

2004年インド洋大津波におけるマングローブ林の フラジリティー関数と津波減衰効果

Fragility function of mangrove forest and its effect on tsunami hazard reduction
based on damage data by the 2004 Indian Ocean tsunami

柳澤英明¹・越村俊一²・宮城豊彦³・今村文彦⁴

Hideaki YANAGISAWA, Shunichi KOSHIMURA, Toyohiko MIYAGI, and Fumihiko IMAMURA

The fragility function of mangrove forest was proposed based on field surveys and the numerical analysis focusing mangrove forests affected by the 2004 Indian Ocean tsunami. The curve of growth for mangroves (*Rhizophora spec.*) was also proposed in order to estimate the change of the tsunami reduction effect depending on the age of them. Using these proposed functions, the numerical modeling was carried out to evaluate a tsunami reduction effect. As the results, we found that the mangrove forest with 10-year-old is mostly destroyed and the reduction effect rapidly decreases when the tsunami inundation depth exceeds 4m.

1. はじめに

2004年インド洋大津波において、海岸林の津波減災効果が確認され、その効果に関心が高まっている(例えば Kathiresanら, 2005)。しかしながら、樹木は津波外力により倒木し、減災効果が低減しうする場合もあり、その限界も明らかにしておく必要がある(首藤, 1985)。現在、津波による倒木の有無を判断する基準には、樹木の引き倒し試験より評価された倒伏限界モーメントと樹径の回帰式が利用されている(今井ら, 2005; 浅野ら, 2007)。しかし、同樹種・樹径の樹木であっても個々の特性や地盤の状況などにより、データは大きくばらついてしまうため(渡邊ら, 1996)、決定論的に倒木の閾値を決めることは難しい。そこで本研究では、マングローブ林を対象として実施した2004年インド洋大津波の被害調査および、数値解析結果から、津波の外力に対するマングローブ林の破壊確率を評価し、個々の樹木が持つ不確実性を考慮したマングローブ林のフラジリティー関数を提案する。さらに、そのフラジリティー関数を利用し、マングローブ林による津波減衰効果を評価する手法を提示する。

2. 研究方法

(1) 調査概要

マングローブ林のフラジリティー関数を検討するにあたり、2004年インド洋大津波で被害を受けたタイ・パカラン岬および、インドネシア・バンダアチェで被害調査

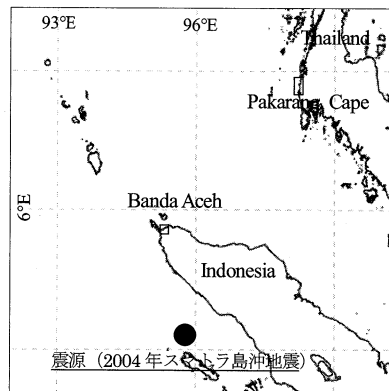


図-1 解析対象地域(インドネシア・バンダアチェ, およびタイ・パカラン岬)



図-2 インドネシア・バンダアチェにおいて、津波による被害を受けたマングローブ(*Rhizophora*属)。同様の樹種・樹径にもかかわらず、右は生存、左は折損している

1 正 会 員 博(工)東北大学大学院 工学研究科
2 正 会 員 博(工)東北大学大学院准教授 大学院工学研究科
3 理 博 東北学院大学教授教育学部地域構想科学科
4 正 会 員 工 博 東北大学大学院教授 大学院工学研究科

を実施した(図-1)。対象樹種は、蛸足状の根形状を持つ *Rhizophora* 属とし(図-2)、パカラン岬で206本、バンダアチェで697本の樹木の被害状況を測定した。ただし、柔軟性の高い若木と成木とでは特性が異なる可能性があるため、本研究では、胸高直径(以下、DBH)が5cm以下の樹木は解析の対象外とした。

