

🎬 SF ミトコンドリアマン®｜SERIES 86

第 6 話「食事編」②

食べたものは、どうやってエネルギーになるのか？

— From Food to ATP —

The Journey from Nutrients to Cellular Energy.

MITO RISING｜THE AGE OF RECOVERY

SCIENCE × STORY × HOPE

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

今回は、Series 83「私たちは、何のために食べるのか？」の続編です。Series 84・85の医学会編を経て、再び食事編へと戻ります。

前回の食事編では、栄養はエネルギー源であるだけでなく、身体をつくる材料であり、細胞に情報を届ける存在でもあることを学びました。

今回は、食べ物が消化・吸収され、細胞内で代謝され、生命活動を支えるATPが産生されるまでの壮大な旅を描きます。

しかし、今回伝えたいのは、生化学的なエネルギー産生の仕組みだけではありません。

生命は、何のためにエネルギーをつくるのか？

そして、エネルギー産生と回復力は、どのようにつながっているのか。

この問いを、ミトコンドリアマンと小さな細胞たちの冒険を通して考えていきます。

PROLOGUE｜セルロンに到着した栄養輸送列車

朝のセルロン。

金色の朝日が、細胞内世界を照らしています。

中央エネルギーステーションに、新しい栄養輸送列車が到着しました。

NUTRIENT EXPRESS

車両には、さまざまな栄養素が積まれています。

- GLUCOSE｜ブドウ糖
- FATTY ACIDS｜脂肪酸
- AMINO ACIDS｜アミノ酸

小さな細胞たちが、列車を取り囲みます。

「わあ！　今日も栄養が届いた！」

「これでATP EXPRESSが走れるね！」

しかし、一つの細胞が不思議そうに尋ねます。

「ねえ、ミトコンドリアマン。」

「食べ物が身体に届くことは分かったけれど、どうやって ATP になるの？」

「ブドウ糖が、そのままエネルギーに変わるの？」

黒とゴールドのアーマーをまとったミトコンドリアマンが微笑みます。

「そこには、生命が長い進化の歴史の中で育んできた、驚くほど精巧な仕組みがあるんだ。」

「今日は、エネルギーが生まれる場所へ行こう。」

巨大な輸送ゲートが開きます。

WELCOME TO THE WORLD OF CELLULAR ENERGY

新しい冒険が始まります。

Scene 1 | ATP とは、いったい何なのか？

セルロンの中央広場。

小さな金色のカプセルが、街の至るところへ運ばれています。

カプセルには、三つの文字が刻まれています。

ATP

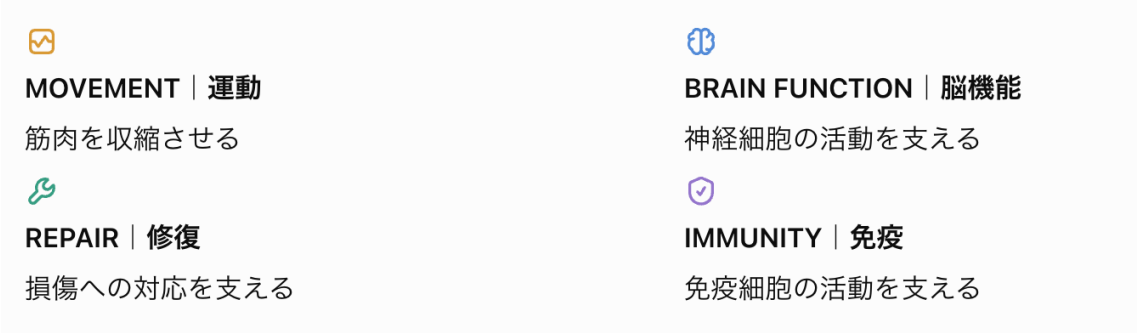
Adenosine Triphosphate（アデノシン三リン酸）

小さな細胞が尋ねます。

「これがエネルギーなの？」

ミトコンドリアマン 「ATP は、生命がさまざまな仕事をするために使う、エネルギーの受け渡し役なんだ。」

街の巨大スクリーンに、さまざまな生命活動が映し出されます。



「歩くことも、考えることも、身体を修復することも、エネルギーを必要とする。」

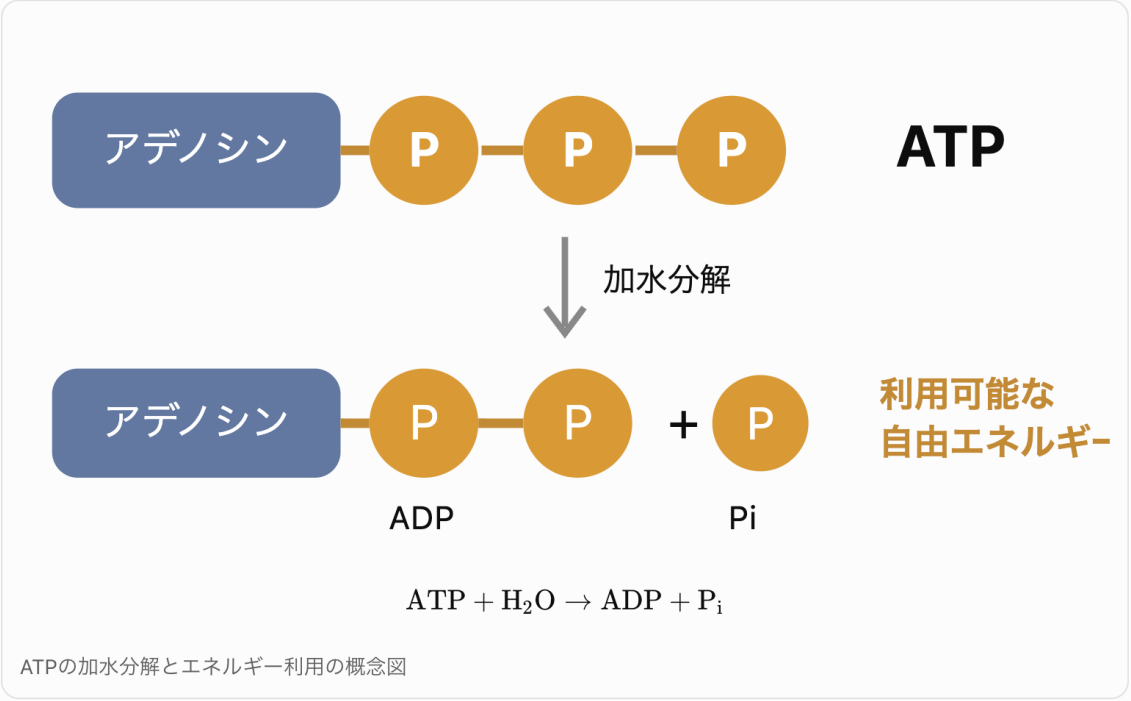
「ATP は、その仕事を支えているんだ。」

小さな細胞 「じゃあ、ATP がなければ、セルロンは動けないんだね！」

「その通り。」

SCIENCE NOTE｜生命のエネルギー通貨

ATP は、加水分解によって放出される自由エネルギーを、筋収縮、物質輸送、生合成などの反応に利用する分子です。



ATPの加水分解とエネルギー利用の概念図

ATP は使われると ADP などに変化し、代謝によって再び ATP へと再合成されます。

生命は ATP を大量に蓄えているのではなく、絶えず産生し、利用し、再合成しています。

ATP is the energy currency of life.

