

論文 (Original article)

海岸林の生育基盤盛土への深耕が土壌の硬さと
クロマツの根の発達に与える効果野口 宏典^{1)*}、小野 賢二²⁾、萩野 裕章²⁾、鈴木 覚³⁾

要旨

東北地方太平洋沖地震津波で甚大な被害を受けた海岸林の再生では、植栽木の根を深く発達させて津波被害に強くすることを目的として盛土による生育基盤の嵩上げが広く用いられている。しかし、盛土を伴う生育基盤は用いられる工法によっては締め固まりやすく、その硬さが根の発達を妨げる可能性が指摘されている。盛土の硬さを解消する手段として耕起が挙げられるが、根の発達と土の硬さの関係や、耕起が土の硬さと根の発達に与える効果について検証は十分ではない。このため、これらの検証を目的として、盛土を伴い整備された海岸林の生育基盤を対象に 1.5 m 程度の深さまで耕起した深耕区と耕起しない対照区を設定してクロマツ苗を植栽し、根の発達と土の硬さに関する調査を行った。

対照区は地表付近に非常に硬い箇所がみられるなど全般的に硬かったのに対し、深耕区の耕起した深さ範囲では、耕起から 30 ヶ月後まで、根の発達を阻害するような硬さは見られなかった。植栽木の根は、対照区では植栽から 3 成長期後も植穴の外にはほとんど伸びていなかったのに対し、深耕区では 1 成長期後には 80 cm 程度の深さに達し、2 成長期後には 110 cm 程度の深さに達した。両区の根の発達の差は深耕により生育基盤の硬さが解消されたことの効果であると考えられた。また、根が侵入した深さにおける土壌硬度の分布から、クロマツの根が侵入しにくくなる土壌硬度の閾値が示された。

キーワード：海岸林、根、生育基盤盛土、土壌硬度、深耕

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震津波を受けた東日本の太平洋沿岸の多くの海岸林では樹木の根返りや幹折れ等により甚大な被害が発生した。樹木の根返りの被害は地下水位が高く、根系の深さ方向への発達が十分ではなかった箇所が多く発生した(渡部ら 2014)。このことから、地下水面が地表に接近し、根系の深さ方向への発達が見込める有効土層の厚さが十分でない場所に海岸林を再生する場合には、植栽木の根を深く発達させて根返りを起こしにくくすることを目的として、盛土による嵩上げを伴った生育基盤を整備して有効土層を厚くし、そこにクロマツが植栽される事例が多く見られるようになった。しかし、小野ら(2016)が海岸林再生事業地での調査から示したように、盛土を伴う生育基盤は重機を用いて整備されるため、重機の踏圧によって締め固まりやすく、従来の海岸林が成立してきた海岸砂丘などに比べて土壌が極度に硬くなる等、土壌の物理性が不良となる事例が多く見られた。この土壌の物理性の不良によって植栽木の根の発達が妨げられることが懸念されている(村上 2015)。

土壌の硬さが根の発達を妨げることについては、ケヤ

キ(*Zelkova serrata*)の根密度が土壌の硬さに応じて減少したこと(長谷川ら 1984)や、盛土を伴う生育基盤に列状に 1.0 m 程度の深さの深耕を施した箇所に植栽して 10 年が経過したクロマツ(*Pinus thunbergii*)の根が深耕を施さなかった箇所の根よりも深部まで発達したこと(野原・高橋 2007)などが報告されている。また、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。しかし、東日本大震災で被災した海岸林の再生で盛土を伴う生育基盤が広く用いられるようになる以前には、硬さが問題となるような生育基盤への樹木の植栽は、都市緑化、道路路面の緑化、低湿地対策としての生育基盤の嵩上げ等の限られた場面においてであった。このため、樹木の根の発達と土壌の硬さの関係についての知見は、前述の長谷川ら(1984)や野原・高橋(2007)によるものがあるものの事例は少ない。東日本大震災以降の海岸林再生において、盛土を伴った生育基盤の整備が盛んに行われていることから、その現場において、植栽される主要樹種であるクロマツの根の発達と土壌の硬さの関係についての実態を把握し知見を積み重ねることの必要性は高い。

原稿受付：令和 2 年 8 月 31 日 原稿受理：令和 3 年 6 月 3 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) 森林総合研究所 森林災害・被害研究拠点

* 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

植栽木の根の発達を妨げることが懸念される極度に硬く整備された生育基盤を改良するための手段の一つとして耕起が挙げられる。耕起が土壌の極度な硬さを改良する効果については、耕起した箇所としていない箇所の土壌硬度の鉛直分布の比較から実証されており（長谷川・猪俣 2015, 小野ら 2016）、篠宮ら（2017）は耕起の効果が少なくとも6ヶ月まで持続したことを示した。また、野原・高橋（2007）は、耕起から10年後の盛土を伴う生育基盤を調査し、耕起による硬さの改良効果が持続していたことを示し、さらに、その生育基盤に植栽して10年が経過したクロマツの根が、耕起した箇所では無耕起の箇所よりも深い範囲に発達し、耕起が根の深さ方向への発達に効果を発揮していたことを示した。以上のように、耕起が極度に硬い生育基盤を改良する効果については一定の知見が得られているが、耕起により土壌の極度な硬さを解消することが植栽木の根の発達に与える効果については、野原・高橋（2007）の植栽から10年後のクロマツを対象としたものが見られる程度となっている。土壌の硬さと植栽木の根の発達に対する耕起の効果に関する知見を積み重ね、信頼性を高めることは、締め固まった生育基盤に対する耕起を実施するか否かの判断に役立つものと考えられる。

以上のことから、東日本大震災からの海岸林再生において広く用いられている盛土を伴う生育基盤を対象として、土壌の硬さと植栽木の根の発達の関係、及び、締め固まった生育基盤に対する耕起が土壌の硬さと植栽木の根の発達に与える効果を評価することを本研究の目的とした。これらの目的のために、盛土による嵩上げを伴って生育基盤が整備された海岸林再生地に、150 cm程度の深さまで深耕を施した区と、深耕を施さない区からなる試験地を設定し、それぞれの区に日本の海岸林の主要構成樹種であるクロマツを植栽して3成長期後までの初期段階の根の発達と土壌の硬さの推移を調査し、その結果を解析した。

