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

ROLE OF COASTAL VEGETATION AT 2006 JAVA TSUNAMI DISASTER AND ITS BREAKING OR BENDING THRESHOLD

田中規夫¹・佐々木寧² Norio TANAKA and Yasushi SASAKI

¹正会員 工博 埼玉大学大学院助教授 理工学研究科 (〒338-8570埼玉県さいたま市桜区下大久保255) ²正会員 理博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科 (〒338-8570埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

This study explored the effects of coastal vegetation on tsunami protection based on field observations carried out after the 2006 Java tsunami disaster on 17 July 2006. Study locations covered about 200 km (27 locations) on the southern coast of Java Island, Indonesia. The impact of vegetation structure on drag forces was analyzed using the observed characteristics of the tree species. Based on the field survey and data analysis, *Pandanus odoratissimus* and *Pandanus boninensis*, representative trees that grow in beach sand and ragstone, respectively, were especially found to be effective in providing protection from tsunami damage due to its complex aerial root structure. The breaking moment of trees were analyzed noting the relationship between tree height and the tsunami water depth. The threshold tsunami water depth for bending or breaking of *Pandanus odoratissimus* is about 80 % of the tree height. It is similar to the previous research value in Sri Lanka in Indian Ocean tsunami. The tree can be expected large protection to tsunami current until the threshold water depth.

Key Words: 2006 Java tsunami disaster, coastal vegetation, Pandanus odoratissimus, Pandanus boninensis, threshold tree height of breaking

1. はじめに

マングローブ樹や海岸砂丘に生える植生が,津波防御 に効果を発揮した事例がタイ¹⁾,スリランカ^{2),3),4},イン ド⁵⁾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^{6,7}.しかし,南洋の海岸林は,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^{1),2),3}.こうした状況下, 2006年7月17日にジャワ津波が発生し,一般災害の状況 が報告されつつあるが,海岸林が今回のジャワ津波に果 たした役割と限界についての情報は乏しい.

グリーンベルトの配置構想⁸,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2006年ジャワ津波災害が発生したばか りのジャワ島において、現地植生が果たした役割とその 限界を調査し、インド洋大津波時に確認された傾向の検 証と相違点を明らかにすることとする.

2. 研究方法

(1) 樹林被害ならびに樹林特性調査

「2006年ジャワ津波災害に関するインドネシア・日本 合同調査⁹」を参考に、ジャワ島南海岸線沿いのCilacap, Ciamis, Tasikmalaya, Garut県の約200km区間を調査範 囲とした. さらに、現地の海岸林の被災状況を踏まえ調 査個所を適宜追加し、図-1に示す27箇所について、2006 年9月10日から9月14日にかけてその被害実態を調査した. 調査項目は、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、樹林構成種、樹木の胸高 直径、樹林密度)、現地住民へのヒアリングである.本 研究では、ジャワ島南海岸でかつ津波被害を受けた地域 の代表的植生として、A)ココヤシCocos nucifera(海岸に 多い栽培植生)、B)アダンPandanus odoratissimus, C) タコノキPandanus boninensis, D) オオハマボウHibiscus tiliaceus, E) クサトベラScaevola sercea, F)ゴバンノアシ Barringtonia asiaticaの6種類の樹木と樹形に注目した.

(2) 抵抗特性の評価

樹林帯沿岸方向の単位幅あたりの合成抗力D(N)は, 図-2に示すように,水深方向に微小面積dA=b(z)dz (b(z):地盤からの鉛直高さz(m)における幹と枝の幅の 総和,dz:鉛直方向分割幅)を考慮して積分し,沿岸方 向1m×幅Lm内の樹林本数nを掛け合わせることにより,

$$D = n \times \int_0^h \frac{1}{2} C_d(z) \rho u(z) |u(z)| b(z) dz$$

= $n \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} b_{ref} U |U| \int_0^h \frac{b(z)}{b_{ref}} \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} dz$ (1)

$$n = \frac{L \times 1}{l_1 \times l_2} = \frac{L}{l^2} \tag{2}$$

とした.ここに、 $C_d(z)$, u(z): それぞれ、高さzにお ける抗力係数と流速(m/s)、 C_{dref} : 胸高直径の円柱の抗力 係数(本研究では1とした)、 b_{ref} : 高さ1.2mにおける樹木 幅(m)、h: 津波浸水深(m)、 ρ : 海水の密度(=1030kg/m³)、 L: 岸沖方向の植生域長(m)、 l_1, l_2 : それぞれ沿岸方向、 岸沖方向の樹木間距離(m)、l: 平均樹間距離(m)である. なお、本研究ではu(z)の鉛直方向変化は考慮せず、断面 平均流速U(m/s)を用いて整理した.

