

水辺植生群に作用する波力特性と消波機能に関する研究

林 建二郎*・今 野 政 則**

海岸や湖岸に生育している水辺植生に作用する流体力とその消波機能特性を把握することは、水辺植生の保持・育成法の検討や、水辺植生が持つ環境再生機能および護岸浸食防止機能等の評価において重要である。植生群中の植生 1 本に作用する波力に及ぼす周辺植生の干渉効果及び植生の波に対する揺動特性を沈水植物（アマモ）模型と抽水植物模型を用いて調べた。現地に生育しているアマモの通常の植生密度においては、植生間の干渉効果は小さいこと明らかにした。植生の空中における固有振動周期 T_{na} より十分長い周期の波に対しては、非振動時と同程度の消波効果を示すが、 T_{na} に近い周期を有する波に対しては消波効率が著しく低下することを明らかにした。

1. はじめに

水辺植生に作用する流体力とその消波機能特性を把握することは、水辺植生の保持・育成法の検討や水辺植生が有する護岸浸食防止機能等の評価において重要である。著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等の沈水植物、アサザ等の浮葉植物に作用する波力とその消波機能特性を現地採集した実植物やその模型等を用いた室内実験により検討してきた(林ら, 2002)。その中には、造波水槽内に単独で設置した植生 1 本(株)に作用する流体力を評価し、その線形的な重ね合わせを行い植生群が有する消波機能及び浸食防止機能等の評価を行ってきた。しかし、実際の植生は群落で生育している。群落中では、植生相互の干渉効果により植生周辺の流れ場や圧力場が変化し、植生 1 本に作用する流体力は、単独で生育している場合と異なる可能性が考えられる。

本研究では、植生群中の植生 1 本に作用する波力に及ぼす周辺植生の干渉効果及び植生の波に対する揺動特性を沈水植物のアマモ模型および抽水植物のヨシ模型を用いて調べ、これら植生群が有する消波機能を評価した。

2. 実験装置及び方法

実験装置の概略を図一 1 に示す。実験には、長さ 40 m、幅 0.8 m、高さ 1 m 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。実アマモと類似の揺動特性を示す発泡部材 3 枚 1 株を沈水植物模型として使用した。上端に 1 N の重りを付けた比較的剛性の高いアルミ平板を抽水植物模型とした。

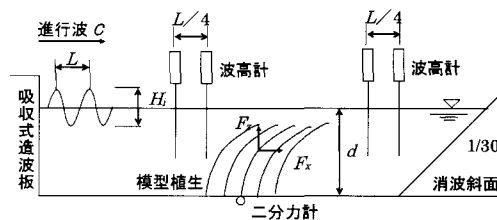
単独に設置したアマモ模型(葉幅 $b=1$ cm, 葉長 $l=50$ cm)に作用する波の進行方向波力 F_{xt} と鉛直方向波力 F_{zt} を水槽床下部に設置した小型 2 分力計(三計エンジニアリング(株)、容量 5 N)を用いて計測した(図一 2

参照)。比較として、アマモ模型を図一 2 に示すように間隔 $s=10$ cm の正三角形で千鳥配置し、植生群中の模型植生 1 株に作用する波力を計測した。2 分力計は保護ケースで覆われているため、水路床と 2 分力計との間隙を通る流速は小さい。模型植生群の密生度(=直立している模型植生の波進行方向の全投影面積/模型植生群が占める体積)は $a=3 \times 2b/(3^{1/2}s^2)=0.0345/\text{cm}$ であり、現地のアマモの密生度の平均値に近い値である。

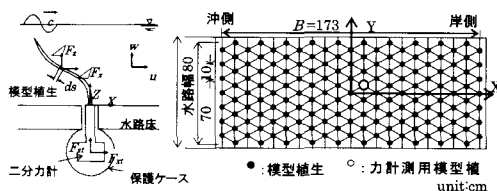
本 2 分力計で検知した F_{xt} , F_{zt} には、波の進行方向波力 F_x と鉛直方向波力 F_z の他に植生の揺動による慣性力(=質量×加速度) F_{xt} , F_{zt} が含まれるが、使用した模型植生の質量は 2.19 g と小さいので F_{xt} , F_{zt} は無視でき、 F_x , F_z は本 2 分力計で検知した F_{xt} , F_{zt} で評価できる。

