

普及資料(林産)

# 建築用針葉樹製材の人工乾燥技術

改訂3版

島根県中山間地域研究センター  
島根県農林水産部林業課

## 建築用針葉樹製材の人工乾燥技術改訂3版目次

<b>I. 乾燥材生産の動向</b> .....	1
1. 乾燥材の需要と供給.....	1
(1) 乾燥材出荷量の動向（全国）.....	1
(2) 木造軸組構法における木材使用割合（全国）.....	1
2. 製材工場の概況.....	2
(1) 乾燥材率の全国順位.....	2
(2) 乾燥機の納入実績（全国）.....	3
<b>II. 木材乾燥の基礎</b> .....	4
1. 木材乾燥の目的.....	4
2. 木材中の水分.....	4
(1) 自由水と結合水.....	4
(2) 木材中の水分の変化.....	5
(3) 含水率.....	5
3. 空気の温度、湿度と木材の平衡含水率.....	6
(1) 温度と湿度.....	6
(2) 平衡含水率.....	7
4. 水分管理.....	8
(1) 適正な仕上がり含水率.....	8
(2) 含水率基準.....	10
5. 含水率の測定方法.....	11
(1) 全乾法.....	11
(2) 木材水分計による方法.....	11
(3) 木材水分計の公的な認定.....	12
(4) 含水率傾斜の求め方.....	14
(5) 日本農林規格（JAS）における測定方法.....	15
6. 木材の強度と含水率.....	15
7. 木材の強度と乾燥割れ.....	17
8. 木材の収縮と含水率.....	17
(1) 木材の収縮.....	17
(2) 収縮率の表し方.....	19
9. 人工乾燥前の材の選別.....	20
<b>III. 乾燥設備・機器</b> .....	22
1. 木材乾燥における温度、湿度、風速の役割.....	22
(1) 温度.....	22
(2) 湿度.....	22

(3) 風速	22
2. 乾燥機の具備すべき条件	22
3. 蒸気式乾燥機	22
3. 1 乾燥室炉体	24
(1) 容量	24
(2) 乾燥室炉体	24
3. 2 送風装置	25
(1) 風速と室内温度	25
(2) 風速と栈木厚	25
(3) 送風機と送風機用モーター	25
3. 3 加熱装置	25
3. 4 加湿装置	25
3. 5 吸・排気装置	26
3. 6 その他	26
4. 除湿式乾燥機	26
4. 1 乾燥室炉体	27
4. 2 送風装置	27
4. 3 温湿度の制御装置	27
4. 4 補助熱源	27
5. 温水式乾燥機	28
6. 品質管理機器	28
7. 乾燥設備費	28
8. 乾燥設備の選択方法	29
9. 乾燥設備設計の際の要件	29
<b>IV. 木材乾燥の実務</b>	<b>31</b>
1. 針葉樹の乾燥特性	31
2. 天然乾燥の実務	31
(1) 天然乾燥の目的	31
(2) 天然乾燥の方法と留意点	32
(3) 天然乾燥の日数	32
(4) 天然乾燥における損傷	33
(5) 板材の天然乾燥	34
(6) 柱材などの天然乾燥	34
3. 人工乾燥の実務	35
(1) 人工乾燥の方法	35
(2) 乾燥スケジュールの基本形	36
(3) 乾燥スケジュールの作成手順	36
4. 熱風乾燥の実務	39
(1) 熱風乾燥の特徴	39

(2) 熱風乾燥の留意点	39
(3) 板及び平割の熱風乾燥（蒸気式中温）	39
(4) スギ柱材の熱風乾燥（蒸気式中温）	40
(5) ヒノキ柱材の熱風乾燥（蒸気式中温）	42
(6) スギ柱材の熱風乾燥（蒸気式高温）	43
(7) スギ梁桁の熱風乾燥（蒸気式中温・高温）	44
(8) マツ梁桁の熱風乾燥（蒸気式高温）	45
(9) ヒノキ板・平割の熱風乾燥（蒸気式中温）	47
<b>V. 乾燥操作（熱風乾燥）</b>	48
1. 人工乾燥の手順	48
2. 乾燥機の点検・整備	49
(1) 乾球、湿球温度計	49
(2) 電圧計	49
(3) スチームトラップ装置	49
(4) モーターファン	49
(5) 配管系統	49
3. 棧積み	50
(1) 棧積みの高さと幅	50
(2) 材と材の間隔	50
(3) 棧木の位置	50
(4) 棧木の方向	50
(5) 圧縮	50
(6) 試験材の位置	50
(7) 乾燥むらの防止対策	50
4. 試験材の準備	51
(1) 試験材の作成	51
(2) 試験材及び試験片の重量測定	52
(3) 試験材のコーティング	52
(4) 試験材の配置	52
(5) 試験材（A）の初期含水率の推定	53
(6) 試験材（A）の全乾重量の推定	53
(7) 試験材の初期含水率、全乾重量の推定野帳	53
5. 乾燥スケジュールの決定	55
(1) 材の厚さ	55
(2) 仕上がり含水率	55
(3) 天然乾燥後の人工乾燥	55
(4) タイムスケジュール	55
6. 棧積み材の搬入	55
7. 脱脂（ヤニ抜き）操作	55

8. 乾燥操作	56
(1) 含水率の推定	56
(2) 温度・湿度の設定	56
(3) 乾球温度・湿球温度の設定、変更の例	57
(4) 乾燥経過の記録	57
9. 調湿処理	60
10. 炉出しと保管	60
(1) 炉出し	60
(2) 保管	61
11. 間けつ運転の方法	61
12. 仕上がり含水率	61
13. 乾燥の進み方の模式図	62
14. 乾燥による損傷	63
(1) 初期割れ	63
(2) 狂い	63
(3) 落ち込み	64
(4) 内部割れ	64
(5) 変色	64
(6) ヤニ	64
(7) 部分的残留水分	64
15. 損傷の防止方法	65
(1) 木口割れ	66
(2) 表面割れ	66
(3) 内部割れ	66
(4) 狂い	67
(5) 落ち込み	67
(6) 変色	67
<b>VI. 乾燥経費</b>	69
1. スギ心持ち柱材の乾燥コスト	69
<b>資料</b>	
共同研究「自然エネルギーを利用した木材乾燥技術の開発」 (最終報告)の概要	70
主な引用文献	72

## I. 乾燥材生産の動向

### 1. 乾燥材の需要と供給

(1) 乾燥材出荷量の動向 (全国)

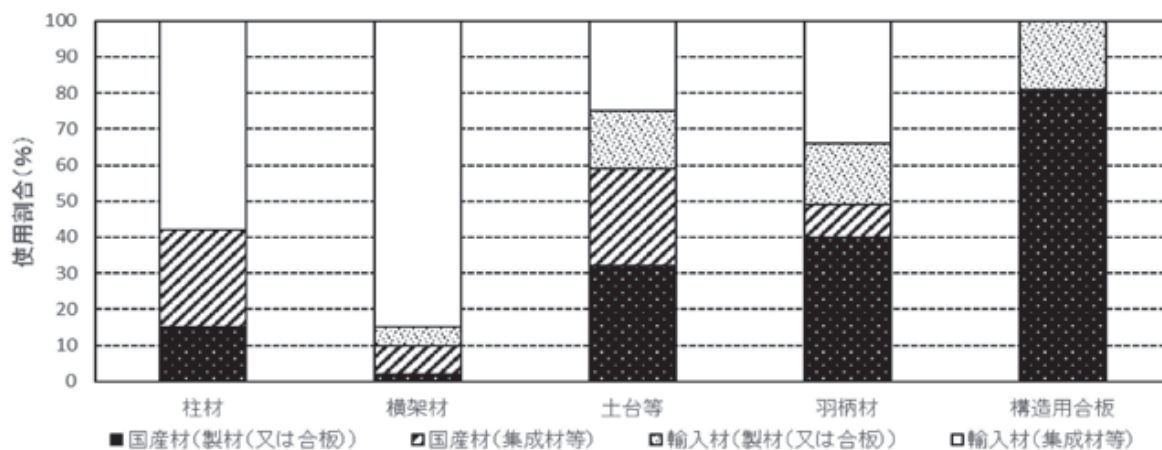
区 分	平成15年	平成20年	平成25年	平成30年
製材品生産量 (千m <sup>3</sup> )	13,929	10,884	10,100	9,202
人工乾燥材出荷量 (千m <sup>3</sup> )	1,938	2,348	2,984	3,930
人工乾燥材の割合 (%)	13.9	21.6	29.5	42.7
島根県の人工乾燥材の割合 (%)	4.3	15.8	14.9	27.9

(資料：農林水産省「木材統計」)

※製材品供給を巡る環境の変化

- ①SDGsの達成に向けた貢献
- ②非住宅・中高層建築物の木造化・木質化の推進
- ③プレカット材の普及に伴う乾燥材への需要の高まり
- ④人工乾燥材の割合は全国、島根県とも増加傾向

(2) 木造軸組構法における木材使用割合 (全国)



(資料：一般社団法人日本木造住宅産業協会 2019)

※変化する木材製品の需要動向

- ①木造軸組構法による木造戸建て注文住宅については、半数以上が年間供給戸数 50 戸未満の中小大工・工務店により供給されたもの
- ②ツーバイフォー工法など、木造軸組構法以外の工法を中心とする住宅メーカーでも、国産材の利用が進展
- ③木造軸組構法による住宅建築では、梁・桁等の横架材での国産材割合が低い状況にあり、こうした部材における新たな国産材製品や技術開発が必要

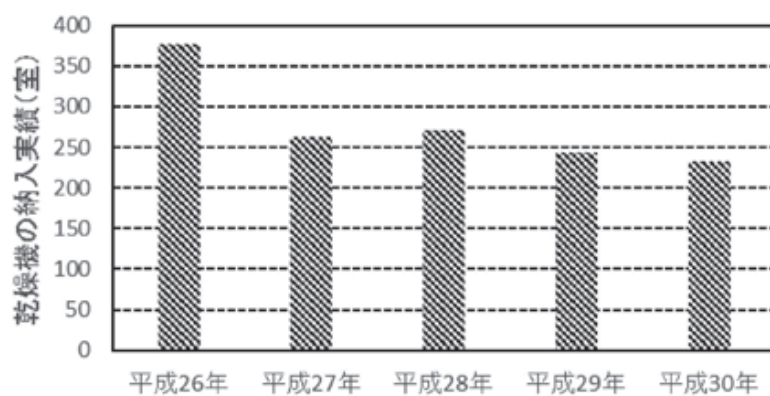
## 2. 製材工場の概況

### (1) 乾燥材率の全国順位

順位	都道府県	素材消費量 (千m <sup>3</sup> )	製材品出荷量 (千m <sup>3</sup> )	人工乾燥材 (千m <sup>3</sup> )	乾燥材率 (%)	工場数
1	京 都	137	98	83	85	54
2	富 山	220	155	117	75	64
3	香 川	44	31	23	74	26
4	茨 城	1,264	739	547	74	99
5	栃 木	491	294	210	71	111
6	広 島	1,670	996	636	64	71
7	愛 媛	764	409	248	61	86
8	福 島	699	438	261	60	154
9	岡 山	303	156	85	54	69
10	三 重	222	138	74	54	195
11	兵 庫	157	92	48	52	94
12	山 口	236	137	69	50	62
13	神奈川	9	6	3	50	22
14	岐 阜	264	147	73	50	201
15	宮 崎	1,839	955	466	49	139
16	和歌山	196	124	59	48	103
17	鳥 取	45	26	12	46	44
18	大 分	734	392	178	45	124
19	群 馬	126	69	31	45	83
20	徳 島	207	120	53	44	89
21	山 形	300	127	53	42	104
22	奈 良	190	111	45	41	164
23	熊 本	725	380	147	39	133
24	秋 田	487	233	90	39	90
25	埼 玉	51	34	13	38	52
26	福 岡	488	260	92	35	106
27	高 知	429	230	76	33	88
28	宮 城	202	95	31	33	83
29	長 野	152	96	31	32	131
30	鹿児島	263	137	40	29	105
31	岩 手	632	305	85	28	121
<b>32</b>	<b>島 根</b>	<b>99</b>	<b>58</b>	<b>16</b>	<b>28</b>	<b>80</b>
33	新 潟	103	66	18	27	167
34	静 岡	207	121	30	25	170
35	福 井	53	32	6	19	113
36	愛 知	133	84	15	18	105
37	北海道	1,730	812	106	13	175
38	滋 賀	25	19	2	11	83
39	青 森	163	79	8	10	78
40	石 川	56	33	2	6	67
41	佐 賀	196	118	1	1	48
42	山 梨	21	16	0	0	23
43	千 葉	44	29	x	-	98
44	東 京	12	x	3	-	21
45	大 阪	14	8	-	-	36
46	長 崎	37	20	x	-	48
47	沖 縄	1	x	-	-	3

(資料：農林水産省「令和元年木材統計」)

(2) 乾燥機の納入実績 (全国)



(資料：日本木材乾燥施設協会 KD REPORT VOL. 62)

※製材工場の概況

- ①島根県の乾燥材率の向上が必要
- ②乾燥機の納入実績は平成27年以降横ばい～やや減少



## II. 木材乾燥の基礎

### 1. 木材乾燥の目的

木材を使って製品を作る場合には、材料である木材を十分に乾燥してから加工することが大切である。その理由として次のようなことが挙げられる。

- ①木材は乾燥に伴って収縮するので、湿潤な木材で作った製品は、使用している間に狂いや割れ、透き間、継ぎ目の段差などが生じる。
- ②湿潤な木材は腐朽菌や変色菌に侵されやすい。
- ③湿潤材の強度は低く、乾燥が進むほど諸強度性能が向上する。
- ④湿潤な木材では十分な接着力が得られない。
- ⑤湿潤な木材は加工性や塗装性が悪い。
- ⑥乾燥すると軽量になり、荷扱や輸送が容易になる。

建築用材に湿潤材を使用すると、上記のほかにも次のような様々な弊害が生じる。

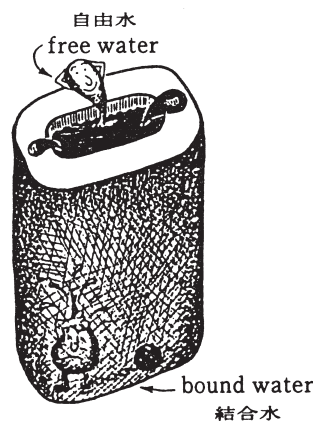
- ①接合部のゆるみ
- ②釘保持力の低下による床鳴り
- ③壁面のかび
- ④大壁工法における柱材の背割りの開きによる壁面のクロスの亀裂またはしわの発生
- ⑤化粧面の見苦しい割れの発生
- ⑥金具のさびの発生

### 2. 木材中の水分

#### (1) 自由水と結合水

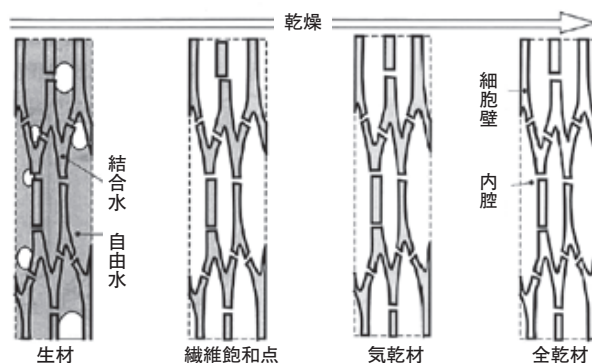
木材中に含まれる水分には2種類があり、自由水と結合水とに分けられる。

- ①自由水：細胞と細胞の間隙や細胞内腔に液状に含まれている水分で簡単に除去できる。
- ②結合水：細胞壁の中に含まれている水分で、物理化学的結合力で強く吸着されている水分のため、除去しにくい。結合水が減少すると細胞は収縮し、増加すると膨張する。



図Ⅱ－1 自由水と結合水 (G.Bramhall)

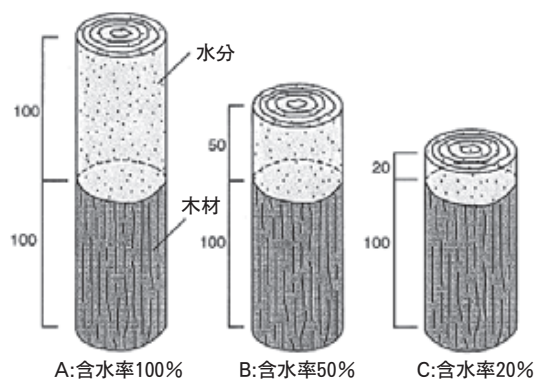
## (2) 木材中の水分の変化



図Ⅱ-2 木材中の水分の状態

- ①生材：伐採直後乾燥されていない状態の木材。伐採直後の生材含水率は、針葉樹材では辺材の含水率が心材に比べて著しく高い。広葉樹では樹種によって値が違ってきますので特にそのような違いはない。
- ②繊維飽和点：生材が乾燥するとまず自由水が失われ、ついで結合水が失われる。その過程で、自由水を全く含まず、最大限の結合水を含む状態があり、それを繊維飽和点と呼ぶ。繊維飽和点は樹種によって若干異なるが含水率28～30%に相当する。
- ③気乾材：生材は大気中に放置すると、やがて大気の温湿度に応じた一定の含水率になる。その含水率を「平衡含水率」といい、その段階の材を気乾材という。この平衡含水率は樹種によらず、ほぼ一定で日本での平均値は15%とされている。
- ④全乾材：含水率0%の材。一般に換気の良い乾燥器の中で、温度100～105℃で乾燥して、重量が変わらなくなれば全乾に達したとみなされる。厳密には若干の結合水が残っている。

## (3) 含水率



図Ⅱ-3 木材の含水率のイメージ図

木材中の水分量の大きさは含水率で表す。含水率（ $u$ ）は次式で計算する。

$$u = \frac{W_u - W_0}{W_0} \times 100 (\%)$$

ここで、 $W_u$ ：水を含んでいる状態の木材の重さ

$W_0$ ：水を含まない状態（全乾重量）の木材の重さ

※JISでは、試験片の乾燥前重量（単位g）を測定し、恒温乾燥器（100～105℃）で恒量に達するまで乾燥し、全乾重量（単位g）を測定すると規定されている。

### 3. 空気の温度、湿度と木材の平衡含水率

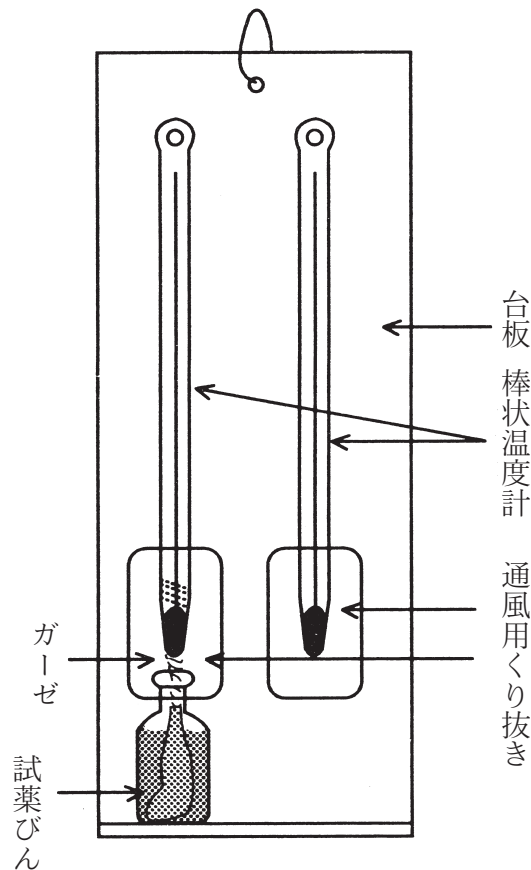
#### (1) 温度と湿度

木材乾燥の分野では、周辺の環境（気候）条件あるいは乾燥室内の空気条件を2種類の形で表現する。一つは、乾球温度と湿球温度による方法、もう一つは乾球温度と相対湿度による方法である。

##### ①乾球温度と湿球温度による方法

乾球温度 (Dry Bulb Temperature DBT と略す) は、ごく普通の温度計が示す値である。一方、湿球温度 (Wet Bulb Temperature WBT と略す) は、温度計の感温部分を常に湿ったガーゼで包んだ状態 (これを湿球という) にしておいた時に示す温度である。

湿球部分からは水の蒸発があり、蒸発潜熱が奪われるので、湿球温度は乾球温度よりも低いことがほとんどである。この乾球温度と湿球温度の差を、乾湿球温度差 (Wet Bulb Depression WBD と略す) という。乾湿球温度差は、空気が乾いている時ほど蒸発が盛んになり奪われる蒸発潜熱が多くなるため、大きくなる。



図Ⅱ-4 乾湿球温度計

##### ②乾球温度と相対湿度による方法

湿度には、相対湿度と絶対湿度がある。単に湿度といえば、相対湿度を表すのが一般的である。相対湿度とは、そのときの水蒸気圧を飽和水蒸気圧に対する百分率で表したもので、乾湿球温度差と大気圧で算出される。乾球温度と乾湿球温度差から相対湿度を求めることが可能な表を次ページに示す。この表Ⅱ-1は木材乾燥を進める上でよく利用されるので、内容をよく理解しておく必要がある。

表Ⅱ－１ 乾球温度、乾湿球温度差と相対湿度

(単位: %)

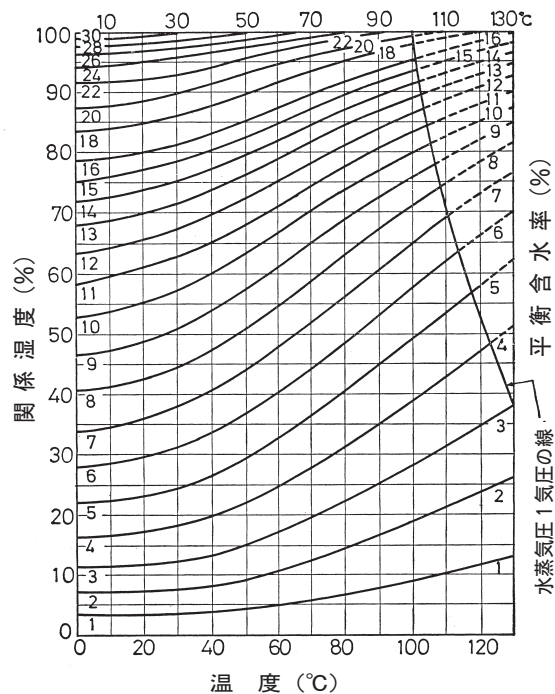
乾湿球 温度差 (°C)	乾 球 温 度 (°C)																					
	0	10	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
2	64	76	83	86	87	88	89	90	90	91	91	92	92	92	93	93	93	94				
3	47	65	75	79	81	82	83	85	85	86	87	87	88	88	89	89	90	90				
4	30	54	66	73	75	77	79	80	81	82	82	83	84	84	85	85	86	87				
5	14	44	59	67	69	72	73	75	77	78	78	79	80	80	81	82	83	83				
6		33	51	61	64	67	69	71	72	74	75	75	76	77	78	78	79	80	81			
7		23	44	55	59	62	64	66	68	70	71	72	73	74	74	75	76	77	78			
8		14	37	50	54	57	60	62	64	66	67	68	70	71	72	72	73	74	75			
9		4	30	44	49	53	56	58	60	62	63	65	66	67	68	69	70	71	72			
10			24	39	44	48	52	54	57	59	60	62	63	64	65	67	68	69	70			
11			18	34	40	44	48	51	53	55	57	59	60	62	63	64	65	66	67	68		
12			11	30	36	40	44	47	50	52	54	56	58	59	60	61	62	63	64	65		
13			6	25	31	37	41	43	46	48	51	53	54	56	57	58	60	61	62	63		
14				21	28	33	37	40	43	46	48	50	52	53	54	56	57	58	59	61		
15				16	24	29	34	37	40	43	45	47	49	51	52	54	55	56	57	58		
16				12	20	26	30	34	38	40	43	45	47	48	50	52	53	54	55	57	58	
17				8	17	23	28	32	35	38	40	42	44	46	48	49	50	52	53	54	55	
18					12	19	25	28	32	35	38	40	42	44	45	47	48	50	51	52	53	
19					9	16	22	26	29	32	35	37	40	42	43	45	47	48	49	50	52	
20					6	13	19	23	27	30	33	35	37	39	42	43	45	46	47	48	50	
22						7	13	18	23	26	28	31	33	35	37	39	41	42	44	45	47	48
24							8	13	18	22	25	27	30	32	33	35	37	38	40	42	43	44
26								8	13	18	22	24	26	28	30	32	34	35	37	38	40	41
28								3	10	14	17	20	23	25	27	29	31	32	33	35	37	38
30									6	10	13	17	20	22	24	25	27	29	30	31	32	33

(2) 平衡含水率

木材を温度と相対湿度を一定にした大気中に長期間放置すると、その温度、湿度に見合った含水率に達し、安定した状態になる。このときの含水率を平衡含水率 (Equilibrium Moisture Content EMC と略す) という。

