

スマート林業の実証に向けた研究 II

-衛星画像を用いた機械学習法による広葉樹林、松林の分類-

合田 雅浩・井口 朝道

1. はじめに

森林は木材の生産のみならず、国土の保全や水源涵養、地球温暖化防止等の多面的機能を有する貴重な資源である。特に沖縄県においては周囲を海に囲まれ台風の常襲地帯であることから古くから防潮・防風林の重要性が広く認識されてきた。また近年は、沖縄島北部地域や西表島の森林を基盤とする固有の生態系の貴重な価値が認識され、生物多様性保全の観点からも森林の重要性はますます高まっている。このように重要な役割を担う森林を将来の世代に渡って保全することが世界的に求められている。2015年に国際連合（UN）が国連サミットで採択したSDGs（持続可能な開発目標）では、「持続可能な森林の経営」を含む目標（目標15）が掲げられている（林野庁、2024）。この持続可能な森林の経営を進めるためには、現在の森林資源の正確な情報を取得し、実効性の高い森林施業に関する計画を策定することが求められる。

森林の所在や所有者、面積、樹種および材積等の森林の情報は、都道府県が林小班を単位として策定する森林簿において管理されることとなっている。しかし、特に樹種や資源量については、一部に森林簿上の記載内容と現実林分との間に乖離があることが指摘されている（白石、1999）。本県においても、台風や松くい虫等による森林被害の実態を正確に森林簿に反映させることは現実的に厳しい状況であり、また材積についても現状は主要な樹種毎に林齢に応じた成長曲線により算出しているが、地位指数などの立地環境に応じたきめ細やかな管理は出来ていない状況にある。

しかし、正確な森林資源情報の把握には現地調査が必要となるが、森林面積は非常に広大である。また、森林にアクセスするための路網も限られているため、林分全体を現地調査により確認することは、莫大なコストと労力を要し、実質的には極めて困難である。

そのような中、近年技術革新が進む、インターネット通信に基づく情報共有等のクラウド技術やUAV（Unmanned Aerial Vehicle：無人航空機、ドローンと同意）を含むロボット技術、さらに人工知能（AI）技術による自動判別などの基盤技術等を背景に、急速に発展している「スマート林業（デジタル管理・ICTによる林業、安全で高効率な自動化機械による林業）」（林野庁、2023）に大きな期待が高まっている。現在、スマート林業の1つとして、森林GISを基盤として、航空レーザやUAV等で得たデータを組み合わせることで、広範囲の森林を対象に、効率的に森林資源の情報を把握し、木材需給システムによる木材流通効率化に繋げる取り組みが全国各地で試験的に導入されている（林野庁、2023）。

今後、沖縄県においてもスマート林業を推進するためには、他県と植生の異なる沖縄の森林を対象とした森林資源情報の把握に関する精度検証を積み重ねていく必要がある。これまで、本県では、UAV撮影画像におけるRGB値やHSV値（H:色相、S:彩度、V:明度）を用いてリュウキュウマツと広葉樹の識別を試みた事例や（岸本・高嶋、2024）、衛星画像と既存土地利用土地被覆図を統合的に利用することで、沖縄島と伊江島における空間解像度10mの土地利用土地被覆図を作成した事例が報告されている（泉澤ほか、2023）。しかし、

既往の研究手法では、鮮明な画像が得られる一方で一度に撮影できる範囲が限られている UAV 撮影画像を用いていることや、解析に既存の土地利用土地被覆図が必要であることなどから、その内容は限定的であり、本県におけるスマート林業の実証に向けたデータの蓄積は不十分である。

そこで、本研究は、広範囲の情報取得が可能である衛星画像を用い、機械学習法により本県における針葉樹の主要樹種であるリュウキュウマツ林（以下、「松林」という。）と広葉樹林等の分類を試みたので報告する。

2. 材料および方法

1) 使用データおよび分類手法

解析に使用した画像は、沖縄県農林水産部森林管理課から提供を受けた、2019年4～5月にかけて国頭村奥、楚洲周辺における、worldView-2衛星で観測された高解像度衛星画像である（縦×横：3,000×4,000m、解像度0.5m、大気補正処理済、図-1）。

分類手法は、教師あり学習によるピクセルベース分類とし、ランダムフォレスト（以下、「RF」という。Breiman, 2001）およびサポートベクターマシン（以下、「SVM」という。Cortes and Vapnik, 1995）を使用した。RF および SVM は、画像分類によく用いられる機械学習法である（例えば、望月・村山、2016；泉澤ほか、2023；岸本・高嶋、2024）。RF による分類は、R ver. 4.1.3 のパッケージ caret 6.0.93 を採用し、SVM による分類は、Python 3.12.7 のパッケージ scikit-learn 1.5.1 を採用した。

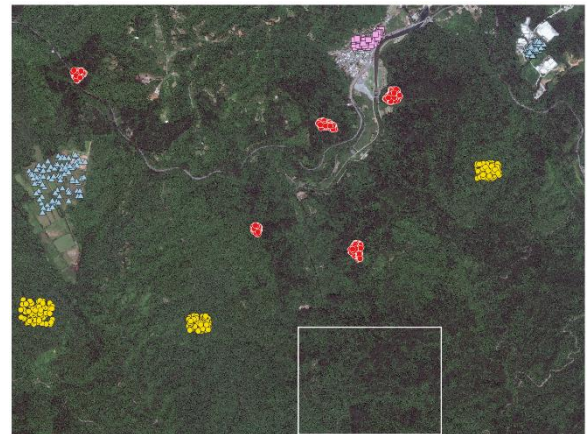
2) 機械学習

分類する土地区分は、①松林、②広葉樹林、③農地、④人工物（民家、道路、構造物など）の4区分とした。

トレーニングデータには、衛星画像から抽出した RGB 値を使用した。まず、QGIS 3.22.9

を用いて衛星画像における各区分の範囲を囲むポリゴンを①5、②3、③2、④1個の計11個作成した。次に、各ポリゴン内にランダムに100点のポイントを発生させ、①500、②300、③200、④100点の計1,100点の各座標におけるRGB値を抽出した（図-1）。

以上により抽出したトレーニングデータを使用し、RF および SVM による各土地区分の予測モデルを作成した。



● 松林 ● 広葉樹林 ▲ 農地 ■ 人工物

図-1 衛星画像とトレーニングデータ
白枠は図-2の範囲を示す。

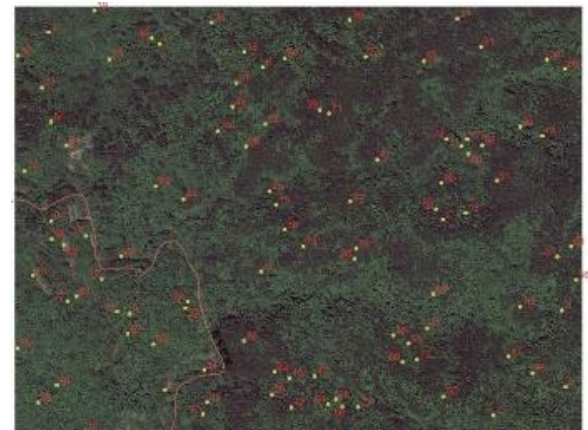


図-2 精度検証に用いたテストデータ

3) 精度検証

精度検証には、同衛星画像からトレーニングデータとして使用していない範囲（縦×横：750×1,000m）において、ランダムにサンプリングしたテストデータ100点を用いた（図-2）。精度検証は、テストデータ100点

を目視（研究員3名の多数決）で判読した土地区分を正解データとした。そして、各予測モデルをテストデータ100点に適用し、正答率を算出した。

次に、作成した予測モデルを用いて、衛星画像全体における土地区分の予測分類図を作成した。予測分類図は、ゴマ塩ノイズ（Salt-and-pepper noise）を除去するため、5つの処理サイズ（無処理、3×3、5×5、7×7、9×9）の範囲内における最頻値を中心のピクセルの値として採用した。また、作成した各予測分類図において、各土地区分の面積割合を算出するとともに、テストデータ100点の正答率を算出した。

また、解析処理の高速化および省力化を目的に、元画像（解像度0.5m）を1/16に圧縮した画像（解像度2.0m）を使用した場合についても、同様の手法を用いて検証した。

3. 結果および考察

1) 各土地区分のRGB値

トレーニングデータ1,100点における土地

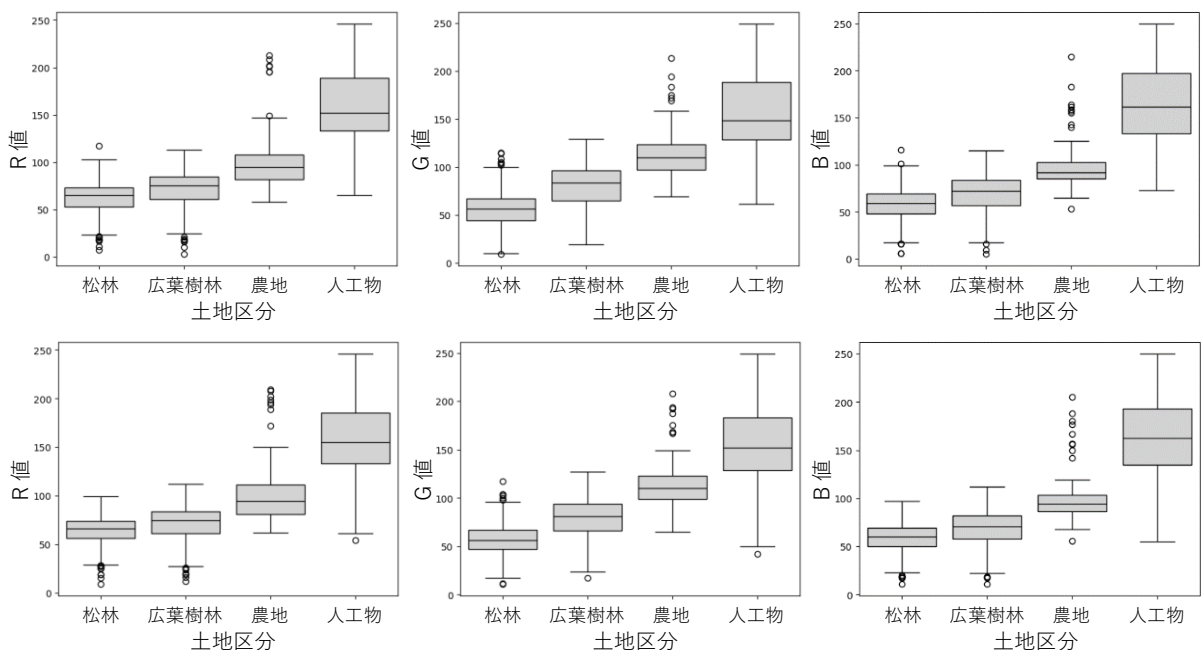


図-3 トレーニングデータにおける土地区分毎のRGB値
 (上：元画像（解像度0.5m）、下：圧縮画像（解像度2.0m）)

