

## 環境保全・浄化のための植物バイオテクノロジー

森 一博

植物を用いた環境浄化・修復法はファイトレメディエーションと呼ばれ、バイオレメディエーションに含めることができる手法の一つである。植栽系での浄化メカニズムは複雑であるが、維持管理において注目すべき浄化因子は、植物体による無機物質（栄養塩や金属など）の吸収・固定作用と、根圏での有機物質の分解や硝化脱窒などの物質変換作用であろう（図1）。前者は植物の生長に伴うバイオマス生産により生じる。主に根圏微生物の作用に由来する後者に関しても、植物の根面には非常に多様な微生物が多数観察されるが、それらは植物から供給される酸素やアミノ酸などの物質を通して活性化していると考えられている。このように直接あるいは間接的に植物の作用が浄化を促していることから、太陽エネルギーにより稼働するシステムであり、エネルギー消費が少なく高度な維持管理操作も必要でないなど他の手法にない利点を有している。一方で、気候の影響を受けやすく、難分解性の汚染物質への適用性が限定的であるなど課題も指摘されている。本稿では、植物による水や土壌中の汚染物質に対する浄化効果と共に、課題克服に向けた研究事例を紹介し、今後の展望を考察した。なお、筆者は水生植物の利用を専門としていることから水系での紹介が中心となることをご容赦頂きたい。

## 植物による水や土壌の浄化作用とその利用の現状

植物の環境浄化への利用は随分以前から行われており、1960年代以降少なくとも80種類以上の植物について水質浄化作用が報告されている<sup>1)</sup>。同じく土壌中の有機および無機汚染物質の浄化作用についても少なくとも

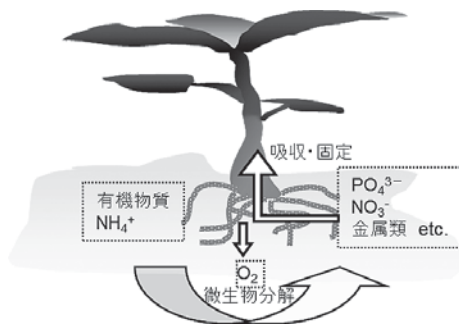


図1. 植物と根圏微生物による浄化

表1. 代表的な水生植物の窒素・リン除去速度

植物名	窒素除去速度 (mg m <sup>-2</sup> 日 <sup>-1</sup> )	リン除去速度 (mg m <sup>-2</sup> 日 <sup>-1</sup> )
ボタンウキクサ	985	218
ホテイアオイ	1278	243
サンショウモ	406	105
ゼニグサ	365	86
アカウキクサ	108	33
ウキクサ	151	34
コウキクサ	292	87
ミジンコウキクサ	126	38

1970年代頃から多数報告されている<sup>2)</sup>。水と土壌では対象となる汚染物質の種類や物質の動態が異なるが、筆者らが検討している水生植物を用いた水質浄化について述べると、浄化機能の中でまず期待できるのは、内部生産を誘発し富栄養化の原因となる窒素・リンの吸収・除去である。根圏微生物による硝化・脱窒や植生域での食物連鎖を介した汚濁物質の系外への排出も大きな効果を示すとされるが、ここでは植物による吸収固定作用に焦点を絞って説明したい。この場合、浄化速度は植物の窒素・リン含有率と生育速度により決まることになり、生育速度は植物によって大きく異なるので、生育が速くバイオマス量の大きな植物の利用が検討されることが多い。これまでに報告されている代表的な水生植物の窒素・リンの除去能力を表1<sup>3)</sup>に示すが、水面積あたりの浄化作用は微生物リアクターに比べると劣るので比較的広い栽培面積が求められる。一方で、有機性汚濁物質の浄化作用も非常に重要である。これは根圏微生物の作用によるところが大きい。たとえば1 cm程度と小さいが水面を覆い活発な増殖を示すウキクサでは根に付着している微生物の数や作用について詳細な検討が行われている<sup>4)</sup>。筆者らの検討例では、根の乾燥重量1 gあたり10<sup>10</sup> CFUの微生物が検出され非常に高密度で根面に付着している。これは、栽培水面1 m<sup>2</sup>中のウキクサに付着している数に換算しても同程度の値となる。根面を囲む水中にも懸濁生の微生物がいるので根圏としてはさらに大きな数の微生物を抱えていることになる。このような微生物が活発に活動するときの分解作用は水質浄化において非常に