国内の平均的な温湿度と平衡する含水率は15%とされている。屋外における平衡含水率は地域や季節によって変動があり、住宅の柱材等のように数十年にわたって吸湿・放湿を繰り返すと、その地点の平均的な値となる。

大まかには、図Ⅱ－5や表Ⅱ－2を用いて、各温度、湿度(相対湿度)に対応する平衡含水率を求めることが可能である。



表Ⅱ－２ 乾球温度、乾湿球温度差と平衡含水率 (Keylwerth)

(単位:%)

乾湿球 温度差 (°C)	乾 球 温 度 (°C)																					
	0	10	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
2	12.2	15.5	17.0	17.9	18.0	18.1	18.2	18.1	17.9	17.6	17.1	16.8	16.3	15.9	15.5	15.2	14.9	14.6				
3	9.0	12.0	14.2	15.4	15.8	16.0	15.9	15.8	15.6	15.3	15.0	14.7	14.4	14.1	13.8	13.4	13.2	13.0				
4	6.6	10.4	12.2	13.4	13.9	14.0	14.2	14.1	14.0	13.8	13.6	13.3	13.1	12.8	12.5	12.3	12.0	11.8				
5	3.8	8.5	10.6	11.8	12.1	12.4	12.6	12.7	12.7	12.5	12.3	12.1	12.1	11.6	11.4	11.1	11.0	10.8				
6		7.0	9.2	10.6	11.0	11.2	11.4	11.5	11.5	11.4	11.3	11.1	11.0	10.7	10.5	10.2	10.1	9.9	9.8			
7		5.3	8.2	9.6	10.0	10.3	10.6	10.7	10.7	10.6	10.5	10.8	10.1	9.9	9.7	9.5	9.3	9.1	9.0			
8		3.6	7.2	8.8	9.2	9.5	9.7	9.8	9.9	9.8	9.7	9.6	9.5	9.3	9.1	9.0	8.8	8.6	8.5			
9		1.7	6.1	8.0	8.4	8.8	9.0	9.2	9.3	9.2	9.1	9.0	8.8	8.7	8.5	8.4	8.2	8.1	7.9			
10			5.0	7.2	7.7	8.2	8.5	8.6	8.7	8.7	8.5	8.5	8.3	8.2	8.0	7.9	7.7	7.5	7.5			
11			4.0	6.5	7.2	7.6	8.0	8.0	8.1	8.1	8.0	8.0	7.8	7.7	7.5	7.4	7.3	7.1	7.0	6.9		
12			2.9	5.8	6.5	7.0	7.4	7.5	7.6	7.7	7.5	7.5	7.3	7.2	7.1	7.0	6.9	6.7	6.7	6.5		
13			1.7	5.0	5.9	6.4	6.8	7.0	7.1	7.2	7.1	7.0	7.0	6.8	6.7	6.6	6.5	6.4	6.3	6.1		
14				4.3	5.3	5.9	6.3	6.6	6.7	6.7	6.7	6.6	6.5	6.4	6.3	6.2	6.0	5.9	5.8	5.8		
15				3.6	4.7	5.3	5.9	6.2	6.3	6.4	6.4	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6		
16				2.9	4.1	4.9	5.4	5.7	5.9	6.0	6.0	6.0	5.9	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3		
18				1.1	3.0	3.9	4.5	4.9	5.2	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	5.0	4.9	4.8	
20					3.0	3.8	4.2	4.6	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8	4.7	4.6	4.6	4.5	
22					1.8	2.9	3.5	3.9	4.2	4.3	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.3	4.3	4.2	4.1	4.1	
24							2.8	3.3	3.7	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.8	3.8	
26							2.1	2.7	3.1	3.4	3.5	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.6	3.6	3.6	3.6	3.5	
28							1.4	2.2	2.6	2.9	3.1	3.2	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	
30								1.5	2.1	2.4	2.7	2.8	2.9	2.9	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	

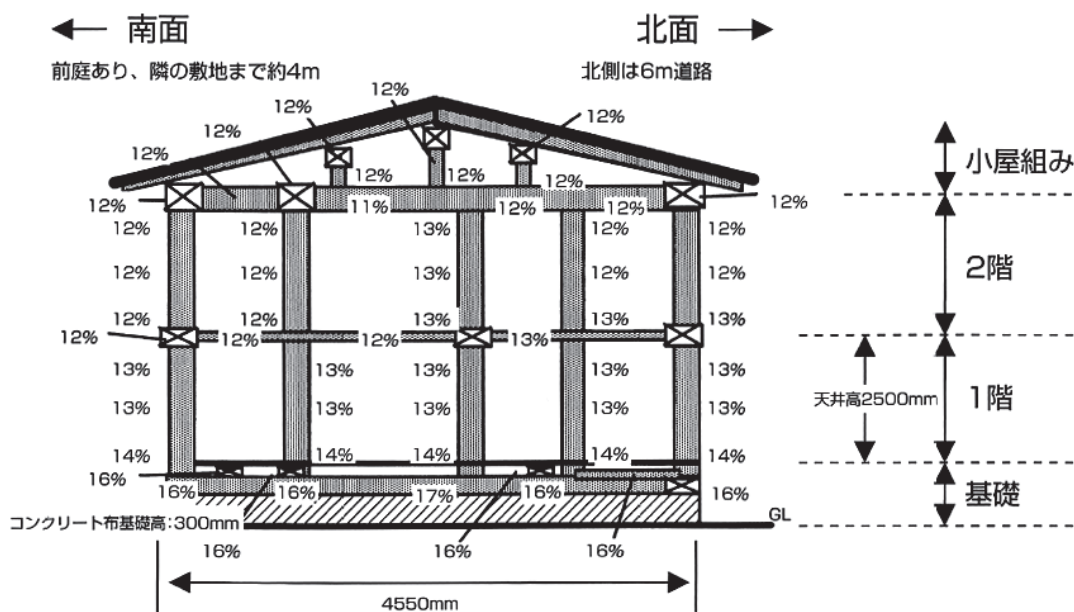
#### 4. 水分管理

木材は含水率の変化に伴って寸法が変化するため、使用目的に見合った含水率にあらかじめ揃えておく必要がある。材料を的確な含水率に調整し、加工中あるいは加工後にもそれを保持しようとするを「水分管理 (含水率管理)」という。

##### (1) 適正な仕上がり含水率

人工乾燥は、一連の加工段階における最初の含水率調整として位置づけられる。乾燥の際には、まず仕上げるべき目標含水率が設定される。仕上がり含水率は、その材料で作られた製品が最終的に使用される場所 (環境条件) によって、決定される。したがって、仕上がり目標含水率は材料ごとに異なることになる。

建築用材の適正な仕上がり含水率を決定するためには、実際に住宅部材として長年使用された木材の含水率値が参考となる。図Ⅱ－6に長期間使用され水分状態の安定している住宅部材の全乾法による含水率を示す。季節変動があるので絶対値としてはとらえ難い面もあるが、仕上がり含水率を設定する上で重要な指針となる。



図Ⅱ－6 住宅構造部材の含水率測定値

(資料：「性能規定化に対応した国産材による高信頼性構造用材の開発調査」、  
森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集4、2004.9)

また、島根県林業技術センター（現島根県中山間地域研究センター）が行った木造在来軸組構法住宅の部材別、建築経過年別含水率調査では次のとおり報告されている。なお、測定は高周波式木材水分計（DELTA-5、DELTA-55）を使用している。

表Ⅱ－3 柱材の含水率（既設住宅）

	築1年目	築3年目	築4年目	築10年目	築14年目
測定本数（本）	17	5	11	20	20
平均値（％）	14.9	15.9	15.3	12.7	14.2
標準偏差	1.4	1.9	1.8	1.6	2.1
変動係数（％）	9.5	11.7	11.6	12.9	15.1

表Ⅱ－4 横架材の含水率（既設住宅）

	築1年目	築3年目	築4年目	築10年目	築14年目
測定本数（本）	11	20	—	16	20
平均値（％）	15.4	12.0	—	13.6	14.4
標準偏差	2.6	1.8	—	3.7	1.4
変動係数（％）	16.7	15.1	—	27.1	9.9

—：未調査

表Ⅱ－5 土台の含水率（既設住宅）

	築1年目	築3年目	築4年目	築10年目	築14年目
測定本数（本）	18	20	20	20	7
平均値（％）	27.6	25.7	25.3	24.9	19.5
標準偏差	4.1	2.5	2.4	1.8	2.0
変動係数（％）	14.7	9.6	9.5	7.0	10.3

(資料：島根県林業技術センター研究報告No.52、2001)

(2) 含水率基準

① 公的基準

木質材料の公的規格としては、日本農林規格（JAS）が、最も一般的な規格として普及している。日本農林規格には次に示す含水率基準が定められている。

表Ⅱ－6 日本農林規格（JAS）の含水率基準

品 名	含水率基準
<b>製 材</b>	
●目視等級区分構造用製材(人工乾燥表示)	
●機械等級区分構造用製材(人工乾燥表示)	
(SD:仕上げ材) (D:未仕上げ材)	
	D25
	25%以下
SD20	D20
	20%以下
SD15	D15
	15%以下
●造作用製材(人工乾燥表示)	
(SD:仕上げ材) (D:未仕上げ材)	
SD18	D18
	18%以下
SD15	D15
	15%以下
●下地用製材(人工乾燥表示)	
(SD:仕上げ材) (D:未仕上げ材)	
SD20	D20
	20%以下
SD15	D15
	15%以下
●広葉樹製材(人工乾燥材表示)	
	D13
	13%以下
	D10
	10%以下
●目視等級区分構造用製材、造作用製材、下地用製材 広葉樹製材(天然乾燥表示)	30%以下
<b>集成材・直交集成板・接着合せ材</b>	15%以下
<b>接着重ね材</b>	18%以下 8%以上
<b>単板積層材</b>	14%以下
<b>枠組壁工法構造用製材・枠組壁工法構造用たて継ぎ材 乾燥材</b>	19%以下
<b>フローリング</b>	
●単層フローリング (人工乾燥表示)	針葉樹
	15%以下
	広葉樹
	13%以下
(天然乾燥表示)	針葉樹
	20%以下
	広葉樹
	17%以下
●複合フローリング	14%以下
<b>普通合板・コンクリート型枠用合板・構造用合板</b>	14%以下

※ 仕上げ材 : 人工乾燥処理後、修正挽き又は材面調整を行い、寸法仕上げをした製材

未仕上げ材 : 人工乾燥処理後、寸法仕上げをしない製材

## 5. 含水率の測定方法

含水率の測定は、原則として全乾法によることと定められている。しかし、これと同等の精度が得られる場合は、その方法にもよることができると定められている。企業の現場では、全乾法以外の実務的な方法によって含水率を測定していることが多い。

### (1) 全乾法

木材の含水率測定方法は、J I S Z2101 に全乾法による測定方法が定められている。

全乾法による含水率は、含水率の定義に従い、木材中に含まれる水分の重量の全乾重量に対する百分率で表すことになっている。

具体的な測定手順は、以下のとおりである。

- ①含水率を求めようとする木材の重量 ( $W_u$ ) を測定する。測定最小目盛りは、木材の重量と自分が必要とする含水率値の精度から勘案して決める。通常は、0.1 g 程度まで計測できる天秤で計測することが望ましい。
- ② $W_u$  を測定した後、100～105℃に保たれた恒温乾燥器に木材を入れて、重量が変化しなくなる状態（これを恒量という）まで乾燥する。
- ③恒温乾燥器から木材を取り出し、すばやく全乾重量 ( $W_0$ ) を測定する。
- ④求めた $W_u$ と $W_0$ の値を下記の式に代入して、含水率 ( $u$ ) を求める。

$$u = \frac{W_u - W_0}{W_0} \times 100(\%)$$

### (2) 木材水分計による方法

正確な含水率の測定は全乾法によらなければならないが、一般の生産工場や流通段階では、簡易な方法によらざるを得ないと思われる。しかし、便宜上簡易な方法を採用しているのであって、機器の特徴や測定値の取り扱いには十分な知識と注意が必要である。

通常用いられる電気式木材水分計には、2種類のタイプがある。一つは直流電気抵抗式のもので、木材の電気抵抗値が含水率の変化とともに変わる性質を利用したものである。

もう一つは、高周波誘電率（容量）式で、含水率の変化とともに木材の電気容量が変わることを利用したものである。

両方式の機種とも、全乾法による値と常に一致するというのではなく、含水率傾斜が大きい材を測定するときなどには大きな誤差が生じる。特に、断面の大きな建築用材の測定には注意を要する。よって、人工乾燥材の最終的な仕上がり状態のチェックは、ある程度養生期間を経て含水率傾斜が減少した段階で行うことが望ましい。

#### ①直流電気抵抗式

木材の電気抵抗値が含水率によって変化する性質を利用したもので、通常針状電極を木材に打ち込んで測定する。測定の深さは針の深さまでで、一般のものは表面から5～7mmの深さまでの含水率が表示される。

#### (特徴)

- (a) 繊維飽和点（含水率30%）以下において比較的正確な測定が可能であるが、高含水率域での測定値は信頼度が低い。
- (b) 温度にかなり影響を受けやすく、温度補正を行う必要がある。



- (c) 比重や樹種には比較的影響されにくい。
- (d) 塩分を含んだ材は、高めの値を示す。
- (e) 針状電極は、材に傷をつける。

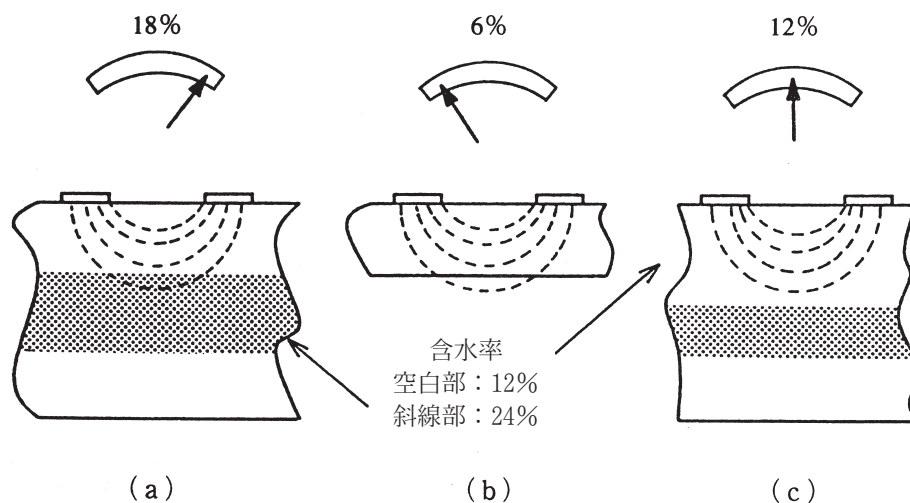
②高周波誘電率（容量）式

誘電率は、交流電場におかれた物質が蓄えた電気エネルギーの大きさを示すもので、通常、空気に蓄えた電気エネルギー（電気容量）に対する比率で表す。測定深度は1～2 cm程度で、この厚さの層の平均的な値が示される。

（特徴）

- (a) 繊維飽和点（含水率30%）以上の含水率でも、概略の値は測定できる。
- (b) 温度の影響を受けにくい。
- (c) 比重や樹種により大きく影響されるので、補正を行う必要がある。
- (d) 材を傷つけない。

図Ⅱ－7は高周波式含水率計の含水率指針値の模式図である。乾燥後の含水率傾斜の大きい場合には指針値が低くなる。ヒノキ材は木材内部の含水率傾斜が小さいので、高周波式含水率計の値と全乾法の値が比較的近似している。これに対し、スギは含水率傾斜が大きく内部の含水率が高い場合が多いため、測定誤差が生じやすい。黒心材などでは両者の差異は極めて大きい。



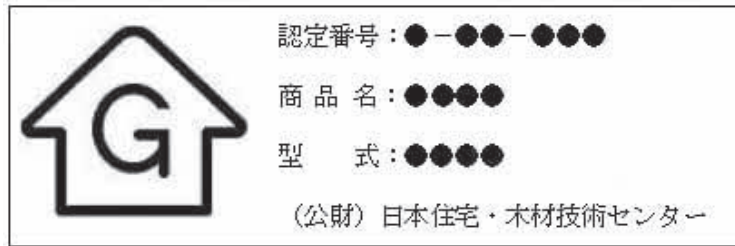
図Ⅱ－7 高周波式含水率計の含水率指針値の模式図（上村）

(3) 木材水分計の公的な認定

JAS製品やAQ製品\*の含水率検査には、性能認定された木材水分計を使用することが義務付けられている。

令和2年4月1日現在は、(公財)日本住宅・木材技術センターが認定した携帯型5製品、設置型3製品が認定機種として認められており、認定マークが貼られている。

\*AQ製品：(公財)日本住宅・木材技術センターが新しい木質建材について品質性能等を客観的に評価し、優良な製品として認定した製品で、AQマークが表示されている。



図Ⅱ-8 認定マーク

①携帯型

表Ⅱ-7 携帯型含水率計認定製品

製品名・型式	会社名
高周波木材水分計(HM-520)	(株)ケット科学研究所
携帯型マイクロ波含水率計(MC-3200EX)	(株)エーティーエー
携帯型マイクロ波水分計(HM-10)	マイクロメジャー(株)
高周波木材水分計(HS-200)	マイクロメジャー(株)
非破壊式高周波木材水分計(HM9-WS25型)	キクカワエンタープライズ(株)



写真Ⅱ-1 HM-520



写真Ⅱ-2 MC-3200EX



写真Ⅱ-3 HM-10



写真Ⅱ-4 HS-200



写真Ⅱ-5 HM9-WS25型

なお、過去に認定機種として購入した製品であっても、現在、再認定を受けていない製品は、認定製品として取り扱ってはならないことになっている。しかし、「認定されていた時期に購入された認定マークが添付されている製品であって、取扱説明書に従った補正等を定期的に行っていれば、運用上認定製品と同等のものとして取り扱っても差し支えない」との見解が、(公財)日本住宅・木材技術センターから示されている。

②設置型

表Ⅱ－８ 設置型含水率計認定製品

商品名・型式	会社名
マイクロウォッチャー(タイプLA-1)	マイクロメジャー(株)
マイクロ波透過型木材水分計(MB-3100)	(株)エーティーエー
非接触型マイクロ波水分計(AS-320)	マイクロメジャー(株)



写真Ⅱ-6 タイプLA-1



写真Ⅱ-7 MB-3100



写真Ⅱ-8 AS-320

(4) 含水率傾斜の求め方

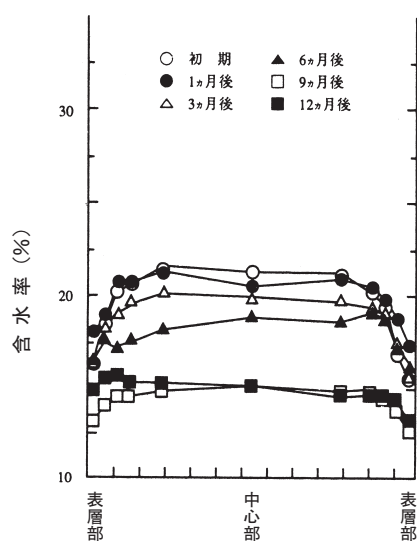
断面の厚い材では、表層部と中心部で乾燥経過が異なる。一般的に外部加熱方式(蒸気式、除湿式など)による乾燥では、表層部の乾燥が先に進み、次第に中心部におよぶという経過をたどる。したがって、乾燥途中における断面方向の含水率は、表面が低く、中心部に向かって高くなるという状態になっていることが多い。これを、『含水率傾斜』が生じた状態という。また、乾燥終了時点になっても柱材、梁材など断面が大きな材では、一般的に含水率傾斜が残存する。

平均含水率が同じであっても、含水率傾斜が異なればその後の寸法変化は必ずしも同様でないし、品質管理の面からもどのような含水率傾斜が残存しているかを把握しておく必要がある。

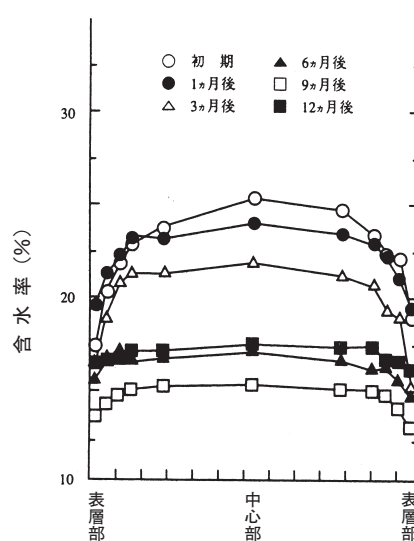
含水率傾斜の測定方法の一例として、分割法がある。これは、試験片の両側を適当に切り落とし、残りを鉋等で適当に細分化することにより、厚さ方向あるいは幅方向の含水率傾斜を全乾法によって求める方法である。柱材における分割例を写真Ⅱ－9に示す。分割法によって求めたヒノキとスギ柱材の人工乾燥後の含水率傾斜の変化を図Ⅱ－9、図Ⅱ－10に示す。分割法によれば、このように含水率傾斜の経時変化も明瞭に把握できる。



写真Ⅱ－９ 含水率傾斜測定試験片



図Ⅱ－９ ヒノキ柱材の人工乾燥後の含水率傾斜の推移（河崎）



図Ⅱ－10 スギ柱材の人工乾燥後の含水率傾斜の推移（河崎）

(5) 日本農林規格（JAS）における測定方法

製材の日本農林規格（JAS）における含水率測定方法は、原則として全乾法によるとされているが、電気式木材水分計の使用も条件付きで認められている。

ここで付けられている条件とは、使用できる水分計の型式は高周波式で、樹種及び温度補正が可能であり、さらに測定誤差も明らかなものでなければならないという点である。具体的には5.（3）で記した（公財）日本住宅・木材技術センターが認定した製品が、製材のJAS製品に対する含水率判定用機器として使用可能とされている。

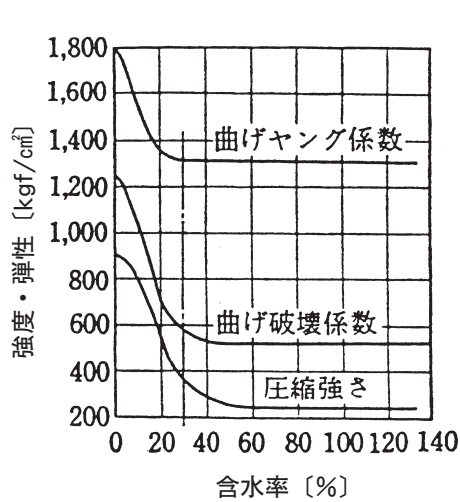
6. 木材の強度と含水率

木材の含水率が強度に与える影響は、無欠点小試験体を用いた多くの試験によって明らかになっている。木材中の水分の状態によって強度等の機械的性質は変わる。図Ⅱ－11に例示したように無欠点小試験体の木材の強度は繊維飽和点を境に変化する。すなわち、繊維飽和点以上の含水

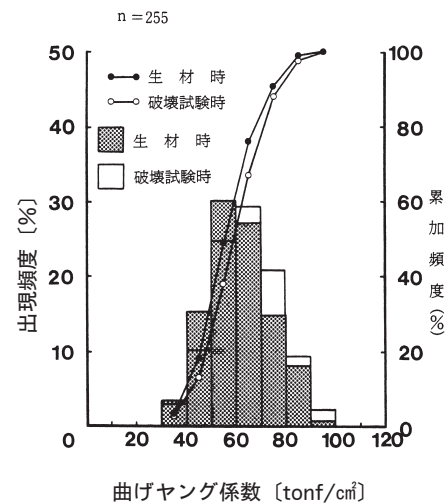
率では、各種強度的性質には変化が認められないが、繊維飽和点より含水率が低くなっていくにつれて、各種強度的性質は増加している。

さらに、島根県林業技術センターが行ったスギ実大材の生材時と気乾時の曲げヤング係数の出現頻度と累加頻度を図Ⅱ-12に示す（島根県林業技術センター研究報告 No. 42、1991）。木材のたわみにくさを示す曲げヤング係数を比較すると、生材時と気乾時の実大材の曲げヤング係数は、平均値でそれぞれ61.6tonf/cm<sup>2</sup> [6.04kN/mm<sup>2</sup>]、64.1tonf/cm<sup>2</sup> [6.29kN/mm<sup>2</sup>]となっている。

