

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、あるいは高气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。

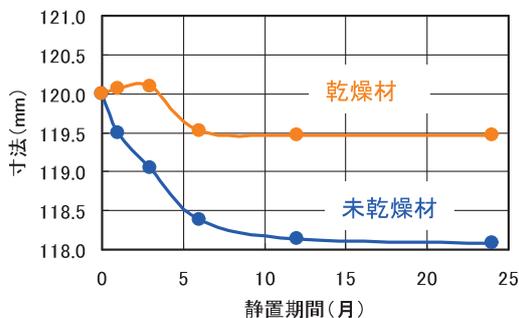


図1 静置期間と寸法との関係（スギ）¹⁻¹⁾

(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。

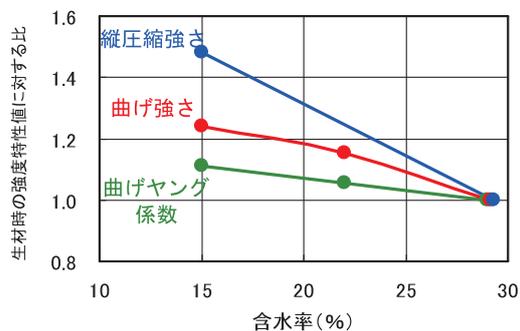


図2 含水率と生材時の強度特性値に対する比との関係（スギ）¹⁻²⁾

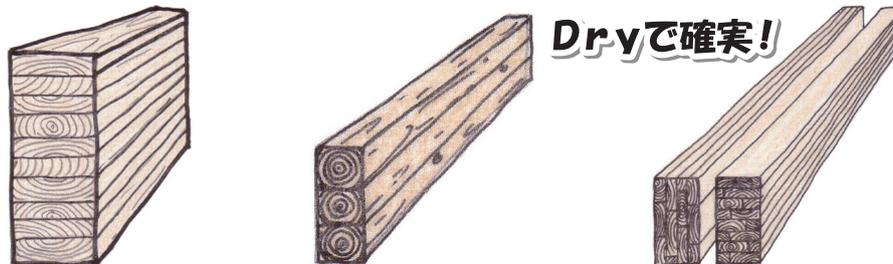
(3) 生物劣化の軽減

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。

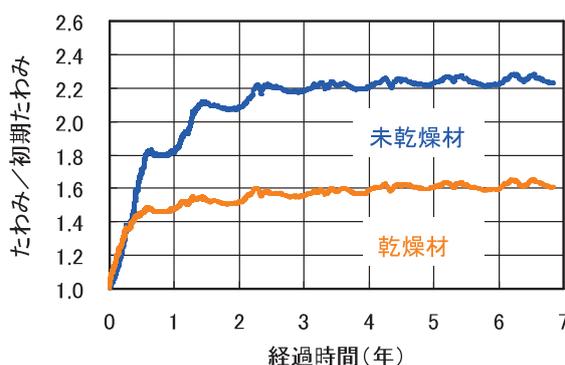


図3 経過時間に伴う長期たわみの変化¹⁻³⁾



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	—	—	—

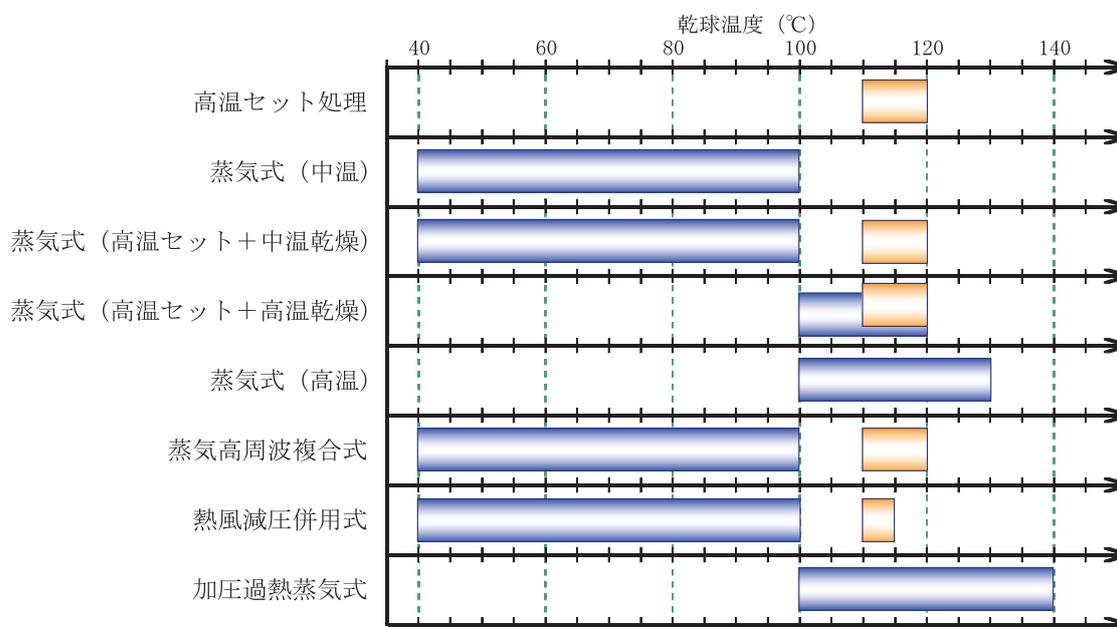
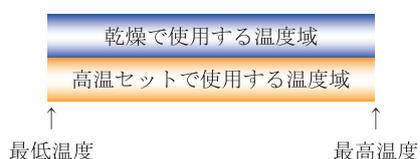


図 使用温度（乾球温度）域の目安



(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。

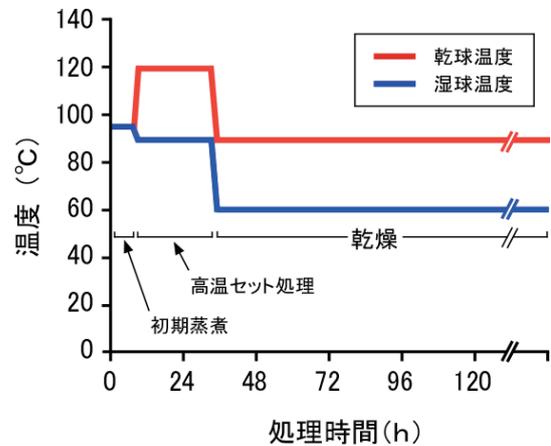


図 代表的な乾燥スケジュールの例 (スギ心持ち正角)

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)

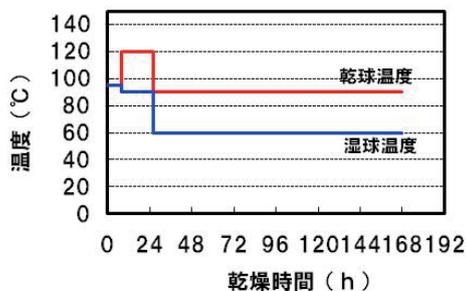


図1 高温セット処理後に中温乾燥

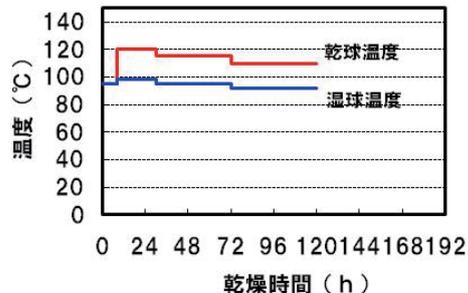


図2 高温セット処理後に高温乾燥

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行います。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)

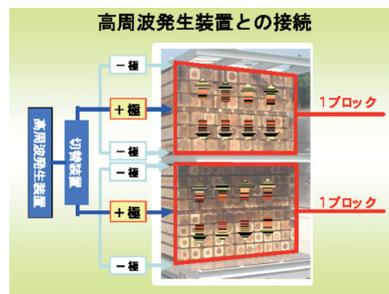


図1 装置の構成
(出典：山本ビニター㈱技術資料)

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。

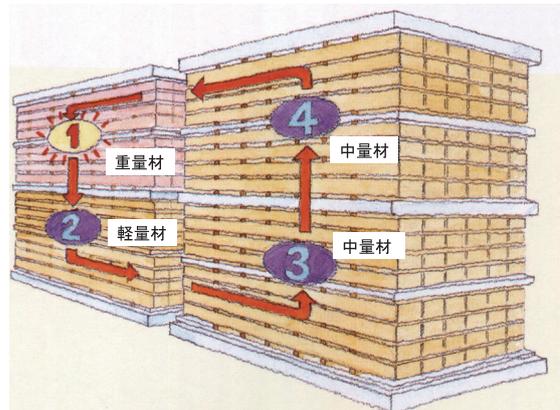


図2 栈積みのブロック分けの例
(出典：山本ビニター㈱技術資料)

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。

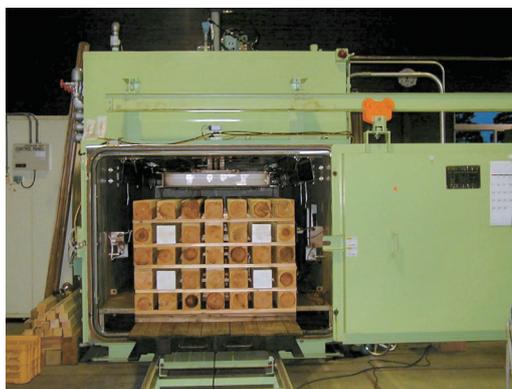


写真 熱風減圧併用式乾燥機
(愛媛県久万高原町)

表 沸点と圧力の関係

沸点	圧力
60°C	20kPa
65°C	25kPa
70°C	32kPa
75°C	39kPa
80°C	48kPa
85°C	58kPa
90°C	71kPa
95°C	85kPa
100°C	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。

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ため、仕上げの人工乾燥が不可欠と考えられます。



写真 天然乾燥風景（熊本県人吉市）

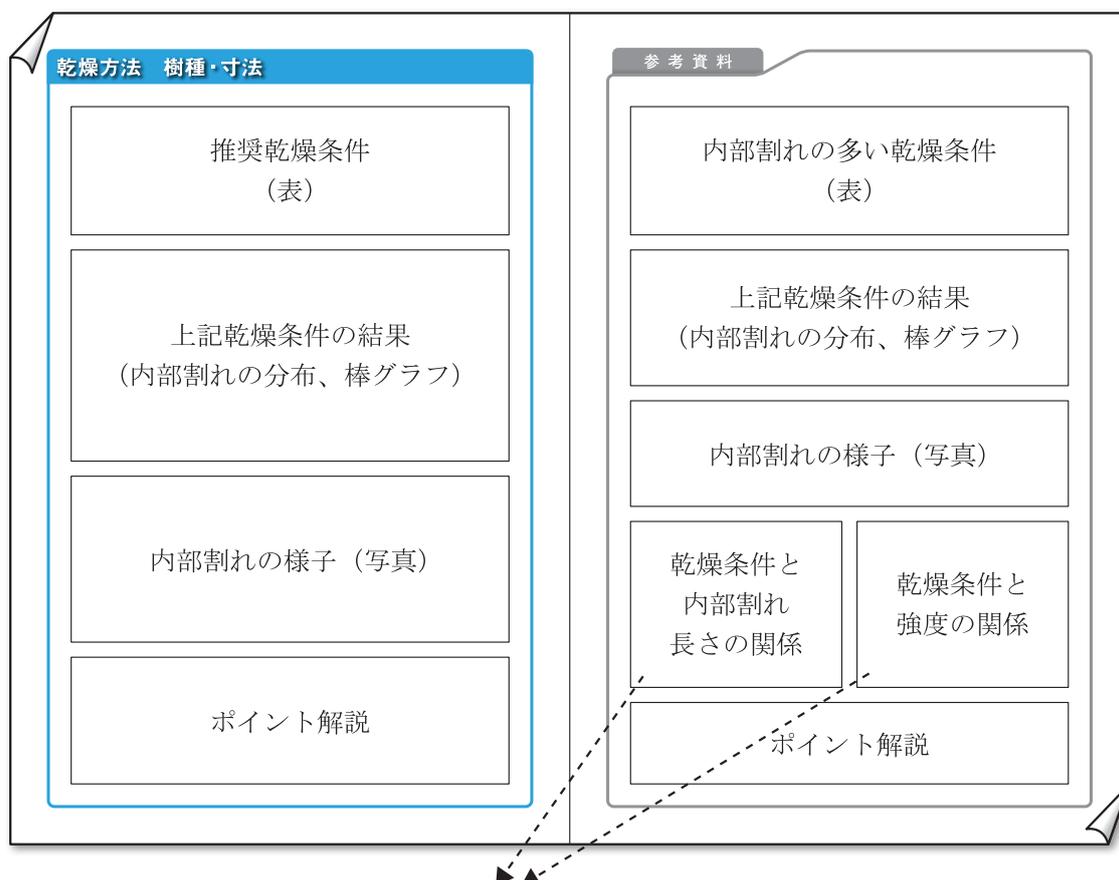
推奨乾燥条件

ここでの推奨乾燥条件とは、これまでに試験してきた中で、①強度低下が少なく、②内部割れが少なく、③含水率が20%以下に乾燥できるスケジュールを紹介しています。

対象とする製材の初期含水率や断面寸法によって時間の長短は生じますので、その点をご理解いただいた上で参考にしてください。

本章では、乾燥方法・樹種別に、推奨乾燥条件とその他参考となる情報を見開きで示しています。左ページには内部割れの少ない乾燥条件に関する情報を、右ページには、内部割れの多い乾燥条件、乾燥条件と内部割れおよび強度との関係についての参考資料を掲載しました。

各ページの見方



グラフの横軸の数字は、たとえば、
 ○120/90(12)の場合、
 乾球温度/湿球温度(処理時間)を意味します。
 ○115[71](18)の場合、
 乾球温度[圧力](処理時間)を意味します。

注) 本章では、内部割れは「長さ」で示しています。内部割れの分布図においては、断面に現れている内部割れの長さの合計です。また、乾燥条件と内部割れ長さの関係においては、材の中央部分に現れた内部割れの長さの合計を示しています。

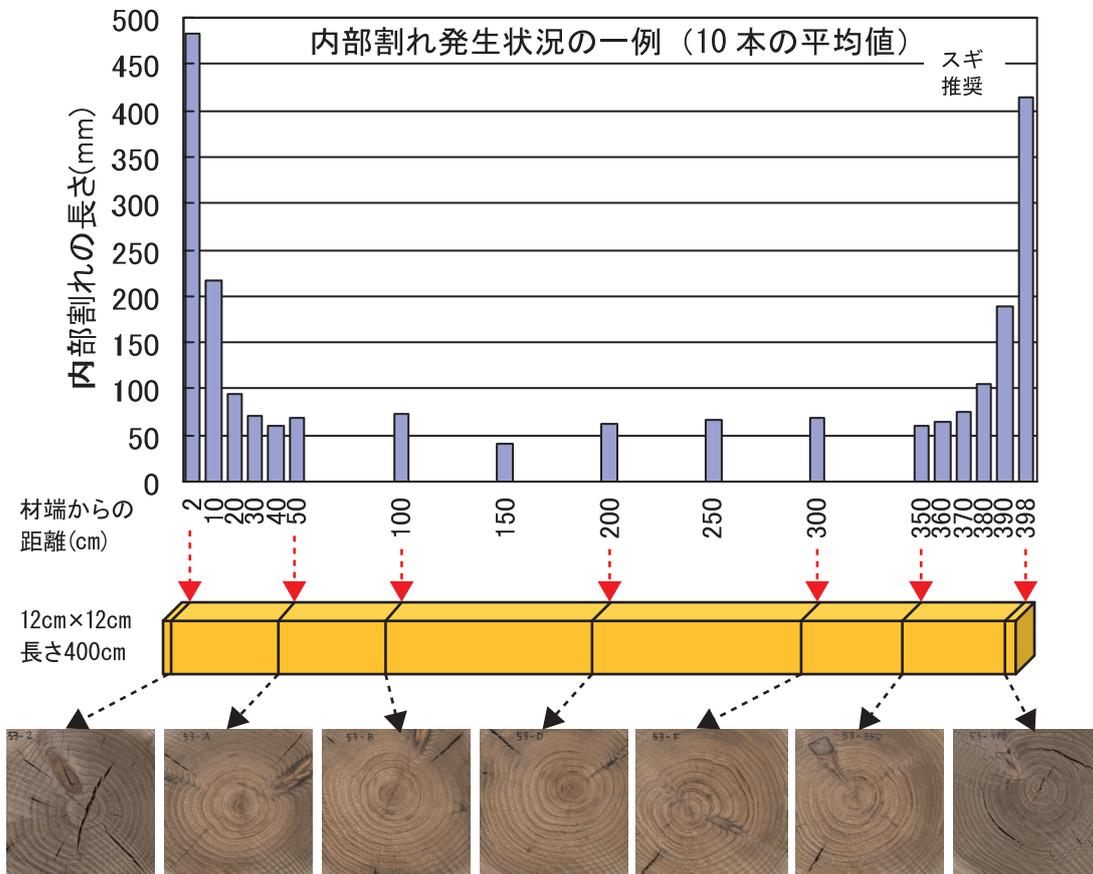
(1) 蒸気式 ①スギ (120mm正角)

• 推奨乾燥条件 •

推奨乾燥スケジュール

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	24	高温セット
③	90	60	184	乾燥 (注)

注：平均初期含水率84%のスギ正角（135mm角、長さ4m）を18%まで乾燥した場合



• ポイント解説 •

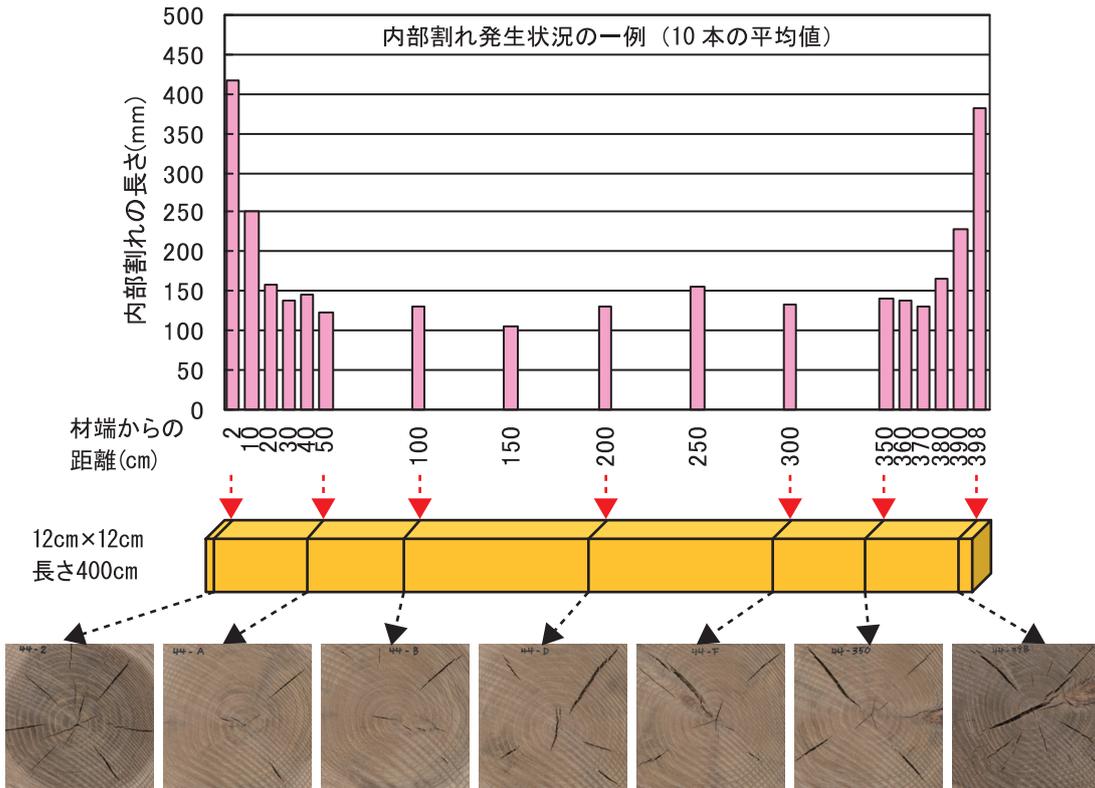
スギの心持ち無背割り正角を乾燥するスケジュールは、①蒸煮、②高温セット、③乾燥の3つのステップから構成されます。内部割れをできるだけ少なくするためには、②のステップを必要以上に長くしたり、③のステップの乾球温度を高くしないように注意します。

参考資料

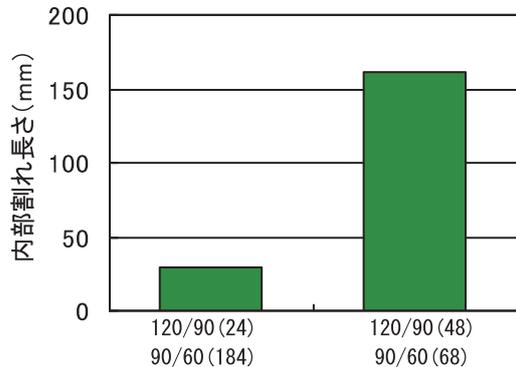
内部割れの発生が多い乾燥スケジュール例

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	36	高温セット ← 高温セット時間が長すぎる!!
③	110	80	100	乾燥 (注) ← 乾球温度が高すぎる!!

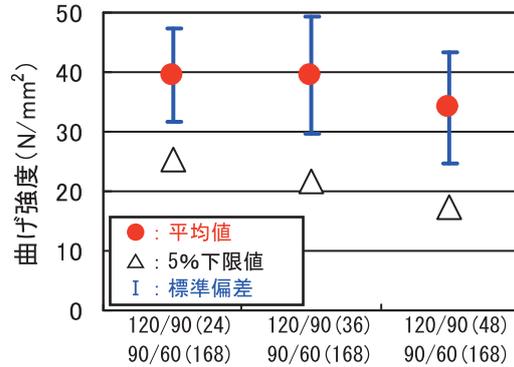
注：平均初期含水率99%のスギ正角（135mm角、長さ4m）を14%まで乾燥した場合



乾燥条件と内部割れ



乾燥条件と強度



ポイント解説

②のステップが長すぎたり、③の乾球温度が高すぎると内部割れが増大します。場合によっては強度に影響を及ぼします。

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

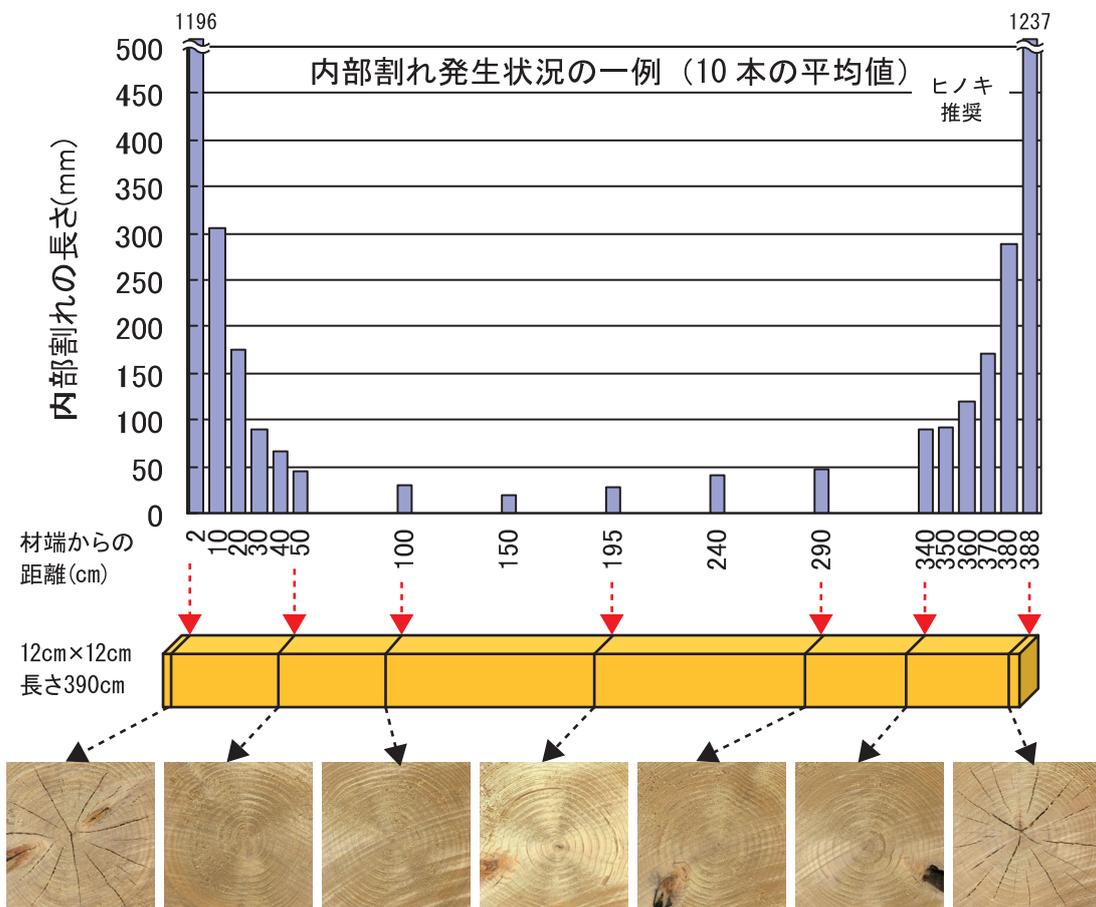
(1) 蒸気式 ②ヒノキ (120mm正角)

• 推奨乾燥条件 •

推奨乾燥スケジュール

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	18	高温セット
③	90	60	120	乾燥 (注)

注：平均初期含水率36%のヒノキ正角（135mm角、長さ3.9m）を14%まで乾燥した場合



• ポイント解説 •

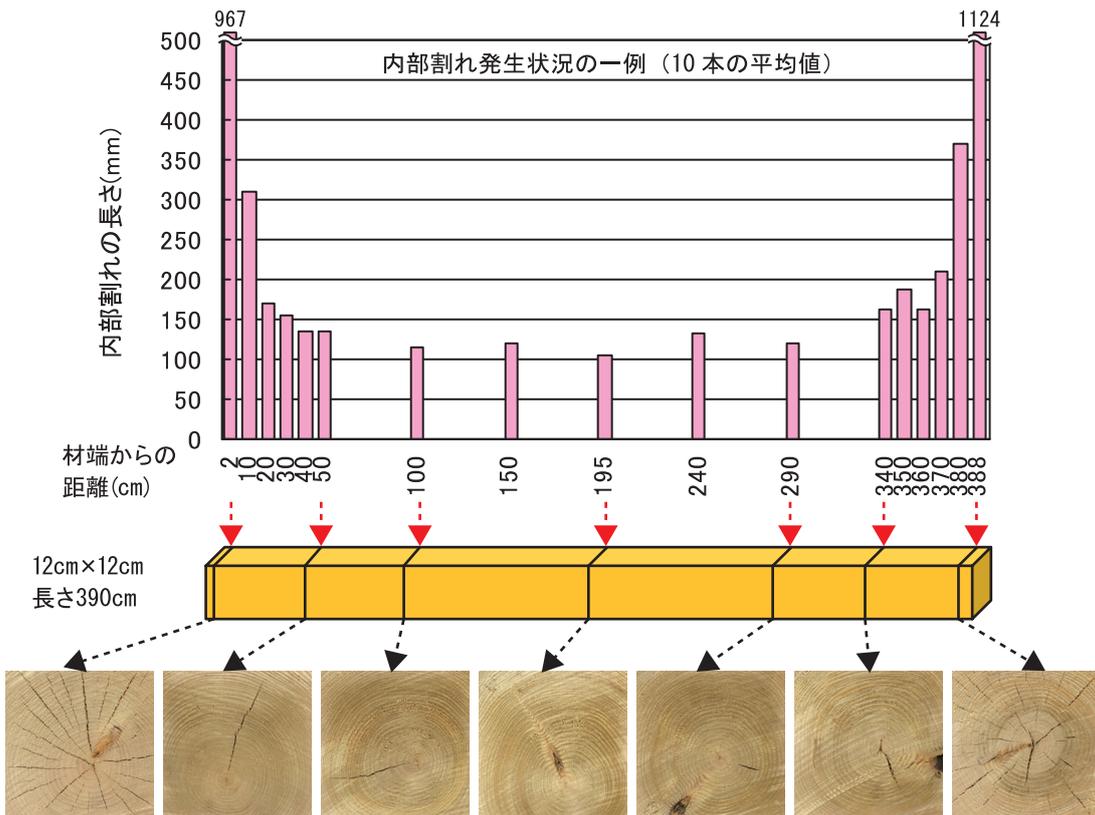
ヒノキの心持ち無背割り正角を乾燥するスケジュールは、①蒸煮、②高温セット、③乾燥の3つのステップから構成されます。内部割れの発生に影響を及ぼすステップは②と③です。内部割れをできるだけ少なくするためには、②と③のステップを必要以上に長くしないように注意します。

参考資料

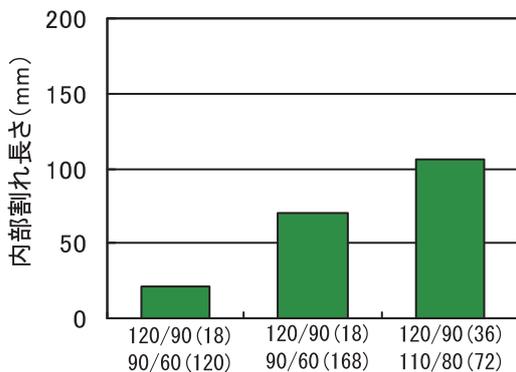
内部割れの発生が多い乾燥スケジュール例

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	36	高温セット ← 高温セット時間が長すぎる!!
③	110	80	72	乾燥 (注) ← 乾球温度が高すぎる!!

