



軽くて丈夫な竹の智慧 ～竹が「軽さ」と「丈夫さ」を併せもつ理由は、 竹に埋め込まれた繊維の疎密分布にあった～

研究成果のポイント

- ・竹が理想的な傾斜機能材料(※注1)であることを、構造・材料力学的に初めて証明。
- ・中空円筒一般に適用できる繊維補強の剛性最大化スキームを、初めて定式化。
- ・生物の合理的な仕組みを取り入れた新しい構造・材料設計技術の進展に期待。

研究成果の概要

北海道大学の佐藤太裕准教授らの研究グループは、竹に埋め込まれた繊維の疎密分布と、その補強効果との関係を構造・材料力学的に考察しました。その結果、竹の断面で見られる繊維の疎密は、竹全体を曲がりやすく補強するために理想的な分布であることがわかりました。この成果は、竹が進化の過程で獲得した「生存競争を勝ち抜くための最適構造デザイン」の一端を明らかにしたことになります。また、繊維分布の制御により構造全体の剛性を最大化できるという発見は、タワー、パイプライン構造などを合理的に設計する際のヒントを与えます。すなわち、竹がもつ智慧を活かした、軽くて丈夫な新しい中空円筒構造の設計開発につながることで期待できます。

本研究成果は、米国東部時間の 2017 年 5 月 3 日(日本時間 5 月 4 日)に PLOS ONE の電子版に掲載されました。本研究は、北海道大学大学院工学研究院の佐藤太裕准教授、熊本県立大学環境共生学部の井上昭夫教授、山梨大学生命環境学部の島 弘幸准教授の 3 名による共同研究であり、文部科学省科学研究費補助金、寿原記念財団の支援を受けて行われました。

論文発表の概要

研究論文名 : Bamboo-Inspired Optimal Design for Functionally Graded Hollow Cylinders (竹に学ぶ傾斜機能円筒構造の最適デザイン)

著者 : 佐藤太裕 (北海道大学), 井上昭夫 (熊本県立大学), 島 弘幸 (山梨大学)

公表雑誌 : PLOS ONE

公表日 : 米国太平洋時間 2017 年 5 月 3 日(水) (オンライン公開)

研究成果の概要

(背景)

竹は、軽さと丈夫さを併せもった「天然の機能材料」と言われています。竹が軽い理由は、空洞部分が多いからです。この空洞があるおかげで、竹は少ない材料(木質部)で素早く成長することができ、周囲の樹木よりも高い位置で多くの光を浴びることができます。ただし、軽いだけだと、竹は横風による力や自重に耐えきれず、崩壊するリスクが生じます。そこで、この弱点を補うべく、竹の木質部には、細くて丈夫な繊維(維管束鞘(※注2))がたくさん埋め込まれています。この繊維の一本一本は、鉄鋼と同程度の剛性をもっています。そのため、木質部に埋め込まれた多くの繊維は、竹全体を補強する強化繊維の役目を果たします。このように竹は、巧みな仕掛けによって軽さと丈夫さを獲得し、他の樹木との生存競争を有利に進めていると言われています。

ところで、竹を割ってその横断面をよく見ると、そこに埋め込まれているたくさんの繊維は、均一には分布していません。断面の内側から外側に向かって、繊維の密度が徐々に高くなっていることがわかります(図1)。維管束鞘は強化繊維の役目を果たすので、それが密に詰まっている部分は力学的な強度が高いといえます。ゆえに稈(竹の幹の部分)の強さは、内側から外側にかけて徐々に大きくなると予見されます。このことと竹全体の曲げ強さとの間に、どのような合理性があるのかを調べました。

(研究手法)

佐藤准教授らによる研究チームは、稈の断面における繊維分布の疎密さと、稈全体の曲げ強さとの関係を、構造力学理論を用いて解析しました。さらに、実際の竹を伐採して得られた測定データを使って、竹が示す繊維分布と、理論的に得られた理想的な繊維分布とを比較しました。

(研究成果)

上記研究手法による研究の結果、竹は自分自身の曲げ剛性(曲がりにくさ)が最も大きくなるよう、繊維分布の疎密さを絶妙に調節していることが、初めて明らかとなりました。

生育する竹にとって重要なのは、横風などによる曲げ応力に対する強さです。一般に円筒を曲げたとき、円筒断面の各部に働く力の大きさは、内側から外側に向かって徐々に増加します。そのため材料の力学的な強度も、外側に向かって大きくなるのが望ましいといえます。すなわち円筒の内側は、外側と同等の強さをもつ必要はありません。このように、材料の機能や組成がある一方向に向かって徐々に変化する材料のことを、一般に傾斜機能材料と呼びます。この言葉を借りれば、竹は強化繊維を傾斜分布させてできる、天然の傾斜機能材料だといえます。

佐藤准教授らは、繊維をどのように傾斜分布させれば、竹全体の曲げ剛性を最大化できるかを理論的に解明しました。その結果、次のことが明らかとなりました。

1. 断面を貫く繊維の総数が少ない場合は、繊維密度を内側から外側へ向かって一次関数に従い(直線的に)増加させることで、その断面位置における竹の曲げ剛性を最大にできる。
2. 断面を貫く繊維の総数が多い場合は、繊維密度を内側から外側へ向かって二次関数に従い増やすことで、竹全体の曲げ剛性を最大にできる。

