

水ある小惑星の形成：太陽系誕生から 350 万年後

藤谷 涉^注 (マックスプランク研究所 博士研究員)
杉浦 直治 (地球惑星科学専攻 教授)

炭素質コンドライトとよばれる隕石は太陽系最初期の状態を保存している始原的な物質である。われわれは新たに開発した分析技術を用いて、炭素質コンドライトに含まれる炭酸塩鉱物の正確な年代測定に世界で初めて成功した。その結果、分析した炭酸塩は太陽系誕生から約 480 万年後に形成したことが判明した。炭酸塩は隕石の故郷である小惑星において、液体の水の存在下で形成する物質である。われわれは得られた年代情報に基づいて小惑星進化のシミュレーションを行い、水ある小惑星は太陽系誕生から約 350 万年後に形成したことを明らかにした。

太陽系には小惑星とよばれる天体が無数に存在し、地球に飛来する多くの隕石の起源、すなわち母天体と考えられている。小惑星内の水や有機物は地球の海や生命の材料になった可能性があるため、水を含む小惑星の形成と進化過程の解明は生命誕生の理解に不可欠である。

炭素質コンドライトという一部の始原的な隕石は、水の存在下で形成した炭酸塩鉱物を含有しているものがあり、放射性元素である質量数 53 のマンガン (^{53}Mn) を用いた年代測定が適用できる。マンガン - 53 は半減期 370 万年でクロム - 53 (^{53}Cr) に崩壊するため、炭酸塩にはマンガン - 53 起源のクロム - 53 が過剰に存在し、クロムの同位体比 ($^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$) が大きくなる。また、その過剰量はクロムに対するマンガンの量が多いほど (Mn/Cr 比が大きいくほど) 大きくなる。この関係を利用して、これまでに二次イオン質量分析計という分析装置を用いた年代測定が行われてきた。

しかし、Mn/Cr 比を決定するところが、この分析の最大の難関である。実際の分析では、隕石の分析値を較正するために、Mn/Cr 比がわかっている標準試料を使用する必要があるが、クロムを十分量含んだ炭酸塩が天然には産出しないためである。そのため、これまでの研究では分析値に大きな不確定性があり、中には太陽系の年齢 (約 45 億 6820 万年) よりも古い、矛盾した年代値も報告されている。

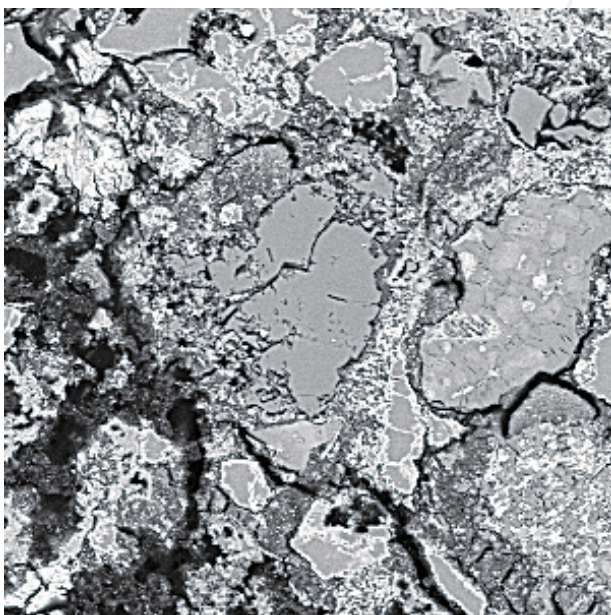
そこでわれわれは、実験室内でマンガン、クロムの濃度が既知の炭酸塩を合成し、それを標準試料に用いる新しい分析技術を開発した。そしてその技術を用い、炭素質コンドライトに含まれる炭酸塩の形成年代を、東京大学大気海洋研究所に設置されている最先端の分析装置・ナノシムス (NanoSIMS) で分析した。

