

樹木はどこまで高く成長することができるのか？

～数理モデルで「最大高さ」の導出に成功～

ポイント

- ・ 樹木が高さを確保するために重さを賢く配分していることを、構造力学の視点から初めて解明。
- ・ 密度が連続的に変化する計算モデルを導入し、枝葉の影響を考慮した最大高さを初めて定式化。
- ・ 生物の智慧を取り入れた新しい構造設計や新材料創成への応用に期待。

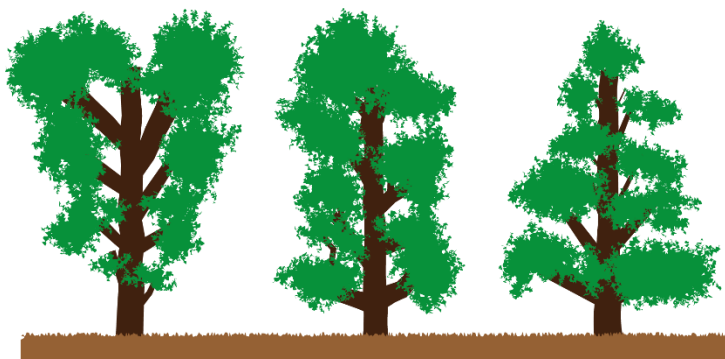
概要

北海道大学大学院工学院修士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、樹木が重い体を有しているのにも関わらず、安定して、光合成のために高く大きく成長していることに着目し、そこに樹木が成長過程で獲得してきた「重力に効率よく打ち勝つための仕組み」が秘められていると考え、重量物の配分バランスと実現可能な最大高さの関係を構造力学的な観点から紐解きました。

本研究では、樹木がもつ多様な重量分布を表現できるよう、密度が連続的に変化する数理モデルを構造力学の理論をベースに構築し、重量物の配分バランスと実現可能な最大高さの関係を定式化しました。その結果、樹木は、生存戦略のために光合成を効率化させるべく、葉がバランス良く光を受けられるように配置しつつ、高さを獲得するという目的を阻害することのないよう、極めて賢く枝葉を分布させていることが明らかになりました。

この成果は、樹木が進化の過程で獲得してきた「重力に効率よく打ち勝つための智慧」の一端を明らかにしたものです。次世代で求められる自然と調和する構造デザインを開発していくために、自然との関わり方を誰よりも知っている植物たちに訊ねることは、極めて合理的なアプローチといえます。本研究で解明された樹木の力学的合理性は、植物が持つ巧妙な重量配分の仕組みを模倣した、自然に優しい経済的な構造デザインや新材料の創製へと繋がります。さらに、本研究で構築した数理モデルは、重量分布と最大高さに関する普遍的な力学法則を示すとともに、複雑な力学問題を解決するための強力なツールとなり得るなど、極めて幅広い分野における応用可能性が期待されます。

本研究成果は、2022年2月7日（月）公開の *Scientific Reports* 誌にオンライン掲載されました。



本研究の概念図

高さを損なわないまま
枝葉をうまく配分したい



重量の分布によって
実現可能な最大高さは
どのように変わるのか？



実際の樹木はどうか？

【背景】

自然界にある植物の生存には光が必要です。光を得るため、植物は重力に抗いながら、高く大きく成長することが求められます。しかし、この高く大きく成長するという目的を果たす上で、力学的なハンディキャップとなる特徴を有している植物が存在します。

それが「樹木」です。樹木は断面が密であり枝葉も重く、植物の中でもとりわけ重たい体を有しています。植物が高さを際限なく大きくしようとした場合、ある高さに達すると自身の重さに耐えきれず、自立した状態を維持することができなくなってしまいます。そのため、樹木が有している「重い」という特徴は、自立した状態を維持しながら実現できる限界の高さを、小さくする要因となってしまいます。

しかし、実際には樹木はその長い寿命の中で、自然の極めて厳しい環境に適合しつつ、非常に安定して高く大きく成長しています。この事実は、樹木が人々の想像よりも遥かに賢く、自身の重量を巧みに配分していることを示唆するものです。この樹木の智恵に迫るべく、佐藤教授らの研究グループは構造力学的なアプローチを用いて、「重量物の配分バランス」と「実現可能な最大高さ」の関係を探りました。

【研究手法】

研究グループは、樹木の多様な重量分布を表現するべく、密度が連続的に変化する計算モデルを初めて導入し、構造力学の理論をベースに「重量物の配分バランス」と「実現可能な最大高さ」の関係を定式化しました。また、実際の樹木における幹と枝の重量バランスや、高さ方向の重量分布に関する調査結果に基づき、自然界の樹木が取っている重量の分布が、成長可能な最大高さにどのような影響を与えているのかを推定しました。

