

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——

藤田 稔・金子 哲朗・畑 茂樹
佐伯 浩・原田 浩

Periodical Analysis of Wood Structure I

——Some trials by the optical Fourier transformation——

Minoru FUJITA, Tetsurou KANEKO, Shigeki HATA,
Hiroshi SAIKI and Hiroshi HARADA

要 旨

木材の組織構造と材質との具体的な関係を探るために、木材をマクロからミクロまでの周期構造の集合物として捕らえ直すことを試みた。そしてこの周期構造を光学的なフーリエ変換法により検出するための基礎的な実験条件を検討した。ここで用いた光学的フーリエ変換法は、コヒーレントな He-Ne レーザー光束と簡単な光学系からなり、フラウンホーファ回折現象を利用して木材の組織形態をフーリエ変換するものである。そして組織形態の周期性を二次元的なパワースペクトル像として出力する。木材の光学顕微鏡観察用標本や、顕微鏡写真撮影フィルムをこの装置に入力することにより、年輪の周期や細胞の寸法と配列、細胞壁の厚さと方向性など、木材の様々な形態と周期性を検出することができた。

1. 緒 言

木材の様々な性質、すなわち材質に、木材の組織構造の特徴が重大な影響をおよぼしていることは自明のことであろう。しかしながら、組織構造と材質との間の具体的な関係については未だ不明な点が多い。この不明な点については、これまでの顕微鏡的方法では組織構造の形態的特徴を直感的・経験的に把握する場合が多く、形態の特徴の定量的な解析が困難であったことに主な原因がある。最近になって、各種の画像処理装置が販売されるようになった。これらの装置を利用すれば顕微鏡的形態像の定量解析が比較的迅速に行い得る。この方法では、形態像を一定数の画素に分割して演算を行うが、これらの画素自体がかなり粗いために、顕微鏡本来の解像力を著しく低下させてしまうことや、ソフトウェア不足による計測種目の制約などの問題がつきまとう。このため研究対象によっては大変有効な方法ではあっても、一般的な顕微鏡像の定量的解析には未だ多くの問題を残している。そこで筆者らは、光学的な画像解析法、すなわちフーリエ変換法を木材組織の形態解析に導入することを試みた。

木材を少し俯瞰的に眺めると、年輪や交錯木理などの肉眼的レベルから、仮道管・道管などの形状と配列などの細胞レベル、そして細胞壁の壁層構造やミクロフィブリル配列などの超微細レ

ベル、さらにはマイクロフィブリルの結晶構造に代表される分子レベルまで、各種の形態要素がかなり規則的なリズム、すなわち“繰り返しの周期性”を持っていることがわかる。また針葉樹の一年輪内における早材—晩材の移行過程や仮道管壁の個々の厚さなど個別の形態についても、樹種に特有な一定の規則性すなわち“個別の周期性”を見いだすことができる。言い替えれば、木材は“マクロからミクロまでの様々な周期構造の集合体”として捕らえることができよう。そして形態の解析に周期構造という概念を導入すると、フーリエ解析法が利用できる。天然物の常として、木材中の各種の周期構造は、規則正しい周期とまったくのランダムとの間の、“ゆらぎ”を持つ曖昧な周期であるが、フーリエ変換法ではパワースペクトルの形でこの様な曖昧な周期性をも定量的に表現できる。形態画像のフーリエ変換には、コンピュータによる高速フーリエ変換（いわゆるFFT）を二次元的に応用したデジタル方式のものと、光波のフラウンホーフェ回折現象を利用するアナログ的なものがある。いずれも形態画像の二次元的な濃淡分布を様々な空間周期成分の集合として捕らえ、フーリエ変換によってその試料中の周波数成分の二次元的分布を解析するものである。本報で導入を試みる光学的なフーリエ変換法はフラウンホーフェ回折現象を用いる点で、X線回折法や電子線回折法と基本原理は同じであり、光回折法とも呼ばれる方法である。しかしながら本報で光学的フーリエ変換法やパワースペクトル像という用語を用いているのは、木材の細胞配列などの曖昧な周期構造を定量化するためである。電気通信の信号処理という大きな需要を背景にして、フーリエ変換法の最近の発達と普及は著しい。木材の周期的形態の解析についても、回折法として考えるよりもフーリエ変換法として捕らえた方が有利であると判断される。そこでこの光学的フーリエ変換について、その原理と装置、周期構造の解析例などについて以下にまとめ、木材形態の解析に利用するには、どのような問題点があるのかを検討することにした。

