

藻類は“進化”する

生体システム専攻 太田・下嶋 研究室



太田 啓之 教授 1957年大阪府生まれ。京都大学大学院農学研究科食品工学専攻博士課程修了。1991年より東京工業大学生命理工学部助手、1997年より同助教授。2007年より同大学バイオ研究基盤支援総合センター教授。2014年より、同大学大学院生命理工学研究科教授。

下嶋 美恵 准教授 1970年東京都生まれ。1998年東京工業大学大学院生命理工学研究科バイオサイエンス専攻博士課程修了。2015年より同研究科生体システム専攻准教授。



太田・下嶋研究室では、藻類や植物に代表される光合成生物が周囲の環境からどのような影響を受け、どのように適応してきたのかについてあらゆる側面から研究している。本稿ではその中から、太田先生が解明した藻類・植物のルーツと環境適応について紹介した後、藻類が生み出す新たなエネルギーの展望について取り上げる。

藻類と植物

私たち人類をはじめ、全ての動物の祖先は海で誕生し進化した。植物もまた、水中に生息する藻類から進化してきた。ここで言う植物とは主にコケ、シダ、種子植物のように陸上に生息する光合成生物を、藻類とは主に水中に生息する光合成生物を指す。

陸上に進出することで、より多くの光や酸素を得られるようになった植物であるが、乾燥や酸化力の強いオゾンにさらされるなど、大きなデメリットもあった。そこで植物は、陸上の過酷な環境に耐えるためにさまざまな適応能力を身に付けてきた。そのひとつの例として、細胞が水不足に陥っ

たり強い酸化力にさらされたりすると、ジャスモン酸という物質を合成する、という適応能力がある。ジャスモン酸は抗酸化物質であるビタミンCなどの合成を誘導し、これが植物を乾燥や酸化から守っている。

ジャスモン酸のように植物の体内ではたらく、植物内部の状態を調整する物質を植物ホルモンという。実は、このジャスモン酸のはたらきを解明したのは太田先生だった。そして先生は植物の適応機構を解明していくうちに、植物が現在どのような環境適応能力をもつのかだけでなく、その獲得過程についても興味をもった。この過程を解明するためには、藻類がどのようにして植物へ進化したのかを知ることが重要だと先生は考え、同じ

分野の研究者と協力し研究を進めることにした。まずは先生方がどのようにして進化の過程を解明していったのか触れていこう。

植物への進化

進化過程の研究にあたって太田先生たちの研究グループが注目したのは、クレブソルミディウムという車軸藻植物門に属する藻類である。車軸藻植物門の藻類は植物に進化するまでの中間的生物と考えられ、クレブソルミディウムも乾燥した場所から湿ったコンクリートの隙間や水たまりにまでさまざまな環境に生息できる。このクレブソルミディウムはあまりにもありふれた藻類であるため、これまで着目した人はほとんどいなかった。しかし先生方は、このような特徴をもつクレブソルミディウムが、厳しい陸上環境に適応するための鍵を握っているのではないかと考えた。

先生方は、クレブソルミディウムから植物の起源を知るために、ゲノム解析という手法を用いることにした。ゲノム解析とは、生物の全遺伝情報の解明をすることである。その結果、驚くべきことが判明した。クレブソルミディウムには、植物になると失われてしまう藻類特有の遺伝子が含まれている一方、植物特有であると思われていた陸上植物型遺伝子が実は全体の7.7%も含まれていたのだ。藻類がここまで多く陸上植物型遺伝子をもつ例はこれまで発見されていなかったもので、陸上植物型遺伝子がクレブソルミディウムにこれだけ多く存在すると判明したことはとても驚くべきことだった。同時に、水中に生息しているほかの藻類についても調べたが、陸上植物型遺伝子はほと

んど含まれていなかった(図1)。これらのことから、クレブソルミディウムがもっている陸上植物型遺伝子は藻類の陸上進出にとって特に重要であったと考えられる。そして先生方は、陸上植物型遺伝子が藻類の進化する過程にもたらした影響を、今まさに解明しようとしているのだ。

藻類がつくる油脂

ここまで、植物ホルモンや、藻類が陸上に進出するにあたっての遺伝子の違い、および変化に関する太田先生の研究について述べてきた。ここからは、環境適応してきた藻類や植物の性質を利用した先生の研究について説明していく。

みなさんは植物や藻類が生み出すバイオマスエネルギーについてご存知だろうか。現在主流となっているエネルギー源は、石油などの化石燃料である。しかし近年、再生可能なエネルギーとして生物由来のバイオマスエネルギーが注目されている。これからとりあげるのは、藻類が蓄積する油脂を用いたバイオマスエネルギーだ。

油脂を得るために多くの研究者が用いている手法は、重要な栄養素のひとつである窒素を欠乏させた際、藻類が蓄積する油脂を用いるというものだ。しかし、窒素を欠乏させて油脂を蓄積する方法にはひとつ欠点がある。それは、光合成に関わるチラコイド膜が維持できなくなってしまう点だ。

