

サーペント型造波機で発生した多方向不規則波の特性

高山 知司*・平石 哲也**

1. ま え が き

実際の海の波は波峯線が短く切れた“切れ波”であり、さまざまな方向からの波が重なり合っているために“多方向不規則波”とも呼ばれている。海の波が沖合から浅水域へ伝播してくると、海の波を構成する成分波の波向が、屈折現象によって、汀線に直角になるように変化する。したがって、比較的水深の浅い海域では、海の波の波峯線は汀線と平行に長くつながるようになって、“単一方向不規則波”としての性質が強くなる。

従来の防波堤、護岸、係船岸、堤防等の海岸・港湾施設は、汀線近傍あるいは水深の比較的小さい海域に築造されてきたので、作用する波を単一方向不規則波とみなして水理模型実験を行っても、構造物に作用する波力、越波流量等をほぼ正確に推定することができた。近年では、関西新国際空港島のような沖合人工島あるいは大水深防波堤は水深が数 10 m 以上の海域に建設されるようになってきた。このような水深の深い海域においては、波は多方向不規則波としての性質が強く、水理模型実験においても、現地の波を従来のような単一方向不規則波ではなく多方向不規則波として作用させなければならない。

多方向不規則波を実験水槽内で造波する装置として“サーペント型造波機”が世界の主要な研究機関で設置されてきている。運輸省港湾技術研究所においても昭和 58 年度からサーペント型造波機の整備を進め、現在 35 台の小型ピストン造波機から成るサーペント型造波機を完成させている¹⁾。サーペント型造波機で発生した多方向不規則波を解析した例^{2),3)}はあるが、いずれの実験例においても多方向不規則波の造波条件が限定されており、多方向不規則波の方向分布特性については検討が十分ではない。そこで、本研究では、運輸省港湾技術研究所内のサーペント型造波機で造波された多方向不規則波の特性を検討し、今後の多方向不規則波を用いた模型実験に役立てることを目的とした。

2. 実験の内容

(1) 造波装置および造波信号発生法の概要

図-1 は、造波装置の平面配置を示した図で、水槽全体の大きさは、長さ 36 m、幅 24 m であり、最大水深は 1.2 m である。サーペント型造波装置は水槽の側壁に沿って設置されており、幅 80 cm のピストン型造波機 35 台で構成されている。実験では東側の 5 台を除く 30 台を用いた。造波機を並べていない 3 側壁に沿って、移動可能なプレストレスコンクリート製の横スリットを有する階段状の消波工が設置されている。単一方向波を作用させて消波工の反射率を測定したところ、有義波高 $H_{1/3}$ が 10 cm 以上の波に対して、反射率は 0.26 ~ 0.30 となった。

サーペント型造波機によって起こされる斜め方向に進む規則波、すなわち“斜め波”の波高、周期の分布は、“斜め波の造波理論⁴⁾”によって計算することができる。それによると、斜め波の波高および周期は、各造波板幅が有限値であること、および全造波板幅が有限値であることによって場所的に変動し様ではない。しかし、波向を、造波板に対して直角方向から $\pm 15^\circ$ 傾けた場合でも、造波板から 10 m の距離の範囲では、目標波高の $\pm 20\%$ 以内に波高変動が納まる波高安定領域がある程度確保できることが明らかとなっている¹⁾。