さらに、気根・葉茎の付加投影面積・付加抗力影響を 含む合成抗力係数*C*_{dall}を次式で定義した.

ここに、 $\alpha(z)$:樹形(幹・枝・気根形態)の相違(幹・ 枝・気根幅の高さz における総和を胸高における幅 b_{ref} で 基準化した比)を表す付加係数、 $\beta(z)$:葉層による付加 抗力・気根の密集度による抗力変化を表す付加係数であ る.現地海岸林のアダン、タコノキはタコの足状の気根 (直径5-10cm程度)を30本程度は出していることから、

気根層のβ(z)は、武村・田中¹⁰より、1.5(地際)から1 (気根付け根部)まで線形に変化させた. 葉層について

は、福岡ら¹¹⁾を参考に1.25(幹層は1)とした(図-2).

今回の調査では,式(1)から(6)で定義されるb_{ref}, n, L, l₁, l₂, a(z), h,特に枝分かれ本数や枝の直径等を計測し,実際に積分を行うときは,図-2のdA_iを0.5m刻みの水平方 向投影面積とし合成抗力係数C_{dall}に反映させた.



 図-2 合成抗力係数C_{dall}の定義図(上図のdA₁₂は胸高における 面積=b_{ref} dzを表す.下図左の各分割領域における面積 dA_{in}を足して,その層における面積とする.)

3. 調査結果

(1) 一般的被害と地形特性, 土地利用の関連性

ジャワ島南部は沿岸漂砂量が多いと想定され(活発な 火山活動があること,森林は木材資源などとしての利用 が進み土砂生産が多いと想定されること),海岸地域に は古いラグーン(現在は水田等),古い砂丘(農民の居 住地等),新しいラグーン(水田または漁業等),新し い砂丘という二重の砂丘とラグーンよりなる地形構造を しているところが多い.そのため,建物被害,人的被害 を受けたのは新しい砂丘の上に開発された観光地か漁労 作業中の漁民がほとんどであった.インド洋大津波で被 害を受けたスリランカの海岸線構造と類似しているが, 新砂丘の利用がスリランカほど進んでいなかったため, 津波浸水深が1-7mと大きかったのにもかかわらず,被害 はスリランカほど出ていない.特に,農業地域の Tasikmalaya県では観光利用された個所(No.12)を除き 自然地であった.また,Cilacap県のWetan村(No.26) では,新砂丘上の観光施設が約7mの津波により多大な被 害を受けたものの,農民居住地はラグーン跡の畑をはさ み海岸から約1km離れており,被害を受けていなかった.

ジャワ津波災害調査団中間報告9にも報告されている ように、Cilacap県の西部地域はNusakambangan半島に守 られており被害は少なかった. Ciamis県のPangandaran 市はトンボロ(島に続く砂州)上に発達した市であり、 津波は西海岸に押し寄せた後、1分(ヒアリングより) ほどの時間差を持って島を回折した津波が東海岸に押し 寄せた(インド洋大津波時におけるスリランカのGalle 市の状況に似ている). 西海岸, 東海岸の津波浸水深は それぞれ約5m, 3mであり, 海岸構造物や沿岸の家屋・住 民が多大の被害を受けた. また, Wetan村やBatuhue (No. 19) で砂丘頂部を越えた津波が減速することなく 内陸まで建物や避難者を押し流した状況は、スリランカ のHikkaduwa等の状況と類似している. 2つの津波の事例 からも特に危険な地域は事前に想定可能であり、最近運 用を開始したインド洋津波警報システム (UNESCO/IOC) はこうした新砂丘利用地域に如何に迅速に情報を伝達す るかが重要である.また、津波を減勢させるには、新砂 **丘部の土地利用が重要であり、可能な限り砂丘頂部より** も前に密度高い樹林を形成する必要性のあることが示唆 される.

