

# 大津波による岩手県内被災海岸林に見られた

## マツ類折損木の根株の特徴と破壊の様態

森と緑の研究所 佐藤 一紘

Features of stumps of broken trunks by huge tsunami and destruction modality  
in tsunami-hit coastal pine forests of Iwate Prefecture  
Kazuhiro SATO ( Research Institute on Forest and Greenery )

### 1. はじめに

2011年3月11日14時46分に牡鹿半島の東南東約130kmの三陸沖を震央とし、長さ450～500km・幅約200kmを震源域とするマグニチュード9.0の地震が発生した。宮城県北部で震度7、宮城県南部・中部、福島県中通・浜通、茨城県北部・南部、栃木県北部・南部では震度6強で、岩手県沿岸南部・内陸北部・内陸南部では震度6弱、岩手県沿岸北部は震度5強であり<sup>1)</sup>、岩手県沿岸が宮城県以南の沿岸部より強く揺れた訳ではなかった。

地震発生から30～50分後、東日本の太平洋沿岸に巨大な津波が襲来した。津波がない場合の潮位からの最大浸水高は釜石市両石湾で18.3m、最大遡上高は大船渡市三陸町綾里で40.1m、各地の浸水高を北から示すと久慈市小袖漁港12.1m(久慈市大湊の最寄り地点)、野田村十府ヶ浦14.5m、宮古市田老15.9m(宮古市栃内浜の最寄り地点)、宮古市7.3m、釜石市9.3m(釜石市根浜の最寄り地点)、大船渡市綾里湾16.7m、大船渡市11.8m、陸前高田市15.8m等とされ、津波は県内沿岸各地にも甚大な被害をもたらした<sup>2)</sup>。

ここでは岩手県でマツ類の被災海岸林に見られた折損木の根株の特徴とそれから検討した破壊の様態を示し、沖縄での巨大津波に対する対策の考え方にも若干触れたい。

### 2. マツ類の被災海岸林

大津波によって折損・根元の洗掘・倒伏・流失した宮古市田老や栃内浜のスギ林の例もみられたが、各地のスギ林の被害は斜面下部まで押寄せた海水による塩害で、褐変・枯死に至ったものが大部分であり、その多くは倒木による危険を避けるため伐倒処理された。

村井によれば岩手県内には約151haの防潮林(潮害防備保安林)の他約4,200haの魚付き・飛砂防備等の海岸保安林があり、岩手県による県有防潮林の被災調査の結果(2011年10月28日現在)によれば21事業区のうち津波が到達しなかった1事業区以外は壊滅に近い被害(平均88.6%)を受け、その平均林帯幅は72mだった<sup>3)</sup>。この防潮林の大半はクロマツやアカマツの海岸林である。

陸前高田市の高田松原は17世紀中期から先人が飛砂防備のために造成してきた7万本のマツ林といわれ、クロマツ・アカマツ主体の民有林であった。中北と齋藤によれば全体は長さ約1,100m、幅160mであり、海側の広い林分は12.8haで植栽年度の違う複数の高層林や中層林で構成されていた。海側前面の高層林は平均樹高21.3m、林帯中央の高層林は平均樹高24.7mと推定され、陸側の細長い林分は3.0haで平均樹高18.5mと推定され

