feature

オプトフルイディクス

太陽由来燃料の生産を支援する オプトフルイディクス

マシュー・D・オームス、デイビッド・シントン

自然の光合成プロセスと同様に、照明にオプトフルイディクスアプローチを使った光バイオリアクタでのシアノバクテリアの培養は、「適切に規模を拡大できるのであれば」、在来型化石燃料と競える新しい燃料源になる。

太陽エネルギーは最も有望な再生可能エネルギー源の1つであり、太陽エネルギーを活用して二酸化炭素(CO₂)や水(H₂O)を燃料—太陽燃料—に直接変換して、化石燃料の使用を控えることは地球規模での課題だ。この太陽由来燃料の生産という課題に挑戦すべく、水の光触媒分解による水素の発生、生体物質内に蓄積されたエネルギーからバイオ燃料を生成するための処理など、さまざまなアプローチが開発されている。

自然においてと同様に、設計されたシステムにおける光合成微生物または光触媒作用を使った光化学還元による、CO2から生物学的に有用な炭素への変換あるいはH2Oから水素への変換では、大面積にわたって小さなスケールでの光と流体の相互作用の組み合わせを要求するであろう。オプトフルイディクス(光と流体の融合)は、現在の太陽燃料生産に向けたオプトフルイディック

アプローチがうまくいき、大規模なエネルギー生産を可能にするオプトフルイディックツールが開発されたならば、直ちに、この領域に貢献するだろう。

なぜオプトフルイディクスなのか

オプトフルイディクスは光と物質がマイクロまたはナノスケールで相互作用する際に起きるユニークな現象を活用する1つの領域として2000年代中頃に開発された(1)。広範な応用が期待されるが、この領域はそのほとんどが小型化に焦点をあてたセンサ、レーザ発振、光操作などに役立つフォトニックデバイスの開発に向けられた。化学的物理的な微小環境や流れ条件の制御と、ナノスケールのフォトニック構造を使った近接場光学の増強とを組みあわせることによって、サイズを最小化しながら検出分解能、可同調性、特異性のすべてが改善された。

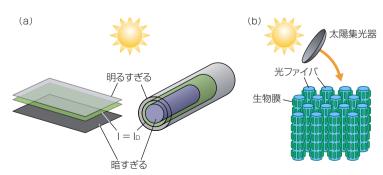


図1 太陽燃料生産の概略図はバルク懸濁式光バイオリアクタやポンド固有の細胞相互の陰効果による不等価な配光を示す(a)。しかし、エバネッセント照明(b)を使った光ファイバベース光バイオリアクタの概念図はリアクタ内のすべての細胞に光と流体を供給する。

最近になって、オプトフルイディクスのエネルギーへの応用が、微小藻類フォトバイオリアクタ、光触媒反応、光を捕獲してエネルギー生産デバイスへと方向づける流体素子など、いくつかの領域で提案された⁽²⁾。いずれの場合も、太陽エネルギーの液体燃料への変換はマイクロとナノスケール流体の相乗的な応用とオプトフルイディックアーキテクチャが提供する光操作とを通して可能になる。小規模流体と光操作が提供するコントロール、表面積、高反応速度などの長所を活かすことによって、エネルギー生産技術の生産性を数桁増大させる道が開かれた。

太陽燃料生産を支援するオプトフルイディックの利点の1例は、増強された太陽光集光レンズとして機能する液体界面固有の曲率の利用である。さらに、オプトフルイディックデバイスの高い表面積/体積比は、生成物と反応物の流れをコントロールするのに有用であり、水素発生などに使用する光触媒の反応速度の向上にも役立つだろう。同様に、光合成微生物を含む生物系は、オプトフルイディックシステムに固有の増大した表面積と短い栄養素拡散経路からも恩恵を受けるだろう。この後者のアプローチは特に太陽燃料生産に有望である。

レンズを通した光合成

おそらく、太陽燃料生産への最も直接的なルートは、光合成を利用したバイオ燃料の生産である。地球上で最大のエネルギー転換プロセスは生物圏に

生息する緑色植物と微小藻類の細胞内で起きている。化学反応物質と生成物は有機体から有機体へと変化するが、すべての光合成プロセスの中核は光子エネルギーの付加による低エネルギー炭素から高エネルギー有機物炭素への変換であり、これは植物や藻類の葉緑体とシアノバクテリアのチラコイド膜内においてサブ細胞スケールで起きている。

