

水辺植生に作用する波力と消波機能に関する研究

林 建二郎*・藤井 優 宏**・重村 利 幸***・萩原 運 弘****

1. 諸 言

環境問題への関心が高まる中で、河岸や海岸・湖岸における、ヨシ原等の水辺植生が持つ環境機能や侵食防止機能も再認識され、その積極的な保持・利用に対する要求が高まっている(堀江ら, 1987; 松原ら, 1998; 林ら, 1999a; 中村ら, 1999; 西廣ら, 2000; Kunii・Minamoto, 2000)。

水辺植生の生育保持やその維持管理法の検討においては、植生域での流れ特性(辻本, 1995; 伊福, 1997; 田中・長岡ら, 1999)や植生に作用する流体力特性(松田ら, 1998; 林ら, 1998)、植生の波浪エネルギー反射・吸収特性(Bouter, 1991; 瀬戸ら, 1997; Massel ら, 1997; Mazda ら, 1997; 中村ら, 1999)、並びに植生基盤の侵食・堆積特性等(西島・宇多ら, 1998; 園ら, 1998; 小沼・池田ら, 1999)を把握することが重要である。

本研究は、室内実験により、模型植生や実ヨシ群に作用する波力特性および波力に対する動揺特性を調べ、水辺植生群の有する消波特性評価法を検討したものである。

2. 実験装置および方法

実験には長さ 40 m, 幅 0.8 m, 高さ 1 m の吸収式造波式二次元造波水槽を用いた。実験装置の概略を図-1 に示す。

外径 $D=1$ cm, 内径 $=0.5$ cm, 長さ 100 cm のアクリルパイプ製円柱を、ベニヤ板で仕上げた水槽底面の一區間(長さ $B=1.8$ m)に、図-2 に示すように千鳥配置で鉛直設置し円柱群とした。円柱の上端を拘束せず、底面支持の片持ち梁形式で設置された各円柱(振動円柱)の水中固有振動数は $f_{nw}=2.22$ Hz である。円柱の波に対する動揺特性を調べるために、円柱群の中央に位置する円柱(振動変位計測用円柱)の上端に光学式変位計(浜松フォトテクニクス社製)の変位発信器を取り付けた。本変位計により、円柱上端での 2 方向振動変位成分の時間変化計

測が可能である。円柱上端での振動変位量の波の進行方向成分を X 、その直角方向(揚力方向)成分を Y とする。

正三角形をなす各円柱の中心間隔は $S=10$ cm である(図-2 参照)。円柱群の樹林帯密度 λ (単位床面積に占める円柱群の断面積比, $\lambda=\pi D^2/(2 \times 3^{1/2} S^2)$)は 0.00906 である。円柱群の空隙率は 0.99 である。河岸や湖岸に生育しているヨシ原群の樹林帯密度 λ は一般に小さく、その最大値は 0.02 程度である。ヨシの茎径 D_p も細くその最大値は 1.5 cm 程度である。従って、本実験に用いた円柱群の λ および円柱径 D の値は、一般に生育しているヨシ群の概ねの代表値である。

円柱群による波の反射率 K_r (=反射波高 H_r /入射波高 H_i)と透過率 K_t (=透過波高 H_t /入射波高 H_i)を計測するために、容量線式波高計を円柱群の沖側と岸側に 2 本ずつ設置した。沖側と岸側における波高計 A と B および C と D の間隔は、それぞれ作用波波長 L の $1/4$ とした。波高計 A, B より円柱群への入射波高 H_i と円柱群からの反射波高 H_r を、波高計 C, D より円柱群からの透過波

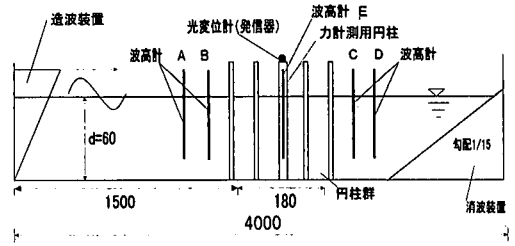


図-1 実験装置の概略 (Unit: cm)

