

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 1日現在

機関番号：13601
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22580180
 研究課題名（和文）フラクトグラフィー観察によるカラマツ高温セット材の強度低減機構の解明
 研究課題名（英文）Explanation for reduction of mechanical properties of Japanese larch timber kiln-dried by the high-temperature setting method based on fractography observation
 研究代表者
 武田 孝志（TAKEDA TAKASHI）
 信州大学・農学部・教授
 研究者番号：50242673

研究成果の概要（和文）：カラマツ高温セット材の強度低減機構の解明を目的として、いくつかの乾燥条件と暴露条件を組み合わせて引張試験を行ってフラクトグラフィー観察を行った。フラクトグラフィー観察の結果、スギと比較してカラマツは平滑な破面を示す場合が多く、高温セットの影響が大きいことが明らかになった。実大曲げ試験及び無欠点小試験体の JIS 曲げ試験から、暴露条件の強度性能に及ぼす影響は小さく、乾燥条件が強度性能を決定していた。

研究成果の概要（英文）：ensile tests were conducted, and the fracture surfaces were observed with the SEM to explain for reduction of mechanical properties of Japanese larch timber under four drying methods and three exposure conditions. Brittle cases were often observed in Japanese larch specimens compared with Japanese cedar, and the high-temperature setting method brought more brittleness for Japanese larch timber. The results of bending tests for structural timber and small clear specimens indicated that drying methods was critical to mechanical properties of both, but exposure had little effects on them.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・木質科学

キーワード：フラクトグラフィー

1. 研究開始当初の背景

近年、背割りの無い柱材を短時間で蒸気式乾燥機を用いて人工乾燥する方法、いわゆる「高温セット法」が急速に普及してきている。この方法は、生材状態の柱材に乾球温度 110～120℃程度で乾湿球温度差 40～50℃の初期条件によって高温低湿条件下で一気に初

期乾燥を行うことにより、表面に引張セットを生じさせ、材面割れを防止させようとするものである。

これまで、高温セット法によって人工乾燥したスギ材については、顕著な強度低下はみられず、実用的に支障がないことを確認してきた。しかし、カラマツ材については、強度

的な低減や劣化が生じる可能性が示唆されている。特に、衝撃曲げに対しては、内部は外層と比較して顕著に強度低下を生じることが確認されている。

特に、カラマツ高温セット材が経時変化に伴って強度低下を生じるのかについては検討されていない。このため、暴露条件別に明らかにする必要性は高くなっている。

これまで、カラマツ高温セット材についてシャルピー型のJIS衝撃曲げ試験を行った結果、破壊断面のフラクタル次元(D)と衝撃曲げ吸収エネルギー(U)の関係において、高温セット処理時間が長くなるにつれて、Uが低下するのに対してDは増加したことから、強度低下は破壊断面形状に直接的に表れないことが明らかになった。

つまり、静的・衝撃曲げ試験の破壊形状と比較して、より微細なオーダーでの損傷を高温セット法がもたらしめていることが強く予測される。このため、フラクトグラフィーによりより微細な構造を観察することによって、強度低下の要因が明らかになることが期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高温セット法の強度に及ぼす影響について、①強度低下における定量的な把握、②フラクトグラフィー観察による詳細なメカニズムの解明、③金物腐食への影響について検討を行うことにより、高温セット材の実際の使用に当たっての重要な情報を得るとともに、たとえば、強度低下を抑制するような新しい人工乾燥スケジュール開発などへの応用へとつなげることができるような基礎的な知見を求めるところにある。

(1) 暴露条件別の強度低下の定量的な把握

実用的な見地から人工乾燥における乾燥条件の違いによって、経時的に、はたしてどの程度強度低下が起こるのか、また、それは、外層と内部でどの程度異なるのか、それらは表面色との関係があるのかなどについて検討を行う。これまで、暴露条件によって材内応力状態が異なることが明らかになってきていることから、特に、暴露条件の違いによる影響について明らかにする。

(2) フラクトグラフィーの観察による損傷オーダーの解明

電子顕微鏡を用いて、引張試験の破壊面等を観察することにより、細胞壁レベルにおける損傷の形態を乾燥条件・暴露条件について相互に比較することにより、カラマツ材強度低下原因解明の糸口を明らかにする。

