

曲線型多方向不規則造波装置の開発

磯部 雅彦*・渡辺 晃**・小西 勇介***・都築臨太郎****

1. はじめに

海岸・海洋構造物の水理特性の解明等において水理模型実験の果たす役割は大きい。近年、防波堤や人工島のような海洋構造物が、沖合の大水深域に設置されるようになり、その設計においては波の多方向性を考慮することが必要になってきている。このため、多方向不規則造波理論の研究と、多方向不規則造波装置の開発が精力的に進められている。(たとえば、河口, 1986; 池谷ら, 1992; 伊藤ら, 1994, 1995; 平石ら, 1995)

従来の多方向不規則造波装置の造波板列形式には、図-1の(a)に示すような一枚ごとに不連続になる離散型造波板や、図-1の(b)に示すようにヒンジで接合されて折れ線状になる連続型造波板があるが、これらの構造が造波時に攪乱波を発生させる原因となっている。

また、造波板列を用いた造波においては、反射波の影響をどのように軽減するかが課題となっている。各種の海岸・海洋構造物に関する模型実験の場合、造波された入射波は構造物模型により反射される。この反射波は造波板に達し、そこで再反射され、その結果入射波が乱されることになる。そのため、実際の海域で生じている現象を実験室内で再現するためには、入射波を造波すると同時に、造波板における再反射を防ぐ必要がある。

そこで本研究においては、図-1の(c)に示すように造波板全体を一枚のステンレス鋼板として、一定間隔ごとの支点を運動させる曲線型造波板を備えた多方向不規則造波装置を、その造波吸収制御理論とともに開発する。

2. 造波吸収制御理論

(1) 造波理論

解析における座標系を図-2に示す。静水面上に x 軸, y 軸をとり、鉛直上向きに z 軸をとる。

造波板は y 軸に沿って配置されているものとする。

造波の定式化に先立ち、以下の仮定をする。

- 完全流体、渦無しで速度ポテンシャルが存在する。
- 水面変動の振幅が十分に小さく、微小振幅波理論が適用できる。
- 造波板の振幅も十分に小さく、境界条件を線形化できる。
- 造波板の運動モードはピストン型である。
- 造波板列の長さは無限大、造波板の支点間隔は無限小とする。
- 水槽は一樣水深であり、側壁がない。

以上の仮定に基づくと、造波の現象は以下のように定式化できる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} + \eta = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

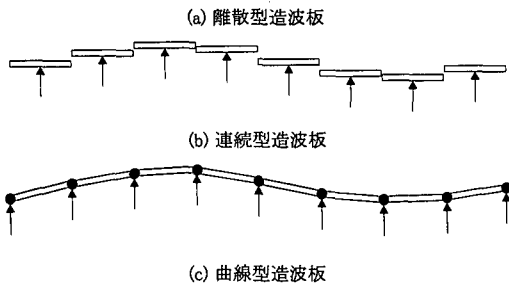


図-1 造波板の駆動方式

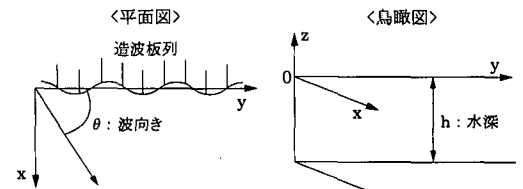


図-2 座標系の定義

* フェロー 工博 東京大学教授 新領域創成科学研究科環境学専攻
 ** 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻
 *** 学生会員 東京大学工学系研究科社会基盤工学専攻
 **** 学生会員 東京大学工学系研究科社会基盤工学専攻

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=0} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $\Phi(x, y, z, t)$ は速度ポテンシャル、 $\eta(x, y, t)$ は水位変動、 $X(y, t)$ は造波板変位である。また、 g は重力加速度、 h は水深である。

式 (1) から式 (5) で示される偏微分方程式の境界値問題を規則波について変数分離法により解くと、造波板変位 X 、進行波 (規則波) の水位変動 $\eta_{i,p}$ 、および水位変動 η_i の関係は以下のように導かれる。

$$X(y, t) = i \frac{A_0 \sin \theta}{\tanh k_0 h} \eta_{i,p}(0, y, t) \dots\dots\dots (6)$$

$$\eta_i(x, y, t) = \eta_{i,p}(x, y, t) - i A_0 k_0 \sin \theta \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\sqrt{k_n^2 + k_0^2} \cos^2 \theta x}}{A_n \sqrt{k_n^2 + k_0^2} \cos^2 \theta} \eta_{i,p}(0, y, t) \dots\dots\dots (7)$$

