イイギリの乾燥に関する研究

井口　朝道・仲摩　和寛

1. はじめに

イイギリはヤナギ科イイギリ属の落葉高木で、日本では本州から先島諸島まで分布し、山地に点在する（大川・林、2016）。幹から枝を左右対称に出す樹形が特徴的であり、幹は比較的通直である。また秋～冬には、ぶどうの房のような直径 7-8㎜ の赤い実が多数垂れ下がる光景が特徴的である（大川・林、2016）。

沖縄県の森林・林業アクションプラン（沖縄県農林水産部森林管理課、2017）では、環境に対する影響が少ない集落周辺の未利用造成地等を活用し、早生樹種による短伐期施業を行うことで、森林資源の循環利用を図ることとしている。イイギリはウラジロエノキ、ハマセンダンと同様に早生樹種として位置付けられており、35 種ある造林樹種の 1 つとして 2017 年に指定された。一方で、イイギリは木材利用の実績が少ないことから、これまで造林事業としては植栽されてはいない。

県産木材の利用については、沖縄県では、県産木材のブランド化を図り、家具や食器、さらに建築内装等、付加価値の高い用途である製材の利用拡大を目指しているが（沖縄県農林水産部森林管理課、2022）、一般に、広葉樹を製材利用する際は、針葉樹と比較した場合に、乾燥期間の長期化や、乾燥時のくるいや割れが生じやすい等、乾燥の困難性が大きな課題の 1 つとして挙げられる。

これまで県産広葉樹を対象にした木材乾燥に関する研究としては、天然乾燥試験は、イタジイ（嘉手苅、1992）、デイゴ（嘉手苅、1995）、モクマオウ・テリハボク・アカギ・タイワンフウ（嘉手苅、2007）やホルトノキ（井口・仲摩、2024）について行われているが、イイギリに関する知見はない。また、それぞれ材厚や測定項目が異なっており、正確な樹種間の比較ができない状況にある。一方、人工乾燥試験は、リュウキュウマツ（嘉手苅、1987）、イタジイ（嘉手苅、1992）、ホルトノキ（井口・仲摩、2024）について実施されているのみであり、イイギリを含め県産主要樹種に関するデータの蓄積は未だ不十分な状態である。

そこで、本研究は、イイギリを対象に、乾燥特性を把握するとともに、乾燥スケジュールについて検討することを目的に実施した。

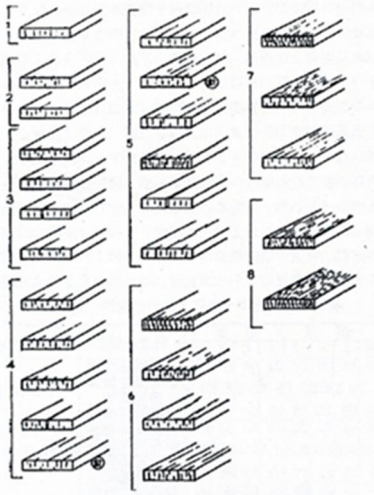
2. 材料および方法

1）供試材料

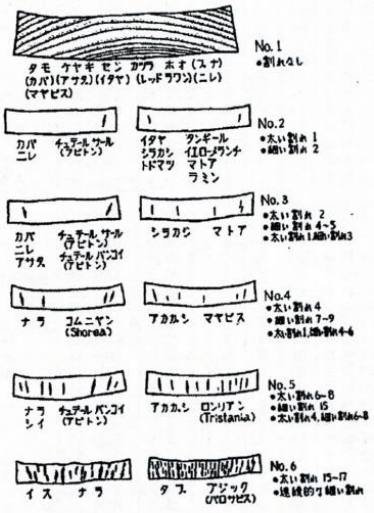
試験には 2022 年 11 月 16 日に名護市源河県営林内で伐採した 3 個体（No2～4）を供試した。長さ 2m で、No2 は 2 玉（以下、先玉を 21、元玉を 22 と記す）、No3 は 3 玉（以下、先玉から 31～33 と記す）、No4 は 1 玉の計 6 玉に造材を行い、1 週間以内に企業組合キンモク（金武町）において材厚 40㎜ で製材した後に、以下の 3 種類の乾燥試験を行った。

2）急速乾燥試験

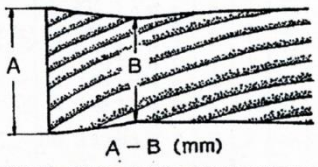
イイギリの乾燥性の難易等を把握し、人工乾燥の適合性を評価するとともに人工乾燥の際のスケジュール条件を検討するため、無欠点小試験体を用いた急速乾燥による推定法（寺澤、2004）を行った。厚さ 40㎜ で製材した後、速やかに寸法を 20㎜（厚さ；半径方向）×100㎜（幅；接線方向）×200 ㎜ （長さ；繊維方向）とした正板目無欠点小試験体の製作を行った。



第3図　乾燥初期にあらわれる割れの段階
◉は針葉樹の意味，段階の分類は割れの最も甚だしい時の状態で行う



第4図　内部割れの段階
No. 1で（　）をしてあるものは材質によにて，No. 2～No. 3の割れの生ずる樹種



第5図　断面の糸巻状の変形の測定方法
かどの一番厚いAと1～2cm入つたところで一番薄くなつているBとの差

厚さの差	損傷の段階			
	1	2	3	4
A-B(mm)	0～0.3	0.3～0.5	0.5～0.8	0.8～0.2
	5	6	7	8
	1.2～1.8	1.8～2.5	2.5～3.5	3.5以上

図-1　初期割れ（上）、内部割れ（中央）、断面の糸巻状変形（下）の損傷の分類
（出典：寺澤（2004）による図表を一部抜粋）

105℃に調整した恒温乾燥機を用いて、生材から全乾状態まで急速乾燥を行い、その間、試験体に発生する初期割れ、全乾状態に至った時点での断面の糸巻状変形、内部割れを観察・計測し、図-1（寺澤、2004）に従い損傷の段階を評価した。なお、各丸太から1枚ずつ計6枚を同時に試験し、2023年2月7～10日の期間に2回繰り返し試験を行った後、評価は損傷の種類毎に最も損傷の段階が大きいものを採用した。

人工乾燥スケジュール条件（初期乾球温度、初期乾湿球温度差、終末乾球温度）は、この各損傷の段階から表-1（寺澤、2004）に準じて、損傷の種類毎に選択された各乾燥条件の中で最も緩やかな条件となる値を採用した。

表-1 損傷の種類と段階による乾燥条件
（出典：寺澤（2004）による表を一部抜粋）

損傷の種類	損傷の段階	乾燥条件		
		初期温度	初期温度差	終末温度
初期割れ	1	70	6.5	95
	2	65	5.5	90
	3	60	4.3	85
	4	55	3.6	83
	5	53	3.0	82
	6	50	2.3	81
	7	47	2.0	80
	8	45	1.8	79
断面の糸巻状変形	1	70	6.5	95
	2	66	6.0	88
	3	58	4.7	83
	4	54	4.0	80
	5	50	3.6	77
	6	49	3.3	75
	7	48	2.8	73
	8	47	2.5	70
内部割れ	1	70	6.5	95
	2	55	4.5	83
	3	50	3.8	77
	4	49	3.3	73
	5	48	3.0	71
	6	45	2.5	70

さらに、国産広葉樹の既往の文献値（寺澤、2004）を参考にして、乾球温度が45～60℃となる、より緩やかな条件についても作成した。

決定した乾燥条件をもとに、初期乾球温度は含水率 35%まで一定とし、そこから含水率15%時に終末温度になるように、また乾湿球温度差については、初期含水率の 2/3 まで一定とし、そこから最終の温度差が 15℃になるように調整し、乾燥経過中の含水率に応じた人工乾燥スケジュールを作成した。

3）人工乾燥試験①

イイギリの急速乾燥試験の結果を基に作成した人工乾燥スケジュール①の妥当性および生材状態からの人工乾燥の適合性を検討するため、小板材を用いた人工乾燥試験を行った。

試験には、電気式木材乾燥機 HD74（ヒルデブランド株式会社）を使用し、試験体は、寸法を 35㎜（厚さ）×150㎜（幅）×600㎜（長さ）とした追い柾目材（12 枚）および板目材（8 枚）の計 20 枚を用いた。両木口面には、木口からの乾燥を防ぐためシリコンコーティングを施した。供試体は試験体製作後、ラップに包み冷蔵庫内で保管した後、2023 年 2 月 13 日から試験を開始し、調湿処理を経て 2 月 18 日に終了した。

本試験での人工乾燥スケジュール①は、急速乾燥試験の結果を基に作成した乾燥条件を使用し、乾燥温度は 60～85℃とした。

目標含水率は家具や内装材での利活用を念頭に 8%とした。

試験中は、供試体の平均含水率に標準偏差を加えた含水率に該当する試験体 2 枚を含水率コントロール材としてスケジュール管理を行った。また、平均含水率相当の 2 枚を加えた計 4 枚について、およそ 24 時間毎に重量と寸法、割れを計測した。終了時には、全ての試験体を対象に寸法、木材のくるいである、ねじれと幅そり（図-2）、木表、木裏両面の割れを測定した。なお、割れの長さについては木表、木裏の合計値とした。

さらに、試験体中央部から採取した 2cm 幅の小試験片を用いて、乾燥終了時点の含水率および厚さ方向の含水率分布を求めた（図-3）。また、試験体中央部を切断した際に、内部割れの有無についても確認を行った。

以上の測定した項目から、方向別の収縮率、木目毎のくるいや割れ、経過日数と含水率の推移について解析し、人工乾燥スケジュール①における人工乾燥の適合性を検討した。

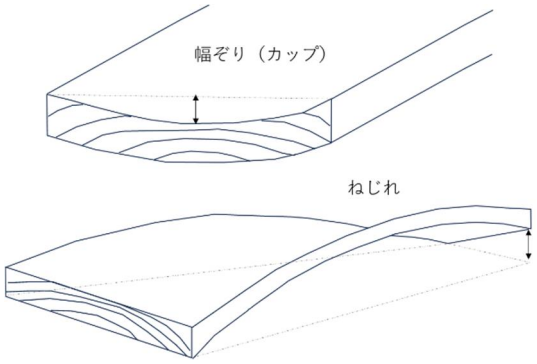


図-2　木材のくるい（幅そり、ねじれ）

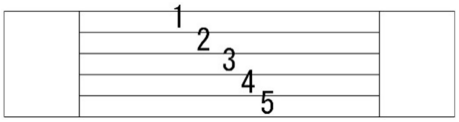


図-3　厚さ方向の含水率分布の試験片の位置の模式図

4）人工乾燥試験②

急速乾燥試験の結果と国産広葉樹の既往の文献値（寺澤、2004）を参考にして決定したより緩やかな乾燥条件（乾燥温度：45～60℃）から作成した人工乾燥スケジュール②を用いて人工乾燥試験を行い、人工乾燥の適合性を検討するとともに、乾燥スケジュール①との比較を行った。

試験には、追い柾目材（10 枚）、板目材（10 枚）の計 20 枚を用いて、2023 年 3 月 7 日から試験を開始し、調湿処理を経て 3 月 13 日に終了した。

試験体の寸法や目標含水率、測定項目等については、人工乾燥試験①と同様である。

5）天然乾燥試験

イイギリの天然乾燥の適合性を評価するとともに、人工乾燥との効率的な組み合わせ方法について検討するため、小板材を用いた天然乾燥試験を行った。

試験には、追い柾目材（12 枚）、 板目材（8 枚）の計 20 枚を用いて、森林資源研究センター木材実験棟の屋根のある半屋内空間に桟積みして行った（図-4）。なお、供試体の寸法や事前の処理は人工乾燥試験と同様である。

2022 年 11 月 28 日から試験を開始し、乾燥期間中は、開始約 1 ヵ月間は週に 2 回、その後は 1～2 週間に 1 回の頻度で重量、寸法および割れを計測し、全ての試験体の重量が平衡状態となった 2023 年 2 月 2 日に終了した。

図-4 天然乾燥試験の桟積み状況

終了時には、人工乾燥試験と同様に幅そり、ねじれを測定し、試験体中央部から採取した 2cm 幅の小試験片を用いて、乾燥後の含水率および厚さ方向の含水率分布を求めた。

以上の測定した項目から、乾燥後の方向別の収縮率、乾燥期間中の経過日数と含水率の推移、含水率と収縮率の関係について解析し、天然乾燥時の乾燥特性について検討を行った。

3. 結果および考察

1）急速乾燥試験

急速乾燥試験によって確認された各損傷の程度は、初期割れ 3、断面変形 2、内部割れ 1 となり（図-5）、いずれの損傷も小さくなった。これらを評価することで得られた乾燥条件を表-2 に示す。また、乾燥初期から終期までの人工乾燥スケジュール①は表-3 のとおりとなった。損傷が小さいことから、終末温度が 85℃となり、広葉樹としては高温帯での乾燥が可能であることが示唆された。

図-5　各損傷の程度
（上：表面割れ、下：内部割れ・断面変形）

表-2 急速乾燥試験から求めた乾燥条件

損傷の種類	評価値	乾燥条件（単位：℃）		
		初期温度	初期温度差	終末温度
初期割れ	3	60	4.3	85
断面変形	2	66	6.0	88
内部割れ	1	70	6.5	95
総合評価		60	4.3	85

表-3　人工乾燥スケジュール①

含水率	乾球温度（℃）	温度差（℃）	湿球温度（℃）
生材 to 90	60.0	4.3	55.7
90 to 80	60.0	5.0	55.0
80 to 70	60.0	5.8	54.2
70 to 60	60.0	6.7	53.3
60 to 50	60.0	7.7	52.3
50 to 45	60.0	9.0	51.0
45 to 40	60.0	9.7	50.3
40 to 35	60.0	10.4	49.6
35 to 30	60.0	11.2	48.8
30 to 25	65.0	12.0	53.0
25 to 20	71.0	12.9	58.1
20 to 15	78.0	13.9	64.1
15 to final	85.0	15.0	70.0
Conditioning	85.0	9.0	76.0

さらに、国産広葉樹の既往の文献値（寺澤、2004）を参考にしてより緩やかになるよう設定した人工乾燥スケジュール②を表-4 のとおりとなった。

表-4　人工乾燥スケジュール②

含水率	乾球温度（℃）	温度差（℃）	湿球温度（℃）
生材 to 90	45.0	4.3	40.7
90 to 80	45.0	5.0	40.0
80 to 70	45.0	5.8	39.2
70 to 60	45.0	6.7	38.3
60 to 50	45.0	7.7	37.3
50 to 45	45.0	9.0	36.0
45 to 40	45.0	9.7	35.3
40 to 35	45.0	10.4	34.6
35 to 30	45.0	11.2	33.8
30 to 25	48.0	12.0	36.0
25 to 20	52.0	12.9	39.1
20 to 15	56.0	13.9	42.1
15 to final	60.0	15.0	45.0
Conditioning	60.0	10.0	50.0

2）人工乾燥試験①

人工乾燥試験①（乾燥温度：60～85℃）における試験中の管理材の含水率の推移を図-6 に示す。初期含水率が 200%を超える非常に高含水率の試験体が含まれていたが、追い柾目材、板目材ともに、生材状態からわずか 5 日間で調湿処理を終えることができ、平均の最終含水率については、目標含水率である 8%に到達した（図-6、表-5）。

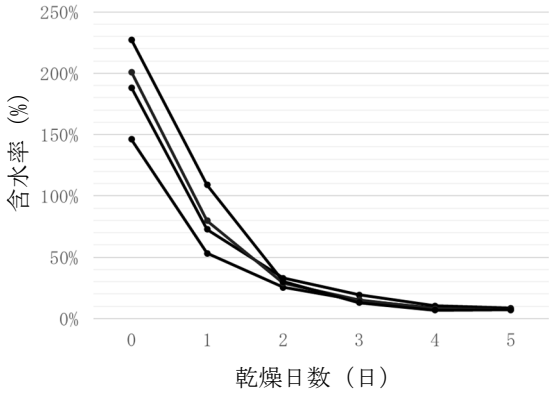


図-6 人工乾燥中の含水率の推移

次に木目毎の乾燥特性を表-5 に示す。収縮率について木目毎に見ると、木材の接線方向となる幅方向で、追い柾目材が 4.1%（平均値、以下同じ）、板目材が 4.8%とより大きくなる傾向がみられたが（表-5）、国産の主要な広葉樹材（3.9～8.9%）（信田・河崎、2020）と比較して特に大きな値ではなかった。

表面割れは計 7 枚で確認されたが（表-5）、追い柾の 2 枚については、樹芯由来の割れが人工乾燥開始時点ですでに発生していた。また、追い柾目の平均割れ長は 13.0 ㎝であり（表-5）、木表・木裏の材面の長さの合計は 120㎝であることから軽度の割れと判断した。なお、木目を問わず、内部割れは確認されず、くるいについては、追い柾目材では、ねじれ 1.8㎜、幅そり 1.9㎜、板目材ではねじれ 2.7㎜、幅そり 1.6㎜と、いずれの木目でも小さな値であり（表-5）、材の歩留まりは高いと判断された。

次に、試験終了時の試験片の位置毎の含水率分布を図-7 に示す。全体的に、材表面に対して材中央部で若干含水率が高い傾向を示したが、追い柾目材である材番号 21-4-2（原木番号-製材位置-鉛直方向位置）以外は、いずれもその差が 1%未満に抑えられており、十分に材内部まで均一に乾燥が進んでいることが確認された。また、21-4-2 についても、全体の含水率は、目標含水率とおりの 8.2%であ

表-5　人工乾燥試験①における乾燥特性

木目	供試体数	乾燥後平均含水率	平均収縮率(%)			平均ねじれ	平均幅そり	表面割れ	平均表面割れ	内部割れ
	(枚)	(%)	長さ方向	厚さ方向	幅方向	(mm)	(mm)	(枚)	(cm)	(枚)
追い柾	12	7.4%	0.2%	3.3%	4.1%	1.8	1.9	6	13.0	0
板目	8	7.5%	0.3%	2.6%	4.8%	2.7	1.6	1	5.1	0

平均表面割れ（cm）は、割れた供試体のみでの平均値とする

り、含水率差も 1.1%と 1%をわずかに上回る程度で、全体として目標含水率の 8±2%の範囲内であった。

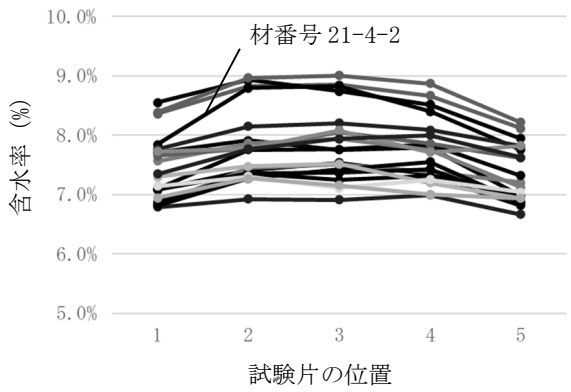


図-7 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

3）人工乾燥試験②

人工乾燥試験②（乾燥温度：45～60℃）における試験中の含水率の推移を図-8 に示す。初期含水率が 200%を超える非常に高含水率の試験体が多く含まれている中で、生材状態から 7 日目に調湿処理を終えたところ、木目毎に平均した最終含水率については、追い柾目材、板目材のいずれにおいても 9%程度となり、目標含水率の 8±2%の範囲内となった（表-6）。

次に、木目毎の乾燥特性を表-6 に示す。収縮率について木目毎に見ると、木材の接線方向となる幅方向で、追い柾目材が 3.4%（平均値、以下同じ）、板目材が 4.0%と大きくなる傾向がみられたが（表-6）、人工乾燥試験①や国産の主要な広葉樹材（3.9～8.9%）（信田・河崎、2020）と比較して特に大きな値ではなかった。表面割れは、追い柾目材で 1 枚確認され、43.4cm とやや大きな値となったが（表-6）、乾燥開始前から発生していた樹芯由来の割れであった。くるいについては、追い柾目材では、ねじれ 2.3mm、幅そり 1.7mm、板目材ではねじれ 2.1mm、幅そり 1.4mm と木目を問わず特段大きい値ではなく、内部割れは発生しなかった（表-6）。

