

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24580242

研究課題名(和文) 準脆性破壊挙動にもとづく高温処理での木材のねばり低下の解明

研究課題名(英文) Effect of thermally modification in high-temperature on toughness of wood based on quasi-brittle behavior

研究代表者

村田 功二 (MURATA, KOJI)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・助教

研究者番号：00293910

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：準脆性材料と言われる木材の破壊過程の評価方法の確立を試みた。デジタル画像相関法を利用して、くさび型割裂試験やSENB試験でのき裂の進展挙動を観察した。き裂が安定的に進展する同方法ではひずみ軟化を示す応力-ひずみ曲線を広いひずみ範囲で得ることができた。人工乾燥を想定した熱処理によるき裂進展の違いを調査したが、明確な違いは観察されず、樹種による差の方が大きかった。また、サーモウッド処理による破壊靱性値と緩和挙動も調査した。180℃を超える温度の処理により、破壊靱性値は急激に減少し、緩和時間も長くなった。熱処理による多糖類の分解およびリグニンの凝集がこれらの挙動に影響していると考えられた。

研究成果の概要(英文)：Wood was explained as a quasi-brittle material. The method to analyze the fracture process of a wood specimen was tried to be established using image analysis. The crack development of specimens in a wedge splitting test and a SENB test was observed with digital image correlation technique. We succeeded in obtaining the stress-strain curve with strain-softening branch in a wide range of strain. An effect on the crack development by thermally modifying was investigated to model a kiln drying. An obvious effects was not found using SEM observation, but differences among the species was found on the fracture surfaces. The effect on the fracture toughness and stress-relaxation behavior by thermo-wood process was also investigated. By heating processes in high temperature over 180°C, the fracture toughness decreased strongly and the stress-relaxation time increased. We thought that thermal degradation of polysaccharide and condensation of lignin affected on the behavior of the thermo-wood.

研究分野：木質科学

キーワード：針葉樹材 準脆性材料 破壊靱性値 熱処理 デジタル画像相関法 ひずみ軟化

1. 研究開始当初の背景

木材生産の工業化のため人工乾燥の導入が進められている。高温セット乾燥法や180℃を超える高温で熱処理が施された熱処理材が注目されている。乾燥効率や寸法安定性などで大きなメリットある反面、強度などの物性の低下も指摘されている。しかしこれまでは破壊強度のみが評価され、木材特有の「ねばり」についての評価が不十分であった。報告者らは、画像相関法によって木材の破壊挙動を観察してきた。特に荷重が最大値に達した後に徐々に応力が低下する準脆性破壊挙動（Quasi-brittle fracture）を、「真の応力 - ひずみの関係」としてとらえた（ ）。この真の応力 - ひずみの関係に適する単純な関係式を導き出した（ ）。この関係式では応力低下の様子を1つの定数で示すことができる。さらに、この関係式から破壊進行領域（Fracture Process Zone、FPZ）の幅を見積もることに成功した（ ）。木材特有の「ねばり」は、この破壊プロセスに関係すると考え、先述の「真の応力とひずみの関係」やFPZの大きさを評価が可能であると考えた。

2. 研究の目的

本研究では木材の準脆性的な破壊挙動を評価することで、高温セット乾燥や高温熱処理による木材の「ねばり」の低下のメカニズムを明らかにすることを目的とした。報告者は研究開始時点で下記の研究結果を得ていた（ ）。

- 1) くさび型割裂試験で、き裂が安定的に進展する様子を確認することができた。
- 2) デジタル画像相関法でき裂進展量を測定し、破壊靱性値（き裂抵抗）を得ること

ができた

- 3) 生材の蒸煮処理を想定した湿潤材の高温環境での熱処理では、処理温度に伴い最大荷重・破壊靱性値が低下した。
- 4) 高温セット処理を想定した低温環境での乾燥では、最大荷重は若干増加し、破壊靱性値は僅かに低下したが処理温度による変化は見られなかった。

