

県産スギ大径材の有効利用技術の開発

- 9丁取りした正角材の強度と4丁取りした正角材の乾燥試験 -

令和元年度～令和3年度

木材チーム 古曳 博也

1. 目的

大分県における10齢級以上のスギ人工林は、面積及び蓄積量ともに約7割を占めることから、今後大径材の供給量が増すものと予想される。大径材から複数本の正角材や平角材が採材される場合、材質や性能に不明な点も多く、明らかにすることが求められる。

初年度は、1本の大径材から9本採材した正角材（以下、9丁取り正角材と記す）について、採材位置ごとに性状を調査¹⁾した。昨年度は、採材位置ごとの強度試験や人工乾燥試験²⁾を行った。今年度は、昨年度人工乾燥した9丁取り正角材を用いて性状調査と曲げ強度試験を、さらに1本の大径材から4本採材した正角材（以下、4丁取り正角材と記す）の人工乾燥試験を行ったので報告する。

2. 試験方法

1) 乾燥した9丁取り正角材の性状調査と曲げ強度試験

(1) 供試材

昨年度人工乾燥試験²⁾に供した材長約3mの試験体を用いた。人工乾燥後、室内にて5か月以上養生した。その後、モルダー加工機を用いて一辺が90mmの正角材に仕上げた。

(2) 性状調査

仕上げ加工前後に、正角材の寸法、重量、含水率、曲がり及び縦振動ヤング係数（以下、 E_{tr} と記す）を、仕上げ加工後に内部割れ、節数及び節径を調べた。含水率は、高周波木材水分計HM-520型（株式会社ケツト科学研究所製）を用いて、元口から材長500、1,500、2,500mmの位置の4面を測定した。縦振動周波数の測定は、ポータブルFFTアナライザーAD-3527型（株式会社エー・アンド・デイ製）を用いた。内部割れは、元口から材長100、2,000、2,900mmの位置で長さ約25mmの薄片を切断し（図-1）、木口面に生じた割れの個数、長さを測定した（高温2、高温3、中温乾燥の試験体のみ²⁾）。

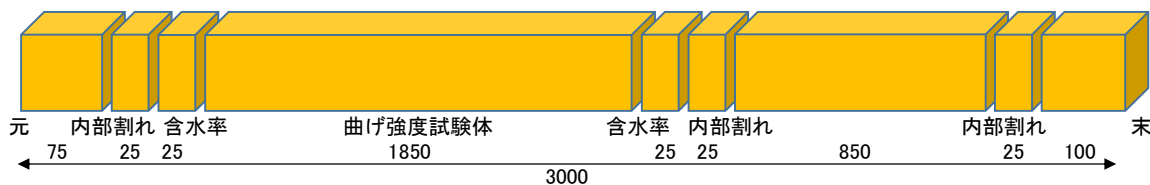


図-1 強度試験体の採取方法模式図（数字は長さ（mm）を示す）

(3) 曲げ強度試験

曲げ強度試験体は、図-1のように切り出した。試験体の両端からは長さ約25mmの薄片を切断し、平均年輪幅及び含水率を全乾法で求めた（高温2、高温3、中温乾燥²⁾）。曲げ強度試験は、万能試験機AG-100kNAR（株式会社島津製作所製）を用い、「構造用木材の強度試験マニュアル」³⁾に従って実施した。スパンは材せいの18倍（1,620mm）、3等分点4点荷重方式により、载荷速度10mm/minの

条件で木表側から加圧した。曲げ強さ(以下、MOR と記す)及び曲げヤング係数(以下、MOE と記す)を求めた。

2) 4丁取り正角材の人工乾燥試験

(1) 供試材

県西部地区から調達した材長約 4 m、末口径 40 cm 以上の丸太 9 本について、末口径、元口径、材長、重量、年輪数、 E_{fr} 及び材長中央部における曲がり測定した。

