

2004 年インド洋大津波によるマングローブ林と沿岸微地形の破壊状況に関する調査 The Impact of 2004 Indian Ocean Tsunami to the coastal mangrove forest and the response in Thailand and BandaAche Indonesia

宮城 豊彦（東北学院大・地域構想学科）、馬場 繁幸（琉球大学農学部、
ISME 国際マングローブ生態系協会）、柳沢 英明（東北大・院・工学研究科）、
今村 文彦（東北大・工学部）、斎藤 綾子（東北学院大・院・人間情報学）、
林 一成（奥山ボーリング Co.Ltd）、Charlchai Tanavud（Prince of Songkla Univ., Thailand）、
Muzailin Affan（Shakuala Univ., Indonesia）

キーワード：インド洋大津波・マングローブ・破壊モード・津波シミュレーション・植林戦略

Keywords: Indian Ocean Tsunami • Mangrove forest • Destruction mode •
Tsunami Simulation • Plantation strategy

1. はじめに

2004 年 12 月に発生したスマトラ島沖地震に際した 2004 年インド洋大津波では、インド洋沿岸の極めて広い地域で激烈な災害を引き起こした。なかでもタイ南西部沿岸のナムケムやカオラック、プーケットなどのリゾートを中心とした沿岸の人口集中地区やインドネシアのスマトラ島北端部のバンダアチェ市一帯、スリランカ東・南海岸などでは夥しい数の死者・行方不明者を記録し、人的被害の総数は 23 万人に達したと言われる。まさに未曾有とも言うべき大災害である。

本報告で取り上げるマングローブ林は、陸と海の境界に発達する森林生態系として津波の波力を低減することを期待されている。はたしてこの森は、どのような反応を示したのであろうか。津波直後から、津波とマングローブに関する数編の報告が提出されている (Danielsen et al., 2005, Kathiresan and Rajendran, 2005)。しかし、Cochard et al., (2008) の指摘に拠るまでもなく、マングローブ林と津波の関係がどのようなものであったのかについて、現地の観察や計測データに基づいた実態把握の報告は実に不十分なものしかなかったと考える。

これには、以下の 2 点に集約される問題があったと思われる。その第一は、研究の潮流に関わる問題である。森や樹木また立地と関

与しあう環境条件の関係についての課題整理や実証研究が乏しいままに、森林が有するであろうと想定される機能が、あたかも実際に機能しているかのように短絡した社会風評が流布してしまったこと。マングローブの研究は元々生物学・林学の研究が主流で、この林が有する様々な環境調節機能や防災機能についての研究はごく少数の研究者によって実行されているに過ぎなかった (マングローブ林が有する波力の減衰や潮汐流の研究には, Mazuda, 2008 などの労作がある)。マングローブ林やその生態学的な意義は、森林の人為的な破壊に対する警鐘 (典型的には、1970 年代に大きく広がったエビ養殖池の開発による森林の破壊が沿岸生態系の立地基盤を破壊することによる沿岸環境の劣悪化) とともに注目されたが、防災機能の分析のような工学や物理学、地学などの共同研究が必要な分野は、歴史も蓄積も浅い。第二は、現象把握の難しさに関わる問題である。とりわけ、津波などの広域の災害の場合、場所ごとに異なる破壊実態を短い調査時間のなかで合理的に把握するには、調査法がある程度確立されている必要があろう。第一の問題とリンクして、調査法がまちまちな状況で得られたデータは、相互に比較しにくく、ましてやそのデータをもとにして、将来の防災対策を構築して政策に結び付けようとすることは難しいものになる。

2004 年インド洋大津波に際して、我々は津波とマングローブ林との関係をできるだけ広範な現地調査に基づいて理解しようと努めた。具体的には次の二つの研究が実行された。柳沢らによって津波エネルギーとマングローブ樹木の防災機能に関する実証的、定量的な研究が進められた。この研究は、これまでに数編の報告としてまとめられている（大家他, 2006, 柳沢他, 2007, Yanagisawa et al., 2008a,b）。宮城らは、津波によるマングローブ林とその土地の破壊と再生の現地データを広汎で収集し、これを整理して「津波によるマングローブ破壊とは一般にこのようなものであろう」という定式化された知見を構築することを目指した作業を行った（林他, 2005, 宮城他, 2005）。

2. 調査内容の構成

筆者らは、津波発生の直後から最近まで、計 6 次に渡って、タイのアンダマン海沿岸からインドネシアのスマトラ島のバンダアチエ一帯において、マングローブの津波破壊と再生に関する現地調査を重ねてきた。ここでは、その調査内容の記載をおこなうこと、そしてそこから得られた知見をもとに、津波による

マングローブ林破壊の理解の仕方を提案することとしたい。

調査は、1) アンダマン海沿岸で実施された地形植生断面調査、2) アンダマン海の 2 地域における破壊実際の詳細調査、3) バンダアチエにおける破壊実態の詳細調査、4) 植林や自然更新による植生復活の実態把握からなる。これらの調査の報告は、それぞれの実態把握とともに、その手法の長短についても付言した。更に 5) 津波などの災害や環境変化に対するマングローブ環境のあり方の理解に関する現時点での提言や研究の方向性を示した。

3. マングローブ生態系と立地に関する基本的な知識

マングローブ林は、世界の熱帯林面積の僅か 1% を占めるに過ぎない。しかし、この森は陸と海の境界に発達する。この場所は古くから文明が発達し多くの人類が居住してきた場所でもある。日本では、マングローブ林は熱帯の人跡未踏のジャングルではないかと思う人々が一部に見られるが、世界の殆どのマングローブ林は、言わば「海の里山」として、長く地域の人々の生活とともにあった。図 1

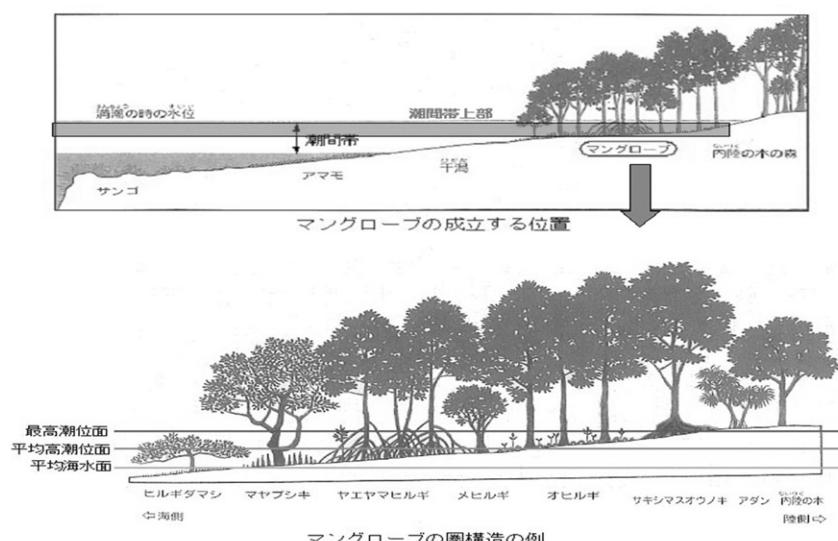


図 1 マングローブ生態系の立地位置と潮位の関係 (Mochida et al., 2000)

に示すように、マングローブ林は、陸と海の境界部において、潮間帯の上半部、即ち平均海面の高さから最高高潮位面の範囲にのみ形成される。平均海水面以下には藻場やサンゴ礁が、最高高潮位面よりも高い土地には陸生の植物が生育する。この立地位置の中で、マングローブは、ゾーネーション（植物の優占種が順次置き換わり帶状の分布構造を作ること）を示すことが多い。干満の差が大きい場所はそれだけ、ある地点が潮に浸かる頻度や時間などの環境傾度の差が明瞭になるため、この構造は明確になるが、潮汐の差が小さな地域では、環境傾度が明確ではないものもある。混合した森になることもある。何れにせよ、マングローブ林を構成する多様な樹種は、それぞれ特徴的な生育形を示し、これが津波などの災害に代表される外的な働きかけに対して、様々な反応を示す素因となる。

マングローブ林は多くの地で、海の里山とされるが、例えば Mochida et al, 2000 が端的に図示しているように、タイからインドネシアにかけて一般的に見られるマングローブ林のゾーネーションとそこで営まれるマングローブ林利用、更にその森がどのような地盤に成立しているのかは、かなり類似した傾向がある。その中で、木材生産力の高い *Rhizophora* や *Bruguiera* などの森は、古くから薪炭林として利用されてきた。地盤高が

やや高い位置に立地する樹種群は、地元住民が普段に用いる薪として日常的に刈り取られてきた。このようなゾーネーションは、必ずしも所与の環境傾度が設定されていて、その上に「植物が乗っかっている」というものではない。最近では潮間帯の平均海水面付近の地盤が設定されることを契機として引き起こされる「海・土地・生物の相互作用」と考えられるようになってきている。図2にそのイメージを描いた。平均海水面付近に土地ができると、そこに *Sonneratia* や *Avicennia* などの先駆種が生育する。潮間帯に樹林が成立することで潮汐流、波浪、突発的な土砂供給などでもたらされた物質の堆積が促進され、これに伴って地盤高が高くなる。この地盤高の上昇はその場所における潮汐特性を変化させ、そのことが先駆種から次の、例えば *Rhizophora* などの森への変化を促す。*Rhizophora* の地上部・地下部のバイオマス蓄積量は大きく、特に地下部には根を主体とする泥炭を蓄積することとなる。こうして地盤高は次第に高くなり種も順次置き換わることとなる。マングローブ域では、こうした過程で、それ以外の干潟と比較しても多彩な微環境が生まれることとなる。このように形成されるマングローブ林と海洋の基本要素である波力の関係は幾多の研究があるが、具体的に森林の発達が波力などの外力を吸収し、結果として波のエネルギーを減衰させていくとい

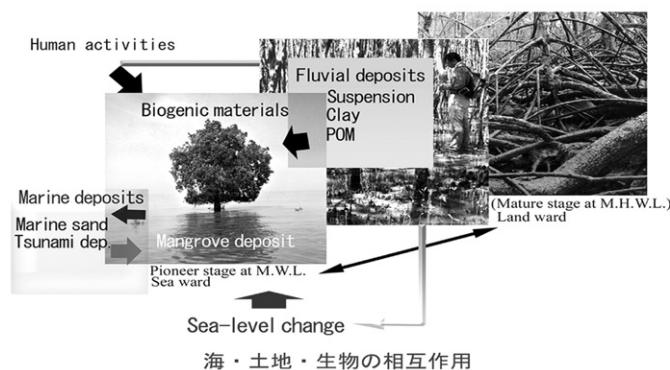


図2 潮間帶の中等潮位付近の水位を占める地盤にマングローブの先駆種が定着することで開始される堆積・潮汐・森林群落構造の相互作用的な変化 (Miyagi, 2004)

う実証的な調査結果は Mazuda et al., (1996) が示している。

4. タイ国南西岸アンダマン海沿岸における津波襲来波高とマングローブ林の破壊

タイ国南部アンダマン海沿岸、ラノン県からクラビ県のピピ島までの約 300km の区間を対象に、主としてマングローブ林域における津波災害の概要を予察的に把握した状況報告を行う。調査項目は、アスター、イコノス、空中写真、地形図などによる事前準備、現地関係者からの聞き取り、現地での植生・地形・津波堆積物の観察、簡易測量による諸計測の結果である。

4.1 タイ国アンダマン海沿岸部のマングローブ林分布

熱帯域に位置するタイでは、サンゴ海岸・岩石海岸・砂浜などを除けば、マングローブ林は沿岸に広く分布している。しかし、図 3 に示したように、2004 年時点での、調査地一帯のアスター画像の合成図に見るよう、アンダマン海沿岸の大半の場所は、マングローブ林が点在するのみで、その面積は決して広くない。この画像から読み取るマングローブ林は、図の北端部ミャンマーと国境を接する深い内湾に面するラノン県、プーケット島の東に広がるパンガ湾などで大規模な森が広がる。インド洋に面した海岸は、南西モンスーンによる波浪が強く、浜堤が発達しやすい。浜堤の陸側にラグーンが形成されれば、その波静かな潮間帶にマングローブ林を形成することも多い。ラノン県カムファン、パンガ県ナムケム、サラカオ、ナイライなどの森がこれにあたる。プーケット島のパトン、カマラ、パンガ県カオラックなどでは典型的に砂浜が発達するものの、林は殆ど存在しない。この内、カオラック地区の浜堤背後の低地には、有機質を含む粘土の堆積物があることから、従来はマングローブ林が存在したもの、その後の開発で消滅した可能性がある。マングローブ林は河川の河口部にも発達する。カ

オラックの小河川、カペー地区の一部にその例がある。マレー半島は、東西幅が極めて細い脊梁山脈の半島であり、アンダマン海に流れる大河川は無い。

4.2 断面調査によるアンダマン海沿岸各地の津波被害把握

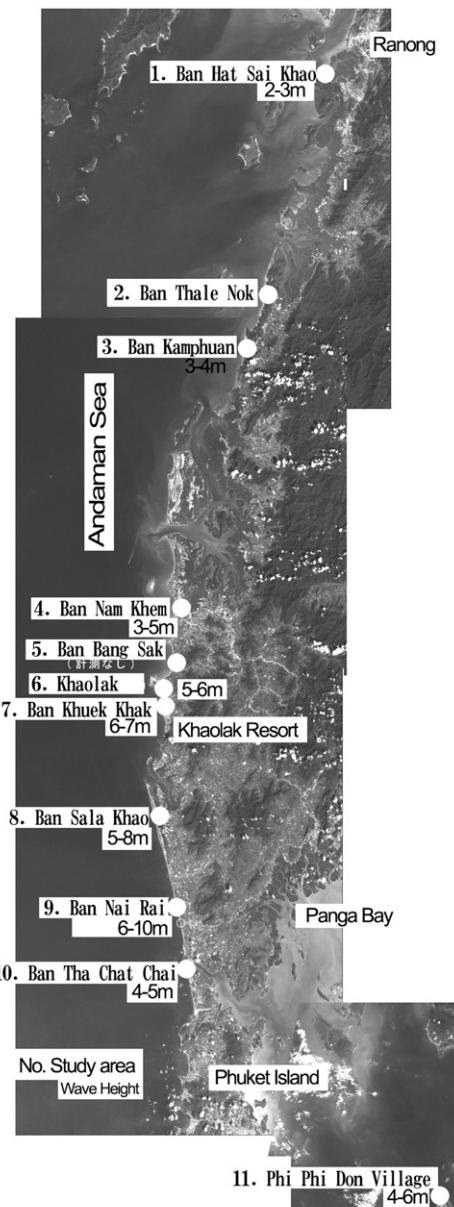


図 3 タイ、アンダマン海沿岸におけるマングローブ林の分布と主な津波被害調査地

タイ国におけるマングローブ林への被害は、タイ国環境省沿岸・海洋資源局の見積もりによれば、僅か 320ha (2000 Rai) であり (Wijan Meepol 氏談, 2006), それもラノン県のサクサムラン村に集中している。この村以外の被害はタクアパ付近やカオラックに若干認められるに過ぎない。この理由は、今後解明されるべきであると考える。調査地一帯に観察されたマングローブ林の破壊状況は、写真 1 にまとめた。

