

呼吸

キーワード

呼吸、燃焼、有機物、
エネルギー変換、
ミトコンドリア、発酵

講師・監修 長尾嘉崇

学習のねらい

「呼吸」と聞くと、多くの人は息を吸って吐くといった体の動きをイメージするかもしれませんが、私たちはなぜ息をしているのでしょうか？ そして激しい運動をすると、なぜ息が荒くなるのでしょうか？ 実は、食べた物質を細胞で分解するしくみの中にその答えがあります。今回は「呼吸」という生物のしくみを理解し、自分の体の中で起こっていることとして捉えながら学んでいきましょう。

学ぶ前に考えてみよう

- なぜヒトは酸素を体の中に取り入れるのでしょうか？
- マラソンなどで長時間速く走りたいとき、どのような食事をとればいいのでしょうか？
- ミトコンドリアはどんな働きをしている細胞小器官でしょうか？

生物学での呼吸とは？

ヒトは起きていても寝ていても息をしている。これは、息をすることで体の中へ酸素を供給するためと言える。肺から取り込まれた酸素は、血液や組織液によって体の隅々の細胞まで運ばれる。細胞の中に取り込まれた酸素は、ヒトが摂取した有機物などを水と二酸化炭素に分解する過程で使われるのである。

有機物とは、炭素を含む化合物（物質）のことであるが、一般に、有機物も含めたあらゆる物質が分解される時はエネルギーが放出される。生物の場合、そのエネルギーをATPという物質の中に閉じ込め、さらにそのATPを分解することで様々な生命活動にエネルギーを使用しているのである。また、有機物の分解で発生した一部の水（水蒸気）と二酸化炭素は、息として体外に吐き出されているのである。

このように、酸素を体内に取り入れ、細胞内で有機物などを水と二酸化炭素に分解し、ATPを合成する一連の過程を、生物学では「呼吸」と呼んでいる。また、「呼吸」は息などによるガス交換の「外呼吸」と、細胞の活動によるガス交換の「細胞呼吸」に分けて言うこともできる。

呼吸に利用される有機物

呼吸のしくみによく似た化学反応に物が燃える「燃焼」がある。たとえば、ピーナッツを燃やすことは、ピーナッツに含まれる有機物などが空気中の酸素によって水と二酸化炭素に分解されることであり、その時に、エネルギーが発生する。有機物などに含まれていた「化学エネルギー」が「熱エネルギー」に変換されたのである。

酸素を用いて有機物などを分解するといった点で、「燃焼」も「呼吸」も化学反応としては同じである。しかし呼吸の場合、さまざまな酵素などによって段階的に有機物が分解されるため、燃焼よりも穏やかにエネルギーが放出されている。

また、生物の体内で分解される有機物には「炭水化物」、「脂質」、「タンパク質」などがある。長時間運動をする場合、激しい運動を続けたときは主に炭水化物が、穏やかな運動を続けたときは主に脂質が、呼吸によって使われている。そのため、マラソンなどで長時間速く走りたいときは炭水化物をメインとした食事をとることが推奨されている。一方、タンパク質はほとんど呼吸に使われることはない。これは、筋肉などの体を構成する成分として、飢餓状態にならない限り体ができるだけ残そうとしているしくみとも言える。

呼吸によってどんな有機物が主に使用されているかは、排出される二酸化炭素の量(体積)と消費される酸素の量(体積)とを測定することで、ある程度知ることができる。たとえば、番組で行った実験のように、吐き出した二酸化炭素の量と吸い込んだ酸素の量が同じ量であれば、この時の呼吸では主に炭水化物が消費されていることがわかる。一方、吐き出した二酸化炭素の量が吸い込んだ酸素の量よりもやや少ない場合、この時の呼吸では主に脂質が消費されていることがわかる。計算式で表すと、「単位時間当たりの二酸化炭素排出量」÷「単位時間当たりの酸素消費量」となる。この計算で求められる数値のことを「呼吸商：RQ」と呼ぶ。番組の実験では、モニターにこの呼吸商の数字が表示されていたのである。1.0の時は主に炭水化物が、0.71の時は主に脂質が消費されていたことがわかる。

ミトコンドリアのはたらき

細胞の中で呼吸をつかさどる細胞小器官がミトコンドリアである。ミトコンドリアはヤヌスグリーンと呼ばれる試薬によって青緑色(青色)に染色することができて、光学顕微鏡でも観察することができる。オオカナダモのような植物細胞の観察では、小刻みに震えている小さな青い粒が多数見られるが、これは液胞の中に入り込んでしまったミトコンドリアであると推定される。実際に細胞内ではたらいっているミトコンドリアは、葉緑体とともに細胞の中をゆっくりと流れている青い粒であり、光学顕微鏡でピントを合わせて観察するのは難しい。

急激に化学変化が起こる燃焼とは異なり、呼吸ではミトコンドリアのはたらきによって段階的に有機物が分解されていく。呼吸は大きく分けて3つの過程に分けられ、「解糖系」、「クエン酸回路」、「電子伝達系」があげられる。「解糖系」は細胞質基質で起こり、グルコース(炭

水化物) をひと回り小さな物質であるピルビン酸にまで分解する。「クエン酸回路」はミトコンドリアのマトリックスで起こり、ピルビン酸を二酸化炭素にまで分解する。「電子伝達系」はミトコンドリアの内膜で起こり、解糖系とクエン酸回路で生じた水素イオンを用いて大量のATPを合成する。電子伝達系において、水素イオンは最終的に酸素と結合して水となる。すなわち、酸素は燃焼のように有機物と結合するのに使われるのではなく、呼吸では水素イオンと結合して水を発生させることに使われるのである。

“探究”してみよう!

