

マングローブ林内を遡上した津波の挙動と樹木の破壊条件 —2004年インド洋大津波によるタイ Khao Lak での被害調査—

柳澤英明¹・越村俊一²・後藤和久³・今村文彦⁴
宮城豊彦⁵・林 一成⁶

タイ南西部 Khao Lak を対象に, 2004 年インド洋大津波に関する樹木の被害調査および津波の数値解析を行い, 津波の挙動と倒木の関連性について検討した。被害調査では, まず津波による倒木形態を五つに分類し, その状況について整理した。また, 河川周辺のマングローブ林における調査では, 倒木の方法や漂流物の状況より, 津波が河川を遡上する流れを確認した。数値解析では, 津波高, 浸水域および流動状況と観測記録を比較し, 妥当性を検証した。その後, 津波の計算流速を利用し倒木状況と比較した結果, 流速と樹径の関係から倒木の有無が明瞭に分かれ, 破壊限界線を示すことができた。

1. はじめに

2004 年インド洋大津波において, 樹木の減災効果については多くの報告がなされており, 特に沿岸域に繁茂するマングローブ林は減災に大きな役割を担った (例えば Danielson ら, 2005)。しかし一方で, 樹木は津波により倒木し, エネルギー減衰効果の低減, 漂流物への変化など被害を拡大しうる危険性もある。そのため樹木を防災に利用していくためには, 津波外力と倒木の関連性も十分把握しておく必要がある。これまで, 津波による倒木に関する検討については, 浅野 (2005) や今井ら (2005) によって樹木の静的引き倒し試験を基準とすることが提案されているが, 実際の津波時の状況を十分に反映しているとはいえずさらなる検討が必要となっている。一方, 津波による倒木状況については, 田中ら (2005) や首藤 (1985) によって定性的に検討されているものの, 定量的な検討は行われていない。そこで本研究では, 2004 年インド洋大津波で大きな被害を受けたタイ Khao Lak を対象とし詳細な植生被害調査および津波の数値計算を行い, 津波と倒木の関連性を明らかにすることを目的とした。

2. 現地調査

(1) 調査概要

2005 年 9 月 6~12 日, 2006 年 2 月 23~3 月 1 日, 2006 年 4 月 14~21 日の期間において, 図-1 に示すタイ南西部 Khao Lak の Pakarang 岬周辺を対象に, 2004 年インド洋

大津波による樹木の被害状況の調査を行った。今回調査を行った地域の海岸付近には, 等間隔に植林されたココヤシ (*Cocos nucifera*) やモクマオウ (*Casuarina equisetifolia*) などが分布している。また, Pakarang 岬南端にある河川周辺ではマングローブ林がひろがっており, ここでは, 主にフタバナヒルギ (*Rhizophora apiculata*), オヒルギ (*Bruguiera gymnorrhiza*), ウラジロヒルギダマシ (*Avicennia alba*), シマシラギ (*Excoecaria agallocha*) などが分布している。Pakarang 岬周辺の植生分布図についても図-1 に示した。