2005 年 2 月から 2006 年まで、図 3 の 11 地区のマングローブ林において現地調査を実施した。この調査は、沿岸からマングローブ林に向かって直交するように地形の断面測量を実施し、併せて断面上の微地形に見られる浸食・堆積の兆候、樹木の破壊やゴミの堆積、樹幹の汚れやキズの状態などを観察することを、マングローブ林の破壊が認められなくなるまで続けた。尚津波の波高は、計測時の汀線を基準にした便宜的なものである。その概要を図 4 と表 1 に示した。現地で、樹木や構造物に記された津波の痕跡から計測した波高は、多くの場合、浜堤頂部で極めて高くなり、浜堤陸側の斜面で急激に波高を低下させる。これは、「砂浜前面の斜面で津波が段波状の高まりを示したものと、その後陸側に流れ込んだ津波の水深を示したもの」との違いによると見られる。つまり、ラグーン内の最も海側に位置するマングローブ樹木に見られる傷やゴミの高さが示すものは、浜堤を越えてラグーンに流入した海水の水深と見られ、この部分の波高を到達波高として、これとマングローブ林破壊との関係を把握する必要があろう。河川の河口部や干潟のマングローブが外洋に直接面するような場所では、浜堤のような段波は発生しないと見られる。

成熟した自然林が、砂泥から成る外洋に面した干潟に立地するラノン県パンハッサイカオ (図 4A, 図 5) では、波高 2-3m 内外の津波が襲来したとされる。しかし、現地調査において樹木に津波の痕跡を認めるることは出来なかった。林床堆積物の観察でも、僅かにカキなどの貝殻片が表面に散乱して認められる

のみであった。ラノン県のマングローブ林研究所を管理する Wijan Meepol 氏によれば、津波は林内にザバザバと入って来たが、異常な上げ潮ではないかと感じたそうである。入り江に面して祠が祀られているが、これは破損し、直ぐに修復された。入り江奥の港には 200 艘ほどの船があったが、被害は極めて軽微であったという。津波後、研究所のスタッフと地元住民が森林内に散乱するゴミを清掃し、今では津波の痕跡を確認できない。ゴミの量も大したものではなかったと言う。この調査地は、筆者らが数年前から調査を重ね、詳細な地形・地質・植生の構造が明らかにされていた。そのため、津波破壊の詳細も明らかになると想定されたが、波高 3m 程度の津波では、成熟したマングローブ林の破壊は極めて小規模に留まる事を示唆する結果となった。類似の波高を示したと思われるタイ南部のサトン県でも、河川の河口部に杭を立てた家屋で漁労を行っていた人々に若干の犠牲が生じたものの、マングローブ林の被害は極めて微少なものだった (Sonjai Havanond 氏談)。

パンガ県のピピ島 (図 4B, 写真 1-1,2) では、マングローブ林が残る漁村に、最大計測波高 6.6m の津波が襲来した。ここでは、比高 2m 弱の浜堤を乗り越えた津波はココナツ林と点在する漁村の家々を約 150m に渡って破壊し、大量の浮遊物を伴って、海岸線から 200m 奥で、集落よりも 2m ほど低所にあるマングローブ林に到達した。マングローブ林に達した時点での波高は、付近の家屋の破壊状況や樹木への傷などからみて 3-4m 程度の水深であったと見られる。*Rhizophora* の若木が点在していたと思われる林縁では、無数の若い支柱根が地表面すれすれの高さから、まるで大型の草刈ガマで削ぎ切られるように破壊されていたが、その延長距離はせいぜい 30 m 以下であった。林縁に殺到した波と浮遊物は、直径 10cm 内外の *Rhizophora* 林縁木を 2 ~ 3 列なぎ倒したものの、林そのものはほぼ無傷で保全された。従って林縁には夥しい浮遊物が累積することとなった。

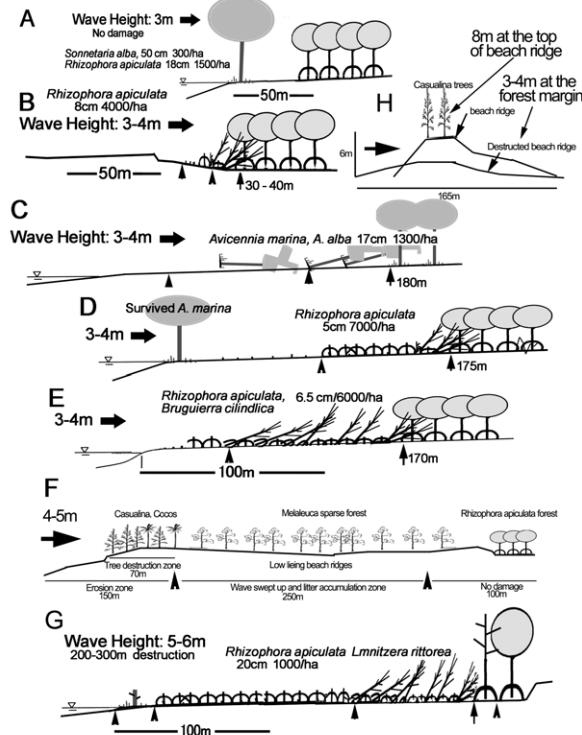


図4 タイ、アンダマン海沿岸各地における到達波高とマングローブ林破壊の関係

表1 タイ南部アンダマン海沿岸の調査地に見られる津波被害の概要

地名	波高	マングローブ林の規模		マングローブ林への影響	被害の程度	隣接する浜 高さ：幅
		主要構成種	最大樹高			
Ranong県 Hat Sai Kao村	3.0m	<i>Sonneratia alba</i> <i>Rhizophora apiculata</i> <i>Bruguiera parviflora</i>	20m	無し。	無し。	河口部デルタ
Ranong県 Kamphuan村	4.0m	<i>Rhizophora apiculata</i>	20m	森林前面の小さな木が1~2列倒木。1km陸側で3-4cmのシルトや粘土からなる津波堆積物が確認された。	マングローブ前面の浜堤上の集落や、マングローブ林を切り開いて造られた集落が破壊された。	2m 300m
Phanga県 Bang Sak村	7.0m	マングローブ伐採跡地	-	-	低い浜堤の背後のマングローブ林を伐採してきたエビ養殖池や建築物が破壊された。	1m 400m
Phanga県 Pakarang岬	7.1m	<i>Avicennia sp.</i> <i>Rhizophora apiculata</i> <i>Bruguiera sp.</i> <i>Excoecaria agallocha</i>	20m	河道に沿って中低木林がなぎ倒されるように破壊。 <i>R.apiculata</i> の大木は倒木しなかったが、立ち枯れの状態であった。	岬部分は大きく侵食されマングローブ前面のココナツ林、リゾート施設は大きく破壊された。	2m 200m
Phanga県 Khuek Khak村	7.2m	<i>Nypa fruticans</i> <i>Excoecaria agallocha</i>	-	<i>N.fruticans</i> , <i>E.agallocha</i> の森林が大きくなぎ倒される。最大20cm程度の砂質の津波堆積物が見られる。	浜堤上のリゾート施設などが破壊。	200m
Phanga県 Sala Khaو村	8.0m	<i>Rhizophora apiculata</i>	15m	前面の浜堤が大規模でマングローブ林には影響が及んでいない。	マングローブ前面の浜堤の長さは350mで大規模な砂州を形成しており、浜堤上の <i>Melaleuca</i> 林や <i>Coco, Casuarina</i> 林の破壊や、運搬された枯葉や木片が見られ	4m 450m
Phanga県 Nai Rai村	10.0m	<i>Avicennia sp.</i> <i>Aegiceras sp.</i> <i>Bruguiera parviflora</i> <i>Rhizophora apiculata</i>	10m	小規模な <i>R.apiculata</i> 林では瓦礫を林縁部でせき止めた、林内では10cm以下の津波堆積物が確認された。対照的に、 <i>Rhizophora</i> 以外のマングローブ種、 <i>Avicennia</i> などはなぎ倒されるように倒木し枯死した。	マングローブのない場所での地すべり性の破壊や浜堤の破堤、 <i>Casuarina</i> のがみられた。	6m 100m
Phuket島 Tha Chat Chai村	4.9m	<i>Rhizophora apiculata</i>	15m	前面の浜堤が大規模でマングローブ林には影響が及んでいない。	大きな被害無し。	200m
Phi Phi島	6.6m	<i>Rhizophora apiculata</i> <i>Bruguiera sp.</i>	20m	前面の幅200mほどの浜堤に立地するココナツ林や集落の流亡物質が背後のマングローブ林に押し寄せた。前面の孤立する <i>R.apiculata</i> は支柱根直上からせん断破壊されたが、それら瓦礫は <i>R.apiculata</i> 林の林縁部でせき止められた。	浜堤上のココナツ林と集落はほぼ壊滅した。	2.5m 200m

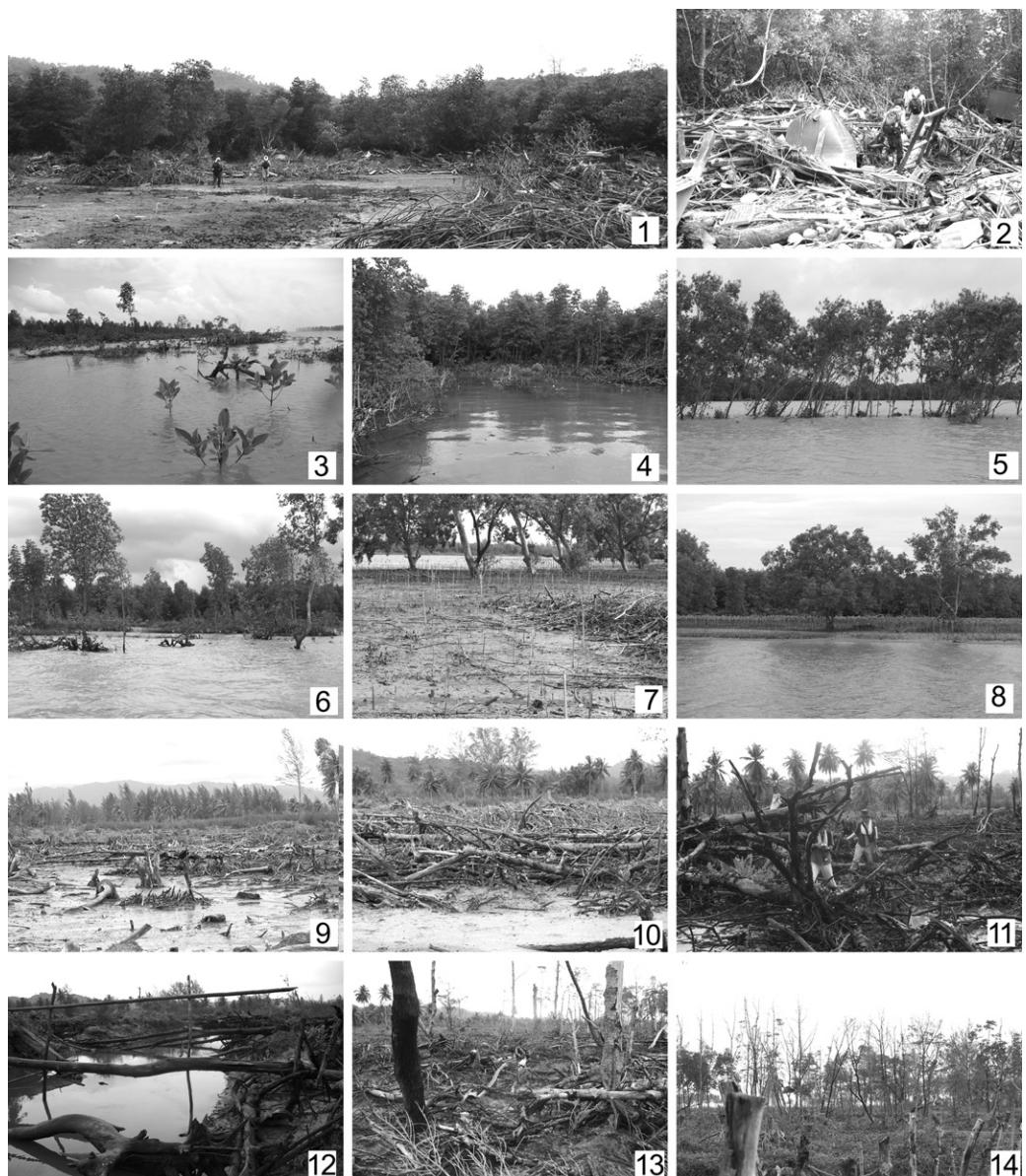


写真1 タイ国アンダマン海沿岸におけるマングローブ林の破壊状況

1: パンガ湾ピピ島におけるマングローブ林破壊は、林縁に大量のゴミが堆積したが林縁が僅かに破壊された。2: 同ピピ島のゴミの累積状況。3: ナムケム中州地区の鋸歯状の破壊域。4: 同その奥に向かった破壊状況。5: ナムケム砂干潟地区の *Avicennia* の破壊と傾動。6: ナムケム中州地区の鋸歯状の破壊域（図8,9の場所に相当）。7: ナムケム中州地区の林床が削ぎ切られるような状態。8: 若木のナムケム中州地区林縁に残存する *Avicennia*。9: カオラック地区における一面の曲げ折れの状態。10: 倒木が広がるカオラック地区。11: 同左。12: 水路に倒れこむマングローブ樹木。13: 同荒廃の状況。14: 破壊域の奥側では、次第に生存樹が目立ってくる。

沿岸にやや大規模な浜堤が連続するパンガ県バンナイライ（図 4F, 写真 4-4,5）では、沿岸浜堤頂部で最大 8m を越す波高（モクマオウの樹幹に、津波で薄く削られたと見られる色調の急変）が計測されたが、陸側の平坦な浜堤上を構成するメラルカ林の疎林（胸高直径 30cm 程度、樹木密度ヘクタール 300 本内外）は、ほぼ無傷で残存した。津波は、瞬間に 8m の段波となつたが、その後減衰し 4-5m 程度の水深でメラルカ林に達し、大量のゴミを巻き込んで 500m 程度侵入したと思われる。500m 地点は草原状の平坦地で、そこに大量の浮遊ゴミが残地されていた。マングローブ林は、更に 100 m 以上陸側のラグーンに見られたが、無傷であった。

カオラックでは、浜堤を乗り越えた越波によるマングローブ林破壊と小河川を遡上した場合のマングローブ林破壊で大きな相違があった。越波は、浜堤頂部で 7m 内外の波高を示し、リゾートの建物を大きく破壊したが、その背後のラグーンに立地していた *Avicennia*, *Bruguiera*, *Lumnitzera* などの直径 25cm 以上の成熟したマングローブ林では、4m 程度の波高を記録したものの、林縁の一部を破壊（林縁 1-2 列の破壊と林内の若木の破損）するに留まり、森林の大規模な破壊には至らなかった。

浜堤頂部で段波となった津波が、急勾配の陸側浜堤斜面を流れる際のインパクトで、浜堤が破壊されたり（図 4H），急激に波高を減じることによる上載加重の不均衡と高い浸透能が関与したと思われる流動性の地すべりが一部地域（バンサラカオ）に発生した（写真 4-1,2）。この破壊は、浜堤自体の破壊に直結すると共に、陸側に住居などがあった場合には、その大きな破壊に通じる（宮城他, 2006）。バンサラカオの場合、この崩壊土砂の流動もマングローブ域の林縁で停止していた。

