

## 三陸南部の津波浸水地における広葉樹 6 種の サイズと樹冠の浸水程度が個体の樹冠の衰退程度に及ぼす影響

本田詩織<sup>1</sup>・林田光祐<sup>2</sup>

### Effects of tree size and crown inundation on the extent of tsunami damage of six broadleaved woody species on the southern Sanriku Coast

Shiori Honda<sup>1</sup> and Mitsuhiro Hayashida<sup>2</sup>

**Abstract:** We examined whether tree size and crown inundation influence individual damage for six broadleaved woody species in two the 2011 tsunami inundated areas on the southern Sanriku Coast, Japan. Although the survival rates of all species exceeded 50% and they were fairly even, the extent of crown damage differed with the species and the study areas. Results of analyses with generalized linear models, revealed that the extent of crown damage decreased with tree size for *Machilus thunbergii*, *Zelkova serrata*, *Callicarpa japonica* and *Acer mono* but increased for *Camellia japonica* and *Euonymus japonicus*. The extent of crown damage increased with the extent of crown inundation for *Camellia japonica*, *M. thunbergii*, *E. japonicus* and *Callicarpa japonica*. We need to evaluate the tolerance of broadleaved woody species to tsunami considering tree size and crown inundation.

#### 1 はじめに

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生し、太平洋側の海岸林はこれまでにない甚大な被害を受けた。今回の津波による青森・岩手・宮城・福島・茨城・千葉の6県の海岸林の浸水被害面積は約3,660haとなり、大規模な被害となった(東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会, 2012)。

これまでの全国の海岸防災林の造成には主にクロマツが用いられてきた(田中, 1992)。クロマツ海岸林は下刈りや落葉掻きなどの手入れによって育てられてきたが、1960年代の燃料革命により落葉や落枝が不要になったことに加えて、その後に猛威をふるい始めたマツ枯れによる衰退によって海岸林の多くが放置されていった(吉崎, 2011)。さらに、近年、海岸林にレクリエーションや環境教育の場としての期待が高まっており、生物多様性が注目されていることから(林田, 2011)、今後、被災した海岸防災林を再生するにあたり広葉樹の植栽も考慮するべきとの提言が出された(東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会, 2012)。さらにクロマツに代えて常緑広葉樹による防潮林をつくるべきとの考えも提示されている(宮脇, 2011)。しかし、広葉樹が津波にどの程度耐えられるのかは、岡田ら(2014)の津波浸水地の屋敷林や社寺林での評価結果以外はほとんど明らかにされておらず、海岸防災林として植栽する広葉樹種を選択する際の情報はいまだ極めて少ない現状である。

これまでの広葉樹種の耐塩水性は苗木を用いた塩

水処理試験による評価がほとんどであるが(高橋・堀江, 1965; 堀江, 1966; 垣原ら, 2007; 2008)、これらは広葉樹の耐塩水性を種間で比較、あるいは特定の種の耐塩水性の評価をしたものである。しかし、実際の海岸部では、同じ樹種でも苗木のような実生から大径木まで、さまざまなサイズの個体が生育している。個体サイズの違いによって津波に対する耐性が異なる可能性も十分に考えられるが、これまで明らかにされていない。また、三陸の海岸部には太平洋に面した斜面上の森林が多く、生育する地盤の高さが個体によって異なる。個体サイズと生育する地盤の高さの違いは津波時に浸水する部位の違いをもたらす。チリ地震津波後の調査によって、クロマツ植栽苗で樹体全部が冠塩水したものは地下部のみ浸塩水したものと比較して枯れた苗が多かったことが報告されている(中野ら, 1962)。このことから、樹冠の浸水が津波による個体の被害程度に影響を及ぼす可能性が考えられるが、いまだ十分に検討されていない。

本研究では、2011年3月の津波による樹木の浸水被害において、同じ広葉樹種内でもサイズと樹冠の浸水程度が個体の津波による被害程度に影響を及ぼすのかを明らかにすることを目的とした。そのため、宮城県北部の太平洋に面した斜面上の森林で、津波の浸水があった場所に生育する広葉樹6種の個体のサイズ、生育する地盤の高さ、樹冠の衰退程度を調査し、その結果から個体の樹冠の衰退程度にサイズと樹冠の浸水程度が影響を及ぼしたのかを検討した。

#### 2 調査地および調査方法

##### 2.1 調査地

宮城県石巻市雄勝町名振と南三陸町長清水の三陸海岸の2か所を調査地とした(図1)。

石巻市から北の海岸地帯は断崖の多い磯浜海岸となっており、冬季に季節風から守られる島嶼や岬端

<sup>1</sup> 山形大学大学院農学研究科

Graduate school of Agriculture, Yamagata University,  
Wakaba-machi, Tsuruoka, Yamagata 997-8555, Japan

<sup>2</sup> 山形大学農学部

Faculty of Agriculture, Yamagata University,  
Wakaba-machi, Tsuruoka, Yamagata 997-8555, Japan