その結果、炭酸塩の年代は、現在より約 45 億 6340 万年前に集中することを明らかにした。これは、太陽系が誕生してから 480 万年後に相当し、これまでの研究で得られた年代と比べて若い年代である。すなわち、太陽系の年齢よりも古くなるという矛盾は解決され、液体の水はこれまで考えられていたよりも後に存在した、ということになる。さらにわれわれは、炭酸塩の年代に基づいて小惑星の進化を数値計算し、水ある小惑星が太陽系誕生から 350 万年後に形成したことを世界で初めて明らかにした。

本研究の成果により、矛盾のない太陽系初期の年代学を築き、初めて水を含む小惑星の形成・進化に関する正しい時間的な描像を得ることができた。小惑星の形成期間は、惑星形成の理論に対して重要な制約となる。また、「はやぶさ 2」など将来の探査計画によって小惑星から水や有機物を含んだ汚染の少ない試料を持ち帰ることができれば、年代の情報と併せて、生命の起源と進化について重要な知見が得られるかもしれない。なお、本研究成果は W. Fujiya *et al.*, *Nature Communications* 3, 627 (2012) に掲載された。

(2012 年 1 月 18 日プレスリリース)

注) 2011 年度地球惑星科学専攻博士課程修了



本研究で分析した隕石 (さやま隕石) に含まれる炭酸塩の電子顕微鏡写真。中央のやや暗い色の物質が苦灰石という炭酸塩鉱物。視野は 0.2 × 0.2 ミリメートル。

光によってイオンが輸送される道筋を明らかに

加藤 英明 (生物化学専攻 博士課程 2年)
濡木 理 (生物化学専攻 教授)

光を当てると陽イオンを取り込むチャネルロドプシン (ChR) は、その発見以来、神経生物学の有用なツールとして注目を集めてきた。その注目とは裏腹に ChR の分子構造はほとんど不明であり、内部のイオン輸送メカニズムが論争的となっていた。今回われわれは ChR の X 線結晶構造解析と電気生理学的解析によって、詳細な分子構造を世界で初めて解明するとともに、ChR のイオン輸送経路を解明し、イオン輸送に重要なアミノ酸の同定に成功した。今回の結果は ChR のイオン輸送メカニズムの一端を明らかにしただけでなく、より有用な変異型 ChR の設計に必要な構造情報を提供した点で重要な意味をもつ。

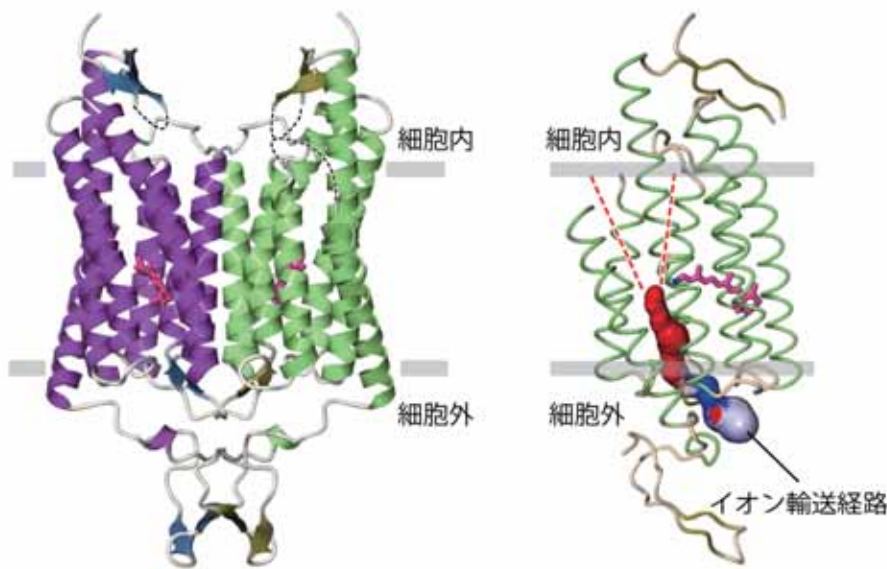
ヒトを含めた多くの生物は光情報に応じて行動するが、多くの場合この光受容は、ロドプシンファミリータンパク質によって担われている。ロドプシンの機能は多岐に渡るが、光を受容してイオンチャネルとして働くロドプシンは長らく発見されておらず、その存在も疑問視されていた。そのような折、1995年に初の陽イオンチャネル型ロドプシンであるチャネルロドプシン (ChR) が発見された。青色光を当てると陽イオンを取り込むという性質から、ChR はロドプシン研究者からのみならず、神経科学者からの注目も集めることとなり、ChR を用いた研究数は飛躍的に増加することとなった。しかし研究数の増加のいっぽうで ChR の分子メカニズム、すなわち ChR が陽イオンを通す仕組みや、そもそも陽イオンがこのタンパク質のどこを通るのかといった問題に対しては、ほとんど知見が得られていなかった。また、ChR が神経科学のツールとして注目されて以降、より使いやすい変異型 ChR を創出しようという研究の