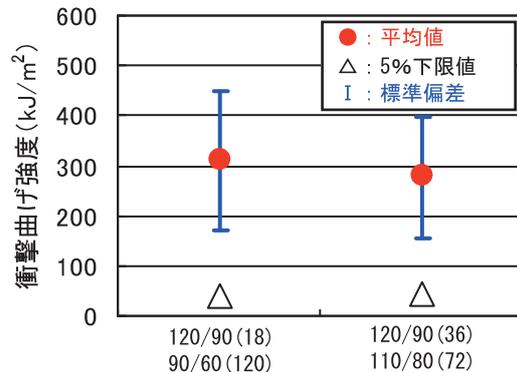
注：平均初期含水率38%のヒノキ正角（135mm角、長さ3.9m）を7%まで乾燥した場合



乾燥条件と内部割れ



乾燥条件と強度



ポイント解説

ヒノキは内部割れが発生しにくい樹種ですが、②と③のステップが長すぎると内部割れが増加する傾向にあります。また、過乾燥になってしまうと内部割れが増大します。

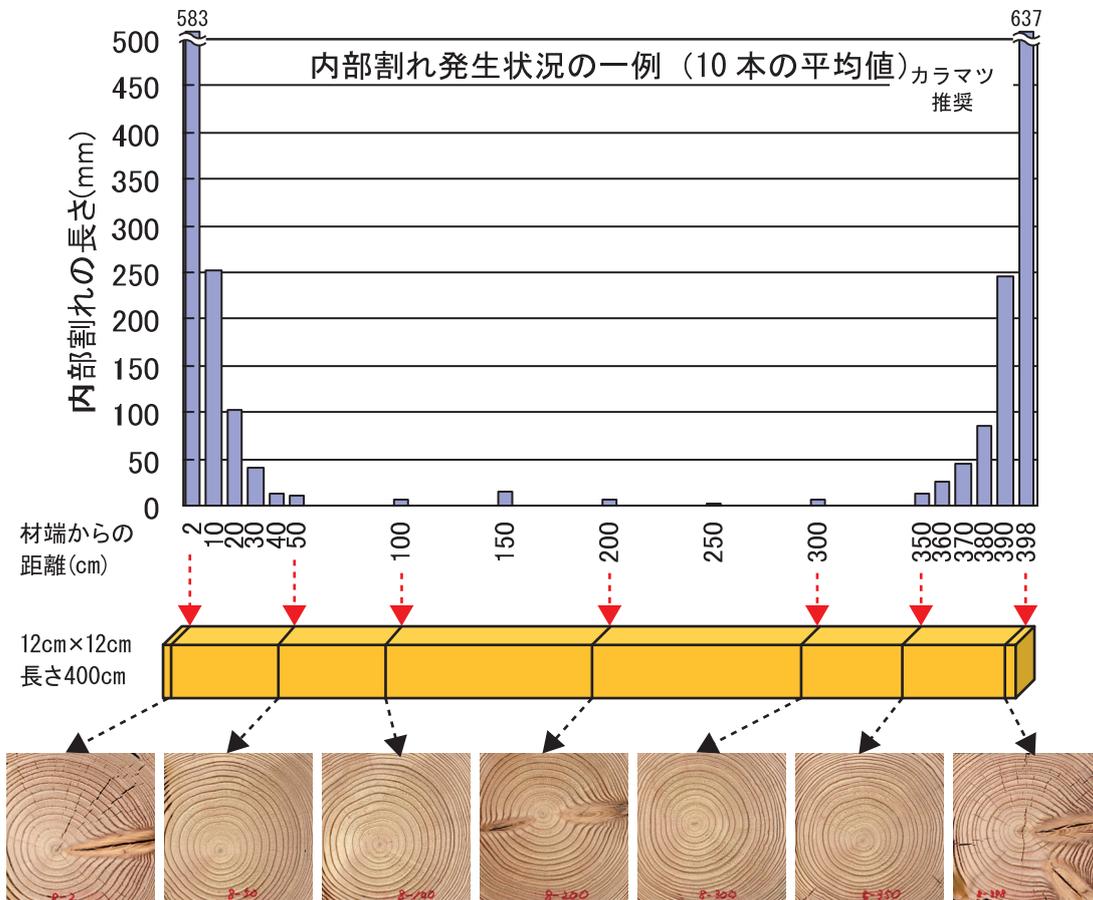
(1) 蒸気式 ③カラマツ (120mm正角)

• 推奨乾燥条件 •

推奨乾燥スケジュール

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	18	高温セット
③	90	60	168	乾燥 (注)

注：平均初期含水率39%のカラマツ正角（145mm角、長さ4m）を15%まで乾燥した場合



• ポイント解説 •

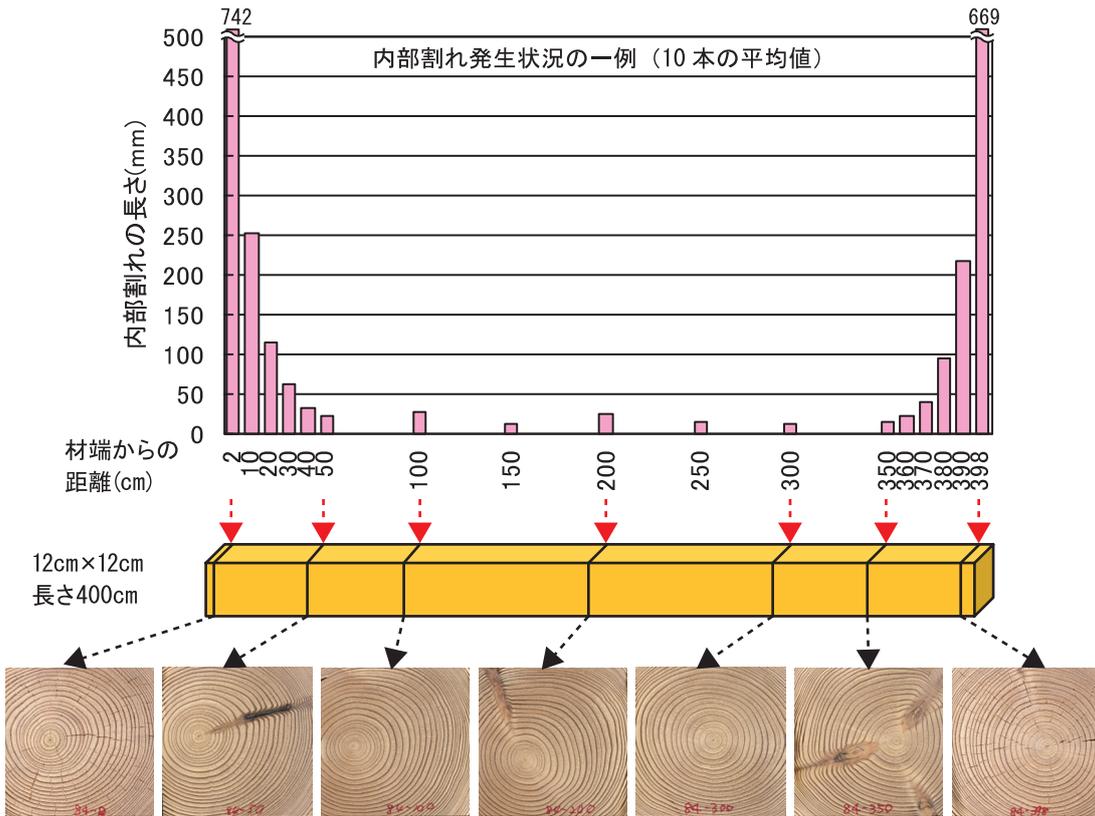
カラマツの心持ち無背割り正角を乾燥するスケジュールは、①蒸煮、②高温セット、③乾燥の3つのステップから構成されます。カラマツ正角の場合、熱による強度低下が ocorrênciaやすいので、②のステップを必要以上に長くしたり、③のステップの乾球温度を高くしすぎないようにします。

参考資料

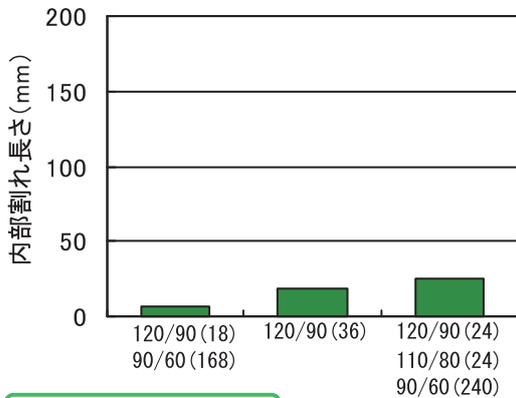
内部割れの発生が多い乾燥スケジュール例

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	24	高温セット
③	110	80	24	乾燥 ← 乾球温度が高すぎる!!
④	90	60	240	乾燥 (注) ← 乾燥時間が長すぎる!!

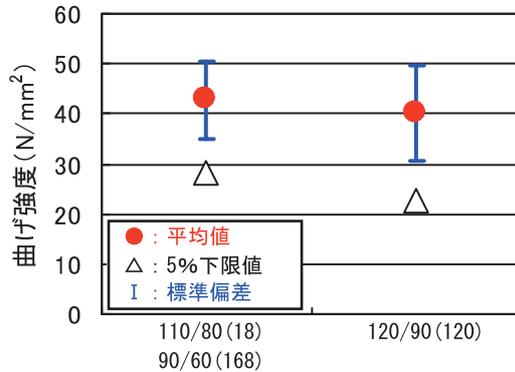
注：平均初期含水率41%のカラマツ正角（145mm角、長さ4m）を13%まで乾燥した場合



乾燥条件と内部割れ



乾燥条件と強度



ポイント解説

カラマツの場合、②のステップが長すぎたり、③と④の乾球温度が高すぎたり時間が長すぎても内部割れの発生はあまり大きくありません。しかし、強度が低下します。

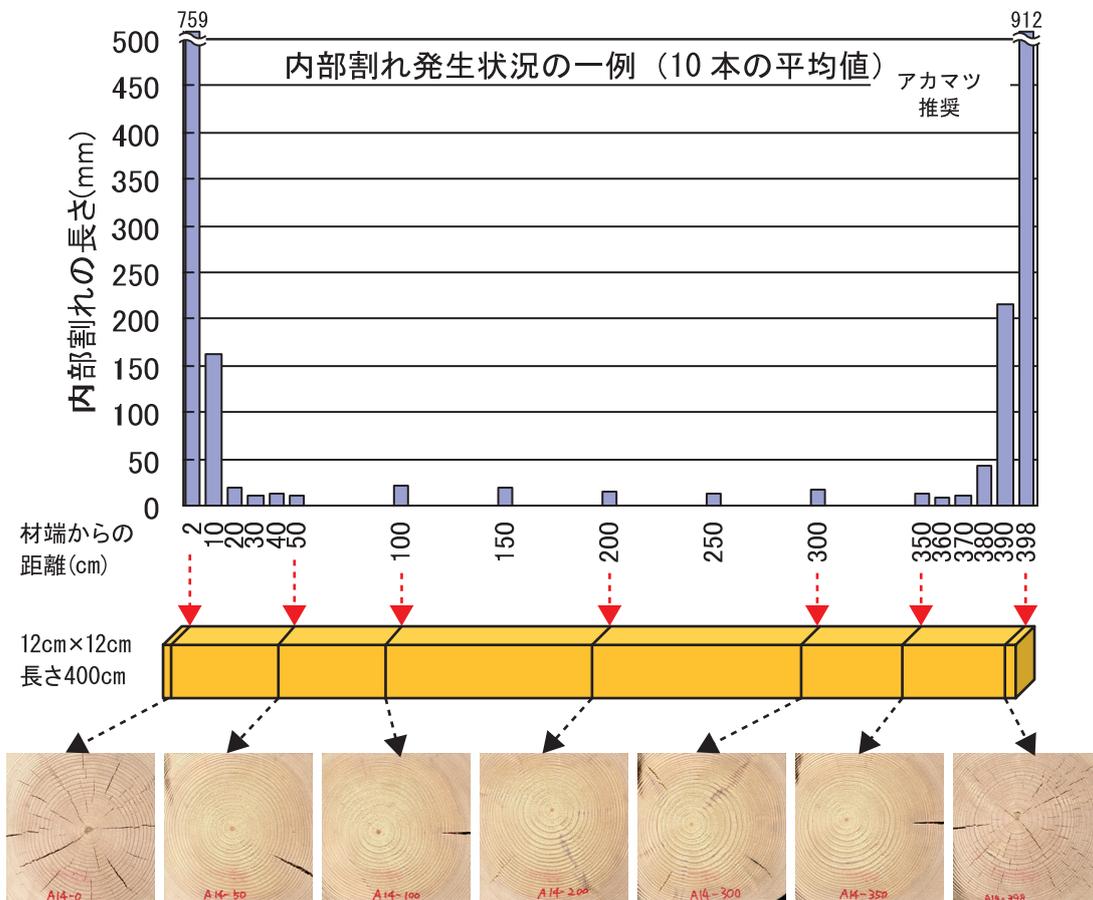
(1) 蒸気式 ④アカマツ (120mm正角)

● 推奨乾燥条件 ●

推奨乾燥スケジュール

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	110	90	24	高温セット
③	90	60	72	乾燥 (注)

注：平均初期含水率73%のアカマツ正角（145mm角、長さ4m）を16%まで乾燥した場合



● ポイント解説 ●

アカマツの心持ち無背割り正角を乾燥するスケジュールは、①蒸煮、②高温セット、③乾燥の3つのステップから構成されます。内部割れをできるだけ少なくするためには、②のステップを必要以上に長くしたり、③のステップの乾球温度を高くしないように注意します。

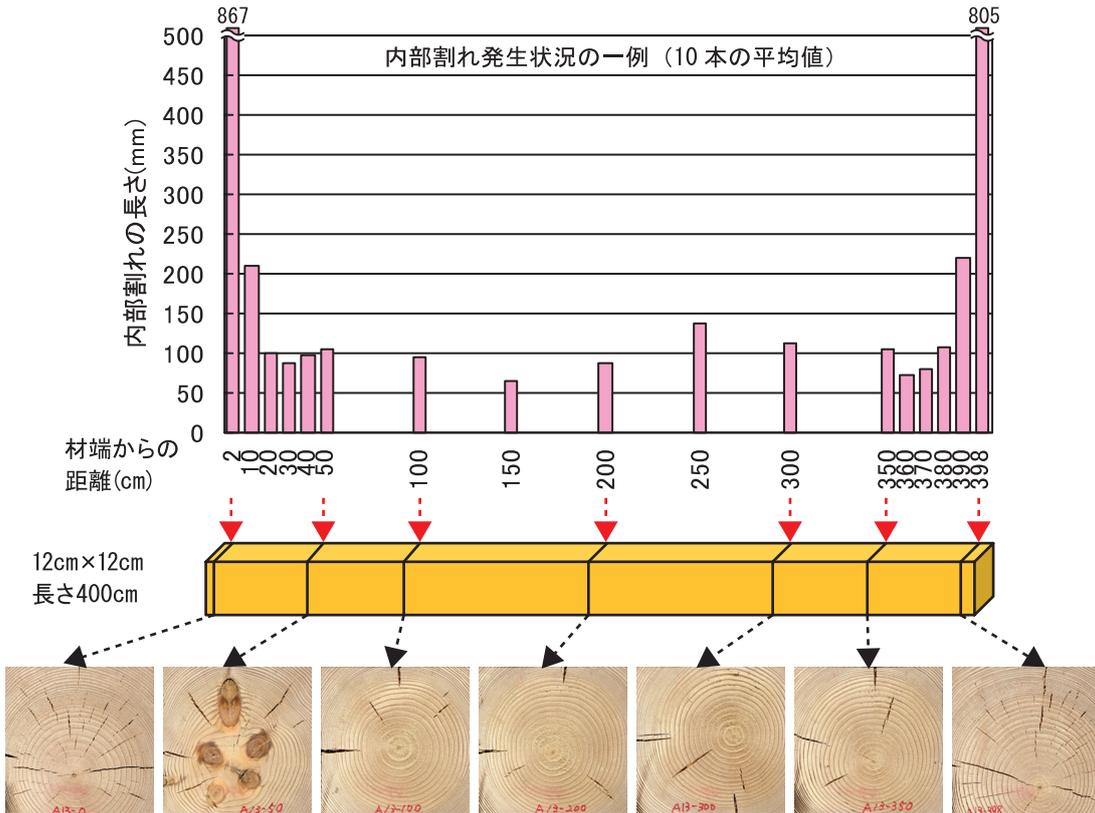
なお、アカマツ正角の場合、材面割れが発生しやすい傾向があります。

参考資料

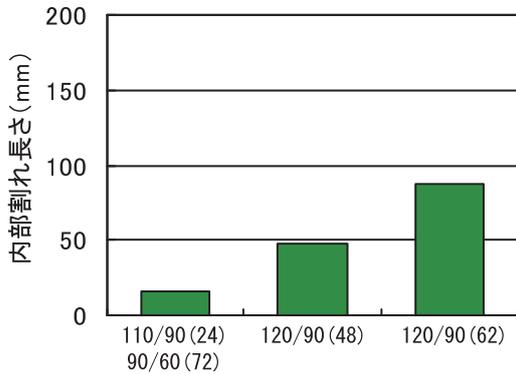
内部割れの発生が多い乾燥スケジュール例

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	62	高温セット(注) ← 高温セット時間が長すぎる!!

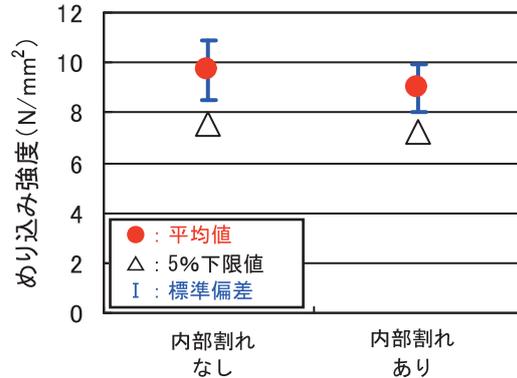
注：平均初期含水率82%のアカマツ正角（145mm角、長さ4m）を9%まで乾燥した場合



乾燥条件と内部割れ



乾燥条件と強度



ポイント解説

辺材の多いアカマツは水分の抜けが速いため、②のステップの時間を長くしすぎたり、乾球温度を高くしすぎると、過乾燥となり内部割れが増加します。また強度にも影響を及ぼします。

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

3. 推奨乾燥条件

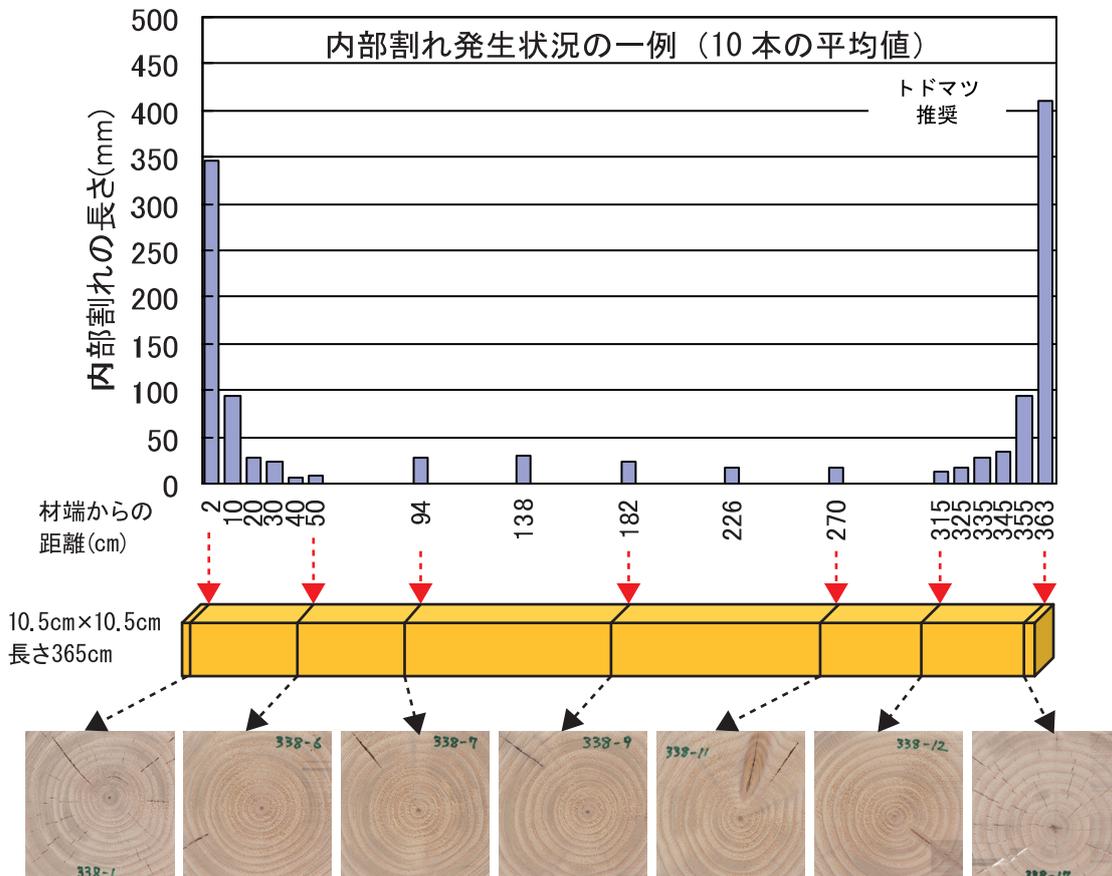
(1) 蒸気式 ⑤トドマツ (105mm正角)

● 推奨乾燥条件 ●

推奨乾燥スケジュール

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	98	4	高温セット
③	105	85	24	高温セット
④	90	60	61	乾燥 (注)

注：平均初期含水率50%のトドマツ正角（120mm角、長さ3.65m）を15%まで乾燥した場合



● ポイント解説 ●

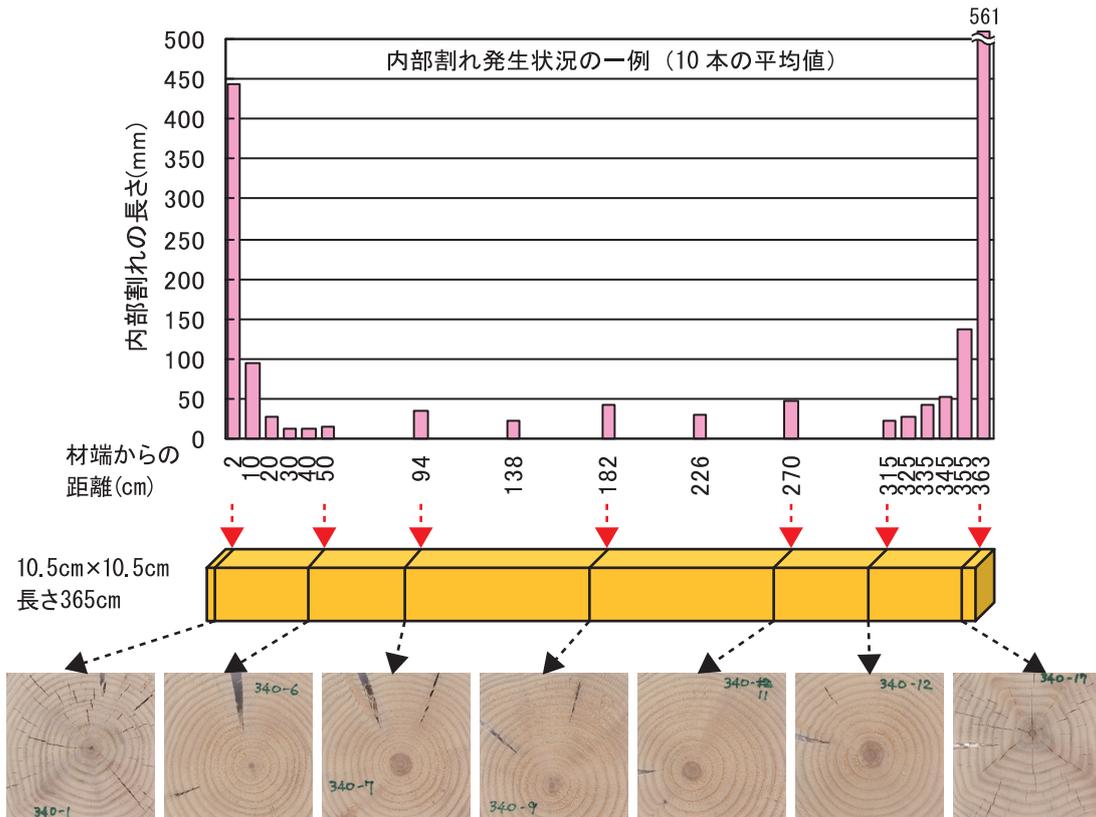
トドマツの心持ち無背割り正角を乾燥するスケジュールは、①蒸煮、②③高温セット、④乾燥の4つのステップから構成されます。内部割れをできるだけ少なくするためには、②と③のステップを必要以上に長くしたり、③のステップの乾球温度を高くしないように注意します。

参考資料

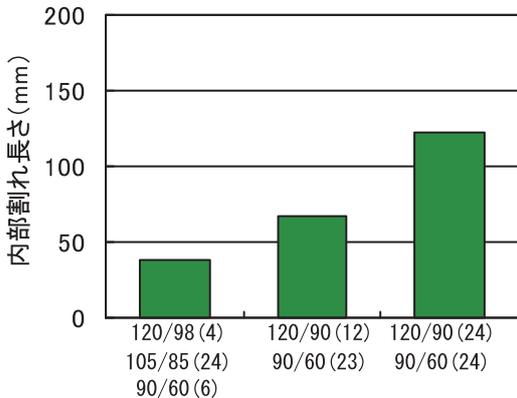
内部割れの発生が多い乾燥スケジュール例

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	98	4	高温セット
③	105	85	60	高温セット(注) ← 高温セット時間が長すぎる!!

