解 説

《バイオニックデザイン—I》

木材組織の秘めたるもの

榊 原 彰*

1. はじめに

樹木の重量は一般には数トン程度であるが、レッドウッドあるいはジャイアントセコイヤのような木は数千トンに及んでいる。樹木の中で世界最大なものは、カリフォルニアの“シャーマン將軍”と名づけられているセコイヤらしい。その重量は約6千トンと推定されている。このような巨大な樹体が風雨に耐えて、数千年も生きのびてきたのは、それを構成する物質と、物理的な構造がきわめて合理的であることを意味している。しかも、それはたんに静的状態で強度を保持しているだけではなく、樹木が何らかの原因によって傾斜すると、それを補正するように樹体内で構造の変化を起こし、長時間をかけて本来の垂直な形状を保つようにする。この働きは横に広げられた枝を保持する機構と同じものである。ここでは樹木の組織がどのような構造であり、それが強度的性質にどのように寄与しているか、また樹体が傾いたようなとき、どのような対応がなされるかについて簡単に述べてみたい。

2. 木材の強度的特性

樹木から側方に長く張り出した枝に多量の雪が積もっても、それに耐えられるというのは、曲げに対する力が非常に強いことを示す象徴的な現象といえるだろう。このような木材について、その物理的な性質の特徴をひらいてみると、次のようになる¹⁾。

1) 木材の比重は一般に、0.3~0.8の範囲にあり、他の材料に比べて著しく軽い部類に属する。

2) 木材の繊維方向に引張り、圧縮、曲げなどの力を加えたとき、その強さは相当に大きく、変形量は小さい。そのうえ木材は比重が小さいから、同一質量あたりの強さは非常に大きなものとなる。繊維方向の各種の強

さのうち、引張り強さが最も大きく、次に曲げ強さとなる。圧縮強さは引張り強さの $1/3 \sim 2/3$ 程度である。さらに、剪断強さは圧縮強さに比べても非常に小さい。また、繊維直角方向のヤング率や、引張り強さの値は繊維方向の $1/10 \sim 1/20$ である。すなわち、極端な異方性を有している。

木材は粘弾性体で、一定荷重が加えられると、変形が時間とともに増加するクリープ現象を示すが、他の高分子物質に比べて、クリープ量は小さい部類に属する。しかし、クリープ過程で含有水分量が変化すると、クリープ量が著しく増加する。

3) 木材の熱による膨張は、繊維方向の場合、他の材料に比べて非常に小さく、一方、繊維直角方向では、繊維方向の10倍程度である。

木材は多孔性物質であるから熱伝導率が小さく、したがって断熱性や保温性にすぐれている。

4) 乾燥した木材は低い電気伝導率を示し、すぐれた絶縁体である。しかし、電気伝導率は含水率の増加とともに著しく増加する。また、木材の誘電率は乾燥状態では低い値を示すが、含水率の増加とともに増加する。さらに、木材中に存在するセルロース結晶のため、圧電効果を示す。

5) 木材が楽器用材として使用されるのは、比重の割に弾性率が高く、内部摩擦による振動の減衰が比較的小さいためとされている。木材はコンクリートや大理石に比べて吸音率が高く、吸音性がよい。

3. 木材の組織構造

このような木材の物理的な特性が何に起因するのかを知るには、まずその組織構造をしらべてみる必要がある。木材は多数の細胞の集合体であるが(図1左)、その大部分を占めているのは、針葉樹では仮道管、広葉樹では繊維細胞である。そして、これらはほとんどが中空の死んだ細胞で、細胞壁と内腔から成っている。つま

* Akira SAKAKIBARA : 北海道大学名誉教授

図1 樹木（マツ）の断面図と年輪の拡大図

図2 針葉樹仮道管の模式図

P: 1次壁, S₁: 2次壁外層, S₂: 2次壁中層, S₃: 2次壁内層, ML: 細胞間層, W: イボ状構造, L: 空隙

り、全体としては空隙の多い多孔質である。しかも細長い中空の仮道管、あるいは繊維細胞は管径が同一ではなく、細胞壁の厚い、直径の小さな晩材（夏材ともいう）と、細胞壁が薄い、直径の大きな早材（春材ともいう）とから成っていて、それが図1右のような年輪を作っている。つまり、疎密の同心円筒を構成しているので、強度的にはきわめて合理的な形をとっているわけである。いわば、細い竹筒から順に外側に太い竹筒をはめていったようなものでもいえるだろう。

