

## 木材の密度について

藤原 健

## 1. はじめに

密度とは、一般的には単位体積当たりの質量で表される物理量で、質量と体積を測定し、質量を体積で除算することで求めることができる。木材利用の面では、密度が強度的な性質や物理的な性質と関連するため、材料試験の際には必ず測定される項目の一つである。一方、林木のバイオマスや炭素蓄積量を材積から求める際にも木材の密度が用いられる。

木材の密度は、測定される木材の含水率条件によって変化するため、いくつかの種類に区分されている。密度の測定値を得るあるいは密度値を何かの計算に使うという場合には、適切なものを選ぶ必要がある。本稿では、木材の密度に関わる因子やよく用いられている密度の種類などについて概説する。

## 2. 木材の密度を支配する因子

木材の質量とは、木材試料の重さであり、木材そのものの質量に木材中に含まれる水の質量を加えたものである。木材そのものの質量は、木材の細胞壁の量で決定される。木材の細胞壁の密度（真密度）は、約  $1.5 \text{ g/cm}^3$  で、樹種によらずほぼ一定とされている。このため、木材の密度は、木材を構成する細胞の大きさや細胞壁の厚さに支配される細胞壁の割合で決まり、木材の組織構造の違いが樹種による密度の違いとして現れる。すなわち、木材を構成する細胞の直径が大きく細胞壁が薄い樹種では、空隙の比率が高くなるため密度が低く（写真1左）、細胞の直径が小さく細胞壁が厚い樹種では、細胞壁の比率が高くなるため密度が高いことになる（写真1右）。一方、木材中の水の質量は、その木材の状態

や置かれた環境により異なる。伐採したばかりの木材中には、多量の液体の水が含まれており、材中の水の質量が木材そのものの質量を上回ることも少なくない。木材の乾燥が進むと、材中の液体の水は減少し、ついには液体の水が存在しない状態に至る。この時点での含水率を繊維飽和点といい、樹種によらず約 30% とされている。このように材中に液体の水が存在しない状態が気乾状態である。液体ではない水は、材の細胞壁と結合した状態で存在するため、結合水と呼ばれている。結合水の量は、木材が置かれた環境の気温や相対湿度と平衡するため、気温と相対湿度の変化に応じて変化する。したがって、気乾密度は試料がどのような温湿度環境に置か

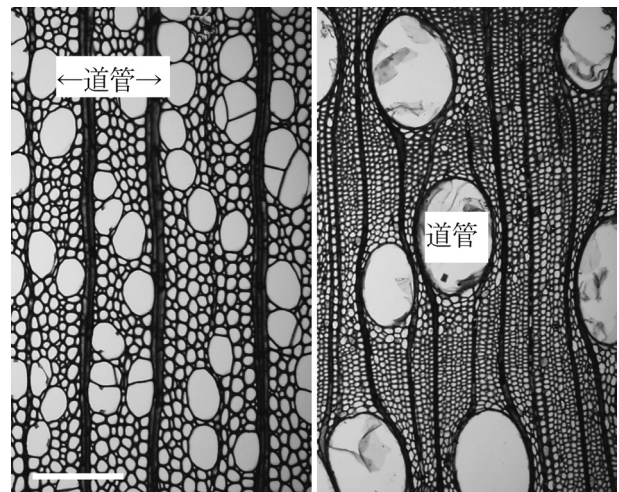


写真1 ホオノキ（左）およびユーカリの一種（右）の木口切片（左下白線のスケールバーは  $200 \mu\text{m}$ ）ホオノキは細胞の内腔が占める割合（空隙）が多く、ユーカリでは道管以外は細胞壁が占める割合が大きい

れていたかによって変化する。

木材の性質の一つに、木材の含水率の変化によって収縮あるいは膨潤するというものがある。水分を吸収すると細胞壁が膨潤し、水分を放出すると細胞壁が収縮する。このような膨潤および収縮は繊維飽和点以下の含水率の範囲で生じる。樹種によって差はあるが、概ね密度が高い樹種では収縮率が大きい。このように、木材の含水率が変化することによって質量とともに体積も変化するため、どのような含水率状態のときの質量と体積を用いるかによって同じ試験体であっても異なる密度値が得られる。

### 3. 木材の密度の種類

木材の密度は木材中の水分状態によって変化するため、密度を求めるときの木材の水分状態によって、全乾密度、気乾密度、容積密度数などと区別されている（表1）。全乾密度は、水を含まない全乾状態における質量と体積から求めている。気乾密度は、気乾状態での密度であるが、多くの場合、特定の温度湿度環境下で平衡した状態で測定されている。容積密度数は、全乾質量を生材体積で除したものを  $\text{kg/m}^3$  で表したものである。

これらの密度のうち、気乾密度は主に木材の物理的性質や強度的性質との関係を検討する際に用いられており、木材の性質に関連する分野では最も一般的に用いられている。容積密度数は、全乾質量を生材体積で除したもので、生材の材積あたりの木材の重さを求めるときに用いられるため、特に近年は国

家温室効果ガスインベントリや REDD プラス（途上国の森林減少及び劣化に由来する排出の削減等）において、森林の炭素蓄積量を計算するためのパラメータの一つとして重要性が増している<sup>1,2)</sup>。なお、京都議定書第2約束期間における木材製品の炭素量を計算するルールが決まったため、気乾体積あたりの全乾質量で求める密度値の必要性が増しているが、これについてはこれまで測定例がほとんどない状態である。

### 4. 木材の密度の測定法

木材密度を計算するためには、木材の質量と体積がわかればよい。JIS や ISO など木材の試験方法を規定した規格<sup>3,4)</sup> では、体積を求めやすい直方体の試験体を用いて寸法を測定して体積を計算し、測定した質量を除算して密度を求める方法が採用されている。直方体の試験体を作ることができれば、天秤とノギスがあれば質量と体積が測定できるので、比較的測定が容易な形質であるといえる。