植生群内・外での流れ場の相違を調べるために、流れの可視化実験と 2 成分レーザー流速計(Dantec 社製)による波の水粒子速度計測を行った。ビデオ撮影を行い模型植生の揺動特性を調べた。

容量線式波高計を力計測用植生の真横、植生帯の前後方 1 m および $1+L/4$ m の位置(L :波長)に設置し、植



図一 1 実験装置の概略



図一 2 2 分力計設置図(左)および沈水植物模型配置図(右)

* 正会員 Ph. D. 防衛大学校助教授 建設環境工学科

** 学生会員 防衛大学校理工学研究科 地球環境科学専攻

表-1 模型植生の諸元

<沈水植物模型 (古川電工(株)) 1株>	
材質:	発泡部材 (比重=0.146), 乾燥重量=2.16 gf
葉の枚数:	3枚, 葉長 $l=50$ cm, 葉幅 $b=1$ cm, 葉厚 $t=1$ cm
<抽水植物模型 1本>	
材質:	アルミ板 (比重=2.55), 剛性=0.84 Nm ²
葉長 l :	80 cm, 葉幅 $b=2.5$ cm, 葉厚 $t=0.2$ cm
空中固有振動数 f_{na} :	0.85 Hz, 空中減衰定数 $h_a=0.04$
静水中固有振動数 f_{nw} :	0.62 Hz, 静水中減衰定数 $h_w=0.21$

生帯の入射波高 H_i , 透過波高 H_t を入射分分離法を用いて求め, 植生帯を透過する波の透過率 K_t を評価した。

抽水植物模型を水路床下面の6分力計に片持ち梁形式で接続し, 波の進行方向波力 F_{xx} を計測した。模型上端の振動変位量 X を光学式変位計を用いて計測した。比較のために模型の上・下端を3分力計と6分力計に両端固定し, 振動しない状態の本模型に作用する F_{xx} を測定した。

静水深は $d=60, 70$ cm とし, 使用した規則波の周期は, $T=0.8\sim 3.0$ s, 波高は $H=2\sim 25$ cm とした。

3. 植生帯を透過する波の透過率評価式

(1) 植生による波のエネルギー損失評価式

植生の微小部分長 ds に作用する波の進行方向 (X 方向), 鉛直方向 (Z 方向) の波力を $\Delta F_x(x, z, t)$, $\Delta F_z(x, z, t)$ とする (図-2 参照)。これら波力による単位時間当たりの波のエネルギー損失 EL_x , EL_z は, 植生の揺動量が波の波長 L に比べて小さく, また, 浅海波を対象とすると, 波の水粒子速度の水平方向成分 $u(x, z, t)$ の植生軸上での場所 (x, z) 的变化は小さいので, EL_x , EL_z は (1), (2) 式で表される。

$$EL_x = \frac{1}{T} \int_0^T u(x_p, z_p, t) \left\{ \int_0^S \Delta F_x(x, z, t) ds \right\} dt \\ = \frac{1}{T} \int_0^T u(x_p, z_p, t) F_x(t) dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$EL_z = \frac{1}{T} \int_0^T w(x_p, z_p, t) \left\{ \int_0^S \Delta F_z(x, z, t) ds \right\} dt \\ = \frac{1}{T} \int_0^T w(x_p, z_p, t) F_z(t) dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中, $u(x_p, z_p, t)$, $w(x_p, z_p, t)$ は, 植生軸上における代表位置 (x_p, z_p) での主流速度 (= 植生の影響を受けない波の水粒子速度) である。 $F_x(t)$, $F_z(t)$ は, 植生に作用する全波力の x, z 方向成分であり, 2分力計で検知された $F_{xt}(t)$, $F_{zt}(t)$ で近似評価できる (林ら, 2002)。

