

側岸に沿岸植生が繁茂する水路上を伝播する波の変形特性

浅野 敏之*・松元 涼子**・菊池 誠治***

アシ、海藻、マングロープ等の沿岸植生は、景観や生態系保全に対して大きな価値を有することが広く認識されている。しかし、そこでの水理現象は不明な点が多い。本研究は、側岸に沿岸植生が繁茂する水路やエスチュアリー内に波が伝播するときの波高変化を、数値モデルと解析モデルによって議論したものである。植生の密度や水路断面の形状、入射波の性質によって、結果の特性がどのように変化するかを検討した。また、植生の抗力抵抗や主流部分と植生内の停滞水との運動量交換が、全体の流れに及ぼす影響についても検討した。

1. はじめに

今日の沿岸域には、景観や余暇を楽しむ空間として、また野鳥や海岸小動物とふれあう憩いの場としての役割が期待されている。沿岸植生は、景観や生態系保全に大きな価値を有することが認識され、また来襲波浪に対して背後の海岸を保全する機能も有している。こうした時代の要請の中で、沿岸域植生の持つ水理学的機能の解明が必要とされている。これまでの研究のほとんどは、植生繁茂域に波が直角に入射する場合の波高減衰特性についてであり(例えば浅野ら, 1991; 林ら, 2002), それ以外の植生の有する多様な水理学的機能については十分に研究がなされていないのが現状である。

側岸の植生は、繁茂域内の低流速域と水路中央部の高流速域との運動量交換を通じて水路中央部の流れをも変化させる。こうした研究は、高水敷に樹木が存在する場合の河川の通水能力や河床変動への影響評価の観点から、河川工学の分野で先行して研究が進められている(例えば、泉・池田, 1989; 建設省河川局治水課, 1994)。著者らは、マングロープ湿地帯内の土壌堆積量・堆積速度を現地観測し、水路中央部で浮遊した底質が、波動運動が穏やかな側岸の植生繁茂域内で堆積するメカニズムを考察した(Saad ら, 1998)。この課題は、マングロープ林の繁茂域自己造成能力を検討したものであるが、底質移動の外力である波動場の解析はその時点では十分でなかった。

本研究は、側岸に植生が繁茂するときの波の減衰特性を、水路中央部との運動量交換に着目して、これを記述するモデルを考察したものである。対象とする現象には、波の条件、地形条件、植生条件といった多くの因子が関与する。本研究では、まず現実の細かな地形条件・植生条件を表現できる数値解析モデルによる検討を行った。次いで、波の変形特性の骨格を明らかにするため、単純化された条件下における解析解を導いた。両者の比較か

ら解析モデルの有用性と限界について考察した。

2. 植生繁茂域の波高減衰の数値解析モデル

(1) 計算条件の設定

図-1 に示すように、一定水深 h を有する水平床の直線水路で、側岸 $y=0 \sim B_v$ の範囲で植生が繁茂する水路を考える。水平方向に x 軸、側岸から水路横断方向に y 軸、静水面を原点として鉛直上方に z 軸をとり、半無限の植生繁茂域に線形波が侵入する場合を考える。

数値解析によれば、どのような複雑な地形条件も取り込んで計算することができる。また植生密度や植生の直径などを空間的に変化させて与えることも可能である。植生繁茂域内の低流速域と水路中央部の高流速域の運動量交換は、流速勾配に比例する拡散項で表現する。

基礎式は、次式のような非定常緩勾配方程式で与えた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial x} (nM) + \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial y} (nN) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{1}{2} (f_b + f_v) |Q| M / h^2 + A_n \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

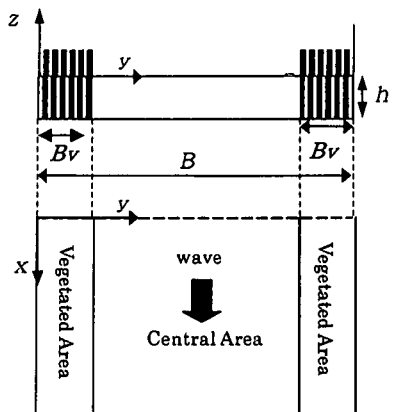


図-1 座標系

* 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科
** 正会員 工修 鹿児島県環境技術協会
*** (株) 伸紀

