

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。

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。

● 測定の原理 ●

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。

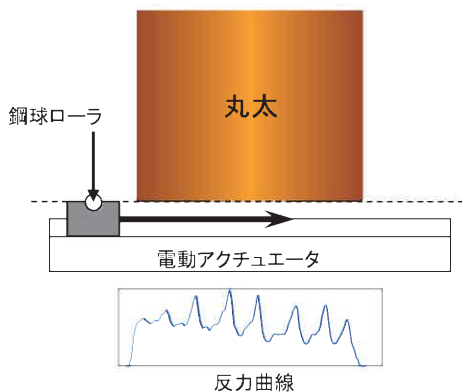


図1 連続木口面反力測定法の概略
矢印はローラ移動方向

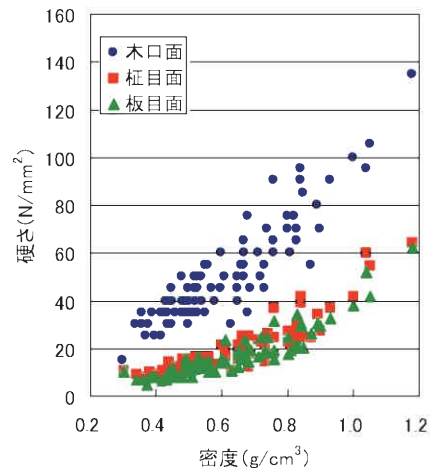


図2 密度と硬さとの関係
(参考図書⁵⁻¹⁾のデータより作成)

