

カラマツ圧縮木材の材料特性および腐朽に対する残存強度*

高橋 剛^{*1}, 田中 康基^{*2}, 富樫 巖^{*3}, 岩淵 義孝^{*1}, 長澤 徹^{*4}

Material Characteristics and Residual Strength for Decay of Compressed Wood Made of Japanese Larch

Tsuyoshi TAKAHASHI^{*1}, Koki TANAKA, Iwao TOGASHI,
Yoshitaka IWABUCHI and Tohru NAGASAWA

^{*1} Kushiro National College of Technology
2-32-1 Otanoshike-nishi, Kushiro-City, Hokkaido 084-0916 Japan

Utilization of scrap wood produced by thinning-out the Japanese larch forest is a serious problem to be solved. Since wood is comparatively easily strengthened by compressing it, depending on the future developments, a lot of usages of compressed wood can be expected in the future. On the other hand, the decay of wood damages the timber and it remarkably shortens the life of a wooden building. In this study, the investigation was carried out to aim to apply compressed wood produced by compressive forming to wooden buildings. The following conclusions were obtained as the first stage. 1) The compressed wood was produced through four processes of softening → compression → shape fixation → drying. Particularly, the condition of shape fixation is steam processing at 132°C for 70 min. 2) As for a useful index to clarify the situation of compression, it was found that "late wood ratio" is even better than "density". 3) The accelerated decay tests for compressed woods and non-compressed woods were conducted. Then, these decayed woods were subjected to a uniaxial compression loading. As a result, it was found that, after the decay test, the compressive Young's modulus and the compressive strength of compressed woods are larger than those of solid wood. In point of residual strength for decay durability, compressed wood is superior to solid wood (non-compressed wood).

Key Words : Japanese Larch, Compressed Wood, Shape Fixation, Late Wood, Residual Strength, Decay Durability

1. 諸言

木材は、古くから自然に近い状態で住宅用建材として用いられ、安価で比強度が高く、耐久性に優れた材料である。しかし、湿潤環境下において腐朽菌が繁殖すると、生物劣化により木材は加速的に本来強度を喪失する。この状態で住宅が地震などに強い揺れに見舞われると、倒壊など甚大な被害を招く。例えば、2007年能登半島地震においても、倒壊した住宅の建材に腐朽跡が認められたケースも多く、これが被害を大きくした要因にも挙げられている⁽¹⁾。能登半島地震よりも震度が大きかった1995年阪神大震災や2011年東日本大震災でも同様な被害がより大きな規模で発生したであろうことは容易に想像できる。このように、この生物劣化によって、木造建築物の耐用年数は大幅に短縮することもある。地震多発として知られる北海道根釧地区は、湿潤環境という点においても春夏の霧による湿気、冬期間の積雪や凍結などで住宅用木材は一層傷みやすく、腐朽などの劣化も懸念される地帯である。

木材腐朽に関する研究は、例えば阿部⁽²⁾の促進腐朽試験によってトドマツ、カラマツなどの北海道産針葉樹材に対する耐朽性評価など多くの報告がなされている。しかしながら、これらの多くは生物学的な視点でまとめられたもの^{(例え(3), (4))}が多く、腐朽による強度低下との関連性に着目した研究報告^{(5)~(7)}は少ない。そのような中で、鈴

* 原稿受付 2012年6月5日

^{*1} 正員, 釧路工業高等専門学校 (〒084-0916 北海道釧路市大楽毛西 2-32-1)

^{*2} 学生員, 東北大学大学院工学研究科 機械・知能系ナノメカニクス専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)
(元 釧路工業高等専門学校 専攻科 (〒084-0916 北海道釧路市大楽毛西 2-32-1))

^{*3} 旭川工業高等専門学校 (〒071-8142 北海道旭川市春光台 2条 2-1-6)

^{*4} 正員, 北海道教育大学釧路校 (〒085-8580 北海道釧路市城山 1-15-55)

E-mail: t-taka@mech.kushiro-ct.ac.jp



木らは木材腐朽による強度低下の経時変化を約2年にわたり測定し、その結果をもとにダメージの数学的予測モデルを構築した⁶⁾。

ところで、釧根地区は1957年の国有林生産力増強計画を受けて、カラマツ、ドトマツおよびエゾマツを主とする針葉樹林が植林され、広大な造林群生地帯が幾つも森林資源に恵まれた地帯である。数ある樹種の中でも成長の早いカラマツはその代表格で規模も大きい。当初計画によると、当時の需要状況から、坑木、杭丸太、建築用仮設材や農業用資材など丸太のまま消費されることを見込んでいた。しかし、その後、産業構造が変化し、木材以外の材料代用あるいは安価な海外木材資源が国内需要を賄うようになり、国産木材の使用量が激減した結果、成木はそのまま製材化されず、間伐材だけが大量に排出される事態に陥った。ところが、2011年の東日本大震災により、今後、木造住宅建設が本格化するため、この国家的大規模需要に応えるためにも、間伐材を含めたカラマツ材の建材としての有効活用方法、それも建材としての付加価値がついた国際競争力のある国産建材にすることが強く望まれている。実際、カラマツの有効活用に関するシンポジウムが各地で行われている。例えば、「カラマツ材の生産と利用を考える」では、カラマツの国際動向⁸⁾が紹介され、議論されている。

本来、カラマツは、上述したように比較的成長が早いと言われるが、その性能を十分発揮するためには40年以上の樹齢が必要とされる。その間に材料特性の均質性を損なう節の成長により欠陥も増え、それが機械的特性のバラツキや強度低下をもたらす。このような品質低下が無垢材の弱点である。集成材は、この点を克服できる製材があるが、一般的には価格が無垢材のその2倍以上もする。

