

論文 (Original article)

クロマツと4種の広葉樹の根系発達への土壌硬度の影響

野口 宏典^{1)*}、小野 賢二²⁾、渡部 公一³⁾、新田 響平⁴⁾

要旨

東日本大震災からの海岸林再生では、植栽木の根を深く張らせて根返りへの耐性を高めるために、厚い生育基盤の確保が盛土により図られる事例が多く見られる。しかし、盛土を伴う生育基盤の土壌は重機での締め固めにより硬くなり易く、硬い土壌による根の発達阻害が再生事業関係者に懸念されている。本研究では、日本の海岸林の代表的樹種であるクロマツと海岸林への導入が見込まれる広葉樹の根系の発達への土壌硬度の影響を調べることを目的として、土壌カラムへの植栽実験を行った。土壌カラムには、直径15 cm、高さ50 cmの塩化ビニル製円筒を筐体として用い、海砂を充填し、中層部に異なる土壌硬度を設定した厚さ4 cmの設定層を設けた。設定層には、極度に硬い層、硬い層、軟らかい層(対照層)の3つの硬さを設定し、2種の硬い層には海岸林再生地の生育基盤から採取した不攪乱土壌コアを、対照層には海砂を充填したコアを用いた。クロマツと4種の広葉樹(カシワ、ケヤキ、ミズナラ、コナラ)を対象樹種とし、コンテナ苗を設定層上方に植栽した。極度に硬い層では、カシワの根が僅かに通過しただけであった。硬い層では、カシワの根は僅かに通過しただけであったが、他の4樹種の根は対照層を通過した根と比較して断面積合計で30%程度が通過した。これらの結果から、ケヤキ、ミズナラ、コナラの根が硬い土壌を通過する能力はクロマツと同等であることが示唆された。

キーワード：海岸林、生育基盤盛土、根、土壌硬度、土壌カラム実験

1. はじめに

樹木を植栽するための生育基盤を重機等により整備することは、都市公園の造成や道路の法面緑化では一般的に行われてきたが、森林造成ではあまり行われてこなかった。しかし、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波の被害を受けた海岸林の再生では多用されており、その規模は都市公園整備や道路法面の緑化等の生育基盤に比べて大きなものとなっている。これは、津波によって被災した海岸林で多く見られた樹木の根返り被害が深さ方向への根の発達が十分ではない樹木で発生しやすい傾向がみられた(渡部 2014)ことから、地下水位が高く、根が支障なく発達できる有効土層の厚さが不十分と判断された海岸域において、盛土により厚い生育基盤を確保して根を深く発達させ植栽木の根返りへの耐性を高めるためである。この盛土による生育基盤の確保は、林野庁が学識経験者等を集めて開催し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)によって海岸防災林再生の推進方向の中に盛り込まれた。しかし、盛土を伴う生育基盤は重機の踏圧による締め固めのため、従来の海岸林が成立してきた海岸砂丘等に比

べると土壌が硬くなりやすく、その硬さが植栽木の根の発達を妨げ、盛土によって確保された生育基盤の厚さが十分に活用されないことが海岸林再生事業関係者によって懸念されている(村上 2015)。

土壌の硬さが根の発達を妨げることは緑化分野において以前から認識され、日本造園学会緑化環境工学研究委員会(2000)は、「緑化事業における植栽基盤整備マニュアル」の中で、樹木の根の侵入の可否について土壌の硬さの判定基準を示している。また、数は限られているが、樹木と土壌の硬さについての調査事例も報告されており、長谷川ら(1984)はケヤキ、福永ら(2003)はコナラを対象として、土壌の硬さに応じて根の分布が減少していく様子が測定データから示されている。荻住(2010)は、土壌の硬さと根の発達の関係については示してはいないものの、固結した孔隙が少ない土壌に対して、根端が細い樹種は土壌への根端の貫入力が弱く侵入できないが、根端が太い樹種は貫入力が大きく生長・分布できるとし、多くの樹種の根端の太さを示した。

海岸林の生育基盤が盛土を伴って整備された事例は、東日本大震災以前には千葉県において低湿地対策として

原稿受付：令和2年10月12日 原稿受理：令和3年1月13日

1) 森林総合研究所 森林防災研究領域

2) 森林総合研究所 東北支所

3) 山形県森林研究研修センター

4) 秋田県林業研究研修センター

* 森林総合研究所 森林防災研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

行われたものがある程度であった。野原・高橋（2007）はそこで実施されたクロマツの根の発達と土壌の硬さに関する調査の結果から、耕起によって硬さを解消した箇所では深さ方向への根の発達がよくなっていたことを報告した。

以上のように樹木の根の発達と土壌の硬さの関係についての知見は存在するが、定量的な評価に基づくものは少なく、海岸林に用いられる樹種についてはさらに限定される。しかし、震災後の海岸林再生において整備が進められてきた盛土を伴う生育基盤での植栽木の根の発達が再生事業関係者の間で懸念されており、海岸林の樹木の根系発達と土壌の硬さについての定量的な知見が必要とされている。こうしたことから、日本の海岸林を代表する樹種であるクロマツと松枯れ対策や植生の多様性保全の観点から海岸林への導入の増加が見込まれる広葉樹を対象樹種として、根系発達に対して土壌の硬さが与える影響を評価することを本研究の目的とした。この目的のために、異なる硬さの土壌層を設定した土壌カラムを作成し、そこにクロマツと4種の広葉樹を植え、1成長期後の根系の調査結果から根系発達への土壌の硬さの影響について検討した。