すると驚くことに、竹は非常に高い精度で、理想型とほぼ同じ繊維分布を示していることがわかりました(図 2)。竹断面を貫く繊維の総数は、竹の根本と先端で大きく異なることがわかっています。根本の近くでは繊維の総数は多いため、二次関数形の傾斜分布が理想的です。一方先端の近くでは繊維の総数が少ないため、一次関数の傾斜分布をとることで曲げ剛性は最大となります。野生の竹から得られた測定データは、この理論的なシナリオと完全に一致しました。すなわち竹の根本から先端に向かって、竹繊維の傾斜分布は二次関数形から一次関数形へ推移していくことがわかりました。さらにその傾斜分布の曲線グラフは、佐藤准教授らの理論予測と定量的にほぼ一致しました。この成果は、以下二つのことを意味しています。

- 竹は「最少材料・最大強度」の理念を実現した、最高性能の傾斜機能材料である。
- 本研究で提唱した力学理論は、中空円筒一般に対して、その曲げ剛性を最大化するための最適傾斜分布を教えてくれる。

(今後への期待)

竹のように軽さと丈夫さを兼ね備えた材料は、工学的に魅力ある材料の一つです。一般に、軽い材料は携帯性や操作性に優れますが、力学的に脆くて変形しやすいという弱点があります。逆に、丈夫な材料は重いことが多く、操作性や運送コスト・建設コストの面で劣ります。このため軽量性と力学的強度を兼ね備えた先進素材の需要は高く、省エネルギー社会を担う次世代技術の基盤素材として長く注目を集めてきました。現在では、ガラス繊維や炭素繊維を埋め込んだ多種の繊維強化複合材料が、航空機や宇宙ロケットなどの基盤部材、風力発電用のブレードなど、様々な場面で活躍しています。

こうした先進材料開発の分野において注目されるのが、生物模倣という考え方です。厳しい生存競争を勝ち抜いてきた植物や動物の仕組みを模倣して、人々の生活に役立つ技術を開発するという生物模倣技術は、これまで多くの成功を収めてきました。今回の研究で解明された竹の高機能性は、その巧みな仕組みを模倣した先進材料開発につながることで期待できます。

お問い合わせ先

北海道大学大学院工学研究院 准教授 佐藤 太裕 (さとう もとひろ)

TEL/FAX : 011-706-6174 E-mail : tayu@eng.hokudai.ac.jp

【参考図】

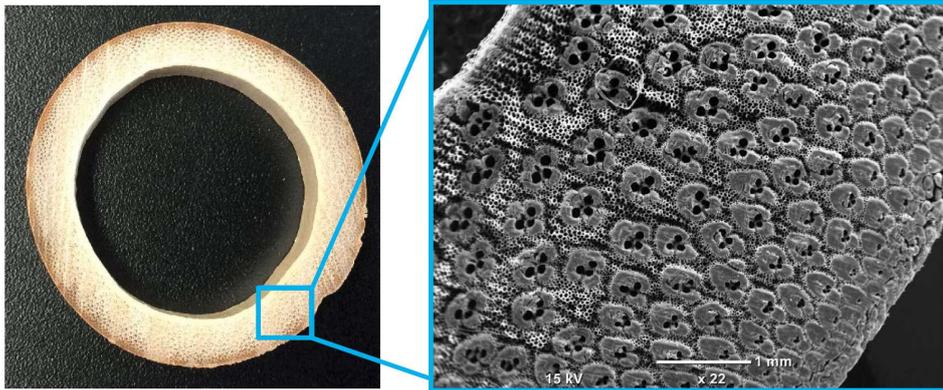


図 1. 竹（モウソウチク）の断面写真[左]と、その一部を拡大した電子顕微鏡写真[右]。ハート型の黒い孔を取り囲む肉厚の膜が維管束鞘であり、断面の外側部分で密に詰まっている様子がわかる。

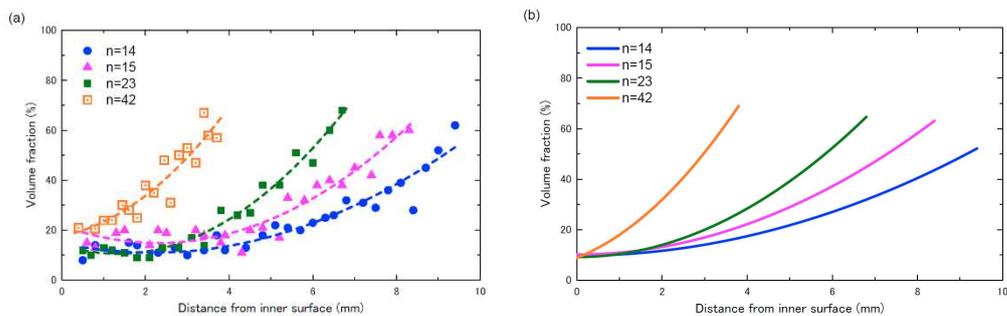


図 2. 竹断面における維管束鞘の傾斜分布曲線。左は竹林を伐採して得た実測データ。右は力学理論から演繹した、曲げ剛性を最大にするための傾斜分布である。竹の根本に近い部分 (n=14, 15) では、どちらも二次曲線となる。竹の先端に近い部分 (n=42) では、一次関数に近い曲線系をとる。ここで n の値は、根本から数えた節間番号(※注 3)を意味する。

【用語解説】

注 1 傾斜機能材料 (Functionally graded material: FGM) : 材料の機能や組成を連続的に変化させることで、力学強度・耐熱性・光学特性などに関する機能を付与した材料のこと。

注 2 維管束鞘 : 道管(根から吸い上げた水や肥料の通り道)と師管(葉で作られた養分の通り道)の束でできた維管束の外側をとりまく膜組織のこと。

注 3 節間番号 : 竹の節と節に挟まれた部分を節間と呼び、この節間に対して根本から順に割り振った番号を節間番号と呼ぶ。地面に一番近い根本部分の節間は n=1 に相当し、そこから高くなるにつれて n の値が増加する。