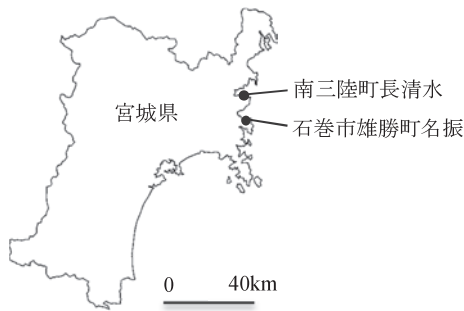


図1 調査地

で、かつ自然がよく保護されているところには常緑広葉樹林であるタブノキ林がみられる。林内にはヤブツバキ、トベラ、マサキなどが多い(宮脇, 1987)。南三陸町の椿島では上層をタブノキ、下層をヤブツバキが覆っており、名振沖の八景島ではタブノキやユズリハ、モチノキなどが混交しているが(山内・林田, 2000)、これらの島の森林はほとんど津波による被害を受けなかったことが報告されている(林田, 2013)。

2011年3月の津波により、石巻市雄勝町名振小浜において34.94m、南三陸町藤浜で30.10mの津波浸水高が記録された(原口・岩松, 2011)が、同じ地域でも地形等の条件により津波浸水高は異なる。そこで本研究では、三陸沿岸部でスギ針葉樹変化の範囲が津波到達箇所と一致したこと(小野・平井, 2012)を利用して、スギの枯死木の根元の標高を津波到達高の目安とした。そのうえで、スギの生存木と枯死木の境界が明瞭に確認でき、常緑・落葉含む数種類の広葉樹が確認できる地点を探し、雄勝町名振の漁港に隣接した南西斜面と南三陸町長清水の海岸に面した北西斜面の森林の2か所を調査地として選定した。両調査地ともに均一な斜面であり、目立った凹凸の微地形はなく、土壌は褐色森林土であった。

## 2.2 調査区の設定

調査は2013年6~7月に行った。各調査地ではスギの枯死木で最も斜面上部にある個体の根元の高さまでの場所に1か所ずつ調査区を設置した(図2, 3)。

雄勝町では汀線と垂直方向の斜面上に、横幅25m、奥行き10mの調査区を設置し、さらに内陸側に横幅

25m、奥行き8mの調査区を接続して設置し(以下、「雄勝区」とする)、南三陸町では海に面した斜面上に横幅70m、奥行き10mの調査区(南三陸区)を設置した。調査区の四隅の標高を調査区に最も近い海岸の干潮時の海水面を基準にして、eTrex 10J(Garmin社製)とVertexLaser VL400(Haglof社製)を併用して測定した。その結果、雄勝区の海側の調査区の斜面下側は標高5.6m、斜面上側は標高9.9m、陸側の調査区の斜面下側は標高6.3m、斜面上側は標高8.8mであった。そして南三陸区の斜面下側は標高2.5m、斜面上側は標高7.0mであった。

さらに、南三陸区よりも斜面上方の津波の浸水がなかった場所に横幅20m、奥行き10mの対照区を設置した。対照区の斜面下側は標高8.8m、斜面上側は標高10.6mであった。雄勝区では対照区は設置しなかったが、設置した調査区よりも斜面上方の津波の浸水がなかった場所で、調査区内に出現した樹種を対象に無作為に個体を抽出し対照木として調査した。

## 2.3 調査区(対照木と対照区を含む)の林分調査

雄勝区と南三陸区内のすべての個体の樹高(m)、枝下高(m)、胸高直径(cm)、着葉度、褐変度、幹と根元からの萌芽枝の発生の有無、生育地盤高(調査時の海面の高さからの個体の根元の地盤高;m)を調べた。ただし、マサキは樹高が胸高に満たず胸高直径を計測することが不可能な個体が多かったため、根元直径を計測した。なお複数幹を持つ個体については各幹の胸高直径を計測して断面積合計を求め、その値を円周率で割って算出した直径を算出胸高直径として用いた。着葉度と褐変度は目視により0~100の範囲で5刻みで評価した。生育地盤高は調査区の隅の標高を起点として、測量用ポールを用いて起点からの標高の上下や隣接する個体との標高差を測定することによって求めた。

雄勝区の対照木と南三陸区の対照区内のすべての個体については胸高直径、着葉度、褐変度、幹と根元からの萌芽枝の発生の有無を調べた。

なお、樹冠に健全な葉がなく、幹と根元からの萌芽枝の発生が確認されない個体を枯死木とした。

雄勝区は出現種14種、胸高断面積合計85.1m<sup>2</sup>/ha、高木層は樹高約15~20mであった。各種の断面積合計から求めた相対優占度はスギが約8割を占め、中層から下層にタブノキやヤブツバキが更新している。

南三陸区は出現種9種、胸高断面積合計36.5m<sup>2</sup>/ha、

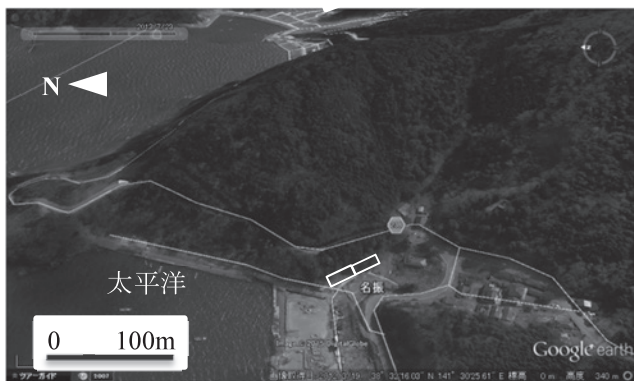


図2 調査区の設置場所(雄勝区)

