

愛媛大学工学部 正会員 山口 正 隆
京都大学防災研究所 正会員 土 屋 義 人

1. 緒 言：風波の不規則性を1点あるいは少数点での水位変動記録に基づいて取り扱う方法として、水面変動の分散特性を記述する平均波法、分散への周波数あるいは周波数および方向ごとの寄与を記述するスペクトル法、さらに波浪の非線型性の程度を表わすskewnessおよびkurtosisの周波数ごとの寄与を記述するバイスヤクトル法およびトリスヤクトル法などが展開されている。本研究ではこうした解析方法にのっとり、琵琶湖において実施した大規模な波浪観測の資料を解析し、有限風域場における風波の統計的特性を模試しようとするものである。ここで解析する波浪記録は1975年3月～12月に、琵琶湖彦根奥西湖岸の水深4mの地点で得られたものである。また、平均波の計算には $\Delta t = 0.1 \sim 0.16 \text{ sec}$ および $N = 4100 \sim 10250$ の資料を、一方スペクトルの計算には $\Delta t = 0.2 \sim 0.4 \text{ sec}$ および $N = 2048 \sim 4096$ の資料を用いた。

2. 平均波の特性：表-1は波浪観測結果173例について全データ、発達期、平衡期および減衰期別に各種波高比および周期比などの平均値および標準偏差を一括して示し、合田の名古屋港における観測結果と比較したものである。表に示した各種代表波高間の関係はRayleigh分布によるものに十分近く、したがって波高分布はRayleigh分布で近似されるという従来の研究成果が再確認されたことになる。一方、周期比については、 $T_{\max}/T_{1/3}$ および $T_{1/10}/T_{1/3}$ はほぼ合田の結果と対応しており、 $T_{\max} \approx T_{1/10} \approx T_{1/3}$ が成立すると考えてよいであろう。しかし、 $T_{1/3}/\bar{T}$ は合田による名古屋港

での単一スペクトルの場合の観測結果よりかなり大きく、むしろ浅海性の波浪より得られた結果に近い。これは波としての程度の波高まで採用するかという解析上の問題にも起因していると考えられる。図-1は $H_{\max}/H_{1/3}$ と波数との関係を示したもので、図中の実線は合田が計算した $H_{\max}/H_{1/3} > (H_{\max}/H_{1/3})_M$ となる確率である。図から明らかなように、観測結果はかなりの幅

にわたって分散しており、かつピーク分布のピークの位置が理論分布よりずれる傾向がある。また、 $H_{\max}/H_{1/10}$ と $H_{1/3}/h$ との関係から、図-1の波数が350波以上の資料は碎波の影響を多分に受けている可能性が強いことがわかった。さらに、skewness および kurtosis に及ぼす $H_{1/3}/h$ の影響を調べた結果、前者は $H_{1/3}/h$ とともに増加するのに対して、後者はほとんど依存せず、むしろ図-2に1例を示すように、 $H_{\max}/H_{1/3}$ 、 $H_{1/10}/H_{1/3}$ および $H_{1/3}/\bar{H}$ と関係づけられることが見出された。なお平均波間の関係に及ぼす波の発達状況の系統的な影響はほとんど確認されなかった。

3. 周波数スペクトルの特性：周波数スペクトルの形状特性を表示するために、surfbeat など長周期波を除いた周波数帯から $4f_m$ (f_m ：ピーク周波数)までのスペクトルの推定値

表-1

	all data	growth	equilibrium	decay	Goda	theory
N_0	173	22	90	61	60	
$H_{\max}/H_{1/3}$	1.643(0.143)	1.686(0.133)	1.637(0.153)	1.641(0.129)	1.739(0.251)	
$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.251(0.033)	1.253(0.031)	1.248(0.032)	1.254(0.036)	1.281(0.036)	1.271
$H_{1/3}/\bar{H}$	1.615(0.043)	1.608(0.052)	1.610(0.040)	1.625(0.043)	1.586(0.056)	1.597
$H_{1/3}/\bar{H}$	1.134(0.017)	1.131(0.017)	1.133(0.017)	1.137(0.016)		1.128
$H_{1/3}/\bar{H}$	3.902(0.067)	3.914(0.068)	3.904(0.060)	3.869(0.075)	3.97*(0.18)	4.004
$T_{\max}/T_{1/3}$	0.998(0.075)	0.994(0.091)	1.002(0.070)	0.992(0.075)	0.968(0.114)	
$T_{1/10}/T_{1/3}$	1.010(0.027)	1.002(0.033)	1.010(0.024)	1.011(0.027)	0.994(0.033)	
$T_{1/3}/\bar{T}$	1.222(0.039)	1.211(0.040)	1.215(0.037)	1.238(0.037)	1.050(0.076)	
$T_{\text{rms}}/\bar{T}$	1.062(0.009)	1.057(0.011)	1.060(0.008)	1.066(0.007)		
$\sqrt{B_1}$	0.198(0.049)	0.206(0.057)	0.206(0.045)	0.185(0.047)	0.330(0.191)	
B_2	3.070(0.136)	3.053(0.104)	3.066(0.132)	3.081(0.150)	3.63(0.62)	

