

# 波浪フィルタ型構造物による波浪制御

清川 哲志\*・望月 仁\*\*

## 1. はじめに

従来の波浪制御構造物は、ほとんどすべてが波エネルギーを乱れに変えて消波するタイプであった。いわゆる消波堤である。これに対し、波の位相を制御することにより、透過性防波堤でありながら極めて効率的に波を遮断する方式が、清川ら(1987, 1988), 中村ら(1988, 1989, 1990)によって提案され、その有効性が確かめられている。しかし、透過特性は波の周波数に強く依存するため、最適な形状を決定するためには、ある程度の試行錯誤が必要となる。

一方、望月ら(1987, 1990)は、電気回路によるフィルタとのアナロジーにより、独自の波浪制御構造物として波浪フィルタを提案している。フィルタの一般概念から容易に想像できるように、波浪フィルタは、特定の周波数帯の波のみを遮断したり、透過させたりすることができ、波浪制御構造物として極めて有望である。透過特性が周波数依存性を持つところは、位相制御方式と同様であるが、大きな違いは、予め設定した周波数特性を持つように構造物を設計できる点である。これは、設計する立場からすれば、非常に便利である。望月らは、こうして設計された波浪フィルタが、設計どおりの性能を有することを模型実験によって既に確かめている。しかし、等価電気回路を用いる制約から、波は深海波か極浅海波、波浪フィルタは矩形断面水路中に設置されていると仮定しており、実際とはかなり異なる。したがって、波浪フィルタが波浪制御構造物として本当に機能するかどうかは、まだ確かめられたとは言えないのが現状である。

そこで、本研究では、オープン海域に波浪フィルタ型構造物をいくつか並べて設置した場合を想定し、波に関しても上記の制約を取り除いて、より実際的な条件の下で波浪フィルタの適用性を検討した。波の運動に関しては線形ポテンシャル理論を用い、散乱波の解析には、まず、グリーン関数とグリーン定理を用いて、散乱波ポテンシャルに関する積分方程式を導き、それを離散化して数値解を求めた。さらに得られた数値解とグリーンの

定理を用いて構造物周辺のポテンシャル分布を求め、これから波高分布等を求めた。数値計算は、離岸堤のような波浪制御構造物として用いた場合について行なった。本論文では、これらの概要について述べ、波浪フィルタが極めて有望な波浪制御構造物となる可能性が高いことを示す。

## 2. 波浪フィルタの設計

望月らによる波浪フィルタの概念(平面図)を示すと図-1のようになる。これは、図-2に示す等価電気回路に置き換えることができ、図-1中の構造寸法が、図-2中の  $R_0, L_a, L_b, C_0$  等に対応する。この事実により、フィルタの周波数特性と構造物の寸法が対応付けられる。フィルタ設計で重要な概念は、遮断周波数  $f_c$  と減衰極周波数  $f_\infty$  である。ここで、 $f_c$  はこの周波数以下の波は通過させ、これ以上の波は減衰させるという周波数、 $f_\infty$  は最も減衰させたい波の周波数である ( $f_c < f_\infty$ )。波浪フィルタ設計においては、現地の波浪条件を考慮し、上記の  $f_c, f_\infty$  を決めると、図-1中の構造諸元が式(1)によって求められ、波浪フィルタを設計することができる。すなわち、まず  $f_c$  と  $f_\infty$  を式(1)の第4式に代入して  $m$  を求める。そして、与条件として設置水深  $h$  が与えられるから、第2式により  $b_2$  が求められる。さらに、水路幅  $b_0$  が与えられれば、第1式により  $b_3$  が、また、第3式により  $h/b_1$  が求められる。 $h$  および  $b_1$  は、第3式で求められた比を満足さえしていれば、 $h > b_2/2$  の条件の下で任意に選べる。

$$\begin{cases} b_3 = \frac{mb_0}{\sqrt{2(1-m^2)}}, & b_2 = \frac{1}{\pi f_c} \sqrt{\frac{gh(1-m^2)}{2}}, \\ \frac{h}{b_1} = \frac{m\sqrt{gh}}{2\pi f_c b_0}, & m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_\infty}\right)^2} \end{cases} \dots\dots (1)$$

