



特集

水生植物による水質浄化とバイオマスの有効利用

大阪大学大学院 工学研究科 環境・エネルギー工学専攻
教授 池 道彦

●はじめに

私は環境工学を専門にしており、環境をどのようにきれいにしていくか、保全していくかという仕事をしていますが、バイオマスの関係では水生植物を使って水を浄化する試みに取り組んでいます。水の浄化に伴って植物が成長しますが、実際にはそのバイオマスが廃棄物になってデメリットになることがあります。だから、それをメリットに変えないと植物を使った水質浄化が成就しないことにもなります。本日は、水質浄化に使った植物バイオマスを利用しようという試みを紹介したいと思います。それを進めると、バイオマスとしても面白い側面が出てきます。バイオマスからエタノールをつくる試みをしているのですが、バイオマス専門の研究者でないために未熟な方法でやっています。もっと先端のバイオ技術を使っていけば、もしかしたら、環境浄化はバイオマス生産としっかり結びつくということを夢に見ています。

バイオマスを資源やエネルギーとして使うには制約があり、それはコストの問題が大きいだろうといわれます。また、全ての需要を満たす分だけ生産が可能かという課題もあります。すなわち、経済性やバイオマス生産に伴う地球環境負荷の問題があり、それを最低限にとどめながら、真のマーケットに乗せるには、もう少しクリアすべき問題があるというのが現状だと思います。

一方で、環境問題はクリアしなければならないという人類としての命題です。アジア諸国がさらに経済発展していくと、産業活動が増えて、悪いものとして廃棄物、排ガスが出ていく。それらは、人が豊かに健全に暮らしていくためにクリアしなければならないというバイオマスとは別の問題です。二酸化炭素の問題ばかりが取りざたされると、身近な環境が守られなくてよいのかということにもなりますが、実際にはそれは人が豊かに生きていくための命題であり、環境問題を解決しなければならないということからスタートすれば、環境浄化をする中で、バ

イオマスが広まるきっかけになるのではないかと思います。環境浄化は一義的に必要なベネフィットとしてとらえ、もう1つのダブル・ベネフィットとしてバイオマスがうまくやれるようになったらいいと思っています。

実際に堺では、バイオエタノールジャパン関西という会社が建築廃材からエタノールをつくっていて、大阪府下の20～30ヵ所のガソリンスタンドでE-3が買えるような状況になっています。産廃業者側の建築廃材を処分しなければならないというコストを逆ザヤで入れた上で、それをバイオエタノールに変えるという2つのメリットがあります。これだけでは採算が取れていないようですが、そこに環境省等のサポートが入ることによってペイする段階にきたともいわれています。こうした取り組みは、環境を考慮すればバイオマスの経済性も成り立っていくという一例ではないでしょうか。

●植生浄化法とは

水生植物によって水質浄化を図る方法は植生浄化法とか、英語ではナチュラルシステム（自然浄化法）ウェットランドシステム（湿地法）ともいいます。湿地の水は自然浄化できれいにはなりますが、それに少し人的なサポートをする工学的な浄化システム



講師 池 道彦 氏

が、植生浄化法だと理解していただければよいと思います。そのときにバイオマスの処分が問題として出てきます。植生浄化法という方法は耳慣れないと思いますが、これは通常の下水処理や産業排水処理などにダイレクトに使われるというよりは、軽く処理したものの仕上げ処理に使っていくという感覚のもので、とくに途上国などでのニーズがあります。どんなメカニズムで水をきれいにするかをまず説明します。

植物があって、そこに水が流れてきます。水中の汚染物質は、実際にはトイレ由来が多いので基本的に有機物です。そして窒素、リンというものが、水を悪化させる根本的な物質です。富栄養化問題などを引き起こす窒素、リンを取り除くのが、植生浄化法の基本的な機能です。植物は独立栄養の生物であり、光合成で二酸化炭素を吸って増えます。通常、植物体には窒素が10～20%、リンが5%程度入っていますので、植物が成長すれば二酸化炭素とともに窒素とリンの何割かを吸収してくれます。それによって水中から窒素、リンを取り除こうというものです。日本の従来の下水処理法では、有機物は取れるが窒素やリンが効率よくは除去できないが、それを吸収してくれる。しかも太陽のエネルギーで駆動するマシーンであって、さらに水質をきれいにしながら増えていくという触媒です。窒素、リンを吸収し、二酸化炭素を吸収して、しかも二酸化炭素を出さずに触媒が増える。触媒が増えればさらに処理機能が上がるという理想的な方法です。その速さに問題があるので先進国はともかくとして、途上国では非常によい方法だと思います。

