

48. マングローブ林の津波軽減効果に関する考察

STUDY ON TSUNAMI REDUCTION EFFECTS DUE TO PRESENCE OF MANGROVE FORESTS

浅野敏之*・馬場繁幸**

Toshiyuki ASANO*, Shigeyuki BABA**

ABSTRACT : We are increasingly aware of various benefits that mangrove forests provide us for our environment. The great tsunami occurred off the west coast of Sumatra Is. in 2004 leads us to look at another aspect of mangrove forests; their damage reduction capacity. This study discusses hydrodynamic functions of mangrove forests to attenuate tsunami waves. In order to quantify the dumping effect, a mathematical model is proposed. The present analysis reveals that universal properties on mangrove-tree configurations and on physical strength against tsunami sweeping power should be clarified for further improvement of the model predictability.

Key Words ; Tsunami protection, Mangrove forests, Disaster mitigation

1. はじめに

2004年12月26日に発生したインド洋津波は死者約30万人の未曾有の大災害となった。今回被害にあったインドネシア・マレーシア・スリランカ等の諸国沿岸には、マングローブが広く繁茂している。この津波に対してマングローブ林が背後地の津波軽減に果たして役立ったのか、様々な報告・私信などが寄せられている。インドのTamil Nadu州で行った調査では、海岸がマングローブで防御されている集落では、防御されていない集落に比べ、人命や家屋に対する被害が少ないという結果が報告されている¹⁾。今後、こうした科学的議論に耐える記録・データが出てくるものと思われる。

わが国では、最近、海岸林・防潮林の津波に対する軽減効果が注目を集め、いくつかの研究成果が報告されている^{2), 3)}。こうした樹木群は、ふだんは沿岸の環境・景観に対して寄与するから、津波来襲時に有意な軽減効果を持つとすれば環境・防災の両面に役立つわけで、たいへん望ましいことである。

本研究は、マングローブの樹高・幹径・支持根形状・分布密度などから、流体抵抗を見積もり、津波の軽減効果を考察したものである。マングローブの分布特性や形状特性についての既往の現地測定データを使って、津波波高の低減効果を具体的に計算した結果を報告する。津波に対する抵抗特性は、水面下の検査面内に占有するマングローブの幹・支持根・枝葉の体積と流れに対する投影面積を既往の測定

* 鹿児島大学工学部海洋土木工学科

Dept. Ocean Civil Engrg., Kagoshima Univ.

** 琉球大学農学部生産環境学科

Faculty of Agric., Univ. of the Ryukyus

データに基づいてモデル化し、その抗力と慣性力を水深の関数として表示した。その流体抵抗力を組み込んだ運動方程式と連続式に基づいて、来襲津波の波高減衰を計算し、マングローブの形状特性・分布特性が波高減衰に及ぼす効果を検討した。

2. 流体抵抗としてのマングローブの形状特性

津波に対する流体抵抗を評価する上で必要な、マングローブの樹高、幹径、支持根の形状、枝葉の分布密度などは、マングローブの樹種、樹齢、環境条件など多くの因子によって決定される。Mazda et al.⁴⁾ は、西表島仲間川とオーストラリア Hinchinbrook 島 Coral Creek で、検査面 V 内にあるマングローブの支柱根・気根・膝根・幹部の全体の流れへの投影面積 A_M とその占有体積 V_M を測定している (図-1)。後述するように、 A_M/V はマングローブの抗力抵抗に、 V_M/V はマングローブ林に作用する慣性力の反力としての抵抗に直接関係する。

