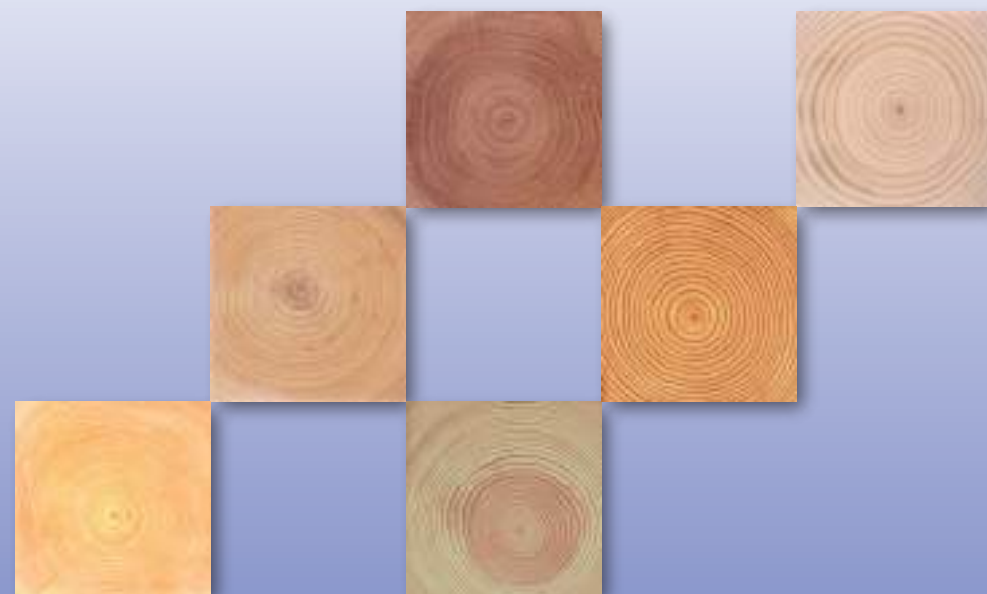


安全・安心な 乾燥材の生産・利用マニュアル

内部割れのない乾燥材生産を目指して！



「安全・安心な乾燥材生産技術の開発」研究グループ



はじめに

住宅に使用する構造用製材は古くは未乾燥材を使用していましたが、建築期間の短縮、あるいは高気密化など住宅の建て方の変化に伴い、乾燥材が求められるようになりました。このため、蒸気式乾燥をはじめとするさまざまな乾燥方法や乾燥スケジュールが考案され、割れや狂いの少ない乾燥材が木造住宅に使用されています。

心持ち無背割り材は材面割れが発生しやすく、天然乾燥だけでなく不適切な人工乾燥の場合でも発生します。この割れは、見た目の悪さから施主のクレームになりやすく、材面割れの少ない乾燥材が住宅業界から求められました。これを受けて、乾燥初期に100℃以上の高温・低湿度条件で処理することにより材面割れを防ぐ方法（高温セット法）が考え出されました。現在では、高温セット法は全国に普及し、心持ち無背割り材の乾燥材生産の主流を占めています。

しかし、この方法は温湿度管理が不適切な場合には、外側からは確認できない「内部割れ」と呼ばれる割れが発生することがあり、仕口や継手加工などをして初めて露見するといったケースが見られます。プレカット工場や工務店からは、内部割れによる強度への影響が懸念され、内部割れと強度・接合性能の関係解明が望まれています。

そこで、この「内部割れ」について強度の面で問題がないのか、問題があるとするればそれは何なのか、またできるだけ内部割れの発生しない乾燥条件を確立できないか、ということについて、高温セット法を用いた構造用一般材の心持ち直角を対象として、3年間研究する機会を得ました。

その成果をまとめた本マニュアルを是非お読みいただき、安全で安心して使用できる乾燥材の生産と利用にお役立ていただければ幸いです。

本マニュアルは、農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」の課題「21029安全・安心な乾燥材生産技術の開発（実施年度：平成21年度～23年度）」の成果です。

