

44年生トドマツ林分における水食い程度と心材含水率の実態解明および 心材含水率に対する遺伝・立地・外傷要因の影響

米澤美咲*・大野泰之*・滝谷美香*・渡辺一郎*・内山和子*
津田高明*・角田悠生*・蝦名益仁*・松本和茂**・石塚航***

Factors affecting wetwood and/or moisture content of heartwood of 44-year-old Sakhalin fir (*Abies sachalinensis*) stand, especially from the genetic, microtopographic, and injury-related perspectives

Misaki YONEZAWA*, Yasuyuki OHNO*, Mika TAKIYA*, Ichiro WATANABE*, Kazuko UCHIYAMA*,
Takaaki TSUDA*, Yuuki TSUNODA*, Masuto EBINA*, Kazushige MATSUMOTO**, Wataru ISHIZUKA***

要旨

トドマツの心材含水率が高くなる“水食い”は、建築材利用を推進する上でしばしば問題となるが、発生状況の把握や評価方法の確立は十分とは言えず、水食い形成に関わる要因についてもいまだ定説がない。そこで、豊頃町にある火山灰土壌に成林する44年生のトドマツ次代検定林において、水食い程度あるいは心材含水率の実態を調査し、その発生に関わる要因を、遺伝・立地環境・個体の外傷に着目し検討した。間伐木52個体について心材含水率と水食い材割合を測定したところ、それぞれ平均89.36% (39.51–193.43%)、12.42% (0.00–64.35%)であった。心材含水率の値をもって一律に水食い材と正常心材を区別することはできなかったが、心材含水率と水食い材割合は有意な正の相関を示し、特に心材含水率が124%を超えると、水食い材割合の増加が急激となった。間伐個体52本の胸高直径 (d) とFFTアナライザー測定による横打撃共振周波数 (f) から心材含水率を推定するための換算式 (推定精度 $r^2 = 0.58$) および適用可能な d の範囲を決定した ($22.5 \text{ cm} \leq d \leq 39.2 \text{ cm}$)。調査プロット内全立木 ($N = 229$) のうち、この範囲に含まれた147個体について心材含水率を推定した。この推定心材含水率にみられる遺伝的影響の大きさを知るため、空間的な偏りも加味した育種価を推定したところ、明瞭な空間構造は検出されず、一定程度遺伝の影響が存在していることが明らかとなった。次に、推定心材含水率を応答変数、立地要因として立木周囲の土壌条件 (含水率・硬度・カリウム含有量) と地形条件 (斜面相対位置・曲率・地形湿潤指数 (TWI; Topographic Wetness Index)), 外傷要因として落枝痕数・傷面積を説明変数とした一般化線形モデルによりモデル選択を行った。その結果、ベストモデルは候補要因のうち全カテゴリー (土壌・地形・外傷要因) より構成され、選択された変数は土壌含水率・TWI・傷面積だった。ベストモデルにおいて推定された係数から、土壌含水率の高い地点や湿潤度の高い地形では水食いリスクが高い傾向にあり、大きな外傷は水食いリスクを高めることがわかった。以上より、水食いには遺伝的影響とともに複合的な因子が関わっていることが示唆された。

キーワード：水食い材，心材含水率，土壌，空間解析，遺伝解析

* (地独) 北海道立総合研究機構林業試験場 Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Bibai, Hokkaido 079–0198

** (地独) 北海道立総合研究機構林産試験場 Forest Products Institute, Hokkaido Research Organization, Asahikawa, Hokkaido 071–0198

*** (地独) 北海道立総合研究機構 Hokkaido Research Organization, Sapporo, Hokkaido 060–0819

[北海道林業試験場研究報告 第62号 令和7年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 62, March, 2025]

はじめに

樹木の中には、心材に水分が集積する現象（wetwood）が生じる樹種や属があり（Lagerberg 1935；Coutts and Rishbeth 1977；Worrall and Parmeter 1982）、針葉樹ではモミ属（*Abies*）やツガ属（*Tsuga*）、スギ（*Cryptomeria japonica*）など、広葉樹ではハコヤナギ属（*Populus*）やニレ属（*Ulmus*）、トネリコ属（*Fraxinus*）、コナラ属（*Quercus*）などで報告されている（Ward and Pong 1980；Hartley et al 1961；中田 2014, 2018；矢沢ら 1963；Yazawa et al 1965；石井・深沢 1987；蕪木 1973 など）。wetwoodが生じる樹種のうちトドマツ（*Abies sachalinensis*）は、北海道の人工林面積の52%を占める主要造林樹種であり（北海道水産林務部 2024a）、製材需要も近年増加している。トドマツにおけるwetwoodは「水食い材」として知られており、水食い材によって製材品のロットでの含水率が不均一になることから、構造部材である柱や梁のような比較的断面の大きな製材品では、人工乾燥の所要時間の長期化や、乾燥不足などの発生リスクが高まることが課題となっている。このため、トドマツの乾燥製材としては、より乾燥が容易な羽柄材や集成材ラミナなどの比較的断面の小さな製品が主な生産品目となっている（中野 2019）。ウッドショックやウクライナ侵攻などと関係したトドマツ建築材需要の急増（松本 2022, 2024）が見られた2022年においても依然として、トドマツの製材品に占める構造材の用途割合は約7%と低く（北海道水産林務部 2024b）、需要に対応しきれていない。この一因として、前述の水食いも影響していると考えられる。乾燥後の水食い材と非水食い材との間に強度の違いは認められず、水食い材であっても乾燥すれば同様の使用が可能であることから（吉本・信田 2001）、心材含水率のばらつきを把握することができれば、断面の大きな製材への利用拡大に大きく貢献できると考えられる。また、トドマツの水食いは冬季に樹幹が縦方向に割れる「凍裂」という現象の原因ともされている（石田 1963）。トドマツの凍裂は北海道全域で発生し、材の価値を著しく低下させることからしばしば育林上の問題となっている（松崎 2006；今川・真田 1996；井城・田村 2010）。

これまで水食い材の評価には、心材含水率を基準に水食い材と正常心材を規定する取り組みと、肉眼で水食いを区別する取り組みが行われてきた。前者では、正常な心材の含水率が30～50%であることより50%以上を水食い材とする研究（蕪木 1973）や、心材小片含水率の頻度分布から正常心材と水食い材を区別し、両ピーク中間の約120%を閾値とする研究（石井・深沢 1987）が挙げられる。客観的な判断基準ではあるが、正常心材と水食い材ピークの分離ができないケースもあり（石井・深沢 1987；飯塚ら 2000）、再現性の検証が不十分であることや、人工乾燥を伴うため評価環境を選び、多数のサンプルに対して適用しづらい点が課題である。後者で

は、木口面における材色を基準に肉眼で水食い材部を識別することを共通として、伐倒面における水食い材の有無を多数の林分にわたり調査した研究（松崎 2006）や心材に占める水食い材部の割合として水食い程度を評価した研究（飯塚ら 2000；井城ら 2010）が挙げられる。比較的簡便な方法であり、製材現場などにおける応用が見込まれるものの、水食い材部の判断ができるタイミングが冬季・伐倒直後などに限られることや、前提となる心材含水率との関連が十分でない点が課題である。いずれの方法も、評価の妥当性について検証が必要である。

トドマツの水食いおよび心材含水率には、遺伝的影響があることが報告されている（飯塚ら 2000；真田ら 1987, 1988；井城・田村 2010；井城ら 2010）。それゆえ、遺伝的な改良によって水食いのリスクを低減できる可能性があり、林木育種分野において『心材含水率を小さくすること』がトドマツの育種目標のひとつとして設定された。実際に、この取組みによって優良な系統の選抜が実施されている。たとえば、石塚ら（2015）は、根釧地域における優良な系統を選抜し、選抜木から生産される苗木を用いて造成した林分では、従来の苗木を用いた林分よりも心材含水率の指標について1.9%の低減が期待されると報告している。また、育種材料を用いて心材含水率を評価するにあたり、FFTアナライザーによる横打撃共振周波数を用いた非破壊的な測定方法も開発が進められている（釜口ら 2000, 2001；井城・田村 2010）。しかし、汎用性がまだ十分に検証されていないことや、推定精度の向上が望まれる点が課題である。

トドマツの水食いに関係する立地環境としては、広域スケールよりも土壌条件や微地形といった局所スケールの要因がより影響を与えているとされる（石井・深沢 1987；片寄 1984；松崎 2006）。たとえば、道南を除く全道に渡る水食い発生調査を基にした研究では、林分ごとの水食い材出現率には、地域性や気象、標高、斜面方位といった広域スケールの要因との関係は認められず、地下水位の高い林分でより水食い材出現率が高かった（松崎 2006, 2007）。地下水位や透水性などの土壌条件が心材含水率に影響している可能性は、ほかの研究でも指摘されている（真田ら 1987；1988）。また、トドマツとスギでは、心材に含まれるカリウムの量と心材含水率に正の相関関係があることが知られている（中田 2018；石井・深沢 1987；石井ら 1984；富田ら 2004；古川 1964；西澤ら 2003）。そのうちスギ心材の高含水率化（いわゆる黒心や黒化現象と呼ばれる）については、炭酸カリウム集積がその要因であると報告されている（阿部ら 1994）。黒心は従来、土壌含水率が高い立地（谷筋や斜面下部）で出現しやすいと言われてきたが、土壌中カリウム含有量が高い立地では斜面上部であっても出現しやすいことが報告された（西澤ら 2003）。しかし、トドマツにおけるこれら立地要因の影響は未解明である。土壌要因以外には、折れた枝や折損部から心材内部へ

異常水分が浸透する「枝水食い」が生じるとの説があり (Lagerberg 1935; 北村 1941; 石田 1963), 節・樹脂条・入り皮などの欠点とともに現れることも指摘されている (吉本・信田 2001)。このように, 水食い材の発生には, 土壌条件や地形条件が, あるいは立木の傷が影響している可能性がある。

以上のことから, トドマツの建築用材としての利用拡大が期待されている現在, 将来的な水食い材の低減に向けて, 一林分内での水食い出現実態の把握や, 水食い材発生リスクを高める要因を検討することが重要になる。そこで本研究では, 各立木の遺伝情報が判明しているトドマツ次代検定林のひとつにおいて, 間伐木における水食い材の発生程度と心材含水率との関係を明らかにするとともに, FFTアナライザーを用いて心材含水率を非破壊推定し, 推定心材含水率に対する遺伝要因と立地要因, 外傷要因の影響を評価することを目的とした。

