



配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

報道の解禁日(日本時間)
(テレビ,ラジオ,インターネット) : 2025年2月3日(月) 19時
(新聞) : 2025年2月4日(火) 付朝刊

2025年1月31日

報道機関 各位

葉の内部組織を生きたまま切り取ることに成功！ C₄ 光合成植物の細胞間コミュニケーションが浮き彫りに

【本研究のポイント】

- ・これまで観察が困難だった厚い葉の内部を生きたまま観察可能な新手法「葉切片ライブイメージング」を確立。
- ・上記手法を用い、2種の光合成細胞を利用して高効率の光合成を行う C₄ 植物^{注1)}における葉緑体^{注2)}の運動が、隣接する細胞とのコミュニケーションの下に起こることを発見。
- ・葉切片ライブイメージングにより、これまで解析が困難であった葉内の生理応答を直接観察する研究が進むと期待される。

【研究概要】

名古屋大学大学院生命農学研究科の加藤 優太 研究員(現所属: 京都大学農学研究科)、大井 崇生 助教(現所属: 高知工科大学理工学群)、谷口 光隆 教授、および名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所ライブイメージングセンターの佐藤 良勝 特任准教授らのグループは、これまで観察が困難であった、複数の細胞層で構成される厚い葉の内部を生きたまま観察可能な新手法「葉切片ライブイメージング」を開発しました。この手法を用いて、2種の光合成細胞(葉肉細胞^{注3)}、維管束鞘細胞^{注4)})の分業により CO₂ を効率よく固定できる C₄ 植物の葉緑体運動を経時的に長時間観察することに成功しました。

葉緑体は環境変化に応答して細胞内で配置を変え、代謝を最適化しています。本研究では、葉肉細胞の葉緑体が青色光に応答して維管束鞘細胞側に凝集運動する様子をライブ観察し、隣接する維管束鞘細胞の破壊により凝集しないことを見出しました。このことは、葉肉細胞の葉緑体運動は維管束鞘細胞からのシグナルにより誘導され、2種の細胞間のコミュニケーションの下に制御されることを意味します。

本研究では、変動する環境下における C₄ 植物の効率的な光合成が調整されるメカニズムの一端を解明できたことに加え、新たに開発した葉切片ライブイメージングは葉緑体運動に限らず、解析困難であった葉内の生理応答を可視化できる画期的手法です。

本研究成果は、2025年2月3日19時(日本時間)付国際科学雑誌『Scientific Reports』に掲載されます。

葉の内部組織を生きのまま切り取ることに成功！
C₄光合成植物の細胞間コミュニケーションが浮き彫りに



【研究背景と内容】

トウモロコシやシコクビエ(図1)に代表される C₄ 植物は、2種の光合成細胞(葉肉細胞、維管束鞘細胞)にまたがる C₄ 光合成回路を駆動して維管束鞘細胞内部を高い CO₂ 濃度に保つことで、高効率の CO₂ 固定と高いストレス耐性を実現しています。両細胞では異なる酵素タンパク質が機能して分業しており、葉緑体の細胞内配置も異なります。維管束鞘細胞の葉緑体は植物種によって葉肉細胞側または維管束側に片寄って存在しますが(シコクビエの場合は維管束側に局在)、葉肉細胞の葉緑体は細胞周縁部に広がって配置しています。この葉肉細胞の葉緑体は、乾燥や塩などの環境ストレスあるいは強い青色光を受けると維管束鞘細胞側へと近づく「葉緑体凝集運動」を起こします(図2)。



