

2024年5月21日

報道関係者各位

北里大学
京都大学
国際農林水産業研究センター
玉川大学

進化による CO₂ 固定酵素の最適化が葉の多様性を支える

～世界自然遺産小笠原諸島で共存する樹木から解明～

北里大学一般教育部の坂田剛准教授と海洋生命科学部の安元剛講師、京大大学生態学研究センターの石田厚教授と松山泰氏、国際農林水産業研究センター林業領域の河合清定研究員、玉川大学農学部の関川清広教授らの研究グループは、「光合成の二酸化炭素 (CO₂) 固定酵素ルビスコが、進化の過程で種ごとに最適化された性質を獲得し、葉の多様性を支えている」ことを世界自然遺産である小笠原諸島での調査から発見しました。植物は葉緑体に含まれる CO₂ 固定酵素「ルビスコ」を用いて、空気（大気）中から取り込んだ CO₂ を固定し、光合成産物（有機物）を生成します。しかし、世界の植物種で葉の特徴（寿命、構造、成分など）は数百倍も異なり、ルビスコにとってのプラットフォーム（働く環境）は大きく異なっています。これまで、ルビスコと葉の特徴に相互関係があるのか十分に解明されていませんでした。本研究は、小笠原諸島父島で種分化した固有種などを対象に調査を行い、ルビスコの性質が種ごとの葉の特徴に合わせて最適化されていることを発見しました。この最適化は森林生態系における樹種の多様性や光合成戦略の多様性を支える重要な要素であると考えられます。この研究成果は、2024年5月16日付で、植物科学の国際学術誌 *New Phytologist* に掲載されました。

研究成果のポイント

- ◆光合成ではたらく CO₂ 固定酵素（ルビスコ^{*1}）は同じ酵素であるにもかかわらず、CO₂ の選別能力（S_{0.9}^{*2}）に 1.7 倍もの種間差があることが世界自然遺産である小笠原諸島父島に共存する樹木種で発見されました。
- ◆葉の寿命が長く葉内に CO₂ が拡散しにくい種ほど、CO₂ の選別が正確なルビスコをもち、反対に葉の寿命が短くタンパク質量の少ない種ほど、CO₂ の選別が不正確なルビスコを持っていました。
- ◆調査したほとんどの種のルビスコは数値シミュレーションが予測する最適値に対して 95% を超える最適化を達成していました。植物が種の分化と自然選択を通じて獲得したルビスコの性質は、森林での多様な植物種の共存や光合成戦略の多様性を支える重要な要素だと考えられます。

葉が厚く
長寿命で
タンパク質が多い
けれど、
二酸化炭素が拡散しにくい



CO₂ の選別が正確だが低速なルビスコ

葉が薄く
短寿命で
タンパク質が少ない
けれど、
二酸化炭素が拡散しやすい



CO₂ の選別が不正確だが高速なルビスコ

植物の CO₂ 固定酵素（ルビスコ）は種ごとに最適化され、
森林での種の共存と光合成戦略の多様性を支える。

研究の背景

ほとんどの陸上生物の生活は、光合成によって支えられています。ひとくちに光合成と言っても、光合成生産を担う葉の寿命、葉面積当たりの有機物量、光合成効率などには、さまざまな植物の種間で数百倍もの違いが見られます。

光合成において大気中の CO_2 を有機物に固定する酵素は、ルビスコと呼ばれる地球最多のタンパク質です。しかし、ルビスコは CO_2 だけでなく酸素 (O_2) も有機物に固定する性質があり、 O_2 を固定する場合は有機物の分解と CO_2 の放出をもたらしてしまいます。この性質は森林による CO_2 の吸収や農業生産を大きく阻害していると考えられ、数多くの研究が行われてきました。ルビスコが CO_2 と O_2 のどちらをより固定しやすいか（親和性が高いか）を表す指標として、 CO_2/O_2 比親和性 $S_{c/o}$ という値が用いられます。 $S_{c/o}$ 値が高い（ CO_2 との親和性が高い）ルビスコほど、正確に CO_2 を選別することができます。これまで、陸上の C_3 植物^{*3} のルビスコは、 CO_2 濃縮機構を持つ C_4 植物や藻類に比べて $S_{c/o}$ 値が高く CO_2 の選別能力が優れていることが知られていました。