(2) 海岸林の被災状況

a) 海岸林の繁茂状況

Pangandaran市などの観光地にはココヤシ以外にオ オハマボウ、ゴバンノアシ等の樹木が植えられていたが、 街路樹もしくは海岸線付近の日よけとして植えられてい たため、樹林帯幅はせいぜい数列であり、樹木の間隔は 6-10mと広く抵抗としてはあまり機能していなかった. 土地利用の進んでいない新砂丘には若く樹高の低いアダ ン、クサトベラが多く繁茂していた.新砂丘の裏側のラ グーンや河口付近の河川沿いに多かったのはニッパヤシ であった.気根を発達させ流水に対する抵抗特性が高い Rhizophora属^{1), 2), 3)}も存在したが、当該地域では特に木材 資源として活用が進んでいるため、少しでも大きくなっ たものは伐採される傾向があり、タイやスリランカのよ うに樹高が発達したものは極めて少ない状況であった. (a)







図-3 海岸林の被災形態、(a)海岸洗掘(No.15地点,2mの浜崖と3m幅以上の洗掘幅),(b)アダンのなぎ倒しと破断(Batuhue: No.19地点),(c)複雑なアダンなぎ倒し(Pangandaran西海岸: No.16地点),(d)ココヤシのなぎ倒し(Wetan: No.26地点),(e)河川遡上津波によるニッパヤシの葉部破断(No.23地点)

b) 海岸林の 被災形態

図-3に海岸林の被災形態の例を示す.被災形態は大きく、①主幹の破断破壊、②主幹のなぎ倒し(被災時において、降伏モーメントを越えているが破断モーメントには達していない)、③海岸線の全体的な洗掘による倒伏、④幹周辺の局所洗掘と抗力モーメントの相乗作用による根の引っ張り破壊に伴うなぎ倒し、に分けられる.

①はスリランカではアダン、オオバヒルギ、タイでは フタバナヒルギ、オオバヒルギに多く見られた被災形態 である. ②は今回のジャワ津波において、アダン、クサ トベラで多くみられた被災形態である. ③はNo. 15地点 で観測された. ④は津波浸水深さが7m程度と大きかった Wetanまたは3mと低いもののPangandaran東海岸(No. 7) の新砂丘上の前列の若いココヤシで多く見られた.

主要6樹種のうち、オオハマボウ、ゴバンノアシは樹 高が低く枝を広げるグループであり、これらの樹種は津 波を減勢させるというよりはエスケープ効果、トラップ 効果^{1), 2), 3)}が期待できる樹種である.また、クサトベラは アダンの周辺に繁茂しておりアダンよりも容易になぎ倒 される.従って、本研究では、流水抵抗特性の大きいア ダン、タコノキと代表的海岸林のココヤシに焦点を絞っ てその効果と限界をまとめることとする.

4. 考察

(1) アダンとココヤシの破壊限界の相違

図-4(a),(b)は、それぞれアダン、ココヤシに対して、 なぎ倒しの有無を樹高と津波浸水深の関係で整理したも のである. (a), (b)のグラフの点線は樹高の8割,7割の 値を示すもので、津波浸水深さが概ねこの線をこえると なぎ倒しが起こっていることを示している. アダンのほ うがココヤシよりも、なぎ倒し限界値が高いのは気根の 効果と考えられる. 図-5は、スリランカで観測されたア ダンの破断限界を示す.これも津波浸水深が樹高の8割 を超えた値が限界値を示しており、インド洋大津波時に おける既往知見^{1), 2), 3)}と概ね符合する.アダンのように剛 性が高い樹木は、①傾いて元に戻る(加わった外力モー メントが主幹の降伏モーメントより小), ②傾いたまま 元に戻らない(加わった外力モーメントが主幹の降伏 モーメントより大だが、破断モーメントより小),③破 断破壊(加わった外力モーメントが主幹の破断モーメン トより大)の3つのパターンをとると考えられる. 図-4(a)のなぎ倒し限界と図-5の破断限界が同じ限界値を示 しているのは、なぎ倒しは痕跡の津波浸水深になる前の 段階で発生していたと想定され、破断限界、降伏限界に いたらなかった樹木(主幹が太く樹高が高い)が残った ためと考えられる. 樹高が高いスリランカのココヤシは 一部の地域 (Kalutara等) を除き, なぎ倒しはあまり発



