

スギ材の高温域での乾燥に関する研究

1998年度～2000年度(県単)

近藤和幸 豊嶋 勲 菱田重寿
 大林育志 榊原弘修*

要 旨

スギ柱材を対象に人工乾燥の期間短縮を目的として、割れ等欠点の発生や抑制、また材色変化について、いくつかの乾燥スケジュールにおいて特性を検討した。

その結果、乾燥初期に蒸煮をしてから、沸点を超える温度を与えるスケジュールが効率的であった。心持ち(赤心)13cm正角材が、JASに定められた構造用材乾燥材の最低基準である25%に至るまでの日数は当初含水率が65%程度以下の場合には約2日、95%まででは約3日、125%までなら約4日であった。これは一般的な60～80℃の温度域を用いた場合の1/4～1/5程度の日数にあたる。ただし、乾燥終了時、ほとんどの試験材で木口面から見える内部割れが入り、材面には焼け色が付き、天然乾燥材等との違いは目視でも明らかだが、割れの発生・抑制に効果のある蒸煮工程や高温域を用いる以上避けられないといえる。

無背割りの場合、割れ長さが増伸する場合があったが、割れ幅は収縮する傾向が確かめられた。また背割りを入れることは乾燥の促進、割れ防止等に一定の効果があった。

I 目的

愛知県の地域森林計画対象森林のうちスギが占める割合は面積で1/4、蓄積で4割を超えるまでになっている。このように豊富な資源であるスギ材の需要拡大のためには、住宅用材として乾燥材の普及が必須条件であるといえる。昨年施行された「住宅の品質確保の促進等に関する法律」〈通称：品確法〉はこの傾向に拍車をかけると思われる。

スギは同じ国産針葉樹でもヒノキと比較すると一般的に含水率が高い、水分傾斜が大きい等種々

の特徴があり、乾燥困難材といわれている。特に建築用構造材として用いられる正角材・平角材のように厚みのある材料は、施工以降の含水率変化による狂い等の欠点の影響が避けられる程度の含水率まで到達させるには、長い乾燥時間が必要でそれに伴う経費もかかる。

スギ材の蒸気式人工乾燥は、50～80℃程度の温度域で実施されることが多く、技術的にもほぼ確立されているが、市場では乾燥コストが製品価格に十分反映されていないこともあり、スギ構造用乾燥材を目にすることは少ない。近年、乾燥

Kazuyuki Kondo, Isao Toyoshima, Sigetoshi Hishida, Hironobu Sakakibara, Yasuyuki Obayasi :

The study of kiln drying for sugi lumber on higher temperature

* : 平成12年3月退職

材についての認識が広まるにつれ、設計段階から乾燥材の使用を指定するケースも増えてきた。しかし、実際の市場では注文どおりの乾燥材が作業工程上必要な時期までに都合のつかない状況も多い。発注を受けた乾燥材を希望し現物がすぐに入手できることはふつう稀であるので、この解決手段としてより高い処理温度域を使って少しでも乾燥時間を短縮させて乾燥材を生産する技術について研究を行った。

II 方法

1. 試験材

末口径 20 cm から 32 cm、年輪幅心材部 3 ~ 9 mm・辺材部 1 ~ 7 mm の心持ち県内産スギ原木を伐採搬出後当センター内土場で 1 カ月から 3 カ月のはい積み期間を経て、長さ 1.2 m の 13 cm 角(予備試験では 12 cm 角)の準備試験材を製作してから、試験片を採取した後、最終的には長さ 1 m の試験材とした。

試験材は実大材に比し短尺であり、乾燥しやすい木口周辺部分の割合が高いため、乾燥の進み過ぎを防止するよう木口にシリコンコーティングを施した。

なお、目視で極端な黒心材と認められる材料は使用しなかった。

2. 乾燥機

蒸気式実験用乾燥機を使用した。この乾燥機の熱源は電気によるもので一般的な乾燥機が風向の切り替えが可能なのに対して、一方向のみから固定されているのが特長となっている。

試験材の取り出しに便利のように、乾燥機中に棧積みの役割をするヒノキ製枠を設置した。

3. 乾燥スケジュール

以下の乾燥スケジュールを試行した。

- (1) 高温初期蒸煮→湿球温度降下後一定
- (2-1) 高温初期蒸煮→乾球温度上昇後一定

(2-2) 高温初期蒸煮→湿球温度定率降下

(2-3) 中温初期蒸煮→乾球温度一定上昇

(2-4) 高温初期蒸煮→乾球温度上昇後一定→
乾球温度降下後一定・

4. 測定

(1) 含水率：長さ 1.2 m の準備試験材を長さ 1 m の試験材に調製する際に切り落とした両端の試験材直近部分から各々厚さ約 2 cm の切片を切り取り、方形に 16 分割、または対角線で分割した三角形をさらに材面と平行に各 3 分割して、計 12 分割した<図-9>後、全乾法によって含水率を測定し、試験片 2 枚の平均値をその試験材の当初含水率と推定した。

当初重量と当初含水率から試験材の全乾重量を計算し、乾燥開始以後の含水率は定期的
に実施する測定重量値から算出した。

(2) 割れ：長さ・幅(一部隙間ゲージを使用)

(3) 材色：色彩色度計(光源-パルスキセノン、光学条件：大面積拡散照明・垂直受光式
測定径 50 mm、観察条件：標準の光 C)
表示は L*a*b*表色系。

乾燥の前後に同一箇所を測定した。ただし乾燥後に割れが生じたり、滲出成分等が付着して測定不適となった箇所は対象から除外した。

III 結果及び考察

1. 予備試験 1

(1) 高温初期蒸煮→湿球温度降下後一定

履歴の異なる(条件 a・b・c)試験材を用いて、乾球・湿球温度 95°C で 24 時間蒸煮後、湿球温度を 90°C に下げて、この条件を全試験材が 25% に達するまで保った。<図-1>

含水率(重量)は 24 時間(1日)置きに測定した。

(条件 a) 伐採搬出後場内土場で、覆い等を用いず
3 カ月から 5 カ月保管後に製材(12本)

(条件b)伐採搬出後1週間以内に製材(7本)

(条件c)伐採搬出して1週間から2週間以内に製材した後水中貯木して50日経過(6本、ただし、これのみ末口径27.5cm及び38cmの原木から採取した心去り材で一部に丸身が有る)
 <図-2>に試験材の含水率が25%を切るまでの日数を示した。

乾燥前後の割れの変化を<表-1>に示した。

乾球温度95℃・湿球温度90℃は、相対湿度約85%に当たる。これまで行ってきた実大材の蒸気式人工乾燥知見から、一般的な乾球温度60~80℃の範囲を用いた場合と比べると割れの発生は少ないものの、乾燥時間の差はほとんどなかった。

