

高温乾燥技術利用のための手引き

中 島 厚

はじめに

針葉樹製材の乾燥は、住宅性能保証問題が提起され、欠かすことができない処理工程の一つとして一層認識が深められています。しかし、とりわけ断面の大きな構造部材については水分のバラツキや割れ等の損傷が発生しやすく問題視されている現状があります。一般に針葉樹は広葉樹に比べ乾燥が容易で、乾燥時間も短いと理解されがちですが、これは製材厚さや木取りが同じ場合のことで、柱・梁のような大断面の製材には当てはまりません。また乾燥の難易は乾燥時間の長短とほぼ同じと考えられ、難しい材ほど緩やかな乾燥条件で十分な時間をかけて乾燥を行うのが基本となります。最近、こうした標準的な乾燥方法に対し、大きく発想を逆転させた高温乾燥が針葉樹構造材を対象に利用されはじめています。ここでは高温乾燥の特徴・方法・問題点などについて説明します。

高温乾燥が有効な樹種・材種は？

高温乾燥の対象のほとんどは針葉樹材です。中でも乾燥が困難とされる樹種・材種に適用されるのが一般的です。裏を返せば、通常用いられる低温や中温（一般に80 程度まで）の乾燥条件を適用した場合、損傷が発生し商品価値を著しく損なうと予想される製材です。具体的には、カラマツ・トドマツ・スギなどの心持ち材（樹心を含む製材）で、これらは断面が大きくなるとますます乾燥が困難となります。心持ち材であっても厚さ40mm程度以下であれば割れの危険性は比較的少ないと思われませんが、これらの材は逆に曲がり・ねじれといった狂いが目立ちやすくなる傾向があります。また、経済的な面でも大断面材ほど乾燥時間が長くなるので、普通の乾燥条件では乾燥コストが増大してしまいます。コストを優先させた場合には、中途半端な乾燥に終わり、未乾燥材が流通するなどの問題をはらうことができます。

高温乾燥の特徴

以下が高温乾燥材の主な特徴として挙げられます。

- 1) 標準温度の乾燥に対し、乾燥時間が1/5～1/2に短縮でき、乾燥コストの低減が図られる。ただし、単位時間当たりに消費されるエネルギーは標準条件に対し数倍となる。
- 2) 低温や中温条件に比べ材面割れが少ない。
- 3) 載荷（圧縮）乾燥を併用することにより、標準温度よりも狂いが抑制できる。
- 4) 材色が変化する（明るさの低下、暗色化）。焼け色は材表面を切削することによってかなり低減できる。
- 5) ヤニ^{しんじゅつ}滲出防止効果がある。
- 6) 乾燥スケジュールによっては内部割れが発生する可能性がある。
- 7) 強度低下の可能性はある。ただし、温度条件や処理時間によって異なり、適正な高温スケジュールを適用することにより利用上の問題は少ない。

高温乾燥装置

中温用の乾燥装置も十分な気密性、断熱性、耐久性等に配慮しなければなりません。高温用はこれらが特に要求されます。加えて加熱性がよく温度調節機能に優れていることなどが求められます。

装置内は蒸煮・加湿の際に圧力が発生するのでこれに耐える躯体強度の設計が大切で、使用鋼材は強度と耐腐食性の高い材質のものをを用いることが必要です。気密性では開口部、内張り材施工の際の加工精度や溶接技術等が性能を左右します。送風機は材間風速が2m/s以上を確保できるような性能を有するものを用意し、モータは耐熱性が高いもので保守点検が容易に行える工夫が必要です。その他、高温・高湿条件下に耐えるボイラ、吸排気ダンパ、加熱配管、湿球温度センサー用の給水設備など十分な性能のものを備えることが必要です。

また、乾燥スケジュールは含水率低下に応じて温・湿度を設定する含水率スケジュール方式を基本としますが、重量測定のためサンプル材を取り出す際、高温・高湿下であれば危険（やけど）を伴うので、タイムスケジュール方式が採用されるケースが一般的です。ただしこの場合は、時間設定のためのバックデータを用意しなければなりません。したがって、温湿度制御には両方式に対応できるプログラム式自動制御機器を備えることが必要です。

