

沈水模型植物(コアマモ)が有する 消波特性に関する研究

WAVE DAMPINGS BY A CROWD OF MODEL PLANTS
(*Zostera Japonica Ascheras*) IN WATER

林建二郎¹・今野政則²・重村利幸³

Kenjiro Hayashi, Masanori Konno and Toshiyuki Shigemura

¹正会員 Ph. D. 防衛大学校助教授 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

²学生会員 防衛大学校理工学研究科 地球環境科学専攻 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

³正会員 Dr. Eng. 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

Laboratory experiments were performed to study the wave forces acting on a model plant (*Zostera Japonica Ascheras*) on the bed of two dimensional wave flume. The wave forces acting on the both directions of wave propagation (in line direction) and gravity were measured by using a two components load cell installed under the bed of wave flume. In order to study the wave damping capacity of a crowd of model plants, the energy dissipation per unit time due to a model plant were evaluated by measuring the wave forces and incident flow velocities.

Key Words : *Zostera Japonica Ascheras, Vegetation in water, Wave forces, Wave energy dissipation, Transmission coefficient*

1. はじめに

既設の湖岸堤の沖側に覆土を行った場合, 従来の自然湖浜と比較して湖浜勾配が大きく, その前面の水深も深くなることから, 風波の作用がより激しくなり, 覆土が流出する場合も多い. そのため, 水辺植物群落の湖岸への定着には何らかの方法によって波浪を減衰させることが必要である. しかし, 風波を遮るために構造物によって閉鎖性水域を形成した場合, 富栄養湖においては総じて水質が悪化しアオコの発生等が起こり, かえって問題が生じる可能性も指摘されている^{1), 2)}.

筆者らは, 水辺植物の定着に及ぼす波浪の影響を調べることを目的として, ヨシ等の抽水植物やコアマモ, アマモ等の沈水植物, アサザ等の浮葉植物に作用する流体力とその消波機能特性を円柱群模型や実植物等を用いた室内模型実験により検討してきた³⁾. その中においては, 群ではなく単独で設置した植生1本(株)に作用する波力計測値より植生部での損失波エネルギーを算定し, 水辺植生帯が有する消波効果(透過率)の評価を試みた.

本研究は, この消波機能評価法に対する更なる検討として, 植生群中の植生1本(株)に作用する波力に及ぼす周辺植生の干渉効果および植生の波に対する動揺特性を

沈水植物のコアマモ模型を用いて調べたものである.

2. 実験装置および方法

実験には, 図-1に示す長さ40m, 幅0.8m, 高さ1mの吸収式造波装置付き2次元造波水槽を用いた. 水槽の他端には1/30勾配の消波用斜面を設置した. 本斜面からの波の反射率 K_r をできるだけ小さくするために, 本斜面上に厚さ5cmの塩化ビニール製のサンドマットを敷設した. 波の反射率は概ね $K_r < 0.05$ であった.

金澤等⁴⁾がアマモを対象して製作した人工海草模型と類似な部材(生分解性発泡部材, 比重=0.098, 厚さ=0.5mm; 古河電工)を, コアマモ模型として使用した.

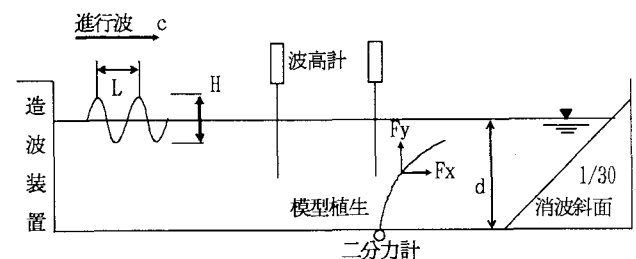


図-1 実験装置の概略

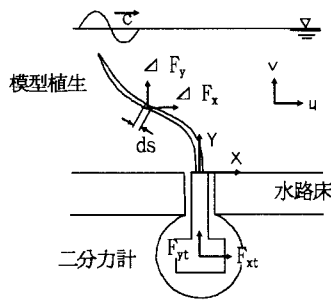


図-2 二分力計による波力計測

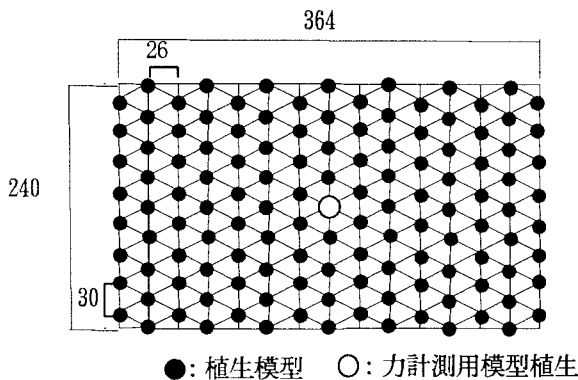


図-3 植生群の配置 (unit:mm)

