

海藻群落上を伝播する波の特性

鹿児島大学工学部 学生員 出口 浩
鹿児島大学工学部 正 員 浅野敏之

1. はじめに

本研究は、海藻群落が繁茂する場を伝播する波の分散方程式を導き、波速ならびに波高減衰率の特性を理論的に調べたものである。前報(浅野・筒井・酒井:1988)で提示した理論を海藻の揺動を取り込んで修正・拡張した。理論の妥当性は、実験水槽内に疑似海藻を敷設したときの波浪伝播実験のデータを用いて検討した。

2. 2層流モデル

図-1に示すように、海藻群落を有する内部領域と、その上部の外部領域からなる流体場を考える。ここに d は揺動する海藻群の平均高さである。内部領域における運動方程式は次式で表される。

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial z} - \rho V^* C_M \frac{Du_r}{Dt} - \frac{\rho}{2} C_D N^* D_0 u_r |u_r| \quad (1)$$

ここに、 C_D : 海藻の抗力係数、 C_M : 質量係数、 N^* : 単位面積当りの植生本数、 V^* : 単位体積当りの海藻占有体積、 D_0 : 海藻の等価直径、 u_r : 水粒子と海藻の相対速度である($u_r = u - u_{sw}$; u : 水粒子速度、 u_{sw} : 海藻の揺動速度)。(1)式右辺最終項を線形化する。ローレンツの等価仕事則よりこの抗力によってなされる仕事と等価なエネルギー減衰量を次式で定義されるエネルギー減衰係数 f_p で表す。

$$f_p \sigma \int_V \int_0^T |u|^2 dt dV = \int_V \int_0^T \left(\frac{1}{2} C_D N^* D_0 |u_r|^3 \right) dt dV \quad (2)$$

右辺第3項を左辺に移項し、 $C_r = 1 + C_M V^*$ によって左辺にまとめる。

右辺第2項は渦動粘性係数 K_v を用いて

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} = K_v \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \quad (3)$$

で表せようが、Liu-Dalrymple(1984)によれば、 $\epsilon = \frac{\sigma^2}{g} \sqrt{\frac{K_v}{\sigma}} \ll 1$ であれば、この項が $O(\epsilon^0)$ の

範囲で分散関係式に関与しない。以上より、海藻が繁茂する下層部の運動方程式は次式となる。

$$C_r \frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - f_p \sigma u \quad (4)$$

水粒子速度をポテンシャル成分とソレノイダル成分とに分離し、 $\phi = \phi_0 + \epsilon \phi_1 + \epsilon^2 \phi_2 + \dots$ と表したときの、 ϕ_0 に関する運動方程式は次式となる。

$$C_r \frac{\partial \phi_0}{\partial t} + \frac{1}{\rho} (p + \rho g z) + f_p \sigma \phi_0 = 0 \quad (5)$$

周期解を考え、上下層部の速度ポテンシャルをそれぞれ次のようにおく。

$$\phi_{0u} = \Phi_u \exp(i\sigma t), \phi_0 = \Phi_0 \exp(i\sigma t) \quad (6)$$

これを、連続式ならびに自由表面・界面・底面での6つの境界条件を満足するように求める。

$$\Phi_u = \frac{ig\eta}{\sigma} G(z), \Phi = \frac{ig\eta}{\sigma} H(z) \quad (7)$$

とおけば、鉛直分布関数 G, H は次式のように求まる(Rojanakamthornら(1989))。

$$G(z) = \frac{\sinh(kd) \exp\{k(z+h)\} - \delta \cosh\{k(z+h)\}}{\exp(kh) \sinh(kd) - \delta \cosh(kh)} \quad (8)$$

$$H(z) = \frac{\cosh\{k(z+h+d)\}}{\exp(kh) \sinh(kd) - \delta \cosh(kh)} \quad (9)$$

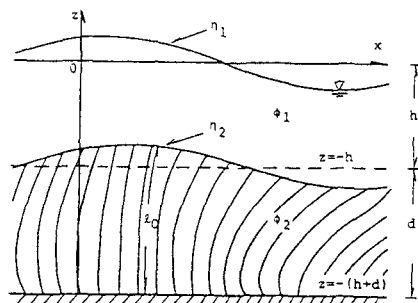


図-1 2層流モデル

$$\delta = \sinh(kd) - (C_r - if_p) \cosh(kd) \quad (10)$$

複素波数 k は、次式の分散方程式から求められる。

$$\sigma^2 = gk \frac{\exp(kh) \sinh(kd) - \delta \sinh(kh)}{\exp(kh) \sinh(kd) - \delta \cosh(kh)} \quad (11)$$

