



名古屋大学
NAGOYA UNIVERSITY

配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

2025 年 7 月 1 日

報道機関 各位

光合成を失う進化の初期プロセスを観察 ～光合成と呼吸のトレードオフをもたらす突然変異～

【本研究のポイント】

- ・光合成をやめた植物がどのように光合成を失ったのかその進化を観察した例はない。
- ・シアノバクテリア^{注1)}を暗所で長期間培養し光合成の能力を調べた。
- ・暗所に適応した株の多くは光合成で生育できないか、もしくは光合成能力が低下した。一方、暗所での呼吸による生育は親株よりも向上していた。
- ・ゲノム解読の結果、多数の突然変異が一つの遺伝子に集中して生じていた。
- ・この遺伝子 *phsP* は、光合成と呼吸のトレードオフに関わる調節的役割を担うと推定される。
- ・光合成と呼吸のトレードオフを調節するシステムへの突然変異は光合成を失う進化の初期プロセスの一つかもしれない。

【研究概要】

ナンバンギセルやギンリョウソウのように光合成の能力を失った寄生植物^{注2)}がよく知られていますが、光合成を失う進化のプロセスを観察した例はこれまでありませんでした。名古屋大学大学院生命農学研究科の肥田 真太郎 博士前期課程学生(研究当時)、西尾 万梨恵 博士前期課程学生(研究当時)、上坂 一馬 研究員、馬場 真里 研究員、高谷 信之 研究員(研究当時)、山本 治樹 助教、井原 邦夫 准教授、藤田 祐一教授らの研究グループは、葉緑体と同じ祖先をもち植物と同じ光合成を営む微生物シアノバクテリアを、光合成ができない暗闇で長期間培養を行い、光合成の能力の変化を調べました。その結果、実際に光合成能力の喪失・低下が起こり、そのような変化の多くは、ある遺伝子への突然変異による光合成と呼吸のトレードオフによってもたらされたことが分かりました。これらの突然変異と形質の変化は、まさに光合成を失う進化の初期プロセスと思われます。今後は、この新しい光合成と呼吸の調節メカニズムの解明と、光合成が失われるプロセスの具体的な道筋の解明につながると期待されます。

本研究成果は、2025 年 7 月 1 日午前 9 時 01 分(日本時間)に日本植物生理学会誌『*Plant & Cell Physiology*』のオンライン版に掲載されました。

【研究背景と内容】

ススキの根に寄生するナンバンギセルや地中の菌類に寄生するギンリョウソウは被子植物ですが、光合成の能力を完全に失っています。被子植物以外にも光合成生物が光合成能力を喪失する例が数多く知られています。これらの光合成生物はおそらく、光合成を必要としない環境に適応していく進化のプロセスで光合成の能力を失ったと考えられます。しかし、実際に光合成を喪失する具体的な進化の道筋を観察した例はありませんでした。

