

九州大学応用力学研究所 学生員 ○郭 一羽
九州大学応用力学研究所 正会員 光易 恒

1. まえがき

風波の方向スペクトルの構造を明らかにすることは、理論的にも実用的にも重要な意義を有し、これまでに多くの研究が行なわれている。実用的には、SWOPのスペクトル、光易のスペクトルなどが提案されているが、これらは殆ど海洋波に関するもので、風胴水槽における風波の方向スペクトルに関する信頼できるデータは極めて少ない。これは風胴水槽の風波のパワースペクトルに関しては極めて多くのデータが得られている事実からすると意外である。その原因の一つは、風胴水槽における風波の方向スペクトルを高精度で測定する適切な方法が確立されていない点にある。この問題を解決するために、今回、我々は回転可能な波高計の直線型アレーを用いて、風胴水槽の風波の方向スペクトルの測定を試みたので、その結果について報告する。

2. 測定原理

風胴水槽の風波の方向スペクトルの測定法として、Barberが提案した方法の一つである回転出来る波高計アレーによる方法を採用した。直線的に配置された n 本の波高計より減る波高計アレーの各出力信号を $\eta_s(t)$ とする、それらの信号の和
$$Y(t) = \sum_{s=1}^n \eta_s(t) \quad (1)$$
 のパワー $\bar{Y}^2$ は、 η_r, η_s ($r, s = 1, 2, \dots, n$) の相関関数の逆フーリエ変換、すなわち2次元波数スペクトル $E(l, m)$ により次のように表わされる。

$$\bar{Y}^2(t) = \int E(l) g(l) dl \quad (2)$$

$$\text{ただし} \quad g(l) = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \cos(l \Delta_{rs}) \quad (3) \quad E(l) = \int E(l, m) dm \quad (4)$$

ここに l は波数 k のアレー軸方向の成分、 m はそれと直角方向の成分、 Δ_{rs} は波高計 r と波高計 s の間の距離である。ここにアレーを形成した各波高計を適当な間隔で配列すれば、 $l=0$ の近傍だけ $g(l) \neq 0$ と方向的選択性をもたせることができる。(図-1) この $g(l)$ の特性に従って、近似的に(2)式右辺の $E(l)$ が $E(0)$ になって積分の外に出すことができる。なおこのとき、ある狭い周波数範囲 $f \sim f + \delta f$ の間だけのパワー $\delta \bar{Y}^2$ を考えると、

$$\delta \bar{Y}^2(f) = \delta E(0) \int g(l) dl \quad (5)$$

ここに $\delta E(0)$ は l の方向において(このとき $m \equiv k$)、 δf に対応するある波数範囲 δm の間に $E(0) \neq 0$ 、その範囲以外に $E(0) = 0$ のような一次元波数スペクトルである。(4)式を用いて、 $\delta E(0)$ は次のように表わされる。

$$\delta E(0) = E(0, m) \delta m = E(0, m) \delta k \quad (6)$$

一方、 $E(0, m)$ は極座標を用いて、 $E(k, \alpha)$ と表わすことが出来る。ここに α は $l=0$ の方向で、アレー軸の直角方向と一致する。アレーの設定方向 α をいろいろ変えさせて、各方向 α におけるパワー $\bar{Y}^2$ が求められる。とこ

ろで、方向スペクトルには、

$$E(f, \alpha) = E(k, \alpha) k(f) \frac{dk}{df} \quad (7)$$

の関係があるので、(5)式及び(6)式を用いて、次式が導かれる。

$$E(f, \alpha) = \delta \bar{Y}^2(f, \alpha) k(f) / \delta f \int g(l) dl \quad (8)$$

(8)式右辺の分母の積分値は波高計の配置により一定値である。波数 k が普通の波の分散関係により周波数 f と関係づけられれば、これより方向スペクトルが求められるけれども、もし流れや波の非線形性等の影響があると、簡単に求まらない。この問題をさけるため、波の方向スペクトルを方向分布関数 $S(f, \alpha)$ を導入して次のように表現する。

$$E(f, \alpha) = S(f, \alpha) \phi(f) \quad (9)$$

ここに $\phi(f)$ は波の一次元周波数スペクトルで

$$\phi(f) = \sum E(f, \alpha) \Delta \alpha \quad (10)$$

式(8)、(9)および(10)から方向分布関数は

$$S(f, \alpha) = \delta \bar{Y}^2(f, \alpha) / \int_0^{2\pi} \delta \bar{Y}^2(f, \alpha) d\alpha \quad (11)$$