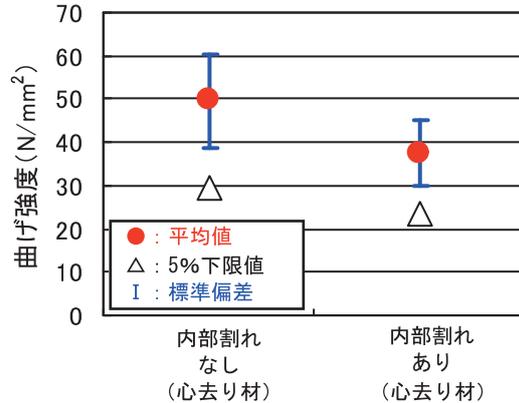
注：平均初期含水率50%のトドマツ正角（120mm角、長さ3.65m）を15%まで乾燥した場合



乾燥条件と内部割れ



乾燥条件と強度



ポイント解説

②と③のステップが長すぎたり、③のステップの乾球温度を高くしすぎると、内部割れの発生が大きくなったり、強度が低下するおそれがあります。

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

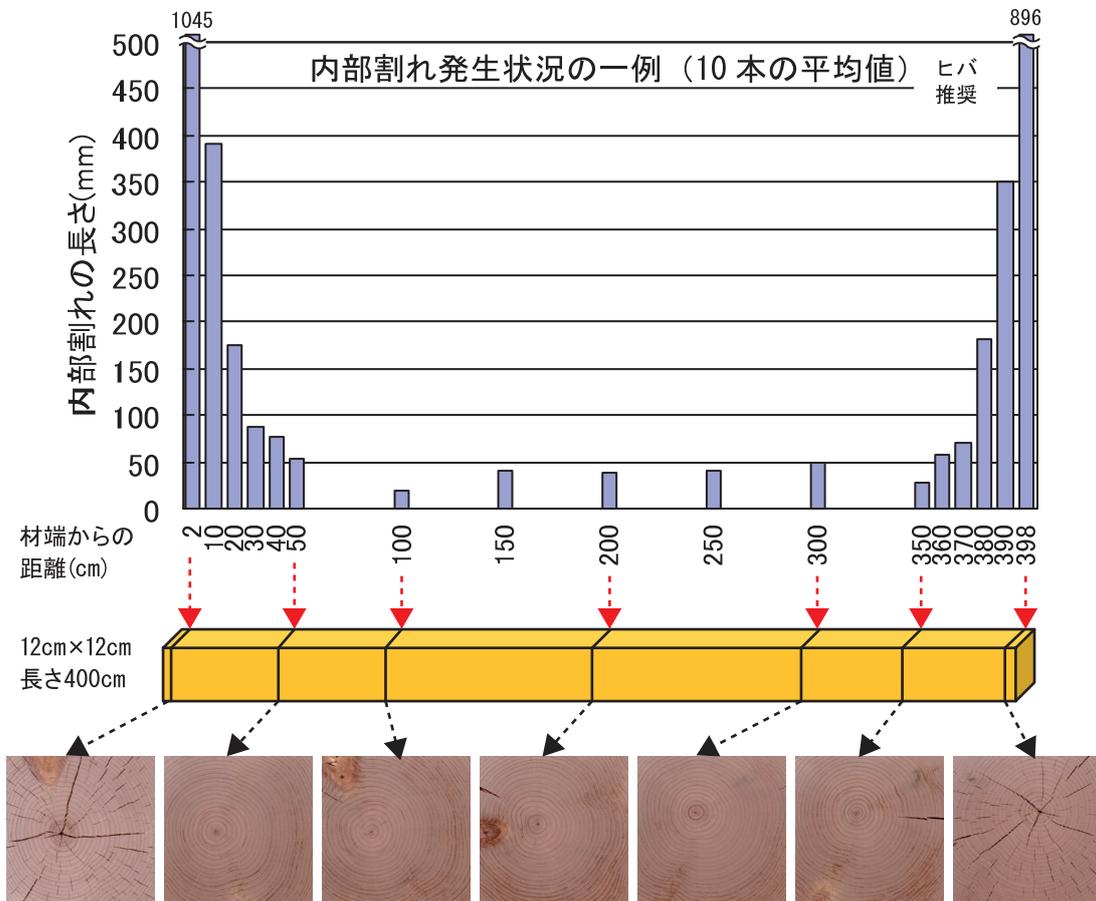
(1) 蒸気式 ⑥ヒバ (120mm正角)

• 推奨乾燥条件 •

推奨乾燥スケジュール

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	110	90	12	高温セット
③	90	60	216	乾燥 (注)

注：平均初期含水率36%のヒバ正角（147mm角、長さ4m）を14%まで乾燥した場合



• ポイント解説 •

ヒバの心持ち無背割り正角を乾燥するスケジュールは、①蒸煮、②高温セット、③乾燥の3つのステップから構成されます。内部割れをできるだけ少なくするためには、②のステップを必要以上に長くしないように注意します。

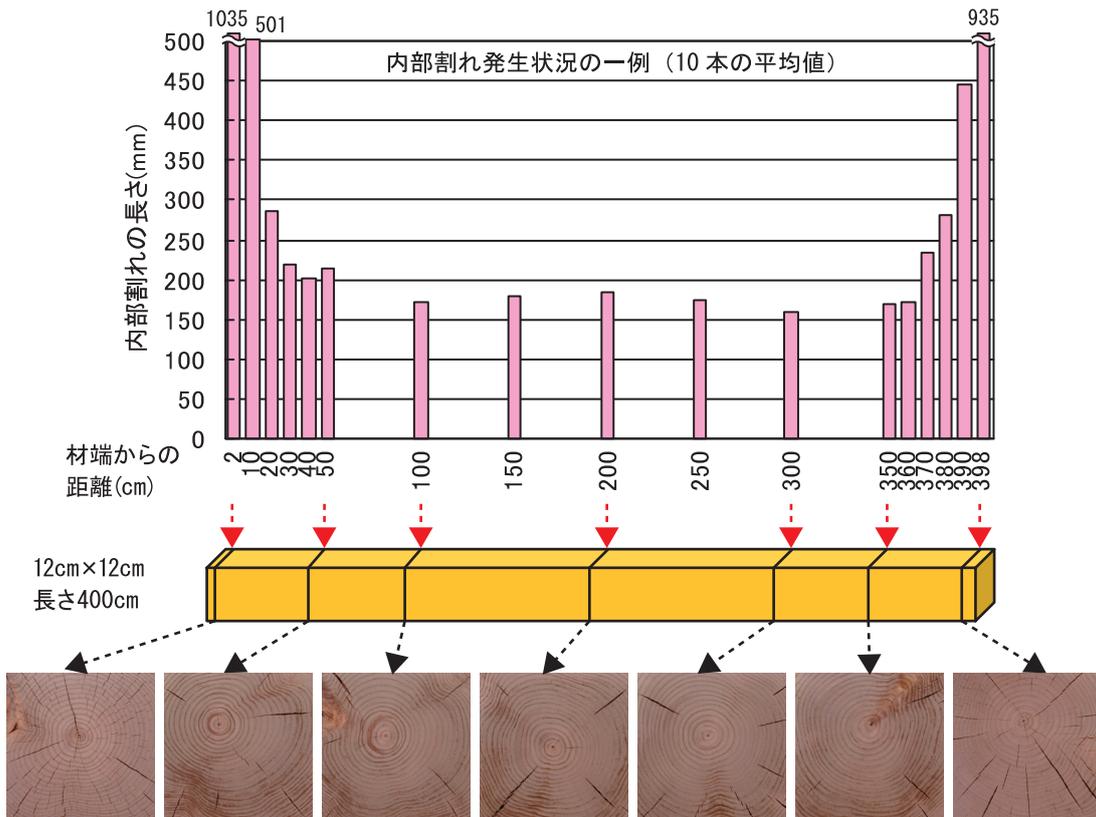
なお、ヒバ正角の場合、材端部に割れが発生しやすい傾向があります。

参考資料

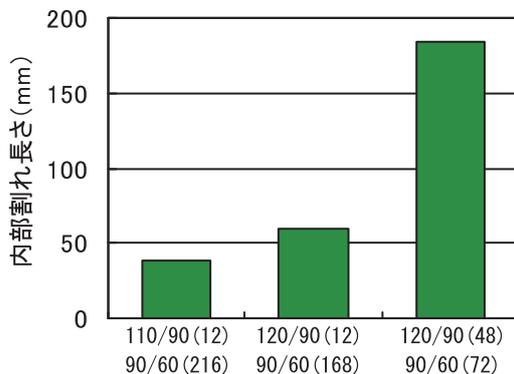
内部割れの発生が多い乾燥スケジュール例

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	48	高温セット ← 高温セット時間が長すぎる!!
③	90	60	72	乾燥 (注)

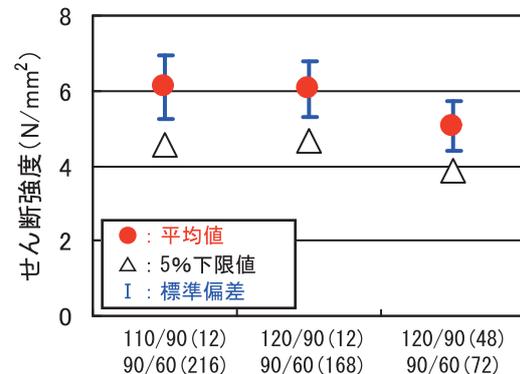
注：平均初期含水率36%のヒバ正角（147mm角、長さ4m）を12%まで乾燥した場合



乾燥条件と内部割れ



乾燥条件と強度



ポイント解説

②のステップが長すぎると、内部割れが多く発生し、場合によっては強度が低下するおそれがあります。ヒバの場合、寸法仕上げ時に内部割れが材面割れとして現れやすいので注意が必要です。

(2) 蒸気高周波複合式 ①スギ (120mm正角)

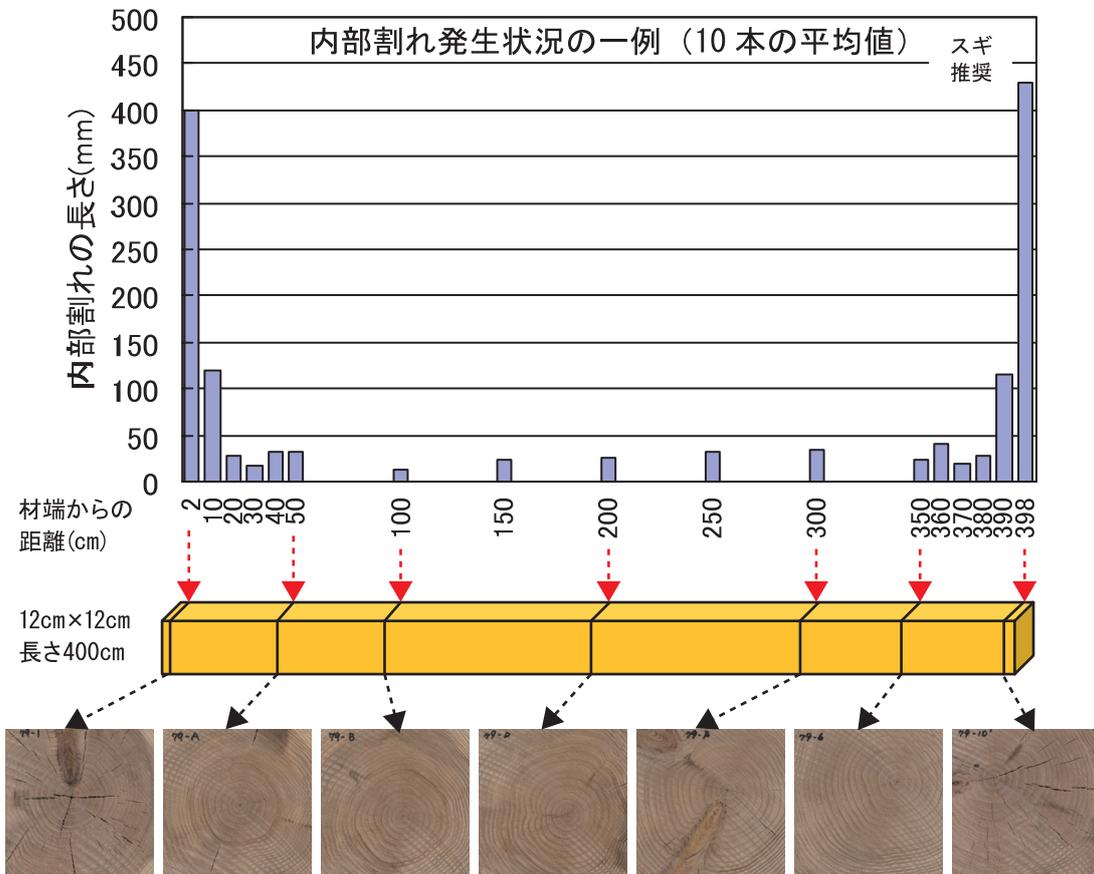
● 推奨乾燥条件 ●

推奨乾燥スケジュール

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	24	高温セット
③	90	60	76	乾燥 (注1) 高周波加熱を併用 (注2)

注1：平均初期含水率84%のスギ正角（135mm角、長さ4m）を12%まで乾燥した場合

注2：材内温度を100°C程度に制御するよう出力（初期重量 1kgあたり15W）を調整



● ポイント解説 ●

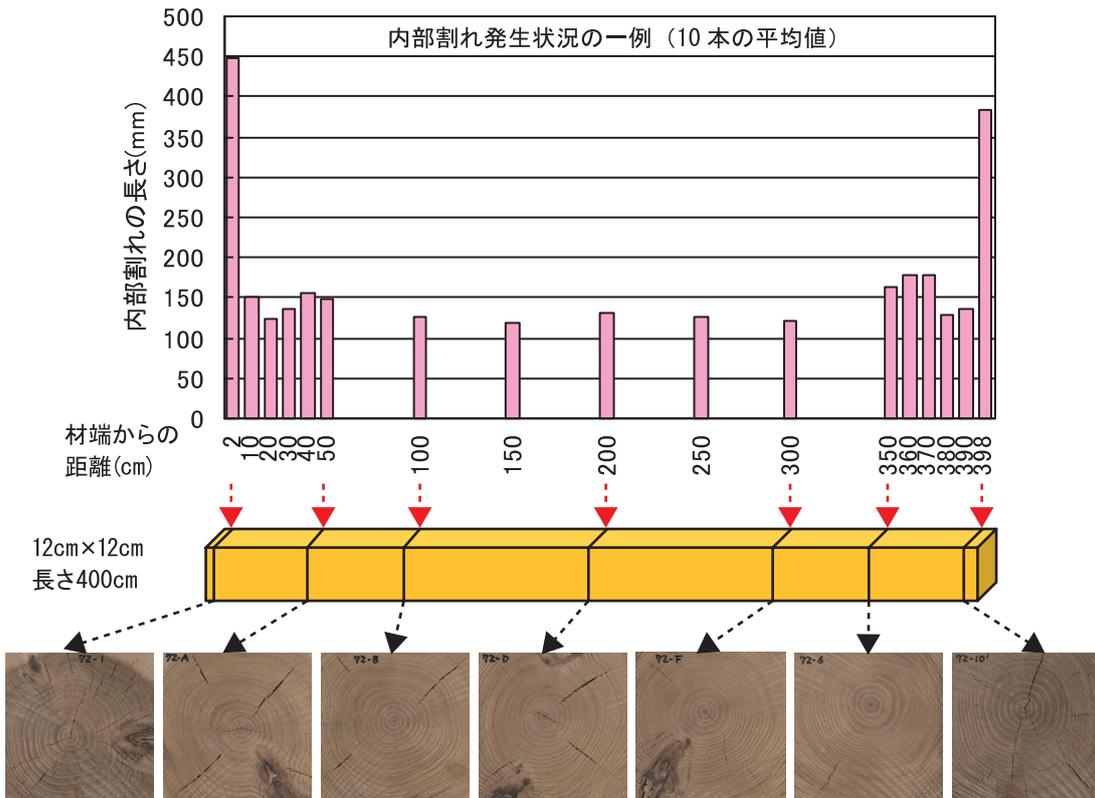
スギの心持ち無背割り正角を乾燥するスケジュールは、①蒸煮、②高温セット、③乾燥の3つのステップから構成され、一般には③のステップで高周波加熱を併用します。内部割れの発生に大きく影響を及ぼす工程は②と③です。内部割れをできるだけ少なくするためには、②のステップを必要以上に長くしたり、③のステップの乾球温度を高くしないように注意します。

参考資料

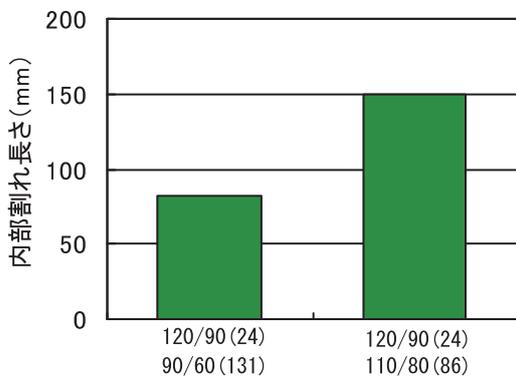
内部割れの発生が多い乾燥スケジュール例

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	36	高温セット ← 高温セット時間が長すぎる!!
③	110	80	52	乾燥 (注1) ← 乾球温度が高すぎる!! 高周波加熱を併用 (注2)

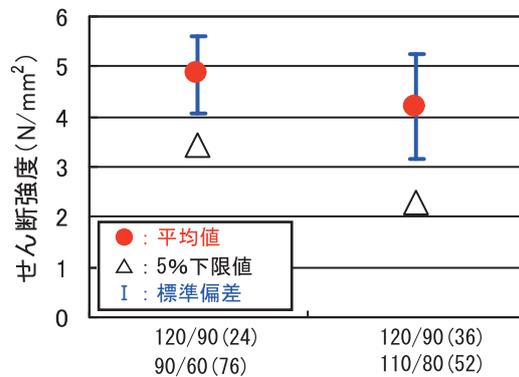
注1: 平均初期含水率88%のスギ正角(135mm角、長さ4m)を10%まで乾燥した場合
 注2: 材内温度を120°C程度に制御するよう出力(初期重量 1kgあたり15W)を調整



乾燥条件と内部割れ



乾燥条件と強度



ポイント解説

特に③のステップの乾球温度を高くすると、材内温度は高周波によって必要以上に加熱され内部割れが増大します。場合によっては強度に影響を及ぼします。

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

(2) 蒸気高周波複合式 ②ヒノキ (120mm正角)

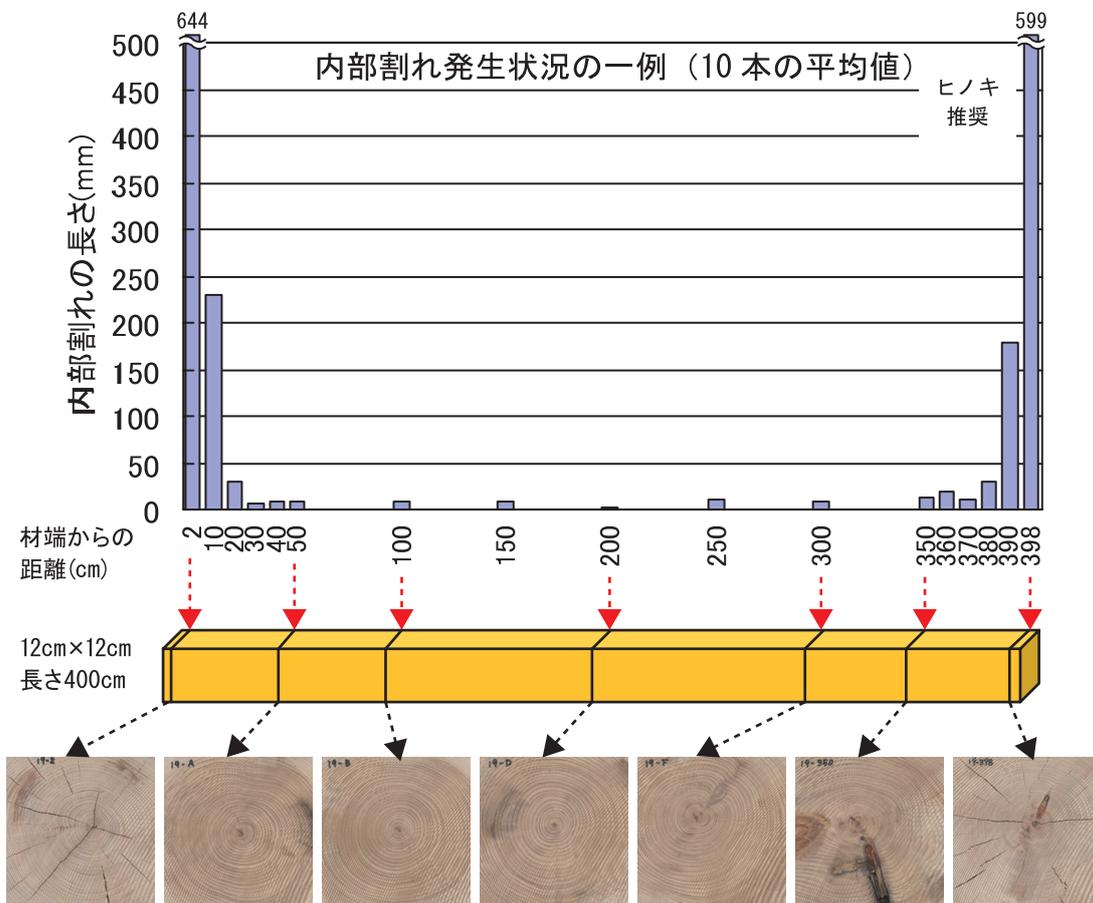
• 推奨乾燥条件 •

推奨乾燥スケジュール

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	12	高温セット
③	90	60	50	乾燥 (注1) 高周波加熱を併用 (注2)

注1：平均初期含水率40%のヒノキ正角（135mm角、長さ4m）を16%まで乾燥した場合

注2：材内温度を100°C程度に制御するよう出力（初期重量 1kgあたり13W）を調整



• ポイント解説 •

ヒノキの心持ち無背割り正角を乾燥するスケジュールは、①蒸煮、②高温セット、③乾燥の3つのステップから構成され、一般には③のステップで高周波加熱を併用します。ヒノキは、初期含水率が低く、そのばらつきも小さいので、短時間で均一に乾燥することができます。

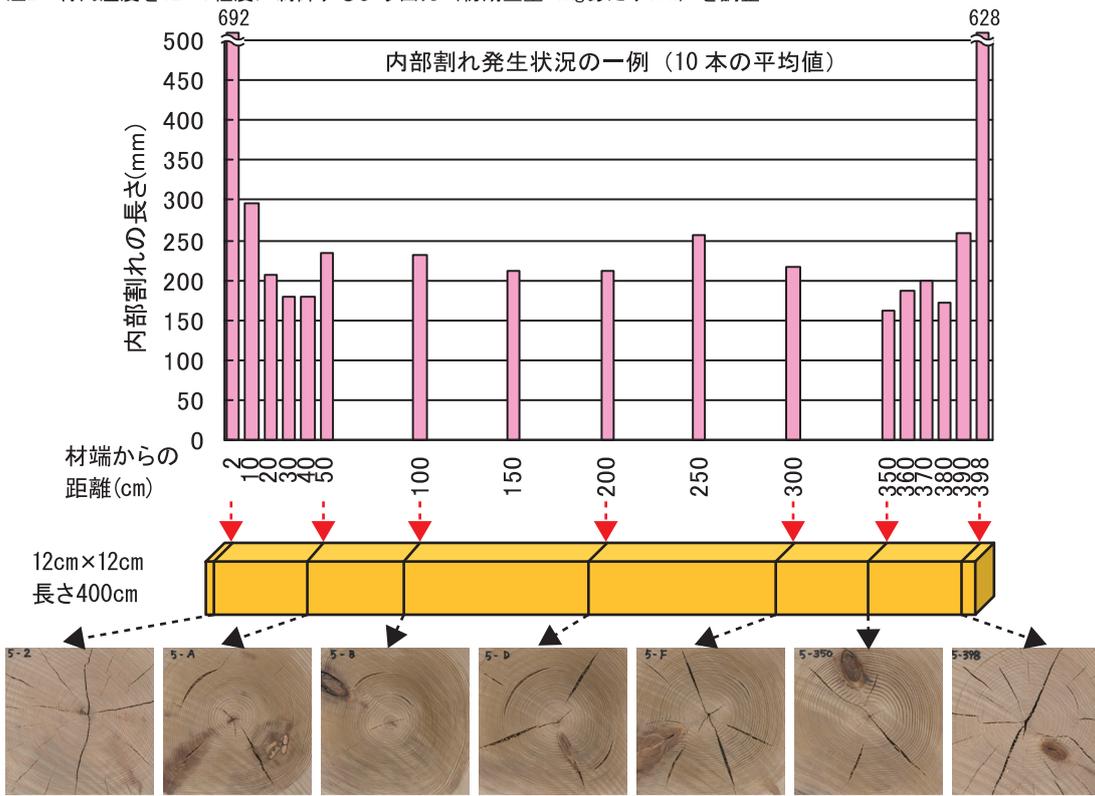
参考資料

内部割れの発生が多い乾燥スケジュール例

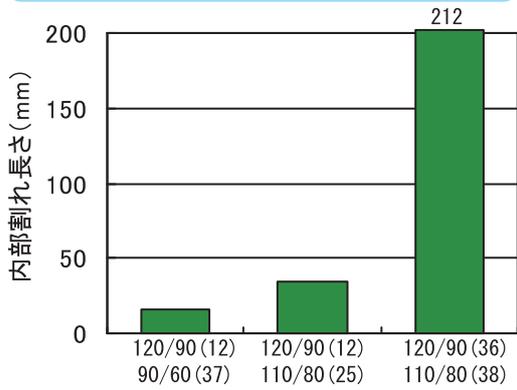
ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(h)	備考
①	95	95	8	蒸煮
②	120	90	36	高温セット ← 高温セット時間が長すぎる!!
③	110	80	38	乾燥 (注1) ← 乾球温度が高すぎる!! 高周波加熱を併用 (注2)

注1: 平均初期含水率42%のヒノキ正角 (135mm角、長さ4m) を6%まで乾燥した場合

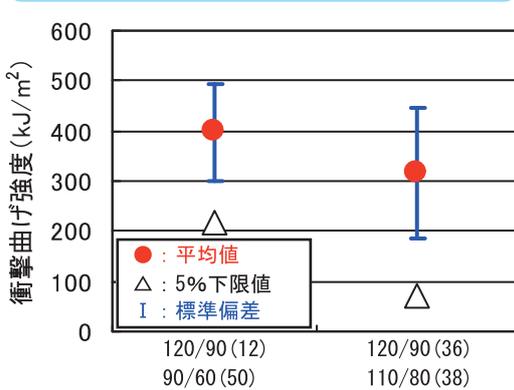
注2: 材内温度を120°C程度に制御するよう出力 (初期重量 1kgあたり13W) を調整



乾燥条件と内部割れ



乾燥条件と強度



ポイント解説

ヒノキは内部割れが発生しにくい樹種ですが、②のステップが長すぎたり、③の乾球温度が高すぎると内部割れが増加する傾向にあります。また、過乾燥になってしまうと内部割れが増大します。

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

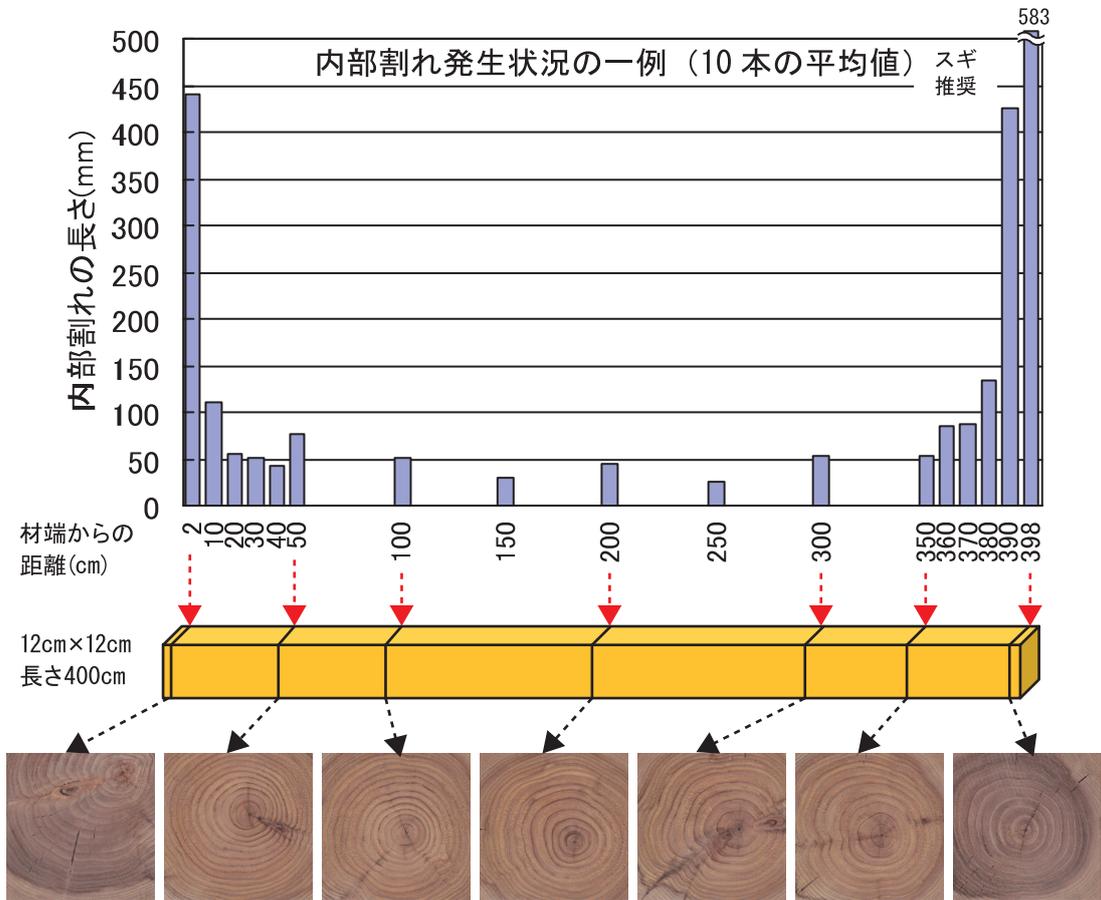
(3) 熱風減圧併用式 ①スギ (120mm正角)

● 推奨乾燥条件 ●

推奨乾燥スケジュール

ステップ	乾球温度(°C)	圧力(kPa)	時間(h)	備考
①	92	常圧(101)	8	蒸煮
②	115	71	18	高温セット 沸点:90°C
③	85	39	18	乾燥 沸点:75°C
④	70	20	120	乾燥 沸点:60°C(注)

注：平均初期含水率71%のスギ正角（135mm角、長さ4m）を14%まで乾燥した場合



● ポイント解説 ●

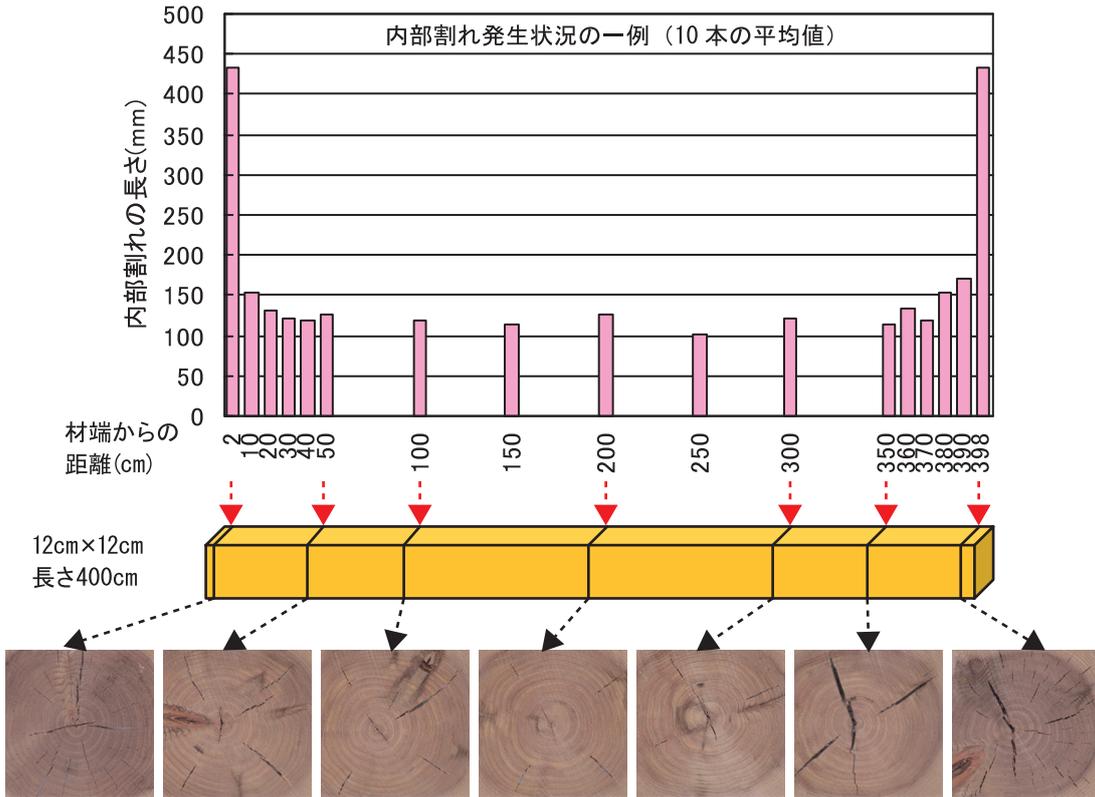
スギの心持ち無背割り正角を乾燥するスケジュールは、①蒸煮、②高温セット、③④乾燥の4つのステップから構成されます。一般には②以降のステップで減圧を併用します。高温セット後は、段階的に乾球温度を下げることで、より内部割れの発生を抑えることができます。

