

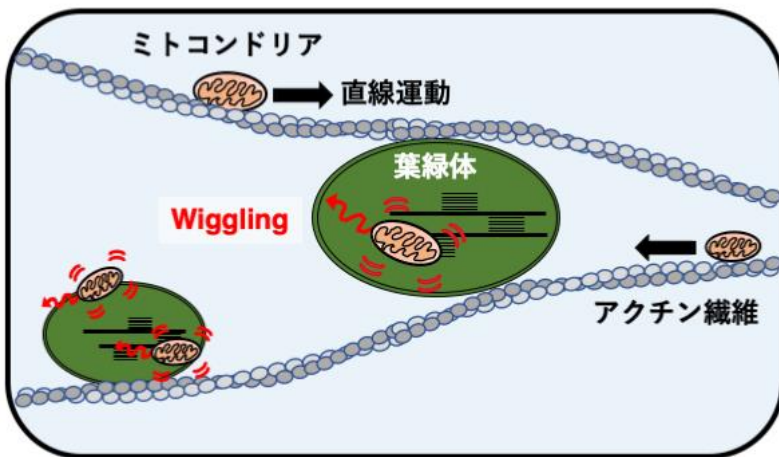
葉緑体との相互作用におけるミトコンドリア運動を発見

—相互作用の制御による効率的な物質代謝の可能性に期待—

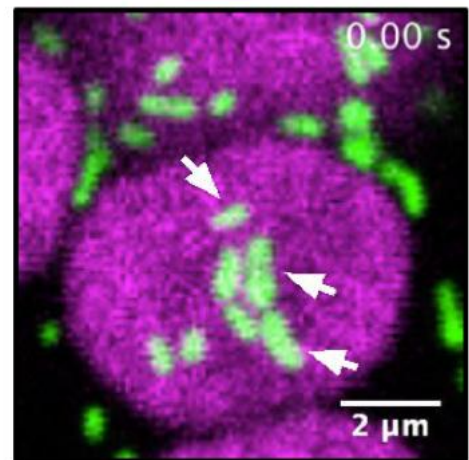
概要

京都大学大学院工学研究科 沼田圭司 教授（理化学研究所 環境資源科学研究センター チームリーダー）、及川和聡 同特定講師、および宇都宮大学バイオサイエンス教育研究センター 児玉豊 教授の研究グループは、植物細胞内のミトコンドリアが見せる特異的運動形態“Wiggling（小刻みな揺れ）”に注目して、Wiggling がミトコンドリアと葉緑体との物理的相互作用に関与することを世界で初めて発見しました。多くの真核生物の細胞内では、異なる性質のオルガネラ（細胞小器官）が動的に相互作用を行い物質代謝に関与します。一般的にミトコンドリアは植物細胞内で、アクチン繊維上を直線的に移動することが知られています。本研究では、シロイヌナズナ葉肉細胞内におけるミトコンドリア運動を、共焦点レーザー顕微鏡により高速撮影しました。ミトコンドリアの移動距離、角度、速度の詳細な解析を行うことで、直線的な運動とは異なる“Wiggling”が葉緑体との相互作用に相関することを明らかにしました。これらの知見は、ミトコンドリアと葉緑体間で行われる物質代謝の仕組みの解明に寄与する重要な発見であると期待されます。

本研究成果は、2021年3月5日に英国の国際学術誌「Communications Biology」にオンライン掲載されました。



植物細胞



共焦点レーザー顕微鏡による高速撮影
緑色：ミトコンドリア（矢印）
マジェンダ色：葉緑体

1. 背景

オルガネラ（細胞小器官）は、独自の代謝系や関連酵素をもち、各々独立した機能を保持しています。その一方で、性質の異なる他のオルガネラと代謝系の一部を共有し、協調的に細胞機能を支えています。このオルガネラであるミトコンドリアと葉緑体も、代謝や輸送の一部を共有し互いに物質の受け渡しを行っています。また、植物細胞内は、原形質流動のもとで動的な環境にあり、ミトコンドリアもアクチン繊維に沿い、活発に運動を行います。現在までに、ミトコンドリア運動に関する多くの知見が報告されています。しかし、本研究で注目した特殊な運動形態 Wiggling については、理解されていませんでした。本研究グループは、植物を材料として、細胞膜透過性ペプチドと DNA によるオルガネラ形質転換法の開発を進めています。その一環として、オルガネラ動態を利用した効率的な物質代謝の制御を目指しています。そこで、ミトコンドリア運動を詳細に解析することで、ミトコンドリアと葉緑体との物理的相互作用との関連性について明らかにする解析を行いました。

