

樹木形態学に基づいた海岸林の津波減衰率の評価

Evaluation of Tsunami Attenuation Performance of Coastal Forests based on Tree Morphology

浅野敏之¹・藤宮祐介²・伊藤 暖³

Toshiyuki ASANO, Yusuke FUJIMIYA and Dan ITOH

Tsunami attenuation ability of coastal forests is attributed to the fluid resistance of their elements; such as a trunk, branches and leaves. In order to evaluate the fluid resistance precisely, quantitative relationships among these elements and the characteristics of their forms should be clarified. This study applies findings in the tree morphology to the modeling for coastal forests. The tree crown region is herein modeled as a three dimensional porous structure. Based on the mathematical model developed here, effects of wave and forest properties on the tsunami attenuation rates are discussed.

1. はじめに

海岸林による津波波高の減衰は、主として幹や枝・葉の抗力抵抗によって生じるため、海岸林樹木の形状特性を明らかにする必要がある。最近、海岸林の津波減衰効果を評価するために、実験水槽内に樹木群の模型を設置し、それに波を伝搬させた時の波高減衰を測定する実験的研究が行われている（例えば、今井ら、2004、松富ら2004）。一方で、数値計算によって海岸林の波高減衰効果を調べた研究（例えば、原田ら、2000）や、実際に津波が現地に遡上した状況を再現する数値実験も行われている（例えば、平石・岩瀬、2003）。

このように、津波防潮林としての関心の高まりから、海岸林について多くの研究がなされるようになったが、既往の研究では主として樹木の幹部による減衰を取り扱っており、枝や樹冠部による抵抗についてはあまり考察されていない。津波が樹冠部に達した場合には、密度が高く繁茂した枝や葉による大きな減衰効果が予想される。

本研究では、樹冠部の流体抵抗のモデル化にあたって、従来の研究のように2次元的な投影面積に比例するとして取り扱うのではなく、3次元的な多孔性構造物の扱いが実現に則していると考えた。林学で得られている樹木形態学の知見を応用して、津波に対する流体抵抗となる樹木形状の特性を現地観測によって調査し、この結果を基に樹冠部を含めた樹木群全体による津波波高減衰を記述するモデルを提示した。

2. 樹木形態学と流体抵抗表示のための樹木形状のモデル化

樹木は草本と違って3次元的な幹・枝・葉の構造を持

っている。葉は光合成生産を行い、幹や枝は光合成に必要な水や養分の通導組織としての役割を担う。樹冠内部で、枝や幹の断面積とそれによって支えられる葉の重量が比例することも知られている（鈴木2003）。樹木の幹・枝・葉を一定太さのパイプをつないだ単位パイプ系で表現するパイプモデル（Shinozaki et al., 1964）は、樹木形状についての多様な測定結果をよく説明できるとされる。

分岐前後の幹と枝、枝と枝の関係について見れば、図-1に模式図を示すように、根で吸収された水分が、幹・枝から分岐後の枝へと輸送されるわけであるから、水理学的に見れば分岐管路に相当する。分岐の前後で連続式を適用し、かつ通水速度は一定とすると次式が得られる。

$$D_1^2 = D_2^2 + D_3^2 \dots \dots \dots (1)$$

上式は、優れた自然観察者でもあったレオナルド・ダビンチによって見いだされたため、ダビンチ則とも呼ばれる。現在の林学研究からも、枝分かれした前後の樹木断面積が保存されることは、多くの調査結果から支持されている（城田・作田、2003）。なお、針葉樹（裸子植物：仮導管）と広葉樹（被子植物：導管）では導水機構が異なる。また枝の太さは導水機能だけでなくそれ以上の枝葉の重量を支える力学機能によっても支配され、ど

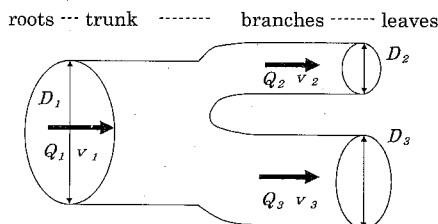


図-1 分岐前後の断面積保存則

1 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科
2 工修 (株)九電工
3 JR 東日本

ちらが形態形成を支配するかについての研究もある(種子田・館野, 2003)。しかし, これらは上述の断面積保存則の成立を大きく変えるものではない。

枝分かれ前後の樹木断面積が保存され, かつ樹木の立体角が小さければ, 幹・枝の単位高さ当たりの占有体積は地面からの高さ z によらず一定となり, 後述するように簡単な波浪モデルで津波波高減衰係数が表現できる。また一定量の葉を支持するために一定断面積の枝が必要であるというパイプモデルが成立すれば, 葉の形状抵抗の定量化も可能となる。こうした点で, 機能的・定量的な観点から研究された樹木形態学の知見が, 海岸水理学の研究と結びつく。

