

ソリトンモード法に基づく非線形不規則波の造波

岐阜大学 正員 安田孝志・篠田成郎 学生員 ○服部武・石原貴司

1. 緒言 本研究では、海岸波浪を非線形波動であるソリトンの連なりとして取り扱うことにより、従来の手法では困難であった所定の時系列特性を持つ非線形不規則波の造波を試み、実験水槽内において、実際の現地波浪に即した不規則波による模型実験が可能となることを示す。

2. 実験装置 実験は、岐阜大学工学部水理実験棟の1m×1m×54mの1次元波浪水槽で行われた。この実験水槽の概略を図-1に示す。この水槽には、最大変位2mおよび最大速度7.3cm/sの低速駆動部と最大変位30cmおよび最大速度60.0cm/sの高速駆動部から成る2-ウェイモード方式の不規則造波装置が設置されている。また、水位変動の計測には3台の容量式波高計を使用し、それらの測点を造波板前面から順にP.1, P.2およびP.3とする。

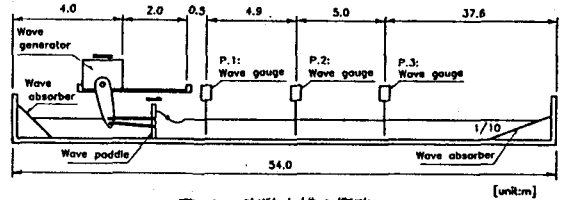


図-1 実験水槽の概略

3. 造波理論および造波方法 非回転流体場での非線形不規則波の造波問題を流体力学的に取り扱うことにし、座標および造波板を図-2のように定めれば、このときの基礎方程式および境界条件は次式で与えられる。

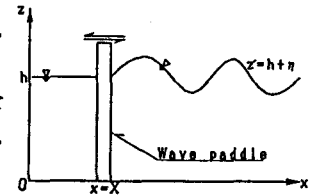


図-2 座標および記号

$$\nabla^2 \varphi = 0, \quad z'_t + z' \varphi_x - \varphi_x = 0|_{z=h+z'}, \quad \varphi_z = 0|_{z=0}, \quad (1)$$

$$\varphi_t + (\varphi_x^2 + \varphi_z^2)/2 + g z' = 0|_{z=h+z'}, \quad dX/dt = \varphi_x|_{x=X}$$

ここに、 $\varphi$ ：速度ポテンシャル、 $z'$ ：平均水面周りの水位変動、 $g$ ：重力加速度、 $h$ ：平均水位および $X$ ：造波板の変位を表す。ここで、波動の場がKdV方程式に支配されているとすれば、式(1)は

$$\eta_t + 3/2 \eta \eta_x + 1/6 \eta \eta \eta_x = 0 \quad (2), \quad dX^*/dt^* = \eta|_{x^*=X^*} \quad (3)$$

のように書き換えられる。ここに、 $\varepsilon \eta = z'/h$ ,  $\xi = \varepsilon^{1/2}(x^* - t^*)$ ,  $\tau = \varepsilon^{3/2} t^*$ ,  $x^* = x/h$ ,  $X^* = X/h$ ,  $t^* = t \sqrt{g/h}$ ,  $\varepsilon = (h/l)^2$ である。いま、造波すべき波を不規則ソリトン列として扱えば、求める造波板の変位 $X^*(t^*)$ は次式のようにになる。

$$X^*(t^*) = X^*(t_n) + \exp\left(-\sum_{j=1}^N \eta_j / c_j\right) \int_{t_n}^{t^*} \sum_{j=1}^N \eta_j \exp\left(\sum_{j=1}^N \eta_j / c_j\right) dt^* \quad (4)$$

$$\eta_j = A_j \operatorname{sech}^2\left(\sqrt{3A_j}(X^* - c_j t^* + \delta_j)/2\right) - \eta_0/N \quad (5)$$

ここに、 $\eta_0$ は静水面とソリトン列の波谷面との水面差である。これより、所定の $\{A_j\}$ および $\{\delta_j\}$ を与えれば、それに対応した波列を造波するための信号が得られる。図-3は、期待波形とこれに対応した式(4)より計算される造波板の変位の一例を示す。この図からもわかるように、変位 $X^*$ は時間とともに増大していくため、造波板のストロークが高々数十cmの従来の造波機では、造波できる波の数が限られることになる。そこで、造波板の変

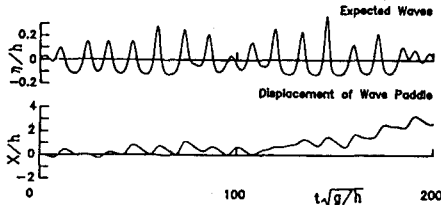


図-3 期待波形および造波板変位

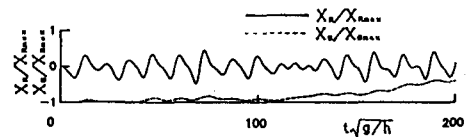


図-4 高速および低速駆動部の造波信号(水深20.0cm)

