

論文 (Original article)

海岸防災林造成を目的として植栽された広葉樹と クロマツの土壌特性に基づく成長と根系発達

太田 敬之^{1)*}、新田 響平²⁾、宇川 裕一³⁾、小野 賢二¹⁾、萩野 裕章¹⁾、谷川 東子⁴⁾、
大谷 達也⁵⁾、平野 恭弘⁶⁾、小森谷 あかね⁷⁾、野口 宏典⁸⁾

要旨

海岸に植栽された広葉樹には防風、防砂の他に津波被害の軽減の効果も期待され、太くて深い根系を持つ樹種によって構成されることが望ましい。手を加えられていない海岸砂丘と低湿地対策や津波後の海岸再生のために盛土、締め固めをした海岸では土壌の硬さが異なり、根系、地上部の成長への影響が予想されるため、植栽木の成長と土壌特性を比較した。秋田県では海岸砂丘に落葉広葉樹(カシワ、ケヤキなど)を植栽した2か所(浜山、向浜)、千葉県では盛土の上に常緑広葉樹(タブノキ、ウバメガシなど)を植栽した2か所(富津、小松)で調査を行った。すべての調査地でクロマツが植栽されている。胸高直径、樹高、土壌の硬さを測定し、樹種ごとに2~4本ずつ、根の掘り取りを行った。直径1cm以上の根の側方、下方の長さの測定を行い、固結層と根の深さを比較した。広葉樹の植栽木でクロマツの樹高を上回るものは見られず、胸高直径で富津のタブノキだけがクロマツを上回った。植栽後43年の浜山ではクロマツの直根が深さ1mの固結層より深くまで達し、カシワ、ケヤキでも一部の根の侵入が見られた。向浜では土壌は柔らかかったが、貧栄養や強風の影響で地上部の成長は悪かった。植栽後10年の小松では深さ30cmの固結層で、富津では固結層や帯水層で根の成長が止まっていた。海岸林の根の成長には土壌の硬さだけでなく、樹種特性や硬さ以外の土壌特性も影響していることが推察された。

キーワード：海岸砂丘、固結層、帯水層、盛土

1. はじめに

東日本大震災では津波により青森県から千葉県に至る本州太平洋側の海岸林が大きな被害を受け、クロマツ(*Pinus thunbergii*)を中心とした林分がほとんど消失してしまった地域も多く見られた。一方で海岸林が漁船などの大きな漂流物をせき止めたり(坂本ら2012)、津波の勢いを弱めたりした(佐藤ら2012)など、後背の住宅地、農地などへの津波の被害を軽減した事例も報告されている。従来、海岸林造成の目的は主に防砂、防風といった点が重視されてきたが、津波被害の軽減という観点からも海岸林の役割が近年注目され始めている(今井ら2009、吉崎2011、赤澤ら2012)。

海岸林では近年もう一つの問題として、クロマツの枯れ被害が指摘されている(吉田2006、吉崎2011)。そのため、クロマツの単純林から広葉樹を混交した海岸林の造成が各地で行われたり(金子2005、森林総合研究所多摩森林科学園2014)、自然に侵入してきた広葉樹を育成することが行われたりしている(中島・吉崎2016、2018)。

海岸への植栽に適した広葉樹種の選定も行われ、塩害に強いカシワ(*Quercus dentata*) (清水2005)や、千葉県の海岸林の内陸側には生態的に安定したタブノキ(*Machilus thunbergii*) (小平2010)の優位性が報告されている。広葉樹の海岸林導入に当たり、これらの樹種にもクロマツ同様の津波に対する減災機能の付与が期待されることとなるが、そのためには津波に耐えうる根系の発達が必要になると考えられる。

海岸林で植栽を行う際に、低湿地対策として植栽木が根を張らせるために盛土が行われてきた(小田2000、小田2001、野原・高橋2007、寺嶋2012)。東日本大震災で失われた海岸林を再生する際にも根系をより深く張らせるために、盛土を造成した上に植栽を行うことが多い(坂本2015)。基盤整備時に重機による締め固めが行われ、硬化した盛土に植栽された苗木は透水性の悪さも加わって成長が阻害されることが懸念される(村上2015)。締め固めをされた盛土上では土壌を再度深耕するなどの作業を行うことで成長が改善する事例も報告され(小野ら

原稿受付：令和2年8月12日 原稿受理：令和3年4月2日

1) 森林総合研究所 東北支所

2) 秋田県林業研究研修センター

3) 千葉県農林水産業研究センター森林研究所

4) 名古屋大学大学院生命農学研究科

5) 森林総合研究所 四国支所

6) 名古屋大学大学院環境学研究科

7) 千葉県中部林業事務所

8) 森林総合研究所 森林防災研究領域

* 森林総合研究所 東北支所 〒020-0123 盛岡市下厨川字鍋屋敷 92-25

2016)、根の発達と土壌の硬さには相関があるとされる(長谷川ら 1984)が、海岸林を構成する広葉樹について、根系発達を様々な土壌条件下で異なる樹種で比較した事例はほとんど見られない。

筆者らは海岸に植栽された広葉樹の根張りのサイズ、分布範囲などを明らかにすることを目的に調査を行った。海岸林に導入されてきた広葉樹種を対象として、それらの根系掘り取り、根の深さ、太さ、広がっている範囲などを直接観察することによって樹種ごとの根系の構造特性を把握した。また土壌硬度測定を行って土壌特性との関連を解析した。さらに各調査地で広葉樹と同年に植栽されたクロマツの根系と特性を比較した。千葉県においては盛土に植栽された常緑広葉樹について宇川ら(2021)が、秋田県では海岸砂丘に植栽された壮齢の落葉広葉樹について新田ら(2021)が報告している。樹木の根が土壌から引き抜かれる際の引き抜き抵抗力は根の直径(大谷ら 2019)、木の地際直径(阿部 1991, 山瀬ら 2015)との相関があり、太い根や幹の発達が津波に対する減災機能を発揮するのに重要であることと推察される。本報告では両者の結果を踏まえて、海岸林に植栽されたケヤキ、カシワ、タブノキなど広葉樹7種の根系発達について、クロマツとの違いや土壌硬度の影響を明らかにすることを目的とした。

