

論文 (Original article)

秋田県の海岸砂丘に生育するクロマツおよび植栽広葉樹数種の根系分布

新田 響平^{1)*}、野口 宏典²⁾、太田 敬之³⁾、小野 賢二³⁾、萩野 裕章³⁾、野口 享太郎³⁾、大谷 達也⁴⁾、宇川 裕一⁵⁾、小森谷 あかね⁶⁾、谷川 東子⁷⁾、平野 恭弘⁸⁾、鈴木 寛⁹⁾

要旨

津波への根返り耐性に影響する樹木の根系について、砂丘環境に植栽された広葉樹が山地と同様の根系分布を有するのか確認するため、植栽年が異なる秋田県の2つの海岸林において、クロマツおよび広葉樹数種の根系分布を調査した。林齢16年生の調査地においては、シナノキやクロマツについては既往の研究における山地の根系分布の形態的特徴との類似が観察された。しかし、カシワの1個体やケヤキについては観察されなかった。これは隣り合う植栽木と近接していたこと、根系の成長を阻害する埋設物(肥料袋やプラスチックゴミ)が影響したと推察された。林齢43年の調査地においては、掘り取り対象としたカシワ、ケヤキ、クロマツすべての樹種で山地の根系分布との類似が観察された。両調査地において掘削した深さでは長期にわたる土壌水の停滞は確認されず、停滞水による根の成長阻害はないと推察された。また調査対象木周辺の土壌において、植物の根の侵入が困難とされる固結層は確認されないか、確認されても固結層を突き抜けて根系が伸長していた。これは両調査地が砂質土壌であり、透水性が高いことに起因していると考えられた。これらのことから、埋設物がある、土壌中での水の停滞があるといった根系成長を阻害する要因がなければ、広葉樹の根系は砂質土壌の海岸砂丘地においても山地と同等の分布や形態となることが示唆された。

キーワード：根系、広葉樹、海岸林、津波耐性

1. はじめに

総延長35,649km(環境省大臣官房環境計画企画調査室2017)におよぶ長い海岸線を持つ我が国において、海岸林は飛砂防備、防潮、防風といった防災機能の発揮を通して内陸側の生活空間を確保する重要な役割を担っている。2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波によって多くの海岸林で根返り等の被害が発生した。特に地下水深度が1.0m未満の範囲では根返りが起こりやすく、その一部は流亡した(渡部ら2014)。このことから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)は、地域の防災機能の確保を図る観点から、飛砂・風害の防備等の災害防止機能に加え、津波に対する被害軽減効果も考慮した海岸防災林の復旧・再生を検討していく必要があるとし、そのために津波に対して根返りしにくい林帯を造成する必要性を示している。

海岸林において、これまでクロマツ(*Pinus thunbergii*)が主要な造成樹種とされ、歴史的にも長く、広範囲にわ

たり植栽されてきた。しかし、マツバノタマバエ被害やマツ材線虫病の蔓延など、単一樹種で構成される森林は脆弱であることが指摘されている(金子・田村2007)。ま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)は、自然条件や地域のニーズを踏まえた多様な森づくり、生物多様性の保全も求められていることから、植栽地の状況を見極めつつ、広葉樹の植栽等についても考慮することが望ましいとしている。

海岸林への広葉樹の導入について、これまで導入樹種や導入方法等の視点から研究がなされてきた。導入可能な広葉樹種については、太平洋側の林帯最前線にマサキ(*Euonymus japonicus*)、トベラ(*Pittosporum tobira*)、カシワ(*Quercus dentata*)等が、林帯後方部にアカメガシワ(*Mallotus japonicus*)、エノキ(*Celtis sinensis* var. *japonica*)、ネズミモチ(*Ligustrum japonicum*)、イボタノキ(*Ligustrum obtusifolium*)、ウバメガシ(*Quercus phillyraeoides*)、タブノキ(*Machilus thunbergii*)、コナラ(*Quercus serrata*)、エゾ

原稿受付：令和2年8月24日 原稿受理：令和3年3月15日

1) 秋田県林業研究研修センター

2) 森林総合研究所 森林防災研究領域

3) 森林総合研究所 東北支所

4) 森林総合研究所 四国支所

5) 千葉県農林総合研究センター 森林研究所

6) 千葉県中部林業事務所

7) 名古屋大学大学院生命農学研究科

8) 名古屋大学大学院環境学研究科

9) 森林総合研究所 森林災害・被害拠点

* 秋田県林業研究研修センター 〒019-2611 秋田県秋田市河辺戸島字井戸尻台47-2

イタヤ (*Acer mono* var. *glabrum*) などが有望な樹種として挙げられる (小田 1987, 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)。日本海側の例ではケヤキ (*Zelkova serrata*)、エゾイタヤ、シナノキ (*Tilia japonica*)、カシワ、アカメガシワ、コナラ、クリ (*Castanea crenata*)、エノキ等が導入広葉樹として提案されている (伊藤 2000, 金子・田村 2007)。またこれらの広葉樹の導入環境や植栽方法について小田 (1987) や金子・田村 (2007) が植栽試験により検討している。しかし、これらの既存の研究において、海岸林に植栽された広葉樹の津波耐性という視点に立って実施されたものは限定的であり、海水の侵入によって発生する塩水への浸漬に対する耐性や津波による物理的な破壊力への耐性については考慮されていない。

塩水浸漬に対する耐性については、クロマツだけでなく複数の広葉樹において、苗木における実験や津波浸水地などでの被害調査などから検証されてきた (高橋・堀江 1965, 堀江 1966, 吉崎 2011, 伊東・吉崎 2013, 岡田ら 2014, 本田・林田 2015, 井上ら 2015)。これらの先行研究によって広葉樹の塩水浸漬への耐性は解明されつつある。その一方で、津波による物理的な破壊力への耐性について研究事例が少ないのが現状である。

海岸林は、津波の波力を減衰させて流速やエネルギーを低下させ、その破壊力を弱める効果 (Inoue et al. 2007, Okada et al. 2009, 岡田ら 2012)、漂着物を捕捉し、二次的災害を軽減または防止する効果 (Sakamoto et al. 2008, 坂本ら 2012)、すがりつきの対象となる機能 (石川 1992) などを持つとされる。これらの効果・機能の発揮には、海岸林の樹木自体が津波によって根返りや流木化を起こさないことが重要である。つまり、根返り・流木化への耐性が津波による物理的な破壊力への耐性と考えることができる。根返りと根系構造は深い関係がある (田村 2012) が、これらを定量的に評価した研究は、クロマツやスギ (*Cryptomeria japonica*) などの針葉樹を対象とした事例が見られるのみであり (Coutts 1983, 野々田ら 1996, 木下ら 2013, Hirano et al. 2018, Todo et al. 2019)、広葉樹ではほとんど見られない。さらに広葉樹の根系構造等については苅住 (1979) に詳しいものの、そこで示される事例の多くが山地土壌での観察事例であるため、未熟な砂質土壌を主とする海岸砂丘地において同様の根系構造を示すかどうかは明らかではない。このような背景から、砂丘環境における広葉樹の根系分布に関する知見を蓄積する必要がある。

そこで本研究では砂丘環境においても山地と同様の根系構造を示すか検証するため、海岸砂丘上に造成された植栽年の異なる広葉樹 2 林分において、根系の三次元構造等について調査した。

2. 調査地・調査方法

2.1 調査地

2.1.1 向浜調査地

向浜調査地 (以下、向浜) は秋田県秋田市向浜地内の標

高 3.5 m、北緯 39 度 47 分 46.1 秒、東経 140 度 2 分 20.8 秒、汀線から約 200 m に位置する (Fig. 1 下)。海側に防潮堤はないが、西側に 40 m、東側に 60 m のクロマツ林帯 (樹高 7 ~ 9 m) に挟まれているため、直接的な潮風が弱められている環境にある。土壌は砂質土で構成される未熟土である (土じょう部 1976)。当該調査地は 2002 年にケヤキ、シナノキ、カシワ、エゾイタヤが各樹種ともに 10,000 本/ha 植栽された海岸広葉樹植栽試験地であり (金子・田村 2007)、植栽区画内には天然に定着したクロマツがわずかに混生する一斉林である。この植栽試験地において生存している広葉樹個体およびクロマツの天然更新個体を根系調査の対象とした。調査時 (2017 年) の広葉樹生存木は林齢 16 年生で、最大樹高 2 m 程度であった。また枝階痕から推定されたクロマツ天然更新個体の樹齢は 8 年生であった。

2.1.2 浜山調査地

浜山調査地 (以下、浜山) は秋田県潟上市天王字浜山地内の天王海岸林内の広葉樹植栽地である (Fig. 1 上)。浜山は男鹿半島の南部から秋田港にかけて南北長さ約 14 km、林帯幅 290 ~ 600 m の海岸林の一部である。標高 8 ~ 11 m、北緯 39 度 47 分 46.1 秒、東経 140 度 2 分 20.7 秒、汀線からの距離 520 ~ 560 m の砂丘背後に位置し、海側には約 500 m のクロマツ林帯が形成されている。土壌は砂質土で構成される未熟土である (土じょう部 1976)。広葉樹は 1977 ~ 1979 年に秋田県の治山事業として植栽されたものの一部で、林齢は 42 ~ 44 年生であった。植栽樹種はエゾイタヤ、ケヤキ、カシワ、ミズナラ (*Quercus crispula*)、セイヨウヤマハンノキ (*Alnus glutinosa*) であり、調査時点において樹高 18 m 前後のクロマツとともに二段林ないし混交林状の林相を呈していた。

