

水辺植生模型に作用する波力について

WAVE FORCES ACTING ON MODEL VEGETATION IN WATER

林建二郎¹・上原正一²・重村利幸³

Kenjiro HAYASHI, Masahiro Fujii and Tosiya 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 陸上自衛隊帯広 (〒086-8639 帯広市南町7-31)

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 model plants 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. The influence of the ratio of plant height and water depth to the wave forces were evaluated. The drag and inertia coefficients of Morrison equation applied to the analysis of in line forces were obtained. The damping of waves due to the crowd of model plants are also evaluated.

Key Words : Vegetation in water, Wave forces, Morrison equation, Wave energy dissipation, Transmission coefficient

1. はじめに

環境問題に対する対応が重要性を増す中で、河口や湖岸におけるヨシ原等の水辺植生（抽水、浮葉、沈水植物）が持つ侵食防止機能も再認識され、これら水辺植生の積極的な保持・利用に対する要求が高まってきた。一方、新たな海岸保全工法の一つとして人工海藻を用いた波浪・漂砂制御技術の開発や研究も多く行われ、海藻の持つ波浪制御効果や漂砂制御効果も明らかにされている^{1), 2), 3)}。水産分野では、魚貝類の生息場のための藻場の形成条件⁴⁾や、生息環境改善工法に用いられた潜堤被覆材の所要重量設計における付着海藻に作用する波力の影響を調べる研究⁵⁾が行われている。

水辺植生域における波や流れの減衰機構の解明⁶⁾および水辺植生の生育保持や維持・管理法の検討においては、水辺植生に作用する波力の評価は重要である。しかし、植生の形状や構造が複雑なため、植生に作用する波力の特性についてはまだ不明な点が多い。

本研究は、波浪に対する水辺植生群の耐波特性およびそれが有する波の反射・透過特性を明らかにすることを目的として、波動場に設置された模型植生群および浮葉植物の一種である実物のアサザに作用する波力特性を室内水理実験により調べたものである。模型植生群に作用する波力計測においては、前報⁷⁾で使用した波力計測法に対する検討と改良を加え、計測精度の確認を行った。

2. 実験装置および方法

実験には、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。ビニール製の市販の疑似植生模型を一株ずつ、図-1に示すようにベニヤ板製の水路床の一区間に千鳥配置で設置した。模型植生の一株は径1~2mmの48本のビニール線(比重=0.825)で構成され、その投影面の高さは $s \approx 22\text{cm}$ 、代表幅は $D=5\text{cm}$ である(図-2参照)。1辺の長さが8cmの正三角形で千鳥配置された植生群の設置間隔は、波の進行方向に6.9cm、横断方向に8cmである。

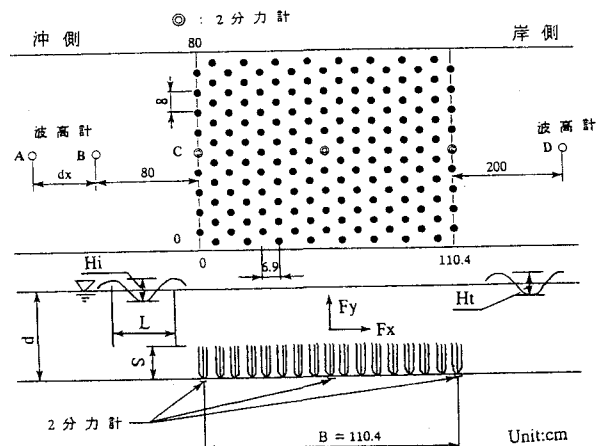


図-1 実験装置の概略

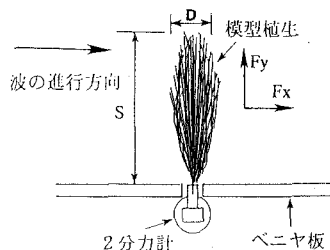


図-2 模型植生と2分力計

植生群の水路方向の長さは $B=110.4\text{cm}$ である。植生群（幅 $W=80\text{cm}$ ，高さ $s=22\text{cm}$ ，長さ $B=110.4\text{cm}$ ）の密度 $\lambda (=V/(W \times s \times B))$ ， V :植生の実質体積は 0.016 である。本模型植生は，葉の発達が見られない時季のヨシやシオクグ，コアマモ等の植生を模擬したものである。

