

Press Release

報道機関 各位

資料提供 令和5年7月11日
秋田県立大学
システム科学技術学部 機械工学科
担当者 助教 津川 暁
TEL 0184-27-2191
【共同研究グループ】
岩手生物工学研究センター
立命館大学
山梨大学

イネが自重で倒れないためには穂に最も近い節間の特性が 重要であることを発見

～イネの形と硬さに存在するトレードオフ関係を
考慮した数理力学モデルを構築～

■ 概要

イネなどの穀物は、自重や暴風などによる倒伏により、収量や品質が大幅に低下します。この倒伏を低減させるため、これまで、イネの倒伏に関わる特性（倒伏耐性^{*1}、とうふくたいせい）の研究が盛んに行われてきました。しかしながら、特性の異なる品種間を比較する方法は、これまで確立されていませんでした。

本研究では、まず背丈など特性の異なるイネ12種について詳細な形態測定や力学測定（曲げ試験）を行いました。その結果、イネの稈^{*2}の太さと硬さにはトレードオフ関係^{*3}があること、つまり稈が太いタイプ（柔らかく太い）と硬いタイプ（細くて硬い）が存在することを発見しました（図1B）。

秋田県立大学、岩手生物工学研究センター、立命館大学、山梨大学の共同研究グループは、材料力学の弾性柱理論を応用し、どのような形あるいは硬さの条件でイネが倒伏するかを定量的に明らかにする力学モデルの構築に初めて成功しました。この力学モデルは、特性の異なるイネを比較できるため、これまで解析できなかった品種間の比較も可能になります。

この力学モデルを用いた解析により、穂に最も近い節間^{*3}の特性が自重で倒れないために重要であることが明らかになりました。このことから、穂に最も近い節間の特性を改良することで、イネの倒伏耐性を向上できる可能性が示唆されました。この研究成果から、力学理論と育種学の融合により、倒伏耐性が向上した新たなイネ品種の作出が期待されます。

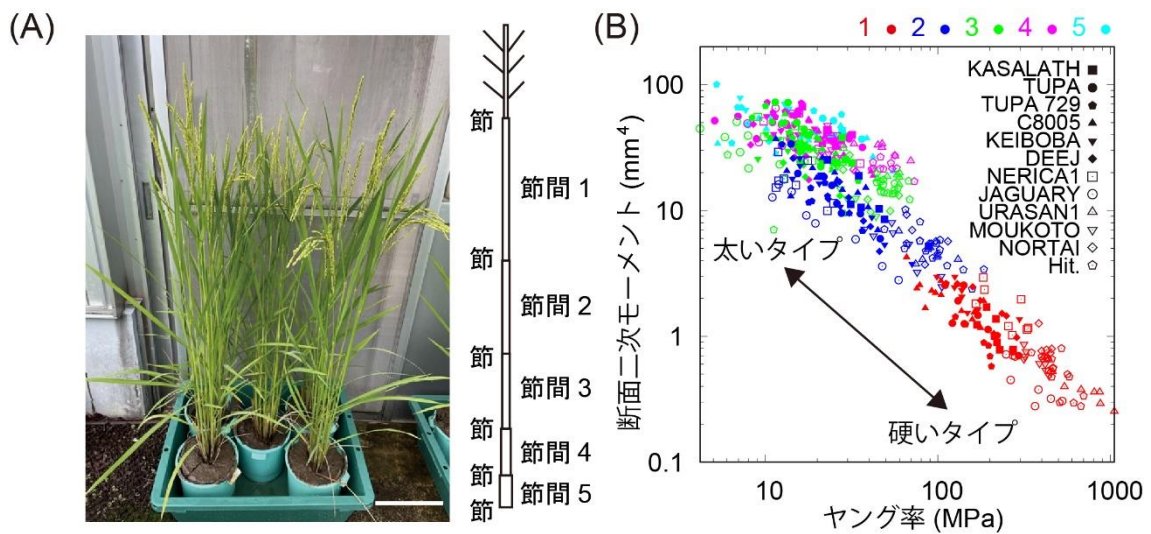


図 1: イネの太さと硬さにトレードオフ関係があることを発見。(A) イネの写真 (左)。イネの模式図と節間番号 (右) (B) 12 品種のイネのヤング率(硬さの指標)と断面二次モーメント(太さの指標)の測定結果を、それぞれ X 軸と Y 軸とシグナフを作成。イネには柔らかく太いタイプ (主に 5 節間群) と細く硬いタイプ (主に 4 節間群) が存在する。

■ 成果掲載誌

本研究成果は、電子ジャーナル Scientific Reports に令和 5 年 7 月 4 日午前 10:00 (グリニッジ標準時、日本時間 JST 18:00) に掲載されました。