そこで、木材の圧縮化あるいは圧密化による強度向上に着目する。これまでも圧縮木材に関する研究報告⁹⁾⁻¹²⁾は幾つかある。例えば、浅井ら⁹⁾はガラス転移点以下の温度で圧縮成形を試み、強度および寸法安定性に及ぼす成形条件の影響を調べている。また、大谷ら¹⁰⁾は複合則を用いて圧縮木材の引張強度に対する圧縮量の影響を明らかにし、破断形態の観察結果から圧縮量の影響を評価した。北守ら¹¹⁾も、圧縮木材の構造用途として必要となる各種力学諸係数を得るべく広く実験し、設計情報を供している。しかしながら、これらの研究対象の多くはスギを対象としたものが多く、カラマツの検討結果は少ない。更に、圧縮木材が腐朽した際の強度劣化を対象とした研究例は見当たらない。

以上述べたことを背景に、本研究では、カラマツ材間伐材の有効活用を念頭に、木造建材などへの適用を目的とした強度耐久性に優れた圧縮木材の開発に着手する。その第一段階として、以下の3点を目的に研究を遂行する。

- 1) 圧縮木材の製法検討；圧縮形状の固定化のための条件検討を行い、比較的簡易で、確実に形状固定できる製法を確立する。
- 2) 機械的強度との相関性が強く、圧縮状態を表現するのに適した指標の検討；木材は特性バラツキの大きい材料であるため、定性的傾向を把握するのに多くの試験片を要する。そこで、機械的強度を比較的簡単に把握でき、かつ相関性が強い指標を検討する。
- 3) 圧縮木材の耐朽性および腐朽後残留強度検討；木材が腐朽するための条件の一つに水分がある。圧縮木材の吸水特性を明らかにすることで耐朽性への優位性を検討する。更に、促進腐朽試験によって十分に腐朽した試験片を対象に機械特性の残存率を明らかにし、圧縮木材の優位性について検討する。

2. 圧縮木材の製法と機械的特性

2-1 材料試験片と試験名称

本研究で扱う材料はカラマツ間伐材である。但し、間伐材といえども直径は成木のそれとほぼ等しいものである。試験片はその材料から切り出した。試験片サイズとそれ用いる試験の名称を表1に示す。なお、これら試験片は、個体差によるバラツキを排除するため、目視により節や割れがないものを選び、本数は各種10本用意した。

2-2 圧縮木材の製法

図1は表1, Type①試験片の(a)縦圧縮あるいは(b)横圧縮のときのストロークと圧縮応力を示したものである。縦圧縮とは繊維方向への圧縮、横圧縮とは繊維に対して直角方向、すなわち原木の半径方向の圧縮である。図1の結果より、縦圧縮は、剛性の高い繊維を軸方向に押すため、大きな圧縮応力が発生するが、圧縮ひずみ2.4%で

繊維がせん断割れを生じるため、圧縮応力が減少し破断する。一方、横圧縮は繊維間隔の距離が小さくなるにつれて軸方向圧縮応力が大きくなっている。特に圧縮ひずみが 30%を超えると圧縮応力は急激に大きくなることから分かる。本研究では、繊維間隔を小さくするように繊維直角方向に圧縮し、繊維密度を大きくすることを圧縮化あるいは圧密化と呼ぶ。

Table 1 Specimen size and Type of tests

Type	Specimen size(mm)	Type of test
①	20×20×40	・Compression parallel to the grain and perpendicular to the grain ・Dimension recovery by water immersion
②	20×20×400	・Water absorption for compressed and non-compressed wood ・Bending by 4 points supports(JIS Z2113)
③	5×5×15	・Accelerated decay(JIS K1571), ・Compression parallel to the grain for the decayed specimen

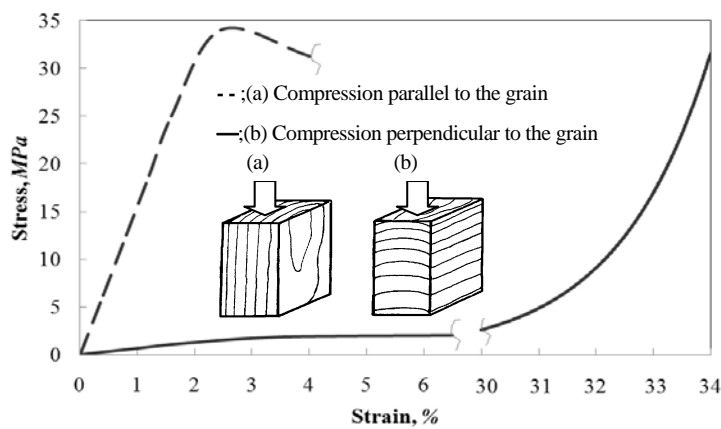
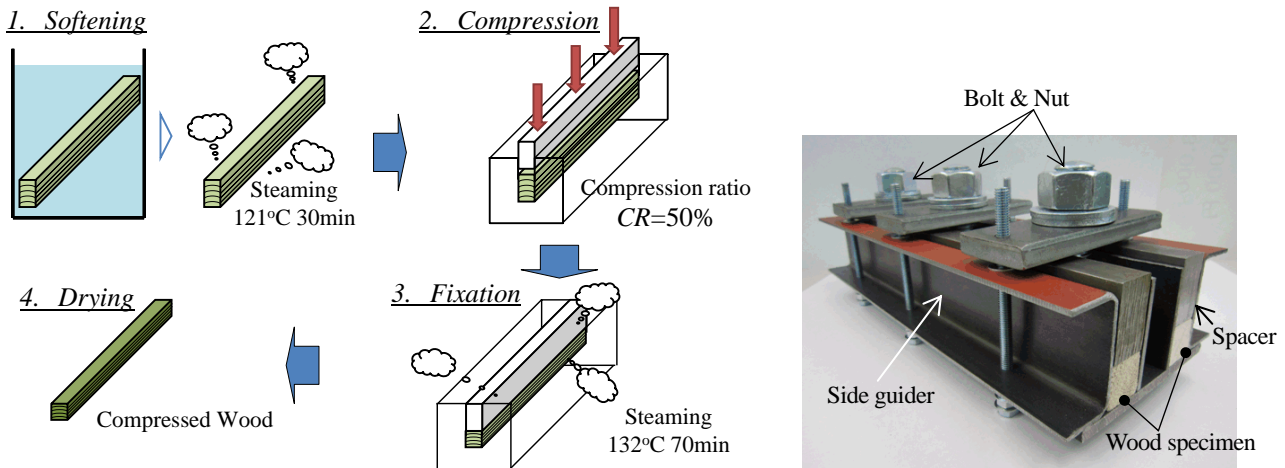


