

北の森だより

No.27 令和3年12月

—目次—

研究紹介

- 多種混植による森林生産性の向上 辰巳 晋一・・・2
- どうやって樹木は水を高いところまで持ち上げる？ 矢崎 健一・・・4
- 森の土の硬さが植栽苗木の成長に及ぼす影響 菅井 徹人・・・6

施設紹介

- 北海道支所標本館の材鑑標本 矢部 恒晶・・・8



多種混植による森林生産性の向上

北方林管理研究グループ 辰巳晋一

はじめに

植物の種(しゅ)にはそれぞれ得意・不得意があります。例えば、カバノキの仲間は光がたっぷりと注ぐ条件ではグングンと大きくなりますが、日陰では成長できずに枯れてしまいます。反対に、トドマツなどの常緑針葉樹は暗い林内でも生き続けることができますが、明るい条件ではカバノキほど早く成長できません。この様な「あちらを立てればこちらが立たず」というトレードオフ関係が、植物の間では見られます。そして、こうした得意・不得意があるからこそ、野外では特定の種が一人勝ちせずに、多様性に富む自然が形成されるのです。

それでは、この「種の多様性」の効果についてもう少し詳しく見ていきましょう。草木が生えていない土地に、植物を100本植えることになったとします。この時、「1種だけを100本植えた区画」と「2種を50本ずつ混ぜて植えた区画」とでは、どちらの方が成長が良くなるでしょうか？この様な実験が、草本植物(木ではない草花)を使ってアメリカやヨーロッパで行われてきました。

実験の結果、「1種を単植した区画」よりも「2種を混植した区画」において、生産性(各区画における植物の総重量)が概して高くなる傾向が見出されたのです⁽¹⁾。また、混植する種数を3種、4種、…と増やすと、さらに生産性が上がることも分かりました。この理由としては、上で挙げたような種ごとの得意・不得意が考えられます。つまり、早く成長できる種や、暗い環境に耐えられる種、暑さが得意な種、寒くても平気な種など、異なる種が混在することで競争が緩和され、全体としての生産性が向上したということです。

それでは森林でも、複数の樹種を混植すれば森全体の成長は良くなるのでしょうか？上記のような混植実験は、これまで草本植物を対象に数多く行われてきましたが、樹木を使った事例は限られていました。そこで私は2018年に、東京大学北海道演習林(富良野市)にある、3つの樹種が混植された実験地において、樹木の多様性が森林の生産性に与える効果を調べました⁽²⁾。

樹木の多様性と生産性

当実験地では、ウダイカンバ、ミズナラ、トドマツの3樹種が1987年に植えられました。具体的には、①ウダイカンバ単植区画、②ミズナラ単植区画、③トドマツ単植区画、④3樹種を混植した区画(混植



写真1 3種が混植された区画の様子(植栽31年後、落葉期に撮影)。初期成長の早いウダイカンバが上層を占め、ミズナラが中層、最も日陰に耐えられるトドマツが下層を占めるという、垂直構造が見られます。

区画)(写真1)の計4つの区画が作られました。植栽本数については、単植区画と混植区画で同じとなるよう、混植区画ではそれぞれの樹種が1/3の数だけ植えられました。そして、過去30年以上に渡って、全ての木の生存本数や大きさ(幹の太さなど)が記録されています。この記録を使って、各区画における生存木の総重量(森林バイオマス)を計算しました。

その結果、予想していた傾向が見られました。次ページの図1は、4つの区画における植栽後3、15、31年後の森林バイオマスを示しています。青い横線は、3つの単植区画における森林バイオマスの平均値を表しています。赤色の矢印は、単植区画の平均値(青色の横線)と混植区画の森林バイオマスとの差を示しています。もし混植が生産性に対して何の効果も与えないのであれば、単植区画のバイオマス平均値は混植区画のバイオマスと一致するはずです。しかし実際には、赤色の矢印で示されたよう