多方向不規則波の造波信号は、異なった周期および波向を持つ斜め波の造波信号を線型的に重ね合わせるこ

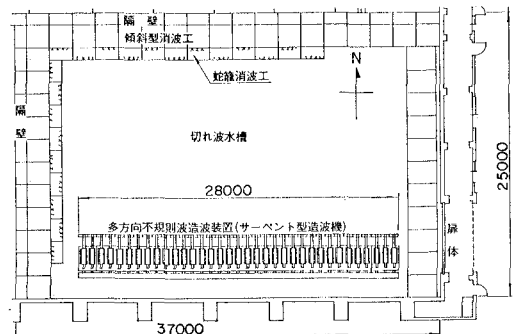


図-1 造波装置の平面配置

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室長

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室

によって作ることができる。\$l\$ 番目の造波板変位 \$\zeta(t, l)\$ は次式で与えられる。

$$\zeta(t, l) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{a_{nm}}{F_n} \cos(\sigma_n t - l k_n b \sin \theta_m + \varepsilon_{nm}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、\$N\$; 周波数分割数、\$M\$; 方向分割数、\$a_{nm}\$; 各成分波の振幅、\$b\$; 造波板幅、\$\varepsilon_{nm}\$; 乱数で与えられる位相角、\$F_n\$; ピストン型造波機の造波効率、\$\sigma_n\$; 各成分波の周波数、\$k_n\$; 各成分波の波数、\$\theta_m\$; 成分波の波向で、\$\theta_m\$ は、造波板列に対して直角方向に進む波向を \$0^\circ\$ とし、反時計回りが正となるように定義した。\$a_{nm}\$ は次式で定義される。

$$a_{nm} = \sqrt{2 \int_{f_{n-1}}^{f_n} \int_{\theta_{m-1}}^{\theta_m} S(f, \theta) d\theta df} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、\$S(f, \theta)\$ は造波目標とする方向スペクトルであり、周波数スペクトル \$S(f)\$ と方向関数 \$G(\theta; f)\$ の積として定義される。\$f_{n-1} \sim f_n\$ および \$\theta_{m-1} \sim \theta_m\$ は、それぞれ成分波を代表する周波数および波向の範囲である。\$S(f)\$ は Bretshneider・光易型を用い、方向関数は次式で示す光易型方向関数を用いた。

$$G(\theta; f) = G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta - \theta_a}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、\$\theta_a\$ は目標とする主波向であり、造波板に対して直角方向を \$0^\circ\$ とした。\$G_0\$ は波向範囲における \$G(\theta; f)\$ の積分値を 1 とするための定数で、次式で定義される。

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2S} \left(\frac{\theta - \theta_a}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、\$\theta_{\min}\$、\$\theta_{\max}\$ はそれぞれ成分波の波向範囲の最小値および最大値であり、ここでは、\$\theta_{\min} = \theta_a - 45^\circ\$、\$\theta_{\max} = \theta_a + 45^\circ\$ とした。\$S\$ は波の方向集中度を表す指標で、方向集中度パラメータ \$S_{\max}\$ を用いて、次式のように提案されている⁵⁾。

$$S = \begin{cases} S_{\max} \cdot (f/f_p)^5 & : f \leq f_p \\ S_{\max} \cdot (f/f_p)^{-2.5} & : f > f_p \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

\$f_p\$ は周波数スペクトルにおけるピーク周波数である。

(2) 実験および解析手法

サーペント型造波機で造波された多方向不規則波を測定し、その特性を検討するためには、方向スペクトルを求めることが不可欠となる。本研究では、方向スペクトルを求めるために、波高計群を用いる方法と、波高計と流速計のペアを用いる方法を採用した。図-2 は、実験における測定点の位置を示したもので、サーペント型造波装置から 6 m 離れた直線に沿って 4 m おきに 5 点の測点を設けた。中央部の Point 3 では、4 台の波高計を用いて星型アレイを作った。波高計間の最小距離は、合田の指針⁶⁾に従って、50 cm とした。Point 1~Point 5 の 5 点では、波高計と 2 成分電磁流速計を用いて水面波

○ measurement point (wave profile+current)

△ measurement point (wave array)

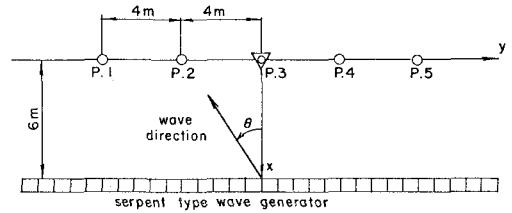


図-2 実験における測定点の配置

形と水平 2 方向の流速を測定した。水深は 80 cm とした。また、流速計センサー部の設置水深は 40 cm とした。

実験では、各造波数に同一の信号を与えた場合に生じる、造波板列に対して直角方向に進む単一方向不規則波および (1) 式において方向分割数 \$M\$ を 1 とした場合に生じる斜め方向へ進む単一方向不規則波、さらに多方向不規則波を造波した。