材料と方法

1. 検定林および調査プロット概要

調査地は, 豊頃町にある道有林十勝管理区203林班80小班 (北緯42.731度, 東経143.491度) に位置するトドマツ準次代検定林A37内の一区画である (図-1左)。この検定林は, 1980年に造成され, 2023年には第二世代精英樹候補木選抜が完了している (石塚ら 2024a)。なお, “準”次代検定林とされるのは, 両親が精英樹由来ではないためである。植栽木は, 第一世代精英樹を母親系統とし選抜された原木から自然交配によって得られた検定苗, ならびに本試験地を有する地域などにおいて植栽当時用いられていた事業用苗から構成され, 斜面上下方向に苗間1.8 mで植栽されている。配植は家系及び事業用苗ごとに10本×3列の30本をひとまとまりとしたプロット植栽である。植栽時は本数密度3,000本/haで, 2023年

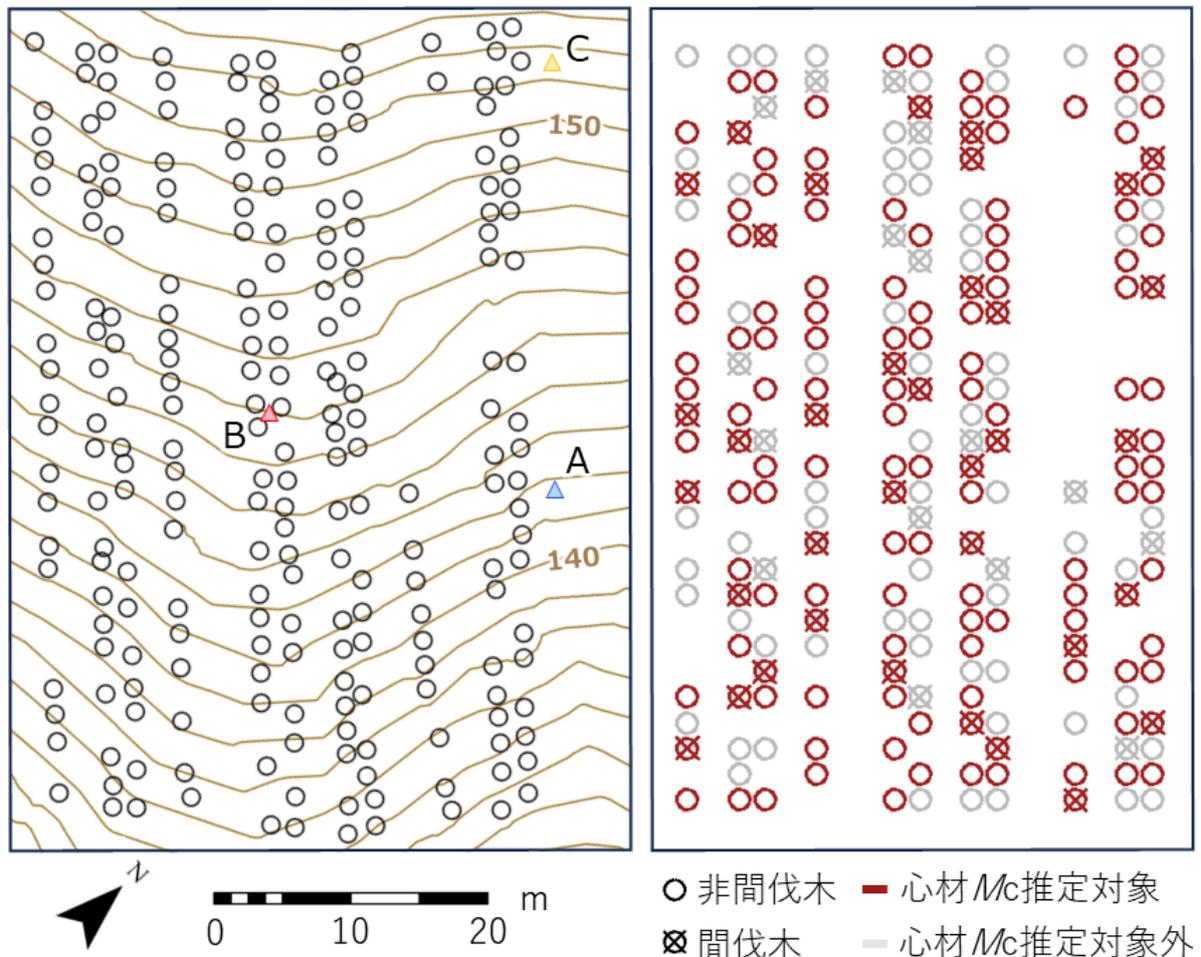


図-1 調査地概要

左: 高精度測量した立木位置 (計229本) と立地要因調査地点。図中の数字は0.5 mメッシュで測定した航空測量データから取得した標高を示す。右: 間伐および解析対象の情報を含む立木位置 (計229本)。地点A・Bにおいて土壌飽和透水係数と土壌硬度を測定し (付録図-1), 地点Cにおいて土壌含水率の時系列変化を測定した (付録図-2)。Mc: 乾重基準含水率。カラー版はホームページ参照。

までに2回の列状間伐が行われ、1列あるいは2列が伐採された。これまでの検定林A37全体の概況については石塚ら(2024a)による報告が詳しい。今回の調査地は、主尾根斜面横に派生する微尾根地形上の標高約135~153 mにおいて21家系プロットからなる長方形サイトで、調査開始時点で229本の生立木から構成されていた(図-1)。土壌タイプは、十勝地方のほぼ全域に分布する火山性土壌であるアロフェン質黒ボク土亜群の、淡色アロフェン質黒ボク土であり、表層の有機物含量は低く土色が淡い特徴がある(農研機構日本土壌インベントリー 2024;橋本 2011)。現地での観察では、15 cmほどの深さに新規火山灰とみられる白い層がみられ、40 cmほどの深さから黄土色になる層もみられた(図-1;地点B)。下層植生は少なく、一部斜面上側にササ属(*Sasa*)が生育する。また、本検定林では、事前調査によって残存させる樹木を決めたうえで、これまでの間伐列に対して斜めに交差する列での定量間伐(目標間伐率25%)が行われ、本調査プロットでは、2023年7月11日に52本が間伐された。

2. 現地調査

本試験地での調査は、立木が44年生となる2023年に実施し、5月11日から間伐が行われた7月11日までの間に行った。間伐前の調査では、全立木229本を対象に、GNSS受信機(R2, Trimble社)によって測位した基点より、レーザー距離計(TruPulse 360, LTI社)を用い、個体位置の緯度経度を取得した(図-1)。次に、心材含水率を非破壊推定するために、胸高直径(d :単位cm)・横打撃共振周波数(f :単位Hz)を6月に測定した。 d は直径巻き尺を用いて0.1 cm単位で測定した。 f 値は加速度分析器(FFTアナライザー SA-A1, リオン社)を用いて胸高(地表高約1.3 m)で測定した。各個体について、斜面方向に直交する2方向において、加速度計と打撃部が約120度となるように重量246 g、加振面φ2.3 cmのハンマーで振動を与えた。1か所につき2回の打撃を行い、波形データの平均値から f を計算した。測定者の技術・経験が計測データに影響を及ぼすため(基盤整備センター 2006)、同一の調査者が一貫して測定を行った。また、心材含水率に影響する候補要因のうち外傷要因として、落枝痕数と傷面積を5月に測定した。落枝痕数は、胸高位置を中心に高さ方向で5 cm幅の樹体周囲にあるものをカウントした。傷面積については、内樹皮まで到達するような傷のみを測定対象とし、地表高2 mまでの範囲にある傷の縦と横の長さを測定後、長方形に近似しその面積を求めた。さらに、心材含水率に影響する候補要因のうち土壌条件として、土壌含水率・土壌硬度・土壌カリウム含有量を全立木周囲で測定した。土壌調査の測定方法の詳細は「3.分析方法(3)解析対象木周囲の土壌分析」で述べる。

3. 分析方法

(1) 心材含水率・水食い材割合の測定

全立木229本のうち間伐木52本について、心材含水率および水食い材の割合を調査した(図-1)。水食い頻度は地表高0~4 mで最大となることから(蕪木 1973)、調査木は水食いの影響が最も大きいと考えられる1番玉(4 m材)を対象とした。

各調査木を対象に、地表高1.3 m・2.0 m・3.9 mから含水率測定用の4 cm厚円板を採取した。また、地表高1.3 mでは、水食い材割合測定用の1 cm厚円板も4 cm厚円板とずらして採取した。辺材や水食い材は凍結状態下では暗い鉛色を示し、通常的心材と肉眼で容易に識別できるため(石田 1963;井城ら 2010)、水食い材割合測定用の円板は、チャックつきビニール袋で密閉した状態で測定まで冷凍保管した。4 cm厚円板は鋸断後速やかに色相の違いから心材と辺材を区別し、それぞれ6~12片の約4 cm角小片にナタで分割し、以下の式(1)に従い乾重基準含水率(Mc ;単位%)を計算した。

$$Mc = \frac{W_g - W_0}{W_0} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

ここで W_g (g)は生材質量、 W_0 (g)は乾燥質量である。小片ごとの Mc を計算したほか、個体平均を算出する際には各円板の心材ごとに、すべての小片の合計値を用いて Mc を算出した。サイズが小さく、辺材部が極端に少ない円板に関しては、分割せず円板の含水率を心材の Mc として扱った。次に、冷凍した1 cm厚円板について心材部と水食い材部を肉眼で識別後マーキングし、スキャナーで断面を読み取り、Image J (Rasband 1997-2012)を用いて心材部に占める水食い材割合(%)を算出した。

