

論文 (Original article)

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—

小野 賢二^{1)*}、今矢 明宏²⁾³⁾、高梨 清美⁴⁾、坂本 知己¹⁾

要旨

大津波で被災した仙台平野の海岸防災林再生現場では、事業初期段階に生育基盤として造成された盛土に部分的な水溜まりが発生している所がある。この状態はクロマツ苗に悪影響を与える。本論では、こうした盛土の状態を把握し、対策法としての盛土の耕起による物理矯正効果を評価した。水溜まりが生じる盛土は全般に堅密で、土壌構造は未発達だったが、地表部では滞水に由来するグライ層の形成が確認された。盛土の全孔隙率は低い傾向を示し、特に0～50 cm深で低かった。全孔隙に対して粗孔隙が少ないものは特に透水係数が低く、締固めによる孔隙の縮小や減少が透水性不良の原因となったと推察された。海砂に比べて盛土はシルトや粘土の含有率が高く、粒度に幅があった。そのため、盛土は海砂に比べ締固まりやすいと考えられる。この盛土材料そのものの特性に加えて盛土造成時の重機走行による締固めが盛土に水溜まりが生じた原因と考えられた。仙台森林管理署では盛土への水溜まりの発生解消と硬盤層破碎を目的とし盛土の耕起を行っている。そこで耕起後の盛土に対し工法ごとに土壌硬度鉛直分布を測定した。その結果、スケルトン式バックホウ、リッパードーザ、プラウとサブソイラを用いた耕起工では、いずれも刃の到達深度まで十分な物理矯正効果が認められたため、耕起工は土壌物理性改善に効果的であることが分かった。また、事業着手初期に造成された未耕起盛土で認められるような長期にわたる水溜まりの発生も認められなかった。以上から、いずれの工法も耕起完了から1～20ヶ月が経過していたが、物理矯正効果は時間が経過しても持続していたことが示された。

キーワード：生育基盤盛土、海岸防災林再生、土壌硬度鉛直分布、耕起工、物理矯正効果、東北地方太平洋沖地震大津波

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震から5年半が経過した。この地震による大津波では、青森県から千葉県にかけての太平洋沿岸部約140 kmにおいて、海岸防災林の浸水被害が約3,660 haにも及んだ(東北地方太平洋沖地震に係る海岸防災林の再生に関する検討会 2012)。地震と津波が絡んだ複合的な災害によって沿岸各地で防潮・防波堤の損壊や海岸防災林地盤の沈下、流失が発生し、海岸防災林を構成していた多数の樹木も倒伏、折損、流亡等の甚大な被害を被った(森林総合研究所 2011, 中村ら 2012, 星野 2012, 林野庁 2015a)。これらの海岸防災林が被った倒伏、流亡の被害要因には、次の2つが考えられている。1つは、海岸防災林の立地する海岸沿岸部の多くが浜堤部に位置し、それらは砂の堆積物で構成されることから地盤が軟弱な上に地下水位が比較的高かったため。もう1つは、その地下水の影響で樹木の根張りが地下方向に不十分であり、津波の浸入による水平方向に対する抗力が弱かったため、とされている(伊藤 2015, 村上 2015, 坂本 2015)。

林野庁は2011年5月から学識経験者等で構成された「東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会」を開催し、2012年2月に「今後における海岸防災林の再生について」を取りまとめ(東北地方太平洋沖地震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の方針を示した。同方針には、海岸防災林の復旧・再生にあたり留意すべき事項として、根系の健全な成長のための生育基盤の造成、背後の林帯を保護する人工盛土の造成等、津波に対する減災、防災の観点から生育基盤造成について具体的な内容が書き込まれた(林野庁 2015a)。仙台湾沿岸の海岸防災林復旧・再生の現場では、この方針を踏まえて、地下水位を測定し、根系が100年成長できる深さを小田(2000)に準じて考慮し、地下水位から2.4 mほど高く盛土して生育基盤を造成し、クロマツ苗の植栽が実施されている(伊藤 2015, 村上 2015)。仙台湾沿岸の海岸防災林復旧・再生現場においては、生育基盤となる盛土材には、海岸から10～30 km離れた丘陵地帯から採取した「山砂」が用いられている。山砂は、土の粒度試験結果や土壌pH、電気伝導度、透水性、

原稿受付：平成28年6月3日 原稿受理：平成28年9月29日

1) 森林総合研究所東北支所

2) 森林総合研究所立地環境研究領域

3) 国際農林水産業研究センター林業領域

4) 農林水産省林野庁東北森林管理局仙台森林管理署

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

礫含有量などの土壤理化学特性値が治山工事標準仕様書（林野庁 2015b）に示された基準を満たしているものである（伊藤 2015, 村上 2015）。

しかしながら、事業開始初期に施工した生育基盤では、この山砂を用いて造成した盛土において、造成後、時間が経過すると、次第に盛土が硬化して、さらに水はけも悪くなり、地表に水溜まりが発生する事例が報告されている（伊藤 2015, 村上 2015, 太田 2015, 朝日新聞社 2015）。地表面への水溜まりが発生する要因として、一般に、①盛土造成時における重機走行による踏圧に起因した土層内への難透水層の形成（長谷川ら 1984）や、②盛土造成後の降雨による土粒子の分散と孔隙の目詰まりに起因する土壤クラスト（土膜）の形成（土壤物理学会 2002, 伊藤 2015）が考えられる。こうした水溜まりが生じる状態では植栽したクロマツ苗の生育に悪影響を与える可能性が懸念される（伊藤 2015, 村上 2015）。そのため、東北森林管理局仙台森林管理署では、盛土地表面の水溜まり発生状況の改善と盛土内に形成された硬盤層の破碎を目的として、リッパードーザやスケルトンバケット式バックホウ、あるいは農業用プラウと農業用サブソイラの併用等で、それぞれの現場の実情にあわせた耕起工を実施している。リッパードーザについては盛土上を往復して地表

面を掻き起こすことにより、盛土内の硬盤層が破碎され、植栽面を柔軟にすることに成功したとの報告もある（伊藤 2015, 村上 2015）。しかしながら、現状では各種耕起工が盛土内の土壤硬度分布にどのような効果をもたらし、土壤物理性の改善にどう寄与しているのかは未解明であり、耕起を施工した箇所と未施工の箇所における盛土内の土壤硬度に関して鉛直二次元的な分布は不明な状況である。

そこで、本研究では、水溜まりが発生する盛土内における土壤硬度分布の把握と、盛土に対する耕起工が盛土内の土壤硬度鉛直分布に及ぼす効果の評価を目的として、宮城県内の海岸防災林復旧・再生事業地 3 箇所 4 工区で調査ラインを設定し、長谷川式土壤貫入計による土壤硬度測定をライントランセクト法に準じて行うこととした。本論文では、この調査によって得られた土壤硬度データを用いて、盛土への耕起のために使用した機材の違いが盛土内部の土壤硬度分布に及ぼす改善効果を二次元的に検討し、その有効性を評価した。また、降雨時に形成された土壤クラストによる水溜まり発生への影響を検討するため、土粒子の分散性を表層土壌について評価したので、それらの結果を報告する。



Fig. 1. 調査位置図と調査ライン
Studying sites and lines in the present study.

2. 調査地および方法

2.1 調査地の概要

調査位置図を Fig.1 に、調査地の概況を Table 1 に示した。事業初期に着手され、未耕起のため部分的に水溜まりが発生する盛土内における土壌硬度分布を把握するための試験地を、宮城県仙台市若林区荒浜地内松林国有林 87 林班 海岸防災林仙台地区第五治山工事（荒浜 8 工区）（北緯 38°13.5′、東経 140°59.3′）に設定した（Fig.1a）。また、盛土に対する各種耕起工が盛土内の土壌硬度の鉛直分布に及ぼす効果を評価するための試験地を、スケルトンバケット式バックホウを用いた耕起工処理区として同県名取市下増田地内台林国有林 89 林班 海岸防災林名取地区（名取 10 工区）（北緯 38°9.2′、東経 140°56.8′）に、リッパードーザを用いた耕起工処理区として同県名取市下増田地内台林国有林 89 林班 海岸防災林名取地区（名取 2 工区）（北緯 38°9.1′、東経 140°56.8′）に、農業用プラウと農業用サブソイラを併用した耕起工処理区として同県亶理町吉田浜の民有林海岸防災林 亶理地区第五治山工事（亶理 5 工区）（北緯 38°0.6′、東経 140°54.9′）に設定した（Fig.1b, c, d）。耕起工処理に関しては、スケルトンバケット式バックホウでは、耕起箇所を踏んで再度