次に個々の仮道管あるいは繊維細胞の構造をみてみよう。図2は針葉樹仮道管細胞の模式図である。その長さは、ほぼ1.5~5cmで、直径20~60 μ m、壁厚は早材1.5~3 μ m、晩材3~6 μ m（広葉樹の繊維細胞では、長さ1.0~1.5cm、直径10~40 μ m、壁厚1.5~5 μ m）であるが、それぞれ樹種によってかなり変動がある。このような木繊維の細胞が相互に細胞間層という膜層によって接合されている。しかも、細胞壁は単一層ではな

く、図2のように4層からなり、おのおのの厚さや、構成している物質の量や配列が異なっている。各壁層が網目状あるいは縞状になっているのは、セルロースの長鎖分子が束になっているマイクロフィブリルという微細な糸の配列状態を示したものである。セルロース分子は非常に重合度の大きな（D.P. 2,000~12,000）直鎖状高分子であるが、天然に存在するものは例外なく、このような整列した結晶状マイクロフィブリルの形態をとっている。それはセルロース分子が水酸基に富み、側方において相互の鎖分子が水素結合により、固く結びつく性質があるためである。そしてこの微細なマイクロフィブリル自体もさらに束状になり、木材の場合、50~100 $\text{\AA}$ 程度のフィブリルとして存在している。その引張り強さは、100kg/mm²というきわめて強いものである。このようなフィブリル状のセルロースが各壁層を構成しており、それを固めているのがリグニンという物質である。リグニンは無定形のポリフェノール重合体であり、いわばフェノール樹脂と考えてもよい。したがって、セルロース・マイクロフィブリルとリグニンの関係は鉄筋とそれを固めるセメントに似ており、鉄筋コンクリートのようなものである。またはガラス繊維を埋め込んだ強化プラスチックといってもよいであろう。

しかも、各層は一樣ではなく、最も厚い2次壁中層（S₂）を構成しているマイクロフィブリルは、繊維軸にはほぼ平行して（18°）直線的に配向している。その厚さは1~5 μ mと、かなり変動が大きい。その理由は、春期の成長が活発なときに形成されたものはこの部分が薄く、細胞全体としては大型となり（早材）、夏期の成長が鈍化したときは細胞直径が小さいけれど2次壁中層は厚くなる（晩材）ためである。その内側の2次壁内層（S₃）は非常に薄く、約0.1 μ mで、最外層の1次壁（P）と同程度の厚さである。ともにフィブリルの配向は比較的ランダムな網目をなしている。2次壁外層（S₁）は厚さ約0.2 μ mで、フィブリルの配向は繊維軸に対して40~50°の角度で、直線状に交叉している。このように、それぞれフィブリルの配向を異にする各層が仮道管または繊維の細胞壁を構成しており、これら各細胞を接合しているのが、リグニンとヘミセルロースのマトリックスである。

図3は細胞壁中におけるマイクロフィブリルを、リグニンとヘミセルロースからなるマトリックスで固めている状態を模式的に表わした Goring ら²⁾の模型である。ヘミセルロースのある部分は、マイクロフィブリル外側を覆っており、セルロース分子と同方向に配列していると仮

定されている。

ヘミセルロースは多糖類の一種で、セルロース分子のような高分子ではなく、重合度は200~300程度である。その種類は針葉樹、広葉樹の間で相違があり、広葉樹ではキシランが主体、針葉樹ではグルコマンナンとキシランが主要成分で、構造上にも若干の相違がみられる。一般に側鎖を有しているため、結晶構造を作りにくく、無定形で存在している。

4. 木材の強度

すでに述べたように、木材の細長く、中空の細胞は幹

図3 木繊維細胞壁中におけるセルロースフィブリル、ヘミセルロースおよびリグニンの配列状態の模型 (Goring による)

に沿って一方に配列しており、それぞれは直径、壁厚の違いによって疎密の層が交互に円心円筒を作っている。この形態は強度的にきわめて合理的なものといえよう。しかも、各細胞壁を作っている化学成分はたんなる混合物としてではなく、鉄筋コンクリートのように効果的な構成をしている。こうした構造が木材の強度的特性を作っている要因である。それでは、木材は具体的にどんな強度を有し、それが他の材料に比較してどのような特色があるかということになるが、それを表1³⁾に示した。木材の代表として針葉樹のスプルース (唐松) が挙げられているが、もちろん、樹種によって強度の変動は大きい。しかし、大まかな傾向はわかると思う。