(2) 4丁取り正角材の採材工程及び性状調査

送材車付き帯鋸盤を用い、図-2 に示す工程で採材した。周辺部から①～⑧の順に厚さ約 30 mm 程度の背板を採材した後、中央部から正角材 4 本を⑨～⑭の順に採材した。正角材の寸法は、表-6 に示す原木のうち、末口径 44 cm 以上の丸太からは一辺が 135 mm の正角材を、末口径 42 cm 以下の丸太からは一辺が 120 mm の正角材を採材した。芯の抜き幅は 25 mm 程度、鋸入れ後の修正挽きは行わなかった。図-3 に正角材の採材位置と年輪の模式図を、表-1 に正角材のグループ分けを示す。正角材の性状について、寸法、重量、含水率、曲がり及び E_{fr} を測定した。

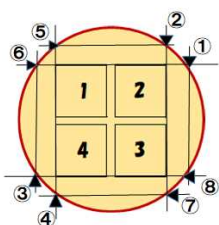


図-2 4丁取り正角材の採材工程

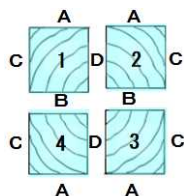
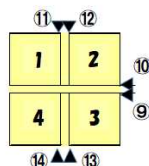


図-3 正角材の採材位置と模式図

表-1 グループ分け

| 面 | 摘要 |
|-------|-----|
| A面、C面 | 木表側 |
| B面、D面 | 木裏側 |

(3) 乾燥試験の方法

図-4 に示すように、中央部から材長約 3 m に切り出し試験体とした。試験体の両端からは長さ約 25 mm の小片を採取し、全乾法により含水率を求めた。試験体の寸法、重量、含水率(元口から 500、1,500、2,500 mm の位置の 4 面)、曲がり及び E_{fr} を調べた後、表-2 に示す 3 条件のスケジュールで乾燥した。



図-4 乾燥試験体の採取方法模式図(数字は長さ(mm)を示す)

表-2 4丁取り正角材の乾燥スケジュール

| 乾燥条件 No. | 項目 | 蒸煮 | 中温乾燥 | 降温 |
|----------|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 乾球 98-湿球 98(°C) 時間(h) | 乾球 90-湿球 60(°C) 時間(h) | 乾球 30-湿球 20(°C) 時間(h) |
| 1 | | | 60 | |
| 2 | 中温 | 8 | 120 | 24 |
| 3 | ※ | | 132 | |

※ 条件3は、条件1の終了後に中温乾燥をさらに 72 時間追加したスケジュール



写真-1 試験体の設置とベルト圧縮

乾燥機は、大分県立日田林工高等学校の高周波・蒸気複合乾燥機 MDW-2SD 型（山本ビニター株式会社製）を用い、曲がりの向きが下向きになるように設置した。乾燥時の载荷は、中 2 段に位置する計 8 体の試験体のみ、ラチェット荷載機にて材長方向 5 か所を圧縮した（以下、ベルト圧縮と記す。写真-1）。乾燥終了後に再び、寸法、重量、含水率、曲がり及び E_{fr} を測定し乾燥前後の変化を調べた。

3. 結果及び考察

1) 乾燥した 9 丁取り正角材の性状調査と曲げ強度試験

(1) 供試材

昨年度に人工乾燥²⁾した試験体について、仕上げ加工前後の測定結果を表-3 に示す。4 方まき及び 2 方まきは、どの試験体も含水率 20% 以下を示していた。一方、心持ち材は 20% 以上の含水率を示すものが多かった。同一の乾燥スケジュールでこのような差が生じたことから、心持ち材に比べて 4 方まき及び 2 方まきは、乾燥しやすい材であることが分かった。 E_{fr} の値は、仕上げ加工の前後で差異は生じなかった。含水率及び密度に変化がなかったためと判断できる。

