

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

林 建二郎*・高橋 祐**・重村利幸***

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。対象としたコアマモやアマモ等の沈水植物やアサザ等の浮葉植物の波動場中での揺動現象は複雑なため、現地に生育している実植生を使用した室内水理実験により波力特性および動揺特性を調べ、これら植生群が有する消波機能評価法を検討した。

1. 諸 言

環境への関心が高まり、海岸や湖岸における水辺植生の保全（西廣ら, 2000；Kunii・Minamoto, 2000）や、植生が有する環境再生機能や浸食防止機能も再認識され、その積極的な復元や利用が検討されている（堀江ら, 1987 松原ら, 1998；林ら, 1999；中村ら, 2001；中村, 2002）。また、新たな海岸保全工法として人工海草や模型植生を用いた波浪・漂砂制御技術の開発も行われている（片岡ら, 1990；菅原・永井, 1992；小島ら, 1993；伊福, 1997；林ら, 1999）。

水辺植生の育成法や保全管理法の検討においては、植生域での流れ特性（辻本, 1995；田中ら, 1999；川崎ら, 2001）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；長谷川, 1999；川崎ら, 2001；林ら, 2001；中村, 2002）、並びに植生基盤の侵食・堆積特性等（西廣ら, 1998；團ら, 1998；小沼・池田, 1999）を把握する必要がある。

筆者らは、水辺植生の一種であるヨシ等の抽水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ヨシ等を用いた室内模型実験により検討してきた（林ら, 2001）。本研究は更に、コアマモやアマモ等の沈水植物およびアサザ等の浮葉植物を対象としたものである。これら沈水植物や浮葉植生の波動場中での揺動現象は複雑なため、実際に現地に生育している植生の波力特性および波に対する動揺特性を室内水理実験により調べ、これら植生群が有する消波機能評価法を検討した。

2. 実験装置および方法

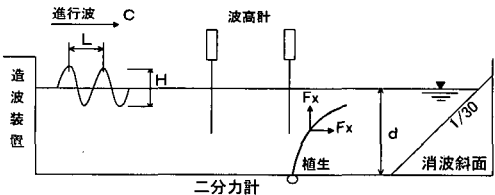
実験には、図一に示す長さ 40 m、幅 0.8 m、高さ 1 m の吸収式造波装置つき 2 次元造波水槽を用いた。水槽の他端には 1/30 勾配の消波用斜面を設置した。本斜面からの波の反射率 K_r をできるだけ小さくするために、本斜

面上に厚さ 5 cm 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 $K_r < 0.1$ であった。

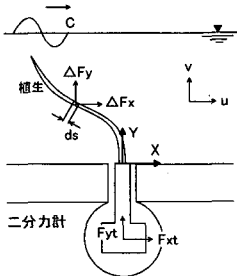
表一に示す実植生および模型植生の 1 本又は 1 株に作用する波の進行方向波力 F_x と鉛直方向波力 F_y を、図一に示すように水路床の下面に設けた小型分力計（三計エンジニアリング製、2 分力計 LV-30-2、定各容量 200 gf）に取り付けて計測した。

容量線式波高計を植生の真横 20 cm 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。実験に用いた各種植生の諸元と実験水深 d を表一に示す。使用した規則波の周期および波高の範囲は、 $T = 0.8 \sim 3.0$ sec, $H_i = 2 \sim 26$ cm である。

植生に対する主流速度分布を精度良く評価するために、植生の真横約 25 cm の位置における波水粒子速度の



図一 実験装置の概略



図二 二分力計による波力計測

* 正 会 員 Ph.D. 防衛大学校助教 建設環境工学科
** 学生会員 防衛大学校 建設環境工学科
*** 正 会 員 Dr.E. 防衛大学校教授 建設環境工学科