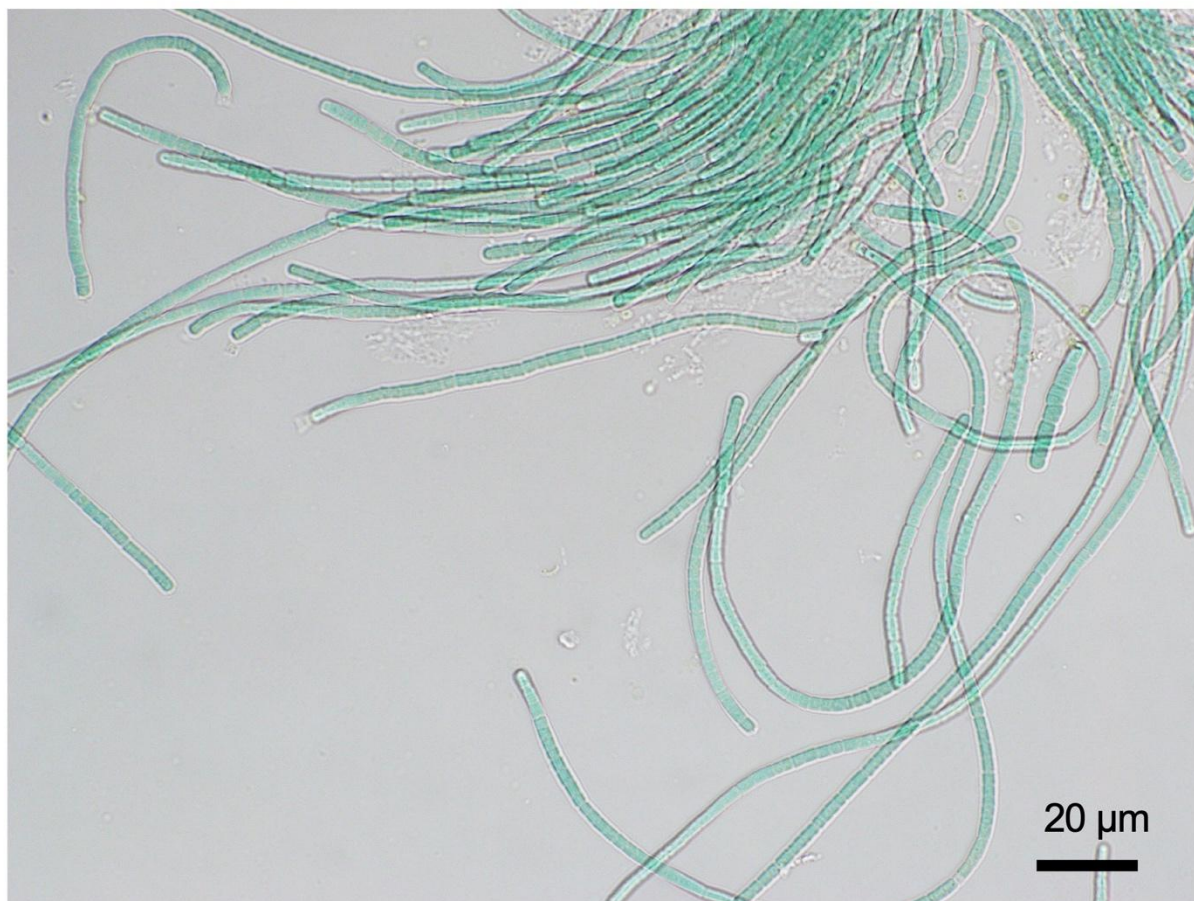


図 1. 糸状性シアノバクテリア *Leptolyngbya boryana*

本シアノバクテリアは、培養液にグルコースを加えておくと光合成ができない暗闇でも継続的に培養できます。(撮影:馬場真里研究員)

植物と同じ光合成を営むシアノバクテリアは、植物の葉緑体と共通の祖先から進化してきたと考えられているため、葉緑体のモデル生物として研究されています。シアノバクテリアの一種 *Leptolyngbya boryana*(レプトリンビア ボリアナ;図 1)は、培養液にグルコース(ブドウ糖)を加えておくと、光合成ができない暗所でも呼吸によって良好に生育することができる性質を持っています。

当研究グループは、このシアノバクテリアを長期間(半年から 4 年間)暗所で培養し、光合成の能力がどのように変化したのか調べました。その結果、調べた 28 株のうち大半が光合成で生育できなくなっており、そのほかの株も光合成での生育が非常に遅くなって