上記部材を長さ30cm、横幅3mmで切断したものを3枚束ねたものをコアマモ1株の模型として使用した。本模型1株の乾燥重量は約0.13gfである。実生のコアマモ1株は通常3枚の葉部で構成されている³⁾。

本模型植生1株に作用する進行方向波力 F_x と鉛直方向波力 F_y を、図-2に示すようにベニヤ製の水路床の下面に設けた小型二分力計(日章電気製、定各容量200gf、固有振動数=約400Hz)に単独で取り付けて計測した。小型二分力計の設置位置は、造波板より15mの位置における水路幅中央点とした。

同様な模型植生を図-3に示すように千鳥配置し、本模型植生に作用する波力 F_x 、 F_y を計測した。正三角形をなす模型植生の間隔は3cmである。模型植生群の水路方向長さは36.4cm、水路横断方向長さは24cmである。比較として、径3mm、長さ30cmのステンレス丸棒を単独で設置し、ステンレス丸棒1本に作用する波力 F_x 、 F_y を同様に計測した。

容量線式波高計を植生の真横約20cmの位置に設置し、作用波の水位変化 η を計測した。また、この波高計とその前方約 $L/4$ (L :波の波長)の位置に設置した波高計を用いて消波斜面からの反射率 K_r (=反射波高 H_r /入射波高 H_i)を計測した。反射率 K_r の評価に必要な入射波高 H_i と反射波高 H_r の算定には入・反射分離法を用いた。

模型植生に対する主流の速度分布を精度良く評価するために、力計測用の模型植生の真横約25cmの位置における波の水粒子速度の水平および鉛直方向成分 u 、 v を、2

成分レーザードップラー流速計(Dantec社製)を用いて計測した。実験に使用した規則波の周期 T および波高 H の範囲は、 $T=0.8\sim 3.0\text{sec}$ 、 $H=2\sim 26\text{cm}$ である。静水深 d は $d=40, 50, 60, 70\text{cm}$ の4種類とした。

3. 植生帯における波の透過率評価式

(1) 植生に作用する波力の測定法

植生に作用する流体力(波力)は、a)植生表面に作用する摩擦による壁面せん断力と、b)植生表面に作用する圧力分布の非対称性による形状抗力からなる。圧力分布の非対称性は、植生体背後に生じる渦や、波動場圧力の空間変動に起因する。動揺する植生に作用する波力の評価式としてモリソン式を適用する場合には、波の水粒子速度・加速度と植生の動揺速度・加速度との相対速度・加速度を用いる必要がある。しかし、植生动揺による植生の形状変化や空隙密度変化が生じる結果、投影面積等の評価が複雑であり、式中の抗力係数 C_D や質量係数 C_M の評価は複雑・困難である。

図-2に示すように植生を設置した二分力計によって検知された波の進行方向分力 F_{xt} と鉛直方向分力 F_{yt} には、植生全体に作用する上記波力の波の進行方向合力 F_x と鉛直方向合力 F_y の他に、植生动揺による質量力(植生の質量×動揺加速度)が含まれている。しかし、本実験に用いた模型植生の質量は0.13gと小さいので、この質量力は無視できると考えられる。従って、 F_x 、 F_y は本二分力計で検知された F_{xt} 、 F_{yt} で近似評価できる。

