

カラマツ心去り正角材（2丁取り）の乾燥特性及び強度特性の解明

吉田孝久，奥原祐司，今井信，山口健太，柴田直明^{※1}，田畑衛^{※2}，山内仁人^{※3}，山岸信也^{※4}

今後、増産が見込まれるカラマツ大径材であるが、この大径材から製材された心去り正角材の乾燥試験及び曲げ強度試験を行い、その利用有効性について検討した。

試験の結果、(1) 初期推定含水率がおおよそ 40～50%であったカラマツ心去り正角材の天然乾燥では、1～2 年間の天然乾燥でその平衡含水率は 16～18%程度となった。(2) 14 日間の 90℃中温乾燥により、カラマツ心去り正角材は含水率 12.7% (9.2～16.0%) に仕上がった。(3) 9 日間の高湿セット乾燥では、乾燥による材面割れや内部割れはほとんどなく平均 15%程度の含水率に仕上がったがバラツキは大きかった。(4) 柁目荷重で行った実大材曲げ試験では、曲げヤング係数及び曲げ強さの平均値は、天然乾燥材が 11.25 kN /mm²，57.3N/mm²，中温乾燥材が 12.74kN/mm²，51.0N/mm²，高湿セット乾燥材が 10.83 kN /mm²，41.1N/mm² であり、天然乾燥材は全体の上位に位置していた。

キーワード：カラマツ心去り材，天然乾燥，中温乾燥，高湿セット乾燥，曲げ強度

1 はじめに

長野県における人工林カラマツは、戦中から戦後にかけての乱伐により荒廃した県下の森林の復興と、その後の拡大造林の主役として昭和 40 年代まで、県下各地で広く植栽されてきた。その結果、長野県のカラマツ人工林面積は、全人工林の 5 割を超えるに至っており、近年、この資源が成熟する中で、カラマツ材の一層の利用拡大が切望されている。

現在、利用が多い国産材の建築構造用材は、間伐材から製材された心持ち柱材が主体であり、今後はこの心持ち柱材に加え、大径材から製材される心去り材の柱材や梁桁材の生産が多くなることが予想される。

しかし、心去り材の利用に当たっては、その材質を把握しておく必要があり、実大材での乾燥特性や強度特性に関わる文献は多くない。カラマツ心去り材に関しても同様で、その材質を知る意味での基礎的研究が数件(例えば 2)、実大材の材質や利用に関する研究³⁾が見られる程度である。

今後、カラマツ心去り材の利用を考える場合、乾燥時間の短縮のための乾燥方法や、また、乾燥温度による材質変化や曲げ強度を知るための荷重方向を考慮した強度性能等、様々な検討をしなければならない。

本試験においては、カラマツ心去り二方柁正角材について、天然乾燥、90℃中温乾燥、110℃高湿セット乾燥における乾燥特性と、それぞれの乾燥材の柁目方向での曲げ強度性能について検討し、今後の心去り正角材の利

用方向を探った。

2 試験の方法

試験は以下の 3 回を実施し考察した。3 回の試験の概要を表-1 に示した。

試験 A：心去り正角材の天然乾燥と高湿セット乾燥 (1)

試験 B：心去り正角材の天然乾燥と高湿セット乾燥 (2)

試験 C：心去り正角材の天然乾燥と中温乾燥

試験 A と試験 B は、同一内容の試験で、同一丸太から製材された 2 本の心去り正角材の一方を天然乾燥、一方を高湿セット乾燥として両者を比較検討した。

試験 C は、同一丸太から製材された 2 本の心去り正角材の一方を天然乾燥、一方を中温乾燥として両者を比較検討した。

表-1 試験の概要

| 樹種 | カラマツ | | | | | |
|------|----------------|---------|------|---------|------|------|
| 正角寸法 | 140×140×4000mm | | | | | |
| 試験 | 試験 A | | 試験 B | | 試験 C | |
| 乾燥方法 | 天然乾燥 | 高湿セット乾燥 | 天然乾燥 | 高湿セット乾燥 | 天然乾燥 | 中温乾燥 |
| 正角本数 | 17 | 17 | 20 | 20 | 12 | 12 |

3 試験 A：

「心去り正角材の天然乾燥と高湿セット乾燥 (1)」

3.1 試験の方法

3.1.1 供試材

供試材は、長さ 4m の長野県産カラマツ丸太 17 本とした。供試した丸太の末口短径と元口短径を表-2 に示した。

※1 元林業総合センター木材部

※2 現上小地域振興局林務課

※3 現上伊那地域振興局林務課

※4 現南信州地域振興局林務課

表-2 供試丸太の概要

| | 丸太短径 (cm) | |
|------|-----------|------|
| | 末口 | 元口 |
| 平均値 | 37.1 | 42.2 |
| 最大値 | 40.3 | 50.5 |
| 最小値 | 35.0 | 37.7 |
| 標準偏差 | 16.5 | 37.6 |

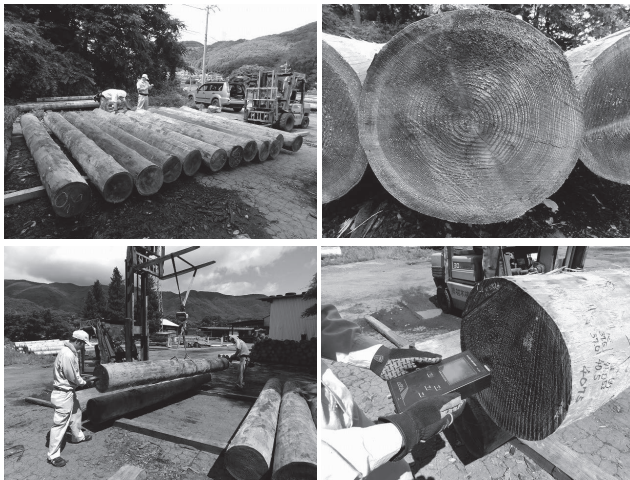


写真-1 供試丸太の概要 (丸太ヤングの測定は試験Cのみ)

丸太の末口及び元口短径を測定した後、側面定規にて心去り135mm正角材を2丁取りした(図-1)。

製材の各種初期値は、製材後1週間以内に測定した。製材の4材面は木表側をA面とし、順次、B、C、D面とし、反りはA・C面、曲がりにはB・D面で測定し、両者の最大を最大曲がりとした。含水率は、高周波式含水率計(MOCO2)を用い、A面の材中央付近で測定した。

各種初期値を測定後、同一丸太から得られた2本の正角材の内、一方を天然乾燥とし、残りの一方は高温セット乾燥に供した。

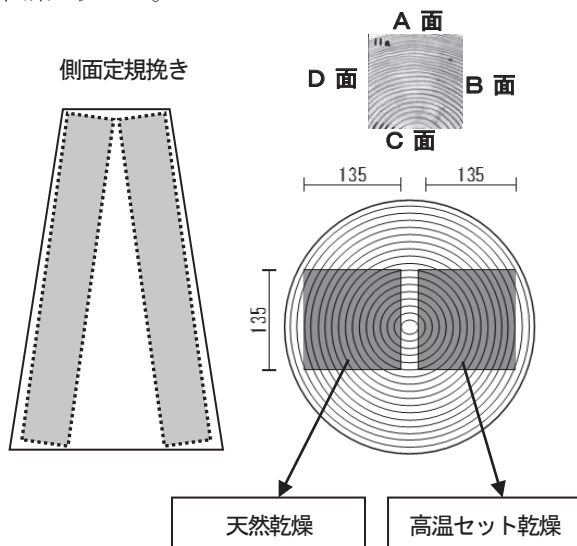


図-1 製材木取り

3.1.2 乾燥試験

天然乾燥は、屋根付きの屋外天然乾燥場にて平成26年(2014)1月14日から平成27年(2015)2月27日までの約13ヵ月間実施した。

乾燥経過を調査するため、乾燥初期の冬から秋にかけては1ヶ月ごとに試験体重量を測定した。13ヶ月経過となる平成27年2月には天然乾燥を終了し寸法等を測定した。ここで、試験体の材面割れは1面ごとにcm単位で測定し、1体ごとの合計長さを求めた。また、ねじれについても測定した。

含水率は、A面の材面割れが多くて測定が困難だったためB面の中央付近で測定した。

高温セット乾燥は、当所所有の(株)新柴設備の高温型蒸気式木材乾燥装置を使用し、表-3の乾燥スケジュール表に従って約9日間の乾燥を行った。

乾燥初期にヤニ滲出防止のための95℃蒸煮を行った後に材面割れ防止と乾燥時間の短縮を兼ねた110℃の高温セット処理を18時間行った。さらに引き続き90℃の中温乾燥を192時間(8日間)実施した。

高温セット乾燥を終了した17本は、栈積み状態で約3ヵ月間養生した後、再度、製材直後と同項目の測定を行った。また、この際には材面割れ合計長さを測定し、また、ねじれについても測定した。

乾燥を終了した心去り正角材はモルダー掛け後に曲げ強度試験に供した。

表-3 高温セット乾燥スケジュール(試験A、B)

| 乾球温度(°C) | 湿球温度(°C) | 時間(h) | 備考 |
|----------|----------|-------|-------|
| 95 | 95 | 8 | 蒸煮 |
| 110 | 80 | 18 | 高温セット |
| 90 | 60 | 192 | 中温乾燥 |

※蒸煮時間は昇温(90℃)後からの時間



写真-2 人工乾燥の様子



写真-3 天然乾燥の様子

3.1.3 曲げ強度試験

曲げ試験体は、長さ4mの正角材の一端から2,400mmの位置で鋸断して作製した(図-2)。

曲げ試験体の鋸断時には、その隣接部から全乾法による含水率試験片(約30mm長)を切り出し、また、この試験片を用いて、全乾密度と平均年輪幅を測定した。

水分傾斜を測定するため、17本の試験材の内8本を無作為に選び含水率試験片を切り出した隣から水分傾斜測定用の試験片を切り出した(図-2)。

2,400mmの曲げ試験体は、モルダーにより120mm×120mmの正角に仕上げ、再度、寸法・材面割れ等を測定した。

曲げ試験は、実大材曲げ強度試験機：(株)島津製作所製UH-1000kNAを用い、下部支点間距離(スパン)2,160mm、上部荷重点間距離720mmの3等分点4点荷重方式で実施した。

試験体は柾目面であるB面あるいはD面を上側にセットし、荷重速度は10mm/分とした。なお、試験Aではモーメント一定区間(上部荷重点間のスパン720mm)におけるたわみも測定した。