また、スギ構造材の含水率1%あたりの各種強度性能の変化率は表Ⅱ-9のとおりである。乾燥により強度が増加する傾向が明らかになっている。



図Ⅱ-11 木材の物理的性質と含水率（浅野）



図Ⅱ-12 生材時と破壊試験時の曲げヤング係数の出現頻度と累加頻度

表Ⅱ-9 スギ構造材の含水率1%あたりの各種強度性能の平均値の変化率（長尾）

（単位：％）

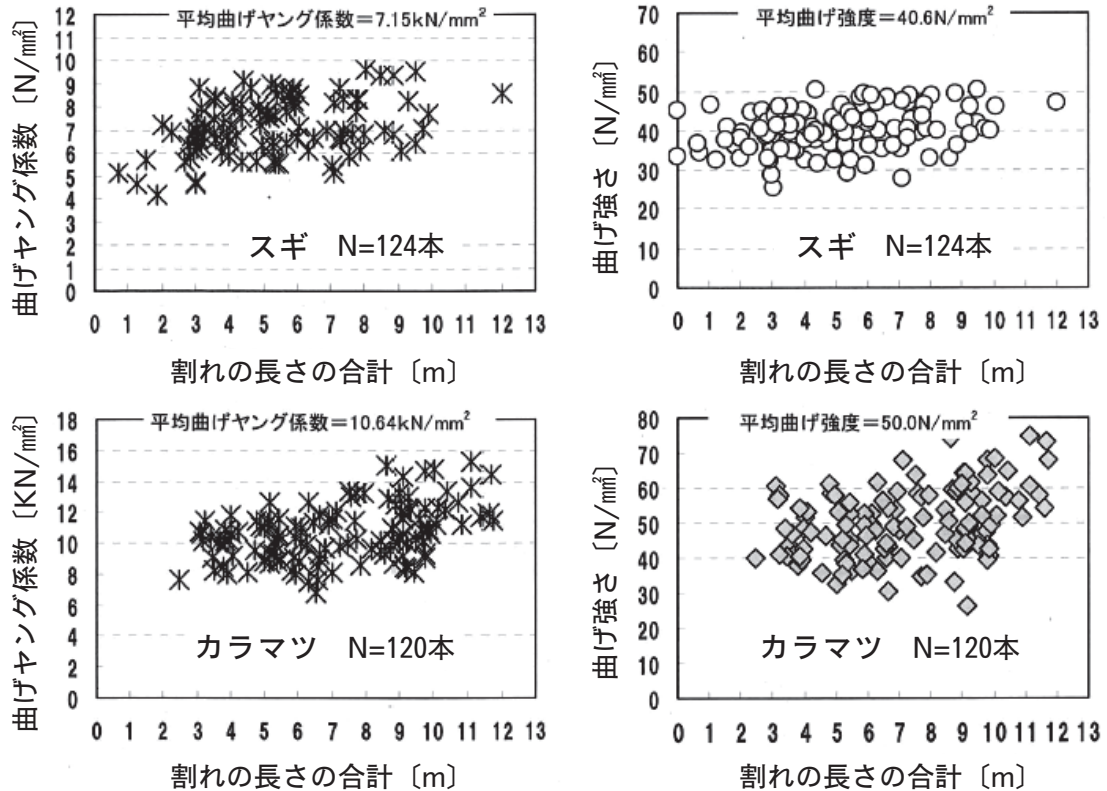
	厚板	正角	平角	丸太
曲げ強度	1.85	1.98	0.77	0.71
	(2.02)	(1.92)	(-)	(-)
縦圧縮強度	5.77	3.78		
	(5.61)	(4.33)		
ヤング係数	0.95	0.9	1.06	0.78
備考	断面寸法： 35mm×200mm	断面寸法： 105mm×105mm	断面寸法： 120mm×240mm	末口径： 18～24cm

注) 上段は平均値の変化率

下段の ( ) 内は5thパーセンタイル値の変化率

## 7. 木材の強度と乾燥割れ

製材のJASにおいて、強度に最も影響するとされるのは節であるが、この他に年輪幅、繊維傾斜、割れ等も挙げられている。通常行われる天然乾燥や人工乾燥において発生する一般的な材面割れが、強度低下を引き起こすことはほとんどないと考えてよい。図II-13はその試験例である。



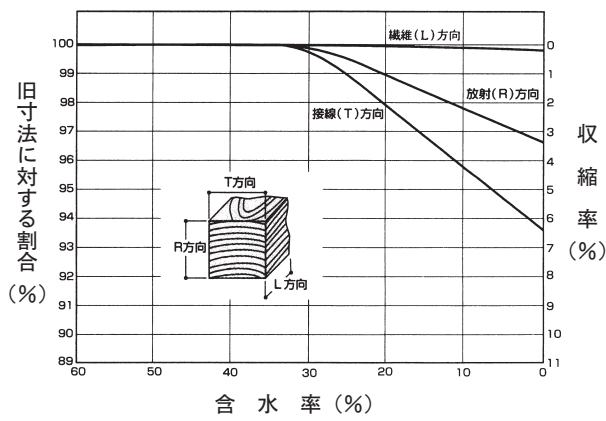
図II-13 材面割れの長さと同曲げ強さとの関係 (吉田)

## 8. 木材の収縮と含水率

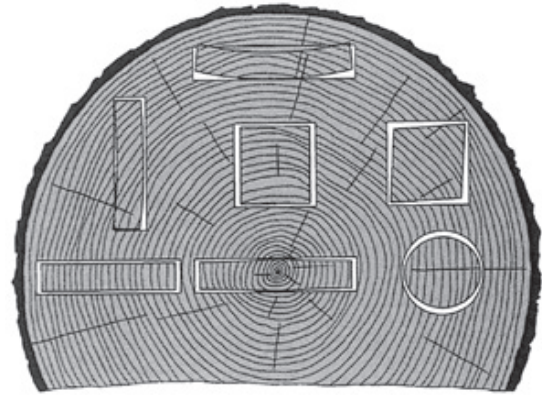
### (1) 木材の収縮

木材の収縮は一般に繊維飽和点以下の含水率範囲で水分が減少することによって細胞壁の厚さが減少し全体の寸法が縮むことをいう。木材の収縮率は接線方向 (T方向) が最も大きくなる。このように方向によって収縮の異なる性質を「収縮の異方性」といい (図II-14)、この性質があるために、木材を伐り出した丸太の部分によって収縮による断面の変形 (狂い) が図II-15のようにそれぞれ異なることとなる。

$$\begin{array}{ccccccc} \text{接線方向} & : & \text{半径方向} & : & \text{長さ方向} & = & 10 : 5 : 1 \sim 0.5 \\ \text{(T)} & & \text{(R)} & & \text{(L)} & & \end{array}$$



図II-14 含水率による寸法変化 (ヒノキ)

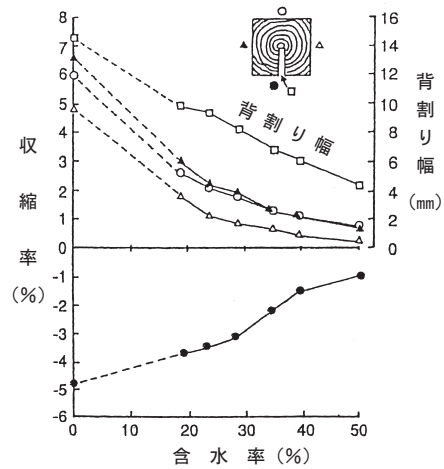


図II-15 木取りの違いによる木材の収縮異方性

柱材では乾燥前後で図II-16のように断面変形が生じる。また、背割りのある柱材は乾燥に伴い断面の特徴的な寸法変化を示す(図II-17)。背割りのない3面は含水率低下とともに収縮し寸法が短くなるが、背割りのある面は逆に寸法が長くなる(マイナスの収縮=寸法が長くなる)。このような木材の寸法変化をよく認識した上で木材を良質な構造材料として利用することを考えれば、「木材は乾燥した後仕上げを行い、寸法の狂いが後に出ない状態として使用することが望ましい。



図II-16 柱材断面の乾燥に伴う形状変化 (久田)



図II-17 乾燥によるスギ柱材(12cm角)の寸法の変化 (久田)

収縮は、含水率の低下によって起こる現象で、結合水が細胞壁から失われることによって起こる。従って、繊維飽和点(およそ30%)を下回った時点から収縮が始まり、その大きさは密度や細胞壁の厚さに影響される。一般に収縮率の大きい材は、密度が大きい(細胞壁の厚い)重い材である。

(2) 収縮率の表し方

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{含水率 15\%まで} \\ \text{の収縮率} \end{array}} \quad \text{気乾収縮率} = \frac{l_{\text{生}} - l_{15}}{l_{\text{生}}} \times 100 \quad (\%)$$

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{含水率 0\%まで} \\ \text{の収縮率} \end{array}} \quad \text{全収縮率} = \frac{l_{\text{生}} - l_0}{l_{\text{生}}} \times 100 \quad (\%)$$

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{含水率 1\%当り} \\ \text{の収縮率} \end{array}} \quad \text{平均収縮率} = \frac{l_n - l_0}{n l} \times 100 \quad (\%)$$

$l_{\text{生}}$  : 生材時の長さ

$l_{15}$  : 含水率 15%時の長さ

$$l_{15} = l_0 + \frac{15 (l_n - l_0)}{n}$$

$l_0$  : 全乾時の長さ

$l_n$  : 含水率 n %時の長さ (15%付近の気乾時の長さ)

表Ⅱ-10 主要樹種の小試験片での収縮率 (寺沢・筒本)

樹種	収縮率 (%)									比重		
	含水率15%まで			全乾まで			含水率1%当り			$r_0$	$r_{15}$	
	T	R	L	T	R	L	T	R	L			
針葉樹材	スギ	3.5	1.1	0.03	7.2	2.4	0.19	0.26	0.09	0.011	0.33	0.36
	トドマツ	4.1	1.0	0.03	9.5	2.8	0.19	0.38	0.12	0.010	0.39	0.41
	ヒノキ	3.5	1.5	0.05	6.4	3.1	0.25	0.21	0.11	0.013	0.37	0.41
	モミ	2.6	1.3	—	6.1	3.0	0.29	0.24	0.12	—	0.40	0.44
	カラマツ	4.1	1.7	0.01	8.6	3.9	0.18	0.31	0.14	0.011	0.50	0.53
	ツガ	2.9	1.6	0.02	7.2	4.0	0.16	0.30	0.17	0.010	0.51	0.54
	アカマツ	4.4	1.9	0.03	8.9	4.1	0.20	0.31	0.15	0.013	0.52	0.55
	ベイスギ*	2.6	1.2	—	5.0	2.4	—	0.14	0.07	—	—	0.38
	ベイモミ	—	—	—	6.9	2.9	—	0.20	0.08	—	—	0.43
	ベイトウヒ*	3.8	2.1	—	7.5	4.3	—	0.19	0.12	—	—	0.45
	ベイツガ*	3.9	2.1	—	7.9	4.3	—	0.23	0.13	—	—	0.47
	ベイマツ*	3.8	2.5	—	7.8	5.0	—	0.23	0.14	—	—	0.55
	アガチス	4.2	1.8	0.02	8.6	4.1	0.17	0.30	0.16	0.011	0.43	0.46
広葉樹材	キリ	2.2	0.5	0.02	5.2	1.4	0.17	0.20	0.06	0.011	0.26	0.29
	カツラ	4.1	1.9	0.15	7.5	4.0	0.44	0.24	0.15	0.020	0.45	0.49
	シナノキ	5.7	3.7	0.08	9.6	6.7	0.25	0.28	0.21	0.012	0.46	0.49
	ブナ	6.9	2.4	0.11	11.5	5.0	0.37	0.33	0.18	0.017	0.64	0.68
	ミズナラ	5.9	2.0	0.24	10.1	4.3	0.48	0.30	0.16	0.016	0.65	0.70
	マカンバ	3.9	2.6	0.20	7.6	5.2	0.44	0.26	0.21	0.016	0.61	0.65
	タブノキ	4.1	1.6	0.06	8.1	4.0	0.23	0.28	0.16	0.012	0.63	0.68
	アカガシ	6.8	2.6	0.09	12.1	5.6	0.27	0.38	0.20	0.013	0.87	0.92
	イスノキ	8.9	3.9	0.11	14.2	6.9	0.29	0.39	0.21	0.012	0.88	0.92
	レッドラワン	4.2	1.4	0.05	8.1	3.3	0.26	0.27	0.13	0.014	0.47	0.51
	カプール	5.2	1.7	0.03	10.0	4.2	0.24	0.35	0.17	0.013	0.62	0.65
	アピトン	6.6	2.8	0.01	11.3	5.7	0.21	0.34	0.20	0.013	0.68	0.72
	クルイン	8.3	3.9	0.03	13.7	7.5	0.22	0.39	0.25	0.013	0.76	0.79
	ジョンコン	4.1	1.8	0.02	8.1	4.1	0.18	0.28	0.16	0.011	0.47	0.50
	ラミン	5.3	1.7	0.03	10.8	4.8	0.16	0.39	0.21	0.011	0.62	0.65

T : 接線方向 R : 半径方向 L : 長さ方向  $r_0$  : 全乾比重  $r_{15}$  : 気乾比重

\*印の気乾収縮率は平均収縮率と含水率 6 %時の収縮率から外挿して求めた。



表Ⅱ-10 に示された収縮率を使って寸法変化を計算する例をあげてみる。

例) 内装に用いられているスギの壁板(板目板)は、夏に含水率 13%で幅が 120mm であった。冬に暖房を開始し含水率が 8%になった場合、板幅は何 mm 縮むか。

①夏と冬で含水率の変化はいくらであるかを算出。

$$13\% - 8\% = 5\%$$

②表Ⅱ-10 から、含水率 1%あたりのスギ板目方向の収縮率は、0.26%である。

③①で算出した含水率 5%変化に対して、何%収縮するかを算出。

$$0.26\% \times 5\% = 1.3\%$$

④夏の板幅は 120mm であるため、

$$120\text{mm} \times 0.013 = 1.56\text{mm}$$

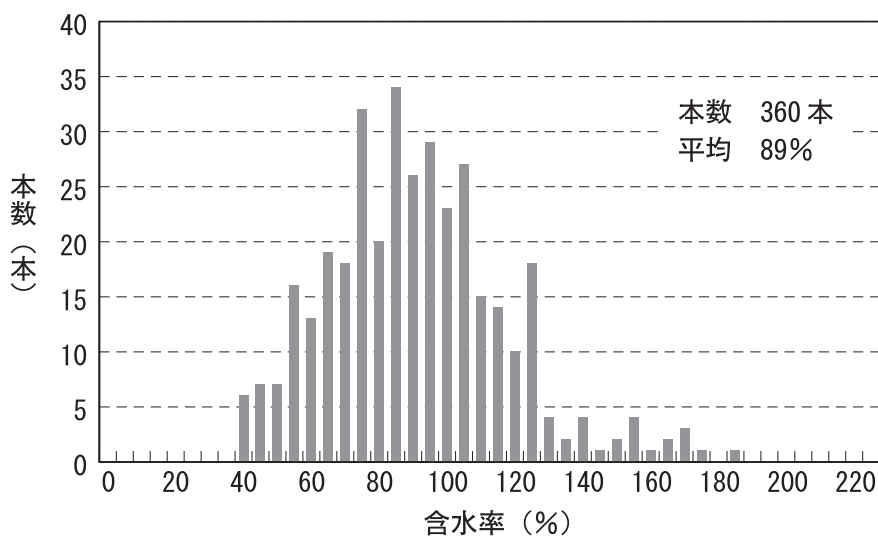
したがって、1.56mm 縮むことになる。

## 9. 人工乾燥前の材の選別

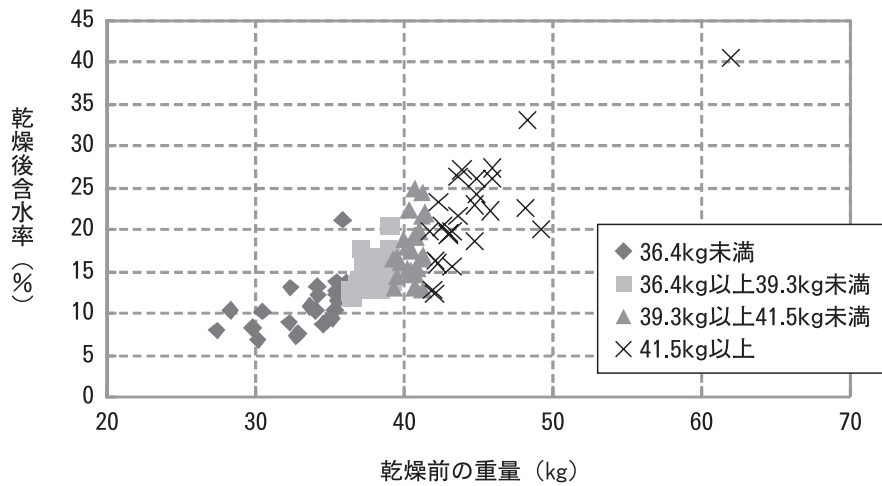
スギ心持ち材の初期含水率は概ね 40~150%の広い範囲に分布しているうえに部位によっても異なる分布を示す(図Ⅱ-18)。このため仕上がり含水率を均一にするには、乾燥前の材の選別仕分けが非常に重要になる。

図Ⅱ-19 は、初期含水率の異なる材を同時に乾燥機に入れて乾燥した時の乾燥終了後の含水率の測定結果であり、乾燥前の重量との関係を示している。この図によると、仕上がり含水率は非常に広い範囲に分布しており、高温乾燥等の採用によって乾燥時間が短くなると、このような傾向が顕著になると思われる。また、測定結果によると乾燥前の重量と乾燥後の材の含水率とは高い相関を示している。このことから乾燥前に重量選別によって似通ったものだけを集めて乾燥すれば、仕上がり含水率を狭い範囲にコントロールすることが可能であるとともに、乾燥能率の向上も期待できる。

乾燥前の選別を重量で行うのと含水率の高低で行うのとどちらが良いかは、現在のところ明らかでないが、高含水率領域において精度の高い含水率測定を行うことは技術的に極めて困難であるため、現状では重量選別のほうが実用的であると考えられる。

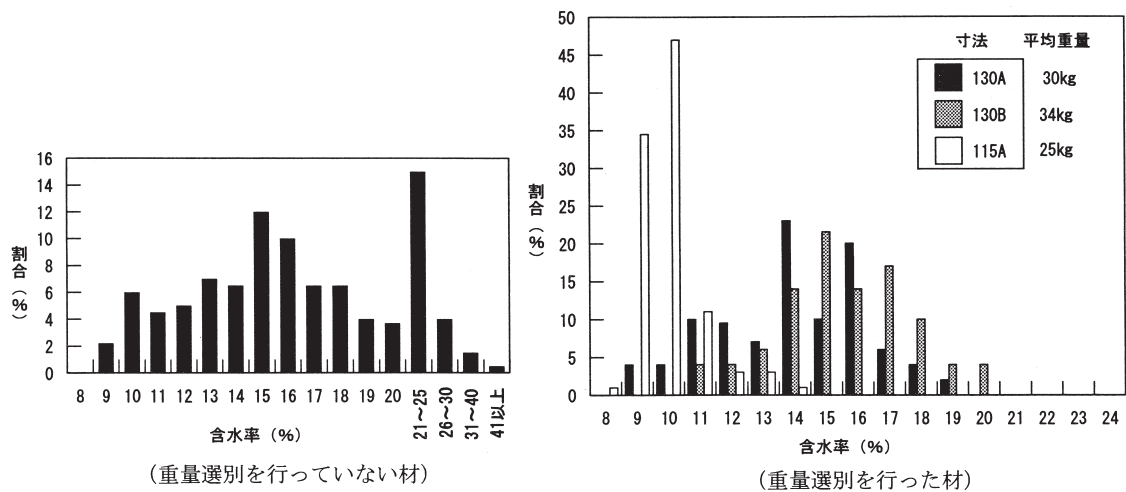


図Ⅱ-18 スギ心持ち柱材の初期含水率の分布



図Ⅱ-19 高温乾燥した材の乾燥前の重量と乾燥後の含水率との関係  
 供試材：スギ心持ち柱材、寸法 130×130×4000mm

図Ⅱ-20は、重量選別を行った材と行わなかった材の仕上がり含水率の違いを示したものであるが、選別を行うことにより仕上がり含水率の差をある程度狭い範囲に管理することができる。しかし、JAS規格にしたがって含水率を一定値以下に管理しようとする、この場合でもまだ平均含水率を15%くらいまで下げる必要があり、乾燥時間短縮や乾燥コスト低減の目的からするとなお困難な問題を抱えている。



図Ⅱ-20 重量選別による仕上がり含水率の均一化（院庄林業）

### Ⅲ. 乾燥設備・機器

#### 1. 木材乾燥における温度、湿度、風速の役割

木材の乾燥において温度、湿度、風速は極めて重要な3要素であり、それぞれ次のような役割を担っている。

##### (1) 温度

- ①木材を加熱し、木材中の水分を蒸発させる。
- ②壁体から逃げる熱を補充する。
- ③換気による吸気（新鮮空気）を加熱する。

##### (2) 湿度

- ①乾燥速度を調節し、材料の割れ等欠点発生を抑制する。
- ②仕上がり含水率の均一化（イコーライジング）。
- ③乾燥応力の除去（コンディショニング）。

##### (3) 風速

- ①棧積み材全体に均一な温度、湿度を供給する。
- ②材面付近の低温、高湿空気を速やかに取り去る。

#### 2. 乾燥機の具備すべき条件

木材を能率的で損傷の発生も少なく乾燥するためには、使用する乾燥機は当然必要とされる性能を有していなければならない。乾燥装置として最低限備えるべき条件には、次のようなものがあげられる。

- ①乾燥室内の温度、湿度、風速の分布が均一であり、乾燥むらが少ないこと。
- ②温度、湿度の保持や調節が容易で、正確に行えること。
- ③高温、高湿、酸性ガスなどに対する耐久性が優れていること。
- ④気密性、保温性が優れていること。
- ⑤乾燥コスト（ランニングコスト、設備費、運転経費等）が安いこと。
- ⑥取り扱いが容易であること。
- ⑦保守管理や修繕が容易であること。
- ⑧安全性が高いこと。
- ⑨公害発生（騒音、排煙、有毒ガス等）がないこと。

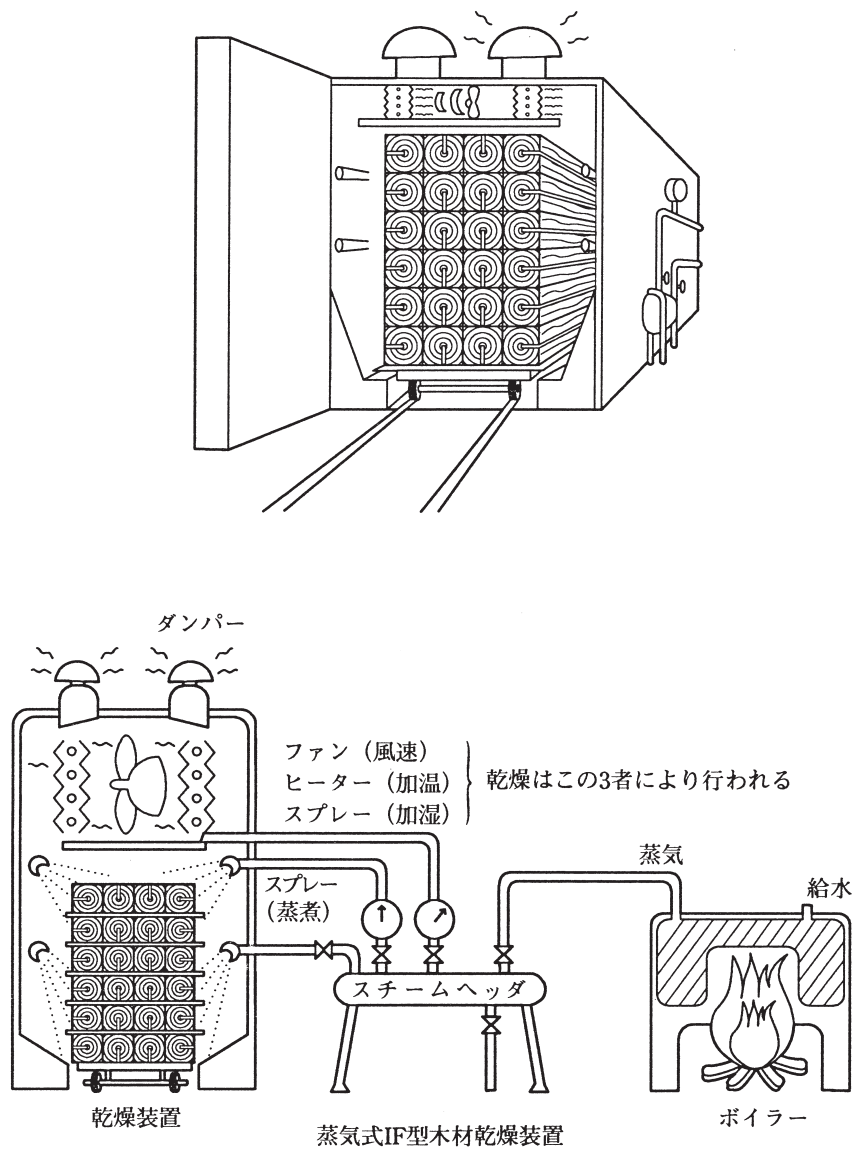
乾燥装置を導入する際には、これらの点が具備されるよう予め乾燥装置メーカーに対して要求すべきである。

