

【解説】講座

林木育種の現場の ABC (14) 材質調査 (立木状態での測定)

藤澤 義武^{*,1}

はじめに

これまでに、木材の材質とは何か、その育種における意義と基本的な測定手法を紹介した。これは、木材材質をイメージするのに、少しは役に立ったものと期待する。しかし、多数のサンプルを対象とする林木育種では、伐倒による供試材の採取は多大な労力と経費を必要し、選抜に用いるのであれば育種素材を失ってしまうこととなる。しかし、これも萌芽力の高い樹種には十分実用できる。パルプ生産に適したポプラはそのようにして選抜された。すなわち、樹幹と根張りにナンバーリングした後に伐倒して供試材を採取し、常法によって密度、繊維長、パルプの蒸解性などを評価した結果、合格と評価された個体の根株から萌芽を採取して増殖した。また、我が国におけるカラマツ材質優良木(旋回木理の小さい個体)の選抜では、冬期に伐倒して穂木と供試材を採取し、供試材から割裂法によって繊維傾斜を評価したうえで、合格した個体のみをつぎ木で増殖した。前者はまだしも、後者は薄氷を踏む思いの選抜作業であったろうことは容易に想像がつく。すなわち、伐倒は穂木の採取に適した時期に実施する必要がある、材質評価はつぎ木の適期までに終えなければならない。また、合格個体についてもつぎ木が成功する保証はなく、不成功の場合は貴重な育種素材を失うこととなる。

このように、伐倒による材質評価は多大な労力・経費を必要とするだけでなく、育種素材を失うリスクをとらなう。そこで、立木状態で非破壊的に、少なくとも生存に影響するような致命的な傷害を与えないように測定できるシステムが求められる。そこで、林木育種において有用な測定手法をいくつか紹介する。

立木状態でのサンプル採取

ここでは、立木に致命的な傷害を与えないように樹体の一部を切り取ることでサンプルを採取するいくつかの方法を示す。年輪構造、繊維傾斜(旋回木理)、繊維長(仮道管)、細胞の直径・壁厚、マイクロフィブリル傾角などの生物学的な木材の性質は、現在のところ、サンプルを採取して評価するしかない。試験体の大きさや形状を選ぶことで、密度のみならずヤング率や含水率などの物理・力学的性質についても適用できる。

成長錐

林学分野における最も一般的な採取器具であり、成長輪の計測用サンプルを採取する中空の錐である。写真-1に示すようにハンドルを回してビットと呼ばれる錐の本体を樹幹にねじ込み、エキストラクターを挿入、成長錐を反対方向に少し戻した後、エキストラクターを引き抜いてサンプルを採取する。かつては国産を含めていくつかのメーカーがあり、ガデリウスが輸入して同名ブランドで販売するスウェーデン製のものの評価が高かったが、現在はハグロフ(HAGLOF)とマトソン(MATTOSON)の2ブランド(ともにスウェーデン)が入手可能である。両者の違いとして、マトソンはビットにテフロンコーティングがないこと、ビット取り付け部などに真鍮を多用してサビが来ないようにしていることなどで、ビットの材質は双方ともに同じスウェーデン鋼である。ビットにテフロンコーティングしてあると、サンプルの取り出しに有利であるが、サンプルの取り出しを円滑にするには、テフロンコーティングの有無にかかわらず、ビットにシリコーンスプレーを塗布しておくのが良い。

ビットの先端は、製造元が販売する砥石や研磨機などで、適宜研いで鋭くしておくことが肝要である。切れない刃先ではサンプルが年輪間で分離しやすく、連続

* E-mail: yochan53@agri.kagoshima-u.ac.jp

¹ ふじさわよしただけ 鹿児島大学農学部



写真-1 成長錐によるサンプルの採取

した完全なサンプルを採取できない。この点においても、ビットにシリコンスプレーを塗布しておくことで切り込みが円滑になる。採取したサンプルからは、年輪構造(年輪幅、晩材幅、年輪密度、晩材密度、早材密度 etc.)、密度、繊維長(仮道管長)、マイクロフィブリル傾角を得ることができる。ただし、仮道管長、マイクロフィブリル傾角の測定用としては、一般的な内径5mmのものでなく、材質評価用として開発された内径12mmの太いものを利用する方が良い。