植生群の最前列（沖側），中央列，最後列（岸側）の水路中央線上に設置された各模型植生の一株に作用する，波の進行方向流体力 F_x と鉛直方向の流体力（揚力） F_y を，ベニヤ板製水路床の下面に設けた小型2分力計（容量 100gf ）を用いて計測した（図-2参照）。既報⁷⁾の計測において懸念された，水路床部に設けた小孔（直径 6mm ）部を通じた水路床上下間での水の移動が計測波力値へ与える影響を調べるために，二分力計全体を密閉し小孔部での水の移動を無くした。

比較のために同水路床に模型植生の一株を単独に設置した場合の流体力も同様な波浪条件下で計測した。

模型植生群による波の反射率 $K_r (= \text{反射波高} H_r / \text{入射波高} H_i)$ と透過率 $K_t (= \text{透過波高} H_t / \text{入射波高} H_i)$ を計測するために，4本の波高計を植生群最前列より沖側 $(0.8+dx)\text{m}$ の位置Aと $(0.8)\text{m}$ の位置B，流体力計測用の模型植生の位置C，ならびに植生群最後列より岸側 2m の位置Dにそれぞれ設置した。水路の長さ方向に dx の間隔をもって沖側に設置した2台の波高計（A，B）の時系列記録より入射波高 H_i と反射波高 H_r を分離・推定し波の反射率 K_r を求めた。波高計Dの時系列記録より透過波の平均波高 H_t をゼロ・アップ・クロス法を用いて算定した。

実験水深は， $d=15\text{cm}$ ， 22cm ， 60cm の3種類とした。各水深 d において， $d/L=0.1$ ， 0.2 ， 0.3 を有する規則波を実験波として使用した。波形勾配 H/L の範囲は $0.005 \sim 0.10$ である。模型植生の高さ s と水深 d の比が $s/d=1.467$ および 1.0 となる $d=15\text{cm}$ と $d=22\text{cm}$ の場合は，沿岸域に生育しているヨシ等を対象とした場合である。

次に，浮葉植物の一例として，実物のアサザ1本を上記の波力計に取り付けて同様な波力計測を行った。本アサザは，霞が浦で6月に採取したものを野外の苗床で1週間育成したものである。水表面に浮いている葉（浮葉部）の縦方向長さは約 10cm ，横方向長さ約 8cm である。浮葉部から底面の力計までの茎部の径は $2 \sim 3\text{mm}$ ，長さは 68cm である。実験水深は， $d=60\text{cm}$ の1種類とした。