た。この海岸林は大津波で壊滅し、西側 1/4 の地盤を残し地盤沈下 (84 cm) で水没した<sup>4)</sup>。

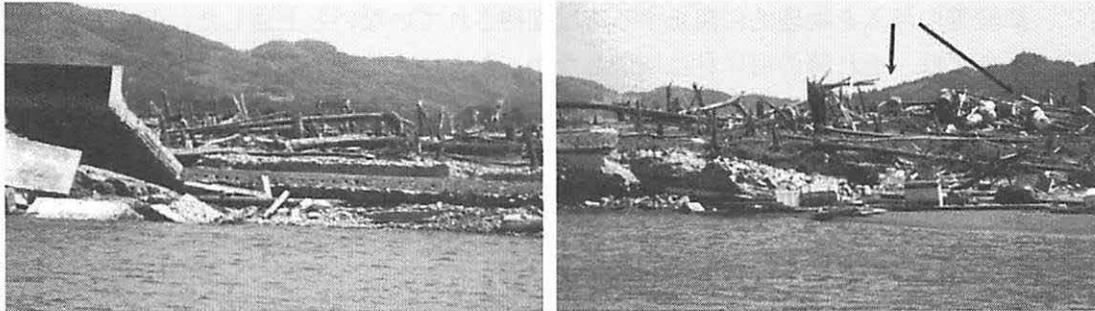


写真-1 高田松原の西側 1/4 の根株の遠望状況

(背後の山並みとの間に広田湾がある 2011年4月12日撮影) \* : 破壊された構造物は陸側の防潮堤、写真右の矢印の白い堆積物は発泡スチロールの浮きである。

### 3. 海岸林から流出した樹木の挙動

ほとんど壊滅状態の海岸林が県内各地で見られ、またそこから流出した漂流木が家屋等に衝突して被害を拡大したと決めつけ、海岸林は機能せずその上被害を拡大させたと話す市民がいると何度も聞いた。しかし、それらは伝聞であり確認できなかったため、被災1ヶ月後に陸前高田市で筆者が撮った写真を基にまず漂流木の挙動を検討した<sup>5)</sup>。家屋等に衝突した状態で確認できる写真は70枚中3枚であった。事例としては2件で、1件では1個体のマツがもう1件では2個体のマツがコンクリート構造物の2階部分に乗り上げていた。限られた地点で撮影した写真からも家屋等への衝突を確認したし、木造構造物はほとんど残っていない事と多くの漂流木が生じた可能性とから、そのような状況は肯定した。

一方、城戸は海岸林の被害と再生に関する聞き取りを、11の被災地域で男性32名と女性1名を対象に実施した。対象者は地域やその地域の団体から適任者として推薦・紹介された方々としている<sup>6)</sup>。その聞き取り事例の中に、被災時の流木による障害・損害・漂流物捕捉効果等について述べたものが4件あり、うち3件にマツまたは流木が家屋を破壊した・衝突したという証言が記載されていた。

壊滅的に破壊された海岸林から流出した漂流木が家屋等に衝突した事実は、写真からも証言からも確認された。折られていない立木が見えない高田松原の状況を写真-1に示した。林立する根株の状況や漂流木の事後の状況の写真から漂流木の発生数も少なくはなかったと推測された事から、家屋等への衝突も少なからず発生したものと推測された。

しかし、この事から海岸林は機能せず被害を拡大したとする評価は当たらない。想定する津波や波浪による外力と構造物の強度とから設計される防潮堤や護岸等の防災施設と海岸林を同列に見るのは適切ではない。海岸林には飛砂防備・潮害防備・魚付き・保健・風致等の機能・効果を期待されている保安林が多い。過去の津波の事例から漂流物の捕捉効果や漂流物のすがり付き効果等が海岸林へ新たに期待されるようになってはいたが、成立状態での生材の強度等の樹木物理学的知見もほとんどない現状で、津波等の流入を物理的に阻止する機能は期待されていなかったからである。

#### 4. 防潮林の津波に対する機能

潮風害や飛砂害に対する機能を明確に期待されている潮害防備保安林や飛砂防備保安林に、津波等の流入を物理的に阻止する事は期待されていないと上述した。しかし沿岸の住民の一部には、それ等の海岸林は機能しなかったという認識・評価があった事も事実であろう。その間の齟齬を解消する事は海岸林の営林・管理上重要な課題だと思われる。

見上げるほどの樹高や両手を回しても届かない幹の太さで強風にも耐えてきたマツ林に強さを感じ、津波にも耐える事を期待した住民の気持ちに不思議はない。成立状態での樹木の風や雪の重さや波浪に対する強さ等に関する樹木物理学的研究の立ち遅れは否めない。

マツ林がススキ原のようになびき押し倒されたら、津波に抵抗しなかったと感じるであろう。しかし、押し折られ、洗掘され、押し倒され、蹴散らされ、押し流された無数のマツは、それぞれの立地条件のもとで津波に対して抗力・粗度・粘性等の物理的な大きい仕事を課したからこそ壊滅したのである。すぐ後ろまで波が迫っていて助かった人や、下の家まで流されたが残った家屋は、海岸林が機能したから助かり残ったのであり、海岸林はその物理的限界強さで破壊されたのだから機能したと評価するべきである。

