

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 –ラグーン、海岸砂丘、樹林帯に注目して–

Investigation on the damage by Indian Ocean Tsunami at the southern coast in Sri Lanka in relation to the effect of lagoon, coastal sand dune and vegetation

田中 規夫*, 佐々木 寧*, M.I.M. Mowjood**

Norio TANAKA, Yasushi SASAKI and M.I.M. MOWJOOD

For elucidating the effect of seaside forest on Tsunami protection, this study investigated the damage at the southern coast in Sri Lanka by Indian Ocean Tsunami occurred at Dec.26.2004. The investigated area covered about 250 km at the coast line. The representative vegetation was classified into five according to the stand structure of the tree and their stem diameter (d), tree height, branch structure, density of the trees and the forest-width to the Tsunami-direction were investigated. From the survey, mangrove, especially *Rhizophora apiculata* forest, and *Pandanus odoratissimum* was effective to protect Tsunami damage with its complex root structure. Two layer's forest in vertical direction with *Pandanus odoratissimum* and *Casuarina equisetifolia* were assumed effective to decrease the damage behind the forest. Mixed forest structure with small and large diameter trees in plan view was also assumed important because the densely populated small diameter trees ($d > 0.1$) can reduce the velocity of the tsunami current and large diameter trees ($d > 0.3$) can trap the broken branches, houses, etc. The survey indicates the importance of the horizontal and vertical forest structures.

Keywords: Tsunami, Seaside vegetation, Mangrove, Lagoon, Tree diameter

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。防災の観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を明確化し、今後のマ

ングローブ樹林・沿岸植生の回復計画に反映させる必要がある。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、津波の波高との関係でまとめられている。しかし、マングローブ樹は、樹形も気根形態が多様で、日本の赤松、黒松を主体とする海岸林の結果とは、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ラグーン、海岸砂丘、樹林帯について特に注目した。現地調査は Fig.1 に示すスリランカ西部から東部海岸地域において行なった。

*埼玉大学 工学部 建設工学科

Department of Civil & Environmental Engineering,
Faculty of Engineering, Saitama University, 255
Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama, 338-8570,
Japan

**ペラデニヤ大学 農学部

Department of Agricultural Engineering, Faculty of
Agriculture, University of Peradeniya, Peradeniya, Sri
Lanka

2. 現地調査地点ならびに方法

Fig.1 に示す海岸線沿い約 250km の区間で、19 箇所

についてその被害実態を、2005年4月1日から4月6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、A.モクマオウ *Casuarina equisetifolia*、B.パダンナス *Pandanus odoratissimum* (A,Bは日本では例えば黒松やアダンに相当する代表的海岸林)、C.フタバナヒルギ *Rhizophora apiculata* (干満の差の大きい場所のマングローブ樹林)、D.ココヤシ *Cocos nucifera* (栽培植生として海岸に多い)、E.雑木林 (胸高直径 $d = 0.1$ m 以下) の5種類の樹木と樹形に特に注目した。

3.調査結果

3.1 一般被害状況

最初にスリランカにおける、一般的な被害状況をまとめておく。

1) リゾートホテル

日常的には、海岸線は景観的にも美しく、余暇を過ごす一等地である。海岸にはホテル、レストラン、ショップが設置される。しかも、その多くは海の望める場所に立地する。Sea Side、Sea View Beach Resort、Ocean View、Sun Resort、Coral Gardens、Beach Inn、Blue Wave などの名前がそのことを示している。こうした観光施設も砂丘（サンドバー）を削り、平場を形成、海に直結した形をとっていた。全壊した Yala Safari Hotel の例でも、前線のサンドバーが欠如している。こうした新砂丘上の施設は、直撃を受け、ほとんど全壊している。

2) 住宅地の進出と植生の破壊

山岳地の多いスリランカでは、沿岸地に集落が集中している。最近では、一般住宅は、海岸ぎりぎりの新砂丘上にまで進出している(Fig.2)。とくに漁村は、こうした新砂丘上にあり、集落には植生はほとんどなく、ココヤシなどがわずかに散在するにすぎない。特に、河口周辺の漁港付近では、人口集中地であり、波打ち際まで住宅地が並ぶ。