#### 3. 蒸気式乾燥機

蒸気式乾燥機は現在最も多く普及しており、針葉樹及び広葉樹を問わずあらゆる材の乾燥に広く使われている。原理的には、ボイラーからの蒸気を乾燥機内の熱交換機に送り、加熱した空気によって木材を乾燥する方法である。また、必要に応じて生蒸気を噴射して湿度の調整を行う。機内の空気を循環するため送風機が用いられる。我が国では送風機を機内に設置する方式が多く、インターナルファン型（略して「IF型」という）と呼ばれている。

蒸気式乾燥機のうち、乾燥温度を100℃以上に高められるものを高温乾燥機と呼んでいるが、

高温乾燥機には高い気密性と断熱性が要求される。機材の耐久性を高めるとともに、乾燥むらを少なくするため、一般の乾燥機より送風量を多くする必要がある。



図Ⅲ－１ 蒸気式 IF 型木材乾燥装置

〔長所〕

- ①乾燥温度範囲が 40～130℃と広く、広範囲の樹材種の乾燥に対応できる。
- ②設備の大型化が可能であり、乾燥能率を上げることができる。
- ③加湿、増湿は生蒸気の噴射で行い、割れやすい材の割れ防止や脱脂処理などの操作が容易に行える。
- ④使用する燃料（木屑、重油、灯油）が任意に選択できる。

〔短所〕

- ①大きなボイラーでは資格取得者が必要であり、人件費という点で費用がかさむ。
- ②設備費は比較的高い。木質ボイラーでは自動燃料投入装置や防塵装置も高価である。
- ③ある程度木材乾燥の理論に精通し、実務経験のある技術者が必要な場合がある。

### 3. 1 乾燥室炉体

#### (1) 容量

収容材積が 14~16 m<sup>3</sup> (50~60 石) の規模のものが一般的である。乾燥室の幅は、乾燥室入口の幅が、棧積み幅、送風方向の乾燥むら、フォークリフトによる運搬等の点から 1.5~2 m が標準である。さらに乾燥室内では作業性、風の循環等の点から棧積みと壁の間に 0.5mほどの空間が必要である。したがって乾燥室の幅は合計 2.5~3 mとなる。

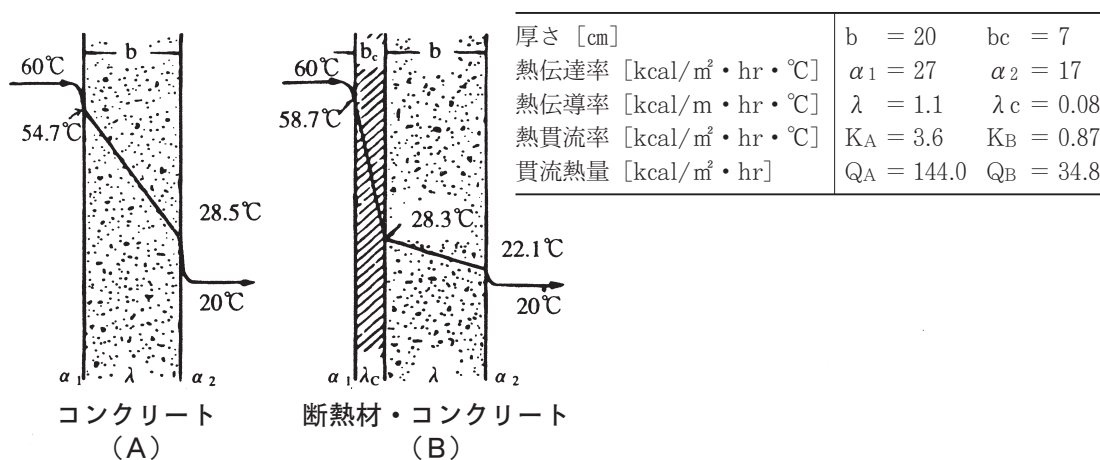
乾燥室の高さは全高 4 m程度が必要である。棧積みの高さは作業性、上下方向の風速の均一性から実高 2~2.5mが適しており、乾燥室の高さにはこれに台車、棧積み上部の空間 (床面から天井仕切板まで 3 m)、送風装置、加熱装置等の高さ加わる。乾燥室の長さは、たとえば 4 m定尺材の台車を 2 台直列に入れる場合には、乾燥室長さを 9.5m程度とし、材が乱尺の場合には 10mと余裕が必要である。また、乾燥室前後と各棧積み間にも 0.5mほどの余裕が必要である。

最近では装置が大型化する傾向にあり、収容材積が 50~100 m<sup>3</sup>近くに達する装置も現れている。材を台車に載せて搬入する方法と、間口を広く取って材をフォークリフトで搬入する方法とがある。

#### (2) 乾燥室炉体

鉄筋コンクリート等で構築し、内側に断熱材を貼ったものと、断熱材をサンドイッチしたパネル構造のものが一般的である (図Ⅲ-2)。パネル構造のものは工事期間を短縮でき、小型のものは予め工場で全て組み立ててしまうことが可能である。パネルは一度損傷すると部分的な取り替えができないため、良質のステンレスパネルを用いる必要がある。

炉体には、まず構造的な強さが基本的な性能として求められる。さらに、気密性、断熱性、耐久性なども求められる。蒸煮を頻繁に行う場合や高温で使用する場合には、壁や扉の耐久性に特に注意を払う必要がある。また、壁体の断熱性にも十分留意する必要がある。断熱性が悪いと熱ロスが多くなり、内壁に結露が生じて必要な湿度条件を確保できない事態が生じる。これは、特に寒冷地などで多く見られる現象であるため、予め壁体仕様での対策をしておく必要がある。さらに乾燥機内は木材中から揮発する成分によってかなり強い酸性になるため、腐食が進行する前に必要な箇所を定期的に塗装し直す配慮も必要である。



図Ⅲ-2 壁体構造による熱貫流の比較 (寺沢)

### 3. 2送風装置

乾燥における風の役割は、乾燥する木材へ熱を供給することと、木材から蒸発した水分を速やかに取り除くことである。必要とされる風速は、風の流れる距離（棧積み幅）と棧木厚、乾燥する材種によって異なる。

乾燥が速い材ほど、高含水率の乾燥材ほど風速を大きくする必要がある。これは、蒸発する水分量が多い分だけ、それらを取り除くのに多くの風量が必要になるためである。棧積み内を通過する風速が小さいと、乾燥むらが発生し、乾燥が遅れた部分の含水率を低下させるのに長時間を必要とする。

#### (1) 風速と室内温度

風速が小さいと、風が棧積み内を通過する際に熱が奪われて、風下側の温度が低下する。この場合には、風下側で乾燥の遅れが生じる。一般の装置では風速 1.5～2.0m/sec が必要である。また、乾燥むらを少なくするために、ファンは一定時間ごとに切り替えられる両循環式が適当である。さらに風が効率よく棧積み内を通過するために、吊り天井と棧積み上部との間の風路を遮蔽板（バップル）で閉ざす必要がある。

#### (2) 風速と棧木厚

棧木厚は、風速 1.5～2.0m/sec の範囲では20～30mm が標準である。棧木厚が薄い場合は、風速を強くして、風上と風下との温度差を小さくする必要がある。

#### (3) 送風機と送風機用モーター

一般的に、直径 50～70cm のプロペラファンが多く用いられる。送風機は、乾燥機の長さ方向に 1.5～2.0mの間隔で配置する必要がある。送風機は十分な風量を持つことのほか、風圧の高いことが必要である。通常は棧積み 1 列当たり 0.05～0.07kP の風圧が必要であるとされる。これを下回ると、風が風下側まで到達しなくなる。

モーターはファンと直結式の場合は耐熱耐湿型を用いる必要がある。高温乾燥機では、耐熱性の限界からモーターを機外におくことが一般的である。

### 3. 3加熱装置

加熱装置には、一般に放熱効率のよいフィン付きヒーターが用いられ、送風機の前後に配置される。ヒーターの容量は、乾燥する木材の量や使用温度範囲を考慮して決められる。装置の使用温度範囲が広い場合は、ヒーター系列を分割したり、蒸気圧力が変更できるようにしておくとう率的である。

### 3. 4加湿装置

加湿装置は、乾燥開始時の温度上昇、乾燥が遅く割れ易い材を乾燥させる場合の湿度調節、乾燥終了時の含水率調整（イコーライジング）、応力除去（コンディショニング）等の操作を行うのに必要である。直径 2～3mm の孔を開けた管を天井付近に設置し、生蒸気を噴出して加湿する。

蒸煮処理の際に用いる蒸煮管は、これとは別の管を側壁部に設け、大量に蒸気を噴出できるようにしておく。乾燥終了時の加湿操作で生蒸気を用いると、蒸気の熱によって室温が上昇してしまい、結果として目的とする湿度条件を維持することが困難になる場合がある。このような場合には、水や温水の噴射装置が必要となる。

### 3. 5吸・排気装置

吸・排気装置は、木材から蒸発した水分を乾燥機外へ放出するためのものである。蒸気式の場合、吸排気筒は標準的な規模のもので直径約20cm、高さ2m以下（長すぎると吸気機能が低下する）の筒を天井部ファンの前後に設置する。この筒はファンの回転方向の切り替えによって（風圧差によって換気する構造）吸排気の機能が入れ替わる。必要とされる排気量は、木材からの蒸発水分量によってきめられる。吸・排気方式では、排出する空気量に見合う量の外気を吸入しなければならないため、吸入した外気を温めなければならなくなる。したがって熱ロスを少なくするためには、換気量を最小限にとどめる工夫が必要である。このため寒冷地などでは、熱交換器を用いて吸入空気を加熱する方法も用いられている。近年では強制排気を採用している装置もある。必要換気量は一般的に乾燥室の奥行き方向1mあたり1～2（ $\text{m}^3/\text{min}$ ）である。

### 3. 6その他

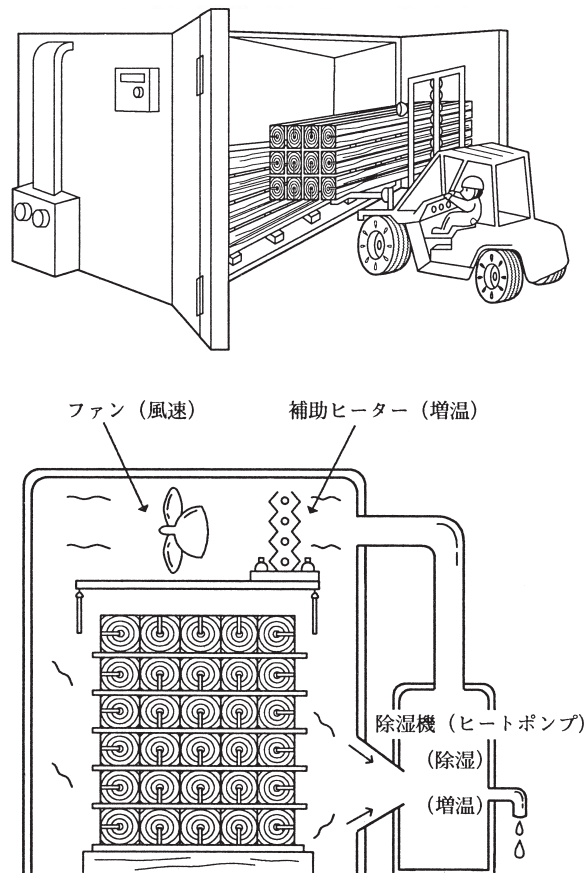
- 1) 温湿度の自動制御装置
- 2) 温湿度自動記録計
- 3) ファン正逆自動制御装置
- 4) 台車・狂い矯正装置

### 4. 除湿式乾燥機

除湿式乾燥機は、除湿機を利用して乾燥炉内の湿度を下げることによって、木材を乾燥させようとする方式である（図Ⅲ-3）。

除湿式乾燥機は当初建築用針葉樹の人工乾燥用として昭和50年代に普及していた。最近では乾燥機自体がシンプルな構造をもつことから導入しやすく、広葉樹材の建築内装用や木工・工芸品などにも使用されている。

除湿機は、通常圧縮式ヒートポンプが用いられる。除湿式乾燥は蒸気式と比較しても使用する温度範囲や機械の構成が異なるだけで、乾燥原理上は同じ通気式乾燥機に属する。また、現在のヒートポンプに用いられる冷媒は、環境に配慮して、オゾン破壊係数0で地球温暖化係数1430と比較的小さい代替フロンR-134a等である。エネルギー効率の高い運転可能温度は40～50℃である。



図Ⅲ-3 低温除湿乾燥機

#### [長所]

- ①用いる乾燥温度が低いため、割れ、落ち込み、収縮量の増大、変色などの発生が蒸気式と比較して少ない。
- ②ボイラーが不要で、設備費が安い。またボイラーマンを必要としないため人件費が割安である。
- ③電気エネルギー主体の乾燥方式であるため、操作は比較的容易で安全性も高い。
- ④ヒートポンプ方式の採用により、所用電力量はさほど大きくならない。
- ⑤設置場所の制限は少ない。

#### [短所]

- ①蒸気式と比較すると乾燥時間が長くなる（蒸気式の1.3～2.0倍）。特に、低含水率域での乾燥速度は小さくなる。
- ②仕上がり目標含水率が低い材の乾燥には不向きである。
- ③除湿機の容量が過小の場合には材にカビが発生する。
- ④寒冷地の冬季には電熱ヒーターの電力量がかさみ乾燥コストが高くなる。
- ⑤加湿装置のないものが多く、調湿処理が難しい。
- ⑥除湿ユニット部（ラジエーター）の腐食が早い（1～2年）。
- ⑦低温乾燥のため脱脂処理が難しい。

### 4. 1 乾燥室炉体

炉体はほとんど硬質ウレタン等の断熱材を内包したステンレスまたは鋼板パネル構造のものである。高温域での使用ではないので、断熱材自体の耐久性はある程度低くても良い。しかし、熱ロスを嫌うため、断熱性や気密性については蒸気式よりむしろ高い性能が要求される。床面も断熱モルタル加工することが望ましい。その他、冷凍コンテナを利用する例もある。

### 4. 2 送風装置

一般的に乾燥速度が遅いため、風速は蒸気式より弱くても良い。しかし除湿式乾燥機の場合でも風の循環が不十分だと乾燥が遅れたり材表面のカビの発生原因となるので、少なくとも、0.5～1.0m/sec 程度の材間風速を確保できるファンが必要である。また、加湿操作がしにくいいため、特に割れやすい材の乾燥では風速を弱くする必要がある。

### 4. 3 温湿度の制御装置

除湿式乾燥機の温湿度制御装置は、基本的には蒸気式と同じ仕様であるが、調節計が湿度表示であり、湿度の検出には相対湿度センサーを用いることが多い。湿度の調節は、除湿機の運転・休止により行う。乾燥室内の温度、湿度の制御は温度センサー等の検出値と設定値との差でコントロールするのが基本であるが、場合によっては除湿機の運転、休止タイマーで調節する方式も行われる。

### 4. 4 補助熱源

乾燥開始時の昇温と乾燥後期の室温維持のために、補助熱源が必要になる。熱源としては、電



気ヒーターのほか温水ボイラーや小型ボイラーによる蒸気が用いられる。特に寒冷地では熱消費が多くなるので、コストの低い熱源を利用する必要がある。

## 5. 温水式乾燥機

高温セット処理と中温乾燥の組合せ乾燥方式を採用し、中温乾燥での熱源機器を蒸気ボイラーから太陽熱集熱器とヒートポンプへ代替することで、省エネ・低コスト化を目指した研究事例を巻末の資料に示す(70頁)。

この研究事例では、太陽熱集熱器の熱供給寄与率は低いため、ヒートポンプにより生成した温水をユニットヒータ(モーター・ファン・熱交換器により構成)に供給し、熱交換器により乾燥室内の空気を昇温するとともに、ファンにより空気を循環させる温水式乾燥機として機能している。

蒸気式高温乾燥機により高温セット処理を行ったスギ平角を試験材として、試作した乾燥機で中温乾燥18日間行ったところ、含水率は16%に低下し、日本農林規格(JAS)基準であるSD20を満たす結果となっている。

蒸気式高温乾燥機による高温セット処理は必要であるものの、その後の中温乾燥により乾燥材の品質を保ちながら、一次エネルギー消費量を56%削減、ランニングコストを60%削減している。

## 6. 品質管理機器

良好な人工乾燥を行うには、乾燥機の温度・湿度や通風条件の管理、乾燥材の含水率などの品質管理のため、次のような機器を備える必要がある。

### (1) 温度計

棒状温度計(精度 $1/5^{\circ}\text{C}$ )、または電気式温度計

### (2) 湿度計

ポータブルタイプの電気式湿度計

### (3) 風速計

熱線式風速計

### (4) 恒温乾燥器

全乾重量を求めるための必需品。温度 $100\sim 105^{\circ}\text{C}$ に調節できるものでなければならない。

### (5) 秤

試験材用 秤量：10Kg 感量：1.0g

小試験片用 秤量：200g 感量：0.1g

## 7. 乾燥設備費

乾燥設備としては、乾燥機本体のほか建物、ボイラー、棧積み場、天乾場などの付帯設備が必要である。直接的な乾燥設備のみを比較すると、標準的な性能を有する装置の概算額は、以下のとおりである。除湿式の場合にはパッケージ型の除湿機を室内に置いただけの簡易なものから、送風機や除湿機を完備した本格的なものまで各種あり、設備費にかなりの差がある。

(1) 蒸気式乾燥機：50石( $13.9\text{ m}^3$ ) 2機( $27.8\text{ m}^3$ )

乾燥機	1,800万円
ボイラー設備	800万円（木くずだき 500kg/hr マルサイクロン付き） 500万円（重油だき貫流、500kg/hr）
(2) 除湿式乾燥機：50石（13.9 m <sup>3</sup> ）	
乾燥機	500～1,000万円

## 8. 乾燥設備の選択方法

乾燥方式の選択については、次の点を考慮する必要がある。

- (1) 乾燥する樹種及び材種
- (2) 材の用途及び品質（材色、割れなど）
- (3) 初期含水率
- (4) 仕上がり含水率
- (5) 乾燥日数（処理サイクル）
- (6) 使用燃料の種類
- (7) 操作員、作業員の配置
- (8) 設備規模と設備費
- (9) 乾燥コスト

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所が各樹種・材種に適する乾燥方式として、指針を示している（表Ⅲ—1）。これは設備導入の際の基本的な指針として役立つものである。

表Ⅲ—1 樹種、材種と適する乾燥方式（久田）

樹種・材種	乾燥方式
広葉樹 一般材	蒸気式
難乾燥材	減圧式、除湿式
厚材	減圧式
針葉樹 一般材	蒸気式、除湿式
構造用材	除湿式、蒸気式、減圧式
造作用材	除湿式、蒸気式
集成材ラミナ	蒸気式、除湿式
短尺材	減圧式
木工芸用材	除湿式
ヤニ処理の必要な材	蒸気式、減圧式

## 9. 乾燥設備設計の際の要件

乾燥室の設計は、乾燥材の生産量に直結するものであるため、使いやすく効率的な仕様にすべきである。この場合の判断基準は以下のとおりである。特に次の点に留意して乾燥室の設計にあたる必要がある。

- (1) 乾燥方式：対象となる材料の種類で決まる。
  - ① 樹種（針葉樹、広葉樹、国産材、外材）

②用途（建築構造材、造作材、家具、楽器）

③設置目的（乾燥材を自社で使用するのか、賃乾燥か）

(2) 乾燥室の規模：規模は生産量で決まり、それは樹種、材種（木どり）、初期含水率等から乾燥サイクルが予想され推定可能である。その推定方法は以下の①および②の式を参考にする。

$$\text{必要乾燥室容量 (m}^3\text{)} = \frac{\text{月間所用材積 (m}^3\text{)}}{\frac{\text{月間運転日数 (日)}}{\text{乾燥1サイクル日数 (日)}}} \cdots \text{①}$$

乾燥室の容量は収容される木材の実材積で示されているので注意する。当然、木材の厚さ、形状、積み方で材積の値は変わる。栈積み実材積 (V) の推定は式②を用いる。

栈積み実材積 V (m<sup>3</sup>)

$$= \text{積み幅 (m)} \times \text{積み高さ (m)} \times \text{積み長さ (m)} \times \frac{\text{材厚 (mm)}}{\text{材厚 (mm)} + \text{栈木厚 (mm)}} \times K \cdots \text{②}$$

ここに、K=空げきロス係数

幅決め材 : 0.8~0.9

片耳付き材 : 0.65~0.75

両耳付き材 : 0.5~0.6、とする。

## IV. 木材乾燥の実務

### 1. 針葉樹の乾燥特性

針葉樹材は、広葉樹材よりも乾燥が容易で、乾燥時間も短くて済む場合が多い。しかし、このことはあくまで材の厚さや木取りが同じという前提においてのことであり、実際の乾燥では、針葉樹と広葉樹との違いの他に、樹種や木取りも多様になるため、これらを総合して乾燥の難易度が決まる。例えばスギ材の場合、板材は乾燥が容易であっても、心持ち柱材になると乾燥が難しい材として扱われる。

乾燥の難易度は、必要とされる乾燥時間の長短とほぼ比例的な関係にある。よって、乾燥が難しい材ほど緩やかな条件で、十分時間をかけて乾燥する必要がある。

針葉樹材の乾燥における留意点を示す。

- ①全体的に含水率の高い材がある（例：スギ辺材、スギ黒心材）。

表IV-1 主要針葉樹材の生材含水率

樹種	生材含水率（％）	
	辺材	心材
ヒノキ	153	34
スギ	151	72
アカマツ	145	37

- ②特に割れ易い材がある（例：スギ心持ち材）。

- ③狂いの大きな樹種がある（例：マツ材全般）。

- ④ヤニ処理の必要な樹種がある（例：マツ材全般）。

- ⑤材色や艶など視覚的な性質が重視される材がある（例：ヒノキ材、スギ材）。

### 2. 天然乾燥の実務

天然乾燥は屋外に木材を棧積みし、太陽熱、風など自然のエネルギーを利用して乾燥する方法で、古くから行われている。天然乾燥では、乾燥条件を人為的に制御できないので、人工乾燥よりも損傷が多くなったり乾燥時間が延びる。一般的に、我が国では天然乾燥で到達できる含水率は15～16%が限度であり、経済的に考えると25%前後が限度と見なされる。したがって、人工乾燥の予備乾燥として含水率を均一に揃えることが最大の目的になる。乾燥の速さは自然条件に大きく影響されるので、工場生産を計画的に行うには所要日数をできるだけ正確に把握しておく必要がある。なお、割れやすい材、かびやすい材、腐りやすい材は天然乾燥には不向きで、生材から直接人工乾燥に回した方がよい。

#### (1) 天然乾燥の目的

- ①生材から乾燥すると収縮が増大する材の歩留まり向上

- ②高含水率材の含水率低下による人工乾燥時間の短縮化

③生材含水率のバラツキの減少

(2) 天然乾燥の方法と留意点

①天然乾燥土場は、整理整頓して常に水はけ及び通風を良くしておく。

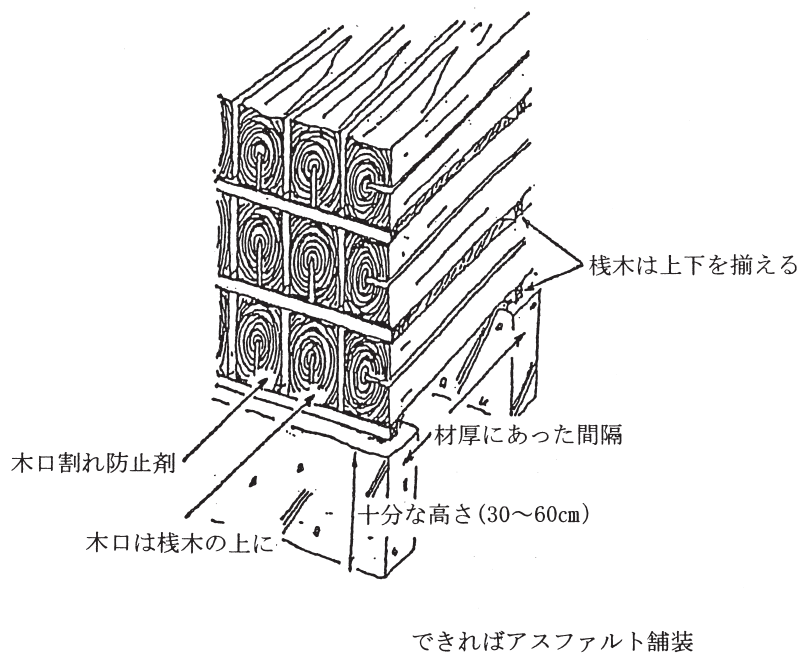
②栈積みの前後左右には少なくとも人が通れる程度の間隔を開けて、常風に対して材が直角になるように配置するとともに、適切な厚さの栈木を正しい間隔で入れる（表IV-2）。