区分毎のRGB値を図-3に示す。元画像（解像度0.5m）と圧縮画像（解像度2.0m）ともに、RGB値のいずれにおいても、人工物は高い数値を示し、次に農地、広葉樹林、松林の順になっていた。

2) 機械学習法による予測分類まとめ

RGB値を用いて、機械学習法によりテストデータ100点の予測を行った分類結果を表-1に示す。RF予測モデルによる正答率については、元画像では80% (80/100)、圧縮画像では79% (79/100)と、いずれも8割程度の精度で予測できることが示され、解像度を2.0mに圧縮した場合でも予測精度は同等であることが示された。また、SVM予測モデルによる正答率については、元画像と圧縮画像のいずれも79% (79/100)と、RFと同じく8割程度の精度で予測できることが示され、解像度を2.0mに圧縮した場合でも予測精度は同等であることが示された。しかし、RF予測モデルと比べ、広葉樹林を農地と予測する点が多く確認された。

また、いずれの予測モデルも松林および農

表-1 各予測モデルにおける分類結果

RF予測モデル (解像度0.5m)						RF予測モデル (解像度2.0m)							
		予測モデル							予測モデル				
		松林	広葉樹林	農地	人工物	小計			松林	広葉樹林	農地	人工物	小計
目視	松林	38	8			46	目視	松林	37	9			46
判読	広葉樹林	9	41	2		52	判読	広葉樹林	11	41			52
	農地			1		1		農地			1		1
	人工物				1	1		人工物				1	1
	小計	47	49	4	0	100		小計	48	50	2	0	100

SVM予測モデル (解像度0.5m)						SVM予測モデル (解像度2.0m)							
		予測モデル							予測モデル				
		松林	広葉樹林	農地	人工物	小計			松林	広葉樹林	農地	人工物	小計
目視	松林	39	7			46	目視	松林	38	8			46
判読	広葉樹林	8	39	5		52	判読	広葉樹林	9	40	3		52
	農地			1		1		農地			1		1
	人工物				1	1		人工物				1	1
	小計	47	46	7	0	100		小計	47	48	5	0	100

※太字の数字は予測と目視判読が一致している箇所を示す。

表-2 各予測モデルにおけるゴマ塩ノイズ除去処理区別の面積割合と正答率

RF予測モデル (解像度0.5m)							RF予測モデル (解像度2.0m)						
		ゴマ塩ノイズ除去処理区分							ゴマ塩ノイズ除去処理区分				
		無処理	3x3	5x5	7x7	9x9			無処理	3x3	5x5	7x7	9x9
面積	松林	32%	30%	29%	29%	28%	面積	松林	31%	26%	25%	24%	24%
割合	広葉樹林	58%	62%	63%	64%	64%	割合	広葉樹林	59%	67%	68%	69%	69%
	農地	7%	5%	5%	5%	5%		農地	7%	5%	4%	4%	4%
	人工物	3%	3%	3%	3%	3%		人工物	3%	3%	3%	3%	3%
正答率		80%	81%	86%	87%	85%	正答率		79%	86%	88%	87%	85%

SVM予測モデル (解像度0.5m)							SVM予測モデル (解像度2.0m)						
		ゴマ塩ノイズ除去処理区分							ゴマ塩ノイズ除去処理区分				
		無処理	3x3	5x5	7x7	9x9			無処理	3x3	5x5	7x7	9x9
面積	松林	30%	31%	30%	30%	30%	面積	松林	30%	30%	28%	27%	27%
割合	広葉樹林	55%	59%	62%	63%	63%	割合	広葉樹林	57%	64%	66%	67%	67%
	農地	12%	8%	5%	5%	4%		農地	11%	4%	4%	4%	3%
	人工物	2%	2%	2%	2%	3%		人工物	2%	2%	2%	2%	2%
正答率		79%	79%	83%	84%	85%	正答率		79%	83%	84%	87%	86%

地は過大に、広葉樹林および人工物は過小に予測されていた。誤判定となった箇所を確認したところ、光の反射等により明るく写っている部分において、松林が広葉樹林に、広葉樹林が農地に誤判定されることがあり、影により暗く写っている部分において、広葉樹林が松林に誤判定されることがあった。

3) ゴマ塩ノイズ除去による予測精度の変化

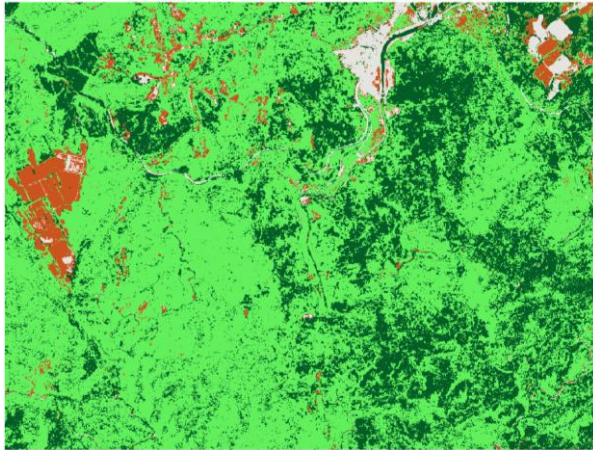
作成した各予測分類図における、ゴマ塩ノイズ除去の処理区別の各土地区分の面積割合とテストデータ 100 点の正答率を表-2 に示す。元画像 (解像度 0.5m) では、RF による予

測モデルの場合は7×7の精度が最も高く87%となり、SVMによる予測モデルの場合は、9×9の精度が最も高く85%となった。圧縮画像 (解像度 2.0m) では、RFによる予測モデルの場合は5×5の精度が最も高く88%となり、SVMによる予測モデルの場合は、7×7の精度が最も高く87%となった。以上により、各予測モデルにおいて最も正答率の高い処理サイズが異なっていたことから、予測分類図のゴマ塩ノイズ除去を行う際には、都度、適切な処理サイズを検討する必要があると考えられた。また、各予測モデルにおいて、最も正答率の高かった処理サイズにおける予測分類図を図

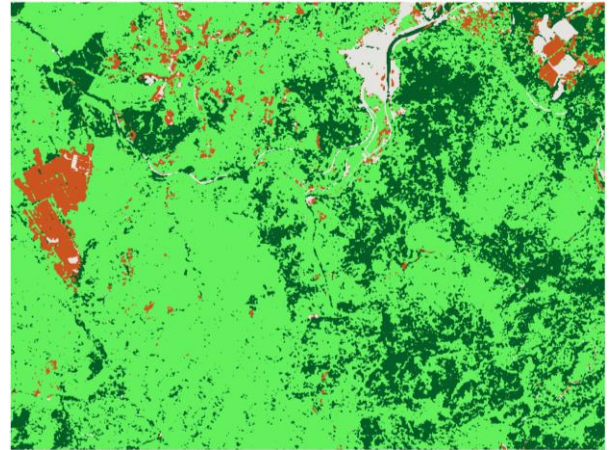
-4に示した。

ゴマ塩ノイズ除去の各処理サイズにおける土地区分の面積割合を見ると、処理サイズが大きくなるほど松林および農地の割合が低くなり、広葉樹林の割合が高くなった（表-2）。

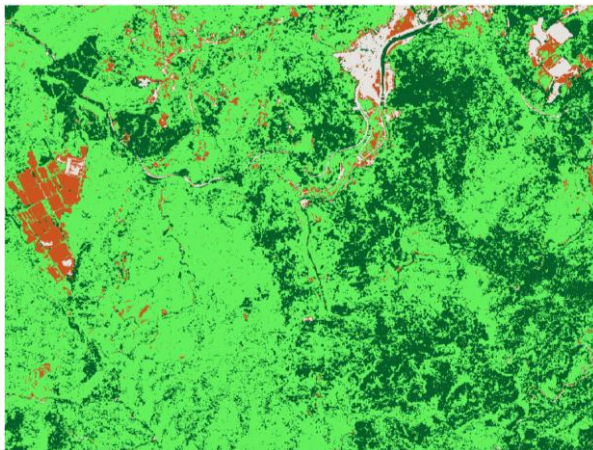
表-1において、無処理では松林および農地は過大に、広葉樹林および人工物は過小に予測されていたことを踏まえると、ゴマ塩ノイズ除去により、それぞれの土地区分における過大・過小評価が是正されたと考えられた。



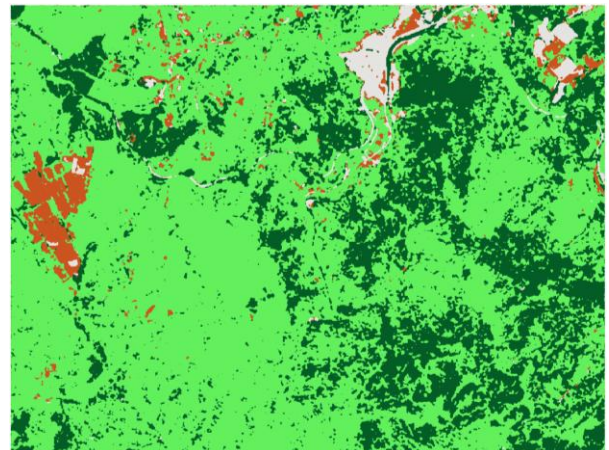
RF 予測モデル（解像度 0.5m）、ゴマ塩ノイズ除去：7×7



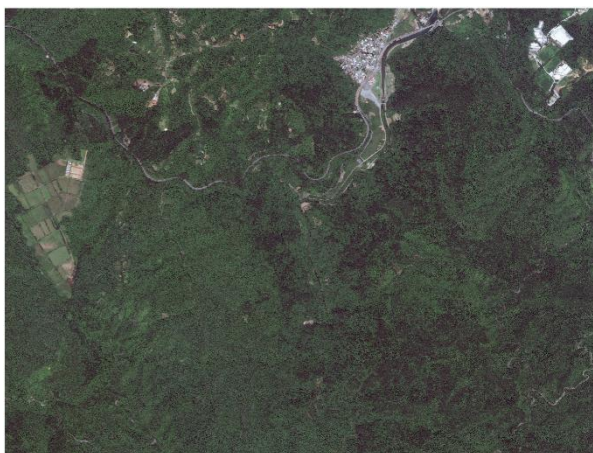
RF 予測モデル（解像度 2.0m）、ゴマ塩ノイズ除去：5×5



SVM 予測モデル（解像度 0.5m）、ゴマ塩ノイズ除去：9×9



SVM 予測モデル（解像度 2.0m）、ゴマ塩ノイズ除去：7×7



衛星画像

- 松林
- 広葉樹林
- 農地
- 人工物

図-4 各予測モデルによる土地区分予測分類図

次に、作成した予測分類図において、ゴマ塩ノイズ除去により不正解から正解になる例を図-5に、正解から不正解になる例を図-6に示す。いずれの予測モデルにおいても、無処理の場合、目視により松林と判断された箇所において偽広葉樹林のゴマ塩ノイズが、広葉樹林と判断された箇所において偽松林や偽農地のゴマ塩ノイズが生じ、予測が外れる箇所があったが、ゴマ塩ノイズ除去により、正答率が向上した(図-5)。一方で、ゴマ塩ノイズ除去の処理サイズを大きくした場合、予測分類図の境界が緩いカーブを描くように補正がかかり、予測が外れる箇所が確認された(図-6)。また、解析対象木の樹冠サイズを大幅に超えるサイズでノイズ除去を行った場合、単木で生えている木をノイズとして除去してしまう恐れがある。これらのことから、今後、判読樹種の細分化などのより細かい分類を行う場合には、ゴマ塩ノイズ除去の処理サイズを大きくしすぎないように注意する必要があると思慮される。

