

報道関係者 各位

2022年11月21日
国立大学法人 東京農工大学

キク科 *Flaveria* 属の分子系統樹の完成 C₄ 光合成進化に関わる新たな仮説の提唱

国立大学法人東京農工大学大学院農学研究院生物生産科学部門 安達俊輔准教授と同グローバルイノベーション研究院スーパー教授（カナダトロント大学教授）Rowan F. Sage らは、高効率な光合成（C₄ 光合成）進化のモデル植物であるキク科 *Flaveria* 属植物を網羅する分子系統樹を作成しました。さらにそれら植物の光合成特性や酵素特性の解析を通じて植物が C₄ 光合成を獲得した過程に関わる新たな仮説を提唱しました。C₄ 光合成をもたないイネに人為的に C₄ 光合成を導入する試みが世界中で行われており、本研究成果はその実現の後押しとなるものです。

本研究結果は、*Plant Physiology* 誌に10月6日に掲載されました。

論文名：The Evolution of C₄ Photosynthesis in *Flaveria* (Asteraceae): Insights from the *Flaveria linearis* Complex

著者：Shunsuke Adachi, Matt Stata, Duncan G. Martin, Shifeng Cheng, Hongbing Liu, Xin-Guang Zhu and Rowan F. Sage

掲載 URL：<https://academic.oup.com/plphys/advance-article/doi/10.1093/plphys/kiac467/6749591>

現状：トウモロコシやサトウキビなどの C₄ 植物^{注1)}は、葉肉細胞と維管束鞘細胞が協働する独自の光合成システム（C₄ 光合成）を有しており、葉肉細胞のみで光合成を行う（C₃ 光合成）イネ、コムギ、ダイズなどの C₃ 植物と比較して高い光合成効率を發揮します。そのため、C₃ 植物である作物に C₄ 光合成を導入することによって、生産性の大幅な向上が期待されています。地球上に現存するすべての C₄ 植物は C₃ 植物から進化したと言われており、しかも多様な植物系統において 60 回以上独立に進化（いわゆる収斂進化^{注2)}）したことが知られています。この進化メカニズムの詳細を解明することが、イネなどの作物に対する人為的 C₄ 化に貢献すると考えられています。

キク科の植物である *Flaveria* 属には、C₃ 植物から C₄ 植物への光合成進化の痕跡を残す種が数多く含まれています。たとえば C₃ 植物の *F. pringlei*、C₂ 植物（C₃-C₄ 中間植物）の *F. linearis*、C₄-like 植物（C₄ に非常に近い）の *F. brownii*、C₄ 植物の *F. trinervia* など計 21 種が知られています（図 1）。*Flaveria* 属は C₄ 光合成進化のモデル植物として長年にわたり研究対象となってきました。しかし、過去の研究ではこれらの植物種の一部を利用したものが多く、網羅的な分子系統樹^{注3)}はありませんでした。

研究体制：本研究は University of Toronto, Faculty of Arts & Science, Department of Ecology & Evolutionary Biology, Rowan F. Sage 研究室および東京農工大学大学院農学研究院生物生産科学部門で実施しました。

研究成果：世界中から収集した *Flaveria* 属の植物コレクション（*Flaveria* 属の種や亜種、近縁種を含む全 45 系統）をトロント大学の温室内で栽培し、実験を行いました。まずゲノムデータに基づき網羅的な *Flaveria* 属の分子系統樹を完成させました（図 2）。従来の報告と同様、*Flaveria* 属の種が 2 つの大きな分類群に分けられることが確かめられました。一方で、*F. brownii* の最も近縁な種は *F. chlorifolia* であること、メキシコのユカタン半島に自生する *F. linearis* はフロリダに自生する *F. linearis* とは別種である可能性が高いこと、*F. floridana* はフロリダに自生する *F. linearis* と同種である可能性が高いことなど、従来の説を覆す発見がありました。