これらの詳細については、装置メーカーに相談することになりますが、装置価格は従来の標準タイプに比べおおむね1.25～1.45倍になるようです。

高温乾燥スケジュール

高温乾燥スケジュールを組み立てる際には、乾燥時

間の短縮、割れ・狂いの抑制、材色変化の低減、強度低下の防止などを念頭におく必要があります。心持ち材が対象であれば、この中で割れの抑制は第一の目標となり、例えば変色を嫌うあまり温度を下げては乾燥時間が長くなり、また多大な損傷を引き起こしかねませんので十分な検討が必要です。

以下はこれまで、トドマツ・カラマツ・道南スギの心持ち正角材を対象とした試験によって提案できた高温乾燥スケジュールです（表1）。

なお、段階5の設定時間はサンプル材の含水率がおおむね14～17%になった時点で次の降温過程の段階6に進めることを基本としています。この理由は個々の製材の含水率をそろえること、並びに内部水分の減少を図る上で、仕上がり含水率をなるべく低く抑える必要があるからです。

表1 高温乾燥スケジュール（心持ち正角材）

| | | 乾球温度（℃） | 湿球温度（℃） | 時 間（h） | 工 程 |
|------------------|------|---------------|---------|--------|----------|
| ト ド マ ツ | 段階 1 | 100（ヒータoff） | 100 | 2 | 初期蒸煮 |
| | 段階 2 | 97～98（ヒータoff） | 97～98 | 12～16 | 蒸煮 |
| | 段階 3 | 140 | 97～98 | 4 | 昇温・乾燥 |
| | 段階 4 | 120 | 97～98 | 4 | 乾燥 |
| | 段階 5 | 110 | 97～98 | 24～50 | 〃 |
| | 段階 6 | 97 | 97 | 2～4 | 降温第1段階 |
| | 段階 7 | 80 | 78 | 8～12 | 降温第2段階 |
| | 段階 8 | 80 | 77 | 24～48 | 調湿処理 |
| | 段階 9 | 制 御 停 止 | | 2～3日 | 冷却（湿度保持） |

| | | | | | |
|------------------|------|---------------|-------|-------|----------|
| カ ラ マ ツ | 段階 1 | 100（ヒータoff） | 100 | 2 | 初期蒸煮 |
| | 段階 2 | 97～98（ヒータoff） | 97～98 | 10～14 | 蒸煮 |
| | 段階 3 | 130 | 97～98 | 4 | 昇温・乾燥 |
| | 段階 4 | 120 | 97～98 | 6 | 乾燥 |
| | 段階 5 | 110 | 93 | 24～50 | 〃 |
| | 段階 6 | 93 | 93 | 2～4 | 降温第1段階 |
| | 段階 7 | 80 | 78 | 8～12 | 降温第2段階 |
| | 段階 8 | 80 | 77 | 24～48 | 調湿処理 |
| | 段階 9 | 制 御 停 止 | | 2～3日 | 冷却（湿度保持） |

| | | | | | |
|------------------|------|---------------|-------|-------|----------|
| 道 南 ス ギ | 段階 1 | 100（ヒータoff） | 100 | 2 | 初期蒸煮 |
| | 段階 2 | 97～98（ヒータoff） | 97～98 | 12～16 | 蒸煮 |
| | 段階 3 | 130 | 97～98 | 4 | 昇温・乾燥 |
| | 段階 4 | 120 | 97～98 | 4 | 乾燥 |
| | 段階 5 | 110 | 97～98 | 24～50 | 〃 |
| | 段階 6 | 97 | 97 | 2～4 | 降温第1段階 |
| | 段階 7 | 80 | 78 | 8～12 | 降温第2段階 |
| | 段階 8 | 80 | 77 | 24～48 | 調湿処理 |
| | 段階 9 | 制 御 停 止 | | 2～3日 | 冷却（湿度保持） |

