

(資 料)

ミズナラ・クリフローリング材の人工乾燥技術の開発

森 諒平

Development of kiln drying method for flooring materials of *Quercus crispula* and Chestnut
Ryohei MORI**要 旨**

100℃試験法によりミズナラとクリの乾燥スケジュールを作成するとともに、広葉樹無垢フローリング材を想定した実大板材による乾燥試験を実施し、含水率推移の観察及び乾燥による割れや狂い等を評価した。乾燥スケジュール作成の結果、ミズナラでは主に乾球温度と乾湿球温度差が異なる7条件の乾燥スケジュールが得られ、クリでは主に初期含水率区分が異なる4条件の乾燥スケジュールが得られた。また、100℃試験法の試験体の約8割が適合又は緩やかな条件となる乾燥スケジュールを用いて乾燥試験を行い、生材から含水率8%まで乾燥したところ、乾燥時間はミズナラで447時間、クリで334時間を要した。さらに、乾燥による割れについて日本農林規格の広葉樹製材の品質基準に基づき区分したところ、ミズナラの約6割、クリの約8割が特等及び1等に区分され、本試験で用いた乾燥スケジュールの実用性が確認できた。

キーワード：広葉樹，人工乾燥，乾燥スケジュール，100℃試験法，調湿処理

目 次

1 はじめに	2	3 乾燥スケジュールの実証	7
2 乾燥スケジュールの作成	2	3.1 実験方法	7
2.1 実験方法	2	3.1.1 供試材料	7
2.1.1 供試材料	2	3.1.2 コントロール材の作成	8
2.1.2 初期含水率の測定	2	3.1.3 乾燥方法	8
2.1.3 初期割れの測定	3	3.1.4 乾燥経過の観察	9
2.1.4 断面の糸巻状変形の測定	3	3.1.5 割れや狂い等の測定	9
2.1.5 内部割れの測定	3	3.1.6 含水率の測定	9
2.1.6 乾燥スケジュールの作成方法	3	3.2 結果	9
2.2 結果	4	3.2.1 含水率の推移	9
2.2.1 初期含水率区分	4	3.2.2 割れや狂い等の評価	11
2.2.2 初期割れ区分	5	3.3 考察	13
2.2.3 断面の糸巻状変形区分	5	3.3.1 乾燥スケジュールの適合性	13
2.2.4 内部割れ区分	6	3.3.2 調湿処理の必要性	13
2.2.5 乾燥スケジュールの分布	6	3.3.3 乾燥終期の乾燥方法	13
2.3 考察	7	3.3.4 製材寸法の日安	13
		4 おわりに	13
		引用文献	14

1 はじめに

岩手県の民有林森林面積は約 78 万 ha であり、そのうち広葉樹は約 49%を占める¹⁾。県内で生産される広葉樹は、しいたけ及び木炭生産の原木、建築用材、家具用材、製紙用原料などに利用されており、本県の令和 2 年度の広葉樹素材生産量は 243 千³m³で全国 2 位となっている²⁾。しかし、その内訳は木材チップ用 216 千³m³、製材用 26 千³m³、合板用 1 千³m³であり²⁾、付加価値の高い建築用材や家具用材等としての利用は針葉樹に比べて進んでいない。その理由のひとつとして、広葉樹材の乾燥の難しさが挙げられる。

木材は、空気中の温度と湿度の変化に応じて、放湿、吸湿し、それに伴って収縮、膨張する。そのため、建築用材等に用いる場合は、あらかじめ使用場所に応じた適正な含水率まで乾燥させることで寸法安定を図ることが必要である。適正な含水率は、使用場所の他、用途や室内の冷暖房の有無などによって、必ずしも一定ではないが³⁾、日本農林規格では広葉樹製材の人工乾燥処理を施したものの含水率の基準は、10%以下と 13%以下の 2 種類と定めている⁴⁾。また、乾燥を行うメリットとして、寸法安定の他にも、強度増加や腐朽防止など諸性能の向上が挙げられる³⁾。

広葉樹材の乾燥スケジュールは、樹種や木材の厚さ等により大きく異なり、乾燥スケジュールが適合しないと割れや狂い等が発生し、製材品としての商品価値を損なう。県内で広葉樹材を乾燥した事例はあるが、確立した技術を有していないため、手探りで乾燥が行われ、時間と手間がかかる上、失敗するリスクも大きい。そのため、実用的な広葉樹材乾燥技術の開発が急務となっている。

今回は、広葉樹無垢フローリング材の人工乾燥を想定し、ミズナラとクリの乾燥スケジュールの作成及び実大板材による乾燥試験を実施するとともに、含水率推移の観察及び乾燥による割れや狂い等の評価した。

2 乾燥スケジュールの作成

乾燥スケジュールを作成する方法のひとつに、100℃試験法⁵⁾がある。100℃試験法とは、試験体を急速に乾燥させ、その過程において発生する初期割れ、断面の糸巻状変形及び内部割れといった損傷の程度から、初期温度、初期乾湿球温度差及び終末温度を決定するものである。これまでの

100℃試験法を用いた報告では試験体数が 3 枚程度のものが多いが、一般的に同一樹種でも丸太や採材部位により乾燥による損傷の程度が異なると考えられることから、今回は供試丸太と試験体数を、一度に実験可能な限り増やして試験した。

その後、100℃試験法により決定した初期温度、初期乾湿球温度及び終末温度を米国マヂソン林産研究所の乾燥スケジュール表に照合し、後述する 2.1.1~2.1.6 に示す手順で乾燥スケジュールを作成した⁵⁾。

なお、乾燥スケジュールは、温度スケジュールである乾球温度区分(T 1~T14)と湿度スケジュールである初期含水率区分(A~G)と乾湿球温度差区分(No. 1~8)の組み合わせで示す。温度スケジュールの数字が大きくなるほど高温条件、湿度スケジュールのアルファベットが後のものになるほど、数字が大きくなるほど低温条件となる。

【乾燥スケジュール例】

T 5 C 3

① ② ③

①: 乾球温度区分 (T 1~T14)

②: 初期含水率区分 (A~G)

③: 乾湿球温度差区分 (No. 1~8)

2.1 実験方法

2.1.1 供試材料

表 1 のとおり岩手県産ミズナラ及びクリ丸太を各樹種 3 本(A, B, C)供試した。

供試丸太を製材し得られた板材から、それぞれ節や繊維の乱れがない無欠点板材(材厚 20mm, 材幅 100mm, 材長 200mm)をミズナラ 59 枚, クリ 45 枚採材し、試験体とした。

表 1 供試材料

樹種	本数 (本)	長さ (mm)			平均直径 (mm)※			平均年輪数		
		平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
ミズナラ	3	2285	2336	2236	379	438	323	58	60	56
クリ	3	2286	2311	2273	304	322	274	53	55	52

※平均直径: 元末口の長径, 短径の平均

2.1.2 初期含水率の測定

試験体は、採材直後に初期重量を測定した後、105℃に設定した乾燥機に置き、乾燥を行った。乾燥は 3 日間程度行い、約 12 時間経過しても重量に

変化がなかった時点を変量とし、全乾重量を測定し、初期含水率を算出した。

その後、初期含水率から表2のとおり7段階(A～G)に区分した⁵⁾。

$$U = (W_u - W_0) / W_0 \times 100$$

U : 初期含水率 (%)

W_u : 初期重量 (g)

W₀ : 全乾重量 (g)

表2 初期含水率区分

区分	A	B	C	D
初期含水率 (%)	40以下	40～60	60～80	80～100
区分	E	F	G	
初期含水率 (%)	100～120	120～140	140以上	

(出典) 寺沢 眞 (1994). 木材乾燥のすべて. 海青社: 309.