一方、流出した漂流木が衝突した家屋は、それが衝突しなければ残ったであろうか。漁船や車や家屋や無数の残骸等がそして何よりも水塊が押し寄せた状況下で、漂流木さえ衝突しなければそれは破壊を免れたと断定できる状況は極く少なかったと推測される。よって海岸林は完全に機能し、防災・減災効果を発揮し、そこから流出した多くの漂流木も家屋等へ衝突し破壊したが、瓦礫等他の漂流物より被害を拡大したとは言えないと判断した。

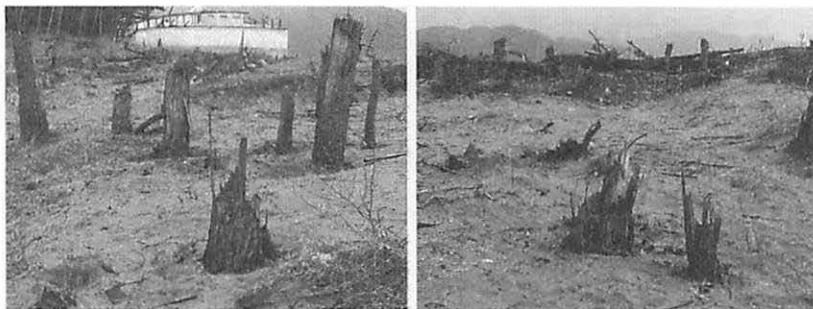


写真-2 釜石市根浜の被災クロマツ林の折損木の根株 (2012年3月17日撮影)  
(左:奥は残存林分と被災海水浴場のトイレ・シャワー室 右:海側を向いて撮ったもの)

#### 5. 残された根株の根元直径と折損高

壊滅的に破壊されたマツ林の跡に残された折損木の根株の根元直径から破壊され流失したマツの大きさの指標の1つとしての胸高直径を推定するために、釜石市根浜<sup>7)</sup>と久慈市大湊<sup>8)</sup>で根株に関する調査を行った。この根元直径とは地際の根張りの上で通直になる下の変曲点に相当する部分の直径である。また、折損高は地面から破断面の上端・下端の中間の高さを測った。隣接する残存林分の根元直径と胸高直径の回帰式を適用する事で根株の根元直径から津波に折られ流失したマツの大きさを、樹木の大きさを表わず一般的な要素である胸高直径で把握できた。

根浜での折損木の根株の様子を写真-2に、折損高の頻度分布を図-1に示した。折損高2.5m以上の根株は見られなかった。また、岩手県で撮った被災林の多くの写真に約3m

より高い位置で折られている折損木は見られず、岩手県での折損高の測定例の最高位置は久慈市大湊のクロマツで240 cmであった<sup>9)</sup>。この事を以降「3 m 問題」と略記する。これが岩手県沿岸部で起こった普遍的現象なのか、どのような破壊を想定すればこの問題を理解できるかを検討した。

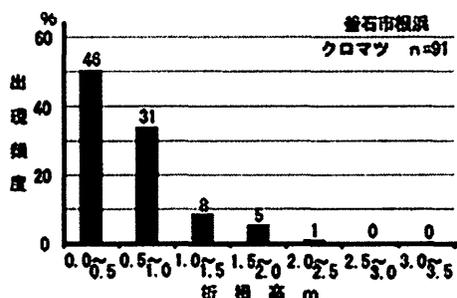


図-1 根浜の被災クロマツ林の根株の折損高の頻度分布図 (2012年3月17日測定)

\* : ここでは図-2の2方形区の外の36本の根株の測定値も用いた

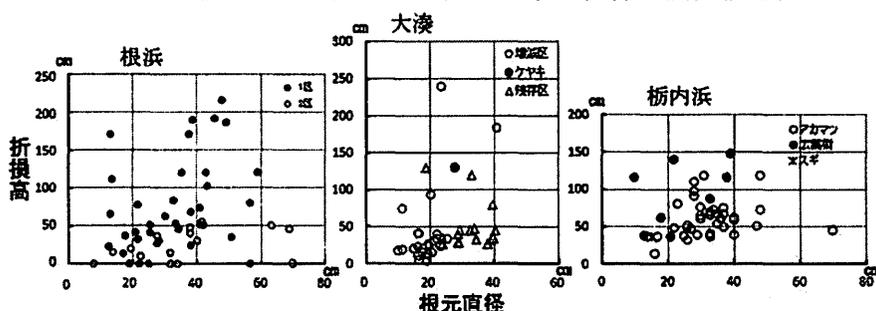


図-2 3地点の残存根株の根元直径と折損高との関係

(根浜 : クロマツ n=55, 大湊 : クロマツ n=41, 栢内浜 : アカマツ n=37)