表2 乾燥後の品質(トドマツ心持ち正角材)

| | | 中 温 条 件 | 高 温 条 件 |
|------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| 乾 燥 直 後 | 初期含水率 (%) | 72.0 44.3~131.7 | 70.0 42.2~134.4 |
| | 含 水 率 (%) | 23.2 14.0~ 49.6 | 23.1 12.9~ 49.3 |
| | ね じ れ (度/3.65m) | 3.2 0.4~ 8.3 | 2.3 0.6~ 7.6 |
| 鉋 削 後 | 曲 が り (mm/3.65m) | 7.3 2.5~ 18.0 | 4.7 0.5~ 15.0 |
| | 含 水 率 (%) | 14.6 12.8~ 21.2 | 14.3 12.4~ 17.6 |
| | ね じ れ (度/3.65m) | 2.1 0.3~ 6.7 | 0.9 0.0~ 3.8 |
| | 曲 が り (mm/3.65m) | 4.6 0.0~ 13.5 | 2.9 0.5~ 11.0 |
| | 表面割れ面積 (cm ² /材) | 44.7 0.0~ 97.5 | 17.3 0.0~ 82.8 |
| | 木口割れ面積 (cm ² /材) | 40.8 0.0~167.6 | 4.6 0.0~ 19.9 |
| | 割れの総面積 (cm ² /材) | 85.5 9.4~167.6 | 21.9 0.2~ 99.7 |

注：1. 数値は、上の段が平均値、下の段が範囲(最小値~最大値)。
 2. 鉋削後の含水率は約4か月養生後の値。
 3. 試験材数は、各条件につき40体。

また、湿度は全期間にわたり、常に高い雰囲気を持する傾向であるため、強制排気は行わないで(ダンパは常に閉じ状態)、むしろ加湿しながら自動制御させます。この時、設定した値(湿球温度)が高すぎると湿度が上がりにくく連続で蒸煮され、ボイラー燃料が過大に消費するケースも考えられますので、間欠蒸煮となるように2~3 下げ気味に設定します(例えば段階2の煮煮過程では、100 の目標に対し、湿球温度を97~98 に設定)。

乾燥後の品質

トドマツ心持ち正角材(寸法：114×114×3,650mm、鉋削仕上げ105mm角)の高温乾燥後の品質例を表2に示しました。表には中温条件(55~70)によるデータを併記し高温条件と比較しています。なお、各乾燥条件の試験材数は40体で、棧積みの上部からは約2.3トンの重しを載せ、載荷(圧縮)乾燥を行っています。

この結果、初期含水率と仕上がり含水率の平均値は両条件とも同程度で、ねじれ・曲がり・割れの発生はいずれも高温条件の方が小さな値となり、高温乾燥の方が有利であることが確認されました。また、乾燥時

間は高温乾燥が約4.5日(冷却時間を含めない)となり、中温条件では約2週間です約7割もの短縮を図ることができました。

また、ここには示しませんがカラマツや道南スギについても同様の結果が得られ、特にカラマツは割れの程度が極めて低く、トドマツに比べると約1/3の発生量に留まりました。

載荷乾燥は非圧縮(棧積み上に何も載せない)に比べ狂いが抑制されるとともに、割れを低減させる効果も確認されているので、必ず取り入れる必要がある技術です。これは非圧縮の条件でも、下方に棧積みされた材ほど上方に積まれ、荷重がさほどかからない製材よりも、割れや狂いが少ない傾向となることなどからみても明白です。さらに棧積みについては大断面の製材ほど、材と材との間隔を十分に設けることなども品質維持の点で重要と思われます。

次に強度特性について、曲げ破壊試験の結果を表3に示します。これによると、高温条件の曲げ強さは中温条件に対し1割程度低い結果となりました。しかし、曲げヤング係数は乾燥条件の違いによる差は認められませんでした。ただし、すべての試験材の曲げ強さは建築基準法に示されているトドマツの材料強度値

表3 曲げ試験結果(トドマツ心持ち正角材)

| | | 中温条件 | 高温条件 |
|--|------|-------|-------|
| 試験材数(体) | | 40 | 40 |
| 曲げ強さ (kgf/cm ²) | 平均 | 441.6 | 403.4 |
| | 最小 | 326.8 | 265.6 |
| | 最大 | 630.1 | 582.3 |
| | 標準偏差 | 67.9 | 87.7 |
| 曲げヤング係数 ($\times 10^3$ kgf/cm ²) | 平均 | 103.2 | 105.8 |
| | 最小 | 84.6 | 82.8 |
| | 最大 | 124.4 | 129.0 |
| | 標準偏差 | 9.7 | 10.3 |

