多雪地域の重粘土地におけるコバノヤマハンノキ植栽木の成長に及ぼす 植栽基盤整備の効果

棚橋生子¹・眞坂一彦^{*、2}・佐藤弘和¹・福地 稔¹・佐藤孝弘³

多雪地域の重粘土地における樹木の植栽方法検討のため、北海道当別町にある「道民の森・神居尻地区」の牧野跡地において、植栽基盤整備しない区画（無処理区）と、地表を畝上げ及び耕耘の処理を行った区画（畝上げ区と耕耘区）にコバノヤマハンノキを植栽し、その後6年間の生育状況を調査した。本試験地の土壌は固相率が高く気相率が低いのに加え、難透水性の重粘土であり、地表下10～20 cmに耕盤層が認められた。畝上げ区の土壌水分（pF値）は植物の生育にとって適正な範囲に収まるが多かったが、耕耘区では飽和状態になることもあった。植栽木には、越冬期間中に主軸折れ等の雪害を受けるものが多数あった。雪害を受けた個体数は最大積雪深が大きい年ほど多く、また樹高が高くなるほど雪害を受けにくくなる傾向が認められた。また、被害個体数は畝上げ区よりも耕耘区と無処理区で多い傾向だった。3処理区で樹高成長に大きな差は認められず、直径成長に差が現れた。直径成長の差は形状比の違いとなり、雪害への感受性に反映した。以上の結果から、多雪地域の重粘土地では耕耘よりも畝上げが効果的な植栽基盤整備方法として提案できる。

キーワード：透水性、雪害、植栽基盤整備、コバノヤマハンノキ、土壌貫入抵抗

Ikuko Tanahashi,¹ Kazuhiko Masaka,^{*、2} Hirokazu Sato,¹ Minoru Fukuchi,¹ Takahiro Sato³ (2019) Effects of Site Preparation before Planting on the Growth of *Alnus inokumae* Saplings at a Site of Heavy Clay Soil in a Heavy Snow Region. J Jpn For Soc 101: 227-234 To demonstrate the optimal planting method at site of heavy clay soil in heavy snow regions, we planted saplings of *Alnus inokumae* in an abandoned pasture in Tobetsu, Hokkaido, after the site preparation. Mounded- and plowed treatments were conducted for the site preparation in addition to no treatment (control). We investigated the growth of saplings for 6 successive years. Soil of the study site showed typical impermeable heavy clay soil with high solid-phase and low gaseous-phase ratio. We also found a hardpan horizon caused by the passage of vehicles at depth in the soil. Though water contents (pF value) at the mounded 10–20 cm site often proved favorable for plant growth, water contents at the plowed site occasionally showed saturation. Many saplings suffered snow damage during winter, and the number of damaged trees ($N_{\text{damage},t}$) increased with an increased maximal depth of snow cover, and decreased with height growth. $N_{\text{damage},t}$ at the plowed and control sites tended to be greater at the mounded site. No significant difference in height growth was found among the three treatments, whereas a significant difference was found in radial growth. The difference in radial growth effected a difference in the slenderness of the trunk, and it was reflected in the sensitivity to snow damage. These results suggest that the mounded treatment is effective site preparation compared with the plowed treatment at the site of heavy clay soil in heavy snow region.

Key words: permeability, snow damage, site preparation before planting, *Alnus inokumae* Murai et Kusaka, soil penetration resistance

I. は じ め に

重粘土といわれる土壌は、北海道に広く分布しており（北海道開発局農林水産部 1967）、農林業において大きな影響を与えてきた。重粘土は通気性が悪く、過湿になりやすい難透水性の土壌であり、水田には適しているものの畑地や人工林造成には適さない（佐久間 1985；杉浦・薄井 1976）。ただし寒冷地では草地に利用されている（岩間ら 1983）。重粘土地を畑地や林地にするには、暗渠排水や心土破碎、砂客土など重粘土の土壌物理性の改善が必要とされる（佐久間・赤沢 1984；杉浦・薄井 1976）。このような背景から、土壌物理性の改善については、農業分野では北海道開発局や北海道農業試験場を中心に多くの研究が行われてきた（佐久間・赤沢 1984）。一方、林業分野では、重粘土対策を目的とした研究（笹島 1974；杉浦・薄井 1976；棚橋ら 2011）はわずかしかなない。

通常、林業では適地適木の考えから立地に適した樹種の

植栽が推奨される。しかし現実には、重粘土地が北海道に広く分布していることから、重粘土地で林業が営まれていることも多い（e.g. 菊地 1983；笹島 1974；山根 1983）。近年では、重粘土地に造成された牧野の跡地が森林再生を目的とした植樹祭会場として利用されたり（e.g. 北海道水産林務部森林環境局森林活用課 2008）、転圧された重粘土で被覆された産廃処理場が緑地公園として利用されたりもしているが（e.g. 北海道立総合研究機構林業試験場 2011）、植栽された樹木苗の成長が悪いのが現状である。一般に、重粘土地に植栽された樹木の成長は抑制される（山根 1983）ため、植栽基盤整備など、なんらかの成長改善方法が必要になる（菊地 1983）。

加えて、北海道内において重粘土地が分布するのは道北、道央、オホーツク海側であり（松田 1980）、多雪地域と重なる部分が多い。多雪地域では、植栽木は幹折れ等の雪害を受ける可能性が高い（福地 2012；佐藤 1980）。多雪地域における成林の成否には雪害への耐性が大きく影響して

*連絡先著者（Corresponding author）E-mail: masaka@iwate-u.ac.jp

¹ 北海道立総合研究機構林業試験場 〒079-0198 北海道美瑛市光珠内町東山（Hokkaido Research Organization, Forestry Research Institute, Higashiyama, Koshunai, Bibai, Hokkaido 079-0198, Japan）

² 岩手大学農学部森林科学科 〒020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8（Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Iwate University, 3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan）

³ 北海道立総合研究機構林業試験場道南支場 〒041-0801 北海道函館市桔梗町 372-2（Donan Branch Station, Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, 372-2 Kikyo-cho, Hakodate, Hokkaido 041-0801, Japan）