これらの植物の C₄ 光合成酵素の活性を、分光光度計を用いた方法により測定しました。ホスホエノ

ールピルビン酸カルボキシラーゼや NADP-リンゴ酸酵素などの活性は C₄-like 植物や C₄ 植物において極めて高く、C₃ 植物や C₃-C₄ 中間植物とは大きな開きがありました。これは、C₃-C₄ 中間植物が C₄ 植物に進化する過程において、C₄ 酵素活性のダイナミックな変化があったことを示しています。一方、これまで C₄ 光合成システムの脇役と捉えられていたアスパラギン酸アミノ基転移酵素やアラニンアミノ基転移酵素の活性は、C₃ 植物から C₃-C₄ 中間植物、C₄ 植物にかけて連続的に上昇していることがわかりました。筆者らは、これらの酵素活性の高まりがホエノールピルビン酸カルボキシラーゼの基質であるピルビン酸の再生を促し、C₄ 光合成の形成に結びついたとする新たな仮説を提唱しました。

葉の CO₂ ガス交換測定（光合成測定）結果から、もう一つ興味深い結果を得ました。メキシコのユカタン半島に自生する *F. linearis* は、フロリダに自生する *F. linearis* と比較して極めて小さな CO₂ 補償点^{注4}を持ち、見かけ上光呼吸^{注5}を生じていませんでした（図3）。光呼吸とは C₄ 植物を除くすべての植物において光合成の副産物として生じる代謝反応で、光合成効率を低下させることが知られています。すなわち C₃-C₄ 中間種である本種は、光呼吸を抑制する独自のシステムを発達させてきたこととなります。ユカタン半島の海岸沿いという高温や塩ストレスを受けやすい地域において、適応度を高めるため独自の進化を遂げたものと考えられます。

今後の展開：C₃ 植物から C₄ 植物への進化過程は、植物科学における最大の謎の一つです。今回の研究で提唱された仮説が検証されれば、C₄ 光合成進化メカニズムやそれをもたらした鍵遺伝子が解明に結びつき、イネなどの主要作物の C₄ 化の実現に一步近づくと期待されます。またユカタン半島に自生する *F. linearis* の光呼吸抑制システムが解明されれば、光合成進化の新たな過程が明らかになるかもしれません。

用語解説：

注1) C₄ 植物 トウモロコシ、ソルガム、サトウキビ、ヒエなど、C₃ 植物とは異なる独自の光合成システム（C₄ 光合成）を持つ植物の総称。

注2) 収斂進化 種の系統が異なっても、環境に適応して類似の外見や機能を有するようになること。

注3) 分子系統樹 生物の持つ DNA などと比較することで生物間の系統関係を示した樹形図のこと。

注4) CO₂ 補償点 光合成による CO₂ 吸収速度と光呼吸・暗呼吸による CO₂ 放出速度が釣り合うときの CO₂ 濃度のこと。この値が小さいほど呼吸（主に光呼吸）による CO₂ ロスが小さい。

注5) 光呼吸 CO₂ 固定酵素である Rubisco が持つ O₂ 固定活性により産生された毒性物質（ホスホグリコール酸）を除去するために働く一連の化学反応のこと。反応過程で細胞内から CO₂ が放出されるためにこの名が付いた。

研究費：本研究はグローバルイノベーション研究院からの支援ならびに JSPS 科学研究費補助金（16K18643 および 21K19104）の支援を受けて行われたものです。