図-2、図-3 は、Mazda et al.⁴⁾ の測定結果を片対数紙上に整理したものである。 A_M/V 、 V_M/V は底泥面からの高さ z の関数であり、その鉛直分布の特性はマングローブの樹種によって大きく異なる。しかしながら、マングローブ林の津波減災機能を定量的に評価するためには、流体抵抗として機能する形状特性の普遍的表示がどうしても必要である。ヤエヤマヒルギ(Rhizophora)は代表的なマングローブ樹種であり、蛸足状の支持根形状から大きな流体抵抗を有する。そこで、図-2、図-3 の仲間川で測定された Rhizophora に対する観測結果から次式のような関数式を抽出した。

$$A_M/V = 3.387 \exp(-2.346z) \quad (1)$$

$$V_M/V = 0.162 \exp(-2.160z) \quad (2)$$

ただし、 z は底泥面からの高さで単位は m である。Mazda et al. の測定したマングローブの支持

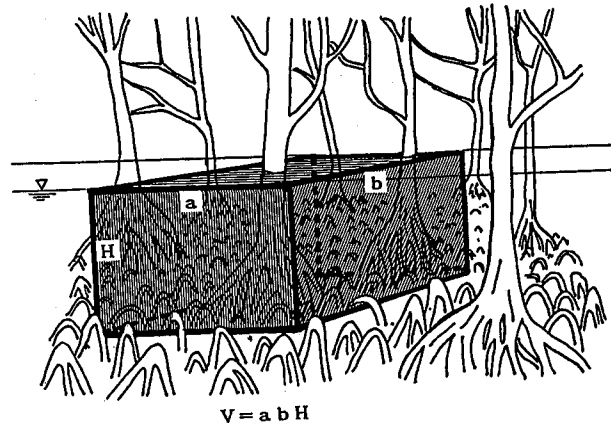
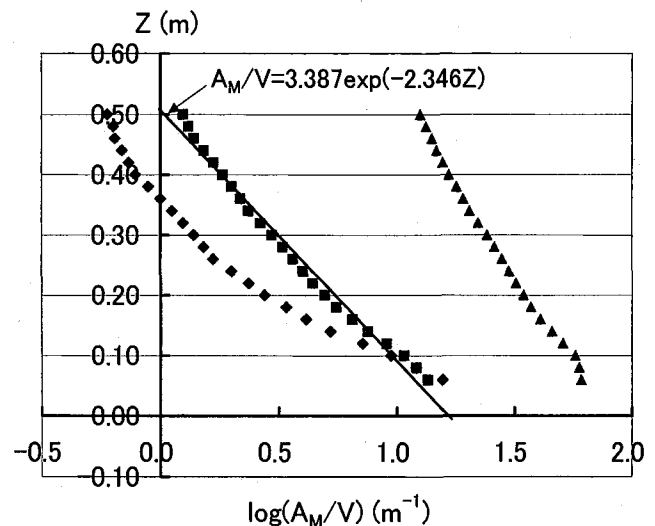
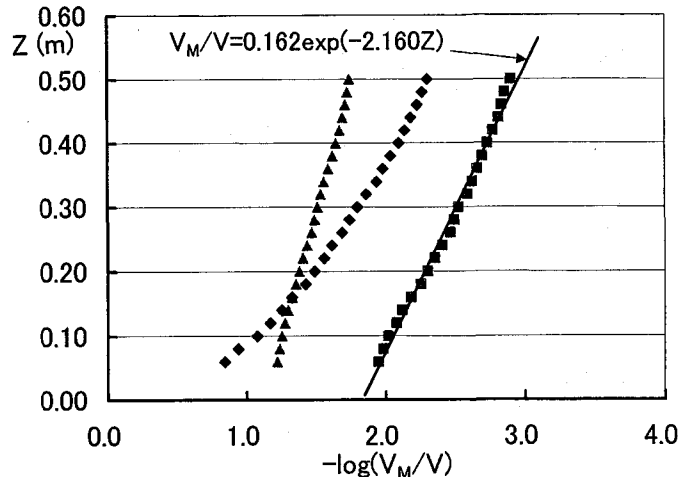


図-1 検査面中のマングローブ樹の投影面積・占有体積の測定のスケッチ (Mazda et al.⁴⁾)



◆ Bruguiera ■ Rhizophora(Nakama) ▲ Rhizophora(Coral C.)