地形断面の上に植生情報を重ねた調査結果を見る限り、マングローブ林域への到達波高（水深）と森林破壊の関係は、樹木の分布密度や直径とも関係すると見られた。すなわち、

波高が 3 m 以下あれば、直径 10cm 程度以上の森林（若木は一般に樹木密度が高い）であれば、林縁で大方の破壊を止め、陸側の森は保全される。4m に達する到達波高であっても成木からなる森であれば林縁が数列、林内の若木が破壊されるものの森林の陸側には破壊が及ばない。一方で、疎林であれば津波は深く侵入するものの、途中で破壊し巻き込んだゴミの量が少なく、これによる破壊は軽微に留まるようである。

4.3 ナムケム地区とカオラック地区におけるマングローブ林破壊状況の詳細調査

4.3.1 ナムケム地区

タイ南部のナムケム地区は、二つの島が外洋と入り江を境しており、広い入り江の中に大規模なマングローブ林が発達している。この森は、主として *Rhizophora* の再生林と見られるが、大半は胸高直径が 10cm 内外の若齢林で、近年までは薪炭材として大規模に伐採されてきた可能性がある。この地区は、ナムケムの集落が大規模な被害を蒙ったことで注目されているが、マングローブ林も多彩な破壊をこうむった場所である。そこで、その破壊実態を明らかにし、破壊過程と原因を分析することとした。実態の把握は、津波前後のイコノス画像やアスターなどの衛星画像の比較、現地調査などによった。また、取得データの管理と解析にあたっては GIS を用いて、出来る限りデジタル情報化することに勤めた。GIS の機能を活用することで、地図化が容易になり、面積測定や多彩な情報のオーバーレイなどが迅速に実行でき、結果としてマングローブ林の破壊実態の把握と解析に大いに役立った（図 6）。以下に主な結果を列挙する（写真 1-3～8）。津波エネルギーとマングローブ林の破壊に関する力学的な分析が Yanagisawa et al. 2007, 2008 によって解明されている。

ナムケム地区では、全域で約 0.33km² のマングローブ林が今回の津波で破壊されたと見積もられる。破壊はこの地区の全体に「均一に広がる」ものではなく、河川下流部の中州

Field Data Sheet of Mangrove-Tsunami Damage Research		Study area: Thailand Ranong	Date: 8, Aug. 06, April 07	T. MIYAGI, K. Hayashi, A. Saitoh, W. Meapol, S.Baba
Site: Ban Hat Sai Khao 1/1	Location: 8° 72' 04.4" N. 98° 23' 88.6" E	Study stage: Before (Damaged) After Damage Rehabilitation Other		
Location Map	Topographic map (1/200,000)	Site characteristics: ハッサイカオ村のマンゴロープ林は、タイ国で最も古い歴史を持つ最も多く残っている林である。駆来波浪2-3mでは、沿岸のソニテイア林林、リゾカラオの林とともに、ほぼ無被害であった。聞き取りでは、林内に多数の漂流物が流入・散乱したが、それらは地元民もマンゴロープ研究所の所員らによって拾捕された(つまり、毎日漂流物を拾うことはなかった)。 河口部の観察結果、大規模な高潮のようだった。船の被災はごく軽微、養殖いかだの流亡被災大、林内の津波痕跡、林内に津波が来たかと押寄せたので、木に觸つて見てきたが、津波の跡はない。 津波後2年経過時、林内のソニテイアに多数の枯死木が立った。虫害との説明があるが、林縁のもののが害である。推測だが、津波に衝突による細胞の破壊などの影響はないか。今後検証したい。	measured data	
google画像(2006年3月)	google画像(2006年3月) 調査断面	Landscape of the site and the surroundings Field conditions		
		写真的解説: (左)2006年3月時点、森を、樹高30m、DBH60cmを超えるRhizophora mucronata 上中: 森林の R. mucronata 無被災。左: 林床には確かに砂が堆積した。下中: 河川側の林床無被災。右: 中等潮位付近の森林外縁を採取した Sonneratia alba 蔓林(無被災)。林床津波堆積物: 何も表示1cm以内に枯れ木の跡が散在するのみ。		
		写真的解説: (左)2006年3月時点、森を、樹高30m、DBH60cmを超えるRhizophora mucronata 上中: 森林の R. mucronata 無被災。左: 林床には確かに砂が堆積した。下中: 河川側の林床無被災。右: 中等潮位付近の森林外縁を採取した Sonneratia alba 蔓林(無被災)。林床津波堆積物: 何も表示1cm以内に枯れ木の跡が散在するのみ。		

図5 ラノン県ハッサイカオ村の津波被害データシート

Field Data Sheet of Mangrove-Tsunami Damage Research		Study area: Thailand Ban Nam Khem	Date: 8, Aug. 06, April 07	T. MIYAGI, H. Yanagisawa, A. Saitoh, T. Charchai
Site: Ban Nam khem 1 1/1	Location: 8° 72' 04.4" N. 98° 23' 88.6" E	Study stage: Before (Damaged) After Damage Rehabilitation Other		
Location Map	Topographic map	Site characteristics: ナムケム地区は、外洋から大規模な堤岸で囲まれた入り江にリゾカラオを主体としたマンゴロープ林が立地する。河口部に堤防が設けられ、DBH15cm未満の木が立地する。林床には樹高15m、DBH30cm超えるアセサエが点々と生えている。この地区は、1990年代後半薪炭材の伐採が盛んに行われていた。林床堆積物は、粘土質の泥土が広い範囲を占めるが、一部では砂質堆積物が優勢な場所もある。 津波後2年経過時、津波地化した林床に、主としてリゾカラオの倒木が散見される。河口部では、堤防上に砂が堆積している。堤防上の不適合が一部にあるが、倒して生育は順調である。自然更新はリゾカラオ・シントリカヤコ・ルルなどのが立つものである。	measured data	
Image data (Before Tsunami) Aerial photograph	Image data (After Tsunami) google image	Landscape of the site and the surroundings Field conditions		
		写真的解説: 上: ナムケムの集落は壊滅的な破壊を蒙った。タイの津波被害者は、フランス人や、など外国人を主な客層としたリゾートが大きな被害を受けた。このため、ターキー、カリヨンの地域住民は大きな被害が生じた。下: ナムケム地区のマンゴロープ林は、林床は砂が堆積し、森の森であり、波高4-5mの津波で森林がなぎ倒されている。		

図6 ナムケム地区の概況把握津波被害調査データシート

とその対岸、河口近くの砂で構成された干潟の2カ所に集中する傾向がみられた。同時に、入り江内的一部には *Sonneratia* の流木が散見され、潮間帯中部の砂質地の浸食との関連を示唆した。

図7は、中州地区における津波前後の森林分布状況である。河川下流部にある中州と河川左岸では、潮間帶中等潮位付近のマンゴロープ林外縁部に *Avicennia* や *Sonneratia* の高木が散生する部分があり、その陸側

やや地盤高の高い場所に樹高 10 m 以下の *Rhizophora* がヤブ状に密生している。この場所でのマングローブ林破壊は、地盤高が中等潮位付近に位置する林縁部の高木林には殆ど発生せず、その陸側の地盤高がやや高い位置の *Rhizophora* 林に集中している。更にその破壊域の平面分布を詳しく見れば、言わば鋸歯状に破壊域を広げている（図 7- 右）。個々の鋸歯の破壊領域は、その中央部には必ず澪が見られ、その規模は澪の規模にはほぼ対応していた（図 8）。おそらく、津波の流れが澪の部分に集中し、周囲より激しい破壊を引き起こしたと考えられる。チャーターした船の船頭によれば、津波以前の澪筋は、満潮時に小船が何とか入り込める程度の狭いものであったが、津波による破壊で幅が広く地面も

削剥されたという。図 9 の地形図は、その典型例である。図 9, 10 は、図 27 の地形測量断面から推定した破壊域の侵食・堆積域分布図である。

鋸歯状の破壊域において、個々の樹木がどのように破壊されたかを見ると、図 4D, E のように、水路側から奥側に、破壊から停止に至る推移は、大径木疎林の生存、若木のせん断破壊、曲げ折れ破壊、傾動、漂流物の累積、破壊の停止と経過した（図 8）。この経過に要した距離は、中洲で最大 200m、左岸側で 170m であった。

ナムケム地区の河口付近には、未固結の砂で構成される干潟が中等潮位付近に広がっており、ここを便宜的に砂干潟地区と呼ぶ（図 10, 写真 1-6～8）。ここには樹高 10m 内外

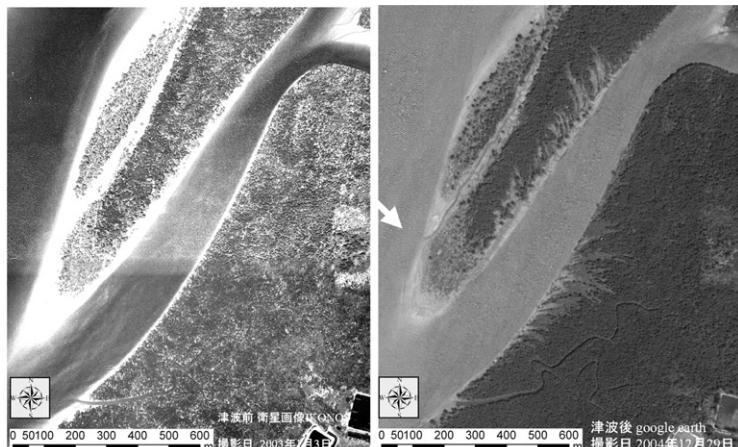


図 7 ナムケム、中州地区における詳細調査地点のイコノス画像
(左: 津波約 1 年前の画像、右: 津波後 3 日後の画像)

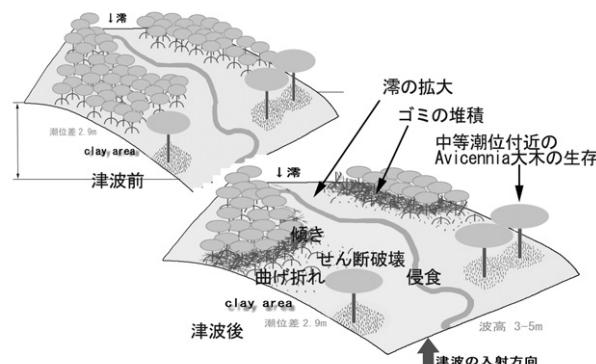


図 8 ナムケム、中州地区の鋸歯状破壊のパターン

の *Avicennia* や *Sonneratia* の林が広がっていたが、その海側縁辺部で広範な森林破壊と侵食が生じた。侵食が激しかった地点は先の中州地区と大きく異なる（図10右）。この箇所における破壊から停止に至る推移は、海側の林縁から帶状の圈構造を呈するように侵食流亡、抜根倒壊、傾動、流亡木の累積、破壊停止と経過した。この経過に要した距離は最大で170m程度である（図4C）。この地区の破壊は曲げ折れではなく、侵食流亡や傾動が主である。未固結の砂で構成される地盤の侵食

が、浅根性の樹木にとっては根が洗い出されることに直結したのではないか（図11）。

ナムケム地区の津波波高は、3～4m程度であった。カオラック地区と比較すれば決して大きくはない。このような場合でも、微地形によっては遡上波が集中する箇所で破壊が卓越し、砂質の地盤では広範な土壤侵食による浅根性樹木林の破壊が引き起こされた。

4.3.2 カオラック地区

パンガ県カオラック平野パカラーン岬付近の小河川河口部に発達するマングローブ林（図

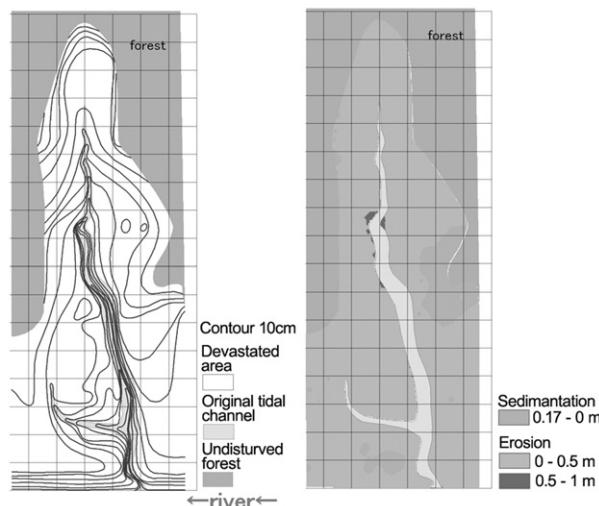


図9 ナムケム地区の中洲に形成された鋸歯状の破壊域における津波による侵食・堆積の状況

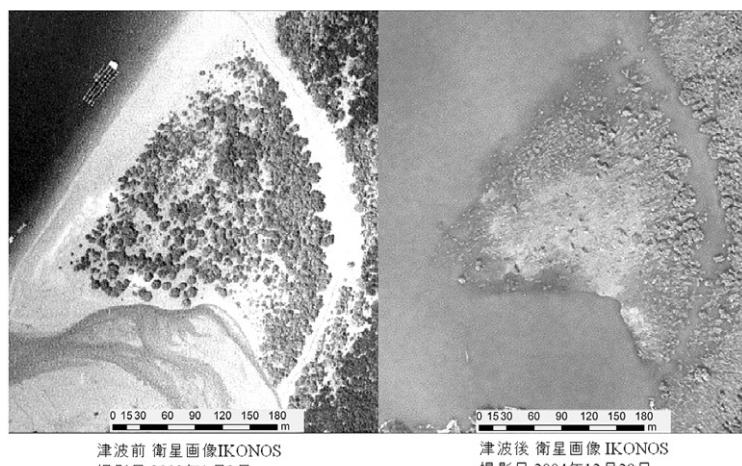


図10 ナムケム地区集落対岸の砂干潟のマングローブ林破壊状況
(イコノス画像左：津波以前、右：津波直後の画像)

12) は、タイ国内において最も激しいマングローブ林の破壊に曝された（写真 1-9～14）。この破壊状況を詳細に観察し、地形測量と津波の痕跡から波高を測定し、それぞれの地域においてマングローブ林の構成樹種、樹高・樹木密度の簡易測定、森林の分布と津波堆積物の観察などを行った。パカラーン岬付近ではナムケム地区同様に、イコノスデータによる津波前後の地形・植生変化の解析、植生被害の詳細調査、地盤高の詳細測定とともに津波浸入に関するシミュレーションを行い、津波破壊力に対するマングローブ林の応答を分析した（Yanagisawa et al. 2007）。

津波によるマングローブ生態系への影響：図

13 は、地盤高実測結果と 30mDEM とを滑らかに接続させた地盤高と植生情報の重ね合わせたものである。この図から明らかのように、ここでもマングローブ林の立地はこの地区における最高高潮位の領域までであり、地盤高と植生の帶状配列は調和的であった。図 14 は、現地調査に基づいて作成したマングローブ林の林相区分図である。図 15 は津波後のマングローブ林破壊状況であるが、小河川の河口部から水路に沿って侵食を伴う激しい破壊があり、その周囲に裸地化した部分、樹木の破壊域が広がる（図 4G）。図 16 は、土地の破壊状況である。沿岸の浜堤は、河口付近で大きく侵食されて消失した部分があり、河