Scene 2｜最初のエネルギー工場「解糖系」

ミトコンドリアマンと小さな細胞たちは、細胞質にある代謝施設へ向かいます。

入口には、大きな文字が掲げられています。

GLYCOLYSIS STATION

解糖系ステーション。

六つの炭素を持つブドウ糖が、巨大な分子装置へ入っていきます。

いくつもの酵素が、順番に働き始めます。

やがて、一つのブドウ糖から二つのピルビン酸が生まれました。

小さな金色の ATP カプセルも出てきます。

「わあ！　もう ATP ができた！」

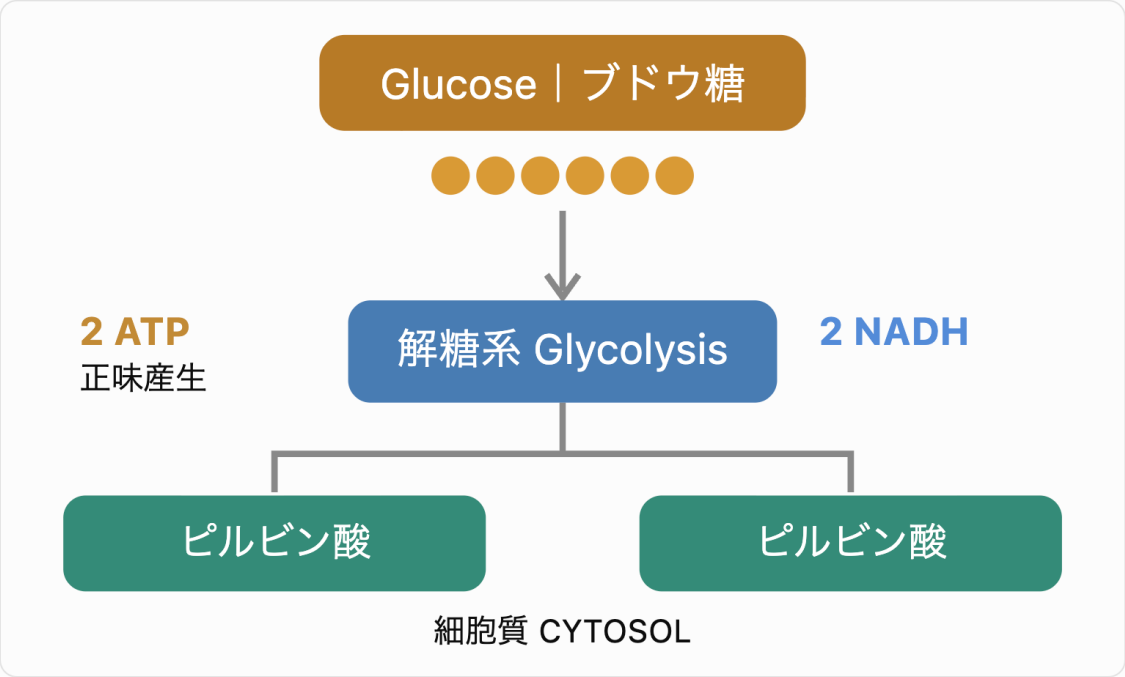
「まだミトコンドリアに入っていないのに！」

ミトコンドリアマン 「そうだ。ATP はミトコンドリアだけでつくられるわけではない。」

「解糖系は、細胞質で進むエネルギー代謝の重要な仕組みなんだ。」

「ただし、ブドウ糖には、まだ利用できるエネルギーが残っている。」

SCIENCE NOTE｜解糖系の仕組み



解糖系では、ブドウ糖 1 分子から、ピルビン酸 2 分子、正味 2 分子の ATP、2 分子の NADH が産生されます。

解糖系自体は酸素を直接必要としません。

ピルビン酸は細胞の代謝状態に応じて、ミトコンドリアでの酸化代謝に利用されたり、乳酸へ変換されたりします。

Scene 3 | ミトコンドリアへの入口

セルロンの奥深く。

巨大なミトコンドリアが姿を現します。

二重の膜に包まれ、その内部には美しいひだ状の構造が広がっています。

MITOCHONDRIAL GATEWAY

ピルビン酸を載せた輸送車両が、ミトコンドリアの入口に到着します。

ゲートには、次の文字が表示されています。

MPC ― Mitochondrial Pyruvate Carrier

ミトコンドリア内膜を通過したピルビン酸は、内部で新しい分子へと変換されます。

PYRUVATE → ACETYL-CoA

小さな細胞が尋ねます。

「また形が変わったよ！」

ミトコンドリアマン 「生命は、食べ物をそのまま使うのではない。」

「さまざまな分子へと変換しながら、その中にあるエネルギーを取り出していくんだ。」

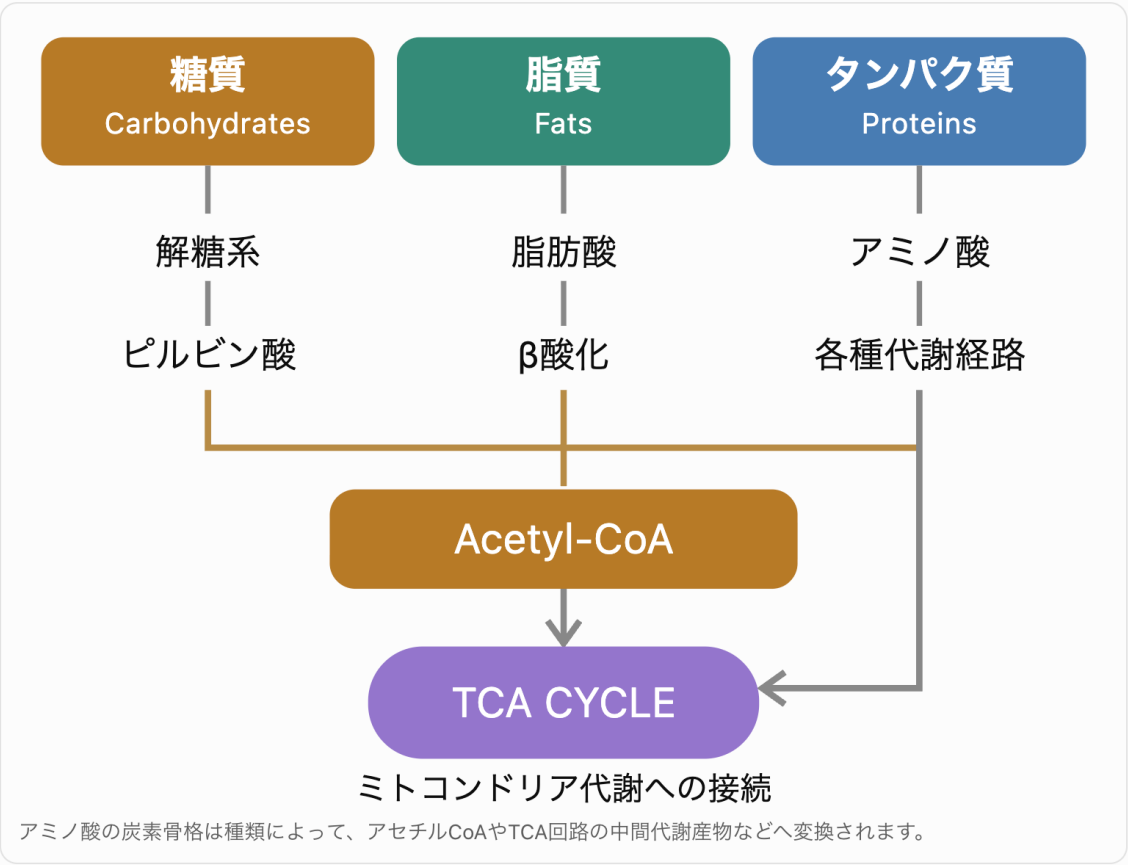