流れが生まれたが、構造既知のロドプシンから得られる情報だけでは変異体の設計に限界があり、ChR 自体の構造情報が待ち望まれていた。そこでわれわれは X 線結晶構造解析という手法を用いて、これらの諸問題に答えを与えようと試みた。

われわれは 2.3 Å という高分解能で ChR の構造を明らかにした。得られた結晶構造から、ChR は先行研究で推測されたように、他の微生物型ロドプシンとは異なり二量体構造を取っていることが判明した (左図)。何より特筆すべき点は ChR の表面電荷であった。得られた結晶構造をもとに二量体 ChR の表面電荷を計算したところ、2つの単量体それぞれが強い負電荷を帯びた空洞を有していることが判明した (右図)。ChR のイオン輸送経路については以前よりさまざまな議論がなされていたが、大別すると「イオン輸送経路は二量体の境界面に位置する」という主張と「輸送経路は単量体中に存在している」という主張であった。今回のわれわれの結果は後者の主張を強く

支持し、この論争に決着をつけるものであった。さらにわれわれは、この系路上に位置するアミノ酸に変異を入れ、電気生理学的解析を行うことで、イオン輸送に重要なアミノ酸の同定に成功した。今回の研究結果は、ChR のイオン輸送メカニズムの一端を明らかにしたという点で重要な意味をもつ。また、ツールとして、より利便性の高い ChR 変異体の設計に必要な構造情報を提供したという点で、今後神経生物学の発展にも大きな影響を与えることが期待される。本研究は H. E. Kato *et al.*, *Nature* 482, 369 (2012) に掲載された。

(2012年1月23日プレスリリース)



二量体を形成している ChR の全体構造 (左図)
結晶構造から明らかになった ChR のイオン輸送経路 (右図)

器官原基と未分化細胞との対話に関わる遺伝子

田中 若奈^{注)} (生物科学専攻 博士研究員)
平野 博之 (生物科学専攻 教授)

植物では、メリステムとよばれる未分化細胞からなるドーム状構造体の中に「幹細胞」が存在し、一生を通して維持されている。幹細胞は自身を複製するとともに、葉や花器官などの側生器官を作るための細胞を供給している。これらの側生器官は、メリステムから出現した後もしばらくの間はメリステムとのコミュニケーションを通じて、発生をとげていくことが知られている。今回私たちは、イネを用いて、器官原基からメリステムへのコミュニケーションに関わる遺伝子 *TONGARI-BOUSHI1 (TOB1)* を発見した。

イネの花は、^{がいえい}外穎と^{ないえい}内穎という独特な器官が分化するなど、高度に特殊化している。しかしながら、それらの形態形成に関する分子機構については、不明な点が多い。そこで私たちは、当研究室で単離した *tob1* 変異体に着目して研究を進めた。この変異体の花はさまざまな異常を示したが、その中でもとくに特徴的なのが、外穎、内穎の代わりに形成される継ぎ目がまったくないシームレス穎である(図)。その形態が「とんがり帽子」に似ていることが、本変異体の名前の由来となっている。また、*tob1* 変異体では、外穎や内穎のサイズが減少した花や、本来1つの花ができるところに形成された2つの花、さらには、すべての花器官を作る前に発生を停止した花の痕跡などが観察された。前者の異常は、外穎と内穎という側生器官の発生異常が原因であり、後者2つの異常については、メリステムの構造や維持の異常が原因であると考えられる。これらのことから、この変異体の原因遺伝子は側生器官の発生だけでなく、メリステムの構造や維持を正常に保つために必要であることが示唆された。