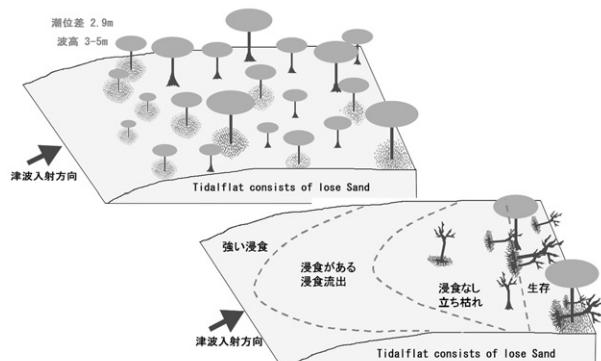


図 11 ナムケム地区集落対岸の砂質干潟に立地するマングローブ林の破壊状況（地盤高がやや低く、且つ砂質の未固結堆積物からなる干潟では、波高が 3-5m 程度だったにもかかわらず、水路側で 30～50cm の深さの侵食が広範に見られた。地盤の侵食に伴って、*Sonneratia* と *Avicennia* が広い範囲で倒壊、流亡した。流亡木は 200m 内外陸側に集積した。）



図 12 カオラック地区詳細調査対象域の津波襲来前イコノス画像



図13 カオラック地区の地盤高と植生分布（画像中央部に広がる濃い緑がマングローブ林域である。周辺にはココナツ林やエビ養殖池、海岸線の緑はモクマオウである。）



図14 カオラック地区マングローブ林林相区分図

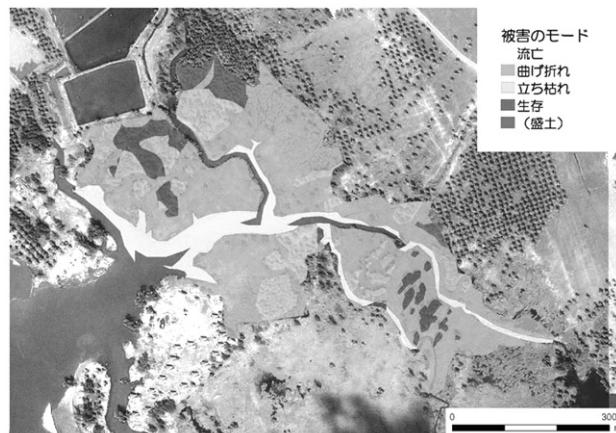


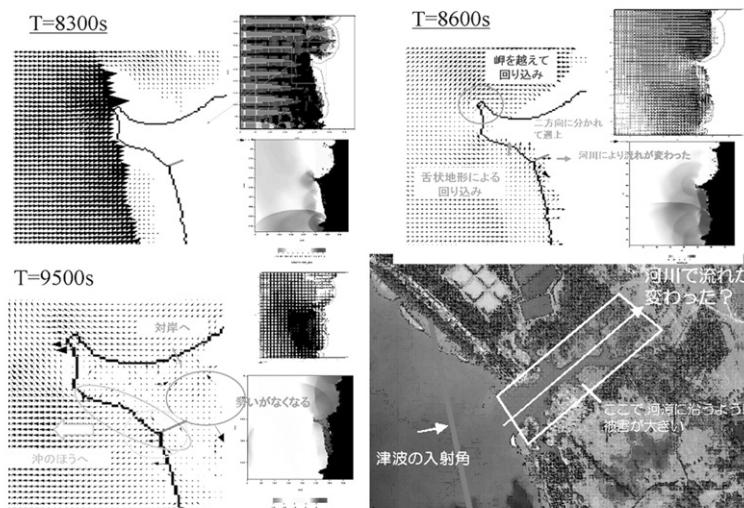
図15 カオラック地区津波後のマングローブ林破壊状況
(侵食域の周りに樹木の破壊域が広がる)

口両岸の土地が大きく侵食されて川幅が著しく拡大している。河川両岸には地表がむき出しになった部分が広がり、その周囲に立木が見られる領域がある。この調査区では、河口部を軸として帶状に、被害の程度が推移していることが良く理解できる。この破壊のパターンは、ナムケム地区の中州で確認されたものと類似している。津波の伝播の解析（図

17）では、カオラックに押し寄せた津波波小河川の河口部で入射角を変えている。津波の到達波高はカオラック周辺で 7-10m に達し、南北に減少する傾向が見られた。分析の対称となる津波をまともに被ったマングローブ林は主に浜堤背後の後背湿地に立地していたが、波高 2 ~ 3m 程度の津波ではほとんど影響を被らなかった。波高が 4 ~ 7m の地域で



図 16 カオラック地区津波による土地破壊の状況



Estimated tsunami action at cape Pakarang

(Calculated based on the 30mDEM and field measurement data)

図 17 津波シミュレーションに計算結果と破壊の集中状況（地震発生後、約 2 時間 20 分後に襲来した。津波伝播の計算は、大洋を伝播する津波の計算領域を最大 1800m グリッドから狭領域の 17.3m グリッドにサイズを変化させながら接続計算を行った（柳沢他, 2006）。河川河口部で津波の侵入方向が変わり、そこで破壊が集中している。）

は、*Avicennia*などの浅根性の種は根を掘り返されたように倒木し、*Rhizophora*であっても孤立するものや林縁、若木などは破壊された。一方でマングローブ湿地の前面の浜堤に植林された海岸林や人工建築物はほとんど破壊、流亡しこれがマングローブ林に押し寄せ、*Rhizophora*林の林縁でせき止められている例が多く確認された。浜堤上の疎らな植生は津波の波高減衰にはほとんど寄与しないとみられた。マングローブの、特に林床に支柱根をはりめぐらす*Rhizophora*は津波の被害軽減に大きく寄与した。また、マングローブ林の無い海岸や伐採して造成された土地などでは被害が大きく、返し波の破壊などが繰り返され破堤した場所もみられた。津波の衝撃に対してはバリアとして有効な*Rhizophora*林であるが、その後の水環境の変化による枯死や、津波による浸水と津波堆積物の堆積が海岸から1kmほど陸に入ったマングローブ林内に達した例があり、この水環境の変化が今後のマングローブ生態系に影響を与える可能性がある。

津波の破壊力とマングローブ林の被害：パカラン岬南の小河川河口部では、*Rhizophora*, *Bruguiera*, *Avicennia*などの森林が様々な程度の破壊を被った。すなわち、地盤高にして周囲よりも1.5m程度低い河口部で、津波入射角が変化し、この部分を中心軸として破壊力が大きく変化していると考えられた。この力の変化に相応するように、河口を中心として幅200mほどのゾーンで、*Rhizophora*の大径木林が支柱根の直上部からなぎ倒されるように折れ、若木は根元から倒壊し、その両側部では曲げ折れや高木の立ち枯れが発生し、さらにこの南側では生存した林分が見られるという一連の変化傾向が見いだされた。

5. インドネシア国バンダアチエが蒙ったマングローブ林域の破壊

5.1 概況と破壊前のマングローブ林

インドネシアのスマトラ島北端に位置するバンダアチエは、マラッカ海峡の西の玄関とし

て栄えた歴史ある都市である。この町が最大波高10mを超える巨大な津波に襲われた(写真2)。津波は、島の西側から町に回り込むように伝播したため、町の西側ほど波高が高く、東に低くなる傾向がある。津波襲来前後の衛星画像(図18)を用いてバンダアチエの土地利用概況とマングローブ林の実際を略述する。バンダアチエ一帯は、北東-南西方向に延びる海岸線でマラッカ海峡に面している。地域の西にある河川の河口などを除けば、海岸から内陸側に、浜堤、ラグーン、居住地、農村地帯と、海岸線にほぼ平行した土地利用が帶状形成されている。陸と海を境する浜堤の幅は、数十m程度から0.5km程度に大きく変化し、幅の広い場所は集落やココナツ林が広がっていた。浜堤の背後には大規模なラグーンが形成され、水域、養殖池、マングローブ林などが広がる。養殖池の間に小規模な集落や家屋の点在がある。養殖池は最も広い面積を占めるが、その大半は本来マングローブ林であったと見られる。ラグーンの陸側は集落に接している。バンダアチエ市の市街地の内陸側や河川沿いには農地や農村集落が広がる。図19から明らかなように、今回の津波は、浜堤を大きく破壊し、ラグーン内の養殖池やマングローブ林を破壊し、養殖池では広範囲な土砂の堆積を引き起こした。津波の週上は沿岸から4-5kmにおよび、3本の河川や放水路では7-8km上流まで到達した。集落は海岸から2-3km内陸から始まるが、沿岸から内陸までの随所に集落が点在していたため、津波襲来域で広範な人的被害が発生した。その死者・行方不明者数は7万人に達すると言われている。

この海岸におけるマングローブ林の大方は、エビ養殖池の畔や開発から免れた小規模な林分として散在するに過ぎない。それでも、調査地の東端部やさらにその東側に足を伸ばせば僅かながら多様な種からなる森を見ることが出来る。また、調査地の西側ではKrueng Lamteh付近から砂質堆積物からなる干潟にSonneratiaの巨木がマングローブ林の前縁を構成して列状の疎林を形成してい

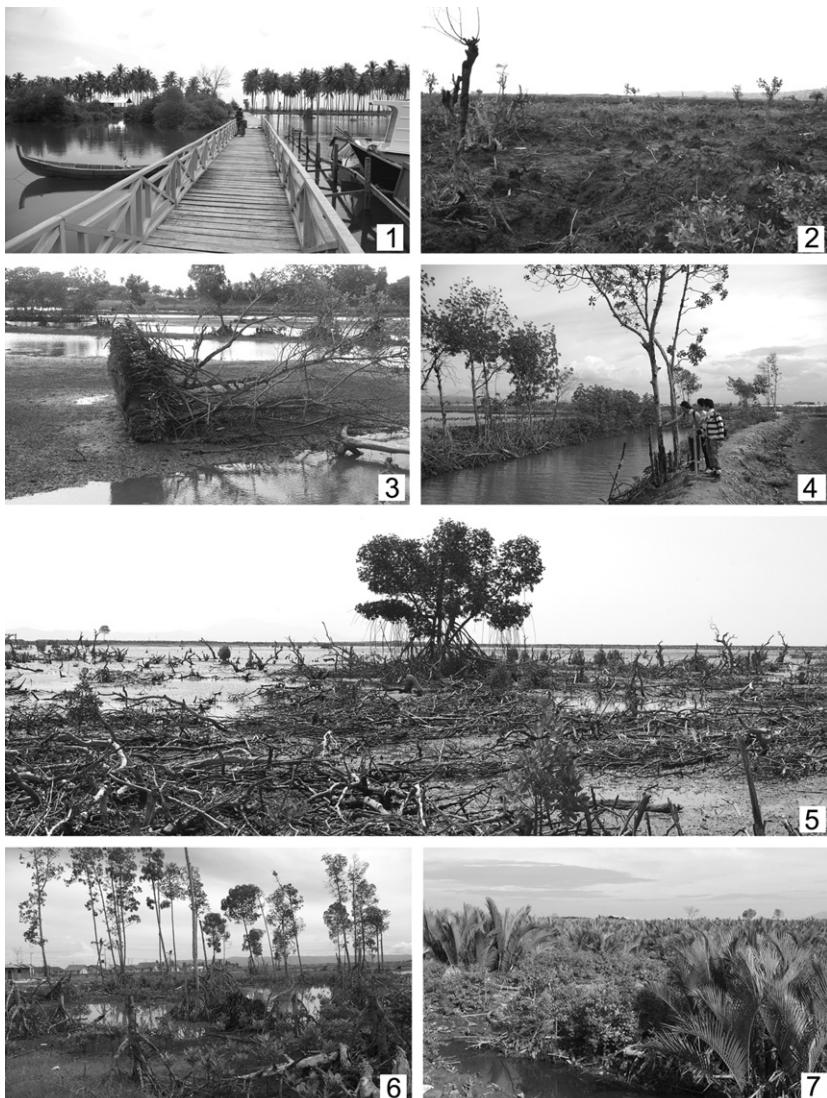


写真 2 バンダアチエ市沿岸におけるマングローブ林の破壊状況

1：バンダアチエの東 40km 付近の沿岸では、破壊は僅かであった。2：同東 30km 付近では *Avicennia* や *Lumnitzera* が広範に破壊されていた。3：同市東部に隣接する地では、胸高直径が 10cm 以下の *Rhizophora* が流亡していた。4：*Rhizophora* の破壊状況（図 20 の 1 地区）。5：*Rhizophora*, *Avicennia* 混交林が激烈な破壊に見舞われた（図 20 の 2 地区）。6: 同図 20 の 3 地区。7：強い破壊から免れたニッパ林。

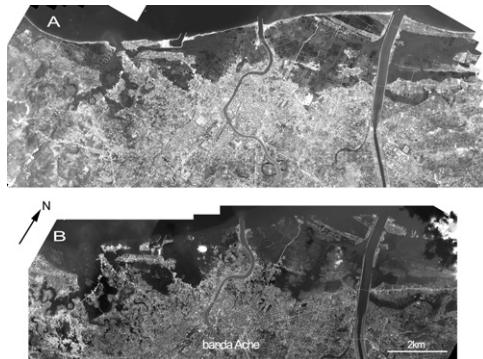


図 18 バンダアチエ市津波襲来前後のイコノス画像

る。散在するマングローブの林は、主として *Rhizophora* や *Bruguiera* で構成される。一部には *Avicennia* を交えた混交林や *Nypa* のやや大規模な植林地なども存在する。

現地をくまなく歩いて作成した、津波前後における植生と土地の変化状況を示すデータである。堆積物や残存木を確認すると、エビ養殖池が造成される以前のバンダアチエの調査区には、浜堤で海岸線を画されたラグーン、河川の河口部などに約 1500ha のマングローブ林があったと考えられる。しかし、その大半の森は、養殖池の開発や都市化などにより失われて、約 100ha 程度にまでに減少していた。津波の約 1 年前に撮影されたイコノスの画像から読み取れるマングローブの森は、南西側の入り江である Krueng Lamteh にやや大規模な残され、沿岸の随所に 10ha 前後の小規模な林が散在し、また養殖池の周囲は列状にマングローブが植栽されていた。これらの樹木はその殆どが *Rhizophora* である。インドネシアは、以前から養殖池を開発する際にマングローブの一部を切り残したり、植栽してエビの養殖を行うタンパックツンパンサリが奨励されていた。しかし、最近は水面面積を出せるだけ多くとるために木が切られ、養殖池のマングローブも僅かな規模に縮小していたと言われる。なお付言すれば、これらの樹木や林は全て原生林ではなく、長年にわたって抜き切りをされた林や、養殖池の開発とともに植林されたもので、言わば二次林や

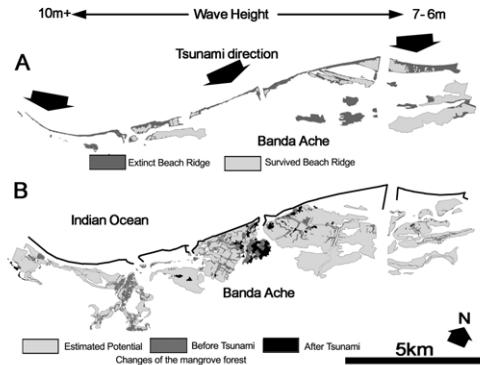


図 19 津波襲来前後におけるバンダアチエ市沿岸の地盤（特に浜堤）とマングローブ林の変化状況図

人工林である。図 18、19 の中央部に、津波襲来後も残存した大規模な森林が見られる。これはニッパの植林地で、津波襲来直後には枯死した状態にあったが、1 年以内に新葉が復活し、被害は殆ど生じなかった。ニッパは地上部には幹を展開しない、いわば葉のみのマングローブであることで、津波に破壊に柔軟な反応を示したのではないか。地域資源としてのニッパは、屋根材や食用など様々な用途に利用されるので、住民によって良く管理され、現在もその規模を維持している。