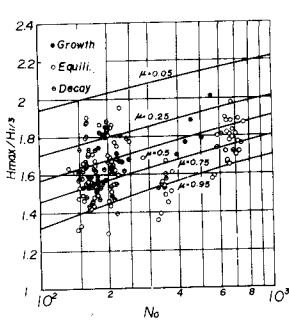


図-1

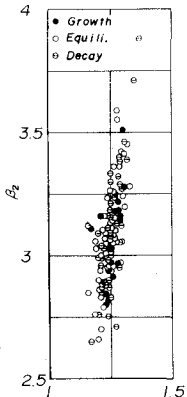


図-2

に対して、高周波側での適合度を高めるために対数変換した JONSWAP スペクトルの表示式を最小自乗法であてはめ、それに含まれるパラメーターを算出した。また、高周波側での平均勾配も最小自乗法より推定した。表-2 は周波数スペクトルパラメーターおよび平均勾配の平均値を示したものである。これらのパラメーターは JONSWAP の結果と同様に無次元放送距離と明確な関係を示さず、それぞれ平均値は $\gamma = 1.72$, $\sigma_a = 0.0512$ および $\sigma_b = 0.0503$ であって、とくに γ は JONSWAP スペクトルのそれよりかなり小さい。つまり、ピーク周波数付近へのエネルギーの集中度は JONSWAP スペクトルのそれに比べてかなり小さいことになる。以上の結果は高周波側が f^{-5} 則に従うとして求めた結果であるが、今回得られた m の値の平均値 4.45 であり、 f^{-5} 則より若干緩やかになっていた。また、 γ および m は波の発達段階に応じて変化し、発達期では、ピーク周波数付近のエネルギーの集中度がより高く、高周波側の勾配もより急になる傾向があるように見える。つぎに、表-3 はスペクトルから計算される各種統計量 (T_z : スペクトルの傾率から定義される平均周期および Q_p : spectral peakedness) の平均値および標準偏差を示したものである。まず、この表において、各種周期比は合田の結果とかなり異なっている。すなわち、 T_z/T_m および $\bar{T}/T_m$ は名古屋港における観測結果よりかなり小さく、むしろ沿岸波浪に対する結果に近い。一方、 T_z と $\bar{T}$ の関係は平均的に $T_z \approx 1.02 \bar{T} \approx \bar{T}$ となって、Rice の理論結果と一致する。この点は $T_z = 0.83 \bar{T}$ を与えた合田の結果と大いに異なるところである。この理由として、著者らの観測結果ではかなり波高および周期の小さい波まで 1 波として数えていることがあげられる。そのほか合田の示唆や光易の研究を参考にすれば、著者らの資料の skewness がかなり小さいことから考えて、これは波の非線型性の影響とも考えられる。なお、 ϵ は $\Delta\epsilon/T_m$ との関係において、 f^{-4} および f^{-3} 則を仮定して行われた合田のシミュレーション結果の間に図示されることが確認された。図-3 は γ と Q_p の関係を示したもので、著者らの観測結果のように、単一ピークの場合には、両者の間に明確な相関関係が存在する。しかし、その値は JONSWAP 型スペクトルを仮定して求められる理論結果より小さい。この理由は不明である。

表-2

	γ	σ_a	σ_b	m
all data	1.72 (163)	0.0512 (163)	0.0503 (163)	4.45 (172)
growth	1.97 (22)	0.0459 (22)	0.0403 (22)	4.54 (22)
equilibrium	1.77 (85)	0.0539 (85)	0.0538 (85)	4.48 (90)
decay	1.56 (56)	0.0492 (56)	0.0488 (56)	4.37 (60)

表-3

	all data	growth	equilibrium	decay	Goda
N_p	173	22	90	61	60
$T_z/\bar{T}$	1.019(0.032)	1.020(0.027)	1.013(0.030)	1.028(0.036)	0.841(0.061)
$T_z/\bar{T}_m$	0.889(0.034)	0.898(0.041)	0.896(0.032)	0.875(0.030)	0.957(0.051)
$\bar{T}/T_m$	0.728(0.041)	0.743(0.051)	0.739(0.038)	0.708(0.033)	0.917(0.088)
ϵ	0.807(0.046)	0.805(0.030)	0.798(0.053)	0.821(0.034)	0.829(0.036)
Q_p	2.538(0.335)	2.665(0.437)	2.586(0.311)	2.422(0.290)	2.32 (0.53)

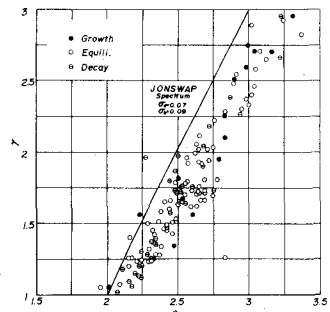


図-3

4. 方向スペクトルの特性: 8 台の波高計記録から Fourier 級数の項数を適切に選択した Borgman の最小自乗法により方向スペクトルを求め、さらにその結果に円正規分布をあてはめて形状母数を推定した。図-4 は平衡状態からピーク周波数での波向が $\pm 11.25^\circ$ 以内で風向と一致する資料の形状母数と f/f_m の関係を示したものである。図中の実線は資料の平均的傾向を表示するために、JONSWAP 型関数を仮定して得られた結果を表わす。すでに指摘したように、一様風域場での円正規分布の形状母数は従来海洋で得られているものよりはるかに大きい。また、形状母数はピーク周波数より低周波側で最大となる傾向がある。

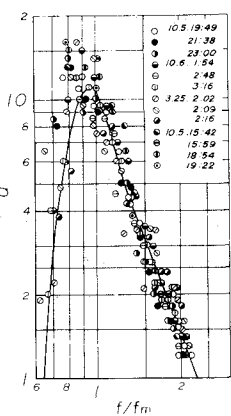


図-4

5. 結 語: 以上、本研究では琵琶湖における波浪観測資料を平均波法および方向スペクトルまで含めたスペクトル法によって解析し、有限かつ一様風域場における風波の統計的特性を検討した結果、それぞれについて若干の知見が得られた。