次に、試験終了時の試験片の位置毎の含水率分布を図-9 に示す。追い柾目材である材番号 21-4-1 については、全体的に含水率が 10～13%と高い上に、材中央部と材表面との差も 2.6%と大きいことから、乾燥が明らかに不十分であっ図。この材の人工乾燥開始時点の含水率は 166%で、全体の試験体の平均初期含水率（176%）と比較しても低く、乾燥が十分に進まなかった要因については不明である。含水率が高止まりする材中央部付近（試験片の位置 2～4）の含水率が目標含水率の 8+2%である 10%以下で、材表面との含水率差が 1%程度に抑えられた供試体は、20 枚中 12 枚となり、4 割にあたる 8 枚は乾燥が不十分と判断された。

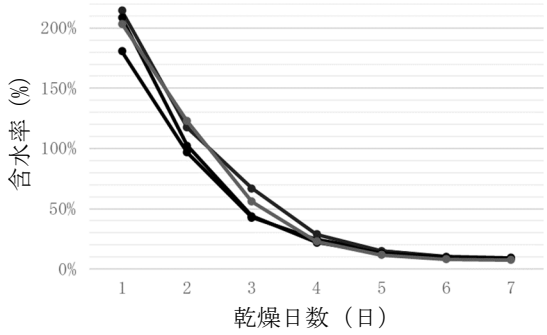


図-8 人工乾燥中の含水率の推移

表-6　人工乾燥試験②における乾燥特性

木目	供試体数	乾燥後平均含水率	平均収縮率(%)			平均ねじれ	平均幅そり	表面割れ	平均表面割れ	内部割れ
	(枚)	(%)	長さ方向	厚さ方向	幅方向	(mm)	(mm)	(枚)	(cm)	(枚)
追い柾	10	9.0%	0.1%	3.1%	3.4%	2.3	1.7	1	43.4	0
板目	10	8.9%	0.2%	2.4%	4.0%	2.1	1.4	0	-	0

平均表面割れ（cm）は、割れた供試体のみでの平均値とする

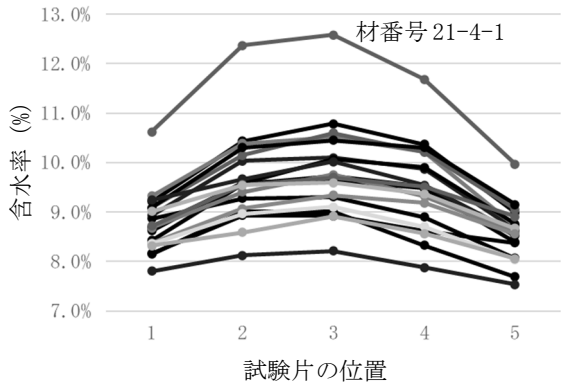


図-9 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

4)　人工乾燥試験①、②の評価

今回、人工乾燥スケジュールを変えて2回の人乾燥試験を行った。終末温度が高いスケジュール①では、乾燥終了までの日数は5日となり(図-6)、スケジュール②の7日(図-8)に対して2日間の短縮となった。また、スケジュール②では、4割の材で乾燥が不十分と判断され、本来は後1～2日間の乾燥期間が必要となることから、乾燥温度を高めたことによる期間短縮の効果は大きいと考えられた。

次に2つのスケジュールの違いによる木材のくるいについて比較したところ図-10のとおりとなった。なお、含水率はくるいの発生に影響を与えると考えられるため、解析対象は含水率が目標含水率の8±2%のものとした。ねじれは、二つの乾燥スケジュール間でほぼ変わらない一方で、幅そりは、終末の乾燥温度が高いスケジュール①のほうが、より緩やかな条件である②に対してわずかに大きくなる傾向が見られたがt検定（ウェルチ）により比較したところ、有意な差は確認されなかった（$p>0.05$）（図-10）。

表面割れは、スケジュール①では7枚発生したのに対して（表-5）、②では1枚となったが（表-6）、これは前述のとおり、樹芯由来での割れも含まれており、また、①での平均割れ長についても表裏の両面の合計値で5.1～

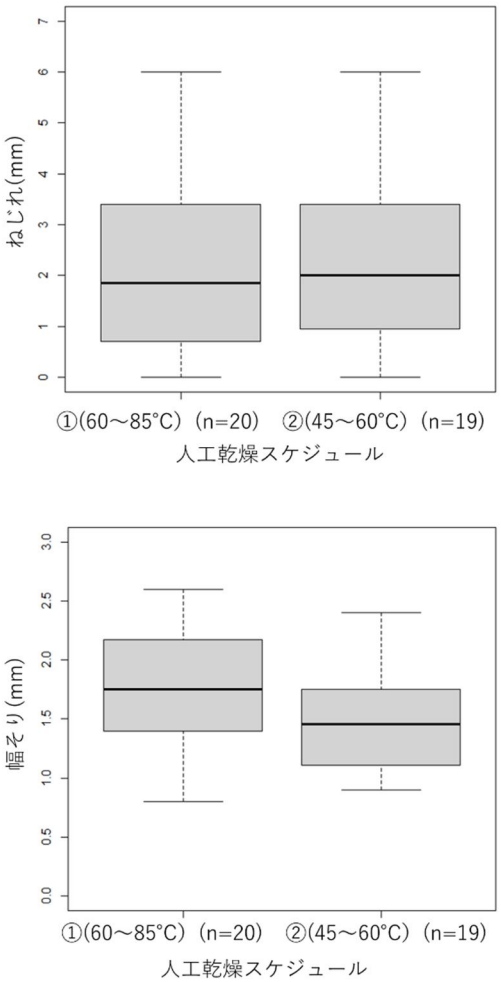


図-10 スケジュール毎のくるい
（上：ねじれ、下：幅そり）

13.0 ㎝程度と大きく目立つものでは無いことから大きな差は無いものと判断した。

また、内部割れについては木材の利用価値を大きく損なう上、材表面からは確認できず、木工事業者が乾燥板材を購入後、自身で製品製作のために加工する際に初めて明らかになるため、県産木材のイメージを大きく低下させる欠点であるが、いずれのスケジュールにおいても発生しなかった（表-5、6）。

よって、乾燥温度を 60～85℃と高めに設定することで、損傷を低減したまま乾燥期間を大幅に短縮することが可能と考えられた。

5)　天然乾燥試験

供試した 20 枚を木目毎に分けて、天然乾燥試験における乾燥特性を示す（表-7）。乾燥後の平均含水率は、いずれも日本の一般的な気乾含水率である約 15%となり、乾燥が十分に進んでいることが確認された。

方向別の平均収縮率は、接線方向にあたる幅方向で追い柾目材が 2.3%（平均値、以下同じ）、板目材が 3.0%と最も大きな値を示したが、国産の主要な広葉樹材（3.9～8.9%）と比較して低くなった(表-7)。くるいについては、追い柾目材では、ねじれ 1.1㎜、幅そり 1.0㎜、板目材ではねじれ 2.6㎜、幅そり 0.8㎜ と木目を問わず小さい値であった（表-7）。表面割れは、追い柾目材で 3 枚確認されたが、うち 1 枚は樹芯や節の影響であり、また平均割れ長も 13.8 ㎝と全体的に大きな割れは確認されなかった。また、内部割れは発生しなかった（表-7）。

続いて図-11 に天然乾燥中の含水率の推移を示す。初期平均含水率 170%程度と高含水率だったものが 40 日程度で 15%程度の平衡状態に到達しており、速やかに乾燥が進んだと考えられる。

含水率と収縮率の関係については図-12 に示すとおりである。多くの試験体で、含水率が繊維飽和点とされる 30%付近になった時点で収縮率が上昇している傾向が見られた。一方で含水率が高い状態から収縮が始まる供試体ほど、最終の収縮率が大きくなる傾向が見られた。

試験終了時の試験片の位置毎の含水率分布については、供試した 20 枚全てで特に材中央部が材表面と比較して高い傾向は確認されず、また、最大の含水率差は全て 1%未満に抑えられており（図-13）、材の中心まで均一に乾燥が進んでいることが確認された。

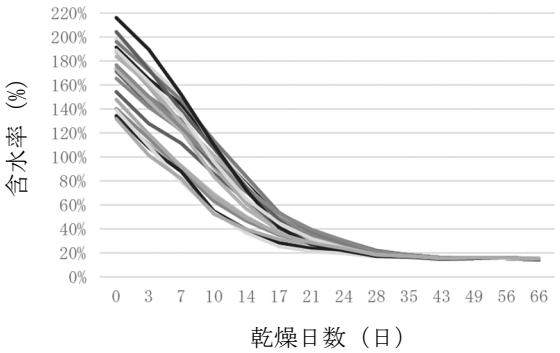


図-11 天然乾燥中の含水率の推移

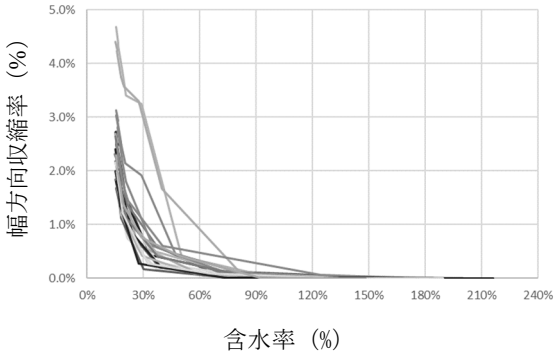


図-12 含水率と幅方向の収縮率の関係

表-7　天然乾燥試験における乾燥特性

木目	供試体数	乾燥後 平均含水率	平均収縮率(%)			平均 ねじれ	平均 幅そり	表面割れ	平均 表面割れ	内部割れ
	(枚)	(%)	長さ方向	厚さ方向	幅方向	(mm)	(mm)	(枚)	(cm)	(枚)
追い柾	12	15.1%	0.1%	2.0%	2.3%	1.1	1.0	3	13.8	0
板目	8	15.3%	0.1%	1.5%	3.0%	2.6	0.8	0	-	0

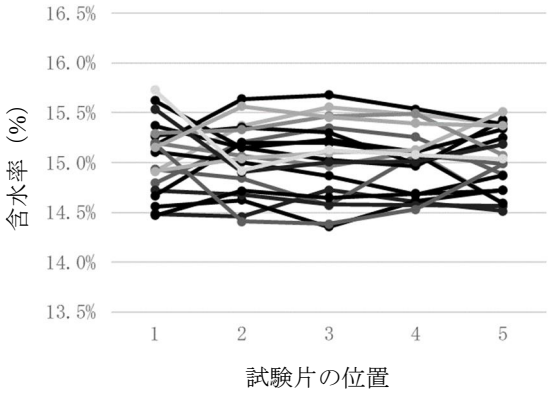


図-13 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

4. まとめ

この報告では、イイギリを対象に急速乾燥試験を経てスケジュールを変えた2回の人工乾燥試験および天然乾燥試験を行い、その際の、小板材の材の収縮やくるい、割れの発生状況等、材の乾燥特性について評価を行った。

天然乾燥は、大気中の湿度が下がってきた11月下旬から試験を開始したが、初期の平均含水率が 170%程度と高含水率であったものの、厚さ35㎜の材は一般に気乾含水率とされる15%の平衡状態に達するまでわずか40日程度と2カ月を要しなかった。

生材から人工乾燥を行った場合は、乾燥温度を 85℃まで上昇させた乾燥スケジュールでは、乾燥期間はわずか5日間となり、非常に短期間でかつ、割れや狂い等の材の損傷を抑えた上での人工乾燥が可能であることが明らかとなった。また60℃以下に設定した緩やかな条件においても、1 週間では不十分であったが後1～2日程度では目標含水率の8±2%に到達すると思われ、イイギリは従来の広葉樹材と比べて短期間かつ歩留まりの高い木材利用が可能な樹種であると判断された。

一方で、乾燥速度は材の厚さに逆比例し、乾燥に要する時間は材厚の比の 1.5～2 乗とも言われることから（信田・河崎、2020）、今回の結果はあくまで材厚 35㎜ の板材での結果であり、60㎜を超えるような厚みのある板材での適応は困難であると思われる。そのため、行政、事業者からの要望に応じて、今後はより厚みのある板材での乾燥試験も検討する必要がある。

また、全体的に天然乾燥の材が人工乾燥のものと比較して、収縮やくるいが抑えられている結果となったが、これは試験終了時の含水率が異なっていることが大きく影響していると考えられ、今後は、天然乾燥後に仕上げの人工乾燥を行い、含水率を揃えた状態で乾燥特性を把握し、より損傷が少なく歩留まりが高い乾燥方法を検討することも求められる。

さらには、これまで沖縄県内で造林され、今後利用が期待される沖縄県産樹種は他にも多数存在しているため、これらの主要樹種を対象に、条件を揃えた同様の試験を行うことで、樹種間の乾燥特性の比較検証を可能にし、木材利用に適した沖縄県産樹種の選定を進めていくことが、将来の沖縄県の林業・木材産業の発展には重要と考える。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人　森林研究・整備機構　森林総合研究所　木材研究部門　木材加工・特性研究領域　木材乾燥研究室の吉田室長および齋藤チーム長から調査手法についてご教授頂き実施しており、この場を借りて感謝申し上げる。

引用文献

井口朝道・仲摩和寛（2024）沖縄県森研セ研報 64：1-10

嘉手苅幸男（1987）沖縄県林試研報 30：111-115

嘉手苅幸男（1992）沖縄県林試研報 35：19-30

嘉手苅幸男（1995）沖縄県林試研報 38：55-58

嘉手苅幸男（2007）沖縄県林試研報 50：23-31

信田聡・河崎弥生編（2020）木材科学講座 7 木材の乾燥　Ⅰ基礎編：70、91

沖縄県農林水産部森林管理課（2017）沖縄県森林・林業アクションプラン【後期:平成29年度～平成33年度】:24
沖縄県農林水産部森林管理課（2022）沖縄の森林・林業　令和4年版:40
大川智史・林将之（2016）ネイチャーガイド琉球の樹木:225
寺澤眞（2004）木材乾燥のすべてー改訂増補版ー：230-246、394-402

センダンの乾燥に関する研究

井口　朝道・仲摩　和寛

1. はじめに

センダンはセンダン科センダン属の２回羽状複葉を持つ落葉高木で、日本では関東から先島諸島まで分布し､海岸から山地に生育し、沖縄に自生する落葉樹としては有数の大木である（大川・林、2016)。

近年、全国的に有用な早生樹として認識され､センダンに大きな関心が高まっているが、沖縄県においては古くから着目されてきた歴史を持つ。琉球王朝時代の蔡温の森林管理の思想と実践の内容をとりまとめた｢林政八書｣の１つで、1869 年に発効された「御差図扣」の中では、当時過伐から杣山が荒廃している状況を背景に､植栽後 7～8 年で利用できる成長の早さに着目し、適地にセンダンを造林し丁寧に保育するよう指導している（仲間、2017)。

このようにセンダンは古くから沖縄を代表する有用な早生樹種として認識されており、現在は35種ある造林樹種の1つとして指定されている｡沖縄県の森林･林業アクションプラン（沖縄県農林水産部森林管理課、2017）では、環境に対する影響が少ない集落周辺の未利用造成地等を活用し、早生樹種による短伐期施業を行うことで、森林資源の循環利用を図ることとしている｡記録の残る昭和 60 年から令和 4 年までの期間に 48ha（県営林除く）が新植され（沖縄県農林水産部森林管理課､2023)、7～8 齢級に達する人工林も現存し、今後の収穫および利用が期待される。

県産木材の利用については、沖縄県では、県産木材のブランド化を図り、家具や食器、さらに建築内装等、付加価値の高い用途である製材の利用拡大を目指しているが（沖縄県農林水産部森林管理課、2023）、一般に、広葉樹を製材利用する際は、針葉樹と比較した場合に、乾燥期間の長期化や、乾燥時のくるいや割れが生じやすい等、乾燥の困難性が大きな課題の１つとして挙げられる。

これまで県産広葉樹を対象にした本県における木材乾燥に関する研究としては、天然乾燥試験は、イタジイ（嘉手苅、1992）、デイゴ（嘉手苅、1995）、モクマオウ・テリハボク・アカギ・タイワンフウ（嘉手苅、2007）やホルトノキ（井口・仲摩、2024）について行われているが、センダンの知見はない。また､それぞれ材厚や測定項目が異なっており、正確な樹種間の比較ができない状況にある。人工乾燥試験は､リュウキュウマツ(嘉手苅、1987）、イタジイ（嘉手苅、1992）、ホルトノキ（井口・仲摩、2024）について実施されているのみであり、センダンを含め県産主要樹種に関するデータの蓄積は未だ不十分な状態である。

一方で、近年、センダンは日本有数の家具産地として知られる福岡県の大川家具工業会において、早期的循環型ビジネスモデルとしてブランド化されるなど、全国的な関心の高まりを受け、他県においても材質や乾燥に関する研究は一定程度進みつつある(朝野ほか、2022）。しかし、材の寸法や測定項目が異なること、また産地による性質の違いが存在することも考えられるため、諸条件を統一した上で、県産のセンダン材を用いた試験の必要性は大きいと考える。

そこで、本研究は、沖縄県産のセンダンを対象に、乾燥特性を把握するとともに、乾燥スケジュールについて検討することを目的に実施した。

2. 材料および方法

1）供試材料

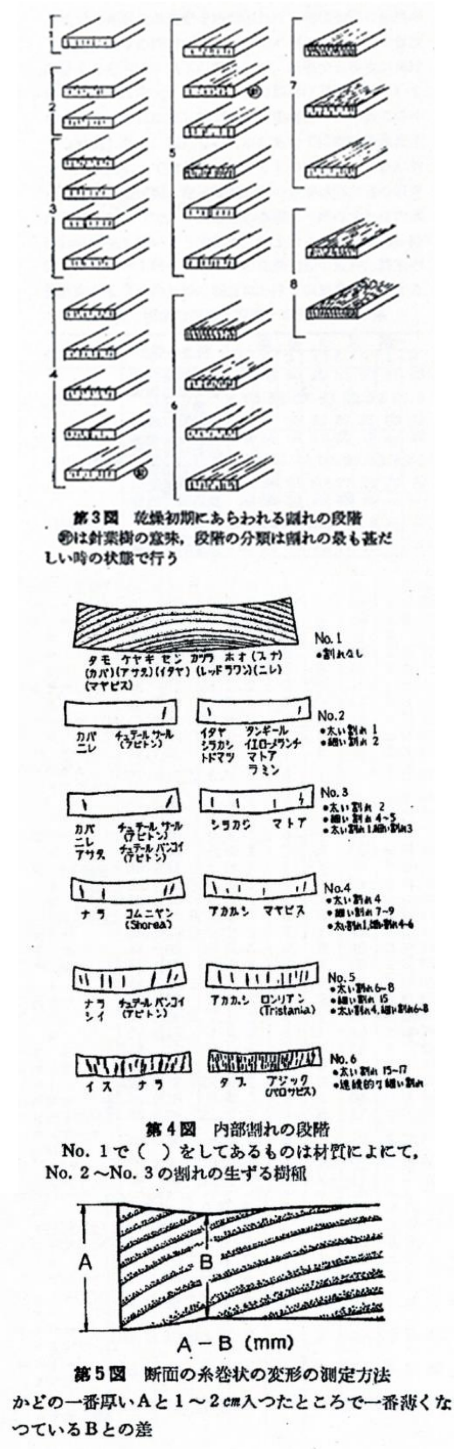
試験には 2023 年 7 月 4～6 日にかけて名護市源河県営林内で伐採した 3 個体(No1～No3)を供試した。いずれも長さ 2m で、2 玉（以下 No1 であれば先玉を 11、元玉を 12 と記す）の計 6 玉に造材を行い、1 週間以内に、企業組合キンモク（金武町）において材厚 40mm で製材した後に、以下の 3 種類の乾燥試験を行った。

