

2.3 生育基盤盛土工の各種基準等の検証

2.3.1 検証の目的

海岸防災林の再生事業では、樹木の津波波力に対する耐性を高めるために、多くの場所で生育基盤盛土工を取り入れてきた。海岸防災林の造成事業で、今回ほど大面積に生育基盤盛土を実施した経験がなく、現場での試行錯誤を繰り返しながら取り組まれた。その試行錯誤の結果を生かす形で各種基準等の改定などもおこなわれた。本検証は、生育基盤盛土から植栽までの再生事業が終了することを期に、生育基盤盛土の品質や植栽木の成育状況を把握し、今後の海岸防災林造成における生育基盤盛土造成に生かすことのできる知見を得ることを目的として実施した。

2.3.2 調査場所の選定

(1) 林野庁の工事標準仕様書改訂前後における調査箇所

再生事業で生育基盤盛土を実施する最大の目的は、垂下根が深く伸長するための土層深を確保することにある。そこで、本業務による現地調査では、樹木地上部の形状測定、土壌硬度を中心とした物理性測定、土壌掘削による断面調査および根系調査などが調査項目になる。また、調査箇所選定にあたっては「樹木地上部の成長が良好な場所は垂下根の伸長に適した土壌環境である」という前提に立つことにした。

仙台湾沿岸の仙台市～山元町の海岸防災林は、民有林直轄事業として仙台森林管理署が生育基盤盛土および植栽工を施工した。仙台森林管理署では、今後実施される本数調整伐などの保育に資するため、令和元年度に植栽木の成育状況（主に樹高）を全域調査した資料を作成している。また、仙台市～山元町で実施された生育基盤盛土は約 700ha、植栽面積は約 560ha に及ぶことから、本業務での調査場所選定の自由度も高い。

本業務の現地調査は仙台市～山元町から予備調査の結果をもとに、具体的な調査箇所を選定した。結果的に、全ての調査箇所が山元町から抽出された。なお、予備調査では本業務で実施する調査対象木となる標準木を 3 本選定し、その樹高を測定した。



(背景は GoogleEarth)

図 2.3 調査箇所全体位置図

(2) 土壌硬度の経年変化に関する調査箇所

本業務では、土壌掘削をしなくても深度方向の土壌硬度を測定できる SH 型土壌貫入試験から換算した長谷川式土壌貫入試験の S 値（軟らかさ指数）の経年変化を調査することにした。

過去の調査結果として、林野庁が平成 30（2018）年度に実施した「海岸防災林の保育管理のためのガイドライン策定調査」において、岩手県山田町で 2 点、宮城県仙台市で 11 点、福島県相馬市で 12 点があり、測定場所も誤差数 m の範囲で特定できることから、そこを調査箇所とした。

表 2.9 土壌硬度経年変化に関する調査箇所一覧表

都道府県	予定箇所	林帯幅	管轄等	施工履歴
岩手県	山田町 小谷島地区	50m	施工：県 管理：県	盛土：H29 年度 植栽：H30 年度 樹種：クロマツ
宮城県	仙台市 若林区 井土地区	500m ※貞山堀 を挟む	施工：国 管理：国・県	盛土：H26 年度～H28 年度 植栽：H28 年度～ 樹種：クロマツ
福島県	相馬市 大洲地区	各 200m ※市道を 挟む	施工：国・県 管理：国・県	盛土：H24 年度～H28 年度 植栽：H26 年度～ 樹種：クロマツ

