

水辺植生の水理特性について

林 建 二 郎* ・ 萩 原 運 弘** ・ 上 原 正 一***
藤 間 功 司**** ・ 重 村 利 幸*****

1. 緒 言

河岸や湖岸における環境問題への関心が高まる中で、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・利用に対する要求も高まってきた。しかし、水辺植生の生育・保持やその維持・管理法の検討において重要な植生の耐波特性や、植生が波浪エネルギーをどの程度まで反射・減衰 (Bouter, 1991; 福岡ら, 1994; Mazda ら, 1997) させるかについてはまだ十分に明らかにされていない。これら植生の水理問題の解明においては、植生域内・外の流れや、植生に作用する流体力の特性を明らかにする必要がある。

また、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 (浅野ら, 1988; 菅原・永井, 1992; 伊福, 1997)。水産分野では、魚貝類の生息場のための藻場の形成条件 (瀬戸ら, 1997) 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 (長谷川, 1997) を調べる研究が行われている。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未解明な点が多い。

反射波を抑えるとともに、越波および透過による港内透過波を許容最小限に抑え、港内外の海水交換を図れる利点から、透水性消波構造物の採用が計画・施工されている。その基礎的な研究として、円柱などの多柱杭を波の進行方向に複数列並べた複数列多柱杭構造物や一様な透過性物体 (捨石やブロック等) の波の反射率 K_r や透過率 K_t 、ならびに作用波力等の水理特性が調べられている (近藤・藤間, 1970; 榎木, 1991; 浦島, 1992)。

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エネルギーの反射や減衰特性を明らかにすることを目的として、波動場における模型植生群に作用する波力特性および波の反射・消波特性を水理模型実

験により調べたものである。

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 1~2 mm 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 $s \approx 22$ cm, 代表幅は $D = 5$ cm である (図-2 参照)。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 6.9 cm, 横断方向に 8 cm である。植生群の水路方向の長さは $B = 110.4$ cm である。植生群 (幅 = 80 cm, 高さ = 22 cm, 長さ $B = 110.4$ cm) の空隙率は $\lambda = 0.984$ 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等の植生を模擬したものである。

模型植生群の透水係数 K_p を評価するために、水槽内に定常流を環流させ、植生群内の動水勾配および透過水量を計測し植生群の透水係数 K_p を評価した。植生群下流部の流速分布より透過水量を評価した。流速の計測には超音波流速計 (電子工業 (株) 社製) を使用した。本流速計は搬送波変調方式のため、植生領域内部のような間隙体内での流速も計測可能である (但し、搬送波の送受信が可能な範囲に限る)。

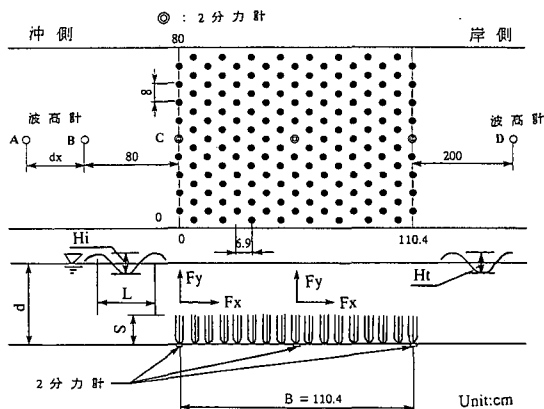


図-1 実験装置の概略

* 正 会 員 Ph.D. 防衛大学校助教授
** 正 会 員 工博 沼水建設技術研究所環境技術開発部
*** 学生会員 防衛大学校土木工学教室
**** 正 会 員 工博 防衛大学校助教授
***** 正 会 員 Dr.E. 防衛大学校助教授

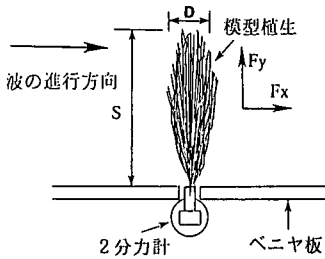


図-2 模型植生と2分力計

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 100 gf)を用いて計測した(図-2参照)。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。但し, これら計測された流体力には, 植生の動揺による慣性力(模型植生の質量×動揺加速度)も含まれている。