2. 方法

2.1 調査地

宮城県仙台市若林区の松林国有林内の海岸林再生地に調査地を設定した。調査地周辺の海岸林再生地は盛土による1.5 m程度の嵩上げを伴って生育基盤が整備されている。この生育基盤は内陸の丘陵地（宮城県黒川郡大和町）から採取された鮮新～中新世の海成または半海成の半固結堆積物（経済企画庁 1972）を材料として、東日本大震災後の海岸林再生事業初期の2013年春に整備が完了した（小野ら 2016）。調査地は短辺7 m、長辺15 mの長方形で、汀線から約300 m内陸、防潮堤から約200 m内陸に位置し、短辺が汀線と平行するように設定した（Fig. 1）。調査地を設定した盛土は汀線から250 m付近から350 m付近にかけて幅100 m、汀線と平行方向には600 mにわたるもので、その盛土の中で調査地は汀線と直行す

る方向に対しては中央あたりに、汀線と平行方向に対しては端から200 mの場所に位置する。調査地の汀線側の短辺の数m海側には高さ2 m程度の防風柵が汀線と平行するように設置されている。この調査地を二分し、深耕を施した区（以下、深耕区、短辺3 m、長辺15 m）と、深耕を施さない区（以下、対照区、短辺4 m、長辺15 m）を設定した。深耕区の耕起作業は、小型バックホウ（機械幅1.0 m、掘削可能深2.0 m）を用いて、元地盤が現れる深さ1.5 m程度までの土を一旦掘りだした後に、重機が載らないように留意しながら生育基盤面耕起前の高さまで埋め戻すことによって行った。埋め戻し作業は掘り出した土の一部を残して完了した。小型バックホウのバケツは、スケルトンバケツ等の特殊なものでなく、容量0.06 m³の標準バケツを用いた。耕起作業は生育基盤の整備完了から4年後の2017年5月下旬に実施した。

深耕区の耕起を実施してから11日後に、播種後2年が経過したクロマツ (*Pinus thunbergii*) のコンテナ苗を深耕区に15本、対照区に25本、植栽密度が5,000本/haとなるように1.4 m間隔の格子状に植栽した。苗の植栽は、

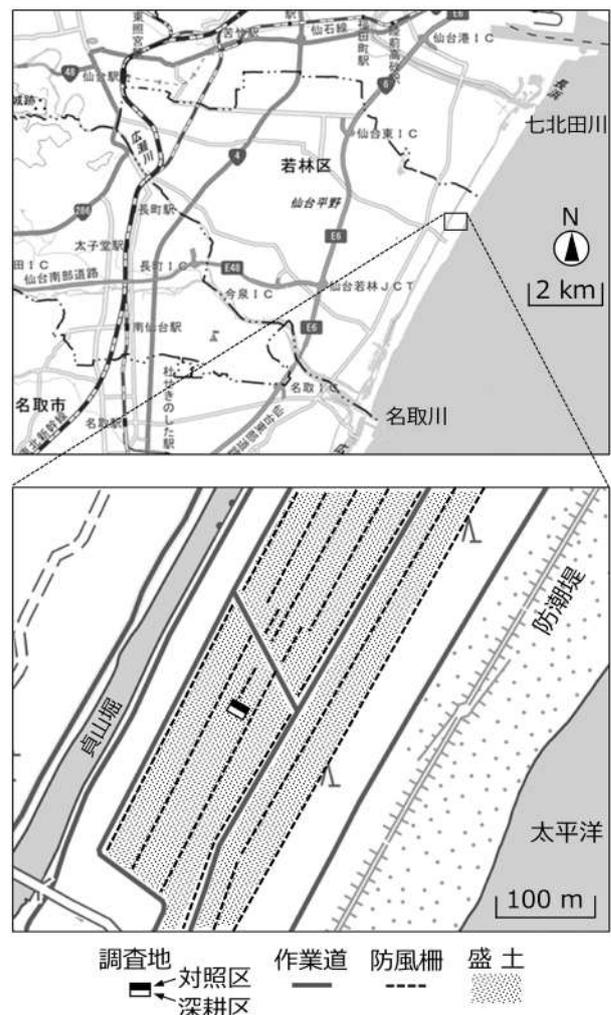


Fig. 1. 調査地位置図（地理院地図（国土地理院 2020）を加工して作成）

直径7 cm、深さ20 cm程度の植穴を掘り、そこに根鉢の直径が5 cm程度、高さが15 cm程度のコンテナ苗の根鉢を挿し込み、植穴と根鉢の間に植穴を掘った際に生じた土を充填することによって根鉢の上端が地表面と揃うように行った。

2.2 測定

2.2.1 土壌硬度鉛直分布

土壌硬度の鉛直方向の分布を調べるために、耕起から1ヶ月後、6ヶ月後、17ヶ月後、30ヶ月後に土壌貫入試験を実施した。土壌貫入試験は、耕起から1ヶ月後には深耕区と対照区の中ほどの4地点ずつで、耕起から6ヶ月後以降はそれぞれの区での後述の根系調査の実施直前に対象としたクロマツ4本それぞれの幹から約10 cm側方の1地点ずつ合計4地点でSH型貫入試験機（ダイトウテクノグリーン（株））を用いて実施した。SH型貫入試験機の先端部を土壌に貫入させるための重錘は3 kgのものを用い、重錘を高さ50 cmから落下させた1打撃ごとの先端部の貫入深を0.1 cm刻みで記録した。この値から、1打撃ごとの貫入量であるS値（cm/drop）の鉛直方向の分布を得ることができる（長谷川2006）。S値は土壌の硬さの指標として用いられ、小さいほど土壌が硬いことを意味する。日本造園学会緑化環境工学研究委員会（2000）は0.7以下のS値を示す土層を「固結」と表現し、「多くの根が侵入困難」と判定している。土壌貫入試験は、基本的には200 cm程度の深さまで実施したが、長谷川ら（1984）や福永ら（2003）等の既往の研究から根の侵入が報告されていない0.5を下回るS値が10 cm以上連続する層が出現した場合には、貫入試験機の劣化や破損を避けるために、その深さで測定を打ち切った。