4. まとめ

本報では広範囲の情報取得が可能である衛星画像を用いて機械学習法による松林と広葉樹林等の分類を試みた。機械学習法としてRFとSVMの2つの方法を採用し、衛星画像は元画像(解像度0.5m)と圧縮画像(解像度2.0m)を用い、また土地区分の予測分類図は5パターン(無処理、3×3、5×5、7×7、9×9)の範囲でゴマ塩ノイズの除去を行うことで、それぞれの予測モデルにおける予測精度について検証した。

まず、本研究で予測を行った土地区分毎のRGB値は、元画像(解像度0.5m)と圧縮画像(解像度2.0m)ともに、RGB値のいずれにおいても、人工物は高い数値を示し、次に農地、広葉樹林、松林の順になることが明らかとなった。

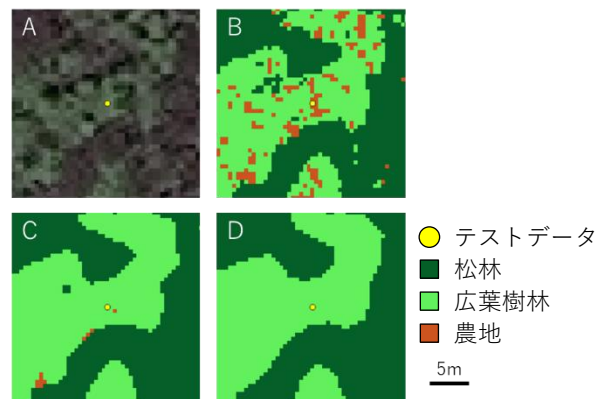


図-5 ゴマ塩ノイズ除去処理により正解となる例 (SVM 予測モデル (解像度 0.5m)、正解：広葉樹林)

A：元画像、B：無処理（農地）、C：5×5（広葉樹林）、D：9×9（広葉樹林）

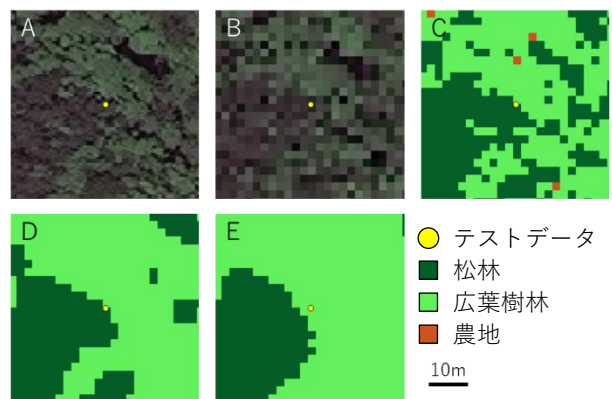


図-6 ゴマ塩ノイズ除去処理により不正解となる例 (RF 予測モデル (解像度 2.0m)、正解：松林)

A：元画像、B：圧縮画像、C：無処理（松林）、D：5×5（松林）、E：9×9（広葉樹林）

次に、各予測モデルにおける予測精度については、元画像と圧縮画像、RFとSVMのいずれの組み合わせにおいても、約8割の精度で予測ができることが示された。特に、解像度を2.0mに圧縮した場合でも、予測精度が同等であったことは、広範囲で森林資源の情報を解析する際に、処理の高速化・省力化の面から有用であると考えられる。

さらに、各予測モデルにより作成した土地区分の予測分類図について、ゴマ塩ノイズの除去を行ったうえで予測精度を検証したところ、いずれの予測モデルにおいてもゴマ塩ノイズの除去により正答率が向上し、最も正答率の高い予測分類図（画像：圧縮画像、機械学習法：RF、ゴマ塩ノイズ除去処理サイズ：5×5）で正答率88%となった。一方で、ゴマ塩ノイズの除去を行うことで、土地区分の境界が緩いカーブを描くように補正がかかり、境界付近の正答率が低下することが示唆された。また、解析対象木の樹冠サイズを大幅に超えるサイズでノイズ除去を行った場合、単木で生えている木をノイズとして除去してしまう恐れがある。これらのことから、より正確な面積割合を予測したい場合や、判読樹種の細分化などに取り組む場合には、ゴマ塩ノイズ除去の処理サイズを大きく設定しすぎないように注意する必要がある。また、本研究では1つのピクセルのRGB値から土地区分の予測を行ったが、さらに予測精度を向上させるためには、正規化植生指数（NDVI）などのマルチスペクトルデータも併せて使用することや、ディープラーニングのアルゴリズムを用いて周囲のピクセルの情報を含めて学習させることなどの検証が必要であると考えられる。

このように本研究では、衛星画像を用いた沖縄の針葉樹の代表種である松林と広葉樹林の分類について検証したが、本県の森林の主体である広葉樹について、分類の細分化を行

った場合に精度よく判読する技術が求められる。このように、他県と植生の異なる沖縄の森林を対象とした各種の森林資源情報の把握に関する精度検証を積み重ねていくことにより、沖縄県におけるスマート林業を実証することが、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、九州大学 農学研究院 森林計画学研究室の溝上教授および太田准教授から解析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ます。

引用文献

- Breiman, L. (2001) Mach. Learn. 45 : 5-32
Cortes, C. and Vapnik, V. (1995) Mach. Learn. 20 : 273-297
泉澤遙ほか (2023) 日本リモートセンシング学会誌 43 : 73-85
岸本咲紀・高嶋敦史 (2024) 九州森林研究 77 : 161-164
望月翔太・村上拓彦 (2016) 統計数理 64 : 93-103
林野庁 (2023) スマート林業実践マニュアル 総集編 : 2-3
林野庁 (2024) 令和5年度 森林・林業白書 : 39
白石則彦 (1999) 森林科学 27 : 35-37

クスノキの乾燥に関する研究

井口 朝道・仲摩 和寛

1. はじめに

クスノキはクスノキ科クスノキ属の常緑高木で、常緑広葉樹としては日本最大級の大木になる（大川・林、2016）。日本では関東南部から南西諸島まで分布するが、本来の自生地は九州から屋久島までとされる（大川・林、2016）。沖縄では、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、1751年に法制化された「山奉行所公事帳」の中でクスノキに関する記述がある。当時、中国に渡る唐船用の造船用材の調達が困難な状況の中、クスノキに着目し、種子を採取し各間切りに配布して苗木の生産を指示する内容があるほか、伐木から運搬まで徹底した監視体制の対象となる禁止木（計 21 樹種）の 1 つに指定される等（仲間、2017）、クスノキは琉球王朝時代から重要な木として沖縄の人々に認識されてきたことが分かる。

また近代では全国的にクスノキからの樟脳採取に関心が高まった。クスノキの材からとれる樟脳は、薬用、防虫用として古くから知られていたが、日本国内では元禄年間に薩摩藩で樟脳生産がはじまり、明治からはセルロイドの原料として海外需要が急増し（林野庁研究普及課、1981）、昭和 20 年代まで国有林や公社でクスノキの計画的な造林が行われた（日本林業技術協会、1997）。沖縄においても、戦前までは材の利用よりもむしろ樟脳油を生産するために谷あいの肥沃な土地に盛んに造林され（天野、1985）、名護・やんばる地域では少なくとも 15 カ所で樟脳製造がおこなわれており、中でも今帰仁村呉我山や大宜味村喜如嘉では大規模な村営の樟脳製造の工場が稼働していた（名護市教育委員会、2004）。

現在は、沖縄県の 35 種ある造林樹種の 1 つとして指定されており、記録の残る昭和 60 年から令和 5 年までの期間に用材生産を目的に 74ha（県営林除く）新植されている（沖縄県農林水産部森林管理課、2024）。今帰仁村今泊に位置するクスノキ人工林（調査時 34 年生）における調査結果では、3 つの調査区全てで 300m³/ha を超える良好な材積成長を示し（久高・井口、2025）、今後の収穫および利用が期待される。

近年、沖縄県は、県産木材のブランド化に取り組み、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（沖縄県農林水産部森林管理課、2024）。クスノキはその特有の香りや木目の美しさおよび加工の容易さから県内の小木工事業者から高い評価を得ており（沖縄県農林水産部森林管理課、2022）、飲食店等の家具等にも活用されている（沖縄県農林水産部森林管理課、2022）。

一般に、広葉樹を用材として利用する際は、針葉樹と比較した場合に、乾燥期間の長期化や、乾燥時のくると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。近年、当センターでは本県の有用広葉樹であるホルトノキ（井口・仲摩、2024）、ハマセンダン（井口、2025）、イイギリ（井口・仲摩、2025）、センダン（井口・仲摩、2025）を対象に、急速乾燥試験、人工乾燥試験、および天然乾燥試験を行い樹種毎の乾燥特性の把握を進めている。一方、クスノキについては過去に小試験体を用いた急速乾燥試験により、人工乾燥スケジュールの推定までは行ったものの（嘉手苺、1991）、実際の人工乾燥機を用いた試験や天然乾燥試験はこれまで実施されて

いない。

寸法や人工乾燥の際の目標含水率等の試験方法を統一して乾燥時の材質変化等に関する情報を収集・蓄積し、沖縄県産の有用樹種間の特性の比較を可能にすることは県産木材の利用を推進する上で有意義であると考えます。