2. 調査地と調査方法

調査地は千葉県山武市小松海岸(以下、小松)、千葉県富津市富津海岸(以下、富津)、秋田県秋田市向浜海岸(以下、向浜)、秋田県潟上市浜山試験地(以下、浜山)の4箇所である。各調査地の諸元をTable 1に示す。

小松と富津はクロマツと常緑広葉樹が主に植栽されており(富津では落葉広葉樹のアカメガシワも植栽)、小松は調査時10年生、富津は30年生であった。小松では地下水位から1.8mほどの高さまで盛土を行っており、土を30cmほど盛るごとに転圧をしたところに植栽が行われた。富津はもともと地下水位が高く、クロマツ林が過湿害により枯損が進行したところに約1mの盛土をして植栽を行った(宇川ら 2021)。

向浜は調査時林齢16年、浜山は林齢43年で秋田県内では最も古い海岸広葉樹植栽林とされており、いずれも締め固めや盛土の行われていない海岸砂丘である(新田ら 2021)。

向浜のように密植されているところでは10m四方、浜山のように成木が広範囲に分布しているところでは約3haの範囲内の植栽木の胸高直径、樹高の測定を行い、樹種ごとにそれらの平均を求めた。これらの測定を行ったものを以降「植栽木」と記載する。

根系の発達を調査するために植栽木の中から樹種別に数本ずつ選定し、それらを伐採し、根を掘り起こした。これらを「掘り取り木」とする。掘り取り木の周囲の土壌硬度は、SH式型貫入試験機(ダイトウテクノグリーン株式会社)を用いて、3kgの重錘を50cmの高さから自由落下させた1打撃ごとの貫入量(土壌に入っていく深さ)の鉛直分布を測定した。この測定で得られる1打撃ごとの貫入量は軟らか度S値と称される。日本造園学会緑化環境工学研究委員会(2000)により、S値が0.7以下は「多くの根が侵入困難」とされている。本研究ではS値が0.7以下となる厚さが5cm以上続いた層を「固結層」と呼ぶこととし、硬い土壌の指標とした。なお、掘り取り木については根系を掘り取る際に土質も観察することができたが、礫が見られることはほとんどなく、すべての調査地点において砂質の土層が深いところまで続いていた。

掘り取り木は地上部、地下部とも重量(乾燥重量)の測定を行った。根の掘り取りはサイズの小さい向浜、小松では人力で、サイズの大きな浜山、富津ではバックホウや圧縮空気による掘削機を用いて行い、根の深さ、側方への根の長さの測定を行った。掘り取り木は向浜ではケヤキ(*Zelkova serrata*)3本、カシワ2本、シナノキ(*Tilia japonica*)2本、クロマツ2本、浜山ではケヤキ3本、カシワ3本、クロマツ2本、小松ではウバメガシ(*Quercus phillyraeoides*)4本、ヤマモモ(*Morella rubra*)3本、トベラ(*Pittosporum tobira*)1本、クロマツ3本、富津ではタブノキ2本、クロマツ2本である。富津においてはクロマツは地下部の重量は30~40kg、地上部の重量は

Table1. 各調査地の植栽樹種と植栽年、最大樹高

	調査地			
	浜山 (秋田県)	富津 (千葉県)	向浜 (秋田県)	小松 (千葉県)
植栽年	1975年	1990年	2003年	2007年
広葉樹の植栽樹種	カシワ ケヤキ ミズナラ	タブノキ	カシワ ケヤキ シナノキ	ウバメガシ ヤマモモ トベラ
広葉樹の最大樹高 (樹種)	11.8m (ケヤキ)	10.4m (タブノキ)	5.0m (シナノキ)	3.1m (ウバメガシ)
クロマツの最大樹高	13.7m	8.4m	3.0m	3.7m
汀線までの距離	500m	100m	200m	250m

100 kg 前後となり、タブノキは地上部 150 kg、地下部 80 kg を越える個体がみられた。掘り取り木の根系の太さ別の根の分布などの詳細は宇川ら (2021)、新田ら (2021) を参照されたい。

向浜、小松では根の先端まで掘り取ることができたものもあったが、浜山、富津の大きな木では困難であった。そこで本報告では根の最小直径 1 cm 時の根の最大深、幹からの距離で比較を行うこととした。ただし、浜山のクロマツ、富津のクロマツ、タブノキは根系が大きいと、側方への根の長さについては根の太さが 1 cm に至る前、幹からの距離が 1.5 m 程度で根を切断し、掘り取ったものもある。

現地で掘り取り直後の生重量を測定し、サンプルを職場に持ち帰り、乾燥重量の測定を行って、各部位の推定重量を算出した。ただし、浜山で掘り取りを行ったクロマツは松枯れで調査の前年 (2018 年) に地上部を伐倒処理されたものを使用した。そのため、浜山のクロマツは地上部のサイズ、重量は不明である。

3. 結果

3.1 植栽木のサイズ構成

各調査地の植栽木の平均胸高直径と平均樹高を Fig. 1 に示す。いずれの調査区においてもクロマツの平均樹高が最も高かった。胸高直径においては富津 (30 年生) のタブノキがクロマツを上回っており、平均樹高もクロマツと大きな違いは見られなかった。小松、向浜といった林齢が比較的若い林分 (それぞれ、林齢 10 年、16 年) では前者ではヤマモモ、後者ではシナノキが樹高ではク

ロマツに近かったが、いずれも胸高直径では劣っていた。最も林齢が高い浜山ではクロマツの平均樹高は 11.2 m、ミズナラ 9.9 m、カシワ 8.5 m であったが平均胸高直径ではクロマツ 24.2 cm、ミズナラ 13.3 cm、カシワ 14.8 cm と大きな違いが見られた。

広葉樹同士を比較すると、浜山ではカシワ、ミズナラ、ケヤキがほぼ同じサイズであったのに対し、イタヤカエデが胸高直径、樹高ともこれらに劣っていた。向浜ではシナノキが最も平均サイズが大きく、次いでカシワとなり、ケヤキは胸高直径、樹高とも劣っているという結果となった。小松ではヤマモモとウバメガシが樹高、胸高直径とも大きな違いが見られなかった。