3. 結果および考察

3.1 模型植生に作用する波力特性

単独で設置された模型植生一株に作用する波力 F_x ， F_y とその設置点における波の水位変化 η の記録例を図-3のa)，b)に示す。

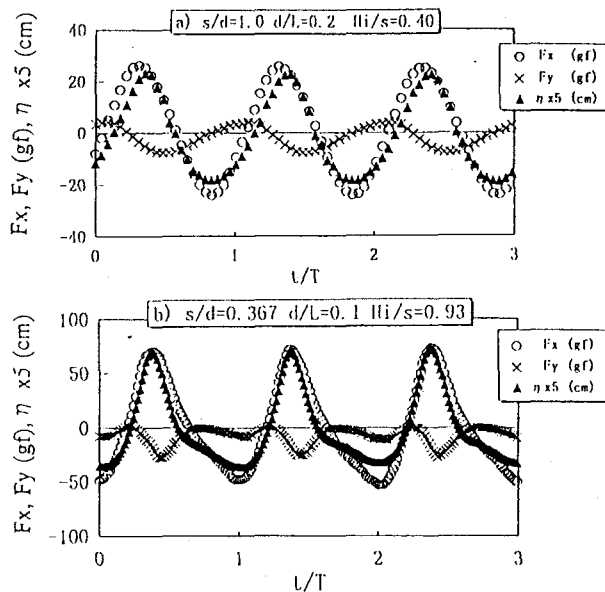


図-3 模型植生に作用する波力の記録例

a)は，植生高さ s が静水深 d と等しく $(s/d=1)$ ，水深波長比が $d/L=0.2$ の場合である。波の進行方向に作用する波力 F_x は水位 η とほぼ同位相で変化しているが，波の運動による水粒子の水平加速度成分 du/dt に伴う慣性力が加わる結果， F_x の位相は η より若干進んでいる。 F_x の+方向を波の進行方向とする。波動場においては，水粒子の鉛直速度 v および加速度成分 dv/dt も存在する結果，鉛直方向に作用する波力 F_y も同時に存在している。本作用波においては，鉛直方向の波の水粒子速度および加速度は，水平方向のそれらに比べて小さいので， F_y の大きさは F_x に比べて小さい。また， F_y は+方向（上方）よりも-方向（下方）に大きくなっている。

b)は，植生高さ s に比べて静水深 d が十分深い場合 $(s/d=0.367)$ である。 d/L も 0.1 と小さくなった結果，水粒子速度，加速度が鉛直方向成分は水平方向のそれらに比べてより小さくなるため， F_x に対する F_y の比はより小さくなっている。

模型植生群中の植生一株に作用する波の進行方向流体力 F_x の正の最大値を $F_{x\text{max}}$ とする。図-4に，無次元値 $F_{x\text{max}}/(\rho g D^3)$ の無次元波高 H_p/s に対する変化特性を，設置場所をパラメータとして各水深別に示す。 H_p は波力計測用の植生一株を設置した位置における波高である。 D は植生一株の代表幅である $(D=5\text{cm}$ ，図-2参照)。図中には，比較のために植生一株のみを単独に設置した場合の結果も示している。これら図は， $d/L=0.2$ の場合の結果

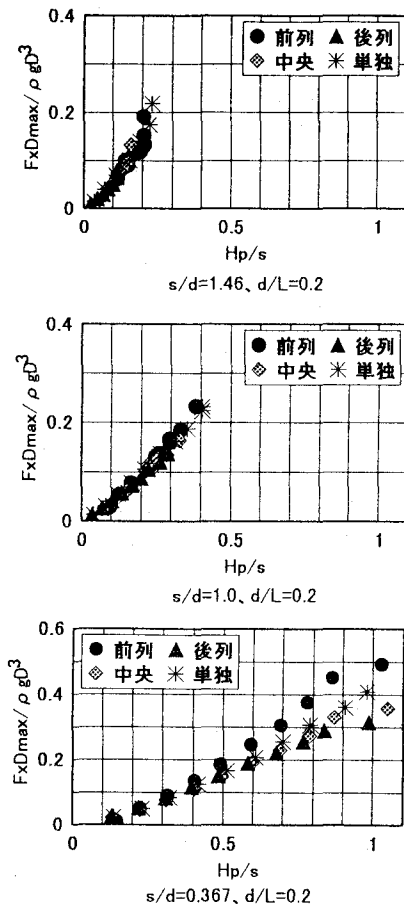


図-4 FxDmaxと波高Hpの関係

果である。FxDmaxは、波高Hp/sの増加に伴い、水平水粒子速度uが増加するために大きくなっている。水深が浅いs/d=1.46および1.0の場合には、FxDmaxと波高Hpとの関係におよぼす植生設置場所の影響は認められない。

3.2 模型植生の抗力係数と質量係数

波力Fxの水粒子速度uおよび加速度du/dtとの同位相成分をそれぞれ抗力Fdおよび慣性力Fmとする。FdおよびFmの算定にはフーリエ解析を用いた。FmとFdの比Fm/FdのCKC数に対する変化特性をs/dとd/Lをパラメータとして図-5に示す。CKC数は植生上端の位置（但し、s/d=1.467の場合には静水面の位置）におけるKeulegan-Carpenter数⁹⁾であり次式で定義される。

$$CKC = U_{mc} \cdot T / D_p \quad (1)$$

式中のU_{mc}は、植生の上端（但し、s/d=1.467の場合には静水面の位置）での水粒子速度uの最大値、Tは作用波の周期、D_pは植生一株を構成する柱状部材一本の換算直径（D_p=0.155mm）である。