(2) 植生帯を透過する波の透過率評価式

密度 a が十分小さい場合, 植生帯からの波の反射率は $K_r < 0.1$ と非常に小さく, 反射波のエネルギーは十分に小さい。従って植生帯を透過する透過波のエネルギーは, 植生帯への入射波が有する波エネルギーから, 植生帯内で生じる波の損失エネルギーを引いたものに等しい

とみなせる。この損失エネルギーは, 植生群内の各植生からの後流渦に起因し, 各植生に作用する波力による仕事量に等しい (Dalrymple ら, 1984; 林ら, 2002)。

単位床面積あたり N 株の植生を有する植生帯内における波進行方向の微小区間 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 (3) 式が得られる。式中, ρ は水の密度, g は重力加速度, C_g は波の群速度である。

$$\frac{1}{8} \rho g (H_{ip}^2 - H_{tp}^2) C_g = N \cdot (EL_x + EL_z) dx \quad \dots\dots (3)$$

区間 dx での透過率 K_{tp} は (4) 式で評価される

$$K_{tp} = \frac{H_{tp}}{H_{ip}} = \sqrt{1 - \frac{8N \cdot (EL_x + EL_z) dx}{\rho g C_g}} \quad \dots\dots (4)$$

(1), (2) 式で評価される EL_x , EL_z を (3), (4) 式に代入し算定された微小区間 dx の透過波高 H_{tp} を, 次の微小区間 dx への入射波高 H_{ip} とし, 次の微小区間 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。但し, EL_x , EL_z を入射波高 H_{ip} の3次式で評価すると, (3) 式の解析解として植生帯を透過した波の透過率 $K_t (= H_t/H_i)$ が得られる (浅野ら, 1991; 中野ら, 1994; Hayaishi ら, 2004)。

4. 結果及び考察

(1) 沈水植物模型の揺動および流れ場の特性

模型植生の揺動形態を図-3 に示す。これらの揺動形態は, 金澤ら (2002) の指摘と同様に, 波高 H_i が小さい場合は図中 (a) のように沖方向と岸方向にほぼ対称に揺動するが, 波高が大きくなると図中 (b) のように非対称に揺動している。これは単独で設置 (単独植生) と植生群中に設置 (群植生) のどちらにも言える特徴であった。

単独植生と群植生の揺動量片振幅値 PX_{amp} の波高 H_i に対する変化特性を, d/L をパラメーターとして図-4 に示す。単独植生と群植生の揺動量には大きな差が見られない。作用波力により植生の揺動が生ずるので, 揺動量に大きな差がないということは, 単独植生と群植生の作用波力には大きな違いはないと推測できる。

$d=70$ cm, $T=2.02$ s, $H_i=17.4$ cm の波動場での植生群内の代表位置 ($X=4.8$ cm, $Y=0, 2.8, 4.7$ cm) および植生が無い場合の代表位置 ($X=4.8$ cm, $Y=0$ cm) における, u, w のオイラー平均流速 $\bar{u}, \bar{w}$ の鉛直方向分布を図-5 に示す。 X, Y の座標は図-2 に示す通りであり $Z=0$ cm が水路床である。植生がない場合は, 沖方向に約 3 cm/s の $\bar{u}$ が鉛直方向に一樣に生じている。