tob1 変異の原因遺伝子を単離した結果、YABBY タンパク質

をコードしていることが判明した。また、発現パターンを調べた結果、*TOB1* 遺伝子は、側生器官の原基において強く発現していた。いっぽう、メリステムでの発現は、まったく認められなかった。前述したように、*tob1* 変異体ではメリステムでも異常が生じるので、この結果は、*TOB1* 遺伝子が細胞非自律的にメリステムに作用していることを示している。すなわち、*TOB1* 遺伝子は、側生器官からメリステムへ何らかのシグナルを伝えることにより、側生器官からメリステムへのコミュニケーション(対話)に関与していると考えられる。さらに、機能解析の結果、*TOB1* 遺伝子は、転写抑制に関わっていることが判明した。近年、特定の遺伝子の働きを抑えることが、植物の発生においても重要であるという知見が集積しているが、*TOB1* 遺伝子も下流の遺伝子を抑えることにより、植物が正常に発生することに貢献していると考えられる。

今後、*TOB1* 遺伝子がどのようなシグナルの生成に関与し、そのシグナルがどのようにメリステムへと伝達されるのかということをも明らかにしたいと考えている。これまで、メリス

テムから側生器官への情報伝達に関わる遺伝子はいくつか報告されているが、逆方向の情報伝達に関わる遺伝子については、まだ例が少ない。したがって、*TOB1* 遺伝子が関与するコミュニケーションの解明は、植物の発生と形態形成の理解に大いに貢献すると思われる。本研究は、W. Tanaka *et al.*, *Plant Cell* 24, 80 (2012) に掲載された。

(2012年1月31日プレスリリース)



イネの花。 *tob1* 変異体では、穎に全く継ぎ目がない(シームレス)。

注) 2011年度生物科学専攻博士課程修了

表紙に関連する図を掲載してありますので、
そちらもご覧ください。

植物細胞内感染性リケッチア “MIDORIKO” の発見

川船 かおる (生物科学専攻 博士課程 2年)
野崎 久義 (生物科学専攻 准教授)

40 年来の謎であった緑藻におけるバクテリアの細胞内共生現象を解明するため、細胞内バクテリアの分子同定を行った結果、植物細胞に感染しているリケッチア “MIDORIKO” を初めて発見した。リケッチアはミトコンドリアの祖先に近縁と考えられており、今後 “MIDORIKO” と宿主である緑藻細胞との関係がより詳細に解明されることで、ミトコンドリア進化初期段階の理解が深まると考えられる。

緑色の葉緑体を持ち水中に生息する緑藻には、モデル生物であるクラミドモナスやボルボックスなど、鞭毛をもち遊泳する種が存在する。そのような種を数多く含むボルボックス目には、細胞内にバクテリアが共生しているものが存在することが 1970 年ごろから知られていたが、それらの共生バクテリアの種類や性質は一切不明のままであった。ボルボックス目とバクテリアのように、生物の細胞内に別の生物が共存する現象である細胞内共生は、われわれヒトを含む動植物の細胞である真核細胞の起源を考える上でひじょうに重要である。なぜなら真核生物に特有の細胞内器官であるミトコンドリアは、約 20 億年前に細胞内に共生していたバクテリア (真正細菌) が起源であると考えられているためである。

