

## 短報 (Short communication)

水溜まりが生じた生育基盤盛土の物理性  
— 海岸防災林再生事業初期に造成された盛土の事例 —篠宮佳樹<sup>1)\*</sup>、今矢明宏<sup>2)、3)</sup>、高梨清美<sup>4)</sup>、坂本知己<sup>1)</sup>

## 要旨

東日本大震災後の海岸防災林再生事業初期に造成された盛土の一部で、地表に水溜まりが発生し植栽木の生育への影響が懸念されている。重機走行は盛土を締固める傾向があり、水溜まりの発生を誘引した可能性がある。海岸防災林再生事業で造成された盛土において締固めが起きているか確認するため、宮城県仙台市荒浜に造成された盛土の物理性を調査した。深さ 10 ~ 40 cm を中心として深さ 75 cm 以下で、山中式硬度指数は 20 mm、容積重は  $1.5 \text{ Mg m}^{-3}$  を超え、かつ粗間隙率が 20% 未満を示す箇所が多かった。盛土は硬く、密に詰まっており、粗間隙が少なく、締固められた状態にあると考えられた。

キーワード：海岸林再生、盛土、土壌物理性、容積重、粗間隙、締固め

## 1. はじめに

平成 23 年東北地方太平洋沖地震で発生した津波により、東北地方太平洋岸にある海岸林が壊滅的被害を受けた(星野 2012, 田村 2012)。そのうち根返りの被害について、地下水位が高いところでは直根が発達せず扁平な根系になるため、根返りしやすかったことが報告されている(渡部ら 2014)。そのため、海岸防災林の再生に際しては、地下水位から 2 ~ 3 m 程度の地盤高を確保しつつ植栽木の生育基盤として盛土が造成されている(林野庁 2013, 坂本 2015)。しかしながら、造成された一部の盛土表面で、わずかな雨でも水溜まりがつくられ(伊藤 2015)、植栽木の成長への影響が懸念される状況が生じている。

重機で造成された植栽基盤では固結や通気通水不良により根の伸長阻害などが起きやすいことが指摘されている(長谷川ら 1984, 長谷川・猪俣 2015)。農耕地や樹園地でも機械走行により硬盤が形成されること(ヒレル 1998b)や林地においても林業用機械が走行した作業道や林地土壌で締固めが起ること(猪内 2001)が知られている。このように機械が走行すると土は締固められる傾向がある。土が締固められたことにより透水性が低下し、水溜まりが発生することが考えられる。

海岸防災林再生事業における生育基盤盛土も重機によって造成されているため、締固められた可能性がある。そこで、盛土において締固めが起きているか、締固めが生じた箇所で飽和透水係数が低下しているか、同様の箇所で気相率が低下しているかの 3 点について確認するため、水溜まりの発生した生育基盤盛土の物理性の実態を

明らかにすることにした。

## 2. 研究方法

調査地は宮城県仙台市若林区の松林国有林および仙台市有林において、2013 ~ 2014 年に完成した盛土である。近隣の気象観測所(仙台)での 1981 年 ~ 2010 年の平均の年降水量は 1254.1 mm、年平均気温は 12.4 °C である(気象庁 2016)。盛土の材料は山砂(宮城県大和町、大郷町で採取された、海成または非海成の未固結堆積物)で、運ばれてきた山砂をブルドーザー(小松製作所製 D51PX 等)で、地下水位から 2.4m の高さになるまで

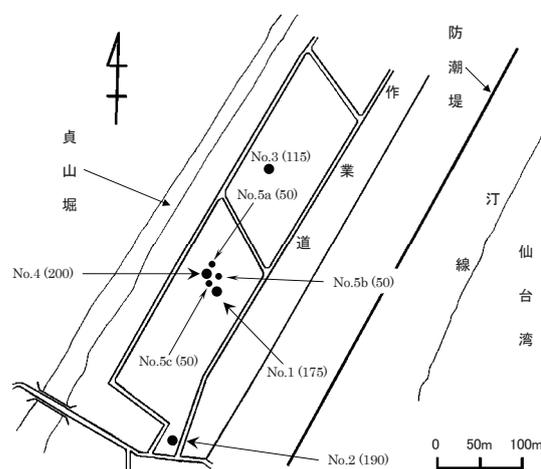


Fig.1. 試験地の位置  
( )内の数値はその調査試孔の最底部の深さ(cm)を示す。  
The location of research site  
The numbers in parentheses represent the depth (cm) of bottom in each pit.

原稿受付：平成 28 年 6 月 20 日 原稿受理：平成 28 年 11 月 15 日

1) 森林総合研究所東北支所

2) 森林総合研究所

3) 現所属 国際農林水産業研究センター

4) 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

4 層程度に分けて敷均しを繰り返し、地表面を平坦に整地して盛土が造成された。調査地付近一帯の盛土では水溜まりの発生が観察されている。盛土断面調査を2014年5月から7月にかけて4か所(調査日はNo.1が2014年5月8日、No.2が6月3日、No.3が6月4日、No.4が7月15日)で実施した(Fig.1)。各調査地点において、深さ1 m以深の断面を作成し、その形態的特徴を記載した。各層位において硬度を山中式土壌硬度計により測定(5回計測の平均)し、粒径分析試料及び円筒試料を採取した。円筒試料(400 mL 採土円筒; A=100 cm<sup>2</sup>; h=4 cm)は各層位より1個ずつ非攪乱状態で採取した。水溜まりの発生状況について連続観察するため、インターバルカメラ(Brinno製 GardenWatchCam)1台を2014年9月17日から同年12月15日まで調査地点No.4に設置し、周辺を日中3時間間隔で撮影した。

