

論壇

木と木材とセルロース

セルロース学会名誉会長・東京大学名誉教授
岡野 健

辺材と心材

「木(き)」と「木材」は若干違う。「木」は身近にあって、老若男女誰もが知っていて、多くの人の飯のタネでもあるのに対し、「木材」はやや改まっていて、利用・研究の対象なのである。したがって大学の講義は、木の組織学、木の物理学、木の化学ではなく、木材組織学、木材物理学、木材化学なのである。筆者は東京大学農学部を定年退職し、財団法人日本木材総合情報センター「木のなんでも相談室長」になって、「木」と「木材」の違いを感じるようになった。

まずはあまり知られていない「木材」について記す。学術的には、樹皮の内側にあって髄を除いた部分を木部と言う。木部は図 1 に示したように樹皮に近い辺材とその内側の心材とから成り立っている。心材は辺材が変化したものだが、木材としても樹木の生理的役割でも両者には大きな違いがある。



図 1 スギ丸太の木口断面

樹木は光合成に不可欠な水を根から吸い上げ、重力に抗して数 10 メートルの、時には 100 メートルを超す高所の葉まで送っているが、その機能を担っているのは辺材に限られていて、針葉樹では木部の約 95% を占めている仮道管、広葉樹では道管に依る。広葉樹での道管の比率は 5% に満たないものから 50% を超えるものまで樹種によって大いに異なる。特異なことは仮道管も道管も原形質を失った死細胞なので、したがって水分移動は材の組織構造に依存した物理現象であって、生きた細胞（原形質を持った細胞）の関与はない。もちろん、根と葉、すなわち水の入り口と出口には生きた細胞があって、根圧で押し上げ、蒸散で引き上げることによって水は樹を昇る。ライフル銃で撃ち落とした高所の枝の切り口では水は負圧だったから、蒸散が主流であることも分かっている¹⁾。心材の役割は樹体を支持することである。木材はその樹種に固有な色、香り、耐朽性、耐蟻・耐虫性などを持っているが、それら樹種特性は心材化によって獲得されるものであり、辺材での特性の差は小さい。辺材の死んだ

細胞といっても細胞壁に過ぎないが、それが樹種に固有な耐朽性や色を獲得する心材化は極めて興味深い。人為的な心材化は夢のまた夢である。

木材の構成細胞＝要素（原形質を失った細胞を含めるので要素と呼ぶ）は二つのグループに大別される。一つは仮道管や道管など両端のどがった紡錘形細胞、他の一つは末端壁を持つ煉瓦様の柔細胞である。どちらも木部形成層で作り出されるが、紡錘形細胞が分化して1～2週間で原形質を失うのに対し、柔細胞は原形質を失うことなく数年から十数年生き続ける。そしてあるとき突如としていわゆる心材化物質を作り出して周辺の紡錘形細胞壁中に拡散させ、自らも心材化して生命を閉じる。柔細胞の活動＝心材化物質を作り出す酵素活性化のきっかけは何なのかは不明である。

2003年、『木とつきあう智恵』という訳本が地湧社から出版された。原著者はオーストリアの林業家エルヴィン トーマ氏、訳者は宮下智恵子氏で、冬の新月に伐採した木は腐朽しにくく、狂いも少ないというものだった。話題の原著者は林業者に招かれて「新月伐採」について講演したと聞いている。当時、「木のなんでも相談室長」の私にも「新月伐採」に関する電話による問い合わせが幾度となくあった。室長といっても室員はいないので、すべての相談、問い合わせに応じるのが務めだった。「新月伐採」に対しては、「新月」には何の意味もありません、「満月伐採」でも効果は同じですと答えていた。効果は？ と問われれば「あります」と答えていた。それは先の心材化と関係していると思えたからである。