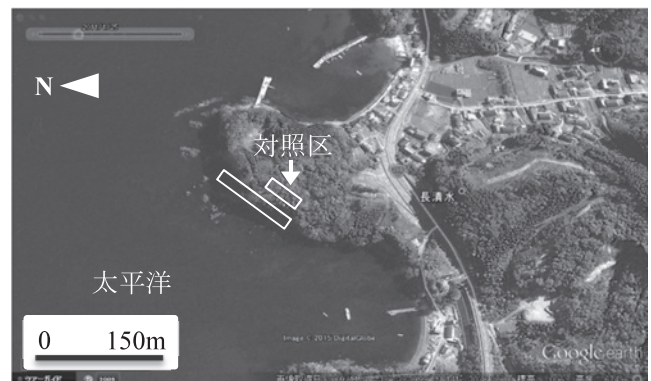


図3 調査区の設置場所(南三陸区)





図4 雄勝区の林分状況



図5 南三陸区の林分状況

高木層は樹高約 16~23m であった。各種の断面積合計から求めた相対優占度はタブノキが約 4 割を占めて最も高く、次いでケヤキとスギがそれぞれ 28%、12% を占めた。

#### 2.4 解析方法

着葉度から算出した落葉度と、着葉度と褐変度から算出した樹冠に占める褐変した葉の割合の合計値を樹冠衰退度とした。個体毎の樹冠衰退度を以下の式で求めた。

$$\text{樹冠衰退度} = (100 - \text{着葉度}) + (\text{着葉度} \times \text{褐変度} / 100)$$

また、樹冠深度 (m) を樹高と枝下高から、浸水した部分の樹冠深度 (浸水樹冠深度 (m)) は枝下高と生育地盤高、各調査区の津波到達高 (m) から算出し、さらにそれらから樹冠浸水度を求めた。樹冠深度、浸水樹冠深度、樹冠浸水度は以下の式で求めた。

$$\text{樹冠深度 (m)} = \text{樹高} - \text{枝下高}$$

$$\text{浸水樹冠深度 (m)} = (\text{津波到達高} - (\text{生育地盤高} + \text{枝下高}))$$

$$\text{樹冠浸水度} = (\text{浸水樹冠深度} / \text{樹冠深度}) \times 100$$

なお、津波到達高は雄勝区の海側の調査区が 9.9m、陸側の調査区が 8.8m、南三陸区は 7.0m であった。これは、各調査区の斜面上側の標高である。

本研究では各個体の樹冠衰退度を樹冠の衰退程度を評価する指標として用いた。そして、個体サイズを示すものとして胸高直径、樹冠の浸水程度を示すものとして樹冠浸水度を用い、それらと樹冠衰退度との関係を調査区ごとに樹種別に調べた。

さらに、樹冠衰退度を応答変数とし、一般化線形モデル (GLM) を構築した。確率分布は二項分布に従うとし、リンク関数は logit 関数を用いた。説明変数の候補には胸高直径と樹冠深度、浸水樹冠深度の

3 要因を用いた。このとき、モデルにおける説明変数の係数の絶対値が大きくなるほど、個体の樹冠の衰退程度が大きくなることを示している。モデル選択には AIC (赤池情報量基準) を用いた。

多重共線性が生じることを防ぐため、両調査区のすべての樹種において説明変数候補の 3 要因間のピアソンの積率相関係数とその有意性を調べた。

なお、これらの統計解析は統計解析ソフト R (R Development Core Team 2014) を用いて行った。

### 3 結果

#### 3.1 2 調査区の出現樹種

雄勝区にはスギ (*Cryptomeria japonica*)、広葉樹では常緑高木種のヤブツバキ (*Camellia japonica*)、タブノキ (*Machilus thunbergii*)、シロダモ (*Neolitsea sericea*)、常緑低木種のマサキ (*Euonymus japonicus*)、落葉高木種のケヤキ (*Zelkova serrata*)、ウワミズザクラ (*Prunus grayana*)、エノキ (*Celtis sinensis*)、落葉低木種のムラサキシキブ (*Callicarpa japonica*)、ヤマグワ (*Morus australis*) を含む計 14 種が出現し、サンプル数は計 223 個体であった。そのうち、ヤブツバキとタブノキの 2 種が半数を占めた。南三陸区にはスギ、ヤブツバキ、タブノキ、マサキ、ケヤキに加え常緑低木種のトベラ (*Pittosporum tobira*)、落葉高木種のエゾイタヤ (*Acer mono*) を含む 9 種が出現し、サンプル数は計 239 個体であった。そのうちヤブツバキとタブノキの 2 種が 8 割を占めた。

幹折れや倒伏などの物理的損傷は樹冠の衰退程度に大きく影響することが考えられるため、本研究では物理的損傷が確認された個体について雄勝区では 11 個体、南三陸区では 1 個体を解析対象から除外することとした。その結果、調査区内でサンプル数が 10 個体以上であった樹種は雄勝区のヤブツバキ、タブノキ、ケヤキ、ムラサキシキブ、南三陸区のヤブツバキ、タブノキ、マサキ、エゾイタヤの計 6 種であり、これらを解析の対象種とした (表 1)。

雄勝町の対照木はヤブツバキ、タブノキ、ケヤキ、ムラサキシキブ、スギを含む計 7 種、サンプル数は 51 個体であった。南三陸町の対照区にはヤブツバキ、タブノキ、エゾイタヤ、ケヤキ、スギの 5 種が出現し、サンプル数は計 59 個体であった (表 2)。

### 3.2 個体の生存率と樹冠衰退度

両調査区内の個体の生存率（個体数に占める生存木数の割合）は常緑高木種 78.3%、常緑低木種 100%、落葉高木種 86.5%、落葉低木種 92.3%といずれも高い生存率であったが、その中では常緑高木種が最も低かった。