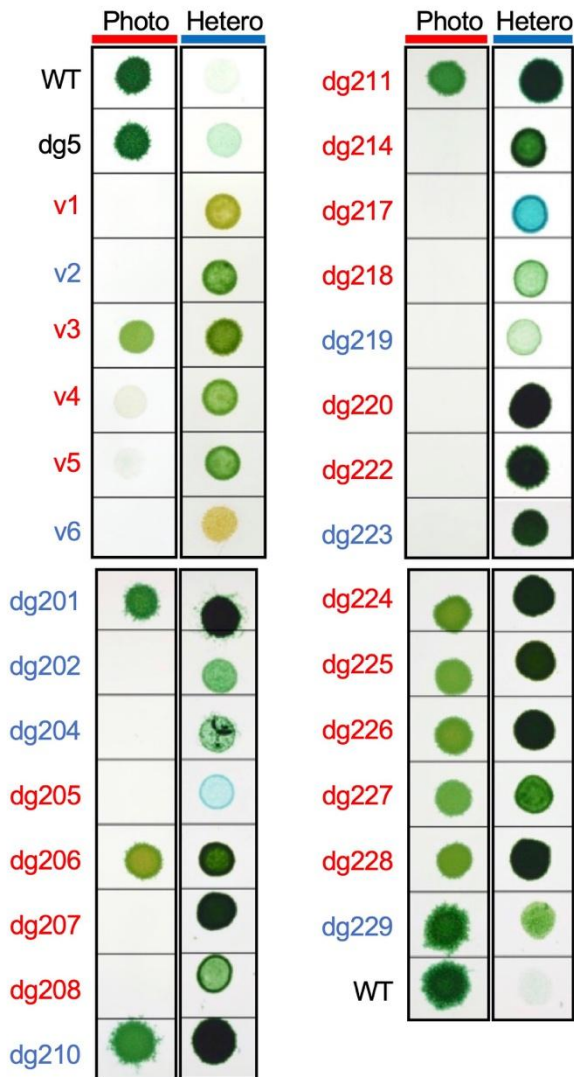


図 2. 長期間暗所で培養を継続したシアノバクテリアの生育 v1～v6 は 49 ヶ月、dg201-dg223 は 15 ヶ月、dg201-dg223 は 7 ヶ月暗所で培養を継続しました。これらの培養液を寒天培地に接種し、左の列(Photo)は光合成条件で、右の列(Hetero)は暗所で生育させました。ゲノム解読で *phsP* 遺伝子に変異をもつ株名は赤字、それ以外の株は青字で示しました。なお、WT は dg201～dg229 の親株、dg5 は v1～v6 の親株です。

ています(図 5A)。つまり、PhsP が関わる制御システムは、昼間は光合成によってせつせと CO₂ から糖を作って貯めておいて、光合成ができない夜になったらその貯めた糖を節約しながら少しずつ使って翌日の朝を待つという生き方をするために役立っていると考えられます。ところが、糖(グルコース)がいつも得られる環境で長い間生きていくうちに、この *phsP* 遺伝子への突然変異が高い頻度で起こると考えられます。この突然変異体は、光合成が低下するけれども呼吸が活発になるので、暗いところではずっと早く増殖ができます(図 5B)。この環境でさらに世代を重ねていくうちに、最後には、別の突然変異が起こって光合成が完全に失われていったと考えられます。

いました。その一方で、すべての株は暗所での呼吸による生育が向上していました(図 2)。また、これらの暗所適応株は水色から黄緑色など非常に多様な色調を示すようになりました(図 3)。

これら 28 株すべてのゲノムを解読したところ、全部で 90 個の突然変異が見つかり、このうち 19 個が一つの遺伝子に集中していました(図 4)。そこで、この遺伝子の機能をあらためて調べてみたところ、この遺伝子に突然変異が起ると、光合成での生育が低下し、呼吸による暗所での生育が向上することが分かりました。つまり、この遺伝子は、普段は光合成を活発にさせる一方で呼吸を低下させる、光合成と呼吸を互いにトレードオフとなるように制御する役割を果たしていることが分かりました。私たちは、この遺伝子を光合成と呼吸をスイッチするホスファターゼ(Phototrophic-heterotrophic switching phosphatase)という役割にちなんで *phsP* と名づけることを提案しました。

光合成は光のエネルギーで CO₂ から糖を作る過程であり、呼吸は糖を分解してエネルギーを取り出す過程です。これらは互いに真逆の反応なので、同時に起こるとエネルギーが無駄になってしまいます。このようなことが起こらないように、シアノバクテリアは、通常は、PhsP の作用(具体的にはパートナースイッチングシステム^{注 3)}と呼ばれる PhsP と他のタンパク質との共同作用と推定されます)で、光合成を活発にさせる一方で呼吸を低いレベルに保つようにし

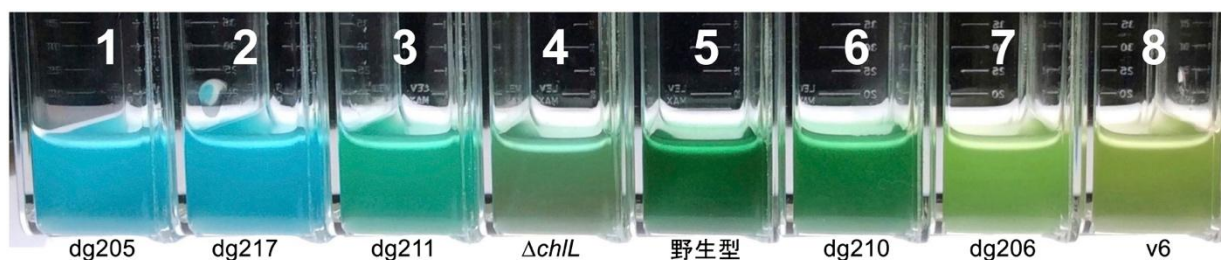


図 3. 多様な色調を示す暗所適応株

親株(5, 野生型)は緑色ですが、長期間暗闇で培養を続けた暗所適応株(1~3 と 6~8)の多くは水色や黄緑色といった多様な色調になりました。なお、4 ($\Delta chlL$)は以前単離した暗所でクロロフィルを作ることができない変異株で、他の株と色調比較のために示しました。