一方、成長錐で採取したサンプルは、心材含水率の測定には不適である。ビットの先端部は連続して切り込んで行くために先端の刃先部分が若干絞り込んである。また、切り込みに際しては、ビットの外径部に刻まれたねじによって強い前進力が与えられ、先端部で、圧縮、剪断破壊による切断が連続的に起こる。そこで、サンプルは切り込みの際に全周と先端部から強い圧縮力を受けるので、水分の一部は絞り出された状態にある。このため、含水率測定用のサンプルは、成長錐ではなく後段に示す切削によって採取するのがベターである。

なお、成長錐はうまく樹心をとらえると樹皮から樹心へ連続したサンプルを採取できるが、確実に樹心を

とらえるようになるには若干の経験が必要である。スギ造林木で二人一組なら40～60本/日程度の採取が可能。採取したサンプルは表面紙を剥がした段ボールの凹部に並べる、あるいは1本ずつ適当な太さのストローに入れるなどしてサンプルをまっすぐ固定した状態で確実に管理する。固定していないと、乾燥に伴って反って変形するので、扱いにくくなる。また、容積密度を測定する場合は体積を測定するために飽水状態にする必要があるため、乾燥しないようにラップでくるむなどの配慮を行う。

なお、確実に切り込んで、しかも、ぶれないように正確に切り進むため、胸でビットを押さえて保持する補助具がハグロフから販売されている。

皮抜きポンチ

文字通り、革細工に用いる穴開けポンチであり、円形のものなら2mmから25mm程度まで各種のサイズが販売されている。必要なサイズを選び、樹皮にあてて木槌などで打ち込むことで、最外周から2、3年輪程度のサンプルを容易に採取できる。外周部に近い部分の密度、繊維長、マイクロフィブリル傾角、細胞の形状などを測定、あるいは観察するためのサンプルの採取に最適であり、特に成熟材部のサンプル採取に適している。ポンチは、品質的にもピンからキリまでであるが、炭素鋼などの工具用の鋼を用い、焼き入れとさびないように表面処理をした製品を選択するのが良い。

なお、本器具は打ち込み量が限られていることから採取できる部位に制約はあるものの、成長錐より格段に作業効率が良い。しかし、打ち込んだポンチを抜くのに力があるので、このことを考慮した効率的な作業工程を考えておくと良い。

木工用ドリル(クリコギリ)

立木状態で含水率を測定するためには先述したように成長錐で採取したサンプルは不適なので、木工用ドリルによって穿孔しながら切削片を採取する。すなわち、15～20mm程度のドリルビットを取り付け、樹幹に切り込む際に排出される切削片を受け皿などで受けて集める。受け皿は適当な形状のものを薄手のプラスチック板などで作ると良いが、水分を吸収し易い素材は避ける。集めた切削片は速やかに管ビンに入れて密閉する。生材重量はこの状態で管ビンごと測定し、後に管ビンの重量を風袋引きする。なお、辺材部と心材部の区分は心材形成が明確な樹種では切削片の色の変化で容易に判断できる。

その他

鋸とのみは、比較的大きなサンプルを採取するのに便利である。鋸は「レザーソー」と呼ばれるタイプ、のみは「おい入れのみ」と呼ばれるタイプで、刃幅が50mm程度の刃幅の広いものが良い。レザーソーとは0.3mm程度の極めて薄い刃に細かい横切り刃がついたもので、刃が薄いために背に胴と呼ばれる支持部が取り付けられているのが特徴。樹幹が折れない程度に大きく切り取ることができるが、切り込み深さは30～50mm程度が限界であろう。必要なサイズの範囲より若干外側をレザーソーで切り込み、さらに外側からのみを打ち込んで掘り下げ、さらに鋸で切り込む。この作業をくり返して目的とする厚みまで切り込んだのち、底部のみをあててサンプルを割り取る。このとき、早晚材の密度差が明確な樹種では容易に割裂して採取することができるが、旋回木理がある場合や広葉樹では、割裂が容易ではなく手間取ることがあり、この場合は意図しない方向に割れないように慎重に進める。サンプルのサイズにもよるが工程は低く、数多くのサンプルを採取するのは難しい。この点において写真-2に示したニュージーランドFRIのサンプル採取機は効率的に立木から曲げ試験など力学的性質評価用の大きなサンプルを切り取ることができる。