大学在職中、千葉演習林の「相ノ沢スギ見本林」の間伐材を頂き、様々な観察を行った。そのなかに材の含水率分布を調べたデータがあって、辺材が心材に変化する領域＝移行帯、通常白線帯（図2）と呼ぶ領域の含水率が極めて低かった。伐倒直後のスギ木部の含水率は、辺材部で180～200%、心材部で80%前後が一般であるが、白線帯では40%ほどに低下していた。ちなみに木材の含水率は外分比であって、内分比ではない。白線帯で含水率が低いことを、その時は気にも留めなかったが、エルヴィン トーマの「新月伐採」は冬の新月に伐採して、その木を谷側に倒し、そのまま夏を越して秋に集材するとあるので、ピンときた。谷側に倒された木は急激に葉枯し乾燥が進むはずである。辺材では含水率が急激に低下し、白線帯と類似の状態となって柔細胞が活性化したと考えれば辻褄は合う。問題は急激な葉枯で辺材の柔細胞に変化が起こっているかどうかである。



図2 乾燥直前のヒノキ製材の白線帯

京都大学農学部友人高部圭司教授（現名誉教授）によれば、北山スギで葉枯し材と未葉枯し材とを比較したらデンプンの消費量に有意な差がみられた。木を倒す方向でも差があった²⁾。したがって、オーストリアの「新月伐採」は効果があるといえるのではなかろうか。しかし、新月に伐採すること自体には意味はないが、意味がないなどと大きな声で言うつもりはない。林業の生産者の立場に立てば、補助金に頼る木材生産はやめたいし、自伐林業が可

能な世の中になることを願うからである。思えば今、木が安すぎる。読者諸賢、木の値段は最も安価な旬の大根の値段より一桁下だということを知って頂きたい。真冬になると直径 10 数 cm、長さ 40cm を超すようなみずみずしいダイコンが 1 本 100 円以下で手に入る。立方メートルでは 1.8~2.2 万円であり、種をまいて 3~4 か月で収穫される。他方、スギは皮つき丸太で立方メートル 1.2 万円ほど、立木ではその数分の 1、しかも収穫までには 20 年以上を要し、その間の作業は半端ではない。先ず地拵えをした山に 1 本 100 円の苗を植え、下草刈り、つる切りなどの世話をし、ようやく間伐である。「新月伐採」が付加価値になれば結構なことだと思う。問題は含水率が下がるとなぜ柔細胞での酵素が活性化するかであるが、私には皆目分らない。

葉枯しは辺材の含水率を低下させる効果があることはよく知られているが、長期になると問題が生じる。葉をつけたままなので、オーストリアとは異なる日本では虫害などが発生する危険が大きい。また日本では谷側に木を倒すことはしない。跳ね返りの危険があるからである。山側も滑り落ちるのでしないことになっている。「新月伐採」が山側ではなく谷側に倒すという点にも面白い話があるが、「木」の話すぎるので控える。

木材とセルロース

木材の研究で記したいのは、私のライフワークである木材の構造と性質の関係である。が、それを記す前に特記すべきは、東大理学部物理学科のポスドク西川と学生の小野が同じ学科の助教授寺田寅彦の指導下で東京数学物理学会で初めて発表した研究で、1913 年の Proceedings³⁾に掲載されている。彼らは、木材、麻、絹、竹に X 線を投射して得られた回折図（繊維図）を Bragg・寺田の式 ($2d \sin \theta = n\lambda$) で解析し、木材などの繊維物質が微結晶を有していて、それらの微結晶が繊維軸に対して配向分布していることを明らかにした。なぜそれが傑出した成果であるかといえば、X 線が回折現象を示す電磁波であるとして Max von Laue がノーベル物理学賞を受賞したのが 1914 年なので、日本の若き学徒と彼らの指導者は Laue の遙か上をいていたからである。換言すると、西川・小野は木材中で微結晶がある規則性で配列していることを世界で初めて実験的に示したのであった。