表1に種毎の解析の対象となった6種の生存率と樹冠衰退度の平均値、標準誤差を調査区別に示す。生存率は南三陸区のヤブツバキが最も低い56.0%で、次いでエゾイタヤが66.7%であった。それ以外の樹種と雄勝区のヤブツバキは80%以上と高かった。樹冠衰退度の平均値はマサキが10.8%と最も低くなり、ヤブツバキが90%以上と高かった。

両調査地は海岸部の森林であるため、頻繁に潮風などの影響を受けていることが予想される。また、林内の個体については上層木の被圧によって衰退している可能性もある。両調査区の個体に確認された樹冠の衰退が津波によるものかを検討するために各調査地の対照木の個体数と生存率、樹冠衰退度の平均値、標準誤差を樹種別に示す（表2）。両調査地のすべての樹種が生存率100%であり、樹冠衰退度の平均値が最も高かったのは南三陸町のタブノキで23.2%、それに次いでムラサキシキブが20.0%、南三陸町のヤブツバキが13.8%であったが、それ以外の樹種は10.0%以下と低かった。

調査区内の個体と対照木の生存率の差が見られなかったのは雄勝区のケヤキのみで、それ以外の樹種はいずれも調査区内の個体の生存率が対照木より低

かった。特に南三陸区のヤブツバキはその差が44.0%と極めて大きく、次いでエゾイタヤが33.3%であった。

同様に、樹冠衰退度の平均値においてはいずれの樹種も調査区内の個体が対照木より高かった。雄勝区のケヤキはその差が5%と小さかったが、それ以外の樹種では50%以上の差が見られ、特に雄勝区のタブノキとムラサキシキブ、南三陸区のヤブツバキは70%以上の差があった。津波浸水域の調査区内の個体は浸水を受けなかった対照木よりも明らかに樹冠の衰退が進んでいた。

### 3.3 胸高直径および樹冠浸水度と樹冠衰退度の関係

各調査区の解析対象樹種における胸高直径および樹冠浸水度と樹冠衰退度の関係を図6～図9に示す。

胸高直径と樹冠衰退度の間には雄勝区のすべての解析対象樹種において有意な相関関係が認められなかったが、南三陸区ではタブノキ（相関係数 = -0.345,  $p < 0.001$ ）とエゾイタヤ（相関係数 = -0.788,  $p < 0.01$ ）において有意な負の相関が認められた（図7（B）、（F））。

樹冠浸水度と樹冠衰退度の間には雄勝区のすべての解析対象樹種において有意な相関関係が認められなかった（図6）。南三陸区ではヤブツバキ（相関係数 = 0.472,  $p < 0.001$ ）とタブノキ（相関係数 = 0.523,  $p < 0.001$ ）において樹冠浸水度と樹冠衰退度の間において有意な正の相関が認められた（図9（A）、（B））。

表1 6種の調査区別個体数と生存率および樹冠衰退度の平均値と標準誤差

| 生活型  | 種名      | 雄勝区        |            |       |      | 南三陸区       |            |       |       |
|------|---------|------------|------------|-------|------|------------|------------|-------|-------|
|      |         | 個体数<br>(本) | 生存率<br>(%) | 樹冠衰退度 |      | 個体数<br>(本) | 生存率<br>(%) | 樹冠衰退度 |       |
|      |         |            |            | 平均値   | 標準誤差 |            |            | 平均値   | 標準誤差  |
| 常緑高木 | ヤブツバキ   | 85         | 81.2       | 54.6  | 4.50 | 84         | 56.0       | 92.5  | 2.00  |
|      | タブノキ    | 24         | 83.3       | 86.5  | 5.61 | 105        | 91.4       | 77.1  | 2.96  |
| 常緑低木 | マサキ     | —          | —          | —     | —    | 18         | 100.0      | 10.8  | 3.50  |
| 落葉高木 | エゾイタヤ   | —          | —          | —     | —    | 12         | 66.7       | 59.0  | 10.95 |
|      | ケヤキ     | 11         | 100.0      | 11.4  | 2.41 | —          | —          | —     | —     |
| 落葉低木 | ムラサキシキブ | 21         | 90.5       | 91.0  | 3.92 | —          | —          | —     | —     |
| 計    | 6種      | 141        | 84.4       | 62.1  | 3.45 | 219        | 77.3       | 76.5  | 2.28  |

表2 各調査区の対照木（対照区）の樹種別個体数と生存率および樹冠衰退度の平均値と標準誤差

| 生活型  | 樹種      | 雄勝区の対照木    |            |       |      | 南三陸区の対照区   |            |       |      |
|------|---------|------------|------------|-------|------|------------|------------|-------|------|
|      |         | 個体数<br>(本) | 生存率<br>(%) | 樹冠衰退度 |      | 個体数<br>(本) | 生存率<br>(%) | 樹冠衰退度 |      |
|      |         |            |            | 平均値   | 標準誤差 |            |            | 平均値   | 標準誤差 |
| 常緑高木 | ヤブツバキ   | 9          | 100        | 1.1   | 0.69 | 8          | 100        | 13.8  | 1.71 |
|      | タブノキ    | 11         | 100        | 8.6   | 2.81 | 42         | 100        | 23.2  | 2.52 |
|      | シロダモ    | 2          | 100        | 0.0   | 0.00 | —          | —          | —     | —    |
| 広葉樹  | エゾイタヤ   | —          | —          | —     | —    | 5          | 100        | 4.0   | 1.67 |
|      | ケヤキ     | 14         | 100        | 6.1   | 1.53 | 1          | 100        | 5.0   | —    |
| 落葉高木 | エノキ     | 1          | 100        | 0.0   | —    | —          | —          | —     | —    |
|      | ムラサキシキブ | 8          | 100        | 20.0  | 4.33 | —          | —          | —     | —    |
| 針葉樹  | 常緑高木    | 6          | 100        | 0.0   | 0.00 | 3          | 100        | 3.3   | 2.72 |
|      | 計       | 8種         | 51         | 100   | 6.9  | 1.36       | 59         | 100   | 19.0 |

