

ミドリムシの祖先は「アカムシ」だった?

丸山 真一郎 (元生物科学専攻 博士研究員^注)
野崎 久義 (生物科学専攻 准教授)

長い研究の歴史をもちながらも、まだその進化過程に謎の多いミドリムシ。今回、われわれが独自に開発した遺伝子解析法を用いてスーパーコンピュータでミドリムシのゲノム情報を解析したところ、緑藻由来の「緑色」の葉緑体をもつミドリムシが、実は紅藻由来葉緑体をもつ別の生物からも「紅色」の遺伝子を取り込んで進化してきた「ハイブリッド生物」であることが示された。本研究は、われわれヒトを含む真核生物のゲノムが、他生物からの遺伝子伝達や細胞内共生などを経て複雑な進化を遂げる過程を理解する上で重要なモデルとなると考えられる。

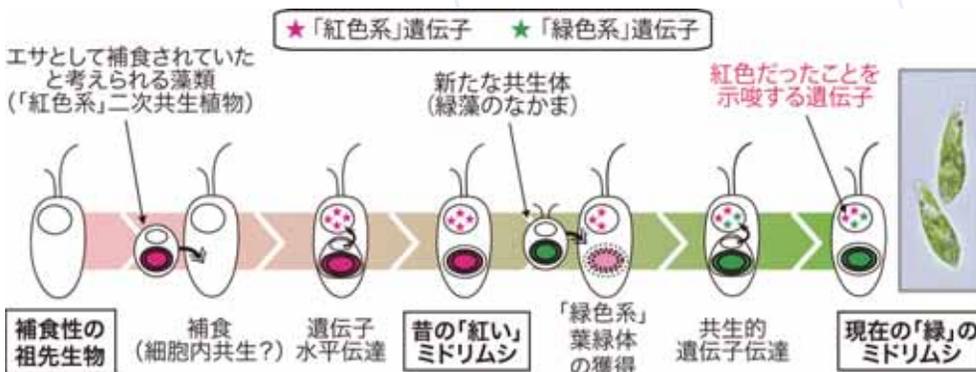
太古の地球において、ある真核生物が光合成をする細菌（現在のシアノバクテリアに近縁な種）を細胞内に共生させること（一次共生）に成功し、緑藻（およびそこから派生した陸上植物）や紅藻などが誕生した。ミドリムシはさらにこの緑藻の仲間を細胞内に共生させて「緑色」の葉緑体をもつに至ったため、二次共生植物とよばれる。地球上の全光合成量の約半分を担うと言われる藻類は、多様な海藻、淡水藻、普段われわれが目にする陸上植物を含めさまざまな系統へと進化してきたが、これらの複雑な進化の過程はいまだに不明な点が多い。

われわれは、ダルハウジー大学（カナダ）、神戸大学、ハインリヒ・ハイネ大学（ドイツ）との共同研究で、ミドリムシ（学名 *Euglena gracilis*）の細胞核のゲノム情報を対象にして、東大医科学研究所のスーパーコンピュータを使った大規模分子系統解析プログラムを独自に構築し、遺伝子を進化的な由来ごとに振り分ける解析を行った。その結果、ミドリムシの（祖先的原生動物に由来する）核ゲノムには、緑藻のもつ遺伝子と類似性をもつものだけでなく、紅藻に由来する葉緑体をもつ二次共生植物と進化的に起源が近いと考えられる遺伝子が複数見つかった。この中には、現在の「緑色」の葉緑体を獲得する以前の、藻類を餌として補食していた祖先生物の時代からゲノム中

に保存されてきたと考えられる遺伝子も含まれていたことから、おそらくこれらの遺伝子は餌の藻類から祖先生物の核ゲノム中へと移行すること（遺伝子水平伝達）により獲得されたと考えられる。