2.2 掘り取り対象木の選木とサイズ

向浜において、地上部の生育状況および掘り取りの効率等を考慮してケヤキ 3 本、シナノキ 2 本、カシワ 2 本の 3 樹種 7 本とともに周辺で天然更新したクロマツ 2 本を掘り取り対象木として選木した。浜山においては広葉樹植栽地内に生育するカシワおよびケヤキそれぞれ 3 本を掘り取り対象木とした。またそれら対象木周辺で確認されたマツ材線虫病被害により 2018 年に枯死したため伐採されたクロマツ 2 個体の伐根も掘り取り調査の対象とした。クロマツ伐根の年輪から伐採時の年輪を読み取ったところ、樹齢はともに 47 年生であった。選木は向浜においては 2017 年の 7 月に、浜山においては 2018 年 5 月に実施した。また選木と同時に地際直径、胸高直径 (測定高 1.3 m : 以下、胸高直径の定義は同じ)、樹高を計測した。いずれの調査地においても樹高は逆目盛検測桿 (竹谷商事製) あるいは レーザー距離計 (インパルス 200, Laser Technology 社製) を用いて測定し、地際直径や胸高直径はノギスで直径を実測するか、スチールテープ (エ

ンジニアポケット、タジマ製)を用いて直径周囲長を測定し、表計算ソフトで直径に換算した。浜山のクロマツ伐根の地上部サイズについては秋田県松くい虫防除事業における毎木調査データを参照した。

2.3 調査対象木周辺の毎木調査および土壌硬度の鉛直および平面的分布の把握

根系調査に先んじて、毎木調査と周辺の土壌硬度について調査を実施した。向浜では10 m四方の調査区を1箇所設定し、同区画内に生存していた樹高1.3 m以上の植栽木を対象に毎木調査を実施した。測定項目は樹種、樹高、胸高直径である。カシワについては設定した調査区内には生存木はなく、その周辺においても選木した2本のみが生存個体であり、クロマツも孤立した天然更新木であったことから毎木調査を実施していない。また掘り取り対象木周辺における土壌の物理性を調査するため、掘り取り対象木の根元から30 cm北側で土壌硬度の測定を実施した。これらの調査は2017年の7月に実施した。

浜山においては、掘り取り対象木を中心とする半径5.0 mの円形調査区を設定し、胸高直径5 cm以上の全木本を対象に胸高直径、樹高を測定した。また掘り取り対象木を中心とし、各辺が東西南北を向く1 m四方の方形区を設定し、その4隅で土壌硬度を測定した。調査は広葉樹については2018年5月に、クロマツについては2019年5月に実施した。

2調査地の毎木調査は掘り取り対象木の選木と同様の器具により実施し、土壌硬度はSH型貫入試験機(ダイトウテクノグリーン(株)製)落錘3 kgにより実施した。土壌硬度の指標は、日本造園学会緑化環境工学研究委員会(2000)に準拠し、「多くの根の侵入が困難」とされるSH型貫入試験機による1打撃あたりの貫入量(以下、S値)

が0.7 cm/drop以下が5 cm以上続いた場合を固結層と定義し、初出の深さを観測点毎に記録した。浜山においては掘り取り対象木を中心に、その周辺を北東、北西、南東、南西の4区画に区分し、土壌貫入試験を実施した4点で算出した固結層の初出の深さをその区画の固結層の深さとした。

2.4 根系構造の調査

向浜においては根系構造を極力保存するよう配慮しながら、人力によって根系周囲の土壌を掘削し、完全に根系を露出させ、掘り出した。その後、実験室に持ち帰り作業架台に吊り下げて固定し、固定した状態で基準とする任意の方向を定めマーキングした。その後、根系の構造と計測点同士の関係を得るために必要な分岐や屈曲箇所の直径を計測した。また直径計測点について、地際幹中心を原点とする水平距離、垂直距離およびマーキングした方向からの水平角度による三次元座標を計測し、計測点同士のつながりを記録した。なお、対象とした根は直径1 cm以上とした。直径の測定にはノギス(プラノギスポッケ、シンワ測定株式会社製)、深さの測定には測量用ポールと水準器、角度の測定にはプロトラクター(シンワ測定株式会社製)を用いた。作業は2017年10月に実施した。

浜山においては向浜とは異なり、現地において三次元座標の計測を行った。バックホウ、エアースコップを使用して粗掘りを行った後、人力による掘削作業を通じて、根系構造を破壊しないように保存しながら一定程度掘り出した。その後は根系の自重による沈下を想定し、対象木の地際幹中心を基準点とする計測のための原点を決定した。以後は、掘削作業を継続しつつ、地際幹中心からの水平、垂直距離が50 cm、100 cm、150 cmとなる位置



Fig. 1. 調査地の位置図(地理院地図(国土地理院 2020)を加工して作成)

の根の直径と水平距離、垂直距離及び北を0°とする方位角による三次元座標を計測した。また同時に根の分岐や屈曲箇所についても直径及び三次元座標の計測を実施し、計測点同士のつながりを記録した。対象とした根は向浜同様直径1 cm以上とし、計測器具も向浜と同様の道具に加え、登山用コンパス（SILVA社製）を用いた。浜山のクロマツのうち1個体（H1）については、北西方向30°程度の範囲の根系を掘り出すことができなかったものの、それ以外の方位については根系を露出することができたことから、露出した範囲において三次元座標を計測した。またもう1個体（H2）については、作業時間の都合上、根系座標を詳細に計測できなかったことから、根系を完全に掘り出した後に根の最大到達深および最大到達幅のみを計測した。作業はカシワについては2018年9月と10月、ケヤキとクロマツについては2019年8月と9月に実施した。

向浜と浜山の計測方法が異なるため、すべての根系計測点の三次元座標値をもとに地際幹中心からの斜距離が50 cm、100 cm、150 cmとなる箇所の三次元座標を計算し、根の直径と地際幹中心からの水平を0°とする高低角を推定した。高低角は90°～60°を「下方」、60°～30°を「斜め」、30°～0°を「側方」として区分した。サイズの異なる対象

Table1. 掘り取り対象木周辺の毎木調査結果

向浜				
掘り取り対象木	樹種	立木密度 (本 /ha)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)
ケヤキ M1-3	ALL	7,300	1.8 ± 0.1	1.1 ± 0.1
シナノキ M1-2		5,300	1.7 ± 0.0	0.9 ± 0.1
		2,000	2.2 ± 0.2	1.5 ± 0.2
浜山				
掘り取り対象木	樹種	立木密度 (本 /ha)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)
カシワ H1	ALL	764	6.8 ± 1.4	14.7 ± 4.0
	イタヤカエデ	255	10.3 ± 0.0	13.4 ± 1.5
	カシワ	127	9.8 ± 0.0	36.0 ± 0.0
	ケヤキ	382	3.6 ± 0.6	8.5 ± 0.7
カシワ H2	ALL	2,165	7.2 ± 0.9	11.0 ± 1.4
	カシワ	764	11.9 ± 0.6	16.8 ± 2.5
	ケヤキ	1,146	4.0 ± 0.4	8.0 ± 0.7
	ニセアカシア	255	8.4 ± 1.1	7.6 ± 0.4
カシワ H3	ALL	1,528	7.4 ± 1.4	12.9 ± 2.2
	カシワ	509	8.0 ± 1.0	12.7 ± 2.0
	クロマツ	255	15.4 ± 0.2	25.2 ± 2.1
	ケヤキ	637	3.0 ± 0.6	6.3 ± 0.3
	ミズナラ	127	11.7 ± 0.0	22.3 ± 0.0
ケヤキ H1	ALL	1,019	8.4 ± 0.6	9.3 ± 0.9
	イタヤカエデ	255	8.4 ± 0.7	11.8 ± 1.9
	カシワ	127	6.0 ± 0.0	11.4 ± 0.0
	ニセアカシア	637	9.0 ± 0.7	7.8 ± 0.6
ケヤキ H2	ALL	637	6.1 ± 1.2	7.9 ± 1.0
	カシワ	127	4.4 ± 0.0	5.5 ± 0.0
	ケヤキ	509	6.6 ± 1.4	8.5 ± 1.1
ケヤキ H3	ALL	1,019	13.0 ± 2.0	17.2 ± 2.6
	クロマツ	637	16.7 ± 1.2	22.0 ± 2.3
	ケヤキ	382	6.8 ± 1.6	9.2 ± 0.6
クロマツ H1	ALL	637	11.9 ± 3.2	15.5 ± 4.3
	クロマツ	255	19.1 ± 0.7	26.9 ± 2.2
	ケヤキ	255	6.0 ± 0.0	9.3 ± 0.2
	ヤマウルシ	127	3.6 ± 0.0	5.2 ± 0.0
クロマツ H2	ALL	891	12.8 ± 2.2	16.4 ± 3.1
	クロマツ	255	18.7 ± 1.0	26.0 ± 2.8
	ケヤキ	637	9.9 ± 2.1	12.6 ± 2.6