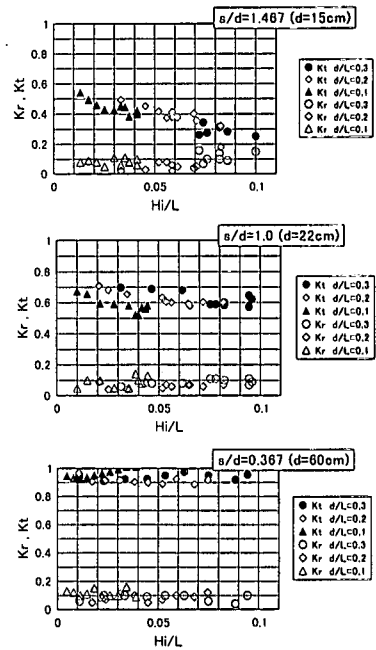
模型植生群による波の反射率 K_r (=反射波高 H_r /入射波高 H_i) と透過率 K_t (=透過波高 H_t /入射波高 H_i) を計測するために, 4本の波高計を植生群最前列より沖側 $(0.8+d_x)$ m の位置Aと0.8 m の位置B, 流体力計測用の模型植生の位置C, ならびに植生群最後列より岸側2 m の位置Dに設置した。波高計A, Bの間隔 d_x は波長 L の1/4とした。沖側に設置した2台の波高計(A, B)の時系列記録より入射波高 H_i と反射波高 H_r を分離・推定し, 波の反射率 K_r を求めた。岸側2 m に設置した波高計Dの時系列記録より, 透過波の平均波高 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, $d=15$ cm, 22 cm, 60 cm 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 と水深 d の比が $s/d=1.467$ および1.0となる, $d=15$ cm と22 cm の場合は, 河口や湖岸に生育しているヨシ等を対象とした場合である。

3. 結果および考察

3.1 模型植生の消波特性

模型植生群からの波の反射率 K_r および透過率 K_t 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 d 別に図-3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。水深 d が模型植生の高さ s より小さい場合 ($s/d=1.467$) には K_t は0.25~0.55の範囲である。 d が s と同程度の場合 ($s/d=1$) には $K_t=0.5\sim0.7$ の範囲である。 d が s より大きい場合 ($s/d=0.367$) には $K_t=$

図-3 模型植生群による波の透過率 K_t と反射率 K_r

0.87~1.0の範囲である。

一方, 植生高さ 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 ($s/d>1$) 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。

水深 d が浅い場合に透過率 K_t が低下する原因としては, 水深波長比 d/L を一定に保った場合, 水深 d の減少に伴い植生群の波の進行方向長さ B と波長の比 B/L (= $d/L * B/d$) が増加することも挙げられる。

K_t に及ぼす H_i/L , d/L の影響は, 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。

3.2 模型植生に作用する波力特性

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 $F_{x\max}$ とする。 $F_{x\max}$ を $\rho g D^3$ で割った無次元値の, 入射波高 H_i を植生高さ s で割った無次元値 H_i/s に対する変化特性を, 設置場所をパラメーターとして各水深別に図-4に示す。但し, D は植生一株の代表幅である ($D=5$ 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, $d/L=0.2$ の場合の結果である。 $F_{x\max}$ は, H_i/s の増加および s/d の減少に伴い, 水平水粒子速度 u が増加するため大きくなっている。

水深が浅い $s/d=1.46$ の場合には, 植生群による波高の減衰が顕著なため, 中央や後列の植生の一株に作用する波力は, 著しく小さくなっている。水深が深い $s/d=$

0.367 の場合には、前列における $F_x D_{\max}$ は植生一株のみを単独に設置した場合よりも大きくなっている。

図-4 に示した $F_x D_{\max}$ の波高 H_p に対する変化特性を図-5 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。水深が浅い $s/d=1.46$ と 1.0 の場合には、 $F_x D_{\max}$ と波高 H_p 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。

3.3 模型植生の抗力係数と質量係数

波力 F_x 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 F_a および慣性力 F_m とする。これら F_a および F_m の算定にはフーリエ解析を用いた。 F_m と F_a の比 F_m/F_a の CKC 数および CRe 数に対する変化特性を s/d と d/L をパラメーターとして

図-6 に示す。CKC 数および CRe 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 数と Re 数でありそれぞれ次式で定義される。

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

$$CRe = U_{mc} \cdot D_p / \nu \quad (2)$$

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、 ν は水の動粘性係数、 D_p は植生一株を構成する柱状部材一本の換算直径（ $D_p=0.155$ cm）である。

F_m/F_a は CKC 数および CRe 数の増加に伴い減少していることがわかる。 F_m/F_d と CRe 数の関係においては、 s/d の影響が認められる。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、CKC 数が非常に大きくなる結果、 F_a が卓越している。植生群中の植生一株に作用する波力の場合も図-6 と同様な結果が得られている。