「紅色系」遺伝子をもたらしただけの藻類が単なる餌以上の存在だった可能性もある。まだ緑藻由来の葉緑体を獲得する（「緑色」になる）前の進化段階にあった祖先生物は、「紅色系」藻類を細胞内に維持し、あたかも現在の「紅色系」二次共生植物のようにふるまう「紅い」ミドリムシ（『アカムシ』）だったのかもしれない。そして、この『アカムシ』が緑藻のなかまを細胞内に取り込んで、「紅色」から現在のミドリムシのような「緑色」の藻類へと進化を遂げたのかもしれない。こうした中間的生物はまだ報告されていないが、今後より多くの新規系統を探索し、そこから得られたゲノムを解析することで、詳細な進化史が明らかになることが期待される。静的なゲノム情報からダイナミックな進化現象を読み解くことは、自然界の多様性を真に理解するための生物学の新たな挑戦である。『アカムシ』の探求はその第一歩であり、まだ始まったばかりだ。本成果は S. Maruyama *et al.*, *BMC Evolutionary Biology* 11, 105 (2011) に掲載された。

(2011年4月19日プレスリリース)



注) 現所属: ダルハウジー大学 (カナダ) 博士研究員

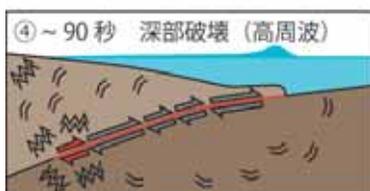
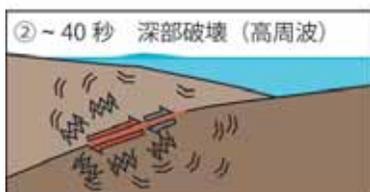
ミドリムシの進化過程を表すモデル図。祖先生物が「紅色系」遺伝子と「緑色系」葉緑体を獲得したことにより、現在のよう複雑なゲノムが進化してきたと考えられる。

東北沖巨大地震はどのような現象だったのか？

井出 哲 (地球惑星科学専攻 准教授)

2011年3月11日の東北沖地震はマグニチュード9という日本史上最大の地震であり、広範囲での揺れと巨大な津波によって東日本大震災を引き起こした。地震の源は、海底下の岩盤中に生じた破壊すべりである。本研究ではその破壊すべりがどのように進行したのかを世界各地の地震波データを用いて解明した。その結果からは超巨大地震ならではの特殊性がみえてきた。

今回の研究では全世界のデジタル地震観測網で観測された地震波記録と、「経験的グリーン関数法」という地震波解析法を用いた。この手法では小さい地震の地震波を合成して大地震の地震波と比較することにより、大地震の破壊すべりの時間空間分布を推定する。分析により、破壊すべりは次のように進行したことがわかった。①最初数秒の初期破壊(低周波)、②プレート境界深部、陸地方向へ向かった破壊すべり(約40秒後まで)、③一番浅い部分(海溝)を一度に断ち切るような大きな破壊すべり(約60秒後)、④再びプレート境界深部、陸地方向へ向かった破壊すべり(約90秒後まで)。破壊すべりはさらに150秒後くらいまで続いたが、その全体に占める割合は小さい。この4つのフェーズのうち①と③は主にプレート境界浅部、②と④は深部で起きた。



東北沖巨大地震の破壊プロセスを特徴付ける4つのフェーズ

地震に伴う災害は主に津波によって引き起こされた。その津波を引き起こしたのが③の海溝を断ち切るような破壊すべりである。破壊すべりが地下深部から地表に向かって進行し地表に現れるとすべり量が増幅される。さらに地表に現れた直後に再び深い方へ向かって破壊すべりが伝播する。これらの現象は過去に数値計算で理論的に予想されていたが、今回上記③から④への転換として実際に観察された。数値計算ではさらに、すべり量が増幅され、境界面の応力が動摩擦レベルより減少すること(ダイナミックオーバーシュート)が予想される。これも東北沖地震後の奇妙な現象として現れた。ふつう沈み込み帯の地震ではプレート境界をはさんで上盤が下盤に対して跳ね上がる(逆断層地震)。その反対、上盤が下盤に対してずり落ちるような地震(正断層地震)はまず起きない。にもかかわらず東北沖地震の直後、3月12日と14日に正断層地震が2つ発生した。地震によって境界面の応力状態が反転したことを示唆する。