私共の研究で最近明らかになってきたのは、水生植物は根の部分に酸素を供給する能力を持っているということです。光合成で余った酸素を根に対して能動的に送り込むようなシステムがあって、根の部分に生息する微生物（根圏微生物）がその酸素を使って有機物を分解してくれる。有機物が分解したら、窒素がアンモニアやリン酸の形になって余計に植物が取り込みやすくなるため、下水の三大要素の有機物、窒素、リンのすべてに対して、ただで仕事をしてくれるということになります。また、特異な効果として濁りをヒゲ根のような部分で捕らえて、ろ過効果で水が清らになる。

根からの分泌物はかなり特殊なもので、根の周り



は様々な有害物質分解微生物が棲息するという世界にもなっています。植物があることで通常では分解されないような化学物質を微生物が分解することができます。実は植物がそれら特殊微生物をリクルートしているのではないかといいデータも出てきているのです。もしかしたら、エネルギーをかけずに、難分解物質の汚染も解決してくれることになるかもしれません。だからこの方法は、非常にポテンシャルの高い方法だと見ています。問題点は、曇ったら機能が滞ってしまうことです。また、微生物と異なり、植物の成長速度はそんなに速くないために広大な面積が必要となり、安定的に一定の水質を保つということには問題があるかと思います。ですから、今より少し良くしようという途上国での仕上げ処理には理想的だと言えます。

付加価値的な意味から植生浄化法は、景観形成をデザインするにも役立ちます。植物を入れてファイトリメデーションする所は一般の人にも受け入れてもらいやすいといえます。馴染みやすいというか、緑があるのはよいという感覚を持ってもらいやすいため、うまく管理していけばビオトープとしての生物多様性、景観形成や環境学習にも貢献すると思います。常に基準を守るというのは大変ですが、何も設置しなくても環境を少しずつ復元するというパッシブシステムの概念からみれば、理想的なプロセスだといえます。ただバイオマスの関連で少し問題はあります。

● 植生浄化の事例

少し事例を紹介します。人工湿地法や自然湿地という方法で、八郎潟や琵琶湖で注目されているのは沈水植物を使う方法です。完全に沈んでいる藻の類は、結構おもしろい浄化作用を持っているとも言われています。土浦にはビオパークという施設があっ

て、太陽電池で動くポンプで、あまり水質が良くない霞ヶ浦の水を汲み上げて水路上を流す。そこには植栽が施されていて、流れていくうちに水がきれいに浄化されます。ここでは市民イベントを行い、クレソンや花などを持ち帰ってもらうなどして、バイオマスを利用しながら上手に管理しています。植生浄化法はバイオマスを管理することが大事なのです。当初は自治体でやろうとしていたが、管理費が高つくことから頓挫しかけていた中で、こうしたイベントでバイオマスを摘み取ってもらうことになったわけです。山梨県の大門ダムの事例ですが、ダムは砂が入ってくると埋まってしまうため、数年毎に底を浚うことをしなければなりません。段差のある所に植物を植えて、砂を落として窒素やリンの一部を取り除き、ダムに藻類等が発生しないという工夫をしています。

また、ベトナムの農村部の事例では、家庭下水を段々の水田状になっている所に流し、浮き草を培養して窒素やリンを吸収させるとともに、根の部分の微生物が有機物を分解する水質浄化を図っています。バイオマスを豚の飼料として活用するなど、うまくリサイクルをしています。有害物質がある場合には難しいのですが、有害物質がないのであれば、こうしたプリミティブな方法も可能となります。

● 合理的なバイオマス管理が重要

植生浄化法の良い面だけ話をしましたが、じつは植物を定期的に刈り取ってやらないといけません。枯れてしまうとせっかく固定した二酸化炭素が水中に入ってしまうし、窒素やリンも戻ってしまうので、有機物が増えた分だけ水質が逆に悪くなる。もちろん微生物が分解してくれる部分はプラスになりますが、バイオマスを定期的にうまく刈り取ってやることによって二酸化炭素の吸収、窒素やリンの除去につながるのです。今の問題としては、バイオマスをどうにかしなさいということです。例えば私が見たアジアの現場では、刈り取ったままに放置していて、冬になると枯れてしまう。そこから黒い水が流れ出すという状況でした。合理的な管理がやはり必要となるわけで、その際にバイオマスを資源として使えば、問題が解決した上でプラスになります。日本では廃棄物として処理する方向にあり、その辺りが私の研究のきっかけになっています。