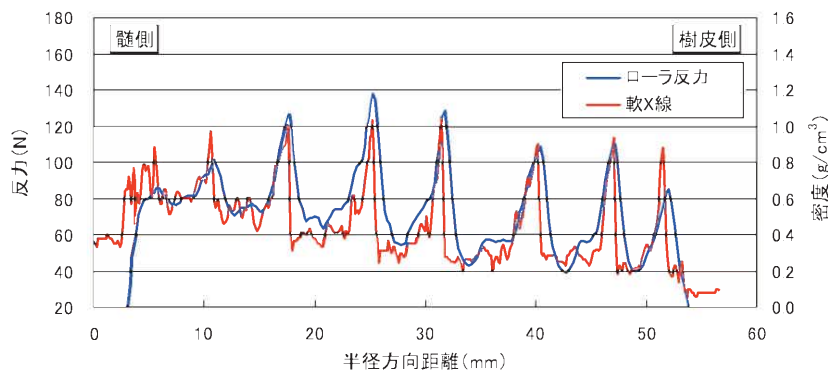


図3 反力曲線と木材の密度曲線との比較

● 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。

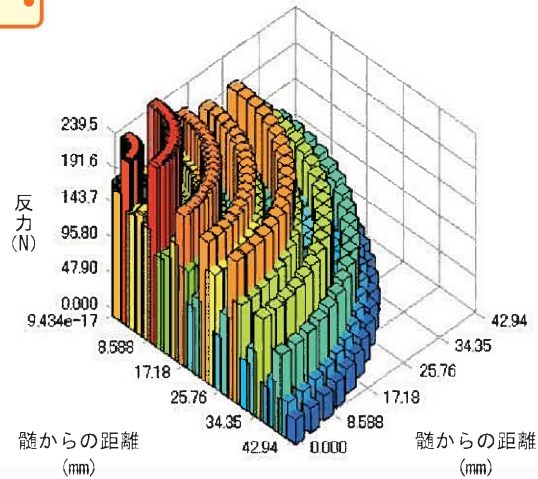


図4 木口面反力 (密度) 分布のイメージ

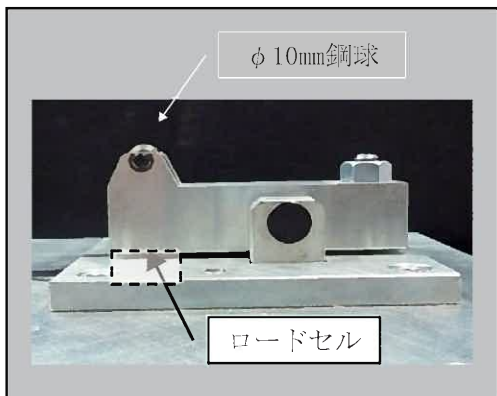


写真 考案したロードセル支持のローラ部

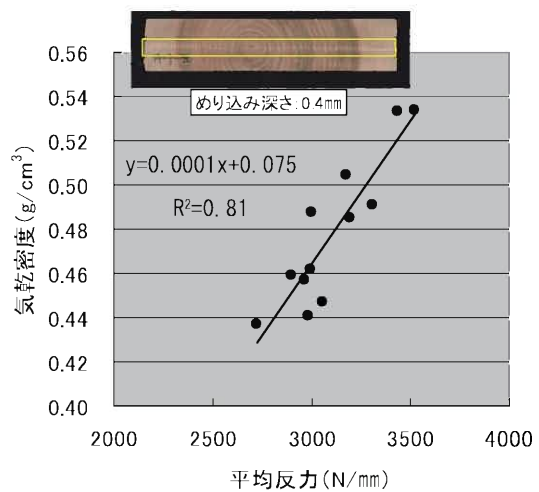


図5 考案した測定法による硬さと密度との関係

- ・ 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。

5. 乾燥材の生産性向上を目指したその他の技術

(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。

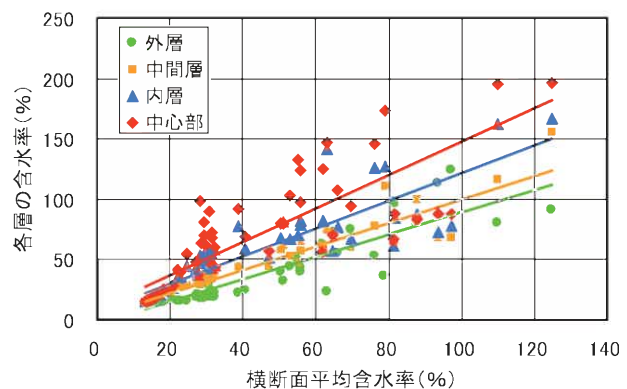


図1 平均含水率と各層の含水率との関係式
(富山県産スギ・高温セット24時間処理の例)

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

5. 乾燥材の生産性向上を目指したその他の技術

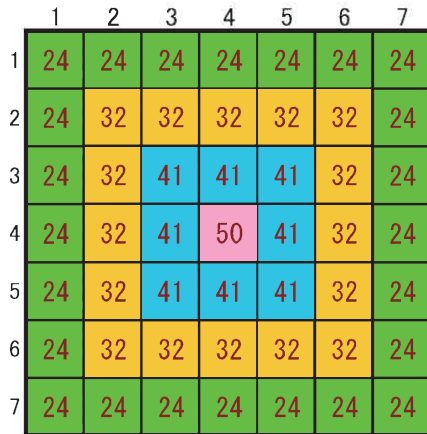


図2 モデル化した横断面含水率分布

- : 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 18.4~31.6	63.8 41.5~81.1	12.7 6.9~18.2
冬季 (12~5月)	9.4 1.6~23.4	70.4 44.4~87.8	16.7 8.7~25.0

