

「付 - 3」動的平衡（福岡伸一）より

私たちの体内にいる別の生物

どんな細胞でもよい。顕微鏡で覗くと、まず丸い細胞核が目にとまる。この中にDNAが折りたたまれて格納されている。しかし、それは通常の光学顕微鏡では見ることができない。細胞核の内部はぼんやりとした粒状の溶液で満たされているようにしか見えない。

次いで目につくのは、多数、細胞内に散在している楕円形の粒子である。よく見ると楕円の内部には、努定された英国式迷路庭園のような秩序ある複雑な文様が見える。

秩序には美があり、知性がある。この粒子を最初に見つけた十九世紀の科学者アルトマンは「生命の本体はこの粒子にあり、細胞は彼らが自らを守るために作り出した要塞である」と考えた。この楕円形の粒子に、アルトマンはギリシャ語で「綾なす微粒子」と名付けた。ミトコンドリアである。

『パラサイト・イヴ』（角川書店）というホラー小説がある。瀬名秀明さんのデビュー作で、第二回日本ホラー小説大賞（一九九五年）を受賞して話題になった。映画やドラマにもなり、ゲーム・ソフトまで発売されているから、小説を読んでいなくてもタイトルを知っている人は多いだろう。

物語は人間の細胞内に存在するミトコンドリアが反乱を起こすという設定で、これは言うまでもなく「ミトコンドリアの共生起源説」、つまり細胞内のミトコンドリアは、その細胞によって形成される生物とは別の生物だったという説をベースにしている。

私たちの身体を形成している細胞に、別の生物が棲みついていた。それは、一個の独立した生命だと感じている私たち自身が、実は複数の生命の集合体であるということの意味しているのだろうか。

フォースの源泉

ミトコンドリア - この言葉を口ずさむと、私たちは不思議な感覚にとらわれる。それはミトコンドリアに生命のかそけき謎が内包されているからかもしれない。

映画『スター・ウォーズ』では、選ばれた戦士 = ジェダイには超越した力が与えられる。フォースである。字幕では「理力」と訳されていた。ジェダイの導師が、若き主人公スカイウォーカーに与える祈りの言葉はこうだ。

「理力がともにありますように（May the force be with you）」

『スター・ウォーズ』の後のシリーズでは、このフォースの源泉としてジェダイの身体に宿るメディックロリアンというものが登場する。これは明らかにミトコンドリアをもじつたものだ。

確かに細胞におけるミトコンドリアの役割はエネルギーの生産である。つまりフォースを産み出す。とはいえ、メディックロリアンがミトコンドリアとは、リリシズムとロマンティズムに満ちた『スター・ウォーズ』にあって、いささか直接的すぎる、かなりチープな当てはめにはめにはしないか。

それはさておき、ミトコンドリアは確かに生命の本質にかかわる、つまり酸化によってエネルギーを産生する粒子である。ジェダイでなくとも、誰の身体にもあまねく存在する。その数は細胞の種類によって異なるが、多い場合は一つの細胞内に数千個にもなる。

人体は約六〇兆個の細胞からなっているから、私たちの身体には京という単位の、おそろしく膨大な数のミトコンドリアが棲息していることになる。

ミトコンドリアは、細胞内のエネルギー生産工場であるがゆえに、常に活性酸素にさらされる。活性酸素は両刃の剣として、時にミトコンドリアDNAを傷つけることになる。

これが私たちの老化現象と密接に関係していることが最近明らかになってきた。

ミトコンドリアを見つめると、私たち生命のミステリーが解き明かされる。進化も、性の発生も、人類史も、そして老化もまたミトコンドリアのなせる業なのである。

しかし、それは私たちの細胞の中に最初から備わっていたものではない。また私たちの細胞が作り出したものでもない。私たちの細胞に寄生（パラサイト）した別の生命体だったのである。

