

地球で一番大きな生物を支える「セルロース」について

阿部 賢太郎^{1*}

“Cellulose”

~Nanofibers supporting the biggest organism on earth~

Kentaro Abe^{1*}

概要

我々が生活しているこの地球は大体 46 億年前に誕生したと言われている。その長い歴史の中で、もっとも大きな生物は何だろうか？ときに 100 m を超え、1000 t を超えるその巨大生物の体は、幅 4 nm (1 nm は 1 mm の 1,000,000 分の 1) 程度の、とても細くてとても強い繊維によって支えられている。その繊維は、我々の周りに豊富に存在しており、我々もよく食べている。そして、今、その細くて強い繊維が、さまざまな形で我々の暮らしをも支えようとしている。この総説では、その巨大生物が自分の体を支える秘密について紹介しつつ、その秘密に関係する細くて強い繊維「セルロース」について紹介する。

1. はじめに

約 46 億歳の地球に住んでいる生物で最も巨大なものは何だろうか。恐竜が思い浮かぶだろうか。もっとも大きな恐竜の 1 種はアルゼンチノサウルスとされ、1 億年くらい前に生きていたようである。その体長は 45 m で、体重は 90 t とも言われている。しかし、その恐竜よりも大きな生物がいることを我々はよく知っているはずである。それは「樹木」である。樹木ももちろん生きている。京都・峰定寺の御神木である花背の三本杉は 62.3 m もあり (図 1)、すでにアルゼンチノサウルスを見下ろしている。さらに、世界には 100 m を超える樹木がいる。アメリカにいるハイペリオンを名付けられたその木の高さは 115 m もある。他にも、シャーマン将軍と呼ばれる木もある。その高さは 84 m で、重さは 1000 t を軽く超え、世界で最も重い生き物である。そのように巨大で逞しい樹木は、古くかから人々に崇拜され、畏れられてきた。

大きくなれば当然重くなる。樹木が巨大な体を支えるためには、想像を絶する強さが必要となる。さらに、樹木は天に向かって成長するため、自重だけでなく、横風等による曲げ



図 1 : 峰定寺の三本杉

2022 年 3 月 30 日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生物機能材料分野。

* E-mail: abe.kentaro.3a@kyoto-u.ac.jp

にも耐えなくてはならない。そのため、樹木はなるべく「軽くて」「強く」なければならない。植物が陸地上陸してから約5億年。その間に、少しずつ構造（形）を進化させ、ついには100mに達している。一体、樹木はどのような構造をしているのだろうか。

2. 樹木の構造

図2に樹木内部の写真を示す。樹木の中身はスカスカで、ストローを束ねたような構造をしている。といっても、本当は空ではなく、生きている樹木では中に水が詰まっている。文字通り、ストローのように地上から100m上まで水を吸い上げている。同時に、このストローの束が、樹木の巨大な体を支えている。このストロー1本1本が樹木の細胞である。正確には、細胞だったものである。樹木の細胞は成長後に死に、中身（細胞質）が消失する。消失して、一体何が残っているのか。それが、「細胞壁」である。我々動物の細胞と、植物の細胞の違いは色々あるが、その一つが細胞壁で、動物の細胞には細胞壁が無い。細胞壁は植物細胞の外側にあり、細胞が死に中身が消失した後も、細胞壁だけが残り樹木内部に蓄積される。我々は死んでしまうと、その体は消失してしまうが、樹木は切り倒された後も強度を保ったまま残っており、我々の暮らしを支えている。法隆寺は創建されて1400年は経っている。