そこで、本研究は、クスノキを対象に、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

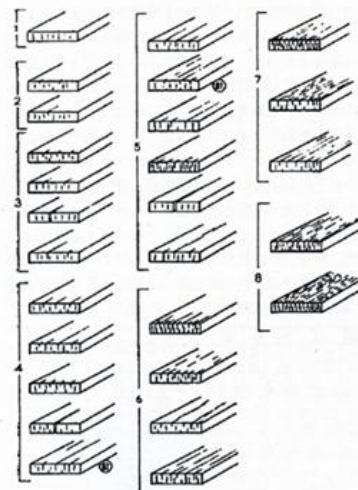
1) 供試材料

試験には 2023 年 11 月上旬に今帰仁村謝名で伐採され、同月の中旬に企業組合キンモク（金武町）に搬入された 5 本の丸太を供試した。12 月 5 日にキンモクにおいて材厚 40mm で製材した後に、以下の 3 種類の乾燥試験を行った。

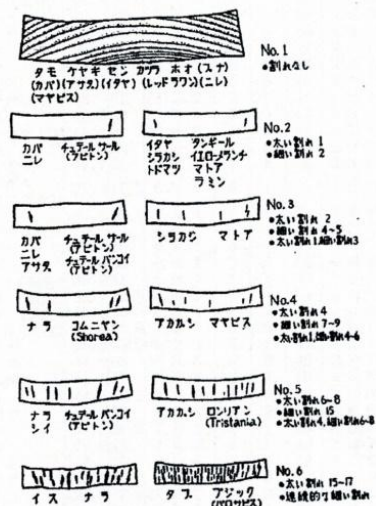
2) 急速乾燥試験

イジュ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、速やかに寸法を 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い、ラップに包んで冷蔵庫で保管した。

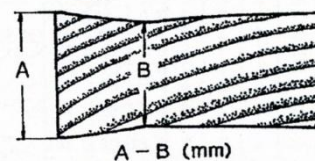
試験は 105℃に調整した恒温乾燥機を用いて、生材から全乾状態まで急速乾燥を行い、その間、試験体に発生する初期割れ、全乾状態に至った時点での断面の糸巻状変形、内部割れを観察・計測し、図-1（寺澤、2004）に従い損傷の段階を評価した。なお、各原木から 1 枚ずつ計 6 枚を同時に試験し、2023 年 12 月 12～14 日（1 回目）、同月 18～20 日（2 回目）の 2 回繰り返し試験を行った後、評価は損傷の種類毎に最も損傷の段階が大きいものを採用した。



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らず、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入ったところが一番薄くなっている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）

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、近年実施している本県の有用樹の試験と合わせるため、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℃になるように一定の速度で調整し、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。

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

3) 人工乾燥試験①

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 35mm（厚さ）×150mm（幅）×600mm（長さ）とした板目材（9枚）、追い柁目材（4枚）および柁目材（6枚）の計 19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、2024年2月14日から試験を開始し、調湿処理を経て3月15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48～71℃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±2%とした。

試験中は、供試個体の平均含水率に該当する試験体2枚、さらに平均値に標準偏差を加えた含水率に相当する3枚を加えた計5枚について、含水率コントロール材（以下、管理材）としてスケジュール管理を行い、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2つ（a、b）を用いて、乾燥終了時点の含水率（a）および厚さ方向の含水率分布（b）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。

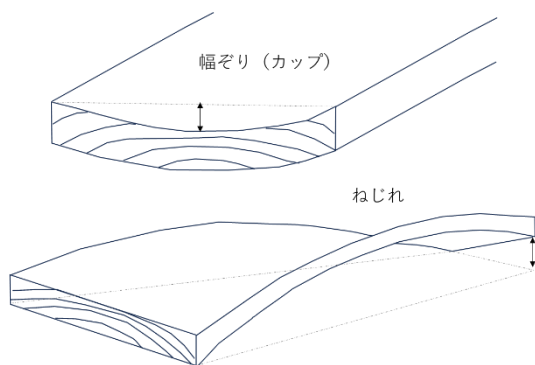


図-2 木材のくるい（幅ぞり、ねじれ）

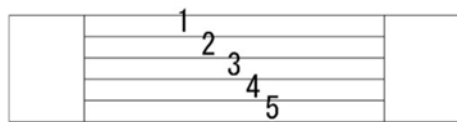


図-3 厚さ方向の含水率分布の試験片の位置の模式図

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）、追い柵目材（7枚）および柵目材（4枚）の計19枚を用いて、2024年1月10日から試験を開始し、調湿処理を経て2月9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

クスノキ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（6枚）、追い柵目材（10枚）、柵目材（3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積み重ねて行った（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。



図-4 天然乾燥試験の積み重ね状況（手前側上段：クスノキ）

2023年12月11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、その後は基本的には1週間に1回の頻度で重量、寸法および割れを計測した。全ての試験体の重量が平衡状態となった2024年6月3日に試験を終了した。ここで、5月1日の計測時に、梅雨の期間中で湿度が高く含水率が高止まりしていたため、計測後は、家庭用除湿機を設置した倉庫内に移動させ、そのまま倉庫内で試験を終了した。

終了時には、人工乾燥試験と同様に幅ぞり、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2つ（a、b）を用いて、乾燥終了時点の含水率（a）および厚さ方向の含水率分布（b）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について解析し、天然乾燥時の乾燥特性について検討した。

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段階は、初期割れ4、断面変形7、内部割れ5

となり、大きな断面変形が生じた（図-5）。

これらを評価し得られた乾燥条件を表-2 に示す。



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：°C)		
		初期温度	初期温度差	終末温度
初期割れ	4	55	3.6	83
断面変形	7	48	2.8	73
内部割れ	5	48	3	71
総合評価		48	2.8	71

また、表-2 の乾燥条件に対応する乾燥初期から終期までの人工乾燥スケジュール①を作成した（表-3）。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-3 人工乾燥スケジュール①

含水率(%)	乾球温度(°C)	温度差(°C)	湿球温度(°C)
生材 to 70	48.0	2.8	45.2
70 to 60	48.0	3.6	44.4
60 to 50	48.0	4.7	43.3
50 to 45	48.0	6.1	41.9
45 to 40	48.0	6.9	41.1
40 to 35	48.0	7.9	40.1
35 to 30	48.0	8.9	39.1
30 to 25	53.0	10.2	42.8
25 to 20	58.0	11.6	46.4
20 to 15	64.0	13.2	50.8
15 to final	71.0	15.0	56.0
Conditioning	71.0	10.0	61.0

表-4 人工乾燥スケジュール②

含水率(%)	乾球温度(°C)	温度差(°C)	湿球温度(°C)
生材 to 70	45.0	2.8	42.2
70 to 60	45.0	3.6	41.4
60 to 50	45.0	4.7	40.3
50 to 45	45.0	6.1	38.9
45 to 40	45.0	6.9	38.1
40 to 35	45.0	7.9	37.1
35 to 30	45.0	8.9	36.1
30 to 25	48.0	10.2	37.8
25 to 20	52.0	11.6	40.4
20 to 15	56.0	13.2	42.8
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：48～71°C）における木目毎の乾燥特性を表-5 に、試験中の管理材(n=5)の含水率の推移を図-6 に示した。生材状態から調湿処理までに30日間を要し、木目毎に平均した最終含水率についてはいずれの木目でも目標含水率の8±2%程度に到達し（表-5）、全供試体で含水率10%以下となった。

次に平均の収縮率について木目毎に見ると、板目・追い柁目材では幅方向（各4.8%、5.1%）、

表-5 人工乾燥試験①における乾燥特性

木目	供試体数 (枚)	乾燥後 平均含水率 (%)	平均収縮率(%)			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)
			長さ方向	厚さ方向	幅方向					
板目	9	6.8%	0.3%	3.5%	4.8%	10.4	1.3	2	7.8	0
追い柵目	4	7.6%	0.2%	5.0%	5.1%	3.1	1.8	2	16.6	0
柵目	6	8.5%	0.1%	6.5%	4.0%	4.4	1.9	4	16.0	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 (木表、木裏の合計値)

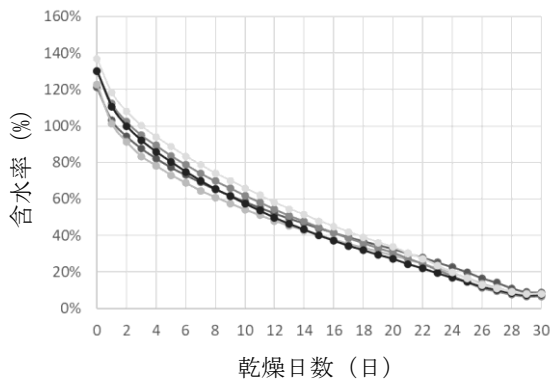


図-6 管理材の人工乾燥中の含水率の推移

柵目材では厚さ方向 (6.5%) とそれぞれ木材の接線方向でより大きくなる傾向がみられたが、既往の研究 (井口・仲摩、2024 ; 井口、2025 ; 井口・仲摩、2025 ; 井口・仲摩、2025) における概ね同様の温度帯での結果と比較した場合、クスノキは収縮が中程度の樹種であると判断された (表-5、表-6)。

表-6 人工乾燥試験における樹種別の乾燥特性 (既往の成果を一部抜粋)

樹種 温度 (°C)	木目 (供試体数)	平均収縮率(%)		平均 ねじれ (mm)	平均 幅そり (mm)
		厚さ方向	幅方向		
ホルトノキ 45~70	板目 (8)	3.3%	6.3%	4.3	1.6
	追い柵目 (2)	5.2%	4.1%	5.0	1.0
	柵目 (3)	6.3%	3.8%	6.0	0.9
ハマセンダン 48~73	板目 (1)	5.0%	7.2%	1.0	1.2
	追い柵目 (8)	4.9%	7.6%	5.1	5.1
イイギリ 60~85	板目 (8)	2.6%	4.8%	2.7	1.6
	追い柵 (12)	3.3%	4.1%	1.8	1.9
センダン 58~83	板目 (10)	3.4%	5.0%	3.4	1.0
	追い柵目 (9)	3.8%	4.4%	2.3	1.5
	柵目 (3)	3.8%	3.1%	1.6	1.7

表面割れは計 8 枚で確認されたが、うち 4 枚は入り皮由来の割れであり、別の 1 枚については剥離のような形態を示し、これらは木取りに原因があり乾燥方法が要因によるものではないと考えられた。