有効である。おもしろいことに、これらの微生物による有機物分解作用は植物により活性化されている。たとえば明条件では根から酸素が供給されるため高い酸素消費速度が得られ、暗条件よりも高い有機物の分解速度が得られる<sup>4)</sup>。このような植物と微生物の広い意味での共生系が示す作用はかなり高濃度の汚水でも処理することができ、中小規模であれば栄養塩の除去だけでなく生活排水処理への利用も可能である。処理施設<sup>1)</sup>は、ホテイアオイやウキクサのような浮遊植物では池や水路が用いられ曝気を施す場合もある。ヨシやガマなどの抽水植物の場合には人工湿地や濾材を充填した人工河川や水路に植生したシステムが用いられ、濾材にゼオライトや鹿沼土などのイオン交換作用の強い材料を用いることより大きな窒素・リンの除去効果を得ることができる。濾材と組み合わせる場合には陸生の植物を用いることも可能である。施設の計画と設計では植物種ごとの特性の理解が必要となり、専門家の経験への依存が大きいのは事実だが、ホテイアオイやウキクサではすでにかなり以前に生活排水処理システムの設計基準も報告されている<sup>5)</sup>。日本でも植物は浄化に利用されているが(図2(a))、下水道普及率(人口ベース)が75%に達するなど水洗化率が高くなっていることに加えて、根と水の接触部で浄化が生じるので反応槽の容積を大きくすることで施設のコンパクト化には限界があることも相まって、我が国での植物を用いた浄化施設の利用例は現状では多くはない。しかし面積の制約が少ない場合には欧米をはじめ海外では意外なほど広く利用されている(図2(b))。ここでは水質浄化への利用を中心に述べてきたが、土壌浄化の場合にも浄化の原理は同様である。土壌の場合は汚染物質の

土壌粒子への吸着など水系に比べて考慮すべき要素が複雑であるが多くの事例を見ることができる。対象となる汚染物質も石油系炭化水素、農薬、重金属など多様である<sup>2)</sup>。水質浄化におけるBOD処理や栄養塩除去に比べると土壌浄化では難分解性あるいは毒性の高い汚染物質を対象とすることが多いため概して浄化作用が制限的で数ヶ月から年単位の長期の処理期間を要することも多い。しかし、たとえば重金属の場合にはハイパーアキュムレーターと呼ばれる非常に高い金属蓄積能力をもつ植物の利用やキレート剤の添加による浄化の効率化などさまざまな手法が提案され、実用化も図られている<sup>6,7)</sup>。図2(c)は複合有機汚染土壌の浄化の様子である。

### 植物選択の合理化に向けた取り組み

植物を用いた浄化施設の計画では、どのような植物を選ぶのかは非常に重要で、現状では専門家の経験に頼らざるを得ない。特に水質浄化の場合、浄化効果はもちろんであるが、余剰植物の処理や施設の景観や環境教育への利用など多様な要素を考慮して計画を進めることが求められる。しかし、必要な情報を膨大な数の文献などから抽出、分析し比較することは困難である。そこで、大阪大学では植物による浄化施設の計画に必要なデータを集めることを目的に、150以上の研究報告よりデータ抽出と平均化処理を施してデータベースを作成しインターネット上([http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/wb/home/database/index\\_j.html](http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/wb/home/database/index_j.html))に公開している<sup>8)</sup>。これには陸上22種、抽水11種、浮遊7種、沈水4種、浮葉2種の合計46種について、表2に示した植物の名称や大きさなどの基本情報、分布域や温度などの適応可能条件、窒素・リン除去速度や増殖速度などの水質浄化特性値、および余剰植物の利用法などの情報がデータベース化されている。すべてのデータがそろっているわけではないが、掲載データを比較することで窒素・リン除去速度の比較や余剰バイオマス利用法の検討の目安とすることができよう。今後、さまざまな植物での知見が増すとともに、