(2) 心材含水率の非破壊推定

横打撃共振法では、FFTアナライザー測定による f と打撃部直径 d から得られる $1/df$ より心材含水率を推定する(釜口ら 2000, 2001;井城・田村 2010)。横打撃共振法による心材含水率の推定では、推定精度に個体サイズおよび測定に用いたハンマーの質量が影響する(陶山ら 2012)。そこで、心材含水率の推定に用いる d の範囲を適正に決めるため、地表高1.3 mにおける、間伐木の円板で実測した心材含水率と各個体2か所で求めた $1/df$ の平均値との関係を d の範囲を変えながらそれぞれ回帰し、決定係数(r^2)を求めた。両者の関係の変化については結果で後述するが、先行研究(井城ら 2010)よりも r^2 が高くなる d の範囲は約23 cm以上であり、下記の換算式(2)を得た。最終的には、明らかに正しく推定が行えない d 最大個体を考慮して $22.5 \text{ cm} \leq d \leq 39.2 \text{ cm}$ の範囲にある個体($N = 147$)を対象に心材含水率(心材 Mc)を推定し、これを胸高位置における推定心材含水率とした(以降、単に推定心材含水率として表す)。

$$\text{心材 } Mc = 3.0137 \times \frac{1}{df} - 53.986 \dots \dots \dots (2)$$

(3) 解析対象木周囲の土壌分析

事前検討の際、本調査地内でごく緩い尾根・沢地形であり比較的地形の異なる地点A・Bの両地点において、深度0～30 cmの飽和透水係数 (K_s ; 単位 cm sec^{-1}) と土壌硬度に有意な負の相関が認められ (付録図-1), 透水性が低い土壌ほど土壌硬度が高い傾向があるものと考えた。このため、本調査では測定が容易な土壌硬度を土壌の透水性の代替とし、深度0～30 cmにおける最大土壌硬度を透水性の低さの指標として用いた。

土壌含水率は、TDR水分計 (CS-650, Campbell) および土壌水分モニターレコーダ (SMLG-650-01, 株式会社 シーエス 特機) を用いて、誘電率から土壌の体積含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) を推定した。5月に各トドマツ個体斜面下側の1か所、深さ30 cmで測定を行った。なお、深さ30 cmでは、時系列による土壌含水率の変化は少ないことが事前の検討により分かっている (付録図-2)。土壌硬度は、トドマツ個体斜面下側の1か所において6月に測定した。デジタル貫入式土壌硬度計 (DIK-5531, 大起理化工業) を用いて、土壌の深度別硬度プロファイルを1 cmごとに取得した。柄であるスピンドルは長さ60 cm, 貫入させるための先端のコーンは頂角30度、底面積 2 cm^2 のものを使用し、深さ30 cmまでの土壌硬度として貫入抵抗値 (kPa) を1 cmごとに測定し、最大値を記録した。なお、本試験で用いたデジタル硬度計を含む貫入式土壌硬度計の使用評価では、人為的誤差の影響で測定限界付近のデータにばらつきが生じやすく、作業員個々の能力が測定結果に影響を与えるため (江波戸 2021), 深度0～30 cmの土壌硬度測定のために60 cmのスピンドルを用い、同じ調査者が一貫して測定を行った。土壌カリウム含有量測定のため、5月に各立木周囲3か所から、検土杖 (DIK-1640, 大起理化工業) を用いて深さ25～35 cmの土壌を採取し、イオンメーターによる測定まで封筒で風乾保管した。2024年1月に中山ら (2018) の手法に則り、小型カリウムイオンメーター (LaquaTwin B-731, HORIBA) による土壌カリウム含有量の簡易測定を行った。これは、フレーム式原子吸光光度計 (AA280FS, VARIAN) を用いた従来法による土壌の交換性K ($10^{-2} \text{gK}_2\text{O kg}^{-1}$) を小型カリウムイオンメーターで測定した K^+ 濃度 (mg L^{-1}) で回帰した手法であり、以下の (3) 式で表される。

$$Y = \frac{X_1}{X_2} \times a + b \dots \dots \dots (3)$$

ここでY: 従来法での交換性K ($10^{-2} \text{gK}_2\text{O kg}^{-1}$), X_1 : 簡易法での供試液測定値 (mg L^{-1}), X_2 : 簡易法でのブランク値 (mg L^{-1}), a: 傾き, b: 切片である。Y \geq 40のとき a = 57.1, b = -54.5, 相関係数rは0.990であり, Y < 40のとき a = 49.2, b = -43.0, 相関係数rは0.944である。今回測定した土壌はい

ずれもY < 40であったので、後者の傾きと切片を用いて計算した。測定では、風乾した2 mm以下の粒径の土壌10 gに、pH7.0に調整した 1.0 mol L^{-1} の酢酸アンモニウム溶液を20 mL加え、10分間振とう後、15分ほど静置した。上澄み液をイオンメーターセンサー部に滴下し、同量の脱塩水で2倍希釈し十分混合した状態で X_1 を測定した。供試液の測定ごとに 1.0 mol L^{-1} の酢酸アンモニウム溶液と等量の脱塩水の混合液を滴下し、測定直前のブランク値 (X_2) を測定した。得られた値を式 (3) に当てはめ、各土壌サンプルの交換性Kを推定した。全立木周囲で測定した各土壌項目は、局所点を均し平滑化することを目的に、GISソフトを用いて自然近傍 (Natural Neighbor) 法による内挿補間を行い、1 mメッシュのラスターデータを取得し、個体周囲4 m以内の平均値として各個体にデータを与えた (図-2)。本解析には、空間解析ソフト ArcGIS Pro 3.1.2 (ESRI社, USA) の Spatial Analyst を使用した。

(4) 解析対象木周囲の地形解析

心材含水率に影響する候補要因のうち地形条件として、斜面相対位置・曲率・地形湿潤指数 (TWI; Topographic Wetness Index) を取得した。地形条件は国土交通省国土地理院が管理する航空レーザー測量 (LiDAR; Light Detection and Ranging) データを利用した。LiDARはALS70 (ライカ社) を用い、点群密度約3点/ m^2 で取得された点群データである。この点群データより0.5 mメッシュの数値標高モデル (DEM; Digital Elevation Model) を作成した。作成したDEMより、調査プロット内229本の立木のうち、一番標高が高い個体が1, 低い個体が0となるよう、個体ごとの調査区内での斜面相対位置を計算した。地形の凹凸を表す指標である曲率 (C) は、ArcGIS Proを用いて標準曲率として式 (4) ~ (6) より算出した。

$$C = -2 (D + E) \times 100 \dots \dots \dots (4)$$

$$D = \frac{H_x - H}{d^2} \dots \dots \dots (5)$$

$$E = \frac{H_y - H}{d^2} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 H_x : 計算対象セルに水平方向で隣接するセルの標高の平均値 (m), H_y : 計算対象セルに斜面方向で隣接するセルの標高の平均値 (m), H: 対象セルの標高 (m), d: セルの一辺の距離 (m) である。斜面位置によって生じる土壌水分傾度の指標であるTWIも同様にArcGIS Proを用いて式 (7) より算出した。

$$\text{TWI} = \ln \left(\frac{A_s}{\tan \beta} \right) \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 A_s : 単位幅当たりの上流域面積 ($\text{m}^2 \text{m}^{-1}$), β : 傾斜角度である。曲率・TWIは土壌要因と同様にして個体周囲4 m以内の平均値として各個体にデータを与えた (図-2)。

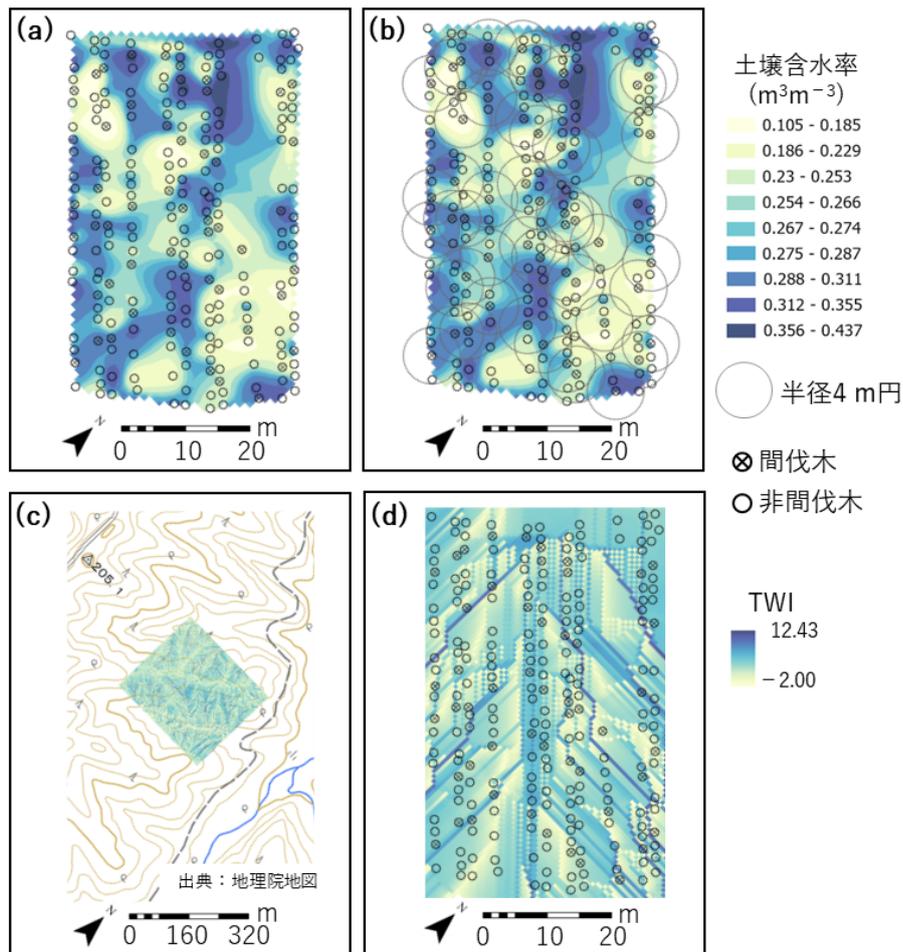


図-2 立地要因取得の例

TWI ; Topographic Wetness Index (地形湿潤指数)

上：土壌要因のGIS演算（例：土壌含水率）。(a) 全立木地点で測定した土壌含水率を内挿補間し得られたラスターデータ。(b) 間伐対象木を例に、土壌含水率を個体周囲4 m以内平均として取得したイメージ図。

下：LiDARデータによる立地要因の取得（例：TWI）。(c) TWI作成の範囲。(d) 調査プロットの範囲におけるTWI。なお、データ解析においては、個体周囲4 m以内の平均値を用いた。カラー版はホームページ参照。