図-4 海岸林のなぎ倒し限界:樹高と津波浸水深の関係(観測 地点No.は表-1参照,B:なぎ倒しあり,NB:なぎ倒しな し),(a)アダン,(b)ココヤシ



図−5 アダンの破断限界(2004年インド洋大津波時におけるス リランカ事例^{2,3}と図−4の樹高8割水深との比較(B:破 断破壊あり,NB:破断破壊なし)

生していなかった.しかし,品種改良などで樹高が低い ココヤシが植えられているインドネシア・ジャワ島では, なぎ倒しが比較的多く見られた.

図-6に破断限界から推定したアダンの気根上部の抗力 係数 C_d (気根部より上の水深平均値で式(4)の C_{d-all} とは 異なる)の樹高による変化を示す.8mクラスの樹高に 育ったアダンの気根は主幹よりもはるかに多く存在し, 主幹の8-9倍^{1), 2), 3)}の抵抗を示すことを考慮すると,アダ ンの気根より上の部分の抵抗は必ずしも大きくない.破 断が生じる気根付け根部より上の部分は剛性が高く変形 を受けるので, C_d は津波浸水深とともに減少する.

(2) インド洋大津波で被災を受けたスリランカのアダン との比較

破断限界から推定したアダンの気根上部の抗力係数C_dを用いて、胸高直径一破断限界関係式¹²⁾を検証した結果を図-7に示す(抗力モーメントは気根付け根部で評価した).図-4(a)に示したように、ジャワ津波におけるアダンの被災形態はほとんどがなぎ倒しであったが、Batuhueでは破断破壊も存在した.点線の式は実際の破壊実験で求められた式、Batuhue以外のプロットはインド洋大津波におけるスリランカの事例¹²⁾である.観測をもとに計算したデータの幅が広いことから、今後データをさらに補充し精度をあげる必要がある.しかし、約2000N(非破壊)と約4000N(破壊)付近のデータの間を実験式が通っており、今回のジャワ津波のプロットは概ねこの条件式を満足している.図-4,6に示す破壊限界や気根上部のC_d値の精度の高さを示していると考えられる.

(3) 生長段階, 樹種による相違

図-8に合成抗力係数C_{d-all}と津波浸水深の関係を示す. 図-8(a)は、アダンの樹高さによるC_{d-all}の変化を示す.密 集した葉層があるために樹高が2mのときに4mよりも大き くなる部分があるが、概ね樹高の増加とともに大きくな る傾向を示す. 図中の8mのアダンにはTanakaら³⁾のもの をあわせて示す. Tanakaら³⁾では, 剛性によるC_{dall}値の 減少を見込んでいなかったため、過大評価されている. 今回のジャワ津波のデータも含めて計算したCdall分布と 図-4(a)の破断限界が今後の海岸林整備計画や津波被害の 推定に重要である. 図-8(b)にはアダンのCdallを, ココヤ シ、タコノキと比較して示す。タコノキは気根がアダン よりも密集し、かつ樹高が高い. 抗力係数だけを見ると ココヤシは1/3から1/8程度であるが、幹の太さが3倍、 樹間が6倍程度ある. そのため, 同じ幅の海岸林があっ たとしても実際には1/6から1/16程度の抵抗になる. タ コノキは樹間が同程度で幹の太さが倍なので、アダンの 約2倍の抵抗となる.実際に、No.22地点では、アダンが なぎされた背後で一部気根が発達していなかったタコノ キを除き倒れていなかった. そして背後の民家では津波 が徐々に1m押し寄せたのみ(図-9(b)はタコノキにより被