単一方向不規則波では、目標有義波高 \$H_a\$ を 5~20 cm、目標有義波周期 \$T_a\$ を 1.5~2.0 sec、目標波向 \$\theta_a\$ を \$0 \sim 30^\circ\$ とした。多方向不規則波は、方向分割数 \$M\$ を 30 とし、造波した。この場合、\$H_a\$ は 10~15 cm、\$T_a\$ は 1.5 sec とした。そして、目標とする方向集中度 \$S_{\max a}\$ は 10~100 に変化させて、\$\theta_a\$ を \$0^\circ\$ で一定としたケースと、\$S_{\max a} = 25, 200\$ とし、\$\theta_a\$ を \$5 \sim 15^\circ\$ に変化させたケースについて実験を行った。実験波の造波時間は 5 分間とし、造波開始 30 秒後から 4 分間波高および流速を測定した。測定したアナログデータは、0.2 秒毎にサンプリングしてデジタルデータに変換した。そして、1024 個のデジタルデータを用いて有義波高、有義波周期、周波数スペクトルおよび方向スペクトルを求めた。

方向スペクトルの解析は、分解能が高く、広く使用されている MLM 法および磯部ら⁷⁾が示した EMLM 法を用いて行った。

3. 単一方向不規則波の特性

(1) 周波数スペクトルによる検討

ここでは、直角方向および斜め方向に進む単一方向不規則波の特性を検討した。図-3 は、水槽中央部の Point 3 における水面変動から求めた周波数スペクトル形を示した図である。\$H_a = 15\$ cm、\$T_a = 1.75\$ sec とし、目標波向 \$\theta_a\$ は \$0 \sim 45^\circ\$ に変化させた。図に示されるように、全造波板を同一信号で動かした \$\theta_a = 0^\circ\$ の場合には、周波数スペクトル形は単峰型となり、目標とするスペクトル形にはほぼ一致する。\$\theta_a\$ が大きくなると、

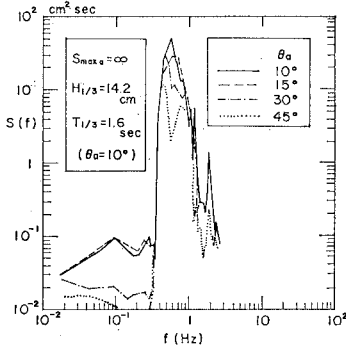


図-3 単一方向波の周波数スペクトル

スペクトル形のピークは分裂し、双峰型に近くなる。 $\theta_a = 45^\circ$ のときには、スペクトル形は明瞭な2つのピークを持ち、 $\theta_a = 0^\circ$ の場合とは大きく異なる。この原因としては、斜め波の波向が 30° を越えると、周波数による波高の変動性が大きくなることが考えられる。

(2) 方向スペクトルによる方向分布特性の検討

図-4 は、 $\theta_a = 0^\circ$ の単一方向不規則波の、Point 3 の波高計アレイで解析された方向スペクトルを示した図である。図-4 では横軸に波向をとり、縦軸に方向スペクトルのエネルギー密度 $S(f, \theta)$ を示した。そして、周波数スペクトルのピーク周波数 f_p とその近傍の周波数における方向スペクトルの分布形を示した。各周波数において、方向スペクトルの分布形は鋭く尖っており単一方向波としての特性が明瞭になっている。 f_p における $S(f, \theta)$ の最大値は約 $80 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}$ であった。