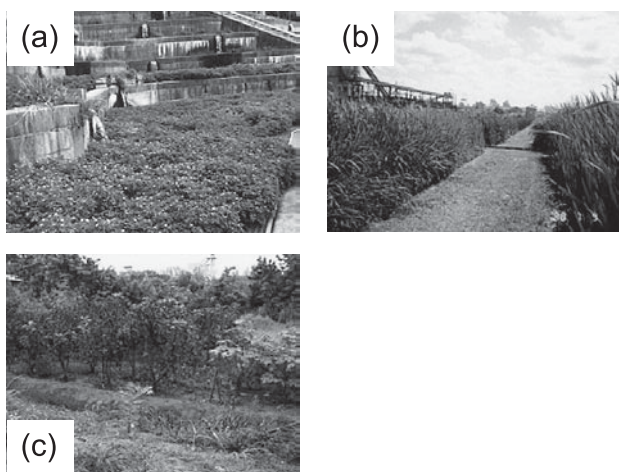


図2. 植物による浄化事例。(a): 貯水池に併設された浄化施設(日本・山梨)、(b): 油含有排水の処理施設(ドイツ)、(c): 複合有機汚染土壌の浄化サイト(タイ)。

表2. 水質浄化に利用可能な植物データベースに含まれる項目

大項目	小項目
基本項目	和名, 別名, 学名, 英名, 写真, 生活型, 世代時間, サイズ, 特徴, バイオマス, 含水率, 含窒素率, 含リン率
生育環境項目	分布域, 生存温度, 適応可能温度, 適応可能塩分濃度, 適応可能pH, 水深
水質浄化項目	窒素除去速度, リン除去速度, 増殖速度
その他	余剰植物体の有効利用方法, 利用上の留意点など

このようなデータベースが充実し実用に寄与できるようになると考えられる。また、気候や汚濁・汚染条件に対する植物の生育や浄化作用の応答をモデル化する試みも始まっており、データベースと共にこのようなモデル手法を活用できるようになれば環境浄化における植物の利用は大きく進むものと期待される。

### 浄化作用強化に向けた取り組み

先にも述べたように、植物による環境浄化・修復法の欠点の一つは微生物リアクターやバイオレメディエーション系に比べて浄化速度で劣ることである。そこで栽培のための浄化施設を広くしたり、数年にわたる浄化期間を設定することも多い。太陽エネルギーを利用して簡潔な維持管理で浄化を達成しコスト面での利点も大きいことを考えれば、この課題を克服することで利用が促進されると思われる。そこで、近年は特に根圏の微生物の作用に着目した機能向上の試みが進められている。上述した根圏微生物による有機物質の分解作用は基質との接触が十分に行える場合には大きな効果を発揮する。特に植物による微生物の活性化の効果は大きく、生分解性に難がある汚染物質においても浄化を達成することができる。図3は河川水での2-ニトロフェノールの分解を模した試験結果<sup>9)</sup>であり、非植栽状態ではほとんど分解されていない。しかし、ここに予め無菌処理されたウキクサを植栽すると分解が促進され2バッチ目には速やかな浄化が達成されている。無菌化した河川水に無菌植物を植栽した場合にはこのような反応は見られないので、河川中の分解微生物が根面に付着しウキクサにより活性化されていると考えられる。これはウキクサに限ったことではなく、図4の例のように水質浄化でよく利用されるヨシの植生底質部においてもビスフェノールA (BPA)、ノニルフェノール (NP)、4-tert-ブチルフェノール (4-tert-BP) といった内分泌攪乱作用が懸念される化学