No.1 および No.4 付近の比較的浅い土層(深さ50 cm程度まで)の硬度や物理性の傾向を追認するため、2014年9月17日にNo.1 および No.4 近くの3試孔(No.5a、No.5b、No.5c)で、深さ5~45 cmを鉛直方向に5 cm間隔で山中式土壌硬度計により硬度を測定(5回計測の平均)するとともに、深さ15 cm、30 cmより1個ずつ合計6個の円筒試料を非攪乱状態で採取した。

円筒試料(n=34)について、河田・小島(1979)に従って容積重、気相率、粗間隙率、飽和透水係数を測定した。今回の試料はほぼ砂で構成されていたので、石英や長石の真比重に相当する値2.65を土粒子の比重に用いた。飽和透水係数の測定には定水位法を、粗間隙率の測定には素焼板を用いた。全間隙率から粗間隙率を減じたものを細間隙率とした。なお、締固められているかどうかの比較対象として、風乾させた盛土材料をゆるく詰めた時の容積重(n=3)、山砂の採取現場(宮城県大和町、大郷町)の容積重(n=5)を100 mL円筒を用いて測定した。日本造園学会(2000)では、植栽基盤としての透水性の「良」、「不良」の境界について飽和透水係数 $10^3 \text{ cm s}^{-1} = 36 \text{ mm h}^{-1}$ を基準にしており、本稿でもこれを参考にした。山中式土壌硬度計の硬度指数は20 mmを超すと「根系発達阻害樹種あり」、24 mmを超す場合に「根系発達阻害あり」と判断されている(長谷川・猪俣2015)。粒度分析をピペット法にて行い、各層位の土性を国際土壌学会法に基づいて決定した。粗間隙率と飽和透水係数との関係におけるSpearman順位相関係数は、統計解析ソフトウェア JMP12(SAS Institute Inc. Cary, NC, USA)を使用して求めた。

### 3. 結果

#### 3.1 断面の形態的特徴

Table1に断面の形態的特徴と断面写真を示す。盛土厚はNo.1では158 cm、No.4では200 cmで、No.1、No.4の盛土の下には被災前の地表面である海砂が出現した。No.2 および No.3 は、それぞれ試孔を作成した深さ190 cm および 115 cm までには、被災前の地表面である海砂が

現れなかった。No.3、No.4では山砂を材料とした盛土の下に津波堆積物由来の再生資材が投入されていた。再生資材は、No.3では深さ105 cmより下で、No.4では深さ120~200 cmで観察された。いずれの地点にも共通する特徴として、被害木由来のウッドチップが5~10 cm程度の厚さで地表に散布されていた(但しNo.1を除く)。盛土は緻密で、構造発達がみられなかった。盛土には石礫が含まれており、そのほとんどが腐朽礫であった。

盛土土層の大部分において土性は砂土または壤質砂土で、山砂を材料とする盛土のほとんどは砂(粒径2~0.02 mm)を主とするが、シルト(粒径0.02~0.002 mm)及び粘土(粒径0.002 mm未満)を5~15%含んでいた。一方、No.1の深さ165 cmから採取された海砂のシルト及び粘土含有率は5%未満であった。各断面においてシルトや粘土のような細粒成分が集積した層位は肉眼では観察されなかった。No.3の深さ40~105 cmは他の地点や層位に比して明らかに粗粒であった。円筒試料の解析によれば、当該層位の礫(2 mm以上)の体積含有率は18~22%であるのに対し、他の試料は平均1.4%(最大で4.2%)であった。なお、インターバルカメラによる水溜まりの連続観察の結果、総雨量10 mm程度の降雨で水溜まりが発生し、降雨後も2日程度水溜まりが残存したことが確認された。

#### 3.2 硬度

山中式土壌硬度計による硬度指数の鉛直分布は、No.1で深さ20~80 cmにかけて20 mmを超え、深さ20~50 cmにおいてその断面の最大値26 mmを示し、深さ50 cm以深は徐々に低下した(Fig.2a)。No.2は他地点に比べて硬度指数が低い傾向があり、深さ20 cm付近で最大値15 mmを示した。No.3では材料が礫質である深さ40 cm以深では20~22 mmを示し、深さ40 cm以浅では深さ20 cm付近で最大値21 mmを示した。No.4も深さ20 cm付近で最大値の25 mmとなった。No.5aでも深さ15及び20 cmで最大の硬度指数19 mmを示した。No.5bの深さ5~15 cm、No.5cの深さ5~35 cmで20 mmを超えていた(Fig.2b)。以上のように、硬度指数で20 mmを超す硬い土層が比較的浅い深さ10~40 cmの範囲を中心に出現し、土壌硬度は下層へ向かって漸減していた。