生材体積あたりの全乾質量である容積密度数は、試験方法を定めた規格でも体積測定さえできればどのような形であってもよいとされているので、試験体の加工に精密さは要求されない。樹幹から採取した円盤や円盤を鉋で割った扇型の試験体でも測定できる。このような不定形の試料の体積測定には水を使っている。水中に物体を沈めるとその物体の体積分だけ水の体積が増えるというアルキメデスの原理を利用している。この水を使った木材試料の体積の測定法にはいくつかの方法があるが、水の入った容器の側面や底面に触れないように試料を水中に完全に沈めたときの、①容器内の水の体積増加を測定する、②容器内の水の質量増加を測定する、③試料に働く浮力を測定する、の3種類のいずれかの方法がとられている。②の方法は、水を入れた容器を天秤にのせて質量を測定したのち、容器に触れないように試料を水没させて再度質量を測定してその増加分が試料と同体積の水の質量であることを利用している。③の方法は、試料の空気中での質量と水中での

表 1 木材における密度の種類と計算方法

密度	計算方法
全乾密度	$r_0 (\text{g/cm}^3) = \frac{\text{全乾質量 (g)}}{\text{全乾体積 (cm}^3)}$
気乾密度	$r_w (\text{g/cm}^3) = \frac{\text{気乾質量 (g)}}{\text{気乾体積 (cm}^3)}$
容積密度数	$R (\text{kg/m}^3) = \frac{\text{全乾質量 (g)}}{\text{生材体積 (cm}^3)} \times 1000$

質量の差が試料に働く浮力に相当し、それが試料と同体積の水の質量と等しいことを利用している。体積測定のとくに、オープンを用いて 103℃ で試料を乾燥し（重量が安定するまで、含水率にもよるが通常 2~3 日）、乾燥後に測定した質量を体積で除算すれば容積密度数が求められる。

なお、生態学のバイオマス調査では、従来、試料を乾燥するオープンの温度は 80℃ 前後と低く目に設定されることが多い<sup>5)</sup>。80℃ と 105℃ の乾燥重量の差異は 1~数 %<sup>5)</sup> といわれるが、比較の際には注意が必要である。

### 5. 木材の密度の変動について

密度の樹体内変動は、とくに髄から樹皮にかけての半径方向の分布については、多くの樹種について測定されている。多くの針葉樹樹種では、髄周辺つまり若齢時に形成された材（未成熟材）の密度はそれよりも樹皮側の材（成熟材）に比べて密度が低い傾向にある。このような場合、若齢個体の平均密度はより高齢な個体の平均密度に比べて低いことになる。しかしながら、スギやヒノキなどのヒノキ科の樹種では、髄周辺の密度が高いものがあり、これらでは若齢木の密度が高くなるという逆の傾向を示すものがあることに注意が必要である。一方、ナラ類など広葉樹の環孔材の場合は、成長期の初めに大きい道管ができるため年輪幅が狭くなるにつれて密度が低くなり、成長の旺盛な髄周辺の材の密度は年輪幅の狭い樹皮側に比べて高い個体が多い。それに比べて、カシ類など放射孔材やブナなど散孔材の密度は、髄からの距離や年輪幅と関係を示さないことが多い。

林分レベルの変動については、一般に木材の密度に及ぼす林齢や地域の影響は明確ではなく、筆者らが日本産の針葉樹 10 種 572 個体および広葉樹 50 種 440 個体について、容積密度数の測定を行い、プロット数及び測定個体数が多い 14 樹種について平均値を比較した結果、地域別に有意差はなく、20 年生未満及び以上に区分して求めた平均容積密度数

にも有意差が認められなかった<sup>1)</sup>。

### 6. 密度の参考値

主要な樹種については、木材工業ハンドブックや Wood Handbook などのハンドブックに気乾密度や容積密度数が収録されている。しかしながら、有用樹種や現時点では未利用であっても人工木材として有効利用が見込める樹種を除いて木材利用の分野ではあまり密度の報告例がないのが実態である。樹木の炭素蓄積量や成長量などを扱う分野の方が容積密度数の測定例が多いように思われる。“Basic density” などと入力して検索すると多くの論文やデータベースがヒットする。データベースの場合、データの出典（論文）が明示されていれば引用元文献をあたることによって、測定条件等を確認の上、その値を用いることができるが、出典が明らかではない場合には、参考値にとどめた方がよい。データベースとしては、熱帯地域の材については FAO や ITTO のサイトに掲載されている電子版（閲覧のみ）やデータがダウンロード可能な Global Wood Density Database<sup>6)</sup> 等が参考になると思われる。

〔引用文献〕 1) Fujiwara, T., Yamashita, K. and Kuroda, K. (2007) Basic densities as a parameter for estimating the amount of carbon removal by forests and their variation. Bulletin of FFPRI 6 : 215-226. 2) IPCC (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. 3) 日本工業標準調査会 (2009) JIS Z2101 : 2009 木材の試験方法. 4) ISO (1975) ISO 3130 : 1975 Wood-Determination of density for physical and mechanical tests. 5) 木村 充 (1976) 植物群落の生産量測定法, 共立出版, 112pp. 6) 森林総合研究所監修 木材工業ハンドブック改訂 4 版, 丸善 2004. 7) Zanne, AE., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, DA., Ilic, J., Jansen, S., Lewis SL, Miller, RB., Swenson, NG., Wiemann, MC. and Chave, J. (2009) Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Dryad Digital Repository. doi:10.5061/dryad.234