図-5, 6, 7 は、 $\theta_a = 10^\circ, 15^\circ$ および 30° のそれぞれの単一方向不規則波の、ピーク周波数 f_p の近傍の周波数における方向スペクトルの分布形を示している。図-5 の $\theta_a = 10^\circ$ の場合、 $S(f, \theta)$ は、ピーク周波数 f_p において、 $\theta = 5 \sim 10^\circ$ で最大値をとり、その値は約 $35 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}$ である。この値は、 $\theta_a = 0^\circ$ の場合に比べて $1/2$ 以下で小さい。これは、黒丸で示した $S(f_p, \theta)$ の分布形を、図-5 と 図-4 で比較すると明らかなように、 $\theta_a = 10^\circ$ の場合は、 $\theta_a = 0^\circ$ の場合よりエネルギーがより広く分布するためである。方向スペクトルが最大となる波向は目標波高にはば一致している。

図-6 の $\theta_a = 15^\circ$ の場合には、 $S(f, \theta)$ は $f = f_p, \theta = 10^\circ$ で最大値をとり、エネルギーが最大となる波向は、 $\theta_0 = 15^\circ$ から 5° 程度ずれている。しかし、 $\theta = 15^\circ$ と $\theta = 10^\circ$ における $S(f, \theta)$ の値はほぼ同じであるので、真の最大値は $\theta = 10 \sim 15^\circ$ に出現しており、目標波向とほとんどずれていないと考えられる。 $S(f_p, \theta)$ の最大値は $44 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}$ 程度で、 $\theta_a = 10^\circ$ の場合と同様に $\theta_a = 0^\circ$ の場合に比べて小さい。