2）急速乾燥試験

センダンの乾燥性の難易等を把握し、人工乾燥の適合性を評価するとともに人工乾燥の際のスケジュール条件を検討するため、無欠点小試験体を用いた急速乾燥による推定法（寺澤、2004）を行った。厚さ 40mm で製材した後、寸法を 20mm（厚さ；半径方向）×100mm（幅；接線方向）×200mm（長さ；繊維方向）とした正板目無欠点小試験体の製作を行った。105℃に調整した恒温乾燥機を用いて、生材から全乾状態まで急速乾燥を行い、その間、試験体に発生する初期割れ、全乾状態に至った時点での断面の糸巻状変形、内部割れを観察・計測し、図-1（寺澤、2004）に従い損傷の段階を評価した。なお、各原木から 1 枚ずつ計 6 枚を同時に試験し、2023 年 7 月 21～25 日の期間に 2 回繰り返し試験を行った後、評価は損傷の種類毎に最も損傷の段階が大きいものを採用した。

人工乾燥スケジュール条件(初期乾球温度、初期乾湿球温度差、終末乾球温度）は、この各損傷の段階から表-1（寺澤、2004）に準じて、損傷の種類毎に選択された各乾燥条件の中で最も緩やかな条件となる値を採用した。

さらに、国産広葉樹の既往の文献値（寺澤、2004）を参考にして、乾球温度が 45～60℃となる、より緩やかな条件についても作成した。



厚さの差	損傷の段階			
	1	2	3	4
A-B(mm)	0～0.3	0.3～0.5	0.5～0.8	0.8～0.2
	5	6	7	8
	1.2～1.8	1.8～2.5	2.5～3.5	3.5以上

図-1　初期割れ（上）、内部割れ（中央）、断面の糸巻状変形（下）の損傷の分類
（出典：寺澤(2004)による図表を一部抜粋）

表-1 損傷の種類と段階による乾燥条件
（出典：寺澤（2004）による表を一部抜粋）

損傷の種類	損傷の段階	乾燥条件		
		初期温度	初期温度差	終末温度
初期割れ	1	70	6.5	95
	2	65	5.5	90
	3	60	4.3	85
	4	55	3.6	83
	5	53	3.0	82
	6	50	2.3	81
	7	47	2.0	80
	8	45	1.8	79
断面の糸巻状変形	1	70	6.5	95
	2	66	6.0	88
	3	58	4.7	83
	4	54	4.0	80
	5	50	3.6	77
	6	49	3.3	75
	7	48	2.8	73
	8	47	2.5	70
内部割れ	1	70	6.5	95
	2	55	4.5	83
	3	50	3.8	77
	4	49	3.3	73
	5	48	3.0	71
	6	45	2.5	70

決定した乾燥条件をもとに、初期乾球温度は含水率 35%まで一定とし、そこから含水率15%時に終末温度になるように、また乾湿球温度差については、初期含水率の 2/3 まで一定とし、そこから最終の温度差が 15℃になるように調整し、乾燥経過中の含水率に応じた人工乾燥スケジュールを作成した。

3）人工乾燥試験①

センダンの急速乾燥試験の結果を基に作成した人工乾燥スケジュール①の妥当性および生材状態からの人工乾燥の適合性を検討するため、小板材を用いた人工乾燥試験を行った。

試験には、電気式木材乾燥機 HD74（ヒルデブランド株式会社）を使用し、試験体は、寸法を 35㎜（厚さ）×150㎜（幅）×600㎜（長さ）とした板目材（10 枚）、追い柾目材（9 枚）および柾目材（3 枚）の計 22 枚を用いた。両木口面には、木口からの乾燥を防ぐためシリコンコーティングを施した。供試体は試験体製作後、ラップに包み冷蔵庫内で保管した後、2023 年 8 月 31 日から試験を開始し、調湿処理を経て 9 月 6 日に終了した。

本試験での乾燥スケジュール①は、急速乾燥試験の結果を基に作成した乾燥条件を使用し、乾燥温度は 58～83℃とした。

目標含水率は家具や内装材での利活用を念頭に 8%とした。

試験中は、供試体の平均含水率に標準偏差を加えた含水率に該当する試験体 2 枚を含水率コントロール材としてスケジュール管理を行った。また、平均含水率相当の 2 枚を加えた計 4 枚について、およそ 24 時間毎に重量と寸法、割れを計測した。

終了時には、全ての試験体を対象に寸法、木材のくるいである、ねじれと幅そり（図-2）、木表、木裏両面の割れを測定した。さらに、試験体中央部から採取した 2cm 幅の小試験片を用いて、乾燥終了時点の含水率および厚さ方向の含水率分布を求めた（図-3）。また、試験体中央部を切断した際に、内部割れの有無についても確認を行った。

以上の測定した項目から、方向別の収縮率、木目毎のくるいや割れ、経過日数と含水率の推移について解析し、人工乾燥スケジュール①における人工乾燥の適合性を検討した。

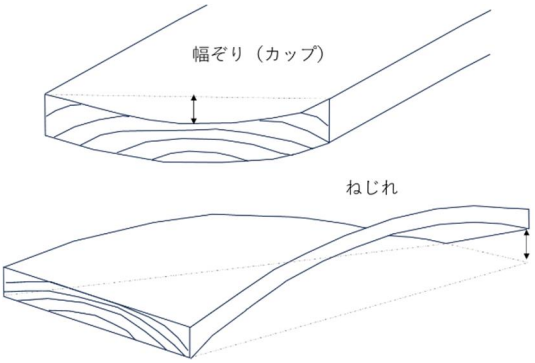


図-2　木材のくるい（幅そり、ねじれ）

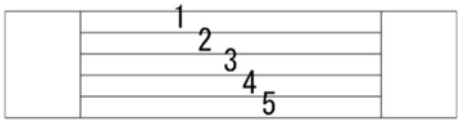


図-3　厚さ方向の含水率分布の試験片の位置の模式図

4）人工乾燥試験②

急速乾燥試験の結果と国産広葉樹の既往の文献値（寺澤、2004）を参考にして決定したより緩やかな乾燥条件（乾燥温度：45～60℃）から作成した人工乾燥スケジュール②を用いて人工乾燥試験を行い、人工乾燥の適合性を検討するとともに、乾燥スケジュール①との比較を行った。

試験には、板目材（8 枚）、追い柾目材（13 枚）および柾目材（1 枚）の計 22 枚を用いて、2023 年 8 月 17 日から試験を開始し調湿処理を経て 8 月 23 日に終了した。

試験体の寸法や目標含水率、測定項目等については、人工乾燥試験①と同様である。

5）天然乾燥試験

センダンの天然乾燥の適合性を評価するとともに、人工乾燥との効率的な組み合わせ方法について検討するため、小板材を用いた天然乾燥試験を行った。

試験には、板目材（10 枚）、追い柾目材（12 枚）の計 22 枚を用いて、森林資源研究センター木材実験棟の屋根のある半屋内空間に桟積みして行った（図-4）。なお、供試体の寸法や事前の処理は人工乾燥試験と同様である。

2023 年 7 月 24 日から試験を開始し、乾燥期間中は、開始約 1 ヵ月間は週に 2 回、その後は 1～2 週間に 1 回の頻度で重量、寸法および割れを計測し、全ての試験体の重量が平衡状態となった 2023 年 10 月 2 日に終了した。

終了時には、人工乾燥試験と同様に幅そり、ねじれを測定し、試験体中央部から採取した 2cm 幅の小試験片を用いて、乾燥後の含水率および厚さ方向の含水率分布を求めた。

以上の測定した項目から、乾燥後の方向別の収縮率、乾燥期間中の経過日数と含水率の推移、含水率と収縮率の関係について解析し、天然乾燥時の乾燥特性について検討を行った。

図-4 天然乾燥試験の桟積み状況

3. 結果および考察

1）急速乾燥試験

急速乾燥試験によって確認された各損傷の程度は、初期割れ 3、断面変形 3、内部割れ 1 となり（図-5）、いずれも小さかった。

図-5　各損傷の程度
（上：表面割れ、下：内部割れ・断面変形）

これらを評価することで得られた乾燥条件を表-2 に示す。また、乾燥初期から終期までの人工乾燥スケジュール①は表-3 のとおりとなった。

表-2 急速乾燥試験から求めた乾燥条件

損傷の種類	評価値	乾燥条件（単位：℃）		
		初期温度	初期温度差	終末温度
初期割れ	3	60	4.3	85
断面変形	3	58	4.7	83
内部割れ	1	70	6.5	95
総合評価		58	4.3	83

表-3　人工乾燥スケジュール①

含水率	乾球温度（℃）	温度差（℃）	湿球温度（℃）
生材 to 70	58.0	4.3	53.7
70 to-60	58.0	5.2	52.8
60 to 50	58.0	6.3	51.7
50 to 45	58.0	7.7	50.3
45 to 40	58.0	8.4	49.6
40 to 35	58.0	9.3	48.7
35 to 30	58.0	10.2	47.8
30 to 25	63.0	11.2	51.8
25 to 20	69.0	12.4	56.6
20 to 15	76.0	13.6	62.4
15 to final	83.0	15.0	68.0
Conditioning	83.0	9.0	74.0

さらに、国産広葉樹の既往の文献値（寺澤、2004）を参考にしてより緩やかになるよう設定した人工乾燥スケジュール②は表-4 のとおりとなった。

表-4　人工乾燥スケジュール②

含水率	乾球温度（℃）	温度差（℃）	湿球温度（℃）
生材 to 70	45.0	4.3	40.7
70 to-60	45.0	5.2	39.8
60 to 50	45.0	6.3	38.7
50 to 45	45.0	7.7	37.3
45 to 40	45.0	8.4	36.6
40 to 35	45.0	9.3	35.7
35 to 30	45.0	10.2	34.8
30 to 25	48.0	11.2	36.8
25 to 20	52.0	12.4	39.6
20 to 15	56.0	13.6	42.4
15 to final	60.0	15.0	45.0
Conditioning	60.0	10.0	50.0

2）人工乾燥試験①

人工乾燥試験①（乾燥温度：58～83℃）における試験中の管理材の含水率の推移を図-6 に示す。生材状態から 6 日目に調湿処理を終えたところ、平均含水率は板目材（6.8%）、追い柾目材（7.1%）では目標含水率に到達していたのに対して、柾目材（10.3%）はわずかに高くなった（表-5）。これは、柾目材が 3 枚と供試数が少ない中で、そのうち 1 枚が初期含水率 144%と供試体平均の 47%に対して突出して高かったことから最終含水率が 17%に留まったことが要因である。

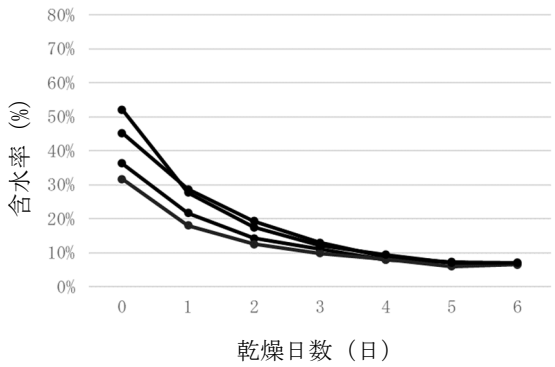


図-6 人工乾燥中の含水率の推移

次に木目毎の乾燥特性を表-5 に示す。収縮率について木目毎に見ると、板目材、追い柾目材では木材の接線方向となる幅方向で 5.0%（平均値、以下同じ）、4.4%となり、柾目材では厚さ方向で 3.8%とより大きくなる傾向がみられたが（表-5）、国産の主要な広葉樹材（3.9～8.9%）（信田・河崎、2020）と比較して特に大きな値ではなかった。

表面割れは計 5 枚で発生したものの、うち 3 枚は柾目で発生した樹芯由来の割れであり、追い柾目で発生した割れは平均 5.9cm と小さいものであった（表-5）。

くるいについては、板目材ではねじれ 3.4mm、幅そり 1.0mm、追い柾目材では、2.3mm、1.5mm、柾目材では 1.6mm、1.7mm と小さな値であり。また、内部割れは追い柾目で 1 枚が確認された（表-5）。

表-5　人工乾燥試験①における乾燥特性

乾燥温度 (℃)	木目	供試体数 (枚)	乾燥後平均含水率 (%)	平均収縮率(%) 長さ方向	厚さ方向	幅方向	平均ねじれ (mm)	平均幅そり (mm)	表面割れ (枚)	平均表面割れ (cm)	内部割れ (枚)
58～83	板目	10	6.8%	0.1%	3.4%	5.0%	3.4	1.0	0	-	0
	追い柾	9	7.1%	0.0%	3.8%	4.4%	2.3	1.5	2	5.9	1
	柾目	3	10.3%	0.2%	3.8%	3.1%	1.6	1.7	3	62.5	0

次に、試験終了時の試験片の位置毎の含水率分布を図-7 に示す。柾目材である材番号 32-7-1（原木番号-製材位置-鉛直方向位置）、追い柾目材である 32-8-1 の 2 枚は、全体的に含水率が 10%を超え、また材中央部（試験片の位置:2～4）と材表面（試験片の位置:1、5）との差も非常に大きく乾燥が不十分であった。これらの材の初期含水率は 116～144%であり、全体の平均（47%）と比較して突出して高かったことから乾燥が十分に進まなかったと考えられる。これらを除いた残りの 20 枚は、材中央部と材表面との差が 1%未満に抑えられ、目標含水率の 8±2%の範囲内に収まっており、乾燥が十分に進んでいることが確認された。

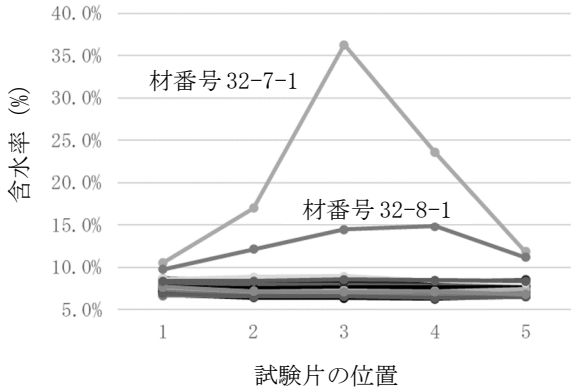


図-7 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

3）人工乾燥試験②

人工乾燥試験②（乾燥温度：45～60℃）における試験中の含水率の推移を図-8 に示す。コントロール材では初期含水率が 70%程度のものを含んでいたが、生材状態から 6 日目に調湿処理を終えたところ、平均含水率は板目材（7.7%）、追い柾目材（7.0%）、柾目材（9.5%）といずれも目標含水率 8±2%の範囲内であった（表-6）。

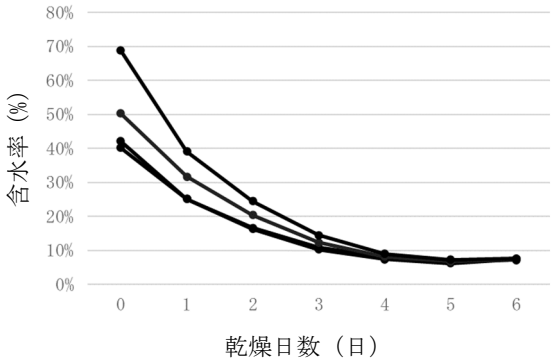


図-8 人工乾燥中の含水率の経過

次に木目毎の乾燥特性を表-6 に示す。収縮率について木目毎に見ると、板目材、追い柾目材では木材の接線方向となる幅方向で 4.3%、4.0%となり、柾目材では厚さ方向で 5.1%とより大きくなる傾向がみられたが（表-6）、国産の主要な広葉樹材（3.9～8.9%）（信田・河崎、2020）と比較して大きな値ではなかった。

表面割れは、4 枚で発生し、平均の表面割れ長も大きいものもあったが（表-6）、いずれも乾燥開始前から確認されていたものであり、うち 2 枚は樹芯由来の割れであった。

くるいについては、板目材ではねじれ 1.7mm、幅そり 1.1mm、追い柾目材では、2.0mm、1.4mm、柾目材では 3.2mm、1.3mm と大きく目立つものは無く、また内部割れは確認されなかった（表-6）。

次に、試験終了時の試験片の位置毎の含水率分布を図-9 に示す。板目材である材番号 32-9-1、柾目材である 32-7-2 については、全

表-6　人工乾燥試験②における乾燥特性

乾燥温度	木目	供試体数	乾燥後 平均含水率	平均収縮率(%)			平均 ねじれ	平均 幅そり	表面割れ	平均 表面割れ	内部割れ
(℃)		(枚)	(%)	長さ方向	厚さ方向	幅方向	(mm)	(mm)	(枚)	(cm)	(枚)
	板目	8	7.7%	0.1%	3.3%	4.3%	1.7	1.1	0	-	0
45～60	追い柾	13	7.0%	0.2%	3.3%	4.0%	2.0	1.4	3	32.4	0
	柾目	1	9.5%	0.2%	5.1%	3.4%	3.2	1.3	1	68.0	0

体的に含水率が 9～12%と高い上に、材中央部と材表面との差も 1.5%以上と大きく乾燥が不十分と判断された。その要因として、これらの材の人工乾燥開始時点の含水率は 54%（32-7-2）と 83%（32-9-1）であり、全体の試験体の平均初期含水率（40%）に比較して高い点、また広葉樹材において柾目材は板目材と比較し乾燥速度が小さいことが多いとされ（信田・河崎、2020）、これらの要因が複合的に影響したと考えられる。この 2 枚以外は、含水率が高止まりする材中央部付近の含水率が目標含水率の 8+2%である 10%以下で、材表面との差が 1%程度に抑えられており、乾燥が十分に進んでいることが確認された。

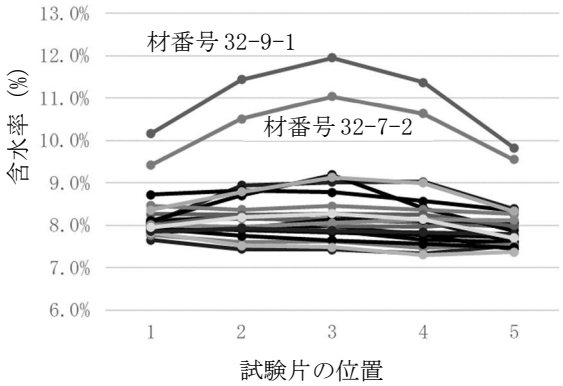


図-9 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

4）人工乾燥試験①、②の評価

今回、スケジュールを変えて 2 回の人乾燥試験を行った。終末温度が高いスケジュール①とより緩やかなスケジュール②のいずれも乾燥終了までの日数は 6 日となり（図-6、8）、スケジュールの短縮効果は確認されなかった。また、いずれの試験でも初期含水率が他より大幅に高い供試体および柾目材を除いては、材の内部まで目標含水率の 8±2%に到達しており、今回の初期含水率の場合、1 週間以内での人工乾燥が十分可能と考えられた。なお、福岡県では、材厚 38㎜ の板材を目標含水率 12%まで乾燥させる場合に、乾燥温度を 65～80℃とした際の必要な時間は 75 時間（標準）～123 時間（最大）としている（朝野ほか、2022）。本試験では目標含水率を 4%低く設定していることを踏まえると、今回の 6 日間（144 時間）という時間は大きく異なるものではないと考えられた。

次に 2 つのスケジュールの違いによる木材のくるいについて比較したところ図-10 のとおりとなった。なお、木目および含水率はくるいの発生に影響を与えると考えられるため、解析対象は、供試体数の少ない柾目材を除いた板目および追い柾目材のうち、含水率が目標含水率の 8±2%のものとした。

ねじれについては終末の乾燥温度が高いスケジュール①が、より緩やかな条件である②に対して有意に大きくなったが（ウェルチの t 検定、$p<0.05$）、①においても、中央値は 3 程度となり大きく歩留まりが低下するものでは無いと判断された。幅そりについては、スケジュール間で有意な差は確認されなかった。

表面割れは、スケジュール①では 5 枚（表-5）、スケジュール②では 4 枚確認されたが（表-6）、これは前述のとおり、樹芯由来の割れや乾燥前の時点ですでに発生していた割れを多く含んでいることから、乾燥条件による大きな差はないと考えられた。

