

Press Release

報道機関 各位

資料提供 令和5年5月9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】
奈良先端科学技術大学院大学
東京工業大学
熊本大学

植物の根の浮き上がり現象の力学的仕組みを解明

～根の成長による浮力と土圧を上回る 根毛の強靱な摩擦効果～

■ 概要

植物の根は水と栄養を獲得するとともに地上部を力学的に支えるために土中に潜り込む必要があります。しかしながら、土中へ潜り込むには植物体の健全な成長や適切な土壌環境が必要であり、適切な条件でないと根は土中に貫入（かんにゅう）することができません。そのため、どのような環境条件あるいは力学条件で根の貫入が起きるかを理解することは植物科学の重要な課題でした。

本研究では、若いハツカダイコンの根が、土に隙間が空いていない高密度の土壌において、貫入できずに浮き上がる現象を発見しました（図1A）。また、播種から1日目の根毛の発達していない初期根でもまた貫入できずに浮き上がることもわかりました（図1B）。これらの実験結果は、土の環境条件および根の成長力学条件が貫入にとって重要であることを定量的に明確にしました。

東京工業大学、秋田県立大学、熊本大学、奈良先端科学技術大学院大学の共同研究グループは、土質工学の基礎杭に発想を得た根の貫入力学モデルを構築し、どのような力学条件下で根が貫入できるかを数理的に表現する根の貫入基準式を導出することに初めて成功しました。

この知見を利用することにより、植物科学におけるミクロな細胞成長動態と人間の目で見えるマクロな根の貫入や浮き上がりを結びつけることができるため、植物生理学の進展に寄与するばかりでなく、生物模倣工学や新しい基礎杭の提案など他分野に波及性の高い研究手法になる可能性があります。

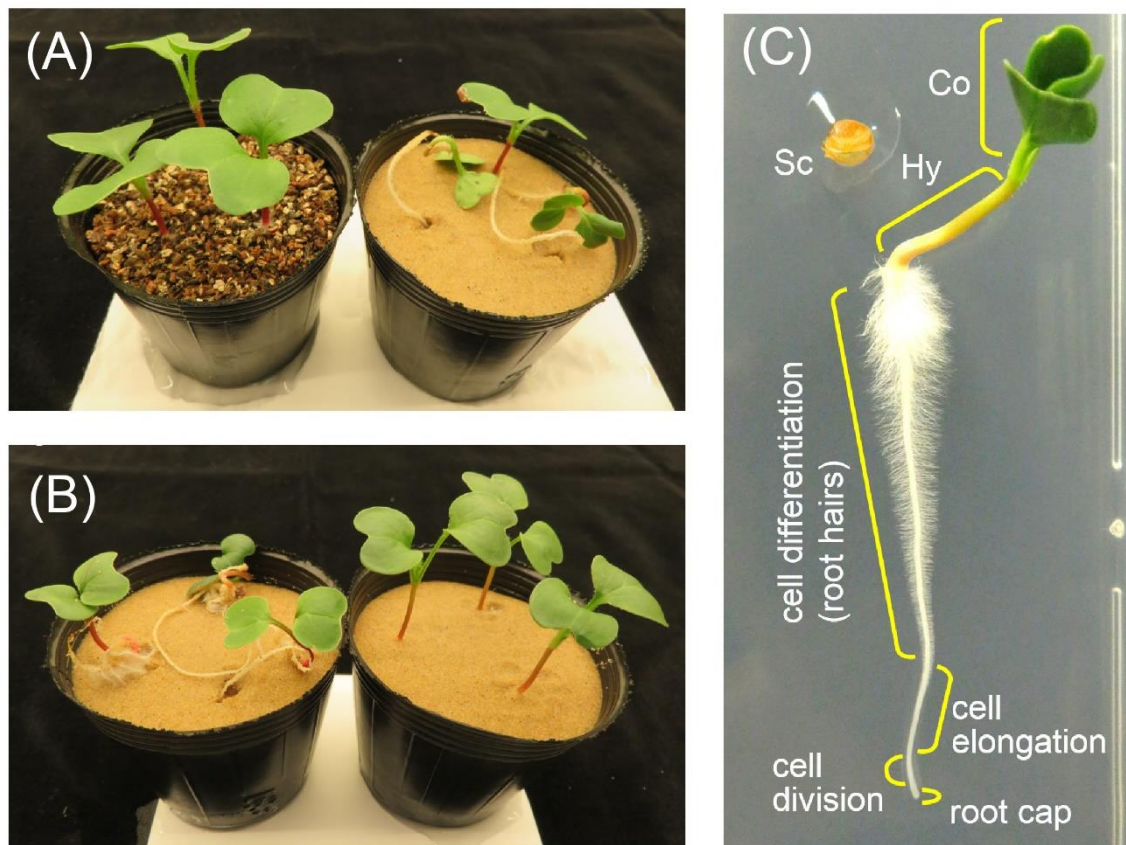


図 1：若いダイコンの根の浮き上がり現象を発見。（A）植物の根は適切な土壌環境の下でないと土から浮き上がってしまう。（B）側面構造（側根や根毛）が十分に発達しないと土中に潜ることができない。（C）植物の根に根毛が発達することで、根の先端部位にある成長による浮力を中和し、土中へ潜ることが可能になる。