人口増加に伴う宅地の開発も、海岸砂丘上へ進出

している。Arugam Bay の例では、約 20 年前に新興住宅地として、砂丘上に新たに開発、整備された集落である。この場合、小学校など公共施設は、より汀線に近い場所に設置されており、よく発達した比高のある砂丘は、それ自体防潮の役割をはたすが、住宅他の施設の設置で砂丘は削られ、砂の採取も行われ、砂丘の形を失う例も多い。また、砂丘の土地利用の一つとして、墓地の利用があり、ほとんど植生がなく、砂むき出しの状態にあった。

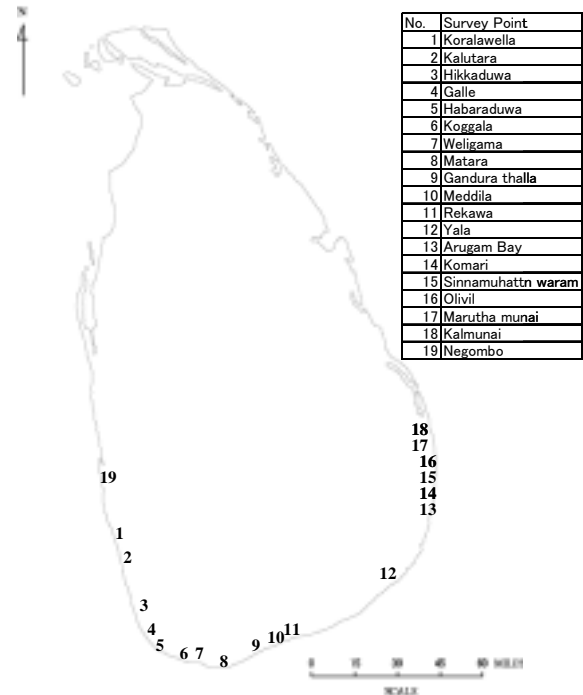


Fig.1 Locations of the observed damage site



Fig.2 Broken houses at the shoreline



Fig.3 Damaged train and rails at Hikkaduwa

3.2 樹林の災害状況

1) 樹林量

スリランカの内陸部農村は、住宅地内にココヤシ、マンゴー、バナナ、ニームトリー (*Azadirachta indica*) の有用木を多数種植栽し、密度の高い Garden Forest を形成している。しかし、今回の被害地となった沿岸域の多くは漁民である場合が多く、集落にはココヤシ樹が主で、その樹木量は少ない。このことも津波被害範囲が、海岸から内陸 1 km にも及んだ原因となっている。Hikkaduwa の列車被災現場は、ラグーンの海岸砂丘後背湿地に発達した集落でココヤシ樹主体であった(Fig.3)。ラグーンの海岸砂丘上にあるココヤシ樹林下の集落も完全に壊滅している。遠望では深い森のように見えるココヤシのみの樹林では、ほとんど抑止効果はなかったといえる。

2) 倒伏・流亡

津波により主幹が折れる例はほとんどないが、地盤が砂地であることから、根茎部が洗掘され、根茎ごと流出する例がほとんどであった。とくにヤシ類はヒゲ根状で、表層 30~40 cm に広く根を張っている。その長さは主幹部から 10 m 以上にも及ぶ。しかし根元部分が洗掘され、樹幹に圧力が加わることで、根茎が切断倒伏している。

高木で倒伏した例は多くあり、ココヤシ (多い)、コバテイシ (*Terminalia catappa*)、パンダナス (一例のみ)、サトウヤシ (*Borassus flabellifer*) などがあるが、倒伏木のほとんどは流亡していない。すなわち、高木類は流木の原因とはなっていないことを示す。

