日 本 木 材 学 会

北 海 道 支 部 講 演 集

第 55 号

令和 5 年 11 月

日本木材学会北海道支部

旭川

日本木材学会北海道支部講演集
第 55 号

目次

＜口頭発表＞
13:05～13:50
【座長】今井良 (道総研林産試)
1. 道産カラマツ CLT を床版に用いた林道橋の改修……1
〇岡本涼太郎, 佐々木貴信, 澤田圭 (北大院農), 大橋義徳, 宮内輝久,
高梨隆也 (道総研林産試), 久保征治 (北海道空知総合振興局)
2. 旭川市近郊における非住宅木造建築物における室内の平衡含水率 ……3
〇石原亘（道総研林産試）
3. 有限要素法解析を用いたラミナの繊維直交方向の応力分布の評価 ……7
〇川合慶拓, 高梨隆也, 石原亘, 大橋義徳 (道総研林産試), 澤田圭,
佐々木貴信 (北大院農)

13:50～14:35
【座長】大崎久司 (道総研林産試)
4. ビニールハウスを用いた木材乾燥法の可能性 …… 10
〇土生川友香, 佐々木貴信, 澤田圭, 佐々木義久 (北大院農)
5. ICT ハーベスタと自動選木機・人力による径級検知の比較…… 12
〇酒井明香, 石川佳生 (道総研林産試)
6. 60 年生ヨーロッパトウヒ人工林における間伐強度の材密度への影響…… 15
〇村上了 (道総研林産試), 大野泰之, 内山和子, 蝦名益仁 (道総研林業試),
山田健四 (道総研森林研究本部), 滝谷美香 (道総研林業試)

14:35～14:55　休憩

14:55～15:40
【座長】東智則 (道総研林産試)
7. 食用担子菌菌床栽培におけるドロノキ樹皮温水抽出物の利用 …… 19
〇小黒浩平, 玉井裕, 幸田圭一 (北大院農)
8. 北海道産アミガサタケ類の培養 …… 21
〇窪田愼太郎, 玉井裕, 幸田圭一 (北大院農)
9. 食用キノコ栽培における樹木葉の添加効果【予報】 …… 22
〇渋川凜太郎, 幸田圭一, 玉井裕（北大院農）

15:40～16:40

【座長】幸田圭一 (北大院農)

10. リグノスルホン酸塩を原料としたゲルの作製とその性質 …… 23
〇田内郁士, 鈴木栞, 重冨顕吾, 浦木康光 (北大院農)
11. 木質ペレット由来ガス化発電副産物の土壌改良効果
ーホウレンソウ栽培を例にしてー …… 24
〇西宮耕栄, 本間千晶 (道総研林産試), 中村隆一 (道総研上川農試)
12. ナナカマドの樹皮組織から発生するシアン化水素の検出 …… 27
〇小山正登, 重冨顕吾, 玉井裕, 荒川圭太, 佐野雄三 (北大院農)
13. 樹皮に含まれる氷核物質の解析 …… 30
〇筒井路実, 古賀泰雅, 荒川圭太 (北大院農)

0-1　道産カラマツ CLT を床版に用いた林道橋の改修

○岡本涼太郎，佐々木貴信，澤田圭（北大院農），大橋義徳，宮内輝久，高梨隆也（道総研林産試）
久保征治（北海道空知総合振興局）

【緒言】

インフラの長寿命化に向けて橋梁の改修・補修はわが国の大きな課題である。市町村道や林道、農道などにある多数の小規模橋梁では、角材を並べるなどの木製床版が用いられている例も少なくなく、劣化した床版の取替工事では改修前と同等の軽量な床版が求められる。土木分野での利用が期待されている CLT（直交集成板）は、軽量であり、橋梁床版として十分な強度を有していることから、秋田県などで試験的に施工が行われている（図 1）。これらの CLT は何れもスギ CLT が用いられているが、令和 4 年度に北海道内の林道橋の床版補修においてカラマツ CLT が初めて採用された。

林道橋（秋田県）　農道橋（秋田県）　歩道橋（鹿児島県）

図 1　CLT 床版を用いた橋梁

【対象橋梁】

対象橋梁は北海道赤平市内の林道に架かる奥大谷沢線 1 号橋であり、橋長 6.8m、設計荷重 90kN の 3 等林道橋である。幅員 3.7m の林道橋である（図 2）。H 形鋼の主桁や横桁、縦桁の鋼部材の腐食や木床版の腐朽劣化により架設後約 42 年を経過して木床板の CLT への取替や主桁の塗装などの工事が行われた。

改修前の床版には針葉樹の厚さ 100mm の製材が橋軸方向に敷並べられ、橋面には厚さ 40mm の製材が幅員方向に敷かれていた。改修工事では、縦桁の数を減らし、床版に厚さ 210mm のカラマツ CLT を用いて設計荷重 140kN で設計が行われた。CLT は、JAS 3079（直交集成板の日本農林規格）の異等級構成 CLT（Mx120-7-7）を用いた。このときのラミナの構成は図 3 のようであり、外層に 12GPa、内層に 6GPa の曲げヤング係数のラミナが配置されている。この構成に基づき CLT 関連告示等解説書 [1]に示される方法により求めた CLT の曲げ強度は強軸方向で F_{bs}=13.8N/mm^2、弱軸方向で F_{bw}=3.8N/mm^2 であった。なお、床版支間方向（橋軸直角方向）が CLT の強軸方向、床版支間直角方向（橋軸方向）が弱軸方向としている。CLT の許容曲げ応力度 σ_{bsa} と σ_{bwa} は、表 1 に示すように、曲げ強度に各種の係数をを乗じて求める [2]。

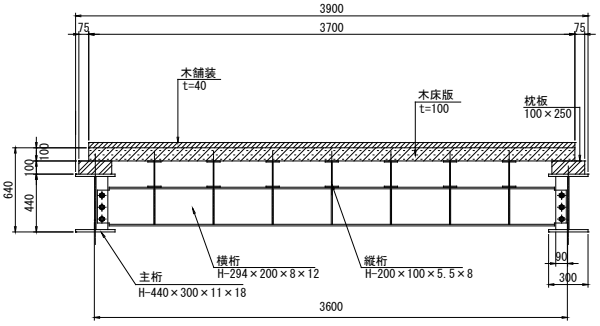


図 2　断面図（改修前）

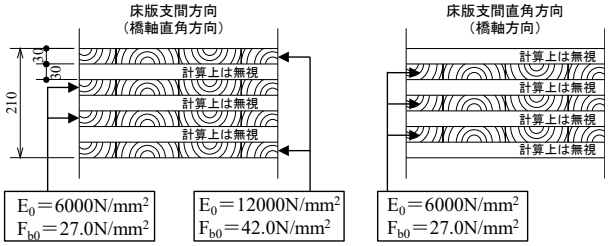


図 3　CLT の構成（Mx120-7-7）

表 1　CLT 床版の許容曲げ応力度

方向	床版支間方向	床版支間直角方向
曲げ強度 F_b	13.8 N/mm^2	3.8 N/mm^2
F_b×1.1/3	5.1 N/mm^2	1.4 N/mm^2
含水率影響係数	0.8	0.8
許容曲げ応力度	σ_{bsa}=4.0 N/mm^2	σ_{bwa}=1.1 N/mm^2

【改修工事概要】

図 4 に改修後の断面図を示す。CLT 床版の寸法は厚さ 210×幅 1110×長さ 4300 ㎜㎜であり、橋軸方向に 6

枚並べて設置されている。床版は 2 本の主桁と 2 本の縦桁で幅員方向に支持されている。また、隣り合う CLT の継ぎ目において床版の連続性が断たれることから、中間部の床版端部には、床版の支持と車両走行時の段差防止として、CT 形鋼を補助横構として配置している。また、CLT 床版は、縦桁や CT 形鋼とラグスクリューボルト（LSB）で固定されている[3)]。

北海道北見市の CLT 工場で製作された床版は、LSB の埋込加工後に防水処理として全面にポリウレアが塗布された（図 5）。これらの加工後に測定した CLT の重量は 1 枚当たり約 540kg（単位体積重量 540kg/m^3）であった。また、縦振動法およびたわみ振動法で求め CLT のヤング率（平均値）はそれぞれ 8.1GPa、10.6GPa であった。防水処理の性能を確かめるために、ポリウレアで塗布処理した厚さ 150×幅 145×長さ 300 ㎜のカラマツ CLT を用いて減圧加圧処理（室温水中に浸せき→0.085MPa の減圧を 5 分間→0.51±0.03MPa の加圧を 1 時間→これらの処理を 2 回繰り返し）を行った。処理前後での試験体の重量や寸法の変化を測定した結果、質量増加率（吸水率）は無処理材の 34%に対して処理材が 0.87%、寸法変化率は無処理材が最大 1.9%だったのに対して処理材は 0.1%程度であり高い防水性が確認された。

CLT 床版の架設は令和 5 年 1 月に行われ、両岸に 3 体ずつ置かれた CLT をそれぞれの方向に配置されたバックフォー（クレーン仕様）によって設置された（図 6）。6 枚の CLT の設置に要した時間は 1 時間程度であり、LSB の固定作業を含めても 2 時間程度であった。橋面のアスファルト舗装を敷設するにあたり、ポリウレアの耐熱性やアスファルトの接着性を考慮して、CLT 床版上面にアスファルトルーフィングが敷設された。アスファルト舗装の敷設は令和 5 年 3 月に行われた（図 8）。

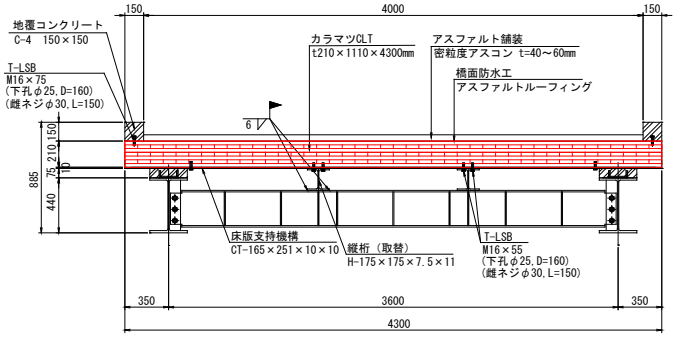


図 4　断面図（改修後）

図 5　CLT の防水処理

図 6　CLT 床版の架設

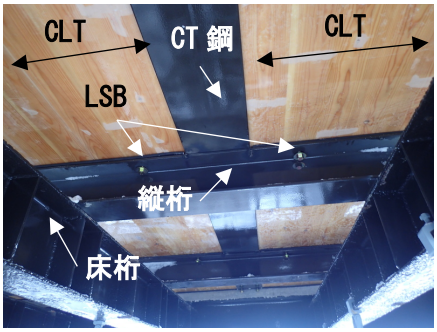


図 7　LSB による CLT の固定

図 8　アスファルト敷設

【まとめ】

道産カラマツ CLT を用いた林道橋の床版取替が行われた。カラマツはスギやトドマツよりも高強度であり、高い強度等級の CLT が製造可能であり、床版材としての需要が期待される。なお、本橋の改修後の性能を確認することを目的に、令和 5 年 8 月に 10 トンダンプを用いた載荷試験を実施した。

【参考文献】

1）日本住宅木材技術センター：CLT 関連告示等解説書，pp.67-85，2016.
2）日本建築学会：木質構造設計規準・同解説，pp.153-157，2002 ．
3）佐々木貴信，後藤文彦，荒木昇吾，今井良，本宮由美子：LSB を用いた CLT の接合部強度，令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会，V-73，2022.

【謝辞】本研究の一部は JSPS 科研費 21H01412 の助成を受けて実施した。

0-2　旭川市近郊の非住宅木造建築物における室内の平衡含水率

○石原　亘（道総研林産試）

【緒言】

昨今，木造の非住宅建築物において，構造材（主として，構造用集成材）を“内装現し”仕上げとしている例が多くみられる（**図 1**）が，北海道のような寒冷地においては冬季の室内が著しい低湿度環境になるため [1,2]，心持ち製材に比べて割れが生じにくい集成材であっても，過乾燥による割れが生じる例が多い（**図 2**）。こうした割れは，美観を損ねるだけでなく，ヤニだれの誘発や，補修手間を生じさせる。実務者向けの木材乾燥のマニュアル [3] では，こうした割れの発生や寸法変化を抑えるために，乾燥時の目標含水率を製品供用時の使用環境における平衡含水率（EMC）をやや下回る程度に設定することが推奨されている。

図 1　構造材の“内装現し”

一般的に，北海道内の平衡含水率は 15%程度とされており [4,5]，集成材の日本農林規格（JAS）の含水率基準の上限（15%）と同程度であるが，これは屋外での温湿度を基準とした平衡含水率であり，建築物の室内環境に基づいたものではない。特に，“内装現し”が多用される非住宅木造建築においては，加湿が難しい大空間を有することや，用途によっては人の出入りが限定的であることから，住宅建築よりも乾燥した環境になることが予想される。そこで，寒冷地にて構造材を“内装現し”で使用する場合の目標含水率を検討するために，北海道旭川市近郊の非住宅木造建築（4 物件，一部に混構造建築を含む）において，288 日間（9 ヶ月と 15 日間）の室内の温湿度データを収集し，平衡含水率の調査を行った。

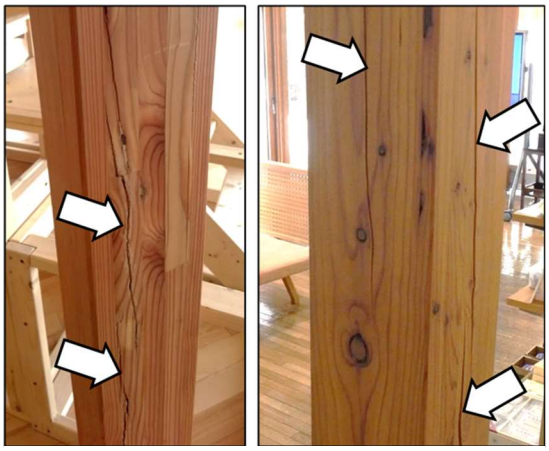


図 2　構造用集成材に生じた割れ

【調査方法】

［調査対象の非住宅木造建築および温室度の測定］

本報における調査の対象は旭川市近郊の非住宅木造建築 4 物件で，温湿度の測定場所は計 7 か所とした。測定は温湿度データロガー（㈱ティアンドデイ，TR-72nw（おんどとり））により行い，付属のセンサー（㈱ティアンドデイ，TR-3100）は新品を使用した。測定間隔は 1 時間（毎時 00 分），測定期間は冬季を跨ぐ 288 日間（2021 年 6 月 10 日～2022 年 3 月 25 日）とした。調査対象の各非住宅木造建築（測定場所）の名称および概要について**表 1** に，各建築物の外観および内観を**図 3** に示す。

［平衡含水率の計算］

平衡含水率の計算は，木材乾燥のテキスト [6] に記載されている 2 つの計算式（①Hailwood and Horrobin の吸着理論に基づく式 [7] および②齋藤らの提案する実験式 [4,5]）を用いて行った。以下に両式を示す。

① Hailwood and Horrobin の吸着理論に基づく式（以下，Hailwood-Horrobin の理論式）

$$\mathrm{EMC} = \frac{1800}{M}\left(\frac{abh}{1+abh} + \frac{ah}{1-ah}\right)$$

$$a = 0.6740 + 0.001053T + 0.000001714T^2$$

$$b = 3.730 + 0.03642T + 0.0002547T^2$$

$$M = 216.9 + 0.01961T + 0.005720T^2$$

ここで，EMC：平衡含水率（%），T：温度（華氏），h：湿度（＝相対湿度/100）

なお，Hailwood-Horrobin の理論式における T は華氏温度であるため，データロガーの記録（摂氏（℃））を華氏に変換して計算した。

② 齋藤らの提案する実験式（以下，齋藤の実験式）

$$\mathrm{EMC}_1 = \frac{a + bx + cx^2 + dy + ey^2 + fy^3}{1 + gx + hy + iy^2 + jy^3} \qquad (②-1\text{ 式})$$

ここで，EMC_1: 平衡含水率（%），x: 温度（℃）（$1 \leqq y \leqq 90$），y: 相対湿度（%）（$5 \leqq y \leqq 99.5$），a: 1.33，b: -8.27×10^{-3}，c: -6.40×10^{-5}，d: 1.10×10^{-1}，e: -2.28×10^{-3}，f: 1.47×10^{-5}，g: -1.16×10^{-5}，h: -2.42×10^{-2}，i: 2.54×10^{-4}，j: -9.85×10^{-7}

ただし，低気温においては以下の式を用いる。

$$\mathrm{EMC}_2 = \frac{a + bx + cy + dy^2 + ey^3}{1 + fx + gy} \qquad (②-2\text{ 式})$$

