

## 減衰定常波を考慮した数値フィルタによる反射波の吸収造波

森屋 陽一\* 関本 恒浩\*

## 要 旨

不規則波を用いた模型実験を行う際に、構造物模型からの反射波の存在は、実験精度上大きな問題となる。この問題に対処するために、最近、木村・谷口<sup>1)</sup>により、周波数幅に制限のない数値フィルタを用いた反射波の吸収造波理論が提案された。しかしながら、木村・谷口<sup>1)</sup>は、減衰定常波を考慮していないため、相対水深の小さい波を含んだ不規則波に適用する場合、反射波の吸収性能が悪くなると考えられる。本研究は、数値フィルタを用いた反射波の吸収造波理論を、減衰定常波が考慮できるように拡張し、理論計算の妥当性を数値的に確認した結果を報告するものである。

## 1. はじめに

近年の波動理論等の研究の進歩により、実験にも高い精度が要求されるようになってきた。しかし、不規則波を用いた模型実験を行う際に、構造物模型からの反射波の存在は、実験精度上大きな問題となる。これまでも、造波板で反射波を吸収しつつ、目標とする入射波を造波するシステムが、いくつか提案されている。川口<sup>2)</sup>は、線形ポテンシャル理論を用い、減衰定常波も考慮して造波板前面の水位から反射波を検出する吸収制御方式を提案した。ただし、不規則波に対して用いる場合、式に含まれる周波数に依存する係数は、代表周波数の値で代用する必要があり<sup>3)</sup>、広帯域の不規則波に対しては、反射波の吸収性能は悪くなる。島田ら<sup>4)</sup>は、造波板前面の水位変動と造波したい水位変動との差が0となるように、造波板の動きを制御する波形制御方式を提案した。この方法でも、造波板が中立位置を大きく逸脱しないような向心ゲインを用いているので、長周期波を含む広帯域の不規則波に対して、反射波の吸収性能は悪くなる。

最近、木村・谷口<sup>1)</sup>は、数値フィルタを用いて反射波を吸収する造波方法を提案し、吸収制御方式および波形制御方式について検討している。数値フィルタは、理論的には周波数の制限はなく、長周期波を含む広帯域の不規則波に対しても適用可能である。ただし、相対水深の小さい波を含んだ不規則波に適用する場合、造波板前面に発生する減衰定常波が有意な大きさになるが、木村・谷口<sup>1)</sup>は、減衰定常波を無視している。

本研究では、理論的にシンプルであり、周波数に対する制限がない木村・谷口<sup>1)</sup>の数値フィルタを用いた反射波吸収システムを、減衰定常波が考慮できるように拡張し、理論計算の妥当性の確認を数値的に行う。

ここで、吸収制御方式とは、反射波を造波板の後方に向かって造波するように、造波板を制御する方式であり、

波形制御方式とは造波板前面水位  $\eta$  と入射波形  $\eta_i$  の差 (つまり反射波の水位) が0になるように、造波板を制御する方式である。波形制御は、 $\eta$  が  $\eta_i$  より大きければ造波板を後ろに引き、小さければ造波板を前に押し出すように制御するものである。木村・谷口<sup>1)</sup>は、両方式について検討している。

## 2. 理論的背景

まず、減衰定常波を考慮した不規則波に対する線形の造波理論について概説し、数値フィルタを用いた反射波の吸収造波に適用する。

造波板の変位  $\xi(t)$  を、

$$\xi(t) = \sum_{n=1}^{\infty} r_n \sin(\sigma_n t) \quad (1)$$

とすると、造波板の前面 ( $x > 0$ ) での水位変動  $\eta(t)$  は、減衰定常波も考慮すると、

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n r_n \cos(k_n x - \sigma_n t) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_{mn} \exp(-k_{mn} x) r_n \sin(\sigma_n t) \quad (2)$$

となる。(2)式の右辺2項目が減衰定常波成分である。ここで、 $r_n$ は造波板のストローク、 $\sigma_n$ は角周波数である。造波板変位は微小であるとし、常に、 $x=0$ に造波板がある場合を考える。 $x=0$ で係数の $A_n$ 、 $B_{mn}$ は、造波機がピストン型である場合、