・ 上段が平均値、下段が最小値~最大値

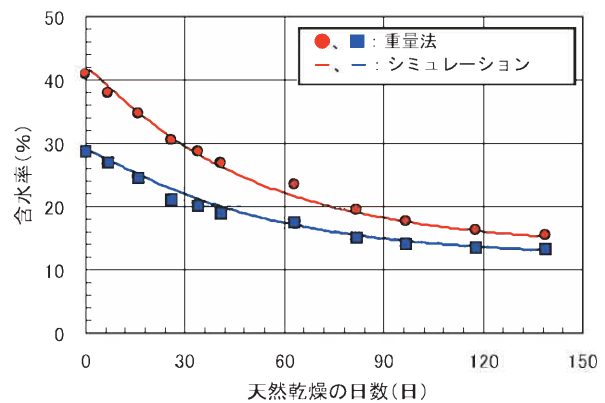


図3 数値シミュレーションの適合性（富山県）

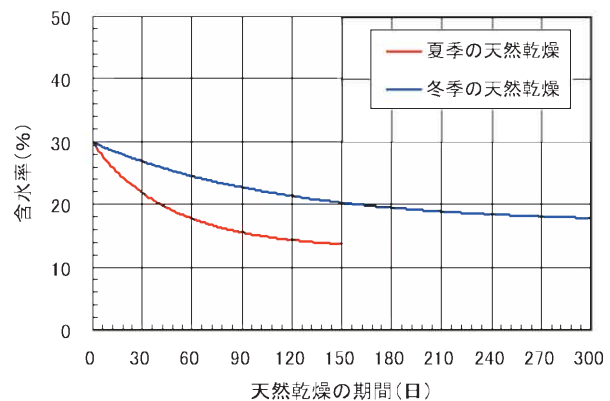


図4 季節の違いによる含水率の経過例（富山県）

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。

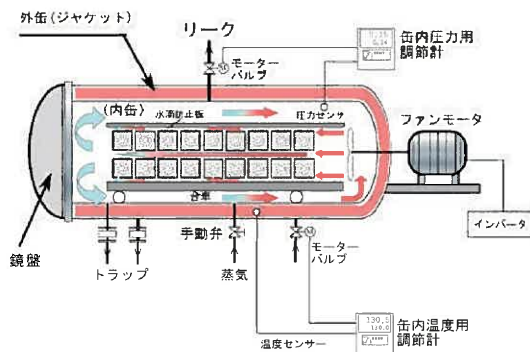


図1 装置の概略図

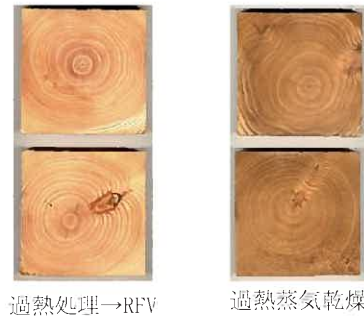


写真 乾燥方法による材色の違い
- 過熱蒸気のみでは暗色化が進む -

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重ね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。