私は大学 3 年生になって所属した農学部林産学科木材材料学講座の北原助教授室の片隅に、電車の運転席を思わせるハンドルのついたボックスを見つけた。それは高電圧を発生させるトランスで、ランプのホヤのようなガラス管（ケノトロン＝整流管）と開放型 X 線発生管もあり、北原先生が木材を圧縮して X 線回折図の変化を調べた理学電機製志村式 X 線発生装置だった。私は中学時代、ラジオの組み立てに熱中したことがあったので、X 線回折装置を組み立てて、電磁波で木材を分解すれば木材糖化が容易になると思った。真空を得るための拡散ポンプ、トランスの一部巻き替えなどに経費を要したが、平井教授、北原助教授は共に快く(?) 応じて下さった。いよいよ X 線の発生が確認された段階で、両先生は私に木材の分解ではなく構造解析を勧めた。分解など出来るはずがないことを承知していたからであろう。

当時、偏光顕微鏡による観察で木材細胞壁が層状構造物であり、さらに TEM(透過型電子顕微鏡)や SEM(走査型電子顕微鏡)による観察で、層はセルロースマイクロフィブリル (CMF) から

成り立っていることが明らかにされた⁴⁾。他方、X線を回折するセルロース微結晶はミセルと呼ばれ、CMFとの関係は必ずしも明確ではなかった。今から思えば、ミセル=セルロース結晶の構造について重大な誤認があった。それは、結晶単位胞が誤っていたのである。

私がX線回折で調べた最初の木材は千葉演習林に生育していた137年生のアカマツで、その樹体内、年輪内でのミセルの配向・分布、結晶化度などを調べた。それらは木材や繊維の力学的・物理的性質を左右する基本的な因子であったが、建築や製紙・パルプなどの木材利用分野でインパクトを与えるものではなかった。要するに、楽器用材の選別に役立つ程度であって、さしたる実用的な意味はないとされた。そんな時代、確か1974年にハワイで開催されたアメリカ化学会 (ACS) 年次大会での A. Sarko らと J. Blackwell らの2件の発表が物議をかもし、ミセル=セルロースの結晶構造が明らかになるきっかけとなった。

ACSでの二つの発表は互いに異なるものであったが、彼らの結晶単位胞はそれまでの単位胞と全く違っていた。当時の Meyer & Mark の単位胞では二つのセロビオースが互いに逆向きの配置 (逆平行鎖構造) だった。ところが、A. Sarko らと J. Blackwell らの単位胞は同じ向き (平行鎖構造) だったのである⁵⁾。

いわゆる石油化学の時代以前、生物界を支える光合成産物を対象とする研究は極めて多く、したがって早くからセルロースはグルコースが1,4結合した直鎖状分子であることは認識されていた。しかし、その直鎖状分子がどんな集合体 (高次構造) なのかは必ずしも明らかではなく、多くの考え・仮説があった。さらにはセルロース結晶が唯一ではなく、幾つかのX線回折図が得られていて、天然セルロースは Cell I、マーセル化セルロースは Cell II などがあつた。マーセル化セルロースはコットンや麻などの天然繊維 (Cell I) をアルカリで膨潤させ、水洗・風乾して得られ、その繊維は絹の風合になる。テンセルはビスコースレーヨン (Cell II) を開発した社による新しい繊維で、Cell II とは異なるX線回折図 (Cell IV) を示す。

ACS年次大会での A. Sarko らの単位格子は、セルロース分子内ならびに分子間の反発エネルギーを最小とし、且つ、X線回折図を満足する結晶構造を電子計算機で計算した結果、得られたものだった。彼らの計算結果では、Cell I が平行鎖、Cell II が逆平行鎖だった。Cell II のデータはマーセル化セルロースだったから、繊維が繊維の形態を保ったままで分子鎖が一本おきに逆転するなど起こり得るはずがないと散々だったと聞かされた。その後、ニューヨーク州立大学で A. Sarko と同じ College の W. A. Côté 先生が学振で来日され、ホストの京大原田教授とともに私の職場に来られた。木材を対象とする TEM、SEM で世界のリーダーである大先生に、私はドキドキしながらセルロースに関する Frey Wissling の新ミセル説に反する私の実験結果を話したことを覚えている。後で知ったが、Côté 先生は A. Sarko から平行鎖の Cell I がマーセル化で逆平行鎖の Cell II になる機構を研究する若い人を探してくるよう頼まれていた。その白羽の矢が立ったのは若くもない私だった。当時、大学紛争は最終段階だったが、演習林職組の一部過激な人たちが演習林長の自宅にまで押しかけ、団交を迫っていた。林長はなんと林産学科木材物理学講座の浅野教授であり、私はその講座の助教授だったので連中と相対することも多く、講義室の黒板に「岡野、死ぬ」などと落書きされた