平均値±標準誤差

向浜におけるカシワとクロマツは設定した調査区内に生育しておらず、孤立木であったことから毎木調査を実施していない。

木の根系の分布を比較するため、斜距離および高低角区分ごとに根の断面積合計を算出し、地際幹の断面積で除した相対断面積合計を算出した。

水平方向の根系の発達に対する周辺の木本類の影響を確認するため、掘り取り対象木周辺の毎木調査に基づく立木密度と最大到達幅について Pearson の積率相関分析を実施した。なお、向浜のカシワ及びクロマツについては孤立木であったことから解析から除外した。統計解析は統計パッケージ R-ver. 4. 0. 2 (R Development Core Team 2020) を用いて実施した。

3. 結果

3.1 調査地の林相と掘り取り対象木のサイズ

向浜および浜山における掘り取り対象木周辺の毎木調査結果を Table. 1 に示す。向浜における調査区内にはケヤキとシナノキの植栽木が生存しており、その立木密度はケヤキで 5,300 本/ha、シナノキで 2,000 本/ha、合計 7,300 本/ha であり、植栽当時の密度 10,000 本/ha (金子・田村 2007) よりも減少していた。平均樹高はケヤキで 1.7 m、シナノキ 2.2 m、平均胸高直径はケヤキ 0.9 cm、シナノキ 1.5 cm であった。浜山における掘り取り対象木の周辺には 637 ~ 2,165 本/ha の木本類が生育していた。樹種は植栽木であるクロマツやイタヤカエデ、カシワ、ケヤキ、ミズナラのほかニセアカシアやヤマウルシの生育が確認された。周辺木本類の平均樹高は 6.8 ~ 13.0 m、平均胸高直径は 9.3 ~ 17.2 cm であり、掘り取り対象木毎に違いはあるものの概ねクロマツの下層に各広葉樹が生育する 2 段林の構造を呈していた。

掘り取り対象木の地上部サイズについての調査結果を Table. 2 に示す。向浜においてカシワは樹高 2.0 ~ 2.3 m、胸高直径 2.0 ~ 2.3 cm、ケヤキは樹高 1.6 ~ 1.9

m、胸高直径 0.9 ~ 1.5 cm、シナノキは樹高 2.1 ~ 2.8 m、胸高直径 1.6 ~ 2.9 cm、クロマツは樹高 1.7 ~ 3.0 m、胸高直径 1.7 ~ 4.6 cm であった。ケヤキおよびシナノキについて調査区における平均樹高と比較すると、いずれの樹種もその地上部サイズは平均と同程度かやや大きかった。浜山において、カシワは樹高 7.7 ~ 10.4 m、胸高直径 12.9 ~ 17.7 cm、ケヤキは樹高 9.0 ~ 11.8 m、胸高直径 10.6 ~ 14.9 cm であった。クロマツの地上部は伐採されていたため、秋田県の松くい防除事業実施時の調査野帳データを参照した結果、いずれも樹高 20.0 m、胸高直径 30.0 cm であった。掘り取り対象木周辺の木本類の樹高平均と比較すると、カシワ 3 本は平均値以上、ケヤキ H1、H2 については平均値以上、H3 は平均値よりも樹高が低かった。クロマツ 2 個体についてはいずれも平均値よりも樹高が高かったが、周辺のクロマツのみの平均樹高と比較すると同程度であった。

3.2 掘り取り対象木周辺の土壌硬度

各調査地における各掘り取り対象木周辺土壌の土壌硬度 (S 値) の分布を Fig. 2 に示す。浜山試験地においては対象木の地際幹中心から北に 50 cm、東に 50 cm の測定点のデータを代表として示した。

日本造園学会緑化環境工学研究委員会 (2000) によれば、S 値 ≤ 0.7 cm/drop は、「多くの根が侵入困難」な「固結」した土壌、0.7 ~ 1.0 cm/drop は「根系発達に阻害あり」な「固い」土壌、1.0 ~ 1.5 cm/drop は「根系発達が阻害される樹種あり」な「締まった」土壌と評価されている。向浜における土壌硬度はいずれの掘り取り対象木周辺も深さ 50 cm 程度までは S 値 1.5 cm/drop 以上の比較的柔軟な土壌であった。50 cm 以深では箇所ごとに異なる硬度分布を示し、カシワやシナノキ周辺は S 値 1.5 cm/drop 以下の「締まった」~「固い」・「固結」な土壌層が確認されたのに対し、ケヤキでは 100 cm 以深でも S 値 2.0 cm/drop 以上の「軟らか」~「膨軟すぎ」な土壌層が断続的に出現した。クロマツの周辺では深さ 50 ~ 100 cm では S 値 1.5 cm/drop 以上の「軟らか」~「膨軟すぎ」な土壌層が確認されたが、100 cm 以深では S 値 1.5 cm/drop 以下の「締まった」~「固い」・「固結」な土壌層が続いていた。固結層の初出の深さはカシワ M1 で 165.2 cm、シナノキ M2 で 192 cm、クロマツ M1 で 138.5 cm となっており、それ以外の掘り取り対象木周辺においては深さ 200 cm の範囲で固結層は確認されなかった。

浜山におけるカシワ 2 個体およびクロマツ 2 個体の周辺は深さ 50 cm までは S 値 1.5 cm/drop 以上の「軟らか」~「膨軟すぎ」な土壌であったものの、それ以深は徐々に固くなる傾向がみられ、カシワでは 83.7 ~ 97.1 cm、クロマツでは 101.9 ~ 136 cm で S 値 0.7 cm/drop 以下の固結層が出現した。ケヤキについては掘り取り対象木ごとにその周辺の土壌硬度分布は異なり、ケヤキ H1 では深さ 50 cm 程度までは S 値 1.5 cm/drop 以上の「軟らか」~「膨

Table2. 掘り取り対象木の地上部サイズ

調査地	樹種 + 番号	樹高 (m)	胸高直径 (cm)
向浜	カシワ M1	2.3	2.0
	カシワ M2	2.0	2.3
	ケヤキ M1	1.9	1.5
	ケヤキ M2	1.6	0.9
	ケヤキ M3	1.6	0.9
	シナノキ M1	2.8	2.9
	シナノキ M2	2.1	1.6
	クロマツ M1	1.7	1.7
	クロマツ M2	3.0	4.6
浜山	カシワ H1	8.3	15.7
	カシワ H2	7.7	17.7
	カシワ H3	10.4	12.9
	ケヤキ H1	9.1	10.6
	ケヤキ H2	9.0	12.2
	ケヤキ H3	11.8	14.9
	クロマツ H1	20.0	30.0
	クロマツ H2	20.0	30.0

軟すぎ」な土壌となっていたものの、それ以深は徐々に固くなり、深さ 122.2 cm で固結層が確認された。ケヤキ H2 や H3 では深さ 25 cm 程度から S 値 1.5 cm/drop 以下の「締まった」土壌が断続的に確認され、50 cm 以深は「締まった」土壌が連続して分布していた。固結層はケヤキ H2 で 98.3 cm、ケヤキ H3 で 88.2 cm の深さで確認され、ケヤキ H1 に比較して浅い土層深に形成されていた。

3.3 根系の鉛直および水平方向への分布状況

根の鉛直および水平への広がり进行を明らかにするため、

各掘り取り対象木の直径 1 cm 以上の根系における最大到達深および最大到達幅を指標として Table. 3 に示した。向浜における最大到達深はカシワで 66 ~ 78 cm、ケヤキで 32 ~ 88 cm、シナノキで 51 ~ 102 cm、クロマツで 61 ~ 85 cm となっており、樹種によって異なっただけでなく、同一樹種でも違いが見られ、特にケヤキやシナノキでは 2 倍以上の差がみられた。最大到達幅においてはカシワで 149 ~ 155 cm、ケヤキで 45 ~ 110 cm、シナノキで 166 ~ 193 cm、クロマツで 54 ~ 83 cm となっており、ケヤキにおいては最大到達深同様に個体差が大きかった。