\* 技術研究所

$$A_n = \frac{4 \sinh^2 k_n h}{2k_n h + \sinh 2k_n h} \quad (3)$$

$$B_{mn} = \frac{4 \sin^2 k_{mn} h}{2k_{mn} h + \sin 2k_{mn} h} \quad (4)$$

$$\sigma_n^2 = gk_n \tanh k_n h = gk_{mn} \tan k_{mn} h \quad (5)$$

であり、ここで、gは重力加速度、hは造波板の前面水深である。また、造波板の後面 (x<0)では、進行波の波数ベクトルの向きはx>0の場合と異なり、水位変動が有限値であるためには、(2)式は、

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n r_n \cos(k_n x + \sigma_n t) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_{mn} \exp(k_{mn} x) r_n \sin(\sigma_n t) \quad (6)$$

となり、結果として、(3)式と(4)式は、

$$A_n = -\frac{4 \sinh^2 k_n h}{2k_n h + \sinh 2k_n h} \quad (7)$$

$$B_{mn} = -\frac{4 \sin^2 k_{mn} h}{2k_{mn} h + \sin 2k_{mn} h} \quad (8)$$

となる。造波板前面の水位変動は、(2)式でx=0とすることにより得られるが、わかりやすくするために、

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n r_n \cos(\sigma_n t - \varepsilon_n) \quad (9)$$

の形で表す。ここで、

$$D_n = \sqrt{A_n^2 + \left( \sum_{m=1}^{\infty} B_{mn} \right)^2} \quad (10)$$

$$\varepsilon_n = \arctan \left( \frac{\sum_{m=1}^{\infty} B_{mn}}{A_n} \right) \quad (11)$$

である。

さて、ある入力スペクトルZ(f)と出力スペクトルS(f)の間に、

$$S(f) = H(f)^2 Z(f) \quad (12)$$

の関係があるとすると、H(f)はシステム関数と呼ばれる

もので、パワースペクトルZ(f)を有する不規則信号x<sub>k-n</sub>に対して、

$$y_k = \sum_{n=-N}^N \alpha_n x_{k-n} \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (13)$$

の荷重平均操作を行うと、y<sub>k</sub>のパワースペクトルがS(f)となる。ここに、Nは十分大きな数である。x<sub>k-n</sub>はdtで離散化されたxのt=(k-n)dtにおける値である。このときの

$$\alpha_n = 2 \sum_{j=0}^N H(f_j) \exp(i2\pi f_j t_n) dt df \quad (14)$$

であり、

$$i = \sqrt{-1} \quad (15)$$

$$df = \frac{1}{2Ndt} \quad (16)$$

$$f_j = \frac{j}{2Ndt} \quad (17)$$

である<sup>5)</sup>。ここで、入力と出力の成分波に位相差がある場合には、H(f<sub>n</sub>)に振幅D<sub>n</sub>のみでなく位相差<sub>n</sub>も考慮しなければならず、入力を造波板変位、出力を水位変動とする場合には、

$$H(f_n) = D_n \{ \cos \theta_n + i \sin \theta_n \} \quad (18)$$

であり、位相差<sub>n</sub>は、(1)式と(9)式を比較することにより、

$$\theta_n = \frac{\pi}{2} - \varepsilon_n \quad (19)$$

となる。

次に、吸収制御方式の場合、入力は水位変動、出力は造波板変位となり、反射波を造波板の後ろに造波すると考えれば、x<0の領域を考えなければならず、(3)式および(4)式ではなく、(7)式および(8)式を用いることになるので、H(f<sub>n</sub>)の符号は負になる(または、位相が<sub>n</sub>だけズレる)よって、H(f<sub>n</sub>)は、

$$H(f_n) = -\frac{1}{D_n} \{ \cos \theta_n + i \sin \theta_n \} \quad (20)$$

となり(木村・谷口<sup>1)</sup>では(21)式の符号は+である)位相差<sub>n</sub>は、(1)式と(9)式を比較することにより、

$$\theta_n = -\frac{\pi}{2} + \varepsilon_n \quad (21)$$

となる。また、波形制御方式の場合、木村・谷口<sup>1)</sup>に従えば、システム関数H(f)は(20)式と同様になり、位相差  $\theta_n$  は、

