

6 県産スギ大径材の乾燥技術に関する研究（県単：H20～H27）

林崎 泰

1 目的

県内の人工林は、長引く木材価格の低迷により立木伐採が見送られ、齢級構成のピークが9～10 齢級（41～50 年生）へと移行していることから、樹木の大径化が進んでおり、森林資源の循環利用を進めていくうえで、これらを有効利用していくことが重要な課題となっている。

しかし、大径材から製材し、梁材や桁材として利用される木材は乾燥に長期間を必要とするため、需要に即応して乾燥材を供給することが難しい状況にある。

このため、品質の安定した県産スギ乾燥材を早期に生産・供給することができるよう、大径材の利用拡大の一つの方向としての無垢の梁・桁材に対応した乾燥技術を開発し、県産スギ材の利用拡大と森林資源の循環利用の推進を図るための資料を得る。

2 経過の概要

平成 20 年度から県内産スギ心持ち平角材の乾燥試験に取り組んでおり、平成 21 年度までに天然乾燥を 1 回、人工乾燥を 9 回実施した。平成 22 年度に木材乾燥機を更新し、人工乾燥試験を 4 回実施した結果、材の変色を抑え、表面割れを基準（または 評価：表面割れ長さ 50cm 未満・・・「大断面無垢材の乾燥推進に向けて P.3」木構造振興株式会社）以下に少なくすることには成功したが、内部割れを基準（または 評価：内部割れ長さ 100mm 未満・・・「大断面無垢材の乾燥推進に向けて P.3」木構造振興株式会社）以下に抑えることは困難と思われた。人工乾燥のみで仕上げる乾燥試験結果により、供試材から黒心材を除去した方が、仕上がり含水率のばらつきが小さくなることが分かった。また、過乾燥が内部割れにつながることも分かった。

そこで、平成 23 年度からは人工乾燥と天然乾燥との組み合わせ乾燥試験に着手し、乾燥開始から乾燥終了までの木材重量や含水率の推移、表面割れ、内部割れの発生状況を調査することで、県産材に適した乾燥方法を検討した。

なお、平成 23 年度は 4 回の乾燥試験を実施したが、天然乾燥に長期間を要した。平成 24 年度は 5 回の乾燥試験を実施し、人工乾燥後、屋外の屋根下と屋内の 2 グループに分け天然乾燥を実施したが、天然乾燥に 3～10 ヶ月を要した。また、屋外の屋根下と屋内の天然乾燥における乾燥速度の有意差はなかった。平成 25 年度は初期蒸煮時間の長さによる乾燥速度の違いが確認できていなかったことから、初期蒸煮温度及び時間の検討を行うとともに、人工乾燥終了時点の含水率を 30%程度とすること、天然乾燥で 6 ヶ月以内に仕上がることを目標に試験を実施した。その結果、蒸煮温度及び時間を変えてもあまり効果がないことが分かった。また、高温乾燥時間 18、24 時間では、人工乾燥終了時点の含水率を目標の 30%以下にすることはできなかった。

3 試験方法の概要

(1) 試験木

県産スギ心持ち平角材（255mm×135mm×4.00m）を1回の乾燥行程に10本ずつ、合計40本を供試した。

(2) 乾燥試験

乾燥試験は、人工乾燥の後、天然乾燥で仕上げる組合せ乾燥を4回実施した。

人工乾燥は、平成22年度に更新導入した蒸気加熱式高温木材乾燥機（収容材積約4m³）を使用し、高温処理を行った。

4回の乾燥試験の人工乾燥スケジュールを、表-1及び図-1に示す。

表-1 人工乾燥スケジュールの設定

乾燥試験	初期蒸煮			高温乾燥		
	乾球温度	時間		乾球温度	時間	
	湿球温度	昇温時間	継続時間	湿球温度	昇温時間	継続時間
						20時間
	85			120		24時間
	85	1時間	8時間	85	1時間	30時間
						36時間