論文タイトル: Thickness-stiffness Trade-off Improves Lodging Resistance in Rice (太さ-硬さトレードオフによるイネの倒伏耐性向上)

著者: 津川暁^{*1}, 島弘幸^{*2}, 石本志高^{*1}, 石川和也^{*3, 4, 5}

¹ 秋田県立大学システム科学技術学部

² 山梨大学大学院総合研究部

³ 岩手生物工学研究センターゲノム育種研究部

⁴ 奈良先端科学技術大学院大学

⁵ 立命館大学立命館グローバル・イノベーション研究機構

■ 研究の詳細

・ 研究の背景

イネはアジアやアフリカを中心とする多くの国の重要な主食であり、イネの収量増加を達成することは農業の大きな目標です。しかし、収量を上げるためにはイネが自重や風で倒れてしまわないように力学的に支持する必要があります。先行研究によって、イネの倒伏には (1) 稈 (かん) が曲げによって大きくたわみ戻らなくなる曲げ型、(2) 稈が過重によって破壊され折れてしまう破壊型、(3) 根が折れて倒伏してしまう根倒伏型、の 3 つ

の型があることが知られていました。その中でも、(1)と(2)の曲げ型と破壊型が良く研究されており、節間の長さや太さ、地上から穂までの高さなどのイネの特性が、これらの倒伏に重要であることがわかっていました。しかしながら、イネの品種改良に重要な、特性の異なる品種間の比較を行うための方法は確立されていませんでした。

・本研究の成果

本研究は、当時岩手生物工学研究センターに所属していた石川和也研究員が、倒伏耐性の高い品種を同定するために様々なイネ品種の稈の形と硬さを計測したことが始まりでした。その結果、比較的背の高い5節間群(5つの節間を持つ品種群)と背の低い4節間群(4つの節間を持つ品種群)で稈の形や硬さが大きく異なることがわかりましたが、最終的にどの品種の倒伏耐性が強いのかは不明でした。さらに解析を進めたところ、驚くべきことに背の高い5節間群の稈は太く柔らかい性質をもち、背の低い4節間群の稈は細く硬い性質をもつことがわかりました。この性質はとても興味深く、イネは稈の高さによってその特性を変えて倒伏しないようにしていることを示しています。私たちはこの性質を、太さを優先させると硬さを犠牲にし、硬さを優先させると太さを犠牲にするような、一得一失の関係であることから、太さ-硬さトレードオフ関係と名付けました。

発見されたトレードオフ関係をさらに詳しく調べるために、特性の異なるイネ間で比較可能になるような物理量を探索しました。様々な指標の中で、無次元パラメータ^{*5}である細長比($\lambda_i = L_i/R_i^2$: L_i は*i*番目節間の長さ、 R_i は*i*番目節間の断面二次半径)を形態安全指数と定義し、重力-曲げ剛性比($\alpha_i = F_i L_i^3/E_i I_i$: F_i は*i*番目節間の先端荷重、 E_i は*i*番目節間のヤング率(硬さの指標)、 I_i は*i*番目節間の断面二次モーメント(太さの指標)、および $\beta_i = \rho_i L_i^2/E_i I_i$: ρ_i は*i*番目節間の重量)を力学安全指数と定義しました。無次元パラメータは長さのような空間スケールに依らない性質を表現できるため、この λ 、 α 、 β によって、特性の異なるイネの倒伏耐性を比較可能な形式で特徴づけることが可能になります。その結果、図2Aに示されるようにそれぞれの安全指数を比較することができ、驚くべきことに、地上に最も近い節間でこれらの安全指数が5節間群と4節間群でほぼ同程度であることが見出されました(図2B、C)。