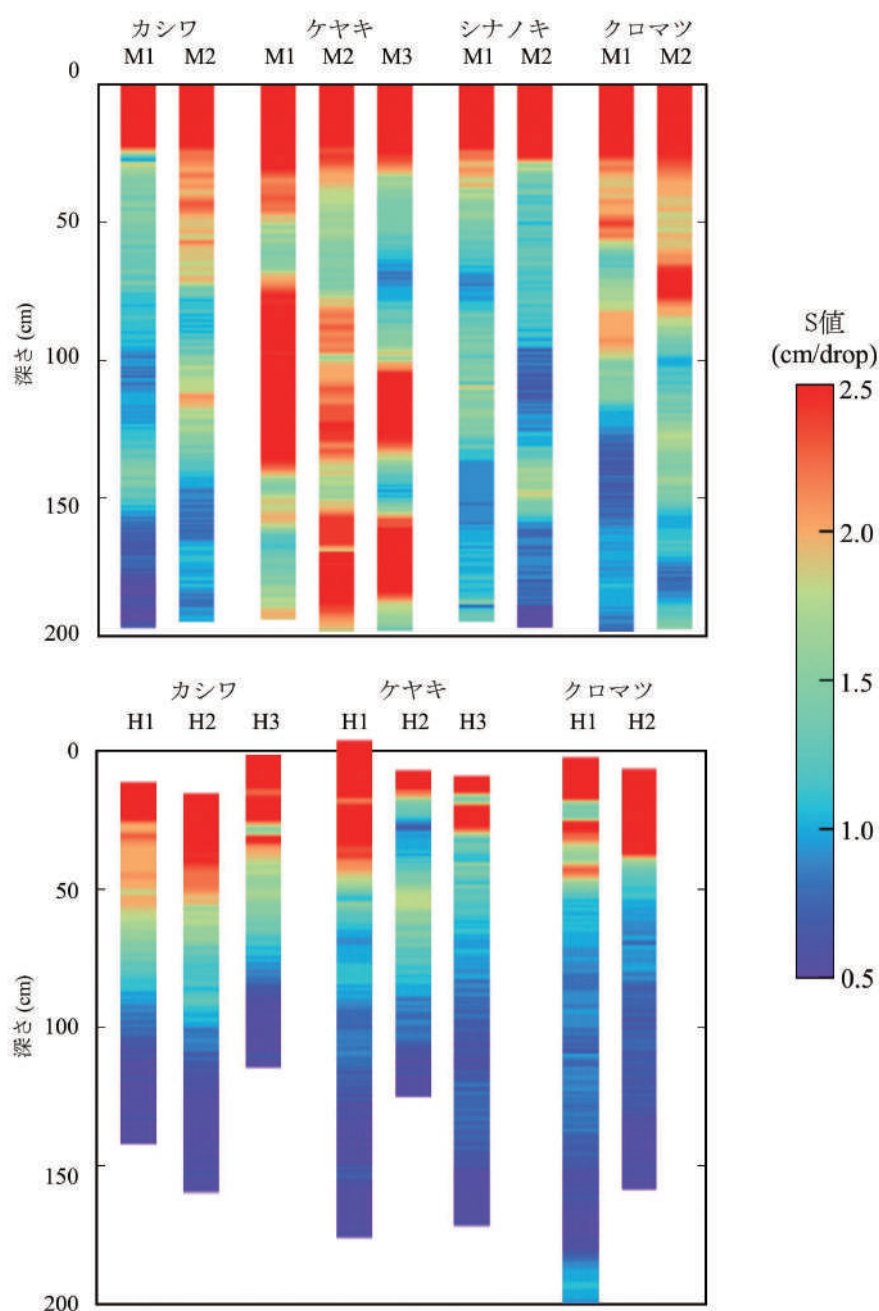


Fig. 2. 掘り取り対象木周辺の土壌硬度 (上：向浜、下：浜山)

浜山においては掘り取り対象木の幹中心から北に 50 cm、東に 50 cm の位置の土壌硬度観測点を代表として表示した。また、浜山における深さは掘り取り対象木の地際幹中心を基準としている。

浜山における根系最大到達深はカシワで 125 ～ 224 cm、ケヤキで 50 ～ 220 cm、クロマツで 260 ～ 330 cm となっており、特にケヤキにおいて個体差が大きかった。最大到達幅においてはカシワで 35 ～ 160 cm、ケヤキで 250 ～ 850 cm、クロマツで 100 ～ 150 cm となっており、ケヤキの水平方向への根系の伸長が顕著であった。カシワ、ケヤキ、クロマツについて向浜と比較すると、浜山ではより広い範囲に根系が広がっていた。

掘り取り対象木周辺の立木密度と周辺の根系最大到達幅についてピアソンの積率相関係数を計算した結果、有意な相関関係は認められなかった ($r = -0.35, p = 0.25$)。

3.4 根系の三次元分布と固結層位置との関係

計測された三次元座標値および測定部位の直径をもとに、向浜における根系の三次元分布を作成し、固結層の初出の深さとともに示した (Fig. 3)。写真 (Photo. 1) と比較すると、根系の形状は類似しており、作成された三次元分布図は代表的な根系の分布を再現していると判断

Table3. 各掘り取り対象木根系の最大到達深と最大到達幅

調査地	樹種 + 番号	最大到達深 (cm)	最大到達幅 (cm)
向浜	カシワ M1	78	149
	カシワ M2	66	155
	ケヤキ M1	88	45
	ケヤキ M2	32	49
	ケヤキ M3	78	110
	シナノキ M1	51	193
	シナノキ M2	102	166
	クロマツ M1	61	54
浜山	クロマツ M2	85	83
	カシワ H1	125	35
	カシワ H2	224	160
	カシワ H3	128	150
	ケヤキ H1	220	250
	ケヤキ H2	150	350
	ケヤキ H3	50	850
	クロマツ H1	260	150
	クロマツ H2	330	100