3. 波による海藻の揺動

海藻は曲げ剛性と浮力を復元力として、波による流体運動に応答する。海藻の運動方程式は次式で表示可能である（酒井・浅野・上田（1989））。

$$\begin{aligned} \rho_{sw} bw \ddot{\xi} + C_1 \dot{\xi} + EI \xi_{zzzz} = \frac{1}{2} \rho C_D b |u - \dot{\xi}| (u - \dot{\xi}) \\ + \rho (C_M - 1) bw (\dot{u} - \ddot{\xi}) + \rho bw \dot{u} - (\rho - \rho_{sw}) g bw \xi_z \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、 ξ は海藻の横変位、 ρ_{sw} , b , w , EI , C_1 は、それぞれ海藻の密度、幅、厚さ、曲げ剛性、減衰定数である。(12) 式を厳密に解く代わりに海藻頂部の部の水平変位 ζ によって $\xi = \frac{z}{d} \zeta$ と近似できるものとする、(12) 式は次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (\rho + \rho_{sw}) V \ddot{\zeta} + \frac{1}{2} \rho C_D |u| A \dot{\zeta} + \left\{ \frac{8EI}{d^3} + \right. \\ \left. (\rho - \rho_{sw}) g \frac{V}{d} \right\} \zeta = \frac{1}{2} \rho C_D A u |u| + \rho C_M V \dot{u} \end{aligned} \quad (13)$$

ここに $A = bd$, $V = bdw$ である。

海藻の揺動を考慮した計算の手順は以下の通りである。

1) $u_{sw} = 0$ として、速度ポテンシャル、分散方程式を求める。2) 式 (13) に基づいて海藻の運動を計算し、 u_{sw} を求める。3) 相対速度 u_r を計算し、式 (2) から減衰定数 f_p を求める。4) 海藻の揺動の大きさから、海藻の長さ l_0 を与えて、海藻群落の高さ d を求める。5) 速度ポテンシャル、分散方程式を再度計算する。6) 計算を繰り返し、解の収束を図る。

4. 実験結果との比較

前報では比重 0.9 のポリプロピレンで疑似海藻を製作し、全長 8 m にわたって水槽底に敷設することによって、波の伝播実験を行った。6 台の容量式波高計のデータをもとに、波速ならびに波高減衰率を解析し直した。波速に関する実験結果と計算結果を比較したものが図-2 である。また波高減衰率についての比較を図-3 に

示す。現段階では、理論中での諸定数の与え方に検討の余地があり、現在解析を急いでいる。

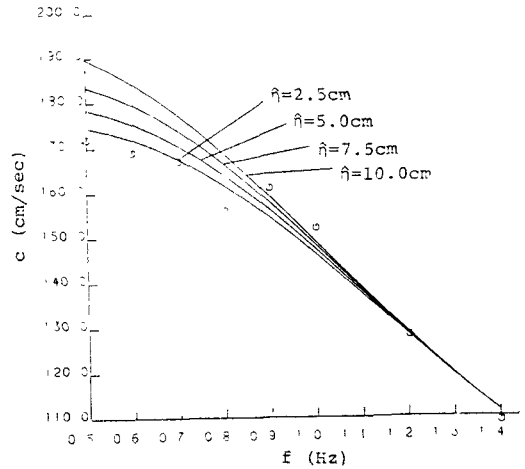


図-2 波速に関する理論値と実験値の比較
(水深 $d+h = 45\text{cm}$ 、海藻の長さ $l_0 = 25\text{cm}$ 、植生密度 $N^* = 0.083/\text{cm}^2$ の場合)

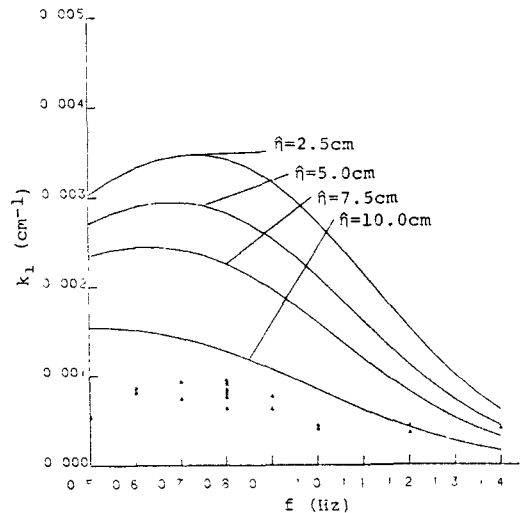


図-3 波高減衰率 k_1 に関する理論値と実験値の比較

(実験・計算条件は図-2 と同じ)