(3) 接合金物腐食への影響

高温セット処理によって木材の化学成分が変化して金物がさびやすくなる可能性があるため、接合金物を装着して金物を装着してその経時変化を明らかにする。

3. 研究の方法

実験の主なスキームは、スギ高温セット材における暴露試験を参照して、まず、初年度には、正角材を人工乾燥機で乾燥して試験体作製して暴露試験を開始し、2年目に、実大強度試験を行い、最終年度にJIS小試験体試験を行った。これに対応して、フラクトグラフィー観察を行った。金物試験については初年度にセッティングして観察を行った。

(1) 試験体

生材状態の長野県産カラマツ心持ち正角材(145mm角、長さ3m)を120本用意した。縦振動法により動的ヤング係数を測定して、ヤング係数の分布が均等になるように30本ずつ4グループに振り分けた。この各グループに対して、乾球温度120°C、湿球温度90°Cの高温セット法によって48時間(HL)と18時間(HS)の2種類、対照試験体として、従来方式の乾球温度90°Cで312時間の中温乾燥(M)と天然乾燥(AS)を行った。

試験体は長さ方向に、実大曲げ試験用、フラクトグラフィー観察用、金物腐食試験用に割り当てた。実大曲げ試験用は長野県林業総合センターにおいて、それ以外は、信州大学農学部において暴露試験を行った。

(2) 暴露方法

実大曲げ試験用試験体の屋外暴露条件(以下、屋外)では、長野県林業総合センターにおいて、コンクリートブロックの上に木材を渡してその上にアルミ製棧を置き、各乾燥方法6本ずつ、4種類、計24本を設置した。屋根付き屋外暴露条件(以下、屋根)では、棧積みした上にトタン屋根をかけた。屋内条件(以下、屋内)では、長野県林業総合センターの木材加工棟内に棧積みして保管した。

(3) 含水率・水分傾斜測定

材面の含水率測定(以下、含水率計含水率)は高周波木材水分計(ケット社、HM-520)を用いて、乾燥前の初期状態、設置前(天延乾燥以外は乾燥後)、約1年間の暴露後に測定した。暴露後の測定では上面を測定した。

暴露後、木口から十分離れた位置で切断して、板を2枚採取して、一方はそのまま全乾法で含水率を測定し、もう一方は水分傾斜用とした。水分傾斜用の板からは、縦に3等分して、その中央の部分を上から下に8等分して、その中心の2つは一つのブロックにして計7個の小片を得た。その小片から全乾法により水分傾斜を求めた。

(4) 実大曲げ試験

約1年間の暴露後、各正角材を長さ2400mmに切断し、120mm角にモルダージュ仕上げをして曲げ試験体とした。静的曲げ試験は、スパン2160mm(スパン/梁背比=18)、3等分点4点曲げ方式により行った。スパン中央たわみから静的曲げヤング係数(MOE)を求め、あわせて、MOR、最大荷重時たわみ

(Ym)、曲げ破壊仕事量 (W) を求めた。また、モルダ前に高周波型含水率計により含水率を測定し、曲げ試験体採取のときに隣接部から切片を採取して全乾法による含水率を求めた。

(5) JIS 曲げ試験

上述の実大曲げ試験体の非破壊部を雨のかからない状態でさらに約 1 年間保管した。この非破壊部から、断面を 4×4 の 16 分割を行ってスティック状に切断して、各試験体から部位により角 (四隅)・周囲 (四隅および中央部の 4 本以外の計 8 本)・中心 (中央部の 4 本) の 3 グループ分けた。静的曲げ試験体の寸法は、25×25×400mm とした。

静的曲げ試験は、精密万能試験機 (オートグラフ AG-X 100kN、島津) を用いて行った。実験方法は JISZ2101 (木材の試験方法) に基づく。柱目荷重 (追い柱目の場合は木表側から荷重)、スパン 350mm の中央集中荷重で行った。荷重速度は 5mm/min とした。試験時の含水率は静的曲げ試験を終えたものから順次小試験片を切り取り、全乾法より算出した。