2. 方法

2.1. 土壌カラム

任意の硬さの土壌層の設定が可能な「土壌硬度設定層（以下、設定層）」を有する土壌カラムを内径 15 cm、高さ 50 cm の塩化ビニル製の円筒の底に蓋を嵌めた筐体内に作成した（Fig. 1）。筐体内には、底から 25 cm の高さまで砂を充填し、その上に設定層として、盛土を伴って整備された海岸林の生育基盤から断面積 100 cm²、高さ 4

cm、容量 400 ml の芝本式土壌採取用円筒（大起理化工業株式会社 DIK-1506）で採取した不攪乱土壌コア試料 1 個または 2 個重ねたものを土壌採取用円筒ごと設置した。筐体との間にシリコンを充填することによって土壌採取用円筒を筐体に固定した。設定層の上には海砂を 5 cm 程度の厚さになるよう充填し、その上に対象とする樹種のコンテナ苗を置き、苗とパイプの間に海砂を充填して苗を土壌カラム内に植栽した。設定層として、日本造園学会緑化環境工学研究委員会（2000）が「固結、根の多くが侵入困難」とした硬さの上限値である S 値 0.7 を示す硬さの土層（以下、S 値 0.7 層）と、さらに硬い S 値 0.5 を示す硬さの土層（以下、S 値 0.5 層）、および、硬い層との対照として砂を充填した軟らかい層（以下、対照層）の 3 種類の硬さの設定層を用いることとした。なお、S 値は SH 型貫入試験機（ダイトウテクノグリーン（株））で 3 kg の重錘を高さ 50 cm から落下させた 1 打撃あたりの先端部の貫入量（cm/drop）であり、小さいほど硬いことを表す。S 値 0.5 層と S 値 0.7 層には、山砂を材料とした盛土によって仙台平野に整備された海岸林の生育基盤で採取した不攪乱土壌コア試料を用いた。不攪乱土壌コア試料は、採取地周辺の土壌硬度の鉛直分布を調査し、設定層に用いる硬さ（S 値 0.5 と 0.7）の箇所を特定した後に採取した。土壌硬度の鉛直分布の調査は、穴を掘らずに実施できることから貫入試験によることとし、貫入試験には SH 型貫入試験機を用いた。対照層には、土壌採取用円筒と同サイズの塩化ビニル製円筒に海砂を充填したものを用いた。各設定層の容積重（Mg m⁻³）は、S 値 0.7 層では 1.73 ± 0.04 （平均±標準偏差）、S 値 0.5 層では 1.83 ± 0.05 、対照層では 1.45 ± 0.02 であった。

2.2. 対象樹種

日本の海岸林を代表する樹種であるクロマツ（*Pinus thunbergii*）、および、広葉樹 4 種（ケヤキ（*Zelkova serrata*）、カシワ（*Quercus dentata*）、ミズナラ（*Quercus crispula*）、コナラ（*Quercus serrata*）を対象樹種とした。対象とした広葉樹は、森林総合研究所（2014）による潮風や堆砂等の海岸環境への耐性の 3 つの区分での評価では、カシワは最も耐性が高い「（海岸林の海側）最前縁で耐性がある」に区分され、ケヤキ、ミズナラ、コナラは 2 番目に耐性が高い「（海岸林の海側）最前縁で耐性はないが、海側に樹木または工作物等があれば生育する」に区分されている。また、最大樹高については、カシワは 15 m 程度、ケヤキ、ミズナラ、コナラは 20 m 以上と区分されており、クロマツと同等かやや劣る程度とされている。これらから、対象とした広葉樹 4 種は、海岸環境への耐性が高く、ある程度の樹高まで成長して防風効果等を発揮するものと考えられるため、海岸林への導入が見込める樹種として本研究の実験に用いることとした。

クロマツは、厚さ 4 cm の 3 つの硬さの設定層と厚さ 8 cm の S 値 0.7 設定層を、広葉樹 4 種は、厚さ 4 cm の 3

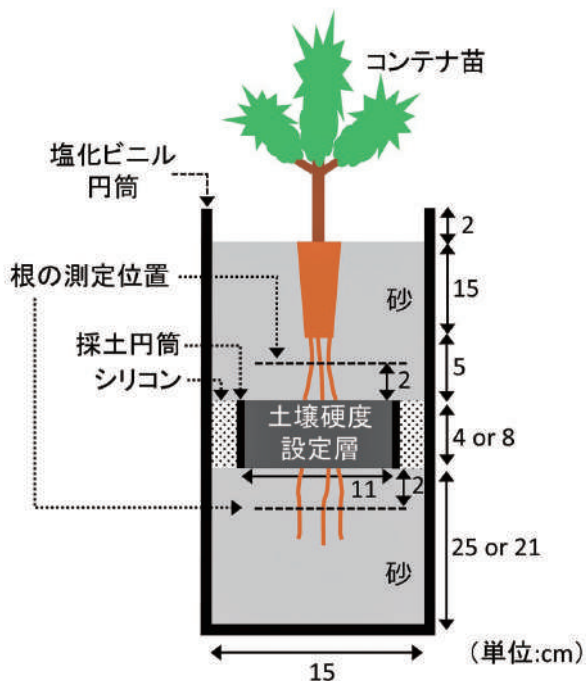


Fig. 1. 実験装置の概略

つの硬さの設定層を設定し、それぞれの設定で4個体前後ずつ土壌カラムを作成し苗を植栽した (Table 1)。クロマツのコンテナ苗は宮城県の種苗業者から購入した播種後2年が経過したものを、ケヤキのコンテナ苗は秋田市内で育苗された播種後2年が経過したものを、カシワ、ミズナラ、コナラのコンテナ苗は酒田市内で育苗された播種後1年が経過したものをを用いた。植栽時のそれぞれの樹種の地際幹直径と樹高は、クロマツが 8.0 ± 1.0 (平均値±標準偏差) mm と 37.4 ± 5.8 cm、ケヤキが 4.3 ± 0.7 mm と 41.2 ± 9.7 cm、カシワが 5.8 ± 0.9 mm と 34.3 ± 7.3 cm、ミズナラが 4.8 ± 0.5 mm と 34.4 ± 5.5 cm、コナラが 4.0 ± 0.5 mm と 36.9 ± 5.9 cm であった。ケヤキのみが播種後1年の苗であったが、播種後2年の他樹種に比べて、地際幹直径と樹高が小さいということはない。ケヤキは2017年5月、クロマツ、カシワ、ミズナラ、コナラは2018年5月にカラムへの苗の植栽を行った。