写真-2 エンジンツインソーによるサンプル採取機

主要な材質指標となる木材性質の 非破壊的測定法

この項では、立木状態で非破壊的に木材性質を測定する手法をいくつか紹介する。非破壊とは言っても、完全に非破壊で測定できる手法は限られており、多くは

若干の傷を樹体に残す。ただし、自然界においても日常的に起こりうる程度である。

密度（年輪構造を含む）

ピロディン法：ピロディン (Proceq社：スイス) は写真-3の外観を持ち、6Jのバネで直径2～5mmの平頭のピンを樹幹に打ち込む。その打ち込み量が密度と反比例の関係にあることを利用して密度を推定するものである。スギの場合2.5mmもしくは3mmのピンでスギの密度の範囲である200～500kg/m³で最大の打ち込み量の差異が得られるとし、打ち込み量と密度との間には比較的高い負の相関関係 ($r=-0.82$) があったことが報告されている (山下ら2007)。高い精度で測定するためには樹皮を剥がして打ちこむ必要があり (写真-4)、樹皮の上から打ち込むと精度は低下する。樹皮の厚みによる影響以上に樹皮部と木部の性質の違いが影響している。すなわち、ピンが陥入していく過程では、ピンが当たった瞬間の部分圧縮による圧縮及び剪断破壊をへて陥入を開始し、その後、摩擦や繊維の束を引き剥がすような力によってエネルギーが吸収されていくことで停止すると考えられている。樹皮はその性質上ヤング率が木部より低くたわみやすいなどの性質によって、ピロディン陥入量に対する影響が大きいと考えられる。樹皮が厚く堅いカラマツなどは樹皮を剥がすのが大変であるが、この場合、樹皮の上から陥入させるとともにバークゲージで樹皮厚を測定し、これを陥入量から差し引いて修正すると精度が向上する。しかし、前述した理由から、樹皮を剥がした場合より精度が低いのは当然である。

なお、Proceq社はピロディンの製造を中止したようであるが、現在もリース会社での取り扱いが継続されているとともに、同様の製品が他社で製造されているようである。



写真-3 ピロディンの外観



写真-4 ピロディンによる樹幹陥入量の測定

レジストグラフ法：レジストグラフ (Resistograph) は先端部がツボ錐と同様の形状の3 mm 幅のチップと呼ばれるビットが取り付けられた直径1.5 mm 長さ280～1000 mm の鋼鉄製のシャフトを電動で回転させて一定の速度で陥入させる。その時の抵抗の変化をモータへの負荷の変化としてとらえるものであり、その変化を最高0.04 mm の分解能で変化を連続して記録できる。その結果得られる変化の曲線は、軟エックス線デンシトメトリで得られる密度曲線と相似である。すなわち、変化曲線のピークは年輪界を示すのでピークからピークまでが年輪幅、その精度は機材の分解能となる。また、レジストグラフで測定した部位から試験体を採取し、軟エックス線デンシトメトリ法で密度の変化を連続して測定した結果から検量線を作成することで、樹皮から髄までの連続した密度変化の曲線が得られ、年輪幅、年輪毎の密度、晩材密度、早材密度、晩材率などを軟X線デンシトメトリ法と同様に得ることができる。なお、測定によって樹幹に直径3 mm の穴があくが、ビットの構造上、切削した切りくずを穴の中に残しながら進み、戻るときも同様なので、測定終了後には切削した切りくずで穴はふさがれた状態になる。本機はWalesh electronic社(スイス)製であり、陥入距離及び記録方式がアナログ式もしくはデジタル式などの違いでいくつかのタイプがある。

ヤング率

ぶら下がり法：本手法は完全に非破壊であり、しかも本手法による測定部位から採取した供試材による曲げ試験と同じ結果を得ることができる。図-1に示したように樹幹に曲げモーメントを加える挺子を取り付け、その反対側に曲げの変異量を測定する変異計を取り付ける。本手法の特徴として、荷重に調査員そのものを用い