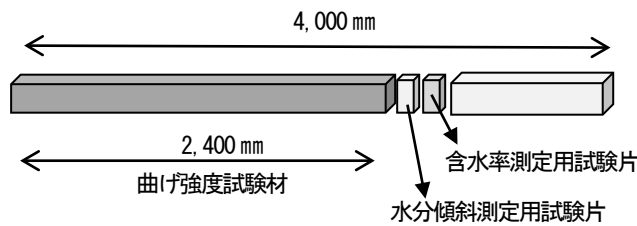


図-2 曲げ試験材と含水率試験片の切り出し

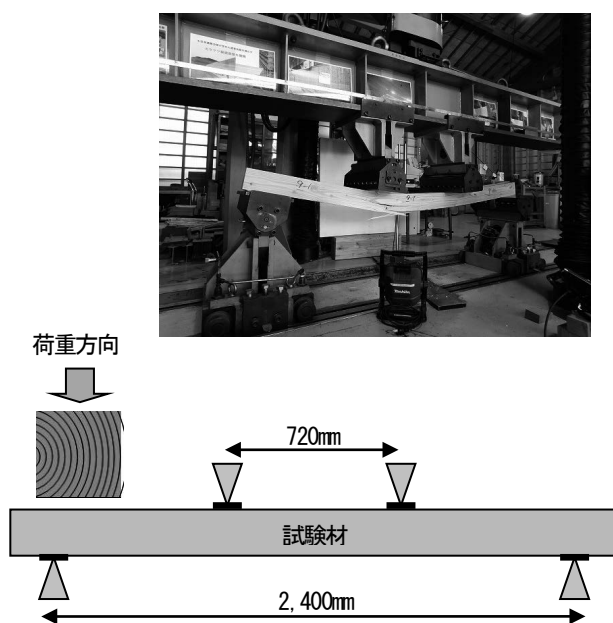


図-3 曲げ強度試験の条件と曲げ試験の様子

荷重-変位曲線の比例域内の荷重と変位の関係から曲げヤング係数(MOE)を、最大(破壊)荷重から曲げ強さ(MOR)を算出した。

3.2 結果と考察

1本の丸太から2丁取りした心去り正角材の形質の差を表-4に示した。

表-4 1本の丸太から2丁取りした心去り正角の形質の差(試験A)

| | 最大曲がり (mm/4m) | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | 含水率計 (%) |
|------------------------|------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1本の丸太から製材された2本の正角の形質の差 | 3.6 (0~12) | 1.29 (0.12~2.51) | 11.7 (1.0~30.5) |

()内は最小値~最大値

製材後の曲がりは少ないものの、木表側に反る材が多く見られた。しかし、1本の丸太から2本の心去り正角を製材して、片方の正角が大きく曲がったとしても、もう一方の正角もそろって大きく曲がる傾向はなかった。

動的ヤング係数については、1本の丸太から製材された2本の正角に大きな差はなく同程度の値を示した。

3.2.1 天然乾燥

心去り正角の天然乾燥での含水率経過を表-4に示した。

乾燥途中の含水率は、天然乾燥終了時の含水率(全乾法)を元に逆算したものである。平均含水率を見ると、乾燥開始後5ヵ月程度でかなり乾燥が進み、7ヵ月後にはほぼ平衡状態になっているかに見える。しかし、13ヵ月後において含水率(全乾法)の平均は17.7%であったにも関わらず、内部はまだ完全には乾燥しておらず、水分傾斜が残った状態であった(図-5)。

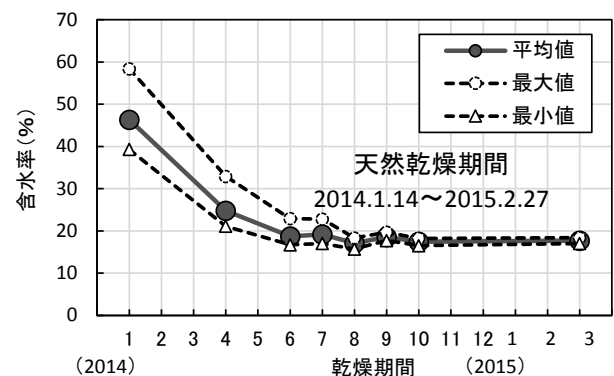


図-4 カラマツ心去り正角材の天然乾燥経過(試験A)

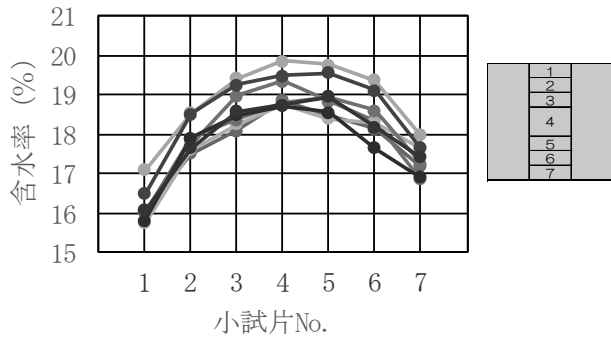


図-5 天然乾燥13ヵ月経過後の水分傾斜 (試験A)

平成 26 年 1 月に天然乾燥を開始した試験体の形質の初期値を表-5, 表-6 に示した。また, 13 ヲ月の天然乾燥後の測定値を表-7, 表-8, 表-9 に示した。

製材後 (乾燥前) の反りは木表側に多く見られたが, 乾燥後には木裏側に反る材が多かった。

ねじれは, 13 体が 0~8 mm/4m の範囲にあったが, 4 体は 10~22 mm/4m であった。

材面割れは, ほぼ全数において, 木表である A 面 (板目面) の全長にわたって存在した。木裏である C 面に材面割れがあった試験体は 3 体のみで, B, D 面 (柁目面) には材面割れが認められなかった。

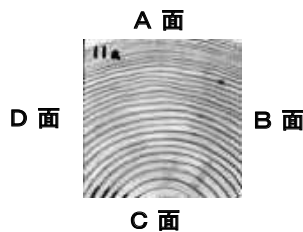


表-5 製材後の形質 (試験A) (1) -天然乾燥用: 乾燥前-

| | 幅A (mm) | 幅B (mm) | 曲がり (mm) | |
|-----|---------|---------|----------|------|
| | | | AC 面 | BD 面 |
| 平均値 | 135.90 | 135.72 | 1.1 | 0.9 |
| 最大値 | 137.32 | 138.20 | 6 | 5 |
| 最小値 | 134.42 | 133.21 | 0 | 0 |

表-6 製材後の形質 (試験A) (2) -天然乾燥用: 乾燥前-

| | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | 密度 (g/cm ³) | 含水率計 (%) |
|-----|-------------------------------|-------------------------|----------|
| 平均値 | 10.88 | 0.673 | 56.8 |
| 最大値 | 14.39 | 0.728 | 89.0 |
| 最小値 | 6.78 | 0.589 | 41.5 |

表-7 天然乾燥後の形質 (試験A) (1) -乾燥後-

| | 幅A (mm) | 幅B (mm) | 曲がり (mm) | |
|-----|---------|---------|----------|------|
| | | | AC 面 | BD 面 |
| 平均値 | 132.54 | 133.26 | 0.5 | 2.8 |
| 最大値 | 134.17 | 135.36 | 5 | 12 |
| 最小値 | 130.36 | 131.21 | 0 | 0 |

表-8 天然乾燥後の形質 (試験A) (2) -乾燥後-

| | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | 密度 (g/cm ³) | 含水率計 (%) |
|-----|-------------------------------|-------------------------|----------|
| 平均値 | 12.12 | 0.544 | 19.0 |
| 最大値 | 14.30 | 0.598 | 24.0 |
| 最小値 | 8.17 | 0.486 | 14.0 |

表-9 天然乾燥後の形質 (試験A) (3) -乾燥後-

| | 全乾法含水率 (%) | 材面割れ (cm) | ねじれ (mm/4m) |
|-----|------------|-----------|-------------|
| 平均値 | 17.7 | 383 | 6.5 |
| 最大値 | 18.4 | 480 | 23 |
| 最小値 | 17.0 | 220 | 0 |

3.2.2 高温セット乾燥

製材直後 (乾燥前) の形質の初期値を表-10, 表-11 に示した。

製材直後の縦振動法で求めた動的ヤング係数 (Efr) には, かなりのバラツキが認められた。また, 反りは主として木表側である A 面で測定された。B, D 面における曲がりの出現には, 特定の傾向は認められなかった。

表-10 製材後の形質 (試験A) (1) -高温セット乾燥用: 乾燥前-

| | 幅A (mm) | 幅B (mm) | 曲がり (mm) | |
|------|---------|---------|----------|------|
| | | | AC 面 | BD 面 |
| 平均値 | 136.04 | 136.01 | 1.9 | 3.2 |
| 最大値 | 137.84 | 137.77 | 7 | 12 |
| 最小値 | 133.86 | 133.98 | 0 | 0 |
| 標準偏差 | 1.10 | 1.19 | 2.4 | 3.4 |

表-11 製材後の形質 (試験A) (2) -高温セット乾燥用: 乾燥前-

| | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | 密度 (g/cm ³) | 含水率計 (%) |
|------|-------------------------------|-------------------------|----------|
| 平均値 | 10.88 | 0.673 | 56.8 |
| 最大値 | 14.39 | 0.728 | 89.0 |
| 最小値 | 6.76 | 0.589 | 41.5 |
| 標準偏差 | 1.77 | 37.9 | 10.9 |

高温セット乾燥の乾燥状況を図-6 に示した。乾燥経過は, ほぼスケジュール通りに運転された。

高温セット乾燥・養生後の形質の測定値を表-12, 表-13, 表-14 に示した。

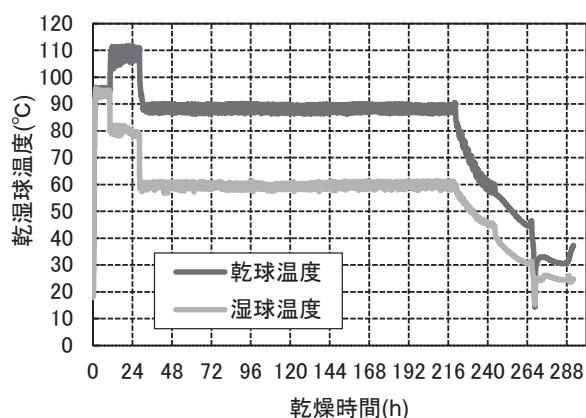


図-6 高温セット乾燥の乾燥経過（試験A）

乾燥に伴う収縮は、A面で3.7 mm程度、B面で3.2 mm程度であった。

A面あるいはC面での乾燥後の反りは、全て木裏側であるC面で測定された。これは、製材後、木表側であるA面に多かった反りが、乾燥後には木裏側のC面に逆転しており、製材後の反りが乾燥によりそのまま大きくなることはなかった。

4m材でのねじれは、17本中15本は8 mm以下であり、既往の心持ち材のデータ（例えば④）と比較して今回の心去り材のねじれはかなり小さい値であった。これは、心去り材の場合、心持ち材に比べ繊維傾斜の大きい髄周辺部の未成熟材部の割合が少なかったためと推測される。しかし、中には21 mm/4mと31 mm/4mのねじれの大きい材も存在した。なお、ねじれの大きかった2試験体はモルダーでの整形時に軽微な未切削面が残った。

