

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—

田中規夫*・佐々木 寧**・湯谷賢太郎***・Samang Homchuen****

インド洋大津波に対し沿岸植生が果たした役割を、樹種・樹形影響に特に注目し調査を行なった。樹形を考慮した植生厚みを定義し、太い枝で枝分かれする低木林により適用性を確認した。密集し、かつ複雑な気根形態を持つ Mangrove 樹フタバナヒルギは、5 m 以下の津波に対し大きな効果を発揮した。植栽林のうち、ココヤシは樹形が単純で、樹間が大きく効果は少ないが、10 cm 以上の太い枝で枝分かれをするカシューナッツ等の低木林は 5 m 以下の津波防御・避難に貢献すると判断した。また、樹種や樹齢の異なる樹木で形成される階層構造や平面構造（林内ギャップやクリーク）の有効性を確認した。

1. はじめに

インド洋大津波は、インド洋沿岸諸国に未曾有の被害をもたらした。防災の視点からは災害痕跡をもとに、津波防御に対する防潮林の役割と限界（首藤，1985；原田ら，2000；松富ら，2001；原田・今村，2003）を明確化し、今後の Mangrove 樹林・沿岸植生の回復計画に、反映させる必要がある（佐々木ら，2005；田中ら，2005）。防潮林の役割は、首藤（1985）にまとめられており、有効な場合の条件等が、津波浸水深との関係でまとめられている。また、ココヤシ、マンゴー等の植林による防潮林整備（グリーンベルト）が唱えられている（平石ら，2001）が、マンゴーは塩害に弱く、ココヤシは樹高が高くなり、かつ浸水部分に枝葉がない場合が多いなど、樹木の種類や樹形そのものについての検討がさらに必要である。また、同地域に発達する Mangrove 樹は、樹形も気根形態が多様で、日本の赤松、黒松を主体とする結果とは、大きく異なることも想定される。そこで、今回の津波に対し、沿岸植生が果たした役割を樹林幅と樹種・樹形影響について特に注目し調査を行なった。

2. 調査・解析方法

（1）津波被害の痕跡調査

図-1 に示すタイ西海岸線沿い約 200 km の区間で、29 箇所についてその被害実態を、2005 年 2 月 27 日から 3 月 5 日にかけて、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、樹林の胸高直径、樹林密度）、現地住民へのヒアリングという形で行った。

本研究では、タイ西海岸における代表的植生として、

A) モクマオウ *Casuarina equisetifolia*（日本で言えば黒松に相当する代表的海岸林）、B) フタバナヒルギ *Rhizophora apiculata*（干満の差の大きい場所の Mangrove 樹林）、C) ヒルギダマシ *Avicennia alba*（干満の差の小さい場所の Mangrove 樹林）、D) ココヤシ *Cocos nucifera*（栽培植生として海岸に多い）、E) カシューナッツ *Anacardium occidentale* 果樹園（果樹栽培植生として海岸に多い）、F) 雑木林（胸高直径 $d = 0.1$ m 以下で高さ 10 m 以下：主にシジギウム *Syzygium grandii*）の 6 種類の樹木と樹形に注目した（図-2 にそれぞれの種の写真を示す）。また、Mangrove 樹林は、もともと

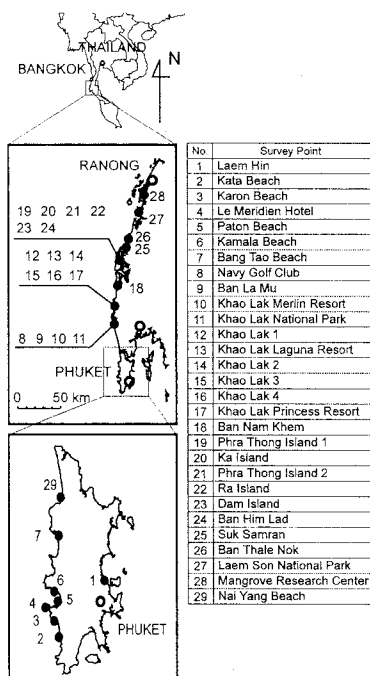


図-1 調査地点位置図

* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設工学科
** 正会員 理博 埼玉大学教授 工学部建設工学科
*** 正会員 工修 埼玉大学助手 工学部建設工学科
**** コンケン大学 理学部環境科学科