平均のくるいについては、幅そりは 1.3~1.9mm と特段大きい値を示さなかったが、ねじれについては、板目では平均が 10mm を超え、利用する上で欠点となる大きくなるいが一部の材で確認された (表-5)。既往の研究での対象樹種の中では、クスノキは板目材でのねじれが大きい樹種であると判断された (表-6)。なお、内部割れは確認されなかった。

続いて試験終了時の厚さ方向の試験片の位置毎の含水率分布を図-7 に示す。板目材は、全体的に含水率が低く、乾燥が遅い材内部 (試験片の位置 : 2~4) の含水率も 6.1~10.3% と概ね十分に乾燥が進んでいた。柵目材では材

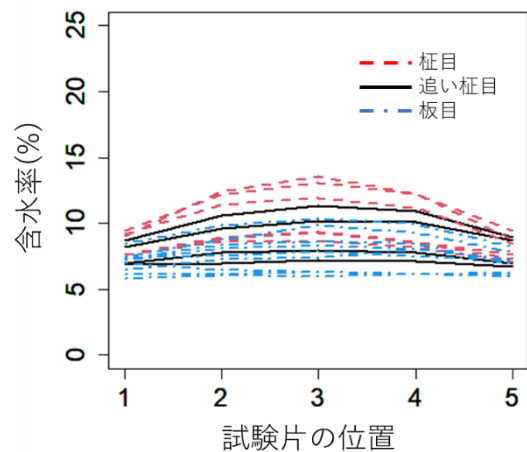


図-7 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

内部の含水率が 8.6~13.6%となり 10%以上のものが複数見られた。最も含水率が高い位置において10%以下となり、適切に材内部まで乾燥が進んでいる供試体数は、板目材 (8/9)、追い柵目 (3/4)、柵目 (3/6) と木目による差が見られ、全体では 19 枚中 14 枚となった。

3) 人工乾燥試験②

人工乾燥試験② (乾燥温度: 45~60°C) における木目毎の乾燥特性を表-7 に、試験中の管理材の含水率 (n=5) の推移を図-8 に示す。生材状態から調湿処理までに 30 日間を要し、木目毎に平均した最終含水率については、板目材では 7.5%となり、目標含水率に到達した。一方で、追い柵目材では 10.6%、柵目材では 11.8%となり目標に到達しなかった。含水率 10%以下の供試体は 19 枚中わずか 13 枚に留まった。

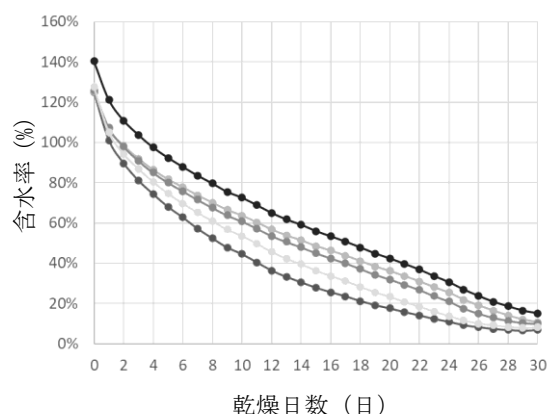


図-8 管理材の人工乾燥中の含水率の経過

収縮率について木目毎に見ると、板目では幅方向 (4.8%)、柵目では厚さ方向 (5.5%) とそれぞれ木材の接線方向でより大きくなる傾

向がみられ、また追い柵目では厚さ方向、幅方向のいずれも 4%程度となり、既往の研究における同様の温度帯での結果と比較した場合、試験①と同様にクスノキは収縮が中程度の部類の樹種であると判断された (表-7、表-8)。

表-8 人工乾燥試験における樹種別の乾燥特性 (既往の成果を一部抜粋)

樹種	木目 (供試体数)	平均収縮率(%)			平均 ねじれ (mm)	平均 幅そり (mm)
		厚さ方向	幅方向	温度 (°C)		
ホルトノキ	板目 (6)	3.5%	6.3%	45~60	8.2	1.3
	追い柵目 (4)	5.1%	5.2%	8.7	1.6	
	柵目 (3)	6.8%	3.6%	7.1	2.1	
ハマセンダン	板目 (1)	3.8%	3.7%	0.9	1.0	
	追い柵目 (9)	3.9%	4.8%	3.8	1.7	
イイギリ	板目 (10)	2.4%	4.0%	2.1	1.4	
	追い柵目 (10)	3.1%	3.4%	2.3	1.7	
センダン	板目 (8)	3.3%	4.3%	1.7	1.1	
	45~60	追い柵目 (13)	3.3%	4.0%	2.0	1.4
			柵目 (1)	5.1%	3.4%	3.2

表面割れは計 5 枚で確認されたが、うち 2 枚については樹芯由来の割れ、1 枚は剥離のような形態を示し、いずれも乾燥前から確認されており、人工乾燥が原因のものではなかった (表-7)。

平均のくるいについては、幅そりは 0.8~1.3mm と特段大きい値を示さなかったが、ねじれについては、板目では平均が 13.2mm となり、利用する上で欠点となる大きくなるが一部の材で確認された (表-5)。既往の研究での対象樹種の中では、クスノキは板目材でのねじれが大きい樹種であると判断された (表-8)。なお、内部割れは確認されなかった。

表-7 人工乾燥試験②における乾燥特性

木目	供試体数 (枚)	乾燥後 平均含水率 (%)	平均収縮率(%)			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)
			長さ方向	厚さ方向	幅方向					
板目	8	7.5%	0.4%	3.4%	4.8%	13.2	1.0	2	23.5	0
追い柵	7	10.6%	0.1%	3.9%	4.0%	3.4	1.3	2	31.3	0
柵目	4	11.8%	0.1%	5.5%	3.2%	2.6	0.8	1	12.5	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 (木表、木裏の合計値)

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。板目材は、他の木目と比較して全体的に含水率は低くなったが、乾燥が遅い材内部（試験片の位置：2～4）の含水率は 7.8～12.6%と 10%を超える供試体も複数確認された。追い柵目材および柵目材では材内部の含水率が 11.9～23.0%（柵目材）、10.0～24.0%（追い柵目材）と乾燥が不十分であった。最も含水率が高い位置において10%以下となり、適切に内部まで乾燥が進んでいる供試体数は、木目毎に、板目（5/8）、追い柵（0/7）、柵目（0/4）と板目以外は乾燥が不十分で、全体では 19 枚中 5 枚に留まった。

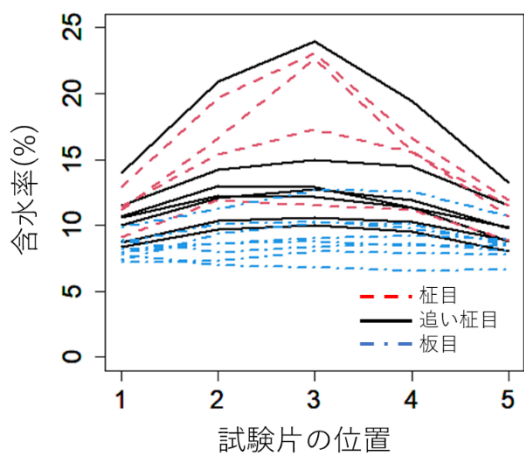


図-9 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

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 回の人工乾燥試験を行った。乾燥終了までに要した日数は終末温度が高いスケジュール①、より緩やかなスケジュール②のいずれも 30 日（図-6、図-8）となり、日数上は終末温度をより高温にすることでスケジュールの短縮効果は確認されなかった。しかし、木目毎に終了時の厚さ方向の含水率分布をみると、スケジュール②では、追い柵目、柵目では材内部が含水率 10%に到達している供試体が全くなく、全体でも 19 枚中 5 枚となり（図-9）、スケジュール①の 19 枚中 14 枚（図-7）と比較し大幅に減少し、

乾燥が不十分な状況がより顕著となった。また、木目に着目すると、一般的に、広葉樹材では板目材の乾燥速度は柵目材より大きいものが多いとされるが（信田・河崎、2020）、クスノキも同様に板目は、追い柵目・柵目と比較して乾燥が早いことが明らかとなった（図-7、図-9）。全ての木目において材内部まで適切に乾燥を終了させるためには、乾燥速度を考慮し、板目と追い柵目・柵目を分けて乾燥を行うことが望ましいと考えられるが、乾燥の早い板目においても 30 日程度の長期間の人工乾燥を必要とし、乾燥コストが増大するため、クスノキを生材から人工乾燥することは現実的ではないと考えられた。

続いて 2 つのスケジュールの違いによる木材のくりにについて図-10 に示す。

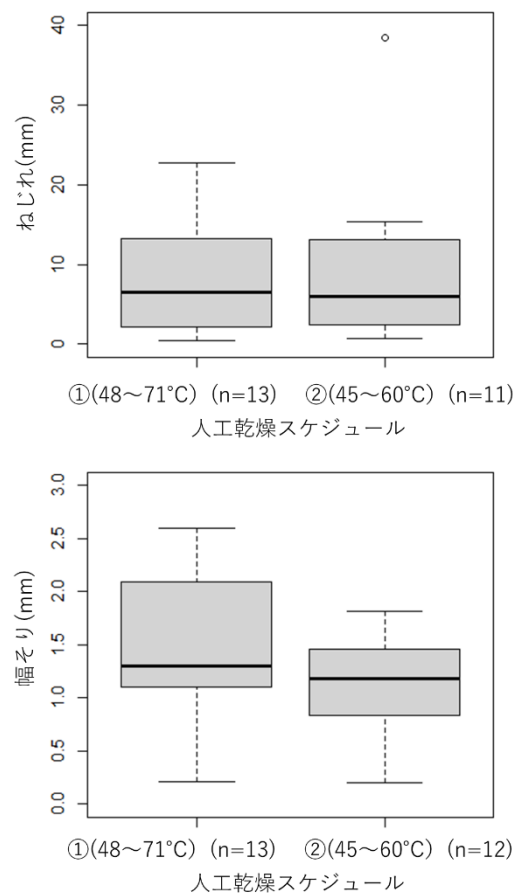


図-10 スケジュール毎のくりに
（上：ねじれ、下：幅そり）

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、解析対象は柾目材を除いた板目および追い柾目材のうち、小試験片 (a) の含水率が目標含水率の $8 \pm 2\%$ を満たしているものとした。ねじれ、幅そりともに両スケジュール間では有意な差は見られなかった (ウェルチの t 検定、 $p > 0.05$)。

表面割れは、スケジュール①では 8 枚 (表-5)、スケジュール②では 5 枚確認されたが (表-7)、ともに入皮や樹芯由来であるものが多かったことから、乾燥条件による大きな差はないと考えられた。