ただし各変数は以下のように与えられる。

$$A_0 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k_0 h}{\sinh 2k_0 h} \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$A_n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k_n h}{\sinh 2k_n h} \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$\omega^2 = g k_0 \tanh k_0 h = -g k_n \tan k_n h \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 ω は造波板の角周波数、 k_0, θ はそれぞれ進行波の波数、波向きである。

式 (7) の右辺第 2 項を減衰定常波成分と呼ぶ。造波で必要なのは進行波成分であるが、造波板の鉛直方向運動モードと進行波成分の水平流速の鉛直分布の相違により、同時に減衰定常波成分が発生する。減衰定常波は、 y 軸の向きには、造波板列と同じ波数、振動数の波である。 x 軸の向きには波数を持たず空間的に波打たない。減衰定常波成分の振幅は、造波板前面で最大であり造波板から離れるにしたがって減衰する。

線形理論においては多方向不規則波は規則波の重ね合わせで表すことができるので、式 (6) に従った造波板変位を与えることにより、多方向不規則入射波の造波が可能になる。

(2) 規則波における吸収理論

造波された波が構造物模型などにあたると反射波が生じるため、造波をしつつ反射波を吸収する必要がある。これを實現する方法として本研究では、造波板前面の水面変動を測定して反射波を検出し、反射波が再反射しないように造波板の運動を制御する方法を用いた。ここでは、反射波が規則波である場合について理論を展開する。今、図-3 に示されるような状況を考える。すなわち、構造物模型から造波板方向に斜めに向かう反射波 $\eta_{r,p}$ が造波板により再び反射され、再反射波 η_{rr} が水槽内部に

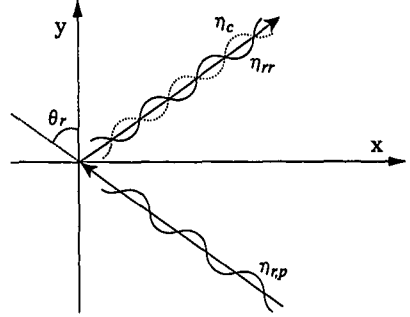


図-3 吸収造波の原理

戻っている。この時、もし造波板が η_{rr} と波向きが等しく逆位相であるような補償波 η_c を造波すれば、反射波は造波装置により吸収されることになる。

反射波を $\eta_{r,p}$ とし、以下のようにおく。

$$\eta_{r,p}(x, y, t) = a e^{i(k_0 x \sin \theta_r + k_0 y \cos \theta_r - \omega t)} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 a は複素振幅、 $\theta_r (< 0)$ は反射波の波向き、 ω は η_r の角周波数である。 $\eta_{r,p}$ が静止している造波板で完全反射して生じる再反射波を η_{rr} とする。 η_{rr} は、 $\eta_{r,p}$ と比較すると、波向きの符号が逆で造波板における位相は同じである。

$$\eta_{rr}(x, y, t) = a e^{i(k_0 x \sin(-\theta_r) + k_0 y \cos(-\theta_r) - \omega t)} \dots\dots\dots (12)$$

η_{rr} をうち消す、 η_{rr} と逆位相の水面変動を η_c とする。

$$\eta_c(x, y, t) = -a e^{i(k_0 x \sin(-\theta_r) + k_0 y \cos(-\theta_r) - \omega t)} \dots\dots\dots (13)$$

η_c の波向きは、 $-\theta_r (> 0)$ である。式 (11)、式 (13) より、反射波 $\eta_{r,p}$ と補償波 η_c の関係は以下のように表される。

$$\eta_c(0, y, t) = -\eta_{r,p}(0, y, t) \dots\dots\dots (14)$$

$\eta_{r,p}$ を吸収することは、 η_c を造波すること等価である。

式 (6)、式 (14) より、 η_c を造波する ($\eta_{r,p}$ を吸収する) 造波板変位 X_r は以下のように与えられる。

$$X_r(y, t) = i \frac{A_0 \sin \theta_r}{\tanh k_0 h} \eta_{r,p}(t, y, t) \dots\dots\dots (15)$$