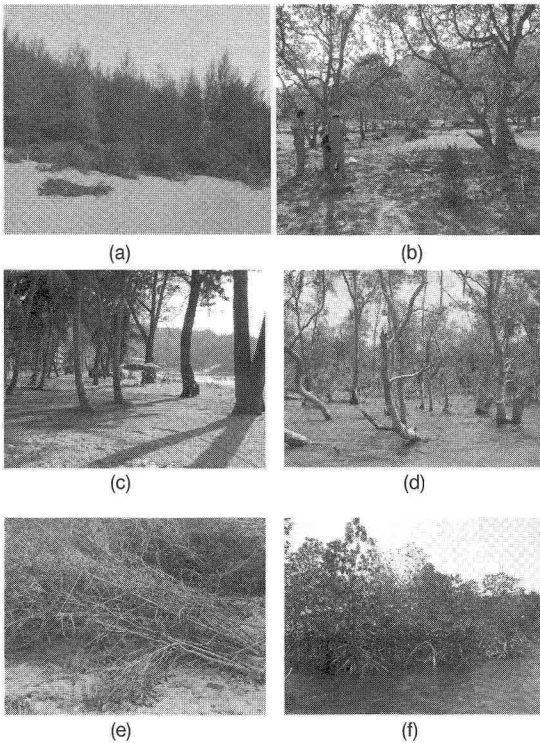


図-2 海岸付近に繁茂する代表的樹林（タイ西海岸）
 (a)モクマオウ（手前にあるのがなぎ倒された幼木）、(b)カシューナッツ、(c)ココヤシとモクマオウ、(d)ヒルギダマシ、(e)シジギウム、(f)フタバナヒルギ

内湾の津波の高さが低いような地点に生えている場合も多いことから、外洋に面しかつ Mangrove 樹林が繁茂する島嶼地域でも、樹林の被災状況を調査した。

(2) 抵抗特性の評価

首藤（1985）の植生厚み dn (d : 樹木主幹の胸高直径（以後、主幹直径）(cm), n : 沿岸方向 $1\text{ m} \times$ 幅 $L\text{ m}$ あたりの植生本数 (trees/Lm²)), 松富ら（2001）の合成抗力を、本研究目的に合うように再定義した。

樹林帯沿岸方向の単位幅あたりの合成抗力 D (N) は、水深方向に微小面積 dA_i を考慮して積分し、沿岸方向 $1\text{ m} \times$ 幅 $L\text{ m}$ 内の樹林本数 n を掛け合わせることに、

$$D = n \times \int_0^L C_{di} \rho u_i^2 dA_i \dots\dots\dots (1)$$

$$n = \frac{L \times 1}{l_1 \times l_2} = \frac{L}{l^2} \dots\dots\dots (2)$$

とした。ここに、 L : 岸沖方向の植生域長 (m), C_{di} , u_i : それぞれ、各分割領域の抵抗係数と流速 (m/s), ρ : 海水の密度 (= 1030 kg/m³), l_1 , l_2 : それぞれ沿岸方向、岸沖方向の樹木間距離, l : 平均樹間距離である。なお、本研究では u_i 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、合成の抵抗係数 C_d , C_{d-all} を次式で定義した。

$$D = n \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \frac{1}{2} C_d \rho U^2 \times \left(h \times \frac{d}{100} \right) = \frac{1}{2} \times \frac{dn}{100} \times \alpha \beta \times C_d \rho U^2 h \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha \beta = \frac{1}{h} \int_0^h \alpha(z) \beta(z) dz \dots\dots\dots (4)$$

$$C_{d-all} = \alpha \beta \times C_d \dots\dots\dots (5)$$

$$dN_{all} = \alpha \beta \times dn \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 z : 鉛直方向にとった座標軸, h : 津波浸水深 (m), $\alpha(z)$: 樹種による樹形や気根形態の相違を表す付加係数, $\beta(z)$: 葉層の付加係数で、 $\alpha\beta$ は水深平均値である。なお、 C_{d-all} , dN_{all} はそれぞれ、気根・葉茎の付加投影面積・付加抵抗影響を含む抗力係数、植生全厚みである。