この表によると木材の引張り強さは、ほぼ中程度であるが、比引張り強さは在来他の材料よりはるかにすぐれている。もっとも、最近の合成樹脂のあるものは別格である。ヤング率は他の物質と比較すれば中程度以下であるが、その重量あたりの強さではアルミニウム、鋳鉄および銅に近い。曲げ剛性が大きいのは木材の特徴の一つである。圧縮強さは木目方向に対してはかなり大きい。その垂直方向は非常に弱い。これは木材が極端な異方性をもっているからである。木目方向なら重量あたりの強さでは、コンクリートや鋳鉄よりもはるかに大きな値を示す。

このように木材は重量あたりの強度が著しく大きいのが特徴で、それは前述したような組織構造、および木材化学成分の細胞壁への合理的沈着によるものである。

表1 木材と他の材料間の強度比較

材 料 名	比 重	引張り強さ (MN/m ²)	比引張り強さ (MN/m ²)	ヤング率 <i>E</i> (GN/m ²)	比ヤング率 <i>E</i> /比重 (GN/m ²)	圧縮強さ (MN/m ²)	比圧縮強さ (MN/m ²)
木材 (スプルース)	0.46	104	226	10	22	37	80
コンクリート	2.5	4	2	48	19	69	28
ガ ラ ス	2.5	50	20	69	28	50	20
アルミニウム	2.8	247	88	69	25	—	—
鋳 鉄	7.8	138	18	207	26	120	15
鋼 (0.06%炭素)	7.9	459	58	203	26	800	101
ABS	1.1	50	45	3	3	50	45
PVC	1.5	59	39	2.4	1.7	55	37
ポリエステル樹脂(布)	1.8	276	153	18	10	270	150
エポキシ樹脂 (方向性を もたせた糸)	1.8	1,100	611	45	25	400	222
CFRP	1.5	1,040	693	180	120	1,040	693

5. 生きている樹木の動的な強度対応（アテ材の形成）

これまで述べてきたことは、樹木から木材として取り出してきたものについてであった。しかし、樹木は生物であるから、立木の状態でもっと複雑な環境対応がある。樹木の総重量はきわめて大で、直立している正常な立木でも、それを支えるには相当な強度を必要とする。そのうえ、風雨に暴されると、その荷重はいっそう苛酷なものとなるだろう。また、何らかの原因で樹体が傾いたような場合、その重量はテコの効果からはなはだしく高められるであろう。樹木はたんに自重を支えるだけではなく、このような傾斜を余儀なくされた場合に、姿勢を元に戻すために動的な対応が樹木内でなされる。これがピサの斜塔とは決定的に異なるゆえんである。すなわち、地すべりなどで幹が傾斜したとき、樹木内部にアテ材という新たな組織が形成される。ところで、マツやスギのような針葉樹とナラやブナのような広葉樹では、アテ材の形成される場所も、アテ材中に生成する物質も異なっている。アテ材の形成は傾斜幹のみではなく、枝のつけ根にも生ずる（図4）。この状態は枝打ちをした樹木の切口をみればよくわかる。図4の断面図に示したように、針葉樹の場合は年輪の中心が上方に偏っているが、それはアテ材が下方に形成されるからである。広葉樹の場合は逆に年輪の中心は下方にあり、アテ材は上側に形成されている。もし、この切口が新鮮なものであれば、針葉樹の場合（圧縮アテという）、下部のアテ材は暗色を呈しており、広葉樹の場合（引張りアテという）は上部が銀白色をしているはずである。

アテ材を異常材あるいは欠点材と称しているが、これは樹木にとっては決して異常なものではなく、その形成はきわめて健全な働きで、合理的かつ巧妙な対応の結果なのである。木材を扱う関係者がアテ材の入った木材を嫌うのは、乾燥するとねじれたり、割れやすくなるので、建築材あるいは家具材には不適当なためである。木を伐倒するとき、“悪い木に当たる”ということから、“アテ”という通俗の呼び名が生まれたという説もあるくらいである。しかし、樹木にとってはまさに健全材で、このような対応ができなければ、それは欠陥材というべきだ。

傾斜地に生えている樹木の幹には、ほとんど例外なくアテ材がみられる。この現象は植物の屈地性という性質によるもので、植物は水平に保たれていると、上部先端は上方に向かって屈曲し、姿勢を垂直に立て直そうとす

図4 圧縮アテ材（針葉樹）と引張りアテ材（広葉樹）の形成位置とその断面図

る。このとき、首をもたげるために、それを支えるに十分な強度が必要になってくる。その補強作用に加えて、積極的に曲がった幹を押し上げる作用がアテ形成の意義である。ところが面白いことに針葉樹と広葉樹では、その対応がまるで正反対なのである。