なお樹木の立体角については, 樹木個体が光を奪い合う競争の観点から研究がなされている。すなわち, 混み合っていない森林では樹木は枝を水平的に伸ばした方が葉の光合成生産に有利であるが, 隣接個体との競争が激しくなると, 枝をより高く伸ばした方(立体角を小さくした方)が有利となる。このトレードオフの関係から, 隅田(1996)は枝の立体角が決まると考え, 樹木の骨格構造の実測値からこの仮説を検討している。

3. 海岸林の樹木形状の現地観測

海岸林の津波減衰率の評価の観点から, 鹿児島県日置市にある吹上浜のマツ林で現地観測を行った。海岸側のマツは海からの強い潮風を受ける厳しい環境下であり, 樹高は低く幹も大きく傾いている。内陸側に行くと, マツは人工間伐を受け十分な間隔で繁茂しており, 胸高直径も大きい。海岸側と内陸側を除く中間部のマツの平均樹高は 14.4 m, 平均枝下高 6.6 m, 平均胸高直径 33 cm であった。

まず, 幹と 1 次枝の断面積保存則式(1)が成立するかを吹上浜海岸マツ林の現地観測から検討した。幹や枝の直径は測量標尺を当て写真上から読み取った。図-2 に示すように, 海岸側・陸側のマツの両者について式(1)が成立することが認められた。この結果が広葉樹についても成立するかを確かめるため, 鹿児島大学構内の広葉樹について断面積保存則を調べたところ(図-3),

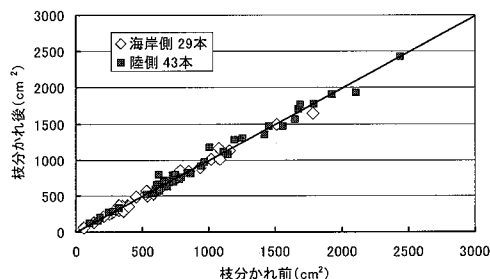


図-2 枝分かれ前後の断面積の関係(吹上浜マツ林)

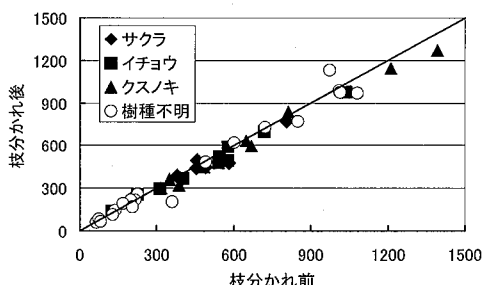


図-3 枝分かれ前後の断面積の関係(広葉樹)

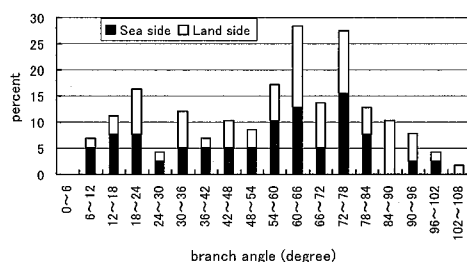


図-4 枝の分岐角 α , β の度数分布

樹種を問わず式(1)が成立することがわかった。なお, 図-3 の測定では画像内に基準となる寸法を撮影しなかったため, 縦軸・横軸を単位付きで表示できなかった。

次に, 同じ吹上浜海岸林のクロマツについて写真上から枝の分岐角と幹の傾きを測定した。分岐角に関しては鉛直軸からの角度を α , β とした。この角度分布図を図-4 に示す。分岐角 α , β は, 海岸側・陸側のどちらも $60^\circ \sim 78^\circ$ 付近を極大とすることがわかる。なお, 幹も地盤から鉛直に立ち上がっているのではなく, 潮風による影響で鉛直より $\gamma = 12 \sim 15^\circ$ の角度で傾いていることがわかった。