$$\frac{\partial N}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{1}{2}(f_b + f_v)|Q|N/h^2 \\ + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 η は水位変動、 c は波速、 n は群速度係数、 M 、 N はそれぞれ x 、 y 方向の線流量、 Q は合成線流量 $Q = \sqrt{M^2 + N^2}$ 、 A_h は水平拡散係数であり、ここでは簡単に $A_h = 0.05 \Delta x^{4/3}$ を基準値として与えた。 f_b は底面摩擦係数、 f_v は植生による抗力抵抗係数であり植生密度 N_v 、植生径 d_0 、抗力係数 C_D を用いて次式で与えられる。

$$f_v = C_D \int_{-h}^0 N_v d_0 dz \dots\dots\dots (4)$$

数値計算は、 M 、 N と η をスタッガード格子にとり、時間差分には leap-frog 法とした。水路上上流端では、日野・仲座 (1988) による無反射境界スキームを leap-frog 法に適用できるよう修正した久連山・浜中 (1991) の計算スキームを採用し、波が反射することなく透過するようにした。

(2) 計算結果と考察

ここでは、水路全幅 $B = 80$ m、水深 $h = 1.0$ m の一様矩形断面水路上を周期 $T = 10$ s、初期波高 $H_0 = 20$ cm の波が遡る状況を基本的な計算条件として与えた。底面摩擦係数は、 $f_{b,1} = f_{b,2} = 0.01$ 、植生の抗力係数 $C_D = 2.0$ 、植生径 $d_0 = 2$ cm、植生密度 N_v は 20 本/m² を標準の値と採用した。側岸の植生繁茂幅 B_v と水路全幅の比は $0.1 \sim 0.3$ の間で変化させた。空間メッシュの寸法は $\Delta x = \Delta y = 1.0$ m とし、時間刻みは $\Delta t = 0.1$ s とした。計算は静水状態から波を入射させ、計算領域が定常に達する 10 周期後の計算結果を採用した。

図-2 は水路内を進行する波のスナップショットである。上流端の無反射境界はほぼ良好に処理されているが、1 割以下の小さな反射波も認められた。

図-3 は水路横断方向の波高分布を示したものである。植生繁茂域の波高は水路中央に比べて小さいが、伝播とともに両者は均等化していくことがわかる。

図-4 は、初期入射波高 H_0 をパラメータとした時の波高分布を示したものである。植生群による抗力は流速の 2 乗に比例するため、入射波高の増加とともに波高減衰は大きくなり、波高への依存性が見られる。水路中央部では $x = 10 \sim 30$ m 付近でいったん波高は初期波高より大きくなり、植生繁茂域に侵入した波のエネルギーが水路中央部に輸送されることがわかる。なお、図-3 中には、次節で示す解析モデルによる結果も示しているが、両者の比較についての考察は、他のパラメータの波高減衰に及ぼす影響とともに、4 節で述べる。