(2) 植生に作用する波力による波エネルギー損失評価式

海底摩擦力によって波エネルギーの損失が生じるように、円柱群や植生群への作用する波力によっても波エネルギーの損失が生じる⁴⁾。植生の微小部分 ds に作用する波の進行方向(X方向)、鉛直方向(Y方向)の波力を $\Delta F_x(x, y, t)$ 、 $\Delta F_y(x, y, t)$ とすると、これら波力による単位時間当たりの波エネルギー損失 EL_x 、 EL_y は(1)～(2)式で表される。 x 、 y は植生微小部分のX、Y座標、 s は植生の長さ、 t は時間、 $u(x, y, t)$ 、 $v(x, y, t)$ は植生微小部分点における主流速度(=植生が無い場合の波の水粒子速度)のX、Y方向成分である(図-2 参照)。

$$EL_x = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^S \{ \Delta F_x(x, y, t) \cdot u(x, y, t) \} ds dt \quad (1)$$

$$EL_y = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^S \{ \Delta F_y(x, y, t) \cdot v(x, y, t) \} ds dt \quad (2)$$

植生の動揺量は波の波長 L に比べて小さいことおよび浅海波を対象とすると、波の水粒子速度の水平方向成分 $u(x, y, t)$ の場所 (x, y) 的变化は小さいので、 EL_x は(3)

式で近似できる。 $u(x_p, y_p, t)$, $v(x_p, y_p, t)$ は、植生部の代表位置 (x_p, y_p) での主流速度(波水粒子速度)である。

$$\begin{aligned} EL_x &\approx \frac{1}{T} \int_0^T u(x_p, y_p, t) \left\{ \int_0^S \Delta F_x(x, y, t) ds \right\} dt \\ &\approx \frac{1}{T} \int_0^T u(x_p, y_p, t) F_x(t) dt \end{aligned} \quad (3)$$

一方、波の水粒子速度 $v(x, y, t)$ の水深方向 (y) 変化は無視できないが、簡単化のために場所的代表的値を用いると、 EL_y は(4)式で近似できる。

$$\begin{aligned} EL_y &\approx \frac{1}{T} \int_0^T v(x_p, y_p, t) \left\{ \int_0^S \Delta F_y(x, y, t) ds \right\} dt \\ &\approx \frac{1}{T} \int_0^T v(x_p, y_p, t) F_y(t) dt \end{aligned} \quad (4)$$

$F_x(t)$, $F_y(t)$ は、植生に作用する全波力の x , y 方向成分であり、二分力計で検知された $F_{xt}(t)$, $F_{yt}(t)$ で近似評価できる。

模型植生には、波の進行方向に対して直角方向に揚力 F_L が作用している。しかし、主流速度 (= 植生が無い場合の波の水粒子速度) の揚力の作用方向成分 w は存在しない ($w=0$) ので揚力 F_L による波エネルギー損失 ($=F_L \times w$) は生じないと考えられる。

(3) 植生群における波の透過率評価式

植生帯密度 λ (= 植生帯部の全植生体積 / 植生帯部の全流体体積) が十分小さい円柱群からの波の反射率は、 $K_r < 0.1$ と非常に小さい。従って、反射波のエネルギーは小さいので、円柱群を透過する波(透過波)のエネルギーは、円柱群への入射波が有する波エネルギーから、円柱群内で生じる波の損失エネルギーを引いたものに等しいと見なせる。この損失エネルギーは、円柱群内の各円柱からの後流渦に起因し、各円柱に作用する波力による仕事量に等しい⁴⁾。このような仮定に基づき、林ら³⁾は、植生帯密度が小さい円柱群や模型植生群を透過する波の透過率評価法を提案しその妥当性を検証している。今回対象とした模型植生の植生密度も $\lambda=0.0065$ と十分小さいので、この評価法の適用が可能であると考えられる。

単位床面積当たり N 本の植生を有する植生群において、波方向の単位長さ当たり失われる単位幅当たりの損失エネルギー LE は(3), (4)式を用いた(5)式で示される。

$$LE = N (EL_x + EL_y) = N \cdot EL_t \quad (5)$$

植生帯内における波進行方向の微少区間 dx への入射波

高を H_{ip} , dx からの透過波高を H_{tp} とすると、エネルギー釣り合い式として(6)式が得られる。式中の ρ は密度、 g は重力加速度、 C_g は波の群速度である。

$$(1/8) \rho g (H_{ip}^2 - H_{tp}^2) C_g = LE \, dx \quad (6)$$

(3), (4)式で評価される EL_x , EL_y を用いた(5)式の LE を(6)式に代入すると、区間 dx での透過率 K_{tp} は(7)式で評価される。

$$K_{tp} = H_{tp}/H_{ip} = \{1 - 8 \, LE \, dx / (\rho g C_g H_{ip}^2)\}^{0.5} \quad (7)$$

