

# 海岸樹林端部付近における樹木 (アダン) に働く津波曲げモーメント

## Bending Moment on a Tree (*Pandanus odoratissimus*) due to Tsunami Flow around Edge of Coastal Forest

N. B. THUY<sup>1</sup>・谷本勝利<sup>2</sup>・田中規夫<sup>3</sup>・原田賢治<sup>4</sup>・飯村耕介<sup>5</sup>

N. B. THUY, Katsutoshi TANIMOTO, Norio TANAKA, Kenji HARADA and Kosuke IIMURA

*Pandanus odoratissimus* grown on sandy beach is considered as effective tree species providing tsunami mitigation due to its density and complex aerial root structure, but it is not strong enough to preclude the risk of breaking by action of high tsunami. In the present paper, the bending moment acting at a critical position (top of aerial root) of mature *P. odoratissimus* around edge of coastal forest has been investigated by numerical simulations. The bending moment is greatly influenced by forest condition (forest width and tree density) as well as tsunami conditions (period and height) and was formulated in the non-dimensional form for three representative points including the front corner of forest. The bending moment calculated by the curve-fit formula agrees with the simulated bending moment within 10% error.

### 1. はじめに

熱帯において砂浜に生育するアダン (*Pandanus odoratissimus*) は気根を有し密生することから、感潮帯に生育するマングローブとともに、津波防御樹林 (バイオシールド) の樹種として有望視される。しかしながら、2004年のインド洋大津波や2006年のジャワ津波に際して折損の例 (例えば, Tanaka et al., 2007) が見られたように、津波に対する抵抗に限界があることは明らかであり、Tanaka et al. (2009) は主としてスリランカにおける現地試験等によりその破断曲げモーメントの算定法を提案している。

一方、樹林があるときの津波の流速は樹林端部近くや通路出口において顕著に増幅されることが実験や数値計算によって明らかにされているが (たとえば, Thuy et al., 2009), 破断に直接関わる曲げモーメントは流速のみならず没水深も関係する。谷本ら (2009) は半無限のアダン林を対象として、潜在的津波力やそれによってアダンに働く曲げモーメントの樹林幅による変化の特性を検討している。また, Yanagisawa et al. (2009) は樹木の破壊を考慮したマングローブ林の津波減災効果に関する事例研究を行っている。

しかしながら、これら既往研究は樹林密度や津波条件が固定されているなど特定条件での検討であり、樹林お

よび津波条件が曲げモーメントにどのように影響するかについてはいまだ十分には明らかにされていない。そのため、本研究においては、谷本ら (2009) と同様な半無限樹林を対象として津波遡上に関する二次元数値計算を行い、アダンに働く津波曲げモーメントに及ぼす樹林および入射津波条件の影響を系統的に検討するものである。特に、結果の無次元表示を試みる。

### 2. 数値計算の方法と計算条件

#### (1) 基礎方程式と数値計算法

数値計算法はThuy et al. (2009) および谷本ら (2009) と基本的に同じであるが、基礎方程式は津波力や曲げモーメントの計算の便宜から水深平均流速を用いた非線形長波方程式に変えている。ただし、平均流速を用いても、全水深が非常に小さいときの流速を除き、線流量を用いたときの計算結果と違いはなく、数値計算モデルの実験的検証と現地スケールへの適用に対する考え方に変わりはない (Thuyら, 2010)。

平均流速を用いたときの樹林による抵抗力ベクトル $\vec{F}$  (没水深積分値として表示) は次式のとおりである。

$$\vec{F} = \gamma \frac{1}{2} \rho C_{D-all} (d) b_{ref} \vec{V} \Big|_0^d \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\gamma$ は樹林密度 (単位面積あたりの樹木の本数)、 $\rho$ は水の密度、 $C_{D-all} (d)$ は樹木の水深平均抵抗係数 ( $d$ の関数)、 $b_{ref}$ は樹木の基準投影幅 (胸高での幹の直径)、 $\vec{V}$ は流速ベクトル、 $d$ は全水深 (没水深) である。 $C_{D-all}$ は次式で与える (田中・佐々木, 2007)。

$$C_{D-all} (d) = C_{Dref} \frac{1}{d} \int_0^d \frac{b(z_G)}{b_{ref}} \frac{C_D(z_G)}{C_{Dref}} dz_G \dots \dots \dots (2)$$