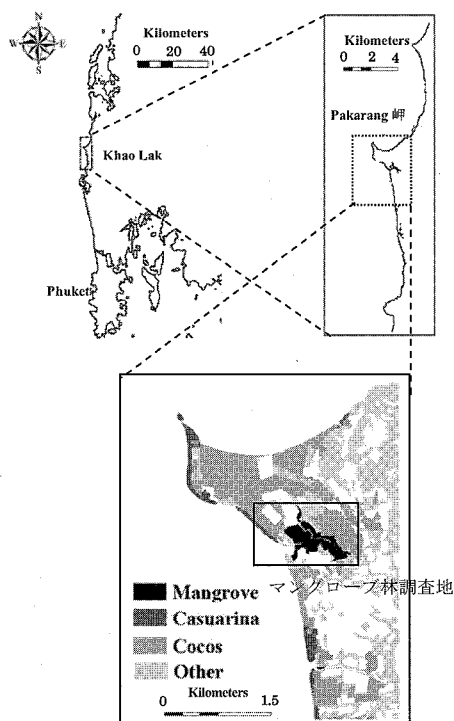


図-1 調査対象地域とその植生分布図

- 1 学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
2 正 会 員 博(工) 東北大学助教授大学院工学研究科付属災害制御センター
3 博(理) 東北大学助手大学院工学研究科付属災害制御センター
4 正 会 員 工博 東北大学教授大学院工学研究科付属災害制御センター
5 理博 東北学院大学教授教養学部地域構想科学科
6 修(文) (株)奥山ボーリング KK

(2) 樹木調査

以下の項目に分け、津波による樹木の被害状況を調査した。(③～④)はマングローブ林のみ対象)

- ① 倒木の有無
- ② 樹径(胸高直径, 株元径)
- ③ 樹高・枝下高さ
- ④ 樹林への付着物の量と方向

各項目について、測定および写真撮影を行いその状況を記録した。また調査樹木すべての位置情報を GPS を用いて記録し、GIS によりマップ上にプロットした。

3. 調査結果

(1) 樹木の倒木状況

倒木を理解する上で、倒木の形態とそれに至る要因を明らかにしておくことは重要である。河川洪水時の倒木形態については、北川ら(1988)によってまとめられている。しかし、津波においては詳しい調査は行われていない。そこで今回の調査結果を元に整理を行ったところ、倒木形態については洪水時のものとほぼ同様であった(図-2)が、倒木に至った状況については違いが見られた。以下代表的な樹種を対象に、津波による倒木形態とその要因について整理を行った。

a) 内陸樹種(モクマオウ, ココヤシ)

モクマオウは、海岸付近で倒木していたものを対象に計 13 本を調査し、内 2 本で抜根が確認されたが、その他はすべて幹部での折損により倒木していた。ココヤシも同様に、海岸付近ではほぼ折損で倒木していた。一般に、洪水時の倒木では、樹径が細い物を除き、折損は少ないとされているが、津波は洪水よりも流速が早く折損を生じさせてしまうと考えられる。一方、Pakarang 岬南端にある河川の上流部に生えていたココヤシには、根

返りや根が抜けずに傾倒しているものが見立った。これは、河川周辺では地盤の含水率が高く軟弱なため、根部分が持ち上がってしまうことが原因と考えられる。海岸線沿いでは津波により地盤が侵食されておりココヤシなどが侵食流出していた。

b) マングローブ林(フタバナヒルギ, オヒルギ)

マングローブ林においてはフタバナヒルギおよびオヒルギを対象に、それぞれ 95 本, 17 本を測定した。倒木していたフタバナヒルギ(52 本を測定)のうち、数本のみに抜根、傾倒がみられたものの、その他は幹部もしくは支柱根部分で折損していた。これは、フタバナヒルギ特有の支柱根(図-3 右)によって、根が地盤にしっかりと固定されており、根部分からの倒木が起こりにくいためと考えられる。一方、オヒルギに関しては、河口に面した部分では折損によって倒木し、樹林奥ではほとんどが抜根で倒木していた。マングローブ域は地盤が泥炭で軟弱でありかつ、オヒルギは根が浅いため抜根しやすいと考えられる。以上のように津波による倒木は、海岸付近では主に折損を起こし、河川周辺域のような地盤の軟弱な場所では、根部分から倒木する傾向にある。ただし、フタバナヒルギについては、場所や地盤条件にかかわらず、折損が主な倒木形態となる。また、海岸線および河川沿いで侵食が生じた場合には、樹種を問わず流出