国土地理院 WMTS 淡色地図、
国土交通省国土数値情報を利用

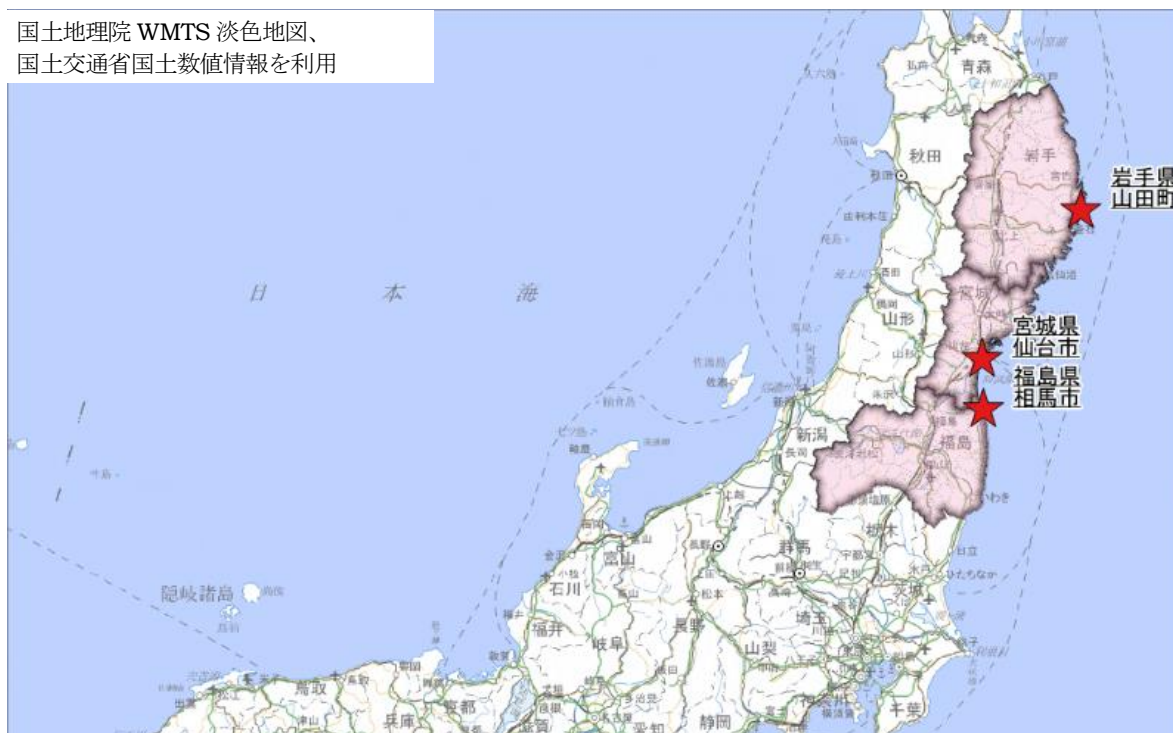


図 2.4 調査地点位置図（全体）

2.3.3 調査内容

(1) 林野庁工事標準仕様書の改定前後に注目した調査内容

樹高成長区分と施工年代の組み合わせごとに、予備調査で選定した根系掘削調査等を実施した。

調査箇所と掘削調査の場所との数量は表 2.10 に示すとおりである。また、実施した調査の内容を表 2.11 に示した。

表 2.10 根系掘削調査および土壌硬度等調査数量

生育基盤盛土工の区分		植栽工	樹高成長区分			
施工年代	工事施工基準	施工年度・季節	早	中	遅	計
平成 24 年度	工事標準仕様書 改訂前	平成 27 年 春	A 地区 3 本	B 地区 3 本	C 地区 3 本	9 本
平成 30 年度	工事標準仕様書 改訂後	令和元年 秋	－ 該当なし	D 地区 3 本	E 地区 3 本	6 本
計			3 本	6 本	6 本	15 本

※各地区の本数は根系掘削調査の数量

表 2.11 樹木地上部調査および根系掘削調査の内容と方法

区分	調査内容	調査方法など
樹木地上部調査	樹高、根元直径、胸高直径 樹冠長率、1 成長期ごとの 輪生枝間隔	根系掘削調査対象木を含め 20 本を測定
根系掘削調査	土壌断面の掘削	地表から垂下根先端を確認するまで掘削して土壌断面を作成。 掘削は、バックホウと人力を併用。 ただし、安全上の目安となる深度 2m を上限として掘削した。
	土壌断面調査	土壌層区分をおこなったうえで、国有林野土壌調査法に準拠して調査。 垂下根、水平根の発達状況をスケッチし、垂下根の到達深度を cm 単位で記録した。
	垂下根直径	深度 20cm から深度方向 20cm 間隔で直径を測定。 垂下根が複数本ある場合はそのすべてを測定した。
	水平根直径	断面調査で確認できる水平根の垂下根からの分岐部直径について、直径の太さの上位 10 本の分岐部深度と直径を記録した。
	土壌硬度調査① SH 型土壌貫入試験	5 つの調査箇所それぞれで 1 箇所測定した。
	土壌硬度調査② 山中式土壌硬度試験	深度 20cm から深度方向 20cm 間隔で測定した。 各深度 10 点で測定し平均値を採用。
	根系堀上及び写真撮影	根系発達の状況を、一般の方々を含めて視覚的に説明するため、断面調査で切断根系以外の全てを掘り上げ、記録写真を撮影した。掘り上げの対象は根系掘削調査の対象木から 1 本を抽出。
	樹幹および根系の年輪解析	掘り上げ根系の記録写真の対象木 1 本について、樹幹および根系の年輪解析を実施した。根系については、垂下根と水平根それぞれの中で最も根長が長い一本を対象にした。

(2) 土壌硬度の経年変化に関する調査内容

図 2.4 に示した箇所について、SH 型土壌貫入試験を実施した。調査地区ごとの調査数量は表 2.12 に示すとおりである。

表 2.12 土壌硬度経年変化に関する SH 型土壌貫入試験調査数量

都道府県	市町名	地区名	管轄等	施工履歴	調査数量
岩手県	山田町	小谷鳥地区	施工：県 管理：県	盛土：H29 年度 植栽：H30 年度 樹種：クロマツ	2 点
宮城県	仙台市 若林区	井土地区	施工：国 管理：国・県	盛土：H26 年度～H28 年度 植栽：H28 年度～ 樹種：クロマツ	11 点
福島県	相馬市	大洲地区	施工：国・県 管理：国・県	盛土：H24 年度～H28 年度 植栽：H26 年度～ 樹種：クロマツ	12 点
計					25 点

2.3.4 生育基盤盛土工の各種基準等の検証結果

(1) 検証結果

平成 29 年 3 月の工事標準仕様書の改定前の C 地区（図 2.5）と改定後の E 地区（図 2.6）の断面と土壌硬度（長谷川式 S 値および山中式土壌硬度）を例示する。

