FFT 法による木質繊維板の配向評価†

村田 功 二* 藤田 稔**

FFT-Estimation of Fiber Orientation on Wood Fiberboard

by

Koji MURATA* and Minoru FUJITA**

The property of many engineering woods depends on the shape and orientation of their elements. This paper describes an attempt to estimate the 3-dimensional fiber orientation in insulation fiberboard (IB).

Serial sections of IB were sliced off at every 50 μ m parallel to the board plane by a sliding microtome. Before sectioning, the specimen was embedded in epoxy resin and cured. Then, it was boiled in water for several hours to make the resin moderately soften. The orientation values were calculated on 2-dimensional Fourier transform image analysis. Analytical value indicates that fibers near the both surfaces orient to machine direction and the orientations decrease on inner plane. Section thickness was shown to affect the orientation values. The value was underestimated on a too thin section, because fibers are fragmented. On the other hand, obscure image of overlapping fibers on a too thick section gave also underestimated value. Some ideas are proposed to search for appropriate thickness.

Key words : Wood fiberboard, Orientation analysis, Fourier transform, Fiber orientation

1 緒 言

木材資源を有効に活用するために、低質な材料から作られる PB (particleboard) や木質繊維板が注目され、その需要が年々増加している。特に OSB (oriented strand board) に代表されるような構成要素に配向性を持たせて機能性を高めた材料が関心を集めている。より高い機能性を追求するためにはボード全体としての配向性にとどまらず、表面や内部の各々に効率的な配向性の付与が試みられるだろう。そして一方ではこれら配向性の的確な評価法の確立が重要になると考えられる。最近では MDF (medium density fiberboard) などでも機能性を高めるために、配向性を持たせたものが報告されており¹⁾、今後もしろいろな機能性を付与された木質繊維板が開発されると思われる。木質系ボード以外でも、紙、不織布、FRP (fiber-reinforced plastics) 等で、その構成要素の配向性と物性の関係が注目され、その配向性の計測が試みられてきた。特に、近年のコンピュータの普及と性能の向上により、画像解析法が身近なものとなり、それを用いた多数の報告がなされている。紙では、FFT (fast Fourier transform) 処理を用いて薄い紙の配向性を評価した Yuhara ら²⁾、比較的厚い紙について、粘着テープによって紙の表裏両面から繊維の層を逐次はぎ取り、非常に薄い紙層の顕微鏡画像を作製し、試験線交点計測法 (intersection counting method) で評価した板東ら³⁾がある。Xu⁴⁾は、細線化技術を用いて不織布の配向性を評価した。Yaguchi ら⁵⁾は、試験線交点計測法と Prewitt

オペレータを用いた画像濃淡法 (image intensity method) の2つの方法を用いて、薄い FRP の軟 X 線写真から繊維配向性を評価し、また Pourdeyhimi ら⁶⁾は、FRP の繊維配向の測定を目的として、シミュレーション画像の繊維の配向状態を、濃淡画像の FFT と、直接追跡法 (direct tracing method) の2つで測定し、比較を行った。両者とも、複雑に交錯し、識別の難しい繊維の配向を測定するには、濃淡画像からの計算方法が良いとしている。

これまでの報告は比較的薄い試験体を使用したものが多く、画像作製が困難な木質ボード等の厚い供試材についての解析例は少ないが、藤田ら⁷⁾は PB の表面模様を複写機で画像化し、また製造過程で落下するパーティクルを受け板に逐次取り出して写真撮影し、これらを FFT 処理した。特に FFT 処理前後の画像処理を改良し、2次元パワースペクトルパターン (PSP (power spectral pattern)) の極座標解析を行うことで配向性を的確に評価した。しかしながら、これは PB の表面に見られる配向性を評価したに過ぎず、配向性と機能性の関係を十分に考察するためには、さらに内部の配向状態を調べることが必要である。

MDF や IB (insulation fiberboard) では解離された数 10 μ m 幅の短繊維あるいはこれらが数本集まった繊維束が基本的な形態要素である。これらが接着剤を添加されて湿式あるいは乾式でかく拌積層されて数 mm 以上の厚さのボードに成型される。原材料や抄造工程は製紙の

† 原稿受理 平成 10 年 2 月 17 日 Received Feb. 17, 1998

* 正 会 員 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Div. of Forest and Biomaterials Science, Grad. School of Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