（2019年2月1日受付；2019年8月27日受理）

おり、雪害への耐性は樹冠形や、形状比（樹高/幹直径）を反映する（四手井 1954）。もし土壌の物理性改善により過湿状態が緩和され、それが植栽木の成長改善につながるならば、成林の成否にも強く反映することが予想される。

そこで本研究では、多雪かつ重粘土における植栽基盤整備による植栽木の成長への影響を検証し、多雪重粘土地で必要とされる植栽基盤整備の方法を明らかにするため、耕耘処理（cf. 笹島 1974）、ならびに降雨後の浸透水が排水されやすいと考えられる畝上げ処理（細川 2004）を行い、コバノヤマハンノキ *Alnus inokumae* Murai et Kusaka を用いて植栽後6年間の植栽木の生育状況を比較する試験を実施した。この樹種は、北海道の治山工事施行地において使用頻度が高く、堅い盛土や切土面、重機で転圧された重粘土地など土壤瘠悪地でも良好な成長を示す（e.g. 新村ら 1981）。また、多雪地では、積雪面からの早期脱出を考慮した成長の早い樹種の植栽が適しており（福地 2012）、ハンノキ類の中でもコバノヤマハンノキは特に初期成長が良好な特徴を持つ（植村 1964）ことから、多雪地に適していると期待される。なお、前報（棚橋ら 2011）は短期間のデータであったため、おもに活着状況の報告であったが、本研究ではさらに土壌の物理的環境に対する成長応答に加え、雪害への感受性について検討し、植栽基盤整備の効果を検証した。

II. 試験地と方法

1. 試験地概況

本研究の試験地は、北海道石狩郡当別町北部に位置する三番川地区内の標高 250 m の地点にある牧野跡地である（図-1；N43°29'50", E141°37'33"）。「地質図 Navi」（<https://gbank.gsj.jp/geonavi/>）によると、試験地の地質は第四系の段丘堆積物である。同 Navi で検索できる土壤図では、細粒質普通疑似グライ土に分類されている。現場における牧野跡地の土壌は、主に粘土～シルト質土壌であり、一部に亜角礫が混在している。また、北海道水産林務部森林環境局森林活用課（2008）によると、試験地周辺において深さ 20～40 cm に硬盤と呼ばれる硬い層が一部存在していることが報告されている。本試験地の牧野としての利用は古く、大正初期の地形図には草地としての利用が示され、その後町営牧野として 2003 年まで利用された（石狩振興局森林室 2013）。現在は 2005 年から供用開始となった北海道立の森林レクリエーション施設である「道民の森」の一部として、企業や団体による森づくり活動の場所として利用されている（石狩振興局森林室 2013）。最寄りの AMeDAS 観測地点「空知吉野」では、過去 30 年（1981～2010 年）での年平均気温が 6.3℃、月最高平均気温が 20.5℃（8 月）、月最低平均気温が -7.3℃（1 月）、そして年平均降水量は 1,557.2 mm である（気象庁 HP、過去の気象データ検索、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>；2016 年 7 月 15 日確認）。またこの地域は多雪地であり、最寄りの道路テレメータによる観測によると、本研究の調査期間中における毎年の最大積雪深は、国道 451 号線の「四番川」（試験地から北へ約 2.8 km）では 250～400 cm、道道 28 号線の「青山中央」（試験地から南南西へ約 5.6 km）では 160

～290 cm である。なお、これらの観測地点は山地にあるため、両地点の積雪深の違いは斜面方位や谷の向きに影響を受けていると考えられるが、積雪深の年次変動はおおよそ一致している。

当地は町営牧野として長年利用されてきたため、地表はオーチャードグラス *Dactylis glomerata* L. やチモシー *Phleum pratense* L. 等の牧草に大部分が覆われており、場所によっては、オオイトドリ *Fallopia sachalinensis* (F. Schmidt) Ronse Decr., アキタブキ *Petasites japonicus* (Siebold et Zucc.) Maxim. subsp. *giganteus* (G. Nicholson) Kitam. 等の多年生草本が群生する。

2. 試験地の設定

2009 年 5 月に、傾斜 5～8° の北東向きの緩斜面において、建機を用いて畝上げ、耕耘の 2 種類の植栽基盤整備を行った。これら「畝上げ区」、「耕耘区」に植栽基盤整備を行わなかった「無処理区」を加えて 1 セットとし、これを 3 反復設定した。各プロットは斜面の垂直方向に長い 15 m × 3 m の長方形とし、4 m の間隔をあけて斜面の水平方向に並べて配置した（図-1）。畝上げ区は、プロット予定地に隣接する土を列状に掘り取り、プロット内全面に地表から高さ 30～40 cm に盛り上げてバケットで転圧し上面を平らにならした。耕耘区は、建機のバケットでプロットの土を

図-1. 試験地の位置
Location of study site.

A. 道民の森内における試験地の位置（©Google Earth より作図）；B. 処理区およびコバノヤマハンノキ苗の配列。○、植栽位置；●、テンシオメータと土壌水分センサーの設置位置；■、テンシオメータの設置位置。ミズナラ苗はコバノヤマハンノキ苗と交互に植栽された。

A. Location of study site in Dominno-mori (drawn using ©Google Earth)；B. Arrangement of treatment plots and planting of *Alnus inokumae* saplings. ○, Planting saplings；●, Tension meter and soil moisture sensor；■, Tension meter. Saplings of *Quercus crispula* and *A. inokumae* were planted alternately.

