

細胞内共生と植物の進化

先回は、葉緑体と光合成を中心とした話でした。今号は、葉緑体と細胞内共生を中心とした話です。細胞には核をはじめ様々なもの（細胞小器官：オルガネラ）が入っています（前号の図1参照）。前回は葉緑体のみ説明しましたが、今回はミトコンドリアを含めた話です。

（1）葉緑体とミトコンドリア

ミトコンドリアは動物も含めた多くの生物の細胞に入っています。葉緑体は主に植物細胞に入っています。この二つには共通の特徴があります。それは両者とも2重の細胞膜があることです。

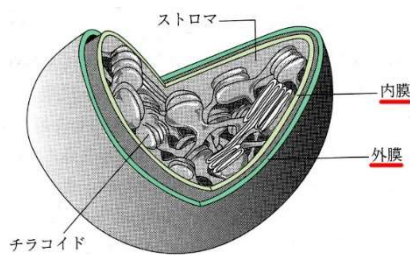


図1 葉緑体 (柄内新ほか, 2006 を改)

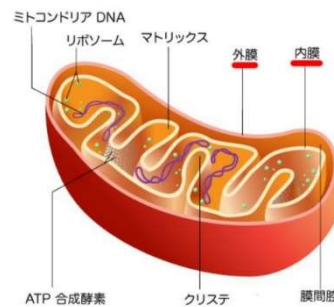


図2 ミトコンドリア (URL1 に加筆)

ミトコンドリアの重要な働きは、エネルギー（アデノシン三リン酸；ATP）を作り出すことです。また、細胞内のカルシウムイオン濃度の調節、脂質の酸化や免疫反応でも大きな働きをしています。図2のように描かれますが、ミトコンドリアはこの形で細胞内にぶかりと浮いているのではなく、細胞質全体に管状の網様構造をつくり、絶えず融合と分裂を繰り返す運動性に富んだ器官です。

（2）細胞内共生

真核生物*が持つミトコンドリアや葉緑体にある2重の細胞膜の存在は古くから注目され、細胞内共生の考えが出されました。それは、ミトコンドリアと葉緑体はそれを含む細胞（宿主）とは元は別の生物であり、ミトコンドリアは細胞内に好気性細菌が、葉緑体はシアノバクテリアが、入り込んで共生（細胞内共生といいます）

したという考えです（図3）。細胞内共生の宿主となった原核細胞は嫌気性細菌と考えられています。約20億年前、ある真核生物が、好気性細菌（プロテオバクテリア）を取り込みました。そして好気性細菌を取り込んだ細胞が、約10億年前にシアノバクテリアを取り込み、シアノバクテリアが葉緑体へと変化します。これが植物へと進化

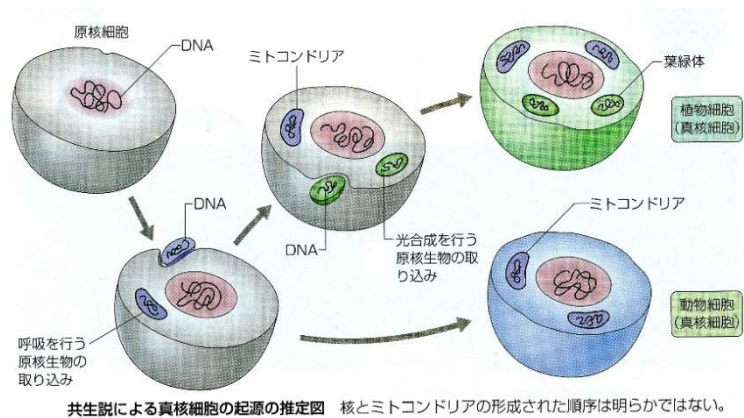


図3 細胞内共生 (浜島書店, 2023)

していきます。この考えは140年も前に出され、18年前にロシアの植物学者が提案しました。その後、アメリカの生物学者の研究もあり、現在では定説になりつつあります。その根拠として次のことが挙げられています。

- ・性質の異なる二重膜で囲まれている。ミトコンドリアの内膜は、その成分が、細菌の内膜と良く似ており、細菌の内膜がもとになっていると考えられる。
- ・ミトコンドリアや葉緑体は核と異なるDNAを持ち、ミトコンドリアは好気性細菌の特徴に近く、葉緑体のDNAの遺伝子はシアノバクテリア類のものに近縁である。ミトコンドリアや葉緑体の持つDNAは非常に少なく、宿主の核中に移動したり、不要なものは欠損したりしたと考えられている。
- ・細胞分裂をしないときにも、細胞が必要だと判断したときにはミトコンドリアはどんどん分裂して増殖する。細胞分裂と葉緑体の分裂は同調しておらず、細胞ごとに葉緑体の分裂速度を調節することができる。