この二つの例と合わせ、A 地区、B 地区、D 地区の状況から、工事標準仕様書の改定により、つぎのような点が改善された可能性がうかがえる。

改善点 1 盛土材料に含まれる礫の量が少なくなっている可能性がある。

改善点 2 一層仕上げとしたことで層区分が少なく、上位層よりも透水性の低い層位が生じることを防止できる可能性がある。

改善点 3 盛土後の各種作業による転圧が避けられ、深度 1 m 以深の盛土層の土壌硬度を軟らかくできる可能性がある。

改善が十分ではない点として次のことがあげられる。

未改善点 1 深度 50cm より浅い層位の土壌硬度は改善されていない。

また、盛土の層数を 1 層仕上げにすることによる懸念材料としてつぎの可能性が挙げられる。

懸念材料 1 地山をダンプトラックや重機が走行する頻度が増え、生育基盤中の地山表層部に固結盤を作る可能性が懸念される。

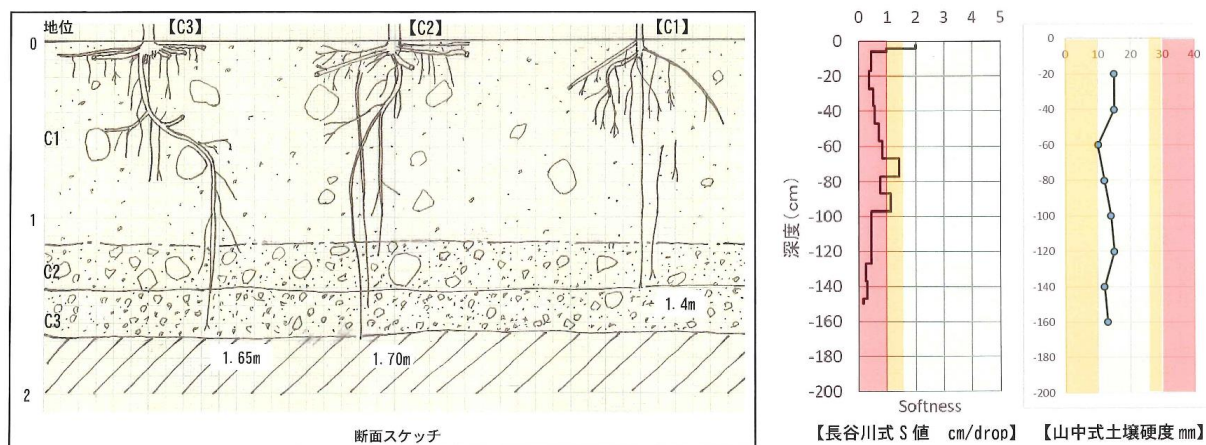


図 2.5 C 地区の土壌断面と土壌硬度

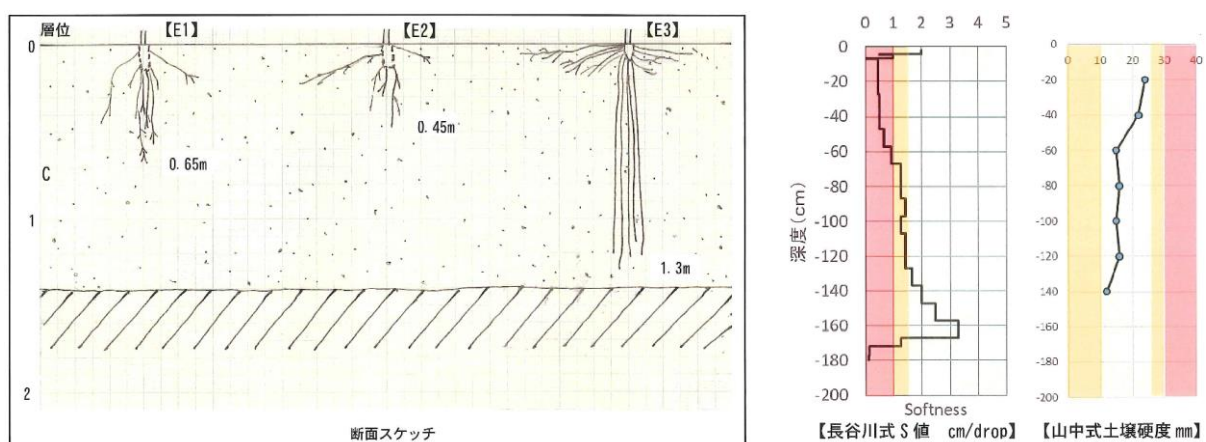


図 2.6 E 地区の土壌断面と土壌硬度

(2) 生育基盤盛土の土壌硬度評価に用いる調査手法の課題

今回の根系掘削調査でクロマツの根系発達状況と合わせて長谷川式土壌貫入計による S 値と山中式土壌硬度を測定したところ、図 2.5 や図 2.6 で示したように、S 値で根系発達に障害が生じるとされる区間においても根系が発達していることが確認された。一方、山中式土壌硬度計の値は根系が発達可能な硬さを示す値が得られる場合が多いことがわかった。

今後の保育管理で長谷川式土壌貫入計の S 値を活用するにあたっては、つぎに列記するような検討が必要になると考える。

- ①根系発達と土壌硬度測定手法の適応性について、調査事例を増やし適切な調査手法を検討する。
- ②非掘削により深度方向の硬度分布を得る方法として長谷川式土壌貫入計（SH 型を含む）は非常に有効である。S 値の評価数値基準を海岸防災林（砂質土壌）に適合するように見直すための検討をする。ただし測定機械の打撃に対する耐性の問題もあるため、スウェーデン式などその他のサウンディング試験についても検討する必要がある。
- ③植栽後の保育として特殊掻き起こしを検討する場合には、長谷川式土壌貫入計で抽出した対象深度について、施工前の土壌掘削調査により山中式土壌硬度、土質および根系発達状況を確認するのが好ましい。

