水辺植生が有する波浪減衰効果の評価

Evaluations of Wave Damping by Vegetation in Water

林建二郎1•斉藤 良2

Kenjirou HAYASHI and Ryou SAITOU

Laboratory experiments ware performed to study the forces acting on trees in coast and river. Fluid forces acting on the model trees and real small cedar were measured by using load cell. Drag coefficients decrease with increase of Reynolds number because projected frontal area of tree canopy in still flow decrease with increase of incident flow velocity. The wave damping capacity of Mangrove as a coastal protection from waves were evaluated by using drag coefficients of trees in Mangroves and incident flow velocities. The equivalent value of friction coefficient in Mangrove were also estimated by using drag coefficients of trees and flow velocity on the bed in Mangrove.

1. はじめに

汽水域や海岸線に生育しているマングローブや樹林帯 に作用する波力特性の把握は、これら水辺植生の育成お よび植生群が有する波浪減衰効果の評価において重要で ある(原田, 2003;浅野ら, 2004;松富ら, 2004).

水深dが浅く樹幹部のみが浸水している場合の抵抗則 (例えば,海底面の透過摩擦係数 f_c)は,円柱群の抗力係 数 C_a や,単位床面積に占める樹幹部断面積の比である樹 林帯密度 $\lambda = N\pi D2/4$ (D=円柱径,N=単位面積当りの 円柱本数)の関数として評価可能である(林ら,2000, 飯村ら,2007).一方,水深dが増加した場合においては, 小枝と葉からなる樹冠部の流体力評価も必要となる.

しかし,流れに対し変形する複雑な構造の樹冠部に作 用する流体力特性の把握は不十分であり,その評価法も 確立されていない(林ら,2007).本研究は,大型風洞 や2次元造波水槽を用いて,樹冠を有する単独樹木に作 用する抗力や波力特性を明らかにし,樹林帯が有する波 浪減衰効果の評価を行なったものである.また,樹林に 作用する砕波や段波による衝撃的流体力の評価も行った.

2. 樹木群を透過する波の透過率評価式

植生群が占める水域全体積 V_i 中における,植生の幹・ 枝や茎・葉の全体積部分 V_P の割合を植生群密度 $\lambda = V_P/V_A$ と定義する.また,水域全体積 V_A と植生の幹・枝や茎・ 葉の波進行方向への全投影面積 S_P の割合を,植生群の密 生度 $a=S_P/V_A$ と定義する.密生度aは,植生群の単位体積 が有する植生体の遮蔽面積であり,植生群中を通過する 流体に対する植生の遮蔽面積度合いを示している.

1 正 会 員 Ph.D 防衛大学校建設環境工学科准教授 2 学生会員 学(工)防衛大学校大学院理工学研究科前期過程

(1) 円柱群における波の透過率評価式

汽水域に生育しているマングローブ等の樹林帯を簡単 に円柱群で模すと,これら樹林帯の植生群密度(=樹林 帯密度)λは十分小さく,樹林帯や円柱群からの波の反 射率K,は非常に小さい(林ら,2000).従って,円柱群 を透過する波のエネルギーは,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式を提案している.

円柱群内の円柱一本に作用する進行波方向の波力Fx をモリソン式で評価すると、F.による単位時間あたりの 損失エネルギー(=仕事量)Eは、(1)式で示される.

$$E_{f} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \left[\int_{0}^{d+\eta} \frac{\rho}{2} C_{d} u \, | \, u \, | \, u D dz + \int_{0}^{d+\eta} \rho C_{m} \frac{\pi D^{2}}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \, u dz \right] dt \quad (1)$$

式中,a=静水深, $\rho=$ 水の密度, $C_a=$ 抗力係数, $C_m=$ 質量係数,H=波高, $k=2\pi/L$, $\sigma=2\pi/T$ である. よび*T*は,波の波長と周期である.*z*は底面から上方への 距離である.