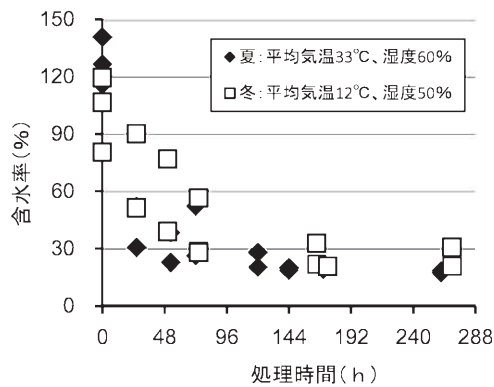


図2 屋内静置材の表面含水率の変化

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

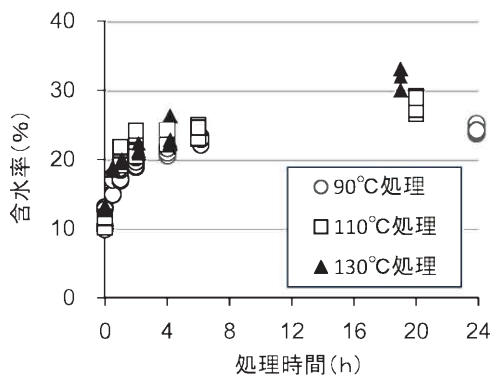


図3 蒸煮処理による含水率変化

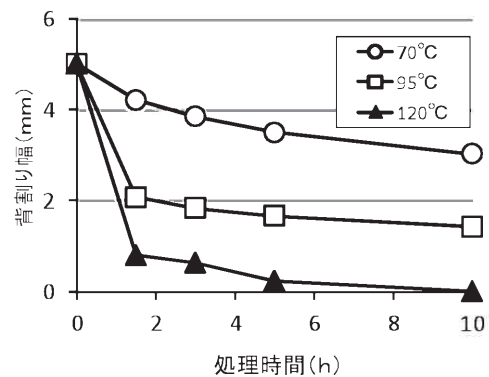


図4 蒸煮による背割り幅の変化

● 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

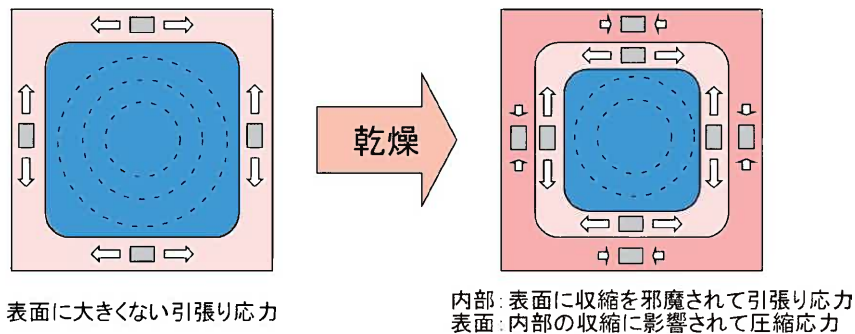
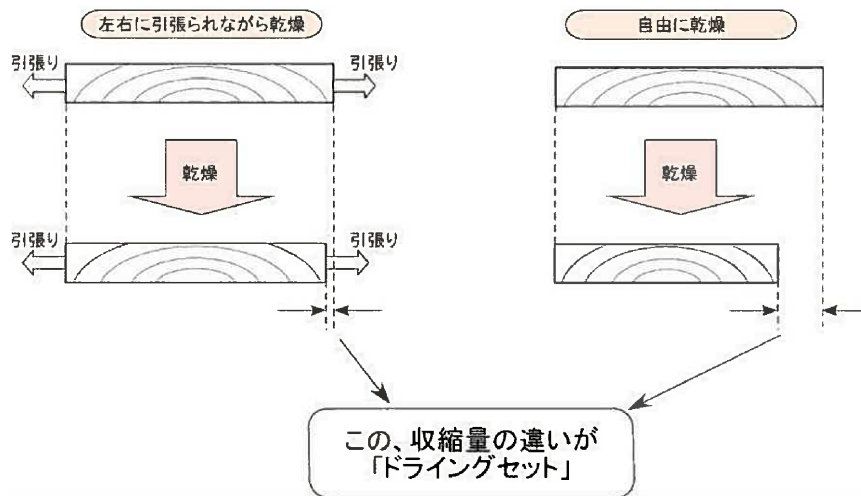
- Q.12** 自然エネルギーを活用した乾燥方法はあるの？ 65

○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、内部の細胞の収縮ともなって、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。

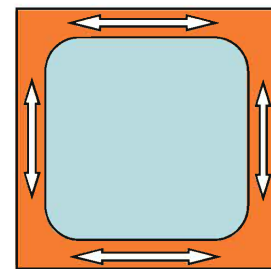
引張られた状態で乾燥するので、ドラインゲットが形成されて、表面は長い寸法を保ったまま、非常に低い含水率まで乾燥してしまいます。

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)

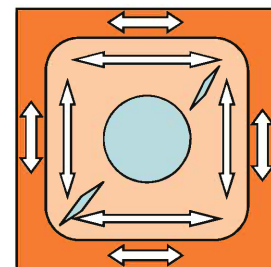
この引張り応力が強すぎると、内部割れを生じます。

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。

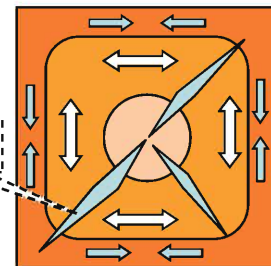
このような理由から、高温セット処理は処理時間が長すぎると内部割れが大きくなります。一方、処理時間が短すぎると、表面のセットが不十分となって材面割れの原因となりますので、処理時間を適切に設定することが重要です。



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

6. Q&A 高温セット処理を用いた乾燥法について

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(℃)	湿球温度(℃)	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。