3.2 掘り取り木の地下部、地上部の重量比

掘り取り木の地下部乾燥重量 (W_u)、地上部の乾燥重量 (W_a) を比較すると向浜ではクロマツ以外の広葉樹は図中の $W_a=W_u$ の直線上付近に集中しており、地上部と地下部の重量がほぼ等しかった (Fig. 2a)。これに対し、クロマツは地下部の重量に対する地上部の重量が大きかった。また、クロマツの地下部の重量は広葉樹で最も小さかったケヤキとほぼ同じであり、生育初期にはまず地上部の成長に資源を配分していることが予想される。カシワは地上部、地下部とも平均 4 kg 程度の重量があるのに対し、ケヤキは 2 本とも 2 kg を下回っていた。

浜山では地上部がないクロマツは Fig. 2b に示されていないが、その地下部の乾燥重量は推定 110.8 kg と 93.8 kg であり、他の広葉樹の掘り取り木の 2 倍以上の値であった。ケヤキはほぼ $W_a = 2W_u$ (地上部の重さが地下の 2

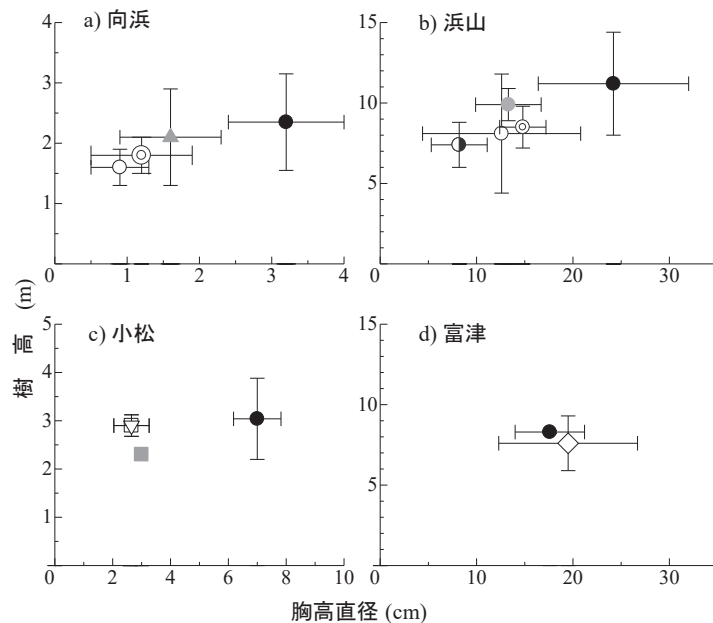


Fig. 1. 各調査地の植栽木の平均サイズ
 ●クロマツ ○ケヤキ ◎カシワ ▲シナノキ ●ミズナラ
 ○イタヤカエデ □ウバメガシ ▽ヤマモモ ■トベラ ◇タブノキ

倍)の線上にプロットされるのに対し、カシワはそれより上にプロットされた。つまり、浜山においてケヤキはカシワより地下部に資源を多い比率で配分していた (Fig. 2b)。向浜ではカシワとケヤキの重量には明らかな違いが見られたが、浜山ではケヤキでもカシワと同等に成長している個体も見られた。

小松ではウバメガシが $W_a=2W_u$ の線上に集まるのに対し、ヤマモモはその線より上に来る個体がほとんどであった。ヤマモモはウバメガシに対し、地下部に対する地上部の比率が高い傾向が顕著に見られた (Fig. 2c)。クロマツはウバメガシに対し、地上部、地下部とも重量が大きかったが、ヤマモモの成長の良い個体とは地上部、地下部ともほぼ同じ重量を示すこともあった。(Fig. 2d)。クロマツとタブノキの地上部と地下部の重量比はいずれも 2:1 に近い値を示した。

3.3 掘り取り木の地際直径と根の重量

根の重量と地際直径の関係について Fig. 3 に示した。浜山のクロマツでは胸高直径が得られなかったこと、向浜の広葉樹では複数の幹が発生している個体が多かったことから、各個体の固有値として地際直径を選択した。なお、根の重量は log スケールで表している。

クロマツは 4 つの調査地で唯一共通して見られる樹種である。浜山では根の重量が 100 kg を越える個体が見られるが、富津では根の重量が 30~40 kg となる。地際直径、根の重量でこの二つの試験地は明確に分かれるが、小松、

向浜ではともに地際直径が 5-10 cm、根の重量は 1-3 kg とほぼ同じ値の範疇に入った。

落葉広葉樹では向浜、浜山の 2 つの試験地でケヤキとカシワが見られる。浜山では地際直径で飛び抜けているケヤキが見られたが、根の重量では両者に大きな違いは見られなかった。一方、向浜のケヤキとカシワでは点が乖離しており、太さ、重量ともカシワはケヤキより大きいことがわかる。また、シナノキはカシワに近いサイズであった。

千葉県の 2 箇所では常緑広葉樹では共通する樹種はないが、タブノキは地際直径、重量とも小松の両種を大きく上回った。ヤマモモとウバメガシはほぼ同じ範疇に入っていた。

いずれのグラフにおいても点はほぼ直線上に並んでいる。グラフは両対数なので地際直径の増え方に対し、根の重量は指数的に増加することを意味している。例えばクロマツでは地際直径が 10 cm から 40 cm になると根の重量が 2 kg から 100 kg に増加している。クロマツ (すべてのプロット)、落葉広葉樹 (浜山、向浜)、常緑広葉樹 (富津、小松) で地際直径 (D_0 , 単位 cm) と地下部乾重 (W_u , 単位 kg) のべき乗回帰式を作成したところ