2.1.3 初期割れの測定

乾燥開始から試験体の木口面と材面の割れの状況を観察し、割れの大きさと本数が最大となった時点初期割れとした。割れの甚だしい一方の木口面を観察し、木口割れ、木口のさげ、独立した面割れ、木口から伸びた面割れの大きさと本数を測定した。

その後、初期割れによる損傷の程度を8段階(No. 1～8)に区分した⁵⁾。

2.1.4 断面の糸巻状変形の測定

試験体の全乾重量を測定した後、試験体の中央部を繊維と直角方向に切断し、切断面の最も厚い部分と最も薄い部分の厚さをノギスにより測定した。

その後、最も厚い部分と最も薄い部分の厚さの差により断面の糸巻状変形の程度を表3のとおり8段階(No. 1～8)に区分した⁵⁾。

表3 断面の糸巻状変形の段階区分

区分	1	2	3	4
厚さの差 (mm)	0～0.3	0.3～0.5	0.5～0.8	0.8～1.2
区分	5	6	7	8
厚さの差 (mm)	1.2～1.8	1.8～2.5	2.5～3.5	3.5以上

(出典) 寺沢 眞 (1994). 木材乾燥のすべて. 海青社: 401.

2.1.5 内部割れの測定

2.1.4により切断した断面の割れを観察し、細い割れと太い割れの本数を測定した。なお、100℃試験法では割れが詳細に定義されていないため、ヘアクラックを細い割れ、割れ幅が視認できるものを太い割れとした。

内部割れによる損傷の程度を、細い割れ1点、太い割れ2点として試験体ごとに合計点を求め、その合計点により表4のとおり6段階(No. 1～6)に区分し、指数化した。

表4 内部割れの段階区分

区分	1	2	3	4	5	6
割れ点数 (点)	0	1～2	3～5	6～9	10～16	17以上

※細い割れ1点/本, 太い割れ2点/本

2.1.6 乾燥スケジュールの作成方法

表5に初期割れ、断面の糸巻状変形及び内部割れの損傷の程度による乾燥条件を示す。

2.1.3から2.1.5で指数化した初期割れ、断面の糸巻状変形及び内部割れの各損傷の程度を表5に照合し、得られた乾燥条件から、最も乾燥条件が緩やかなもの(初期温度、初期温度差及び終末温度がより低いもの)を当該試験体の乾燥条件とし、初期温度、初期温度差及び終末温度を決定した⁵⁾。

表5 損傷の種類と程度による乾燥条件

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

(出典) 寺沢 眞 (1994). 木材乾燥のすべて. 海青社: 402.

表6に乾球温度区分の各含水率範囲における乾球温度を示す。なお、表中の含水率範囲30%以上における乾球温度が各乾球温度区分の初期温度、含水率範囲15%以下における乾球温度が各乾球温度区分の終末温度となる。

乾球温度区分の中から初期温度と終末温度が、

表5により決定した初期温度と終末温度に最も近いものを探し、最も乾燥条件が緩やかなものを当該試験体の乾球温度区分とした。

【乾球温度区分選択の例】

初期温度 54℃, 終末温度 80℃ → T 8

初期温度 49℃, 終末温度 75℃ → T 5

初期温度 45℃, 終末温度 50℃ → T 1

表6 乾球温度区分別の各段階における乾球温度

		(単位:℃)						
含水率範囲 (%)	乾球温度区分 (℃)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
30以上	38	38	43	43	50	50	55	
30~25	40	43	50	50	55	55	60	
25~20	40	50	55	55	60	60	65	
20~15	45	55	60	60	65	65	70	
15以下	50	65	70	80	70	80	70	

		(単位:℃)						
含水率範囲 (%)	乾球温度区分 (℃)							
	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	
30以上	55	60	60	65	70	75	80	
30~25	60	65	65	70	77	80	90	
25~20	65	70	70	70	77	80	90	
20~15	70	70	77	77	80	90	95	
15以下	80	70	80	80	80	90	95	

(出典) 寺沢 眞 (1994). 木材乾燥のすべて. 海青社: 309.

表7に乾湿温度差区分の各乾燥段階における乾湿球温度差を示す。なお、表中の段階1における乾湿球温度差が乾湿球温度差区分ごとの初期乾湿球温度差となる。

乾湿球温度差区分の初期乾湿球温度の中から、表5により決定した初期乾湿球温度差が最も近いものを、当該試験体の乾湿球温度差区分とした。なお、表5により決定した初期乾湿球温度差が乾湿球温度差区分の中間にあたる場合は、区分を3.5, 4.5のように表し、各段階の乾湿球温度差については、2区分の平均値とした。

表7 乾湿球温度差区分別の各段階における温度差

		(単位:℃)							
段階	乾湿球温度差区分 (℃)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1.7	2.2	2.8	3.9	5.6	8.3	11	14	
2	2.2	2.8	3.9	5.6	7.8	11	17	20	
3	3.3	4.4	6.1	8.3	11	17	23	28	
4	5.6	7.8	10.5	14	20	28	28	28	
5	14	17	20	23	28	28	28	28	
6	28	28	28	28	28	28	28	28	

(出典) 寺沢 眞 (1994). 木材乾燥のすべて. 海青社: 310.

表8に初期含水率区分別の各段階開始時の含水率を示す。

2.1.2により指数化した初期含水率区分を表8と照合し、各段階における含水率範囲を求めた。

その後、表8で求めた各段階の含水率範囲と表7で求めた各段階における乾湿球温度差を組み合わせ、湿度スケジュールとした。

表8 初期含水率区分別の各段階開始時の含水率

段階	初期含水率区分 (%)						
	A	B	C	D	E	F	G
1	生~30	生~35	生~40	生~50	生~60	生~70	生~2/3Ua
2	30	35	40	50	60	70	
3	25	30	35	40	50	60	
4	20	25	30	35	40	50	
5	15	20	25	30	35	40	
6	10	15	20	25	30	35	

※Ua: 初期含水率 (%)

(出典) 寺沢 眞 (1994). 木材乾燥のすべて. 海青社: 310.

