

愛媛大学工学部 正員 山口 正 隆

1. 緒言: 波浪の方向スペクトルを測定する方法の1つとして、1点での波のベクトル量から方向スペクトルを算出する方法がある。この方法による方向スペクトルの測定結果としては、Pitch and roll buoy を用いた Longuet-Higgins の結果をはじめ、流速計を用いた永田およびストレーンゲージ型波向計を用いた鈴木の結果などがある。著者らも琵琶湖の水深1mの地点で3成分ドップラー式流速計を用いた観測を実施した。(しかしながら、方向スペクトルの測定にあたって最も重要な方向分解能の検討は、鈴木の研究を除いて行われておらず、これらの測定結果がどの程度の信頼性をもつかは不明といわねばならない。そこで、本研究では、計算機内でシミュレートした既知の方向スペクトルをもつ不規則波浪の近似的方向スペクトルを各種の方法で推定することにより、この測定方法の方向分解能を検討しようとするものである。

2. 方向スペクトルの計算方法: いま、方向スペクトル $E(f, \theta)$ (f : 周波数, θ : 方位角) が Fourier 級数 $E(f, \theta) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \dots (1)$ に展開されるならば、係数 a_n および b_n は式(2)で与えられる。 $a_0 = N_{00}/\pi$, $a_1 = N_{10}/\pi k$, $b_1 = N_{01}/\pi k$, $a_2 = (N_{20} + N_{02})/\pi k^2$, $b_2 = 2N_{11}/\pi k^2 \dots (2)$ ここに、 $N_{00} = P_{\eta\eta}$, $N_{10} = Q_{\eta\eta_x} = 2\pi f C_{\eta u}/gK$, $N_{01} = Q_{\eta\eta_y} = 2\pi f C_{\eta v}/gK$, $N_{20} = P_{\eta_x\eta_x} = (2\pi f)^2 P_{uu}/(gK)^2$, $N_{02} = P_{\eta_y\eta_y} = (2\pi f)^2 P_{vv}/(gK)^2$, $N_{11} = C_{\eta_x\eta_y} = (2\pi f)^2 C_{uv}/(gK)^2$, $K = \cosh kh(h+Z)/\cosh kh \dots (3)$ である。なお、 P : power spectrum, C : co-spectrum, Q : quadrature spectrum である。また、 $N_{20} + N_{02} = k^2 N_{00} \dots (4)$ が成立するので、この関係式は、シミュレーションの妥当性を検討するために用いることができる。いま、方向分布関数 $D(\theta)$ として円正規分布 $\exp\{a \cos(\theta - \theta_0)\}/2\pi I_0(a) \dots (5)$ を仮定するならば、Fourier 係数との関係は、 $a_1 = I_1(a) \cos \theta_0/\pi I_0(a)$, $b_1 = I_1(a) \sin \theta_0/\pi I_0(a)$, $a_2 = I_2(a) \cos 2\theta_0/\pi I_0(a)$, $b_2 = I_2(a) \sin 2\theta_0/\pi I_0(a) \dots (6)$ で与えられる。ここに、 a : 形状母数, θ_0 : 主方向および $I_n(a)$: n 階の変形 Bessel 関数である。したがって、円正規分布を方向分布関数として用いる場合には、式(6)から a および θ_0 を推定する必要がある。

3. 2次元不規則波浪のシミュレーション: 不規則波のシミュレーション方法は合成波法とデジタルフィルター法の2つに大別されるが、ここでは、計算の簡単さから合成波法を用いた。すなわち、周波数スペクトルとして光島II型スペクトル、方向分布関数として円正規分布を用い、それぞれの分割数も60および72として、サンプリング間隔 $\Delta t = 1/10f_{max}$ (f_{max} : スペクトルのピーク周波数) データ個数 $N=600$ でシミュレーションを行った。周波数の分割方法は累積スペクトルを等分割する方法、方向分布関数の分割方法は等分割法に依った。図-1は入カスペクトルと出カスペクトルを比較したものである。この図によれば、低周波側および高周波側で両者に若干の相違が見られるが、全体的に期待スペクトルをかなりよくシミュレートできたと考えてよいであろう。図-2はシミュレーションの結果の妥当性を検討するために、式(4)がどの程度成立するかを示したものであり、いずれの場合も $0.2 \text{ cps} < f < 0.6 \text{ cps}$ の範囲で式(4)の関係を近似的に満たしていると考えられる。また、図-3は図-2と同様にシミュレーションの精度を検討するために、鉛直水粒子速度 w と水平2方向の水粒子速度 u および v 相互の位相差の絶対値を示したものである。この図によれば、 u と w の位相差は周波数の広い範囲にわたり、理論結果(90°)と一致しているが、 u と v のそれは若干程度が悪くなっている。以上の結果からシミュレーション