2.2.2 樹木の測定

6月上旬の植栽から1成長期（5ヶ月）後、2成長期（17ヶ月）後、3成長期（30ヶ月）後に、深耕区と対照区の4本ずつのクロマツを対象として根を掘り出し、各個体の根の最大到達深、および、深さごとの根の分布量の指標として根の断面積合計を計算するために、深さ20 cmごとにその深さに存在する根の直径を測定した。各区の1成長期ごとの調査対象木には、基本的に各区の内陸側の端から隣接するクロマツ4本ずつを選んでいった。1成長期ごとの調査の度に調査地内のクロマツの本数は減ったが、3成長期後においても隣接するクロマツ同士の枝が重なり合うような状況にはなく、調査に伴うクロマツの本数の減少が残存木に及ぼす影響は小さいものと考えられる。また、深耕区においては中ほどに行くほど時間経過に伴う沈下が生じた等の場所の違いによる目立った差異は見られなかった。根の掘り出し作業は、隣接木の影響が少ない方向の対象木まで1 m程度の位置から、対象木と隣接木の根を損傷させないように対象木に向かって慎重に進め、対象木の最も深くに到達した根を掘り出し、

その根の先端の深さを対象木の最大到達深として測定した。対象木の根を掘り出す際、隣接木の周囲0.7 m以内の範囲は攪乱しないよう留意した。対象木と隣接木の根は、地表近くのわずかな水平根を除けば、それぞれの周囲0.7 mの範囲に収まっており、対象木の掘り出し作業時に隣接木の根を切断することなく、隣接木の生育基盤への影響を及ぼすこともほとんどなかった。根の最大到達深の測定後、対象木の根全体を地上に取り出し、その後、深さ20 cmごとの根の直径を測定した。また、地表付近の浅い範囲を伸びる根が存在したため、下方へ伸びた根と比較するために、深さ20 cmに到達せずに浅い範囲を側方に伸びた根を対象として、樹幹からの水平距離20 cmでの直径を測定した。直径の測定位置は根全体を地上に取り出した後に地際の幹との位置関係から決定した。このため、1 mm程度の細く軟らかい根については地中での位置関係を正確に再現できずに測定位置が数cm程度ずれた可能性が考えられる。直径の測定は、測定位置での直径が1 mm以上の根を対象として行った。

クロマツの地上部については、植栽直後、及び、前述の根の調査実施時に、それぞれの区の全ての植栽木を対象として樹高と地際の幹直径の測定を行った。なお、それぞれの区の植栽木の中に調査期間に枯死したものはなかった。

2.3. 統計解析

2つのデータ群の平均値の間に差異があるか否かの検定は、Studentのt検定によって行った。2つのデータ群の間の相関性の検定は、Pearsonの相関係数を用いて行った。2つの回帰線の傾きの差の検定は共分散分析によって行った。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 土壌硬度鉛直分布

対照区と深耕区の土壌硬度の鉛直分布は大きく異なった（Fig. 2）。対照区には、いずれの調査時期、いずれの調査地点においても共通して、深さ10 cm程度から50 cm程度までの範囲と、深さ80 cm程度より深い範囲でS値が0.7を下回る硬さの層が現れた。調査時期ごとに土壌硬度分布の調査地点が異なるため厳密な時間変化ではないが、対照区の土壌硬度鉛直分布には、試験地設定時から30ヶ月後までの期間で顕著な時間変化の傾向は見られなかった。対照区で見られた土壌硬度の鉛直分布の特徴について小野ら（2016）は、その原因を、盛土の全層を一度に盛らずに、途中まで盛った後に一旦整地し、その上に土が盛られたことであると報告している。

深耕区では、耕起した深さ1.5 m程度までの範囲においてS値が0.7以下の硬さの層はほとんど見られなかった。耕起から17ヶ月後と30ヶ月後には、深さ10 cm付近の浅い箇所にS値の低下、つまり土壌の硬化が見られ、

30ヶ月後の1つの地点の10 cm ~ 30 cm 付近では0.7以下のS値が現れた。この表層の硬い箇所の上にS値0.7以下で5 cm以上の厚さを持つ層が見られたのは深さ120 cm 付近であった。

3.2 根の発達

対照区の根の最大到達深は、植栽から1成長期後から3成長期後まで、いずれも20 cm程度であった。(Fig. 2, Fig. 3)。これに対し、深耕区の根の最大到達深は、植栽から1成長期後に80 cm程度、2成長期後に110 cm程度となり、2成長期後までは1成長期ごとに1%水準で有意な差が見られたが、3成長期後は2成長期後と同程度であり、10%水準で有意な差が見られなかった。1成長期以降の両区の最大到達深を比較すると、いずれの時期も対照区より深耕区の方が大きく、1%水準で有意な差があった。

植穴の底部に相当する深さ20 cmでの対照区の根の断面積合計は、植栽から3成長期後でも植穴の底部付近までしか根が到達しなかったため、いずれの測定時期においても僅かであった(Fig. 4a)。一方、深耕区の深さ20 cmでの根の断面積合計は成長期ごとに大きくなり、その差は5%水準で有意であり、植栽から3成長期後には1個体あたりの平均値は3 cm²を超えた。1成長期以降の両区の値を比較すると、いずれの時期も5%水準で有意に差があり深耕区の方が大きく、3成長期後の対照区の値は深耕区の1%程度であった。深耕区では、直径5 mm以上の根が植栽から2成長期後には深さ20 cmで、3成長期後には深さ40 cmで、直径10 mm以上の根が3成長期後の深さ20 cmで見られるようになるなど、根が次第に太くなっていく様子が観察された(Fig. 5)。

植栽時の根鉢から側方に伸びて、深さ20 cmには到達

せずに、樹幹からの水平距離20 cmに到達して直径が1 mm以上であった根は、深耕区と対照区ともに、植栽から1成長期後にはほとんど見られなかったが、2成長期後にはそれぞれの区の根の断面積合計は1成長期後の値より大きくなり、その差は10%水準で有意であった(Fig. 4b)。3成長期後は2成長期後から平均値は大きくなったがその差は10%水準で有意でなかった。樹幹からの水平距離20 cmの根の断面積合計を両区の間で比較すると、いずれの時期においてもその差は10%水準で有意でなかった。樹幹からの水平距離20 cmでの根は、対照区では植栽から2成長期後に直径2 mm以上のものが見られたものの、3成長期後に直径5 mm以上に達したものは見られなかったのに対し、深耕区では2成長期後に直径5 mm以上のものが見られるようになった(Fig. 6)。