$$\theta_n = \varepsilon_n \quad (22)$$

となる。ただし、波形制御方式の場合の位相差は、減衰定常波を無視すれば、 $\theta_n = 0$ であり、つまり、造波板変位と水位変動の位相差は0になる。

実際に、造波システムとして反射波を吸収する場合は、以下のように行う。

目標とする入射波  $\eta_i$  に対する造波板変位  $\eta_p$  をあらかじめ計算しておく。

ある時刻において、

計測した造波板前面水位  $\eta$  から入射波  $\eta_i$  を引き、反射波  $\eta_r$  を求める。

反射波  $\eta_r$  に吸収制御方式および波形制御方式による数値フィルタを用いて、反射波を吸収するための造波板変位  $\eta_p$  を求める。

入射波  $\eta_i$  に対する造波板変位  $\eta_p$  と反射波を吸収するための造波板変位  $\eta_p$  の和を求め、実際に動かす造波板変位  $\eta_p$  を計算する。

この  $\eta_p$  を時々刻々計算して得られた造波板変位信号を、造波機に送って造波すればよい。

ここで、造波板前面水位  $\eta$  は、造波板で反射波の吸収を行わない場合、造波板での反射波の再反射波の水位も重なるため、

$$\eta = \eta_i + 2\eta_r \quad (23)$$

となるが、反射波の吸収を行う場合は、反射波の再反射は起こらないので、造波板前面水位  $\eta$  は、

$$\eta = \eta_i + \eta_r \quad (24)$$

となる。よって、 $\eta_p$  では造波板前面の水位から入射波の水位を線形的に差し引き、反射波の水位を求めればよい。

### 3. 数値的確認

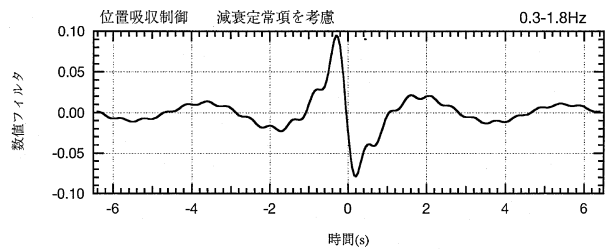
#### 3.1 数値フィルタ

周波数の範囲や時間間隔など木村・谷口<sup>1)</sup>と同様の値 (N=128, dt=0.05s, 周波数帯は 0.3Hz < f < 1.8Hz, 水深は 50cm) を用いて、数値的な検討を行った。

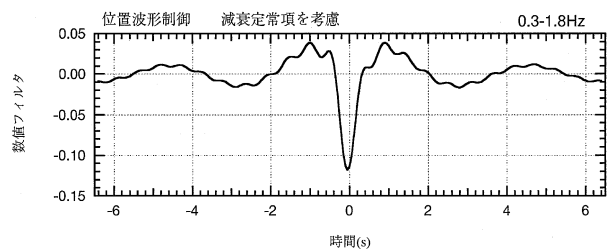
図-1は、反射波を吸収するために、反射波の水位変

動から造波板変位を計算する際に用いる数値フィルタを示したものである。

図-1(a)は吸収制御方式による結果、図-1(b)は波形制御方式による結果をそれぞれ示したものであり、両者とも減衰定常波を考慮したものとなっている。減衰定常波を無視した場合、木村・谷口<sup>1)</sup>の結果と符号のみ異なる結果になるが、造波板変位の前が+、後ろが-であれば、ここに示した結果が正しい。



(a) 吸収制御方式



(b) 波形制御方式

図-1 数値フィルタ

#### 3.2 反射波の吸収

規則波について計算を行った。周波数としては、減衰定常波の寄与がわかるように f=1.5Hz とし、造波板の変位を ± 1cm とした。

図-2は、造波板前面での反射波の水位変動と、その水位変動の内の進行波(2)式における右辺第1項)と減衰定常波(2)式における右辺第2項)を示したものである。(2)式からもわかるように、進行波と減衰定常波は位相が  $\pi/2$  ずれており、f=1.5Hz では減衰定常波の振幅も無視できない大きさになることがわかる。