2. 原 理

図—1 Aに示すように、濃淡のある物体を凸レンズの前焦点（F1）の前方（O1）に置くと、幾何光学の理論に従えば、もとの物体の濃淡画像それぞれの場所から放射した光線が、他の場所からの光線と互いに干渉することなく、レンズで屈折されて後焦点の後方（O2）にそれぞれ集光し、全体としてもとの物体に対応した実像を形成する。このよく知られた現象を波動光学で簡単に表現すると（図—1 B），“もとの物体の濃淡画像（A B）のすべての場所から放射された光波が互いに干渉し合って様々な回折光を生じ、これらが凸レンズで集光されてレンズの後焦点（F2）の位置に二次元的なフラウンホーフェ回折像を生じる。そしてこの後焦点の位置を通過すると光束は再び拡散し、特定の位置（O2）で個々の場所から放射された光線が再び干渉し合ってA Bに対する実像A' B'を形成する”と説明される。最近ではこれら幾何光学と波動光学に加えて、フーリエ光学と呼ばれる概念が、上述の図—1と同様の過程における画像情報の伝達と再生の説明に導入されるようになった。そこでは“もとの物体の濃淡画像は図—1BのO1からF2に至る過程で光学的にフーリエ変換され、F2から再び拡散する過程で今度は逆フーリエ変換が行なわれる。そしてO2の位置でもとの画像の実像が再現する。”したがって、このフーリエ変換と逆フーリエ変換の境界となる後焦点の位置F2にスクリーンを置くと、もとの濃淡画像の空間周期成分に対するフーリエ変換像（パワースペクトル像）が得られると表現される。本報では以後パワースペクトル像という用語を用いるが、これは空間周波数成分の分布を中心軸から放射方向に二次元的に表示したものである。この波動光学とフーリエ光学は同じ現象を説明するものであり、フラウンホーフェ回折像とパワースペクトル像とが同一であることはすでに数学的に証明

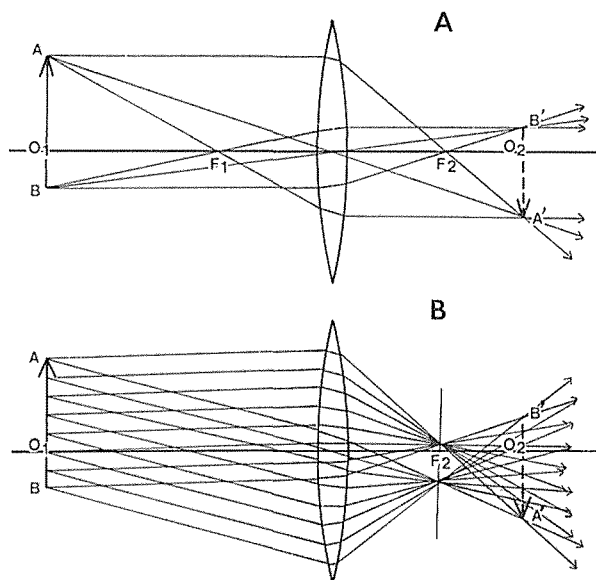


Fig. 1 Image formation through a lens system illustrated by the geometric optics (A) and the wave optics (B).