2) 土壌侵食

海岸最前線の植生帯、すなわちグンバイヒルガオ帯 (*Ipomoea pes-caprae*) では、表層 20~40 cm 程の砂が侵食・流出しており、地下茎が露出している。表層のほ伏茎は一部流亡しているが、直根部分は残存、調査時 (被災後三ヶ月経過) には群落の中心部は、新葉が展開し、密度高く再生していた。

東部海岸でのツキイゲ群落 (*Spinifex littoreus*) は、より植被率の低い群落であるが、やはり直根部分が残存し、大きな損壊は生じていない。一方、地下茎を持たないハマオモト (*Crinum asiaticum*) は球根部

が露出、横伏していた。

砂丘背部のココヤシ植栽部では、とくにその最先端で侵食が激しく、ほ伏根が露出、後方部でも、ビル風効果で根元部分がより侵食され、30~40cm 程えぐられている。しかし、根茎がヒゲ根状であり倒伏する例は少ない。海岸林モクマオウやコバテイシの場合、根茎下の砂が流出、1m 以上の侵食穴が生じている。この例の場合の多くも、伏状しないが、枯死に至っている例がある。

しかし、裸地や植生の薄い部分に比較しても、ココヤシの人工林を含め、林床土壌が大きく侵食されることはなかった。

河口部の他、ごく小規模の小水路、溝沿いでは、流水が集中、深堀した侵食量は 1m 以上に及び、ココヤシは根茎ごと倒伏している。この場合、返し波の侵食と圧力が大きかったと思われ、ココヤシが海岸方向に倒伏している例があった。

砂の移動は、汀線近い砂丘部と、植生のうすい砂丘前線部からの流出が多く、植生のある場所ではその量は限定的と考えられる。砂丘部分でも植生のうすい部分では、波の通り道となり、その侵食量も大きく、侵食岸を形成する程、おおきく侵食されていた。流水砂は約 100 m ~ 200 m まで流出、密度濃い樹林部前で堆積している。

3) 海水流入の影響

津波は、大量の海水と砂を内陸部に移動、返し波でその多くは再び海に流出しているが、一時的あるいは溜まり水として長く内陸部に留まっている。この海水の大量流入は、沿岸部の地下水、すなわち井戸水にも影響を与えている。

植物影響の例でみると、沿岸部では、人為的に植栽した樹木も多く、海水への物理的耐性と塩水に対する違いが認められた。物理的にも、生理的にも塩水にもっとも弱かったのはサトウヤシであった。また、海水の浸水で3ヶ月後も新葉を展開せず、枯死したと思われる樹が、*Altocarpas* とマンゴー、チェリー木であった。浸水時に枯死落葉し、その後、新葉を展開したのは、ニームトリー、インドソケイなどであり、その他、自然性のモクマオウ、コバテイ

シヤ植栽木のココヤシ等はほとんど影響なく、耐塩性が強いといえる。

林床に見られる草本群落は、3ヶ月後の現状で、植生が再生しており、枯死茶変したままの場所はなかった。ただ、すでに枯死、消失した草本は確認できない。スリランカ沿岸に多いラグーン（内湖）に生育する水生植物のうちスイレン、ガガブタ、ヒメガマ、フトイ、ハスは開花しており、ダメージの痕跡は見られない。もっとも多いホテイアオイ (*Eichhornia crassipes*) は茶変した場所が多く見られ、海水流入時に多く枯死したものと思われるが、しかし一方で、新葉と花を展開し、再生しており、急速に回復している。