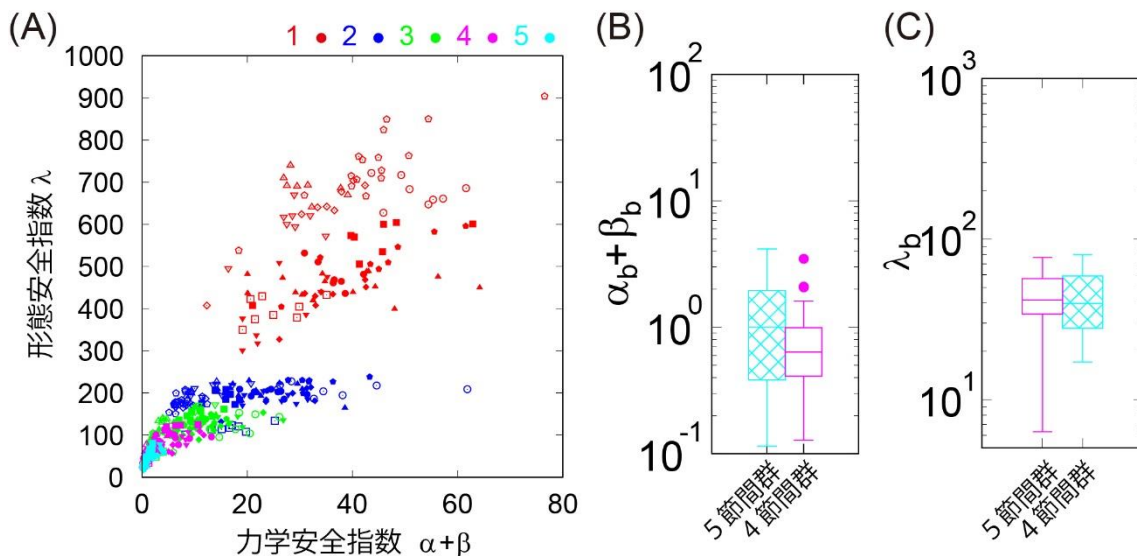


図 2: (A) 形態安全指数と力学安全指数を示す定量解析結果。(B) 地上に最も近い節間の形態安全指数。(C) 地上に最も近い節間の力学安全指数。

そこで本研究グループは、この力学安全指数が真にイネの倒伏耐性を特徴づけているかどうかを判定するために、弾性柱理論を構築しました。弾性柱理論では、電信柱のような柱構造がどの程度の重量で曲がるかを定量的に特徴づけ、柱の安全性を評価することができます。図 3A に示すような加重条件で、図 3B の i 番目の節間の局所角度 θ_i は次の式に従うことがわかりました。

$$\frac{d^2\theta_i}{ds_i^2} = -(\alpha_i + \beta_i s_i) \sin \theta_i, i = 1, 2, \dots, b$$

ここで b は節間数で、 s_i は i 番目の節間の上方から計算した節間曲線上の距離を表します。この方程式の導出によって、イネがどのような相対的荷重量 α_i および β_i によってどのくらいの角度たわむかが定量的に議論可能になりました (図 3C、D、E)。この方程式は近似的に解くことができ、どのパラメータが最も倒伏耐性に影響を与えるかを調べることができます。解析の結果、穂重と関わりが深い穂に最も近い節間の長さ、硬さ、外径の順番で自重に対する倒伏耐性に効果的であることが初めてわかりました。