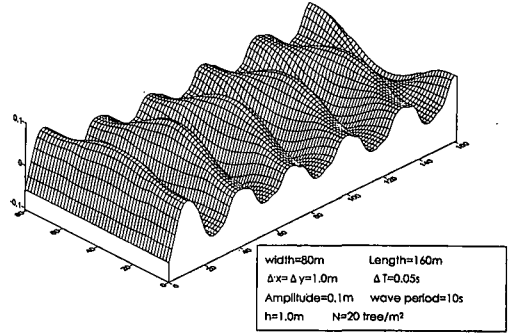


図-2 水路内を進行する波のスナップショット

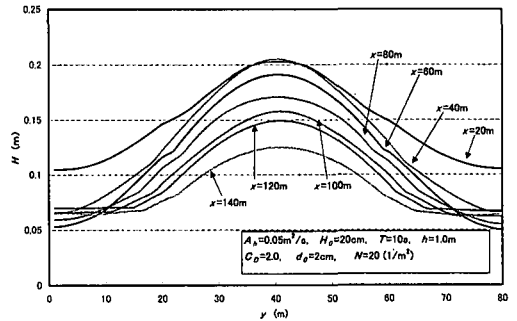


図-3 波高の横断方向分布

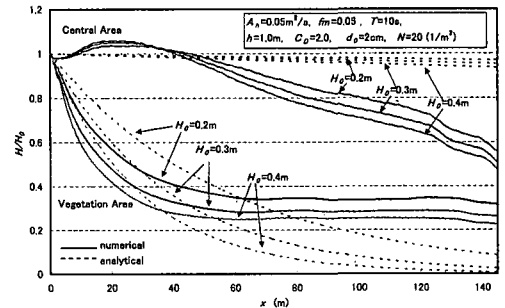


図-4 初期波高 H_0 をパラメータとしたときの波高減衰曲線

3. 解析モデルの構築

(1) 一様水深上の線形長波の解

数値モデルは、現地の複雑な地形条件や植生条件に対しても解を得ることができるが、波高減衰率の普遍的特性を直示するためには解析的表示が優れている。そこで、図-1 に示した条件下で、植生繁茂域と水路中央域の両者に対して、線形長波に対する波高減衰の表示式を解析的に誘導する。

境界 $y = B_v$ で植生繁茂域内の低速水塊と水路部の高速水塊との間の運動量交換に起因するせん断力を考慮する。水路中央域、植生繁茂域の水路方向水平流速をそれ

それ u_1 , u_2 とすると, 基礎式は次式となる.

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta_1}{\partial x} - \frac{f_{b,1}}{2h} |u_1| |u_1 - u_2| - \frac{f_m}{h} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta_2}{\partial x} - \frac{f_{b,2}}{2h} |u_2| |u_2| + \frac{f_m}{h} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| - \frac{C_D}{2} N_v d_0 u_2 |u_2| \quad (6)$$

上式で f_m は運動量交換係数である. f_m については, 複断面河道における低水路の流れと高水敷上の流れの相互干渉と流水抵抗の評価として, 河川工学の分野で研究が行われており, 境界混合係数とも呼ばれている (福岡・藤田, 1989).

ここでは, 線形の範囲で解を求めるために, 流速の 2 乗に比例する項をフーリエ級数の初項で置き換え準線形化する. すなわち, 底面摩擦力は次式のように線形化される.

$$\frac{f_{b,i}}{2h} |u_i| |u_i| = \frac{4}{3\pi} \frac{f_{b,i}}{h} \bar{u}_i u_i = B_i u_i \quad (i=1, 2) \quad (7)$$

ここに, $i=1$ は水路中央域, $i=2$ は植生繁茂域の諸量を示す. 植生による抗力については次式で表示する (浅野ら, 1991).

$$\frac{1}{2} C_D d_0 N_v |u_2| = \frac{4}{3\pi} C_D d_0 N_v \bar{u}_2 u_2 = D u_2 \quad (8)$$

式 (5), (6) の右辺第 3 項の水路中央部と植生繁茂域前面の運動量交換によって生じるせん断応力を,

$$\frac{f_m}{h} |u_r| |u_r| = M_i u_i \quad (i=1, 2) \quad (9)$$

と表す (u_r は相対速度, $u_r = u_1 - u_2$) と, 両辺の 2 乗誤差 $\bar{E}_r^2$ を最小にする条件 $\partial \bar{E}_r^2 / \partial M_i = 0$ より, 係数 M_i は

$$M_i = \frac{f_m}{h} \frac{\overline{|u_r| |u_r| u_i}}{\overline{u_i^2}} \quad (10)$$

で求めることができる. ここに上線は一周期平均を表す. 正弦波形変動を仮定すると,

$$M_i = \frac{8}{3\pi} \frac{f_m}{h} \frac{\bar{u}_i^2}{\bar{u}_i} \quad (11)$$

となる. 本解析は, この運動量交換項によって水路中央域と植生繁茂域の干渉効果が考慮された, 準 2 次元モデルとなっている.

以上より, 式 (5), (6) は次式に変形される.