4. 樹木群内を通過する波動運動の定式化

(1) 基礎方程式

図-5 に示すように, 津波が海岸林に來襲する時の流体場を, 樹冠部領域(領域①: $z = h_0 \sim h_1$)と幹枝領域(領域②: $z = h_1 \sim h_2$)に分割する時, それぞれの領域における運動方程式は次式となる。

$$\rho \varepsilon_i \frac{Du_i}{Dt} = -\nabla(p + \rho g z) - f_M - f_D (i=1,2) \cdots (2)$$

ここに, ρ は水の密度, ε_i は空隙率, u_i は水粒子速度ベクトル, p は圧力, g は重力加速度, f_D , f_M はそれぞれ樹木群の鉛直距離 dz あたりに作用する抗力, 慣性力の反力ベクトルである。 f_M は慣性力係数 C_M と樹木体積占有率 $\delta_i = 1 - \varepsilon_i$ (ε_i は空隙率), 幹枝の直径 D , 単位面

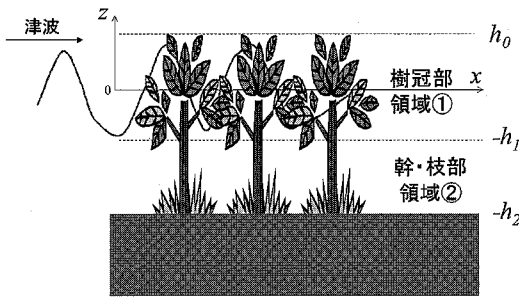


図-5 座標系

積あたりの幹の本数 N を使って次式で与えられる.

$$f_M = \frac{\pi}{4} \rho C_M \Sigma D^2 N \frac{Du_i}{Dt} = \rho C_M \delta_1 \frac{Du_i}{Dt} = \rho C_M (1 - \varepsilon_i) \frac{Du_i}{Dt} \quad (3)$$

領域② (幹枝部) の幹の体積占有率は

$$\delta_2 = \frac{\pi}{4} \Sigma D^2 N \quad (4)$$

となる. 一方, 領域① (樹冠部) で樹木の体積占有率 δ_1 を考えると, 枝の立体分岐角が十分小さい場合には, ダヴィンチ則より枝分かれした樹木上部においても $\delta_1 = \delta_2$ となる. 今井・鈴木 (2005) によるマツの幼木の調査結果では, 幹・枝葉の換算断面積は地上からの高さに対してほぼ一定であると報告されている. この結果によれば後々の解析においてモデル化が容易になるが, 著者らの図-4 に示した結果からは, 枝の立体分岐角は一般には小さいとは言えず, 幹・枝の体積占有率 δ_1 は鉛直方向 z の関数となる. なお, 樹冠部の葉による付加体積を考慮すると, 領域① (樹冠部) の樹木体積の占有率は葉の付加分の補正係数 C_{Lv} を用いて

$$\delta_1 = 1 - \varepsilon_i = C_{Lv} \delta_2 \quad (5)$$

で表すことができる.

領域②の樹木群に作用する抗力の反力 f_D は次式で表される.

$$f_{D,2} = \frac{1}{2} \rho C_D u_2 |u_2| N \Sigma D \quad (6)$$

領域①では, 枝の抗力抵抗に葉による抗力抵抗と粘性抵抗が加わるが, 葉による投影断面積の増大を補正係数 C_{Lv} で考慮し, 次式で表す.

$$f_{D,1} = \frac{1}{2} \rho C_D u_1 |u_1| N C_{Lv} \Sigma D \quad (7)$$

抗力 f_D を線形抵抗係数 f_P で表す.

$$f_{D,i} = f_{P,i} \rho \sigma u_i \quad (8)$$

ここに σ は波の各周波数である. 式 (8) の両辺に $\varepsilon_i u_i$ をかけ, 1 周期積分, 体積積分を行うと, f_P は次式で求められる.

$$f_{P,i} = \frac{\frac{1}{2} C_D N \int_V \int_0^T C_{Lv} \Sigma D \varepsilon_i |u_i|^3 dt dV}{\sigma \int_V \int_0^T \varepsilon_i |u_i|^2 dt dV} \quad (9)$$

式 (2) の実質微分 Du_i/Dt 内の移流項を無視し, f_M に式 (3) を代入し左辺に移項すると, 左辺は次式となる.