表-3 仕上げ加工前後の測定結果

| 項目 | 試験体 (本) | 含水率 (%) | | 密度 (kg/m ³) | | E_{fr} (GPa) | | |
|------|------------|---------|------|-------------------------|------|----------------|------|------|
| | | 仕上げ前 | 仕上げ後 | 仕上げ前 | 仕上げ後 | 仕上げ前 | 仕上げ後 | |
| 高温 1 | 4 方まき | 5 | 15.1 | 15.2 | 369 | 373 | 6.41 | 6.40 |
| | 2 方まき | 3 | 19.7 | 17.6 | 386 | 390 | 6.28 | 6.25 |
| | 心持ち材 | 9 | 22.5 | 25.5 | 475 | 490 | 8.01 | 7.69 |
| 高温 2 | 4 方まき | 5 | 17.2 | 14.7 | 388 | 392 | 5.46 | 5.91 |
| | 2 方まき | 3 | 15.1 | 12.8 | 356 | 357 | 5.43 | 5.34 |
| | 心持ち材 | 9 | 21.7 | 20.1 | 466 | 479 | 7.39 | 7.39 |
| 高温 3 | 4 方まき | 5 | 16.1 | 15.4 | 402 | 403 | 6.54 | 6.26 |
| | 2 方まき | 3 | 10.8 | 10.4 | 346 | 347 | 5.78 | 5.81 |
| | 心持ち材 | 9 | 19.4 | 19.3 | 465 | 474 | 8.01 | 7.38 |
| 高温 4 | 4 方まき | 10 | 12.0 | 9.9 | 368 | 375 | 6.83 | 7.01 |
| | 2 方まき | 8 | 12.6 | 10.2 | 362 | 368 | 6.99 | 7.14 |
| | 心持ち材 | 28 | 22.6 | 19.3 | 492 | 512 | 9.18 | 8.71 |
| 中温 | 4 方まき | 12 | 15.1 | 15.0 | 352 | 355 | 5.31 | 5.37 |
| | 2 方まき | 12 | 14.6 | 14.6 | 353 | 355 | 5.24 | 5.17 |
| | 心持ち材 | 7 | 23.0 | 24.9 | 487 | 480 | 8.58 | 7.75 |

(2) 曲がり

仕上げ加工前後の試験体の曲がりの状況を図-5 に示す。記載の数値は、4 面における矢高の平均値を示す。数字のみの記載は、製材の日本農林規格⁴⁾（以下、規格と記す）の甲種Ⅱの 1 級の曲がりに該当することを、丸数字は規格の 2 級の曲がりに該当することを意味する。

仕上げ加工前後で、矢高の値に大きな変化は生じなかった。材表面を削る際に、応力緩和が起きな

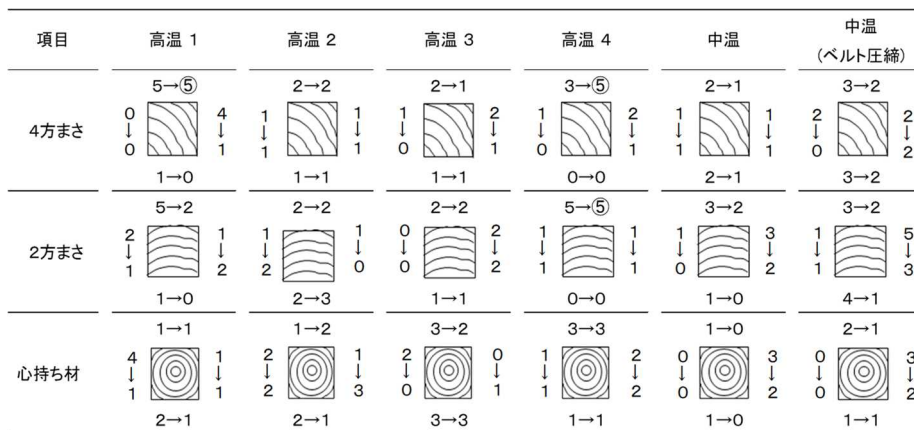


図-5 仕上げ加工前後の矢高の平均値（単位：mm、仕上げ前→仕上げ後）

かったものと推察される。ただ規格において、仕上げ材の曲がり、挽き材の1/2程度であることが求められるため、採材及び乾燥工程を通じて曲がり抑制を図ることが必要となる。