研究内容と成果

小笠原諸島は世界自然遺産に認定されている島々です。これらの島々は過去に大陸と一度もつながったことがない海洋島で、木本植物種の 70% が固有種で占められています。これは、進化の“実験場”とも言える状況です。我々は小笠原諸島の父島に自生する 23 種（18 科、12 目）の木本 C_3 種（図 1）を対象に、ルビスコの $S_{c/o}$ 値と葉のさまざまな性質を比較しました。



図 1 小笠原諸島父島での野外調査の様子と調査対象の 23 種

- ① *Planchonella obovata* (R.Br.) Pierre var. *dubia* (Koidz. ex H.Hara) Hatus. ex T.Yamaz.;
- ② *Photinia wrightiana* Maxim.;
- ③ *Wikstroemia pseudoretusa* Koidz.;
- ④ *Osmanthus insularis* Koidz.;
- ⑤ *Psidium cattleianum* Sabine;
- ⑥ *Syzygium cleyerifolium* (Yatabe) Makino;
- ⑦ *Vaccinium boninense* Nakai;
- ⑧ *Hibiscus glaber* (Matsum. ex Hatt.) Matsum. ex Nakai;
- ⑨ *Dodonaea viscosa* Jacq.;
- ⑩ *Rhaphiolepis indica* (L.) Lindl. var. *umbellata* (Thunb.) H.Ohashi;
- ⑪ *Elaeocarpus photiniifolius* Hook. et Arn.;
- ⑫ *Drypetes integerrima* (Koidz.) Hosok.;
- ⑬ *Bischofia javanica* Blume;
- ⑭ *Ilex mertensii* Maxim.;
- ⑮ *Elaeagnus rotundata* Nakai;
- ⑯ *Distylium lepidotum* Nakai;
- ⑰ *Schima wallichii* (DC.) Korth. subsp. *mertensiana* (Siebold et Zucc.) Bloemb.;
- ⑱ *Ligustrum micranthum* Zucc.;
- ⑲ *Trema orientalis* (L.) Blume;
- ⑳ *Psidium guajava* L.;
- ㉑ *Ochrosia nakaiana* (Koidz.) Koidz. ex H.Hara.;
- ㉒ *Neolitsea sericea* (Blume) Koidz. var. *aurata* (Hayata) Hatus.;
- ㉓ *Hibiscus tiliaceus* L.

その結果、父島で共存する C_3 樹木種は、ルビスコの $S_{C/O}$ 値に 1.7 倍もの種間差があること、また、葉寿命が長く葉面積当たりの有機物量の多い種ほど、 CO_2 の選別が正確なルビスコをもつことを発見しました (図 2)。さらに、葉寿命の長い種は、葉面積当たりの有機物量が多い、葉緑体内の CO_2 が少ない、葉のタンパク質量が多いなどの特徴をあわせ持つこともわかりました。

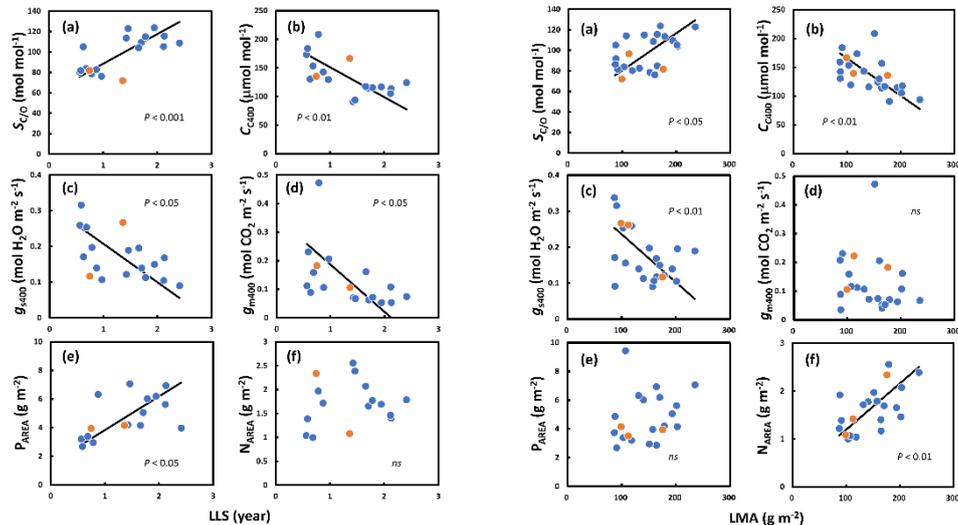


図 2 日本の海洋島 (小笠原諸島父島) に共存する C_3 被子植物樹種の光合成に関連する葉の形質と葉寿命 LLS および葉面積あたりの有機物量 LMA との関係