加速度に比例する力によるエネルギー損失は生じないので,(1)式の辺の第2項の慣性力によるエネルギー損失 量は0となる.従って,*E*,は(2)式で示される.

$$E_{f} = \rho C_{d} \frac{D}{T} \left(\frac{\pi H}{T \sinh(kd)} \right)^{3} \left\{ \frac{1}{3} \sinh^{3}(kd) + \sinh(kd) \right\} \frac{4}{3k\sigma}$$
(2)

水路単位幅断面を通っ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.

$$W = \frac{1}{8}\rho g H^2 C_g \tag{3}$$

式中, C_s は波の群速度(=(L/T){ $1/2+(2 \pi d/L)/sinh(2 \pi d/L)$ }, gは重力加速度である.

(7)

直径Dの円柱が、中心間隔Sの正三角形で配置されている円柱群の樹林帯密度は(4)式となる.

$$\lambda = \pi D^2 / \left(2\sqrt{3} S^2 \right) \tag{4}$$

円柱群において失われる波進行方向の単位長さ・単位幅 当たり(=単位床面積当たり)の損失エネルギーLE_tは, (5)式で示される.

$$LE_f = \lambda E_f / (\pi D^2 / 4) \tag{5}$$

この E_t と入射波 H_t によって植生群へ輸送される波エネ ルギーを,輸送波エネルギーの釣り合い式 ($W_{1x}=LE_t$) に代入すると, (6)式の微分方程式が得られる.

$$\frac{\rho g}{8} C_g \frac{\partial H^2}{\partial x} = -AH^3 \tag{6}$$

式中のAは(7)式で示される.

$$A = 2\rho \frac{C_d}{3\pi} \frac{D}{k} \left(\frac{gk}{\sigma}\right)^3 \left\{\frac{\sinh^3(kd) + 3\sinh(kd)}{3\cosh^3(kd)}\right\} \frac{1}{8} \left(\frac{\lambda}{\pi D^2/4}\right)$$

(6)式の解として,長さxの円柱群中を透過した波の透 過率K,は(8)式で示される.H,は円柱群への入射波高,H, は透過距離xにおける透過波高である.

$$K_{t} = \frac{H_{t}}{H_{i}} = 1 / \left(1 + \frac{4Ax}{\rho g C_{g}} H_{i} \right)$$
(8)

(2) 樹木群における波の透過率評価式

樹木の樹幹上部には、枝葉からなる樹冠部が存在している。樹木群内の樹木一本に作用する進行波方向の波力 F_x による単位時間あたりの損失エネルギー(=仕事量) E_f は、(1)式と同様な(9)式で示される。

$$E_{f} = \frac{1}{T} \int_{0}^{\pi} \left[\int_{0}^{t+\eta} \frac{\rho}{2} C_{d} u \mid u \mid uB(z) dz + \int_{0}^{t+\eta} \rho C_{m} \frac{\pi B(z)^{2}}{4} \frac{\partial u}{\partial t} u(z) dz \right] dt$$
(9)

式中の*B*(*z*)は、高さ*z*の位置における樹幹部または樹 冠外径部の投影幅である.

樹冠外形幅が底面から樹頂まで一様なB_aと近似可能な 樹木のE_fは,(2)式と同様な(11)式で示される.

$$E_f = \rho C_d \frac{B_u}{T} \left(\frac{\pi H}{T \sinh(kd)} \right)^3 \left\{ \frac{1}{3} \sinh^3(kd) + \sinh(kd) \right\} \frac{4}{3k\sigma}$$
(10)

この樹木が中心間隔S₄の正三角形で配置されている樹木 群の透過率K,は,(8)式と同様な(11)式で示される.

$$K_{t} = \frac{H_{t}}{H_{i}} = 1 / \left(1 + \frac{4A x}{\rho g C_{g}} H_{i} \right)$$
(11)

ただし,式中の,Aは(7)式と同様な(12)式で示される.