ここで，EMC_2: 平衡含水率（%），x: 温度（℃）（$-10 \leqq y \leqq 10$），y: 相対湿度（%）（$7 \leqq y \leqq 97$），a: 0.93×10^{-1}，b: -1.47×10^{-2}，c: 1.87×10^{-1}，d: -2.35×10^{-3}，e: 7.92×10^{-6}，f: -1.60×10^{-4}，g: -8.86×10^{-3}，本報においては，気温 5℃以下において②−2 式を用いることとした。

また，本報では，比較のために気象台の温湿度データ [8] より，旭川市屋外における平衡含水率を両式により計算した。この際，齋藤の実験式においては，相対湿度が 99.5%を超える場合と，気温が−10 度を下回る場合の式（係数）は規定されていないが，前者については気温に応じた式（②−1 式および②−2 式）を，後者については②−2 式により平衡含水率を参考値として求めることとした。

表 1　調査対象の非住宅木造建築と測定場所の概要

施設名称	所在地	用途	構造・階数	データロガー設置場所	冷暖房設備
鷹栖地区住民センター「ふらっと」（うち鷹栖町図書室）	鷹栖町	図書館	木造+RC造（混構造） ※調査対象は木造部分 平屋	図書開架スペース（本棚上部）	冷暖房(ヒートポンプ式) 大型加湿器（30畳用）2台設置
				読書スペース（学習机上部）	冷暖房(ヒートポンプ式)
くるみなの木遊館	当麻町	木育施設	木造 平屋	遊戯室受付（本棚上部）	冷暖房(ヒートポンプ式) 薪ストーブ，床暖房
				事務室（ロッカー上部）	冷暖房(ヒートポンプ式)
大谷さくら幼稚園	旭川市	幼保施設	木造 平屋	ロビー（本棚上部）	床暖房
				遊戯室（仏壇）	床暖房，灯油ストーブ 冷風扇（冷房は事務室・保育室のみ）
丘のまち郷土学館「美宙」	美瑛町	資料館	木造 ２階建て	2階フリースペース（本棚上部）	床暖房（1F部分のみ）

図 3　調査対象の建築物

【結果および考察】

温湿度および平衡含水率の測定結果を**表 2** に，室内温湿度と平衡含水率の経時変化の代表例を**図 4～図 7** に示す。結果より，①建物の用途や冷暖房の稼働状況，平衡含水率の計算方法の違いにより多少の

差異はあるものの，非住宅木造建築における室内の平衡含水率は 7～9%であり，屋外のそれより大幅に低いこと，②特に冬季の平衡含水率は 2～4%にまで低下すること，③室内の平衡含水率の季節変動は 10%程度と大きいことが示された。

以上の調査結果より，寒冷地にて構造材を“内装現し”で使用する場合の目標含水率は 10%をやや下回る程度が適切であると考えられる。もっとも，実際の製品が平衡含水率に達するのにどの程度の期間を要するのかについては，材料の断面寸法や乾燥履歴（ヒステリシス）の影響を考慮した実験的な検証が必要である。また，著者ら[9,10]は，ラミナ製品（CLT・集成材）において，ラミナの貼り合わせの方向等を工夫することで割れのリスクが抑えられることを報告しており，実務上ではこれらの知見を踏まえて目標含水率を設定すべきと考えられる。

表 2　温湿度および平衡含水率の測定結果

施設名称	計測場所	気温［℃］			相対湿度［%］			齋藤の実験式による平衡含水率［%］			Hailwood-Horrobin の理論式による平衡含水率［%］		
		平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値
鷹栖地区住民センター「ふらっと」（うち鷹栖町図書室）	図書開架スペース	**21.4**	31.1	10.0	**39.1**	78.0	13.0	**7.3**	14.5	3.1	**8.2**	16.5	3.8
	読書スペース	**21.8**	34.3	8.4	**36.1**	78.0	7.0	**6.8**	14.5	2.0	**7.7**	16.5	2.7
くるみなの木遊館	遊戯室受付	**21.2**	30.7	7.8	**37.2**	75.0	7.0	**7.0**	13.7	2.1	**7.9**	15.5	2.6
	事務室	**21.7**	33.5	7.1	**37.6**	77.0	6.0	**7.1**	14.2	1.9	**7.9**	16.1	2.3
大谷さくら幼稚園	ロビー	**20.9**	35.6	5.4	**40.9**	75.0	12.0	**7.6**	13.6	2.8	**8.4**	15.5	3.8
	遊戯室	**20.9**	35.6	5.4	**42.3**	74.0	20.0	**7.9**	13.6	4.2	**8.6**	15.2	5.2
丘のまち郷土学館「美宙」	2階フリースペース	**22.0**	32.2	12.9	**35.4**	68.0	12.0	**6.7**	12.0	2.9	**7.5**	13.5	3.7
（参考）旭川地方気象台		**7.9**	37.2	-19.7	**78.4**	100.0	25.0	**16.3**	31.0	4.7	**17.3**	28.6	6.0

注：平均値，最大値および最小値は2021/6/10～2022/3/25の期間が対象

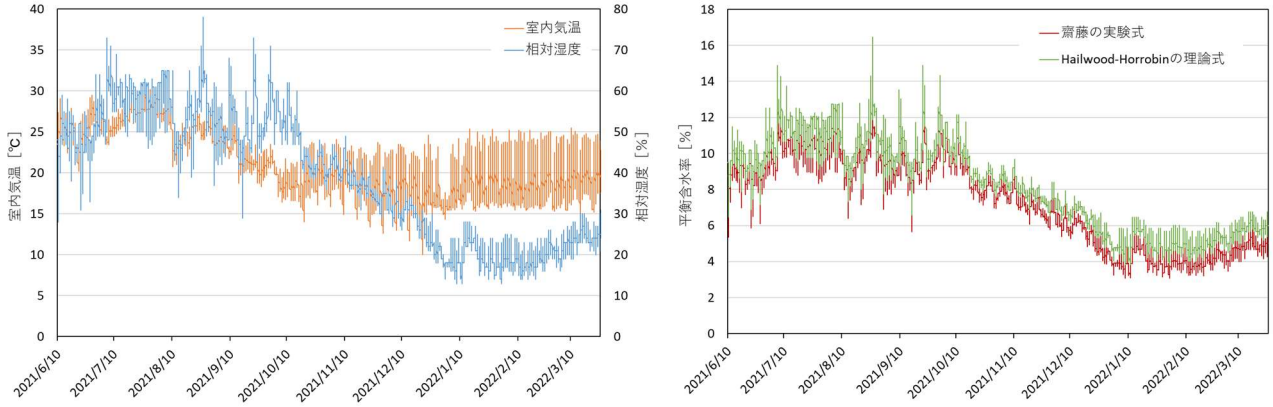


図 4　温湿度および平衡含水率の経時変化の例（鷹栖地区住民センター「ふらっと」・図書開架スペース）

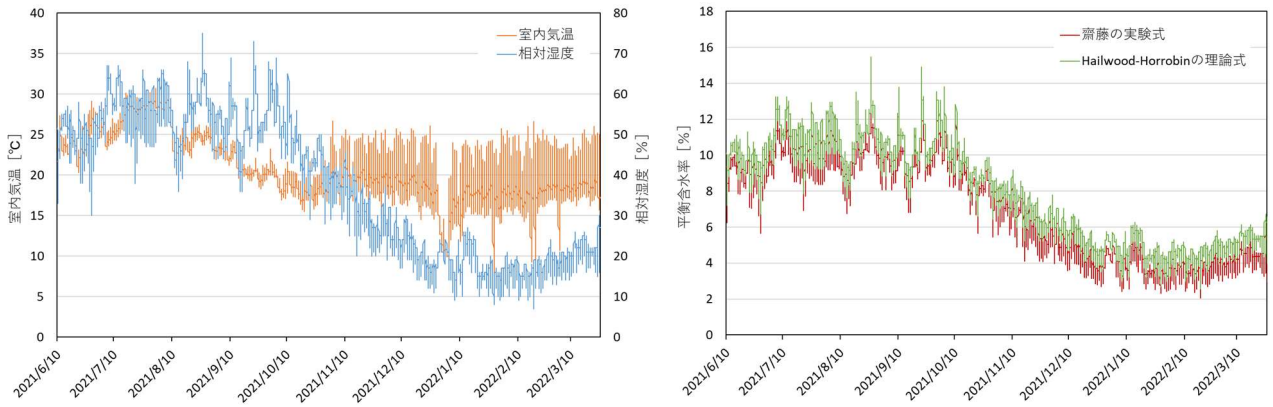


図 5　温湿度および平衡含水率の経時変化の例（くるみなの木遊館・遊戯室受付）

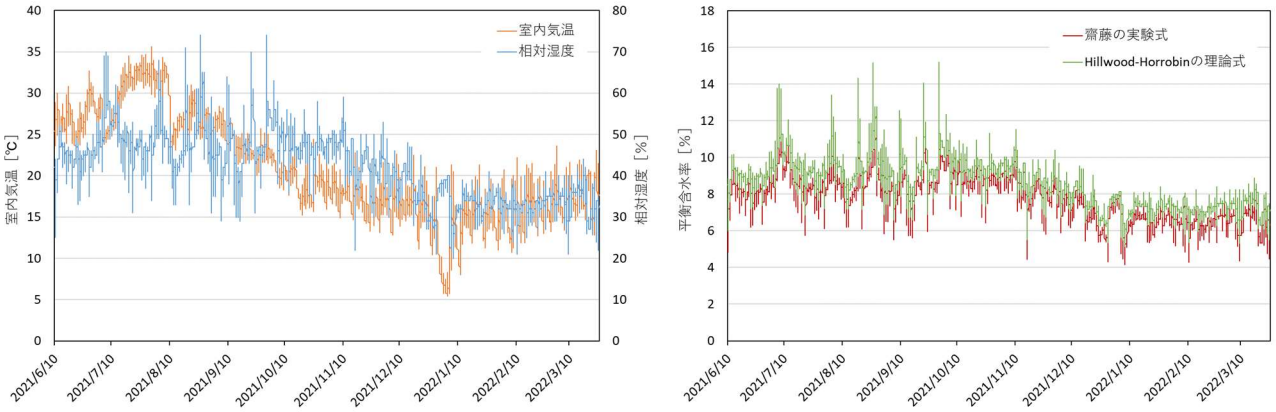


図 6　温湿度および平衡含水率の経時変化の例（大谷さくら幼稚園・遊戯室）

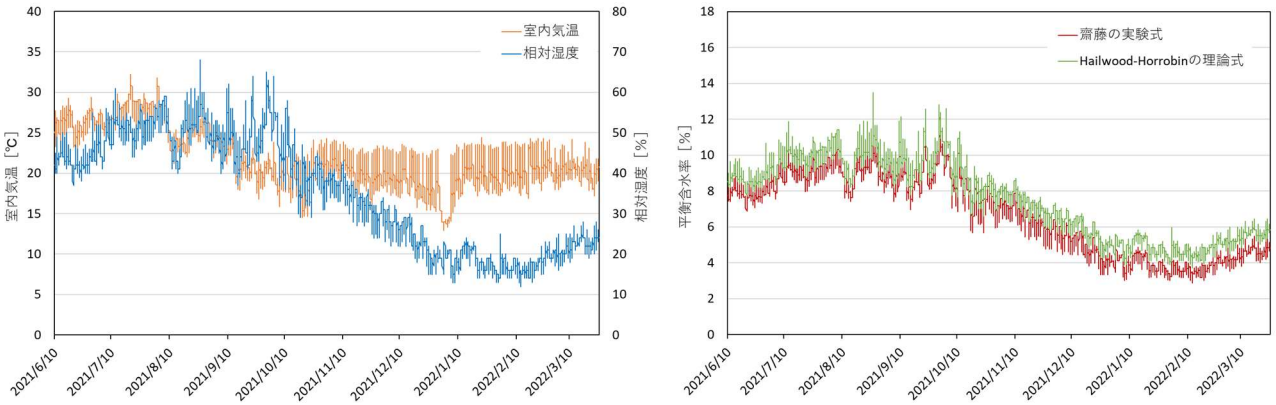


図 7　温湿度および平衡含水率の経時変化の例（丘のまち郷土学館「美宙」・2 階フリースペース）

【謝辞】

温湿度の測定にあたっては，調査対象物件の関係者の皆様（鷹栖町建築水道課・髙見様，鷹栖町教育委員会・山本様，くるみなの木遊館所長（現，アイト産業㈱）・八鍬様，美瑛町文化スポーツ課・荒明様，大谷さくら幼稚園副園長・河井様）に多大なるご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

1) 立松宏一ほか：日本建築学会北海道支部研究報告集 84, 415-418 (2011).
2) 大澤元毅ほか：空気調和・衛生工学会平成 28 年度大会学術講演論文集 8, 109-112 (2016).
3) （公社）日本木材加工技術協会編：木材乾燥講習会テキスト（令和 4 年度版），東京，2022，141-162.
4) 齋藤周逸ほか：木材学会誌 62(5), 182-189 (2016).
5) 齋藤周逸ほか：森林研究所研究報告 16(3), 163-211 (2017).
6) 信田聡ほか編：木材の乾燥，海青社，滋賀，2020，71-74.
7) Simpson, W.T.：*For. Prod.J.*21(5), 48-49 (1971).
8) 気象庁旭川地方気象台：https://www.jma-net.go.jp/asahikawa/ (2023 年 10 月 17 日参照).
9) 石原亘ほか：木材工業 75(1)，10-15 (2020).
10) 石原亘ほか：林産試だより 2023 年 8 月号, 3, (2023).

0-3　有限要素法解析を用いたラミナの繊維直交方向の応力分布の評価

○川合慶拓，高梨隆也，石原亘，大橋義徳（道総研林産試），
澤田圭，佐々木貴信（北大院農）

【緒言】

CLT を建築物の屋根や床などの水平部に使用すると，部材には面外方向のせん断応力が発生する。CLT の面外せん断強度は，主に直交層のせん断破壊によって決定するため，CLT を構造利用する上で，ラミナに発生するせん断応力の分布を把握することは重要である。既往の研究 [1] では，ラミナがせん断変形した際に発生する応力を有限要素法（以下，FEM）によって数値解析したところ，繊維直交方向（面外方向）の応力が材端部に集中し，せん断応力が低下する傾向が見られた。本研究では，ラミナが塑性変形した際の応力分布を FEM 解析によって検証し，ラミナの枚数および幅の変化による影響を評価した。

【解析方法】

本研究では，オープンソース CAE ソフトウェアである Salome-Meca 2021 w64[2] を使用した。解析するモデルは，既報 [3] における圧縮型試験での試験体と同様とし，120 mm（120S），100 mm（100S），80 mm（80S），幅 60 mm（60S），幅 60 mm のラミナを二枚並列した 60D に加え，幅 60 mm のラミナを三枚並列した 60T の 6 条件とした。試験体の各寸法は Fig. 1 に示す通りとした。モデルは全条件においてソリッド要素で構成し，それぞれの節点数および要素数は Table 1 に示す通りとした。平行層ラミナと直交層ラミナが接する面は連結状態に設定した。また，60D および 60T において，各直交層ラミナ同士を隣接させる（空隙を 0 mm とする）と，ソフトの性質上，全てのラミナが一体となった解析となるため，直交層ラミナの間に 60D で 0.7 mm，60T で 0.3 mm の空隙を設置した。

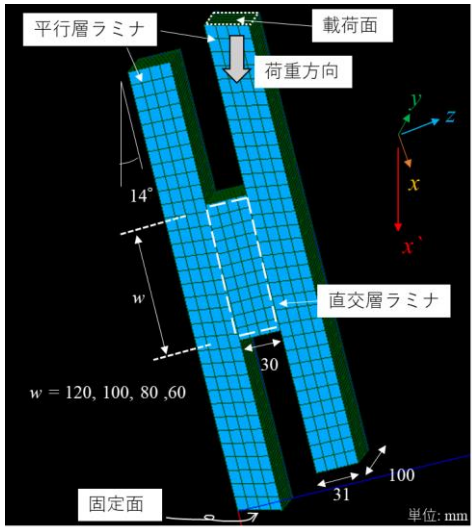


Fig. 1 モデルの概要

モデルに付与する荷重は，x 軸に対して時計周りに 14 度傾いた方向（x`方向）に対する変位量が約 5.0 mm となる値とした。この場合，平行層ラミナには主に x 軸方向への軸力，直交層ラミナには xz 面に対してせん断力が発生するため，平行層ラミナには，繊維方向のヤング係数（E_L）および繊維方向に対する半径方向のポアソン比（μ_{LR}）を設定する必要がある。また，直交層ラミナには木口面（RT 面）に対してせん断力（ローリングシアー）が発生するため，木口面内のせん断弾性係数（G_{RT}）および接線方向に対する半径方向のポアソン比（μ_{TR}）が必要となる。そこで，木口面のせん断弾性係数を直交層ラミナのヤング係数（G_{RT}）と仮定し，既報 [3] のラミナ条件に基づいて平行層ラミナの E_L を 16.0 kN/mm^2，直交層ラミナの E_L を 12.0 kN/mm^2 とした。そして，文献値 [4,5] を参考に，以下の式より E_L，G_{RT}，μ_{LR}，および μ_{TR} を求め，これをモデルの物性値とした（Table 2）。

