

タイ Namkem でのマングローブ林の津波被害調査と破壊率評価

柳澤 英明*・越村 俊一*・今村 文彦*
宮城 豊彦**・佐藤 博幸**・Charlchai Tanavud***

1. はじめに

2004 年インド洋大津波における海岸林の減災効果は、これまで多くの報告例があり、特に沿岸域に広がるマングローブ林は津波減災に大きな役割を担った (Danielson ら, 2005)。しかしながら、海岸林は津波により大規模に破壊され、漂流物となり被害を拡大させうる場合もある (首藤, 1993)。そのため、海岸林を防災に利用していくためには、その限界も定量的に把握しておく必要がある。樹木の破壊限界を示す研究には、樹木を人工的に引き倒し、そのときの引き倒す力を測定したものや過去の津波被害の文献から定性的に破壊限界を推定したものがある (渡邊ら, 1996; 今井ら, 2006; 首藤, 1992)。しかし、樹種や地盤の状況により破壊限界は異なっており、特に、マングローブ林は、一般とは異なる樹木特性を持つため、その破壊限界は分かっていない。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地域に対して、マングローブ林の被害調査、衛星画像の解析、および津波の数値解析を行い、津波外力に対する破壊率の評価をおこなった。

2. 対象地域

本研究では、タイ南部 Phang Nga 県の北部に位置する Namkem を対象とし、河川周辺に広がるマングローブ林を調査・解析した (図 1)。今回の津波によるタイ全体の死者

数の 8 割弱が、この Phang Nga 県に集中しており、特に Namkem は村落被害としては最も大きかった。市街地では、4 ~ 6m 程度の津波が襲来した (行谷ら, 2005)。

3. 研究の手法

3.1 現地調査

2006 年 8 月 7 日から 17 日にかけて、タイ Namkem 周辺でマングローブ林の被害調査を行った。調査項目は、樹種、津波による破壊形態、位置、樹径 (胸高直径、株元径) の測定とし、マングローブ林の密度に応じ 10m ~ 20m の方形区を設定後、内部の樹木を測定した。また、船をチャーターし、津波の影響を受けたマングローブ林における全体的な樹種分布と破壊状況の記録を行った。

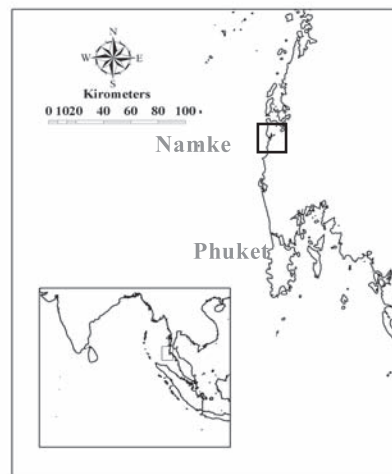


図 1 調査地域

* 東北大学大学院工学研究科

** 東北学院大学

*** Prince of Songkhla 大学, タイ国

3.2 衛星画像および航空写真による解析

まず、Namkem におけるマングローブ林の樹種分布を把握するため、津波前に撮影された航空写真と現地で記録した樹種分布をあわせ、Namkem 全体の樹種分布図を作成した。さらに、津波による被害状況を把握するため、津波後 (2005 年 1 月 2 日) に撮影された QuickBird (DIGITAL GLOBE) のパンシャープン画像 (解像度: 0.6m) を用い、マングローブ林の被害面積の評価を行った。マングローブ林の被害判定には、NDVI (正規化植生指標) を利用する。

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

ここで、*NIR*: 近赤外波長帯 *RED*: 可視赤波長帯である。被害抽出における閾値設定には、現地調査でマングローブ林の状態を確認した地域をサンプルとし、被害状況に合わせて決定した。

3.3 数値解析

津波の外力評価を行うため、浅水波理論を用いて津波の遡上計算を行なった。計算領域はインド洋全体から対象地域までとし、水深に応じ 5 領域に分割し、最小 17m メッシュとした。またマングローブ林内では、合成等価粗度モデル (油屋ら, 1999) を利用し、マングローブ林の密度、形状に応じ粗度を与えた。マングローブ林の形状、密度については、現地によって得られた値の平均値を用いた。ただし、津波後生存していた樹木のみを考慮している。

