



XRD 測定を用いた積層木質材料の力学性能の解明

山崎真理子¹⁾，佐々木康寿¹⁾，住岡雅将²⁾，杉本貴紀³⁾

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：BL8S1，木材，In-plane 法，力学環境下，細胞壁層構造

1. 測定実施日 BL8S1 合計 8 シフト 7月5日，7月26日，9月1日，9月12日

2. 背景と研究目的

近年，環境優位性の観点から世界的に木造建築が再評価され，新しいスタイルの木造建築が多く建設されている．一方で，木材供給において大径木の割合が減少していること，低品質な未利用材の有効活用などを背景に，木材を単板や挽き板にしてから接着剤で積層接着する木質建材が多く活用され，新しい木質材料の開発も盛んである．中村建築研究所が設計監理する社寺建築においても，大径木の入手ルートに限られることから今後，木質建材の活用も視野に入れる必要が出てくると予想される．

木質建材の場合，一般に単板や削片（ストランド）といったエレメントが積層接着されており，エレメントの力学挙動は近隣のエレメントの動きに拘束される．例えば，合板では単板が層単位で直交積層されている．しかし，このような場合に，外力に対してそれぞれの単板のセルロース結晶がどのように変形して荷重を負担するかということは明らかになっていない．ほかにも，木質材料の中にはより細かい削片をある程度の配向性を持たせて接着剤で固めるようなものもあり，そうした材料ではさらに複雑な力学挙動を示すと考えられる．このような木質建材におけるセルロース結晶の挙動を詳細に把握することができれば，接着剤の耐久性にも影響を受けるであろう木質材料の耐久性解明につながり，一般の住宅に比べて使用年数が極めて長い社寺建築に最適な木質建材設計に生かすことができる．こうした木質材料に対して，シンクロトロン光を用いた XRD 測定はほとんどされておらず，シンクロトロン光の可能性は未知数である．

そこで本研究では，単板をエレメントとし配向方向が層により直交している合板（Fig. 1 左図），および原木から切削された長方形の薄い木片を表面層とコア層で繊維方向が直交するように重ねて高温圧縮した構造用木質ボードである配向性ストランドボード（OSB: Oriented Strand Board）（Fig. 1 右図）を対象に，シンクロトロン光を用いた In-plane 法の XRD 測定を行い，各エレメントのセルロースをどのように計測できるか調べるとともに，各層のセルロースの力学挙動の測定を試みた．

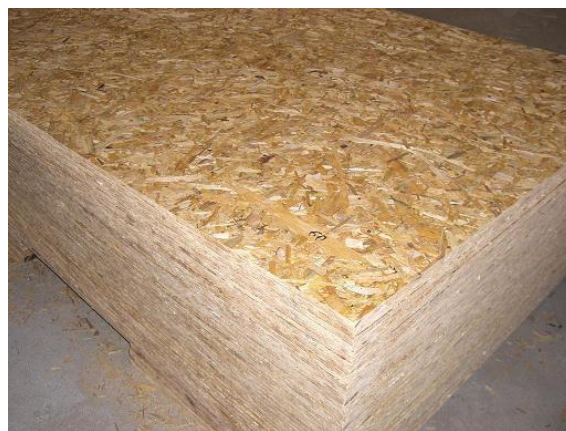


Fig. 1 Engineering wood (Left: plywood; right: OSB).

Plywood: <http://www.takizawaveneer.co.jp/shina-plywood/>

OSB: <http://www.chb-tech.com/solutionsmarkets/temporary-shelter-building-materials/lumber-and-roofing-materials/>

3. 実験方法

供試材は針葉樹合板（5層構造）とOSB（3層構造）である。合板試験片の寸法は長さ60mm、幅10mm、厚さ9mmで、積層した単板の材軸方向の組み合わせで2種類の試験片（Fig. 2）を用意した。すなわち、繊維方向と引張負荷方向が平行な場合をL、直交する場合をRとして、表層からRLRLRの試験片とLRLRLの試験片である。一方、OSB試験片の寸法は長さ60mm、幅10mm、厚さ13mmで、繊維方向と引張負荷方向が平行な場合をL、直交する場合をRとして、表層からLRLの試験片とした。

試験片の巨視的な力学挙動を確認するため、試験片中央部にひずみゲージを貼付した。BL8S1のステージの中央に特殊製作した負荷治具、ロードセルを装着して試験片に段階的な引張を荷重させながら、波長9.16KeV（1.35Å）のシンクロトロン光をIn-plane法で照射した。ビームサイズは0.5mmで、引張負荷の1段階ごとに、L層とR層（合板の場合は上から第2層と第3層、OSBの場合は上から第1層と第2層）それぞれの厚み方向の中央2点を照射した。Bragg角はセルロース（004）面に対応する26.5~35°である。