また、 X_r によって生じる水位変動の減衰定常波成分 $\eta_{r,e}$ は以下のように得られる。

$$\eta_{r,e}(x, y, t) = -i A_0 k_0 \sin \theta_r \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\sqrt{k_n^2 + k_0^2} \cos^2 \theta_r x}}{A_n \sqrt{k_n^2 + k_0^2} \cos^2 \theta_r} \eta_{r,p}(0, y, t) \dots\dots\dots (16)$$

反射波吸収造波の場合、造波板前面水位 η_{total} は、造波目標とする波の水位 $\eta_{i,p}$ 、造波に伴う減衰定常波成分の水位 $\eta_{i,e}$ 、反射波の進行波成分の水位 $\eta_{r,p}$ および吸収に伴う減衰定常波成分の水位 $\eta_{r,e}$ の和である。 $\eta_i (= \eta_{i,p} + \eta_{i,e})$ は式 (7) によって算出できるので、 $\eta^* (= \eta_{r,p} + \eta_{r,e})$ は以下のように検出できる。

$$\eta^* = \eta_{total} - \eta_i \dots\dots\dots (17)$$

反射波が規則波である場合、反射波の波向きが θ_r であ

るから、式 (16) より以下が得られる。

$$\begin{aligned} \eta^*(0, y, t) &= \eta_{r,p}(0, y, t) + \eta_{r,e}(0, y, t) \\ &= \left(1 - i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_0 k_0 \sin \theta_r}{A_n \sqrt{k_n^2 + k_0^2} \cos^2 \theta_r}\right) \\ &\quad \cdot \eta_{r,p}(0, y, t) \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

式 (15) および式 (18) より、規則波の場合、吸収のための造波板変位 X_r と η^* は伝達関数 $\gamma(\omega, \theta)$ を用いて以下のように関係づけられる。

$$X_r(y, t) = \gamma(\omega, \theta_r) \eta^*(0, y, t) \dots\dots\dots (19)$$

伝達関数 $\gamma(\omega, \theta)$ の具体的な形は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \gamma(\omega, \theta) &= i \frac{A_0 \sin \theta}{\tanh k_0 h} \\ &\quad \cdot \left(1 - i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_0 k_0 \sin \theta}{A_n \sqrt{k_n^2 + k_0^2} \cos^2 \theta}\right)^{-1} \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

以上より、反射波が規則波である場合において、造波板前面で計測される水位 η_{total} から反射波吸収のための造波板変位 X_r を求めることが可能になった。

(3) 多方向不規則波における吸収理論

以下では、反射波が多方向不規則波である場合における吸収理論を展開する。

式 (20) で示される伝達関数 γ は、周波数と波向きの両者に依存している。この性質は、実時間の波の吸収制御を行う際に複雑なフィルターを設計し使用しなければならず、実時間制御の実現を困難なものにしている。そこで、実用性を高めるためには近似が必要となる。

反射波が狭帯スペクトルを有するものと仮定すれば、 η^* は造波板前面で以下のように表される。

$$\eta^*(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \eta_m(x, y, t) \dots\dots\dots (21)$$

$$\eta_m(x, y, t) = a_m e^{i\varphi_m(x, y, t)} \dots\dots\dots (22)$$

$$\begin{aligned} \varphi_m(x, y, t) &= (\bar{k} + \Delta k_m) \{x \sin(\bar{\theta} + \Delta\theta_m) \\ &\quad + y \cos(\bar{\theta} + \Delta\theta_m)\} \\ &\quad - (\bar{\omega} + \Delta\omega_m)t + \epsilon_m \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

ただし、添え字の m は成分を表す番号、 $\bar{}$ は代表値を表し、 ϵ_m は位相定数、 φ_m は成分波の位相である。

伝達関数 $\gamma(\omega, \theta)$ は反射波の代表周波数 $\bar{\omega}$ と反射波の代表波向き $\bar{\theta}$ の周りでテーラー展開することができる。この一次の微小量まで考慮することによって反射波吸収のための造波板変位 X_r は、式 (19) および式 (21) より以下のようになる。

$$\begin{aligned} X_r(y, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \{\gamma(\bar{\omega} + \Delta\omega_m, \bar{\theta} + \Delta\theta_m) \eta_m(0, y, t)\} \\ &= \bar{\gamma} \sum_{m=1}^{\infty} \eta_m(0, y, t) + \bar{\gamma}_\omega \sum_{m=1}^{\infty} \Delta\omega_m \eta_m(0, y, t) \\ &\quad + \bar{\gamma}_\theta \sum_{m=1}^{\infty} \Delta\theta_m \eta_m(0, y, t) \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