Table 1 モデルの節点数と要素数

条件	節点数	要素数
120S	4581	6186
100S	4460	6030
80S	4340	5874
60S	4220	5718
60D	4700	6412
60T	5180	7106

$$E_T = 0.05E_L \quad (1)$$
$$E_R = 0.1E_L \quad (2)$$
$$G_{RT} = 0.003E_L \quad (3)$$
$$\mu_{LR} = 0.40 \quad (4)$$
$$\mu_{RT} = 0.70 \quad (5)$$
$$\mu_{TR}/E_T = \mu_{RT}/E_R \quad (6)$$

ここで，E_T: ラミナの接線方向のヤング係数（kN/mm²），E_R: ラミナの半径方向のヤング係数（kN/mm²），μ_{RT}: 半径方向に対する接線方向のポアソン比

Table 2 モデルの物性値

E_L	G_{RT}	μ_{LR}	μ_{TR}
16000	36	0.40	0.35

弾塑性解析では，xz 面に作用するせん断力に対する降伏応力およびその際のひずみを設定する必要があるが，それらの計算方法に関する規定はない。そこで本研究では，既報 [3] の圧縮型試験で得られた幅 60 mm（$n=17$）のせん断応力-変位曲線から，降伏点（降伏時のせん断応力（以下，降伏せん断応力（τ_y））とそのひずみ（以下，降伏ひずみ（ε_y））および最大点（せん断応力の最大値（以下，最大せん断応力（τ_{max}））とそのひずみ（以下，最大ひずみ（ε_{max}））を求めた。そして，それぞれの平均値を本研究における直交層ラミナの降伏せん断応力（τ_y），降伏ひずみ（ε_y），最大せん断応力（ε_{max}），および最大ひずみ（ε_{max}）とした（Table 3）。なお，せん断応力の増分に関して，原点-降伏点間および降伏点-最大点間それぞれで，ひずみに対して線形的に変化するものとした。また，最大点を超えた場合は，応力値は一定でひずみが無限に増大する設定とした。

Table 3 モデルの応力およびひずみ

τ_y	ε_y	τ_{max}	ε_{max}
0.767	0.032	1.307	0.076

【結果および考察】

x`方向に対する変位が約 5.0 mm となった際のせん断応力を Table 4 に示す。ラミナ幅（60S～120S）で比較すると，どの条件でも同等の値となった。同じせん断面積（120S と 60D）では，60D の方が低く示された。これは，既報 [3] と同様の結果である。ラミナの枚数（60S，60D，60T）で比較すると，ラミナの枚数が多い条件ほど低い値となった。

Table 4 解析結果

条件	せん断応力 (N/mm²)
120S	0.71
100S	0.70
80S	0.70
60S	0.69
60D	0.65
60T	0.64

せん断応力の分布を Fig. 2 に示す。直交層ラミナの中央部では，全条件で同等の値を示す傾向となった。一方，材端を起点とした約 15 mm の範囲では，材端に近いほど低い値となった。また，60D および 60T では材端に加え，ラミナの隣接面周辺においても低く示された。

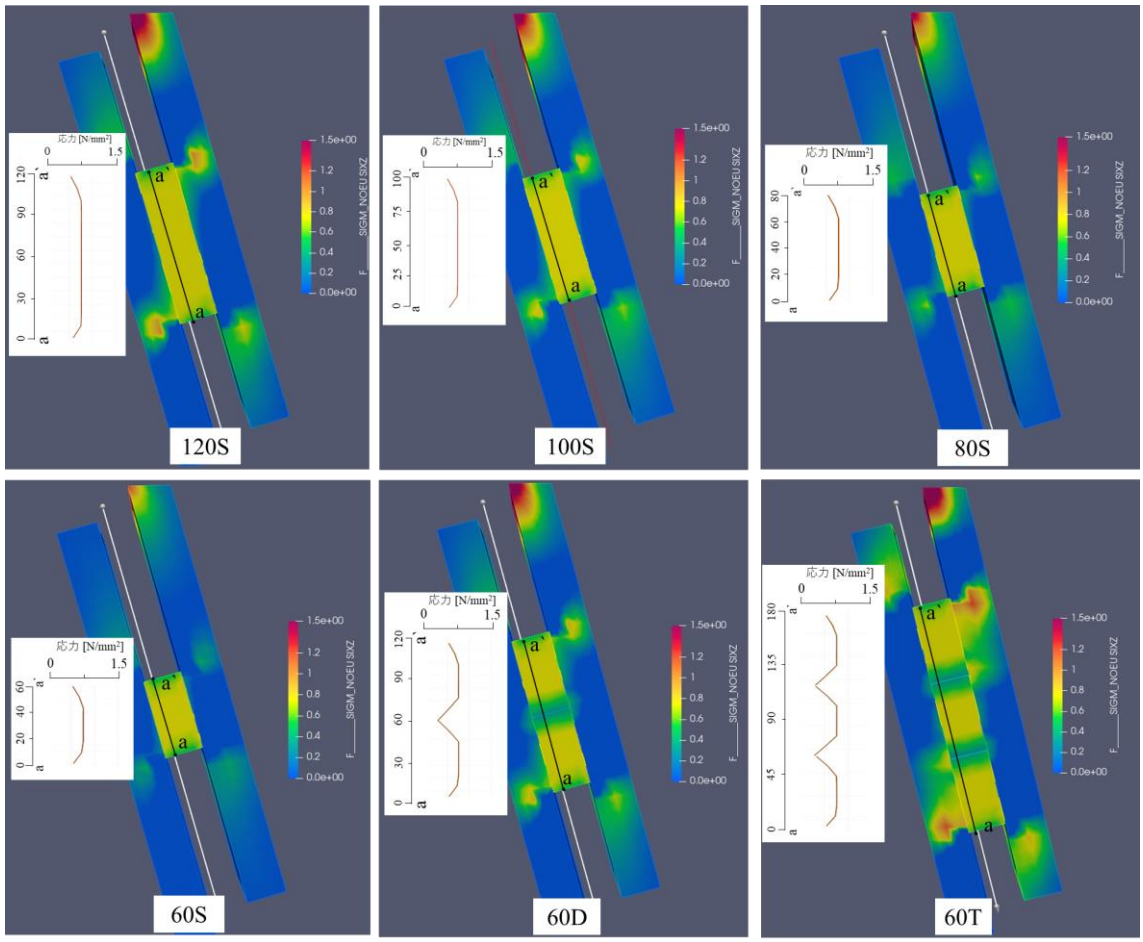


Fig. 2 せん断応力の分布

面外応力の分布を Fig. 3 に示す。全条件において，応力はラミナ材端に分布する傾向となり，報告[1]と同様の結果が示された。また，複数の直交層ラミナで構成される 60D および 60T では，材端に加えてラミナの隣接面でも同様に，応力が分布している様子が見られた。

面外応力が発生している場所は，せん断応力（Fig. 2）と同様，主にラミナの材端から約 15 mm までの範囲にあり，材端ほど面外応力が増大する反面，せん断応力は低下している。同様の傾向は，ラミナの隣接面（60 および 60T）においても見られ，隣接面における面外応力の影響によって 60D の応力が 120S よりも低下したと考えられる。

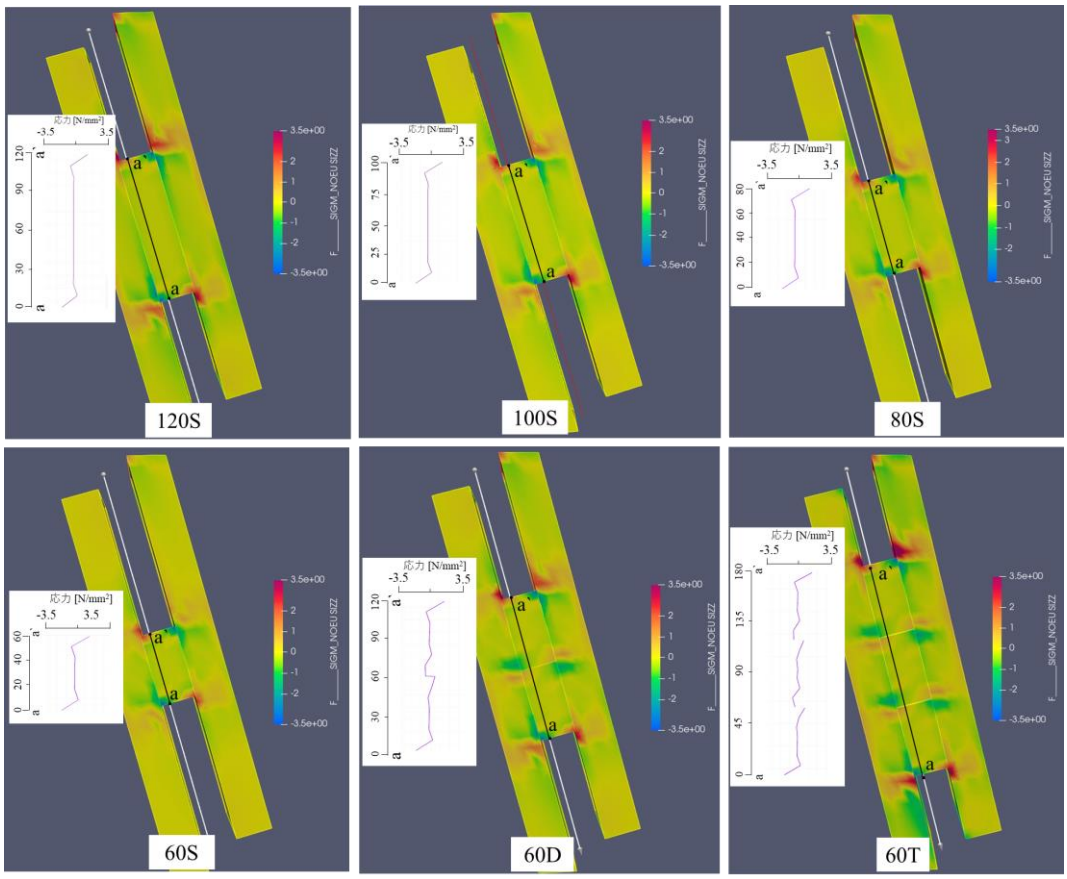


Fig. 3 面外応力の分布

【参考文献】

1) Ehrhart ら: Rolling shear properties of some European timber species with focus on cross laminated timber (CLT): test configuration and parameter study. Conference paper of International Network on Timber Engineering Research (INTER 2015), Volume: 2nd meeting, Šibenik, Croatia, August 24–27, 2015, pp.61-76.
2) SimulEase: Affordable and convenient numerical simulation field, French (2023) https://code-aster-windows.com/download/.2023 年 10 月 13 日参照.
3) 川合慶拓ら:カラマツラミナの幅厚さ比とローリングシアー強度の関係, 木材学会誌 69(3), 134-139(2023)
4) 沢田 稔: 直交異方性材料としての木材の弾性および強度，木材学会誌 12(121)，749-753（1963）.
5) 森林総合研究所: 木材工業ハンドブック 改訂 4 版，丸善出版, 135 (2004).
6) Wang ら: Influence of technical characteristics on the rolling shear properties of cross laminated timber by modified planar shear test. Maderas. Cienc. Tecnol. 20(3) (2018).

【謝辞】FEM 解析にあたって，林産試験場村上了氏，住友林業株式会社豊田真慧氏にご指導を頂いた。記して謝意を表する。

0-4　　ビニールハウスを用いた木材乾燥法の可能性

○土生川友香，佐々木貴信，澤田圭，佐々木義久（北大院農）

【緒言】

未乾燥材は、乾燥材と比較して割れや狂いが生じやすく、耐久性や強度性能の面でも不安が残る。また、接着性能や加工性にも影響を与えることから、木材を利用、販売するうえでは木材乾燥は不可欠である。

木材の乾燥法には天然乾燥と人工乾燥の 2 種類があるが、天然乾燥では、含水率を 15%程度に下げるのが限界で、一般には含水率 20%以上である。日本の屋外で利用される木材含水率の目標値は 15%で、屋内で利用する内装材などの木材の場合は一般に 15%より低い値が求められ、構造材では 12%～13%の含水率が理想的である。そのため、木材の使用や販売のためには、天然乾燥より含水率を下げることができる人工乾燥を行う必要がある。

しかし、人工乾燥では乾燥期間に応じて投入エネルギーや人件費などのコストがかかる。昨今の世界的な燃料価格の高騰や円安の影響から、エネルギー資源の輸入価格が高騰しており、電気料金の高騰にもつながっている。そのため、特にエネルギー費は木材乾燥のコストに大きく影響する。人工乾燥の期間を短縮し、燃料費や電力費を削減することは、木材乾燥の低コスト化につながる。そこで、本研究では、札幌市において、ビニールハウスでの木材乾燥を人工乾燥の予備乾燥として利用できないかを調査した。

【実験の方法】

製材をハウス及び屋外で乾燥させ、両者の含水率推移を比較することでハウスでの木材乾燥の効果を調査した。

幅約 12 ㎝×長さ約 210 ㎝×厚さ約 2 ㎝、3 ㎝、4 ㎝、5 ㎝、6 ㎝の 5 種類のトドマツ製材を、屋外とハウス（容量約 17 ㎥，H-2236:南榮工業）で同じように桟積みして乾燥させた。桟積みの様子を図 1 に示す。ハウスでは、ハウス内の空気循環を目的に扇風機を稼動させた。また、乾燥開始から約 1 ヶ月後までは、夜間にハウスが結露するのを防ぐために昼間はハウスを締め切り、夜間はハウスの裾を約 30cm 開放した。そして、乾燥開始から約 1 ヶ月経過後から、ハウス内で除湿機（YDC-E300:山善）を乾燥モードで稼動させた。また、温湿度データロガーを用いてハウス及び屋外の温湿度をそれぞれ毎時測定した（ハウス内：RS-13:エスペックミック（株）製、屋外：TM-317:TENMARS 製）。乾燥期間中に 1 日～2 週間おきに製材の重量を測定した。乾燥終了後、製材から含水率測定用の試験体を切り出し、絶乾法によって製材の含水率を求めた。含水率測定用の試験体は、製材内の水分傾斜も確認するために図 2 のように複数個所から

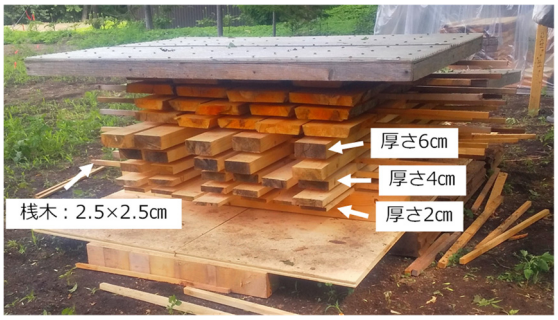


図 1　桟積みの様子

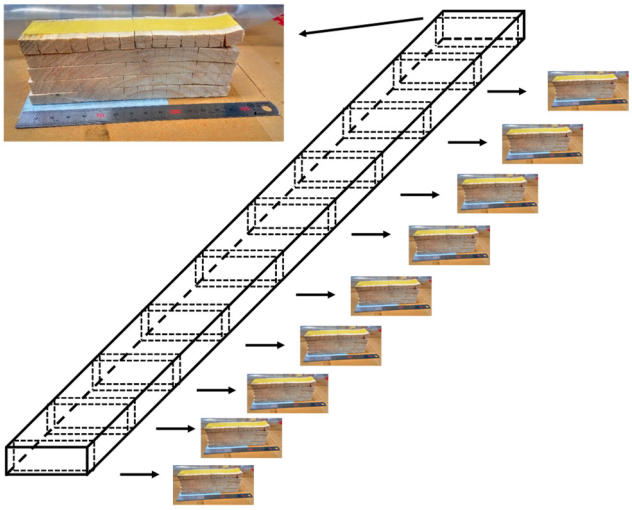


図 2　含水率測定用試験体の切り出し位置

切り出し、これらの平均値をその製材の含水率とした。乾燥中及び乾燥終了時に測定した製材重量と乾燥終了時の製材含水率から、乾燥途中の製材の含水率推移を計算した。なお、乾燥を開始したのは 2022 年 6 月、乾燥を修了したのは 2022 年 10 月～11 月である。

【結果及び考察】

ハウスおよび屋内ともに、製材内での水分傾斜はほとんど見られず、均一に乾燥した。しかし、含水率の測定を行ったのは製材の含水率が平衡含水率に落ち着いてから 1 ヶ月以上経過してからであり、平衡含水率に到達してからある期間は、製材内の水分傾斜があった可能性がある。