2.3. 樹木の測定

カラムへの苗の植栽を行った5月から1成長期が経過し、根の成長が停止していると考えられる冬季の12月に根の調査を行った。根の調査は設定層の上下で行うこととし、土壌カラムを解体して根を掘り出し、設定層の上では層の上端の2 cm 上で、設定層の下では層の下端の2 cm 下において、直径0.5 mm 以上の根を対象として直径の測定を行った (Fig. 1)。根の発達の指標として、根の直径から根の断面積合計を計算し、設定層の上下での根の断面積合計の比較によって土壌の硬さの根の発達への影響を評価した。根の調査の他に、植栽時と1成長期後に、樹高と地際での幹直径を測定した。

2.4. 実験環境

苗を植栽したカラムは、森林総合研究所東北支所 (岩手県盛岡市、北緯 $39^{\circ}46'04''$ 、東経 $141^{\circ}07'59''$) のガラス室内に設置した。ガラス室は側面と天井がガラス張り、室内には屋外と同様に日射は差し込むが、降水は遮断される。灌水は、降水量に換算して1日あたりの平均が3 mm となるように週2回の頻度で行った。室内の気温が過度に上昇せずに外気温と同程度に保たれるように、天井と側面の窓を降水が入りこまない範囲で開放し換気を図った。ガラス室内では、実験期間中の最高気温は2017年が 37.3°C 、2018年が 38.7°C 、7月～8月の平均気温は2017年が 24.5°C 、2018年が 25.2°C であった。設置場所から南南東に約8 km に位置する最寄りのアメダス観測点である盛岡では、実験期間中の最高気温は2017年が 35.1°C 、2018年が 36.3°C 、7月～8月の平均気温は2017年が 23.3°C 、2018年が 24.0°C であり (気象庁 2017, 2018)、いずれの年も最高気温が 2°C 程度、平均気温が 1°C 程度、盛岡のアメダス観測点よりもガラス室内の方が高かった。

2.5. 統計解析

数値の集団の平均値に差異があるか否かの検定は、集団数が2つの場合は Student の t 検定、集団数が3つ以上の場合は Tukey の多重比較によって行った。これらの統計解析には統計解析ソフトウェア R ver. 4.0.2 (R Core Team 2020) を用いた。

3. 結果

3.1 地上部の成長

土壌カラムへの植栽から1成長期の間での樹高成長の

Table 1. 樹種、設定層の種類、設定層の厚さごとの実験個体数、植栽時の苗のサイズ、播種から植栽までの経過年数、実験実施年、苗の生育地

樹種	設定層	設定層の厚さ (cm)	個数	植栽時のサイズ (平均値±標準偏差)		播種から 植栽までの 経過年数	実験 実施年	苗の 生育地
				樹高 (cm)	地際幹直径 (mm)			
クロマツ	対照	4	5	37.4 ± 5.8	8.0 ± 1.0	2	2018	宮城県 亘理町
	S値0.7	4	4					
		8	3					
	S値0.5	4	4					
ケヤキ	対照	4	5	41.2 ± 9.7	4.3 ± 0.7	2	2017	秋田県 秋田市
	S値0.7	4	5					
	S値0.5	4	5					
カシワ	対照	4	4	34.3 ± 7.3	5.8 ± 0.9	1	2018	山形県 酒田市
	S値0.7	4	4					
	S値0.5	4	4					
ミズナラ	対照	4	3	34.4 ± 5.5	4.8 ± 0.5	1	2018	山形県 酒田市
	S値0.7	4	3					
	S値0.5	4	3					
コナラ	対照	4	3	36.9 ± 5.9	4.0 ± 0.5	1	2018	山形県 酒田市
	S値0.7	4	3					
	S値0.5	4	3					

樹種ごとの平均値は 10 ～ 20 cm 程度で、5% 水準で樹種間に差はなかった (Fig. 2)。各樹種の異なる設定層の間には、5% 水準で有意な差は表れなかった。

土壌カラムへの植栽から 1 成長期の間での地際幹直径成長の樹種ごと平均値は、クロマツだけが 1 mm 以下となり他の 4 樹種との間に 5% 水準で有意な差があった (Fig. 2)。また、カシワとミズナラの間にも 5% 水準で有意な差があり、ミズナラの方が大きかった。各樹種の異なる設定層の間には、クロマツの S 値 0.7 層の厚さ 2 倍と他の 3 つの層との間に 5% 水準で有意な差があったのみで、他の 4 樹種の異なる設定層の間には 5% 水準で有意な差はなかった。

直径の測定値から計算した 1 成長期後の地際幹の断面積の平均値は、クロマツが $6.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 、カシワが $4.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 、ミズナラが $4.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 、ケヤキが $3.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 、コナラが $3.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ であり、クロマツと他の 4 樹種それぞれとの間には 1% 水準で有意な差があった (Fig. 3)。各樹種の異なる設定層の間には 5% 水準で有意な差はなかった。

