

スリランカ海岸林の樹種による破壊条件と津波到達遅延時間の相違

田中規夫¹・武村 武²・佐々木 寧³・M.I.M. Mowjood⁴

スリランカ海岸林の破断モーメントを樹種、胸高直径ごとに算定した。オオバヒルギやアダンは単位面積あたりの抗力は大きい。樹木高さの 6-7 割強程度で破断すること、破断時水深が高いモクマオウは、密度高い樹林帯の維持が重要であることがわかった。樹木特性（合成抵抗係数、密度、直径）を樹種ごとに与え数値解析を行い、樹林帯幅と津波到達遅延時間の関係を調べた。汀線より岸側の勾配 1/100-1/1000 において、アダン、モクマオウ（密）の樹林帯幅 50-200 m で、到達時間はそれぞれ 5-66 秒、1-22 秒程度遅らせることが可能であるが、ココヤシ樹林帯は 200 m 幅であっても 3 秒程度の差しか生じさせなかった。

1. はじめに

インド洋大津波は、沿岸諸国に未曾有の被害をもたらした。マングローブ樹や海岸砂丘に生える植生が、津波防御に効果を発揮したと考えられ、その事例がタイ（田中ら、2005b）、スリランカ（田中ら、2005a, Dahdouh-Guebas ら、2005）、インド（Kandasamy & Narayanasamy, 2005）において詳細に報告されている。こうした防潮林の有効な場合の条件等は、津波の波高と植生帯特性の関係で研究されている（首藤、1985；原田ら、2000；原田・河田、2005）。しかし、スリランカ・タイの海岸林は、樹形、気根形態が多様であるため、樹種によって効果が大きく異なることが報告されている（田中ら、2005a, 2005b）。

グリーンベルトの配置構想（平石ら、2001）、海岸林再生計画をその場所の地形条件や都市計画にあう現実的なものとするためには、樹種による樹林帯の効果と限界を明確にする必要がある。そこでスリランカにおいて、現地植生の破壊実験を主体とした二次調査を行うこと、数値解析により津波到達遅延時間（樹林あり・無しによる樹林背後の津波到達時間の差）を解析し樹種による効果の相違を把握することとした。

2. 研究方法

（1）樹林被害ならびに樹林特性調査

第一次調査では、図-1 に示す区間（1 から 19）について、2005 年 4 月に、その被害実態調査を津波の痕跡（折れた枝の高さ、壊れた屋根の高さ）、樹林帯の特性（幅、構成種、胸高直径、密度）、現地住民へのヒアリングという形で行なった（田中ら、2005a）。第二次調査は、有効と判断された樹種の破壊実験・曲げ剛性試験を行うこと、有効な樹種の追加を、今なお残る樹林の倒伏状況

から解析することを目的として 2006 年 1 月に行った。上記目的を達成するため、調査対象地は第一次の 19 箇所から A) 都市域近郊 (Kalutara), B) Lagoon と Sand Dune の組み合わせ (Rekawa, Medilla) の 3 箇所に絞り、さらに乾燥地域の C) Hambantota を新たに追加した。

植生の破壊強度試験は、以下の樹種に対し行った。

- 1) オオバヒルギ *Rhizophora mucronata*
- 2) アダン *Pandanus odoratissimus*
- 3) モクマオウ *Casuarina equisetifolia*
- 4) サキシマハマボウ *Thespesia populnea*
- 5) ヒルギダマシ *Avicennia marina*
- 6) クサトベラ *Scaevola sercea*
- 7) シマシラキ *Excoecaria agallocha*
- 8) ヒルギモドキ *Lumnitzera racemosa*
- 9) メスキート *Prosopis juliflora*

