



人工光合成のための光と水と 気体の経路

信州大学 宇佐美 久尚

高活性の光触媒材料のライブラリや設計指針は、先のニュースレターに紹介されているように、かなり解明されてきている。そこで、実用化のために必要なスケールアップ戦略として、化学工学的な観点から光と物質の供給経路を考慮した反応系を考えてみる。

光合成では、太陽光を利用して水と二酸化炭素からブドウ糖と酸素および水を生成する。ブドウ糖を1分子生成するために、12分子の水と6分子の二酸化炭素を消費し、少なくとも48個の光子を吸収する。

一個体の植物が成長するためには、光合成により相当量の水と二酸化炭素が必要となる。例えば、一玉1 kgのキャベツの乾燥重量は約200 gであり、この質量のほとんどが糖やセルロースとすれば、その原料として約290 gの二酸化炭素と240 gの水が必要である。大気中の二酸化炭素濃度が約400 ppmであることを考慮すると、少なくとも41 m³の大気を気孔から取り込み、二酸化炭素を吸収する必要がある。また、根から葉に供給する水の量は、上記の原料と含水量800 gを加えて約10 lである。さらに、根から葉に養分を運ぶために葉から蒸散される量を加えると合計90 l以上の水が流れることになる。播種から収穫までに3月を要するので、水溶液の流れは概ね緩やかで層流になると考えられる。

これらの光合成に必要な二酸化炭素、水および光子は、すべて植物の外部から摂取され、必要な場所と時刻に必要な量が供給されなければならない。まずは日光の受光に適するように葉が配置される。キャベツの場合には新芽を中心として緑色の葉を周囲に展開する。それぞれの葉の中では、葉緑体を多量に含む細胞は葉の表面に緻密に配列され、一方、葉の裏面には多くの気孔が配置され、その周辺に多孔質構造を形成し

て気-固界面を増やし、二酸化炭素の溶解速度を高めている。

水の移動は維管束を経由して行われる。これは根から吸い上げた水を供給する道管と、葉で生成した糖を水溶液として要所に移動させる篩管から構成される。維管束のような配管による物質移動は、光合成反応を継続的に進めるために必要であり、人工光合成系でも考慮する必要がある。

今年、物質移動を考慮した大量合成のための反応器として、水の完全分解反応用の光触媒パネルが報告された。Gotoらはアルミニウムをドーブしたチタン酸ストロンチウムに助触媒を付けた光触媒を用いて、約1 m角の光触媒パネルを試作した。このパネルを照射すると水素と酸素を量論比で生成し、その光-水素エネルギー変換効率は太陽光照射下でも0.4%を示すと報告された。注目されるのは電子と物質移動を考慮した装置構造である。炭素シートに二種類の光触媒を接続し、その表面に1 mmの膜状に液体の水を供給し、生成する酸素と水素は、気相として自発的に装置外に排出される。動力ポンプが不要なため、メンテナンスが容易で電力のない地域にも導入できる。

昨年、筆者らは光触媒の担持面積を増やし、各光触媒への導光性を考慮した反応器として多孔質ガラス反応器を提案した(2017)。多孔質ガラスの内部に励起光を導光し、ガラスの間隙に反応溶液を通す網目状のマイクロチャネルを形成する。単一カラム内に数百ものマイクロチャネルが網目状に接続されているので、気/液混合系にも対応し、スケールアップに適している。

実験室内の二酸化炭素の還元反応では、直接バブリングしながら照射してもよいが、大量合成での効率と安全性を考慮すれば、Ohtaniらが光酸化反応で提案した多孔質膜反応器(2003)が現実的な候補となる。この反応器では、多孔質膜の界面に光触媒と気/液相の試薬を近づけることが可能であり、葉の多孔質構造との類似性が興味深い。今後、地域の気候や経済的条件に応じて選択可能な新エネルギーの候補として、効率と反応スケールを見据えた多様な人工光合成システムの開発が待たれる。