参考資料

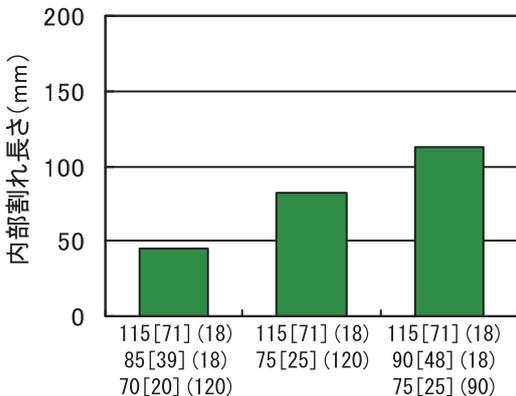
内部割れの発生が多い乾燥スケジュール例

ステップ	乾球温度(°C)	圧力(kPa)	時間(h)	備考
①	92	常圧(101)	8	蒸煮
②	115	71	36	高温セット ← 高温セット時間が長すぎる!!
③	85	39	60	乾燥(注)

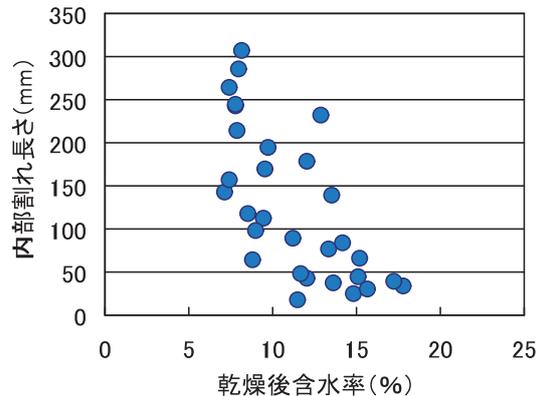
注：平均初期含水率67%のスギ正角（135mm角、長さ4m）を12%まで乾燥した場合



乾燥条件と内部割れ



含水率と内部割れ



ポイント解説

②のステップが長すぎたり、③のステップの乾球温度が高すぎたり、時間が長すぎると内部割れが多く発生します。また、過乾燥になってしまうと内部割れが多く発生する傾向が認められます。

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

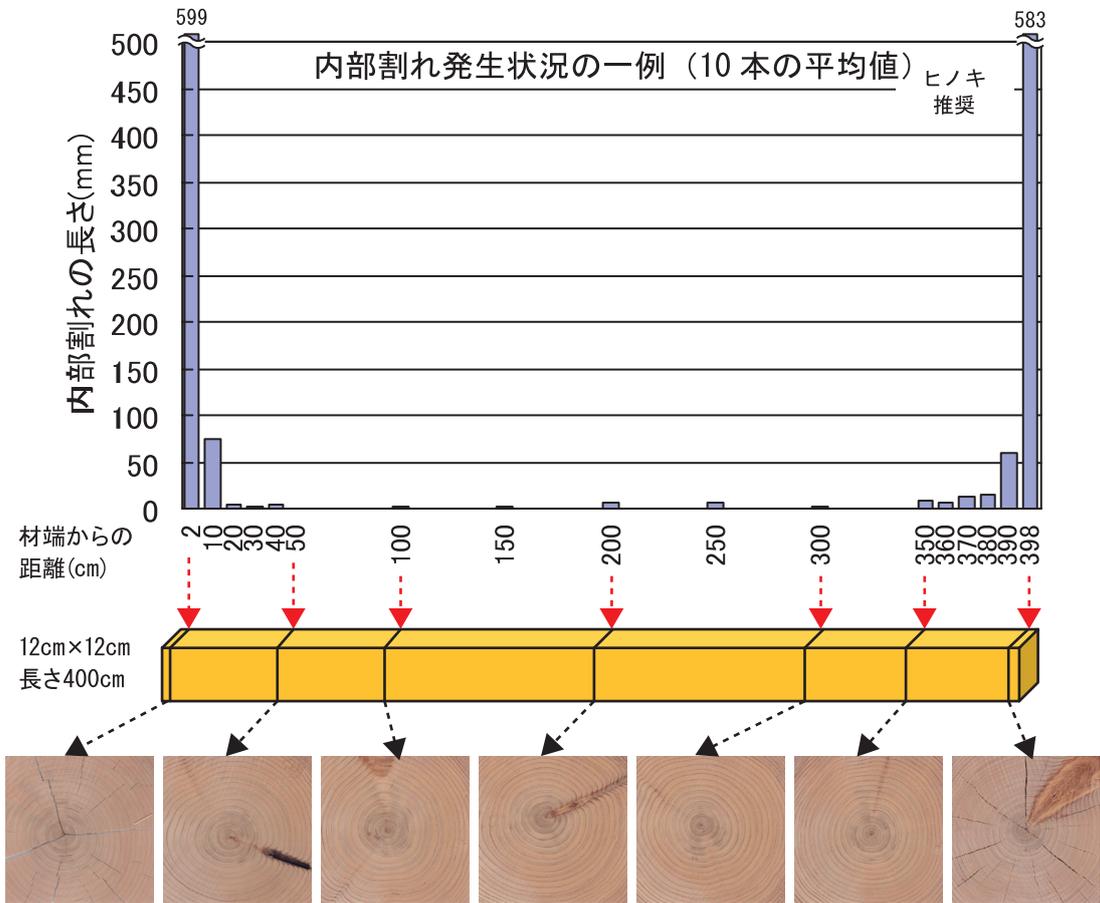
(3) 熱風減圧併用式 ②ヒノキ (120mm正角)

● 推奨乾燥条件 ●

推奨乾燥スケジュール

ステップ	乾球温度(°C)	圧力(kPa)	時間(h)	備考
①	92	常圧(101)	8	蒸煮
②	110	71	18	高温セット 沸点:90°C
③	80	39	18	乾燥 沸点:75°C
④	70	20	75	乾燥 沸点:60°C(注)

注：平均初期含水率45%のヒノキ正角（135mm角、長さ4m）を12%まで乾燥した場合



● ポイント解説 ●

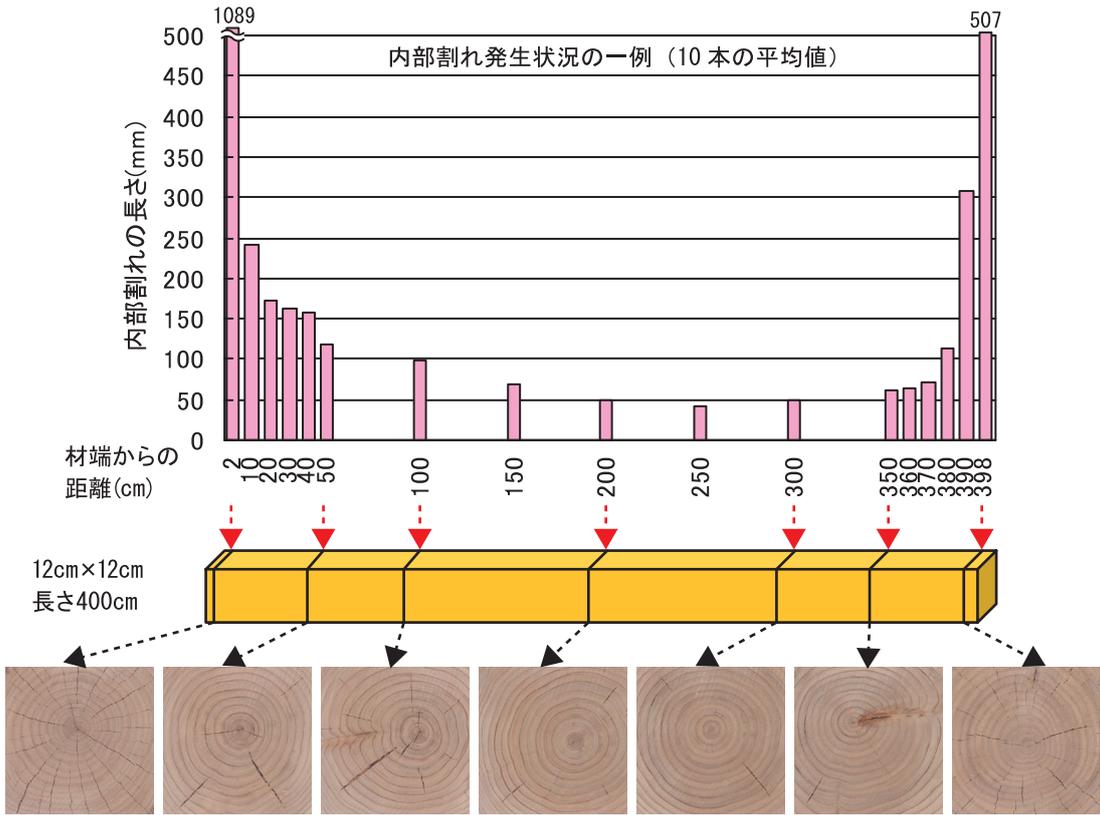
ヒノキの心持ち無背割り正角を乾燥するスケジュールは、①蒸煮、②高温セット、③④乾燥の4つのステップから構成されます。一般には②以降のステップで減圧を併用します。高温セット後は、段階的に乾球温度を下げることで、より内部割れの発生を抑えることができます。

参考資料

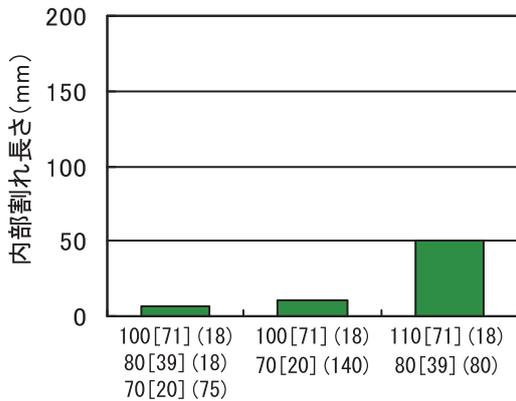
内部割れの発生が多い乾燥スケジュール例

ステップ	乾球温度(°C)	圧力(kPa)	時間(h)	備考
①	92	常圧(101)	8	蒸煮
②	110	71	18	高温セット
③	80	39	80	乾燥(注) ← 乾球温度が高すぎる!!

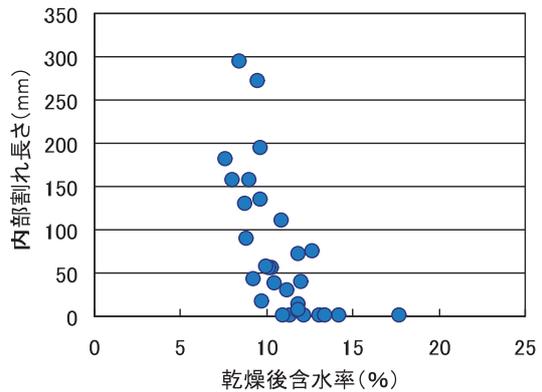
注：平均初期含水率45%のヒノキ正角（135mm角、長さ4m）を13%まで乾燥した場合



乾燥条件と内部割れ



含水率と内部割れ



ポイント解説

ヒノキは内部割れが発生しにくい樹種ですが、②のステップが長すぎたり、③の乾球温度を高くしすぎたり、時間を長くしすぎると内部割れが増加する傾向にあります。また、過乾燥になってしまうと内部割れが増大します。

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

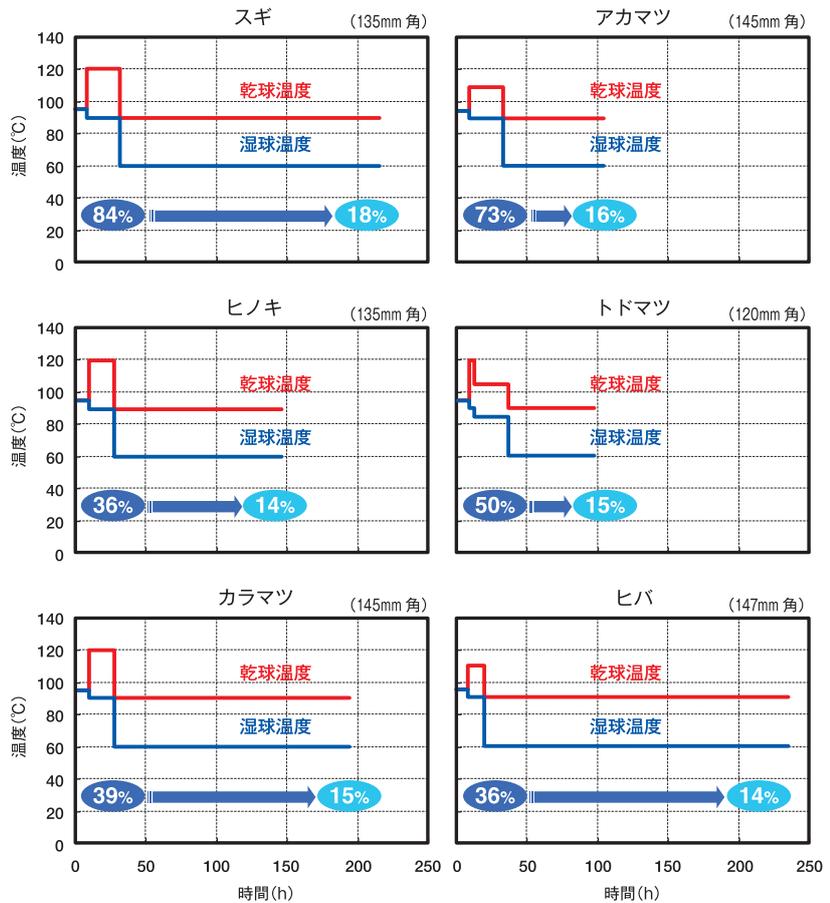
生産性向上

Q & A

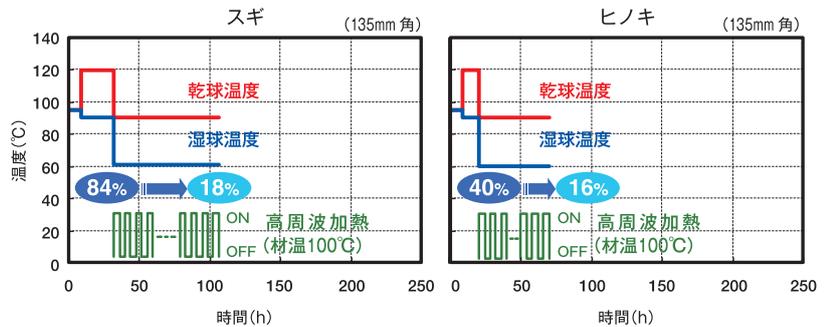
用語の解説

内部割れが少なく、強度面でも問題が生じない 推奨乾燥スケジュール

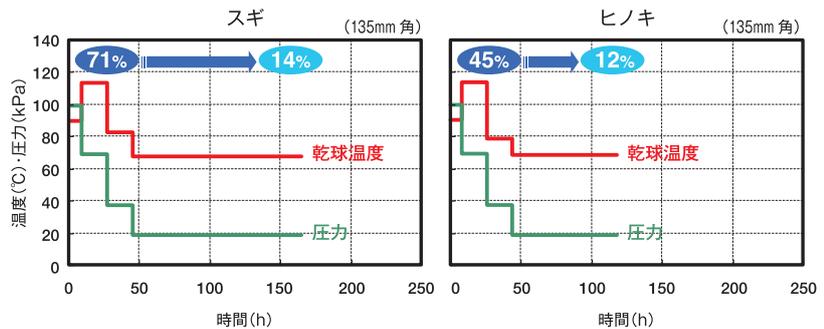
蒸気式
高温セット
+
中温乾燥



蒸気高周波複合式



熱風減圧併用式



10体の平均含水率: 乾燥前 → 乾燥後

内部割れの評価法

製材品に発生した内部割れは、外側からは確認できません。また乾燥条件を誤ると、強度的に危険な内部割れが発生することもあります。

本プロジェクトでは、乾燥材に発生している内部割れを検知したり、画像解析技術を活用して比較的容易に内部割れを評価する技術についても検討しましたので、その成果を紹介します。

(1) 応力波を用いた内部割れの推定法

木材の非破壊試験法の一つである応力波伝播速度を用いた内部割れ推定法について記述します。ここで、応力波伝播時間の測定に使用する機器は、市販の応力波速度測定機ファコップ (FAKOPP Enterprise製) です。

ポイント解説

- ファコップを用いた応力波伝播時間の測定は、心持ち正角の木口から30cm以上内側の位置で、対角線方向に発信側および受信側センサーを差し込み、発信側センサーを打撃して測定します。正角の断面内に内部割れが存在する場合は、応力波は内部割れを迂回して伝播するため、伝播速度が遅くなります。
- 応力波伝播速度による内部割れ評価項目としては、「最長の内部割れ長さ」が最も有効です。内部割れ発生例を写真に、応力波伝播速度と最長の内部割れ長さとの関係を図1にそれぞれ示します。
- 最長の内部割れ長さを推定するための「内部割れ評価シート」を作成し、これを用いて行った実証試験結果を図2に示します。なお、このシートは心持ち平角にも適用できます。
- 応力波伝播速度を測定した断面における「内部割れ長さの合計」を推定する場合は、表を目安とします。
- センサーの差し込み傷が残りますので、仕上げ加工前の測定が望ましいです。

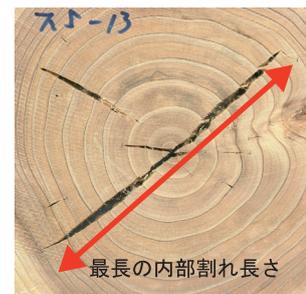


写真 内部割れ発生例 (スギ)

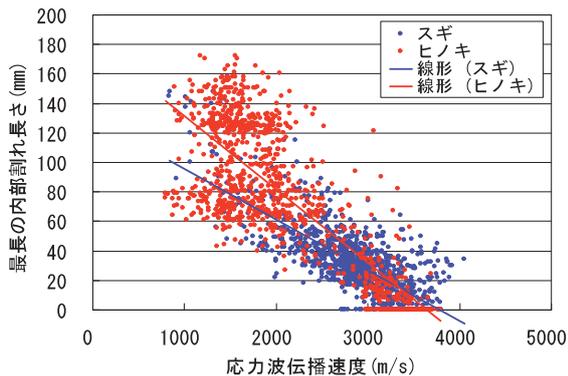


図1 応力波伝播速度と最長の内部割れ長さとの関係 (スギ、ヒノキ)
スギ ; $y = -0.0343x + 129.95$ ($R^2 = 0.5608$)
ヒノキ ; $y = -0.0497x + 180.89$ ($R^2 = 0.6354$)

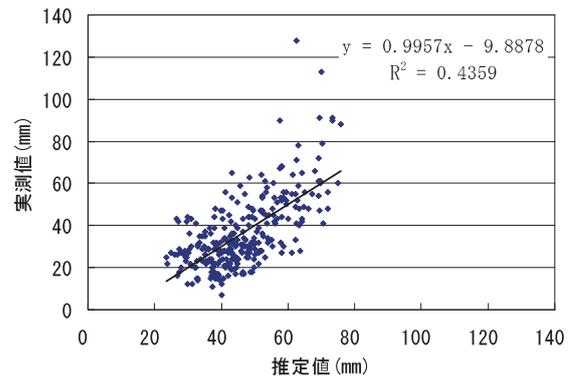


図2 最長の内部割れ長さの推定値と実測値との関係 (スギ)

表 内部割れ長さの合計と最長の内部割れ長さとの関係

(単位 : mm)

内部割れ長さの合計	100	150	200	250	300	350	400	450	500
最長の内部割れ長さ	スギ	21	35	50	64	78	93	107	136
	ヒノキ	22	49	76	102	129	155	182	235

● 内部割れ推定手順 ●

①被験材を準備します。



②被験材の木口から30cm以上内側で、断面寸法（幅と材せい）を測定します。



③含水率計により2材面の含水率を測定します。



④ファコップにより、各対角線方向で応力波伝播時間を3回ずつ測定します。



⑤各測定値を内部割れ評価シートに入力し、最長の内部割れ長さを求めます。

内部割れ評価シートVer.1

① 樹種No.の入力（スギ：1，ヒノキ：2）		<input type="text"/>
② 断面寸法の入力（mm）	幅×材せい	<input type="text"/> <input type="text"/>
③ 含水率の入力（%）	2箇所	<input type="text"/> <input type="text"/>
④ 一方の対角線方向の応力波伝播時間の入力（ μs ）	1～3回目	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
⑤ 他方の対角線方向の応力波伝播時間の入力（ μs ）	1～3回目	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
⑥ 内部割れ評価の表示 (応力波伝播時間測定位置における被験材断面の評価です。)	最長の内部割れ長さ	<input type="text"/> mm

注) 「内部割れ評価シートVer.1」は、島根県中山間地域研究センターの以下のホームページからダウンロードの上、ご利用ください。

<http://www.pref.shimane.lg.jp/chusankan/kenkyu/mokuzai/>

(2) ねじりを用いた内部割れの推定法

木材は含水率がおおよそ30%を下回ると、ねじりにくさの指標であるせん断弾性係数が変化しますが、内部割れが多いとその傾向は弱くなります。ここでは、せん断弾性係数を指標として内部割れの程度を推定する方法について解説します。

測定方法と手順

- ①被験材の高さ、幅、長さ、重量を測定し密度を求めます。
- ②図1のように中央部分を支持した被験材の両材端の材軸の中心（○の位置、曲げの周波数）と材端（●の位置、曲げとねじりの周波数）で打撃し（図1）、二つの周波数を比較することでねじりの周波数 f_n を確認します（図2）。

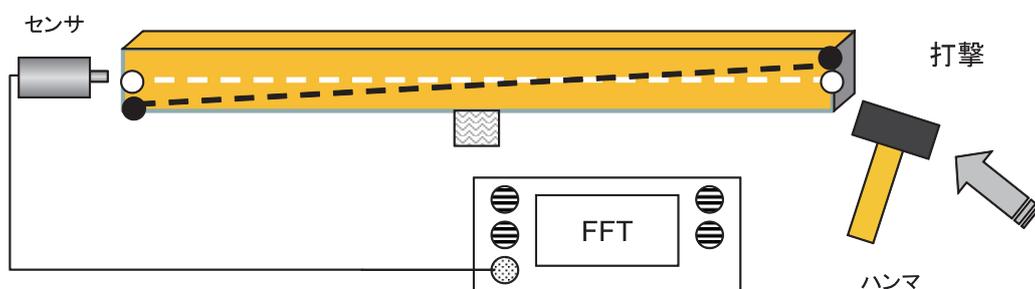


図1 動的ねじり試験の概要

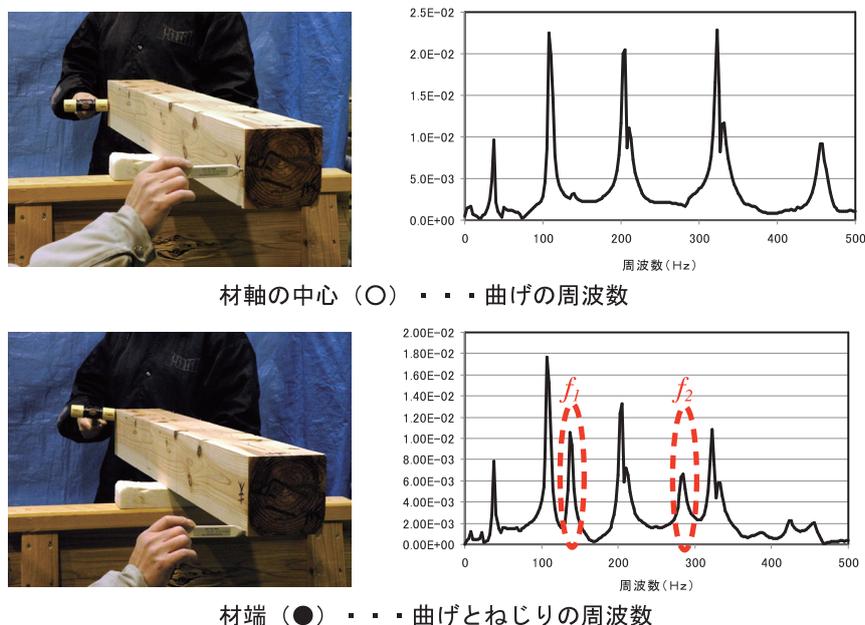


図2 ねじりの周波数の読み取り方法

材端（●）で打撃すると、材軸の中心（○）で打撃した時には現れないピーク（赤で囲んだ部分）がわかります。これがねじりの周波数 f_n で、周波数が低い方から1次（ f_1 ）、2次（ f_2 ）となります。

③せん断弾性係数 (Gd) を算出します。

$$Gd = m_n \cdot l^2 \cdot \rho \cdot f_n^2$$

(l :長さ、 ρ :密度、 f_n : n 次のねじりの周波数、 $m_1=4.730$ 、 $m_2=7.854$ 、 $m_n=\frac{\pi}{2(2n+1)}$)

④上記①～③を乾燥前と乾燥後に行い、その比を算出します。

⑤乾燥後の含水率を求めます。

⑥上記④と⑤の値を図3にプロットすると内部割れの程度が推定できます。

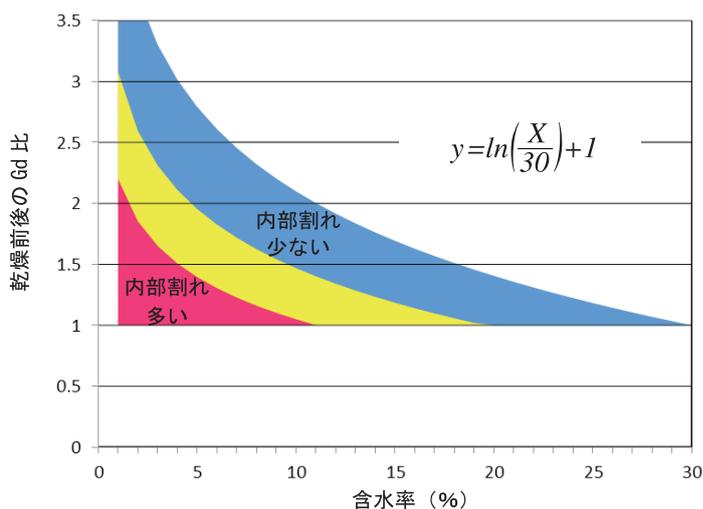


図3 内部割れを推定するための含水率とGd比の関係

ポイント解説

- せん断弾性係数を測定すれば、製品を鋸断しなくても木材の内部割れの程度を推定できます。
- せん断弾性係数を測定する方法には、動的と静的の2種類があります。
- 動的にせん断弾性係数を測定する時の注意点
 - ・周波数を測定する際、打撃する力が強いと様々な振動が励起され、ねじりに関する周波数が判別できない場合があります。また、打撃する力が弱いと周波数が読み取れない場合もあります。打撃する力は徐々に強くしていくことをお勧めします。
 - ・曲げの周波数とねじりの周波数が全く同じ部分に出現し、2回の打撃とも同じ波形となる場合があります。この場合は、高次（2次や3次）の周波数を確認すると分離できます。