また、内部割れについては木材の利用価値を大きく損なう上、材表面からは確認できず、

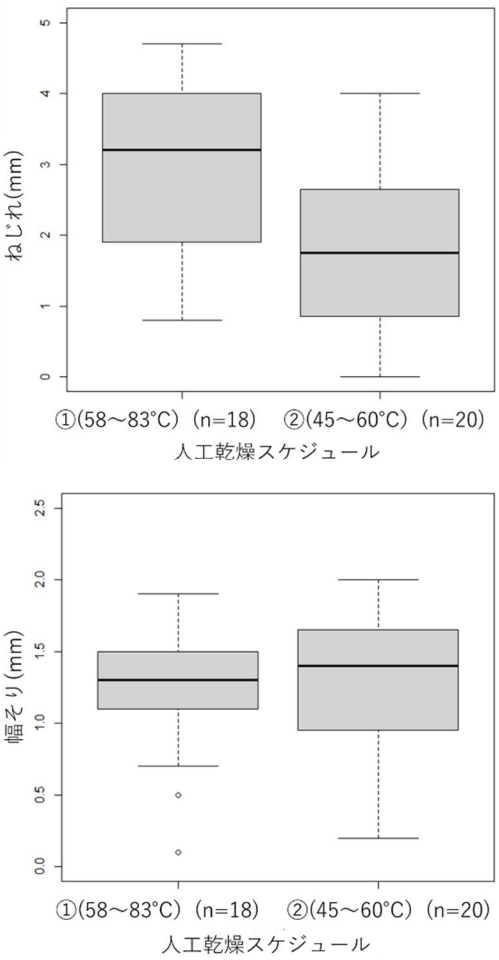


図-10 スケジュール毎のくるい
（上：ねじれ、下：幅そり）

木工事業者が乾燥板材を購入後、自身で製品製作のために加工する際に初めて明らかになるため、県産木材のイメージを大きく低下させる欠点である。今回、スケジュール①において1枚で確認されたが（表-5）、その割合は非常に少なく、また 100℃という高温での急速乾燥試験においても、計12枚の供試体で全く確認されなかった（表-2）ことからも偶発的に発生したものであり、これをもって高温帯での人工乾燥を避けるべきと判断するものでは無いと考えられた。

5）天然乾燥試験

供試した22枚を木目毎に分けて、天然乾燥試験における乾燥特性を示す（表-7）。乾燥後の平均含水率はいずれも 16%をやや上回り、一般的な気乾含水率とされる 15%にわずかに到達していなかった。

平均収縮率は、木材の接線方向となる幅方向で板目 （2.7%）、追い柾目（2.5%）となり（表-7）、人工乾燥時の平均収縮率より小さくなった。

くるいについては、追い柾目材では、ねじれ 1.4㎜、幅そり 0.3㎜、板目材ではねじれ 1.8㎜、幅そり 0.7㎜ と木目を問わず目立ったくるいは発生せず（表-7）、人工乾燥時よりそれぞれ小さくなった。

表面割れは、板目材で2枚、追い柾目材で1 枚確認されたが、平均割れ長も小さく大きな問題になるものはなく、また、内部割れは確認されなかった（表-7）。

図-11 に天然乾燥中の含水率の推移を示す。初期含水率は一部に 70%を超える試験体も含まれていたが多くは 50%以下と低かった。途中、台風の影響で1週間ほど湿度が高く乾燥が停滞した時期があったが、開始後 49 日目で最も含水率が下がり、平衡状態に達した。

含水率と収縮率の関係については図-12 に示すとおりである。ほとんどの試験体で含水率が 30%以下になった時点で収縮率が上昇している傾向が見られた一方で、最も収縮率の高かった試験体（32-4-2）は含水率 40%以上の時点で既に収縮が進んでおり、他の試験体と大きく挙動が異なっていたが、その要因は不明であった。

試験終了時の試験片の位置毎の含水率分布については、材中央部が材表面と比較してわずかに高い傾向は確認されたものの、最大の含水率差は22枚中20枚で1%未満に抑えられており、残りの2枚も 1.1%と小さいことから（図-13）、標準的な気乾含水率の 15%には到達していないものの、乾燥した気候である冬季を経ていない状況においては材内部まで乾燥が進んでいると判断された。

表-7　天然乾燥試験における乾燥特性

木目	供試体数	乾燥後平均含水率	平均収縮率(%)			平均ねじれ	平均幅そり	表面割れ	平均表面割れ	内部割れ
	(枚)	(%)	長さ方向	厚さ方向	幅方向	(mm)	(mm)	(枚)	(cm)	(枚)
板目	10	16.7%	0.1%	2.2%	2.7%	1.4	0.3	2	11.5	0
追い柾	12	16.6%	0.1%	2.2%	2.5%	1.8	0.7	1	2.9	0

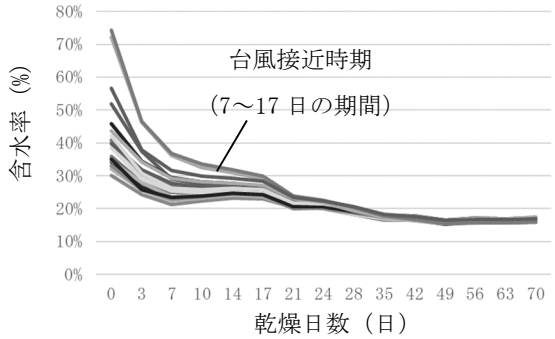


図-11 天然乾燥中の含水率の推移

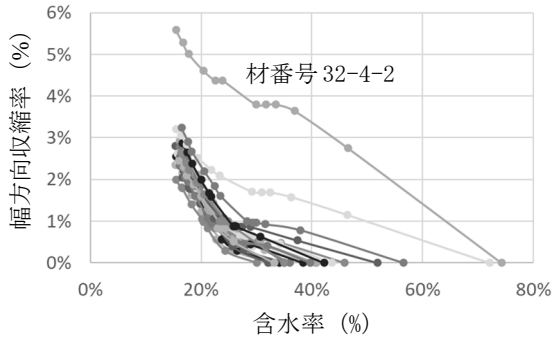


図-12 含水率と幅方向の収縮率の関係

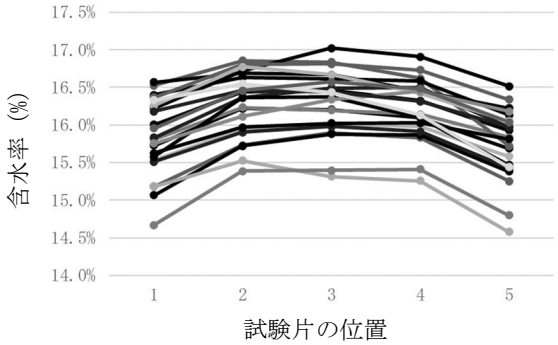


図-13 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

4. まとめ

本報ではセンダンを対象に急速乾燥試験を経てスケジュールを変えた 2 回の人工乾燥試験および天然乾燥試験を行い、その際の、小板材の材の収縮やくるい、割れの発生状況等、材の乾燥特性について評価を行った。

天然乾燥は、2023 年 7 月 24 日～10 月 2 日と夏季に行ったところ、初期の平均含水率が 70%程度までの厚さ 35㎜ の材は、途中台風の影響を受けたものの平衡状態に達するまでわずか50 日程度と 2 カ月を要しなかった。また、乾燥終期に大気中の湿度が下がる秋～冬を経ていないため、最終の含水率は 15%には到達しなかった。

生材から人工乾燥を行った場合は、乾燥温度の高い条件（58～83℃）のみならず、乾燥温度を 60℃以下に設定した緩やかな条件においても、初期含水率が他より大幅に高い供試体および柾目材を除いては 1 週間以内では目標含水率の 8±2%に到達するなど乾燥が速やかに進み、また目立った割れや狂いも発生しにくいことから、従来の広葉樹材と比べて短期間かつ歩留まりの高い木材利用が可能な樹種であると判断された。

一方で、乾燥速度は材の厚さに逆比例し、乾燥に要する時間は材厚の比の 1.5～2 乗とも言われることから（信田・河崎、2020）、今回の結果はあくまで材厚 35㎜ の板材での結果であり、60 ㎜を超えるような厚みのある板材での適応は困難であると思われる。そのため、行政、事業者からの要望に応じて、今後はより厚みのある板材での乾燥試験も検討する必要がある。

また、全体的に天然乾燥の材が人工乾燥のものと比較して、収縮やくるいが抑えられている結果となったが、これは試験終了時の含水率が異なっていることが大きく影響してい

ると考えられ、今後は、天然乾燥後に仕上げの人工乾燥を行い、含水率を揃えた状態で乾燥特性を把握し、より損傷が少なく歩留まりが高い乾燥方法を検討することも求められる。

さらには、これまで沖縄県内で造林され、今後利用が期待される沖縄県産樹種は他にも多数存在しているため、これらの主要樹種を対象に、条件を揃えた同様の試験を行うことで、樹種間の乾燥特性の比較検証を可能にし、木材利用に適した沖縄県産樹種の選定を進めていくことが、将来の沖縄県の林業・木材産業の発展には重要と考える。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人　森林研究・整備機構　森林総合研究所　木材研究部門　木材加工・特性研究領域　木材乾燥研究室の吉田室長および齋藤チーム長から調査手法についてご教授頂き実施しており、この場を借りて感謝申し上げる。

引用文献

朝野　景ほか（2022）福岡県農林総試　令和4年度成果情報

井口朝道・仲摩和寛（2024）沖縄県森研セ研報 64：1-10

嘉手苅幸男（1987）沖縄県林試研報 30：111-115

嘉手苅幸男（1992）沖縄県林試研報 35：19-30

嘉手苅幸男（1995）沖縄県林試研報 38：55-58

嘉手苅幸男（2007）沖縄県林試研報 50：23-31

仲間勇栄　（2017）蔡温と林政八書の世界：237-238

信田聡・河崎弥生編（2020）木材科学講座 7 木材の乾燥　I 基礎編：69-70、91

沖縄県農林水産部森林管理課（2023）沖縄の森林・林業　令和5年版:17、40

沖縄県農林水産部森林管理課（2017）沖縄県森林・林業アクションプラン【後期:平成29年度～平成33年度】:24

大川智史・林将之（2016）ネイチャーガイド琉球の樹木:265

寺澤眞（2004）木材乾燥のすべてー改訂増補版ー：230-246、394-402

沖縄県産早生樹 4 種の強度性能に関する研究

井口　朝道

1. はじめに

近年、全国的に成長が早く短期間での伐採を可能とし、林業採算性の向上に寄与する早生樹に関心が高まっている。沖縄県の森林･林業アクションプランにおいても、未利用造成地等を活用し早生樹種による短伐期施業を行うことで、森林資源の循環利用を図ることとしている。

そのような中､沖縄県の造林樹種としては、以前から指定されていたセンダンに加えて、ウラジロエノキ、ハマセンダン、イイギリの早生樹 3 種を含む 8 種が 2017 年に新たに追加指定され、これら県産早生樹の造林地も拡大しており、今後の収穫および利用が期待されているところである。

県産木材の利用については、沖縄県では、県産木材のブランド化を図り、家具や食器、さらに建築内装等、付加価値の高い用途である製材の利用拡大を目指しているが（沖縄県農林水産部森林管理課､2022)､早生樹の木材利用の面では未解明な部分が多く、通常の木材とは異なる材質を持つことが想定されるため、乾燥特性に加えて基本的な強度性能の把握が必要である。

これまで県産樹種を対象にした本県における木材強度に関する知見としては、仲宗根・小田（1985）が 24 樹種について、概要、材の組織・性質・加工性および用途についてとりまとめており、そのうちセンダンを含む 21 樹種について気乾比重、曲げ強さ、圧縮強さ等を掲載している。また、伊波（2016）は県内に生育する針葉樹 6 樹種､広葉樹 40 樹種およびヤシ類のビロウの計 47 種を対象に､密度､膨潤率､曲げ強度について測定を行っており、その中には、センダン、ハマセンダン、ウラジロエノキは含まれている。しかし、いずれの試験においても個体数は限られており、また樹種毎に平均値と最大・最小値の範囲は示されているものの詳細なバラツキは不明であり、さらに試験体の採材の位置と強度との関係性については明らかになっていない。

そこで、本研究では、現在、造林樹種に指定されているウラジロエノキ､ハマセンダン、イイギリ、センダンの 4 樹種を対象に、無欠点小試験体を用いた曲げ試験および縦圧縮試験を行い、採材位置に着目した上で県産早生樹 4 種の強度性能を評価した。

さらに、センダンについては、近年、材面に孔状の白色腐朽によると考えられる病徴が頻繁に確認されるようになっており、この病徴については、材の美観を損ない材の価値を低下させるだけでなく、強度の低減を招くことが懸念されているため、強度に及ぼす影響についても併せて評価を行った。

2. 材料および方法

1）ウラジロエノキ（略記号：U）

試験には 2020 年 10 月 27 日に森林資源研究センター（名護市）内で伐採した 4 個体（以下、center）、2021 年 1 月 21 日に国頭村字辺土名に位置する既存造林地内で伐採した 4 個体（以下、hentona）および企業組合キンモクから購入した材（個体数、生育地、伐採日は共に不明、以下、kinmoku）を供試し、地域間の差についても検証した。また無欠点小試験体の試験とするため、目視により節や割れ等の欠点については除外した。

曲げ試験は、JIS Z 2101 に準拠して行うこ

ととし、試験材の寸法は、20（R）×20（T）×320（L）mm、スパン長は280mmとした。なお、centerとhentonaの供試体については、採材位置と強度との関係を把握するため、髄からの距離が40mm、80mm、120mmとなるよう採材を行った。

試験機は、オートグラフAG-X plus100kN(島津製作所、最大容量 100kN）を用い、変位計CDP-50（東京測器研究所）を試験体中央下部に設置し、荷重とスパン中央部のたわみを測定した。また、荷重方向については柾目面とした。曲げ試験から得られた、荷重-たわみ曲線から、曲げ強さ（以下、MOR）（N/mm^2）および見掛けの曲げヤング係数（以下、MOE）（kN/mm^2）を算出した。

なお、強度試験を行う前に、非破壊検査として、FFT アナライザーCF-4500（小野測器）を用いて、固有縦振動数を測定し、①式により、縦振動ヤング係数（以下、Efr）を算出した（一次波の場合、式中のρは密度)。また、試験体は、十分な天然乾燥期間を取った後に、温度20℃、湿度65%に設定された恒温恒湿機で標準状態となるよう調湿し、試験終了後には、全乾法により含水率を測定した。

Efr（kN/mm^2）=4×L（mm）^2×fr^2（Hz）×ρ（kg/m^3）×10^（-15）　①式

縦圧縮試験はJIS Z 2101に準拠して行い、試験材の寸法は、20（R）×20（T）×60（L）mmとした。なお、centerとhentonaの供試体については曲げ試験と同様、髄からの距離が40mm、80mm、120mmとなるよう採材を行った。

試験機は、オートグラフ AG-X plus100kNを用い、長さ20mmのひずみゲージPFL-20-11（東京測器研究所）を試験体両側に貼付することでひずみを測定し、その平均値を採用した。ただし、ひずみについては一部で測定を行った。

縦圧縮試験から得られた、荷重-ひずみ曲線から、縦圧縮強さ（以下、σc）（N/mm^2）および縦圧縮ヤング係数（以下、Ec）（kN/mm^2）を算出した。試験体の調湿および含水率の測定法については、曲げ試験と同様である。

また、これ以降の3樹種についての曲げ試験および縦圧縮試験の方法はウラジロエノキと同様であるため省略する。

2）ハマセンダン（略記号：H）

試験には2021年10月27日に名護市源河県営林内で伐採した7個体を供試した。

3）イイギリ（略記号：I）

試験には2022年11月16日に名護市源河県営林内で伐採した3個体を供試した。

4）センダン（略記号：S）

試験には2023年7月4～6日にかけて名護市源河県営林内で伐採した 3 個体を供試した。また、センダンについては、孔状白色腐朽が疑われる病徴の強度への影響について評価するため、目視により節や割れ等の欠点および強度の低下を招くとされるスポルテッドと呼ばれる菌による腐れや特有のシミの見られるものを除いた上で、目視により判断した孔状白色腐朽の有無毎に解析を行った。なお、今回の孔状白色腐朽の症状は、収穫伐採時点で目視にて材の断面に確認できたことから、伐倒前に既に材内部に侵入（発生）していたと判断された。

3. 結果および考察

1）ウラジロエノキ（曲げ試験）

地域別の曲げ試験の結果の概要を表-1 に、さらに地域毎のMOR、MOEを図-1に示す。多重比較（ホルム式）の結果、MOR、MOEのいずれも全ての地域間で有意な差が確認され（$p<0.01$）、地域差が大きいことが示唆された。

表-1　ウラジロエノキの曲げ試験の概要

樹種	地域	供試数	平均密度 (kg/m^3)	平均含水率 (%)	平均Efr (kN/mm2)	MOE(kN/mm2) 平均値	MOE(kN/mm2) 標準偏差	MOR(N/mm2) 平均値	MOR(N/mm2) 標準偏差
ウラジロエノキ	center	92	398.8	14.1%	6.23	5.71	1.06	52.1	7.1
	hentona	77	361.0	14.8%	5.26	4.60	0.91	38.7	6.5
	kinmoku	9	494.7	13.9%	8.99	8.02	0.56	71.2	6.5
	総計	178	387.3	14.4%	5.95	5.35	1.28	47.3	10.9

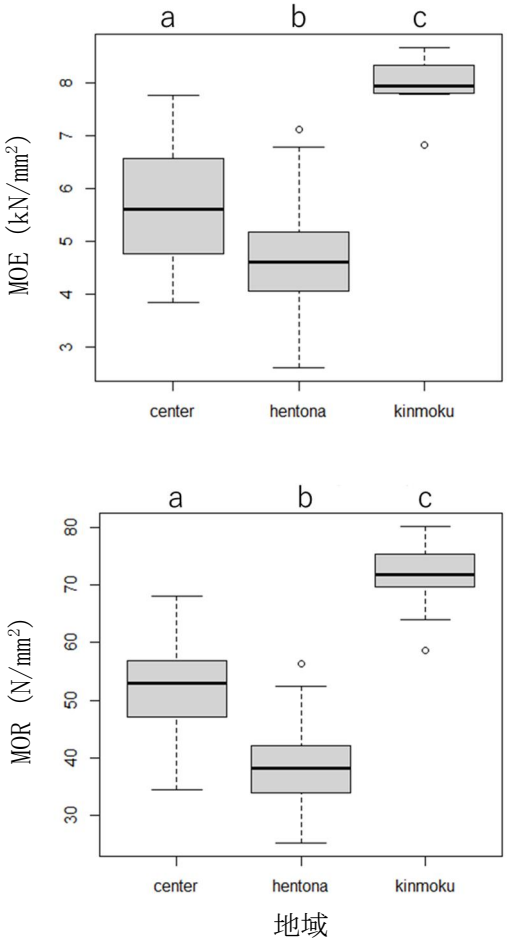


図-1　地域毎の曲げ性能（U）
（上：MOE、下：MOR）
（図中の異なるアルファベットは有意差があることを示す、以下同様）

非破壊検査から算出した Efr と MOE の関係を図-2 に示す。ピアソンの積率相関分析の結果、相関係数（以下、cor）が 0.98 と非常に強い有意な正の相関が確認された（$p<0.01$）。

MOE と MOR（cor:0.87）、および密度と MOR（cor:0.86）では、いずれも有意な強い正の相関が確認された（$p<0.01$）（図-3、図-4）。