ただし、 $2b_2 = b_3$  としている。

以上が望月による波浪フィルタの設計手段であるが、実際には外部水路は不要で、切断することが可能としている。これは、フィルタの外につける水路は、フィルタの通過周波数帯域で反射を小さくするためのもので、対応する電気フィルタの場合には、インピーダンスマッチングの条件から必要となるが、彼を遮断することを目的とした構造物の場合には重要ではないためである。し

\* 正会員 工博 清水建設(株)大崎研究室主任研究員

\*\* 工博 明星大学情報学部教授

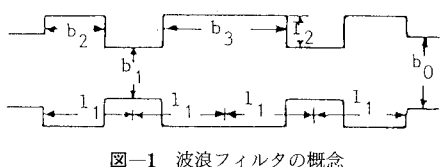


図-1 波浪フィルタの概念

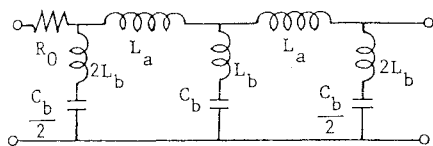


図-2 波浪フィルタの等価電気回路の一例

たがって、実際の設計にあたっては、式(1)の第1式と第3式から水路幅  $b_0$  を消去した式(2)を用い、まず、 $b_1$  を海水交換、小型船舶の通行等から決めた希望の開口幅として与え、 $l_1 > b_2/2$  の条件の下に  $l_1, b_3$  を決める方が合理的である。

$$\frac{l_1}{b_1} = \frac{m^2 \sqrt{gh}}{2\pi f_c \sqrt{2(1-m^2)}} b_3 \dots \dots \dots (2)$$

また、ここでは、図-1 に示したように、図中の  $l_1$  を単位とするユニットを4個直列に接続した場合の例を示したが、ユニット数は何個でもよい。一般にユニット数を増やした方が周波数特性がよくなるが、構造物長は短い方が経済的なので、制御効果と経済性の兼合によってユニット数を決める必要がある。

### 3. 波浪変形の解析理論

#### (1) 流体に関する基礎方程式と境界条件

図-3 に示すように、一定水深  $h$  の海域に任意断面のフィルタ構造物があって、これに波高  $H_i$ 、角振動数  $\omega$  の微小振幅波が入射しているものとする。

図中に示したように、座標系  $(x, y, z)$  を定義し、入射波は、 $x$  軸の負の方向から正の方向に、 $x$  軸と  $\theta$  の角をなして進行しているものとする。また、流体は、非圧縮性の非粘性流体とし、流体運動は非回転運動であると仮定する。そして、流体運動の場を速度ポテンシャルによって記述する。

場全体の速度ポテンシャルを  $\Phi(x, y, z, t)$  とし、線形性を仮定して、次式のように、入射波ポテンシャル  $\phi_i$ 、散乱波ポテンシャル  $\phi_s$  の和と考える。

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{gH_i}{2\omega} \{ \phi_i(x, y, z) + \phi_s(x, y, z) \} e^{-i\omega t} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $g$  は重力加速度、 $i$  は虚数単位 ( $=\sqrt{-1}$ ) で、以下、添字以外の  $i$  は虚数単位を表すものとする。

入射波ポテンシャル  $\phi_i$  は既知で、一定水深  $h$  中を  $x$  軸

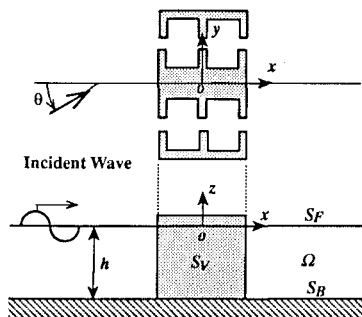


図-3 記号および座標系の定義

の負の方向から  $x$  軸と  $\theta$  の角をなして進行する場合、次式で表される。

$$\phi_i(x, y, z) = \frac{\cosh k_0(h+z)}{\cosh k_0 h} e^{ik_0(x \cos \theta + y \sin \theta)} \dots \dots (4)$$