クロマツ H1 の最大到達幅は掘り出すことができた根系の最大値。

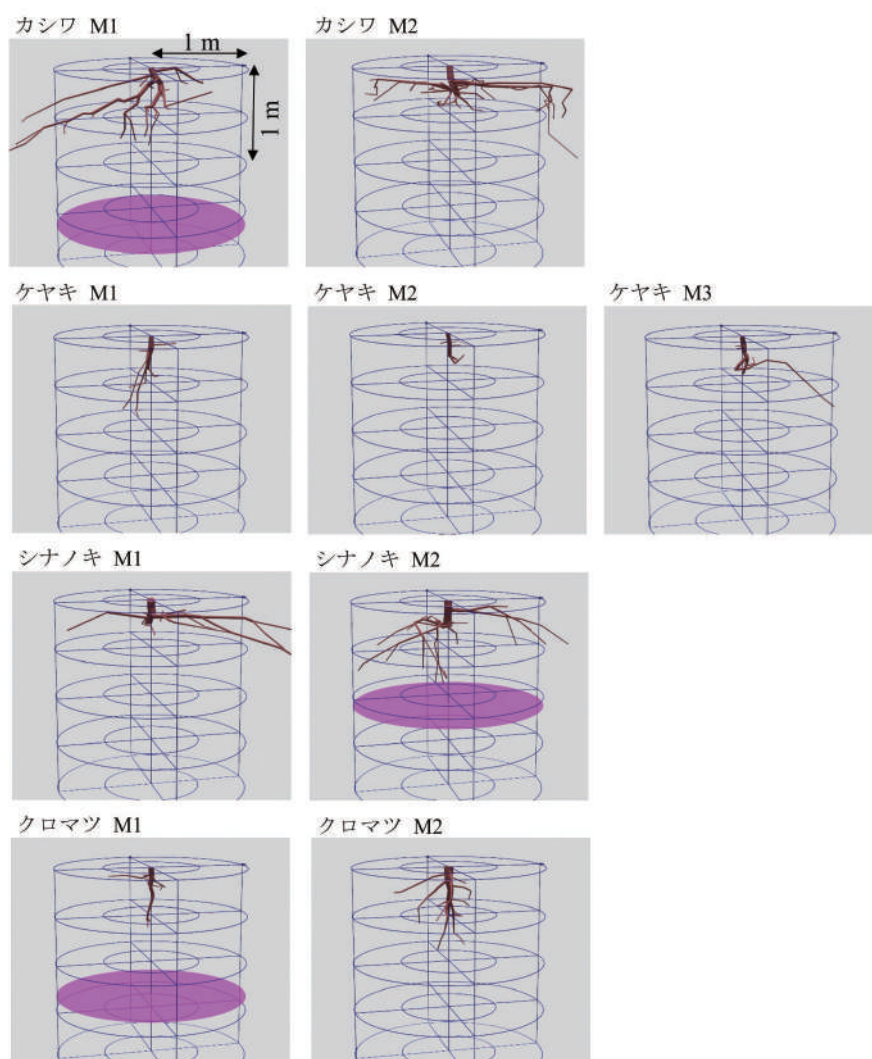


Fig. 3. 向浜における掘り取り対象木根系の三次元構造

図中の着色面は固結層 (S 値 0.7 cm/drop 以下が 5 cm 以上) の初出の深さを示す。



Photo. 1 向浜における代表的な掘り取り対象木の根系

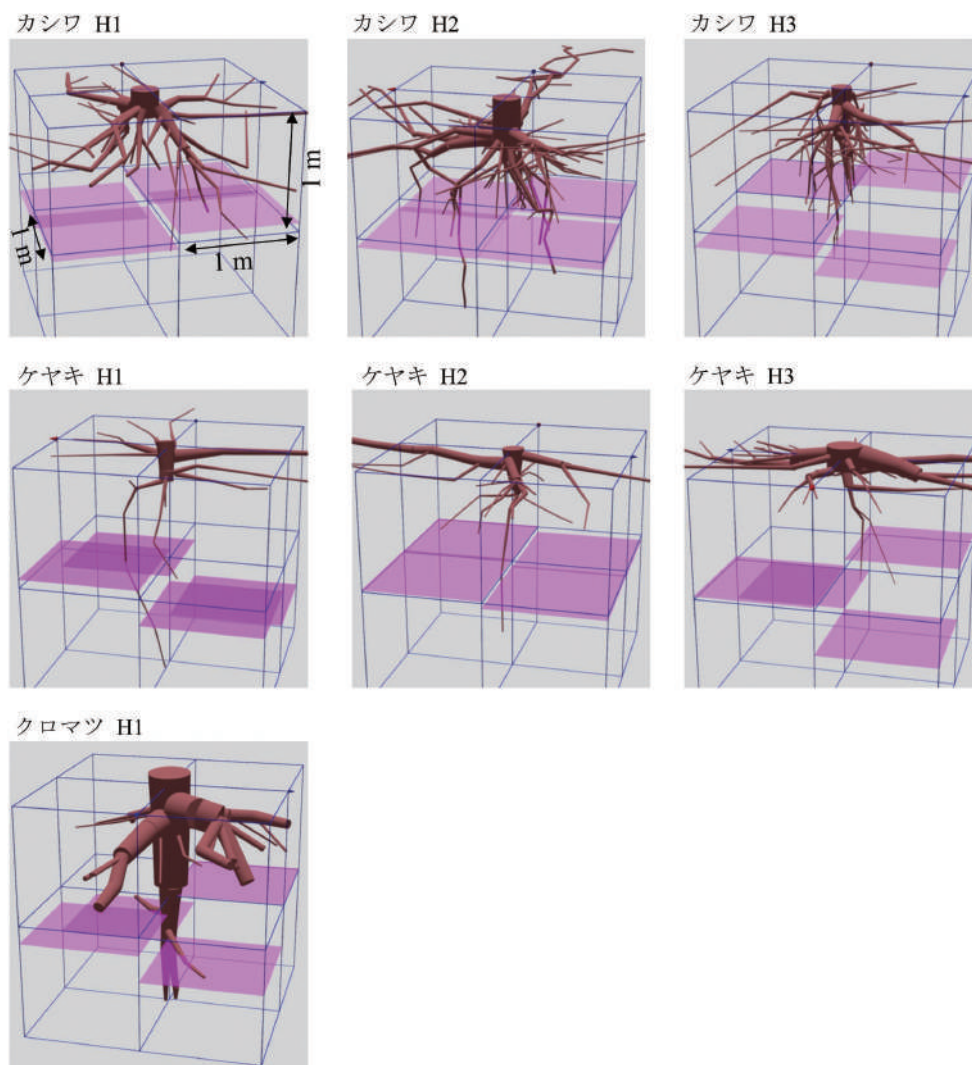


Fig. 4. 浜山における掘り取り対象木根系の三次元構造
図中の着色面は固結層（S 値 0.7 cm/drop 以下が 5 cm 以上）の初出の深さを示す。

された。いずれの掘り取り対象木も断面積で6割以上の根が斜距離50 cmの範囲に分布していた。カシワやシナノキでは、その範囲において多数の分岐が確認され、水平方向や斜め下方向へ伸長した根が複数確認された。一方、ケヤキやクロマツでは分岐が少なく、主根と思われる形状の根が鉛直方向へ伸長している様子が確認された。またケヤキ M2 や M3 の根系においては深さ約30 cm前後の付近で根系が急激に細り、屈曲していた。掘り取り対象木周辺の土壌の固結層は主たる根系の分布域に比較して深い位置で確認された。

同様に浜山における根系の三次元分布を作成し、4区画の固結層の初出の深さとともに示した (Fig. 4)。写真 (Photo. 2) と比較すると、作成された三次元分布図は、向浜同様おおむね根系の分布を再現していた。広葉樹2種の根系は、地際幹中心からの斜距離50 cmの範囲に断面積合計の6割以上、100 cmの範囲に8割以上が分布して

いたが、その分布構造は樹種により違いが見られた。カシワの根系は、3個体ともに地表付近で多数の分岐が確認され、水平方向だけでなく斜め下方へ伸長する根が多数確認された。一方ケヤキでは、3個体とも水平方向へ分布する根が多く、斜め下方へと伸長する根はほとんど見られなかった。またカシワに比較してケヤキの根の分岐は少なかった。カシワ・ケヤキともに垂直方向へは数本の細い根が固結層を超えた深さまで長く伸長していた。クロマツ H1 については明瞭な垂下根が確認され、固結層を超えて深さ300 cm近くに達していた。また分岐は少ないものの、垂下根の地表付近と深さ100 cm付近から水平方向へ太い根が発達していた。

3.5 距離別および高低角区分ごとの根の断面積合計

向浜における地際幹中心からの斜距離および高低角区分ごとの根の断面積合計の地際幹断面積に対する相対値



Photo. 2 浜山における代表的な掘り取り対象木の根系

を Fig. 5 に示す。カシワは2 個体ともに側方で距離 150 cm に到達した根が観察され、直径 2 cm 以上の比較的大い根の割合が高かった。斜めについて、カシワ M1 は距離 100 cm へ到達した直径 2 cm 以上の根が確認できたものの、カシワ M2 では観察されなかった。距離 50 cm の範囲ではすべての高低角区分の根が観察されたが、下方に比較して斜めや側方に区分される根の割合が高かった。ケヤキの根系はそのほとんどが距離 100 cm に到達しておらず、到達が確認されたわずかな根系も直径 2 cm 未満であり、相対的な根系断面積は向浜における根系サンプルの中で最も低かった。シナノキの根系は2 個体ともに側方の距離 150 cm に到達しており、特にシナノキ M1 では直径 2 cm 以上の根も確認された。一方で斜めや下方に伸長している根は側方に比較して少なかった。クロマツでは下方に伸長している根の割合が高く、クロマツ M1 では距離 50 cm まで、クロマツ M2 距離 100 cm まで分布していた。一方で側方や斜めへ伸長している根の割合は低く、直径 2 cm 未満の細い根のみが確認された。

浜山における地際幹中心からの斜距離および高低角区分ごとの根の断面積合計の地際幹断面積に対する相対値を Fig. 6 に示す。カシワについて、距離 150 cm まで到達した根は側方においては3 個体ともに確認され、カシワ H2 では直径 2 cm 以上の根が斜めや下方でも確認され

たが、主要な根は距離 50 cm の範囲に集中していた。距離 50 cm における高低角区分毎の割合は3 個体で異なり、カシワ H1 では斜めで、カシワ H2 では斜めや下方で、カシワ H3 では下方の割合が最も高かった。ケヤキについて、3 個体とも側方への根の伸長が顕著であり、距離 150 cm に到達した根も確認された。一方で斜めや下方に区分される根の割合はいずれの個体も低かった。クロマツは浜山の中で相対断面積合計が顕著に大きかった。下方においては距離 150 cm を超えて直径 5 cm 以上の根が確認され、側方に対しては距離 100 cm に達していた。その一方で斜めに区分される根の割合は距離 50 cm や 150 cm では側方と同程度であったが、100 cm ではほとんど確認されなかった。

4. 考察

4.1 山地森林における広葉樹の根系形態と本調査結果との比較

菊住 (1979) は様々な樹種を対象として根系の形態や分布を分類しており、本研究において対象としたクロマツ及び広葉樹数種についてもその観察事例を報告している (Fig. 7)。それによれば、クロマツは根系の形態が大径の垂下根型に分類され、「根株の下に長大な垂下根がある」、「太い水平根の基部からも垂下根が発達する」、「小・中径