なお、藻類の葉緑体は、二重膜ではなく、三重、四重の膜に包まれたもの、あるいはその中にはっきりとした核のような構造を持つものがあります。細胞内共生を繰り返したようです。

*真核生物：細胞内に核（DNAをまとめておくところ）を持つ生物

（3）植物の進化

地球上に生命が誕生したのは、35億年以上も前のことだと考えられています。「一番古い化石」は、化石かどうかの判断も含めて、新発見に伴って変わってしまいます。2017年に報告されたカナダで見つかった管状の微小な構造物が、37億7000万～42億8000万年前の生物由来の化石として、現在の最古の化石のようです。生命誕生の主要な舞台が熱水噴出孔のまわりの温水とする説を支持するそうです。真核生物は27億年前ころには出現していたと推測されており、体化石としては19億年前から知られているグリバニアが現在では最古です。

光合成生物の出現以前は大気中にオゾン層が存在せず、DNAや細胞に損傷を与える紫外線や宇宙線が直接地表に届くため陸上は生物にとって危険な場所でした。最初に光合成を始めた生物に最も近いものはシアノバクテリア（藍色細菌）という原核生物です（かつては藍藻と呼ばれていました）。光合成生物によって大気中に酸素が蓄積されると紫外線による反応でオゾン層が形成されました。そして、水中生活をしていた緑色植物の一群（藻類）から進化した生物群が陸上に進出しました。陸上植物が出現したのは約4億7000万年前のオルドビス紀中期～後期です。陸上植物が出現したきっかけは、地球の寒冷化による淡水域の乾燥化であるという仮説があります。

陸上への進出には乾燥と重力への適応が不可欠です。その対応のひとつに維管束の形成があります。植物の生育によってデボン紀のころにはCO₂の急激な減少が起こりますが、その対応として気孔の密度の増加が起きました。しかし、気孔が開くことによってCO₂を取り入れている間に水分が蒸発してしまいます。維管束は根から水分が効率よく吸収できる仕組みです。また、維管束は木部をつくり茎を丈夫にし、背が高くなることで光合成を有利にしました。

種子の形成は、乾燥を避け受精を安全に確実にを行うために役立ちます。精子の移動（受精）には水が必要ですが、種子を持つことで受精に自然の水が不要になります。また、種子は栄養分を貯蔵し、種皮という保護層を持ち次世代を残しやすくします。根の進化は地盤にしっかりと固着する働きがあ

ります。そのほかにも植物に進化にはとげや苦み、毒を持つなど草食動物などへの自衛手段を持つものもあらわれます。

もっとも古い大型の陸上植物と考えられているのはクックソニア類で約4.2億年前のシルル紀の地層から見つかっています。維管束がなく胞子で増えます。初期の植物は種子をつくらず水際にのみ生育していたようです。

デボン紀になると古生マツバラン類（プシロフィトン）という葉や根が分化していない植物が出現します。クチクラ層が発達していなかったため、乾燥には弱く、湿地に生えていたと推定されます。やがて、表層細胞の外側にクチクラ層を発達させ、気孔もつくられました。また、維管束を持つものも現れ、安定した



図4 リンボク（鱗木） USA イリノイ州産

水分の供給と機械的な強度をもたらしました。デボン紀中期には、葉や根などの器官を持つように進化しました。葉は太陽エネルギーを効率よく吸収できるように扁平になり、光合成器官として特殊化していき、一方、根は植物体を支え水分を地中から吸収する器官へと特殊化していきました。デボン紀後期には原始的な種子（胚珠）をつくる植物が現れます。この頃出現した森林は光合成によって O_2 濃度を増加させ、 CO_2 濃度を減少させました。また、森林土壌が形成され岩石の風化作用が促進されて（風化によって大気中の CO_2 がケイ酸塩鉱物と反応して消費される）、さらに CO_2 を減少させます。この傾向はデボン紀後期からペルム紀にかけて長期に持続し O_2 の増加は森林火災の増加をもたらし、 CO_2 の減少は地球の寒冷化を引き起こしました。



図5 精子を見つけたイチョウの木
（小石川植物園にて撮影）

石炭紀になるとシダ植物は巨大化し、ヒカゲノカズラ類のリンボク（図4）やフウインボクなどヤトクサ類のロボクなどが、高さ数十mにもなって森林を形成し、石炭のもととなります。