---

1 修(工) 埼玉大学大学院理工学研究科理工学専攻  
2 フェロー 工博 埼玉大学名誉教授  
3 正会員 工博 埼玉大学教授大学院理工学研究科  
4 正会員 博(工) 埼玉大学助教大学院理工学研究科  
5 学生会員 修(工) 埼玉大学大学院理工学研究科理工学専攻

ここに、 $C_{Dref}$ は基準抵抗係数（胸高での幹に対する抗力係数で与える）、 $b$ および $C_D$ は地面からの高さ $z_G$ での幹と枝の投影幅およびその高さでの樹木の抗力係数である。このように、 $C_{D-all}$ は高さ方向における抗力係数の変化ばかりでなく、投影幅の変化を含んだもので、全水深（没水深）の関数であるところに特色がある。

数値計算は基礎式を差分式に変換して行いが、本論文での差分間隔 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ は5mとする。

(2) 対象とする海岸と津波および樹林条件

対象としたのは図-1に示した断面が汀線方向（ $y$ 軸方向）に一樣に続く海岸であり、そこに津波がまっすぐ（ $x$ 軸方向）に來襲する条件である。汀線付近は基準面（ $z=0$ m）までが1/100勾配、基準面上+4.0mまでが1/50勾配であり、続く陸地の勾配は1/500である。この断面形状は比較的緩勾配の海岸における砕波帯と浜の典型的地形を念頭に単純化したもので、特定の地点を対象としたものではない。津波來襲時の潮位は+2.0mとし、入射津

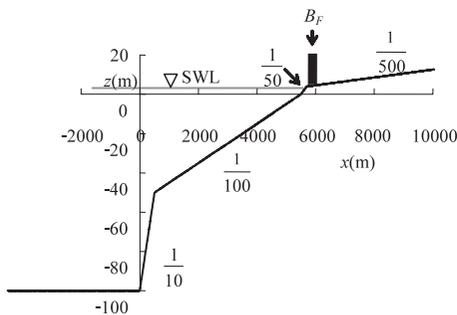


図-1 海岸断面と樹林位置

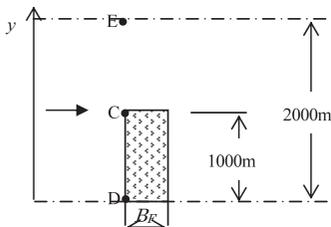


図-2 樹林の配置と代表地点



写真-1 スリランカにおけるアダン林の例

波は水深100mの沖側境界で押し波スタートの正弦波で与えており、周期 $T$ を600~3600s、波高 $H_i$ を2~8mの範囲で変化させる。ただし、沖側境界をどこにとるかは任意性があるので、本論文では飯村ら（2009）と同様に入射津波高を樹林なしの場合の汀線（ $z=2.0$ m）での津波高 $H_{s10}$ で表す。

海岸樹林は1/500斜面の沖側端（ $x=5700$ m、 $z=4.0$ m）から幅 $B_F$ にわたってあるものとし、図-2に示しているように計算領域の $y$ 方向距離は2000mであり、樹林はその半分の1000mにわたって配置する。図中のC、D、Eは計算結果を解析する代表地点を示している。地点C（ $x=5702.5$ m、 $y=997.5$ m）は樹林帯最前列の端部である。地点D（ $x=5702.5$ m、 $y=2.5$ m）、E（ $x=5702.5$ m、 $y=1997.5$ m）は端部の影響をほとんど受けにくい十分に離れた地点に設定しており、それぞれ樹林あり、なしの場合の一次元結果に対応する地点である。対象とした樹木は熱帯海岸樹のアダンで気根があり、写真-1に示したように砂浜海岸に密生して生育するので、津波防御樹林（バイオシールド）として注目される樹木である。本研究ではほぼ最大に生長したアダンを考え、樹高 $H_{Tree}$ を8m、基準投影幅 $b_{ref}$ を0.2mとし、基準抗力係数 $C_{D-ref}$ は1.0とする。なお、アダンの水深平均抵抗係数 $C_{D-all}$ （ $d$ ）は2004年インド洋大津波、2006年ジャワ津波に際しての樹木特性や破壊事例の調査結果（田中・佐々木、2007）に基づき与えている。

