

木材の周期構造解析 III

— 針葉樹横断面における仮道管の2次元的配置の評価 —

前川 知之・藤田 稔・佐伯 浩

Periodical Analysis of Wood Structure III

— Evaluation of two-dimensional arrangements of softwood tracheids on transverse sections —

Tomoyuki MAEKAWA, Minoru FUJITA and Hiroshi SAIKI

要 旨

針葉樹横断面における仮道管の2次元的配置の状態について検討するため、接線方向の仮道管単列という概念を導入した。その結果、早材部の仮道管配置は、このような接線方向の仮道管単列を放射方向にほぼ一定の周期で並べたものとしてとらえ得ることを示した。また、この接線方向の仮道管単列の定量的解析法を導入した。そして、その手法を用いた早材部と晩材部の仮道管配置の比較検討により、晩材部では早材部の仮道管配置が放射方向にそのまま圧縮されたものであると考えられることを示した。

1. 緒 言

これまで針葉樹横断面における仮道管の配置については、放射方向あるいは接線方向についての1次元的な特徴のみが記載されてきた。しかしながら、横断面切片やそこから派生した画像を2次元でフーリエ変換し、パワースペクトルパターンを得ることによって、仮道管の斜状配列の存在が検出されるようになった¹⁾。このようなことから仮道管の配置について検討する場合、今後は2次元的な特徴を詳しくとらえることが必要であると考えられる。また、その特徴を数量的に表現することができれば、例えば材質の評価、あるいは樹種識別などへの応用が可能となるであろう。

本実験では、針葉樹木口断面における仮道管の2次元的な配置についてフーリエ変換法により検討を行い、さらにその特徴を数量表現するための1つの方法を提示した。とくに針葉樹においては、早材に加えて晩材の存在が重要であるが、フーリエ変換法によっても晩材部仮道管の配置についてはこれまで触れられたことがない。そこで、晩材についても検討を行うことによって、早晩材を含む1年輪内すべての部分における仮道管の2次元的配置を評価することを試みた。

2. 試料と実験方法

供試材料として日本の代表的な針葉樹であるスギ (*Cryptomeria japonica* D. DON), アカ

マツ (*Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC.), ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.), および早晩材の移行が極端に急である例としてカラマツ (*Larix leptolepis* GORD.) を選んだ。各試料の小ブロック (約 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 7\text{ mm}$) を煮沸による軟化処理後, 脱水し, エポキシ樹脂包埋した。これらから, ガラスナイフを取り付けた超マイクロームを用いて $2\text{ }\mu\text{m}$ 厚さの木口面薄片を作製した。そして, 0.02% サフラニン溶液で染色後, カナダバルサムで封入した。

本実験におけるフーリエ変換および各種の測定のためには画像解析装置 Luzex III (ニレコ社製) を用いた。まず, 上記の方法で作製した木口面薄片の像を, 顕微鏡に取り付けたモノクロテレビカメラから装置に入力し, ディスクに保存した。この際の画像の入力は, 顕微鏡の倍率を対物レンズ10倍, 接眼レンズ2.5倍, テレビカメラ用中間レンズ0.2倍とし, 切片における放射方向が常に画面の垂直方向となるように定めて行った。なお, このような顕微鏡の条件でキャリブレーションを行ったところ, 1画素が実際の試料中の $1.36\text{ }\mu\text{m}$ に相当していることがわかった。ここで画像は, 1024×1024 の画素から構成されているので, 切片上の約 $1390 \times 1390\text{ }\mu\text{m}$ の領域が画像として表示されていることになる。

本実験では細胞配置の評価法の一つとして, フーリエ変換で得られるパワースペクトルパターンによる検討を当初の目的とした。木口断面像を直接フーリエ変換して得られるパワースペクトルパターンには細胞配置の情報だけでなく, その他の様々な情報が混在しており解読が容易ではない。細胞配置の情報のみを取り出すための方法としては, 各細胞を, その中心の位置に置いた均一な円ドットで置き換えておくという処理が有効である²⁾。従って, 本実験においても木口断面像に対してこのような前処理を行った³⁾。その具体的な方法としては, 入力画像を2値化し, 画像処理機能を使用してすべての仮道管内こうをまず1画素まで収縮させた。つづいて, それらを全方向に同じ割合で膨張させることによって, 各仮道管の位置を示す均一な寸法のドットから成る像を作製した。以後これをドットマップと呼ぶことにする。本実験での解析は, すべてこのドットマップを対象として行った。Fig.1AとBにカラマツの木口断面像と, そこから作製したドットマップを示す。