図-8 C_{d-all}と津波浸水深の関係, (a) アダン (Pandanus odoratissimus) の樹高による変化, (b) アダン, ココヤシ (Cocos nucifera), タコノキ (Pandanus boninensis) の比較





(b)

図-9 密集した気根で津波の減勢に貢献したタコノキ, (a)漂 流物のトラップ効果, (b)タコノキにより守られた住民

害を受けなかった住民)で、逆にタコノキを迂回した流 れが3mの津波氾濫流となって家の両側の納屋などを破壊 した.また、タコノキの気根前面部には、折れたアダン などが蓄積されており(図-9(a))、トラップ効果も大き いと考えられる.アダンよりも効果の大きい樹種と考え られるが、繁茂域は石灰岩質の土壌であり制限される.

7. おわりに

海岸防潮林の効果と限界を2006年ジャワ津波において 調査した.調査結果をまとめると以下のようになる. 1)陸に乗り上げたあとの津波氾濫流に対し強い抵抗とな

るアダンの破壊限界は樹木高さの8割を津波浸水深が超 えたあたりで発生する.ココヤシのなぎ倒し限界も樹木 高さの8割程度であった.

ジャワ津波のアダンのなぎ倒し限界はインド洋大津波時のタイ・スリランカの破断限界と同程度の値であった.
海岸間際に繁茂するアダン(土壌条件によってはタコノキも含む)を育成し樹高を高く維持管理することが津波防御という視点で重要である.

4)インドネシア特有の条件として木材の伐採がある.社 会林業を改良もしくは両立する形で,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,地域の計画上, 必要である. 今後,樹林特性と地形特性を考慮した数値モデルで, 更なる検討が必要と考えられる.

謝辞:本研究の一部に「(独)防災科学技術研究所・防 災研究フォーラム海外災害調査費(研究代表:佐々木 寧」を使用した.調査の際には、インドネシア・ガジャ マダ大学のSunarto教授、Summer氏に便宜を図っていた だいた.また、埼玉大学大学院の谷本勝利教授にご助言 いただいた.記して謝意を表します.

参考文献

- 1)田中規夫,佐々木 寧,湯谷賢太郎,Samang Homchuen: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.1346-1350,2005.
- 2) Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood, M.I.M., Jinadasa, K.B.S.N. and Takemura, T.: Effective coastal vegetation species and structures with landform, sand dune and lagoon, for tsunami protection at the Indian Ocean tsunami, *15th APD-IAHR Congress*, pp.1279-1285, 2006.
- Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood M.I.M. and Jinadasa, K.B.S.N. : Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: Experience of the recent Indian Ocean tsunami, *Landscape and Ecological Engineering*, 2006(in press)
- 4) Dahdouh-Guebas, F., Jayatissa, L.P., Di Nitto, D., Bosire, J.O., Lo Seen, D. and Koedam, N.: How effective were mangroves as a defence against the recent tsunami? *Current Biology*, Vol.15, pp.443-447, 2005.
- Kandasamy, K. and Narayanasamy, R.: Coastal mangrove forests mitigated tsunami, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.65, No.3, pp. 601-606, 2005.
- 6) 首藤伸夫: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.465-469,1985.
- 7)原田賢治,河田恵昭: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.276-280,2005.
- 8) 平石哲也,竹村慎治,永瀬恭一:南太平洋地域における植林 による津波対策法の適用性,海工論文集,第48巻,pp.1411-1415,2001.
- 9) インドネシア国海洋漁業省,港湾空港技術研究所,日本土木 学会:2006年ジャワ津波災害に関するインドネシア・日本合 同調査,4p.,2006.
- 武村武,田中規夫:株状粗度モデルに作用する流体力の評価に関する基礎実験,水工学論文集,Vol.49, pp.871-876, 2005.
- 福岡捷二,藤田光一,平林 桂,坂野 章:樹木群の流水 抵抗について,第31回水理講演会論文集,pp.335-340,1987.
- 田中規夫,武村 武,佐々木 寧, M.I.M. Mowjood: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,海工論文集,第53巻,pp.281-285,2006.

(2006.9.30受付)