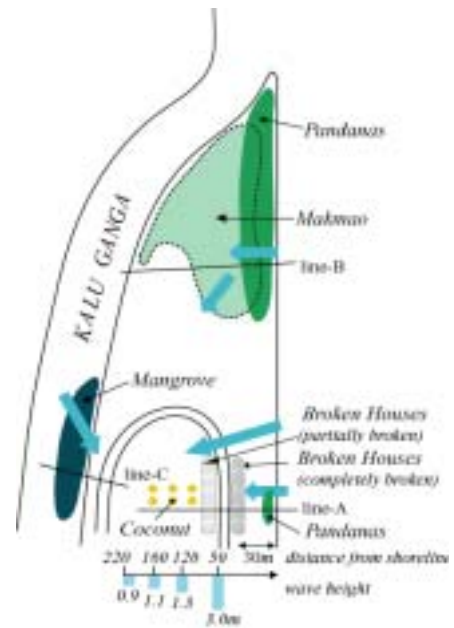


Fig.4 Plan view at Kalutara



Fig.5 *Cocos nucifera* (damaged)



Fig.6 *Pandanus odoratissimus* (No damage)



Fig.7 *Rhizophora apiculata* (No damage)

3.3 主要地点における被害状況

1) Korawalwella

海岸部に護岸はあるが防波堤・樹林帯はなく、海面との標高差も3-5 m程度と低い。その海岸線から50 m程度の所を鉄道が、その陸側を国道が走る。その鉄道よりもさらに海岸線寄りに家が建っていたため、その多くが壊滅的に破壊された(Fig.2)。スリランカ西海岸地域における津波浸水深は東海岸や南海岸に比べてやや低く、この地点は痕跡より2-3 mと推定された。ここは、土地利用上の問題から被害を受けたと考えられる。この地点から Kalutara までしばらくの間、同様に海岸線ぎりぎりまで住民が居住しており、その多くが被災している。こうした海岸沿いの集落構造は、サイクロンなどが来襲しないこの地域における特長とも言える。

2) Kalutara

Fig.4 に Kalutara 地点の概要図を示す。はじめに、Line-A における状況を記述する。海岸線に樹高の低いココヤシがあり（樹高約3-7 m程度）、そのうち海浜の浸食が激しく、津波の通り道になったと考えられるラインに生えていたココヤシは根こそぎ倒れていた (Fig.5:むき出しになった根の深さは約0.3 m、根の長さは長いもので約4 m)。ココヤシの海岸側最前列の間隔は約3 mと狭い。ココヤシ樹林帯の海岸より端部のすぐ内側には家屋が存在していたが、そ

のほとんどが壊滅的に破壊された。ココヤシ樹林は陸側では樹間距離が大きく、かつ樹高も高い（住宅と住宅の間で栽培）。津波はこれらの樹冠下を通り抜け、海岸から 100 m 以内にある家をおおむね破壊した。津波の痕跡高さは、海岸から 50, 120, 160, 220 m 地点で、それぞれ 3, 1.3, 1.1, 0.9 m であった。

前述した地点の約 500 m 南側に、カルガンガ川の河口があり、その地点（Line-B）には自然に発達したと考えられるパンダナス（*Pandanus odoratissimus*）とモクマオウ（*Casuarina equisetifolia*）の群落が存在していた（Fig.6）。パンダナスの樹林幅は約 20 m、モクマオウは約 40 m でそのうち約 20 m はモクマオウとパンダナスが鉛直方向に階層構造をなし、混生群落を形成していた。海岸線から 60 m はなれたところに存在していた家屋地点における、津波高さは約 0.6 m 程度であり、破壊されていなかった。これは密集した樹林帯により樹林帯を透過する流量が減少し、樹林帯の外側に主流線がそれ、結果として家屋が守られたと考えられる。武村・田中(2005)により、密集した株における透過流速は、茎と茎との間隔が直径の 3 倍から 0.5 倍で 90-60% 程度まで減衰することが知られている。複雑な根構造を持つパンダナス樹林帯において同様の効果が発揮されたものと想定された。なお、Line-A における海岸線にも、パンダナスの樹木も 1 列程度生えていたが、減衰効果はなかったと考えられる。Line-C においては繁茂したマングローブが護岸効果を発揮したと考えられ、河川を遡上する津波による側岸侵食などの被害は生じていなかった（Fig.7）。