東北沖地震では③のフェーズが重大であったが、奇妙なことに日本列島で観測された地震波を調べると、特に体に感じるような高周波の地震波は②と④の深部の破壊すべりからしか放射されなかったと分かる。海溝近傍での最大のすべりからはこのような地震波はあまり放出されず、その意味で「静かな」破壊すべりだったといえる。東北では過去にもプレート境界浅部で「静かな」破壊すべりと巨大津波を伴った1896年明治三陸地震が知られている。いっぽうで1978年宮城県沖地震は高周波地震波も励起したふつうの地震であった。このすべりの性質の違いは境界面の摩擦特性と応力場の特徴を反映したものであろう。ただし両者が互いに影響するかしないかで起きる地震の振る舞いは大きく異なり、東北沖地震はこの両者の相互作用が顕著であった。今後、沈み込むプレート境界での地震の発生パターンを予測する際には、このような性質の違いを考慮する必要がある。本成果はS. Ide, A. Baltay, and G. C. Beroza, *Science*, 332, 1426 (2011)に掲載された。

(2011年5月20日プレスリリース)

励起子ボース・アインシュタイン凝縮の実現

吉岡 孝高 (物理学専攻 助教), 五神 真 (物理学専攻 教授)

◆ ◆ ◆
 半導体中の電子と正孔はクーロン引力によって結合し、水素原子状の準粒子，“励起子”を形成する。励起子はボース統計に従う粒子であり、準熱平衡下で低温高密度に保持するとボース・アインシュタイン凝縮を示すことが予想されていたが、予言から約 50 年を経過しながらも実験的検証には至っていなかった。今回、準熱平衡下での励起子のボース・アインシュタイン凝縮状態への転移を明瞭にとらえることに成功した。これは固体物理学の長年の懸案にひとつの解決を与えたものであると共に、量子多体物理学研究の新たな扉を開く成果である。

◆ ◆ ◆
 低温に冷却した半導体が光を吸収すると、伝導電子とその抜けた穴である正孔がクーロン引力によって結合して水素原子のような粒子が形成される。これは励起子（エキシトン）とよばれる固体の準粒子（素励起）のひとつである。励起子はフェルミ粒子である一個の電子と一個の正孔が対を形成した粒子で、ボース統計に従う。

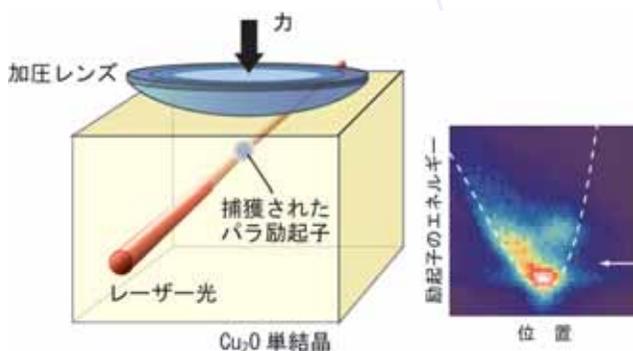
ボース粒子の集団が示す顕著な特徴は、物質の波としての性質が現れる低温で、その波同士が重なり合うほど高密度になったときに粒子系の大多数がひとつの大きな波として振る舞うことである。ボース粒子がこの量子的な凝縮状態をとりうることはアインシュタインによって理論的に示された。これは現在ボース・アインシュタイン凝縮（BEC）とよばれ、ボース粒子の集団が、巨視的な量子現象を示すことの原理として知られている。この BEC を観測することができれば、励起子がボース粒子であることを明確に示すことができる。しかし、励起子は本来、固体に存在する多数の電子の場から生み出された準粒子であり、多体系としての複雑さが内在する。従って励起子がヘリウムのような実在する原子と同様のボース粒子として振る舞うかどうか自明ではなく、半世紀にわたり議論が続いていた。

亜酸化銅とよばれる半導体において形成される励起子（1s パラ励起子）は、光と結合しないため寿命がひじょうに長く、結晶と励起子の相互作用を通じて十分な低温に冷却できる。半導体結晶を超流動液体ヘリウムで冷却し、励起子温度を 2 ケルビン程度まで下げることで、容易に BEC に到達可能であると考えられてきた。しかし、これまで世界各地で多くの挑戦が行われたが、BEC は実現しなかった。われわれの最近の研究により、励起子の密度が上がるにつれ、二個の励起子が衝突して消滅する過程が強く起こり、期待された密度に到達できないことが判明した。