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta_1}{\partial x} - E_1 u_1, \quad (E_1 = B_1 + M_1) \quad (12)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta_2}{\partial x} = E_2 u_2, \quad (E_2 = B_2 - M_2 + D) \quad (13)$$

式 (12), (13) と連続式

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial t} = -h \frac{\partial u_i}{\partial x} \quad (i=1, 2) \quad (14)$$

から, E_i の x 方向変化が無視できると仮定すると, 最終的に次式が得られる.

$$\frac{\partial^2 \eta_i}{\partial t^2} + E_i \frac{\partial \eta_i}{\partial t} = g h \frac{\partial^2 \eta_i}{\partial x^2} \quad (i=1, 2) \quad (15)$$

水位変動 η_i は, a_0 を入射波の振幅, σ を角周波数とすると次式で表される.

$$\eta_i = a_0 \exp(-k_i x) \cos(k_r x - \sigma t) \quad (16)$$

式 (16) を式 (15) に代入すると波高減衰率 $k_{i,i}$ は次式となる.

$$k_{i,i} = \frac{\sigma}{\sqrt{2gh}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{E_i}{\sigma} \right)^2} - 1 \right]^{1/2} \approx \frac{\sigma}{2\sqrt{gh}} \left(\frac{E_i}{\sigma} \right) \quad (i=1, 2) \quad (17)$$

波高減衰率の最終結果である式 (17) によれば, 底面摩擦係数 f_b , 抗力係数 C_D , 植生径 d_0 , 植生密度 N_v は合成抵抗項 E_i を通じて波高減衰率 $k_{i,i}$ を基本的には比例関係で増加させることがわかる. 周期 T については, 長波の適用範囲にある限りは, 式 (17) の σ はうち消されるので現象に関与しない. 水深 h については, 長波の適用範囲内で $1/2$ 乗に逆比例して波高減衰率に影響する.

(2) 線形表面波の解

表面波の場合は, x , z 方向の運動方程式と連続式を基礎式として, 水面と底面の境界条件の下に解くことになる. 長波の場合と異なるのは, 水路中央部と植生繁茂域の運動量交換項の係数 M_i を求める際に, 位相平均に加え鉛直方向平均を考慮する必要があることである. すなわち, 式 (10) の代わりに次式を用いる.

$$M_i = \frac{f_m}{h} \frac{\int_{-h}^0 \overline{|u_r| |u_r| u_i} dz}{\int_{-h}^0 \overline{u_i^2} dz} \quad (18)$$

得られる分散方程式は以下のようになる.

$$\sigma^2 = g a_i \tanh(a_i h) \quad (19)$$

ここに, a_i ($i=1, 2$) は複素数で次式で与えられる.

$$a_i = \sqrt{\frac{\sigma k^2}{\sigma + i E_i}} \quad (20)$$

総抵抗項 E_i が十分小さい場合は次式に簡略化される.

$$a_i = k \left(1 - i \frac{E_i}{\sigma} \right)^{1/2} \approx k \left(1 - \frac{i E_i}{2\sigma} \right) = k (1 - i \varepsilon_i) \quad (21)$$

ただし, $\varepsilon_i = E_i / 2\sigma$ であり, $O(\varepsilon^2)$ 以上を無視すると, 複素波数の実数部 k_r , 虚数部 k_i は次式で計算される.

$$\sigma^2 = g k_r \tanh k_r h, \quad k_{i,i} = (E_i / 2\sigma) k_r \quad (22)$$

4. 解析モデルと数値モデルの計算結果の比較検討

解析モデルに基づく計算は、数値モデルの場合と同じ地形・植生パラメータで行った。運動量交換係数 f_m については、福岡ら (1992) による石狩川での検討結果を参考に $f_m=0.03$ を基準値として与えた。以下では、解析モデルと数値モデルの結果の特性を、計算パラメータごとに考察することにする。

先に示した図-4では、初期波高 H_0 による波高減衰について、数値モデル (図中実線) と解析モデル (破線) の結果の比較を示した。図-4の解析モデルによる計算結果では、数値モデルと同様、波高減衰率は初期波高 H_0 とともに大きくなる。これは流速の2乗に比例する抵抗項を考慮したためである。また、水路中央域と植生繁茂域の運動量交換によって、水路中央域でもわずかながら波高減衰が生じている。以上の特性は、数値モデル、解析モデルともに認められる結果である。しかし、波高減衰曲線の形状については、解析モデルでは指数的な減衰となっているのに対し、数値モデルでは減衰曲線の形状が異なることがわかる。

