

モヤシは将来の光合成に備え、まず糖脂質を作る ～長年闇に包まれていた脂質の役割が明るみに～

1. 発表者：

藤井 祥（東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻生命環境科学系 博士後期課程2年）
小林 康一（東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻生命環境科学系 助教）

2. 発表のポイント：

- ◆暗いところで発芽した被子植物（モヤシ）は、光を浴びる前から葉緑体を作る準備をしているが、その準備段階に糖脂質が必要であることを発見した。
- ◆モヤシの子葉に蓄積する糖脂質が、葉緑体を準備する際の色素の合成やタンパク質の機能に重要であることを初めて突き止めた。
- ◆植物が葉緑体を効率的に発達させ、光合成をおこなうための戦略の解明に貢献することが期待される。

3. 発表概要：

明るいところで芽生えた植物は、緑色のクロロフィル（葉緑素、注1）を蓄積した葉緑体の子葉の細胞内に発達させて光合成を行います。いっぽう、暗いところで芽生えた被子植物は、黄白色のいわゆるモヤシの形態になります。その際、葉緑体はエチオプラスト（注2）と呼ばれる前駆的な形態をとり、光が当たるまでその状態で待機しています。エチオプラストの内部には蜂の巣状の膜構造が発達し、そこにクロロフィルの前駆物質と、クロロフィルの合成に必要なタンパク質、そして葉緑体膜構造（チラコイド膜、注3）の骨格となる脂質が蓄えられます。子葉が光を受けると、前駆物質がクロロフィルに変換されるとともにチラコイド膜が発達し、エチオプラストは葉緑体になります。これは、被子植物が光に応答して速やかに光合成を始めるための重要なしくみですが、この過程における脂質の役割は全く分かっていませんでした。東京大学大学院総合文化研究科の藤井祥大学院生、小林康一助教、増田建教授、和田元教授と日本女子大学理学部の永田典子教授の共同研究グループは、モデル植物のシロイヌナズナ（注4）を用いた研究により、糖脂質（注5）の一種がエチオプラストの発達に必要であることを突き止めました。この糖脂質は、規則正しい蜂の巣構造を形成するうえで必要であり、クロロフィルの合成反応にも深く関わっていることが明らかになりました。クロロフィルの合成は光合成に不可欠である反面、活性酸素を生じる危険性も併せ持つため、厳密な制御が必要です。糖脂質はクロロフィル合成の制御を通じて、植物が安全かつ効率的に葉緑体を発達させるうえで重要な役割を担っているのだと考えられます。本研究は、植物が効率的に葉緑体を発達させ、光合成によって成長するための戦略を理解するうえで大きな一歩となります。

4. 発表内容：

①研究の背景

明るいところで芽生えた被子植物は、緑色の葉を発達させて光合成を行います。いっぽう、物陰や土中のような暗いところで芽生えた場合は、いわゆるモヤシの形態となり、緑色にはなりません。モヤシの先端には黄白色の小さな葉（子葉）がついていて、そこに光が当たると子葉は数時間のうちに緑色になります（図1）。この緑化と呼ばれる現象は、光に反応して葉緑体がすばやく発達し、クロロフィル（葉緑素）を蓄積することによって起きます。光に応答して急速に緑化するための準備段階として、モヤシの子葉の細胞内では、葉緑体はエチオプラストと呼ばれる前駆的な形態をとっています。エチオプラストは内部に蜂の巣状の膜構造をもち、そこにクロロフィルの材料となる色素（クロロフィル前駆体、注6）と、クロロフィルの合成に必要なタンパク質、そして葉緑体の膜構造（チラコイド膜）の材料となる脂質を蓄えています。ここに光が当たると、クロロフィル前駆体がクロロフィルへと変換されるとともにチラコイド膜が発達することで、エチオプラストは葉緑体になり、被子植物は速やかに光合成を開始することができます（図1）。これまでのエチオプラスト研究は、色素とタンパク質に注目して進められてきており、第三の要素である脂質の役割は全く分かっていませんでした。本研究グループは先行研究により、モデル植物であるシロイヌナズナにおいて、植物に特有の糖脂質の合成を人為的に制御できるシステムを確立しました（リンク1）。本研究ではこの系を用いて、糖脂質が葉緑体の準備段階であるエチオプラストにおいてどのような機能をもつかを詳細に調べました。

②研究内容

まず、エチオプラストの蜂の巣構造の形成に糖脂質が関わっているかどうか調べるため、糖脂質合成を抑制した状態の植物を暗所で発芽させ、高分解能の電子顕微鏡を用いて植物細胞内の細かな構造を観察しました。通常の状態では非常に規則的な蜂の巣構造がつくられますが、糖脂質の合成を抑制すると、不規則で緩んだような構造になりました（図2）。規則正しい蜂の巣状構造を形成するには、この糖脂質が必要であることを示しています。