別のゲートからは、脂肪酸を運ぶ輸送隊がやってきます。

さらに、アミノ酸由来の代謝産物も到着します。

「みんな、違う入口から来るんだね！」

「そうだ。生命には、複数のエネルギー供給経路があるんだよ。」

SCIENCE NOTE | 三大栄養素とミトコンドリア代謝



アミノ酸の炭素骨格は種類によって、アセチルCoAやTCA回路の中間代謝産物などへ変換されます。

糖質、脂質、タンパク質は異なる代謝経路を通りますが、その一部はミトコンドリアの酸化代謝へとつながります。

この代謝経路の多様性は、栄養状態やエネルギー需要の変化に対応するうえで重要です。

Scene 4｜生命の巨大な循環装置「TCA 回路」

ミトコンドリアの内部。

そこには、巨大な円形の分子装置が回転しています。

TCA CYCLE（クエン酸回路）

アセチル CoA が装置へ入っていきます。

一つ、また一つと、分子が姿を変えていきます。

そのたびに、青色と金色のエネルギー輸送カプセルが生まれます。

NADH

$FADH_2$

小さな細胞が尋ねます。

「ここで、たくさんの ATP がつくられるの？」

ミトコンドリアマン 「実は、TCA 回路の大切な仕事は、それだけではない。」

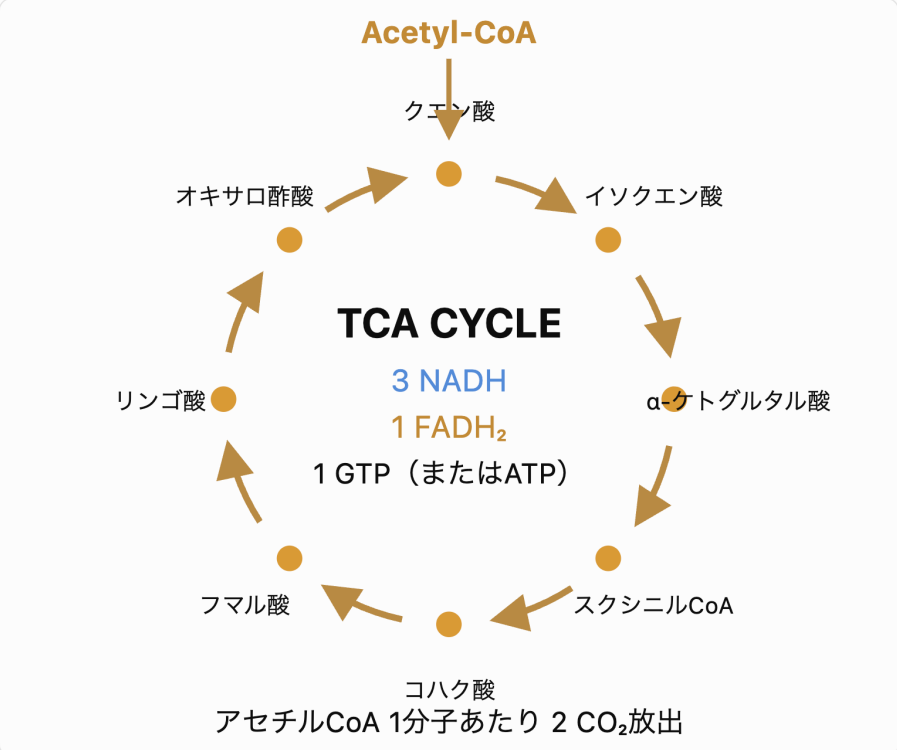
「栄養素を酸化する過程で、電子を受け取った分子をつくる。」

「その電子が、次のエネルギー産生装置へ運ばれていくんだ。」

小さな細胞 「エネルギーを次の場所へ届ける運び屋なんだね！」

「その通り。」

SCIENCE NOTE｜TCA 回路と電子の受け渡し



TCA 回路では、アセチル CoA の酸化に伴って NADH や $FADH_2$などが生じます。

これらは電子伝達系を通じた ATP 産生につながります。

また、TCA 回路の中間代謝産物は、アミノ酸や脂質などの生合成にも利用されます。

つまり、TCA 回路はエネルギー産生だけでなく、身体を構成する分子をつくる代謝ネットワークの中心でもあります。

The TCA cycle connects energy metabolism with biosynthesis.