#### 3.3 容積重

容積重は、No.1の深さ20~50 cmとNo.3の深さ15~30 cmで $1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ を超え、各断面の最大であった(Fig.3)。No.2では深さ15~80 cmで $1.5 \sim 1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ を示した。No.4の最表層(深さ4 cm)で $1.8 \text{ Mg m}^{-3}$ と、本調査の試料のなかで最大を示した。No.5a~5cでは、深さ15 cm(n=3)では $1.6 \pm 0.0 \text{ Mg m}^{-3}$ (平均±標準偏差、以下同じ)、深さ30 cm(n=3)では $1.5 \pm 0.1 \text{ Mg m}^{-3}$ であった。No.2を除いて、いずれの地点でも40 cmより浅い

Table 1. 調査地点 No.1 ~ 4 の盛土断面と形態的特徴  
The morphological properties of profile in the embankment in plot No.1 ~ 4

調査地点	層位	深さ cm	形態的特徴 土色	硬度	土壌構造	石礫	水湿状態	備考	断面写真
No.1	C1	0 ~ 4	7.5YR 5 / 4	鬆	無し	無し	乾	ウッドチップ無し	
	C2	4 ~ 10	5YR 5 / 4	堅	無し	無し	乾		
	C3	10 ~ 40	10YR 4 / 4	固結	無し	腐朽円中礫あり	乾~潤		
	C4	40 ~ 60	10YR 4 / 4	固結	無し	腐朽円大礫あり 腐朽円中礫あり 腐朽垂角大礫乏し	乾~潤		
	C5	60 ~ 80	10YR 4 / 4	頗る堅	無し	腐朽円大礫あり 腐朽円中礫あり 腐朽垂角大礫乏し	乾~潤		
	C6	80 ~ 100	5Y 5 / 4	堅	無し	腐朽円中礫乏し	潤		
	C7	100 ~ 130	2.5Y 5 / 4	堅	無し	無し	潤		
	C8	130 ~ 158	5Y 4 / 4	軟	無し	腐朽円大礫乏し	潤		
	IIC	158 ~ 175 +	2.5Y 6 / 2	軟	無し	無し	潤	元の海砂	

調査地点	層位	深さ cm	形態的特徴 土色	硬度	土壌構造	石礫	水湿状態	備考	断面写真
No.2	L	5						ウッドチップ敷設	
	C1	0 ~ 8	2.5Y 4 / 4	鬆	無し	無し	—		
	C2	8 ~ 25	2.5Y 5 / 3	堅	無し	無し	—		
	C3	25 ~ 70	2.5Y 5 / 3	軟	無し	無し	—		
	C4	70 ~ 90	2.5Y 6 / 3	軟	無し	無し	—		
	C5	90 ~ 130	10YR 5 / 4	軟	無し	無し	—		
	C6	130 ~ 190 +	2.5Y 5 / 4	鬆	無し	未風化角中礫乏し*	—		

\*震災関連の瓦礫と思われる

調査地点	層位	深さ cm	形態的特徴 土色	硬度	土壌構造	石礫	水湿状態	備考	断面写真
No.3	L	厚さ記載なし						ウッドチップ敷設	
	C1	0 ~ 5	10YR 8 / 3	鬆	無し	無し	乾~潤		
	C2	5 ~ 25	2.5Y 6 / 3	堅	無し	腐朽円小礫含む 腐朽半角小礫含む 腐朽円細礫あり 腐朽半角細礫あり	潤		
	C3	25 ~ 40	2.5Y 5 / 4	やや堅	無し	腐朽円小礫含む 腐朽半角小礫含む 腐朽円細礫あり 腐朽半角細礫あり	湿		
	II C1	40 ~ 67	2.5Y 4 / 2	頗る堅	無し	腐朽半角小礫富む 半腐朽半角細礫富む	潤		
	II C2	67 ~ 85	2.5Y 4 / 2	堅	無し	腐朽半角小礫富む 半腐朽半角細礫富む	潤		
	II C3	85 ~ 105	2.5Y 3 / 2	堅	無し	半腐朽半角細礫富む	湿~多湿		
	IIIC	105 ~ 115 +	N 1.5 / 0	—	無し	無し	多湿	再生資材	

調査地点	層位	深さ cm	形態的特徴 土色	硬度	土壌構造	石礫	水湿状態	備考	断面写真
No.4	L	11						ウッドチップ敷設	
	C1	0 ~ 8	7.5Y 5 / 1	軟	板状**	無し	潤~湿		
	C2	8 ~ 27	2.5Y 4 / 6	固結	無し	無し	潤		
	C3	27 ~ 45	2.5Y 4 / 4	堅	無し	無し	潤		
	C4	45 ~ 78	10YR 4 / 4	堅	無し	無し	潤		
	C5	78 ~ 120	2.5Y 4 / 3	堅	無し	風化垂角大礫乏し	潤		
	C6	120 ~ 200	10YR 1.7 / 1	堅	無し	無し	潤~湿	再生資材	
	IIC	200 +	—	—	—	—	—	元の海砂	