### 1) 用いる測定値

ここでは上述の釜石市根浜<sup>7)</sup>・久慈市大湊<sup>8)</sup>と宮古市栢内浜<sup>9)</sup>での根株に関する調査の測定値を引用して用いる。釜石市根浜での測定は、2012年3月17日に壊滅クロマツ林分に立木密度が分かるように設けた2つの方形区で佐藤<sup>7)</sup>により実施された(n=1区37, 2区18)。1区は壊滅林分の地盤高の低い部分に設け、2区は地盤高が高い残存林分に近い部分に設けた。流失した折損木の胸高直径の推定を目的としていたので根株の地盤高は測定しなかったが、地盤高を全て測定すべきであった。久慈市大湊での測定は、2012年6月27日にほぼ平坦地の東側の壊滅林区と西側の残存林区のクロマツの根株について佐藤<sup>8)</sup>により実施された(n=壊滅区クロマツ25, 残存区クロマツ16, 壊滅区ケヤキ1)。宮古市栢内浜での折損木の測定は、2011年9月19日に汀線から約50mのほぼ平坦なアカマツ・広葉樹混交林の被災跡地で村井<sup>9)</sup>により実施された(n=アカマツ37, 広葉樹8, スギ1)。散布状態や範囲の以下の検討には、クロマツとアカマツだけを用いた。2樹種の差異については、アカマツが1地点で標本も少ない事から、区別せずに扱った。

### 2) 根元直径と折損高の関係の散布範囲

根浜、大湊、栢内浜3地点での根元直径と折損高の関係を図-2に示した。共通に広く散布しているが散布範囲は中高状の上に凸の形を呈した。いずれも散布範囲は広く有意な相

関関係は認められない。まず3地点について、「3m問題」を確認する。

根浜では1・2区で散布範囲が大きく異なり、2区での折損高は約50cm以下で範囲は狭い。1区では折損高100～215cmの根株が11本あり、散布範囲はかなり広い。この傾向の違いと、2区から1区にかけての緩斜面上での地盤高の差即ち1区は1～2m低くその分津浪の浸水深は大きかったと推測される事との関係については明言できない。

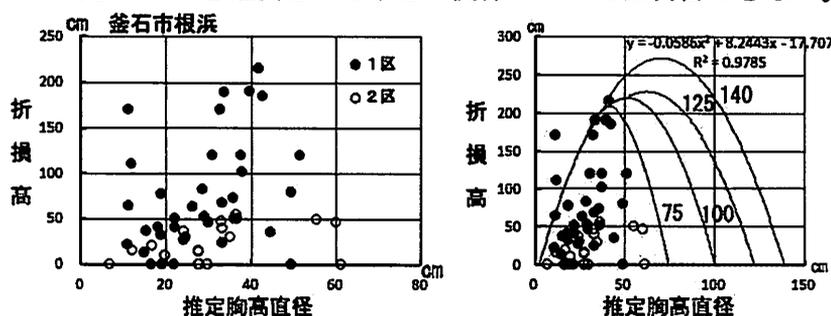


図-3 折損木の推定胸高直径と折損高の関係(左)と散布範囲の上縁に当てはめた曲線(右)  
\* : 右図の数値と2次曲線は散布範囲の上縁に想定林分の最大胸高直径毎に当てはめた。

しかし、同じ樹高と胸高直径の樹幹を片持ち梁と仮定し津波の流速を同一にすると浸水深が大きいほど幹折れ高は大きくなる幹折れ判定表<sup>10)</sup>が示されているので、2区は地盤が高い分浸水深は小さく、そこで高い折損高が測定されていない事に矛盾はない。また地盤が1～2m低く浸水深がその分大きかったと推測される1区で、2区の高い折損高より約1.5m高い折損高が5・6本測定された事にも矛盾はない。1・2区をまとめて概観すると、根元直径の細い個体の折損高は1・2例外もあるが1mより低く、中庸のものでは1～2m程度のものが8本程見られ、太い7本で約1.2m以上のものは見られず折損高は低くなっている。全般の散布範囲は広く散布しながら中高状を呈している。