Fm/FdはCKC数の増加に伴い減少していることがわかる。本植生一株を構成する柱状部材の代表径D_pが小さいため、KCが非常に大きくなる結果、Fdが卓越している。植生群

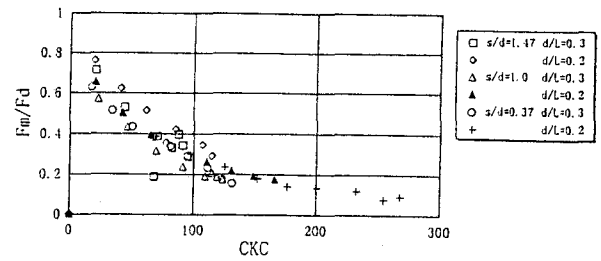


図-5 Fm/FdとCKCの関係（単独設置）

中の植生一株に作用する波力の場合も、図-5と同様な結果が得られている。

波力Fxの特性を詳しく調べるために、植生一株を構成する柱状部材1本に作用する波の進行方向波力（=Fx/柱状部材数(48本)）の評価にモリソン式を適用し式中の抗力係数Cdと質量係数Cmを算定した。CdとCmの算定にはフーリエ解析を用いる方法⁸⁾を使用した。波の水粒子速度u、加速度du/dtの算定には微小振幅波理論を用いた。

植生一株のみを単独で設置した場合の、CdおよびCmのCKC数に対する変化特性を、s/d、d/Lならびにβ値をパラメータとして図-6に示す。β=Dp²/(LT)で定義されるβ値は、Re数とKC数との比を示す周波数パラメータである。CdはCKCの増加に対し減少している。CmもCKCの増加に伴い減少しているが、s/dやβの影響が明らかである。s/dが同じ場合、Cmはd/Lおよびβ値の減少にともない大きくなっている。波動場や振動流場に置かれた円柱の抗力係数および質量係数のCKC数に対する変化特性においては、β値の減少に伴いCdは増加しCmは減少することが明らかにされている^{9), 10)}。しかし、本模型植生のようにβが非常に小さい場合における円柱のCdおよびCmを調べた結果はまだ報告されていない。

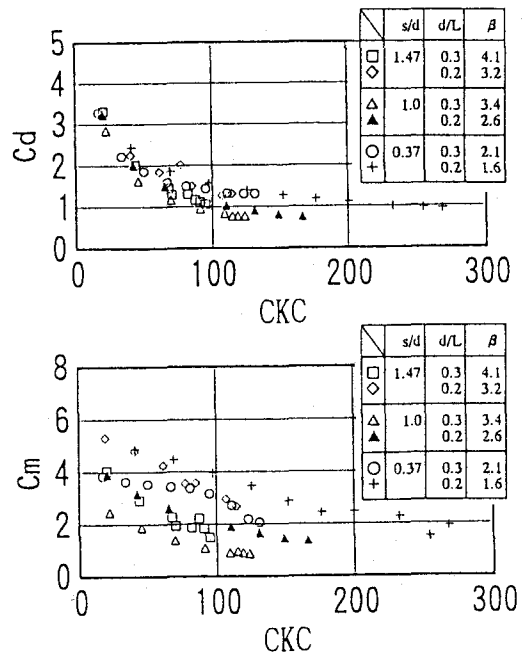


図-6 CdとCmのCKC数に対する変化（単独配置）

3.3 模型植生群の反射率と透過率

模型植生群からの波の反射率 $K_r (=H_r/H_i)$ および透過率 $K_t (=K_t/K_i)$ の入射波高 H_i と波長 L との比 H_i/L に対する変化特性を、水深波長比 d/L をパラメーターとして各水深別に図-7に示す。水深 d の減少に伴い透過率 K_t は小さくなっている。 d が模型植生の高さ s より小さく植生が水没して無い場合 ($s/d=1.47$) の K_t は0.25~0.55の範囲である。 d が s と同程度の場合 ($s/d=1$) の K_t は0.5~0.7の範囲である。 d が s より大きく植生が水没している場合 ($s/d=0.367$)の K_t は0.87~1.0の範囲である。