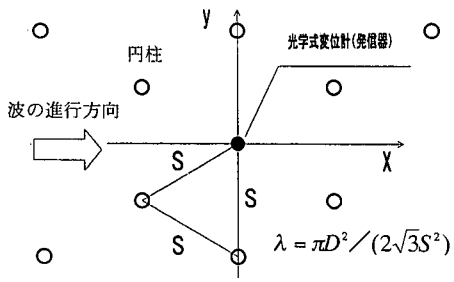


図-2 円柱群の配置間隔

* 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所
*** 正 会 員 Dr.E. 防衛大学校教授 建設環境工学科
**** 正 会 員 工博 沼水建設技術研究所環境技術開発部

高および岸側の消波斜面からの反射波高を、入・反射分離法を用いて算定した。

比較のために、同円柱群の上端をもベニヤ板で固定し、波による振動を抑えられた円柱群（固定円柱群）による波の反射率 K_r と透過率 K_t を同様に計測した。この場合、三分力計に外径 $D=1$ cm、長さ 80 cm の剛性の高い（＝振動を無視できる）ステンレス円柱を片持ち梁形式で鉛直に設置し、円柱群の中央に位置する円柱（力計測用円柱）1 本に作用する波の進行方向波力 F_x を計測した。力計測用円柱の下端と水路床との間隔は 1 mm 以下とした。

円柱群内における波浪諸元を計測するために、円柱群中央に設けられた振動変位計測用円柱および力計測用円柱の真横に容量線式波高計を設置した。

実験水深は $d=60$ cm の一種類とした。使用した規則波の周期は $T=1.6$ 秒の 1 通り、波高の範囲は $H=1\sim 22$ cm とした。比較のために力計測用円柱を単独に設置した場合の F_x も同様に計測した。

3. 円柱群における波の透過率評価式

3.1 円柱の振動が無い場合

樹林帯密度 λ が十分小さいヨシ原群およびヨシ原群を簡単に模した、円柱群からの波の反射率 K_r は非常に小さい（福岡ら、1992；林ら、1999a, 2000）。この場合、反射波のエネルギーは十分小さいので、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、円柱群内で生じる損失エネルギーを差し引いたものに等しい。この損失エネルギーは、円柱群を構成する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（Dalrymple ら、1984；林ら、2000）。このような仮定に基づき、林ら（2000）は、以下に示す円柱群を透過する波の透過率評価法を提案している。

円柱群内の一本円柱に作用する波の進行方向波力 F_x をモリソン式で評価すると、 F_x による単位時間当りの損失エネルギー（＝仕事量） E_f は、（1）式で示される。

$$E_f = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_0^{d+\eta} \frac{\rho}{2} C_D u |u| u D dz + \int_0^{d+\eta} \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} u dz \right] dt \quad \cdots \cdots (1)$$

式中、 ρ は水の密度、 C_D は抗力係数、 C_M は質量係数である。 u および du/dt は波水粒子の水平速度成分と加速度である。 dz は円柱の微小部分長、 d は静水深、 η は波の水位変動量である。

微小振幅波理論を適用しかつ水位変動 η の影響を無視すると、 E_f は（2）式で示される。

$$E_f = \rho C_D \frac{D}{T} \left(\frac{\pi H}{T \sinh kd} \right)^3 \left\{ \frac{1}{3} \sinh^3 kd + \sinh kd \right\} \frac{4}{3} \frac{1}{k\sigma} \quad \cdots \cdots (2)$$