締め固まらないよう後退しながら耕起し、リッパードーザについてはリッパのブレード間の幅が 90 cm であるので、往路と復路で爪の間に爪が入るよう車両位置をずらして耕起間隔がほしい 50 cm 間隔となるよう往復して耕起した（仙台森林管理署、私信）。盛土工完了時期（耕起工実施区については耕起完了時期）は、荒浜 8 工区で 2013 年 3 月、名取 2 工区で 2014 年 3 月、名取 10 工区で 2015 年 3 月、亶理 5 工区で 2014 年 4 月であった。いずれの試験地も、林野土壌の分類（土じょう部 1976）では未熟土に分類される。盛土の材料は荒浜 8 工区では主に宮城県大和町から採取した、鮮新～中新世の海成または非海成の半固結堆積物（経済企画庁 1972）、名取 2、10 工区、亶理 5 工区では同県亶理町、山元町等から採取した鮮新～中新世の海成または非海成の半固結堆積物（経済企画庁 1972）である。これらは、一般に「山砂」と呼ばれている。本研究の試験地すべてにおいて、東北地方太平洋沖地震大津波では海水が浸入して浸漬したが、いずれの試験地でも山砂による盛土を施工したため、調査時においては土壌自体には津波侵入、海水浸漬の影響はないと考えられる。調査地の様子を Fig.2 に示した。荒浜 8 工区、名取 2 工区は盛土造成後に津波被災木の木材チップを

Table 1. 試験地の概要および土壌貫入試験の調査ラインの設定方法、調査間隔
Summary of study sites and study designs.

調査地名	原土採取地	盛土造成完了年月*	掻き起こし工法	植栽樹種	植栽年月	土壌貫入試験の調査ライン長、間隔など	貫入試験実施日	盛土造成後～試験実施日の経過月数
荒浜8工区	宮城県大和町・大郷町・富谷町	2013年3月	無	クロマツ	2013年5月	2.00 m長ラインを3本、全てのラインを25 cm間隔で。	2015年11月13日	32ヶ月
名取10工区	宮城県岩沼市・山元町	2015年3月	スケルトンバケット式バックホウ	アカマツ	2015年6月	13.25 m長ラインを1本、うち11.25 mを25 cm間隔で。	2015年4月3日	1ヶ月未満
名取2工区	宮城県亶理町・大和町	2014年3月	リッパードーザ	クロマツ	2014年5月	10.50 m長ラインを1本、うち9.00 mを50 cm間隔で。さらに4.00 mを25 cm間隔で。	2015年2月3日	10ヶ月
亶理5工区	宮城県角田市・山元町	2014年4月	農業用プラウ＋サブソイラ	クロマツ	2014年5月	8.00 m長ラインを1本、ライン全長を25 cm間隔で。	2015年11月12日	20ヶ月

*盛土造成完了年月には、耕起を実施した工区に関しては、掻き起こし工の完了までを含んだ完了年月を示した。



Fig. 2. 試験地概況

The berms along the coast in the damaged forest areas.

地表面に敷設した (Fig.2a, c)。荒浜 8 工区では耕起工がなされていないこともあり、降雨に見舞われると地表面に水溜まりが発生しやすい。名取 10 工区、亘理 5 工区は木材チップの敷設はなされていない (Fig.2b, d)。これらの試験地は、クロマツ苗、またはアカマツ苗が植栽されている (Table 1)。

2.2 盛土土壌における土壌断面観察および各層位の一般理化学性分析

水溜まりが発生する未耕起の盛土および耕起工を施した盛土内における土壌の一般理化学的特性を把握するために、耕起していない荒浜 8 工区内と、スケルトンバケット式バックホウによって耕起された名取 10 工区内において土壌断面調査を行い、Guidelines for soil description (FAO 2006) に準じて、土壌断面情報を記載した。土壌断面調査では、試坑を行い、土壌断面の代表性を確認している。盛土土壌の一般理化学性分析に供するため、芝本式土壌採取用円筒 (大起理化学工業 400 ml 容) にて不攪乱土壌コアを層位ごとに 1 個採取した。荒浜 8 工区の土壌断面における層厚が薄かった 2A 層は、理化学性分析試料は採取出来なかった。採取した不攪乱土壌コア試料は、河田・小島 (1976) に準じて、一般理化学性分析、透水性試験、加圧板法による孔隙組成分析、粒径組成分析に供した。荒浜 8 工区の土壌断面における C5 層は、400 ml 容円筒では試料が採取出来なかったため、100 ml 容の採土円筒 (大起理化学工業) で不攪乱土壌コアを採取し、容積重、孔隙量、三相組成、採取時含水量のみ測定した。さらに荒浜 8 工区の土壌断面における 2C 層は、津波浸漬前の海浜の砂で構成されていたことから、円筒の網蓋から砂が

漏れ、飽水処理や透水性試験が実施出来ないことから、400 ml 容円筒で試料は採取したものの、容積重、孔隙量、三相組成、採取時含水量のみの測定とした。また、土壌クラスト (土膜) が盛土表面の水溜まり発生に及ぼす影響の有無について検討するため、盛土表層部での粘土や微砂を含む細粒成分 (粒径 0.02 mm 未満の成分) の分散率について、種田 (1975) に準じて測定した。得られた結果を解析し、盛土表面に水溜まりが発生する原因を検討した。なお、粒径分析については、海砂由来の土砂と比較するため、近隣の貞山堀土手の 0 ~ 30 cm 深の範囲から土砂を採取して分析に供した。

2.3 土壌硬度測定および盛土内の土壌硬度分布の評価

本研究では、盛土内部の土壌硬度の垂直的变化を連続的にかつ盛土区画に対して掘りを持って把握するために、長谷川式土壌貫入計 (ダイトウテクノグリーン株式会社製; 形式: H-100SE, 長谷川ら 1984) を用いて、ライントランセクト法によって土壌硬度を測定し、各種耕起工を施した盛土について、生育基盤としての土壌硬度の分布状況を把握した。盛土の土壌硬度を表す値として、長谷川 (2008) に準じ、S 値 (cm/drop) を用いた。この S 値とは、長谷川式土壌貫入計において 2 kg の重錘を 50 cm の高さから落下させたときの一打撃あたりの貫入計先端の直径 20 mm のコーンの土壌中への貫入量 (cm) である (長谷川 2008)。S 値は小さいほど硬い土壌であることを示している。長谷川式貫入計による軟らかさ (硬さ) の評価は、日本造園学会緑化環境工学研究委員会 (2000) の基準に準じ、以下の 5 段階で表現した: 固結 ($S \text{ 値} \leq 0.7 \text{ cm/drop}$), 硬い ($0.7 < S \text{ 値} \leq 1.0$), 締まった ($1.0 < S \text{ 値} \leq$



Fig. 3. 植栽基盤盛土の掻き起こしに用いた機械類 (写真提供: 仙台森林管理局)
Machinery used for tikkages in berms.

1.5), 軟らか ($1.5 < S \text{ 値} \leq 4.0$), 膨軟すぎ ($4.0 < S \text{ 値}$)。S 値 1.0 cm/drop 以下が 10 cm 以上続いた場合、根の侵入が困難と判断され、S 値 4.0 cm/drop より大きい場合は乾燥害や支持力低下の懸念がある (長谷川・猪俣 2015)。

調査ラインの設定は、荒浜 8 工区については、盛土内の土壌硬度の不均一性を把握するため 2 m 長のライン①～③の三本を設定した (Fig.1a)。また、盛土造成後に耕起工を実施した名取 2、10 工区、亘理 5 工区に関しては、耕起に使用したバケットのサイズ (幅や深さ) (Fig.3a)、リッパー・サブソイラ・プラウのブレードの間隔や掘削深度 (Fig.3b, c, d) を考慮し、10 ～ 15 m 長のラインをそれぞれ 1 本設定した。その上で、各調査ラインの中で盛土内の耕起効果や土壌硬度分布の不均一性が捉えられるよう、25 cm または 50 cm 間隔で (名取 2、10 工区の一部では各 1 点 150 cm 間隔の調査点箇所あり)、土壌深度約 100 cm に達するまで、土壌硬度分布を測定する貫入試験を実施した (Fig.1b, c, d)。貫入試験は、荒浜 8 工区が 2015 年 11 月 13 日、名取 2 工区が同年 2 月 3 日、名取 10 工区が同年 4 月 3 日、亘理 5 工区が同年 11 月 12 日に実施した (Table 1)。盛土内鉛直面における土壌硬度の分布を視覚的に把握して、評価・比較するため、各調査ラインにおける長