一方、植生高さ s と水深の比 s/d の反射率 K_r に対する影響は少なく、全般に K_r は0.1前後である。従って、水深 d が模型植生の高さ s より浅い場合 ($s/d > 1$: 水深が浅い場合) には、多くの波浪エネルギーが植生群の中で吸収されていることが分かる。

K_r および K_t に及ぼす H_i/L , d/L の影響は、植生高さ s に比べて水深が深い $s/d=0.367$ の場合は少ない。一方、水深が浅い $s/d=1.0$ と 1.467 の場合は、 K_t は H_i/L の増加に伴い減少している。

水深 $d=22\text{cm}$ の場合における K_t と H_i/L の関係を図-8に示す。図中の太い実線は、振動している模型植生に作用する波力の実測より得られた、抗力係数 C_d および模型植生帯の樹林帯密度 λ を用いた透過率 K_t の計算値である¹⁰⁾。

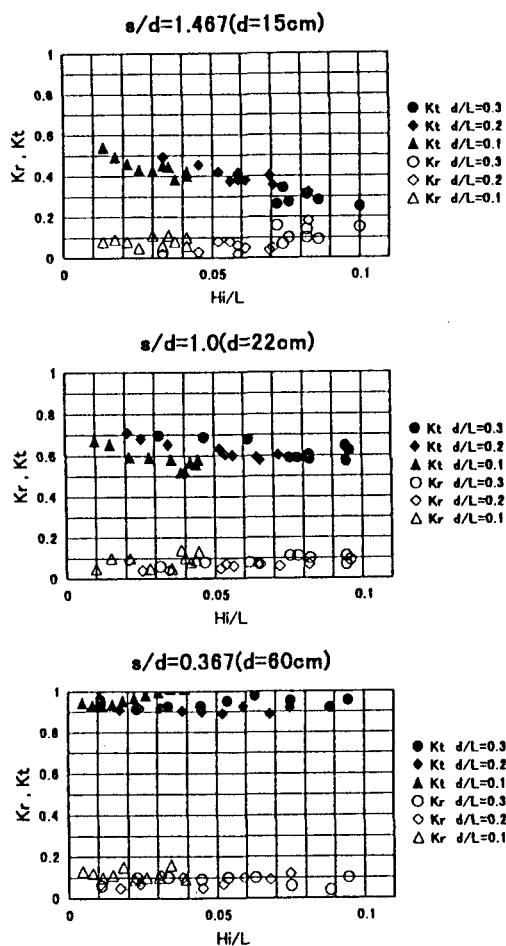


図-7 模型植生群の反射率と透過率

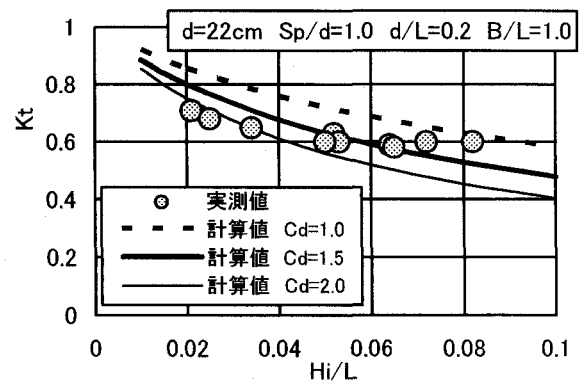


図-8 模型植生の透過率 (水深 $d=22\text{cm}$)

本計算は、植生1本に作用する波力および主流速度の位相変化特性より植生1本により失われる波のエネルギー損失量を評価し、それを植生群全体に積分し透過率 K_r を評価するものである¹⁰⁾。実測値と計算値との一致は概ね良好である。