$$\rho \{ \varepsilon_i - C_M (1 - \varepsilon_i) \} \frac{\partial u_i}{\partial t} = \rho C_{ri} \frac{\partial u_i}{\partial t} \quad (10)$$

f_D に式 (8) を考慮すると, 運動方程式は次式のように変形される.

$$C_{ri} \frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla (p + \rho g z) - f_{P,i} \sigma u_i \quad (11)$$

(2) 樹木の空隙率によって上下2層に領域分割した波高減衰モデル

幹枝部と樹冠部の領域で z にかかわらずそれぞれ一定の空隙率 ε_i を持つと考え, 運動方程式の係数は定数となり, 後の数式の展開が簡単になる. また枝直径の総和 ΣD は z の関数であるが, 式 (9) の領域平均を通じ線型化した抗力項も z によらないものとなる. 式 (11) の回転をとると非回転であり, 流れは形式的に速度ポテンシャルで表現できる.

式 (11) 中の u_i を速度ポテンシャル ϕ_i で書き直すと,

$$C_{ri} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \frac{1}{\rho} (p + \rho g z) + f_{P,i} \sigma \phi_i = 0 \quad (12)$$

となる (Rojanakamthorn ら, 1989, 泉宮ら, 1989). 周期解を考え,

$$\phi_1 = \Phi_1 \exp(i\sigma t), \quad \phi_2 = \Phi_2 \exp(i\sigma t) \quad (13)$$

と置くと, 領域界面の圧力の連続式より

$$(c_{r1} - i f_{P1}) \Phi_1 = (c_{r2} - i f_{P2}) \Phi_2 \quad (z = -h_1) \quad (14)$$

が得られる.

界面の振幅を $\hat{\eta}_1 = \hat{\eta}_1 \exp i(\sigma t - kx)$ とし, 領域①と②の速度ポテンシャルの空間変数部分を海底における境界条件を考慮して次式とおく.

$$\Phi_1 = X \cosh k(z+h_1) + Y \sinh k(z+h_1) \quad \dots (15)$$

$$\Phi_2 = Z \cosh k(z+h_2)$$

以上で未知変量は $\hat{\eta}_1$, X , Y , Z の4つであり, 水面と領域界面の境界条件から決定していく. 水面 ($z=0$) の境界条件から次式が得られる.

$$\{gk - \sigma^2 \coth kh_1\} X + \{gk \coth kh_1 - \sigma^2\} Y = 0 \quad \dots (16)$$

界面 ($z=-h_1$) の運動学的境界条件から

$$\varepsilon_1 Y = \varepsilon_2 Z \sinh k(h_2-h_1) \quad \dots (17)$$

$$Y = i \left(\frac{\sigma}{k} \right) \frac{1}{\varepsilon_1} \hat{\eta}_1 \quad \dots (18)$$

が得られ, 式 (16), (18) より X が次式のように求まる.

$$X = \frac{\sigma^2 - gk \coth kh_1}{gk - \sigma^2 \coth kh_1} i \left(\frac{\sigma}{k} \right) \frac{1}{\varepsilon_1} \hat{\eta}_1 \quad \dots (19)$$

式 (17) より Z が求まる.

$$Z = \frac{1}{\varepsilon_2 \sinh k(h_2-h_1)} i \left(\frac{\sigma}{k} \right) \hat{\eta}_1 \quad \dots (20)$$

式 (14) に式 (19), (20) を代入すると次式となる.

$$(c_{r1} - if_{p1}) \frac{1}{\varepsilon_1} \frac{\sigma^2 - gk \coth kh_1}{gk - \sigma^2 \coth kh_1} = (c_{r2} - if_{p2}) \frac{1}{\varepsilon_2} \coth k(h_2-h_1) \quad \dots (21)$$

式 (21) において $E_1 = (C_{r1} - if_{p1})/\varepsilon_1$, $E_2 = (C_{r2} - if_{p2})/\varepsilon_2$ と置くと最終的に分散方程式として

$$\sigma^2 = gk \frac{E_1 \coth kh_1 + E_2 \coth k(h_2-h_1)}{E_1 + E_2 \coth k(h_2-h_1) \coth kh_1} \quad \dots (22)$$

を得る. $F = E_1/E_2$ とすると

$$\sigma^2 = gk \frac{F \coth kh_1 + \coth k(h_2-h_1)}{F + \coth k(h_2-h_1) \coth kh_1} \quad \dots (23)$$