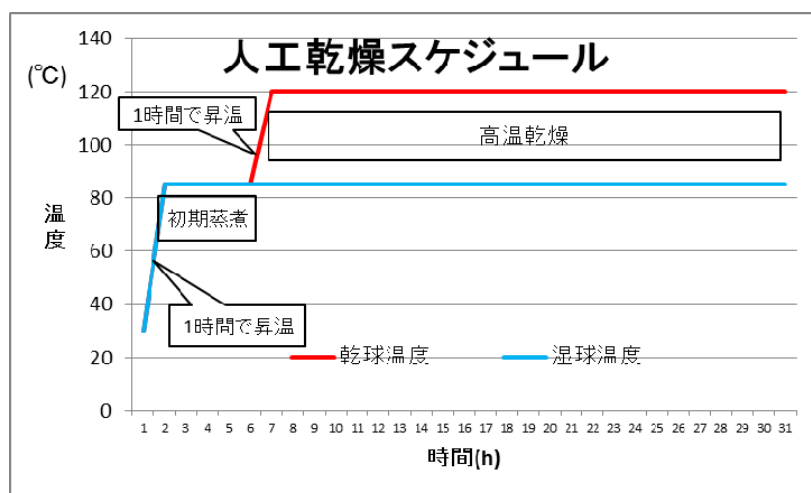


図-1 人工乾燥スケジュールの設定

人工乾燥の後、試験木を栈積みし、白色波板の屋根を付け、屋外で天然乾燥を行った。1ヶ月ごとに試験木の元口から15cm位置で、厚さ2cmの含水率試験片を採取し、全乾法による含水率を測定し、試験木10本中、9本以上の含水率が20%以下になった時点までを天然乾燥期間とした。



(3) 調査内容

組合せ乾燥における各乾燥条件による試験木の乾燥状況を確認するため、人工乾燥前、人工乾燥後、天然乾燥1ヶ月ごとの含水率、木材重量、ヤング係数、表面割れ面積、内部割れ面積などを調査した。

含水率

- ・試験木の元口から15cmの位置で、厚さ2cmの含水率試験片を採取し、全乾法により含水率を算出。
- ・測定は人工乾燥直前と直後及び天然乾燥期間中の1ヶ月ごとに実施。

表面割れ

- ・供試材の木口以外の4面に生じた幅1mm以上の表面割れの長さを測定し、その長さを合計。
- ・判定基準は、表-2-1のとおり。

表-2-1 表面割れの評価基準

表面割れ長さ合計	10cm未満	50cm未満	100cm未満	100cm以上
評価				×

表面割れの基準は、「大断面無垢材の乾燥推進に向けてp.3」
平成23年3月 木構造振興株式会社による。

内部割れ

- ・供試材の元口から15cmの位置で採取した含水率試験片において、木口面に現れた幅1mm以上の内部割れの長さを測定し、その長さを合計。
- ・判定基準は、表-2-2のとおり。

表-2-2 内部割れの評価基準

内部割れ長さ合計	20mm未満	100mm未満	200mm未満	200mm以上
評価				×

内部割れの基準は、「大断面無垢材の乾燥推進に向けてp.3」
平成23年3月 木構造振興株式会社による。

ヤング係数

- ・FFTアナライザー（エーアンドデー社製）を使用し、ハンマー打撃による固有振動数を測定し、併せて試験木の寸法、重量を測定し密度を算出。
- ・計算式 $E_f = 4L^2 f^2 / g$ [tf/cm²] で動的ヤング係数を算出。E_f：動的ヤング係数、L：試験木の長さ、f：固有振動数、 ρ ：試験木の密度、g：重力加速度

4 試験結果

(1) 乾燥試験1回目

85の初期蒸煮9時間(1時間の昇温時間を含む)の後、乾球温度120、湿球温度85の高温乾燥を20時間(1時間の昇温時間を含む)の前処理人工乾燥を実施した後に、屋外での天然乾燥を行った。

乾燥スケジュール

乾燥試験1回目の人工乾燥スケジュールを表-3に示す。

表-3 平成26年度1回目乾燥スケジュール

ステップ	DBT	WBT	移行時間	維持時間
1	30	30		
2	85	85	1	8
3	120	85	1	20
			2	28
総乾燥時間				30

DBT:乾球温度(), WBT:湿球温度()

