



光捕集作用の効率を上げるには

東北大学 吉澤雅幸

光合成初期過程では太陽光のエネルギーを効率よく集める光捕集作用が働いている。これを担う物質はアンテナ色素分子と呼ばれており、カロテノイドはその代表である。ここでは光合成細菌の光捕集作用を例として、その効率について考えてみたい。

光合成細菌の反応中心にはバクテリオクロロフィル分子があり、太陽光のエネルギーはこの分子に集められる。光捕集作用に重要な電子励起準位は、カロテノイドでは光学禁制な最低一重項状態 S_1 と光学許容な S_2 であり、バクテリオクロロフィルでは Q_x と Q_y である。カロテノイドの S_2 で吸収されたエネルギーがバクテリオクロロフィルの Q_y に伝わるまでが光捕集作用である。

まず、光の吸収について考えてみよう。バクテリオクロロフィルは、800 nm より長波長の近赤外と 400 nm 付近の近紫外に強い吸収帯をもっている。600 nm 付近にも弱い吸収があるが、可視領域にはほとんど吸収がない。このため、太陽光の最も強い緑色（波長 500 nm 付近）を吸収できない。一方、カロテノイドは可視領域に強い吸収をもつだけでなく、共役結合長が違えば吸収極大波長が異なる。したがって、吸収したい光の波長に合わせてカロテノイドを選ぶことができる。

しかし、吸収されたエネルギーが反応中心に伝達されなければ意味がない。伝達効率は、吸収された光エネルギーがバクテリオクロロフィルの発光として放出される収率として測定することができる。ただし、この方法では伝達の最初と最後を観測するだけなので、途中過程を知ることはできない。我々は、フェムト秒吸収分光を用いてエネルギー伝達機構のダイナミクス全体を明らかにしている。

光合成細菌のアンテナ色素蛋白複合体には LH2 と LH1 があるが、面白いことに含まれるカロテノイドの種類が違っている。

LH2 に含まれるカロテノイドは、主としてロドピングルコシド(共役長数 $n=11$)である、このカロテノイドの吸収帯は比較的短波長であるが、エネルギー移動効率は 100% に近い。一方、LH1 に含まれる主なカロテノイドはスピリロキササンチン ($n=13$) である。吸収帯が LH2 よりも長波長であるため、より多くの太陽光エネルギーを吸収できるが、エネルギー移動効率は約 30% と低い。

このようなエネルギー伝達効率の差がなぜ生じているのかを探るため、我々は橋本秀樹教授（関西学院大、反応ダイナミクス・反応予測ネットワーク代表）と共同で、カロテノイドを人工的に変えた LH1 の研究を行った。すると共役長の短いスフェロイデン ($n=10$) を用いると、エネルギー移動効率が約 50% に向上した。この効率の向上には S_1 から Q_y へのエネルギー移動が寄与しており、共役長の短いカロテノイドで起こることがわかった。

では、なぜ自然はエネルギー移動効率の悪いカロテノイドを LH1 に用いたのだろうか。これには光保護作用が関係していると思われる。アンテナ色素蛋白複合体に強い光が照射されるとバクテリオクロロフィルの励起 3 重項状態ができてしまい、生体系に障害を与えてしまう。これを防ぐ機構としてカロテノイドの 3 重項状態へのエネルギー移動が起こる。この効率は長いカロテノイドの方がよいので、スピリロキササンチンが優れている。つまり、LH2 のカロテノイドは光捕集に最適化されており、LH1 では光保護を含めた最適化が行われていると考えられる。

それでは、人工光合成系に適した光アンテナはどのようなものだろうか。強い光による障害を別の方法で回避できるのであれば、光アンテナは捕集作用を最適化するように設計できる。カロテノイドは共役長だけでなく末端構造もバラエティに富んでおり、複数のカロテノイドを組み合わせることで太陽光のエネルギーを余すことなく利用することも夢ではないと考えている。