

「草」と「木」の境目はどこ？ ～力学のレンズを通して、植物の新しい分類方法を発見～

ポイント

- ・草と木の体を支える仕組みの違いに基づく、植物の明快で新しい分類方法を開発。
- ・内部水分による圧力を考慮した計算モデルを導入し、到達可能な最大高さを初めて定式化。
- ・「材質や形状による固有の硬さ」と「水分による疑似的な硬さ」の力学的な分離に成功。

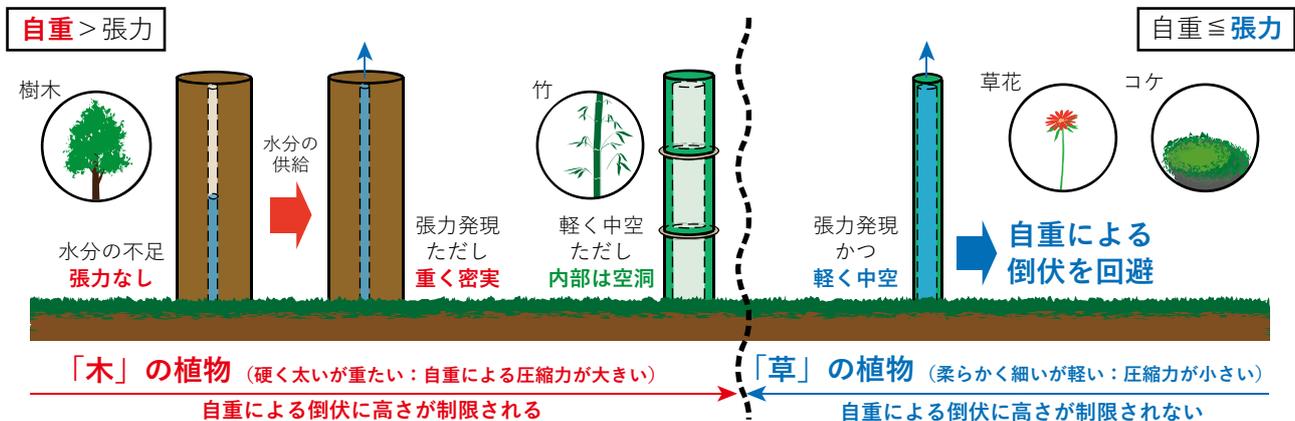
概要

北海道大学大学院工学院博士後期課程の金浜瞳也氏と同大学院工学研究院の佐藤太裕教授の研究グループは、草と木の体を支える仕組みの違いに基づく、明快で新しい植物の分類則を発見しました。

研究グループは、細く柔らかい体を有する草をはじめとする「草本植物」が、光合成に必要な高さまで自立した状態を保ちつつ成長できることに着目しました。そして、この仕組みを力学的に明らかにすることは、細く柔らかい体で重力にうまく抵抗する仕組みの解明に繋がると考えました。乾燥や伐採に伴う水分の流出によって体が大きくたわむことから、草本植物の体を支える仕組みには内部水分が大きく関わっていると予想されます。植物に見られる円筒形の構造では、十分な水分が供給されることで生じる圧力が、植物を上部に引き上げる張力に還元されます。研究グループは、この張力が植物の力学的な安定性に及ぼす影響について、力学理論に基づく定式化を行いました。

その結果、一般的に「草」と呼ばれる植物たちが、張力を活かした構造と軽く細い形状を巧みに組み合わせることで、自重により体が倒伏する現象を巧みに回避し、自身の重さで最大高さが支配されないようにしていることが理論的に明らかになりました。これを踏まえ、「張力の影響と自重の影響のどちらが大きいか」という観点から、その植物が「自身の材料的な性質や形状が織りなす固有の硬さ」と「水分によって生じる疑似的な硬さ」のどちらを駆使して体を支えているタイプなのかを判別し、力学的観点から草と木を明快かつ簡単に分類できる、植物の新たな分類則の開発に成功しました。