谷川式土壌貫入試験の結果については S 値を用いた等値線図で表した。データの図化には、OriginPro 8.5J (OriginLab Corp. 2010) を用いた。本ソフトでは、直交座標上において (x, y, z) ワークシートデータに対して三角分割法と線形補間法によって等値線を描画し、さらにそれをスムージングすることで、土壌硬度の等値線図を作成している (OriginLab Corp. 2010)。本論では便宜上、盛土の地表面は水平に均されているものとして土壌硬度の等値線図作成を行った。

3. 結果

3.1 事業着手初期に造成された未耕起盛土の鉛直断面内の土壌硬度分布

荒浜 8 工区に設定した 3 本の調査ライン①～③において実施した土壌貫入試験の結果から作成した盛土の土壌硬度分布を Fig.4 に示した。いずれの調査ラインにおいても、S 値の鉛直断面分布は概ね類似した傾向を示した。すなわち、土壌表層部 (0 ～ 10 cm 深) では S 値 > 1.0 cm/drop を示し、「締まった」～「軟らか」な土壌硬度分布を示していたものの、その下の 10 ～ 40 cm 深では S 値 ≤ 1.0 cm/drop で、「硬い」土壌が分布し、さらに 10 ～ 20 cm 深においては、S 値 ≤ 0.5 cm/drop を示す、「固結」した層状の土層、すなわち硬盤

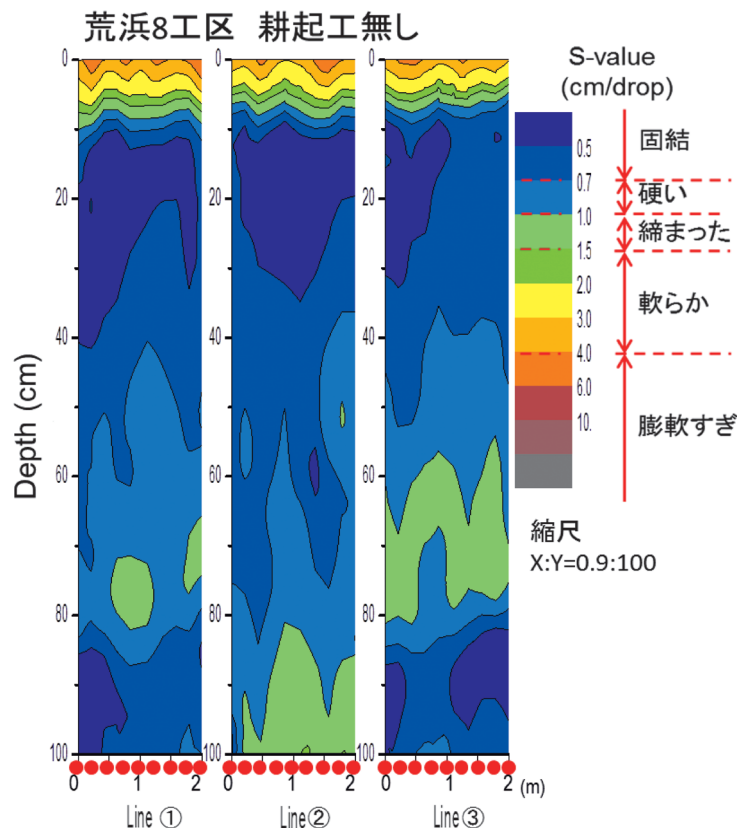


Fig. 4. 未耕起盛土の鉛直断面内の土壌硬度分布
X 軸下の赤点は貫入試験箇所を示す
Vertical distribution of soil hardness in non-tilled berm.

が存在した。その下の 60～80 cm 深（ライン②では 80～100 cm 深）には、S 値 > 1.0 cm/drop である「締まった」土壌が層状に存在していたが、その下 80 cm 以深には再び S 値 ≤ 0.7 cm/drop を示す「固結」した土壌が層状に存在していた（除、ライン②）。以上の結果から、荒浜 8 工区の耕起工未施工の盛土では、土壌深 10cm 以深に比較的厚い堅密な土層が分布し、それは 100 cm 深部まで不均質に存在していることが明らかとなった。こうした傾向は、①～③の 3 本の調査ラインで同様であったことから、盛土内部における硬盤（「固結」した土層）、締まった層の垂直分布位置にいくぶんのズレはあるものの、荒浜 8 工区においては、深さ 8 cm 以深では全般に「硬い」～「固結」した土層が広く分布していると推察された。

3.2 水溜まりが発生する未耕起盛土の土壌断面の性状と一般理学的特性

荒浜 8 工区の土壌断面調査時における断面情報を Table 2 に、一般理化学特性データを Table 3、粒径組成分析の結果を Fig.5 に示した。造成された盛土の土性は壤質砂土であり（Table 2）、盛土工を施した層の土壌は 7 割程度が砂で、残りの 3 割は細砂以下（粒径 0.2 mm 未満）の粒径成分で構成されていた（Fig.5）。近隣の貞山堀土手から採取した海砂由来の土砂の粒径

組成と比較すると組成が大きく異なることが明らかとなった（Fig.5）。

土壌断面の観察から、土層全体において土壌構造の発達や明瞭な層位分化は認められなかったが、C2 層において青灰色の土壌が層状に観察され、これは滞水による嫌気環境とその嫌気環境下で土壌微生物が盛土地表面上の木材チップから供給された溶存有機物を分解する際に同時平行して起こる土壌鉱物中の酸化鉄の還元反応に起因したグライ化によるとみられた（Table 2）。各土層の土壌硬度は堅～すこぶる堅（山中式土壌硬度計読み値で 15～24 mm）を示し、長谷川式土壌貫入計における結果と同様の傾向が観察された。一方、実際に土層から土塊を採取し手で砕いてみると比較的脆く、砕けやすい性状を持つことが確認された（Table 2）。植生由来の生根の存在は断面内に認められなかった。一方で、盛土造成時に除去しきれなかった被災木枯死根や大量に発生した被災枯死木を碎片化して敷設した木材チップが土壌表層部に混入している様子が断面内に観察された（Table 2）。盛土の地表面に敷設された木材チップ下の土壌深 0～5 cm 深では、板状の構造がみられ、その板状構造面の亀裂には Fe^{3+} の集積による膠結が層状に形成されていた（Table 2）。この構造は重機走行による盛土材料の敷き均しの痕跡と推察される。盛土内に明瞭な細粒成分の移動集積は観

Table 2. 荒浜 8 工区の植栽基盤盛土（造成後 13 ヶ月未耕起）における土壌断面情報と断面写真
Descriptions and photos of soil profile in non-tilled berm at Arahama 8 district

層位	層深/層厚 (cm)	断面の記載
L	12	津波被災木のウッドチップ敷設
C1	0～	8 にぶい黄褐色(10YR 4/3)、壤質砂土、潤、腐朽小円礫あり、中度の板状構造、砕けやすい、堅(15.4*)、隙間孔隙あり、孔隙率**1、板状構造水平面に粘土由来の非常に薄い明瞭な膠結層(コントラスト<1 mm)5層程度あり、根無し、ウッドチップあり、次層位との層界は不規則漸変
C2	～ 25	暗オリーブ灰色(2.5GY 4/1)、壤質砂土、潤、腐朽小円礫含む、構造なし、砕けやすい、すこぶる堅(23.8*)、孔隙なし、孔隙率**1、根なし、次層位との層界は不規則漸変
C3	～ 60	褐色(10YR 4/4)、壤質砂土、潤、腐朽小円礫乏し、構造なし、砕けやすい、堅(17.5*)、隙間孔隙あり、孔隙率**2、細・小・中根乏し、次層位との層界は不規則漸変
C4	～ 93	暗灰黄色(2.5Y 4/4)、壤質砂土、潤、礫なし、構造なし、砕けやすい、堅(20.2*)、隙間孔隙あり、孔隙率**2、根なし、次層位との層界不規則明瞭
C5	～ 98	暗オリーブ灰色(5GY 4/1)、壤質砂土、潤、礫なし、構造なし、砕けやすい、堅(16.2*)、隙間孔隙あり、孔隙率**2、被災埋没木(根株)あり、次層位との層界不規則明瞭
2A	～ 100	黒色(7.5YR 1.7/1)、壤土、潤、礫なし、構造なし、砕けやすい、堅(15.2*)、隙間孔隙あり、孔隙率**2、被災埋没木あり、被災木枯死小根多数、次層位との層界不規則明瞭
2C	100+～	暗灰黄色(2.5Y5/2)、砂土、潤～乾、礫無し、構造なし、鬆(しょう)(7.4*)、被災クロマツ埋没根あり

*山中式硬度計で5回測定したものの平均値

**孔隙率とは、全ての大きさの空隙の総体積を意味し、単位面積あたりに占める孔隙面積の割合(%)を目視で判断し記録する。孔隙率1: <2%, 孔隙率2: 2～5%, 孔隙率3: 5～15%, 孔隙率4: 15～40% (Guidelines for soil description (FAO 2006)参照)。

調査地: 宮城県仙台市若林区荒浜 海岸防災林 第8工区
緯度: 38°13'29", 経度: 140°59'16", 標高: 4 m asl.
地形: 海岸後浜 盛土工施工地, 汀線より250 mほど内陸部
調査日: 2014年4月28日, 調査者: 小野賢二

<土壌断面の様子>



<板状の構造面に生成した膠結>



Table 3. 荒浜 8 工区の植栽基盤盛土における土壌の一般理学的特性
Soil physical characteristics of non-tilled berm at Arahama 8 district.

