

乾燥材生産現場における効率的乾燥の実証試験

A proof test of the effective kilndrying in the kilndry wood production factory

工藤康夫・小黒正次・町田初男・後藤義臣*

製材工場の乾燥機を使用して、スギの心持平角材のドライングセット・天然乾燥の組合せ試験、及びスリット加工・中温乾燥試験を行い、乾燥材生産現場における効率的乾燥方法を検討した。

- 1 120℃処理材の材面割れ発生量は110℃処理材の約1/4であり、ドライングセットの処理温度が高いほど材面割れ抑制効果が高いことが確認された。
- 2 材面割れ評価の結果、110℃処理材の材面割れ発生量についても、天然乾燥による材面割れ面積の約3割にとどまった。
- 3 スリット加工材の材面割れ発生量は、通常の中温乾燥を行った場合の2割以下に低減されることを確認した。

キーワード：製材工場乾燥機、ドライングセット、スリット、材面割れ

I はじめに

スギ心持ち平角は木造住宅の梁桁材として価格面、供給面の両方で安定しており、なおかつ県内中小規模の製材工場を中心とした生産が期待できる一方、乾燥にコストや時間を要するだけでなく、乾燥に伴う材面割れが現場でのクレームに発展することも多い。

この問題に対して、2004年度から2005年度にかけて、高温タイプ乾燥機を使用したドライングセット処理や、材面にあらかじめスリットを入れて中温乾燥を行うことで、材面割れを抑える効果を検証した。

しかし、これらの検証結果は、試験研究機関の実験用乾燥機により確認されたものである。表-1に実験用乾燥機と工場乾燥機の性能比較を示す。

実験用乾燥機の場合、容量が小さく、ボイラー出力やファンの送風能力にも十分な余裕があるため、目標温度まで容易に上昇し、また運転中も乾燥機内部の温度ムラがほとんど生じないため、設定したスケジュールどおりの乾燥を行うことは比較的容易である。

これに対して工場乾燥機は、実験用乾燥機と比較した場合その容量は総じて大きく、ボイラー出力やファンの送風能力はその乾燥機に要求される性能の限界に近い場合が多い。

このため乾燥機内部の各箇所では極端な温度むらが発生するなどにより、適切で効率的な乾燥が行われていないことが考えられる。

* 渋川環境森林事務所

表－1 実験用乾燥機と一般的な工場乾燥機の性能比較

	容量 (m ³)	蒸気量 (kg/h)	ファン能力
実験乾燥機	5.5	400	φ600×1.5kw×3個
工場乾燥機	20	500	φ600×1.5kw×7個

適切で効率的な乾燥を行うためには、乾燥機運転中の各箇所の温度分布を把握し、適切な温度管理を行うことが必要であるが、乾燥機の温度センサーは通常1～2箇所にだけ取り付けられているだけであり、乾燥機内の正確な温度分布を知ることは難しい。

そこで乾燥材生産現場における効率的な乾燥方法を検証するため、製材工場の乾燥機を使用したドラインセットと天然乾燥の組合せ試験を実施し、乾燥機内部の温度分布が乾燥速度や材面割れ抑制に与える影響を調査した。

また、高温タイプの乾燥機を所有しない工場での効率的乾燥方法も併せて検証するため、スリット加工平角の中温乾燥試験を実施した。

II 方 法

1 工場の乾燥機を使用したドラインセットと天然乾燥の組合せ試験

群馬県産心持ちスギ平角（t 250mm × w 130mm × L 4m）40体を初期含水率分布が同じになるよう20体ずつに分け、製材工場所有のエノ産業（株）製高温蒸気式木材乾燥機（図－1）を使用して、それぞれ表－2のスケジュールによりドラインセットを行った後、開放型の屋根付きストックヤードで含水率20%を目標として天然乾燥を行った。

なお、乾燥機の運転中、T熱電対、（株）キーエンス製データロガー NR250、及びノートパソコンにより、乾燥機内部各所の温度を測定した。



図－1 工場乾燥機と試験体

表－2 ドラインセットと天然乾燥試験スケジュール

乾燥スケジュール	蒸煮	高温セット	セット後天然乾燥
120℃処理	95℃/15h	乾球温度120℃/湿球温度90℃/25h	8ヶ月
110℃処理	95℃/15h	乾球温度110℃/湿球温度70℃/25h	9ヶ月

図-2にT熱電対の取付箇所を示す。

T熱電対を乾燥機付属の左右乾球温度計（熱電対 NO1、熱電対 NO2）と、試験体ロットの左右中央部（熱電対 NO3、熱電対 NO4）に取り付けて温度を測定した。

また、ドラインゲットによる表面割れ抑制の効果と乾燥速度を検証するため、天然乾燥期間中、各試験体の表面割れ面積と重量の測定を行い、乾燥試験終了後全乾法により含水率を測定した。