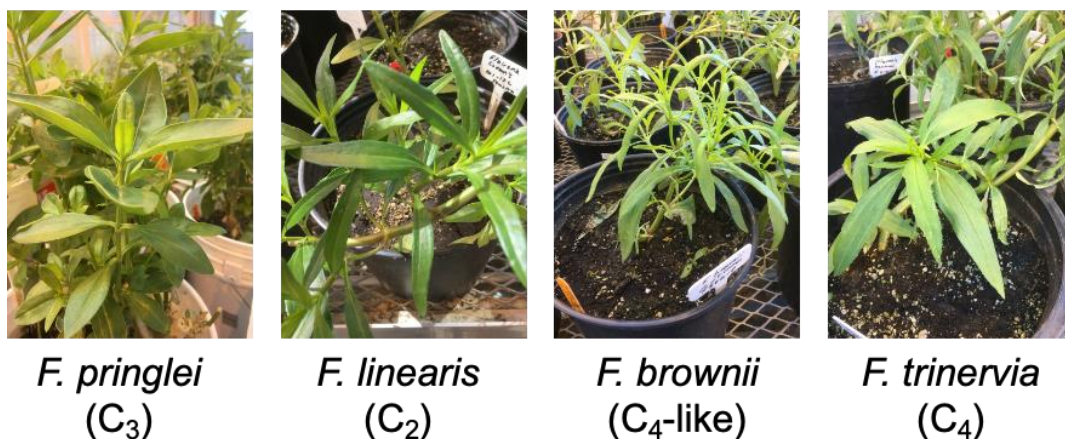


図1：本研究で使用した *Flaveria* 属植物の例。

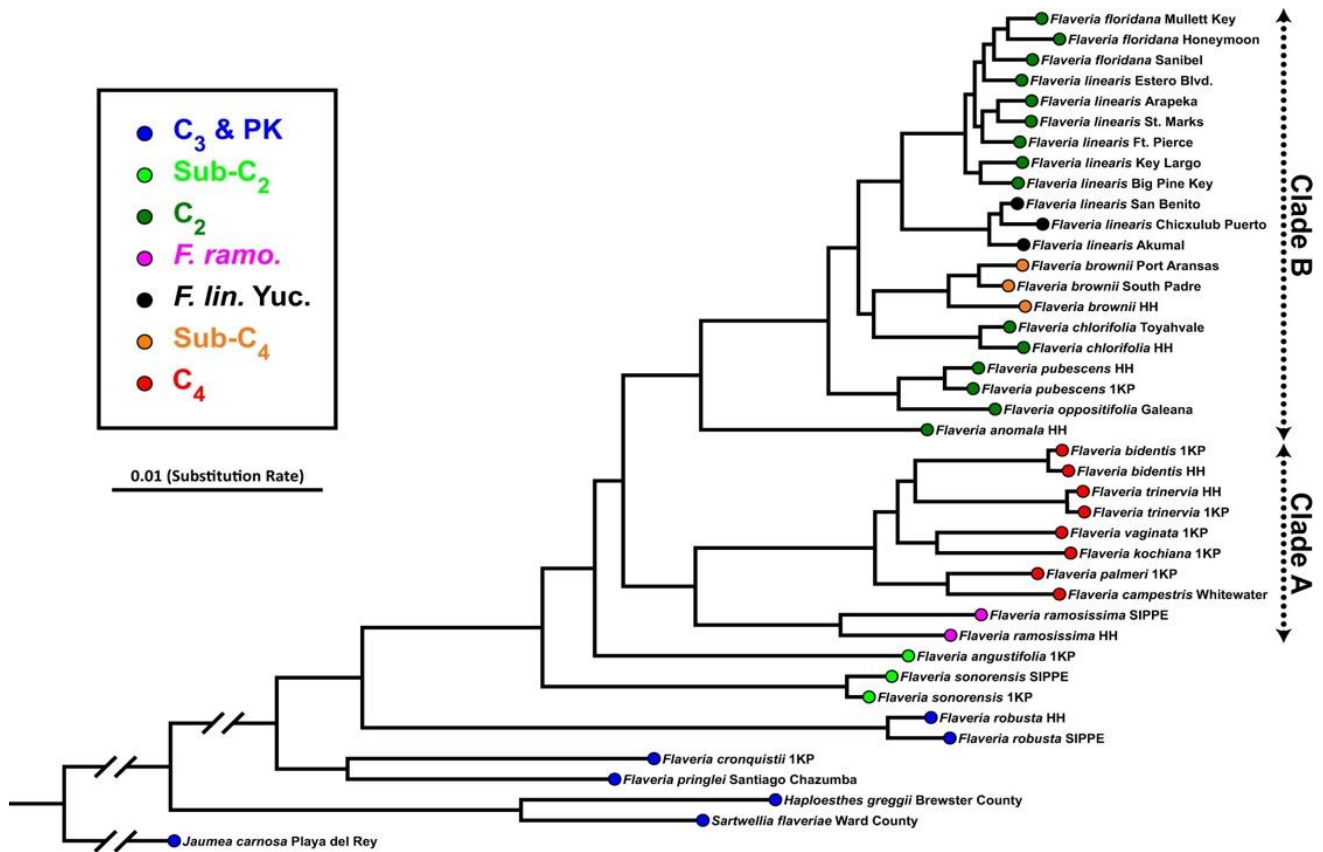


図 2 : 新たに作成した *Flaveria* 属植物の分子系統樹。

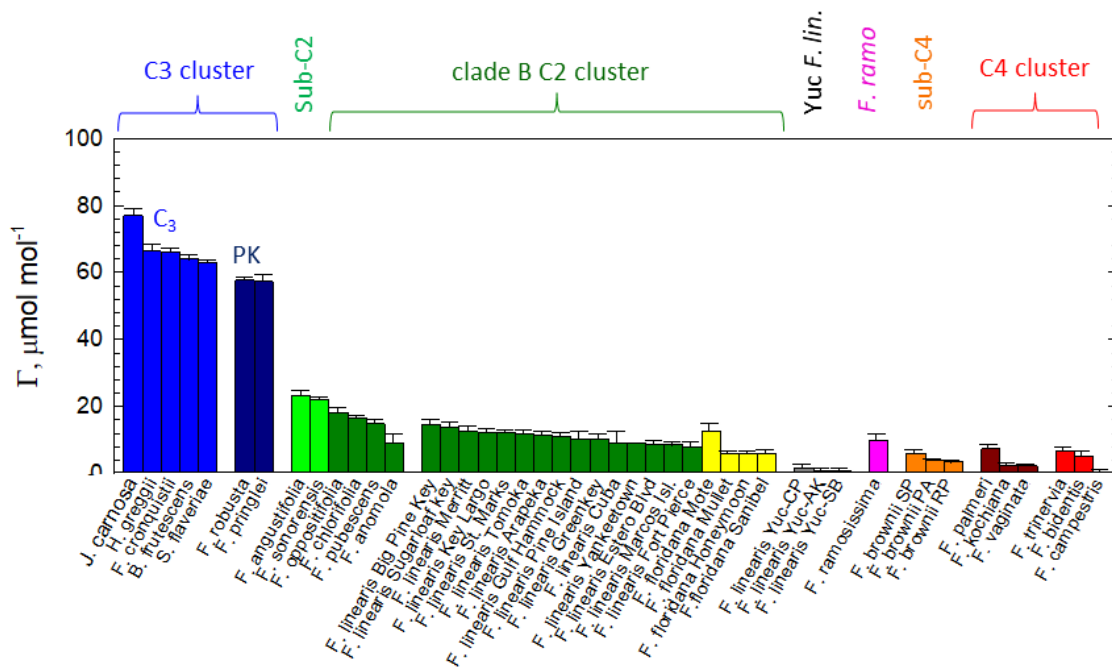


図 3 : CO₂ 補償点 (CO₂ compensation point, Γ) の種間比較。ユカタン半島に自生する *Flaveria linearis* Yucatan は CO₂ 補償点がほぼゼロになっていることがわかる。

◆研究に関する問い合わせ◆

東京農工大学大学院農学研究院

生物生産科学部門 准教授 安達 俊輔 (あだち しゅんすけ)

TEL : 042-367-5671 E-mail : adachi@go.tuat.ac.jp