ここに、 $k_0$  は波数 ( $=2\pi/L$ 、 $L$ : 波長) である。波数  $k_0$  は  $k_0 \tanh k_0 h = \omega^2/g$  の実正根として求められる。

散乱波ポテンシャル  $\phi_s$  は、次の境界値問題の解として求められる。

$$\nabla^2 \phi_s = 0 \quad (\text{in } \Omega) \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial z} - (\omega^2/g) \phi_s = 0 \quad (\text{on } S_F) \dots \dots \dots (6)$$

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial z} = 0 \quad (\text{on } S_B) \dots \dots \dots (7)$$

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_i}{\partial n} \quad (\text{on } S_V) \dots \dots \dots (8)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} (\frac{\partial \phi_s}{\partial r} - ik_0 \phi_s) = 0 \dots \dots \dots (9)$$

これらは、それぞれ、流体内部  $\Omega$  での流体の連続性 ( $\nabla^2$  は、3次元ラプラス演算子)、自由表面  $S_F$  における運動学的・力学的条件、海底面  $S_B$  および構造物没水表面  $S_V$  における不透過条件を表している。ただし、 $n$  による微分は構造物表面における法線方向微分である。また、 $S_V$  は構造物が複数個ある場合、それらすべての没水表面を表すものとする。最後の式(9)は、無限遠における放射条件で、無限遠において、散乱波は、放射状に広がっていく進行波成分のみになるという物理的条件を表している。ただし、 $r$  は  $z$  軸からの距離である。

さらに、フィルタ構造物の様な一様断面構造物の場合、構造物表面のいたるところで  $n_z = 0$  であるので、 $\frac{\partial}{\partial n} = n_x \cdot \frac{\partial}{\partial x} + n_y \cdot \frac{\partial}{\partial y}$  であり ( $n_x, n_y, n_z$  は表面上に立てた単位法線ベクトルのそれぞれ  $x, y, z$  成分)、構造物表面の境界条件(8)に入射波ポテンシャル  $\phi_i$  および散乱波ポテンシャル  $\phi_s$  を代入したとき、 $z$  に関する関数部分に変化しない。したがって、散乱波ポテンシャル  $\phi_s$  も、 $z$  に関しては式(4)で表される入射波ポテンシャルと同様の関数形でなければならない。これより、一般的に、次のように表すことができる。

$$\varphi_s(x, y, z) = \varphi_s(x, y) \frac{\cosh k_0(h+z)}{\cosh k_0 h} \dots\dots\dots(10)$$

式(10)は、境界条件(6)および(7)を満足している。したがって、平面分布関数  $\varphi_s$  は、次の境界値問題の解として求められる。

$$\nabla^2 \varphi_s + k_0^2 \varphi_s = 0 \quad (\text{in } \Omega_2) \dots\dots\dots(11)$$

$$\frac{\partial \varphi_s}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_i}{\partial n} \quad (\text{on } S_V) \dots\dots\dots(12)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} (\frac{\partial \varphi_s}{\partial r} - ik_0 \varphi_s) = 0 \dots\dots\dots(13)$$

ここに、 $\Omega_2$  は2次元平面を示し、 $\nabla^2$  は  $x-y$  平面内の2次元ラプラス演算子である。また、境界条件(12)はフィルタ水平断面の境界上で満足すればよく、右辺の  $\varphi_i$  は、次式で与えられる入射波ポテンシャルの平面分布関数である。

$$\varphi_i(x, y) = \exp\{ik_0(x \cos \theta + y \sin \theta)\} \dots\dots\dots(14)$$

$\varphi_s$  に関する境界値問題 (11)~(13) は、グリーン関数とグリーンの定理を用いて積分方程式に変換した後、通常のグリーン関数法を用いて解くことができる。