Scene 5｜電子が走る、ミトコンドリアの内膜

ミトコンドリアのさらに奥へ。

そこには、どこまでも続く美しい膜構造があります。

クリステです。

膜には、巨大な分子装置が並んでいます。

COMPLEX Ⅰ－Ⅱ－Ⅲ－Ⅳ

電子伝達系。

NADH から電子が受け渡され、分子装置が次々に働き始めます。

そのエネルギーによって、水素イオンが膜の片側へと運ばれていきます。

小さな細胞が驚きます。

「電子が流れている！」

「まるで、生命の中に発電所があるみたい！」

ミトコンドリアマン 「そう見えるね。」

「でも、ここでつくっているのは、私たちが普段使う電気そのものではない。」

「膜を隔てた水素イオンの濃度差と電位差なんだ。」

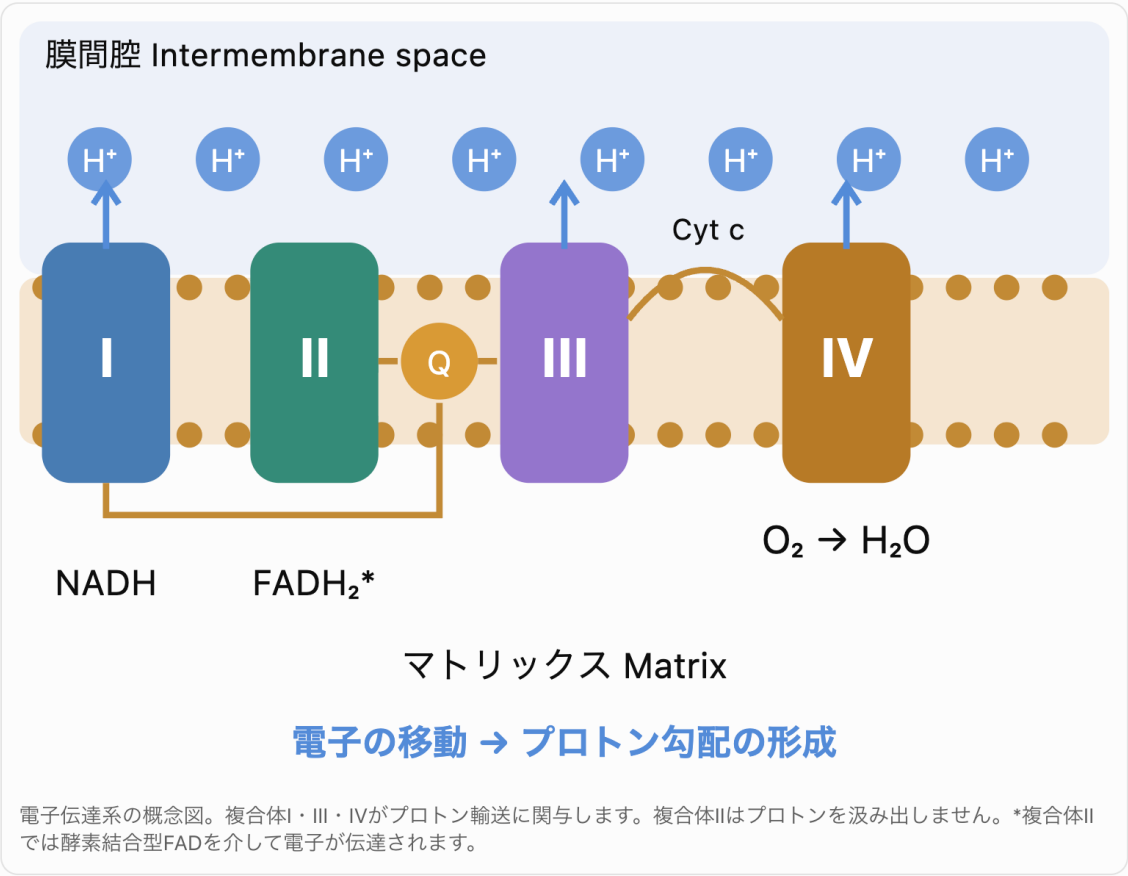
巨大スクリーンに表示されます。

PROTON MOTIVE FORCE

プロトン駆動力。

「この力が、ATP をつくるために使われるんだ。」

SCIENCE NOTE | 電子伝達系と酸素



電子伝達系の概念図。複合体I・III・IVがプロトン輸送に関与します。複合体IIはプロトンを汲み出しません。*複合体IIでは酵素結合型FADを介して電子が伝達されます。

電子伝達系では、電子が最終的に酸素へと受け渡され、水が生成されます。

呼吸によって取り込まれた酸素は、酸化的リン酸化における最終電子受容体として重要な役割を果たしています。

The oxygen we breathe helps sustain the energy of life.