3.2 根の発達

樹種と設定層の違いが根の発達に与える影響を検討することを目的として、根の発達の指標として設定層の上と設定層の下での断面積合計を根の直径の測定値から計算し、その値から樹種と設定層の種類ごとに断面積合計

の平均値を計算した (Fig. 3)。地上部のサイズと根の発達との関係を検討するため、地際の幹の直径の測定値から幹の断面積を計算し、その値から樹種と設定層の種類ごとに平均値を求めた (Fig. 3)。設定層の上での根の断面積合計の樹種ごとの平均値は大きい方から順に、コナラが $3.7 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 、ミズナラが $3.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 、カシワが $2.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 、ケヤキが $5.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 、クロマツが $2.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ となり、クロマツとケヤキの 2 樹種と他の 3 樹種の間には 5% 水準で有意な差があった (Fig. 3)。各樹種において、設定層の上の根の断面積と設定層の種類の間には、5% 水準で有意な差はなく、対照層の値が大きかったり、極度に硬い S 値 0.5 層の値が小さかったりなどの関係は見られなかった (Fig. 3)。地際での幹断面積に対する設定層の上での根の断面積合計の割合には樹種間で差が見られ、コナラのみで根の断面積の方が大きく、他の 4 樹種は根の断面積の方が小さく、特にケヤキとクロマツは根の断面積の方が大幅に小さかった。

対照層の下では全ての樹種の全ての個体で根の存在が確認された。対照層の下での根の断面積合計の平均値は対照層の上に比べて全樹種で減少したが、10% 水準において有意な差はなかった。対照層の上下での根の断面積合計の平均値の減少率は、カシワが最も大きく 37% であった (Fig. 3)。

S 値 0.7 層の下では、コナラは全ての個体で、クロマツ、ケヤキ、ミズナラは根が確認できない個体もあったが過

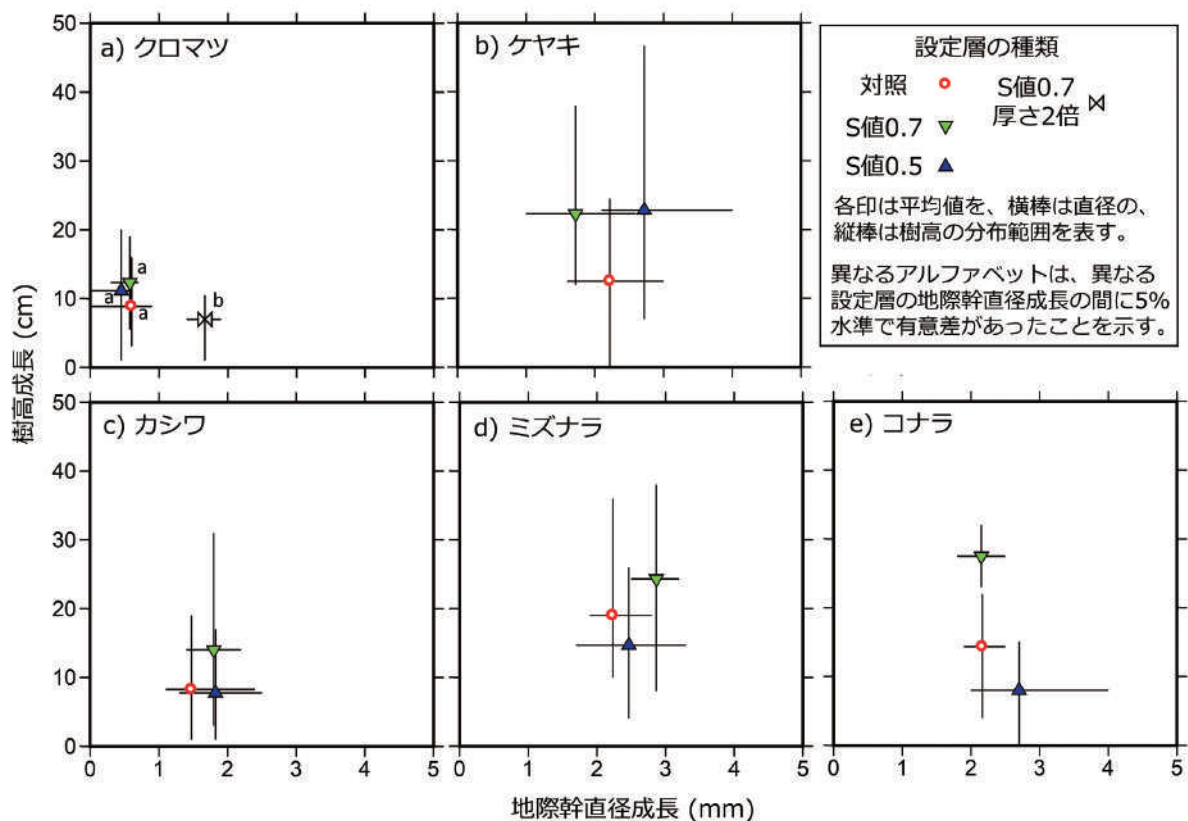


Fig. 2. 各設定層の樹高成長と地際幹直径成長の関係

半数の個体で、カシワは4個体中1個体のみで根の存在が確認された。S値0.7層の下での根の断面積合計は層の上に比べて全樹種で減少しており、樹種ごとにS値0.7層の上下での断面積合計の平均値を比較すると、カシワでは5%水準で、他の樹種では10%水準で有意な差があった。層の上下での断面積の平均値の減少率は、カシワが最も大きく99%、他の4樹種は70%程度であった。各樹種の対照層とS値0.7層の下での根の断面積合計を比較すると、クロマツでは10%水準でも有意差はないがS値0.7層の方が平均値は81%小さく、ケヤキでは5%水準で有意差がありS値0.7層の方が平均値は65%小さく、カ