3) Hikkaduwa

海岸線を走る列車が転倒し報道された地点である。この地点には海岸沿いにパンダナスの樹木が奥行きで 1-2 列程度あるが、多くはタコの足状の根よりも上部（地上高さ 2 m-4 m）で破断していた（Fig.8）。通常の樹木は根本で折れるが、パンダナスの場合は、茎に働く抗力モーメントが最大になるのはタコの足の直上部であり、これよりも下の浸水深の場合は、減勢効果を発揮するが、樹木高さ程度を超える津波では、破断する傾向があるようである（詳しくは力

学計算が必要）。津波浸水深は、痕跡より海岸線で約 5 m 以上、海岸線より 300 m 地点（倒れた列車地点付近）で約 3 m 以上と推定した。

ココヤシ樹林帯（胸高直径は約 0.3 m、樹木間隔は、短いところで約 4 m、家などで間隔があいているところは約 40 m 程度）は、海岸線から約 500 m 地点までであったが、津波は列車地点までの多くの家屋を全壊し、500 m 地点より陸側にあるラグーンまで到達した（津波の侵入域はココヤシで決まったのではなく、地形影響で決まっていた）。ココヤシは樹冠下に枝もなく樹間が狭いところでも直径の 10 倍以上あいていることから、樹林帯の幅があっても減勢効果は皆無に近いことがわかる。

4) Weligama

ここにはモクマオウの樹林帯（幅 50 m（樹幹距離約 2.8 m）×津波進行方向の奥行き 18 m（樹幹距離約 6 m）が存在する（Fig.9）。しかし、幅は薄く、背後の家屋は破壊されているものもある。津波浸水深は、海岸線から約 60 m の民家地点で約 4 m であった。海岸の砂浜は鉛直方向に全体的に約 30-50 cm 侵食されていた（樹林帯端部の樹木地点）。

5) Rekawa

砂丘上にリゾートコテージが立ち並び、その周囲にはココヤシが栽培されているものの、100 m 程度の区間に渡って家屋は全壊した。砂丘頂部付近にはパンダナスも 10 m 程度の厚さで生育していたが最前列のパンダナスは破壊されていた。砂丘を越えた流れは、背後のラグーンのマングローブ樹をなぎ倒した（Fig.10）。津波の進行した方向にパンダナスとココヤシが繁茂していたライン（以後、Line-I）では約 45 m（Fig.11）、パンダナスのみのライン（以後、Line-II）では約 64 m、ココヤシのみのライン（以後、Line-III）では約 84 m であった。マングローブ樹林入り口付近における、津波浸水深は約 4 m で、砂丘部における勾配・距離は大きく変わらなかった。砂丘頂部（樹林帯端部）における津波の入力条件（Line-I の痕跡では 5 m、Line-II,III の樹林帯入り口部は不明）や Mangrove 樹林の構成が厳密に同じではないため、単純に比較はできないが、ココヤシのみの Line-III

ではココヤシ帯内部での洗堀も観測されたことから、10mの厚さのパンダナス帯は若干の減勢効果をはたしたと考えられる。

6) Yala

津波浸水深は、樹林帯入り口部で約5~5.5mであった。当該地点にあったリゾートホテルは全壊状態であった。津波は海岸線から約300m地点の古い砂丘で一部は止まったが、一部は回りこみ、その背後に巨大な湖を形成した。直径0.15m程度のモクマオウは倒れなかったものの、直径0.07 - 0.1mの低木林 (*Bauhinia* spp., *Zizyphus* spp.) を200m以上にわたってなぎ倒した(Fig.12)。0.05m程度の低木の多くは破断し、流出していた。直径0.3mクラスで低い高さで太い幹を形成する高木 *Manikara hexandra* は、内陸に流された船やホテルの残骸を受け止めていた(Fig.13)。こうした付加抵抗によるなぎ倒しを防ぐためには、 $d = 0.3$ m以上クラスの樹林も必要であることが伺える。しかし、直径の大きい樹木は、樹幹も発達し樹間距離が大きくなるので、 $d = 0.3$ m以上の巨木と $d = 0.1$ m-0.3 mの密集樹林が平面的に混在することが重要であると考えられる。