2.3.5 クロマツ垂下根の初期伸長

東日本大震災で被災した海岸防災林の復旧事業では、生育基盤盛土の高さを決定する根拠として、下記の小田（2001 年）の式が用いられた。

$$y = 2.1x + 11.6 \quad (y : \text{根系枯死上端深さ (cm)} \quad x : \text{樹齢 (年)})$$

土壌掘削調査した樹木の樹齢と垂下根発達深度の関係をプロットし、小田の式による根系枯死上端深さのラインを記入したのが図 2.7 である。これによると、現段階での樹齢に対しては、どの調査木も垂下根が小田の式以上の深度に達していることがわかる。

なお、多くの調査木は小田の式で想定した垂下根の深さよりも遥かに深い深度まで垂下根を発達させている。したがって、土層中に帯水層や極端な固結層などが存在しなければ、クロマツは成長初期に相当深い位置まで垂下根を一気に伸長させるものと考えられる。

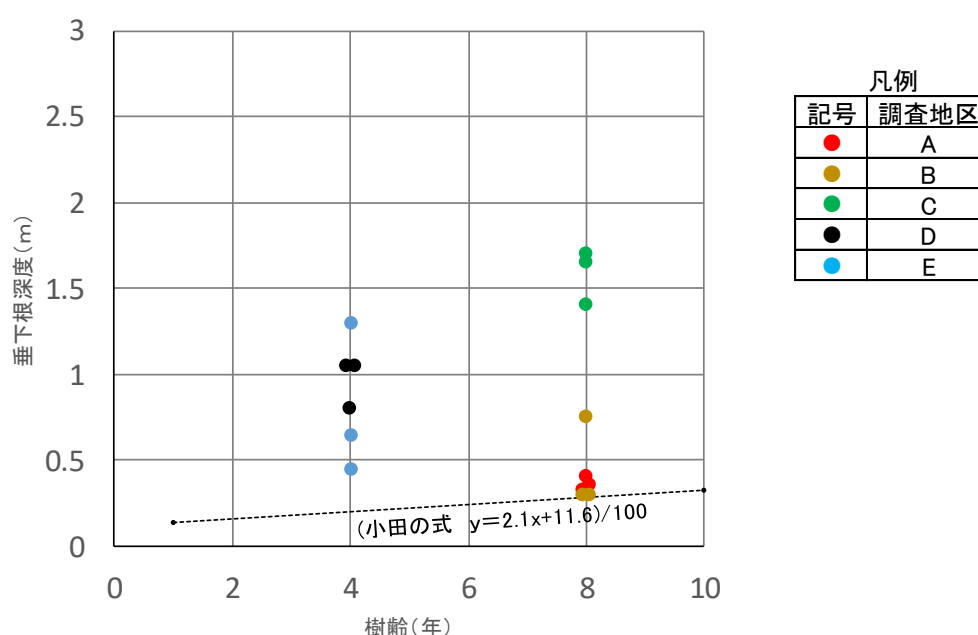


図 2.7 林齢と垂下根発達深度

2.3.6 根系の伸長と樹木地上部の成長

(1) 樹木地上部の成長の指標

樹幹解析を実施した個体（B-1）の結果を用いて、樹高と幹材積の関係を確かめたのが図 2.8 である。それによると、樹高と幹材積とは相関が高いことが確認できることから、本項における樹木地上部の成長量は樹高と根元直径を用いて評価することにする。

(2) 垂下根の伸長と樹木地上部の成長

今回の調査では『樹高成長が早い樹木の垂下根は深く発達している』と仮定したが、図 2.9 および図 2.10 に示すように樹高や根元直径の成長が早い個体の垂下根が必ずしも深くまで発達していないことがわかった。しかし、C、D、E 地区では樹高と垂下根深度で相関が取れている傾向があるように見える。垂下根の成長については、今後の継続調査が必要であると考えられる。

