

40mまで水を引き上げられるシンプルな装置の作出

(元東京大学理学系研究科、東京理科大学) 館野正樹
TEL 070-6445-0651 e-mail tateno.masaki24@gmail.com

1. バックグラウンド

高木が葉の細胞の浸透圧を利用して水を引き上げていることは広く認められている。しかし、高木が 100m もの高さまで水を引き上げる仕組みについては、工学者や物理学者全員を満足させる答えが得られてはいない。水は極性分子ゆえに強い凝集力を持つが、それでも連続した水柱を 10m 以上の高さまで引き上げることはできないからである。

それを回避するための様々な仮説が提案され、例えば幹の中では真空以上の強い陰圧が生じ得る可能性も議論されている。しかし、目視できない幹の中をあれこれ議論しても決定的な答えに到達することはできそうもない。

そこで、透明あるいは半透明な素材を使うことで誰もが目視でき、かつ真空よりも弱い陰圧で 10m 以上の高さまで水を引き上げることのできる装置を作成することを試みた。これによって高木が水を引き上げる仕組みの解明に寄与したいと考えている。

まず、生物学者以外の方のために、植物が水を吸い上げるときに起きる現象についてまとめておくことにする。

- 1) 細胞は液体の水だけでなく、飽和した水蒸気も内部に引き込むことができる。
- 2) 根からは無機イオンや低分子の有機物である情報伝達物質が葉に送られてくるため、それらの溶媒となる液体の水も根から葉まで到達する必要がある。
- 3) 葉の細胞が水を引き上げ始めると、水を輸送する道管にキャビテーションが生じる。

2. 最初のアイデアとその問題点

最初に思いついたことは、「液体の水ー空気ー液体の水ー空気という縞模様のような状態がキャビラリー中に生じれば、液体の水の積算高さが 10m に満たない限り、どこまでも水を引き上げることができるだろう」というものだった。実際、こうした状態をつくることによって 25m の高さまで水を引き上げることができた。荏原製作所の知り合いに聞くと、空気を混ぜ込むことで高い場所まで物質を引き上げることは様々な現場で行われているとのことだった。しかし、ここには致命的な問題があった。細胞は大量の窒素や酸素を内部に引き込むことはできず、道管の中に空気が入り込むと吸水できなくなってしまって枯死する。これはエンボリズムとして知られている現象である。

3. 液体の水と高い圧力の水蒸気を混在させるための試行錯誤

次に考えたことは、「水ー飽和水蒸気ー水ー飽和水蒸気という縞模様ならば細胞は両者を引き込むことができるので、エンボリズムの問題は回避できる」というものだった。問題はそのような現象が果たして存在するのかどうかであり、ここからは様々な素材を用いて試行錯誤を行うことにした。ここでの陰圧は大気圧を 0 としたゲージ圧表示で -0.085MPa 程度になるようにした。その結果は次の通りである。1)から 4)に向かってより疎水的になっていく（表面自由エネルギーが小さくなっていく）ことに注意してほしい。

- 1) 内径 1mm のウレタンチューブに親水コートを施した場合、水は 10cm も引き上げられなかった。
- 2) 内径 0.3mm のガラス管では、せいぜい 3m 程度までしか水は引き上げられなかった。
- 3) 内径 1mm の塩ビチューブの場合、水は 5m 程度まで引き上げるのが限界だった。

4) 内径 0.5mm のシリコンチューブ（非常に疎水的）ではキャビテーションが生じ、液体の水と水蒸気が縞模様となって上昇し、高さ 40m まで水を引き上げることができた。高さ 40m でのチューブ内はほとんどが水蒸気の状態であったが、液体の水も上昇してきた。

実験に使用した水は煮沸して脱気したものを使っているため、シリコンチューブに生じた気体は水蒸気である。また、この水蒸気は飽和水蒸気圧よりも高い圧力を持っていた。水蒸気が発生するキャビテーションは高さ 50cm 付近で生じることもあった。これらの結果は、キャピラリーが疎水的ならば 10m の高さを越えて水を引き上げられることを示している。

4. 疎水性のキャピラリーで常圧の水蒸気が安定して存在する仕組み

シリコンチューブの場合、陰圧をかけなくとも常圧の水蒸気が自然に生成する。シリコンは水蒸気を透過させやすいため、水で満たしたシリコンチューブは生成した水蒸気が外部に出ていくことで、1 週間程度すべての水が蒸発する。疎水性かつ透過性のないテフロンチューブの場合は陰圧をかけないと縞状の水蒸気は生じないが、陰圧をかけたチューブを常圧に戻して放置しても水と水蒸気は数ヶ月間安定して存在していた。



写真 疎水性キャピラリーの中で液体の水と共に安定して存在する常圧の水蒸気

疎水性のキャピラリーで常圧の水蒸気が安定して存在できる仕組みは、ボルツマン分布を持つ液体の水から大きな運動エネルギーを持った水分子のみが飛び出して水蒸気となること、およびその水蒸気分子は疎水性界面と弹性衝突を行うことでそこで運動エネルギーの減衰が起きないということで説明できるのかもしれない。この場合、水から飛び出てくる分子数と水に飛び込んでいく分子数は釣り合っていかなければならない。

5. 今後の展開

ここで示したように、疎水性のキャピラリーの内部では、陰圧の元で生じる高圧の水蒸気と液体の水とが交互に存在することができ、液体の水を 10m 以上に引き上げることができる。

これから展開の一つは、疎水的なキャピラリー内部での水分子の挙動を物理学的に解くことだと思う。キャピラリーだけでなく、一般的な疎水性界面での水分子の挙動の解明も待たれる。例えば、平板な疎水性界面で生じるナノバブルである。上記の実験事実から考えれば、ナノバブルは常圧の水蒸気バブルなのかもしれない。そうだとしたら、曲率の大きなキャピラリーでは、ナノバブルが容易に融合してキャビテーションが起きることになる。こうした現象は 19 世紀の古典統計レベルの物理学で説明できるように感じている。

生物学的には、目視できない幹内部の水の状態を物理的な測定法によって明らかにすることが必要だろう。道管の内壁は疎水的な性質の強いリグニンで覆われており、実際にここで明らかにした現象が生じている可能性がある。

今回報告した現象が様々な研究を進展させるためのヒントとなってくれれば幸いである。