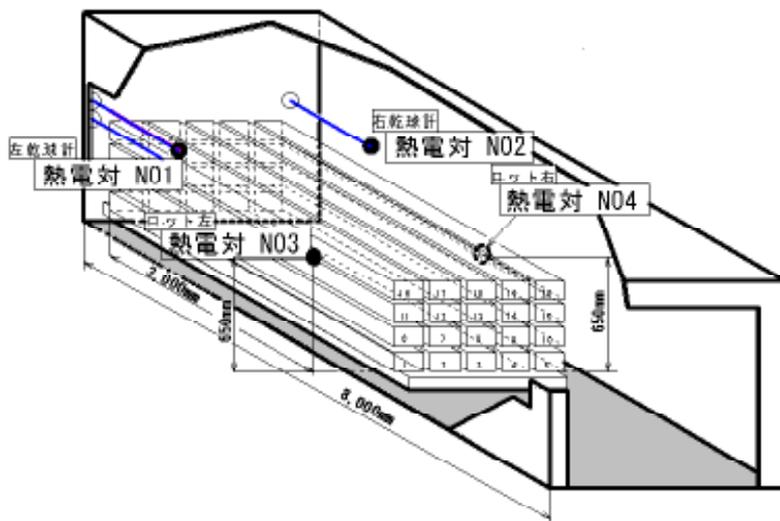


図-2 熱電対取付箇所

2 スリット加工平角の中温乾燥試験

群馬県産心持ちスギ平角（t 250mm × w 130mm × L 4m）15体に、材面割れの抑制効果が確認された2面4本のスリット¹⁾を加工した後（図-3）、中温乾燥を行った。

スリットはハンディ丸鋸を使用し、幅 1.5mm・深さ 15mm に加工した。中温乾燥は目標含水率を20%として、蒸煮処理（85℃/12h）後、乾球温度85℃（最大乾湿球温度差9℃）で28日間の中温乾燥を行った。

スリット加工による材面割れ抑止効果を確認するため、乾燥試験終了後も5ヶ月間、材面割れの測定を継続した。

また各試験体の重量測定を行い、測定終了後全乾法により含水率を測定した。

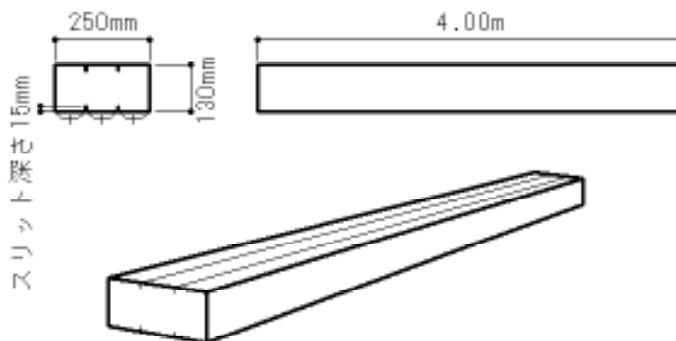


図-3 スリットパターン

ドラインセットと天然乾燥の組合せ試験、スリット加工平角の中温乾燥試験のいずれも、材面割れ面積の測定は次式により行い、最大幅 0.5mm 未満の材面割れは測定の対象から除外した(図-4)。

$$\text{材面割れ面積 (cm}^2\text{)} = \text{割れ最大幅 (mm)} \times 0.1 \times \text{延長 (cm)} \times 1 / 2$$

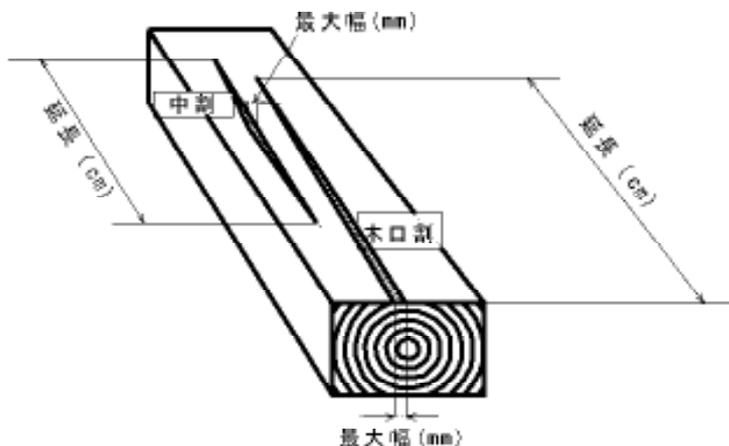


図-4 材面割れの測定方法

III 結果及び考察

1 工場の乾燥機を使用したドラインセットと天然乾燥の組合せ試験

120℃処理の温度分布を図-5、6に示す。

各測定箇所とも、初期蒸煮からドラインセットに移行する段階では、実温度も順調に上昇し、ドラインセット開始後おおむね1時間後(運転開始後16時間後)には設定温度に達した。