波力 F_x の特性をより詳しく調べるために、植生一株を構成する柱状部材に作用する波の進行方向波力（＝

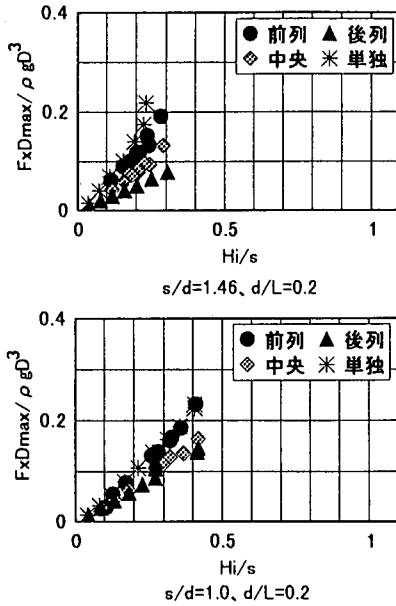


図-4 $F_x D_{\max}$ と波高 H_i の関係

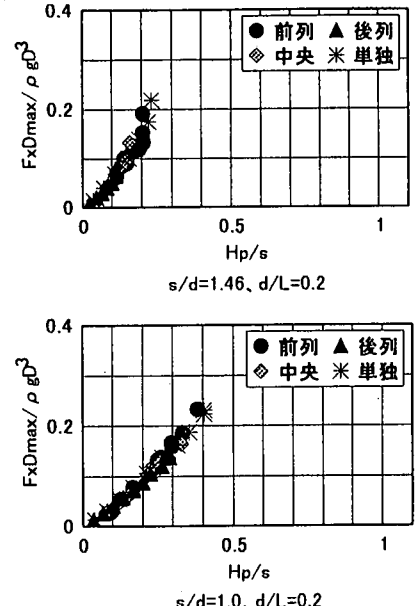


図-5 $F_x D_{\max}$ と波高 H_p の関係

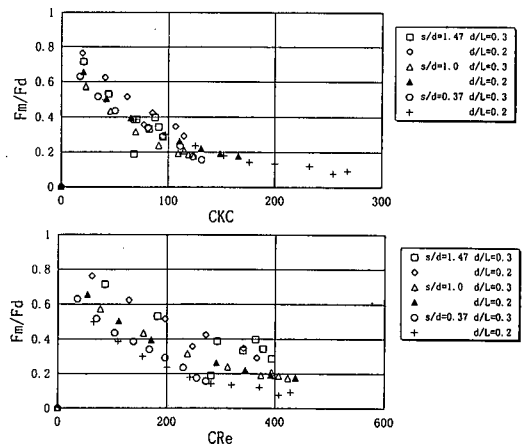
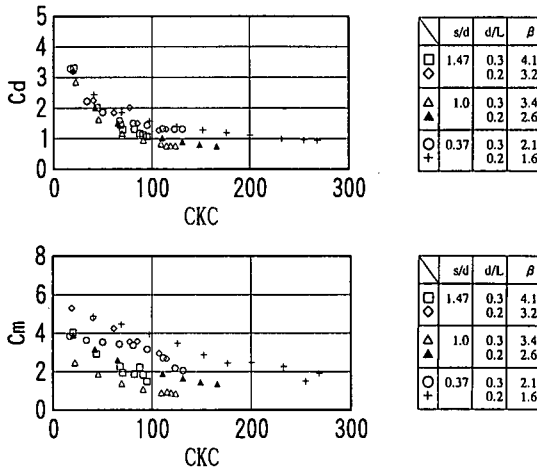
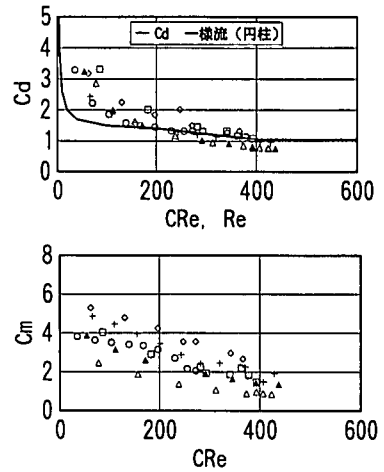
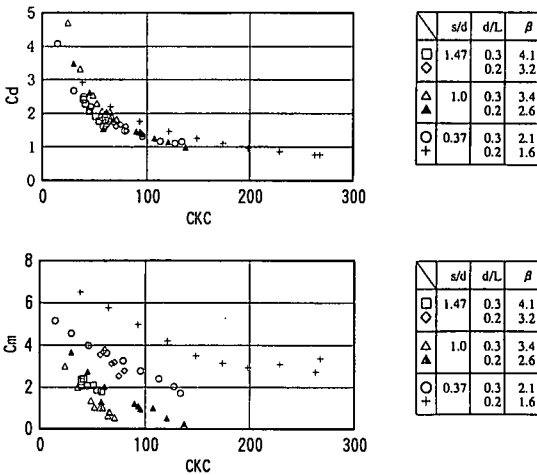
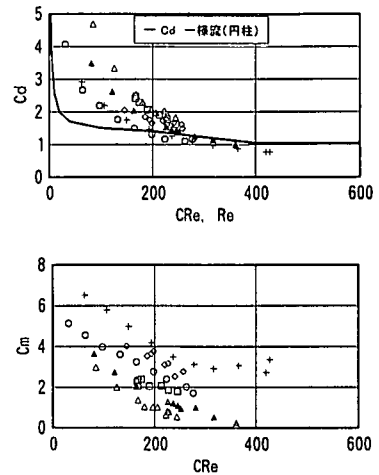