表-1 予備試験1 乾燥前後の割れ

各条件 (面数)	割れ数	
	乾燥前	乾燥後
条件a(48)	34	36
条件b(28)	0	1
条件c(24)	0	1

※(条件a)では34カ所中30カ所の割れが伸長

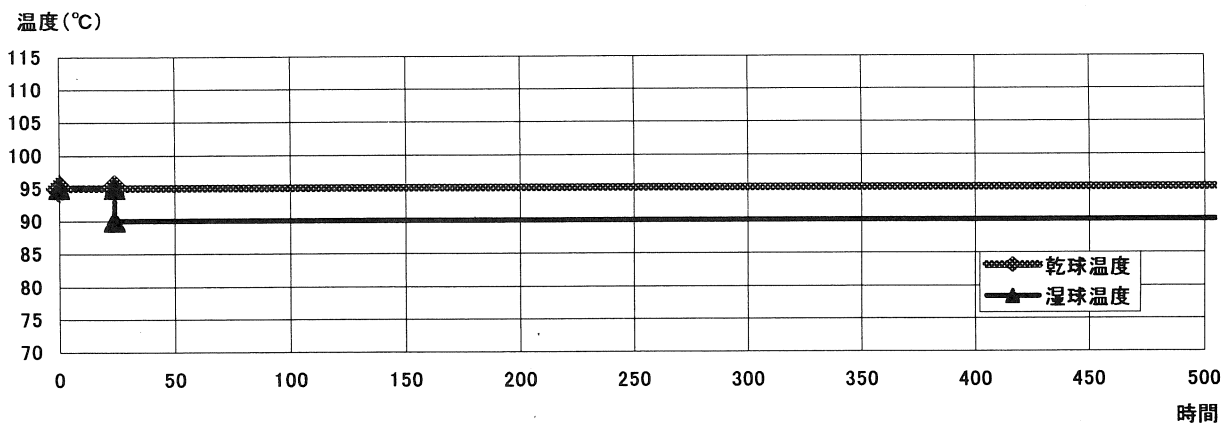


図-1 予備試験1スケジュール

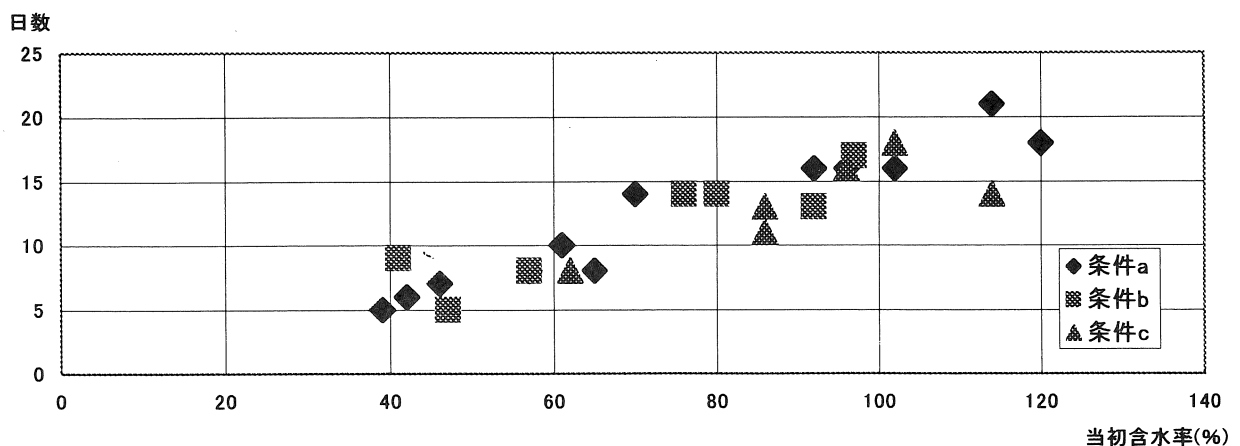


図-2 予備乾燥1:25%到達日数

2. 予備試験2

月曜日から開始して週末までに終了する乾燥作業の実現を目指して、5日間(120時間)熱投与する数種類の乾燥スケジュールを各設定毎に1回6本ずつ各2回の計12本実施した。

なお、試験材は割れの入っているものを排除して行った。

(2-1) 高温初期蒸煮→乾球温度上昇後一定

乾球温度95℃・湿球温度95℃で6時間初期蒸煮後、乾球温度を115℃に上昇させ、114時間維持した。〈図-3〉

当初含水率は40%台から120%台であったが、仕上がり時には全数が含水率20%以下に達していた。また、全48面中4面に材面割れが生じていた。

(2-2) 高温初期蒸煮→湿球温度定率下降1

乾球温度95℃・湿球温度95℃で6時間初期蒸煮後、湿球温度を時間当たり0.25℃ずつ降下、114時間後66.5℃に達する。〈図-4〉

当初含水率は40%台から90%台で、仕上がり時に含水率20%以下に達していたのは5本であった。また、全48面中2面に材面割れが生じていた。

(2-3) 高温初期蒸煮→湿球温度定率下降2

乾球温度95℃・湿球温度95℃で6時間初期

蒸煮後、湿球温度を時間当たり0.5℃ずつ降下させ、57時間後66.5℃に達した後、57時間その温度を保持する。〈図-5〉

当初含水率は60%台から120%台で、仕上がり時に含水率20%以下に達していたのは1本であった。また、全48面中2面に材面割れが生じていた。

(2-4) 中温初期蒸煮→乾球温度一定上昇

乾球温度60℃・湿球温度60℃で6時間初期蒸煮後、乾球温度を時間当たり0.5℃ずつ上昇させ、70時間後95℃に達した後、44時間保持する。〈図-6〉

当初含水率は50%台から110%台で、仕上がり時に含水率20%以下に達していたのは2本であった。また、全48面中18面に材面割れが生じていた。

3. 本試験

a) 乾燥スケジュール

予備試験の結果から、乾燥の速さと割れの発生を考慮し<高温初期蒸煮→乾球温度上昇後一定>の乾燥スケジュールにより、供試材54本(無背割り50本・背割り有り4本)を用いて試験した。