【研究成果】

上記の手法による研究の結果、樹木は高さを獲得するという目的を妨げることはないよう、極めて賢く枝葉を分布させていることが、理論的に初めて明らかとなりました。

本研究では、図1に示すような高さ方向への重量分布を有する円柱について、その最大高さを構造力学の理論に基づき定式化を行いました。力学的な観点からみると、成長可能な最大高さを大きくするには、重量物をなるべく低い位置に集中させ、重心を下げるのが望ましいと予想されます。まず、枝葉のみの重量分布（図1における緑の部分のみ）を考慮した場合について、解析した結果、高さ方向に一定の重量分布を取る場合に比べ、上から下に向かって重量が増加する場合の方が、最大高さをおよそ1.25倍も大きくできることがわかりました。

さらに、より現実的な樹木の最大高さを検討するために、前述のモデルを発展させ、図1に示すような幹と枝葉の重量を同時に考慮したモデルについて検討を行いました。これは、幹の重量は高さ方向に一定とし、枝葉の重量を高さ方向に変化させたものです。先ほどのモデルと同様の解析を行ったところ、次の2点が判明しました。

1. 「枝葉重量の増加」と「重量物の上部への集中」に伴い、最大高さは著しく低下する。
2. 枝葉重量を増加させたとしても、重量物を下部に集中させることにより、最大高さへの影響を小さく抑えることができる。

実際の樹木では、効率的な光合成のために、なるべく多くの枝葉を広く分布させたい、ということが想定されます。したがって、枝葉の総重量はなるべく大きく保ったまま、最大高さへの影響を限りなく小さく抑えることができるものが、樹木にとって理想の重量配分となります。

ここで、樹木における幹と枝葉の分布について、実際に測定を行っている既往の研究によると、枝葉の重量分布は、基本的に上から下に向かって増加する傾向にあることが報告されています。また、樹木の幹に対する枝葉の重量比は、およそ 0.1~0.6 程度であることがわかっています。これらの報告結果と、本研究の解析結果を照らし合わせたところ、樹木は、枝葉が一切ない場合と比較しても、最大高さが約 1%~15%ほど減少する程度に収まるよう、枝葉を巧みに分布させていました。すなわち、樹木は、前述した理想の重量配分を達成するように、自身の重量分布を決定していることが、新たに明らかになったのです。

以上のように、樹木における枝葉重量の分布や幹との重量バランスは、重い体を有している樹木が、最大高さを確保するために極めて合理化されたものであるといえます。なお、上から下に向かって枝葉を増やしていくという樹木の戦略は、力学的な側面だけでなく、光合成を効率化させるべく、葉がバランス良く光を受けるといった生物学的な意味でも、極めて理にかなっています。樹木の形態は、様々な制約を最小限の損失で乗り越え、その上で目的を最大限に達成するために、自身が長い年月をかけて学習し、それを積み重ね、辿り着いた答えだったのです。

【今後への期待】

ほとんどの植物は、その一生を同じ場所で過ごします。そのため、例えば樹木のような、極めて長い寿命を持つ植物は、目まぐるしく変化する厳しい自然環境に順応しなければ、生きていくことができません。樹木をはじめとする自然由来の構造物について、その形や仕組みを力学的な観点から紐解くことは、長年に渡って植物たちが積み重ねてきた智慧を、私たちに教えてくれるものです。また、次世代で求められる自然と調和する構造デザインを開発していくために、自然との関わり方を誰よりも知っている植物たちに訊ねることは、極めて合理的なアプローチです。

本研究で解明された樹木の力学的な合理性は、その巧妙な重量配分の仕組みを模倣した、自然に優しい経済的な構造デザインや、新材料の創製へと繋がります。それだけでなく、本研究により構築された数理モデルは、重量分布と最大高さに関する普遍的な力学法則を与えるとともに、複雑な力学問題を解決するための非常に強力なツールとなり得るものであり、極めて幅広い分野における応用可能性が期待できます。

【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) の助成を受けて行われました。

論文情報

論文名	Mathematical modelling to determine the greatest height of trees (樹木の最大高さを決定するための数学的モデリング)
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	Scientific Reports
DOI	10.1038/s41598-022-06041-w
公表日	2022年2月7日(月)(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)

