

多方向波造波システムの効率化とその造波特性

平口博丸*・清水隆夫*・池野正明*・田中寛好**

1. はじめに

多方向不規則波の造波装置が我が国でも導入されてきており、その数は今後益々増えるものと予想される（高山・永井・合田（1985））。この種の実験設備は従来の造波設備に比べてシステム規模が格段に大きくなるため、実験効率の面で特に注意する必要がある。

電力中央研究所では、人工島や浮揚式による海上立地方式発電所の建設技術、快適な海域環境の創造・利用技術などに関連した水理模型実験手法の精度向上を目的として、1986年から多方向不規則波の造波装置の開発に取り組んでおり、1989年3月には24台の造波機を導入し、1990年3月には更に24台の造波機を増設した。この造波機の開発に当たっては、システム規模の適正化、実験効率の向上、発生波が目標波になるような修正操作などについて特に注意した。

本研究は、当所が導入した多方向不規則波の造波機システムの特長を紹介すると共に、その造波特性を規則波および多方向波の造波実験により検討したものである。

2. 造波機システムの構成

当所が開発した多方向不規則波の実験装置は、造波機、操作盤、造波機制御盤、計算機システムから構成されており、当所では大型平面水槽（長さ35m、幅45m、深さ1.1m）を含めてこの装置を外洋施設波浪実験設備と呼んでいる。実験装置の全体構成を図-1に示す。

(1) 造波装置

本造波機は、48枚の造波板からなるピストンタイプの不連続型であり、造波機の総延長は19.2mである（1990年4月現在）。各造波板の幅は約40cm、高さは約120cmであり、造波板4枚を1ユニットとして1つの架台に取り付けている。1ユニット当りの重量は1.2tonであり、天井クレーンにより移動可能となっている。造波板は500Wのサーボモータにより駆動され、そのストロークは±40cmで、オーバーストロークを防ぐために光電式

リミットスイッチが設置されている。造波板の位置・速度検出にはポテンショメータとタコジェネレータが各々用いられており、制御用信号として制御盤に送られる。制御用信号としてはこの他に、低反射制御時に用いられる水面波形信号があり、これは造波板の前面に取り付けられた容量式波高計（測定レンジ80cm）により検出される。

本造波機の使用可能最大水深は80cm、造波可能な波の周期は0.5～4.0sec、最大波高は30cmである。また、造波機の制御方式は、位置制御および水面波形による低反射制御の2種類である。

(2) 造波機制御盤

造波機制御盤には、位置制御回路と低反射制御回路、緩起動・緩停止回路、および造波信号演算器などが造波板の数だけ組み込まれている。造波信号演算器の構成は、16ビットCPU（6800）、乗算累積器、プログラム用ROM（64KB）、関数テーブル用ROM（64KB）、データ用RAM（64KB）、造波板番号設定用のディブスイッチ、D/A変換器と4Hzのローパスフィルタからなる。この演算器は、ホストコンピュータから転送された造波信号用パラメータを用いて、40msec間隔に造波信号時系列を作成するためのものであり、[最大1024個の周波数成分波の和を計算→A/D変換→（ローパスフィルタ）→造波]言う一連の処理をリアルタイムに行うことができる。この演算器は本システムにおいて重要な役割を果たしており、以下のような長所がある。①造波信号作成手順の内、周波数に関する和の計算と造波信号時系列の計算をこの演算器が処理しているため、ホスト計算機の負担を軽減することができ、造波信号作成時の計算時間が大幅に短縮される。これにより実験の効率化が図れる。②この演算器に必要なデータは、各成分波の振幅・周波数・位相だけである。したがって、造波時間を長くしてもデータ量は変化せず、造波信号時系列を保存する従来の方法に比べて、ホスト計算機のディスク容量が大幅に軽減される。③造波板を増設してもシステム全体としての負荷は小さく抑えられる。④一度制御盤にデータを転送しておけば、電源を切らない限り、瞬時に何度で