チラコイド膜は、葉緑体の中に存在し、主に糖脂質からなる膜構造で、光エネルギーを化学エネルギーに変換するはたらきをもつ。植物や藻類は普段、光合成で生産した糖脂質でチラコイド膜を維持し、光合成を繰り返して成長している。しかし、窒素欠乏時には油脂を溜める一方で、糖脂質をつくる量を減らしてしまう。すると糖脂質からできたチラコイド膜が小さくなってしまい、光合成や細胞増殖の効率が下がり、細胞が増えなくなる。そのためこれまで知られていた窒素欠乏条件下では、溜められる油脂の量に限界があった。

そこで先生が思いついたのが、窒素同様に重要な栄養素であるリンを欠乏させるアイデアだ。実際に実験してみたところ、先生は最適なリン欠乏条件を世界で初めて見つけることができた。この

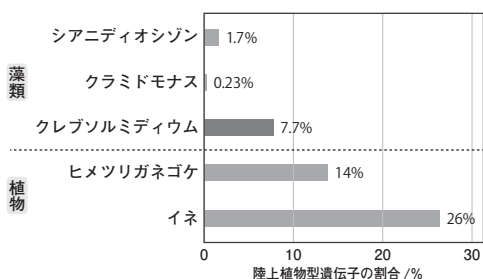


図1 藻類と植物における陸上植物型遺伝子の割合

条件下では、糖脂質の生産量は減少せず、光合成や細胞増殖を大きく妨げずに油脂が溜まったのだ。

ここで、植物の三大栄養素が窒素、リン、カリウムだと知っている方は、既に窒素と同様にリンを欠乏させる実験が以前から試みられていたのでは、と思うかもしれない。しかし窒素を欠乏させるだけで簡単に油脂を溜められることがわかっており、かつこれまで知られていた窒素欠乏条件と同じタイミングでリンを欠乏させても、油脂が溜まる量は非常に少なかった。そのためリン欠乏条件での研究を推し進めた人はこれまでいなかった。

先生は、リン欠乏条件下で多くの油脂を溜めるために、植物がリン欠乏時に起こす膜脂質転換という機構を利用した。これまでも膜脂質転換の現象自体は海外研究グループによって知られていたが、その詳細な仕組みまでは判明していなかった。そこで先生は、膜脂質転換に関係する遺伝子を解明し、機構全体を明らかにすることに成功した。そして、その機構が油脂を溜めるはたらきに良い作用をすると考え、応用することにしたのだ。

膜脂質転換は、植物が身につけた環境適応の仕組みのひとつだ。このはたらきにおいては、植物がもつ膜の主成分の違いが重要となっている。それは、細胞膜の主成分はリン脂質であり、チラコイド膜の主成分は糖脂質である、という違いである。この違いをふまえて、膜脂質転換の具体的な機構について説明していこう。

リン欠乏条件下の植物では、細胞膜に含まれるリン脂質が分解されてリンが切り出され、植物の体の中でリンを必要とするところに運ばれる。その代わりに、通常ならば葉緑体のみ存在する糖脂質が、リン脂質を失った細胞膜に用いられる。このようにしてリン欠乏に適応する機構を膜脂質転換という（図2）。重要なのは、葉緑体のチラコイド膜を維持するための糖脂質もこのとき同時に合成されていることである。窒素欠乏時には糖脂質をつくる量は減ってしまうが、リン欠乏時には葉緑体のはたらきが大きく低下することではなく、光合成のはたらきを保つことができるのだ。

リンを欠乏させて油脂を溜める発想は植物の膜脂質転換から得たが、クラミドモナスという藻類においても植物とほとんど同様の仕組みで膜脂質

転換が行われていた。先生はこの仕組みを利用して、リンを欠乏させたクラミドモナスにおいてチラコイド膜を維持し、光合成や細胞増殖を大きく妨げずに油脂を溜められることを発見したのだ。

このようにして糖脂質と油脂の生産の両立には成功したが、単にリンを欠乏させるだけでは油脂の溜まる量はまだ十分ではなかった。そこで先生は、リン欠乏条件の設定を窒素欠乏時から二つ大きく変えることで、より多くの油脂が溜まることを発見した。その二つの条件とは何だろうか。

一つ目は、栄養素を欠乏させ始める時期を意図的に変えたことである。これまで窒素欠乏条件をつくる際は、細胞が成熟してから窒素を欠乏させていた。しかし細胞が成熟してからリンを欠乏させても、すでに細胞内に多くのリンが蓄積しているため、膜脂質転換によって足りないリンを供給できてしまう。それゆえリンをこのように欠乏させても植物は栄養欠乏のストレスを感じず、油脂がなかなか溜まらなかった。一方、リンを欠乏させる時期が早すぎると、油脂は溜まるがそれと同時に栄養不足によって成長が阻害されてしまうため、効率がよくなかった。そこで先生は、細胞の成長が飽和に達する少し手前の段階でリンを欠乏させる、という条件を使うことにした。そうすることで、成長を妨げることもなく効率よく油脂を溜められるようになったのだ。