(a) ルビスコの CO_2/O_2 比親和性 $S_{C/O}$, (b) 葉緑体の CO_2 濃度 C_{C400} , (c) 気孔コンダクタンス g_{s400} (大気から葉内空隙までの気体の通りやすさ), (d) 葉肉の CO_2 コンダクタンス g_{m400} (葉内空隙から葉緑体内までの気体の通りやすさ), (e) 葉面積あたりのタンパク質量 P_{AREA} (葉が含むルビスコなどのタンパク質の量), (f) 葉面積あたりの窒素量 N_{AREA} (窒素は主にタンパク質に含まれる)。青とオレンジのシンボルは、それぞれ小笠原諸島の在来種と外来種の植物を表す。

葉寿命 LLS が長く、葉面積当たりの有機物量 LMA の多い種ほど、 CO_2 の選別が正確なルビスコをもっていた。また葉寿命の長い種は、葉面積当たりの有機物量が多い、葉緑体内の CO_2 が少ない、葉のタンパク質量が多い、などの特徴をあわせ持っていた。

葉寿命の長い種では、葉緑体内の CO_2 が少ないために $S_{C/O}$ 値が高く CO_2 の選別が正確なルビスコの方が有利であると予測されます。しかし、ルビスコには $S_{C/O}$ 値が高いほど反応速度が低くなる傾向が知られています。そのため、葉寿命が短くタンパク質量の少ない種では、ルビスコの量が少ないために $S_{C/O}$ 値は低いけれど反応速度の高いルビスコの方が有利になると予測されます。これらの予測は、葉の CO_2 拡散コンダクタンスと葉のタンパク質量を用いた光合成の数値シミュレーションにより正しいことが確認されました (図 3a と b)。さらに、野外で測定されたルビスコの $S_{C/O}$ 値は、数値シミュレーションの予測する最適値とほぼ一致しており (図 3c)、 $S_{C/O}$ 値による光合成の最適化の割合はほとんどの種で 95% を超えていました。

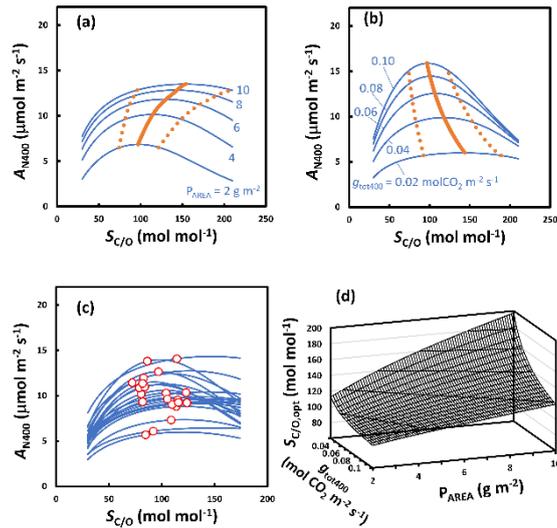


図3 ルビスコの $S_{C/O}$ が葉の光合成速度 A_{N400} に与える影響の数値シミュレーション

(a, b) におけるオレンジの線は A_{N400} が最大となる値 ($S_{C/O,opt}$) を示し、オレンジの破線は A_{N400} が最大値の 95%以上を達成する範囲を示す。タンパク質量 P_{AREA} が少ない葉ではルビスコの量が少ないため $S_{C/O}$ 値は低いけれど最大反応速度の高いルビスコの方が有利になる (a)。葉の CO_2 拡散コンダクタンス g_{tot400} が低い葉では葉緑体内の CO_2 が少ないため $S_{C/O}$ 値が高く CO_2 の選別が正確なルビスコの方が有利になる (b)。(c) の青線は各樹種の A_{N400} の数値シミュレーション結果で、赤丸は各樹種の実際の $S_{C/O}$ 値を示す。各樹種のルビスコの $S_{C/O}$ 値 (赤丸) は、葉の CO_2 拡散コンダクタンスと葉のタンパク質量から予測された最適値とほぼ一致し、その最適化率はほとんどの種で 95%を超えていた。(d) 光合成速度を最大化する $S_{C/O}$ ($S_{C/O,opt}$) の P_{AREA} と g_{tot400} 依存曲面。