（1）式の左辺の第 2 項の慣性力による影響は、微小振幅波を適用した結果、（2）式においては消えている。

水路単位幅断面を通して単位時間当たりに輸送される波エネルギー W は、（3）式で示される。

$$W = (1/8) \rho g H^2 \cdot C \cdot n \quad \cdots \cdots (3)$$

式中、 $n=1/2+(2\pi d/L)/\sinh(2\pi d/L)$ 、 g は重力加速度、 H は波高、 C は波速（ $=L/T$ ）である。

径 D の円柱が樹林帯密度 λ で配置されている円柱群において、波進行方向の単位長さ当たりに失われる水路単位幅当たりのエネルギー LE_f は（4）式で示される。

$$LE_f = \lambda E_f / (\pi D^2 / 4) \quad \cdots \cdots (4)$$

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（5）式が得られる。

$$(1/8) \rho g (H_{ip}^2 - H_{tp}^2) C \cdot n = LE_f \cdot dx \quad \cdots \cdots (5)$$

数値積分による（1）式の E_f を用いた（4）式の LE_f を（5）式に代入すると、微小区間 dx における透過波高 H_{tp} および透過率（ $K_{tp}=H_{tp}/H_{ip}$ ）を評価できる。

（2）式で近似される E_f を用いた（4）式の LE_f を（5）式に代入すると、区間 dx での透過率 K_{tp} は、（6）式で近似される。

$$K_{tp} = H_{tp}/H_{ip} = [1 - (32/3) \lambda (H_{ip}/D) \{ dx / (g \cdot T^2) \} \cdot (C_D/n) \{ 1/3 + 1/(\sinh(2\pi d/L))^2 \}]^{1/2} \quad \cdots \cdots (6)$$

このように算定された H_{tp} を、次の微小区間 dx への入射波高 H_{ip} とし、次の区間 dx での透過波高 H_{tp} を逐次求める。この逐次計算を円柱群間の全長で行うと、円柱群を透過する波の透過波高 H_t が求まり透過率 K_t を評価できる。解に対する微小区間 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。

3.2 円柱振動による損失エネルギーの変化

主流速度 u が（7）式で表される一様振動流中に置かれた弾性円柱の、主流方向への振動変位量 x および振動変位速度 dx/dt は、（8）式、（9）式で表されると仮定する。

$$u = U \sin(2\pi t/T) \quad \cdots \cdots (7)$$

$$x = X \sin(2\pi t/T - \alpha) \quad \cdots \cdots (8)$$

$$dx/dt = U_p \cos(2\pi t/T - \alpha) \quad \cdots \cdots (9)$$

式中、 U は最大主流速度、 X は円柱の振動振幅、 U_p は最大円柱振動速度（ $=X2\pi/T$ ）、 α は振動速度 u に対する

振動変位 x の位相遅れである。

モリソン式を用いて振動円柱の単位長さ当たり作用する主流方向の流体力 dF_x を評価すると、 dF_x による単位時間当たりの損失エネルギー dE_f は (10) 式で示される。

$$dE_f = -\frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_0^{h+\eta} \frac{\rho}{2} C_D u_s |u_s| u D ds + \int_0^{h+\eta} \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u_s}{\partial t} u ds \right] dt \dots\dots\dots (10)$$

式中の u_s は、主流速度 u と円柱振動速度 dx/dt との相対速度 ($u_s = u - dx/dt$) である。

4. 結果および考察

4.1 円柱振動による損失エネルギーの変化

振動流中に置かれた固定円柱の単位長さ・単位時間当たりの損失エネルギーを dE_{fs} とする。振動流の主流方向に振動している円柱による損失エネルギー dE_f の固定円柱による損失エネルギー dE_{fs} に対する変化率を $AE(dE_f/dE_{fs})$ とする。一例として、 $U=10$ cm/s の場合における増幅率 AE の位相差 α に対する変化特性を、速度比 U_p/U をパラメータとして図-3 に示す。ただし、円柱振動時の抗力係数 C_D および質量係数 C_M は、円柱固定時の値と変わらないと仮定している。実際においては、円柱振動と流れとの相互作用により、円柱振動時の C_D , C_M は円柱固定時より変化すると考えられる。一方向流中や振動流中で円柱が主流と直角な揚力方向にのみ渦励振動している場合の C_D や揚力係数 C_L の、円柱固定時からの変化特性は明らかにされているが(林ら, 1997, 1999b), 円柱が主流方向に振動している場合の C_D の変化特性については不明である。