図-2 Mazda et al.¹⁾ の測定結果に基づくマングローブ樹の投影面積の鉛直分布



◆ Bruguiera ■ Rhizophora(Nakama) ▲ Rhizophora(Coral C.)

図-3 Mazda et al.¹⁾ の測定結果に基づくマングローブ樹の占有体積の鉛直分布

根群中の最も高い分岐高さ $h_{\max}$ は 50cm 程度であり、実際には(1)、(2)式は樹高の高い *Rhizophora* に適用できるような普遍表示式ではない。これに対して Sato⁵⁾ は、西表島・石垣島・宮古島で *Rhizophora* の樹高 H 、胸高幹径 D_{BH} 、樹木あたりの支持根本数 n 、前述の最高分岐高さ $h_{\max}$ などを測定し、その結果から次のような回帰式を提案している。なお、式(4)～(6)中の h_c とは、支持根の本数 n の鉛直分布を片対数紙上にとった時に 2 本の直線で表され、その境界となる高さである。

$$D_{BH} = 0.41 \exp(0.65H) \quad (3)$$

$$h_c = 0.58h_{\max} + 8.3 \quad (4)$$

$$n = 0.15 \exp(1.55H - 4.0z) \quad 0 < z < h_c \quad (5)$$

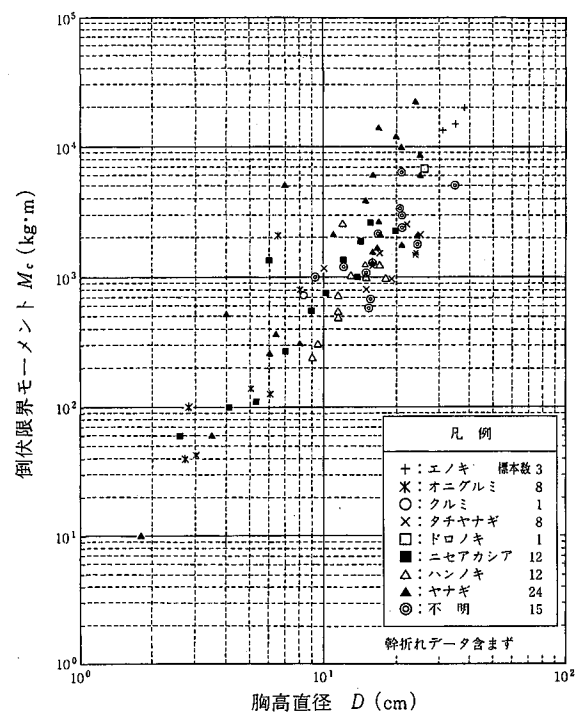
$$n = 0.15 \exp(1.55H + 5.5h_c - 9.5z) \quad h_c < z < h_{\max} \quad (6)$$

なお、Sato の原論文では m と cm の単位が混在しており、誤解を避けるため上記の表示式はすべて m 単位となるよう修正した。また Sato は、支持根本数 n の表示について測定地点によって異なる係数値を提案しており、その中で(5)、(6)式は西表島船浦での回帰式を示したものである。Sato の表示式も *Rhizophora* に一般的に適用できるかは疑問である。また、こうしたマングローブ形状は同じ樹種、同じ観測サイトであっても、局所的にも変化する。これはマングローブエッジからの距離によって塩分濃度や底泥の粒度が変化するため、またエッジ近くには若い樹種が成長し始めることにもよる。波高減衰効果の評価の面からのマングローブ樹木密度の水平分布に関する考察は、Mazda-Magi ら⁶⁾ がベトナムのマングローブ林を取り上げて検討している。

3. 津波による樹木の倒伏

防潮林など植生による津波の減衰効果についての研究は最近活発に行われているが^{3)、7)、8)}、津波流体力の作用下においても植生は安定に直立していることを仮定している。植生の揺動を組み込んだ研究もあるが⁹⁾、植生の倒伏までは考慮されていない。今回のような巨大津波の作用下にあつては、沿岸の植生は一部あるいは全部がなぎ倒れており、植生がどの範囲まで倒伏するか、また、倒伏を考慮しての津波減衰率の評価が重要な課題となる。