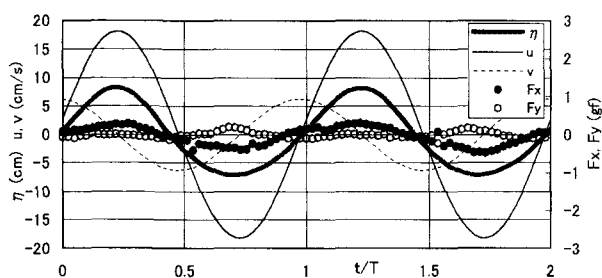
このように算定された H_{tp} を、次の微少区間 dx への入射波高 H_{ip} とし、次の微少区間 dx での透過波高 H_{tp} を求める。この逐次計算を植生帯の全長 B に渡って行くと、植生帯を透過する波の透過波高 H_t が求まり透過率 $K_t (= H_t/H_i)$ を評価できる。数値解に対する微少区間 dx の影響を無視できるように、 dx は十分小さい値 ($dx < B/100$) とする。

4. 結果および考察

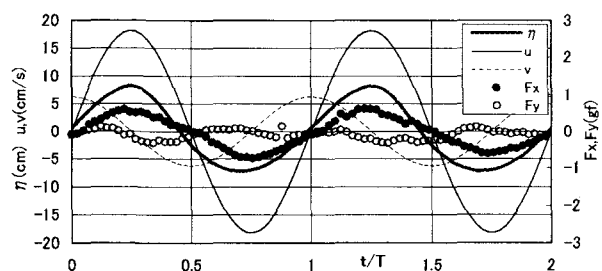
(1) 模型植生に作用する波力特性

単独および植生群中に設置された模型植生1株に作用する波力 $F_x (=F_{xt}(t))$, $F_y (=F_{yt}(t))$ と、その設置点における波の水位変化 η , 波の代表水粒子速度の水平および鉛直方向成分 u_p , v_p の時間変化例を図-4のa), b)にそれぞれ示す。 u_p , v_p は、植生部の代表位置 ($x_p=0\text{cm}$, $y_p=20\text{cm}$) における波の水粒子速度 u , v である。

F_x の時間変化は、水位変化 η および波水粒子速度 u_p と



a) 単独で設置した場合



b) 植生群中に設置した場合

図-4 波力の記録例 ($d=70\text{cm}$, $T=1.625\text{s}$, $H=14.3\text{cm}$)

同位相となっている。これは、模型植生のKC数($=u_p$ の最大値 $\times$ 波周期 T /植生の代表幅)が大きいと、模型植生に作用する波力 F_x においては u の2乗に比例する抗力項が卓越している結果である。 v_p は u_p に比べて小さいため F_y は F_x に比べて小さい。

植生群中に設置した場合の F_x は、単独設置した場合の F_x に比べて大きくなっている。この原因としては、a) 戻り流れの影響や、b) 揺動を伴う植生群と植生群周辺流れとの相互干渉、c) 植生群内における流れの乱れ強度の増加等が考えられる。一方向流中に設置された円柱群中の1本円柱の抗力係数 C_D は、円柱の設置密度の増加に伴い大きくなる結果が報告されている⁵⁾。

波周期 T で変動する F_x の振動片幅振幅の平均値をゼロアップクロス法で求めた。岸方向への平均片幅振幅値を $F_{x\max}$ 、沖方向への平均片幅振幅値を $F_{x\min}$ とする。全振幅の平均値を $F_{x\text{amp}} (= F_{x\max} - F_{x\min})$ とする。これら振幅値の波高 H_i に対する変化特性の一例として水深 $d=70\text{cm}$ 、周期 $T=2.02\text{s}$ の結果を図-5に示す。単独設置の場合は、 $H_i=12\text{cm}$ 以上になると沖方向への戻り流れ(質量輸送速度)が明確になる結果、単独植生(植生単体)の $F_{x\max}$ は植生群の $F_{x\max}$ より顕著に減少し、また、単独植生の $F_{x\min}$ の絶対値は植生群の $F_{x\min}$ の絶対値より若干増加している。単独植生の $F_{x\text{amp}}$ は植生群の場合より若干減少している。