光合成の科学は豊かで多様であるが、この分野におけるオプトフルイディックツールの適用は利用が開始されたばかりである。細胞の長さスケールでの光伝達を目標としたオプトフルイディックシステムの開発は、①生物、特に微生物がこの必須の機能をいかに実行しているかについてのわれわれの理解を深める独特のツールセットを提供し、②生物有機体を使った太陽燃料生産への新しい道を開く可能性がある。

通常、微小藻類を使った太陽燃料生産のための生物光合成は、微小藻類の希釈した懸濁液が直接太陽光に曝される大型のオープンポンド(開放型小規模池)またはチューブ状構造を利用して行われる。しかし、これらの配置の主要な課題は、バイオマスの全密度を減らすことなくすべての有機体に対して均一に光を分配することにある。常に、オープンポンドまたは光バイオリアクタの表面近くに存在する細胞は飽和限界よりも1桁以上も大きな光強度に曝され、細胞損傷を起こし、光合成の効率に著しい影響を与える。

逆に、リアクタの内部空間を占める 有機体の細胞同士が陰になることによ り光強度を不十分にし、有機体は最適 値に満たないエネルギー入力に悩まさ れる。最適レベルの光を常時受け取る には細胞の体積分率を小さくしなくて はならない。この制約の結果、希釈し た細胞懸濁液が必要になり、工業規模



図2 エバネッセント照明において、導波路内の光は、光合成シアノバクテリアの光中心と相互作用する導波路表面のエバネッセント場を励起し、光合成を駆動する。エバネッセント場が到達しない領域は暗いままであり、流体輸送に使われる。

の大量のバイオマス生産を目指すのであれば培養設備の設置面積の拡大が必要になる。こうした設備拡大は、自立培養を維持するのに必要な熱管理、敷地選択、設備維持費など、複数の問題を同時に抱え込むことになる。

これらの大量の細胞懸濁液を利用する方式とは対照的に、オプトフルイディックアーキテクチャは光と栄養の細胞スケールでの伝達が可能である(図1)。過去1年間に、大規模なオプトフルイディック太陽燃料生産の前身として、光合成シアノバクテリアを培養するオプトフルイディックアプローチが数例登場した。これらのアプローチに共通の特徴は、構成細胞内の光合成の駆動にエバネッセント場を利用することである。

適切な光

可視光によって導波路表面に励起されたエバネッセント場は波長(約500 nm)と同程度の深さまで浸入する。この浸入深さは小さいとはいえ、光合成微生物の1群である各種タイプのシアノバクテリアの小さな寸法とほぼ同じである。さらに、シアノバクテリアは表面から数百 nm 以内の細胞壁末端周辺の膜内にそれらの光合成器官を配置させている。したがって、導波基板の表面と接触している細胞はエバネッセン

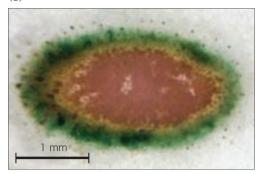
ト光場の侵入深さ内の位置に光中心を もつので、エバネッセント光場による 光合成器官の励起が可能である(図2)。

エバネッセント場の侵入深さ、光合成微生物のサイズ、微生物内光中心位置間の相乗効果を利用することによって、標的細胞スケールの光伝達方式が可能になる。この照明アプローチで構築されたリアクタは一連の並列導波路からなり、その各々が光合成細胞の表面吸着膜をもつ。栄養物の微小流体輸送と不用物の除去が十分に可能な間隔で高密度パターンに配置された場合、最適照明された細胞を含むリアクタの全体積分率は伝統的な光バイオリアクタで使用されている懸濁液方式に比べて数桁大きくなるだろう。

本年の初めに、カナダのトロント大学 (University of Toronto)のわれわれの グループと米コーネル大学 (Cornell University)の共同研究者たちは、この細胞スケール照明アプローチの実現可能性を示す最初の実証を報告した(3)。エバネッセント光駆動光合成は、全内部反射を起す臨界角よりも大きい角度でプリズム表面に円形断面のレーザビームを入射させて実証された。このセットアップは、プリズム上に楕円形エバネッセント場プロファイルを生成し、結果として得られた光場は培地内へと指数関数的に減衰してプリズム上部の狭い領域

• feature オプトフルイディクス

(a)



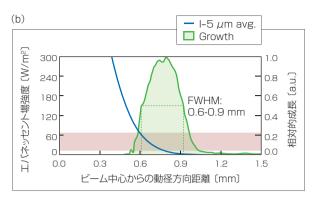


図3 明視野像(a)は エバネッセント照明で成 長させたS. elongatus を示す。グラフ(b)は、 表面と細胞幅にほぼ等 しい表面から5 μ mの位置間の平均エバネッ セント場強度に対する 成長の相関を示す。