(6) フラクトグラフィー観察

乾燥した正角材を、横断面で 4×4 の 16 等分になるようスティック状に切断し、角・周囲・中心の 3 グループに分けた。それぞれのグループから欠点のないスティックを選び、幅約 7mm、厚さ約 4mm、つかみ具間距離約 45mm の試験体を作製した。試験体に対して精密万能試験機 (右図、オートグラフ AG-X 100kN、島津) を用いて、



荷重速度 2mm/min で引張試験を行った。破壊した試験体からカミソリを用いて破面を含む観察用試験料を採取した。そして、イオンスパッタ装置 (E-1030、日立) で白金パラジウムをコーティングし、FE-SEM (S-4500、日立) を用いて破面を観察した。対照試験体としてスギの天然乾燥材と高温セット材 (HL) を用いた。

(7) 金物腐食試験

市販の 3 種類の帯金物および N50 釘を装着して約 1 年間の暴露試験 (写真、左: 屋外 + 屋根付き、右: 屋内) を行った。

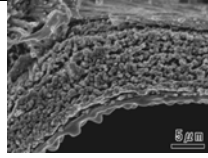
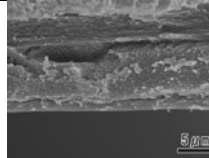
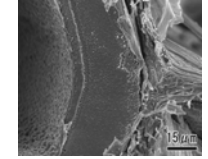
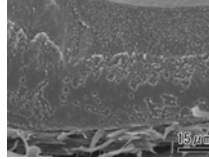


4. 研究成果

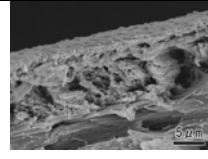
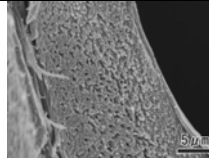
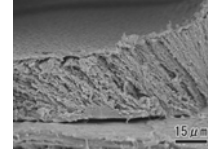
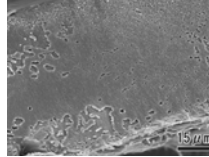
(1) フラクトグラフィーの観察

カラマツ材と同様にスギ材においても、角部分よりも中心部の方が高温セット法の影響を大きく受けるが、高温セット法が引張破面形状に与える影響はスギ材よりもカラマツ材の方が大きいことが明らかになった。

高温セット材 (HL) 中心部の木口面における引張破面をみると、カラマツでは、早材も晩材も平滑な破面を示すのに対して、スギでは早材はささくれ状の破面を示し、晩材では平滑な破面を示していた (下図)。

HL 中心	スギ	カラマツ
早材		
晩材		

中心部と比較して高温セットの影響が少ないと考えられる角部においては、カラマツ晩材部のみが平滑な破面を示した (下図)。

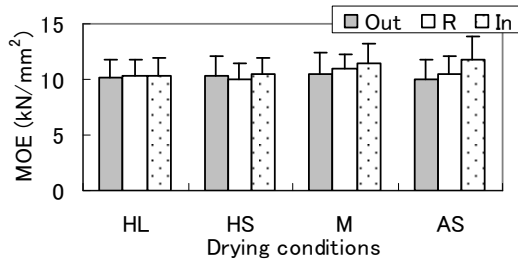
HL 中心	スギ	カラマツ
早材		
晩材		

従って、高温セット法は、スギと比較してカラマツにおいてより顕著に脆性化に寄与していることが明らかになった。

これまでカラマツについて、関連研究として、天然乾燥材と比較して高温セット材ではホロセルロース含有量が減少していることも明らかになってきていることから、さらに、曲げ試験における破面解析、曲げ破壊のフラクタル次元解析への展開して、カラマツ脆性化機構の多面的解析を進める予定である。