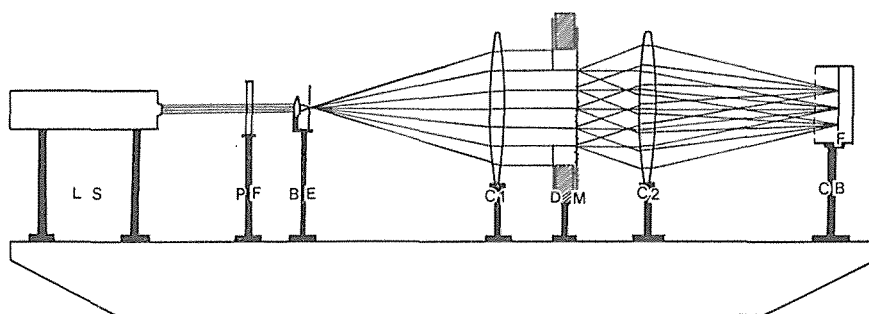


Fig. 2 Optical equipments for the Fourier transformation arranged from left to right on a 3 m bench. LS: polarized He-Ne laser source of 3 mW power, 633 nm wave length and 1 mm ϕ . PF: polarization filter. BE: beam expander with a pin hole of 25 μ m ϕ . C1: collimator lens of 50 mm ϕ and 500 mm focal length. D: diaphragm. M: material holder. C2: condenser lens of 50 mm ϕ and 200 mm or 500 focal length. CB: camera body with a photographic film (F).

説明されている。波動光学やフーリエ光学の基本原理は高度な概念であり、ここでは十分に説明できないが筆者らは、光学¹⁾²⁾、周波数解析³⁾、フーリエ解析⁴⁾、そして光学的フーリエ変換法などの専門書⁵⁾⁶⁾を参考にして研究を進めている。とくに装置については植田の文献⁷⁾を参考にした。ここでは実際に用いた装置と試料を説明する際に、必要な事項についてのみ記す。

3. 装置と光路図

図-2に実際に用いた光学装置と光路図を示す。光学系の最初に直線偏光した波長 633 nm のコヒーレント光を出力する He-Ne レーザー発振器 (LS: 日本科学エンジニアリング製 NEO3 MS) を置いた。この光源から出力される平行光束の中では光波の波長と位相が良く揃っており、

通常光およびX線や電子線の光束に比べて干渉性が大変優れているのが特徴とされる。この特性によって、光束が濃淡のある光透過性の薄い物体を通過する時に、非常に効率的に回折現象が生じることになる。Borchら⁸⁾、平井ら⁹⁾はこの発振器からの光束を直接試料面に投射して、試料の後方に置いた感光材料に回折光を記録するという、X線回折と極めて似た方法により、木材の細胞形態の定量的検出を試みた。しかしながら、レーザー発振器からの直接光束は、光量の分布むらもあり、光束の直径も約1mmと非常に小さい。これを針葉樹早材の木口断面切片に照射すると、仮道管の直径はおよそ40 μm であるので、一次元的には約20個、二次元的には約400個の仮道管がこの直接光束に含まれることになる。目的とする形態要素たとえば仮道管断面が、光束の中に多数含まれるほどフーリエ変換法は威力を発するが、上記の数量には不満が残る。仮道管よりも大きい形態要素たとえば年齢周期は1mmよりも一般に広いので、この直接光束はまったく解析できないことになる。また回折光の記録については、試料と記録用の写真フィルムの間の距離を無限とみなしうる程に長くしないと、フラウンホーフェ回折すなわち光学的フーリエ変換の条件を満足できないことになる。