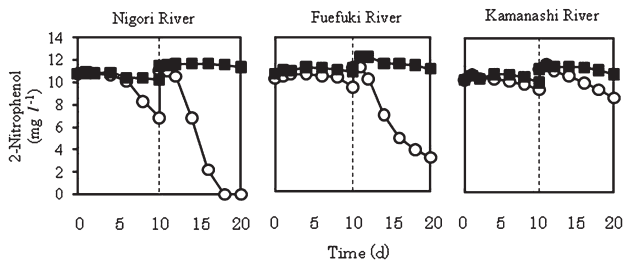


図3. ウキクサを植栽した河川水における2-ニトロフェノールの分解。3つの河川水試料に10 mg l<sup>-1</sup>の2-ニトロフェノールを添加し、ウキクサを植栽した系(○)と植栽しない系(■)で連続バッチ試験を行った。植え継ぎ時には10%の試験水とウキクサを新しい系に移植し、経時的に基質濃度の変化を測定した。

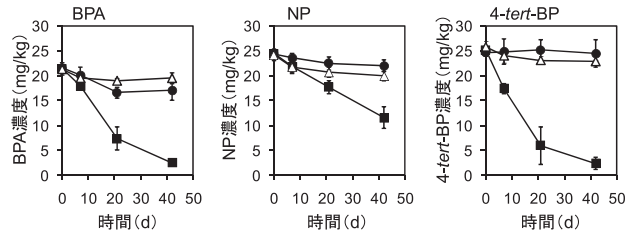


図4. ヨシ根圏底質での内分泌攪乱化学物質分解作用。野外池のヨシ植生の底質にヨシを植栽した系(■)、ヨシから離れた池の底質(●)および無菌化した底質に無菌のヨシを植栽した系(△)に各物質を添加し経時的に系内の濃度を測定した。

物質が非常に効果的に分解されることが確認され、多数の分解菌がその根圏より分離されている<sup>10)</sup>。しかし、植物種や条件によっては植栽系においても分解が見られない場合もあり、浄化システムとしての信頼性を上げるためには直接根圏機能を制御することが望まれる。そこで、根圏に分解微生物を導入・定着させる積極的な浄化効果強化手法が検討されている。図5<sup>4)</sup>はウキクサ根圏での*p*-クロロフェノールの分解能の強化に向けて、長期間馴化した活性汚泥中の分解微生物を根面の微生物群集へ導入した効果を調べた例である。通常ウキクサ植栽系では概して低い*p*-クロロフェノール(全有機炭素(TOC)として)除去率に留まったが、分解微生物を導入した根圏をもつウキクサの植栽系では高い分解能力が確認され、バッチを経て新鮮な培地へ植物を植え継いでもその能力は安定に維持され微生物導入が効果的であることが分かる。ウキクサからは根圏での残存性に優れた微生物も報告されており<sup>11)</sup>、一方、先のヨシ根圏から分離された分解菌の中には純粋培養系では分解効果を示さないが、ヨシとの共培養系では分解作用を示すものも確認されている<sup>12)</sup>。このように浄化作用と根圏での安定性を併せ持つ分解微生物が得られれば浄化効果の促進も可能となるだろう。

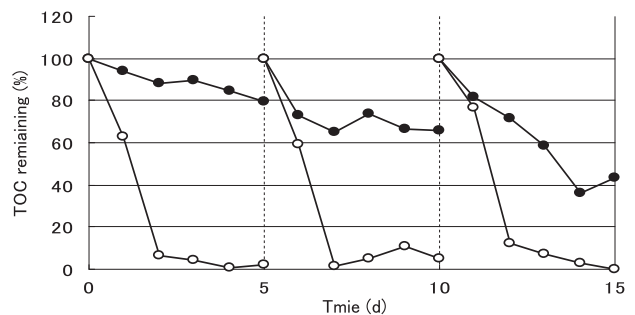


図5. ウキクサ-微生物共生系による*p*-クロロフェノールの分解。馴化活性汚泥と接触させたウキクサ(○)と通常の野生型のウキクサ(●)を*p*-クロロフェノール15 mg-TOC/lを含む系で栽培し、経時的にTOC残存量を測定した。

