

一様風域場における波浪の方向スペクトルの特性について

山口正隆*・土屋義人**・小矢田宏***

1. 緒 言

波浪の方向スペクトル特性を適確に把握することは、波浪に伴う海岸工学上の諸問題の解明に重要であるが、一般に方向スペクトルの正確な測定は、周波数スペクトルのそれに比べてきわめて困難であるため、Cotéらおよび光易ら¹⁾の測定結果など少数の例を除いて、風特性との関連が明確である方向スペクトルはあまり得られていないのが現状であろう。

幸い、京都大学防災研究所海岸災害部門では、同工学部土木工学科海岸工学講座と協力して、琵琶湖で大規模な波浪観測を実施する機会を得た。この観測では、風波の方向スペクトルを測定するために、8台の波高計からなる波高計アレイが使用された。

琵琶湖における波浪の発生原因となる湖上風の最大の特徴は、季節風時のとくに強風時(N~NW方向)にほぼ一様な風が連吹するという点であって、そのため琵琶湖で発生、発達する波浪は、有限かつ一様な風域場における方向スペクトルの特性をかなりの程度有しているものと考えられる。

そこで、本研究では、この観測で得られた記録の解析結果に基づき、ほぼ一様風域とみなせる場合の定常状態における風波の方向スペクトル特性を考察しようとするものである。

2. 観測装置の概要

すでに別の機会²⁾に述べたように、本観測は図-1に示す琵琶湖彦根愛西地区および長浜地区において14台の容量型波高計を用いて1975年3月より約1年間実施された。方向スペクトル観測用アレイは、図-2に示すように、彦根愛西地区の汀線より約260m離れた水深4mの地点の観測塔およびそれをほぼ重心として正三角形の各頂点の位置に設置された観測支柱に取り付けた合計8台の波高計より構成されている。このアレイの分解能を数値シミュレーションにより検討した結果、

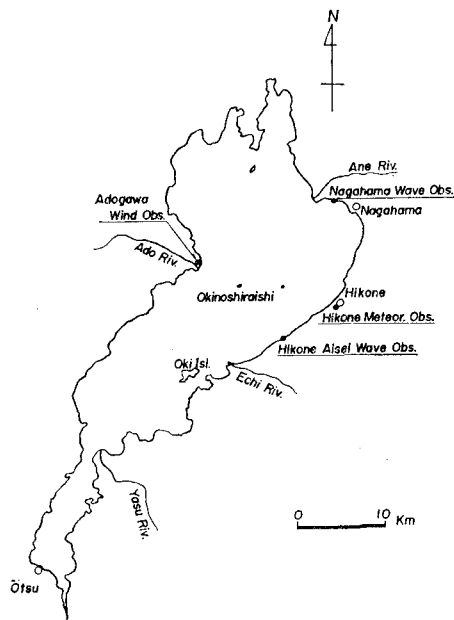


図-1 琵琶湖の概略図

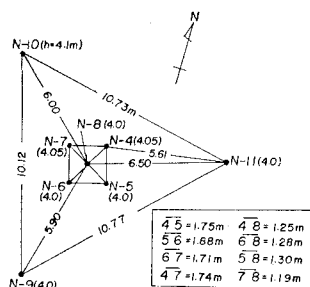


図-2 方向スペクトル観測用アレイ

Borgmanの最小自乗法および分布関数あてはめ法を用いれば、このアレイは琵琶湖における風波のエネルギーの主要な部分を占める0.2 cps~0.45 cpsおよびより高周波数側の0.6 cps~0.8 cpsの周波数帯に対して、方向分布関数の集中度係数の大ききにかかわらず、かなり良好な分解能を与えることがわかった³⁾。また、彦根愛西地区では有義波周期3 sec前後の風波が卓越し、一方観測水深は4mであるので、観測された風波は比水深が

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

*** 学生会員 京都大学大学院工学研究科

0.3程度の浅海波に相当し、湖底地形の影響をうけていることになる。そこで、エネルギー平衡方程式に基づいて不規則波の変形計算を行い、とくに方向分布関数に及ぼす湖底地形の影響を検討した結果、もちろん波向によるけれども、 $f > 0.2$ cps (f : 周波数)の範囲ではこの影響は小さいと考えられた。したがって、本研究では観測された波浪を深海波とみなして考察を加えることにした。