表-1 実植生と植生模型の諸元および実験水深

実植生

- a) アサザ (浮葉植物, 淡水, 沼ヶ浦産) 1本
 茎径=2~3 mm, 茎長=60 cm, 浮葉部の寸法=8 cm×7 cm,
 重さ=約 0.6 gf,
 植生高さ S=60 cm, 実験水深 d=53 cm
- b) ササバモ (沈水植物, 淡水, 沼ヶ浦産) 1本
 茎長=30~40 cm, 葉の枚数 8枚,
 植生高さ S=30~40 cm, 実験水深 d=50 cm
- c) コアマモ (沈水植物, 汽水, 穴道湖・中海産) 一株
 葉の枚数=3枚, 葉長=25~30 cm, 葉幅=約 1 mm,
 重さ=約 0.2 gf,
 植生高さ S=30 cm, 実験水深 d=60 cm
- d) アマモ (沈水植物, 海水, 横須賀市観音崎海岸産) 一株
 葉の枚数=3枚, 葉長=45~55 cm, 葉幅=約 0.8 cm,
 植生高さ S=45~55 cm, 実験水深 d=60 cm

模型植生

- a) 植生模型 ((株)ニッソー) 一株
 材質: ビニール (比重=0.825)
 茎数=48本, 茎径=1~2 mm, 代表茎長=22 cm, 重さ=17 gf
 植生高さ S=22 cm, 実験水深 d=15 cm, 50 cm
- b) 人工海草 (伸起(株)) 一本
 材質: ポリプロピレン 21 (比重=0.45)
 葉長=55 cm, 葉幅=1.6 cm, 葉厚=0.45 mm, 重さ=1.78 gf
 植生高さ S=55 cm, 実験水深 d=60 cm

水平および鉛直方向性分 u , v を, 2成分レーザー Doppler 流速計 (Dantec 社製) を用いて計測した。

3. 植生帯群における波の透過率評価式

3.1 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。水中での動揺を共なう植生に作用するこの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, 植生動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_x と鉛直方向分力 F_y 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, 植生動揺による質量力(植生の質量×植生の動揺加速度)が含まれている。しかし, 本実験に用いた植生の質量は小さい(表-1 に示す植生重量参照)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。

3.2 植生に作用する波力による波エネルギー損失

海底摩擦力によって波エネルギーの損失(服部, 1991)

が生じるように, 植生への作用波力によっても波エネルギーの損失が生じる (Dalrymple ら, 1984; 林ら, 2000)。

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)。

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

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

植生の動揺量は波の波長 L に比べて小さいことおよび波の水粒子速度の水深方向変化が小さい浅海波を対象とすると, EL_x , EL_y は (3)~(4) 式で近似できる。

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

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

$u(x_p, y_p, t)$, $v(x_p, y_p, t)$ は, 植生部の代表位置 (x_p, y_p) での主流速度である。 $F_x(t)$, $F_y(t)$ 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 $F_{xt}(t)$, $F_{yt}(t)$ で近似評価可能である。

3.3 植生群における波の透過率評価式

植生密度 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 (林ら, 2000)。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 (Dalrymple ら, 1984; 林ら, 2000)。このような仮定に基づき, 林ら (2001) は, 植生密度 λ 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。

今回対象とした植生の現地湖岸や海岸における植生密度 λ は十分小さいので, この評価法の適用が可能である。

単位床面積当たり N 本の植生数を有する植生群において, 波方向の単位長さ当たりに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.

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

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 (6) 式が得られる. 式中の ρ は水の密度, g は重力加速度, C_g は波の群速度である

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

(3), (4) 式で評価される EL_x , EL_y を用いた 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.

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

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 ($=K_t/K_i$) 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.

4. 結果および考察

4.1 植生に作用する波力の時間変化特性

アサザ (浮葉植物) とコアマモ (沈水植物) に作用する, 全波力の水平および鉛直方向成分 F_x , F_y と, 水位 η の時間変化の一例を図-3 の a), b) に示す. アサザの場合には, 茎の上端にある浮葉部に作用する波力が支配的となる結果, F_y の正方向 (上向き) に大きな衝撃的な波力が作用している. この衝撃的な波力 F_y が作用する場合, 茎は斜め上向きに緊張状態となっている. 植生全体が水没しているコアマモの F_y は, F_x より小さい. F_y の位相は F_x の位相より約 1/4 周期進んでいる.