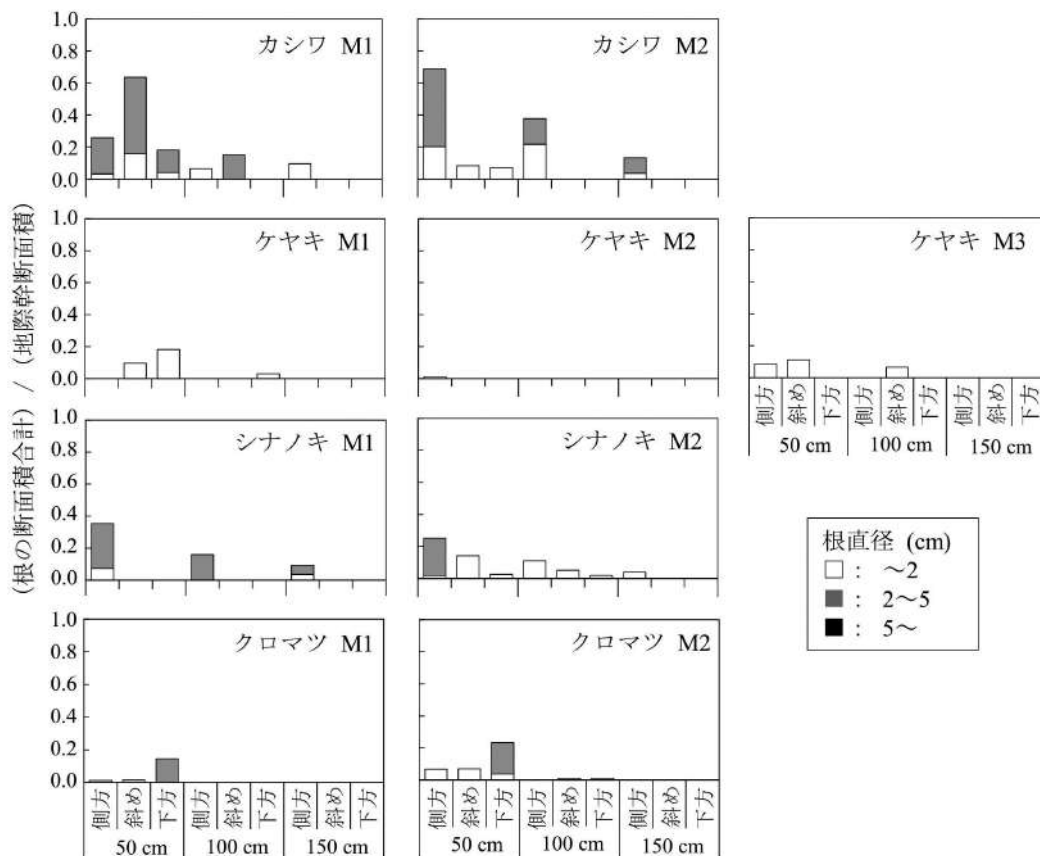


Fig. 5. 向浜における地際幹中心からの斜距離、高低角区分毎の根の断面積合計の相対値

根は表層部に集中分布する」といった特徴がその代表的なスケッチとともに記載されている。一方、海岸砂地で埋没し側根が枯死し、高い地下水で主根が腐朽したクロマツ根系の写真も掲載されており、クロマツの根系が地下水等の影響で分類とは異なる形態となることも示されている。カシワについては、中・大径の斜出根・垂下根型で、「太い斜出根と多数に分岐する小・中径根によって特徴付けられる」とされる。ケヤキは小・中径の水平根型で、「垂下根があるが発達が悪く、比較的浅い土壌層で多くの中径根に分岐し、これらの根が平板状に発達して根系を特徴付ける」とされている。シナノキは中・大径の斜出根・垂下根型に区分され、「中径根・大根が地表部を横走り、各所から垂下根を分岐して水平根を固定する」、「主根は多数の側根に分岐する」といった特徴が記載されている。クロマツについては2個体のスケッチや異なる土壌条件下での観察事例が記載されている一方で、カシワやシナノキにおいては1サンプルのスケッチしか記載されておらず、関東ロームや黒色土での観察事例に限定されている。またケヤキについても関東ロームや火山砂礫土壌における事例の記載のみで、海岸砂丘での事例はない。

秋田地方におけるミズナラを主林木とする広葉樹施業林の収穫予想表（日本林業技術協会 1990）に基づく広葉樹林の上層水平平均樹高は16年生で4.8～8.2 m、44年生で9.0～15.5 mである。これを本研究における2調査地と比較すると向浜は地位3等に大きく及ばず、浜山は地位3等相当かやや下回る生育状況であり、山地の広葉樹に比較して成長が悪いと判断された。これは2調査地が

砂質土で構成される未熟土であり、乾燥しやすく貧栄養であることが影響していると推察される。また向浜において、より樹高成長が抑制されているのは、浜山よりも汀線からの距離が近いこと、海側の海岸林帯の樹高が低く、林帯幅も狭いことで海風の影響を受けやすかったためであると考えられる。このように地上部が成長阻害を受けていることから、根系についても山地に生育する広葉樹とは異なる構造を示す可能性は十分に考えられる。

植栽された広葉樹の直径1 cm以上の根系について、最大到達深や最大到達幅について調査した結果、浜山のカシワ、ケヤキは向浜と比較して広い範囲に根系が到達している様子が観察された（Table. 3、Fig. 3 および Fig. 4）。2調査地の根系の分布範囲の違いは、林齢のほか、汀線からの距離や海側のクロマツ林帯幅、周辺の立木密度、土壌の水分や物理性といった条件が複合的に影響したと考えられる。また同一樹種でも個体差が大きく、数本だけ極端に伸長しているなどの多様な構造が観察された。

より複雑な根系構造の特徴等を評価するため、各掘り取り対象木の根系の三次元構造（Fig. 3, 4）と距離別の相対断面積合計（Fig. 5, 6）を作成し、苅住（1979）の根系図（Fig. 7）と比較した。向浜においては樹齢が低いためか、樹種にかかわらず全体的な根系の量が苅住（1979）に比較して少なかったものの、シナノキとクロマツについては分布形態の特長はスケッチとおおむね類似していた。すなわち、地際中心からの斜距離別の根の断面積合計の相対値（Fig. 5）において、シナノキについては水平方向や斜め方向へ比較的太い根（直径2～5 cm）が分布する

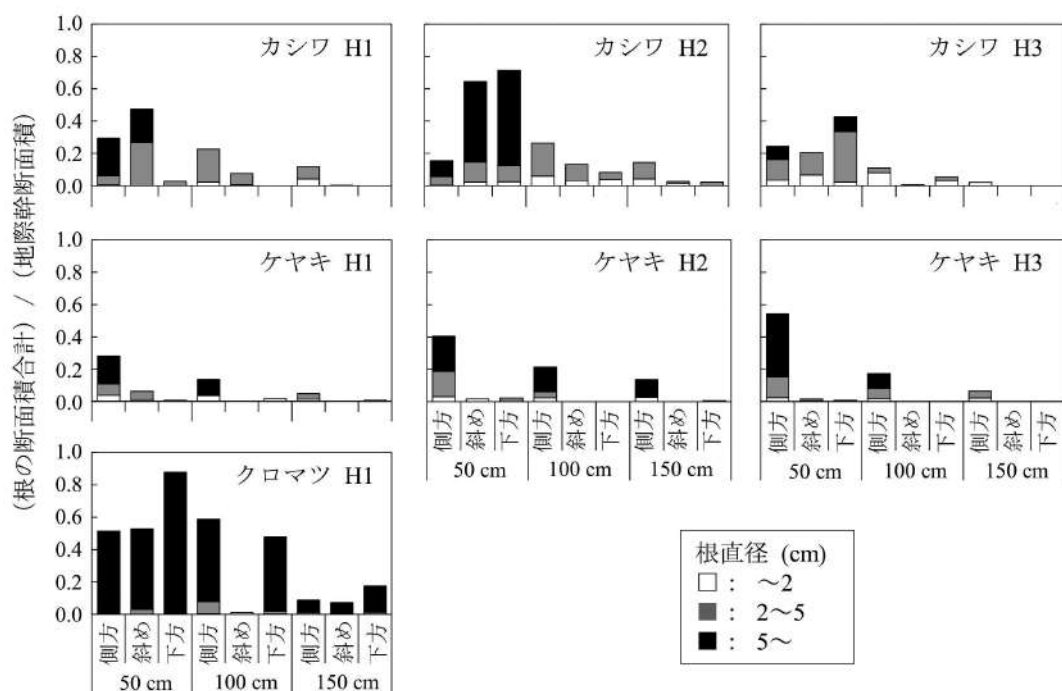


Fig. 6. 浜山における地際幹中心からの斜距離、高低角区分毎の根の断面積合計の相対値

という特長が、クロマツについては明瞭な垂下根があり、比較的分岐が少ないという特徴が一致していた。しかし、ケヤキについては水平根よりも斜めや下方へ分布する根の割合が高く (Fig. 3, 5)、根系図や小・中径の水平根型という形態区分とも類似しているとは言いがたかった。周辺の立木密度と最大到達幅の間には有意な相関は見られ

なかったが、特に向浜のシナノキ・ケヤキは調査区内に 7,300 本 /ha が生存しており、対象木周辺の植栽木と競合していないということは考えづらい。小・中径の水平根型であるケヤキは、中・大径の斜出根・垂下根型であるシナノキよりも周辺の植栽木の影響を受けやすかったと推察される。カシワについてはその形態的特徴や距離別