4. 結果

4.1 マングローブ樹種と分布

図 2 に、Namkem 周辺での樹種分布図を示す。この地域では、主に *Rhizophora* sp. が先駆する混交林が広がっており、一部、中洲や河口前面部などの地形の低い部分に *Avicennia* sp. や *Sonneratia* sp. などが群生し

ている。その他、*Rhizophora* sp. の森には、*Cerios* や *Buruguera* などの樹種も混在する。この地域の *Rhizophora* sp. の森は、樹径が、5-15cm 程度と細く密に茂っている。本研究では、この地域で最も群生する *Rhizophora* sp. の森を対象とした。

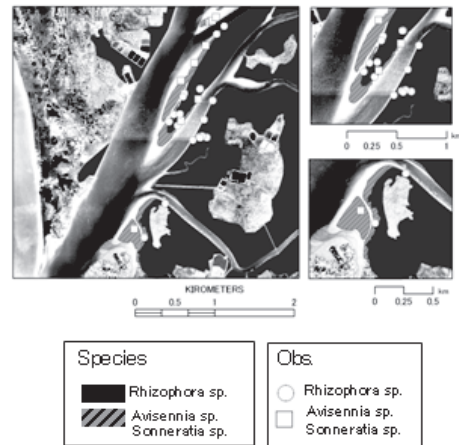


図 2 マングローブ林の樹種分布図

4.2 津波によるマングローブ林の破壊形態の空間的変化

柳澤ら (2005) によれば、津波による樹木の破壊形態は、折損、抜根、根返り、傾倒、侵食流出の五つに大きく分類される。ここでは、津波による破壊形態の空間的な変化を検討するため、予測される津波の流動方向に沿って、図 3 のように 4 つの調査点を取った。それぞれの地点における破壊形態の測定結果を表 1 に、その割合を図 4 に示す。汀線付近の地点 1 においては、破壊形態の 90% 以上が折損となっている一方で、地点 2, 3 では傾倒が目立っている。そして、地点 4 に至ると津波による被害はなくなり、破壊限界となる。図 5 は、図 3 中の Line1 に沿った破壊に関する模式図と現地の写真である。破壊は、汀線から 170m 地点まで進行しており、その間、75m 地点までは、ほぼ折損で破壊され、その後、傾倒と折損が混在した状態で破壊限界に至る。

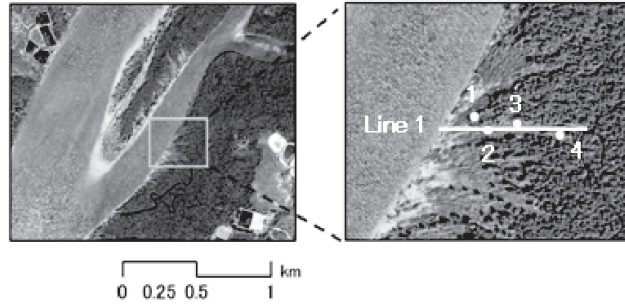


図3 津波の流動方向に沿った調査地点

表1 地点1～4における破壊形態の測定本数

	地点1	地点2	地点3	地点4	合計
折損	23	64	28	0	115
抜根	0	9	1	0	10
傾倒	1	37	10	0	48
生存	1	1	2	46	50
合計	25	111	41	46	223
方形区 (m ²)	20 × 20	12 × 12	10 × 10	10 × 10	