ることである。数十キロに及ぶウエイトを持ち歩くのではなく、自ら移動、载荷を行う人間を用いるところが本手法のポイントである。体重は、载荷する際の装備を全て身につけた状態で、ヘルスメーターなどによって測定する。一日の間に調査員の体重は大きく変化することはないので、午前と午後、それぞれの測定開始直前に量れば充分であるとされる。変異計の中央部には1,000分の1 mm 単位で測定できるリニアゲージを取り付け、曲げの変異量を測定する。変異計はひもで樹幹に縛り付け、樹幹上では上部2点、下部1点の支点で支持する。このとき、上部の2点は変異計がズレ落ちないように軽く打ち込むが、下部の1点は浮き上がらないように樹皮に軽く押しつける程度に留める。下部の1点も強く固定すると自由支点とならず、変異が拘束されてヤング率を過大評価することになる。本機材はリニアゲージ以外全て自作であり、図-1の機材も手作りである。構造の詳細は参考資料(小泉・上田1987)に詳しいので、それを参照する。

本手法で留意しなければならないのは、次に示すヤング率の算出式において木部の直径は4乗となることである。

$$Es = S^2M / 2\pi r^4\sigma$$

ここで、 Es ：ヤング率、 S ：変異計測定区間の長さ、 r ：樹幹木部の半径、 σ ：測定区間 S の変異量、 M ：モーメント = 荷重者の体重 × (カンチレバーの長さ+加力点部の樹幹の皮付きの半径)

すなわち、木部径が荷重量よりも影響が大きいので、直径と樹皮厚を正確に測定する必要がある。本手法の

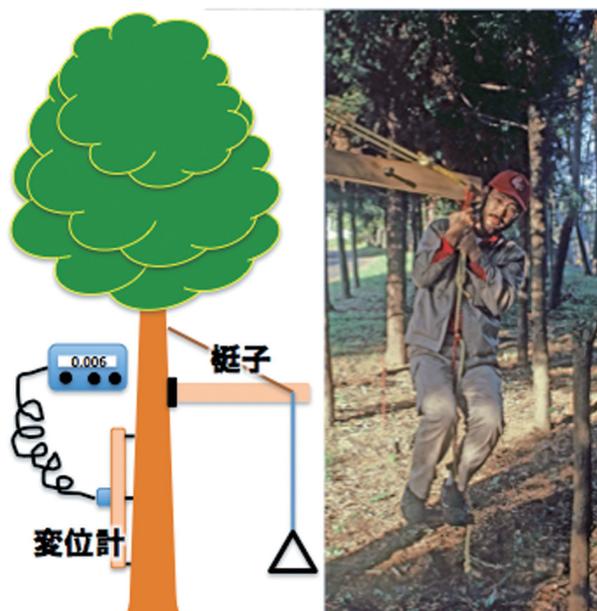


図-1 ぶら下がり法による立木のヤング率の測定

制約として、梃子のセット等に手間がかかることもあって1個体の測定に15分以上必要なこと、風によって樹幹が揺れる場合には測定できないこと、载荷によって対象木の枝が隣接木の枝に触れあうと過大に評価される危険性があることなどがある。大径木を測定する場合には加重量を増やす、すなわち、2名加重とするか、モーメントを大きくするために梃子の長さを増やす必要があるが、その場合は梃子の取り付け部に力がかかりすぎ、形成層に影響を及ぼして非破壊とはならないことがあるので留意する。

応力波伝搬速度測定法：物体中の応力波の伝搬速度 (m/sec) の2乗と密度 (kg/m³) の積がヤング率 P (N/m²) である。このように、応力波伝搬速度はヤング率に2乗で寄与するうに、木材の密度はヤング率に比べて変動が少なく、変動係数で10%程度以下であることなどから、小さなハンマーによる打撃などによって応力波を発生させて伝搬速度だけを測定し、密度の測定は省略する (名波ら 1992)。ピロディンによる密度の推定と組み合わせるとより正確にヤング率を推定しようとする試みもあったが、ピロディン陥入量がヤング率などの影響を強く受ける値であるなどによってそれほど精度は上がらない一方で労力が増加するなどによって、応力波伝搬速度のみを測定するのが一般的である。かつては、樹幹に釘を打つなどして発生させた応力波の伝搬速度を樹幹の上下2箇所に設置した加速度計と携帯型オシロスコープで測定したが、現在はファコップ (FAKOPP Enterprise 社製:ハンガリー) を用いるのが一般的である。これはスタート、ストップ2個のセンサーと本体からなり、両者を一定の間隔に取り付けて、スタートセンサーを打撃すると応力波の発生と測定の開始を同時に行い、応力波がストップセンサーに達するのに要した時間を本体にマイクロ秒でデジタル表示する (図-2)。このため、トリガーと停止、双方のピーク波形から時間差を読み取らなければならないオシロスコープよりも格段に効率が良い。ファコップの留意点としてはスタートとストップ双方のセンサーが動作するトリガーの閾値の設定がブラックボックスとなっていることであるが、スタートセンサーのタッピングの強さを変えても値は変化せず、だれが測定しても同じ結果が得られる。この絶妙な閾値の設定が本機材の最大の利点と言えよう。同様の廉価な機材が開発されたことがあるが、タッピングの強さによって測定値が変化するので、実用には問題があった。