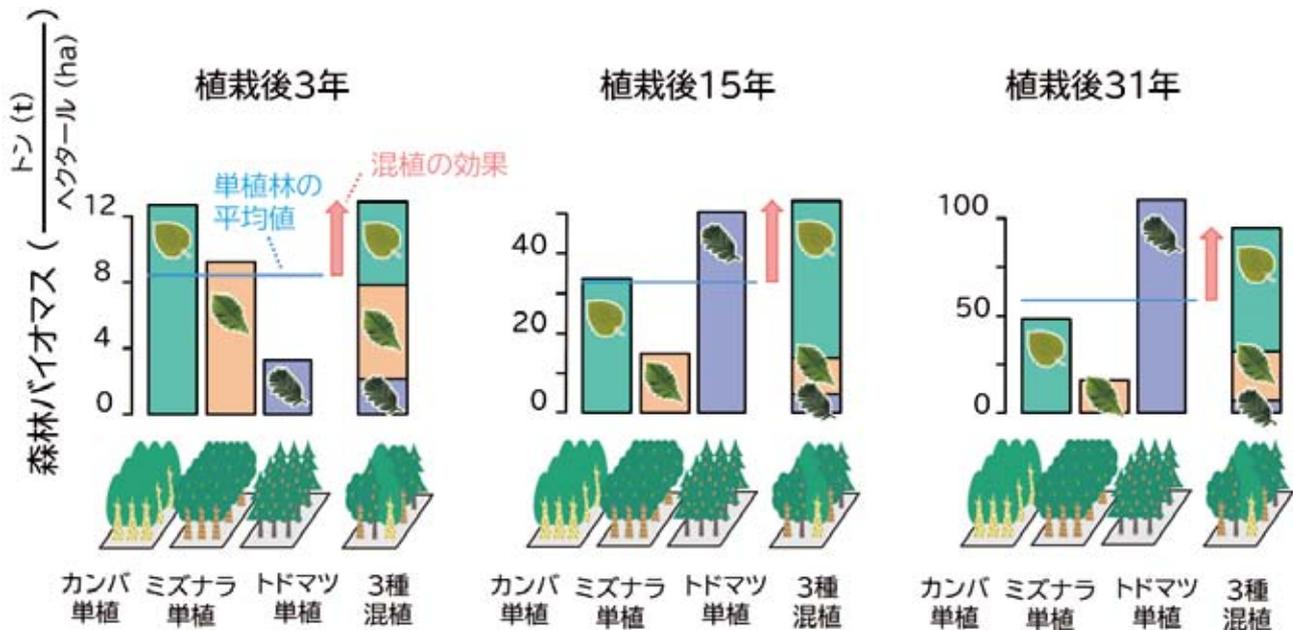


図1 ウダイカンバ単植区画、ミズナラ単植区画、トドマツ単植区画、および3樹種を混植した区画における、森林バイオマスの経年変化。青色の横線は、3つの単植区画における森林バイオマスの平均値。赤色の矢印は、単植区画の平均値（青色の横線）と混植区画の森林バイオマスとの差。

に、単植区画の平均値よりも混植区画において、どの年でも森林バイオマスが高かったのです。

このような差が生じる理由は何でしょうか？それは冒頭でも触れた、光に対する樹種ごとの反応の違いが考えられます。例えば、遷移初期種（スピード重視型）のウダイカンバは明るい環境では一気に大きくなります。これは、図1の「植栽後3年目」において、ウダイカンバのバイオマスが大きいことから分かります。成長の早いウダイカンバの単植区画では、少しでも伸び遅れた木は大きな木に光を遮られて枯れてしまいます。一方で、ミズナラやトドマツは日陰への耐性がより高く、暗い環境でもゆっくりと成長することができる遷移中期～後期種です。混植区画では、ウダイカンバ、ミズナラ、トドマツが上層、中層、下層を占める垂直構造が発達し（写真1）、これら3種が上から降り注ぐ光を各樹種が余すことなく利用する結果、森林全体の生産性が向上するのです。

おわりに

現在の林業では、多様性の低い単一種人工林（トドマツ人工林など）が主役となっています。その理由として、単一種人工林は植栽する苗木が一種類で済み、森林が均質なため管理が効率的に行えるといった点が挙げられます。一方で、混植は多様性の高い森林を育てられる分、管理に手間がかかります。例えば、シカに食べられやすい広葉樹の苗木を防獣ネットで囲ったり、先に大きくなった樹種を伐る際に小さな樹種が下敷きにならないよう注意したりする必要があります。単一種人工林と混交林のそれぞれの利点を理解したうえで、両者をうまく使

