

木材の構造と特性を活かした材料開発に関する研究

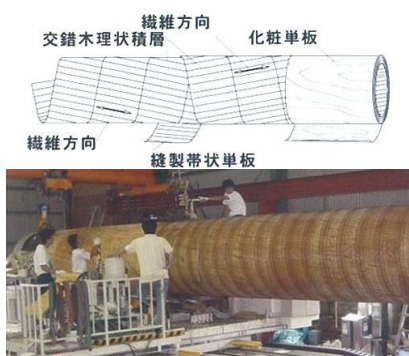
川 井 秀 一

京都大学教授・京都大学農学博士

1. はじめに

近年、地球規模では過伐による森林資源の劣化が著しく、一方、わが国では成熟しつつある人工林を十分に活用できないために森林の荒廃を招いている。このため、小径低質丸太や草本系資源の有効活用のための技術開発が緊喫の課題となっている。本研究は、このような未利用木質資源を用いた新しい木質材料の開発や歴史的木造建造物/木彫文化財の修理修復技術など、木材の構造や特性を活かした材料と技術の開発研究に関するものである。その内容は、以下に記載する①円筒形単板積層材 (LVL) の開発、②ケナフ繊維ボードの開発、③熱処理木材による文化財修復等への応用技術の開発にまとめられる。

2. 円筒形単板積層材 (LVL) の開発 (文献 1-4)



ヘリカルワインディング構造をもち、木材繊維細胞と同じ構造を有するこれまでにない新しい木質材料、中空円筒形 LVL を考案し、その製造技術および利用技術を開発した (左図)。鉄芯 (マンドレル) にテープ状単板を巻きかけて積層成形された円筒形 LVL の特徴は、交錯構造をもち、高い剛性と寸法安定性など構造材料として必要な特性を有していることである。また、マンドレル径 (内径) と積層数の選択により比較的自由に材料設計が可能であることも大きな特長であり、製品の寸法

は最大で直径約 1.5m、長さ 12m まで可能である。中空であることを生かして配管や送風ダクトとしても利用されている。

製造のための理論的な考察と積層装置の試作、接着剤の塗布技術、圧縮および成形技術などの各種要素技術の開発、建築材料としての利用技術、商品開発を重ね、実用化に成功した。

3. ケナフ靱皮繊維ボードの開発 (文献 5-9)

木材はセルロース、ヘミセルロース、およびリグニンからなる 3 成分系複合材料である。草本類の中から骨格成分であるセルロースの構成比が高いもの、ミクロフィブリル傾角が小さく、結晶化度の高いものなど高強度繊維を選抜した。たとえば、ケナフ茎芯部の周縁を囲む靱皮繊維やパイナップル、サンシベリア、ラミーなどの葉脈繊維束の平均引張強度およびヤング率はそれぞれ 500-800MPa および 20-40GPa に達することを明らかにした。これらの繊維にフェノール樹脂接着剤



を添加したボード (密度 800kg/m^3) の繊維方向曲げ強度および曲げヤング率は、それぞれ 120-400MPa および 17-40GPa の値を示し、無欠点木材の数倍以上の高い曲げ性能が得られた。

一年生植物であるケナフ (*Hibiscus cannabinus*, 左図) は、成長が極めて早く、ヘクタール当たりの収量が約 20 トンと大きいので、この靱皮繊維を基材にした材料開発を進めた。繊維の精製・配向・



積層技術、接着剤の含浸技術などの製造技術と利用技術の開発を行ったのち実用化され、耐力壁材やドアなどの内装基材として使われている。

なお、ヘミセルロース成分の多い軽量のケナフ茎芯チップやファイバーを高圧水蒸気により加水分解を促進、熱圧することによって接着剤を用いない、いわゆるバインダーレスボードの製造が可能であることを示し、その詳細な接着メカニズムおよび製造条件と物性の関係を明らかにした。密度 $0.2\text{--}0.5\text{g/cm}^3$ の軽量ボードの製造が可能であることも特長のひとつである。

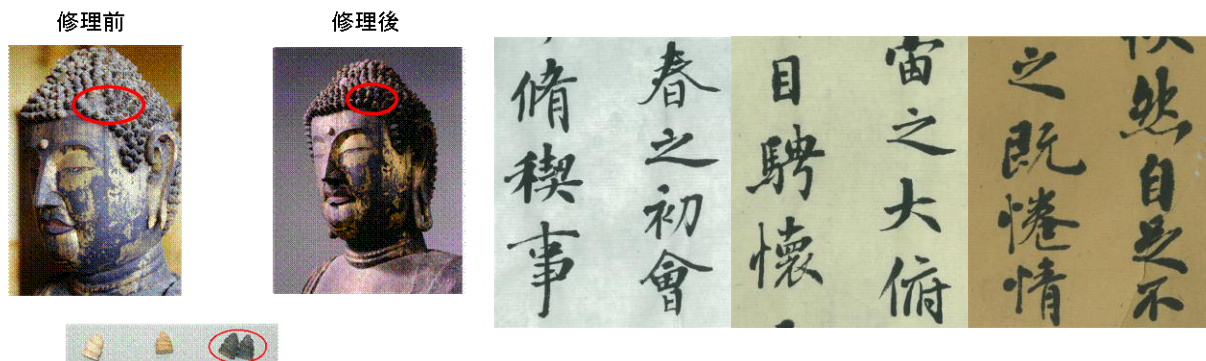
ケナフ繊維を配向させた高性能繊維ボード（上）、茎芯を用いた軽量バインダーレスパーティクルボード（中）、および靱皮繊維を表層に、茎芯パーティクルをコアにもつ3層複合パネル（下）を上図に示す。