Fig. 1 Stress-Strain relation to compression parallel to the grain and perpendicular to the grain



(a) Manufacturing process of compressed wood (b) Fixing tool
Fig.2 Manufacturing process of compressive timber and Fixing tool

圧縮木材の製法の模式図を図 2a)に示す。製法の工程は“軟化”⇒“圧縮”⇒“形状固定”⇒“乾燥”の4工程⁷⁾からなる。最初の軟化工程と次の圧縮工程のことをドラインセットといい、圧縮木材の製法の一つとなっている。まず”軟化工程”は、吸水し加熱によって軟化する工程である。軟化条件の因子は、重量含水率と加熱条件の二つであり、重量含水率の条件は飽和状態までの吸水あるいは気乾状態の二種類とし、一方の加熱条件は試行錯誤を繰り返し、結果的に 121°C×30 分で加熱あるいは全くの加熱なしとした。表 2 に示すようにこれらの条件を組み合わせ、繊維方向に対して直角方向に圧縮する横圧縮試験を実施し、圧縮荷重に対する変形抵抗すなわち横圧縮ヤング率を求めた。その結果、表 2 の最右列に結果を示すように、Case 4(重量含水率 60%、蒸気温

度 121°C×30 分間)で処理した横圧縮ヤング率が最も小さくなったことから、この条件が最も加工し易いと判断し、これを本研究における軟化条件とした。

Table 2 Conditions of softening treatment and results

Case	Ratio of water contents (%)	Steam treatment condition	Young's modulus for compression perpendicular to the grain (MPa)
1	10	-	267
2	10	121°C×0.5hr	224
3	60	-	218
4	60	121°C×0.5hr	189

次の”圧縮工程”は、軟化工程済みの材料を圧縮する工程である。圧縮に用いた鉄鋼製の自作治具の外観写真を図 2b)に示す。この治具は、M20 ボルト 3 本を用いて鋼鉄製スパーサーを介して、同時に 2 本の試験片材料を一緒に圧縮する方式であり、サイドガイドで試験片幅方向へ膨らみ変形を拘束している。治具設計に際しては、構造解析を実施し、締め付け荷重に対する治具剛性が十分であることを確認した。なお、圧縮方向は板目面に対して繊維直角方向とした。圧縮度合いを示す指標として圧縮率 CR を式(1)のように定義した。

$$CR(\%) = \frac{t_1 - t_2}{t_1} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 t_1 は圧縮前厚さ、 t_2 は圧縮後厚さである。更にその後、圧縮治具装着のまま約 60°C の温風により試験片木材を強制乾燥させた。

次の”形状固定化工程”とは、圧縮木材が水分などによって圧縮前の寸法に戻ることを防ぐための重要な工程である。現在報告されている形状固定化方法には、熱処理^{(13), (14)}、薬品処理⁽¹⁵⁾ 或いは高温高压蒸気⁽¹⁶⁾を用いる方法があるが、この中から処理時間が短く、強度へ悪影響度合いが少ない高温高压蒸気処理法を採用した。形状固定化という点では、180~200°C の蒸気による数分間の処理が良い⁽¹⁴⁾とされているが、その反面木材の残留強度が低下することも報告されている⁽⁹⁾。そこで、圧縮しても組織崩壊が生じない上限とされる圧縮率 50%⁽¹²⁾ の木材試験片(以後、50%圧縮材というように呼ぶ)に対して、飽和蒸気温度を少し低めの 132°C に設定し、保持時間を 40, 55, 70, 85, 100 分間の 5 条件で形状固定化処理を試みた。この 132°C という温度は、木材の湿潤状態におけるガラス転移温度(80°C~250°C)の中から、保持時間を考慮し、試行錯誤を繰り返しながら設定したものであるが、他の研究^{例えば(7), (16)}に見られるそれに比べ低く、扱い易い温度である。

その後、これら試験片を水温 20°C の純水中に 24 時間浸漬し、寸法回復率を測定した。寸法回復率 RD の定義を式(2)に示す。

$$RD(\%) = \frac{t_3 - t_2}{t_1 - t_2} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 t_1, t_2 は上述した通り圧縮前、圧縮後のそれぞれの試験片厚さ、 t_3 は圧縮後試験片を水中で所定浸漬した後の厚さである。ここでは、その所定時間を 24 時間とした。式(2)より RD 値が小さいほど、水分を吸収しても寸法は戻りづらく、形状固定に成功していると判断できる。なお、最後の”乾燥工程”は自然乾燥により、材料を気乾状態に保つようにした。

図 3 は、132°C 蒸気で形状固定した試験片を 24 時間水中浸漬させた後の寸法回復率の結果である。いかなる保持時間においても寸法回復率は 10~8%程度であり、処理時間の違いによる有意な差は見られない。その中でも、処理時間は 70 分間以上であればほぼ 8%程度で済むことから、本研究では 132°C で 70 分間の蒸気処理時間を形状

固定のための熱処理条件とした。

図4は、無垢材すなわち非圧縮材と50%圧縮材の断面微視組織の写真である。これは、薄さ0.1mm程度に切り出した試料を対象に、マイクロSCOPE(SH130PC, 松電舎製)を用いて、観察倍率1500倍、画素数130万画素で撮影した。圧縮木材は厚さ方向に圧縮されることにより道管が潰され、材料密度が高くなっている。非圧縮材のそれと比べると明らかなように、道管部分への水分が入り難い状態にある。