製材の含水率推移を図 3 に示す。除湿機を稼動させる前は、日中はハウスの相対湿度が屋外より低く、夜間は屋外より高い傾向があった（図 4)。また、屋外とハウスで製材の含水率推移に差はなく、厚さ 6cm の製材では、平衡含水率には到達せず、厚さ 2cm と 4cm の製材では、含水率が平衡含水率とほぼ一致する約 19%だった。ハウスで除湿機の稼動を開始してからは、ハウスの相対湿度が屋外より低かった。また、ハウスの製材の含水率が 8～10%に低下したのに対して、屋外の製材の含水率は 14～18%だった。

実験の結果から、札幌では除湿機を稼動しないハウスでの木材乾燥は、屋外での天然乾燥より優位性があるとはいえない。しかし、ハウスで家庭用の除湿機を稼動させることで、内装材などの屋内で使用する木材や構造材で要求される含水率より低い含水率の製材を得ることができた。そのため、ビニールハウスでの木材乾燥は、除湿機を併用することで、人工乾燥の予備乾燥に加えて、簡易な木材乾燥法として活用できる可能性がある。

本研究では、小規模なハウスを用いたが、実用性を高めるためにはより大きなハウスでの乾燥が可能かを調査する必要がある。また、本研究では太陽光によって日中に暖められるハウス内の空気を活用することが出来ず、除湿機を使用した。今後、換気方法の改善や蓄熱を利用することで、太陽光の熱エネルギーを活用し、より少ないエネルギーで木材乾燥を行う方法を模索することが必要である。

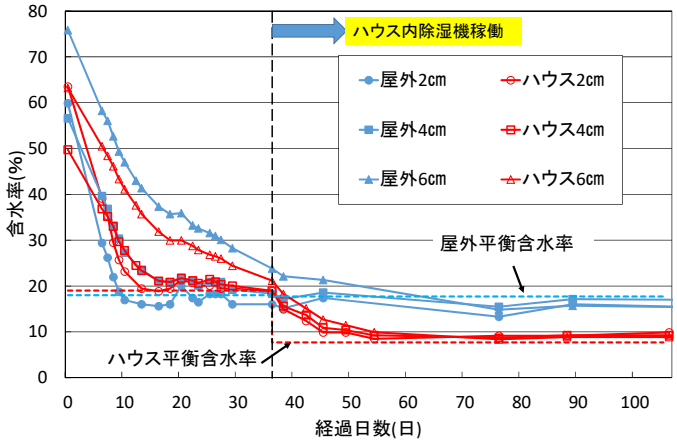


図 3　製材の含水率推移

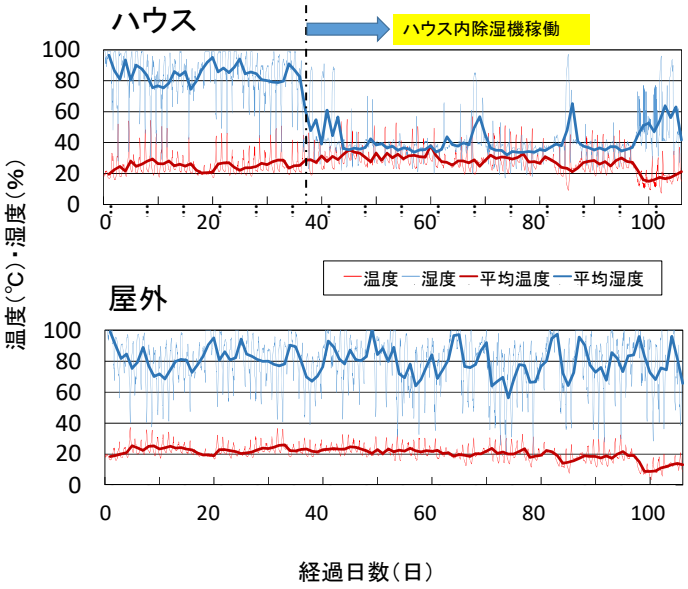


図 4　温湿度

【参考文献】

1)信田聡、河崎弥生：木材科学講座 7 木材の乾燥 I 基礎編，初版，海青社，2020
2)信田聡、河崎弥生：木材科学講座 7 木材の乾燥 II 応用編，初版，海青社，2020

0-5　　ICT ハーベスタと自動選木機・人力による径級検知の比較

○酒井明香, 石川佳生（道総研林産試）

【緒言】

ICT ハーベスタとは，1 本の立木から最適な採材方法を検知し，造材した丸太の直径と長さをデジタル情報として記録・送信するなど多目的な機能を搭載した造材機械のことである [1)]。欧米で開発され，既に道内でも複数メーカーの機種が導入されている。ICT ハーベスタにより径級が検知された丸太（以下「ICT ハーベスタ検知（材）」）は，その情報を工場に直接送り込めるため，土場で作業員が検尺する過程（以下「人力検知」）は省略される。そのため，径級幅に合わせてスプレーで色分けされているのみで，木口に径級が数字で書かれていないという特徴がある（図１）。

ICT ハーベスタは，検尺の省力化や採材効率化により造材の現場に革新をもたらすことが期待される一方で，必ずしもその新機能が十分に活用されている状況とは言えない。その背景として，原木の取引先である製材工場等にとって，ICT ハーベスタ検知材の木口に径級が書かれておらず，ICT ハーベスタ検知の精度も不明であることが不安要素であるという現状が挙げられる [2)]。

本研究では，ICT ハーベスタ検知と，製材工場に導入されている自動選木機による検知(以下「選木機検知」)，人力検知結果の比較を行い，その計測値の乖離について整理することを目的とする。

図１　ICT ハーベスタ，ICT ハーベスタ検知材，人力検知材の例

【調査方法】

調査は厚真町産カラマツおよび下川町産トドマツ原木を用いた。人力検知，ICT ハーベスタ検知，選木機検知は，それぞれ計測している箇所が微妙に異なるため，事前に再定義した。人力検知による径級は慣例に従い「樹皮なし最短径」とした（図 2 の黒実線）。ICT ハーベスタ検知は，機種によって計測システムが微妙に異なり，なおかつ補正（キャリブレーション）機能を有するが，本稿では「最短径と直行する径の平均値」とした（図 2 の黒実線と黒点線の平均値）。選木機検知は，木口付近より 5 か所の断面から内接円をレーザー測定し（図 2 の青点線），その内接円の最短径を検知する（図 2 の青実線）ため，「５つの内接円のうち樹皮なし最短径」とした。

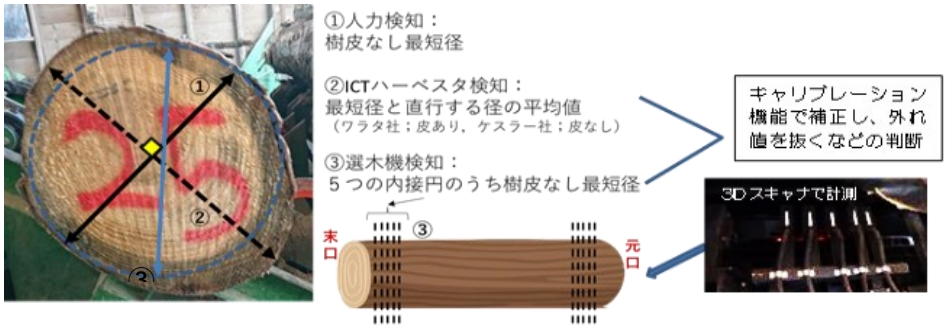


図２　３種類の検知の測定箇所の違い

カラマツおよびトドマツの伐採から 3 種類の検知の流れを図 3 に示す。運材には 1 ヶ月から 1 ヶ月半を要した。人力検知は 2 回計測をし，本稿では選木機を通す直前の検知結果を用いた（図 3 の人力検知②）。選木機検知は，人力検知②と同日で実施した。

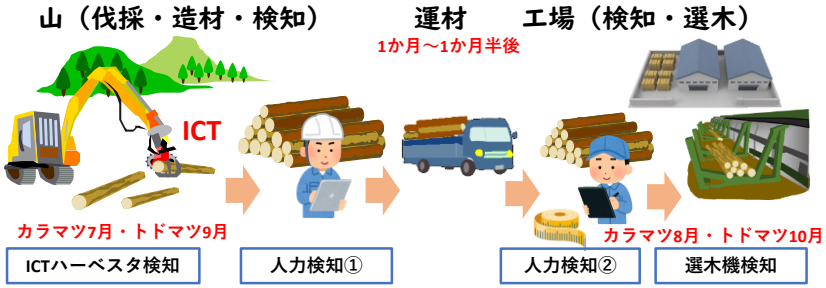


図 3　試験における 3 種類の検知の流れ

【結果】

(1)カラマツ試験結果

3 種の検知の基本統計量（表 1）と ICT ハーベスタ検知・選木機検知による末口径級の比較を示す（図 4）。平均径級は ICT ハーベスタ＞人力＞選木機の順となり，最大 12%の差があった（表 1）。ただし ICT ハーベスタと選木機検知の相関は R^2=0.920 と高かった（図 4）。次に 3 種の検知による 2cm 括約後の径級別本数分布（図 5）と箱ひげ図を示す（図 6）。末口 18 - 28cm を中心に本数分布に乖離が見られ（図 5），ICT ハーベスタが最も太く検知される結果となった（図 6）。

表 1　3 種の検知の基本統計量
（カラマツ：n =139）

	人力	ICTハーベスタ	選木機
平　均	224	246	216
不偏分散	2984	3713	2806
標準偏差	55	61	53
中央値	230	252	222

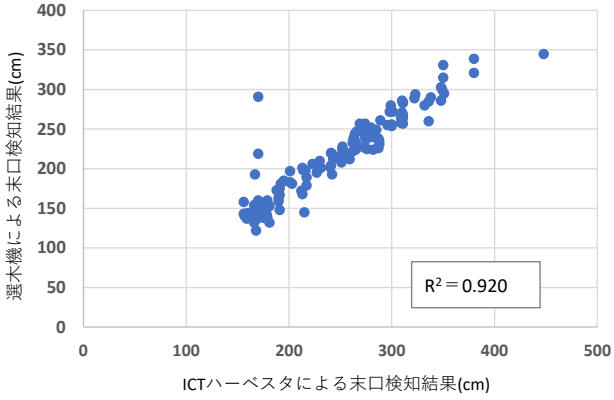


図 4　ICT ハーベスタ検知と選木機検知による末口径級の比較(カラマツ：n =139)

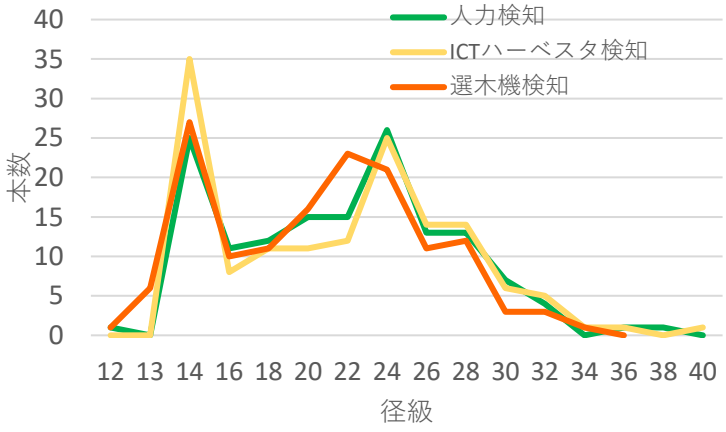


図 5　3 種の検知による径級別本数分布（カラマツ）

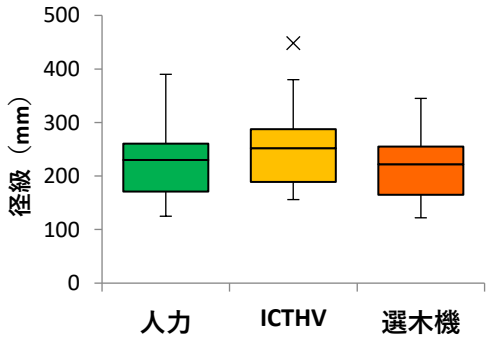


図 6　2cm 括約後の径級分布
（＊ICTHV：ICT ハーベスタの略）

(2)トドマツ試験結果

3 種の検知の基本統計量（表 2）と ICT ハーベスタ検知・選木機検知による末口径級の比較を示す（図 7）。平均径級は人力＞選木機≧ICT ハーベスタの順となり，最大 4%の差に収まった（表 1）。ICT ハーベスタと選木機検知の相関は R^2=0.998 と高かった（図 7）。次に 3 種の検知による 2cm 括約後の径級別本数分布（図 8）と箱ひげ図を示す（図 9）。末口 18 - 30cm を中心に

本数分布に乖離が見られ（図 8），人力検知が最も太いという結果となった（図 9）。
トドマツの検知においては ICT ハーベスタが最も小さくなり，カラマツと異なる傾向が見られた。

表 2　3 種の検知の基本統計量
（トドマツ：n=104）

	人力	ICTハーベスタ	選木機
平　均	267	258	259
不偏分散	2474	2060	2406
標準偏差	50	45	49
中央値	266	249	258

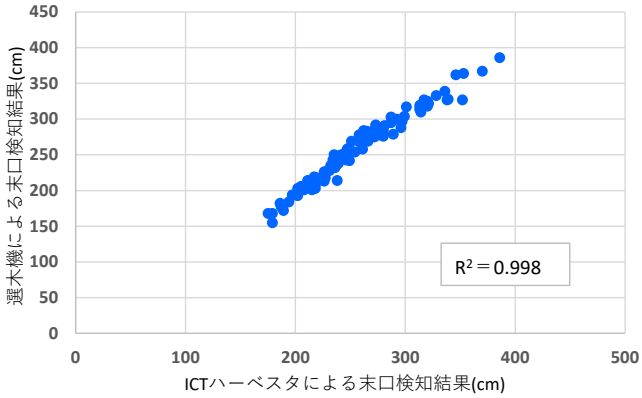


図 7　ICT ハーベスタ検知と選木機検知による末口径級の比較（トドマツ：n=104）

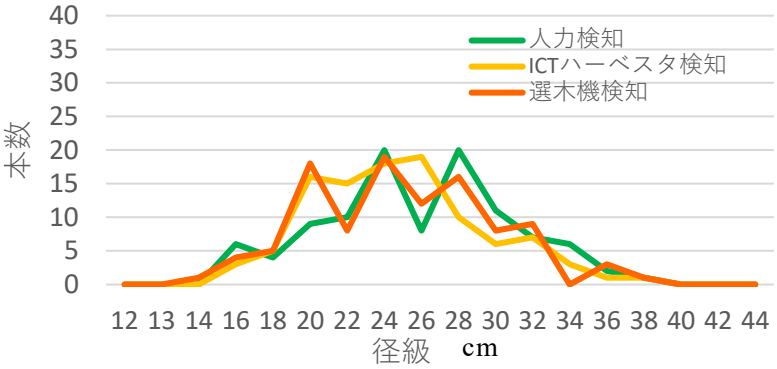


図 8　3 種の検知による径級別本数分布（トドマツ）

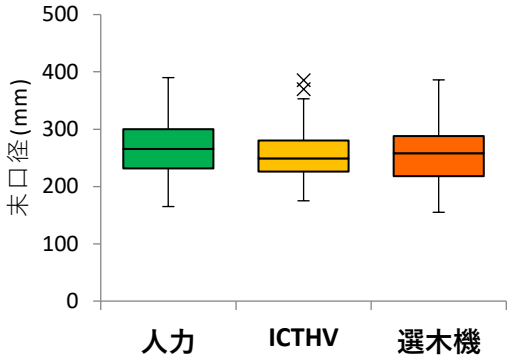


図 9　3 種の検知による径級分布
（＊ICTHV：ICT ハーベスタの略）

【考察】

3 種類の検知結果は，木口が正円であれば理論的に一致するものの，実際の木口は正円ではないため，ICT ハーベスタの検知結果は他の検知に比較し平均値で最大 12%の乖離が見られた。特に 2cm 括約で比較すると，末口 18～30cm における差異が大きく，2cm 括約後の一致率が低くなることが明らかになった。一方，ICT ハーベスタと選木機検知の相関係数は高いため，山側と製材工場側の合意の上で，検知結果に係数を乗じ修正して取引に用いる可能性は示された。

3 種類の検知結果に差異が生じる要因として，現時点で考えられるものは①計測のタイムラグによる原木の傷み，②伐採時期による樹皮の剥がれ，③木口の形状の複雑さが挙げられる。①は，伐採直後に検知する ICT ハーベスタと，工場への運材後に検知する自動選木機は，計測時期に 1 か月以上のずれが生じることに由来するものである。その間に樹皮の部分的な脱落や反り返り，木口の腐朽等が生じ，検知に影響すると推察された。②は，樹液の流動期に伐採された原木は採材時に樹皮が脱落し，検知に影響すると考えられた。③は木口の形状が複雑な場合，人力検知で計測する箇所は目測に頼ることが多く，それが検知結果に影響していると推察された。特に今回の検証は夏期伐採の原木を用いており①と②の影響が大きいと考えられるため，今後は冬期伐採の原木で同様の試験が必要である。