Fig. 3に木材組織の階層構造を示す。樹木を切り倒すと年輪が見える断面が現れるが、断面によりその現れ方が異なる（図中のマクロ）。特に互いに直交する3断面（樹高方向＝材軸方向、半径方向、年輪の接線方向）で大きく物性や力学性能が異なっており、典型的な直交異方性材料である。針葉樹の場合、この年輪は仮道管の季節変動による形態の違いが見えているものである（図中のセミマクロ）。仮道管は針葉樹材の大部分を占める細胞で、長さ1~7mm程度、幅0.005~0.07mm程度の縦長の形状を持つ。仮道管細胞は形成層で分裂して程なく死に、細胞壁のみが残る。この細胞壁が水や養分の通導と樹体の支持の役目を果たしており、木材そのものである。仮道管は、春から夏にかけての時期と、夏から秋にかけての時期で生長具合が変化するために、両時期では細胞壁の内径も厚みも大きく異なっている。これが年輪である。さらに、仮道管細胞壁は中間層（M）、一次壁（P）、二次壁（S）から成る多層構造を有し、さらに二次壁はS1層、S2層、S3層から成る（図中のセミミクロ）。これらのS1層、S2層、S3層ではセルロース繊維の配向が異なり、たとえば、Kozlowski（2012）のヨード染色法による偏光顕微鏡観察ではS1層は樹高方向に対して60~80°、S2層は5~30°、S3層で60~90°と報告されている。

この中でS2層は壁厚がほかの層よりかなり厚く、またセルロース繊維が樹高方向に近い角度で配向していることから、木材力学において重要な位置づけにある。なお、細胞壁を構成する化学成分は主に3つの高分子で構成されており、セルロース50%、ヘミセルロースとリグニンがそれぞれ20~30%で、結晶化しているのはセル



Fig. 2 Specimen (Left: plywood-RLRLR; center: plywood-LRLRL; right: OSB).

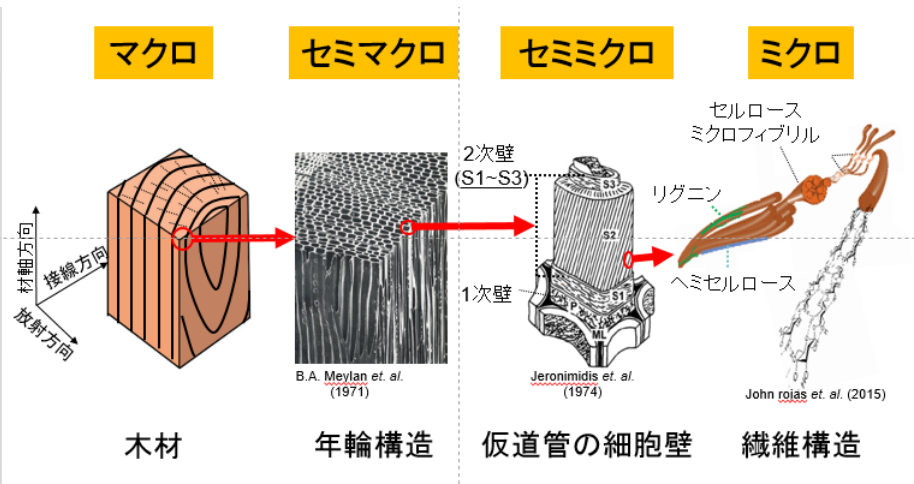


Fig. 3 Schematic diagram from macro level to micro level of wood.

ロースの一部だけである（図中のマイクロ）。

これまでの研究により、L方向に配置した木材を In-plane 法で計測すると針葉樹の95%以上を占める仮道管細胞壁のS2層が、Out-of-plane 法で計測すると細胞壁S1層およびS3層のセルロース格子を測定できることがわかっている。このことから合板やOSBを対象とした測定では、L方向の測定は同じようにS2層のセルロース格子の観察が、L方向と直交するR方向ではS2層の配向角とほぼ直交しているS1層およびS3層のセルロース格子が測定されると考えた。

4. 結果および考察

今回のXRD測定により得られたセルロース(004)面の2D回折図形の一例として、Fig. 4に単板の積層方向が上からRLRLRの試験体の結果を、またFig. 5にOSBの結果を示した。いずれも(a)および(b)はL方向の結果で、(a)は無負荷時、(b)は破壊後である。一方、(c)および(d)はR方向の結果で、(c)は無負荷時、(d)は破壊後である。