損失エネルギー dE_f は、位相差 $\alpha=0$ 度と 180 度近傍では、円柱の振動振幅 X の増加による振動速度 U_p の増加に伴い、固定円柱時よりも大きくなっているが、その他の位相では U_p の増加に伴い減少している。位相差が $\alpha=90$ 度となる共振時には、 u と dx/dt は同位相となる

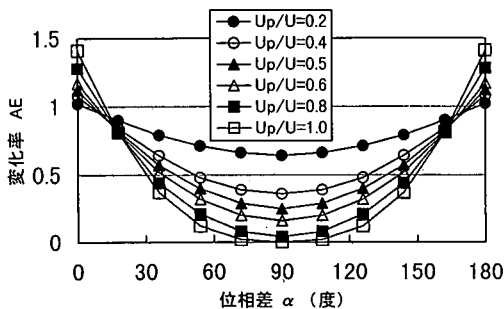


図-3 損失エネルギーの位相変化 ($U=10$ cm/s の場合)

ために相対速度 ($u_s = u - dx/dt$) が最小となり、作用波力および損失エネルギー dE_f は最小となる。

4.2 振動円柱群の透過率

ゼロアップクロス法を用いて求めた円柱上端での波進行方向振動振幅の平均値を X_{mean} 、揚力方向振動振幅の平均値を Y_{mean} とする。振動円柱の真横で計測された波の平均波高を H_p とする。 X_{mean}/D および Y_{mean}/D の H_p/L に対する変化特性を図-4 に示す。波高 H_p の増加に伴い波力が増加する結果、 X_{mean} は増加している。 Y_{mean} は X_{mean} に比べて全般に小さいが、 $H_p/L=0.25$ 付近では、 X_{mean} より大きくなっている。この付近の波高においては、作用波周波数 $f_w (=1/1.6)$ の 4 倍の周波数 $4f_i (=4/1.6)$ を有する揚力成分 (第 4 次周波数成分) が卓越する。大きな Y_{bar} は、この揚力周波数 $4f_i$ が円柱の固有振動数 $f_{nw} (=2.22$ Hz) に近づいた結果生じる共振現象に起因している (林, 1997)。

円柱群の透過率 K_t の H_i/L に対する変化特性を図-5 に示す。○印は振動円柱群の K_t を示す。●印は固定円柱群の K_t を示す。両者には顕著な差が認められない。この原因としては、周波数比が $f_w/f_{nw}=0.28$ (f_w : 作用波周波数, f_{nw} : 円柱の水中固有振動数) である本実験条件においては波の水平水粒子速度と円柱の振動変位との位相差が $\alpha \approx 10$ 度だったために、両者の損失エネルギーに明確な差が生じていないためと考えられる (図-3 参照)。

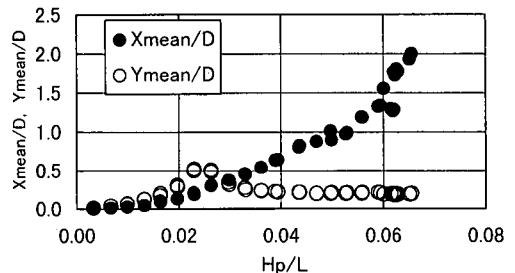


図-4 振動円柱群の振動変位特性
($\lambda=0.0091$, $d/L=0.18$, $B/L=0.54$)