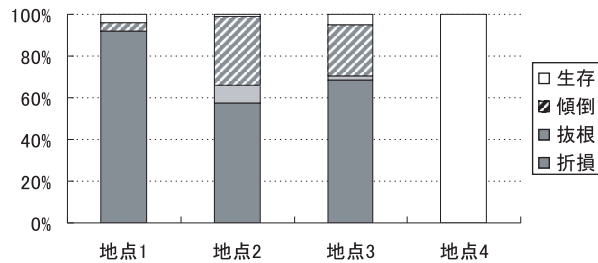


図4 地点1～4における破壊形態の割合

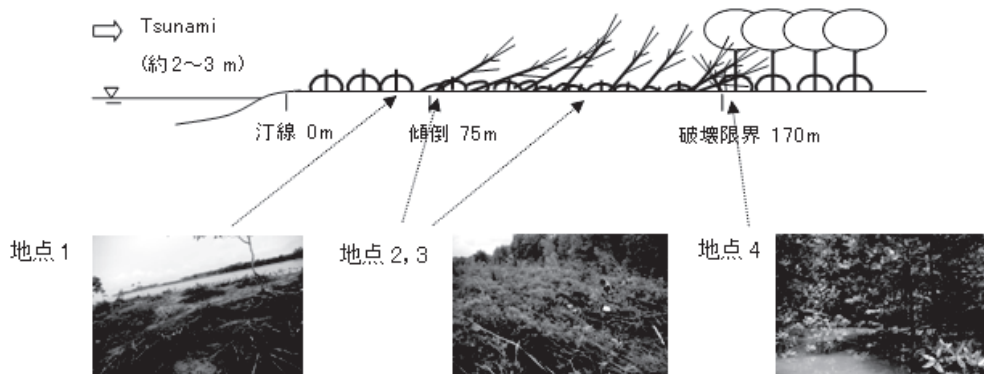


図5 津波の流動方向に沿った破壊形態の変化

4.3 NDVI の閾値設定

表 2 は、図 6 における各サンプル地域での NDVI の集計で、10m × 10m 内の値を整理している。Namkem でのマングローブ林の破壊は、前述のように、折損と傾倒があり、傾倒では葉を残している場合もある。そのため、折損している範囲よりも NDVI が高くなる傾向がみられた (図 7)。それぞれの状態に対して、平均値の差を確認するため、長谷川ら (2003) に倣い t 検定を行った。その結果、生存域と傾倒域、および傾倒域と折損域ともに、それぞれ優位な差となった (t 値 : 74.8, 自由度 : 1805, p 値 : < 0.001 ; t 値 : 32.5, 自由度 : 750, p 値 : < 0.001)。このことにより、NDVI はマングローブ林の破壊と生存を抽出する上で有効な指標であり、その閾値を検討するにあたり、生存域と傾倒域の NDVI で検討するのが良いと考えられる。本研究では、図 7 において生存域の NDVI の最小値と傾倒域の NDVI の最大値が、ほぼ同程度の値になっていることに注目し、それらを平均した値 (0.37) を閾値として採用した。図 8 は、図 2 の樹種分布図に従い、*Rhizophora* sp. の生存域を NDVI による閾値により抽出したものである。

4.4 数値解析

数値解析よれば、津波は地震発生より 2 時間 20 分後、NamKem 沿岸付近まで襲来し、その 25 分後には、NamKem 一帯を浸水させる。襲来した津波は、まず河川を遡上したのち、Namkem 市街地および、マングローブ林内へ

表 2 マングローブ林の状態と NDVI (*Rhizophora* sp. が先駆する森)

地点	平均	分散	データ数	最大	最小	状態
1	0.37	0.0017	289	0.48	0.31	生存域
2	0.42	0.0011	289	0.49	0.35	生存域
3	0.44	0.0115	272	0.48	0.42	生存域
4	0.41	0.0017	289	0.51	0.31	生存域
5	0.47	0.0229	272	0.55	0.41	生存域
6	0.3	0.0002	289	0.33	0.26	傾倒域
7	0.3	0.0327	289	0.41	0.27	傾倒域
8	0.27	0.0014	289	0.37	0.22	折損域
9	0.15	9E-05	289	0.18	0.13	折損域