3. 周波数スペクトルの特性

ほぼ定常状態にある風波の周波数スペクトルの特性は、Neumann 以来多くの研究者によって詳細に検討されている。すなわち、外洋で十分発達し、吹送距離に無関係になった風波に対しては、Neumann や Pierson および Moskowitz のスペクトルが、また有限の吹送距離に対しては、Bretschneider や Darbyshire, さらに最近では光易や JONSWAP のスペクトルが提案されている。そこで、ここでは有限の吹送距離におけるこれらのスペクトルと観測結果とを比較する。図-3 はほぼ定常状態と考えられる風波のスペクトルを $E(f)f_m/E = \phi(f/f_m)$ の形で規格化し、光易Ⅱ型および JONSWAP スペクトルと比較したものである。ここに、 $E(f)$: 周波数スペクトル、 f_m : 周波数スペクトルの最大値に対応する周波数および E : スペクトルの全エネルギー、である。周知のように、風波の周波数スペクトルを前述の形で規格化した場合、相互によく似た形状を示すが、このことは図-3 においても成立し、高周波数側ではほぼ f^{-5} 則に従っててい減することがわかる。しかし、ピーク周波数付近へのエネルギーの集中度は光易Ⅱ型スペクトルより著しく、かつ JONSWAP スペクトルより少なく、全体的に両者の中間の形を示す。この傾向は風域場の定常性のいかんにかかわらず、観測結果全般に見られた。また、観測結果は低周波数側でこれらのスペクトルより小さくなる傾向がある。

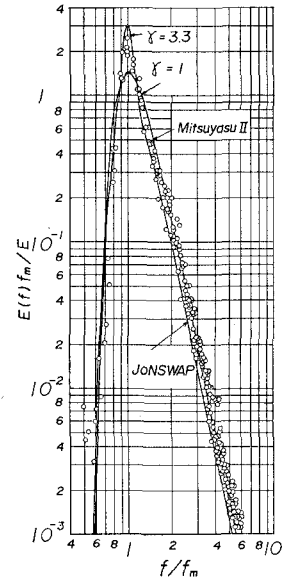


図-3 規格化した風波の周波数スペクトル

次に、無次元ピーク周波数、高周波数側での平衡定数および無次元全エネルギーと無次元吹送距離との関係を図示し、光易および JONSWAP の結果と比較したのが図-4 である。図において、 F : 吹送距離、 g : 重力の加速度および U_{10} : 水面上 10 m の高度での風速、であり、またスペクトルの高周波数側での平衡定数 α はピーク周波数より高周波数側 (1.5 Herz まで) の平均値より算出した。さらに、光易の表示式はもともと水面の摩擦速度で表示されているが、ここでは著者らの観測結果と比較するため、JONSWAP の結果にならい、水面の抵抗係数 $c_{10} = 1.0 \times 10^{-3}$ を用いて光易の式を換算した。さて、図-4 によれば、観測結果はいずれも光易の結果より JONSWAP のそれに近い値を与えるようである。しかし、抵抗係数の決定方法などに問題があるので、即断することはできない。

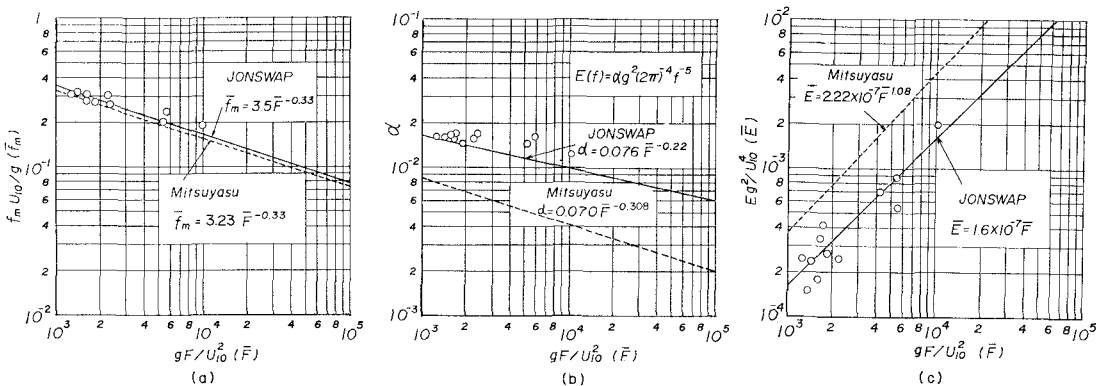


図-4 $\bar{f}_m$, α および $\bar{E}$ と $\bar{F}$ との関係

4. 方向スペクトルの特性

(1) 方向スペクトルの計算方法

方向スペクトルの計算方法として、種々の方法が展開されているが、ここでは比較的良好な分解能を与える分布関数あてはめ法について述べる。

いま, unimodal な方向分布関数に対して, Borgman により提案された円正規分布

$$D(\theta) = \exp\{a \cos(\theta - \theta_0)\} / 2\pi I_0(a) \cdots \cdots (1)$$