式(1)における代表投影面積は、植物を代表するパラメータとして主幹直径 d を用いた。また Mangrove のうち検討対象の *Rhizophora* 属はタコの足のような気根（直径 5 cm 程度）を 30 本程度は出している。株状気根の C_{di} は、武村・田中（2005）を参考に、1.5 から 1 に変化させた。ただし、 dA_i を 0.5 m 刻みの水平方向投影面積とした。太い枝で枝分かれする木については、枝分かれ本数や枝の直径等を計測し、合成抵抗係数に反映させた。葉層の抵抗は、福岡ら（1987）、原田・今村（2003）を参考に、葉層に付加係数 $\beta(z)$ を 1.25（茎層は 1）とした。

今回の調査で計測したものは、式(1)から(6)で定義される d , n , L , l_1 , l_2 , α , h である。

3. 調査結果

(1) 主要樹木の特性整理結果

単位幅あたり植生本数 n は樹木高さや胸高直径と相関がある（原田・今村，2003）ことから、対象樹種の特性（樹木高さ H , 平均樹間距離 l ）を主幹直径と関連付けて整理した。図-3, 4 に、対象とする 6 種植物の主幹直径と樹高の関係、樹高と樹間距離の関係をそれぞれ示す。図-3 より主幹直径の増大に対して樹高が増加し、その増加率は徐々に小さくなる。決定定数 R^2 の差はあるものの、データの少ないシジギウムを除いた 5 種すべてに認められる傾向である。図-4 より、樹高が高い場合には樹間距離も線形的に増加することが確認できる。この 2 つの図は、主幹直径 d が大きくなると樹間距離が大きくなり n が小さくなるため、 d と n は独立には議論できないこと、さらにその傾向は種によって大きく異なることを示している。

図-5 に、付加係数 $\alpha(z)$ の鉛直分布を示す。枝分かれ、葉面積密度、気根の本数が多い樹種ほどこの係数 $\alpha(z)$ が大きくなる。すなわち、津波浸水深 h よりも樹木高

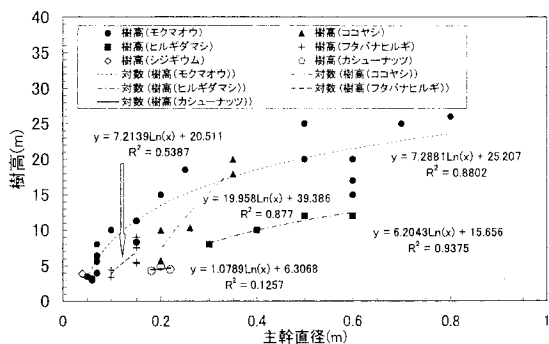


図-3 代表6樹木の主幹直径と樹高の関係

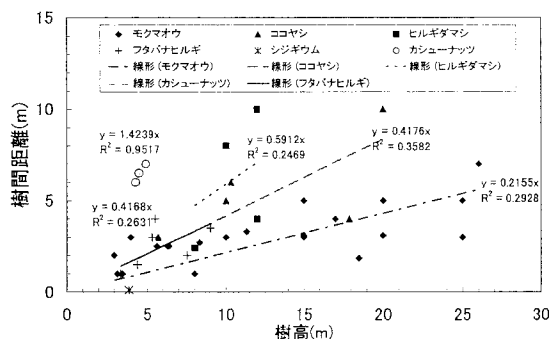
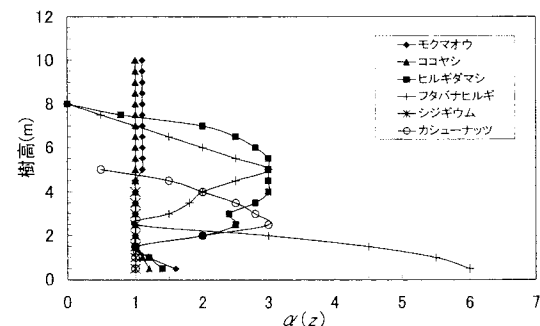
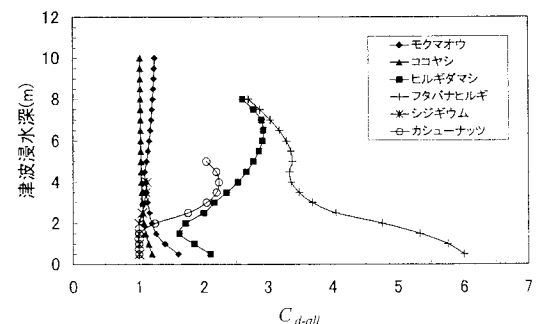