$$A = 2\rho \frac{C_d}{3\pi} \frac{B_u}{k} \left(\frac{gk}{\sigma}\right)^3 \left\{\frac{\sinh^3(kd) + 3\sinh(kd)}{3\cosh^3(kd)}\right\} \frac{1}{8} \left(\frac{\lambda_u}{\pi B_u^2/4}\right) H^3$$
(12)

樹林帯密度λuは(4)式と同様な(13)式となる.

$$\lambda_{u} = \pi B_{u}^{2} / \left(2\sqrt{3} S_{u}^{2} \right)$$
(13)

(3) 樹木群の抵抗則

(10)式で示す樹木の立体構造による形状抵抗によるエネルギー損失E,の効果を,底面摩擦によるエネルギー損失の効果を,底面摩擦によるエネルギー損失の効果に置き換えると,海底面の単位面積当たりに作用する等価せん断弾力(摩擦応力)τ_{bu}は,海底面での水粒子速度をu,とすると(14)式で与えられる.

$$\tau_{bu} = f_c \rho u_b \left| u_b \right| \tag{14}$$

 f_c は海底面の等価摩擦係数であり、(5)式で示される損 失エネルギーLE,を満たす(15)式で与えられる.

$$f_{c} = \frac{\tau_{bu} u_{b}}{\rho u_{b} | u_{b} | u_{b}} = \frac{\lambda_{u} E_{f} / (\pi B_{u}^{2} / 4)}{\rho u_{b} | u_{b} | u_{b}}$$

$$=\frac{\rho C_{d} \frac{B_{u}}{T} \left(\frac{\pi H}{T \sinh(kd)}\right)^{3} \left\{\frac{1}{3} \sinh^{3}(kd) + \sinh(kd)\right\} \frac{4}{3k\sigma} \left\{\lambda / (\pi B_{u}^{2} / 4)\right\}}{\rho u_{b} | u_{b} | u_{b}}$$
(15)

式中のλ₄は、(13)式で定義される.

3. 実験装置および方法

(1) 小型模型樹木に作用する風力計測

実験には,九州大学応用力学研究所の地球大気動態シュ ミレーション装置(回流式大型境界層風洞)を用いた.測 定断面の横幅は3.5m,高さは2m,長さは15mである(林 ら,2003).

落葉広葉樹であるモミジ,ケヤキ,シラカバと針葉常 緑樹のヒノキを精巧に模擬した高さ約1.2mの市販の模 型樹木(樹高H=約1.2m,樹幹径D=約0.03m,代表樹冠 幅B_e=約0.6m)を使用した.これら模型樹木の形状構造 は実樹木とほぼ相似に製作されている.ただし,材質(樹 幹,枝,葉)の剛性の相似は未調整である(林ら,2003).

風洞床下に設置した三分力計((株)和泉測器:定格負 荷 F_x =100N, F_y =100N, M_y =10N-m)に, 模型樹木を鉛 直に取り付け,流れ方向に作用する抗力 F_x , その直角横 方向に作用する横揚力 F_y , 抗力による風洞横断横方向軸 まわりの回転モーメント M_y を計測した. 樹木の影響を 受けない場所(=樹幹より風上に1.5m, 横断方向に1m離 れた位置)に3D超音波風向風速計(株カイジョー)を設置 し,主流速度Uを計測した. Uの最大値は30m/sとした.

樹木後方10mの位置から撮影された写真を画像処理で 2値化し,幹や枝葉で構成される樹幹と樹冠部の総投影 面積を算定した(写真-1参照).主流風速Uの変化に対す る樹幹の傾倒および樹冠の形状変化を観察するために, 樹木の真横および真上方向からも写真撮影を行った.



a) 無風時 U=0m/s b) 通風時 U=12m/s 写真-1 樹木設置例(モミジ)