* 正会員 工修（財）電力中央研究所 我孫子研究所 水理部
** 正会員 工博（財）電力中央研究所 水理部構造水理研究室長

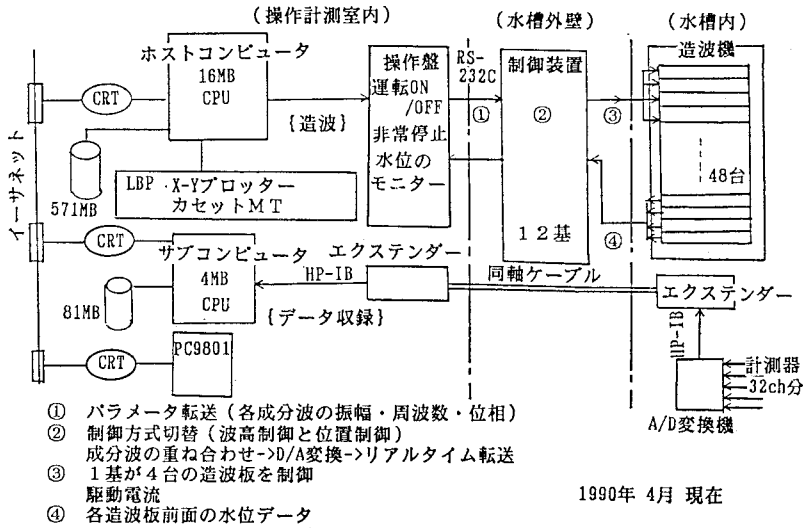


図-1 多方向不規則波の造波システムの全体構成

も造波が可能であり、実験効率がよい。

(3) 操作盤

操作盤では、造波機の制御方式 (位置/低反射) の切り替え、造波のスタート/ストップ、非常停止などを行う。また、操作盤では、造波機の制御信号 (造波板変位と水面波形信号) がモニターできる。

(4) 計算機システム

本計算機システムは、32ビットの計算機システム2台 (YHP 9000 319 C+) および16ビットのパソコン (NEC 製 9801) からなり、イーサネットネットワーク化されている。CPUが16MBの32ビット機 (OS: UNIX) をホスト計算機とし、同じく4MBのものをサブとしている。周辺機器は、2台の磁気ディスク (571MB, 80MB)、カセットMT、プリンター、XYプロッタ、A/D変換器などである。この計算機システムでは、造波信号の作成・修正、造波信号の転送、A/D変換器を用いた波浪データの収集、および波浪データの解析などを行う。

3. 造波信号の作成・修正

(1) シングルサンメーション法

シングルサンメーション法 (SS法) とは、周波数が各々異なる N_f 個の成分波に不規則波を分割し、各々の成分波について1つの波向きおよび1つの波高を定める方法である。SS法において N_f 個の成分波の合成を考えると、不規則波の水面波形 η は次式のように表される。

$$\eta(X, t) = \sum_{i=1}^{N_f} a_i \sin(k_i x \cos \theta_i + k_i y \sin \theta_i + \varepsilon_i - 2\pi f_i t) \quad (1)$$

ここに、 X は平面座標、 t は時間、 a は成分波の振幅、 k は波数、 θ は波向き、 ε はランダムな初期位相、 f は

周波数である。各周波数成分の振幅 a_i は次式で表される。

$$a_i = (2P(f_i) \Delta f_i)^{0.5} \quad (2)$$

ここに、 $P(f_i)$ は目標周波数スペクトルである。

M 台の造波機を y 軸方向に直線状に並べ、波を x 軸の正方向に造波する場合、 m 番目の造波板位置での水面波形 $\eta_m(t)$ は次式で表される。

$$\eta_m(t) = \sum_{i=1}^{N_f} a_i \sin(m\phi_i + \varepsilon_i - 2\pi f_i t) \quad (3)$$