4. データ解析

統計解析は全て、データ解析環境R 4.1.2 (R Core Team 2021) を用いた。

まず、実測心材含水率と水食い材割合の関係を評価するために、52本の間伐木で測定した水食い材割合を応答変数、心材含水率を説明変数に、単変量ロジスティック回帰分析を行った。次に、モデルの妥当性検証のために、McFaddenの擬似決定係数を求めた。また、回帰線の特徴を把握する目的で、応答変数に対して説明変数で2回微分をすることで得た、二次導関数が最大になる点および0となる変曲点における応答変数と説明変数の値を算出した。計算にはstatsパッケージを用いた。

心材と辺材で含水率に差があることを確認するために、全ての心材・辺材小片の含水率の平均値を求め、t検定を行った。また、樹体内の材含水率に高さによる違いがあるのか調べる

ために、心材・辺材ごとに地表高別に採取した小片の含水率に対して、採取高(1.3 m・2.0 m・3.9 m)を要因としてTukeyの多重比較検定を行った。

心材含水率を推定した22.5 cm ≤ d ≤ 39.2 cmの個体を対象に心材含水率に影響する要因について解析を行った。個体の推定心材含水率に対する遺伝的影響の大きさを調べるため、個々の植栽木が親から受け継いだ遺伝的能力を示す指標である育種価を推定した。育種価は期待値として統計モデルより推定する。その推定においては、個々の植栽木に親の系統情報を付与し、血縁関係によって構築されたまとまりごとに表現型(本研究では推定心材含水率)のばらつきを抽出することで、子がどれだけ親の遺伝的能力を受け継いで形質値を獲得したかを推定することができ、親ごとの遺伝的影響を評価することができる(武津 2021)。さらに、この推定の際に、空間的異質性が存在することを前提とした解析モデルを構築す

表-1 推定心材含水率に関わる解析に用いた各測定項目の要約統計量

測定項目	単位	間伐木 (N = 52)				全立木 (N = 229)				解析対象木 (N = 147)			
		平均	SD	最小値	最大値	平均	SD	最小値	最大値	平均	SD	最小値	最大値
材関連形質													
実測心材 M_c	(%)	89.36	34.52	39.51	193.43								
水食い材割合	(%)	12.42	14.50	0.00	64.35								
胸高直径	(cm)	24.92	4.60	14.00	35.80	24.37	5.50	9.40	41.90	27.44	3.44	22.50	39.20
推定心材 M_c	(%)									84.47	21.30	53.71	167.24
育種価 (推定心材 M_c)	(%)									-0.27	6.53	-12.89	22.31
土壌要因													
最大土壌硬度	(kPa)	1190	183	777	1625	1163	185	733	1625	1157	186	733	1535
土壌含水率	($m^3 m^{-3}$)	0.26	0.03	0.19	0.32	0.26	0.03	0.14	0.37	0.26	0.03	0.14	0.33
土壌K含有量	($10^{-2} g K_2O kg^{-1}$)	6.26	2.05	3.15	11.53	5.94	2.00	2.49	12.95	5.92	1.89	2.49	12.95
地形要因													
TWI		2.85	0.42	2.17	3.77	2.94	0.42	1.99	4.02	2.94	0.44	1.99	4.02
曲率		1.31	1.87	-2.61	6.20	1.03	2.06	-3.63	6.77	1.01	2.11	-3.63	6.77
斜面相対位置		0.54	0.26	0.04	0.96	0.54	0.28	0.00	1.00	0.54	0.27	0.04	0.99
外傷要因													
落枝痕数		2.6	2.2	0	6	2.6	2.3	0	8	2.7	2.4	0	8
傷面積	(cm^2)	153	459	0	2600	206	496	0	3520	182	490	0	3520

SD: 標準偏差, M_c : 乾重基準含水率, TWI: Topographic Wetness Index (地形湿潤指数)。各解析データセットの個体位置については図-1を参照。

ることによって、遺伝的影響とともに常にある程度の割合で存在する環境条件の空間的な偏りの影響も考慮することができる。具体的には、解析モデルにおいて構築する線形混合モデルの変量効果に分散共分散行列を指定し、ここに空間自己相関の効果として、一次自己回帰の相関行列を組み込む手順を踏む。これによって、空間自己相関の程度を知り、かつ空間的な偏りを考慮した育種価の推定が可能になる(高橋ら2016;石塚ら2024b, 2015)。このような利点があることから、本研究においても空間的な偏りを加味した解析モデルによって育種価の推定を行うこととした。解析は、アニマルモデルおよびAR (Autoregressive; 自己回帰) モデルに従う最良線形不偏推定法(BLUP法; best linear unbiased prediction method)に基づき、分散共分散の推定には制限付き最尤推定法(REML法; restricted maximum likelihood)を採用した。なお、空間構造として方形型の行列構造が求められるため(石塚ら2024b)、配植情報による行列に基づき、一部は高精度測定した立木位置を参考にxy座標を振り、空間構造として与えた(図-1)。推定にはbreedRパッケージを用いた(Muñoz and Sanchez 2019)。モデルの推定結果より、親(母親)と植栽個体(子)それぞれの育種価について整理した。また、同時に算出されるパラメータからは、①親から子へと遺伝的能力がどの程度受け継がれるかを示す指標である狭義の遺伝率(h^2)、②観測された遺伝・空間のばらつきとそれ以外の残差のそれぞれでどの程度説明できるかを示す指標である分散共分散成分、ならびに、③等高線方向(行方向)と斜面上下方向(列方向)それぞれにどの程度空間的な偏りが生じているかを

示す指標である自己相関係数、の3つについても整理した。

また、解析対象木の心材含水率に対する立地および外傷要因の影響解析のために、応答変数を推定心材含水率、説明変数を土壌要因(土壌含水率・土壌硬度・土壌カリウム含有量)、地形要因(相対的斜面位置・曲率・TWI)、外傷要因(落枝痕数・傷面積)とした一般化線形モデル(GLM; generalized linear model)を構築し、モデル選択による変数選択の手続きを実施した。構築したモデルの確率分布は正規分布とし、リンク関数にはlogを用いた。変数選択は全ての変数を含めたフルモデルからの変数減数法により、赤池の情報量基準(AIC; Akaike's Information Criterion)を最も低くするモデルを採択した後、選ばれた変数に多重共線性がないことを確認し、ベストモデルとして決定した。また、妥当性確認のため、AICが次に低いモデルについても次点モデルとして結果を確認し、 ΔAIC を求めた。これらにはlmerTestパッケージを用いた。

結果

1. 測定項目の概要

心材含水率および影響因子として測定した項目の要約統計量を表-1に示す。間伐木の胸高位置の円板から得た実測心材含水率、目視による心材に占める水食い材割合の平均はそれぞれ89.36% (39.51 - 193.43%)、12.42% (0.00 - 64.35%)であった。

推定心材含水率の平均は84.47%であり、最小値53.71%から最大値167.24%と大きな幅があった。

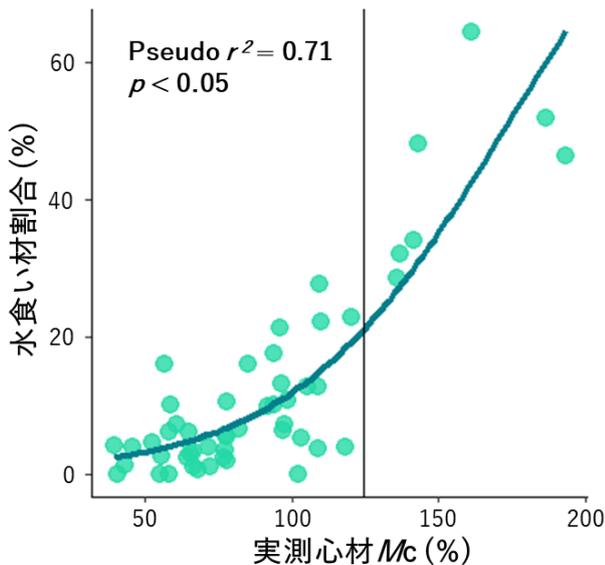


図-3 間伐木における実測心材含水率と水食い材割合の関係
 Mc; 乾重基準含水率。図中の数字はMcFaddenの擬似決定係数 (Pseudo r^2) と有意確率 (p)。図中の縦線は、回帰式の接線の傾きの増加率が最大になる実測心材Mcの値を示す。カラー版はホームページ参照。

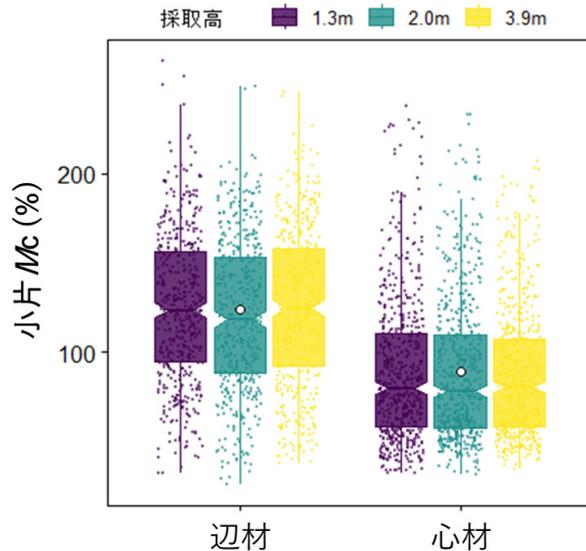


図-4 間伐木における3採取高別の辺材・心材小片含水率
 Mc; 乾重基準含水率。箱の上端は3四分位点を、下端は1四分位点を示し、くびれ部分は中央値を示す。図中白丸は、全採取高込みの辺材・心材ごとの平均値を示す。カラー版はホームページ参照。

2. 心材含水率・水食い材割合

実測した心材含水率と水食い材割合には有意な正の相関があり、水食い材割合は心材含水率の増加に伴い、単調増加する傾向が認められた。また、回帰式の二階微分で得られた導関数の最大値を取る心材含水率の値は約124%であり、そのときの水食い材割合は約21%であった(図-3)。また、二階微分の値が0となる回帰線の変曲点における心材含水率、水食い材割合の値はそれぞれ約172%、50%であった。

地表高1.3 m, 2.0 m, 3.9 mにあたる3か所から採取した辺材小片と心材小片の含水率は、林分平均としてそれぞれ123.6 ± 42.9%, 88.7 ± 39.5%であり、両者には有意な差があった(図-4; $p < 0.001$)。一方、両材部ともに各採取高間の含水率には有意差はみられなかった(図-4)。このため、このあとの解析では立木時の測定に適した高さである地表高1.3 m(胸高位置)における心材含水率の評価を行った。