\*\*板状の不連続な膠結面に酸化鉄の集積(10YR4/6 褐色)が5層程度あり

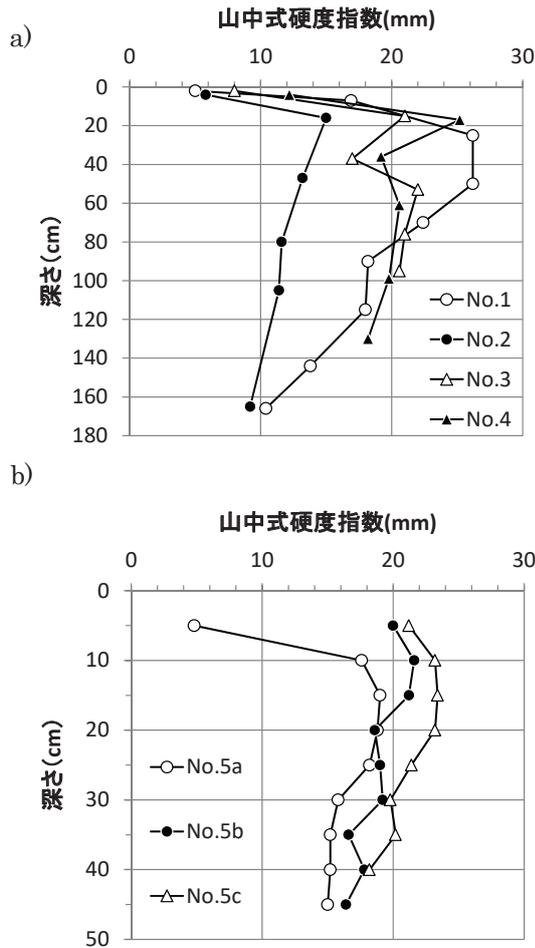


Fig. 2. 盛土の硬度指数 (山中式土壌硬度計) の鉛直変化  
 (a)No.1 ~ 4 (b)No.5a ~ 5c  
 The vertical variation in the index of soil hardness in embankment measured by a Yamanaka-type soil hardness tester  
 (a)No.1 ~ 4 (b)No.5a ~ 5c

土層で容積重が大きかった。風乾させた盛土材料をゆるく詰めた場合の容積重は  $1.2 \pm 0.0 \text{ Mg m}^{-3}$ 、山砂の採取現場の容積重は  $1.3 \pm 0.1 \text{ Mg m}^{-3}$  であった。比重 2.65 の球体が立方充填された場合 (均一な粒子を粗く充填する場合に理論的に最小の容積重が得られる) の容積重は  $1.4 \text{ Mg m}^{-3}$  である (ヒレル 1998a)。

3.4 気相率

近隣の気象観測所 (仙台) によれば、No.1 は調査 7 日前に  $14.0 \text{ mm d}^{-1}$ 、No.2 は調査 7 日前に  $6.5 \text{ mm d}^{-1}$ 、No.3 は調査 8 日前に  $6.5 \text{ mm d}^{-1}$  の降雨があった。No.4 は調査の 2、5、6 日前にそれぞれ  $4.5$ 、 $18.5$ 、 $19.5 \text{ mm d}^{-1}$ 、No.5a ~ c は調査の 4、6 日前にそれぞれ  $8.0$ 、 $57.5 \text{ mm d}^{-1}$  の降雨があった (気象庁 2016)。気相率は全般的には 0 ~ 30% の範囲にあって、No.1 の深さ 20 ~ 80 cm では 4 ~ 7% であった (Fig.4)。No.4 の最表層 (深さ 4 cm) で

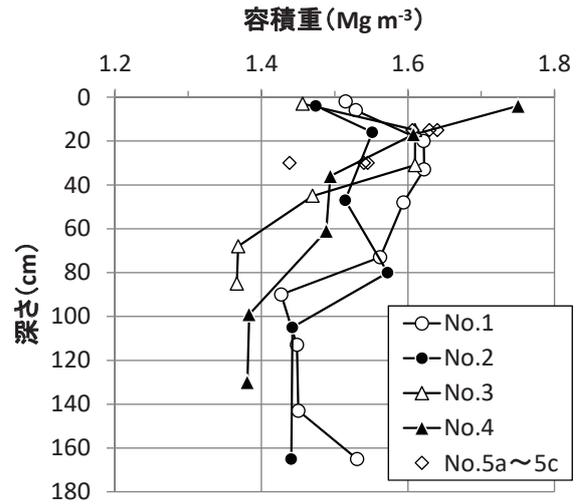


Fig.3. 盛土の容積重の鉛直変化  
 The vertical variation of bulk density in the embankment

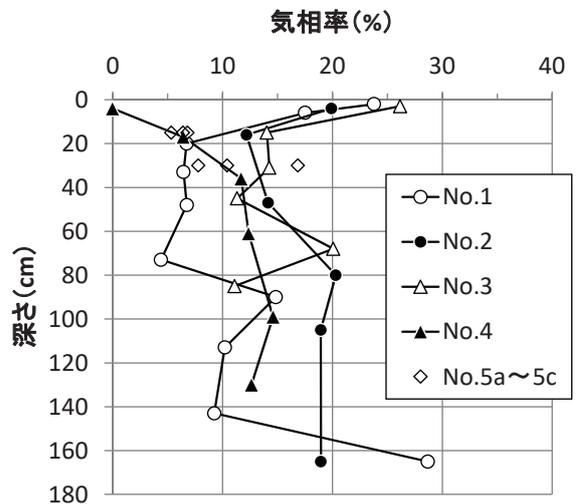


Fig. 4. 盛土の気相率の鉛直変化  
 The vertical variation of air content in the embankment

は 0% を示した。No.5a ~ 5c の深さ 15 cm で 5 ~ 7%、深さ 30 cm で 8 ~ 17% と、No.1、No.4、No.5a ~ c で特に気相が少ない傾向であった。日本の森林土壌の気相率は 5 ~ 50% (河田 1989) とされ、そのうちの低い気相率をもつ、湿性な森林土壌 (湿性褐色森林土、湿性黒色土) の気相率は 5 ~ 30% であり、今回の盛土の気相率は湿性な森林土壌と同等であった。