乾球及び湿球温度95℃で18時間初期蒸煮後、乾球温度を120℃に上昇させ、72時間(3日間)維持した。〈図-7〉

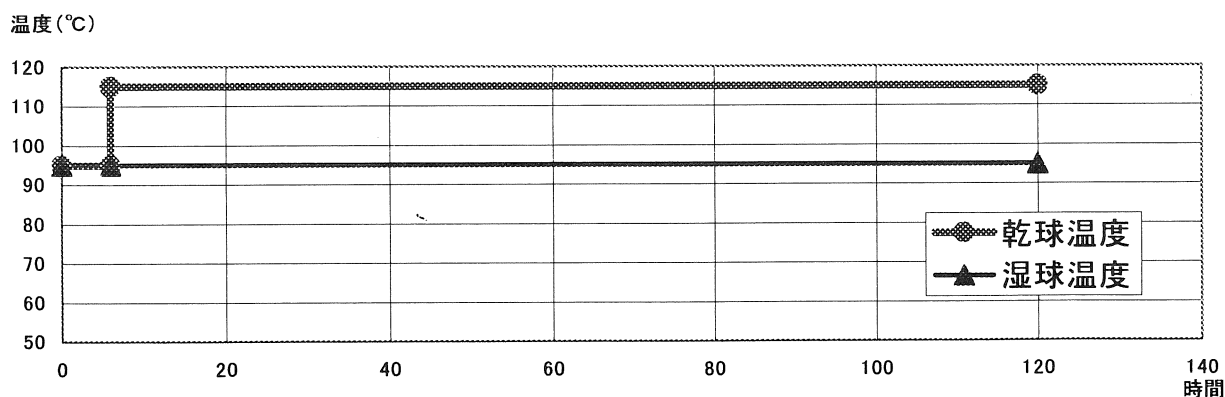


図-3 予備試験(2-1)スケジュール

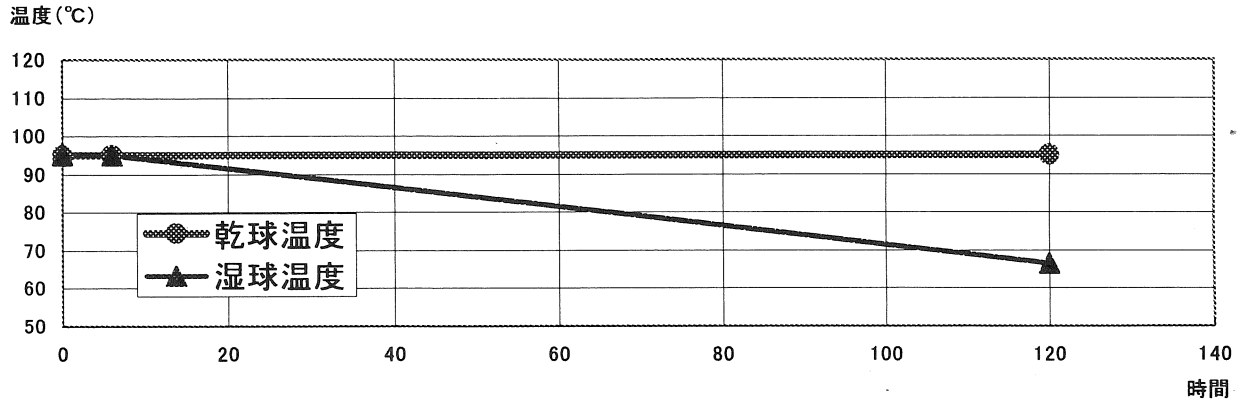


図-4 予備試験(2-2)スケジュール

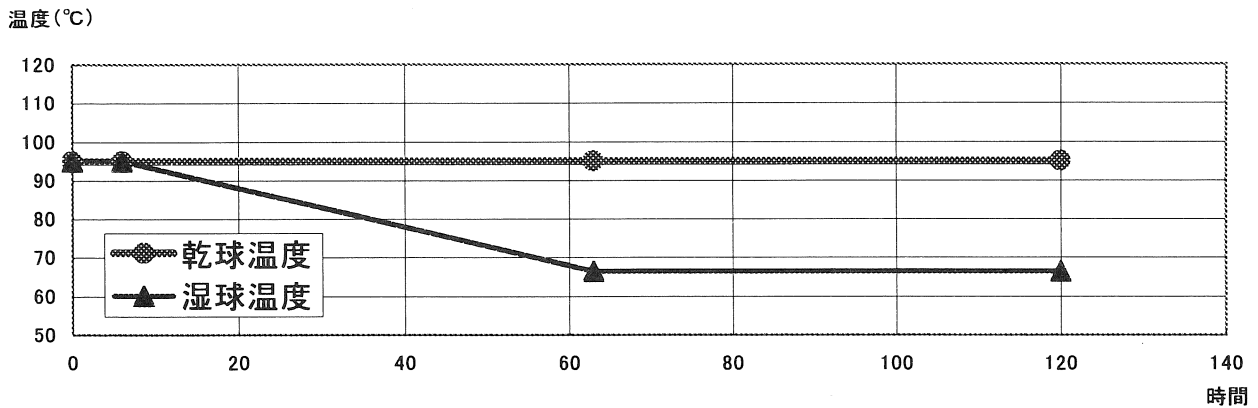


図-5 予備試験(2-3)スケジュール

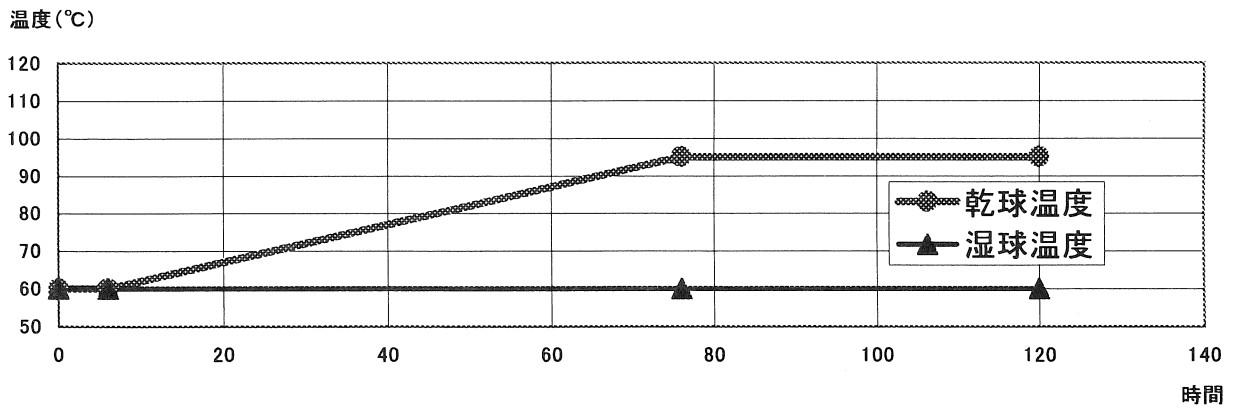


図-6 予備試験(2-4)スケジュール

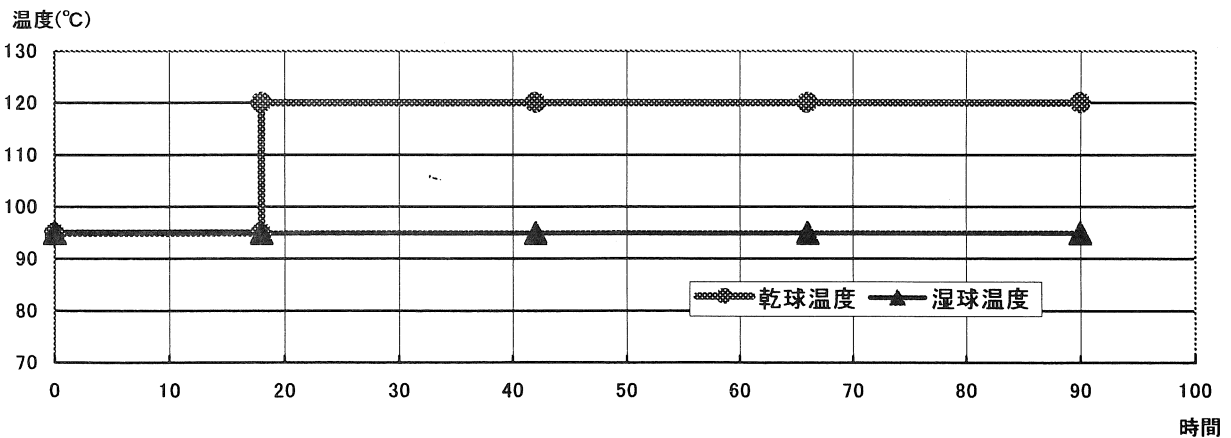


図-7 本試験スケジュール

なお、このスケジュールは月曜日の朝から製材をして、夕刻に乾燥を開始し金曜日の夕刻に加熱を終えることをイメージしている。

b) 乾燥必要時間

乾燥開始から18時間後、42時間後、66時間後、90時間後に重量を測定して当初含水率から算出した全乾重量を基にその時点での含水率を求めた。ただし、この測定時に日本農林規格の針葉樹構造用製材乾燥材の最低基準である25%以下に達していれば乾燥の終了とみなし、乾燥室から取り出して別室にて自然養生した。

全結果を<表-2>に示した。