材面割れは心去り材であったため予想通り少なかったが、発生個所は主として木表であるA面で観察された。また、天然乾燥材では、モルダー仕上げ後にも主として木表側のA面に材面割れが残った。

平均年輪幅は4.1 mmであり、特別に狭くはなかった。

仕上り含水率は、高温セット処理後、中温乾燥を8日間、さらに養生期間を3ヵ月間置いたにも関わらず、平均で18.3%とやや高めであった。仕上がり含水率を15%以下とするためには、中温乾燥の時間をさらに延長する必要がある。

表-12 高温セット乾燥・3ヵ月養生後の形質（試験A）

| | 幅A (mm) | 幅B (mm) | 曲がり (mm) | |
|------|---------|---------|----------|-----|
| | | | AC面 | BD面 |
| 平均値 | 132.39 | 132.77 | 4.9 | 0.6 |
| 最大値 | 135.11 | 134.51 | 0 | 8 |
| 最小値 | 128.32 | 130.45 | 9 | 4 |
| 標準偏差 | 1.75 | 1.38 | 2.3 | 3.2 |

表-13 高温セット乾燥・3ヵ月養生後の形質（試験A）(2)

| | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | 密度 (g/cm ³) | 含水率計 (%) |
|------|-------------------------------|-------------------------|----------|
| 平均値 | 11.93 | 0.563 | 16.4 |
| 最大値 | 15.40 | 0.612 | 23.5 |
| 最小値 | 8.53 | 0.487 | 7.5 |
| 標準偏差 | 1.60 | 38.2 | 4.5 |

表-14 高温セット乾燥・3ヵ月養生後の形質（試験A）(3)

| | 全乾法含水率 (%) | 材面割れ (cm) | ねじれ (mm/4m) | 平均年輪幅 (mm) |
|------|------------|-----------|-------------|------------|
| 平均値 | 18.3 | 25 | 6.2 | 4.1 |
| 最大値 | 25.4 | 135 | 31 | 5.1 |
| 最小値 | 11.7 | 0 | 1 | 3.1 |
| 標準偏差 | 3.29 | 39 | 7.9 | 0.50 |

6本の正角材について材内の水分傾斜を調査した結果、6本全てが表層は15%前後に乾燥し、中心部付近は20%以上の未乾燥の状態であった。さらに、木裏側に比べ木表側がやや高い傾向にあった。

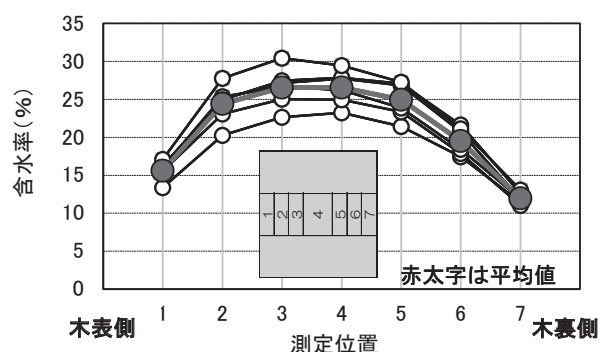


図-7 高温セット乾燥・3ヵ月養生後の水分傾斜（試験A）

3.2.3 曲げ強度性能

3.2.3.1 同一丸太から製材された2本の心去り正角材の動的ヤング係数 (Efr)

同一丸太から製材された2本の心去り正角材の動的ヤング係数について検討した。

同一丸太から製材された2本の心去り正角材の動的ヤング係数 (Efr) の関係を図-8に、また、同一丸太から製材された2本の心去り正角材の動的ヤング係数 (Efr) と両者の動的ヤング係数の差を図-9に示した。

2本の正角材のEfrの差の平均は1.29kN/mm²、最大差で2.51kN/mm²であり、両者のEfrはほぼ近似していた。このことから、同一丸太から製材された正角材のヤング係数はほぼ同一であると判断できた。

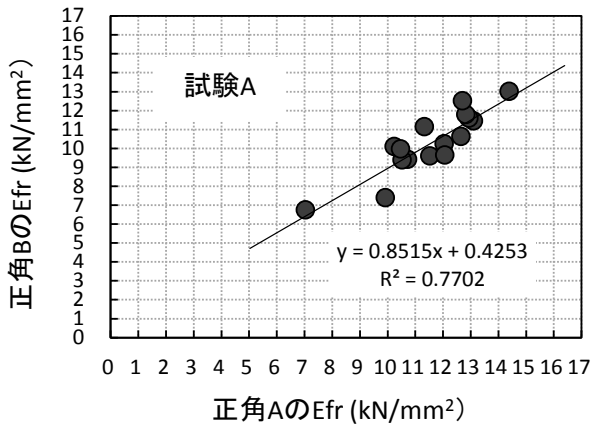


図-8 1本の丸太から製材された2本の正角材のEfrの関係

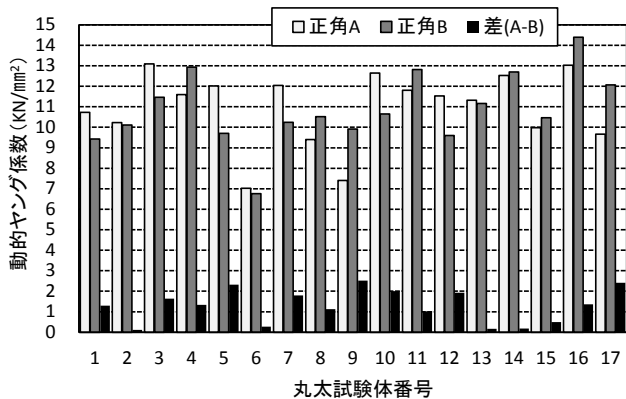


図-9 同一丸太から製材された2本の心去り正角材の動的ヤング係数と両者の差 (試験A)

3.2.3.2 曲げ強度試験

曲げ試験 (柱目面荷重) の結果を、表-15 に示した。破壊形態は、すべて曲げ破壊であった。表中の MOE は製材の JAS に従って求めた曲げヤング係数 (静的ヤング係数)、MOE はモーメント一定区間での真の曲げヤング係数、MOR は曲げ強さを示している。

天然乾燥材の曲げ性能は、曲げヤング係数 (MOE) の平均が 11.10 (kN/mm²) であり、曲げ強さ (MOR) は 14.7~68.7 (N/mm²) の範囲で平均値は 54.7 (kN/mm²) であった。

一方、高温セット乾燥材の曲げ性能は、MOE の平均が 10.40 (kN/mm²) であり、MOR は 26.8~57.5 (N/mm²) の範囲で平均値は 41.1 (kN/mm²) であった。

心去りの天然乾燥材、高温セット乾燥材ともに、既往の心持ち材のデータ^{例えば5)}と比較して大きく、高い強度性能を有していることがわかった。

図-10 に、曲げヤング係数 (MOE) と曲げ強さ (MOR) の関係を示した。両者とも正の相関関係にあったが、心持ち材の場合と同様に、高温セット乾燥材は天然乾燥材と比較してやや低位に位置していた。

これを同一丸太から製材された2本の正角材 (一方が天然乾燥材、もう一方が高温セット乾燥材) で比較して示したのが図-11 である。

17本の丸太の内、14本は天然乾燥材の方が上位にあり、高温セット乾燥材の方が強かったのは3本のみであった。このことから、高温セット乾燥を行った場合、心去り材であっても心持ち材と同様に熱的劣化が起こる可能性があり、天然乾燥材の方が曲げ強さは有利であることが示された。ちなみに、曲げ強さが最も低かった天然乾燥材 NO.6 の破壊はモーメント一定区間下側の大きな節が確認された (写真4)。

表-15 天然乾燥材の曲げ試験結果 (試験A)

| | Efr (kN/mm ²) | MOE (kN/mm ²) | MOEt (kN/mm ²) | MOR (N/mm ²) |
|------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 平均値 | 11.99 | 11.10 | 11.41 | 54.7 |
| 最大値 | 14.66 | 13.93 | 14.20 | 68.7 |
| 最小値 | 7.32 | 6.49 | 6.52 | 14.7 |
| 標準偏差 | 2.13 | 2.10 | 2.16 | 15.57 |

表-16 高温セット乾燥材の曲げ試験結果 (試験A)

| | Efr (kN/mm ²) | MOE (kN/mm ²) | MOR (N/mm ²) |
|------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 平均値 | 11.93 | 10.40 | 41.1 |
| 最大値 | 8.53 | 13.90 | 57.5 |
| 最小値 | 15.40 | 7.47 | 26.8 |
| 標準偏差 | 1.60 | 1.46 | 9.11 |

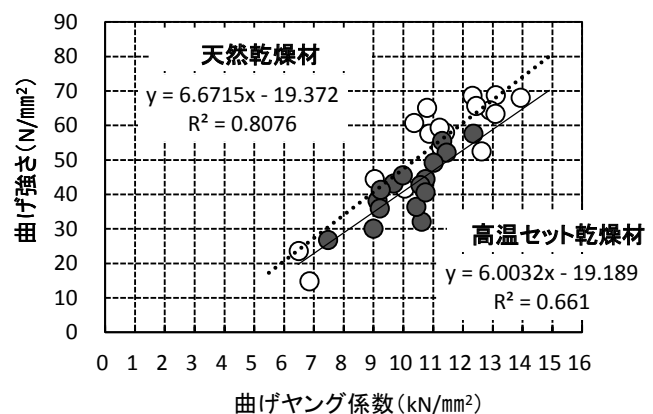


図-10 曲げ試験結果 (MOE と MOR の関係) (試験A)

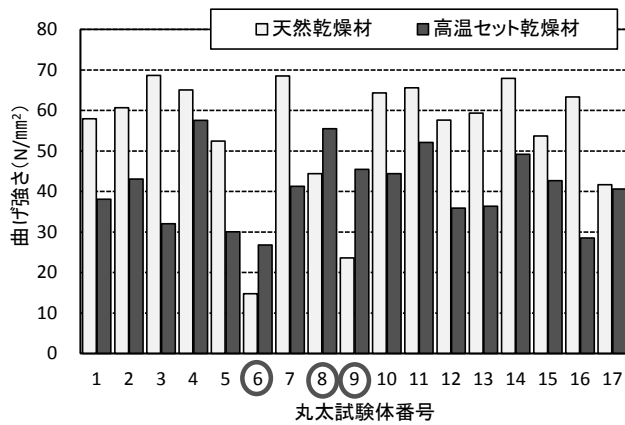


図-11 天然乾燥材と高温セット乾燥材の曲げ強さの差の比較 (試験A)