い分けられると林業の幅が広がるかもしれません。

「樹種の多様性が高い森林では生産性（バイオマス）も高くなる」という知見は、地球温暖化や生き物の保全を考える上でも大きな意味を持ちます。樹木が成長するという事は、それだけ多くのCO₂（二酸化炭素）を大気中から光合成によって固定することです。環境破壊などによって樹種の多様性が低下すると、森林のこうしたCO₂固定機能も弱まってしまう可能性があります。本稿に出てきたウダイカンバ、ミズナラ、トドマツは今のところ絶滅の心配はありませんが、世界的に見れば、地球上に存在する樹種の実に30%が絶滅の危機に瀕していると言われています⁽³⁾。これらの樹木を守ることは、CO₂固定（地球温暖化の抑制）をはじめ、人間が森林から享受している様々な恵みを維持することにも繋がるかもしれません。

引用文献

- (1) Loreau M & Hector A (2001) Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature* 412:72-76.
- (2) Tatsumi S (2020) Tree diversity effects on forest productivity increase through time because of spatial partitioning. *Forest Ecosystems* 7:24.
- (3) Botanic Gardens Conservation International (2021) *State of the World's Trees*. BGCI, Richmond, UK.

どうやって樹木は水を高いところまで持ち上げる？

植物土壌系研究グループ 矢崎健一

樹木の中の水

時には数十mもの高さになる樹木は、その樹冠に青々とした葉を沢山つけています。では一体どのようにしてそんな高いところの葉まで水を持ち上げているのでしょうか。そこまで水を上げるにはどのくらいの力があるか、試しに建物の3階(約10m)から長いストロー(チューブ)で地面においたコップから口でジュースを吸い上げようとしてみました(写真1)が、一向に出来ませんでした。大気圧下では、世界最高の真空ポンプを使ってもストローで10m以上水を吸い上げることはできないのです。



写真1 ジュース吸い上げ実験

実は、樹木の中の水は葉っぱの力と水がくっつく力の二つによって運ばれています。樹木には、根から枝先の葉まで水を運ぶためのパイプのような組織構造(通水系)があります。そして、機能している通水系には、根から葉まで水が充填されています。葉の気孔から水が蒸発(蒸散)する時に、水を持ち上げる力が発生します。そして水の分子と分子の間には分子間力という強く引き合う力があり、それによって水がじわりじわりと引き上げられているのです。

水を切らさない仕組み

通水系の中の水にかかる力(負圧)は、時には大気圧の10~20倍(1~2MPa)以上に相当します。そのため、気泡が引き込まれるリスクを常に抱えて

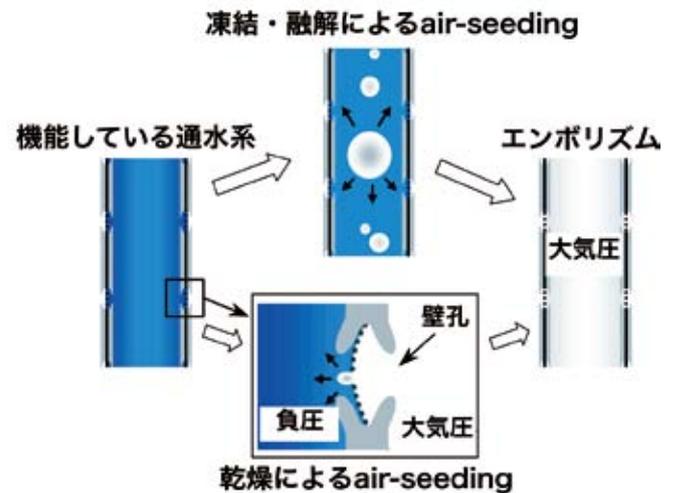


図1 通水系のエンボリズム (Hacke & Sperry 2001 を改編)