### 余剰植物の有効利用に向けた取り組み

植物を用いた浄化システムでは、余剰バイオマスは適宜収穫しなければならない。土壌浄化系では汚染濃度の低下により事業が終了するが、水質浄化の場合は、連続的な流入負荷に対する継続的な浄化が期待されるため永続的な運転が必要となる。旺盛な増殖を示す水生植物では、作物品種よりも高いバイオマス生産能力を示すものもあり、ホテイアオイのように生育が早いものでは、月に数回程度とかなり頻繁に余剰植物の収穫が必要で、ヨシなどの抽水植物でも少なくとも一年に一度は刈りとらなければ腐敗による再汚濁を招いてしまう。残念ながら現時点では多くの植物で十分な有効利用法が確立されてはおらず、浄化効果と共にこの手法の利用を制限する主要な原因となっている。現在提案されているものは、食料・飼料・花卉による直接利用、コンポストによる土壌還元、メタンやエタノールなどのエネルギー回収である<sup>1)</sup>。もっとも容易なのは食料や飼料あるいは花卉として利用できる植物を浄化に用いることであろう。多くの検討がされており、水質浄化ではクウシンサイやクレソンなどの水生野菜はもちろんのこと、トマトやバジルなどの野菜やハーブ、稲や小麦などの穀物、トウモロコシやライグラスなどの飼料作物、ベチュニアやショウブなどの花卉も利用されることがある。続いて、コンポスト化により土壌に還元できれば物質循環の観点から都合がよい。しかし、植物体の乾燥工程にコストがかかるため、コンポスト化にはなるべく水分含有量の少ない植物が求められる。また、以上の直接あるいは間接的な利用法ではバイオマス中の汚染物質が懸念されることもあり現状では利用が限られている。特に食用とする場合には処理対象水と可食部の含有成分をよく検討し、重金属など有害成分に注意しなければならない。そこで、近年注目されているのがバイオマスに処理を施してエネルギーを回収することである。植物バイオマス中の有機物からメタン発酵によりエネルギー変換する試みはホテイアオイやヨシなどで検討されているが、新たにバイオエタノール原料としての利用も期待されはじめた。現在、穀物が広くバイオエタノールの原料として利用されているが、図6<sup>13,14)</sup>に示す大阪大学の検討からも分かるように水生植物のバイオマスにもセルロース、ヘミセルロース、デンプンなどの多糖類が多く含まれていることが分かる。またヨシやホテイアオイなどは穀物に匹敵するバイオマス生産速度をもつので、十分にバイオエタノール生産への利用価値があると思われる。同研究グループは化学処理と酵素処理を組み合わせた糖化方法を検討した上でエタノール

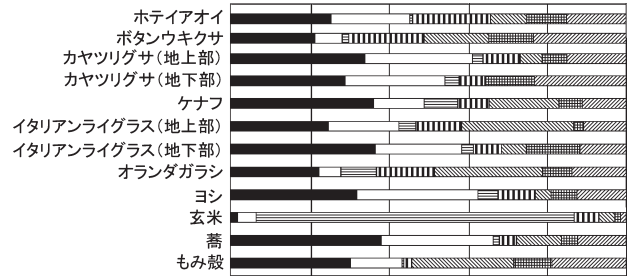


図6. 水生植物の含有成分の比較。  
セルロース ■■■■, ヘミセルロース □□□□, デンプン ▨▨▨▨, タンパク質 ▩▩▩▩, その他 ▧▧▧▧, リグニン ▩▩▩▩, 灰分 ▨▨▨▨