間伐木の胸高位置において実測心材含水率と $1/df$ の関係を検討したところ、 d が小さな個体を除いていくと両者の相関係数がおおむね増加し、 d が約23 cm以上のデータセットにおいて先行研究(井城ら 2010; $r^2 = 0.50$)以上の精度が得られた(図-5; $r^2 = 0.58$, 付録図-3)。解析に供する個体の制限を最小限にすることを考えて、その際得られた換算式(2)を用いて、対象となる $d \geq 22.5$ の個体($N = 148$)に対して心材含水率を推定したところ、 d 最大値を示す1個体において心材含水率が29.83%と、次に低い個体の53.71%よりも極端に小さな心材含水率を示し(表-1)、正しい推定が行えなかった。よって、本林分においては、 $1/df$ から適正に心材含水率を推定できる個体サイズは $22.5 \text{ cm} \leq d \leq 39.2 \text{ cm}$ の範囲であった。

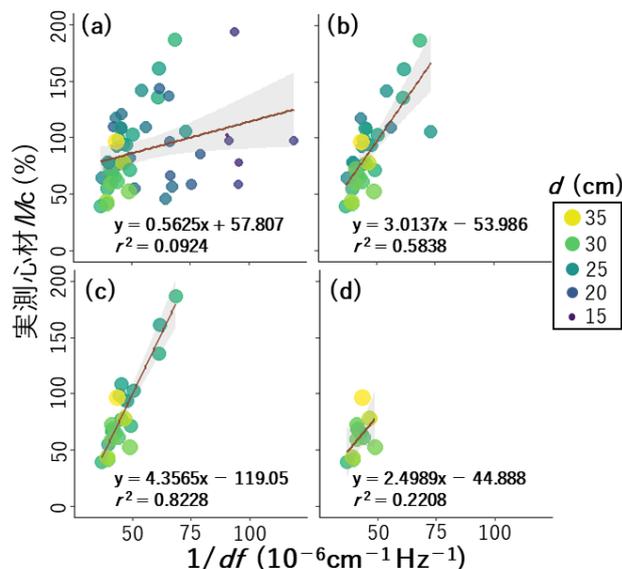


図-5 間伐木における $1/df$ と心材含水率の関係
 Mc; 乾重基準含水率。(a) $14.0 \leq d \leq 35.8$ ($N = 52$), (b) $22.8 \leq d \leq 35.8$ ($N = 34$), (c) $26.1 \leq d \leq 35.8$ ($N = 23$), (d) $28.4 \leq d \leq 35.8$ ($N = 11$)。カラー版はホームページ参照。

3. 心材含水率に対する遺伝・環境要因の寄与

推定心材含水率の育種価を求め、親ごとの値として整理した(図-6)。植栽木の推定心材含水率は母親の違いによって-10~+10%程度異なり、相対的に心材含水率が低い系統が存在した。遺伝率(h^2)は0.274であった。遺伝、空間、残差の分散共分散成分はそれぞれ128.34 (28%), 93.32 (20%),

238.85 (52%) であった。観測された推定心材含水率のばらつきの約3割に遺伝的影響がみられ、そのほか、2割が空間的な偏りによって、約5割が残差として局所的な立地環境や個体差による要因などで説明できることがわかった(図-6)。自己相関係数は等高線方向と斜面上下方向でそれぞれ-0.8, 0.2で、等高線方向においてのみ強い負の相関がみられたことがわかった。

4. 心材含水率に対する土壌・地形・外傷要因の影響

一般化線形モデルの変数選択の結果、土壌含水率・TWI・傷面積がベストモデルの変数に選ばれ、次点モデルでは土壌カリウム含有量が追加選択された。また、ベストモデルと次点モデルの両方において傷面積が有意水準1%で効いており、土壌の湿潤度に関する変数である土壌含水率・TWIについては、有意水準5%の項目があったものの、モデル間で効果の確からしさの傾向が異なっていた(表-2; 図-7)。なお、次点モデルの土壌カリウム含有量は、有意な変数ではなかった。

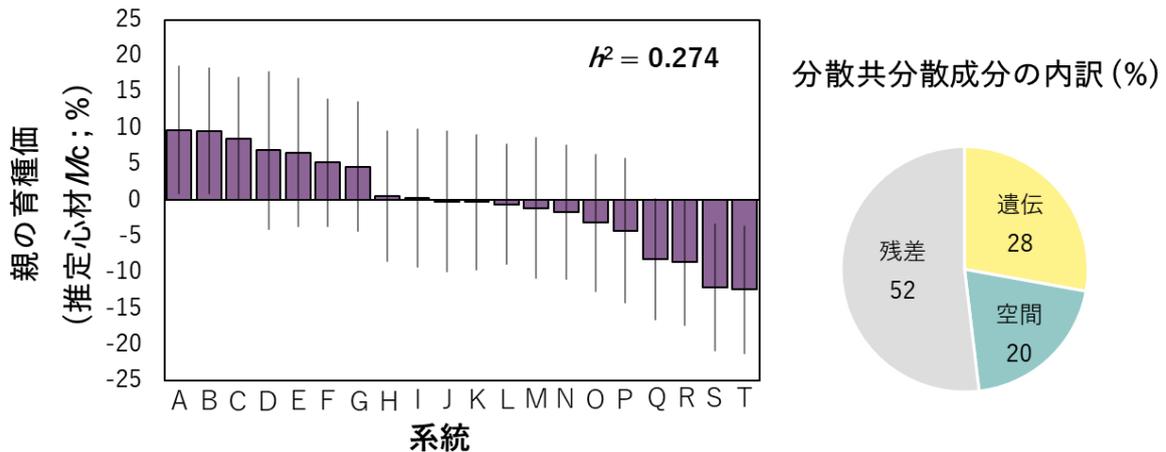


図-6 推定心材含水率に対する親の育種価とその算出に対する設定要因のばらつき

Mc; 乾重基準含水率。左: 空間効果を考慮して算出した、推定心材Mcに対する親の育種価。エラーバーは標準誤差を表す。図中には、狭義の遺伝率 (h^2) を示した。右: 推定心材Mcのばらつきを構成する要因の割合 (各種分散共分散成分の割合)。カラー版はホームページ参照。

表-2 推定心材含水率を目的変数とした重回帰モデルの変数選択の結果

説明変数	ベストモデル			次点モデル		
	係数	誤差	p	係数	誤差	p
切片	3.85	0.21	0.000	3.93	0.22	0.000
土壌要因						
最大土壌硬度	-			-		
土壌含水率	1.15	0.60	0.058	1.21	0.60	0.045
土壌K含有量	-			-0.01	0.01	0.299
地形要因						
TWI	0.09	0.05	0.049	0.08	0.05	0.090
曲率	-			-		
斜面相対位置	-			-		
外傷要因						
落枝痕数	-			-		
傷面積	0.0001	0.0000	0.002	0.0001	0.0000	0.003
AIC	1312.85			1313.68		
ΔAIC	0			0.83		

TWI; Topographic Wetness Index (地形湿潤指数)。-; モデル選択時に除外された変数。ΔAIC; ベストモデルのAICより差2以内のAICをもつモデルを次点モデルとしたときの、両者モデルのAICの差。

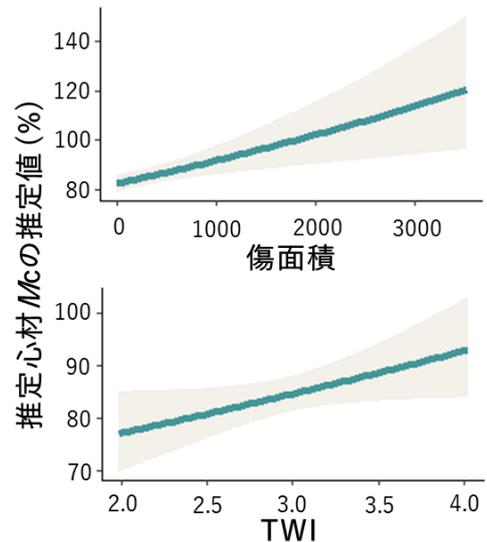


図-7 ベストモデルにおいて有意であった変数より推定した心材含水率の変動

Mc; 乾重基準含水率。表-2において選ばれたベストモデルから有意であった2変数の変動を基に推定心材Mcを推定した。ベストモデルに選択されたほかの説明変数は平均値で固定した。カラー版はホームページ参照。

考察

1. 心材に占める水食い材割合と心材含水率およびその評価

実測心材含水率の平均は89.36%であり、先行研究の77%, 78.7% (飯塚ら 2000; 井城ら 2010) よりも約10ポイント高くなった。また、心材に占める水食い材割合の平均は12.42%であり、先行研究の26%, 10.3% (飯塚ら 2000; 井城ら 2010) の範囲内にあった。心材含水率と水食い材割合には有意な正の相関があり、水食い材割合は心材含水率の増加に伴い緩やかに上昇し、心材含水率約124%以降から増加が急激になり、変曲点の約172%まで増加率が上昇した (図-3)。今回の心材含水率の最大値が約193% (表-1) であることから、ほとんどの範囲において心材含水率の増加に伴う水食い材割合の増加率が上昇し続けた。実測心材含水率と心材に占める水食い材割合の間に見られた有意な正の相関は井城ら (2010), 飯塚ら (2000) においても同様に認められており (それぞれ $r = 0.806$, $p < 0.01$; $r = 0.811$, $p < 0.01$), 心材含水率の多寡を持って水食い程度を評価することは妥当と判断された。また今回、心材小片含水率の頻度分布からは、正常心材と水食い材を分ける顕著な2ピークは検出されなかった (付録図-4)。これまで頻度分布など、心材含水率から水食い材の含水率を規定する試みでは、その値は50%以上や (蕪木 1973), 120%以上 (石井・深沢 1987) とされる例と、今回と同様、正常心材と水食い材を分ける明瞭な2ピークはみられていない例がある (飯塚ら 2000; 石井・深沢 1987)。これらのことから、心材含水率の頻度分布の特徴は調査対象のサンプル群間で大きく異なり、心材含水率から、一律に水食い材の含水率閾値を規定することは難しいと考えられる。しかし、水食い材割合は心材含水率の増加に伴い有意に増加し、両者の関係は明瞭であった。特に心材含水率約124%以上では水食い材割合が大きく増加した。一方で心材含水率約124%未満の場合は水食い材割合が心材含水率の変動によらず約21%未満の範囲で取まっており、軽度の水食いの判断は難しいとされていることと一致した (石田 1986)。そのため、水食い材割合の評価が可能となる心材含水率は、124%以上が目安となる。