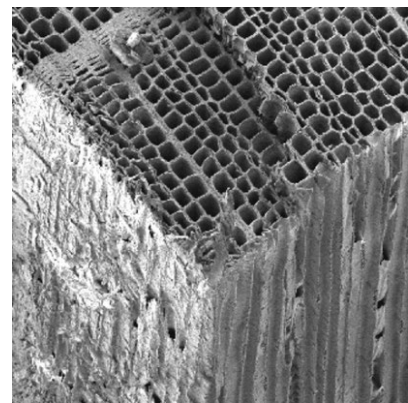


図2：樹木内部の構造

とはいえ、残された細胞壁自身が強くなければ、その巨体を支えることはできない。ここからは樹木細胞壁の構造について説明する。樹木の細胞壁は図3のように、何層か重なった構造をしている。各層の違いは何であろうか。図3をよく見ると細い線の向きがそれぞれ違っているのが分かる。この線は、「セルロース」と呼ばれる繊維状の物質を表しており、樹木の細胞壁の約半分はセルロースでできている。セルロースはブドウ糖（グルコース）がつながってできている。ご承知のとおり、植物は光合成によってグルコースを作り、それをエネルギー源としている。それと同時に、自分を支える壁をも作っている。セルロースはグルコースが直線状につながった鎖のようなもの（高分子）だが、さらにその鎖が何十本も束になって、「結晶化」している。その幅は約4nmである。我々の髪の毛の幅は50-100μmだが、1μmは1mmの1000分の1である。そして、1nmは1μmの1000分の1であるから、それがとても細い繊維であると分かる。また、結晶と聞くと何かとても堅そうなイメージがあるが、その直感は正しく、セルロースの結晶もとても強い。その1本1本が鋼鉄の5倍くらい強いと言われている。それにもかかわらず、その重さ（密度）は鋼鉄の1/5と非常に軽い。「軽くて」「強い」セルロースが壁になって、巨大な樹木の支えになっている。

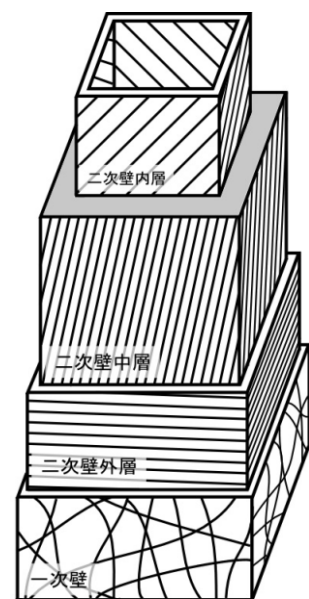


図3：樹木細胞壁の構造

全ての植物の細胞壁は、このセルロースを豊富に含んでいる。しかし、草本と樹木の細胞壁の成分には大きな違いがある。セルロースがいくら強くても、それだけで樹木の巨体を支えることはできない。セルロースのような一次元の繊維状物質は、基本的に引張の力に対して強さを発揮するが、それ以外の力に対しては弱い。セルロースで編まれた植物細胞壁の各層は、言ってみればハンカチのようなものである。木綿のハンカチは実際にセルロースからできている。実際に手に持ってみれば分かるが、ハンカチは、引っ張った時はとても強く、簡単には引きちぎれない。それは、セルロースの強さ

でもある。しかし、ハンカチは簡単にクシャクシャになってしまい、それを基にストローのような構造を作っても、重いものを上にのせて支えることはできない。そこで、樹木はセルロース等のできた細胞壁の隙間に、「リグニン」と呼ばれる接着成分を染み込ませた（樹木が意識的に行動したように書いているがこれは比喩である）。ちょうど、ハンカチに接着ボンドを染み込ませて、固めたようなものである。ガチガチに固まったハンカチはクシャクシャにはならず、しっかりした壁となって重いものを支えられるようになる。そのように強靱な壁からできたストローを束にすることで、ハニカム構造のように「軽くて」「強い」構造ができ、巨大な樹木は自身の体を支えることができる（体を支える理由は、他にもある）。

前に樹木の細胞は成長とともに死に、残った細胞壁だけが蓄積すると書いた。リグニンは、細胞の死と共に細胞壁に徐々に染み込む。細胞壁にリグニンが堆積し、強固な構造になることを「木化」と呼ぶ。この木化は、樹木（と竹や稲）における現象であり、天高く成長するために長い進化の過程で習得されたものである。

3. 繊維強化複合体

樹木細胞壁の構造をととても単純に言う、比較的柔らかな「リグニン」の中に、細くて強靱な「セルロース」が無数に分散した構造ということになる。このような構造を「繊維強化複合構造」と呼ぶ。リグニンはセルロースに比べて柔らかく、「繊維強化」などと聞くと、強いセルロースが柔らかいリグニンを補強し支えているように聞こえる。しかし、実際には柔らかいリグニンもまた強いセルロースを支えている。リグニンがセルロース繊維間を接着することで、細胞壁中のセルロースに均一に力がかかるようになっている。お互いの弱点を補い、お互いの長所を伸ばすこの繊維強化複合構造は、軽さと強さを発揮するための優れた構造の一つと言える。