【引用文献】

1)北海道水産林務部林務局林業木材課(2022)北海道におけるスマート林業の取組. 北方林業 73(3). 3-7

2)斎藤丈寛(2022)ICT 生産管理に向けた製材工場の HV【ハーベスタ】検知材の受入. 北方林業 73(3). 8-11

O-6　60 年生ヨーロッパトウヒ人工林における間伐強度の材密度への影響

○村上了（道総研林産試），大野泰之*，内山和子*，蝦名益仁*，山田健四**，滝谷美香*
*道総研林業試、**道総研森林研究本部

【緒言】

ヨーロッパトウヒ（*Picea abies* (L.) H.Karst.）はヨーロッパ全域に自生する針葉樹で，北海道には 1900～1910 年代に導入された [1]。北海道に植栽されたヨーロッパトウヒの成長は良く，耐陰性が高く枯死が発生しにくいという特性を持つため、近年では主に鉄道防雪林や耕地防風林として植栽されている。造林樹種として扱われる事例は少ないものの，毎年北海道では一定面積で造林されている。

本研究では間伐強度の異なるヨーロッパトウヒ林分の試験木から得られた試料を軟 X 線デンシトメトリー法にて密度解析を行い、間伐強度の違いが材密度へ与える影響を調べた。

【実験方法】

試験地は（地独）北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場（北海道美唄市光珠内）の実験林に位置する。対象とする林分は 1962 年に 3000 本/ha で植栽した。林齢 21 年次の 1982 年に 0.1ha（36.5 m × 27.5 m）の試験区 5 つを配置し，1 回目の間伐を本数間伐率で 0%, 15%, 31.3%, 49.3%, 78%で実施した。36 年次の 1997 年に間伐率が上記の順に 0%,　33% , 31%, 36%, 21%の 2 回目の間伐を実施した。以後，各試験区について 1982 年の間伐率の値を用いて T-0, T-15, T-30, T-50 及び T-78 として記述する。

試験木は 2021 年 9 月、林齢 60 年次に試験区で平均的な胸高直径の 10 本を選木し、供した。**表 1** に試験区の間伐率と胸高直径、樹高を示す。

表 1　試験区の間伐率と胸高直径、樹高 [1]

Plot	21-year thinning rate	36-year thinning rate	Experimental forest DBH (cm)		Experimental forest Height (m)		Sampled tree DBH (cm)	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
T-0	0.0	0.0	27.2	7.0	24.2	1.5	26.6	1.0
T-15	15.0	33.0	31.5	6.8	27.3	1.9	32.1	3.6
T-30	31.3	31.0	33.2	6.5	28.9	2.5	33.2	0.9
T-50	49.3	36.0	40.0	7.5	28.6	1.4	40.7	1.9
T-78	78.0	21.0	45.4	5.7	28.3	1.7	44.0	2.8

*Meanは平均値、SDは標準偏差を示す。

供試材は地上高 3.65 m 付近の厚さ 100 mm の円板から採取した。円板から、偏心、アテの無い髄を含む外周-髄-外周を結ぶ線を中心とする幅 7 mm、繊維方向へ厚さ 2 mm の試験片を切り出し、エタノールとベンゼンの混合溶液（1:2 v/v）で脱脂後、恒温恒湿環境下で含水率約 12 %に調整した。軟 X 線撮影にはソフテックス社 CMB-2 を用い、フィルムは富士フィルム社 IXFR を用いた。軟 X 線の照射条件は電圧 19 kV、電流 2.5 mA、照射時間 39 秒とした。透過型スキャナー（エプソン社 DS-G2000）を用い、解像度 1600 dpi にて現像したフィルムを読み込んだ。得られた画像から Regnet 社 WinDENDRO 2019a を用いて各年輪の年輪幅、早材幅、晩材幅、年輪内平均密度（以下年輪密度）、早材密度、晩材密度を算出した。早材と晩材の境界は密度 550 kg/m^3 とした。

間伐強度の材密度への効果について統計解析を行った。解析には Mathwork 社の Matlab.R2023a および Statistics and Machnine LeaningToolbox を用いた。

【結果および考察】

・年輪幅　図１に伐採した林齢 60 年次までの各試験区の年輪幅の平均値の推移を示す。各試験区の大まかな傾向として、林齢 20 年くらいまで年輪幅は 4～7 mm で推移し、その後急に年輪幅は狭くなった。林齢 40 年からは微減し、およそ年輪幅 1～2 mm 前後で一定になった。1 回目の間伐により T-50、T-78 で次年以降に明らかに年輪幅が一時的に増加した。2 回目の間伐では 1 回目の間伐ほどではないが、間伐の次年に全ての試験区で年輪幅の増加が見られた。

T-50、T-78 の試験区では 1 回目の間伐の翌年から林齢 24 年まで 3 年間の年輪幅の増加がみられ、その後年輪幅は低下した。林齢 24 年次の年輪幅に対して試験区の一要因分散分析を行った結果、条件間に有意な差が得られた（$p < 0.001$）。併せて Tukey-Kramer 法による多重比較検定を行ったところ、T-78、T-50 でそれぞれ他の試験区間とで有意な差が認められた。T-0、T-15、T-30 の間では差が認められなかった。

2 回目の間伐の次の年に全ての区画で一時的な年輪幅の増加が見られた。その後 T-0 以外の試験区では年輪幅が 2 mm 以上に増加し、間伐の効果が見られた。

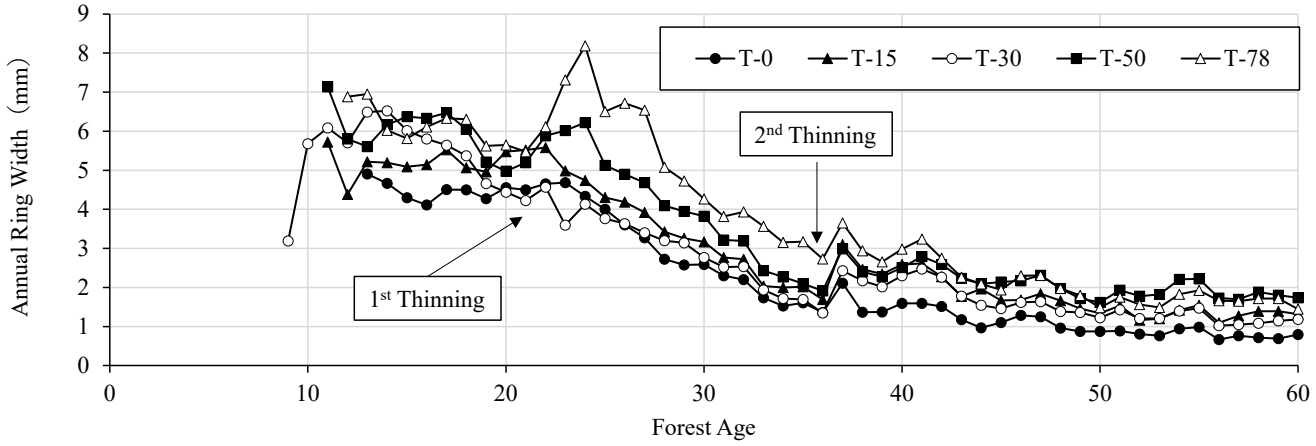


図１　年輪幅の推移

1 回目の間伐前年の林齢 20 年から 45 年まで、各試験区での早材幅、晩材幅の平均値の推移を**図２、３**に示す。早材幅は**図１**で示した年輪幅とほぼ同様の傾向が見られた。林齢 24 年次の早材幅も条件間に有意な差が得られ（$p < 0.001$）、多重比較検定（Tukey-Kramer 法）を行ったところ、T-50、T-78 でそれぞれ他の試験区間とで有意な差が認められた。一方で晩材幅のピークは年輪幅、早材幅のピーク（林齢 24 年）と異なり、前年の林齢 23 年次であった。晩材幅は林齢 30 年以降、全ての試験区において大きな差は無く 0.4 mm 程度で推移した。

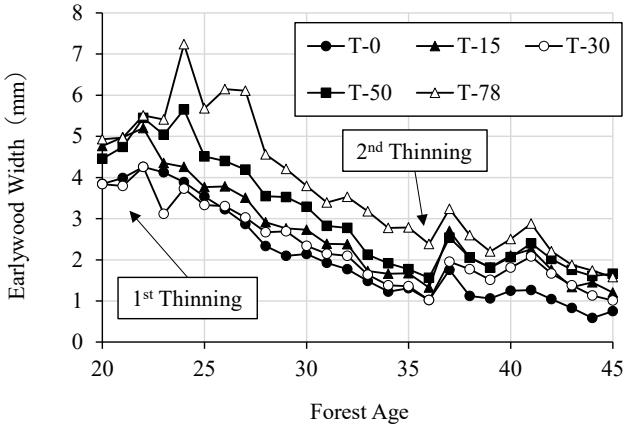


図２ 早材幅の推移（林齢２０～４５年）

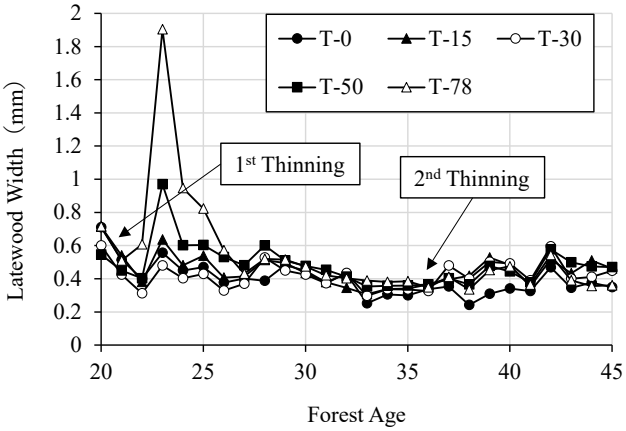


図３　晩材幅の推移（林齢２０～４５年）

・年輪密度　図４に伐採した林齢 60 年次までの各試験区の年輪密度の平均値の推移を示す。年輪密度の

各試験区の傾向として、樹芯近くで高く、林齢 20 年くらいまで低下した。樹芯近くで年輪密度が高い特徴は、同じトウヒ属のアカエゾマツでも同様の傾向を示す[2)]。林齢約 20 年を底とし、その後増加した。

1 回目の間伐後の翌々年、林齢 23 年に T-78 のみ年輪密度は増加した（$p < 0.05$）。多重比較検定（Tukey-Kramer 法）を行ったところ、T-78 は T-15 と T-50 との間で有意な差が認められた。しかしその後 T-78 の年輪密度は他の試験区の年輪密度より低く推移した。T-0 は他の試験区よりも高い年輪密度で推移した。

一般的な施業履歴に近いものが T-30 であるが、それ以上に強い間伐は、短期的には年輪密度を増加させるが、長期的には年輪密度の低下をもたらす。カラマツにおける既報の研究[4,5)]を鑑みて、T-50 あたりが著しい年輪密度の低下を引き起こさずに肥大化する限界だと考えられる。

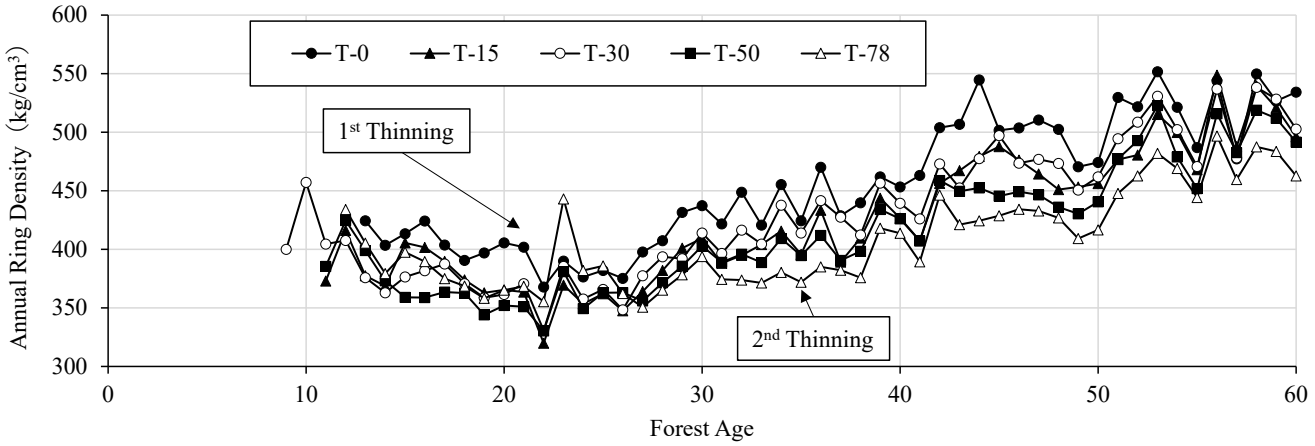


図４　年輪密度の推移

1 回目の間伐前年の林齢 20 年から 45 年まで、各試験区での早材、晩材密度の平均値の推移を**図５、６**に示す。早材密度は各試験区で有意な差が見られず、間伐はほとんど早材密度には影響しないと考えられる。一方で T-78 において林齢 23 年の晩材密度は低下し（$p < 0.001$）、他の処理区間とで有意な差が認められた。これは林齢 23 年次、晩材幅が極端に他の年より広くなったことに関連していると考えられる。

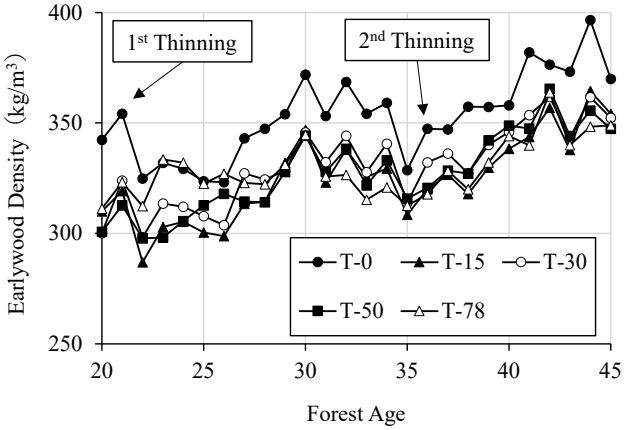


図５　早材密度の推移（林齢２０～４５年）

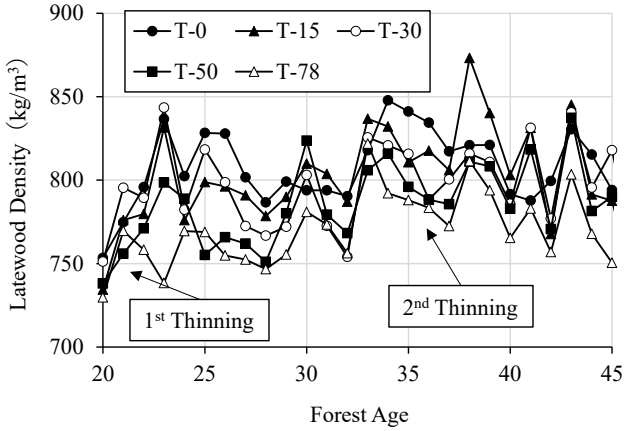


図６　晩材密度の推移（林齢２０～４５年）

表２、３に 1 回目間伐及び 2 回目間伐の前年から 10 年間の密度解析結果の平均値と標準偏差を示す。林齢 20～30 年、林齢 35～45 年の平均値は共におよそ間伐率が高いほど年輪幅は広くなった。林齢 20～30 年の年輪密度は T-78 でも T-15、T-30、T-50 に比べて高い。これは**図４**で示したとおり、間伐の効果で一時的に年輪密度が増加したためと考えられる。一方で林齢 35～45 年の年輪密度は間伐率が高いほど低下する傾向が見られた。

表２　密度解析結果（林齢 20～30 年の平均値及び標準偏差）

	Annual Ring Width (mm)		Earlywood Width (mm)		Latewood Width (mm)		Annual Ring Density (kg/m^3)		Earlywood Density (kg/m^3)		Latewood Density (kg/m^3)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
T-0	3.89	1.10	3.42	1.01	0.47	0.21	394	42	337	28	801	56
T-15	4.54	1.11	4.03	1.07	0.51	0.20	363	44	308	30	785	74
T-30	3.81	0.91	3.38	0.88	0.43	0.16	368	46	314	34	789	57
T-50	5.11	1.48	4.54	1.39	0.57	0.33	360	47	310	34	767	59
T-78	6.23	1.71	5.48	1.56	0.75	0.60	376	52	324	30	754	54