6. アテ材の化学成分

針葉樹のアテ材は濃色で、他の部分とははっきり区別でき、材質は非常に硬い。正常材のリグニン含量は25～30%であるが、この圧縮アテ材では40%あるいはそれ以上含まれている。木材繊維を構成している細胞壁はセルロース・ミクロフィブリルが鉄筋の役目、リグニンがセメントの役目を果たしていることは前述のとおりである。リグニンはフェノール樹脂に似ており、圧縮に強いのであるが、このようなリグニンが傾斜している幹や枝の下側部に多量に沈積すれば、傾斜幹や枝を支えるための合理的補強剤となるのはいうまでもない。つまり、針葉樹のアテ材は圧縮力の働く部分に生ずるから、圧縮アテ材といわれているのである。

しかも、圧縮アテ材のリグニンは、正常材のリグニンとその化学構造を異にしている。この部分のリグニンをNMRスペクトル、過マンガン酸カリ酸化分解物等によってしらべた結果、正常材のリグニンに比べて、構造単位間の結合様式に、炭素-炭素結合が著しく多いことが

わかった⁴⁾。正常材のリグニンではこの種の結合型（縮合型といっている）が約 50% であるのに対し、圧縮アテ材のリグニンでは 80% 近い値を示したのである。このことは圧縮アテ材のリグニンは、より強固な結合様式で高分子を構成していることを示しており、それは圧縮に対する抵抗力が大きいことを意味する。

一方、広葉樹の場合には、傾斜部分の上側部に多量のセルロースが生成され、高度に結晶状態のセラチン層を形成する。アテ材の度合によっても異なるが、引張りアテ材のセルロース含量は 1.5~2 倍も多い、それで圧縮アテ材とは対照的に、このセルロース層は白っぽい色をしている。セルロースの抗張力は前述のとおり、きわめて強いので傾斜部分の上部にあれば、傾斜幹を引張りによって保持するのに好都合である。枝に対しても同様で、それが引張りアテ材という名称の語源である。このように同じ樹木でも、針葉樹と広葉樹では外力に対して、まったく反対の機構によって対応している。

アテ材中に存在するヘミセルロースの構造も、正常材のそれとは異なっているが、この場合ヘミセルロースが強度的にどのような関わりがあるのかはまだ不明である。

7. 樹幹内における内部応力

垂直に立った正常な樹木は図5(右)⁵⁾に示したように、樹幹内部では外側部には引張り、中心部では圧縮応力が働いている。これは種々の手段で測定されており、応力分布は、樹皮側の約 1/3 の部分が引張り、樹心側約 2/3 が圧縮となっている。これは、樹木の幹が生長期ごとに肥大生長をし、新しく形成した木材部には生長に起因する歪みが生じ、それに相応する応力が発生するからである。この応力が年々累積して、幹の内部にはかなり規則的に変動する応力分布が生ずる。このような樹幹が太る生長に関連して、幹の内部に生ずる応力を生長応力と呼んでいる。このような応力分布をもった構造体は強度的に有利であると思われる。風に対して弾力的な抵抗を示すのは、このような内部応力が関与しているからであろう。

ところが、環境によって樹木が傾斜すると、直立した幹内に存在する生長応力は著しい変化を受ける。針葉樹の傾斜幹の内部では、下側部に圧縮アテ材が形成されて圧縮を受けるが、そのために幹が引き起こされるから、反対側材（上側部）においても圧縮応力が働くことになる（図5左）。強化ガラスの両面は圧縮力、中心部は引張り応力が働いており、それによって通常の板ガラスより

図5 正常材と圧縮アテ材中に存在する応力⁵⁾

図6 若木を人工的に曲げたときに形成されたアテ材

G: 針葉樹, A: 広葉樹, CW: 圧縮アテ材, TW: 引張りアテ材. 矢印はループ切断後に働く力の方向。

もはるかに大きな強度が与えられるように、樹木の幹内における、このような応力の分布が、その強度をいっそう高めているものと思われる。

8. アテ材形成の機構

アテ材形成の機構をさぐるため、興味ある実験がなされた⁶⁾。樹木の枝や幹を人工的に圧縮したり、引張ったりすると、その部分に、対応する圧縮アテ材や引張りアテ材が形成されるだろうか、というのである。