実のところ、自然界ではこの繊維強化複合構造が数多く利用されている。例えば、蟹の甲羅である。蟹の甲羅は細くて強い「キチン」と呼ばれる繊維と、その隙間を埋める「炭酸カルシウム」からできている。キチンは、植物のセルロースと非常によく似た構造をしているが、セルロースと同様に強靱である。そして、炭酸カルシウムは非常に脆い物質だが、キチンによって強靱となり、結果として軽くて強い甲羅となる。もう一つ、昆虫の殻や羽も似たような構造を持っており、蟹の甲羅と同じキチン繊維の隙間にタンパク質が充填されている（図4）。樹木、蟹、昆虫…と、一見共通点がなさそうな生物達だが、いずれも生きるために、似たような「軽くて」「強い」構造を獲得している。そして、これらの構造は生物が死んだ後もその形が残っている。

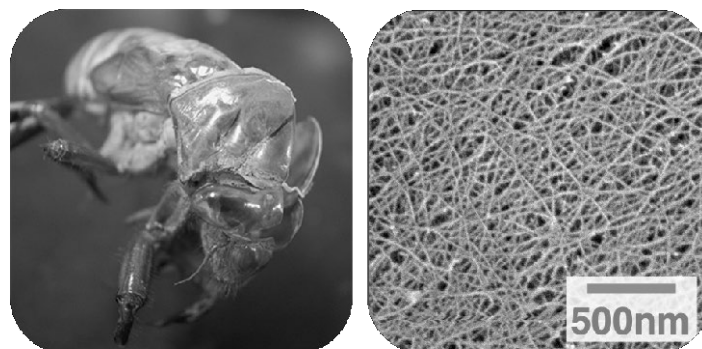


図4：セミの抜け殻に豊富に含まれるキチン

そして、この繊維強化複合構造は我々の生活でも広く活用されている。古代エジプトでは、泥にワ

ラを混ぜて乾燥させることで、強いレンガを作っていた。日本においても、土壁にはワラ等が混ぜられてきた。そして現在、この構造は、繊維強化プラスチック（FRP, Fiber-Reinforced Plastics）として生活の様々な場所で活用されている。これは文字通り、プラスチックに繊維素材を混ぜることでその強度を向上させたものである。使用される繊維は、ガラス繊維や炭素繊維など様々である。プラスチックは軽くて加工もしやすいが比較的柔らかいため、繊維を混ぜることで、軽くて強い材料を作ることができる。そして、最も軽くて強い素材が求められるものの一つが飛行機である。現在、飛行機の機体は50%程度の炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が使われているものもある。これにより、機体の重量は大幅に減少する。機体が軽くなれば、その分、人や荷物を多く運ぶことができる。逆に、運ぶ人や荷物の量が同じであれば、その分、使う燃料の量や排出するCO₂の量を減らすことができる。軽くて強い昆虫の羽と同じ工夫が飛行機にも使われている。

4. セルロースナノファイバー

話を、植物に含まれるセルロースに戻す。我々は昔からセルロースを広く利用してきた。衣服等に使われる綿はほぼ100%セルロースである。また、紙もセルロースからできている。図2を思い出してほしい。樹木はストローを束ねたような構造をしている。樹木からリグニンを除くと、このストローが1本1本バラバラになる。それを漉き上げて乾燥させたものが紙である。紙の繊維の幅は数十 μm だが（図5左）、その繊維をさらに拡大してみると、さらに細い繊維が観察される（図5右）。これが「セルロース」の正体である。これまで、我々は図5左のような太い繊維を衣服や紙として利用してきた。しかし、最近では図5右のような非常に細いセルロース繊維を利用するための研究が進められている。上でも少し書いたが、図5右のようなセルロース繊維の結晶性で幅は4-20 nmである。そのため、「セルロースナノファイバー」や「ナノセルロース」と呼ばれている。