います。負圧が大きくなりすぎた時(例えば雨不足など)に通水系の中に気泡が発生・侵入することをair-seedingと呼びます(図1)。このような気泡が大きくなると、やがて水の流れをブロックしてしまいます。この現象を「エンボリズム(塞栓症)」と呼びます(図1)。

木部構造の水分保護機能

エンボリズムが木部通水系で大量に発生すると、樹木にとっては命に関わります。では、どのように樹木はエンボリズムを回避しているのでしょうか。水不足の時に落葉したり、根を多く張ったりして、通水系の水を確保しますが、幹や枝の木部の細胞にも水を抜けにくくする仕組みが備わっていると考えられています。細胞と聞くと、核や原型質がある生きた細胞を思い浮かべるのではないのでしょうか。ですが、これまで述べてきた通水系は、死んで空っぽになった細胞の細胞壁で出来ています。針葉樹は「仮道管」、広葉樹は「道管」から構成されています。針葉樹仮道管は通水と木材支持の二つの役割を兼ねていますが、広葉樹では木材支持の役割は「木繊維」という細胞が担っています。つまり、幹の細胞の多数は、これら死細胞なのです。ただし、木部の中には数年にわたって生き続ける細胞もあり、これを「柔細胞」とよび、糖やデンプンの貯蔵や代謝物質の生成などを担当しています。

これらの細胞間を水は行き来していますが、脱水時、水がどのように失われていくのか、これまでよくわかっていませんでした。なぜなら、木部の水の動きを直接観察する方法がなかったからです。近年、樹木の水分移動の研究にX線CTが世界的に使われるようになりました。そこでX線CTを使って、コナラの小枝からどのように水が抜けていくのか調べてみました⁽¹⁾。これまでは、通水系を守るためにまず木繊維から水がぬけ、その後柔細胞が道管に水を補う、と予想されていました。しかし実験の結果、道管→木繊維の順で水が抜け、柔細胞は水を保持し続けました(図2、3)。以上より、これまでの説と異なり、木繊維や柔細胞の水はほとんど道管に移動しないことが示されました。また、コナラには細胞壁の厚さが違う2種類の木繊維があり、道管の周りに存在する木繊維(周囲仮道管)は厚い細胞壁の木繊維や道管よりも長く水を蓄え続けました(図3)。コナラは比較的脱水しにくい樹種で、このような細胞が木部の貯水をサポートしていると考えられます。

一方、針葉樹の細胞にはこれとは違う仕組みがあります。木部細胞間には水が行き来する多くの小さな孔(壁孔)があります。壁孔の中には網目状の薄い膜(壁孔膜)があるのですが、針葉樹仮道管の壁孔膜は、膜の中央が水を通さないよう厚くなっていて、ある程度の圧力差が発生すると壁孔膜が壁孔を塞いで水を通さなくなります。この機能によって、脱水時にそれ以上の水の流出を防ぐ可能性がありそうです(図4)^(1,2)。ただ、詳細についてはまだわかっておらず、今後更なる研究が必要です。

おわりに

北海道のように冬の間厳しい寒さになる地域では通水系内の水が凍りますが、この際に水の中に溶けていた気体が気泡として分離します。そして、通水系内の水が溶けるとそのまま気泡として残ってしまうことがあります。厳しい冬があけて春が近づき、凍結と融解を繰り返すような気温になったときに、木部のエンボリズムが発生しやすくなると考えられます。ですが、ここに述べたような仕組みが、樹木が厳しい環境に耐える手助けをしているのでしょうか。

引用文献

- (1) Yazaki K et al. (2020) Am J Bot 107(8):1122-1135.
- (2) Yazaki K et al. (2018) J Exp Bot 69(3):589-602.