大湊の壊滅区で折損高が50cm以上の根株は4個体、残存区には3個体見られる。両区のこれ等7個体では太い個体で折損高が低い傾向を示し、全般の散布範囲は広く、中高状を呈している。

柄内浜の37本のアカマツの散布範囲を概観すると根元直径が小さいもので折損高は全般に低い範囲に散布し、中庸のもので折損高の高い範囲に広がり、太いものでは低い部分に散布する傾向が認められる。ここでも全般の散布範囲は広く、中高状を呈している。

この3地点の散布図を合わせて概観すると、全般の散布範囲は広く散布しながら中高状を呈していて、3m以上の折損高は見られない。ここではこの「3m問題」を普遍的な現象と捉え、その形を整理し、散布範囲の上縁の形と破壊の様態について以下で検討する。

## 6. 胸高直径と折損高の関係の散布範囲

根株の根元直径を測定した目的は流失したマツの大きさの一般的要素である胸高直径を推定する事であり、相関係数の有意に高い回帰式で推定できた<sup>7)</sup>と前項で述べた。図-2の横軸の根元直径を胸高直径で描くため、根浜で折損・流失したクロマツの推定胸高直径と実測折損高との関係を図-3の左図に示した。この推定した胸高直径と折損高の関係は、根元直径と折損高の関係とほぼ類似し根元直径より推定胸高直径が小さい分左に寄っている。右図は散布範囲の上縁に沿うように2次曲線を適宜当てはめた。その曲線は胸高直径

75 cmのもので折損高が0 cmになるように作った。この条件は想定する林分の最大胸高直径が75 cmの場合、この曲線と  $x$  軸とで囲まれる範囲で散布すると考えるのである。同じ胸高直径で折損高が異なりいろいろの値が得られた理由としては、個体毎に地盤高が異なり折られた時点での浸水深が異なる、幹の強度のバラツキやアカマツ・クロマツの特徴である輪生枝の死節等欠点の位置が個々に違う、さらに津波の波頭の干渉の節や腹の状況等が関与すると想定した。よって、想定する最大直径がより大きい林分ではより大きい胸高直径の個体数も多くなり、いろいろな高さで折られ散布範囲も広がると想定している。

図-3の左図の散布状態を大津波の破壊の実態であると受け止め、それが成り立ち説明できる前提や条件を当てはめ展開する過程から誘導<sup>11)</sup>したのが図-3の右図の曲線である。上部に示した2次式は最大胸高直径が140 cmの林分を想定したものである。この図の考え方が妥当であるならば、最大胸高直径が160 cmや180 cmの林分では3 mを越える折損高が生じ得るし、岩手県沿岸では最大胸高直径が140 cmを越える林分が無かったから3 mを越える折損高が見られなかったとも解釈できる。

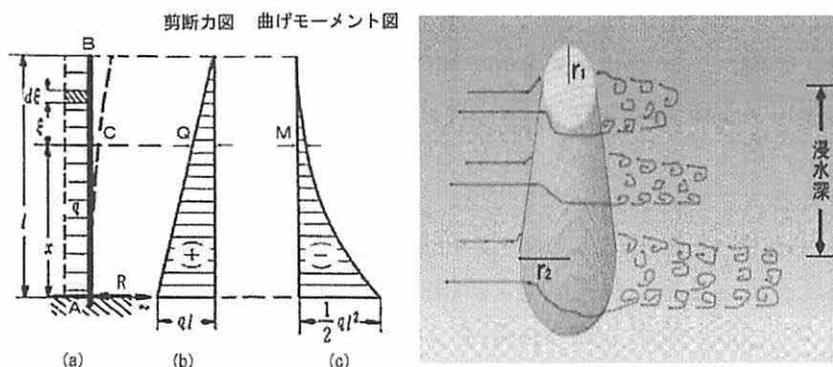


図-4 片持ち梁に等分布荷重が加わる場合の剪断力図と曲げモーメント図及び円錐台 ( $r_2 > r_1$ ) の後流の渦列の模式図

## 7. 太い個体の低い位置での折損

マツの幹を単純化し、片持ち梁に浸水深の等分布荷重が加わると見なした場合の剪断力図と曲げモーメントを図-4左図に示した。剪断力も曲げモーメントも地際で最大値となる。部位の太さの違いを無視すれば等分布荷重になり、単純な円錐台と見なせば等変分布荷重になり地際の最大値はより大きくなる。