ここに、 m は造波板の番号 ($m=1 \sim M$) であり、本造波システムでは制御盤のディプススイッチで設定できる。また、 ϕ_i は隣接する造波板間の位相差 (運転位相) を表す。

$$\phi_i = (2\pi b \sin \theta_i) / L_i \quad (4)$$

ここに、 b は造波板の幅 ($=40$ cm)、 L は波長である。

式(3)で表される波を造波するにあたっては、造波機の伝達関数などを考慮して、式(2)の替わりに、

$$a_i = (2P(f_i) \Delta f_i)^{0.5} / H(f_i) \quad (5)$$

とすればよい。ここで H は造波機の伝達関数であり、例えば位置制御による造波の場合には、次のようなピストン型造波機の伝達関数を考慮し、

$$Hp(f) = 4 \sinh^2 kh / (2kh + \sinh 2kh) \quad (6)$$

低反射制御の場合には入力電圧と発生波高に関する伝達関数などを考慮すればよい。ここに h は造波板前面の水深である。

本造波機システムでは、式(3)の周波数に関する和は各時間ステップ毎 (40 msec) に制御盤の演算器で計算しているため、ホスト計算機ではその計算に必要な造波信号用パラメータ (振幅 a 、運転位相 ϕ 、初期位相 ε 、周波数 f) のみを計算すればよい。また、運転位相 ϕ を導入

したことにより、各造波機に必要な造波パラメータは全て等しくなる。したがって、SS法による造波の場合、計算・転送が必要な造波パラメータは 1024×4 個で済み、RS-232Cによるデータ転送時間は約25 sec程度である。

(2) ダブルサンメーション法

ダブルサンメーション法(DS法)は、1つの周波数について波向き異なる複数の成分波を考慮する方法である。周波数を N_f 分割、方向を N_θ 分割するものとするれば、多方向不規則波の水面波形 η は次式で表される。

$$\eta(X, t) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_\theta} a_{ij} \sin(k_i x \cos \theta_j + k_i y \sin \theta_j + \varepsilon_{ij} - 2\pi f_i t) \\ = \sum_{i=1}^{N_f} [\zeta_{oi} \cos 2\pi f_i t - \zeta_{si} \sin 2\pi f_i t] \dots (7)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \zeta_{oi} &= \sum_{j=1}^{N_\theta} a_{ij} \sin \alpha_{ij} \quad (i=1 \sim N_f) \\ \zeta_{si} &= \sum_{j=1}^{N_\theta} a_{ij} \cos \alpha_{ij} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (8)$$

$$\alpha_{ij} = k_i x \cos \theta_j + k_i y \sin \theta_j + \varepsilon_{ij} \dots \dots \dots (9)$$

なお、式(7)を造波信号に変換するには

$$a_{ij} = (2S(f_i, \theta_j) \Delta f_i \Delta \theta_j)^{0.5} / H(f_i) \dots \dots \dots (10)$$

とすればよい。

式(7)の周波数に関する和は制御盤で分散処理されるので、ホスト計算機では造波用パラメータとして ζ_{oi} と ζ_{si} のみを計算すればよい。 ζ_{oi} と ζ_{si} は角度方向の和を計算したものであり、水面波形のフーリエ成分に対応している。本システムでは、SS法とのプログラムの整合性を取るために、フーリエ成分を振幅と位相に変換している。ただしこの造波方法の場合、各造波板での振幅と位相は互いに異なるため、造波用パラメータは各造波板毎に計算・転送する必要がある。

なお、各時間毎に成分波を重ね合わせるためのプログラムは制御盤の演算器のROMに保存されている。

(3) 目標不規則波の設定

造波信号の作成法としてはSS法とDS法の2種類があり、各々について位置制御・低反射制御が選択できる。目標とする多方向不規則波の種類としては、周波数スペクトルとしてBretschneider-光易型(B-M型)とJONSWAP型が、方向関数として光易型と $\cos^{2n}\theta$ 型が選択できる。周波数は最大1024個まで設定可能であり、周波数設定法としては、SS法ではエネルギー等分割法が、DS法ではエネルギー等分割法と周波数等分割法が利用できる。波向き設定は、SS法では一様乱数により設定し、DS法では角度等分割(最小分割幅 $\Delta\theta=2^\circ$)とした。

(4) 造波信号の修正

発生させた多方向不規則波が目標とする方向スペクトルに一致していない場合には、造波信号の修正が必要となる。断面水路内の1方向不規則波の場合、このような修正は簡単に行える。しかし、多方向不規則波の造波信号の修正について検討された例はほとんど無い。