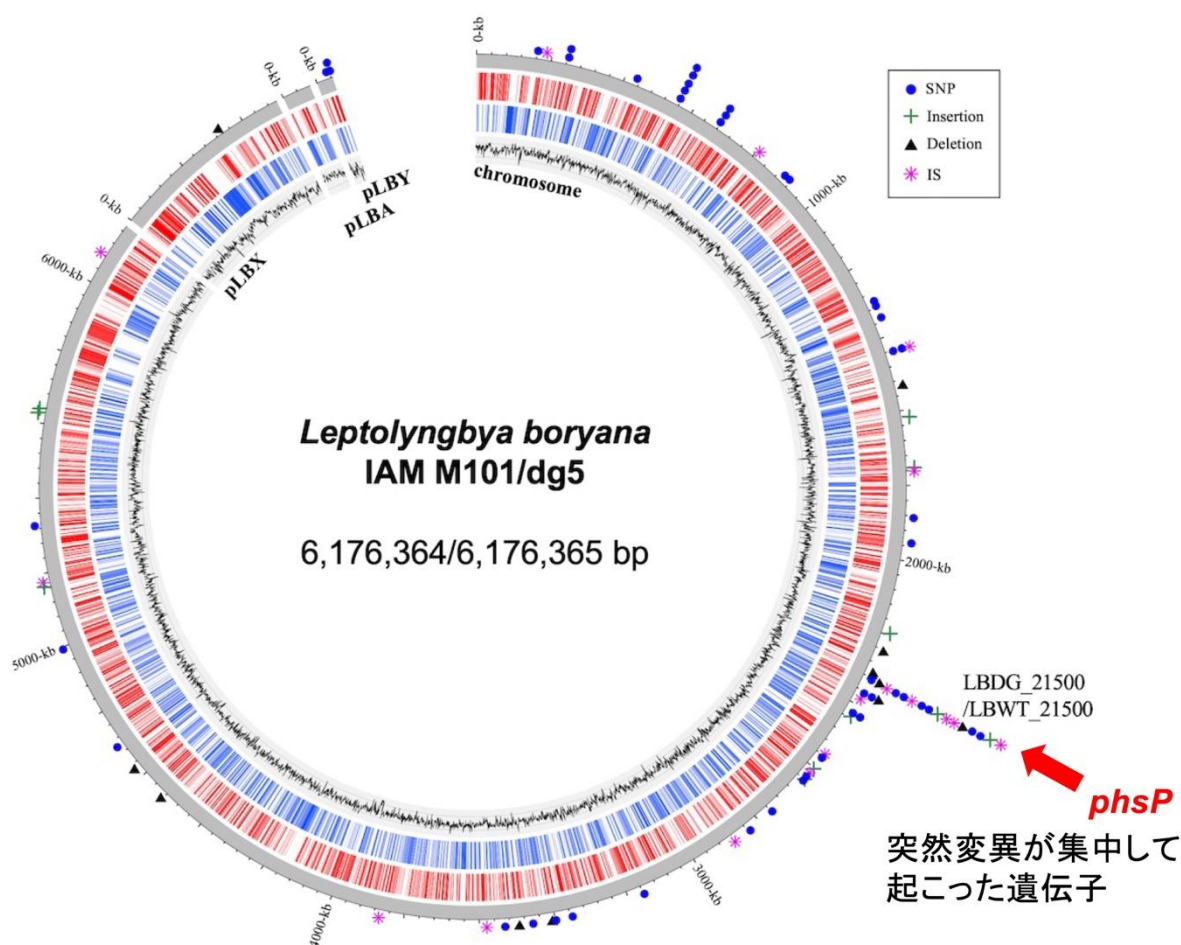


図 4. 暗所適応株 28 株のゲノム解析

28 株のゲノム解析の結果、90 カ所の突然変異が見つかりました。約 4 時の位置にある遺伝子 *phsP*(赤い矢印)に多くの突然変異が集中していました。

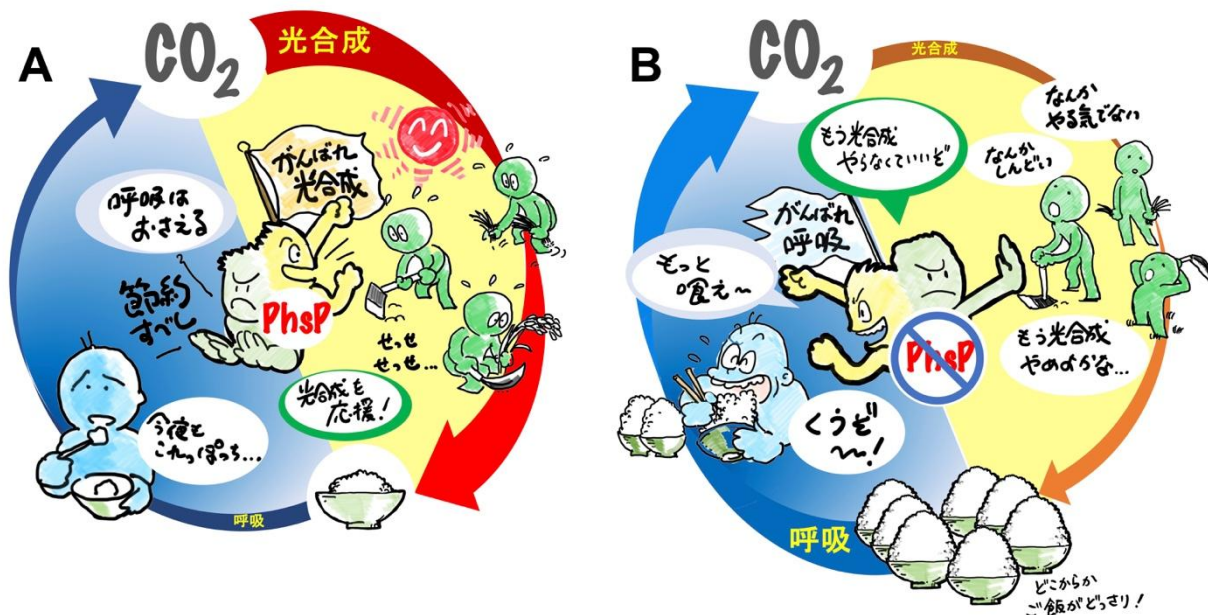


図 5. 光合成を促進し呼吸を抑制する PhsP のはたらき

A. 正常なトレードオフ制御。PhsP は他のタンパク質と共同して、通常は、光合成を活発にさせる一方で呼吸を低いレベルにおさえています。B. *phsP* への突然変異によって異常になったトレードオフ制御。糖(グルコース)がいつもたくさん得られる環境(このイラストでは大盛りのご飯で表しています)で長くおかれると、*phsP* に変異が起こり(つまり PhsP の本来の作用がなくなる)、制御が逆になってしまい、呼吸が活発になる一方で光合成が低下してしまいます。

【成果の意義】

光合成が失われる進化に関するこれまでの研究は、寄生植物の葉緑体のゲノム解析や近い種類の藻類の間で光合成によって生育する種と呼吸によって生育する種とのゲノム比較などから、光合成を失う進化がどのように進行したのか推察していました。しかし、その進化のプロセスを具体的に観察した例はありませんでした。