合板とOSBともに、L方向のR方向のいずれも無負荷と負荷後に2D図形の目視レベルの違いは認められない。合板の場合、L方向(Fig. 4 (a), (b))は回折角の2 θ 幅が比較的狭く、方位角 β 方向では図の中央部の強度が高い。これに対して、R方向(Fig. 4 (c), (d))はL方向より2 θ 幅が大きい。一方、OSBの場合には、L方向(Fig. 5 (a), (b))は合板の場合と同様に2 θ 幅が比較的狭く、 β 方向では図の中央部の強度が高い。しかし、合板との差異として β 方向への広がりや合板より大きいようである。R方向(Fig. 5 (c), (d))についても合板と同様の傾向が見受けられる一方で、合板と比べて β 方向の偏りが見られ若干の差異が見受けられた。これらの結果と素材に対する既往研究を比較すると、特にL方向では画像の特徴が類似している。L方向とR方向の違いからも、各種木質材料の層ごとの配向性の違いをXRD測定で確認できる可能性が示唆された。

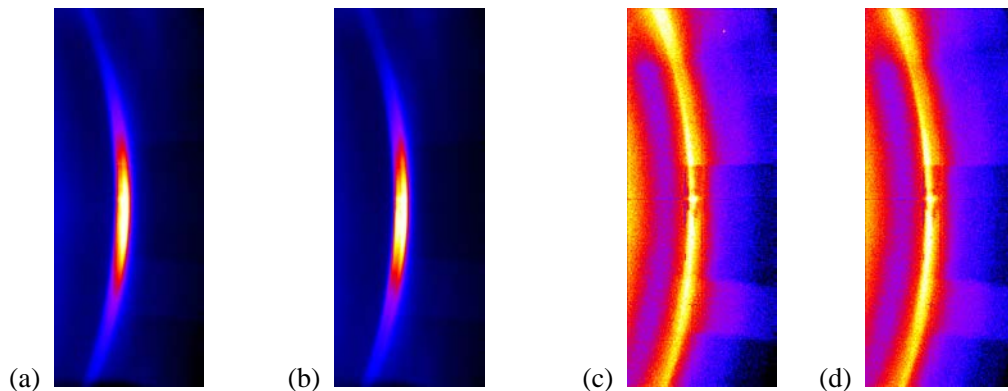


Fig. 4 2D diffraction pattern of cellulose (004) plane of plywood. (a) L direction unloading. (b) L direction after failure. (c) R direction unloading. (d) R direction after failure.

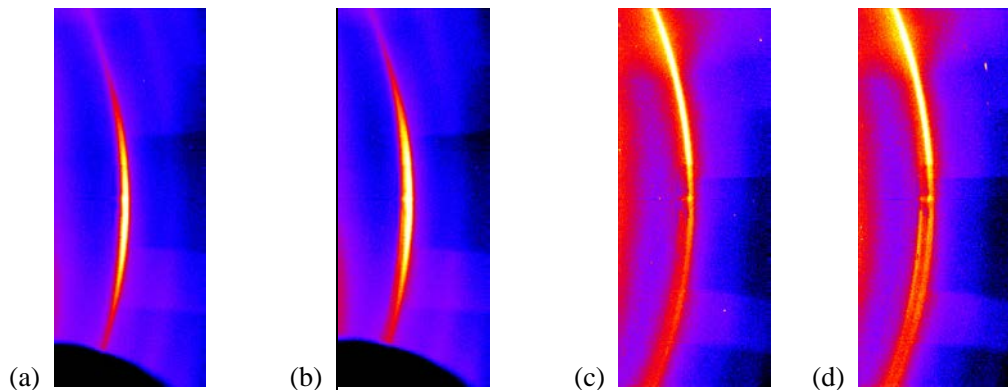


Fig. 5 2D diffraction pattern of cellulose (004) plane of OSB. (a) L direction unloading. (b) L direction after failure. (c) R direction unloading. (d) R direction after failure.