*Meanは平均値、SDは標準偏差を示す。

表３　密度解析結果（林齢 35～46 年の平均値及び標準偏差）

	Annual Ring Width (mm)		Earlywood Width (mm)		Latewood Width (mm)		Annual Ring Density (kg/m^3)		Earlywood Density (kg/m^3)		Latewood Density (kg/m^3)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
T-0	1.46	0.62	1.13	0.55	0.34	0.17	470	64	362	35	816	66
T-15	2.28	0.86	1.85	0.80	0.43	0.19	431	64	334	33	819	74
T-30	2.00	0.56	1.57	0.50	0.43	0.16	442	50	342	30	806	71
T-50	2.39	0.68	1.95	0.63	0.43	0.18	422	49	340	31	798	63
T-78	2.85	1.08	2.44	1.05	0.41	0.14	403	48	335	32	783	72

*Meanは平均値、SDは標準偏差を示す。

【結言】

間伐強度の異なるヨーロッパトウヒ人工林の試料を用い年輪解析を行い、以下の結論を得た。

1. 間伐率 78 %の強い間伐を行って肥大化させると、密度の低下が懸念された。
2. 林齢21年次の1回目の間伐による材密度への影響のピークは間伐当年には現れず､年輪密度と晩材幅、晩材密度は 2 年後、年輪幅と早材幅は 3 年後に見られた。
3. 林齢 36 年次の 2 回目の間伐の影響は 1 回目の間伐よりも小さく､間伐の翌年に年輪幅の増加が見られたが、年輪密度への影響は小さかった。

【謝辞】

本研究の試験の遂行にあたり（地独）北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場利用部資源・システムグループ安久津久氏に協力をいただいた。また、試料採取にあたり（地独）北海道立総合研究機構森林研究本部企画調整部企画グループ早坂一文氏、藤本恵二氏に選木、伐採でご助力いただいた。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

1) 小澤準二郎：北海道の造林用種子、147、北方林業会、札幌、1964
2) 滝谷美香、大野泰之、内山和子、蝦名益仁、山田健四：60 年生ヨーロッパトウヒ人工林における間伐強度の林分･個体成長量への効果、北方森林研究、71、21-25、2023
3) 村上了：アカエゾマツ間伐材の密度解析、北海道の林木育種、65 (2). 11-14、2022
4) 王賀新、佐々木賢治、魚住侑司、植木達人、加藤正人、関慶偉： カラマツ大径材生産を目的とした強度間伐の有効性、信州大学農学部 AFC 報告、1、63-71、2003
5) 安久津久、松本和茂、藤本高明、大野泰之、滝谷美香、八坂通泰：カラマツにおける間伐強度の違いが年輪構造や丸太のヤング係数に及ぼす影響、木材学会誌、58 (5)、249-259、2012

0-7　食用担子菌菌床栽培におけるドロノキ樹皮温水抽出物の利用

○小黒浩平，玉井裕，幸田圭一（北大院農）

【緒言】

食用きのこの菌床栽培には主に広葉樹材が用いられているが、現在良質な広葉樹材の供給不足や価格高騰が懸念され、代替材料が求められている。そこで萌芽更新が旺盛で増殖が容易なことから、短伐期で利用できるヤナギ類が早生樹バイオマスとして注目されている。オノエヤナギ（*Salix udensis*）樹皮おが粉にはシイタケ菌床栽培において、増収効果があることが明らかになっている[1)2)]。またオノエヤナギと共にヤナギ科（*Salicaceae*）に属するドロノキ（*Populus maximowiczii*）の樹皮温水抽出物には、数種の食用担子菌の菌糸成長を促進する効果が認められた[3)]。本研究では増収効果を期待し、ドロノキ樹皮温水抽出物が菌床栽培に与える影響を検証した。

【材料と方法】

試料採取：北大構内で風倒したドロノキ（材直径 20㎜）の樹皮をスクレーパーで採取し、風乾後カッターミルにより粉砕した。抽出条件：樹皮粉末に重量比で 10 倍量の純水を加え、50℃で 3 時間攪拌抽出し、濾液として温水抽出物を得た。寒天培地培養試験：PDA 培地に対し各温水抽出物が固形分濃度で 0.10，0.20，0.25，0.50，0.75% となるように添加した。マイタケ、シイタケ、ブナシメジ、ナメコ、およびヌメリスギタケを接種、25℃,暗所でシャーレ上において培養し、2 日毎に培養 10 日目まで菌叢直径を測定した。また、培養 11 日目の培地を電子レンジで加熱溶解し、菌体を濾別し乾燥重量を測定した。液体培地培養試験：PD 液体培地に対し 0.10，0.20% となるように添加した。マイタケ、シイタケ、ブナシメジ、およびヌメリスギタケを接種、25℃,暗所で培養した。培養 15 日目に菌糸体を濾別し、菌糸体乾燥重量を測定した。木粉培地培養試験：木粉（カラマツ、ナラ、またはカンバ）をそれぞれ小麦フスマと絶乾重量比 4：1 で混合し、カラマツは含水率 65%、ナラまたはカンバは含水率 60%に調整した。水分調整には各温水抽出物を固形分濃度 0.10，0.20% となるように希釈して用いた。マイタケ、シイタケ、ブナシメジ、およびヌメリスギタケを接種、25℃,暗所で培養し、培養 15 日目まで菌叢直径を測定した。また培養 15 日目の培地をミキサーで粉砕し、5 倍量の 10㎜M リン酸緩衝液で懸濁し振とう抽出・遠心分離をすることで上澄みとして粗酵素液を得た。得られた粗酵素液を用いてリグニン分解酵素（ラッカーゼ及びマンガンペルオキシダーゼ）活性を分光光度計により測定した。ラッカーゼ活性測定には ABTS を基質とした反応溶液を用い、マンガンペルオキシダーゼ活性測定には 2,6-ジメトキシフェノールを基質とした反応溶液を用いた。菌床栽培試験：カラマツおが粉と小麦フスマを 4：1 で混合し、含水率 65%の培地を調製した。水分調整には温水抽出物が固形分濃度 0.10% となるように添加した。調製した培地をポリプロピレン製 1.3L 容栽培袋に 1kg ずつ充填し、滅菌・放冷後シイタケの種菌を接種し、23℃,暗所で培養した。シイタケは約 30 日間で菌糸が蔓延した後、約 60 日間光照射下で追培養を行った。その後、18℃,湿度 90%,光照射下で子実体を発生させ、子実体収量を測定した。また、クラーソン法により発生後の培地におけるリグニン量を測定し、培養によるリグニン分解量を算出した

【結果および考察】

ドロノキ樹皮粉末の温水抽出物の収率は、約 15%であった。寒天培地と液体培地の培養試験から、ドロノキ温水抽出物添加によりマイタケ、シイタケ、ブナシメジ、およびヌメリスギタケに対して菌糸成長促進効果が認められ、0.10～0.20%添加濃度で最も顕著であった。ドロノキ温水抽出物を 0.50%以上添加した培地では、シイタケに対して著しい菌糸成長抑制効果が認められた。また他の菌種に対しても、1.0%以上添加した培地では著しい菌糸成長抑制効果が認められた。木粉培地培養試験により、0.10%ドロノキ温水抽出物添加によりカラマツ木粉培地においてシイタケの菌糸成長促進とラッカーゼ活性促進、そしてマイタケの菌糸成長とマンガンペルオキシダーゼ活性促進が認められた。カンバについては、0.20%抽出物添加によりシイタケの顕著なラッカーゼ活性促進とヌメリスギタケの菌糸成長促進が認められた。またナラについては、0.20%抽出物添加によりマイタケの両リグニン分解活性の促進が認められた。カラマツおが粉を用いたシイタケ菌床栽培では、抽出物添加による増収効果やリグニン分解促進効果は認められなかった。

1) 原田 陽・折橋 健・檜山 亮・宣寿 次盛生・棚野 孝夫：シイタケ菌床栽培における早生樹「ヤナギ」の利用，日本きのこ学会誌，22(1)，24-29(2014)
2) 原田 陽・折橋 健・檜山 亮：シイタケ菌床栽培における早生樹「ヤナギ」の利用－子実体収量に及ぼすヤナギ樹皮の影響，日本きのこ学会誌，26(3)，112-116(2018)
3) 小黒 浩平：食用担子菌の菌糸成長に及ぼすヤナギ類樹皮成分の影響について，卒業論文，2021

0-8　北海道産アミガサタケ類の培養

○窪田 愼太郎,　玉井　裕,　幸田 圭一(北大院農)

【緒言】

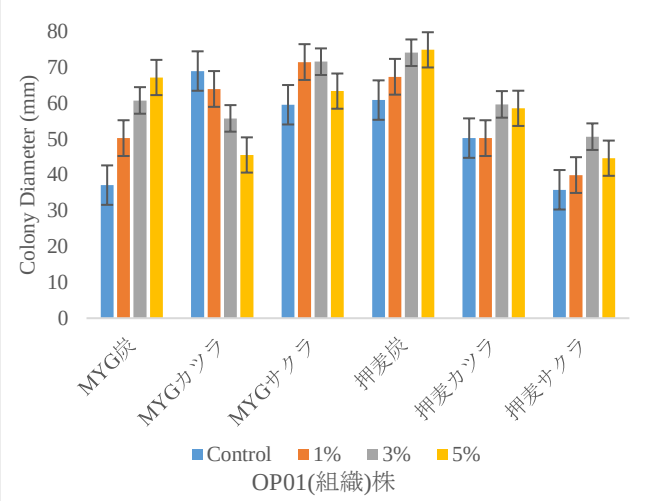
アミガサタケ(*Morchella* sp.)は春にバラ科植物やカツラなどの樹下や、山火事跡の攪乱地やたき火跡地などに発生する子嚢菌である。子実体は優秀な食用菌として知られており、主に欧米や中国において好んで食される。これまで栽培が検討され、近年、中国やデンマークで屋外でのアミガサタケ栽培技術が確立されつつあり、日本でも岩手県林業技術センターが中国で栽培に使われている菌株と近縁の日本産菌株(*Mel*-21 系統)の子実体の発生に成功した。本研究は北海道産アミガサタケ類の栽培を目指し、培養特性の検討を行った。

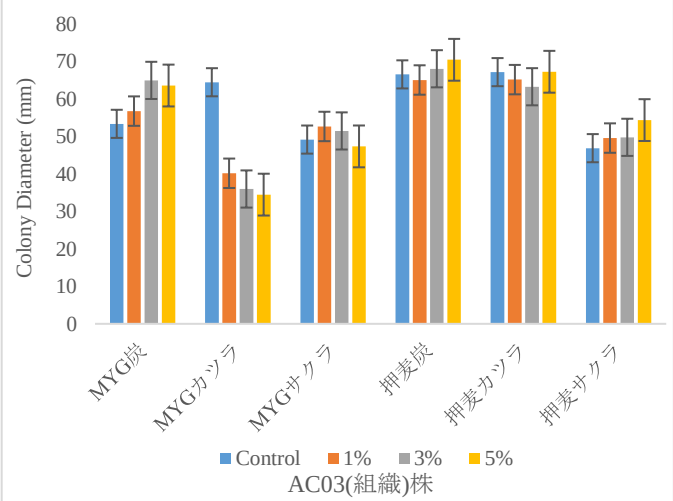
【材料と方法】

供試菌株：菌株は札幌市内 9 か所から 11 本の黒色の子実体を収集し、組織または多胞子分離して、MYG 培地上において継代培養により保存した。系統と交配型解析：子実体組織及び分離菌株の菌叢から DNA を抽出し、PCR に供した。系統解析には ITS、交配型解析には MAT-1,2(交配型遺伝子)領域を使用した。菌糸伸長試験：菌糸成長が良好な OP01 株及び AC03 株の組織分離株、多胞子分離株を使用した。基本培地には MYG 培地及び押麦培地(押麦 49%+カラマツ木粉 32%+小麦ふすま 19%：含水率 50%)を使用した。基本培地に炭、カツラまたはエゾヤマザクラの落葉粉砕物を段階的(1～5%)に添加し、各培地中央に菌糸片を接種した後、室温暗所で培養した。接種後は 1～2 日毎に菌叢直径を測定した。

【結果と考察】

系統と交配型解析：収集した菌株は栽培に成功している菌株(*Mel-21*, *M. importuna*, *M. sextelata* など)とは異なるアミガサタケ類(*Mel-23* または *Mel-20*)との近縁性が認められた。2 種類の交配型を同時に有する菌株は得られなかった。菌糸伸長試験：炭添加区のうち、MYG 培地に添加した場合は添加割合が増えるほど菌糸伸長量が増加した。しかし、押麦培地では無添加との有意差は認められなかった。カツラ添加区では MYG 培地に添加割合を増やすほど菌糸伸長速度が減少したものの、押麦培地に添加した場合は菌糸伸長速度が増加した。サクラ添加区では MYG、押麦培地それぞれで添加割合が特に 1~3%の条件で菌糸伸長量が増加する傾向にあった。菌核形成：MYG 培地の場合、無添加区と炭添加区は培地に小さな菌核が微量見られる程度だったが、サクラ及びカツラ添加区では培地中央に多量の菌核を確認した。しかし、押麦培地ではどの条件区も菌核の形成は確認されなかった。結果として、炭の添加を 1~3%にすることで培養期間の短縮が見込むことができる。また、サクラ及びカツラ落葉添加をすることにより菌核の形成を促進し、子実体発生につながる可能性がある。





0-9　　食用キノコ栽培における樹木葉の添加効果【予報】

○渋川凜太郎，　玉井裕，　幸田圭一（北大院農）

【緒言】

食用きのこ栽培には培地基材として主に広葉樹おが粉が利用されているが、供給不足や価格高騰などにより入手困難であり、代替として針葉樹の利用が模索されている。しかし多くのきのこ種について、針葉樹は栽培には適さないとされている。今実験ではこれまであまり利用されることのなかった樹木葉を添加材として針葉樹おが粉の利用性の改善を試みた。

【実験方法】

供試菌としてシイタケ、ヤナギマツタケ、ヌメリスギタケ、ムラサキシメジ、マイタケ、ブナシメジの6菌種、添加材として広葉樹（ミズナラ、シラカンバ、オオヤマザクラ、カツラ、ブナ、ハルニレ）落葉、ミズナラ及びシラカンバの緑葉、クマイザサ緑葉を用いた。

スクリーニングとしてまず寒天培地上で菌糸伸長試験を行った。寒天に添加材を 1~10%加えた培地に供試菌を接種後、暗所にて培養し、成長が良好な組み合わせを選抜し、針葉樹木粉培地でも同様の試験を行った。

栽培試験は木粉培地上における菌糸伸長が良好であったマイタケ×クマイザサ緑葉、ブナシメジ×クマイザサ緑葉、シイタケ×シラカンバ緑葉、シイタケ×ミズナラ落葉、シイタケ×ミズナラ緑葉の組み合わせで行うこととした。

マイタケ×クマイザサ葉部の試験区はカラマツを培地基材として、クマイザサの微粉末をフスマに対して 5～50%置換、培地重量に対して 5~15%添加した試験区を設けた。コントロールとしてナラおが粉又はカラマツおが粉を基材として、フスマのみを加えた試験区を設けた。

その他の試験区は添加材として落葉または緑葉を 1~10%添加して同様の実験を行った。

【結果および考察】

マイタケ×クマイザサ緑葉の栽培試験においては 10~50%置換区及び 10%、15%添加区の菌回りが早かった。10%、25%置換区と 5%、15%添加区、においては収量がナラ培地に近づいており、特に 5%添加区では収量の増加が顕著であった(図 1)。

シイタケ×シラカンバ緑葉の栽培試験においては、1%、5%添加区において菌回りが短縮される傾向にあり、ファーストフラッシュでは 5%添加区において有意に収量が増加した。しかし 10%添加では収量が減少した(図 2)。