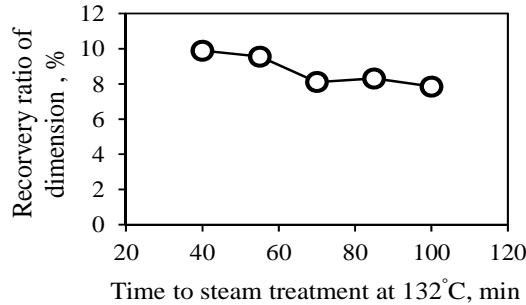


Fig. 3 Recovery ratio of dimension after water immersion test

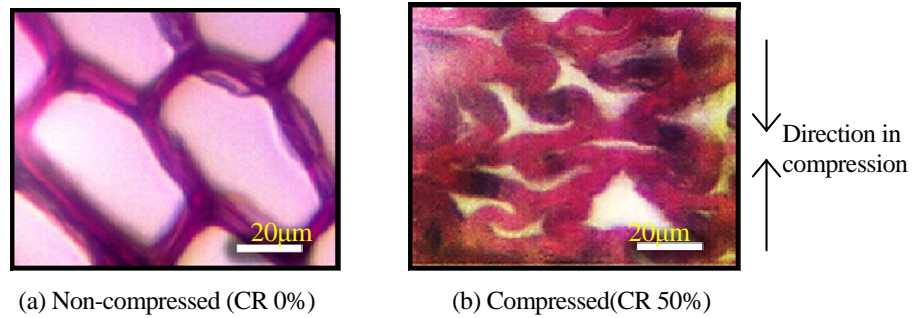


Fig.4 Photographs of microstructures (Non-compressed wood vs Compressed wood)

2.3 圧縮木材の曲げヤング率

2.1 で述べた圧縮木材製法により、圧縮率の異なる試験片(表 1, Type②)に対して実施した曲げ試験結果を図5に示す。図中のプロットは黒丸が圧縮材、白丸が非圧縮材すなわち無垢材を示している。n数は最低5であり、図中の実線は平均を意味する。圧縮率が高くなるに従い曲げヤング率は増加傾向にある。例えば、50%圧縮材の圧縮前の素材寸法は、圧縮後のその2倍であり、曲げヤング率もほぼ同じく約2倍になっている。これは木材に含まれる繊維密度も2倍になったことに起因する。なお、圧縮率が60%程度になると細胞壁の破壊が起こり¹²⁾、曲げヤング率は低下するため、50%を上限とした。なお、圧縮比と曲げヤング率の相関係数は $R^2=0.6381$ と低い値となっていることから同じ圧縮率であっても個々の試験片に由来するバラツキ要因が影響し、曲げヤング係数に違いを生む。したがって、n数を多くしなければ定性的な傾向を明らかにすることができない。

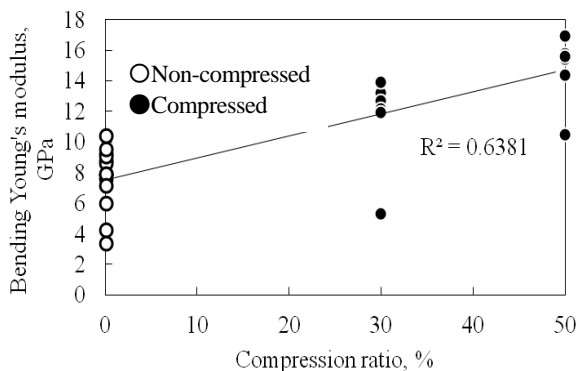


Fig. 5 Bending Young's modulus depended on Compression ratio

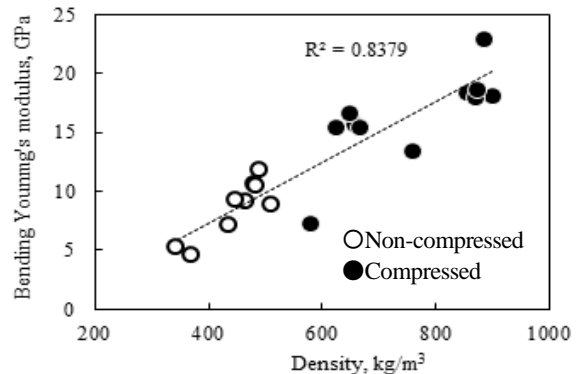


Fig. 6 Bending Young's modulus depended on density

一方、図6は、図5の横軸を圧縮比から密度に代えて、曲げヤング率との関係を示したものである。図中の相関係数 $R^2=0.8379$ が示すように密度を指標にとることによって、曲げヤング率との関係を整理することは可能である。しかしながら、単に密度だけでは、例えば曲げヤング率などの機械的特性に及ぼす繊維組織の影響を推測することはできない。

そこで、木材の機械強度を左右する繊維密度に着目し、繊維密度の高い晩材と強度との相関性を調べる。図7は試験片断面を撮影した写真であり、これを見ると色の薄い部分と濃い部分に分けられる。色の薄い部分を早材部といい、夏期に形成され、成長が速いために空隙が多くなるので色は薄くなる。対する濃い部分は晩材部といい、冬期に形成されるので成長が遅く、結果的に繊維密度が高くなり色は濃くなる。晩材の密度は早材のその約2.4倍である。繊維は本来機械的性質の支配する最も大きな要因であることから、断面内に繊維密度が高い晩材を多く含む材料ほど機械的強度も高くなるはずである。図7を見ると晩材と早材は目視で判別できるほど明かであるが、晩材幅は必ずしも一定ではなく、その境界があいまいな箇所も見受けられる。よって、晩材幅を直接測定し、それを特性値とすることは誤差の点で好ましくない。そこで、木材断面の画像処理によりRGB値の閾値を設定し、色を二値化し、早材と晩材を区別することを試みた。図8は、図7をRGB値80で二値化したものであり、黒が晩材、白が早材である。この画像データに含まれる全ピクセル数を色別に自動カウントし、全体に占める黒ピクセルの割合、つまり、断面全体に占める晩材部の面積比を求める。これを晩材率と定義する。