これらの知見に基づき、以下のことを明らかにすることを試みた。

- (1) くさび型割裂試験や SENB 試験から「真の応力 - ひずみの関係」を求める手法を確立する。
- (2) 高温セット乾燥工程の蒸煮処理工程での破壊靱性値の低下のメカニズムを明らかにする。
- (3) 木材の熱処理(180℃以上)での破壊靱性値の変化を測定し、破壊のメカニズムを検討する。
- (4) 上記の木材の熱処理において、物理的・化学的な変化との関係から破壊のプロセスを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 応力 - ひずみの関係

a) くさび型割裂試験

先に行った試験（ ）と同様の手順で、くさび型割裂試験を行った。実験には気乾のスプルース材を使用した。負荷開始からき裂の進展過程をビデオカメラで撮影し、デジタル画像相関法によってひずみ解析を行った。ひずみ解析には市販のソフトウェア（VIC-2D）を使用した。同試験をモデルとして有限要素法解析を行い、応力分布を計算した。解析には ANSYS を利用した。得られた応力分布より、ひずみ軟化領域をもつ

応力 - ひずみの関係を得る方法を検討した。

b) SENB 試験

気乾材のスプル - ス小試験体 (40 mm × 40 mm × 15 mm) に 80mm 長さのサポートブロック 2 個を接着して、Single-Edge Notched Beam (SENB) 試験を行った。この試験でも、き裂の進展過程を撮影し、応力 - ひずみの関係を得ることを試みた。

c) CT 試験

湿潤状態のスギ試験体を用いて、Compact Tension (CT) 試験を行った。初期き裂長さがわずかに異なるペアとなる試験体を用意して、J 積分法よりひずみ軟化領域をもつ応力 - ひずみの関係を得る方法を検討した()。実験ではき裂先端開口変位 (CTOD) とき裂肩開口変位 (CMOD) を測定して、破壊過程を評価した。

(2) 蒸煮過程での破壊靱性値

湿潤状態のスギ試験体 (容積密度 0.29g/cm³) を、相対湿度 95% の環境下で熱処理を行った。熱処理温度は 55、65、75、85 の 4 水準とした。CT 試験を行い、荷重方向は T 方向とした。三橋ら()の方法に従い、割裂引張強度を求めた。

(3) 180℃以上での熱処理による破壊靱性値

気乾のスギの同一板材から切り出した試験体から、処理温度 220、237.5 での熱処理材と無処理材を用意した。CT 試験で破壊靱性値を求めた。同一試験体で応力緩和試験を行い、緩和時間を評価した。応力緩和の評価には、KWW 関数を用いた特性緩和時間を得ることとした()。

(4) 物理的・化学的な変化と破壊のプロセス

湿潤状態のスギ材とヒノキ材を用いて SENB 試験を行い、破壊エネルギーを評価した。また破断面の SEM 観察を行い、破

壊のメカニズムを検証した。200 を超える高温熱処理材を CT 試験での破断面も観察し、同様に破壊のメカニズムを検証した。高温熱処理材では、FT-IR での解析も行った。化学的な評価も行った。

4. 研究成果

(1) 応力 - ひずみの関係

a) くさび型割裂試験

試験を行うに先立って、FEM 解析により試験体内部の応力分布をシミュレーションした(Fig.1)。き裂先端には引張応力が集中するが、反対側では圧縮応力が生じ、中央付近に中立軸があることが分かる。中立軸を想定して梁の曲げ理論での応力分布の仮定が適用できることが分かる。

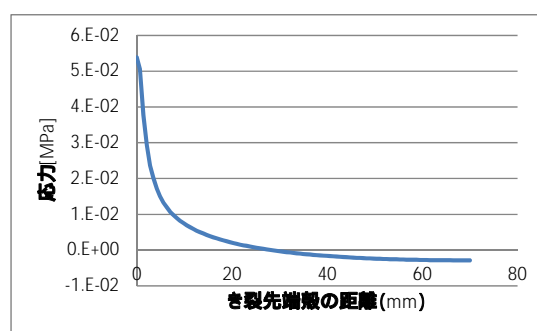
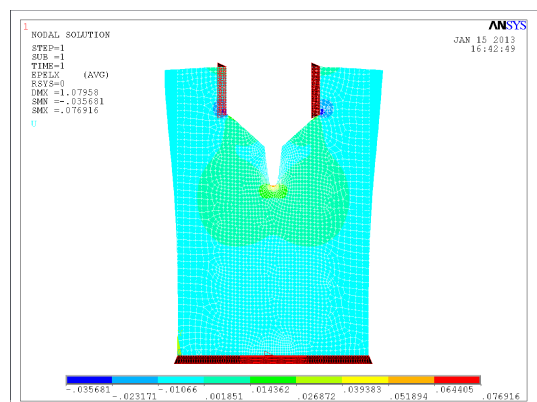