(2) グリーン関数

柱体構造物による波の散乱問題のためのグリーン関数  $G$  は、次の境界値問題の解として定義される。

$$\nabla^2 G + k_0^2 G = -\delta(x-\xi)\delta(y-\eta) \quad (\text{in } \Omega_2) \dots\dots(15)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} (\frac{\partial G}{\partial r} - ik_0 G) = 0 \dots\dots\dots(16)$$

ここに、 $\delta$  はディラックのデルタ関数、点  $(\xi, \eta)$  は領域  $\Omega_2$  内の点である。

これを満足するグリーン関数は、よく知られており、次式で表される。

$$G(x, y; \xi, \eta) = (i/4) H_0^{(1)}(k_0 R) \dots\dots\dots(17)$$

ここに、 $H_0^{(1)}$  は第1種0次のハンケル関数、 $R$  は領域  $\Omega_2$  内の点  $(x, y)$  と点  $(\xi, \eta)$  の距離 ( $R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$ ) である。

(3) 積分方程式と離散化

グリーンの定理をフィルタ構造物を内部に含む円領域  $\Omega_2$  に適用し、円の半径  $r$  を  $r \rightarrow \infty$  とすると次式を得る。

$$\iint_{\Omega_2} (\varphi_s \nabla^2 G - G \nabla^2 \varphi_s) dv = \int_{S_V} \left( \varphi_s \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \varphi_s}{\partial n} \right) ds + \lim_{r \rightarrow \infty} \int_{S_R} \left( \varphi_s \frac{\partial G}{\partial r} - G \frac{\partial \varphi_s}{\partial r} \right) ds \dots\dots\dots(18)$$

ここで、 $S_R$  は  $\Omega_2$  を囲む円の境界面を表し、 $n$  に関する微分は領域外向法線方向微分を表す。

次に、 $\varphi_s$  に関する式(11)~(13)、および  $G$  に関する式(15)、(16)を考慮すると、左辺では、 $\varphi_s$  および  $G$  がそれぞれ式(11)、式(15)を満足することからデルタ関数と  $\varphi_s$  の積の項のみが残り、積分するとデルタ関数の性質により  $-\varphi_s(P)$  ( $P=(\xi, \eta)$ ) となる。右辺では、 $\varphi_s$  および  $G$  が、 $S_R$  上で同じ形の放射条件を満足することから、互いに消

し合って、 $S_R$  上での積分は0となる。したがって、上式より  $\varphi_s$  に関する次の積分方程式を得る。

$$\gamma \varphi_s(P) = - \iint_{S_V} \left( \varphi_s \frac{\partial G}{\partial n} + G \frac{\partial \varphi_i}{\partial n} \right) ds \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 $\gamma$  は、 $P$  が  $\Omega_2$  の内部点のとき1、構造物没水表面上の点のとき1/2となる係数である。

式(19)は、 $P$  をフィルタ表面上の点とすれば、散乱波ポテンシャル  $\varphi_s$  のフィルタ表面上の分布に関する第2種フレドホルム型積分方程式である。

積分方程式(19)を数値的に解くために、フィルタ表面  $S_V$  を  $N$  個の小要素に分割し、各要素内で未知ポテンシャルを一定と近似する。このとき、積分方程式は次のように複素係数連立1次方程式となる。

$$\frac{1}{2} \varphi_s(P_i) + \sum_{j=1}^N \varphi_s(P_j) \iint_{A_j} \frac{\partial G(P_i, Q)}{\partial n} ds = - \sum_{j=1}^N \frac{\partial \varphi_i(P_j)}{\partial n} \iint_{A_j} G(P_i, Q) ds \quad (i=1, 2, \dots, N) \dots\dots(20)$$

ここに、 $P_i, P_j$  : それぞれ  $i$  番目、 $j$  番目要素の中心座標である。

これは、通常の汎用解析プログラムで簡単に解くことができる。そして得られた  $\varphi_s(P_i)$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) を用いて、任意点  $P$  におけるポテンシャル  $\varphi_s(P)$  が次式によって求められる。

$$\varphi_s(P) = - \sum_{j=1}^N \left\{ \varphi_s(P_j) \iint_{A_j} \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} ds + \frac{\partial \varphi_i(P_j)}{\partial n} \iint_{A_j} G(P, Q) ds \right\} \dots\dots\dots(21)$$