図1 C₄植物シコクビエ
本研究で用いたシコクビエはイネ科の雑穀であり、C₄植物に分類される。

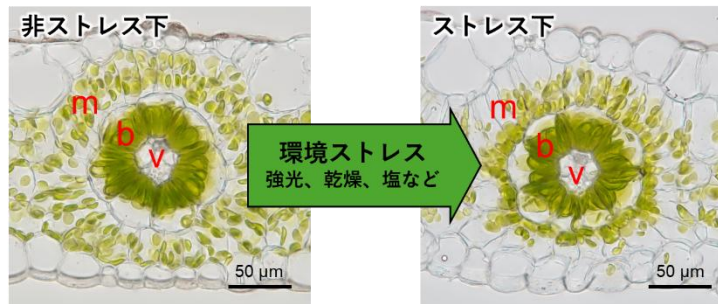


図2 C₄植物シコクビエの葉断面
C₄植物の葉組織では、維管束(v)の周りを維管束鞘細胞(b)が取り囲み、その外側を一層の葉肉細胞(m)が取り巻いている。葉肉細胞の葉緑体は、通常は細胞周縁部に広がって存在するが、環境ストレス下では維管束鞘細胞側に移動する「凝集運動」を起こす。

この葉緑体凝集運動は、両光合成細胞にまたがって起こる光合成反応を環境ストレス下でも維持するための生理応答だと考えられてはいるものの、そのメカニズムやストレス耐性にどの程度の効果があるかについては不明な点が多くあります。加えて、 C_4 植物の葉は複数の細胞層から構成されるため、葉の表面から直接観察するだけでは、葉の内部で起こっている葉緑体運動を正確に捉えることはできませんでした。一方で、内部を詳細に観察するためには、葉を化学薬品により固定してから薄く切り、断面を顕微鏡観察する必要がありました。しかし、この方法では、生きた状態での細胞内構造の変化を追跡することはできません(図 3)。

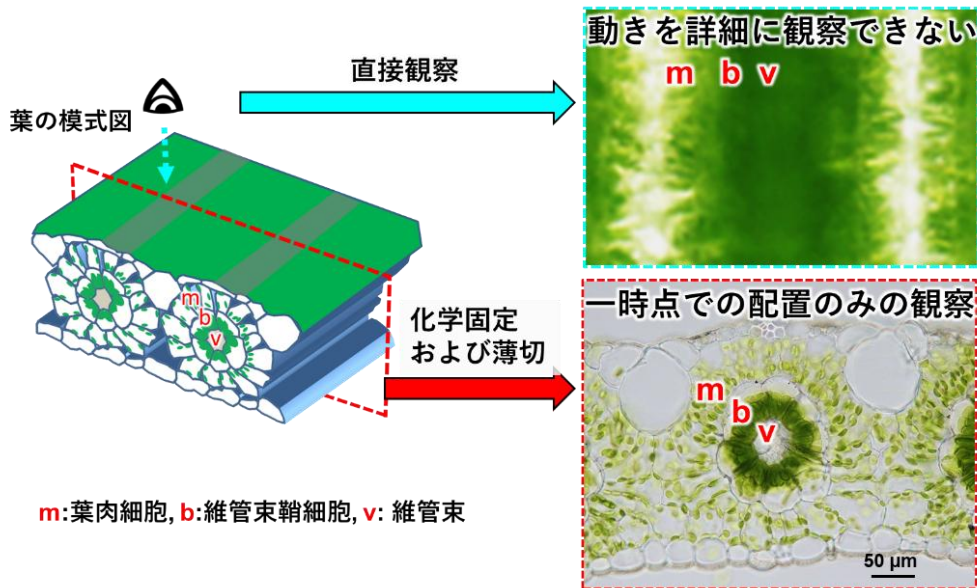
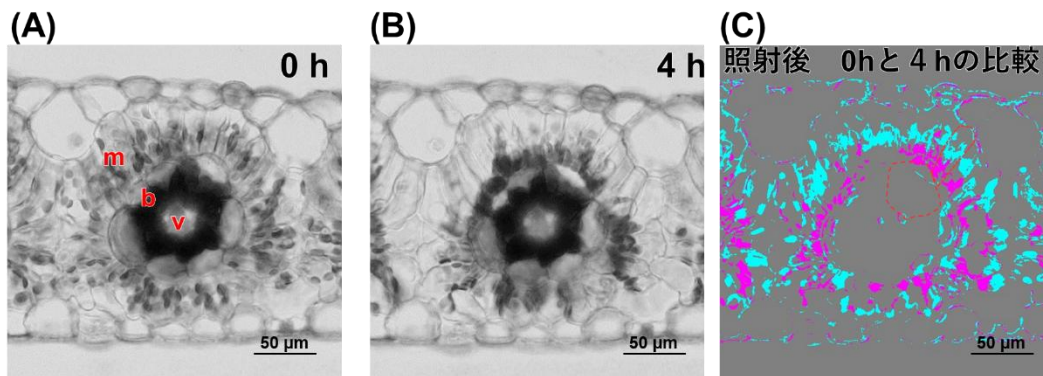