この状況を打破し BEC を実現するには、密度を上げずに、温度を下げるのが唯一の手だてとなる。そこで本研究では、ヘリウム 3 冷凍機という超低温冷却装置を使用して、亜酸化銅の単結晶を 0.3 ケルビン（摂氏マイナス 272.9 度）以下に冷却した。さらに、励起子を半導体中の微小空間にトラップする技術を使い、準熱平衡状態にある温度 0.8 ケルビンの励起子雲を用意した。

理想的には BEC が発現するとトラップの底のきわめて狭い空間に大多数の粒子が圧縮される。ところが、今回の実験で密度を上げ温度を下げて BEC が期待される条件を満たしたとき、励起子雲の空間広がりエネルギー広がりとともに閾値的に増大することが見いだされた。これは、粒子間の衝突によって粒子の消失を伴うプロセスが存在する場合に起こりうる、BEC の「緩和爆発」とよばれる現象であり、水素原子の BEC が示す挙動として理論的に予測された現象である。この緩和爆発の様子を詳細に調べたところ、全体の粒子数のうちおよそ 1% が凝縮体であることを明らかにした。すなわち、励起子の BEC 転移を初めてとらえることに成功した。本研究は、K. Yoshioka *et al.*, *Nature Communications* 2, 382 (2011) に掲載された。

(2011 年 6 月 1 日プレスリリース)



実験の模式図。亜酸化銅 (Cu₂O) の半導体単結晶に対して、極低温で不均一な歪みを加えてレーザー光で狙い撃ちすると、低温の励起子が局所的に捕獲され、量子縮退領域に到達する。(右図) 励起子 BEC の緩和爆発。

細胞内の交通網はどのように整備されたのか

海老根 一生 (生物科学専攻修了^{注1)})
上田 貴志 (生物科学専攻 准教授)

真核細胞のオルガネラ（細胞小器官）の間では、小胞や小管を介して物質のやりとりがさかんに行われている。この仕組みは、自動車などを介した交通の仕組みになぞらえ、膜交通とよばれる。膜交通経路網は、それぞれの生物の体制や生活様式に応じて多様化していることが知られているが、この多様性がいかにしてもたらされたのかは不明であった。われわれは、モデル植物であるシロイヌナズナを用いて研究を行い、植物が進化の過程で独自に獲得した膜交通経路を発見するとともに、この経路が塩ストレス耐性に関わることを明らかにした。

真核細胞の細胞内には色々なオルガネラが存在しており、それらの間は膜交通により結ばれている。それぞれの都市がその歴史や目的に応じて独自の交通網を整備してきたのと同様に、この膜交通経路網やオルガネラの働きも、生物ごとに多様化していると考えられている。膜交通において機能する基本的な分子自体は、真核生物においてひじょうによく保存されている。例えば RAB とよばれる分子は、オルガネラ間の輸送を仲介する輸送小胞を目的地のオルガネラにドッキングさせる働きをもつ。細胞内のオルガネラ間を結ぶさまざまな輸送経路では、それぞれ異なる RAB が機能していることから、この RAB をコードする遺伝子の増加とそれに続く機能の多様化が、膜交通経路の多様化のために必要であったと考えられる。

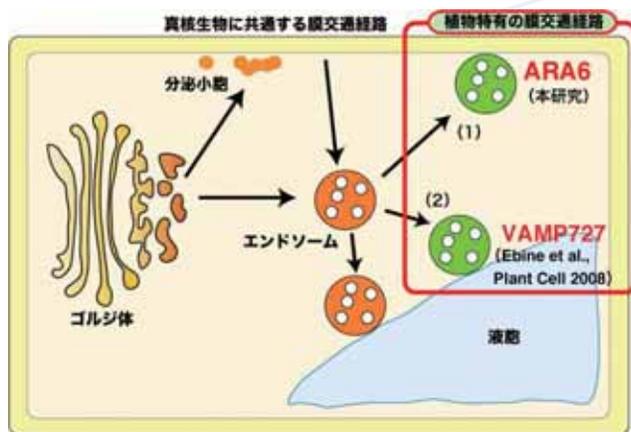
動物の細胞では、RAB5 という RAB の仲間が、エンドサイトーシス^{注2)}のさまざまなステップで重要な働きを担っている。植物にも、動物の RAB5 とよく似た分子（保存型 RAB5）が存在し、動物の RAB5 と共通の働きを担っていることが知られている。いっぽうでわれわれは、独特の構造をもつ変わった RAB5 の仲間（ARA6 グループ）が、植物にのみ存在していることを明らかにしている。つまり、植物は 2 種類の RAB5（保