平成24年3月
マニュアル作成ワーキンググループ
取りまとめ責任者 松元 浩

マニュアル作成ワーキンググループ名簿

執筆者

松元 浩	(取りまとめ責任者)	石川県林業試験場石川ウッドセンター	専門研究員
寺西 康浩	(乾燥分野責任者)	奈良県森林技術センター	主任研究員
加藤 英雄	(強度分野責任者)	独立行政法人森林総合研究所	主任研究員
伊藤 洋一		地方独立行政法人北海道立総合研究機構	林産試験場 主査
戸田 正彦		地方独立行政法人北海道立総合研究機構	林産試験場 研究主任
吉田 孝久		長野県林業総合センター	木材部長
柴田 直明		長野県林業総合センター	再任用技師
坂井 正孝		富山県農林水産総合技術センター	木材研究所 主任専門員
橋本 彰		富山県農林水産総合技術センター	木材研究所 主任研究員
松元 浩		前出	
滝本 裕美		石川県林業試験場石川ウッドセンター	主任技師
和多田浩樹		福井県総合グリーンセンター	主任研究員
小林 秀充		三重県林業研究所	主任研究員
寺西 康浩		前出	
柴田 寛		鳥取県農林水産部農林総合研究所	林業試験場 研究員
中山 茂生		島根県中山間地域研究センター	科長
藤田 和彦		広島県立総合技術研究所	林業技術センター 副部長
藤田 誠		愛媛県農林水産研究所	林業研究センター 主任研究員
田中 誠		愛媛県農林水産研究所	林業研究センター 主任研究員
池田 元吉		熊本県林業研究指導所	研究主幹兼林産加工部長
横尾謙一郎		熊本県林業研究指導所	研究参事
長尾 博文		独立行政法人森林総合研究所	室長
加藤 英雄		前出	
軽部 正彦		独立行政法人森林総合研究所	チーム長
小林 功		独立行政法人森林総合研究所	チーム長
井道 裕史		独立行政法人森林総合研究所	主任研究員

協力者

伊東 嘉文	長野県林業大学校	教授
源済 英樹	社団法人ふくい農林水産支援センター	企画管理室長
福本 浩士	三重県林業研究所	主任研究員
吉村 太一	広島県農林水産局林業課	技師
武智 正典	愛媛県宇和島地方局八幡浜支局	担当係長

アドバイザー

藤本 登留	国立大学法人九州大学大学院農学研究院	准教授
植本 敬大	国土交通省国土技術政策総合研究所	室長

専門プログラムオフィサー

田崎 清	社団法人農林水産技術情報協会
------	----------------



目次

1. 木材乾燥の必要性	1
2. 乾燥方法の解説	5
(1) 高温セット処理	6
(2) 蒸気式	7
(3) 蒸気高周波複合式	8
(4) 熱風減圧併用式	9
(5) 加圧過熱蒸気式	10
(6) 天然乾燥	11
3. 推奨乾燥条件	13
(1) 蒸気式	
①スギ	14
②ヒノキ	16
③カラマツ	18
④アカマツ	20
⑤トドマツ	22
⑥ヒバ	24
(2) 蒸気高周波複合式	
①スギ	26
②ヒノキ	28
(3) 熱風減圧併用式	
①スギ	30
②ヒノキ	32
4. 内部割れの評価法	35
(1) 応力波を用いた内部割れの推定法	36
(2) ねじりを用いた内部割れの推定法	38
(3) X線CTを用いた内部割れの評価法	40
(4) 画像処理技術を用いた内部割れの測定法	42
5. 乾燥材の生産性向上を目指したその他の技術	45
(1) 木口面硬さによる丸太の密度推定法	46
(2) 天然乾燥中の木材の含水率を推定する数値シミュレーション	48
(3) 加圧過熱蒸気を用いた内部割れを低減するための熱処理法	50
6. Q&A	53
7. 用語の解説	73
参考文献	84
付録	85
問い合わせ先一覧	88

