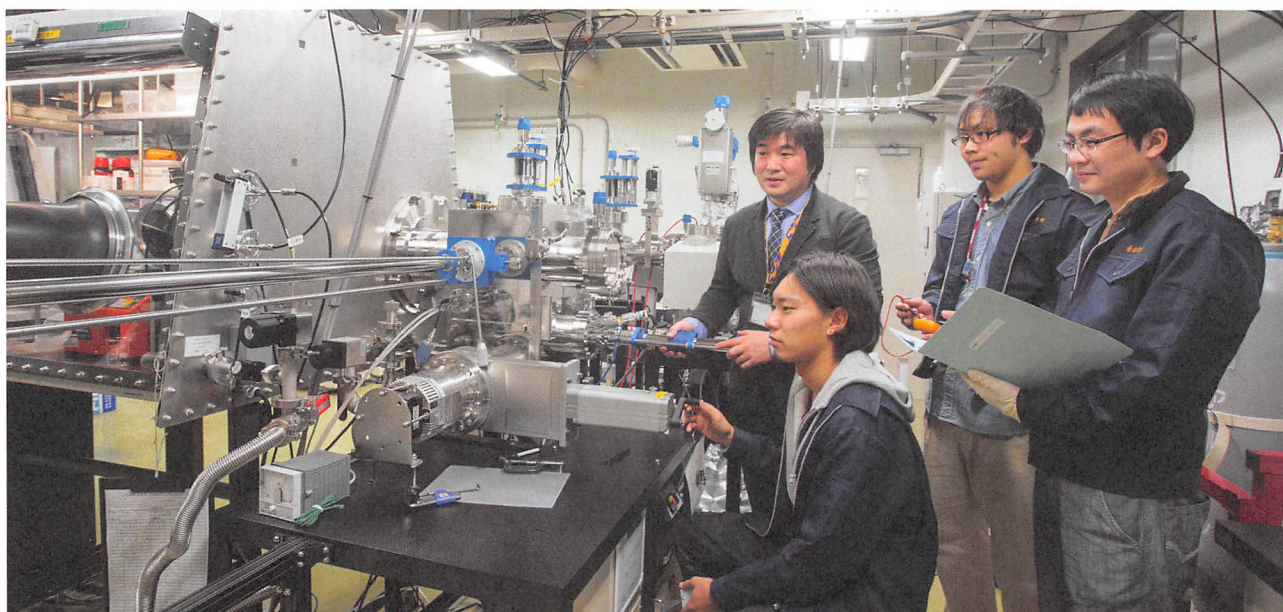


Division of Organic Solar Cells

有機薄膜太陽電池部門

□ 専任 當摩 哲也 准教授

ナノロッドシート新構造による 高効率有機太陽電池の開発



太陽電池は、シリコン系・化合物系・有機系に大別されます。本部門が取り組んでいる有機薄膜太陽電池は、色素や炭素材料、ポリマーといった安価な原料を使い、塗布による製造プロセスも可能なため大幅な低価格化が見込まれます。しかも、着色性やフレキシブル性、軽量という特徴を付与することもできます。

現状では、市場シェアは結晶シリコンが圧倒的であり、有機太陽電池の実用化には、光電変換効率や耐久性、量産化に適したプロセスなどがネックとなっています。それでも最近、変換効率10%を超える有機系も登場し、ポストシリコンとして有機薄膜太陽電池の将来が期待されています。

本部門では、2012年7月、専任の當摩哲也准教授が、従来のバルクヘテロ構造を超える高効率な新規デバイスを開発しました。

バルクヘテロの問題克服をモチベーションに

近年、p型半導体とn型半導体を混合し、接合界面の増大によって効率的に電荷分離を起こすバルクヘテロ構造が開発され、有機薄膜太陽電池の変換効率が向上されました。私たちが用いている低分子蒸着法では、p型半導体の亜鉛フタロシアニン(ZnPc)とn型半導体のフラーレン(C60)を真空中で同時に加熱昇華させ、基板に混合膜を作る共蒸着でバルクヘテロ層を作ることができます。

しかし、この構造も万能ではなく、例えば、結晶性の高いp型半導体の α -6T^{*1}を用いると、分子の凝集が生じて混合膜の性能を低下させるなど、適用できない材料もあります。しかも、バルクヘテロ層の作製は材料の凝集・結晶性に依存しているため、

制御が困難です。

そこで私たちは、分子を立たせたり寝かせたりする配向制御により光を良く吸収し、高い結晶性によって電気が効率よく流れ、p-n接合界面の大きい理想的なデバイスを探求してきました。

分子の配向制御については、Pc分子と相互作用のあるヨウ化銅(CuI)を無機バッファ層^{*2}に用いることで分子を寝かせた状態で成長させられます。結晶性の向上は、超平滑な基板に有機半導体をゆっくり蒸着することで可能になります。

これまでに、超平滑に加工したITO透明電極基板にCuIの連続膜を作り、その上に有機バルクヘテロ層を形成することで高性能化を図ってきました。しかし、この方法も、混合に手間とコストがかかるバルクヘテロ構造を用いていること、並びに大面積

Division of Organic Solar Cells

図1 斜め蒸着法を用いたナノロッドによる作製プロセス

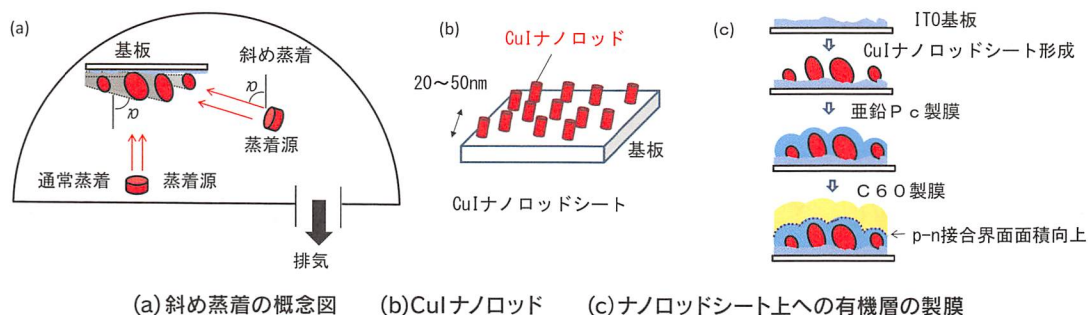
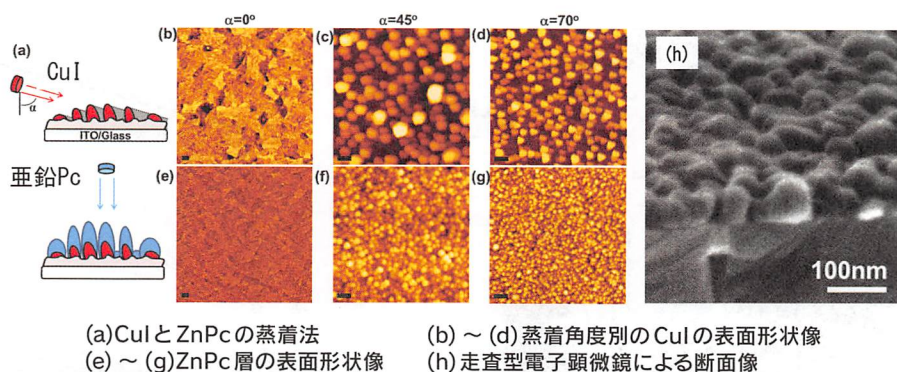