本機材で測定した応力波伝搬速度は同じ部位をタッ

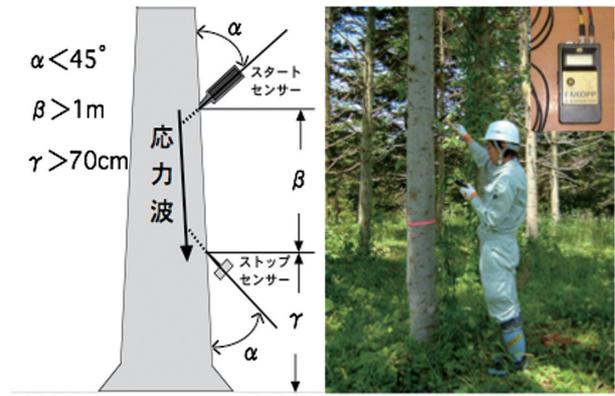


図-2 ファコップのセット法と応力波伝搬速度の測定

ピング法で測定した場合のヤング率と相関が高いことが、スギ、ヒノキ、カラマツ、トドマツで確認されており、スギでは個体単位で $r=0.91$ 、クローン平均では $r=0.96$ の高い相関関係が示されている (藤澤ら 2005)。なお、使用に際しては、図-2 に示したようにセンサーの取り付け角度に留意する。樹幹に直角の方向に取り付けてはならない。

心材含水率

スギとトドマツでは、スギでは黒心、トドマツでは水喰い材と呼ばれる多湿心材が高頻度で発生する。これらは材を加工する上での欠点となるだけでなく、材が重くなるために運材コストを高め、さらには凍裂の原因ともなり、これらの樹種の深刻な欠点の一つとしてとらえられている。このため、これらの樹種では心材含水率の評価が重要であるが、これまでは、サンプルを採取して測定するのが一般的であった。サンプルを採取しない方法として樹幹にドリルで穴を開け、その空間の相対湿度から含水率を推定することなどが試みられた。一方、横打撃共振法は、精度はそれほど高くないものの、黒心材や水喰い材とされるような含水率の高い個体は区別することができるので、現時点で最も実用的な非破壊的測定手法としてとらえられている。その概要を次に示す。

樹幹方向に直角方向、すなわち、横方向から樹幹をハンマーで打撃すると、図-3 に示すように断面の円周に4点のノードを持つ振動が起きる。この振動はモーダル解析から伸縮振動であるとされ (釜口ら 2000)、ヤング率、密度、心材含水率などの要因によって固有に決まる。この、打撃による振動を加速度計や音としてマイクでFFTアナライザに取り込むと、固有振動数が得られる。この固有振動数と胸高直径との間には次の関係がある。