木材乾燥の必要性



乾燥の必要性

乾燥方法の解説

推奨乾燥条件

内部割れの評価

生産性向上

Q & A

用語の解説

1. 木材乾燥の必要性

(1) 寸法安定性の向上

木材は、通常の使用環境下では含水率が繊維飽和点（約30%）より低くなります。そして、含水率が繊維飽和点より低いと含水率の増加・減少に応じて変形（膨潤・収縮）します。ですから、あらかじめ乾燥して、使用環境に適した含水率としておくことで、含水率の変化による変形を最小限に抑えることができます。

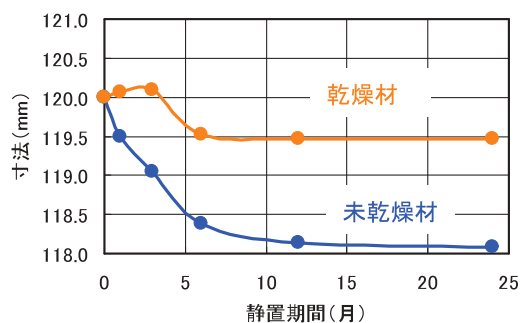


図1 静置期間と寸法との関係（スギ）¹⁻¹⁾



(2) 強度性能の向上

木材は繊維飽和点を境に強度性能も変化します。繊維飽和点を下回ると強度性能は向上します。ですから、乾燥材は強度の面からみても未乾燥材に比べて有利です。

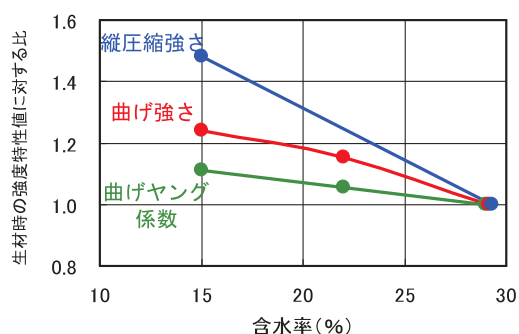


図2 含水率と生材時の強度特性値に対する比との関係（スギ）¹⁻²⁾

Dryは強い!



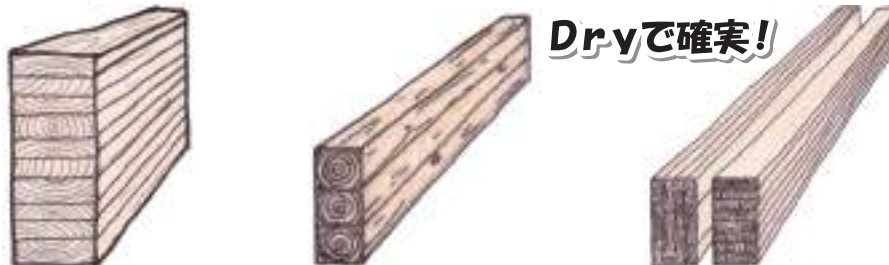
(3) 生物劣化の軽減

木材は含水率が高いまま放置すると、カビがはえたり腐ったりします。これを防ぐためには、含水率を20%以下にすることが重要です。



(4) 接着性の向上

含水率が高くても接着できる接着剤もありますが、一般的には接着力は未乾燥材より乾燥材の方が大きく、また、接着後に変形すると問題が起こるので、乾燥してから接着することが望ましいとされています。



(5) 重量の軽減

たとえば、含水率が100%であれば木材全体の重量のうち、半分は水の重さです。ですから、乾燥することによる重量の軽減効果は大きく、取り扱いが楽になるだけでなく、運搬コストの低減に繋がります。特に、スギ材は含水率が200%を超えるものもあるので、乾燥による重量の軽減効果は絶大です。



(6) 長期たわみの低減

木材に一定の力を長期間加えたままにしておくと、変形が進みます。これをクリープ変形と言います。このクリープ変形は、乾燥材よりも未乾燥材の方が大きいことがわかっています。たとえば、住宅の梁などに未乾燥材を使用すると、梁が大きく変形してしまい、床の傾斜や扉の開閉に支障を来すなどの不具合の原因になることもあります。乾燥材を使用することで、建築後のクリープ変形を小さくすることができます。