7) Olivil

この地点の津波浸水深は海岸地点で約2.5mと他の地点に比べ、大きくはない。ココヤシ樹林帯は津波進行方向に対し最大54mで、8列程度存在したが、前述したようにココヤシの減衰効果は薄く、背後の家屋を破壊した。ここで特筆すべきは、ココヤシ林の背後に海岸線に平行に走る水路が存在し、津波が水路を越えて来襲した家屋では、水位上昇が緩やかであったため破壊されなかったことである(Fig.14)。

3. 5 海岸線付近における地形影響、樹林帯影響

今回調査したスリランカ東部から南部海岸にかけての典型的な地形は、①新砂丘の上を道路・鉄道が走り、その背後は、②Lagoon (Mangroveを主とする湿地帯)、あるいは③古砂丘(10-30mクラス)、が形成されていた。漁民やリゾートホテルは海岸沿いぎりぎりに居住地を求め(①よりも海岸線よりにまで)、農民はラグーン周辺に耕作地と居住地をおく。①をこえて加速され



Fig.8 *Pandanus odoratissimum* (Broken) at Hikkaduwa



Fig.9 *Casuarina equisetifolia* (No damage) at Weligama



Fig.10 *Rhizophora apiculata* (Broken) at Meddilla



Fig.11 Damaged mangrove forest (*Excoecaria agallocha*, Line I at Rekawa)

た流れは、200m 程度の樹林では勢いを止めることができずに②や③まで到達したことが多い。Olivil のような単独水路であっても、海岸線に平行に走っているものが減勢効果を発揮したことから、Mangrove 効果はそれ単独では議論できず、Mangrove 樹林帯内部の多くのクリーク効果を含めて勢いを減衰したと考えられる (Fig.10)。しかし、Yala 地区においては、低木林が長さ 200 m 以上もなぎ倒されたのに対し、Rekawa では同等の胸高直径をもつシマシラキ *Excoecaria agallocha* やヒルギ属 *Rhizophora* のなぎ倒し距離長は、わずか 50 m 程度であった (津波浸水深は両地点とも 4-5 m)。これは、こうした樹種は、気根を含む非常に複雑な形状で空隙率の低い樹林を形成しているためと考えられる。

3.6 有効な樹種と樹林帯内部構造

Yala、Rekawa 地点の結果より、幹直径が太すぎず ($d > 0.3$ m : 樹間が広がる)、細すぎず ($d < 0.1$ m : なぎ倒し・破断が生じる)、その中間クラスの幹 (0.1 m $< d < 0.3$ m) が、高い密度で繁茂する方が効果あると判断された。また、流出木等を受け止めて倒れないクラスの樹木 ($d > 0.3$ m) が平面的に混在することも重要と考えられた。ただし、これらの条件は 5 m クラスの津波に対するものである。Fig.16 にパンダナス樹林帯の被害状況を首藤(1985)の結果と比較して示す。自然林で密生群生型のパンダナス樹林は、その幹が $d = 0.1$ m 程度であるが、根系構造が複雑であることから、この条件をよく満足すると考えられ、Mangrove 樹林とあわせてこれら樹林帯を保存することの重要性が示唆された。一方、モクマオウとパンダナスが二層構造をなし混在する地点では、さらにその効果が高まる可能性があるが、ギャップのあくココヤシとの混在 (Fig.15) や、ココヤシ同士の階層構造は効果がないと判断された。

3.7 海岸林の防災効果

今回の津波では、建物崩壊などの被害は、数十 m から 1 km 以上に及んでいる。海岸先端部ではほとんどの建物が壊滅している。

樹木に関しては植栽のココヤシをはじめ、一部の例外を除いて、高木類は大きく破損することなく残



Fig.12 Broken trees (*Bauhinia* spp., *Zizyphus* spp.) at Yala



Fig.13 Trapping effect by trees (*Manikara hexandra*) at Yala



Fig.14 Creek effect (parallel to the coast line) at Olivil



Fig.15 Two layer forest (*Cocos nucifera*, *Pandanus odoratissimum*): little effect because of a wide gap