掘り上げて、砕かずに上下を反転させただけで埋め戻し、平らにならして造成した。植栽基盤整備には、バケット容量 0.45 m^3 の油圧ショベル (ZAXIS 125 US, 日立建機) を用いた。

植栽は、コバノヤマハンノキの苗を1プロット当たり縦5本、横2列に千鳥状に配置し、間隔は列間が1 m、苗間が2 mである (図-1)。苗高約50 cmの9 cmポット苗を用い、2009年6月にポットが入る大きさの植穴を掘って植栽した。植栽後、処理区間の草本による被圧の影響を低減するために2011年までは6月下旬から7月に1~2回の下草刈りを行った。2009年の晩秋には、積雪による倒伏被害を軽減するため、イボ竹 (直径16 mm, 長さ1.8 m) にビニール製のひもで2, 3カ所縛って冬囲いを行い、2010年5月に取り除いた。

なお、同試験では福地 (2012) の事例を参考に、活着率が高く、試験地周辺の企業等による植樹会場でしばしば用いられているミズナラ *Quercus crispula* Blume も2010年5月にコバノヤマハンノキの苗間に植栽した。しかし、エゾユキウサギ *Lepus timidus ainu* Barrett-Hamilton の食害 (越冬期間の食害率は初年度が88%, 2年目が21%, 3年目が76%) に加え、コバノヤマハンノキからの被陰によって、ミズナラの成長に対する処理の効果検証が困難となったため調査の対象から除外した。両樹種の樹高差 (コバノヤマハンノキの平均樹高は2010年10月が255 cm, 2011年10月が375 cm, 同様にミズナラは2010年10月が40 cm, 2011年10月が44 cm) から、コバノヤマハンノキの成長に対するミズナラの影響は考慮しなくても問題ないと考えられる。

3. 土壌の物理性の調査

土壌の物理性については、土壌試料を2011年8月26日に無処理区付近において地表下20 cmの深度から1サンプルずつ100 mL 採土円筒を用いて礫や根がみられないところを選んで採取し、分析を行った (3反復)。採取した土壌試料の土壌三相分布 (固相率, 液相率, 気相率) および乾燥密度 (容積重), 飽和度, 間隙率は, デジタル実容積測定装置 (DIK-1150, 大起理化工業株式会社) を用いて測定した。透水性の評価については, 変水位法により飽和透水係数 K_s (cm/s.) を推定した (DIK-4050, 大起理化工業株式会社)。推定に当たっては, 三相を調査した後, 蓋を外した円筒ごと一晚水に浸水した試料を用いた。粒度分析用の試料は, 試験区内での採土による攪乱を防ぐため, 2017年6月14日に試験区近傍3箇所において, 表層50~60 cm程度の深さで不攪乱試料を採取し, 採取時に触感による土性の簡易判定を行った。粒度分析には, レーザー回折粒度分析装置 (COULTER LS230, コールター社) を使用した。

土壌硬度は, 貫入試験器を用いて表層土壌の貫入抵抗を測定して評価した。測定は2009年7月に簡易貫入試験器 (坂田電機株式会社) を用いて行った。簡易貫入試験では5 kgの重りを50 cmの高さから自由落下させ, 先端のロッド ($\phi 2.5 \text{ cm}$) が10 cm土中に挿入されるのに要した打撃回数である N_c 値を求めた。各プロットとも, 植栽列間に

おいて約2 m間隔で5カ所, 深さ60 cmまで測定した。

生育期間内における土壌水分の測定は, 3反復のうち中央に位置する反復の各プロットにおいて, 2009~2010年はテンシオメータを地表下20 cmと40 cmにそれぞれ埋設し, 無降雨時にマノメータ (PG100-102-VP, 日本電産コパル電子株式会社) によって圧力を測定した (図-1)。2009年と2010年の圧力 (pF値に換算) の測定値については, 各試験区およびテンシオメータの埋設深を群別する変数とした反復測定分散分析を適用した (欠測値のある測定日のデータは除外した)。2011~2012年は, 降雨時における土壌水分の違いも評価するために, データ記録計 (WatchDog, Spectrum社) と土壌水分センサー (Watermark 土壌水分センサー, Spectrum社) を地表下10 cmに設置して土壌水分の経時データを計測した (図-1)。土壌水分は, pF値で評価した。

4. 土壌の物理性の調査

植栽木については, 2009~2014年まで毎年5月に積雪による折損の状況, 5月と10月に樹高 H (cm), 10月に地表から130 cmの高さにおける幹の直径である胸高直径 D (cm) を調査した。ただし, 植栽後2年間は $H=130 \text{ cm}$ に達しない個体が多かったことから, D の測定は2011年10月から行った。現地での調査だけでは, 雪圧と冠雪による雪害が区分できないことから, 双方を合わせて雪害とし, 主軸の折れをもって雪害を受けたと定義した。なお, 雪害の有無にかかわらず, 樹高は現況で最も高い生存部分を測定した。

調査地は3反復をもつブロック・デザインであり, 各個体の成長を評価するにあたり, 各反復内においてプロット間変動があるため, 個体レベルとプロット・レベルの二つの効果を分離する必要がある。ここではプロット・レベルの効果を考慮して, 植栽した個体の樹高成長および直径成長を次の式 (1) のように記述する。

$$Size_{t,ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j} cSize_{t-1,ij} + e_{ij} \quad (1)$$

ここで, i は個体, j はプロットを表す。 β_{qj} ($q=0, 1$) と e_{ij} は, それぞれ係数とランダム効果である。 t は当年の生育期間終了期を, $t-1$ は前年の生育期間終了期を意味する。ただし, 植栽年である2009年の $t-1$ については春の植栽時点とする。 $Size_{t,ij}$ は $H_{t,ij}$, または $D_{t,ij}$ を表す。 $cSize_{t-1,ij}$ はセンタリングされた $Size_{t-1,ij}$ であり ($cH_{t-1,ij}$, および $cD_{t-1,ij}$), $Size_{t-1,ij} - \overline{Size}_{plot}$ によって求められる。このとき, $\overline{Size}_{plot}$ はプロット j における前年の生育期間終了後の平均 H ($\overline{H}_{plot}$), および平均 D ($\overline{D}_{plot}$) である。なお, センタリングによって個体レベルの効果とプロット・レベルの効果が分離され, プロット間変動が完全になくなる (清水 2014)。

式 (1) における係数 (切片 β_{0j} , 傾き β_{1j}) は, 次のように作られる。

$$\beta_{0j} = \gamma_{00} + \gamma_{01} \overline{Size}_{plot} + \gamma_{02} treatment + \gamma_{03} position + \gamma_{04} damage_{t-1} + u_{0j} \quad (2a)$$

$$\beta_{1j} = \gamma_{10} + \gamma_{11} \overline{Size}_{plot} + \gamma_{12} treatment + u_{1j} \quad (2b)$$

