



AichiSR

表面風化木材の表面組織におけるセルロース鎖の引張挙動解析

山崎真理子¹⁾, 住岡雅将²⁾, 浅野太智¹⁾, 今枝紘樹¹⁾, 小島瑛里奈¹⁾, 佐々木康寿¹⁾, 杉本貴紀²⁾
 1)名古屋大学大学院生命農学研究科, 2)中村建築研究所, 3)あいち産業科学技術総合センター

キーワード：木材, In-plane 法, 細胞壁層構造, 風化

1. 測定実施日

- 2020年8月6日 BL8S1 (2シフト)
- 2020年9月29日 BL8S1 (2シフト)
- 2020年10月21日 BL8S1 (2シフト)
- 2020年11月25日 BL8S1 (2シフト)

2. 概要

木材は直射日光や風雨に対して曝露状態にあると風化することが知られている。本研究の目的は、表面風化が木材の細胞壁に含まれるセルロース鎖（以降、セルロース鎖と称す）の力学挙動に与える影響を明らかにすることである。最も風化の影響があると考えられる表面部から連続した3点についてXRD測定を行うことで風化組織の力学挙動の観測を試みた。

3. 背景と研究目的

木材は木造建築や家具の材料として多用されるが、建材や外装材として使用する際、直射日光や風雨に対して曝露状態にあると風化することが知られている。Fig. 1に示すように、風化によって表面の材質が変化し暗褐色化や表面の細胞壁が流出することにより凹凸が生じる。このような風化の影響を受けた木材（以降、風化木材と称す）は、風化の影響を受けて組織構造が変化するため、力学特性も変化するだろう。木材利用を促進するために風化の影響を科学的に明らかにすることが必要と考える。

ここで、木材は階層構造を有する材料である (Fig. 2)。木材 (マクロ) は成長輪 (温帯地域の場合は年輪) 構造を構成する早材層と晩材層があり (セミマクロ)、その下位構造として細胞壁の層構造がある (セミマイクロ)。そして、細胞壁は繊維要素であるセルロースとマトリクス要素のリグニンおよび結合要素であるヘミセルロースから成る (マイクロ)。このような階層構造の影響を受けて、建材としての木材の力学特性が発現されている。本研究グループでは、これまでに細胞壁2次壁のS2層とS1・S3層 (Fig. 2中、セミマイクロ) に存在するセルロース結晶を分離測定する手法を開発し¹⁾、この測定方法と負荷治具を組み合わせ、セルロース結晶の力学挙動と木材全体の力学挙動の関連を検討してきた²⁾。



Fig. 1 Surface of Cedar woods.

(Left : New wood Right : Weathered wood)

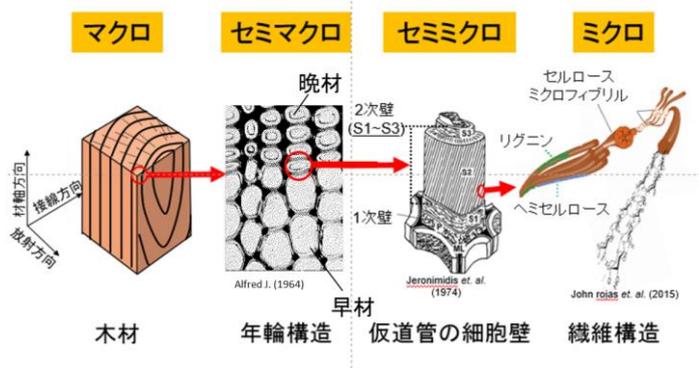


Fig. 2 Schematic diagram from macro level to micro level of wood.

本研究の目的は、表面風化が木材の細胞壁に含まれるセルロース鎖（以降、セルロース鎖と称す）の力学挙動に与える影響を明らかにすることである。前述の測定手法を用いて、表面風化の影響が予想される表層部のセルロース結晶の引張挙動を調べた。

4. 木材の風化

前項にて紹介したように、木材は外部に曝露された状態で長期間使用されると太陽光の影響により風化する場合がある。風化の反応は太陽光に含まれる紫外線や可視光線（主に紫色光）が木材組織に照射されることで、光分解が誘発することから始まる。木材の細胞壁は骨組み部分となるセルロース繊維とセルロース繊維同士を結合する役割を果たすヘミセルロース、上記の2成分の隙間を充填するように存在するリグニンの主に3種類の化学成分より成る。ここで光分解反応は主にリグニンで生じる。光分解により疎水性であったリグニンが水溶性化するため、雨や空気中の水分に溶解し組織から溶出する。この光分解反応によって表層の細胞壁の薄化³⁾や収縮、細胞要素間の接合の弱体化が起こる。脆弱化した表層組織は侵食作用を受けやすくなるため、雨や風などにより密度の低い早材組織の剥離し表層部で凹凸がみられる。また、リグニン以外の構成成分であるセルロースやヘミセルロースの結晶化度の低下も観測されている。これら風化による影響を受ける範囲は、原因となる紫外線や可視光線の浸透する深さに依存することが既往研究にて明らかとなっている⁴⁾。ランベルト・ベール則に基づく計算から紫外線は表層から90 μm、可視光線は150 μmで10%に減衰する。そのため、風化の影響は表層部から数mm深さ地点までしか及ばない。そこで本研究では、最も風化の影響があると考えられる表面部から連続した3点についてXRD測定を行うことで風化組織の力学挙動の観測を試みた。