今後の展開

森林の樹木は、隣り合って育つものでも葉寿命などの特徴が種によって大きく異なります。植物は種の分化と自然選択を通じて、それぞれの葉の特徴に最適なルビスコを獲得し、その結果、ルビスコには種間の違いが生じたと考えられます。このルビスコの種間差は森林の樹種の多様性や光合成戦略の多様性を支える重要な要素だと予想されます。気候変動にともなう気温の上昇や大気中の CO_2 の増加などがルビスコの性質を最適値から逸脱させ、近年頻発する森林衰退の原因となっていないか、今後の研究が求められます。

論文情報

掲載誌：New Phytologist

論文名：Interspecific variation in Rubisco CO_2/O_2 specificity along the leaf economic spectrum across 23 woody angiosperm plants in the Pacific islands

著者：Tsuyoshi Sakata、Shin Matsuyama、Kiyosada Kawai、Ko Yasumoto、Seikoh Sekikawa、Atsushi Ishida

DOI：10.1111/nph.19820

■本研究は JSPS 科研費(16K07526、23K11392、24K09622、24H00778、20K15554、19K12310、20H03077、18H04149、21K19864、23KK0119、24K03129)の助成を受けたものです。

用語解説

* 1 ルビスコ

生体内で起こる化学反応を促進する（触媒する）タンパク質を酵素と呼びます。ルビスコは光合成生物がCO₂を固定する反応を触媒する酵素で、地球上のほとんどの生態系において、有機物生産の入り口に相当する酵素です。多くの酵素に比べてルビスコは反応速度が遅いため、植物は大量のルビスコを葉に含む必要があります。通常、光が十分あたっている場合、光合成はルビスコの反応に制限（律速）されています。また、ルビスコはCO₂だけでなく、大気中のO₂を有機物に固定する反応も引き起こします。その結果、植物は光合成と同時に、これまでに稼いだ有機物を分解してCO₂を放出しています。つまり光を受けている葉では、光合成に加えてルビスコのO₂固定に由来するCO₂の放出とミトコンドリアでの呼吸によるCO₂の放出が同時に起きています。

* 2 $S_{c/o}$

$S_{c/o}$ （ルビスコのCO₂/O₂比親和性）は、ルビスコがCO₂の固定またはO₂の固定のいずれの反応を触媒しやすいかを表す指標です。高い $S_{c/o}$ 値をもつルビスコはCO₂を正確に選別し、光合成を効率よくすすめることができます。しかし、一般に高い $S_{c/o}$ 値を持つルビスコは最大反応速度が低くなるというデメリットが報告されています。

* 3 C₃植物

植物は光合成のタイプによりC₃植物やC₄植物などに分けられています。多くの草本植物、木本植物、作物などはC₃植物で、大気中のCO₂をルビスコが有機物へ固定しています。一方、C₄植物はルビスコとは別の酵素（PEPカルボキシラーゼ）が大気中のCO₂を葉の中に濃縮してから、濃縮されたCO₂をルビスコが有機物に固定しています。

問い合わせ先

＜研究に関すること＞

北里大学 一般教育部
准教授 坂田 剛
e-mail : sakata@kitasato-u.ac.jp

＜取材に関すること＞

学校法人北里研究所 総務部広報課
〒108-8641 東京都港区白金 5-9-1
TEL : 03-5791-6422
e-mail : kohoh@kitasato-u.ac.jp

京都大学 渉外・産官学連携部広報課国際広報室
TEL : 075-753-5728
FAX : 075-753-2094
e-mail : comms@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

国際農林水産業研究センター 情報広報室
〒305-8686 茨城県つくば市大わし 1-1
TEL : 029-838-6708
e-mail : koho-jircas@ml.affrc.go.jp

学校法人玉川学園 教育情報・企画部 広報課
〒194-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1
TEL : 042-739-8710
e-mail : pr@tamagawa.ac.jp

＜配布先＞ 文部科学記者会 | 科学記者会 | 京都大学記者クラブ