X線とは異なり、可視域の光線では、ガラス製のレンズによって光束を自由に発散させること

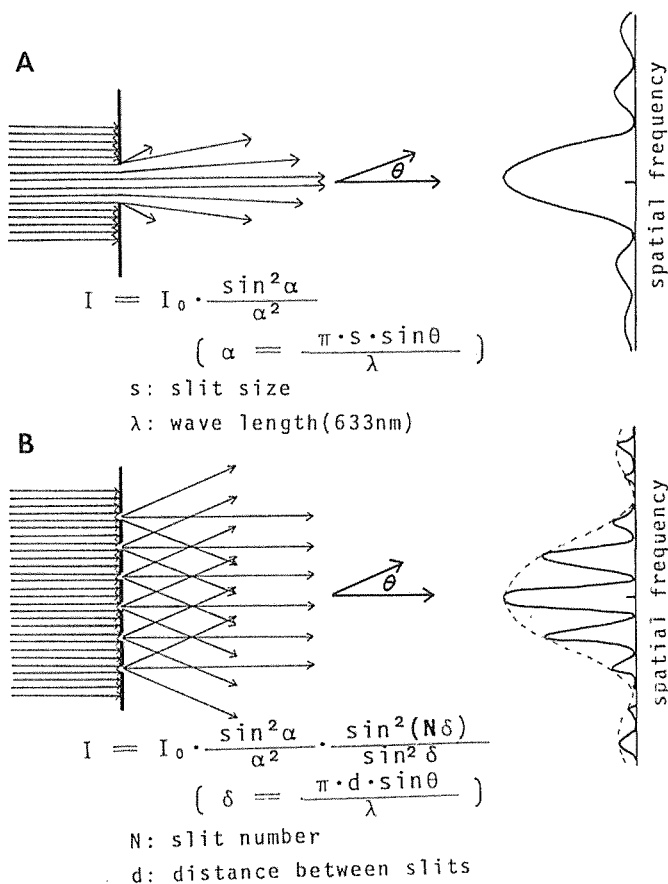


Fig. 3 Fraunhofer diffractions by the single slit (A) and the multiple slits (B), and their power spectrums. The diffraction angle θ and the spatial frequency can be linked by a standard grid taken on the optical system.

ができる利点がある。本報で使用した光学的フーリエ変換装置（中央精機製）では、 $25\text{ }\mu\text{m}$ 径のピンホールをともなったビームエクspander（BE）とコリメータレンズ（C1）によって非常に広く、かつ強度むらの少ない平行光束（最大直径約 50 mm ）を得ることができる。この光束に対して垂直に試料（M）を挿入すると、試料中の濃淡画像に対応して様々の回折光を生じる。この中でフーリエ変換に相当するのはフラウンホーファ回折である。このフラウンホーファ回折には、試料の中の個々の形状をフーリエ変換のかたちで情報化することになる“単開口のフラウンホーファ回折現象（図-3 A）”と、これら個々の形状の、相互の位置関係をフーリエ変換する“複開口のフラウンホーファ回折現象（図-3 B）”とがある。筆者らは今後前者を“個別周期”、後者を“繰り返し周期”と区別し、両者を併せて“周期”と呼ぶことにする。単開口によるフラウンホーファ回折光はその法則に従い拡散し、複開口のそれは光軸から一定の角度を持って進むが、図-2の光路図において、試料の後ろに凸レンズ（C2）を置くと、回折光はこの凸レンズの後焦点の位置（F2）に集光する。この集光レンズあるいは回折レンズと呼ばれる凸レンズの働きによって、無限遠のスクリーンに投影して初めて得られたとされるフラウンホーファ回折像、すなわち試料の濃淡画像をフーリエ変換したパワースペクトル像が、非常に短い距離で得られる効果がある（図-1 B参照）。そして集光レンズの後焦点（F2）に写真フィルムやテレビカメラなどの感光材料を置けば、このパワースペクトル像が検出・記録される。

上記の装置でフーリエ変換できる画像の領域は光束の最大面積で約 2000 mm^2 であり、ここに含まれる木材の組織形態としては、針葉樹の仮道管断面で一次的にはおよそ 1 千個、二次元的には 100 万個にも達する膨大な量となる。年輪のような、長い距離の一次的周期についても数十のものが含まれることになり、年輪幅の計測はもとより、早晚材の割合や移行過程などの解析も可能となろう。本装置によるフーリエ変換では、上述の例のように極めて大量の形態情報を一瞬のうちに処理する能力を持つ。もし入力画像の面積がこれよりも小さい場合や特定の場所を選定する場合には視野絞り（D）を光路に入れる必要がある。この視野絞り自体も一つの単開口として光軸付近（低周波領域）に鋭い回折光を生じ、入力画像中のサイズ（空間周期）の大きい形態要素の回折光と重畳することに留意しなければならない。そこで実験に先立ち、視野絞りの形や寸法を色々と変えることにより絞りの影響を調べた。その結果、写真フィルムを利用して、絞りの端の濃淡を少しばかすと、アボダイゼーションの効果により絞りの影響を著しく軽減することができた。また円形の視野絞りでは、特徴的なパワースペクトル像、いわゆるエアリーの円板を示すので絞りの影響を識別し易い。そして、 1 cm 以上の直径の円形視野絞りであれば、本実験の範囲内では実用的には問題がないと判断された。