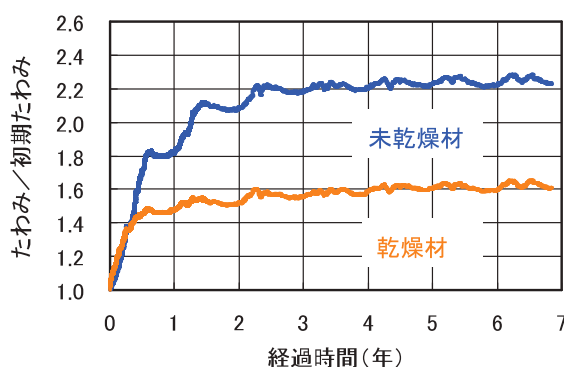


図3 経過時間に伴う長期たわみの変化¹⁻³⁾



乾燥方法の解説

乾燥材生産現場では、種々の乾燥方法が採用されていますが、本章では、本研究で取り扱った乾燥方法について解説しました。ここで紹介する以外の乾燥方法の解説については、参考文献²⁻¹⁾をご覧ください。

表 乾燥方法の分類

乾燥方法	蒸気	高周波	圧力
高温セット処理	○	—	—
蒸気式（中温）	○	—	—
蒸気式（高温セット＋中温乾燥）	○	—	—
蒸気式（高温セット＋高温乾燥）	○	—	—
蒸気式（高温）	○	—	—
蒸気高周波複合式	○	○	—
熱風減圧併用式	○	—	減圧
加圧過熱蒸気式	○	—	加圧
天然乾燥	—	—	—

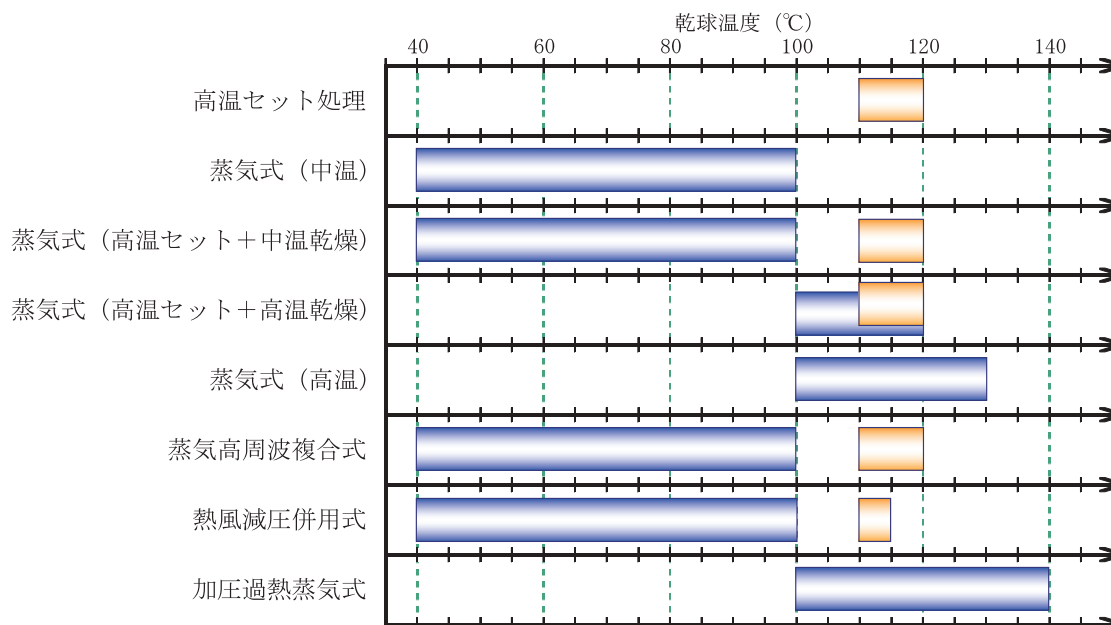
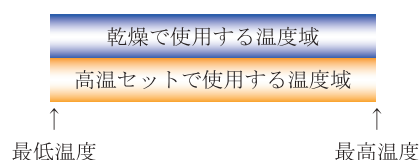