(2) 小型実樹木に作用する流体力計測

実験には、長さ40m,幅0.8m,高さ1mの回流装置付 き2次元造波水槽を用いた.波および流れの進行方向を X軸の正、その横断方向をY軸,床面から樹幹上方向をZ 軸の正とする.水槽床下に設置した3分力計(三計エン ジニアリング(株),容量20N(2Kgf),固有振動数50Hz) に、円筒ボット(外径=8cm,高さ=5.5cm)に育成した 西洋杉の苗木(高さ H_{c} =30cm,最大樹冠幅 B_{c} =12cm, 樹幹径=1.2cm,床より樹冠下端までの距離 H_{c} =2cm)を 取り付け,西洋杉に作用する力のX方向成分 F_{s} ,鉛直上 方向成分 F_{s} ,ならびにY軸周りの曲げモーメント M_{s} を測 定した.西洋杉周りの水位変化を計測するために、樹幹 から横断方向にy=19cm離れた測線上に3本の波高計を 64cm間隔で設置した.波の水粒子速度および流れの流 速計測にはレーザードップラー流速計を使用した(図-1, 図-2参照).

先ず、回流装置を用いて水槽に一方向流を流し、開水 路中の西洋杉に作用する流体力を計測した。西洋杉設置 位置における擬似等流水深はd=15cm, 20cm, 30cm, 40cmの4種類とした。樹幹の真横 (x=0cm, y=21cm, z=0.4d)における流速の水平方向成分uの時間平均値を代 表主流速度 U_c とした。 U_c の範囲は0.05m/s~0.6m/sである。 流れは、 $F,数=U_c/(gd)^{0.5}$ が0.02~0.43の常流である。

次に,規則波中における西洋杉に作用する波力を計測 した.使用した規則波の静水深はd=20cmと30cm,周 期はT=2secと5secの2種類である.樹幹の真横(x=0cm, y=21cm,z=0.6d)における波の水粒子速度水平方向成 分の計測値を代表波水粒子速度 U_c とした.

最後に,西洋杉に作用する砕波等による衝撃的な流体 力を計測するために,樹幹の沖方向x=-3.5mの地点にダ



ム板堰板を設置し、ダム決壊に伴い発生する段波を樹木 に作用させた、ダム決壊前の貯留水深を h_0 とする、段波 の代表水位 h_c の計測点はx=0, y=19cm, 代表流速 U_c の 計測点はx=0, y=19cm, z=2cmとした.

4. 結果および考察

(1) 模型樹木に作用する風力と実樹木に作用する抗力 次式で定義される換算抗力係数*C*₄を用いて,葉の付 着状況変化や,流速増加による枝・葉部の形状変形に伴 う樹冠部の投影面積変化の影響を評価した。

$$F_d = 0.5\rho C_d A_u U^2 = 0.5\rho C_d A_0 U^2 \tag{16}$$

$$C_{dc} = (A_{u} / A_{0})C_{d} \tag{17}$$

式中の, F_a :作用抗力, ρ :流体の密度, C_a :抗力係 数, A_a :通風時の樹幹+樹冠部の投影面積, A_a :無風時 の葉が茂っている状態(葉1)の樹幹+樹冠部の投影面積, C_a :換算抗力係数,U:主流速度である.

 C_{a} は実用的に評価可能な無風時の投影面積 A_{a} を用いた ものである.従って、 C_{a} には、樹木の変形・傾倒や葉 の付着状況による投影面積変化の影響が含まれている.

大型風洞内に設置した樹木模型シラカバ (広葉落葉樹) とヒノキ (針葉常緑樹) の換算抗力係数 C_{*} と Re 数 (= $UB_{d}\nu$)の関係を図-3の(a), (b)に示す. これら図中には, 比較のために一様流中に置かれた円柱 (直径=D)の抗力 係数 C_{d} とRe数 (= UD/ν)の関係 (豊倉ら, 1976)を実線 で記入している. a) 葉が無い場合 (葉0)には,投影面積 A が A_0 より著 しく減少する結果, C_{4*} =約0.2と一様流中における円柱 の抗力係数 C_{4} =1~1.2より小さくなっている((17)式参照).

b) 葉が茂っている状態(葉1)および葉の枚数を半分に 減じた状態(葉1/2)では、Uの増加にともない枝部が流 れ方向に変形するため樹冠部の投影面積が減少し樹木の 実投影面積 A₄が減少する結果、C₄ は減少している。

c) 針葉常緑樹のヒノキの場合は,枝部や葉部の流速U に対する変形が小さいため,実投影面積4.の減少が少な い結果, *C*_{*}の減少は小さい.