位を図-4に示すように移動平均法によって低周波および高周波成分に分離し、これらをそれぞれ低速および高速駆動部への造波信号 $X_s$ および $X_R$ として与えてそれらを合成すれば、式(4)に従う造波板の運動が実現されることになる。ただし、図中の $X_{Rmax}$ および $X_{Smax}$ は $X_s$ および $X_R$ のそれぞれの最大変位を表す。

4. 規則的ソリトン波列の造波特性 不規則波の造波を行うに先立ち、造波装置および実験水槽の特性を検討するために、一様な振幅および間隔を有するソリトン列の造波実験を行った。図-5は、期待振幅 $A^*$ と実際に造波されたソリトンの振幅 $\hat{A}^*$ の平均 $E[\hat{A}^*]$ との関係を示したものであり、実測振幅は期待振幅と極めて良好に一致していることがわかる。ただし、実測振幅 $\hat{A}^*$ は、測点P.1およびP.3の実測波形の位相差から求められる各波峯の伝播速度 $\hat{c}^*$ を次式のソリトンの振幅と波速との関係式に代入することによって算出した。

$$\hat{c}^* = 1 + \hat{A}^* / 2 - 3\eta_0 / 2 \quad (6)$$

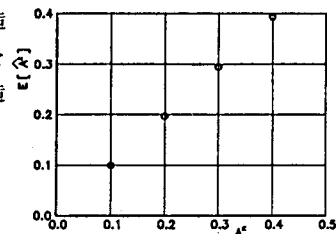
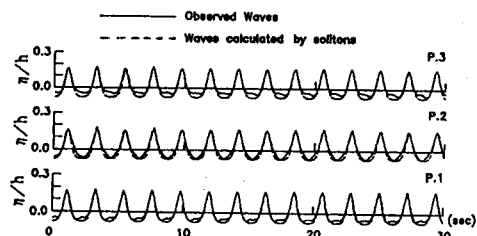


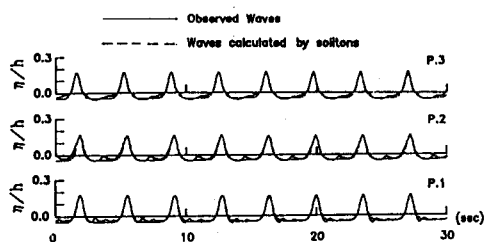
図-5 期待振幅と実測振幅との関係

図-6は、この方法により得られた実測振幅 $\hat{A}^*$ を用いてソリトン合成した波形と実測波形とを比較したものである。ただし、 $d^*$ は周期に相当する無次元波峯間隔である。波谷面において若干の相違は存在するものの、両者はほぼ一致しており、図-5と併せて考えれば、造波された波は波形および波速ともに所定のソリトン列としての性質を保持しており、ほぼ期待通りの波が造波されていることが確認できる。

5. 非線形不規則波の造波結果 ここでは、非線形不規則波の造波の一例として、現地波浪を実験水槽内に再現することを試みる。実験対象とした現地波浪は1981年3月に京都大学防災研究所大渦波浪観測所において観測されたものの一部であり、Urseil数が26の極めて非線形性の強いうねり性の波浪である。造波信号は、この現地波浪をソリトン分解して得られるソリトンの振幅および位相を前述の造波理論に適用して計算される。図-7は、造波対象とした現地観測波形とそのソリトン分解合成波形、およびこれを期待波形として造波した測点P.1における実測波形を示す。実測波形の振幅が期待波形に比べ若干小さめではあるものの、3種類の波形は全体的にはたいへん良好な一致を示しており、この造波システムにより、極めて精度よく所定の非線形不規則波を実験水槽内に造波することが可能であると判断できる。



(a)  $A^* = 0.3$ ,  $d^* = 15.0$ ,  $h = 20.0 \text{ cm}$



(b)  $A^* = 0.3$ ,  $d^* = 25.0$ ,  $h = 20.0 \text{ cm}$

図-6 実測波形とソリトン合成波形との比較

6. 結 語 以上、フーリエモードに基づく従来の造波方式では困難であった非線形不規則波の造波問題をソリトンモード法に基づく方法により解決し、良好な精度で所定の波を造波可能となることを示した。なお、造波装置の作成に当たっては伊勢屋機械製作所から格別のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

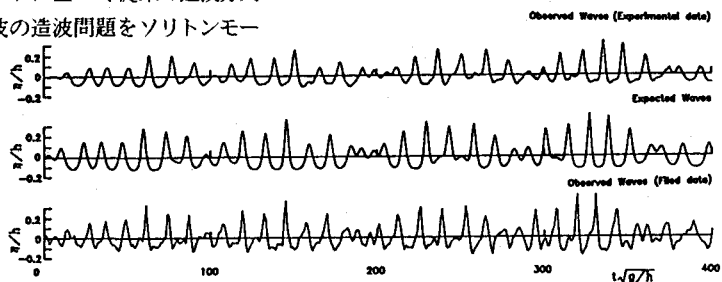


図-7 造波対象とした現地観測波形、期待波形としてのソリトン合成波形、および実測波形の比較