

ミトコンドリアの起源と生体における役割

井上 正康

IVF Japan & 健康科学研究所

生命が誕生した原始地球は酸素の無い還元的世界であった。このため初期生物群は深海の海底火山が放出する硫化水素などを利用する嫌気的生命体であった。しかし、約32億年前に出現した藻類により光合成が始まると、産生された酸素は海水中の鉄を不溶性の酸化鉄として海底に沈殿させた後、ゆっくりと大気中へ拡散していった。この酸素が地球に降り注ぐDNA障害性の紫外線と反応してオゾン層を形成し、生物が上陸できる時代が到来した。

約20億年前には好気性のプロテオバクテリアが出現し、真核細胞内に共生してミトコンドリアへと進化した。ミトコンドリアが誕生した原始地球は、水素、メタン、アンモニアなどが充満するガス環境であった。この頃繁栄していたメタン産生菌は、水素と二酸化炭素を原料として有機物を産生放出していた。メタン菌から排泄された有機分子はプロテオバクテリアに取り込まれて燃料となり、再び水素や二酸化炭素として放出されていた。プロテオバクテリアから排出される水素と二酸化炭素は再びメタン菌の餌となった。この様に両細菌群の代謝産物が相互の栄養源となることにより、共生が有利な微生物群を進化させてきた。大気中の水素濃度が低下するとメタン菌はプロテオバクテリアへの依存度を高め、後者から効率よく水素を得るために細胞内小器官として取り込んでいった。太古の細菌群の共生進化によるミトコンドリアの誕生には、この様な代謝的相互依存関係があった。共生関係にある多様な微生物の代謝系を有機的に組み合わせることにより、ヒトの体内で機能している解糖系、酸化的磷酸化、尿素回路など、全ての代謝サイクルが誕生した。

5～6億年前のカンブリア紀の大気中酸素濃度は現代の1/100に過ぎなかった。この低酸素環境下で生物が爆発的に突然変異して種の多様性が広がった。海から陸に広がった植物群は光合成により大気中酸素濃度を一気に増加させて現代の地球環境を創成し、これを追って上陸した両生類が陸上で多様な生態系を進化させてきた。

ミトコンドリアのエネルギー産生には酸素を4電子還元して水を生じる反応が不可欠である。これに関与するcytochrome c oxidaseの酸素親和性($K_m = 0.1 \mu M$)は極めて高いため、ミトコンドリアに富む細胞内外はカンブリア紀並の低酸素環境となる。事実、ヒトの消化管内は先カンブリア紀並の超低酸素環境であり、水素やメタンを産生する無数の嫌気性細菌が共生している。大腸で生じるオナラは水素産生菌やメタン

産生菌の代謝排泄ガスである。胃にはアンモニアを産生するピロリ菌も共生している。ミトコンドリアは酸素を消費するエネルギープラントであると同時に、体内に原始地球の超低酸素世界を再現する保守的環境維持装置でもある。

生物進化は「一創造百盗作」であり、酸化毒性による遺伝子の突然変異を追い風に種の多様性を拡大してきた。ヒトをはじめとする全てのほ乳類も、活性酸素代謝を積極的に利用しながら生き続けるスーパーシステムを進化させてきた。生物が永い進化の過程で海から陸へ、陸から空へとニッチを拡大しながら遺伝子を継承してきた生殖機構も本スーパーシステムの統制下にある。本講演では、悠久の生命潮流が創成した生命の鳥瞰図を内観し、進化生物学的視点から生殖の問題を考察する。