3. 数値計算結果と考察

(1) 津波曲げモーメントの定義と時間変化および平面分布の例

本研究では次式で定義するアダンに働く津波曲げモーメント $\vec{M}_p$ を議論する。

$$\vec{M}_p = \frac{1}{2} \rho C_{Dref} b_{ref} \vec{V} \left| \vec{V} \right| \int_{h_c}^d \frac{b(z_G)}{b_{ref}} \frac{C_D(z_G)}{C_{Dref}} (z_G - h_c) dz_G, \dots (3)$$

$$h_c \leq d$$

ここに、 $h_c$ は樹木の破断位置の地面からの高さであり、アダンの場合気根上端部の高さで与え2mとする。

図-3に代表地点C、Eにおける全水深 $d$ 、流速 $V$ および津波曲げモーメント $M_p$ の時間変化（第1波）を示している（ $B_F=50$ m、 $\gamma=0.2$ 本/m<sup>2</sup>、 $H_{s10}=6.94$ m、 $T=1200$ sの条件での例）。ここに、 $V$ および $M_p$ は流速および津波曲げモーメントの絶対値に $x$ 方向流速成分の符号を付したものである。この場合、地点Eの津波曲げモーメントは樹林帯の影響をほとんど受けにくい地点に単独にあるアダンに働く津波曲げモーメントに相当する。地点Dを含めた代表3地点における津波曲げモーメントの最大値 $M_{Pmax}$ （以降、これを単に津波曲げモーメントと呼ぶ）、そのときの全水深 $d_{MPmax}$ 、流速 $V_{MPmax}$ を表-1に示している。このように地点Eでの津波曲げモーメントが大きく、端部コーナー

表-1 代表地点における津波曲げモーメントの最大値等  
( $B_F=50\text{m}$ ,  $\gamma=0.2\text{本/m}^2$ ,  $H_{s10}=6.94\text{m}$ ,  $T=1200\text{s}$ )

	$M_{Pmax}/10^3$ (kNm)	$d_{MPmax}$ (m)	$V_{MPmax}$ (m/s)
C	8.56	5.08	2.96
D	7.47	5.87	2.06
E	15.6	4.88	4.25

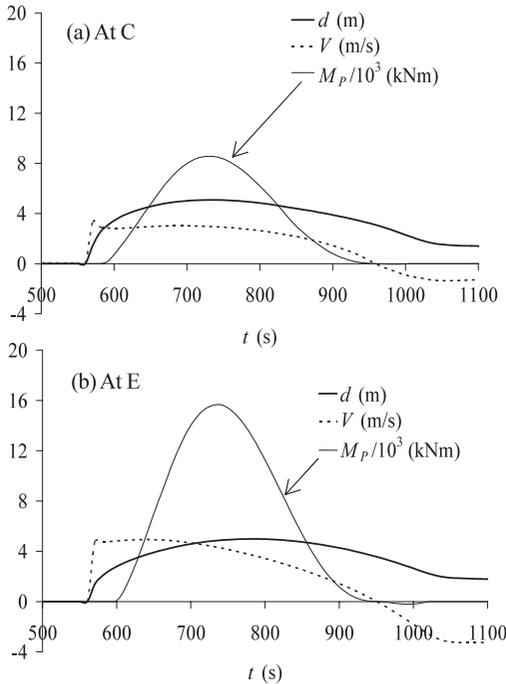


図-3 代表地点における津波曲げモーメントの時間変化等  
( $B_F=50\text{m}$ ,  $\gamma=0.2\text{本/m}^2$ ,  $H_{s10}=6.94\text{m}$ ,  $T=1200\text{s}$ )