この方面の研究報告は著者の知る限り皆無であるが、河川工学では河道内の樹木群が洪水時にどの程度倒伏するかの研究が進んでおり、この知見が応用できると考えられる。洪水による樹木倒伏を知ることは、河道断面の洪水流に対する通水能を評価する上で重要であり、建設省河川局では林学分野で行われている樹木の引倒し試験を実施し、図・4の結果を得ている¹⁰⁾。これより、樹木の倒伏限界モーメント M_c と樹木の胸高直径 D_{BH} の概略的な関係は、次の式で表される。



図・4 樹木の倒伏限界モーメントと樹木直径の関係 (建設省河川局¹⁰⁾)

$$M_c = \alpha D_{BH}^{2.0} \quad (7)$$

ここに α は係数で、樹種によって異なるものと考えられる。

マングローブの倒伏限界について(7)式を適用できるかは不明であるが、既往の知見がないため次節以降の計算では暫定的に(7)式を用いることとした。

4. マングローブ林による津波氾濫流の減衰に関する数値計算

本解析で用いた基礎方程式を、以下に示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial x} (nQ) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{h} \frac{\partial Q}{\partial x} - A_h \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = -c^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{2} f_b \frac{Q|Q|}{h^2} - F_M / \rho \quad (9)$$

ここに、 η は水位変動、 Q は線流量($Q = uh$)、 n は群速度係数、 h は水深、 A_h は水平拡散係数、 c は波速、 f_b は底面摩擦係数、 F_M はマングローブに作用する流体力である。

(9)式の左辺を0と置いた式は、次式に示す Burgers 方程式であり、非線形項による波の突立ちが拡散項によって抑えられることになる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{h} \frac{\partial R}{\partial x} - A_h \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (10)$$

ただし、 $R = (1/2)Q^2$ である。

(9)式右辺最終項の流体抵抗 F_M / ρ は次式で表される。

$$\begin{aligned} F_M / \rho &= \frac{1}{2} C_D \int_0^h \frac{A_M}{V} u |u| dz + C_M \int_0^h \frac{V_M}{V} \frac{\partial u}{\partial t} dz \\ &= \frac{1}{2} C_D \frac{Q|Q|}{h^2} \int_0^h \frac{A_M}{V} dz + C_M \frac{1}{h} \frac{\partial Q}{\partial t} \int_0^h \frac{V_M}{V} dz \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 V は水面下の検査面体積、 V_M は体積 V 中のマングローブの体積、 A_M はマングローブの流れ方向の投影面積である。上式、最終項の変形は本計算では流速は断面一様分布となるため、積分領域より外に出したものである。 A_M / V および V_M / V は底面からの高さの関数であり、その関数形は樹種・樹齢・場所・環境条件などで変化するが、以下の計算では Mazda ら⁴⁾の測定結果に基づいて定式化した式(1)、(2)を代入する。 C_D は流れの Reynolds 数や支持根群体の近接効果によって変化するが¹¹⁾、ここでは一定値 2.0 とした。

今回のマングローブ林による津波の減衰計算は、定性的な特性を押さえることを目的としており、以下のような実験室規模での波を対象に行った。すなわち入射波高 $H_0=0.5\text{m}$ 、周期 $T=10\text{ s}$ 、水深 h は一様で $h=1.0\text{m}$ 、マングローブの幹径 $d=0.1\text{m}$ を基本条件とした。計算領域は水平距離 800m の区間であり、後半の 400m 区間に式(1),(2)で与えられる一定密度のマングローブ樹木群を与えた。前半の 400m 区間では最初の 50m 区間でマングローブ密度 0 の水域を助走区間とし、 $50\text{m}\sim 400\text{m}$ 区間で樹木密度が 0 から一定密度まで線形的に変化するよう与えた。