私が駆け出しだった頃、すでに植物による浄化法は存在していて、資源化の試みもありました。資源化価値の高い植物で水処理を考えた場合、例えば観賞用の花は、値段は付くが市場とのバランスがつかないとのことでした。食料や飼料用となると、排水成分との関係で食の安全面から必ずしも成り立たない。昔からの方法として、ヨシを刈り取ってヨシズにしていました。琵琶湖では人々がヨシを刈り取っていたので、山から流れてくる窒素やリンがうまくリサイクルされていました。しかし中国産のヨシが安いということで工芸作物となるヨシを刈り取らなくなり、それ以降は琵琶湖の水がきれいではなくなったともいわれます。

エネルギー生産では、従来はメタン発酵というのがありましたが、セルロース系はかなり硬いものがあるため、技術的なレベルが低くて決め手にはなりません。我々が研究に着手した今から6～7年前に、エタノール生産分野では技術開発が進み、プロセスの向上が図られることが見えてきましたので、エタノールにトライしていこうということになったわけです。バイオマスからのエタノール生産は、プロダクトとしてニーズが高いので魅力的だということです。御存知のように低炭素社会構築という社会的要請によるものです。従来の廃棄物をどうにかならないかといった、お金をかけずにやってきた資源化ではなく、企業ベースの技術力が上がってきている中で、それに乗らない手はないと考えました。バイオマス技術は、ポテンシャルが高くなってきています。日本では昔から、発酵工業の蓄積がありますから、これらをうまく活かせば、ビジネスベースでもエタノールは面白いということで検討しました。実際にエタノールを作ってみたのですが、それを進めるうちに植生浄化の廃棄物をどうにかしようとい



う面からでなくて、植生浄化を水処理系というより生産系ととらえるほうが面白いという考え方すら持つようになりました。

● バイオマス生産系としての植生浄化法

面白いとはどんな考え方なのかを、少し話したいと思います。我々は様々なデータを集めた結果、水生植物は1haあたりの生産速度が非常に速いことが分かりました。水質浄化の植物データベースは過去から作っていて、それらは数十種類にもなっています。水生植物の例えばホテイアオイやボタンウキクサ、ヨシなどは、1haあたりで見ると、もしかしたら農産物より成長が速い。陸地でなく水辺で生産すれば、生産高はかなりの量になります。また、バイオマス組成の分析をしました。水生植物のホテイアオイ、ボタンウキクサ、シュロガヤツリ、ヨシなどと、玄米、ワラ、籾殻などの稲のセルロース廃棄物で使われるものを並べてみると、セルロース、ヘミセルロースなど糖の類が半分程度あって、籾殻より少し落ちる程度のリグノセルロース系のポテンシャルを持っている。成長速度が速いことから、糖類の生産速度は勝る可能性があるわけです。

もう1つ、エタノール生産は食料と関係する問題がどうしても出てきます。農地は食料生産の場であり、人口が2050年まで増えて行き世界の人口は90億人に達するという話がありますが、その中で食料確保の問題があります。食料価格が高騰してきた一因として、バイオリファイナリー作物との競合が指摘されています。ここでよく考えてみると、水はいけるのではないかと思います。陸、つまり農地とは競合しないですね。だから水辺や湿地をうまく使える方法があれば面白い可能性があるわけで、陸を食わない水生植物は面白いということです。

● 森林等の開発を伴わない生産の場合

例えばブラジルなどの森林を開拓して、農地でバイオディーゼル燃料を作るとして、300年かからないと潰した森林の二酸化炭素吸収をペイバックできないといわれます。ブラジルでセラドを潰してサトウキビを作る場合が一番速いペイバックですが、それでも17年ということです。今から森林を開拓してバイオ作物を作るのは、やっていけないということになります。ですから、もう陸はないのだという見方をするほうがよいのかもしれませんが。廃棄物をエタノールに変える以外では、新しいエネルギークロップを作ろうとすれば、水辺は重要な資産だと思います。

もう1つ、バイオマス燃料を作る時には、インプットのエネルギーを最小限にとどめなければなりません。ここに示した例は、バイオエタノール生産に関するエネルギー収支ですが、必要なエネルギーがこれだけかかってしまうと、僅かしか儲からない。必要とされるエネルギーの半分程度は耕作にかかっていますが、これは何かといえば、化学肥料をつくるために化石燃料を使い、灌漑のためにポンプアップする、そして耕作機械を動かすためのエネルギーです。陸上での栽培コストは、基本的には灌漑や合成肥料でかなり高くなるわけです。