3.4 模型植生群が有する波エネルギー損失率

植生群からの波の反射率 K_r が小さい場合 ($K_r \ll 1$)、植生群における波エネルギー損失率 E は式(2)で示される。

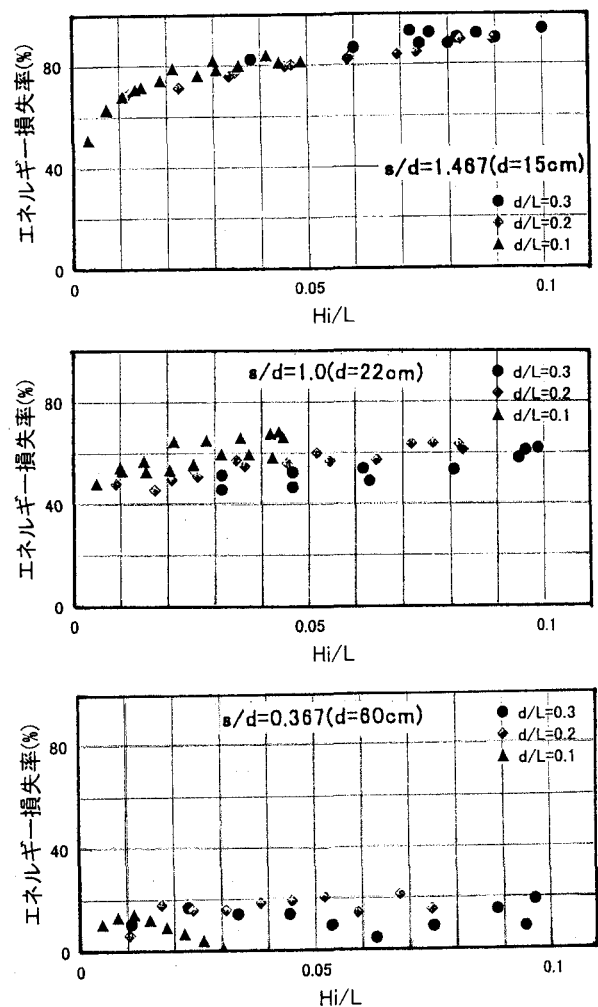


図-9 模型植生群が有するエネルギー損失量

$$E = 1 - (H_t/H_i)^2 - (H_r/H_i)^2 \\ \approx 1 - (H_t/H_i)^2 = 1 - Kt^2 \quad (2)$$

波エネルギーの損失率 E の H_i/L に対する変化特性を、 d/L をパラメーターとして図-9に示す。植生が水没して無い場合 ($s/d=1.47$) には、波高 H_i の増大に伴い、多くの波エネルギーが模型植生群中で吸収されていることが分かる。

3.5 浮葉植物(アサザ)に作用する波力特性

単独で設置されたアサザ一本に作用する波力 F_x , F_y とその設置点における波の水位変化 η の記録例を図-10に示す。茎径が小さいため水面に浮葉している葉部に作用する波力が支配的であるために、水位上昇時に大きな波力 F_y が生じていることが分かる。この時、茎部は緊張状態となっている。

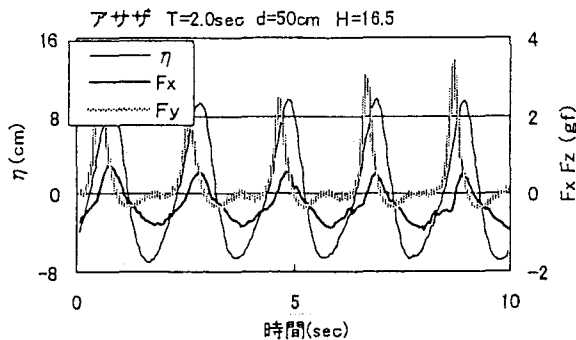


図-10 アサザ1本に作用する波力の位相変化

ゼロ・アップ・クロス法を用いて以下の代表波力を算定した。波の進行方向(岸方向)に作用する F_x の最大値を F_{xmax} 、その逆方向(沖方向)に作用する F_x の最小値を F_{xmin} とする。鉛直上方向に作用する波力 F_y の最大値を F_{ymax} 、その鉛直下方向に作用する F_y の最小値を F_{ymin} とする。これら波力の入射波高の平均値 $\bar{H}$ に対する変化特性を周期 T をパラメーターとして図-11に示す。 $T=1.2$ 秒の場合、茎部の緊張時に大きな波力が生じる結果、波高 H_i の増加に伴い F_{ymax} が支配的になっていることが分かる。一方、 $T=3$ 秒の場合には、 F_{ymax} が著しく減少している。これは、葉部が浮葉状態を保つことが出来ず、水底近くに水没した状態となったためである。