また、同一測定箇所におけるファン正転時、逆転時での温度差は5℃前後で、安定して推移した。

しかし、各測定箇所の温度はNO1(左乾球計)を除いて設定温度より常に10℃から20℃も高い状態で推移し、NO2(右乾球計)では、ドラインセット開始7時間後に最高温度が153℃に達した。

また測定箇所間での温度ムラが大きく、乾燥機の運転終了までこれらの傾向は解消されなかった。

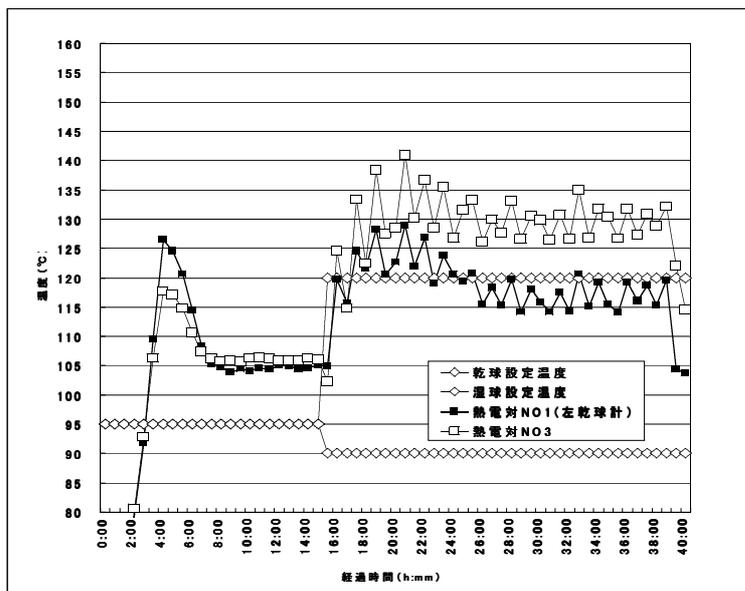
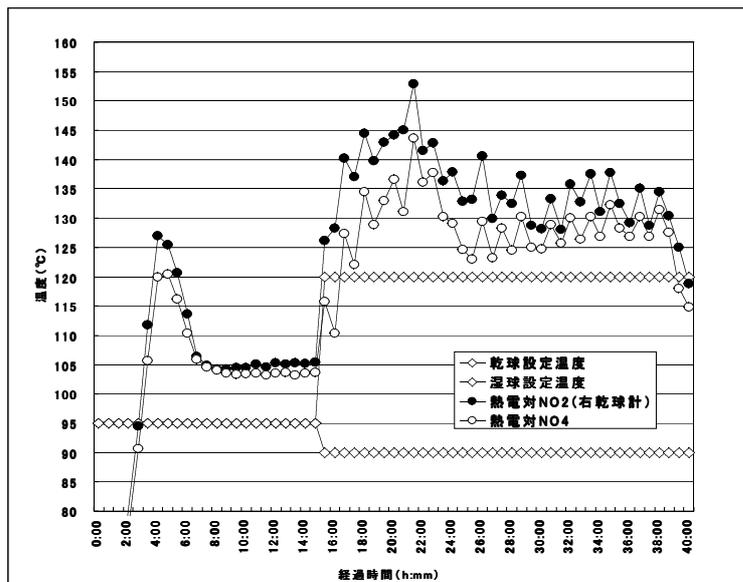


図-5 120℃処理の温度分布 (NO1、NO3)



図－6 120℃処理の温度分布（NO2、NO4）

一方 110℃処理の温度分布では、初期蒸煮からドライイングセットに移行する段階での温度上昇に5時間以上を費やし、またドライイングセット中の実温度は平均 107℃で、設定温度よりも低い温度で推移した。

温度上昇に多くの時間を要した原因として、初期蒸煮の設定温度 95℃から、ドライイングセット時には湿球温度を 70℃まで急激に下げるスケジュールを実施したため、湿球温度を低下させるための強制排気が行われ、これが乾球温度の上昇も妨げていたことが確認された。

さらに、110℃処理では測定箇所間の温度ムラは少なかったものの、同一測定箇所では常にファンの正転、逆転時に 10℃前後の温度差が確認され、ドライイングセット処理時間の半分以上にわたって、風下の温度が 100℃前後まで低下したことが確認された。

高温乾燥では、風下の温度が 105℃以下になると、材表面のセットがかかりにくくなる危険があることや、乾燥ムラの原因となる温度ムラ発生の原因となるため、これを防止するため、風下の風速は 1.5～2.5 m/sec を確保することが必要であるとされている²⁾。

これらの正転、逆転時に発生した温度差は、ロットの空隙（図－7）が風の大きな通り道となり、材間に流入する風量が少なくなったことで、風下の材間風速が十分に得られなかったことが原因と考えられる。