開水路中に置かれた実樹木 (西洋杉)の C_{*} とRe数の関係を併せて図-3(b)に示す.空気流中と同様に流速の増加に伴い実投影面積 A_{*} が減少する結果, C_{*} は減少している.



図-3 風洞および開水路中に置かれた樹木の抗力係数C_d

小型実樹木である西洋杉に作用する波力算定式(モリ ソン式)中の抗力係数 $C_* \varepsilon(17)$ 式と同様に求めた. $C_* \varepsilon$ KC数の関係を β 値 = $Re/KC \varepsilon^{?}$ ラメーターとして図-4 に示す. KC数の増加に伴い水粒子速度が大きくなり投 影面積が減少する結果, C_* が減少する影響も併せて考 慮する必要があるが, 図中に示す西洋杉の $C_* \varepsilon$ 一様振 動流中における円柱の $C_* \varepsilon Re$ 数(= UD/ν)の関係 (Sarpkaya ら, 1981) との対応性は, KC数の大きな領域 では認められる. KC数の小さい領域では, 実樹木の小 枝や葉部に作用する摩擦抗力が支配的となる結果, 小型 実樹木の C_* は円柱の $C_* \varepsilon$ 均加している.



(3) 実樹木 (西洋杉)に作用する段波の衝撃的流体力

3分力計で検知された本西洋杉に作用する衝撃的流体 力をF_aとする.西洋杉に作用する真の流体力の時間変化 が激しい場合,このF_aには、樹木の変位加速度と変位速 度にそれぞれ比例する慣性力と減衰力も含まれている. 本西洋杉の振動変位を線形振動方程式で近似し,F_aに含 まれている慣性力と減衰力の影響を取り除いた値を真の 流体力F_aとする(林,2008).F_aとF_aの時間変化例を**図**-5 に示す.F_aの立ち上がり時間は0.4secであり、樹木の固 有振動周期0.2s(=5Hz)に比べて十分長い結果、樹木に 作用する上記の慣性力や減衰力の影響は小さいのでF_aと F_aの一致度は良好である.従って,3分力計によって本 西洋杉に作用する真の流体力F_aは精度良く計測されてい る.



図-5 西洋杉に作用する衝撃的流体力の時間変化例



1184

⁽²⁾ 実樹木 (西洋杉)に作用する規則波の波力

このF,を(16)式に代入し, F,のピーク時とその約2秒後 における C_{*} 値を算定した. C_{*} とF,数の関係を図-6に示 す. 図中には,開水路定常中に水深・円柱直径比d/D=2で設置された円柱の C_{a} を実線(Hsieh, 1964)で示す. C_{*} は, C_{a} と同様にF,=0.8近くで大きくなっている. 石油タ ンク模型に作用する津波の圧力分布計測より評価した津 波波力の抗力係数の結果においても, F,=1近くで抗力 係数が大きく増加する現象が報告されている(榊山ら, 2007).

(4) マングローブ帯が有する波浪減衰効果評価例

今回の実験で用いた西洋スギと同様な樹木で形成され ている静水深d=4mのマングローブ帯に,波高H=2m, 周期T=9secの波が来襲(入射)した場合に,マングロー ブ帯が有する波浪減衰効果推定例を**図**-7に示す.マング ローブ帯は,代表樹冠幅 $B_u=1.68m$ の樹木が,樹幹間隔 $S_u=2.4m$ の正三角形で一様に配置されていると仮定する. 樹木の抗力係数は $C_{de}=0.5\sim1.5$ と仮定した.**図**-7に示す 透過率K,は,これら B_u , S_u , C_{de} の値を(11)~(13)式に代入 して求めた推定値である.ただし, C_{de} は(12)式中の C_{d} に 代入する。現地海岸に生育している樹林の形状・寸法や 樹林帯密度の評価と併せて,抗力係数の的確な評価は今 後の課題であるが,樹林帯幅が200mあれば透過率 $K_{r}=$ 0.15~0.35と推定できる一例である.