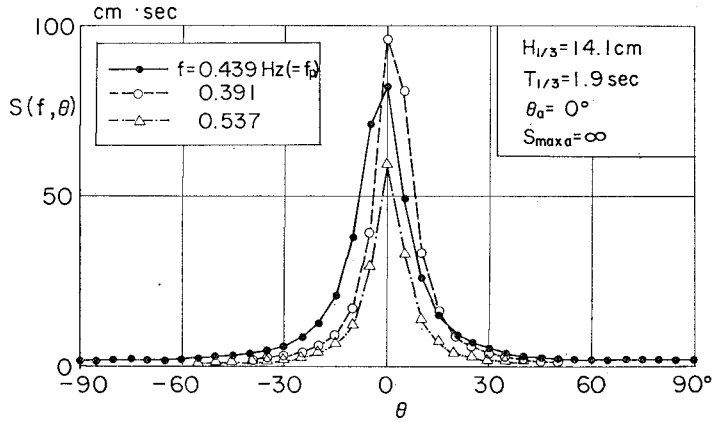


図-4 単一方向 ($\theta_a = 0^\circ$) 不規則波の方向スペクトル

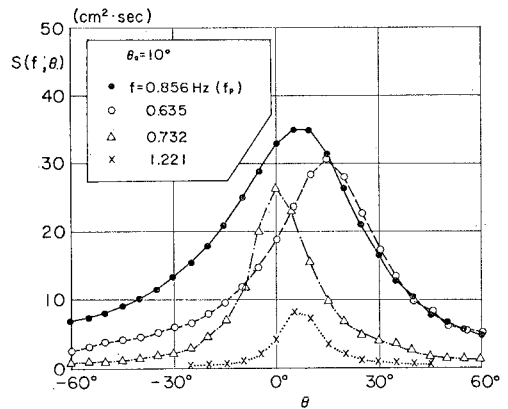


図-5 単一方向波 ($\theta_a = 10^\circ$) の方向スペクトル

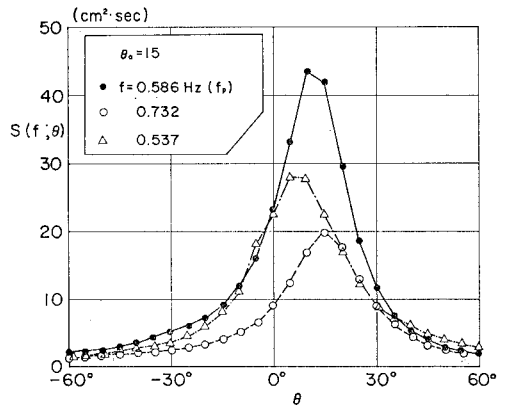


図-6 単一方向波 ($\theta_a = 15^\circ$) の方向スペクトル

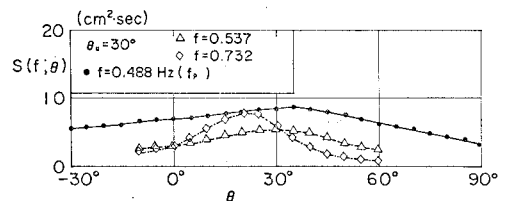


図-7 単一方向波 ($\theta_a = 30^\circ$) の方向スペクトル

図-7の $\theta_a=30^\circ$ の場合の方向スペクトルの分布形は平坦な形をしており、明瞭なピークは認められにくい。

以上のことから、サーベント型造波装置で単一方向不規則波を造波した場合、 θ_a が 15° 以内であれば、ほぼ目標とする波向を持った不規則波が造波できることがわかる。しかし、 θ_a が 30° 程度になると、今回の実験ケースについては、目標とする波向を持つような波を造波することが困難になることがわかった。また θ_a が 0° 以外の場合には、 $\theta_a=0^\circ$ の直角方向単一方向波に比べて、方向スペクトルの最大値が小さくなり、エネルギーが広く分布する。したがって、斜め単一方向不規則波は多方向不規則波に近い性質を持つものと考えられる。

Point 3においては、波高計アレイと同時に、流速計・波高計ペアによっても実験波を測定しており、その解析結果を比較したところ、両者はほぼ一致した。

4. 多方向不規則波の方向分布特性

図-5, 6で示したように、方向スペクトルは $f=f_p$ において最大となるので、本章では、周波数スペクトルのピーク周波数 f_p における方向関数 $G(\theta; f_p)$ によって多方向不規則波の分布特性を検討した。

(1) 方向集中度パラメーターおよび設定主波向による方向分布特性の変化

図-8, 9は、Point 3の波高計アレイで解析した多方向不規則波の $G(\theta; f_p)$ の分布形を示した図である。実験波の主波向は 0° で一定で、 $H_a=10\text{ cm}$ 、 $T_a=1.5\text{ sec}$ とし、目標とする方向集中度 $S_{\max a}$ を10~100まで変化させた。図-8は、 $S_{\max a}=50\sim 100$ および単一方向波の場合、図-9は、 $S_{\max a}=10\sim 25$ の場合を示す。図-8, 9では、分布形を比較するために、 $\theta=0^\circ$ における $G(\theta)$ の値 G_{peak} で標準化した方向関数形を示している。図中の細実線は、式(3)~(5)から求めた計算値を示している。

図-8において、太線で示した実験値をみると、 $S_{\max a}$ が大きくなるにつれて、方向関数の分布形が鋭くなっているが、 $S_{\max a}=75$ の場合と $S_{\max a}=50$ の場合では大きな変化は見られない。計算値の方も、 $S_{\max a}=50\sim 100$ では大きく変化していない。実験値と計算値を比較すると、 $-15^\circ\sim +15^\circ$ の範囲では、両者はほぼ一致しているが、 $\pm 15^\circ$ を越えた範囲では、いずれのケースにおいても実験値の方が計算値より大きくなる。これは、実験波には側壁および造波板からの反射波の影響が含まれており、波のエネルギーが全方向に分布する傾向があるためと推測できる。図-9の方向集中度の低いケースと比較すると、 $-30^\circ\sim +30^\circ$ の全範囲において実験値と計算値はほぼ一致している。したがって、サーベント型造波機で $\theta_a=0^\circ$ の多方向不規則波を造波した場合には、方向集中度が高いときには、反射波等の影響に