本研究で観察された推定心材含水率の範囲は、本研究と同齢の44年生トドマツを対象に非破壊推定された心材含水率の値 (井城・田村 2010; 平均値78.7%, 最小値42.9%, 最大値146.7%) と同程度であった。他の先行研究でも、目視で判断された水食い材部の含水率は平均160%, 範囲が77~244%と大きな変異がある (飯塚ら 2000), トドマツ生材含水率の一般的なパターンは正常な辺材部で100~200%, 心材部で30~50%を示す (蕪木 1973), との報告があることから、本研究では妥当な範囲で心材含水率推定がされていたと考えられる。ただし、FFTアナライザーによる心材含水率の推定には、胸高直径約23 cmよりも小さい個体や約39 cmよりも大きい個体は適さなかった。小さな個体が測定に適さなかった理由

としては、FFT測定では対象物に加速度センサーを取り付けることで生じる接触共振を測定するが、小さな個体に打撃を与えた際、対象物全体が揺れることで、接触状態が影響を受け、正確な接触共振が測定できなかったと推察された。実際にFFTアナライザーを使用する上で、接触状況に影響を与えないよう、測定対象に対して十分に軽く小さな加速度センサーが推奨されている。また、振動計測は、対象物の支持状態により結果が異なることがある。加振ごとに支持条件が変化してしまうような場合には、計測データの精度や結果にも影響を与えることがあり (基盤整備センター 2006), 小さな個体を打撃した際のしなりが影響した可能性がある。大きすぎる個体が測定に適さなかった理由としては、低周波を加振するのに十分なエネルギーを今回使用した重量のハンマーで与えることが困難であった可能性がある。そのため、より重く大きなハンマーを用いることで測定が可能かもしれないが、打撃部への損傷が大きくなることに留意する必要がある。しかし、これまでFFTアナライザーを用いた心材含水率推定には推定精度の問題が指摘されていたが、個体サイズを限定し、対象物に適した重量のハンマーを用いることで、測定精度の向上が期待できることが示された。

2. 心材含水率への遺伝的影響および空間自己相関の影響

心材含水率にどの程度遺伝の影響が寄与するかは、遺伝率によって評価できる。これまでの報告から、心材含水率の遺伝率は0.27~0.56の範囲にあることが知られている (井城・田村 2010; 片寄ら 1992; Katayose et al 1992; 工藤ら 1993; Kadomatsu et al 1994)。本研究において得られた遺伝率 (h^2) は0.274で、既往報告の範囲内だったが、相対的に低い結果であった。本試験の植栽木は自然交配によって得られた個体を用いており、母親は自明だが父親は不明の血縁構造のため、片親に限られた情報だったことに起因した可能性、もしくは、遺伝率の算出方法の違いに起因した可能性がある。本報告では、近年一般的に使われている狭義の遺伝率 (子にて観察される遺伝分散より算出) を用いたものの、既往の報告では広義の遺伝率 (全遺伝分散より算出) を用いており、方法の違いがあった。今後、狭義の遺伝率での知見蓄積が求められるが、心材含水率には一定程度、親の違いによる遺伝の影響があることが確認された。横打撃共振法は心材含水率の低い個体群の選抜に向いていると報告されており (井城ら 2010; 井城・田村 2010), 今回の結果からも、遺伝的に心材含水率の低い系統の選抜や高い系統の除去といった、育種の手法により水食い程度を低減できる可能性が示唆された。

一方で、遺伝的影響と同時に推定した空間の影響からは、ばらつき2割が空間の偏りに起因していることも明らかになった (図-6)。ただし、等高線方向に自己相関係数が-0.8の負の相関がみられ、斜面上下方向は0.2のわずかな正の相関となり、両者の符号が逆転していることから、明瞭な空間自

己相関を指摘することができないとみられた。等高線方向の強い負の相関は、間伐列が考慮されない解析上の仕様に起因した可能性があり、間伐や枯死により個体が存在しない行・列は自己相関係数の行列計算から省かれるため、列状間伐が入った場合には最大2列の間伐列の両端の個体が“隣接”個体として処理され、非類似性として検出されたことが推察される。

本モデル解析によって寄与度が推定された遺伝以外の要因のうち、空間の偏り、および、残差の一部については、立地条件によって説明できる可能性がある。残差にはそのほか個体差も含まれるが、これについても、個体ごとに異なる候補要因（外傷要因）によって説明できる可能性がある。次節では、別のモデルによる結果から、この点を検討する。

3. 心材含水率に対する立地要因と外傷要因の影響

推定心材含水率に対する土壌・地形・外傷を説明変数とした解析では、すべてのカテゴリで変数が選択された（表-2）。そのなかでも立木の傷面積はベストモデル、次点モデルともに有意水準1%で選択されており、心材含水率に影響があるといえる（表-2；図-7）。外傷がきっかけとなり水食い材を形成する過程には、いくつかのメカニズムが提唱されている。たとえば、節などの開放部からガスが抜けることによる樹液の流入（氏家 1984）、傷害への反応としての無機物（特にカリウム）集積に伴う浸透圧の増加（Blanchard et al 1978；石井・深沢 1987）などが挙げられる。本研究の結果は、水食い材が外傷をきっかけとして形成されるというこれらの知見と一致している。なお、今回落枝痕数に変数選択されなかった一因として、大きな傷には、造材時に生じるような縦に長い形状のものが目立ったこと、水食い材は縦方向につながっている報告例が多いことから（吉本・信田 2001；井城ら 2008など）、測定対象の5 cm幅からだけでは胸高部位の心材含水率に対する影響を十分に評価できなかった可能性がある。

ベストモデルと次点モデルで、土壌含水率かTWIのどちらが有意な変数になるか異なったものの、土壌中に水分が多い立地では、心材含水率が高くなりやすい傾向があった（表-2；図-7）。また、透水性の低さを示す指標である最大土壌硬度が選択されなかったことは、本試験地においては深さ30 cmまでには不透水層が存在せず、かつ火山灰土壌による水はけの良さから、局所スケールでの滞水の違いに対する透水性の寄与度が小さかったことが示唆される。土壌中の水分が降雨後長く留まるような場所に水食い材の発生が多いと言われていることから（石井・深沢 1987；松崎 2006；真田ら 1987；1988）、土壌の透水性と保水性のバランスの違いで、場所によって影響の大きな土壌パラメータは変化する可能性があるが、少なくとも土壌中の水分状態が水食いの発生に関わっている点はこれまでの研究の結果を支持した。

4. 結論と今後の課題

心材含水率の非破壊推定については、対象個体サイズを見極めることや、対象個体サイズに応じた質量のハンマーを使用することで、心材含水率の推定精度を向上させることが可能であると考えられた。心材含水率約124%以上では水食い材割合が心材含水率の増加に伴い大きく増加したことから、非破壊推定により心材含水率の高いトドマツを立木段階で選別することで、トドマツの製材品への水食い材の混入を軽減できることが期待される。

推定心材含水率に対する母親の違いによる遺伝的な影響が確認された。このため、遺伝的に心材含水率の低い系統を選択することや、心材含水率の高い系統を採種園から除去することにより、水食い材の発生程度を低減できる可能性がある。

推定心材含水率に対し立木の傷の影響が確認されたため、間伐などの施業の際には、立木に外傷を与えない方法をとることが、水食い材形成を防ぐために重要であると考えられる。また、推定心材含水率と土壌水分との関連も示唆されたことから、水食い発生リスクを低減するため、湿潤度の高い立地条件を避けることが重要である。

本研究は十勝の火山灰土壌における1事例であり、本研究結果の妥当性や適用幅については今後、異なる土壌タイプ・立地条件・水食い進行段階におけるトドマツ林分調査により検証が必要である。また、今回心材含水率に影響を与える要因が遺伝・土壌・地形・外傷から認められたが、各要因間の関連性や因果関係については、今後木材生理や解剖学的視点、分子遺伝などからのアプローチも踏まえてさらに検討する必要がある。

謝辞

間伐木の個体追跡にあたって、井原林産株式会社には多大な協力をいただいた。十勝総合振興局森林室職員には、調査地の設定や施業時期の調整に協力いただいた。また、寺澤和彦道総研フェローには、土壌分析の手ほどきをいただいた。北海航空株式会社には、LiDARデータを提供いただいた。菅野正人道総研フェローには、LiDARデータの前処理をしていただいた。森林総合研究所林木育種センター北海道育種場の中田了五博士には、研究遂行にあたって有益な助言をいただいた。フィールド調査・透水性試験実施および間伐木測定にあたり、北海道立総合研究機構林業試験場の職員・林産試験場の研究支援職員に協力を賜った。この場を借りてお礼申し上げます。