図9は、図7のように断面に含まれる晩材と早材の層数が同じ試験片に対し、この図の上下方向断すなわち板目面に4点曲げ荷重を作用させたときの曲げヤング率と晩材率の関係を示したものであり、図6との違いは横軸を密度から晩材率に代えたことである。図9の相関係数 $R^2=0.8528$ が示すように、密度を用いた図6の $R^2=0.8379$ よりも若干相関性が高い。このことから、晩材が木材の機械強度を決定する大きな要因であり、画像処理により直接的にこの値を求めることができるこの手法は有効である。なお、RGB値の閾値設定に対しては、通常室内照明の下で75から80の間で複数の値を試したが、相関係数に有意な差はなく、バラツキが少なく安定した結果が得られることがわかった。

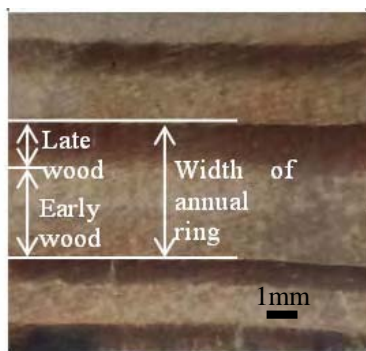


Fig.7 Definition of early wood and late wood

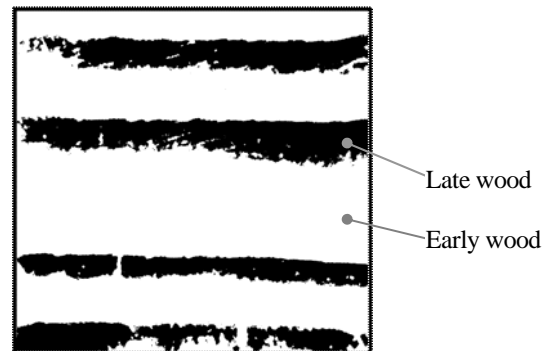


Fig.8 Binary representation of early wood and late wood

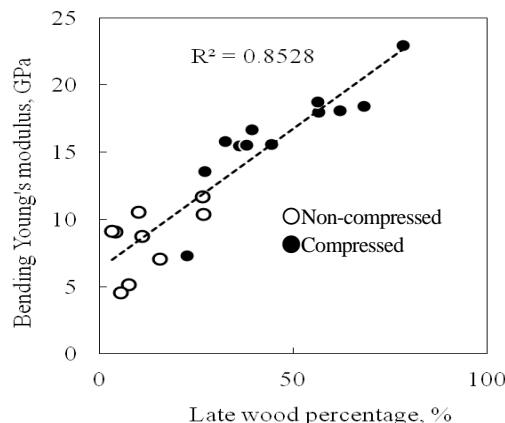


Fig.9 Relationship between ratio of late wood and bending Young's modulus

3. 圧縮材の耐朽性

木材の腐朽には、菌が繁殖できる4つの条件として酸素、栄養分、水分と温度が必要になり、これらの腐朽条件が全て揃わなければ腐朽できない。さらに、腐朽条件が全て揃った場合でも、菌の繁殖に耐える能力すなわち耐朽性は条件によって左右される。ここでは、4つの腐朽条件の中で最も対策が講じ易い吸水性について検討し、更に腐朽後の残留強度に対して圧縮木材の優位性を検討する。

3.1 吸水速度

吸水特性試験の試験片形状は表1, Type②とし、非圧縮材(圧縮率0%), 30%圧縮材および50%圧縮材を用いた。試験方法は、木口面以外の面をシールドし、木口面のみから水分を吸収させるように試験片を水中に浸漬させた。図10は、圧縮率違いに対する一週間後の重量含水率を比較したものである。この図より、非圧縮材の重量含水率が約35%、そして圧縮率30%, 50%の場合はそれぞれ30%強, 25%弱であり、非圧縮材のそれに比べそれぞれ14%強, 28%強減少している。圧縮率が高くなるほど重量含水率が低下する理由は、図4に示したように、木材を圧縮すると道管が潰され、水分を取り込みづらくなるためである。ところで、重量含水率に含まれる水分は、組織に含まれる結合水と道管に含まれる自由水であり、木材腐朽菌は自由水を養分に繁殖する。結合水としての限界を表す繊維飽和点は概ね30%であるため、重量含水率がこの値よりも小さければ、腐朽菌は繁殖しづらくなる。重量含水率30%^⑤を腐朽条件の基準値に設定している所以はここにある。もちろん、このまま水中浸漬を継続すれば、重量含水率は何れも増加するであろうが、圧縮木材の適用を想定している一般木造住宅において一週間水中浸漬するケースは極稀と考えられる。このように圧縮木材は非圧縮材に比べ吸水速度が明らかに遅く、腐朽条件の一つである重量含水率基準を満たさない可能性が高い。このように図10の結果から、圧縮木材は非圧縮材に比べ、腐朽条件が揃いづらいという点で有利である。

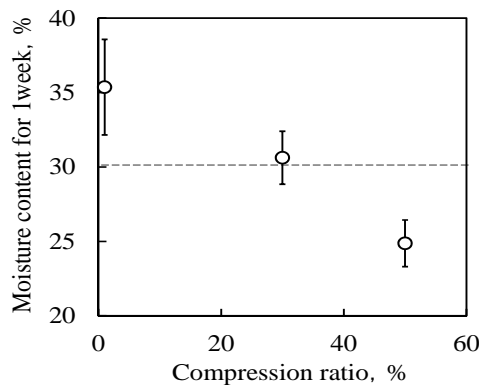


Fig.10 Immersion test results for 1 weeks

3.2 促進腐朽試験

腐朽は進行速度の遅い現象であるため、JIS K 1571 (木材保存材の性能試験方法及び性能基準)を準用した促進腐朽試験を実施した。試験片形状は表1のType③であり、材料はカラマツの間伐材で、それぞれ非圧縮材(無処理材;圧縮率0%)と圧縮木材(圧縮率30%, 50%)の3種類に対し、各9個の試験体を用意した。腐朽菌は、針葉樹に対して甚大な被害をもたらす褐色腐朽菌として、オオウズラタケMAFF 420001 (JIS K 1571 指定菌 FFPRI 0509)を供試した。具体的な試験方法としては、ガラス製200ml培養瓶の中にPDA培地を30ml分注した後、オオウズラタケを接種し、温度25℃で9日間培養することで生育した菌叢上に殺菌処理を施した試験片を載せ、同温度で12週間曝露した後で重量減少率を求めた。なお、腐朽後強度試験方法は、腐朽試験片に対して図1のスケッチ図(a)に示したように繊維方向を圧縮し、圧縮ヤング率および圧縮破断強度を測定した。