Fig. 1 くさび型割裂試験体の FEM 解析

スプルー気乾材試験体を用いてくさび型割裂試験を行い、ひずみ解析の結果を

Fig.2 に示す。割裂の負荷は半径方向に行った。Fig.2 下図に示すひずみ分布は半径方向への引張ひずみである。Fig.1 とほぼ同等の分布が得られ、中立軸が確認できる。ただ、ある程度のノイズも含まれ、中立軸の決定には工夫が必要であることが分かった。

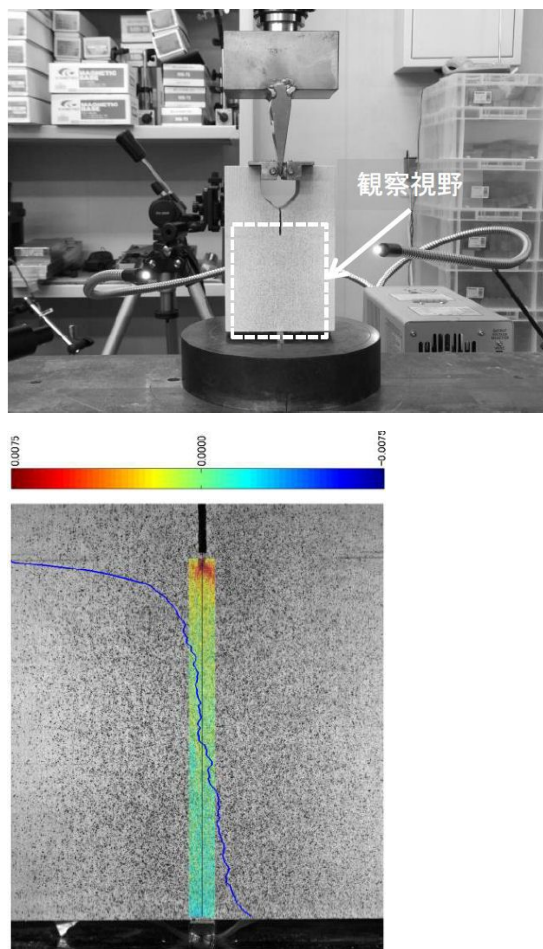


Fig.2 くさび型割裂試験

b) SENB 試験

くさび型割裂試験で使った供試材料より小試験体を作成し SENB 試験を行った (Fig.3 上)。き裂進展過程を同様にビデオカメラで撮影、自作プログラムを使用してデジタル画像相関法解析により、ひずみ分布を得た (Fig.3 下)。き裂先端には大きな引張ひずみが集中し、反対側では圧縮ひずみ

が生じていることがわかる。ひずみ分布に直線近似を行って中立軸を設定することで応力の再配分を試みた。その結果、Fig.4 で示すようなひずみ軟化領域をもつ応力 - ひずみの関係を得ることができた。しかし、Fig.3 下図では試験体の表側と裏側のひずみ分布を示している。表側と裏側では中立軸の位置が異なり、荷重方向に対して傾斜していることが分かる。このため、裏面からの解析ではひずみ軟化領域をもつ関係は得られなかった。