1), 2) は、既往調査（田中ら、2005a, 2005b）から有効とされた樹種であるが、生態系の攪乱・生物多様性を考慮すると可能な限り在来の多様な自然植生を利用することが望ましい。その意味で、海岸砂丘の最前線にはアダンとともにクサトベラ、ラグーンにはその土壤環境により 5) や 7) などの選択もありうる。なお、タイ西海岸にはフタバナヒルギ *Rhizophora apiculata* が主でそのさらに水際にオオバヒルギが繁茂する場合が多かったのに対し、スリランカの Rekawa ラグーンや Kalutara の河岸沿いのヒルギ属はほとんどがオオバヒルギであった。その樹形には大きな差はないが、オオバヒルギの方がやや高い位置まで気根が密集する傾向があるようである。しかし、群落内の位置によっても樹形は変わるため、田中ら（2005b）のタイの調査結果と今回のオオバヒルギは、同様の力学特性をもつものとして考える（両種を *R. apiculata*-type とする）。タイの *Avicennia alba* とスリランカの *Avicennia marina* も同様とする。

破壊モーメントは 1,000 N までの負荷をかけることのできるフォースゲージを用いて、代表的樹林の第一枝（*L. racemosa* 以外）または主幹（*L. racemosa* のみ）を

1 正会員 工博 埼玉大学大学院助教授理工学研究科
2 正会員 博(学) 東京電機大学助理工学部建設環境工学科
3 正会員 理博 埼玉大学大学院教授理工学研究科
4 非会員 PhD ペラデニア大学 Senior Lecturer 農学部

破壊し (直径 1-17 cm で、すべて断面の破断、抜根はなし)、そのときの破断強度、負荷をかけた箇所から主幹までの枝の長さ・平均直径を計測した (図-2 は実験状況)。各樹木について実験は三回以上行った。また、実験状況をビデオ撮影し、力と変位の関係を求め (図-3 にアダンの例を示す)、樹木の曲げ剛性特性の値 EI (Nm^2) はヤング係数、 $I(\text{m}^4)$ は断面二次モーメント) を以下により算出した。

$$EI = \left(\frac{l^3}{3} \right) \left(\frac{F}{Def} \right) \dots (1)$$

ここに、 l は支点から作用点までの距離 (m)、 F は加えた力 (N)、 Def は力の作用点における変位量 (m) である。なお、断面二次モーメントは直径の関数で整理でき、 E そのものが樹木材質の剛性を現している。しかし、樹木直径が樹種により必ずしも同じ範囲にないため、破断特性の比較は $EI(\text{Nm}^2)$ で整理することとした。

(2) 数値解析方法ならびに計算条件

現地における地形特性を考慮すると、樹木効果は、繁茂する場所 (Dune とラグーン) との関連で解明する必要がある。ここでは第一段階として、以下の連続式と平面 2 次元不定流方程式を用いることとした。なお、陸に乗り上げた後の津波の挙動に関しては十分な検証データが得られていないことから、慣性力項と分散項はいれずに、樹木による抗力と樹林帯内部の空隙を考慮し、樹種による密度、抗力係数の違いを反映させた。

$$\theta \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial x} + \theta_0 \frac{\tau_{xb}}{\rho} + \frac{f_x}{\rho} = 0 \dots (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial y} + \theta_0 \frac{\tau_{yb}}{\rho} + \frac{f_y}{\rho} = 0 \dots (4)$$

$$(f_x, f_y) = \frac{1}{2} n_i \rho C_{d-all} d \times \left(\frac{M \sqrt{(M^2 + N^2)}}{h}, \frac{N \sqrt{(M^2 + N^2)}}{h} \right) \dots (5)$$

ここに、 $u, v = x, y$ 方向の水深平均流速、 $h =$ 津波浸水深、 $H =$ 水位、 $M = uh$ (x 方向流量フラックス)、 $N = vh$ (y 方向流量フラックス)、 $\tau_{xb}, \tau_{yb} = x, y$ 方向の底面せん断応力 (マンニングの式で与えた。マンニングの粗度係数は樹林抵抗を含めずに、下草の繁茂状況から 0.025 とした)、 $f_x, f_y = x, y$ 方向の単位面積あたりの抗力、 $g =$ 重力加速度、 $\theta, \theta_0 =$ 空間空隙率、底面空隙率、 $\rho =$ 流体密度、 $n_i =$ 植生密度、 $d =$ 胸高直径、 $C_{d-all} =$ 樹形を考慮した樹種・津波浸水深ごとに異なる抵抗係数 (田中ら, 2005b) である。