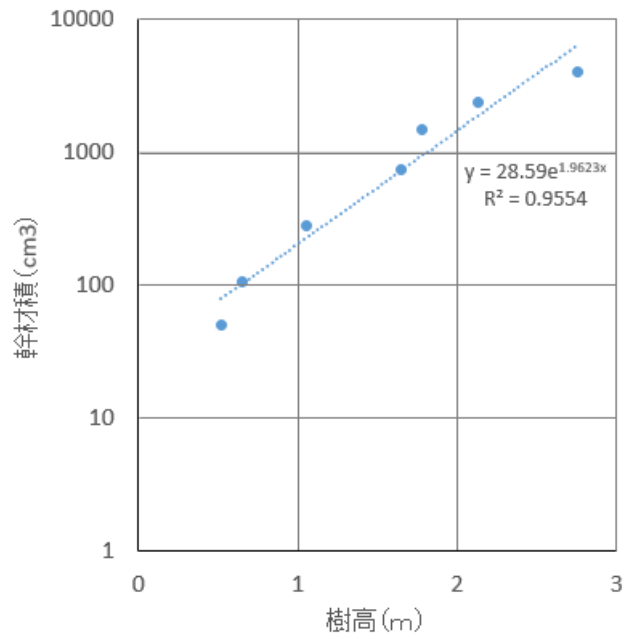


図 2.8 クロマツの樹高と幹材積の関係

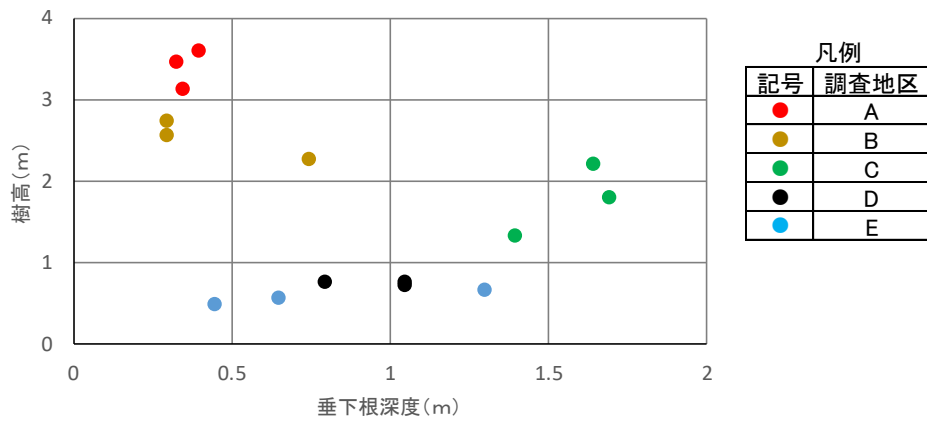


図 2.9 樹高と垂下根発達深度

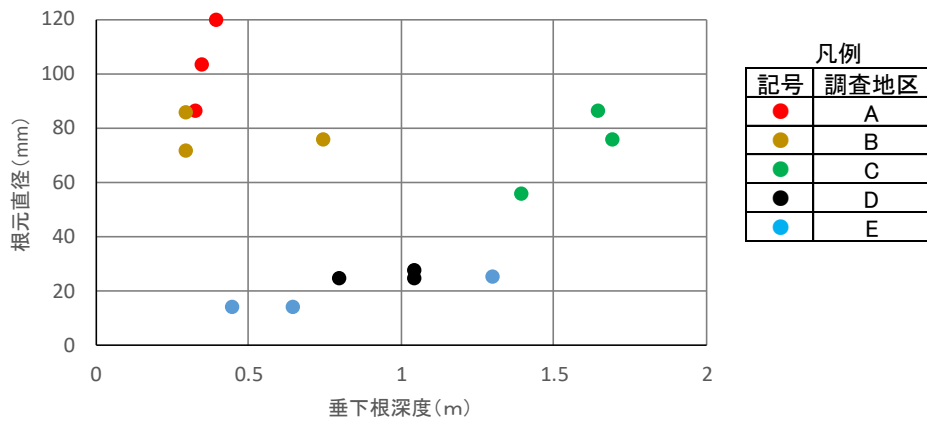


図 2.10 根元直径と垂下根発達深度

(3) 水平根の成長と樹木地上部の成長

本調査では垂下根の調査を主体に実施した。水平根については、垂下根からの分岐深度と分岐部の根系直径（極力分岐に近い位置）について、土壌断面調査で確認できる中で（概ね全体の半分）直径の太い順に上位 10 本を測定した。水平根の発達状況を評価する指標として、測定した水平根の断面積合計を用いて樹高および根元直径との関係を図 2.11 および図 2.12 に示す。なお、水平根の全体の約半分の測定であることから、断面積合計は測定値の 2 倍とした。

これらの図から、水平根断面積合計と樹高および根元直径との間には相関があることがわかった。樹木の成長に必要な水分や養分を吸収するのは水平根の先端部の細根の役割であることを考えると当然の結果といえよう。