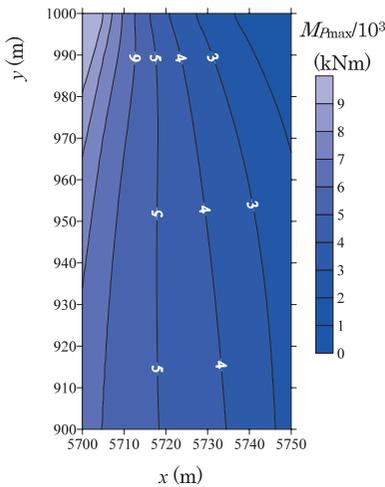


図-4 樹林帯端部付近における津波曲げモーメントの最大値の平面分布

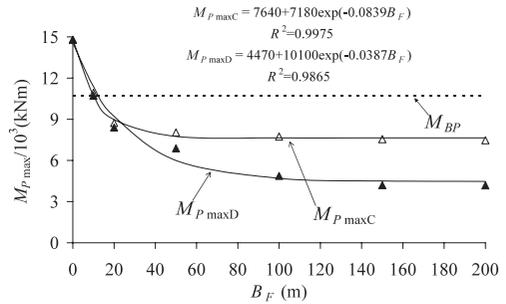


図-5 樹林幅による津波曲げモーメントの変化

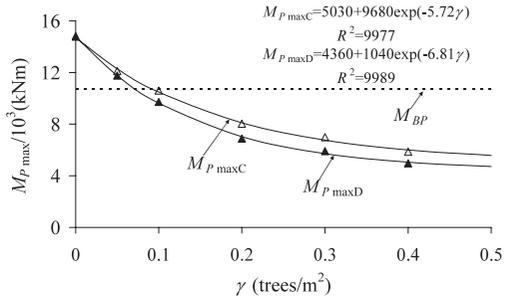


図-6 樹林密度による津波曲げモーメントの変化

地点Cおよび樹林帯が無限に続く場合に相当する地点Dでの津波曲げモーメントは地点Eのそれぞれ55%, 48%と小さい。これは、同表に示してある津波曲げモーメント最大時の全水深と流速からもわかるように、樹林帯による反射によって、最前列での水位は上昇するもの、流速が大きく減ることによって、図-4は樹林帯内の端部付近における津波曲げモーメント $M_{Pmax}$ の平面分布である。樹林帯の中では最前列端部の地点Cでの津波曲げモーメントが最大で、そこで破断の危険性が最も高いことが確認できる。

(2) 樹林条件の影響

図-5, 6は $H_{s10}=6.94\text{m}$ ,  $T=1200\text{s}$ の津波条件での樹林幅 $B_F$  ( $\gamma=0.2\text{本/m}^2$ に固定), 樹林密度 $\gamma$  ( $B_F=50\text{m}$ に固定)による津波曲げモーメント $M_{Pmax}$ の変化である。図中, $M_{Pmax}$ の後の添字CおよびDはそれぞれ地点CおよびDの値であることを示している ( $B_F=0$ ,  $\gamma=0$ は地点Eでの値)。樹林幅, 樹林密度が増大することは樹林抵抗が増大することを意味しており, いずれの結果においても樹林抵抗が増大するにつれて津波曲げモーメントは減少し, 一定値に近づく変化を示している。図中, 当てはめ曲線とその式を示しているが, 樹林幅による変化では $B_F=25\text{m}$ 付近まで地点Dの値がわずかに大きくなっているけれども, これは当てはめ式による結果にすぎない。また, 図中の $M_{BP}$ は現地調査の結果得られたTanaka et al. (2009)によるアダンの破断限界曲げモーメント (単位: Nm)