2.2 結果

2.2.1 初期含水率区分

表9にミズナラ, 表10にクリの初期含水率区分別の出現枚数を示す。

ミズナラの初期含水率は、55.8~75.9% (平均 70.6%) の範囲に分布し、丸太ごとの初期含水率の平均値は約 70% であり、ほとんど差が見られなかった。一方、クリの初期含水率は、94.5~133.3% (平均 111%) の範囲に分布し、丸太ごとの初期含水率の平均値は、クリAが約 120%、クリBは約 110%、クリCは約 100% であった。

初期含水率区分別の出現枚数については、ミズナラは試験体 59 枚中、初期含水率区分Cが 57 枚と最も多く出現した。一方、クリは試験体 45 枚中、初期含水率区分Eが 25 枚と最も多く出現した。ミ

ズナラは、試験体の9割以上が初期含水率区分Cとなり、その他は初期含水率区分Bがわずかに出現する程度であった。一方、クリは、出現頻度の高い初期含水率区分が丸太ごとで異なる結果が得られた。クリAは初期含水率区分F、クリBは初期含水率区分E、クリCは初期含水率区分Dが最も多く出現した。

表9 初期含水率区分別の出現枚数(ミズナラ)

丸太No.	枚数 (枚)	初期含水率(%)			初期含水率区分(枚)	
		平均	最大	最小	B	C
ミズナラA	15	70.4	75.9	63.5	-	15
ミズナラB	24	71.7	75.9	64.4	-	24
ミズナラC	20	69.4	75.9	55.8	2	18
全体	59	70.6	75.9	55.8	2	57

表10 初期含水率区分別の出現枚数(クリ)

丸太No.	枚数 (枚)	初期含水率(%)			初期含水率区分(枚)		
		平均	最大	最小	D	E	F
クリA	15	121.7	133.3	96.1	1	3	11
クリB	17	110.0	119.9	102.7	-	17	-
クリC	13	99.9	107.1	94.5	8	5	-
全体	45	111.0	133.3	94.5	9	25	11

2.2.2 初期割れ区分

表11にミズナラ、表12にクリの初期割れ区分別の出現枚数を示す。

これによると、ミズナラは試験体59枚中、初期割れ区分No. 1が49枚と最も多く出現した。一方、クリは試験体45枚中、初期割れ区分No. 2が25枚と最も多く出現した。

ミズナラの初期割れは、軽微なものが多く、試験体の8割以上が初期割れ区分No. 1であったが、1割程度の試験体で木口のさげや独立した面割れが観察されたため、初期割れ区分No. 4やNo. 5も出現した。一方、クリは、初期含水率区分と同様に丸太ごとで出現頻度が高い区分が異なる結果が得られた。クリAは初期割れ区分No. 1、クリBは初期割れ区分No. 2、クリCは初期割れ区分No. 3が最も多く出現した。

表11 初期割れ区分別の出現枚数(ミズナラ)

丸太No.	枚数 (枚)	初期割れ区分(枚)				
		1	2	3	4	5
ミズナラA	15	14	1	-	-	-
ミズナラB	24	17	2	-	2	3
ミズナラC	20	18	-	-	1	1
全体	59	49	3	-	3	4

表12 初期割れ区分別の出現枚数(クリ)

丸太No.	枚数 (枚)	初期割れ区分(枚)		
		1	2	3
クリA	15	10	5	-
クリB	17	1	16	-
クリC	13	-	4	9
全体	45	11	25	9

2.2.3 断面の糸巻状変形区分

表13にミズナラ、表14にクリの断面の糸巻状変形区分別の出現枚数を示す。

これによると、ミズナラは試験体59枚中、糸巻状変形区分No. 5が21枚、No. 7が20枚とピークが2つ出現した。一方、クリは試験体45枚中、糸巻状変形区分No. 5が23枚と最も多く出現した。

ミズナラの糸巻状変形は、顕著なものも多く、最大3.8mmの厚さの差が観察されたが、わずかに軽微な糸巻状変形も観察されたため、糸巻状変形区分はNo. 4からNo. 8と幅広く出現した。一方、クリは、糸巻状変形による損傷の程度にバラつきは少なく、ほとんどの試験体の糸巻状変形区分はNo. 5とNo. 6であり、その他はNo. 4がわずかに出現した程度であった。

表13 断面の糸巻状変形区分別の出現枚数(ミズナラ)

丸太No.	枚数 (枚)	厚さの差(mm)			糸巻状変形区分(枚)				
		平均	最大	最小	4	5	6	7	8
ミズナラA	15	2.4	3.3	1.4	-	4	4	7	-
ミズナラB	24	2.4	3.8	1.0	2	5	4	11	2
ミズナラC	20	1.8	3.2	1.3	-	12	6	2	-
全体	59	2.2	3.8	1.0	2	21	14	20	2

表 14 断面の糸巻状変形区分別の出現枚数(クリ)

丸太No.	枚数 (枚)	厚さの差(mm)			糸巻状変形区分(枚)		
		平均	最大	最小	4	5	6
クリ A	15	1.8	2.1	1.5	-	6	9
クリ B	17	1.7	2.0	1.2	-	12	5
クリ C	13	1.7	2.0	1.0	1	5	7
全体	45	1.7	2.1	1.0	1	23	21

2.2.4 内部割れ区分

表 15 にミズナラ、表 16 にクリの内部割れ区分別の出現枚数を示す。

これによると、ミズナラは試験体 59 枚中、内部割れ区分 No. 3 と No. 4 が各 15 枚と最も多く出現した。一方、クリは試験体 45 枚中、内部割れ区分 No. 1 が 28 枚と最も多く出現した。

ミズナラの内部割れは、顕著なものが多く、試験体の 2 割以上で太い割れは 5 本以上観察された。一方、クリの内部割れは、軽微なものが多く、7 割以上の試験体で太い割れは観察されなかった。

表 15 内部割れ区分別の出現枚数(ミズナラ)

丸太No.	枚数 (枚)	内部割れ区分(枚)					
		1	2	3	4	5	6
ミズナラ A	15	1	3	5	2	1	3
ミズナラ B	24	3	1	5	9	6	-
ミズナラ C	20	2	5	5	4	4	-
全体	59	6	9	15	15	11	3

表 16 内部割れ区分別の出現枚数(クリ)

丸太No.	枚数 (枚)	内部割れ区分(枚)				
		1	2	3	4	5
クリ A	15	10	1	1	1	2
クリ B	17	6	6	5	-	-
クリ C	13	12	1	-	-	-
全体	45	28	8	6	1	2