なお、本研究成果は、2023年10月6日（金）公開の Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS、米国科学アカデミー紀要) 誌に掲載されました。



本研究の概念図

【背景】

自然界のあらゆる植物は、光の奪い合いを有利に進められるように、重力に抗いながら十分な高さを獲得することが求められます。しかし、「高く大きく成長する」ということは、同時に自身の体が重くなることでもあります。そのため、むやみに高さを大きくすると、自身の重さによって直立した状態を維持することができなくなり、やがて倒伏に至ってしまうことが予想されます。

この問題を解決するための最も単純な力学的アプローチは、「体を硬く太くすること」です。植物のような円柱形の構造では、「硬さ」と「太さ」の二つの要素が、重力による倒伏に対する強さを決定します。そのため、硬くて太い体の獲得は、自身の到達可能な最大高さを向上させる手段の一つです。

しかしながら、これとは対極的な「細く柔らかい」という要素を有する、草や花などをはじめとする草本植物も多くいます。硬くて太い木本植物の代名詞とも言える樹木は、自身の体を支えるための十分な硬さと太さをもちますが、草本植物の茎はとりわけ細く、かつ柔らかい材質で形成されており、さらにその構造はほぼ中空の円筒形です。これらの特徴は、力学的に見ると不利なものでしかありませんが、実際の草本植物たちは自身の体を支えることに成功しています。

この事実は、力学的なハンディキャップを有している草本植物たちが、重力に抗って高く大きく成長するための「細く柔らかいならでは」の巧みなアプローチをとっている可能性を示唆するものです。これを明らかにすることは、植物がその形態に蓄積してきた智恵を解明するだけでなく、体を支持する仕組みの違いという観点から、これまでは分類が曖昧であった竹のような種も含め、「木」と「草」の分類を明確化することにつながると考えられます。以上を踏まえ、研究グループは「内部の水分がもたらす圧力」と「実現可能な最大高さ」の関係について、力学理論に基づく定式化と結果の洞察を行いました。

【研究手法】

草本植物の体を支える仕組みには、内部の水分が大きく関わっていると予想されます。草本植物では、乾燥状態において大きく体がたわみますが、十分な水分が内部に蓄えられると、ピンと張る様子が観察されます。この現象は、膨らませる前はペラペラのゴム風船が、膨らむことによって強度を獲得する現象に、実によく似ています。研究グループはこの現象を力学的に捉え、草本植物にみられるような円筒形の構造では、内部に十分な水分が入ることによって生じる圧力が、植物を上部に引っ張り上げる張力に還元されることに着目しました。この影響を取り入れた中空円筒形の計算モデルを導入し、構造力学の理論をベースに「内部水分による張力」と「実現可能な最大高さ」の関係を定式化しました。

【研究成果】

上記の手法による研究の結果、草本植物における内部水分がもたらす張力は、到達できる最大高さを著しく向上させるだけでなく、自身の重さが原因で倒れてしまうリスクを完全に消失させ、到達可能な最大高さが自重によって支配されないようにしていることが、理論的に初めて明らかとなりました。

本研究では、参考図に示すような先端に張力を受ける中空の円筒モデルにおいて、その最大高さを構造力学の理論に基づき定式化しました。このモデルでは、物体に重さを生じさせる原因となる「重力」と、重力に逆らって植物を引き上げようとする「張力」が考慮されています。自身の体を曲げようとする作用は、自身の重量、すなわち「自重」に起因するものです。そして、自重と反対の方向を向く張力は、自重の影響を低減させるため、張力の増加は最大高さを向上させる効果があると予想されます。

そして、この影響を実際に定式化した結果、当初の予想通り、張力が最大高さの向上に著しく寄与することが分かりました。例えば、張力の大きさが自重の半分の場合、その最大高さは、なんと張力が全く作用しない場合の約2.4倍にも到達します。それだけでなく、張力が自重を上回る大き