** 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Div. of Forest and Biomaterials Science, Grad. School of Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

場合と類似している点も多いが、繊維相互の接着や3次元の絡み合いが紙の場合と異なる。ボードの厚さそのままでは、表層を除き繊維要素を画像化することは不可能であり、紙のように粘着テープで内部の繊維層をはぎ取ることも困難である。そこでこれら繊維板の内部構造の観察にはボード面に平行あるいは垂直に切り出された切片で繊維構造を画像化することが必須となる。しかしながら繊維板の薄切は非常に困難な作業である。

従来木材などの光学顕微鏡観察にはスライディングミクロトームを用いて、数10 μm 厚さで1cm $\times$ 1cm程度の広さを持つ断面切片が作製されてきた。またより精密な電子顕微鏡観察には試料の空隙をエポキシ樹脂などで充填固化させ、ダイヤモンドナイフ等を装着した超ミクロトームで薄切する超薄切法が採用されてきた。この方法では非常に精度の高い薄切片を作製することができるが、薄片の厚さは数 μm 以下に限られ、また薄片の面積も数mm $\times$ 数mm程度の狭いものとなる。この限られた面積では木質繊維板の基本構成要素（例えば針葉樹仮道管では数10 μm の太さと数mmの長さ）を多数含むことが不可能となる。そこで樹脂包埋法を改良し、十分な厚さと面積を持つ切片作製法を考案し、抄造方向に繊維配向の見られる低比重IBについて、表面から内部へとボード面に平行な切片を連続的に作製して、ボードの厚さ方向における繊維配向性の変化の測定を試みた。

2 解析方法の検討

2.1 フーリエ変換法による解析の手順

濃淡画像から繊維配向を評価する方法として、濃淡画像を2次元FFT処理して得られるPSPを解析する方法を採用した。濃淡画像を用いるため画像のコントラストが解析に大きく影響するので、全画素の最大濃度と最小濃度がそれぞれ255と0になるように線形変換し、コントラストを強調した。また、画像処理装置に取り込まれた画像は、矩形ではあるがこれをそのまま2次元FFT処理すると画像端の直線部分の影響が出て、パワースペクトルの垂直方向と水平方向に鋭いピークが現れる。これは、離散的フーリエ変換では、取り込んだ有限のデータを無限に繰り返すと仮定して計算しているために、不連続部分の影響が現れるからである。この影響を少なくするため、画像を円形（半径240画素）に切り取り、周辺部の画素の濃度を標本画像のほぼ中央値（128）にそろえた。

濃淡画像の2次元FFT処理には、画像処理装置付属（LUZEX-FS、ニレコ社製）の機能を使用し、出力されたPSPの解析にはパーソナルコンピュータを使用した。解析方法としては、前川⁸⁾が報告しているPSPの極座標解析を応用した。PSPの全方位を32個の扇型に分割し、直交座標で表されているPSPのそれぞれの画素をその扇形に当てはめることで極座標変換を行った。この極座標解析で注意すべきことは探查する周波数領域の選択であ

る。細長い矩形もしくは長楕円形の形態要素の2次元フーリエ変換したPSPでは元の形態要素の長軸に垂直な方向に細長く現れる。すなわち元の形態要素の長軸方向に起因するパワーは低周波領域に限られ、角度分布は短軸方向の寸法の逆数となって分散する傾向がある。一方短軸（幅）方向のそれは高周波領域にまでおよび、角度分散は非常に小さい。そこで繊維のような非常に細長い形態要素の方位を検出するには高周波領域の計測が適している。またコンピュータ画像処理の実際的な面においても、低周波での計測には問題が多い。画像処理装置では一定寸法の画素が方眼状の直交座標に配置されている。これに対してPSPは極座標上に展開されるが、低周波領域（原点に近い領域）では高周波領域（原点から遠い領域）に対して画素が相対的に粗くなり誤差を招きやすい。一方、高周波領域ではパワーレベルが低下する弱点もあるので、これらの長短所を勘定して中—高周波領域をドーナツ状に探查し、パワー分布を方位ごとに集計した。実際に集計した中—高周波成分は、半径が100画素（元の画像5画素の周期に相当する）から255画素（元の画像2画素の周期に相当する）までである。