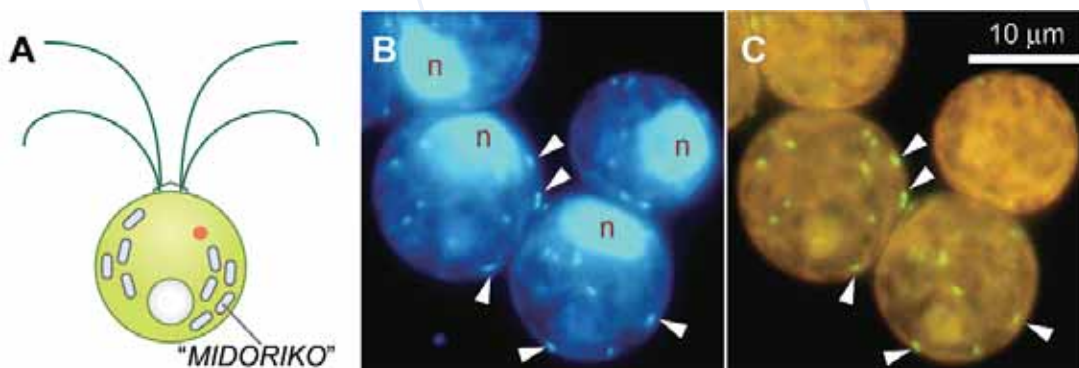
われわれは、緑藻ボルボックス目の細胞内に共生するバクテリアの性質と進化的起源を解明する目的で、これまでほとんど用いられていなかった単細胞のカルテリア (学名 *Carteria cerasiformis*) を材料として研究を行った。その結果、共生バクテリアのリボソーム RNA 遺伝子を解読し、カルテリアと群体性のプレオドリナ (学名 *Pleodorina japonica*) の共生バクテリアの分子同定に成功した。さらに系統解析によって、これらの共生バクテリア “MIDORIKO” はヒト病原菌のリケッチアと同じリケッチア目リケッチア科に位置することを示した。また “MIDORIKO” のリボソーム RNA に特異的に結合する蛍光 DNA プローブを用いた蛍光染色 (FISH) によって “MIDORIKO”

の植物細胞内における存在を確証した (図)。

リケッチア科のバクテリアは宿主の細胞内でしか増殖できず、ほとんどの種が昆虫やダニなどの節足動物の細胞内に生息している。“MIDORIKO” は世界で初めて植物細胞内に生息することが確認されたリケッチアとなった。カルテリアとプレオドリナは系統的には比較的離れているにもかかわらず、それぞれの “MIDORIKO” 同士はきわめて近縁であるため、“MIDORIKO” と緑藻の共生は比較的最近、2 種の藻類で独立に始まったと考えられる。また、カルテリア宿主細胞の増殖速度の測定から、“MIDORIKO” をもっている株も正常に成長することがわかった。“MIDORIKO” は観察したすべてのカルテリア細胞内に存在が認められたことから、宿主のカルテリアが細胞分裂で増殖するとき、“MIDORIKO” は次世代にもれなく受け継がれると考えられる。

“MIDORIKO” という愛称には緑藻の細胞内で守られながら育ててもらっているという意味が込められている。共生の開始時期が比較的最近であると予想され、宿主と「まずまずの関係」で共生する “MIDORIKO” は、ミトコンドリアの共生進化の初期段階を解明するための新たな手がかりになると考えられる。本研究は、川船かおるの本研究科の修士課程の中で始まり、東京工業大学本郷裕一准教授と京都大学浜地貴志博士の研究協力のおかげで論文投稿までたどり着き、K. Kawafune *et al.*, *PLoS ONE* 7, e31749 (2012) に掲載された。

(2012 年 2 月 22 日プレスリリース)



(A) 単細胞のボルボックス目緑藻カルテリア (*Carteria cerasiformis*) と細胞内共生リケッチア科バクテリア “MIDORIKO” の模式図。(B, C) カルテリアと “MIDORIKO” の蛍光顕微鏡像。(B) は DAPI による DNA 蛍光染色像で、宿主カルテリアの細胞核 (n) や “MIDORIKO” DNA の桿菌状蛍光 (白三角) などが見られる。(C) は “MIDORIKO” のリボソーム RNA に特異的な蛍光 DNA プローブを用いた像。(B) の桿菌状蛍光と (C) の “MIDORIKO” 由来のシグナル (白三角) は一致する。