2.2.5 乾燥スケジュールの分布

初期割れ、断面の糸巻状変形及び内部割れの損傷の程度を表 5 に照合した結果、ミズナラは試験体の約 6 割が糸巻状変形、約 4 割が内部割れによる損傷の程度が乾燥条件を決定する要因となった。一方、クリは試験体の 9 割以上が糸巻状変形による損傷の程度が乾燥条件を決定する要因となった。

表 17 と図 1 にミズナラの乾燥スケジュール別の出現枚数と分布を示す。

ミズナラは、ほとんどの試験体の初期含水率区分が C であるため、主に乾球温度区分と乾湿球温度差区分が異なる 7 条件の乾燥スケジュールが得られた。得られた乾燥スケジュールの中で、最も緩やかな乾燥条件の T 1 C 2.5 が、乾球温度 38~50℃であるのに対して、最も厳しい乾燥条件の T 8 C 4 は、乾球温度 55~80℃であり、乾燥条件が全く異なる幅の広い乾燥スケジュールが出現した。また、乾燥スケジュールの分布については、試験体 59 枚中、T 5 C 3.5 が 26 枚、T 3 C 3 が 23 枚となり、ピークが 2 つ出現した。

表 17 乾燥スケジュール別の出現枚数(ミズナラ)

丸太No.	枚数 (枚)	乾燥スケジュール(枚)							
		T1 C2.5	T3 C2.5	T3 C3	T3 C3.5	T5 B3.5	T5 C3.5	T8 C4	
ミズナラ A	15	3	-	5	1	-	6	-	
ミズナラ B	24	-	2	13	-	-	7	2	
ミズナラ C	20	-	-	5	-	2	13	-	
全体	59	3	2	23	1	2	26	2	

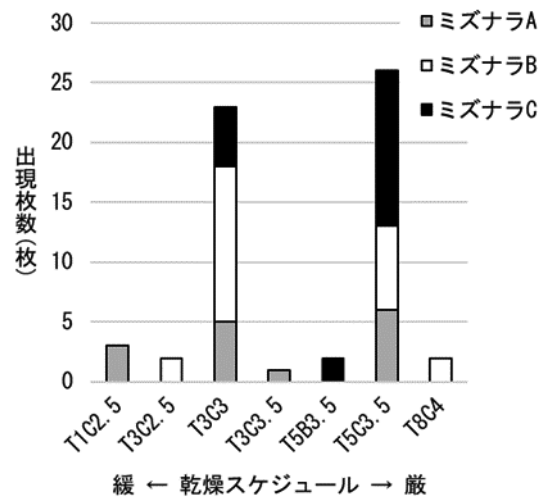


図1 乾燥スケジュールの分布(ミズナラ, n=59)

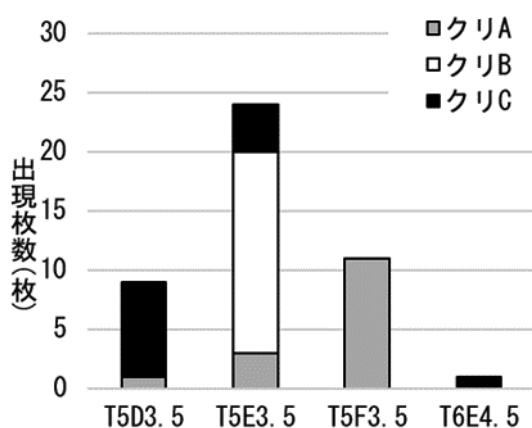
表 18 と図 2 にクリの乾燥スケジュール別の出現枚数と分布を示す。

クリは、ほとんどの試験体の乾球温度区分は T 5、乾湿球温度差区分は 3.5 であるため、主に初期含水率区分が異なる 4 条件の乾燥スケジュールが得られた。乾燥スケジュールの分布については、試験体 45 枚中、T 5 E 3.5 が 24 枚と最も多く出現したが、丸太ごとで出現頻度の高い乾燥スケジュールが異なる結果が得られた。クリ A は T 5 F 3.5、クリ B は T 5 E 3.5、クリ C は T 5 D 3.5 が

最も多く出現した。T 5 F 3.5 と T 5 D 3.5 では、含水率範囲 70～25%における乾湿球温度差と湿球温度が異なり、T 5 F 3.5 がより低湿条件となる。

表 18 乾燥スケジュール別の出現枚数(クリ)

丸太No.	枚数 (枚)	乾燥スケジュール(枚)			
		T5D3.5	T5E3.5	T5F3.5	T6E4.5
クリA	15	1	3	11	-
クリB	17	-	17	-	-
クリC	13	8	4	-	1
全体	45	9	24	11	1



緩 ← 乾燥スケジュール → 厳

図2 乾燥スケジュールの分布(クリ, n=45)

2.3 考察

ミズナラの乾燥スケジュールを検討するにあたり、最も高頻度で出現したT 5 C 3.5 のスケジュールを選択すると、試験体の半数以上にとって厳しい乾燥条件となる。一方、次いで高頻度で出現したT 3 C 3のスケジュールを選択すると、試験体の半数以上にとって緩やかな乾燥条件となる。

また、クリの乾燥スケジュールを検討するにあたり、クリは丸太ごとで出現頻度が高い乾燥スケジュールが異なるため、最も高頻度で出現したT 5 E 3.5 のスケジュールを選択すると、クリBから得られた試験体は全て適合するが、クリAの7割以上にとっては緩やかな条件となり、クリCの6割以上にとっては厳しい条件となる。

適合する乾燥条件より厳しい条件で乾燥した場合、割れや狂い等が発生するリスクが高まる。一

方、適合する乾燥条件より緩やかな条件で乾燥した場合、乾燥日数の増加が予想される。乾燥日数の増加は、燃料コストの増加や乾燥機の回転率低下を招く。したがって、得られた乾燥スケジュールの中から、製材品の品質と乾燥日数の許容範囲を考慮して乾燥スケジュールを選択する必要がある。

今回は、約8割の試験体が適合又は緩やかな条件となる乾燥スケジュール(ミズナラT 3 C 3, クリT 5 E 3.5)を実大板材による乾燥試験の乾燥スケジュールとした。

また、本試験では、供試丸太及び試験体数をこれまでの報告と比べ増やして100℃試験法を実施したが、ミズナラのように試験体間で乾燥スケジュールの分布に大きなバラつきがある樹種を少ない試験体数で試験した場合、各乾燥スケジュールの出現頻度を正確に把握できない恐れがある。

