

Press Release

報道機関 各位

資料提供 令和4年8月2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
東京大学生産技術研究所

新手法で植物の持つ強靱な環境適応力の物理に光

～原子間力顕微鏡によるミクロな物理計測に 建築学のマクロな構造理論を適用～

■ 概要

植物細胞は、硬い細胞壁が浸透圧に起因する内圧（膨圧）による膨らみを抑えることで形作られています。植物は水の取り込みによって内圧を巧みに制御することで、雨風などに立ち向かう直立姿勢を維持する強靱な環境適応力を持っていると考えられています（図1）。そのため、細胞内圧と細胞壁の性質の関係を理解することが植物科学の重要な課題でした。

細胞の形や細胞壁の性質を詳細に測定する方法として原子間力顕微鏡（AFM）が知られています。しかし、AFMで測定される値には細胞壁自身の持つ外力に対する抵抗力（曲げ剛性、いわゆる硬さ）と膨圧に依存する諸々の成分（膨圧、張力）が含まれており、物理量として分離することが具体的な課題でした（図2）。

秋田県立大学、奈良先端科学技術大学院大学、東京大学生産技術研究所の共同研究グループは、タマネギ表皮細胞のAFM実験によるミクロな解析に建築構造学で用いられるマクロな構造理論で知られる「弾性シェル理論」による力学モデルと、レーザー穿孔による膨圧解放を組み合わせ、AFM計測で細胞壁弾性成分と内圧成分を分けて推定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、表皮細胞をはじめとする植物の花、葉、根、茎などの様々な器官の細胞壁弾性とその内部の内圧を同時推定することができ、植物の力学的性質を明らかにする革新的な手法になる可能性があります。

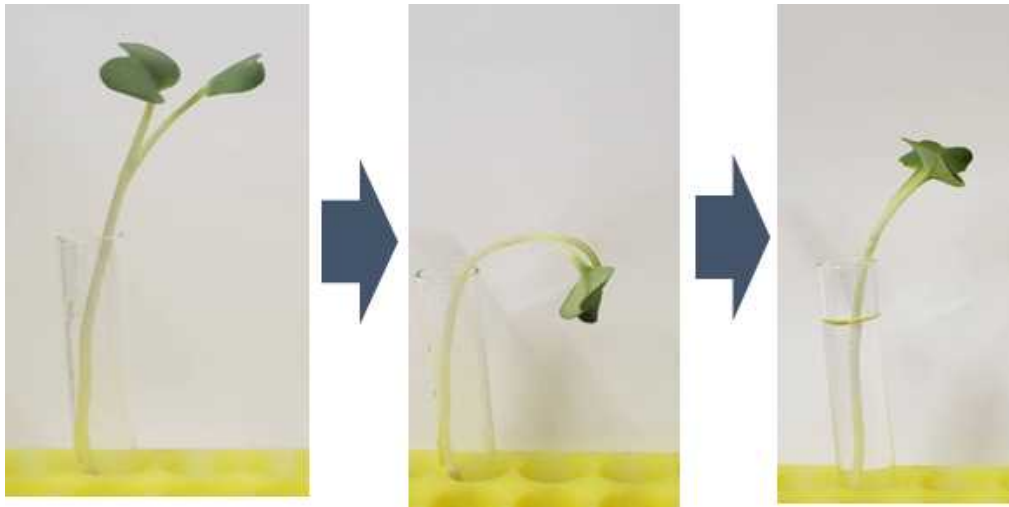


図 1：植物の環境適応力を表す内圧状態と形態の関係。十分な細胞内圧があり細胞壁が張りを持つ状態（左）から細胞内圧が下がって細胞壁が張りを持たず萎れた状態（中央）になるが、再度水を与えて細胞内圧が上がると張りを回復する（右）。