これから、当初含水率が65%程度までならば42時間(約2日)、95%程度までは66時間(約3日)、125%程度までは90時間(約4日)で目標含水率25%以下に到達したことが分かる。

なお、当初含水率125%を超える材(最高は175%)の多くは90時間の熱投与では25%に達し得なかったが、他の材の挙動から考え、さらに同条件の熱投与を続ければ、24時間若しくは48時間以内には達成が可能と推定された。

背割りを入れた柱材は近年敬遠される傾向があるが、同一丸太から採取したほぼ含水率が近似の4組の試験材を背割りのあるもの・無いもので比較試験した。いずれも背割りを施した材の乾燥速度が大きい傾向があり、高温域の乾燥においても乾燥の促進に対して背割りの効果があることが認められた。<図-8>

高温域での乾燥は、温度を保持する意味からも材の乾燥経過の確認を頻繁には行いがたいので、乾燥前に当初含水率別に分類して実施することがより重要となる。

なお、当初含水率を測定する方法としては、高周波式木材含水率計を用いるのが一般的であるが、スギ材の場合、乾燥前には辺材部と心材部の含水率傾斜が大きい場合が多く、できれば試験片採取による全乾法を実施するのが望ましい。乾燥終了時にはこの傾斜がかなり緩やかになっていたが、これは試験材が赤心材であったからと思われる。表-3に人工乾燥7日~11日経過後に中央部で全乾含水率を測定した試験体9体の結果を当初含水率とともに掲げた。

