HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	植物形態に潜む構造力学的学理の学際的探究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	金浜, 瞳也
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15844号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91995
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Tohya_Kanahama_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　金浜 瞳也

学 位 論 文 題 名

植物形態に潜む構造力学的学理の学際的探究
(Interdisciplinary Exploration of Structural Mechanics Principle in Plant Morphology)

人類は, 複雑な事象の本質を捉えるべく, その事象を代表する因子を抽出し, 検討が容易な概念へと落とし込む「モデル化」を駆使することで, 数多の興味深い知見を獲得してきた. 中でも, 特に材料力学・構造力学は, 人工物を対象とした力学モデルと理論の構築により, 現代では広く普及している自動車から, 橋やダムなどの社会基盤構造物に至るまで, 我々の生活を支える土台を築き上げてきた. さらに近年では, 人工物に対して発展してきた力学理論を用いて, 適者生存の厳しい自然環境を生き抜く植物の智恵を紐解き, これを工学的に応用する「植物形態模倣工学」が注目されるまでに至っている.

しかしながら, 植物への力学理論の応用は, 単にモノづくりに活きる工学的知見をもたらすだけのものではない. 対象が人工物から植物へと移ることは, より複雑な系に対応するために, 力学理論そのものを発展させることに繋がる. さらに, 種を絞った実験的アプローチを柱とする植物学的研究に対して, 植物に広く通ずる特徴を抽出した力学モデルに基づく理論的アプローチは, あらゆる植物に等しく作用する重力への合理的な抵抗機構をはじめとして, 植物が繁栄の過程で大切にしてきた「叡知の真髄」に触れることを可能にする.

本研究は, 植物形態に潜む構造力学的学理を広く探究し, その知見を整理・洞察することで, 植物の形態に蓄積されてきた叡智の真髄を解明することを目指すものである. 植物学分野の知見により植物を力学モデルへと落とし込み, その形態に秘められた合理性を紐解くための力学理論を構築する. この理論から導かれる知見の妥当性は, 植物学分野で蓄積されてきた統計データにより検証する. このような学際的なアプローチは, 既存の枠組みを超えて植物学・工学分野を融合させ, 新たな研究領域を開拓するための土台を築くものである. さらには, 遥か昔から自然と共生してきた植物を通して, 自然と共に生きる次世代的な工学の在り方を学ぶことができると考えられる.

第 1 章には, 本研究の背景を示す. 厳しい自然を生き抜く植物の形態は驚くほどに賢く, そして驚くほどに多様であるが, 種を貫いて成り立つ形状則が存在する. このような形状則をはじめとして, 植物の形態を力学的見地から広く洞察する意義について概説した.

第 2 章では, 本研究の着想の原点である, 樹木の高さが直径の 2/3 乗に比例することを理論的に示した Greenhill の研究と, その妥当性を立証した McMahon の統計的研究を中心に, 植物の形状則に関する広範な先行研究を説明した. また, Greenhill の計算モデルおよび最大高さ式における問題点を定量的に説明するとともに, 植物学的研究において混同されている「材質そのものや形状がなす固有の硬さ」と「内部水分による疑似的な硬さ」を整理することの必要性と, 木本植物と草本植物の特性から推測される身体支持機構の違いに着目する意義について述べた.

第 3 章では, 植物学における木本植物の定義を踏まえ, その形態に秘められていると推測される「重量と剛性の巧妙な配分」に着目し, これを考慮した自重座屈理論を開発することで, 木本植物の形態に潜む力学的合理性を解明した. Greenhill のモデルにおいて考慮できていない, 先端に向かっ

て径を細くするテーパー形状や, 重たい枝葉の重量分布, 竹に見られる断面の中空化について, それぞれの要素を考慮した自重座屈理論を開発し, 最大高さに与える影響について解明した. これらの知見と生態学的知見を組み合わせ, 「植物はテーパー形状と中空断面のどちらを採用すべきか」という命題について, 最大高さと生存戦略の観点から考察を示し, 一個体で生存する樹木のような場合も, 地下茎で接続された集団で生存する竹のような場合も, 高さ方向への成長のためにはテーパー形状が有効であることを初めて理論的に示した. また, Greenhill の式から得られる理論上の最大高さは, 実際の高さの 4 倍であることが知られている. これについて, 初期たわみをはじめとする初期不整や, 地盤-根系の相互作用による固定力の不完全性を考慮した自重座屈理論を構築することで, この問題における厳密な固有方程式を初めて理論的に導出し, 実際の樹木の高さが巧妙に決定されていることを明らかにした. さらに, 本章において扱ったすべての計算モデルで, 自重座屈に対する最大高さが直径の 2/3 乗に比例することを示した.

第 4 章では, 木本植物とは対照的な力学特性を有する軽く柔らかい草本植物について,「張力を巧みに活用した剛性発現の仕組み」に着目した. 草本植物では, 内部水分の消失によって大きく変形する様相が観察される. これは, 内部水分がもたらす膨圧に起因して軸方向張力が生じ, 曲げ剛性とは本質的に異なる「幾何剛性」によって身体を支えていることを示唆するものである. そこで, 自重と張力を受ける水平方向に伸長した片持ち梁を用いて, 膨圧による自重たわみの抑制効果を定量的に解明した. その結果, 草本植物の「細く・薄く・柔らかい」という, 一見すると力学的に不利な特性が, 膨圧によるたわみ抑制効果を高めていることが分かった. さらに, 膨圧を考慮した自重座屈理論を構築し, 膨圧による引張力が最大高さを飛躍的に向上させることを理論的に示すとともに, この場合の最大高さも直径の 2/3 乗に比例することを明らかにした.

第 5 章では, 本研究で得られた形状則の総括を行い, 木本植物における 2/3 乗則の普遍的な成立と, 幾何剛性を考慮した最大高さの定式化における固有値の挙動から, 膨圧による引張力が自重による体積力を上回るとき, 自重座屈の発生そのものを回避できることを示した. そして, 両者の力学特性の差異から, 草本植物が自重座屈の発生を回避している可能性を指摘し, 植物学分野における測定データを用いて, この仮説の妥当性を立証した. ここで得られた「膨圧による軸方向張力」と「自重による体積力」を用いた自重座屈の発生規準は, これまでに分類が曖昧であった竹のような植物も含め, 木本植物と草本植物を明快かつ簡潔に分類できるものである.

第 6 章「結論」では, 本論文の総括を示し, 今後の展望および課題について述べた.

以上のように, 本研究では植物学分野における観察に基づく知見を用いて, 植物の力学挙動を支配する要素を抽出し, これを反映させた計算モデルを構築した. そして, これに対応するための力学理論を開発し, 植物形態に潜む力学的合理性をはじめとする工学的知見と, 形状則をはじめとする生態学的知見を獲得した. さらに, これらの妥当性や有効性を, 植物学分野における膨大なデータをもとに検証した. このような本研究のアプローチは, 従来の独立した研究体系では明らかにできない知見の獲得を可能にしただけでなく, 工学と植物学を結びつける新たな研究領域の礎となるものである.