長さ  $l$  の等分布荷重で高さ  $x$  点の曲げモーメントを  $M_x$ 、その点の曲げ強度を  $\sigma_f$ 、その点の幹の直径を  $d$ 、断面係数を  $Z$ 、曲げ破壊モーメントを  $M_f$  とすれば、次式のようになる。

$$M_x = -(q \cdot x^2)/2, \quad Z = \pi \cdot d^3/32, \quad M_f = \sigma_f \cdot Z = \sigma_f \cdot \pi \cdot d^3/32$$

立木即ち生材の  $\sigma_f$  は不明だが高さで  $d$  が変わらない円柱では  $M_f$  も変わらないから、最大曲げモーメント  $((q \cdot l^2)/2) > (\sigma_f \cdot \pi \cdot d^3/32)$  となる  $d$  のものは地際で折られ、それより太いものは折られない。幹を円錐と仮定すれば高さで  $d$  は変わるから、 $M_x$  の曲線と  $x$  で変わる  $d_x$  で決まる  $M_f$  の曲線の交点の高さで折られる。

このような力学的考え方で折損高を求める判定表を示した報告<sup>10)</sup>があり、これは胸高直径が細いものは低い位置で太いものほど高い位置で折られるという結果を示している。

しかし、実際の折損高によった図-2と図-3の左図では胸高直径が細いものからある太

さのものまで最大折損高は高くなるが、より太いものでは低い位置で折られる事を示している。より太いものの  $d$  は3乗で効くのに、低い位置で折られる理由の検討が必要になる。

土屋ほか<sup>12)</sup>は被災防潮林の現地調査を基に模型水理実験を実施した。模型は直径6mm、樹高200mmの木製円柱を林帯幅1000mmに千鳥状に配置した。そこに孤立波の段波を1.67m/s(実物では11.85m/sに相当)で流入させた。林帯の4点で水平波圧等を測定し、No.1～3では林帯の根元で瞬間的に負の衝撃水圧が生じ、これを被災林の破断・倒伏の原因としている。単木ではないが、樹列の根元に瞬間的に負圧が生じたという結果が得られており、6節で述べた太い樹幹の低い位置での折損に関係すると考えた。

流れの中の物体の後流には渦列が生じる。図-4の右図は、円錐台の後流の渦列を模式的に描いたものである。浸水部分の円錐台は  $r_1 < r_2$  であるから、低い地際部分の渦列ほど大きい。このような部分に段波が衝突すれば、瞬間的・衝撃的に負圧が生じ得ると考えた。被災時の状況を考えても宮古市田老の海岸林の被災時の映像(小林義一2011年3月11日撮影)を見ても、津波は海岸林に段波状で進入したと思われる。相対的に細いものでも後流に渦は生じるが、太いものほど渦による負圧は大きくなる。根元・地際部分に瞬間的に生じる負圧は、陸側に引き寄せる力として波圧に加わる。即ち等分布荷重にしる等変分布荷重にしる、想定する波圧にこの負圧が加わり断ち切るように作用するから、その効果は太い立木ほど低い位置で大きいと考えられる。後流に生じる渦による負圧は太いものほど大きいから、ある太さを越えると太くて低い位置で、波圧と負圧の和が破壊強さを越える事になる。さらに太いものではさらに低い位置で波圧と負圧の和が破壊強さを越える。この渦による負圧を考える事で胸高直径と折損高の関係が中高状を呈し、頭打ちが見られ、さらに太いものでは低い位置で折られる図-3の右図を説明できる。

材積という視点からではなく、樹幹の形状という視点からの検討や立木状態即ち生材の強度等に関する樹木物理学的検討が進めば、樹幹の高さ毎の断面積や破壊強度等が明らかになる。さらに津波の波高や波速を想定して、樹幹下部の後流の渦列の状況や負圧に関する知見が蓄積されれば、上述の問題は力学的に明らかにできよう。



写真-3 ソロモン諸島マライタ島のランガランガ・ラグーンに見られるマングローブの天然の緑の防波堤(ラグーン内から外海側を撮った、満潮時林床は水没する)

