

強者の戦略

【生物：第22章：「分子モーター」に関して

2016年 京都大学 前期試験 より】

真核生物の『呼吸』では、ミトコンドリアが重要な役割を果たしています。1 molのグルコースを呼吸基質として用いた場合、解糖系では2 mol、クエン酸回路では2 mol、電子伝達系では3.4 molのATPが生産されます。電子伝達系では、他の反応系と桁違いに大量のATPが生産されています。この電子伝達系は、ミトコンドリアの内膜上に存在し、複数のタンパク質複合体が関与しています。その中でもATP合成酵素として働くタンパク質複合体について見ていきましょう。

ミトコンドリアの内膜上に存在するATP合成酵素は、働きの上から「回転触媒」と呼ばれます。膜の内外にプロトン (H^+) の濃度勾配が形成されている場合、ATP合成酵素はこのプロトンの電気化学的ポテンシャル勾配に沿った流れを利用してATPを合成しています。プロトンの流れがシャフト(回転子サブユニット)を回転させることでATPが合成されます。構造的には、「イオンモーター」と「ATPモーター」が同じ回転シャフトに連結されているイメージになります。これはタンパク質の常識から言えばあまりにも突拍子もない構造です。

このATP合成酵素が回転触媒(回転モーター)であることは、1997年に明らかになりました。X線結晶構造解析によって回転シャフトの存在が濃厚となりました。その後、吉田賢右教授(京都産業大学総合生命科学部)がこのシャフトに蛍光アクチン繊維を取り付けて、実際に回転する姿を顕微鏡写真に収めることに成功しました。ちなみにこのとき用いたATP合成酵素は、伊豆の温泉に棲息する好熱菌

のものを用いたとのことです(熱に強く丈夫なため、ガラス基板上に固定するのに都合がよかったとか)。

ところでこのATP合成酵素は、構造的には「イオンモーター」と「ATPモーター」が同じ回転シャフトに連結されているイメージでした。ならば《逆回転》は可能なのでしょうか? [通常回転]では、プロトンの濃度勾配を用いてATPを合成しています。《逆回転》では、ATPの加水分解に伴ってプロトンが濃度差に逆らって輸送される、ということになります。実は吉田教授は、この《逆回転》を観察証明したのです。そして《逆回転》は「反時計回り」、[通常回転]は「時計回り」と、《逆回転》と[通常回転]ではシャフトの回転方向が反対であることも観察証明しました。すなわち、ミトコンドリアの電子伝達系のATP合成酵素は、逆に言えば世界最小の分子モーターでもあるのです。

吉田教授によると、この分子モーターであるATP合成酵素は1秒間に100回転(以上)します。 $2/3\pi$ (120°)でATP1分子が合成されるので、1秒間に300分子以上のATPが生産されます。このATP合成酵素が、ミトコンドリア1つあたり1万個(東京工業大学生命理工学院の久堀徹教授)、1細胞内に数百~数千個のミトコンドリアがあり、ヒトは60兆個の細胞でできているとすると、ATP合成酵素の数は 10^{20} 個。ざっくりと計算すると、ヒトが生産可能なATPモル数は1日あたり最大400モルとなります。ヒトの1日の日常生活でのATP使用量が150モル程度と見積もられるので、これらの数値は信憑性の高い数値と言えます。

今回の解説は、吉田賢右教授の著作物

(ATP合成の回転モーター)を大いに参考にしました。

強者の戦略

【解答例】

問5(1) 120°

問5(2) 図4より、ATP濃度が $200\ \mu\text{mol/L}$ のとき、心棒は1秒間に120回転する。問題文より、この際ATP360個を加水分解する。従って、心棒1回転あたり3個のATPが分解されており、ATP1個あたりでは心棒は $360 \div 3 = 120$ 度回転していると考えられる。

問6 ATP濃度がある一定値より高くなると、すべてのATPアーゼが常時ATPと結合している状態となり、すなわち、ATPアーゼとATPの複合体が常に形成されている状態である。そのため、これ以上ATP濃度が高くなってもATPアーゼによるATPの分解はできず、ATPの分解によって得られるエネルギーは一定となるはずで、分子モーターの回転速度も一定となる。