植生群内の場合, 植生部の真後ろ ($X=4.3$ cm, $Y=0$ cm) では, 水路床近傍 ($Z \leq 6$ cm) で沖方向に約 5 cm/

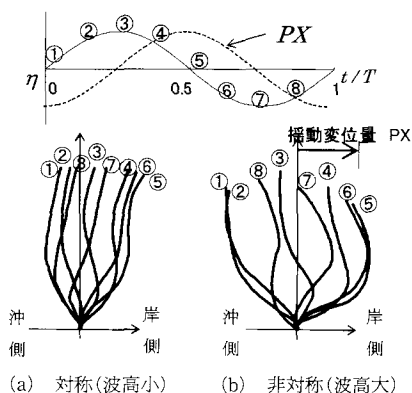


図-3 沈水植物模型の揺動形態

s, 水深中央部付近 ($22 \text{ cm} \leq Z \leq 36 \text{ cm}$) で岸方向に約 3 cm/s の $\bar{u}$ が鉛直方向にほぼ一様に生じている。 $X=4.3 \text{ cm}$, $Y=4.7 \text{ cm}$ の位置では、水路床付近 ($Z \leq 6 \text{ cm}$) で岸方向に約 $3 \sim 6 \text{ cm/s}$, 水深中央部付近 ($18 \text{ cm} \leq Z \leq 44 \text{ cm}$) で沖方向に約 $5 \sim 8 \text{ cm/s}$ の $\bar{u}$ が生じている。このことから、植生群内においては若干ではあるが流れ場が場所的に複雑に変動していることが確認できる。また、 $X=4.3 \text{ cm}$, $Y=0, 2.8, 4.7 \text{ cm}$ のどの位置においても、植生が存在しない $Z \geq 50 \text{ cm}$ では植生がない場合とほぼ同じ大きさの質量輸送速度 $\bar{u}$ が沖方向に生じていることが確認できる。これら質量輸送速度は、作用波力への影響を少ないが、植生群内における土砂の移動現象の解明に重要である。田村・灘岡 (2002) は、2次元造波水槽内の長さ方向一区間の全水槽幅に水没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計測結果を報告している。

(2) 沈水植物模型に作用する波力特性

単独設置の沈水植物模型に作用する波力の時間変化記録例を図-6に示す。 η は本模型植生位置での水位変化、 u , w は模型植生から 15 cm 真横の水路床から 27 cm 上方点における水平および鉛直方向水粒子速度である。 F_x , F_z は本模型植生に作用する波の進行方向および鉛直方向波力である。 u と F_x はほぼ同位相である。 F_z は全体的に負値であり、植生は下方向に押さえられている。

F_z の片振幅値を F_{zamp} とする。 F_{zamp} の H_i に対する変化を、 d/L をパラメーターとして図-7に示す。 d/L の減少に伴い u の水深方向への減少が小さくなるため F_{zamp} は増加している。単独植生と群植生に作用する波力の大きさには顕著な差は認められない。従って、本実験のように密度 a が $0.0345/\text{cm}$ と小さい場合は植生相互の流れの干渉効果は小さく、植生群中の植生1株と単独植生1株に作用する波力はほぼ同じであると言える。

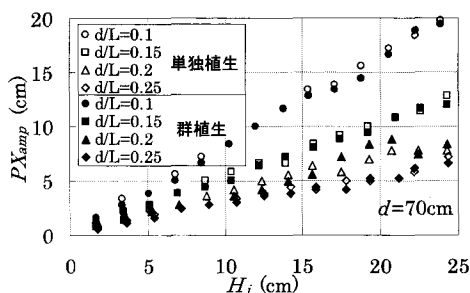


図-4 沈水植物模型の揺動量特性

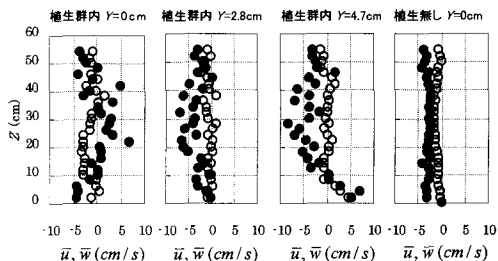
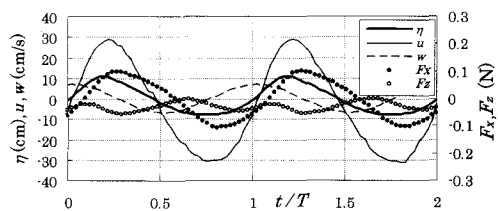
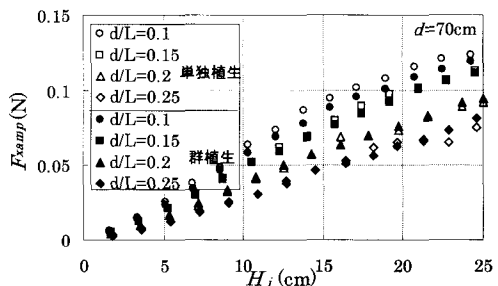
図-5 オイラー平均流速の鉛直分布 (●: $\bar{u}$, ○: $\bar{w}$)図-6 波力の記録例 ($d=70 \text{ cm}$, $T=2.83 \text{ s}$, $H_i=17 \text{ cm}$)