移行時間:直前ステップから当該ステップへの移行時間

維持時間:当該ステップの維持時間

含水率

人工乾燥後の含水率は、24.0～139.4%、平均51.8%となり、30時間の人工乾燥で含水率は人工乾燥前の1/2以下となった。

表-4 乾燥試験の含水率推移

		(%)											
乾燥区分	試験木 NO.	人工 乾燥前	人工 乾燥後	1ヶ月後	2ヶ月後	3ヶ月後	4ヶ月後	5ヶ月後	6ヶ月後	7ヶ月後	8ヶ月後	9ヶ月後	10ヶ月後
乾燥試験	1	120.5	35.4	29.5	25.9	23.9	20.7	20.0	20.3	19.9	19.8	18.5	18.1
	2	60.2	30.8	29.1	26.7	26.3	23.1	22.2	21.7	22.2	21.4	20.2	19.8
	3	229.5	139.4	81.7	59.5	44.9	28.9	25.8	25.2	24.9	24.1	22.8	21.0
	4	68.6	28.9	27.7	26.4	24.5	22.2	21.2	20.9	20.8	20.2	19.9	19.0
	5	191.4	70.2	50.3	37.2	33.1	25.3	21.5	21.7	21.1	21.4	20.2	19.6
	6	86.2	39.8	34.1	30.3	29.5	25.5	23.3	23.2	22.9	22.4	21.5	21.0
	7	47.3	24.0	23.2	23.5	22.7	20.4	19.7	19.7	20.2	19.9	19.1	18.8
	8	136.4	65.6	51.0	37.6	35.1	28.3	25.7	26.5	25.4	23.9	23.8	22.8
	9	59.2	25.0	24.5	22.6	22.0	19.3	18.3	18.9	18.7	18.8	18.0	17.7
	10	101.5	59.1	50.4	40.7	33.3	27.5	24.8	24.7	24.2	23.7	22.5	21.6
平均		110.1	51.8	40.2	33.0	29.5	24.1	22.3	22.3	22.0	21.6	20.7	19.9

ヤング係数

ヤング係数の調査結果を表-5に示す。

人工乾燥後のヤング係数は、天然乾燥の段階で増大していき、人工乾燥前より8.6tf/cm²増大した。

表-5 乾燥試験のヤング係数推移

		(tf/cm ²)											
乾燥区分	試験木 NO.	人工 乾燥前	人工 乾燥後	1ヶ月後	2ヶ月後	3ヶ月後	4ヶ月後	5ヶ月後	6ヶ月後	7ヶ月後	8ヶ月後	9ヶ月後	10ヶ月後
平均	1~10	56.4	55.0	57.7	55.2	59.5	62.1	63.4	65.7	64.6	66.6	73.6	65.0

表面割れ

表面割れ面積は全体的に小さく、幅1mm超の表面割れは11.6cmで表-2-1の表面割れの評価基準により評価であった。(表-6)

表-6 乾燥試験の表面割れ

(cm)			
区分	試験木 NO.	幅1mm超の表 面割れ長さ	表面割れ評価
平均	1~10	11.6	

内部割れ

割れはほとんど発生しなかったため、11ヶ月後の内部割れの平均の長さは0.0mmで表-2-2の内部割れの評価基準により評価であった。(表-7)

表-7 乾燥試験の内部割れ

区分	試験木 NO.	人工 乾燥後 (元口15cm)	人工乾燥後の 内部割れ評価	(mm)												
				1ヶ月後	2ヶ月後	3ヶ月後	4ヶ月後	5ヶ月後	6ヶ月後	7ヶ月後	8ヶ月後	9ヶ月後	10ヶ月後	11ヶ月後	10ヶ月後の 内部割れ評価	
平均	1~10	0.0		0.0	4.3	0.0	0.0	0.0								
				0.0	0.0	2.4	1.2	0.0	0.0							