Scene 6｜回転する生命の分子モーター

突然、ミトコンドリアの内膜に並ぶ巨大な装置が光り始めます。

無数の小さなタービンのような分子装置です。

ATP SYNTHASE

ATP 合成酵素。

水素イオンが装置を通って流れ始めます。

すると、分子モーターが回転します。

ADP とリン酸が結びつき、ATP が生まれます。

ATP PRODUCTION INITIATED

小さな細胞たちは、目を輝かせます。

「回っている！」

「身体の中に、こんな小さなモーターがあるの？」

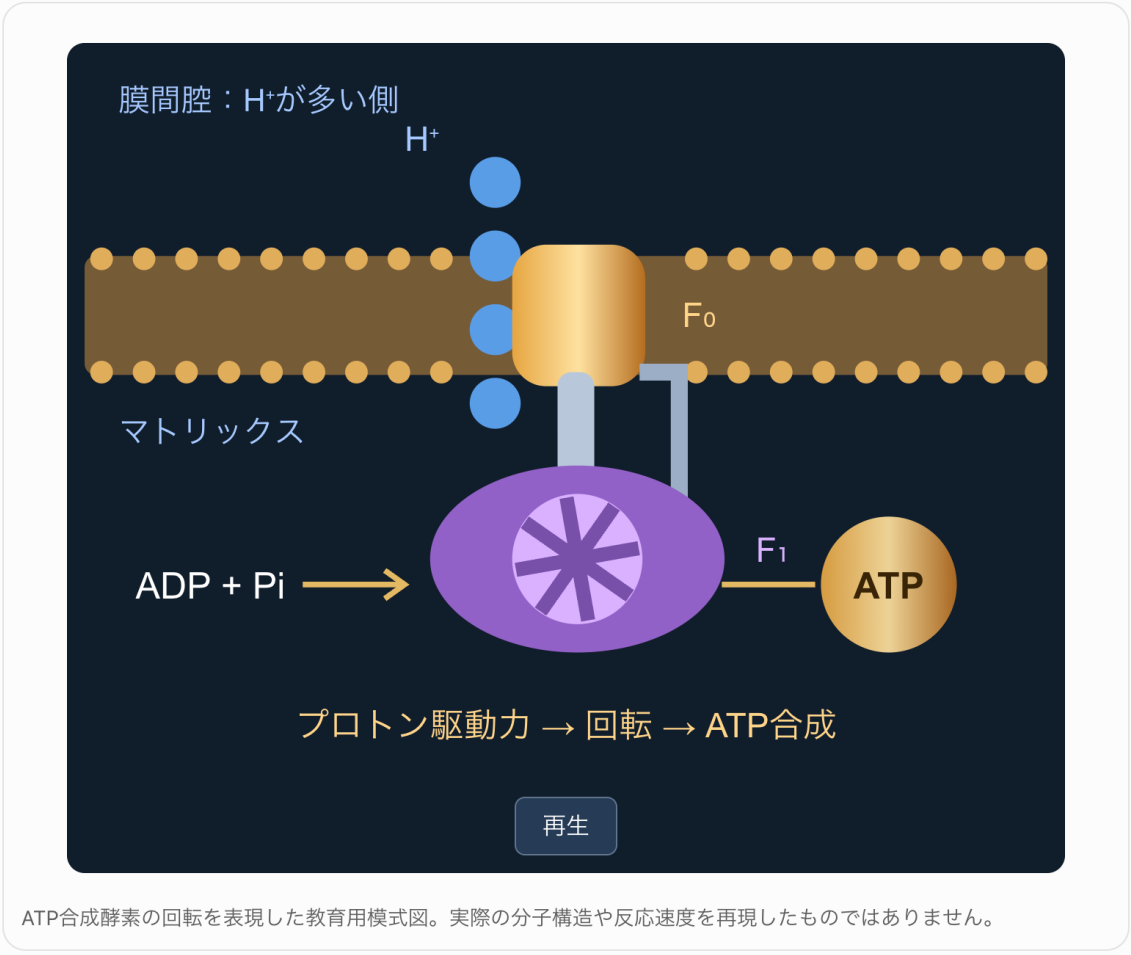
ミトコンドリアマン 「そうだ。」

「生命は、分子の大きさで働く回転装置を持っているんだ。」

「私たちが歩き、考え、笑い、眠っている間も、この仕組みは働き続けている。」

ATP カプセルが次々と輸送され、セルロンの街へと届けられます。

SCIENCE NOTE｜ATP 合成酵素の働き



ATP合成酵素の回転を表現した教育用模式図。実際の分子構造や反応速度を再現したものではありません。

ATP 合成酵素は、膜を隔てたプロトン駆動力を利用して ATP を合成する分子装置です。

電子伝達系と ATP 合成酵素が連携する仕組みを、酸化的リン酸化（Oxidative Phosphorylation）と呼びます。

ヒトの多くの細胞では、酸素を利用した酸化的リン酸化が ATP 供給の主要な経路となっています。

Life is powered by molecular machines.

Scene 7 | 一つのブドウ糖から、いくつの ATP が生まれるのか？

セルロンの中央スクリーンに、今日のエネルギー産生レポートが表示されます。

CELLULAR ENERGY REPORT

小さな細胞が尋ねます。

「最初のブドウ糖一つから、結局いくつの ATP ができるの？」

ミトコンドリアマン 「一般的な理論計算では、完全に酸化されたブドウ糖 1 分子から、およそ 30〜32 分子の ATP が得られると見積もられている。」

「ただし、実際の細胞では、いつも同じ数になるわけではないんだ。」



小さな細胞 「ミトコンドリアって、すごいんだね！」

ミトコンドリアマン 「そうだね。でも、ATP をたくさんつくることだけが、生命の目的ではないんだ。」

「必要な場所で、必要なときに、必要な量を供給すること。」

「それが大切なんだ。」

Scene 8 | 脂肪も、乳酸も、エネルギー源になる

セルロンの別の地区。

筋肉の細胞たちが、活発に働いています。

そこには、ブドウ糖だけでなく、脂肪酸や乳酸を運ぶ輸送車両も走っています。

METABOLIC FLEXIBILITY

代謝柔軟性。

小さな細胞が驚きます。

「乳酸って、疲れたときにできる不要なものじゃないの？」

ミトコンドリアマンは首を振ります。

「乳酸は、単なる老廃物ではないよ。」

「別の細胞や組織に運ばれ、再びエネルギー代謝に利用されることもある。」

「脂肪酸も、ミトコンドリアで酸化され、ATP 産生につながる。」

「生命は、いつも同じ燃料だけを使っているわけではないんだ。」

SCIENCE NOTE | 代謝柔軟性

代謝基質	主な利用経路
ブドウ糖	解糖系・ピルビン酸酸化
脂肪酸	β 酸化
乳酸	ピルビン酸への変換・酸化代謝
ケトン体	利用可能な組織でアセチル CoA へ変換
アミノ酸	炭素骨格を各種代謝経路へ供給

代謝柔軟性とは、栄養状態、運動、絶食、ホルモン環境などの変化に応じて、エネルギー基質の利用を調整する能力です。

ただし、利用できる基質や代謝経路は細胞・組織によって異なります。

Metabolic flexibility helps life adapt to changing demands.