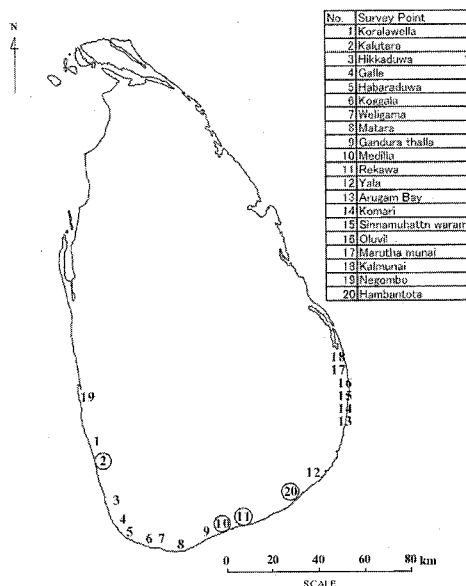


図-1 現地観測地点 (丸囲み文字は第二次調査 (2006年) 地点)

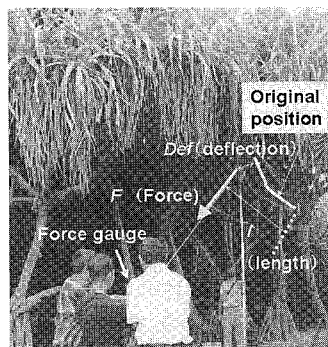


図-2 枝の破壊実験例 (定義は式 (1)) : 樹木はアダン

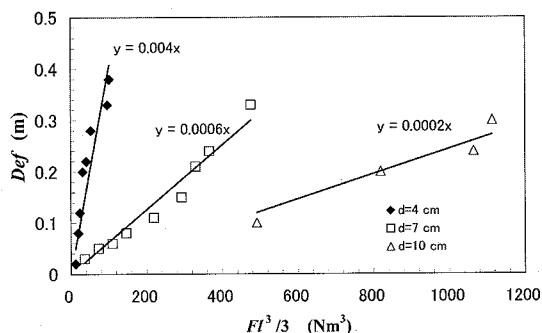


図-3 引っ張り力による変形量の変化 (傾きが EI の逆数となるように横軸を記載。式 (1) 参照) : 樹木はアダン

斜面は汀線より沖側は一樣斜面 (1/1,000 勾配 : スリランカ南海岸の代表的な値) とし、汀線より岸側の勾配を 2 ケース (1/1,000, 1/100) 設定した。陸側は、実際

にはもっと急勾配も存在するが安定して計算が行える状況下で勾配による変化を把握するためこの2ケースとした。沖側境界条件として、線流量を周期20分のサイン波(3.44~9.74 m²/sの幅)で与えた。樹林帯は、汀線より50 m地点から津波進行方向に4ケースの幅(25, 50, 100, 200 m)を設定した。樹林帯条件は、水深平均した合成抵抗係数、樹林密度、樹木直径(田中ら, 2005b)を樹種毎に与えた。

3. 現地観測結果

(1) 詳細調査地点の被害状況

a) Sand Dune 頂部より前面部の樹林帯の重要性

Rekawa では、海岸砂丘(N06°02.659', E080°50.141': 海側の比高2.6 m, 勾配1/24: 樹林側の比高3.9 m, 勾配1/11)を越流した流れが上のココヤシ樹林の林床内部を幅約50 m, 長さ20 m, 最大深さ約2 mにわたって洗掘した。砂丘頂上部(越波入り口付近)にはアダンはなく、砂丘の急勾配で加速された流れが、背後のMangrove 樹林帯を約20 mの長さにわたって破壊した(破断による破壊)。やや離れた箇所の海岸砂丘(N06°02.700', E080°50.421': 海側の比高2.5 m, 勾配1/24: 樹林側の比高4.6 m, 勾配1/16, 頂部より前面にアダン(直径17 cm程度)の樹林帯(5 m程度))では、アダンの最前列が高さ1~2 m付近で破断されたものの、林床内部の洗掘や背後の樹林帯被害は発生していなかった。Medillaでも同様の現象が確認されている。砂丘の特性ではとくに、頂部より前面部の樹林帯の有無が重要であることがわかる。