2.2 シミュレーション画像の繊維配向の評価

先述の研究者たちにより、画像を2次元FFT処理することで構成要素の配向性を評価することが可能であることが明らかにされてきた。しかし、厳密な定量性には未だ検討すべき点もある。今回の解析方法においても、実際の配向状態と解析結果の差にみられる特性を明確にしておく必要がある。そこで、繊維の配向状態が既知のシミュレーション画像を用いて、解析方法の検討を行った。シミュレーション画像では、疑似繊維は長さが100画素、幅が3画素、濃度階調が255とし、背景の濃度階調は1とした。つまり、疑似繊維から背景への移行部（エッジ）は濃度階調が255から1へと急激に変わる不連続なものとした。また、半径256画素の円より外側の画素は濃度階調を128と設定し、その円の中に全部で321本の疑似繊維を配置、座標は乱数を用いてランダムなものとした（Table I）。

これらのシミュレーション画像とそれらを2次元FFT処理することにより得られたPSPをFig. 1に示す。シミュレーション画像で設定した16方位にパワースペクトルのピークがシャープに現れているのが分かる。さらにこれらのPSPを極座標解析した結果をFig. 2に示す。そこでは配向方向の値が小さく見積もられ、それに直交する方向では大きめに見積もられている傾向がみられる。特に45度に繊維配向させたものではその傾向が著しい。方眼状の離散情報を計算していることが原因のひとつとも考えられるが、詳しくは今後の研究課題となろう。しかし、多少のばらつきや増減はあるものの繊維配向の特性をほぼ正確に評価しており、インシュレーションボードの繊維配向の解析に使用できると思われる。

3 IB の繊維配向の測定

3.1 試験体の作製

低比重 (SG : 0.23) の IB (厚さ 10mm) から, 20mm (抄造方向) $\times$ 10mm (ボード幅方向) $\times$ 10mm (厚さ) の試験体を作製した. これらを電子顕微鏡試料作製法で

Table I. Fiber distribution on simulation images.

Orientation direction [degree]	at 90°	at 45°	at random
0.00	2	19	20
11.25	4	26	20
22.50	8	33	20
33.75	13	37	20
45.00	19	39	20
56.25	26	37	20
67.50	33	33	20
78.75	37	26	20
90.00	39	19	20
101.25	37	13	20
112.50	33	8	20
123.75	26	4	20
135.00	19	2	20
146.25	13	4	20
157.50	8	8	20
168.75	4	13	20
Total	321	321	320

Fig. 1. Simulation images (left) and power spectral patterns (right). Weak power was enhanced with logarithmic function, A, a : Oriented at 90°, B, b : at 45°, C, c : at random.

Fig. 2. Orientation distribution functions for simulation images, Top : oriented at 90°, Middle: at 45°, Bottom : at random, ○ : Original distribution of simulated fibers, ● : Power distribution after FFT-treatment.

調査したエポキシ樹脂液 (ルベアック 812 (ナカライテスク社) 62 容量部, ルベアック DDSA (同) 100 容量部, ルベアック DMP-30 (同) 2 容量部) に浮かべ, 35℃で半日おいてボードの低面から樹脂液をボードの空隙に浸透させた. そして 60℃で 2 日間静置して樹脂を硬化させた. 樹脂は吸湿によりもろくなるので通常は乾燥させて保存するが, 本報では厚い切片を得るために敢えて吸水軟化させた. すなわち試験体の周りの樹脂を鋸で除去してから熱水で数時間煮沸して繊維成分および樹脂部分に十分に吸水させて軟化した. そしてスライディングミクロトームに装着して, 切削面が試験体の上面および下面 (ワイヤー側) に平行になるように注意深く角度調節をし, それぞれの面からスチールナイフで 50 μ m 毎に 10 枚の切片を切り出した. 切片面積を非常に大きくしたので, 切削時にナイフの試験片への潜り込みが生じて, 少し厚い切片と薄い切片が交互に切り出される傾向があった. また, 一枚の切片中においても多少の厚さむらもあった. 一方, 抄造方向と平行にボード面に垂直な 50 μ m 厚さも作成した. これら切片はカナダバルサムで封入し光学顕微鏡用標本とした.

Fig. 3. Sample images of IB (Left) and their power spectral patterns (Right), A, a : Upper side of IB, B, b : Lower side, C, c : cross section vertical to the board plane.