層位	透水性*			飽和透水係数 (mm/h)	容積重 (Mg/m ³)	孔隙率**			三相組成			最大容水量 (vol%)	最小容水量 (vol%)	採取時含水量 (wt%) (vol%)	
	5分後 (ml/min)	15分後 (ml/min)	平均 (ml/min)			全孔隙 (vol%)	細孔隙 (vol%)	粗孔隙 (vol%)	固相 (vol%)	液相 (vol%)	気相 (vol%)				
C1	24.6	22.5	23.5	113.0	1.62	37.9	30.5	7.4	62.1	32.3	5.6	39.4	-1.5	20.3	32.0
C2	36.7	32.8	34.7	166.6	1.60	40.1	30.3	9.8	59.9	32.6	7.5	40.5	-0.3	21.0	32.6
C2(青灰色部分)	3.4	3.0	3.2	15.2	1.62	39.9	31.2	8.7	60.1	31.5	8.4	40.8	-0.9	20.0	31.5
C3上	5.0	4.6	4.8	23.0	1.50	44.3	27.1	17.2	55.7	32.0	12.3	38.7	5.6	21.9	32.0
C3下	35.4	30.8	33.1	158.9	1.49	44.4	28.2	16.2	55.6	32.8	11.6	47.2	-2.8	22.6	32.8
C4	51.8	46.9	49.4	237.1	1.37	49.0	28.4	20.6	51.0	30.2	18.8	49.3	-0.3	22.6	30.2
C5***	n.d.****	n.d.	n.d.	n.d.	1.36	49.5	n.d.	n.d.	50.5	7.5	41.9	n.d.	n.d.	23.2	30.1
2C****	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.37	48.5	n.d.	n.d.	51.5	9.6	38.8	n.d.	n.d.	7.1	9.5

*透水性のデータは、透水試験開始5分後と15分後の透水量およびその平均値で示した。

**本Tableにおける全孔隙率(全孔隙、細孔隙、粗孔隙)の数値は、素焼き板法による測定値を示した。

***C5層は、層厚が薄く、被災クロマツ埋没根があったため、100 ml円筒を採取し、容積重、孔隙率、三相組成、採取時含水量のみ測定した。

****not determined(未計測)。

*****2C層は、もともとの海浜の砂であったので、400 ml円筒の網蓋の隙間から、砂が漏れ落ちてしまうため、飽水処理、透水性試験が行えないため、容積重、孔隙率、三相組成、採取時含水量のみを測定した。また、層厚が薄い2A層の物理性分析用試料は採取していない。

察されなかった。一方で、盛土中に含まれる微砂や粘土などの細粒成分(粒径 0.02 mm 未満)の分散性を分析した結果、水への浸漬の有無で細粒成分の分散量が異なる(水への浸漬なし 0.0 ~ 1.0wt%、水への浸漬あり 0.9 ~ 8.5wt%) こと、水に浸漬した場合には細粒成分の分散率が大幅に増加することが明らかとなった(Table 4)。さらに水への浸漬がない場合では粘土採取時に懸濁水の上澄みにほとんど濁りが見られなかったものが、水への浸漬によっていずれの試料の上澄みにも濁りが確認された。但し、既述した細粒成分の分散率と比べると、粘土の分散率(0 ~ 42%)に関しては水に浸漬した効果はそれほど明確には表れなかった(Table 4)。

盛土土壌の一般理学的特性に関しては、滞水が疑われたC2層のうち、青灰色を呈していた土層部分とその下層に位置するC3層上部は、飽和透水係数がそれぞれ15、および23 mm/hであり、透水性が低かった(Table 3)。容積重は、C1 ~ C4層で1.5 Mg/m³以上の値を示し、特にC1、C2層では1.6 Mg/m³以上と著しく高かった(Table 3)。盛土の全孔隙率は38 ~ 50

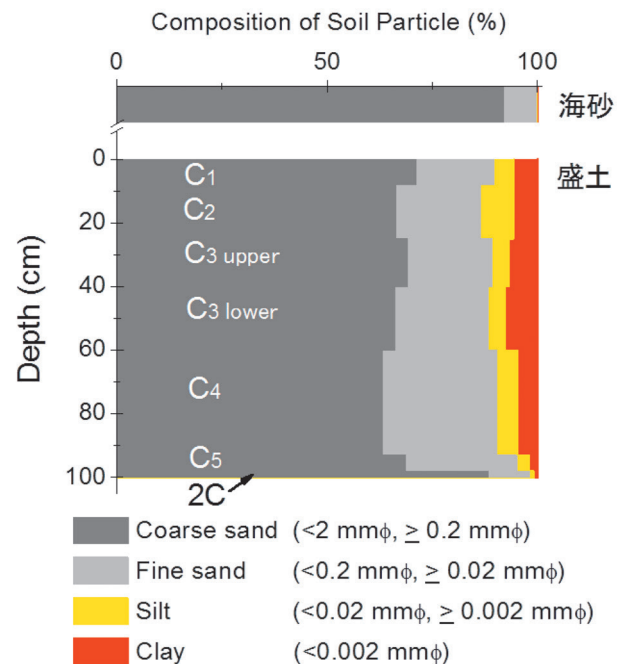


Fig. 5. 荒浜 8 工区の盛土の層位ごとの粒径組成
海砂は同試験地近隣の貞山堀脇土手の元地盤より採取した。
Soil profile of particle size compositions in berm at Arahama 8 district.

Table 4. 荒浜 8 工区の植栽基盤盛土における表土の微砂および粘土の分散性*1
Dispersibility of fine soil particles in topsoils in non-tilled berm at Arahama 8 district.

層位	採取深度 (cm)	完全分散*2			水分散*3				分散率*4			
		微砂 (wt%)	粘土 (wt%)	細粒成分*5 (wt%)	a)水への浸漬無し		b)水への浸漬有り		a)水への浸漬無し		b)水への浸漬有り	
					細粒成分*5 (wt%)	粘土 (wt%)	細粒成分*5 (wt%)	粘土 (wt%)	細粒成分*5 (%)	粘土 (%)	細粒成分*5 (%)	粘土 (%)
C1	0~2	4.0	9.0	13.0	0.9	0.0	8.5	0.9	7.3	0.0	65.5	10.5
	2~6	4.8	8.7	13.5	0.0	0.0	5.8	0.0	0.0	0.0	42.7	0.0
	6	2.0	3.0	5.0	1.0	0.0	4.8	1.0	19.2	0.0	96.2	32.1
	6~11	2.9	1.0	3.9	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	24.2	0.0
	11	6.9	4.0	10.9	0.0	0.0	6.8	1.0	0.0	0.0	62.6	24.6
C2	20	3.9	6.8	10.6	0.0	0.0	6.7	2.9	0.0	0.0	62.7	42.2
	30	4.8	5.7	10.5	1.0	0.0	5.8	0.0	9.1	0.0	54.8	0.0

*1分散率の測定については、種田(1975)に準じた。

*2完全分散では、過酸化水素水処理(ホットプレートでの加熱を含む)後、超音波処理15分を行い、一晚回転振盪して測定した。

*3水分散に関して、<a>水への浸漬無しでは風乾試料10 gに蒸留水1000 mlを加え、直ちに手で30秒間振盪したものを測定した。水への浸漬有りでは前述のa)の測定後、一昼夜放置し、その後更に一晚回転振盪して測定した。