他の組み合わせにおいては特に有意な添加効果は認められなかった。

これらのことからクマイザサ緑葉やシラカンバ緑葉の添加によってカラマツ培地における収量が改善される傾向にあることが示唆された。

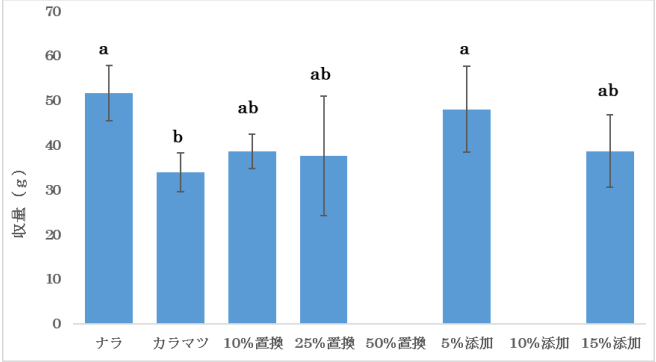


図 1 マイタケ×クマイザサ緑葉の収量（p<0.1）

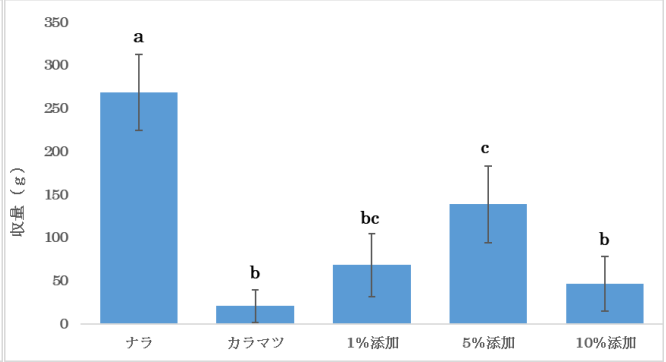


図 2　シイタケ×シラカンバ緑葉の収量（p<0.1）

0-10　リグノスルホン酸塩を原料としたゲルの作製とその性質

○田内郁士，鈴木栞，重冨顕吾，浦木康光（北大院農）

【緒言】

当研究室の本多らは昨年、リグノスルホン酸塩（LS）をポリエチレングリコールジグリシジルエーテル（PE）で化学架橋して得られるリグノスルホン酸塩ゲル（LS-PE ゲル）は、リチウムイオン電池（LIB）の電解液である $LiBF_4$ を含有する有機溶媒を多量に取り込むが、その有機溶媒単体に対する取込量は少ないことを示し、LS-PE ゲルの特異な膨潤挙動を明らかにした。このことは、LS-PE ゲルの LIB 用ゲルセパレータとしての可能性を示唆するものである[1]。本研究では、LS-PE ゲルの膨潤機構を推定するために、LS 純度及びスルホ基量が異なる LS を用いてゲルを作製し、その電解液取込量を比較した。

【実験方法】

原料の LS には、日本製紙㈱から提供された LS_N、LS_P、LS_{PD} を使用した。各 LS の詳細は後述する。10 g の LS_N は 15 mL、同量の LS_P と LS_{PD} は 20 mL の 3.3 M 水酸化ナトリウム水溶液に 、室温で一晩かけて溶解した。これらの溶液に、所定量の PE（エチレンオキサイドの繰り返し単位数が 22）を添加し 5 分間撹拌した後、80 ºC のオーブンで 1 時間加熱することで、LS-PE ゲルが生成した。ゲルは十分に水洗した後、凍結乾燥して保存した。

LIB の電解液 [1 M $LiBF_4$/ethylene carbonate (EC) – dimethyl carbonate (DMC) ; EC : DMC = 1:1 (v/v)]に、各種 LS-PE ゲルを一晩浸漬し、浸漬前後のゲル重量を測定し、各ゲルの電解液取込量［$(W_s-W_d)/W_d$; W_s, 湿潤重量 ; W_d, 乾燥重量］を求めた。対照実験として、EC-DMC の混合溶媒の取込量も同様に求めた。

【結果および考察】

日本製紙㈱のカタログデータによると、各 LS 純度は、LS_N：50%、LS_P：89 %、LS_{PD}：97%である。また、LS_{PD} のみ部分脱スルホン化処理が施されているため、スルホ基量は LS_{PD} で最も少なく、LS_N、LS_{PD} の順で多くなる。

各種ゲルの電解液取込量を Table 1 に示す。8 g の PE を用いて作製したゲルの電解液取込量を比較した場合、LS_{PD}-PE ゲルは最も低い値を示した。この結果は、LS のスルホ基量が電解液の取込に重要であることを示している。一方、LS_P-PE ゲルは、最も多量の電解液取込量を示し、これは LS 純度すなわち LS の分子骨格も、電解液の取込に重要であることを示している。LS_P-PE ゲルは電解液を取り込むとともにゲルが脆くなった。そこで、架橋剤量を増やすことで、力学特性が向上したゲルの調製を試み、架橋剤量と電解液の取込量の関係についても調べた。

予想された通り、架橋剤である PE 量が増加すると、力学強度は僅かに向上した。同時に、電解液取込量は低下した。しかし、B/A 値から、架橋密度が増加しても、EC-DMC よりも電解液の方がより膨潤するという特性が示された。このことより、架橋密度が高い LS-PE ゲルが、LIB 用ゲルセパレータとして有望であると考えられる。

Table 1. Uptake ratio of EC-DMC (A) and 1 M $LiBF_4$/EC-DMC solution (B) in various LS-PE gels.

	PE / g	(A) EC-DMC	(B)1 M $LiBF_4$ /EC-DMC	B/A
LS_P	8	22	35	1.6
	10	21	30	1.4
	16	9.3	17	1.9
LS_N	8	11	23	2.0
LS_{PD}	8	6.8	14	2.1
LS [a]	8	5.1	13	2.5

[a] LS purchased from Tokyo Chemical Industry Company [1)]

【参考文献】

1) 本多ら、第67回リグニン討論会 (2022).

0-11

木質ペレット由来ガス化発電副産物の土壌改良効果
－ホウレンソウ栽培を例にして－

○西宮耕栄，本間千晶（道総研林産試），中村隆一（道総研上川農試）

【緒言】

小規模ガス化発電設備の導入事例が全国的に増加しており、北海道内でも下川町、当別町などで木質ペレットを燃料としたガス化発電設備が導入され、道産材利用や地域活性化への貢献が期待されている。一方、ガス化発電では、副産物として、炭素分が多い熱分解残渣（以下チャーとする）が発生するが、その利用は進んでおらず、産業廃棄物として処理されているのが現状で、有用な用途開発が望まれている。本研究では、ガス化発電副産物の土壌改良資材としての可能性を検討するために、ホウレンソウを用いたポット栽培試験を行い、その栽培状況と、土壌の化学性、物理性を測定した結果を報告する。

【実験方法】

林産試験場内に設置したビニールハウスにおいて、1/5000a ワグネルポット(表面積 200 cm^2)を用いたホウレンソウの栽培試験を令和 3 年 8 月 20 日～9 月 29 日および令和 4 年 8 月 22 日～9 月 30 日に行った。土壌は、北海道立総合研究機構中央農業試験場岩見沢試験地（グライ低地土 、水田転換畑作土）から採取し、2×15 mm の縦目篩を通したものを用いた。チャーは、下川町のガス化発電所から発生したものを用いた。チャーの配合は体積比で 0%、5%、10%、20%とし、5 反復各ポット共通施肥（1 ポットあたり窒素 0.2 g、リン酸 0.2 g、カリウム 0.2 g）した。令和 4 年の栽培試験時にはチャー配合の試験区に加えて、消石灰を配合した試験区を設定した。消石灰の配合量は、通気法により市販消石灰の石灰中和量を測定[1)]して緩衝曲線を作成し、目標 pH6.5 となるように決定した。

ホウレンソウの栽培状況については、播種後 10 日目の発芽率および試験中の草丈、葉数を測定し、試験終了後に地上部の生重量、60℃で乾燥した後の乾物重量を測定することにより確認した。

土壌化学性は、栽培前後の土壌 pH および電気伝導度の測定、トルオーグーリン酸の分析により行った。加えて令和 3 年に栽培試験を行った土壌について、窒素 N、リン酸 P、カリウム K、カルシウム Ca、マグネシウム Mg の全量分析、交換性塩基（K_2O、CaO、MgO）の分析を行った。トルオーグーリン酸測定は、試料 1 g（気乾）を採取し、トルオーグ抽出液 200 mL を加え 30 分間振り混ぜた。その後乾燥ろ紙(5C)でろ過し、得られたろ液に発色液を加え分析した。全量測定は、土壌試料 2 g（全乾換算）を採取して硝酸と過塩素酸で湿式分解し、最終液量が 250 mL となるように調製した。チャーのみの場合は 0.3 g とした。K、Ca、Mg に関しては得られた試料液中の金属濃度を原子吸光分析法により、P に関してはバナドモリブデン酸アンモニウム法により分析した。N に関しては CHN コーダー（(株)柳本製作所製，MT-3）を用いて分析した。交換性塩基（K_2O、CaO、MgO）の測定は、試料 2.5g（気乾）を採取し、1N 酢酸アンモニウム水溶液 50 ml を加え、栓をして 1 時間振り混ぜ、乾燥ろ紙(5C)でろ過し、得られたろ液中の金属濃度を原子吸光分析法により分析した。なお、K、Ca、Mg の分析で用いた原子吸光分析は、日立製偏光ゼーマン原子吸光光度計 Z-2000 により行った。測定波長はカリウムで 766.5 nm、カルシウムで 422.7 nm、マグネシウムで 285.2 nm とし、適宜干渉抑制剤を添加し測定を行った。

土壌物理性は、栽培後の土壌について 100 cm^3 の採土管に採取し、飽和透水係数、保水性、三相分布を測定[2)]することにより評価した。

【結果および考察】

図 1 にホウレンソウの草丈に与えるチャー、消石灰の配合の影響について示した。チャーの配合により、ホウレンソウの草丈は大きく改善された。表 1 に栽培試験前後の土壌 pH の値を示したが、チャーあるいは消石灰の配合により土壌 pH がアルカリ性となるため、ホウレンソウの生育に適した pH 矯正がな

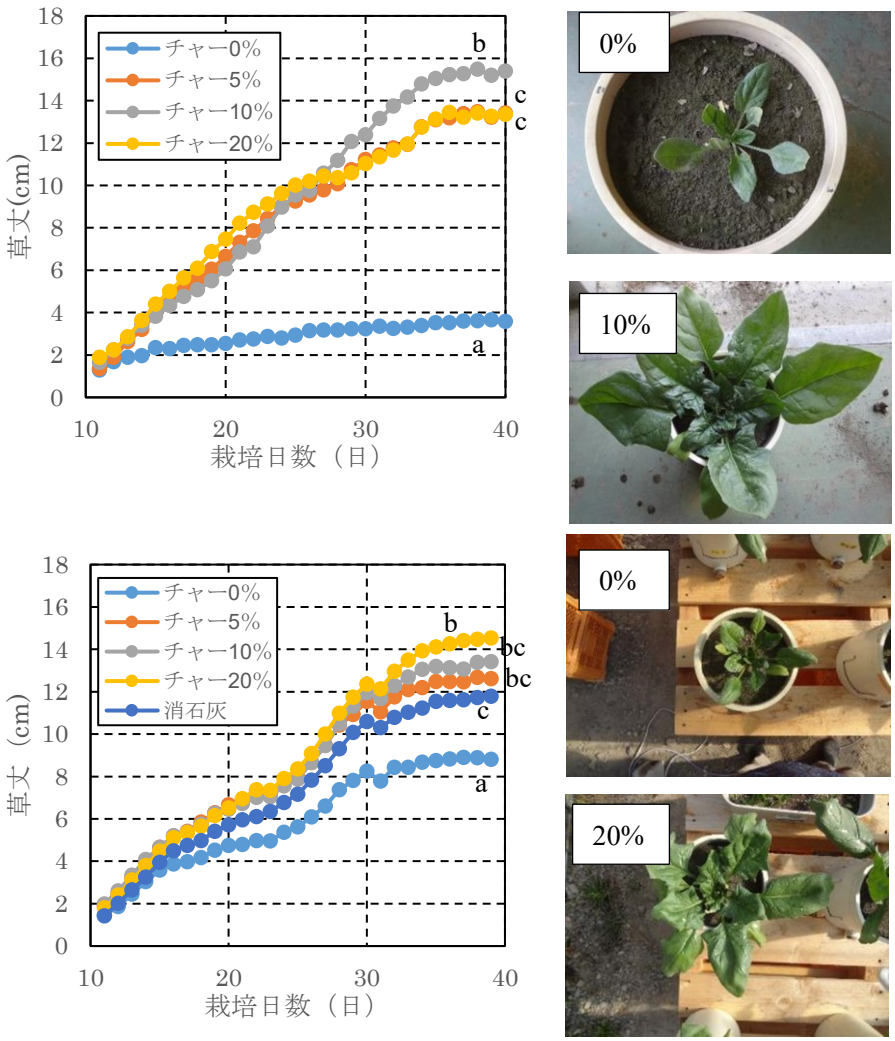


図１　ホウレンソウの草丈の影響（上：R3 栽培、下：R4 栽培）

多重比較検定の結果をグラフ中のアルファベットで表示した。
異なるアルファベット間に 5%水準で有意差あり

され、pH 矯正による生育効果が大きいことが確認された。また、Tukey-Kramer 法による多重比較分析を行った結果、特に R4 試験時においては、チャー20%配合区と消石灰配合区との間でも 5%水準で有意差が認められ、pH 矯正効果のみが期待される消石灰と比較して土壌改良効果も期待されるチャーの優位性が示唆された。

土壌化学性の結果について、全量分析の結果を表２に示す。供試土壌とチャーの配合割合の変化により、各元素の増減は見られるが、大きな変動は確認されなかった。表３に交換性塩基とトルオーグーリン酸の分析結果を示したが、特にチャーに含まれる交換性 K とトルオーグーリン酸 P の割合が土壌と比較してかなり多かったため、チャーの配合が多くなると、特に植物体が利用しやすい形態のリンやカリウムが配合されたものと考えられ、チャーの配合が植物体の成長に影響を与えている可能性が示唆された。なお、消石灰のみの試験区では、トルオーグーリン酸の量はかなり少なかった。

また、土壌物理性については、消石灰試験区と比較すると、チャーを配合した試験区では、栽培試験終了後の土壌の気相率が増加し、飽和透水係数が大きくなり、透水性が改善されていたことが確認された。また、保水力も向上し、チャーの配合により、消石灰を配合した場合と比較して、植物体の利用しやすい状態でリンなどの栄養分や水分が保持されていると推察された。

表１　チャーの配合率と土壌の pH との関係

チャー配合率	土壌 pH（R3）		土壌 pH（R4）	
(%)	開始時	終了時	開始時	終了時
0%	4.99	4.88	5.73	4.99
5%	6.23	5.56	7.62	5.79
10%	6.87	6.18	8.75	6.15
20%	7.38	7.28	9.1	7.14
消石灰	-	-	6.62	5.61
供試土壌	4.99	-	5.73	-
チャー	9.95	-	10.29	-

表２　土壌化学性分析結果（全量分析）

配合比	K K_2O mg/100 g	Ca CaO mg/100 g	Mg MgO mg/100 g	P P_2O_5 mg/100 g	N mg/100 g
0%	1410	937	517	252	281
5%	1430	904	523	294	327
10%	1480	978	518	268	275
20%	1550	1060	519	283	293
供試土壌	1350	815	519	238	332
チャー	6370	4990	1190	882	226

表３　土壌化学性分析結果（交換性塩基（K,Ca,Mg）・トルオーグーリン酸（P））

配合比	K K_2O mg/100 g	Ca CaO mg/100 g	Mg MgO mg/100 g	P（R3） P_2O_5 mg/100 g	P（R4） P_2O_5 mg/100 g
0%	27.7	275	62.2	3.25	8.31
5%	72.2	328	68.2	8.13	7.68
10%	131	360	72.3	14.2	9.01
20%	253	401	75.2	27.2	18.89
消石灰	-	-	-	-	3.95
供試土壌	26.2	295	63.4	8.32	7.14
チャー	3630	3580	466	267	182

謝辞

土壌分析にご協力いただきました道総研中央農業試験場巽和也氏および藤田一輝氏（現十勝農業試験場）に厚くお礼申し上げます。

※本稿は第 72 回日本木材学会（2022）、第 20 回日本炭化学会（2022）、第 21 回日本炭化学会（2023）において発表した内容をまとめたものである。

参考文献

1)地独）北海道立総合研究機構農業研究本部編：土壌・作物栄養診断のための分析法、2012、p. 104
2)地独）北海道立総合研究機構農業研究本部編：土壌・作物栄養診断のための分析法、2012、pp. 36-42

0-12　ナナカマドの樹皮組織から発生するシアン化水素の検出

○小山正登，重冨顕吾，玉井裕，荒川圭太，佐野雄三（北大院農）

【緒言】

樹皮とは、維管束形成層より外側の全組織であり、樹木の枝・幹・根の最外層を構成し、その機能の一つとして樹体内部を害菌の侵入から守る防御機能を持つと考えられている。しかしながら、その防御機能の詳細なメカニズムについてはほぼ未解明である。そこで、筆者らは、化学的な恒常的防御メカニズムに着目し、樹皮片を置いた培地上で木材腐朽菌のカワラタケ（*Trametes versicolor*）を培養することで樹皮片の抗菌活性を評価したところ、ナナカマド（*Sorbus commixta*）の内樹皮が高い抗菌活性を示したため[1]、その抗菌活性発揮メカニズムの解明を目的に研究を進めてきた。これまでに、ナナカマドの内樹皮に含まれるカワラタケの菌糸成長を強く阻害する成分は、樹皮に含まれるシアノゲン配糖体（amygdalin または prunasin）が酵素的に加水分解されることで発生するシアン化水素（HCN）である可能性が高いことが明らかになった[2]。加えて、培地上に置いたナナカマドの樹皮片から実際に HCN が発生することが確認された[3]。しかしながら、ナナカマドの樹皮片からどれ程の量の HCN が発生するのか、また、ナナカマドの生立木からも HCN が発生するのか否か、については不明である。そこで、今回は、ナナカマド樹皮組織から発生する HCN を検出した結果について報告する。