(2) 乾燥試験2回目

乾燥試験2回目は、乾燥試験1回目のステップ3を4時間延長した乾燥スケジュールで実施した後に、屋外での天然乾燥を行った。

乾燥スケジュール

乾燥試験2回目の人工乾燥スケジュールを表-8に示す。

表-8 平成26年度2回目乾燥スケジュール

ステップ	DBT	WBT	移行時間	維持時間
1	30	30		
2	85	85	1	8
3	120	85	1	24
			2	32
			総乾燥時間	34

含水率

含水率の調査結果を表-9に示す。

人工乾燥前の含水率が48.9~150.3%、平均77.9%だったものが、人工乾燥後の含水率は、24.8~78.7%、平均40.5%となった。

表-9 乾燥試験の含水率推移

乾燥区分	試験木 NO.	人工 乾燥前	人工 乾燥後	(%)									
				1ヶ月後	2ヶ月後	3ヶ月後	4ヶ月後	5ヶ月後	6ヶ月後	7ヶ月後	8ヶ月後	9ヶ月後	10ヶ月後
乾燥試験	11	82.3	27.3	25.1	22.8	20.7	20.3	19.0	18.8	18.6	18.5	18.1	17.7
	12	57.5	29.0	24.7	22.9	20.6	19.5	18.9	19.1	19.1	18.7	18.5	18.0
	13	53.1	28.3	24.9	23.2	21.6	20.3	19.5	19.7	19.5	19.1	19.1	18.5
	14	58.6	26.5	24.3	22.7	20.9	20.1	18.9	19.1	18.8	18.6	18.2	18.1
	15	50.5	26.6	23.7	22.1	20.5	19.7	19.0	19.2	19.0	18.6	18.3	18.1
	16	48.9	25.5	23.8	22.0	19.4	19.1	18.7	19.0	18.8	18.5	18.3	18.0
	17	50.8	24.8	23.0	21.3	19.0	19.0	18.1	18.7	18.4	18.2	18.6	17.9
	18	119.8	77.6	57.6	49.5	37.4	32.3	29.3	28.2	27.9	26.6	25.9	23.8
	19	150.3	78.7	59.4	46.5	32.1	28.2	25.6	25.9	25.2	24.5	23.6	22.2
	20	107.6	60.6	57.0	51.1	40.5	32.6	29.8	28.1	26.3	25.3	24.3	22.1
平均		77.9	40.5	34.4	30.4	25.3	23.1	21.7	21.6	21.2	20.7	20.3	19.4

表-13 平成26年度3回目乾燥スケジュール

ステップ	DBT	WBT	移行時間	維持時間
1	30	30		
2	85	85	1	8
3	120	85	1	30
			2	38
			総乾燥時間	40

含水率

含水率の調査結果を表-14 に示す。

人工乾燥前の含水率は、55.2～172.2%、平均 89.1%だったものが、人工乾燥後は 20.3～63.0%、平均 31.5%となった。その後の天然乾燥で含水率は徐々に低下し、8ヶ月で天然乾燥を終了した。

表-14 乾燥試験 の含水率推移

乾燥区分	試験木 NO.	人工 乾燥前	人工 乾燥後	(%)							
				1ヶ月後	2ヶ月後	3ヶ月後	4ヶ月後	5ヶ月後	6ヶ月後	7ヶ月後	8ヶ月後
乾燥試験	21	61.5	20.3	23.4	22.1	20.3	20.2	19.9	19.7	20.1	18.9
	22	90.8	25.9	26.1	23.4	21.2	20.6	20.2	19.8	19.5	18.5
	23	100.8	32.6	27.5	24.3	20.6	19.2	19.8	19.0	19.5	17.7
	24	106.8	42.5	35.4	28.2	23.3	21.2	22.3	20.6	19.3	18.5
	25	55.8	20.9	21.1	22.5	19.5	19.0	19.0	19.1	19.3	18.0
	26	79.4	29.7	26.0	24.6	22.7	21.1	20.1	20.6	19.6	18.2
	27	55.2	22.9	23.6	23.4	21.0	19.9	19.7	19.4	19.0	18.2
	28	68.0	24.1	23.5	22.4	20.5	19.2	19.1	19.4	17.4	18.1
	29	100.7	33.5	28.0	26.0	21.4	21.1	20.2	20.3	20.0	18.5
	30	172.2	63.0	44.5	39.6	30.2	26.3	25.7	24.1	24.5	21.4
平均		89.1	31.5	27.9	25.7	22.1	20.8	20.6	20.2	19.8	18.6

ヤング係数

ヤング係数の調査結果を表-15 に示す。

人工乾燥後のヤング係数は、天然乾燥の過程で増大していき、最終的に人工乾燥前より平均 12.3tf/cm² 増大した。

表-15 乾燥試験 のヤング係数推移

乾燥区分	試験木 NO.	人工 乾燥前	人工 乾燥後	(tf/cm ²)							
				1ヶ月後	2ヶ月後	3ヶ月後	4ヶ月後	5ヶ月後	6ヶ月後	7ヶ月後	8ヶ月後
平均	21～30	49.2	47.8	47.8	47.8	50.3	52.2	65.7	53.9	56.6	61.5

表面割れ

表面割れ面積は全体的に小さく、大部分が僅かな表面割れに収まり、幅 1mm 超の表面割れの平均の長さは 4.1cm で、表-2-1 の表面割れの評価基準により 評価であった。(表-16)