内部割れ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低下させる欠点である。100℃の急速乾燥試験では内部割れが発生したが、人工乾燥試験ではいずれのスケジュールでも内部割れは確認されず、70℃までの温度帯であれば内部割れのリスクは低いと判断された。

5) 天然乾燥試験

供試した 19 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-9)。試験終了時の平均含水率は、除湿倉庫に移動させた後、試験を終了したこともあり、梅雨の期間中であったが、いずれも日本の一般的な気乾含水率である 15.0~15.5%であった。

方向別の平均収縮率は、板目・追い柾目材では幅方向 (2.7%、2.0%)、柾目材では厚さ方向 (2.7%) とそれぞれ木材の接線方向でより大きくなる傾向がみられたが国産の主要な広葉

樹材 (3.9~8.9%、含水率 15%まで) (信田・河崎、2020) と比較して低い値であった。くるいについては、ねじれは板目で平均 5 mm程度とやや大きくなったが、幅そりは木目を問わず 0.8mm以下であった。表面割れは、計 4 枚で確認されたが、入り皮や節の影響によるものがあり、それ以外で目立った割れは確認されなかった。また、内部割れはなかった。

次に図-11 に天然乾燥中の含水率の推移を示す。供試体の含水率は、2023 年の 12 月上旬の試験開始時は 75~150%程度であったが、緩やかに乾燥が進み、133 日目 (4 月 22 日) に平均含水率 18.4%まで低下した。その後梅雨入りによる湿度上昇の影響を受け 142 日目 (5 月 1 日) に含水率がわずかに増加したため、測定後に除湿室に移動させた。その後は、再び緩やかに乾燥が進み、開始後 161 日目 (5 月 20 日) で、平均含水率 15.2%と最も低下し、その後、平衡状態となり 175 日目 (6 月 3 日) の終了時には 15.3%となった。

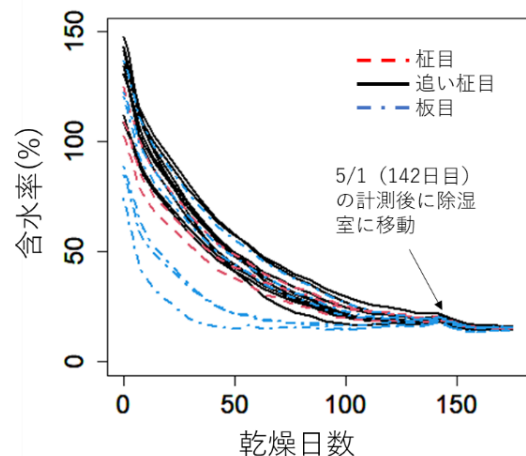


表-9 天然乾燥試験における乾燥特性

木目	供試体数 (枚)	乾燥後 平均含水率 (%)	平均収縮率 (%)			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)
			長さ方向	厚さ方向	幅方向					
板目	6	15.0%	0.2%	1.7%	2.7%	4.8	0.8	1	15.0	0
追い柾	10	15.5%	0.0%	2.0%	2.2%	3.2	0.4	2	22.4	0
柾目	3	15.4%	0.1%	2.7%	1.7%	2.1	0.3	1	11.4	0

試験終了時の厚さ方向の含水率分布については、材中央部が材表面と比較してやや高い傾向は確認され、厚さ方向の試験片の位置による含水率差が 1%程度に抑えられている供試体は、19 枚中 8 枚となり、木目による大きな差は見られなかった（図-12）。

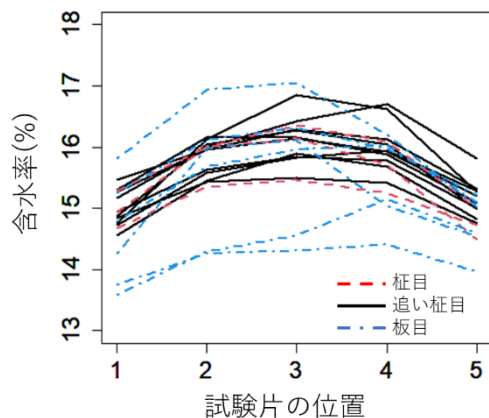


図-12 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

4. まとめ

本報ではクスノキ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。

天然乾燥試験は、2023 年 12 月 11 日～2024 年 6 月 3 日の期間に行い、乾燥終期は梅雨の影響を受けたが除湿機を使用することでその影響を低減しながら実施した。初期の含水率が 150%程度までの厚さ 35mm の材は、平衡状態に達するまで約 160 日を要し、クスノキは長期の乾燥期間を必要とする樹種であることが判明した。

また、生材から人工乾燥を行った場合は、乾燥温度を高く設定した条件においても 30 日間を要したにも関わらず、柾目・追い柾目では、材内部まで目標含水率の $8 \pm 2\%$ まで到達しない供試体も複数見られ、乾燥日数が不足していた。以上の結果から、クスノキは、乾燥の速

度が遅い樹種であると考えられ、生材から直接人工乾燥を行うことは、乾燥コストの増大を招くため、あらかじめ天然乾燥により一定程度含水率を低下させた上で人工乾燥を実施することを推奨する。

さらに、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 35mm の板材での結果であり、60 mmを超えるような厚みのある板材での適応は困難である。そのため、行政、事業者からの要望に応じて、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おり、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、他の主要な沖縄県産樹種を対象に、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ます。

引用文献

天野 鉄夫 (1985) 沖縄産有用木材の性質と利用 : 51-53

- 井口朝道 (2025) 沖縄県森研セ研報 65 : 37-46
- 井口朝道・仲摩和寛 (2024) 沖縄県森研セ研報
64 : 1-10
- 井口朝道・仲摩和寛 (2025) 沖縄県森研セ研報
65 : 47-56
- 井口朝道・仲摩和寛 (2025) 沖縄県森研セ研報
65 : 57-66
- 久高梢子・井口朝道 (2025) 沖縄県森研セ研報
65 : 27-33
- 嘉手苧幸男 (1991) 沖縄県林試研報 34 : 48-55
- 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 (2022) おきなわ
の木 木のある暮らし編改訂版:7、10
- 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:17、40
- 大川智史・林将之 (2016) ネイチャーガイド琉
球の樹木:42
- 寺澤眞 (2004) 木材乾燥のすべて—改訂増補版
— : 230-246、394-402
- 日本林業技術協会 (1997) 林業技術 661 : 24
- 林野庁研究普及課 (1981) 広葉樹林とその施
業 : 262
- 仲間勇栄 (2017) 蔡温と林政八書の世界:177、
198-201
- 名護市教育委員会 (2004) クスノキ製造-久志
大川ダム建設に伴う久志大川上流域生産遺
跡緊急発掘調査報告書 : 84-85、88

リュウキュウマツの乾燥に関する研究

井口 朝道・合田 雅浩

1. はじめに

リュウキュウマツは本県唯一のマツ科マツ属の常緑高木で、トカラ列島から先島諸島に分布する南西諸島の固有種である（大川・林、2016）。沖縄全島に広く分布し、松並木の美しい枝ぶりは沖縄を象徴する景観を作り出し、経済的価値も高いことから1967年に県木に指定された。本県の森林資源は、民有林総蓄積量10,133千 m^3 のうちリュウキュウマツを含む針葉樹の材積は28%にあたる2,840千 m^3 であり、沖縄県は広葉樹主体の森林となっている（沖縄県農林水産部森林管理課、2024）。しかし、本県の主林業地域である沖縄島北部地域において、単一樹種別に資源量をみると、やんばるの森の優占種であるイタジイ（1,492千 m^3 ）に次いで、リュウキュウマツの材積が968千 m^3 となり、針葉樹材積の95%以上を占めることから（沖縄県、2023）、資源量の観点から非常に重要な樹種である。

リュウキュウマツの木材利用については、古くは琉球王朝時代に木造船材、糖業における黒糖樽材や燃料、かつお節製造用燃料として利用されてきたが、シロアリに食害されやすいため、建築材への使用はされなかったとされる（天野、1985）。一方、近年では、沖縄県は、県産木材のブランド化に取り組み、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おり（沖縄県農林水産部森林管理課、2024）、リュウキュウマツはその木目の美しさや県木であることから小木工事業者から高い評価を得ており（沖縄県農林水産部森林管理課、2022）、また広葉樹と比較した場合に通直性に優れるため、沖縄県立図書館、国頭村役場、石垣市

役所などの公共建築物における内装材や家具材としても活用されている（沖縄県農林水産部森林管理課、2022）。

このように、リュウキュウマツは本県にとって非常に有用な樹種であることから、当センター（旧沖縄県林業試験場）においては、小試験体を用いた急速乾燥試験（嘉手苅、1986）や、厚さ2.5~3.1cm、幅15~20cm、長さ160cmの板材を用いた人工乾燥試験（嘉手苅、1987）を実施し、含水率15%程度に低下させる時間を明らかにした。

一方で、近年は、本県の有用広葉樹であるホルトノキ（井口・仲摩、2024）、ハマセンダン（井口、2025）、イイギリ（井口・仲摩、2025a）、センダン（井口・仲摩、2025b）を対象に、急速乾燥試験、人工乾燥試験、および天然乾燥試験を行い樹種毎の乾燥特性の把握を進めているが、以前のリュウキュウマツの乾燥試験とこれらの近年の広葉樹の試験とでは寸法や人工乾燥の際の目標含水率等の試験方法が異なっているため、樹種間の正確な比較ができない状況にある。

そこで、本研究は、改めてリュウキュウマツを対象に、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2024年3月上旬に国頭村で伐採され、同月の下旬に企業組合キンモク（金武町）に搬入された長さ2mの7本の丸太（No.1~7）を供試した。2024年4月9日にキンモクにおいて材厚40mmで製材した後に、以下の3種類

の乾燥試験を行った。

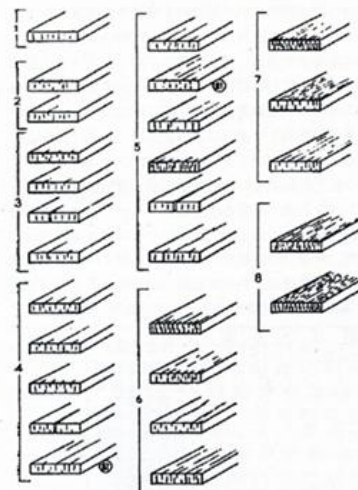
2) 急速乾燥試験

リュウキュウマツ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、4月15日までに寸法を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い、ラップに包んで冷蔵庫で保管した。試験は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7枚を同時に試験し、2024年4月18~19日(1回目)、25~26日(2回目)の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。