アサザの引っ張り強度試験を現地(霞ヶ浦)で行った。本試験に用いた大きさのアサザの引っ張り強度は、200gf/本~400gf/本であった。従って、本アサザが水深 $d=60$ cmの場に生育している場合、周期 $T=1\sim3$ 秒、波高 $H=20$ cm以下の波に対しては、本アサザは十分なる引っ張り強度を有している。

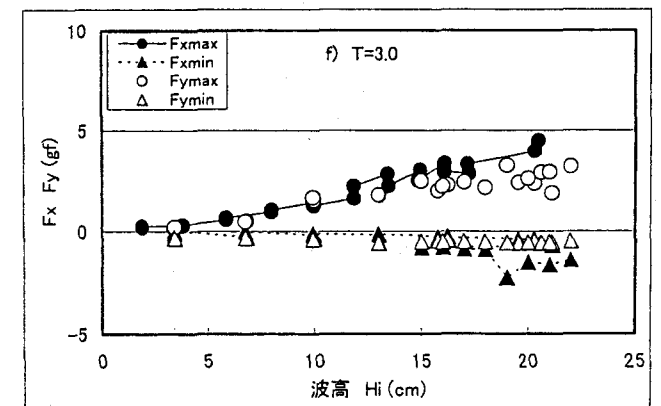
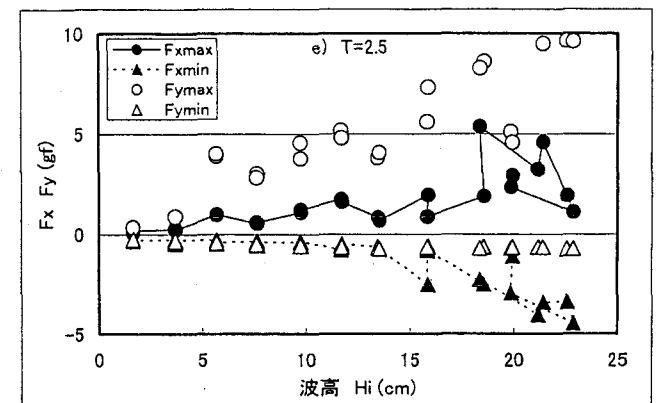
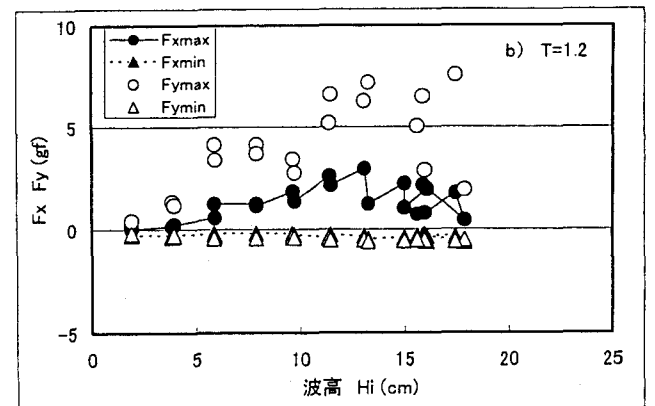
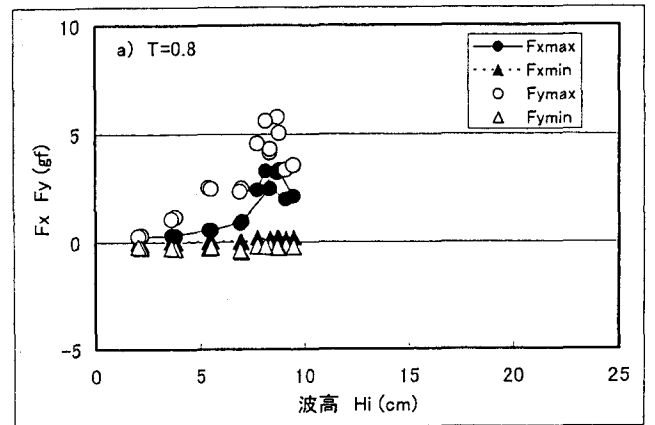