(3) X線CTを用いた内部割れの評価法



写真1 X線CTによる観察

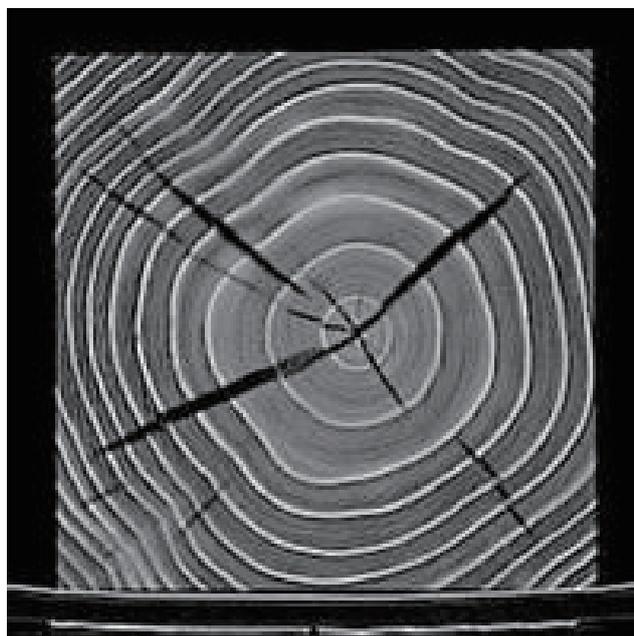


写真2 スギ105mm正角の断面観察例

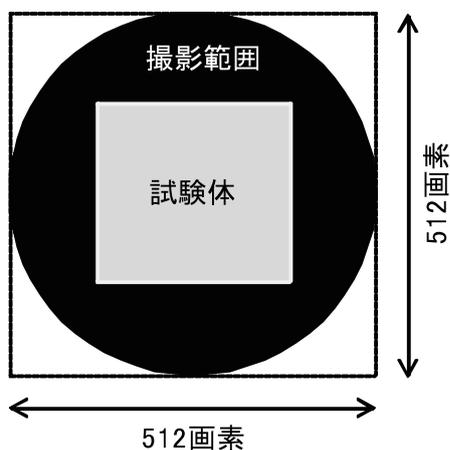


図 撮影断面の概要

X線CTによる観察像では、密度の高い部分が白く表示されるので、内部割れのほか、年輪や節も鮮明に写し出されます。

ポイント解説

- X線CTを用いると、製品を鋸断しなくても全長に渡って内部割れの有無や大きさなどを正確にチェックできます。分解能を1mm前後とした場合、正角4本あるいは平角2本を同時にチェックすることも可能です。
- さらに、節、腐朽・虫害、あて・目回り等のチェックも可能ですし、試験体の寸法や平均年輪幅等の測定もできます。心持ち材の場合は、髓の位置の変化から樹幹の曲がりや、割れの位置（髓からの角度）の変化から繊維傾斜を測定することも可能です。
- 医療用X線CTでは、図の黒い円内が観察対象となります。円の直径は試験体に合わせて変更が可能ですが、画素数は通常512×512です。したがって、120ないし150mmの正角の観察では0.4～0.5mm程度、120×300mmの平角では0.8mm程度の分解能となります。なお、撮影間隔は一般に1～10mm程度の範囲で選択できます。撮影間隔が短いほど高解像度になりますが、画像数が膨大になります。

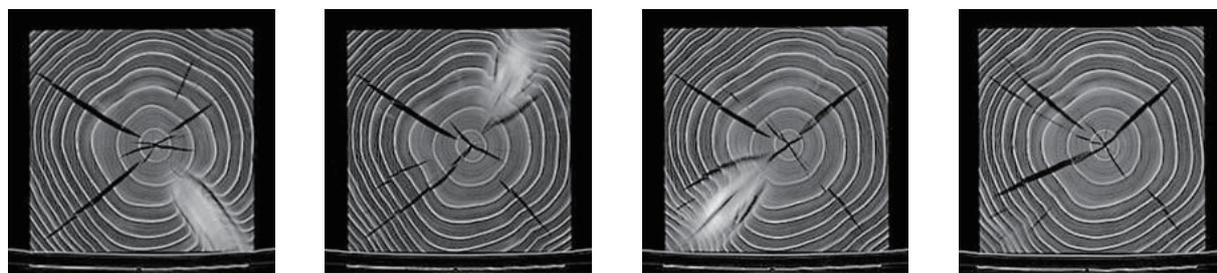
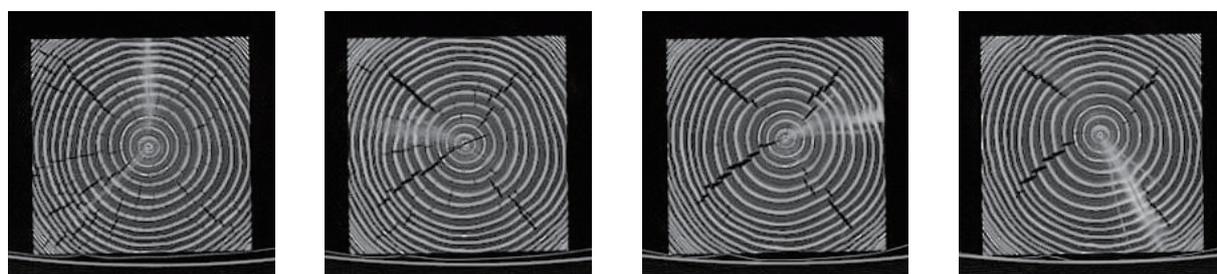


写真3 スギ105mm正角の観察例（断面写真の表示は30mm間隔）

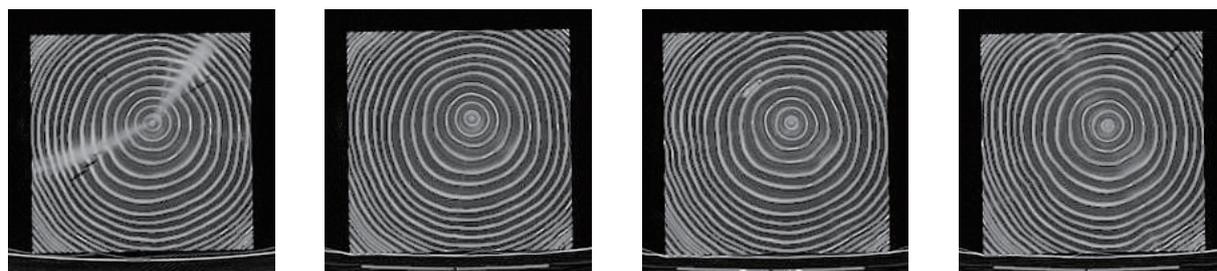


15mm

55mm

105mm

155mm

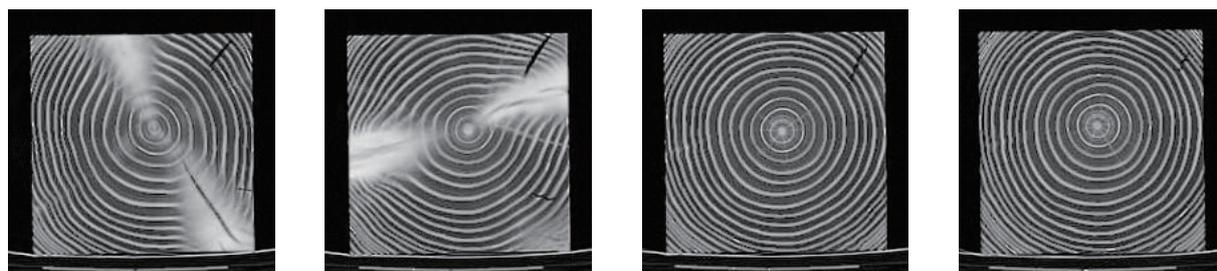


205mm

245mm

325mm

375mm



425mm

475mm

525mm

575mm



625mm

2, 275mm

写真4 カラマツ120mm正角の観察例
[写真下の数値は木口からの距離]

- 細かい割れは木口～100mmで観察されました。
- 大きな割れは木口～240mmで観察されました。
- 繊維方向の長さ約300mmの内部割れが木口から325～625mmの位置で観察されました。

(4) 画像処理技術を用いた内部割れの測定法

ImageJの使い方

- ① スキャナーにより木口面を1400×1400pixel程度の画像として読み取ります。
- ② 画像編集ソフトウェア(Microsoft Windows 標準添付のペイント等)を使って、割れ部分を黒色に塗り潰し、BMP形式で保存します(図1)。
- ③ 画像処理解析ソフトウェアImageJにファイルを読み込み、二値化します(図2)。
- ④ メニューの[Analyze]から[Set Scale]ウィンドウを開き、各辺の寸法を入力し、1 pixelあたりの長さを決定します。
- ⑤ メニューの[Analyze]から[Set Measurements]ウィンドウを開いて、測定条件を指定します(図3)。
- ⑥ メニューの[Analyze]から[Analyze Particles]を選び、開いたウィンドウで解析条件を指定(図4)して実行すると、解析結果として画像(図5)と結果一覧(図6)が出力されます。
- ⑦ 出力された表を選択・コピーして、解析評価用エクセルシートにテキストとして貼り付けます。
- ⑧ 貼り付けたテキストデータを基に、割れの箇所数や長さ、面積などが再計算され(表)、図として表示されます(図7)。

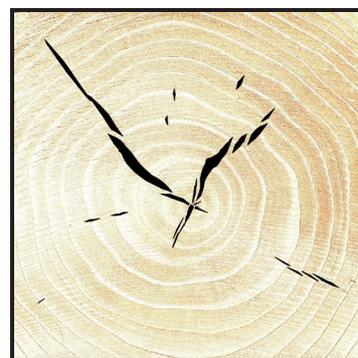


図1 割れを塗った画像

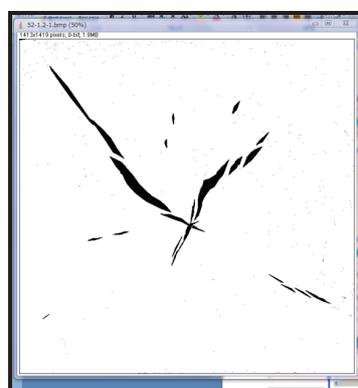


図2 二値化後の画像

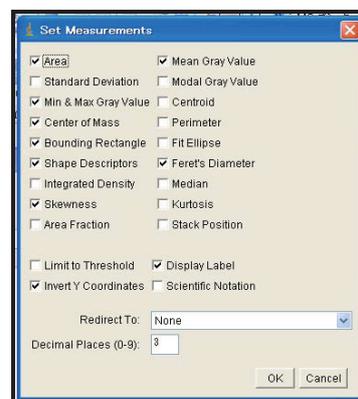


図3 測定条件の設定

注：ソフトウェアImageJ (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>)
 アメリカ国立衛生研究所で開発されたオープンソースのパブリック
 ドメインソフトウェアで、Java言語で動作します。MacやWindowsな
 ど、様々なプラットフォームに向けたパッケージが無償配布されて
 おり、ここではVer. 1.42を利用しています。

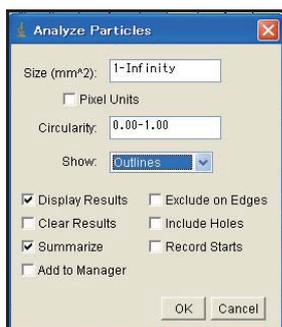


図4 解析条件の設定

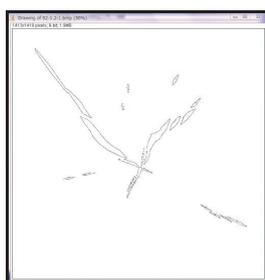


図5 解析画像

Label	Area	Mean	Min	Max	X	Y	Width	Height	Circ	Feret	Show	Fer				
1	52.12-1.bmp	57.540	255	255	25	25	24.916	92.395	10.701	110.820	26.921	33.546	0.087	42.959	NaN	126
2	52.12-1.bmp	5.164	255	255	255	77.549	95.770	76.178	96.344	2.897	4.841	0.427	5.637	NaN	59	126
3	52.12-1.bmp	2.402	255	255	255	55.099	91.706	54.607	93.758	0.934	4.246	0.351	4.254	NaN	93	126
4	52.12-1.bmp	4.940	255	255	255	87.093	84.325	84.841	86.964	4.586	4.756	0.297	6.607	NaN	46	126
5	52.12-1.bmp	2.056	255	255	255	52.511	82.853	51.990	84.416	1.189	3.227	0.383	3.237	NaN	84	126
6	52.12-1.bmp	14.180	255	255	255	83.234	76.271	80.085	81.783	6.964	7.558	0.333	10.277	NaN	47	126
7	52.12-1.bmp	10.682	255	255	255	77.404	74.923	74.904	78.217	5.011	6.794	0.355	8.442	NaN	53	126
8	52.12-1.bmp	77.302	255	255	255	42.450	67.407	32.957	78.132	22.081	20.212	0.228	29.978	NaN	131	126
9	52.12-1.bmp	51.561	255	255	255	69.074	67.176	62.590	77.113	12.869	21.996	0.197	25.354	NaN	60	126
10	52.12-1.bmp	4.948	255	255	255	62.108	56.338	61.146	62.590	1.839	0.323	0.180	4.494	NaN	78	126
11	52.12-1.bmp	10.682	255	255	255	55.810	55.852	50.531	57.455	9.766	3.992	0.253	10.369	NaN	160	126
12	52.12-1.bmp	11.287	255	255	255	58.818	48.097	54.437	53.758	7.304	15.032	0.103	16.393	NaN	66	126
13	52.12-1.bmp	2.539	255	255	255	63.837	52.042	61.911	53.240	4.556	2.378	0.228	4.934	NaN	161	126
14	52.12-1.bmp	3.065	255	255	255	36.432	50.441	33.546	51.125	5.605	1.274	0.241	5.748	NaN	12	126
15	52.12-1.bmp	3.339	255	255	255	56.379	45.986	54.522	49.342	3.822	7.389	0.130	2.204	NaN	64	126
16	52.12-1.bmp	2.712	255	255	255	26.839	48.304	24.374	49.087	5.180	1.359	0.256	5.315	NaN	12	126
17	52.12-1.bmp	2.684	255	255	255	82.206	39.953	89.427	26.669	5.265	3.142	0.188	6.069	NaN	145	126
18	52.12-1.bmp	3.058	255	255	255	96.553	30.610	93.673	32.102	5.265	3.057	0.223	6.046	NaN	156	126
19	52.12-1.bmp	3.217	255	255	255	101.570	29.030	98.999	30.828	5.860	3.652	0.179	6.860	NaN	146	126
20	52.12-1.bmp	6.772	255	255	255	107.001	27.273	102.335	29.979	9.172	5.011	0.168	10.371	NaN	155	126

図6 解析結果

表 エクセルシートによる内部割れ情報の表示例

52-1.2-1.bmp	選択	割れ長さ	割れ幅	割れ面積	木口面割れ	推定起点位置		推定終点位置		割れ長軸	円形性平均	縦横比平均
	割れ箇所数	mm	mm	mm ²	面積割合%	x座標 mm	y座標 mm	x座標 mm	y座標 mm	角度平均度	0.0~1.0	短辺/長辺
合計	20	225.3	33.0	280.1	1.94	-	-	-	-	93.9	0.24	0.15

※1.0が完全な円

抽出条件	選択割れ	割れ長さ	割れ幅	割れ面積	木口面割れ	推定起点位置		推定終点位置		割れ長軸	円形性	縦横比平均
	箇所No	mm	mm	mm ²	面積割合%	x座標 mm	y座標 mm	x座標 mm	y座標 mm	角度度	0.0~1.0	短辺/長辺
面積最大	8	29.9	4.7	77.3	0.54	32.4	78.1	54.4	58.0	137.7	0.23	0.15
割れ長さ最大	1	43.0	2.8	57.5	0.40	10.7	110.8	37.6	77.3	128.7	0.09	0.04
割れ幅最大	9	25.3	5.1	51.6	0.36	75.2	77.1	62.6	55.1	60.3	0.20	0.20

行No	割れNo	最大割れ長さ mm	最大割れ幅 mm	割れ面積 mm ²	推定起点位置		推定終点位置		割れ長軸角度度	円形性 0.0~1.0	縦横比 短辺/長辺
1	1	43.0	2.8	57.5	10.7	110.8	37.6	77.3	128.7	0.09	0.04
2	2	5.6	1.6	5.2	79.1	98.3	76.2	93.5	59.2	0.43	0.26
3	3	4.3	0.9	2.4	54.9	93.8	55.2	89.5	93.4	0.35	0.20
4	4	6.6	1.4	4.9	89.4	87.0	84.8	82.2	46.0	0.30	0.18
5	5	3.2	1.1	2.1	52.4	84.4	52.6	81.2	94.5	0.38	0.29
6	6	10.3	2.3	14.2	87.0	81.8	80.1	74.2	47.3	0.33	0.23
7	7	8.4	2.0	10.7	79.9	78.2	74.9	71.4	53.6	0.36	0.23
8	8	29.9	4.7	77.3	32.4	78.1	54.4	58.0	137.7	0.23	0.15
9	9	25.3	5.1	51.6	75.2	77.1	62.6	55.1	60.3	0.20	0.20
10	10	8.5	1.0	4.9	62.8	62.6	61.1	54.3	78.5	0.18	0.10
11	11	10.4	1.6	10.7	50.5	57.2	60.3	53.8	160.4	0.25	0.14
12	12	16.4	1.6	11.3	61.4	53.8	54.8	38.7	66.5	0.10	0.07
13	13	4.8	1.1	2.5	61.9	52.8	66.5	51.3	161.6	0.23	0.15
14	14	5.7	0.9	3.1	39.2	51.1	33.5	49.9	12.8	0.24	0.13
15	15	8.2	0.7	3.3	58.2	49.3	54.6	42.0	64.2	0.13	0.06
16	16	5.3	0.9	2.7	29.6	49.0	24.4	47.8	12.9	0.26	0.14
17	17	6.1	0.6	2.6	89.4	35.6	94.7	32.6	149.9	0.19	0.09
18	18	6.0	0.9	3.1	93.7	32.1	98.9	29.1	150.6	0.22	0.12
19	19	6.9	0.8	3.2	98.6	30.8	104.5	27.2	148.7	0.18	0.09
20	20	10.4	1.1	6.8	102.3	29.9	111.5	25.1	152.2	0.17	0.09

・エクセルファイルダウンロードURL

<http://www.pref.hiroshima.lg.jp/site/sougougizyutukennkyuuzyo/1219628260277.html>

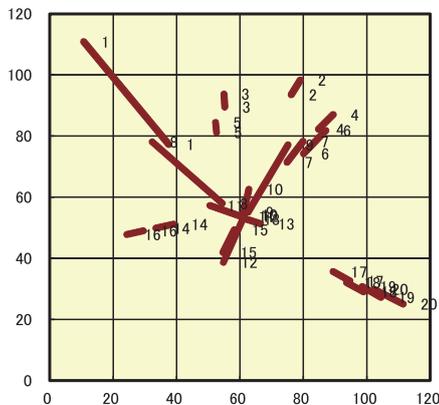


図7 割れの位置情報



図8 実際の画像

● ポイント解説 ●

- ① スキャナーで読み取った画像の割れを黒く塗り潰すのは、割れの範囲をハッキリさせるためです。
- ② ImageJは、割れの形を起・終点を結ぶ菱形様に認識して、傾きなどの情報を出力します。したがって、X字状など、いろいろな方向の割れが繋がった部分では、「割れの位置情報」が正しく表示されません。その際には、画像編集により、割れを分割する必要があります。

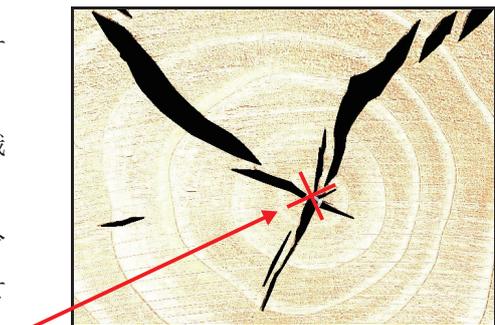


図9 割れの分割

乾燥材の生産性向上を目指したその他の技術

木材を乾燥すると、商品として扱えないものもわずかながら発生します。この量を減らすことができると、歩留まりや収益の向上に繋がります。

本プロジェクトでは、乾燥材の生産性向上に寄与すると思われる技術について検討しましたので、その成果を紹介します。

(1) 木口面硬さによる丸太の密度推定法

乾燥材の仕上がり含水率を揃えるため、乾燥前の重量によって含水率の高い材とそうでない材とを分ける「重量選別」が行われています。しかし、木材の密度が異なると同じ重さの丸太でも含水率が違ってしまいますので、重量選別の精度を上げるためには乾燥前の丸太の密度を推定する方法が必要です。

ここでは、密度の推定法と得られた密度から乾燥前含水率を算出する手順を紹介します。

● 測定原理 ●

今回開発した丸太密度の推定法は、丸太の木口に鋼球を押し当て、その反力で密度を推定するもので（図1）、木材の密度と木口面の硬さとの間に高い相関があることを利用しています（図2）。実際に反力測定装置を試作し、鋼球が受けた反力と軟X線による密度測定結果を比較すると高い相関が認められました（図3）。この方法で得られる丸太密度の推定値と重量の結果とを合わせれば、これまでの重量選別より高い精度で選別できると期待できます。

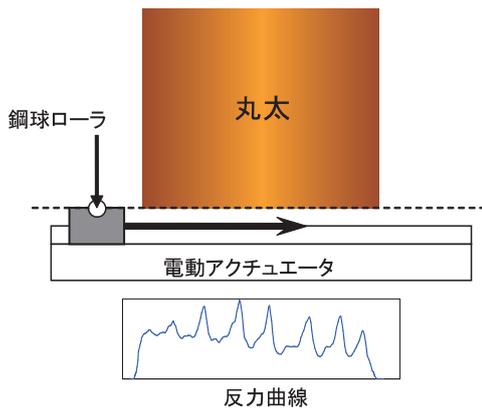


図1 連続木口面反力測定法の概略
矢印はローラ移動方向

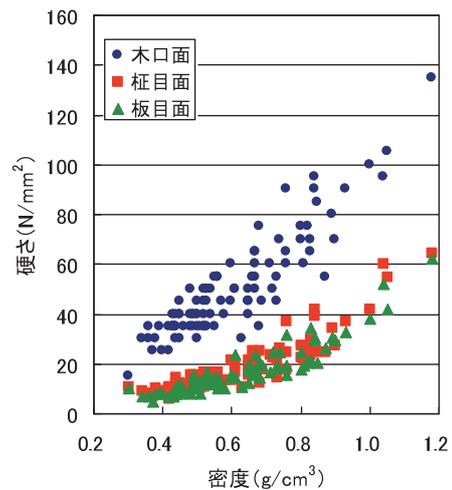


図2 密度と硬さとの関係
(参考図書⁵⁻¹⁾ のデータより作成)

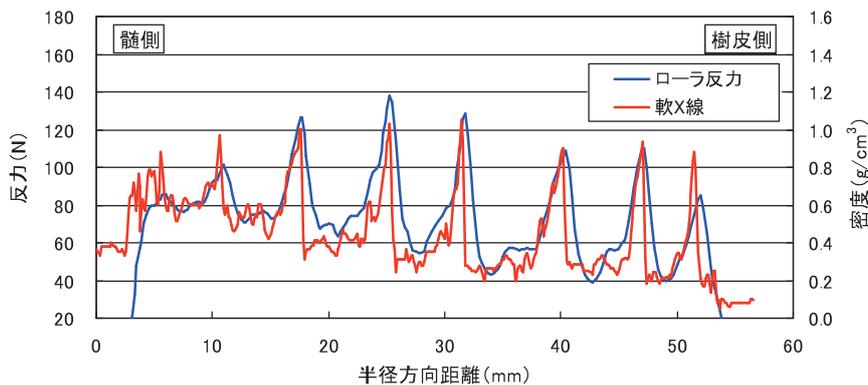


図3 反力曲線と木材の密度曲線との比較

● 丸太含水率の推定と乾燥前含水率の算出 ●

- ①直線運動する電動アクチュエータ
 (図1)のスライダにセットした鋼球ローラ(写真)が、平滑な丸太木口面に一定深さめり込み、かつアクチュエータを動かした際にローラが髓を通るようにセットします。
- ②木口面の端から端をカバーするようにローラを移動させ連続した反力曲線を得ます。
- ③連続した反力曲線の反力の総和を測定距離で除して、平均反力を求めます。
- ④平均反力と気乾密度との高い相関関係(図5)から、丸太の気乾密度を推定します。
- ⑤丸太重量と気乾密度から算出される気乾状態の丸太重量から、丸太含水率を算出します。

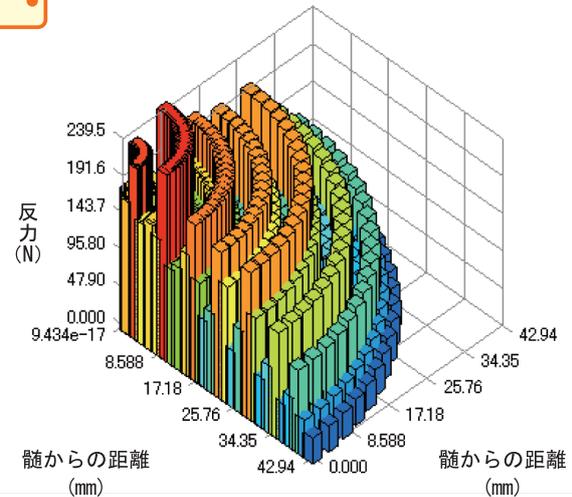


図4 木口面反力(密度)分布のイメージ

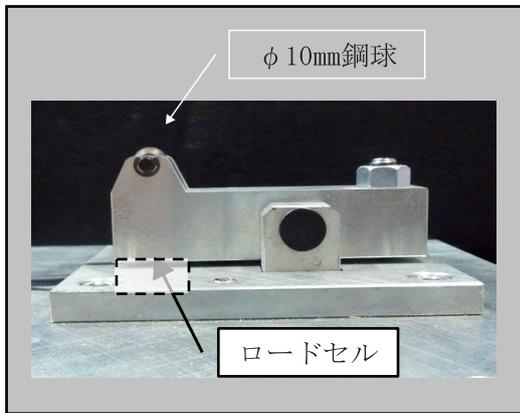


写真 考案したロードセル支持のローラ部

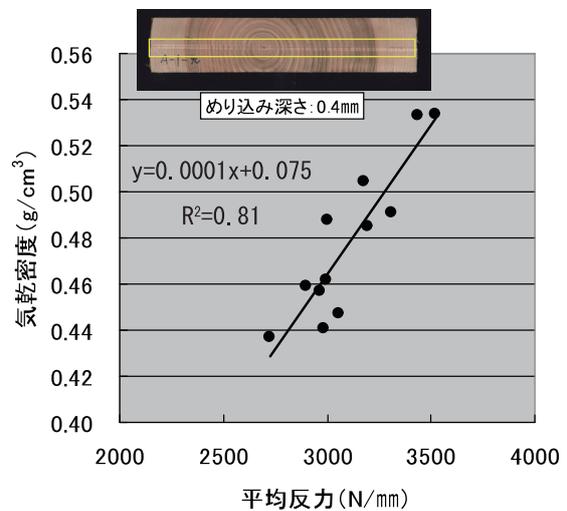


図5 考案した測定法による硬さと密度との関係
 ・気乾密度は写真の黄色枠内の値
 ・平均反力=測定間の反力の総和/測定距離

● ポイント解説 ●

この測定法の精度は木口面の平滑度と含水率に大きく左右されます。平滑度は、丸太の木口を“丸のこ”でカットした材面の平滑さであれば十分です。木材の硬さは、繊維飽和点以上では含水率の影響を受けがたいことが知られています。製材前の新しい丸太の木口面の含水率は繊維飽和点以上の場合が多いので、ここで示した手法は、丸太の密度および含水率の推定精度向上に有効であることがわかります。

(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

天然乾燥中の含水率を調べるためには、重量や専用の測定器で計測する必要があります。この測定を生産現場で実施すると、手間がかかったり、作業が重労働になったりする問題があります。そこで、天然乾燥中の含水率を推定する方法として提案されている微分方程式⁵⁻²⁾を用いて、高温セット後に行う天然乾燥中の含水率を推定できる方法を開発しました。

• 予測に必要な3つのパラメータ •

予測に必要なのは、①拡散係数（定数）、②天然乾燥開始時の含水率（初期条件、高温セット直後）、③天然乾燥終了時における表層部含水率（境界条件、平衡含水率）です。拡散係数は平均的な含水率経過を示す製材について、最も適合度の高い値を用います。富山県で行ったスギ心持ち135mm正角の拡散係数を実験により求めた結果、夏季は0.00027、冬季は0.00012でした。なお、ここで取り上げたパラメータの数値は、富山県で行ったデータを基に算出しており、地域特性を考慮する必要があります。

• シミュレーションの手順 •

- ①横断面の平均含水率と含水率分布の関係を実験によりあらかじめ求めておきます（図1の式1～4）。
- ②天然乾燥開始時（高温セット処理直後）の横断面平均含水率を式に代入すると、図2のような横断面の含水率分布が得られます。
- ③仕上がり（乾燥終了）時の表層の平衡含水率を、表の天然乾燥場所の環境条件から設定します。
- ④シミュレーションにより方程式を解きます。
- ⑤天然乾燥に必要な日数が得られます。

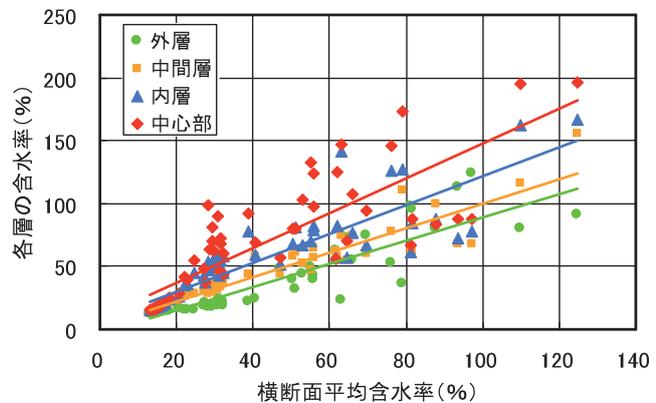


図1 平均含水率と各層の含水率との関係式
(富山県産スギ・高温セット24時間処理の例)

外層 (第1層) $y=0.934x-4.100$ ($R^2=0.831$)・・・式1
 中間層 (第2層) $y=0.974x+2.992$ ($R^2=0.885$)・・・式2
 内層 (第3層) $y=1.147x+7.044$ ($R^2=0.885$)・・・式3
 中心部 (第4層) $y=1.388x+8.937$ ($R^2=0.697$)・・・式4
 ここで、 x =平均含水率、 y =各層の含水率