図11は促進腐朽試験において曝露12週間後の試験片が入ったビンの外観写真を示す。ビンの底部の培地上にある白綿状物質がオオウズラタケの菌糸体であり、旺盛に生育している気中菌糸が試験片を完全に覆い尽くしている。

るため試験片を確認できない。従って、圧縮率の違いによる腐朽状態の違いを外見上判断することは不可能であった。図12は図(a)非圧縮材の腐朽試験前、すなわち健全状態、図(b)非圧縮材の腐朽試験後、図(c)50%圧縮材の腐朽試験後をそれぞれの試験片を示したものである。図(b), (c)に示す腐朽後試験片は、図(a)に示す腐朽前試験片に比べて褐色に変色しており、痩せ細っていることが外観で分かる。腐朽菌が主として細胞壁を分解したことに依り、細くなったと考えられる。次に腐朽試験後の図(b)非圧縮材と図(c)50%圧縮材を比べた場合、変色の仕方や外形に大きな違いはない。但し、表面を注意深く観察すると(c)50%圧縮材よりも(b)非圧縮材の表面損傷が顕著であり、特に(b)非圧縮材には図中矢印で示すように繊維方向に対して直角方向すなわち幅方向の大きな割れが数本確認できる。この表面性状は、非圧縮材の他試験片にも見られた傾向である。

図13は、(a)図が先に示した図4(a)と同じ図、すなわち非圧縮材試験片の腐朽試験前の微視組織であり、図12(a)の組織である。一方、(b)図は同じく非圧縮材の腐朽試験後の微視組織を示したものであり、図12(b)のそれに対応する。腐朽前後の組織を比較すると腐朽前の図13(a)は多角形のセルが規則的に配列されており、細胞壁も厚い。一方、図13(b)の腐朽後組織はセル形状の規則性は失われ、形状が崩れており、セルサイズも概ね健全材の半分以下になっている。これらは、細胞壁が腐朽菌によって分解されたことにより細胞壁が薄く痩せ細り、結果的に試験片重量が減少し、外形寸法も小さくなることが分かる。

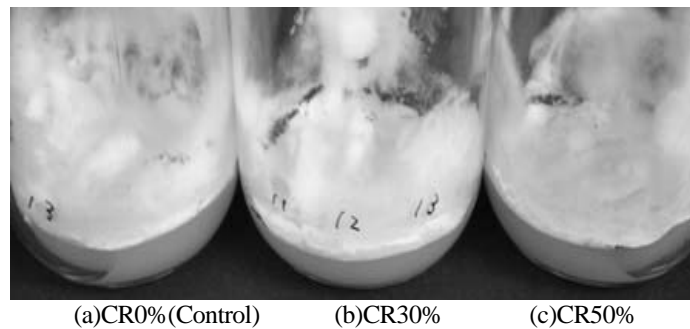


Fig. 11 Overview of accelerated decay test with *Fomitopsis palustris* for 12 weeks at 25°C

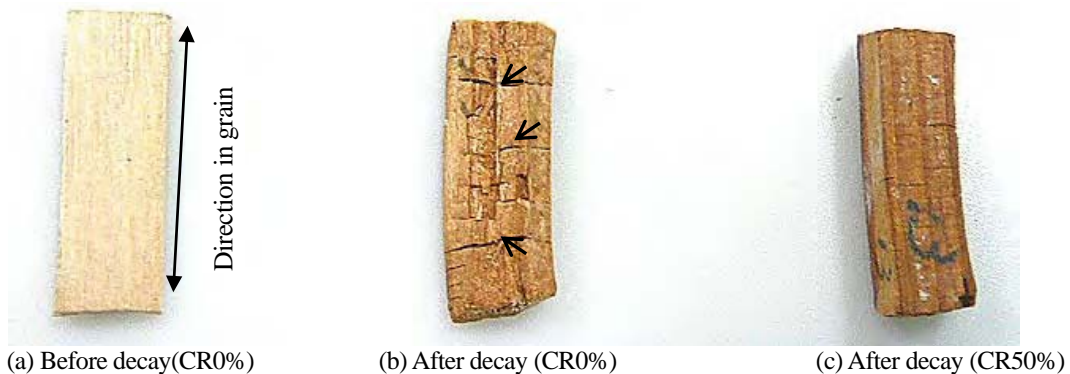


Fig. 12 Overview of specimen before vs after decay test for 12 weeks at 25°C

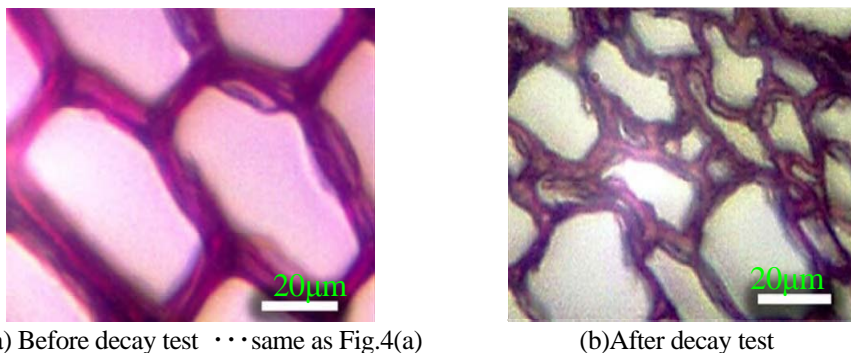


Fig.13 Microstructure of Brown-rot wood cells of CR0% non-compressed wood specimen before and after decay test for 12weeks