図-11 アサザ1本に作用する波力と波高の関係

4. おわりに

2分力計を用いて模型植生および浮葉植物（アサザ）に作用する波力の直接計測を行い、植生に作用する波力特性を調べるとともに、植生群による消波効果を調べた。得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 透水性（浸透性）物体である植生群に作用する波力の評価法として、植生一株を構成する一本の柱状部材に作用する波力に対するモリソン式の適用性を検討した。植生のように茎径 D_p が細いために β 値が小さい部材の抗力係数 C_d と質量係数 C_m のCKC数に対する変化特性を明らかにした。
- 2) 水深 d の減少に伴い透過率 K_t は減少する。水深が高く模型植生が水没している場合（ $s/d=0.367$ ）は、 K_t は0.9以上となり植生による消波効果は小さい。模型植生が水没していない場合（ $s/d>1$ ）は、 $K_t=0.25\sim0.55$ であった。一方、植生群による波の反射率 K_r は、全ての水深比 $s/d=0.367, 1.0, 1.467$ において小さく $K_r=0.1$ 前後であった。従って、植生が水没していない $s/d>1$ の場合には、多くの波エネルギーが植生群中で吸収されている。
- 3) 植生に作用する波力の実測より得られた、抗力係数 C_d および植生群の樹林帯密度 λ を用いた、透過率 K_t の計算法の有用性を確認した。

謝辞：霞ヶ浦に生育している植生の実態調査およびアサザの採取には、土木研究所の中村圭吾氏、西廣 淳氏、宮脇成生氏に多大な御指導と協力を頂いた。中海・宍道湖に生育している植生の実態調査およびヨシやコアマモの波や流れに対する被害調査では、島根大学の國井秀伸先生、（株）エステックミックの木村保夫氏に多くのご指導を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 浅野敏之・筒井勝治・酒井哲郎：海藻が繁茂する場の波高減衰の特性，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 138-142, 1988.
- 2) 菅原一晃・永井紀彦：波による堤体前面の洗掘・海岸浸食に対する人工海藻の防止効果，海岸工学論文集，39巻，p. 461-465, 1992.
- 3) 伊副 誠：人工海藻による波・流れの制御と漂砂，海岸工学論文集第44巻(1)，pp. 536-540, 1997.
- 4) 瀬戸雅文・江畑恵吾・桜井泉・松岡学・山下俊彦：ホッカイエビ生息藻場形成条件，海洋開発論文集，Vol. 13, pp. 303-308, 1997.
- 5) 長谷川寛：二枚貝の生息環境を改善する離岸潜堤の設計法，海洋開発論文集，Vol. 13, pp. 273-278, 1997.
- 6) Mazda Y., E. Wolanski, B. King, A. Sase, D. Ohtsuka, and M. Magi : Drag force due to vegetation in mangrove swamp, Mangroves and Salt Marshes, 1 (3), pp. 193-199, 1997.
- 7) 林建二郎・萩原運弘・上原正一・藤間功司・重村利幸：水辺植生の水理特性について，海岸工学論文集，第45巻(1)，pp. 536-540, 1998.
- 8) Keulegan, G. H. and L. H. Carpenter : Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid, Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 60, No. 5, May, pp. 423-440, 1958.
- 9) Sarpkaya, T. : Vortex shedding and resistance in harmonic flow about smooth and rough circular cylinderts, BOSS-76, Vol. 1, pp. 220-235, 1976.
- 10) 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.

(2002. 9. 30受付)