ここで、 γ_{gh} ($h=1\sim4$) と u_{ij} は個体レベルの係数およびランダム効果である。固定効果である説明変数の *treatment* は、植栽基盤整備（無処理区、耕耘区、畝上げ区）を表すカテゴリー変数である。*Position* は各プロット内における等高線に鉛直方向の植栽位置を表すカテゴリー変数であり、高い位置から順に 1, 2, ..., 9, 10 と順番を付けた (図-1)。なお、*position* は順序変数であるが、個体は緩傾斜地に等間隔で植栽されており、植栽位置を比高と同じと見なすことができることから、ここでは連続変数として扱うことにする。 $Damage_{t-1}$ は、 $t-1\sim t$ 年の越冬期間中における主に主軸折れによる雪害の有無（雪害を受けた=0, 雪害を受けなかった=1）を表す 2 値のカテゴリー変数である。このとき、植栽年である 2009 年については越冬期間が含まれず、また 2014 年については、2013 年～2014 年の越冬期間中の主軸折れが 1 個体にしか認められなかったもので、式 (2a) から $damage_{t-1}$ を除外した。なお、雪害については、いったん受けると翌年以降も同じ位置で発生する傾向がみられたため、多重共線性を考慮して、前々年の $damage_{t-2}$ を含めるなど累年的な影響については評価の対象外とした。

式 (1) に式 (2a) と式 (2b) を組み込んだモデルは、一般化線形混合モデル (GLMM: generalized linear mixed model) によって評価した。このとき、反復は切片に、 $cSize_{t-1,ij}$ は傾きに作用するランダム効果とした。

5. 雪害への感受性に対する積雪深および樹高の効果

各越冬期間における処理ごとの雪害を受けた個体数 $N_{damage,t}$ を説明する要因として、 $t-1\sim t$ 年の越冬期間中の最大積雪深 $snow\ depth_t$ および各処理区の越冬前の樹高を説明変数と想定し、次の一般化線形モデル (GLM: generalized linear model) によって評価した。全データ数は、冬囲いをした 2009～2010 年の冬を除く、2010 年の冬から 2014 年の春までの 4 冬×3 処理で $n=12$ である。

$$N_{damage,t} = b_0\ snow\ depth_t + b_1\ \hat{H}_{plot} \quad (3)$$

ここで $\hat{H}_{plot}$ は、樹高成長に関する GLMM から推定した各処理における $t-1$ 年（越冬前）の期待樹高であり、処理間で条件を揃えるため $position=1$, $damage_{t-1}=1$ （雪害を受けなかった）を代入した。そして $cH_{t-1}=0$ を代入することで樹高が平均化される ($H_{t-1}-\bar{H}_{plot}=cH_{t-1}=0$ ゆえ、 $H_{t-1}=\bar{H}_{plot}$)。つまり、 $\hat{H}_{plot}$ は、植栽列の 1 番目にあって前々年の越冬期間中に雪害を受けなかった個体が期待される平均樹高である。各越冬期間の最大積雪深については、国道 451 号線（「四番川」）および道道 28 号線（「青山中央」）の道路テレメータ・データを用いた。

6. 統計解析

GLMM および GLM を用いた分析を実行するにあたり、統計ソフトは R ver. 3.2.2 (R Core Team 2014) を使用した。モデル選択では、総当たりによる説明変数の組み合わせによる各モデルの AIC (赤池の情報量基準) を求め、最小の AIC を示す組み合わせをベスト・モデルとした。最小 AIC との差 (ΔAIC) が 2 未満の場合は同等の説明力を持つモデルとみなすが、最少節約原理に基づき、説明変数の数が

もっとも少ないモデルをベスト・モデルとした (Crawley 2005; McCarthy 2007)。また、GLMM では、交互作用項 ($\overline{Size}_{plot} \times cSize_{t-1,ij}$ と $treatment \times cSize_{t-1,ij}$) がすべて除外された場合、傾きに作用するランダム効果を除外したランダム切片モデルに変更して再計算した。計算に使用した R のパッケージは *lme4* で、説明変数の総当たりによる各モデルの AIC の計算には *MuMIn* を用いた。使用した関数は *glmer*, および *glm* である。 $Size_t$ の分布は正規分布を、 $N_{damage,t}$ の分布はポアソン分布を仮定した。なお、直径成長については、全個体の樹高が 130 cm を超えたのが 2011 年であるため、2011 年以降のデータを評価対象とした。反復測定分散分析の解析には、R コマンダーのプラグインである EZR を使用した。

III. 結 果

1. 土壌の物理性

表-1 に土壌の物理性に関する試験結果を示す。飽和透水係数 K_s は試料間でばらついたが、値は $10^{-4}\sim10^{-8}$ cm/s オーダーが記録された。試験地の土壌は土木学会 (2008) に従えば難透水性に区分される。土壌三相分布は、気相率が 10% 未満で、固相率が高い典型的な重粘土の範囲に収まった。また、土壌採取時では、間隙率（液相率+気相率）は 51.5～59.8% の範囲にあり、間隙のほとんどを液相が占めていたことから、飽和度が平均 88.02% と高い値となった。乾燥密度は平均 1.416 g/cm³ で、粒度分析用の試料採取時に触感で簡易判定したところ、埴土から埴質壤土に該当した。粒度分析では、粒径の中央値がすべての試料で 3 μ m であった。日本農学会法によれば、同粒径値は粘土に相当する。森泉 (1998) では、重粘性土壌が農学会法の埴土（粘土含量>50%）に相当しているとしており、調査区の土壌もこれに該当する。

各処理区における土壌水分 (pF 値) の推移は、2009 年後半と 2011 年については処理間で差が不明瞭だったものの、2010 年における 40 cm 深と 2012 年については、畝上げ区が他の処理区より高い傾向が認められた (図-2)。耕耘区では、2010 年の 40 cm 深の場合、無処理区より高い傾向にあったが、2012 年については無処理区より低い傾向にあった。また 2010 年の無処理区と 2011 年の耕耘区では、真下 (1957) が報告した「pF 値が 1 を下回るとは

表-1. 試験地における土壌の透水性および物理性
Permeability and physical property of soil at study site.