を用いるならば, 形状母数 a および方向分布関数が最大値をとる方向 θ_0 (以下主方向と呼ぶ) は, 次式により求められる。

$$\left. \begin{aligned} c'(f) &= J_0(kD) + \{2/I_0(a)\} \sum_{n=1}^{\infty} \{(-1)^n J_{2n}(kD) \\ &\quad \times I_{2n}(a) \cos 2n(\beta - \theta_0)\} \\ q'(f) &= \{2/I_0(a)\} \sum_{n=1}^{\infty} [(-1)^{n+1} J_{2n-1}(kD) \\ &\quad \times I_{2n-1}(a) \cos \{(2n-1)(\beta - \theta_0)\}] \\ c'(f) &= c(f)/E(f), \quad q'(f) = q(f)/E(f) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (2)$$

ここに, k : 波数, D : 波高計間の距離, β : 規準方向と波高計を結ぶ線とのなす角, $c(f)$: コ・スペクトラム, $q(f)$: クォドラチャ・スペクトラム, J_n : n 階の第1種 Bessel 関数および I_n : n 階の第1種変形 Bessel 関数, である。本研究では, 式 (2) より最小自乗法を用いて a および θ_0 を推定した。この方法の特徴は, 少数の波高計により方向分布関数を推定できることにある。数値計算にあたっては, 式 (2) において $n=4$ とすれば, 十分な精度で a および θ_0 を算出することができる。

図-5 は形状母数 a をパラメータにして円正規分布を示したものであり, a の値の増加とともに, しだいに特定方向へのエネルギーの集中度の著しい対称な分布形を与えることがわかる。図-6 は円正規分布の形状母数と Longuet-Higgins および光易らによって用いられた $\cos^{2S}(\theta/2)$ 型および $\cos^n \theta$ 型の方向分布関数の指数との関係を示したものである。図中の実線は指数 S あるいは n だけを考慮して最小自乗法により a を求めた結果であ