今回の成果は、実験室の中でシアノバクテリアを暗闇に保ってグルコースを与えた環境で半年から4年にわたって培養を継続することで、光合成が低下もしくは喪失するような進化プロセスを再現し、ゲノム解析等によりその原因となった突然変異を特定し、光合成喪失の進化の道筋を具体的に例示することができました。光合成の低下と呼吸の向上をもたらす突然変異が高い頻度で現れたことは、光合成と呼吸のトレードオフをもたらす進化が光合成喪失の初期過程となった可能性を示唆しています。

光合成は空気中の CO_2 から光のエネルギーを使ってグルコース($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)のような糖(有機物)を作る過程です。一方、呼吸はグルコースなどの糖を CO_2 に分解してエネルギーを取り出す過程です。光合成をする細胞の中で、これら2つのプロセスが同時に起こってしまうと、光合成で作った糖がすぐに呼吸で分解され、光合成が無駄になってしまいます。このため、シアノバクテリアは、光合成で生きるために、光合成と呼吸のバランスをうまく保つ必要がありますが、これまでにそのバランスを制御するシステムについてよく分かっていませんでした。今回の *phsP* 遺伝子の発見をきっかけに光合成と呼吸の制御システムについての理解が深まることが期待されます。また、*phsP* への突然変異以外にもカロテノイドなどの光合成色素の生合成に関わる突然変異が多数見つかりました。暗所適応株が多彩な色調を示すのはそのためだと考えられます(図3)。光合成を失う進化には