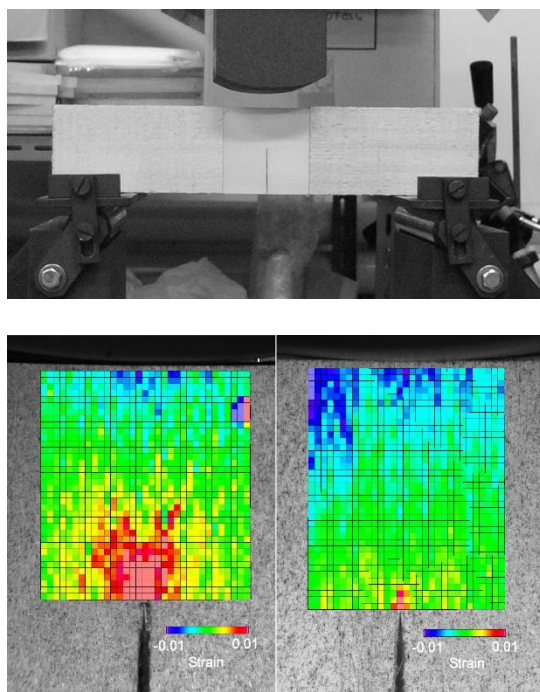


Fig.3 SENB 試験 (上) とひずみ分布 (下)

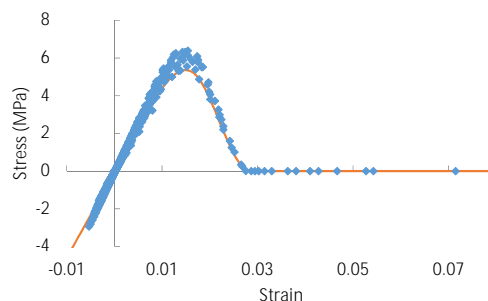


Fig.4 ひずみ軟化領域をもつ応力 - ひずみの関係

c) CT 試験

三橋ら()の方法に従い、初期き裂長さがわずかに異なる一対の CT 試験体を使用して割裂試験を行い、J 積分値を CTOD で微分することでひずみ軟化領域をもつ関係式を得ることができた (Fig.5)。しかし、セットとなる試験体でき裂先端と木目の関係がわずかに異なると、J 積分による解析が難しくなる場合も確認された。

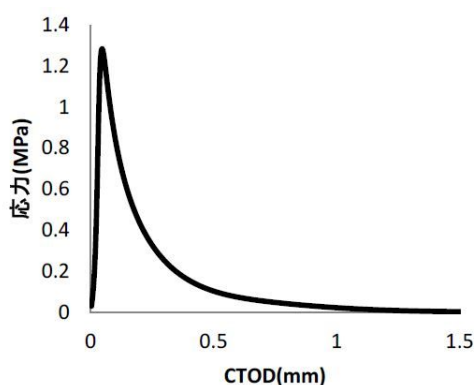


Fig.5 J 積分法による応力と変位の関係

(2) 蒸煮過程での破壊靱性値

CT 試験体による試験で割裂引張強度を求め、蒸煮温度の影響をみると、熱処理温度が高くなるにつれ強度が低下する傾向にあった (Fig. 6)。しかし、J 積分値 (破壊エネルギー) は増加する傾向がみられた。

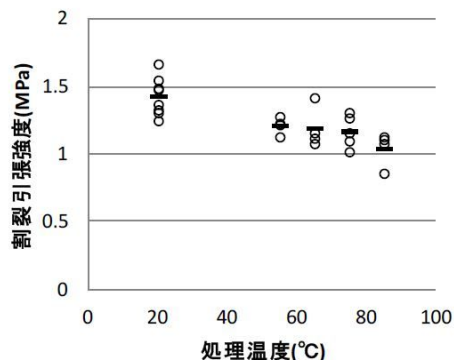


Fig. 6 割裂引張強度と処理温度の関係

(3) 180℃以上での熱処理による破壊靱性値

いわゆるサーモ処理を施した試験体で CT 試験を行ったところ、破壊靱性値 (K_{IC}) は急激に減少していることが分かった。また、KWW 関数による応力緩和の解析の結果、熱処理温度が高くなるに従って特性緩和時間が長くなることが分かった (Fig.7)。