■ 成果掲載誌

本研究成果は、米国電子ジャーナル Scientific Reports に令和 5 年 5 月 9 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：A Mechanical Theory of Competition between Plant Root Growth and Soil Pressure Reveals a Potential Mechanism of Root Penetration (植物根部の成長と土圧の競合を考慮した力学理論による根部貫入の潜在的な仕組みの解明)

著者：Haruka Tomobe, Satoru Tsugawa, Yuki Yoshida, Tetsuya Arita, Allen Yi-Lun Tsai, Minoru Kubo, Taku Demura, Shinichiro Sawa

■ 研究の詳細

・ 研究の背景

植物の根は土壌を突き抜けて水と栄養を得る水理学的な機能をもつことに加え、地上部

を支える支柱として力学的な機能も有する重要な器官です。根が土壌へ貫入するための必要条件として、根が土に入りやすい形状をしていることや、強く下方方向に成長することが重要であると考えられてきました。例えば、根冠は粘液を分泌し外側の細胞を脱落させることにより、土に潜りやすくしていることが明らかにされており、また、根端形状は根が貫入するために最適な形状をしている可能性も指摘されています。さらに、主根に加えて、側根や根毛などの根の側面構造の成長に由来する摩擦力も貫入を助ける役割をもつと考えられています。このように先行研究によって、主根や側面構造（側根や根毛）の成長と形状や土との摩擦相互作用が重要な要素であることがわかっていましたが、実際にどのような条件で根が貫入できるのかはこれまで調べられていませんでした。

・本研究の成果

本研究の始まりは、熊本大学の研究グループが植物の根と土の摩擦効果を理解するために様々な品種の根を観測したところ、土に隙間が少ない豊浦砂に対して根が土中に潜ることができず、地上部に浮き上がる現象を発見したことがきっかけでした（図 1A）。また、別の実験で根が十分に発達していない場合にも根が浮き上がる事がわかっていたため、根の貫入条件は土だけで決まるのではなく根の成長過程も重要であることがわかりました。そこで、この根の浮き上がり現象の力学的な仕組みを解明するために、土質工学で対象とする基礎杭の力学を根に応用することを考案しました。

土質工学では図 2A のように基礎杭に下向きにかかる荷重に拮抗するように、側面構造の摩擦力や貫入抵抗力（土圧）は上方向にかかります。一方で、植物の根では、成長領域が先端付近に存在しているため、荷重に対応する外力は上下双方向に働きます。そのため、根毛による摩擦力は逆向きに働き、それによって、土に貫入する力を得ていると考えられます（図 2B）。つまり、植物は自らの成長力と根毛摩擦を組み合わせることで下方向の土圧に打ち勝つことで下方向に進展できることが明らかになりました。この結果は、根毛の摩擦係数と貫入抵抗係数のグラフで定量的に理解できます。しかし、この力学モデルでは、根毛の発達が未成熟な場合の根の浮き上がり現象を説明することはできませんでした。