また、点  $P$  における水位変動振幅  $\eta(P)$  は、 $\eta(P) = (a/g) \varphi_s(P)$  によって求められる。

4. 数値計算と考察

算定の対象にしたフィルタの基本ユニットを図-4に示す。これは、水深  $h$  が3mの場合に、遮断周波数  $f_c$  を0.1 Hz ( $T_c=10$  秒)、減衰極周波数  $f_\infty$  を0.2 Hz ( $T_\infty=5$  秒) に設定して設計したものである。まず、式(1)の第4式によって  $m$  が簡単に求められ、 $m=0.866$  となる。すると、第2式により  $h_2=6.13$  m が得られる。次に、開口部幅  $b_1$  を20mとして、式(2)を用いて  $h_1 > b_3/2$  となるように  $h_1$  および  $b_3$  を選ぶ。ここでは、 $b_3$  を18mとし、 $h_1=10.2$  mを得た。a型はこれを図-1の中の部分のように2段並べたものであり、b型は両端部を並べたものである。 $b_1=20$  mには、特に強い理由があるわけではないが、この程度開いていれば、漁船・プレジャーボート等の小型船舶の航行には影響がないからである。結局、フィルタ設置間隔(中心間距離)が34.66mとなり、この場合、開口率(開口幅/設置間隔)は約58%となつて

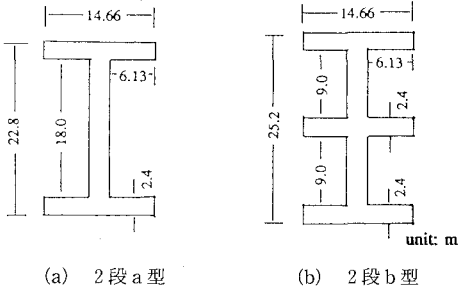


図-4 計算に用いた波浪フィルタの基本ユニット

いる。計算は、図に示した基本ユニットを一列に5基並べた場合について行った。以下に計算結果について述べる。

(1) 透過特性

本研究で対象とした有限個設置の場合、波の場は一樣とならないので、透過率を厳密に定義することができない。そこで、平面的に分布する透過波高の代表量として、次式で定義される空間的な自乗平均値 (rms 値)  $\bar{H}_T$  を採用する。

$$\bar{H}_T = \sqrt{\frac{\int S_T H_T^2 dS}{A_T}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M H_{Ti}^2}{M}} \dots\dots\dots (22)$$

ここで、 $H_T$  は透過波高、 $S_T$  は透過波高を評価する領域、 $A_T$  はその面積である。また、 $H_{Ti}$  は  $S_T$  を覆う格子網の  $i$  番目格子点における波高、 $M$  は格子点の総数である。ここでは、 $S_T$  を堤体列直後 50 m までの矩形領域とし、メッシュ幅 2.5 m の格子網上で透過波高の自乗平均値を求めた。

図-5 は、それぞれのフィルタに対する透過波高比 ( $\bar{H}_T/H_T$ ) の特性を、横軸に周期をとって表したものである。図中に示した  $T_c, T_\infty$  等は、それぞれ  $f_c, f_\infty$  に対応している。図からわかるように、周期 5.5 秒、6.5 秒の前後で透過波高比は、0.4、0.3 以下となっており、開口率が 58% と通常の場合に比較して著しく大きい割には効果が大きい。また、同じ 2 段フィルタでも、張り出し部分一枚多い b 型の方が効果が大きい。また、フィルタ理論による設計では、 $T_\infty$  のところで透過波高比が最小となるはずのところ、それより約 0.5 および 1.5 秒長周期側にずれており、結果としてフィルタ効果が得られる範囲が狭くなっていることがわかる。これは、フィルタ構造物相互間の波の干渉効果等によるものと思われる。したがって、最適設計をするためには、フィルタ理論だけでは不十分で、波動理論あるいは模型実験等で効果を確認しながらチューニングする必要がある。

b 型フィルタについて、透過特性に及ぼす入射角の影響を示したのが図-6 である。これは、入射角度が 0 度、10 度、20 度、30 度の場合について透過特性を比較したも