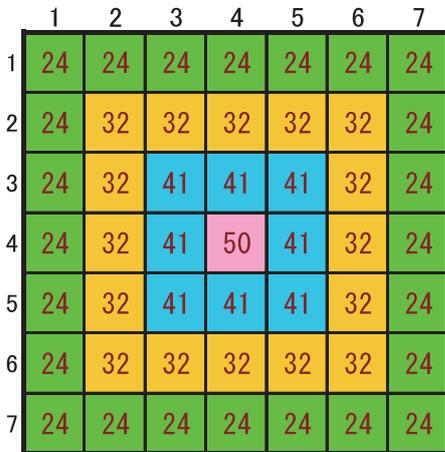


図2 モデル化した横断面含水率分布

- : 外層 (第1層)
- : 中間層 (第2層)
- : 内層 (第3層)
- : 中心部 (第4層)

● 数値シミュレーションの結果 ●

夏季の天然乾燥における重量法と数値シミュレーションの関係を図3に示します。重量法と数値シミュレーションの結果はほぼ一致していました。

初期含水率（天然乾燥開始時）および含水率分布が同一の製材について、季節別の天然乾燥中の含水率経過（数値シミュレーション）例を図4に示します。たとえば、初期含水率30%の製材（図2）が天然乾燥によって20%に達するには、夏季が約1.5ヶ月、冬季が約6ヶ月必要であると計算されました。

ここで示した数値シミュレーションを活用することにより、天然乾燥の必要日数や天然乾燥中の含水率の推移を把握することができます。

表 数値シミュレーションに用いた環境条件

	気温 (°C)	湿度 (%)	平衡含水率 (%)
夏季 (6~10月)	25.5	63.8	12.7
冬季 (12~5月)	9.4	70.4	16.7
	18.4~31.6	41.5~81.1	6.9~18.2
	1.6~23.4	44.4~87.8	8.7~25.0

・ 上段が平均値、下段が最小値~最大値

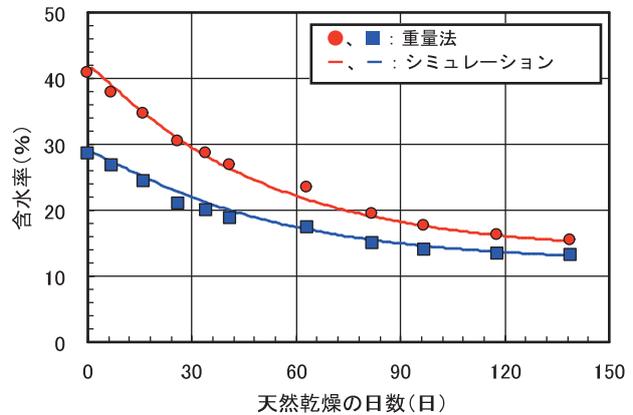


図3 数値シミュレーションの適合性（富山県）

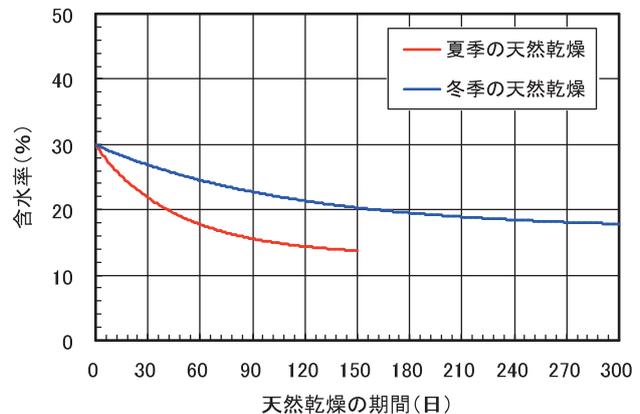


図4 季節の違いによる含水率の経過例（富山県）

5. 乾燥材の生産性向上を目指したその他の技術

(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

● 心持ち材を加圧過熱蒸気処理によって材面および内部割れともに少なく乾かす方法 ●

通常の蒸気式乾燥機では、温度が100℃を超えると、制御できる湿度の上限が100%から徐々に低くなるので、温度を上げれば乾燥が速くなる反面、割れやすくなります。圧力容器内で加圧蒸気によって乾燥する「過熱蒸気乾燥機」は、100℃より高くても湿度を100%まで制御できるので、高温・高湿条件で熱処理できます。ただし、高温・高湿条件であまりに長時間処理すると木材が変色し強度も低下するので、蒸気式乾燥や天然乾燥など、ほかの乾燥法の割れ防止のための前処理としての利用が有効です。

以下に、過熱蒸気のみで乾燥した場合と、過熱蒸気処理を前処理として高周波加熱減圧乾燥試験を行った結果を示します。

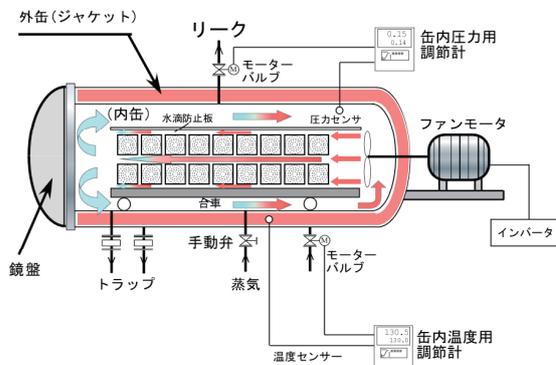


図1 装置の概略図



過熱処理→RFV 過熱蒸気乾燥

写真 乾燥方法による材色の違い
- 過熱蒸気のみでは暗色化が進む -

表1 乾燥試験の結果

試験方法	前処理		乾燥方法			結果 ^{*2)}		
	蒸煮	前処理条件	乾燥方式	条件	時間	材面割れ	内部割れ	色差 ΔE^*_{ab}
過熱蒸気処理 ↓ RFV ^{*1)}	100℃ 6h	・温度 115℃ ・相対湿度 100→65% ・処理時間 12h	RFV ^{*1)}	・圧力 20kPa ・投入エネルギー 5kW/m ³	94h	15 cm/m	0	5.8
過熱蒸気乾燥	130℃ 6h	—	過熱蒸気	・温度 130℃ ・相対湿度 100→60%	66h	0	0	15.8

*1) RFV 高周波加熱減圧乾燥
*2) 材面割れ 材1mあたりに生じた材面割れの長さ合計
 ΔE^*_{ab} L*a*b*表色系による色の違いを示す指標
ここでは、天然乾燥材との色の違い

● ポイント解説 ●

- 130℃の過熱蒸気のみで乾かすとスギ心持ち正角が約3日で材面および内部割れが非常に少なく仕上がりますが、材色が暗くなり強度が低下するので用途が限られます。
- 前処理として使えば、変色、材面割れ・内部割れともに少なく乾かせます。
- 高周波乾燥のほか、蒸気式乾燥、天然乾燥の前処理としても使えます。

● 高温・高圧蒸気処理の効果 ●

たとえば、製材と乾燥前に工場内で積み上げたまま長時間待機した場合、表面含水率が下がり（図2）、乾燥によって割れやすくなります（表2）。

過熱蒸気処理は、最初に装置内空気を水蒸気で置換するため蒸煮処理を数時間行いますが、この蒸煮処理には木材の表面が乾いている場合には水分を補給する効果（図3）があり、また十分に温度が高ければ接線方向成長応力が解放されて、背割りを入れた心持ち材なら背割り幅が狭くなり（図4）、背割りのない心持ち材の場合には表面に圧縮応力が生じる効果があります。たとえば、高温セット処理をする直前に製材の表面に十分な水があり、かつ圧縮応力があれば、表面が割れにくくなると期待できます。

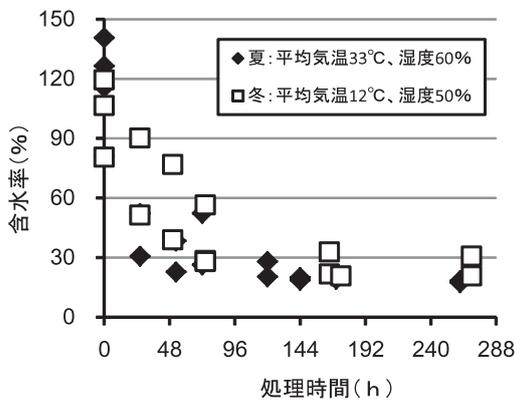


図2 屋内静置材の表面含水率の変化

表2 表面含水率の異なる製材の乾燥による割れ^{*)}

乾燥開始時の表面含水率の状態	初期含水率	乾燥終了時含水率	乾燥後の材面割れ cm/m
低い (屋内静置)	141	→ 18	25
	65	→ 12	62
	32	→ 9	10
高い (製材直後)	187	→ 20	5
	82	→ 17	15
	25	→ 8	0

*) スギ正角、上下段はエンドマッチした試験材

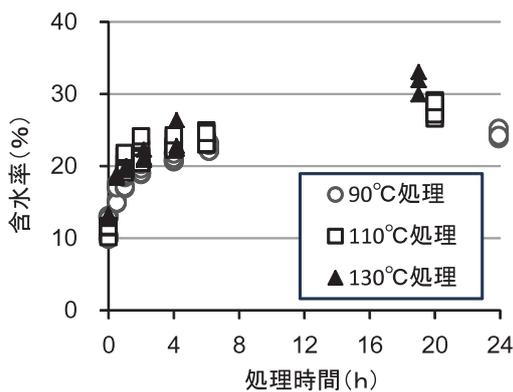


図3 蒸煮処理による含水率変化

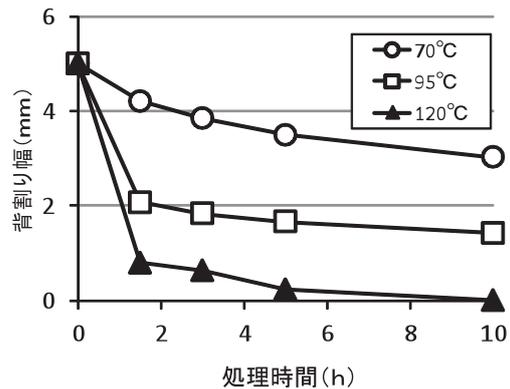


図4 蒸煮による背割り幅の変化

● ポイント解説 ●

- 表面が乾燥しすぎて、乾燥開始時に割れていると蒸煮の効果はあまりないので、乾燥前に割れないように保管することが第一です。
- 温度が高いほど短時間で効果が得られますが、温度が高すぎると変色しやすくなります。
- 蒸煮処理のためだけに過熱蒸気処理装置を導入するのではコストが高くなりますので、割れ防止の熱処理装置としての導入が有効です。

ここでは、主に高温セット処理した乾燥材に関して寄せられる疑問・質問について、本プロジェクトで得られた成果をもとに回答案を示しました。参考にしてください。

○高温セット処理を用いた乾燥法について

- Q.01** なぜ材面割れを抑えられるの？ …… 54
- Q.02** 内部割れが生じてしまうのはどんな時？ …… 55
- Q.03** 高温セット処理時の乾球温度は120℃でなければならないの？ …… 56
- Q.04** 内部割れは含水率が何%になると発生するの？ …… 57
- Q.05** 材面割れや内部割れの発生量は樹種によって違うの？ …… 58
- Q.06** 適切に乾燥しても木口付近には割れが多く発生します。
この割れを防ぐ方法は無いの？ …… 59
- Q.07** 材色変化を防ぐ方法はあるの？ …… 60

○他の乾燥法との組み合わせ

- Q.08** 高温セット処理後、天然乾燥した場合、どれくらいの乾燥時間が必要なの？ …… 61
- Q.09** 葉枯らし材や屋外で長く放置した未乾燥材に高温セット処理を用いた乾燥法を適用すると材面割れがたくさん発生するのはなぜ？ …… 62

○高温セット処理を用いた乾燥法で生産した乾燥材の品質管理

- Q.10** 乾燥することによってどれくらい収縮するの？ …… 63
- Q.11** 高周波式含水率計で水分管理する際の注意点は？ …… 64

○その他の乾燥法

- Q.12** 自然エネルギーを活用した乾燥方法はあるの？ …… 65

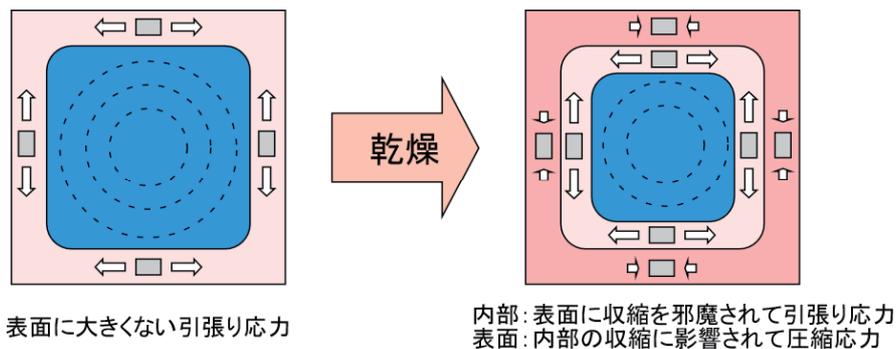
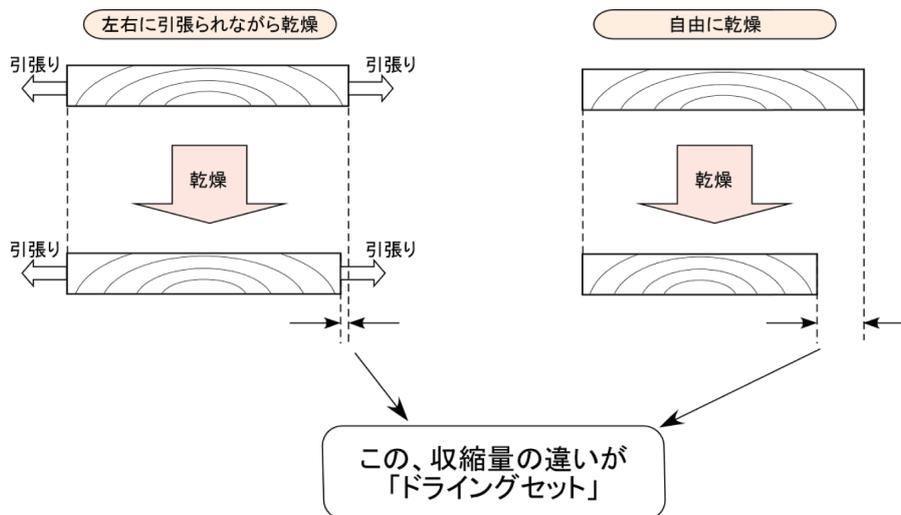
○割れと強度性能との関係

- Q.13** 内部割れと強度の関係は？ …… 66
- Q.14** 材面割れや背割りは製材の強度性能に影響を及ぼすの？ …… 67
- Q.15** 材面割れや背割りは接合部の性能に影響を及ぼすの？ …… 68
- Q.16** 内部割れは接合部の性能に影響を及ぼすの？ …… 69
- Q.17** 高温セット処理を用いた乾燥法をスギ材に適用した場合、
強度性能に及ぼす影響について、品種の違いによる差はあるの？ …… 70
- Q.18** 心去り材を高温セット処理を用いて乾燥した場合、どうなるの？ …… 71

Q.01 なぜ材面割れを抑えられるの？

A.01

心持ち材の表面を柔らかくして水分を取り除くため、乾燥しても収縮が小さく、表面が割れにくくなります。



- ①心持ち材の表面が高温で柔らかくなります。
- ②表面が乾いて収縮しますが、まだ乾いていない内部の細胞に邪魔されて接線方向に引張られながら乾燥します。(上図左と同じ)
- ③表面は乾燥してもあまり縮まないで、引張り応力が小さく、割れません。
- ④その後、内部が乾燥すると、内部の細胞も縮もうとするので、あまり縮まなかった表面の細胞と一緒に縮もうとします。
- ⑤表面の細胞はすでに乾いており、簡単には縮みません。このため、内部の細胞の収縮にもなって、接線方向に圧縮されることになり、より割れにくくなります(応力の逆転と呼ばれます)。

Q.02 内部割れが生じてしまうのはどんな時？

A.02 心持ち材の内部に強い引張り応力 (縮む力・割れようとする力) が発生するときに内部割れが発生します。

心持ち材の表面が速く乾燥して、内部の乾燥が遅れると、上段図のように表面ばかりが大きく収縮しようとしています。

その結果、表面の細胞は内部のまだ縮んでいない細胞に収縮を邪魔されるので、接線に沿った方向に引張られた状態になります。

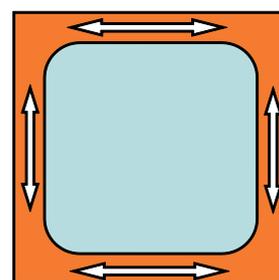
引張られた状態で乾燥するので、ドラインゲットが形成されて、表面は長い寸法を保ったまま、非常に低い含水率まで乾燥してしまいます。

その後、内部が乾燥を始めると、内部の細胞は、本来より長い寸法を保っている表面の細胞に収縮を邪魔されます。このため、内部の細胞も接線方向に引張られ、結果として材内部に引張り応力が生じ、これが内部割れを生じさせる力になります。(中、下段図)

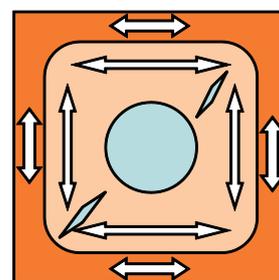
この引張り応力が強すぎると、内部割れを生じます。

乾燥初期に表面で生じるドラインゲットが大きすぎると、つまり、表面があまりに長い寸法のまま乾燥してしまうと、内部の細胞の収縮が大きく邪魔されるため内部に生じる引張り応力は大きくなり、内部割れも大きくなります。

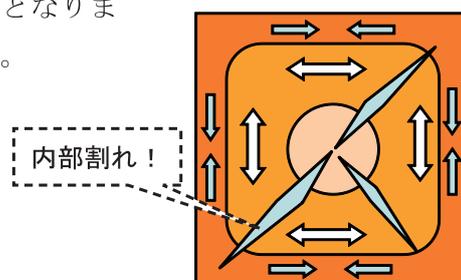
このような理由から、高温セット処理は処理時間が長すぎると内部割れが大きくなります。一方、処理時間が短すぎると、表面のセットが不十分となって材面割れの原因となりますので、処理時間を適切に設定することが重要です。



表面付近のみの乾燥



内部の収縮開始



縮みの少ない表面が内部の収縮を邪魔

Q.03

高温セット処理時の乾球温度は
120℃でなければならないの？

A.03

樹種や乾燥方法によっては
乾球温度が120℃以外でも有効です。

高温セット処理を用いて表面を割らずに乾燥するためには、材温を上げて材の表層を軟らかくしておくことが重要です。そのため、乾燥中に割れずに軟らかくなる適切なセット条件（温度範囲、乾燥速度（湿度）、処理時間）を採用する必要がありますが、それは、樹種や含水率などによって異なると考えられます。

これまでの多くの試験結果から、スギ心持ち無背割り正角を高温セット処理する場合、適切な乾湿球温度条件として、乾球温度120℃、湿球温度90℃が採用されています。

しかし、今回の試験結果によると、アカマツやヒバなどにおいては、乾球温度110℃、湿球温度90℃の方が有効な事例もあります（P20、P24参照）。

参考までに、高温セット処理後に発生した材面割れおよび内部割れについて、表に示します。

表 高温セット処理後に発生した材面割れおよび内部割れ（4m材、平均値）

樹種	高温セット処理条件				材面割れ長さ (mm)	内部割れ長さ (mm)	高温セット処理後 の含水率 (%)
	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	圧力(kPa)	処理時間(h)			
スギ	115	-	71	18	1,039	37.4	45.1
	115	-	71	24	903	48.2	29.2
	110	-	58	18	1,988	49.9	39.5
ヒノキ	100	-	71	22	1,095	3.4	23.2
	110	-	71	17	92	44.8	20.9
	100	-	71	24	186	10.2	22.5
アカマツ	110	90	-	12	5,285	0	25.3
	110	90	-	24	4,965	29.3	20.8
	120	90	-	12	8,998	7.2	23.1
	120	90	-	24	9,186	48.0	17.7
	130	90	-	12	7,592	70.9	17.5
	135	95	-	12	4,575	161.9	19.4
ヒバ	110	90	-	12	1,345	36.1	24.8
	110	90	-	24	1,201	86.1	23.3
	120	90	-	12	1,254	119.8	25.9
	120	90	-	24	1,155	183.6	20.3

注：材面割れ長さは1本あたりの総延長を示す。

内部割れ長さは試験材中央部に現れた内部割れ長さの総延長を示す。

圧力(kPa)は、熱風減圧乾燥における乾燥機内の圧力を示す。

Q.04 内部割れは含水率何%になると発生するの？

A.04 正角の場合、含水率30%前後から内部割れの危険が生じます。

高温セット処理を行った正角は、そのまま高温乾燥（100℃以上の乾燥）を続けると内部割れの発生の危険が大きくなります。

図はスギ心持ち無背割り正角を高温セット処理を用いて乾燥した時の内部割れ発生状況です。

高温セット+高温乾燥では、多くの内部割れが発生し、内部割れの発生が確認される時の含水率はおよそ30%前後であることがわかります。（まれにこれ以上の含水率でも発生する例もあります。）

また、内部割れは、含水率10%を切るあたりから急激に増加しているのも注目すべき点です。

これに対して高温セット+中温乾燥や高温セット+高周波減圧乾燥では、低含水率域であっても内部割れの発生が非常に少なくなっているのがわかります。これは、高温セット処理後の乾燥をいずれの乾燥でも100℃以下としていることが影響していると考えられます。



写真 スギ材に発生した様々な内部割れ

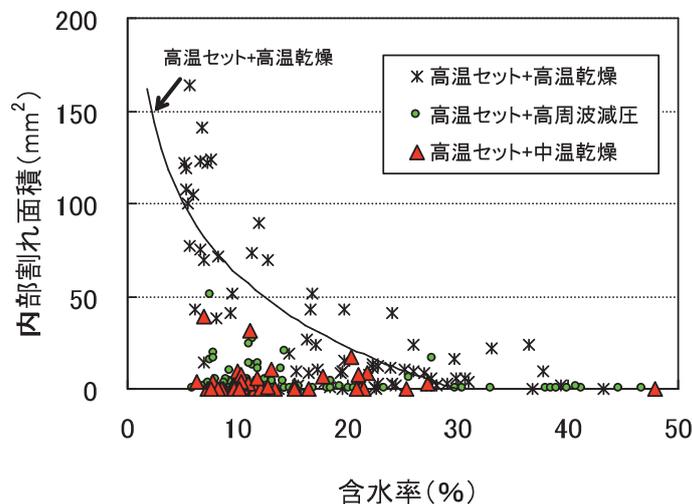


図 仕上がり含水率と内部割れとの関係（スギ）⁶⁻¹⁾

Q.05

材面割れや内部割れの発生量は樹種によって違うの？

A.05

アカマツは材面割れが発生しやすく、カラマツは内部割れが少ない樹種です。

材面割れや内部割れの発生の多少は、木材の接線方向の横引張り強さに影響します。つまり、横引張り強さの弱い木材が割れやすく、強い材が割れにくい木材ということになります。

木材は乾燥する時に応力が発生します。この応力は引張り応力と圧縮応力がありますが、割れに関与するのは引張り応力です。この引張り応力が横引張り強さの限度を超えると割れが発生することになります。

引張り応力は、乾燥初期には表面部に、乾燥中期から末期には内部に働くため、乾燥初期に材面割れが、乾燥中期から末期にかけて内部割れが発生しやすくなります。

割れようとする力に耐える横引張り強さは、樹種によって異なるため、割れの発生量も樹種によって異なります。アカマツは材面割れが発生しやすく、カラマツは内部割れが少ない樹種です（図1、図2）。

もちろん、割れの発生しやすい樹種は、極力割れが発生しないように乾燥条件をコントロールします。

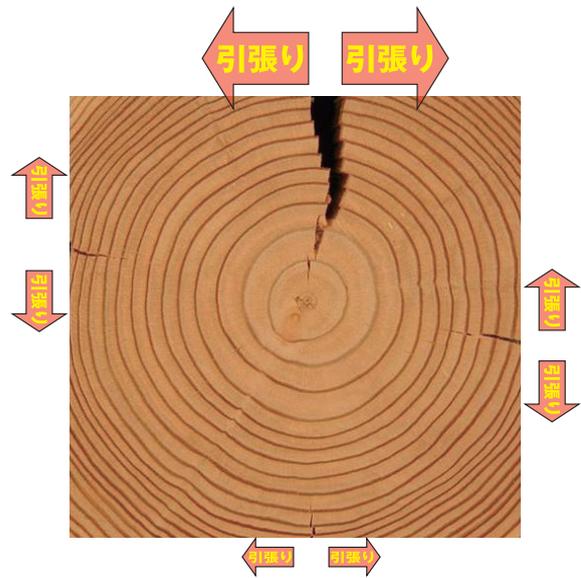


写真 心持ち材に働く引張り応力（イメージ）

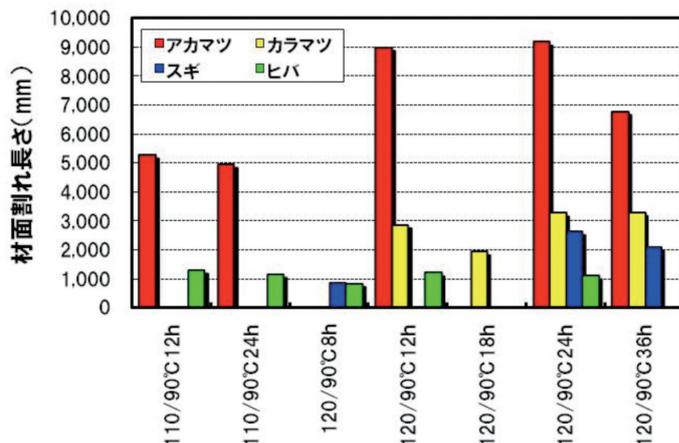


図1 高温セット条件別の材面割れ長さ

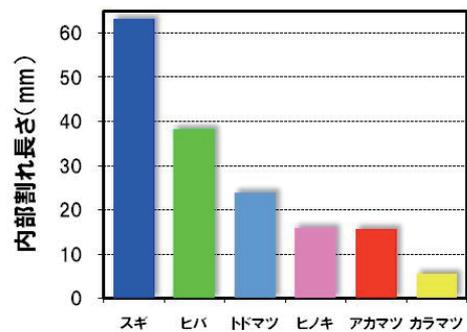


図2 樹種別の内部割れ長さ（平均値）
（本マニュアル書での推奨スケジュール）

Q.06

適切に乾燥しても木口付近には割れが多く発生します。
この割れを防ぐ方法は無いの？

A.06

**木口からの乾燥の抑制、
あるいは乾燥による木口付近の変形の抑制が
効果的です。**

木材の組織構造上、木口は板目、まさ目に比べ最も乾燥しやすい材面です。そのため乾燥初期に発生する割れの多くは木口割れになります。木口割れを少なくするためには、木口からの乾燥を抑えること、木口付近の乾燥による変形を物理的に抑制することがポイントになります。

木口割れ抑制効果が期待できる方法として以下のことが挙げられます。

- ①製品の両端を丸鋸等で平滑にカットし材長を揃えます。
- ②栈積みを台車に載せるとき、木口に強い風が当たらないように製品の間隔、製品と乾燥室内の奥およびドア側との隙間を狭く置きましょう。大きな空間には、しゃ風板の利用が効果的です。
- ③栈積み時、両木口には少し幅の広い栈木を材端に揃えて丁寧に置きましょう。材長が揃っていることで、栈木による木口割れ抑制効果の増加が期待されます。また、栈木の厚みむらは、製品を押える力にばらつきを生じさせ、木口割れ抑制効果が低減します。栈木の厚み管理は大切です。
- ④木口付近の変形抑制には、栈積みにおもしを載せることが効果的です。おもしは、乾燥中に栈木が製材にめり込まない程度のものを使うことが肝要です。

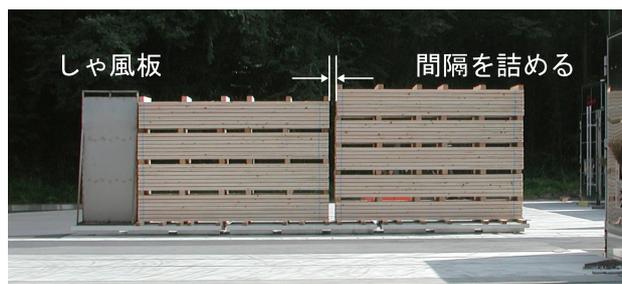


写真1 台車への栈積み状況

入炉時、材と乾燥室内の奥、ドア側との隙間を狭くしましょう

材端の栈木位置に配慮を！



写真2 栈積みした材端部の様子



写真3 木口部分をカバーした天然乾燥材

また、木口からの乾燥を抑える方法として、木口に塗料等を塗る、木口をシートで覆うのも効果があります。この方法は天然乾燥で行われることがあります。

Q.07 材色変化を防ぐ方法はあるの？

A.07 乾球温度を低くすると 材色変化が小さくなります。

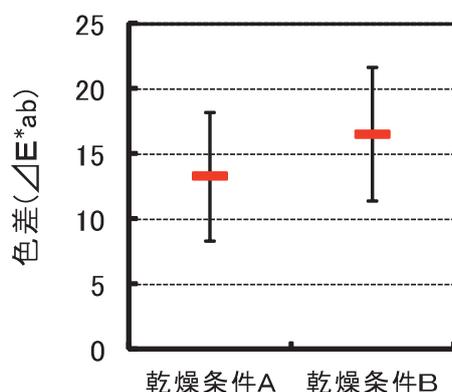
高温で長時間の乾燥を行うと、酸化などの化学反応により、材色変化が大きくなります。高温セット処理後の乾燥温度を低くすれば、材色変化を小さくすることができますが、仕上がりまでの期間が長くなります。