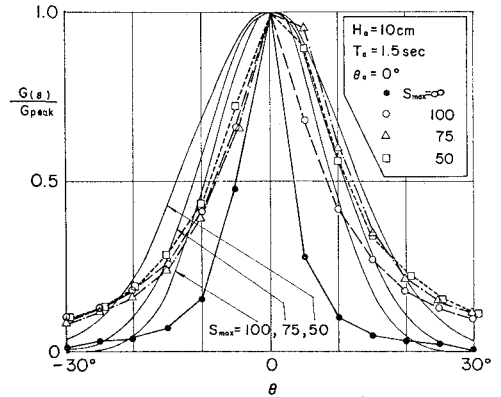


図-8 多方向不規則波の方向分布 ($S_{\max a}=50\sim\infty$)

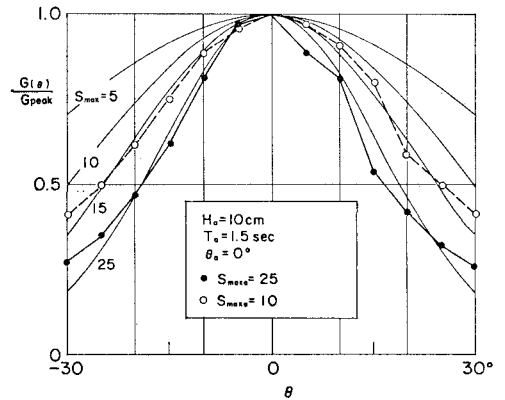


図-9 多方向不規則波の方向分布 ($S_{\max a}=10, 25$)

よって $\pm 15^\circ$ を越える波向範囲においては計算値よりエネルギーが広く分布し、目標とする方向集中度より低い方向集中度をもった波が造波されていることがわかった。目標とする方向集中度が低い場合には、計算値でも $\pm 15^\circ$ を越えた範囲である程度のエネルギーが分布するために、 $-30^\circ\sim +30^\circ$ の範囲において、目標とする方向集中度をもった多方向不規則波が造波できる。

次に、設定主波向が 0° より傾いた場合について方向分布特性を検討した。図-10は、目標とする主波向が 0° 以外の場合の多方向不規則波の方向スペクトルの解析結果で、ピーク周波数 f_p における標準化された方向関数の分布形を示した図である。図に示したように、実験波の目標方向集中度 $S_{\max a}$ は25, 200とし、 θ_a は $10^\circ, 15^\circ$ とした。黒丸および三角印で示した $S_{\max a}=200$ の実験値の分布形は、細線で示した $S_{\max a}=10\sim 25$ の計算値とほぼ等しい。白丸で示した $S_{\max a}=25$ の実験値は、 $S_{\max a}=5$ の計算値の分布形とほぼ等しい。なお、計算値は $\theta=10^\circ$ を主波向として描かれている。したがって、実験結果から推測される実験波の方向集中度は、いずれの場合も目標とする方向集中度の1/5以下となっており非常に小さい。これは、前章で示したよう

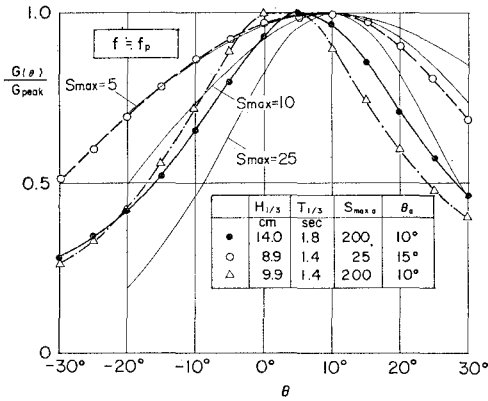


図-10 多方向不規則波の方向分布 ($\theta_a \approx 0^\circ$)