3.5 粗間隙率

No.1 の深さ 165 cm の海砂 (粗間隙率 36%、細間隙率 6%) を除けば、粗間隙率は 5 ~ 30%、細間隙率は 15 ~ 30% の範囲にあった。No.1 の深さ 20 ~ 75 cm、No.2 の深さ 16 cm、No.3 の深さ 15 cm、45 cm では粗間隙率が 20% 未満であった (Fig.5)。No.4 は深さ 99 cm から採取された 1 試料を除き、No.5a ~ 5c も No.5a の深さ 30 cm から採取された 1 試料を除き粗間隙率は 20% 未満であっ

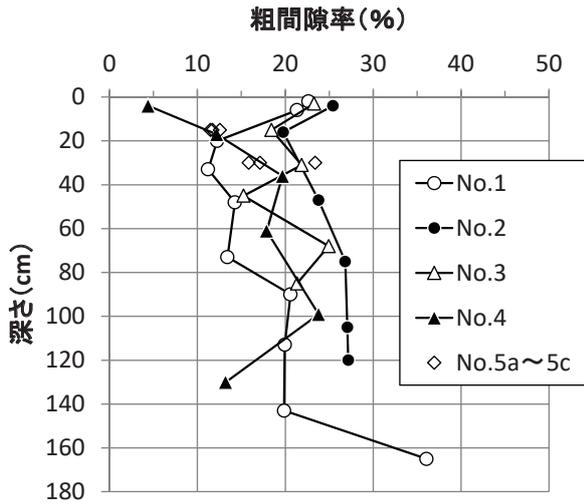


Fig. 5. 盛土の粗間隙率の鉛直変化  
The vertical variation of coarse porosity in the embankment

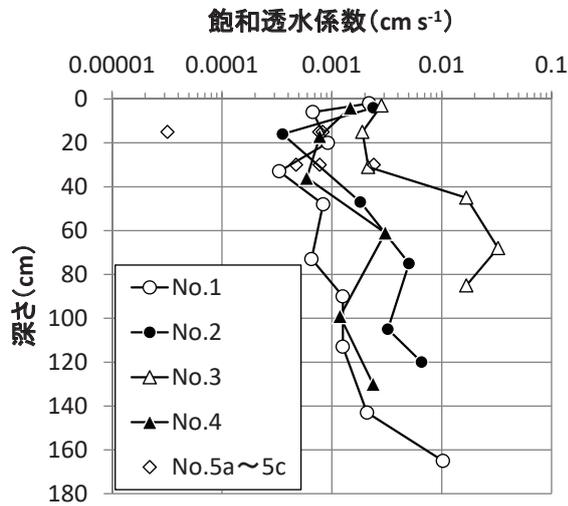
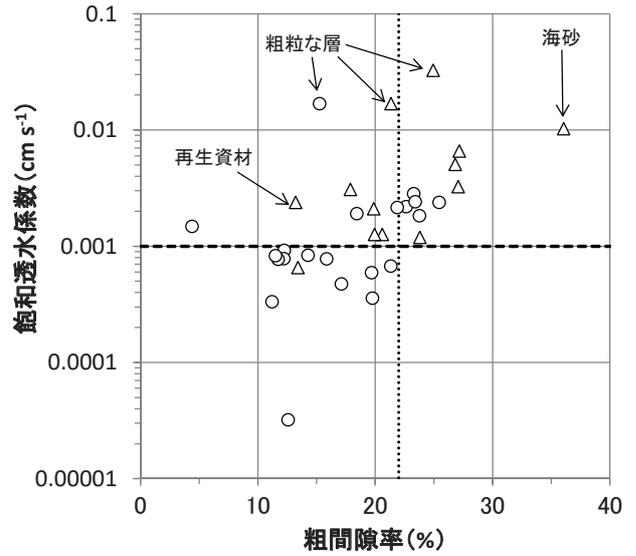


Fig. 6. 盛土の飽和透水係数の鉛直変化  
The vertical variation of saturated hydraulic conductivity in the embankment

た。特に No.4 の深さ 4 cm の粗間隙率は 5% と非常に小さい値であった。盛土では、20% 未満の粗間隙率が概ね深さ 10 ~ 30 cm を中心とした深さ 75 cm 以浅で多く観察された。この粗間隙率の値は砂丘地の海岸林下層土の粗間隙率 20 ~ 45% (後藤ら 1987a, 1987b, 森貞ら 1987) より小さいものであった。