Sample	K_s (cm/s)	土壌三相 Three phase distribution (%)				
		固相 Solid phase (A)	液相 Liquid phase (B)	気相 Gaseous phase (C)	乾燥密度 Dry density (g/cm ³)	飽水度 ^a Water saturation p.c. ^a (%)
#1	1.2×10^{-5}	48.45	48.51	3.04	1.512	94.10
#2	2.4×10^{-4}	40.26	49.63	10.11	1.312	83.08
#3	8.9×10^{-8}	42.66	49.82	7.52	1.424	86.89
Average	8.4×10^{-5}	43.79	49.32	6.89	1.416	88.02

^a 飽水度 = A/(B+C).

^a Water saturation percentage = A/(B+C).

飽和状態」といえる状況も出現した。なお、2009年のpF値について処理区と深さでそれぞれ有意差が認められた(処理区; $df=12$, $F=9.327$, $p=0.004$, 深さ; $df=12$, $F=7.559$, $p=0.017$)。2010年のpF値についても処理区と深さでそれぞれ有意差が認められた(処理区; $df=12$, $F=4.214$, $p=0.041$, 深さ; $df=12$, $F=19.253$, $p=0.001$)。

図-3に各区における造成当時の N_c 値を示す。同図では、各プロットにおいて繰り返し5カ所測定した結果を平均値で示した。無処理区では、深さ60cmまで他の処理区に比べ N_c 値が高い傾向にあり、深さ10~20cmにおいて、 N_c 値が5以上の硬い層がみられた。耕耘区と畝上げ区では、深さ40cmまでの N_c 値が低い傾向を示し、それ以深では N_c 値が5以上を示す地点が多かった。

2. 雪害と植栽木の枯損の発生状況

植栽木の枯死については、植栽直後に畝上げ区で1本が枯れたのみで、良好な活着を示した。これは、ポット苗の使用により、植栽時の根系の乾燥によるダメージ等がなかったためと考えられる。それ以降、2013年に無処理区で、2014年に畝上げ区でそれぞれ2本が枯死した。無処理区2本のうち1本はエゾヤチネズミ *Clethrionomys rufocanus bedfordiae* による食害、畝上げ区の2本のうちの1本は雪害による主軸の折損が原因であった。

図-4に、処理区別の雪害発生数の年推移を示す。植栽して初めての越冬後は、いずれの処理も多くの個体が雪害を受け、処理間でほとんど差が認められなかった。翌年以降は畝上げ区が他の2処理区と比べて、雪害を受けた個体数が常に少なかった。耕耘区では、2011年以降、雪害を受けた個体数が畝上げ区の2倍以上だった。

図-2. 処理区別の土壌水分の違い

Difference of soil water contents with different treatments.

各処理区の値は平均値を使用。2009~2010年のデータには標準偏差も付けた。Average values were used for each treatment. Standard deviation was attached for the data during 2009-2010.

3. 処理間による樹高成長、直径成長、および形状比の違い

樹高成長を説明する要因についてGLMMで評価したところ、いずれの年についても交互作用項を含まないモデルがベスト・モデルとして選択されたため、ランダム切片モデルに変更して再解析した。植栽年である2009年については、*treatment*のみが説明変数であるモデルがベスト・モデルとして選択された(電子付録付表-1)。ベスト・モデ

図-3. 各処理区の土壌硬度(N_c)
Soil hardness for each treatment plot (N_c).

図-4. 処理区別の雪害発生数の年変化

Yearly fluctuation of the number of damaged trees by snow with different treatments.

データは処理ごとの3反復合計値。2009年の冬は冬囲いしているため、2010年以降のデータと結んでいない。

Data were pooled for each treatment. Symbols were not connected between 2010 and 2011, since the trees were protected by snow-shelter during 2009-2010 wintering.

ルに $damage_{t-1}=1$ (雪害を受けなかった), $position=1$, $cH_{t-1}=0$ を代入した $\hat{H}_{plot}$ を用い, 図-5A に処理ごとの樹高成長曲線を示す。 $\hat{H}_{plot}$ は, 調査期間を通して処理間で大きな差は認められなかった。なお, 参考のため各個体の樹高成長曲線を電子付録付図-1 に示す。

図-5B に, $\hat{H}_{plot}$ と同様に推定した $\hat{D}_{plot}$ を用いて処理ごとの直径成長曲線を示す (ベスト・モデルは付表-2)。直径成長曲線は, 2011 年と 2012 年は無処理区<耕耘区<畝上げ区の順で $\hat{D}_{plot}$ が大きい傾向があり, 続く 2013 年と 2014 年では耕耘区の成長速度が低下して無処理区とほぼ同程度となった。

$\hat{H}_{plot}$ と $\hat{D}_{plot}$ から推定した処理区別の形状比 ($\hat{H}_{plot} / \hat{D}_{plot}$) の年次推移を図-5C に示す。いずれの処理区も, 形状比は年とともにほぼ低下する傾向が認められた。そして処理区間で形状比には明瞭な差が認められ, 畝上げ区<耕耘区<無処理区の順で高い傾向があった。

4. 雪害を受けた個体数 $N_{damage,t}$ を説明する要因

$N_{damage,t}$ に関する GLM 分析において, 当初想定した二つ

図-5. 一般化線形混合モデルによって処理ごとに推定された樹高成長曲線 (A), D 成長曲線 (B), 形状比の推移 (C) Change of growth curve of estimated tree height ($\hat{H}_{plot}$) and D ($\hat{D}_{plot}$), and slenderness ($\hat{H}_{plot} / \hat{D}_{plot}$) with different treatments.