続いて、クロロフィル前駆体の蓄積に糖脂質がどのように関わっているか、詳細に解析しました。その結果、クロロフィル前駆体の合成には糖脂質が必要であることが分かりました。また、糖脂質合成を人為的に抑制した実験から、クロロフィル前駆体を合成するには、それに先立って糖脂質が合成されていなければならないことも突き止めました。特に、エチオプラストの膜において行われる反応が糖脂質の不足により強く阻害されたことから、糖脂質の豊富な膜環境がこれらの反応に必要なのだと考えられます（図3）。

光が当たったときにすぐクロロフィルを合成するためには、その材料となる前駆体を蓄積しておくことが必要ですが、蓄積量が増えすぎると光が当たったときに活性酸素が発生することも知られています。そのため、クロロフィル前駆体の合成量は厳密に調節されていなければなりません。そこで植物は発芽したあと、まず糖脂質を合成し、いわば安全な膜環境を整えてから、クロロフィル前駆体を合成するようなくみをもっているのではないかと推測

されます。このしくみがなければ、モヤシは光が当たったときに活性酸素による傷害を受け、それ以降の生育が阻害されてしまうでしょう。普段何気なく食べているモヤシにも、植物の巧みな生存戦略が隠されていたのです。

③社会的意義

発芽した植物が大きく成長するうえで、効率的に葉緑体を発達させて光合成能力を獲得することは非常に重要です。本研究によって、効率的な葉緑体の発達には、葉緑体の形成前から糖脂質を蓄えておくことが重要であるということが初めて明らかとなりました。この発見は、植物が葉緑体を発達させるしくみを解き明かす上で、重要な一步となります。この研究をさらに進めることで、植物が光エネルギーを利用しつつ安全かつ効率的に成長するうえで必要なしくみを理解できるようになると考えられます。

本研究は、独立行政法人日本学術振興会の科学研究費補助金の研究助成 16J10176、26711016、16K07393、26440170 を受けて行われました。

(リンク1)

東京大学大学院 総合文化研究科 トピックス【研究発表】『発芽初期の膜合成が葉緑体の運命を左右する ―脂質合成の人工制御が解き明かす葉緑体の分化制御―』
(<http://www.c.u-tokyo.ac.jp/info/news/topics/20141023141201.html>)

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Plant Physiology」

論文タイトル：Monogalactosyldiacylglycerol facilitates synthesis of photoactive protochlorophyllide in etioplasts

著者：Sho Fujii, Koichi Kobayashi*, Noriko Nagata, Tatsuru Masuda and Hajime Wada

DOI 番号：10.1104/pp.17.00304

アブストラクト URL：<http://www.plantphysiol.org/content/early/2017/06/27/pp.17.00304>

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 生命環境科学系

助教 小林 康一 (こばやし こういち)

Tel/Fax: 03-5454-6628

Email: kkobayashi@bio.c.u-tokyo.ac.jp

HP: <http://hajimewada.c.u-tokyo.ac.jp/>

7. 用語解説：

(注1) クロロフィル

葉緑素とも呼ばれる植物の緑色色素で、光合成に必要な光エネルギーを集める機能をもつ。

(注 2) エチオプラスト

被子植物が暗所で芽生えたときに、子葉の細胞中で発達する細胞内小器官 (図 1 参照)。内部に規則的な蜂の巣状の膜構造をもつ。光が当たると急速に葉緑体へと発達する。

(注 3) チラコイド膜

葉緑体の内部にみられる扁平な袋状の膜構造で (図 1 参照)、光合成の初期反応の場である。脂質が作る膜に、クロロフィルやタンパク質が蓄積している。

(注 4) シロイヌナズナ

アブラナ科シロイヌナズナ属の 1 年草。学名は *Arabidopsis thaliana*。モデル実験生物として植物で初めてゲノム解読が行われ、多くの変異系統やデータベースが世界各国の研究機関で維持・管理されている。