表-16 乾燥試験 の表面割れ

区分	試験木 NO.	(cm)	
		幅1mm超の表 面割れ長さ	表面割れ評価
平均	21～30	4.1	

内部割れ

内部割れ測定結果を表-17 に示す。

割れがわずかに発生したが、8ヶ月後の内部割れの平均の長さは1.1mmで表-2-2の内部割れの評価基準により 評価であった。

表-17 乾燥試験 の内部割れ

区分	試験木 NO.	人工 乾燥後 (元口15cm)	(mm)				
			人工乾燥後の 内部割れ評価	1ヶ月後	2ヶ月後	3ヶ月後	4ヶ月後
平均	21～30	4.9		24.3	3.4	3.5	3.5
							8ヶ月後の 内部割れ評価
			5ヶ月後	6ヶ月後	7ヶ月後	8ヶ月後	
			4.7	4.0	0.0	1.1	

(4) 乾燥試験 4 回目

乾燥試験 4 回目は、乾燥試験 3 回目のステップ 3 を 6 時間延長した乾燥スケジュールで実施した後に、屋外での天然乾燥を 9 ヶ月間行った。

乾燥スケジュール

乾燥試験 4 回目の乾燥スケジュールを表-18 に示す。

表-18 平成26年度4回目乾燥スケジュール

ステップ	DBT	WBT	移行時間	維持時間
1	30	30		
2	85	85	1	8
3	120	85	1	36
			2	44
			総乾燥時間	46

含水率

含水率の調査結果を表-19 に示す。

人工乾燥前の含水率は、49.9～169.8%、平均 84.0%であった。人工乾燥後の含水率は、18.1～99.7%、平均 45.1%となり、その後の天然乾燥で含水率は徐々に低下し、9ヶ月後に天然乾燥を終了した。

表-19 乾燥試験 の含水率推移

			(%)									
乾燥区分	試験木 NO.	人工 乾燥前	人工 乾燥後	1ヶ月後	2ヶ月後	3ヶ月後	4ヶ月後	5ヶ月後	6ヶ月後	7ヶ月後	8ヶ月後	9ヶ月後
乾燥試験	31	149.2	57.0	48.0	38.2	30.1	26.4	27.8	26.0	24.8	21.8	16.7
	32	169.8	46.9	41.4	38.1	29.9	26.5	25.5	24.0	22.9	20.9	18.3
	33	69.1	16.9	18.8	18.2	16.9	16.1	16.6	16.3	16.7	16.0	18.0
	34	57.2	18.9	19.8	19.1	19.0	17.8	18.3	17.7	18.1	16.9	16.8
	35	52.9	15.5	16.9	18.1	18.2	17.9	19.1	18.8	19.2	17.9	17.9
	36	76.9	26.8	25.5	26.8	22.3	20.5	20.4	20.4	20.3	18.6	17.5
	37	67.6	16.2	18.0	18.8	17.5	17.0	17.6	17.7	17.8	16.7	17.2
	38	74.7	18.4	20.8	20.8	20.8	18.7	19.1	18.9	18.5	18.3	15.9
	39	49.9	15.7	18.2	19.0	19.1	18.9	19.4	19.7	19.7	18.7	19.5
	40	73.0	19.3	20.3	21.4	18.4	17.8	19.1	18.8	18.4	17.4	20.4
平均		84.0	25.2	24.8	23.9	21.2	19.8	20.3	19.8	19.6	18.3	17.8

ヤング係数

ヤング係数の調査結果を表-20 に示す。

人工乾燥後のヤング係数は、乾燥するにつれて増大していき、最終的に人工乾燥前より 6.0 ~ 10.9tf/cm² 増大した。

表-20 乾燥試験 のヤング係数推移

			(tf/cm ²)									
乾燥区分	試験木 NO.	人工 乾燥前	人工 乾燥後	1ヶ月後	2ヶ月後	3ヶ月後	4ヶ月後	5ヶ月後	6ヶ月後	7ヶ月後	8ヶ月後	9ヶ月後
平均	31 ~ 40	53.1	54.9	53.4	55.4	57.9	59.3	60.5	61.8	61.9	61.7	60.5

表面割れ

表面割れ面積は全体的に小さく、大部分が僅かな表面割れに収まり、幅 1mm 超の表面割れの平均の 10.0cm で表-2-1 の表面割れの評価基準により 評価であった。(表-21)

表-21 乾燥試験 の表面割れ

			(cm)
区分	試験木 NO.	幅1mm超の表 面割れ長さ	表面割れ評価
平均	31 ~ 40	10.0	

内部割れ

内部割れは人工乾燥直後に発生したが、9ヶ月後の内部割れの平均の長さは1.7mm で表-2-2 の内部割れの評価基準により 評価であった。(表-22)