シワでは5%水準で有意差がありS値0.7層の方が99%小さく、ミズナラでは10%水準で有意差があり平均値は64%小さく、コナラでは10%水準でも有意差はないがS値0.7層の方が平均値は55%小さかった。

S値0.5層の下では、根の存在が確認できたのはカシワの1個体のみで、クロマツ、ケヤキ、ミズナラ、コナラの根は確認できなかった (Fig. 3)。いずれの樹種も上から下に向かって鉛直方向に伸びてきた根はS値0.5層に達すると屈曲して水平方向に方向を変えた様子が観察された (Photo 1)。

クロマツのみで実施したS値0.7で厚さを他の2倍の8

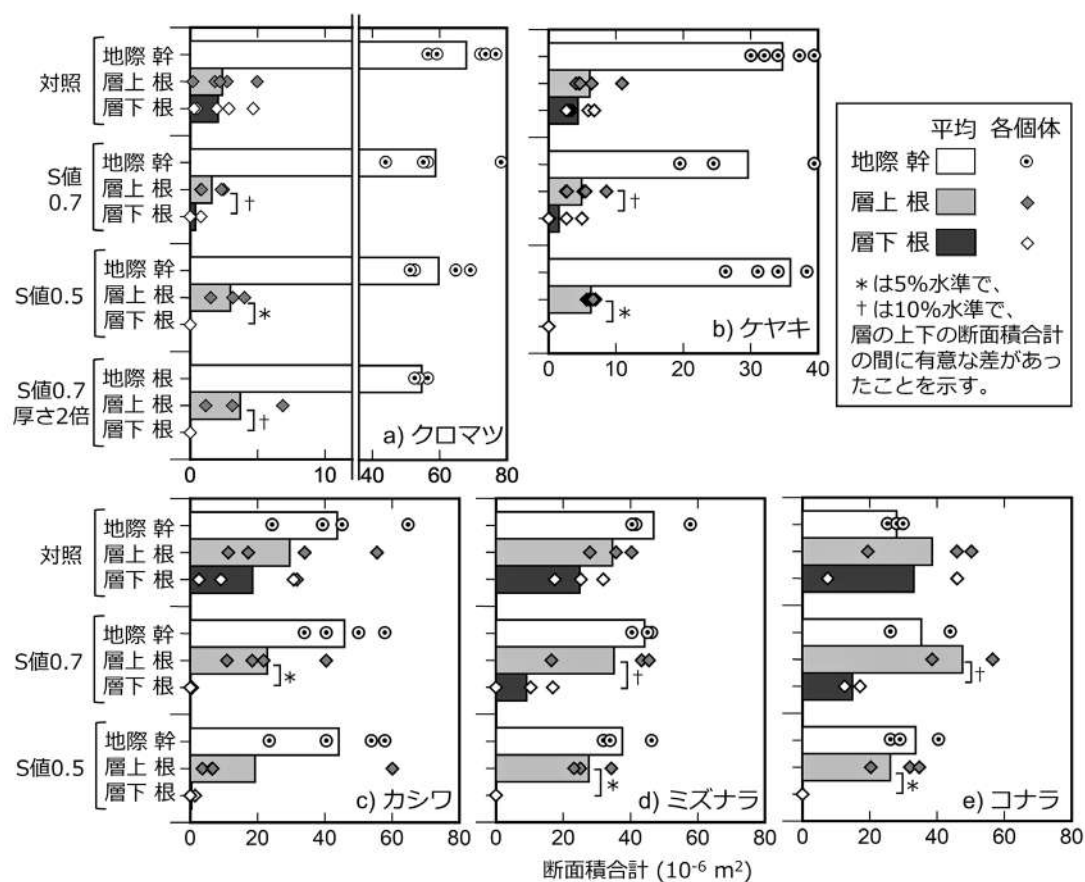


Fig. 3. 各設定層の地際幹断面積と根の断面積合計

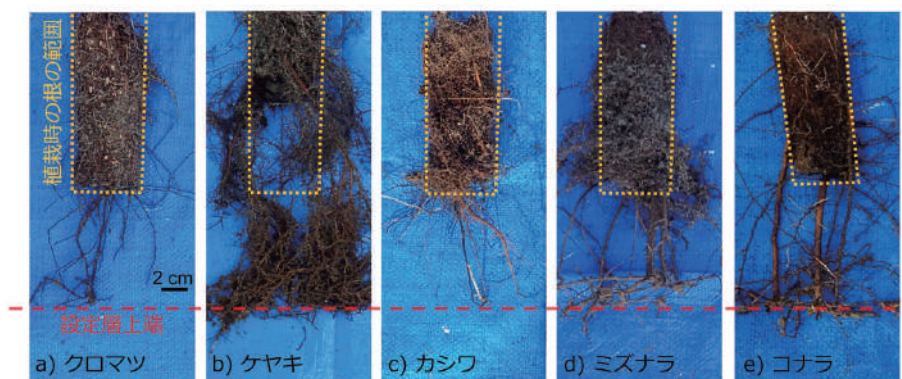


Photo 1. S値0.5層の上面で曲がった各樹種の根

cmとした設定層に対しては、層の下では根を確認できなかった (Fig. 3a)。

根の断面積合計の根の太さに対する分布を検討するため、設定層の上下での根の1 mm毎の直径階での断面積合計を樹種と設定層の種類ごとに求めた (Fig. 4)。クロマツでは、いずれの設定層の上下においても、直径2 mmを越える根は見られず、1 mm毎の直径階での断面積合計は直径1 mm以下が最も大きかった (Fig. 4a, b)。ケヤキでは、対照層の上と下でのみ直径2 mmを越える根が見られた (Fig. 4c, d)。カシワでは、対照層の上でのみ直径5 mmを越える根が見られ、対照層の下、S値0.7層の上、S値0.5層の上では直径3 mm前後の根の断面積合計が最も大きく、S値0.7層の下とS値0.5層の下では直径1 mm以下の根が僅かに見られただけであった (Fig. 4e, f)。ミズナラの設定層の上では、いずれの設定層でも直径3 mmを越える根が見られた (Fig. 4g)。ミズナラの設定層の下では、対照層で直径4 mmを越える根が見られ、S値0.7層で直径3 mmを越える根が見られた (Fig. 4h)。コナラの設定層の上では、いずれの設定層でも直径4 mmを越える根が見られた (Fig. 4i)。コナラの設定層の下では、対照層で直径6 mmを越える根が、S値0.7層で直径4 mmを越える根が見られた (Fig. 4j)。

根の断面積合計の根の直径に対する分布の中心的な直

径について検討するために、樹種と設定層の種類ごとの設定層の上下それぞれに対して根の断面積を、細い根から順に足し合わせていき、根の断面積合計の半分に達する根の直径を根の断面積分布の中心的な直径として求めた。この値は、全ての設定層の上と全ての樹種の対照層の下では、コナラが最も大きく、次いでカシワとミズナラとなり、ケヤキとクロマツは小さかった (Fig. 4)。S値0.7層の下での断面積分布の中心的な直径は、1 mm以下の根が僅かに存在しただけであったカシワを除くと、大きい方から順に、コナラが約3 mm、ミズナラが約2 mm、ケヤキとクロマツが約1 mmであった (Fig. 4)。

4. 考察

地上部の大きさを表す樹高と地際幹直径、および、設定層上での根の断面積合計には、設定層の違いによる差は表れなかった (Fig. 2, Fig. 3)。これは、コンテナ苗の根の下端と設定層との間に植栽時に5 cm程度の厚さの軟らかい土層が存在しており、硬い設定層の個体においても5 cmの深さ範囲に根を発達させることができたためだと考えられる。

長谷川ら (1984) はケヤキを、福永ら (2003) はコナラを対象として根と土壌の硬さに関する調査を行い、ケヤキとコナラの根はともに、まとまった根が存在する土層