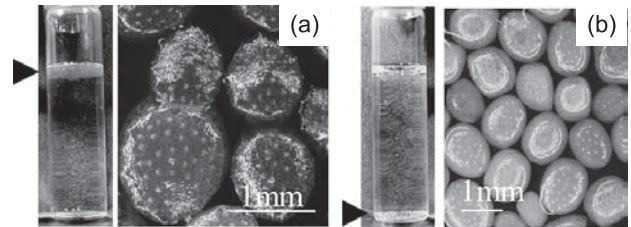


図7. ウォルフィアの葉状体とチュリオン。(a)：葉状体（水面上に浮遊している植物体）、(b)：チュリオン（水底に沈降している植物体）。

生産を行い穀物に匹敵する高い単位面積あたりの年間エタノール収量を指摘している。また、筆者らは体長が1 mm程度と非常に小さく、根を持たないウォルフィアに注目している。この浮遊性の植物は、温暖で栄養に富む条件では葉状体として水面を覆うほどの非常に旺盛な増殖を示す一方で、冬季など環境条件が生育に適さなくなるとチュリオンと呼ばれる形態をつくりデンプンを蓄積して水底に沈んで越冬するなどおもしろい特徴を有している(図7)。葉状体と水底に沈降したチュリオンをそれぞれ調べたところ、乾燥重量あたり葉状体中にデンプン20%、チュリオン中にはデンプン50%程度をそれぞれ確認することができた<sup>3,15)</sup>。主要な穀物のデンプン生産速度は3~5 t-デンプン ha<sup>-1</sup>年<sup>-1</sup>であるが、この植物の詳細な生育特性を基にした試算では、年間通して温暖な条件では、穀物にも匹敵する生産力が求められ、非常に優れたエネルギー資源価値を有しているといえる。この特異な特徴は、水質浄化系に適用することでバイオエタノールへの利用が可能なデンプン資源の生産に寄与するはずである。温暖な条件では年間通して連続栽培ができる上に、デンプンを豊富に含むバイオマス(チュリオン)の回収には自然沈降が利用でき、エネルギー的にも有利である。このように、水質浄化系での植物利用にお

いて余剰植物の処理は大きな課題となっているが、近年の研究成果はエネルギー回収への利用が十分に可能なことを示しており、実用化に向けた取り組みが急がれる。

### おわりに

以上、環境保全・浄化における植物利用技術の現状と課題克服に向けた取り組みのいくつかを紹介した。紙面の都合から言及できなかったが、遺伝子組み換え技術による植物側の機能改善（環境適応性の向上、金属蓄積能力の向上や根面への吸着作用の付与）などの検討も行われている。アジアを中心に経済の発展と共に深刻な環境問題が広がりを見せている中、低エネルギー低コスト型の浄化システムとしての植物の利用は今後ますます注目されると思われる。また、日本などにおいても水処理をはじめとする環境浄化系における電力消費の低減は重要な課題といえよう。その一部をここで紹介したような手法が代替することができればその効果は大きなものとなる。今後の植物利用技術の課題克服に向けた取り組みが期待される。

### 文 献

- 1) 藤田正憲ら：植物代謝工学ハンドブック，p.713，エヌ・ティー・エス (2002).
- 2) Cunningham, S. D. *et al.*: *Plant Physiol.*, **110**, 715 (1996).
- 3) 森 一博ら：植物機能のポテンシャルを活かした環境保全・浄化技術，p.231，シーエムシー (2011).
- 4) 森 一博ら：生物工学，**85**, 221 (2007).
- 5) DeBusk, T. A. *et al.*: *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery*, p.27, Magnolia Publishing (1987).
- 6) Brooks, R. R. *et al.*: *J. Geochem. Expl.*, **7**, 49 (1994).
- 7) 北島信行ら：植物機能のポテンシャルを活かした環境保全・浄化技術，p.69，シーエムシー出版 (2011).
- 8) 藤田正憲ら：環境科学会誌，**14**, 1 (2001).
- 9) Kristanti, R. A. *et al.*: *J. Env. Sci.*, **24**, 800 (2012).
- 10) 遠山 忠ら：植物機能のポテンシャルを活かした環境保全・浄化技術，p.160，シーエムシー出版 (2011).
- 11) 松澤宏朗ら：日本水処理生物学会誌，**46**, 129 (2010).
- 12) Toyama, T. *et al.*: *J. Wat. Env. Technol.*, **9**, 411 (2011).
- 13) 藤田正憲ら：バイオ環境工学，p.52，シーエムシー出版 (2006).
- 14) 池 道彦ら：植物機能のポテンシャルを活かした環境保全・浄化技術，p.213，シーエムシー出版 (2011).
- 15) Fujita, M. *et al.*: *J. Biosci. Bioeng.*, **87**, 194 (1999).