表-22 乾燥試験 の内部割れ

区分	試験木 NO.	人工 乾燥後 (元口15cm)	(mm)												
			人工乾燥後の 内部割れ評価	1ヶ月後	2ヶ月後	3ヶ月後	4ヶ月後	5ヶ月後	6ヶ月後	7ヶ月後	8ヶ月後	9ヶ月後 内部割れ評価			
平均	31~40	47.9		39.1	24.0	7.2	19.9								



図-2 NO.33 の内部割れ状況

表-23 乾燥試験 のヤング係数推移

乾燥区分	試験木 NO.	人工 乾燥前	人工 乾燥後	(tf/cm ²)									
				1ヶ月後	2ヶ月後	3ヶ月後	4ヶ月後	5ヶ月後	6ヶ月後	7ヶ月後	8ヶ月後	9ヶ月後	10ヶ月後
平均	50~59	64.9	64.9	66.2	67.8	67.8	69.1	67.5	68.3	70.7	69.5	70.0	71.9

5 考察

表-24 に、高温乾燥温度の違いによる表面割れ及び内部割れの発生状況並びに人工乾燥終了後の含水率をまとめた。

表-24 高温乾燥条件の違いによる表面割れと内部割れの長さの評価
及び人工乾燥後含水率

高温乾燥時間	幅 1 mm 超の 表面割れ	内部割れ	人工乾燥 終了後 平均含水率	天然乾燥 期間
20h	11.6cm	1.9cm	51.8%	9ヶ月 (調査中)
24h	3.7cm	5.6cm	40.5%	9ヶ月 (調査中)
30h	4.1cm	4.9cm	31.5%	8ヶ月
36h	10.0cm	47.9cm	25.2%	9ヶ月

人工乾燥と天然乾燥の組合せ乾燥により、表面割れ、内部割れともに 評価以上の仕上がりとなった。表面割れはすべての人工乾燥条件で平均 評価以上であり、24 時間、30 時間の条件では 評価となった。また、内部割れもすべての人工乾燥条件で平均 評価以上となり、36 時間以外は 評価となった。

人工乾燥終了後の含水率をみると、高温乾燥時間を長くするほど下がる傾向が見られた。そのため、人工乾燥終了後に含水率を 30%程度まで下げるためには、高温乾燥に 30 時間以上かけた方が有利と思われる。また、表面割れ、内部割れを考慮すると、高温乾燥時間が 24 時間及び 30 時間のスケジュールが人工乾燥と天然乾燥を組み合わせた木材乾燥に適していると考えられる。

しかし、人工乾燥後の天然乾燥では、高温乾燥時間が24時間以下で9ヶ月以上を要しており、同様に 30 時間以上でも 6 ヶ月以上を要している。天然乾燥終了の目安として、10 本中 9 本の試験材が含水率 20%以下になった時点までとしているが、人工乾燥前から含水率の高い材については、時間をかけてもなかなか含水率が落ちないことが、乾燥期間の長期化の要因となっているようであった。

6 これまでの経過と今後の課題

平成 26 年度は初期蒸煮温度 85 で、高温乾燥時間を 20 時間、24 時間、30 時間、36 時間の 4 パターンとし、人工乾燥終了時点の含水率が 30%程度、天然乾燥で 6 ヶ月以内に仕上がることを目標に、棧積みの上に波板の屋根を付けた屋外乾燥を実施した。割れが少なく、人工乾燥終了後の含水率が 30%程度になるスケジュールについて考察できたが、実際の天然乾燥期間でみると、6 ヶ月以上を要しているのが現状である。その原因として、試験材毎での含水率の違いがあげられる。これまで、人工乾燥を行う際、初期含水率にかかわらず同様のスケジュールを実施していたが、高含水率材（初期含水率 100%以上）または低含水率材（100%未満）の、どちらか一方にあった人工乾燥スケジュールを行うと、割れが多く発生する、天然乾燥時間が長くなる等の傾向がみられ、同一のスケジュールで乾燥を行うことに限界があると感じられた。そのため、来年度は乾燥を行う材の初期含水率にあった、人工乾燥スケジュールを検討する必要があると思われる。

人工乾燥と天然乾燥を組み合わせた乾燥に取り組んだ、H23 から現在までのデータ蓄積から、乾燥スケジュール毎でなく、試験材を単木でみた場合の割れや乾燥期間について分析を行い、乾燥を行う材の初期含水率の違いに応じた人工乾燥スケジュールの作成に取り組みたい。

また、ビニールハウス内で天然乾燥を行う等、天然乾燥条件の違いや天然乾燥期間の短縮化についても調査を行い、より効率的な乾燥スケジュールを検討する。