

2011年東北地方太平洋沖地震津波による海岸林の被災*

秋田大学 松富 英夫
秋田大学 直江 和典
秋田大学 山口枝里子
静岡大学 原田 賢治

1. はじめに

海岸林は津波の流勢次第で倒伏 (Lodging) , 抜根 (Uprooting) , 折損 (Breaking) する。したがって、海岸林の津波減勢効果をより正確に評価するには各種の海岸樹木の倒伏、抜根、折損といった被害条件を知る必要がある。

2011年東北地方太平洋沖地震津波では多くの海岸林が被災した。海岸樹木の被害実態や被害条件を把握するため、岩手県野田村海岸から宮城県岩沼市海岸にかけて（図-1），主に黒松を対象に樹木諸元、浸水深（高）、倒伏・抜根・折損の被害形態を現地調査した。また、宮古市田老海岸の防潮堤内（田老子向山）において、被災後に枯死した黒松を対象に倒伏、抜根、折損に関する現地試験を実施した。

本研究は2011年東北地方太平洋沖地震津波における海岸黒松の被害実態および力やモーメントから見た被害条件に関する現地調査と力やモーメントから見た被害条件に関する現地試験の結果を論じる。被害条件では、インドネシアの *Sea casuarinas* に対する現地試験に基づいた倒伏と抜根の被害条件との比較・検討も行う。津波が巨大であったため、多くの海岸林で津波減勢効果を確認できなかつたが、仙台海岸での効果例を示す。

2. 現地調査と現地試験

海岸黒松の諸元や被害などに関する現地調査は岩手県野田村海岸から宮城県岩沼市海岸にかけて実施した。調査項目は樹高 H 、胸高直径 D 、浸水深 h と被害形態である。

海岸黒松の被害形態と被害条件に関する現地試験は宮古市田老子向山で実施した。測定項目はワイヤーとパワーショベルで樹木へ載荷する水平方向の力 F 、樹木の水平変位 δ （図-2）、胸高直径、抜根時の根部の深さ h_R と幅（長軸と短軸の2方向）、樹幹の比重である。力は引張型荷重計（東京測器研究所、定格容量 100 kN）で測定した。力の載荷点は地面から高さ 1.2 m の胸高直径測定部である。水平変位は 10 cm 間隔で目盛を入れた測量ポールを試験対象樹木の横

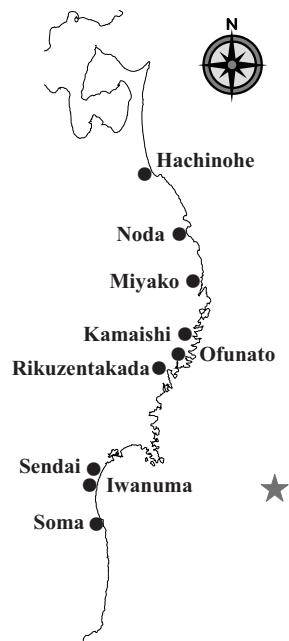


図-1 東北地方太平洋岸

* Damage to Coastal Black Pine Trees in the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami
by Hideo MATSUTOMI, Kazunori NAOE, Eriko YAMAGUCHI and Kenji HARADA