計測時間内における F_x , F_y の正の最大値 $F_{x\max}$, $F_{y\max}$ と負の最大値 $F_{x\min}$, $F_{y\min}$ の, 波高 H_i に対する変化特性を調べた. これら波力は, H_i の増加にともない増加するが, その増加率は, 波高が大きくなると減少している. これは, 波高の増加に伴い波の水粒子速度が増加し, 茎部の傾倒や浮葉部の形状変化が顕著となり, 主流に対する植生の投影面積が減少するためと考えられる.

4.2 植生に作用する波力によるエネルギー損失

本実験に用いたアサザ 1 本に周期 $T=2$ 秒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-4 に示す. 図中には, EL_t の H_i に対する

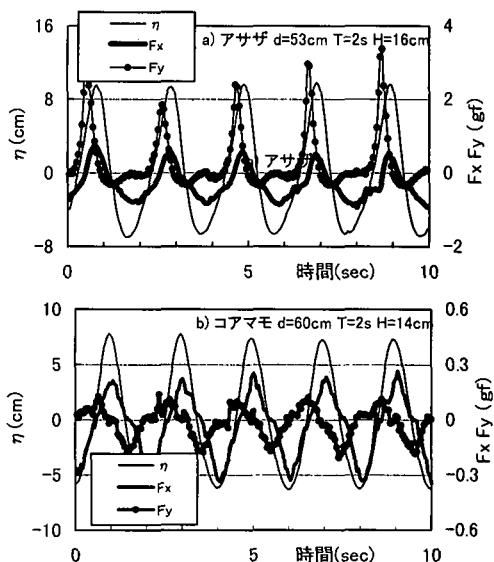


図-3 植生に作用する波力の記録例

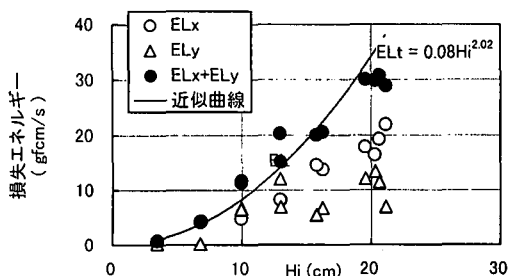


図-4 植生による損失エネルギーの波高 H_i に対する変化特性 (アサザ 1 本, $T=2$ s, $d=53$ cm)