図-5は、同じ入力条件の下で、伝播長を800mと長くして、初期波高 H_0 をパラメータとして表示したものである。数値モデルの結果では、波の伝播過程で水路中央部の波高が植生繁茂部よりいったん小さくなってまた復元するという水路横断方向の振動が認められた。これは、植生繁茂部での流体抵抗による波高減衰が、伝播初期の x が100m付近まで極めて大きいために、水路横断方向の水位勾配が陰しくなって、水路中央部から植生繁茂域へのエネルギー輸送が過渡的に大きくなったためと思われる。

図-6は、パラメータを植生密度 N_v として数値モデルと解析モデルの比較を示したものである。数値モデル・解析モデルの結果とも N_v の増大とともに波高減衰が大きくなることは共通しているが、伝播に伴う減衰特性は異なる。解析モデルは干渉項の計算を含むとは言え指数減衰で表されるのに対し、数値モデルの結果は形状が異なり、また伝播初期の $0\text{m} < x < 40\text{m}$ 付近では水路中央域での波高は初期波高よりわずかに増大している。また、解析モデルによる結果では植生密度 N_v が増大しても、水路中央部では相違が見られないのに対し、数値モデルでは両領域で波高の減少が認められる。

図-7は、パラメータとして数値モデルでは水平拡散係数 A_h 、解析モデルでは運動量交換係数 f_m をとった時の、両者の結果の比較を示したものである。両パラメータは物理的には同じであるが、数値モデルと解析モデルとの波高減衰特性は一致しない。解析モデルでは運動量交

換係数 f_m を $0.00 \sim 0.15$ の範囲で変化させても、140mの計算領域の中ではほとんど波高減衰に相違を与えなかった。運動量交換係数 f_m の効果は、伝播距離が極めて大きな場合には有意な差が生じる。図-8は、潮汐 (周期 $T=12\text{h}=43200\text{s}$) が水路長さ $x=2500\text{m}$ を遡上するときの解析モデルによる波高減衰を示したものである。ここでは植生密度を $N_v=40\text{m}^{-2}$ とした。潮汐を対象とした場合には波高減衰の大きな植生繁茂域との運動量交換によって、特に水路中央域での波高減衰に f_m の効果が現れていることがわかる。