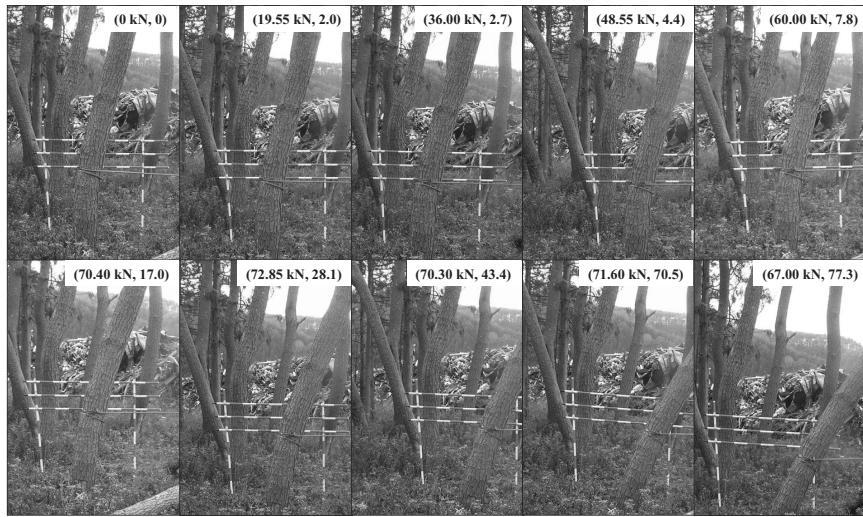
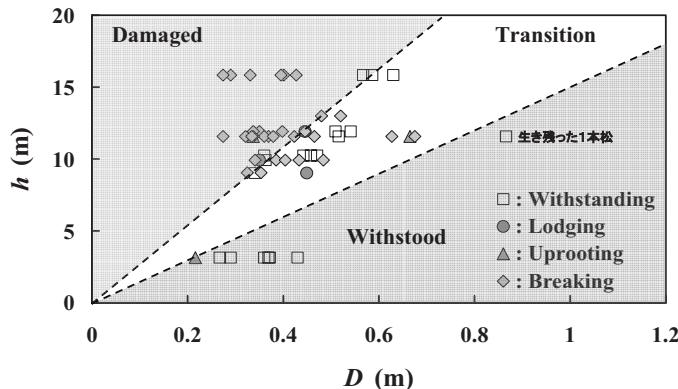


図-2 海岸黒松の倒伏過程の時系列例 (Case 10)

図-3 海岸黒松の胸高直径 D , 浸水深 h と被害形態の関係

に設置し、載荷荷重毎に撮影した写真から判読した。

図-2 は海岸黒松の倒伏過程の時系列例を示す。各過程段階の数値は左から水平力 (kN), 地面から高さ 1.2 m での水平変位 (cm) である。この樹木は最終的に抜根した。

3. 海岸黒松の被害形態と被害条件

図-3 に 2011 東北地方太平洋沖地震津波における海岸黒松の胸高直径 D , 浸水深 h と被害形態の関係例を示す。被害を受けたものと持ち堪えたものが入り交じった遷移領域（破線で囲まれた領域で、破線は暫定的なもの）がかなり広いが、両者が胸高直径と浸水深で比較的よく分類されることが判る。また、浸水深と胸高直径の比が大きくなるにつれて、折損の傾向が強いことも判る。折損が倒伏と抜根の両領域にまたがっていることは既報（松富ら, 2011）の Sea casuarinas の場合と同じである。抜根の力が倒伏の力より小さい傾向にあるが、これは既報およ