図-4 代表6樹木の樹高と樹間距離の関係

図-5 樹種による樹形や気根形態の相違点を表す付加係数 $\alpha(z)$ の鉛直分布図-6 樹形や気根形態の相違点を考慮した合成抵抗係数 C_{d-all} の津波浸水深による変化

さの高い場合のココヤシは1で、水深による変化はあまりなく、フタバナヒルギは1よりはるかに大きく、水深が浅いときに大きな効果を発揮する。

図-3.4 から、防御範囲の津波高さを10 m 以上のものも想定する場合にはモクマオウ、10 m 以下の場合にはモクマオウ若木 ($d = 10$ cm 以上)、フタバナヒルギは有効と判断される。カシューナッツやヒルギダマシは、樹間距離があくものの図-5 で示す α の分布が、底面付近からすぐに大きくなっていることから、5 m 以下の場合に限定して有効である。ココヤシの有効性は低い。

図-6 に合成抵抗係数 C_{d-all} の津波浸水深による変化をそれぞれの種の代表主幹直径に対し示す。ココヤシの C_{d-all} は変化しないのに対し、フタバナヒルギは浅い浸水深の場合に大きな効果を発揮し、樹高付近までその高い値を維持する。求めた C_{d-all} 値は榊山ら (1990) が求めた抗力係数の範囲 $C_d = 2 \sim 6$ をおおむね満足している。

(2) 主要地点の被害状況

主要3地点の位置図を図-7(a), (b), (c) に示す。各調査地点の被害状況は下記に示すとおりである。

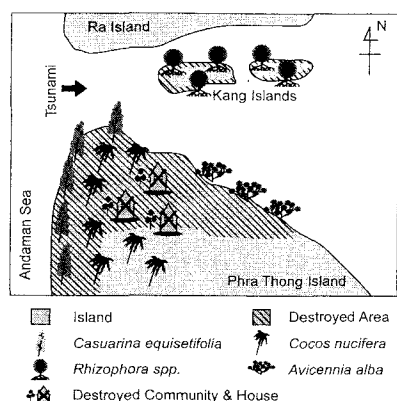
a) Phra Thong Island と Kang Islands (図-7(a))

Phra Thong Island では、第3波目で最大の約10 m の津波浸水深を記録した。津波は主幹直径10 cm 程度のモクマオウや、一部のココヤシをなぎ倒し、約50 cm 程度のモクマオウ樹林は素通りし、人家を襲っている。人家のない領域に繁茂していた Mangrove 林ヒルギダマシそのものの倒伏・破断は端部を除き発生していなかった。

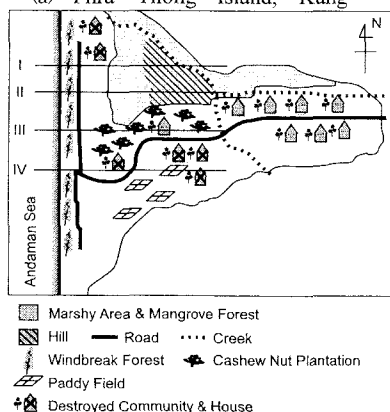
Kang 群島の内、津波に対して上流側の島 (以後、上島) は、島前面部で約50 m、下流側の島 (以後、下島) は、島前面部で約20 m の樹林帯が破壊された (下島では上島の後流域にあたる)。Kang 群島周辺の海底勾配は、ヒルギダマシが生えていた Phra Thong Island よりも急であり、ほぼ全島に生えていたフタバナヒルギ (ただし島周辺部1-2列は、オオバヒルギ *Rhizophora mucronata*) のなぎ倒し状況から津波高さは約8 m と推定した。これらの種は、地際で破断される場合は少なく、気根の付け根部分の主幹で切断されている例が非常に多かった。

b) Ban Thale Nok (図-7(b))