T E L 011-706-6366 F A X 011-706-6366 メール tayu@eng.hokudai.ac.jp

配信元

北海道大学総務企画部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

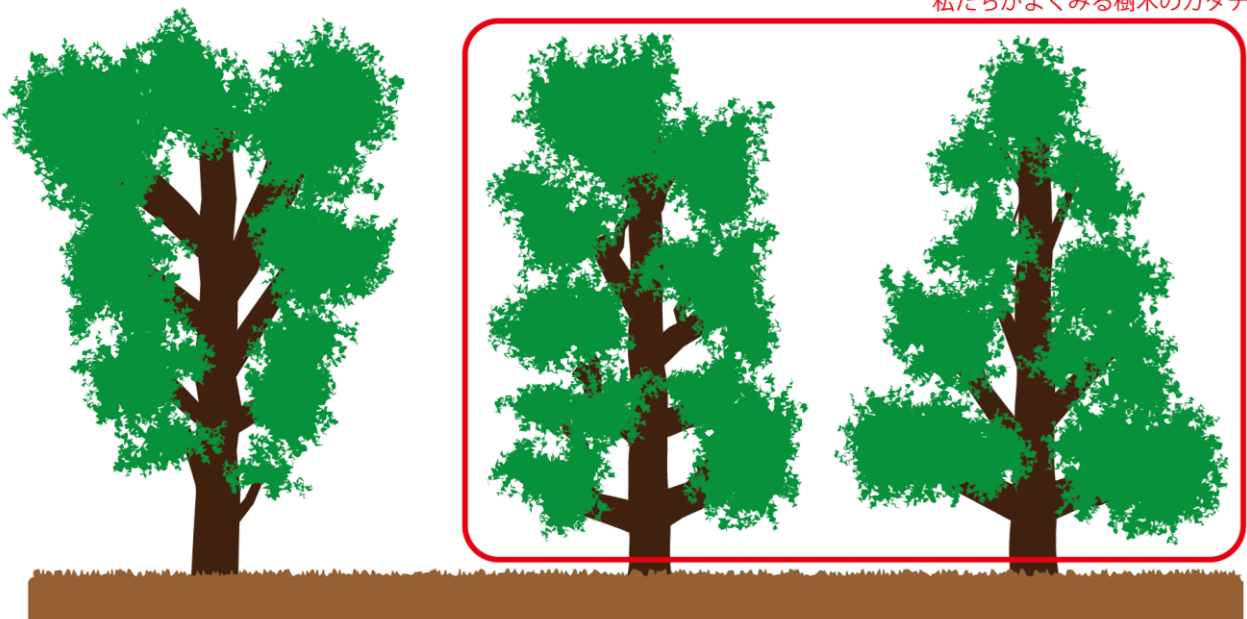
【参考図】

太く重い枝葉が
上部に集中する場合

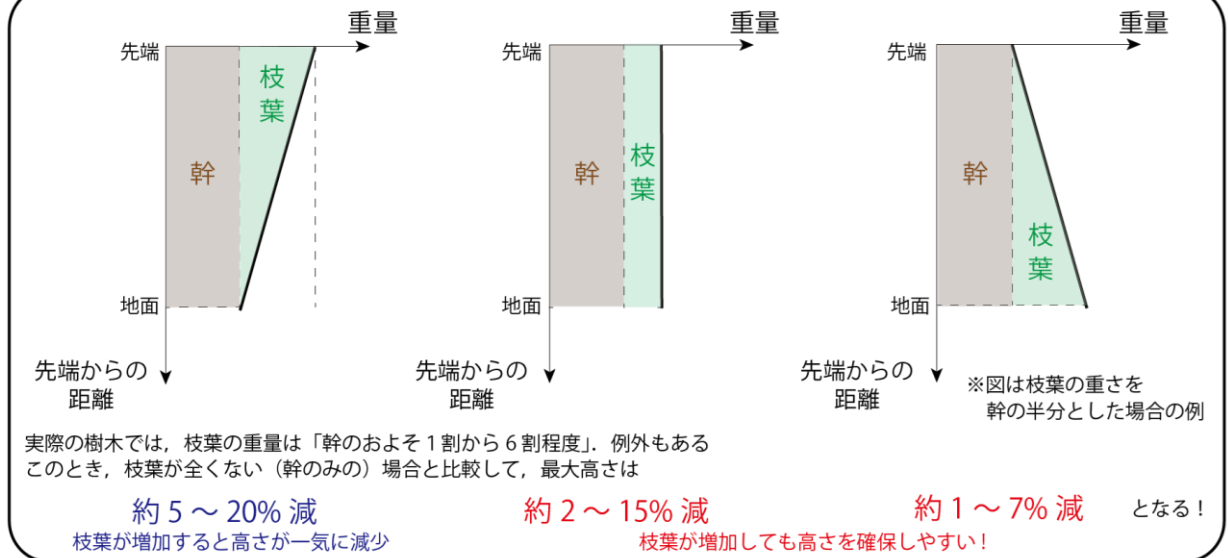


太く重い枝葉が
下部に集中する場合

私たちがよくみる樹木のカタチ



様々な樹木を表現できる重量分布モデルを導入して解析



樹木はかしく「枝葉を増やしつつ高さを確保する目的」を達成している!

図 1. 樹木の重量分布を考慮した数理モデルの構築と解析結果