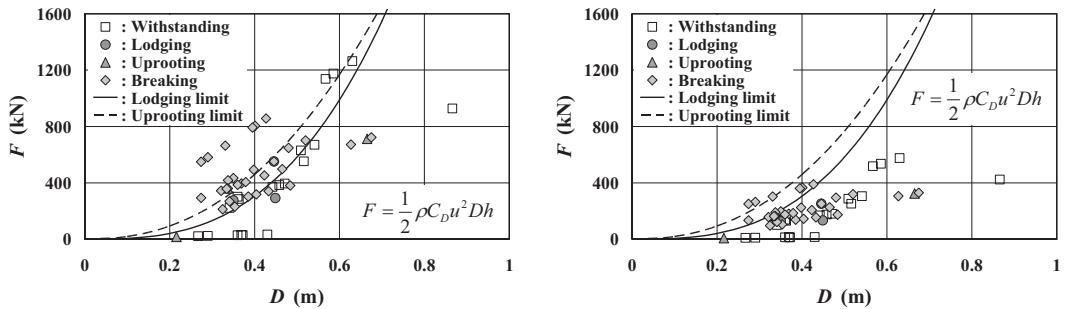


図-4 海岸黒松の胸高直径 D , 簡易氾濫流速評価式に基づく抗力 F と被害形態の関係例（左図は最大氾濫流速, 右図は平均氾濫流速を採用）

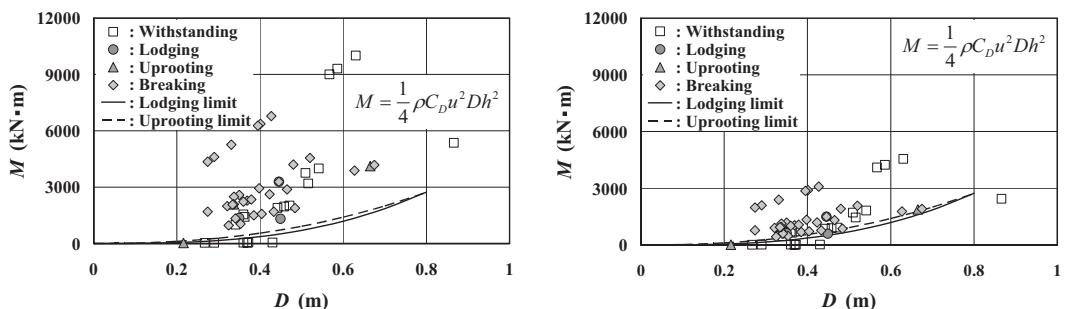


図-5 海岸黒松の胸高直径 D , 簡易氾濫流速評価式に基づくモーメント M と被害形態の関係例（左図は最大氾濫流速, 右図は平均氾濫流速を採用）

び常識と逆傾向である。これには地盤条件が関係しているかもしれない。

三陸海岸での2011年東北地方太平洋沖地震津波は浸水高が20 m以上と巨大であった（The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group, 2011）。しかも、海岸陸域の奥行きがあまりなく、陸域入射津波と戻り津波が同じところを行き交うなどしたためか、または津波が滞留したためか、建物の前・背面浸水深に顕著な差が認められなかった。したがって、最大の入射津波成分に起因した浸水深の評価は難しい。そこで、本研究では建物の前面浸水深は最大の入射津波成分に起因したと仮定（危険側の大きな津波を想定）し、浸水深を用いる既報（Matsutomi and Okamoto, 2010）の簡易法で津波の氾濫流速 u を推定し、海岸黒松に働く抗力やモーメントを推定することにする。

図-4と5に海岸黒松の胸高直径 D , 次式の簡易氾濫流速評価式に基づく力（抗力） F またはモーメント M と被害形態の関係例を示す。図中にはインドネシアの Sea casuarinas に対する現地試験に基づいた倒伏（実線）と抜根（破線）の上限条件（松富ら, 2011）も示してある。

$$\text{最大氾濫流速 : } u_{\max} = 1.2\sqrt{gh} \quad (1), \quad \text{平均氾濫流速 : } u_{\text{mean}} = 0.81\sqrt{gh} \quad (2)$$

$$\text{抗力 : } F = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 D h \quad (3), \quad \text{モーメント : } M = \frac{1}{4} \rho C_D u^2 D h^2 \quad (4)$$

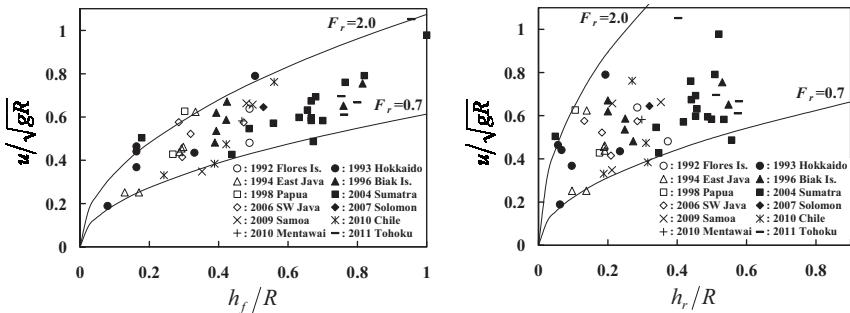


図-6 津波氾濫浸水深 h_f (建物前面) または h_r (建物背面) と氾濫流速 u の関係 ($C_v=1.0$)