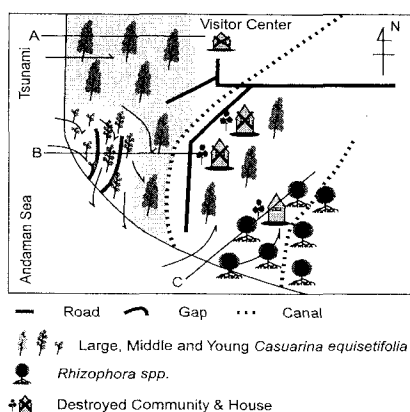
沿岸の防風林 ($d = 0.5$ から 1 m) 地点における津波浸水深は約10 m 程度と推定された。防風林の先の湿地にはつる草が茂る部分 (測線I) とモクマオウ、フタバナヒルギがまばらに生えていた部分 (測線II) がある。測線II上の樹木の一部 (主幹直径10 cm 以下) とシジギウム *Syzygium grandii* は寸断・なぎ倒されていた。その先の深さ約2 m、幅約5 m のクリークに切断された樹木が蓄積され、クリークの先のフタバナヒルギ樹林帯 (津波浸水深: 約6 m) は破断していなかった (測線I,



(a) Phra Thong Island, Kang



(b) Ban Thale Nok



(c) Laem Son National Park

図-7 主要調査地点概要

測線Ⅲのカシューナッツ群落においては、群落端部において、枝の切断などの破壊が見られ、一部根こそぎ倒れたものが1%程度存在するものの、多くはそのまま残っていた。測線Ⅲでは約450 m地点にあった住宅が破壊されていなかった。測線Ⅲ、Ⅳとも本来はマングローブ樹林帯で、開発により防御効果が減少した場所であるが、土地利用の差が被害状況に差をもたらしたと言える。

c) Laem Son National Park 付近

この地点においては、図-7(c)の3測線について考察する。測線Ⅰ（樹林帯入り口付近での津波高さは約3 m）は主にモクマオウの巨木（主幹直径0.5-1.0 m）が約200 mの幅で生えていたが、樹木間隔が粗く、津波は樹林帯を通り抜け、一部の家を破壊して、津波は1.8 kmの地点まで侵入した。測線Ⅱでは、モクマオウの若木を次々になぎ倒し、砂州形成時期の違いによって生じたと想定されるギャップ（4列存在）部分で向きを変え、折れた枝を巨木前面部に蓄積した。一方、測線Ⅲにおいては、主幹直径約0.1 mのフタバナヒルギは5 mの津波に対して、単独でも折れていない場合がほとんどであった。

4. 考 察

(1) 樹形の相違が植生厚み dn と抗力に与える影響

図-8に津波浸水深と樹林帯厚さ (dn , dN_{all}) の関係を示す。この図の領域は首藤 (1985) により、A: 主樹木に被害なく漂流物阻止の効果はあるが、流勢緩和や浸水被害の効果はない領域、B-1: 主樹木に倒伏が生じるが条件によっては漂流物阻止も可能、B-2: 主樹木に被害が生じるので防潮林効果は期待できない、C-1: 林帯内での倒木や土壌洗掘も生じない、C-2: 林帯内に被害が発生しうるが、防潮林が破壊される規模ではない、D-1: よほどのことがない限り林帯内で被害は生じない、D-2: 林帯内表土洗掘のような被害が生じるが、流勢や浸水深が軽減され、被害が緩和される、と定義される。

モクマオウは dn を用いても首藤 (1985) の結果をおおむね満足していることがわかる。カシューナッツとヒルギタマシは dn では適合性が悪く、 dN_{all} を用いた場合にB-2、C-2の境界線をおおむね満足する。これは図-5で示した樹形の相違からくるもので、樹種影響を評価するためには、一次分岐枝の本数を考えたパラメータ dN_{all} ($= dn\alpha\beta$) がより適切なパラメータと考えられる。

フタバナヒルギは津波の高さが5 m以下の時に、少ない樹林幅でも効果を発揮する傾向があり、 dN_{all} を用いた場合のB-2領域でも破壊されていない。しかし、8 mクラスの津波に対して、逆にC-2領域（非破壊領域）においても破壊される傾向がある。これは、5 m以下の津波に対し約30本の根が受けた力を分散させたが、8 mクラスでは密集した樹冠構造により、気根上部の細い主

Ⅱとも)。

測線Ⅰ、Ⅱを進行した津波とは対照的に、その300-400 m横（測線Ⅳ）は、かつてはMangrove樹林帯であったが、津波前には開発され、水田地域となっていた。ここは汀線から700 mの地点までの住宅をほぼ全壊した。