植栽時の根鉢から外側に伸びた根の量の目安として、深さ20 cmと樹幹からの水平距離20 cmでの根の断面積合計の合計値を計算した。対照区での1成長期ごとの差は、2成長期後までは5%水準で有意であったが、2成長期後と3成長期後の間の差は10%水準で有意でなかった(Fig. 4c)。深耕区での1成長期ごとの差は、2成長期後までは5%水準で、2成長期後と3成長期後の間には10%水準で有意であった。1成長期後以降のいずれの調査時期においても、深耕区の値は対照区よりも大きく、その差は5%水準で有意であった。この値に対する深さ20 cmの根の断面積合計の割合は、深耕区では2成長期後、3成長期後ともに80%程度であったのに対し、対照区では、2成長期後は10%程度、3成長期後は5%程度であった。

3.3 地上部の成長

樹高は、深耕区と対照区ともに、植栽から2成長期まではほとんど大きくなり、成長期の前後での差は10%

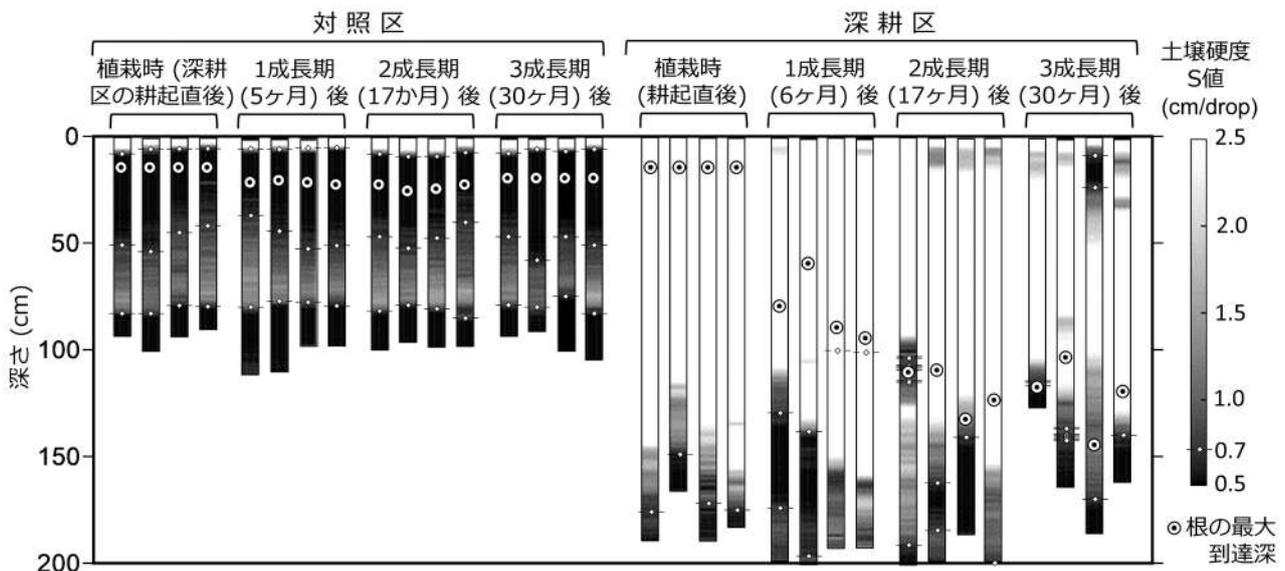


Fig. 2. 土壌硬度の鉛直分布と根の最大到達深

水準で有意でなかったが、3 成長期目には両区ともに成長が見られ、両区ともに2 成長期後と3 成長期後の差は1% 水準で有意であった (Fig. 7a)。対照区と深耕区を比較すると、1 成長期後は10% 水準で有意な差はなかったが、2 成長期後と3 成長期後は対照区より深耕区の方が大きくなり、その差は2 成長期後には10% 水準で、3 成長期後には1% 水準で有意であった。

幹直径から計算した地際での幹断面積は、深耕区と対照区ともに植栽から成長期ごとに次第に大きくなり、いずれの区のいずれの成長期においても成長期の前後の値の差は1% 水準で有意であった (Fig. 7b)。対照区と深耕区を比較すると、1 成長期後は有意水準5%、2 成長期後以降は有意水準1% で差があり、いずれも対照区より深耕区の方が大きかった。