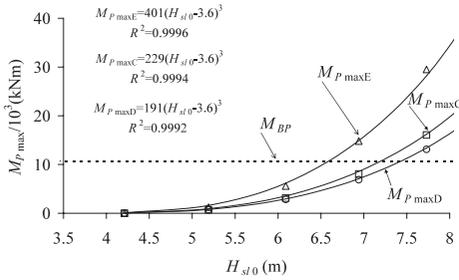


図-7 入射津波高による津波曲げモーメントの変化

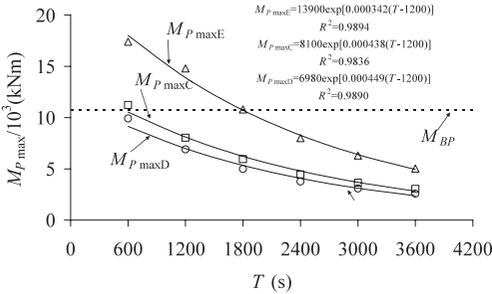


図-8 周期による津波曲げモーメントの変化

$$M_{BP} = 4.45(100b_{ref})^{2.62} \dots\dots\dots (4)$$

を示しており、樹林幅が狭い場合や樹林密度が小さい場合には津波曲げモーメントは破断モーメント（10.7kNm）を超え、折損の危険性が高いことがわかる。

(3) 津波条件の影響

図-7, 8は  $B_F=50m$ ,  $\gamma=0.2$ 本/m<sup>2</sup>の樹林条件のもとでの入射津波高  $H_{sl0}$  ( $T=1200s$ に固定), 周期  $T$  ( $H_{sl0}=6.94m$ に固定) による津波曲げモーメントの変化を示したものである。図中,  $M_{PmaxE}$ は地点Eでの津波曲げモーメントである。津波曲げモーメントはいずれの代表地点においても入射津波高が大きくなるにつれて増大し, 周期が長くなるにつれて減少する。図中の曲線は

$$M_{Pmax} = a_{Hm}(H_{sl0} - H_{cm})^{b_{Hm}} \dots\dots\dots (5)$$

$$M_{Pmax} = a_{Tm} \exp\left\{-b_{Tm}\left(\frac{T}{T_{rep}} - 1\right)\right\} \dots\dots\dots (6)$$

の関数で当てはめられた式による変化である。ここに  $a_{Hm}$ ,  $a_{Tm}$ は有次元係数,  $b_{Hm}$ ,  $b_{Tm}$ は無次元指数,  $H_{cm}$ は遡上津波が  $h_c$ に達する限界の入射津波高,  $T_{rep}$ は津波の代表周期である。このうち  $H_{cm}$ は厳密に言えば樹林条件および地点の関数であるが, 本研究の範囲ではそれほど変化しないので, その平均的な値である3.6mに固定する。また,  $b_{Hm}$ は津波曲げモーメントが津波高の3乗に比例すると考え3としている。代表周期は任意性のあるところであるが, 本研究では20分を考え,  $T_{rep}=1200s$ とする。そうした上での当てはめ曲線であるが, 適合度は良好である。

(4) 無次元化の試み

Shuto (1987)は樹林条件を表すのに樹林厚を定義し, 田中ら (2005)はそれに樹種による抵抗特性の違いを取り入れた式を提案した。式 (7)は田中ら (2005)の式をSI単位系に変更して書き換えたものである。

$$B_{dNall} = \gamma(1 \times B_F)b_{ref}C_{D-all} = \gamma B_F b_{ref}^* C_{D-all} \dots\dots\dots (7)$$

ここに,  $B_{dNall}$ は樹林厚 (単位: m),  $b_{ref}^*$ は数値は樹木の基準投影幅  $b_{ref}$ に同じであるが, 表記の簡単のため単位を m<sup>2</sup>/本とした便宜的なものである。  $C_{D-all}$ を与える没水深としては飯村ら (2009)と同様に汀線での津波高を用いる。

本研究では, これを次のように代表津波条件に対する長さスケールを導入して無次元化する (Thuyら, 2010)。

$$\frac{B_{dNall}}{T_{rep}\sqrt{gH_{rep}}} = \frac{\gamma B_F b_{ref}^* C_{D-all}(H_{rep})}{T_{rep}\sqrt{gH_{rep}}} \dots\dots\dots (8)$$

ここに,  $H_{rep}$ は汀線における代表津波高で, 任意性があるところであるが, 本研究では7mと設定する。したがって, この無次元パラメータは津波条件は入っているものの固定条件であり, 単に樹林条件を表すにすぎない。なお, 上式の分母は周期  $T_{rep}$ の長波の水深  $H_{rep}$ における波長に相当する。