なぜ、ミトコンドリアが別の生命体だったと言えるのか。それはミトコンドリアの「体内」に DNA が確認されたからである。これをミトコンドリア DNA と呼ぶ。繰り返し述べてきたように、生物は DNA によって自己複製する。DNA を持つ、あるいは持っていたということは、それが独立した生物だったことを意味するのである。

15回ボツになった論文

ミトコンドリアは太古、自律的な細菌だった。海の中を自由自在に泳ぎまわっていた。

それがあつた時、大型の細胞に捕らえられ、飲み込まれた。しかし、たまたま大型細菌の内部で破壊されずに生き延びたものがいた。生き延びただけではない。大型細菌とのあいだに奇跡的な関係を築いたのである。

ミトコンドリアのもとになった小型の細菌は、その酸化能力を使ってエネルギー(ATP)を作り出し、大型細菌に供給する。宿主側の大型細菌は、小型細菌をその体内に守り、必要な栄養素をすべて分け与える。だから「ミトコンドリアがパラサイト=寄生体である」という言い方は正確ではない。寄生は片務的、つまり寄生する側が一方的に宿主から利益を得る。人間と回虫などの寄生虫にみられるように、宿主には被害こそあれ、利益はない。しかし、ミトコンドリアとその宿主細胞は相互恵与によって共生しているのである。

この「ミトコンドリアの細胞共生説」を唱えたのは、ボストン大学の女性科学者リン・マーギユリスだった。彼女は天文学者カール・セーガンの妻で、セーガンとのあいだに二児をもうけたのだが、後に離婚してしまう。

それはさておき、マーギユリスは一九六七年に『有糸分裂する真核細胞の起源』と題する細胞内共生説の中心となる論文を発表した。掲載したのは『理論生物学ジャーナル』という科学雑誌である。理論生物学だから、『ネイチャー』や『サイエンス』に比べるとより専門的でマイナーだった。

本当はマーギユリスも『ネイチャー』あたりで発表したかったに違いない。イギリスの科学者ニック・レーンが著した『ミトコンドリアが進化を決めた』（斉藤隆攻訳、みすず書房）によると、マーギユリスの論文は掲載されるまでに一五の学術誌に拒絶されている。

彼女にとって『理論生物学ジャーナル』は一六番日の科学雑誌だったのだ。

学術誌はそれぞれ、論文掲載の可否を審査する委員会を持っている。委員は学識豊かな科学者や科学ジャーナリストたちである。

彼女の論文をボツにした一五の学術誌のうちのいくつかにおいて、夫カール・セーガンに対する批判的な意見、そして妻であるリン・マーギユリスが夫の影響を受けているのではないかという指摘がなされたらうことは想像に難くない。

カール・セーガンはシカゴ大で学び、天文学と天体物理学で博士号を得た科学者だが、後に SF 小説を書いたり、NASA における惑星探査の指導者にもなった。そして、この惑星探査計画では、地球外の知的生命、つまり宇宙人にメッセージを伝えようとする。

こうしたセーガンの姿勢は、たぶん学会の主流をなす科学者たちの目にはあまり快いものではなかったろう。それは、セーガンが二度（一九八四年、一九九二年）にわたって全米科学アカデミーの会員に推薦されたにもかかわらず、いずれも「業績が足りない」という理由で入会を許されなかったことから推測できる。

後に画期的で正しいとされる学説が、なかなか発表の場を得られなかったり、発表直後に評価されず、異端扱いされることはよくある。だから、マーギュリスの論文が一五回ボツになっても、その原因を「変わり者」の夫に求めることはできない。一五回もボツになった最大の原因は、やはり、マーギュリスの説が当時の生物学の常識を大きく超えていたからだと考えるべきだろう。