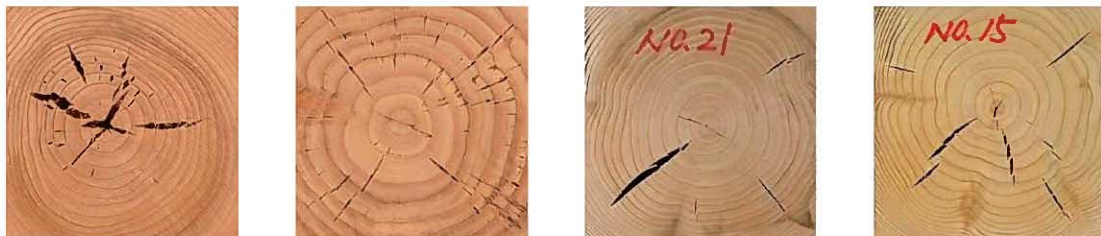


写真 スギ材に発生した様々な内部割れ

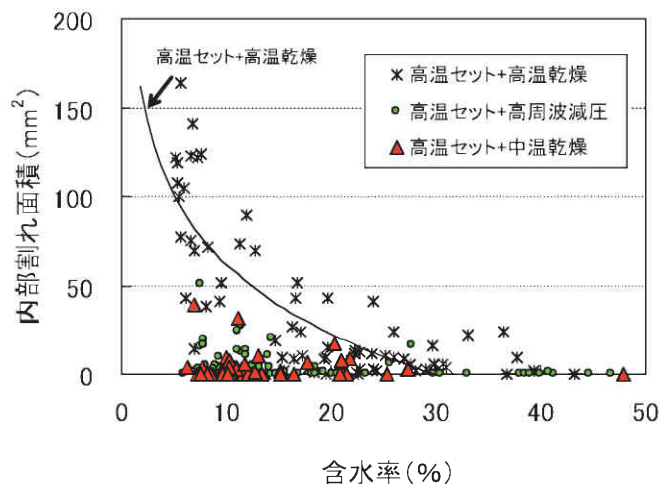


図 仕上がり含水率と内部割れとの関係（スギ）⁶⁻¹⁾

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。

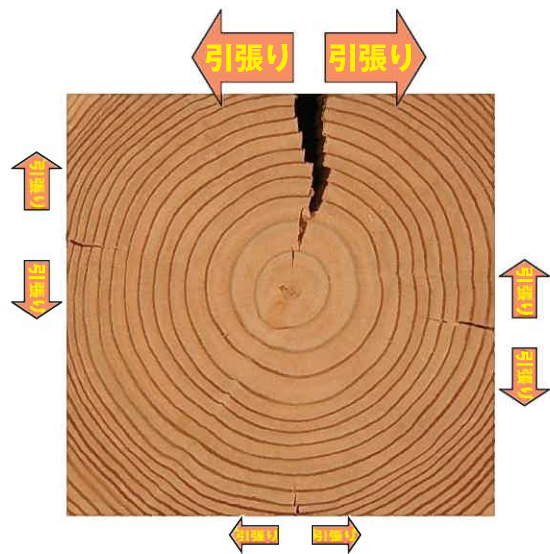


写真 心持ち材に働く引張り応力（イメージ）

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。

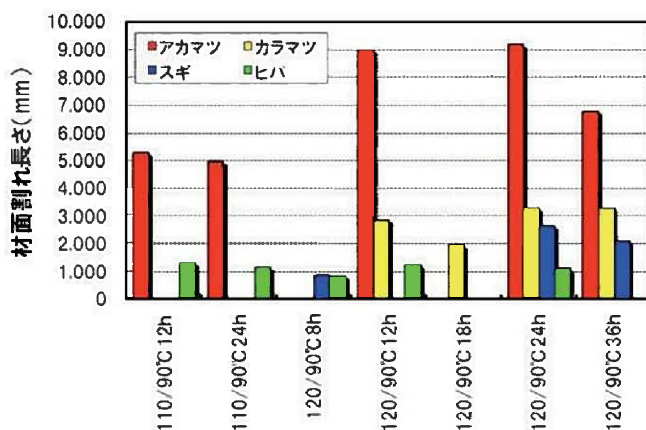


図1 高温セット条件別の材面割れ長さ

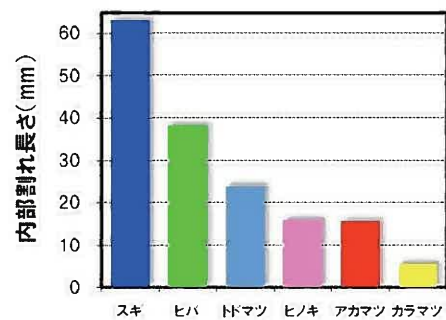


図2 樹種別の内部割れ長さ（平均値）
（本マニュアル書での推奨スケジュール）

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。

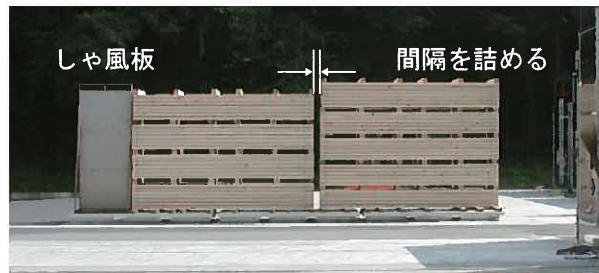


写真1 台車への栈積み状況

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。

6. Q&A 高温セット処理を用いた乾燥法について

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。**

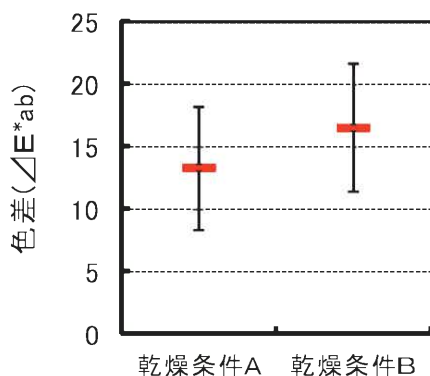
高温で長時間の乾燥を行うと、酸化などの化学反応により、材色変化が大きくなります。高温セット処理後の乾燥温度を低くすれば、材色変化を小さくすることができますが、仕上がりに至るまでの期間が長くなります。

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に至る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	18h 120℃/90℃	120h 90℃/60℃	146h	18h	14
B	95℃/95℃	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時間短いにも関わらず100℃以上の高温で乾燥を行っている時間が長いと考えられます。