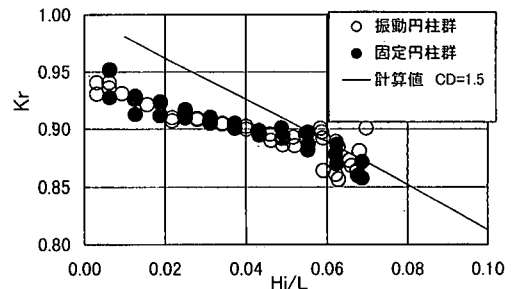


図-5 振動円柱群と固定円柱群の透過率 K_t
($\lambda=0.0091$, $d/L=0.18$, $B/L=0.54$)

図中に示す実線は、(1)式による E_f を数値積分して求めた場合の透過率 K_t の計算値である。式中の抗力係数には固定円柱群における抗力係数の実測値 $C_D=1.5$ を用いた(林ら, 2000)。

4.3 実物ヨシ群の透過率

ヨシ群の消波特性と耐波特性を調べるために、実物ヨシ群の反射・透過特性ならびに動揺特性を室内実験により調べた(林ら, 1999a)。深さ 7 cm, 5 cm 四方のポット内に育成されたヨシ束を造波水槽内に敷設しヨシ群を作製した。ヨシ群の長さ $B=1.5$ m である。ヨシ茎の平均高さは約 90 cm, 茎の平均径 D は約 0.15 cm, 平均曲げ剛性 EI は約 8×10^5 (N/cm²) である。ヨシの植生密度 λ は約 0.008 である。

ヨシ群の波に対する動揺特性を計測するために、ヨシ群の中央にサーボ式波高計と光学式変位計を設置した。茎の静水表面上 15 cm の位置に変位計の発信器を取り付けた。実験水深は $d=50$ cm の一種類とした。静水中におけるヨシ茎の平均固有周期は $f_{nw}=1.09$, 平均減衰定数 ζ_w は約 0.27 であった。

ヨシ群の透過率 K_t の水深波高比 H_i/d に対する変化特性を、水深波長比 d/L と周波数比 f_w/f_{nw} (f_w : 作用波周波数, f_{nw} : ヨシの静水中における固有振動数) をパラメーターとして図-6 に示す。共振点に近い $f_w/f_{nw}=1.08$ の場合、位相差が $\alpha=90$ 度に近づくために損失エネルギー E_f が減少する(図-3 参照)。その結果、透過率 K_t は他の場合に比べて大き目となっている。

4.4 模型植生群の透過率

長さ 40 m の 2 次元造波水槽の一区間に、植生模型を一株ずつ千鳥配置で配置した(林ら, 1998)。模型植生一株は径 1~2 mm の約 50 本のビニール線(比重=0.825)で構成され、その投影面の代表高さは S_p =約 22 cm, 代表幅は 5 cm である。植生群の樹林帯密度は $\lambda=0.016$ である。植生群の空隙率は 0.984 である。植生模型を、水路幅 80 cm, 水路方向長さ $B=110.4$ cm の水路床の一区間に均等に配置した。配置は一辺の長さが 8 cm の正三角

になる千鳥配置とした。植生群の樹林帯密度 λ は約 0.016 である。植生群の最前列(沖側), 中央列, ならびに最後列(岸側)の水路中央線上に設置された、模型植生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_z を、水路床の下面に設けた小型 2 分力計(容量 200 gf (1.96 N))を用いて計測した。比較のために同水路床に模型植生一株のみを設置した場合の流体力をも計測した。

模型植生群による波の反射率 K_r と透過率 K_t を計測するために、模型植生群の沖側と岸側に計 4 本の波高計を設置した。入射波高 H_i および反射波高 H_r の算定には、入・反射分離法を用いた。

実験水深は、 $d=15$ cm, 22 cm, 60 cm の 3 種類とした。各水深 d において、水深波長比 $d/L=0.1, 0.2, 0.3$ を有する規則波を使用した。波形勾配 H_i/L の範囲は 0.005~0.10 である。模型植生の高さ $S_p=22$ cm と水深