腐朽試験の結果として、図14に圧縮率違いに対する気乾状態での腐朽の質量減少率を示す。これらのデータは平均値とバラツキの大きさを示している。この結果を見ると、重量減少率という点においては圧縮比の異なる3条件とも同じレベルにあり、木材を圧縮化したことの効果は認められない。なお、促進腐朽試験JIS K 1571 における試験の有効性は「無処理材の質量減少率がオオウズラタケで30%以上であること」と定められおり、図14のCR0%非圧縮コントロール材の重量減少率は60%強であることから、促進腐朽試験環境は適正であったと言える。

図15は、非圧縮(コントロール材)、30%圧縮材、50%圧縮材の3種類のカラマツ試験片に対するオオウズラタケ腐朽前後の繊維方向圧縮試験結果を示している。図中の白抜きの棒グラフは腐朽試験前、すなわち健全な試験片での値、黒塗りのそれは腐朽試験後の値を示している。図(a)圧縮ヤング率、図(b)圧縮強度は、圧縮材および非圧縮材共に腐朽後の値が腐朽前のそれよりも著しく低下している。このことから、腐朽による圧縮ヤング率および圧縮強度の低下は木造構造物の強度耐久性を維持していく上で大きな問題となると言える。図15(a)、(b)の折れ線は残存率を示している。残存率とは、腐朽後の値を腐朽前の値で除して算出された割合のことであり、残存率が高いほど、腐朽による機械的強度の低下が少ないことになる。非圧縮材の残存率を見ると図(a)の圧縮ヤング率では約17%、図(b)の圧縮強度では高々9%しかない。これに対して50%圧縮材の残存率は、圧縮ヤング率で約35%、圧縮強度で約16%であり、非圧縮材に対して約2倍もある。腐朽によって木材強度は低下するものの、非圧縮材よりも圧縮材の方が残存強度は明らかに高いことから、圧縮木材の耐朽性に対する優位性は明らかである。

この理由を推察すると、図12(b)に示した非圧縮材の腐朽後試験片の表面には、図中矢印で示すように長手方向繊維を切断する幅方向の割れが多数認められ、表面劣化も顕著である。一方の図12(c)に示した50%圧縮材の劣化や割れやそれは明らかに少なかった。

表面劣化が劣化するのには、褐色腐朽菌オオウズラタケが木材成分のセルロースを選択して代謝し、そのためセルロース鎖が切断されるためである。結果的に、木材の繊維方向と直角に多数のひび割れが生じ、材料は褐色化する⁽¹⁷⁾。木材の機械強度は繊維密度に強く依存することから、この表面割れ状況の違いが、機械特性の差を生むと推察できる。具体的には、軸方向に圧縮荷重が作用すると中空構造の繊維が潰れ、局部的な折れ曲がりが発生する。非圧縮材に多く見られる幅方向の深い割れが折れ曲がりを助長していると考えられる。いずれにしろ、図14に示した重量減少率の結果のみから、腐朽による材料の機械的強度の低下傾向を推定することは難しいと言える。

なお、図15(a)圧縮ヤング率、(b)圧縮強度のそれぞれの残存率に対する圧縮率の影響を見ると、(a)圧縮ヤング率の残存率は圧縮率が大きくなるほど増加するが、(b)圧縮強度の残存率は圧縮率30%以降増加せず、頭打ちになっている。ヤング率は全体剛性に依存し、圧縮強度は局部的強度に依存するが、両者の傾向の違いを説明することが難しい状況にあり、今後検討を進める。

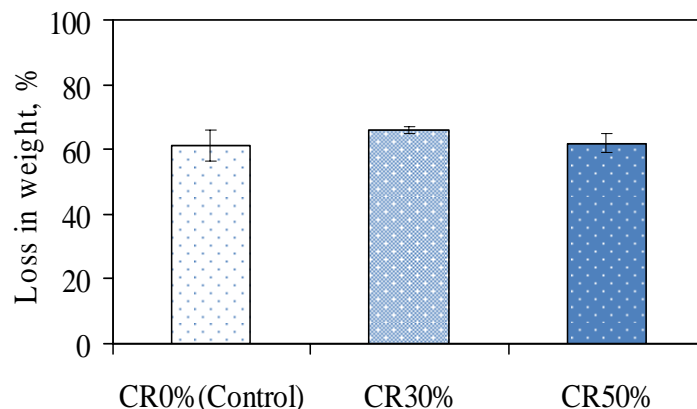
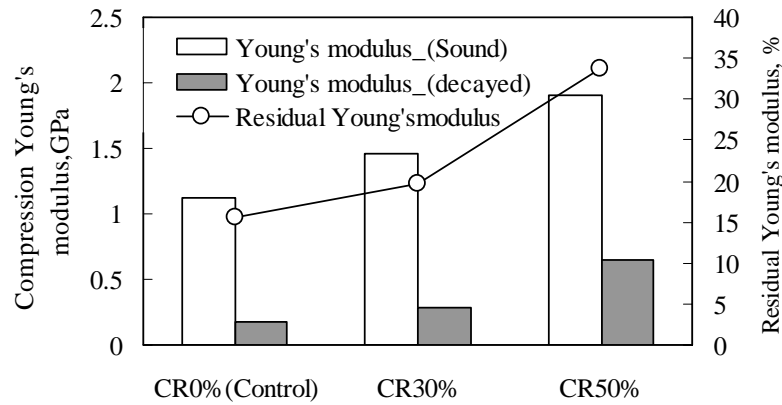
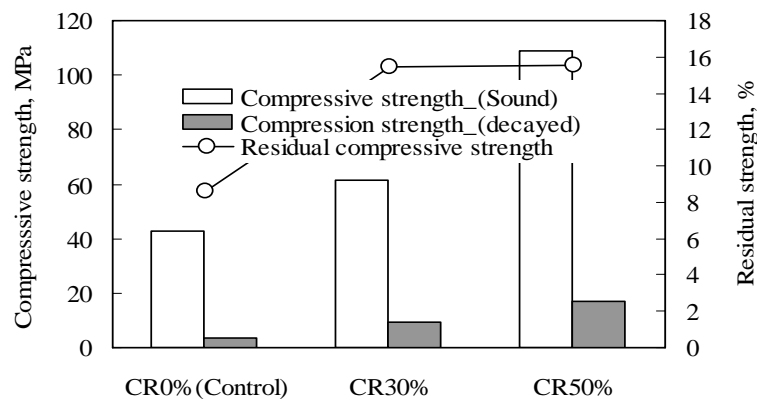