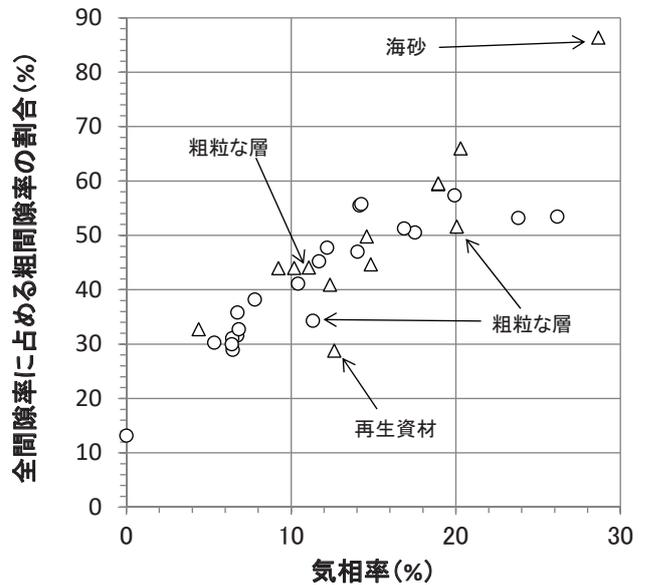
### 3.6 飽和透水係数

盛土試料が示した飽和透水係数は  $3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$  の範囲にあった。No.1 の深さ 5 ~ 75 cm、No.2 の深さ 16 cm、No.4 の深さ 15 ~ 40 cm より採取された試料の飽和透水係数は  $10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$  オーダーを示した (Fig.6)。No.5a ~ 5c の 6 試料のうち、No.5a の深さ 30 cm から採取された 1 試料以外は  $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$  オーダーであった。なお、No.1 の深さ 165 cm の海砂および No.3 の深さ



○ 採取深さ 2~48 cm    △ 採取深さ 61~165 cm

Fig. 7. 飽和透水係数と粗間隙率の関係  
縦方向の点線は粗間隙率が 22%、横方向の点線は飽和透水係数が  $10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  を示す。  
The relationship between the coarse porosity and the saturated hydraulic conductivity  
Vertical and horizontal dotted lines represent 22% in coarse porosity and  $10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  in saturated hydraulic conductivity, respectively.



○ 採取深さ 2~48 cm    △ 採取深さ 61~165 cm

Fig. 8. 気相率と全間隙率に占める粗間隙率の割合との関係  
The relationship between the air content and the percentage of coarse porosity to total porosity

40 ~ 105 cm の粗粒な層の飽和透水係数は  $10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$  オーダーであった。 $10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$  オーダーの飽和透水係数が深さ 10 ~ 20 cm を中心に多数存在していることは盛土の透水性が不良であることを示している。

### 3.7 粗間隙率と飽和透水係数との関係

Fig.7 に粗間隙率と飽和透水係数との関係を示す。材料が異なる試料 (No.1 の海砂、No.3 の粗粒な層、No.4 の再生資材) を除いた場合の粗間隙率と飽和透水係数との関係に有意な正の相関 ( $r=0.68$ 、 $P<0.001$ 、 $n=29$ ) が認められた。粗間隙率が 22% を上回れば、飽和透水係数は  $10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  以上となっていた。

### 3.8 気相率と間隙組成の関係

Fig.8 に気相率と全間隙率に占める粗間隙率の割合との関係を示す。気相率が 29% と高かった No.1 の海砂は、間隙組成について粗間隙：細間隙の比率がおおよそ 9:1 であった。気相率が 0% であった、No.4 の最表層 (深さ 4 cm) の全間隙率に占める粗間隙率の割合は 13% と、全間隙のうちほとんどが細間隙により構成されていた。材料が異なる試料 (No.1 の海砂、No.3 の粗粒な層、No.4 の再生資材) を除いた場合、気相率の低い試料は全間隙に占める粗間隙の割合が小さい傾向がみられた。

## 4. 考察

### 4.1 生育基盤盛土の物理性

今回調査した生育基盤盛土では、根の侵入を妨げる 20 mm 以上の硬度指数が深さ 10 ~ 40 cm の範囲を中心に観察された (Fig.2)。風乾させた盛土材料をゆるく詰めた場合の容積重、山砂の採取現場の容積重、比重 2.65 の球体を粗く充填して得られる最小容積重より大きい  $1.5 \text{ Mg m}^{-3}$  以上の容積重が、深さ 40 cm より浅い範囲を中心に観察された (Fig.3)。粗間隙率について 20% を下回る試料は概ね深さ 10 ~ 30 cm を中心とした深さ 75 cm 以浅で多く観察された。測定項目間、調査地点間で鉛直変化の傾向は全て一致しているわけではないが、硬度指数 20 mm 以上で容積重  $1.5 \text{ Mg m}^{-3}$  以上、かつ粗間隙率 20% 未満を示す深さは、10 ~ 30 cm を中心とした 75 cm 以浅であった。これらの結果から、深さ 10 ~ 40 cm を中心に概ね 75 cm 以浅で、盛土は密に詰まっていた、締固められた状態にあると考えられた。

締固めの際、細粒分 (JIS では、粒径  $74 \mu\text{m}$  以下) を含むほど容積重が大きくなること、最適含水比付近で締固めると、同じエネルギーで締固めても容積重が大きくなる、あるいは同じ容積重に少ないエネルギーで達することが知られている (吉岡ら 1973, 矢橋・金光 1985)。これらの報告は、砂 (2000 ~  $75 \mu\text{m}$ ) を 80 ~ 90%、 $74 \mu\text{m}$  以下の細粒分を 10 ~ 20% 含む、“稲城砂” と呼ばれる材料を対象にしたものである。今回用いられた盛土材料も砂を主成分としてシルト及び粘土を 5 ~ 15% 含んでおり、“稲城砂” と同様の特徴をもっていた。これらのことから、材料の粒径組成が締固めを促進した可能性もある。なお、硬く密度の高い層は雨滴衝撃やスレーキングなどで分散した細粒成分が集積して乾燥した場合にも形成されるが、断面観察では細粒成分が集積した層位は肉眼で