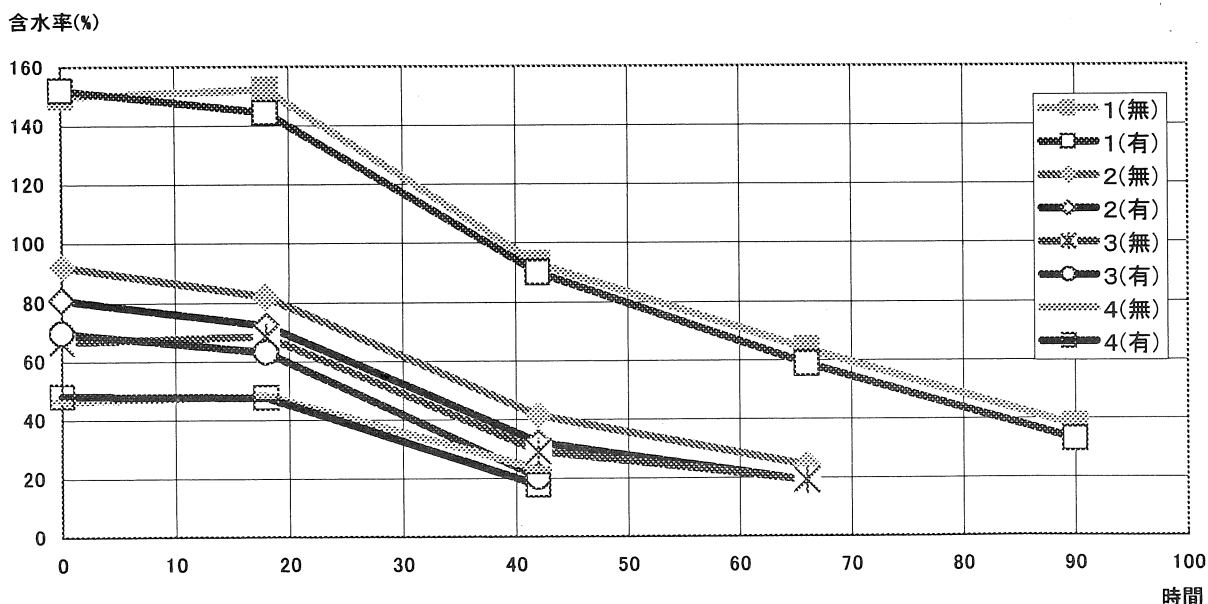


図-8 背割りの有無による乾燥速度の違い

表-2 本試験乾燥スケジュールによる含水率推移

当初含水率(%)	18時間後含水率	42時間後含水率	66時間後含水率	90時間後含水率	備考
24.8	30.4	17.9			
26.4	31.2	18.2			
28.8	37.0	18.9			
29.0	34.2	19.4			
30.2	39.1	19.2			
37.5	42.7	19.1			
38.9	45.1	19.7			
39.5	46.3	16.4			
40.0	40.2	19.6			
40.8	41.0	21.0			
44.2	44.2	18.4			
45.5	46.1	18.6			
46.2	48.1	23.0			1
47.7	48.1	21.4			
47.9	47.6	20.9			1'
48.5	52.1	23.4			
52.3	54.6	23.9			
52.4	50.4	22.4			
56.1	54.4	18.3			
60.9	59.7	14.2			
62.8	59.2	19.2			
66.5	68.4	29.1	19.0		2
67.7	73.8	50.5	23.0		
69.4	70.2	28.4	18.8		
69.5	63.0	20.1			2
70.6	77.2	51.0	22.4		
72.0	67.8	23.9			
74.3	73.2	35.4	21.3		
75.2	75.8	35.9	20.8		
78.4	76.7	23.7			
79.3	75.0	20.2			
80.6	80.0	41.4	20.1		
80.8	72.1	32.2	18.8		3
82.4	83.1	45.7	24.2		
92.1	81.9	41.3	24.2		3
93.8	91.6	48.4	22.2		
95.8	80.8	39.9	18.9		
96.0	94.5	52.1	22.8		
96.7	95.2	54.4	24.7		
99.7	114.1	66.6	41.7	23.4	
100.7	106.7	59.0	29.8	19.6	
106.1	104.7	59.7	33.3	23.4	
113.2	110.4	66.4	34.2	17.3	
121.6	121.3	70.6	41.2	20.4	
123.5	120.3	66.4	40.1	23.4	
124.5	127.6	68.5	39.7	19.7	
126.7	129.3	86.8	55.3	27.4	※
129.6	126.4	87.8	58.4	29.8	※
135.2	130.2	69.0	42.2	21.2	
140.5	133.8	76.6	49.6	24.8	
142.4	140.3	79.0	54.6	27.8	※
149.7	152.1	93.0	63.6	37.3	※ 4
151.9	144.4	89.9	58.6	32.7	※ 4'
175.4	173.8	103.9	70.8	42.8	※

備考欄: ※は目標含水率(25%)未到達

1-1',2-2',3-3',4-4'は背割り無し-背割り有り,での対照試験

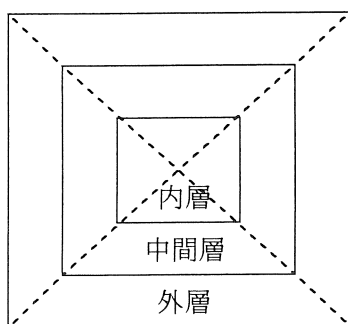


図-9 全乾含水率分割測定

表-3 試験材の含水率傾斜(%)

外層	中間層	内層	全体平均
(17.2)	(19.5)	(21.5)	(17.6)
23.9	30.9	39.2	30.2
(18.7)	(19.5)	(26.3)	(19.6)
38.5	40.7	44.1	40.8
(18.3)	(20.0)	(23.1)	(18.6)
53.8	61.3	71.6	60.9
(17.2)	(19.5)	(21.5)	(17.6)
63.1	90.5	82.7	82.4
(21.4)	(22.7)	(26.5)	(23.0)
68.6	102.4	139.8	96.0
(20.9)	(20.8)	(23.6)	(21.1)
70.7	105.3	143.4	96.7
(21.9)	(22.6)	(25.1)	(22.2)
85.6	115.5	133.2	106.1
(24.0)	(25.2)	(27.3)	(24.6)
105.5	128.6	122.9	123.5
(29.6)	(32.0)	(34.8)	(31.6)
125.9	134.2	141.1	129.6
(23.8)	(25.6)	(28.3)	(25.3)
138.2	144.7	152.4	142.4

B) 割れの状況

本試験材(無背割り)50本のうち乾燥前に材面割れの無かったものは42本で、このうち25本は乾燥終了後にも割れの発生は見られなかった。残りの17本は乾燥後に1面に割れの入ったものが6本、2面は4本、3面は7本で、1材面に複数の割れが入ったものが35材面中11面・16カ所であった。割れの長さは50mmから250mmと様々だが、割れ幅はヘアクラックから0.1mm程度がほとんどで、最大でも0.9mmであった。

乾燥前から割れが確認できた8本については、6本が1材面、2本が2材面の計10面・13カ所で、幅は0.03mm~0.7mmで、乾燥後に割れ長さが伸びたのは2面・3カ所であった。乾燥により材が収縮していることから割れ幅はすべてが狭くなっており、ほとんどがヘアクラック程度に収まっていた。

新たに発生したものを含めて、乾燥後に認められた計29カ所の割れのうち、材面及び木口に掛かるものは10カ所であった。

木口で確認できる内面割れは100面中92面に認められた。長さは5mm~52mm・平均34.66mm、幅は0.5mm~9mm・平均1.2mm。なお、比較試験で用いた4本の背割り材は当初から7面・12カ所の割れがあったが、うち1カ所だけ長さが乾燥後にわずかに伸び、乾燥前最大0.7mmあった割れ幅はほとんど目立たなくなった。また割れの無かった1面に3カ所の新たな割れが生じた。また、背割り底部から髄を通る割れが木口面で8面中2面に見られた。以上から背割りが乾燥の促進だけでなく、割れの抑制にも効果があることが認められた。

本試験で発生した割れは、同様のスケジュールを以前に実大材で実施した場合の知見からの予想に比して長さ・幅ともに少ないように感じられた。特に木口割れ(材面に掛かるもの)の発生が小

乾燥後

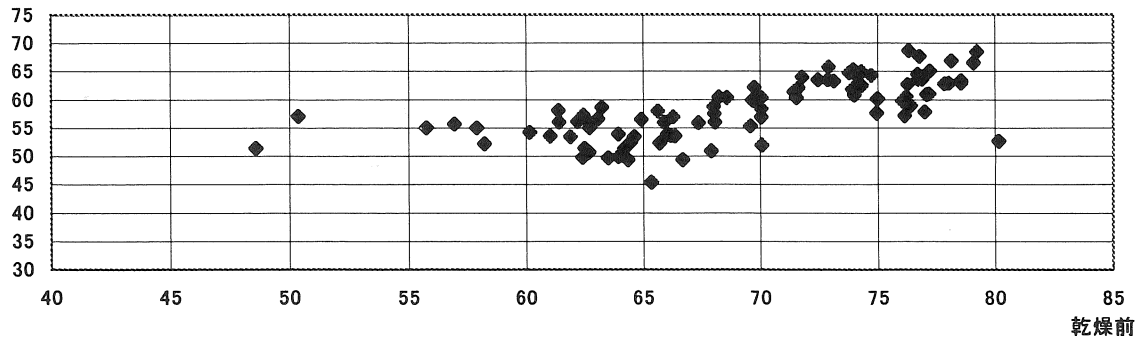


図-10 乾燥前後の明度(全体)