二つ目は、遺伝子組み換えをしたことだ。藻類がつくる油脂の合成にはDGTT4という酵素が関わっている。この酵素は、リン欠乏時には発現が弱くなるという欠点があり、この欠点がリン欠乏

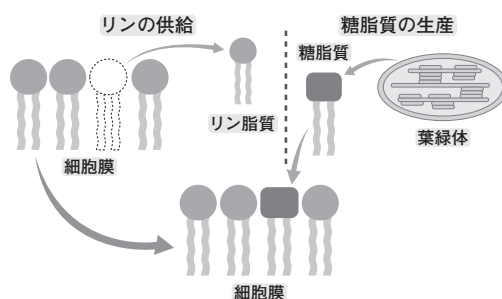


図2 リン欠乏時における植物の膜脂質転換の仕組み

細胞膜からリンが切りだされると、糖脂質がリン脂質の代わりに用いられる。

条件下における油脂の蓄積を妨げていた。

ここで先生は、pCrSQD2というプロモーターに注目した。プロモーターというのは、遺伝子のはたらきのオンとオフを切り替えるスイッチの役割をもつ遺伝子領域のことで、これは特定条件下でのみ作用する。先生は、膜脂質転換に関わる遺伝子を解析した際、pCrSQD2がリン欠乏条件下で強く活性化されることを見出していた。そしてこのpCrSQD2をDGTT4合成に関わる遺伝子のプロモーターとして用いてみたところ、リン欠乏条件下でもDGTT4が効率よく合成され、油脂が多く溜まることを発見したのだ。

これらの条件を試したことで、今まであまり研究のされていなかったリン欠乏条件を活用し、葉緑体のチラコイド膜の維持と油脂の蓄積を両立できるようになった。そして先生はこの油脂をバイオマスエネルギーとして用いるにあたり、さらに効率よく溜められないか、と考えた。ここで先生が使い始めたのが、ナンノクロロプシスという藻類である。ナンノクロロプシスは栄養欠乏時に、自身の乾燥重量の50～60%もの油脂を蓄積することができる。クラミドモナスのような他の藻類でも油脂は溜められるが、それに比べてこのナンノクロロプシスは生産効率が非常に高いのだ。

これに加え、ナンノクロロプシスは海水中でも培養させられること、クラミドモナスの約100倍の密度で培養できることから、現在の研究はナンノクロロプシスを用いて進められている。先ほど紹介したクラミドモナスと同様の二つの条件を先生方が用いてみたところ、ナンノクロロプシスでもリン欠乏条件下で油脂を多く生産することに成功した。今後の展望として、遺伝子の操作により脂肪酸の炭素数を変え、油脂の質を変えることができれば、自動車のガソリンからジェット燃料、重油まであらゆる用途のバイオマスエネルギーを作れるのではないかと先生は考えている。

先生の信念

太田先生の研究における独自の発見を可能にしたものは何だったのだろうか。それは、研究の方向性を選択する際には固定観念にとらわれず、マ

イナーな方を選ぶ、という先生の信念である。先生は長いあいだ植物の研究をしているが、そもそも植物を選んだのも、研究対象としてメジャーな動物より、マイナーな植物を研究の方が面白いのでは、と思ったからだ。また、一般には植物の研究の中でも特にDNAやタンパク質の研究が盛んである。しかし先生は、扱いにくく研究が盛んではなかった生体膜の研究を進めた。これは、地球に生命が生まれた瞬間というのはタンパク質やDNAができた瞬間ではなく、これらが膜に包まれた瞬間である、と先生が考えているためである。

もちろん、このようなマイナーな研究分野における発見が生物学全体の発展にとってはあまり有用ではない可能性もある。だからこそ、このような分野から汎用性が高く優れた発見をしよう、と先生は常に考えているようだ。その目標を達成する鍵となっているのが先生のバックグラウンドだ。先生は東工大に来て研究を始めた当初、今より理学寄りの見地から基礎的な研究をしていた。その成果の例が本稿で述べたゲノム解析や、藻類から植物への進化過程の解明である。先生はそのバックグラウンドを活かすことで、リン欠乏条件下の藻類で効率よく油脂を溜める、という優れた発見ができたのだ。

自分が手をつけ始めたこの新しいバイオマスエネルギーが形になれば幸せだと語る先生は、独自性の高い工夫をしながら研究を続けている。今後、小さな藻類の生み出す油脂が、環境に負荷をかけない新エネルギーの主軸となっていくことも期待できる。先生が選んだ一見マイナーと思われる分野から大発見が生まれ、世界の常識となる日が来るかもしれない。

執筆者より

取材では、本稿で紹介した膜脂質転換のバイオマスエネルギーへの応用のみならず、その詳細な仕組み等、多くの興味深いお話を伺うことができました。研究室の引越などで大変お忙しい時期にも関わらず、快く取材に応じてくださった先生方に、心より御礼申し上げます。

(錦織 桜子)