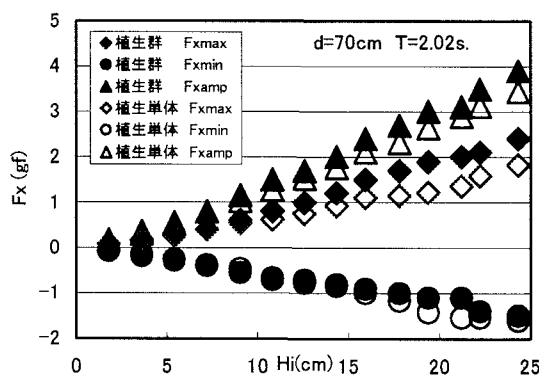


図-5 植生に作用する波力 F_x と波高 H_i の関係

(2) 模型植生の揺動特性

模型植生の揺動と波の水位変化 η をビデオ画像を用いて解析した。単独および植生群中に設置された模型植生1株の波の1周期内での揺動形態変化を図-6に示す。植生は、水位 η がゼロアップする位相で最も沖側に、水位 η がゼロダウンする位相で最も岸側に傾倒している。また、岸・沖方向それぞれの最大移動量は、顕著に異なっている。従って、これらの移動形態は、金澤ら⁶⁾の分類法による「非対称」に属する。

単独設置の場合の揺動は、全般的に沖方向に偏っている。これは、水深下方部に波の進行方向と逆(沖方向)の質量輸送が生じている結果に起因するものと考えられる。レーザー・ドップラー流速計を用いた波の水平

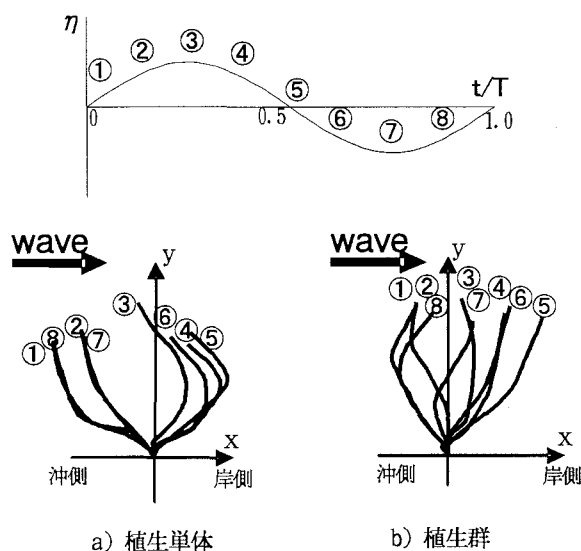


図-6 模型植生の揺動特性

水粒子速度計測より波の質量輸送速度の水深方向分布を調べた結果、本波浪条件下(水深 $d=70\text{cm}$ 、周期 $T=2.02\text{s}$ 、 $H_i=15.6\text{cm}$)では、単独設置の場合には、水深 d の中央付近から底面近傍にかけて沖方向に約 5cm/s の質量輸送速度が生じていた。

植生群中に設置された模型植生の揺動は、全般的にやや岸方向に偏っている。これは、植生群により沖方向への質量輸送が阻害された結果だと思われる。

本模型植生群を水深 $d=40\text{cm}$ 、 $T=1.6\text{s}$ 、 $H_i=13.4\text{cm}$ の波浪場に設置した場合の模型植生群内・外における u 、 v の質量輸送速度 U_{mean} 、 V_{mean} の水深方向分布を図-7に示す。本模型植生の高さは揺動の結果、約 $20\text{cm} \sim 30\text{cm}$ と変動している。群内の計測位置は力計測用植生設置点の近傍、群外の計測位置はその真横 25cm の位置である。植生群外においては、底面付近から $y=15\text{cm}$ の領域で約 5cm/s の質量輸送速度が沖方向に生じている。一方、植生群内にお