石炭紀～ペルム紀には裸子植物が出現し、植物は種子を持つことによって乾燥した陸域内部にも分布域を拡大します。このように植物の変化は気候の変化に影響を与えさらには、動物の進化にも影響を与えました。石炭紀からペルム紀にかけて生育していたシダ型の葉と裸子植物型の種子を持っていたシダ種子植物研究に貢献したことがらに平瀬作五郎によるイチョウの精子の発見があります。現在、東京の小石川植物園にそのイチョウの木が残されています（図5）。ここは徳川幕府が設けた「小石川御薬園」の跡地であり、精子を見つけたソテツの木や、ニュートンの「万有引力発見のリンゴの木」（接ぎ木）（図



図6 「万有引力発見のリンゴの木」
ケンブリッジ大学トリニティカレッジ
で撮影

6) などもあり、興味深いものが多く見られます。

現在、私たちがよく見かける種子植物の系統は図7のように考えられています。

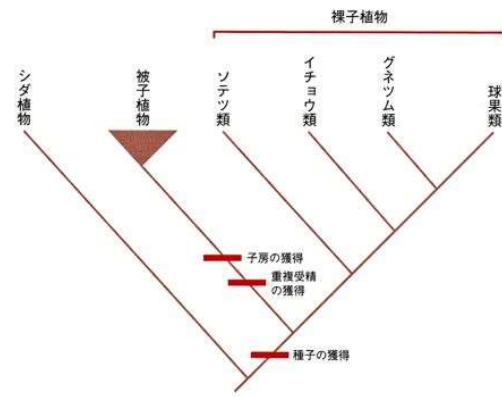


図7 種子植物の系統と進化 (伊藤, 2012)

(4) 生物の分類

生物分類でよく使われてきたのは五界説で、全生物を、モネラ界 (原核生物に対応), 原生物界 (原生物, 藻類などの単細胞生物), 菌界 (きのこ, かび, 地衣植物など), 植物界 (コケ類, シダ類, 被子および裸子植物など), および動物界 (脊椎動物およびさまざまな無脊椎動物を含む多細胞動物) の5つの界に分類します。

近年ではリボソーム RNA の解析から「界」より上の階級である3つのドメイン (図8) が提唱されています。

細菌 (バクテリア) ドメイン: 古細菌以外の原核生物。大腸菌, ネンジュモ (シアノバクテリア), 枯草菌, 硝酸菌, クラミジアなど。

古細菌 (アーキア) ドメイン: 細菌よりも真核生物に近い原核生物で、過酷な環境で生息しています。メタン菌, 高度好塩菌, 超好熱菌など。

真核生物ドメイン: 核膜に包まれた核を持ちます。このドメインをさらに、6つにわける考えも提唱されています。

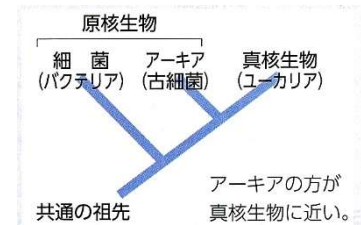


図8 三ドメイン (浜島書店, 2023)

また、図9のような大分類 (スーパーグループ) も提唱されています。

真核生物の大分類

Adlら(2019)による

アモルフェア		エクスカバータ	ディアフォレティケス	
アミーボゾア	オピストコンタ		クリプティスタ	ハプトティスタ
アメーバ類 変形菌類 細胞性粘菌類	動物 襟鞭毛虫類 菌類	ミドリムシ類 キネトプラスト類	クリプト藻類	ハプト藻類
ディアフォレティケス				
SAR			アーケプラスタダ	
ストラメノパイル	アルベオラータ	リザリア	緑色植物	紅色植物
褐藻類 ケイ藻類 卵菌類	アピコンプレクサ類 渦鞭毛藻類 絨毛虫類	有孔虫類 放射虫類	ストレプト植物 (シャジクモ類, 接合藻類, 植物) 緑藻類	紅藻類

図9 真核生物の大分類 (浜島書店, 2023)

引用文献

浅島誠ほか, 2012, 生物. 東京書籍高等学校教科書.

伊藤元巳, 2012, 植物 1-植物の系統と進化. 生物の科学 遺伝, 66, 485-490. エヌ・ティー・エス.

枘内新ほか, 2006, 新しい高校生物の教科書. 講談社.

浜島書店, 2023, ニューステージ生物図表. 357 p.

立山 晃, 2010, 葉緑体から見えてきた細胞内共生による大進化. RIKEN NEWS, no.347, 理化学研究所.

URL1 <https://rikei-jouhou.com/mitochondria/>