3.4 一般化線形モデルにより選択された要因

両調査地の各樹種における GLM によるモデル選択の結果を表 3 に示す。南三陸区のタブノキについては説明変数候補の 3 要因のうち胸高直径と樹冠深度の間に強い相関 (相関係数=0.916,  $p < 0.001$ ) が認められ、樹冠深度は個体サイズを示すと考えられた。そのため、南三陸区のタブノキは胸高直径を除外して樹冠深度と浸水樹冠深度のみを説明変数候補として用いモデル選択を行った。

個体サイズを示す胸高直径 (南三陸区のタブノキは樹冠深度、マサキは根元直径) は両調査区のすべ

ての樹種において最適モデルの説明変数として選択され、有意性が認められた (表 3,  $p < 0.001$ )。ただし、両調査区のタブノキ、ケヤキ、ムラサキシキブ、エゾイタヤの係数は負であったのに対し、両調査区のヤブツバキとマサキの係数は正であった。

樹冠深度と浸水樹冠深度も両調査区のすべての樹種において最適モデルの説明変数として選択された。しかし、雄勝区のタブノキとエゾイタヤは浸水樹冠深度に、ケヤキは樹冠深度に有意性が認められなかった。

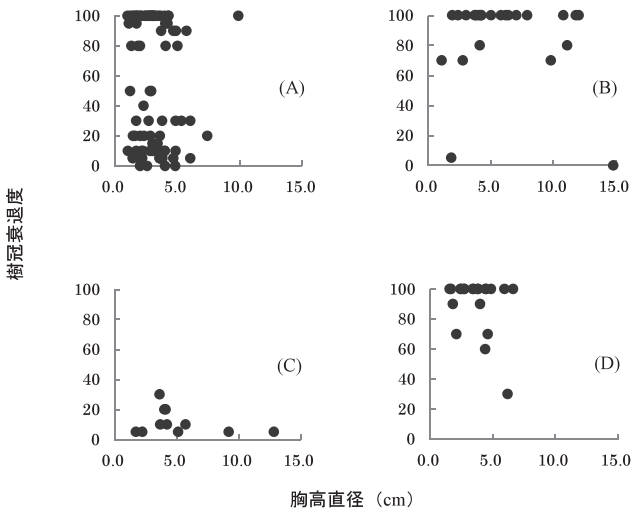


図 6 雄勝区各樹種における胸高直径と樹冠衰退度との関係。(A)ヤブツバキ、(B)タブノキ、(C)ケヤキ、(D)ムラサキシキブ。

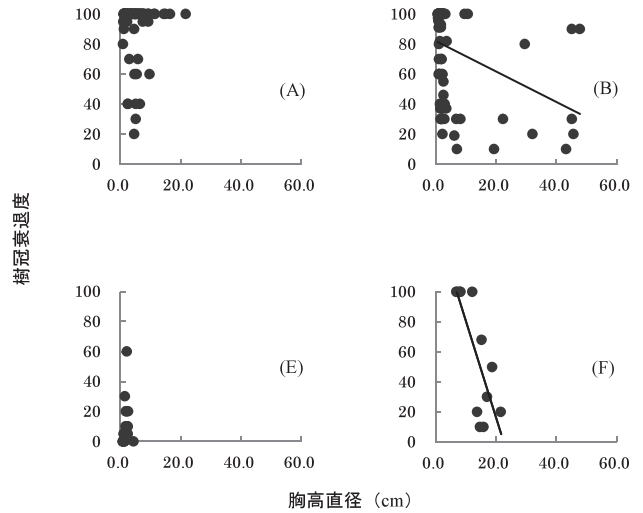


図 7 南三陸区各樹種における胸高直径と樹冠衰退度との関係。(A)ヤブツバキ、(B)タブノキ、(E)マサキ、(F)エゾイタヤ。

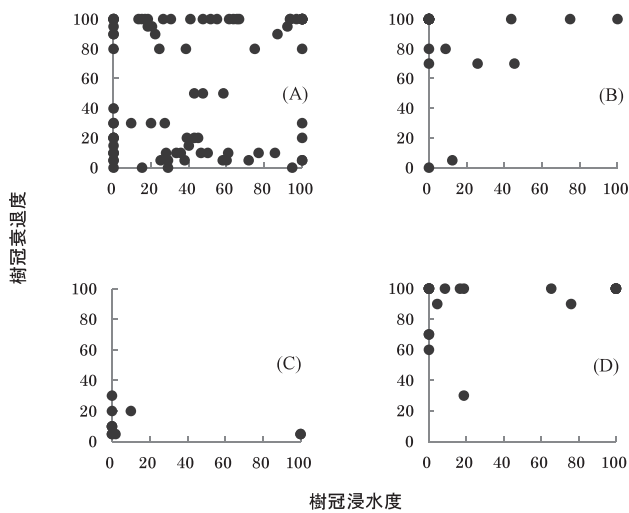


図 8 雄勝区各樹種における樹冠浸水度と樹冠衰退度との関係。(A)ヤブツバキ、(B)タブノキ、(C)ケヤキ、(D)ムラサキシキブ。

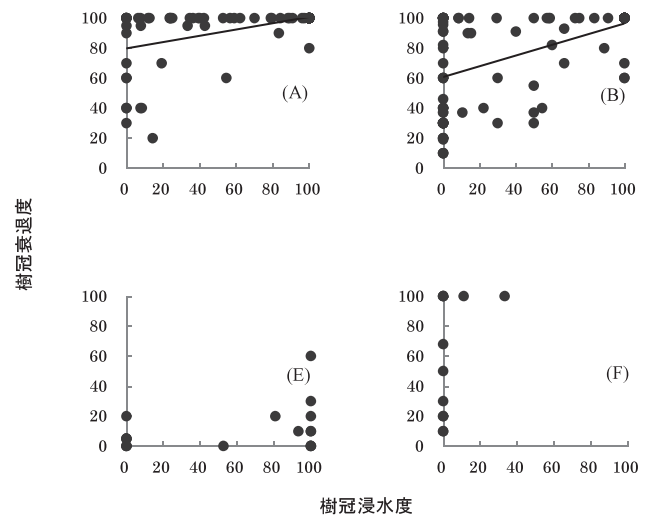


図 9 南三陸区各樹種における樹冠浸水度と樹冠衰退度との関係。(A)ヤブツバキ、(B)タブノキ、(E)マサキ、(F)エゾイタヤ。