SS法の場合、1つの周波数には1つの波向きしか設定しないため、波向きに関する修正のロジックが難しい。それに比べDS法の場合には、修正のロジックは比較的簡単である。発生波の方向スペクトルを目標と比較し、各周波数および各方向毎に修正応答関数 $H_m(f, \theta)$ を決定し、式(10)の関係に基づいて各成分波の振幅を計算し、式(8)により造波用パラメータを再計算すればよい。なお、パワーのみを修正する場合の計算は非常に簡単となり、パワーの伝達関数に応じて式(7)の ζ_{oi} および ζ_{si} を修正すればよく、式(8)の計算は不要である。

4. 水理実験

(1) 斜め規則波

規則波の造波特性実験は、24枚の造波板(造波機長さ9.6m)で実施した。水深は50 cmとし、水槽の周囲4辺は碎石により消波した。実験は位置制御および低反射制御の両方でを行い、波高は10 cmと一定とし、周期は3種類($T=1.0, 1.5, 2.0$ sec)、波向きは3種類($\theta=90, 120, 135^\circ$)とした。図-2に示すように (x, y) 座標系を設定し、造波機の並ぶ方向と平行な $y=5, 7, 9$ mの測線上で波高および流速を測定した。

(2) 多方向不規則波

多方向不規則波の造波実験は、48枚の造波板(造波機長さ19.2 m)で実施した。実験水深は50 cmである。目標波の有義波高・周期・主波向きは、 $H_{1/3}=10$ cm, $T_{1/3}=1.0$ sec, $\theta_0=90^\circ$ とし、目標周波数スペクトルはB-M型とJONSWAP型、目標方向関数としては光易型と $\cos^{2n}\theta$ 型を用いた。

また、JONSWAP型周波数スペクトルと光易型方向関数で表される不規則波が2つ重なった2方向性波浪場について検討した。1つの不規則波は $H_{1/3}=5$ cm, $T_{1/3}=1.0$ sec, $\theta_0=60^\circ$, $S_{\max}=75$ とし、もう1つは $H_{1/3}=5$ cm, $T_{1/3}=2.0$ sec, $\theta_0=120^\circ$, $S_{\max}=10$ と設定した。この実験では、DS法による修正ロジックを検討する意味で、パワーのみを修正した場合とパワーと方向の両方を修正した場合について検討した。なお、この実験の波浪条件では、低周波側に分散性の大きな波を、高周波側に分散性の小さな波を設定しており、実際の海で見られる2方向波とは逆の関係になっている。

方向スペクトルの測定は、波高計4台による星型アレーを用い、造波板から6 m離れた $(x, y)=(0, 6)$ mの

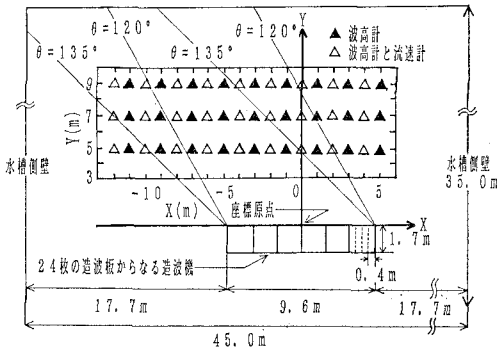


図-2 斜め規則波の測定位置と造波機の関係

位置で実施した。アレーの基本間隔は 50 cm である。方向スペクトルの解析には、磯部ら (1984) の拡張最尤法 (EMLM) および橋本 (1987) のベイズ型モデル (BDM) を用いた。

5. 実験結果

(1) 斜め規則波

図-3(a) は $H=10$ cm, $T=1.0$ sec, $\theta=120^\circ$ の時の波高分布を設定波高 H_0 との比で示したものである。モデル 1 とは Takayama (1982) による斜め波の造波理論解であり、モデル 2 とは非定常緩勾配方程式による数値計算結果である。Takayama (1982) の造波理論解は、造波板により発生した波が両側に隣接する造波板や静止壁 (図-2 の x 軸上) で完全反射され、造波されたすべての波浪エネルギーが前方 (y 軸方向) へ伝播する条件で求められたものである。モデル 2 は、発生波の内、前方に進行する成分のみを考慮したものであり、回折波が隣接造波板などによって x 軸上で再反射される成分を無視した時の結果である。図-3(a) によると、モデル 1 と 2 の違いは比較的小さく、どちらも実験結果に近い断面変化をしていると言える。なお、 $\theta=90^\circ$ の時にはモデル 1 と 2 の結果はほぼ完全に一致し、実験結果との対応もこの図以上によい。これらのことから、 θ が $60^\circ \sim 120^\circ$ の範囲内であれば理論的に予想される波がほぼ造波されているものと判断される。