5.2 マングローブの破壊実態

津波によるマングローブ林とその立地地盤の破壊：津波襲来直後のイコノス画像、約半年後に撮影されたデジタル空中写真などの解析を行って、マングローブ林とその立地地盤の破壊状況を把握することができた。写真 2 と写真 3-6～11、写真 4 には、津波による森林破壊の様相と、大きく破壊された土地の例を示した。図 19 は、津波前後における地形と植生の変化状況を示したものである。この図と現地の写真を用いて、森林破壊と土地破壊の様相を以下に述べる。図 19 の上段に、津波前後のイコノスデータを比較して作成した津波による土地の侵食状況のデータを示した。この図から明らかなように、バンダアチエでは海岸線を形成していた浜堤がほぼ完全に侵食された。この浜堤には海岸林（ココナツ

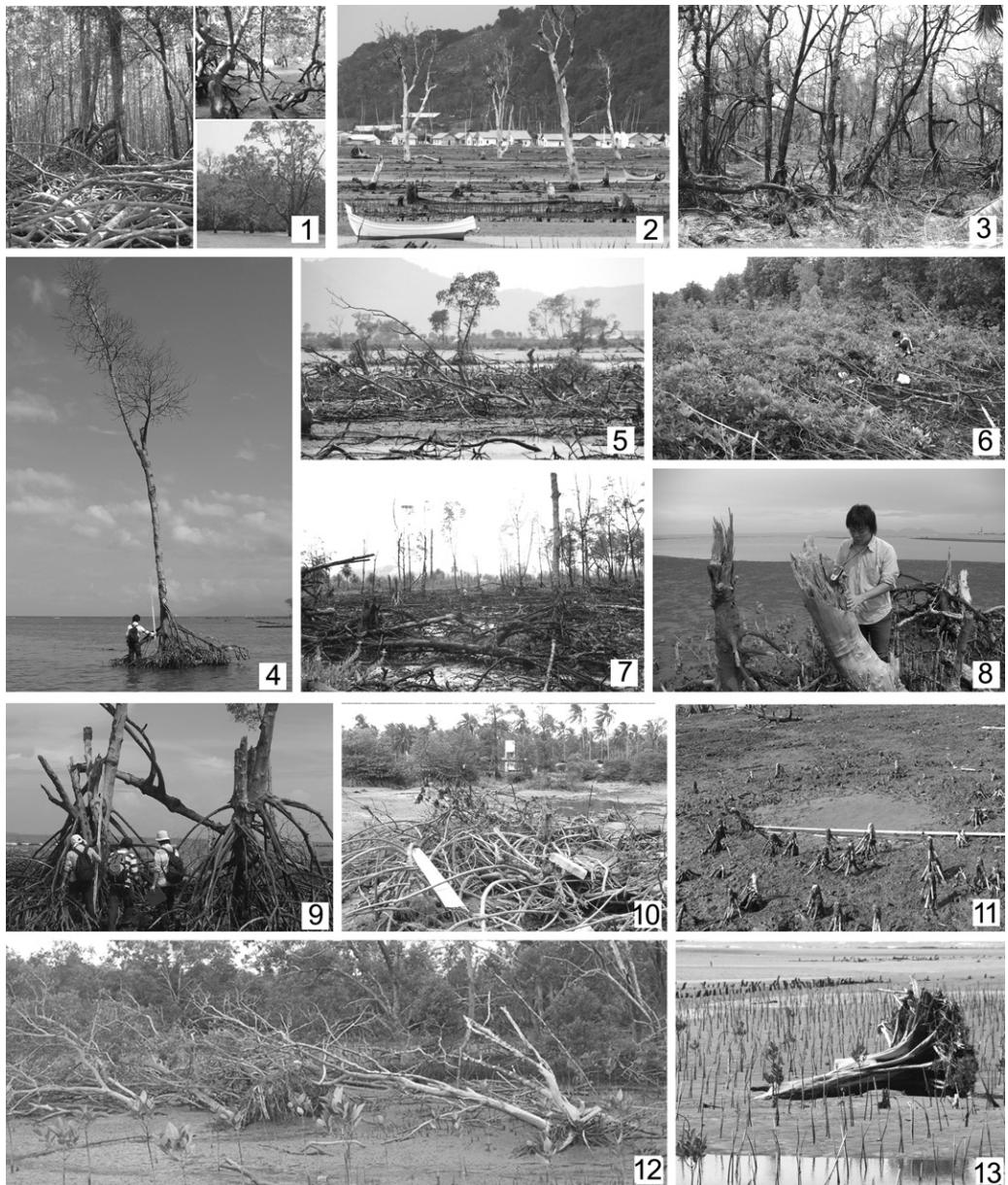


写真3 マングローブ樹木破壊の例 (図22に対応)

1:タイ国ラノン県の健全なマングローブ林。2:バンダアチェ市西側の枯死した *Sonneratia* 巨木。
3:カオラック地区の枯死林。4, 5:傾倒。6:若木の引っ張り・曲げ折れ。7, 8:成木の曲げ折れ。9: *Rhizophora* 成木の曲げ折れ。10:若い支柱根のせん断破壊。11: *Bruguiera* の抜根流亡。12: *Avicennia*, *Sonneratia* の流亡。13: *Bruguiera* の流木。

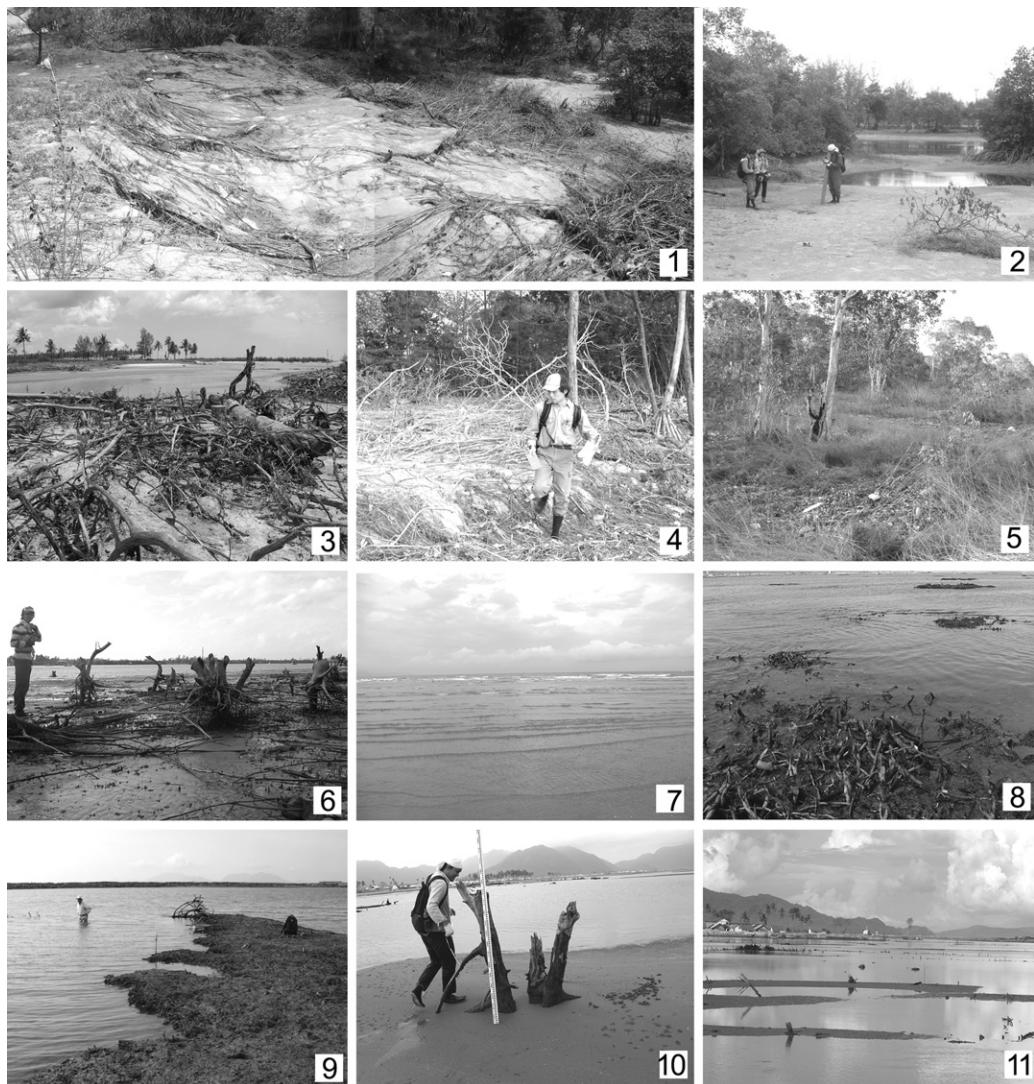


写真4 津波によるマングローブ林関連地形の破壊状況その1

1: タイ国ナイライ村の浸透性流動破壊による浜堤の地すべり。2: 同地区でみられた追堀。3: カオラック地区の河口部で生じた激しい浸食による川幅の拡大。4: ナイライ村の浜堤に見られる侵食性の小崖。5: ナイライ地区のメラルカ疎林に見られる津波が運搬したゴミの堆積。6: ナムケム砂干潟地区に見られる激しい浸食による根元の露出。7: バンダアチエの広範な侵食。8: バンダアチエ西部で見られた激しい侵食による地下部の根の露出。9: 同中部で見られた侵食。10: 同西部で見られた砂の堆積。11: 同中部におけるエビ養殖池の広範な土砂堆積。



1



2

写真 5 バンダアチエにおけるマングローブ林 林床地形の破壊

1：大規模な土砂の堆積。2：浜堤の破壊で生じる林床の侵食。

やカジュアリナなどの植栽木)があり、漁民の住居もあった。詳細に観察すると、マングローブ林の立地地盤も侵食され消失している箇所も散見される。一方で図の東部などでは広範囲に土砂の堆積がみられた場所もある。ここでマングローブ林の破壊状況を概括的にまとめると、バンダアチエ市の南西側から北東側に破壊が減少する。西側の入り江では津波前に残されていた森林がほぼ完全に破壊された。図20に示した詳細調査区の範囲外であるが、その北東2km地点では、マングローブ林の破壊は軽微となった。更に東方30~40kmでは、破壊は極めて軽微となった(写真2-1)。立地地盤の破壊もこれに準じるが、この土地の侵食が広範に発生したのは図の西側にある入り江から西側のみであった。一方で、侵食から免れた浜堤の残存域と堆積域の分布を示してある。これらの情報は、もともと、その土地がマングローブ林の立地に適した土地であったとしても、その後の地形変化で地盤高や堆積物、その固結度などが変化し、以前の状態に復すことの困難な場所や、却ってマングローブ植林に適した立地を形成した箇所などがモザイク上に再編成されたことを意味している。マングローブ生態系は、潮間帯の微妙な水位、土地、潮汐条件などに相応して成立する森林生態系であることを踏まえれば、こうした立地環境の再編は、植林を実施する際の様々な配慮条件となる筈である。

5.3 津波によるマングローブ樹(*Rhizophora*)の破壊:バンダアチエにおけるマングローブの破壊は、先に述べたタイ南西部での調査例の域をはるかに超える激烈なものと映った。この背景は、第一に津波の襲来波高が6m以上と極めて大規模であったことが挙げられる。しかし同時に、森林の分布自体が広範な養殖池の造成などによって自然の姿から作り変えられ、言わば小さなモザイクになり、または並木のような状態にまで小規模化していたこと。さらにまとまった森林は、沿岸付近に散在するだけという状況にあり、タイの各地で確認したような破壊状況の空間的

な推移を確認できるような森が、そもそも殆ど無かったことにもその原因を求められよう。

このような状況における破壊実態の把握は、地域を広範に踏査して、破損樹木を発見し、その破壊状態を逐一記録するということになった。これは、津波のエネルギーと樹木破壊との関係を理解するためには基本的な必要な調査である。しかし、マングローブ林の林縁における襲来波高と森林の破壊域との関係という最も端的な現場データの取得は難しいこととなった。

マングローブ樹木の破壊状況を計測した総数は約800本に上り、その箇所は調査地における津波後にマングローブが残存した箇所の殆どを網羅したと考えている。

図20、21は、調査地を東から西に、6つのブロックに分け、そのブロックにおける*Rhizophora*を対象として、曲げ折れ破壊木と生存木それぞれを胸高直径ごとに示したものである。これらのグラフからは、襲来した津波のエネルギーと破壊・非破壊の間には極めて明瞭な関係がみて取れる。すなわち、波高が6m内外の調査地東部1地区では、破壊非破壊の境界が10-15cm付近にあるが、波高が高い西側に移動するに連れてその境界が順次25cm内外に移行し、波高が10mを超える西端は計測対象樹木の全てが破壊を蒙っていた。

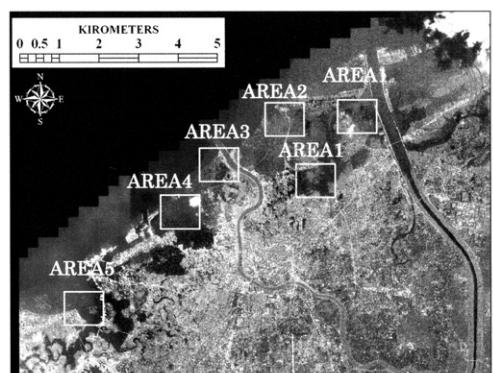


図20 バンダアチエと周辺における詳細樹木計測調査区

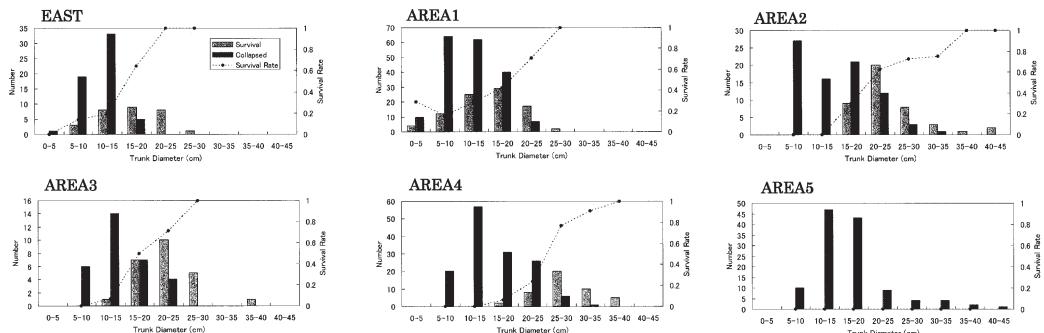


図21 バンダアチエ市沿岸の詳細調査区におけるマングローブ樹木の株元径と地域別生存率の関係

6. マングローブ樹の生態的特徴と津波による破壊モードの理解

6.1 現在の東南アジアにおけるマングローブ林域の地生態的特性

現在みられる多くの森林：マングローブは、熱帯・亜熱帯の海岸線を縁取るように発達する森林生態系である。世界各地の原生林の場合、森林の樹高は 30m に達するのが普通であるが、現在見られる東南アジアやインド洋沿岸のマングローブは、その殆どが薪炭材として利用された歴史を持つ 2 次林で、多くの森林の樹高は 20m 内外である。その立地位置は潮間帯の上半部（ほぼ平均海面のレベルから最高高潮位まで）にほぼ限定される。ここは、海と陸のまさに境界にあり津波や高潮など海からの影響を真っ先に蒙る場所にあたる。その土地は一般に極めて軟弱な未固結の堆積物で構成され、森林が成熟するとともにマングローブ自体の有機物と粘土など細粒物の堆積が促進されて極めて平坦な潮間帯湿地が形成される。