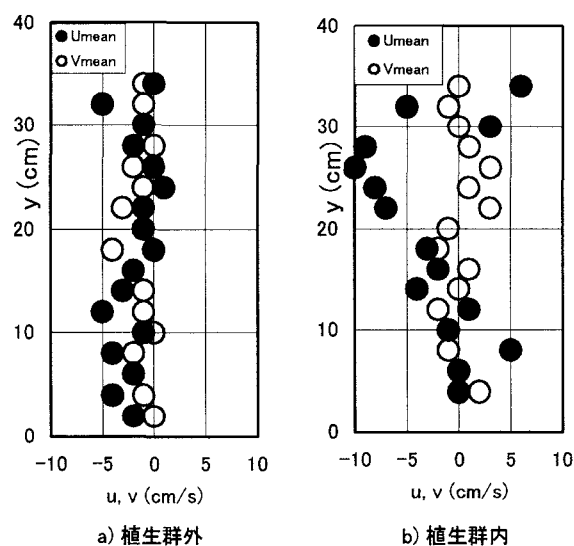


図-7 質量輸送速度の水深方向分布

いては沖方向への質量輸送速度は消滅し岸方向への質量輸送速度が若干生じ、植生の上部には質量輸送速度約10cm/sの強い沖方向への戻り流れが生じている。田村・灘岡⁷⁾は、レーザー・ドップラー流速計測を行い、2次元造波水槽内の長さ方向一区間の全水槽幅に設置された可撓性の藻場模型キャノピーの上部境界付近では波の進行方向とは逆向きの質量輸送流れが、一方、自由表面付近や藻場キャノピー内においては波の進行方向への弱い質量輸送流れが生じている現象を報告している。

(3) 模型植生に作用する波力によるエネルギー損失

単独設置した模型植生1株に静水深 $d=70\text{cm}$ 、 $T=2.02\text{s}$ の波が作用した場合に失われる単位時間当たりの波の損失エネルギー EL_x 、 EL_y 、並びに $EL_t = EL_x + EL_y$ の波高 H_i に対する変化を図-8に示す。図中には、 EL_t の H_i に対する近似式($EL_t = \alpha H_i^\beta$)を記入している。 EL_t と H_i の単位には、 gfc/s と cm を使用している。模型葉部の形状が、波に対して変形しないと仮定すると、 EL_t は H_i の3乗($\beta=3$)に比例すると考えられるが、揺動や葉部の形状変化が生ずる結果、 EL_t は H_i の約2.4乗($\beta=2.37$)に比例している。

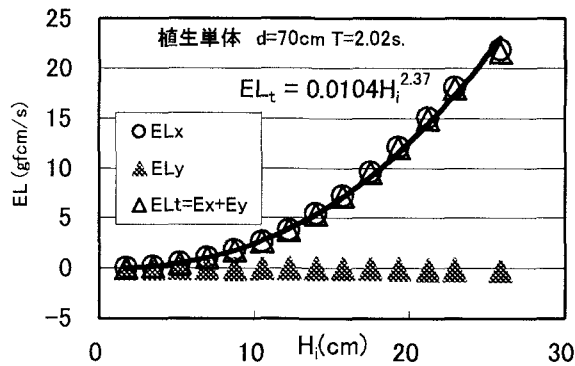


図-8 単独模型植生による損失エネルギーと波高の関係

静水深 $d=70\text{cm}$ の波動場に単独で設置された模型植生1株による EL_t の波高 H_i に対する変化特性を周期 T をパラメーターとして図-9に示す。近似式($EL_t = \alpha H_i^\beta$)中の α および β は、周期 T の関数となっている。

$x=0\text{cm}$ 、 $y=20\text{cm}$ の位置における水粒子速度 u の波周期内での最大値を代表波流速 U_{pm} とする。 EL_t の U_{pm} に対する変化特性を周期 T をパラメーターとして図-10に示す。図中には、 EL_t の U_{pm} に対する近似式($EL_t = \alpha_u U_{pm}^{\beta_u}$)を記入している。 EL_t と U_{pm} の単位には、 gfc/s と cm/s を使用している。式中の α_u および β_u の周期 T に対する変化は小さい。

単独および植生群中に設置された模型植生1株による損失エネルギー近似式中の係数 α_u および β_u の、周期 T の関数である水深波長比 d/L に対する変化特性を、静水深 d をパラメーターとして図-11に示す。 α_u および β_u の d/L に対する変動は小さい。植生群の α_u は、単独植生の α_u に比べて若干大きくなっている。この原因としては、植生