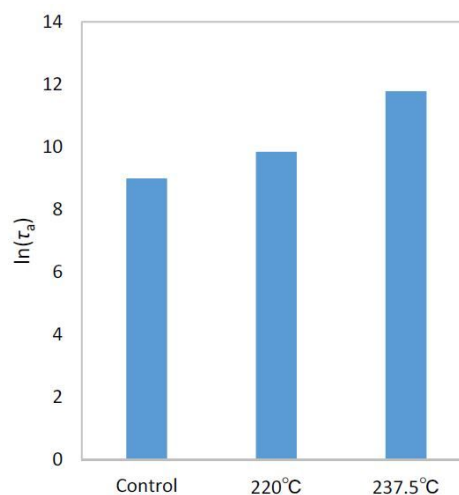


Fig.7 特性緩和時間と処理温度の関係

(4) 物理的・化学的な変化と破壊のプロセス

蒸煮過程を経た試験体と無処理材の破断面の SEM 観察を行ったが、明確な違いは観察できなかった。しかし、スギとヒノキではいくらか違いが観察された。スギでは仮道管の細胞壁が破壊しているのに対してヒノキでは細胞間層が剥離し、仮道管が架橋構造を取る様子が観察された。

サーモ処理材では、無処理材と比較して仮道管が破断している様子が数多く観察され、破壊靱性値低下に関係すると思われる。FT-IR の結果からは、カルボニル基に由来すると考えられるピークが現れ、多糖類の熱分解やリグニンの凝集が緩和挙動に影響を及ぼしたと考えられる。

<引用文献>

宇京齊一郎、増田 稔、画像相関法による真のせん断応力-ひずみ関係の究明、木材学会誌、50(3), pp.146-150、2004

K. Miyauchi, K. Murata, Strain-softening behavior of wood under tension perpendicular to the grain, Journal of Wood Science, 53, pp.463-469, 2007.

K. Murata, H. Nagai, T. Nakano, Estimation of width of fracture process zone in spruce wood by radial tensile test, Mechanics of Materials, 43, pp. 389-396, 2011

暮沼侑士、村田功二、中野隆人、高温セツト乾燥法をモデルとした熱処理の破壊じん性値への影響、材料、61(4)、pp.317-322、2012

三橋博三、星野正宏、非線形破壊力学的手法を用いた集成材の割裂強度特性に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、414、pp.11-21、1990

S. Nakao, T. Nakano, Analysis of molecular dynamics of moist wood components by applying the stretched-exponential function, Journal of Materials Science, 46, pp.4748-4755, 2011.

S. Moriya, K. Murata, T. Nakano, The effect of thermal treatment on fracture properties of green wood, 23rd Annual Meeting of MRS-Japan, Yokohama, 2013

内海真弓、村田功二、中野隆人、非線形破壊力学を適用した湿潤木材の熱劣化の評価、第64回日本木材学会大会、松山、2014

守屋 覚、村田功二、中野隆人、生材の破壊に及ぼす年輪傾斜角の影響、第64回日本木材学会大会、松山、2014

K. Murata, S. Ukyo, Strain-softening behavior of wood estimated in single-edge notched bending test, World Conference on Timber Engineering 2014, Quebec City, Canada, 2014

S. Moriya, K. Murata, T. Nakano, Observing crack development of Spruce and Sugi in transverse direction, 24th Annual Meeting of MRS-Japan, Yokohama, 2014

M. Utsumi, K. Murata, T. Nakano, Stress relaxation and fracture toughness of thermally modified wood, International Symposium on Wood Science and Technology 2015, Tokyo, 2015

守屋 覚、村田功二、中野隆人、樹種およびき裂進展方向がモード I 破壊特性に及ぼす影響、第65回日本木材学会大会、東京、2015

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

K. Murata, Y. Watanabe, T. Nakano, Effect of Thermal Treatment on Fracture Properties and Adsorption Properties of Spruce Wood, *Materials*, 査読有, Vol. 6, 2013, pp. 4186-4197, DOI: 10.3390/ma6094186

[学会発表] (計8件)

守屋 覚、村田功二、中野隆人、非線形破壊力学を適用した湿潤木材の熱劣化の評価、第63回日本木材学会大会、岩手、2013

6. 研究組織

村田功二

所属：京都大学大学院農学研究科
役割：とりまとめ・実験解析 (SENB 試験および CT 試験での評価、熱処理材・人工乾燥材の分析)

宇京齊一郎

所属：独立行政法人森林総合研究所
役割：実験解析 (くさび型割裂試験の応力解析およびひずみ解析)