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^* : クロマトイクネス指数

(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℃	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
		W.B.T. 98℃								
		D.B.T.105℃ W.B.T. 85℃								
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%	
		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。

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

6. Q&A 他の乾燥法との組み合わせ

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)	乾燥方法	乾燥処理条件		収縮率(%) 最小 - 平均 - 最大	このときの含水率(%) 収縮率が 最小の材 - 平均 - 収縮率が 最大の材	備考	
		乾燥スケジュール					
		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 高周波加熱を 複合	1.2 - 2.3 - 3.1	26.9 - 17.4 - 12.0	福井県産材	
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 高周波加熱を 複合	1.3 - 1.8 - 2.5	17.5 - 17.1 - 14.7	奈良県産材	
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）。

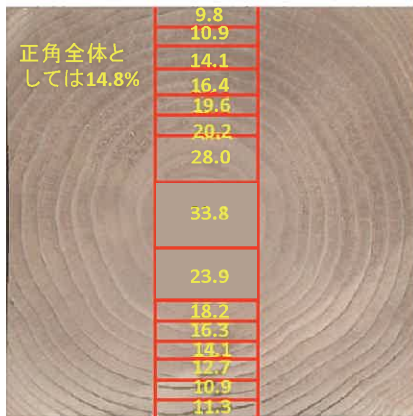


図1 蒸気式（高温セット+中温乾燥）で乾燥したスギ正角の含水率分布（一例）

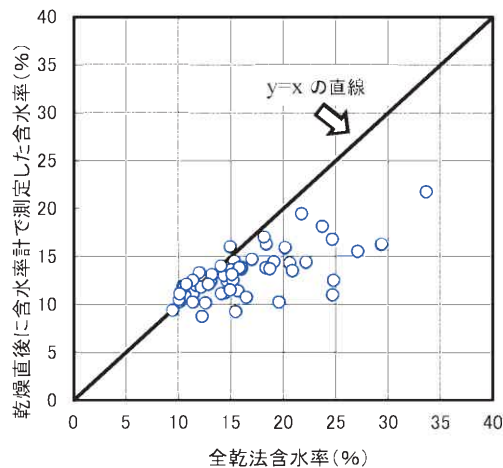


図2 全乾法含水率と高周波式含水率計で測定した含水率との関係

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 ピニールハウスを利用した太陽熱乾燥
(長野県松川村)