図-7 沈水植物模型の波力特性

(3) 沈水植物模型の作用波力によるエネルギー損失

静水深 $d=70 \text{ cm}$ の沈水植物模型1株で失われる単位時間当たりの波の損失エネルギー $EL_t (=EL_x + EL_z)$ の H_i に対する変化を d/L をパラメーターとして図-8に示す。図中には EL_t の H_i に対する近似式 ($EL_t = aH_i^3$) の一例 (単独植生 $d/L=0.1$ の場合) を記入している。どの d/L においても単独植生と群植生の EL_t にはほとんど差が認められない。これは単独植生と群植生に作用す

る波力にほとんど差がないためである。従って、植生帯内の波の全損失エネルギーは、単独植生1株の EL_t と単位面積当たりの植生本数 N で評価できる。

単独植生および群植生の損失エネルギーに対する近似式($EL_t = \alpha H_i^\beta$)中の係数 α 、 β の d/L に対する変化特性を図-9に示す。 EL_t 、 H_i の単位は W 、 m である。 α 値は d/L の増加にともない減少している。 β 値は d/L が変化してもほぼ一定($\beta=2.1$)である。比較として $d/L=0.1$ における両端固定した模型植生の α 、 β 値も併せて示す(×印)。本植生模型の揺動時の β 値は約2.1であり、揺動しない両端固定時の β 値は約2.8である。

本植生模型が揺動せず投影面積も変化しない場合には、形状抗力が支配的となり作用波力 F_{xamp} は波高 H_i の2乗に比例し、 EL_t は H_i の3乗に比例する。揺動時における β 値=2.1の原因としては、水粒子速度 u と揺動植生との相対速度の減少による形状抗力の減少と揺動による u に対する投影面積の減少等が考えられる。

(4) 沈水植物模型帯が有する消波効果の評価

$d=70\text{ cm}$ において植生帯長さ $B=173\text{ cm}$ を有する沈水植物模型帯を透過した波の透過率 K_t の入射波高 H_i に対する変化特性を d/L をパラメーターとして図-10に●印で示す。図中の実線は(4)式を用いた計算式である。(4)式中の $EL_t(=EL_x+EL_z)$ には近似式($EL_t = \alpha H_i^\beta$)を用いた。 α と β の値には、図-9に示す本実験で得られた評価値を用いた。 K_t の実験値は、計算値と概ね一致している。従って、3章で述べた沈水植生に対する損失エネルギーの評価法は適当と考えられる。

比較として、 $d/L=0.1$ における、非揺動時(両端固定)の透過率 K_t の計算値をあわせて示す。揺動時の K_t は約0.97~0.98程度である。非揺動時は、入射波高の増加に伴ない K_t は大きく減少している。非揺動時は、揺動時と比べて、波のエネルギーを大きく減衰させることがわかる。

(5) 抽水植物模型に作用する波力の評価

波高 $H=10\text{ cm}$ の場合における(a)アルミ平板模型上端の振動変位量 X 、(b)水位変化 η と X の位相差 φ の f_w/f_{na} に対する変化特性を図-11(a)、(b)に示す。 X は $f_w/f_{na}=0.7$ ($f_w/f_{nw}=1$)付近で最大値を示す。位相差 φ は、 f_w/f_{na} の増加に伴い大きくなり $f_w/f_{na}=1$ で φ =約0.25(90度)となっている。線形振動方程式で近似評価すると、 $f_w/f_{na}=1$ で $\varphi=0.25$ (90度)となる。