図3 葉緑体運動観察の課題

葉を表面から直接観察すると、細胞同士の重なりにより葉緑体の配置を詳しく見ることができない。構造保持のための化学固定処理後に葉を薄く切ると、内部構造を詳しく観察できるが、細胞活動は停止しており、経時変化を観察できない。

そこで、谷口教授および大井助教らの研究グループは、加藤研究員の卓越した葉切片の作製技術と、佐藤特任准教授のライブイメージングに関する知見を活かし、「葉切片ライブイメージング」という新しい観察手法を開発しました。本手法は、まず化学固定処理をせずに葉をカミソリ刃で薄く切り、その切片を低濃度の寒天溶液中に包埋(ほうまい)して顕微鏡観察するといったシンプルなものであり、長時間生きた状態で切片中の細胞活動を維持することができました。この手法を用いて、 C_4 植物シコクビエの葉内部で起こる葉緑体凝集運動を世界で初めて詳細にリアルタイム観察することに成功しました(図 4)。

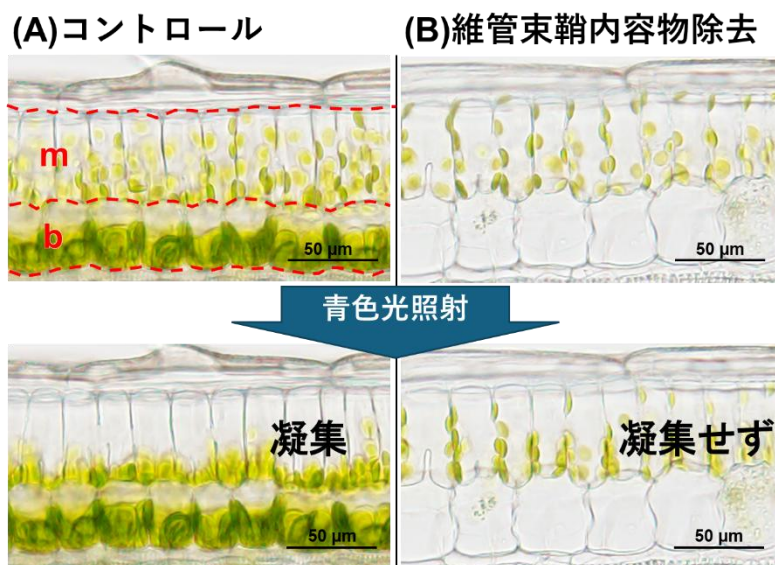


m:葉肉細胞, b:維管束鞘細胞, v: 維管束

図4 葉切片ライブイメージングによる同一葉切片の観察

(A) 青色光照射前。葉肉細胞(m)の葉緑体は細胞周縁部に広がって配置している。
 (B) 青色光を向軸側（写真の上側）から4時間照射したところ、葉肉細胞の葉緑体が維管束鞘細胞(b)側に動く凝集運動が観察された。(C) 照射前後の比較画像。赤色で示した領域が葉緑体が新たに移動した位置、水色が移動によりなくなった位置を示す。