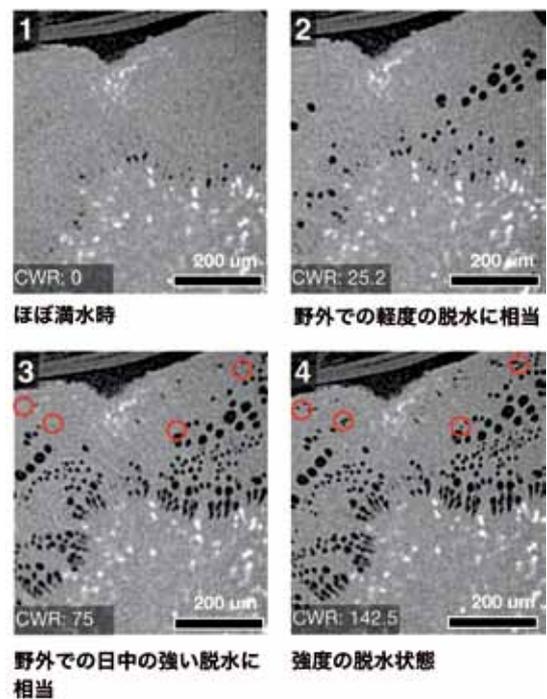


図2 X線CTによるコナラ木部の脱水過程(Yazaki et al. 2020 を改編)。黒い部分は水が抜けた道管です。乾燥が進む(1→4)と道管の中の水が抜けますが、日中の強い脱水時にも小さい道管の中に水が残ります(3-4、赤い丸内)。CWR: 単位体積あたりの積算脱水量。

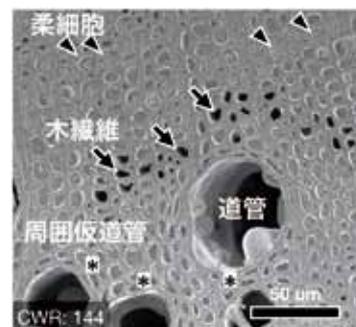


図3 脱水時のコナラ木部の水の分布(Yazaki et al. 2020 を改編)。低温走査型電子顕微鏡で水を氷として観察しました。木繊維(矢印)は脱水していますが、柔細胞(矢頭)や周囲仮道管(*)は水を蓄えています。

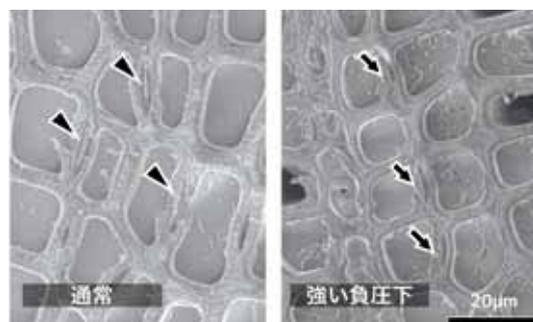


図4 負圧下でのクロマツの壁孔膜(Yazaki et al. 2018 を改編)。通常の壁孔は矢頭のような状態ですが、強い負圧下では矢印のように壁孔のどちらかに引き寄せられます。

森の土の硬さが植栽苗木の成長に及ぼす影響

植物土壌系研究グループ 菅井徹人

はじめに

光や二酸化炭素を利用して光合成を行う樹木は、根を通して、土から生活に必要な物質の多くを吸収しています。一方、樹木が枯れると葉や枝などが土の上に積み重なります。その後、昆虫やミミズ、微生物などに分解されて、土になります。このように、森の土とは、樹木の生活と切り離すことのできない大切な存在です。この大事な森の土を、どのように利用し、管理すればよいのでしょうか？ここでは、近年の人工林管理で普及している林業機械に注目しながら、森の土の硬さと植栽苗木の関係について紹介したいと思います。

林業機械と森の土

現代の林業でもチェーンソーや刈払い機を利用した伐採や下刈り作業等が行われていますが、このような作業の効率や安全性を改善する技術として高性能林業機械が注目されてきました。主に大型の重機が利用される高性能林業機械は、伐採作業や集材等の作業を効率的に行うことができる機械です。林業を行う人手の不足や再造林を背景として急速に普及し、令和元年には国内での保有台数が1万台を突破しました(図1)。

一方、高性能林業機械の利用が拡大することで、森の中に機械が入る頻度が増えると予想されます。森の中で高性能林業機械を利用するためには、森の外から作業する場所まで、安全に移動する道が