今回使用した工場乾燥機では構造上、乾燥機内部の材間風速を計測することができなかったため、これを実証するため実験用乾燥機を使用して同様のロットの空隙を再現し、風上、風下の材間風速と温度を測定した。

乾燥機容量 1 m³あたりのファン出力を工場機とほぼ同じに設定し、図－8のとおり風の通り道となるロットの空隙を設定した。

乾球温度 120℃、湿球温度 90℃で 24 時間定値運転し、正転、逆転時の風上風下の風速と、その時の乾燥機内部の温度分布を調べた。



図-7 工場機におけるロットの空隙



図-8 実験機に設定したロットの空隙

正転時、逆転時の材間風速を図-9に、またロット右の温度測定結果を図-10、11に、また、ロット左の温度測定結果を図-12、13に示す。

ファン正転時に風下となるロット右側の測定箇所(熱電対1~3)では、風下時の風速が1.5m/sec以上確保されており、このときの熱電対1(右)の測定温度を見ると、ファンの正転時、逆転時の温度差は5℃以下であり、常に温度が安定して推移していることが確認された(図-10)。

しかしロット右側の熱電対4では、風速が1.5m/secを下回っており、熱電対4(右)の測定温度はファンの逆転時に比べ、正転時が5~10℃ほど低くなる温度ムラが試験中盤まで確認された(図-11)。

一方、ファンの逆転時に風下となるロット左側の測定箇所全て(熱電対9~12)で風下風速が1.5m/secを下回っていた。

このときの熱電対9(左)、熱電対12(左)の測定温度はファンの正転時に比べて、常に10℃以上低くなる大きな温度ムラが発生していることが確認できた(図-12、図-13)。

そこで、ロットの空隙を塞いだところ、ファン逆転時に風下となるロット左側の測定箇所での風速は概ね1.5m/sec以上が確保され、正転時、逆転の大きな温度差は解消された。

このことから、表面セットを確実にし、また乾燥ムラを解消するためには、風下の材間風速を十分確保して温度ムラを発生させないことが必要であると考えられた。

現場での対応として、できる限りロットの空隙を造らないような積積をする。またやむを得ない場合には遮風板などでロットの空隙を塞ぐなど、材間風速を確保する適切な管理が必要と考えられる。

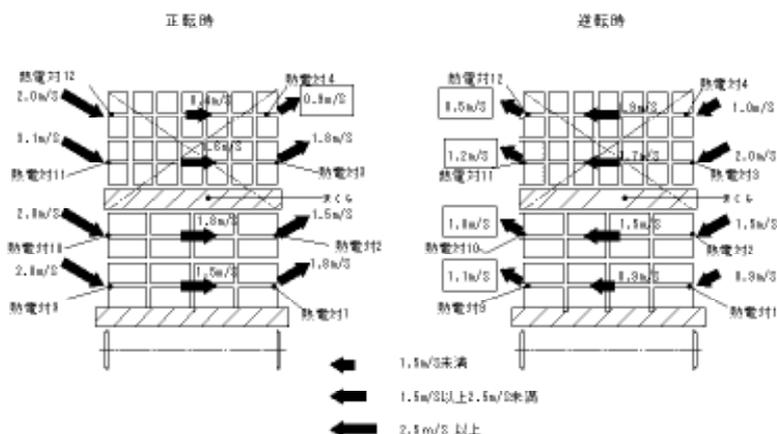


図-9 材間風速(試験機・ロットに空隙あり・ファン稼働状態=径600×1.5kw×2)

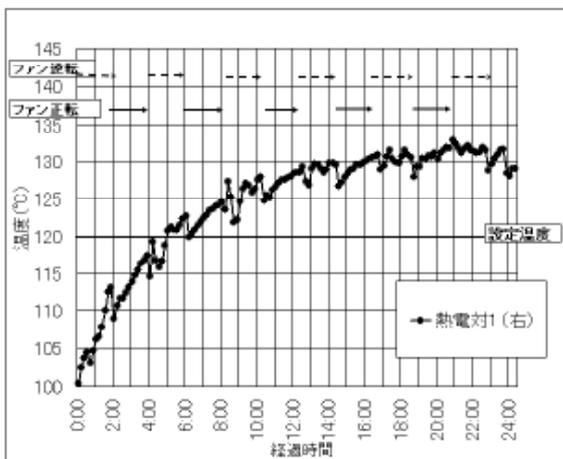


図-10 ロット右 温度測定結果 (熱電対1)