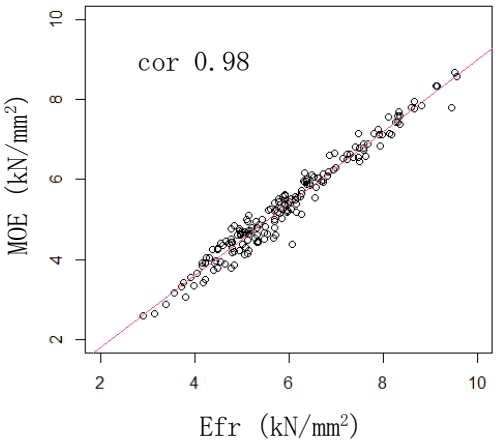


図-2　Efr と MOE の関係（U）

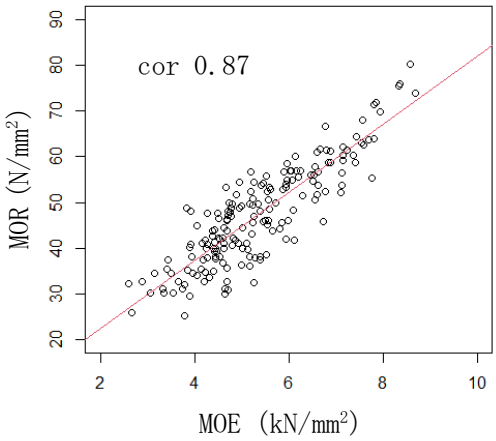


図-3　MOE と MOR の関係（U）

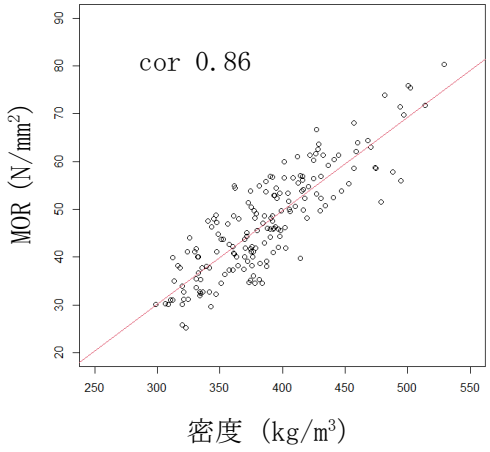


図-4　密度と MOR の関係（U）

さらに、center、hentona の供試材を用いて、採材位置を示す髄からの距離が MOR に及ぼす影響について把握するため、髄からの距離毎の MOR を図-5 に示す。ホルムによる多重比較の結果、髄からの距離が 40mm の材は、80mm、120mm の材と比較して有意に低い値を示した（p<0.01）。

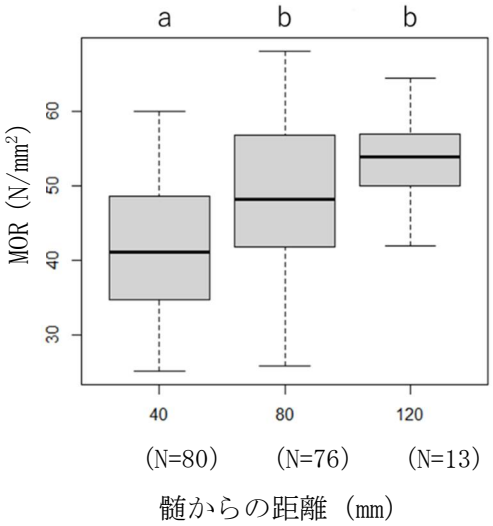


図-5　髄からの距離毎の MOR（U）
（図中の N は試験体数を示す）

2）ウラジロエノキ（縦圧縮試験）

地域別の縦圧縮試験の結果の概要を表-2 に、さらに地域毎のσc、Ec を図-6 に示す。多重比較（ホルム式）の結果、σc、Ec のいずれも全ての地域間で有意な差が確認され（p<0.01）、曲げ強度と同様に地域間差が大きいことが明らかとなった。

Ec とσc、密度とσc について、それぞれピアソンの積率相関分析を行ったところ、いずれも cor が 0.8 程度となり、有意な正の相関が確認された（p<0.01）（図-7、図-8）。

center、hentona の供試材を用いて、髄からの距離がσc に及ぼす影響について把握するため、髄からの距離毎のσc を図-9 に示す。ホルムによる多重比較の結果、σc は 40mm<80mm<120mm の順に有意に大きい値を示した（p<0.05）。

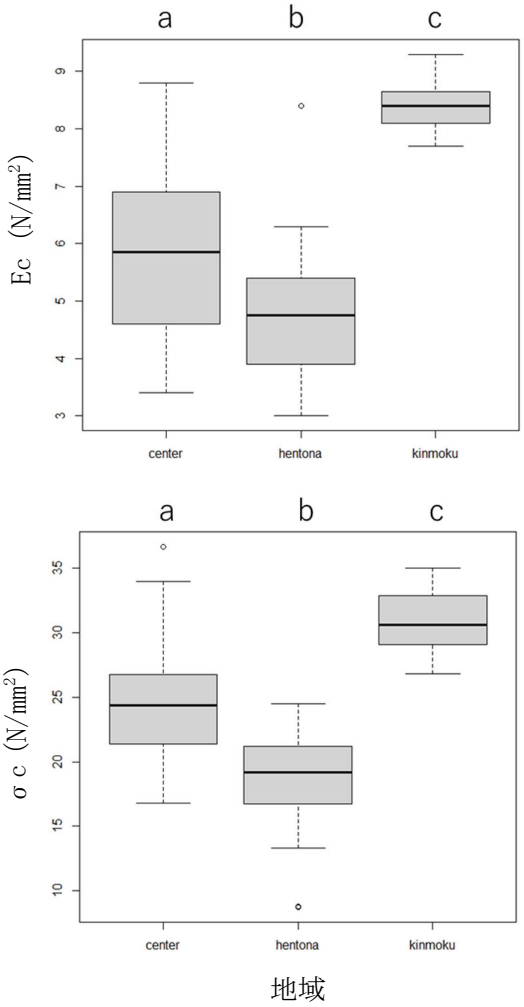


図-6　地域毎の縦圧縮性能（U）
（上：Ec、下：σc）

表-2　ウラジロエノキの縦圧縮試験の概要

樹種	地域	個数	平均密度 (kg/m3)	平均含水率 (%)	σc(N/mm2) 平均値	σc(N/mm2) 標準偏差	個数	平均密度 (kg/m3)	平均含水率 (%)	Ec(kN/mm2) 平均値	Ec(kN/mm2) 標準偏差
ウラジロエノキ	center	92	394.7	13.2%	24.3	4.2	50	395.5	12.6%	5.9	1.4
	hentona	73	356.0	14.8%	18.7	3.3	50	352.9	13.3%	4.7	1.0
	kinmoku	8	498.0	13.7%	30.9	2.8	8	498.0	13.7%	8.4	0.5
	総計	173	383.2	13.9%	22.2	5.0	108	383.4	13.0%	5.5	1.6

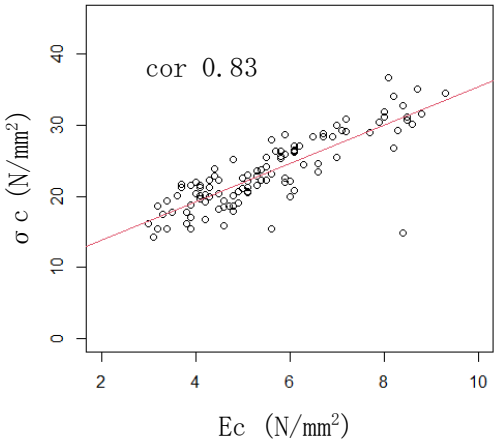


図-7　Ec と σ c の関係（U）

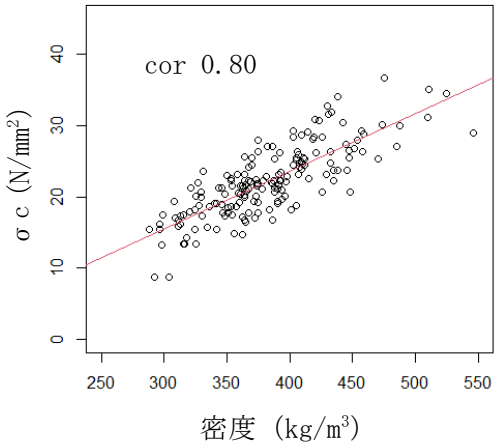


図-8　密度と σ c の関係（U）

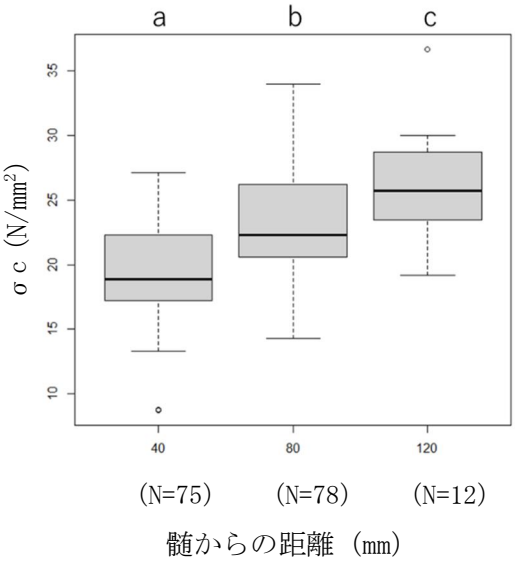


図-9　髄からの距離毎の σ c　（U）

（N は試験体数を示す）

3）ハマセンダン（曲げ試験）

曲げ試験の結果の概要を表-3 に示す。平均 MOE は 7.23kN/m²、平均 MOR は 60.9N/mm² であった。次に、非破壊検査から算出した Efr と実際の MOE の関係を図-10 に示す。ピアソンの積率相関分析の結果、cor が 0.95 と非常に強い有意な正の相関が確認された(p<0.01)。

MOE と MOR（cor:0.80）、および密度と MOR（cor:0.82）については、いずれも有意な正の相関が確認された（p<0.01）　（図-11、図-12）。

髄からの距離が MOR に及ぼす影響について把握するため、髄からの距離毎の MOR を図-13 に示す。多重比較の結果、髄からの距離が 40mm の材は、80mm、120mm の材と比較して有意に MOR が低い値を示した（p<0.01）。

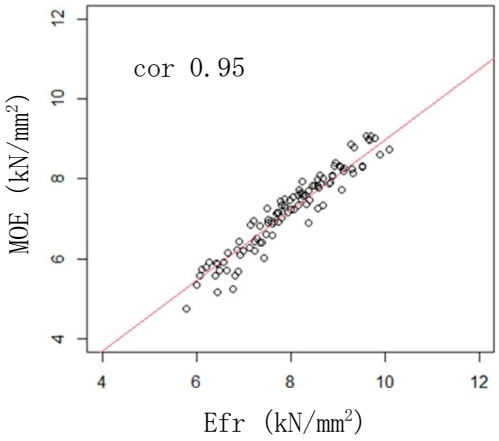


図-10　Efr と MOE の関係（H）

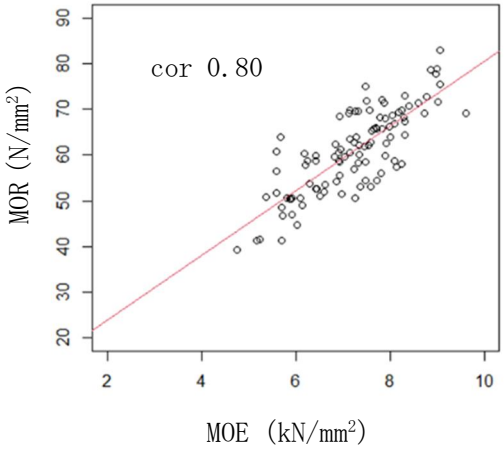


図-11　MOE と MOR の関係（H）

表-3　ハマセンダンの曲げ試験の概要

樹種	供試数	平均密度 (kg/m^3)	平均含水率 (%)	平均Efr (kN/mm2)	MOE(kN/mm2)		MOR(N/mm2)	
					平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
ハマセンダン	102	402.9	13.3%	8.01	7.23	1.03	60.9	9.1

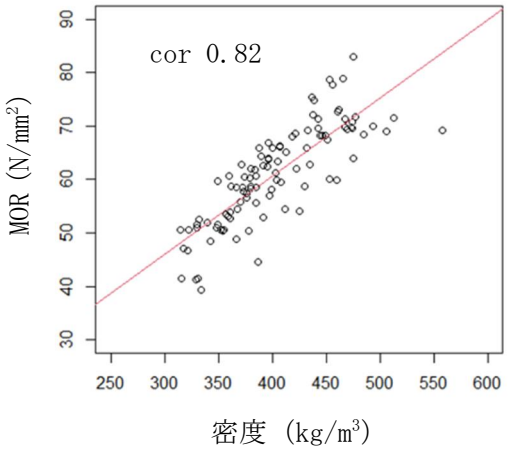


図-12　密度と MOR の関係（H）

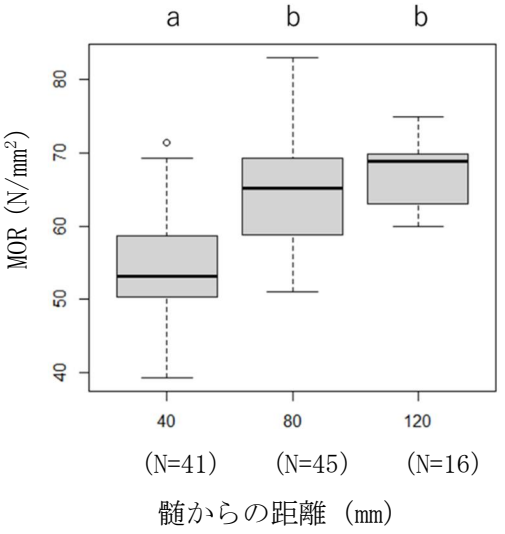


図-13　髄からの距離毎の MOR（H）

（N は試験体数を示す）

4）ハマセンダン（縦圧縮試験）

縦圧縮試験の結果の概要を表-4 に示す。平均 Ec は 7.8kN/m^2、平均 σc は 31.3N/mm^2 となった。

Ec と σc、密度と σc、Ec の関係について、それぞれピアソンの積率相関分析を行ったところ、cor は順に 0.80、0.79 となり、有意な正の相関が確認された（$p<0.01$）（図-14、図-15）。

髄からの距離が σc に及ぼす影響について把握するため、髄からの距離毎の σc を図-16 に示す。ホルムによる多重比較の結果、髄からの距離が 40mm の材は、80mm、120mm の材と比較して有意に σc が低い値を示した（$p<0.05$）。

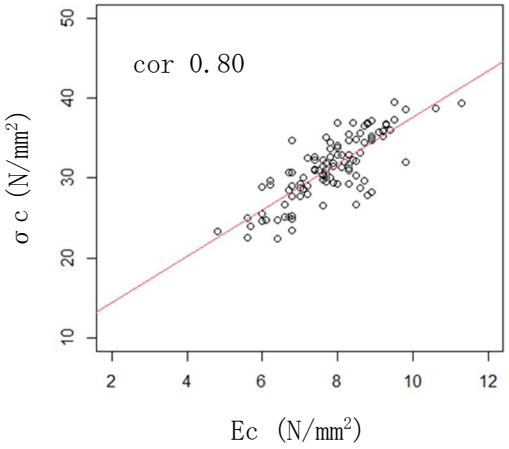


図-14　Ec と σc の関係（H）

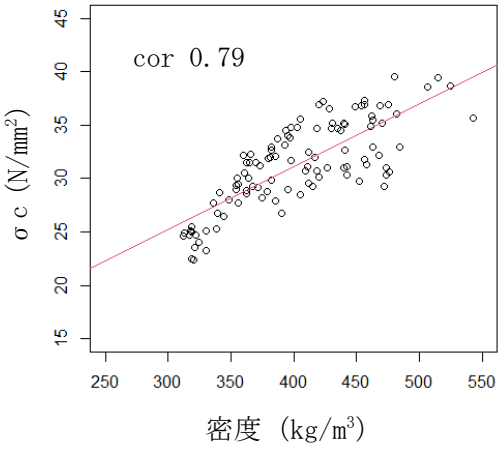


図-15　密度と σc の関係（H）

表-4　ハマセンダンの縦圧縮試験の概要

樹種	個数	平均密度 (kg/m3)	平均含水率 (%)	Ec(kN/mm2) 平均値	Ec(kN/mm2) 標準偏差	σc(N/mm2) 平均値	σc(N/mm2) 標準偏差
ハマセンダン	106	402.4	12.3%	7.8	1.1	31.3	4.0

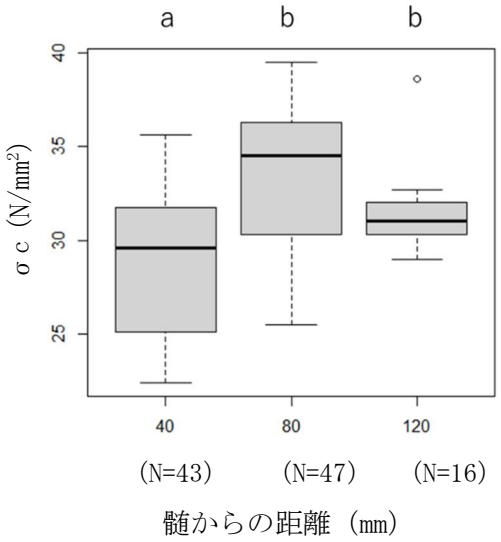


図-16　髄からの距離毎のσc　(H)

(N は試験体数を示す)

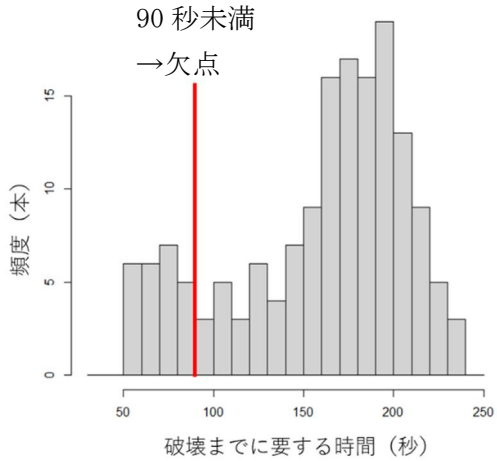


図-17 全試験体の破壊までに要する時間の頻度分布

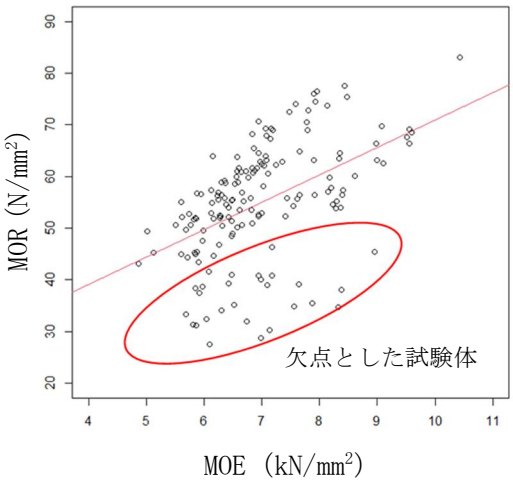


図-18　欠点を含む試験体での MOE と MOR の関係

5）イイギリ（曲げ試験）

節や割れなど目視により判別できる欠点を除いて試験を行ったが、一部の試験体では、十分に塑性変形を起こす前に破壊が発生し、試験時間が通常より短くなり(図-17)、結果、一般に相関関係が成立する MOE に対応する MOR が異常に小さい値を示す試験体が存在した（図-18)。原則として、小試験体による強度試験は無欠点とするため、破壊までに要する時間が 90 秒未満の試験体については、目視では判読が困難な欠点が存在するものとした。これらの欠点の発生状況について、髄からの距離毎に確認したところ、全てが 40 mmで発生していた（表-5)。Fisher の正確確率検定による多重比較を行ったところ、40mm と 80, 120mm 間で有意に欠点の発生状況が異なることが判明した（p<0.01)。

これらの目視により判読が困難な欠点を除いた 135 本の結果は表-6 のとおりである。

表-5　髄からの距離毎の欠点の発生状況

髄からの距離(mm)	欠点の有無 有	無	総計
40	24	33	57
80	0	61	61
120	0	41	41
総計	24	135	159

表-6　イイギリの曲げ試験の概要

樹種	供試数	平均密度 (kg/m3)	平均含水率 (%)	平均Efr (kN/mm^2)	MOE(kN/mm^2)		MOR(N/mm^2)	
					平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
イイギリ	135	399.9	14.0%	7.61	6.98	1.05	58.1	8.5