クロマツ $W_u = 0.0046 * D_0^{2.80} R^2=0.997, P=0.047$

落葉広葉樹 $W_u = 0.0869 * D_0^{1.90} R^2=0.973, P=0.010$

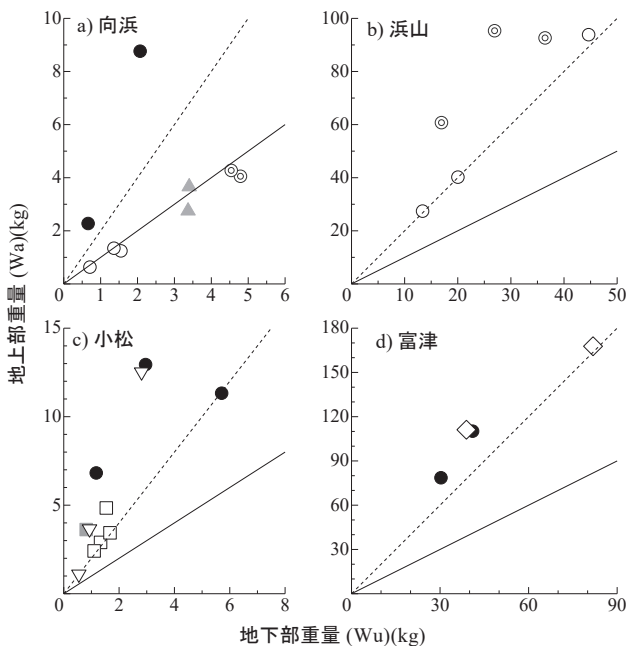


Fig. 2. 掘り取り木の地下部と地上部の重量比
 図中の直線は実線が $W_a=W_u$, 点線が $W_a=2W_u$ を示す
 ●クロマツ ○ケヤキ ◎カシワ ▲シナノキ
 □ウバメガシ ▽ヤマモモ ■トベラ ◇タブノキ

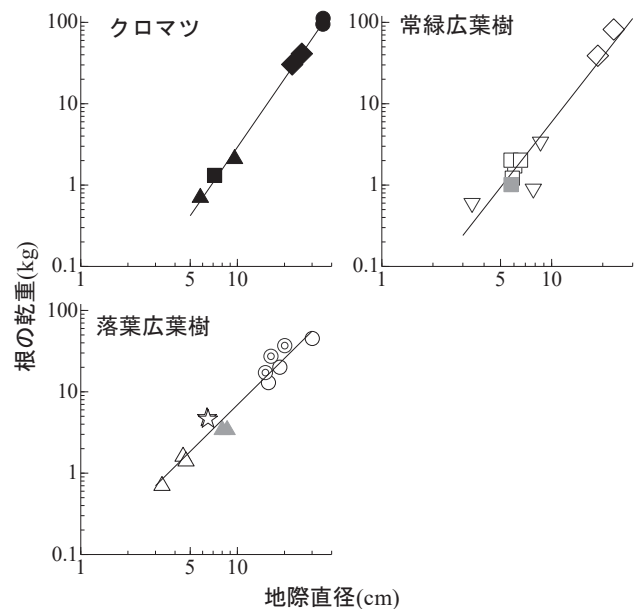


Fig. 3. 掘り取り木の地際直径と根の重量
 図中の直線は回帰式
 クロマツ ▲向浜 ●浜山 ■小松 ◆富津
 常緑広葉樹 小松 □ウバメガシ ▽ヤマモモ ■トベラ
 富津 ◇タブノキ
 落葉広葉樹 向浜 △ケヤキ ☆カシワ ▲シナノキ
 浜山 ○ケヤキ ◎カシワ

常緑広葉樹 $W_u = 0.0127 * D_0^{2.67}$ $R^2 = 0.950$, $P = 0.043$ と示された。いずれも高い相関が得られ、根の重量はクロマツ、常緑広葉樹では地際直径の約3乗に、落葉広葉樹は地際直径の約2乗に比例して増加していく関係が示された。

3.4 根系の側方と下方への伸長

掘り起こした根系がどのように広がっているか、宇川ら (2021)、新田ら (2021) が模式図を示した。本研究では樹種間の比較を行うため、直径1 cm以上の根の側方の距離と深さについて各調査地で比較を行った (Fig. 4)。

クロマツの深さと側方への伸びを4つの調査地で比較すると、浜山の深さが2本とも3mを越えており、それ以外の調査地では1m以上の深さに達している個体は見られなかった (Fig. 4 左上)。浜山ではクロマツの根は他の広葉樹 (カシワ、ケヤキ) より1m近く深いところまで根が伸びていた。向浜では胸高直径5 cmのクロマツの深さが85 cmなのに対し、富津では胸高直径22 cmのクロマツが深さ70 cmまでしか根が到達していなかった。クロマツは小松、向浜などの生育初期では広葉樹と根の下方への伸長は大きく違わないが、浜山のように年数が経つと広葉樹よりも深くまで達することができると推察される。なお、クロマツの側方へ伸びた根は浜山では

100 cm、150 cmで切断されているが、そのときの根の直径は最大でそれぞれ14.2 cm、8.8 cmであった。また、富津のクロマツも実際の側方への根の到達範囲は150 cm、300 cmでそのときの根の断面の直径は4.2 cm、3.0 cmであった。つまり実際のクロマツの根の側方への伸びはグラフよりもはるかに大きい。

落葉広葉樹は浜山と向浜で根系の発達を比較した (Fig. 4 下)。浜山では深さは50 cm程度だが、側方には8 mも伸びているケヤキが観察された。下方への伸びはこのケヤキ1本を除くとケヤキ、カシワ両樹種ともに深さは最大2 mを越えるなど大きな違いは見られない。ただし、この図は根の到達した最大値を示したものであり、実際にはケヤキが浅い地中に太い根を側方に張っているのに対し、カシワは下方に太い根を伸ばしている傾向が顕著であった (新田ら 2021)。向浜ではケヤキは側方に1 m以上根を伸ばしている個体はないが、カシワはいずれも1 mを越えていた。また浜山と同様に下方への最大値は両樹種で大きな違いは見られなかったが、根の重量ではカシワがケヤキを大きく上回った (Fig. 2)。

小松と富津では常緑広葉樹の根系の発達を比較したところ、小松では側方への伸びはウバメガシとトベラで1本ずつ1 mを越えるものがあつたが、それ以外の6本は18~60 cm、下方への伸びはおおむね30~50 cm程度でとどまっていた (Fig. 4 右上)。富津では広葉樹はタブノキだけであり、側方への伸びは見られたが深さは70 cm程度でとどまっていた。なお、タブノキ2本はクロマツと同様に側根をそれぞれ150 cm、250 cmで切断しており、根の切断面の直径は3.8 cm、2.6 cmであった。

小松では植栽から10年しかたっていないこともあり、調査対象となる直径1 cm以上の根はかなり乏しく、富津では太い根がほぼ水平に発達していた (宇川ら 2021)。