## 4 考察

### 4.1 両調査区の各樹種の津波被害の程度

両調査区に共通して出現した樹種は常緑高木種のヤブツバキとタブノキの2種だけである。この2種は両調査区において調査区内の個体と対照木の樹冠衰退度の平均値の差が50%以上あった。この樹冠衰退度の差は津波の浸水の影響によって生じたものであると考えられる。両種の樹冠衰退度の差を比べると、雄勝区ではヤブツバキが53%であるのに対し、タブノキが78%と高かったが、南三陸区ではタブノキの54%に対してヤブツバキが79%と逆に高かった。また、南三陸区においてこの2種の樹冠浸水度と樹冠衰退度の間に有意な正の相関が認められたが、雄勝区ではそれらの間に相関関係が認められなかった(図8, 9)。このような結果には両調査区の立地条件の違いが影響していると考えられる。南三陸区は太平洋に面した斜面であるのに対して、雄勝区は内陸側に面した斜面である。そのため、雄勝区の調査個体は海水による浸水被害が主な要因であるのに対し、南三陸区の個体は海水の浸水に加え、津波の衝撃を直接受けたことが個体の樹冠の衰退に影響を及ぼした可能性が考えられる。

### 4.2 樹冠の浸水程度が個体の樹冠の衰退程度に及ぼす影響

一般化線形モデルによるモデル選択の結果、両調査区のヤブツバキと南三陸区のタブノキ、マサキ、雄勝区のムラサキシキブにおいて最適モデルの説明変数として樹冠深度と浸水樹冠深度が選択され、有意性が認められた。さらに、樹冠深度の係数が負で浸水樹冠深度の係数が正であったことから、これらの樹種では樹冠の浸水程度が大きいほど個体の樹冠の衰退程度が大きかったことが示された。特に、南三陸区の常緑広葉樹3種はいずれも樹冠の浸水程度の影響が顕著であった。これまで、常緑樹の葉はCIが侵入しにくい一方で落葉樹の葉は侵入しやすい特徴が指摘されている(倉内, 1956)。しかし、今回の津波発生時の3月は落葉樹の樹冠の葉は冬芽の状態でありこれまでの既存研究とは条件が異なった。さらに、本調査地の落葉高木種であるケヤキとエゾイタヤは樹高の高い個体が多く、調査木の樹冠浸水度が50%以上になった個体の割合はケヤキでは18%、エゾイタヤでは0%と低かった。そのため、この両種が津波によって樹冠の浸水を受けた場合、それが個体の樹冠の衰退程度に影響を及ぼすかは明らかに