Scene 9｜エネルギーをつくる装置も、回復しなければならない

突然、一つのミトコンドリアの光が弱くなりました。

内部の分子装置の一部が、十分に働いていません。

スクリーンに警告が表示されます。

MITOCHONDRIAL QUALITY CONTROL REQUIRED

小さな細胞が心配そうに尋ねます。

「ミトコンドリアも疲れてしまうの？」

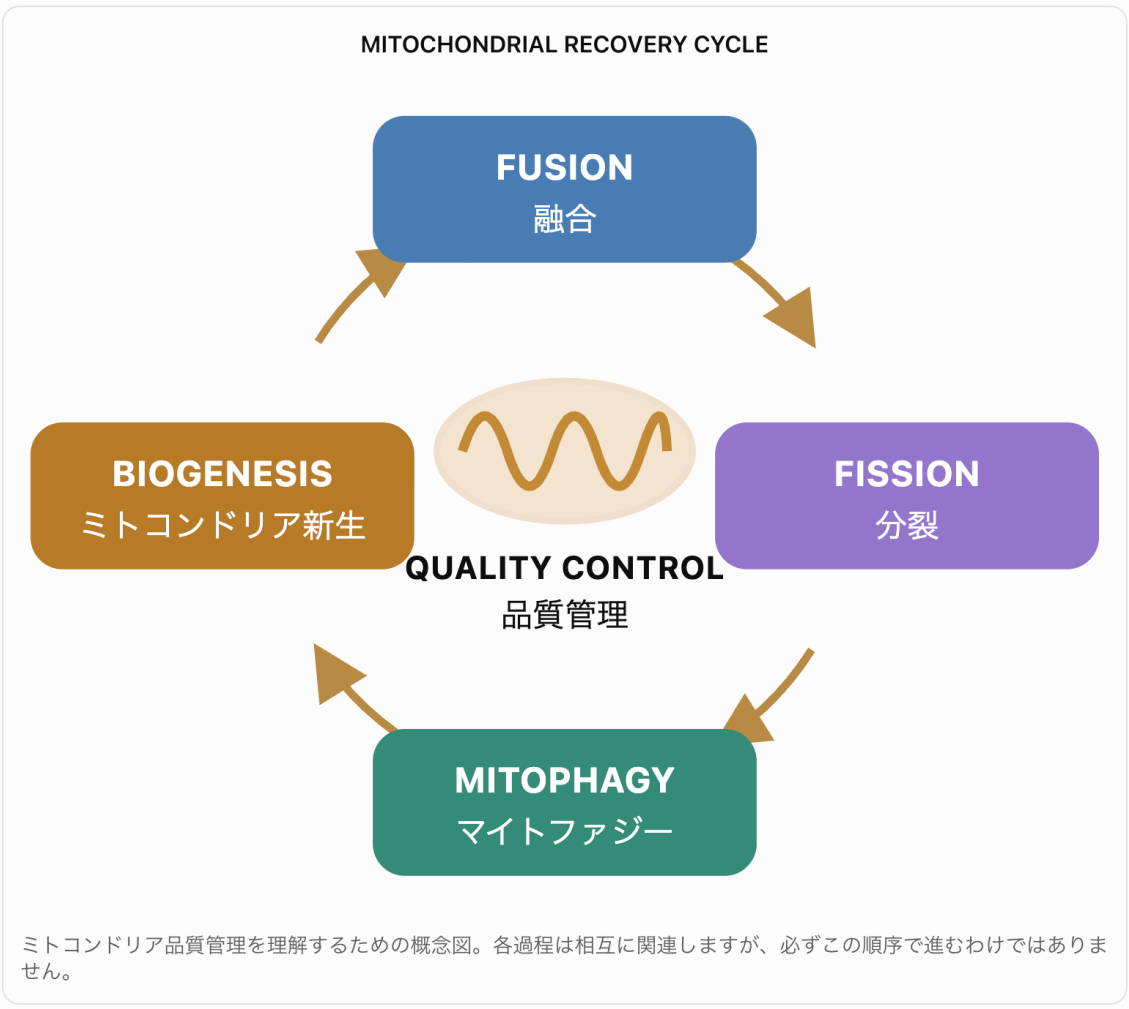
ミトコンドリアマン 「ミトコンドリアも、損傷を受けたり、機能が低下したりすることがある。」