図-3 横打撃による振動の模式図と測定の様子

$$1/F = (k\rho / E)^{1/2} \times D$$

ここで、 F : 共振周波数、 k : 形状係数、 ρ : 密度、 D : 直径

さらにこれを全乾重量に対する含水率として式を次のよう変形できることがわかっており (釜口ら 2000)、

$$u = [(m - m_0) / m_0] \times 100$$

ここで、 u : 含水率、 m : 生材重量、 m_0 : 全乾重量

$$u = [1.93 \times 10^{11} / (D \times F)^2] \times 100$$

含水率は固有振動数と直径の積もしくは積の自乗の逆数と関係が深いことがわかる。この固有振動数と直径の積の逆数と実際の心材含水率との相関関係はいくつか調べられており、スギでは個体単位で $r = -0.77$ 、クローン平均値で $r = -0.84$ の比較的高い相関関係にあることがわかっている (中田 2007)。しかも、いくつかのラメートを含むクローン間の比較では、相関係数が高くなることが示されている。それでも、含水率を推定する上では十分な精度とは言えないが、多湿心材として問題のある個体もしくはクローンや家系を抽出するには十分な精度であり、非破壊的で効率も高いところが大きな利点である。ただし、携帯型の廉価な FFT アナライザが現在は製造されていないのが難点である。

繊維傾斜角 (旋回木理)

大径木であれば、動力成長錐で 3 cm 角程度の断面の樹皮から髓にいたる試験片を採取し、割裂法で繊維傾斜を測定した例がある (中川 1980)。これは、手間と供試材料の傷害の大きさから、林木育種に適用できる方法ではない。現実的な方法としては、引き裂き法とひっかき法がある (三上 1988)。引き裂き法とは、樹幹の表面部分から木部の一部を剥ぐ、もしくは切り取って樹

幹方向との関係から繊維傾斜角を測定するものであり、四角形の皮ポンチなどを利用すると比較的容易に実施できる。また、ひっかき法は引きはぎ法のように材を採取せずに、立木状態で樹皮を剥ぎ、木部を露出させ、左右に自由に動くことができるようにしたかぎ針を木部に軽く刺し、それを樹幹方向にゆっくり引くことでできる溝と樹幹方向との角度を測定するものである。このように、樹皮を剥ぐ、さらには木部の薄片を採取するので、非破壊ではないが、樹体への負担はそれ程大きくはない。しかし、いずれの手法も測定範囲は最外周、もしくは最外周から 2、3 年輪程度に限定される。

まとめ

伐倒を必要としない木材性質の測定法について、サンプル採取法を含めていくつか紹介した。こうした手法は新しい機材の開発とともに常に発展していくものであり、従来の手法に固執するのではなく、常に新たな技術の導入を心がけていく必要がある。現在、新たな手法として期待されるのは、赤外線分光法である。これは、サンプル採取を必要とするので非破壊ではないが、ポンチ、成長錐などで若干のサンプルを採取し、赤外スペクトルアナライザーで分析するだけで、生物学的な性質から理学・力学的性質まで複数の性質を同時に評価できる (Fujimoto et al. 2010)。もちろん、測定に先だって十分な予備試験を行い、検量線を作成する必要があるが、新たな評価システムを構築できる可能性を示唆するものである。

新たな機材の開発によってめまぐるしく移り変わっていくのがこの分野であり、旧来に固執するのではなく、常に新しいものに目を向けておかなければならない。

引用文献

- 藤澤義武・柏木 学・倉本哲嗣・平岡裕一郎 (2005) FAKOPP による立木ヤング率評価手法のヒノキへの応用 . 九州森林研究 58: 142-143
- Fujimoto T, Kurata Y, Matsumoto K, Tsuchikawa S (2010) Feasibility of near infrared spectroscopy for on-line multi-traits assessment of sawn lumber. Journal of Wood Science 56: 452-459
- 釜口明子・中尾哲也・児玉泰義 (2000) 横打撃共振法によるスギ立木の心材含水率非破壊的推定 . 木材学

- 会誌 46: 235–241
- 小泉章夫・上田恒司 (1987) 生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究. 北海道大学農学部演習林研究報告 44: 1329–1415
- 三上 進 (1988) カラマツの材質育種に関する研究 – 旋回木理の遺伝的改良 –. 林木育種センター研究報告 6: 47–152
- 中田了五 (2007) スギの樹幹内水分分布の変異とその変動要因に関する研究. 林木育種センター研究報告 23: 121–254
- 名波直道・中村 昇・有馬孝禮・大熊幹章 (1992) 応力波による立木の材質測定 (第1報) 測定方法と応力波の伝播経路. 木材学会誌 38: 739–746
- 中川伸策 (1980) カラマツの母樹とクローンの繊維傾斜度の関係. 林業試験場研究報告 312: 21–43