(3)内部割れ

内部割れの状況を図-6に示す。3条件の乾燥スケジュール（高温2、高温3、中温乾燥²⁾）について、元口から2,000mmの位置の内部割れ個数、長さを表している。中温乾燥で乾燥した試験体は良好な結果を示し、2方まさの試験体は、内部割れの発生がわずかに確認される程度、4方まさの試験体には全く確認されなかった。中温乾燥の条件は、表層部と内部との含水率傾斜が小さい状態で乾燥することができるため、内部において引張応力が働きにくくなったものと考えられる。



図-6 元口から2,000mmの位置における内部割れの個数と長さ

(4)節

試験体の節の状況を図-7に示す。心持ち材は、4面に多くの節が確認されたのに対し、4方まさ及び2方まさは、木表側で少なくなる傾向を示した。節径は、4方まさの木表側が最も小さかった。しかし、2方まさの側面（まさ目面）には、節の縦断面が見える大きな流れ節が存在した。

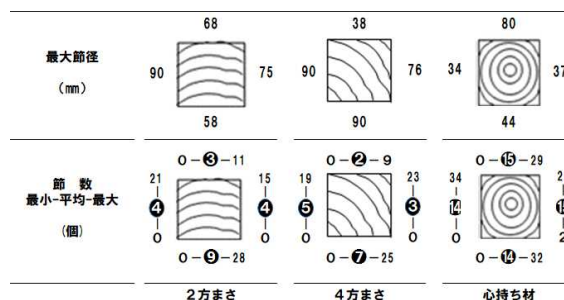


図-7 節の状況

(5)曲げ強度試験

曲げ強度試験の結果を表-4、図-8及び図-9に示す。MORの平均値は、4方まさが35.7MPa、2方まさが30.3MPaを示した。両者の間に危険率5%で有意差が認められることから、2方まさ<4方まさの関係があるものと考えられる。MOEの平均値は、4方まさが5.77GPa、2方まさが5.51GPaを、 E_{fr} の平均値は、4方まさが5.98GPa、2方まさが5.70GPaを示した。MOE及び E_{fr} は、4方まさ及び2方まさの間に有意差がないことから、4方まさ \approx 2方まさの関係があるものと考えられる。また、図-8においてMOEと E_{fr} の間には相関が見られた。

表-4 曲げ強度試験の結果

| 試験体 (本) | 含水率 (%) | 密度 (kg/m ³) | MOR (MPa) | MOE (GPa) | E_{fr} (GPa) | |
|---------|---------|-------------------------|-----------|-----------|----------------|-------|
| 4方まさ | 平均値 | 14.0 | 376.4 | 35.7 | 5.77 | 5.98 |
| | 最大 | 17.9 | 433.4 | 46.9 | 7.88 | 8.46 |
| | 最小 | 12.0 | 338.0 | 18.3 | 4.14 | 4.76 |
| | 標準偏差 | 1.7 | 27.0 | 8.5 | 1.17 | 1.10 |
| | 20 | | | | | |
| 2方まさ | 平均値 | 13.7 | 349.9 | 30.3 | 5.51 | 5.70 |
| | 最大 | 16.6 | 388.6 | 43.6 | 7.94 | 7.92 |
| | 最小 | 11.8 | 290.5 | 18.1 | 3.94 | 4.12 |
| | 標準偏差 | 1.4 | 27.1 | 7.5 | 1.22 | 1.23 |
| | 16 | | | | | |
| 心持ち材 | 平均値 | 16.6 | 467.3 | 46.9 | 8.12 | 7.66 |
| | 最大 | 39.9 | 591.3 | 62.2 | 11.65 | 11.53 |
| | 最小 | 11.8 | 388.4 | 32.4 | 4.09 | 4.11 |
| | 標準偏差 | 6.2 | 49.3 | 7.4 | 1.49 | 1.46 |
| | 23 | | | | | |