は観察されなかった。このような集積層は薄い膜状として形成されたり、砂粒子の間隙を埋めたりする可能性があるため、微細形態の観察などにより詳細に検討する必要がある。

### 4.2 生育基盤盛土の飽和透水係数

粗間隙率と飽和透水係数との関係について、粗間隙率が 20% 未満の 17 試料 (山砂を材料とする) のうち 12 試料で  $10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$  のオーダーの飽和透水係数を示し、透水性が不良であった。透水性不良を示したのは深さ 50 cm 以浅の試料がほとんどであった。粗間隙率が小さいと飽和透水係数も低いことは、頻りに機械走行があった林地作業道跡で報告されている (阿部ら 2015)。この事例では、未攪乱林地の粗間隙率は 20 ~ 33%、飽和透水係数は  $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$  オーダーであったが、作業道跡の粗間隙率は 5 ~ 12%、飽和透水係数は  $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$  オーダーとなっていた。本報の結果 (Fig.7) のように粗間隙率が小さいと飽和透水係数が低い傾向がみられたのは、ヒレル (1998b) でも示されているように、圧力が加わって土が締固められ、通気通水に寄与する比較的大きな間隙の体積が減少し、同時に間隙の連続性も低下したためと考えられる。以上のことから、締固められたことにより、飽和透水係数が低下し、水溜まりができるようになったと考えられる。

### 4.3 造成された盛土の生育基盤としての適性

気相が少ないと、土壌中の通気が不良となり酸素が不足することによって、根の呼吸障害、養分吸収が妨げられるほか、根の伸長、活力低下に伴う根腐れの発生および微生物活性の低下をもたらす。植物の根が伸長できる限界の気相率は 5 ~ 20% の範囲で変動するが、平均すると 10% と言われている (ヒレル 1998a)。本調査で採集した 34 円筒試料のうち 28 試料が気相率 20% 未満であり、No.1、No.4、No.5a ~ 5c で 10% 未満もみられるなど、気相率は低い傾向にあった。また、気相率 10% 未満である 11 試料のうち、(No.1 の深さ 143 cm から採取された 1 試料を除く) 10 試料は容積重が  $1.5 \text{ Mg m}^{-3}$  以上、かつ粗間隙率が 20% 未満で、採取深さは 73 cm 以浅であり、気相率が低い箇所と締固められた箇所とは概ね一致していた。なお、最後の降雨から 24 時間以上経過していること、No.4 と No.5a ~ c は No.1 ~ 3 に比べて先行降雨が多いのに No.1 の深さ 20 ~ 73 cm は No.4 及び No.5a ~ c と同じかそれより低い気相率であることから、降雨による土壌水分の増加が気相率を低くさせた主因とは考えにくかった。Fig.8 に示されているように気相率の低い試料は全間隙に占める粗間隙の割合が小さかった。気相率低下の理由について、締固めにより単に固相率が増加しただけでなく、締固めに伴い粗間隙の減少と細間隙の増加といった間隙組成の変化が起こり、細間隙のような水分移動に寄与しない間隙が増えたことも挙げられる。

本報で調査した盛土は、“根系発達阻害樹種あり”(長谷川・猪俣 2015)とされる山中式土壌硬度計の硬度指数で 20 mm を超す値が頻繁に認められ、一部では“根系発達阻害あり”とされる 24 mm を超す値も観察された(Fig.2a 及び 2b)。千葉県九十九里浜に造成された盛土のうち深耕が未実施の地点(山中式土壌硬度計で 23 mm を超える値が頻繁にみられた)では、植栽から 10 年経過したクロマツの地上部の成長は良好であったものの、根系が深部まで発達したものがみられなかったと報告されている(野原・高橋 2007)。このことから、気相率や硬度の測定結果から判断して、本報で調査した盛土においても土層の固結や通気不良により根の伸長が阻害される可能性がある。

### 5. まとめ

水溜まりが発生した生育基盤盛土について、さまざまな物理特性を明らかにした。深さ 10 ~ 40 cm を中心として深さ 75 cm 以浅で、山中式土壌硬度計の硬度指数で 20 mm、容積重で 1.5 Mg m<sup>-3</sup> を超え、かつ粗間隙率が 20% 未満で、飽和透水係数が 10<sup>-4</sup> cm s<sup>-1</sup> オーダーとなるが多かった。以上のように、盛土の深さ 10 ~ 40 cm を中心とした深さ 75 cm 以浅で硬く、密に充填され、粗間隙が少なかったことから、締め固められた状態にあった。また、気相率は 20% 未満が 8 ~ 9 割を占め、特定の地点で 10% 未満が多くみられるなど、盛土は硬度が高いだけでなく、気相率が低い傾向にあった。根系の盛土深部までの伸長が阻害されることにならないよう、施工方法を工夫する等の取り組みが重要と考えられる。

