

異なる層構造をもつ木質建材の In-plane 法 XRD 測定

名古屋大学大学院生命農学研究科・山崎 真理子, LEE Chang goo,

小島 瑛里奈, 佐々木 康寿

株式会社 中村建築研究所・住岡 雅将

あいち産業科学技術総合センター 共同研究支援部・杉本 貴紀

1. 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 (Fig. 1) 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が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tron光を用いた XRD 測定はほとんどされておらず、シンクロtron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. 2 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. 2 右図) を対象に、シンクロtron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。

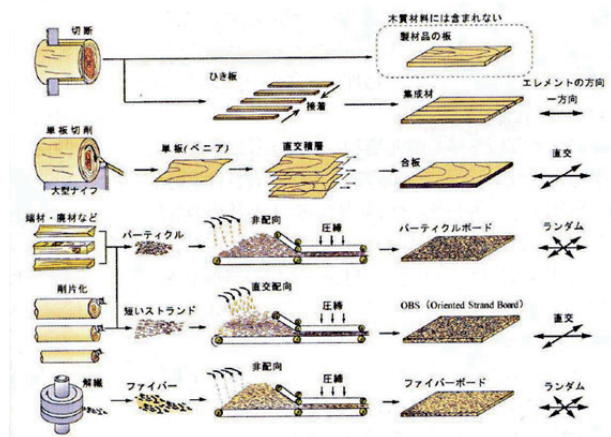


Fig. 1 Manufacturing of wall type engineering woods.



Fig. 2 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/>

2. 実験方法

供試材はシナ合板（5 層構造）と OSB（3 層構造）である。合板試験片の寸法は長さ 60 mm, 幅 10 mm, 厚さ 9 mm 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. 3）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（Fig. 3 左, 厚さの総計: L 層 6mm, R 層 3mm）と LRLRL（Fig. 3 中央, 厚さの総計: L 層 3mm, R 層 6mm）の試験片である。OSB 試験片の寸法は長さ 60 mm, 幅 10 mm, 厚さ 12.5mm で、これについても積層面の方向で 2 種類の試験片を用意した。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 LRL の試験片（Fig. 3 右, 厚さの総計: L 層 4mm, R 層 8.5mm）と RLR の試験片（厚さの総計: L 層 8.5mm, R 層 4mm）である。



Fig. 3 Specimen (Left: plywood-RLRLR; center: plywood-LRLRL; right: OSB-LRL).

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负荷させながら、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 角はセルローズ（004）面に対応する 26.5~35°である。

Fig. 4 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、Kozłowski (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ロースの一部だけである (Fig. 4 中のミクロ)。

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測定されると考えた。一方、L 方向と直交する R 方向の測定は、初めての試みであり、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のか、S2 層の影響もあるのかが論点となる。

3. 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. 5 に単板の積層方向が上から RLRLR の試験片の結果を、また Fig. 6 に OSB の LRL 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. 5 (a), (b)) は回折角の 2θ 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. 5 (c), (d)) は L 方向より 2θ 幅が大きい。一方、OSB の場合には、L 方向 (Fig. 6 (a), (b)) は合板の場合と同様に 2θ 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 方向への広がり合板より大きいようである。R 方向 (Fig. 6 (c), (d)) についても合板と同様の傾向が見受けられ

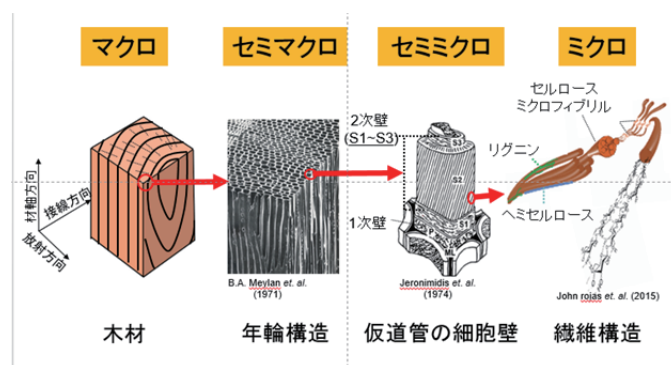


Fig. 4 Schematic diagram from macro level to micro level of wood.