平均MOEは6.98kN/m^2、平均MORは58.1N/mm^{2}となった。非破壊検査から算出したEfrと実際のMOEの関係を図-19に示す。ピアソンの積率相関分析の結果、corが0.98と非常に強い有意な正の相関が確認された（p<0.01）。さらに、MOEとMOR（cor:0.66）、および密度とMOR（cor:0.85）については、いずれも有意な正の相関が確認された(p<0.01)（図-20、図-21）。

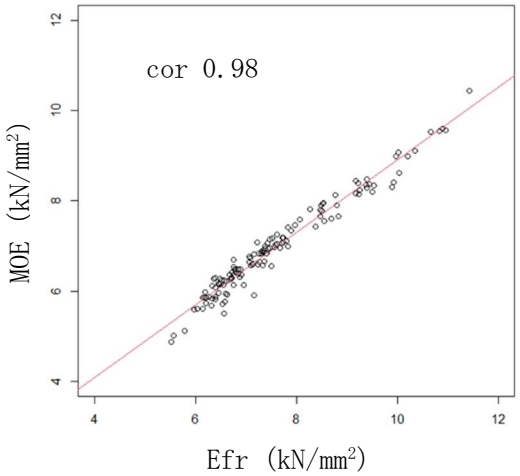


図-19　Efr と MOE の関係（I）

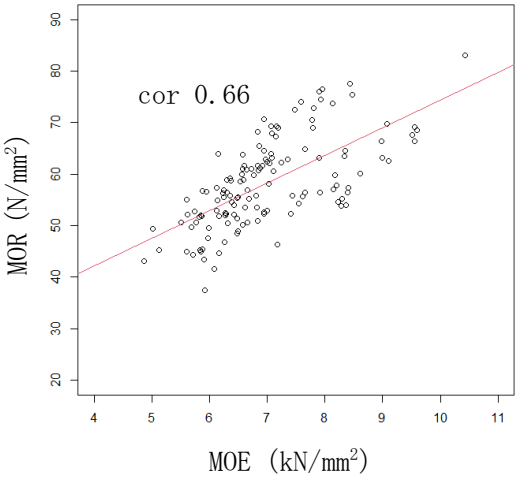


図-20　MOE と MOR の関係（I）

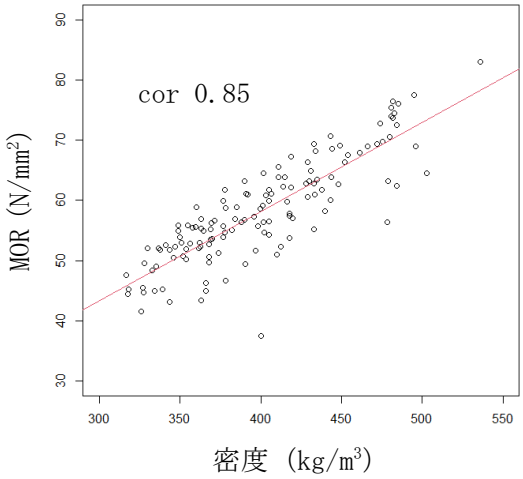


図-21　密度と MOR の関係（I）

髄からの距離が MOR に及ぼす影響について把握するため、髄からの距離毎の MOR を図-22に示す。ホルムによる多重比較の結果、全ての区間で有意な差が確認され（p<0.05）、MOR は 40mm<80mm<120mm の順となった。

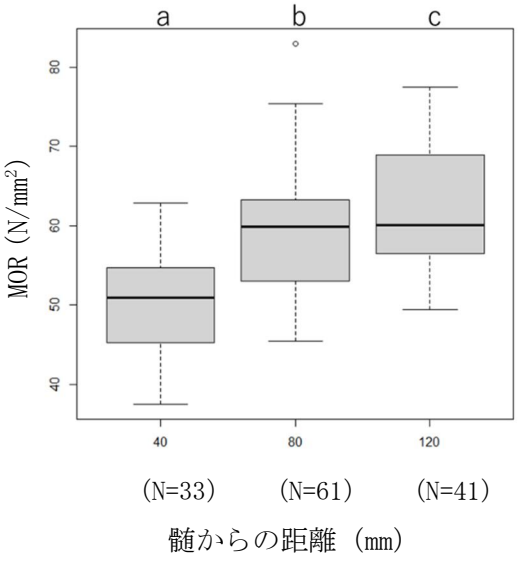


図-22　髄からの距離毎の MOR　（I）

（N は試験体数を示す）

6）イイギリ（縦圧縮試験）

縦圧縮試験の結果の概要を表-7 に示す。平均 Ec は 7.4kN/m^2、平均σc は 28.9N/mm^2 となった。Ec とσc、密度とσc の関係について、それぞれピアソンの積率相関分析を行ったところ、cor が順に 0.68、0.91 となり、有意な正の相関が確認された（p<0.01）　（図-23、図-24）。

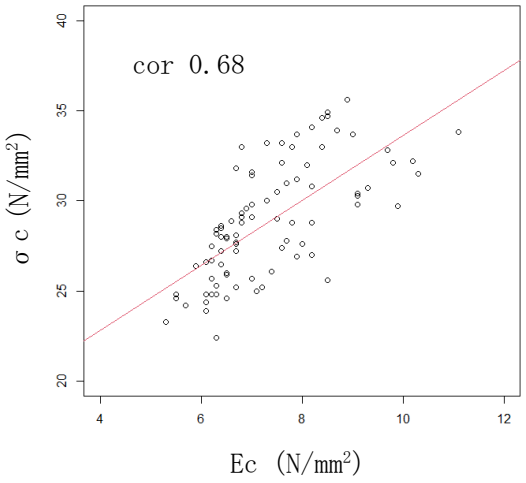


図-23　Ec とσc の関係（I）

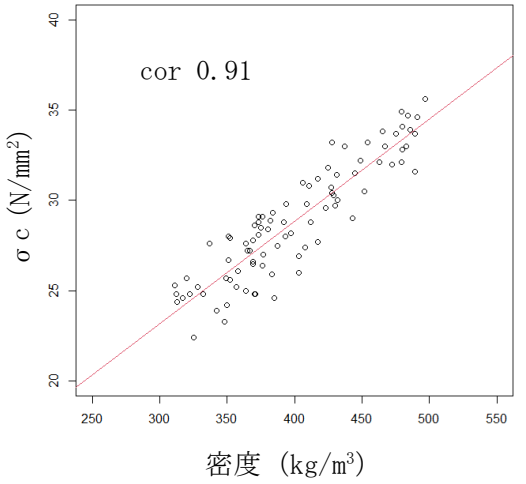


図-24　密度とσc の関係（I）

なお、縦圧縮試験では、曲げ試験と同じ個体から試験体を作成しているが、曲げ試験時に見られた Ec に対してσc が異常に弱くなるような、目視では判読できない欠点を疑われる事象は発生しなかった。

髄からの距離がσc に及ぼす影響について把握するため、髄からの距離毎のσc を図-25 に示す。多重比較（ホルム）の結果、全ての区間で有意な差が確認され（p<0.05）、σc は 40mm<80mm<120mm の順となった。

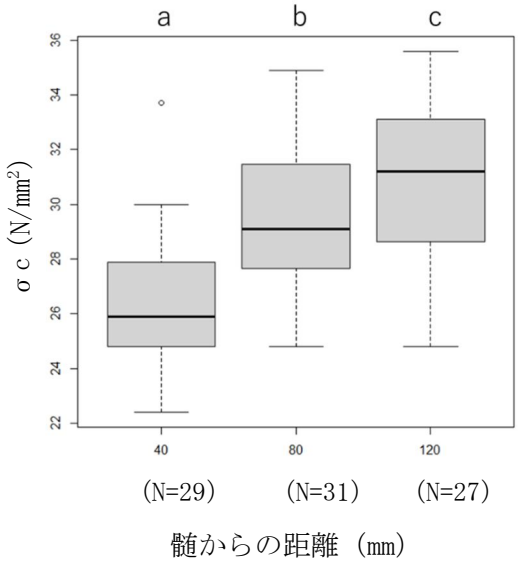


図-25　髄からの距離毎のσc　（I）

（N は試験体数を示す）

7）センダン（曲げ試験）

センダンについては孔状白色腐朽の強度への影響についても評価を行っているが、まずは無欠点試験体の曲げ試験の結果の概要を表-8 に示す。平均 MOE は 8.38kN/m^2、平均 MOR は 57.7N/mm^2 であった。

表-7　イイギリの縦圧縮試験の概要

樹種	個数	平均密度 (kg/m3)	平均含水率 (%)	Ec(kN/mm2) 平均値	Ec(kN/mm2) 標準偏差	σc(N/mm2) 平均値	σc(N/mm2) 標準偏差
イイギリ	87	400.0	13.0%	7.4	1.2	28.9	3.2

表-8　センダンの曲げ試験の概要（無欠点試験体）

樹種	供試数	平均密度 (kg/m3)	平均含水率 (%)	平均Efr (kN/mm^2)	MOE(kN/mm2)		MOR(N/mm2)	
					平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
センダン	63	474.9	14.8%	9.09	8.38	1.34	57.7	12.2

非破壊検査から算出した Efr と実際の MOE の関係を図-26 に示す。ピアソンの積率相関分析の結果、cor が 0.98 と非常に強い有意な正の相関が確認された（p<0.01）。さらに、MOE と MOR（cor:0.76）、および密度と MOR（cor:0.71）については、いずれも有意な正の相関が確認された（p<0.01）　（図-27、図-28）。

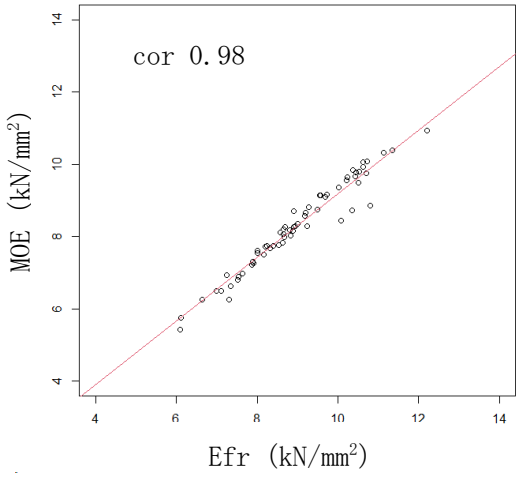


図-26　Efr と MOE の関係（S）

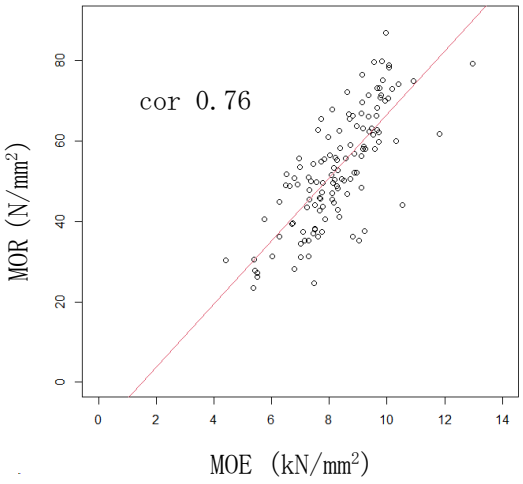


図-27　MOE と MOR の関係（S）

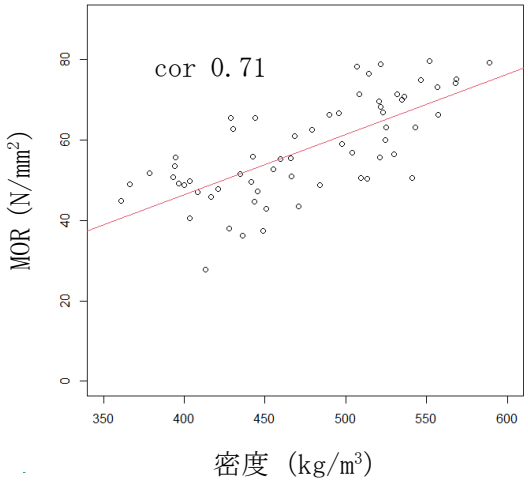


図-28　密度と MOR の関係（S）

髄からの距離が MOR に及ぼす影響について把握するため、髄からの距離毎の MOR を図-29 に示す。ホルムによる多重比較の結果、40mm、80mm と 120mm との間で有意な差が確認された（p<0.01）　。

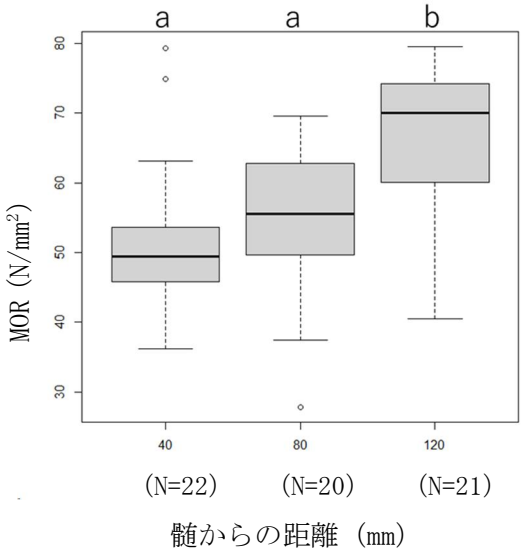


図-29　髄からの距離毎の MOR　（S）

（N は試験体数を示す）

8）センダン（縦圧縮試験）

縦圧縮試験の結果の概要を表-9 に示す。平均 Ec は 8.9kN/m^2、平均σc は 30.6N/mm^2 であった。Ec とσc、密度とσc の関係について、それぞれピアソンの積率相関分析を行ったところ、cor が順に 0.78、0.73 となり、いずれも有意な正の相関が確認された(p<0.01)（図-30、図-31）。

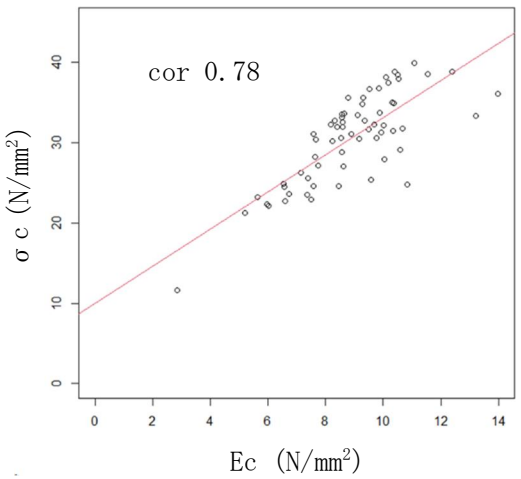


図-30　Ec とσc の関係（S）

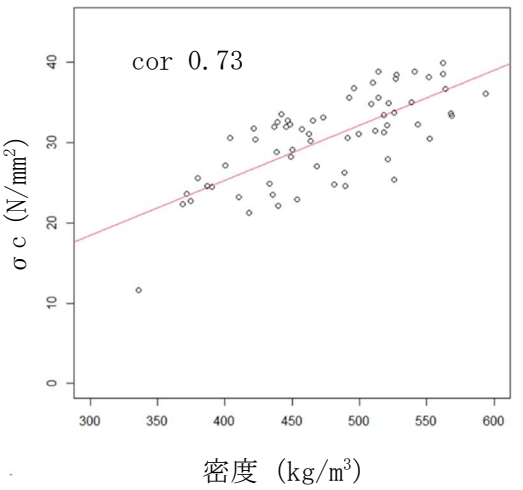


図-31　密度とσc の関係（S）

髄からの距離がσc に及ぼす影響について把握するため、髄からの距離毎のσc を図-32 に示す。多重比較（ホルム）の結果、全ての区間で有意な差が確認され（p<0.05）、σc は 40mm<80mm<120mm の順となった。

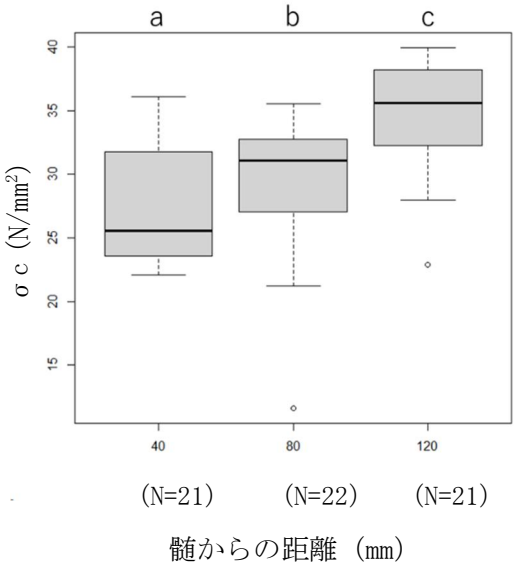


図-32　髄からの距離毎のσc　(S)

(N は試験体数を示す)

9）センダン（孔状白色腐朽）

孔状白色腐朽有無別の曲げ試験の結果の概要を表-10 に、縦圧縮試験の結果の概要を表-11 に示す。孔状白色腐朽の有無により平均密度、平均 MOE には大きな差は確認されなかった一方で、平均 MOR は腐朽有で低い値を示した。また平均 Ec、平均σc についてはいずれも大きな差は確認されなかった。

一般に木材強度は比重と正の相関をもつことから、孔状白色腐朽の有無別に MOE と密度、MOR と密度の関係を図-33 に、Ec と密度、σc と密度の関係を図-34 に示す。

表-9　センダンの縦圧縮試験の概要

樹種	個数	平均密度 (kg/m3)	平均含水率 (%)	Ec(kN/mm2)		σc(N/mm2)	
				平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
センダン	64	476.3	14.3%	8.9	1.9	30.6	5.6

表-10　センダンの孔状白色腐朽の有無別の曲げ試験の概要

孔状白色腐朽	供試数	平均密度 (kg/m3)	平均含水率 (%)	平均Efr (kN/mm^2)	MOE(kN/mm^2) 平均値	MOE(kN/mm^2) 標準偏差	MOR(N/mm^2) 平均値	MOR(N/mm^2) 標準偏差
無	63	474.9	14.8%	9.09	8.38	1.34	57.7	12.2
有	49	488.1	14.8%	9.25	8.40	1.25	49.5	14.2

表-11　センダンの孔状白色腐朽の有無別の縦圧縮試験の概要

樹種	孔状白色腐朽	個数	平均密度 (kg/m3)	平均含水率 (%)	Ec(kN/mm2) 平均値	Ec(kN/mm2) 標準偏差	σc(N/mm2) 平均値	σc(N/mm2) 標準偏差
センダン	無	64	476.3	14.3%	8.9	1.9	30.6	5.6
	有	44	494.3	14.2%	9.2	1.8	31.9	5.4