したがって、製品に求められる品質に応じて材色と仕上がりまでの期間を考慮し、乾燥スケジュールを選択することが必要です。

表 乾燥条件

乾燥条件	蒸煮 DBT/WBT	高温セット処理 DBT/WBT	乾燥 DBT/WBT	乾燥時間 合計	100℃以上で乾燥した時間	乾燥後 含水率(%)
A	8h 95℃/95℃	18h 120℃/90℃	120h 90℃/60℃	146h	18h	14
B		36h 120℃/90℃	72h 110℃/80℃	116h	108h	7

注)h:時間、DBT:乾球温度、WBT:湿球温度



左の図は、ヒノキ心持ち無背割り正角を条件の異なる二つの方法（乾燥条件A、乾燥条件B）で人工乾燥した時の材色の違いを調べたものです。同一のヒノキ心持ち無背割り正角から人工乾燥する試験材と天然乾燥する試験材を採取して、それぞれ乾燥後に材色（ $L^*a^*b^*$ 表色系）を測定し、それらの値から色の違い、すなわち色差（ ΔE^*ab ）を求めています。（詳細は下記式）

結果、乾燥条件Bの方が乾燥条件Aよりも材色の違いが大きくなりました。これは、乾燥条件Bの乾燥時間合計が乾燥条件Aよりも30時間短いにもかかわらず100℃以上の高温で乾燥を行っている時間が長いためと考えられます。

図 天然乾燥後の材色を基準とした乾燥条件と色差の関係

○色差算出式は以下のとおりです。

$$\text{色差算出式 } \Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

ΔE^*ab : 色差(ここでは、人工乾燥後と天然乾燥後の材色の違いを示します。)

L^* : 明度指数 (指数100が白、0が黒を表します)

a^* 、 b^* : クロマティックネス指数

(a^* は赤をプラス、緑をマイナスで表し、 b^* は黄をプラス、青をマイナスで表します)

ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* : 人工乾燥後の L^* 、 a^* 、 b^* 計測値と天然乾燥後の L^* 、 a^* 、 b^* 計測値の差

Q.08

高温セット処理後、天然乾燥した場合、
どれくらいの乾燥期間が必要なの？

A.08

樹種、季節、実施場所によってさまざまで、
一般に長い期間を要します。

正角などを乾燥するにあたり、材面割れを防ぐため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も広く採用されています。この方法の長所としては、エネルギーコストを削減できること、材色変化を小さくできることなどが挙げられます。

必要とされる天然乾燥期間は樹種、季節、実施場所によって様々で、いくつかの実験結果を下の表に示します。

表 高温セット処理後の天然乾燥期間の例

樹種 (柱材)	寸法 (mm)	高温セット処理条件		天然乾燥条件			含水率[平均]			備考
		乾湿球 温度	高温セット 処理時間	高温セット処理後の 天然乾燥期間	天然乾燥 実施場所	天然乾燥 開始時期	乾燥前	高温セット処理後 (天然乾燥開始時)	乾燥後	
スギ	135× 135× 3,000	D.B.T.120℃ W.B.T. 90℃	24時間	140日 (約4.7ヶ月)	富山県 (屋内)	夏季 (2009年6月)	71.2%	39.2%	14.6%	
	135× 135× 3,000	D.B.T.120℃ W.B.T. 90℃	24時間	190日 (約6.3ヶ月)	富山県 (屋内)	冬季 (2009年12月)	72.8%	28.9%	18.0%	
	135× 135× 1,800	D.B.T.120℃ W.B.T. 90℃	24時間	230日 (約7.7ヶ月)	奈良県 (屋外)	冬季 (2010年1月)	77.2%	41.9%	15.4%	
	135× 135× 1,800	D.B.T.115℃ 圧力71kPa	18時間	200日 (約6.7ヶ月)	愛媛県 (屋内)	冬季 (2010年2月)	92.6%	45.7%	13.7%	
ヒノキ	135× 135× 1,800	D.B.T.120℃ W.B.T. 90℃	18時間	180日 (約6ヶ月)	三重県 (屋外)	冬季 (2009年12月)	34.3%	19.6%	16.2%	
	135× 135× 1,800	D.B.T.110℃ 圧力71kPa	17時間	200日 (約6.7ヶ月)	愛媛県 (屋内)	冬季 (2010年1月)	38.3%	22.4%	14.3%	
カラマツ	145× 145× 1,800	D.B.T.120℃ W.B.T. 90℃	18時間	350日 (約11.7ヶ月)	長野県 (屋外)	秋季 (2010年8月)	40.3%	23.6%	15.9%	
アカマツ	145× 145× 1,800	D.B.T.120℃ W.B.T. 90℃	12時間	230日 (約7.7ヶ月)	長野県 (屋外)	冬季 (2010年1月)	67.4%	23.1%	14.6%	
トドマツ	118× 118× 1,800	D.B.T.120℃ W.B.T. 98℃ D.B.T.105℃ W.B.T. 85℃	4時間 + 24時間	190日 (約6.3ヶ月)	北海道 (屋外)	秋季 (2010年9月)	41.0%	21.2%	13.3%	冬季は、製材 工場内で天然 乾燥した
ヒバ	145× 145× 1,800	D.B.T.110℃ W.B.T. 90℃	12時間	310日 (約10.3ヶ月)	長野県 (屋外)	秋季 (2010年9月)	36.7%	25.9%	17.1%	
	145× 145× 1,800	D.B.T.110℃ W.B.T. 90℃	12時間	461日 (約15.4ヶ月)	石川県 屋内	秋季 (2010年9月)	35.2%	23.6%	16.6%	

注: D.B.T.とは、乾球温度を示す。
W.B.T.とは、湿球温度を示す。
圧力(kPa)とは、熱風減圧乾燥における乾燥機内の減圧度を示す。

Q.09

葉枯らし材や屋外で長く放置した未乾燥材に高温セット処理を用いた乾燥法を適用すると材面割れがたくさん発生するのはなぜ？

A.09

表面の含水率が低くなっているためです。

屋外に放置された未乾燥材は、表面部の含水率傾斜が大きくなった状態で乾燥工程に入ります。したがって、放置された未乾燥材を乾燥機内に栈積みして乾燥を開始する際、乾燥機内の湿度が低いまま温度を上昇させると、表面の乾燥がさらに進み、含水率傾斜も大きくなり、非常に割れやすい状態になります。したがって、高温セット処理を行う場合に限らず、葉枯らし材や屋外に長く放置した未乾燥材を乾燥機で乾燥する際には、乾燥初期の昇温時、乾湿球温度差がないように、つまり、生蒸気のみで昇温することが必要です。

なお、広葉樹板材の乾燥においても、天然乾燥（予備乾燥）後に乾燥機で乾燥する際には、同様の理由から乾燥初期条件を通常より緩やかな条件とします。

Q.10 乾燥することによってどれくらい収縮するの？

A.10 下の表のとおり 機種や乾燥条件によってさまざまです。

木材を含水率の高いまま使用すると、次第に乾燥して収縮（ちぢみ）がおこり、狂いや隙間ができます。ですから、あらかじめ十分に乾燥して収縮させておき、使用環境に適した状態にしておくことで、トラブルを最小限に抑えることができます。

木材の収縮の度合いは『収縮率』で表し、下式で計算します。

$$\text{収縮率（％）} = \frac{\text{乾燥前の寸法} - \text{乾燥後の寸法}}{\text{乾燥前の寸法}} \times 100$$

高温セット処理を用いた乾燥法を適用した正角の収縮率は、下の表のとおり、樹種や乾燥条件によって様々です。収縮率を把握しておくことで、荒挽き寸法を考える際の参考にしてください。

表 心持ち正角の収縮率の測定例

樹種 (柱材)	乾燥処理条件			収縮率(%)			このときの含水率(%)			備考	
	乾燥方法	乾燥スケジュール		最小	平均	最大	収縮率が 最小の材	平均	収縮率が 最大の材		
		高温セット	乾燥								
スギ	蒸気式	D.B.T.120℃ W.B.T. 90℃ 24時間	D.B.T. 90℃ W.B.T. 60℃ 184時間	1.1	2.4	4.2	27.1	20.4	11.4	福井県産材	
		D.B.T.120℃ W.B.T. 90℃ 24時間	D.B.T. 90℃ W.B.T. 60℃ 76時間								1.2
ヒノキ	蒸気式	D.B.T.120℃ W.B.T. 90℃ 18時間	D.B.T. 90℃ W.B.T. 60℃ 120時間	1.2	2.1	2.8	21.2	14.1	13.0	三重県産材	
		D.B.T.120℃ W.B.T. 90℃ 12時間	D.B.T. 90℃ W.B.T. 60℃ 50時間								1.3
カラマツ	蒸気式	D.B.T.120℃ W.B.T. 90℃ 18時間	D.B.T. 90℃ W.B.T. 60℃ 168時間	1.1	2.0	3.1	14.2	14.6	13.8	長野県産材	
ヒバ	蒸気式	D.B.T.110℃ W.B.T. 90℃ 12時間	D.B.T. 90℃ W.B.T. 60℃ 216時間	1.7	2.7	4.1	16.9	16.7	16.3	石川県産材	
トドマツ	蒸気式	D.B.T.120℃ W.B.T. 98℃ 4時間	D.B.T.105℃ W.B.T. 85℃ 24時間	D.B.T.90℃ W.B.T. 60℃ 61時間	1.3	2.3	2.6	15.6	14.7	10.5	北海道産材

注: D.B.T.とは、乾球温度を示す。
W.B.T.とは、湿球温度を示す。

Q.11 高周波式含水率計で水分管理する際の注意点は？

A.11 乾燥直後においては、実際の含水率（全乾法含水率）よりも低く表示されることがあります。

製材品の含水率を簡単に知る方法として、高周波式含水率計が広く普及しています。高周波式含水率計は、表面部（2～3cmの深さといわれています）の水分量を求め、それを基に全体の含水率を表示する機構となっていますが、蒸気式等によって乾燥した直後の正角などでは、表面の含水率が内部より低くなっている場合があります（図1）。このため、乾燥直後の高周波式含水率計による測定値は全乾法含水率よりも低く表示されることがあるので、注意が必要です（図2）。

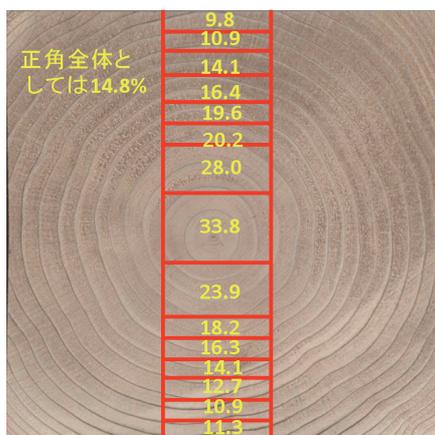


図1 蒸気式（高温セット+中温乾燥）で乾燥したスギ正角の含水率分布（一例）

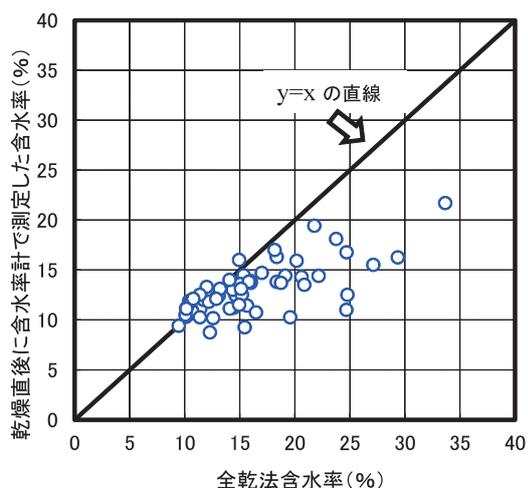


図2 全乾法含水率と高周波式含水率計で測定した含水率との関係

なお含水率計にはいくつかの種類があり、携帯型の場合は、高周波式のほか抵抗式やマイクロ波透過型が挙げられます。抵抗式は、一般に、板材の含水率測定に向いているといわれています。また、マイクロ波透過型の測定対象は構造用製材品とされています。

Q.12 自然エネルギーを活用した乾燥方法はあるの？

A.12 太陽熱や地熱などを利用した乾燥方法があります。

木材乾燥に利用できる自然エネルギーには、太陽熱、地熱、温泉熱、堆肥熱等があります。現在、利用しやすい太陽熱と地熱を利用した施設が一部の地域で実用化されています。また、自然エネルギーとは少し異なりますが、ボイラからの廃熱を利用した乾燥方法も熱エネルギーを無駄にしない方法として注目されています。

低コスト乾燥施設を前提としたこれらの乾燥方法は、高温セット処理した製材（柱桁等）に対する二次乾燥、含水率20%以上の人工乾燥材（柱桁等）に対する仕上げ乾燥（再乾燥）、板材や平割の乾燥（仕上がり含水率10~15%）として位置付けられます。

地熱を利用した施設では、栈積みの下に設置した熱交換器から、乾いた空気を自然対流で栈積み内に送る加熱方式で、送風装置を省いています。



写真1 ビニールハウスを利用した太陽熱乾燥
(長野県松川村)

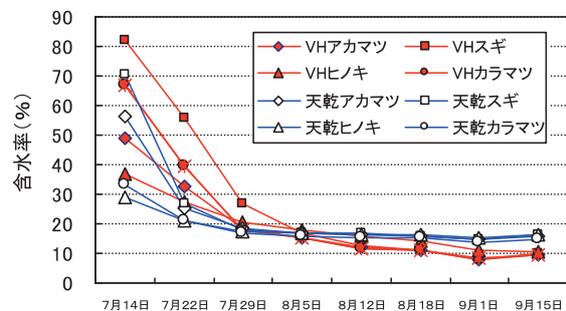


図1 35mm厚板材の含水率経過 (長野林総セ)
(VH: ビニールハウス)



写真2 地熱を利用した乾燥施設 (熊本県小国町)

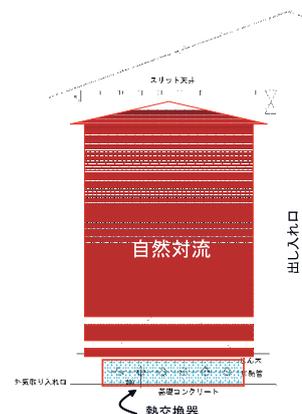


図2 地熱を利用した施設の概要
(特徴) 熱交換器を栈積みの下に設置

Q.13 内部割れと強度の関係は？

A.13 せん断強度の低下に影響します。その他の強度は、樹種によって異なります。

内部割れが長くなったり、大きくなったりすると、せん断強度は低下します（図）。この傾向は、スギ、ヒノキ、トドマツで認められましたが、樹種によって低下の割合は違っていました。

次に、内部割れのあるグループとないグループとで様々な強度を比較したり、不適切な乾燥スケジュール（乾かしすぎ）によって生じた内部割れや熱劣化を評価するための強度試験をした結果、せん断強度以外でも、不適切な乾燥スケジュール（乾かしすぎ）に

よって生じた内部割れや熱劣化が原因で強度が低下するおそれがあることが分かりました。また、樹種によってその傾向が異なることが分かりました（表）。そのため、構造材を人工乾燥して生産するにあたっては、内部割れが少なく、強度面でも問題が生じない乾燥スケジュールの選択が大切です。

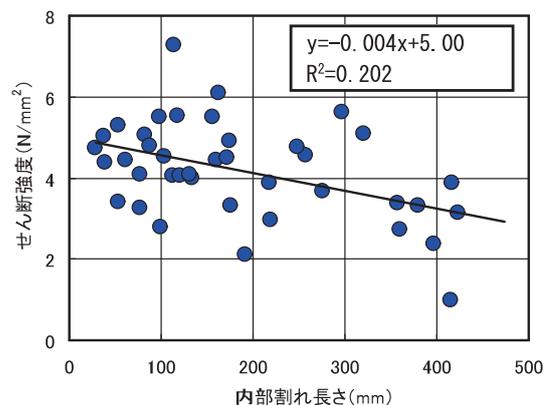


図 内部割れ長さとせん断強度との関係（スギ）

表 不適切な乾燥スケジュール（乾かしすぎ）によって生じた内部割れや熱劣化による強度低下のリスク

	曲げ強度	縦圧縮強度	縦引張り強度	せん断強度	めり込み強度
スギ	B	B	B	C	B
ヒノキ	A	A	A	B	A
カラマツ	C	A	B	C	B
ヒバ	A	B	A	C	A
トドマツ	B	C	B	C	B
アカマツ	B	B	—	B	A

注：心持ち正角の結果、トドマツのみ心去り正角に高温セット処理を用いた場合の結果

A: 低下が認められない、B: 低下の疑いがある、C: 低下が認められる

—: 試験データなし

Q.14

**材面割れや背割りは
製材の強度性能に影響を及ぼすの？**

A.14

**強度は低下しません。
ただし、割れの発生の仕方には注意が必要です。**

割れている製材と割れていない製材を比較すると、概して割れている製材の方が強いという報告がいくつもあります。したがって、材面割れや背割りによる強度低下はないと考えるのが妥当です。詳しくは、割れと強度に関するデータが、次の文献に示されています。是非、一度ご覧いただければと思います。

<割れと強度に関する文献>

- ・「最新データによる木材・木造住宅のQ&A」、木構造振興（株）、2011.
- ・「割れている木は弱いのか?」、長野県林業総合センター、技術情報No.114、2007.
- ・「乾燥割れを有するスギ心持ち構造材の評価について」、鹿児島県工業技術センター、No.20、2006.
- ・「スギ正角材の乾燥温度及び乾燥割れと座屈の関係」、第52回日本木材学会研究発表要旨集、2002.
- ・「構造材の干割れと力学的性質」、木材工業、No.51、1996.

ところで、元々割れがなかったのに使っているうちに割れが発生したり、元々ある割れが、次第に長くなったり幅が広がったりすることがあります。この原因は、二つ考えられます。一つめは、木材の乾燥が不十分で、使っているうちに自然に乾燥したのが原因で、割れが発生したり、大きくなったりしたからです。木材は乾燥することで、強度や変形のしにくさを示すヤング係数は増加しますから、結局乾燥して割れる代わりに強くなったともいえます。したがって、木材の乾燥が不十分で、使っているうちに乾燥したのが原因で発生した割れは、強度低下とは関係ありません。二つめは、木材が十分に乾燥していたにも関わらず、割れが発生したり、大きくなったりする場合です。この場合、木材に大きな力がかかったのが原因で発生したおそれがあり、非常に危険な状態です。大きな力がかかる原因は、地震、台風、積雪などの自然現象のほか、重い家具やピアノを置いたり、多量の書籍を保管したりなど、普段の生活でも起きる可能性があります。これを未然に防ぐには、安全で安心な乾燥材を使うのももちろんのこと、どの位大きい力が発生するかをあらかじめ把握して、それにあつた材料を選んだり、断面の大きさを決めることが大事です。これは、設計士の腕の見せ所の一つでもあります。

ちなみに、強度とは、単位面積あたり（最近では1平方ミリメートルが多い）でどの位の力まで耐えられるかを示すものです。一方、耐力とは、単にどの位の力まで耐えられるのかを示すもので、強度と断面形状で決まります。この強度と耐力という用語が、いつの間にか混同して使われたり理解されたりして、結果として「割れは耐力の低下に影響する」が「割れは強度の低下に影響する」にすり替わり誤解が生じたのでは？と思います。

Q.15

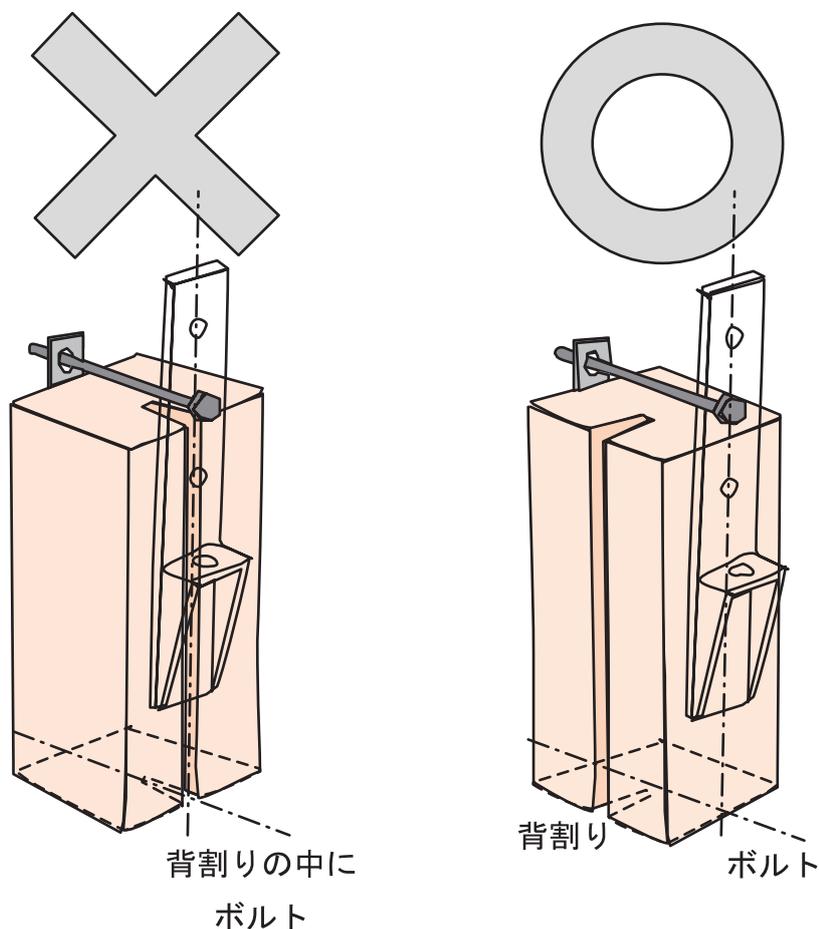
材面割れや背割りは
接合部の性能に影響を及ぼすの？

A.15

使い方や組合せによっては、影響を受けます。

材面割れも背割れも、部材としての強度にはほとんど影響しませんが、不幸にして接合部の釘やボルトがこの割れや溝に位置してしまったら期待した接合部強度は得られなくなってしまいます。

このような強度低下は、接合部の種類や使う補強金物の種類によっても変わってきますが、割れや溝を避けて、部材の中に接合部を割り当てられることが大切です。材料のどの部分を建物のどの部分に割り当てるかを定める作業（「木取り」といいます）は、実際には大工さんやプレカット技術者など、十分な経験を持つ方々がこの作業を担当しています。最新の正しい情報を元に、今まで通り、しっかりとした仕事を続けていただきたいと思います。



Q.16 内部割れは接合部の性能に影響を及ぼすの？

A.16 接合方法によっては、内部割れが多くなると接合部の性能が低下する場合があります。

住宅の耐震性には、接合部が重要な役割を担っています。接合部における内部割れと接合耐力との関係について、ボルト接合の基本形である鋼板添え板接合および鋼板挿入接合と、一般に広く普及しているホールダウン金物接合を、様々な内部割れ状態の105mm角スギ乾燥材（高温セット+高温乾燥）を用いて検討した結果を紹介します。

ボルト接合では端距離 $7d$ として引張り試験を行ったところ、鋼板添え板接合（ボルト径 d 21mm）の場合、最大荷重と内部割れ面積の間に明確な傾向は認められませんでした。鋼板挿入接合（ボルト径 d 12mm）の場合、内部割れ面積が増大するに従い、最大荷重が若干低下する傾向がみられ、降伏耐力も同様の傾向を示しました。要因としては、内部割れの他にも熱劣化が関与したのではないかと考えられます。

次に、ホールダウン金物（ZマークHD10、ビス止め15kN）接合の場合、4種類の接合具（ボルト、ビス、釘、ラグスクリュー）で引張り試験を行ったところ、最大荷重と内部割れ面積の間にはビス止めで負の相関がみられましたが、ボルト止め、釘止め、ラグスクリュー止めでは明確な傾向は認められませんでした。

表 ホールダウン金物の接合性能試験結果

	ボルト止めHD-B10		ビス止め15kN		釘止めHD-N10		ラグスクリュー止めHD-B10	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
内部割れ総面積 (mm ²)	47.7	37.9	57.4	76.0	82.2	76.0	73.9	64.1
比重	0.41	0.04	0.41	0.03	0.43	0.03	0.43	0.02
試験材動的ヤング係数 (kN/mm ²)	6.65	1.19	7.12	1.56	7.53	1.56	7.59	1.16
最大荷重 (kN)	38.4	4.6	30.8	4.4	40.2	4.4	23.7	5.0
降伏荷重 (kN)	25.1	2.0	16.9	1.7	22.1	1.7	12.6	3.8

Q.17

高温セット処理を用いた乾燥法をスギ正角に適用した場合、強度性能に及ぼす影響について、品種の違いによる差はあるの？

A.17

内部割れの発生状況に品種の違いによる差はみられますが、曲げ強度に及ぼす影響に明確な差はみられません。

スギ挿し木在来品種であるアヤスギ、オビスギ、シャカインについて、高温セット+高温乾燥および高温セット+中温乾燥した際の内部割れ発生状況を調べました。また、内部割れが曲げ強度に与える影響を検討しました。なお、試験体の仕上がり含水率が品種で違っていたので、曲げ強度は含水率15%時に補正して比較しました。

まず、高温セット+高温乾燥した正角の内部割れ発生状況に着目すると、オビスギとシャカインでは統計的に有意な差はありませんでしたが、これらの2品種とアヤスギとでは、明らかな差がありました(図1)。これは、アヤスギの場合、密度が高く、初期含水率が低いことが影響したためと推察され、割れの発生抑制には、品種により乾燥スケジュールを設定する必要があるといえます。

次に、スギの強度は、品種によって異なることが知られていますが、今回の検討でも曲げ強度は品種ごとに異なり、強い方からシャカイン、アヤスギ、オビスギの順でした(図2)。また、すべての品種において、高温セット+中温乾燥の方が高温セット+高温乾燥と比べて高い傾向がありました。

以上から、高温セット処理を用いた乾燥法をスギ正角に適用した場合、内部割れの抑制には品種を考慮する必要がありますが、曲げ強度に及ぼす影響については品種による明確な差はないといえます。

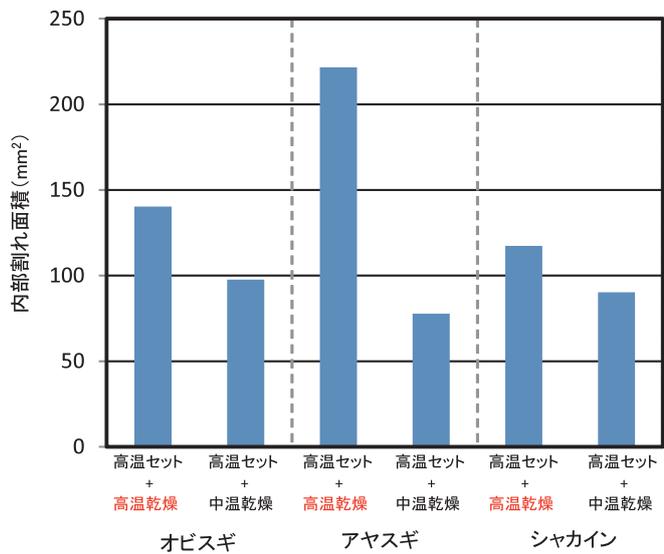


図1 各品種の内部割れ発生量

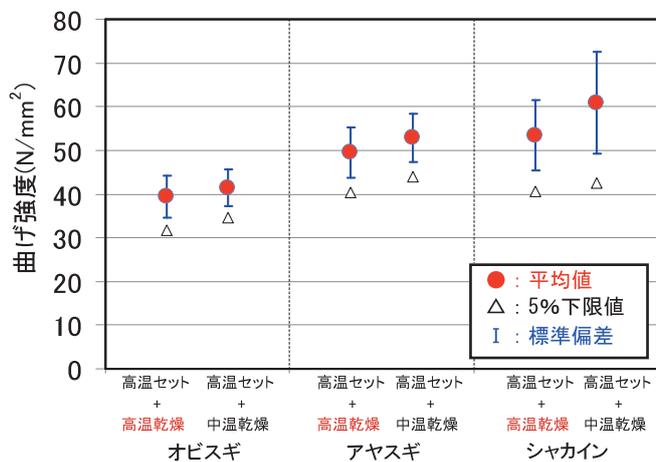


図2 各品種の曲げ強度

Q.18

心去り材を高温セット処理を用いて乾燥した場合、どうなるの？

A.18

心去り材であっても内部割れが発生したり強度性能が低下する場合があります。

心去り材であれば高温セット処理を用いなくとも大きな材面割れは生じません。それでも、乾燥時間を短縮するなどの理由で心去り材に適用するケースがあるかもしれません。

ここでは、トドマツ心去り材について高温セット+中温乾燥した場合の内部割れの発生状況や強度性能に及ぼす影響について検討した結果を紹介します。

心去り材に高温セット+中温乾燥を行った場合でも内部割れが発生することがあります(写真1、2)。また、高温セット処理を行わずに乾燥させたものと強度を比較すると、高温セット処理を行わない方が強度は高いという試験結果が得られました(図1、2)。

高温セット処理は、本来は心持ち無背割り正角の材面割れを防ぐ目的で考え出された方法です。ここで紹介したように、木取りによっては高温セット処理を適用しない方が高品質な乾燥材を生産できる場合があります。



写真1 乾燥後のトドマツ心去り材
(高温セット処理あり)