表IV-2 材の厚さと栈木間隔

材 厚 (cm)	1.2 以下	1.2 ~ 2.4	2.4 ~ 3.6	3.6 ~ 6.0	6.0 以上
栈木間隔 (cm)	30	45	60	75	90

③土台の高さは少なくとも30~60cm以上にして、栈積み下部の乾燥の遅れを防ぎ、上部には屋根をかけるなどして、上部と下部の含水率差を小さくし、割れ、曲がり、反り防止及び歩留まりの向上を図る（図IV-1）。

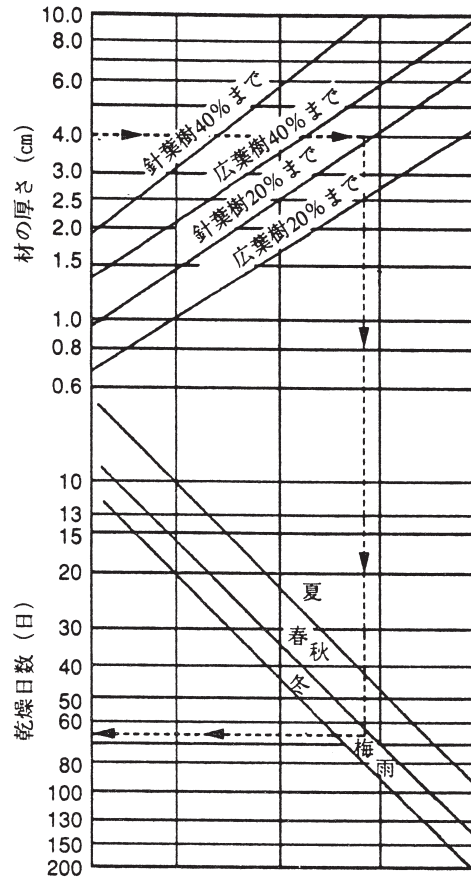
④一つの栈積みは、同一樹種でそろえ、なるべく初期含水率及び厚さを揃えて積む。



図IV-1 天然乾燥の方法と留意点

(3) 天然乾燥の日数

天然乾燥における所要日数の目安を図IV-2に示す。図の例では、材の厚さが4cmの針葉樹材を20%まで乾燥するためには、春・秋の場合には65日の乾燥日数を必要としていることを破線で示している。



図IV-2 季節、材の厚さ別天然乾燥日数（寺沢）

(4) 天然乾燥における損傷

天然乾燥では、乾燥条件が人工乾燥より厳しい場合があり、損傷は予想以上に多く発生することがある。はじめに木口割れが生じ、それが伸びて表面割れや材の裂けに発展することが多い。これを防止するには、木口を割止め剤などでコーティングしたり、栈木を材の木口部分に近づけて配置すると効果がある。

栈積みの最上部や側面の材は、直射日光や雨水で非常に厳しい乾燥条件にさらされるため、反りや変色が生じやすいので屋根をかけたり、捨て板をして防止する。

(5) 板材の天然乾燥

利用目的にもよるが、人工乾燥の前処理として行われることが多い。一般的には、春、秋及び冬には含水率 30%が、また、夏には 20%が人工乾燥に移行する目安である（表Ⅳ－3）。

表Ⅳ－3 季節別の乾燥速度と所要日数（小林）

開始季節	初期含水率 (%)	乾燥速度 (%/日)			所用日数 (日)		
		0～3日	0～7日	0～14日	生～50%	生～30%	生～20%
春	97.0	12.6	8.4	4.8	5	14	47
夏	80.5	11.7	7.4	4.3	3	7	16
秋	69.0	3.2	4.6	3.0	4	12	66
冬	91.5	4.3	5.6	4.0	8	19	50

注) 樹種はスプルース 50mm 厚 (追柁)

(6) 柱材などの天然乾燥

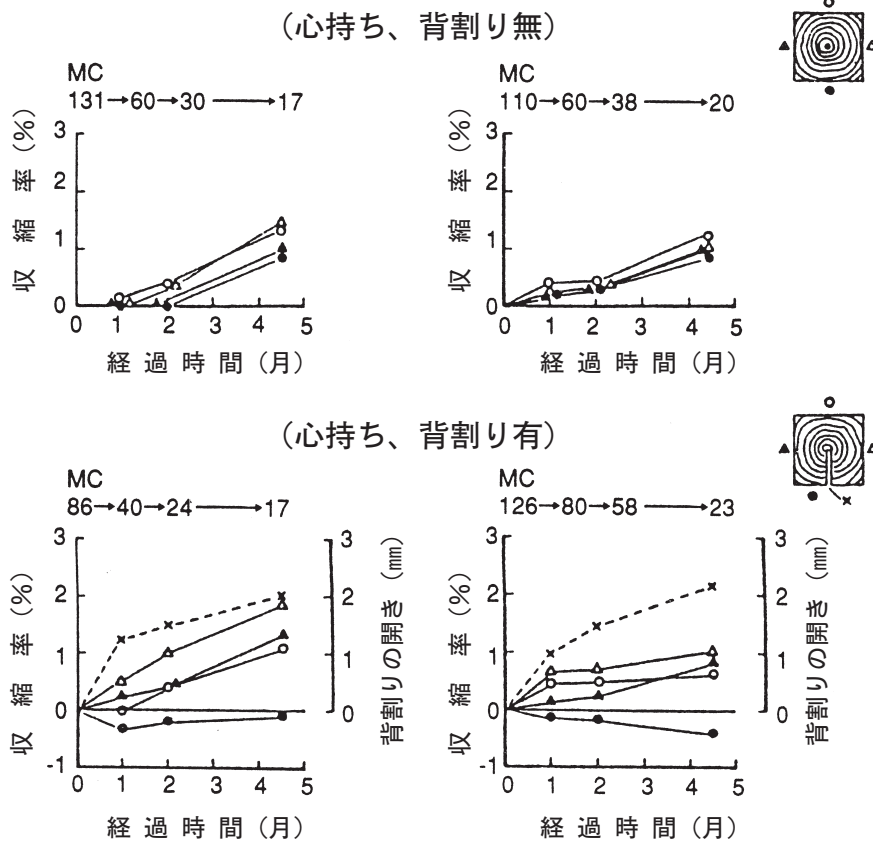
柱材などの製材品の天然乾燥は難しく、乾燥初期に通風が良すぎると割れが生じる場合がある。表Ⅳ－4は、製材品の乾燥日数であるが、季節によって大きく異なる。スギは乾燥日数が長い、ヒノキ及びアカマツはスギに比べて心材含水率が低いために、乾燥所要日数は短くなる。

表Ⅳ－4 製材品の天然乾燥日数（野原）

(生材から30%・25%まで)

樹種	材種(cm)	5月29日		8月30日		11月15日		1月17日	
		30%	25%	30%	25%	30%	25%	30%	25%
スギ	10.5×10.5	52	72	15	24	26	48	72	88
	15.0×10.5	43	52	33	58			53	66
	10.5×4.5	16	26			13	24	73	88
	4.5×4.5	7	10	5	12	14	28	7	15
ヒノキ	10.5×10.5	7	37					21	79
	10.5×4.5							10	15
	4.5×4.5							10	15
アカマツ	10.5×10.5	5	7					16	33
	10.5×4.5	6	7	12	14			15	20
	4.5×4.5			11	14			14	17

心持ち柱材の天然乾燥中の寸法変化は、背割りがない場合には、背割りのある場合に比べて収縮率が小さいことが多い（図Ⅳ－3）。これは背割りのない材には複数面に細やかな割れが生じ、これが広がるためである。これに対し、背割り材では背割りが開いてはかま状の変形が生じ、背割りのある側の寸法が大きくなる。



図IV-3 天然乾燥中（期間5～9月）のスギ心持ち柱材の寸法変化（久田）

### 3. 人工乾燥の実務

#### (1) 人工乾燥の方法

天然乾燥では乾燥に長い時間を必要として、含水率を目標値まで下げることが困難であるだけでなく、樹種によっては損傷の発生を防ぐことが難しい。このため、これを人為的に制御する方法として、各種の人工乾燥法がある。

一般的には、温度及び湿度を調節した空気を循環して乾燥する熱風乾燥法が用いられている。乾燥操作の方法は乾燥法によって異なるが、最も多く用いられている熱風乾燥が基本となる。

熱風乾燥では木材の損傷が少なく、できるだけ早く乾燥させるため、木材の乾燥度合に応じて乾燥機内の温度及び湿度を適正に制御する必要がある。このための目安が乾燥スケジュールで、乾燥材の樹種、材種などによって異なる。

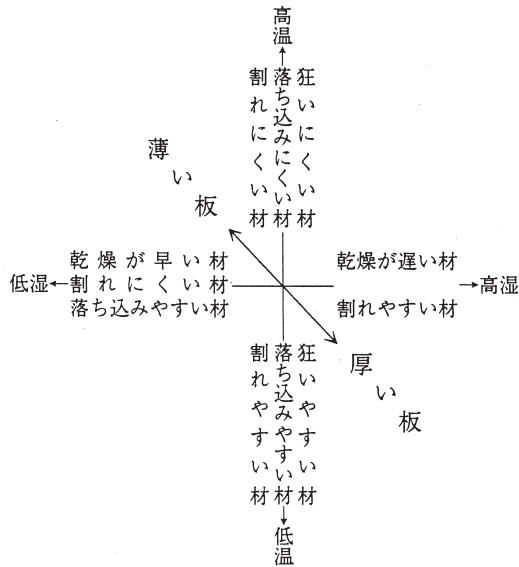
乾燥スケジュールには、①含水率を基準とする含水率スケジュールと、②経過時間を基準とするタイムスケジュールがある。不慣れた樹種・材種を乾燥するときには、始めは試験材を設定して、含水率スケジュールを使って適正処理条件を探す。経験的にどのくらいの時間が経過すれば、どの程度まで乾燥するかを知ってしまえば、時間



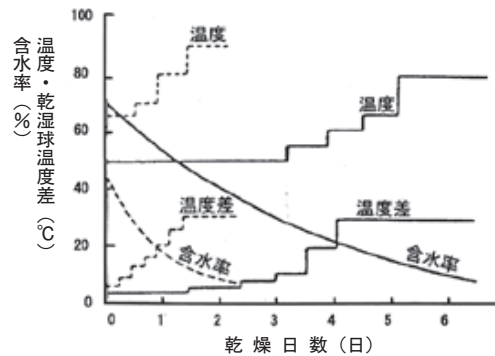
の経過に従って条件を変化させることができる。このように慣れてきたらタイムスケジュールに移行して乾燥機を運転すると良い。

### (2) 乾燥スケジュールの基本形

乾燥スケジュールの作成にあたっては、発生しやすい損傷の種類、水分移動性などをもとにし、乾燥室内の温度及び湿度を設定するが、基本的な考え方は図IV-4、図IV-5のようになる。



図IV-4 材の性状と温湿度との関係



図IV-5 針葉樹と広葉樹のスケジュール模式図

実際の乾燥操作にあたっては、アメリカのマジソン林産研究所が発表している針葉樹材のための人工乾燥スケジュール、国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所等の研究成果、実務経験から得られた国産針葉樹材の資料等をもとに作成された乾燥スケジュール(表IV-5～表IV-8)を参考とするとともに、試験材の含水率と損傷の生じやすさを勘案しながら、乾燥スケジュールを決定することが基本である。

### (3) 乾燥スケジュール作成手順

表IV-5～表IV-8を用いた乾燥スケジュールの作成は、次の手順で行う。

- ① 乾球温度を求めるには、表IV-5から樹種・材種に応じた温度番号を選び出す。表IV-6のT1～T14の温度スケジュールがこれに対応する。
- ② 湿度スケジュールを求めるには、表IV-5から湿度スケジュールの番号を選び出す。
- ③ 表IV-7により初期含水率に応じてA～Gの7種類に分類する。
- ④ 表IV-8の区分別の含水率範囲と乾湿球温度差区分の数値とを段階ごとに組み合わせ、スケジュールを完成させる。

表IV-5 針葉樹材の乾燥スケジュール (森林総合研究所・マジソン林産研究所)

樹種	2.5 cm 厚			5.0 cm 厚		備考
	温度	湿度	日数	温度	湿度	
アカマツ、クロマツ	T11	4	2~3	T10	3	表面割れ
カラマツ	T10	4	2~3	T8	3	表面割れ
モミ(硬)、ツガ	T10	4	3~4	T8	3	表面割れ
トドマツ、モミ(軟)	T12	5	2~3	T10~11	4	
ヒノキ	T11	4	3~3.5	T10	3	
エゾマツ、サワラ	T12	6	2.5~3	T12	4	
スギ、ネズコ	T12	5	2.5~4	T10~11	4	スギ変色防止はT8

表IV-6 温度スケジュール (広葉樹材・針葉樹材共通)

段階	含水率の段階	乾球温度区分 (°C)													
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
1	生~30	40	40	45	45	50	50	55	55	60	60	65	70	75	80
2	30~25	40	45	50	50	55	55	60	60	65	65	70	75	80	90
3	25~20	40	50	55	55	60	60	65	65	70	70	70	75	80	90
4	20~15	45	55	60	60	65	65	70	70	70	75	75	80	90	95
5	15~終末	50	65	70	80	70	80	70	80	70	80	80	80	90	95

表IV-7 初期含水率による区分の基準

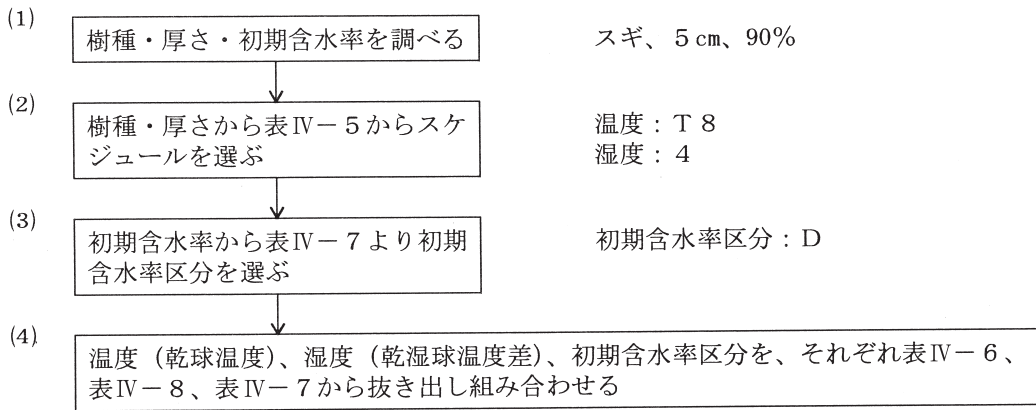
区分	初期含水率 (%)	区分	初期含水率 (%)
A	40 以下	E	100 ~ 120
B	40 ~ 60	F	120 ~ 140
C	60 ~ 80	G	140 以上
D	80 ~ 100		

表IV-8 針葉樹材の湿度スケジュール

段階	初期含水率区分及び段階 (%)						段階	乾湿球温度差区分 (°C)							
	A	B	C	D	E	F		1	2	3	4	5	6	7	8
1	生~30	生~35	生~40	生~50	生~60	生~70	1	1.5	2.0	3.0	4.0	5.5	8.5	11	14
2	30~25	35~30	40~35	50~40	60~50	70~60	2	2.0	3.0	4.0	5.5	8.0	11	14	17
3	25~15	30~25	35~30	40~35	50~40	60~50	3	3.5	4.5	6.0	8.5	11	14	17	20
4		25~20	30~25	35~30	40~35	50~40	4	5.5	8.0	8.5	11	14	17	20	20
5		20~15	25~20	30~25	35~30	40~35	5	8.5	11	11	14	17	20	20	20
6			20~15	25~20	30~25	35~30	6	11	14	14	17	20	20	20	20
7				20~15	25~20	30~25	7	14	17	17	20	20	20	20	20
8					20~15	25~20	8	17	20	20	20	20	20	20	20
9						20~15	9	20	20	20	20	20	20	20	20
10	15~終末	15~終末	15~終末	15~終末	15~終末	15~終末	10	28	28	28	28	28	28	28	28

◇◇◇乾燥スケジュール作成例◇◇◇

(スギ材、5 cm厚、初期含水率90%で変色を押さえて乾燥をしたい場合)



初期含水率区分 D	乾球温度区分 T8	乾湿球温度差区分 4
生 ~ 50	生 ~ 30	生 ~ 50
50 ~ 40	30 ~ 25	50 ~ 40
40 ~ 35	25 ~ 20	40 ~ 35
35 ~ 30	20 ~ 15	35 ~ 30
30 ~ 25	15 ~ 終末	30 ~ 25
25 ~ 20		25 ~ 20
20 ~ 15		20 ~ 15
15 ~ 終末		15 ~ 終末
		4.0
		5.5
		8.5
		11
		14
		17
		20
		28

含水率 (%)	乾球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)
生 ~ 50	55	4.0
50 ~ 40	55	5.5
40 ~ 35	55	8.5
35 ~ 30	55	11
30 ~ 25	60	14
25 ~ 20	65	17
20 ~ 15	70	20
15 ~ 終末	80	28

#### 4. 熱風乾燥の実務

蒸気や電気など熱で木材を外部から加熱・加湿し、人工的に乾燥する方法である。乾燥条件を自由にコントロールできるので、損傷を抑えながら木材の性質や仕上げの程度に応じて、効率的な乾燥ができる。しかし、高温で急速に乾燥するため操作が難しく、損傷が生じやすい。

##### (1) 熱風乾燥の特徴

Ⅲ. 3 (22 頁) 参照

##### (2) 熱風乾燥の留意点

- ①乾燥開始に当たって、装置や機器の点検と整備を十分に行うこと。
- ②乾燥に先立って被乾燥材の樹種や厚さの仕分けを行うこと。
- ③適切な大きさの栈木と、栈木間隔で栈積みを行うこと。
- ④適切な試験材を選択し、正しく配置すること。
- ⑤被乾燥材に適した乾燥スケジュールを用いること。
- ⑥正確な知識で、適切な操作を行うこと。
- ⑦乾燥日誌を必ず付けること。

##### (3) 板及び平割の熱風乾燥（蒸気式中温）

板材のスケジュールには大略のルールがあり、乾燥初期の高含水率の時は温度を低く、乾湿球温度差を小さくし、乾燥中頃で少しずつ温度差を大きくして、含水率 30%程度から温度を上げる。一般的な針葉樹材では、厚さ 50 mm 以下の場合、初期乾球温度 60～70℃、初期乾湿球温度差を 3～4℃としていることが多い。また、末期乾球温度は 70～80℃、末期乾湿球温度差は 20～28℃が適当であるとされている。

樹種・材種別の乾燥スケジュールは、表Ⅳ—5～表Ⅳ—8により求めることができる。針葉樹の場合、広葉樹と比較するといずれの樹種も比較的容易な部類に入るが、一部の樹種には落ち込みや狂いの生じやすいものがある。このような材では、乾燥温度をあまり高くしないことが必要である。狂いは、乾燥条件の選択のみによって完全に防止することは難しく、圧縮処理など特別な操作を要する。

##### ①スギ板乾燥スケジュール例

Ⅳ. (3) (36 頁)の手順に基づき作成した乾燥スケジュールの一例を示す。

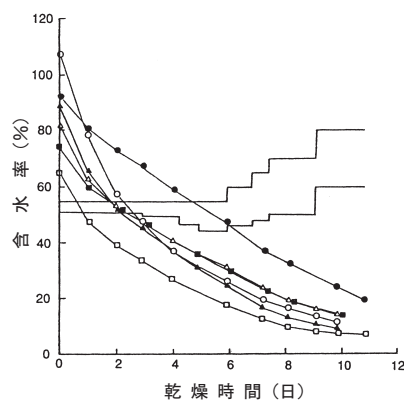
含水率 (%)	乾球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)	相対湿度 (%)	平衡含水率 (%)
生～70	55	5.5	75	12.1
70～60	55	8	64	9.9
60～50	55	11	53	8.1
50～40	55	14	43	6.7
40～35	55	17	35	5.6
35～30	55	20	27	4.6
30～25	60	20	30	4.8
25～20	65	20	33	4.8
20～15	70	20	35	4.9
15未満	80	28	25	3.3

厚さ：25mm、初期含水率：120～140%、仕上がり含水率：10%未満、変色防止を考慮

②スギ平割乾燥スケジュール例（森林総合研究所）

含水率 (%)	乾球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)	相対湿度 (%)	平衡含水率 (%)
生～50	55	4	81	14.0
50～40	55	5.5	75	12.1
40～35	55	8.5	62	9.6
35～30	55	11	53	8.1
30～25	60	14	46	6.7
25～20	65	17	40	5.7
20～15	70	20	35	4.9

寸法：5.5×12cm 日数：8～11日



図IV-6 熱風乾燥によるスギ平割（5.5cm×12cm）の乾燥経過（久田）

(4) スギ柱材の熱風乾燥（蒸気式中温）

スギ材は辺材及び心材とも生材含水率が高く、辺材では200%以上、心材でも150%に達するものもあるが、一般的な製材直後の含水率は、辺材では150%、心材では70～80%で、辺材・心材込みでは100～130%くらいである。しかし、品種、産地、伐採季節及び材質によって違いが大きく、黒心材などでは心材でも200%以上を示すものがある。

心持ち柱材の場合には、中心の心材が乾燥しにくく、表層との間に大きな含水率傾斜ができて、これと接線方向の収縮量が半径方向のそれより2倍以上大きいことが相まって、表面割れが発生しやすい。

割れを防ぐためには、背割りはもちろんのこと、乾燥スケジュールは温度差を小さくして徐々に全体の含水率を下げていかなければならない。したがって、乾燥日数は長くなる。温度は割れにあまり関与しないが、高温は変色の原因となる。

乾燥スケジュールの一例を表IV-9に示す。図IV-7には熱風乾燥による乾燥経過を、また、図IV-8には乾燥過程の寸法変化を示す。背割りは、割れ防止には効果があるが、一方で含水率変化によって背割り幅が大きく開く問題がある。しかし、心持ち柱材の場合には、一般の方法で割れなく乾燥をすることは難しい。

表Ⅳ－9 スギ心持ち柱材の乾燥スケジュール（森林総合研究所）

【標準的スケジュール】

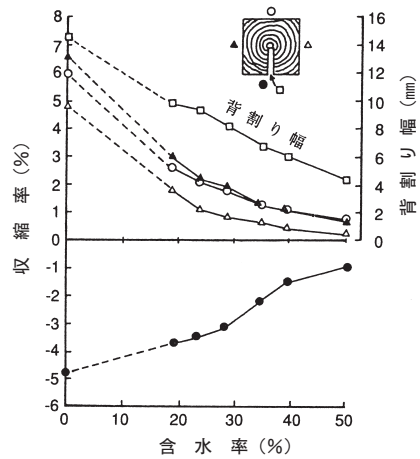
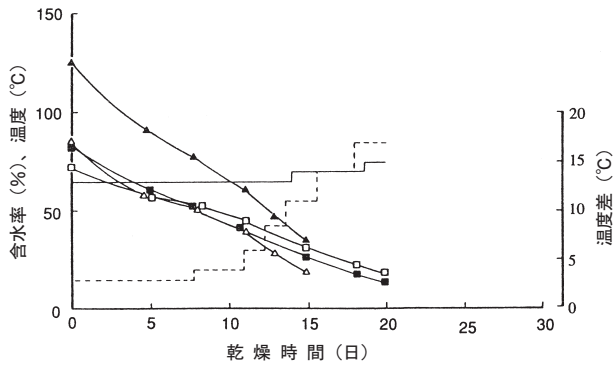
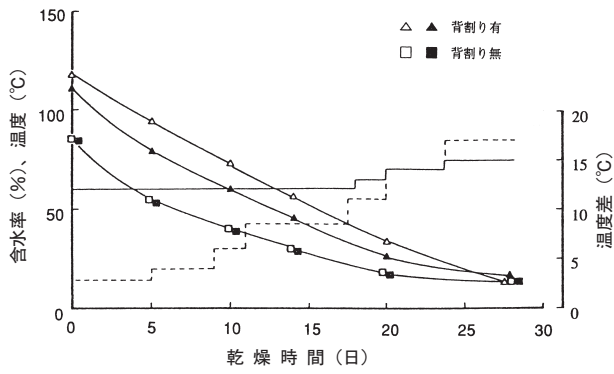
含水率 (%)	乾球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)	相対湿度 (%)	平衡含水率 (%)
生～70	50	2.5	87.5	17
70～65	50	3	85	15.8
65～60	50	3.5	82.5	15
60～55	50	4	80	14.1
55～50	50	4.5	77.5	13.4
50～45	50	5	75	12.7
45～40	50	6	71	11.5
40～35	55	7.5	66	10.3
35～30	55	9.5	58.5	9.0
30～25	60	12	52	7.7
25～20	60	15	43	6.4