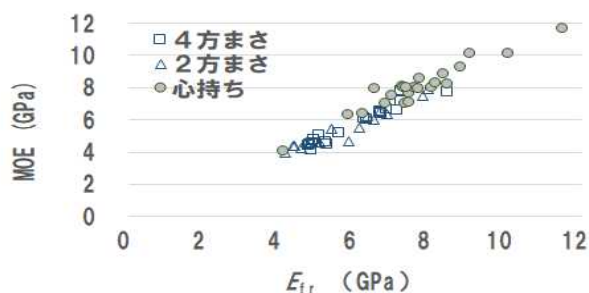


図-8 MOE と E_{fr} の関係

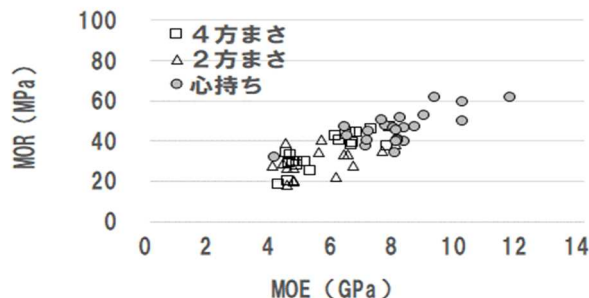


図-9 MOR と MOE の関係

2) 4丁取り正角材の人工乾燥試験

(1) 供試材

末口径 40 cm以上の丸太 9本の測定結果を表-5に示す。9本の材の密度は 620~999kg/m³、 E_{fr} は 4.58~8.02GPa、曲がり(矢高)は 3.6~11.5 cmであった。

4丁取り正角材の採材後の測定結果を表-6、図-10に示す。含水率の平均値は、一辺 135 mmの正角材が 126.0%、一辺 120 mmの正角材が 156.2%であった。採材後の曲がり、木表側に生じた。

表-5 供試丸太の測定結果

| 番号 | 末口径 (cm) | 元口径 (cm) | 密度 (kg/m ³) | 曲がり 矢高 (cm) | 元口 年輪数 (年) | E_{fr} (GPa) | 素材JAS ⁵⁾ |
|----|-------------|-------------|----------------------------|-------------------|------------------|-------------------|---------------------|
| 1 | 46 | 58 | 673 | 3.8 | 35 | 4.58 | Ef 50 |
| 2 | 48 | 55 | 620 | 4.6 | 69 | 4.79 | Ef 50 |
| 3 | 42 | 57 | 883 | 5.8 | 53 | 5.39 | Ef 50 |
| 4 | 40 | 56 | 884 | 11.5 | 53 | 6.27 | Ef 70 |
| 5 | 42 | 58 | 834 | 3.6 | 54 | 6.74 | Ef 70 |
| 6 | 40 | 53 | 767 | 3.5 | 51 | 6.76 | Ef 70 |
| 7 | 42 | 55 | 900 | 4.6 | 52 | 7.22 | Ef 70 |
| 8 | 44 | 54 | 999 | 4.1 | 51 | 7.75 | Ef 70 |
| 9 | 45 | 53 | 847 | 5.2 | 71 | 8.02 | Ef 90 |
| 平均 | 43 | 55 | 823 | 5.2 | 54 | 6.39 | |

表-6 4丁取り正角材の採材後の測定結果

| 採材寸法 | 試験体 | 本数 (本) | 幅 (mm) | 厚さ (mm) | 材長 (mm) | 重量 (kg) | 含水率 (%) | 密度 (kg/m ³) | 曲がり 最大矢高 (mm) | E_{fr} (GPa) |
|---------|------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|----------------------------|---------------------|-------------------|
| 一辺135mm | 4方まさ | 16 | 136.19 | 135.53 | 4150 | 53.23 | 126.0 | 695 | 15 | 6.57 |
| 一辺120mm | 4方まさ | 8 | 122.04 | 120.39 | 4108 | 48.54 | 156.2 | 804 | 18 | 6.47 |