利益相反

なお、本論文に関して、開示すべき利益相反はない。

引用文献

- 阿部善作・小田一幸・松村順司（1994）スギ心材の黒変現象（第2報）原因物質の一つとして、炭酸水素カリウムの同定。木材学会誌 40: 1126-1130
- Blanchard R. O, Smith D, Shigo A. L, Safford L. O（1978）Effects of soil applied potassium on cation distribution around wounds in red maple. *Can. J. For. Res.* 8: 228-231
- Coutts M. P, Rishbeth J（1977）The formation of wetwood in Grand fir. *Eur. J. For. Path* 7: 13-22
- 江波戸宗大（2021）機種や作業者の相違を考慮した貫入式土壌硬度計の定量的な使用に向けた評価。土壌の物理性 149: 23-35
- 武津英太郎（2021）森林遺伝育種のデータ解析方法（実践編 3）BLUP法。森林遺伝育種 10: 49-53
- 古川 忠（1964）林木の幹に蓄積する無機養分元素の研究。日本森林学会誌 46（8）: 281-293
- Hartley C, Davidson R. W, Crandall B. S（1961）Wetwood, bacteria, and increased pH in trees. USDA For. Ser. FPL Report No. 2215, USDA For. Ser. For. Prod. Lab., Madison, WI
- 橋本均（2011）第58回日本ペドロロジー学会野外巡検 十勝地域の土壌と火山灰。ペドロジスト 55: 115-119
- 北海道水産林務部（2024a）令和4年度北海道林業統計。30pp. 北海道水産林務部, 札幌 (<https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/sum/kcs/rin-toukei/04rtk.html>) : アクセス日2024年7月25日)
- 北海道水産林務部（2024b）令和4年度人工乾燥材生産実態調査。3pp. 北海道水産林務部, 札幌 (https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/rrm/05_rinkin/research.html) : アクセス日2024年7月25日)
- 飯塚和也・織部雄一郎・生方正俊（2000）トドマツ精英樹クローンの生材含水率の変異。木材学会誌 46: 397-405
- 井城泰一・田村明・西岡直樹・阿部正信（2008）トドマツ精英樹等クローンにおける心材含水率の樹高方向の変動。北海道の林木育種 51: 5-8
- 井城泰一・田村明（2010）トドマツにおける水食い材および心材含水率に関する考察。林木の育種 237: 16-20
- 井城泰一・田村明・飯塚和也（2010）横打撃共振法によるトドマツの心材生材含水率の非破壊的評価。木材学会誌 56: 33-40
- 今川一志・真田勝（1996）北海道におけるトドマツの凍裂1984年の調査結果について。北方林業 48: 148-151
- 石田茂雄（1963）トドマツ樹幹の凍裂の発生機構、とくにその水喰材との関係について。北海道大学演習林研究報告 22（2）: 273-373
- 石田茂雄（1986）“トドマツの凍裂”。81-102pp. 北方林業会, 札幌
- 石井哲男・深沢和三（1987）トドマツ水食い材の水分移動に関する研究：樹液成分と壁孔閉鎖。北海道大学演習林研究報告 44: 1277-1305
- 石井哲男・深沢和三・氏家雅男（1984）無機成分からみたトドマツ水食い材の発生機構。日本木材学会北海道支部講演集 16: 73-76
- 石塚航・陳淑芬・後藤晋（2024b）育種価の推定に向けた空間自己相関による立地効果の考慮。森林遺伝育種 13: 84-90
- 石塚航・今博計・来田和人（2015）根釧地域におけるトドマツ二世代精英樹の選抜。光珠内季報 176: 9-14
- 石塚航・成田あゆ・今博計・米澤美咲・来田和人・中田了五・加藤一隆・生方正俊・花岡創（2024a）北海道東部太平洋側地域におけるトドマツ優良個体の新規選抜。北海道林業試験場研究報告 61: 11-21
- 蕪木自輔（1973）トドマツ樹幹の生材含水量、とくにその水喰い材との関係について。東京農工大学演習林報告 10: 96-107
- Kadomatsu M, Kudoh H, Ujiie M（1994）Fundamental wood properties of clones grafted with plus-trees of *Abies sachalinensis* (I). -Using trees thinned from the seed orchard in Forest Tree Breeding Experimental Station, Hokkaido University-. *Research Bulletin of the Hokkaido University Forests* 51: 14-30
- 釜口明子・中尾哲也・小玉泰義（2000）横打撃共振法によるスギ立木の心材含水率非破壊的推定。木材学会誌 46: 13-19
- 釜口明子・中尾哲也・中井毅尚・田村明（2001）横打撃共振法によるスギ立木の心材含水率の測定 含水率計との比較および各品種の高さ方向の分布。木材学会誌 47: 235-241
- 片寄謙（1984）トドマツ精英樹クローンの特性：容積密度および含水率。日本林学会北海道支部講演集 33: 95-97
- 片寄謙・工藤弘・氏家雅男（1992）トドマツ精英樹よりつぎ木されたクローン間の材質の比較（I）。北海道大学演習林研究報告 49: 201-218
- Katayose T, Ujiie M, Kudoh H（1992）Clonal differences of some properties for wood quality of grafted plus-trees of *Abies sachalinensis*. *Journal of the Japanese Forest Society* 74: 426-430
- 桂真也・青木稔弥・吉野孝彦（2020）土の飽和透水試験。砂防学会誌 73（3）: 87-90
- 基盤整備センター（2006）応用短期課程モデル教材－振動実験及び振動解析を活用した機械設計秘術－。114: 79-142
- 北村義重（1941）水喰ひ材の性質に就いて。北海道林業試験場時報 27: 1-19
- 工藤弘・片寄謙・氏家雅男（1993）トドマツ精英樹よりつぎ木されたクローン間の材質の比較（II）－築別、塩狩、岐阜採種園からの間伐クローン間の性質－。北海道大学演習林研究報告 50: 179-205

- Lagerberg T (1935) Barrtradens vattved [in Swedish with English abstract]. *Sven. Skogsvardsfoeren. Tidskr.* 33: 177-264
- 松本和茂 (2022) 道産トドマツの建築材利用拡大に向けて：ウッドショックによる状況変化を踏まえて。北海道の林木育種 65 (2): 35-38
- 松本和茂 (2024) トドマツの建築材供給拡大に向けた取組。林産試だより 2024年 6月号 3
- 松崎智徳 (2006) トドマツの水食い材の発生要因。日本林学会北海道支部論文集 54: 21-23
- 松崎智徳 (2007) トドマツの水食い材。森林総合研究所北海道支所研究レポート 96: 1-4
- Muñoz F, Sanchez L (2019) breedR: Statistical methods for forest genetic resources analysts. R package version 0.12-4
- 中田了五 (2014) 樹木の wetwood 現象と定義。木材学会誌 60: 63-79
- 中田了五 (2018) 心材形成研究の最近の進捗。木材学会誌 64 (2): 45-58
- 中野哲則 (2019) トドマツ用途の現状と建材開発事例。ウッドエイジ 7月号: 4-6
- 中山秀貴・佐藤翔平・荒井義光・佐藤陸人 (2018) 小型カリウムイオンメーターによる土壌交換性カリウム含量簡易測定 の精度向上のための改良。日本土壌肥科学雑誌 89 (4): 311-316
- 農研機構日本土壌インベントリー (2024) 土壌図。
(<https://soil-inventory.rad.naro.go.jp/explain/D6.html> : アクセス日 2024年 8月 6日)
- 西澤絵奈・玉泉幸一郎・保坂武宣 (2003) 斜面に生育するスギの心材色に及ぼす材中および土壌中のカリウム量の影響。日本森林学会誌 85 (3): 234-236
- R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing
- Rasband W. S, ImageJ, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, 1997-2012.
- 真田勝・高橋邦秀・片寄謙 (1987) トドマツ水食い材発生環境の解明 (I) - 採種園におけるトドマツの心材含水率と土壌 -。日本森林学会誌 98: 187-188
- 真田勝・高橋邦秀・片寄謙 (1988) トドマツ水食い材発生環境の解明 (II) - 採種園土壌とトドマツ水食い材の分布 -。日本林学会北海道支部論文集 36: 149-151
- 陶山大志・桐田龍一・物部英樹 (2012) 横打撃共振法における大径木の共振周波数の検出に及ぼすハンマー質量の影響 - スギとモミにおける調査例 -。樹木医学研究 16 (4): 169-170
- 高橋誠・平岡裕一郎・武津英太郎・三浦真弘・田村明 (2016) 品種開発への前方選抜の導入。森林遺伝育種 5: 127-133
- 富田智・松永浩史・松村順司・小田一幸 (2004) スギ黒心材におけるカリウム分布。九州森林研究 57: 289-292
- 氏家雅男 (1984) 無機物からみたトドマツ水食い材発生の一考察。北方森林保全技術 48-49
- Ward J. C, Pong W. Y (1980) Wetwood in trees: A timber resource problem. USDA For. Servo Gen. Tech. Rep. PNW-112. 56 pp
- Worrall J. J, Parmeter J. R (1982) Formation and properties of wetwood in white fir. *Phytopathology* 72: 1209-1212
- 矢沢亀吉・石田茂雄・宮島寛 (1963) 広葉樹の多湿心材について (予報)。日本林学会北海道支部論文集 12: 33-35
- Yazawa K, Ishida S, Miyajima H (1965) On the wet-heartwood of some broad-leaved trees grown in Japan. I. *J. Jap. Wood Res. Soc.* 11 (3): 71-76
- 吉本昌朗・信田聡 (2001) トドマツ水食い材の観察と強度。東京大学農学部演習林報告 106: 91-139

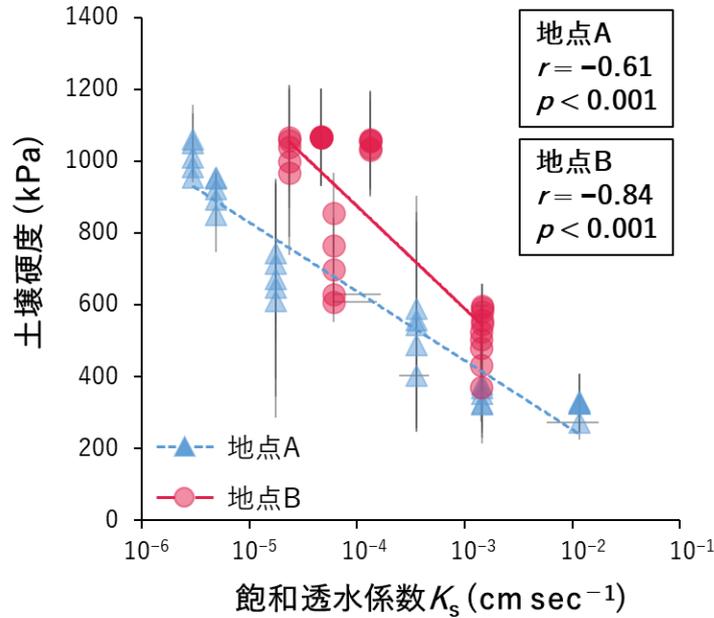
Summary

Wetwood, a phenomenon of water accumulation in heartwood, could be a problem when promoting the use of Sakhalin fir (*Abies sachalinensis*) as a building material, but evaluation methods on wetwood have not yet been established, and there is still no established consensus regarding the contribution of genetics, habitat environment, or tree damage to wetwood formation. Therefore, we investigated the degree of wetwood and moisture content of heartwood and examined the factors related to wetwood proportion and/or heartwood moisture content from the genetic, locational, and injury-related perspectives. In a 44-year-old Sakhalin fir progeny test on volcanic ash soil in Toyokoro, we first measured moisture content of heartwood and wetwood percentage in 52 thinned trees, averaging 89.36% (39.51-193.43%) and 12.42% (0.00-64.35%), respectively. Although it was not possible to distinguish between wetwood and normal heartwood uniformly based on heartwood moisture content, a significant positive correlation was observed between heartwood moisture content and the percentage of wetwood, with a particularly sharp increase in the percentage of wetwood when the heartwood moisture content exceeded 124%. Next, diameter (d) and resonance frequency (f) at breast height and injury-related traits (the number of fallen branches and scar areas) were measured for all the stand trees ($N = 229$) within the study site. Soil factors, such as water content, hardness, and potassium content, and topographic factors, such as the relative slope position, curvature, and TWI (Topographic Wetness Index), where individuals located were obtained from field survey and LiDAR data. By considering the individual size, we determined a conversion formula for estimating the moisture content of heartwood from d and f with higher accuracy than before ($r^2 = 0.58$), and determined the appropriate individual size of Sakhalin fir for this method. According to this appropriate range ($22.5 \text{ cm} \leq d \leq 39.2 \text{ cm}$), we non-destructively estimated moisture content of heartwood for total