表3 両調査区の各樹種における最適モデルの説明変数の係数と標準誤差およびAIC。  
AICは最適モデルとともにnullモデルの数値も示す。

| 種名      | 説明変数   | 雄勝区        |       |        |         | 南三陸区       |          |        |         |
|---------|--------|------------|-------|--------|---------|------------|----------|--------|---------|
|         |        | 係数         | 標準誤差  | AIC    |         | 係数         | 標準誤差     | AIC    |         |
|         |        |            |       | 最適モデル  | nullモデル |            |          | 最適モデル  | nullモデル |
| ヤブツバキ   | 切片     | 0.488 ***  | 0.058 | 7422.6 | 7751.7  | 0.379 ***  | 0.101    | 1788.9 | 2760.4  |
|         | 胸高直径   | 0.159 ***  | 0.025 |        |         | 0.232 ***  | 0.026    |        |         |
|         | 樹冠深度   | -0.507 *** | 0.038 |        |         | -0.264 *** | 0.049    |        |         |
|         | 浸水樹冠深度 | 0.422 ***  | 0.028 |        |         | 2.961 ***  | 0.138    |        |         |
| タブノキ    | 切片     | 2.27 ***   | 0.137 | 1281.9 | 1326.4  | 1.052 ***  | 0.033    | 4734.6 | 6288.8  |
|         | 胸高直径   | -0.141 *** | 0.023 |        |         |            |          |        |         |
|         | 樹冠深度   | 0.142 **   | 0.045 |        |         | -0.165 *** | 0.007    |        |         |
|         | 浸水樹冠深度 | 0.172      | 0.122 |        |         | 1.826 ***  | 0.074    |        |         |
| マサキ     | 切片     | —          | —     |        |         | -3.109 *** | 0.23     | 317.2  | 411.9   |
|         | 根元直径   | —          | —     |        |         | 0.777 ***  | 0.117    |        |         |
|         | 樹冠深度   | —          | —     |        |         | -2.548 *** | 0.332    |        |         |
|         | 浸水樹冠深度 | —          | —     |        |         | 2.644 ***  | 0.333    |        |         |
| エゾイタヤ   | 切片     | —          | —     |        |         | 5.177 ***  | 0.386    | 355.86 | 942.31  |
|         | 胸高直径   | —          | —     |        |         | -0.302 *** | 0.025    |        |         |
|         | 樹冠深度   | —          | —     |        |         | -0.105 *** | 0.017    |        |         |
|         | 浸水樹冠深度 | —          | —     |        |         | 80.086     | 3196.302 |        |         |
| ケヤキ     | 切片     | -1.144 *** | 0.276 | 93.88  | 108.44  | —          | —        |        |         |
|         | 胸高直径   | -0.217 *** | 0.059 |        |         | —          | —        |        |         |
|         | 樹冠深度   | 0.118      | 0.063 |        |         | —          | —        |        |         |
|         | 浸水樹冠深度 | -1.176 *** | 0.353 |        |         | —          | —        |        |         |
| ムラサキシキブ | 切片     | 5.702 ***  | 0.351 | 416.05 | 673.92  | —          | —        |        |         |
|         | 胸高直径   | -0.756 *** | 0.092 |        |         | —          | —        |        |         |
|         | 樹冠深度   | -0.578 *** | 0.142 |        |         | —          | —        |        |         |
|         | 浸水樹冠深度 | 1.877 ***  | 0.204 |        |         | —          | —        |        |         |

※有意水準は、\*\*\*;  $p < 0.001$ , \*\*;  $p < 0.01$ , \*;  $p < 0.05$ .



することができなかつた。同じ落葉樹でも低木種のムラサキシキブは休眠期であっても樹冠の浸水程度が個体の樹冠の衰退程度に正の影響を及ぼし、かつ樹冠衰退度も高かつた。

常緑樹においては葉に傷をつけた後に海水につけると傷の部分が変色して衰退することが報告されている(倉内, 1956)。このことから、常緑樹種については波力を伴った津波の衝撃によって受けた葉の損傷が個体の樹冠衰退の要因の一つであると考えられる。

宮城県南三陸町津の宮の北に位置する椿島では、津波の物理的影響を強く受けたと考えられる東海岸のヤブツバキを除けば、津波浸水域の林内のタブノキやヤブツバキは健全な状態を保っており、樹木に塩分の影響が確認されなかつた(林田, 2013)。このことも、樹冠の葉に対する津波の衝撃が立地条件によって異なることで生じた現象と考えると矛盾がない。

#### 4.3 個体サイズが個体の樹冠の衰退程度に及ぼす影響

一般化線形モデルによるモデル選択の結果、両調査区のすべての樹種の最適モデルの説明変数に胸高直径(南三陸区のタブノキは樹冠深度、マサキは根元直径)が含まれ、有意性が認められた( $p < 0.001$ )。このことから、個体サイズは津波による個体の樹冠の衰退程度に影響を及ぼす要因の一つであることが示唆された。しかし、両調査区のタブノキと雄勝区のケヤキ、ムラサキシキブ、南三陸区のエゾイタヤは個体サイズが樹冠の衰退程度に負の影響を、両調査区のヤブツバキと南三陸区のマサキは正の影響を及ぼすという対照的な結果になった。

多くの生物は個体サイズにもなって生理的な特徴が変化する(Thomas and Winner, 2002)。例えば、樹種によっては個体サイズにしたがって葉の光合成能力が増加することが報告されている(Tanaka *et al.*, 2004)。また、サイズの大きな個体は小さな個体よりも樹冠が浸水しにくく、津波による衝撃への耐性も高いことが考えられる。よって、個体サイズが小さいほど樹冠の衰退程度が大きかつた樹種については上記のような要因が結果に影響を及ぼしたと考えられる。

一方、津波浸水後の土壌は必ずしもサイズの大きな個体にとって有利な環境であったとは限らない。津波浸水地では土壌中の塩分濃度が上昇したことで(小野・平井, 2012)土壌水の浸透圧が増加し、樹木の根の水分吸収機能が低下した(農林水産省農村振興局, 2011)ことが想定される。樹木は樹高にもなって重力ポテンシャルが増加し、水輸送抵抗などの増大にもない気孔コンダクタンスが低下するため(Koch *et al.*, 2004)、サイズの大きい個体ほど水ストレスを受けていたと考えられる。個体サイズが大きいほど樹冠の衰退程度が大きかつた樹種については上記のような要因が影響していた可能性がある。