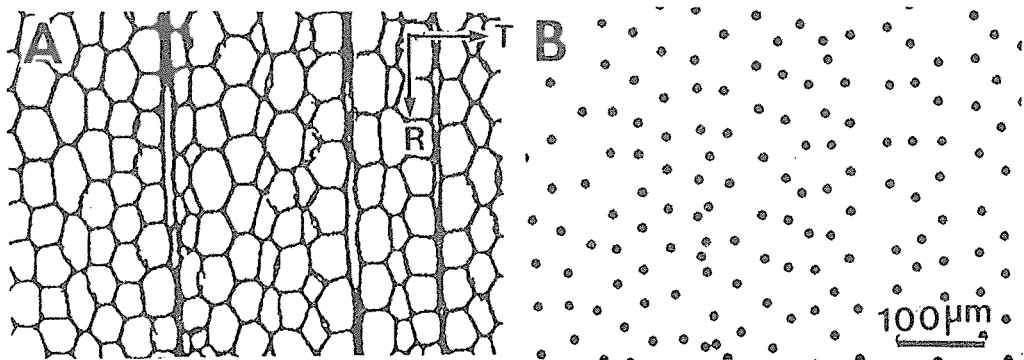


Fig.1 Picture of transverse section of KARAMATSU (A), and its dot map (B).

3. 結果と考察

3-1 早材部における仮道管配置の評価

検討の手順として, 最初は早材部における配置のみを解析の対象とした。そして単純化のため

にまず1次元的な配置について検討し、そこから2次元的な配置についての検討へと発展させることにした。仮道管の1次元的な配置といえば一般的にはFig.2Aの左半に示すような放射列が特徴的である。しかし、これを2次元に拡張する場合、放射列相互の接線方向の間隔を考慮するとともに、隣接する放射列相互では細胞の位置が放射方向にもずれていることを考慮しなければならない。さらに、垂層分裂や仮道管の伸長によって放射列自体も安定しておらず、放射列に帰属できない仮道管も多い。そこで、今回はFig.2Aの

右半に示すような接線方向の細胞列を基本的細胞配置としてとらえることにした。この接線方向の列は、その列内で仮道管が2次元的に分布しており、放射列のような1次元配置とは言えないが、あえてこのような新しい概念を導入した。そうすることによって、仮道管のほとんどすべてをこの接線方向の列に帰属させることができた。この接線方向の仮道管単列は以下に述べるような方法により決定した。まず、ドットマップの像をプリントアウトし、その像において接線方向に任意の直線を引いた。そして各放射列のドットの中で、その直線に最も近いドットを1つずつ選んでいき、それらを接線方向の仮道管単列とした。以後このような列を接線単列と呼ぶことにする。Fig.1Bのカラマツのドットマップの中から得られる接線単列のうちの1列を取り出して示す(Fig.2B)。

ここで、もとのドットマップをそのままフーリエ変換したものをFig.3Aに示す。ここには仮道管配置の放射方向の周期性を示す水平方向のストリーション(r)、接線方向の周期性を示すスポット(t)に加えて、斜め方向の周期性(o)が明瞭に検出できる。これに対して、ある1列の接線単列のみをフーリエ変換すると、興味深いことに全体のドットマップから得られるパターンと同じ様な位置にパワーの集中が見られる。しかしこの場合には、入力したドット数が非常に少ないために粗い模様しか得られなかった。そこで、ドットの数を増やしてこの分布を明瞭にし、かつ接線単列内の仮道管配置の情報だけを維持するために以下に述べるような処理を行った。接線単列内におけるドット相互の位置関係を保ったままで、それぞれの接線単列を放射方向に平行移動させ、接線単列相互の放射方向の間隔がランダムになるように置き換えた。以上のような処理を行った画像をフーリエ変換することによって得られたパターンをFig.3Bに示す。接線単列内における仮道管配置の情報のみを表現するこのパターンにおいても、元の画像のドットマップから得られるパターンと同じ位置にパワーが集中している。このことは、個々の接線単列における仮道管配置の情報だけでも、全体的な仮道管の2次元的配置を解析できる可能性を示唆している。なお、もとのドットマップのパワースペクトルパターンでは垂直方向(原画像では放射方向)の周期性が、ランダム処理されたものよりも明瞭に示されている。(Fig.3Aのストリーション(r)参照)。これは個々の接線単列が一定間隔で多数存在していることに起因している。この一