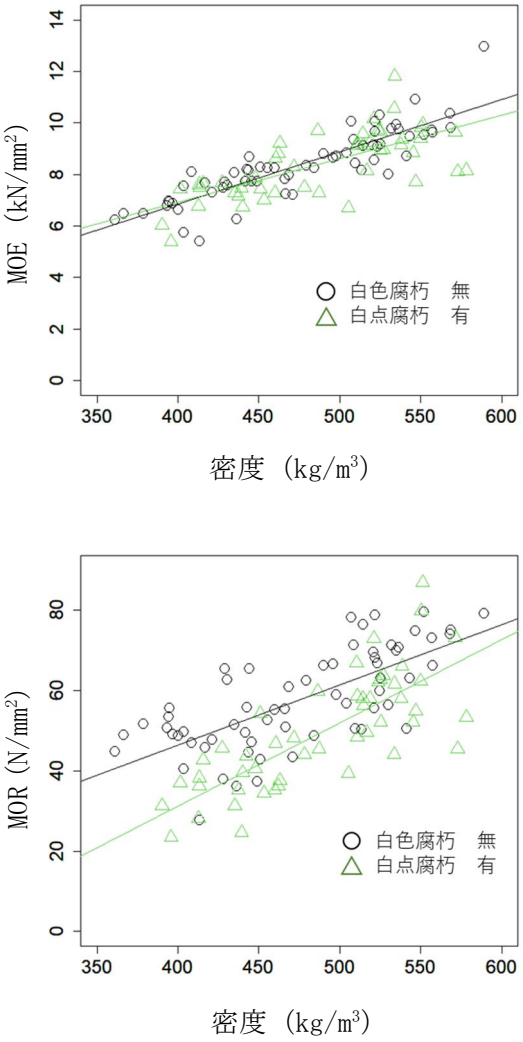


図-33 孔状白色腐朽の有無別の密度と MOE（上）、密度と MOR（下）の関係

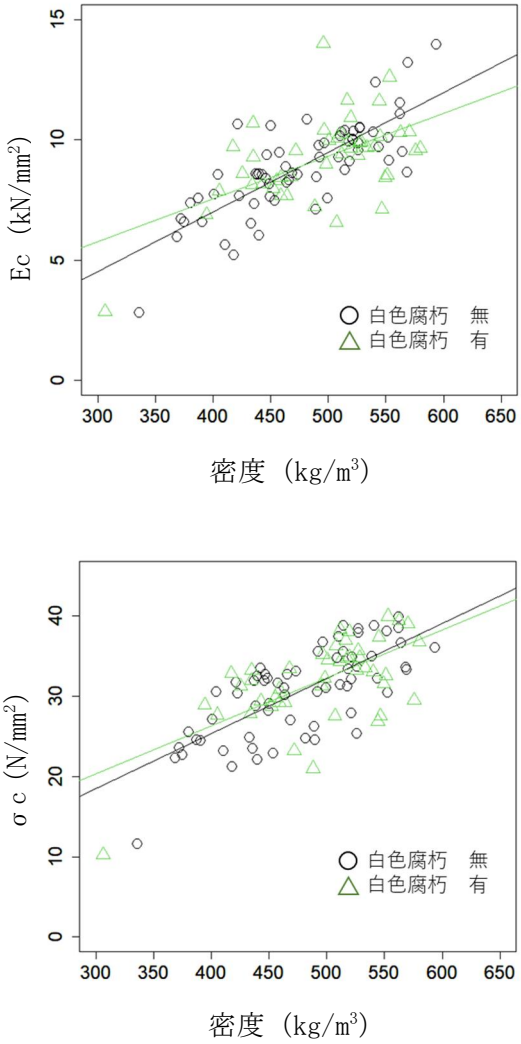


図-34 孔状白色腐朽の有無別の密度と Ec（上）、密度とσc（下）の関係

目的変数にMOEまたはMORを、説明変数に密度と孔状白色腐朽の有無を用いた二元配置分散分析により評価を行ったところ、密度はMOE、MORともに有意に正の影響を与えている（p<0.01）ことが確認された一方で、孔状白色腐朽は、MOEには影響を与えず、MORを有意に低減させることが明らかとなった(p<0.01)。

また、曲げ試験同様、目的変数にEcまたはσc を、説明変数に密度と孔状白色腐朽の有無を用いた二元配置分散分析により評価を行ったところ、密度はEc、σcともに有意に影響を与えている（p<0.01）ことが確認された一方で、孔状白色腐朽は、Ec、σc のいずれにも影響を及ぼしていないことが明らかとなった。

イイギリにおいても、目視で判読できない欠点については、曲げ強度は低減させていたが、縦圧縮強度にはその影響は確認されなかった。このことから、材に発生する部分的な欠点は、縦圧縮強度より曲げ強度により鋭敏に影響を及ぼすことが示唆された。

10）4樹種間の共通事項

これまで、県産早生樹4種の曲げおよび縦圧縮試験の結果をそれぞれ述べてきたが、共通事項について記載する。

曲げ試験において、曲げヤング係数（MOE）と固有縦振動数から算出する縦振動ヤング係数（Efr）の関係については、全ての樹種において非常に強い正の相関（cor:0.95～0.98）が見られ（図-2、10、19、26）、非破壊検査法により、精度の高いヤング係数の推定が可能であることが確認された。

また、MOE と曲げ強度（MOR）（図-3、11、20、27）、密度と MOR （図-4、12、21、28）についても全ての樹種で共通して強い正の相関（MOE-MOR:cor0.66～0.87、密度-MOR：cor0.71～0.86）がみられた。一般に、弾性率と強度は相関があることが知られており（高橋・中山、1992）、本試験でもこの性質が確認された。また、密度については増加に伴って木材実質が増加するため力学的性質に大きく影響することが知られており(高橋・中山、1992）、妥当な結果と考える。

さらに採材位置を示す髄からの距離が MOR に及ぼす影響については、樹齢が若い時に形成された40mmの部位がより外周の80、120mmの材と比較して強度が低い傾向が共通して確認された（図-5、13、22、29）。これは図-35に示すように、40mmの部位が80、120 mmの部位と比較して有意に密度が小さいこと（多重比較、p<0.01)に起因していると考えられた。なお、材の中心に近い部分は未成熟材と呼ばれ、繊維長が短くミクロフィブリル傾角が大きくなり強度が低くなることがあるが（高橋・中山、1992）、今回はそれらの測定を行っていないことから未成熟材の存在については不明である。

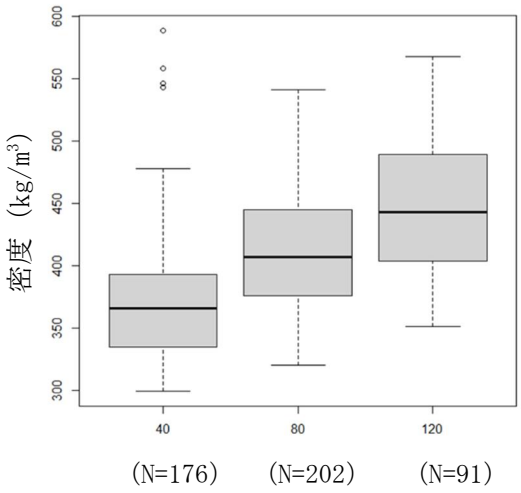


図-35　髄からの距離毎の密度 （全樹種）(Nは試験体数を示す)

縦圧縮試験についても、縦圧縮ヤング係数（Ec）と縦圧縮強度（σc）（図-7、14、23、30）、密度とσc （図-8、15、24、31）についても全ての樹種で共通して強い正の相関（Ec-σc:cor0.68～0.83、密度-σc:cor0.73～0.91）がみられた。よって、縦圧縮ヤング

係数が高い部材は縦圧縮強度も大きくなり、また、密度が大きい材ほど縦圧縮強度が大きくなる傾向があることが確認された。

髄からの距離がσc に及ぼす影響についても曲げ試験と同様に全樹種共通して最も密度の小さい 40mm の部位がより外周の 80、120mm の材と比較して強度が低い傾向が確認された（図-9、16、25、32）。

11）4 樹種間の比較

最後に 4 樹種の無欠点試験体の強度について樹種毎に MOR（図-36）およびσc（図-37）について比較を行った。

MOR について多重比較を行ったところ、イイギリ、ハマセンダンおよびセンダンは

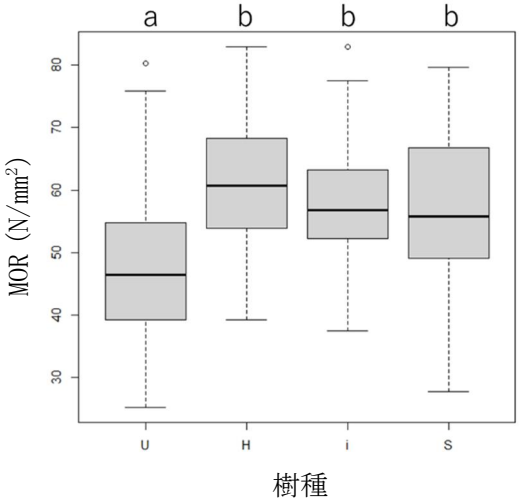


図-36　樹種毎の MOR

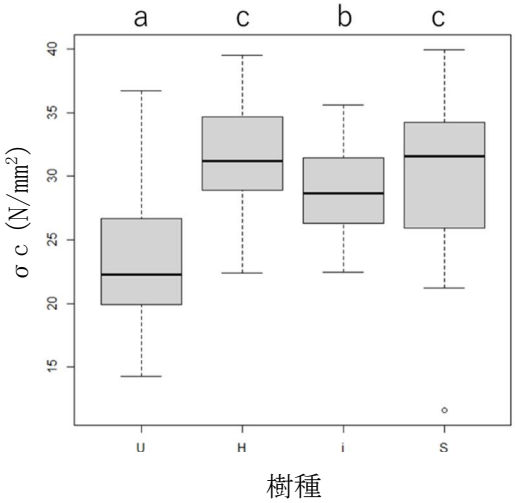


図-37　樹種毎のσc

ウラジロエノキと比較して有意に大きくなった（p<0.05）。縦圧縮強度についても同様に多重比較を行ったところ、ウラジロエノキ＜イイギリ＜ハマセンダン、センダンの順に有意に大きくなった（p<0.05）。よって、今回の試験では曲げ、縦圧縮強度のいずれも 4 種の中ではウラジロエノキが最も低い値を示したこととなる。

その要因については、図-38 に示すように、ウラジロエノキの密度が最も小さいことに起因していると考えられた。

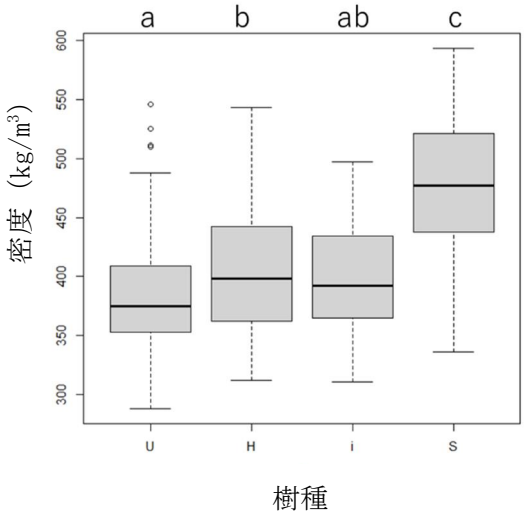


図-38　樹種毎の密度

ただしウラジロエノキについては地域差が大きいことや他樹種でも個体間で強度に大きなばらつきがあることに留意する必要がある。

なお、日本において一般に使用されるスギ材について文献値では MOR は 64（N/mm²）、σc は 27.9（N/mm²）とされている（高橋・中山、1992）。これと比較した場合、県産早生樹 4 種の曲げ強度の中央値はいずれもスギ材に劣ることとなり、一方で縦圧縮強度については、ハマセンダン、イイギリ、センダンは同等程度かそれ以上だが、ウラジロエノキはスギ以下の強度であった。

今回の試験は、無欠点小試験体を用いた試験であり、節等を含み強度が低下する実大試験ではないことから、そもそも構造材として

の強度性能を担保するものでは無いが、県産早生樹を強度性能が求められる構造材等へ利用する際については慎重に検討する必要があると考えられた。

4. まとめ

本報では沖縄県早生樹 4 種（ウラジロエノキ、ハマセンダン、イイギリ、センダン）を対象に無欠点試験体を用いた曲げおよび縦圧縮試験を行い強度性能について評価を行った。

採材位置の影響については、いずれの樹種でも樹齢が若い時に形成した中心部分で密度が小さくなり、その結果、曲げおよび縦圧縮強度が低くなることが確認された。よって、強度性能が求められる際には同一樹種内でも極力中心付近を用いない等部材の位置について留意する必要がある。

また 4 種の比較では、ウラジロエノキが最も強度が低い結果となり、強度性能ではスギ材より劣ることが確認されたため、強度性能が求められる構造材等へ利用する際については慎重に検討する必要があると考える。

一方で、近年ウラジロエノキはその軽さと加工の容易さから学童机の材料として利用されてきた実績がある。今回の試験から、強度性能の観点からは、ハマセンダン、イイギリ、センダンの 3 種はウラジロエノキの代替材として利用できることが明らかとなった。

このように樹種および部材の位置の強度性能を踏まえつつ、沖縄県産早生樹の利用を適切に進めていくことが、将来の沖縄県の林業・木材産業の発展には重要と考える。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人　森林研究・整備機構　森林総合研究所　木材研究部門構造利用研究領域　材料接合研究室の井道室長から調査手法についてご教授頂き実施しており、この場を借りて感謝申し上げる。

引用文献

伊波正和 （2016）沖縄県森研セ研報 57 : 7-17

仲宗根平男・小田一幸 （1985）沖縄産有用木材の性質と利用 : 11、15

沖縄県農林水産部森林管理課（2022）沖縄の森林・林業　令和 4 年版:12、40

高橋徹・中山義雄編（1995）木材科学講座 3 物理 : 97、99、121、125

県産きのこの生産安定化と品質管理手法の開発

伊藤　俊輔、仲摩　和寛、赤池　頼、井ノ口　あゆみ

はじめに

本県において広葉樹おが粉を培地基材の主体とするきのこであるブナシメジ、シイタケ、アラゲキクラゲの内、シイタケ、アラゲキクラゲの県内生産量は増加している（図-1、沖縄県、2024）一方で、木材拠点産地において伐採量の減少に伴う木材生産量は減少傾向にあるが（図-1）、畜産敷料や菌床きのこ培地としてチップ、おが粉の需要が高まり（沖縄県、2024）、おが粉の需給のひっ迫が懸念される中で、おが粉代替資材が求められている。シイタケとアラゲキクラゲの生産量は増加しているが、その生産者は中から小規模でおが粉の供給不足の影響を受けやすい。

そこで、本研究ではイタジイを主体とした広葉樹おが粉の代替資材としてコーンコブ、バガス、シイタケ廃菌床を評価するため、シイタケ（*Lentinula edodes*）とアラゲキクラゲ（*Auricularia polytricha*）の栽培試験を実施した。

コーンコブはエリンギ、エノキタケ栽培で使用され県内に安定供給されていること、バガスは沖縄県の基幹作物として直近で約66万ｔ生産されており（沖縄県、2024）、その搾りかすであるバガスが安定的に供給されていることからシイタケとアラゲキクラゲ用の基材として評価の対象とした。シイタケ廃菌床は、シイタケ廃菌床を使用して再び菌床シイタケを栽培したとしても、イタジイのみの培地と遜色のない収穫量があることが確認（伊藤、2016）されていることから、アラゲキクラゲ栽培用の培地として評価の対象とした。

方法

各試験の共通事項は以下のとおりとした。各種培地基材の比較対照はイタジイ（*Castanopsis sieboldii* subsp. *sieboldii*）とした。添加する栄養剤はフスマとし、基材と栄養剤の配合割合は3：1とした。培地基材はフスマを加える当日までに十分に吸水させ、フスマを添加・混合後直ちに成型し、121℃で90分間滅菌した。培地重量は2.2㎏、含水率は63%に設定した。種菌の接種は滅菌の翌日に培地が十分冷えていることを確認し行った。シイタケ種菌は森XR1号、アラゲキクラゲ種菌は森89号（いずれも森産業）とした。統計解析はR(バ

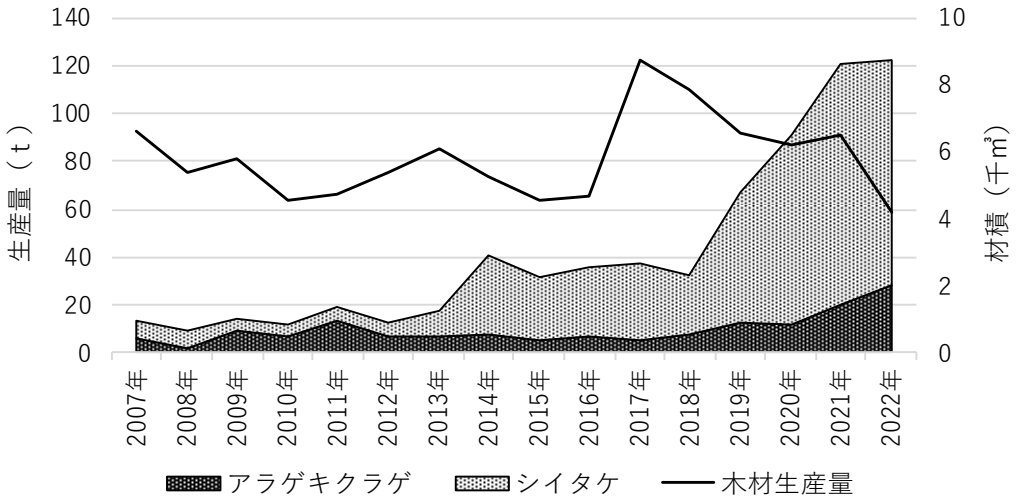


図-1　広葉樹おが粉を培地基材とするきのこ生産量と県産木材生産量の推移

ージョン 1.1)をインストールして行った。

(1) 非木質資源を使用したシイタケ栽培
培地基材はコーンコブ 100%、バガス 100%、インドゴムノキ（購入品）100%、イタジイ 100%（対照区）とし、供試数は 10 とした。バガス 100%の培地重量は、栽培袋への最大詰め量（体積）の関係上 1.0 kgとした。種菌接種は 2020 年 10 月 16 日に行い、翌年 1 月 13 日（90 日間）まで 21℃で培養した。収穫は 4 月 1 まで行った。散水は 8 時間おきに 4 分間、浸水は 3 週間おきに 24 時間行った。インドゴムノキについては沖縄県内で畜産敷料として流通しており容易に入手できたことから試験の対象とした。

(2) 非木質資源を使用したアラゲキクラゲ栽培
培地基材等の条件は（1）と同様とした。種菌接種は 2020 年 7 月 17 日に行い、9 月 17 日（61 日間）まで 23℃で培養した。収穫は翌年 1 月 20 日まで行った。発生処理は菌床袋の一方の長辺に 12cm の切れ目を 10cm 間隔で 3 本入れた。散水は子実体発生期間中に 8 時間おきに 3 分間行った。

(3) バガスを使用したアラゲキクラゲ栽培
培地基材はイタジイを基本に、バガスでそれぞれ 20、30、50%置換（いずれも絶乾重比）した区と対照区にイタジイ 100%区を設定した。供試数は 7 とした。種菌接種は 2021 年 3 月 24 日に行い、5 月 24 日（61 日間）まで 24℃で培養した。収穫は 9 月 17 日まで行った。発生処理は菌床袋の一方の長辺に 6cm の切れ目を 10cm 間隔で 2 本入れた。散水は子実体発生期間中に 8 時間おきに 4 分間行った。

(4) シイタケ廃菌床を使用したアラゲキクラゲ栽培
培地基材はイタジイを基本に、シイタケ廃菌床でそれぞれ 25、50、75%置換（いずれも絶乾重比）した区（以下、廃 25、廃 50、廃 75 とする）と対照区にイタジイ 100%区（以下、廃 100）を設定した。また、培地基材にシイタケ廃菌床のみを使用した培地も作成した。供試数は 7 とした。種菌接種は 2021 年 4 月 21 日に行い、6 月 20 日（60 日間）まで 24℃で培養した。発生処理は菌床袋の一方の長辺に 6cm の切れ目を 10cm 間隔で 2 本入れた。散水は子実体発生期間中に 8 時間おきに 4 分間行った。収穫は 8 月 21 日まで行った。

結果及び考察

(1) 非木質資源を使用したシイタケ栽培
イタジイ菌床の収穫量は平均 763.1g/菌床であったのに対してコーンコブは 460.1g/菌床、インドゴムノキは 19.9g/菌床、バガスは 129.2g/菌床であった（図-2）。収穫量は、いずれの培地もイタジイ培地より有意に少なく（Dunnett 法、P＜0.01、図中の＊印は有意差があることを示す。）、シイタケ栽培におけるおが粉代替資材には適さないと考えられた。特にインドゴムノキについては収穫がほとんどなく忌避すべき資材であると考えられた。一方で、バガスについては重量当たりの体積が大きく、培地重量が本来の 2.2kg ではなく 1.0 kgであったことから、収穫量が少なくなった。ただし、収穫量を 2.2 倍にしたとしてもイタジイに