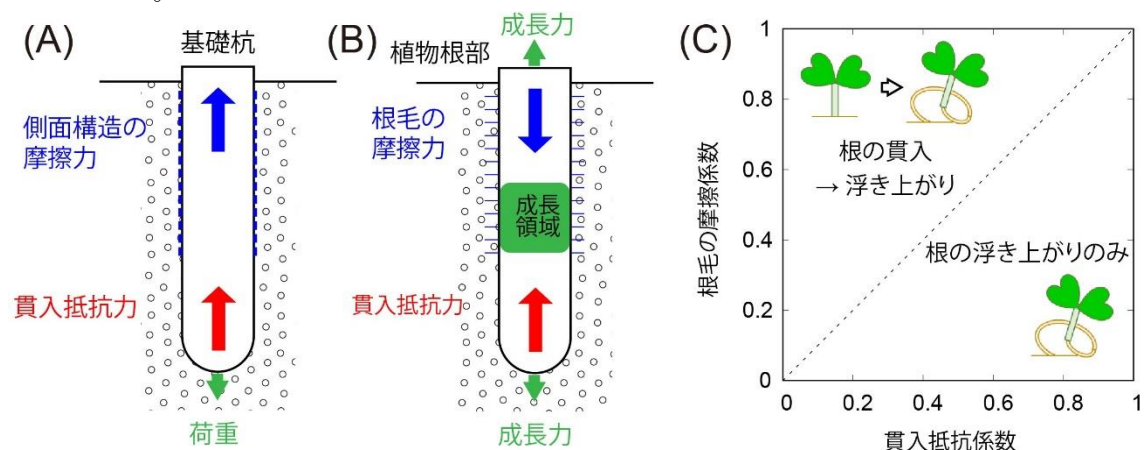
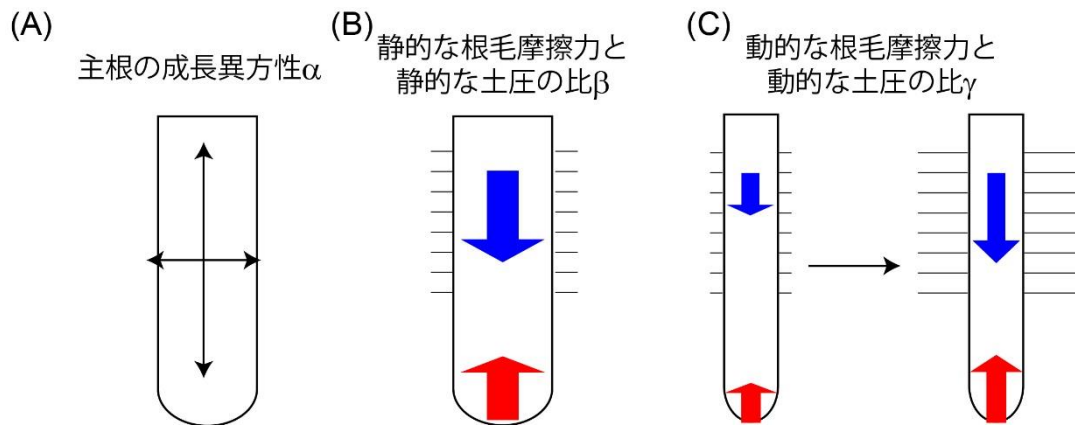


図 2: 基礎杭と異なる根の特異的な力のかかり方と線形応答領域の根の貫入基準を示す定量解析結果。(A) 建築工学における基礎杭と下方向の荷重に対抗する側面構造の摩擦力と先端部の貫入抵抗力の模式図。(B) 植物科学における植物根部と上下方向の成長力に対抗する側面構造の摩擦力と先端部の貫入抵抗力の模式図。(C) 根毛の摩擦係数と先端

部の貫入抵抗係数によって根の浮き上がりやすさが決まる。

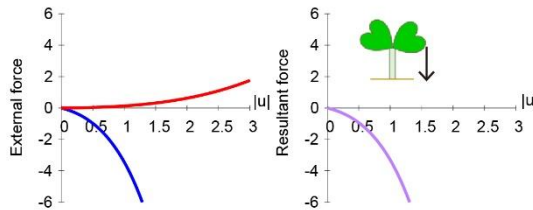
そこで私達は、この考え方をさらに発展させて、実際の実験環境に近い力学モデルを再構築しました。具体的には主根の成長異方性 α を導入することで、下方向への成長しやすさを考慮しました(図 3A)。また、ある時刻で止まった状態での静的な根毛摩擦力と静的な土圧の比 β を導入することでその根形状が持つ上下方向の力の拮抗を表現することができます(図 3B)。さらに、これらに加えて、基礎杭と異なり植物特有の条件である根毛の成長によって摩擦力が増加する効果や土中に潜ることによって下側の隙間がなくなり土圧が上がる効果を定義し、動的な根毛摩擦力と動的な土圧の比 γ が適切なパラメータであることを明確にしました(図 3C)。これらをまとめると、根が土中に潜るための基準式が導出され、根が貫入するか起き上がるかを定量的に明確に考察することが可能になりました(図 3D)。



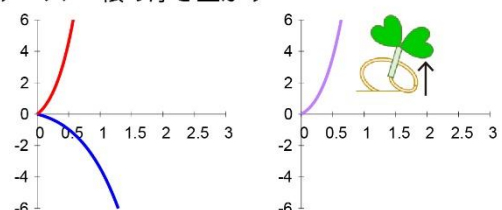
根が土中に潜るための基準式

$$F(\alpha, \beta, \gamma, u) = -(1+u)(\exp(u) - 1) + \pi \beta (1 + \alpha u)^2 (\exp(\gamma u) - 1)$$

