20 億年の進化に耐えたミトコンドリアは、なぜ人間の一生で衰えるのか？

― 生命の進化、ミトコンドリアの品質管理、そして「回復力」の科学 ―

Two Billion Years of Evolution. One Human Lifetime. The Biology of Recovery.

武本重毅（Shigeki Takemoto, MD, PhD）
聚楽内科クリニック／MitoQure

Q｜ミトコンドリアは約 20 億年前から存在しているのに、なぜ私たちの身体では年齢とともに機能が低下するのでしょうか？

A｜それは、20 億年にわたって進化してきた「生命の仕組み」と、一人の人間の身体が機能を維持する仕組みが異なるからです。

ミトコンドリアは、もともと独立して生きていた細菌の祖先に由来します。

約 20 億年前、古細菌に近縁な宿主細胞と共生関係を築き、長い進化の過程で、現在のミトコンドリアになったと考えられています。

それ以来、動物、植物、菌類、そして多様な単細胞真核生物とともに進化してきました。

私は、この長い歴史を次のように表現しています。

「ミトコンドリアは、生命の進化をともに歩んできた、20 億年の共生者である。」

しかし、ここで大切なことがあります。

20 億年間、同じミトコンドリアが生き続けてきたわけではありません。

世代を超えて、その仕組みが受け継がれ、環境に合わせて変化してきたのです。

一方、私たち一人ひとりの身体では、ミトコンドリアは毎日働き、傷つき、修復され、不要になったものが取り除かれています。

問題は、年齢とともに、この**維持・修復・更新する能力**が変化していくことです。

Q｜ミトコンドリアは、なぜ 20 億年もの間、生命を支えることができたのでしょうか？

A｜環境に応じて、働き方を変えながら進化してきたからです。

2026 年 10 月、医学誌『Cell』に発表された MitoCarta Tree of Life（MitoTOL）研究では、多様な真核生物のミトコンドリアが比較されました。