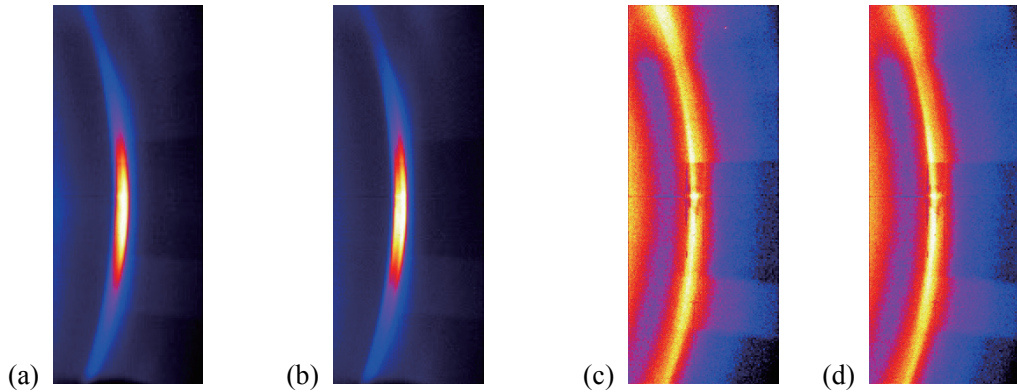


Fig. 5 2D diffraction pattern of cellulose (004) plane of plywood. (a) L direction unloading, (b) L direction after failure, (c) R direction unloading, (d) R direction after failure.

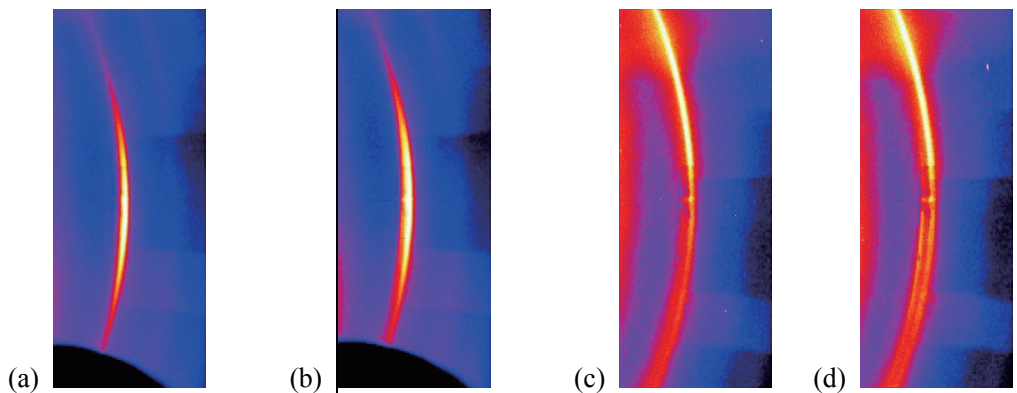


Fig. 6 2D diffraction pattern of cellulose (004) plane of OSB. (a) L direction unloading, (b) L direction after failure, (c) R direction unloading, (d) R direction after failure.

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おり、L 方向では S2 層のセルロースを測定していると考えられる。一方、R 方向では素材の S1 および S3 層の 2D 図形とは異なる図形が得られた。

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. 7 に合板の結果を、また Fig. 8 に OSB の結果を示した。図示するように、まず、合板、OSB とともに 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。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。これに対して、R 方向では中央の回折強度が最も低くなる谷型の曲線となり、また複数の小さなピークが確認されるものの（今回の測定範囲において）明瞭なピークは測定できなかった。素材の S1/S3 層では一峰型あるいは二峰型の回折強度曲線が測定されており、今回の曲線とは明らかに異なっている。以上のことから、R 方向では単純に S1/S3 が測定されているとは言えない。次に、合板と OSB を比較すると、まず、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。しかし、特に R 方向で明確であるが、OSB では回折強度曲線の中央（谷）が中心からずれている。これは OSB のエレメントの配向を示すものであり、ランダムに製造された OSB の配向性について測定可能性が示唆された。