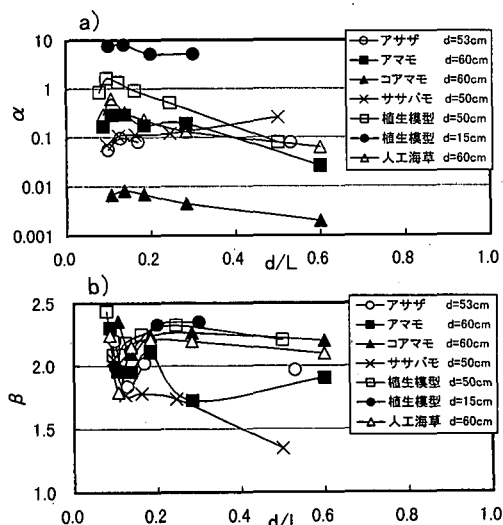


図-5 植生 1 本, 1 株の α , β と d/L の関係

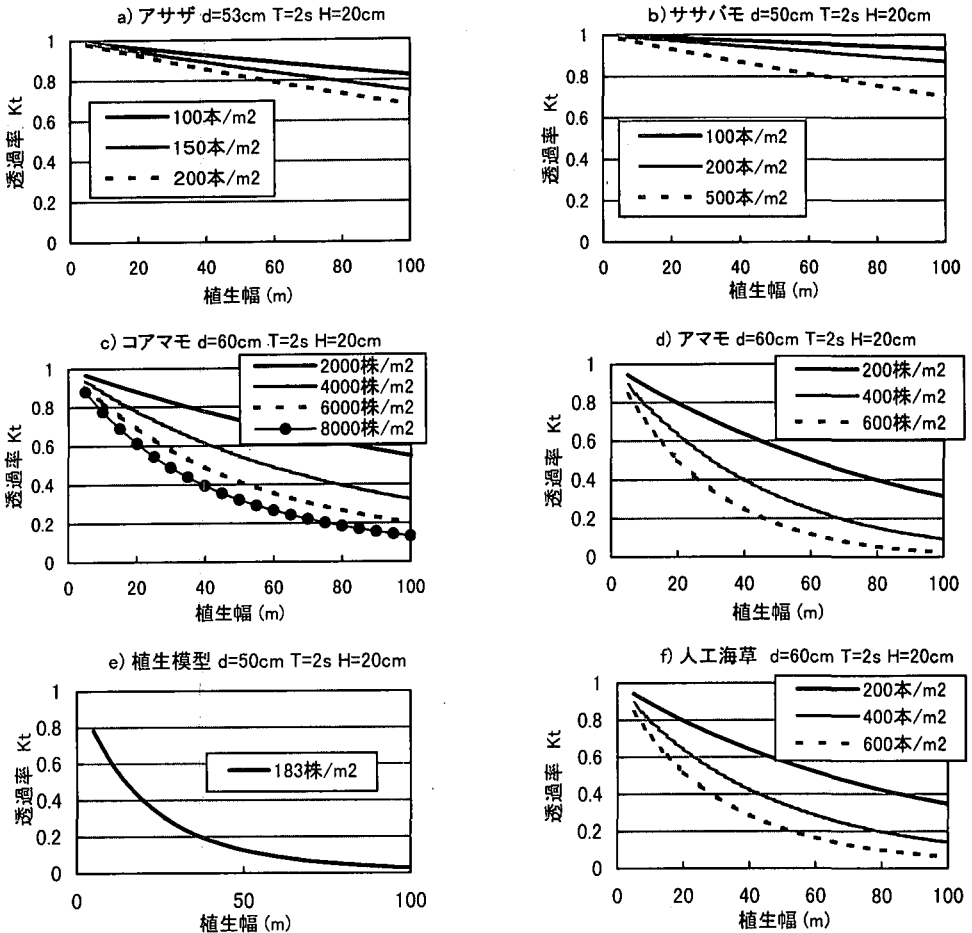


図-6 植生帯の消波効果 (透過率)

近似式($EL_t = \alpha H_t^\beta = 0.08 H_t^{0.02}$)記入している。 EL_t と H_t の単位には、 gfc/cm^2 と cm を使用している。アサザが、波に対して揺動しないと仮定すると、 EL_t は波高 H_t の3乗($\beta=3$)に比例すると考えられるが、実際には揺動や葉部の形状変化が生ずる結果、 EL_t は H_t の約2乗($\beta=2.02$)に比例している。

同様な実験・解析を、表-1に実験水深 d および諸元を示す各植生に対して行い、上記の α と β の周期 T に対する変化特性を調べた結果を図-5のa), b)に示す。横軸には周期 T に対応する水深・波長比 d/L をとっている。使用した規則波の周期および波高の範囲は、 $T=0.8\sim 3.0\text{ sec}$ 、 $H_t=2\sim 26\text{ cm}$ である。 α および β は、植生一株(本)が有する波の損失エネルギー効率を示す指標である。 α は植生の寸法や形状によって大きくことなり、 d/L の減少(T の増加)に伴い、若干増加している。 β は $1.5\sim 2.5$ の範囲であり、 d/L に対する変化は少ない。

4.3 植生帯の消波効果 (透過率)

本実験に用いた植生が、浅い水域($d=53\text{ cm}$, 60 cm)

に種々の単位床面積当たりの植生本(株)数 N (本/ m^2)で植生帯幅 B に渡って生育している場合、 $T=2\text{ s}$ 、 $H_t=20\text{ cm}$ の波が透過した時の波の透過率 K_t を、(7)式を用いて評価した結果を図-6に示す。(7)式中の LE の評価には、実験式 $EL_t = \alpha H_t^\beta$ を用いた。式中の α 、 β には、図-5に示す実験値を用いた。 N の値には、季節変動する現地における代表値を用いた。計算に必要な代表流速 $u(x_p, y_p, t)$ 、 $v(x_p, y_p, t)$ は、床面より植生高さ S の約2/3の位置($x_p=2/3S$, $y_p=0$)での微小振幅波理論式による u 、 v を用いた。