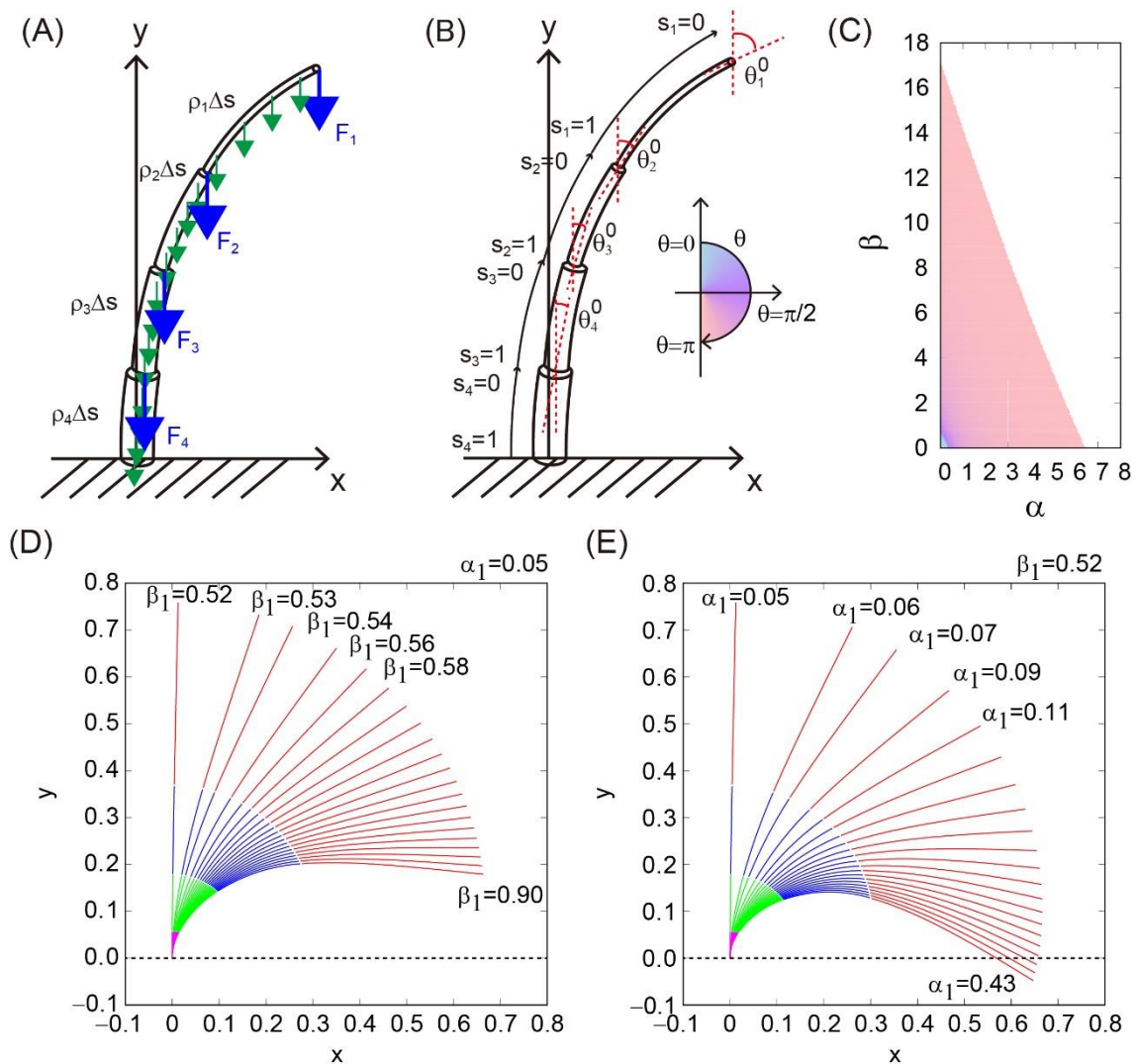


図 3: (A) イネ節間にかかる自重および先端荷重の概念図。(B) イネ節間に沿った曲線上の距離 s と先端角度 θ の概略図。カラープロットはイネのたわみ角を表す。(C) 重力曲げ剛性比 α および β に対するたわみ角の計算結果。(D) 実際のひとめぼれ形状データを代入し、 α_1 を固定し β_1 を変化させたときのイネの形。(E) β_1 を固定し、 α_1 を変化させたときのイネの形。

・今後の期待

本研究の達成により、形態安全指数 λ と力学安全指数 $\alpha + \beta$ を実測値により計算することで、異なる品種間の倒伏耐性を容易に比較できるようになります。また、品種間の比較により、品種ごとの倒伏の原因究明にも役立ちます。さらに、弾性柱理論によって穂に最も近い節間の重要性が見出されました。そのため、その特性を改良することで、倒伏耐性が向上したイネ品種の作出につながり、食料問題の解決に貢献することが期待されます。今後も、農作物に関する力学理論の基盤を構築することで、品種改良などの農学への貢献が期待されます。

今回の研究成果は、国際連合が 2016 年に発行した 17 項目の「持続可能な開発目標 (SDGs)^{*6}」のうち「2. 飢餓をゼロに」および「3. すべての人に健康と福祉を」に貢献することが期待されます。

■ 用語解説

(1) 倒伏耐性

穀物や作物の倒伏に対する抵抗性を指す。

(2) 稈

イネの茎の部分を目指す専門用語。一般の植物では茎や幹という用語が使われるが、イネ科の植物に対しては稈という用語が使われる。1つの根に対して複数の稈が生えることでイネの一個体を構成する。

(3) トレードオフ関係

両立できない関係性を指す。一方を選択すれば別な片方を失う、という関係のことを表現する。

(4) 節間

葉が出ている部位を節といい、節と節の間を節間という (図 1A 右)。

(5) 無次元パラメータ

単位をもたないパラメータのこと。通常の物理量は、ある特定の単位 (m や kg など) をもつ量として表されるが、ある典型値でこれを除することで、単位を持たない数値に表現し直すことができる。この工夫によって、単位の影響を受けずに、異なるシステムや現象を定量的に比較することが可能となる。

(6) 細長比

材料力学や構造工学で用いられる、部材が細くて長い、太くて短いを示す数値。部材のたわみを議論する際の重要なパラメーター、数値が高いほどたわみやすい。

(7) 持続可能な開発目標 (SDGs)

2015 年 9 月の国連サミットで採択された「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」に記載された 2030 年までの国際目標。17 のゴール、169 のターゲットから構成されている。

■ 研究体制と支援

本研究は、秋田県立大学 (津川暁 助教)、立命館大学 (石川和也 助教)、山梨大学 (島弘幸 教授) との共同研究として行われました。

本研究は、文部科学省の科学研究費補助金 (JP20K15832, JP21H00362, JP21H00378)、国立研究開発法人の戦略的創造研究推進事業 (CREST (JPMJCR2121)) の支援を受けて行われました。