図2 CuI ナノロッドシートの表面形状像と ZnPc 層の表面形状像と断面像



化・低コスト化が困難な超平滑基板を使っていることにより、実用化に向けては問題がありました。

斜め蒸着で形成した、ナノロッドシートで新構造

私たちは今回、CuIでナノロッド^{※3}シートを形成し、その上にp型とn型の半導体を単純積層することで接合界面が山谷構造をとる高性能な有機薄膜太陽電池の開発に成功しました。

ナノロッドの加工には、浅い角度から蒸着して製膜する斜め蒸着の手法を用いました(図1)。まず、基板に蒸着材料が付着すると核を作ります。通常の蒸着は、核に蒸着材料が均一に供給されて平坦な膜ができます。斜め蒸着では、核の影となる部分に蒸着材料が供給されないため、成長は異方的^{※4}に進み、ロッド状になります。こうして形成されたCuIのナノロッドシート上にZnPcを蒸着すると、シートの形状に沿ってZnPc層もナノロッド状になることが、表面形状像で確認できました。また、電子線顕微鏡の断面観察により、ナノロッドにZnPcをコーティングしたような山谷の形状になることも明らかになりました(図2)。さらに、透過型電子顕微

鏡で観察したところ、CuIは、表面の粗いITO基板の突起部分に付着して核を作り、そこから結晶性の高いロッドに成長し、その上に成長するZnPc層も結晶性が高くなるを見出しました。すなわち、超平滑な表面よりも粗い表面のITO基板のほうが、結晶性に優れたナノロッドを形成できるということです。

高効率・大面積化・低コストの有機太陽電池の実用化をめざして

このようにして得られた新規デバイスは、

- ①斜め蒸着によってCuIナノロッドの結晶性が高まり、その上の有機層の結晶性も上がる
- ②ナノロッド上のZnPcは、分子が寝た状態で積層されるため、光吸収度が高まる
- ③有機層は、ナノロッドシートの山谷構造をなぞって山谷となり、p-n界面の面積が増大するという高性能を示しました。

その結果、このデバイスの変換効率は4.1%に達し、単純積層型太陽電池1.4%の3倍、従来のバルクヘテロ構造3.6%も超えました。また、バルクヘテロ構造に適用できないp型

半導体でも、ナノロッドシートの導入によって性能が向上されることを確認しました。この技術は、バルクヘテロ構造に代わって有機薄膜太陽電池の効率化を可能にし、かつ材料を選ばず、大面積化と安価を図れる画期的な技術といえます。

今後は、低コスト化に向けて塗布による製膜が重要であり、斜め蒸着法によるナノロッドシートを、塗布による低分子または高分子製膜に応用できるように研究を進めます。企業などとの共同研究も推進し、高性能・大面積・低コストな有機太陽電池の早期実用化をめざします。



※1 α -6T…光電流を大幅に増大させることで知られるアルファセキチオフェン。

※2 無機バッファ層…有機薄膜太陽電池において、電荷の捕集や整流性向上のために用いられる無機半導体層。

※3 ナノロッド…ナノメートルサイズの棒状粒子。

※4 異方性…物質の物理的性質が方向によって異なること。

Division of Renewable Energy

自然エネルギー活用部門

□専任 河野孝昭 助教

市街地に導入する小形風車の開発と風条件の研究



自然エネルギー活用部門では、地産地消型の自然エネルギー活用技術システムの開発に取り組んでいます。都市に適應する分散型電源としての風力や水流を利用した高効率・低騒音な発電システムと、その発電出力変動を補完する燃焼システムを開発し、次世代のスマートシティ構築の一翼を担うことを目指しています。

市街地の風に関する研究は、建築物の耐風設計や、地表近傍の風・熱環境の研究分野で精力的に行われてきていますが、小形風車を設置する観点からの研究はほとんど行われていないのが現状です。一般的に、市街地上空の風条件は、平坦地上空の風条件に比べて、時間的・空間的変動が大きいこと知られていますが、どの様な場所で、どの程度の風の増速や乱れが生じるかといった定性的且つ定量的な情報は、非常に限られて

います。これらの情報を蓄積し、風車やその導入方法の開発に反映させることにより、更なる高効率化と低騒音化及び高い安全性の確保を実現することが可能となります。

今回は、河野孝昭助教の「市街地に導入する小形風車の開発と風条件の研究」を紹介します。

市街地に導入する小形風車の開発

可変ピッチ式直線翼垂直軸風車やフェンス上部設置型のクロスフロー風車の開発は、本部門の主要な研究課題の一つです。

可変ピッチ式直線翼垂直軸風車に関しては、時間的な変動が大きい市街地の風速に対応できるように、翼の形状や枚数、取り付け方法、風に対する角度の制御方法などの検討を風洞実験や数値流体力学 (CFD)^{注1}

解析を利用して行っています。

クロスフロー風車に関しては、道路用フェンスに設置して誘導灯などの小型電源として機能させる研究を行っています。これは、フェンス上部に発生する増速域を利用する発電です。垂直軸のクロスフロー風車は本来、風向に対する依存性がなく、低周速から発電が可能ですが、フェンスに平行に設置する場合、出力は風向の影響を受けるため、これをいかに制御するかを検討しています。

更に、風車の市街地への導入条件として、低騒音化は不可欠であり、騒音発生や伝搬のメカニズムについて風洞実験とCFD解析を実施して解明に取り組んでいます。

小形風車導入のための建築物屋上の風条件の精査

小形風車の設計は現在、IEC規格

Division of Renewable Energy

に準拠しています。しかし、IEC規格において耐久性の評価に用いられる風速や乱れ強度などの風条件は、建築物屋上のような複雑な乱流場を対象としていません。近年、小形風車の建築物屋上への導入事例が増えてきていて、建築物屋上に設置する小形風車の規格や最適配置に関するガイドラインの策定が望まれています。建築物屋上の風条件に関する情報は非常に限られています。