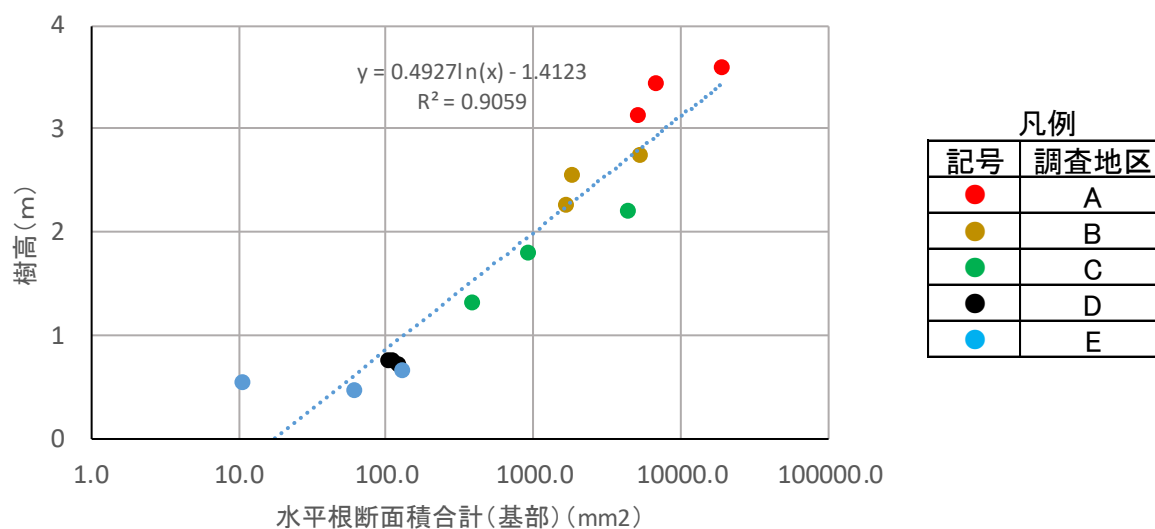


図 2.11 樹高・水平根断面積合計散布図

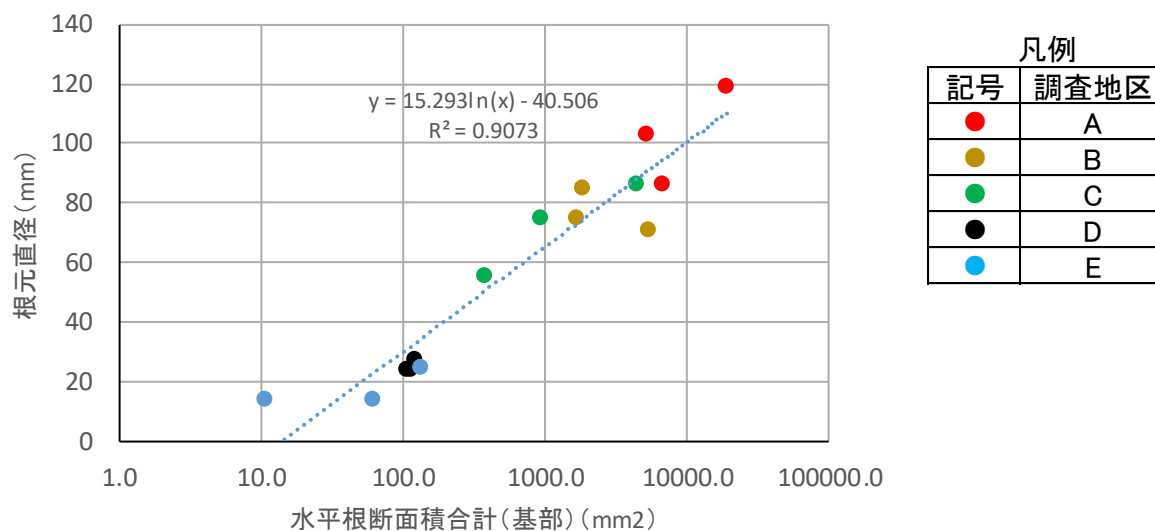


図 2.12 根元直径・水平根断面積合計散布図

(4) 土層中の帯水影響下における樹高成長と根系伸長

年輪解析で得られた樹高、垂下根および水平根の経年的伸長量の変化を図 2.13 に示した。

垂下根に注目すると、年間 5cm～20cm 程度で急速な伸びではないが 2021 年までは伸長を続けていることがわかる。しかし、既に帯水層上面に達していることから、今後は B-2 や B-3 のクロマツのように伸長が抑制される可能性がある。

一方、樹高と水平根は垂下根と比べると年間伸長量の経年変化が大きいことがわかる。この変化は、図 2.13 に赤色破線矢印で示したように樹高が先に伸長してから水平根が伸びるようにも見えるし、灰色破線矢印で示したように水平根が先に伸長してから樹高が伸びるようにも見える。前者だとすればトップヘビーになった地上部を支持するために水平根が発達すると考えられるし、後者だとすれば水平根が発達して地上部が成長するための養分や水分が供給されることにより地上部が発達すると考えられる。今回の調査は植栽後の経過年数が少ないことと、年輪解析を実施したのが 1 個体だけと少ないことから、その結論は今後の課題である。