サトウキビでは肥料のためにエネルギーがかかっているのですが、もしも水の中の窒素やリンを肥料として使っていただいて、かけ流しの間にその肥料分を取ってもらふと考え、肥料にかかるエネルギーは必要ないことになります。灌漑や農機も耕運しないので必要ない。窒素やリンを含む水を供給しつつ、水生植物が増殖していくわけで、栽培という工程では刈り取り以外のエネルギーはほとんどかかっていないことになります。ここに示したサトウキビ生産にかかるエネルギー202メガジュールが半分になるのではないかと発想をします。水辺をバイオマス生産に使う、しかも汚れた水がある所を使うというのは、水処理施設というよりもバイオマスの生産の場としても面白いというアイデアが私の頭の中に渦巻いてきて、こうした計算を見ながら自らの研究を正当化するなどしています。

● 水生植物からのエタノール生産

実際につくってみて、得られた結果を話したいと

思います。まず、バイオマスの前処理としては、粉碎処理して天日乾燥することを想定します。これをさらに、糖化の前処理をして、酵素糖化、発酵する。先ほどの講演の中で紹介されたように、素晴らしいシステムが出てきていますが、我々としては1個ずつ基本的に検討しました。やってみたのは摘み取りやすい浮遊型の水生植物です。我々はいわば素人ですので、いろんな前処理法を比べてみたのですが、アルカリでやったり、酸で処理したり、とにかくエネルギーをかけないでいろんな処理をしました。最終的にはアルカリ（苛性ソーダ）を入れて、その後に過酸化水素を入れるアルカリ酸化処理がよかったということです。その前処理されたバイオマスの糖化を、市販のセルラーゼでやってみました。

これはホテイアオイの例で、バイオマスあたりでどれだけ糖がとれたかという数値です。いろいろやってみましたが、水生植物はどれもアルカリが良さそうということが分かりました。アルカリ処理では、少し濃い濃度なので今後は最適化が必要ですが、結構糖が出てきます。後で過酸化水素を入れる方法ですと、もっと増えて、最終的にエタノール回収率も上がります。ボタンウキクサも同様で、アルカリ処理でほとんどうまくいっています。そこに酸化処理をしてやるともっと出ますが、ソフトなホテイアオイのような葉っぱは、アルカリで処理すれば十分だろうということが分かってきました。

最終的に前処理したバイオマスの中で、グルコーススペースではほぼ全ての糖はエタノールになったというデータが得られています。グルコーススペースでは100%エタノールがとれるだろうということです。ボタンウキクサでも同じです。

今のようなことで実際にエタノール生産の基質として、浮き草バイオマスが利用できるということは分かりました。ここに示したデータは、この段階の最適法ですが、非常に濃い濃度の苛性ソーダを入れたりしていますし、セルラーゼも非常に高いユニットで入れていますのでまだコスト的には非現実です。ただ、日進月歩の技術を適用すればもっとよくなっていくと思います。とにかくエタノールが出来ましたというのが本日の1つの結論です。バイオマスあたりの収率も、柳に比べると少し落ちますが、当時の文献データで比べると、他の農産廃棄物とそんなに変わらない収率になっています。すごくいい加減



な精度で計算をしています。1haあたりで年間とれるエタノールはかなり高い数値になります。この値があまりにもすごいということから、学生さんにいろんな文献を集めた上で再計算してもらったら、少し低い値になっていますが、それでもボタンウキクサやホテイアオイなどはトップクラスに入ってきます。同列で比べてはよくないところもありますが、耕地面積当たりのエタノール生産速度としては面白いと思います。

● 植生浄化法の Co-benefit

実際にはCo-benefit プロセスといって、植生浄化は水質浄化としても意味があり、エタノール生産でも意味があるのではないかという話をします。これはフロリダで行われているボタンウキクサによる水質浄化の事例ですが、ここでは下水をいったん処理したような水を浄化しています。まだ窒素やリンが残っているので、これを吸収してやろうという植生浄化システムです。水域面積は1万m²、根が届く範囲程度ということから水深は40cmになっています。通常のいわゆる3次処理と同じ程度にはきれいになるという仕組みで、ここに示した水質のデータは、実際にフロリダのチームがやって得られたものです。そこで出てきたバイオマスを刈り取ると、微々たるものですが1日あたり29リッターのバイオエタノール生産ができるという計算が成り立ちます。

この面白いところは、排水処理側が省エネになるというメリットです。日本で窒素とリンをとろうとすると、嫌気好気活性汚泥法という硝化脱窒法という方法でやりますので、BODを全部とった後、窒素分を全て硝酸性窒素に変えてやらないといけな