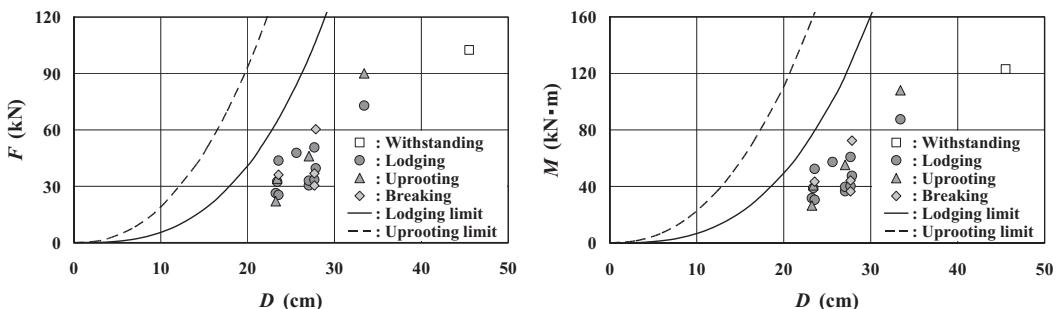


図-7 現地試験に基づく被災後に枯死した海岸黒松の胸高直径 D , 水平力 F (左図) またはモーメント M (右図) と被害形態の関係例

ここで, g は重力加速度, ρ は流体密度で, 抗力係数 C_D は 1.1, 投影面積は $D \times h$, モーメントは $F \times 0.5h$ としている. また, 今回の津波における氾濫流速 u の評価例を図-6 に示す. 図中, R は浸水深の測点やその近傍の浸水高または週上高, C_v は流速係数である (松富, 2009).

図-4 によると, 力から見たとき, Sea casuarinas の被害条件との適合性は最大氾濫流速を採用した場合がよい. ただし, これは Sea casuarinas と海岸黒松が同じ被害条件を有するとした場合に言えることに注意を要する.

一方, モーメントから見たとき (図-5), Sea casuarinas の被害条件との適合性はどちらの氾濫流速を採用してもよくない. 敢えて言えば, 平均氾濫流速を採用した場合が適合性がよい. これにはモーメントの評価法 (式(4)) が原因しているかもしれない. 現地試験では力の作用点を常に地面から 1.2 m の高さに固定しているのに対し, 現地調査では半浸水深として整理している. また, 現地調査データには地面から 1.2 m 以上の高さで折損したものも含まれている.

図-7 に宮古市田老字向山における現地試験に基づく海岸黒松の胸高直径 D , 水平力 F またはモーメント M と被害形態の関係例を示す. 図中には Sea casuarinas に対する倒伏と抜根の上限条件も示してある. 被災後に枯死した樹木のためか, 地盤条件や他のためか, 海岸黒松の方が Sea casuarinas に比べて耐力が弱い. これは, 現地調査データの解析において, 浸水深に基づく力やモーメントの評価では, 平均氾濫流速の採用を支持している. また, 場合によっては, 現地調査結果と同様に (図-4 と 5), 抜根の力やモーメントが倒伏のものより小さいときがある.