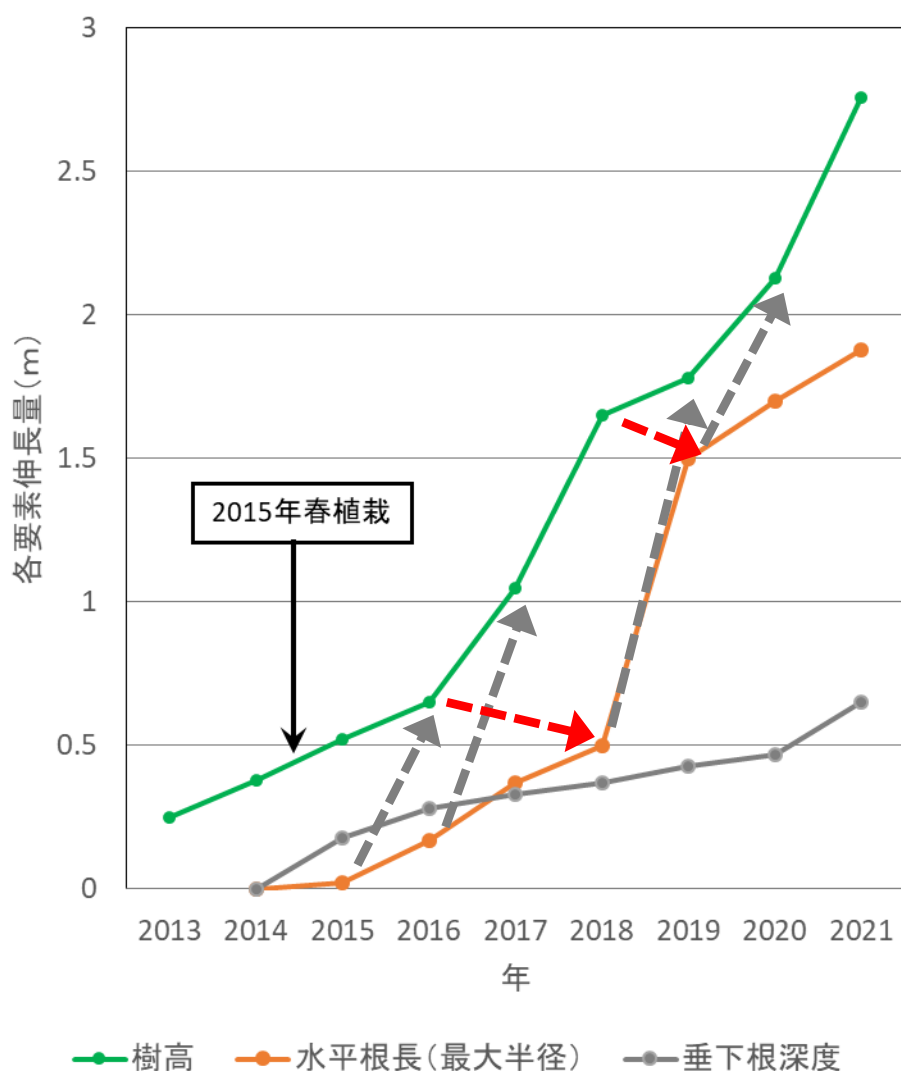


図 2.13 樹高、水平根長、垂下根深の経年変動図

(5) 生育基盤の地表滞水と樹高成長

A～E地区でそれぞれ20本ずつ輪生枝高を測定した結果から、各地区の平均樹高成長曲線を描いたのが図2.14である。それによると、樹高成長曲線は、C地区を除けば概ね類似した曲線を示すことがわかる。A地区とB地区の樹高成長の違いはそれほど大きなものではない。

C地区は、現地に植栽後の樹齢4年から成長が鈍り始め、樹齢7年以降は成長の傾きがA地区やB地区と同程度に回復していることがわかる。写真のように、C地区は現在でも降雨後に地表水の滞水が発生する。植栽後3年程度はこの影響により樹高成長が抑制されたことが考えられる。植栽木の根系発達や林床植生の繁茂により、滞水の影響が徐々に少なくなり、樹高成長が速くなった可能性がある。



地表滞水の程度にもよるが、今回の調査事例のように数年後に成長スピードが回復する可能性があることから、植栽後しばらくは経過を観察することも必要になる。ただし、土層中に帯水層が形成される場合は、樹高成長よりも垂下根の発達に係るので生育基盤の改良等についての検討が必要になる。

C地区地表の冠水状況（2021年10月2日撮影）

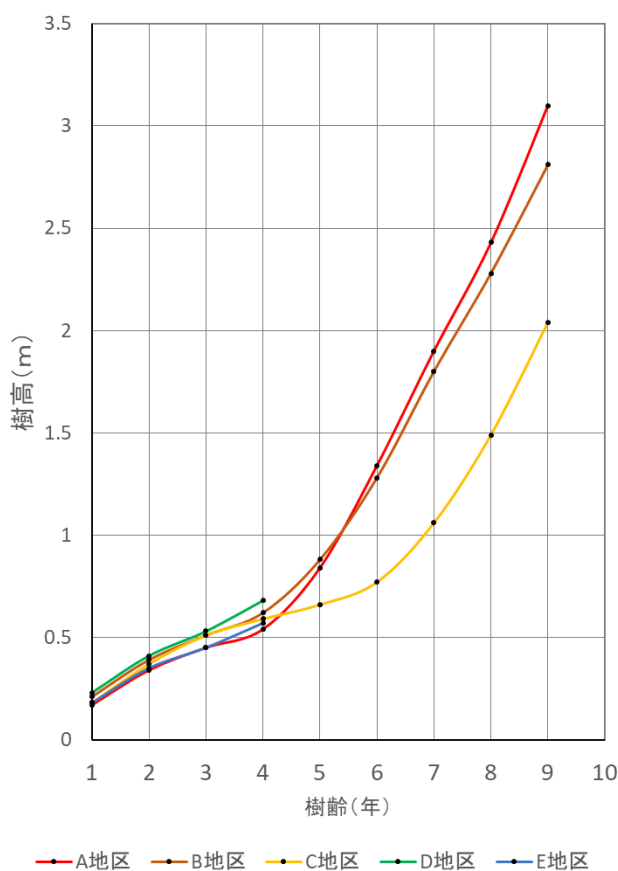


図 2.14 地区別樹高成長曲線

2.3.7 土壌硬度の経年変化に関する精緻な分析

平成 30（2018）年と令和 3（2021）年の土壌硬度試験を用い、地表からの深度を 20cm 間隔で土壌硬度の経年変化を判定した。判定は軟化、不変、硬化の 3 段階でおこない、判断はグラフの目視でおこなった。

判定結果から深度ごとの判定結果をグラフにしたのが図 2.15 である。深度が深くなるにしたがって調査箇所数が少なくなるので、頻度を割合（パーセント）で示したグラフと実数で示したグラフの両方を作成した。