【実験方法】

実験 1：培養試験系における培地上に置いたナナカマド内樹皮片から発生する HCN の検出

HCN の存在下で黄色から赤褐色に変色するピクリン酸紙を用いて、樹皮片から発生する HCN の検出を試みた。北海道大学札幌実験苗畑のナナカマドより、2020 年 6 月下旬に採取し、含水状態で冷凍保存（-80℃）していた内樹皮を用いた。これより、小片（樹軸方向×接線方向 = 3×3 cm）を切り分け、凍結乾燥した後、γ線滅菌（15 kGy）のうえ、さらに凍結保存しておき、適宜実験に供した。内樹皮片を、PDA 培地上の中央に溝を設けたことで分断された一方の培地上に置き、他方の培地側のシャーレの蓋の内側に両面テープでピクリン酸紙を貼り付け、蓋を閉めてピクリン酸紙の変色の様子を観察した（test）。また、control として、内樹皮片が入っていないシャーレの蓋の内側に両面テープでピクリン酸紙を貼り付け、蓋を閉めてピクリン酸紙の変色の様子を観察した（**図 1**）。1 時間経過後、ピクリン酸紙をシャーレから取り出し、ピクリン酸と HCN の反応により生成する赤褐色の成分を 50%エタノールで溶出し、500 nm における吸光度を測定した。標品 KCN の検量線を用いて HCN を定量した。定量の際に用いた吸光度の値は、以下の式によって算出した。

$$\text{定量に用いた吸光度} = \text{test の吸光度} - \text{control の吸光度}$$

実験 2：ナナカマド立木から発生する HCN の検出

札幌実験苗畑のナナカマド 3 個体（DBH = 25.2 cm：個体 1、19.6 cm：個体 2、16.5 cm：個体 3）を用いた。樹幹の胸高部に 4.5×2 cm (樹軸方向×接線方向）の範囲で外樹皮を剥いだ。すぐさま特注の蓋つき密閉型チャンバーで傷口を覆い、チャンバーと樹皮表面の間の隙間をパテ（セメダイン製）で充てんし、ナイロンバンドで幹に括り付けた（**図 2**）。チャンバーの扉を開けて、内部にピクリン酸紙（4×1 cm）を針金で吊り下げてから密封し、ピクリン酸紙の変色の様子を観察した（test）。また、control として、外樹皮を剥がしていない部分も同様にチャンバーで覆い、ピクリン酸紙の変色の様子を観察した。1 時間経過後、**実験 1** と同様に HCN を定量した。各個体において、方角が異なる 3 か所で試験を行うことで、n = 3 とした（それぞれ別日に実施）。

続いて、上記のように外樹皮を剥ぐだけでなく、内樹皮の深さによる HCN 発生量の違いについても調べた。上記の実験に用いたナナカマド（個体 3）の胸高部において 4.5×2 cm（樹軸方向×接線方向）の

範囲で外樹皮を剥いだ後、ノミを用いて内樹皮の深さ 2〜3 mm までを切削除去した。すぐさま密封型箱型チャンバーで傷口を覆い、上記と同様に HCN 量を定量した。方角が異なる 4 か所で試験を行うことで、n＝4 とした（それぞれ別日に実施）。

【結果および考察】

培地上に置いた内樹皮片から発生する HCN を検出した（**図 3**）。無傷な植物組織では、シアノゲン配糖体とその分解酵素は組織・細胞レベルで空間的に隔離されていることが知られている[4]。よって、樹皮の剥離および凍結保存・凍結乾燥の過程で内樹皮の細胞構造が破壊され、シアノゲン配糖体と分解酵素が接触し、樹皮片が培地から吸水することで加水分解が進み、HCN が発生したと考えられる。

ナナカマド立木から発生する HCN の検出を試みたところ、外樹皮を剥ぐことで HCN が発生することが分かった（**図 3**）。一方で、外樹皮を剥がしていない control の条件では、ピクリン酸紙の変色は見られなかった。さらに、傷をより深くつけると発生する HCN 量が増えることが示された（**図 3**）。また、単位面積当たりの HCN 量で比較したところ、培地上に置いた内樹皮片に比べ、立木から発生する HCN 量は少ない傾向にあった（**図 3**）。この理由としては、立木では傷表面に近い樹皮組織でのみシアノゲン配糖体の加水分解反応が進むのに対して、樹皮片では樹皮片の厚さ分、より広範囲で加水分解反応が進むことが考えられる。

【謝辞】

本研究で用いた箱型チャンバーは、北海道大学電子科学研究所技術部の武井将志氏に製作していただきました。また、北海道総合研究機構の寺澤和彦フェローより、メタンフラックス測定用チャンバーの仕様・設計に関する情報を提供いただき、箱型チャンバー設計の参考にさせてもらいました。厚く御礼申し上げます。

【文献】

1) Koyama M. et al. : Evaluation of antifungal activities of woody plant barks using an incubation system with *Trametes versicolor*. Trees. (in press)
2) 小山正登 他：カワラタケを用いた培養系による樹皮の化学的な恒常的防御機能評価の試み. 第 71 回日本木材学会大会要旨集, M1-07-12 (2021)
3) 小山正登 他 : ナナカマド樹皮の化学的防御機構の検討と樹皮に高い抗菌活性を有する樹種の探索. 第 73 回日本木材学会大会要旨集, A14-02-1030 (2023)
4) Poulton J.E.：Localization and catabolism of cyanogenic glycosides. In “Cyanide compounds in biology”, CIBA foundation sympodium 140, pp. 67-91 (1988)

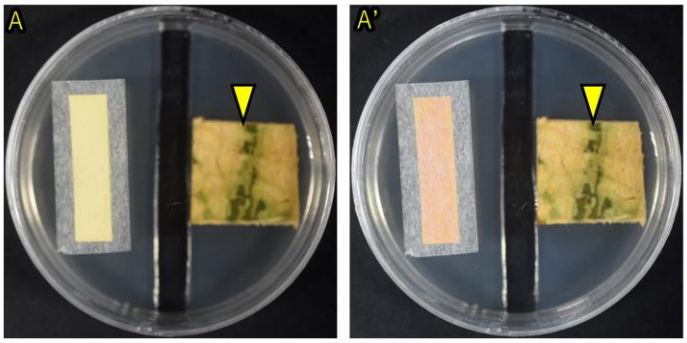


図 1: シャーレ内のピクリン酸紙の変色の様子. A : 試験開始から 10 分経過、A’ ：同 60 分経過. 矢尻＝ナナカマド内樹皮片. シャーレ直径 = 9 cm.

図 2: 箱型チャンバーを用いてナナカマド立木から HCN を検出する様子. 上 = test 用, 下 = control 用.

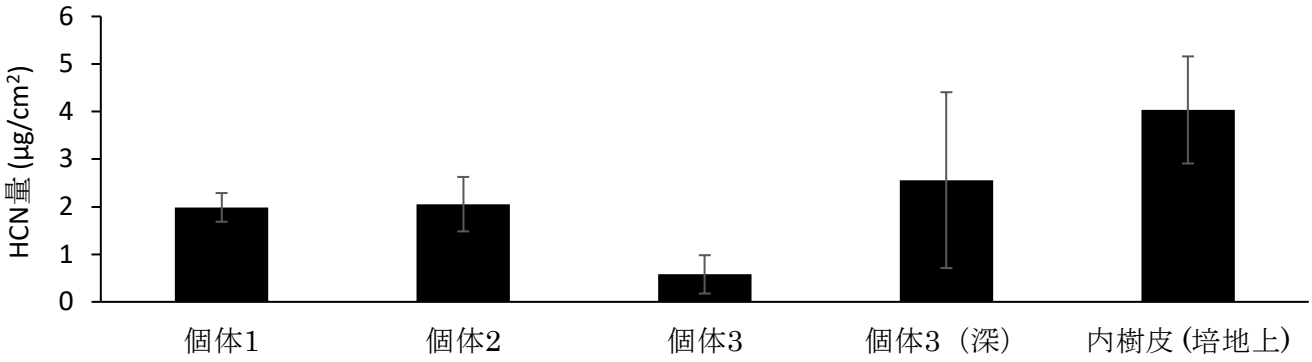


図 3:ナナカマド内樹皮片(実験 1)および立木（実験 2）から発生する単位面積当たりの HCN 量. 個体 3（深）は、個体 3 において内樹皮の深さ 2〜3 mm の部位. 個体 1〜3 および内樹皮（培地上）: n = 3、個体 3（深）: n = 4. Bars = SD.

0-13　樹皮に含まれる氷核物質の解析

○筒井路実，古賀泰雅，荒川圭太(北大院農)

【緒言】

水は通常 0℃では凍らず、一過的に過冷却し、水中に混じった異物質や容器の壁面に存在する物質が凍結を引き起こすことが知られている。水などの溶液の凍結は氷と似た構造をもつ氷核の形成によって開始するため (Zachariassen et al. 2000)、異物質が氷晶形成を促進する活性は、氷核活性と呼ばれる。氷核活性は異物質の種類によって異なり、氷核活性が高い物質は氷核物質と呼ばれる。植物由来の氷核物質として報告されているものには、レンギョウ属の枝髄より単離・同定されたシュウ酸カルシウム 1 水和物がある (石川ら 2016)。さらにヨーロッパシラカンバの花粉では、水抽出される多糖類から氷核活性が検出されたことが報告されている(Dreischmeier et al. 2017)。

また、本研究室の先行研究でも、カツラ樹皮の抽出物より氷核活性を検出している (古賀ら 2021)。なかでも細胞壁を含む不溶性画分から水で抽出されてくる画分(水抽出画分)で検出される氷核活性は多糖類であることも示唆している。このようなカツラ樹皮の水抽出画分で検出された氷核活性が他の樹種でも同様に検出されるか否かを検討するため、本研究では複数の針葉樹を用いてカツラと同様に水抽出画分を調製し、そこに含まれる物質の氷核活性がカツラのものと同様な性質であるのかを明らかにすることを目的とした。さらに、氷核活性が高かった樹種については、先行研究と同様に熱処理や分子量分画することで、氷核物質の性質をカツラのものと比べることを試みた。

【実験材料】

2022 年 2 月と 12 月及び 2023 年 1 月と 11 月に、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター植物園及び北海道大学北方生物圏フィールド科学センター札幌研究林実験苗畑で針葉樹など 7 樹種を採取し実験に供試した。使用したのは 3~10 年生の枝である。

【実験方法】

１）水抽出画分の調製

針葉樹など 7 樹種の枝から切り分けた樹皮(形成層を含む可能性あり) 0.2 g を液体窒素下で磨砕し、磨砕物の 10%重量のポリビニルポリピロリドン (PVPP)と 5 倍容の緩衝液 [50 mM MOPS-NaOH (pH 7.0), 0.5 M ソルビトール, 0.15 M NaCl, 5 mM EDTA, 5 mM $K_2S_2O_5$] を加え、1 分間ボルテックスミキサーで攪拌することによって可溶性の細胞内内容物の除去を試みた。これを遠心分離 (15,000×g, 4℃, 30 分) して、その上清を除去し、次に沈殿に残存する細胞内容物や緩衝液成分を取り除くために、沈殿を 5 倍容の洗浄用緩衝液 [10 mM MOPS-NaOH (pH 7.0), 0.15 M NaCl, 5 mM EDTA, 5 mM $K_2S_2O_5$]で 1 回、50 倍容の超純水で 3 回洗浄した。以上の操作によって最終的に得られた沈殿を凍結乾燥機に一晩かけたものを不溶性画分とした。続いて、不溶性画分を用いて水抽出を行うことで可溶性成分を抽出することにした。不溶性画分に対して 50 倍容相当の超純水を加え、氷冷しながら断続的に 1 分のソニケーションを行った。これを遠心分離 (15,000×g, 4℃, 30 分) して上清を回収した後、限外濾過フィルター (DISMIC 13CP020AS：孔径 0.20 μm) による濾過によって得られた濾液を水抽出画分とした。

２）熱処理画分の調製

氷核活性が比較的高かったアカエゾマツ樹皮由来の水抽出画分を 95℃に 10 分曝した後、氷を用いて急冷したものを熱処理画分とした。

３）分子量による分画

アカエゾマツ樹皮由来の水抽出画分 200 μL と超純水 100 μL を、限外濾過フィルター (アミコンウルト

ラ -0.5 mL 遠心式フィルター) を用いて遠心濾過(14,000×g, 4℃, 40 分)し、得られた濃縮液に新たに MQ 水を 300 µL 加え、再度遠心濾過するという処理を 2 回行った。この操作の後、濾液と濃縮液をそれぞれ回収し、1 mL に定容したものをそれぞれ分子量が 100,000 より小さい化合物を主に含む画分と 100,000 より大きい化合物を主に含む画分とした。

４）凍結温度の測定

サンプルを 10 µL ずつ分注したマイクロチューブを 8~10 本用意し、チューブの外側に熱電対を貼り付け、4℃に予冷しておいたプログラムフリーザーの中に入れ、1 時間静置した。その後、0.2℃/分で冷却し、試料の温度変化をデータロガーで経時的に記録した。これによって水の凍結時に生じる潜熱の放出を検出し、潜熱の放出が確認された温度を凍結開始温度とした。

【結果および考察】

針葉樹 7 樹種の樹皮不溶性画分から得られた水抽出画分の凍結温度を比較したところ、これらは-11.7℃から-13.8℃の間で検出された。対照区(超純水)の凍結温度は−23.2℃であった。そのため、対照区よりも樹皮不溶性画分由来の水抽出画分の方が少なくともおよそ 9℃以上も凍結温度が高い（すなわち凍りやすい）ことが明らかになったため、すべての針葉樹種で氷核活性が検出されたと結論づけられた。また、先行研究で調べられたカツラ樹皮不溶性画分由来の水抽出画分と比較すると、凍結温度が低い（すなわち凍りにくい）樹種が多かった。以上のことより、針葉樹の樹皮不溶性画分由来の水抽出画分は氷核活性を有するが、その単位新鮮重量あたりの氷核活性はカツラのものよりも若干低い傾向があると示唆された。なお、水抽出画分においてカツラ由来のものよりも針葉樹由来のものの氷核活性が低い理由として、抽出効率が低くて活性物質の回収量が少なかったこと、抽出物に含まれる物質の活性自体が低かったこと、抽出工程で活性成分に変性や修飾などの構造変化が起きて活性が低下したこと、活性成分に作用して不活性化するような他の因子が存在することなどの可能性がいくつか考えられるが、これらについての検討は今後の課題である。

また、熱処理画分と未処理画分の凍結温度を比較した結果、両画分の凍結温度は同程度であったため、アカエゾマツの樹皮不溶性画分由来の水抽出画分に含まれる氷核活性は、熱処理の影響を受けないことが示唆された。さらに、分子量が 100,000 より大きい画分は 100,000 より小さい画分に比べて凍結温度が有意に高かったため (マンホイットニーの U 検定 $p<0.001$)、水抽出画分に含まれる氷核物質の分子量は 100,000 より大きい可能性が示された。これらの性質はカツラ樹皮不溶性画分由来の水抽出画分で検出された氷核活性のものと同様であった。よってカツラの樹皮不溶性画分由来の水抽出画分と、アカエゾマツの同画分に含まれる氷核物質の性質は似ている可能性が示された。

【参考文献】

石川雅也, 野村孝之, 槌谷明日香. (2016): シュウ酸カルシウムを含む氷核活性剤. 特許公報

古賀泰雅, 鉄穴口晃, 鈴木伸吾, 重冨顕吾, 荒川圭太. (2021). カツラ樹皮由来の氷核活性物質に関する研究. 低温生物工学会誌, 67(2), 141-145.

Dreischmeier, K., Budke, C., Wiehemeier, L., Kottke, T., & Koop, T. (2017). Boreal pollen contain ice-nucleating as well as ice-binding 'antifreeze' polysaccharides. *Scientific reports*, 7(1), 41890.

Zachariassen, K. E., & Kristiansen, E. (2000). Ice nucleation and antinucleation in nature. *Cryobiology*, 41(4), 257-279.

【謝辞】

本研究に供試した材料は、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター札幌研究林実験苗畑および北海道大学植物園より提供いただいた。また、本研究の一部は、科研費（JP21K05699）により行われた。

日本木材学会 北海道支部講演集 第 55 号

令和 5 年 11 月 10 日 発行
編集人　荒川 圭太，冨髙 亮介，石原 亘
発行人　松本 和茂
発行所　日本木材学会 北海道支部
〒060-8589　札幌市北区北 9 条西 9 丁目
北海道大学農学部内