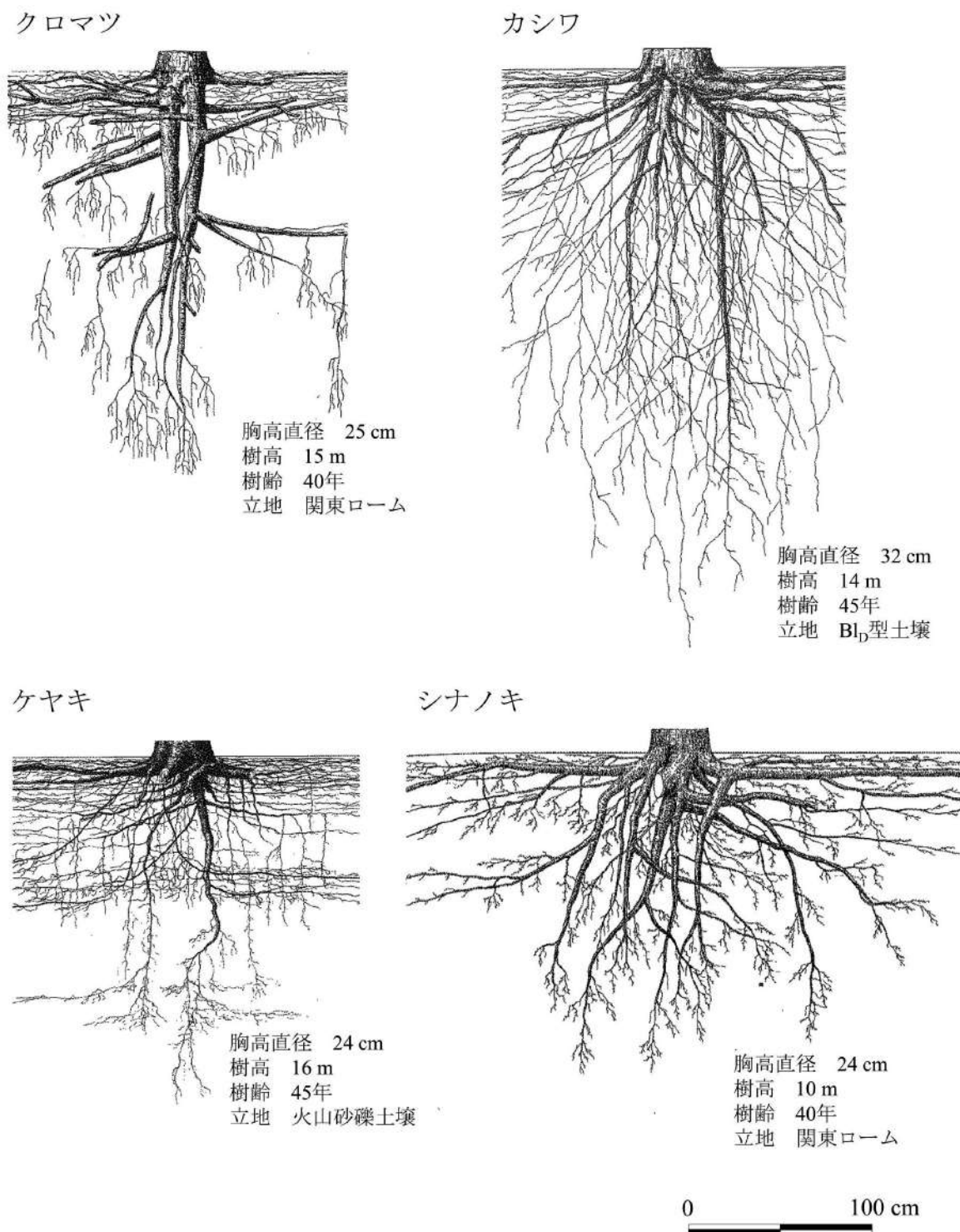


Fig. 7. 既存の研究におけるクロマツおよび広葉樹の根系図 (荻住 (1979) より抜粋)

の相対断面積合計で中・大径の斜出根・垂下根型という分布形態の表現に合致するのはカシワ M1 のみで、カシワ M2 については水平根型の分布形態を示した。カシワ M2 周辺における土壌硬度は深さ 150 cm 以降まで S 値 0.7 cm/drop 以下の固結層は確認されず、地下水が滞水した痕跡も確認できなかった。しかし根株の直下 50 cm ほどの深さに肥料袋や非分解性のプラスチックゴミが埋没していたことから、これらがカシワ M2 の垂下根の成長を阻害したものと推察された。

一方、浜山の根系について三次元構造 (Fig. 4) および距離別断面積合計 (Fig. 6) を根系図と比較した結果、向浜とは異なり、3 樹種ともに多くの形態的分布の共通点がみられた。すなわちカシワは側方に分布する水平根も多かったものの、太い斜出根と多数に分岐する小・中径根によって特徴付けられる (荻住 1979) という形態的特徴が一致していた。ケヤキは数本の根が下方へ伸長していたものの、断面積合計における根系の大半は側方に分布しており、小・中径の水平根型で、比較的浅い土壌層で多くの中径根に分岐し、これらの根が平板状に発達する (荻住 1979) とした記述によく対応していた。さらにクロマツについては極めて太い、明瞭な垂下根が確認され、大径の垂下根型というべき形態を呈していた。また、太い水平根の基部からも垂下根がでて深部に達する (荻住 1979) とされる記述と共通する特徴も観察された。これらの結果から、特に浜山の植栽広葉樹については山地と同様の根系形態および分布を示していると考えられた。

4.2 海岸砂丘地における土壌環境と根系形態の関係

根の成長には地下水 (長谷川ら 1984, 小田 2001) や植栽基盤の硬さ (長谷川ら 1984) が影響するとされる。2 調査地ともに掘削時に地下水の滲出といった現象は確認されず、土壌断面にグライ層のような滞水した痕跡も確認されなかった。このことから地下水面は掘削深よりも深い位置にあると考えられ、高い地下水位による根の成長への影響は少なかったものと推測される。また土壌貫入試験の結果、向浜においては主要な根系の分布する範囲に S 値 0.7 cm/drop 以下の固結層は確認されなかった。浜山においては深さ 1 m 前後の位置に固結層が出現していたが、すべての掘り取り対象木において固結層を突き抜けて根が伸長しており、固結層の出現による根系の発達阻害は観察されなかった。Ono and Imaya (2019) は宮城県仙台市の海岸域において、生育基盤盛土の土壌調査を実施しており、粘土やシルトが少ない盛土以前の海岸砂丘土壌層の透水係数が 369.4 mm/h であることを示している。日本造園学会緑化環境工学研究委員会 (2000) は透水性の判断基準として 100 mm/h で「良好」としていることから、砂丘土壌は極めて透水性が高いと考えられる。本研究における 2 調査地の土性について土壌調査ハンドブック (日本ペトロロジー学会 1997) に準じて触診にて判定した結果、土壌は粒径の細かい粘土やシルトが少ない一様

な砂質土であったことから、本研究における調査地も高い透水性を持っていると考えられる。つまり砂質土であれば S 値 0.7 以下の「固結」した土壌硬度でも孔隙が多く、滞水が発生しづらいために根の侵入には影響しない可能性がある。一方で、この透水性の高さは土壌の乾燥のしやすさとも考えることもできる。しかし、向浜のシナノキやカシワ 1 個体、浜山のカシワ、ケヤキにおいて山地と共通する特徴を持った根系構造が確認されたことから、根系の伸長に対して乾燥の影響は少なかったと推察される。以上のことから、周辺に近接個体が多い、埋設物があるといった特異な条件がなく、地下水位の低い、一様な砂質土であれば、海岸砂丘地でも樹種特性に応じた根系の分布、形態を呈する可能性が示唆された。

4.3 広葉樹導入による高い津波耐性を有する海岸林造成の可能性

森林総合研究所東北支所 (2015) は数値シミュレーションに基づき、波力減殺効果を高めるために、クロマツの下層に広葉樹を仕立てて二段林化することを提案している。このことは海岸林への広葉樹導入についての積極的な動機付けとなる。しかし、このシミュレーションでは広葉樹の根返り耐性が考慮されていないため、実際に津波が襲来した際には広葉樹は根返り等を起こしてしまう可能性がある。この課題を解決するためには広葉樹の根返り耐性と根系構造との関係解析が不可欠である。根返り耐性について、特にクロマツにおいては地下水などの影響で垂下根型から水平根型の根系構造に変化すると根返り耐性が低下することが報告されており (Todo et al. 2019)、東日本太平洋沖地震津波におけるクロマツの被害形態からも垂下根の重要性が指摘されている (田村 2012, 林野庁 2013)。しかしこれは、広葉樹の根系についてはあてはまらない場合もある。野口ら (2014) は大径の垂下根型であるクロマツよりも水平根型のケヤキの根返り耐性が高いことを報告している。本研究の、特に浜山で観察されたように、ケヤキは水平根を長く広範囲に発達させていたことから、ケヤキは水平根によって高い根返り耐性を獲得している種であると考えられる。また野口ら (2014) は根返り耐性は樹種によって異なることを報告しており、これは体積あたりの樹木重量や根の構造等に樹種による差異があるためであると指摘している。つまり、広葉樹においては、クロマツのように垂下根型であれば根返り耐性が高いという単純な関係にはなっていないと推察される。本研究により、海岸砂丘における広葉樹の根系構造を山地と区分して改めて調査する必要性は低くなった。今後、同一個体に対する引き倒し試験と根系構造の調査事例の蓄積によって、根返り耐性と根系構造との関係について代表的な根系型だけでも明らかとなれば、荻住 (1979) を参考に、地下の根系を考慮したより高い津波耐性を持つ海岸林の造成が容易になるだろう。

5. おわりに

これまで根系の分布や構造等に関する調査方法は写真やスケッチが一般的な観察手法として用いられており、定量的な比較検討が難しい側面があった。しかしながら、本研究においては根を高低角毎に区分し、距離別の相対断面積を三次元座標とともに整理することで、異なるサイズのサンプルも定量的に比較することを可能にした。これは今後の樹木根系研究における統一的な調査手法の候補と考えられる。ただし本研究において調査した広葉樹種は3種であり、他の樹種においても同様の結果を示すかは不明である。今後、本研究で採用したような統一的な手法で砂丘環境における多様な広葉樹種の根系調査がなされる必要があろう。

一方、本研究において、固結層を突き抜けて根が伸長していた要因として、調査地が砂質土で構成されていたことを挙げた。しかし、土性と土壌硬度、根系の伸長については、これまで詳細な検討は行われておらず、さらなる知見の集積が必要である。これらの課題の解決を通して砂丘環境における広葉樹の根系分布と物理的耐性の関係解析、ひいては根返り耐性との関係解析が進展することを望む。

謝辞

本研究の遂行にあたり、数多くの方々からのご協力とご指摘を頂いた。特に猛暑の中、根系の掘削という重労働に協力していただいた共同研究者諸氏、ならびに作業をお手伝いいただいた森林総合研究所の荒井和徳氏、杉山正幸氏、秋田県林業研究研修センターの研究員諸氏及び長谷川聡氏、加利屋義広氏、大野幸氏には厚く感謝申し上げる。また本論文の執筆にあたり、2名の査読者の方からは非常に有意義なご指摘を頂いた。ここに記して感謝申し上げる。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

- Coutts, M. P. (1983) Root architecture and tree stability. *Plant and Soil*, 71, 171-188.
- 土じょう部 (1976) 林野土壌の分類 (1975). 林試研報, 280, 1-28.
- 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性と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.
- 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) 今後の海岸防災林の再生について. 林野庁治山課, 22pp.
- 本田 詩織・林田 光祐 (2015) 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. 海岸林学会誌, 14

(1), 13-20.