3.5 根系の到達深さと固結層の深さ

根の侵入が困難とされる、 S 値 ≤ 0.7 となる土壌層の深さを固結層の深さとし、各掘り取り木の下方への根の到達した深さとの関係を調べた。Fig. 5において、黒い横棒よりも下に点があつた場合には、根 (太さ1 cm以上) が固結層よりも下に到達したことを意味しており、富津においては灰色の横棒が帯水層の深さを示している。

向浜では深さ140 cmでようやく S 値 ≤ 0.7 となる箇所が確認され、掘り取り木は9本なのに対して図中の固結層の点が3つしかないのは、残りの6本は深さ2 mでも S 値が0.7に達していなかったためである。浜山では固結層の深さすべての掘り取り木でほぼ同じであり、100~125 cmくらいに見られる。小松ではウバメガシで1本、固結層の深さが100 cmを越えている以外は固結層の深さは50 cm未満であり、浅いところに固い層があることが明らかになった。富津は4本のうち、1本は固結層の深さが約150 cmだが、他3本は50~70 cm前後であった。また、帯水層は80~100 cmのところのみられた。

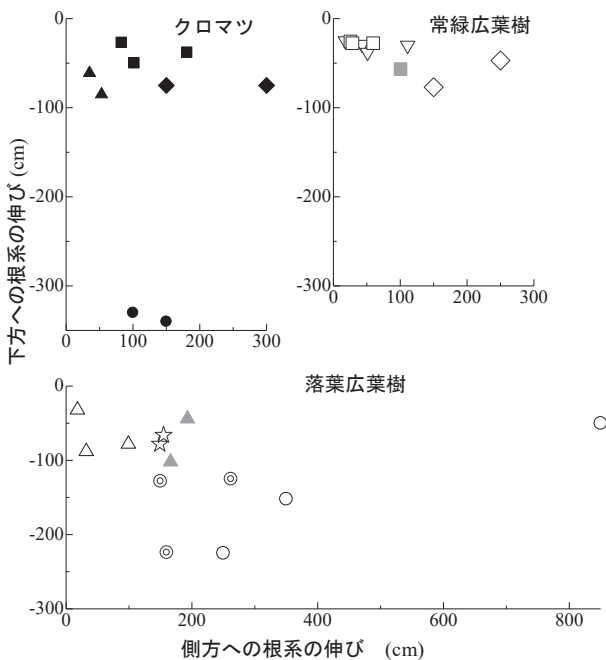


Fig. 4. 根系の下方と側方への発達状態
 クロマツ ▲向浜 ●浜山 ■小松 ◆富津
 常緑広葉樹 小松 □ウバメガシ ▽ヤマモモ ■トベラ
 富津 ◇タブノキ
 落葉広葉樹 向浜 △ケヤキ ☆カシワ ▲シナノキ
 浜山 ○ケヤキ ◎カシワ ●ミズナラ
 ●イタヤカエデ

根の到達深については、向浜では根の到達深は平均で70 cm程度であった。多くの掘り取り木が固結層に達していない。固結層の上端の深さは約200 cmになるものが見られ、他の調査地に比べて極めて柔らかい土壌であることが明らかになった。

浜山では1本を除いて根系到達深が1 mを越えており、クロマツでは2本とも3 m以上の深さまで根が達していた。根の深さが1 m以上のものはいずれも固結層より深く根が達していた。小松については根の到達深は30～50 cmであり、クロマツは固結層を通過していた。それ以外の広葉樹については固結層と根の到達深がほぼ一致していた。富津についてはクロマツ、タブノキとも根の深さはほぼ同じ深さ70 cm前後であった。富津では根系は小松に比べて太かったものの、下方への伸長は固結層と帯水層のより浅いほうでとどまる形となった。

4. 考察

4.1 根系の発達からみた海岸の植栽に適した広葉樹種

本研究では海岸砂丘と盛土に植栽された海岸林で広葉樹とクロマツの根系の調査を実施した。これらから、S値0.7を下回るような硬い土壌には樹種に関わらず根が入りにくいこと (Fig. 5) や、ケヤキは水平方向の根が多い、クロマツは直根が発達するなどの樹種ごとに根の分布の特徴が異なる様子が明らかになった (Fig. 4)。

今回調査対象とした樹種について、根の深さ方向への伸長の特徴を苅住 (2010) によって分類すると、
 深根性：クロマツ、カシワ、ミズナラ、ウバメガシ
 中間型：タブノキ、ヤマモモ

浅根性：ケヤキ、シナノキ、イタヤカエデ、トベラ
 となった。この特性は内陸の森林内で評価されたものが多いが、海岸林の土壌で生育した場合でも同様の樹種特性を示すことが本研究から明らかになった。

宮城県森林整備課 (2012) は宮城県における耐潮性に変容した樹種としてクロマツ、カシワ、タブノキ、トベラをあげている。カシワは浜山ではクロマツに次ぐ胸高直径があり (Fig. 1)、S値0.7以下の土壌深でも成長しうる根を深く張る (Fig. 4) 樹種であることが明らかになった。北海道にはカシワの天然林が海岸沿いに広がり (長谷川 1984)、秋田市にはカシワの40年生の人工林が成立するなど日本海側の海岸に適した樹種であることは明らかである。

ケヤキについては成木になったときの根の重量 (Fig. 2、Fig. 3)、根の到達深 (Fig. 4) はカシワと大きな違いは見られない。しかし、浅根性であり水平根が発達し根の大半が表層に見られる (新田ら 2021) など「深く根を張る」とは言えない。ただし、引き抜き実験ではクロマツ、タブノキなど数樹種の中で最も根回りモーメントが高い (野口ら 2014) と報告され、倒伏しにくい樹種であると言える。また、根の太さあたりの引き抜き抵抗力は多くの樹種の中で飛び抜けて大きいという報告がなされている (北原 2010)。このような倒伏抵抗力の大きい樹種は浅根性であっても海岸林の植栽に選択可能な樹種と言えるだろう。

タブノキについては地上部、地下部ともクロマツとほぼ同様の生育をしていた (Fig. 1、Fig. 2)。今回の調査では地下の停滞水があったために根系が十分な深さに達し