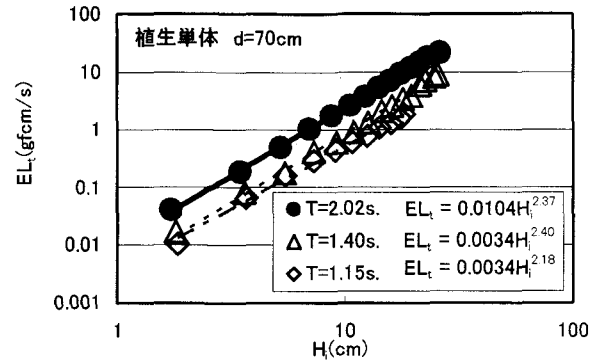


図-9 損失エネルギー EL_t と波高 H_i の関係

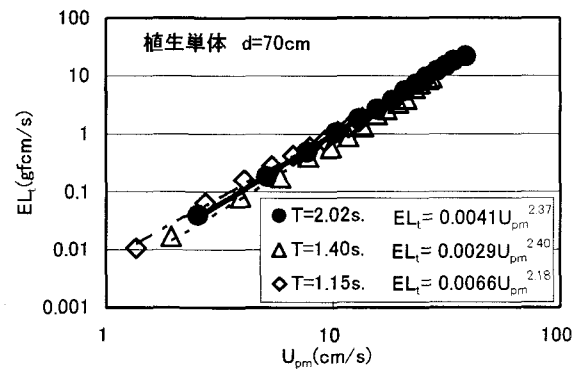


図-10 損失エネルギー EL_t と代表流速 U_{pm} の関係

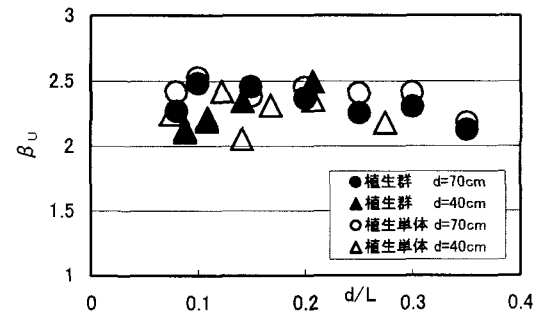
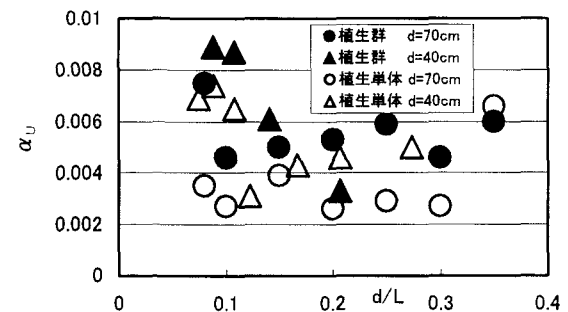


図-11 模型植生の α_u および β_u の d/L に対する変化特性

群中の F_x は単独設置した場合の F_{ox} に比べて大きくなっていることが挙げられる(図-5 参照)。

(4) 単独円柱に作用する波力によるエネルギー損失

模型植生の場合と同様な実験・解析を単独に設置された1本のステンレス円柱に対して行い、上記の α_u および β_u の d/L に対する変化特性を、静水深 d をパラメータとして調べた結果を図-12に示す。模型植生の場合と同様に α_u および β_u の d/L に対する変動は小さい。

本ステンレス円柱1本の投影面積は模型植生1株の約1/3であるが、揺動しない本円柱の抗力係数は、揺動する模型植生の場合に比べて大きくなっていると考えられる。その結果、円柱群の α_u は模型植生群の場合と同程度の値を示している。一方、 β_u は模型植生の場合より増加し理論値の3に近い値を示している。単独円柱からの反射は小さいと考えられるので、 β_u の増加は、円柱後流渦強度の増加による EL_t の増加を意味する。