さに達する場合には、自身の重さによって曲げられようとする影響を完全に打ち消し、どのような高さでも、理論的には直立した状態を維持することが可能であることが分かりました。すなわち、張力と最大高さの関係を定式化した結果から得られた主要な結論は、大きく次の二点となります（図 1）。

1. 内部の水分がもたらす張力は、到達可能な最大高さを著しく向上させる。
2. 張力が植物自体の重さを上回ると、到達可能な最大高さが自重による倒伏に支配されなくなる。

また、多様な形態を示す木本植物において、「高さが直径の 2/3 乗に比例する」という形状則が存在することが、既往の研究によって明らかになっています。この形状則は、自重による倒伏に最大高さが左右されることに由来するものです。ただし、この形状則はあくまで木本植物のみに適合するものであり、草本植物には全く適合せず、その理由すらこれまで明らかにすることができていませんでした。

これについて、本研究で得られた「張力が自重を上回ると、最大高さが自重による倒伏に支配されなくなる」という結論は、その答えに深く関わるものであると考えました。そこで、研究グループは実際の草本植物 76 種における重量や高さを計測した先行研究や、一般的な植物における水分がもたらす圧力の推定値から、草本植物が自重による倒伏現象を回避しているのか否かについて、試行的な調査を行いました。すると見事に、データが開示されていた 76 種類の全てにおいて、張力が自重の影響を上回り、自重によって倒伏する可能性を完全に回避していることが示唆されました。これは、草本植物の高さは自重による倒伏に支配されておらず、その結果として草本植物の体の大きさを支配するルールが木本植物と異なっている、ということを確認する結果であると言えます。

この自重による倒伏現象の回避は、「自身の材料的な性質や形状が有している固有の硬さ」と「水分によって生じる疑似的な硬さ」のどちらを駆使して体を支えているかに由来します。この力学的な観点からは、これまでは分類が曖昧であった竹のような種を含むすべての植物について、これらを明快に「木」と「草」のどちらかとして区別することができる、全く新たな分類法則をもたらすものです。

【今後への期待】

本研究は、草本植物が有する巧みな身体支持の仕組みを明らかにしただけでなく、植物が「自身の材料的な性質や形状が有している固有の硬さ」と「水分によって生じる疑似的な硬さ」のどちらで体を支持するのかについて、その仕組みが切り替わる明確な境界を解明したものです。さらには、両者の体を支える仕組みの違いに基づく、「木」と「草」の新たな分類法則を提案したことになります。

既往の植物学的な研究では、「材料固有の硬さ」と「水分による疑似的な硬さ」の影響が混同されて取り扱われてきました。しかしながら、両者の違いとその影響を力学理論に基づき考える、すなわち「力学のレンズを通して植物の世界を見つめる」ことで、植物学的に極めて意味のある知見を獲得するまでに至りました。これは、植物学と工学という、一見すると極めてかけ離れた二つの分野が交わることによって、はじめて発見できるものであらうと考えられます。本研究は、人工物を対象に築き上げられてきた工学理論のさらなる可能性を提示し、植物学分野において実験・観察で蓄積されてきた様々な知見を双方向的に活かすことができる、新たな学術体系の礎になることが期待されるものです。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業・基盤研究(A)（研究代表：佐藤太裕、課題番号：18H03818）と日本学術振興会科学研究費助成事業・特別研究員奨励費（DC1）（研究代表：金浜瞳也、課題番号：22J21156）の助成を受けて行われました。

論文情報

論文名 Mechanics-Based Classification Rule for Plants (力学に基づく植物の分類ルール)
 著者名 金浜瞳也¹、佐藤太裕² (¹北海道大学大学院工学院、²北海道大学大学院工学研究院)
 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS、米国科学アカデミー紀要)
 DOI 10.1073/pnas.2308319120
 公表日 2023年10月6日(金)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院工学研究院 教授 佐藤太裕 (さとうもとひろ)
 TEL 011-706-6366 FAX 011-706-6366 メール tayu@eng.hokudai.ac.jp

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)
 TEL 011-706-2610 FAX 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