4. 供試材料とパワースペクトル像の記録

木材形態の定量分析を目的として、上述の光路系の（M）の位置に入力できる試料としては、媒体となる波長 633 nm のレーザー光束から回折光を効果的に発生させるために、これを適度に吸収する半透過性の薄い膜である必要がある。そしてまたフーリエ変換法による周期構造解析の精度を高めるためには、入力される半透過性の膜の面積が、本装置の光束の断面積（約 2000 mm^2 ）の範囲内で十分に広いことが有利な条件となる。前者の条件を満たすものとしては、光学顕微鏡観察に用いられている染色・封入された木材切片がある。平井らが指摘したように⁹⁾、木材細胞、とくに $10\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ の範囲にある針葉樹仮道管などの断面の寸法は、 633 nm の波長の光線を広角で回折させることができる。一方木材の形態を顕微鏡などで転写したモノクロ写真フィルムも有効な半透過性の膜となる。本報では、通常の光学顕微鏡観察のために作製された 3 断面の標本

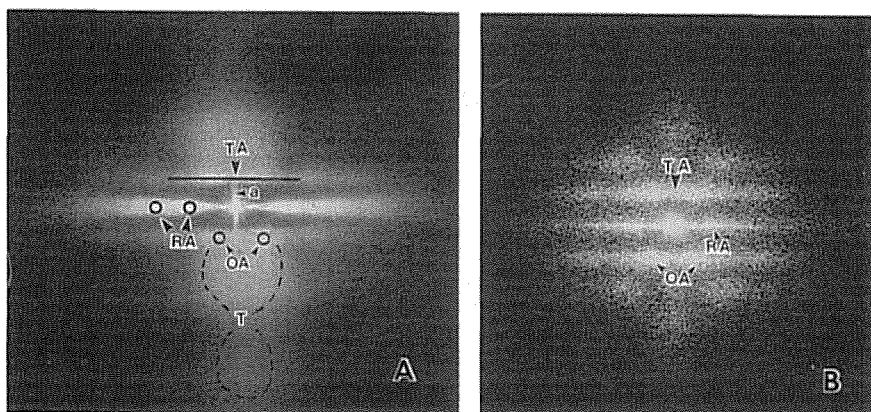


Fig.4 Power spectrum patterns from cross sections of *cryptomeria* normal wood having about 100,000 number of tracheids (A) and compression wood having about 1000 number of tracheids (B). By means of decoding procedures (c.f. Figs.5, 6), periodicities of annual rings (a), cell wall thickness (T), cell arrangement of radial (RA), tangential (TA), oblique (OA) and so on can be identified.

(厚さ $20\ \mu\text{m}$, サフラニン染色, バルサム封入, 面積約 $150\ \text{mm}^2$) を用いた (たとえば図-4 A)。そしてこれとは別にパワースペクトル像解読のために, スギの正常材と圧縮あて材のエポキシ樹脂包埋試料から切りだした, $2\ \mu\text{m}$ 厚さの横断面薄切片 (サフラニン染色, バルサム封入) の低倍率拡大写真 (たとえば図-4 B) と, そこから派生する種々のモデルパターン (図-5, 6 参照) のフィルム転写縮小像 (もとの切片の7.4倍, 面積約 $300\ \text{mm}^2$) などを用いた。

パワースペクトル像の記録については, 図-2 の (F2) の位置に市販の通常の $36\ \text{mm}$ サイズ, $60\ \text{mm} \times 45\ \text{mm}$ および $60\ \text{mm} \times 70\ \text{mm}$ サイズの一眼レフカメラボディ (CB) にネopanSS フィルムを装置して, 多くの場合1秒, $1/16$ 秒, $1/250$ 秒の3段階の露出時間で感光させた。光量が過剰な場合には偏光フィルター (PF) を光源のすぐ後に入れて調節した。