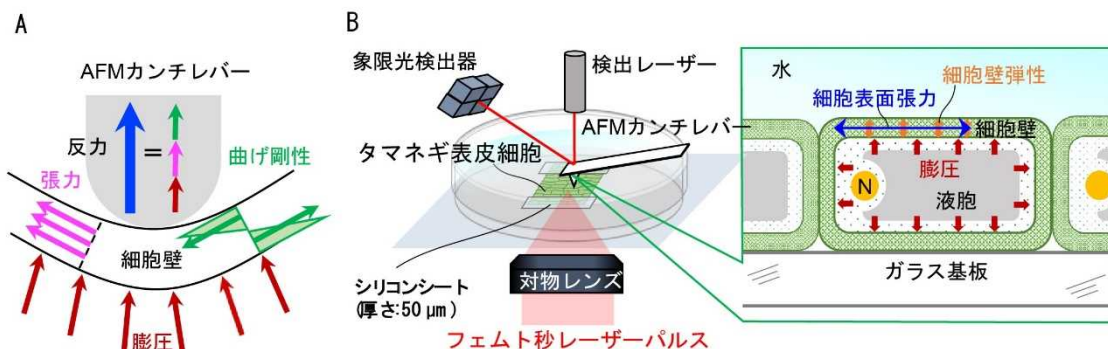


図 2：(A) 原子間力顕微鏡 (AFM) のカンチレバーの反力には、主に細胞壁弾性（曲げ剛性）成分と内圧（膨圧+張力）成分が含まれている。

(B) (左) AFM の実験装置とフェムト秒レーザーパルスによる穿孔過程の概念図。

(右) タマネギ表皮細胞はガラス基板上に 1 層で固定され、水で覆われた表面に AFM カンチレバーを押し当てる。

■ 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 4 年 8 月 1 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：Elastic Shell Theory for Plant Cell Wall Stiffness Reveals Contributions of Cell Wall Elasticity and Turgor Pressure in AFM Measurement (植物細胞壁の硬さ評価のための弾性シェル理論により AFM 実験の細胞壁弾性と膨圧の寄与を解明する)

著者：Satoru Tsugawa, Yuki Yamasaki, Shota Horiguchi, Tianhao Zhang, Takara Muto, Yosuke Nakaso, Kenshiro Ito, Ryu Takebayashi, Kazunori Okano, Eri Akita, Ryohei Yasukuni, Taku Demura, Tetsuro Mimura, Ken'ichi Kawaguchi, and Yoichiroh Hosokawa

■ 研究の詳細

・ 研究の背景

植物形態の柔軟性と多様性を理解するためには、細胞壁の力学特性とその膨圧に対する応答性を知ることが重要な課題です。しかし、細胞壁の力学特性は、植物体の水の含有率や細胞壁材料特性などの物性要因の他に、細胞の形状やサイズなどの幾何要因にも依存するため、それらひとつひとつの寄与を分解して理解する必要があります。タマネギ表皮細胞は、膨圧や細胞壁の配向性などの実測実験が進んでおり、特に、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy; AFM, 図 2B) を用いて表皮細胞の正確な形状を計測できることから植物細胞の力学特性を調査するモデル植物として研究が進んでいます。

AFM は、従来、カンチレバー先端を試験体に押し込んだ際のくぼみの深さと、加えられた力の傾き (計測弾性) により、細胞壁弾性 (ヤング率) を評価する有望な方法の 1 つとされてきました。しかし、従来の推定手法であるヘルツモデルでは植物試験体を半無限の固体とみなし微小ひずみを仮定しているため、植物内部に存在している膨圧 (水の吸水力と浸透圧の差圧) とそれに起因する初期張力の影響 (図 2A) を考慮していないことが問題でした。そこで、私たちは、AFM のカンチレバー押し込みによる反力には、主に細胞壁弾性成分と内圧成分の 2 つが含まれていることを仮定し、AFM 実験によって得られる押し込み変位と押し込み力の曲線 (フォースカーブ) からこれら 2 つを分解することを試みました。

・ 本研究の成果

先行研究では、微小ひずみを仮定したヘルツモデルの代替モデルとして、大ひずみを仮定した弾性シェル理論 (図 4A 左) に基づく細胞壁のたわみ推定が行われてきました。弾性シェル理論は構造工学や建築構造学で用いられる手法で、多くの公園にあるふわふわドーム遊具の安全性計算にも用いられています (図 4A 右)。

弾性シェル理論は物体の弾性と内圧 (と表面張力) の関係を明確にすることができるため、私たちはこの理論を援用し、タマネギ表皮細胞について実験で計測される細胞表面の詳細な幾何情報を用いることで (図 3A)、計測弾性を細胞壁弾性成分と内圧成分に分解しました。その理論的な予測結果が妥当であるかを評価するために、有限要素法 (Finite element method; FEM) のシミュレーションで検証を行いました (図 4B)。

推定結果の信頼性を確保するために、レーザー穿孔によって細胞の内圧を変更した場合も実験を行い、整合性を確かめることができました。

実際のタマネギ表皮細胞の細胞壁弾性 (ヤング率) はおよそ 450 MPa 程度であることが推定され、同時に、膨圧は 0.1 MPa 程度であることが推定されました。