大きな植生帯幅 B が存在すれば、かなりの消波効果(透過率の減少)があることが分かる。コアマモの1株当たりの波の損失エネルギーの大きさはアサザやササバモに比べて小さいが(図-5に示す α 、 β を参照)、コアマモは単位床面積当たりの植生株数 N が大きいために大きな消波効果を有している。アマモの N は小さいが、形状が大きい1株当たりの損失エネルギーの大きさはコアマモに比べて大きいために、コアマモと同程度の大きな消

波効果を有している。

5. 結 言

本研究は、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)の評価を試みたものである。得られた主要な結論は以下の通りである。

- (1) 動揺する実植生と人工海草・模型植生に作用する波力を実測し、植生による波エネルギー損失 EL_t を評価した結果、 EL_t は波高の約2~2.5乗に比例することが分かった。
- (2) 水辺植生群の植生密度 λ は一般に小さい($\lambda < 0.01$) ので、植生群を構成する個々の植生1本(株)に作用する波力に対する植生相互の干渉は小さいと考えられる。このような仮定の基に湖岸や海岸に生育している実植生や人工海草・模型植生の、浅い水域($d=50\sim60$ cm)での消波効果(透過率)の推定法を提案した。

謝辞：コアマモの実態調査と採取には、島根大学汽水域研究センターの國井秀伸先生、エステックミックの木村保夫氏に多くの御指導と御協力を頂いた。アサザ等の水生植物の実態調査と採取には、国土交通省土木研究所の中村圭吾氏、西廣 淳氏(現在、東京大学農学生命科学研究科)、宮脇成生氏、同霞ヶ浦工事事務所の村岡基晴氏に多大な御指導と御協力を頂いた。アマモの実態調査と採取には(株)シャトー海洋調査の吉田司氏、(株)日本海洋生物研究所の輪島毅氏にお世話になった。人工海草の使用においては、(独)港湾空港技術研究所も永井紀彦氏、菅原一晃に御指導を頂いた。ここに記して謝意を表します。

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播する波の特性, 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.

川崎和俊・松村章子・堀内一孝・山田 洋・小竹康夫・さわら木亭(2001): 波浪場で動揺する人工海藻周辺の流れ場に関する実験的研究, 土木学会第56回年次学術講演会工演集, pp. 31-35.

片岡慎二・岩崎健次・寺川博也(1990): 養浜工としての人工海藻の開発, 海洋開発論文集, Vol. 6, pp. 269-274.

小島朗史・西村宣信・宇土寿一(1993): 新エネルギー吸収型波浪制御構造物(フラップボード)の開発について, 海洋開発論文集, Vol. 9, pp. 247-252.

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.

菅原一晃・永井紀彦(1992): 波による堤体前面の洗掘・海岸浸

食に対する人工海草の防止効果, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 461-465.

瀬戸雅文・江畑憲吾・桜井 泉・松岡 学・山下俊彦(1997): ホッケイ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.

岡 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・米澤泰雄・尾澤卓思(2001): 霞ヶ浦における湖岸植生帯の侵食過程に関するモデル的検討, 応用生態工学会, 第5回研究発表会講演集, pp. 49-52.

中村圭吾(2002): 湖岸沿岸帯の復元を考える視点—霞ヶ浦の事例を中心として—, 雑誌 河川3月号, pp. 42-46.

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・藤原直夫・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, 応用生態工学会第4回研究発表会講演集, pp. 77-80.

長谷川寛(1999): 藻場基盤に作用する海浜経由の波力について, 土木学会論文集 No. 621/II-47, pp. 153-165.

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(1999): 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・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.

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(2), pp. 891-895.

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.

服部昌太郎(1991): 海岸工学, コロナ社, 230 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 Nakaumi and its neighboring waters, Journal of Marine Systems, 26, pp. 223-231.

Massel, S. R., K. Fukukawa and R. M. Brinkman (1997): Surface wave propagation in mangrove forces, Fluid Dynamic Research, 24, pp. 219-249.