3・2 画像の入力

切り出した試料を、顕微鏡 (SZH10, オリンパス社製) と CCD カメラ (XC-003, ソニー社製) を用いて画像処理装置 (LUZEX-FS) に、256 濃度階調の濃淡画像として入力し、輝度の最大値が 255, 最小値が 0 となるようにコントラストを調節した。ここでは、抄造方向を水平に入力した。

画像処理装置の解像度は 512×512 画素であるが、CCD カメラの性能のため、取り込まれた画像は 480 画素 (垂直方向) $\times$ 512 画素 (水平方向) であった。1 画素は約 $6.3 \times 6.3 \mu\text{m}$ に相当し、取り込まれた範囲は約 $3.0 \times 3.2 \text{mm}$ であった。また、一枚の切片につき 6 視野の画像を入力した。

3・3 測定結果

入力した画像を処理したものとそれを 2 次元 FFT 処理して得た PSP の一例を Fig. 3 に示す。上層から切り出したサンプルでは抄造方向 (水平方向) に配向しているのがはっきりとわかり (Fig. 3-A), PSP でもパワースペクトルが垂直方向に強く現れて、配向状態を反映していることが確認できる (Fig. 3-a)。下層から切り出したサンプルでは、上層部からのものに比べ配向はかなり緩やかである (Fig. 3-B, b)。一方ボード面に垂直な切片で

は、繊維の多くはだ円状に切断されているが (Fig. 3-C), そのパワースペクトルパターンは明瞭な配向性を示す (Fig. 3-c)。これは繊維のほとんどがボード面にはほぼ平行に配向しているからである。次に上面と下面から、それぞれ表層から $0 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$ 離れたの 3 カ所の試料を解析して得た配向分布関数を Fig. 4 に示す。上層部においては、表層近くで水平方向にはっきりとした繊維配向を示しているが、 $250 \mu\text{m}$ まで内部に入るとはっきりとしたピークはみられず、緩やかに水平方向に配向している状態になる。その状態は $500 \mu\text{m}$ 内部でも大きな差はない。下層部では 3 地点のいずれにも大きな差は見られないが、やはり緩やかに水平方向に配向している傾向は見られ、内部に入るほど配向性は徐々に小さくなっていく。

抄造方向への繊維配向の程度を数量化するするために、抄造方向配向度 *ORM* (orientation rate on machine direction) を以下のように定義した。

$$ORM = \frac{\text{抄造方向 } (0 \pm 45^\circ) \text{ の成分}}{\text{全方向 } (0 \pm 90^\circ) \text{ の成分}} \quad (1)$$

1 枚の切片から得た 6 視野の測定結果を平均した *ORM* の、ボード厚さ方向における変化を Fig. 5 に示す。上層では、表面近くでかなりはっきりと抄造方向に繊維配向しているが、内部に入るに従い繊維配向が緩やかになっているのがわかる。上層表面ほどではないが、下層表面でも緩やかな水平方向への繊維配向を示しており、この場合も内部に進むに従って繊維配向が緩やかになっているのがわかる。さらに *ORM* の変化を詳しく見ると、値に多少のばらつきが見られ、特に下層部においては交互に増減を繰り返している。これらの結果と測定した光学顕微鏡用標本と照らし合わせると、ナイフの潜り込みによって薄片厚さが不均一となった場合には、*ORM* が小さくなる傾向が認められた (Fig. 6)。これは試験体中に本来長い繊維要素があっても、薄切の際にこれらが斜めに切断されるために配向性が過小評価されたと判断される (Fig. 6-A)。極端に切片が薄い場合にはほとんどすべての繊維が断片化されて切片面ではだ円形になってしまう。Fig. 6-B の場合には、切片が特に厚くて繊維密度が過重になり、個々の繊維の像が不鮮明になっており、その結果 *ORM* も過小評価されている。Fig. 6-C, D は適度な切片厚さであると考えられ、計測値が的確な配向性を示すと判断される。今回は実際に測定された面積 ($3.0 \text{mm} \times 3.2 \text{mm}$) に対して $10 \text{mm} \times 20 \text{mm}$ もの広い切片を作製したので、切片に厚さむらが生じたが、切片の面積を小さくすることで厚さむらを小さくすると思われる。

いずれにしても配向性の評価が切片厚さに影響されることが明らかとなったので、今後は試験体の特徴を考慮して切片厚さを選択する必要がある。その適切な厚さを評価する方法として、PSP の周波数解析が考えられる。

Fig. 4. Orientation distribution function of IB, Top: Upper surface, Bottom : Lower surface, ○ : the distance from the surface is 0 μ m, △ : 250 μ m, × : 500 μ m.