「だから、生命にはミトコンドリアの品質を維持する仕組みが備わっているんだ。」

修復隊が到着します。

ミトコンドリアたちは、互いにつながったり、分かれたりしながら、その状態を変えていきます。

不要になったミトコンドリアは処理され、新しい構成成分がつくられていきます。



ミトコンドリア品質管理を理解するための概念図。各過程は相互に関連しますが、必ずこの順序で進むわけではありません。

ミトコンドリアマンは続けます。

「生命に必要なのは、エネルギーをつくる能力だけではない。」

「エネルギーをつくる仕組みそのものを、維持し、更新する能力も必要なんだ。」

小さな細胞 「エネルギー工場にも、回復力が必要なんだね！」

Scene 10 | エネルギーは、回復のためにも使われる

夕暮れのセルロン。

ATP EXPRESS が、街のさまざまな施設へと走っていきます。

DNA 修復センター。

免疫監視センター。

タンパク質合成施設。

細胞膜の更新施設。

ミトコンドリア品質管理センター。

どの施設でも、エネルギーが利用されています。

小さな細胞が言います。

「ATP って、身体を動かすためだけに使われるんじゃなかったんだね。」

ミトコンドリアマン 「そうだ。」

「生命は、今を生きるためにも、未来の機能を維持するためにも、エネルギーを使っている。」

「傷ついた DNA に対応する。」

「必要なタンパク質をつくる。」

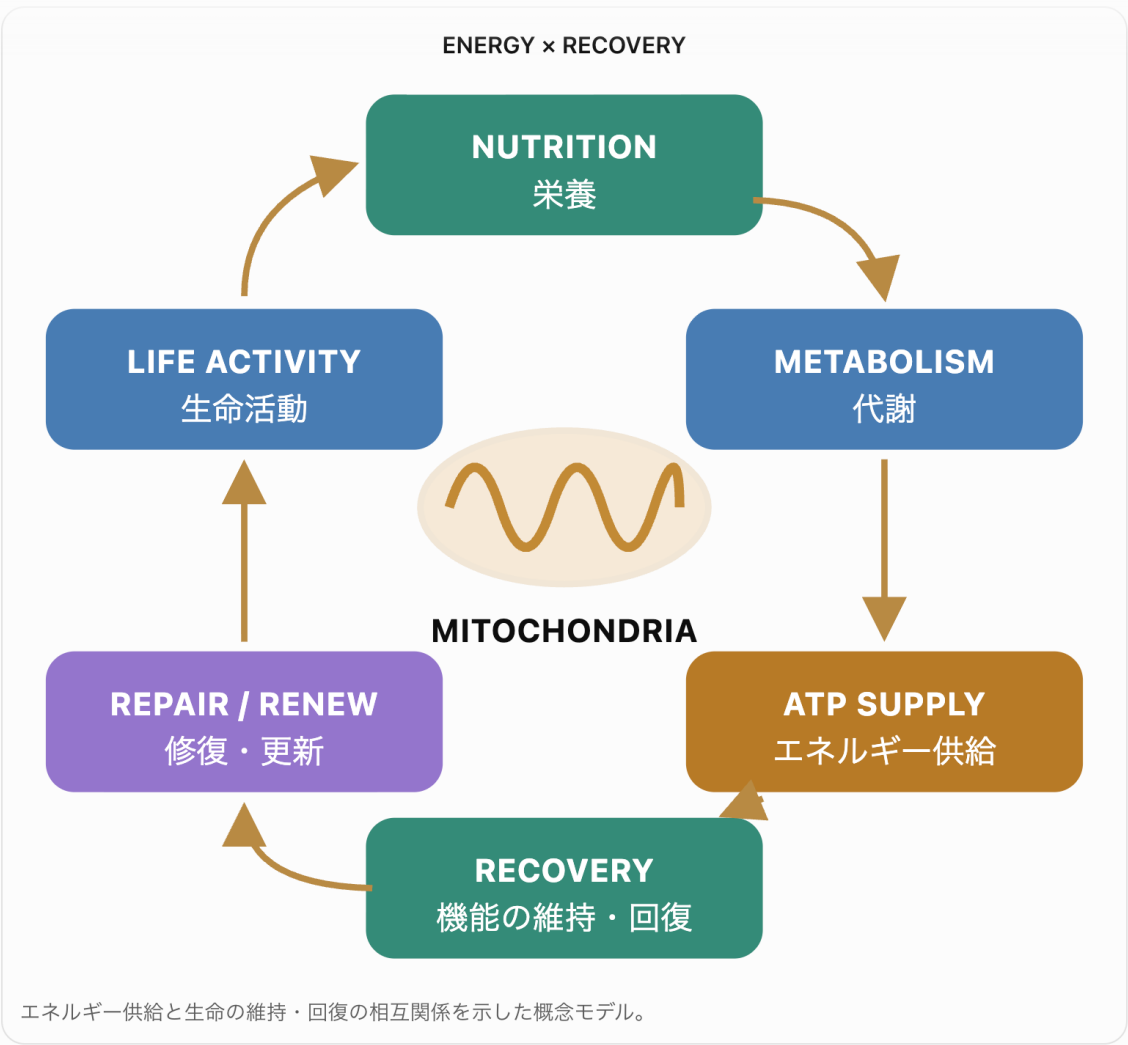
「不要なものを処理する。」

「免疫細胞が働く。」

「そして、環境の変化に適応する。」

「こうした仕事にも、エネルギーが必要なんだ。」

ここで、セルロンの空に巨大な循環図が現れます。



エネルギー供給と生命の維持・回復の相互関係を示した概念モデル。

SCIENCE NOTE | ATP 産生能力と Recovery Capacity

エネルギー代謝は、細胞や組織が損傷やストレスに対応するための重要な基盤です。

しかし、ATP 産生量だけで回復力が決まるわけではありません。

修復機構、免疫機能、炎症の終息、血流、栄養供給、ミトコンドリア品質管理など、多数の要素が関与します。

Recovery Capacity Theory では、エネルギー供給を回復力の重要な構成要素の一つとして位置づけます。

Energy production is essential for recovery, but recovery is more than energy production.

エネルギー産生は回復に不可欠である。

しかし、回復はエネルギー産生だけでは説明できない。

FINAL SCENE｜生命は、何のためにエネルギーをつくるのか？

夜明け。

セルロンの街に、再び金色の朝日が差し込みます。