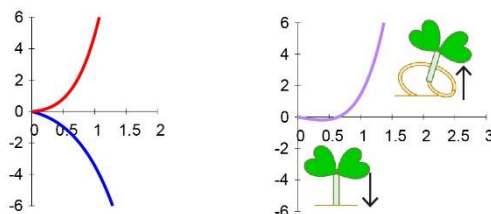
(D) ケース 1: 根の貫入のみ



ケース 2: 根の浮き上がり



ケース 3: 貫入→浮き上がり



ケース 4: 浮き上がり→貫入

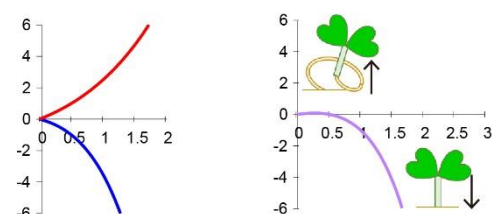
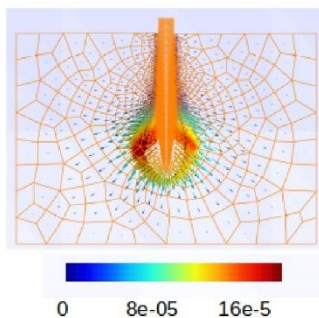


図 3 (A) 主根の成長異方性 α の概念図 (B) 静的な根毛摩擦力と静的な貫入抵抗力の比 β の概念図 (C) 動的な根毛摩擦力と動的な貫入抵抗力の比 γ の概念図 (D) 基準式で得られる様々なケースの根の動態とそれぞれの力の大きさ(左)と合力(右)

・今後の期待

本研究の達成により、根が土中に貫入できるかどうかをパラメータ α 、 β 、 γ により定量的に議論することができます。例えば、図4のように有限要素法（※1）シミュレーションにより β の大小によって土へ貫入しやすさが異なることを明確に示すことができます。このように実際の観測をベースに理論的な基準式を立てて数値シミュレーションで実証する研究が増えていけば、今後さらに植物科学による詳細な生物学的知見と土質力学・構造力学による簡潔な力学的知見が融合し、実験と理論を横断的に考察する学術領域が生まれることが期待されます。

(A) β が小さい場合



(B) β が大きい場合

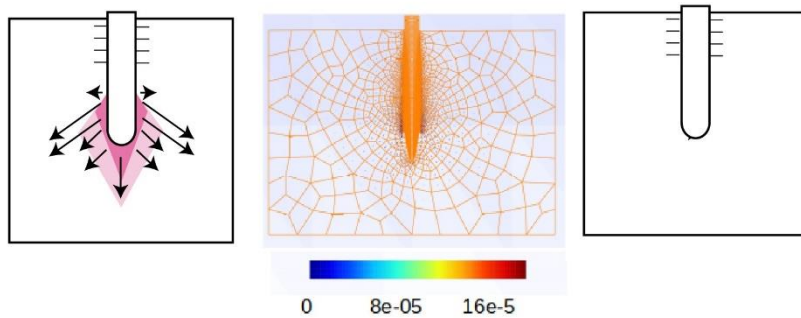


図4 有限要素法シミュレーションによる根を下向きに変化させた場合の土の変位カラープロット。 β が小さい場合(A)と β が大きい場合(B)では、土中の変位が大きく異なる。

■ 用語解説

(1) 有限要素法

主に時空間的な変動を予測する数値解析手法である。解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に得る方法として知られる。

■ 研究体制と支援

本研究は、東京工業大学（友部遥 助教）、秋田県立大学（津川暁 助教）、奈良先端科学技術大学院大学（出村拓 教授）、熊本大学（澤進一郎 教授/吉田祐樹特任助教）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（JP18H05484, JP18H05487, JP20K22599, JP20K22599, JP20K15832, JP20H00422, JP20KK0135）の支援を受けて行われました。

■ 問い合わせ先

<研究に関すること>

- ・秋田県立大学システム科学技術学部機械工学科
助教 津川 暁（つがわ さとる）

<報道担当>

- ・秋田県立大学総務・企画チーム

三浦 大翔（みうら ひろと）

TEL 0184-27-2000 FAX 0184-27-2194 Email office_honjo@akita-pu.ac.jp

- ・奈良先端科学技術大学院大学 企画総務課 渉外企画係

TEL 0743-72-5063/5026 FAX 0743-72-5011 Email s-kikaku@ad.naist.jp

- ・熊本大学総務部総務課広報戦略室

TEL 090-342-3271 FAX 090-342-3110 Email sos-koho@jimui.kumamoto-u.ac.jp