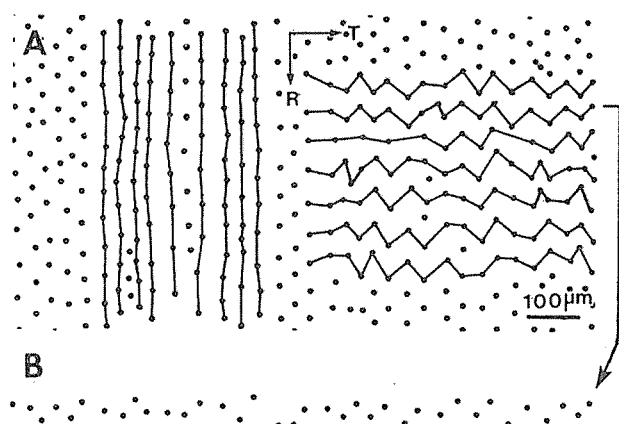


Fig.2 Radial files and tangential cellular units on a KARAMATSU dot map (A), and a certain tangential cellular unit extracted from the dot map (B).

定の間隔というのは放射方向の細胞間距離，すなわち仮道管の放射径に相当する周期に等しいということが実際の測定で確かめられた。以上のことから，ある1列の接線単列の解析を行えば，後はそれを仮道管の放射径に相当する間隔で放射方向に積み重ねたものとして早材部仮道管の2次元的配置をとらえ得ることが明らかとなった。

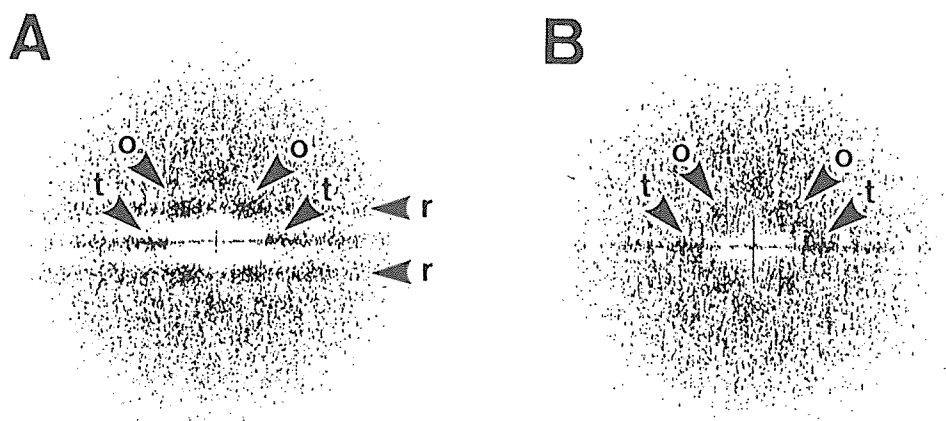


Fig.3 Power spectrum patterns of a KARAMATSU dot map (A) , and of the tangential cellular units disturbed at random along radial direction (B) . Striations (r) and spots (t, o) are originated from radial-, tangential- and oblique- arrangements of tracheids, respectively.

3-2 仮道管配置の数量的表現法について

前述したように，接線単列には仮道管の2次元的な配置の情報が含まれている。この情報は，ドットの放射方向への変動と，ドット相互の接線方向の間隔によって表現され得るであろう。しかしながら本報では，まず仮道管配置の早晚材での変化を解析することを目指して，前者についてのみ数量的解析を試みた。接線単列内のドットの放射方向への変動を解析する1つの方法として次のような手段を用いた。画像解析装置のディスプレイ上に接線単列を表示させ，その接線単列に含まれている各ドットのディスプレイ上でのY座標の値を測定した。それらの座標の平均値に対する各ドットの位置のばらつき具合，つまり