5. パワースペクトル像の解読

上述の条件で得た木材の木口断面切片のパワースペクトル像には, 興味ある回折パターンが示されたが, 木材のX線回折や電子線回折の例と比較すると, その回折のパターンは不明瞭であった (図-4)。これはX線や電子線による回折法が, セルロースの結晶という, 極めて明確な繰り返し周期の成分だけを, 広角の回折スポットとして出力し, 曖昧な周期成分についての情報をほとんどもたらさないのに対して, コヒーレントなレーザー光束が多くの曖昧な周期成分の情報をもフーリエ変換して出力していることを意味している。もし木材の細胞断面形態に, 肉眼・光顕レベルで結晶に相当するような明確な周期が存在するのであれば, 不明瞭な回折パターンに加えて極めて明瞭な回折点が検出されるはずであろう。実際に, スクリーンシートのように, 結晶に相当するような規則正しい濃淡の周期性を持つスタンダードパターンを, 木材切片と同様にして光学的にフーリエ変換すると, 明確な回折スポットが得られた。これに対して木材のパワースペクトル像が示す曖昧な回折パターンは, 木材の持つ様々の曖昧な周期構造が重なり合っていることを意味するであろう。換言すれば本研究の主目的はこれらの曖昧な周期の定量的な検出にある。そして個々の曖昧な周期性を正確に検出するためには“畳み込み (convolution)”などの影響を検討することが重要な課題となろう。しかしながら“畳み込み”の概念は大変複雑であり, また

この現象を利用して形態の情報を解析するには、フーリエ変換像の定量的測定（濃度測定）が必要となる。そこで本報では、パワースペクトル像の定性的な解読に主眼を置き、木材形態のどのような画像情報が比較的容易に判読できるのかを検討した。このとき上述の既知の空間周波数を持つスタンダードパターンを、パワースペクトル像解読の際に、空間周期の算出のための標準試料として利用した。

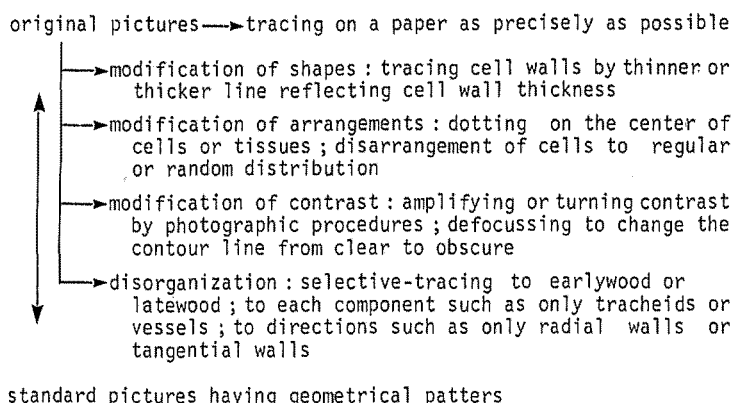


Fig. 5 Procedures for the decoding of the power spectrum pattern by modifications and disorganizations of the original picture. The original picture and its derivative models were offered to the transformation after the photographic reduction.

この解読の実際の過程を以下に述べる。まず木材断面に現れる様々の形態が畳み込まれたパワースペクトル像から、個々の形態要素のスペクトルを識別するために、木材の形態要素を変調・分解させた種々のモデルパターンを作製した（図－5）。そしてスギの正常材春材部に適用した変調と分解の一部の例を図－6に示す。ここでは2 μ m 薄切片の低倍率光顕写真（220倍，図－6 A）を基にして，その上に半透明紙を置き，木材形態を忠実にトレースした（B）。つぎに，仮道管壁の厚さの影響を検討するためにトレース線の太さを細い線に変えてみたり（C），接写の際に焦点をあえてずらせることにより，仮道管壁断面の矩形波的濃度変化を，三角関数波的濃度変化に変える効果により，細胞壁厚さを反映する“単開口のフラウンホーフェ回折”を抑制（D）するなどの，画像の変調を実施した。さらには仮道管の配列の情報だけを取り出すために，仮道管断面の中心に黒点を置いたり（E），細胞壁の方向性を検討するために，仮道管を放射壁と接線壁に分解してトレースするとか（F），様々のモデルパターンを作製した。この一連の操作の過程で得られた，木材の形態に基づく同倍率の多数のパターンを，同一条件で光学的にフーリエ変換し，人為的操作した形態要素の影響がどこに現れるかを検討した。その結果図－4と6の例に示す様に，パワースペクトル像から多くの形態因子を解読することができるようになった。