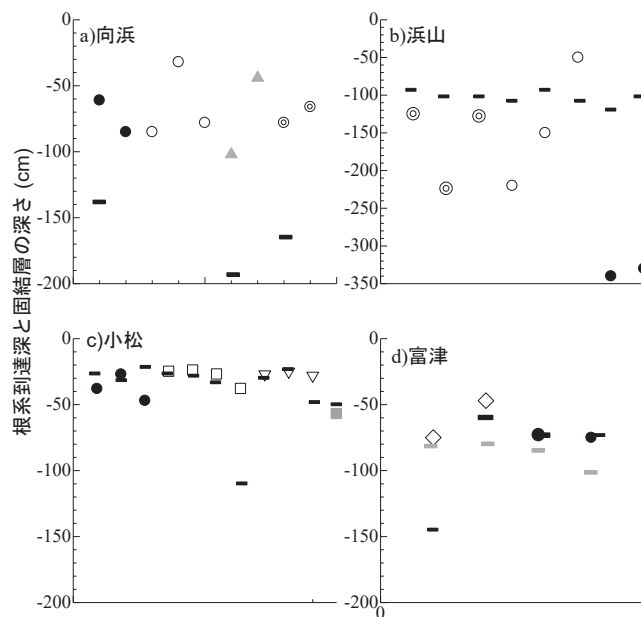


Fig. 5. 固結層、帯水層の深さと根系の到達深

いずれも直径1 cm以上の根を対象としている

— 固結層 — 帯水層 (富津のみ)

●クロマツ ○ケヤキ ◎カシワ ▲シナノキ □ウバメガシ ▽ヤマモモ ■トベラ ◇タブノキ

ていなかったが (Fig. 5)、東北地方日本海側から九州まで広く海岸沿いに分布する樹種であり、耐潮性も高いことから温度環境の適地であれば植栽木として適したものと言えよう。小松ではヤマモモとウバメガシのサイズはほぼ同じであったが (Fig. 1)、地上部重量ではヤマモモのばらつきが大きく、地上部、地下部の重量の最大値ではウバメガシを大きく上回っていた (Fig. 2)。これはヤマモモが多幹であり、直径はそのうちの 1 本の値であったためである。ヤマモモは高木種であるがウバメガシは亜高木種であるため、将来的には両者の成長には差異が生じることが予想される。

同じ調査地では掘り取り木の地上部と地下部の重量比 (TR 比) は多くの樹種でほぼ比例関係がみられた (Fig. 2)。千葉県海岸に植栽されたクロマツでは胸高直径が 2-10 cm の範囲では、根が扁平であってもサイズが大きくなっても TR 比はほぼ同じとされている (小田 2000, 2001)。一方、富津、浜山ではクロマツのサイズはそれより大きく、富津の TR 比は向浜、小松よりも小さい (Fig. 2)。クロマツにおいては根の発達に先立ち、地上部の成長を行うがサイズが大きくなるにつれて根系の発達が重要となることが予想される。一方、広葉樹においては向浜と浜山を比較すると、サイズが小さい向浜では TR 比はすべての樹種でほぼ 1 であるのに対し、浜山ではケヤキで 2、カシワではほぼ 3 となり、クロマツとは全く反対の傾向が見られた (Fig. 2)。クロマツの植栽時には盛土で深耕を行うことにより、深くまで根を張る事例が知られている (野原・高橋 2007) が、生育初期に根の比重の大きい広葉樹植栽にこうした手法がより必要となる可能性が示唆される。

4.2 根系の発達の阻害要因

富津海岸では植栽後 30 年、サイズも大きいクロマツやタブノキの根系が浜山に比べてはるかに浅いのは、深さ 70 cm 前後に帯水層があり、根がそれ以上伸長できないためである。浜山では植栽木の生育が良好で根も深くまで達していた。向浜では土層が柔らかく、固結層がとて深いために根がそこまで達していない。小松では固結層が浅く、根が固結層に達した後に広葉樹の根系はそこをなかなか通過できず、富津では植栽木の生育は良好だが固結層、もしくは帯水層のために根が深くまで達することができない状況であった (Fig. 5)。

帯水層により海岸林の植栽木 (主にクロマツ) が枯死する事例が千葉県九十九里において報告されており、植栽木の樹齢 (x 年) と生存に必要な根系の垂直深 (y cm) は $y = 2.1x + 11.6$ という関係があるとしている (小田 2000, 2001)。富津においては植栽後 30 年とすると、72 cm 程度の厚さが必要とされるが、帯水層からの厚さは約 80 cm でこの基準を現在は満たしていると考えられる。ただし、固結層が帯水層より浅い場合、根系の成長は固結層で制限されていた (Fig. 5)。

津波のときに植栽木が抜けにくいかどうか、決定づける要因として根系の深さ、重量の他に固結層の下まで根が発達しているかどうか、「根の抜けにくさ」というものがあげられる (阿部 1997)。この視点から、浜山は固結層の下まで根を発達させた典型的な事例と言える (Fig. 5)。小松では S 値 0.7 の層よりも深く達している根が一部見られたが、富津では固結層と帯水層が、小松では固結層が根の下方への伸長を阻んでいた (Fig. 5)。

向浜では土壌はきわめて柔らかく、根の到達深は 1 m になるものもあるが (Fig. 5)、植栽木、特に広葉樹の地上部サイズはきわめて小さい (Fig. 1)。この調査地では植栽時に客土、防風柵によりケヤキ、カシワの成長、生存率が改善され (金子・田村 2007)、元々は風が当たり土壌がやせていた。他の 3 つの調査地では堤防や砂丘の後背地であるため、直接の風の影響は少ないが、向浜は海に近く、現在は防風柵もなくなっており、より海風の影響が大きいと考えられる (Table 1)。根系の発達には地上部の成長が不可欠 (Fig. 2, Fig. 3) であり、土壌が柔らかい場合でも他の条件で成長が困難な場合は根系の発達が難しいことも配慮する必要がある。