しかし、これらはどの樹種にも当てはまるため、同じ常緑広葉樹種であるタブノキとヤブツバキが正反対の傾向を示した理由をこれらの要因から説明することは困難である。常緑高木種のタブノキはサイズが大きくなるにしたがって樹高も林冠を形成する

ほどに成長するため、樹冠が浸水しにくくなる。一方のヤブツバキはタブノキのように林冠を形成せず、低木・亜高木層で優占する常緑亜高木種である。よって、サイズが大きくなるにしたがって逆に被圧によるストレスが増し、それが樹冠の衰退に影響を及ぼしていたのではないかと推察される。

本研究によって、樹冠の浸水程度と個体サイズが樹冠の衰退程度に影響を及ぼす広葉樹種が存在することが示唆された。つまり、津波に対する耐性は同じ樹種でも樹冠が浸水した個体と浸水しなかつた個体、また、苗木のような個体と大径木では異なる可能性があるといえる。よって、今後、広葉樹種の津波に対する耐性を評価する際には、樹冠の浸水程度と個体サイズを考慮すべきである。例えば、樹冠が浸水した場合としなかつた場合、サイズの小さな個体と大きな個体を区別して、それぞれの条件のもと各種の津波に対する耐性を比較、評価することが必要であろう。

#### 謝辞

本研究は三井物産環境基金 2011 年度東日本大震災復興研究助成(R11-F3-211)を受けて行った。調査には山形大学農学部森林保全管理工学研究室の皆さんにご協力いただいた。さらに、査読いただいた方には丁寧な助言をいただいた。深く感謝申し上げる。

#### 引用文献

- [1] 原口強・岩松暉(2011): 東日本大震災 津波詳細地図, 上巻, 青森・岩手・宮城. 古今書院, 167pp.
- [2] 林田光祐(2011): 生物多様性保全機能. (海岸林との共生. 中島勇喜・岡田穰編, 218pp, 山形大学出版会, 山形) 56-61.
- [3] 林田光祐(2013): 津波による攪乱を受けなかつた三陸南部の八景島と椿島の照葉樹林. 海岸林学会誌, 12, 9-12.
- [4] 東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会(2012): 今後における海岸防災林の再生について, 林野庁治山課, 22pp.
- [5] 堀江保夫(1966): 植物の耐塩水性(2) —防潮林構成植物選定のための実験—. 林業試験場研究報告, 186, 113-133.
- [6] 垣原登志子・金子桃子・小林範之・中島勇喜・江崎次夫(2007): マサキ(*Euonymus Japonicus* Thunb.)の防潮林としての適応性. 海岸林学会誌, 6, 23-28.
- [7] 垣原登志子・小林範之・中島勇喜・配川美幸・江崎次夫(2008): マサキ(*Euonymus Japonicus* Thunb.)の防潮林としての適応性(II). 海岸林学会誌, 7, 37-42.
- [8] Koch, G. W., Sillett, S. C., Jennings, G. M. and Davis, S. D. (2004): The limits to tree height. *Nature*, 428, 851-854.
- [9] 倉内一二(1956): 塩風害と海岸林. 日本生態学会誌, 5, 123-127.
- [10] 宮脇昭(1987): 宮城県の植生. (日本植生誌 東北. 宮脇昭編著, 至文堂, 東京). 462-465.
- [11] 宮脇昭(2011) 瓦礫を活かす「森の防波堤」が命を守る. 学研新書, 259pp.
- [12] 中野秀章・高橋敏男・森沢万佐男(1962): 岩手宮城両県下防潮林のチリ地震津波時における実態・効果と今後のあり方. 林業試験場研究報告, 140, 1-88.

- [13] 農林水産省農村振興局 (2011) “農地の除塩マニュアル” <http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/pdf/110624-01.pdf> (参照 2014-8-22)
- [14] 岡田穰・坂本知己・後藤義明・林田光祐 (2014) : 東日本大震災津波による屋敷林および社寺林の被害からみた広葉樹の耐塩水性の評価. 海岸林学会誌, 13, 15-24.
- [15] 小野賢二・平井敬三 (2012) : 東日本太平洋沖地震大津波が三陸沿岸地域におけるスギ林 針葉の赤褐変化に及ぼした影響. 森林総合研究所研究報告, 11:33-42.
- [16] 高橋啓二・堀江保夫 (1965) : 植物の耐塩水性 (1) -防潮林構成植物選定のための実験-. 林業試験場研究報告, 183, 132-151.
- [17] 田中一夫 (1992) : 海岸林の沿革. (日本の海岸林. 村井宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也編, ソフトサイエンス社). 2-15.
- [18] Tanaka,K., Ichie,T., Watanabe,Y., Yoneda,R., Ninomiya, I and Koike,T. (2006) : Changes in photosynthesis and leaf characteristics with tree height in five dipterocarp species in a tropical rain forest. *Tree Physiology*, 26, 865-873.
- [19] Thomas,S.C. and Winner,W.E. (2002) : Photosynthetic differences between saplings and adult trees : an integration of field results by meta-analysis. *Tree Physiology*, 22 : 117-127.
- [20] 山内幸子・林田光祐 (2000) : 太平洋側北限域におけるタブノキ純林と混交林の林分構造と更新. 植生学会誌, 17, 23-30.
- [21] 吉崎真司 (2011) : 海岸林の遷移 (雑木の侵入). (海岸林との共生. 中島勇喜・岡田穰編, 218pp. 山形大学出版社, 山形) 144-148.  
[受付 平成27年 1月 5日, 受理 平成27年 4月28日]