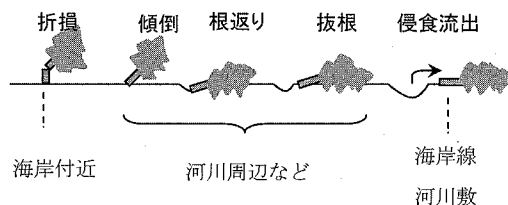


図-2 津波による海岸林の倒木形態

表-1 樹種ごとの倒木形態

	樹種	折損	傾倒	根返り	抜根	侵食流出
内陸樹種	モクマオウ	○				○
	ココヤシ	○	○	○	○	○
マングローブ林	フタバナヒルギ	◎	×	×	×	○
	オヒルギ	○			◎	○

◎: 高頻度 ○: 中頻度 ×: 低頻度 空白: 今後確認が必要

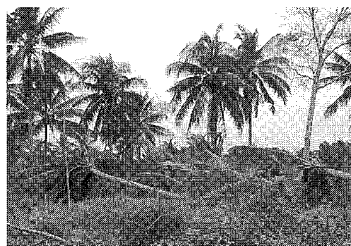


図-3 倒木した樹木(左: モクマオウ折損, 中: ココヤシ根返り, 右: フタバナヒルギ折損)

してしまう。表-1に樹種ごとに定性的に評価した倒木形態の頻度を、図-3には調査を行った樹木の写真を示す。

(2) マングローブ林の津波による破壊状況

次に、Khao Lakにおけるマングローブ林の破壊状況を検討する。まず津波前後のIKONOS画像（津波前：2003/1/3撮影，津波後：2004/12/29撮影）より植生の色彩変化から、破壊状況図を作成した。図-4にその結果を示す。同図より、河口に面した部分で被害が非常に大きいことが分かる。また、津波前後のマングローブ林の面積から破壊率を算定したところ、この地域では約7割が破壊していることが分かった。

(3) 漂流物および倒木状況から見た津波の挙動

マングローブ林内では、家の残骸や倒木した樹木が漂流物となり、堰き止められていた（図-5）。これらの残骸は、流れ方向に明瞭に捕捉されており、津波の流動状況や漂流物の状況を知る重要な手がかりとなる。そこで、漂流物の方向を現場で記録し、その後現場で撮影した写真を解析してその量を把握した。今回調査した樹木のうち、漂流物の量を三段階に分けプロットしたものを図-6に示す。漂流物は、樹間の狭い部分で多量に堰き止められており、樹間が2m程度の位置（図-6：地点1）では、流れ方向に対してほぼ樹林帯の第一目で堰きとめられ、背後には侵入していなかった。一方、樹間が5~10m以上ある部分（図-6：地点2）においては、漂流物は樹林奥まで進入していた。次に、漂流物が捕捉されている方角および、倒木していた樹木の方向を記録したものを図-7に示す。まず、南岸では樹木がほぼ北東方向に一樣に倒れていた。それに対して北岸では流れの方向が変化しており、北西方向の形跡も見られた。これは、河川を遡上した津波が地形の低い部分を伝ってマングローブ林内に流れ込んだためと考えられる。以上より、マングローブ林内を遡上した津波の挙動を推察すると、津波は南西方向から入射し南岸ではそのまま遡上、一方で北岸では河川を遡上しマングローブ林内へ流れ込んだものと見られる。

4. タイ Khao Lak における津波数値解析

マングローブ林内を遡上した津波の詳細な状況を把握するため、数値計算を行い流動状況とその規模について検討した。

(1) 数値モデル

大洋を伝播する津波の数値解析は、計算領域を広領域（最大1,800mグリッド）から狭領域（最小17.3mグリッド）へ格子サイズを変化させながら接続計算を行った。支配方程式には、広領域では地球座標系の線形長波方程式を、狭領域における遡上計算には非線形長波方程