次に、これらの2D回折図形から、回折強度の最も大きい 2θ 領域について β 回折強度曲線を解析した。結果の一例として、Fig. 6に単板の積層方向が上からRLRLRの試験体の結果を、またFig. 7にOSBの結果を示した。図中、青線はL方向の結果を、赤線はR方向の結果を示す。また、実線は無負荷時、破線は破壊後の結果である。図示するように、L方向とR方向では β 回折強度曲線の形状が大きく異なった。L方向では明瞭なピークが存在したが、R方向では（今回の測定範囲において）明確なピークが確認されなかった。R方向については、異なる範囲にピークがあることも考えられ、今後の検討課題である。このようなL方向とR方向の測定結果の違いは、同一試験体で短時間に木質材料の層ごとのセルロース結晶を測定できる可能性を示している。OSBのエレメント配向性はOSBと比べて不均一であるが、合板とある程度類似の曲線が得られたことは予想外の結果である。また、既往研究の木材素材の結果と比較すると、L方向の結果は素材の繊維方向をIn-plane法で照射した結果と形状が一致しており、仮道管細胞壁のS2層のセルロース格子を測定できている可能性が示唆された。一方、R方向の場合は、素材のOut-of-planeの β 回折強度曲線と必ずしも形状が一致していないが、強度の値は概ね一致した。R方向の測定結果が細胞壁のいずれの層のセルロース格子を示すものかについては、更なる解析が必要である。これを明らかにするためにより広範囲（角度）に及ぶ照射実験などが考えられる。

実線の無負荷時と破線の破壊後の結果を比べると、やや測定結果が動いている。これは破壊により測定点が微妙に変化したことによると考えられる。今後、負荷時の推移も解析し、さらなる知見を得たい。

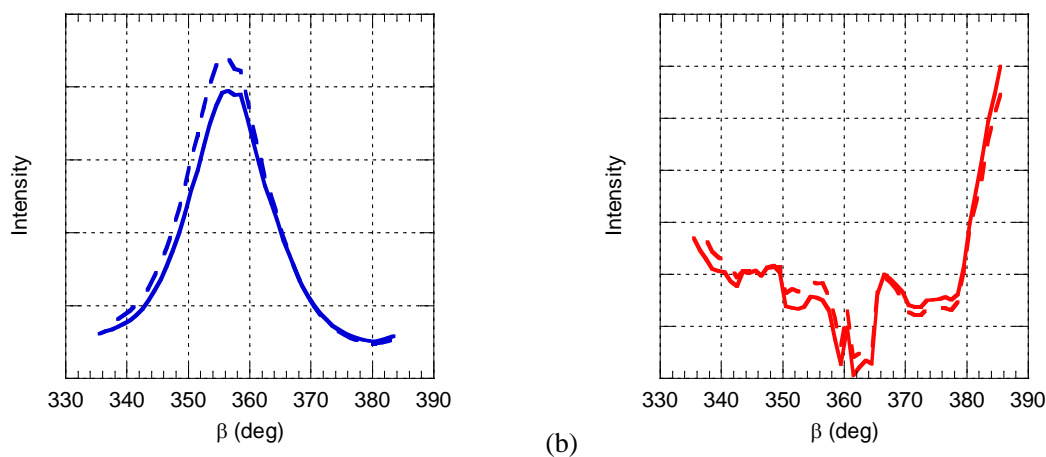


Fig. 6 β profiles of cellulose (004) plane of plywood. (a) L direction. (b) R direction. Solid line: Unload, Dotted line: After failure.

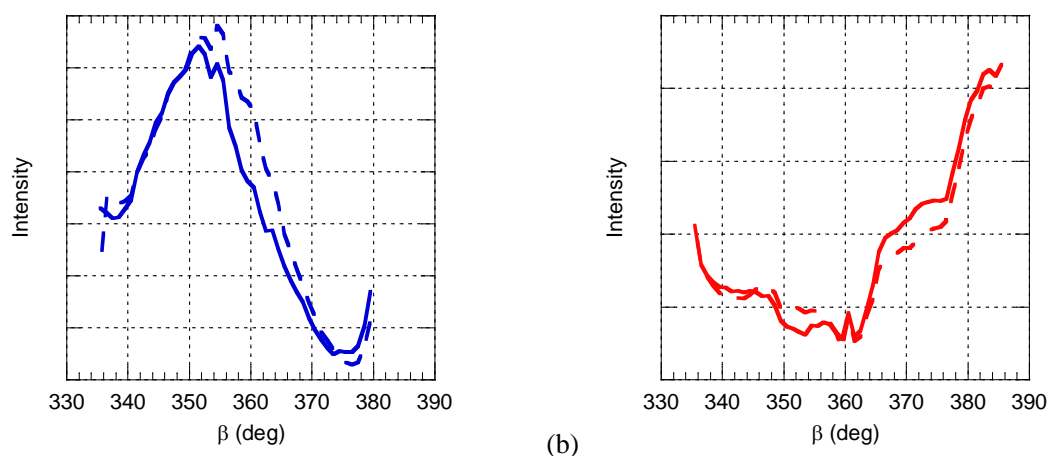


Fig. 7 β profiles of cellulose (004) plane of OSB. (a) L direction. (b) R direction. Solid line: Unload, Dotted line: After failure.