乾燥後

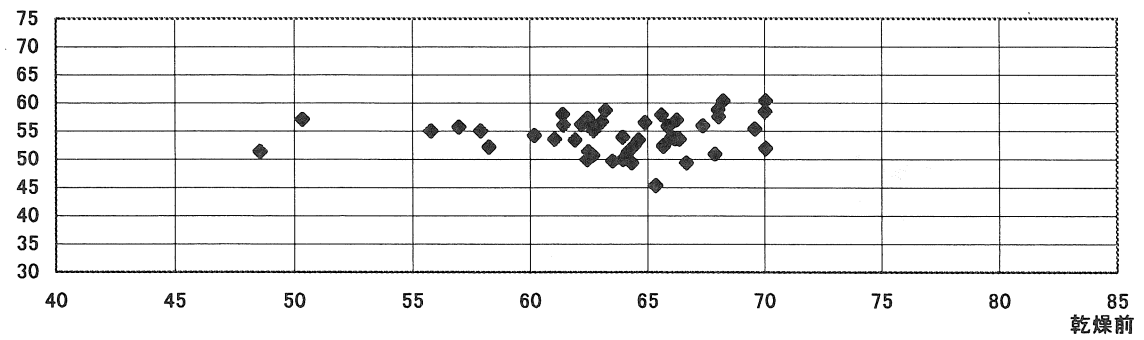


図-11 乾燥前後の明度(心材)

乾燥後

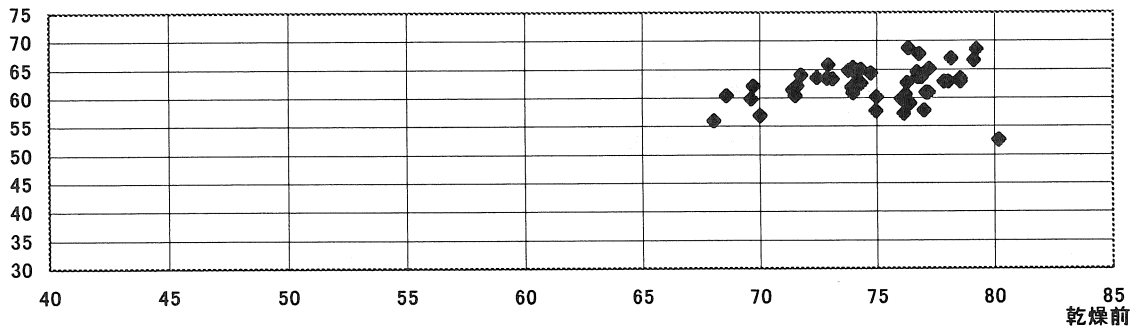


図-12 乾燥前後の明度(辺材)

乾燥後

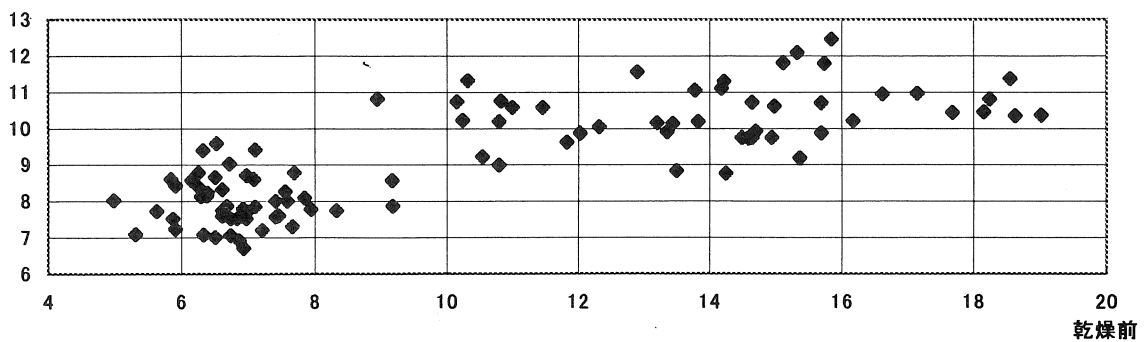


図-13 乾燥前後の色度(赤方向:全体)

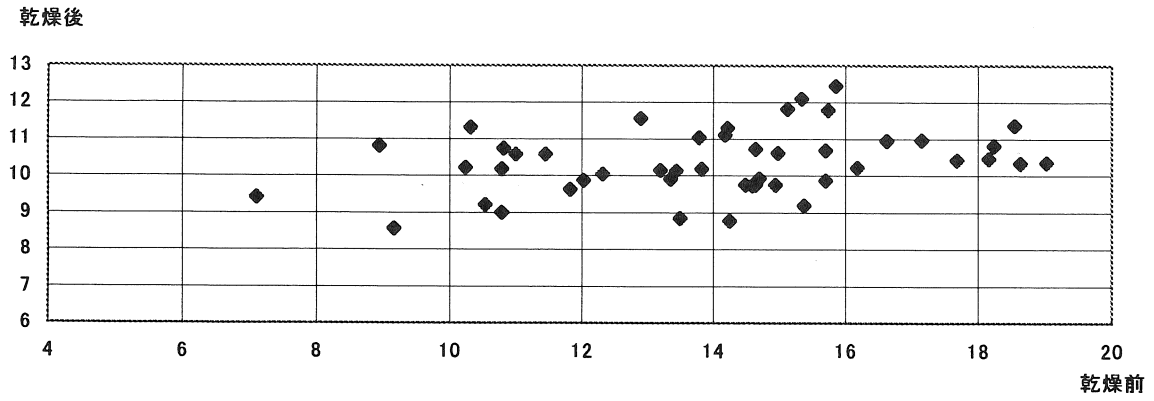


図-14 乾燥前後の色度(赤方向:心材)

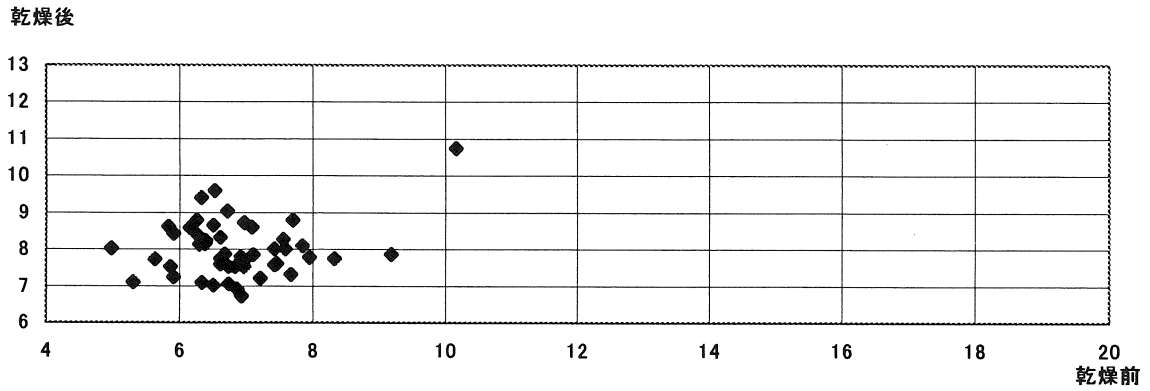


図-15 乾燥前後の色度(赤方向:辺材)