図 使用温度（乾球温度）域の目安



(1) 高温セット処理

特徴

心持ちの構造用針葉樹材の蒸気式乾燥法などで材面割れ軽減のため乾燥初期に行う熱処理です。

心持ち材の表面にドライグセットを意図的に作ることがねらいで、適度に高い温度と水分があると作りやすく、通常100℃以上で木材に十分な水分がある乾燥初期に行います。ただし、ドライグセットが大きすぎると「内部割れ」の原因となるので高温セット処理は適度に行うことが肝要で、また、樹種によって適切な処理条件は異なるとされています。このマニュアルではいくつかの樹種について割れの少ない処理条件を提案しています。なお、高温セット処理後は乾球温度80～90℃、湿球温度50～60℃程度で終了まで乾燥するのが一般的です。

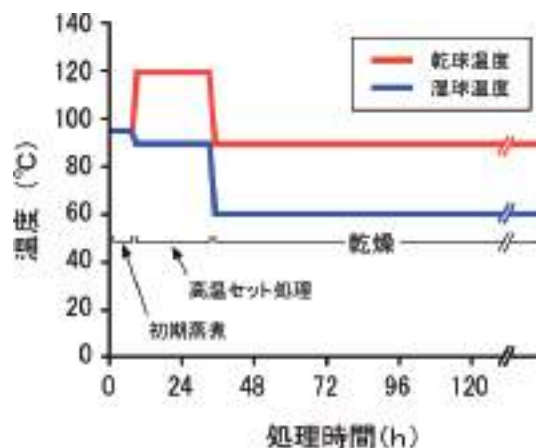


図 代表的な乾燥スケジュールの例
(スギ心持ち正角)

長所

- 割れやすい心持ち無背割り正角の材面割れを軽減できます。
- 高温セット処理によって、ある程度の水分を除去することができます。
- 高温セット処理を、他の乾燥法における割れ防止のための前処理として使うことができます。

高温セット処理



高周波加熱減圧乾燥



蒸気式乾燥



天然乾燥

短所

- 処理条件が厳しすぎると、内部割れが生じる場合があります。

(2) 蒸気式

特徴

熱源を蒸気とする乾燥方法で、乾球温度、湿球温度、風速を制御します。

乾球温度はボイラから発生した蒸気を乾燥装置内のヒータで確保し、湿球温度は蒸気の噴射と吸排気により調整します。室内に設置された送風機により装置内の温湿度を均一に保ち仕上がり含水率の均一化を図ります。

蒸気式乾燥機は主に使用する温度域で中温タイプと高温タイプに分類されます。中温タイプの乾球温度は40～90℃が一般的で、材色を重視した内装材や背割りをしたヒノキ、スギ正角の乾燥に用いられ、このほか多くの樹種や材種に幅広く適用できます。

高温タイプは乾球温度を100℃以上に高め、短時間で乾燥しようとする時に用いられます。また近年では、針葉樹心持ち無背割り正角の乾燥において、材面割れの発生を少なくするため、高温セット処理と組み合わせて、高温セット処理後に中温乾燥するもの（図1）、高温セット処理後に高温乾燥するもの（図2）などのスケジュールが使われています。ただし、これらの方法では水分傾斜が発生しやすいため、ある程度の養生期間が必要となります。



写真 蒸気式乾燥機
(群馬県藤岡市)