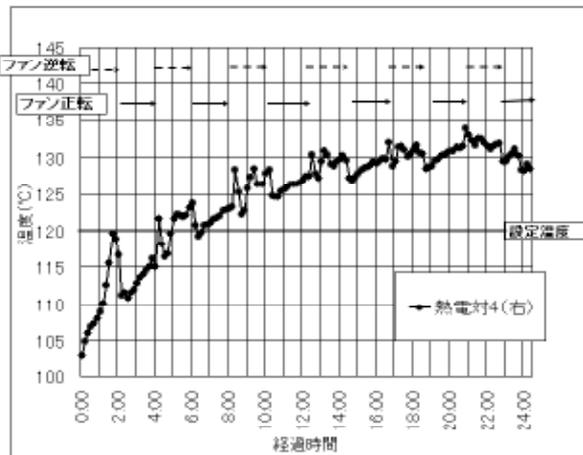


図-11 ロット右 温度測定結果 (熱電対4)

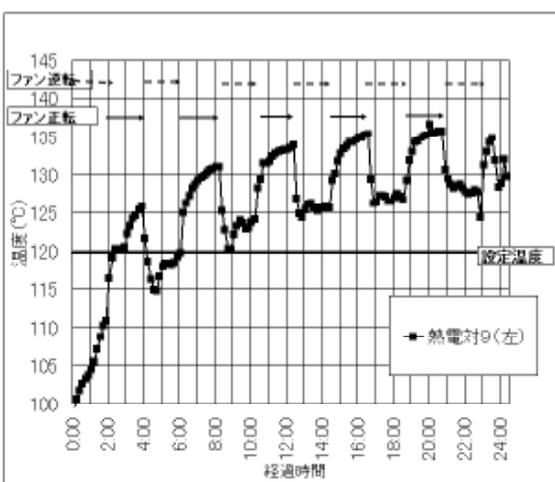


図-12 ロット左 温度測定結果 (熱電対9)

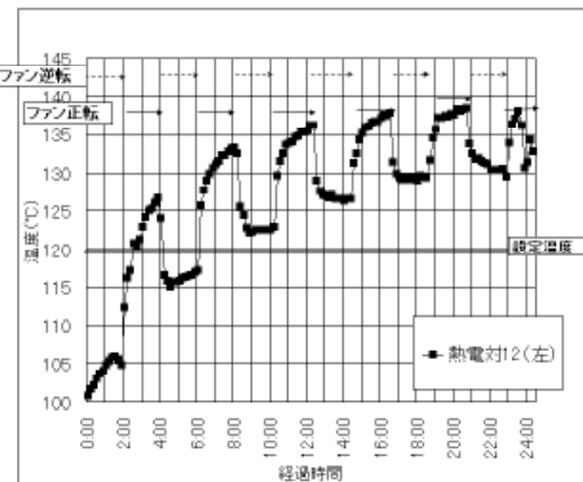


図-13 ロット左 温度測定結果 (熱電対12)

次に含水率分布の推移を図-14に示す。

ドラインセット終了直後の含水率は110℃処理材が平均51.2%、120℃処理材が平均50.8%、また天然乾燥5ヶ月後、天然乾燥終了後(110℃処理9ヶ月、120℃処理材8ヶ月)の含水率分布についても、ほぼ同様の分布傾向を示している。