そこで、規格やガイドラインを策定するための知見の蓄積を目的に、幅40 m・奥行40 m・高さ80 mの正方形柱形状建築物周りの流れ場についてCFD解析し、その屋上の風条件を調べました。風向は、風上側の壁が建築物に正対している場合（風向角 0° ）、 22.5° 傾いている場合（風向角 22.5° ）、 45° 傾いている場合（風向角 45° ）を対象としました。

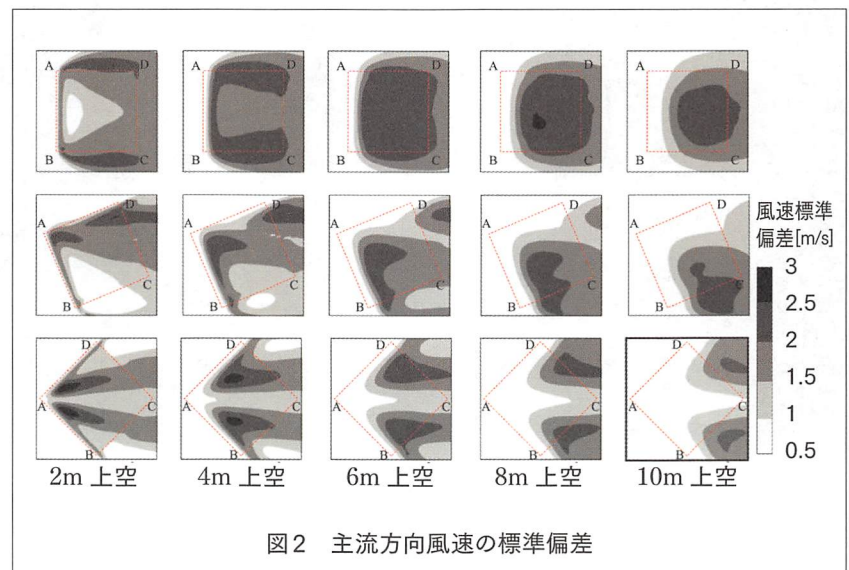
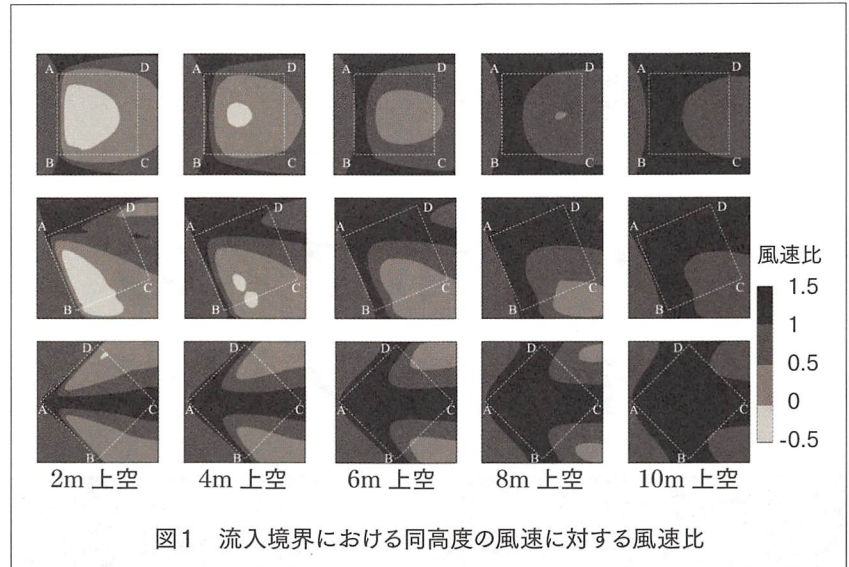
その結果、次のようなことが明らかになりました。

- 1) 建築物の影響を受けていない流入境界における同高度の風速よりも増速する領域（図1の最も濃い領域、主流風向は左から右）の出現の仕方は各風向角の場合で大きく異なるが、接近風が直接衝突する風上側縁辺近傍の上空では比較的低い高度から上空にかけて増速するのは共通している。
- 2) 風の乱れの強さの指標である主流風速標準偏差は、強風域（図1の最も濃い領域）では小さい。一方、主流風速標準偏差の大きな値の各高度における出現の仕方は、風向角 0° の場合と風向角 45° の場合で大きく異なる。

今後、屋上風条件に対して、建築物の縦横高さの比や屋上形状、接近風の性状、周辺建築物がどのような影響を及ぼすのかを検討していきます。

風車後流特性を再現する解析法の開発

風力発電機の風車を近接して複数台設置する場合、風上側風車の後流の減衰した風速により、風下側風車は、発電量が大幅に低下したり、極端にアンバランスな分布の風荷重がかかって寿命が短くなることがあります。こうしたリスクを回避した風車配



置を行うには、風車後流の風速分布を把握する手法が必要です。これまで、水平軸風車を対象に、風車ロータの形状を円盤で近似したアクチュエータ・ディスク (AD) モデルや、ブレードの形状を線で近似したアクチュエータ・ライン (AL) モデルを用いたCFD解析により、風車後流風速の再現を試みる研究がなされていますが、それらは風車タワーの影響を考慮していません。

そこで私たちは、水平軸風車を対象に、ADモデルを用いたLES解析を行い、風車タワーが風車後流風速に与える影響を検討したところ、タワーが後流風速分布に著しい非対称性を生じさせていることが明らかになりました。一方、ADモデルでは風の

乱れ強度が極めて低く計算されることを確認したため、今後はALモデルを計算コードに組み込んで、乱流特性の再現性を改善していきます。さらに、ALモデルを垂直軸風車の解析用に拡張し、風洞実験との比較によって適用性の検証やモデル改良を図ります。