写真-4 最も曲げ強さの低かった試験体の破壊状況

図-12 に全乾密度と曲げ強さ (MOR) の関係を示した。高温セット乾燥材に弱い相関があるものの、全体としては相関関係は認められなかった。

本来であれば両者は比例関係にあると考えてよいが、本試験においては実大材であることもあり、含水率や節のばらつきにより両者の関係にもばらつきが現れたものと思われる。

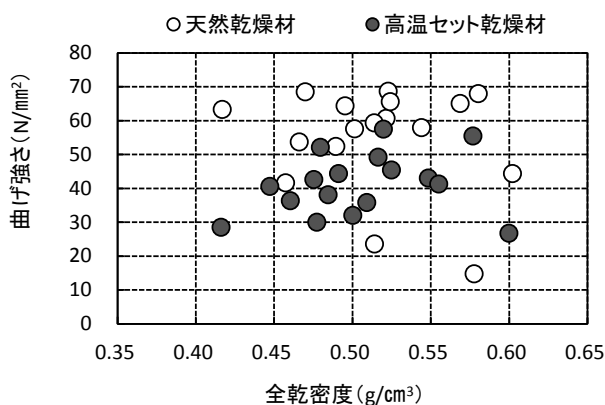


図-12 全乾密度と曲げ強さ (MOR) の関係 (試験A)

4 試験B:

「心去り正角の天然乾燥と高温セット乾燥 (2)」

4.1 試験の方法

4.1.1 供試材

供試材は、長さ 4m の長野県産カラマツ丸太 20 本と

した。以下試験方法は試験 A と同様である。

4.1.2 乾燥試験

天然乾燥は、屋根付きの屋外天然乾燥場にて平成 27 年 (2015) 2 月 27 日から平成 28 年 (2016) 10 月 6 日までの約 15 ヶ月間実施した。

高温セット乾燥は、(株) 新柴設備の高温型蒸気式木材乾燥装置を使用し、表-3 の乾燥スケジュール表に従って約 9 日間の乾燥を行った。

4.1.3 強度試験

試験 A と同様に実施した。

4.2 結果と考察

4.2.1 製材後の正角材の形質

製材後の正角材 40 本 (1 本の丸太から 2 本の心去り正角材を製材) の AC 面における反りは、40 本全部に発生し、発生面の内訳は木表側である A 面が 29 本、木裏側の C 面が 11 本で約 7 割は木表側に発生した。

1 本の丸太から正角 A 及び正角 B の 2 本を製材したが、この 2 本の正角材が揃って大きい反り・曲がりが発生する、あるいは反り・曲がりがないということはなく、2 本の発生量はバラバラで、例えば、7 番丸太の場合、正角 A が 2mm/4m の反りに対し、正角 B では 13mm/4m であったり、また、9 番丸太の場合、正角 A では 10mm/4m の反りに対し、正角 B では 3mm/4m という状況であった。

表-17 製材後の形質 (試験B) -乾燥前-

| | 幅 A (mm) | 幅 B (mm) | 反り・曲がり (mm) | |
|------|----------|----------|-------------|------|
| | | | AC 面 | BD 面 |
| 平均値 | 135.48 | 135.15 | 4.5 | 2.7 |
| 最大値 | 136.55 | 137.15 | 13 | 6 |
| 最小値 | 134.45 | 132.92 | 1 | 0 |
| 標準偏差 | 0.48 | 1.19 | 2.9 | 1.6 |

4.2.2 天然乾燥

天然乾燥終了時の含水率 (全乾法) を元に逆算した初期推定含水率は平均で 46.0% であった。これら試験材は、約 15 ヶ月間の天然乾燥で 16.9% となった。

天然乾燥後の形質を表-18、表-19 に示した。

乾燥前 (製材後) に木表側の A 面に多かった反りはその数値が減るか、乾燥後に木裏側の C 面に転じる材がほとんどであった。

ねじれの発生量は、最小値 0mm ~ 最大値 19mm/4m 平均値 7.3mm/4m であり、10mm 以上のねじれは 7 本であった。仕上がり含水率が平均 16.9% であったため、この後、住環境においては、乾燥が進むに伴いねじれ量も増大するものと思われる。

材面割れは、割れ幅、深さともに軽微なものが全ての試験材の木表に発生した。

天然乾燥終了時の材内水分傾斜を、9本の試験材について図-13に示した。

天然乾燥材の水分傾斜は、15ヵ月の長期間の乾燥であったこともあり、表層部と中心部の含水率差はほとんどなく2%程度であった。

表-18 天然乾燥後の形質 (試験B) (1)

| | 幅A (mm) | 幅B (mm) | 曲がり (mm) | |
|------|------------|------------|----------|-----|
| | | | AC面 | BD面 |
| 平均値 | 132.00 | 131.89 | 3.4 | 0.9 |
| 最大値 | 133.22 | 134.47 | 8 | 7 |
| 最小値 | 130.69 | 129.47 | 0 | 0 |
| 標準偏差 | 0.63 | 1.31 | 3.2 | 2.1 |

表-19 天然乾燥後の形質 (試験B) (2)

| | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | 全乾法含水率 (%) | ねじれ (mm/4m) |
|------|-------------------------------|------------|-------------|
| 平均値 | 11.87 | 16.9 | 7.3 |
| 最大値 | 15.64 | 18.5 | 19 |
| 最小値 | 9.60 | 15.6 | 0 |
| 標準偏差 | 1.42 | 0.8 | 5.1 |

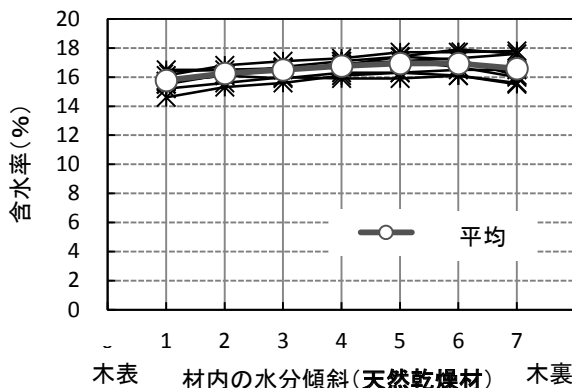


図-13 15ヵ月間天然乾燥終了時の材内水分傾斜

4.2.3 高温セット乾燥

表-20、表-21に高温セット乾燥後の形質を示した。

乾燥後の仕上がり含水率は13.9% (11.5%~15.4%)と試験Aと比較して平均値で4%ほど低かった。この差が生じた理由として、最も乾燥した材が両者とも11%でほぼ同じこと、試験Bの中に仕上がり含水率が20%を超える材が4本存在していたことが原因していた。詳しい考察は6.2の項目で述べる。

乾燥後の寸法は、乾燥前に比べ平均値でA面(板目面)が4.3mm、B面(柁目面)が3.8mmの縮みとなった。収縮率は、A面(板目面)が3.18%、B面(柁

目面)が2.82%であった。

AC面に発生する乾燥後の反りは、全てC面に発生し、乾燥前にA面に多かった反りは、乾燥後に全てC面の方向に転じ、反り量はA面では減少しC面では増加した。

ねじれは、20体中18体に発生した。その発生量は最大20mm/4mであり、ねじれが10mmを超える材は4体であった。天然乾燥材との比較では、天然乾燥材の仕上がり含水率が17%程度と高温セット乾燥の14%より高かったにも関わらず、その発生量が大きかったのは、天然乾燥材は、乾燥時に上部に重石を載せなかったのが一因であったと思われる。

材面割れは少なく、割れ幅1mm以上の材は20体中1体のみで長さは19cmであった。

表-20 高温セット乾燥後の形質 (試験B) (1)

| | 幅A (mm) | 幅B (mm) | 反り・曲がり (mm) | |
|------|------------|------------|-------------|-----|
| | | | AC面 | BD面 |
| 平均値 | 131.18 | 131.87 | 1.9 | 1.5 |
| 最大値 | 133.84 | 133.42 | 8 | 10 |
| 最小値 | 129.22 | 129.14 | 0 | 0 |
| 標準偏差 | 1.25 | 1.16 | 2.5 | 2.6 |

表-21 高温セット乾燥後の形質 (試験B) (2)

| | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | 全乾法含水率 (%) | ねじれ (mm/4m) |
|------|-------------------------------|------------|-------------|
| 平均値 | 11.74 | 13.9 | 7.0 |
| 最大値 | 14.35 | 15.4 | 20 |
| 最小値 | 8.42 | 11.5 | 0 |
| 標準偏差 | 1.87 | 1.3 | 5.2 |

高温セット乾燥終了時の材内水分傾斜を、全試験材について図-14に示した。

高温セット乾燥材の水分傾斜は、天然乾燥材に比べて表層部と中心部の含水率差が大きく、凸型の傾斜となりその差は約4%であった。

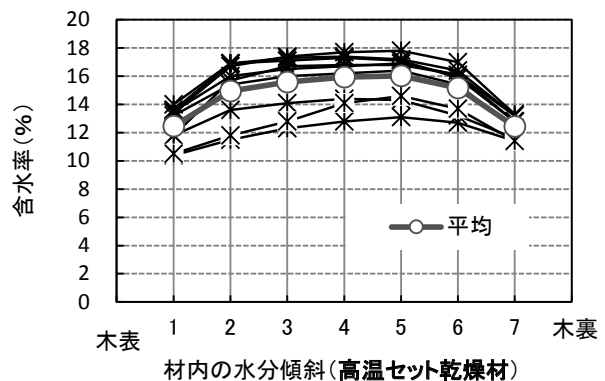


図-14 高温セット乾燥終了時の材内水分傾斜 (試験B)

4.2.4 曲げ強度性能

製材した正角材の動的ヤング係数（Efr）を全体、天然乾燥用、中温乾燥用の順に表-22、表-23、表-24 に示した。

製材後（乾燥前）の Efr の平均値は、天然乾燥用が 11.08kN/mm²、高温セット乾燥用が 10.78kN/mm² でほぼ同程度値であった。その他、密度や含水率計による含水率も同程度の値であった。

表-22 製材後の正角材全体の形質（試験B） -乾燥前-

| | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | 密度 (g/cm ³) | 含水率計 (%) |
|------|----------------------------------|----------------------------|-------------|
| 平均値 | 10.93 | 0.672 | 60.7 |
| 最大値 | 14.84 | 0.765 | 89.5 |
| 最小値 | 7.91 | 0.547 | 32.0 |
| 標準偏差 | 1.59 | 0.056 | 14.8 |

表-23 天然乾燥用の形質（試験B） -乾燥前-

| | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | 密度 (g/cm ³) | 含水率計 (%) |
|------|----------------------------------|----------------------------|-------------|
| 平均値 | 11.08 | 0.673 | 59.8 |
| 最大値 | 14.84 | 0.759 | 86.5 |
| 最小値 | 9.24 | 0.550 | 40.5 |
| 標準偏差 | 1.43 | 0.054 | 14.5 |