さらに、クリのように丸太ごとで乾燥スケジュールの分布が異なる樹種を1～2本の丸太から得られた試験体で試験した場合、誤った乾燥スケジュールの分布を得る恐れがある。

そのため、100℃試験法により乾燥スケジュールを作成する場合は、供試丸太及び試験体数を増やして行い、対象樹種の正確な乾燥スケジュールの分布を得る必要がある。

3 乾燥スケジュールの実証

前述の実験で導き出された乾燥スケジュールの検証のため、ミズナラ、クリの実大板材の人工乾燥を行い、含水率推移の観察及び割れや狂い等の評価を実施した。

3.1 実験方法

3.1.1 供試材料

岩手県産ミズナラ丸太4本とクリ丸太7本を表19のとおり供試した。

供試丸太から得られた板材(材厚 23mm, 材幅 120mm, 材長 1800mm, 板目)ミズナラ 61 枚, クリ 78 枚を乾燥試験に用いた。なお、木口付近に観察された割れは、可能な限り除去した。

表 19 供試材料

樹種	本数 (本)	長さ (mm)			平均直径 (mm)※			平均年輪数		
		平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
ミズナラ	4	2303	2337	2273	362	402	326	60	63	57
クリ	7	2280	2332	2247	303	366	271	47	53	42

※平均直径：元末口の長径，短径の平均

3.1.2 コントロール材の作成

板材の寸法及び重量を測定し，生材密度を算出した。生材密度が高い板材は高含水率であり乾燥が遅く，生材密度が低い板材は低含水率であり乾燥が早いと想定し，板材の中から生材密度が高い，中庸，低いものを各樹種3枚選定し，乾燥経過を観察するためのコントロール材(A, B, C)とした。

コントロール材は，両木口を300mm以上切り捨てた上で，両木口から長さ20mmの小試験片を採取した後，1000mmに採材し，重量を測定した。また，コントロール材の両木口にシリコーンシーリング材を塗布し，木口からの乾燥を防止した。

小試験片は，初期重量を測定した後，105℃に設定した乾燥機に置き，乾燥を行った。乾燥は2日間程度行い，恒量に達していることを確認した後，全乾重量を測定し，初期含水率を算出した。この含水率の平均を当該コントロール材の推定含水率とし，(1)式により推定全乾重量を算出した。

$$W_0 = W_u / (1 + U/100) \quad \dots (1)$$

$$U = (U_a + U_b) / 2$$

$$U_a = (W_a - W_{a0}) / W_{a0} \times 100$$

※ U_b は U_a と同様の式で求める。

W_0 : コントロール材推定全乾重量 (g)

W_u : コントロール材初期重量 (g)

U : コントロール材推定含水率 (%)

U_a, U_b : 小試験体初期含水率 (%)

W_{a0}, W_{b0} : 小試験体全乾重量 (g)

W_a, W_b : 小試験体初期重量 (g)

3.1.3 乾燥方法

乾燥には(株)新芝設備製蒸気式人工乾燥機を用いた。ミズナラ，クリ板材の積みは，それぞれ断面25×25mmの積木を用い，積木間隔を300mmとし，圧縮のため重石1.6tを載荷して行った。また，乾燥スケジュールは，表20(ミズナラ)，表21(クリ)に示す条件で行い，目標含水率を8%と

した。なお，調湿処理として，板材間の含水率のバラつきを均一化するイコーライジング，材一枚一枚の表層と内部の含水率差を無くし乾燥応力を減少させるコンディショニングを実施した⁶⁾。調湿処理の乾燥条件については，乾球温度の終末温度を維持した上で，イコーライジングが平衡含水率8%，コンディショニングが平衡含水率12%となるように湿球温度を設定した。調湿処理開始のタイミングについては，イコーライジングは含水率が中庸なコントロール材が含水率6%に達した時，コンディショニングは含水率が最も高いコントロール材が含水率8%に達した時とした⁶⁾。コンディショニングは，乾燥応力が除去されるまで続けるとされているが，今回は応力の確認は行わず，24時間実施した。

また，調湿処理終了後は乾燥機を全停止させ，乾燥機を密閉した上で，2日間程度自然冷却させた。乾燥機内の温度が外気と同程度となっていることを確認してから，板材とコントロール材を乾燥機から取り出した。

表 20 ミズナラの乾燥スケジュール(T3C3)

含水率範囲 (%)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)
40以上	43	40	3
40～35	43	39	4
35～30	43	37	6
30～25	50	39	11
25～20	55	35	20
20～15	60	32	28
15以下	70	42	28
イコーライジング	70	60	10
コンディショニング	70	65	5
自然冷却			

※ファン出力 45Hz

表 21 クリの乾燥スケジュール(T5E3.5)

含水率範囲 (%)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)
60以上	50	47	3
60~50	50	45	5
50~40	50	43	7
40~35	50	38	12
35~30	50	28	22
30~25	55	27	28
25~20	60	32	28
20~15	65	37	28
15以下	70	42	28
イコーライジング	70	60	10
コンディショニング	70	65	5
自然冷却			

※ファン出力 45Hz

3.1.4 乾燥経過の観察

コントロール材は、乾燥中に取り出せるように棧積み中央部に設置し、乾燥中は1日2回程度取り出し、重量を測定した。測定した重量と3.1.2で算出した推定全乾重量から(2)式により推定含水率を算出し、乾燥スケジュールの段階を進める参考とした。

$$U = (W_u - W_0) / W_0 \times 100 \quad \dots (2)$$

U : コントロール材含水率 (%)

W_u : コントロール材重量 (g)

W_0 : コントロール材全乾重量 (g)

自然冷却終了後、コントロール材を乾燥機から取り出し、重量を測定した後、105°Cに設定した乾燥機に置き、乾燥を行った。乾燥は5日間程度行い、恒量に達していることを確認した後、全乾重量を測定し、含水率推移を補正した。

3.1.5 割れや狂い等の測定

自然冷却終了後、板材を乾燥機から取り出し、重量を測定した後、室内に棧積みして一週間養生した。養生後は、板材の寸法、重量、割れ長さ、曲がり、縦反り、幅反り、ねじれ及び落込みを測定した。

割れについては、木表、木裏の割れ長さを測定し、長さの合計が大きい方の材面で得られた値を当該板材の代表値とした。また、曲がりと縦反りについては、両木口から糸を張り、糸と板材の距離が最大となる箇所を定規を当て、材長方向の最

大矢高を測定した。幅反りについては、板材の繊維と直角方向に定規を押し当て、板材と定規の間にできる最も大きい隙間にテーパゲージを入れ、幅方向の最大矢高を測定した。ねじれについては、スパン 1600mm で材下部3点を固定した時の残りの1点の浮き高をテーパゲージにより測定した。落込みについては、目視等で有無を確認した。

割れや狂い等の測定後は、割れの測定結果から、日本農林規格に規定される広葉樹製材板類の干割れの品質基準に基づいて板材の等級を区分した。特等及び1等の品質基準は「割れの長さが材面の面積 m^2 の数の25倍のcm以下であるもの。」であり、2等は「顕著でないこと。」である⁴⁾。また、狂い等の測定結果から、板材の約8割を削り残し無く仕上げるために必要な削り代を分析した。