マングローブの樹木特性：マングローブ林は、軟弱な地盤、常に浸水するほどの高い地下水位、塩分などの陸上植物にとって厳しい環境下にあるため、何れも耐塩性を持ち、呼吸根や支柱根のような特異な生育形を呈する極めて浅根性の樹木からなる森林生態系を形成している。浅根性という点では、例え森の前縁を構成する種群 (*Sonneratia* sp. や *Avicennia* sp. など) は、多数の気根とケーブル根によって樹体を支えている。しかしその

根が土中に発達する深度は 20cm 程度までに過ぎない。すなわち、地表面が侵食に遭遇すれば即座にケーブル根が露出し、樹木は倒壊する。帶状配列の中心部を構成する種群でも *Bruguiera* も根の発達深度は極めて浅い。陸側に成立する *Heritiera* や *Xylocarpus* のように大規模な板根を作る種群などは、言わば「地表に根が乗っているだけ」という状態である。最も普通に見られ、植林木としても主力をなす *Rhizophora* は、他の樹種に比べて圧倒的に深根性であるが、その深度分布はせいぜい 60cm 程度である (Fujimoto et al., 2000)。このことは、本研究のように「津波によるマングローブの立地や樹木の破壊実態を明らかにする」という観点からは、「樹木が津波などの外力によってどう破壊されるか」という生物的な観点と同時に、「立地する土地が津波によってどう破壊されるか」という地学的観点の双方の視点が必要であることを意味する。樹木自体と津波営力との関係を、破壊非破壊という観点から検討する場合は、「津波破壊に樹木がどのような応答の様式で反応するか」という判断が必要になる。この点、*Rhizophora* のような深根性で支柱根が頑丈であり、現地の観察でも、支柱根の直上部からボッキリと折れるように破壊が生じる場合、その破壊は「樹体全体に力が働き、支柱根の直上部が支点となって破壊された」という判断が出来るようになる。一方で、樹木が根こそぎ倒壊した場合、その支点が根元にあるとしても、根自体が浅根性で地表面が侵食されれば、地耐力自体が劣化していることになる

ので、樹木の倒壊要因を津波エネルギーのみに求めることは出来ないことになる。

破壊実態把握の観点：インド洋沿岸の広域で津波に襲来したために、極めて多様な破壊実態を現場で検証する機会に恵まれた。マングローブ林と言えども、限定的な立地位置(潮間帯の上半部)、多様な植生・生活形(樹種・森林規模・樹木サイズなど)、微地形と堆積物(砂質・泥質など)の相違があり、これらの条件と津波のエネルギーとの関係が整理されて理解されることが必要である。

ここでは、原生林か植林地まで小規模ながらも多様な森林と津波の関係を観察できるタイ南部アンダマン海沿岸とスマトラ島北部のバンダアチエ一帯における調査結果をもとに破壊の実態を理解し類型化しよう。力学的な観点に立てば、究極的に、森林全体が破壊を蒙るのではなく、一本の樹木と水流圧力の関係に集約される。ただし、先に述べたようにマングローブ林の土地自体が侵食・破壊されれば浅根性のマングローブは容易に倒壊するから、土地の侵食特性の理解も必要不可欠であろう。

実態把握のための調査では、津波前後のIKONOS、ASTERなどの衛星画像、大縮尺空中写真の比較判読による破壊域、破壊状態の把握、DEMデータを基礎情報として用いつつも、必要に応じて地形測量を実施して地盤高・微地形・堆積物・植生・破壊状況に関する詳細な実態調査を行った。

樹木の破壊は、強い破壊から順に抜根流亡、侵食流亡、せん断破壊、曲げ折れ(折損)、倒壊、傾動、枯死、生存と類型化できる(図22、写真3)。このモードは、樹木の大小(あ

るいは直径の大小などサイズに関わる要素と津波の流体力に関わる要素で変化する。ここで、侵食流亡は地形と堆積物に依存する破壊過程である。枯死は津波被災以降の生物過程であるから、津波に対しては生存木と同様に扱った。また、抜根流亡とせん断破壊は樹木の最大直径を示す部位が失われているために、水流圧力の評価が困難である。

抜根流亡：樹木にとって最も強い水流圧力を蒙った際に、根が極めて浅根性であるために主幹が折れるのではなく、根こそぎ引き抜かれて流亡する破壊である。タイのカオラックやバンダアチエで、主に*Bruguiera*に現れた。波高5m内外以上の場所で出現している。

侵食流亡：主に津波の流速と水圧に起因する水底の侵食が契機となって根が露出し、水流で流亡する現象である。地盤の侵食特性に依存するため、干潟や河口部の未固結の砂で構成された場所では波高が3~4mから発生し始め、粘土質の土地では波高6~7mを超えると出現し、10mを越す場所では大規模に発生した。砂質の地盤は、多くの場合*Sonneratia*の立地になることが多い、この立地レベルが中等潮位付近という比較的低いことも相俟って、波高が数メートル程度の場合でも、各地で多数の侵食流亡と思われる*Sonneratia*が確認されることになった。波高が10mを越したバンダアチエでは、マングローブ林床の地盤が広範に侵食された。このような場所では相対的に深根性の*Rhizophora*であっても広い範囲で流亡が発生した。このような漂流木は周辺の樹木に大きな破壊力となり、森林破壊を拡大する要因に転化したと見られる。

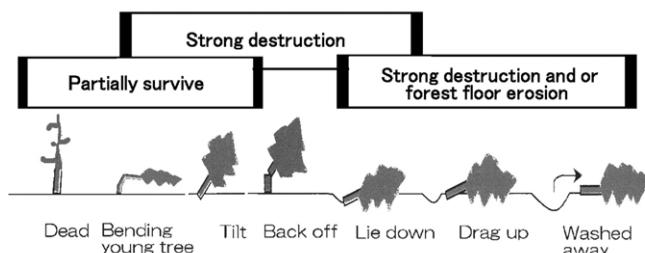


図22 樹木破壊モードの類型化

曲げ折れ破壊：主に水流圧力と樹木の主幹の曲げ折れ抵抗との力関係によって生じる破壊で、津波のエネルギーとマングローブ破壊の関係を最も端的に評価できる現象である。若木や *Bruguiera* などのような抜根が生じやすい樹種には余り見られない。一方で、*Rhizophora* は支柱根の上部で、*Sonneratia* や *Avicennia* などは水流圧力に相応した幹や枝で折れるという現象が普通に確認できる。

せん断破壊：主に *Rhizophora* の若木に認められる現象で、支柱根が地上すれすれで広範に切り取られる現象である。これは水流圧力や流速よりも流木やゴミなど浮遊物が介在する副次的な破壊である可能性が示唆される。

倒壊・傾動：水流圧力により樹木が折れるまでは至らないものの、水流圧力に未固結地盤や根の緩みなどが介在して樹木が倒壊に至る破壊。

枯死：津波襲来直後には生存していた樹木が、数ヶ月後から数年後に枯死する例が多数観察される。この要因は今のところ分からぬ。バンダアチエ調査地の西端部では、中等潮位付近に立地する *Sonneratia* の大径木が全て枯死し、ラノン県バンハッサイカオにおいても、同様に中等潮位付近の林縁を構成する *Sonneratia* が津波襲来後 1-2 年で一斉に枯死している。*Sonneratia* の場合、気根もケーブル根も一般に堅固であるが、水流圧力などが強く働いた場合、堅固な気根部分と脆弱な細根との断裂などが生じ、結果として樹勢の弱体化が進行し、津波後やや時を経て枯死にいたる可能性が指摘できる。枯死木の大量発生は、森林の病虫害発生にもつながる可能性がある。

7. バンダアチエの津波実態と数値解析

7.1 津波波高とマングローブの破壊・生存限界

マングローブ林内を越上した津波の詳細な状況を把握するために、現地調査と数値計算を行い、バンダアチエ一帯の津波流動状況とその規模について解析を行った。バンダア

チエ一帯の津波過上の実態は、Borrero(2005) が速報を出しておおり、筆者らの現地調査とともに、このデータも参照している。

震源域で発生し、大洋を伝播しマングローブ林域を越上した津波の数値解析は、計算領域を広領域（最大 1800 m グリッド）から狭領域（最小 17 m グリッド）へとグリッドサイズを変化させながら接続計算を行った。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、狭領域における越上計算には非線形長波方程式を利用した。バンダアチエ一帯の水深データは、1/50,000 スケールの海図をデジタル化したものを用いた。断層パラメータは越村（2005）を参考にした。また、底面粗度は小谷（2002）に倣って、土地利用に応じた粗度係数を与えた。本研究の対象となるマングローブは、*Rhizophora* の樹木形状を考慮した等価粗度係数を用いた。なお、ここでは津波後生存した樹木のみの形状抵抗を考慮し、倒木や漂流物の影響は無視した。

バンダアチエで調査したマングローブ林で、津波後も生存していた樹種の殆どは *Rhizophora* である（ニッパヤシを除く）。従ってマングローブ林を構成する樹木の形状を *Rhizophora* で代表させることとした。*Rhizophora* の形状は、樹高、株基径、下枝高で樹形を決定し、合わせて支柱根部分の形状は三角形に近似し、支柱根高、支柱根張り、支柱根数を考慮した形状抵抗を決定した。

図 23, 24, 25 に示すような津波浸水深、津波流速および水流圧力が算出された。この内、図 23 の津波浸水深は、一般に到達波高に相当するもので、津波の現地調査結果に対応するかどうかを検証することが可能な指標である。津波波高は、全体として西側が高く東側が弱くなる傾向がある。同時に、タイのカオラック地区でシミュレーションを行った場合に指摘された「臨海部における津波入射角は、小さな河口部であってもそれに影響を受けて屈曲しそこに集中する傾向が明瞭」という結果と調和的に、図の西側にある河川の河口部（Krueng Lamteh）で極めて高く 10 m を越す値となる。また、図の中央やや右手で

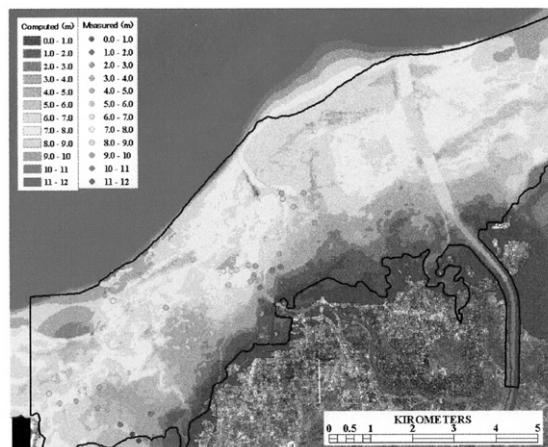


図23 バンダアチェと周辺における2004年インド洋大津波の浸水深(m)

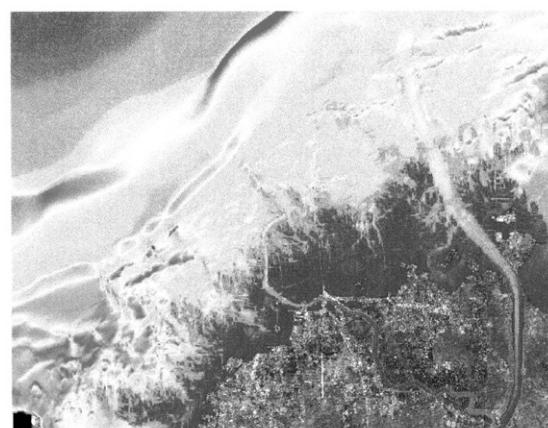


図24 バンダアチェと周辺における2004年インド洋大津波の最大流速(m/s)



図25 バンダアチェと周辺における2004年インド洋大津波の水流圧力(N/m)

浸水深が大きくなるが、これは沿岸の浅海底に微高地があるために波が回折した結果、ここに集中する傾向を示したと考えられる。

このシミュレーション結果は、沿岸の浜堤上における波高実測結果などが一部でさらに大きな値を示す点を除けば、海岸低地部で他の研究者ら、例えば Borrero (2005), 越村 (2005) などの結果に極めて調和的であった。によって実測された波高の分布と調和的である。図 24 は、津波流速のシミュレーション結果である。一般に土地の侵食と堆積は、その地点における流速に支配されると考えられるため、この結果は、図 19 のような津波による地形状況の変化に対応すると考えられる。この結果からは、流速が毎秒 5m を越すような箇所では、砂質の堆積物からなる浜堤などはほぼ流亡することが理解できる。図 25 は、水流圧力の再計算結果である。津波は、北西から襲来し、浅海底の微地形の影響を受けて変形し、海岸からマングローブ林域を越えて 4 ~ 6km 内陸にまで到達した。特に図の西側 Krueng Lamteh 入り江で強く、図の中央部から東に減衰し、さらに東側では浅海底の地形効果で再び強まった。

以上のように、津波によるマングローブ林域の土地の破壊とマングローブ樹の破壊状況は、かなり実際を表現しうる程度に再現されたと考えている。

図 26 はマングローブの株元径測定地点における最大水流圧力の計算値とその対称木株元直径、さらにその樹は生存していたか折

れていたかの結果をグラフ化したものである。この結果から理解できるように、株元直徑（支柱根の直上部）が 30cm を越すような、推定樹齢が 30 ~ 40 年程度の *Rhizophora* は、180kN/m 程度のかなりの強い津波の襲来にも耐えうることが理解された。このことは、バンダアチエ市における入り江の一部を除けば、沿岸域の数百メートル内陸側では十分に津波に抵抗しうる森林としてマングローブ林が機能することを示すものである。

現在我々は、現地計測データ化された、バンダアチエ市における成熟したマングローブ林の樹木データを基礎にして、そのような森が、もし図 19 に示したような、エビ養殖池が開発される前の状態（自然状態の分布域）に発達していたのなら、被害はどの程度軽減されたのかに関する計算を実行している。これによって、マングローブ林の実際の減災効果が初めて力学的に実証されるのではないかと考えている。典型的なマングローブ環境に変化が生じた地域に激烈な災害が発生したことは、極めて悲劇的ではあるが、その悲惨な体験の実態とメカニズムを解明することは、マングローブ林の破壊が進んでいる大方の地域に注意を喚起するとともに、植林の意義を再評価する契機となる。

