

沖合観測塔で観測された方向スペクトル特性と風速場との相関解析

Investigation of the Relationship Between Offshore Observed Directional Spectra and Wind Conditions

○齋藤遼太・馬場康之・今井優樹・山上路生

○Ryota SAITO, Yasuyuki BABA, Yuki IMAI, Michio SANJOU

This study investigates the directional wave spectrum characteristics observed at SOO Tower using an ADCP. Peak wave characteristics and dominant wave directions were categorized, and correlations between wave characteristics and wind conditions were examined. Using dimensionless parameters, theoretical relationships were analyzed. Directional spectra were classified into "Unimodal" and "Complex-field" based on energy distribution. Unimodal spectra dominated under lower wave age conditions for northwesterly waves, while Complex-field spectra often deviated from the cos-power distribution around the peak frequency, underestimating S_{max} . The relationship between dimensionless fetch and peak period showed deviations from the theoretical 1/3 power law, suggesting adjustments in effective fetch for specific wave directions. (104 words)

1. はじめに

沿岸域の適切な維持管理に際し、波高や周期といった波浪諸元に加えて方向スペクトルによって特徴づけられる波峰特性やピーク周波数周りの方向分布関数および集中度パラメータ S_{max} を把握することは沿岸防災上および構造物に対する波荷重の算定上、非常に重要な課題である。本研究では、田辺中島高潮観測塔（以下観測塔（SOO tower））において ADCP（Acoustic Doppler Current Profiler）を用いて観測された 20 分毎の方向スペクトルデータから、波峰特性および主波向による分類を行った。さらに、同時に観測された海上風との相関解析を行い、Bailey et al¹⁾ をはじめとする無次元パラメータ間の関係について理論的考察とともに解析を行った。

2. 方向スペクトルの解析手法

(1) 集中度パラメータ S_{max} の算出について

一般に、方向スペクトル $\psi(f, \theta)$ は以下のように周波数スペクトル $\varphi(f)$ と方向分布関数 $G(\theta, f)$ から定式化される。

$$\psi(f, \theta) = \varphi(f) \cdot G(\theta, f) \tag{1}$$

Mitsuyasu et al.²⁾ による方向分布関数の標準形を以下に示す。

$$G(\theta, f) = G'(S) \cdot \cos^{2S} \left(\frac{\theta - \bar{\theta}}{2} \right) \tag{2}$$

ここで $G'(S)$ は $G(\theta, f)$ を正規化するための規格化関数である。(2)式においてピーク周波数 f_p に対する S が集中度パラ

メータ S_{max} である。本研究では、(2)式に対し半値幅法を用いることで 20 分毎における S_{max} の値を算出している。

(2) 波峰特性に対する分類

集中度パラメータ S_{max} に加えて、WITS³⁾（Wave Identification and Tracking System）を用い、方向スペクトルの形状をもとに波浪データ特性の分類を試みた。WITS は方向スペクトル $\psi(f, \theta)$ に対し、局所的なエネルギー最大値を特定し、 f, θ 空間上のエネルギーの勾配をもとに波峰の分類とグループ化を行うアルゴリズムである。

図-1 に波峰分類の例を示した。図-1 左側に示したものが方向スペクトルを波向 θ ・周波数 f ・ (f, θ) に対応するエネルギー密度の 3 次元からなる右手座標系で表示したものである。図-1 中央に示す通り、例示した時刻の方向スペクトルのデータは 3 分割されていることが分かる。このうち青色のデータはエネルギーが小さいためにノイズと判定されており、実際に独立した波峰として分類されたのは水色の領域と黄色の領域に対応する 2 波峰である。図-1 右側に棒グラフで独立した 2 波峰それぞれのエネルギーを示している。水色の領域が最も大きなエネルギーを持つ主波峰として扱われ、黄色の領域が第二成分として扱われていることが分かる。

本研究では、方向スペクトル全体のエネルギーに対し、主波峰のエネルギーが 75% 以上を占めている場合に、“Unimodal”，それ以外のケースで“Complex-field”と