実際には処理温度に平均で20℃以上の違いがあったにもかかわらず、天然乾燥の段階においてもドラインセットの処理温度による乾燥速度の違いは認められなかった。

これは、処理時間が25時間と短時間であったため、乾燥速度に大きな影響を及ぼさなかったと考えられる。

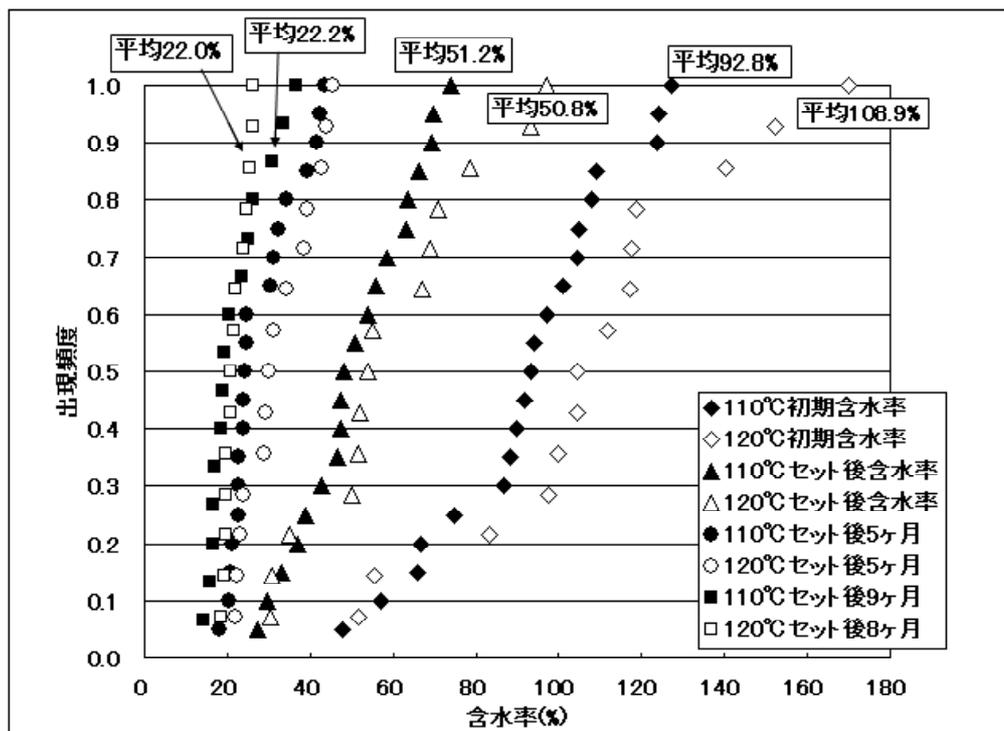


図-14 含水率分布の推移

材面割れの結果を表-3に、材面割れ分布の推移を図-15に示す。

材面割れの評価は、2001年度より実施したスギ心持ち平角の天然乾燥試験³⁾(無背割り・7ヶ月間)の結果と比較した。

天然乾燥5ヶ月後では、ドラインセットの処理温度110℃、120℃処理のいずれも材面割れの平均面積はほぼ同じであったものの、天然乾燥終了時では、110℃処理の材面割れが増加した一方で、120℃処理材の材面割れ発生量は減少した。

高温によるドラインセット処理を行うと、乾燥行程で含水率が低下するに従い、材面割れが閉塞していく事例が報告されている⁴⁾が、110℃処理材は、ドラインセット時の最低温度が100℃～105℃を推移していたため、材表面のセットが弱かったものと考えられる。

しかし、120℃処理材の測定終了時の材面割れ平均面積が1体あたり5.9 cm²、110℃処理材の測定終了時の材面割れ平均面積が1体あたり21.1 cm²であり、いずれも比較対象である天然乾燥7ヶ月後の材面割れ1体あたりの平均面積64.0 cm²を下回っていた。

さらに、比較対象とした試験の結果を用いて、天然乾燥を行った際の最少材面割れ面積を5%下限値により求め、これと比較することにより材面割れの評価を行った。

その結果、天然乾燥を7ヶ月行った場合の1体あたり最少の材面割れ面積は、20.5 cm²であったのに対して、110℃処理の材面割れ平均面積は1体あたり21.1 cm²であったことから、110℃処理の材面割れは、天然乾燥のみで乾燥を行った場合の最も少ない材面割れ面積とほぼ同じであることが確認できた。

また、材面割れ面積の標準偏差は、測定終了時で110℃処理材が10.5、120℃処理材が4.8であり、比較対象である天然乾燥7ヶ月後の材面割れ面積の標準偏差が37.0であることから、ドラインセット処理材の材面割れ分布傾向は、天然乾燥のみで乾燥を行った場合に比べて個体間によるバラツキ

も小さい結果となった。

以上のことから、ドラインセットの処理温度が高い方が、材面割れの抑制効果がより高くなることが確認されたが、ドラインセットの処理温度が低くても、乾燥速度に大きな違いは見られず、また乾燥による材面割れにも大きな影響が無いことが確認できた。

表-3 ドラインセット処理温度による、含水率、材面割れ面積の比較

	ドラインセット110°C +天然乾燥9ヶ月		ドラインセット120°C +天然乾燥8ヶ月		(比較)天然乾燥7ヶ月		(比較)天然乾燥 7ヶ月
	平均含水率 (%)	平均割れ 面積(cm ²)	平均含水率 (%)	平均割れ 面積(cm ²)	平均含水率 (%)	平均割れ 面積(cm ²)	割れ面積の 5%下限値(cm ²)
初期含水率	92.8 (21.8)	0.0	108.9 (32.7)	0.0	82.9 (22.5)	0.0	
ドラインセット後	51.2 (13.9)	13.5 (8.1)	59.6 (21.0)	8.1 (11.3)	—	—	20.5
天然乾燥5ヶ月後	28.3 (8.1)	9.5 (5.7)	32.5 (8.3)	8.9 (7.2)	—	—	(測定終了時)
測定終了時	22.2(6.9)	21.1(10.5)	22.0(2.8)	5.9(4.8)	24.2(6.4)	64.0(37.0)	