(225kgf/cm²)を上回りましたので、利用上の問題はほとんどないと言えます。

高温乾燥材の品質管理

乾燥材の品質管理は、住宅の高気密・断熱化に対処する上で大変重要な役割と認識されはじめています。ここで取り上げる品質管理は取りも直さず、水分管理という表現に置き換わります。すなわち、管理上の問題点は、仕上がり含水率と内部水分の傾斜(材表面ほど乾いている)の2点に絞られると考えられます。また、この二つの問題は互いに関係し、影響を与えています。図1は道南スギ心持ち正角材について、乾燥後に得られた平均含水率に対する表層含水率および内部の中心含水率の関係を示したものです。なお、表層含水率は材面から15mm深さまで、中心含水率は断面の中心点からおよそ8mmの範囲内における全乾法による値です。

平均含水率がかなり高い値であっても表層部は比較的乾燥していますが、中心部は曲線的に増大し、平均含水率が低いほど表層部と中心部の含水率差が縮小してくることが明らかです。30%以下では互いに直線的に低下しており、平均含水率が20%の時、表層含水率は15%前後、中心含水率は約30%弱となり、その開きは15%ほどです。また、中心部の含水率を20%以下にするためには平均値で14~16%程度に上げる必要性が読みとれます。さらに内部水分の完全な均一化(水分傾斜なし)のためには、およそ12%の含水率に整えることも要求されてきます。このことは、中温条件で乾燥された製材もほぼ同様の傾向です。長年住まいした住宅に使われた柱材の含水率を調べるとおよそ12%であったなどの報告がありますが、非常に納得できる数字であると思います。

しかし、乾燥後の含水率は表4に示すように初期含

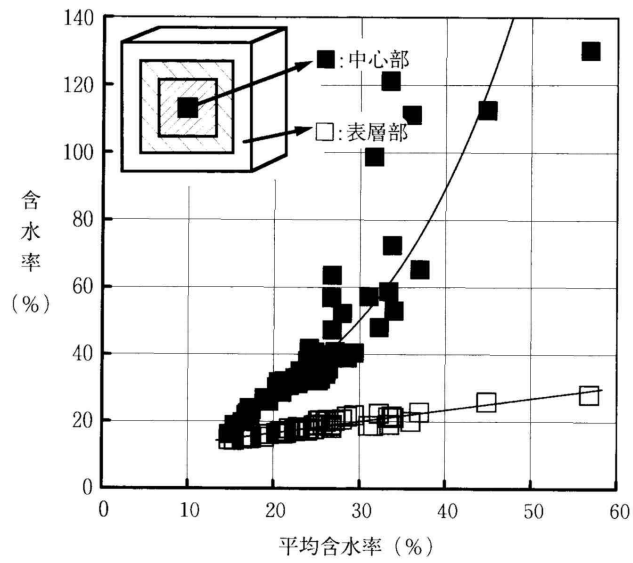


図1 水分傾斜の関係(スギ心持ち正角材)
注: 試験材数は54体

表4 針葉樹心持ち正角材の初期含水率の例

| | トドマツ | 道南スギ | カラマツ |
|------|------|------|------|
| 平均値 | 71% | 86% | 40% |
| 最小値 | 42% | 51% | 33% |
| 最大値 | 134% | 137% | 57% |
| 試験材数 | 80体 | 54体 | 80体 |

含水率のバラツキによって影響を受けるため、表4に示すように特にトドマツ、スギは仕上がり含水率が不均一となりやすく問題です。この対策としては以下が考えられます。

- 初期含水率が近似する製材ごとに仕分けして乾燥する。
- 予備乾燥あるいは前処理を併用する。
- 乾燥時間を十分に確保する。
- 乾燥後、個々の製材含水率を計測し、選別する。
- 乾燥後、十分な養生期間を設ける。