ただし、 $\bar{\gamma}$ 、 $\bar{\gamma}_\omega$ および $\bar{\gamma}_\theta$ は以下のようにおいた。

$$\bar{\gamma} = \gamma(\bar{\omega}, \bar{\theta}) \dots\dots\dots (25)$$

$$\bar{\gamma}_\omega = \frac{\partial \gamma}{\partial \omega}(\bar{\omega}, \bar{\theta}) \dots\dots\dots (26)$$

$$\bar{\gamma}_\theta = \frac{\partial \gamma}{\partial \theta}(\bar{\omega}, \bar{\theta}) \dots\dots\dots (27)$$

ここで、式 (24) の右辺第 2, 3 項の級数は、 η^* 、 $\partial \eta^* / \partial t$ 、 $\partial \eta^* / \partial y$ を連立させ一次の微小量まで考慮することによって以下のように表すことができる。

$$\sum_{m=1}^{\infty} \Delta\omega_m \eta_m = -\bar{\omega} \eta^* + i \frac{\partial \eta^*}{\partial t} \dots\dots\dots (28)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{\infty} \Delta\theta_m \eta_m &= \cot \bar{\theta} \left(1 - \frac{1}{\bar{n}}\right) \eta^* \\ &\quad + i \frac{\cot \bar{\theta}}{\bar{\omega}} \frac{1}{\bar{n}} \frac{\partial \eta^*}{\partial t} + i \frac{1}{k \sin \bar{\theta}} \frac{\partial \eta^*}{\partial y} \\ &\quad \dots\dots\dots (29) \end{aligned}$$

ただし、 \bar{n} は群速度と位相速度の比である。

式 (24)、(28) および (29) より、反射波吸収のための造波板変位 X_r と η^* の関係は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} X_r &= \bar{\gamma} \eta^* + \bar{\gamma}_\omega \left(-\bar{\omega} \eta^* + i \frac{\partial \eta^*}{\partial t}\right) \\ &\quad + \bar{\gamma}_\theta \left\{ \cot \bar{\theta} \left(1 - \frac{1}{\bar{n}}\right) \eta^* + i \frac{\cot \bar{\theta}}{\bar{\omega}} \frac{1}{\bar{n}} \frac{\partial \eta^*}{\partial t} \right. \\ &\quad \left. + i \frac{1}{k \sin \bar{\theta}} \frac{\partial \eta^*}{\partial y} \right\} \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

式 (30) の右辺第 2 項は周波数分散性に対する補正項で、第 3 項が方向分散性に対する補正項である。

以上より、反射波が多方向不規則波である場合にも、造波板前面で計測される水位から吸収のための造波板変位を算出することが可能になった。

(4) 造波吸収制御の流れ

造波吸収制御の大まかな流れを図-4 に示す。

1. 造波目標とする水位変動 $\eta_{i,p}$ を決定し、 $\eta_{i,p}$ を造波するための造波板変位 X_i と、 X_i によって生じる水位変動 η_i を算出する。
2. 1 で算出された造波のための造波板変位 X_i と、後の 4 で算出される吸収のための造波板変位 X_r の和で造波機を制御する。
3. 造波板前面の波高計で計測された水位 η_{total} と、1 で算出された η_i から、 η^* を算出する。
4. 反射波を吸収するための造波板変位 X_r を η^* から計算して 2 に戻る。