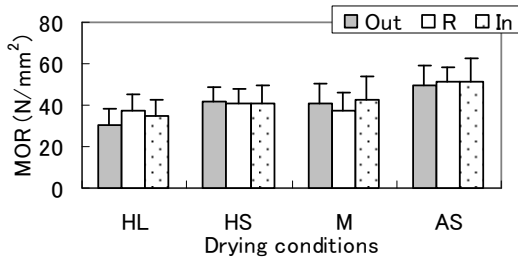
(2) 実大曲げ試験結果

実大曲げ試験における MOE の結果を下図に示す。図中の” Out ”, ” R ”, ” In ” はそれぞれ暴露条件の屋外、屋根付き、屋内条件を表す。



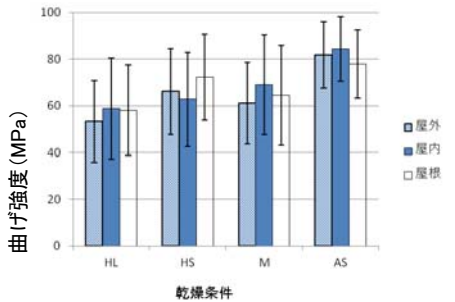
図から明らかなように、MOE に関しては乾燥条件並び暴露条件の影響は少ない。

これに対して、MOR では下図に示すとおり、乾燥方法の影響が顕著なのに対して、暴露方法の影響はほとんど認められなかった。

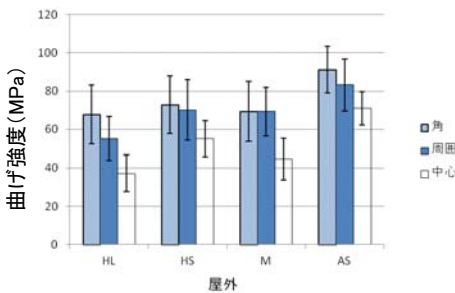


(3) 小試験体曲げ試験結果

無欠点小試験体の JIS 曲げ試験においても、MOR に関して、実大曲げ試験結果と同様に、暴露条件の影響より乾燥方法による違いが顕著であった (下図)。



また、部位別に MOR についてみると、HL において最も中心部の MOR が小さく、逆に、AS において最も高くなっている (下図)。

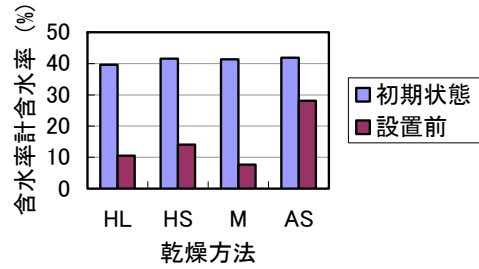


このことは、フラクトグラフィー観察において、中心部の脆性化がより顕著であったことと密接に関係していることが強く予想される。

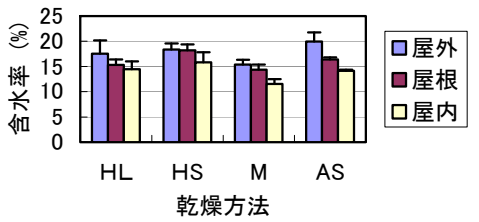
従って、カラマツ高温セット材の強度低下を検討するのに当たっては、“in vitro” 的な実験が必要になってくると考えられる。

(4) 含水率・水分傾斜

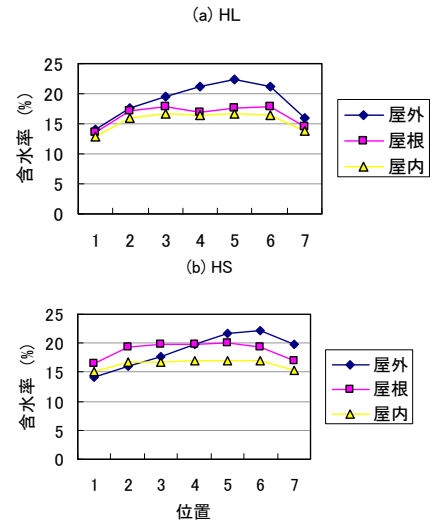
高周波型含水率計で測定した初期含水率と暴露試験開始時 (設置前) の含水率を下図に示す。