以上の研究を通し、市街地に導入される小形風力発電の高性能化と信頼性・安全性の向上に貢献することを目指しています。

注記

①数値流体力学

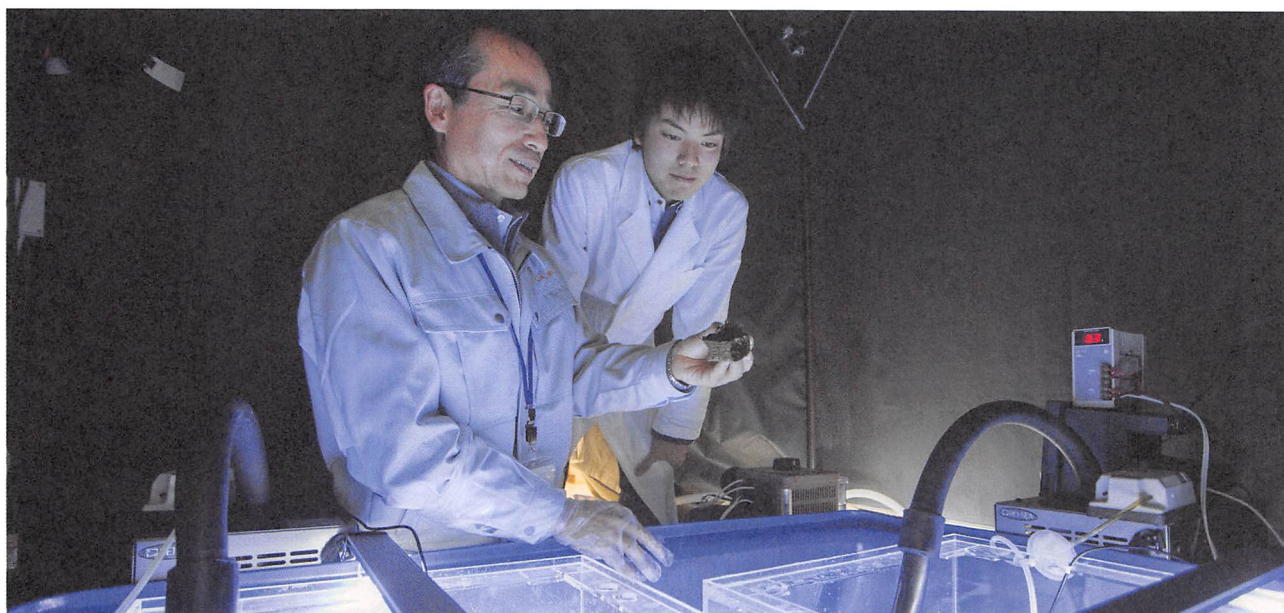
空気や水など流体の運動方程式 (Navier-Stokes方程式やEuler方程式など) をコンピュータで計算し、流れを観察する数値解析法。

Division of Carbon Circulation Technology

炭素循環技術部門

□専任 三木 理 教授

海洋バイオマスの 高効率生産プロセスの開発



炭素循環技術部門では、石炭エネルギー利用における環境負荷低減をめざし、新規の炭素循環技術の開発に取り組んでいます。

現在、石炭は世界の発電燃料の約40%を占め、国際エネルギー機関は、2050年に石炭火力発電と原子力発電が世界の発電エネルギー源の中心となると予測しています。日本では国家戦略「エネルギー基本計画」の見直しが進められるなか、価格と供給の安定性に優れた石炭への需要が高まると考えられます。しかし、石炭の活用拡大には、二酸化炭素と燃焼石炭灰の大量発生という問題が伴うため、二酸化炭素の回収・貯留、石炭灰活用の技術開発がより重要となります。

さらに、100℃以下の膨大な低温排熱の有効利用はまだ進んでおらず、排熱の有効利用推進による省エネルギー技術開発が重要です。

本部門では、二酸化炭素の大量発生源の火力発電と鉄鋼製造をターゲットに、①高効率なCO₂分離回収プロセスとして、新規吸着剤を用いた温度スイング式二酸化炭素吸着装置の開発、②CO₂海洋貯留技術として、光合成利用の藻類バイオリクターの開発、③藻類バイオマスの生産向上を図るための育成技術の開発、④発電所・工場から発生する膨大な未利用の低温排熱を有効活用するための蓄熱・熱輸送、熱利用機器の拡充の研究を推進しています。

今回は、本部門専任の三木理教授の「海洋バイオマスの高効率生産プロセスの開発」を紹介します。

海洋バイオマスエネルギーの研究が活発化

バイオマスの種類は多岐にわたり、下水汚泥などの廃棄物系バイオマス、

間伐材や稲わらなどの未利用バイオマス、穀物などの資源作物に大別されます。こうしたバイオマスの中で、近年、海藻に代表される海洋バイオマスからエネルギーを回収する研究に注目が集まっています。1970年代のオイルショック当時に、石油の代替燃料として海洋バイオマスエネルギーが俄かに脚光を浴び、例えば、米国では、大型藻類であるジャイアントケルプの海洋牧場が計画されました。しかしながら、適量の栄養塩を安価に供給する方法やケルプを魚礁などに固定する技術とがネックとなって、計画は頓挫しています。

近年、再度藻類がバイオマスエネルギーとして着目されている理由としては、単位面積当たりの生産量が大きいの、穀物系バイオマスのように食糧との競合を来たさない、二酸化炭素固定や水域浄化などの環境保全にも

Division of Carbon Circulation Technology

有用である、などがあげられます。また、日本は、領海と排他的経済水域と合わせた面積が世界第6位であり、その広大な海域を藻類の生産に利用できます。実際、大型藻類からのバイオエタノール回収や微細藻類からバイオディーゼルを得る研究が活発に行われており、その実用化には生産コストの低下が課題となっています。

こうしたことを背景に、私たちの研究室では、海産性藻類として大型海藻、および微細藻類を対象に、効率的な生産プロセスの開発に取り組んでいます。

海洋バイオマス生産 高効率化の視点

コンブやホンダワラなどの藻場の衰退、いわゆる磯焼けは、さまざまな要因が指摘されていますが、窒素やリンなどの栄養塩の不足もその要因のひとつであるといわれています。また、森林腐植土由来のフルボ酸は、微量栄養塩である鉄のキレートとして山から川を通じて海へ鉄を運んでおり、山林部からの腐植土の減少が沿岸部で

の鉄不足につながり、磯焼けを招いているという説もあります。また、近年多発しているノリの色落ちについても、原因のひとつとして、窒素やリンなどの栄養塩の低下がありますが、微量栄養源である鉄の欠乏も色落ちも招くことが明らかにされています。

こうした知見から、「海洋バイオマス生産の高効率化」についても、適正な栄養塩の制御が欠かせないと考えています。栄養塩の安価な供給方法については、排水中の窒素やリン、および、副産物（石炭灰、鉄鋼スラグなど）に含まれる鉄などの微量栄養源の活用が考えられます。しかし、窒素やリンと比較し、「海洋バイオマス生産の高効率化」への鉄の影響については知見がまだ十分ではないため、基礎的な検討から副産物の活用方法まで幅広く研究を進めています（図①）。

さらに、「海洋バイオマス生産の高効率化」には、栄養塩ばかりでなく、光条件、CO₂濃度、水温、付着基質など、さまざまな環境条件を制御する必要があります（図②）。また、海洋バイオマスは、室内培養ではなく最終的