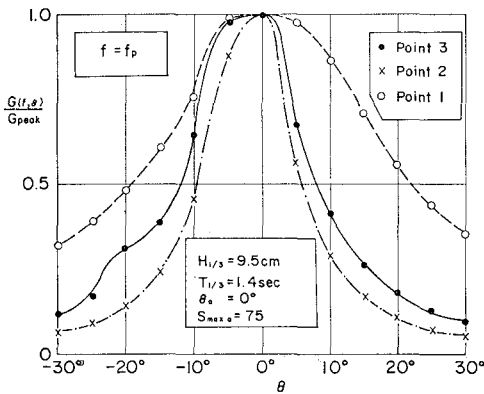


図-11 方向分布特性の場所的変動

に、斜め方向に進む単方向波の方向集中度が、直角方向に進む単方向波に比べて低いことが一因となっていると思われる。

以上のことから、サーペント型造波機で造波される $\theta_a \approx 0^\circ$ の多方向不規則波の方向集中度は、造波時に目標とした方向集中度が同じであっても、 $\theta_a = 0^\circ$ の場合より、造波された実験波のエネルギーは、広く分布することが判明した。

(2) 方向分布特性の場所的変動

図-11 は、図-2 に示した Point 1~3 における測定結果を比較した図で、波高計と水平 2 方向流速計の測定データから求めた f_p における方向関数の分布形を示している。×印で示した Point 2 のエネルギーの分布曲線は、黒丸で示した Point 3 における分布形にはほぼ等しい。白丸で示した Point 1 における方向関数の分布形は、Point 2 および 3 の分布形とは異なり、やや平坦な分布形となっている。これは、Point 1 は水槽側壁に比較的近い測点であるので、側壁からの反射波および造波板の端部の影響が他の測点より強いために生じたと

考えられる。

実験波の波長は約 3 m であるので、Point 2 と Point 3 の距離は 1 波長より若干長い。したがって、サーペント型造波機で多方向不規則波を造波した場合、水槽中央部より 1 波長程度両側に離れた範囲内において、ほぼ同一の方向分布特性を持った波の場を作り出せることが判明した。また、主波向 θ_a が 0° 以外の場合には、全体的に実験波の方向集中度が低くなり、波のエネルギーが各方向へ広く分布するので、Point 1~5 において方向関数の分布形を求めると、各点においてほぼ同様な分布形となった。

5. あとがき

本研究で明らかとなったサーペント型造波機で発生した多方向不規則波の主な特性をまとめると次のようになる。

- (1) サーペント型造波機で発生した斜め単方向不規則波は、そのエネルギーが設定した波向以外にも広く分布し、多方向不規則波に近い性質を持つ。
- (2) 主波向を造波機に対して直角方向にすると、目標とする方向集中度が低い場合には、サーペント型造波機によって、ほぼ目標とする方向集中度を持つ多方向不規則波が造波できる。
- (3) 主波向が直角方向より傾いた場合には、サーペント型造波機で造波された多方向不規則波の方向集中度は主波向が直角方向である場合に比べて小さくなる。
- (4) サーペント型造波機によって発生した多方向不規則波は、水槽中央部の 2 波長程度の範囲内で、ほぼ同様な方向分布特性を示す。

参考文献

- 1) 高山知司・永井紀彦・合田良実：サーペント型造波装置の制御方式と造波特性，港湾技研資料，No. 509，30 p.，1984。
- 2) 高橋重雄・明瀬一行：波力発電ケーソンの空気出力に及ぼす波向きと平面配置の影響，第 33 回海岸工学講演会論文集，pp. 501~505，1986。
- 3) 高山知司，他 4 名：SALM 型ブイ係留タンカーの避泊実験，海洋開発論文集，Vol. 2，pp. 169~174，1986。
- 4) Takayama, T.: Theoretical properties of oblique waves generated by serpent-type wave makers, Rept. of the Port and Harbour Res. Ins., Vol. 21, No. 2, pp. 3~48, 1982。
- 5) 合田良実・鈴木康正：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算，港湾技研資料，No. 230，45 p.，1975。
- 6) 合田良実：波高計群による方向スペクトルを用いた反射波推定法の検討，港湾技術研究所報告，Vol. 19, No. 3, pp. 37~70，1980。
- 7) 磯部雅彦・近藤浩石・堀川清司：方向スペクトルの推定における MLM の拡張，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp. 173~177，1984。