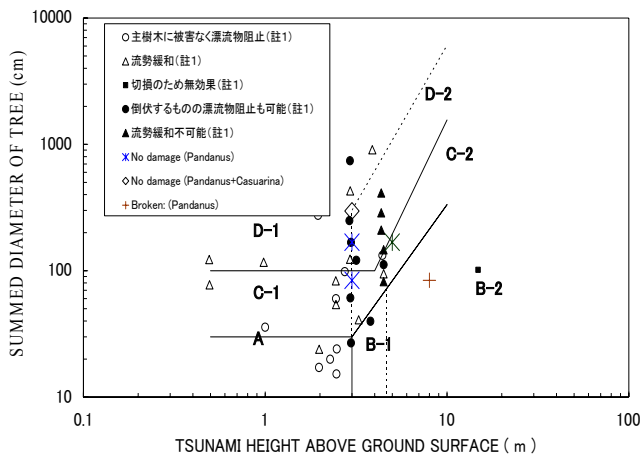


Fig.16 Relationship between Tsunami height and Summed tree diameter of the Pandanus-forest compared with Shuto(1985).

存している。この場合、津波の流水は樹木で抑止されることなく、内陸部深くまで達したといえる。一方で、樹木の存在で生存した例が、インタビュー結果などから多く報告されている。

1)ソフトランディング効果 Soft Landing Effect

津波によって、人々の多くは波に流されている。聞き取り調査によると、津波流水によって 200 m 以上流された例があった。この場合最終的な漂着先が樹上、枝葉の上で助かっている。

人が大きな損傷なく漂着できるのは、枝葉が多く、密度の高い植物が有効である。聞き取りの例では、*Rhizophora* 類のマングローブ樹林が有効であった。

2)トラップ効果 Trap Effect

今回の津波では、速い水流と高波が生じており、大量の車や家具、破損した建物部分、流木などが流出し、水流とともに人体を傷つけ、新たな破壊を生じている。

しかし、高木類のほとんどが流亡せずに残存しており、これらの流出物をトラップしている(Fig.13)。結果的に後背部の物理的破壊力を低減させている。

砂丘後背部にマングローブ林がある場合、ほとんど完全に流亡物をトラップしている。マングローブ林の背後家屋では水位上昇と冠水被害にとどまっている。

3)避難効果 Escape

突然の津波に、ほとんどの人々が逃げ場を失っている。津波の第一波で周囲は冠水し、直撃を逃れた人々も逃げ場を失っている。被災で助かった人々は、流亡しなかった建物の上階に非難できたか、樹木によじ登って助かっている。いったん二階に避難、屋根から木に移って助かった例もある。その後建物は流亡している。この場合、ココヤシやモクマオウのように低い位置で枝のない木は、避難が難しい(ヤシ類、針葉型の樹木)。低い位置で枝分かれし、枝の多い広葉樹類、すなわちクロヨナ、コバテイシ、カシューナッツ、インドソケイ、ニームトリーなどが有効であった。

4.おわりに

本報告では、津波被害を海岸樹林帯が存在した地点における被害状況および樹種、平面配置、鉛直構造との関連で整理した。防潮林計画に役立てるためには、今回収集した茎の直径の分布や樹幹距離、群落構造(鉛直分布)等のデータを用いて、水理実験や解析を行い、その特性を反映した防災の計画論を確立する必要がある。

謝辞

本調査を行なうにあたって、スリランカ Peradeniya 大学の Dr. Werellagama、Rufuna 大学の Dr.Nimal から貴重なご助言をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 武村武, 田中規夫, 株状群落モデルに作用する流体力について, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, 第 3 巻, pp.37-42, 2004.
- 3) 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.