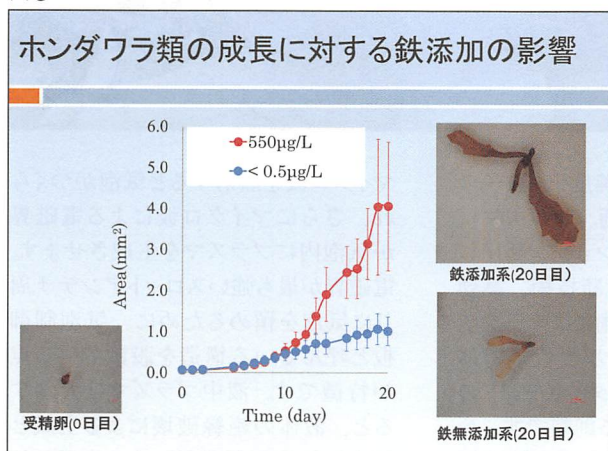
には屋外の培養を想定する必要があるため、バクテリアなどの汚染に対する海洋バイオマスの耐性も非常に重要な要素です。これらの生産効率化に必要な条件は、対象とする海洋バイオマスによっても大きく異なってきます。

「微細藻類」に関しては、バイオディーゼルの原料となる油脂を多く生産するとともに、開放系の条件でも、安定して優先的に成長できる海産性の種の特定を進めています。

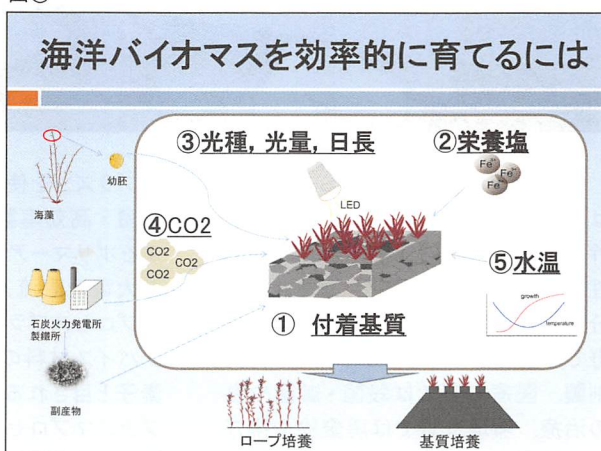
また、「海産性大型藻類」に関しては、日本で数多くの種が存在するとともに、数mにまで大きく成長し二酸化炭素固定量の高いホンダワラ類を対象とし研究を進めています。ホンダワラ類は、磯焼け等の環境再生の視点からも重要な種であると考えています。現在、ホンダワラ類の生育促進に適した栄養塩の供給量、LED光源の光量や波長、付着基質の選定などを検討しています（図③）。

以上、環境系・機械系・化学系・土木系の異分野融合と産学連携のもと、「地産地消」の観点を重視し、本研究を進めています。

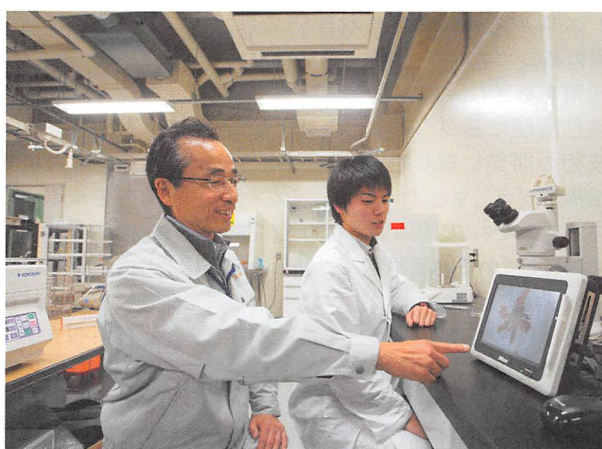
図①



図②



図③

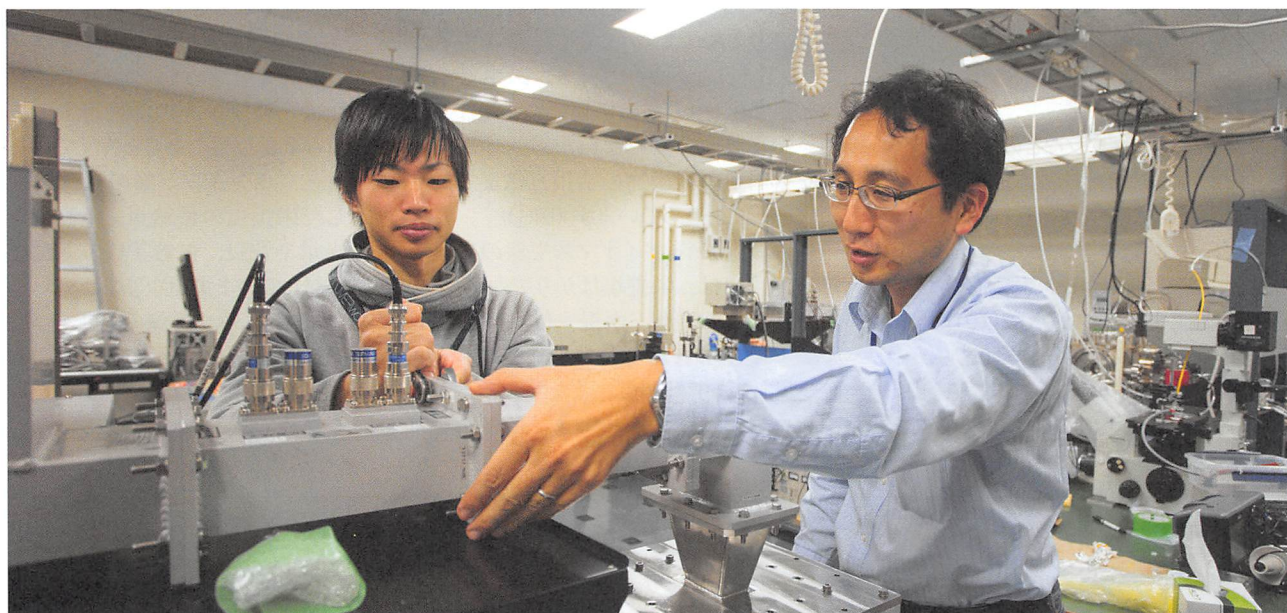


Division of Energy and Environmental Materials

エネルギー・環境材料部門

□専任 石島 達夫 准教授

重相構造プラズマを用いた 革新的基盤技術の創出に取り組む



物質の第四態といわれるプラズマは、現代社会を支え、発展に導く基幹技術です。微細加工分野では異方性エッチングや薄膜堆積、エネルギー分野では太陽電池素子、素材合成分野では機能性ナノ粒子などの新材料の創製、医療分野では殺菌・滅菌や傷の治療、環境分野では廃棄物や排ガスの処理など、さまざまな分野で研究が進められています。