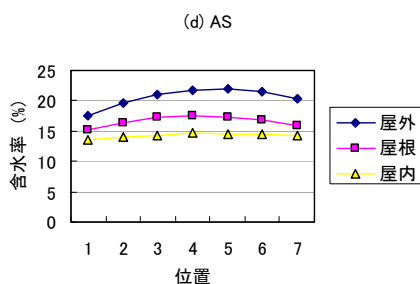
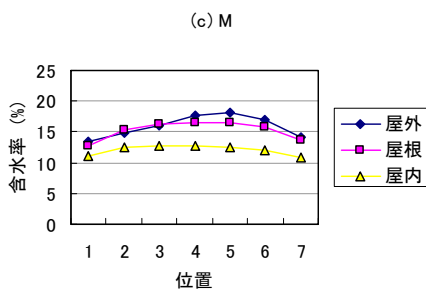


約 1 年間の暴露後の含水率 (下図) は、暴露条件別にみると、屋外が高く、ついで屋根付き、屋内が最も低く、乾燥条件別にみると屋外では AS が、屋内では HS が最も高い値を示した。



以下に、水分傾斜の測定結果を乾燥方法別に示す。





全体的な傾向としては、屋外>屋根>屋内の順になっている。しかし、屋根条件と屋内条件では、表層部分の含水率が低く、内部が高い傾向がみられ、上面側と下面側でほぼ対称な水分傾斜を示しているのに対して、屋外条件では、上面側より下面側のほうがより高い傾向がみられた。

屋外条件のほうが屋内条件より水分傾斜が大きくなる傾向がみられ、また乾燥条件別にはおおむね HL>HS>M>AS の順になった。

(5) 金物腐食結果

メッキなしの釘の場合では、屋外条件ではいずれの乾燥方法においても約 80%程度錆びていることが観察された。高温セット法 2 種類及び中温乾燥では、屋根付では 50%程度、屋内では 30%程度に低減され、天然乾燥材では屋根付及び屋内でほとんど錆びが認められなかった。

金物試験では、屋外条件ではいずれの乾燥材も孔食が観察され、屋根付、屋内で変化が



小さくなる傾向がみられた。下には乾燥方法別の屋外暴露条件の結果を示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] 計 (8) 件

1. 陶剛、武田孝志、細尾佳宏、吉田孝久：カラマツ高温セット材の部位別曲げ強度特性に及ぼす暴露条件の影響，第 63 回日本木材学会大会，2013 年 3 月 28 日，岩手市民文化ホール
2. 武田孝志、細尾佳宏、山内仁人、吉田孝久：カラマツ高温セット材の実大曲げ強さに及ぼす暴露方法の影響，第 63 回日本木材学会大会，2013 年 3 月 28 日，岩手市民文化ホール
3. 塩原幸恵、細尾佳宏、武田孝志、吉田孝久：高温セット法によるカラマツ材の化学成分量への影響，第 63 回日本木材学会大会，2013 年 3 月 27 日，岩手大学
4. 五十嵐康太、武田孝志、細尾佳宏、徳本守彦、吉田孝久：カラマツ及びスギ高温セット材の引張破面解析，第 63 回日本木材学会大会，2013 年 3 月 27 日，岩手大学
5. Takashi Takeda, Yoshihiro Hosoo, Takahisa Yoshida: Changes of mechanical properties of Japanese larch square timber kiln-dried by the high-temperature setting method during various storages, World Conference on Timber Engineering, 2012 年 7 月 16-18 日, Sky City Convention Centre, Auckland, New Zealand
6. 五十嵐康太、武田孝志、細尾佳宏、徳本守彦、吉田孝久：スギ及びカラマツ高温セット材の引張破面解析，第 62 回日本木材学会大会，2012 年 3 月 15 日，北海道大学
7. 武田孝志、細尾佳宏、山内仁人、吉田孝久：カラマツ高温セット材の水分傾斜に及ぼす暴露方法の影響，第 62 回日本木材学会大会，2012 年 3 月 15 日，北海道大学
8. 中寫涼子、武田孝志、細尾佳宏、徳本守彦、吉田孝久：カラマツ高温セット材の引張破面における微細形態の観察，第 61 回日本木材学会大会，2011 年 3 月 19 日，京都大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 孝志 (TAKEDA TAKASHI)

信州大学・農学部・教授

研究者番号：50242673

(2) 研究分担者

細尾 佳宏 (HOSOO YOSHIHIRO)

信州大学・農学部・准教授

研究者番号：80377184