7.2 津波の波高とマングローブ林の防災効果

津波のマングローブ林への影響は、マングローブ林が於かれている地形的位置、波

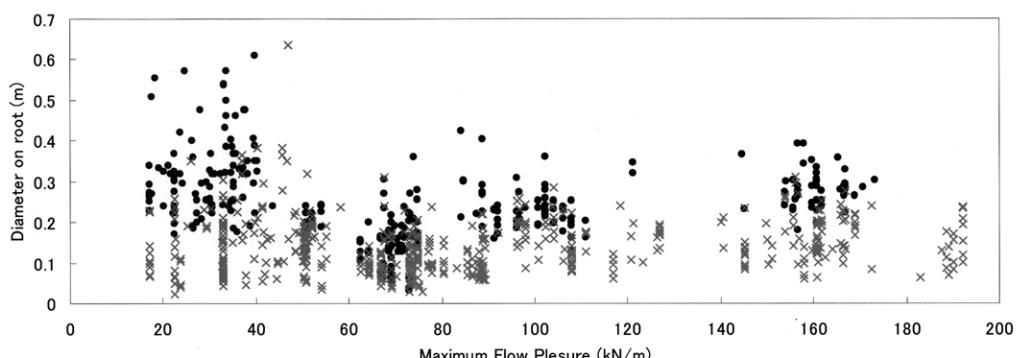


図 26 バンダアチエとカオラックにおける *Rhizophora* の破壊限界

高、森林の構成種、森林規模、樹木のサイズなど多様な要因で異なると予想された。しかし今回の調査では、津波とマングローブ林の破壊との間に極めて明瞭な傾向が見いだせたように思われる。「津波の影響」を外力として捉える際、その波高はマングローブ林の林縁における高さで把握することが現実的である。ここではその波高を林縁到達波高（水深）と表現した。この波高が2-3m程度であれば、例え直径が10cm程度のマングローブ林であっても、森林が広範に破壊されることはほとんど無いと行ってよい。ミャンマーで調査中に津波に遭遇し、*Rhizophora*に掴まって難を逃れた（Mon Mon Than 氏談 2008）と言うように孤立木であってもその意味ある。

到達波高（水深）が3-4mに達する場合は、微地形や地盤条件との関係で森林の破壊程度に大きなバラツキが生じた。ここの条件として最も脆弱と考えられる、若木の森林で、津波圧力が集中するような、もしくは地盤条件としてより脆弱な場所であっても、破壊領域は林縁から最大170m程度までに止まった。胸高直径が10cmを越す程度以上の成木の森林であれば、この破壊域は林縁の数列に限定された。

到達波高（水深）が4-5mに達する場合は、*Avicennia*, *Bruguiera*, *Aegiceras*などの森林は根こそぎ破壊され、孤立したリゾフォラの若木も流れてきた瓦礫などによって、支柱根がまるで巨大な草刈機で削ぎ取られるように破壊された。ただし、このような場合でも、リゾフォラの森林は、その林縁部で多少の破壊が生じるもの、森林深部までの破壊は認められなかった。津波によって襲來した土砂と瓦礫はリゾフォラ林の縁辺を激しく破壊し、そこで堰き止められて内部への拡散はごく小規模なもので止まった。この結果、成木からなる森林であれば、その幅が30m程度の森であっても、今回の津波の破壊から免れることとなつた。

到達波高が4-6mに達する場合、成木の*Rhizophora*林であっても、広範な破壊に見舞われた。この場合、森林の破壊域は数百メー

トルに達したが、この原因には津波の水流圧力のみならず、この水深に伴って生じる林縁地盤の侵食が抜根流亡や侵食流亡の破壊を随伴し、大量の漂流木発生を生み、それが流木となって周辺の樹木に対して大きな破壊圧力として作用することが推測された。

到達波高が6mを越すような場合は、マングローブの破壊が広く発生すると共に、地盤自体の侵食が大きくなり、津波による森林の破壊域は一気に拡大すると考えられる。バンダアチエの観察では、実際の森林破壊の領域限界を観察することは出来なかった。巨大津波によるマングローブ林破壊の限界を把握するには、さらにデータを蓄積することが必要である。

8. 津波後の森林修復

8.1 植林とその効果および実生の分布

津波襲来以前から、タイ・インドネシア両国共に、近年は活発な植林が各地で実施されている。津波によって破壊されたマングローブ林の修復においても各地で植林活動が推進されている。ここでは、活発なその実際を観察し、植林の進捗に関する評価を試みたい。

8.2 ナムケム地区の観察例：タイのナムケム地区では、津波の直後から国家電力庁や様々なボランティア機関などによって、植林が実施されている（写真6）。植林樹種は、*Rhizophora mucronata*, *R. apiculata*などである。この成果について、植林直後の2006年5月に観察を開始し、約1年経過した2007年5月と2007年12月に成長や流失率などの計測を行った。ナムケムの中洲で、津波による破壊をこうむった濬筋の一つに、*Rhizophora mucronata*の植林が実施されている。調査は、津波で破壊されたエリアの最奥部から水路に向かって測線を設け、10mスパンで5mグリッドを設け、そこに生存した苗の数（50cmグリッドの植え付けで1調査区あたりの初期植え付け数は80本程度と見積もられる）、グリッド内の苗成長量を10本～20本程度計測してその平均値を代表値とした。それぞれの

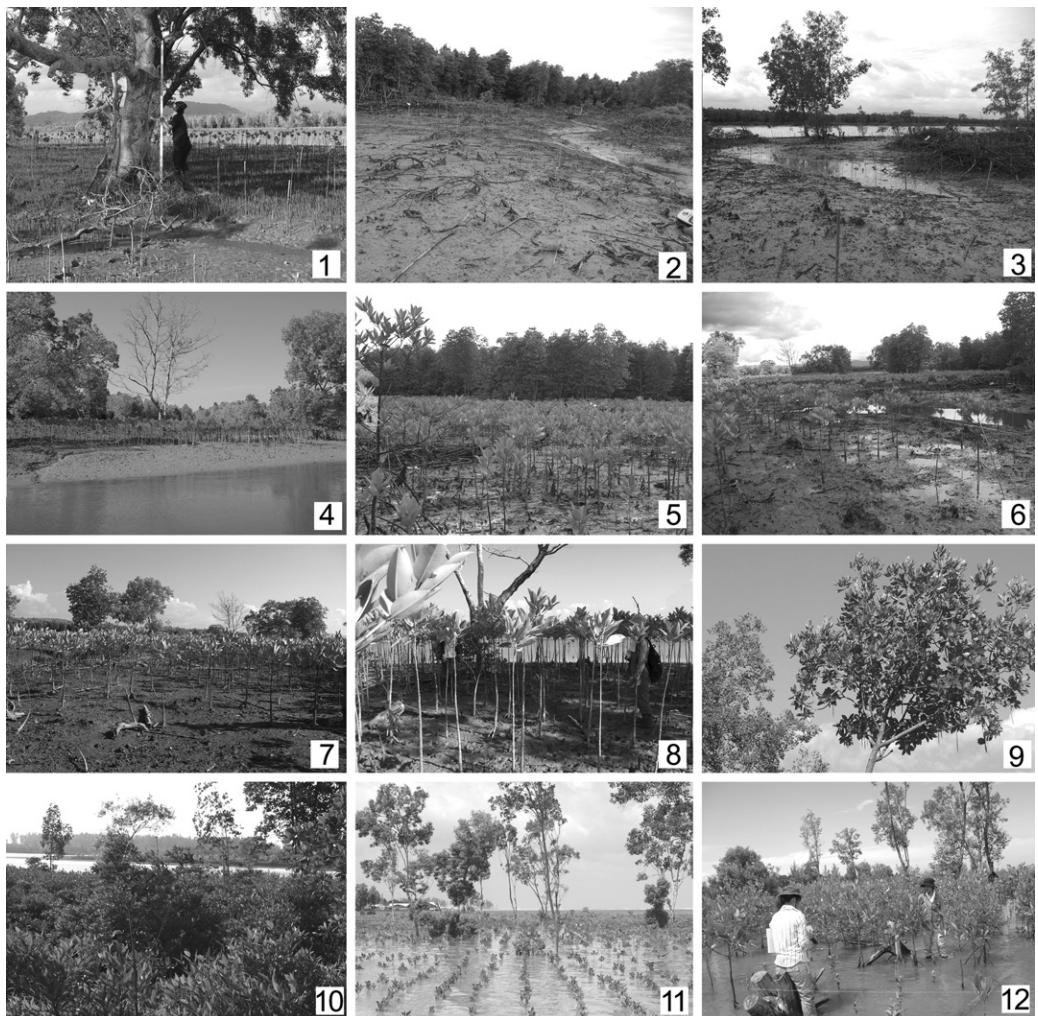


写真 6 ナムケム地区の植林成績 (図 27,28 と対応)

1,2,3 : 2006 年 5 月時点。ナムケム、中州地区の植林は、津波で植生が剥ぎ取られた場所 (1 の手前の裸地の潮間帯上部と 2,3) と河川沿いの緩斜面 (1 大木の向うの水路沿いの潮間帯中部から下部) に施された。剥ぎ取られた場所では竹棒の箇所に胎生種子を植栽した直後でまだ芽生えていない。4,5,6 : 2007 年 5 月時点。4 水路側からの撮影。中央の枯死木周囲で成長を開始しているが、水路側では成長が悪い。5,6 では植林木の成長に大きな差がある。7,8,9 : 2007 年 12 月時点。潮間帯中部付近で成長が良好。水路側の斜面では植林木が消滅。9 の *Rhizophora* に種子が付いている。10 : 中州対岸の自然再生の状況 (*Rhizophora* の植林と *Bruguiera cylindrica*, *Ceriops tagal* の実生が多数発生して、ヤブ状になっている)。11,12 : 2007 年 12 月時点。ナムケム砂干潟地区の植林。生存率、成長ともに良好な状態。

成績は地盤高と極めてよい関係がありそうである（図 27）。地盤高がやや高い場所では、残存率・成長量ともに悪いが、それより地盤高が 50cm 程度低い場所では生存率・成長量ともに良好である。ちなみに、当初の植え付け後、しばらくして成長量を判断し、生育が良好な場所には補植を行ったようである。成長量の計測は、その補植苗の成長量も合わせて計測しているので、2 時期間の成長差 20 ~ 40cm は、最初の植林苗の成長量よりも低めの値となる。なお、2006 年の最初の現地調査時点では、この測線の右側水路沿いの斜面にも植林されていた。それらはほぼ 100% 流亡または枯死した。計測地の周囲には *R. apiculata* 林が広がり、*R. mucronata* も數本茂っている。しかしこれらの樹木から計測地への種子の流入は殆ど確認されない。また、断面の水路側にある高まりには *A. marina* の大径木が散在している。この樹の直下には数十本の *A. marina* 実生が認められる。しかし、これも津波後数年を経ても順調に成長している様子は認められない。

Avicennia や *Sonneratiana* 若齢林が広範な破壊を蒙った砂干潟地区における植林の結果を図 28 に示した。ここでは、*R. mucronata* と *R. apiculata* が植栽されたが、両者の生存状況には、地盤高との間に明瞭な対応の違いが見出された。すなわち、*R. mucronata* は、*R. apiculata* と比較して僅かに地盤高の高い立地で残存率が高い。ただし、双方の成長量に大きな違いはない。この断面上や、断面よりも更に陸側の *Avicennia* 林には、多数の実生が育っている。図 28 のヒストグラム下段は、*A. officinalis* の実生を年齢ごとに集計したものである。この図から明らかなように、津波直後から順調に実生の定着と成長が継続しており、その範囲は順次地盤高がやや低い場所へも拡大する傾向が見て取れる。

もう一つの観察箇所である中州左岸では、*R. mucronata* の成長は他の地域と大差なかったが、倒壊破壊を蒙った場所では *Ceriops* や *B. cylindrica* の実生が多数観察された。

8.3 カオラックの実生苗調査：カオラック

クにおいて、植林は実施されていない。筆者らは津波襲来後の 2005 年 2 月、2006 年 5 月、2007 年 4 月の 3 期にわたって現地の観察を行ったが、*R. apiculata*, *B. gymnorhiza* とともに実生の発生は殆ど確認されなかった。

8.4 バンダアチエの植林とその評価：インドネシア国スマトラ島北端に位置するバンダアチエ市は、2004 年に発生したインド洋大津波によって甚大な被害が生じた。この直後インド洋沿岸の各地で、「マングローブ林の存在が沿岸の集落の被害を軽減させたのではないか」という指摘が相次ぎ、津波防災林としてのマングローブ林の機能が注目されることとなった。実際、現地調査の結果では、マングローブの植林がまさにブームといった感で実施されている状況に出会った。調査は、2006 年 12 月と 2008 年 8 月の 2 期に実施した。その概要は、写真 7, 図 29 に示した。

種苗の取得・生産と植え付けの概況は、以下にまとめられる。マングローブ植林樹種は、*R. mucronata* が最も一般的に用いられ、ほかに *R. apiculata* や *Ceriops tagal* も一部地域で用いられていた。これに対して *Bruguiera* やその他の樹種は殆ど用いられていなかつた。タイのナムケム地区でも、ほぼ同じように、これら 3 種の植林が実施されている。両地域とともに、*R. mucronata* が植林面積の 7 ~ 8 割を占めているのではないかと思われるほど、他の樹種に遭遇しない。バンダアチエ一帯では、津波の破壊から免れたマングローブ林においても *R. mucronata* が最も普通に見られる。この種の種苗の供給は、少量であれば年間を通して可能であるが、今回のような爆発的とも言える植林では、苗の供給は計画的に行われなければならず、同時に一旦取得した胎生種子を育苗床で養生して移植時期まで保持する必要がある。筆者らが現地を訪れた際は、種を付ける時期に相当しており、時折胎生種子を満載したトラックを見かけた。搬送された胎生種子は、竹を裂いて作った長さ 1m のガイドとなる棒とともに植えつけられる。このような植え付けが時間や労働力確保の点で出来ない場合は、100 本程度を束ね