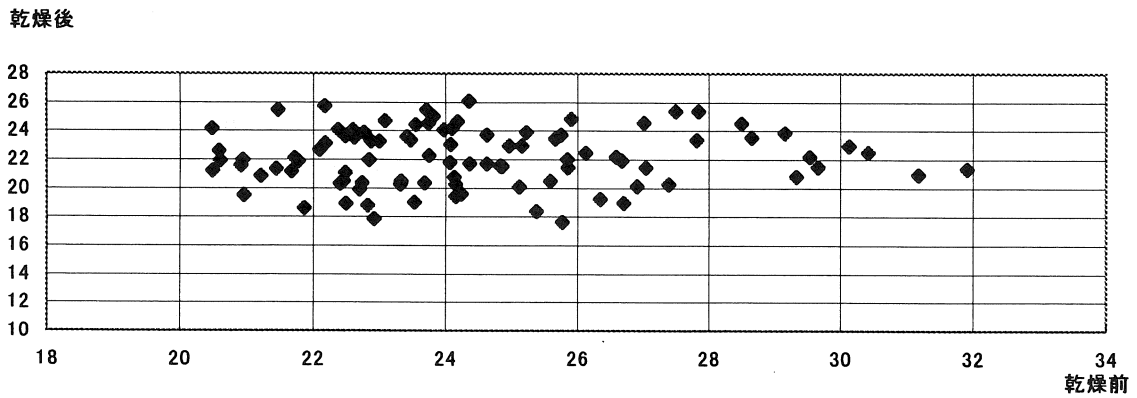


図-16 乾燥前後の色度(黄方向:全体)

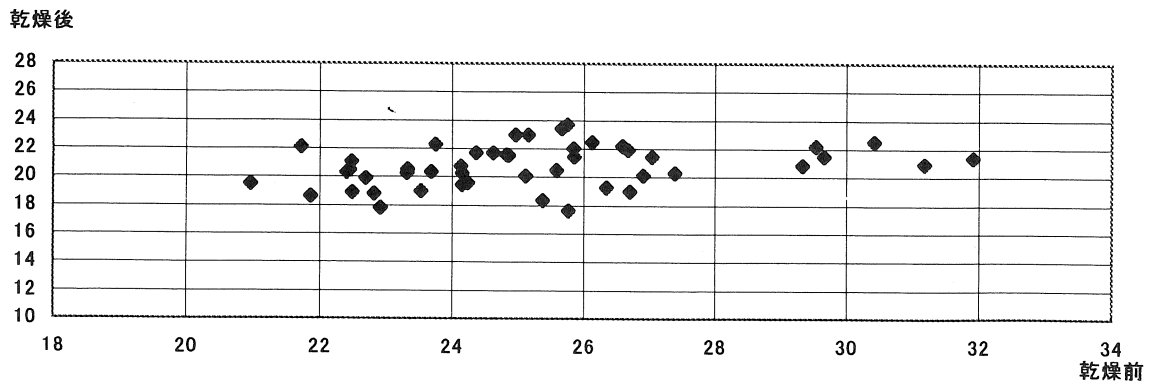


図-17 乾燥前後の色度(黄方向:心材)

乾燥後

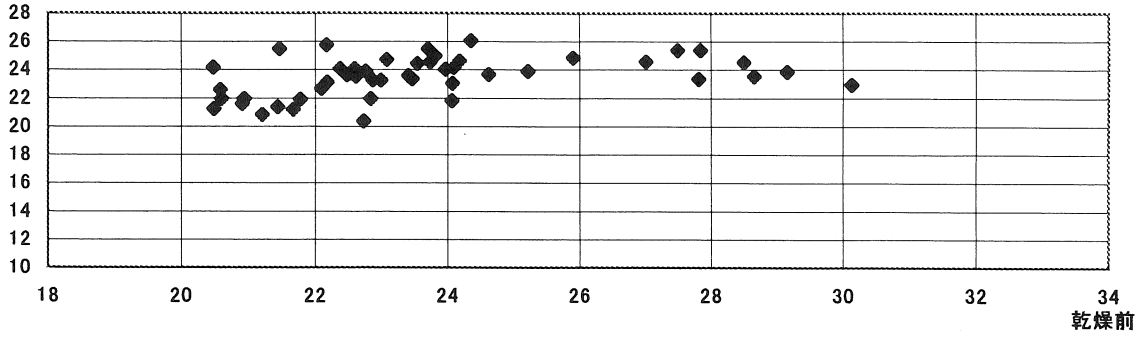


図-18 乾燥前後の色度(黄方向:辺材)

乾燥後

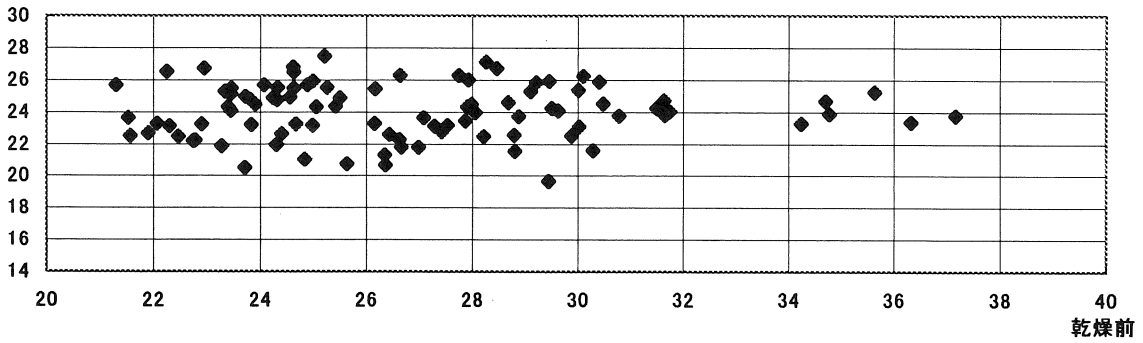


図-19 乾燥前後の彩度(全体)