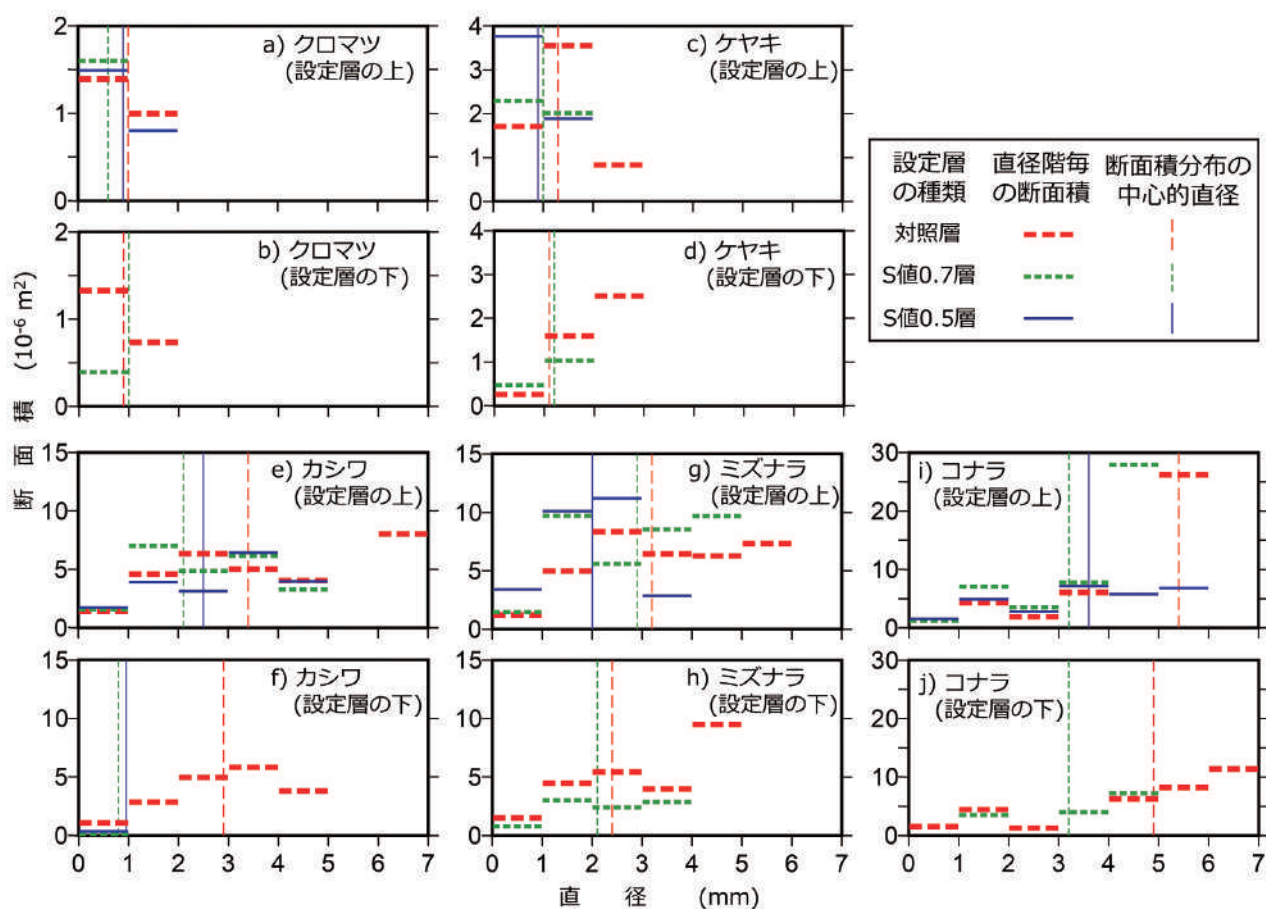


Fig. 4. 各設定層の上下での直径階ごとの根の断面積の分布、及び、断面積分布の中心直径

はS値1.0以上に限られ、S値が1.0より小さくなっていくと根は減少し、S値0.5以下ではほとんど根が認められない土層のみであることを示した。本研究でのケヤキとコナラは、S値0.7層を通過した根は存在したが断面積合計は対照層を通過した根の半分未満となり、S値0.5層を通過した根は存在しなかった (Fig. 3b, Fig. 3e)。これらの結果は、長谷川ら (1984) や福永ら (2003) の結果を支持するものであった。

本研究での実験は苗の植栽から1成長期の間という短い期間のものであったが、S値0.7層を通過した個体がいずれの樹種でも存在した。しかし、それぞれの樹種のS値0.7層の下での根の断面積合計は、それぞれの樹種の対照層の下に比べて大幅に小さくなった。それぞれの樹種で、S値0.7層の上下の根の断面積合計を比較すると、下の値は大幅に小さく、層の上に対する下の値の減少率はカシワ以外の樹種は大きな差がなく概ね70%前後、カシワは99%以上であった。S値0.5層を通過した根は、カシワで僅かに見られただけであり、カシワ以外の樹種の根は通過しなかった。カシワは、S値0.7層では他の樹種より通過した根の断面積が極端に少なかった一方で、S値0.5層では根が通過した個体が見られた唯一の樹種となり、他の樹種と比べて硬い層を根が通過の可否の判断が難しい結果となった。これらの結果から、ケヤキ、ミズナラ、コナラの根の硬い土層に対する貫入能力はクロマツと同等であり、S値0.5に対しては貫入できないがS値0.7に対してはある程度は貫入できるものと考えられた。

カシワ以外の樹種間でS値0.7層の断面積合計の層の上下での減少率に顕著な差が見られなかったのに対し、根の太さに対する断面積合計の分布には差があり、S値0.7層の下での断面積分布の中心的な直径は、コナラでは約3 mm、ミズナラでは約2 mm、クロマツとケヤキでは約1 mmであった (Fig. 4)。