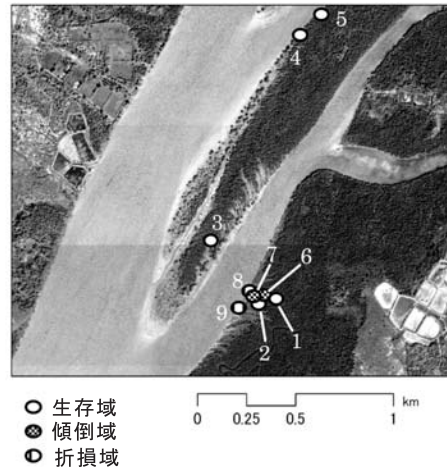


図 6 トレーニングエリアの選定地点

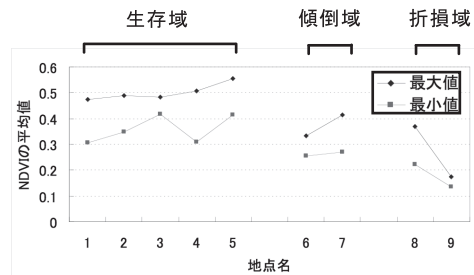


図 7 地点ごとの NDVI の最大値と最小値

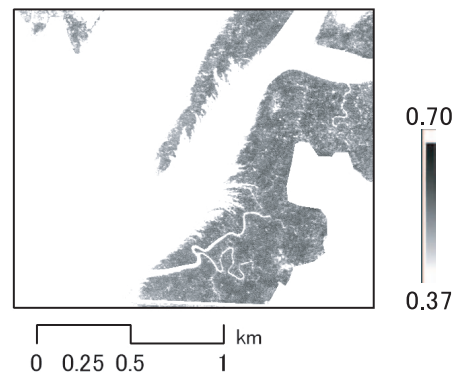


図 8 NDVI の閾値により抽出した *Rhizophora* sp. の生存面積

広がっていった。計算では、NamKem市街地で、津波流速が3~4m/s以上となった。図9に、最大計算津波高、および津波痕跡調査(松富ら, 2005; 行谷ら, 2005) との比較を示す。図9は、図8におけるライン上で断面をとり、北を0としている。痕跡高さにばらつきがあるが、ある程度、計算値は妥当な結果を得ている。

5. 津波の数値解析と衛星画像による破壊面積評価の比較

ここでは、数値解析で得られた津波の外力と衛星画像より抽出した破壊面積を比較し、津波外力に対するマングローブ林の破壊限界を議論する。マングローブ林の破壊率を評価するため、衛星画像から得られた破壊面積を、計算のメッシュサイズ (= 17m) で分割し、

それぞれのメッシュで、破壊率を以下のように定義した。

$$F = 1 - \left(\frac{\text{1メッシュ内の津波後の面積 (m}^2\text{)}}{\text{1メッシュ内の津波前の面積 (m}^2\text{)}} \right)$$

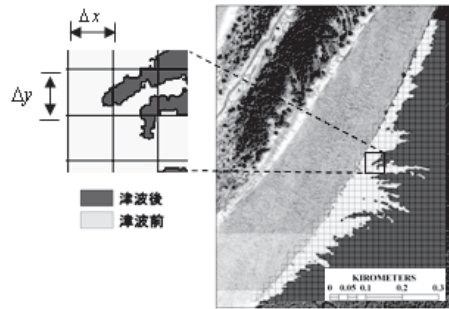


図10 生存率の定義

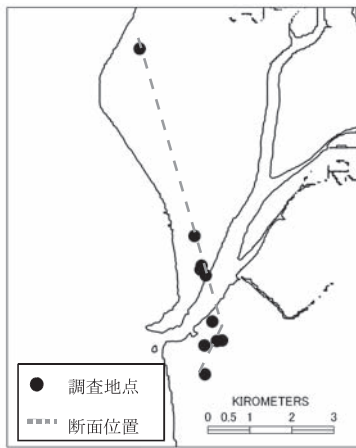


図8 津波痕跡高さの測定地点

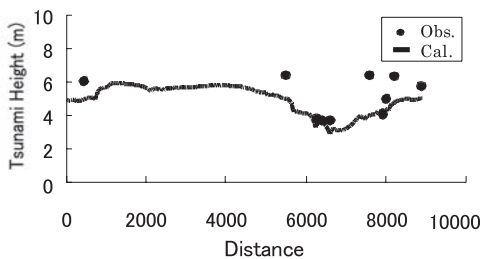


図9 津波痕跡高との比較

津波の外力に関しては、水流圧力を利用する。

$$p = D \times u^2 \quad (2)$$

ここで、 p は水流圧力 (m^3/s^2)、 D は津波浸水深 (m)、 u は流速 (m/s) である。図11に、マングローブ林の破壊率 F を水流圧力 p で整理した結果を示す。また、以下の標準正規分布の累積確率関数 Φ を用いて、近似曲線を作成した。