図-3(b) は図 (a) と同じ条件で波向きを $\theta=135^\circ$ とした時の結果である。モデル 1 の計算結果は 2 に比べて大きく、波向きが斜めになるほど造波板での再反射の影響が大きくなることが分かる。図 (b) の実験結果はモデル 2 の結果に比較的近いが、一般的には実験結果の波高は計算値よりも小さくなる。波向きが大きくなって、隣接する造波板間の位相差が大きくなった場合、造波機の前面で渦の発生が見られた。特に図-3(b) の実験ケースでは発生波の波形勾配が大きいためこの傾向が顕著であった。このような渦の発生が造波板での再反射を妨げると

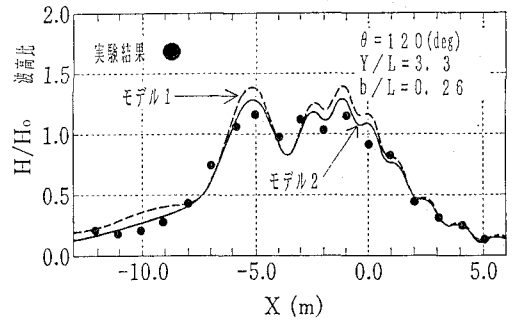
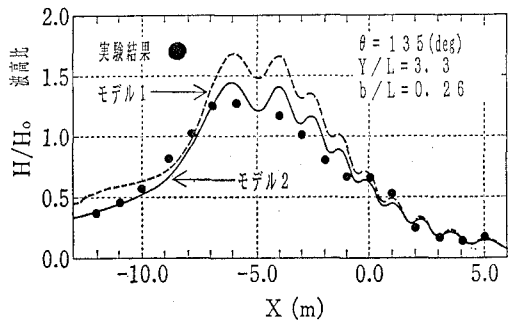
(a) $\theta=120^\circ$ (b) $\theta=135^\circ$

図-3 Y=5 m 位置での波高分布

共に、エネルギーロスを生じさせ、造波効率を低下させているものと考えられる。

(2) 多方向不規則波

目標方向関数を光易型とした場合の方向スペクトル解析結果を図-4 に示す。図-4(a) は B-M スペクトルで $S_{\max}=10$ のピーク周波数 $f_p (=0.95$ Hz) での結果、図 (b) は 2 方向性波浪場の高周波側 ($S_{\max}=75$) のピーク $f_{p2} (=0.95$ Hz) での結果である。図 (a) の場合、EMLM の推定結果は双峰型の方向関数となるが、BDM では単峰型で目標値ともよく一致している。図 (b) では両者の推定結果に大きな差はみられない。また、目標値と推定値を比較すると、主波向きはよく一致しているが、方向集中度は実験値の方が低くなっている。

図-5 は、2 方向性波浪場に対し、修正操作を施したときの結果である。図 (a) はパワーのみを修正した場合、(b) はパワーと波向きを同時に修正した場合の周波数スペクトルである。ここでは目標値と発生波の差の半分を修正するようにした。なお、方向スペクトルの計算には EMLM を用いた。このような修正操作により発生波は目標とする周波数スペクトルに近づくことが分かる。このケースではパワーのみを修正した方が目標値に近づいている。