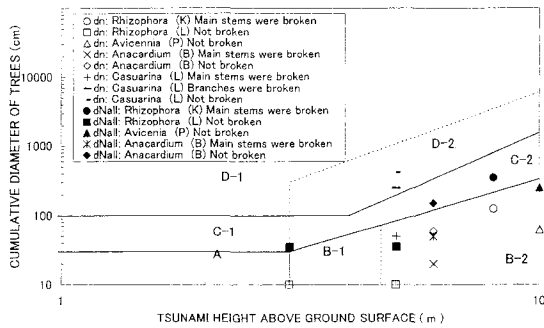


図-8 津波浸水深さと樹林厚み dn , dn_{lit} の関係 (首藤 (1985) に加筆修正). B: Ban Thale Nok, K: Kang island, L: Laem Son, P: Phra Thong

幹に働く抗力モーメントが主幹の破断モーメントを上回るためである。この種の有効性判断には、厚みに加えて樹高のある閾値を越えたか否かが重要である。

(2) 樹林帯の樹種構成・空間構造と避難効果

有効な樹種としては、A. 気根の発達し密生する樹種 (フタバナヒルギ, オオバヒルギ), B. 太い低木林 (カシュエナツなど) であった。これらは 5 m 以下の津波に対しては、大きな効果を発揮すると考えられた。A は生育地に限界があるが、B はすでに開発が進んだ土地におけるココヤシよりも有効な植生として考慮する必要がある。10 m クラスの津波を考慮すると、A は 50 m 以上の長さにわたって破断する可能性も高い。その場合、沿岸部はヒルギダマシ、砂浜部は異なる樹齢の混在するモクマオウ樹林帯やモクマオウと太い主幹・枝を形成する低木林の混在する構造が有効であると考えられた。また、汀線に平行に走る水路は、流木落枝を集め、津波の勢いを減衰させる可能性が 2 箇所 (Ban Thale Nok, Laem Son National Park) の痕跡結果から示唆される。しかし、大規模な津波では、防潮林によって完全に防御できるものではない。生存住民によると、生存理由に、樹林の林冠にソフトランディング、樹上への避難を挙げている。この場合、枝葉の多い Mangrove 樹林や容易に登れる広葉樹 (カシュエナツやクロヨナ *Pongamia pinnata*) が有効であった。単一樹林ではなく避難しやすく、抗力係数の大きい低木林が平面的に混在することが重要である。

5. おわりに

海岸防潮林は、①平面方向・鉛直方向の階層構造、②

折れない範囲の小直径の木 (密度重視、主幹直径 10 cm 程度で樹高が高い)、③流出木を受け止める大直径の木 (混在効果)、④汀線に平行な方向に走る樹林内ギャップやクリーク (枯れ枝を溜めて流枝による二次的災害を防ぐ効果)、⑤人的被害を軽減する低木林の混在、等の構造を持つべきである。インド洋諸国に限らず、このような視点で、海岸防潮林の保全・育成を図ることが必要である。

謝辞：現地調査に際し、カセサート大学 Sanit Aksornkoae 教授、タイ政府の森林保全主任 Sonjai Havanond 氏から、被害状況についてのヒアリングをさせていただいた。現地調査にはタイ・コンケン大学大学院生 Jakrapong Taengtong 氏と学部学生 Phetprakai Wongsorn 氏らの協力を得た。データ解析では、埼玉大学工学部谷本勝利教授からご助言をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 榊山 勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1990)：ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析，海工論文集，第37巻，pp. 554-558.
- 佐々木 寧・田中規夫・湯谷賢太郎・サマン・ホモチュエン (2005)：スマトラ沖大地震における樹林の津波防御効果について タイ南部地区，埼玉大学工学部紀要2005 (印刷予定)。
- 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.
- 武村 武・田中規夫 (2005)：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.
- 田中規夫・佐々木寧・M.I.M. Mowjood (2005)：スリランカ南部海岸線におけるインド洋大津波被害実態調査ーラグーン，海岸砂丘，樹林帯に注目してー，埼玉大学工学部紀要2005 (印刷予定)。
- 原田賢治・今村文彦 (2003)：防潮林による津波減衰効果の評価と減災のための利用の可能性，海工論文集，第50巻，pp. 341-345.
- 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，海工論文集，第47巻，pp. 366-370.
- 平石哲也・竹村慎治・永瀬恭一 (2001)：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.
- 福岡捷二・藤田光一・平林 桂・坂野 章 (1987)：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.
- 松富英夫・穂積拓哉・今井健太郎 (2001)：砂嘴植生域をこえる津波の基礎水理，海工論文集，第48巻，pp. 316-320.