phsP 変異以外にも、カロテノイドが作れなくなる変異など、多くの他の道筋が想定されます。今回使ったシアノバクテリアは、このような進化を研究するために有用な種であることが分かりました。この実験室微小進化実験により光合成喪失の進化過程を一つ一つ明らかにしていくことで、寄生植物などがたどった、光合成を喪失する進化の道筋の解明の一助となることが期待されます。さらに、この制御システムが明らかとなれば、シアノバクテリアを使った効率的な物質生産に活用できるかもしれません。

本研究は、学術変革領域(A)『光合成ユビキティ』(課題番号 24H02075)、科研費挑戦的研究(萌芽)(課題番号 18K19173, 22K19146)の支援のもとで行われました。

【用語説明】

注 1)シアノバクテリア:

植物と同じ光合成を行う微生物。シアノバクテリアの祖先は植物の葉緑体の起源になったと考えられている。本研究で使った *Leptolyngbya boryana*(図 1)もシアノバクテリアの一種である。

注 2)寄生植物:

光合成を行う植物に寄生する植物で、寄生先の植物(宿主となった植物)から光合成による有機物などを得て生育するため、その多くは光合成の能力を失っている。

注 3)パートナースイッチングシステム(図 6):

転写を行う酵素 RNA ポリメラーゼの一部(サブユニット)であるシグマ因子を介して転写を制御するシステムの一つ。バクテリア(原核生物)で広く見られる。シグマ因子(σ ; ベージュ色)と結合するアンチシグマ因子(緑)、アンチシグマ因子と結合するアンタゴニスト(青)、アンタゴニストのリン酸化を外す酵素ホスファターゼ(赤)の 3 つのタンパク質から成る。シグマ因子がアンチシグマ因子と結合している(左の状態)と RNA ポリメラーゼが機能せず転写は起こらない。ホスファターゼが環境要因を感知してアンタゴニストのリン酸基(ピンクの P)を外す(赤矢印)と、アンタゴニストがアンチシグマ因子と結合する。その結果、シグマ因子が解放されて RNA ポリメラーゼと結合し転写が開始される(右の状態)。つまり、アンタゴニストにリン酸基がくっついていてどうかによって、アンチシグマ因子がアンタゴニストと結合するかシグマ因子と結合するかが決まり、結果として転写が起こるかどうかが決まるという遺伝子発現を制御するシステム。今回見出した *PhsP* はこのシステムのホスファターゼ(赤)に当たる。

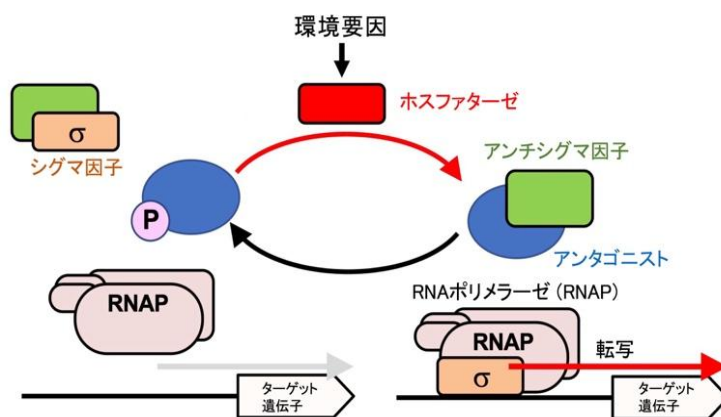


図 6. パートナースイッチングシステムの概略

【論文情報】

雑誌名: Plant and Cell Physiology

論文タイトル: Genome analysis of dark-adapted variants identifies the phosphatase gene *phsP* involved in the regulation of photosynthetic and dark-heterotrophic growth in the cyanobacterium *Leptolyngbya boryana*. (シアノバクテリア *Leptolyngbya boryana* の暗所適応株のゲノム解析による光合成と暗所従属栄養生育の制御に関わるホスファターゼ遺伝子 *phsP* の同定)

著者: 肥田真太郎、西尾万梨恵、**上坂一馬、**馬場真里、**高谷信之、*山本治樹、*井原邦夫、*藤田祐一(すべて本学関係者、*名古屋大学教員、**名古屋大学研究員)

DOI: 10.1093/pcp/pcaf043



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/>