などです。

このうち、比較的簡易な方法としては、 ρ 、 V 、 W が有効と思われます。 ρ は、一定寸法の場合、製材重量と含水率に明確な関係が得られましたので、重量による選別法が有効と考えられています。 W はサンプル材の含水率を監視しながら乾燥時間を調整することにより、ある程度対応が可能です。また、 V については図2に示すように、含水率のバラツキは日を追うごとに縮小していくことが分かります。気温の高い季節には約2か月間、冬季の場合は約4か月間も放置すれば

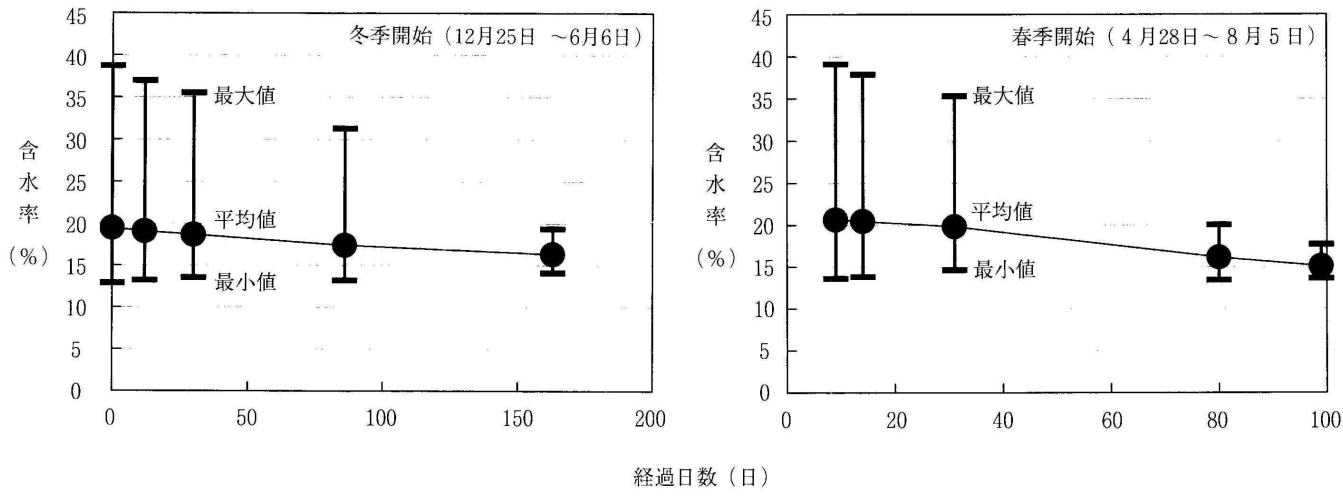


図2 養生中の含水率変化(トドマツ心持ち正角材)
注: 試験体数はいずれも54本, 屋内放置

かなりバラツキの低減が図れるものと期待できます。

ただし、養生中の含水率低下に伴う狂いの変化は、製材ごとの材質特性が絡んできますので必ずしも一定の割合とはなりません。一般に増加するので注意が必要です。一例として、トドマツ心持ち正角材（材長 3.65m）120体を8か月間養生した時のデータを紹介すると、含水率が平均約25%から15%まで低下した時のねじれの変化は矢高平均で約6.6mmとなりました。また割れは、長さが若干伸び、幅は縮む傾向となりました。これらのことから、乾燥後は十分な養生期間を設け、その後に修正挽きを行い最終製品とするような工程管理を是非、実行していただきたいと思ひます。

おわりに

高温乾燥処理された道産針葉樹心持ち材を建築構造材に利用する試みがすでに道内各地で進められています。価格的な問題を除くと、一般には乾燥後、鉋削された製材の割れ・狂いが許容内で、ユーザーである工務店等が示す条件を満たせば問題なく流通が可能となります。しかし、供給される乾燥材の品質が適正範囲内であっても、特に含水率のバラツキは常に問題視される状況にあります。言うまでもなく乾燥材の形状変化の問題は水分増減に起因します。この意味で建築用構造材の安定した供給体制の確立に向け乾燥技術・水分管理技術は非常に重要となります。

(林産試験場 製材乾燥科)