$$\dot{A}(d) = \frac{\sum_{i=1}^N |Y(d) - Y_i|}{N}$$

- N : 接線単列に含まれているドット数
 Y_i : 各ドットのY座標
 $Y(d)$: 各ドットのY座標の平均値
d : 年輪界からの距離

で示される値A(d)を接線単列における放射方向への変動の特徴を示す1つの量と考えた(Fig.4)。以後このA(d)という値を接線単列の振幅と呼ぶことにする。

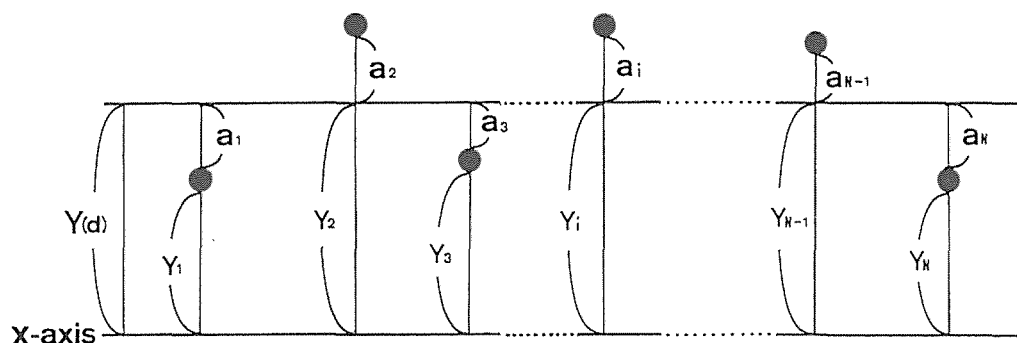


Fig.4 Method for analysis of the tangential cellular unit. 'Amplitude', which characterizes tracheid arrangement in the tangential cellular unit, is calculated with the expression described below.

$$\text{Amplitude: } A(d) = \sum_{i=1}^N a_i / N = \sum_{i=1}^N |Y(d) - Y_i| / N$$

$$Y(d) = \sum_{i=1}^N |Y_i| / N$$

N : Number of dots involved in the tangential cellular unit.

Y : Distance between each dot and X-axis of display.

d : Distance from annual boundary.

3-3 晩材部における仮道管配置の評価

針葉樹においては早材に加えて晩材の存在が重要であり、それを無視するわけにはいかない。そこで晩材部における仮道管の配置について検討するために、さきに述べた振幅を用いた解析法を晩材部にも適用し、早材から晩材にかけて仮道管配置がどのように変化していくか調べた。検討方法として、まず1年輪のすべての部分を含むドットマップを作製し、早材から晩材にかけて接線単列を定めていき、それぞれの振幅を求めていった。なお今回は、接線単列に含まれている細胞数(N)が25~30の範囲で振幅を求めた。3-2で示した振幅の式における年輪界からの距離(d)を年輪界からの接線単列の列番号として横軸にとり、各接線単列における振幅を縦軸にとりプロットしたのがFig.5である。また、同時に放射列における放射方向の細胞間距離(仮道管の放射径とみなすことができる)の変動も調べた。Fig.5にその結果を併せて示す。なお、ここで放射方向細胞間距離は、接線単列相互の距離、 $Y(d) - Y(d-1)$ である。これらの図から、早晩材の移行の緩急に関わりなくいずれの樹種においても、早材から晩材にかけての接線単列の振幅の変動と、放射方向細胞間距離の変動には比例関係が認められる。実際、両者の相関係数を計算したところ、スギ0.96、アカマツ0.90、カラマツ0.97、ヒノキ0.93、であった。また、放射方向細胞間距離と接線単列の振幅の比(振幅/細胞間距離)を早材部と晩材部について別々に計算した結果、スギでは0.25と0.25、アカマツでは0.24と0.24、カラマツでは0.23と0.24、ヒノキでは0.25と0.24であった。以上の2点の事実は、1年輪内で両者の比がほぼ一定であることを示している。このことは、早材から晩材にかけて放射方向細胞間距離が小さくなっていく(すなわち仮道管の放射径の減少)に従って、それに比例した分だけ接線単列の振幅も小さくなることを意味している。ここから次のように考えることができる。つまり、晩材部においては仮道管の形状は早材部のものとは著しく異なっているように見えるが、仮道管の配置については、早材部のそれがただ放射方向にだけそのまま圧縮されたものとして考えることができる。