*4分散率は、完全分散した各成分量を100とした場合の、水分散量の割合(%)で表した。

*5細粒成分は、粒径0.02mm以下の微砂と粘土を合わせたものとした。水分散の細粒成分含量には、粘土が凝集した状態のものを含む。

vol% の範囲にあったが 細孔隙量に対して粗孔隙量は全般に少なかった。特に、C1、C2 層では粗孔隙量が 10vol% 以下であり、著しく低かった (Table 3)。こうした孔隙組成を背景として、盛土の三相組成は固相率が 50vol% 以上であり、土壌が密に詰まっていることが示された (Table 3)。最大容水量は C3 層上部を除いてほぼ全孔隙量に匹敵した。最小容気量はマイナス値を示していたが、いずれもほぼゼロ付近の値を示した。最小容気量が多少なりともマイナス値を示したのは、飽水処理によって盛土土壌が膨潤したことに起因した結果と推察された。特に容積重が高く、土壌が著しく密に詰まっていた C1 ~ C4 層について、加圧板法によって作成した pF - 水分曲線を Fig. 6 に示す。素焼き板処理において粗孔隙とされる孔隙の吸引圧は pF 2.7 以下であるが、加圧板法により求められた pF 2.7 以下に相当する粗孔隙量は 7 ~ 14vol% と算出された。また、重力水に相当する pF 1.8 以下 (日本土壌肥科学会 土壌標準分析・測定法委員会, 2004) の孔隙量は 5 ~ 12vol% と算出された。pF 1.8 以下、および 2.7 以下に相当する孔隙量は、特に C1、C2 層で、それぞれ 5.6、5.4vol%、および 10.6、7.2vol% を示し、著しく低かった (Fig. 6)。

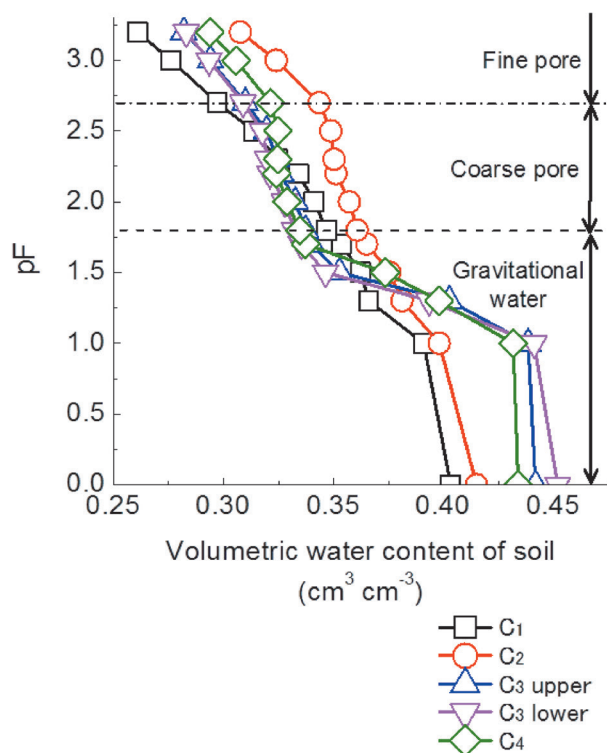


Fig. 6. 荒浜 8 工区の盛土の pF - 水分曲線
Soil water content characteristic curves in berm at Arahama 8 district

3.3 各種耕起工を実施した盛土の鉛直断面内における土壌硬度分布

海岸防災林の生育基盤として盛土を造成した後、スケルトンバケット式バックホウ、リッパードーザ、および農業用プラウとサブソイラを用いた耕起工を実施した盛土の鉛直断面内における土壌硬度分布を Fig. 7 に示した。貫入試験の結果から、耕起工を実施したいずれの盛土においても、断面内で S 値 ≤ 1.0 cm/drop が 10 cm 以上の厚さで、鉛直方向に連続する箇所が存在している様子が捉えられた。名取 10 工区の 11 ~ 13 m 地点の深さ 10 ~ 50 cm 深でみられる S 値 ≤ 0.7 cm/drop を示した「固結」部分は、木材チップが地表面に仮置きされていた箇所に相当し、耕起未施工箇所を示している (Fig. 7a)。また、名取 2 工区、亘理 5 工区の盛土内には、S 値 ≤ 1.0 cm/drop を示す、細い筋状の「硬い」~「固結」箇所が認められた (Fig. 7b, c)。これは、リッパやサブソイラのブレードが引っ掻き残した痕跡と考えられる。その一方で、いずれの耕起工施工盛土においても、土壌断面内のかなりの面積を占める箇所が「軟らか」と判定され、スケルトンバケットやリッパ、農業用プラウ、サブソイラなどのブレードによって盛土断面内が掻き起こされ、柔軟化した様子が確認された。さらに、いずれの耕起工施工箇所においても、耕起完了から 1 ~ 20 ケ月を経過していたにもかかわらず、盛土断面の多くの部分が「軟らか」と判定され、それが調査実施時においても持続されている様子が捉えられた。また、事業着手初期に造成された未耕起盛土で発生しているような長期にわたる水溜まりの存在も認められなかった。各耕起工による最大掘削深度は、盛土鉛直断面内における土壌硬度分布の様子 (Fig. 7) から鑑みて、それぞれ、スケルトンバケット式バックホウで 70 cm、リッパードーザで 60 cm、農業用プラウとサブソイラの併用で 55 cm 程度と推定された。ここで推定された最大掘削深度は各種機材のバケット長およびブレードの掘削深 (Fig. 3) と良く対応していた。

スケルトンバケット式バックホウによる耕起工では、耕起が施工された箇所の盛土内部のほぼ全面で S 値 ≥ 1.0 cm/drop となり、耕起された盛土全体が概ね柔軟に耕起されていることが確認された (Fig. 7a)。一方、木材チップの仮置き場となって耕起工の未実施箇所となった調査ライン 11 ~ 13 m 地点の 10 ~ 60 cm 深における土壌硬度は S 値 ≤ 0.5 cm/drop であった。さらに掻き起こされた盛土内にも S 値 ≤ 1.0 cm/drop を示す箇所が散見され、スケルトンバケットで崩しきれなかった土塊が残っていること、それらの土塊の間に耕起工によって生じた亀裂や隙間が存在している実態が推察できた (Fig. 7a)。例えば、ライン 3 ~ 4 m 地点の深さ 40 cm や深さ 70 cm の「硬い」~「固結」のブロック塊は、バケットで崩しきれなかった土塊と考えら

