単一分子分光で探る光合成色素タンパク質の動的で不均一な光物性

近藤　徹〈自然科学研究機構基礎生物学研究所/生命創成探究センター　tkondo@nibb.ac.jp〉

光合成生物は太陽光によって駆動される．光反応場となるのが**光合成色素タンパク質**であり，光吸収から励起エネルギーの輸送，その後に続く電荷分離や電子移動などの様々な光化学反応を制御している．

タンパク質の骨格構造はアミノ酸で構成される．一方で，反応を媒介するのはタンパク質に結合する非アミノ酸の色素分子である．特に，クロロフィル類を中心とした数種類の分子が一連の反応を制御している．光合成光反応も突き詰めれば色素分子間の相互作用を介した物理化学過程であり，タンパク質に結合する色素分子の物性が反応に大きく寄与する．では，それら分子物性はどのように制御されているのだろうか？

当たり前ではあるが，第一に重要なのが結合する分子の種類である．分子構造の違いにより数多の分子種が存在し，適材適所に配置されることで複雑な光反応ネットワークを支えている．しかし，これだけではバリエーションに限界がある．また，たとえ十分な量の分子種が存在したとしても，タンパク質の種類ごとに異なる分子を用意するには膨大な数の生合成系を構築する必要があり，コストがかかり過ぎる．

そこで，数十億年にも及ぶ進化の荒波にさらされてきた光合成生物は巧みな戦略を編み出した．生体系ではタンパク質に結合する分子の組成だけでなく，分子が結合する足場，つまりタンパク質の分子結合サイトまで調整し，**タンパク質環境**を含めた反応場全体を最適化している．これにより，利用する分子種の数を抑えつつも，各分子の反応場を個別に調整することで，多様な光反応機能を実現することに成功している．

これまでに様々な光合成色素タンパク質の詳細構造が解かれ，構造情報をもとにした量子化学計算などの理論解析が可能となり，各色素分子の結合サイトごとにタンパク質環境が最適化されていることも分かってきた．一方で，分子動力学を用いた計算機シミュレーションなどでは，タンパク質の骨格構造が絶えず揺らいでいることも示されている．構造揺らぎのような動的な挙動は生体系に普遍的な性質であり，生理学的に重要な役割を担っていると考えられる．

そこで筆者らは**単一分子分光法**を用い，光合成光反応における動的特性の意義を探求してきた．タンパク質粒子を1つ1つ個別に分光解析することで，確率的に生じるランダムな揺らぎの寄与を光反応と絡めて議論できる．さらに極低温下で揺らぎを抑制すれば，タンパク質ごとに異なる構造状態でトラップして解析することもできる．

光合成反応中心タンパク質を極低温に冷却し，1粒子ごとに励起スペクトルを測定することで，電子伝達に関わる色素分子の単一分子分光解析に成功した．タンパク質に結合する色素分子のエネルギー準位の不均一性を定量評価することができた．さらに，蛍光スペクトルの経時変化から，タンパク質内の励起エネルギー移動経路が揺らぐことも明らかにした．分子結合サイトで生じる局所的な構造揺らぎが，光捕集機能に大きく寄与することが分かった．

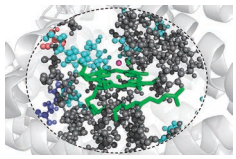
上記のように，単一分子の定常スペクトルやその経時変化から，動的かつ不均一な光物性を調べられる．しかし，励起エネルギー移動などのフェムト秒時間スケールで生じる超高速光反応過程は直接観測できず，間接的な議論にとどまっていた．

そこで，超短パルスレーザー光を用いた時間分解測定法を単一分子分光に応用し，光合成光捕集アンテナタンパク質の超高速励起ダイナミクスの観測に成功した．励起緩和や励起エネルギー移動の時定数が，タンパク質粒子ごとに不均一にばらつくことを明らかにした．このような超高速単一分子分光手法を用いれば，構造の揺らぎや不均一性が光合成光反応の速度や効率にどのように寄与するかについて，実験的かつ定量的に検証できる．

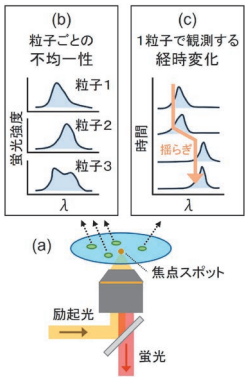
用語解説

光合成色素タンパク質：
光合成の光反応は主にクロロフィル色素類を結合したタンパク質で生じている．光吸収や励起エネルギー輸送を担う光捕集アンテナタンパク質と，光エネルギーを使って電荷分離や電子移動を誘起する反応中心タンパク質などが機能する．

タンパク質環境：
タンパク質に結合する分子の周辺環境を意味する．タンパク質は多数のアミノ酸が鎖状に連なった高分子であり，非アミノ酸の結合分子（緑色）は周囲のアミノ酸などと相互作用することで固定化されている．そのため，アミノ酸の親水性や極性などの性質，およびそれらの配置が結合分子の物性に大きく影響する．



単一分子分光法：
希釈した分子やタンパク質を共焦点光学顕微鏡で観測し，1粒子ずつ空間的に分離して各々の分光測定を行う（a）．粒子ごとに分光特性を評価し不均一性を解析したり（b），1つの粒子で信号の経時変化を測定して時間的な揺らぎを解析する（c）．



©2025 日本物理学会