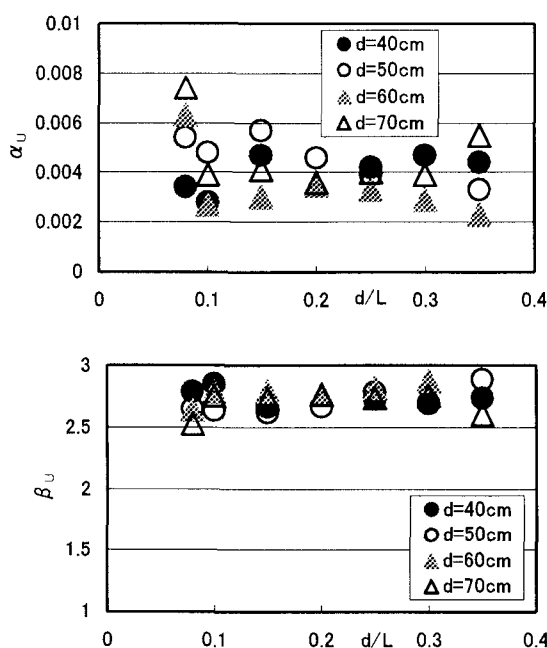


図-12 単独円柱の α_u および β_u の d/L に対する変化特性

5. おわりに

本研究で得られた主要な結果を要約すると以下のようである。

- 1) 植生群中に設置した模型植生1株に作用する波力 F_x は、a)質量輸送流れ(戻り流れ)の影響、b)揺動を伴う植生群と周辺流れとの相互干渉、c)植生群内における流れの乱れ強度の増加等により、単独に設置した場合に比べて若干大きくなることが分った。
- 2) 本模型植生の揺動形態は「非対称」であり、岸・沖方向の最大移動量は顕著に異なっている。この現象は、質量輸送流れに起因していることを指摘した。
- 3) 模型植生1株に作用する波力により失われる単位時間当たりの波の損失エネルギー EL_t の評価式としては、波高 H_t にの代わりに代表水粒子速度 U_{pm} を用いた評価式

$EL_t = \alpha_u U_{pm}^{\beta_u}$ が有益であることを明らかにした。その結果、 α_u および β_u の水深波長比 d/L に対する変動は小さいことが分かった。

- 4) 損失エネルギー EL_t の評価式中の係数 β_u は、揺動している本模型植生の場合には $\beta_u=2\sim2.5$ 、揺動が生じないステンレス円柱の場合には $\beta_u=2.5\sim3$ となることを確認した。

本模型植生の α 値および β 値は、現地海岸に生育しているほぼ同サイズのコアマモに対して得られた α 値および β 値との一致は良好であった³⁾。従って、一例として本模型植生とほぼ同サイズのコアマモ群が2000~8000株/㎡の密度で植生幅 $B=60$ mで生育している場に、水深 $d=60$ cm、周期 $T=2$ s、波高 $H=20$ cmの波が入射した場合の波の透過率 K_t を、波の透過率評価式(7)式を用いて評価すると $K_t=0.7\sim0.25$ となる³⁾。

本解析法で得られる α 値、 β 値および α_u 値、 β_u 値は、植生の種類や生育状況および波浪条件(水深 d 、周期 T 、波高 H)等の関数と考えられる。これら各変数に対する α 値、 β 値および α_u 値、 β_u 値の変化特性を今後調べる必要がある。

謝辞：本研究は、日本大学工学部平成15年度文部科学省学術フロンティア事業の援助を受けた。また、本学学生の安部康洋、服部健一君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宇多高明 編：水辺環境の保全と地形学，日本地形学連合編地形工学セミナー2，古今書院，186p，1998。
- 2) 島谷幸宏・細見正明・中村圭吾 編：エコテクノロジーによる河川・湖沼の水質浄化－持続的な水環境の保全と再生－，ソフトサイエンス社，325p，2003。
- 3) 林建二郎・高橋 祐・重村利幸：湖岸や海岸に生育している水辺植生に作用する波力と消波機能に関する研究，海岸工学論文集，第49巻(2)，pp.721-725，2001。
- 4) Dalrymple R.A., J. Kirby and P. Hwang : Wave diffraction due to area of energy dissipation, Jour. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 110, No.1, pp.67-79, 1984.
- 5) 林建二郎・藤井優宏・重村利幸・萩原運弘：粗な樹林帯密度で配置された円柱群に作用する波力と消波機能に関する研究，海岸工学論文集，第47巻(2)，pp.766-770，2000。
- 6) 金澤 剛・芳田利春・川崎和俊：波高減衰および地形変化抑制効果を期待した人工海草設置法に関する研究，海岸工学論文集，第49巻(2)，pp.1316-1320，2002。
- 7) 田村 仁・灘岡和夫：可撓性着目した藻場キャノピー周辺の流動・乱流構造に関する実験的研究，海岸工学論文集，海岸工学論文集，第49巻(1)，pp.341-345，2002。

(2003. 9. 30受付)