一方, 津波曲げモーメントは, 入射津波による汀線での単位幅あたりの全静水圧に比例した力 ( $\rho g H_{sl0}^2$ )に樹木の基準幅  $b_{ref}$ , 抵抗特性を表す  $C_{D-all}$  ( $H_{sl0}$ )を乗じ, さらに腕の長さに比例するものとして  $H_{sl0}$ を乗じてモーメントの単位とした値で割って, 次のように無次元化する。

$$\frac{M_{Pmax}}{\rho g b_{ref} C_{D-all} (H_{sl0}) H_{sl0}^3} = \alpha_m f_{C_{D-all}} f_{Hm} f_{Tm} \dots\dots\dots (9)$$

ここに,  $\alpha_m$ は無次元値,  $f_{C_{D-all}}$ は水深平均抵抗係数  $C_{D-all}$ ,  $f_{Hm}$ は入射津波高  $H_{sl0}$ ,  $f_{Tm}$ は津波周期  $T$ に関するそれぞれ無次元関数であり, 次のように与える。

$$f_{C_{D-all}} = \frac{C_{D-all}(7)}{C_{D-all}(H_{sl0})} \dots\dots\dots (10)$$

$$f_{Hm} = 8.73 \left(1 - \frac{3.6}{H_{sl0}}\right)^3 \dots\dots\dots (11)$$

$$f_{Tm} = \exp\left\{-b_{Tm}\left(\frac{T}{1200} - 1\right)\right\} \dots\dots\dots (12)$$

これについては後で説明を加える。図-9は全データについて, 式 (8)の無次元樹林厚を横軸にとり, 式 (9)の無次元値  $\alpha_m$  (地点を表す添字C, Dを付加)をプロットしたものである。無次元関数  $f_{Tm}$ に含まれる未定係数  $b_{Tm}$ については, 地点ごとに次のように与えている。

$$b_{Tm} = 0.530, \text{ at C} \dots\dots\dots (13)$$

$$= 0.560, \text{ at D}$$

なお,  $\alpha_m$ は式 (9)からわかるように, 入射津波による

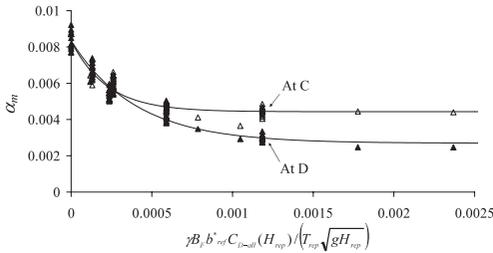


図-9 無次元樹林厚による無次元津波曲げモーメント

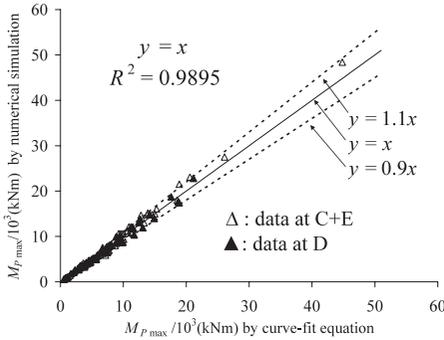


図-10 あてはめ式と数値シミュレーションによる結果の相関

訂線での全静水圧を考えたときのモーメントに比例した値で無次元化した遡上域での津波曲げモーメントを無次元関数  $f_{C_{D-all}}$ ,  $f_{H_m}$ ,  $f_{T_m}$  で除して補正した値であり、本論文ではこれを単に無次元津波力と呼ぶ。