成長曲線は, 樹高については $\hat{H}_{plot}$ を, D については $\hat{D}_{plot}$ を, そして形状比は $\hat{H}_{plot} / \hat{D}_{plot}$ を用いた。 $\hat{H}_{plot}$ および $\hat{D}_{plot}$ は, ベスト・モデル (付表-1, 2) に $damage_{t-1}=1$ (雪害を受けなかった), $position=1$, $cH_{t-1}=0$ を代入した値である。 $\hat{H}_{plot}$ and $\hat{D}_{plot}$ were estimated by coefficients shown in appendix Tables 1 and 2 ($damage_{t-1}=1, position=1, cH_{t-1}=0$).

の説明変数を含むモデルがベスト・モデルとして採択された (表-2; AIC は, 国道 451 号線では Full モデルが 60.5, $Snow\ depth_t$ モデルが 83.5 であり, 道道 28 号線では Full モデルが 58.7, $Snow\ depth_t$ モデルが 73.8 だった。両線に共通となる $\hat{H}_{plot}$ モデルでは 115.4, Null モデルは 131.1 だった)。このとき, $snow\ depth_t$ は正の効果を, $\hat{H}_{plot}$ は負の効果を与えていると推定された。

IV. 考 察

1. 試験地の土壌条件

重粘土地は, 下層に緻密で難透水性の土層をもつために停滞水を生じやすい (佐久間 1985)。今回, 植栽試験を行った牧野跡地でも, 畝上げ処理を行うために掘り込んだ窪地には降水がなくても水が溜まり, 土壌断面にはグライ層も観察された。乾燥密度は平均 1.227 g/cm^3 (地表下 20 cm) (表-1) で, 佐久間・赤沢 (1984) が報告した重粘土の範囲に収まる。間隙率は平均 56% で, 佐藤ら (2000) が報告した農作業機械が走行する麦畑の間隙率 (深さ 30 cm) の平均値 54.2% と同程度であった。土質は違うものの, 本調査地の間隙率は締固めを受けた畑地に匹敵する。飽和透水係数 K_s は $10^{-4} \sim 10^{-8}\text{ cm/s}$ オーダーと, 難透水性を示す値であった。表層土壌における粘土の割合が高いことも鑑みると, この牧野跡地では過湿になりやすい土壤であるといえ, グライ層の形成もこれを支持する。一般に, 透水性が低くて間隙率も低い土壤は, 樹木の生育に不適である (杉浦 1971)。畑作物でも, 正常な生育を得るためには気相率約 20% が必要で, 下限値は約 10% であろうと考えられている (中島 1979)。本研究の調査地の平均気相率 6.89% はその 10% を下回っており, 樹木の生育にとって劣悪な立地であることが示唆される。さらに本調査地となった場所は牧野跡地であることから, 過去に採草などのための機械走行によって土壌が締固められたと推定される。無処理区の 10~20 cm 深に現れた高い N_e 値 (図-3) は硬盤の存在を示し, 根の伸長に影響が出始める程度の値だった (福永ら 2003; 吉松ら 2002)。これらの状況は, 樹木の生育にとって劣悪な条件であることを示唆し, 樹木を植栽する際には, なんらかの植栽基盤整備が必要になるのは当然といえる。

表-2. 各越冬期間の処理ごとの雪害を受けた個体数 $N_{damage,t}$ を説明するベスト・モデルにおける各説明変数の推定値 Estimated coefficients in the best model for the number of snow damaged trees at wintering during $t - t-1$ year ($N_{damage,t}$).

Variables	Route 451		Prefectural road 28	
	Coeff.	z	Coeff.	z
$Snow\ depth_t$	0.00801	9.364	0.00898	9.384
$\hat{H}_{plot}$	-0.00505	-5.092	-0.00348	-4.039

$Snow\ depth_t$ は越冬期間中の最大積雪深, $\hat{H}_{plot}$ は各処理における越冬前の期待平均樹高。帰無モデルの残差逸脱度は 91.582 で, ベスト・モデルの残差逸脱度は国道 451 号線が 15.904, 道道 28 号線が 14.177 である。

$Snow\ depth_t$ and $\hat{H}_{plot}$ indicates the maximal depth of snow cover at wintering and expected mean tree height before the wintering for each treatment, respectively. Null deviance was 91.582, whereas residual deviance was 15.904 for Route 451 and 14.177 for Prefectural road 28, respectively.

土壌の物理性を改善するために畝上げ処理と耕耘処理を行ったところ、表層下 40 cm までは無処理区より相対的に土壌が柔らかくなり (図-3), そして土壌水分環境も変化した (図-2)。処理間の差は年によって不明瞭になることもあったが、2010 年および 2012 年では、畝上げ区の pF 値が他の処理区より高い傾向にあり、植物の生育条件としてほぼ適正な水分の範囲 (成長有効水とされる 1.5~2.7; cf. 真下 [1957]) に収まった (図-2)。一方、耕耘区では飽和状態になることもあり、とくに 2012 年には無処理区の pF 値より下回ることも多かった。これは、耕耘区の底面・柢面がともに難透水性の重粘土に囲まれていることによって同区へ入った降水や融雪水が排水されにくく、滞水状態を持続させることになったと推測された。畝上げ区の方は畝上げ側面が露出しているため、逆に排水されやすかったといえる。なお、2011 年に処理間差が不明瞭になったのは、この年が他の年よりも降水量が多かったためではないかと推察される (最寄りの AMeDAS 観測地点「空知吉野」における 6 月~10 月の降水量は、2009 年が 748 mm, 2010 年が 738 mm, 2011 年が 1014.5 mm, 2012 年が 834 mm)。したがって、重粘土地において、植物にとっての土壌の水分環境を改善するうえで、耕耘処理よりも畝上げ処理が適しているといえる。