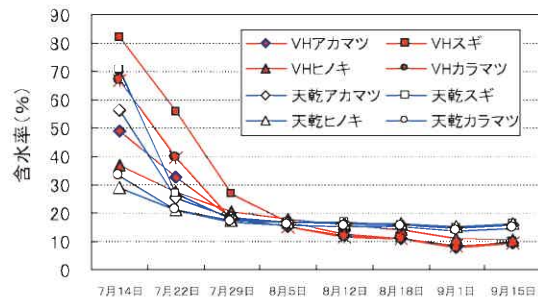


図1 35mm厚板材の含水率経過 (長野林総セ)
(VH: ピニールハウス)



写真2 地熱を利用した乾燥施設 (熊本県小国町)

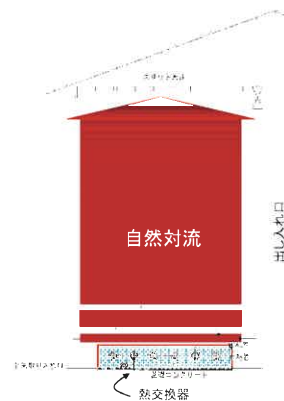


図2 地熱を利用した施設の概要
(特徴) 熱交換器を栈積みの下に設置

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わかりました（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。

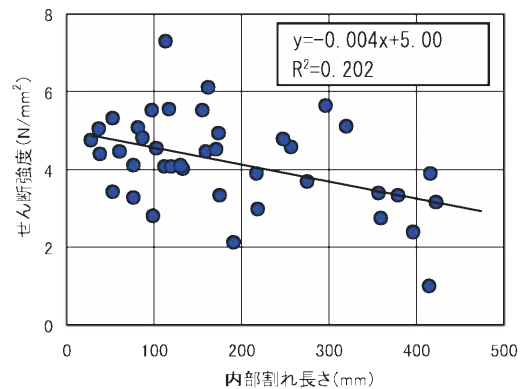


図 内部割れ長さとせん断強度との関係（スギ）

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.
- ・「スギ直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があります。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はもちろんのこと、どの位大きい力が発生するかをあらかじめ把握して、それにあった材料を選んだり、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