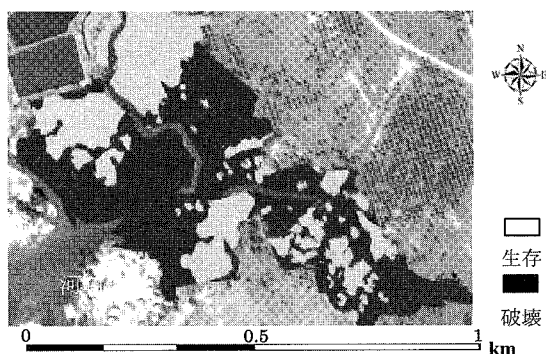


図-4 河川周辺での津波による樹木の破壊分布
 (IKONOS image : 2005 Space Imaging/CRISP-Singapore, Inc)



図-5 家屋の残骸などが引っかかったフタバナヒルギ

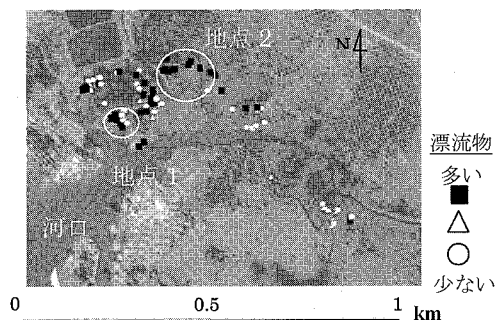


図-6 マングローブ林内の漂流物分布

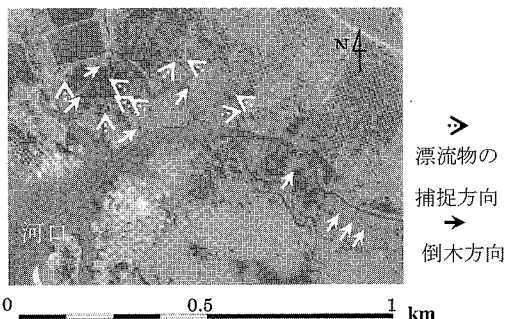


図-7 漂流物および倒木状況から推察されるマングローブ林内の津波の流動状況

式を利用した。また、Khao Lak 周辺での水深データには、1/60,000 スケールのマップをデジタル化したものを、マングローブ林周辺では現地で行った地形測量データを元に作成したものを利用した。断層パラメータには、越村ら (2005) を参考とした。また、底面粗度は小谷ら (2002) に倣い、土地利用に応じた粗度係数を与え、本研究の対象となるマングローブ周辺の条件に関しては、マングローブの形状を考慮し合成等価粗度モデルを利用した (油屋ら, 2002)。ただし、本研究では津波後生存した樹木のみ形状抵抗を考慮し、倒木した樹木や漂流物の影響は無視した。

(2) 樹林帯条件

今回調査したマングローブ林で、津波後に生存していた樹種の多くはフタバナヒルギであり、本研究では代表的な形状としてマングローブ林にはフタバナヒルギを利用した。図-8 にフタバナヒルギの形状について、胸高直径と関連付けて樹高、枝下高さをプロットし、計算には胸高直径の平均値でそれぞれの形状を決定した。また根部の形状は三角形に近似し、支柱根高さ、支柱根張り、支柱根本数より形状抵抗を決定した。支柱根本数は分岐前の本数を利用した (表-2)。

表-2 フタバナヒルギ形状の平均値

	平均値
幹直径 (胸高直径)	0.3 m
支柱根高さ	1.5 m
支柱根張り	3.4 m
支柱根本数 (分岐前)	7 本

(3) 計算結果

図-9 は、地震発生より 2 時間 20 分後に到達した津波の第一波押しの津波流速ベクトルである。津波は河口より遡上し、その後マングローブ林内に進入している。流速ベクトルの方向は、現地調査より得た流速 (図-7) と調和的である。次に、津波痕跡高さおよび、浸水域の比較を行った。図-10 は津波前後 (左: 2002/11/15, 中央: 2004/12/31) に撮影された ASTER による衛星画像と計算による浸水域を重ねたもの (右) である。津波によって、色彩が変化した部分と計算上の浸水範囲はよく一致している。また、図-11 では松富ら (2005) および Goto ら (2006) によって測定された津波痕跡高さとは計算値を比較した。海岸線付近での局所的に高い値を除いて、計算値は妥当な結果を得ている。以上より、本計算結果は現地での津波襲来状況をよく再現しているといえる。