(15)式より、上記の仮定条件を有するマングローブの 等価摩擦係数は f_e =0.3~1と推定できる. ベトナムのト ンキン湾のマングローブ植林域で実測された等価摩擦係 数 f_e <0.2に比べると(間木ら, 1997),今回の推定値 f_e = 0.3~1 はかなり高い値である.



図-7 マングローブ帯が有する波波減衰効果の評価例 (d=4m, $H_i=2m$, T=9sec, $B_u=0.44$, ただし図中の $CD=C_{de}$ である.)

5. おわりに

樹木に作用する流体力の評価を行い、樹林帯が有する

波浪減衰効果の評価を行った.本研究の成果を要約する と以下の通りである.

(1) 流速Uの増加に伴い樹冠部の形状が変化する結果, 抗力係数C_{*}は,Uの増加に伴い減少する。

(2) 小型実樹木の抗力係数を評価し、これと同類な樹木 からなるマングローブが有する波浪減衰効果を評価した 結果、樹林帯幅が200mあれば透過率K=0.15~0.35と 推定された.また、この樹林帯が有する透過摩擦係数は f_{ϵ} =0.3~1と推定された.

謝辞:本研究を遂行するにあたり,鹿児島大学の浅野敏 之先生から現地(志布志湾海岸林)に生育している松林 の構造に関する貴重な計測結果を頂いた.また,本研究 の室内模型実験およびデーター解析には,本校の梨子本 陽太学生,堀 翼学生に熱心な協力を頂いた.ここに, 厚く感謝の意を表する.

参考文献

- 浅野敏之・原口征士・田中雄一(2005):湖岸植生の繁茂状況と 来襲波浪の関係,海岸工学論文集,第52巻,pp.1031-1035.
- 飯村耕介・谷本勝利・N. Xuan Hein・赤川嘉幸・油谷賢太郎 (2007):抽水植物群落による走行波の減衰に関する数値計 算,海岸工学論文集,第54巻,pp.766-770.
- 榊山 勉・松山昌史・松浦真一・河島宏治・佐野正和(2007): 石油タンクに作用する津波波力と津波波に対する座掘現象, 海岸工学論文集,第54巻, pp.836-840.
- 豊倉富太郎・亀本喬司(1976):流体力学,実教出版、p.233.
- 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、pp.766-770.
- 林建二郎・辰野正和・長林久夫・橋本晴行 (2003):単独樹木に 作用する風力計測,流体力の評価とその応用に関する研究論 文集,第2巻, pp.96-103.
- 林建二郎・今野正則(2007):流れによる変形や振動を考慮した 河道内植生に作用する流体力と抵抗則の評価,水工学論文集, 第51巻, pp.1231-1236.
- 林建二郎(2008):多分力計による水理構造物に作用する衝撃的 流体力の計測,水工学論文集,第52巻, pp.721-726.
- 原田賢治: 防潮林の津波減災効果に関する水理学的研究 (2003), 東北大学大学院工学研究科博士論文, 143p.
- 間木道政,松田義弘ら(1997) :マングローブ植林と養殖池保護 機能-ベトナ・Thuy Hai海岸の例-,マングローブ水域の物理 過程と環境形成,黒船出版, pp.179-185.
- 松富英夫・大沼康太郎・今井健太郎(2004):植生氾濫流の基礎 式と植生樹幹部の相似則,海岸工学論文集,第36巻,pp.301-305.
- 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.
- Hsieh, T (1964) : *Resistance of cylindrical piers in open-channel flow, ASCE, Vol.90, No. HY1, pp.447-465.*
- Sarpkata, T. and M. Isaacson (1981) : Mechanics of wave forces on offshore structures, Van Nostrand *Reinhold* Company, p.96.