4. 考察

4.1 土壌硬度鉛直分布

対照区ではS 値0.5 を下回るような極度な硬さの層が

盛土内に多く見られたのに対し、深耕区では耕起直後には極度な硬さは解消され、「根系の侵入が困難」とされるようなS 値0.7 以下の硬さの層は耕起した深さ範囲内に

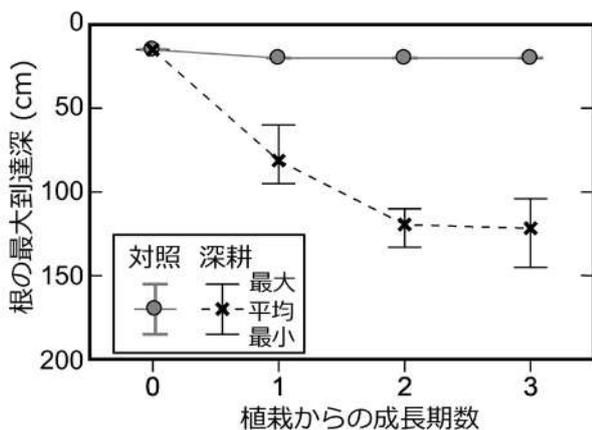


Fig. 3. 根の最大到達深の植栽からの成長期ごとの変化

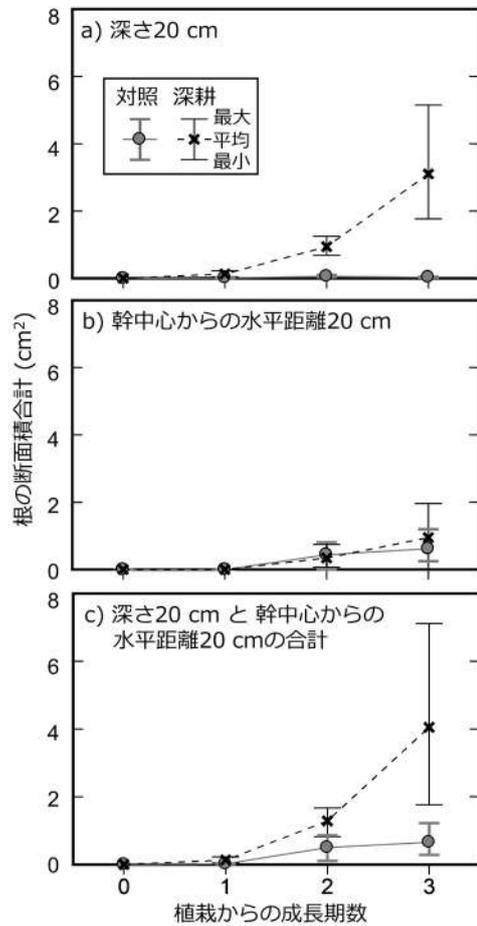


Fig. 4. それぞれの位置での根の断面積合計 ((a) 深さ20 cm、(b) 樹幹からの水平距離20 cm、(c) 深さ20 cm と樹幹からの水平距離20 cm) の植栽からの成長期ごとの変化

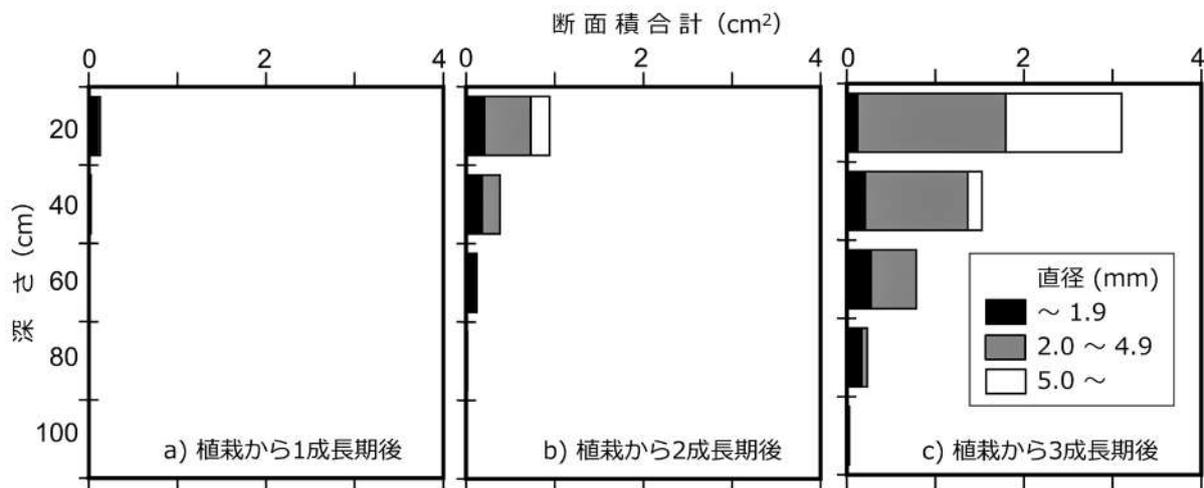


Fig. 5. 深耕区の成長期ごとの根の直径階ごとの断面積の鉛直分布

ほとんど見られなくなり、その状態は耕起から30ヶ月後までほぼ持続していた。耕起から30ヶ月後の深耕区での1地点のみで浅い範囲にS値0.7以下の層が見られたが、これは耕起作業で掘り出した土を埋め戻す際に崩しきれなかった硬い土塊がそのまま混入した箇所を測定した可能性が考えられ、例外的な事例だと考えられる。これらの結果は、長谷川・猪俣(2015)、小野ら(2016)、篠宮ら