Misra et al. (1986) は3種類の草本植物の根の貫入力に関する実験を行い、根の伸長生長圧は草種に依らず根の直径が大きいほど大きくなることを示した。樹木の根の太さと根の貫入力については、苅住 (2010) が、固結した孔隙が少ない土壌に対して、根端が細い樹種は土壌への根端の貫入力が弱く侵入できないが、根端が太い樹種は貫入力が大きく生長・分布できるとし、数多くの樹種の根端の太さを示した。その中で本研究の対象樹種の根端の太さは、クロマツが0.5～0.7 mmの肥厚型、他のケヤキ、カシワ、ミズナラ、コナラは0.1～0.2 mmの繊細型と分類されている。これによると、本研究の対象樹種の中ではクロマツの貫入力が強いということになるが、本研究の結果からは、クロマツの貫入力が他樹種より強いという様子は見られなかった。また、本研究では根の太さの測定を、根端の太さではなく設定層の上下で行ったものであるが、太い根が多かったミズナラやコナラが、細い根が多かったクロマツやケヤキに比べて、S値0.7層の上下での断面積合計の減少率が顕著に小

さくなるということもなかった。

本研究の結果は植栽から1成長期後のみに測定を行ったものであり、さらに成長期が経過した後に測定を行えば、根が細かったクロマツやケヤキの根が肥大成長するなどして、硬い層への反応に差が現れる可能性が考えられる。また、硬さの設定が3つであったが、より細かく設定すれば、樹種ごとの差が現れた可能性はある。いずれにしても、S値0.7、S値0.5の硬さの設定で植栽から1成長期後において、カシワを除けば、異なる樹種の間の硬さに対する根の反応に顕著な違いは現れなかった。

苅住 (2010) は根の垂直分布を深根型、中間型、浅根型の3つに分類しており、本研究の対象樹種は、クロマツ、カシワ、ミズナラ、コナラが深根型で、ケヤキのみが浅根型に分類されている。本研究の結果では、浅根型に分類されるケヤキと深根型に分類される他の樹種との間の根の発達に顕著な違いは表れなかった。根の垂直分布の違いは、土壌の水分、通気等の様々な特性と関係したもののだと考えられるが、本研究の結果からは根の垂直分布の特性と土壌の硬さとの関係は認められなかった。