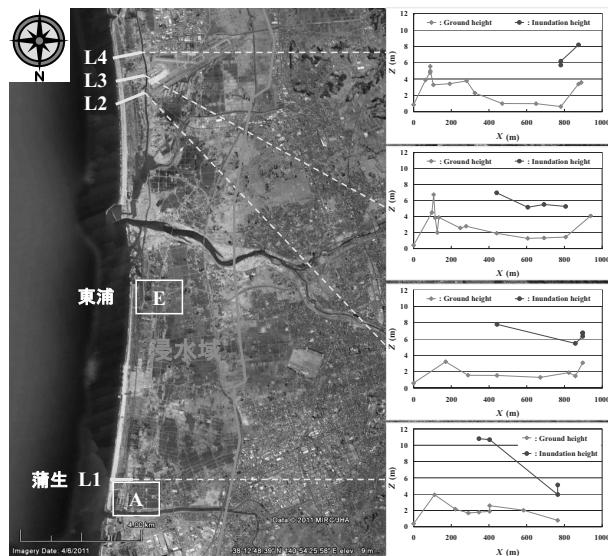


図-8 仙台海岸における汀線から貞山堀までの縦断地形と浸水高Zの例（Google Earth）



(a) 被災後（海岸林幅 140 m, 奥行き 220 m）



(b) 被災前 ((a)は四角囲い部分)

図-9 海岸林の津波減勢の効果と限界例（仙台市東浦）（Google Earth）

4. 海岸林の効果と限界例

巨大津波であったため、多くの海岸林で津波減勢効果を確認できなかったが、仙台海岸ではその効果が認められた。仙台海岸における汀線から貞山堀までの地震後の縦断地形と浸水高 Z の例（DL 基準）を図-8 に示す。蒲生浄化センターなどの特殊なところを除いて、浸水深 h は 3~6 m 程度である。また、東浦における海岸林の津波減勢の効果と限界例を図-9 に示す。図中の κ は植生密度で（松富ら, 2004），図-9(b)は被災前の海岸林の状況を示す。海岸林の一部がいつ倒伏や抜根、流出等の被害を受けたか不明であるが、海岸林が残ったところの陸側背後では、浸水高 Z (DL 基準)，浸水深 h ともに低減していることが判る ($Z-h$ は地盤高)。ただし、東浦では海岸林の奥行きが 220 m 程度あっても（貞山堀海側の海岸林を除く），浸水深は 25%程度の低減であり、海岸林に大きな津波減勢効果を期待することはできない。

5. おわりに

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- ①現地調査と現地試験に基づき、海岸黒松の津波に対する被害条件を検討した（図-3～5）。限られたデータでの判断であるが、海岸黒松の津波に対する耐力はインドネシアの *Sea casuarinas* に比べて弱いようである（図-7）。また、今回の海岸黒松では倒伏に至る力（モーメント）よりも抜根に至る力（モーメント）が小さいというこれまでの逆事象が見られた。
- ②限られたデータでの判断であるが、現地調査データの解析において、浸水深による力またはモーメントの評価では、平均氾濫流速の採用が適切である（図-4, 5, 7）。
- ③2011 年東北地方太平洋沖地震津波における海岸林の効果と限界例を定量的に示した（図-9）。現地調査データ、現地試験データともに数が少ない。現地試験については継続が可能であり、今後ともデータを蓄積する必要がある。

謝 辞：本研究は JST-JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力（佐竹健治），科研費（基盤研究(C)）（松富英夫）と北東北国立 3 大学連携推進研究（堺 茂樹）として行われた。現地試験では、震災対応下にもかかわらず、岩手県から御理解、御協力いただいた。特に、農林水産部森林保全課 千葉一弘氏と沿岸広域振興局農林部宮古農林振興センター 多田広之氏にお世話になった。現地調査では秋田大学卒研生 栗原 航君の助力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 松富英夫・大沼康太郎・今井健太郎：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 卷、pp. 301-305, 2004.
- 松富英夫：最近の沿岸・陸上津波における課題、土木学会 45 回水工学に関する夏期研修会講義集、B コース、pp. B-3-1-20, 2009.
- 松富英夫・原田賢治・A. Bagyo WIDAGDO・Subandono DIPOSAPTONO：Casuarina の倒伏・抜根条件と 2010 年 Mentawai 地震津波でのその検証、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol. 67, No. 2, pp. 301-305, 2011.
- Matsutomi, H. and Okamoto, K.: Inundation flow velocity of tsunami on land, *Island Arc*, Vol.19, Issue 3, pp. 443-457, 2010.
- The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group: NATIONWIDE FIELD SURVEY OF THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering), Vol. 67, No. 1, pp. 63-66, 2011.