b) 津波防御と外来樹種管理の問題

Hambantotaの海浜植生はRekawaまでの植生と大きく変わり、ウチワサボテン *Opuntia rellenii* や外来樹種メスキート *Prosopis juliflora* が主体となる。メスキートは、ラムサール条約登録湿地への影響などの観点から、管理の必要性が唱えられている(Seneviratne & Algalma, 2001)。しかし、今回の津波でメスキートが繁茂している背後では越波流量が抑えられ、逆に植生の欠如した部分では大きな落ちぼれが発生し、背後の家が破壊されている。同地点の海岸砂丘の高さは5 m以上あるが、津波高さは約8~10 mと推定されている(佐藤ら, 2005)。津波防御という点で有効ではあったが、スリランカにおける津波のReturn periodは長いと想定されることから、湿地生態系への影響を含めた長期的な自然海岸林の再生が必要である。

(2) 樹木の破壊特性

図-4に8樹種の直径(主幹または第一枝の直径)とEIの関係を、図-5に同様に定義された直径と樹木の破断強度の関係を示す。図-5には、日本の河道内樹木の平

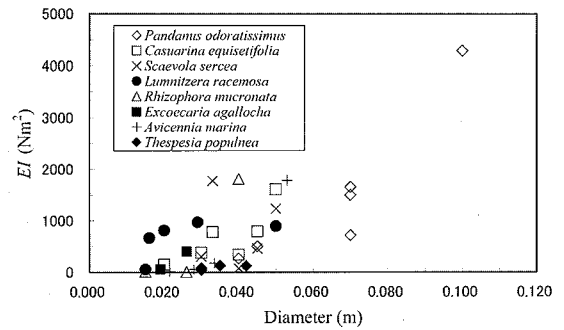


図-4 代表的海岸樹種の直径(主幹の直径(*L. racemosa*のみ)もしくは第一枝(*L. racemosa*以外))と剛性特性EIの関係

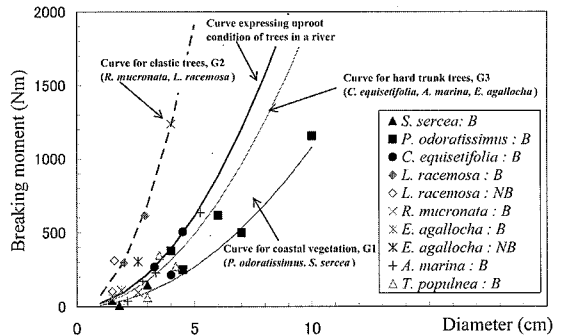


図-5 代表的海岸樹種の直径(定義は図-4)と破断モーメントの関係、B:破断、NB:破断しない、河道内樹林の胸高直径と抜根条件の関係式はリバーフロント整備センター(1999)をもとに作図

均的な抜根条件式(リバーフロント整備センター, 1999)

$$M_R = 24.5 \times d^2 \quad (6)$$

も示してある。ここに、 d (cm)は胸高直径、 M_R の単位はNmとなるように係数を変換してある。

樹木の被災パターンは、一部の軟弱地盤や津波が集中したと思われるところを除き破断が多く見られた。破断と抜根は現象が異なるが、図-5より同様のべき乗に従っていることから、係数のみ変化させた曲線を示してある。この両図よりG1(クサトベラ、アダン: 砂浜の自然海岸樹種、表面は硬いが中の材質は柔らかい)、G2(ヒルギモドキ、オオバヒルギ: 柔らかくて折れにくい樹種)、G3(モクマオウ、ヒルギダマシ、シマシラキ: 陸側の硬い幹の樹種)として、グループ化した。アダンは気根が発達し、ココヤシに比べて単位面積あたりの抵抗は非常に大きい(田中ら, 2005a)が、容易に変形し幹はやや破壊されやすい。サキシマハマボウやメスキートは、幹と第一枝の直径が大きく異なること、津波破壊痕跡による検証データが入手できなかったことより、グループ分けしていないが、G2とG3の領域に分布している。