クロマツを対象として異なる設定層の厚さでの根の発達を比較した結果、S値0.7で厚さ4 cmの設定層に対して通過した根が見られたが、S値0.7で厚さを倍の8 cmの設定層に対しては通過した根は見られなかった。硬さに加えて硬さが連続する厚さについて、日本造園学会緑化環境工学研究委員会 (2000) はS値0.7以下が5 cm以上、または、S値1.0以下が10 cm以上連続した場合を固結層と見なすとしている。これと同様に本研究の結果は硬さに加えて硬い層の厚さも根の侵入の可否の判定基準として重要であることを示唆している。小野ら (2016) は東日本大震災からの海岸林再生事業の初期に整備された盛土を伴う生育基盤の土壌硬度分布を調査から、S値が0.5以下の極度に硬い層が表層近くに厚さ10 cm程度にわたって存在したことを示し、さらに、そうした硬さを解消するための耕起工の有効性も示した。本研究の結果から、硬い層の厚さは根の侵入の可否に対して重要であることが示唆されたことから、盛土を伴う生育基盤を整備する際には、極度に硬くならないように配慮することや硬い箇所への耕起工などが必要だと考えられる。

5. おわりに

日本の海岸林を代表する樹種であるクロマツと海岸林への導入が見込めそうな広葉樹4種 (ケヤキ、カシワ、ミズナラ、コナラ) を対象として、苗の植栽から1成長期後の根の発達への土壌の硬さの影響を樹種間で比較するための実験を実施した。その結果、ケヤキ、ミズナラ、コナラの根の硬い土層に対する貫入能力はクロマツと同等であり、S値0.5に対しては貫入できないがS値0.7に対してはある程度は貫入できるものと考えられた。これは、「S値0.7以下」を「固結、根の多くが侵入困難」とした日本造園学会緑化環境工学研究委員会 (2000) の判

定基準を支持するものであった。東日本大震災後に整備された海岸林の生育基盤へのクロマツ以外の樹種の植栽はまだほとんど見られないが、本研究の結果から、ケヤキ、ミズナラ、コナラの根は、クロマツの根が発達可能な硬さの土壌では発達が可能であると考えられる。

本研究は苗の植栽から1成長期の間の根の発達に限定されているが、根の太さや幹の太さに対する根の量に樹種間の差が見られたことなどから、さらに時間が経過した後の根の発達についても調べる必要があるものと考えられる。また、設定層の硬さが3段階で、対照層とS値0.7層の間で通過する根の量が大きく変化したので、設定層の硬さをさらに細かくすることでより有用な結果が得られることが期待できる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、林野庁東北森林管理局および仙台森林管理署には試験地の使用許可等において、森林総合研究所東北支所の萩野裕章氏、太田敬之氏、森林総合研究所の鈴木覚氏には土壌試料の採取においてご協力をいただいた。編集委員と2名の査読者から多くの有益な助言をいただいた。以上の方々に深く感謝の意を表する。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)の研究成果である。

引用文献

- 福永 健司・石塚 望・富樫 勇介・槇島 朋子・漆崎 隆之(2003) コナラの根系分布と土壌硬度の関係. 日本緑化工学会誌, 29 (1), 261-264.
- 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) “今後における海岸防災林の再生について”, <https://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/kaiganbousairinsaisyuuhoukoku.pdf> (参照 2021-01-08)
- 荻住 昇(2010) 最新樹木根系図説. 誠文堂新光社, 2060pp.
- 気象庁(2017) “過去の気象データ検索”, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (参照 2020-05-13).
- 気象庁(2018) “過去の気象データ検索”, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (参照 2020-05-13).
- Misra, R. K., Dexter, A. R. and Alston, A. M. (1986) Maximum axial and radial growth pressure of plant roots. *Plant and Soil*, 95, 315-326.
- 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. 日本緑化工学会誌, 41, 341-34.
- 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.
- 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—. 千葉県森林研究センター研究報告, 2, 1-6.
- 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—. 森林総合研究所研究報告, 15, 65-78.
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
URL <https://www.R-project.org/>
- 森林総合研究所(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—. 森林総合研究所多摩科学園, 45pp.
- 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及び立木サイズとの関係. 海岸林学会誌, 13, 7-14.

The influence of soil hardness on the root development of *Pinus thunbergii* and four species of broadleaf trees

Hironori NOGUCHI^{1)*}, Kenji ONO²⁾, Koichi WATANABE³⁾ and Kyohei NITTA⁴⁾

Abstract

Coastal forests have been restored since the Great East Japan earthquake and tsunami; thick growth bases have been built with embankments to allow tree roots to grow deeper into the soil to prevent the trees from toppling. Because the growth bases were built by heavy machinery, their soils tend to be harder than those of sand dunes where the former coastal forests grew. As a result, there has been concern that the hard soils in the growth bases may prevent roots from extending deep into the soil. The present study aimed to investigate the root development of the coastal forest into hard soils. For this purpose, a soil column, with a 4-cm set layer whose soil hardness could be adjusted to three different levels, was constructed. The container seedlings of five tree species, *Pinus thunbergii*, *Zelkova serrata*, *Quercus dentata*, *Quercus crispula* and *Quercus serrata*, were planted above the set layer. After one growing season, the cross-section of the roots above and below the set layer was measured for each plant. In case of all five tree species, hardly any roots could penetrate the hardest set layer, whereas some roots could penetrate the second hardest set layer. Whereas the total cross-section of roots penetrated the second hardest set layer was little for *Q. dentata*, that of roots penetrated the second hardest set layer was about 30% in comparison with that of roots penetrated the softest set layer for the other four species respectively. These findings suggest the roots of *Z. serrata*, *Q. crispula* and *Q. serrata* can achieve the same level of penetration of hard soil as those of *P. thunbergii*.

Key words : coastal forest, growth base, tree root, soil hardness, soil column experiment

Received 12 October 2020, Accepted 13 January 2021

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

2) Tohoku Research Center, FFPRI

3) Yamagata Prefectural, Forest Research and Instruction Center

4) Akita Forestry Research and Training Center

* Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN;
E-mail: noguh@ffpri.affrc.go.jp