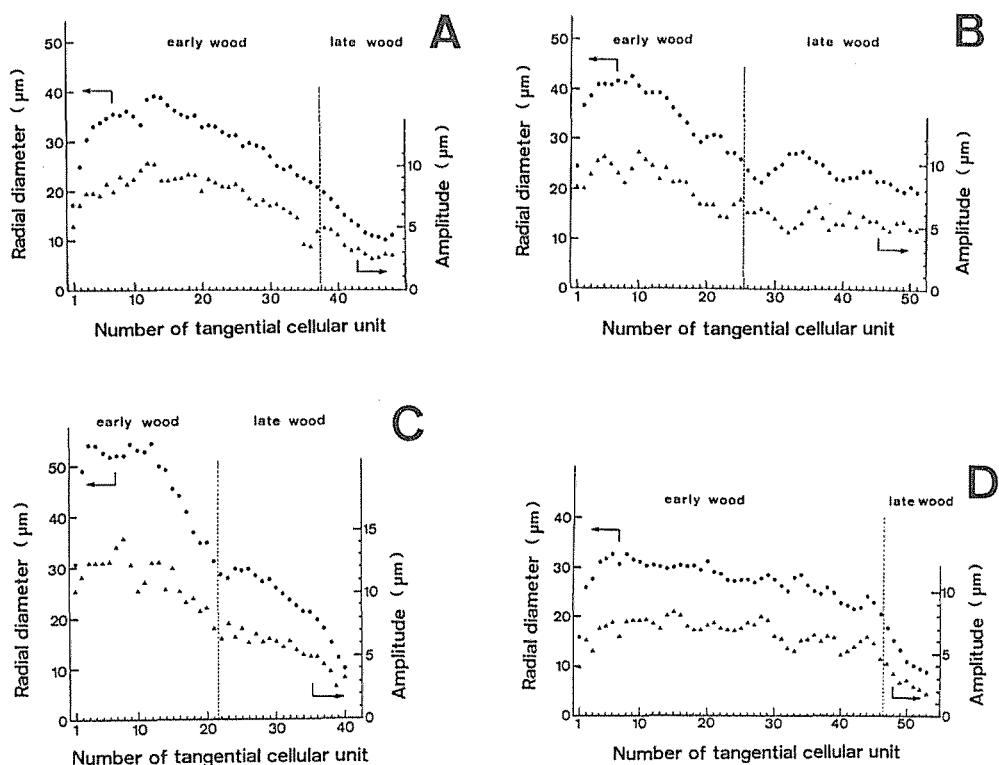


Fig.5 Fluctuation of radial diameter (●), and amplitude of the tangential cellular unit (▲) from early wood to late wood in SUGI (A), AKA-MATSU (B), KARAMATSU (C), and HINOKI (D).

また、もし仮道管が完全な六方格子状配列（隣接する放射列相互で、放射方向に半細胞分の位置のいずれがあるような配置）をとっているならば、放射方向細胞間距離と接線単列の振幅の比は、0.25となるはずである。実際、前記のように各樹種における両者の比は、およそ0.25の値をとっており、仮道管がほぼ六方格子状の配列をとっている可能性が示唆されている。

今回、針葉樹の仮道管配置についてフーリエ変換法を導入した。フーリエ変換法は、入力情報が多ければ（例えば早材部のように入力画面全体に仮道管が等しく分布している場合）、細胞の2次元的配置を的確に表現できる。しかし早材と晩材の移行過程のように、狭い範囲で仮道管の配置が変化する場合にはそのパワースペクトルパターンの解釈が容易でない。これに対して、接線単列による解析法でも細胞の2次元的配置を表現でき、またその放射方向への展開は針葉樹の特徴を抽出しているのに今後活用されよう。

引用文献

- 1) 藤田 稔・金子哲朗・畑 茂樹・佐伯 浩・原田 浩：木材の周期構造解析Ⅰ．光学的フーリエ変換法による試み．京大演報．60, 276-284, 1988
- 2) 畑 茂樹・藤田 稔・佐伯 浩：木材の周期構造解析Ⅱ．放射組織配列の二次元的解析．材料．38 (430), 733-739, 1989
- 3) 藤原 健・佐伯 浩・藤田 稔：FFTによる繊維横断面の特徴抽出の試み．第39回木材学会大会研究

Résumé

Two-dimensional arrangements of softwood tracheids on transverse section were evaluated by FFT and also some mathematical methods, being simplified on the 'dot maps' (Fig.1). In order to extract a basic cell arrangement from original complicated and two-dimensional one, a concept of 'tangential cellular unit' was introduced and offered to actual analyses (Fig.2). Mathematical methods became possible to be adopted on the 'tangential cellular unit', although it had still two-dimensional informations in itself. And also it was proved that the original tracheid arrangement over both early wood and late wood could be expressed by the periodical arrangement of such tangential cellular units along the radial direction. That is, tracheid arrangements could be analyzed mathematically and statistically by only two factors, the tangential cellular unit and change of radial diameter of tracheids.