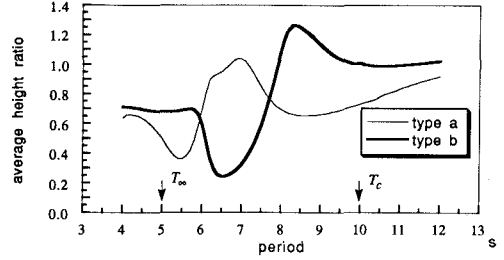


図-5 透過波高比の周期特性 (フィルタ形状による比較)

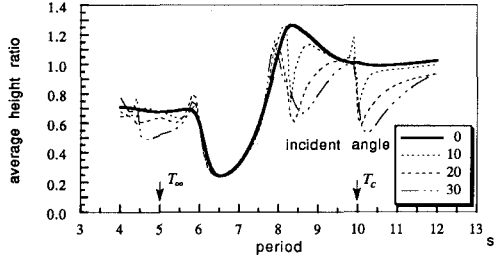


図-6 入射角による透過特性の比較

のである。図から、設計上フィルタ効果を期待した部分では、ほとんど入射角の影響を受けないことがわかる。この理由は後に説明するが、入射角の影響を受けないことから、多方向性の波に対して有利であると期待できる。

(2) 波浪フィルタ周辺の波高分布

図-7 に b 型フィルタ構造物周辺の波高分布を示す。図中に示した等値線 (コンター) は、入射波高との比を表しており、0.2 刻みで描かれている。また、入射波周期が 6.5 秒、入射角度が 0 度、10 度、20 度、30 度の場合について示してある。図からわかるように入射角度にかかわらず広い領域にわたって静穏となっている。図中に示した波浪フィルタの設置状況から広い開口幅を持つことがわかるが、これだけ開口していて、なお波をこのように効果的に遮断できる例は従来見られなかった。ここで、示した例は、先に述べたようにフィルタとして効果的に波を遮断する周波数領域が設計期待値よりも狭くなっているため、不規則波に対しては、狭帯域スペクトルを有する場合にのみ有効であるが、チューニングをすれば、波のみを遮断して海水交換はまったく妨げないという極めて都合のよい波浪制御構造物が開発できる可能性が示されたと言えよう。

(3) 波浪フィルタによる波浪制御のメカニズム

図-7 に示した波高分布図のフィルタ部分を見ると、ユニット間の波高分布は、ユニットの位置の違い、入射角の違いにもかかわらず、極めてよく似ていることがわかる。しかも、ユニット間に大きな重複波が励起されている。このとき、入射波による水粒子の運動方向と、ユ