3. 本研究で開発した造波装置について

造波水槽の寸法を図-5 に、造波機の写真を図-6 に示す。

図-5 に示されているように、造波板列の端部は主造

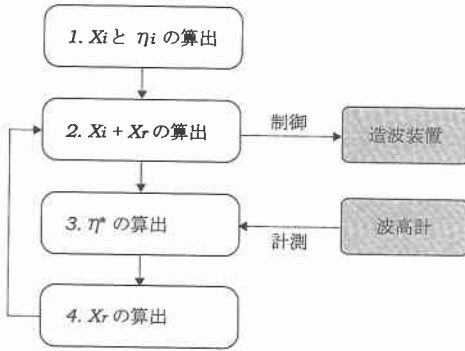


図-4 造波吸収制御の流れ

波板列に対して45度傾けて設置してあるが、これにより、造波板列の長さが有限であることによる有効造波領域の限界を広げることができる。

また、図-6 から分かるように、造波板は連続したステンレス鋼板であるが、各支点はローラー構造になっていて、隣接する支点との位置関係による距離の変化が調整されるようになっている。造波板列全体の両端には、コイル状の造波板巻き取り装置を設けられており、全長の変化に対応できる構造となっている。また、ステンレス鋼板の剛性により造波板列は滑らかな曲線となるが、この曲線型造波板列は、斜め波を造波する上で従来型よりも攪乱の発生を抑えることができると考えられる。

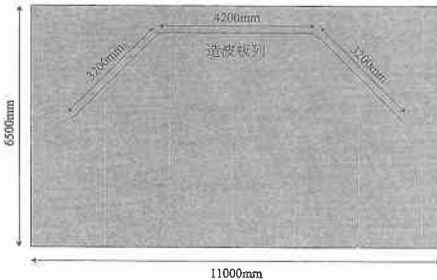


図-5 造波水槽

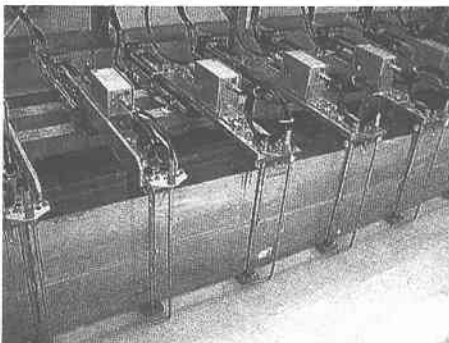


図-6 造波機

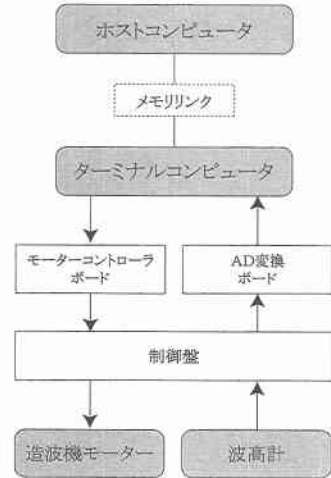


図-7 システム概念図

それぞれの造波機前面には容量式波高計が取り付けられており、これにより反射波を検出する。造波装置システムの概念を図-7 に示す。

ホストコンピュータで行う処理は主に以下の3点である。

- 造波に関するデータ（造波板変位と造波板前面における水位変動の時系列データ）を作成する。
- 造波機にスタートコマンド、ストップコマンドを送出する。
- 造波機作動終了後、ターミナルコンピュータから必要なデータを読み出す。

また、ターミナルコンピュータで行う処理は主に以下の4点である。

- ホストコンピュータから作成された造波に関するデータを読み出す。
- ホストからスタートコマンド、ストップコマンドを読み制御する。
- 制御中、0.01 s/回のペースで、54 個の各波高計の現在値を読み次のタイムステップの造波機変位を算出して造波機位置データを造波機に送出する。
- 造波機作動終了後、データをホストのコマンドによってホストに送る。

4. 検証実験

まず、実際に造波された波が目標とする波となっているかどうかを検証するために、規則波について条件を変えて造波を行った。用意した造波データは、水深 240 mm、波高 40 mm で、周波数について 0.5 Hz から 1.97 Hz までの 6 ケース、波向きについて 30° から 90° までの 4 ケースの計 24 ケースである。実験の結果から求めた造波