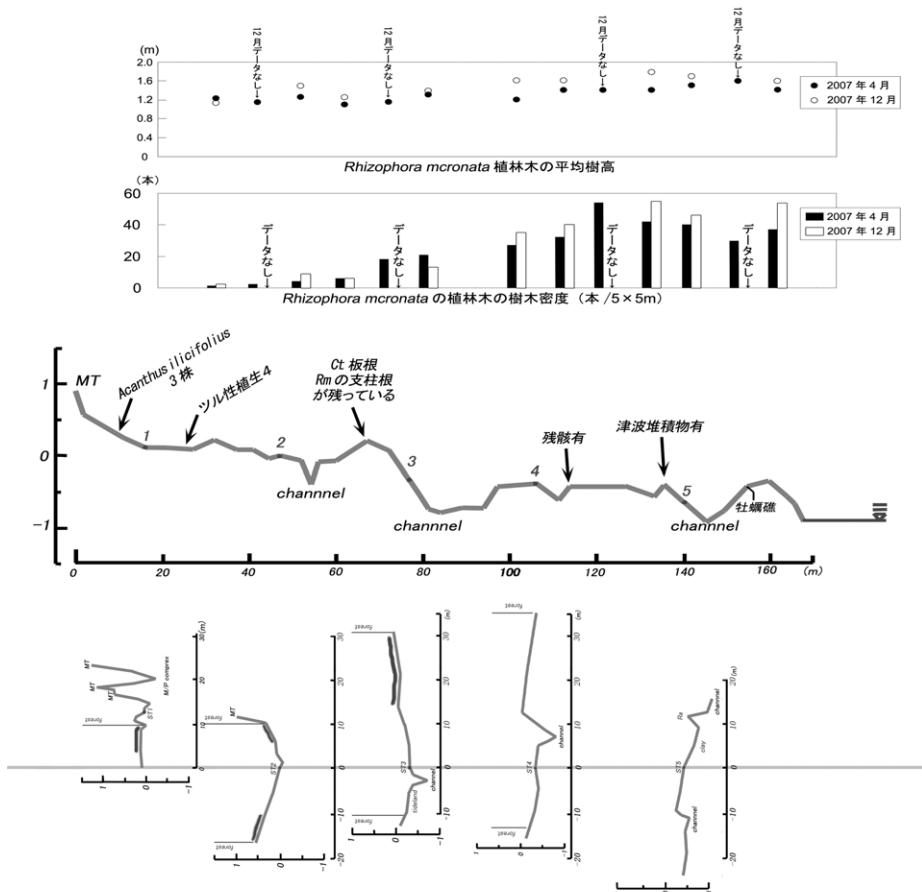


図 27 タイ, ナムケム中州地区の植林成績

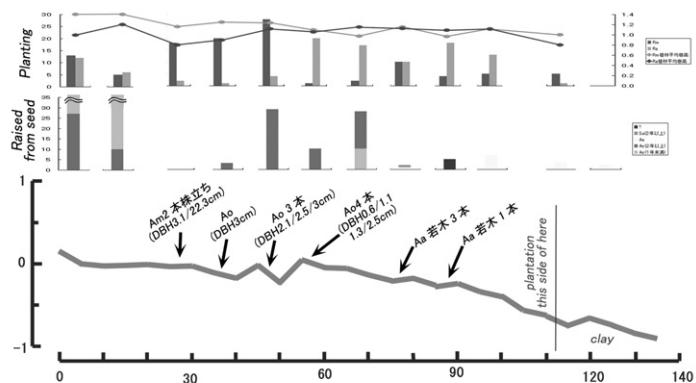


図 28 タイ, ナムケム砂干潟地区に植林成績

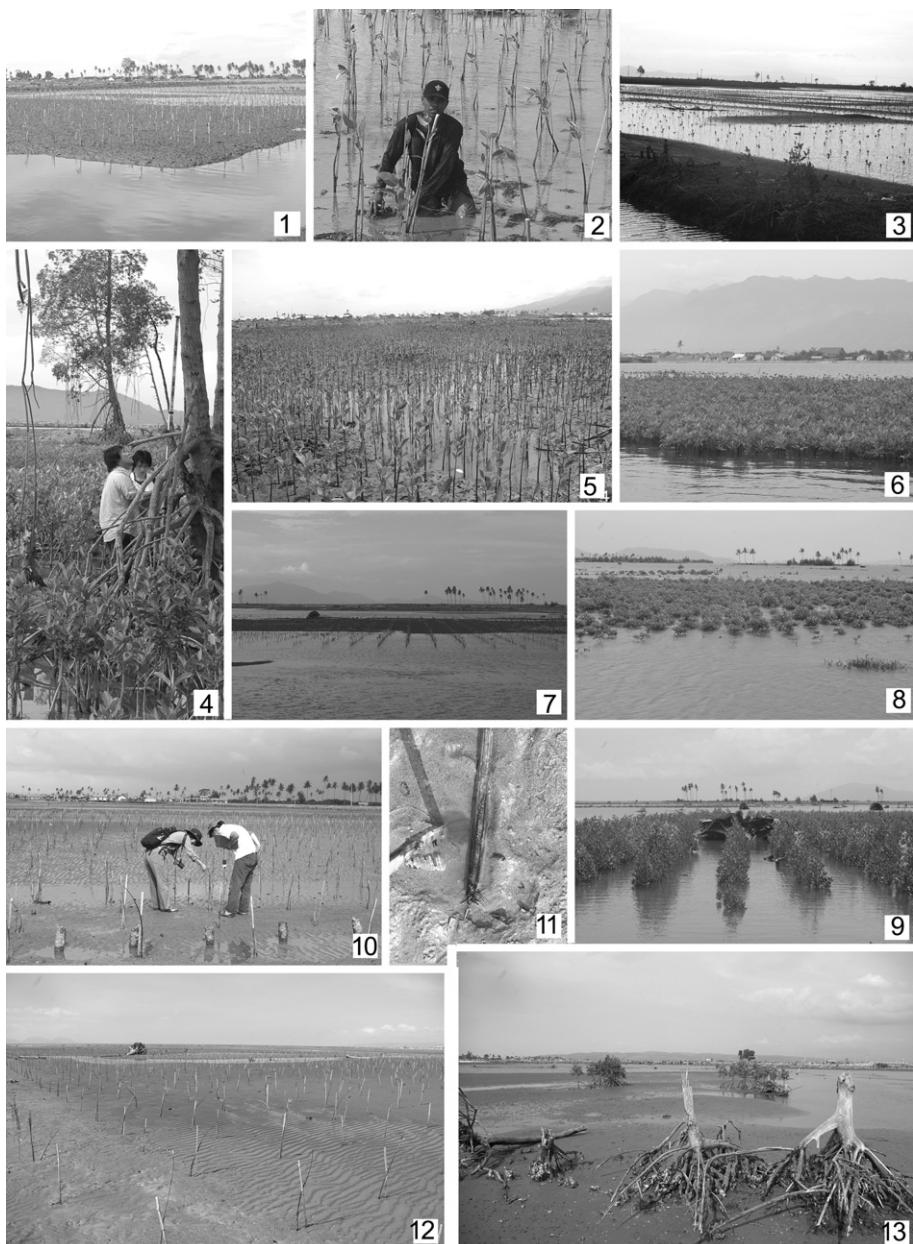


写真7 パンダニアチェ市における植林成績（図29と対応）

1,2,3：調査地中部域。1,2は2006年12月の植栽中の状況 (*R. mucronata* は、葉が3-4枚展開), 3は同地点の2008年8月の状態 (成長は全く見られず、再植林を施したが、成長は不良)。4: 生存林の林床に植栽したものは成長良好 (2006年12月の写真)。5: 2006年12月時点で、調査地西の河口部。植林後数ヶ月で、生存率は良好。6: 2008年8月時点の5地点。良好な成長が見られる。7,8,9: 調査地東部。5,6と同様に良好な成長が継続中。10,11,12: 2008年8月時点の調査地西端部。数百ヘクタールの植林域がほぼ全滅状態。11に見るように、根が成長していくず、黒変して、酸欠状態。13: 2008年8月時点の調査地中央部の広大な干渉。一部に自然再生木が見られる。

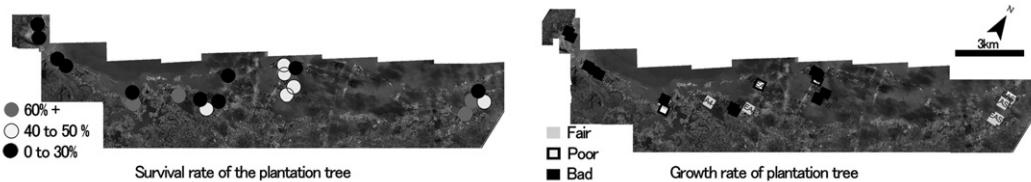


図 29 バンダアチエ市における植林の成績

た状態で、一時的に育苗床に保存される。この間胎生種子の成長は順調に進むので、植え付けを急ぐ必要が出てくる。この地域では一般に *R. mucronata* の移植は、葉が 4 枚程度までに終わらせることが必要とされる。*R. apiculata* も胎生種子を直植えすることが多いが、バンダアチエでは、植林のための時間を稼ぐために、ポット育苗を行う場合が多い。植林は、地元民にとって地震復興の象徴的な作業であり、同時に貴重な現金獲得の手段である。ただし、植林後は本来の稼業にもどる必要があり、広大な植え付け地の管理に課題が残されている。

8.4.2 2006 年 12 月と 2008 年 8 月時点でみた植林の成功例と失敗例

激甚な津波災害の後ということもあり、植林のブームが生じている観さえある。津波による地形と堆積物の変化が余り生じなかつた場所に植林を施している例では、早いもので津波襲来後数ヶ月後に開始され、既に 1 年半を経過した場所もある。それらは、エビの養殖池とマングローブ植林が組み合わされた形式の、この地域で過去数十年にわたって行われてきたことが復活している例や、広い面積にグリッドを設定して植林を施した例の双方がある。成功例を観察すると単純に 2 つの特徴がある。つまり、樹木が残存している場所での植林は成功しており、その行為は津波直後から実行された。もう一つは、潮汐水の交換が良好で、地盤高が維持されている場所で、土砂の性質に大きな変化が生じなかつた場所である。これらの成功箇所は、津波前の土地・環境条件が確保されていた場所では、植林は比較的容易なことを意味する。

一方で、植林が成功していない例も多数の箇所で確認できる。植林は、極めて多数の組

織によって、一気に実施された感がある。植林箇所の設定は、行政当局によって割り振られ、実施主体は、そこでそれぞれの工夫を実施したに違いない。地元 NPO、日本赤十字、大学関係者からの聞き取りでは、植林箇所の適・不適、種子の管理、植林樹種の決定などそれぞれのレベルで、多くの配慮不足や評価の甘さがあったとされる。生存率が極めて低率な場合や流失や生育不良など、植林の失敗例が極めて広範に確認できる（写真 7）。

8.4.3 特に 2008 年 8 月の観察結果

津波襲来後 3 年半が経過した時期に、植林や環境修復の状況を把握するために、若干の現地調査を実施した。津波後の環境修復について、当初懸念されていたことがある。それは、津波以前には、バンダアチエの養殖池やマングローブ林は外海との間に浜堤が存在することで波静かな静穏な環境が維持されていた。しかし、津波によって浜堤の大部分が破壊され、外洋の波浪が直接マングローブ林の立地地盤を破壊する状況が出現した。これによって、津波の破壊からかろうじて免れた点在するマングローブ林とその地盤は、かなりの程度消失するのではないかと想定された。この実際がどうなのかを検証したい。次に、2006 年 12 月の調査では、ブームともいえる植林が実施されていたが、その後の成長はどうなものなのか。先の章でも触れたが、波高 6m を越す津波によって、地域のマングローブ林が破壊されましたが、地盤や潮汐環境の大きく変化した。この変化に植林の結果は即応して、一定の結果を収めているかどうかを検証することが必要である。

地形環境の修復と植林の成果：津波襲来以前の形成されていた浜堤の修復は、そのほぼ同じ位置に石積み堰堤を構築することで実施

されていた。ただし、津波後3年半を経過したにもかかわらず、その完成には至っていない。このこともあって、津波前から周囲に比較して広いラグーンが存在していた地点は、海域が大きく湾入り、仮設住居に近い場所まで波が侵入する状態に変化していた。この土地にも植林が行われた様子があるが、その殆どは流失してしまったようである。植林の成果を、バンダアチエの調査区各地で検証した。図29は植林地の生存率と成長量の調査結果である。ごく概略的な調査結果であるが、津波波高が低めの東側で成績が良く、西側で成績が悪い傾向があり、これは地形や森林の破壊傾向と調和している。西側で成功した僅かな事例は河川の河口部の特殊な例である。地形・水文環境が大きく変化した場合、仮に潮位の観点から植林適地と判断された場合でも、写真7-11に見られるような土壤条件の不適合が生じている場合もある。このような場所であっても、若干の土壤改良や土地改良によって成果を挙げられる可能性も残されているのではないか。植林に当たっては潮汐・土壤・地形・苗の適否・苗の品質管理・植林手法など鍵となる用件を検証しておくことが肝要であろう。

9.まとめ

津波とマングローブ林の関係についての調査を総括的に実施し、以下のような知見を得た。

- マングローブ林への津波到達波高とマングローブ林の破壊には、一定の対応が見られた。波高が3m以下であれば、マングローブ林への破壊は無視できる程度か、林縁に破壊が生じる程度である。この場合、森林は、津波の波高、流速を低下させ、同時に津波が運ぶ大量のゴミを林縁で食い止める。森林の背後地への保全効果は極めて大きい。波高が3-5mの場合、津波の破壊状況は、森林と土地の僅かな条件の違いが破壊の多寡に大きな違いをもたらした。多くの場合は、森林の破壊は200m以内の範囲に留まっていた。波高

が5mを越す場合、これ以下の波高とは次元を異にする破壊が生じた。このような大規模な津波の場合、沿岸の微地形やマングローブ林床の地形が破壊される事態が生じる。このことによる大量の流木の発生が、随伴するゴミや瓦礫に加わり、大きな破壊力となることが推定された。

- 津波が森林をどのように破壊するかを理解する基礎として、津波による樹木の破壊をどう把握するかを検討した。樹木の破壊は、強い破壊から順に抜根流亡、侵食流亡、せん断破壊、曲げ折れ(折損)、倒壊、傾動、枯死、生存と類型化でき、現地での確認は容易である。このうち、曲げ折れ破壊は、津波の力学的な解析に対応できるが、その他の類型はそれぞれ難がある。力学的なアプローチを行う際には一定の配慮が必要である。地域の破壊状況の理解には、他の破壊型の把握が必要であることは言うまでもない。

- 津波のエネルギーと曲げ折れ破壊の状況は、*Rhizophora*を対象として解析が出来る。*Rhizophora*の形態的な特性が曲げ折れ破壊を生じやすいからである。これによって各地で形跡的な検討が実行できた。

- 津波後の森林修復には植林が有効だが、その実施に当たっては、植林に当たっては潮汐・土壤・地形・苗の適否・苗の品質管理・植林手法など鍵となる用件を検証しておくことが肝要であろう。

- 今回の大規模な津波により、極めて広範囲のマングローブ林が多彩な被害を蒙った。しかし、この実態を精査することで、今後の海岸防災について、マングローブ林が果たす役割を、一定程度評価することが出来たのではないか。しかし、事例がまだまだ少なく、今後データの蓄積が求められる。

謝辞

本報告は、科学技術振興調整費、日本学術振興会科学研究費（基盤A：代表今村文彦、課題番号18201033）、林業NGO補助事業経費、笹川科学研究助成金などによって実施された。

関係機関・各位に深く感謝いたします。

参考文献

- Cochard, R., Ranamukhaarachchi, S.L., Shrivakoti, G.P., Shipin, O.V., Edwards, P.J. and Seelanf, KtT. (2008) The 2004 津波院 Ache and Southern Thailand: A review on coastal ecosystem, wave hazards and vulnerability. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics. 10, 3-40.
- Kathiresan, K. and Rajendran N. (2005) Coastal mangrove forests mitigates tsunami. Estuarine, coastal and shelf science 65, 601-606.
- Kerr, A.M., Baird A.H. and Campbell, S.J. (2006) Comments on “oastal mangrove forests mitigates tsunami” by Kathiresan, K. and Rajendran N. [Estuarine, coastal and shelf science 65, (2005) 601-606.]
- Vermaat, J.E. and Thampanya, U. (2006) Mangrove mitigate tsunami damage: A futher response. Estuarine, coastal and shelf science 69, 1-3.
- 大家隆行・越村俊一・柳沢英明・今村文彦 (2006) 2004 年インド洋大津波によるバ
ンダ・アチェ市街地の津波氾濫解析と被害評価。海岸工学論文集, 53 卷, 土木学会, 221-225.
- 柳沢英明・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, 53 卷, 土木学会,
- Yanagisawa, H., Koshimura, S., Goto, K., Miyagi, T., Imamura, F., Ruanggrassamee, A., Tanavud, C. (2008) The reduction effects of mangrove forest on a tsunami based on field surveys at Pakalang Cape, Thailand and numerical analysis. Estuarine, Coastal and Shelf Science. (accepted) .
- Mochida, Y., (2000)
- Miyagi ,T., (2004)
- Mazuda,et al (1996)
- 宮城他 (2006) 地すべり
- Fujimoto.,et al (2000)
- Borrero (2005)
- 越村 (2005)
- 小谷 (2002)