表-24 高温セット乾燥用の形質（試験B） -乾燥前-

| | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | 密度 (g/cm ³) | 含水率計 (%) |
|------|----------------------------------|----------------------------|-------------|
| 平均値 | 10.78 | 0.671 | 61.7 |
| 最大値 | 13.20 | 0.765 | 89.5 |
| 最小値 | 7.91 | 0.547 | 32.0 |
| 標準偏差 | 1.76 | 0.059 | 15.4 |

曲げ強度試験の結果を表-25、26 に示した。また、曲げヤング係数（MOE）と曲げ強さ（MOR）の関係を図-15 に示した。

試験 B での心去り正角材の曲げ強度性能を既往の心持ち正角材のデータ（未発表）と比較すると、心持ち正角材の平均値は、天然乾燥材（145 本）が MOE = 10.97kN/mm²、MOR = 51.9kN/mm² であるのに対し、今回の心去り天然乾燥材（20 本）は MOE = 11.20kN/mm²、MOR = 58.9kN/mm² であり、曲げ強さが高い傾向にあった。

一方、高温セット乾燥材では、心持ち材の既往のデータ（174 本）が MOE = 10.97kN/mm²、MOR = 44.2kN/mm² であるのに対し、今回の心去り材の結果は MOE = 11.19kN/mm²、MOR = 41.1kN/mm² であり、高温セット乾燥材では心持ち材と心去り材に大きな差は見られなかった。

表-25 天然乾燥材の曲げ試験結果（試験B）

| | Efr (kN/mm ²) | MOE (kN/mm ²) | MOR (N/mm ²) |
|------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 平均値 | 12.33 | 11.20 | 58.9 |
| 最大値 | 16.00 | 14.65 | 82.6 |
| 最小値 | 10.03 | 9.01 | 29.8 |
| 標準偏差 | 1.49 | 1.41 | 14.0 |

表-26 高温セット乾燥材の曲げ試験結果（試験B）

| | Efr (kN/mm ²) | MOE (kN/mm ²) | MOR (N/mm ²) |
|------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 平均値 | 11.82 | 11.19 | 41.1 |
| 最大値 | 14.51 | 13.43 | 54.3 |
| 最小値 | 8.11 | 7.77 | 28.0 |
| 標準偏差 | 2.09 | 1.84 | 8.5 |

両乾燥材ともに MOE と MOR は相関関係にあり、高温セット乾燥材は天然乾燥材に比べて曲げ強さでは低位に位置していた。

図-16 には 1 本の丸太から製材された 2 本の正角材 A・B の縦振動ヤング係数（Efr）の関係を示した。2 本の正角材（A と B）は同一丸太から製材されたこともあり強い相関関係にあった。

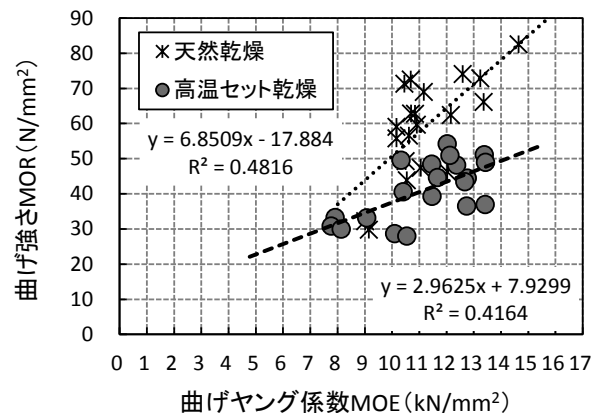


図-15 曲げヤング係数（MOE）と曲げ強さ（MOR）の関係

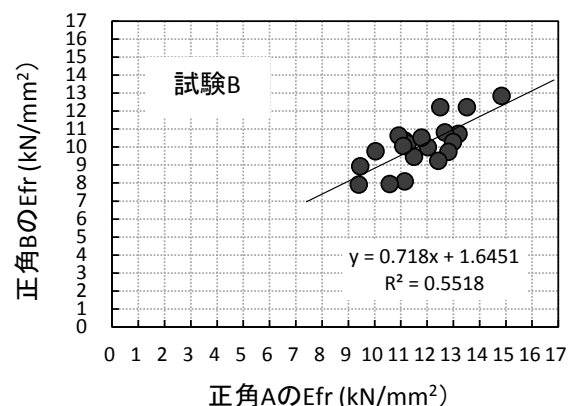


図-16 1本の丸太から製材された2本の正角材のEfrの関係

図-17 と図-18 に 1 本の丸太から製材された 2 本の心去り正角材, つまり天然乾燥材と高温セット乾燥材を対比した MOE と MOR を示した。

MOE についてみると, 高温セット乾燥材が天然乾燥材を上回っている材は 20 本中 10 本で (図-17 中○印), MOE では優位な差が見られなかった。一方, MOR については, 高温セット乾燥材が天然乾燥材を上回っている材は 20 中 4 本のみで (図-18 中○印), 天然乾燥材が優位にあった。つまり, 高温セット乾燥することで強度低下が生じたことがうかがえた。

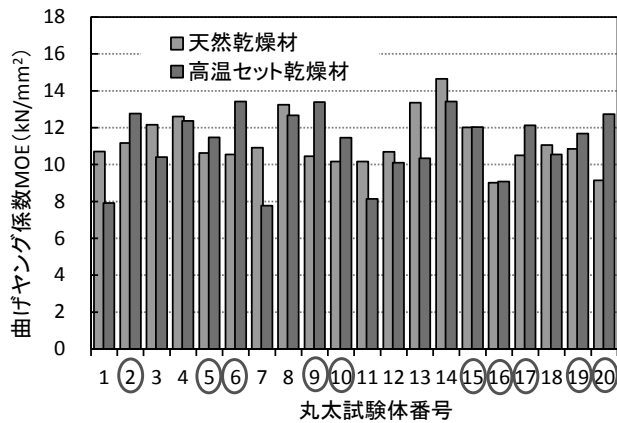


図-17 天然乾燥材と高温セット乾燥材の曲げヤング係数 (MOE) の差の比較 (試験 B)

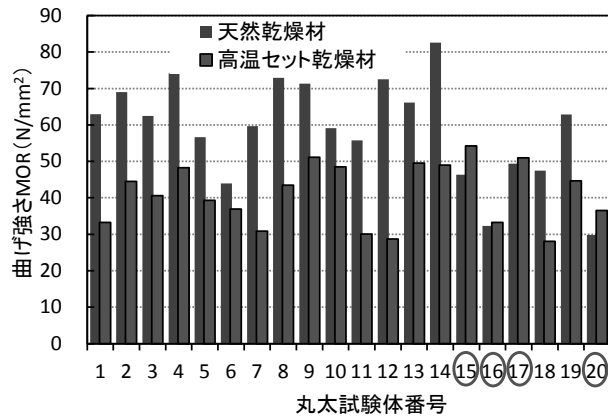


図-18 天然乾燥材と高温セット乾燥材の曲げ強さ (MOR) の差の比較 (試験 B)

5 試験 C :

「心去り正角の天然乾燥と中温乾燥」

5.1 試験の方法

5.1.1 供試材

供試丸太は, 長さ 4m の長野県産カラマツ丸太 12 本とした。供試した丸太の末口短径と元口短径を表-27 に示した。

末口径 34~38 cm カラマツ丸太 (45~91 年生) 12 本より試験 A, 試験 B と同様に図-1 に示した製材木取りにより心去り正角材 (135×135×4,000 mm) を 2 本ずつ,

計 24 本を製材した。製材は繊維の目切れを避けるため側面定規とした。

5.1.2 乾燥試験

1 本の丸太から製材した 2 本の正角材は, 一方を天然乾燥, もう一方を蒸気式中温乾燥で乾燥した。

中温乾燥での乾燥スケジュールを表-28 及び図-19 に示した。

中温乾燥スケジュールは, 100℃以上の高温による熱劣化を考慮し, 試験 A, 試験 B の高温セット乾燥ではなく, 蒸煮後, 直ちに 90℃の中温乾燥を行った。

表-27 供試丸太の概要 (試験 C)

| | 丸太短径 (cm) | | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) |
|------|-----------|------|-------------------------------|
| | 末口 | 元口 | |
| 平均値 | 35.8 | 39.8 | 12.55 |
| 最大値 | 37.5 | 46.8 | 14.71 |
| 最小値 | 34.2 | 37.1 | 10.58 |
| 標準偏差 | 0.8 | 2.9 | 1.23 |

表-28 中温乾燥スケジュール (試験 C)

| 時間 (h) | 乾球温度 (°C) | 湿球温度 (°C) | 温度差 (°C) | 備考 |
|--------|-----------|-----------|----------|-------|
| 8 | 95 | 95 | 0 | 蒸煮処理 |
| 24 | 90 | 85 | 5 | 中温乾燥 |
| 24 | 90 | 80 | 10 | " |
| 24 | 90 | 75 | 15 | " |
| 24 | 90 | 70 | 20 | " |
| 96 | 90 | 60 | 30 | " |
| 96 | 90 | 60 | 30 | " |
| 40 | 90 | 60 | 30 | " |
| 24 | 0 | 0 | 0 | クーリング |

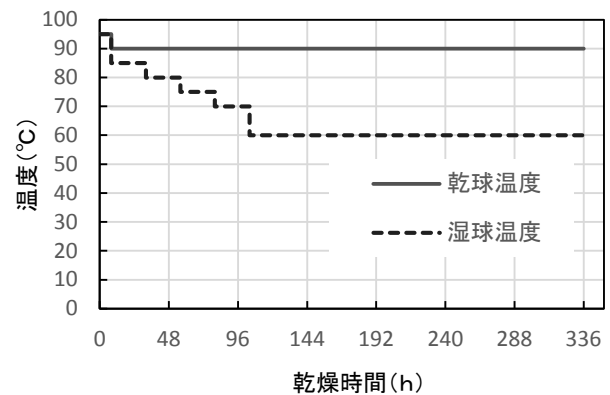


図-19 中温乾燥スケジュール (試験 C)

5.1.3 曲げ強度試験

試験 A, 試験 B と同様に実施した。

5.2 結果と考察

5.2.1 製材後の心去り正角材の形質

製材後の心去り正角材の曲がり, A・C 面で発生する材は全て木表側である A 面であった。しかし, 試験

A や試験 B と同様に、1本の丸太から2本の心去り正角材を製材して、片方の正角が大きく曲がったとしても、もう一方の正角もそろって大きく曲がる傾向はなかった。

表-29 製材後の形質（試験C）(1) -乾燥前-

| | 幅A (mm) | 幅B (mm) | 曲がり (mm) | |
|------|------------|------------|----------|-----|
| | | | AC面 | BD面 |
| 平均値 | 134.92 | 137.36 | 3.2 | 1.1 |
| 最大値 | 135.80 | 140.58 | 10 | 5 |
| 最小値 | 134.23 | 134.35 | 0 | 0 |
| 標準偏差 | 0.4 | 2.0 | 3.5 | 1.6 |