2. コバノヤマハノキの成長と雪害への感受性に対する植栽基盤整備の効果

雪害は樹高成長と直径成長に大きな負の影響を与えていた (電子付録付表-1, 2; *damage* の係数推定値は雪害を受けていない個体に加算される)。植栽後、最初の越冬期間に雪害を受けた個体数は、処理間で大きな違いは認められなかった (図-4)。これは樹高が一律に低いため積雪中に埋没し、融雪期に沈降圧を受けた雪圧害であろう。沈降圧による雪圧害は、一般に傾斜地よりも平坦地の方で被害が大きいといわれ (福地 2012; 酒井 1977), 本調査地も 10° 未満と傾斜が緩いため、被害が多かったと推察される。四手井 (1954) によると、樹高が積雪深を越えても、樹体に着雪することで樹木はその荷重で幹折れなどの冠雪害を受けることがあるという。今回の調査では、雪害を受けた個体数についての統計解析の結果、雪害は積雪深が深いほど発生しやすいものの、樹高が高くなると雪害を受けにくくなる傾向が認められた (表-2)。これは同じ積雪深でも、樹高が高いと積雪面を越えることで冠雪害を受けにくくなることを示唆しているものと推測される。なお、たとえば調査期間後半の 2011~2012 年の冬季は、石狩北部や空知南部において記録的な大雪となり (金田ら 2012), 本調査地においても多数の個体が被害を受けた (図-4)。年々樹高が高くなっても、記録的な大雪のときには樹高の高さの優位性が相対的に低下したと推察される。

各処理区における 2 回目以降の越冬中の雪害に対する感受性は、畝上げ区が最も低い傾向になるなどの違いがみられた (図-4)。雪害への感受性は形状比と密接な関連があり、樹高が同じでも、形状比が高ければ雪害を受けやすい (金子ら 2000; 四手井 1954; 山崎・國崎 2014)。樹高成長は、調査期間中、処理間で明瞭な差は検出できなかった (図-

5A)。一方、直径成長は常に畝上げ区が他の 2 処理区に勝り、また耕耘区の直径成長は、調査期間の後半には無処理と同様の値が検出された (図-5B)。本研究のコバノヤマハノキでは、畝上げ処理により土壌の通水性、通気性が改善され根系が発達したことで、樹高成長以上に肥大成長が促進されたと考えられる。処理間で樹高に大きな違いがみられず、肥大成長に違いが表れたことで、当然、形状比も処理間で変わる。本研究において越冬中の主軸折れなどの雪害は、畝上げ区と比べ、無処理区と耕耘区で顕著に発生した (図-4)。そして畝上げ区における形状比は、他の 2 処理区のそれより常に低い傾向があった (図-5C)。そこで、調査期間中のデータをプールして、越冬期間中の雪害発生日数 ($N_{\text{damage},t}$) と越冬前の形状比 ($\hat{H}_{\text{plot}} / \hat{D}_{\text{plot}}$) を対応させると有意な正の相関関係が認められた (図-6)。本研究で対象としたコバノヤマハノキの樹高は、成木のステージには達していないため単純に成木とは比較できないが、一般に形状比が 70~80 以上になると冠雪害を受けやすくなることが高木性針葉樹では報告がある (金子ら 2000; 山崎・國崎 2014)。したがって、処理間での形状比の違いが雪害への感受性に反映したものと推察される。なお、畝上げ区の形状比の優位性は樹高が低い植栽初期に顕著にみられる傾向があった (図-5)。これは植栽 5 年後には樹高 500 cm を超える個体がほとんどとなり (電子付録付図-1), 最深積雪深を大幅に上回ったことから、樹高が低く雪害への感受性が高い生育ステージはほぼ脱したためと考えられる。

以上の結果から、雪害回避と重粘土における土壌物理性改善の両面を考慮すると、耕耘処理では滞水状態が維持 (持続する) されるという問題点がみられたが、畝上げ処理は通水性・通気性の改善が図られ、初期成長時の形状比から

図-6. 越冬期間中に雪害を受けた個体数と越冬前の形状比の関係 (2011~2014 年)

Relationship between slenderness and the number of trees damaged by snow (2011–2014).

○, 畝上げ区; △, 耕耘区; □, 無処理区. データ数は、樹高が胸高を超えた 2010 年以降のデータを使用しているため、4 冬 × 3 処理で $n=12$. 回帰線は一般化線形モデルによる。使用したソフトは R ver. 3.2.2, パッケージは *lme4*. 応答変数は Poisson 分布を仮定した。切片のみのモデルの AIC (57.1) と比較したところ、固定効果を含むモデルの AIC (53.8) の方が小さかった。推定式 $N_{\text{damage},t} = e^{-5.626 + 0.074 \times \text{slenderness}}$.

○, mound; △, plowed; □, control. Data set was $n=12$ (= 4 winterings × 3 treatments), because trees exceeded 1.3 m in height since 2010. Regression line was derived by GLM. We used R version 3.2.2 for GLM analysis in the package *lme4*. Poisson distribution was assumed for the response variable. AIC of the model with explanatory variable (53.8) was smaller than that of null model (57.1). Regression line $N_{\text{damage},t} = e^{-5.626 + 0.074 \times \text{slenderness}}$.

雪害回避に効果があったと考えられる。

今回の植栽試験では、コバノヤマハンノキの成長に対する植栽基盤整備の効果を統計的に検証した結果、畝上げ処理により形状比が低下し、植栽初期の雪害の感受性を低下させる効果が検出された。多雪地において雪害への感受性が高い樹種 (cf. 福地 2012) では、雪害を受けにくい樹高に成長するまでにより多くの年数が必要と考えられるため、コバノヤマハンノキに比べて各処理間で樹高成長や生残率に大きな差が生じると予想される。重粘土地では停滞水を生じやすいと佐久間 (1985) が指摘する通り、本研究の耕耘区で同様の結果が示された。そのような重粘土の土地に樹木苗を植栽するに当たっては、畝上げが樹木苗にとって生育環境の改善効果をもたらすと考えられる。畝上げのために掘り取ったところを明渠として活用すれば、さらに土壤水分の改善に貢献することが期待できる。