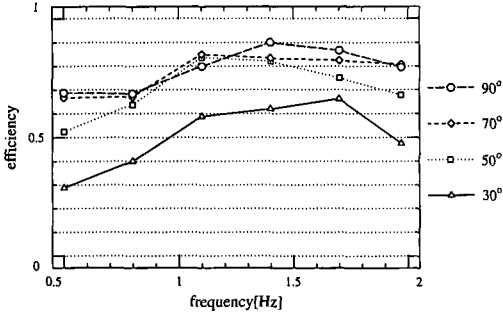


図-8 造波効率の変化

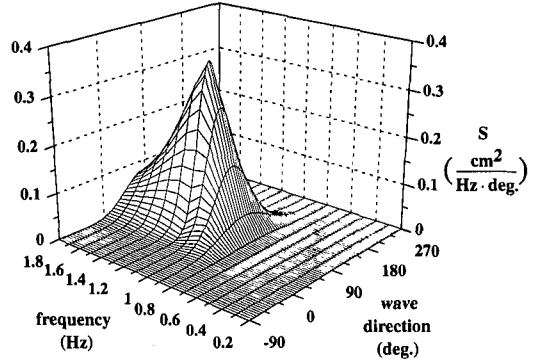


図-10 方向スペクトル (理論値)

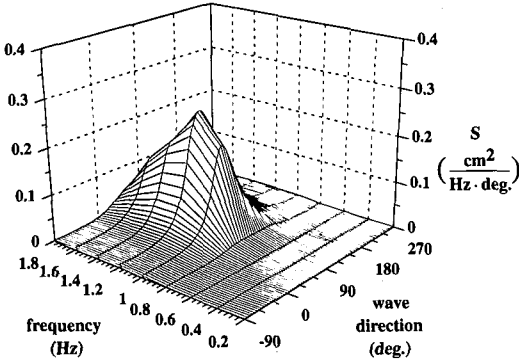


図-9 方向スペクトル (実験値)

効率 (造波された波の波高と目標とする波の波高の比) の周波数, および波向きによる変化を図-8 に示す。

造波効率が低い原因として造波板と水槽底面との空隙が挙げられるが, これについては現在改良中である。以降の実験では, 図-8 に示された実験結果に基づいて造波板の制御について補正係数を導入した。

次に, 有義波高が 4 cm, 主波向きが造波板に直角方向, ピーク周波数が 1.2 Hz, S_{max} が 10 の Bretschneider-光易型の周波数スペクトル (合田, 1977) を持つ多方向不規則波の造波データを, シングルサメーション法を用いて作成した。また, 造波板前面の水深は 25 cm である。造波された波について, 電磁流速計と容量式波高計 1 本ずつを用いた 3 成分アレイによって水位・流速の計測を行い, EMLM 法を用いて方向スペクトルを求め, 理論値の方向スペクトルと比較した。方向スペクトルの実験値と理論値を, それぞれ図-9 と図-10 に示す。

まず, 図-9 と図-10 より, 周波数および方向に関するピークはよく一致していることが分かる。

一方, 実験値における総エネルギーは理論値におけるそれに比べて小さくなっており, また, 方向スペクトルの山は実験値の方がなだらかにつぶれてしまっていることが分かる。

これらは, 造波装置の特性および計測システムの性能によるものと思われる。造波装置の特性としては, 造波効率に対する補正係数決定において, その精度が十分でないことが挙げられる。また, 計測システムの性能については, 方向スペクトルの計測と算出において改良の余地があると考えられる。

5. 結 論

線形理論の適用範囲内で, 多方向不規則波の造波吸収理論を構築した。理論の構築において周波数伝達関数を利用することにより, 造波と吸収を同一の形式で扱うことと, 造波板列が複数ある多面式の造波装置における造波吸収演算が可能になった。

また, 構築した造波吸収理論を用いて, 斜め規則波および多方向不規則波の造波と, 反射波の吸収が可能な造波装置を開発した。

今後, より精度の高い造波を可能にするためには, 造波装置の改良と, 詳細な実験を元にした補正が必要であると考えられる。

本研究は文部省科学研究費の補助を得て行われたことをここに記し, 謝意を表す。

参 考 文 献

池谷 毅・秋山義信・今井賢爾 (1992): 多方向不規則波の吸収造波理論, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 81-85.
 伊藤一教・磯部雅彦・勝井秀博 (1994): 多方向不規則波の反射波吸収造波理論, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 81-85.
 伊藤一教・勝井秀博・望月正志・磯部雅彦 (1995): コ字配置した無反射多方向造波機を用いた反射波吸収実験, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 136-140.
 河口 隆 (1986): 波面検出及び速度制御を用いた無反射方式, 三井造船技法, 第 128 巻, pp. 20-24.
 合田良賢 (1977): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 9-82.
 平石哲也・金澤 剛 (1995): 多面式造波装置の適用性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 131-135.