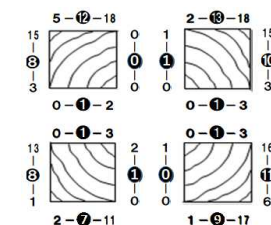


図-10 採材後の最大矢高 (単位: mm 最小-平均-最大)

(2) 含水率

乾燥前後の含水率を図-11に示す。図中の横太線は、目標含水率の 20%を示す。60 時間の乾燥では、乾燥前含水率 80%程度 of 材料については、含水率 30%程度までしか乾燥できなかった。しかし、さらに 72 時間延長し合計 132 時間乾燥させた場合、概ね 20%以下に乾燥できることが分かった。

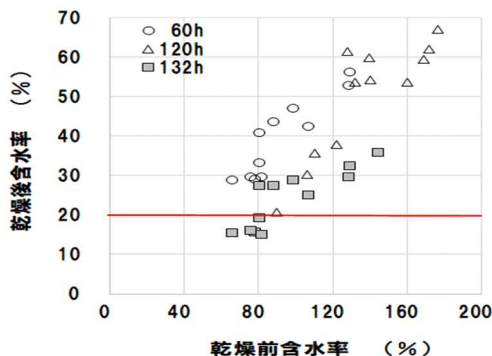


図-11 乾燥前後の含水率変化

(3) 曲がり

乾燥前後の正角材の曲がりの変化を図-12 に示す。記載の数値は、4面における矢高の最大値を示す。側面に位置する木表面の曲がりには、ベルト圧縮無しの場合、矢高が微増したのに対し、ベルト圧縮した場合は、矢高が減少する傾向を示した。ベルトについては、条件1では60時間乾燥後には緩んでいた。締め直して、さらに72時間乾燥を追加した条件3では、極端なベルトの緩みはなかった。圧縮が確実に実施されていたことが曲がり抑制につながったのではないかと推察される。



図-12 乾燥前後の矢高の最大値 (単位: mm、乾燥前→乾燥後)
左2つ: ベルト圧縮無し 右2つ: ベルト圧縮有り

4. まとめ

1) 9丁取り正角材の性状調査と曲げ強度試験

人工乾燥後に十分養生した9丁取り正角材について、以下のことが明らかになった。

- ・仕上げ加工前後で、矢高に大きな変化は生じなかった。
- ・中温乾燥で乾燥した場合、4方まさ及び2方まさにおいて内部割れの発生は少量であった。
- ・MORに、2方まさ<4方まさの関係が示された。
- ・MOEと E_{fr} の間に、相関が見られた。両者に、4方まさ \approx 2方まさの関係が示された。

2) 4丁取り正角材の人工乾燥試験

4丁取り正角材について、以下のことが明らかになった。

- ・4丁取り正角材を採材した直後は、木表面で材長方向に凹型に曲がる傾向を示した。
- ・中温乾燥60時間では、乾燥前含水率80%程度の材料が、30%程度までしか乾燥できなかった。
- ・中温乾燥132時間では、乾燥前含水率80%程度の材料が、概ね20%以下に乾燥できた。
- ・乾燥時の圧縮によって、矢高の増加が防げた。ベルト圧縮の場合、緩まないことが条件となった。

謝辞

今回の乾燥試験では、大分県立日田林工高等学校並びに同校の林業科教諭 後藤英次郎氏、江田雅之氏には、同校所有の高周波・蒸気複合乾燥機を使用させていただく際に多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 古曳博也: 令和元年度大分県農林水産研究指導センター林業研究部年報, 24-29 (令和2年)
- 2) 古曳博也: 令和2年度大分県農林水産研究指導センター林業研究部年報, 20-27 (令和3年)
- 3) (公財) 日本住宅・木材技術センター: 構造用木材の強度試験マニュアル, 5-17 (平成23年)
- 4) 製材の日本農林規格: 平成19年8月29日農林水産省告示第1083号
- 5) 素材の日本農林規格: 平成28年8月30日農林水産省告示第1641号