エネルギー・環境材料部門では、質の高いエネルギーである電気の高度利用をめざし、重相構造プラズマの物性解明に基づく革新的基盤・基幹技術の開発に取り組んでいます。重相構造プラズマとは、固体・液体・気体・プラズマの四相が時間的・空間的に混在している物質構造で、新しい概念です。

本部門の主な研究テーマは、本学独自の技術である変調型超高密度高

温プラズマを使った高純度ナノ粒子の大量・高効率製造技術、プラズマによるポリマーアブレーションを利用した大電流直流アーク遮断技術、高効率プロセスプラズマ技術による高機能デバイス材料の創製、次世代半導体素子と目される単結晶ダイヤモンドのプラズマプロセスによる創製です。今回は、本部門専任の石島達夫准教授の研究を紹介します。

マイクロ波励起液中気泡プラズマを有機物処理に応用

私が主に取り組んでいるのは、マイクロ波励起液中気泡プラズマです。その生成装置とプラズマ生成の様子を図①に示します。液体容器と容器内に突出した導波管で構成され、導波管先端には複数のスロットアンテナと石英板が設置されています。導波管を通してスロットとスロットの間に

マイクロ波を照射すると気泡がつくられ、さらにマイクロ波による電磁界が気泡内にプラズマを生成させます。電磁界が最も強いスロットアンテナ周りに気泡を留めるために、気泡制御板と呼んでいる構造を設けている点が特徴です。液中プラズマは大別すると、液体の絶縁破壊による生成と液中の気泡絶縁破壊による生成とがあります。電界強度を見ると、水は $\sim 10^6$ V/cmであるのに対し、空気は $\sim 10^4$ V/cm。前者の場合は、高電圧によって電極物質がスパッタされて溶出し、溶質の性質に影響を及ぼすリスクがあります。そこで、液中プラズマの多くは、気泡の中にプラズマを生成させます。ところが、従来の加熱法では、気泡の生成促進と電極ダメージ抑制のため、より低い電圧で電流を大量に流す必要があり、液体の導電率を高める工夫が必要でした。

Division of Energy and Environmental Materials

一方、マイクロ波を使うプロセスでは、マイクロ波で極性分子を加熱して気泡をつくるため、液体の電気伝導度に依存しません。また、従来の針電極に比べて、プラズマ発生部であるスロットアンテナの劣化も抑えることができます。

こうした液中気泡プラズマの開発研究は、化学反応性に富むプラズマを用いた溶液中の化学反応を促進させる新規反応プロセスを創出する試みで、最初は水中の有機物分解処理から始めました。一例としてメチレンブルーの分解脱色の様子を図②に示します。0.5kW程度のマイクロ波入射電力によって8Lのメチレンブルーが約30分の液中気泡プラズマで、ほぼ脱色されることが分かります。

非平衡プラズマで生成される活性種の中でもOHラジカルはオゾン以上に酸化力が強く、難分解性の有機物質の分解に有効ですが、短寿命であることがネックとなっています。そこで、ラジカル生成と水処理の同時の進行という観点から液中プラズマが有望視されてきました。

実際、私たちのマイクロ波励起液中気泡プラズマの分解能について、難分解性有機物質に対する実験を行ったところ、マイクロ波利用の減圧プラズマは、外部ガス導入による大気圧プラズマよりも分解速度が速いことが明らかになりました。また、気泡制御板の導入によってプラズマを安定化させ、ならびにスロットアンテナ数を増やして反応領域を拡大することにより、有機物質処理の高効率化が図れることを確認しました。

レジスト膜の除去技術や減圧流水処理法の開発

液中気泡プラズマの新たな応用として、半導体製造プロセスにおけるレジスト膜を、薬液を用いることなく超純水中で除去する新たな技術に取り組んでいます。基板のエッチング加工では、目的部位以外を保護するためにフォトリソ膜を形成します。従来、この膜の除去には、硫酸に過酸化水素を加えた溶剤が大量に用いられています。新たに開発した液中気泡プラズマ法は、超純水を使用し、化学的に活性な反応種は寿命が短いため環境への負荷を小さくすることが可能です。さらに、イオン注入工程

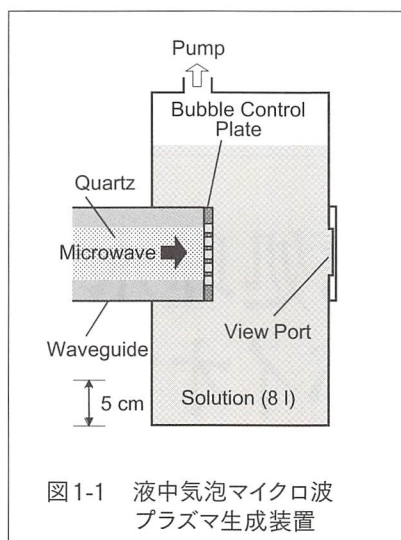


図1-1 液中気泡マイクロ波プラズマ生成装置



図1-2 液中気泡マイクロ波プラズマの発光の様子

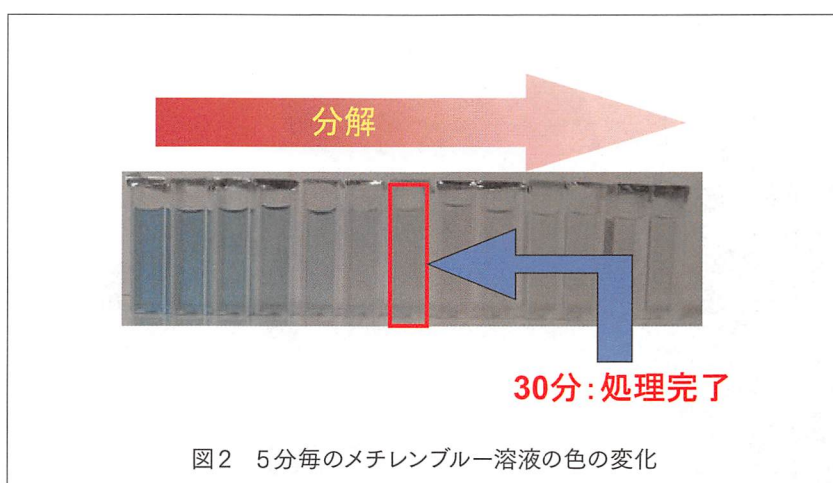


図2 5分毎のメチレンブルー溶液の色の変化

により変質して硬化したレジスト膜に対しても高速除去が可能であるというメリットを有しています。従来のプラズマ生成法と異なり液中でも平面的に広がるため、基板などの平面構造物を液中で処理する新規プロセスを可能にします。