ATP EXPRESS が走り始めます。

何百というミトコンドリアが、それぞれの場所で働いています。

小さな細胞は、ミトコンドリアマンの隣に座っています。

「ねえ、ミトコンドリアマン。」

「僕たちは、何のためにこんなにたくさんの ATP をつくっているの？」

ミトコンドリアマンは、遠くの朝日を見つめます。

「生きるためだよ。」

「でも、それだけじゃない。」

「歩くため。」

「考えるため。」

「学ぶため。」

「傷ついたときに、もう一度立ち上がるため。」

「大切な人と笑うため。」

「そして、まだ知らない明日へ進むためなんだ。」

小さな細胞が微笑みます。

「じゃあ、今日もミトコンドリアたちが、僕たちの明日をつくってくれているんだね。」

ミトコンドリアマン 「そうだ。」

「私たちの身体の中では、目には見えない小さな生命の営みが、今も続いている。」

「その営みが、私たちの人生を支えているんだ。」

朝日に照らされ、ミトコンドリアマンの胸のマークが温かな金色に輝きます。



今回の物語を貫くメッセージは、次の言葉です。

Energy is not the purpose of life.

Energy makes life possible.

エネルギーをつくることが、生命の目的ではない。

エネルギーがあるからこそ、私たちは人生を生きることができる。

From Food to ATP.

From ATP to Recovery.

From Recovery to Life.

MITO RISING | THE AGE OF RECOVERY

SCIENCE × STORY × HOPE

NEXT ー SERIES 87 | 第 6 話「食事編」③

夜のセルロン。

中央エネルギーステーションには、十分な栄養素が届いています。

しかし、ミトコンドリアの一部では、エネルギー産生が低下しています。

NUTRIENTS AVAILABLE

ENERGY PRODUCTION IMPAIRED

小さな細胞が驚きます。

「食べ物は十分にあるのに！」

「どうしてエネルギーがつくれないの？」

ミトコンドリアマンは、静かに答えます。

「食べ物があることと、それを適切に利用できることは、同じではないんだ。」

「次は、生命が栄養を使う力について考えてみよう。」

暗転。

食べているのに、なぜ疲れるのか？

— When Food Is Not Enough —

Nutrient Availability × Mitochondrial Function × Recovery Capacity

食べる力から、栄養を利用する力へ。

MITO RISING | THE AGE OF RECOVERY

© 2026 Shigeki Takemoto / MitoQure