このように無次元関数  $f_{C_{D-all}}$ ,  $f_{H_f}$ ,  $f_{T_f}$  は横軸の津波条件を代表津波条件の値に固定化したことによる津波曲げモーメントの補正関数で、これにより樹林条件が同じであれば津波高あるいは周期による変化は横軸の同じ位置にプロットされ、無次元津波曲げモーメントは代表津波条件による値とほぼ同じ値をとるように基準化したものである。図-9の曲線はそうした無次元津波力に対する次のような当てはめ式による関係を表している。

$$\alpha_{mC} = 0.00443 + 0.00392 \exp\left(-4553 \frac{\gamma B_r b_{ref}^* C_{D-all}(H_{rep})}{T_{rep} \sqrt{g H_{rep}}}\right) \dots\dots\dots (14)$$

$$\alpha_{mD} = 0.00269 + 0.00566 \exp\left(-2507 \frac{\gamma B_r b_{ref}^* C_{D-all}(H_{rep})}{T \sqrt{g H_{s10}}}\right) \dots\dots\dots (15)$$

ただし、式中の数値の有効数字が結果の有効数字を表すものではない。図-10は当てはめ式による津波力とシミュレーションによる津波力の相関である。多様な条件での結果であるためばらついているが、ほぼ±10%の誤差に収まっている。

4. おわりに

本研究により、遡上津波によるアダンの折損に関する津波曲げモーメントに及ぼす樹林および入射津波条件の影響を明らかにした。津波高が大きいほど破断の危険性は高いのはもとより、幅や密度といった樹林条件の影響が大きいことが特筆される。樹林幅が狭いほど、樹林密度が小さいほど津波曲げモーメントは大きい。そうした津波曲げモーメントの無次元式を示したが、広範な条件に対し、誤差はほぼ±10%の範囲に収まっている。今後、津波力や曲げモーメントに関する実験的検討、さらには現地事例に対する適用性を明らかにしていく考えである。

謝辞：本研究の一部に、(独)日本学術振興会の「アジア・アフリカ学術基盤形成事業」の助成(コーディネータ：田中規夫)を使用した。記して謝意を表します。

参考文献

飯村耕介・田中規夫・谷本勝利・田中茂信 (2009)：海岸樹林による津波減災効果の評価式の構築, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.366-370.  
 田中規夫・佐々木寧・湯谷賢太郎・Samang Homchern (2005)：津波防御に対する樹林帯幅と樹種の影響について—インド洋大津波に対するタイでの痕跡調査—, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1346-1350.  
 田中規夫・武村 武・佐々木 寧・M.I.M. Mowjood (2006)：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, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.281-285.  
 田中規夫・佐々木寧 (2007)：2006年ジャワ津波災害において海岸林が果たした役割とその破断・なぎ倒し限界, 水工学論文集, 第51巻, pp.1445-1450.  
 谷本勝利・田中規夫・N.B. Thuy・飯村耕介・原田賢治 (2009)：海岸樹林端部付近における津波の流れ—実験と数値計算—, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.361-365.  
 Thuy, N.B., 飯村耕介・田中規夫・谷本勝利 (2010)：切れ間を有する海岸樹林の潜在的津波力に関する樹林および津波条件の影響, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.291-296.  
 Shuto N. (1987)：The effectiveness and limit of tsunami control forests, Coastal Engineering in Japan, 30 (1), pp.143-153.  
 Tanaka, N., N.A.K. Nandasena, K.S.B.N. Jinadasa, Y. Sasaki, K. Tanimoto and M.I.M. Mowjood (2009)：Developing effective vegetation bioshield for tsunami protection, Journal of Civil Engineering and Environmental Systems, Taylor & Francis, 26, pp.163-180.  
 Tanaka, N., Y. Sasaki, M.I.M. Mowjood and K.B.S.N. Jinadasa, (2007)：Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: Experience of the recent Indian Ocean tsunami, Landscape and Ecological Engineering, 3, pp.33-45.  
 Thuy, N.B., K. Tanimoto, N. Tanaka, K. Harada and K. Iimura (2009)：Effect of open gap in coastal forest on tsunami run-up—Investigations by experiment and numerical simulation, Ocean Engineering, 36, pp.1258-1269.  
 Yanagisawa, H., S. Koshimura, K. Goto, T. Miyagi, F. Imamura, A. Ruangrassamee and C. Tanavud, (2009)：The reduction effects of mangrove forest on a tsunami based on field surveys at Pakarang Cape, Thailand and numerical analysis, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 81, pp.27-37.