2. 研究手法・成果

ミトコンドリア運動を詳細に解析するために、ミトコンドリアが蛍光タンパク質で可視化されたシロイヌナズナの緑葉プロトプラストを用いたイメージング解析を行いました。共焦点レーザー顕微鏡により 250 ミリ秒毎の高速で、ミトコンドリア運動のタイムラプスイメージを 30 秒間撮影しました。次に、時間毎のミトコンドリアの軌跡解析を行いました（図 1①）。ミトコンドリアを移動距離（5 μ m）により分類し（図 1②）、さらに 1 秒毎のミトコンドリア運動の速度と角度変化を抽出しました（図 1③）。この結果、ミトコンドリアは、移動距離が短く、速度が遅いかつ角度変化が大きい集団(A)と、移動距離が長く、速度が速かつ角度変化が小さい集団(B)に分かれました。アクチン繊維を破壊しても、A の集団の運動は保持されましたが、B の集団の運動は消失してしまいました。さらに、葉緑体との関係性に注目して、同様にミトコンドリア運動の解析を行うと（図 2①）、葉緑体と接しているミトコンドリアは、A の集団と類似の速度が遅くかつ角度変化が大きい運動を示しました（図 2②）。

本解析から、葉緑体と接しているミトコンドリアは、アクチンに非依存的な Wiggling を行うことが明らかになりました。このことは、アクチンに依存し直線運動を行うミトコンドリアとは異なり、葉緑体上ではミトコンドリアが、物理的相互作用を介して葉緑体と協調して物質代謝を行なっていることを強く示唆しました。これらからミトコンドリアと葉緑体との相互作用機構の解明が期待されます。

3. 波及効果、今後の予定

本研究では、ミトコンドリア運動を詳細に解析することで、葉緑体上で起こる Wiggling が葉緑体との相互作用に関与することを明らかにしました。この知見を応用して、代謝産物や輸送物質と Wiggling の相関性や、相互作用に関与する因子を明らかにすることで、ミトコンドリアと葉緑体との相互作用を制御し、効率的な物質代謝を可能にすることが期待されます。また、現在、本研究で用いたミトコンドリア運動解析法を蛍光色素や化学物質等の細胞内毒性評価に応用する試みを行っています。本研究の解析手法を環境汚染評価やファイトレメディエーション（植物を用いた環境修復技術）等に応用することも期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 ERATO「沼田オルガネラ反応クラスタープロジェクト（研究総括：沼田圭司）」による支援を受けて行われました。

<用語解説>

共焦点レーザー顕微鏡：観察する目的の蛍光物質（蛍光タンパク質等）を励起する光源として特定波長域のレーザー光を用い、対物レンズで、標本に焦点を結ぶ。標本から発した蛍光は、対物レンズから極力絞ったピンホールを介し、光電子増幅管と高感度検出器に誘導される。像全体を走査し、コンピューターで高解像度のイメージ像を構築することが可能な顕微鏡である。

<研究者のコメント>

従来からミトコンドリア運動の解析は、多くの種で盛んに行われてきました。近年、共焦点レーザー顕微鏡や超解像度顕微鏡の開発が進み、さらに詳細な解析が行えるようになりました。ミトコンドリアの大きさは1マイクロほどです。マイクロの世界（細胞内）でおこる現象がとても複雑で、巧妙であることに日々驚かされます。驚きとそこから得られる基礎的知見を社会に還元できることを願って日々研究を行っています。

<論文タイトルと著者>

タイトル Mitochondrial movement during association with chloroplasts in *Arabidopsis thaliana*
シロイヌナズナでの葉緑体との相互作用におけるミトコンドリア運動