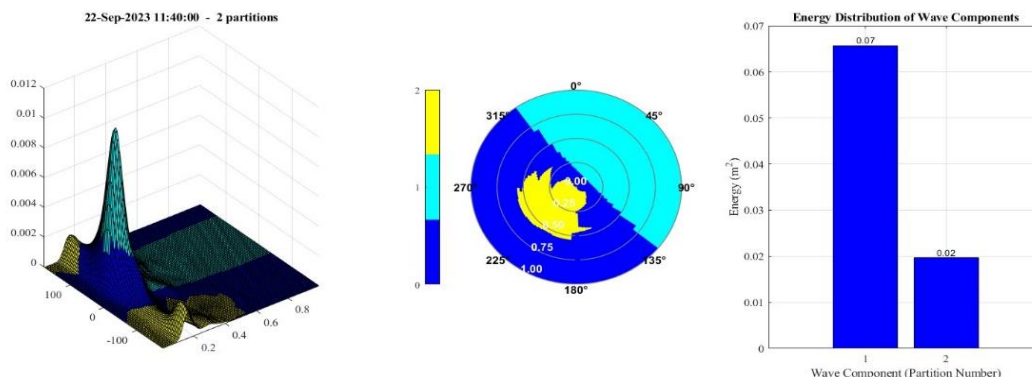


図-1 WITSを用いた波峰の分類例

波浪場を分類し、ラベル付けを行った。

3. 無次元パラメータによる考察

(1) 波齢 C_p/u_* と波形勾配 H_s/L 間の関係

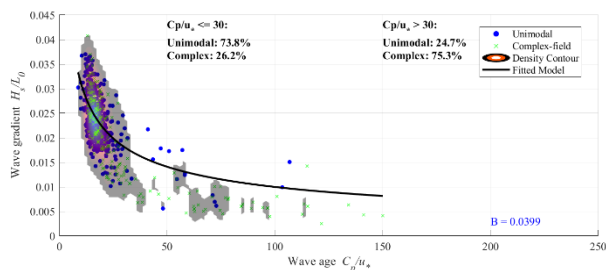
まず、以下に Bailey et al によって提案された波齢 C_p/u_* と波形勾配 H_s/L 間の関係式を示す。ここで、 C_p は波速、 u_* は23 m高度で観測された風速から求めた摩擦速度である。

$$H_s/L = (2\pi)^{\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{C_p}{u_*}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left\{1 + 0.206 \left(\frac{C_p}{u_*}\right)^{-1}\right\}^{-\frac{2}{3}} \quad (3)$$

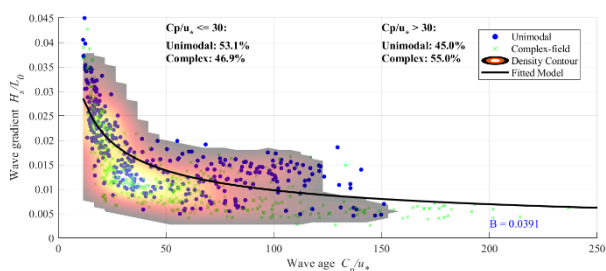
本解析では、この関係式における Toba 係数 B に対する非線形回帰を行い、波浪データの分布特性およびその波峰特性について考察を行った。

図-2(a)に北西方向、図-2(b)に南西方向が主波向である波浪のうち有義波高 H_s が0.5 m以上のデータについて、波齢 C_p/u_* と波形勾配 H_s/L 間の関係および(3)式に対する回帰曲線をプロットしたものをそれぞれ示した。散布図上のコンターは確率密度を示している。図-2から、北西方向からの波浪に関しては波齢の小さい $C_p/u_* \leq 30$ の領域でのデータ密度が高く、この領域で Unimodal として分類される傾向が強い。一方で南西方向からの波浪においては波齢の大きい領域にも分布が広がっており、Unimodal と Complex-field 両方にデータが分散している。