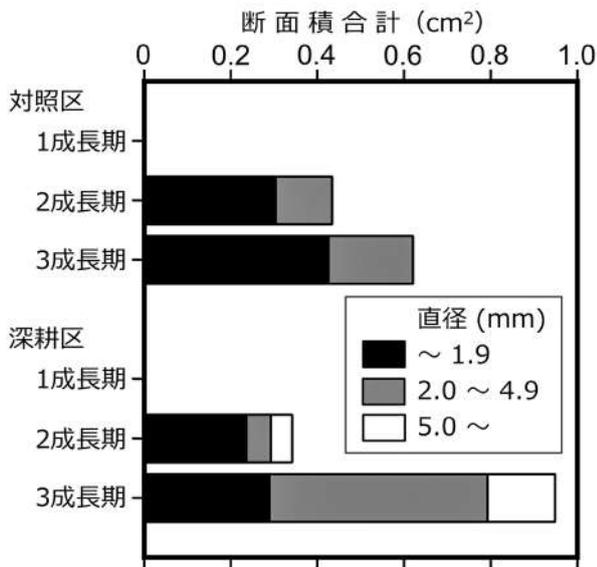


Fig. 6. 樹幹から水平距離20 cmでの根の直径階ごとの断面積

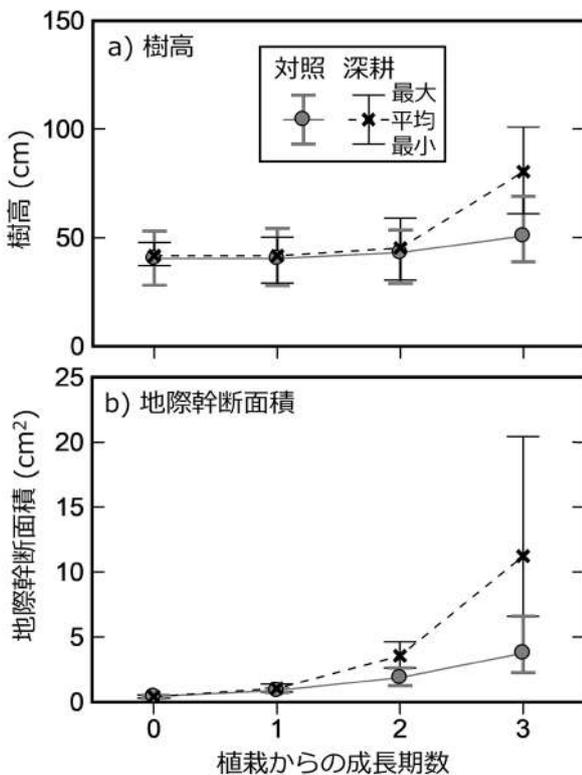


Fig. 7. 樹高 (a) と地際の幹の断面積 (b) の植栽からの成長期ごとの変化

(2017) が盛土を伴う生育基盤を対象とした土壌硬度鉛直分布の結果から示した極度な硬さの解消に対して耕起が有効であるとの結論を支持するものであった。

篠宮ら(2017)は、耕起後の硬さの推移から耕起から少なくとも6ヶ月後まで耕起の効果が持続したことを示した。本研究では30ヶ月後まで耕起の効果が持続することが確認された。加えて、耕起後の土壌硬度の時間変化は明らかにしていないものの、野原・高橋(2007)が耕起から10年後、Ono et al.(2018)が耕起から20年後において、耕起された箇所がされていない箇所よりも軟らかいことが確認されている。これらのことから、極度に硬く整備された生育基盤の硬さを改良する耕起の効果は時間経過に伴ってさほど低下することなく10年、20年と持続するものと考えられる。

4.2 根の発達

野原・高橋(2007)は盛土に耕起を施さない対照区と深さ100 cm程度まで耕起した深耕区を設定して、そこに植栽したクロマツの10年経過後の根の分布と土壌硬度を調べ、対照区では根の分布は深さ30 cmまでの範囲に集中していたのに対し、深耕区では耕起が施された100 cm程度の深さまで根が到達したことを示した。本研究でも、対照区の根は深さ方向にほとんど発達しなかった一方で、深耕区の根は植栽から2成長期後に100 cmを越える深さに到達し、両区の根の発達の違いは明瞭であった。植栽から2成長期後と3成長期後の深耕区の根の最大到達深に大きな差が見られなかったことは、2成長期後に耕起した深さ範囲の下端付近に根が到達していると思われる個体があり(Fig. 2)、2成長期以降は根の下方への発達が土壌硬度によって制限されたためだと考えられる。

根の太さに関して、野原・高橋(2007)は深耕区の10年生のクロマツは60 cmの深さまで大径根(直径20~50 mm)が分布していたことを報告している。本研究での植栽から3成長期後のクロマツでは、大径根はいずれの深さでも見られなかったものの、中径根(直径5~20 mm)が40 cmの深さまで分布していることから、今後同様に、根はさらに太くなっていくことが期待できる。

本研究の対照区の根の最大到達深は植栽から3成長期までのいずれの測定時期においても20 cm程度であった。この深さは植穴の深さと一致しており、S値が0.5程度と非常に硬い植穴底面から下方へ根が侵入できずに植穴内に止まったものと考えられる。長谷川ら(1984)はケヤキ、福永ら(2003)はコナラ(*Quercus serrata*)を対象とした根の分布と土壌の硬さの調査から、ともに、S値が1.0付近の値を境にそれより硬くなると根の分布が減少し、S値が0.5程度の硬さでは根はほとんど分布しなくなることを示した。本研究の対照区のクロマツの根の成長の結果から、クロマツの根もケヤキやコナラと同様にS値0.5程度の硬さの土壌にはほとんど侵入できないことが示された。

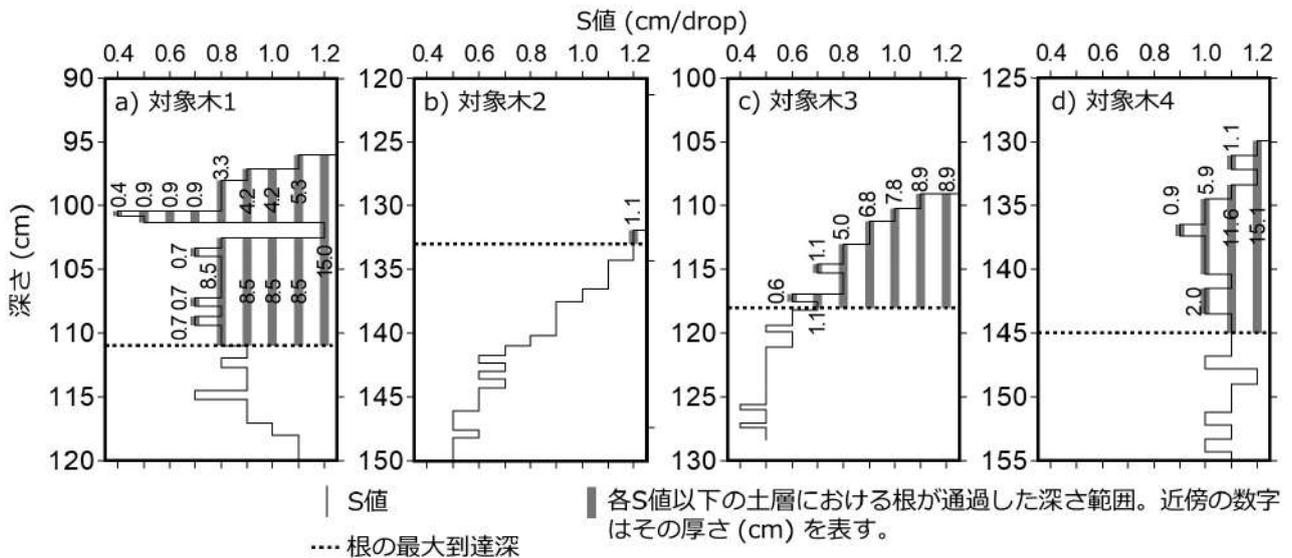
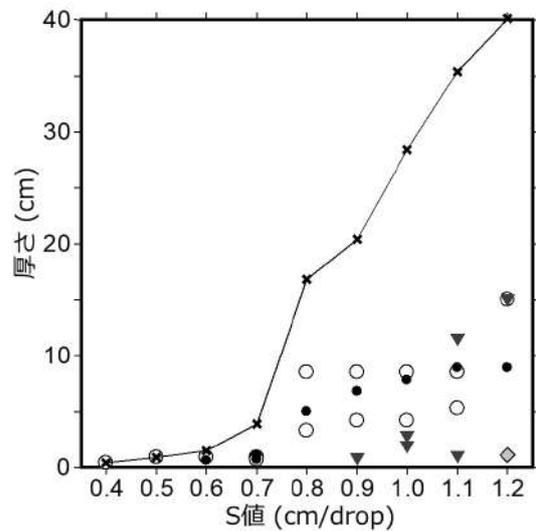