5.1.2 天然乾燥

平成29年9月12日から翌年3月15日まで行った天然乾燥（6ヵ月間）の含水率経過を図-20に示した。

乾燥途中の含水率は、天然乾燥終了時の含水率（全乾法）を元に重量から逆算したものである。

初期含水率42.2%であった試験材は、4ヵ月経過頃から漸減し約5ヵ月経過時で含水率20%に達した。その後は冬期期間を迎えることもあり乾燥速度も遅く、約6ヵ月後の含水率は19.3%であった。

6ヵ月間の天然乾燥後の形質を表-30、表-31に示した。

製材後（乾燥前）の反りはほとんどが木表側に発生したが、乾燥後の反りは全て木裏側に発生した。

ねじれは、12体中4体に発生し、1mm、3mm、4mm、6mm/4mの発生量であった。これは、心持ち材のねじれと比較すると非常に少ない発生量であった。仕上がり含水率が18%程度とやや高いことや水分傾斜が高かったこと（図-21）もあり、その後、乾燥が進むとこれに伴いねじれ量も増大するものと思われる。

天然乾燥終了時の材内水分傾斜を、全試験材について図-21に示した。

天然乾燥材の水分傾斜は、表層部と中心部の含水率差で4%程度あった。試験Bの天然乾燥では、表層部と中心部で含水率がほぼ同じであったのに対し、今回

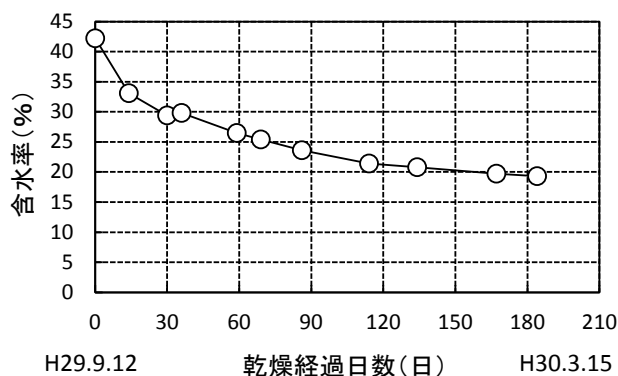


図-20 カラマツ心去り正角材の天然乾燥経過（試験C）

の試験ではやや水分傾斜がり、この原因は、天然乾燥期間の違いであると思われた。つまり、試験Bが約15ヵ月の天然乾燥期間であったのに対し今回の試験Cでは天然乾燥期間が約6ヵ月間と短かった。

表-30 天然乾燥後の形質（試験C）(1)

| | 幅A (mm) | 幅B (mm) | 曲がり (mm) | |
|------|------------|------------|----------|-----|
| | | | AC面 | BD面 |
| 平均値 | 131.88 | 137.23 | 0.8 | 1.4 |
| 最大値 | 133.52 | 139.39 | 4 | 3 |
| 最小値 | 130.92 | 134.66 | 0 | 0 |
| 標準偏差 | 0.81 | 1.43 | 1.6 | 1.3 |

表-31 天然乾燥後の形質（試験C）(2)

| | 全乾法 含水率 (%) | ねじれ (mm/4m) | 平均 年輪幅 (mm) |
|------|-------------------|----------------|-------------------|
| 平均値 | 17.9 | 1.2 | 3.51 |
| 最大値 | 20.1 | 6 | 4.19 |
| 最小値 | 16.6 | 0 | 2.55 |
| 標準偏差 | 1.0 | 2.0 | 0.52 |

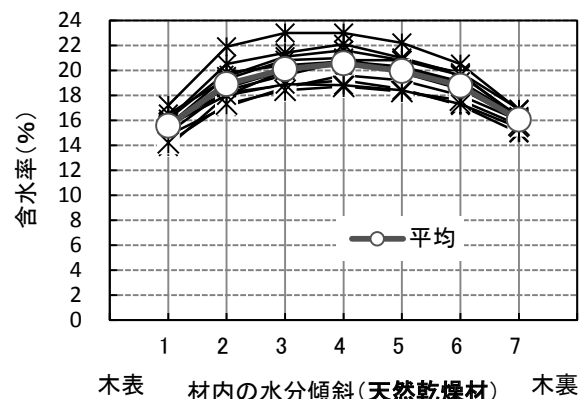


図-21 6ヵ月間天然乾燥終了時の材内水分傾斜（試験C）

5.1.3 中温乾燥

表-32~34に中温乾燥後の形質を示した。

乾燥後の寸法は、乾燥前に比べ平均値でA面（板目面）が5.2mm、B面（柁目面）が3.9mmの縮みとなった。また、乾燥後、栈積みのまま6ヵ月間の養生を行った後には、乾燥後に比べA面が0.14mm、B面が0.25mmの伸びとなった。

AC面での反りはC面に全て発生し、乾燥前にA面に発生していた反りは乾燥後に全てC面に転じた。

ねじれは、仕上がり含水率が平均12.7%ということもあり12体全部に発生した。しかし、その発生量は1体のみ14mm/4mであり、残りは6mm/4m以下の小さなねじれであった。中温乾燥におけるねじれ量は、心去り材であることから既往の心持ち材のデータと比較すると非常に少ない発生量であった。

表-32 中温乾燥後の形質 (試験C) (1)

| | 幅A (mm) | 幅B (mm) | 曲がり (mm) | |
|------|---------|---------|----------|-----|
| | | | AC面 | BD面 |
| 平均値 | 129.73 | 132.00 | 5.7 | 2.0 |
| 最大値 | 132.27 | 136.61 | 10.0 | 5.0 |
| 最小値 | 127.83 | 130.08 | 0 | 0 |
| 標準偏差 | 1.35 | 1.78 | 2.8 | 1.7 |

表-33 中温乾燥後の形質 (試験C) (2)

| | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | 密度 (g/cm ³) | 含水率計 (%) |
|------|-------------------------------|-------------------------|----------|
| 平均値 | 13.68 | 0.546 | 12.8 |
| 最大値 | 15.10 | 0.633 | 19.0 |
| 最小値 | 11.97 | 0.450 | 8.0 |
| 標準偏差 | 1.09 | 0.05 | 2.9 |

表-34 中温乾燥後の形質 (試験C) (3)

| | 全乾法含水率 (%) | 材面割れ (cm) | ねじれ (mm/4m) | 平均年輪幅 (mm) |
|------|------------|-----------|-------------|------------|
| 平均値 | 12.7 | 21.1 | 4.6 | 3.51 |
| 最大値 | 16.0 | 95 | 13.5 | 4.19 |
| 最小値 | 9.2 | 0 | 1.0 | 2.55 |
| 標準偏差 | 1.6 | 33.9 | 3.4 | 0.52 |

中温乾燥終了時の材内水分傾斜を、全試験材について図-22に示した。

中温乾燥材の水分傾斜は、天然乾燥材に比べて表層部と中心部の含水率差が大きく、未乾燥の1本と過乾燥の1本を除いて凸型の傾斜となりその差は約5%であった。また、木表側が木裏側よりやや高い含水率状態となった。

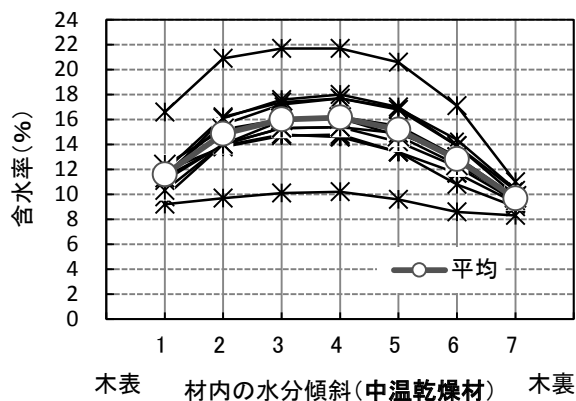


図-22 高温セット乾燥終了時の材内水分傾斜 (試験C)

5.1.4 曲げ強度性能

5.1.4.1 乾燥前の心去り正角材の動的ヤング係数

製材した正角材の動的ヤング係数 (Efr) を全体、天然乾燥用、中温乾燥用の順に表-35~37に示した。

製材後 (乾燥前) の Efr の平均値は、天然乾燥用が

11.49kN/mm²、中温乾燥用が 11.86kN/mm² でほぼ同程度の値であった。その他、密度や含水率計による含水率もほぼ同程度の値であった。

表-35 製材後の正角材全体の形質 (試験C) -乾燥前-

| | 動的ヤング係数 Efr (kN/mm ²) | 密度 (g/cm ³) | 含水率計 (%) |
|------|-----------------------------------|-------------------------|----------|
| 平均値 | 11.68 | 0.631 | 38.8 |
| 最大値 | 13.95 | 0.777 | 56.0 |
| 最小値 | 9.29 | 0.510 | 28.0 |
| 標準偏差 | 1.18 | 0.062 | 6.6 |

表-36 天然乾燥用の形質 (試験C) -乾燥前-

| | 動的ヤング係数 Efr (kN/mm ²) | 密度 (g/cm ³) | 含水率計 (%) |
|------|-----------------------------------|-------------------------|----------|
| 平均値 | 11.49 | 0.633 | 39.7 |
| 最大値 | 13.95 | 0.777 | 56.0 |
| 最小値 | 9.29 | 0.540 | 32.0 |
| 標準偏差 | 1.22 | 0.062 | 6.6 |

表-37 中温乾燥用の形質 (試験C) -乾燥前-

| | 動的ヤング係数 Efr (kN/mm ²) | 密度 (g/cm ³) | 含水率計 (%) |
|------|-----------------------------------|-------------------------|----------|
| 平均値 | 11.86 | 0.630 | 37.9 |
| 最大値 | 13.60 | 0.761 | 50.0 |
| 最小値 | 9.71 | 0.510 | 28.0 |
| 標準偏差 | 1.10 | 0.061 | 6.5 |

1本の丸太から製材された2本の心去り正角材 (AとB) の Efr の平均値との関係を図-23に示した。

丸太の Efr はそこから製材された2本の正角材の Efr に反映され、両者には正の相関関係が認められた。

図-24には1本の丸太から製材された2本の正角材の Efr の関係を示した。試験材本数が少ないこともあるが、2本の正角材 (AとB) は同一丸太から製材されたことから両者には強い相関関係が認められた。