となり、方向分布関数 $S(f, \alpha)$ を $g(f)$ には無関係に求めることができる。

3. 実験とデータ解析

実験は小型の風胴水槽(長さ: 8.5m, 幅: 60cm, 高さ 80cm, 水深 36.5cm) を使用して行われた。今回の研究において、2種類の風波のデータを採用した。すなわち、(1)水槽の途中より風を抜いて水槽の後半部の無風域で測定した波のデータと、(2)風を途中から抜かないで発生域で測定した波のデータとである。風は断面平均風速で、(1)の実験では 15, 12.5, 10 m/s 3種類、(2)の実験では 10, 7.5 m/s 2種類を使用した。波高計は 4cm 間隔で直線に配列した 11 本波高計により組成したアレーである。このアレーは中心軸の周りに 360° 自由に回転させられる。今回は波の主進行方向に向って、 $\pm 90^\circ$ の範囲で 22.5° の間隔で 8 方向について風波の測定を行なった。11 本波高計の信号の和 $Y(t)$ を 40 Hz サンプリング周波数で数値化して、F.F.T. 変換よりそのパワースペクトルを求めた。周波数間隔は $\frac{1}{51.2}$ Hz。測定されたスペクトルの信頼度をあげるために、10 サンプルのサンプル平均および 7 本のスペクトル線の移動平均を加えた。8 方向のパワースペクトル $\bar{Y}^2(f, \alpha)$ を使って、(11) 式により方向分布関数を求めた。

4. 測定の限界

4cm 等間隔の 11 本波高計より構成したアレーの場合、(3) 式の $g(l)$ は $g(l) = 11 + 2 \sum_{n=1}^{10} n \cos[4(11-n)l]$ で表現され、図-1 に示されているようになりに狭い方向分解能を有している。但し、この帯域幅は Δl の大きさに依存するので、短周期の波程この測定法は有利である。今回のアレーの配列について具体的に検討してみると、少なくとも周波数が 1.5 Hz 以上の波に対して有効であることがわかった。一方、また図-1 をみると、 l が 1.57 の間隔で $g(l)$ が周期的に現われている。従って $l > 1.57$ の場合、即ち波長 4cm 以下 ($f > 6.24$ Hz) の波については今回のアレーの配列は適切でない。但し、今回測定した風波のピーク周波数は 1.8 Hz ~ 3 Hz であったので、使用したアレーの配列は適切なものであったことがわかる。

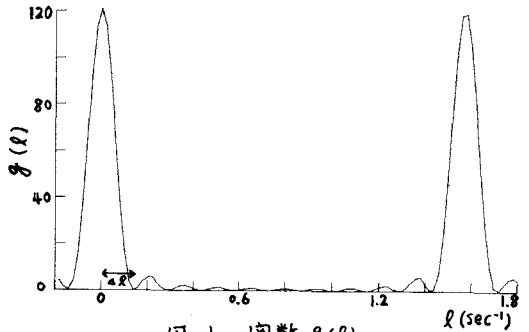


図-1 関数 $g(l)$

5. 測定結果

①無風域のデータ：一般に方向分布関数としては、次のような関数形がよく使用されている。

$$S(f, \theta) = \frac{1}{\sqrt{m}} \frac{\Gamma(1+m/2)}{\Gamma(1/2+m/2)} \cos^m \theta \quad (12)$$

今回実測した分布をこの分布と比較してみると、実測分布では m が 2 ~ 4 の間にあり、高風速で発生した風波ほど集中度が低下して分布が広がっていることがわかった。また発生域における海洋波の方向分布関数によくみられるピーク周波数から離れていくに従って集中度が低下する傾向はそれ程見出されなかった。特にピーク周波数の 2 倍の所の成分においては、方向分布が反ってピークの所より集中している傾向がみられた。これは波の非線型効果に原因するものと思われる。

②発生域のデータ：今回測定した範囲では、発生域の風波についてもピーク周波数の極近辺において、方向分布は(12)式で $m=2 \sim 4$ としたものに近いことがわかった。そしてピークから少し高周波側へいくと、海洋波にみられるように集中度の低下がみられた。しかし分布はかなり複雑で $\cos^m \theta$ の分布に対応できない分布、例えばピークは 0 からずれるもの、或いは 2 つのピークが存在するもの等特異な分布が現われる場合があった。

③結論：よく知られているように風胴水槽の周波数スペクトルは、海洋波のそれに比して非常に高い集中度を有しているが、方向分布関数については必ずしも集中度はそれほど高くない、ほぼ $\cos^2 \theta \sim \cos^4 \theta$ 程度である。しかしながら、その分布形はかなり複雑な性質を示すので、発生条件あるいは周波数等による方向分布の変化に関する一般的な結論を導くまでには至らなかった。