本研究の成果をまとめると、AFM 実験で推定される物理量は、微小ひずみ領域や半無限固体ではヘルツモデルによる「細胞壁弾性 (ヤング率)」と考えられていますが、大ひずみ領域や膨圧下にある生きた植物細胞では弾性シェル理論による「細胞壁弾性 (ヤング

率) + 膨圧」であることを明らかにしました。

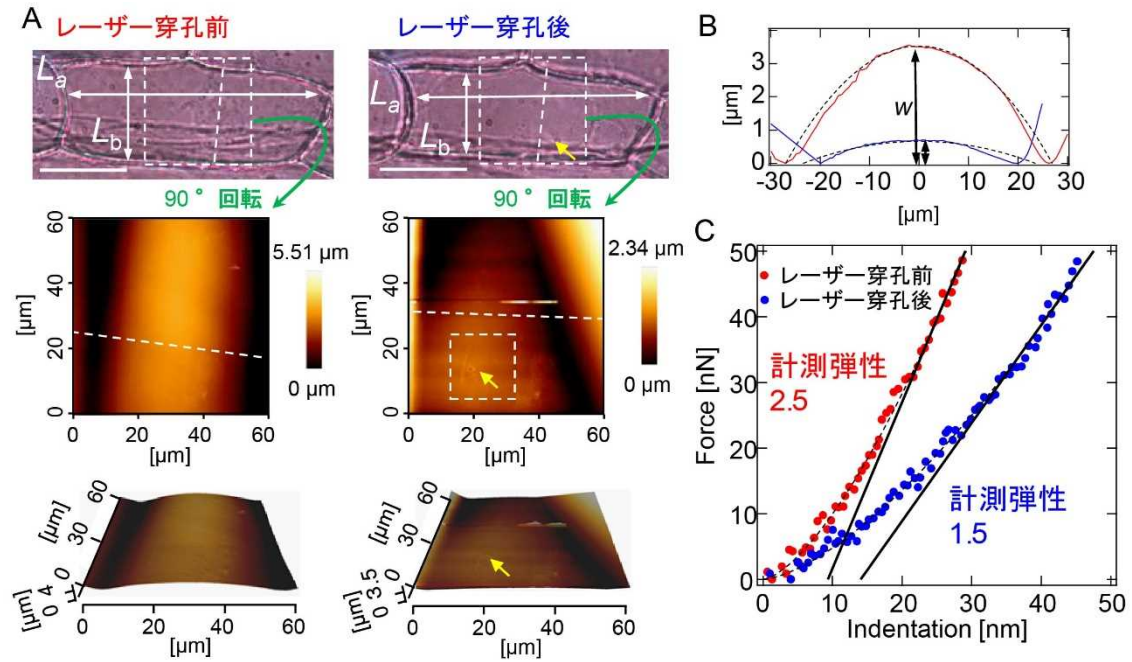


図 3 : (A) レーザー穿孔前後の AFM による細胞表面幾何の撮影データ。(B) 得られた細胞表面形状の断面図 (C) カンチレバーの押し込み変位と押し込み力の曲線 (フォースカーブ) の例。