### 謝辞

本研究では、仙台森林管理署管内松林国有林、仙台市有林を試験地として借用させていただいた。東北森林管理局および仙台森林管理署、仙台市役所の皆様、森林総合研究所東北支所 小野賢二主任研究員、森林総合研究所九州支所 清水晃調整監、森林総合研究所 金子真司領域長、大貫靖浩研究室長、平井敬三研究室長、小林政広チーム長、宮城大学 千葉克己准教授、東北農業研究センター 冠秀昭博士、林木育種センター東北育種場 織部雄一朗育種課長、福島県林業研究センター 小沢創主任研究員には調査遂行や結果の解析に関してご助言、ご協力をいただいた。以上の方々に深く感謝の意を表します。本研究は森林総合研究所運営交付金プロジェクト「海岸林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。

### 引用文献

阿部 俊夫・相澤 州平・橋本 徹・佐々木 尚三 (2015) ハーベスタ・フォワードシステムによる間伐跡地からの濁水発生—生田原国有林の事例—。北森研, 63, 53-56.

ダニエル ヒレル (1998a) (岩田 進午・内嶋 善兵衛 監訳, 2001a) 環境土壌物理学 I 土と水の物理学。農林統計協会, 318pp.

ダニエル ヒレル (1998b) (岩田 進午・内嶋 善兵衛 監訳, 2001b) 環境土壌物理学 III 環境問題への土壌物理学の応用。農林統計協会, 322pp.

後藤 和秋・山本 肇・丸山 明雄 (1987a) 土壌環境の解析 (2) 酒田クロマツ海岸林。松井 光瑠・土井 恭次・石川 政幸編 “プロジェクト研究成果シリーズ 185 環境変化に対応した海岸林の環境保全機能の維持強化技術の確立に関する研究”。農林水産技術会議, 22-24.

後藤 和秋・山本 肇・丸山 明雄 (1987b) 人為による土壌悪化の実態解析 (2) 酒田クロマツ海岸林。松井 光瑠・土井 恭次・石川 政幸編 “プロジェクト研究成果シリーズ 185 環境変化に対応した海岸林の環境保全機能の維持強化技術の確立に関する研究”。農林水産技術会議, 72-74.

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にして—。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。日録工誌, 41(2), 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海岸林と集落の被害状況。日林誌, 94(5), 243-246.

猪内 正雄 (2001) 森林作業の機械化が森林環境にどんな影響を及ぼすのか。森林科学, 32, 25-33.

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。治山研究発表会論文集, 54, 83-89.

河田 弘・小島 俊郎 (1979) 環境測定法 IV—森林土壌—。共立出版, 190pp.

河田 弘 (1989) 森林土壌学概論。博友社, 399pp.

気象庁 (2016) “過去の気象データ検索”, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (参照 2016-02-03).

日本造園学会 (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 咲江・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.

森貞 和仁・田中 永晴・大角 泰夫 (1987) 土壌環境の解析 (1) 東海村クロマツ林。松井 光瑠・土井 恭次・石川 政幸編 “プロジェクト研究成果シリーズ 185 環境変化に対応した海岸林の環境保全機能の維持強化技術の確立に関する研究”。農林水産技術会議, 20-23.

林野庁 (2013) “平成 24 年度 森林・林業白書”,

- [http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/24hakusyo\\_h/all/a11.html](http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/24hakusyo_h/all/a11.html), (参照 2016-02-22).
- 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. 日緑工誌, 41(2), 334-335.
- 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.
- 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(1), 7-14.
- 矢橋 晨吾・金光 達太郎 (1985) 特殊土の植栽基盤としての改良 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.
- 吉岡 昭三・木賀 一美・小杉 紘平・前田 穂積 (1973) 稲城砂の土質工学的性質と土工事設計基準, 土と基礎, 21(12), 23-29.

## The physical property of embankment with a rain pool : A case study of embankment built in the early stage of the Coastal Forest Restoration Project after tsunami

Yoshiki SHINOMIYA<sup>1)\*</sup>, Akihiro IMAYA<sup>2), 3)</sup>, Kiyomi TAKANASHI<sup>4)</sup>  
and Tomoki SAKAMOTO<sup>1)</sup>

### Abstract

Immediately after the Great East Japan Earthquake, an embankment was built in the Arahama coastal area as a planting base by the Coastal Forest Restoration Project. It is feared that a rain pool and the hardness of a part of the embankment, which was built in early year, inhibited the growth of planted trees. Planting bases tend to become compacted by heavy construction machinery, which allows rain water to pool on the embankment. The physical properties of the embankment were investigated in Sendai City, Miyagi Prefecture, Japan. Most soil samples collected from a depth of lower than 75 cm (especially 10 to 40 cm) had the Yamanaka hardness index of higher than 20 mm, a bulk density of higher than  $1.5 \text{ Mg m}^{-3}$ , and a coarse porosity of lower than 20%. The embankment was hard, densely packed and had low coarse porosity, indicating that the embankment has been compacted.

**Key words** : coastal forest restoration, embankment, soil physical properties, bulk density, coarse porosity, compaction

---

Received 20 June 2016, Accepted 15 November 2016

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

2) FFPRI

3) Present address: Japan International Research Center for Agricultural Sciences

4) Sendai District Forest Office, Tohoku Regional Forest Office

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