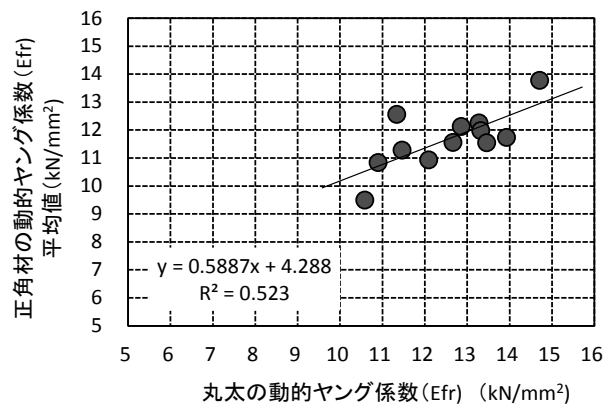


図-23 丸太の Ef とそこから製材された2本の正角材の平均 Efr の関係

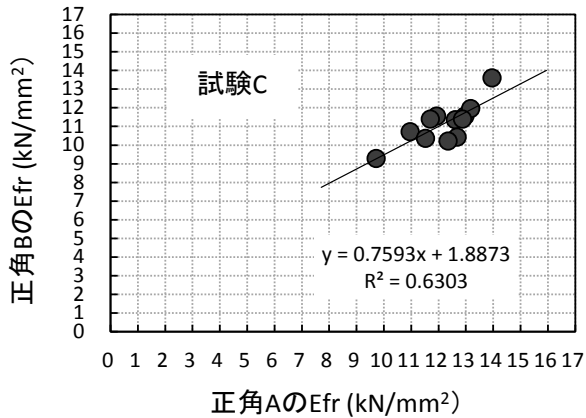


図-24 1本の丸太から製材された2本の正角材のEfrの関係

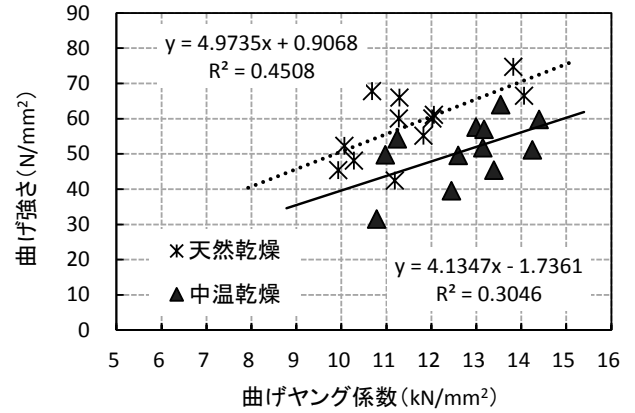


図-25 天然乾燥材と中温乾燥材におけるMOEとMORの関係

5.1.4.2 曲げ強度

柁目面加重で行った曲げ強度試験の結果を表-38, 39に示した。また、曲げヤング係数 (MOE) と曲げ強さ (MOR) の関係を図-25 に示した。

天然乾燥と中温乾燥を比較した場合、曲げヤング係数 (MOE) に差は見られないものの、曲げ強さには差が生じ、中温乾燥することで強度低下が生じた。このことは、図-26 及び図-27 に示した丸太別の強度比較で示されるとおり、曲げヤング係数 (MOE) では中温乾燥材が優位 (図-26 中○印) であるのにも関わらず、図-27 の曲げ強さ (MOR) では○印の3本が天然乾燥を上回ったのみであった。これは試験 A や試験 B の高温セット乾燥材の傾向と同じであった。

今回行った心去り正角材の曲げ強度性能は、既往の心持ち正角材のデータ (未発表) と比較すると、心持ち正角材の平均値は、天然乾燥材 (145 本) が MOE = 10.97kN/mm², MOR = 51.9kN/mm², 中温乾燥材 (32 本) が MOE = 11.20kN/mm², MOR = 49.2kN/mm², であることから、心去り正角材の強度的優位性がうかがわれた。

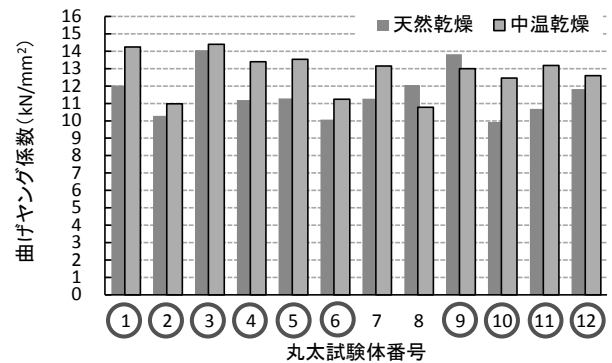


図-26 天然乾燥材と中温乾燥材の曲げヤング係数の丸太別比較

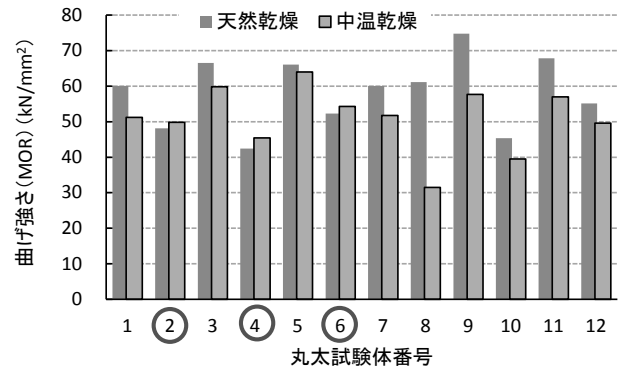


図-27 天然乾燥材と中温乾燥材の曲げ強さの丸太別比較

表-38 天然乾燥材の曲げ試験結果

| | Efr (kN/mm ²) | MOE (kN/mm ²) | MOR (N/mm ²) |
|------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 平均値 | 12.55 | 11.54 | 58.3 |
| 最大値 | 15.13 | 14.06 | 74.7 |
| 最小値 | 10.23 | 9.93 | 42.4 |
| 標準偏差 | 1.40 | 1.33 | 9.87 |

表-39 中温乾燥材の曲げ試験結果

| | Efr (kN/mm ²) | MOE (kN/mm ²) | MOR (N/mm ²) |
|------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 平均値 | 13.49 | 12.74 | 51.0 |
| 最大値 | 15.15 | 14.39 | 64.0 |
| 最小値 | 11.31 | 10.78 | 31.5 |
| 標準偏差 | 1.21 | 1.20 | 9.0 |

全体の試験を通してそうであったが、どの乾燥方法においても髓割れが目立った。今後、製材時には髓割れを防ぐため、製材時には髓を含まないように髓を避けた製材を行うことが必要であると考えられる。

6 まとめ

6.1 心去り正角材の天然乾燥

3回の試験を行う中、天然乾燥の乾燥開始時期はまちまちであったが、初期推定含水率がおおよそ40~50%であったカラマツ正角材は、1月開始の試験Aでは約13カ月の天然乾燥で18%に、3月開始の試験Bでは15カ月で17%に、9月開始の試験Cでは6カ月で18%になった(表-40)。

乾燥終了時の含水率の平均値は試験A, B, Cともにほぼ同値に仕上がったが、乾燥期間の短かった試験Cでは材内水分傾斜のばらつきが大きく、表層部と中心部でおおよそ6%の傾斜が生じていた。乾燥期間の長かった試験Aや試験Bに比べてこの値が大きかったことから、材内水分傾斜がほぼなくなるには最低でも12カ月間の天然乾燥期間が必要と思われた。

また、カラマツ心去り正角材の天然乾燥では、1~2年間の天然乾燥でもその平衡含水率は16~18%程度であり、含水率15%まで下げることは非常に困難であると思われた。

収縮率は、A面(板目方向)が3回の平均値で2.34%、B面(柃目面)が1.37%であった(表-41)。

実寸法では、A面で3.2mm、B面で1.9mmの縮みで、中温乾燥や高温セット乾燥に比べ小さい値であった。

表-40 天然乾燥での仕上がり含水率 (%)

| | 試験A (13カ月) | 試験B (15カ月) | 試験C (6カ月) |
|------|---------------|---------------|--------------|
| 平均値 | 17.7 | 16.9 | 17.9 |
| 最小値 | 17.0 | 15.6 | 16.6 |
| 最大値 | 18.4 | 18.5 | 20.1 |
| 標準偏差 | 0.48 | 0.79 | 0.96 |

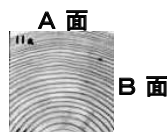


表-41 収縮率 (%)

| | 試験A | | 試験B | | 試験C | |
|------|------|-------|------|------|------|------|
| | A面 | B面 | A面 | B面 | A面 | B面 |
| 平均値 | 2.23 | 0.91 | 2.56 | 2.03 | 2.24 | 1.16 |
| 最小値 | 0.79 | -1.52 | 1.34 | 1.02 | 1.01 | 0.74 |
| 最大値 | 3.83 | 2.97 | 3.57 | 2.96 | 3.11 | 1.71 |
| 標準偏差 | 0.89 | 1.40 | 0.58 | 0.46 | 0.62 | 0.29 |

マイナス数値は割れ等の影響で膨張したため

6.2 心去り正角材の高温セット乾燥

9日間の高温セット乾燥によりカラマツ心去り正角材は、試験Aでは含水率18.3% (11.7~25.4%)、試験Bでは含水率13.9% (11.5%~15.4%)に仕上がった(表-42)。同一乾燥スケジュールで行った2回の試験

において、なぜ仕上がり含水率にこのような差が生じたかを考察した。

最も大きな原因は、仕上がり含水率の最小値が両者ほぼ同一であったのに加え、試験Aでは仕上がり含水率の20%超えの材が4本存在し、試験Bでは全ての材が20%以下であったことが一因していると思われる。つまり、試験Aでは乾き難い材が多かったと推測できる。

まず、仕上がり含水率から逆算した推定初期含水率を比較してみると、試験Aでは推定初期含水率は最小値42.7%~平均値49.0%~最大値63.8%であったのに対し、試験Bでは最小値39.7%~平均値47.8%~最大値58.9%と若干試験Bの方が低かった。試験Aでの仕上がり含水率が20%超えの4本の材の推定初期含水率は、63.8%、53.7%、53.6%、48.1%で、比較的高含水率域にあった。

また、乾燥速度に影響のあるとされる密度や平均年輪幅について検討してみたが関連性は不明であった。

実際の乾燥に当たっては、含水率低下の遅い材が含まれる試験Aの仕上がり状態を考慮したスケジュールの組み立てが必要と思われる。

試験Aと試験Bの2回の高温セット乾燥での収縮率は、仕上がり含水率が18.3%とやや高かった試験Aでは、A面(板目方向)が平均値で2.32%、B面(柃目面)が2.44%であり、仕上がり含水率が13.9%の試験Bでは、A面が3.18%、B面が2.82%であった(表-43)。

実寸法では、試験AがA面で3.2mm、B面で3.3mmの縮み、試験BではA面が4.3mm、B面が3.9mmの縮みであった。

実際の乾燥では、試験B程度の仕上がり含水率(15%以下)が必要であり、その場合、試験Bの結果から製材寸法に5mm程度を上乗せする必要があると思われた。

表-42 高温セット乾燥9日間での仕上がり含水率 (%)

| | 試験A | 試験B |
|------|------|------|
| 平均値 | 18.3 | 13.9 |
| 最小値 | 11.7 | 11.5 |
| 最大値 | 25.4 | 15.4 |
| 標準偏差 | 3.3 | 1.3 |