図-5 はマングローブ林を伝搬していく津波波高と水平流速の空間的減衰状況を示したものである。図-6 は計算領域内 $x=500\text{m}$ 地点での津波波高と水平流速の時間波形を示したものである。時間 $t=25\text{s}$ 付近で津波の第1波が来襲するが、その時の波高と水平流速は第2波以降より大きいことがわかる。これに対して第2波以降の波形はほぼ一定となる。

図-7 は、マングローブ樹1本あたりに作用する流体力を示したもので、図中では抗力と慣性力及びその合成力を分けて表示した。図より、本計算条件下では抗力が慣性力より卓越するが、来襲波の切り立った前面がマングローブ樹に作用する瞬間は、慣性力もかなりの大きさを持った衝撃的な力を与えることがわかる。

図-8 は津波の流体力によってマングローブ樹の底面位置 $z=0$ のまわりに作用するモーメントが、式(7)で与えられる限界条件を超えたときに倒伏するという条件を考慮した計算結果である。いったん倒伏条件を満たした樹木は、それ以降の津波減衰計算には寄与しないとして波高と水平流速の減衰を計算した。図より倒伏を考慮することによって減衰効果が低下することが計算結果に表れている。

図-9 は、波の振幅 a を図-8 の場合の2倍とし、波の周期を 15 s とした結果で、津波のエネルギーを強くすると、倒伏の影響が大きく現れることを示している。