図6は若木をループ状に丸め、しばらく放置した後、ループ内のアテ材形成をしらべた実験である。針葉樹(G)の場合、驚くべきことに、ループ外側で引張られている部分にも圧縮アテ材が形成されたのである。すなわち、圧縮アテ材は外部からの圧縮と引張りとは関係なく、幹または枝の下側、いいかえれば重力の働いている方向に形成されることがわかったのである。広葉樹(A)の場合には、その逆で、引張り、圧縮に関係なく材の上側、すなわち重力の反対側に引張りアテ材が形成された。図6の右はアテ材形成後、ループを切断すると、伸

張、収縮が矢印の方向に起きたことを示している。このような人工的な状況は、自然の樹木にはほとんど起こりえないであろうが、引張りと圧縮は同一部分に対して、同じように働いていることがわかる。

圧縮アテ材が形成される内部的因子は、生長ホルモンであるオーキシンの影響によることが明らかにされている。事実、傾斜していない幹にオーキシンを与えると、その場所にアテ材ができるのである。

しかし、引張りアテ材については、まだ明らかにされていない。おそらく圧縮アテ材とは違った、別な機構が働いているものと思われる。

アテ材の形成は樹木に限られ、草本類にはみられない現象である。灌木やブドウのようなものにも形成されない。つまり、大型の樹体を支える必要のあるものに限られ、ついで他の物体に巻きつくような植物には不必要な対応である。というよりも、通常の樹木のうち、生きてゆくうえで合理的な対応ができるような突然変異を起こ

したものが、生き残ったとでもいうべきだろうか。このように樹木というものは、静的状態で合理的に対応しているだけでなく、環境の変化に対して動的な対応をしていることがわかる。

参 考 文 献

- 1) 伏谷賢美：木材の物理，文永堂，東京（1985），pp. 1-3.
- 2) K. Ruel, F. Barnard & D.A.I. Goring : *Wood Sci. Technol.*, 12 (1978), 287-291.
- 3) J.M. Dinwoodie : *Timber*, The Trinity Press, London (1980), p.140.
- 4) 諸星紀幸，榊原 彰：木材誌，17 (1971)，393-399, 400-404.
- 5) W. Knigge : *Forstarchiv*, 29 (1958), 4-10.
- 6) A.B. Wardrop & G.W. Davis : *Cellular Ultrastructure of Woody Plants*, ed. by W.A. Côté, Syracuse Univ. Press, Syracuse (1965), pp. 371-389.

解 説

傾斜機能材料——宇宙機用超耐熱材料を目指して

新野 正之^{*}，平井 敏雄^{**}，渡辺 龍三^{***}

1. 傾斜機能概念の誕生

1.1 宇宙往還機実現の鍵を握る超耐熱材料開発

21世紀に向けた宇宙往還機（スペースプレーン）あるいは、核融合炉の実現には、苛酷環境に耐えうる構造材料、とりわけ高温環境下で使用される超耐熱材料の開発が、その成否を左右する重要な鍵となる。これら構造体の使用想定温度は後述するようにもはや金属材料では対応しきれない温度領域に達しており、その結果、耐熱性の高いセラミックス材料と構造材料としての金属材料とを組み合わせた技術が不可欠になる。

以下に現在計画されている、宇宙往還機開発を例に超

耐熱材料が占める重要な位置についてふれ、傾斜機能材料に対する期待の大きさについて述べる。

1986年のスペースシャトル・チャレンジャー号の爆発事故以来、これからの宇宙輸送体系では、人と貨物は分離して輸送したほうが安全であり、かつ経済的にも優れているという考え方が世界的な潮流になってきている。

わが国でも宇宙開発委員会の長期政策懇談会において、21世紀初頭には日本が世界における宇宙開発で、よりいっそう大きな役割を果たすべきだ、との考え方に基づき、多岐にわたる研究開発プロジェクトを打ち出した¹⁾。宇宙往還機の開発はそのなかでも根幹となるべき計画で、2000年までに3兆円という巨費を投じる必要があると提言している。

図1にNALの計画する宇宙往還機概念図²⁾を示す。機体、推進システムともに再使用が可能で、普通の航空機と同じように飛行場から水平離着陸でき、空気吸込みエンジンとロケットエンジンを組み合わせた多重モード

^{*} Masayuki NIINO : 航空宇宙技術研究所角田支所 (989-12 角田市君萱字小金沢 1), ^{**} Toshio HIRAI : 東北大学金属材料研究所 (980 仙台市片平 2-1-1), ^{***} Ryuzo WATANABE : 東北大学工学部材料加工学科 (980 仙台市荒巻字青葉)