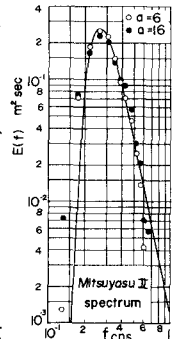


図-1

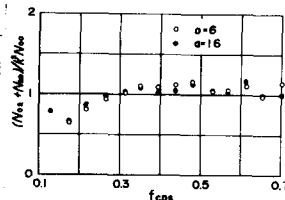


図-2

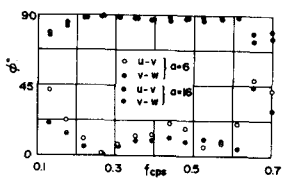


図-3

は $0.2\text{cps} < f < 0.6\text{cps}$ の範囲ではほぼ良好な精度で行われたと考えられる。

4. 方向分解能に対する考察：図-4はFourier級数法により算定した方向分布関数と入力として与えたそれとを比較したものである。図中の実線および点線はそれぞれ式(1)による計算結果および負の方向分布関数の出現をさけるため、Longuet-Higginsにより提案された重み関数を式(1)にかける方法による結果を示す。さて、流連計による方法では、Fourier級数の第2項までしか考慮されていないので、方向分布関数の形状はかなり平滑化され、とくに、当然のことではあるが、その傾向は重み関数をかけた場合に著しい。したがって、Fourier級数法では、ある特定の方向へのエネルギーの集中度の著しい方向分布関数を正しく検出することはほとんど不可能であるといえる。しかし、その場合、方向分布関数のピークの位置はおおむね一致する。図-5はシミュレーション結果から推定した円正規分布の形状母数 α と入力として与えたそれとを比較したものである。この場合、図-5(b)は鈴木によるシミュレーション結果（水位変動および水平2方向水粒子速度）から算出した形状母数を示したものである。図中 C_1 および C_2 はそれぞれFourier係数の第1項および第2項から α を推定した結果であり、また $C_1 \sim C_2$ はFourier係数の第1項および第2項から最小自乗法によって推定した結果である。この図によればピーク周波数近傍の周波数領域では、Fourier係数の第2項を用いる方法および最小自乗法は比較的良好な結果を与えるのに対してFourier係数の第1項を用いる方法による結果にはかなりの変動が見られる。また、前述の周波数領域外のうち、低周波側ではいずれの方法による結果も過小に評価され、高周波側では変動が大きくなる。したがって、形状母数の推定にあたっては式(4)が成立しているかどうかを検討することが重要であるといえよう。図-6はシミュレーション結果からFourier係数の第1項を用いる方法により推定した主方向 θ_0 を示したものである。この場合、いずれの方法によっても同様の結果が得られる。さて、この図から明らかのように、推定した主方向は α および θ_0 の値にかかわらず、既年の主方向とよく一致することがわかる。図-7は現地波浪の特性を考慮して方向分布関数を図中の実線のように与えた場合のシミュレーション結果から前述の方法により推定した形状母数 α を示したものである。シミュレーションに際しては、周波数を $0.5f_{\max} < f < 3f_{\max}$ の範囲で合田による乱数を用いた分割法により100個に、方向を等分割法で120個に分割した。図-2および3と同様の検討をした結果、 $0.25\text{cps} < f < 0.6\text{cps}$ でシミュレーションの精度が良好であることがわかった。さて、図から前述のあてはめ法によれば、 α の値の大きい周波数帯で若干の変動が見られるが、平均的な特性は検出できたと考えられる。

5. 結 語：以上、本研究では数値シミュレーションに基づいて、1点下の波のベクトル量の測定から方向分布関数を算定する方法の方向分解能を検討した。その結果、Fourier級数法では正確な方向分布関数の推定がほぼ不可能であることおよび分布関数あてはめ法が比較的良好な結果を与えることがわかった。最後に、本研究の実施にあたり、御指導賜、東京防災研究所土屋義人教授に謝意を表明するとともに、本研究は文部省科学研究費（一般D）による成果の一部であることを付記する。

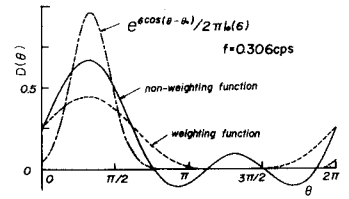


図-4

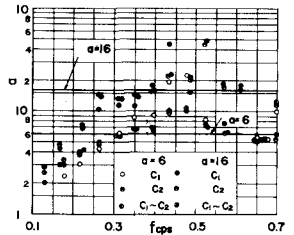


図-5(a)

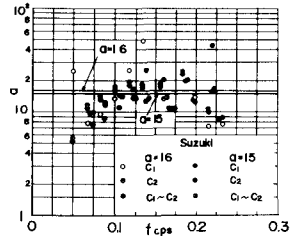


図-5(b)

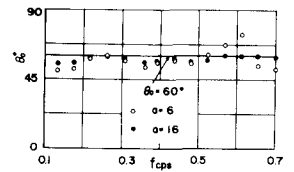


図-6(a)

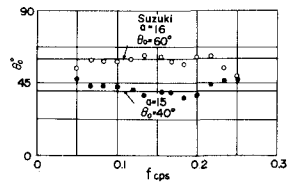


図-6(b)

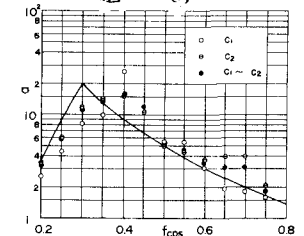


図-7