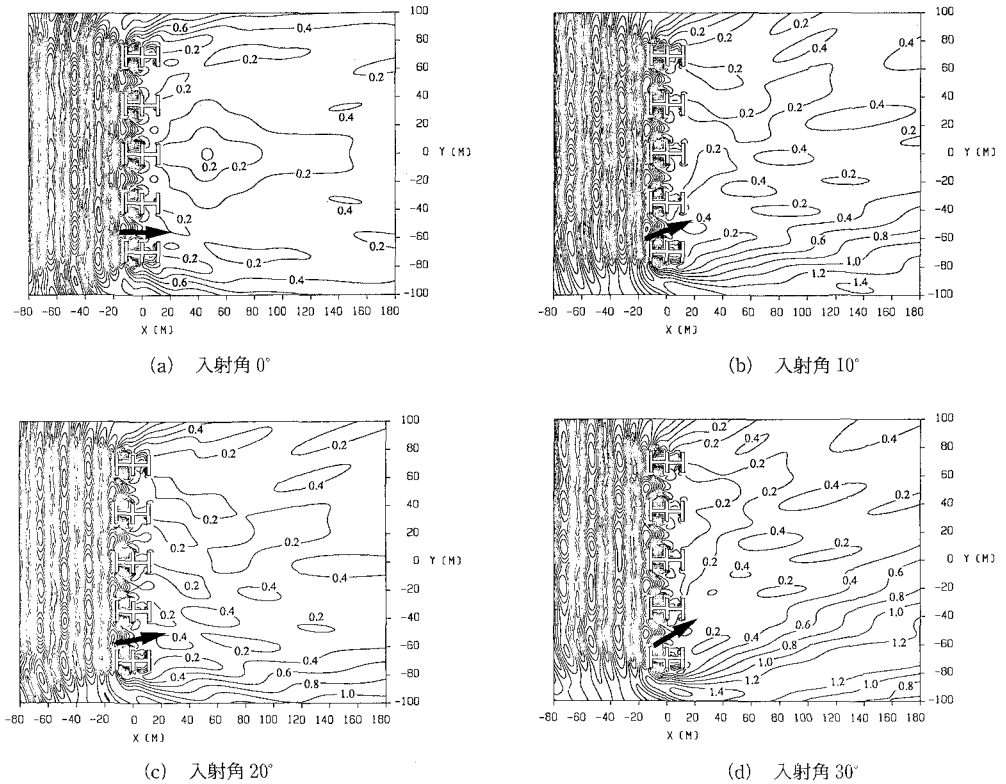


図-7 構造物周辺の波高分布 (周期 6.5 秒, 波の入射角度  $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ )

ニット間に励起された重複波による水粒子の運動方向は直交している。このため、入射波はこの部分で反射される。また、波浪フィルタの背後領域に向けての開口部は、励起された重複波の節になっており、水面の上下方向の変動が少ないため、背後へ波を伝達しにくくなっている。ユニット間で励起されるのは固有モードと考えてよく、そのため入射角度よりも入射波の周期が重要な役割を果たしていると考えられる。これが、図-6のような結果が得られた理由であろう。

## 5. 結 語

以上、本論文では、望月らによって提案された波浪フィルタについて、数値計算によりその有効性を検討した。この結果、波浪フィルタ理論により設計された波浪フィルタは、新しい波浪制御構造物として極めて有望であることがわかった。特に、従来のこの種の波浪制御構造物に比較して格段に大きい開口率をとることができ、波のみを遮断して海水交換は妨げないという理想的な波浪制御構造物が開発できる可能性が示された。また、波向きの影響をほとんど受けないので、多方向からの波が入射するような場合にも有効であり、この点も位相制御方式に比べて有利である。今後、実用化に向けてさらに検討

を進めたいと考えている。この研究は、(財)海洋都市開発研究会 (理事長 寺井精英) OCG 委員会 (委員長 望月 仁) の研究開発の一環として行われたことを記し、関係各位に深くお礼いたします。

## 参 考 文 献

- 清川哲志・三俣正和・田中正博・大山 巧 (1987): 可動板型 Radiation Wave Generator による波浪制御, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 472-476.
- 清川哲志・田中正博・大山 巧 (1988): 3次元波浪場における可動水平板式 Radiation Wave Generator の消波特性, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 517-521.
- 中村孝幸・小野正順 (1988): 規則配列された沖合消波堤まわりの波浪共振とその解析法, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 527-531.
- 中村孝幸・小野正順・長田和久 (1989): 共振装置を設けた堤体列による波浪の制御効果について, 第 36 回海岸工学講演会論文集, pp. 484-488.
- 中村孝幸・長田和久 (1990): 各種の平面形状を有する共振装置型堤体列の波浪制御効果について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 484-488.
- 望月 仁・安藤 繁・三橋 涉 (1987): 海洋波浪フィルタ, 第 2 回波浪エネルギー利用シンポジウム, pp. 137-144.
- 望月 仁・安藤 繁・三橋 涉 (1990): 波浪周波数フィルタ, 電気学会論文誌 A, 110-A, 8, pp. 493-500.