12cm 角、心持ち材、背割り有り、日数：18～25 日

【やや厳しいスケジュール】

含水率 (%)	乾球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)	相対湿度 (%)	平衡含水率 (%)
生～75	60	3	86	15.3
75～70	60	3.5	84	14.6
70～65	60	4	82	13.8
65～60	60	4.5	80	13.2
60～55	60	5.5	76	12
55～50	60	6.5	72	11.0
50～45	60	7.5	68	10.2
45～40	60	8.5	64	9.5
40～35	60	10	59	8.7
35～30	60	12	52	7.7
30～25	65	14	48	6.7
25～20	70	16	45	6.0

12cm 角、心持ち材、背割り有り、日数：15～22 日 やや割れ、変色有り



図IV-7 熱風乾燥におけるスギ柱材 (12cm角) の乾燥経過 (久田)      図IV-8 乾燥によるスギ柱材 (12cm角) の寸法の変化 (久田)

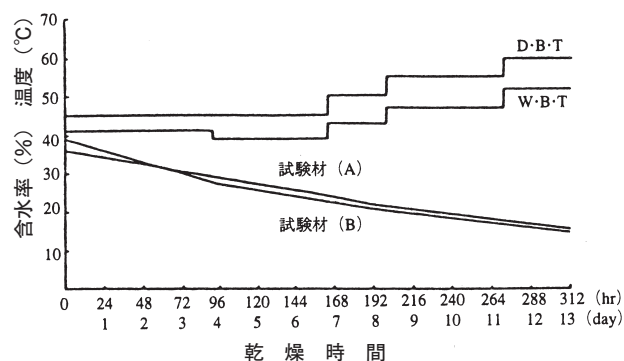
(5) ヒノキ柱材の熱風乾燥 (蒸気式中温)

辺材部の含水率は高いが、心材部は 30~40%の低い値を示す。心持ち柱材には全乾燥期間を通じて表層には常に引っ張り応力が作用しているため、割れが発生しやすい。特に、乾燥条件を急にきつくした直後に発生しやすいので、少し遅れ気味に小刻みに温度差を広げていくようにしなければならない。温度は割れにあまり影響しないが、温度を高くすると材色の変化を生じる。

表IV-10 ヒノキ柱材の乾燥スケジュール (森林総合研究所)

含水率 (%)	乾球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)	相対湿度 (%)	平衡含水率 (%)
生~30	45	3.5	81	15.1
30~28	47	4	79	14.2
28~26	50	5	75	12.7
26~24	53	6.5	70	11.1
24~22	56	8.5	62	9.6
22~20	60	11	55	8.1

12cm角、背割り有り、日数：8~10日



図IV-9 熱風乾燥によるヒノキ柱材（10.5cm角）の乾燥経過（迫田）

針葉樹構造用材の高温乾燥では、極端に低い乾燥温度や、長時間の乾燥ではある程度の材質劣化も認められていることから、必要以上に温度をかけ過ぎないように注意したい。

(6) スギ柱材の熱風乾燥（蒸気式高温）

高温乾燥は本来 100°C以上の乾燥を示すが、乾燥スケジュールによっては一時的に 100°C以上とし、その後は温度を下げて処理する方法もあるので、高温乾燥といっても平均乾燥温度は 100°C以下の場合もある。高温乾燥は設備の回転が速く、熱効率が高く、設備スペースが少なく済むなど、生産コストを低減する上で多くの利点がある。しかし、材の損傷、特に内部割れが生じやすい、また収縮率や狂いが大きくなりやすい、変色が生じやすいだけでなく、含水率のバラツキ、材内部の含水率傾斜が大きくなるなどの欠点も生じやすい。熱による材の劣化を避けるために乾燥温度 100°C以上の温度に長時間さらすことを避けねばならない。

心持ち柱材の乾燥では、表面に大きな引張りの応力が生じやすく、これが表面割れの原因となる。高温乾燥のメリットは、表面にドラインゲット（乾燥時の自由な収縮が引張りの力によって抑制される結果、小さな収縮量で固定されること）が生じやすくなり、このゲットによって表面割れが生じにくくなることである。この高温熱処理で生じるゲット（高温ゲット）のメリットを活かすためには、初期蒸煮した後、乾燥の初期から乾燥温度をこれよりも高め、乾湿球温度差を大きくすることによって、表層にドラインゲットの形成を促すようにする。この際、天然乾燥材等の表面が乾いた材を処理する場合にはかえって表面割れが生じやすいので、製材から乾燥までの材の管理に注意が必要である。また、表面がゲットされた材では、乾球温度と温度差を乾燥後半までそのまま維持すると内部割れが生じやすい。したがって、高温ゲットを取り入れたスケジュールでは、初期の乾燥温度の上限を 120°Cくらいとし、乾燥後半には温度を 100°C以下にまで下げるのが良い。

この種のスケジュールの一例を表IV-11 に示したが、生産目標に合わせて、ゲット処理後の温度と処理時間を調整する。温度を低下させるタイミングは基本的にタ



イムスケジュールによるが、材温のモニターによる自動制御を組み合わせることもできる。後半に温度を低下させても、多少の内部割れの発生と、材色の変化は容認せざるを得ない。乾燥後の含水率については平均含水率を 15%以下に低くそろえることは十分できるが、含水率 20%付近で材の内外共に均一な含水率とすることは難しく、調湿操作を行うかあるいは十分な養生期間を取ることが必要である。

表Ⅳ-11 スギ正角の高温乾燥スケジュール【高温セット型】

(仕上げ寸法 120×120mm, 背割りなし)

時間 (h)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)	備考
12	95	95	0	蒸 煮
24	120	90	30	高温セット
144	90	60	30	乾 燥
12	降 温			

心持ち材, 目標仕上がり含水率 20%, 粗挽き寸法 130×130mm

注) 平均初期含水率の 78%を 20%まで乾燥した場合

(7) スギ梁桁の熱風乾燥 (蒸気式中温・高温)

スギ梁桁用の平角の乾燥では、柱材よりも寸法が大きいため、乾燥に時間がかかる。時間短縮を図るためには乾燥温度を上げざるを得ないが、特に梁材では強度性能が重視されるため、100°C以上の高温で長時間処理することは避けたほうがよい。このため、ここでは平均の乾燥温度が 95°C程度になるようなスケジュールを示す。表Ⅳ-12 には、乾球温度 95°C一定で、乾燥経過に伴って乾湿球温度差を 5~20°Cとしたものである。初期含水率が 100%程度の材では 16 日ほどかけて乾燥する。また、割れを減らすには柱材同様蒸煮後に高温セット処理を取り入れるとよい。その際のタイムスケジュールの例を表Ⅳ-13 に示す。この高温乾燥スケジュールでは、初期含水率や乾燥前の重量選別によって乾燥処理時間を変更する。収縮率あるいは変色を抑えるために高温セット後天然乾燥に供する場合は、上記スケジュールの高温セット後、12 時間程度の降温期間を設けてから炉出しを行うとよい。

表Ⅳ-12 スギ平角の中温乾燥スケジュール

(仕上げ寸法 120×210mm, 背割りなし)

時 間 (h)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)	備 考
12	95	95	0	初期蒸煮
87	95	90	5	乾 燥
87	95	85	10	
87	95	80	15	
87	95	75	20	
24	降 温			

心持ち材, 目標仕上がり含水率 20%, 粗挽き寸法 130×225mm

注) 平均初期含水率の 116%を 12%まで乾燥した場合

表Ⅳ-13 スギ平角の高温乾燥スケジュール【高温セット型】

(仕上げ寸法 120×210mm, 背割りなし)

時 間 (h)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)	備 考
12	95	95	0	蒸 煮
24	120	90	30	高温セット
288	90	60	30	乾 燥
12	降 温			

心持ち材, 目標仕上がり含水率 20%, 粗挽き寸法 130×225~230mm

注) 平均初期含水率の 152%を 22%まで乾燥した場合

中温乾燥や高温乾燥、あるいは高温セット後の天然乾燥など、どのスケジュールを取り入れるかについては、各事業者が持ち合わせている施設や乾燥機の性能、あるいは生産量や生産体制によって使い分ける。

(8) マツ梁桁の熱風乾燥 (蒸気式高温)

マツ材は建築部材、家具用材と広範囲に使われているが、繊維のねじれが大きいいため狂いやすく、青変菌が生じやすい欠点を有し、また、樹脂(ヤニ)の含有量が多く、

製品化後に樹脂の滲みの問題もあり、これらの損傷が生じない乾燥条件の組立てが必要である。

生材含水率は、辺材は 100%以上あるが、心材は 50～60%と低く、針葉樹の中では重い材である割に、乾燥は早い材に分類される。クロマツ材の方がアカマツ材より割れの心配が少ない。

ヤニの滲み防止のため、乾燥初期に脱脂処理が必要で 80℃以上の高温で初期蒸煮を実施する。脱脂処理は表面が乾いていると脱脂効果が薄れるため、製材後すぐ実施する必要がある。

マツにみられる青変菌は、製材後べた積みしておくで発生するため、直ちに栈積みして材表面を乾燥させるか（天然乾燥）、70℃以上の温度で乾燥すると抑制できる。

一般的な中温での乾燥は心持ち無背割り材は割れやすいため、スギやヒノキと同様に、高温セット法による抑制が有効である。高温セット後に乾燥機から搬出し、天然乾燥する場合と乾球温度 90℃、乾湿球温度差 30℃で仕上げる場合があるが、後者は反り、ねじれが生じやすいので、その抑制策として栈積み上部に重しを載せることが有効である。

表Ⅳ-14 はクロマツの高温セット型の高温乾燥のスケジュールである。収縮率、ねじれあるいは変色を抑えるために高温セット後天然乾燥に供する場合は、上記スケジュールの高温セット後、12 時間程度の降温期間を設けてから炉出しを行う。

その際の天然乾燥期間中にも、適切な栈積み間隔、重しによる圧縮を行うことで、その後のねじれ、曲がりを抑制できる。

表Ⅳ-14 マツ平角の高温乾燥スケジュール【高温セット型】

(仕上げ寸法 120×210mm, 背割りなし)

時 間 (h)	乾球温度 (℃)	湿球温度 (℃)	乾湿球温度差 (℃)	備 考
12	95	95	0	蒸 煮
24	120	90	30	高温セット
288	90	60	30	乾 燥
12	降 温			

心持ち材, 目標仕上がり含水率 20%, 粗挽き寸法 150×240mm

注) 平均初期含水率の 39%を 10%まで乾燥した場合

(9) ヒノキ板・平割の熱風乾燥（蒸気式中温）

ヒノキ板・平割の熱風乾燥（蒸気式中温）の乾燥タイムスケジュール例を示す。

表IV-15 ヒノキ板・平割 24mm 厚、生材の乾燥タイムスケジュール例

時間 (h)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)	備考
6	50	50	0	昇温
12	50	47	3	乾燥
12	51	47	4	
24	53	47	6	
12	55	47	8	
18	57	47	10	
18	59	47	12	
24	60	45	15	
6	60	51	9	調湿処理
12	-	-	-	降温

化粧造作材、一般製材を対象。材色変化少ない。計 144 時間（6 日間）。

目標仕上がり含水率 10%以下。ヤニ抜き処理のないスケジュール。

上記スケジュールは、(国研) 森林研究・整備機構 森林総合研究所から提供をされたものに、一部変更を行った。

表IV-16 ヒノキ板・平割 38mm 厚、生材の乾燥タイムスケジュール例

時間 (h)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)	備考
6	50	50	0	昇温
18	50	47	3	乾燥
18	51	47	4	
36	53	47	6	
24	55	47	8	
36	57	47	10	
36	59	47	12	
48	60	45	15	
6	60	53	7	調湿処理
12	-	-	-	降温

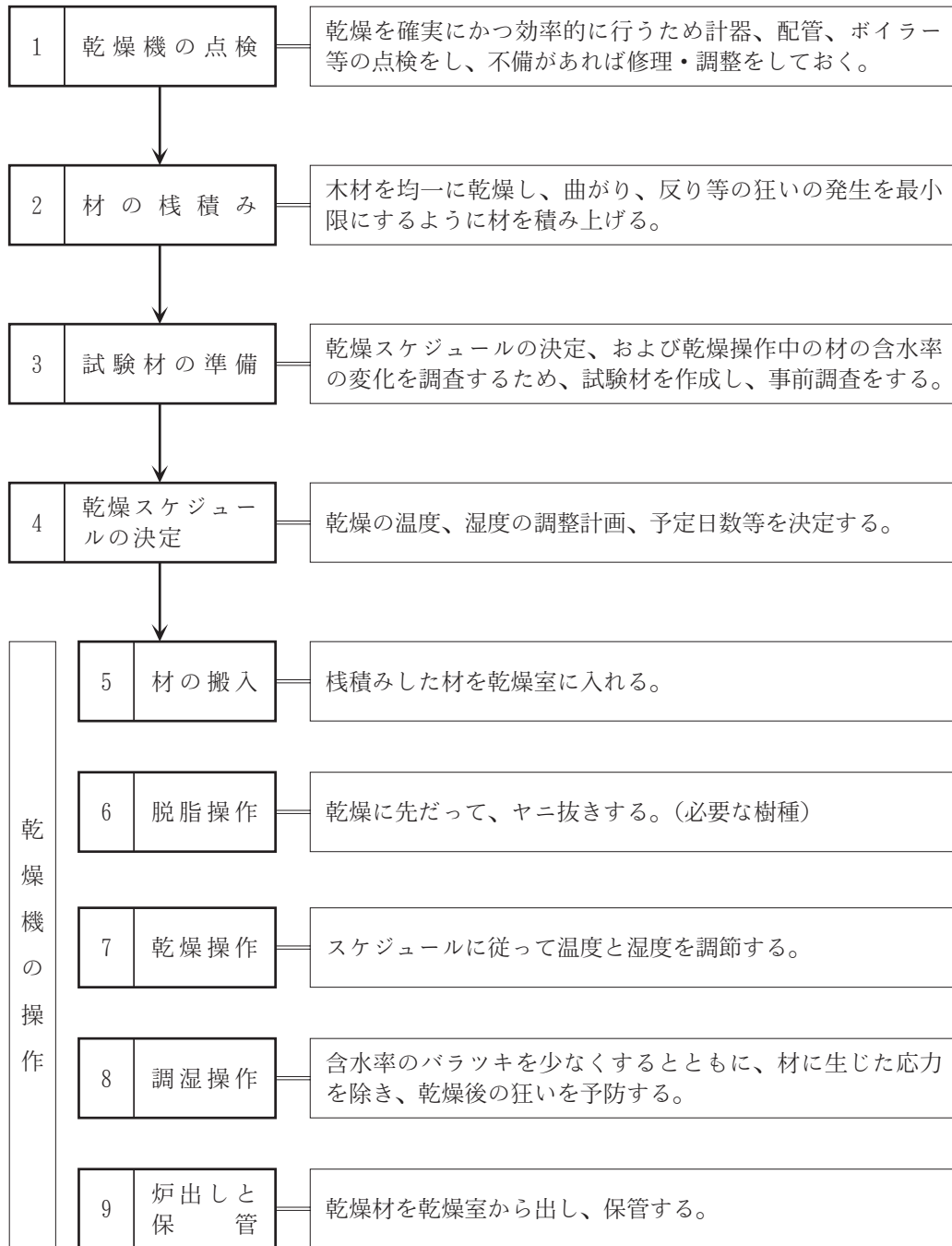
化粧造作材、一般製材を対象。材色変化少ない。計 240 時間（10 日間）。

目標仕上がり含水率 12%以下。ヤニ抜き処理のないスケジュール。

上記スケジュールは、(国研) 森林研究・整備機構 森林総合研究所から提供をされたものに、一部変更を行った。

## V. 乾燥操作（熱風乾燥）

### 1. 人工乾燥の手順



#### 留意点

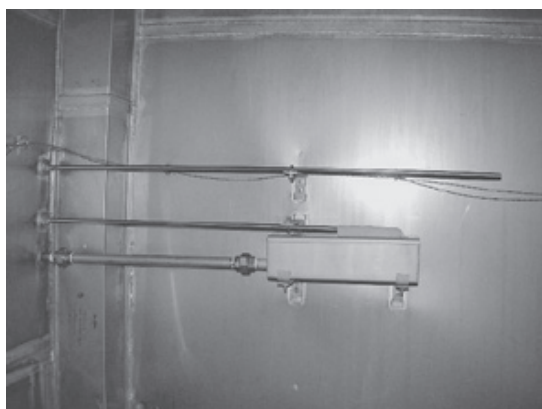
これらの手順は総て極めて重要であり、1項目でも手抜きをすれば含水率のムラ、変色、割れ、曲り、所要日数の長期化、燃料の無駄な消費、さらには商品になってからのヤニの浸出、変形などの原因となるので、十分な注意が必要である。

## 2. 乾燥機の点検・整備

乾燥を始める前に、まず、乾燥室本体、空気循環ファン、温度計、湿度計、ボイラー及び配管などの装置・機器を点検するとともに、含水率計や天秤が正常に作動することを確かめておく必要がある。

### (1) 乾球、湿球温度計 (写真V-1)

- ① センサーの掃除：細かい紙ヤスリでタールやヤニ等の汚れを取る。特に先端部は入念に掃除する。
- ② 湿球温度計のセンサーに被せたガーゼの交換と壺の水位の確認  
：ガーゼは常に新しいものと交換しておく。水位が正常か確認する。
- ③ 表示の正確さの確認：表示目盛りとセンサー部温度が一致しているか確認する。



上：乾球温度センサー  
下：湿球温度センサー  
(先端の白い部分がガーゼ)

写真V-1 乾球・湿球温度計

### (2) 電圧計

電圧に異常があれば総ての電気系統が正常に作動しない。

### (3) スチームトラップ装置

ヒーター管の末端にある装置で、蒸気とドレン（蒸気が冷えてできた水）とを分ける働きをしており、ここにドレンが詰まると温度の保持ができなくなる。

### (4) モーターファン

空転させてみて異常な音がでないか確認する。ファンの異常音はモーターの故障や漏電の原因になる。

### (5) 配管系統

蒸気を送るパイプの付け根、接続部等からの蒸気や水漏れを確認し、ネジの緩み及びパッキングの点検をする。ここの異常は、熱の損失が大きいだけでなく事故の原因となるおそれがある。

### 3. 棧積み

樹種、厚さ、含水率、天然乾燥の履歴、等級などをなるべく揃えて人工乾燥に移ることが、仕上がりの乾燥むらを少なくすることにつながる。オガ屑はよく払っておかないと、乾燥後に棧積みを崩すときオガ屑が飛んで作業を不快にする。極端に含水率が高い材は、あらかじめ屋外にたてかけておき、表面を2～3日乾燥させると水分が滴下し、スティッカーマークを防ぐことができる。

#### (1) 棧積みの高さと幅

使っている乾燥機の仕様にしたがって乾燥室の壁、天井と木材の間に適当な間隔をとる。

#### (2) 材と材の間隔

① 棧木の厚さは20～25 mmを標準とする。材の厚さにより棧木の厚さを変える必要はない。

② 横の間隔は1.5 cmほど空ける。

③ 棧積み幅が大きいと乾燥むらができるので1～1.2mまでに抑える。

#### (3) 棧木の位置

① 棧木は、まず両木口に一本ずつ置き、表Ⅳ－2（32頁）に示す材の厚さに応じた棧木間隔にしたがって配置する。材の厚さに対して棧木間隔が広すぎると曲りの原因になる。

② 棧木位置は棧積みの上から下まで垂直に揃えることが重要である。上下で位置がずれると材が波状に変形する。木口と両側面は凹凸のないように揃え、また、材の長さが乱尺の場合は、一方の木口だけ揃える。揃っている木口面では棧木を末端に置き、木口割れを防止する。割れやすい材や4 cm以上の厚い材は、ペンキなどを木口に塗ることで（エンドコーティング）、木口割れが防止できる。

#### (4) 棧木の方向

棧木は乾燥室内の空気の流れと同じ方向にする。直角にすれば空気の流れが妨げられる。

#### (5) 圧縮

乾燥による材の変形を予防するため、最上段に捨て板をして、その上にコンクリートブロックや鋼材などの重しを均等に置いて圧縮する（写真Ⅴ－2）。

#### (6) 試験材の位置

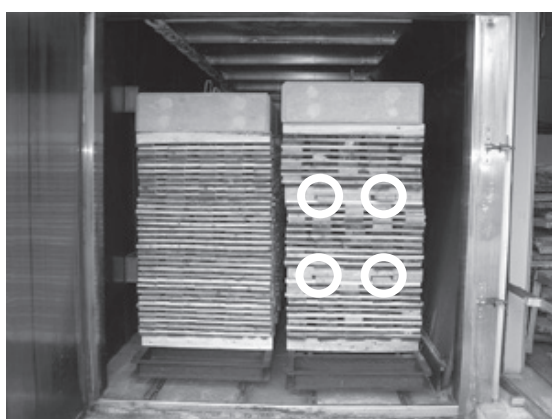
試験材を置くため、棧積みの一部を空けておく（写真Ⅴ－3）。

#### (7) 乾燥むらの防止対策

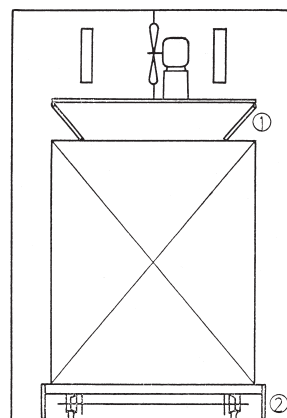
台車を室内に入れ、試験材の位置や湿球の水を確認したあと、棧積み上下左右の空間を風が通り抜けないように、バツフルや板などで止めることにより、乾燥むらを防止できる（図Ⅴ－1）。



写真V-2 栈積みの状況（最上段は圧縮材）



写真V-3 栈積み材の正面（木口面）  
○部は試験材の位置



図V-1 風の遮蔽用バッフル

①栈積み上部のバッフル：乾燥による栈積みの沈下になじむ構造にする。  
②台車下のバッフル：台車に固定し通風を防ぐ。

#### 4. 試験材の準備

乾燥操作は、栈積みした材の含水率の状態に合わせて乾燥室内の温度と湿度を調節しながら進める。試験材は乾燥前、乾燥途中及び仕上がりの含水率を推定するために利用する。

##### (1) 試験材の作成

###### ①試験材の選択

試験材は被乾燥材を代表するものを選ぶ。

- ・初期含水率の高いものと低いもの
  - ・乾燥の速そうなものと遅そうなもの
- などの組み合わせで選ぶことが望ましい。

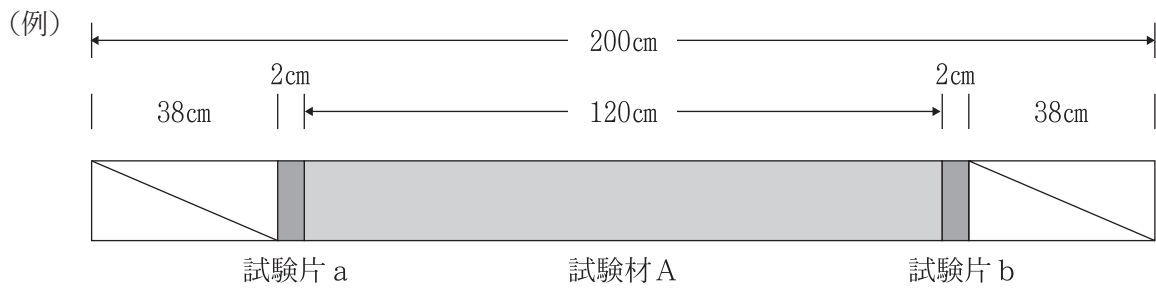
###### ②試験材の本数

栈積みの時に2～4本選んで取り分けておく。

###### ③試験材の作成

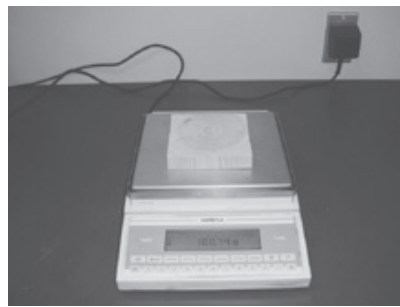
選んだ材からそれぞれ下図（例）のように試験材（A）と試験片（aとb）を採材する。





(2) 試験材及び試験片の重量測定

採材後直ちに試験材 (A) 及び試験片 (a と b) の重量を測定する (写真V-4)。時間が経つと乾燥して重量が変化するので注意が必要である。



写真V-4 重量の測定 (試験片)

(3) 試験材のコーティング

試験材の両木口を銀ニスあるいはペイントでコーティングする (写真V-5)。これをしないと棧積みした材よりも乾燥が速く進み、正確な含水率が測定できない。



写真V-5 コーティング作業 (両木口とも行う)

(4) 試験材の配置

試験材は乾燥期間中 1 日に 2～3 回重量測定することから、取り出しやすいように出入口近くの木口面から差し込むように配置する。基本的には乾燥室内の風上部

分に配置するが、現場的には重量測定用小扉の近くに配置する（51 頁写真V—3 参照）。

(5) 試験材 (A) の初期含水率の推定

- ① (2) で測定した試験片 (a と b) は 100~105℃ に調節した恒温乾燥器に入れ（写真V—6）、24~48 時間乾燥し、全乾状態にする。
- ② 恒温乾燥器から取り出した試験片 (a と b) は直ちに重量を測定する (a と b の全乾重量)。
- ③ 測定した重量によって試験片 (a と b) のそれぞれの含水率を計算する (5 頁参照)。
- ④ 試験片 (a と b) の含水率の平均値を計算する。この平均値が試験材 (A) の初期含水率 (U) となる。