その結果、最後の真核生物共通祖先のミトコンドリアには、酸素を利用する代謝だけでなく、酸素の少ない環境に対応する代謝能力も存在していた可能性が示されました。

さらに、アカントアメーバという単細胞生物では、酸素がなくなるとミトコンドリアの代謝経路が変化し、水素を産生できることも確認されました。

つまり、ミトコンドリアは単に ATP をつくるだけの装置ではありません。

酸素や栄養などの環境変化に応じて、代謝を調節してきたシステムなのです。

もちろん、これは進化によって獲得された種ごとの適応であり、人間のミトコンドリアにも同じ機能があるという意味ではありません。

それでも、生命の歴史において、ミトコンドリアの代謝の柔軟性が重要だったことを示しています。

Q｜では、なぜ人間は年齢とともにミトコンドリアの機能を失うのでしょうか？

A｜ミトコンドリアの損傷と、それを修復・更新する能力の変化が関係しています。

ミトコンドリアはエネルギーを産生する過程で、活性酸素（ROS）も発生させます。

ROS は必ずしも悪いものではありません。適切な量であれば、細胞の情報伝達にも役立ちます。

しかし、過剰な酸化ストレスやさまざまな細胞ストレスは、ミトコンドリア DNA、タンパク質、膜などに損傷を与える可能性があります。

そこで細胞には、ミトコンドリアを守る仕組みがあります。

Fusion（融合）によって構成要素を共有する。

Fission（分裂）によってネットワークを再編成する。

Mitophagy（マイトファジー）によって不要なミトコンドリアを除去する。

Biogenesis（新生）によって必要なミトコンドリア構成要素を作り直す。

これらの仕組みが協調することで、細胞はミトコンドリアの機能を維持しています。

しかし加齢に伴い、組織や個人によっては、その品質管理や代謝調節が乱れます。

すると、損傷したミトコンドリアが蓄積し、エネルギー産生効率やストレスへの適応能力が低下することがあります。

重要なのは、**損傷することそのものよりも、損傷に対応し続ける能力が低下すること**なのかもしれません。

Q｜ミトコンドリアの機能が低下すると、身体には何が起こるのでしょうか？

A｜エネルギー代謝だけでなく、炎症、免疫、筋肉、脳などの働きにも影響する可能性があります。

例えば、傷ついたミトコンドリアから DNA などが細胞質へ漏れ出すと、細胞の自然免疫システムが反応する場合があります。

その代表的な経路が、cGAS-STING です。

このような反応が適切に制御されず、慢性炎症につながると、周囲の組織にも負担を与える可能性があります。

また、ミトコンドリアの代謝調節がうまく働かなければ、運動後の疲労が長引いたり、筋肉や神経などの機能維持が難しくなったりする場合があります。

ただし、疲労や筋力低下にはさまざまな原因があり、すべてがミトコンドリアの機能障害によって説明できるわけではありません。

ここで私が重視しているのは、

身体がストレスを受けたあと、どれだけ元の機能へ戻れるか

ということです。

Q｜それが、Recovery Capacity（回復力）なのですね？

A｜そうです。私は老化を、単なる時間の経過ではなく、回復する能力が徐々に低下していく過程として捉えています。

私たちの身体は、毎日変化しています。

食べると血糖値が上がります。

運動すると心拍数が上がり、筋肉に負荷がかかります。

感染すると免疫が働き、炎症が起こります。

しかし健康な身体は、こうした変化に対応し、再び安定した機能状態へ戻ろうとします。

私は、この能力を Recovery Capacity と呼んでいます。

そして、その回復過程において、ミトコンドリアは重要な役割を担っています。

ただし、回復力はミトコンドリアだけで決まるものではありません。

免疫、血管、神経、筋肉、内分泌、リンパ管などのシステムが協調することで、身体全体の回復が支えられています。

つまり、Recovery is a network property.

回復とは、一つの細胞小器官だけの能力ではなく、生命システム全体の働きなのです。

Q｜では、ミトコンドリアの回復力を守ることはできるのでしょうか？

A｜睡眠、運動、栄養、疾患管理などによって健康とミトコンドリア機能を支えることはできますが、失われた回復力をどこまで取り戻せるかは、今後の研究課題です。

特に重要なのは、ミトコンドリアの働きを常に最大化することではありません。

運動するときには、必要なエネルギーを産生する。

酸化ストレスが強いときには、防御を優先する。

損傷したミトコンドリアを取り除く。

必要に応じて新しい構成要素を作り直す。

こうした柔軟な調節こそが重要です。

私は、これからのミトコンドリア回復医療を、

Repair → Reprogram → Replace → Recover

という 4R Framework から研究しています。

損傷に対応する。

代謝を再編成する。

失われた機能を補完する可能性を探る。

そして、本当に身体の機能が回復したかを測定する。

これらを科学的に検証していくことが、Mitochondrial Recovery Medicine の目標です。

Dr. Shiggekky からのメッセージ

20 億年という時間を考えると、私たち人間の一生は本当に短いものです。

しかし、その短い一生の中で働いているミトコンドリアには、気の遠くなるような進化の歴史が受け継がれています。

ミトコンドリアは、変化する環境の中で、生命とともに進化してきました。

私は、その進化の歴史から、現代の私たちの身体がなぜ回復力を失うのか、そしてどうすればその能力を守れるのかを学びたいと考えています。

進化の成功と、個体の老化は同じではありません。

しかし、その違いを理解することが、回復力の医学を発展させる重要な一歩になると思います。

Mitochondria have been life's evolutionary partners for nearly two billion years.

Today, we seek to understand the biology of recovery through their extraordinary evolutionary history.

ミトコンドリアは、生命の進化をともに歩んできた、20 億年の共生者である。

そして今、私たちは、その進化の歴史から「回復する生命」の仕組みを学ぼうとしている。

MITO RISING | THE AGE OF RECOVERY

Aging is not simply time. It is the progressive loss of recovery capacity.

武本重毅 医学博士 | Dr. Shiggekky

主要参考文献

1. Chen MZ, et al. Comparative analysis of mitochondrial proteomes across the tree of life. *Cell*. 2026;189:6285–6306. doi:10.1016/j.cell.2026.08.029.
2. Stefely JA, et al. Mitochondrial proteome of Acanthamoeba delineates aerobic and anaerobic pathways dynamically regulated by oxygen. *Cell*. 2026;189:6246–6266.e19. doi:10.1016/j.cell.2026.08.056.
3. Mootha VK, Calvo SE. Decoding mitochondrial proteomes of diverse eukaryotes. *Cell*. 2026. doi:10.1016/j.cell.2026.09.007.
4. Goyal M, et al. A high-confidence inventory of the proteins in the mitochondrion-related organelle of Giardia. *Current Biology*. 2026;36:5125–5140.e16. doi:10.1016/j.cub.2026.07.074.

注：ミトコンドリアの進化的な適応と、人間の加齢に伴う Recovery Capacity 低下を結びつける部分は、MITO RISING の研究仮説です。

© 2026 Shigeki Takemoto / MitoQure