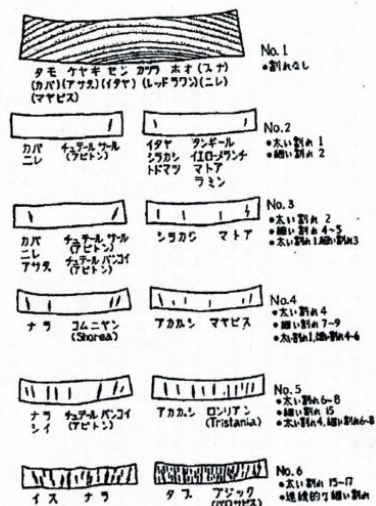
人工乾燥スケジュール条件(初期乾球温度、初期乾湿球温度差、終末乾球温度)は、この各損傷の段階から表-1(寺澤、2004)に準じて、損傷の種類毎に選択された各乾燥条件の中で最も緩やかな条件となる値を採用した。

さらに、近年実施している本県の有用広葉樹の試験と合わせるため、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。

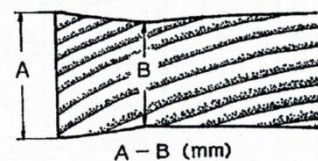
決定した乾燥条件をもとに、初期乾球温度は含水率35%まで一定とし、そこから含水率15%時に終末温度になるように、また乾湿球温度差については、初期含水率の2/3まで一定とし、そこから最終の温度差が15℃になるように調整し、乾燥経過中の含水率に応じた人工乾燥スケジュールを作成した。



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らず、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入ったところ一番薄くなっている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)

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

3) 人工乾燥試験①

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 35mm (厚さ) × 150mm (幅) × 600mm (長さ) とした板目材 (5 枚)、追い柾目材 (10 枚) および柾目材 (6 枚) の計 21 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、2024 年 7 月 31 日から試験を開始し、調湿処理を経て 8 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 50~81℃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±2%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 (以下、管理材) 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。

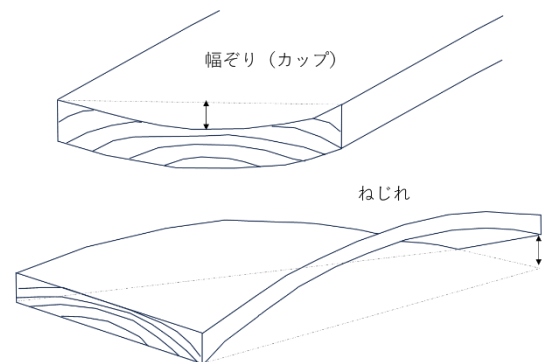


図-2 木材のくるい (幅そり、ねじれ)

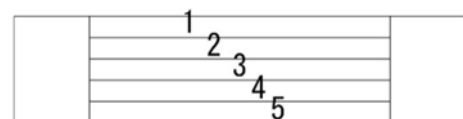


図-3 厚さ方向の含水率分布の試験片の位置の模式図

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℃)

これら进行评估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: °C)		
		初期温度	初期温度差	終末温度
初期割れ	6	50	2.3	81
断面変形	3	58	4.7	83
内部割れ	1	70	6.5	95
総合評価		50	2.3	81

表-3 人工乾燥スケジュール①

含水率(%)	乾球温度(°C)	温度差(°C)	湿球温度(°C)
生材 to 70	50.0	2.3	47.7
70 to 60	50.0	3.1	46.9
60 to 50	50.0	4.1	45.9
50 to 45	50.0	5.5	44.5
45 to 40	50.0	6.3	43.7
40 to 35	50.0	7.3	42.7
35 to 30	50.0	8.4	41.6
30 to 25	56.0	9.7	46.3
25 to 20	64.0	11.2	52.8
20 to 15	72.0	13.0	59.0
15 to final	81.0	15.0	66.0
Conditioning	81.0	9.0	72.0

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(°C)	温度差(°C)	湿球温度(°C)
生材 to 70	45.0	2.3	42.7
70 to 60	45.0	3.1	41.9
60 to 50	45.0	4.1	40.9
50 to 45	45.0	5.5	39.5
45 to 40	45.0	6.3	38.7
40 to 35	45.0	7.3	37.7
35 to 30	45.0	8.4	36.6
30 to 25	48.0	9.7	38.3
25 to 20	52.0	11.2	40.8
20 to 15	56.0	13.0	43.0
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: 50~81°C)における試験中の管理材(n=4)の含水率の推移を図-6に示す。生材状態から7日目に調湿処理を終え、木目毎に平均した最終含水率については、全ての木目において6.1~6.5%となり目標含水率8±2%に到達した(表-5)。

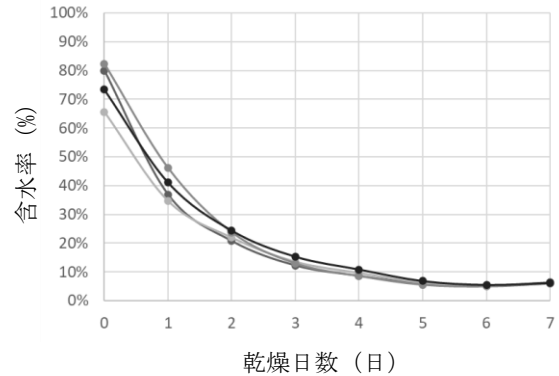


図-6 管理材の人工乾燥中の含水率の推移

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、板目材では幅方向で5.7%(平均値、以下同じ)、柾目材では厚さ方向で6.2%と、木材の接線方向において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10枚で発生したものの、割れ長は11.7~20.3cmと比較的短く、大きく目立つものは少なかった。(表-5)。

平均のくりにについては、幅そりは特段大きい値を示さなかったが、ねじれについては、板目および追い柾目でそれぞれ13.8mm、8.7mmとなり、利用する上で欠点となる大きなくりが一部に確認された。内部割れは確認されなかった。(表-5)。

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。木目を問わず、全ての材において乾燥が遅い材内部(試験片の位置:2~4)の含水率も6.4~8.3%と十分に乾燥が進んでいた。また、コンディショニングの効果によ

表-5 人工乾燥試験①における乾燥特性

木目	供試体数 (枚)	乾燥後 平均含水率 (%)	平均収縮率(%)			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)
			長さ方向	厚さ方向	幅方向					
板目	5	6.1%	0.2%	5.7%	5.7%	13.8	0.7	5	12.0	0
追い柵目	10	6.4%	0.3%	5.1%	5.1%	8.7	1.3	3	20.3	0
柵目	6	6.5%	0.2%	6.2%	4.3%	3.0	0.8	2	11.7	0

* 平均表面割れは割れた供試体のみでの平均値（木表、木裏の合計値）。天然乾燥も同様。

り、材中央部より材表面の含水率がやや高くなる供試体も複数確認された。最も含水率が高い位置において 10%以下となり、内部まで適切に乾燥が進んでいると考えられる供試体数は、木目毎に、板目材(5/5)、追い柵(10/10)、柵目(6/6)と木目を問わず全てであった。

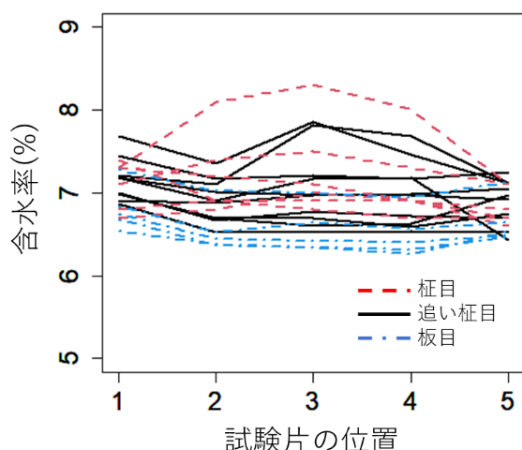


図-7 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

3) 人工乾燥試験②

人工乾燥試験②（乾燥温度：45～60℃）における木目毎の乾燥特性を表-6 に、また試験中の管理材(n=4)の含水率の推移を図-8 に示す。生材状態から 8 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、全ての木目において 6.9～8.6%と目標含水率 8±2%に到達した（表-6、図-8）。

収縮率について木目毎に見ると、板目材では幅方向で 5.5%、柵目材では厚さ方向で 4.7%とそれぞれ木材の接線方向で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%）と比較して特に大きな値ではなかった。表面割れは計 11 枚で確認され、割れ長は木目毎に 6.6～11.3cm となったが、大きく目立つものは少なかった。くるいについては、幅そりは特段大きい値を示さなかったが、ねじれについては、板目材で 12.7mm、追い柵目で 9.9mm となり、利用する上で欠点となる大きなくらいが一部に確認された。また内部割れは確認されなかった（表-6）。

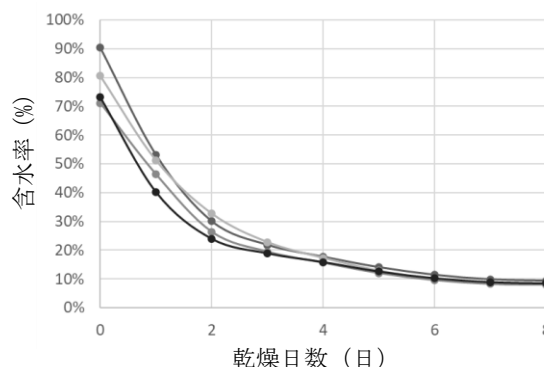


図-8 管理材の人工乾燥中の含水率の経過

表-6 人工乾燥試験②における乾燥特性

木目	供試体数 (枚)	乾燥後 平均含水率 (%)	平均収縮率(%)			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)
			長さ方向	厚さ方向	幅方向					
板目	4	6.9%	0.1%	4.8%	5.5%	12.7	1.3	2	6.6	0
追い柵目	10	7.8%	0.2%	4.7%	4.7%	9.9	1.4	5	11.3	0
柵目	7	8.6%	0.3%	4.7%	3.6%	3.8	0.6	4	11.1	0

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。板目材は、全体的に含水率は低く、乾燥が遅い材内部（試験片の位置：2~4）の含水率も7.1~8.5%と十分に乾燥が進んでいた。柾目材では材内部の含水率が7.9~12.6%と高留りしているものが一部に見られた。最も含水率が高い位置において10%以下となり、内部まで適切に乾燥が進んでいると考えられる供試体数は、木目毎に、板目材（4/4）、追い柾（6/10）、柾目（3/7）と木目による差が大きく、全体では21枚中13枚に留まった。一般に、広葉樹材では板目材の乾燥速度は柾目材より大きいものが多い一方で、針葉樹では両者の差があまり明らかではないとされるが（信田・河崎、2020）、人工乾燥試験②においては広葉樹と同様に柾目で乾燥が進みにくい性質が見られた。