写真V—6 恒温乾燥器

$$\text{含水率の平均値 (\%)} = \frac{\text{a の含水率} + \text{b の含水率}}{2}$$



試験材 (A) の初期含水率 (U)  
これが乾燥スケジュールの初期含水率になる

(6) 試験材 (A) の全乾重量の推定

$$W_0(\text{g}) = \frac{W(\text{g})}{1 + \frac{U(\%)}{100}}$$

$W_0(\text{g})$  : 試験材の推定全乾重量

$W(\text{g})$  : 採材直後の試験材の重量

$U(\%)$  : 試験材の初期含水率

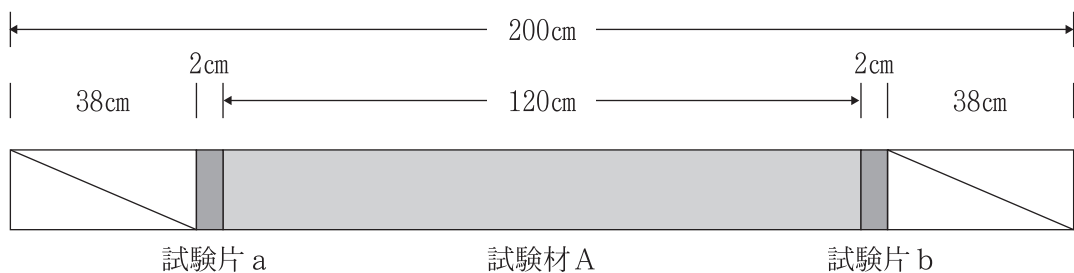
この推定全乾重量 ( $W_0$ ) は、乾燥スケジュールを進めるための指標であり、試験材の乾燥途中および仕上がり含水率を推定する基準値となる。

(7) 試験材の初期含水率、全乾重量の推定野帳

次頁参照。

試験材の初期含水率、全乾重量の推定野帳

No.	試験片 番号	試験片の 初期重量 g	試験片の 全乾重量 g	試験片の 含水率 %	平均 含水率 %	試験材の 初期重量 kg	推定全乾 重量 kg



$$\text{① 試験片 a の含水率(\%)} = \frac{\text{試験片 a の初期重量} - \text{試験片 a の全乾重量}}{\text{試験片 a の全乾重量}} \times 100$$

$$\text{② 試験材 A の初期含水率(\%)} = \frac{\text{試験片 a の含水率} + \text{試験片 b の含水率}}{2}$$

③ 試験材 A の推定全乾重量は

$$\text{試験材 A の推定全乾重量(kg)} = \frac{\text{試験材 A の初期重量}}{1 + \frac{\text{試験材 A の初期含水率}}{100}}$$

## 5. 乾燥スケジュールの決定

乾燥スケジュールは材の厚さ、初期・中期および目標とする仕上がり含水率、所要日数から用途、装置の性能などによって異なるので、乾燥を始める前に決定しておく必要がある。乾燥スケジュールの決定にあたっては次の点に留意する。

### (1) 材の厚さ

薄い材は乾燥が容易で、短期間で済み、厚くなるほど所要日数が長くなる。

### (2) 仕上がり含水率

Ⅱ. 4. (1) ~ (2) 参照 (8~10 頁)

### (3) 天然乾燥後の人工乾燥

人工乾燥を行う前に天然乾燥によって含水率を下げおけば、人工乾燥日数の短縮、燃料の節約ができる。

### (4) タイムスケジュール

①試験材の含水率によって温・湿度を調整する通常の乾燥スケジュールによらず、乾燥経過時間によって温・湿度を変える方法である。試験材の含水率測定の手数が省略できるが、仕上りの含水率は試験材によって判定する必要がある。

②含水率スケジュールによる記録を集積し、含水率の変化と経過時間との関係を十分に分析してから利用する必要がある(乾燥機の種類、取扱う材によって大きく異なるので注意を要する)。

## 6. 棧積み材の搬入

棧積み材に試験材を入れ、乾燥室に搬入する。その後、乾燥室の扉を確実に閉める。

## 7. 脱脂(ヤニ抜き)操作

ヤニ抜きをしないマツ材は、商品化あるいは造作後にヤニが浸出し、消費者からのクレームの元となる。したがってマツ材については必要に応じて脱脂処理を施す。

①増湿管バルブを全開にして乾燥室内に生蒸気を噴射し、室内温度を90~100℃にする(増湿管のみの装置では8~12時間を要するが、専用蒸着管の付いている乾燥機であれば時間を大幅に短縮できる)。

②室内温度90~100℃の状態を2~3時間保った後に蒸気を止める(長時間続けると、ファンモーター、壁体を傷めることがある)。

③この操作でヤニが抜ける。

④ヤニ処理後、適正な乾燥スケジュールによって人工乾燥を行う。

⑤ヤニ抜きは含水率の高い材ほど効果があり、天然乾燥をした材では効果が少ない上、高温の蒸気によって表面割れが発生することがある。

## 8. 乾燥操作

生蒸気を噴射して、乾湿球温度差が開かないように注意しながら、乾燥スケジュールの初期乾燥温度から約 10℃高くなるまで室温を上げる。その後、生蒸気を弱めて徐々にスケジュールの温・湿度条件に合わせていく。ただし、天然乾燥材の場合には乾湿球温度差を 5℃くらいに保ちながら室温を上昇させる。この時高含水率材や初期含水率のバラツキが大きいロットには 85～100℃で所定の時間蒸煮を行うと効果がある。

乾燥条件について、初期は乾球温度および乾湿球温度差を一定とし、含水率の低下に合わせて順次所定の条件に変化させてゆく。表面割れの発生しやすい材は乾燥条件の急激な変化、特に乾湿球温度差の急変は厳禁である。心持ち材では乾燥の末期になってもこの危険は残っている。

乾燥機運転中は、試験材の重量測定を行うために重量測定用小扉（専用の小扉がない場合は扉）を開ける際に、木口付近の材の変化を観察し、割れの兆候があれば直ちに条件を緩める。

乾燥の終了は試験材から推測できるが、できれば棧積み内部から数枚の材を抜き出して、含水率計でチェックするのがよい。

### (1) 含水率の推定

① 乾燥期間中の含水率は、試験材の重量を測定し、これを基に含水率を計算する。

- a. 試験材の初期重量  $W_1=14.50\text{kg}$
- b. 試験材の初期含水率 117% (53 頁 V. 4. (5) 参照)
- c. 試験材の推定全乾重量  $W_0=6.68\text{kg}$  (53 頁 V. 4. (6) 参照)
- d. 乾燥途中の含水率の推定

試験材を乾燥室から取り出し、冷えないうちに重量を測定する。

(測定後は乾燥室の元の位置に戻す)

- ・測定時の重量  $W_2=11.30\text{kg}$
- ・測定時の含水率の計算

$$U_2 = \frac{W_2 - W_0}{W_0} \times 100 = \frac{11.30 - 6.68}{6.68} \times 100 = 69.2\%$$

② この測定は 1 日に 2～3 回行い含水率の変化を調べる。

### (2) 温度・湿度の設定

推定された含水率によって乾球温度と湿球温度を変更する。

#### a. 湿球温度の計算

乾球温度 50℃、乾湿球温度差 3℃の場合の湿球温度

$$\text{湿球温度} = 50 - 3 = \underline{47^\circ\text{C}}$$

(3) 乾球温度・湿球温度の設定、変更の例

◇乾球温度・湿球温度を入力し、温度・湿度をコントロールする機種

含水率 (%)	乾球温度 (°C)	乾湿球温度差 (°C)
生～70	50	2.5
70～65	50	3
65～60	50	3.5
60～55	50	4
55～50	50	4.5
50～45	50	5
45～40	50	6
40～35	55	7.5
35～30	55	9.5
30～25	60	12
25～20	60	15

初期の含水率 117% > 70% であるから  
乾球温度：50°Cに設定  
湿球温度：47.5 (50-2.5) °Cに設定

含水率が70%以下になった時点で  
乾球温度：50°Cのまま  
湿球温度：47 (50-3) °Cに変更

- 順次含水率の変化に伴って設定を変更する。
- 試験材の含水率が20%を下回った段階で必要に応じて調湿処理（60頁V. 9参照）を行い、乾燥を終了。

◇乾球温度・相対（関係）湿度を入力し、温度・湿度をコントロールする機種

含水率 (%)	乾球温度 (°C)	相対湿度 (%)
生～70	50	87.5
70～65	50	85
65～60	50	82.5
60～55	50	80
55～50	50	77.5
50～45	50	75
45～40	50	71
40～35	55	66
35～30	55	58.5
30～25	60	52
25～20	60	43

初期の含水率 117% > 70% であるから  
乾球温度：50°Cに設定  
相対湿度：87.5%に設定

含水率が70%以下になった時点で  
乾球温度：50°Cのまま  
相対湿度：85%に変更

- 順次含水率の変化に伴って設定を変更する。
- 試験材の含水率が20%を下回った段階で必要に応じて調湿処理（60頁V. 9参照）を行い、乾燥を終了。

(4) 乾燥経過の記録

乾燥期間中の含水率の変化、乾球温度・湿球温度の設定経過等は『乾燥日誌』に記録する。様式は次頁参照。

# 乾 燥 日 誌

データNo.

乾燥室No.	容 積 (m <sup>3</sup> )	天 乾 開 始	乾 燥 開 始	乾 燥 終 了
		年 月 日	年 月 日	年 月 日

樹 種	産 地	原 板 寸 法 (cm)	等 級	製 品
		厚さ×幅×長さ	級	

試 験 片	試 験 片 番 号	1 - 1	1 - 2	2 - 1	2 - 2	3 - 1	3 - 2
	初期重量 (g)						
	全乾重量 (g)						
	含 水 率 (%)						
	平均含水率 (%)						

月	時	日	刻	乾 燥 経 過 時 間 (hr)	乾 球 温 度 (°C)	相 対 湿 度 (%)	平 衡 含 水 率 (%)	試験材 1		試験材 2		試験材 3		備考
								重量 (kg)	含水率 (%)	重量 (kg)	含水率 (%)	重量 (kg)	含水率 (%)	
								初期含水率 (%)	推定全乾重量 (kg)	初期含水率 (%)	推定全乾重量 (kg)	初期含水率 (%)	推定全乾重量 (kg)	
								重量 (kg)	含水率 (%)	重量 (kg)	含水率 (%)	重量 (kg)	含水率 (%)	

月	時	乾燥經過時間 (hr)	乾球溫度 (°C)	相對濕度 (%)	平衡含水率 (%)	試験材 1		試験材 2		試験材 3		備考
						重量	kg	重量	kg	重量	kg	
						初期含水率	%	初期含水率	%	初期含水率	%	
						推定全乾重量 kg		推定全乾重量 kg		推定全乾重量 kg		
重量 (kg)	含水率 (%)	重量 (kg)	含水率 (%)	重量 (kg)	含水率 (%)							



## 9. 調湿処理

木材は一本ずつ性質が異なっており、乾燥の速度も異なる。また、木材は乾燥によって不均一な力（応力）が発生し、放置すれば、後で曲り、反り、割れなどの欠点が生じる。

調湿とは乾燥の最後の段階で仕上がり含水率の均一化（イコーライジング）、材内の応力除去（コンディショニング）のために行う温度と湿度の操作である。

### 仕上がり含水率 10%の例

#### 1. 仕上がり含水率の均一化（イコーライジング）

乾燥の速い試験材の含水率が仕上がり含水率(10%)より2%低い8%になった時、含水率8%に適した温湿度条件に設定し、乾燥の遅い試験材が10%になるまで乾燥を続ける。

#### 2. 応力の除去（コンディショニング）

乾燥の遅い試験材の含水率が10%に達した時に、それより2%高い12%に適した温湿度条件とし、応力がなくなるまで乾燥を続ける。必要な時間は、材の厚さによって異なるが、目安としては厚さ25mmで4～6時間、50mmで6～12時間程度である。

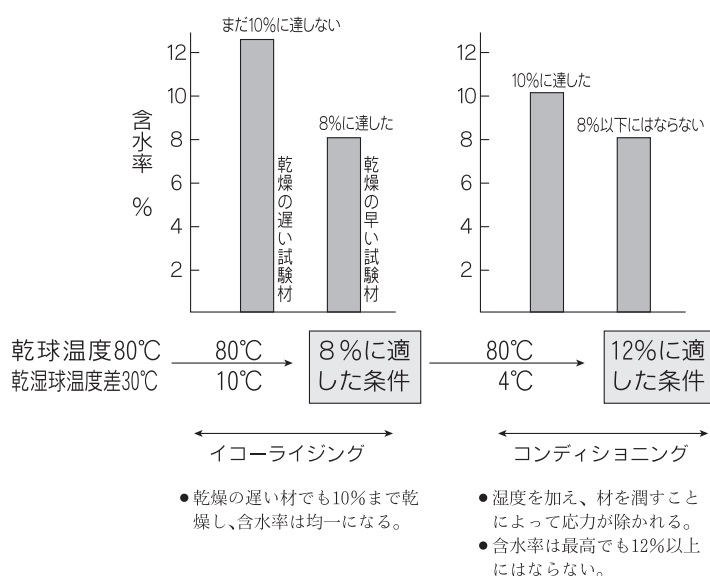


図 V-2 イコーライジングとコンディショニングの方法

## 10. 炉出しと保管

炉出しおよび保管（養生）は十分な注意を払わなければ、割れ、曲りなどが発生するほか、含水率が戻るおそれがある。

### (1) 炉出し

#### ① 炉出しの時期

材を取り出す適当な時期は、材温が夏期には気温より約 20℃、冬季には約 10℃程度高い温度まで冷却された時点とされている。

#### ② 損傷の確認

栈積みを崩すときは、各々の材の損傷について注意深く観察し、どのような原木時の欠点、木取りなどがどのような種類の損傷になるかを調べ、選木、製材時の木取りの方法などの参考とする。

#### ③ 含水率のバラツキ調査

新しい乾燥機では、栈積み全体の含水率を含水率計で調べ、乾燥機のむらや、含水率のバラツキなどを調査し、その後の操作の参考とする。

#### ④ 養生

乾燥室から出材後、木材を直ちに加工段階にまわすのは適当でない。含水率傾斜や乾燥応力が皆無でなく、ロットの中で含水率のバラツキも必ず存在する。一般的には、2 週間以上の養生が必要である。

### (2) 保管

#### ① 場所

乾燥材は、風通しの良い室内に保管する。

床からの湿気を予防するため、床にビニールシートを敷いた上に角材等を枕にして床から浮かせるように積み上げる。

## 11. 間けつ運転の方法

乾燥初期の間けつ運転はできるだけ避けたい。連続運転との乾燥日数の比率は 2～3 cm 材で表 V-1 のようになる。

表 V-1 間けつ運転による乾燥時間の増加率

1 日当たりの運転時間	連続運転を 1 とした時の倍数
8	2
12	1.4
16	1.2
24	1

乾燥初期は停止中にダンパーを開けておき、できれば送風だけはしておくと下部の乾燥遅れも少なく、カビの発生も少ない。乾燥末期では、ダンパーを閉めて停止中に室温が低下しないようにした方が有効である。

## 12. 仕上がり含水率

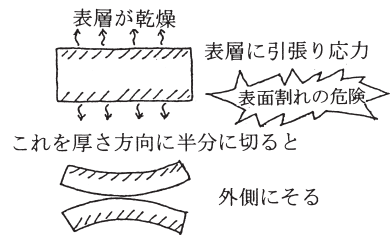
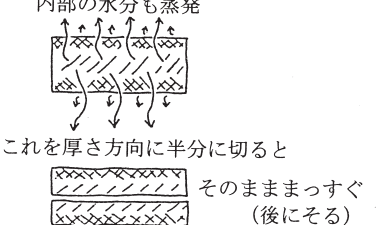
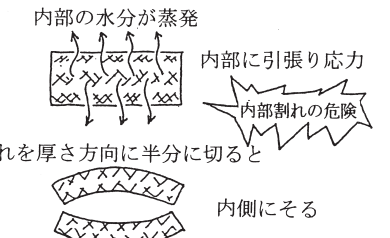
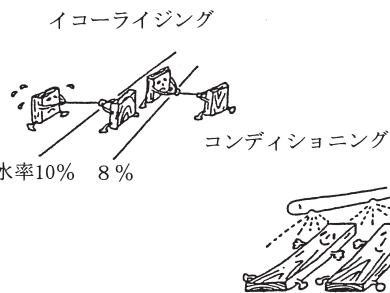
仕上がり含水率は乾燥材の用途、使用場所によって異なるが、一般的には使用中の含水率の 2～3%低い値が望ましい(表 V-2)。加工時の含水率のバラツキは目的とする製品の精度によって決められるが、大きくても問題のない場合もある。

表V-2 使用場所による木製品の含水率と乾燥室での仕上がり含水率

使用場所および用途	使用中の木製品の含水率 (%)	乾燥終了時の試験材含水率 (%)	加工時の含水率 (%)
米国西部向け家具	6 ~ 8	5	5 ~ 7
冷暖房室内用家具	8 ~ 10	7	7 ~ 9
一般家庭家具	9 ~ 14	8	8 ~ 12
機器用箱	8 ~ 12	7	7 ~ 9
一般建築材	12 ~ 20	17	15 ~ 22
ビルディング内装材	8 ~ 11	8	8 ~ 10
運動具	10 ~ 15	10	9 ~ 14

### 13. 乾燥の進み方の模式図

#### 乾燥の進み方

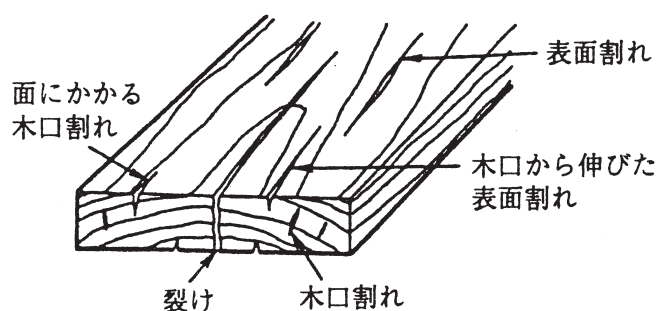
乾燥初期	<p>材の表層部から水分が盛んに蒸発し、乾燥が進みます。このため表層のみが収縮しようとしませんが、内部はそのままのため、力の不釣り合いが生じます。急激に乾燥しようとすると、表面割れが発生します。</p>	 <p>表層が乾燥 表層に引張り応力 表面割れの危険 これを厚さ方向に半分切ると 外側にそる</p>
乾燥中期	<p>材内部の水分が表面に向かって移動を始めます。内部の含水率も下がり、収縮が始まりますから、表層との力のバランスは保たれている状態になっています。</p>	 <p>内部の水分も蒸発 これを厚さ方向に半分切ると そのまままっすぐ (後にそる)</p>
乾燥後期	<p>表層部の乾燥は終了し、内部の水分移動と表面からの蒸発だけが続きます。このた内部が逆に収縮しようとするので、力の不釣り合いが生じ、内部割れが発生しやすくなります。</p>	 <p>内部の水分が蒸発 内部に引張り応力 内部割れの危険 これを厚さ方向に半分切ると 内側にそる</p>
仕上げ	<p>乾燥室内にある材料の含水率を揃えるためのイコーライジングと材料内の含水率を均一にし、材表面に潤いを与えるコンディショニングがあります。もしこの処理が乾燥装置内でできない場合は、積み重ねのまま屋内で1ヶ月程度放置します。</p>	 <p>イコーライジング コンディショニング 含水率10% 8%</p>

## 14. 乾燥による損傷

### (1) 初期割れ

初期割れとは、乾燥の初期の段階に生じる割れの総称で、図V-3のような木口割れ、材面割れ（表面割れ）、木口の裂けなどを指す。繊維に直角方向の木材組織の結合力が弱ければ材面に割れが生じやすくなるが、そのほか、収縮率、変形のしやすさなど、種々の要因が割れやすさに関係してくる。初期割れを防止するには、乾燥初期の湿度を高くし、厚さ方向の含水率傾斜を大きくさせないことが効果的な方法である。

厚さ1～2cmの薄い材では初期割れの危険が少なく、また、同一の厚さの材であっても、針葉樹材は広葉樹材よりも初期割れの生じにくいものが多い。

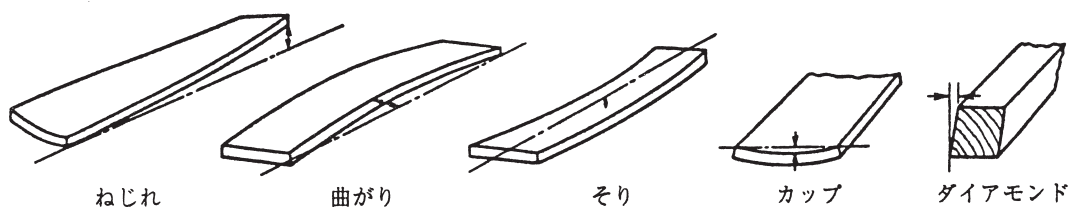


図V-3 各種の初期割れ

### (2) 狂い

乾燥による狂いには図V-4に示すように幅反り（Cup：カップ）、縦反り（Bow：ボウ）、曲がり（Crook：クルック）、ねじれ（Twist：ツイスト）、菱形変形（Diamond：ダイヤモンド）などがある。ほとんどの場合、狂いは節、繊維傾斜、不整木理など材質的な要因によって発生する。幅反りは、板目木取りの板材に発生しやすく、木裏側と木表側の収縮量の差によって生じる。

乾燥中の狂いを制御するには、全体的に低めの温度を与えるほか、栈積み上部に荷重をかけて（圧縮して）材全体を押しえ込んでしまうのが良い方法である（51頁写真V-2参照）。しかし、荷重による方法は、幅反り、縦反り及びねじれにはある程度の効果があるが、曲がりに対しては効果が低いとされている。



図V-4 狂いの種類

### (3) 落ち込み

木材の表面に筋状のくびれや凹みが生じる現象を落ち込みという。このようなくびれや凹みは、放射組織や柔組織などの機密性の高い細胞が脱水時に異常収縮し、これが集団で特定部分に現れる。細胞の異常収縮（落ち込み）は、含水率の高い厚めの材に乾燥初期に高い温度及び湿度を与えると生じやすいが、針葉樹材は広葉樹に比べて生じにくい。

### (4) 内部割れ

内部割れの生じやすい材は細胞がつぶれやすい樹種に多く、乾燥終了後に板断面の中央部がくびれるような材は、内部割れの危険がある。一般的には針葉樹材は広葉樹材よりも内部割れが生じにくい、スギの黒心材部などで現れる。厚さが1 cm以下の材や天然乾燥材では内部割れはほとんど発生しない。

### (5) 変色

木材の変色には変色菌又は腐朽菌によるものと、木材中の化学成分が酸化することによって生じるものがある。前者の場合には、乾燥前の取扱にその原因があり、乾燥による変色とは区別される。乾燥中の酸化変色は樹種によって内容が異なるが、ほとんどの場合は乾燥温度を低めにすることで軽減できる。また、通常の人工乾燥における酸化変色はごく表層に限られているので、かんな仕上げにより容易に除去できる。高温乾燥で高温高湿の空気に長時間さらされた場合には褐色に変色し、これがかなり内部に及ぶことがある。

### (6) ヤニ

マツなど樹脂道が発達している樹種では、天然乾燥中にはあまりヤニ（樹脂）が出てこない場合でも切削して暖かい場所で使用するとヤニが染み出てくることがある。このヤニの染み出しを乾燥工程で軽減するためには、製材を乾燥する時に、乾燥初期に高温で蒸煮処理を行うことが有効である（55頁V. 7参照）

### (7) 部分的残留水分

スギ黒心などは、乾燥後もウォーターポケットとして部分的な残留水が残ることがある。特に、断面寸法の大きな構造部材の乾燥を行う場合には発生しやすい。原因は通常は含水率の低い心材部が特異に高いことによるが、これは材質的な欠点といえる。