(2) 数値解析手法

2004年インド洋大津波の再現計算を実施し、マングローブに作用する津波の外力を算定した。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底面粗度を考慮した非線形長波方程式を利用した。底面粗度係数は小谷ら(2002)に倣い、土地利用に応じた粗度係数(裸地=0.03, 海・川=0.025)を与え、マングローブ林には、合成等価粗度モデルを用いた(油屋ら, 2002)。ただし、*Rhizophora* 属の支柱根粗度に関しては、Latief (2000)を参考に、粗度係数を0.04と設定した。なお、数値解析の再現性については、柳澤ら(2006, 2007)に詳しく記載されている。

(3) マングローブに生じた津波外力の評価方法

津波による樹木の倒木パターンは、折損・傾倒・根返り・抜根・浸食流去に分類される。しかし、*Rhizophora* 属は、蛸足状の根によって地盤に固定されているため、根返りや抜根など、領域の土壌の状態に左右される倒木パターンで倒木することは少なく、折損で倒木することが多い(柳澤ら, 2006)。そこで本研究では、*Rhizophora* 属の破壊に対し、折損のみを対象として解析を行った。また地盤が大きく浸食される地域は対象外とした。

一般的に、木材が曲げによって折損するとき、その強度指標として以下の曲げ応力が利用される。

$$\sigma = M / W \quad (1)$$

ここで、 σ は曲げ応力、 M は曲げモーメント力、 W は円柱の断面係数($=\pi/32d^3$)、 d はDBHである。本研究では、津波が伝播する間に最大となる曲げモーメント力 σ をマングローブの破壊に対する外力の代表値として利用した。曲げモーメント力 M は、幹部に対する抗力のみを流体力として考慮した以下の式で評価した。

$$M = \frac{1}{4} C_D \rho d (D - H_r)^2 u^2 \quad (2)$$

ここで、 ρ は水の密度、 D は津波浸水深、 H_r は支柱根の高さ、 u は津波の平均流速である。折損箇所が主に支柱根上であることから、曲げモーメントの回転点は支柱根上としている。

3. 結果と考察

(1) 現地調査結果の整理

図-3に、パカラン岬および、バンダアチェで取得した

データに関して、DBHごとに生存および、破壊の頻度を整理した結果を示す。これによれば、マングローブ林の生存率は、DBHに依存して大きくなっていき、DBH 15-20cmで生存率は約40%、DBH20-25cm以上となると生存率は約70%に達する。大きな津波(>5m)が来襲したこれらの地域でも、DBH20-25cm以上に成長していれば、高い生存率を維持できることが明らかとなった。

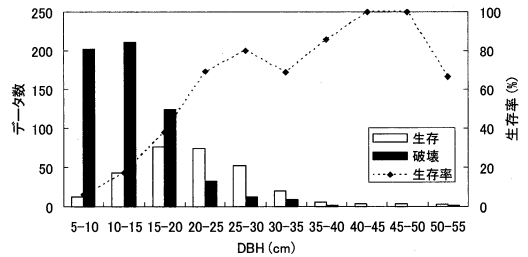


図-3 生存と破壊樹木の頻度分布図

(2) マングローブに作用した津波の最大曲げ応力

図-4、図-5に、数値解析により得られた最大曲げ応力に対し、生存と破壊樹木の割合を整理した結果を示す。

図-4はパカラン岬における結果で、最大曲げ応力に応じてデータを20個ずつに分け、整理した。同様に図-5は、バンダアチェにおける結果で、データ数にあわせ、50個ずつのデータに分けて整理した。これらの図を比較すると、生存樹木における最大曲げ応力の値は、バンダアチェの方がやや高い傾向を示している。このことは、パカラン岬におけるマングローブ林の方が、津波外力に対して脆弱であったということを示している。

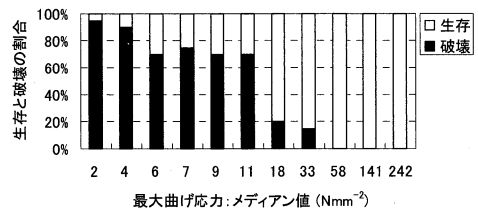


図-4 最大曲げ応力に対する生存および、破壊樹木の割合 (タイ・パカラン岬)