6. 今後の課題

これまでに述べたように，光学的フーリエ変換法が多量の形態情報，とくに周期構造をパワースペクトル像の形で解析できることが示された。また細胞の配列などについて，これまでの放射方向と接線方向の周期性に加えて，斜めの方向にも一定の並びがあることが具体的に示された。この様な特異な細胞配列や各種の周期性の検出は木材材質の解析に新しい展開をもたらすことが期待される。本報では，実験条件やパワースペクトル像の定性的解読に重点を置いたが，パワー

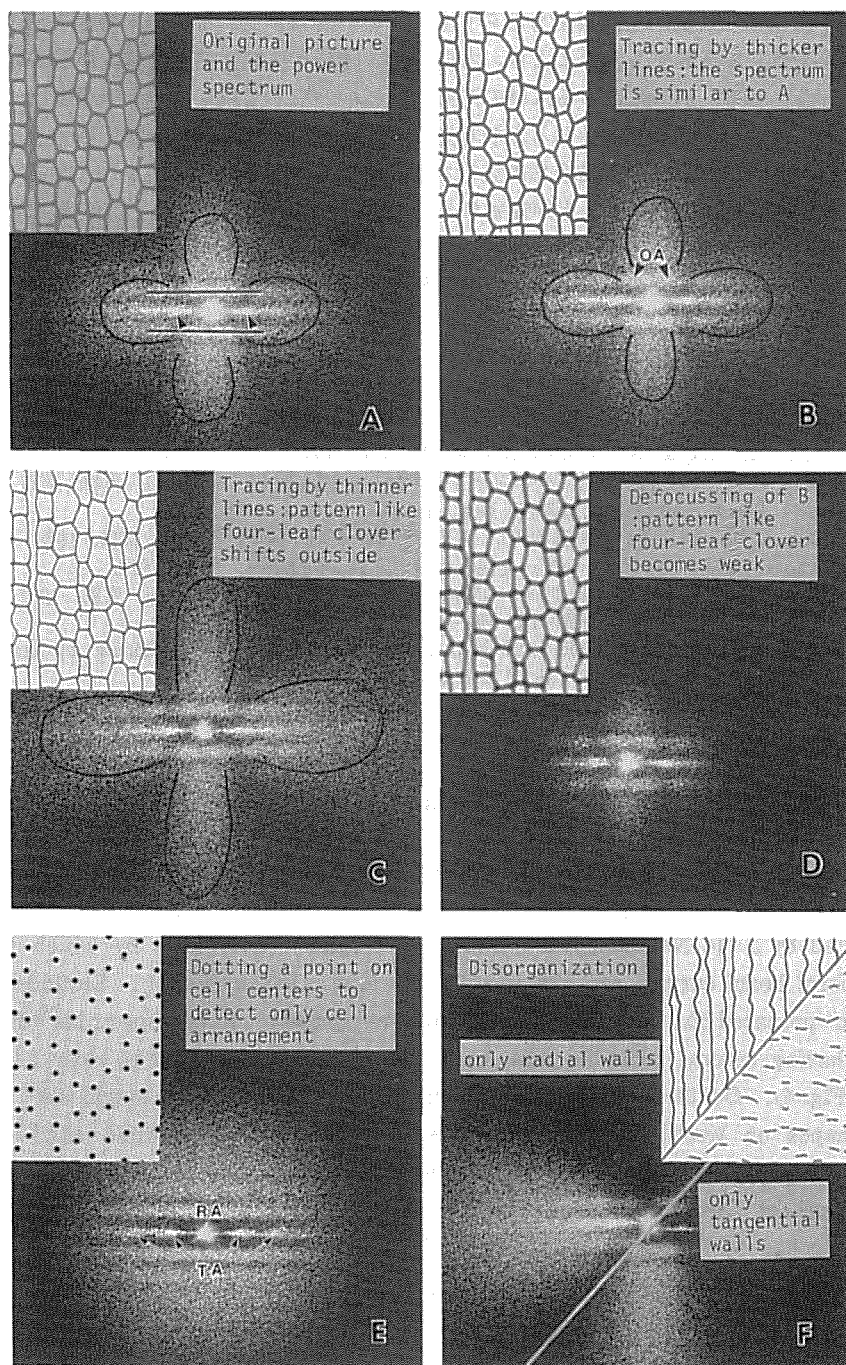


Fig. 6 Examples of decoding procedure in normal wood tracheids of *cryptomeria*. Original picture (A) has about 1000 number of tracheids and its power spectrum shows many periodicities which are decoded by following procedures. Pattern like four-leaf clover (A) is judged reflecting the cell wall thickness by comparing the patterns of B, C, D and F. The horizontal striations (for instance on A and E) show the distinct periodicity of radial cell arrangement, while spots on the equator line show the obscure periodicity of radial of tracheid. Spots on the striations (c. f. B) suggest oblique cell arrangement.

スペクトル像は本来定量的な情報をもたらすものであるから、この像の光学濃度を測定し、畳み込みの影響を正確に把握することにより、木材特有の曖昧な周期性を定量解析することがつぎの課題となろう。一方、解析に供する木材の形態画像についての工夫も重要な意味を持つであろう。FFTなどではサンプル量が多くなると演算処理に長時間を要するが、光学的な方法ではフーリエ変換の過程自体は事実上一瞬のうちに実行されるので、入力画像の面積をこの装置の限度である2000 mm²程度まで広くすることが望まれる。またできるだけ簡便な方法で、木材の形態を半透過性の膜状にすることも実用の点では意味があろう。筆者らは、木材の鋸断薄片を切片のかわりに利用する方法や鋸断面の形態をゼロックス転写する方法などを考案しており、これについては次報に述べる。

引用文献

- 1) HECHT, E. and ZAJAC, A. : Optics. Addison-Wesley, Massachusetts. 1974
- 2) WELFORD, W. T. (石川光男訳) : 光学 (オックスフォード物理学シリーズ14). 丸善. 東京. 1978
- 3) 日野幹雄 : スペクトル解析. 朝倉書店. 東京. 1977
- 4) BRIGHAM, E. O. (宮川洋, 今井秀樹訳) : 高速フーリエ変換. 科学技術出版. 東京. 1978