表V-3に乾燥中に生じやすい主要な損傷と樹種などを示す。

表V-3 乾燥による損傷と生じやすい樹種（寺沢・筒本）

損傷の種類	損傷の生じやすい材種と条件	樹 種	
		国 産 材	外 材
表面割れ	樹心に近い板目材 乾燥の遅い重硬材	カシ、イス、ミズナラ、 シイ、カキ、モミ、マツ、 ツガ、カラマツ	バラウ、バンキライ、 マラス、カプール、 ラミン
木口割れ	樹心に近い板目材 乾燥の遅い重硬材 繊維の通直な材	カシ、イス、カキ、ブナ 心材、ミズナラ、トネリ コ、モミ、カラマツ	バラウ、バンキライ、カ プール、アピトン、クル イン、ベイツガ
内部割れ	板目板、乾燥の遅い 重硬材 厚材、高含水率材	シイ、イス、ミズナラ、 タブ、ブナ心材	アピトン、クルイン、メ ルサワ
収縮率の増大	桁目板の厚さ方向 厚材、高含水率材	ミズナラ、ブナ心材、カ バ、ヤチダモ、ケヤキ、 ハルニレ	アピトン・クルイン、メ ルサワ、カメレレ、マヤ ビス
落ち込み	高含水率材、あて材 樹心に近い桁目材 樹脂分の多い材	シイ、クス、ブナ心材、 ミズナラ、ドロヤナギ、 ハルニレ、スギ	アピトン・クルイン、メ ルサワ、カメレレ、マト ア、ベイスギ
狂い	樹心に近い木理不整 な材、あて材、薄板 落ち込みの生じやす い材の板目材	ブナ、シイ、イス、イタ ヤカエデ、カラマツ	アピトン・クルイン、カ ロフィルム、アガチス(あ て材)
変色	広葉樹の白色辺材 高含水率材の高温に よる人工乾燥	ブナ辺材、シナ、ハンノ キ、イタヤカエデ、マツ 類	シュガーメイプル
スティッカーマーク (栈木あと)	広葉樹材の白色辺材	ブナ辺材、ハンノキ、ス ギ	ラミン、ジェルトン ギ
部分的残留水分		ハルニレ	ベイツガ、ベイスギ

## 15. 損傷の防止方法

乾燥によって生じる損傷については、前述したとおりである。これらの損傷の中で、割れや変色などは、適切な乾燥条件を選択することによってかなり防止することができる。しかし、狂いは主に木材自体が持つ固有の材質特性に起因するため、完全に防止することは困難である。したがって技術的に可能な対策を総て講じても、なお目的とする仕上がり状態を得られない場合は、乾燥に先立ってあらかじめ材の選別を行うこと（20頁Ⅱ．9参照）や木取りを工夫するなど、むしろ材料側での対処が必要になる。次に乾燥によって生じる損傷の軽減対策について概説する。

### (1) 木口割れ

木口割れは、乾燥初期に生じることが多い。また、乾燥の進行に伴い、しばしば材の表面まで伸びたり木口の裂けに発達する。

発生原因は、木口面の乾燥が他の材面よりも急速に進行し、収縮バランスが崩れることにある。したがって、木口面からの水分の蒸発速度を抑制すれば、木口割れを防止することは可能である。

具体的には、木口面を割れ防止剤、塗料あるいは接着剤などでコーティング処理すればよい。この際用いるコーティング剤は、基本的には用いる温度、湿度条件に耐えることができ、木材の付着性が良いものであれば良い。

塗布は、必要に応じて2回塗りが必要であるし、他の材面へもいくらか「返し塗り」をしておくことが望ましい。また、高温条件を用いた乾燥では、木口割れが次第に大きな材面割れへと伸長していくのをしばしば経験する。したがって、高温条件を用いる場合には、コーティング剤を丁寧に塗布しておく必要がある。

### (2) 表面割れ

表面割れは材面割れともいい、ある程度厚い材を乾燥する際の初期に発生する。発生原因となるのは、乾燥の進行に伴って生じる含水率傾斜とその結果発生する乾燥応力である。

表面割れは、比重の大きな樹種の板目材、幅広の板目材、角材で背割りを施していない材などにおいて発生しやすい。

基本的には、適正な乾燥条件を選ぶことによりその多くを防止できる。具体的には、まず乾燥初期に低湿条件を与えないことが必要である。また、湿度条件の操作にあたってできるだけ極端な変更はさけることが重要である。例えば通常1回で変化させる分を、更に細かく分けて変化させるなどの配慮が必要な場合もある。

特に無背割りの角材などは、含水率が20%を下回っても依然として材表面に引張り応力が残留することがあり、表面割れに対する細心の注意を払う必要がある。

### (3) 内部割れ

内部割れの発生形態には、2つのタイプがある。一つは、表面割れが最初にできて内部に進展し、その後表面だけ閉じて内部の割れが残るものである。もう一つは、内部に独立して発生するものである。

後者の独立型の内部割れは、乾燥初期に材の内部圧力が極端に上昇して組織が破壊されたり（いわゆるパンク状態）、乾燥末期の内部に発生する引張応力が極端に大きくなることによって生じる（一種の落ち込み現象）。

引張応力による内部割れの発生時期は乾燥末期であるが、その原因は乾燥初期から中期にかけて作られる。したがって発生を防止するためには、過度のドラインゲセット\*を生じさせないように乾燥初期の高温高湿を避けるとともに、乾燥中期に至ってもできるだけ乾燥温度を低く保つことが必要である。

なお、内部割れは、材厚が1 cm以下の薄い板の場合や天然乾燥では発生するケースは少ない。

#### ※ドラインゲット

材の表層部の含水率が繊維飽和点以下になると、収縮が始まる。しかし、中心部は繊維飽和点以上であるため収縮は生じない。この時点で表層部と中心部とで相対的な力関係が生じてくる。すなわち表層部では、材内部に影響されて十分に収縮できないため、中心部から引張応力を受けたのと同じ状態になる。逆に、中心部は圧縮応力を受けた状態となって、互いに力の平衡が保たれることになる。更に乾燥が進行するとますます表層の引張応力は増大し、相応して中心層部の圧縮応力も増大する。この期間に表層部は自由な収縮が制限され、ある収縮量（寸法）に抑えられて乾燥が進む。この現象を「ドラインゲット」と呼んでいる。

#### (4) 狂い

狂いは、乾燥操作が不適切（例えば、棧木の配置のずれ）であることによっても発生するが、基本的には木材が持つ組織的な性質（例えば収縮の異方性、異常組織、木理の乱れ）によって発生することがほとんどである。特にあて材では大きな狂いが発生する。

狂いの発生を完全に防止することは不可能であるが、増加を抑制したり、いくらか減少させることは可能である。具体的には、狂いが発生しやすい材に対しては、全体的に低めの乾燥温度を用いるのが効果的である。また、棧積み上部に荷重をかけて材全体を圧縮する方法も効果的である。（50頁V. 3.（5）参照）

#### (5) 落ち込み

落ち込みは、木材の表面に筋状の凹凸ができる現象をいう。一般的には、柁目材の長さ方向に、年輪に沿って筋状に現れることが多い。

落ち込みは、細胞が乾燥中に潰されて異常収縮を起こした時に生じる。一般的には、細胞壁が薄い高含水率材を高温、高湿で乾燥したときに生じやすいため、発生を防止するためにはこの様な条件を避けることが必要である。特に、乾燥初期の温度設定には注意を要する。

一般的に国産の針葉樹では、70～80℃までの常識的な範囲の温度域で乾燥する場合には、落ち込みが発生する事は少ない。しかし、100℃以上の温度域を使う高温乾燥では、落ち込みが発生する可能性が高いといわれている。

#### (6) 変色

変色の発生には、2種類の発生原因がある。一つは、変色菌や腐朽菌の繁殖によって発生するものであり、もう一つは材中の含有成分が高温、高湿条件によって変質することによって発生するものである。

前者については、一旦菌が侵入すると変色は材内部まで及ぶ。したがって、天然乾



燥などで長く放置せず、製材後すぐに人工乾燥に入ることが防止策として最良である。但し、この際には乾燥温度が 50℃以下にはならないようにし、割れ易い材であるために乾球温度を 50℃以下にせざるを得ない場合でも、乾湿球温度差を 2℃以上は開くようにすることが必要である。

後者の変色については、樹種特性があり一概に言えないが、一般的には乾燥初期温度を 50℃以下にするとかなり防止することができる。建築用材で役物の場合、特に色艶が重要視される。しかし、色艶を重要視する乾燥条件を用いると、乾燥時間が長くなる。そこで乾燥時間の短縮を図ろうとすると、どうしても乾燥温度を高め、せざるを得ないジレンマが生じる。

## VI. 乾燥経費

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所によるスギ心持ち柱材を対象とした乾燥コストの試算結果を参考として以下に記述する。

### 1. スギ心持ち柱材の乾燥コスト

表VI—1は、スギ心持ち柱材の乾燥用として適用できる方法のうち主なものについて、乾燥仕上がり含水率と乾燥処理日数、月産と乾燥コスト等を比較したものである。

乾燥コストとしては、直接経費である設備償却費、人件費、燃料費のみを示しており、歩留まり低下や仕上げ経費、金利など他の条件は加味されていないが、おおよそこの直接経費の1.5～2倍が必要になると推測される。人件費については、栈積み降ろしの経費のウエイトがきわめて高くなっているが、これは人手による作業を想定しているためである。

なお、ここで示されたコストは燃料に灯油を用い、生産量も年間1,200 m<sup>3</sup>程度を想定して試算されている。

表VI—1 スギ心持ち柱材の乾燥方式別の乾燥コストの比較

乾燥方式 (乾燥温度)	乾燥仕上がり含水率	乾燥日数 (日)	月産 (m <sup>3</sup> )	乾燥コスト (円/m <sup>3</sup> )			
				設備費	人件費	燃料費	計
一般蒸気式 (70-80℃)	20%以下	14	115	3,700	2,000	5,040	10,740
	15%以下	17	95	4,400	2,000	6,100	12,500
高温蒸気式 (100-120℃)	20%以下	5	125	2,220	2,000	4,220	8,440
	15%以下	7	95	2,930	2,000	5,550	10,480
蒸気・高周波 複合乾燥 (80-120℃)	20%以下	3.5	280	2,580	2,000	5,950	10,530
	15%以下	4	248	2,910	2,000	6,720	11,630
除湿式 (60-70℃)	20%以下	20	27	4,930	2,000	7,410	14,340
	15%以下	25	22	6,050	2,000	10,910	18,960
燻煙式 (60-90℃)	20%以下	14	350	3,170	2,000	400	5,570
	15%以下	16	310	3,580	2,000	450	6,030
高周波加熱式 真空乾燥 (50-60℃)	20%以下	3.0	110	4,040	2,000	10,700	16,740
	15%以下	3.5	100	4,440	2,000	12,300	18,740

対象材：スギ心持ち柱材、仕上げ寸法：10.5 cm角仕上げ

## 共同研究「自然エネルギーを利用した木材乾燥技術の開発」(最終報告)の概要

### 1 研究体制

- 企画機関：島根県中山間地域研究センター、東芝キヤリア株式会社、一般財団法人電力中央研究所
- 研究期間：2013年5月1日～2016年3月31日

### 2 研究背景と目的

#### 2.1 背景

- 我が国では、国産木材の利用促進と林業・木材産業の活性化のため、木材の主要な供給先である住宅・建築物向け製材を対象に、高品質な乾燥材を安価に生産することが強く求められている。
- 島根県では、近年、高温蒸気式等の木材乾燥機の導入が徐々に進みつつあるが、コストが高いため、導入に踏み切れない工場が多く、乾燥材率の向上にあまり寄与できていないのが現状である。
- 乾燥材の品質を保ちながら、コストを抑え、省エネ・省CO<sub>2</sub>に寄与するエコ乾燥機が求められている。

#### 2.2 目的

- 高温セット処理と中温乾燥の組合せ乾燥方式を採用し、中温乾燥での熱源機器を蒸気ボイラから太陽熱集熱器とヒートポンプへ代替することで、省エネ・低コスト化を目指す【図1】。
- エコ乾燥機的设计指針を得るために必要なデータを取得し、標準仕様書を作成する。

### 3 研究内容

#### 3.1 試作機的设计および製作

- 木材の乾燥に必要な熱量・換気量を推算し、熱源機器や換気設備を選定し、乾燥システムを設計する。
- 実際に乾燥システムを試作する。

#### 3.2 試作機による木材乾燥試験および蒸気乾燥との比較評価

- 試作機を用いた乾燥試験により、乾燥材品質やエネルギー消費量、ランニングコストを確認し、蒸気乾燥および天然乾燥の場合と比較評価する。
- 試験材は、スギ平角(国内生産量が多く、利用拡大が期待されるが、乾燥が比較的困難な材)を使用。
- 目標上含水率は、全乾法で20%以下(日本農林規格SD20材)。

### 4 研究結果

#### 4.1 試作機的设计および製作

- 熱源に空気集熱式太陽熱集熱器と空気熱源温水循環加温ヒートポンプ(CAONS140)を有する木材乾燥機(乾燥室容量は、22m<sup>3</sup>、比較する蒸気乾燥機と同容量)を製作し、島根県中山間地域研究センターに設置した【図2】。
- 外気を太陽熱集熱器で加熱し、乾燥室温度を所定の温度(60℃)に維持するために、不足熱分はヒートポンプにより補う方式を採用した。また、排気損失の低減を目的に、熱回収熱交換器(市販の顕熱交換器)を併設した【図3】。

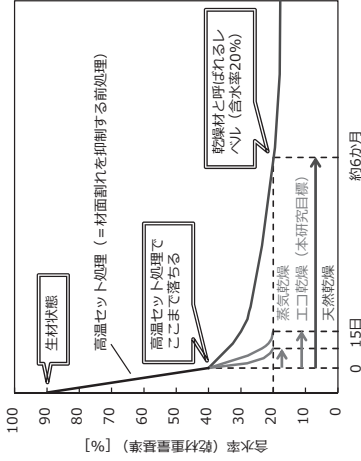


図1 乾燥方式の模式図(高温セット+中温乾燥)

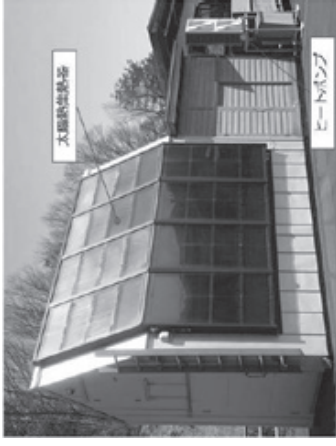


図2 試作機の外観(2016年3月撮影)

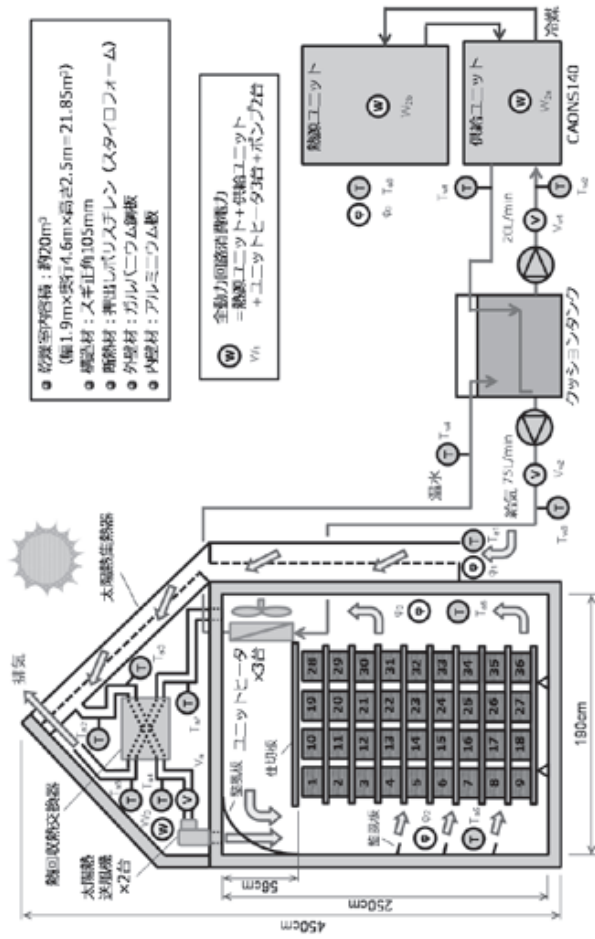


図3 試作機の構成と計測システムの概略図

#### 4.2 試作機による木材乾燥試験および蒸気乾燥との比較評価

##### 4.2.1 蒸気乾燥および天然乾燥との比較評価

- 含水率は、製材後 70%程度、高温セット処理後 35%程度であり、中温乾燥後はエコ乾燥・蒸気乾燥ともに 20%を下回った [図 4]。一方、天然乾燥は 6 か月経過後も 24%であり、SD20 材として流通させるには長い乾燥期間を要することがわかった。

- 蒸気乾燥の約 2 倍の乾燥日数を要するが、乾燥材品質を要するが、乾燥材品質が良かった [表 1]。

##### 4.2.2 エネルギーシステム評価

- ヒートポンプ消費電力量と比較し、補機消費電力量が大きかった [図 5]。ポンプやファン等の適切な選定も重要である。
- 乾燥室に供給した熱量の 14%しか水分蒸発に寄与しておらず、乾燥室からの放熱損失や非気損失が大きいことがわかった [図 6]。乾燥室の断熱性を向上させることも重要である。
- 太陽熱集熱器の熱供給寄与率は 11% (=122÷1116×100) であった [図 5]。太陽熱集熱器による加熱量を COP=2.1 (=950÷(318+130)) のヒートポンプで賄うと、58kWh の電力を消費することになる。太陽熱集熱器による一次エネルギー消費削減効果は 0.57GJ (約 5%=0.57÷11.2×100) 得られるが、ランニングコスト削減効果は 1 千円程度 (乾燥材生産量 3.6m<sup>3</sup>当たり) に留まる。
- 熱回収熱交換器の熱供給寄与率は 4% (=44÷1116×100) であった [図 5]。熱交換器による熱回収量を COP=2.1 (=950÷(318+130)) のヒートポンプで賄うと、21kWh の電力を消費することになる。

表 1 試験結果 (蒸気乾燥との比較)

項目	工口乾燥	蒸気乾燥	蒸気乾燥 (補正後) ※5	効果	
高温セット	乾燥期間	2日間	蒸気乾燥	-	
	A 重油消費量	150L	(補正後) ※5	-	
	一次エネルギー消費量※1	6.2GJ		-	
	ランニングコスト※2	15千円		-	
中温乾燥	乾燥期間	18日間	9日間	9日遅延	
	乾燥温度	60℃	90℃	-	
	A 重油消費量	-	630L	473L	-
	電力消費量	522kWh※4	-	-	-
	一次エネルギー消費量※1	5.1GJ	25.8GJ	19.4GJ	74%削減
	ランニングコスト※2	10千円	62千円	47千円	79%削減
合計	乾燥期間	20日間	14日間	9日遅延	
	乾燥材品質ランクA※3	23本	18本	同等以上	
	乾燥材品質ランクB※3	10本	10本	-	
	一次エネルギー消費量※1	11.2GJ	32.0GJ	25.5GJ	56%削減
	ランニングコスト※2	25千円	77千円	62千円	60%削減

※1 一次エネルギー消費量の算出には、エネルギー消費原単位 9.76MJ/kWh および 4.1MJ/L を適用。  
 ※2 ランニングコストの算出には、鳥根県山間地域研究センターでの実購入価格 19.2 円/kWh および 99.2 円/L を適用。  
 ※3 公益財団法人日本住宅・木材技術センターによる品質基準であり、材長 4m のスギ平角について、含水率が 20%以下の場合に、材面割れ線長が 0.5m 以下であればランク A、1.5m 以下であればランク B。  
 ※4 ヒートポンプ消費電力量 318kWh とポンプ消費電力量 130kWh、送風機消費電力量 74kWh の和。  
 蒸気乾燥機の循環ファン消費電力量が未計測であるため、ユニットヒータの循環ファンの消費電力量は除外。  
 ※5 仕上含水率の計測結果より、蒸気乾燥は過乾燥であったため、乾燥期間が 9 日間であった場合を想定して補正。

熱回収熱交換器による一次エネルギー消費削減効果は 0.20GJ (約 2%=0.20÷11.2×100) 得られるが、ランニングコスト削減効果は 0.4 千円程度 (乾燥材生産量 3.6m<sup>3</sup>当たり) に留まる。

- 試作機の平均熱負荷は 3kW 程度であり、CAONS140 (定格加熱能力 14kW) 1 台に対し、乾燥室容積は 65m<sup>3</sup> (試作機の 3 倍) 程度が適切であることがわかった。

#### 5 エコ乾燥機の設計指針の整理

- コスト回収効果の低い太陽熱集熱器と熱回収熱交換器は装備せず、給排気はダンパー式を採用し、送風機の削減による消費電力の低減と乾燥室からの放熱損失の低減を図る。
- 開放式クッションタンクから密閉式貯場タンク+膨張タンクに変更し、ヒートポンプ単体 COP の向上とタンクからの放熱損失の低減を図る。
- 乾燥室とヒートポンプとの負荷バランスを適正化し、システム性能の向上を図る。

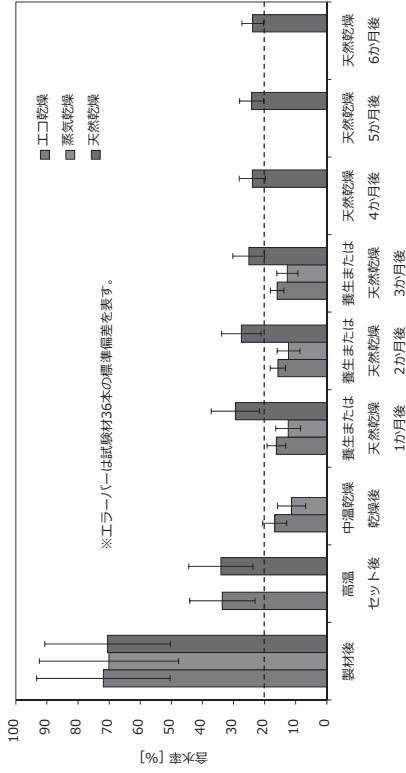


図 4 含水率の推移

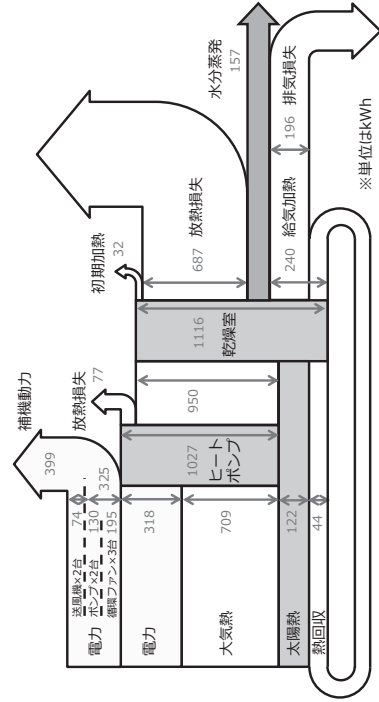


図 5 エコ乾燥機 (試作機) のエネルギーバランス

## 主な引用文献

- ①—建築用針葉樹製材のための—人工乾燥材生産技術入門  
；岡山県木材加工技術センター
- ②「針葉樹製材乾燥技術者研修会」テキスト；(財) 日本住宅・木材技術センター
- ③木材の人工乾燥（改訂版）；(社) 日本木材加工技術協会
- ④わかりやすい「乾燥材生産の技術マニュアル」；(社) 全国木材組合連合会
- ⑤すぐに取り組もう木材乾燥；(社) 全国木材組合連合会
- ⑥木材乾燥のはなし；(財) 日本木材総合情報センター
- ⑦「これからの建築用材の水管理のあり方」；農林水産省森林総合研究所
- ⑧島根県産スギ造林木の強度性能—スギ正角材の曲げ強度—  
；島根県林業技術センター研究報告第 42 号
- ⑨木材乾燥の手引き；島根県農林水産部林業振興課
- ⑩わかりやすい「樹種別乾燥材生産の技術マニュアル」；(社) 全国木材組合連合会
- ⑪わかりやすい「乾燥材生産の技術マニュアル（改訂新版）」；(社) 全国木材組合連合会
- ⑫KD REPORT vol.54；日本木材乾燥施設協会
- ⑬木材需給と木材工業の現況（平成 22 年版）；(財) 日本住宅・木材技術センター
- ⑭木材乾燥のすべて；海青社
- ⑮最新データによる木材・木造住宅の Q & A；木構造振興株式会社
- ⑯木材乾燥ミニハンドブック～基礎知識と実務～；日本木材乾燥施設協会
- ⑰島根県産スギ正角材の高品質乾燥技術の確立と強度性能評価  
；島根県中山間地域研究センター研究報告第 5 号
- ⑱島根県産スギ平角の高品質乾燥技術の確立と強度性能評価  
；島根県中山間地域研究センター研究報告第 7 号
- ⑲高温セット法を利用した隠岐産クロマツ平角の人工乾燥と強度性能評価  
；島根県中山間地域研究センター研究報告第 8 号
- ⑳2015 年版針葉樹製材乾燥の手引き；(公財) 日本住宅・木材技術センター

## 建築用針葉樹製材の人工乾燥技術 改訂3版

令和3年（2021年）1月発行

企画・編集・発行

島根県中山間地域研究センター

〒690-3405 島根県飯石郡飯南町上来島 1207

TEL 0854-76-2025 FAX 0854-76-3758

島根県農林水産部林業課

〒690-8501 島根県松江市殿町1番地

TEL 0852-22-6539 FAX 0852-26-2144