にだけに閉じ込められた。この領域内で、野生型細胞、シネココッケス・エロンガトス(S. elongatus)は最適照射光レベル(これらの細胞の場合は12~66W/m²の範囲の細胞平均光強度)と関連する方式で優先的に成長することが明らかにされた(図3)。この方法は、エネルギー伝達を細胞スケールに閉じ込めて、コントロールする方法を提供するものであり、光合成細菌の培養に高輝度の光を送る現在の実施方式に対する代案になる。

その後、ラボスケールの光バイオリ アクタが細胞増殖と光合成生産性の初 期測定結果とともに報告された。2012 年のレーザと電子光学に関する国際会議 (CLEO)で、ピエロボン氏(Pierobon) は、平面導波路を使ったスケーラブル な光バイオリアクタに向けた研究を報 告した(4)。彼は、さまざまな基板と光結 合技術を使って、エバネッセント場強 度と相関する平面導波路上のシアノバク テリア生物膜の発展を明らかにした。彼 の研究では、野生型細胞、S. elongatus を4つの高強度発光ダイオード(LED) で照明された平面ポリメタクリル酸メ チル(PMMA)導波路上で成長させた。 このLEDはピーク発光波長が660nm であり、クロロフィルa(細胞内の主要 な光捕獲色素)による吸収に適合する。 S. elongatusの希釈懸濁液を導波路表 面に導入し、それらの細胞を光学的に

絶縁されたエンクロージャ内で3日間 35 に保った。正規化細胞表面含量 は明視野顕微鏡検査データを解析する ことによって1 m^2 あたり 1×10^9 細胞 のオーダーであることが見出された。

最近、ユング氏(Jung)らはスラブ導 波路上のシアノバクテリアのエバネッセ ント成長を報告した⁽⁵⁾。その研究にお いて、彼女は、エバネッセント照明を 使った細胞培養の光子利用効率が直接 照明培養のそれに匹敵することを示し た。培養菌を、導波路の役目を果たす ガラスカバースリップ上で成長させた。 660nmのレーザダイオードからの光を カバーガラスに結合させ、カバースリ ップから出射するビームの光強度を測 定した。細胞を増殖させながら、数日 間のコースで出力の変化を監視して、 膜によって吸収されたエネルギーをカ バースリップ表面の時系列顕微鏡像か ら決定し、細胞数と相関させた。ユン グ氏は、スラブ導波路で達成された細 胞密度を評価することによって並列ス ラブ導波路ベースのフォトバイオリアク タにおける体積生産性は従来の光バイ オリアクタ設計に比べて12倍高いと見 積もった。

バイオ燃料生産へのオプトフルイデ ィクスの応用は、動作エネルギー密度 に対する特別な利点に加えて、熱制御、 位置選択、閉じ込めなどの付随的な利 点を持つ新しい関心領域である。エネ ルギー生産微生物の光合成膜で必要に なる集光に近接場光学を使うことによ って、小規模なフットプリント(それに より簡素化された熱制御)を持つ設備 での有機体の大量培養のための新しい アーキテクチャが可能になる。このタ イプのオプトフルイディックアーキテク チャと、直接周辺培地内に燃料を発生 させるように設計された遺伝子工学さ れた有機体の進歩との組み合わせによ って、さほど遠くない将来に大規模燃 料生産が可能になるだろう。

参考文献

- (1) D. Psaltis, S.R. Quake, and C. Yang, Nature, 442, 7101, 381-386(July 2006).
- $\textbf{(2)} \ D. \ Erickson, \ D. \ Sinton, \ and \ D. \ Psaltis, \ Nature \ Photon., \ 5, \ 10, \ 583-590 (September \ 2011) \ .$
- (3) M.D. Ooms et al., Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP, 14, 14, 4817-4823(April 2012).
- (4) S. Pierobon et al., "A Scalable Evanescent Light-based Photobioreactor OSA Technical Digest(online)," in CLEO: Science and Innovations, paper CW1G.4, San Jose, CA(2012).
- (5) E.E. Jung et al., "Slab waveguide photobioreactors for microalgae based biofuel production," accepted paper in Lab On A Chip(2012)

著者紹介

マシュー・D.・オームス(Matthew D. Ooms)はカナダのトロント大学(University of Toronto)シントン研究所(Sinton Lab)の博士課程学生、デイビッド・シントン(David Sinton)は機械産業工学部の準教授および持続可能エネルギーセンターのディレクタ。sinton@mie.utoronto.ca; http://sintonlab.mie.utoronto.ca、http://cse.utoronto.ca。