()内は標準偏差

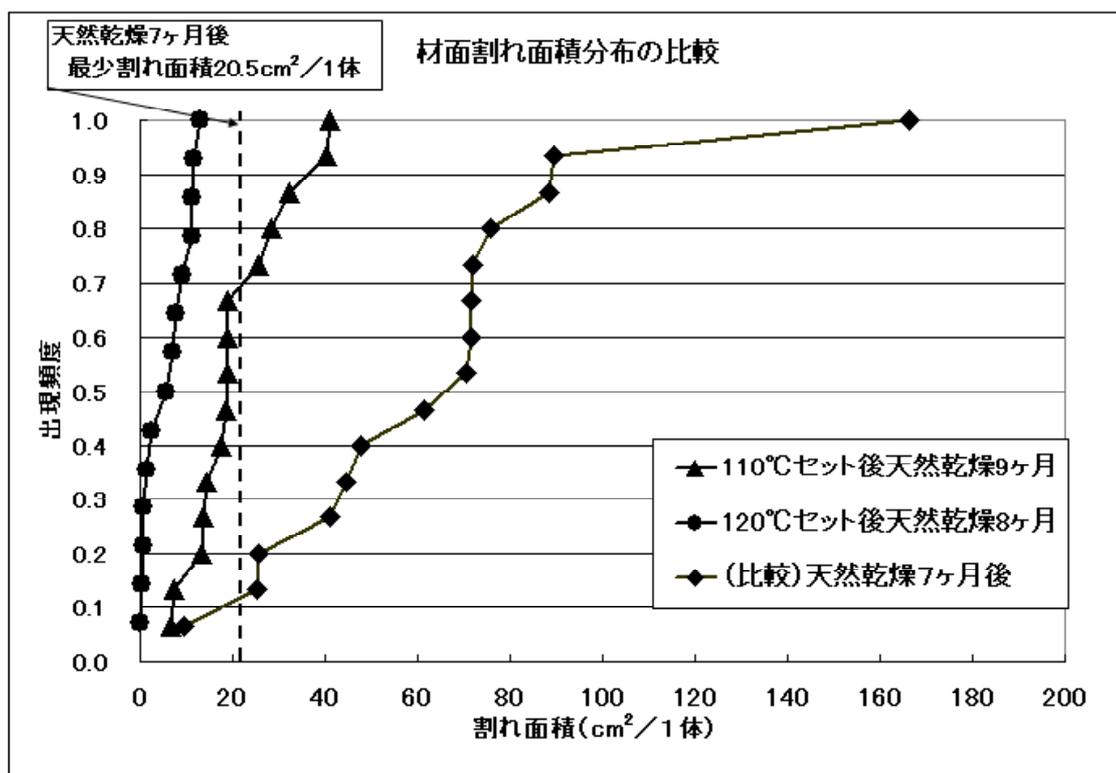


図-15 材面割れ面積の分布比較

2 スリット平角の中温乾燥

乾燥試験終了時の含水率及び材面割れの結果を表-4に示す。

スリット平角の材面割れ平均面積は乾燥終了時に1体あたり 10.1 c m²、標準偏差は 16.9 であった。

また、中温乾燥終了から5ヶ月後の材面割れ平均面積も1体あたり 8.7 c m²、標準偏差は 14.1 であり、乾燥終了後も材面割れが拡大しないことを確認した。

さらに含水率については、初期含水率平均 78.7%から人工乾燥終了後には 14.7%に減少した。

この結果を、2000 年度に実施した平角の中温乾燥試験（スリット無し）と比較した。

比較対象の乾燥スケジュールは、蒸煮処理（85℃/12h）後、乾球温度 85℃（最大乾湿球温度差 15℃）で 30 日間である。

スリット平角の材面割れ平均面積は比較対象である中温乾燥の材面割れ 1 体あたりの平均面積 60.9 cm²の 2 割以下であり、また標準偏差も比較対象の中温乾燥試験の 44.4 に対して、スリット加工平角が 16.9 であり、スリット加工による材面割れ抑制効果が確認された。

その一方で、スリット平角試験の初期含水率が平均 78.7%に対して、比較対象試験の初期含水率平均は 116.4%と大幅に高い上、比較対象試験の乾燥スケジュールの方が厳しい条件であることから、乾燥時間については単純に比較することはできず、本試験ではスリット加工による乾燥速度への影響は明らかに出来なかった。

また材面割れとは別に、スリット底部から材中心に向かって割れが生じたものや（図-16）、乾燥の進行と同時にスリット幅が大きくなったものが見られた。

これは、乾燥によって発生した引張応力がスリット部分に集中することによって、材面の割れが抑えられたと考えられる。

しかし、辺材、その中でも材の木口では乾燥が早期に始まり、それに伴って材面割れも発生しやすくなるため、スリット加工を行う前に材面割れが発生すると、その後スリット加工を行っても、材面割れに引張応力が集中することになり、乾燥の進行とともに割れ幅が拡大する（図-17）。

以上のことから、製材後すぐにスリット加工を行うなど適切な管理を行うことにより、乾燥に伴う材面割れを大幅に低減することができると考えられる。

また、乾燥効率の面から言えば、中温乾燥だけを用いた場合、スギ心持ち平角を生材から含水率 20%以下になるまで乾燥するにはおよそ 1 ヶ月間を要したが、これだけの期間を要する人工乾燥は、実際の製材工場においては製品の生産性、機械の稼働率、また燃料効率の面からも現実的とは言えない。