存型 RAB5 と ARA6 グループ）をもっているのである。

ARA6 グループは、植物が陸上化したころに誕生したと考えられ、ARA6 の獲得に伴い、植物細胞内に新たな膜交通経路が誕生したと推測される。この新たな膜交通経路の詳細を明らかにするため、われわれは遺伝学的、および生化学的な手法を駆使して、この ARA6 の働きをシロイヌナズナを用いて徹底的に調べた。その結果、植物の保存型 RAB5 がエンドソームから液胞への輸送経路を制御しているのに対し、ARA6 はエンドソームから細胞膜（または細胞外）へと物質を輸送する経路で働いていることを突き止めた（図）。エンドソームから細胞膜への輸送経路は動物にも存在するが、植物は動物とは異なる仕組みで類似の輸送経路を開拓していたのである。

では、この輸送経路は植物のどのような生命現象に関わっているのだろうか。ARA6 の機能を壊したり活性化したりしたシロイヌナズナは、通常の栽培条件では野生型のシロイヌナズナと同じ表現型を示した。しかし、それらを塩分の高い条件で生育させると、ARA6 の機能を壊したものは塩ストレスに弱くなり、活性化したものは耐塩性を獲得した。このことから、ARA6 が関わる膜交通経路が、植物が環境ストレスに応答するさいに重要な役割を担っていることが判明した。植物は陸上に進出するに当たりさまざまなストレスに対し耐性を獲得する必要があったと考えられる。ARA6 グループの誕生が植物の陸上化の時期と重なることから、ARA6 が関わる輸送経路を獲得したことにより、植物は陸上の環境に対しより高い適応能力を獲得できたのかもしれない。本研究成果は、K. Ebine *et al.*, *Nature Cell Biology* 13, 853 (2011) に発表された。

(2011年4月1日プレスリリース)



植物が独自に開拓した膜交通経路。本文で述べた ARA6 が関わるエンドソームから細胞膜への輸送経路（図中 1 の経路）のほかにも、植物は独自の輸送経路を獲得している。VAMP727 は、ARA6 と同様に植物が進化の過程で独自に獲得した膜交通制御因子であり、エンドソームから液胞への新規輸送経路（図中 2 の経路）の開拓に寄与した (K. Ebine *et al.*, *Plant Cell*, 2008)。

注 1) 現所属：国立感染症研究所寄生動物部

注 2) 細胞の内部から細胞外へと物質を輸送する仕組みをエキソサイトーシスとよぶのに対し、細胞の外部から細胞内へと物質を輸送する仕組みをエンドサイトーシスとよぶ。細胞内に取り込まれた物質は、エンドソームとよばれる細胞小器官へと運ばれ、そこからさらに最終的な輸送場所へと運ばれる（液胞／リソソームなどの分解系オルガネラへ運ばれ分解されるものもあれば、再び細胞表面や細胞外へと戻されるものもある）。

緑藻の光の好き嫌いを決める細胞内シグナル

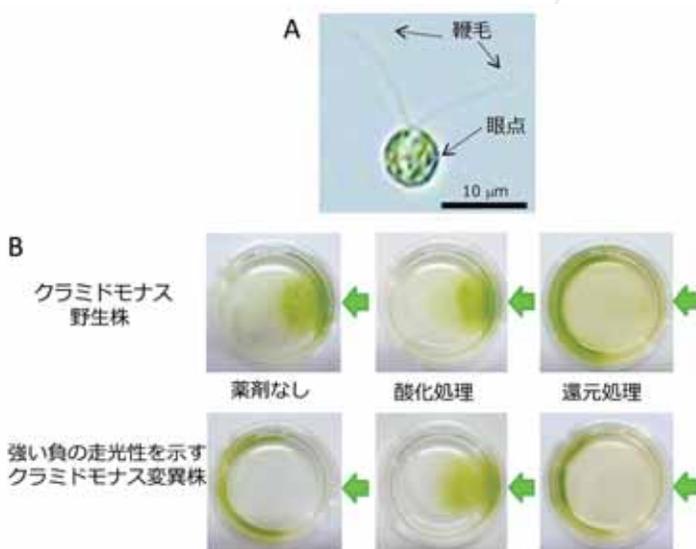
若林 憲一 (生物科学専攻 助教)