いため、さらに曝気をします。通常の有機物だけをとる活性汚泥法に対して、この方法は2～3割増の電力を消費することになります。1トンあたり810W/h程度の電力をくわないと窒素がとれません。それに対して、後に植生浄化を設置すればよいのではないかと考えます。夜はだめだから日本では無理ですが、途上国を想定してやると、通常の活性汚泥法をあまく処理して、BODが残っても根圏微生物が分解してくれるというやりかたもあり得ます。少々甘くしても構わないと想定すれば、電力は440W/hしかくわないことになり、エタノールが生産されるのはプラスアルファと見るだけでも構わないのです。トータルではこれだけの省エネ効果が排水処理側に出てくるということになります。植生浄化を付けることで窒素とリンをとるという覚悟を決めれば、じつは省エネが出来るということになります。この辺りが面白いところだと思います。エタノール生産プロセスとしてみた場合は、バイオマスの生産、収穫、運送に対してはかかりますが、肥料や設備維持にはほとんどいらなくなる。バイオエタノール生産の投入側のエネルギーはカットできますが、エタノール生産にはリグノセルロースだからサトウキビよりは多くのエネルギーがかかります。出てくるエネルギーもサトウキビに比べれば低いですが、かけたエネルギーに対して回収されるエネルギーに、省エネ効果を加えれば、エネルギー負荷は非常に小さくなります。エタノール生産、排水処理ともにエネルギー的に得をすることになり、組み合わせることで両方が受かるような、どちらもが今までよりは良くなるというプロセスになるのではないのでしょうか。

●むすび

植生浄化法は環境負荷をかけない水質保全技術というのが本来の見方です。さらに陸地と競合しない所でバイオマス生産が行え、生産性が高く、汚い水の所でポテンシャルが高いということが調べていくうちに分かりました。バイオマスが出てきて、邪魔だから処分しないといけなないといった視点から脱却し、逆にバイオマス資源生産プロセスという見方をすることによって、植生浄化法のメリットが大きく出てくる可能性があります。

本日話したホテイアオイとボタンウキクサ以外に、最近になってヨシを対象に研究をやっています。ヨ



シは生産性・収穫量がものすごく高く、ホテイアオイを勝る可能性があります。寒い所でも大丈夫であり、日本の固有種です。ヨシの場合はエタノール生産の前処理としてアルカリだけでなく、過酸化水素処理まで施したほうが確実に良いようで、糖分回収は8割程度が可能です。リグニンが75%除去できるため、割といい感じにエタノール生産ができます。実際に糖化を試みたところ、酵素のブレンドをしたり、Tween20を加えたりすることで、最終的にはグルコースベースで81%、キシロースベースで96%の糖回収が可能となりました。ヘミセルロースはほとんど、セルロースのかなりの部分が糖化できたということになります。この糖化は、1回だけ試みた段階ですので、これでエタノールが十分できるとは言い切れませんが、理想的に計算すると、ある程度の力があるということが分かってきました。こうした成果を増やしていきながら、水質浄化とバイオエネルギー生産、これら両方のベネフィットを得られるようなプロセスを構築していきたいと考えています。

質疑応答

< Q > 森林を伐採、耕作地にして資源作物をつくることで、森林が本来吸収していたCO₂蓄積量を回復するのに400年かかるということだが、長いスパンで考えれば手を入れない森林はカーボンニュートラルのはずで、ペイバックする本来のCO₂の量をどのように評価しているのか。

< A > カーボンは自然界で、1年単位で回るのもあれば、10年、100年、1,000年単位もある。表層的な評価かもしれないが、生態学分野の人たちによっ

て測定された異なるフェイズの森林のデータを基にしているものと思います。文献にも掲載されているので、それを見ていただくといいかと思います。ここでは、取り戻すのに400年ということより、今からCO₂を出す方向の活動をすることが問題であるといえます。CO₂が高くなるとある段階で限界を超え、海水温度が急上昇して、いきなり放出されてくる可能性もあるので、とにかく今後CO₂を増やさないことが肝要であるといえます。確かに400年は言い過ぎかもしれないですね。

< Q > 植生浄化法は、污水处理の最後の段階で水

生植物を使うことと理解したが、例えば池のようなものをつくって植えるのか、川に流してしまって川に植えるのか。

< A > 下水処理水が出てきた段階では窒素やリンがかなり多いので、その仕上げ処理を想定しますと、排出先にくねったような水路を作って、そこにゼオライトやグラスウールなどを栽培床として設置して植栽をする。そこに水を流すことによって窒素やリンを落とそうという試みがされています。一方でナイル川などでは、自然湿地をそのまま使っていて、植物をしっかり刈り取ることによって少しでも水を良くしようとしています。