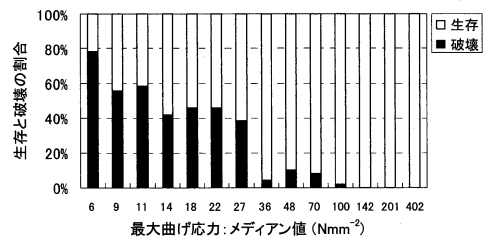


図-5 最大曲げ応力に対する生存および、破壊樹木の割合 (インドネシア・バンダアチェ)

4. マングローブ林のフラジリティ関数

(1) 最大曲げ応力に対する破壊率の評価方法

図-4, 図-5に対して, 任意の最大曲げ応力に対応したマングローブ林の破壊率を算定するため, 回帰分析より近似曲線を作成した. このとき, 津波による曲げ応力の大きさに対してマングローブ林の破壊率 $P_d(\%)$ が, 以下の対数正規分布の累積分布関数に従うと仮定する.

$$P_d(\sigma_f) = \Phi[(\ln \sigma_f - \lambda) / \zeta] \times 100 \quad (3)$$

ここで, Φ は標準正規分布の累積分布関数, λ と ζ は $\ln \sigma_f$ の平均値と標準偏差である. 式(3)における λ と ζ は確率紙を用いた最小二乗法によって決定した. 上記の仮定は, 地震や洪水に対する建物被害の関連性を表すときに, 広く用いられている手法である(例えば, Yamaguchi ら, 2001). 以上によって作成された関数は, 個々の樹木特性や漂流物といった不確実性を含んだ時の破壊率を予測するための関数(フラジリティ関数)となっている.

(2) 結果

回帰分析の結果, λ , ζ および決定係数 R^2 は, パカラン岬で, $(\lambda, \zeta, R^2) = (2.50, 0.94, 0.90)$, バンダアチェで $(\lambda, \zeta, R^2) = (2.57, 1.04, 0.87)$ となった(図-6, 図-7). これらより, パカラン岬における破壊率は, バンダアチェに対して, 最大で約11%高くなることが分かった. また図-8には, 両地域のデータを統合して, 回帰分析を行った結果を示す. λ , ζ および決定係数 R^2 は, $(\lambda, \zeta, R^2) = (2.57, 1.02, 0.90)$ で, バンダアチェにおける関数に比較的, 近い傾向となっている. 以上の関数を利用することによって, 任意の最大曲げ応力に対するマングローブ林の破壊率を評価することが可能となった.

5. マングローブの成長特性

津波が来襲したとき, マングローブ林による津波減衰効果は, 樹径と植生密度に大きく依存する. これらの要素は, マングローブの成長過程で変化するため, 津波減衰効果も経時的に変化していく. それゆえ植林を行った場合に, 将来的な津波減衰効果を予測するためには, 植生密度や樹径の成長特性を明らかにしておく必要がある.

Inoueら(1999)は, インドネシアにおける33地点において, マングローブ(*R. apiculata*)の樹齢と樹径, 植生密度を調査している. ここではInoueら(1999)のデータに, 本調査結果を加え, それらの関連性を検討する.

(1) 植生密度とDBH, 樹齢の関連性

図-9に, 植生密度とDBHの関連性を検討したものを示す. これによれば, 植生密度が低い場合には, DBHは大きくばらつき, 密度が高くなるにつれてばらつきは

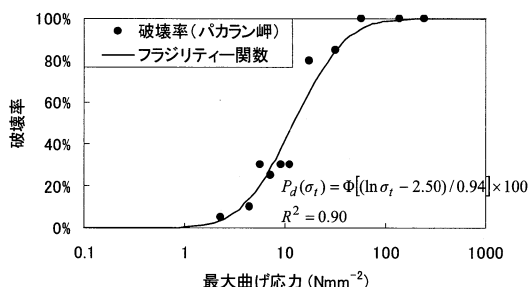


図-6 最大曲げ応力に対するマングローブ林の破壊率
(タイ・パカラン岬)