Fig. 8. 深耕区で S 値 1.2 以下の硬さを根が通過した対象木 4 本の S 値の鉛直分布、根の最大到達深、および、各 S 値以下の土層における根が通過した深さ範囲

本研究の深耕区の結果から、耕起を施した生育基盤での植栽から 3 成長期経過後までの根の下方への成長が示され、植栽から 2 成長期後以降の全ての調査対象木において最大到達深は 100 cm 以上となった。深耕区の根がどのような土壤硬度と厚さを持つ土層を通過できていたのかを検討するため、鈴木ら (2018) の方法を参考に、S 値の鉛直分布と根の最大到達深から、1.2 以下の S 値を示す土層について、0.1 刻みで区切った各 S 値以下の土層において根が通過した深さ範囲の厚さを求めた (Fig. 8)。各 S 値以下の土層とは、例えば、S 値を 0.8 とした場合には、0.8 以下の S 値が深さ方向に連続する層ということになる。S 値 1.2 以下の硬さを示した土層を根が通過した対象木は 4 本であり、これらについてこの解析を行った。3 成長期後に根を調査した対象木の一つの深さ 10 ~ 20 cm 付近に S 値 1.2 以下となる箇所があったが、これは対象木から 10 cm 程度側方での測定の結果であり、この深さ範囲は対象木の真下では植穴にあたることから根はこの硬い箇所を通過していないものと考え、この箇所は解析対象から除外した。なお、調査時期を遅らせれば根が成長を続けて最大到達深がさらに大きくなった可能性や、各 S 値以下の土層がもっと厚く分布していれば根が通過した厚さももっと厚くなった可能性が考えられる。各 S 値以下の土層における根が通過した深さ範囲の厚さは、S 値が小さくなると薄くなり、S 値が 0.8 以下では最大で 8.5 cm であり、他にも 5 cm 以上のものがあつたのに対し、S 値が 0.7 以下では最大で 1 cm 程度であり、S 値が 0.7 以下かどうかで根が通過した土層の厚さの分布に大きな差が見られた (Fig. 9)。また、各 S 値における根が通過した土層の厚さの合計値は、S 値が小さくなるほど小さくなり、隣り合う S 値の間での差は、0.7 と 0.8 の間で最も大きかった。前述の通り、根が調査後に成長して到達深がさらに

大きくなる場合や S 値の鉛直分布が異なる場合には、各 S 値に対して検出した根が通過した深さ範囲の厚さはさらに大きくなった可能性はあるが、S 値 0.7 と 0.8 の間でこの厚さの分布に大きな差が見られたことは、この付近の値が根の侵入を左右する値であることを示唆するものだと考えられる。「緑化事業における植栽基盤整備マニユ



各 S 値以下の土層における根が通過した深さ範囲の厚さ
○対象木1 ◆対象木2 ●対象木3 ▼対象木4
各 S 値以下の土層における根が通過した深さ範囲の厚さを同じ S 値で積算した値
*—

Fig. 9. 深耕区で S 値 1.2 以下の硬さを根が通過した対象木 4 本の各 S 値以下の土層における根が通過した深さ範囲の厚さ、および、その厚さの S 値ごとの積算値

アル」(日本造園学会緑化環境工学研究委員会(2000)では、S値0.7以下が「固結」と表現され、「多くの根が侵入困難」とされた。この硬さの判定基準と概ね一致することから、本研究で検出した根の通過した土層の硬さと厚さの分布は、妥当なものだと考えられた。この結果を対照区に当てはめると、植穴の底面より深部のS値は0.5程度であり、植穴の底面の深さ20 cmより深部へは根が侵入していなかったことが説明できると考えられる。

4.3 地上部と根の発達の関係

野原・高橋(2007)は、深耕の有無による差異が根の発達では見られたのに対し、地上部のサイズを表す樹高や胸高直径では見られなかったとしている。本研究では、根の発達においてだけでなく、樹高や地際での幹の断面積といった地上部のサイズにおいても対照区と深耕区の間に差が見られた(Fig. 7)。地上部のサイズへの深耕の有無の影響が異なった理由として、野原・高橋(2007)の対照区では深耕区よりも少ないものの側方および下方へ伸びる根が観察されたことに対し、本研究での対照区では、下方へ伸びる根は見られず浅い範囲を伸びる水平根が見られたのみで根鉢から伸びた根が深耕区よりも少なかったことが考えられる。しかし、野原・高橋(2007)が植栽から10年程度経過しているのに対し、本研究は植栽から2年半であり、今後の成長の過程で深耕の有無による地

上部のサイズの差は減少していくことも考えられ、この点についてはさらに調査事例を蓄積し、検討する必要がある。

地際での幹の断面積を地上部の成長を表す指標として、深さ20 cmおよび樹幹から水平距離20 cmでの根の断面積の合計を根の発達量を表す指標として捉え、両者の関係を調べると、それぞれの区で正比例の関係が見られた(Fig. 10)。この関係の回帰直線の傾きは対照区の方が大きく、深耕区の1.5倍程度であったが、両区の傾きの差は10%水準で有意でなかった。対照区では硬い土壌によって根の発達が制限され、その影響が地上部の発達にも表れ、結果的に地上部と根の発達のバランスには、両区の間は表れなかったものと考えられる。