(4) マングローブ林の倒木条件

ここでは、津波の数値計算結果と倒木の関連性を検討する。北川ら (1988) によれば、河川洪水時の倒木は流速

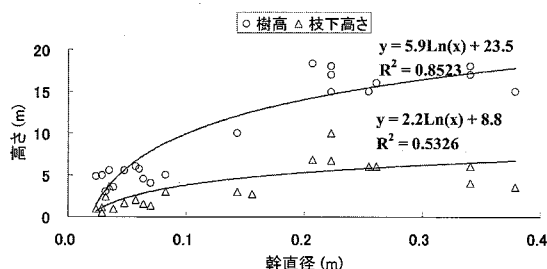


図-8 フタバナヒルギの形状

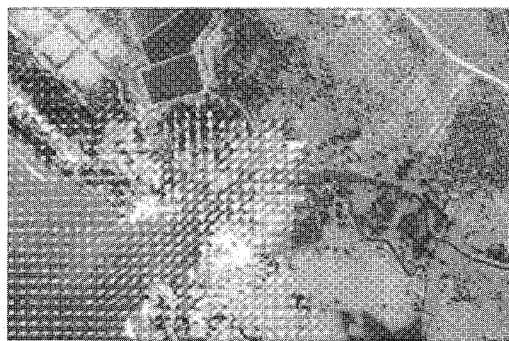


図-9 数値計算による津波の流速ベクトル (2時間20分後)

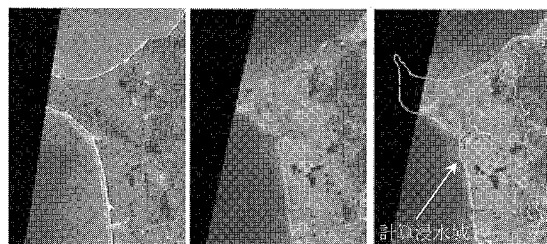


図-10 数値計算による浸水域と衛星画像との比較 (NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team)

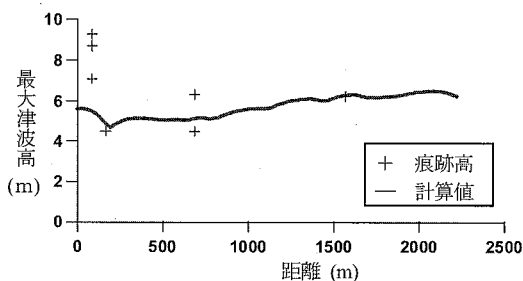


図-11 最大津波高に関する数値計算と現地調査結果の比較

と関連している。そこで、計算で得られた津波流速と樹木の破壊状況 (図-4) を比較した。図-12 にその結果を示す。流速は河口に面した部分で大きく、被害の大きい

部分と一致する。それらの関係をより明確化するため、現地調査でマングロープ林（フタバナヒルギ）を測定した位置ごとに流速を算定し、胸高直径、津波の流速、倒木の有無の関係をプロットした。その結果が図-13である。同図から、倒木の有無はこの表示で明瞭に分けられ、破壊限界線を引くことができる。ただし、今回の結果は漂流物や倒木が流れに及ぼす影響を考慮していない。今後、より精度の高い検討を行っていくためには、それらの影響を定量的に検討する必要がある。