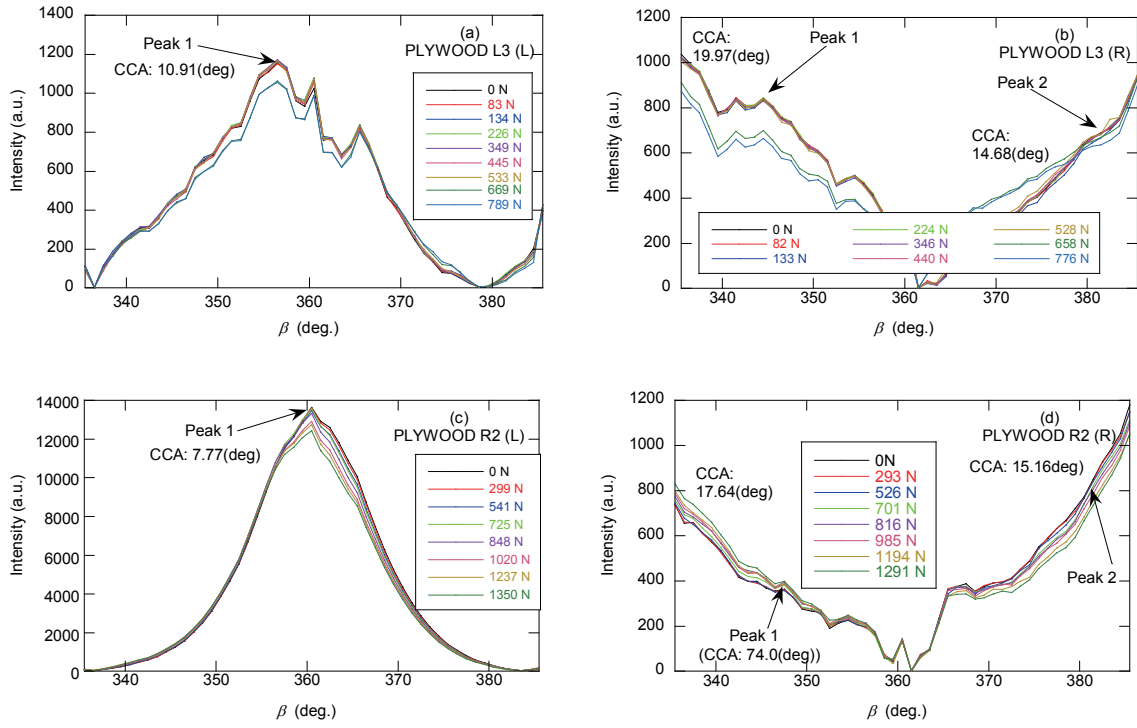


Fig. 7 β profiles of cellulose (004) plane of plywood. (a) LRLRL-L direction, (b) LRLRL-R direction, (c) RLRLR-L direction, (d) RLRLR-R direction.