Fig.14 Loss in weight of compressed wood caused by decay



(a) Compressive Young's modulus vs Compression ratio



(b) Compressive strength vs Compression ratio

Fig.15 Residual ratio of mechanical properties for compressive load after decay test

4. 結論

本報では、カラマツ圧縮木材の製造方法および圧縮木材の耐朽性と腐朽後の残存強度について検討した。その結果、以下のことが結論として得られた。

- (1) 軟化→圧縮→形状固定→乾燥の4工程により圧縮木材を製作した。形状固定化工程は132℃で70分間保持の蒸気処理での固定化が可能になった。
- (2) 木材断面の中で繊維密度の高い領域である晩材部分の占める割合を晩材率と定義し、この指標と各種機械特性との相関性を調べたところ、圧縮率や密度との相関係数よりも高い値が得られた。このことから木材の機械強度と繊維密度は強い因果関係を有するため、繊維密度の高い晩材率を指標とすることは有効である。
- (3) 圧縮木材の耐朽性については、圧縮木材は道管が潰されるために吸水速度が遅く、腐朽条件を満たさない可能性が高い。次に、腐朽試験後の試験片の重量減少率で評価した場合、圧縮木材の優位性は認められない。しかしながら、腐朽後試験片に対する圧縮ヤング率および圧縮強度の残存率については、圧縮材が非圧縮材のそれよりも約2倍高いので、優位性は明らかである。

なお、本研究は、平成22年度ノーステック財団「研究開発助成事業」イノベーション創出研究支援事業スタートアップ補助金制度の支援により遂行できたものである。整理番号 H22 S-4-1

文 献

- (1) 2007年能登半島地震被害調査報告書 第11章 建物被害, p. 281-301. <http://www.jsce.or.jp/report/42/files/11.pdf> (参照日 2012年6月4日)

- (2) 阿部豊, “北海道産針葉樹材の耐朽性に就いて”, 林業指導所研究報告 第1号, 3月(1952)
- (3) Togashi, I., K. Itoh, S. Gisusi, and A. Harada, “Fungal contamination of fruiting houses for the sawdust-based cultivation of *Lentinus edodes* in Hokkaido and the effects of benomyl on *Trichoderma* spp. Growth”, *Journal of the Japan Wood Research Society*, 42, (1996), pp. 1258-1263.
- (4) Togashi, I., K. Itoh, S. Gisusi, and A. Harada, “Distribution of airborne fungi in fruiting houses for the sawdust-based cultivation of *Lentinus edodes*”, *Journal of the Hokkaido Forest Products Research Institute*, 11, (1997), pp. 1-4.
- (5) 鈴木大隆, 北谷幸恵, 岩前篤, 永井久也, 小南和也, 坂本雄三, “定常条件下における各種木材の含水率と腐朽の関係木質系建築材料における腐朽現象の定量化とダメージの数学的予測モデルに関する研究(第1報)”, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 73, No. 627 (2008), pp. 591-597
- (6) 藤沢伸光, 遠藤芳洋, “木材の腐朽と力学特性”, 土木学会第60回年次学術講演会(2005), pp. 561-562
- (7) 後藤崇志, 富川康之, 中山茂生, 古野毅, “腐朽処理した木材の超音波伝播速度及び部分圧縮強度の変化 超音波伝播速度の低下と残存強度との関係”, 木材学会誌 Vol. 57, No. 6 (2011), pp. 359-369.
- (8) 高田克彦, “カラマツ材質研究の国際的動向”, 組織と材質研究会, 2009年春季シンポジウム「カラマツ材の生産と利用を考える」(2009), pp. 16-17
- (9) 浅井将之, 西村尚, “圧縮木材の曲げ強度に及ぼす加工条件の影響”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 67, No. 654 (2001), pp. 267-272
- (10) 大谷忠, 久保島吉貴, 松下清, “圧縮木材の引張強度特性における圧縮量の影響と破断形態”, 木材学会誌, Vol. 51, No. 3 (2005), pp. 189-195
- (11) 井上靖之, 阿部真理, 竹内修, 藤盛啓治, “圧縮木材の基礎的研究と製品への適用: スギ間伐材の有効利用に関する研究(3)”, デザイン学研究. 研究発表大会概要集, Vol. 45, (1998), pp. 266-267
- (12) 北守顕久, 鄭基浩, 森拓郎, 小松幸平, “圧縮木材の力学的性質の圧縮率依存性”, 木材学会誌, Vol. 56, No. 2 (2010), pp. 67-78
- (13) 飯田生穂, 則元京, 今村祐嗣, “圧縮セットの水分・熱回復”, 木材学会誌, Vol. 3, No. 5 (1984), pp. 354-358
- (14) 井上雅文, 門河倫子, 西尾治郎, 則元京二, “木材中の水分を利用した水熱処理による圧縮変形の永久固定”, 木材研究, 資料第29号(1993), pp. 54-61
- (15) 井上雅文, 則元京, 大塚康史, “山田正軟質針葉樹材の表面層圧密化処理(第2報)フェノール樹脂初期縮合物による圧縮木材の固定および処理材の2, 3の物性”, 木材学会誌, Vol. 37, No. 3 (1991), pp. 227-233
- (16) 伊藤洋一, 棚橋光彦, 河合祐和, 重松幹二, 篠田善彦, “[資料]高圧水蒸気処理による木材の圧縮成形とその応用”, 岐阜大農研報(60)(1995), pp. 121-127
- (17) 社団法人日本木材保存協会編, 1・3 腐朽材の特徴・診断法, 木材保存(1982), pp. 50-61, 文教出版