となる. ここで F は複素係数であり, 波数 $k = k_r + ik_i$ は複素数である. 波数の虚数部 k_i は $H/H_0 = \exp(-k_i x)$ を意味し, 海岸林による波高減衰係数となる. 以上をまとめると, 樹木形状を記述する幹径 D や単位面積あたりの幹本数 N は, 式 (9) の線形抵抗係数 f_p , ならびに式 (4), (5) の樹木占有率 δ_i を定め, f_p と $\delta_i = 1 - \varepsilon_i$ で定義される樹木の空隙率 ε_i は, 式 (10) の C_{r1} を通じて E_1 , E_2 , F を決定する. 最終的に, F をパラメーターとして式 (23) 中の波数 k の虚数部から波高減衰

係数 k_i が求まることがわかる.

なお, 空隙率 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ では $F=1$ になり, 分散方程式は

$$\sigma^2 = gk \frac{\coth kh_1 + \coth k(h_2-h_1)}{1 + \coth k(h_2-h_1) \coth kh_1} = gk \tanh kh_2 \quad \dots (24)$$

となって通常の微小振幅波の分散方程式と一致する. 空隙率 $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 0$ の場合には $F=0$ となって式 (23) は, 次式のように簡略化される.

$$\sigma^2 = gk \frac{1}{\coth kh_1} = gk \tanh kh_1 \quad \dots (25)$$

5. 津波波高減衰係数の計算結果

上記のモデルに基づいて, 防潮林による波高減衰係数 k_i を計算した結果を以下に示す. ここでの計算条件は, 枝下までの水深 $h_1 = 3$ m, 全水深 $h_2 = 6$ m, 波の周期 $T = 60$ s, 波高 $a = 1.0$ m, 幹径 $D = 0.20$ m, 慣性力係数 $C_M = 2.0$, 抗力係数 $C_D = 1.0$, 葉の存在を考慮した補正係数 $C_{LV} = C_{LV*} = 1.5$, 樹木密度 $N = 0.5$ 本/m²を基本条件とし, 各パラメーターの値をひとつずつ変化させ, 結果に及ぼす感度評価を行った.