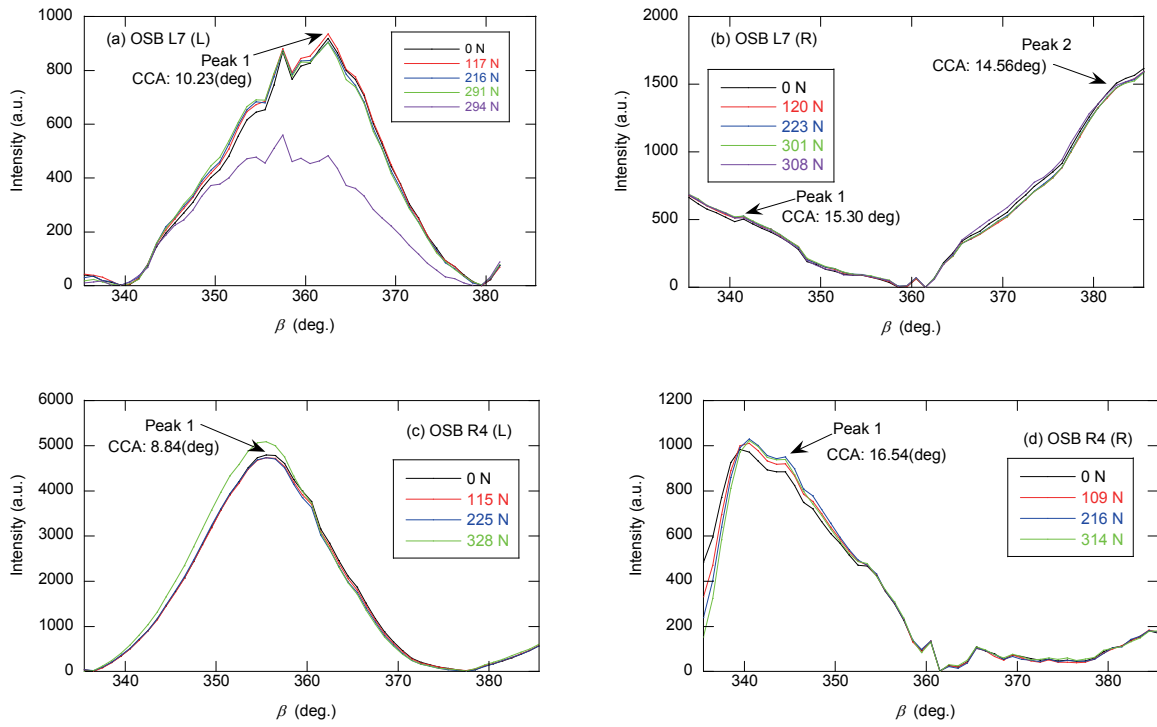


Fig. 8 β profiles of cellulose (004) plane of OSB. (a) LRL-L direction, (b) LRL-R direction, (c) RLR-L direction, (d) RLR-R direction.

次に、 β 回折強度曲線のピーク領域の 2θ 回折強度曲線を解析し、これよりセルロース (004) 面の面間隔 d を算出した。さらに、引張負荷作用下における面間隔 d の変化量からセルロースのひずみを解析した。結果の一例として、Fig. 9 に合板の結果を、また Fig. 10 に OSB の結果を示した。

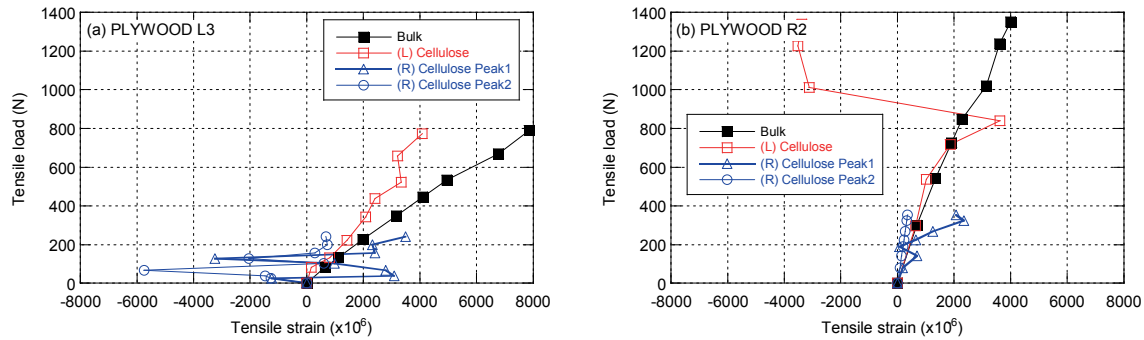


Fig. 9 Load-strain curve of plywood. (a) LRLRL, (b) RLRLR.