Fig. 5. Changes of orientation rate on machine direction (ORM) near the surface of IB, ○ : Upper surface, △ : Lower surface, → : values on too thin sections, ⇨ : values on a too thick section.

Table II. Orientation values (ORM) and image characters corresponding to Fig. 6.

	ORM	FRF(100)/FRF(200)	Average
A	0.55	7.92	199
B	0.52	11.03	106
C	0.60	9.28	141
D	0.60	9.26	160

Fig. 6. Sample images of a relatively thin section (A), of a too thick section (B) and proper sections (C and D).

PSP からドーナツ状の周波数帯 (半径 ± 5 画素) のパワースペクトルを取り出し, 全パワースペクトルの合計で割った値を *FRF* (frequency rate function) とする. Fig. 6 の画像から解析した結果, 半径 100 画素のものと半径 200 画素のものの比を $FRF(100)/FRF(200)$ とし, Table II に示す. 平均輝度の高い場合, つまり画像中に存在する繊維数の少ない場合 (Fig. 6-A) には $FRF(100)/FRF(200)$ は値が小さく, 平均輝度が低い場合, つまり繊維が多すぎる場合 (Fig. 6-B) には値が大きい. Fig. 6-C, D に見られる状態が理想的であろうと思われ, これらの値を利用すると, 適切な試片の厚さや繊維量の評価を行うことが可能であろう. 今回の試片では, 適切な試験片の厚さの検討を考慮には入れていなかったので十分な評価はできないが, 今後試験体厚さと PSP の関係や, コンピュータシミュレーションを使った理想的な繊維量の検討を行っていく必要がある. また, PSP の極座標解析で配向性の抽出に重点を置き, 配向性を反映しやすい高周波領域を取り込み, 誤差を招きやすい低周波領域を取り込まないという方針で, 経験的に具体的な周波数の数値を決定した. しかし, 周波数成分には繊維の大きさやアスペクト比等の情報が含まれており, 周波数成分についての解析を詳しく行うことで, 配向性だけではなく構成要素の形態特性を評価することも可能となる. この点についてもさらなる研究を必要とする.

4 ま と め

繊維板の内部の繊維配向を評価するのは従来難しいとされていたが, 繊維板を硬いエポキシ樹脂で包埋し, さらに煮沸によってもろくすることで繊維の配向状態を維持したまま内部を切り出すことが可能となり, IB の繊維配向の 3 次元的評価に成功した. また, 2 次元フーリエ

変換により得られるPSPを極座標解析することで、繊維配向をある程度正確に評価できることが確認できた。ただ、配向性の評価は切片厚さに影響され、ここの繊維が明瞭に画像化されるための条件設定には、PSPの周波数分布の解析が有効と考えられる。すなわち切片が薄い場合には全体としてのパワーが低下する。また切片が厚すぎて繊維相互の重複が多くなり、個々の繊維像の輪郭が不明瞭になると、PSPの高周波成分が減少し、低周波成分が逆に増加する。これらの特徴を利用すればより信頼性の高い配向評価が可能となろう。

本研究の一部は、著者が大建工業(株)在職中に行いました。同社開発研究所のご協力に、謹んで謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 川井秀一, 佐々木 光, 木材学会誌, **36**, 218 (1989).
- 2) T. Yuhara, M. Hasuike and K. Murakami, Journal Pulp and Paper Science, **17**, J110 (1991).
- 3) 板東貴司, 坂本一秀, 岩田 弘, 蓮池牧雄, 紙パ技協誌, **45**, 841 (1995).
- 4) B. Xu and Y. Ting, Textile Res. J., **65**, 41 (1995).
- 5) H. Yaguchi, H. Hojo, D. G. Lee and E. G. Kim, Intern. Polymer Processing X, **10**, 262 (1995).
- 6) B. Pourdeyhimi and R. Ramandathan, Polymer & Polymer Composites, **3**, 277 (1995).
- 7) 藤田 稔, 梶田 熙, 前川知之, 佐伯 浩, 材料, **44**, 267 (1995).
- 8) 前川知之, 藤田 稔, 佐伯 浩, 材料, **42**, 126 (1993).