なお、本研究は植栽後 6 年間の初期成長に関する調査結果である。今後も継続して調査を行い、年数が経過して植栽木がより大きく成長した後の植栽基盤整備の効果も明らかにしていきたい。また、福地 (2012) では、多雪地に適した樹種としてハンノキ類 (コバノヤマハンノキは扱っていない) とヤチダモをあげる一方、雪害を受けやすいながらも生存率が高い樹種のミズナラやカシワについては、雪害回避を施すことで選択可能と指摘している。一般に森林再生を目指した植樹祭が企画される場合、多様な樹種が用いられることが多い。そのため植栽に利用可能な樹種を増やしてゆくうえで、これらの樹種を対象とした評価も必要とされる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、北海道水産林務部森林環境局森林活用課および石狩振興局森林室道民の森課には調査地の提供の便を図って頂いた。(株)北海道造園コンサルタントには調査地において植栽基盤整備を実施して頂いた。北海道立総合研究機構 (道総研) 地質研究所の加瀬善洋研究職員には粒度分析を行って頂いた。植栽および植栽木の調査では道総研林業試験場の伊藤実、長坂有、内山和子の各位に、下草刈りやシカ除け柵の設置などの保守管理では伊藤奈穂子、熊谷正江、大箭敏雄、佐藤正一、所ひとみ、南山真奈美、早坂一文、山坂和義の各位に手伝って頂いた (敬称略、五十音順)。道路テレメータ・データについては、北海道開発局札幌開発建設部滝川道路事務所工務課に国道 451 号線の「四番川」を、北海道建設部建設政策局維持管理防災課維持グループ (雪対策) には道道 28 号線の「青山中央」を提供して頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- Crawley MJ (2005) Statistics: An Introduction Using R. John Wiley & Sons Ltd.
 土木学会 (2008) 土質試験のてびき [改訂版]
 福永健司・石塚 望・富樫勇介・横島朋子・漆崎隆之・長谷川秀三 (2003) コナラの根系分布と土壤硬度との関係. 日本緑化工誌 29: 261-264
 福地 稔 (2012) 多雪地に植栽した広葉樹の成長と雪害. 光珠内季報

- 165: 8-12
 北海道開発局農林水産部 (1967) 重粘土構造分類調査報告書 (開拓基礎調査)
 北海道立総合研究機構林業試験場 (2011) 土地改変地に造成された緑地公園 (札幌市) に植栽する樹種の選定と今後の管理方法に関する基礎的研究
 北海道水産林務部森林環境局森林活用課 (2008) 道民の森・神居尻地区牧野跡地における「水源の森づくり」について
 細川 寿 (2004) 大豆の耕うん同時畝立作業機による重粘土転換畑の湿害回避技術. 農業機械学会誌 66(5): 14-16
 石狩振興局森林室 (2013) 「水源の森」(道民の森神居尻地区) について. 北方林業 65: 318
 岩間秀矩・渡辺治郎・小川和夫 (1983) 寒冷地域における重粘土草地の灌漑 (I) 北海道オホーツク海沿岸地域における重粘土の水分特性と牧草の生育. 農業土木学会誌 511: 97-203
 金田安弘・永田泰浩・丹治和博・松岡直基・尾関俊浩 (2012) 2011-2012 年冬期に北海道岩見沢市を中心として発生した大雪について (その 1) 一大雪の概要と気象の特徴一. 北海道の雪氷 31: 115-118
 金子智紀・石田秀雄・金澤正和 (2000) 秋田県沿岸南部におけるクロマツの冠雪害について. 東北森林学会誌 5: 97-100
 菊地 健 (1983) リッパー地捨てについて. 光珠内季報 58: 20
 真下育久 (1957) 森林土壌の水湿状態 (pF 値). 林野土壌調査報告 8: 43-66
 松田 豊 (1980) 北海道の特殊土壌とその改良 (客土). 農業土木学会誌 48: 485-489
 McCarthy MA (2007) Bayesian Methods for Ecology. Cambridge University Press
 森泉昭治 (1998) 土壌の物理性. 農作業研究 33(4): 221-226
 中島 誠 (1979) 土壌の通気性と植生. (土壌の物理性と植物生育. 土壌物理研究会編, 養賢堂)
 R Core Team (2014) R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/> (2016 年 7 月 15 日確認)
 酒井 昭 (1977) 植物の積雪に対する適応. 低温科学 生物篇 34: 47-76
 佐久間敏夫 (1985) 重粘土. Urban Kubota 24: 12-19.
 佐久間敏夫・赤沢 傳 (1984) 日本の特殊土壌 (その 8) 一重粘土 (畑) 一. 農業土木学会誌 52: 233-239
 笹島昭弘 (1974) 大型機械地捨てによるトドマツ造林の成績について. 昭和 47 年度林業研究発表大会論文集: 202-203
 佐藤弘和・長谷川昇司・長坂 有 (2000) 土壌物理性からみた畑地からの浮遊土砂発生機構と林地による捕捉効果. 森林立地 42: 47-52
 佐藤啓祐 (1980) 裏日本多雪地の積雪環境と森林雪害. 森林立地 21: 10-15
 四手井綱英 (1954) 雪圧による林木の雪害. 林業試験場研究報告 73: 1-89
 清水裕士 (2014) 個人と集団のマルチレベル分析. ナカニシヤ出版
 新村義昭・伊藤重右エ門・成田俊司・清水 一 (1981) 北海道における山腹植生工法の研究 (1) 一道南・道央地域での既施工地の実態一. 北海道立林業試験場報告 19: 151-177
 杉浦 勲 (1971) 土壌の物理的性質. 光珠内季報 8: 46-53
 杉浦 勲・薄井五郎 (1976) 北海道の重粘土地域における耕耘地捨て. 森林立地 17: 10-14
 棚橋生子・福地 稔・佐藤孝弘・眞坂一彦・長坂 有・佐藤弘和 (2011) 牧野跡地に植栽した樹木の生育について. 日本林学会北海道支部論文集 59: 9-11
 植村誠次 (1964) 肥料木と根粒菌. 地球出版
 山根玄一 (1983) 立地条件からみたトドマツ人工林の生長の地域性. 光珠内季報 55: 1-6
 山崎 遥・國崎貴嗣 (2014) スギ高齢人工林における冠雪害発生と林孔との関係. 日林誌 96: 117-120
 吉松弘行・川満一史・瀬尾克美・長谷川秀三・村中重仁 (2002) 斜面の表層構造調査用の簡易貫入試験機について. 平成 14 年度砂防学会研究発表会概要集: 392-393