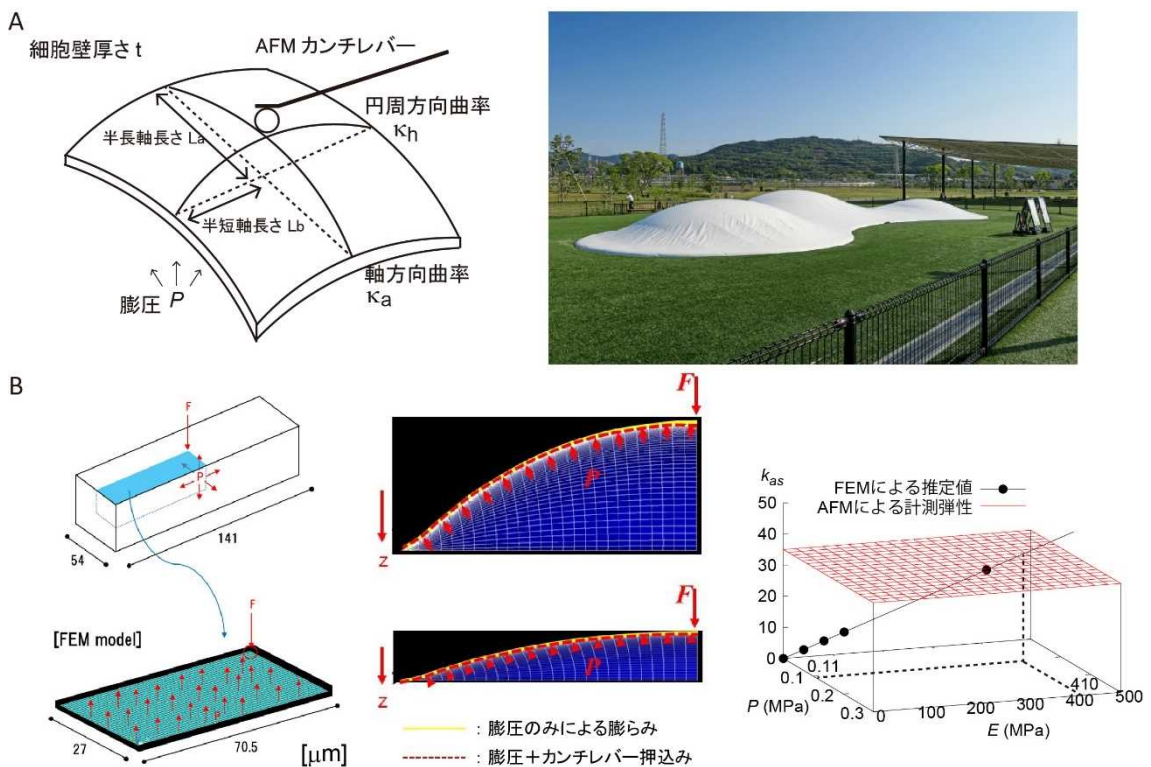


図 4 (A) 弾性シェル理論によるタマネギ表皮構造の概念図 (左)。大阪・高槻安満遺跡

公園のふわふわドーム遊具（右）（photoACの許可を得て引用）(B)FEMシミュレーションによる理論の整合性の検証。（左）直方体模型の概念図。（中央）膨圧のみおよび膨圧とカンチレバー押し込みを加えた場合の表面形状の変化。（右）細胞壁弾性（ヤング率 E ）と膨圧（ P ）を同時推定法の模式図。AFMによる計測弾性とFEMによる推定値を基に、ヤング率と膨圧を推定した。

・今後の期待

本研究は、植物細胞壁を専門とするバイオロジー研究グループと建築構造学を専門とする建築構造研究グループが強力なタッグを組むことにより実現しました。特に、植物細胞壁を弾性シェルに置き換える発想の転換は、従来型の細胞レベルのミクロな動態を調べるバイオロジーに新しい見方を与える画期的な研究成果です。

この推定手法が確立すれば、表皮細胞をはじめとする植物の花、葉、根、茎などの様々な器官の細胞壁弾性とその内部の内圧を同時推定することができ、植物の力学的性質を明らかにする革新的な手法になる可能性があります。また、内圧を測定する技術は侵襲的なものや技術的に困難であるものが多いため、AFM実験のみで内圧を推定することができれば、植物の水理学的な基礎研究の促進にも繋がると期待されます。

■ 用語解説

(1) 植物細胞壁

植物の細胞膜の外側にある力学的に強固な構造。細胞壁は植物のからだを支えるのに役立っている。

(2) フォースカーブ

フォースカーブとは、AFM探針を上下動させて試料に押し込み、探針・試料間の押し込み変位とカンチレバーの押し込み力の関係をプロットした曲線。

(3) シェル構造

シェル構造とは、貝殻のような曲面を持った建築構造のこと。曲面状の薄い板を用いており、球体や曲面にかかる外圧に対する力を逃がす構造を利用している。荷重は全般に分散できるため、軽くても強い構造物を作り上げることが可能。

(4) 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、秋田県立大学の生命流体科学研究室（津川暁 助教）と奈良先端科学技術大学院大学の植物代謝制御研究室（出村拓 教授）、奈良先端科学技術大学院大学の生体プロセス工学研究室（細川陽一郎 教授）、東京大学生産技術研究所（川口健一 教授）との協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（20K15832, 18H05484, 18H05486, 18H05493）と科学技術研究機構（CREST(JPMJCR2121)）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）
TEL 0184-27-2191 Email tsugawa@akita-pu.ac.jp

・奈良先端科学技術大学院大学
教授 細川 陽一郎（ほそかわ よういちろう）
TEL 0743-72-6095 Email hosokawa@ms.naist.jp

<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 0184-27-2021 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

・東京大学生産技術研究所 広報室
TEL 03-5452-6738 Email pro@iis.u-tokyo.ac.jp