また、液中プラズマを用いた減圧流水処理法も開発しています。液体処理容器に流入された液体は、水流ポンプによって吸引され、ポンプから排出された液体がアスピレータを駆動し、容器内を減圧することで、減圧環境により液中プラズマの生成が効率的に進みます。従来のバッチ型処理法では連続処理が困難であり、減圧のためには高価な真空ポンプを必要としますが、考案した処理法では、連続的かつ効率的な流水処理を可能にします。

プラズマの新たな応用領域

非平衡プラズマは、外傷治療や癌細胞の増殖抑制などの効果があると

の研究報告があり、画期的な医療技術としての期待が高く、研究開発が盛んに行われています。日本においても、平成24年から、先進的医療技術の開発をめざし文部科学省の新学術領域「プラズマ医療科学」が採択されるなどプラズマと生体・バイオへの研究開発に注目が集まっています。生体とプラズマとの反応は液体中に存在する細胞組織との固体表面との相互作用であり、重相構造プラズマ環境にあると考えられます。

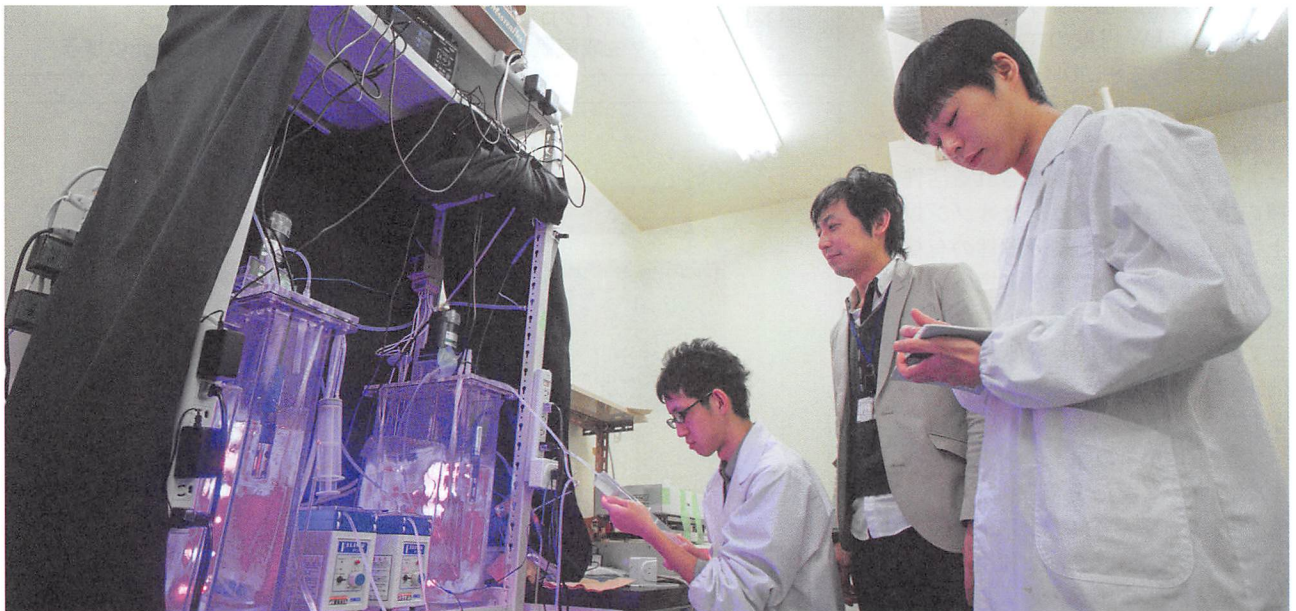
したがって、プラズマと生体との相互作用を解明する研究は、相が異なる状態を複合的かつ有機的に結びつける新しい学際分野であり異分野間の連携が欠かせません。センターの特徴を生かした学内連携に加えて、産学連携体制を整え共同体制で推進していきます。

Division of Unutilized Biomass Energy

バイオマス利用部門

□専任 本多 了 助教

微細藻類と下水処理水を活用した エネルギー・バイオマス生産プロセス



バイオマス利用部門では、未利用バイオマスの利用技術の開発、ならびに、バイオマス使用拡大に伴う環境負荷を軽減するシステムの最適化に基づいたクリーンエネルギーの創出に取り組んでいます。

主たる研究課題は以下のとおりです。

- (1) 堆肥化・消化・光合成によるエネルギー・資源回収技術として、下水処理場集約型バイオマス利用技術、発酵熱の原位置直接利用技術、下水処理水を利用した藻類バイオマス利用エネルギー生産プロセスの開発
- (2) 環境負荷低減型バイオマス燃焼技術として、リスク評価の研究、低コストな排出源対策技術の開発
- (3) バイオエタノール製造技術として、イオン液体・発酵による資源抽出技術の開発

今回は本多了助教の「下水処理水

を利用した地球温暖化緩和型エネルギー・バイオマス生産プロセスの開発」を紹介します。

下水処理水を利用した 藻類バイオマス・エネルギー生産

都市の未利用バイオマスの一つである下水の処理は、有機物や窒素・リンなどの汚濁物質の除去が目的ですが、同時に、除去された有機物（＝余剰汚泥）は廃棄物として排出・処理されます。現在の下水処理システムは、廃棄物となる余剰汚泥を少なくするために多くの曝気エネルギーを投入し、有機物をできるだけ酸化して二酸化炭素にすることに主眼が置かれています。また、閉鎖性水域の富栄養化の原因となる窒素の除去にも多くのエネルギーが投入されています。

私は、下水の再資源化という観点

から、下水処理システムを汚濁物質の除去にとどまらず、バイオマス・エネルギー生産システムとして最適化ができないかと考えています。その方法の一つが、下水処理水中の窒素・リン成分のバイオマス資源化です。まず、有機物除去過程で有機物の酸化による二酸化炭素発生を抑え、下水中の有機物をできるだけ余剰汚泥として回収します。その後、有機物を除去した後に残る窒素・リンは、微細藻類の生産に利用します。微細藻類は二酸化炭素を固定して増殖するので、窒素・リンから有機物を含むバイオマス資源を生産することができます。このようにして下水からバイオマス（＝余剰汚泥と藻類バイオマス）をできるだけ多く生産し、メタン発酵によるバイオガス回収や炭化処理による固形燃料化などによって、エネルギーとして利用することを想定しています。