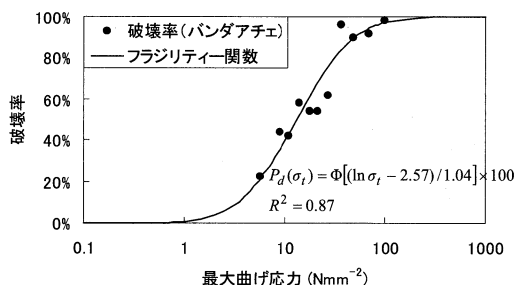


図-7 最大曲げ応力に対するマングローブ林の破壊率
(インドネシア・バンダアチェ)

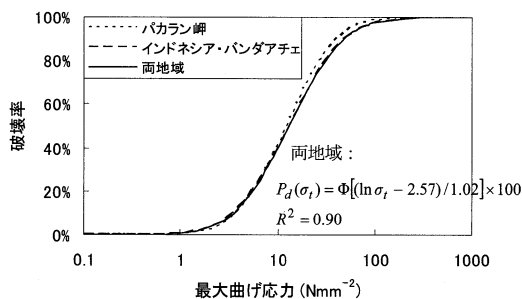


図-8 パカラン岬とバンダアチェのデータを統合したフラジリティ関数(それぞれの地域の関数も併記)

減少していく傾向が見られた. また, 図-10は, 樹齢と植生密度の関係を示したものである. 樹齢に応じて, 植生密度が減少する傾向が見られた. しかし, ばらつきが非常に大きい結果となっている. 植生密度の変化に対しては, 立地条件や間伐などが大きく影響するものと考えられる.

(2) DBHと樹齢の関連性

一般的に, DBHは植生密度と樹齢に関連するとされているが, データにはばらつきが多く, 今回の限られたデータからその関連性を明確にすることは難しい. ただ, 図-9に着目すると, 樹径のばらつきの程度は, 植生密度 $0.3-0.5\text{m}^2$ あたりを境に変化していることが分かる. 本研究では, $0.3-0.5\text{m}^2$ を境に樹径に対する植生密度の影響が変化するものと仮定し, それを閾値としてデータを

二分して整理した。図-11は、植生密度 0.45m^2 を閾値に、高密度($\geq 0.45\text{m}^2$)と低密度($< 0.45\text{m}^2$)に分類し、樹齢とDBHの関連性を示したものである。高密度と低密度の場合では、成長傾向が明確に異なる結果となった。図-11によれば、高密度では樹齢30年生の森でもDBHは約5cm程度にしか成長していないのに対して、低密度では約20cmまで成長していることが分かる。さらにここでは、成長曲線などに一般的に利用される以下のゴンペルツ曲線を用いてガイドカーブを作成した。ただし傾向を明確にするため、明らかにトレンドとは異なるプロットは省いている。

$$d = a \times b^{\exp(-y \times c)} \quad (4)$$

ここで、 d はDBH(m)、 y は樹齢(year)、 a 、 b 、 c は定数で、高密度の場合はそれぞれ、0.053、0.047、0.33、低密度の場合は、0.189、0.073、0.14となった。