式(6)の M_R は、G3とおおむね同様の値を示している。しかし、G1、G2グループはかなり離れており、樹

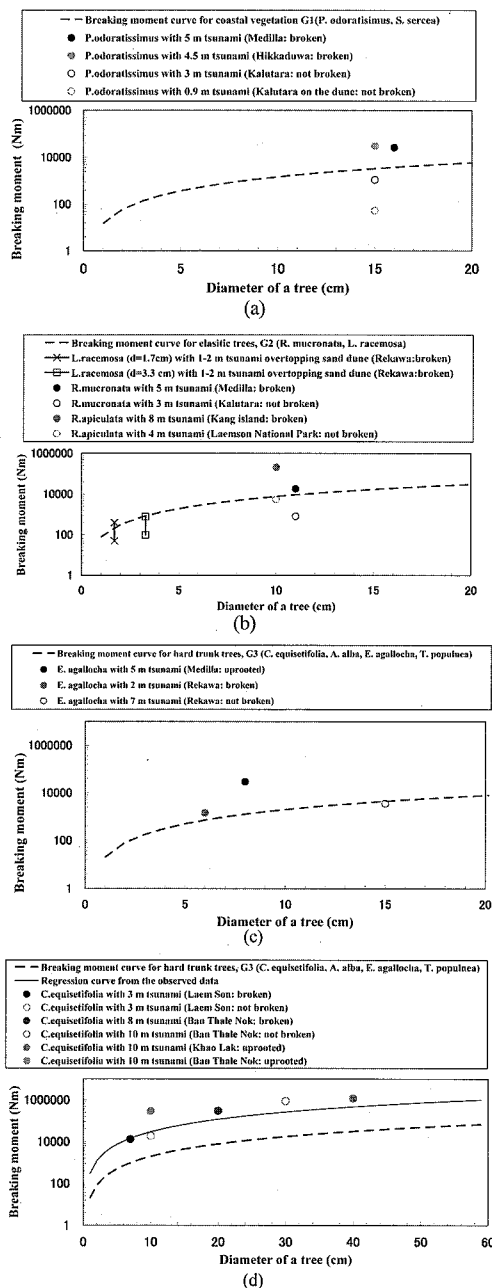


図-6 直径(胸高直径または第一枝:図-4)-破断モーメント関係式の2004年インド洋大津波の樹林被害との比較検証(実績は胸高直径), (a) *Podoratisissimus*, (b) *R. mucronata*, *L. racemosa*, (c) *E. agallocha*, (d) *C. equisetifolia*

種による違いを考慮する必要性を示唆している。G1, G2, G3の破壊モーメント(それぞれ, M_{G1} , M_{G2} , M_{G3} :単位はすべてNm)の直径関係式を以下に示す。

$$M_{G1} = 10.8 \times d^2 \quad (7)$$

$$M_{G2} = 76.4 \times d^2 \quad (8)$$

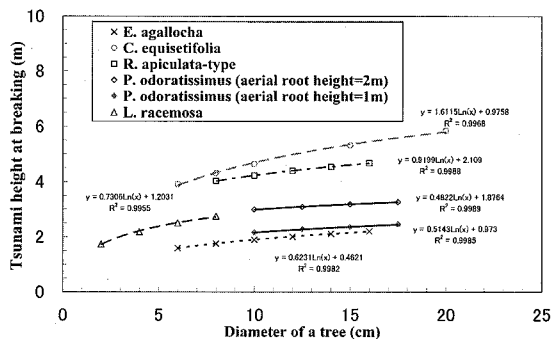


図-7 胸高直径と破断が生じる樹林高さ(計算値)の関係

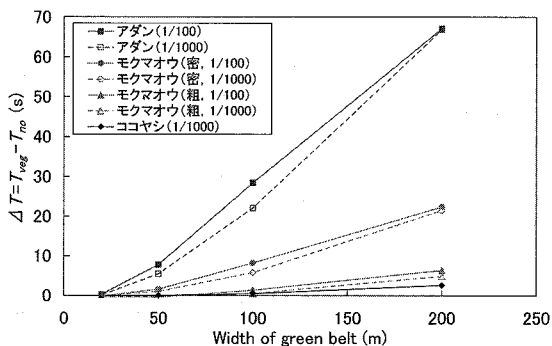


図-8 樹種, 樹林帯幅, 岸側斜面勾配の違いによる津波到達遅延時間 ΔT の変化 (T_{veg} : 樹林帯背後における津波到達時間, T_{no} : 樹林帯が無い時の津波到達時間, 粗: 樹林密度が2本/100m², 密: 樹林密度が34本/100m²)