3.1.6 含水率の測定

板材の乾燥直後と養生後の重量を測定した後、板材の両木口を200mm以上切り捨てた上で、両木口から長さ20mmの小試験片を採取した。小試験片は、重量を測定した後、105°Cに設定した乾燥機に置き、乾燥を行った。乾燥は2日間程度行い、恒量に達していることを確認した後、全乾重量を測定し、含水率を算出した。この含水率の平均を当該板材の含水率とし、全乾重量を算出した。その後、全乾重量から乾燥前(初期含水率)、乾燥直後、養生後の含水率を算出した。

$$W_0 = W_u / (1 + U/100)$$

$$U = (U_a + U_b) / 2$$

$$U_a = (W_a - W_{a0}) / W_{a0} \times 100$$

※ U_b は U_a と同様の式で求める。

W_0 : 板材全乾重量 (g)

W_u : 板材重量 (g)

U : 板材含水率 (%)

U_a, U_b : 小試験片含水率 (%)

W_{a0}, W_{b0} : 小試験片全乾重量 (g)

W_a, W_b : 小試験体重量 (g)

3.2 結果

3.2.1 含水率の推移

表22に供試した板材の乾燥前、乾燥直後及び養生後の含水率を示す。また、表23にミズナラ、表24にクリの乾燥スケジュールの各段階に要した時間を示す。さらに、図3にミズナラ、図4にク

りのコントロール材(A, B, C)の含水率推移を示す。なお、図3と図4の図中の①はイコーライジング、②はコンディショニング、③は自然冷却の期間を示している。

板材の初期含水率は、ミズナラで52~84%(平均68%),クリで81~130%(平均99%)であった。乾燥直後の含水率は、ミズナラで9~11%(平均9%),クリで7~10%(平均9%)であり、概ね目標含水率に仕上げることができた。また、乾燥直後と養生後の含水率にほとんど変化は見られなかった。

乾燥時間は、調湿処理及び自然冷却を含めて、ミズナラで447時間、クリで334時間を要した。生材からの乾燥のため、繊維飽和点に達するまでは乾燥スケジュールの段階を進めるのに概ね1~3日を要したが、繊維飽和点以下では、概ね1日以内で乾燥スケジュールの段階を進めた。また、ミズナラについては、調湿処理開始時点で最も含水率が高いコントロール材が含水率12%であり、かつ、調湿処理中は乾燥速度が低下するため、イコーライジングにクリの3倍の時間を要した。

コントロール材の初期含水率は、ミズナラで52~73%,クリで97~104%であり、コントロール材により乾燥初期の乾燥速度が若干異なるものの、初期含水率による含水率の差は、乾燥中も維持したまま推移した。

調湿処理開始時点でのコントロール材の含水率は、ミズナラで5~12%,クリで4~9%であったが、調湿処理により含水率8%に揃うように推移し、特にコンディショニングの期間においては、過乾燥のコントロール材の含水率は戻るように推移したが、含水率8%に達したコントロール材の含水率はほとんど変化が見られなかった。また、自然冷却の期間においても、含水率にほとんど変化は見られなかった。

表 22 仕上がり含水率(板材)

樹種	枚数 (枚)	乾燥前(%)		乾燥直後(%)			養生後(%)			
		平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
ミズナラ	58	68	84	52	9	11	9	10	11	9
クリ	75	99	130	81	9	10	7	9	10	8

表 23 ミズナラの乾燥時間(T3C3)

含水率範囲 (%)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	乾燥時間 (h)
40以上	43	40	96.0
40~35	43	39	39.0
35~30	43	37	48.0
30~25	50	39	29.0
25~20	55	35	19.0
20~15	60	32	25.0
15以下	70	42	23.0
イコーライジング	70	60	72.0
コンディショニング	70	65	24.0
自然冷却			72.0
合計			447.0

表 24 クリの乾燥時間(T5E3.5)

含水率範囲 (%)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	乾燥時間 (h)
60以上	50	47	97.0
60~50	50	45	24.0
50~40	50	43	39.0
40~35	50	38	24.0
35~30	50	28	9.0
30~25	55	27	15.0
25~20	60	32	9.0
20~15	65	37	15.0
15以下	70	42	24.0
イコーライジング	70	60	24.0
コンディショニング	70	65	24.0
自然冷却			30.0
合計			334.0

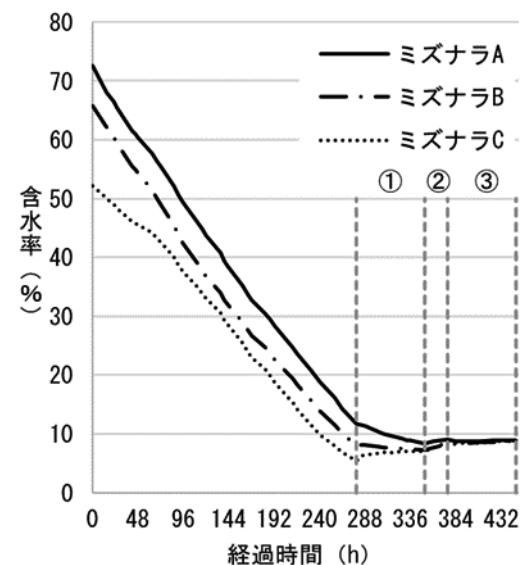


図3 ミズナラの乾燥経過(コントロール材)

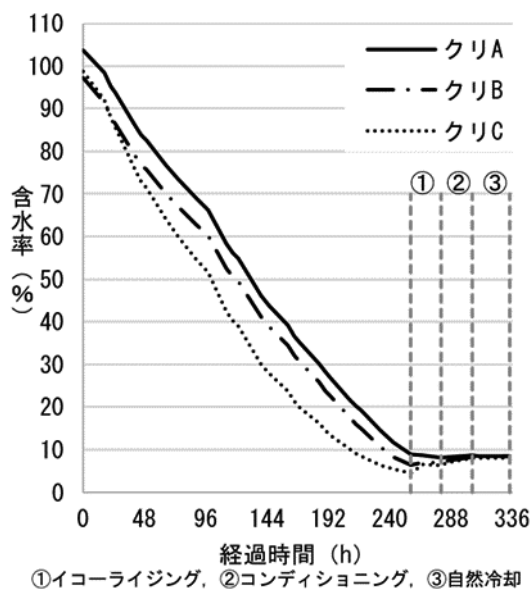


図4 クリの乾燥経過(コントロール材)