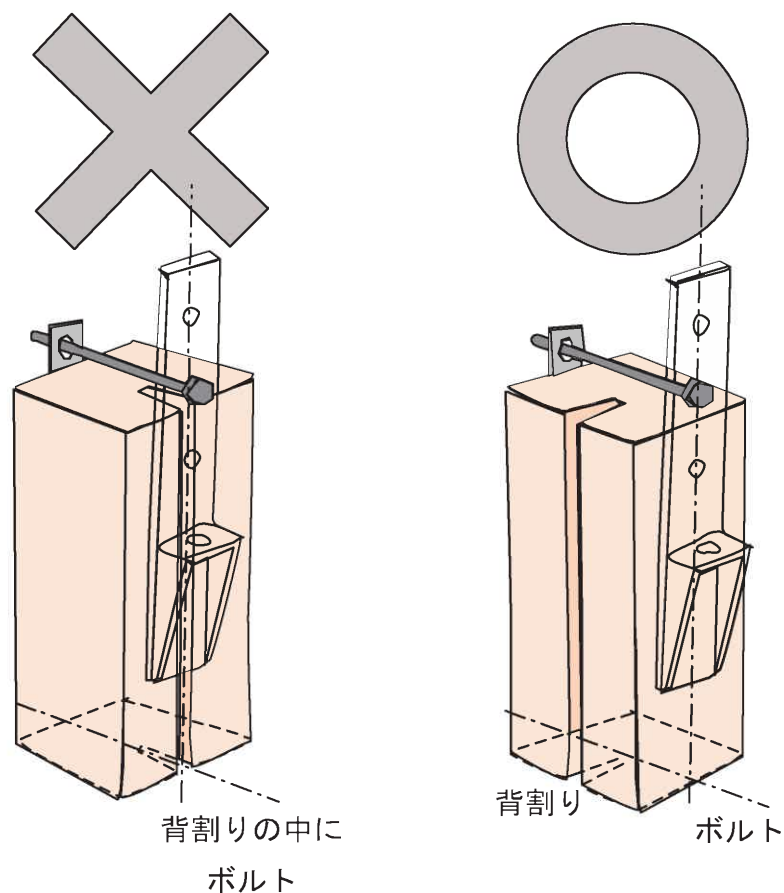
材面割れや背割りは
接合部の性能に影響を及ぼすの？

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。

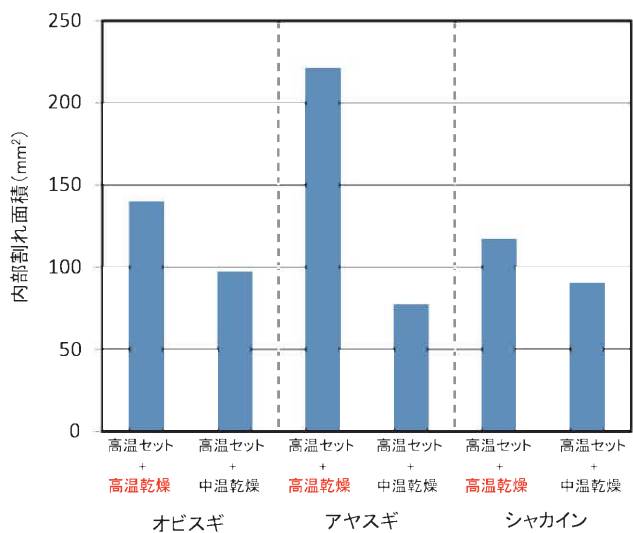


図1 各品種の内部割れ発生量

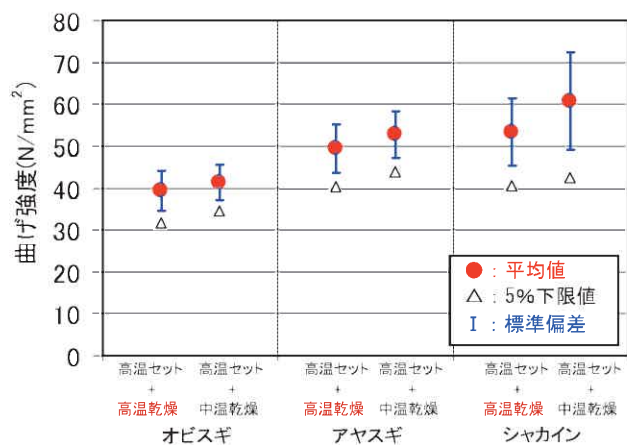


図2 各品種の曲げ強度

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。

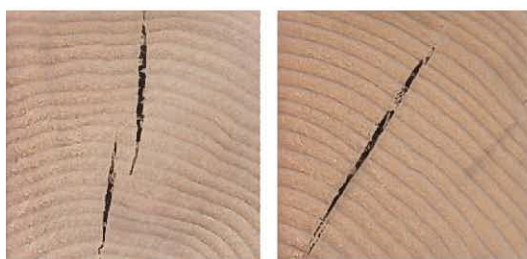


写真1 乾燥後のトドマツ心去り材
(高温セット処理あり)



写真2 乾燥後のトドマツ心去り材
(高温セット処理なし)

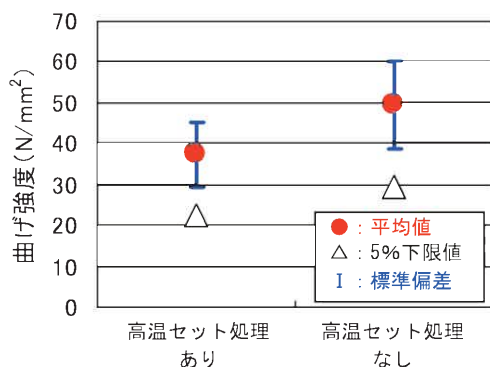


図1 トドマツ心去り材の曲げ強度

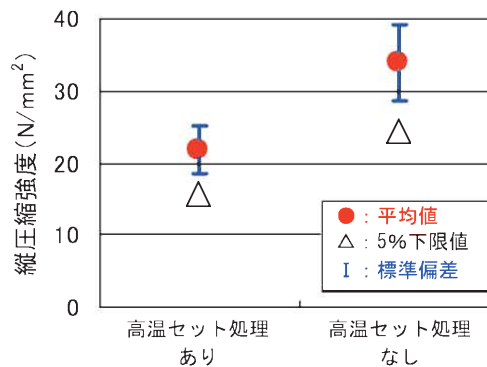


図2 トドマツ心去り材の縦圧縮強度