こともあった。授業は大学では出来なくて、神田一ツ橋の学生会館を予約し、前日の夜に学生一人ずつに電話連絡するのが私の役だった。そんな状況下、渡米を快く認めて下さった浅野教授、三輪、三城助手には感謝してもしきれない。

ニューヨーク州立大学の A. Sarko のラボには理学電機製の X 線回折装置ガイガーフレックスがあり、X 線の光軸をうまく調整すると 30 秒足らずで繊維の回折写真を撮ることが出来た。私はラミー繊維のマーセル化過程＝アルカリセルロースの生成から Cell II になるまでの過程を様々な条件下で追跡することが出来た。それらを基にして平行鎖構造が逆平行鎖構造に変化するメカニズムを説明することが出来たと思っている。

ニューヨーク州立大学の College は州内各地に分散していて、私が働いていた College of ESF (Environmental Science & Forestry、環境科学・林学) のキャンパスはニューヨーク州のほぼ中央に位置するシラキュースにあった。市を一步出ると Apple State を示すリンゴ園、ニューヨークワインのブドウ園など、NY 州が農業の州であることを肌で感じた。休日は妻と 4 人の子供たちと異国でのキャンピングを満喫した。

帰国して大学院修士課程に「セルロース科学」を開設した。磯貝明さんはその講義の一期生だったと思う。天然セルロース (Cell I) が折りたたまれた分子鎖ではなく伸びきった分子鎖であることを格子像によって初めて可視化した⁶⁾ 京都大学修士課程の院生杉山淳司さんを助手に迎えることが出来た。さらに研究対象をセルロースだけではなくキチンにも広げ、斎藤幸恵さんがキチンの結晶多形の相互関係⁷⁾ を明らかにした。他にも内外で活躍する多くの研究者に恵まれた。

セルロースは高分子であり、その基本的機能は植物体を支えることである。支えられる植物体の形や大きさは様々だし、存在している場も様々なので、セルロースの高次構造に違いや揺らぎがあるのはむしろ当然なのである。生物生産物に対するとき、従来の理学・工学的手法では限界があって、それを乗り越えていくことが魅力なのだと思う。

大学を定年で退職し、財団法人日本木材総合情報センター木のなんでも相談室室長を 8 年、木材・合板博物館館長を 10 年勤めて、長かったサラリーマン生活を終えた。今やセルロースナノファイバーによる字義通りの軽自動車の時代を迎えようとしている。“文明の基盤を石油から「木」に”の夢が現実味を帯びてきた。オーマイゴッド！！

- 1) P. F. Scholander et al., Science **148**, 339(1965)
- 2) 高部圭司、吉村剛：木材工業 **61**, 577 (2006)
- 3) S. Nishikawa, S. Ono : Proc. Tokyo Mathematico-Physical Soc., 2nd Series **7**, 131(1913)
- 4) 参考図書：木材の組織、P47-101 (原田浩)、森北出版 (1976)
- 5) 杉山淳司：総説「セルロースの結晶構造——歴史的な展開」SEN' I GAKKAISHI (繊維と工業)、**62**、183 (2006)
- 6) J. Sugiyama et al., Planta **166**, 61(1985)
- 7) Y. Saito et al., Macromolecules **30**, 3867(1997)