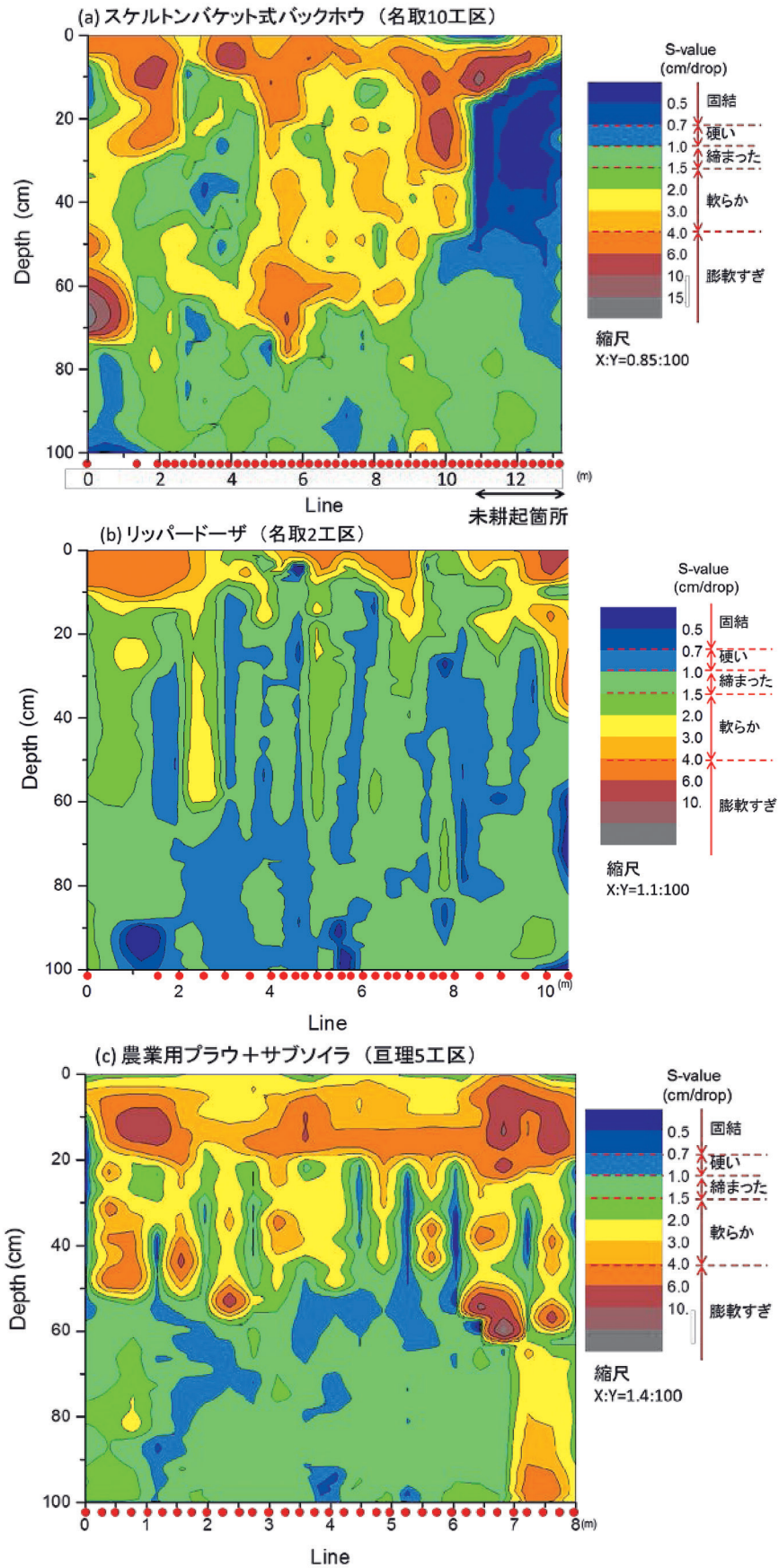


Fig. 7. 各種耕起施工後の盛土の鉛直断面内の土壌硬度分布
X 軸下の赤点は貫入試験箇所を示す。
Vertical distribution of soil hardness in berm tilled by various machhinary.

Table 5. 名取 10 工区の植栽基盤盛土（掻き起こし工実施後 3 ヶ月）における土壌断面情報と断面写真
Descriptions and photos of soil profile in tilled berm at Natori 10 district

			＜土壌断面の様子＞	
層位	層深 (cm)	断面の記載		
A0		無し		
C1	0～	2 黄褐色(10YR 5/8)、砂質壤土、潤、腐朽小円礫乏し、非常に弱度な塊状構造、粗鬆～非常に砕けやすい、軟(10.8*)、隙間孔隙あり、孔隙率**3、根なし、次層位との層界は平坦判然		
C2	～ 20	黄褐色(10YR 5/6)、砂土(～砂質壤土)、潤、腐朽小・中円礫乏し、非常に弱度な塊状構造、砕けやすい、堅(20.0*)、隙間孔隙あり、孔隙率**1、根なし、炭あり、次層位との層界は不規則漸変		
C2-1	～ 50	にぶい黄褐色(10YR 4/6)、埴土、潤、腐朽小円礫乏し、構造なし、砕けやすい、堅(21.4*)、隙間孔隙あり、孔隙率1、根なし、炭あり、次層位との層界は不規則漸変		
C3	～ 60	明褐～黄褐色(7.5～10YR 5/6)、砂質埴壤土、潤、腐朽小垂角礫乏し、非常に弱度な塊状構造、非常に砕けやすい、軟(14.4*)、隙間孔隙あり、孔隙率**2、根なし、次層との層界は不規則判然		
C4	～ 80	明褐色(7.5Y 5/6)、砂質埴壤土、潤、腐朽小垂角礫乏し(砂礫部 2.5YR 5/3 色)、構造なし、非常に砕けやすい、堅(18.0*)、隙間孔隙あり、孔隙率**2、根なし、次層位との層界不規則漸変		
C5	～ 110	明褐色(7.5YR 5/8)、埴土、潤、礫なし、構造なし、非常に砕けやすい、堅(16.4*)、孔隙なし、孔隙率**1、次層位との層界平坦漸変		
C6	～ 130+	明黄褐色(10YR 6/6)、砂土、潤、礫なし、構造なし、堅(15.6*)		

*山中式硬度計で5回測定したものの平均値

**孔隙率とは、全ての大きさの空隙の総体積を意味し、単位面積あたりに占める孔隙面積の割合(%)を目視で判断し記録する。孔隙率1: <2%, 孔隙率2: 2～5%, 孔隙率3: 5～15%, 孔隙率4: 15～40%(Guidelines for soil description (FAO 2006) 参照)。

調査地: 宮城県名取市下増田 海岸防災林 名取第10工区

緯度: 38°09'18", 経度: 140°56'49", 標高: 3 m asl.

地形: 海岸後浜 盛土工施工地、汀線より300 m内陸部

調査日: 2015年7月9日, 調査者: 小野賢二

れ、その間の 50 ～ 60 cm 深の「軟らか」に準ずる部分は、土塊間の隙間と推察される。ブロック状の土塊の間に亀裂状の孔隙が散見する様子は、土壌調査の際に作成した調査坑断面でも、明瞭に観察することが出来た (Table 5)。リッパードーズによる耕起工では、リッパのブレード長が 90 cm で、実測の掘削深度が 60 cm であることから、耕起は比較的深部まで達しているようすが見られたが、一方でブレードの間隔が 90 cm と比較的広いこと、ブレード幅 (厚さ) も 10 cm であることから、往路と復路で爪の間に爪が入るよう層耕箇所をずらし往復して盛土を耕起しても引っ掻き残された箇所が盛土内で筋状に残る様子が捉えられた (Fig. 7b)。

農業用プラウとサブソイラによる耕起工では耕起残しの痕跡が筋状に確認出来た。また、農業用の機械であることから耕起の有効深度がほかの工法に比べて浅い傾向が確認されたが、一方で表層部 (深さ 0 ～ 20 cm) は他の工法に比べて満遍なく軟らかとなっていた (Fig. 7c)。

4. 考察

4.1 生育基盤盛土工施工上の問題点

海岸防災林の復旧にあたり、林野庁では、沿岸域の

防災機能の確保を図る観点から、従来から海岸防災林が果たしてきた保安林としての災害防止機能 (飛砂防止、防風、潮害防備、防霧など) に加え、津波に対する被害軽減効果も考慮して、復旧、再生が実施されている (仙台森林管理署 2014)。この海岸防災林の復旧、再生は、被災した林帯をできるだけ可能な範囲で原形復旧することを基本として進められている。しかし、復旧事業地の一部、具体的には防潮堤の後背地などの地盤高が低く相対的に地下水面が高い箇所や津波によって地盤そのものが流亡してしまった箇所、地震によって地盤沈下した箇所では、地下水の影響を除去するために盛土して嵩上げする必要がある。そうした箇所では、海岸防災林の生育基盤として盛土工を実施し、植栽がなされている (林野庁 2015a)。この生育基盤の造成は運土、搬入、盛土、土寄せ、敷き均し、整地などの作業から構成され、ダンプトラックやバックホウ、ブルドーザなどが用いられる。このような土木的観点から造成された生育基盤は、樹木の生育にとって、土壌の固結や透水通気不良などの極めて不良な土壌物理環境となることが多い (長谷川 1985)。本研究で調査対象とした荒浜 8 工区も例外では無く、生育基盤内部には S 値が 1.0 cm/drop 以下の硬い土層が土壌断面に広