(注 5) 糖脂質

分子の中に糖を含む脂質。植物や藻類の葉緑体では、3 種類のグリセロ糖脂質が全膜脂質の 90%程度を占める。

(注 6) 前駆体

ある物質が合成される前の段階にある物質のこと。

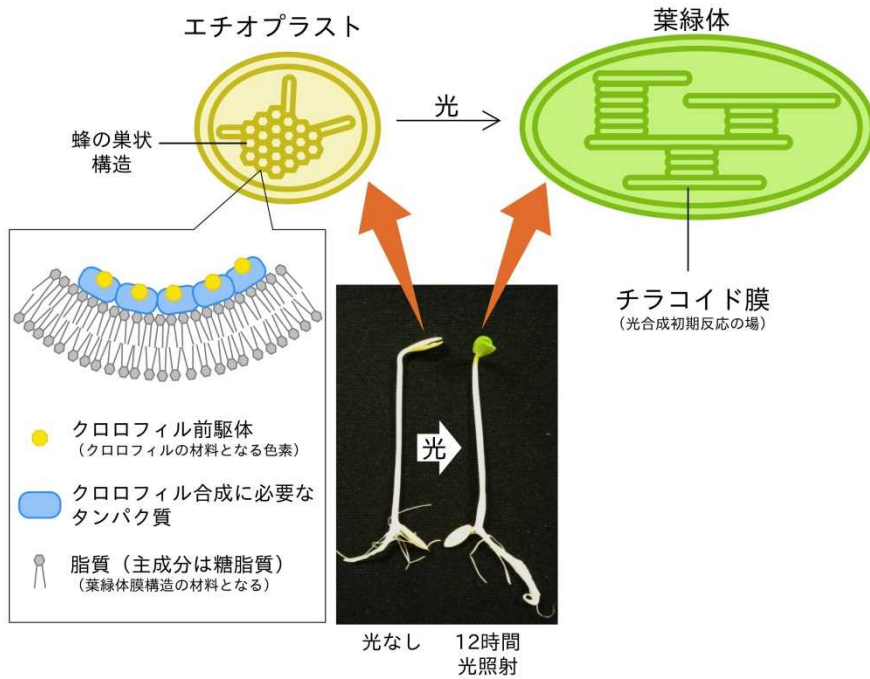


図 1 エチオプラストの蜂の巣状膜構造。暗いところで芽生えた被子植物（モヤシ）の細胞内には、規則的な蜂の巣構造をもつ細胞内小器官、エチオプラストが見られる。蜂の巣構造には、クロロフィルの材料となる色素と、クロロフィル合成に必要なタンパク質、そして葉緑体の膜構造を形成する材料となる脂質が蓄積している。モヤシに光が当たると、エチオプラストはチラコイド膜をもつ葉緑体に発達する。なお、図中の写真はキュウリの芽生え。

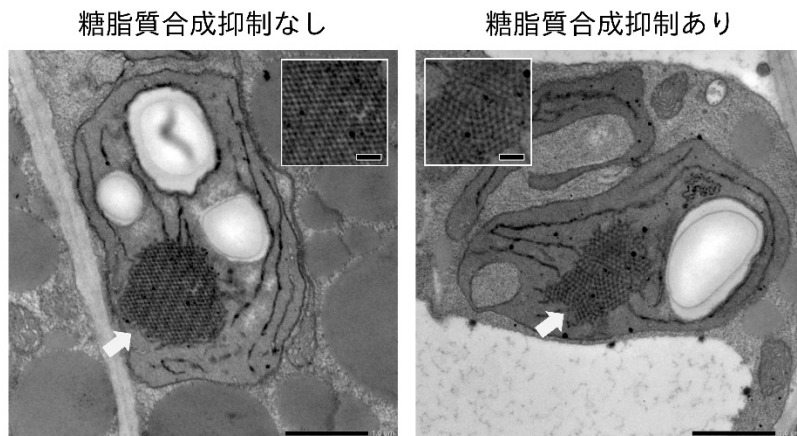


図 2 エチオプラストの電子顕微鏡像。糖脂質の合成が盛んに行われている通常の条件では、非常に規則正しい蜂の巣構造が形成する（左図）。いっぽう、糖脂質の合成を抑制すると、蜂の巣状構造が不規則で緩んだような形状になった（右図）。各図の上側中央寄りに蜂の巣状構造の拡大像を示した。全体像の写真中のバーは 1 μm 、拡大像のバーは 200 nm を表す。

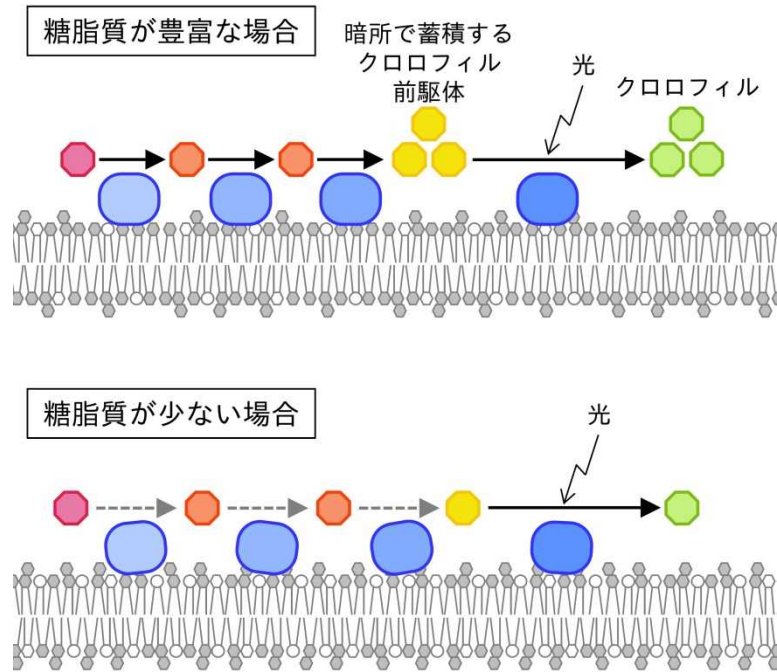


図 3 クロロフィルの合成には糖脂質の豊富な膜環境が必要。糖脂質が豊富にあれば、膜上での反応がスムーズに進行するが、糖脂質が少ないと、これらの反応が阻害される。