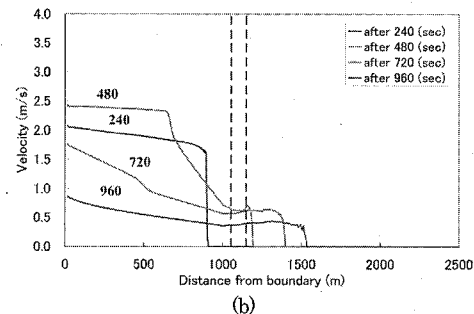
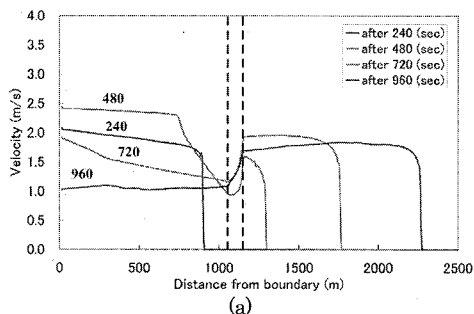


図-9 流速縦断分布の時間変化, (a)汀線より岸側の斜面勾配: 1/1000, (b)同: 1/100, 点線は樹林位置を示す

$$M_{G3}=19.6 \times d^2 \dots\dots\dots (9)$$

図-6 に第 1 回津波痕跡調査 (田中ら, 2005a, 2005b) における樹林帯の破壊の有無と図-5 による破断条件の比較を示す。アダンやオオパヒルギの破断モーメントは実績の破断部である気根付け根部で評価してある。実績の破断モーメントは既往研究 (田中ら, 2005b) で求めた C_{d-all} を用いて、高さ毎の抗力モーメントを地際もしくは気根付け根部から実績の最大水位まで積分して求めた。

現地実験の第一枝で算定した破断実験式は、図-6(a)-(c)において、よい適用性が確認できた。一方、図-6(d)のモクマオウは適用性がよくない。これには二つの理由が考えられる。一つは、モクマオウの第一枝は主幹に比べて細く、強度特性が主幹と大きく異なり実験式の外挿が難しいためである。もう一つは、モクマオウは地際に板根が発達するため、生長すると破断点が地際ではなく、0.5-1 m 上方に上がる傾向がある。また、0.3 m 以上の実績は抜根での破壊であり、破断ではない。そのため実験式と実績が大きく異なったものと考えられる。

図-7 は破断モーメントに対応する津波浸水深を樹種、胸高直径ごとに計算したものである。その結果、オオパヒルギやアダンの破断が生じる水深は、樹木高さの 6-7 割強程度であることがわかった。これは、田中ら (2005b) の考察とおおむね一致する。また、アダンは気根の高さが高いものほど破断限界は高くなるが、気根の高さが低いグループはその分だけ砂を樹林帯内部に堆積していることも多い。モクマオウはもっとも破断限界値が高い。

4. 樹種の相違が津波到達遅延時間に及ぼす影響

図-8 は樹林帯幅と津波到達遅延時間の関係を示したものである。汀線より岸側の勾配 1/100-1/1,000 において、アダン、モクマオウ (密) の樹林帯幅 50-200 m で、到達時間はそれぞれ 5-66 秒、1-22 秒程度遅らせることが可能であった。抵抗係数が大きくかつ密集する樹種 (田中ら, 2005b) は津波到達時間を遅らせる効果がある。しかし、ココヤシ樹林帯 (樹間約 6 m) は 200 m 幅であっても 3 秒程度の差しか生じさせなかった。モクマオウ (粗) もココヤシと同様に効果が低い。生長し胸高直径が大きい樹林では、樹木密度が低く単位面積あたりの抵抗は必ずしも大きくない (田中ら, 2005b)。モクマオウに関しては、密度高い樹林帯の維持が重要になると考えられる。