範に存在した (Fig. 4)。更には 10 ~ 30 cm の深さ、および Line ①、③には 80 cm 以深に 0.7 cm/drop 以下の「固結」した硬盤が層状に存在することも確認された (Fig. 4)。このような「固結」した層 (C2、C3 層上部に相当) では、全孔隙量に対して粗孔隙量が低い傾向を示し (Table 3、Fig. 6)、透水係数も低い傾向にあった (Table 3)。長谷川 (1985) は、こうした固結層の形成は、低接地圧のブルドーザで繰り返し整地された箇所で見られる現象としている。また、80 ~ 100 cm 深の深部にみられた固結層は、運土～整地の作業が何回か (本調査における固結層の観察結果からは、地表から 100 cm 深までの造成では少なくとも 2 回) に分けて行われたことを示唆しており、各作業時におけるその時の盛土地表面において、その都度「固結」した層が形成されたものと考えられる。以上から荒浜 8 工区における堅密でかつ透水不良な土層の存在は、締め固めによる土壌孔隙の縮小化、そしてその量の減少に起因した可能性が示唆された。このような土地造成における生育基盤の土壌物理性の不良化は、多摩ニュータウンの建設や大阪万博跡地開発において指摘されてきた (森本 1985, 矢橋・金光 1985, 1987)。今回のような大規模な造成によって造られた生育基盤における土壌物理性は、植栽木の根系発達や活着、生育に影響を与えるものであることから、生育基盤盛土工の施工においては盛土そのものを締め固めないように留意し、盛土上面には重機を乗せずにバックホウのバケットで盛土表面の地均しを行うだけにするなど、盛土造成の仕方に工夫を加える必要がある。

なお、海水に浸漬した土壌では、過剰な Na イオンが付加されることで、土壌内の粘土中の陽イオンが Na イオンと交換することで、分散しやすくなり (取出・中野 1991)、それらが下層土へと移動して集積することで、土壌孔隙の目詰まりを誘引し、土壌の透水性を著しく低下させることが知られている (Donald 2003)。本研究対象地の荒浜 8 工区では、盛土内に細粒成分 (粒径 0.02 mm 未満の微砂や粘土) の移動集積は観察されなかった。盛土土壌の土壌 EC および Na 飽和度は塩類土壌化が問題となるレベルにはなく (データ未公表)、粘土の分散性が増すほどの Na 付加はない。そのため Na 付加により粘土が分散しやすくなったことによる目詰まりは透水性低下要因ではないと考えられた。ただし、完全分散させた時の分散率を 100% とし、それを基準とした水に対する細粒成分の分散率は浸漬後において 25 ~ 96% で、高い分散性を示した (Table 4)。この結果は、雨水などの浸入によって盛土内の土粒子の分散性が時間経過とともに増加することを示唆し、その高い土粒子の分散性が盛土表面への湛水発生に強く影響している可能性があることを示している。本件に関して本研究では明確な結論を導くことが出来ず、依然として、盛土表面における水溜まりの発生には Na

粘土化に因らずとも降雨により分散した細粒成分が土壌孔隙を埋めたことが原因である可能性が課題として残った。今後、他の土壌の分散性との比較や盛土地表層における土粒子の微細な集積痕をもっと詳細に捉えられるような試料採取、調査、分析を実施して継続して検討することが必要となると考えている。

4.2 耕起による土壌改良工が盛土内の土壌硬度鉛直分布に及ぼす効果とその有効性

生育基盤盛土における土壌硬化や緻密化、地表面への水溜まりの発生は、圧密による土壌の液相・気相、すなわち、孔隙割合の減少と、それに伴う固相割合の増加、さらに透水性が低くグライ化が生じるような土層の存在に起因しているものと考えられた (Table 3)。よって、これらの解消には土壌の物理矯正が基本となる。つまり、水溜まりの解消には、土壌の孔隙率の増加や亀裂の作成により、圧密を解消し、より高い透水性を確保するための作業が有効である。仙台森林管理署は、各現場の状況や各工区の施工者の実情に合わせて、スケルトンバケット式バックホウやリッパードーザ、あるいは農業用機材を活用して、硬く締め固まった生育基盤盛土に対して耕起工を実施し (Fig. 3)、生育基盤の水溜まりの解消や植栽面の柔軟化を図っている (伊藤 2015, 村上 2015)。

土壌物理性の矯正作業、すなわち、生育基盤の土壌改良として行われる耕起工には、一般に普通耕、深耕、混層耕がある (国土交通省都市局公園緑地・景観課緑地環境室 1999)。普通耕は農業用トラクタにアタッチメントを付けて行われるもので、耕耘深度は 30 ~ 50 cm 程度と比較的浅めとなる。本研究では、農業用プラウやサブソイラを用いた耕起工が相当する。深耕は固結した下層土を破碎してブロック状の土塊にして土壌孔隙を造り、透水通気性を改善するもので、本研究ではスケルトンバケット式バックホウやリッパードーザによる耕起工が相当する。混層耕は、深耕によって出来た大小ブロック状の土塊を更に細かくする作業を言い、これにより吸収根の発達域を拡大し、また表層と下層の土壌の連続性を高めることを目的として実施されるものである。

本研究では、スケルトンバケット式バックホウやリッパードーザ、農業用プラウおよびサブソイラをそれぞれに用いた耕起工処理により、いずれの盛土も、各機材のバケットおよびブレードが及んだ深度において固結層が破碎されて、軟らかくなったことを確認した (Fig. 7)。スケルトンバケットは、バックホウのアーム先端部に取り付けるバケットの底部が粗い網目状になっており、土塊の破碎や石礫の篩別に有効とされている。名取 10 工区におけるスケルトンバケット式バックホウによる耕起では、未耕起箇所 (調査ライン 11 ~ 13 m 地点) を除いて深さ約 70 cm までの盛土

内部の全面が深耕された (Fig. 7a)。未耕起箇所では、「固結」した土層が 10 ~ 60 cm 深に 50 cm の厚さで存在していることが確認出来たこと (Fig. 7a) から、耕起による改善工の前は、荒浜 8 工区と同様に、盛土造成の最終段階においてブルドーザなどによる地均し作業が実施されたことが類推された。また 80 cm 以深では、耕起箇所、未耕起箇所ともに S 値 1.0 cm/drop 程度であること (Fig. 7a) から、地均しによる転圧は上層部にのみ限定されるものと推察された。あるいは、名取 10 工区における盛り土造成においては、深部では一回の盛土材料の搬入~整地にかかる盛土の敷厚が 100 cm の厚さに至るほどの厚さで行われたため、「固結」した層が形成されず、一方、浅部では敷厚が薄く、形を整えながらの作業を実施したため、地表面においてはより締固まりやすい傾向が盛土断面に表れた可能性が考えられた。これらのことから、名取 10 工区においてはスケルトンバックホウを用いた深耕による土壌の物理矯正効果は概ね 60 ~ 70 cm 深であることが確認できた。リッパードーザは、ブルドーザ後部にツメ状のアタッチメントを装着したもので、土壌改良においては心土破砕に用いられる。名取 2 工区で用いられたリッパードーザによる耕起工も深部 (60 ~ 70 cm 深) まで深耕された (Fig. 7b)。リッパのブレード間の隙間による引っ掻き残しの筋状痕跡も確認できた (Fig. 7b) が、これは日本造園学会緑化環境工学研究委員会 (2000) の基準に照らし合わせると、S 値 0.7 cm/drop 以下が 5 cm 以上、あるいは 1.0 cm/drop 以下が 10 cm 以上の土層が連続的に層状となって存在するわけでないことから、生育基盤としては問題のないレベルであると考えられる。このことから、往復して耕起することで、名取 2 工区における深耕の効果は、リッパのブレードが届いた深度に関しては十分であることが示された。亘理 5 工区の農業用プラウおよびサブソイラによる耕起工も盛土内の 50 ~ 60 cm 深まで軟らかくなっていることが確認された (Fig. 7c)。サブソイラの効果として、土壌表層から 50 cm 深までは S 値 ≥ 2.0 を連続して示す垂直方向の亀裂が確認され、その亀裂の先端部に当たる 50 ~ 60 cm 深の部分には、S 値 ≥ 2.0 を示す、孔隙径 10 cm 程度の管状孔隙が形成されているようすも散見された (Fig. 7c.; 例えば、1.5、2.5、6.5、7.5 m 地点などの 50 ~ 60 cm 深の部分)。亘理 5 工区では農業用プラウ+サブソイラの施工方向に対し、直交するライン方向で土壌硬度測定線を設定したことから、既述の管状孔隙は水平方向に伸びていることが推察され、これらは暗渠の役割を果たすことが推測される。以上より、サブソイラの効果が及んだ土壌深度は 50 ~ 60 cm 深とみられた。プラウによる効果は 0 ~ 20 cm 深における S 値 4.0 以上の膨軟な性状を示している土層部で認められた (Fig. 7c)。これはプラウによって 20 cm 厚の表土が掻き起こされて、反転

された結果である。表層の耕起箇所はプラウによって細かく碎土されたことが推察される (Fig. 7c) ため、工事直後は軟らかすぎる (国土交通省都市局公園緑地・景観課緑地環境室 1999) ので、特に降雨後の立ち入りは困難となることに留意しなければならない。