写真2 乾燥後のトドマツ心去り材
(高温セット処理なし)

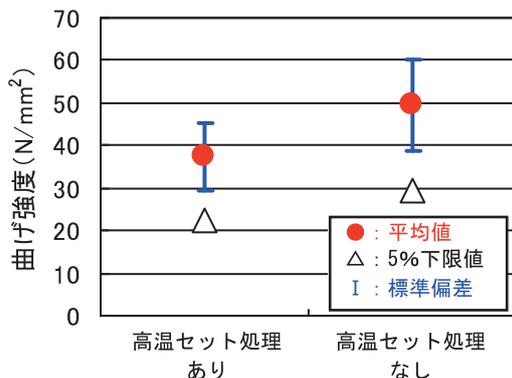


図1 トドマツ心去り材の曲げ強度

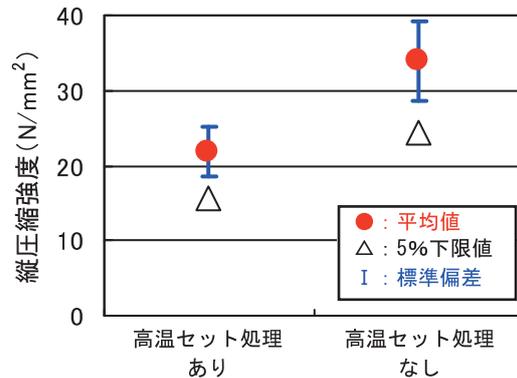


図2 トドマツ心去り材の縦圧縮強度

用語の解説

ここでは、本マニュアルで使用している専門用語について解説しています。用語によっては、明確に定義されていないものもありますが、本マニュアルを読んでいただく際の参考にしてください。

なお、解説中にアンダーラインを付している用語は、本章内で解説をしている用語です。

乾燥方法に関する用語

減圧乾燥（真空乾燥） 装置内圧力を大気圧より低い圧力（減圧状態）にして乾燥する方法です。沸点が100℃より低くなります。木材を温める方法には高周波加熱、蒸気加熱、熱板加熱などが用いられます。

高温乾燥 …………… 一般的に、乾燥工程の大部分で乾球温度が100℃より高い乾燥法が高温乾燥と呼ばれ⁷⁻¹⁾、このマニュアルでもこれに準じています。近年、国内の乾燥の現場では「高温セット処理」の後、100℃より高い乾球温度で乾燥する方法を、セット処理も含めて「高温乾燥」と呼ぶ場合があるようですが、このマニュアルでは、セット処理後の乾燥法によって以下のように区別しています。

高温セット処理後の乾燥法	名称
乾球温度が100℃より高い蒸気式	高温セット＋高温乾燥
乾球温度が100℃以下の蒸気式	高温セット＋中温乾燥
天然乾燥	高温セット＋天然乾燥

高温セット処理 …… 十分に水分を含んだ心持ち材を、初期蒸煮（90～95℃、数時間）の後、乾球温度120℃程度、湿球温度90℃程度で、数時間～20数時間行う熱処理のことです。主にスギ、カラマツなど針葉樹構造用材の乾燥に適用されます。木材の表面付近に積極的にドラインセットを形成し、収縮異方性が原因で発生する材面割れを予防するために行います。本マニュアルの6ページでも解説されています。

高温低湿処理 …………… 高温セット処理と同じです。

高周波加熱減圧乾燥 減圧乾燥のうち、木材の加熱方法として高周波を用いるものです。100mmHgより低い圧力でも、より高い圧力（たとえば150mmHgなど）でも乾燥できる装置が多く、真空式、減圧式を含めた大気圧より低い圧力で高周波によって加熱し、乾燥する方法です。

蒸気高周波複合乾燥 大気圧下で蒸気による加熱および加湿と高周波による加熱とを複合して用いる乾燥方法です。装置は温湿度制御機能を持つ蒸気式乾燥機に高周波発振器をとりつけた構造で、高周波による内部水分の移動と装置内温湿度の制御による木材表面からの水分蒸発とを組み合わせ乾燥します。本マニュアルの8ページでも解説されています。

蒸気式乾燥 ……………	<u>熱風乾燥</u> のうち、熱源に蒸気を用いる場合、蒸気式乾燥法と呼ばれます。 <u>熱風乾燥</u> 以外の方式（たとえば <u>減圧乾燥</u> など）で熱源に蒸気を用いても蒸気式乾燥とは呼びません。本マニュアルの7ページでも解説されています。
人工乾燥 ……………	温度や湿度、風速などの乾燥条件を人工的に調節し、木材から水分を除去するための操作を人為的に行う乾燥方法です。
中温乾燥 ……………	<u>蒸気式乾燥</u> のうち、 <u>高温乾燥</u> と比べて低い温度域で乾燥する場合、たとえば100℃より低い温度域で乾燥する場合にこう呼ばれることがあります。明確な定義はありません。カラマツのやに処理などでは90℃でも高温処理と呼ばれることがあり、「高温」と「中温」の境は曖昧です。
低温乾燥 ……………	蒸気式あるいは除湿式乾燥のうち、 <u>中温乾燥</u> より低い温度で乾燥する場合にこのように呼ばれることがありますが、明確な定義はありません。たとえば除湿乾燥では冷媒の種類によって使用温度が50℃以下と70℃以下に分かれ、50℃以下の冷媒を用いる装置が低温除湿乾燥機と呼ばれています。
天然乾燥 ……………	人工乾燥に対して木材から水分を除去する操作を人為的には行わないで、大気中に静置して乾燥させる乾燥方法です。通常、屋外に積み上げて、屋根をかけて行います。仕上がりが <u>含水率</u> と乾燥速度は周囲の温度、湿度や風通しなどに左右されます。
熱気乾燥 ……………	<u>熱風乾燥</u> と同じです。
熱風乾燥 ……………	温めた空気によって木材を加熱して乾燥する方式で、通常、大気圧下で温度、湿度および風速を調節しながら乾燥します。熱源として蒸気、電気などが使われます。
熱風減圧併用式乾燥	<u>減圧乾燥</u> の一種で、加熱方法として熱風を用いるものです。装置内圧力が低いために沸点が低く、比較的低い温度で乾燥できる利点があります。本マニュアルの9ページでも解説されています。
葉枯らし ……………	立木を伐倒した後、枝葉をつけたまま林内に静置し、葉からの蒸散によって丸太の含水率の低下を促す処理です。

割れに関する用語

- 木口割れ …………… 木材の乾燥中に生じる、木口面から材面におよぶ割れと木口面のみに現れる割れです。
- 材面割れ …………… 木材の乾燥中、特に初期の段階に材面に繊維方向に沿った割れが発生しやすく、これを材面割れと呼びます。板目面に生じやすいのですが、南洋材の中には柾目面に生じるものもあります。
- 心割れ …………… 髓から放射方向に伸びる割れで成長応力によって発生します。伐倒時にあるいは立木中に生じていることもあります。乾燥終了後に収縮によって心割れの幅が大きくなり、初めて存在に気がつくこともあります。髓割れと呼ばれることもあります。
- 髓割れ …………… 心割れと同じです。
- 内部割れ …………… 木材の乾燥中に、木材内部に発生する割れのことです。
- 干割れ …………… 木材が乾燥したときに発生する割れです。天然乾燥で発生した割れをさす場合が多いようです。乾燥割れとも呼ばれます。
- 割れ …………… 木材の割れには、乾燥による割れと成長応力などによる割れがあります。割れた箇所によって木口割れ、材面割れ、心割れ、内部割れなどと呼ばれます。
- 割れ長さ …………… 割れの種類には関係なく、割れの長さの総称です。
- 割れの面積 …………… 割れの種類には関係なく、割れの面積の総称です。割れのある面の画像をスキャナーなどで取り込んで画像処理によって求めたり、割れの長さや幅を測った後、割れの形をひし形あるいは三角形と仮定して、最大幅と長さから面積を算出するといった方法があります。
- 割れ幅 …………… 割れの種類には関係なく、割れの幅の総称です。通常、目視で最も幅の広いところを測定して、割れ幅とします。

その他の用語

【あ】

応力 …………… 材料に外部からの力（外力）が加えられると、これに抵抗する力として、材料の内部に外力と大きさは同じで反対方向の力が生じます。この力を応力と呼びます。なお、一般的に応力は力、応力度は力を単位面積で除した値ですが、木材の強度試験の場合、慣例的に応力度のことを応力と称することが多いようです。

応力波 …………… 材料が衝撃を受けると、その部分に局所的な応力が発生し、この応力は波として材料内部を伝わります。この波のことを応力波と呼び、材料、方向、含水率などにより応力波の伝わる速度は異なります。応力波伝播法はこの性質を利用した方法で、試験体に二つのセンサを取り付け、一方のセンサまたは試験体の木口などを打撃し、発生した応力波が一方のセンサから他方のセンサに伝わる速度を測定して、材料の動的ヤング係数を求めます。

【か】

拡散係数 …………… 木材中の水分の分布が均一でないと、含水率の高いところから低いところへ水が移動します。水は液体状態でも移動しますが、乾燥工程の大部分では気体あるいは細胞壁についての結合水として徐々に移動します。この現象は、大気中に蒸気が拡散するのと同じように、木材中での水分の拡散と考えることができます。このように考えると、木材中の隣り合った小さな部分の水分量の差が大きいほど、水分子の移動量は多いはずで、この水分量の差から水分の移動量を求めるための係数を「拡散係数」と呼びます。

$$\text{式（一次元の場合） } g = D \frac{dC}{dx}$$

g : 水分移動量

$\frac{dC}{dx}$: 水分濃度（たとえば含水率）の傾斜

D : 拡散係数

ある樹種の拡散係数が他の樹種に比べて大きければ、同じ含水率傾斜でも多くの水分が移動しますから、木材中を水分が移動しやすい、すなわち乾きやすい樹種ということになります。

下限値 …………… 材料強度の基準値には、一般的に信頼水準 75%における 95%下側許容限界値（5%下限値）が採用されています。本マニュアルもこの 5%下限値を強度の基準値として用い、略して下限値と表記しています。下限値の算出方法は関数法、順位法がありますが、本マ

ニュアルでは、母集団を正規分布と仮定し、信頼水準75%における95%下側許容限界値を、

$TL_{75\%,1-5\%} = \bar{x} - Ks$ で算出しています。

ここで、 \bar{x} は標本平均、 K は下側許容限界値を求めるための信頼限界係数、 s は標本標準偏差です。詳しくは「ASTM D 2915-03」や「構造用木材の強度試験マニュアル」（財日本住宅・木材技術センター）をご覧ください。

過熱蒸気 …………… 飽和水蒸気にさらに熱を加えると、その時点での蒸気圧力に相当する飽和温度より高い温度の水蒸気になります。これを過熱蒸気と呼びます。過熱蒸気の温度は沸点より高いため、十分に水を含んだ木材を過熱蒸気中に置くと、木材に含まれている水の温度が沸点に達して蒸発し、木材を乾燥することができます。

含水率 …………… 木材に含まれる水の重さと木材実質の重さ(全乾重量)との比で、百分率で表されます。全乾重量を基準に算出するので、「乾量基準含水率」と呼ばれる場合もあります。
なお、値が100%を超える場合があります。
算出式は以下の通りです。

$$\text{含水率} = \frac{(W_w - W_o)}{W_o} \times 100 \quad (\%)$$

W_w : 水を含んだ木材の重さ

W_o : 全乾重量

含水率傾斜 …………… 木材を乾燥するとき表面から乾燥が進むため、通常は木材表面付近の含水率が内部より低くなります。このときの含水率の傾きが含水率傾斜です。木材中のある点とある点との間の距離が L 、この2点間の含水率の差が Δm であったとすると、含水率傾斜は以下の式で表されます。

$$\text{含水率傾斜} = \frac{\Delta m}{L}$$

含水率分布 …………… 通常、木材内部の含水率は部位によって異なります。木材内部の含水率の分布を含水率分布と呼びます。乾燥材はできるかぎり含水率分布が均一であることが望まれます。

乾燥材 …………… 未乾燥材を乾燥し、利用目的に合わせて含水率を調整した木材のことです。ただ乾燥機へ入れただけで、乾燥が不十分な木材は乾燥材とは呼びません。たとえばJAS「製材の日本農林規格」における構造用製材には、25%以下、20%以下、15%以下という基準があります。

- 乾燥初期、中期、後期 いずれもはっきりした定義はありません。しかし、乾燥の現場や研究者の間で使われている事例から、およその意味をくみ取ることができるので、参考までに以下に示します。
- 乾燥初期 …………… 広葉樹板材の乾燥では初期条件を維持する期間をいいます。
このマニュアルで扱っている針葉樹構造用材の乾燥では、単に乾燥工程の初期という意味で使われることが多いようです。構造用針葉樹材の乾燥では、高温セット処理を乾燥初期とする考え方と、高温セット処理は前処理であって、その後、乾燥工程が始まるとする考え方があります。
- 乾燥中期 …………… 広葉樹板材の乾燥では、あまり使われないようです。心持ちの針葉樹構造用材の乾燥において、高温セット処理の後、内部割れが生じ始めると思われる時期までの期間を乾燥中期と呼ぶ場合があります。
- 乾燥後期 …………… 広葉樹板材の乾燥では乾燥末期と呼ばれることが多く、この場合は表面の含水率が装置内の温度、湿度条件に対応する平衡含水率とほぼ同じになるころで、平均含水率が15～20%を下回って以降を表します。心持ちの針葉樹構造用材の乾燥では、内部割れ発生の危険があると思われる時期を乾燥後期と呼ぶことが多いようです。平均含水率で30～40%以下といった感覚で使われることが多いようですが、コンセンサスはないようです。
- 乾量基準含水率 …………… 木材の取引において、通常使われる含水率のことです。チップの取引などでは湿量基準含水率が用いられます。
- クリープ変形 …………… 木材に一定の荷重を継続して負荷すると、時間の経過とともに変形は増大します。この変形をクリープ変形と言います。また、負荷した荷重が大きいとクリープ変形が進行して破壊（クリープ破壊）を生じることもあります。クリープ現象については本マニュアルの3ページでも解説されています。
- 高周波加熱 …………… 高周波電界内で対象物を温める加熱方法です。
平行電極間に木材を置いて、誘電加熱によって温めます。
- 降伏耐力 …………… 接合部の損傷が生じないか、または生じていないと見なすことができる限界の耐力です。
- 【さ】**
- 材面 …………… JAS「製材の日本農林規格」によると、板類（構造用製材の板類を除く）では面積の大きい2平面、構造用製材の角類においては木口を除く4平面を指します。

湿量基準含水率 …… 乾量基準含水率に対して、水分を含んだ木材の重さを基準にして算出する含水率を「湿量基準含水率」と呼びます。
化学の分野でよく用いられ、製紙会社でのチップの含水率にも用いられています。値が100%を超えることはありません。
算出式は以下の通りです。

$$\text{湿量基準含水率} = \frac{(W_w - W_o)}{W_w} \times 100 \quad (\%)$$

W_w : 水分を含んだ木材の重さ

W_o : 全乾重量

収縮 …… 木材は含水率が繊維飽和点を下回ると収縮を始めます。実際に使われる板材、構造材には厚みがあるため、表面が早く乾くなど部位によって含水率の違いが生じますから、見かけ上、繊維飽和点より高い含水率で収縮が始まるようにみえます。

収縮異方性 …… 木材の収縮は方向によってその程度が異なる性質を持っています。この性質を収縮異方性と呼びます。
たとえば、接線方向と髄から外に向かう方向（放射方向）と縦方向（繊維方向）の収縮率の比は、おおむね
接線：放射：繊維＝10：5：0.5⁷⁻²⁾
であるとされています。

蒸煮 …… 蒸気を乾燥機内へ投入し、加熱ヒータを使わずに装置内の温度を上昇させる操作です。加熱ヒータを切り、装置への蒸気投入弁(蒸煮弁)を開いて行います。木材表面付近の乾燥を抑えながら、材温と装置内温度を上げることができます。蒸煮には、ヤニ滲出防止効果や初期含水率のばらつきを緩和するなどの効果があります。

正角 …… 横断面が幅7.5 cm以上の正方形である製材品。平成8年度に廃止されたJAS「製材の日本農林規格」に規定されていました。現在でも製材・流通の現場でよく用いられています。

心去り …… 断面内に髄を含まない製材のことです。

心持ち …… 断面中央付近に髄を含む製材のことです。

推奨乾燥条件 …… 本マニュアルでは、今回のプロジェクトの中で取り扱った試験条件のうち、仕上がり含水率が20%以下、材面割れ、内部割れが最も少なく、しかもその使用にあたって強度に問題がないと考えられる乾燥条件を、推奨乾燥条件と呼んでいます。

- 水分傾斜 …………… 含水率傾斜と同じ意味です。
- 髓 …………… 樹幹の中心部を占める組織のことで、丸太の断面をみたとき、年輪の中心付近にあります。
- 繊維飽和点 …………… 木材の細胞壁が水素結合や物理的な吸着によって最大量の結合水を含んだ時の含水率で、多くの樹種で25～30%、平均して28%とされています。含水率が繊維飽和点より低くなり、結合水が失われると、木材は収縮を始めます。
- 全乾重量 …………… 木材から水分を取り除いた、木材実質の重さです。
水分を含んだ木材を100～105℃のオーブンで乾かし、重さが増えなくなった時点の重さを全乾重量とします。JAS「製材の日本農林規格」では、6時間の間隔をおいて重さを測ったとき、重さの変化が0.1%以下であれば変化しなくなったと見なしてよいことになっています。
- せん断力 …………… 材料に外部から力が加わった際、材料の内部にはこれに抵抗する応力が生じますが、材料の断面に垂直に働く力を軸力（圧縮力や引張り力）と呼ぶのに対して、材料の断面に平行に働く力をせん断力と呼びます。なお、木材は異方性材料であるため、軸方向の力に比べてせん断力が極端に小さいことが知られています。
- 【た】**
- 短期基準耐力 …………… 接合部の許容応力度設計における、単独の接合部のせん断耐力に対する設計値です。設計においては、その接合部に生じる応力がこの値を超えないようにします。
- 弾性係数 …………… 材料に応力が加わる際、応力-ひずみ曲線の直線域では、 $\sigma = E \cdot \varepsilon$ のフックの法則が成り立ちます。ここで、 σ は応力、 ε はひずみで、Eを弾性係数、弾性率、ヤング係数、ヤング率などと呼びます。すなわち、材料に荷重を加えると材料は変形しますが、その変形のしやすさ・しにくさを示す物性値のことです。なお、フックの法則はせん断応力 τ とせん断ひずみ γ との間にも $\tau = G \cdot \gamma$ の関係が成り立ち、Gをせん断弾性係数と呼びます。
- ドラインゲット …… 木材は引張りあるいは圧縮の力を受けながら乾燥すると、本来とは異なる収縮量を示します。この乾燥中に加えられた力によって生じる、本来とは異なる収縮変形、またはそのような変形が生じる現象をドラインゲットと呼びます。引張りながら乾燥すれば本来よりも収縮せず、圧縮しながら乾燥すれば大きく収縮します。

【な】

- 生材 …………… 立木あるいは伐採直後の乾燥していない木材のことです。立ち枯れの木や葉枯らし材は生材ではありません。
流通の現場では、伐採から日数が経った木材も生材と呼ぶことがありますが、伐倒直後より含水率が下がっていると考えられ、厳密には生材ではありません。乾燥する前であれば、未乾燥材と呼ぶ方がより正確です。
- 生蒸気 …………… ボイラで水を加熱して作られた蒸気のことです。木材乾燥では、湿球温度を上昇させるため、蒸気投入弁を開いて乾燥機内へ投入する蒸気を生蒸気と呼びます。
- 二次乾燥 …………… 乾燥工程や乾燥手法を二つに分ける場合、その2番目の工程をこう呼ぶ場合があります。たとえば、6ページの写真のように、高温セット処理後に、高周波加熱減圧乾燥や天然乾燥など、異なる施設や手法で乾燥する場合を二次乾燥と呼ぶことがあります。
- 熱劣化 …………… 高温で長時間乾燥した木材は通常の乾燥材よりも脆くなるなど、品質の低下が認められます。このような熱による品質の低下を熱劣化と呼びます。原因は明らかではありませんが、化学的な変性が理由の一つではないかと考えられています。

【は】

- 端距離 …………… 接合具の中心から部材の端までの距離のことです。
- 複合式 …………… 一般に、二つ以上のものを組み合わせて一つのものにする方式です。「蒸気高周波複合式乾燥法」という場合には、乾燥の1サイクルの中で高周波による加熱と蒸気による加熱を組み合わせて使うという意味が強調されています。常に同時に動作させているとは限らない、という意味も含まれます。
- 平衡含水率 …………… ある温度・湿度の環境に木材を置くと、いずれ木材内の湿度と周囲の湿度とが釣り合い、木材の重さが変化しなくなる時が来ます。そのときの含水率を平衡含水率と呼びます。湿度が高いと平衡含水率は高くなり、温度が高いと平衡含水率は低くなる性質があります。樹種によってあまり大きな違いはありません。
- 併用式 …………… 一般に、二つ以上のものを同時に用いる方式のことです。たとえば、木材乾燥において、「熱風減圧併用式乾燥法」という場合には、熱風による加熱と減圧操作を同時に行うことを強調する意味があります。

飽和温度 …………… 不純物のない水では圧力に応じて飽和水の温度が決まります。この温度を飽和温度と呼びます。沸点とも呼ばれます。

飽和蒸気 …………… 一定圧力（たとえば大気圧）下で水を温めると、これ以上少しでも加熱すると蒸気が発生するという温度（飽和温度、沸点、1気圧なら100℃）になります。さらに加熱すると蒸気が発生し始め、すべての水が蒸気になるまで、飽和温度のまま蒸気と水が共存します。この蒸気を飽和蒸気と呼びます。圧力が異なると飽和温度も異なることは、たとえば気圧の低い高地でお湯を沸かすと100℃未満で沸騰することなどから経験できます。

【ま】

前処理 …………… 乾燥操作の前に行う処理のことです。
たとえば、このマニュアルで取り扱っている「高温セット処理」は、他の乾燥法の前処理として使うことができます。

未乾燥材 …………… 人工乾燥あるいは天然乾燥処理を十分に施していない木材のことです。

密度 …………… 単位体積あたりの重さのことです。重さを体積で割って算出します。単位にはg/cm³、kg/m³などが用いられます。

【や】

ヤング係数 …………… 材料に荷重を加えると材料は変形しますが、その変形のしやすさ・しにくさを示す物性値です。この数値が大きいほど変形しにくい材料であることを意味します。

誘電加熱 …………… 高周波電界内に被加熱物（誘電体）をおいて、内部から加熱する方法です。
水を含んだ木材を2枚の平行電極に挟んで高周波電圧を加えると、電極間に高周波電界が生じ、水分子の極性が電界の方向に並ぼうとします。印加される電圧は交流なので周期的に電圧の向きが変わり、そのたびに水分子が回転運動しようとして隣同士の分子が摩擦して発熱し、これによって温まります。

養生 …………… 製品の寸法を安定させるため、材内の含水率傾斜やばらつきを小さくして乾燥後、直ちに修正挽き（モルダー加工）を行わずに、一定期間、倉庫等に半製品の状態で保管（静置）しておくことをいいます。

参考文献

(1. 木材乾燥の必要性)

- 1-1) 久保 健、日本木材加工技術協会第13回年次大会（東京）講演要旨集、p47(1995)を改編
- 1-2) Hirofumi Nagao, Takashi Nakai, Toshinari Tanaka, IUFRO/S5.02 Timber Engineering Meeting, Sydney, 5-7, July, 1994を改編
- 1-3) 荒木博章、熊本県林業研究指導所研究報告書、No34、p41-47(2008)を改編

(2. 乾燥方法の解説)

- 2-1) 品質・性能向上技術調査・開発事業報告書（国産針葉樹乾燥材の生産技術マニュアル）、財団法人日本住宅・木材技術センター、2003

(5. 乾燥材の品質向上に関する研究成果)

- 5-1) 改訂4版 木材工業ハンドブック、森林総合研究所監修、p192-197(2004)
- 5-2) 中尾哲也、木材学会誌、48(4)、p241-248(2002)

(6. Q & A)

- 6-1) 森林総合研究所交付金プロジェクト研究 成果集8 「スギ材の革新的高速乾燥システムの開発」、p44-45(2006)を改編

(7. 用語の解説)

- 7-1) たとえば、Dry Kiln Operator's Manual, Forest Products Society, p49
- 7-2) たとえば、高橋 徹、中山義雄編、「木材科学講座3 物理」、p41、海青社、1992. 3

表1 平衡含水率表

(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	10.3	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	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	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	6.1		
14				4.3	5.3	5.9	6.3	6.6	6.7	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	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	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	4.9	4.9	4.8	4.8	
20					3.0	3.0	3.8	4.2	4.6	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8	4.7	4.6	4.6	4.5	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	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	

表2 相对湿度表

(単位:%)

乾球 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	84	84	84	85	85	86	87				
5	14	44	59	67	69	72	73	75	77	78	78	80	80	80	81	82	83	83				
6		33	51	61	64	67	69	71	72	74	75	76	77	77	78	79	80	80	81			
7		23	44	55	59	62	64	66	68	70	71	73	74	74	74	75	76	77	78			
8		14	37	50	54	57	60	62	64	66	67	70	71	72	72	73	74	74	75			
9		4	30	44	49	53	56	58	60	62	63	66	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	30	31	32	33	35



付録

表3 圧力と沸点

圧力				飽和温度 (沸点)
MPa	kPa	mmHg	kg/cm ²	°C
0.001	1	7.5	0.01	7.0
0.002	2	15.0	0.02	17.5
0.004	4	30.0	0.04	29.0
0.006	6	45.0	0.06	36.2
0.008	8	60.0	0.08	41.5
0.01	10	75.0	0.10	45.8
0.02	20	150.0	0.20	60.1
0.03	30	225.0	0.31	69.1
0.04	40	300.0	0.41	75.9
0.05	50	375.0	0.51	81.4
0.06	60	450.0	0.61	86.0
0.08	80	600.0	0.82	93.5
0.1	100	750.1	1.02	99.6
0.101325	101.325	760.0	1.03	100.0
0.15	150	1125.1	1.53	111.4
0.2	200	1500.1	2.04	120.2
0.3	300	2250.2	3.06	133.5
0.4	400	3000.2	4.08	143.6
0.5	500	3750.3	5.10	151.8
0.6	600	4500.4	6.12	158.8
1.0	1000	7500.6	10.20	179.9

問い合わせ先一覧

機関名	所在地・問い合わせ先
地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 林産試験場	〒071-0198 北海道旭川市西神楽1線10号 TEL 0166-75-4233 FAX 0166-75-3621 http://www.fpri.hro.or.jp/
長野県林業総合センター	〒399-0711 長野県塩尻市片丘5739 TEL 0263-52-0600 FAX 0263-51-1311 http://www.pref.nagano.lg.jp/xrinmu/ringyosen/04shiken/11seika/seika.htm
富山県農林水産総合技術センター 木材研究所	〒939-0311 富山県射水市黒河新4940 TEL 0766-56-2915 FAX 0766-56-2816 http://www.pref.toyama.jp/branches/1661/index.html
石川県林業試験場 石川ウッドセンター	〒920-2306 石川県白山市河内町吉岡東75番地 TEL 076-273-1873 FAX 076-273-5234 http://www.pref.ishikawa.lg.jp/ringyo/iwc/index.html
福井県総合グリーンセンター	〒910-0336 福井県坂井市丸岡町楽間15 TEL 0776-67-0002 FAX 0776-67-0004 http://www.pref.fukui.jp/doc/green-c/mokuzai_jyouchou.html
三重県林業研究所	〒515-2602 三重県津市白山町二本木3769-1 TEL 059-262-0110 FAX 059-262-0960 http://www.mpstpc.pref.mie.lg.jp/RIN/paper/index.htm
奈良県森林技術センター	〒635-0133 奈良県高市郡高取町吉備1 TEL 0744-52-2380 FAX 0744-52-4400 http://www.nararinshi.pref.nara.jp/
鳥取県農林水産部農林総合研究所 林業試験場	〒680-1203 鳥取県鳥取市河原町稲常113番地 TEL 0858-85-2511 FAX 0858-85-2512 http://www.pref.tottori.lg.jp/dd.aspx?menuid=70824
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 http://www.pref.shimane.lg.jp/chusankan/kenkyu/mokuzai/
広島県立総合技術研究所 林業技術センター	〒728-0013 広島県三次市十日市東四丁目6-1 TEL 0824-63-5181 FAX 0824-63-7103 http://www.pref.hiroshima.lg.jp/site/sougougizyutukennyuuzyo/1219628260277.html
愛媛県農林水産研究所 林業研究センター	〒791-1205 愛媛県上浮穴郡久万高原町菅生2番耕地280-38 TEL 0892-21-2266 FAX 0892-21-3068 http://www.pref.ehime.jp/060nourinsuisan/190ringyo-cnt/00004356040105/
熊本県林業研究指導所	〒860-0862 熊本県熊本市黒髪8丁目222-2 TEL 096-339-2221 FAX 096-338-3508 http://www.pref.kumamoto.jp/site/ringyoukenkyusidouyotop/
独立行政法人 森林総合研究所	〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 TEL 029-873-3211 FAX 029-874-3720 http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/various/index.html

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！

発行日 平成24年3月

編集・発行 石川県林業試験場 石川ウッドセンター

〒920-2306 石川県白山市河内町吉岡東75

TEL:076-273-1873 FAX:076-273-5234

<http://www.pref.ishikawa.lg.jp/ringyo/iwc/index.html>

印刷 前田印刷株式会社