図-9は、植生繁茂域の幅 B_v の水路全幅 B との比をパラメータにとって数値モデルによる波高減衰の結果を示

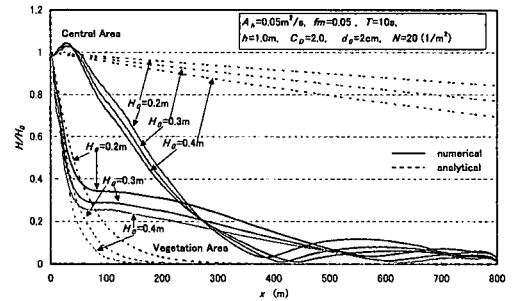


図-5 伝播長 $L=800\text{m}$ とした時の、波高減衰に及ぼす初期波高 H_0 の効果

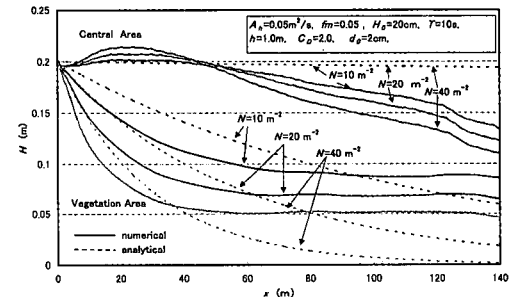


図-6 植生密度 N_v をパラメータとしたときの波高減衰曲線

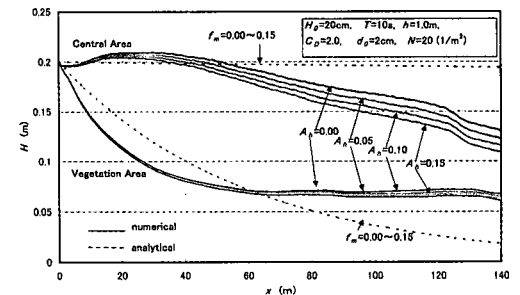
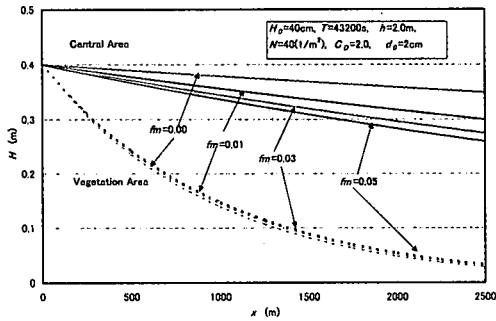
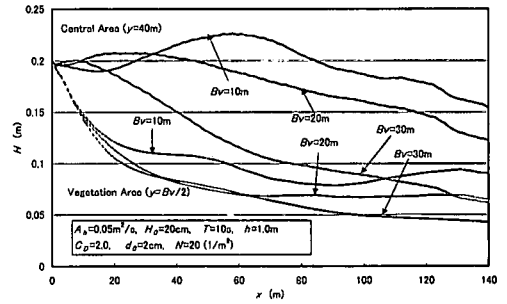


図-7 水平拡散係数 A_h 、運動量交換係数 f_m をパラメータとしたときの波高減衰曲線



図—8 潮汐の伝播に対する運動量交換係数 f_m の効果 (解析モデル)



図—9 植生繁茂域の相対幅 B_v/B をパラメータにしたときの波高減衰曲線 (数値モデル)

したものである。解析モデルは、基本的には1次元の取り扱いであり、水路幅に対する植生繁茂域の幅 B_v/B の影響は考慮できないため、図中には示していない。図—9では水路中心 $y=40\text{ m}$ の結果を水路中央部の結果とし、植生繁茂域の結果は植生部中央 $y=B_v/2$ の値を示している。植生繁茂部の幅が広がるほど、植生繁茂域のみならず水路中央域での波高減衰も大きくなることがわかる。

5. まとめ

側岸に植生が繁茂する水路内を伝播する波に対して、非定常緩勾配方程式に基づく数値解析を行うとともに、線形長波の場合と線形表面波の場合について波高減衰を記述する解析モデルを展開した。植生の形状・繁茂密度や運動量交換係数、入射波振幅などが波高減衰に及ぼす影響を、数値モデルと解析モデルの両面から検討した。

植生による流体抵抗は水粒子速度の2乗に比例するため、数値モデル・解析モデルともに波高減衰は初期波高の関数となることがわかった。しかし、水平拡散項と運動量交換係数は物理的には同じものであるにも関わらず、数値モデルと解析モデルの特性が異なる結果となった。また、解析モデルは水路中央域と植生繁茂域の運動量交換を考慮しているとはいえ、本来1次元的なモデルであることから、植生繁茂域の相対幅などの2次元特性は表現できない。解析モデルは、式 (17)、(22) の形で解の特性を明示させる長所があるが、数値モデルとの比

較を通じて解析モデルの限界についても明らかになった。

参考文献

- 浅野敏之・出口 浩・間瀬 肇・小林信久 (1991): 揺動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.
- 泉 典洋・池田駿介 (1989): 側岸に樹木を有する直線礫床河川の安定横断形状, 土木学会論文集, 第411号, II-12, pp. 151-160.
- 久連山秀樹・浜中健一郎 (1991): 日野の重ね合わせの原理による開放境界スキーム, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, II-209, pp. 458-459.
- 建設省河川局治水課 (1994): 河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン (案), 山海堂, 144 p.
- 佐藤一弘 (1992): マングローブ林, 日本の海岸林, ソフトサイエンス社, 513 p., pp. 226-237.
- 林健二郎・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49巻, pp. 721-725.
- 日野幹雄・仲座栄三 (1988): 数値波動解析における新しい無反射境界スキームの平面2次元問題への適用, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 262-266.
- 福岡捷二・藤田光一 (1989): 複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用, 土木学会論文集, 第411号, II-12, pp. 63-72.
- 福岡捷二・藤田光一・新井田浩 (1992): 樹木群を有する河道の洪水位予測, 土木学会論文集, 第447号, II-19, pp. 17-24.
- Saad S., 浅野敏之, M. Lokman Husain (1998): 潮流と降雨によって流送されるマングローブ湿地帯の底質の堆積特性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1246-1250.
- Dean R. G. and R. A. Dalrymple (1991): Long waves with bottom friction, Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, World Scientific, 353 p., pp. 146-154.