5. おわりに

東北地方太平洋沖地震津波で被災した海岸林の再生事業初期に整備された盛土を伴う生育基盤に1.5 m程度の深さまで耕起した深耕区と耕起しない対照区を設定し、植栽から3成長期後までのクロマツの根の発達と土壌硬度の推移を調査した。その結果から、深耕は土壌の極度な硬さの解消に効果を発揮し、実施から30か月後もほぼ変わらず効果が持続したこと、クロマツの根の深さ方向への発達が対照区では植栽から3成長期後までほとんど見られなかったのに対し、深耕区では2成長期後には100 cmより深くに到達したことなど、根の発達に対する深耕の効果が明瞭に示された。また、緑化事業において用いられてきた根の侵入の可否に対する土壌の硬さの判定基準(日本造園学会緑化環境工学研究委員会2000)と一致するS値0.7前後がクロマツの根の侵入の可否に対して大きな意味を持つ値であることが示唆された。これらの本研究で得られた知見は、対象期間が植栽から3成長期後まで、樹種はクロマツのみ、調査地が1箇所のみ、深耕の深さが1段階のみ、という限定的な条件下でのものであるが、特に植栽後の初期段階での根の発達の推移に対する深耕の効果を示した点は、野原・高橋(2007)をはじめとした生育基盤に対する耕起が植栽木の根の発達に与える効果に関するこれまでの知見には見られなかったものである。本研究で得られた知見は、クロマツを植栽する海岸林の生育基盤を整備する際の土壌の締め固め限度とその根拠、および、極度に硬くなった生育基盤に対する深耕の実施の判断材料として用いられてきたこれまでの知見を補強し、信頼性を高めるものとして、盛土を伴う生育基盤を整備して海岸林を造成する際に有用であると考えられる。

謝辞

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、設定等で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。深く感謝の意を表します。本研究は(国研)森林研究・整

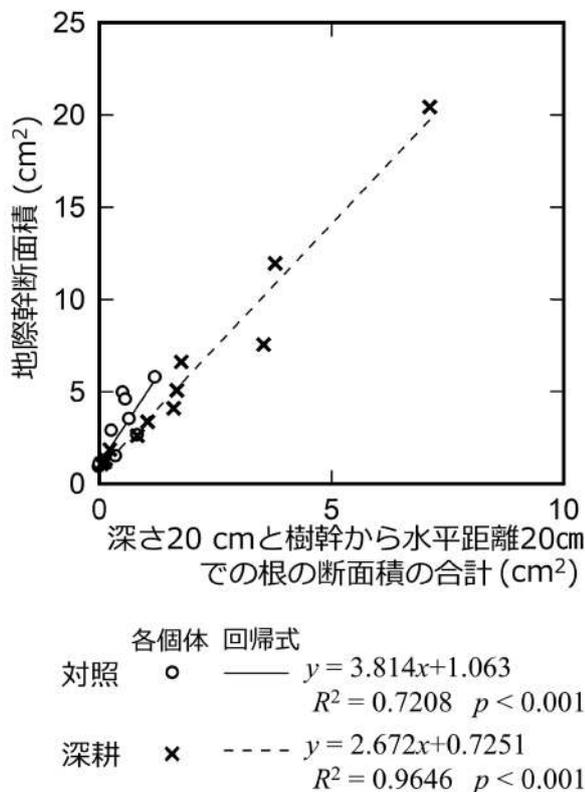


Fig. 10. 深さ20 cmと樹幹からの水平距離20 cmでの根の断面積合計と、地際幹断面積の関係

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・榎島 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，29，261-264.
- 長谷川 秀三（2006）根系深さの推定手法．日本緑化工学会誌，31，346-351.
- 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，48，104-122.
- 長谷川 秀三・猪俣 景悟（2015）陸前高田松原再生の成功に向けた植栽基盤造成試験の取組．日本緑化工学会誌，41，336-340.
- 経済企画庁（1972）国土調査（宮城県）122pp.
- 国土地理院（2020）地理院地図（電子国土 Web），<https://maps.gsi.go.jp/>，（参照 2020-07-27）
- 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，63，224-241.
- 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.
- Ono, K., Komoriya, A., Tachibana, R., Imaya A., Suzuki, S., Noguchi, H., Noguchi, K. and Hagino, H. (2018) Effect of tillage for the growth base formed by piling up soil in damp lowlands behind coastal sand dunes to construct coastal disaster prevention forest belts on the Kujukuri coastline, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64, 168-180.
- 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/>
- 篠宮 佳樹・今矢 明宏・坂本 知己（2017）海岸防災林再生事業で造成された盛土の深耕による硬度と透水性の変化．森林総合研究所研究報告，16，249-256.
- 鈴木 寛・野口 宏典・小野 賢二・萩野 裕章・坂本 知己・多田 賢二（2018）根系成長を制限する土壌硬度を土壌貫入計で検出する方法の提案．第 129 回日本森林学会大会学術講演集，91.
- 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.

Effects of deep tillage on soil hardness of berms built as growth bases of coastal forests and growth of *Pinus thunbergii* roots planted on them

Hironori NOGUCHI^{1)*}, Kenji ONO²⁾, Hiroaki HAGINO²⁾ and Satoru SUZUKI³⁾

Abstract

In the restoration of coastal forests that suffered from the Great East Japan Earthquake Tsunami, thick growth bases have been built with embankments that let roots grow deep into soil. The growth bases are apt to have soil that is harder than the sand dunes where the former coastal forests stood. There has been some concern that the hardness of the growth bases prevents roots from growing deep into the soil. In order to elucidate the effects of soil hardness on the root development of *Pinus thunbergii*, which is the primary species in the coastal forests of Japan, we set up a deep (about 1.5 m depth) tilled area and an untilled area on a growth base with embankment, and investigated the root development of *P. thunbergii* planted on each area for 30 months. Since soils of the tilled areas were much softer than those of the untilled areas, it was confirmed that deep tillage is an effective method to soften hard soils. The roots in the untilled areas were hardly out of the planting hole after 30 months, while the roots in the deep tilled areas reached about 80 cm deep after 5 months, and about 110 cm deep after 17 months. These results confirm that the hard soil prevents roots from developing. Moreover, the vertical soil hardness profiles where the roots penetrated suggest that soil hardness limits to root penetration of *P. thunbergii*.

Key words : coastal forest, root, growth base, soil hardness, deep tillage

Received 31 August 2020, Accepted 3 June 2021

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

2) Tohoku Research Center, FFPRI

3) Center for Forest Damage and Risk management, FFPRI

* Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN;

E-mail: noguh@ffpri.affrc.go.jp