4. 熱処理木材による文化財修復等への応用技術の開発 (文献 10-12)

わが国の歴史的建造物からヒノキ古材を収集して、文理融合の学際共同研究を展開した。古材の材形成年代を同定し、1500 年間にわたる物理/化学的な経年変化を調べてその劣化特性を明らかにした。たとえば、ヒノキ材の繊維方向曲げ強度/ヤング率の変化や劣化は極めて小さい。これに対して、繊維直交（半径）方向の曲げ性能は時間の経過と共に低下し、また両者の破壊靱性は共に低下して脆性が増す。一方、細胞壁内のセルロース結晶は経年に対して比較的安定であり、ヘミセルロースは量的に低減し、リグニンは質的变化を生じていることを示唆する結果を得ている。

木材の経年はその色や密度、寸法安定性の変化に現れ、文化財修復の技術者は経験的にこれを推測の指標としてきた。とくに色に関わる変化については経年に伴い赤みと黄みが増し、濃色化することが知られている。

古材の色変化を熱処理した現生材のそれと比較すると、極めて類似性が高い。古材と熱処理木材との関係について反応速度論的解析を行い、両者の類似性を検証した。この結果、木材の色の経年変化は反応速度論（アレニウス式）に従い、時間－温度加算則が概ね成り立つことを示した。このことは木材の老化が常温下の緩やかな熱酸化反応であることを示唆している。さらに、熱処理紙/セルロースについても同様の解析を行った結果、木材の主成分であるセルロースの色変化もまた同様の傾向を示し、木材の色の経年変化の主たる要因であることが推察された。



修復前後の仏像（ヒノキ熱処理材を用いた羅髪（ろはみ）の修復） 仏師矢野健一郎氏（東京芸術大学）との共同研究による

書家杭迫柏樹氏による臨書「王羲之蘭亭序」
(左から未処理、180°C8hr 処理、180°C48 hr 処理の宣紙)

熱処理材は、色や寸法安定性が古材と調和し、かつ加工性のよい材料として木彫等の保存修復において欠損部を補う後補材として実用に供されている(上図)。また、熱処理によって経年変化を促進した中国宣紙について色特性や墨の浸透特性を調べ、書家への官能検査を行い、「寝かせた紙」、「枯れた紙」と呼ばれる見た目や書き心地の面で優れた性質を示す宣紙の加工を可能にした。

5. おわりに

以上のように、本研究は、木質材料学分野の知識と技術の融合を目指して「木材の構造と特性を活かしたものづくり」を展開し、木材細胞の空隙（内腔）構造と細胞壁のセルロース繊維配向構造のマクロ/ミクロレベルでの空間的再構成、ならびに木材成分の時間的再構成に関する技術開発によって、木質科学の学際領域と木材利用に新たな展開を拓いたものである。

論文等、主な関連研究業績

- (1) 山内秀文、三浦泉、佐々木貴信、小泉章夫、川井秀一、佐々木光 (1998) スパイラルワインディング法を用いて製造した円筒形 LVL の製造条件と機械的性質、材料、**47**:350-355.
- (2) Berard P, Yang P, Yamauchi H, Umemura K, Kawai S (2011) Modeling of a cylindrical LVL I: mechanical properties of the hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) and the reliability of a non-linear finite elements model of a four points bending test, *J Wood Science*, **57**, 100-106.
- (3) Berard P, Yang P, Yamauchi H, Umemura K, Kawai S (2011) Modeling of a cylindrical LVL II: interest of a non-linear finite element model to improve the quality of the butt joint, *J Wood Science*, **57**:107-113.
- (4) 円筒形 LVL に関する特許 2 件：特許第 3388292 号(2003 年)、特許第 3353202 号(2003 年) 発明者
- (5) Munawar S, Umemura K, Kawai S (2007) Characterization of the morphological, physical and mechanical properties of seven non-wood plant fiber bundles. *J Wood Science* **53**:108-113.
- (6) Munawar S, Umemura K, Kawai S (2008) Manufacture of oriented board using the mild steam treated some plant fiber bundles, *J Wood Science*, **54**:369-376.
- (7) Xu J, Widyorini R, Yamauchi H, Kawai S (2006) Development of binderless fiberboard from kenaf core, *J Wood Science*, **52**:236-243.
- (8) Widyorini R, Higashiyama T, Xu J, Watanabe T, Kawai S (2005) Self-bonding characteristics of binderless kenaf core composites. *Wood Science Technology*, **39**:651-662.
- (9) ケナフボード関連特許 4 件：US 6,197,414 B1 (2001 年)、特許第 3399394 号(2003 年)、特許第 3642214 号(2005 年)、特許第 3987644 号 (2007 年) 発明者
- (10) Yokoyama M, Gril J, Matsuo M, Yano H, Sugiyama J, Clair B, Kubodera S, Mitsutani T, Sakamoto M, Ozaki H, Imamura M, Kawai S (2009) Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings, *COMPTES RENDUS PHYSIQUE*, **10**:601-611.
- (11) Matsuo M, Yokoyama M, Umemura K, Gril J, Yano K, Kawai S (2010) Color changes in wood during heating: kinetic analysis by applying a time-temperature superposition method, *Applied Physics A:Materials Science & Processing*, **99**: 47-52.
- (12) Matsuo M, Yokoyama M, Umemura K, Sugiyama J, Kawai S, Gril J, Kubodera S, Mitsutani T, Ozaki H, Sakamoto M, Imamura M (2011) Aging of wood - Analysis of color changes during natural aging and heat treatment-, *Holzforschung*, **65**: 361-368.