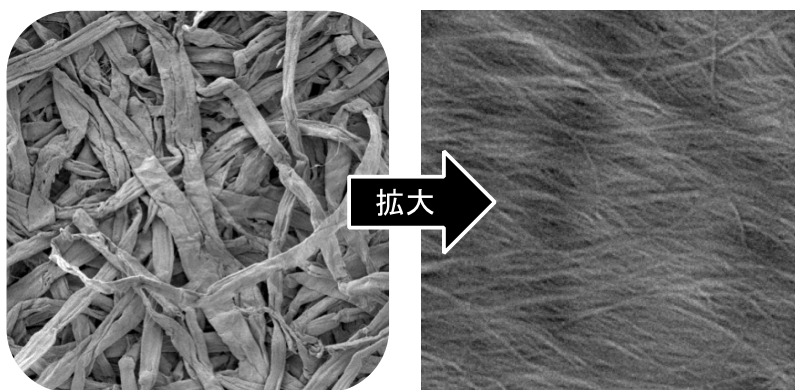


図5：樹木から作った紙の拡大図（左）と紙の繊維をさらに拡大して観察されるセルロース（右）
左図は100倍、右図は30,000倍で観察。

4.1 セルロースナノファイバーの製造

セルロースナノファイバーを得るためには、まず植物原料からリグニンやその他の成分を除去して、セルロース成分だけにする必要があります。いわゆる、紙のような状態である。このままでは図5左のようにまだ太い繊維のままなので、セルロースナノファイバー1本1本バラバラにする必要がある。バラバラにする装置は様々だが、例えば石臼のようなもので試料と水をすりつぶすと、パルプ繊維が次第にバラバラになり（解繊とよばれる）、最終的に図6のようなセルロースナノファイバーの水懸濁液が得られる。このドロドロの液体の中にはセルロースナノファイバーは1%しか入っておらず、あとは水である。紙をすりつぶしただけで、こんな風になってしまう。セルロースは本来水をよく吸収する性質を持つが、解繊によって比表面積が飛躍的に増大し、さらに吸水し、このような状態となる。最近ではセルロースナノファイバーの周りを化学的によりすることで、解繊が促進され、以前より簡便に製造できるようになっており、今では数社から販売されている。



図6：樹木から取り出したセルロースナノファイバー

セルロースは全ての植物細胞壁の骨格物質であるため、セルロースナノファイバーは全ての植物からとりだすことができる。そのため、樹木以外にも、稲わらや、ジュースの搾りかす、ジャガイモデンプンの搾りかすなど、利用価値の低い原料から作ることも可能である。ところで、樹木とジャガイモに含まれるセルロースナノファイバーの性質は同じのだろうか。調べたところ、少なくとも高等植物から取り出したセルロースナノファイバーの強さはほぼ同等であるという報告がある。つまり、原料がセルロースナノファイバーの用途を制限しないということになる。と同時に、巨大な樹木だけが特別に強いセルロースを持っているわけではなく、その構造が巨体を支えていることが分かる。

4.2 セルロースナノファイバーの利用

このように植物から取り出したセルロースナノファイバーをどのように利用するのだろうか。最も期待されている用途の一つが、樹脂（プラスチック）の補強である。つまり、先ほど述べた繊維強化プラスチックである。従来のガラス繊維などに比べると、植物から作られるセルロースナノファイバーは、環境に優しいバイオマス素材だと言える。現在、この分野の研究は非常に進んでおり、京都大学・矢野教授はセルロースナノファイバーを使った自動車のボディや部品の開発を行っている。これにより、自動車の重量は10%程度軽くなる。その結果、燃費は向上し、CO₂の排出は削減される。どんな車が作られているのかを知りたい方は、環境省のHPや動画をご覧ください。他にも、ランニングシューズの靴底のソールやボールペンのインクに、セルロースナノファイバーが混ぜられ、これらの製品はすでに商品化されている。太い繊維を使うよりも細いナノファイバーを使用する利点は色々ある。例えば、同じ量をプラスチックに混ぜたとき、細い繊維のほうがより少ない添加量で均一に分散し、全体的に強化される。図6もナノファイバーが水に均一に分散した結果ドロドロになっている。普通の紙の太い繊維ではこうはならない。面白い利用としては、食品に混ぜることである。すでに商品化されているものもある。ご自身で調べてみてほしい。図6で示したように、セルロースナノファイバーが水をよく吸収する。そのため、食品に混ぜるとふんわりしたりもっちりしたりする。全ての植物は細胞壁を持っており、その細胞壁にはセルロース（ナノファイバー）が豊富に含まれている。つまり、野菜を食べている我々は普段からセルロースを摂取していることになる。我々は、セルロースを食べても分解することはできないが、代わりに食物繊維として作用する。セルロースナノファイバーの利点の一つはこの安全性にあるといえる。