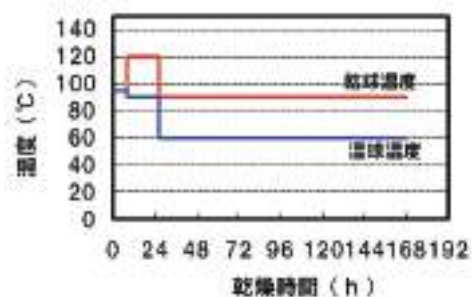


図1 高温セット処理後に中温乾燥

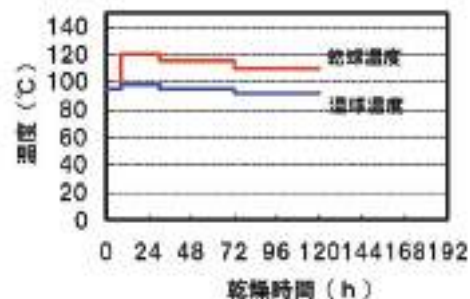


図2 高温セット処理後に高温乾燥

長所

- 樹種・材種を問わず乾燥適用範囲が広域です。
- 蒸気によるヤニ滲出防止や調湿処理ができます。
- 高温タイプの場合、針葉樹心持ち無背割り正角の材面割れ防止乾燥に適します。
- 高温タイプの場合、乾燥時間が比較的短くて済みます。

短所

- 高温タイプの場合、処理条件が厳しすぎると内部割れが発生します。

(3) 蒸気高周波複合式

特徴

蒸気式に高周波加熱を複合した乾燥法です。心持ち無背割り正角を乾燥する場合は、高温セット処理を行います。

蒸気式と同じように、栈木による栈積みをしますが、高周波加熱が行えるよう、栈積み数段ごとにアルミ製の電極板を挿入して高周波発振器に接続します。

高周波加熱を行うと木材の内部を効率的に加熱することができます。したがって、本乾燥法は、木材を外部から蒸気によって加熱するとともに、高周波によって内部も加熱します。そのため、木材内部の水分が積極的に外側へ押し出され、乾燥時間の短縮が期待できます。



写真 蒸気高周波複合乾燥機
(奈良県御所市)



図1 装置の構成
(出典：山本ビニター㈱技術資料)

長所

- 木材内部を積極的に加熱するので、断面寸法が大きな製品も効率的に乾燥することができます。
- 乾燥機内の栈積みを複数のブロックに分け、それぞれのブロックに合った出力で順次高周波加熱を行うことで、乾燥前の含水率にバラツキがあるスギ材などで仕上がり含水率がより均一になります。

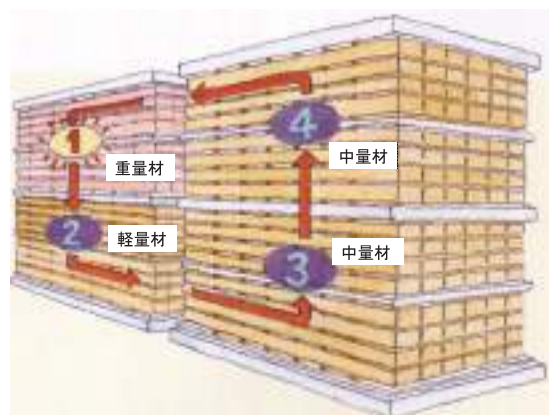


図2 栈積みのブロック分けの例
(出典：山本ビニター㈱技術資料)

短所

- 高周波発振器やこれに付随する回路が必要なため、設備費が高くなるので、乾燥機の稼働率が低下しないように努める必要があります。

(4) 熱風減圧併用式

特徴

ボイラからの蒸気を熱源として減圧下で乾燥する方法です。心持ち無背割り正角を乾燥する場合は、高温セット処理を行います。

この方式では、減圧により水の沸点を下げ、比較的低い温度で乾燥させるため、木材の熱劣化や変色を抑制することができます。

一方、減圧下では熱を伝える媒体が少なくなるため、材温が低下し乾燥速度が減少するおそれがあるので、十分な熱源と風速の管理がポイントとなります。この問題を解決するため、高周波や熱板などのように木材を直接加熱できる方法と組み合わせる方式も考案されています。



写真 熱風減圧併用式乾燥機
(愛媛県久万高原町)