3.2.2 割れや狂い等の評価

表 25 にミズナラ, 表 26 にクリの乾燥による板材の割れや狂い等の測定結果を示す。また, 表 27 に材長に対する割れ長さ合計の割合別の出現割合を示す。

割れ長さ合計は, 材長約 1800mm に対して, ミズナラで平均 109mm, クリで平均 31mm となった。

ミズナラは, 材長に対する割れ長さ合計の割合が 1% 以下の板材が 4 割以上, 1~5% の板材が 3 割以上出現し, 概ね軽微な割れであったが, 大節や髓付近では顕著な割れが観察された。特に髓を含む板材では 211~1395mm の割れが観察され, 材長に対する割れ長さ合計の割合が 10% 以上の板材の約 9 割が髓を含む板材であった。髓を含む板材を除いて集計すると, 割れ長さ合計は平均 41mm, 最大 186mm となった。なお, ミズナラにおいては, 乾燥前に除去しきれなかった木口付近の割れが要因となり, 貫通割れが観察された。一方, クリは, 材長に対する割れ長さ合計の割合が 1% 以下の板材が約 5 割, 1~5% の板材が 4 割以上出現し, 全体的に軽微な割れであった。

また, 日本農林規格に規定される広葉樹製材の干割れの品質基準により板材の等級を区分すると, ミズナラは板材 58 枚中 33 枚(約 6 割), クリは板材 75 枚中 59 枚(約 8 割)が特等及び 1 等に区分された。

表 25 ミズナラ板材の乾燥による割れ狂い(n=58)

	曲がり	縦反り	幅反り	ねじれ	割れ	
					(単位: mm)	
					全体	髓除き
平均	7.0	2.4	1.5	0.5	109.2	41.4
最大	24.0	5.0	2.7	3.5	1395.0	186.0
最小	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※落込みは板材11枚に観察された。

※平均材長1790mm, 平均材幅112mm, 平均材厚24mm

表 26 クリ板材の乾燥による割れ狂い(n=75)

	曲がり	縦反り	幅反り	ねじれ	割れ	
					(単位: mm)	
					全体	髓除き
平均	4.9	4.0	1.0	0.8	31.2	25.3
最大	13.0	10.0	2.2	3.3	159.0	130.0
最小	1.0	1.0	0.2	0.0	0.0	0.0

※落込みは観察されなかった。

※平均材長1797mm, 平均材幅115mm, 平均材厚23mm

表 27 割れの程度別の出現割合

樹種	枚数 (枚)	材長に対する割れ長さ合計の割合 (%)				
		1%以下	1~5%	5~10%	10~20%	20%以上
ミズナラ	58	44.8	31.0	12.1	6.9	5.2
クリ	75	49.3	41.3	9.3	-	-

図 5 にミズナラ, 図 6 にクリの曲がりの大きさ別の出現割合を示す。

曲がりは, 材長約 1800mm に対して, ミズナラで平均 7mm, クリで平均 4.9mm となった。ミズナラは, 板材の約 5 割で 4mm 以下の軽微な曲がりが観察された。しかし, 板材の 2 割程度で 10mm 越えの曲がりが観察されるとともに, 最大 24mm の曲がりも観察されるなど部分的に顕著な曲がりが観察された。一方, クリは, 板材の 8 割以上で 6mm 以下の曲がりが観察され, 全体的に曲がりは軽微な傾向を示した。

ミズナラは 10mm 以下, クリは 6mm 以下の曲がりが板材の約 8 割を占めるため, 約 8 割の板材を削り残し無く仕上げるために必要な削り代は, 幅方向にミズナラで 20mm, クリで 12mm となる。

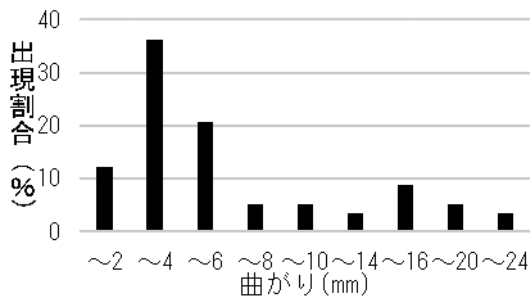


図5 曲がりの出現割合(ミズナラ, n=58)

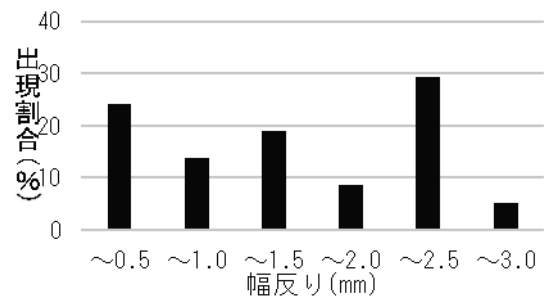


図8 幅反りの出現割合(ミズナラ, n=58)

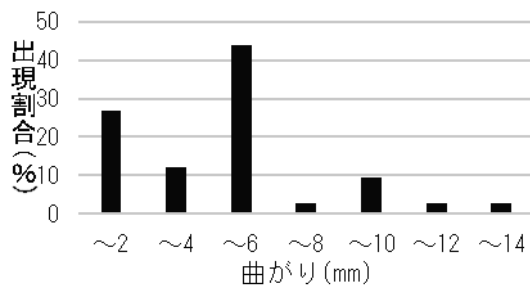


図6 曲がりの出現割合(クリ, n=75)

クリについて、図9に縦反り、図10に幅反りの大きさ別の出現割合を示す。

クリは、縦反りが平均4mm、幅反りが平均1mmとなった。また、縦反りが5mm越えの板材が1割以上観察されるとともに、最大10mmの縦反りが観察されるなど全体的に縦反りが大きい傾向を示した。一方、幅反りは板材の約9割が2mm以下であり、幅反りは軽微な傾向を示した。

クリは、縦反りが5mm以下、幅反りが1.5mm以下の板材が約8割を占めるため、約8割の板材を削り残し無く仕上げるために要な削り代は、厚さ方向に10mmとなる。

また、ねじれは、ミズナラで平均0.5mm、クリで平均0.8mmであり、両樹種とも軽微な傾向を示した。

ミズナラについて、図7に縦反り、図8に幅反りの大きさ別の出現割合を示す。

ミズナラは、縦反りが平均2.4mm、幅反りが平均1.5mmとなった。また、縦反りが5mm越え、幅反りが3mm越えの板材は観察されず、全体的に縦反り、幅反りともに軽微な傾向を示した。

ミズナラは、縦反りが3mm以下、幅反りが2.5mm以下の板材が約8割を占めるため、約8割の板材を削り残し無く仕上げるために必要な削り代は、厚さ方向に6mmとなる。

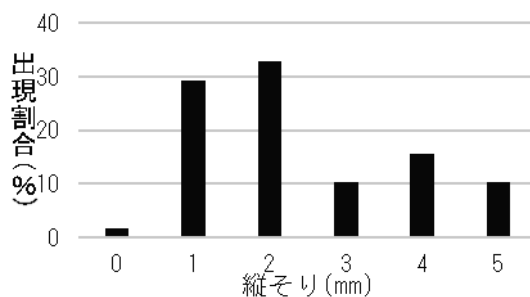


図7 縦反りの出現割合(ミズナラ, n=58)