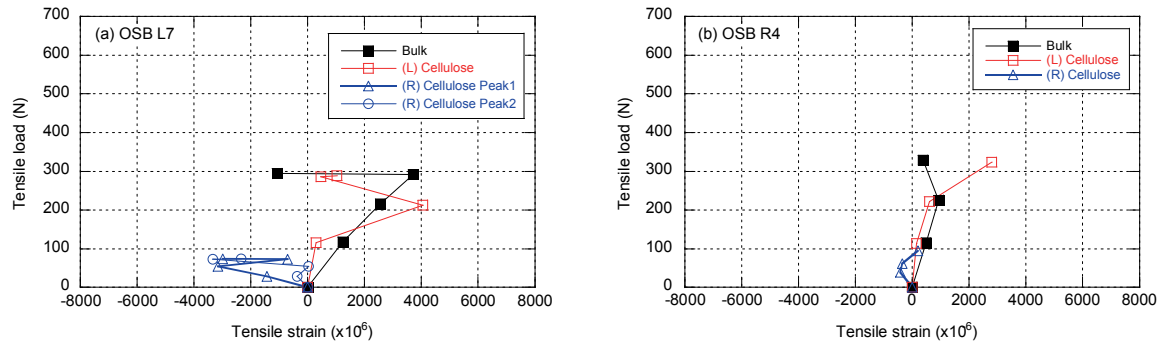


Fig. 10 Load-strain curve of OSB. (a) LRL, (b) LRL.

まず、Fig. 9 より合板の結果をみると、LRLRL 試験片より RLRLR 試験片の方が L 層の割合が大きく、bulk 自身の引張強度および剛性は大きい。L 方向のセルロースはいずれの試験片タイプも bulk と同程度の剛性を示し、強度はいずれも 800N 程度であった。一方、R 方向のセルロースは、同一試験片であっても解析した β 方向の Peak によって異なる挙動がみられた。L3 試験片 (LRLRL, R 層の割合 67%) の場合、Peak 1 は引張ひずみと圧縮ひずみを交互に示しつつ、全体としては引張ひずみが生じたが、Peak 2 では負荷初期に大きな圧縮ひずみを生じた後、ひずみはほぼゼロとなった。一方、R2 試験片 (RLRLR, R 層の割合 33%) では Peak 1 は負荷の作用から少し遅れて引張ひずみが生じたが、Peak 2 はほとんどひずみを生じていない。これについて詳細に調べたところ、R2 試験片の Peak 1 の局所的なセルロース配向性は荷重軸に対して 74° であり、S2 層の可能性が示唆された。すなわち、R 方向の回折強度データには、S1 および S3 層のセルロースと S2 層のセルロースの両方の情報が含まれていると考えられる。もし、そうであるならば、細胞壁の構造上、S2 層は S1 および S3 層より相当厚く、セルロース量が多いことから、R 方向の測定結果において S2 層の測定値が支配的になっていることが予想される。また、 β 回折強度曲線が谷型であることも S2 層の配向性により説明できる。

次に、Fig. 10 より OSB の結果をみると、まず OSB は bulk 強度が合板より小さい。LRL 試験片

より RLR 試験片の方が L 層の割合が大きく、剛性は大きい、強度は同程度である。L 方向のセルロースはいずれの試験片タイプも bulk と同程度の剛性を示し、強度は bulk よりやや小さいか同程度である。一方、R 方向のセルロースは、LRL 試験片（R 層の割合 68%）の場合は圧縮ひずみが生じたのに対して、RLR 試験片（R 層の割合 32%）の場合はほとんどひずみを生じなかった。

4. 結論

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と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 OSB 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。得られた知見は以下の通りである。

1. 0.5mm のスポットサイズでシンクロトロン光を照射する実験により、1 層数 mm 厚さの積層材の層ごとの力学挙動を測定することができた。

2. In-plane 法の法線方向が木材の繊維方向と平行な L 方向の測定では、仮道管細胞壁の 2 次壁 S2 層のセルロースが測定された。

3. In-plane 法の法線方向が木材の繊維方向と直交する R 方向の測定では、想定したものとは異なる 2D 回折図形を得た。β回折強度曲線やそのピーク点における 2θ回折強度曲線に基づくセルロース（004）面の面間隔などを解析した結果、仮道管細胞壁の 2 次壁の S1・S3 層と S2 層のセルロースが混在して測定されていることが推察された。

面接着で試験片木部が内部で連続している合板と、細切れのエレメントが点接着で繋がり、かつ接着剤で全体が固化された OSB では、セルロースの動きに大きな違いが生じると考えられる。まだサンプルが十分ではなく、明確なことは言えないが、合板における R 方向のセルロースの挙動はボアソン効果や細胞壁内の微動を示している可能性があり、一方で OSB はそのような挙動は測定しにくいのではないかと考えている。