表 沸点と圧力の関係

沸点	圧力
60℃	20kPa
65℃	25kPa
70℃	32kPa
75℃	39kPa
80℃	48kPa
85℃	58kPa
90℃	71kPa
95℃	85kPa
100℃	101kPa

長所

- 減圧下での乾燥のため、乾燥時間の短縮が可能です。
- 乾球温度を低く設定できるため、材色変化が少ないです。
- 通常の蒸気式乾燥機の扱いに慣れていれば、比較的簡単に操作できます。

短所

- 蒸気式乾燥機と比べて施設が高価です。

(5) 加圧過熱蒸気式

特徴

過熱蒸気を用いて木材を乾燥する方法です。特に、圧力容器内に大気圧より高い圧力の蒸気を満たし、これをさらに加熱して、装置内の蒸気温度を蒸気圧力に対応する飽和温度より高くして、熱処理または乾燥します。

圧力容器内では100℃より高い温度でも相対湿度を100%まで設定できるので、高温かつ高湿度条件での処理が可能です。これによって心持ち無背割り正角の表面付近の含水率傾斜を小さく保ちながらドライグセットを形成でき、割れなく、短時間で乾燥することが可能です。ただし、温度が高すぎたり処理時間が長すぎると木材を劣化させるので、注意が必要です。



写真 過熱蒸気式乾燥・熱処理装置
(茨城県つくば市)

長所

- 100℃より高い温度でも相対湿度を100%まで設定でき、高温・高湿処理ができます。
- 心持ち無背割り正角の表面に短時間でドライグセットの形成ができます。
- 酸素をほとんど含まず、通常の蒸気式に比べて木材の酸化が進みにくいです。
- 外気がほとんど流入せず、蒸気を循環・再利用すればエネルギーが節約できます。

短所

- 圧力容器が必要なため、導入費、メンテナンス費が高くなります。
- 乾燥途中で装置を開けると、心持ち無背割り正角の場合には再開時に割れる場合があります。そのため、製品の様子を確認しながら乾燥することが難しいです。

(6) 天然乾燥

特徴

木材を栈積み、または立て掛けるなどして自然に乾燥する方法です。最近では心持ち無背割り正角を、材面割れが発生しないよう乾燥するため、事前に高温セット処理を行ってから天然乾燥で所定の含水率に調節する方法や、天然乾燥の後処理として中低温の人工乾燥と組み合わせる方法も提案されていますが、これらを天然乾燥に含めるか否かは、意見の分れるところです。要するに人為的な工程を経ずに乾燥することが天然乾燥ですが、干割れ防止または抑制のために、木口やその周辺の側面などに割れ止め剤を塗布することもあり、天然乾燥の一部と考えるのが普通です。これに対して人為的な送風装置の導入などは、天然乾燥の範疇に入るかどうか、微妙なところです。



写真 天然乾燥風景（熊本県人吉市）

天然乾燥を行う場合に大切なこととして、栈積みの場所、方法および期間が挙げられます。乾燥土場は風通しを良くし、比較的断面の大きな栈木を用いて、適切に配置する必要があります。また、気候や風土に対応して、栈積みの頂部に屋根をかけるか否か、乾燥速度の調節のための栈木の寸法を適切に選択することが、質の高い天然乾燥材を生産する上で重要な要素となります。なお、計画的に良質な天然乾燥材を生産するためには、季節によって乾燥の進み方や干割れなどの発生状況が異なることを把握しておく必要があります。

長所

- 乾燥装置および燃料費は必要ありません。
- 材色変化が少なく、木材本来の色艶が損なわれません。

短所

- 乾燥の進み方は気象条件に左右され、一般に長い乾燥期間が必要です。
- 土地、原木代にかかる資金および金利などが必要となります。
- 到達する含水率は約15%が限度で、一般には20%程度までと考えられています。内装用材、家具用材、集成材ラミナなどは、さらに含水率を低くする必要があるため、仕上げの人工乾燥が不可欠と考えられます。