◆◆ 単細胞緑藻は、鞭毛とよばれる毛状の運動器官を巧みに操って水中を泳ぎまわり、光源に向かったり (正の走光性)、光源から遠ざかったり (負の走光性) できる。走光性の正負を切り替えられることは、藻類が生存に適した光環境に移動するために重要だが、その切り替えのしくみは分かっていなかった。われわれは細胞内のレドックス (酸化還元) 状態に着目し、これを人為的に変化させる実験によって、レドックス状態の変化が走光性の正負切り替えスイッチになることを突き止めた。◆◆

光合成を行う生物にとって、葉緑体が受ける光を「強すぎず、弱すぎない」適切な強さに調節することは生存に必須のしくみである。ミドリムシなどの単細胞緑藻は「走光性」を示して水中を泳ぐが、このとき、光源に向かう「正の走光性」と光源から遠ざかる「負の走光性」を適宜切り替えることで最適な光環境に移動すると考えられている。走光性の正負を切り替える要因として、これまでに光強度が知られていた。(強い光からは逃げ、弱い光には集まる。) しかし、同じ細胞でも、一定強度の光環境下に長時間置くとやがて最初と逆の走光性を示すようになったり、あるいは細胞によって正負がまちまちであったりする。そのため、光強度が正負を一意的に決めるのではなく、細胞内のなんらかの因子が最終的に正負を決めると考えられる。しかし、そのような因子は長らく謎であった。光合成活性が走光性の正負に影響を与えるという過去の知見があったが、具体的に光合成がどのようにして影響を与えているかは分かっていなかった。

多くの細胞では、タンパク質や脂質を酸化変性から守るため、細胞質を適度に還元的に保つレドックス (reduction-oxidation, 酸化還元) 恒常性が機能している。しかし、外部環境の影響や光合成、呼吸の活性変化によって、一過的に酸化あるいは過剰に還元的になることがあり、細胞内ではそれをシグナルとしてさまざまな生理活性が調節される。この現象は「レドックス調節」とよばれ、近年注目を集めている。われわれは光合成が細胞内のレドックス状態を変化させる大きな要因であるという知見に基づいて、この「細胞内レドックス状態」が走光性の正負を決定しているのではないかと考えた。そこで、走光性研究の良い材料である単細胞緑藻クラミドモナス (図A) を用いて、細胞内のレドックス状態を酸化的または還元的に偏らせる実験を行った。具体的には、活性酸素種 (H_2O_2 など) を用いて酸化的にし、逆に活性酸素種消去剤 (ジメチルチオ尿素など) を用いて還元的にした。その結果、細胞内が酸化的になると正、還元的になると負の走光性を示すことが分かった (図B)。また興味深いことに、強い負の走光性を示す突然変異株でも同じ結果が得られた。簡単な実験ではあるが、このように走光性の正負を自由に操ることができる条件が見出されたのは今回が初めてである。クラミドモナスが細胞質レドックス状態をどのようにモニターしているかなど、分子レベルの機構説明が今後の課題である。なお、今回の結果を応用すれば、ポンプや遠心機を使わずに光だけで細胞を簡便に濃縮することができる。藻類の基礎研究や、軽油生産藻によるバイオ燃料生産の工業分野に貢献する可能性がある。本研究は K. Wakabayashi *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108, 11280 (2011) に掲載された。

(2011年6月21日プレスリリース)



A: 単細胞緑藻クラミドモナス (和名コナミドリムシ)。眼点で光を感じ、2本の鞭毛を平泳ぎのように動かして水中を泳ぐ。
B: クラミドモナスの野生株と、強い負の走光性を示す変異株の培養液をディッシュにいれ、右 (緑の矢印) から光を当てた。どちらの株も、酸化処理をすると正、還元処理をすると負の走光性を示す。