147 tree individuals and took them into analysis. In the analysis, we first evaluated breeding values, which was an indicator of the genetic potential of the target trees, in order to understand how much genetic influence could be seen on the estimated moisture content of heartwood. When spatial bias was taken into consideration, not a clear spatial structure was detected. On the contrary, it was clear that there was a certain degree of genetic influence, leading the differences in estimated heartwood moisture content due to parent's difference. After verifying the validity of the data based on the characteristics of various location factors, the influence of candidate factors on estimated heartwood moisture content was evaluated using multiple regression analysis and variable selection. As a result, the variables selected in the best model were composed of all the major items among the candidate factors, and were soil moisture content, TWI, and scar area. The risk of wetwood formation tended to be higher in soil with higher moisture content and in more humid terrain, and with larger scar on individuals. This result suggested that a combination of multiple factors, including genetic influences, were involved in wetwood formation.

Key words

Wet wood, heartwood moisture content, soil, spatial analysis, genetic analysis



付録図－1 地点A・Bでの深度0～30 cmにおける土壌飽和透水係数 (K_s) と土壌硬度の関係

地点A・Bの位置については図－1参照。縦のエラーバーは3回測定して取得した土壌硬度の誤差を、横のエラーバーは3回透水性試験を行い取得した飽和透水係数 (K_s) の誤差を示す。図中の数字はピアソンの積率相関係数 (r) と有意確率 (p)。カラー版はホームページ参照。

【図作成にかかる補足説明】

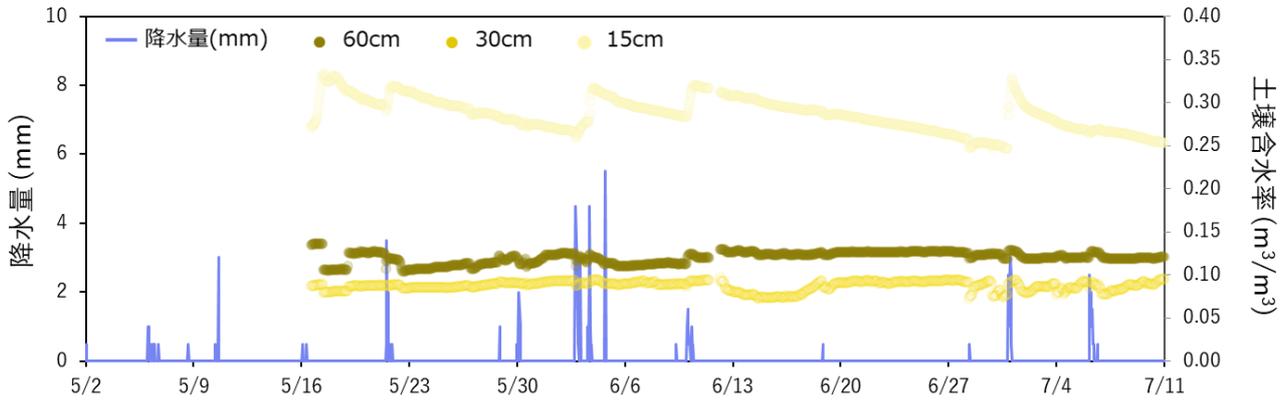
調査プロット内斜面中腹の微凹凸地形上2か所（図－1；地点A・B）において、土壌硬度測定と透水性試験のためのサンプル採取を行った。2023年6月に、本文中で記述した方法で土壌硬度を測定した。各地点で3回測定を行い、各深度の平均値を求め、1 cmごとの土壌硬度を取得した。また、5月に透水性試験のための土壌コアをステンレス試料円筒（DIK-1801，大起理化学工業）に採取した。各2地点において土壌断面を切り出し、表層有機物層を除いた5 cmごとの深さ60 cmまで計12サンプルの土壌コアを採取した。この際、連続する深度で土壌コアが採取できるよう、1サンプル取得後は土壌断面のごく近辺に水平面を切りだし、階段状に採取した。コア採取後は透水性試験開始まで室温で保管した。6月に土壌透水性試験器（DIK-4000，大起理化学工業）を用いて、土壌の飽和透水係数 K_s を測定した。土壌コア下部にキムワイプを添付後、蒸留水を張ったバットに24時間静置し、試料を飽和させた。飽和透水試験の方法には砂や砂質土など K_s が大きい場合に用いる定水位法と、シルトや細粒分など K_s が小さい場合に用いる変水位法があり、その K_s 値の境は 10^{-3} (cm sec^{-1}) が一般的である（桂ら 2020）。今回、どちらの方法が適切か即座に判断できない土壌コアサンプルについては、両方法で測定し、 $K_s \geq 10^{-3}$ であれば定水位法を、 $K_s \leq 10^{-3}$ であれば変水位法で得られた値を採用した。定水位法では、蒸留水で満たしたタンクに接続された試験器に、土壌試料と試料を通り抜けた水を受け止めるメスシリンダーを規定の方法で据え付け、一定時間給水を行った。給水を行った時間 (t_f ; 単位sec) と、排水された水の量 (Q ; 単位mL) を測定し、式 (8) により、 K_s を求めた。

$$K_s = \frac{Q}{AtHL} \dots \dots \dots (8)$$

ここで本試験器では、 A ：土壌試料の断面積 (19.6 cm^2)、 H ：水槽内の水位と水出口の高さの差 (6.8 cm)、 L ：試料の厚さ (5.1 cm) はそれぞれ一定である。変水位法では、土壌試料上部に専用の変水位目盛管を取り付け、洗浄瓶で蒸留水を供給し、水が測定開始位置から測定終了位置まで低下するのにかかった時間 (t_f ; 単位sec) を測定することで、式 (9) により、 K_s を求めた。

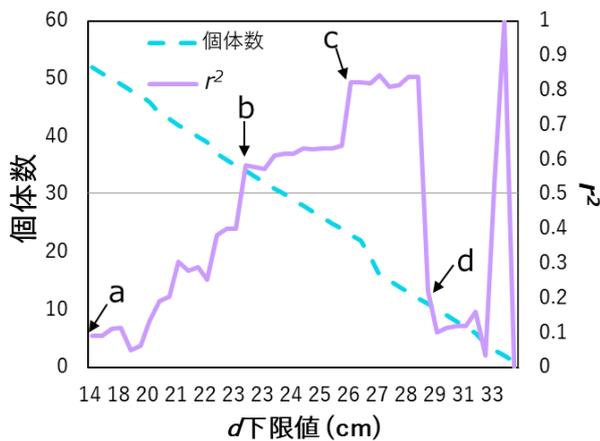
$$K_s = \frac{2.3aL}{At} \log \frac{h_1}{h_2} \dots \dots \dots (9)$$

ここで本試験器では、 A ：土壌試料の断面積 (19.6 cm^2)、 a ：変水位目盛管の断面積 (0.45 cm^2)、 L ：試料の厚さ (5.1 cm)、 h_1 ：測定開始位置から水出口までの高さ (17 cm)、 h_2 ：測定終了位置から水出口までの高さ (7 cm) はそれぞれ一定である。1サンプルにつき3回測定を行い、その平均値を各土壌サンプルの K_s とした。 K_s は深度約5 cmごとの測定であるため、深度1 cmごとに測定した土壌硬度との照合の際には、各土壌コアの値を該当する深度5 cm分の値として扱った。土壌硬度と飽和透水係数の相関関係を、ピアソンの積率相関関係によって求めた。



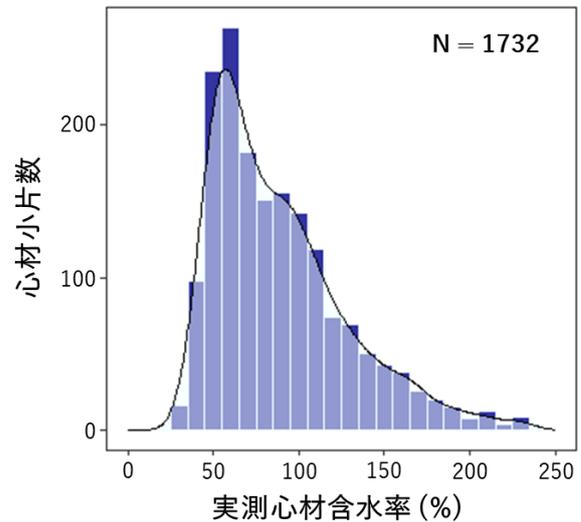
付録図-2 地点Cにおける土壌含水率の時系列変動とアメダス観測降水量

調査プロット内1か所 (図-1: 地点C) において土壌含水率の時系列変化を測定した。深さ15・30・60 cmに土壌含水率センサー (EC-5, METER) を設置し、データロガー (ZL6, METER) を用いて2023年5月17日より間伐日である7月11日までの土壌含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) を1時間ごとに測定・記録した。また、全立木地点における土壌含水率を測定した5月23日より3週間前からの降水量をアメダスデータより入手し示した (地点: 浦幌)。入手先: <https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/index.php>。カラー版はホームページ参照。



付録図-3 間伐木における d 下限値の増加に伴う $1/df$ -心材含水率間の決定係数 r^2 の変化およびデータセットを構成する個体数

d : 胸高直径, f : 横打撃共振周波数。図中アルファベットは図-5に対応する。横線は井城ら (2010) における r^2 値。カラー版はホームページ参照。



付録図-4 心材小片における含水率のヒストグラム

間伐木52本の地表高1.3 m, 2.0 m, 3.9 mから得られた、心材小片計1732個を対象とした。網掛け部は確率密度曲線を示す。カラー版はホームページ参照。