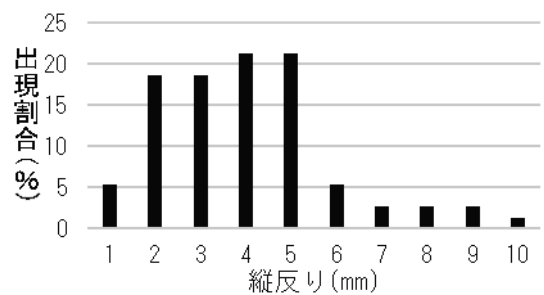


図9 縦反りの出現割合(クリ, n=75)

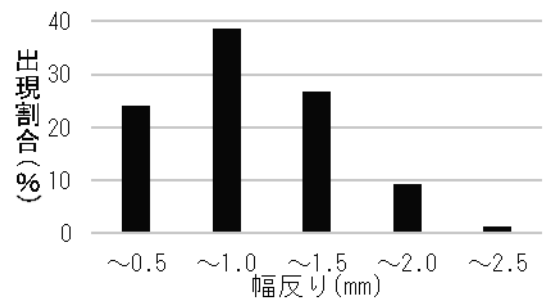


図10 幅反りの出現割合(クリ, n=75)

3.3 考察

3.3.1 乾燥スケジュールの適合性

今回は、ミズナラをT3C3、クリをT5E3.5の乾燥スケジュールで乾燥し、ミズナラは3週間以内、クリは2週間以内で乾燥が終了した。また、割れや狂い等についても、顕著なものはミズナラの大節や髄付近で見られる程度であったため、本試験で用いた乾燥スケジュールは適正であったと考えられる。ただし、乾燥前に除去しきれなかった木口付近の割れが要因となり、貫通割れが観察されたため、木口付近の割れは乾燥前に可能な限り除去することが望ましい。

また、自然冷却は、急激な温度と湿度の変化を抑え、乾燥直後の割れや狂い等の防止に有効であると考えられる。

3.3.2 調湿処理の必要性

人工乾燥の終期であっても板材間に含水率のバラつきが見られることから、含水率を均一に上げるためには、イコーライジングを十分に行う必要がある。

また、コンディショニング中のコントロール材の含水率推移から、乾燥応力を除去するために1～2日程度コンディショニングを実施したとしても、含水率の変化はほとんど見られないと考えられる。なお、コンディショニングのために必要な時間は、樹種や材厚等で異なるが、一般的に、広葉樹の場合、1インチ材(約25mm)で16～24時間、2インチ材(約50mm)で48時間以上といわれている。コンディショニング中の乾球温度が70℃未満の低温条件の場合、乾燥応力の除去に、より長い時間を要する⁹⁾。

3.3.3 乾燥終期の乾燥方法

人工乾燥の終期においても板材間に含水率のバラつきが見られることから、低含水率の板材に合わせて乾燥スケジュールの段階を進めた場合、高含水率の板材が未乾燥となる恐れやイコーライジングにより長く時間を要する恐れがある。イコーライジング中は、高温多湿条件となるため、蒸気を大量に使用し燃料を多く使用する。したがって、イコーライジングを長引かせないために、乾燥終期は高含水率の板材に合わせて乾燥スケジュールの段階を進める必要がある。

しかし、高含水率の板材に合わせて乾燥スケジ

ュールの段階を進めた場合、低含水率の板材は過乾燥となる恐れがある。また、板材の乾燥直後と養生後の含水率にほとんど変化が見られなかったことから(表22)、乾燥機から取り出した後では含水率は戻りにくいと考えられる。したがって、含水率を均一に仕上げ、かつ、燃料コストを抑えるためには、乾燥終期においては、高含水率の板材に合わせて乾燥スケジュールの段階を進め、過乾燥となった板材はイコーライジングにより目標含水率まで戻すことが望ましい。

3.3.4 製材寸法の日安

今回は、材厚23mm、材幅120mmの板材を蒸気式乾燥機により乾燥した。乾燥による狂い等を測定した結果、約8割を削り残し無く仕上げるために必要な削り代は、ミズナラでは厚さ方向に6mm、幅方向に20mmとなり、クリでは厚さ方向に10mm、幅方向に12mm、となった。乾燥による収縮も考慮すると、供試板材の仕上がり寸法は、ミズナラで材厚17mm、材幅95mm、クリで材厚13mm、材幅100mmとなる。

また、削り代から逆算すると、一般的な無垢フローリングの寸法である材厚15mm、材幅75～90mmに仕上げるための製材寸法は、ミズナラで材厚21mm程度、材幅100～115mm、クリで材厚25mm程度、材幅105～120mmが適正と考えられる。

4 おわりに

100℃試験法によりミズナラとクリの乾燥スケジュールを作成するとともに、広葉樹無垢フローリング材を想定した実大板材による乾燥試験を実施し、乾燥による含水率推移の観察及び割れや狂い等を評価した。この結果、顕著な割れや狂い等はミズナラの大節や髄付近で見られる程度であったため、本試験で用いた乾燥スケジュールは実用的であると考えられた。

また、乾燥スケジュール作成において、100℃試験法の供試丸太と試験体数を、一度に実験可能な限り増やし試験した結果、得られた乾燥スケジュールは丸太や試験体間でバラついた。このことから、100℃試験法による乾燥スケジュールの作成する場合、供試丸太と試験体数を可能な限り増やして行い、得られた乾燥スケジュールの中から、製材品の品質や乾燥日数の許容範囲を考慮して乾燥スケジュールを選択することが望ましい。

さらに、実大板材の乾燥試験において含水率推移を観察した結果、乾燥終期においても含水率のバラつきが見られた。このことから、含水率を均一に仕上げるためには調湿処理が重要であることが確認できた。その方法としては、乾燥終期は高含水率の材に合わせて乾燥スケジュールの段階を進め、過乾燥になった材はイコーライジングにより目標含水率に戻すことが望ましいと考えられた。

引用文献

- 1) 岩手県農林水産部 (2021). 令和3年度 いわての森林・林業概要 : 38.
- 2) 農林水産省 (2021). 農林水産統計 令和2年木材統計 : 20-24.
- 3) 満久 崇麿 (1962). 木材の乾燥. 森北出版 : 1-2.
- 4) 農林水産省 (最終改正 2019). 製材の日本農林規格 平成 19 年 8 月 29 日制定 農林水産省告示第 661 号 : 71-72, 78.
- 5) 寺沢 眞 (1994). 木材乾燥のすべて. 海青社 : 163-164, 194-205, 308-311, 394-412.
- 6) 財団法人 日本住宅・木材技術センター (1995) 木材乾燥のマニュアル 操作編 (上) : 46-47 49-50.