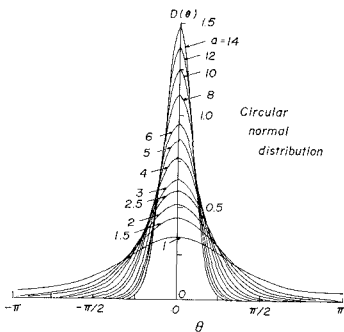


図-5 円正規分布

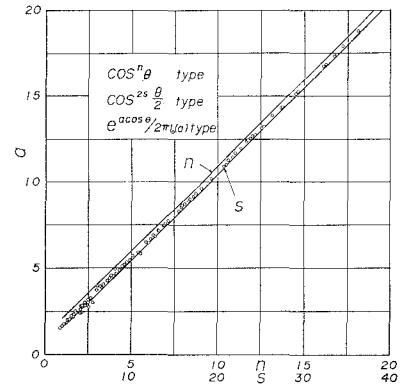


図-6 各種分布関数の形状母数相互の関係

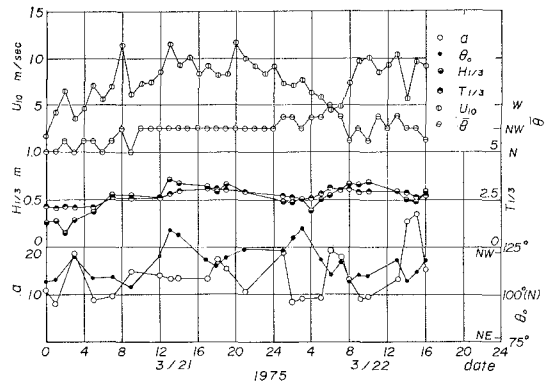


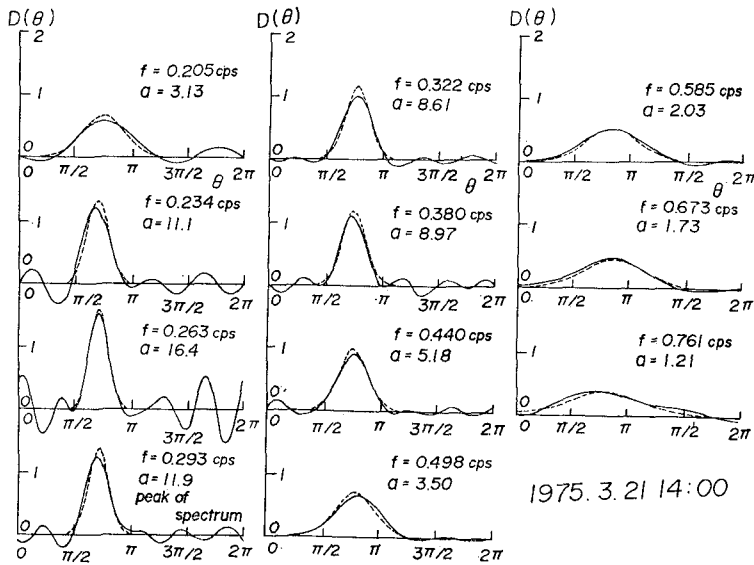
図-7 観測期間中における風および波浪特性の時間的変化

り, また丸印は同一の観測資料から θ_0 まで考慮してそれぞれ最小自乗法により求めた a と S との関係である。この図を用いれば, 分布関数を相互に変換することができる。ただし, 図-5 から推定されるように, $a < 1.5$ の範囲では分布関数の形そのものが若干異なっている。

(2) 方向分布関数の特性

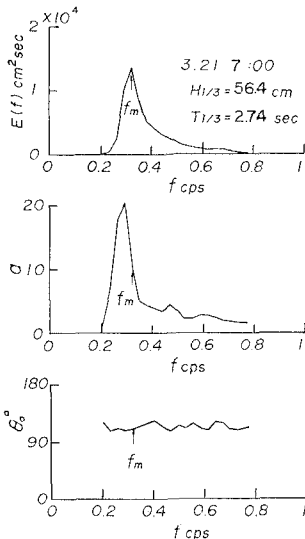
図-7 は, 1975 年 3 月 21 日から 22 日にかけての 1 つのストームにおける彦根愛西地区での風および波浪特性を示したものであり, 図中にはピーク周波数での形状母数および主方向も図示されている。さて, 図に示すように, 風速は 3 月 21 日 0 時からしだいに増大した後, 12 時から 24 時までの間はほぼ定常状態を保っている。これに対応して, この間の有義波はほぼ一定値を示しているが, 波の主方向には多少の変動が見られる。これは風資料の解析精度上現われない風向および風速の変化に起因するものと考えられる。また, 波の主方向と風向は観測期間全体を通じて平均的にはよく対応している。

図-8 は Borgman 法 (実線) および分布関数あてはめ法 (点線) によって算出した方向分布関数の周波数による変化の 1 例を示したものである。Borgman 法の適用にあたっては, Fourier 級数の項数を, 方向分布関数

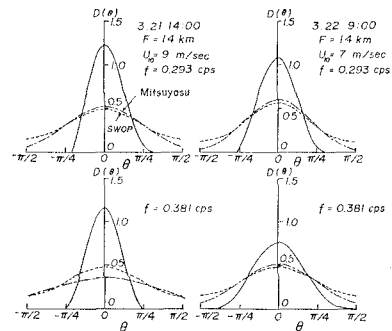


図—8 方向分布関数の周波数による変化

の形状に応じて 2~6 の間で変化させている。一般に、方向分布関数はピーク周波数付近でもっとも特定の方向へのエネルギーの集中度が、大きい形を示し、それより低周波数側および高周波数側になるにつれて、その集中度が減少することが知られている。しかし、より詳細に見れば、ピーク周波数において必ずしも集中度が最大にならず、むしろより低周波数側で最大になる傾向がある。この結果は図—9 に示した a および θ_0 の周波数による変化図に明確に現われている。また、この図では図—7 との比較から明らかなように、全周波数に対して主方向が風向と平均的によく対応しているが、主方向が風向からしだいに变化する資料も多数見出された。