図-3は、吸収制御方式により図-2に示した反射波の水位変動を吸収するための造波板変位を計算したものである。また、比較のために、図-2に示した水位変動を造波板の前面に造波する場合の造波板変位も合わせて示した。両者の振幅は同じで、符号のみが逆になり、重ね合わせれば0になることがわかる。

図-4は、波形制御方式により図-2に示した反射波の水位変動を吸収するための造波板変位を計算したものの

である。図-2に示した反射波の水位変動と比較すると、減衰定常波がある分だけ位相がズれているが(進行波成分と比較すると位相は合っている)水位が下がってくると造波板は前にでて、水位が上がってくると造波板は下がるように動くことになる。

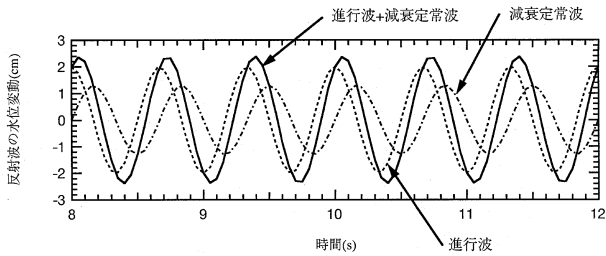


図-2 造波板前面での反射波の水位変動

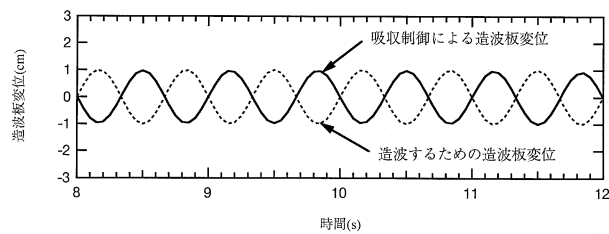


図-3 吸収制御方式による造波板変位

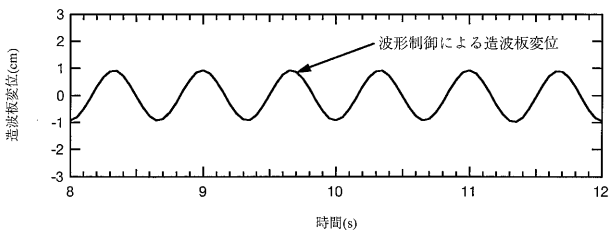


図-4 波形制御方式による造波板変位

#### 4. おわりに

数値フィルタを用いた反射波の吸収造波理論を減衰定常波が考慮できるように拡張し、理論計算の妥当性を数値的に確認した。数値的な確認は、規則波について行ったが、不規則波についての適用にも理論的には問題がない。

今後の課題としては、実際にシステムを作成して実験的に検証を行うことである。また、数値フィルタを用いた反射波の吸収制御方式は、理論的にシンプルであり他の手法に比べて周波数幅などの制約がないため、多方向造波機の反射波吸収システムや、2次の成分も含めた非線形反射波吸収システムについても、拡張を試みる予定である。

#### 参考文献

- 1) 木村晃・谷口丞：外付け型反射波吸収システムの機能向上とコンパクト化、海岸工学論文集、第42巻、pp.126～130、1995
- 2) 川口隆：波面検出及び速度制御を用いた無反射造波方式、三井造船技報、第128号、pp.20～24、1986
- 3) 平口博丸・鹿島遼一：水面波形制御方式による無反射型造波機の不規則波実験に対する適応性、電力中央研究所報告、研究報告、U88013、47p.、1988
- 4) 島田広昭・向和久・向勝己・井上雅夫：反射波吸収式造波装置の試作とその造波特性、関西大学工学会誌、工学と技術、第10巻1号、pp.67～75、1991
- 5) 日野幹雄：スペクトル解析、朝倉書店、300p.、1977