$$F(p) = \Phi((\ln(p) - \lambda) / \xi) \quad (3)$$

ここで、 λ および、 ξ は $\ln(p)$ の平均値 (1.73)、および標準偏差 (0.32) で、確率紙を用いて最小二乗法 ($R^2=0.87$) により算定した。その結果、水流圧力が大きくなるにつれて、破壊率は増加しており、 $5.0m^3/s^2$ で35%、 $11m^3/s^2$ 以上で破壊率が98%に達することがわかった。ここで、簡易に長波の波速で流速を近似すると ($F_r=1.0$)、津波浸水深が1.0m~1.6mで水流圧力は、約3.0~6.0 m^3/s^2 となる。羽鳥ら(1986)によれば、過去、日本に襲来した津波による家屋被

害を整理した結果、水流圧力が $5.0\text{m}^3/\text{s}^2$ 程度から被害が大きくなり始めることを指摘している。このことから、 $1.0\text{m} \sim 1.6\text{m}$ 程度の津波に対しては、今回のマングローブ林の規模でも、破壊面積は 50% 程度にとどまり、十分な樹林帯幅を設置すれば、家屋被害軽減に有効となりえる。しかしながら、それ以上の津波に対しては、漂流物となり被害を拡大しうる危険性もあり、被害軽減効果は期待できないといえる。

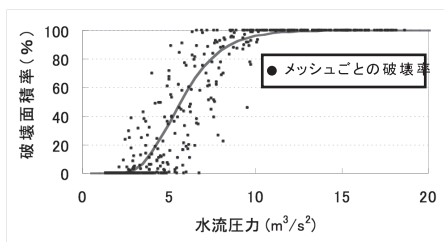


図 11 水流圧力 (計算) と破壊率の関係

6. まとめ

現地調査および衛星画像を用いて津波によるマングローブ林の被害を検討し、数値解析による津波の外力との比較をおこなった結果、水流圧力と破壊率の関係を示すことができた。この関係により、水流圧力が $5\text{m}^3/\text{s}^2$ で 35%、 $11\text{m}^3/\text{s}^2$ 以上で破壊率が 98% 以上となることが分かった。ただし、今回の結果は、樹径が $5 \sim 15\text{cm}$ 程度の細く密に群生する森の結果であり、今後、さらに異なる条件下での破壊率を算定し、比較していく必要がある。

参考文献

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, 海工論文集, 第 49 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.

首藤伸夫 (1992) : 津波強度と被害, 津波工学研究報告, 第 9 号, pp. 101-136

行谷佑一・都司嘉宣・松本浩幸・K. Wattana (2005) : 2004 年インド洋大津波のタイ国海岸 Phuket 島及び Khaolak 以外の場所での浸水高調査, 海工論文集, 第 52 巻, pp. 1351-1355.

長谷川渚・川緑将利・谷川寛樹・法眼利幸 (2003) : リモートセンシング技術を用いた人工維持・管理のための基盤データの構築に関する研究, 第 31 回環境システム研究論文発表会講演集, pp. 579-584

羽鳥徳太郎 (1984) : 津波による家屋の破壊率, 地震研究所彙報, 59, pp. 433-439.

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, 海工論文集, 第 52 巻, pp. 1346-1350.

柳澤英明・越村俊一・後藤和久・今村文彦・宮城豊彦・林一成 (2006) : マングローブ林内を遡上した津波の流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 -, 海工論文集, 第 53 巻, pp. 231-235.

渡邊康玄, 市川嘉輝, 井出康郎 (1992) : 洪水時における河道内樹木の倒伏限界, 水工論文集, 第 40 巻, pp. 169-174.

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.