南西方向からの波浪について詳しく検討を行うため、 S_{max} との関連についても考察した。図-3に示すように、回帰曲線の上側に対応する H_s/L が比較的大きいデータにおいては、Unimodal が卓越する傾向がみられた。一方下側のデータにおいては Complex-field と分類される傾向が強い。この領域では複数の波峰が現れており、弱いうねりの重畳が考えられる。また、Complex-field においては S_{max} の値が10~50程度の領域に分布が集中していたが、Unimodal はより広い範囲での分布がみられた。Complex-field については複数の波峰がピーク周波数周辺に存在する場合、余弦関数のべき乗の関数形から離れた分布となる



(a) 北西方向・ $H_s \geq 0.5$ (m)



(b) 南西方向・ $H_s \geq 0.5$ (m)

図-2 波齢 C_p/u_* と波形勾配 H_s/L 間の関係

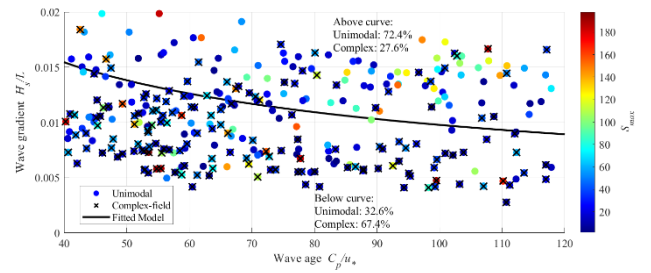


図-3 $40 \leq C_p/u_* \leq 120$ における波峰特性の分布および S_{max}

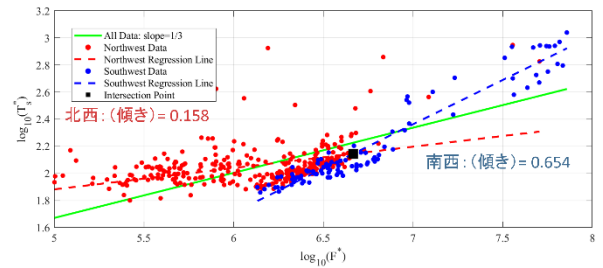


図-4 F^* と無次元有義波周期 T^* の関係

ケースが散見されたため実際の集中度よりも過小評価される可能性があることが分かった。

(2) 無次元フェッチ F^* と無次元有義波周期 T^* の関係

摩擦速度 u_* を用いて無次元化される無次元エネルギー E^* と無次元フェッチ F^* の関係および Toba の 3/2 乗則を用いて F^* と T^* の比例関係を解けば、 $T^* \sim F^{1/3}$ であり、局所平衡の風波であれば理論的に 1/3 乗則が成り立つことを示す。北西方向からのデータと南西方向からのデータの内、 H_s が1.0 m以上の観測データに対し F^* と T^* の関係を図-4に図示した。緑色の直線は全データに対し理論的に導かれる傾きで回帰したものである。 F^* の短い領域に対応する北西からのデータについては1/3乗則よりも小さい傾きで、 F^* の長い南西からのデータについては理論直線よりも長い T^* となる傾向がみられた。

4. おわりに

以下に得られた主要な結論を示す。

1. 北西方向からの波浪においては Unimodal が卓越し、波齢の小さい領域における分布の集中が確認された。
2. Complex-field におけるピーク周波数周りの方向スペクトルは余弦関数のべき乗分布に沿わないケースが散見され、その際 S_{max} を過小評価する傾向があった。
3. F^* と T^* の比例関係において、それぞれの主波向に対する回帰結果は線系に近い関係性を示した。一方で、 F^* の領域に応じてその傾きは 1/3 乗則の回帰直線を挟んで変化しており、1/3 乗則に合わせるためには有効フェッチの調整等が必要な可能性が考えられる。

REFERENCES

- 1) Bailey et al., *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 47, 249–264, 1991.
- 2) Mitsuyasu et al., *J. Phys. Oceanogr.*, 5, 750–760, 1975.
- 3) Hanson and Phillips, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, 277–293, 2001.