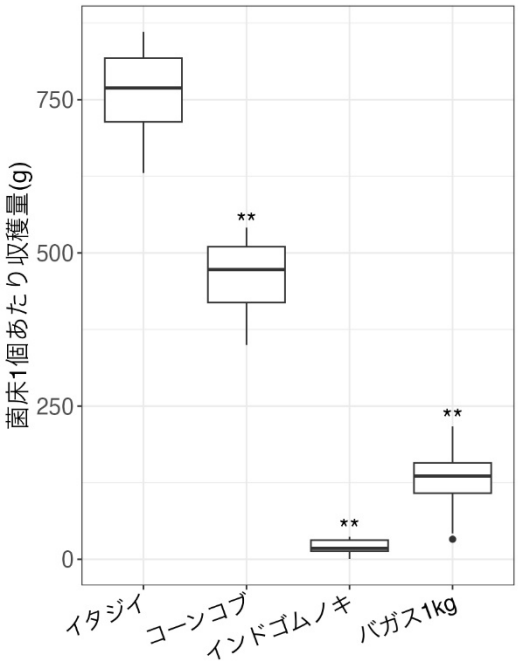


図-2　非木質資源を用いたシイタケの収穫量

は及ばなかった。バガスはむしろその重量当たりの体積の大きさから物理性の改善のための改良剤と考えられ、その効果について確認する必要がある。

(2) 非木質資源を使用したアラゲキクラゲ栽培

図-3 にアラゲキクラゲの菌床 1 個当たり累積収穫量を示す。イタジイ菌床は発生処理から旺盛に子実体を発生させた一方で、コーンコブ菌床は初期の子実体発生は緩やかで発生処理 3 カ月目に収穫量がイタジイ菌床に追いついた。4 か月目時点ではコーンコブ菌床の方がイタジイ菌床よりも収穫量が多くなった。インドゴムノキ菌床については子実体が発生しなかった。

収穫期間別の収穫量を図-4 に示す (Dunnett、P<0.05、図中の ns は有意差がないことを示す)。発生 2 か月目時点では、イタジイ菌床の収穫量が有意に多く、3 か月目、4 か月目ではコーンコブ菌床が同等となった。バガス菌床の収穫量はいずれの時点でもイタジイ菌床より有意に少なかった。

図-5 に通年栽培を想定した試算を示す。図に示す回数は、6 回の場合 2 カ月毎に菌床を入れ替え年間で 6 回の収穫をした場合の総収穫量を示す。4 回の場合は 3 カ月ごとに菌床の入れ抱えた場合、3 回の場合は 4 カ月ごとに菌床の入れ替えた場合の総収穫量を示す。これらの総収穫量は 2 か月目までの収穫量を 6 倍、3 か月目までの収穫量

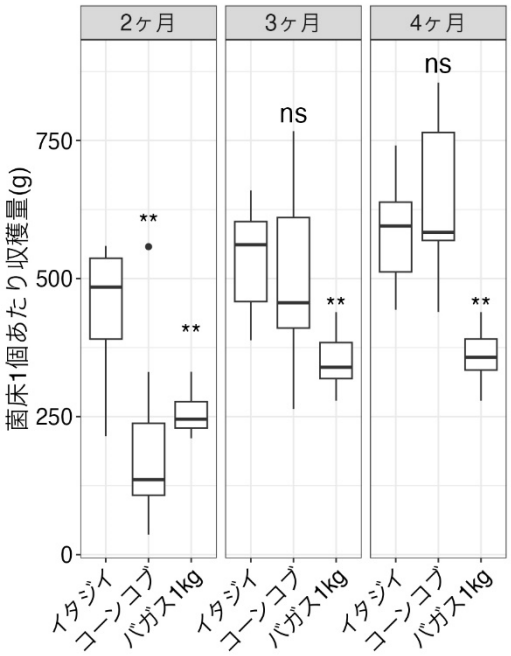


図-4　非木質資源を用いたアラゲキクラゲの収穫量

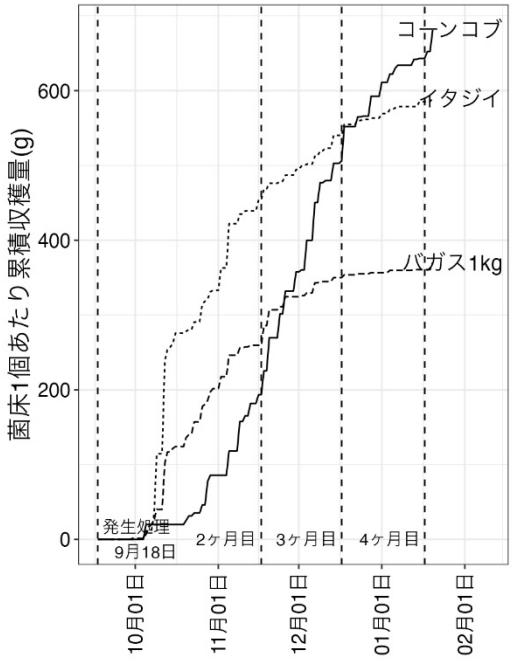


図-3　非木質資源を用いたアラゲキクラゲの累積収穫量

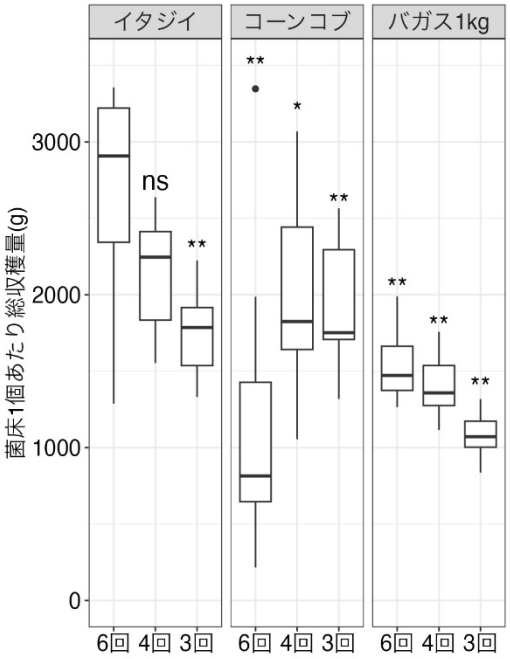


図-5　通年栽培を想定した試算（非木質資源）

を 4 倍、4 か月目までの収穫量を 3 倍した値とした。図中に示す「ns、＊」はイタジイ菌床の 6 回を対照区とした Dunnett 法による多重比較検定の結果を示す(P＜0.05)。イタジイ菌床 6 回と同等の収穫量があったのは、イタジイ菌床の 4 回のみで、コーンコブ菌床、バガス菌床はすべての試算で有意に収穫量が少なかった。

培地基材としてコーンコブ 100%の時は、収穫期間を 3 カ月以上とすることで同一期間のイタジイと同等の収穫量があるが、通年栽培を想定した場合、収穫期間 3 か月で 4 回入れ替えるとしても、イタジイ菌床を 2 か月ごとに 6 回入れ替える場合の収穫量には及ばなかった。バガスのみを培地基材とすると必要とされる培地重量が確保できず収穫期間に関係なく収穫量が劣る。ただし、バガス菌床の収穫量の少なさは菌床重量が 1.0kg であったことが原因であると考えられた。

(3) バガスを使用したアラゲキクラゲ栽培

図-6 にアラゲキクラゲの菌床 1 個当たり累積収穫量を示す。発生処理から 2 か月目までは収穫量に差はなく、3 か月目以降になりイタジイ菌床の収穫量が鈍化した。一方で、バガスで置換した菌床の収穫量は試験を打ち切った 4 か月目まで収穫量の鈍化が少なかった。最終的にはバガス 50%置換菌床が最も収穫量が多かった。

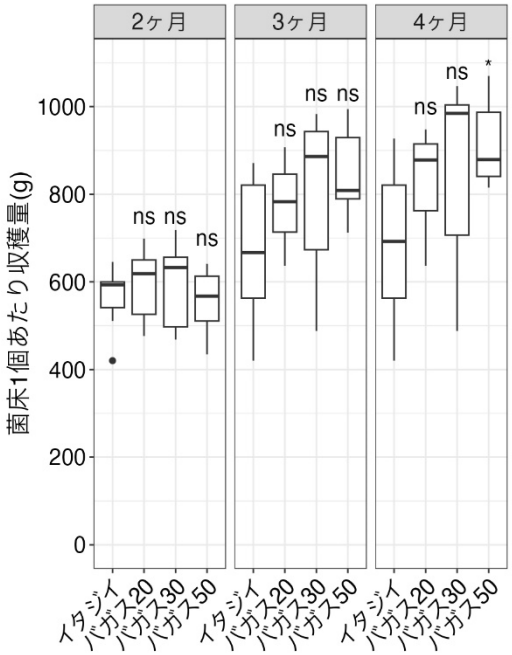


図-7　バガスを用いたアラゲキクラゲの収穫量

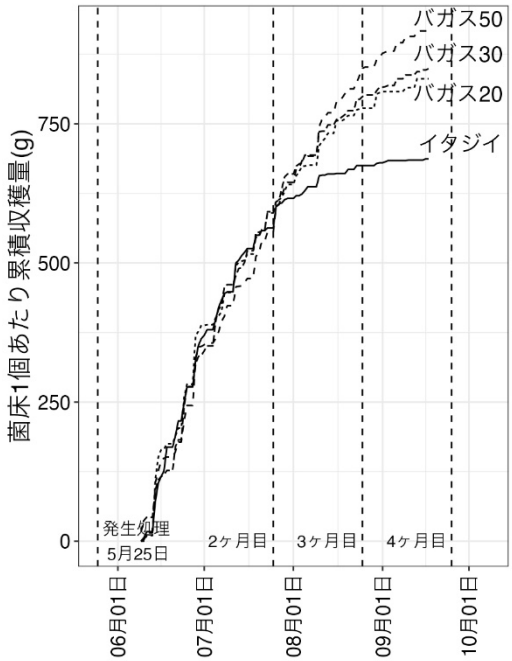


図-6　バガスを用いたアラゲキクラゲの累積収穫量

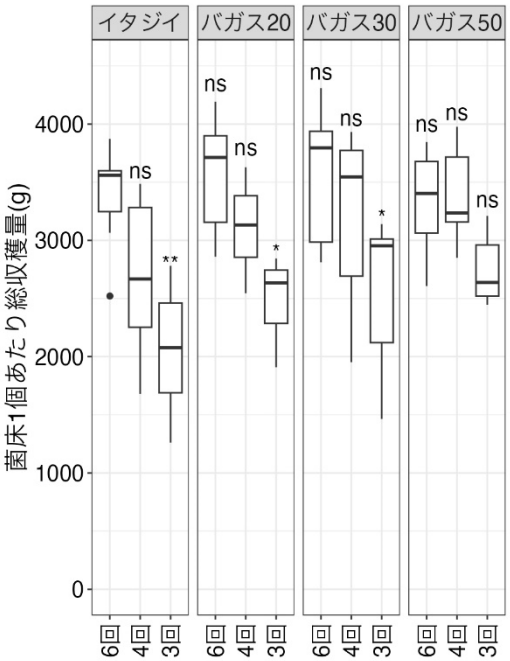


図-8　通年栽培を想定した試算（バガス）

収穫期間別の収穫量は、2 か月目、3 か月目ともにバガス置換菌床はイタジイ菌床と同等の収穫量があり、4 か月目ではバガス 50%置換菌床の収穫量が有意に多くなった（図-7、Dunnett、P<0.05）。イタジイおが粉をバガスで 20～50%置換することで、おが粉の消費量を抑えつつ同等の収穫量が確保できることから、バガスは広葉樹おが粉を代替しうる基材であると考えられた。

図-8 に通年栽培を想定した試算を示す。図に示す表記は図-5 と同様とした。いずれの培地も収穫期間を長くとり、菌床の入れ替え回数を少なくすると総収穫量が低下する傾向にあった。3 回収穫を想定した場合は、バガス 50%置換菌床を除き収穫量が有意に少なくなった。これらの結果、バガスでの置換割合は 20～50%とし、栽培は 2 か月間の 6 回栽培もしくは 3 か月の 4 回栽培とすることで、従来のイタジイ菌床 2 か月間の 6 回栽培と同等の収穫量を確保できると考えられる。

バガスを培地基材として活用する場合の注意点は、機械による袋詰めを行った場合にピンホールができやすくなることである。さらに、バガスは吸水性に優れ、吸水した際に膨張することから、おが粉のみの培地と比較して培地の含水率が過大になったり、培地重量が過少になったりしないように注意が必要となる。

(4) シイタケ廃菌床を使用したアラゲキクラゲ栽培

図-9 にアラゲキクラゲの菌床 1 個当たり累積収穫量を示す。発生処理 2 か月目ではイタジイ菌床、廃 75、廃 100 の収穫量が鈍化し始めたのに対して、廃 25、廃 50 は 3 か月目以降も収穫量の鈍化が抑えられていた。最終的には廃 25、廃 50 の収穫量が最も多くなった。

収穫期間別の収穫量は、2 か月目まではすべての菌床がイタジイ菌床と同等の収穫量があり、3 か月目では廃 50 が、4 か月目では廃 25、廃 50、廃 75 が有意に多く、廃 100 は同等の収穫量があった（図-10、Dunnett、P＜0.05）。シイタケ廃菌床による置換は、イタジイと同等もしくはそれ以上の収穫量があったことから、広葉樹おが粉の代替手段として活用することが可能であると考えられた。

図-11 に通年栽培を想定した試算を示す。図-5 と同様に統計解析を行った結果、すべての試験区が対照区と同等と判定された（Dunnett、P＞0.05）。

廃 75、廃 100 は栽培期間 2 か月目ころか

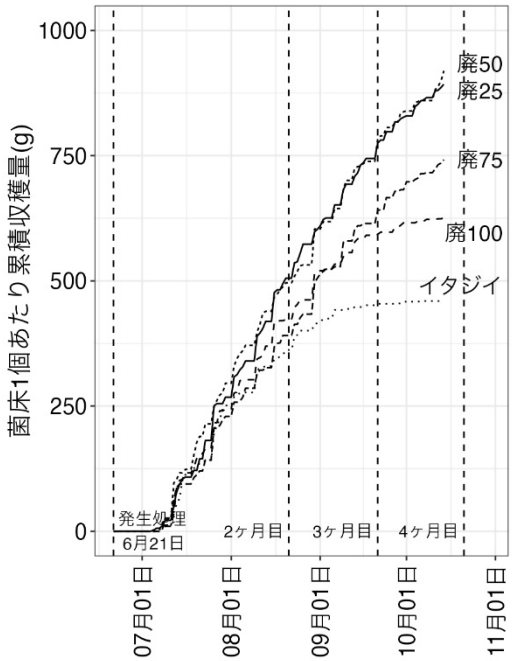


図-9　シイタケ廃菌床を用いたアラゲキクラゲの累積収穫量

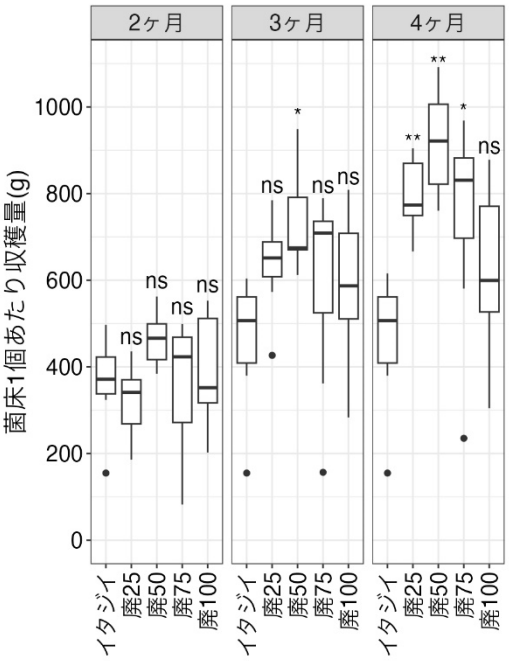


図-10　シイタケ廃菌床を用いたアラゲキクラゲの収穫量

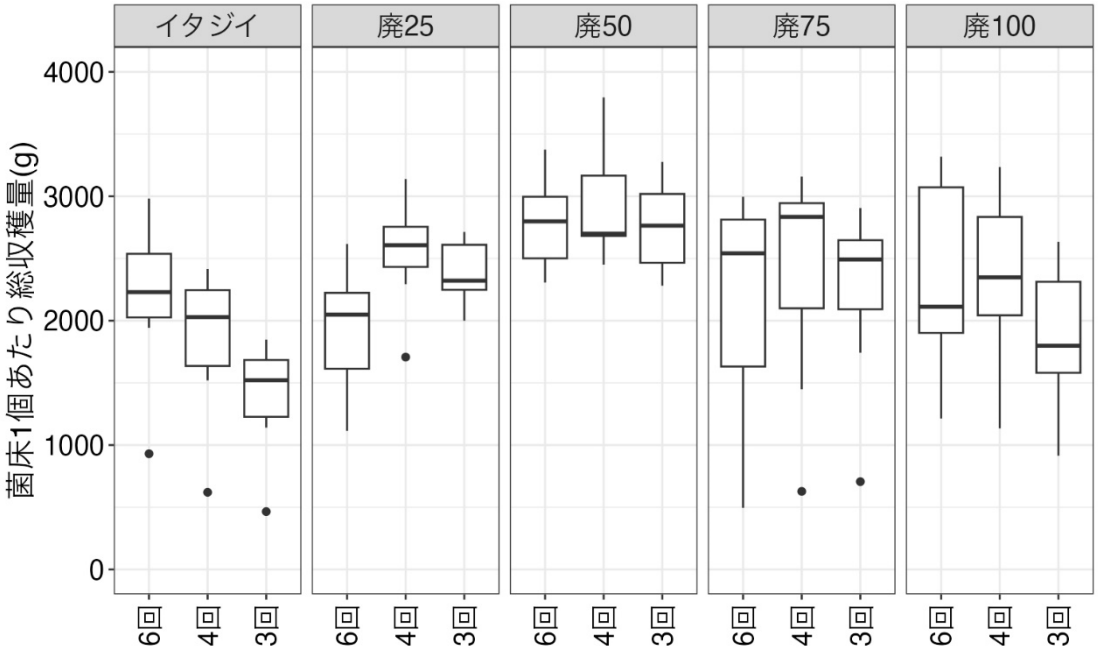


図-11　通年栽培を想定した試算（シイタケ廃菌床）

ら収穫量の鈍化がみられた一方で、廃 25、廃 50 については鈍化がみられなかったこと、シイタケ廃菌床の再利用には廃菌床の破砕という処理が必要であることなどから、廃菌床による置換は25～50%が妥当であると考えられた。

廃菌床を活用する場合は、伊藤（2016）が指摘するとおり菌床の含水率や、炭素・窒素含有量のバラつきがあることに注意が必要となる。また、今回の試験では菌床シイタケの廃菌床を使用しアラゲキクラゲを栽培したが、その後アラゲキクラゲ廃菌床を再び使用し、アラゲキクラゲを繰り返し栽培する場合に何回までなら栽培し続けられるかについては検討がなされていないことにも注意が必要となる。

まとめ

- シイタケ栽培は従来どおりの広葉樹おが粉の利用を推奨する。
- 畜産敷料として入手可能なインドゴムノキはシイタケ、アラゲキクラゲ栽培には適していない。
- コーンコブ菌床でアラゲキクラゲを栽培する場合は収穫期間を 3 カ月以上とすることでイタジイと同等の収穫量が見込めるが、イタジイ培地の年 6 回栽培には劣る。
- バガス置換培地でアラゲキクラゲを栽培する場合の置換割合は20～50%が適しており、収穫期間は 2 か月もしくは 3 か月とする。
- シイタケ廃菌床置換培地でアラゲキクラゲを栽培する場合の置換割合は25～50%が適しており、栽培期間は 2 か月～4 か月とする。

引用文献

伊藤俊輔（2016）九州森林研究 69. 177-179
沖縄県農林水産部糖業農産課（2024）令和 5/6 年期さとうきび及び甘しゃ糖生産実績．（閲覧 2024 年 12 月　URL：https://www.pref.okinawa.jp/shigoto/nogyo/1010390/1023584/1010408.html）
沖縄県農林水産部森林管理課（2024）沖縄の森林林業（令和 6 年版）．沖縄県農林水産部森林管理課