図-6 は、図-5(b) に示したパワー・波向きの両方を

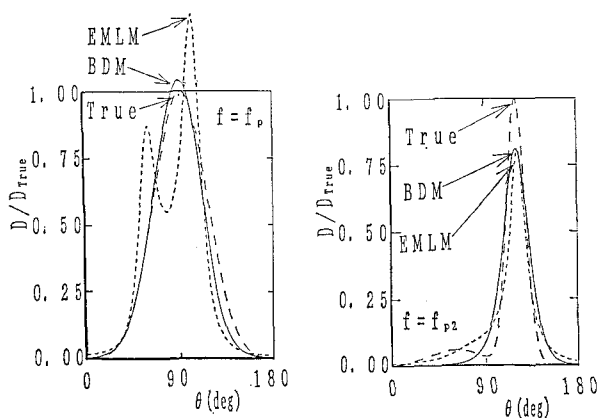
(a) 方向集中度 $s=10$ (b) 方向集中度 $s=75$

図4 方向スペクトルの解析結果

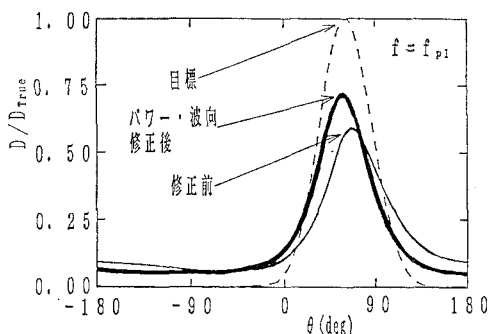


図6 修正前後の方向関数の比較

は目標値に近づく傾向にあり方向スペクトルレベルでの修正の可能性を示唆している。

6. まとめ

当所が開発した多方向不規則波の造波機システムの特長をまとめると以下のようである。

①造波機制御方式として位置制御と低反射制御の2つを採用している。また、造波信号作成法として SS 法および DS 法のどちらにも対応できる。

②造波信号作成に必要な計算の一部を造波信号演算器を用いて分散処理しているため、ホスト計算機の負担が軽減され、実験効率が格段に向上している。また、造波機を増設してもシステム全体への負担は比較的小さい。

③SS法を用いた場合、造波データの作成も含めて2～3分以内に造波が可能である。48枚の造波板を用いたDS法では、造波信号が計算済みならば15分以内、その作成も含めると30分以内に造波が可能である。

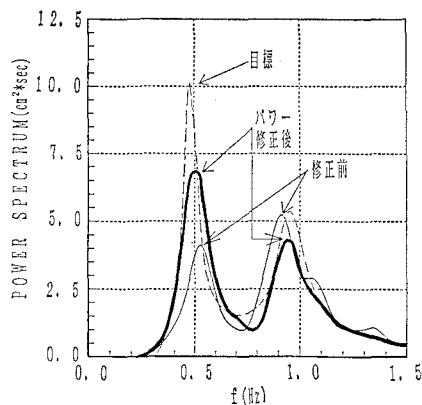
また、本造波機の性能試験結果をまとめると以下のようである。

④斜め規則波および方向分散性の高い波に関しては目標とする造波特性が得られた。ただし、方向集中度の大きな波については目標よりも分散性が大きくなった。

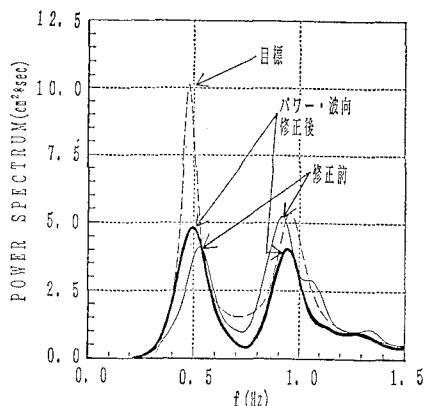
⑤多方向不規則波を目標値と一致させるように修正するアルゴリズムについて検討しその可能性を示唆した。

参考文献

- 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司 (1984): 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.
- 高山知司・永井紀彦・田田良実 (1985): サーペント型造波機の制御方式と発生波の特性, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 16~20.
- 橋本典明 (1987): ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 126~130.
- Takayama, T. (1982): Theoretical Properties of Oblique Waves Generated by Serpent-type Wavemaker, Rept. of the Port and Harbour Res. Inst., Vol. 21, No. 2, pp. 3~48.



(a) パワーの修正



(b) パワーと方向の修正

図5 修正前後の周波数スペクトルの比較

修正したことにより方向関数 D がどのように変化したかを示したものであり、EMLM による推定結果を真値で規格化して示した。このような修正により方向関数の結果