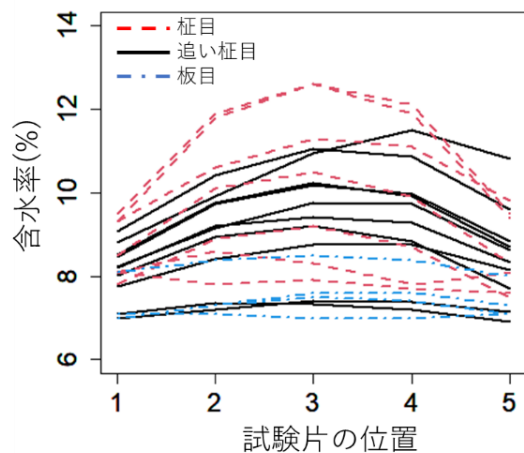


図-9 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

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。乾燥終了までに要した日数は終末温度が高いスケジュール①では7日（図-6）、より緩やかなスケジュール②では8日（図-8）となり、終末温度を81℃と高温とすることでスケジュールはわずかではあるが1日短縮された。さらに、材の中心部の含水率が10%以下に到達している供試体数について

みると、スケジュール①では21枚中21枚と木目を問わず全てであったが、スケジュール②では、乾燥速度が小さい柾目材を中心に到達していないものがあり、21枚中13枚に留まった。このことから、乾燥日数の差以上に、乾燥温度を高温にした効果があったと思慮された。今回の初期含水率（90%程度まで）の場合には、乾燥温度を最大81℃と高温に設定することにより、リュウキュウマツは1週間程度での人工乾燥が十分可能と考えられ、乾燥速度は、ハマセンダン（井口、2025）、イイギリ（井口・仲摩、2025a）、センダン（井口・仲摩、2025b）の早生樹種と同程度であると判断された。

次に2つのスケジュールの違いによる木材のくりについて図-10に示す。

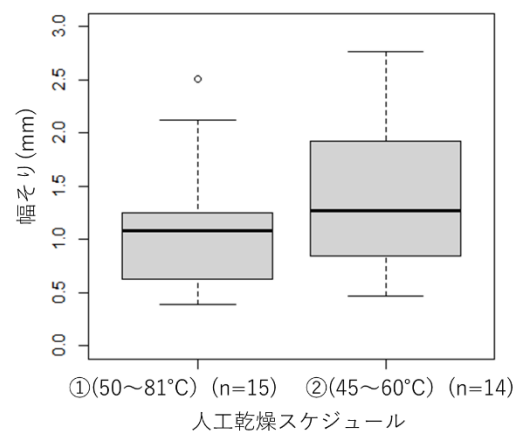
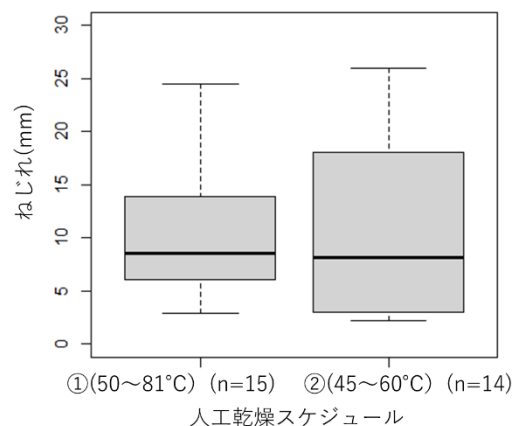


図-10 スケジュール毎のくりに
（上：ねじれ、下：幅そり）

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、解析対象は柾目材を除いた板目および追い柾目材のうち、全体の含水率が目標含水率の $8 \pm 2\%$ を満たしているものとした。ねじれ、幅そりともに両スケジュール間で有意な差は見られず（ウェルチの t 検定、 $p > 0.05$ ）、温度帯を高温にしたことによる顕著な欠点は確認されなかった。

表面割れは、スケジュール①では 10 枚（表-5）、スケジュール②では 11 枚確認されたが（表-6）、ともに大きく目立つものは少なく、乾燥条件による大きな差はないと考えられた。

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。今回、いずれのスケジュールにおいても 1 枚も確認されず、高温帯の乾燥でもリュウキュウマツは内部割れのリスクが小さい樹種であると判断された。

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日本の一般的な気乾含水率である約 15%程度であった。方向別の平均収縮率は、板目・追い柾目材では幅方向、柾目材では厚さ方向とそれぞれ木材の接線方向でより大きくなる傾向がみられ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。平均のくるいについては、幅そりは 0.3～0.9mm と小さい値を示したが、ねじれ

については追い柾で 6.6mm となり、利用する上で欠点となるやや大きくなるいが 10 枚中 2 枚に確認された。表面割れは、乾燥初期に板目材で 2 枚、追い柾目材で 1 枚確認されたが、終了時点では割れが閉じかけており目立つものはなかった。内部割れは確認されなかった。

次に図-11 に天然乾燥中の含水率の推移を示す。初期含水率は概ね 70～100%前後であったが、開始後 28 日目には全ての試験体で含水率が 20%程度まで低下した。それ以降は梅雨の影響を受け含水率の減少は停滞したが、梅雨明けし元の環境に戻した後は 1 週間で平衡状態に到達し、15%程度となった。

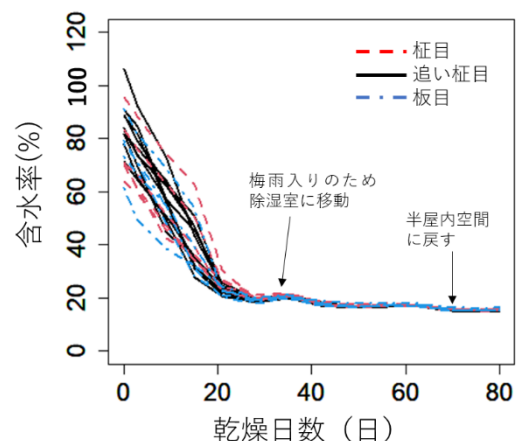


図-11 天然乾燥中の含水率の推移

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。多くの試験体で繊維飽和点付近とされる含水率が 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。

試験終了時の厚さ方向の含水率分布については、材中央部が材表面と比較してやや高い

表-7 天然乾燥試験における乾燥特性

木目	供試体数 (枚)	乾燥後 平均含水率(%)	平均収縮率(%)			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)
			長さ方向	厚さ方向	幅方向					
板目	5	15.6%	0.1%	3.0%	3.1%	3.0	0.3	1	28.9	0
追い柾目	10	15.5%	0.0%	3.3%	3.5%	6.6	0.9	2	14.7	0
柾目	6	15.7%	0.1%	3.2%	2.4%	2.6	0.3	0	-	0

傾向は確認されたものの、木目を問わず含水率差は全てで1%未満に抑えられており、材内部まで天然乾燥の下では十分に乾燥が進んでいると判断された（図-13）。

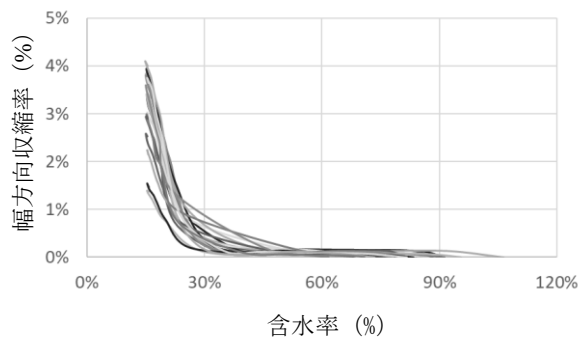


図-12 含水率と幅方向の収縮率の関係

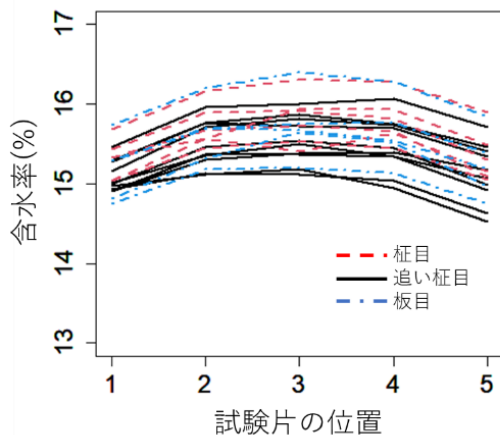


図-13 終了時の試験片の位置毎の含水率分布

4. まとめ

本報ではリュウキュウマツ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。

天然乾燥試験は、2024年4月22日～7月11日と春から夏にかけて行ったところ、初期の含水率が100%程度までの厚さ35mmの材は、途中、梅雨入りの影響を受け乾燥が停滞したものの、平衡状態に達するまで70日程度とな

り、3ヵ月は要しなかった。

生材から人工乾燥を行った場合は、乾燥温度の高い条件（50～81℃）では、木目を問わず全ての供試体において、乾燥が進みにくい材内部までわずか1週間で目標含水率の8±2%に到達した。また、一部の材では大きなねじれが発生したが、その他には目立った割れや幅そりも生じなかったことから、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。なお、リュウキュウマツは天然乾燥に長時間を要すると青変菌の被害のリスクが高まるため、極力、伐倒から製材さらに人工乾燥までを速やかに行うことが求められ、その観点からも生材からの人工乾燥を推奨する。

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35mmの板材での結果であり、60mmを超えるような厚みのある板材での適応は困難である。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ます。

引用文献

天野鉄夫（1985）沖縄産有用木材の性質と利用：29-32
井口朝道（2025）沖縄県森研セ研報 65：37-46
井口朝道・仲摩和寛（2024）沖縄県森研セ研報 64：1-10
井口朝道・仲摩和寛（2025a）沖縄県森研セ研報 65：47-56

井口朝道・仲摩和寛（2025b）沖縄県森研セ研報 65：57-66
嘉手苺幸男（1986）沖縄県林試研報 29：35-45
嘉手苺幸男（1987）沖縄県林試研報 30：111-115
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（2023）沖縄北部地域森林計画書 計画期間 [令和6年～16年]：84
沖縄県農林水産部森林管理課（2022）おきなわの木 木のある暮らし編改訂版：7、18-20
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：1、40
大川智史・林将之（2016）ネイチャーガイド 琉球の樹木：27
寺澤眞（2004）木材乾燥のすべて—改訂増補版—：230-246、394-402