波高 $H=10\text{ cm}$ の場合におけるアルミ板に作用する波力 F_x の f_w/f_{na} に対する変化特性を図-11(c)に示す。図中には、上・下を両端固定された非振動時のアルミ板に作用する波の進行方向波力 F_{xr} を×印で示す。水路床下面の6分力計に片持ち梁形式で固定された振動時のアルミ板に作用する進行方向波力 F_{xv} を○印で示す。 F_{xv}

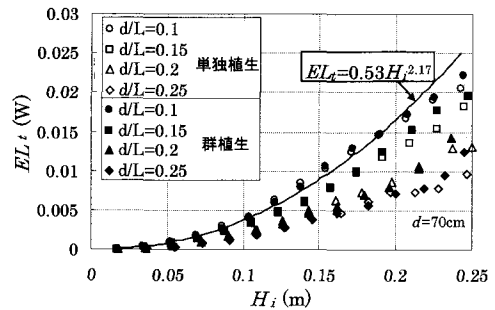


図-8 沈水植物模型の損失エネルギー特性

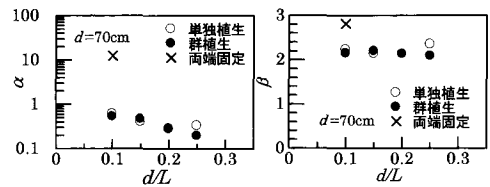


図-9 沈水植物模型の α と β の d/L に対する変化特性

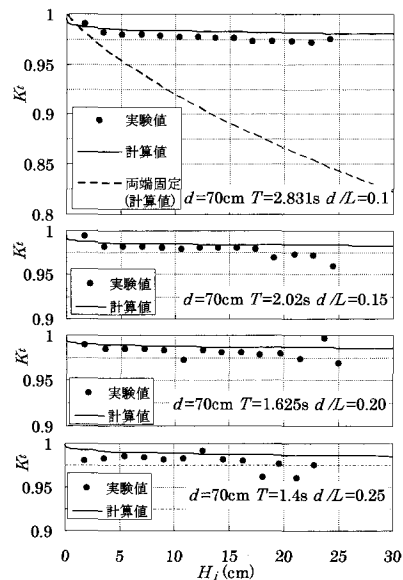


図-10 沈水植物模型の消波特性 ($B=173\text{ cm}$)

には、アルミ板の振動に伴い生じる慣性力(=アルミ板の質量×振動加速度 d^2X/dt^2)が含まれている。 F_{xv} よりこの慣性力を除いた波力 F_{xr} (=真の波力)を●印で示す。波力 F_{xv} は、振動している植生の支持力等の評価に重要である。波力 F_{xr} (=真の波力)は、振動する植生が有する波エネルギー減衰効果の評価において重要である。 F_{xr} に比べて F_{xv} および F_{xr} (真の波力)は減少している。これは、振動時においては、アルミ板に対する波水粒子の相対速度(= $u-dX/dt$)が減少するためと考えられる。

非振動時のアルミ板に作用する波力 F_{xr} による損失エ

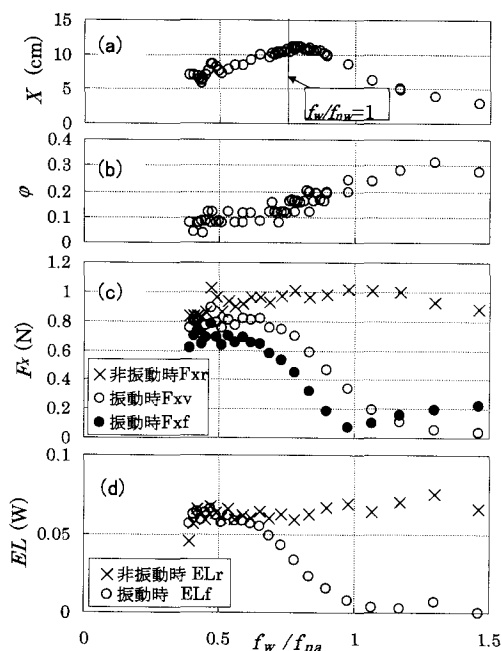


図-11 抽水植物模型の振動と損失エネルギー特性 ($d=60$ cm)