以上から、生育基盤として求められる有効土層深にもよるが、50 ~ 90 cm 深を対象とした物理矯正法として、仙台森林管理署が実施しているスケルトンバケット式バックホウやリッパードーザ、あるいは農業用機材を活用した耕起工は、生育基盤の水溜まり発生の解消や植栽面の柔軟化を図るのに、効果的であることが明らかとなった。また、いずれの耕起工も、耕起工完了から 1 ~ 20 ヶ月を経過していたにもかかわらず、盛土が軟らかであることが確認され、耕起工の効果が持続していることも明らかとなった。

5. おわりに

東日本大震災大津波で被災した海岸防災林に対する復旧・再生事業は、平成 23 年 7 月に政府により策定された「東日本大震災からの復興の基本方針」に基づいて取り組まれている。この大津波では海岸防災林が一定の津波被害の軽減効果を発揮したことが確認されたことを踏まえ、海岸防災林の整備は津波に対するハード・ソフト施策を組み合わせた「多重防御」の一つとして位置付けられている。そのため、海岸防災林の再生には、被災前から具備した機能を強化する形で、津波に対して耐性があり効果的な新世代の海岸防災林としての期待が込められている。

本研究により、再生事業の中で造成された生育基盤盛土における水溜まりの発生原因が類推され、さらにその土壌物理矯正法としての耕起工の有効性が示された。この成果は、生育基盤としての盛土工を伴う再生を技術的により確実にする成果の一部となるものであり、政府による「東日本大震災からの復興の基本方針」および「東日本大震災に係る海岸防災林の再生に関する検討会」報告書における今後の再生の方針に応えることが可能になるものと考えられる。さらに、林野庁の復興事業の促進にも貢献しうるだろう。

謝辞

本研究の遂行や本報文の取り纏めにあたり、国立研究開発法人森林総合研究所東北支所 澤井恵子氏には本研究における試料調製、実験補助などにおいて多大なるご協力を、また、同支所長 駒木貴彰氏、同森林環境研究グループ長 篠宮佳樹氏には懇切なご助言、ご指導を頂いた。本研究の実施にあたり、東北森林管理局および仙台森林管理署には試験地の提供、研究協定締結、海岸防災林再生事業に係る情報提供等でご協力頂いた。これらの方々に深く感謝の意を表する。

本研究は、森林総合研究所運営費交付金「F 2 1 S

26：再生における盛土土壌の湛水原因の解明と改善策の提案」によって行われたものである。

引用文献

- 朝日新聞社 (2015) 朝日新聞朝刊記事 38pp, 2015 年 12 月 12 日
- 土じょう部 (1976) 林野土壌の分類 (1975) 林業試験場研究報告 280:1-28.
- 土壌物理学会 (2002) 土壌物理用語辞典. 養賢堂. 183pp.
- Donald L.S. (2003) Environmental Soil Chemistry. Second edition. Academic press. Amsterdam. Netherlands. 352pp.
- FAO (2006) Guidelines for soil description. Fourth edition. 97pp.
- 長谷川 秀三 (1985) 土壌貫入計による土壌改良の施工管理について 第 5 回道路緑化研究発表会要旨論文集 10-11.
- 長谷川 秀三 (2008) 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) 土壌貫入計による緑化地土壌の三次元の把握法 造園雑誌 47:85-88.
- 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.
- 星野 大介 (2012) 東北地方太平洋沖地震津波による岩手県沿岸のと集落の被害状況. 日本森林学会誌, 94: 243-246.
- 伊藤 智弥 (2015) 盛土を伴う海岸防災林復旧工事と植栽までの手順. 第 54 回治山研究発表会論文集. 治山研究会編 83-89.
- 河田 弘・小島 俊郎 (1976) 環境測定法 IV — 森林土壌 — 共立出版 190 pp.
- 経済企画庁 (1972) 国土調査 (宮城県) 122pp
- 国土交通省都市局公園緑地・景観課緑地環境室 (1999) 植栽基盤整備技術マニュアル 一般財団法人日本緑化センター 169pp
- 森本 幸裕 (1985) 緑地における樹木生育基盤に関する研究 京都大学学術情報リポジトリ <http://dx.doi.org/10.14989/doctor.r5589>(参照 2016-04-16)
- 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 41:341-343.
- 中村 克典・小谷 英二・小野 賢二 (2012) 津波被害を受けたにおける樹木の衰弱・枯死 森林科学 66:7-12.
- 日本土壌肥料学会 土壌標準分析・測定法委員会 (2004) 土壌標準分析・測定法. 博友社. 354pp.
- 日本造園学会緑化環境工学研究委員会 (2000) 緑化事業における生育基盤整備マニュアル ランドスケープ研究 63:224-241.
- 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. 日本砂丘学会誌 47:102-110
- 太田 猛彦 (2015) の現状と将来像. 日本緑化工学会誌 41:332-333
- OriginLab Corporation (2010) OriginPro 8.5.0J SR1
- 林野庁 (2015a) 平成 26 年森林・林業白書 225pp.
- 林野庁 (2015b) 治山工事標準仕様書 156pp.
- 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. 日本緑化工学会誌 41:334-335.
- 仙台森林管理署 (2014) 海岸防災林の復旧 <http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/koho/saigaijoho/pdf/sendai.pdf> (参照 2016-04-23)
- 森林総合研究所 (2011) 林野庁平成 23 年度震災復旧対策緊急調査「海岸防災林による津波被害軽減効果検討調査」報告書 CD-ROM
- 種田 行男 (1975) 侵食率・分散率 農業土木学会誌 43:814.
- 東北地方太平洋沖地震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 <http://www.rinya.maff.go.jp/j/tisan/tisan/pdf/kaiganbousairinsaisyuuhokoku.pdf> (参照 2016-04-23)
- 矢橋 晨吾・金光 達太郎 (1985) 特殊土の生育基盤としての改良 I. 稲城砂の物理的性質. 千葉大学園芸学部学術報告. 35:43-46.
- 矢橋 晨吾・金光 達太郎 (1987) 特殊土の生育基盤としての改良 II. 稲城砂とロームの混合が締固めに及ぼす影響. 千葉大学園芸学部学術報告, 39: 69-76.

Evaluation of the berms built on the Restoration of the Mega-Tsunami-Damaged Coastal Forests

—Comparison with the effects of soil-scratching as a soil physical correction method among the various types of machinery.

Kenji ONO^{1)*}, Akihiro IMAYA²⁾³⁾, Kiyomi TAKANASHI⁴⁾ and Tomoki SAKAMOTO¹⁾

Abstract

To restore coastal forests heavily damaged by the tsunami following the Great East Japan Earthquake of March 2011, the Forestry Agency of Japan has been building berms along the coast in the damaged areas. These berms use sand (loamy sand) brought from adjacent hill areas as a growth base in which the seedlings of domestic tree species are planted. However, in these growth bases, soil surfaces are often covered with water because bulldozing and other heavy machinery has caused compaction of the soil, leaving it susceptible to submersion. The submersion of soils in water is problematic because of the potential for these conditions to interfere with the restoration of coastal forests. The aims of this research are to elucidate the cause of water stagnation in berms, and to evaluate the efficacy of countermeasures to combat water stagnation in these soils. Soils in berms at reforestation areas in Sendai are generally quite hard and dense, having no (massive) structure where the entire soil horizon appears cemented and very low water permeability. Some profiles have gley horizons in topsoil, caused by the reduction of Fe^{3+} under anaerobic conditions. We compared the effects of countermeasures on berms in these areas among the several types of tillage carried out using following machinery; the backhoe with a skelton-bucket, ripper-dozer, and plow/subsoiler. Soil hardness on berms decreased in all cases, although the passage times after execution of tillage were different (1- to 20-months). These findings indicate that the tillage for berms as a growth base were quite effective countermeasure at the depth of cultivated-soils and that the effects of them were kept up for at least 20-months.

Key words : berm building, restoration of damaged coastal forests, vertical distribution of soil hardness, soil-scratching, physical correction effect, the tsunami following the Great East Japan Earthquake of March 2011

Received 3 June 2016, Accepted 29 September 2016

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

2) Forest Soil Department, FFPRI

3) Forestry Division, Japan International Research Center for Agricultural Sciences

4) Sendai District Forest Office, Tohoku Regional National Forest Office, Forest Agency

* Tohoku Research Center, FFPRI, 92-25 Nabeyashiki, Shimokuriyagawa, Morioka, Iwate, 020-0123 JAPAN; e-mail: don@ffpri.affrc.go.jp