乾燥後

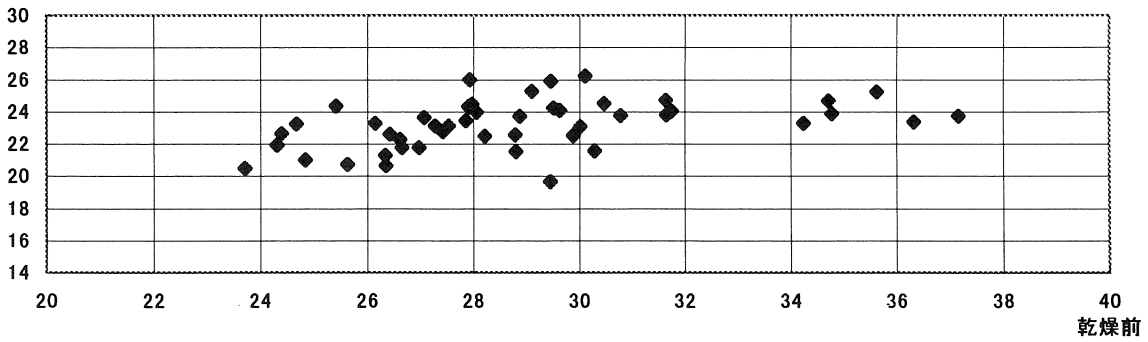


図-20 乾燥前後の彩度(心材)

乾燥後

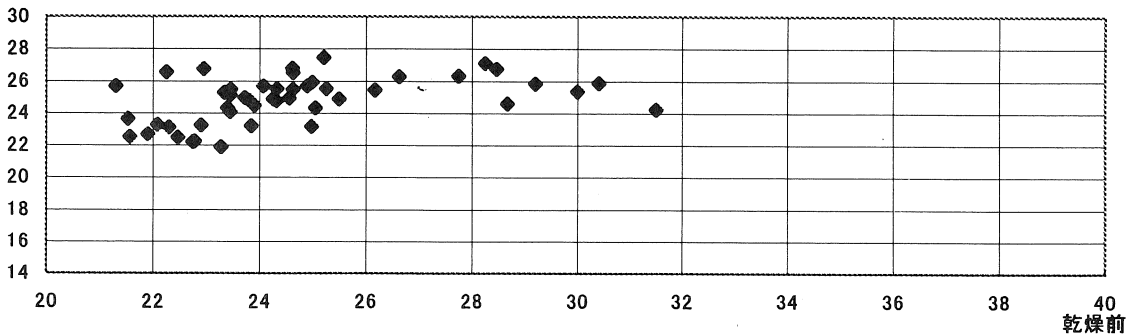


図-21 乾燥前後の彩度(辺材)

さかったが、これは試験材長が単尺であったことと、木口をシーリングしたことが影響している可能性が考えられる。

C) 材色の变化

<図-10~21>及び<表-8>に試験材を乾燥室から取り出して7日から11日経過した時点で全体及び心材・辺材別に測定した結果を示す。

明度<L*>は心材・辺材部ともに低下し、色度<a*: 赤方向、b*: 黄方向>、及び彩度<(a*)²+ (b*)²>^{1/2}も心材では低下してよりくすんだ感じになったが、辺材では変化が小さく、むしろ色度<a*>は上昇していた。また、乾燥前と乾燥後の心・辺材間の色差<ΔE=(ΔL*)²+ (Δa*)²+ (Δb*)²>^{1/2}を計算すると、22.69から15.23までに縮っており、乾燥後は心材・辺材の色調がより近づいてきたことが分かる。

さらに材色変化に及ぼす蒸煮の影響を確認するため、本試験に使った試験材と同仕様の6本の試験体に対して42時間の蒸煮をした比較試験の結果を<表-9>に示した。ただし乾燥作業は含水率の推移に関わらず蒸煮蒸煮後72時間120℃に保った後、計114時間で打ち切った。

乾燥前後の心材・辺材毎の色差は本試験に比べると数値では5割近く上昇しており<表-9>、乾燥前後の心材と辺材の色差も25.32から13.42とさらに小さくなり色調が一層近寄った。

高温域での乾燥は天然乾燥や中温での乾燥に比べると材色の変化が大きいとされているが、温度の上昇と蒸煮の時間が大きく関わっていることが確認できた。また、材面の節の周囲が褐色に滲んでいる箇所も数多く観察され、蒸煮工程で暖められた材が続く沸点を越す高温により内部の水蒸

表-8 L*a*b*表色系値(18時間蒸煮平均値)

	明度(L*)		色度(a*)		色度(b*)		彩度		乾燥前後の色差
	乾燥前	乾燥後	乾燥前	乾燥後	乾燥前	乾燥後	乾燥前	乾燥後	
心材	62.63	54.24	13.96	10.36	25.25	20.74	28.91	23.20	12.20
辺材	74.87	62.24	6.86	8.00	23.71	23.49	24.70	24.82	12.90

表-9 L*a*b*表色系値(42時間蒸煮:平均値)

	明度(L*)		色度(a*)		色度(b*)		彩度		乾燥前後の色差
	乾燥前	乾燥後	乾燥前	乾燥後	乾燥前	乾燥後	乾燥前	乾燥後	
心材	60.14	46.16	15.76	9.89	25.20	17.04	30.00	19.72	17.53
辺材	74.00	56.20	6.46	8.28	24.50	21.76	25.35	23.32	18.19

気圧が高まり水分だけでなく、材(特に心材)含有成分をより激しく移動・排出させ、結果として大きな材色変化をもたらしていると考えられた。

野県林業総合センター研究報告(第14号)別刷

Ⅳ まとめ

高温域の乾燥は、主に乾燥速度を増大させるために行われる。各地でいくつかのスケジュールが実施されているが、それぞれに特徴があり定番といえるスケジュールはまだ確立していない状況といえる。

当研究で採用したスケジュールは、スギ柱材の乾燥時間の短縮に寄与できることが確かめられた。一方、材色の変化・割れの発生は避けられなかった。特に木口から見える内部割れが多数生じたことは、プレカット等の加工段階に影響を及ぼす可能性があることから、乾燥速度を高めるのみでなく、木口割れに対するコーティング効果の確認等、欠点の抑制に役立つと思われる手法も検討していく必要がある。

参考文献

- (1) (財)日本木材加工協会(1998) 木材乾燥講習会テキスト、151pp
- (2) (財)日本木材加工協会(1999) 最新木材工業事典、316pp
- (3) (社)全国木材組合連合会(2001) 乾燥材生産の技術マニュアル、99pp
- (4) 河崎弥生(1998): 木材工業 vol.53、No.4、166-171
- (5) 吉田孝久ら(1998): 地域産材を利用した高信頼性構造用材の開発ースギ柱材の高温乾燥法の確立ー、長野県林業総合センター平成10年度業務報告
- (6) 吉田孝久ら(2000): カラマツ及びスギ心持ち柱材の高温乾燥特性ー高温低湿乾燥条件が乾燥特性に及ぼす影響と曲げ試験性能ー、長