5. 実験内容

・試験体

供試材は名古屋市長者町でウッドデッキとして数年間使用されていたスギ角材である。製材前の寸法は90mm×90mm×2000mmであった。Fig. 3に示すように試験体寸法は、長さ60mm（繊維方向）、幅10mm（接線方向）、厚さ6mm（放射方向）で、中央部が5mmとなるようにテーパを施した。風化の影響を調べるため風化の影響の有無で2条件である。具体的には、日光や風雨に直接暴露していた表面から切り出したA groupと、その深さ方向へのサイドマッチング（風化面から深さ10~20mm）から作成したのA' groupの2条件である。試験体数は各条件5体とした。

・測定条件

BL8S1のビームライン内のゴニオメーターに試作した負荷治具を設置した。試験体は負荷治具に固定し、段階的に負荷を作用させながら、XRD測定を行った。0Nから400N程度まで5段階の負荷を作用させた。試験体の巨視的な力学挙動を確認するため、試験体中央部にゲージ長2mmのひずみゲージを貼付した。照射したシンクロトロン光は波長9.16 keV (1.35 Å)で、測定したBragg角はセルロース(004)面($d=2.59 \text{ \AA}$)に対応する $27^\circ \sim 34^\circ$ である。回折光は半導体検出器(Semi conductor detector PILATUS 100K)を介し、2D回折図形として得た。透過法により測定し、Beam sizeは $0.5 \times 0.5 \text{ mm}$ で、1回の照射時間は30秒である。X線照射はFig.3に示すように合計4点行った。まず、各荷重段階で表層部から連続した3点(spot1, spot2,

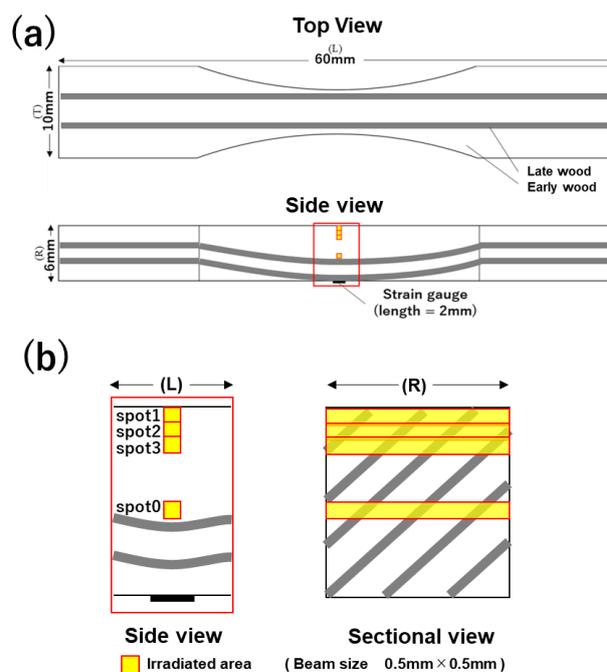


Fig.3 Schema of specimen and synchrotron radiation. (a : Specimen, b: Irradiated area)

spot3)を測定し、一度除荷した後に中央部の spot0 を測定した。ここで、風化した A group の表面は 10~1200 μm 程度の凹凸状となっている。風化表層を測定するために、金属片を水平に乗せることで X 線を遮蔽し、透過量の推移から試験片表面を推定した。その後テーブルを 0.5mm ずつ上昇させることで測定位置の変更を行った。

6. 結果および考察

・2D 回折図形

まず、XRD 測定により得られた無負荷時のセルロース (004) 面の 2D 回折図の一部を Fig. 4 に示す。本研究では風化した表層部から連続した 3 点について測定を行った。2D 回折図形から見るに spot1, spot2, spot3 では明確な違いは得られなかった。除荷後に測定を行った spot0 についても他の 3spot と同様の回折図形が得られた。つまり、風化の有無による明確な差は見られないことが示唆される。2 試験体群の図形を比較すると、A group の 2D 回折図形は画像の中心にピークを持つ比較的短いものが多く見られた。それに対し A' group の 2D 回折図形は明確なピークを持たないものが多く見られた。今回使した試験体は同一の供試体から作成したため製材位置の違いが影響を及ぼしていると考えられる。今後の解析ではより回折量の大きい曲線について分析を行った。