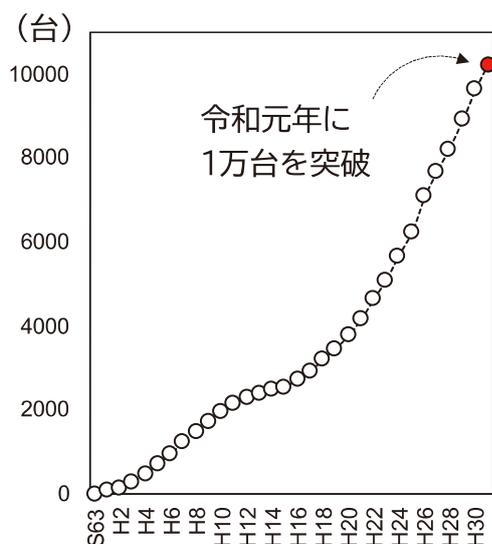


図1 日本国内における高性能林業機械の保有台数(林野庁 2021⁽¹⁾を参考に作成)

必要となります。また、森の中の作業する場所では、10 トン級の機械が動くことで、土が締め固まります。森の土に限らず、土が締め固まることは、土に根を張る植物や土の中の生物、土の中で循環する水分や養分に様々な影響を及ぼします。今後、ますます高性能林業機械の利用が拡大する中、機械の移動に必要な道の安全性を管理すると同時に、森の中の土が硬くなる影響を考慮しながら、機械の利用法を考える必要があります。

土の硬さについて

高性能林業の利用が拡大する中、森の土を管理することが重要になります。しかし、締め固めの影響を考慮した機械の利用技術は発展が遅れています。その背景には、締め固めによる樹木への影響が未だに明らかになっていないことがあります。また、農業とは異なり、林業では一般に耕運しないことから、土の硬さが変化するという現象については比較的、重視されていなかったのかもしれませんが。

森の土が締め固まると、どのような問題が生じるのでしょうか？この点を考える上で、土を耕すことが一般的な農業の研究例を参考にして整理します(図2)。締め固めとは、土の中の空気や水が排出され、密度が増加することを意味します。また土の排水性や通気性も低下することで、養分の利用性も低下します。さらに硬くなった土では摩擦によって、植物の根が伸びにくい状態となります。植物は根を通して養分や水分を吸収しているため、硬い土では、植物の成長が低下すると考えられています。

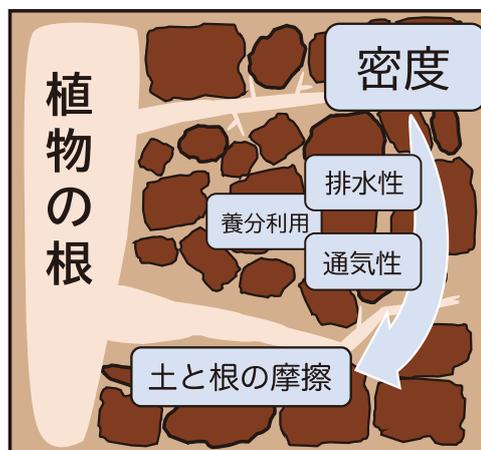


図2 締め固めによる土や植物への影響(Correa et al. 2019⁽²⁾を参考に作成)

植栽苗木への影響が懸念

農業の研究から、締め固めが土や植物に及ぼす影響を整理しましたが、森の土や樹木ではどうでしょうか？実は締め固めの影響は、硬さの程度や土の種類、気候条件に加えて、樹木の種類で異なることが知られています。最近の研究では、締め固めは特に1~2年生の苗木の成長を抑制する傾向が報告されています。逆に、10~20年が経過した後は、締め固めの影響が見られない場合もあります。農業とは異なり、植栽した苗木は長い時間をかけて成長するため、単純に農業の研究成果を応用することはできないかもしれません。

これまでに私が取り組んできた研究課題では、特に北海道の人工林で期待を集めるグイマツ雑種 F_1 と呼ばれるカラマツ属の育種開発品種を対象に、植栽苗木に対する締め固めの影響を評価しました⁽³⁾。研究は北海道大学の札幌研究林、実験苗畑で行いました。褐色森林土を主とする苗畑の土を締め固め、その後2年性の裸苗を植栽しました。苗木の成長は締め固めによって明らかに抑制されており、従来の報告と同じでした(写真1)。これまでは比較的注目されていなかった土の硬さが、グイマツ雑種 F_1 苗木の初期成長を制御する重要な要素だということが分かりました。