Division of Unutilized Biomass Energy

メンブレン フォトバイオリアクターの考案

近年、微細藻類を利用したバイオ燃料の生産に関する研究が盛んに行われています。しかし、藻油 (= 藻類から生産されるバイオディーゼルなどの燃料) は、まだまだ化石燃料由来のガソリンや軽油に比べてはるかに高価であり、実用化・普及に向けては生産コストの大幅な低減が課題となっています。コスト要素の一つとして、培養に要する二酸化炭素や窒素・リンの栄養塩の供給があります。これらを下水処理水から利用できるようにすることで、より低コストな栄養塩供給と資源循環利用を目指しています。しかし、下水処理水中の窒素・リンなどの栄養塩は、藻類培養基質としては低濃度です。より高い藻類生産速度を得るには、なるべく多量の窒素・リンを供給することが重要になります。下水処理水は窒素・リン濃度が低いため、その分供給量を増やす必要がありますが、そのまま供給速度を上げるだけでは、培養槽内の微細藻類も一緒に槽外に流出をしてしまいます (図1左)。微細藻類は細胞分裂によって倍々ゲームで増えていきますから、培養槽内の微細藻類濃度が小さくなると生産速度も小さくなりません。そこで、処理水供給速度の増加と微細藻類の高濃度保持を両立させるために考案したのがメンブレンフォトバイオリアクター (浸漬膜付加型光照射生物反応槽) です (図1右)。この培養槽には、家庭の浄水器にも利用されている精密ろ過 (MF) 膜という孔径約 $0.2 \mu\text{m}$ の細孔をもつ膜が槽内に浸漬されています。微細藻類の大きさはシアノバクテリアで $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度ですから、MF膜を通過することはできません。そのため、この膜を通すことで主に水と溶存物質だけを培養槽内から取り出すことができます。これによって、下水処理水の供給流量と、培養槽内の藻類濃度を別々に制御することができ、供給速度増加と藻類濃度保持のジレンマから脱することができるようになりました。

現在までの結果では、この浸漬膜ろ過の導入が効果的であることは分かりましたが、藻類生産速度は既存の高濃度栄養塩培地を用いた研究と

図1 従来の培養槽と浸漬膜を利用した培養槽のちがいを

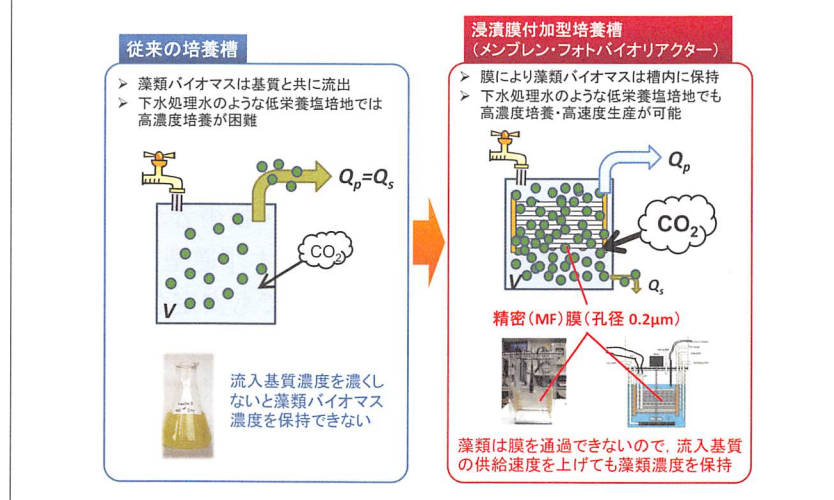
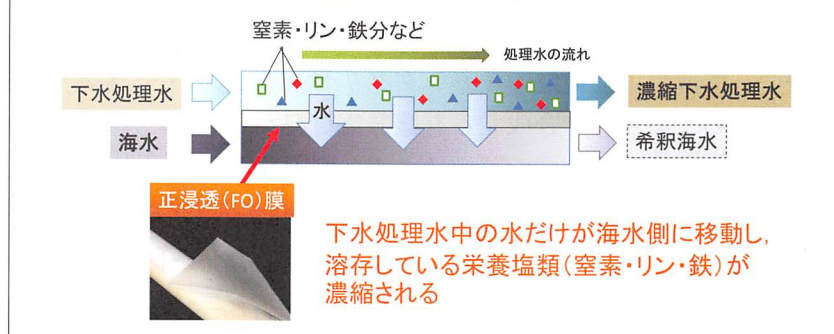


図2 正浸透 (FO) 膜による栄養塩濃縮プロセスの原理



比べてまだ及びません。今後、さらに下水処理水の供給速度を増やして、生産速度の向上を目指していくつもりです。

正浸透膜プロセスへの取り組み

正浸透 (FO) 膜プロセスは、塩濃度の異なる2つの溶液の間に生じる浸透圧を駆動力として利用するプロセスで、浸透圧発電や省エネルギー型海水淡水化への利用などで、最近注目を浴びているプロセスです。先ほど、下水処理水の窒素・リン濃度は低いとお話しましたが、このFO膜プロセスによって、下水処理水中の窒素・リンを低エネルギーで濃縮するプロセスの開発についても取り組み始めました。

FO膜は、メンブレン・フォトバイオリアクターに利用しているMF膜よりもさらに孔径が小さい膜で、主に水だけを通し、溶存物質やイオンをほとんど通しません。下水処理水と海水をFO膜で隔てて循環させることで、下水処理水の水 (H_2O) のみが海

水側へと移動し、窒素・リンイオンは下水処理水側に残ります (図2)。この水 (H_2O) の移動は浸透圧によって外部から圧力を加えなくても起こりますので、エネルギー消費の少ない濃縮が可能となります。ちょうどこの研究の構想を練っていたときに、JSPS「組織的な若手研究者等海外派遣プログラム」で在外研究の機会をいただき、FO膜や逆浸透 (RO) 膜の研究の第一人者の一人、Eric M.V. Hoek教授 (米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校) に受け入れの打診をしました。彼とは面識がなかったにも関わらず快く受け入れていただき、彼の研究室に2012年の8月～10月の2か月間滞在し、研究を本格的に開始することができました。Hoek先生からもメンブレン・フォトバイオリアクターの研究に興味を示していただき、共同研究を模索している段階です。

今後も、バイオマスを利用した新しいエネルギー生産技術の開発を目指して研究を続けていきたいと考えています。