- 5) WRIGHT, G. (増子 寛訳) : レーザーを使った基本実験. 共立出版. 東京. 1977.
- 6) DUFFIEX, P. M. (辻内順平訳) : フーリエ変換とその光学への応用. 共立出版. 東京. 1977
- 7) 植田 夏 : 光回折法. 電子顕微鏡. 15. 59-71, 1980
- 8) BORCH, J., SUNDARARAJAN, P. R. and MARCHSSAULT, R. H. : Light scattering by cellulose. III. Morphology of wood. J. Polymer Sci., A-2. 9. 313-329, 1971
- 9) 平井信之・祖父江信夫・浅野猪久夫・白鳥史芳 : レーザー光線による木材組織の研究. 木材学会誌. 24. 771-777, 1978

Résumé

Optical Fourier transformation was applied to analyze the periodicity of wood structure which may affect wood properties. An optical system for the Fourier transformation was constructed by a He-Ne laser source and several optical equipments by which very wide and uniform beam current can illuminate a material picture (Fig. 2). Sections of wood specimen prepared for the light microscopy gave peculiar power spectrum (diffraction) patterns having several striations and spots, although they were not so clear as those of X-ray (Fig. 4). On these spectrums, "Fraunhofer diffractions of the single slit" reflecting many shapes on wood structure and "the diffraction of the multiple slits" reflecting various arrangements of these shapes are convoluted with each other (Fig. 3). Therefore, modifications or disorganizations of the original picture of wood structure were designed in order to decode the convolution (Fig. 5, 6) and these models were transformed by the same experimental condition with the original one. By the comparison between their spectrum patterns, many periodicities could be identified (Fig. 4, 6).