6. フラジリティ関数を考慮したマングローブ林による津波減衰効果

本研究で提案したフラジリティ関数を用いて、マングローブ林の破壊率を考慮した津波減衰効果を検討する。

(1) 計算モデルと解析条件

津波の伝播計算には、合成等価粗度を含んだ非線形長波方程式を用いた。また、津波の伝播に応じて算定した最大曲げ応力から、フラジリティ関数を用いて破壊率を評価し、時間発展的にマングローブ林の本数を変化させた。ただし、支柱根に関しては、幹が破壊された後にも残る場合が多いため(田中ら, 2005; 柳澤ら, 2006)、粗度係数(=0.04)は変化させないこととした。フラジリティ関数には、パカラン岬・バンダアチェの両地域で統合したものを用いた。マングローブ林は、図-9、および図-11(低密度条件)を参考に、樹齢10年生(DBH:10cm, 密度: 0.4m^2)、20年生(DBH:15cm, 密度: 0.15m^2)、30年生(DBH:20cm, 密度: 0.1m^2)を設定した。海底地形は、タイ・パカラン岬を参考に、海底勾配を1/400とし、陸上はフラットとした。また、マングローブ林による津波浸水深の減衰率 R を評価する上で、以下の定義を用いた。

$$R = \frac{(D_0 - D_1)}{D_0} \quad (5)$$

ここで、 D_0 はマングローブ林なしでの津波浸水深、 D_1 はマングローブ林ありでの津波浸水深である。

(2) 結果と考察

計算結果の一例として、マングローブ林(幅400m)前面部の位置で津波浸水深3m、周期30minとなる津波を入射させたときの水位変化を図-12に示す。マングローブ林前面では、水塊が貯留するため水位が上昇するが、背後では、マングローブ林の抵抗を受け津波の水位が減少

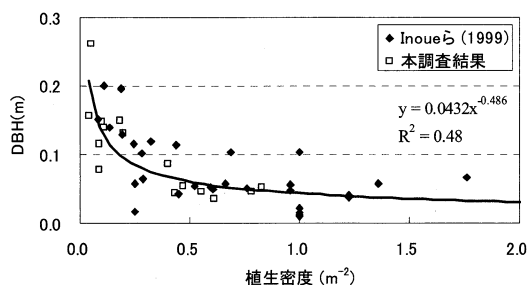


図-9 マングローブ(*R. apiculata*)におけるDBHと植生密度の関係

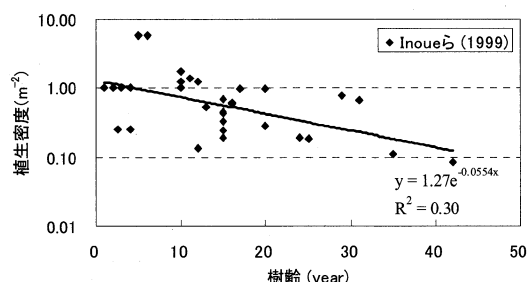


図-10 マングローブ(*R. apiculata*)における樹齢と植生密度の関係

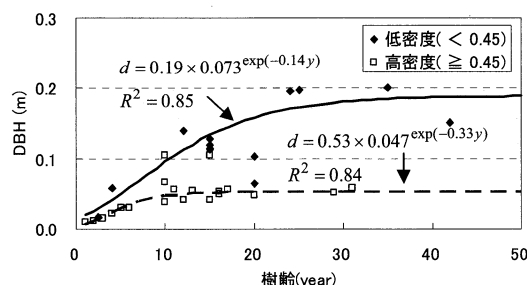


図-11 マングローブ(*R. apiculata*)のDBHに関する成長曲線している。樹齢ごとに比較すると、密度の最も高い10年生の森の減衰効果が最も高い結果となった。一方、図-13には、入射浸水深(汀線における津波浸水深 D_0)を変化させたときのマングローブ林背後における津波浸水深の減衰率を示す。これによると、入射浸水深が4m付近までは、10年生の森による津波減衰率が最も高いが、それ以上となると、マングローブ林の破壊が進み、20・30年生の森の効果が相対的に大きくなる。これより、大きな津波に対しては、樹齢の若い森では効果が小さく、マングローブ林を長期にわたって保全していくことの重要性が示唆された。