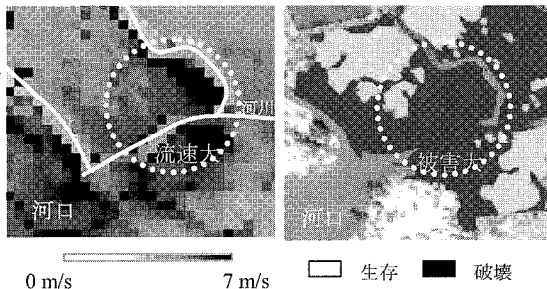


図-12 計算による津波流速と樹木の破壊分布(図-4)の比較

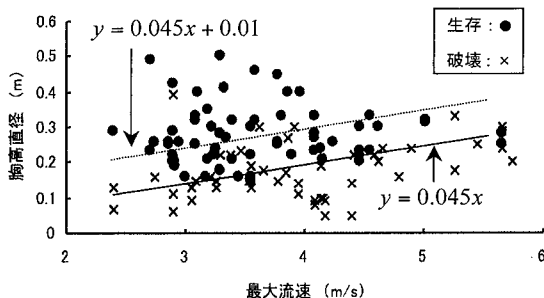


図-13 津波の流速、胸高直径、倒木の関係

5. 結 論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 津波による倒木は海岸付近で折損が多く、少し内陸部、特に河川周辺域では根返りなど根部分から倒木する傾向にある。ただしフタバナヒルギの場合、支柱根を持つため折損が主な倒木形態であった。
- (2) 倒木の方法や漂流物の捕捉状況から、マングロープ林内での津波の流動状況を検討した結果、河川を遡上する津波の流れを確認した。
- (3) タイ Khao Lak を対象に、2004 年インド洋大津波の数値解析を行った結果、観測記録に対して妥当な値を

得ることができた。

- (4) 数値計算による津波流速とマングロープ林（フタバナヒルギ）の倒木状況を比較し胸高直径との関連を検討した結果、破壊限界線を示すことができた。

謝辞：本研究の一部は平成 18 年度笹川科学研究助成金および科学研究費補助金基盤(A)（代表：今村文彦，課題番号：18201033）によるものである。また、本研究を実施するにあたり、Chulalongkorn 大学 Anat Ruangrasamee 博士には多大なる協力と有益な助言をいただいた。現地調査では、NDWC の Passkorn Kunthasap 氏、Chulalongkorn 大学 Suchana Chavanich 博士、Prince of Songkra 大学 Charlchai Tanavud 博士らの協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 浅野敏之(2005)：植生群落の流動特性と環境形成，第 41 回水工学に関する夏期研修会講義集，pp. B-5-1-B-5-20。
- 油屋貴子・今村文彦(2002)：合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの提案，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 276-280。
- 今井健太郎・松富英夫(2005)：沿岸林による津波減災効果とその限界に関する判定図の作成，平成 17 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，pp. 250-251。
- 北川明・島谷幸宏・小栗幸雄(1988)：洪水による樹木の倒伏，土木技術資料 30-7，pp. 9-14。
- 越村俊一・高島正典・鈴木進吾・林春男・今村文彦・河田恵昭(2005)：インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 1416-1420。
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998)：GIS を利用した津波遡上計算と被害予測，海岸工学論文集，第 45 巻，pp. 356-360。
- 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，湯谷賢太郎・Sanang Homchuen(2005)：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—，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 1346-1350。
- 松富英夫・高橋智幸・松山昌史・原田賢治・平石哲也・Seree Supartid・Sittichai Naksuksakul(2005)：タイの KhaoLak と Phuket 島における 2004 年スマトラ島沖津波とその被害，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 1356-1360。
- Danielson, F., M.Sorensen, M. Olwig, V. Selvam, F. Parish, N. Burgess, T. Hiraishi, V. Karunakaran, M. Rasmussen, L. Hansen, A. Puerto, N. Suryadiputra(2005)：The Asian Tsunami: A Protective Role for Coastal Vegetation, SCIENCE, VOL.310, 28, OCTOBER, pp. 643。
- Goto, K., F. Imamura, N. Keerthi, P. Kunthasap, T. Matui, K. Minoura, A. Tuangrasamee, D. Sugawara, S. Supharatid(2006)：Distributions and Significances of the 2004 Indian Ocean tsunami deposits—Initial results from Thailand and Srilanka—Their features and implications, Elsevier, Belrin (in press)