アダンの津波到達遅延効果は非常に大きい。また、砂浜の岸側勾配の大きい場合、到達遅延時間が大きくなる傾向を確認できた。勾配が緩い場合 (1/1,000) は、樹林帯前面部でせき上げにより樹林帯内部から樹林出口にかけて水面勾配が急になり流速が増加する (図-9(a)) のに対し、急な場合 (1/100) は底面摩擦抵抗が高く内部から出口

にかけて加速がされづらい (図-9(b))。樹林幅が 200 m になると津波到達遅延時間の勾配による差は 100 m に比べて小さくなる (図-8)。緩勾配であっても、樹林幅の増加により底面摩擦の効果が大きくなり、樹林による水位のせき上げ影響が相対的に減少するためと考えられる。

5. おわりに

樹木の第一枝または主幹の破断実験をもとにスリランカの代表的な海岸林について、破壊条件式を胸高直径の関数で表現した。これらは、津波被害の閾値をおおむね満足した。防潮林計画に役立てるために、数値モデルにより津波到達遅延時間の樹種による相違を解析した結果、大きな差が生じた。避難には数 10 秒の違いでも大きな差が生じると考えられることから、居住区近傍の守るべき箇所に樹林を有効に配置することが、地域の計画に、必要であると判断できる。今後、樹林特性と地形特性を考慮したモデルで、更なる検討が必要と考えられる。

謝辞：本研究の一部に「2006 年度平和中島財団国際学術研究助成金」を使用した。調査の際には、スリランカ・モラツワ大学の Dr. Samarawickrama, Dr. Manatunge からご助言をいただいた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 財団法人リバーフロンティア整備センター (1999)：河川における樹木管理の手引き，山海堂，p. 203.
- 佐藤慎司・細見 寛・細川恭史・福濱方哉 (2005)：スマトラ沖地震津波のスリランカにおける被災実態，海工論文集，第 52 巻，pp. 1391-1395.
- 首藤伸夫 (1985)：防潮林の津波に対する効果と限界，第 32 回海岸工学講演会論文集，pp. 465-469.
- 田中規夫・佐々木 寧・M.I.M. Mowjood (2005a)：スリランカ南部海岸線におけるインド洋大津波被害実態調査，埼玉大学紀要工学部第 38 号，pp. 66-73.
- 田中規夫・佐々木 寧・湯谷 賢太郎・Samang Homchuen (2005b)：津波防御に対する樹林幅と樹種影響について - インド洋大津波におけるタイでの痕跡調査結果 -，海工論文集，第 52 巻，pp. 1346-1350.
- 田中規夫・佐々木 寧・M.I.M. Mowjood・K.B.S.N. Jinadasa・八木澤順治 (2006)：スリランカ南部海岸線におけるインド洋大津波被害実態調査 (その 2) - 海岸林の破壊限界モーメントに注目して -，埼玉大学紀要工学部第 39 号 (in press).
- 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，海工論文集，第 47 巻，pp. 366-370.
- 原田賢治・河田恵昭 (2005)：津波減衰効果を目的とした海岸林活用条件の検討，海工論文集，第 52 巻，pp. 276-280.
- 平石哲也・竹村慎治・永瀬恭一 (2001)：南太平洋地域における樹林による津波対策法の適用性，海工論文集，第 48 巻，pp. 1411-1415.
- Dahdouh-Guebas, F., L.P. Jayatissa, D. Di Nitto, J.O. Bosire, D. Lo Seen and N. Koedam (2005)：How effective were mangroves as a defence against the recent tsunami? Current Biology, Vol.15, pp. 443-447.
- Kandasamy, K. and R. Narayanasamy (2005)：Coastal mangrove forests mitigated tsunami, Estuarine, Coastal and Shelf Science Vol.65, No.3, pp. 601-606.
- Seneviratne, G.I. and A.L.M.N.S. Algama (2001)：Invasive species Prosopis juliflora in the coastal region of Hambantota district, Sri Lankan Biodiversity Review, Vol.1, pp. 79-83.