葉緑体も別の生物だった

さて、マーギュリスは『理論生物学ジャーナル』に掲載された論文でどんなことを言ったのか。おおよそ次の四点である。

細胞内に存在するミトコンドリア、葉緑体、中心体、鞭毛は、細胞本体以外の生物に由来する。酸素呼吸能力のある細菌が細胞内共生をして、ミトコンドリアの起源となった。

スピロヘータが細胞表面に共生したものが鞭毛の起源となり、ここから中心体が生じた。

藍藻（藍色細菌とも呼ばれる真正細菌）が細胞内共生して葉緑体の起源になった。

このうち鞭毛については誤解だった（鞭毛にはDNAが見つかっていない）が、ミトコンドリアや植物の細胞内にある葉緑体については、現在、マーギュリスの説が定説として受け入れられている。

真核生物（細胞内に細胞核を有する生物 - 動物、植物、菌類、原生生物など）はミトコンドリアを体内に取り込み、共生関係を築き上げることで、より高度な生物へと進化し始めたのである。

植物は、その細胞内にミトコンドリアとともに葉緑体を存在させている。これによって光合成を行い、生存、生長に必要な炭水化物を合成しているのだが、その葉緑体もミトコンドリア同様、もともとは別の生命体だったものが、より大型の細胞に取り込まれて共生するに至ったとされている。

葉緑体の正体に関する研究はミトコンドリアのそれよりも少し先行していた。ざつとたどってみると、まず一八八三年に、細胞内の葉緑体が分裂によって増殖することが指摘され、共生体である可能性が示唆された。

すでにDNAの存在自体は明らかになっていたが、その働きが解明されるのは二十世紀半ばを待たねばならない。葉緑体は「分裂し増殖する」という現象から、それが一個の生物であり、植物の細胞と共生しているのではないかと考えられていたのである。

「取り込まれた」ことの痕跡

当時、細胞内の小器官について、多くの学者が研究を始めていたのだが、アルトマンもその一人だった。前に触れたミトコンドリアの命名者である。アルトマンは当然、葉緑体に関する論文を読んだだろう。そして、一人九〇年、ミトコンドリアについても共生体説を唱えることになる。

そして、時代はのちに「遺伝子の世紀」と呼ばれる二十世紀に突入する。一九四四年、オズワルド・エイプリーらは、DNAが形質転換の原因物質であること、すなわち遺伝子本体であることを強く示唆する論文を発表した。続いて一九五二年、それをハーシーとチェイスが実験によって証明した。そして、その翌年にはワトソンとクリックがDNAの二重らせん構造を明らかにするのである。

ミトコンドリアについては、一九五三年に細胞質遺伝（細胞の核のDNAに依存しない遺伝のこと。核以外のDNAの存在を示唆するものだった）が発見され、一九五八年には細胞から取り出したミトコ

ンドリアが独自のタンパク質合成を行えることが示された。そして、一九六三年にはナス夫妻によってミトコンドリア DNA が確認される。

独自の遺伝子を持ち、それによって独自のタンパク質合成を行えるなら、それはほぼ独自の生物であると言ってよい。リン・マーギユリスはこうしたいくつもの遺伝子研究の上に立ち、ミトコンドリアがもともとは独立した生命体で、それが別の大きな細胞に取り込まれたのだと主張した。そして「取り込まれた」ことの痕跡（二重の細胞膜）を示したのだった。

ミトコンドリアは、より大きな細胞に取り込まれる際、まず、その細胞の体表の窪みに付着した。そこは、おそらくミトコンドリアにとって居心地のいい場所だった。

生物にとって、外敵から身を守るのは最大の関心事である。ミトコンドリアはより大きな細胞の体表の窪みを「安住の地」と判断し、そこに居つづけた。あるいは、そこを「安住の地」とできる一匹のミトコンドリアがいた。

より大きな細胞は、時間の経過とともにミトコンドリアのいる窪みの開口部を狭めていった。その体表（細胞膜）は巾着状となり、やがて開口部が付着した。こうしてミトコンドリアは細胞内に取り込まれたのだが、もともとそこは居心地のよい場所だったから、そのまま生存することができた。