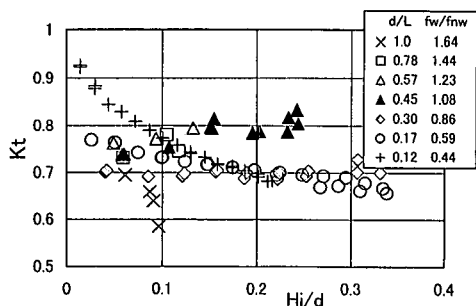


図-6 実物ヨシ群の透過率 ($B=150$ cm)

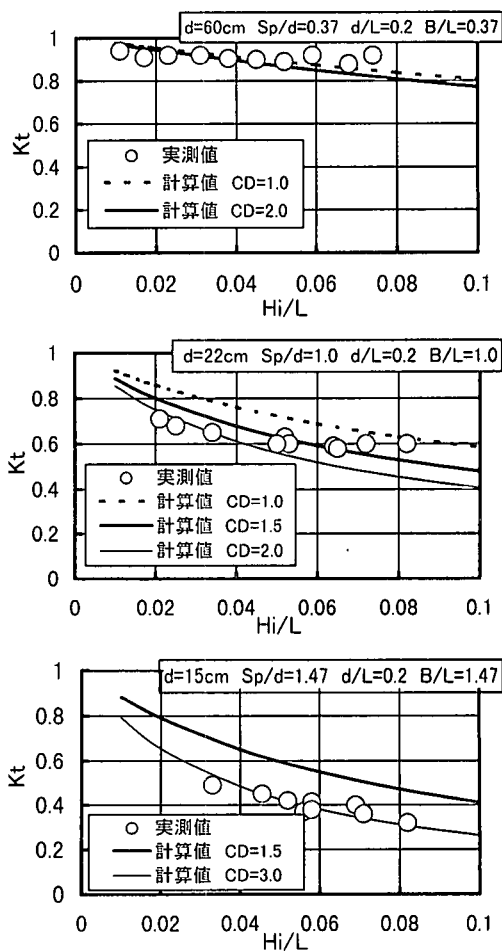


図-7 模型植生群の透過率 ($B=110.4$ cm)

d の比が $S_p/d=1.47$ および 1.0 となる $d=15$ cm および 22 cm の水没していない場合は、河口や湖岸に生育しているヨシやシオクブ等の抽水植物を対象としたものである。 $S_p/d=0.37$ となる $d=60$ cm の水没している場合は、アマモやコアマモ等の沈水植物による藻場を対象としたものである。

$d/L=0.2$ の場合における透過率 K_t の波形勾配 H_t/L に対する変化を、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。全般に、模型植生群からの反射率 K_r は 0.1 前後であった。従って、水深 d が模型植生の高さ S_p より小さい場合 ($S_p/d > 1$) 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。

図中に示す実線は、振動している植生模型に作用する波力 F_x の実測より得られた、抗力係数 C_D および植生帯密度 λ を用いた透過率 K_t の計算値である ((1) 式~(5) 式を参照)。(1) 式の数値積分を行い、損失エネルギー E_f を評価した。ただし、模型植生全体が水没している場合 ($S_p < (d+n)$) の積分範囲は $0 \sim S_p$ である。実測値と計算値との一致は概ね良好である。

5. 結 言

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 茎径が小さく樹林帯密度 λ が小さい水辺植生に作用する流体力を適格に評価すれば、水辺植生群の透過率評価が可能である。
- (2) 振動している円柱群による損失エネルギーは、主流速度と円柱振動変位との位相差 α および円柱振動量の関数である。共振時の損失エネルギーは固定時の場合より減少する。