- Hirano, Y., Todo, C., Yamase, K., Tanikawa, T., Dannoura, M., Ohashi, M., Doi, R., Wada, R. and Ikeno, H. (2018) Quantification of the contrasting root systems of *Pinus thunbergii* in soils with different groundwater levels in a coastal forest in Japan. *Plant Soil*, 426, 327-337.
- 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 -. 林試研報, 186, 113-133.
- 井上 美那・香口 成美・立石 麻紀子・谷口 武士・山本 福壽・山中 典和 (2015) 海水による土壌冠水が東日本太平洋沿岸域に分布する木本植物17種の生育に及ぼす影響. 日緑工誌, 41 (1), 73-78.
- Inoue, S., Sakamoto, T., Hayashida, M., Kobayashi, N., Akojima, I., Ezaki, T., Okada, M. and Nakashima, Y. (2007) Tsunami Disaster in Solomon Islands in April, 2017. -Field survey on the damage reduction effect of coastal forest-. *Journal of the Japanese Society of Coastal Forest*, 7 (1), 1-6.
- 石川 政幸 (1992) 3. 防潮. 村井 宏・石川 政幸・遠藤 治郎・只木 良也編 “日本の海岸林”. ソフトサイエンス社, 284-300.
- 伊藤 聡 (2000) 山形県の海岸地帯に植栽した広葉樹の初期成長特性. 東北森林科学会誌, 5 (2), 105-109.
- 伊東 日向・吉崎 真司 (2013) 沿岸域に生育する常緑広葉樹を用いた塩水による生育実験. 日緑工誌, 39 (1), 117-120.
- 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. 秋田県森技研報, 17, 37-60.
- 苅住 昇 (1979) 樹木根系図説. 誠文堂新光社, 1121pp.
- 環境省大臣官房環境計画企画調査室 (2017) 平成29年度版環境統計集. 338pp.
- 木下 篤彦・坂井 佑介・大野 亮一・田畑 三郎・川島 正照・山崎 孝成 (2013) スギ・ヒノキ林における水平根が発揮する抵抗力の検討. 砂防学会誌, 65 (5), 11-20.
- 国土地理院 (2020) 地理院地図 (電子国土 Web), <https://maps.gsi.go.jp/>, (参照 2020-06-25)
- 日本ペトロロジー学会 (1997) 土壌調査ハンドブック改訂版. 博友社, 169pp.
- 日本林業技術協会 (1990) 秋田地方育成天然林資源予測表作成報告書. 136pp.
- 日本造園学会緑化環境工学研究会 (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.
- 野口 宏典・鈴木 寛・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及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 (2), 59-66.
- 野々田 稔郎・林 拙郎・川邊 洋・本多 潔・小藪

- 一志 (1996) 樹幹引き倒しによる根返りの発生機構. 日林誌, 78 (4), 390-397.
- 小田 隆則 (1987) 海岸クロマツ林への広葉樹導入試験 (I) - 現地植栽試験 8 年後の現況 -. 日林論, 98, 625-626.
- 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樹林帯造成法に関する研究. 千葉県森林研セ特研報, 3, 59-78.
- Okada, M., Sakamoto, T., Hayashida, M., Inoue, S., Yanagihara, A., Akojima, I. and Nakashima, Y. (2009) The damage caused by the 2004 Indian Ocean tsunami and the mitigating effects of the mangrove forest against the tsunami. -A case study of Medilla, southern Sri Lanka-. Journal of the Japanese Society of Coastal Forest, 7 (3), 7-13.
- 岡田 穰・野口 宏典・岡野 通明・坂本 知己 (2012) 平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波における家屋破損程度からみた海岸林の評価. 一宮城県石巻市長浜の事例一. 日本海岸林学会誌, 11 (2), 59-64.
- 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 (1), 15-24.
- Ono, K. and Imai, A. (2019) Soils on newly-constructed coastal berms for reforestation of coastal forests damaged by the 2011 Mega-Tsunami. Anthropogenic Soils in Japan, 59-85.
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 林野庁 (2013) 平成 24 年度森林・林業白書. 258pp. <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/24hakusyo/190411.html> (参照 2020-06-25).
- Sakamoto, T., Inoue, S., Okada, M., Yanagihara, A., Harada, K., Hayashida, M. and Nakashima, Y. (2008) The collision mitigation function of coconut palm trees against marine debris transported by tsunami. -A case study of Tangalla on the southern Sri Lanka coast-. Journal of the Japanese Society of Coastal Forest, 7 (2), 1-6.
- 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.
- 森林総合研究所東北支所 (2015) 津波被害軽減機能を考慮した海岸林造成の手引き. -海岸林を造成・管理する実務者のために-. 森林総合研究所第 3 期中期計画成果 24. 53pp.
- 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 -. 林試研報, 183, 131-151.
- 田村 浩喜 (2012) 仙台平野の海岸林における根返り被害. 森林科学, 66, 3-6.
- Todo, C., Tokoro, C., Yamase, K., Tanikawa, T., Ohashi, M., Ikeno, H., Dannoura, M., Miyatani, K., Doi, R. and Hirano, Y. (2019) Stability of *Pinus thunbergii* between two contrasting stands at differing distances from the coastline. For. Ecol. Manage., 431, 44-53.
- 渡部 公一・海老名 寛・古川 和史・堀米 英明・大築 和彦・上野 満・宮下 智弘・坂本 知己 (2014) 2011 年東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野の海岸林被害と地下水深度および立木サイズとの関係. 海岸林学会誌, 13 (1), 7-14.
- 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.

Root distribution of *Pinus thunbergii* and some broadleaved planted trees in coastal sand dunes at Akita Prefecture

Kyohei NITTA^{1)*}, Hironori NOGUCHI²⁾, Takayuki OTA³⁾, Kenji ONO³⁾, Hiroaki HAGINO³⁾,
Kyotaro NOGUCHI³⁾, Tatsuya OHTANI⁴⁾, Yuichi UGAWA⁵⁾, Akane KOMORIYA⁶⁾,
Toko TANIKAWA⁷⁾, Yasuhiro HIRANO⁸⁾ and Satoru SUZUKI⁹⁾

Abstract

Currently there is limited information on the resilience of uprooted broadleaved trees after tsunami disasters in coastal forests. Therefore, studies must investigate the root distribution of broadleaved trees in coastal sand dunes. In this study, we measured the root morphology and three-dimensional distribution of *Pinus thunbergii* and several broadleaved tree species by excavation survey. The gathered data were then compared with previous root morphology studies at mountainous sites. Except for some excavated root samples, the roots of *P. thunbergii*, *Quercus dentata*, *Zelkova serrata*, and *Tilia japonica* generally showed similar morphology to mountainous tree roots as reported by Karizumi (1979). The roots of young *Q. dentata* and *Z. serrata* trees were concentrated in shallow soil layers (0–50 cm), probably due to a higher stand density with adjacent trees and buried plastic waste. We also hypothesized that root growth was not inhibited by groundwater and hard soil layers at coastal forests on sand dunes because no high groundwater layers in soil profiles were observed when root samples were excavated. At some excavation points, we observed hard soil pan layers, but roots had penetrated into these layers. Sandy soils exhibited considerable permeability due to their porous nature and were not tightened. These observations suggested that the root distribution of broadleaved trees in coastal sand dunes with low groundwater levels, sandy soils, no higher stand density with adjacent tree, and no buried objects were similar to the root distribution of broadleaved trees in mountainous sites.

Key words : root, broadleaved tree, coastal forest, resistant to tsunami

Received 24 August 2020, Accepted 15 March 2021

1) Akita Forestry Research and Training Center

2) Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

3) Tohoku Research Center, FFPRI

4) Shikoku Research Center, FFPRI

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

6) Chiba Prefectural Chubu Forestry Administrative Office

7) Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University

8) Graduate School of Environment Studies, Nagoya University

9) Center for Forest Damage and Risk management, FFPRI

* Akita Forestry Research and Training Center, 47-2 Idojiridai, Kawabe-Toshima, Akita, Akita, 019-2611 JAPAN;

E-mail: Nitta-Kyouhei@pref.akita.lg.jp