この二つのグラフを見ると、土壌硬度の軟化や硬化についての明瞭な傾向は認められない。しかし、細かな差を抽出すると次に列記するようなことを挙げることができる。

- ◆地表から深度 0.2m までの浅層は軟化している調査箇所が約 50%
- ◆地表から深度 1.6m の区間では、例外（1.0～1.2m）を除いて軟化が卓越する傾向
- ◆深度 1.6m～2.0m の区間は不変の調査箇所が多く、軟化と硬化は同じ程度の発生頻度
- ◆深度 2.0m 以深は試験数が少なく地山を測定している可能性が高いが軟化の割合が高くて硬化した試験箇所はない

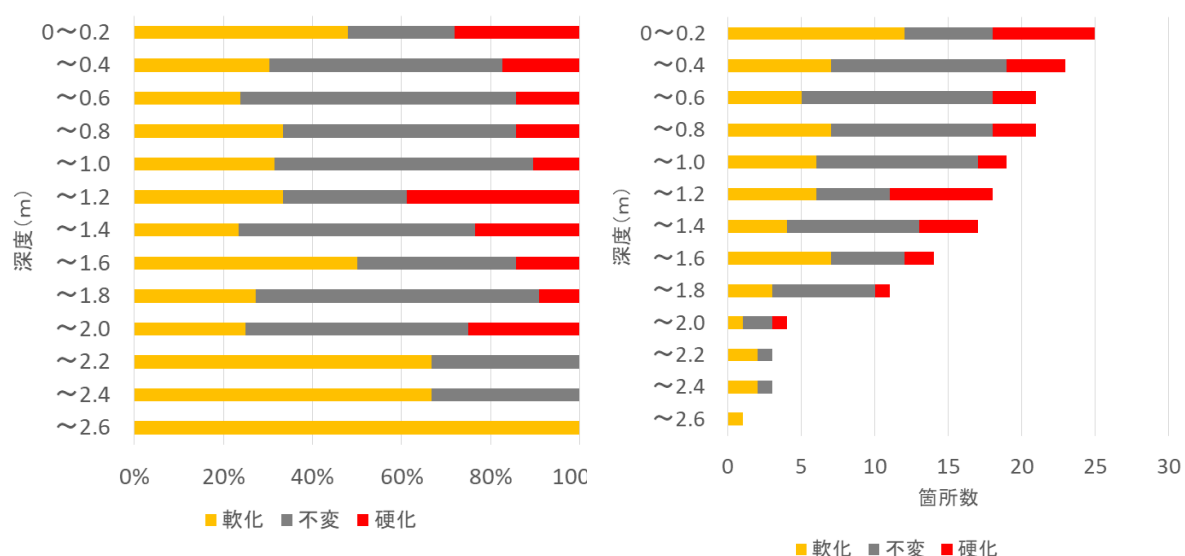


図 2.15 深度別土壌硬度経年変化図

土壌貫入試験の最終到達深度は、図 2.16 に示すように経年的に深化している調査箇所が約 60%を占め、上記の深度別の検討結果が深度 2m 以深で軟化傾向であったことと同じような結果である。この結果については、前回（平成 30 年度）の調査箇所と数 m 程度のズレが生じている可能性があり、測定地点の位置の違いによる土壌硬度測定値のバラツキがあることを考慮する必要がある。

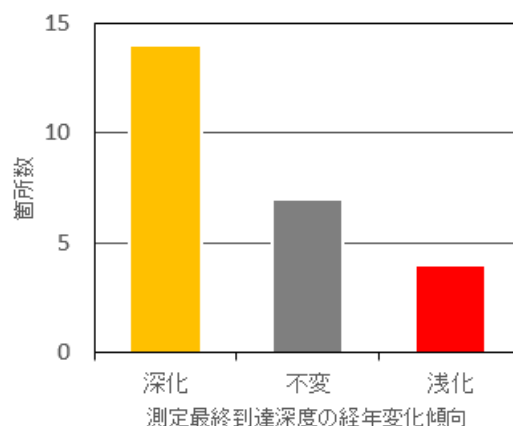


図 2.16 土壌貫入試験最終到達深度経年変化図

2.3.8 今後の課題

生育基盤盛土工の各種基準等の検証について、以下の3つが今後の課題としてあげられる。

◆今後の根系伸長

本数調整伐の実施に合わせ、林内での掘削調査が可能になる5年後、10年後といったタイミングで検証を続けることが望ましい。特に垂下根に注目して生育基盤盛土を評価する。

◆工事標準仕様書の再検討

本業務の調査結果では、改定前の多層仕上げによる生育基盤盛土でも垂下根が伸長可能であることが示唆された。したがって、必ずしも一層仕上げ有利とは言い切れない。一層仕上げの場合、施工方法によっては地山を転圧するリスクが大きくなることに注意が必要である。

本業務では一層仕上げの場合の地山土壌硬度の測定数が少ないので、今後確認調査を実施して標準仕様書再改定の必要性の有無を検討することが望ましい。この検討は、上記5年後、10年後の根系伸長調査とあわせて実施することも考えられる。

◆垂下根発達深度あるいは土層中帯水層の効率的調査手法の検討

本業務の調査結果から、植栽木の樹高成長などの地上部の成育は、水平根の発達と関係性が深いことがわかった。そのため、地上部の成育状況を調査しても、垂下根の発達不良や生育基盤の不良などを把握できず、特殊搔き起こしなどの対策を実施する対象箇所の絞り込みが難しい。

面積の小さな地区であれば、本業務で実施したような根系掘削調査を実施して改良の必要性を判断することも可能であるが、広大な面積がある地区では効率的ではない。非掘削による物理探査など、効率的な調査手法を検討する必要がある。