・方位角回折強度曲線

次に、これらの 2D 回折図形から解析した方位角回折強度曲線を Fig.5 に示す。図中の各曲線は太い実線が spot1, 太い点線が spot2, 太い破線が spot3, 細い実線が spot0 を示す。に示した方位角強度曲線は細胞壁二次壁内の S2 層セルロース鎖の材軸方向に対する配向性を示す。示された通り、2 群の方位角強度曲線は異なる結果が得られた。A group

(Fig. 5 a) では表層部に当たる spot1, spot2, spot3 のデータは 360° 付近に明確なピークを持つのにに対し中心部に当たる spot0 のデータは明確なピークを持たず、回折強度も表層部の 3 データの真ん中程度であった。それに対し、A' group (Fig. 5 b) では全ての測定点で似通った傾向を示した。 360° 付近を中心として方位角が変化するほど回折強度が上昇する傾向が確認された。方位角強度曲線のうち最も回折強度が大きい方位角 $\pm 1^\circ$ の範囲について 2θ 回折強度曲線を解析し次の荷重ひずみ曲線の算出した。

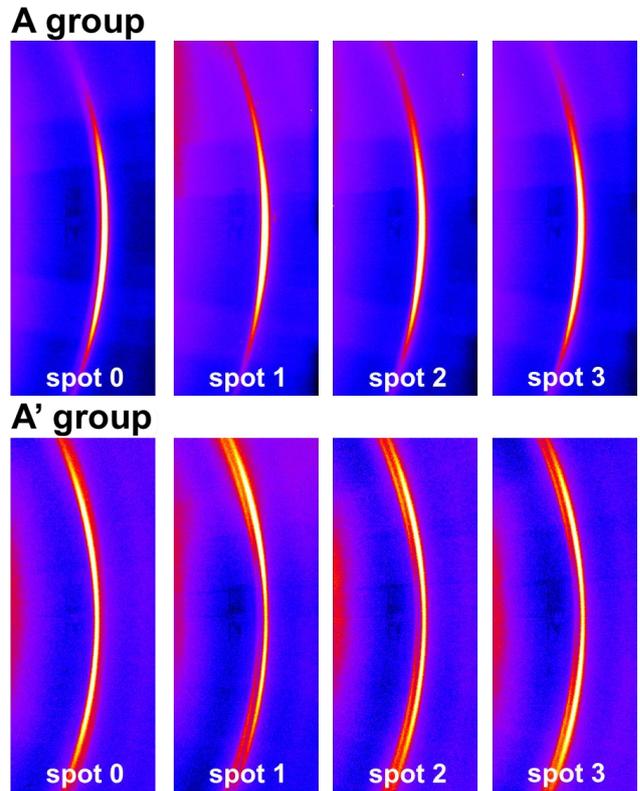


Fig. 4 2D diffraction patterns of cellulose (004) plane

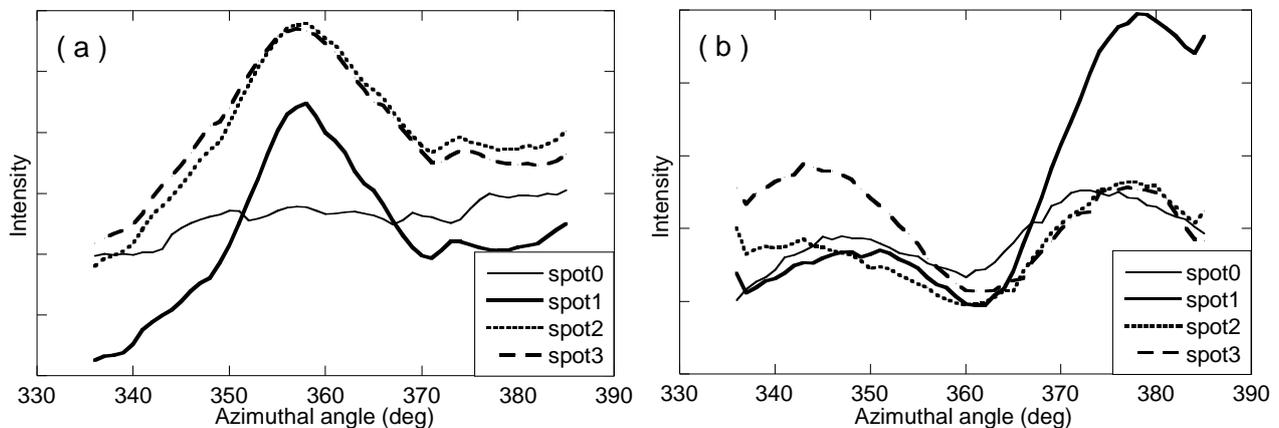


Fig.5 Azimuthal profiles of cellulose (004) plane (a : A group b: A' group).