すると、ミトコンドリアとより大きな細胞との境界には二重の細胞膜が存在することになる。ミトコンドリアの細胞膜と、より大きな細胞の細胞膜である。

マーギユリスはミトコンドリアを包んでいる二重の細胞膜の存在を共生説の決定的証拠だと言ったのだった。一五回のボツが示すとおり、彼女は、最初、異端者扱いされた。しかし、その後「ミトコンドリアの共生起源説」を補強する研究成果が次々と発表され、やがて彼女は生物学のヒーロー（あえてヒロインと呼ばない）となった。

ミトコンドリア DNA で母系をたどれる

卵子と精子が出会って合体するとき、精子からはその DNA だけが卵子の中に入る。精子のミトコンドリアは卵子に入り込まない。だから新たにできた受精卵の内部のミトコンドリアはすべて卵子由来、つまり母親のものである。

母系由来のミトコンドリアは受精卵の中で分裂し増殖する。そして、それが受精卵の成長とともに各細胞へと分配されていく。したがって、ミトコンドリアはすべて母系由来である、ということになる。

そのミトコンドリアの内部には、細胞核内のゲノム DNA とは別に、固有の DNA が存在している（それは紛れもなく、かつて細菌だったものの遺物である。遺物という言い方も正確ではない。ミトコンドリア DNA は今もなお激しく活動している）。

つまり、ミトコンドリア DNA は必ず母親から子に受け継がれ、父親から受け継がれることはない。すると、ミトコンドリア DNA を分析すれば、その人間の母系の出自をたどることが可能になる。

その研究はカリフォルニア大学パークレー校のレベッカ・キヤンとアラン・ウィルソンのグループによって行われた。彼らは、できるだけ多くの民族を含む一四七人の被験者のミトコンドリア DNA の塩基配列を解析した。

被験者たちのミトコンドリア DNA の塩基配列はそれぞれ異なっている。しかし、まったくランダムに異なっているわけではない。共通の部分があったり、あるグループに特定の異なり方が見られたりするるのである。なぜ、そうなっているかと言えば、何代にもわたって継承される間に、ミトコンドリア DNA にも突然変異が起きるからである。突然変異は、いつ起こるかかわからず、ある日突然に起こるか

ら、そう呼ばれるのだが、非常に長い時間を設定して考えれば、その発生頻度を推測することができる。つまり、ある変異が起こるのは 年に一度くらいだと。研究グループは、その尺度をもとに被験者たちの持つ変異を解析し、系統樹を作成した。すると、人類の系図は二つの大きな枝に分かれていた。一つのグループはアフリカ人のみからなる枝で、もう一つはアフリカ人の一部とその他すべての人種からなる枝。これは、その二つのグループに分かれる前、つまり全人類の共通の祖先がアフリカにいたことを示唆している。こうして想定された人類の祖先たる一人の古代女性に「ミトコンドリア・イブ」という名称が冠せられた。これは、すべての人類が、アフリカにいた一人の女性のミトコンドリア DNA を継承しているという意味である。

ただし、現在生きているヒトのすべてが同一のミトコンドリア DNA を持っているわけではない。研究の重要な前提となった突然変異が起きているからである。裏返して言えば、突然変異が起きていない（起きた確率が非常にひくい）同一母系の近親者間では、そのミトコンドリア DNA は同じである。

ミトコンドリア DNA による犯罪捜査

最近、DNA の分析が犯罪捜査に使われているが、そこではミトコンドリア DNA が重要な役割を果たしている。いまだ犯人が捕まらない「世田谷一家殺人事件」を報じる週刊文春（二〇〇九年新年特大号）にこんな記述があった。