## 8. おわりに

3～6節で、海岸林は巨大津波に対して完全に機能し、そこから流出した漂流木が他の要因以上に被害を拡大したとは言えない事、および破壊されたマツ類の根株の特徴から「3m問題」について指摘し、その中高の散布範囲の上縁の形に2次式を仮定し、ある解釈を示した。7節ではある太さ以上のもので低い位置で折られる可能性を示し、浸水部分が円

錐台になる樹木の特徴によるという視点を示した。

島嶼の地形や土地利用の条件を考えると、沖縄では一般的な形の海岸林の長さや林帯幅等の規模的な制約は厳しい。しかし、明和の大津波の例からも巨大津波に無縁ではない。これからの海岸林としては沖縄の条件を活かす工夫は必要だが、インド洋大津波でのマングローブ林の破壊や効果に関しては松田<sup>19)</sup>の他多くの記述・報告があり、参考になろう。特にヤエヤマヒルギ林の支持根層・樹幹層・樹冠層の抗力・粗度等は興味深い。

ここではサンゴ礁と礁湖（イノー）という沖縄の有利な条件を活かす構造物の形状や配置の工夫とマングローブを組み合わせる新たな魚礁林・防災林という形が研究され、低緯度地帯の沿岸での防災・減災に新たな技術として沖縄から発信される事を期待したい。

## 引用文献

- 1) 国土交通省：東日本大震災の記録－国土交通省の災害対応－ (<http://www.mlit.go.jp/common/000194077.pdf>), 1～5, 2012
- 2) 岩手県：岩手県東日本大震災津波の記録－2011.3.11－ (<http://www2.pref.iwate.jp/~bousai/kirokushi/2013kirokushi.html>), 14～20, 2013
- 3) 村井 宏：2. 被災地域の海岸林の概況調査結果, 平成 23 年度東日本大震災による岩手県内海岸林の津波被災状況と再生についての調査研究, 2～6, 森と緑の研究所, 2012
- 4) 中北 理・齋藤 武史：デジタル空中写真モデルによる津波流失林分の推定, 平成 24 年度東日本大震災による岩手県内海岸林の津波被災状況と再生についての調査研究, 3～11, 森と緑の研究所, 2013
- 5) 佐藤 一紘：大津波で破壊された海岸林から流出した樹木の挙動, 平成 23 年度東日本大震災による岩手県内海岸林の津波被災状況と再生についての調査研究, 55～68, 森と緑の研究所, 2012
- 6) 城戸 檀：海岸林の被害と再生に関する聞き取りによる意向調査, 平成 24 年度東日本大震災による岩手県内海岸林の津波被災状況と再生についての調査研究, 162～167, 森と緑の研究所, 2013
- 7) 佐藤 一紘：釜石市根浜地区の津波による海岸クロマツ林の被害と現状, 平成 25 年度東日本大震災による岩手県内海岸林の津波被災状況と再生についての調査研究, 32～51, 森と緑の研究所, 2014
- 8) 佐藤 一紘：クロマツ林の被災状況の比較, 平成 24 年度東日本大震災による岩手県内海岸林の津波被災状況と再生についての調査研究, 38～46, 森と緑の研究所, 2013
- 9) 村井 宏：激甚被災地における立木及び林地荒廃の状況, 平成 23 年度東日本大震災による岩手県内海岸林の津波被災状況と再生についての調査研究, 森と緑の研究所, 48～54, 2012
- 10) 東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会：東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する第 5 回検討会資料 (平成 24 年 1 月 25 日), 32～37・45～46, 2012
- 11) 佐藤 一紘：1. 折損木の推定胸高直径・根元直径と折損部直径・折損高との関係と破壊の様態, 平成 26 年度東日本大震災による岩手県内海岸林の津波被災状況と再生

- についての調査研究, 3~19, 森と緑の研究所 (所内限定製本), 2015
- 12) 土屋十圀・吉江悟・児島正和: 津波による防潮林被害と水理実験による検討—東日本大震災 3.11 巨大津波による被害調査—, 東日本大震災特別緊急共同研究報告書, 京都大学防災研究所, 17~22, 2012
  - 13) 松田 義弘: マングローブ域における津波の力学過程, マングローブ環境物理学, 東海大学出版会, 192~198, 2011