参 考 文 献

- 浅野敏之・出口 浩・間瀬 啓・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.
- 伊福 誠 (1997): 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.
- 小沼秀嗣・池田 博 (1999): 霞ヶ浦, 土浦入り南岸におけるヨシ原の縮小過程について, 筑波大学水理実験センター報告, No. 24, pp. 49-58.
- 瀬戸雅文・江畑憲吾・桜井 泉・松岡 学・山下俊彦 (1997): ホッケイエビ生息藻場形成条件, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 273-278.
- 田中厚至・長岡 裕・原 恒司 (1999): 往復流下における柔軟な植生周りの流に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 806-810.
- 四 昭紀・森口朗彦・三橋公夫・寺脇利信 (1998): 鳴門地先におけるアマモ場と底質および波浪との関係, 水産工学, Vol. 34, No. 3, pp. 299-304.
- 辻本剛三 (1995): 乱流モデルによる単純化された藻場上の流れと浮遊砂濃度特性について, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 451-455.
- 中村圭吾・門倉伸行・宗像義之・島谷幸宏・宇多高明 (1999): 消浮島による湖岸植生帯の復元に関する研究, 環境システム研究一全文審査部門論文, Vol. 27, pp. 305-314.
- 西島照毅・宇多高明・中辻崇浩 (1998): 琵琶湖における湖岸植生の繁茂限界について, 海岸工学論文集, Vol. 45, pp. 1126-1130.
- 西廣 淳・川口浩範・飯島 博・藤原宣夫・鷺谷いずみ (2000): 霞ヶ浦におけるアサザの危機的状況と保全策,
- 林建二郎・田中克也・藤間功司・重村利幸 (1997): 振動流中で渦励振動している円柱と流れとの相互作用による作用波力の変化特性, 海岸工学論文集, 第 44 巻 (1), pp. 536-540.
- 林建二郎・萩原運弘・上原正一・藤間功司・重村利幸 (1998): 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.
- 林建二郎・木村保夫・鈴木正幸・萩原運弘・重村利幸 (1999a): 湖沼における植生護岸の形成とその効果, 海岸工学論文集, 第 46 巻 (2), pp. 1116-1120.
- 林建二郎・田中克也・藤間功司・重村利幸 (1999b): 一方向流中で渦励振動している円柱に作用する流体力の増加特性, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 797-802.
- 林建二郎・藤井優宏・重村利幸・萩原運弘 (2000): 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.
- 福岡捷二・甲村謙友・渡辺明英・三浦央晴 (1992): 船が造る波のエネルギーを減衰させる河岸ヨシ原の効果, 水工学論文集, 第 36 巻, pp. 713-716.
- 堀江 毅・細川恭史・三好栄一・関根好幸 (1987): 植物体 (ヨシ) による浄化能力の検討, 港湾技研資料, No. 591, 18 p.
- 松田義弘 (編) (1998): 熱帯マングローブ生態系を維持する物質分散機構の解明 (研究課題番号 08680559), 平成 8~9 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)) 研究成果報告書, 89 p.
- 松原雄平 (編) (1998): 藻場造成による湖沼生態系修復技術に関する研究—ニューラルネットワークを利用した中海アマモ場造成手法の提案—, 平成 8-9 年度科研成果報告書, 48 p.
- Bouter, E. E. (1991): Wave damping by reed, P.I.A.N.C. • A.I. P.C.N., Bulletin 1991, No. 75.
- 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.
- Kunii H. and K. Minamoto (2000): temporal and spatial variation in the macrophyte distribution in coastal lagoon Lake Nakauimi and its neighboring waters, Journal of Marine Systems, 26, pp. 223-231.
- Mazda, Y., M. Magi, M. Kogo and N. Hong (1997): Mangroves as a coastal protection from waves in Tong King Delta, Vietnam, Mangroves and Salt Marshes, 1 (2), pp. 127-135.
- Massel, S. R., K. Furukawa and R. M. Brinkman (1997): Surface wave propagation in mangrove forests, Fluid Dynamic Research, 24, pp. 219-249.