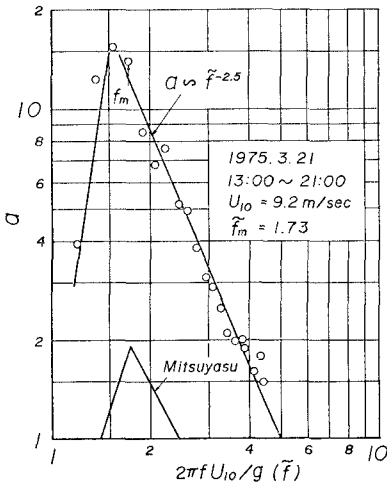


図—9 形状母数および主方向の周波数による変化

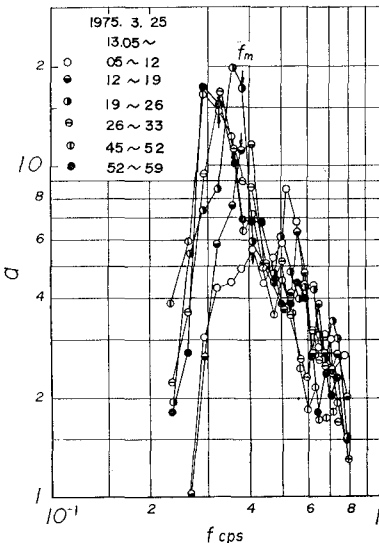


図—10 SWOP および光易の方向分布関数と観測結果との比較

次に、図—10 は図—7 に示した観測期間中の 2 つの時点を対象として、対応する吹送距離、風速および周波数を与えて従来提案されている SWOP および光易の方向分布関数を計算し、Borgman 法により算出した観測結果と比較したものである。図から明らかなように、いずれの方向分布関数も観測結果に比べてはるかにエネルギーの集中度が低い形しか与えない。このことは 3 月 21 日 13 時から 21 時にかけてのほぼ定常状態における風波の方向分布関数の形状母数の無次元周波数 $\tilde{f}$ による変化を示した図—11 からより明確になる。この原因はよくわからないが、実際の海洋ではたとえ理想的な条件であっても、いろいろな方向からの波が重なっていることによるのであろう。また、図—11 によれば、形状母数 a はピーク周波数付近より高周波数側では、図—6 より換算した光易の結果とはほぼ平行になって、平均的に $\tilde{f}^{-2.5}$ に従っててい減する。しかし、今回算出した方向分布関数の解析結果からは、形状母数の無次元ピーク周



図一11 定常状態における形状母数の周波数による変化



図一12 風波の発達に伴う形状母数の変化

波数 $\tilde{f}_m$ による変化は見出せなかった。

図一12 は風速の急激な増大に伴い、減衰状態にあった風波が発達した 1975 年 3 月 25 日 13 時 5 分からの波

浪の連続記録に基づいて、算出した方向分布関数の形状母数の時間的变化を示したものであり、図中の矢印はピーク周波数を表す。この図によると、ピーク周波数および形状母数が最大となる周波数が風波の発達に伴って減少する様子がよく現われている。また、周波数を固定すると、ピーク周波数より低周波数側では形状母数が増大し、一方高周波数側では一度増加したのち、減少する傾向があることがわかる。

5. 結 語

以上、本研究では琵琶湖における多点波浪観測結果の解析に基づいて、有限かつ一様な風域場における風波のスペクトル特性を検討した結果、とくに方向分布関数に関して、ある特定の方向へのエネルギーの集中度が従来提案されていたものよりかなり大きいことがわかった。しかし、本研究で扱った資料は約 1 年間にわたって取得された資料のごく一部であるので、今後さらに多くの資料を解析し、方向スペクトルの特性を解明していくつもりである。

最後に、長期間の観測に協力された京大防災研究所ならびに工学部の諸氏とくに多量の資料のファイリングにも努められた工学部 木村晃助手に謝意を表明する。なお、本研究の実施にあたり、文部省科学研究費自然災害特別研究（代表者京大岩垣雄一教授）および一般研究 D の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Mitsuyasu, H. et al.: Observations of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, Jour. Phys. Oceanogr., Vol. 5, No. 4, pp. 750~760, 1975.
- 2) 岩垣雄一・土屋義人 ほか：琵琶湖における波浪観測について、京大防災研年報，第 19 号 B-2，pp. 361~379, 1976.
- 3) Yamaguchi, M., Y. Tsuchiya and H. Koyata: Resolving power of wave gauge array installed in Lake Biwa, Bulletin, DPRI, Kyoto Univ., Vol. 27, Part 1, 1977 (in printing).