「（捜査）本部はその（犯人の DNA の）鑑定を専門家へ極秘に依頼した」

「全世界の研究者たちとリンクする、DNA データベースとの照合が今も進んでいる。鑑定結果は、定期的に本部に届けられている」

「そして、これまでの鑑定結果によって犯人のク姿クを初めて捉えることとなったのである。《犯人は、アドリア海沿岸民族の母系を持つ男

「犯罪捜査における DNA 鑑定は、細胞の中にあるミトコンドリア DNA が使われる。ミトコンドリア DNA は、母系で遺伝し、クイブに到るまで祖先を特定できるクというジョークもあるほどそのク精度クは高い」注意しなくてはならないのは、この鑑定が「犯人は外国人、あるいは外国人を母親を持つハーフだ」と示唆しているわけではないということ。確かなのは「アドリア海沿岸民族の母系を持つ」ということだけである。

犯人の母系だけをずっとたどつていくと「アドリア海沿岸民族」の女性が登場するという意味であって、それが何代前なのかはわからない。母親であるかもしれないし、一〇〇代前の祖先であるかもしれないのだ。仮にその女性が一五代前にいたとしよう。犯人の一代前の祖先、つまり親は二人である。二代前は祖父母で四人、三代前の曾祖父母は八人である。

では一五代前は？ 二の一五来で三万二七六八人になる。三万以上の祖先のうち、母系の一人が「アドリア海沿岸民族」であっても、そういう鑑定結果になる。一代か二代前なら、犯人に「アドリア海沿岸民族」の外見的特徴が残っているかもしれない。もちろん、その可能性もある。しかし、一五代前だと「アドリア海沿岸民族」の血は三万二七六八分の一に薄められている。外見的特徴が残っているとは考えにくい。

アフリカにいた全人類共通の太母

カリフォルニア大学の研究グループは、アフリカにいたミトコンドリア・イブにたどり着いたが、彼女が存在した時期を約一六万年前プラスマイナス四万年と推定した。

被験者たちにみられる突然変異の痕跡を手掛かりにして、ミトコンドリア・イブから現代までに何度

くらいの突然変異が起きたかを類推し、それに時間的発生頻度を掛けたのである。

単純化して考え方を述べれば、ミトコンドリア DNA の突然変異は 年に一度の割合で起きると推測され、それが Y 回起きていると推測されるので、ミトコンドリア・イブは に Y を乗じた値くらい前に存在したと考えられるということである。その値が一六万年で、推測される誤差が四万年だといふのである。

ヒトの起源については、これまでさまざまな説があった。そして、現在もさまざまな説がある。これはどんな特徴をもってヒトと定義するかにもよるので、きわめて大きな帽があるし、どれが間違いで、どれが正しいと判定することはできない。

現在、「最古の人類」と言われているのは、アフリカ中央部に位置するチャドで発見されたサヘラントロボス・チャデンシス (Sahe 訂 nthropustchadensis) である。六〇〇万年から七〇〇万年前の地層から「人骨」が発見された霊長類で、「人類七〇〇万年の歴史」と言うときの「七〇〇万年」はこれに由来する。

これに対して、新しいほうの人類はエチオピアで発見されたホモ・サピエンス・イダルトウで、約一六万年前に生きていたと推定されている。これは、解剖学的にほぼ現代人と変わらない姿に進化しており、「最も古い現代人」と言われている。

ミトコンドリア・イブの「一六万年前プラスマイナス四万年」はホモ・サピエンス・イダルトウと一致する。ミトコンドリア DNA の研究結果は、それまでにも言われていた「人類のアフリカ超源説」を裏付けることになった。

ヒトの進化については、世界各地(ジャワ原人・北京原人・ネアンデルタール人など)で現代人に進化したとする多地域進化説がある。しかし、それらもさらに大本をたどればアフリカに起源があったという点では一致している。「アフリカ起源説」と「他地域進化説」は矛盾しない。ポイントは「現生人類の祖先はいつアフリカから出発したか」である。

私たちの細胞の中で生き続けているミトコンドリアは、全人類共通の太母が一六万年くらい前にアフリカにいたのだと教えている。