5. 終わりに

本研究では海岸に植栽された広葉樹の根系の発達状態と土壌の関係について、秋田県、千葉県において調査を行ったものである。秋田県の 2 箇所は海岸砂丘に植栽された落葉広葉樹、千葉県の 2 箇所は造成された盛土の上に植栽された常緑広葉樹である。浜山では固結層まで深さが約 1 m あり、砂丘の後背地で海風があまり吹かない理想的な条件の海岸林であり、各樹種の根系が十分に発達した状態を観察することが出来た。向浜では土壌は柔らかいものの地上部の成長が極端に悪く、土壌の貧栄養化の悪影響が見られる事例と言える。富津では帯水層で根系の成長がとどまっていたが、その上の盛土では太い根が見られた。これは海岸林で植栽を行う際の盛土の有効性を示したものであろう。小松では盛土ではあるが、固結層までの深さが 30 cm 程度しかなく、転圧による締め固めが根系の発達に悪影響を与えていた。これらの結果から推察される、海岸林の立地条件と根系の関係性は以下の 4 点に集約される。

- 1) 海岸砂丘でも造成地でも固結層は根の伸長を阻害するが、土壌硬度以外の立地条件が良好であれば、壮齢になった樹木では、固結層に侵入する根が見られる。
- 2) 帯水層の存在は樹木根系の伸長にとってクリティカルな影響を及ぼすため、盛土は有効な施業のひとつである。
- 3) 海岸の中でも貧栄養もしくは風衝地に相当する森林では、地上部の成長は小さく抑えられ、地上部に対する地下部の重量割合が大きくなる。
- 4) 地際直径などを基準とした場合、クロマツに対して

広葉樹の根量は遜色があるとは言えない。

本研究の4つの調査地は立地環境が異なるため、今後、類似する立地環境をもつ複数の調査地での調査を行うことで、これらの推察が修正を施されながら証明されていくものと考えている。

また、これらの樹種の特性を生かし、時期や場所をずらしながら、最適な樹種の組み合わせを考えていくことも海岸林造成には必要である。例えば、クロマツを先行して植栽し、その後に広葉樹を植えるなど風への対策(渡部 2015)、前線に植栽する樹種、後方に植栽する樹種を変えるなどの対策が実際に行われている。日本海側の天然林ではケヤキ、シナノキは海岸最前線、一部にはカシワ林、タブノキ林が成立している(和田・白沢 1998)。一方、宮城県ではケヤキは海岸沿いではなく陸側に植栽すべきとしている(宮城県森林整備課 2012)。海岸の防災林はある程度の林帯幅を持たせる必要があり、どこに何を植えるべきかという林分配置、そして植栽の際には根系の発達を考えた際の盛土工や土壌の攪拌、静砂垣などの防風対策など多くのことを考慮することが重要と考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、浜山、富津での根の掘り起こしは森林総合研究所実験林室の荒井和徳、杉山正幸、根本和也の各氏の協力のもと行われた。調査地の使用許可には千葉県中部林業事務所、千葉県北部林業事務所、秋田県林業研究研修センターのご協力をいただいた。本研究は(国研)森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト(課題番号 201701)による研究成果である。

引用文献

- 阿部 和時(1991) 根系の引き抜き抵抗力によるセン断補強強度の推定. 日緑工誌, 16, 37-45.
- 阿部 和時(1997) 樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究. 森林総研研報, 373, 105-181.
- 赤澤 史顕・佐藤 学・里深 好文(2012) 海岸林による津波減災に関する一考察. 歴史都市防災論文集, 6, 339-344.
- 長谷川 栄(1984) 北海道における天然生海岸林の保全に関する基礎的研究, 石狩海岸におけるカシワ林の構造と更新. 北大演習林研報, 41, 313-422.
- 長谷川 秀三・田畑 衛・小澤 徹三・佐藤 吉之(1984) 重機造成地の植栽基盤の物理的活力度の関係について—高速道路植栽地を例として—. 造園雑誌, 48(2), 104-122.
- 今井 健太郎・原田 賢治・渡辺 修・江刺 拓司・島貫 直樹・八木 智義・今村 文彦(2009) 実地形における海岸林を利用した津波減勢策—仙台湾岩沼・名取海岸を例として—. 土木学会論文集 B2(海岸工学), B2-65, 1, 326-330.
- 金子 智紀(2005) 秋田県中部の海岸砂丘後背地に植栽した広葉樹混交林の成長. 東北森林科学会誌, 10, 90-94.
- 金子 智紀・田村 浩喜(2007) 広葉樹を活用した海岸防災林造成技術の開発. 秋田県森林技術センター研究報告, 17, 37-60.
- 苅住 昇(2010) 最新樹木根系図説 各論. 誠文堂新光社 1101pp.
- 北原 曜(2010) 森林根系の崩壊防止機能. 水利科学, 311, 11-37.
- 小平 哲夫(2010) 千葉県九十九里浜におけるマツ材線虫病により枯れが進んだクロマツ海岸防災林の目標林型の検討. 関東森林研究, 61, 223-226.
- 宮城県森林整備課(2012) 海岸防災林に適した植栽樹種に関する調査報告書～宮城県における海岸防災林に適した樹種の選定と種苗の供給について～. 17pp.
- 村上 卓也(2015) 盛土を伴う海岸防災林復旧工事と植栽までの手順. 日緑工誌, 41(2), 341-343.
- 中島 有美子・吉崎 真司(2016) 愛知県渥美半島掘切海岸における広葉樹海岸林の種組成及び分布パターン. 日緑工誌, 42, 92-97.
- 中島 有美子・吉崎 真司(2018) 西南日本における温暖帯の常緑広葉樹で構成される海岸林の群落型と立地条件について. 日緑工誌, 43, 596-604.
- 日本造園学会緑化環境工学研究委員会(2000) 緑化事業における植栽基盤整備マニュアル. ランドスケープ研究, 63(3), 224-241.
- 新田 響平・野口 宏典・太田 敬之・小野 賢二・萩野 裕章・野口 享太郎・大谷 達也・宇川 裕一・小森谷 あかね・谷川 東子・平野 恭弘・鈴木 覚(2021) 秋田沿岸に植栽されたクロマツ及び広葉樹数種の根系分布. 森林総研研報, 20, 169-184.
- 野原 咲枝・高橋 孝之(2007) 海岸保安林における湿地対策としての盛土工法の評価—クロマツ 10 年生の根系発達—. 千葉森セ研報, 2, 1-6.
- 野口 宏典・鈴木 覚・南光 一樹・竹内 由香里・金子 智紀・新田 響平・渡部 公一・坂本 知己(2014) 海岸砂丘地に植栽された広葉樹およびクロマツの倒伏抵抗特性の引き倒し試験による評価. 海岸林学会誌, 13, 59-66.
- 小田 隆則(2000) 砂丘海岸林の低湿地におけるクロマツ根系の分布特性からみた必要盛土厚. 日砂丘誌, 47(2), 102-110.
- 小田 隆則(2001) 海岸砂丘低湿地における植栽木根系の滞水反応と植林帯造成法に関する研究. 千葉県森林研究センター特別研究報告, 3, 1-78.
- 小野 賢二・今矢 明宏・高梨 清美・坂本 知己(2016) 海岸防災林復旧・再生事業における生育基盤盛土の現状—事業着手初期の未耕起盛土の物理性および盛土への各種耕起工が土壌硬度鉛直分布に及ぼす効果