対照区

締め固め区

写真1 締め固めによる植栽当年の成長抑制の様子。対照区は耕運し、締め固め区では重機を利用しました。

おわりに

高性能林業機械による締め固めの影響に注目しながら土の硬さと植栽苗木の関係を考えてきました。林業の機械化は、林業を担う人手不足や作業の安全性、効率性の改善といった課題を解決する上でも必要不可欠です。また、機械化を通じて再造林にかかるコスト削減が模索される中、植栽苗木の保育作業である下刈りの効率化にも注目が集まっています。あまり重視されていなかった土の硬さを考慮することで、苗木の初期成長を改善できれば、保育コストの削減にも繋がるかもしれません。また、

どんなに成長が優れた樹種を利用しても、植栽してから数十年という長い時間をかけて収穫するという林業のあり様を考えると、森の土を適切かつ持続的に利用できるような管理体制が重要になると考えられます。ここでは詳しく紹介しなかった機械を移動させる道の管理では、経年劣化や急激な豪雨などによって、その安全性が脅かされています。環境が急激に変化している現代だからこそ、大きな期待を背負う林業機械を安全かつ適切に利用することが重要だと言えそうです。

引用文献

- (1) 林野庁 (2021) 特集1 森林を活かす持続的な林業経営. 令和2年度森林・林業白書 26.
- (2) Correa J et al. (2019) Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Journal of experimental botany* 70:6019-6034.
- (3) Sugai T et al. (2020) Evaluating soil-root interaction of hybrid larch seedlings planted under soil compaction and nitrogen loading. *Forests* 11:947.

北海道支所標本館の材鑑標本

産学官民連携推進調整監 矢部恒晶

北海道支所の標本館には、いろいろな樹種の材鑑標本が展示されています。材鑑とは、観察や識別の資料とするため、木材組織の表面や断面が見えるように樹木の幹を切り出した、木材の標本のことで、当館には大きな丸太状や板状の材鑑も展示され、木部の垂直の直交方向および水平の断面や樹皮を観察することができます。

これらの材鑑の多くは、現在の北海道支所の前身となった組織の内務省北海道林業試験場で作られた北海道産のものです。1936年(昭和11年)、当時西野幌(現江別市)にあった同試験場に森林標本館が設置され、試験場や附属試験林に昭和天皇が行幸されました。その前年頃からこれらの樹木の収集と材鑑の作製が行われ、行幸に合わせて標本館の展示物として整備されたようです。

1940年(昭和15年)以降、何度かの組織改編に伴い多くの施設は豊平に移転し、材鑑も当時の新たな標本館に移転しました。さらに1974年(昭和49年)、当時の林業試験場北海道支場が羊ヶ丘に移転し、現在に至っています。材鑑は、その後追加されたものも含めて現在の標本館に展示されています。

2021年の今年からすると85年以上前、野幌や北海道内にはこのような大きな樹木がまだ多く残っていたと思われます。しかしそれらも次第に伐採され、現在では北海道産のこのような大径木は入手困難となっており、これらの材鑑は大変貴重な標本と言えます。ご来館の際にはどうぞご覧下さい。なお、新型コロナウイルス感染症の状況等により開館日が変わることがありますので、北海道支所のホームページなどで情報をご確認下さい。



写真1 北海道支所標本館



写真2 材鑑標本



写真3 材鑑の各方向の断面と樹皮

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所北海道支所 研究情報誌
『北の森だより』 No.27 (本号よりユニバーサルデザインフォントを使用しています)

編集・発行 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所北海道支所 (担当:地域連携推進室)
〒062-8516 北海道札幌市豊平区羊ヶ丘7番地
TEL(011)851-4131 FAX(011)851-4167
URL <http://www.ffpri.affrc.go.jp/hkd/>

印刷 小南印刷株式会社
〒060-0009 札幌市中央区北9条西23丁目2-5
TEL(011)641-5373 FAX(011)611-4343

令和3年(2021年)12月20日発行

本誌から転載・複写する場合は、森林総合研究所北海道支所の許可を受けて下さい。

この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。