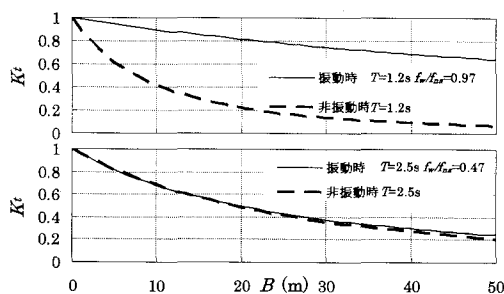


図-12 抽水植物模型の消波特性 ($d=60$ cm)

エネルギーを EL_r 、振動時のアルミ板に作用する波力 F_{xf} による損失エネルギーを EL_f とする。 $H=10$ cm の場合における EL_r と EL_f の f_w/f_{na} に対する変化特性を図-11 (d) に示す。 $f_w/f_{na} < 0.7$ では、 EL_r と EL_f の差は小さい。 $f_w/f_{na} > 0.7$ では、 f_w/f_{na} の増加に伴い EL_f は急激に減少し $f_w/f_{na}=1$ 付近で極めて小さな値となる。

本平板が水深 $d=60$ cm の水域に単位面積当たり $N=18$ 本設置された場合、 $H=20$ cm で $T=1.2$ s と $T=2.5$ s の波が透過した場合の透過率 K_t の植生奥行き長さ B に対する変化を図-12 に示す。 平板の空中固有周期 $T_{na}=1.17$ s 近傍の波周期 $T=1.2$ s の場合、 平板振動時

の K_t は非振動時よりも大きい。 一方、 T_{na} よりも十分長い波周期 $T=2.5$ s の場合、 平板振動時は非振動時と同程度の消波効果を有している。

5. おわりに

本研究の結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 本実験のように密度 a が $0.0345/\text{cm}$ と小さい場合は植生間の干渉効果が少ないため、 単独植生と群植生の作用波力に差がないことが分かった。
- (2) 沈水植物の波力による損失エネルギーの本評価法の妥当性を、 沈水植物が有する消波効果の実験結果及び解析結果から明らかにした。
- (3) 抽水植生模型として使用した平板に作用する波力を、 その振動特性を考慮し適切に評価した。 その結果、 平板の空中固有周期 T_{na} 近傍の周期の波に対しては、 振動する平板の消波効果は振動しない平板より小さいが、 T_{na} より十分に長い周期の波に対しては、 振動する平板は振動しない場合と同程度の消波効果を有することが分かった。

最後に、 実験およびデータ解析に熱心な協力を頂いた本校の服部健一学生に厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 浅野敏之・出口 浩・間瀬 肇・小林信久 (1991): 動揺する海藻群落上を伝搬する波の特性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 26-30.
- 金澤 剛・芳田利春・川崎和俊 (2002): 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, pp. 1316-1320.
- 田村 仁・瀬岡和夫 (2002): 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, 第 49 巻, pp. 341-345.
- 中野 晋・三島豊秋・鈴木直人・三井 宏 (1994): ゴムフラップ消波堤による波高減衰, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 631-635.
- 林建二郎・藤井優宏・重村利幸・萩原運弘 (2001): 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 48 巻, pp. 891-895.
- 林建二郎・高橋 祐・重村利幸 (2002): 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の評価法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 766-770.
- Dalrymple, R. A., J. Kirby and P. Hwang (1984): Wave diffraction due to area of energy dissipation, Jour. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 110, No.1, pp. 67-79.
- Hayashi, K., Y. Kubota and T. Shigemur (2004): Wave damping by an array of circular cylinder and agroup of model plants, Proceedings of the 2nd International Conference of Asian and Pacific Coast 2003, World Science.