- の評価一. 森林総研研報, 15, 65-78.
- 大谷 達也・米田 令仁・野口 宏典 (2019) 磯浜に成立する海岸林における常緑広葉樹の根系引き抜き試験. 日林誌, 101, 168-172.
- 坂本 知己 (2015) 津波による海岸林の被害と海岸林再生で盛土をする理由. 日緑工誌, 41(2), 334-335.
- 坂本 知己・新山 馨・中村 克典・小谷 英司・平井 敬三・齋藤 武史・木村 公樹・今 純一 (2012) 東北地方太平洋沖地震津波における海岸林の漂流物捕捉効果, 青森県八戸市市川町の事例. 日本海岸林学会誌, 11(2), 65-70.
- 佐藤 創・岡田 穰・野口 宏典 (2012) 海岸林が津波に耐え津波の勢いを弱めた事例—海岸林の波力減殺機能—. 森林科学, 66, 17-20.
- 清水 一 (2005) 海岸地域に適した緑化樹選び (II) —塩風で枯れやすい樹種と枯れにくい樹種—. 光珠内季報, 140, 9-13.
- 森林総合研究所多摩森林科学園編 (2014) クロマツ海岸林に自然侵入した広葉樹の活用法—松枯れから防災機能を守るための広葉樹林化—. 45 pp.
- 寺嶋 嘉春 (2012) 千葉県九十九里海岸林造成における低湿地対策の取り組み. 水利科学, 325, 30-40.
- 宇川 裕一・小森谷 あかね・野口 宏典・太田 敬之・小野 賢二 (2021) 海岸防災林の生育基盤盛土に植栽されたクロマツと広葉樹の根系成長—千葉県山武市小松と富津市富津の海岸林における事例—. 森林総研研報, 20, 185-194.
- 和田 覚・白沢 芳一 (1998) 秋田県における海岸広葉樹林の林分構造. 東北森林科学会誌, 3(2), 9-12.
- 渡部 公一 (2015) 海岸風衝地におけるクロマツと落葉広葉樹混交林の造成について. 水利科学, 346, 107-11.
- 山瀬 敬太郎・谷川 東子・池野 英利・藤堂 千景・大橋 瑞江・檀浦 正子・平野 恭弘 (2015) 異なる土壌環境下における根系構造と引き抜き抵抗力との関係. 日緑工誌, 41, 301-307.
- 吉田 成章 (2006) 研究者が取り組んだマツ枯れ防除—マツ材線虫病防除戦略の提案とその適用事例—. 日林誌, 88, 422-428.
- 吉崎 真司 (2011) 海岸林の機能と津波に対する樹木の応答について. 日緑工誌, 37(2), 281-285.

Trunk and root growth of planted broadleaf trees and *Pinus thunbergii* in coastal forests in relation to soil properties

Takayuki OTA^{1)*}, Kyohei NITTA²⁾, Yuichi UGAWA³⁾, Kenji ONO¹⁾, Hiroaki HAGINO¹⁾, Toko TANIKAWA⁴⁾, Tatsuya OTANI⁵⁾, Yasuhiro HIRANO⁶⁾, Akane KOMORIYA⁷⁾ and Hironori NOGUCHI⁸⁾

Abstract

Broadleaf trees in coastal forests are expected to reduce tsunami damage, act as windbreaks, and reduce soil erosion. Trees with strong and deep root systems are desirable for providing these ecosystem services, but root development can be affected by soil properties, especially when trees are planted on consolidated soils. We assessed the trunk and root growth of planted broadleaf trees in relation to soil properties in four plots in Akita and Chiba Prefectures, Japan. Two plots in Akita prefecture, Mukaihama and Hamayama, contained deciduous broadleaf trees (including *Quercus dentata* and *Zelkova serrata*) planted on sand dunes. The remaining two plots in Chiba prefecture, Futtsu and Komatsu, contained evergreen broadleaf trees (including *Machilus thunbergii* and *Quercus phillyraeoides*) planted on embankments of consolidated soil. *Pinus thunbergii* was planted in all plots. Diameter at breast height, tree height, and soil hardness were assessed and the roots of two to four trees of each species were excavated in each plot. The lengths of vertical and lateral roots >1 cm in diameter were measured and we compared the depth of the consolidated soil layer to root length. In Hamayama, the vertical roots of *P. thunbergii* and some roots of *Q. dentata* and *Z. serrata* extended below the consolidated soil layer, which was 1 m in depth. Although the soil was extremely soft at Mukaihama, tree growth was poor due to oligotrophic conditions and strong winds. In Komatsu, where trees had been planted a decade previously, the consolidated soil layer was found at a depth of approximately 30 cm, whereas at Futtsu it was found at depth of 70 cm because of aquifer was found at 80 to 100 cm in depth. We therefore concluded that root growth in coastal forests is affected by soil hardness as well as tree attributes and other soil properties.

Key words : aquifer, banking, consolidated soil layer, sand dunes

Received 12 August 2020, Accepted 2 April 2021

1) Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Akita Forestry Research and Training Center

3) Forest Research Institute, Chiba Prefectural Agriculture and Forestry Research Center

4) Nagoya University, Graduate School of Bioagricultural Sciences

5) Shikoku Research Center, FFPRI

6) Nagoya University, Graduate School of Environmental Studies

7) Chiba Prefecture Chubu Forestry Administrative Office

8) Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI

* Tohoku Research Center, FFPRI, 92-25 Nabeyashiki, Morioka, Iwate, 020-0123 Japan; E-mail: takaota@ffpri.affrc.go.jp