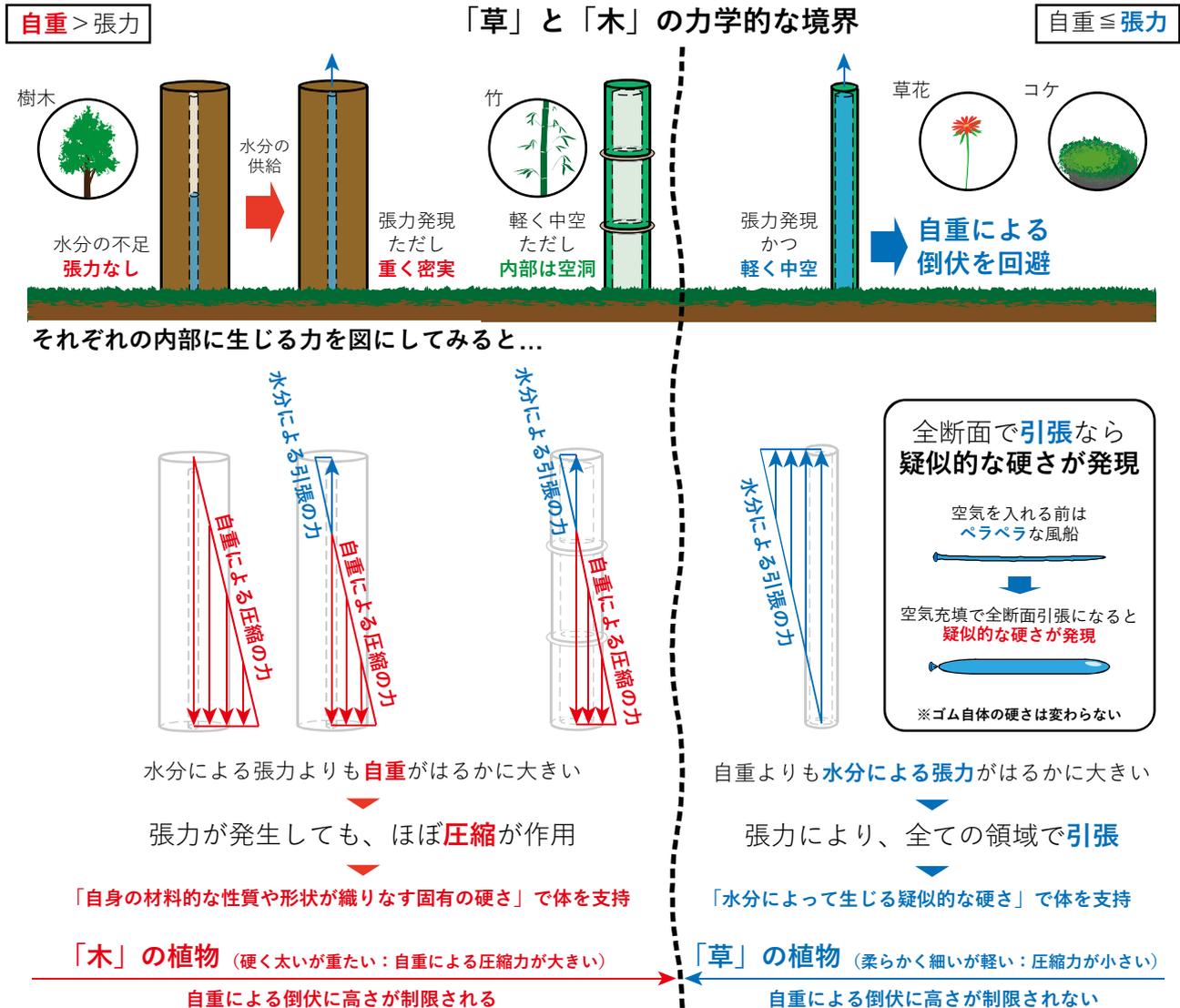


図 1. 張力と最大高さの関係を定式化した結果から得られた主要な結論