図-6 F_m/F_d の CKC および CRe に対する変化

F_x /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 C_d と質量係数 C_m を算定した。 C_d および C_m の算定にはフーリエ解析を用いる方法 (Keulegan

図-7 C_d と C_m の KC 数に対する変化 (単独配置)図-8 C_d と C_m の Re 数に対する変化 (単独配置)図-9 C_d と C_m の KC 数に対する変化 (植生群の中央列)図-10 C_d と C_m の Re 数に対する変化 (植生群の中央列)

and Carpenter, 1958) を使用した。波の水粒子速度 u および加速度 du/dt の算定には微小振幅波理論を用いた。

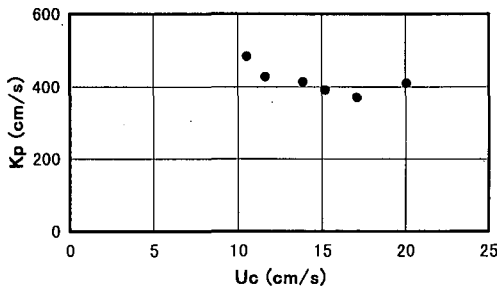
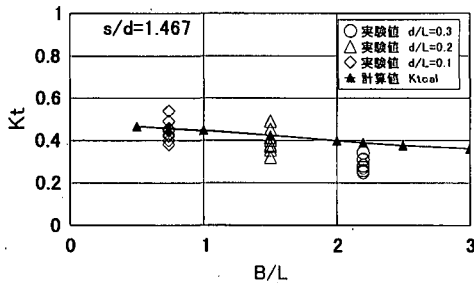
植生一株のみを単独で設置した場合の、 C_d および C_m の KC 数と CRe 数に対する変化特性を、 s/d 、 d/L ならびに β 値をパラメーターとして図-7、8 に示す。 $\beta = CRe/KC = D_0^2/(\nu T)$ で定義される β 値は、Re 数と Keulegan-Carpenter 数との比を示す周波数パラメーターである。同様に、植生群中の中央列に設置した植生一株の C_d と C_m の KC 数と CRe 数に対する変化特性を図-9 と図-10 に示す。

C_d は KC 数および CRe 数の増加に対し減少している。 C_d と CRe 数の関係を示す図-8 および図-10 の上図中には、定常流中における円柱の抗力係数 C_d とレイノルズ数 ($Re = \text{主流速度} \times \text{円柱径}/\nu$) との関係を実線 (—) で記入している。本模型植生の C_d 値は、200 <

CRe の範囲で定常中における円柱の C_d 値と概ね一致している。 C_m も KC 数および CRe 数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 が同じ場合の C_m は、 d/L および β 値の減少にともない大きくなっている。振動流中における円柱の抗力係数 C_d および質量係数 C_m と KC 数の関係におよぼす β 値の影響 (但し、 $\beta > 497$) においては、 β 値の減少に伴い C_d は増加し、 C_m は減少することが振動流発生装置を用いた室内実験により明らかにされている (Sarpkaya, 1976)。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 C_d および C_m を調べた結果はまだ報告されていない。