・荷重ひずみ曲線

得られた荷重-ひずみ曲線の一例を Fig. 6 に示す。図中の各曲線は赤線が木材バルク（試験体の巨視的な挙動）、太い実線が spot1, 太い点線が spot2, 太い破線が spot3, 細い実線が spot0 を示す。作用した荷重は、XRD 測定期間中に作用していた荷重の平均値とした。まず木材バルクでは、作用した荷重に対して線形に近い傾向でひずみを進展した。これに対して両群の全ての測定点におけるセルロース鎖のひずみの挙動は、木材バルクの値よりも小さな値を取った。ひずみの進展程度を表す傾きに注目すると、A' group (Fig.6 b) ではすべての測定点で線形に近い傾向でひずみを進展したのに対し A group (Fig.6 a) では中心部である spot0 は引張荷重に対し引張ひずみの挙動を示したが表層部の spot1, spot2, spot3 では3つのパターンの挙動が得られた。1つ目のパターンが A' group と同様に小さな線形的ひずみの挙動を示すものである、2つ目は荷重の伝達がほとんど起こらずひずみがほとんど乗じないもの、3つ目が引張負荷に対し圧縮ひずみの挙動を示すもの。これらの発生比率は 10:3:2 であった。

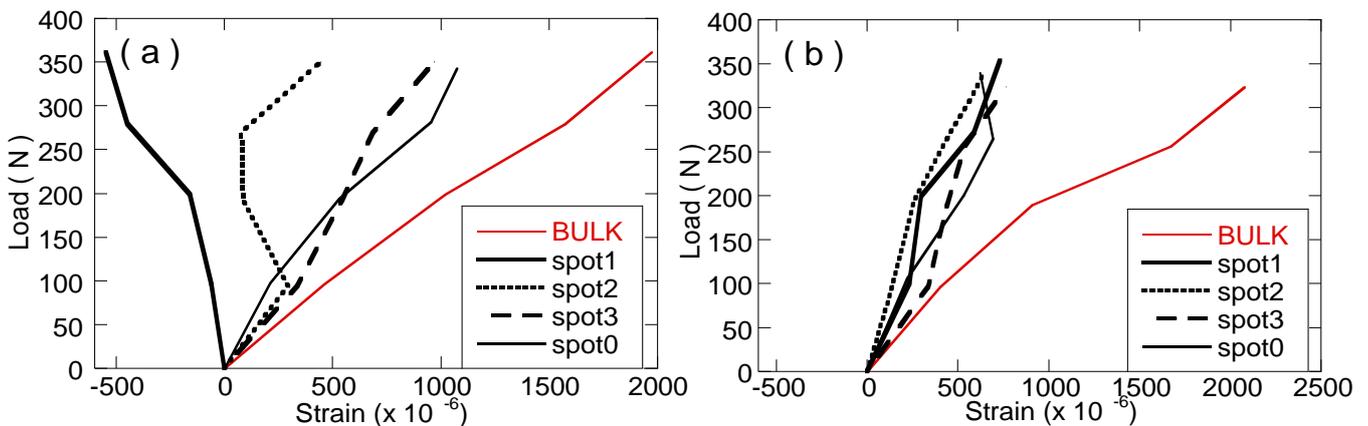


Fig. 6 Examples of load-strain curve (a : A group b: A' group)

7. 今後の課題

本研究で、スギ材の風化した表面部および健全部における引張負荷に対する挙動を測定した。風化した表面部では健全部のように引張負荷に対して引張ひずみの挙動を示す他、圧縮ひずみの挙動を示す結果やほとんどひずみを進展しない結果も得られた。しかしながら、これらの結果と風化した組織構造との因果関係については未だ十分に検討できていない。今後は各点における荷重ひずみ曲線から得られる、ヤング率や剛性、最大ひずみなどの項目について注目しより一層解析を進めたい。

謝辞

本研究遂行において多大なご助言を賜りました、あいちシンクロトロン光センターの東博純様、ビームライン BL8S1 のスタッフの皆様に心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) C. G. Lee, M. Yamasaki, T. Sugimoto, Y. Sasaki, *Holzforchung*, 73(7) (2019) 613-619.
- 2) C. G. Lee, M. Yamasaki, E. Kojima, T. Sugimoto, Y. Sasaki, *Holzforchung* (2020) published online.
- 3) Ladislav Reinprecht, Miroslava Mamoňová, Miloš Pánek & František Kačík, *European Journal of Wood and Wood Products* 76, (2018) 175-190
- 4) Y.Kataoka, *Journal of Wood Protection* 43(2), (2017) 58-68.