C₄ 植物の葉肉細胞と維管束鞘細胞は形状が異なり、維管束鞘細胞の方が葉肉細胞よりも大きいです。そこで、両細胞の大きさと形の違いに着目し、切片化する厚さと方向を調整することで、葉肉細胞を無傷に保ったまま、隣接する維管束鞘細胞の一部を切断して内容物のみを欠損させた葉切片の作製に成功しました。この葉切片に対してライブイメージング観察により凝集運動が起こるかを調べたところ、維管束鞘細胞の内容物がない切片では凝集運動が起こりませんでした(図5)。このことは、葉肉細胞の葉緑体凝集運動は隣接する維管束鞘細胞からの何らかのシグナルにより誘導され、2種の細胞間のコミュニケーションの下に制御されていることを意味しています。



m:葉肉細胞, b:維管束鞘細胞

図5 維管束鞘細胞内容物を除去した葉切片での葉緑体運動の観察

(A) 維管束鞘細胞の内容物が存在する葉切片。
 (B) 維管束鞘細胞の内容物を除去した葉切片。

【成果の意義】

本研究では、世界で初めて葉切片内で起こる葉緑体凝集運動をリアルタイムで観察し、 C_4 光合成代謝と同じく細胞間コミュニケーションが重要であることを明らかにしました。さらに、本研究で確立した「葉切片ライブイメージング」は、これまで生きた状態での観察が困難であった葉組織深部をライブ観察可能とするものです。この手法を用いることで、葉緑体運動のみならず光合成をはじめとした植物の生理反応の変化を細胞・組織レベルで詳細に観察することができるようになりました。また、構造変化の観察のみでなく、蛍光をはじめとする分光分析も導入することで光合成活性なども測定できるようになり、変動する環境下における植物の適応機構についての解析が加速することが期待されます。

本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2125(代表者:加藤優太)、および日本学術振興会(JSPS 科研費)の支援を受けたものです。
助成番号:JP20H02966 および JP23H02195(代表者:谷口光隆)。
助成番号:JP23K26799(代表者:佐藤良勝)。

【用語説明】

注 1) C_4 植物:

CO_2 を葉組織内で濃縮して光合成を行う回路を持つ植物。その濃縮回路は、初期化合物の炭素数が 4 つであることから C_4 回路と呼ばれる(基本的な炭素固定を行うカルビン回路は C_3 回路と呼ばれ、イネなどの一般的な植物の多くは C_4 回路を持たない C_3 植物である)。トウモロコシやキビ、シコクビエなどの高温でも生育旺盛な穀物や、ローズグラスやシバなどの環境ストレスに強い牧草類や被覆植物が挙げられる。

注 2)葉緑体:

植物細胞内に存在する細胞小器官で、光エネルギーを利用し有機物の合成、すなわち光合成を行う。また、葉緑体は光をはじめとした様々な環境変化に応じて細胞内で動き、この葉緑体運動は効率的な光利用やストレスの軽減などに寄与している。

注 3)葉肉細胞:

維管束と上下の表皮の間に詰まった葉緑体を含む柔細胞。一般的な C_3 植物では主に葉肉細胞の葉緑体のみで光合成を行うが、 C_4 植物では葉肉細胞と維管束鞘細胞が連携して光合成を行う。

注 4)維管束鞘細胞:

維管束を取り囲む筒状の“維管束鞘”を構成する細胞。一般的な C_3 植物では葉緑体が小型で少ないが、 C_4 植物では大型の葉緑体が局在して C_4 光合成回路による CO_2 濃縮を行う。

【論文情報】

雑誌名:Scientific Reports

論文タイトル:Bundle sheath cell-dependent chloroplast movement in mesophyll cells of C₄ plants analyzed using live leaf-section imaging

著者:加藤優太、大井崇生、佐藤良勝(共同責任著者)、谷口光隆(責任著者)。

下線は現名古屋大学教員

DOI: 10.1038/s41598-025-86153-1

URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86153-1>



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。
国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。

東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