3.4 模型植生群の透過率

波長 L に比べて有限幅員 B が極めて小さい均質な透過性物体からなる直立堤の透過率 K_t の評価式として以下の理論式がある (近藤・竹田, 1983)。

図-11 透水係数 K_p 流速 U_c の関係 ($s/d=1.467$)図-12 模型植生群の透過率 K_t と CKC 数の関係 ($s/d=1.467$)

$$K_t = 1 / \{1 + 2\pi(B/L) \cdot f / (2\lambda)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中の、 λ は透水層の空隙率である。 f は透水層の抵抗係数であり、透水層の透水係数 K_p と作用波の角周波数 σ ($=2\pi/T$) を用いて (4) 式で与えられる。

$$f = \lambda \cdot g / (K_p \cdot \sigma) \quad \dots\dots\dots (4)$$

水槽内に定常流を還流させて求めた本模型植生群の透水係数 K_p と植生群内の代表流速 U_c との関係を図-11に示す。 U_c は、植生群内の単位幅透過流量を植生群の中央列における水深で割った平均流速である。 K_p の流速 U_c に対する変化は少なく K_p は約 400 cm/s である。

水深 d が植生高さ s より小さい場合 ($s/d=1.467$) における透過率 K_t の、植生群長さおよび波長の比 B/L に対する変化特性を図-12に示す。図中には、透過率の近似理論式である (3) 式に、本模型植生の空隙率 λ と抵抗係数 f を代入して得られた計算値 K_{tcal} を実線で示す。(3) 式は、堤体による波の変形については長波近似を用いたものであり、 B/L が小さい場合の理論式であるが、計算値と本実験値との一致は比較的良好である。しかし、植生群による波の透過率評価式に対する (3) 式の適用に関しては問題も多い。植生群による波エネルギーの減衰機構等を、よりの確に考慮した透過率評価式の確率は今後の課題である。

4. 結 言

模型植生群による波の反射・消波特性を調べるととも

に、力計を用いて模型植生の一株に作用する波力の直接計測を行い、植生群に作用する波力特性を調べた。得られた主要な結論を以下に示す。

(1) 水深 d の減少に伴い透過率 K_t は減少し、水深 d が模型植生の高さ s よりも低い場合の K_t は 0.25~0.55 であった。一方、植生群による波の反射率 K_r は小さく 0.1 前後であった。従って、 $d/s < 1$ の場合には、多くの波エネルギーが植生群に吸収される。

(2) 透水性 (浸透性) 物体である植生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。モリソン式中の抗力係数と Re 数の関係は一方向流中に置かれた円柱の場合と類似していた。

(3) 水深 d が模型植生の高さ s より小さい場合における透過率 K_t は、植生群の長さおよび波長の比 B/L の増加に対し指数関数的に減少する。この K_t と B/L の関係は、波長 L に比べて有限幅員 B が極めて小さく、均質な透過性物体からなる直立堤の透過率 K_t に対する近似理論式により概ね評価された。

参 考 文 献

- 浅野敏之・筒井勝治・酒井哲郎 (1988): 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.
- 浦島三朗 (1992): 円柱杭型消波構造物の反射率及び透過率について, 苫小牧工業高等専門学校紀要, 第 27 号, pp. 91-97.
- 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.
- 近藤俊郎・藤間 聡 (1970): 透過性構造物の水理特性, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 155-162.
- 近藤俊郎・竹田英章 (1983): 消波構造物, 森北出版, pp. 70-99.
- 榎木 亮: 波と漂砂と構造物, 技報堂出版, 482 p., 1991.
- 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藻の防止効果, 海岸工学論文集, 第 39 巻, p. 461-465.
- 瀬戸雅文・江畑恵吾・桜井 泉・松岡 学・山下俊彦 (1997): ホッケイエビ生息場形成条件, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 303-308.
- 長谷川寛 (1997): 二枚貝の生息環境を改善する離岸剪定設計法, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 273-278.
- 福岡捷二・渡辺英明・新井田浩・佐藤健二 (1994): オギ・ヨシ等の植生の河岸保護機能の評価, 土木学会論文集, No. 503/II-29, pp. 59-68.
- Bouter, E. E. (1991): Wave damping by reed, P.I.A.N.C.・A.I.P.C.N., Bulletin 1991, No. 75.
- Keulegan, G. H. and L. H. Carpenter (1958): 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.
- Mazda Y., E. Wolanski, B. King, A. Sase, D. Ohtsuka, and M. Magi (1997): Drag force due to vegetation in mangrove swamp, Mangroves and Salt Marshes, 1(3), pp. 193-199.
- Sarpkaya, T. (1976): Vortex shedding and resistance in harmonic flow about smooth and rough circular cylinders, BOSS-76, Vol. 1, pp. 220-235.