図-6 に波高と波高減衰係数の関係を示す. 図より, 波高とともに波高減衰係数も増加し, 準線形化したとはいえ流速の2乗に比例する抗力の効果が出ている. 図-7

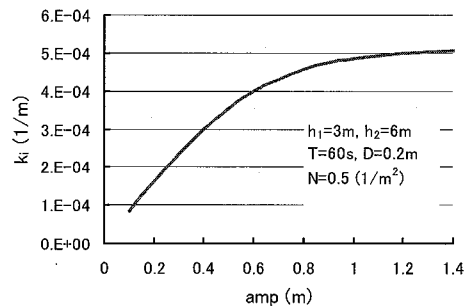


図-6 波高と波高減衰係数の関係

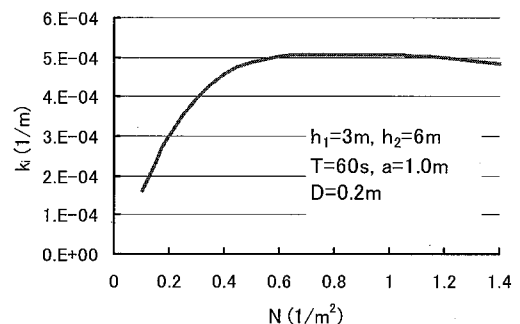


図-7 樹木密度と波高減衰係数の関係

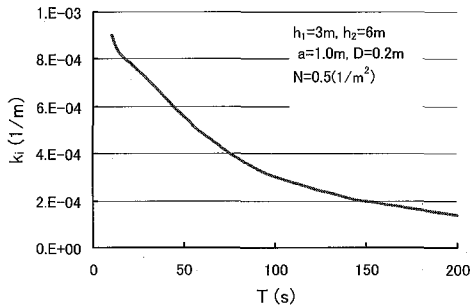


図-8 津波周期と波高減衰係数の関係

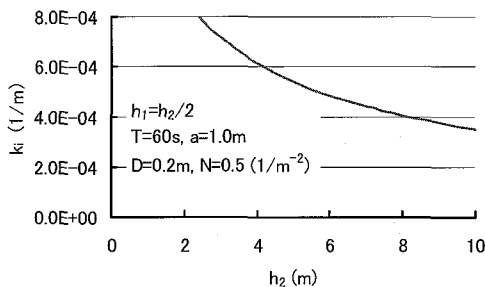


図-9 水深と波高減衰係数の関係

は樹木密度 N の効果を調べたもので、 N が約 0.5 m^{-2} までは波高減衰係数 k_i は増加するが、それ以上になると空隙率 ε の減少のために k_i の増加は頭打ちとなり、やがてやや減少に転じる。図-8 は波の周期 T との関係を示したものである。 T の増加とともに k_i は単調に減少する。図-9 は総水深 h_2 と k_i との関係を示したものである。ここでは $h_1 = h_2/2$ としているので、 h_2 とともに h_1 も変化する。水深が浅くなるとともに k_i は急増し、より簡単な樹木モデルを仮定した浅野・岩塚 (2006) の k_i の結果にオーダー的に一致していく (当論文図-7 の修正図は 53 回海講討議集に示した)。

6. ま と め

海岸林による津波減衰機構は、幹部のみならず樹冠部の枝や葉による流体抵抗によって発揮される。本章では、樹木形態学の知見を応用して、樹木全体の流体抵抗を考慮した津波波高減衰モデルを提案した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 海岸林マツの樹木形状を現地観測により調べた。枝分かれの前後における断面積保存則の成立は、広葉樹・海岸林マツの両者の観測結果で確かめることができた。
- 2) 樹木形態学の知見を取り入れ、幹枝部と樹冠部を領域分けした津波波高減衰の数学モデルを展開し、物理諸量が波高減衰係数に及ぼす効果を明らかにした。

ここで展開したモデルでは、樹木が占有する体積が各領域で鉛直方向に一樣であることを仮定し解析解を得たが、一樣でない場合は波高減衰係数 k_i は数値的に求めることになる。海岸林の幹・枝の立体構造や、樹冠内部の葉の重量と枝の断面積の関係をモデルにより精密に取り込むことが今後の課題である。枝や葉が近接する樹冠部付近の抗力の評価には、抗力係数 C_D の設定などに近接効果を考慮する必要がある。またモデルの妥当性を明らかにするために、樹木群模型を水槽内に設置した波高減衰実験の結果などと比較・検討することが必要であり、併せて今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 浅野敏之・岩塚雄大 (2006): 森林生態学に基づいた津波防潮林の防災機能の評価, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 1081-1085.
- 泉宮尊司・遠藤雅人 (1989): 潜堤および透過性構造物のある海岸における波動場解析, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 638-642.
- 今井健太郎・松富英夫・高橋智幸 (2004): 津波氾濫流れによる植生の揺動とその流体力特性, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 306-310.
- 今井健太郎・鈴木明葉 (2005): 沿岸樹木のパイプモデルを用いた表面積, 体積評価法とその倒伏外力, 水工学論文集, 第 49 巻, pp. 859-864.
- 城田徹央・作田耕太郎 (2003): 「樹形のパイプモデル」は「樹形」をどこまで説明できるだろうか? スギとヒノキの場合, 生物科学, 第 54 巻, 第 3 号, pp. 163-171.
- 鈴木 牧 (2003): シュートが作る木, 木が作るシュート, 生物科学, 第 54 巻, 第 3 号, pp. 139-146.
- 隅田明洋 (1996): 広葉樹群落の空間構造—個体レベルからのアプローチ—, 日本生態学会誌, 46 巻, pp. 31-44.
- 種子田春彦・館野正樹 (2003): シュート内の物質分配は茎の通導作用と力学的支持作用のどちらを規範として行われているのか?, 生物科学, 第 54 巻, 第 3 号, pp. 154-162.
- 原田賢治・油屋貴子・Latief Hamzah・今村文彦 (2000): 防潮林の津波に対する減衰効果の検討, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 366-370.
- 平石哲也・岩瀬浩之 (2003): 1998 年バブアニューギニア津波を対象としたグリーンベルト防災の効果, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 1366-1370.
- 松富英夫・大沼康太郎・今井健太郎 (2004): 植生域氾濫流の基礎式と植生樹幹部の相似則, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 301-305.
- Rojanakamthorn, S.・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 透過潜堤による波浪変形の解析モデル, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 643-647.
- Shinozaki, K. Yoda, K., Hozumi, K. and Kira, T. (1964): A quantitative analysis of plant form—the pipe model theory—, Japanese Journal of Ecology, Vol. 14, pp. 97-105.