5. あとがき

本研究では、マングローブ林の津波軽減効果を定量的に評価するため、マングローブの支持根形状・分布密度

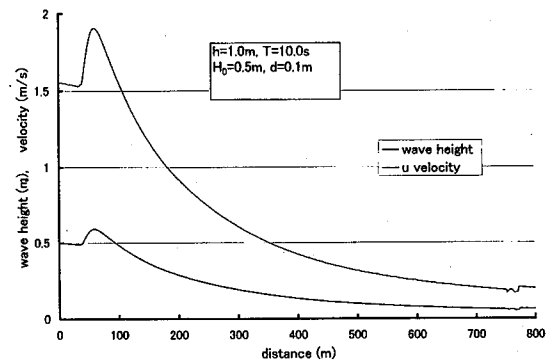


図-5 津波波高と水平流速の空間的減衰状況

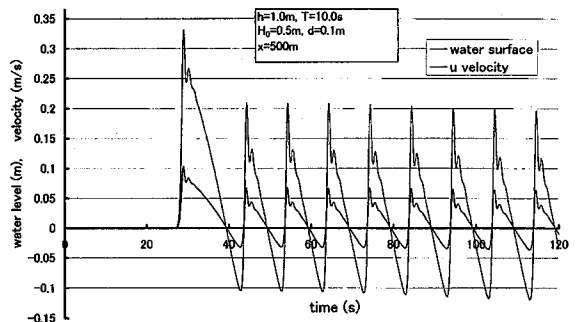


図-6 津波波高と水平流速の時間波形

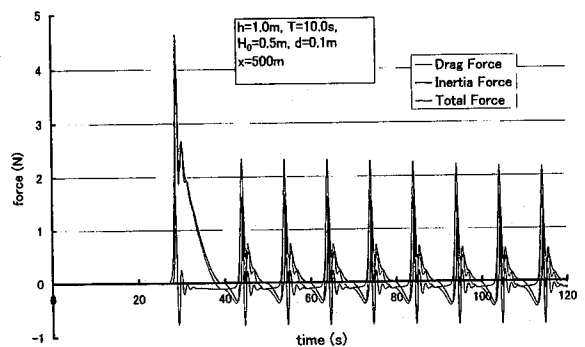


図-7 マングローブ樹に作用する流体力の時間波形

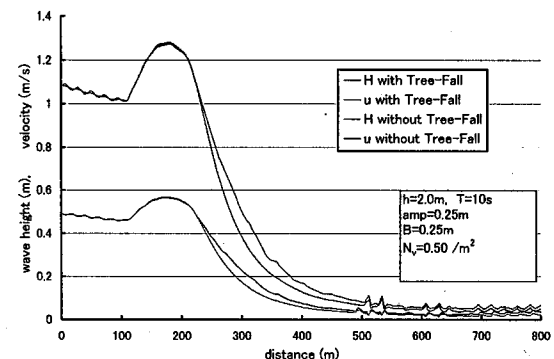


図-8 マングローブ樹の倒伏を考慮したときの津波波高の減衰状況

から流体抵抗を算定し、波高低減を記述する数学モデルを提案した。また、特定のマングローブ林で測定された形状・繁茂密度データに基づいて、数値計算によって津波波高の低減効果を具体的に試算した。こうした形状特性や分布特性は、マングローブの樹種・樹齢・環境条件によって当然さまざまに変化する。したがって、マングローブ林による津波の低減効果をより一般性に評価するためには、マングローブの樹種や成育環境に固有の形状特性を普遍性のある形で明らかにする必要がある。こうした物理過程を解明する上では、林学・生態学の方面から個別的・分析的な方向ではなく、概括的・総合的な方向で知見を提供して頂ければと考える。津波の大きな流体力でマングローブ林が倒伏するかどうかは樹木としての強度の情報が必要であり、津波低減効果に直接影響する。これについても普遍性のある知見が今後の研究展開に必要と考える。

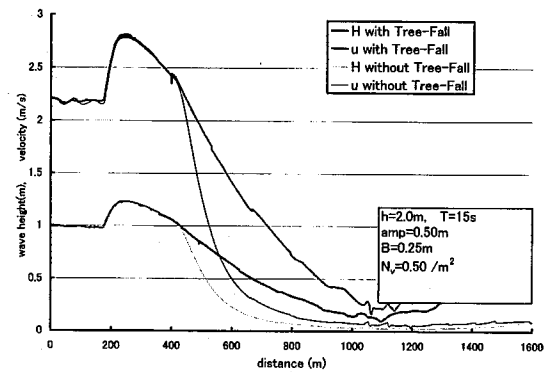


図-9 マングローブ樹の倒伏を考慮したときの津波波高の減衰状況

参考文献

- 1) V. Selvam(2005): Impact assessment for mangrove and shelterbelt plantations by tsunami for Tamil Nadu forestry project, M.S. Swaminathan Research Foundation, 29p.
- 2) 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.
- 3) 原田賢治・油屋貴子・Latief Hamzah・今村文彦(2000):防潮林の津波に対する減衰効果の検討、海岸工学論文集、第47巻、pp.366-370.
- 4) Mazda, Y., E. Wolanski, B. King, A. Sase, D. Ohtsuka and M. Magi (1997): Drag force due to vegetation in mangrove swamps, Mangrove and Salt Marshes, Vol. 1, pp.193-199.
- 5) Sato, K. (1981): Studies on the protective functions of the mangrove forest and erosion and destruction (III), On the numerical distribution of the prop roots of Rhizophora stylosa tree in Okinawa, The Sub-Tropical Forest, Vol.3, pp.40-59.
- 6) Mazda, Y., M. Magi, M. Kogo and N. Hong (1997): Mangrove as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam, Mangrove and Salt Marshes, Vol.1, pp.127-135.
- 7) 今井健太郎・松富英夫・高橋智幸(2003): 津波氾濫流の植生に作用する各種流体力、海岸工学論文集、第50巻、pp.276-280.
- 8) 松富英夫・大沼康太郎・今井健太(2004): 植生域氾濫流の基礎式と植生樹幹部の相似則、海岸工学論文集、第51巻、pp.301-305.
- 9) 今井健太郎・松富英夫・高橋智幸(2004): 津波氾濫流れによる植生の揺動とその流体力特性、海岸工学論文集、第51巻、pp.306-310.
- 10) 建設省河川局治水課(1994): 河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案)、山海堂、144p.
- 11) Furukawa, K, E. Wolanski and H. Mueller (1997): Currents and sediment transport in mangrove forests, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.44, pp.301-310.