もう一つ、細いナノファイバーならではの特性がある。それは透明な樹脂を使って、上記の樹脂補強を行った時に起こる。例えば、セルロースナノファイバーの分散液を、普通に紙を作るときの要領でメンブレンフィルターを使って漉き上げ、乾燥させる。すると、セルロースナノファイバーからなる紙ができる。この紙に透明な樹脂を染み込ませると、非常に透明になる（図7）。これは、可視光波長に比べて十分に小さい繊維が分散している場合、光が散乱せずそのまま透過してしまうためである。図7の複合材料の内60%がセルロースナノファイバーで、残りの40%が樹脂である。強靱なセルロースナノファイバーが豊富に入っているため、このフィルムも非常に強い。また、樹脂は熱に弱い性質があるが、このフィルムはセルロースのおかげで、熱による変形にも強い。熱に強く透明な物質で思いつくのはガラスだが、ガラスはこんなにしなやかには曲がらない。

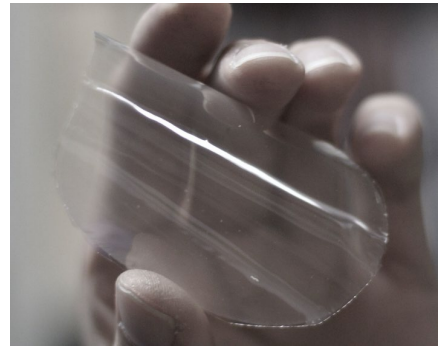


図7：セルロースナノファイバー60%を含む透明複合フィルム

ここからは少し余談になるが、先ほど蟹の甲羅について述べた。蟹の甲羅の構造は、植物細胞壁と似ていて、セルロースの代わりにキチンナノファイバーを豊富に含んでいる。そして、キチンナノファイバーの間には炭酸カルシウムがあり、非常に強い構造を持っている。ここで、蟹の甲羅から炭酸カルシウムを除去してみる。すると、キチンナノファイバーだけが残る。このとき、蟹の甲羅は真っ白である。キチンナノファイバーの間には含まれる空気によって光が産卵するためである。この状況は、先ほどのセルロースナノファイバーでできた紙と似ている。そこで、この真っ白な蟹の甲羅に透明な樹脂を染み込ませると、やはり蟹の甲羅も透明になる（図8）。蟹の甲羅が細いナノファイバーでできたナノ複合体である証拠であるといえる。

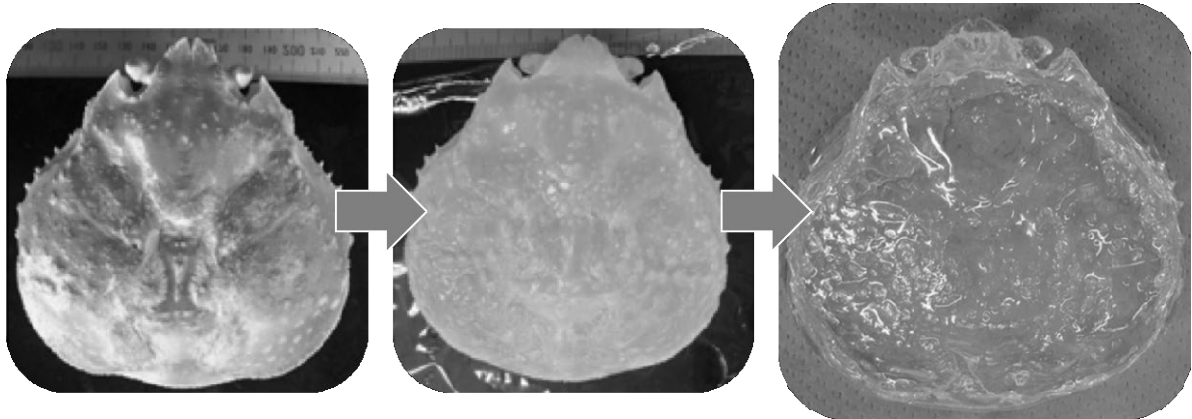


図8：透明になる蟹の甲羅

5. さいごに

我々は古くから植物を、セルロースを、いろいろな形で利用してきた。綿や紙と並んで、セルロースナノファイバーもその形の一つであるといえる。今はまだ製造コストなども問題でそれほど広くは使われていないが、今後人々が気づかないうちに、車や家電や食品にセルロースナノファイバーが使われているかもしれない。また、生物における繊維強化複合構造のように、自然の知恵が我々の生活に活用されている例が、周りにはあふれている。そして、まだまだ知らない自然の知恵が、今も明らかにしようとしている。その恩恵を受けて、我々の暮らしも少しだけ豊かになる。その繰り返しがいつまでも続けばと思う。