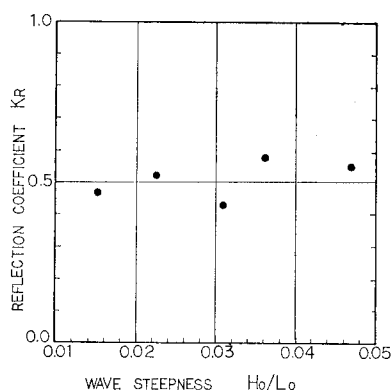


図-14 方向スペクトルを用いた防波堤反射率 K_R の推定例

ローブの影響が強く現われ、反射率の推定はできなかった。そこで、永田法による方向スペクトルを防波堤と平行な直線で半分に分割し、各半円のスペクトルの積分値の平方から推定した反射率を沖波形勾配(水深15mに設置した超音波式波高計からの推定値)とともに図-14に示した。反射率はほぼ0.5と推定された。

4. おわりに

機動性を有する比較的簡便な方向スペクトル測定方法を現地調査に応用し、その有効性を確かめることができた。今後、現地海岸における複雑な屈折現象や防波堤からの反射波などの問題に応用して行きたい。

本検討を行うにあたって、水理実験は中部電力総合技術研究所の設備を使用し、かつ同所土木研究室の方々の協力を得た。実測においては東京電力株式会社新潟原子力建設所および五洋建設株式会社土木設計部の方々の協力を得た。また、解析の一部については開発計算センターの協力を得た。関係者の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1977.
- 2) Yamaguchi, M. and Y. Tsuchiya: Directional spectra of wind waves in growing stage, Coastal Eng. in Japan, Vol. 24, pp. 93~104, 1981.
- 3) Barber, N. F.: The directional resolving power of an array of wave detector, Ocean Wave Spectra, Prentice-Hall Inc., pp. 137~150, 1961.
- 4) Panicker, N. N. and L. E. Borgman: Directional spectra from wave gage arrays, Proc. 12th Conf. Coastal Eng., pp. 117~136, 1970.
- 5) Panicker, N. N. and L. E. Borgman: Enhancement of directional wave spectrum estimates, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 258~279, 1974.
- 6) 鹿島遼一・丸山康樹: 方向スペクトルの観測, NERC Report No. 14, TR-80-2, 第5回合同総合現地観測報告書, pp. 215~231, 1981.
- 7) 丸山康樹・鹿島遼一: 屈折算法における水深補間法の検討, 第35回年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 17~18, 1980.
- 8) 丸山康樹・鹿島遼一: 海岸変形予測における1-lineモデル計算手法の改良, 第36回年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 835~836, 1981.
- 9) Karlson, T.: Refraction of continuous ocean wave spectra, Jour. of the Waterways and Harbor Division, ASCE, Vol. 95, No. WW4, pp. 437~448, 1969.
- 10) Nagata, Y.: Observation of the directional wave properties, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 7, pp. 11~39, 1964.
- 11) NERC Report No. 9, TR-78-3, 第3回合同総合現地観測報告書, pp. 9~12, 1979.
- 12) 合田良実: 波高計群による方向スペクトルを用いた反射推定法の検討, 港湾技術研究報告, 第19巻, 第3号, pp. 37~70, 1980.