表-43 収縮率 (%)

| | 試験A | | 試験B | |
|------|------|------|------|------|
| | A面 | B面 | A面 | B面 |
| 平均値 | 2.32 | 2.44 | 3.18 | 2.82 |
| 最小値 | 0.68 | 0.85 | 1.62 | 1.76 |
| 最大値 | 4.84 | 4.89 | 4.60 | 3.93 |
| 標準偏差 | 1.18 | 1.31 | 0.89 | 0.48 |

6.3 心去り正角材の中温乾燥

14日間の90℃中温乾燥により、カラマツ心去り正角材は含水率12.7%（9.2～16.0%）に仕上がった（表-44）。この時の水分傾斜は、表層部と中心部の差で約5%であった。

収縮率は、A面（板目方向）が平均値で3.74%、B面（柃目面）が2.68%であった（表-45）。

実寸法では、A面で5.0mm、B面で3.6mmの縮みであった。試験の結果から製材寸法に5mm程度を上乗せする必要があると思われる。

表-44 高温セット乾燥9日間での仕上がり含水率（%）

| | 試験A | 試験B |
|------|------|------|
| 平均値 | 18.3 | 13.9 |
| 最小値 | 11.7 | 11.5 |
| 最大値 | 25.4 | 15.4 |
| 標準偏差 | 3.3 | 1.3 |

表-45 収縮率（%）

| | 試験A | | 試験B | |
|------|------|------|------|------|
| | A面 | B面 | A面 | B面 |
| 平均値 | 2.32 | 2.44 | 3.18 | 2.82 |
| 最小値 | 0.68 | 0.85 | 1.62 | 1.76 |
| 最大値 | 4.84 | 4.89 | 4.60 | 3.93 |
| 標準偏差 | 1.18 | 1.31 | 0.89 | 0.48 |

6.4 カラマツ心去り材の曲がりやねじれ

天然乾燥、中温乾燥、高温セット乾燥全てを含めて、最大曲がり及びねじれの発生量の度数分布図を図-28に示した。

AC面での反りとBD面での曲がりを含めた最大曲がりは、最大値で12mm/4m、平均値で4.1mm/4mであった。また、ねじれの最大値は31mm/4m、平均値で5.7mm/4mであった。このため、製材時には収縮量にこれらの曲がりやねじれの発生量を考慮した挽き直し量の上乗せが必要となろう。

今回の試験では、仕上がり120mm正角材を想定して135mm正角材に製材したが、モルダー仕上げ時での削り残しが存在する材もあったことから、製材寸法は、20mm上乗せの140mm程度（120mm+収縮量5mm+最大曲がり・ねじれ量15mm）が適当ではないかと思われた。

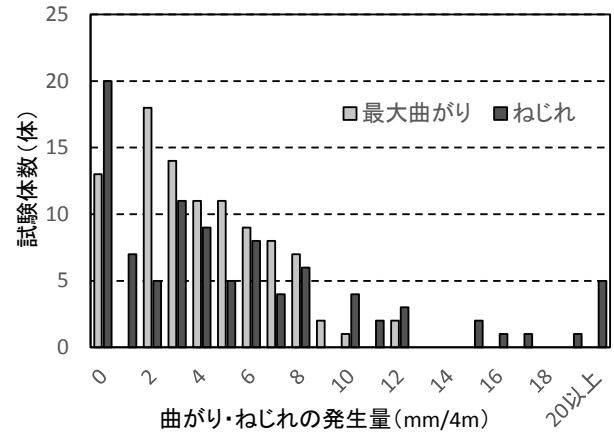


図-28 最大曲がりやねじれの発生状況

6.5 丸太と心去り正角材の縦振動ヤング係数

試験Cのみの試験ではあったが、図-23で示すとおり丸太とそこから製材される心去り正角材の縦振動ヤング係数(E_{fr})には相関関係があり、丸太の縦振動ヤング係数(E_f)を測定することで、そこから製材される心去り正角材の縦振動ヤング係数がほぼ推定できることが分かった。

6.6 1本の丸太から製材された2本の心去り正角材の縦振動ヤング係数

1本の丸太から髓を挟んでほぼ対面で木取られた2本の心去り正角材（生材）の縦振動ヤング係数(E_{fr})には強い相関関係があった（図-29）。また、両者の差の最大値は3.19kN/mm²であった。

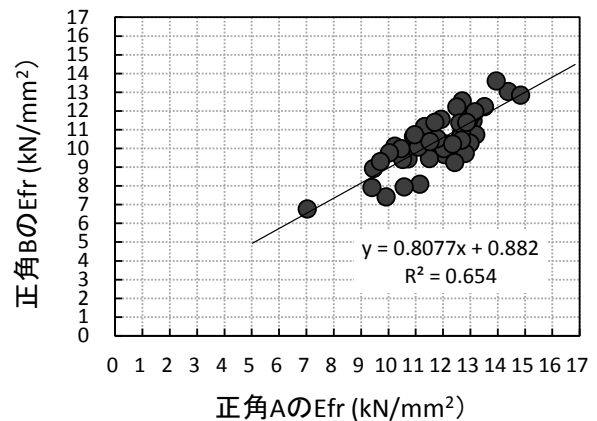


図-29 1本の丸太から製材された2本の心去り正角材の縦振動ヤング係数(E_{fr}) (E_{fr}の高い方を「正角A」、E_{fr}の低い方を「正角B」とした。)

6.7 乾燥別の強度性能

天然乾燥, 中温乾燥, 高温セット乾燥を行ったカラマツ心去り正角材曲げ試験結果を表-46, 47 に示した。また, 曲げヤング係数と曲げ強度との関係を機械等級区分による基準強度線を含めて図-30 に示した。

乾燥方法の違いによる曲げヤング係数の比較では, 差の検定の結果では差は見られないが,

図-30 より, 天然乾燥材は全体の上位に位置し, 中温乾燥材及び高温セット乾燥材は天然乾燥材よりも低い位置にあった。

さらに表-47 より, 熱劣化が心配される中温乾燥や高温セット乾燥では, 曲げ強度が低下する傾向にあり, 乾燥温度が高いほどこの傾向が強いことがうかがえる。このことは, 心持ち材と同様の結果であった⁵⁻⁶⁾。

表-46 カラマツ心去り材の曲げヤング係数

| | 曲げヤング係数 (MOE) (kN/mm ²) | | |
|------|-------------------------------------|-------|---------|
| | 天然乾燥 | 中温乾燥 | 高温セット乾燥 |
| 平均値 | 11.25 | 12.74 | 10.83 |
| 最小値 | 6.49 | 10.78 | 7.47 |
| 最大値 | 14.65 | 14.39 | 13.90 |
| 標準偏差 | 1.64 | 1.20 | 1.70 |
| 試験体数 | 49 | 12 | 37 |

表-47 カラマツ心去り材の曲げ強さ

| | 曲げ強さ (MOR) (N/mm ²) | | |
|------|---------------------------------|------|---------|
| | 天然乾燥 | 中温乾燥 | 高温セット乾燥 |
| 平均値 | 57.3 | 51.0 | 41.1 |
| 最小値 | 14.7 | 31.5 | 26.8 |
| 最大値 | 82.6 | 64.0 | 57.5 |
| 標準偏差 | 13.6 | 9.0 | 8.6 |
| 試験体数 | 49 | 12 | 37 |

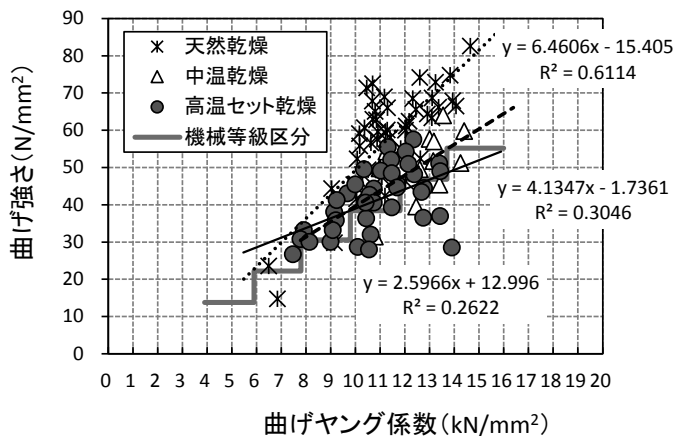


図-30 曲げヤング係数と曲げ強さの関係

今後, カラマツ心去り材を建築構造材として使用する場合は, 強度値のみを重視するのであれば, 熱劣化の少ない天然乾燥を主体とした乾燥方法を採用すべきであろう。しかし, 中温乾燥, 高温セット乾燥においても十分な強度性能を有しているため, 用途に応じた使い分けが必要であると思われる。

また, 今回の曲げ強度試験における荷重方向は柁目加重としたため, 大径材から木取られた心去り材の材質特性を活かすのであれば, 成熟材部を下側に配置した木裏荷重とすることで今回の試験結果よりは高い数値が得られるものと思われる¹⁾。

今後のカラマツ大径材から製材される構造材の利用には, 天然乾燥による乾燥日数長期化の解消のため, また, 熱劣化を最小限とするための乾燥方法の確立が欠かせない技術開発であると考えます。

謝辞

本研究を行うに当たり, 丸太の手配から丸太の計測をお手伝い頂いた小林木材(株)の小林保経専務, 本研究をまとめるに当たって度々のご指導ご助言を頂いた信州大学農学部武田孝志教授, また, データ整理にお手伝い頂いた当センター非常勤職員の蒲原静子氏, 五味妙子氏に深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 重松頼生, カラマツの材質試験, 日林中支講 28, 253~258, (1980)
- 2) 塩倉高義・渡辺治人, カラマツの品質に関する基礎的研究, 農学集報第 16 巻第 2 号, (1971)
- 3) 橋爪丈夫, 長野県産カラマツ構造材の強度特性に関する研究, 長野県林業総合センター研究報告第 13 号, 16-30, (1998)
- 4) 吉田孝久, 橋爪丈夫, カラマツ及びスギ心持ち柱材の高温乾燥特性, 長野県林業総合センター研究報告第 14 号, 3-18, (2000)
- 5) 今井信・柴田直明・吉田孝久・山内仁人・守口海, 安全・安心な乾燥材生産技術の開発 (Ⅲ), 長野県林業総合センター研究報告第 28 号, 63-67, (2014)
- 6) 柴田直明・吉田孝久・山内仁人, 安全・安心な乾燥材生産技術の開発 (Ⅱ), 長野県林業総合センター研究報告第 29 号, 75-94, (2015)
- 7) 柴田直明・吉田孝久・山内仁人・伊藤嘉文, カラマツ・アカマツ正角の曲げ強度特性—天然乾燥材と過度の高温乾燥材との比較—, 第 61 回日本木材学会大会研究発表要旨集, P113, (2011)