- 動物の呼吸と植物の呼吸にはどのような共通点と違いがあるだろうか。考えてみよう。
- 真核生物はミトコンドリアによって呼吸を行っているが、原核生物はどのようにして呼吸をおこなっているのだろうか。調べてみよう。

column



発酵と腐敗

番組の中で、久保田さんと中島さんは体を動かすエネルギーが、酸素を使って有機物から取り出す、「呼吸」によって得られることに気が付きました。しかし、生物の中には酸素を使わずに有機物からエネルギーを取り出すしくみである「発酵」を行うものがいます。

パン作りのときに、パンをふっくらと膨らませるために用いるイーストは、^{こうぼ}酵母と呼ばれるカビやキノコの仲間を乾燥して粉末状にしたものです。ふだんの酵母は他の生物と同様に、酸素を取り込んで呼吸を行っています。しかし、パン作りで小麦粉などといっしょにパン生地としてこねられると、パン生地の中にはほとんど酸素がなくなります。そこで酵母は、酸素を使わずに有機物（グルコースなど）からエネルギーを取り出す「発酵」を行います。発酵にはさまざまな種類がありますが、酵母が主に行う発酵は「アルコール発酵」です。

アルコール発酵は、有機物を二酸化炭素とエタノール（アルコールの一種）に分解する反応です。焼きあがったパンにたくさんの穴が空いているのは、酵母の発酵により発生した二酸化炭素の気泡の跡なのです。一方、エタノールはパンに独特の風味を与えています。そのため、パン生地に加えるイースト（酵母）の量がパンの味づくりのポイントになります。多すぎるとスカスカで風味のないパンに、少なすぎると硬くてアルコールの香りが強いパンになってしまいます。また、酵母を用いたアルコール発酵は、パン作り以外にもビールなどのお酒を作るときにも利用されています。

パンやビール作りだけでなく、生物による発酵は人々の食生活を支えてきました。たとえば、チーズ、ヨーグルト、味噌、ぬか漬、そして醤油などを作るときには乳酸菌による「乳酸発酵」が用いられています。乳酸発酵は、酸素を使わずに有機物（グルコースなど）を、ひとまわり小さな有機物である乳酸へと分解する反応です。乳酸菌にはさまざまな種類がありますが、乳酸菌の種類によっては乳酸の他に二酸化炭素とエチルアルコール（アルコールの一種）を発生

させるものもあります。乳酸菌の乳酸発酵により、牛乳や野菜などの食材に独特の酸味や旨味を加えることができるだけでなく、乳酸菌以外の菌が増加しにくくなることから、食材の保存方法の一つとして用いられているのです。

一般に「発酵」はヒトの生活に役に立つ反応として定義されています。一方で、悪臭や食中毒の原因となる毒素を発生させるような反応は「腐敗」といわれ、腐敗を引き起こす菌のことを腐敗菌と呼んでいるのです。

「発酵」とは別に、番組では無酸素状態でも生きながらえるハダカデバネズミを紹介しました。ハダカデバネズミは無酸素状態になると、酸素を使って有機物を分解する呼吸から、酸素を使わずにフルクトースと呼ばれる有機物を分解する特殊な代謝を行うことが2017年に発表された研究で明らかになりました。一般に、多くの哺乳類では無酸素状態になると体内にフルクトースが蓄積されて細胞や組織を傷つけることがわかっています。しかし、ハダカデバネズミの場合、このフルクトースを仮死状態のなかでうまく利用して、心臓や脳の細胞の代謝を極力止めないしくみをもっているのです。このしくみを解明することができれば、血管が詰まることで酸素不足に陥る脳卒中や心筋梗塞など、ヒトの疾病の予防や改善にもつながる可能性があります。ところが、ハダカデバネズミの体の中のフルクトースがどこから来ているのかは、まだ解明されていません。ハダカデバネズミが日常的にフルクトースを体に蓄積しているのか、もしくは低酸素状態が引きがねとなってフルクトースが体で作られるのか、いまだに謎が多く、今後の研究が期待されています。

生物のしくみを用いてヒトの生活を豊かにしている例はほかにもたくさんあります。一つの生き物をじっくりと観察することや、生きているしくみを継続的に研究することで、新たな発見や発明につながるかもしれません。