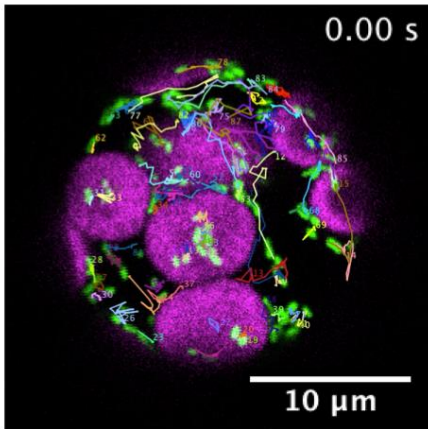
著者 及川和聡、今井拓人、Chonprakun Thagun、豊岡公德、吉積 毅、石川一也、児玉豊、沼田圭司

掲載誌 communications biology

DOI <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01833-8>

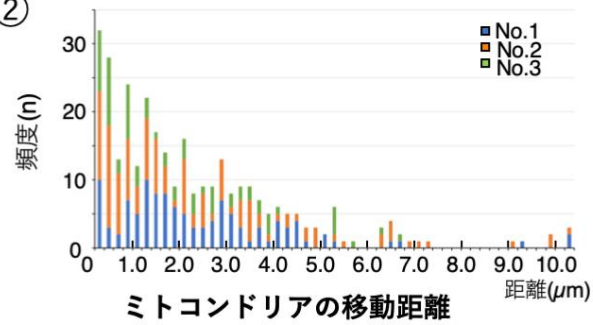
<参考図表>

①



ミトコンドリアの軌跡解析

②



③

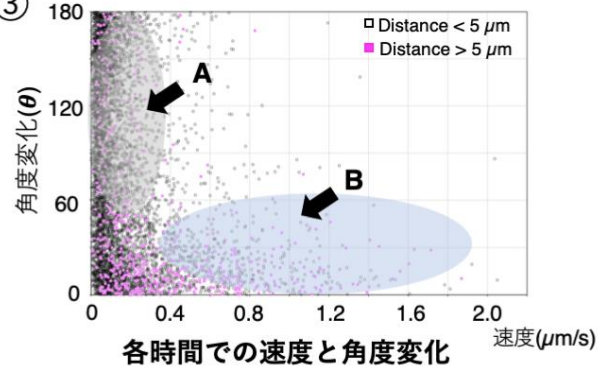
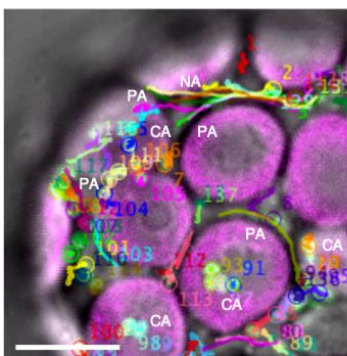


図1. ミトコンドリア運動解析

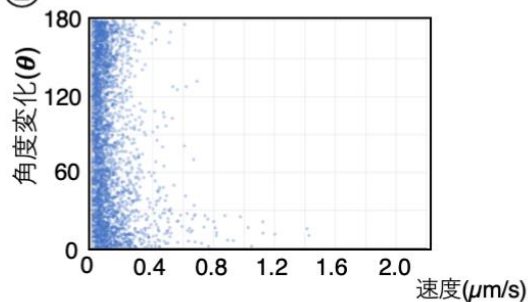
①プロトプラスト内のミトコンドリア（緑）各々の移動軌跡を異なる色の線で示している。一部は葉緑体（マゼンタ）上に留まっている。②異なる3つのプロトプラストにおけるミトコンドリアの移動距離の分布を示している。③各時間におけるミトコンドリアの速度と角度分布を示している。**A**は速度が小さくかつ角度変化が大きい領域を示す。**B**は速度が大きくかつ角度変化が小さい領域を示す。

①



ミトコンドリアの軌跡解析
(葉緑体近傍)

②



各時間での速度と角度変化

図2. 葉緑体近傍のミトコンドリア運動解析

①プロトプラスト内の葉緑体近傍のミトコンドリア（緑）各々の移動軌跡を異なる色の線で示している。②各時間における葉緑体と接触しているミトコンドリアの速度と角度分布を示している。