7. まとめ

本研究で得られた成果を以下に列挙する。

- (1) 2004年インド洋大津波に対し、タイ・パカラン岬お

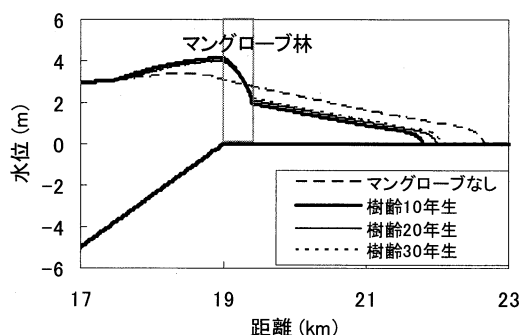


図-12 マングローブ林内における津波高の変化
(入射波浸水深3m: マングローブなしのとき)

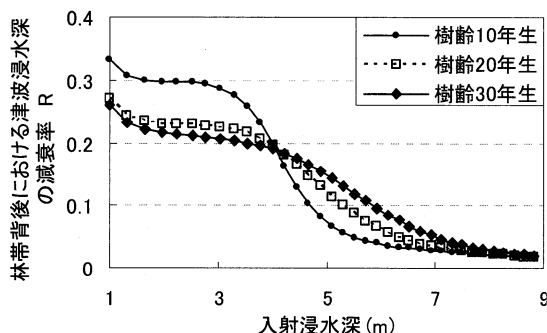


図-13 入射浸水深Dに対するマングローブ林の減衰率R

および、インドネシア・バンダアチェにおけるマングローブ林(*Rhizophora*属)の被害調査および、数値解析を実施し、津波による最大曲げ応力に応じたフラジリティー関数を構築した。

(2) マングローブ(*R. apiculata*)に関する樹径、樹齢、植生密度のデータを整理し、それらの関連性に対するガイドカーブを作成した。

(3) (1)で提案したフラジリティー関数と(2)で作成したガイドカーブを用いて、津波の減衰効果を定量的に評価する手法を提示した。このモデルを用いることで、マングローブ植林を行った際に期待される津波減衰効果を定量的に見積もることが可能となった。

謝辞：本研究を実施するにあたり、農林水産省大臣官房

国際部国際経済課国際専門官、井上泰子氏よりマングローブに関する貴重な資料をご提供いただいた。記して謝意を表す。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤(A)(代表：今村文彦、課題番号：18201033)および、科学研究費補助金若手研究(A)(代表：越村俊一、課題番号：19681019)の補助を受けて実施された。

参考文献

- 浅野敏之・三谷敏博・三嶋俊樹(2007)：海岸林の幹直径の分布特性と津波による樹木倒伏率，海岸工学論文集，第54巻，pp.1376-1380。
- 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。
- 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。
- 柳澤英明・越村俊一・今村文彦・宮城豊彦・林一成(2006)：マングローブ林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—，海岸工学論文集，第53巻，pp.231-235。
- 柳澤英明・越村俊一・宮城豊彦・大家隆行・今村文彦(2007)：2004年インド洋大津波におけるインドネシア・バンダアチェでのマングローブ林の潜在的減災効果，海岸工学論文集，第54巻，pp.246-250。
- 渡邊康玄・市川嘉輝・井出康郎(1996)：洪水時における河道内樹木の倒伏限界，水工学論文集，第40巻，pp.169-174。
- Inoue, Y., H. Oki, H. M. Affendi, K. R. Sudarma and I. N. Budiana (1999)：Yield Prediction and Estimation of Site-Class for a Mangrove Species: *Rhizophora apiculata*, Ministry of Forest and Estate Crop in Republic of Indonesia, Japan International Cooperation Agency, 57 p.
- Kathiresan, K. and N. Rajendran(2005)：Coastal mangrove forests mitigated tsunami, Estuarine, Coastal and shelf science, Vol.65, pp.601-606。
- Latief, H., 2000. Study on tsunamis and their mitigation by using a green belt in Indonesia, PH.D thesis, Tohoku University, 110p.
- Yamaguchi, N. and F. Yamazaki (2001)：Estimation of strong motion distribution in the 1995 Kobe earthquake based on building damage data, Earthquake engineering and structural dynamics, Vol.30, pp.787-801。