スギ心持材の乾燥を行う場合、天然乾燥による一次乾燥、中温乾燥による仕上げ乾燥の複合乾燥を行うことで、人工乾燥に要する時間を中温乾燥のみを用いた場合の 1/3 程度に短縮することが可能である⁵⁾。

またその一方で、天然乾燥時に発生した材面割れは、中温乾燥を行うことでさらに拡大する⁵⁾。

そこで、スリット加工によって乾燥初期段階から材面割れを抑制し、その上で天然乾燥と中温乾燥の組合せ乾燥を行うことで、高温タイプの乾燥機を所有しない工場での効率的な乾燥が可能であると考えられる。

表-4 スリット平角材の材面割れ面積

	スリット加工		中温乾燥（比較）		
	平均含水率 (%)	平均割れ面積 (cm ²)	平均含水率 (%)	平均割れ面積 (cm ²)	
人工乾燥前	78.7 (25.5)	0.0	人工乾燥前	116.3 (25.1)	0.0
人工乾燥後	14.7 (4.1)	10.1 (16.9)	人工乾燥後	16.5 (7.3)	60.9 (44.4)
人工乾燥後3ヶ月	12.6 (2.4)	10.3 (14.2)			
測定終了時 (人工乾燥後5ヶ月)	12.0 (1.8)	8.7 (14.1)			

()内は標準偏差



図- 16 スリット底部から材中心に向かって発生した割れ



図- 17 スリット部外に発生した材面割れ

IV まとめ

今回工場乾燥機を使用したドラインセット処理と天然乾燥の組合せ試験を実施した結果、120℃処理では設定温度よりも平均で20℃以上も高い温度で推移し、また大きな温度ムラが確認された一方で、110℃処理では設定温度に到達しない、あるいはファンの正転、逆転時での温度差が解消しないなど、不安定な温度分布傾向が確認された。

この不安定な温度分布と乾燥速度、または乾燥ムラの相関は今回の試験では確認できなかった。これは木材乾燥機による処理時間が短いためであり、ドラインセット終了後、引き続き中温乾燥に移行するスケジュールの場合は、不安定な温度分布が乾燥速度や乾燥ムラに大きな影響を与えることが考えられる。

また、120℃処理では、乾燥末期に材面割れが閉塞する傾向が見られ、ドラインセット処理温度が高い方が、材面割れを抑制する効果も大きいことが確認された。

その一方で、110℃処理材の材面割れ評価を行った結果、ドラインセット処理温度が低温であっても、大きな材面割れが発生する危険は少ないと考えられた。

さらに、乾燥機内の不安定な温度分布傾向は、ボイラーやファンなど当初想定した機材の性能面に拠るものだけではなく、ロット状態などによって十分な材間風速が確保されていないために生じている可能性が高い。

生産現場においても、材間風速が確保できるようにロットの状態を改善することで、乾燥機内部の温度ムラを解消し、効率的な乾燥を行うことが可能であると考えられる。

また、スリット加工乾燥においても、材面割れを抑制する効果が確認されたが、さらに天然乾燥と組み合わせることにより、高温タイプの乾燥機を持たない製材工場における効率的な乾燥方法として期待される。

V おわりに

大規模製材工場とは異なり、中小規模の製材工場では、受注による生産が中心であることから、多種類の製品を少量生産することを余儀なくされている。

このことから製品の品質の高さだけに限らず、人件費や燃料の軽減、製品歩留まりの向上や木材乾燥機の稼働率向上などによる効率的な乾燥が求められている。

また、木材乾燥機は、製造メーカーや機種タイプ、また木材乾燥機のユーザーである製材工場の仕様などによっても性質がすべて異なるため、各工場の乾燥機それぞれの効率的な乾燥が提案されるものと考えられる。

今後も必要に応じて工場の乾燥機を調査し、当該製材工場の仕様に合った効率的乾燥方法を検証していきたいと考えている。

謝 辞 本研究の実施にあたり、ご協力いただいた小井土製材（株）の方々に深く感謝します。

引用文献

- 1) 後藤義臣・小黒正次・町田初男・信澤宏由：スギ平角の乾燥に関する研究,群馬県林業試験場研究報告第11号,9-17(2006)
- 2) (財)日本住宅・木材技術センター針葉樹製材乾燥技術資料,41-42(2005)
- 3) 工藤康夫・中島靖雄：スギ中目材の乾燥に関する研究,群馬県林業試験場研究報告第10号,43-45(2004)
- 4) 吉田孝久・橋爪丈夫・徳本守彦・武田孝志・印出晃：スギ心持無背割り柱材の高温乾燥における高温セット法の割れ防止効果について,長野県林業センター研究報告第18号,135(2004)
- 5) 工藤康夫・中島靖雄：スギ中目材の乾燥に関する研究,群馬県林業試験場研究報告第10号,43-45(2004)