

ファイトレメディエーションによる水質浄化

長谷川 有 紀^{*1} 八 東 絵 美^{*2} 張 野 宏 也^{*3}

Water Treatment by Phytoremediation

HASEGAWA Yuki^{*1} YATSUZUKA Emi^{*2} HARINO Hiroya^{*3}

*1 神戸女学院大学 人間科学研究科

*2 神戸女学院大学 人間科学部 教学嘱託職員

*3 神戸女学院大学 人間科学部 環境・バイオサイエンス学科 教授

連絡先：張野宏也 〒662-8505 西宮市岡田山4-1 神戸女学院大学人間科学部環境・バイオサイエンス学科
harino@mail.kobe-c.ac.jp

要 旨

水は限りある資源であるにもかかわらず、産業の発展、人口増加、都市化により深刻な水質汚染を引き起こすことで使用できる水の量が減少し、世界中の多くの人々が水不足に苦しんでいるのが現状である。限られた水を使い続けていくためには、汚染された水を浄化する技術を開発することが必要である。

ファイトレメディエーションは、利便性、低コストおよび操作の容易さで高く評価をうけ、ビオトープ空間としても活用できる優れた水処理技術のひとつである。水質浄化に用いられている植物は、生活型から陸上植物、抽水植物、浮葉植物、沈水植物および浮遊植物にわけられる。また、植物を固定するろ床材は、根を固定するのみならず、微生物の住居となるフィルターの役割を果たす。つまり、懸濁物質や有機物をろ過蓄積し、そこに棲む微生物により分解し、植物に吸収されやすくする。植物の水質浄化機能から、ファイトエクストラクション、ファイトアキュミュレーション、ファイトディグラデーション、ファイトトランスフォーメーション、ファイトボラタリゼーション、ファイトスタビリゼーション、ライゾフィルトレーション、ライゾディグラデーションの8つに分類することができ、それぞれ浄化効率に対して大きく寄与している。植生浄化法としては、湿地法、浮遊法、水路法および沈水・浮葉植物法があり、実用化されているものもある。

1990年代より新たな環境汚染物質として PPCPs (Pharmaceutical and Personal Care Products) が注目され、すでにいくつかの河川域からこれらの化合物が比較的高濃度で検出されている。著者らは PPCPs の一つであるアセトアミノフェンを、植物を用いて水中から除去することを試みている。今後、PPCPs をはじめ多種多様な汚染物質の水中からの除去法として、ファイトレメディエーションは有益な手段になると考えられる。

キーワード：植物浄化、水質浄化、PPCPs

Abstract

Water is essential to life, however, millions of people are suffering from a shortage of drinking water. Industrialization, population expansion and urbanization have largely contributed to severe water pollution, because main sources of water pollution can be attributed to the discharge of untreated toxic industrial and municipal waste, the dumping of industrial effluent and runoff from agricultural fields. In order to reuse the limited available water, many water treatment systems have been developed.

Among various available water treatment technologies, phytoremediation is an excellent water treatment system, because of its convenience, lower cost, ease of operation and use of biotope space. In this paper, the characteristics and application of phytoremediation, and the degradation mechanism of contaminants by phytoremediation are reviewed.

Key words: Phytoremediation, water treatment, PPCPs

1. 研究の背景と目的

世界人口は2010年に入って70億人になり、その後も年々増加傾向にあり、2019年までには80億人に到達すると予測されている¹⁾。一方、地球に存在する水のうち人間が消費できる淡水量は0.01%と少なく、水は地球上を循環しているのみで増減はないため、世界的に人口が増加すると、一人当たりの使用できる水の量は減少する。特に中国北西部、アフリカ北部、オーストラリア東南部、アメリカ西部などは今後水不足が深刻化するであろう地域となっている。環境汚染等でさらに水質が悪化すれば使用できる水が減少し、水不足による世界紛争や汚染された水の摂取による健康被害が増加することが予測されている。

最近「将来の世代の欲求を満たしつつ、現在の世代の欲求も満足させるような開発」という“持続可能な開発”に基づく社会の在り方が問われるようになった。2002年に「持続可能な開発に関する世界首脳会議」(ヨハネスブルグ・サミット)が開催され、当時の国連事務総長が水(Water)、エネルギー(Energy)、保健(Health)、農業(Agriculture)、生物多様性(Biodiversity)の5分野を重視し、各々の頭文字を取って、「WEHAB」いう提案がなされた。その水の分野で、「10億人の人々が安全な飲料水を得ていない。20億人以上の人々が適切な衛生設備を持っていない。毎年200万人の子供達が水に関連した疾病で死亡している。アクセスを改善する必要がある。」と提言している。このようなことから安全な水を供給する社会を構築することが急務となっている。

汚染された水の修復技術は、膜技術の進歩にともない、膜ろ過法が主流となってきているが、水不足が深刻化されているアフリカ等の開発途上国では、膜等の高度な技術を用いることは、コスト面や維持するための技術面で問題があり、実用化するには困難である。そこで、比較的安価で、維持管理に高度な技術も必要とせず、持続可能な開発の理念に適した方法として注目されているのが、Bioremediation(バイオレメディエーション)である。

Bioremediationとは、植物や微生物を利用することにより汚染された土壌や水を修復する技術のことである。Bioremediationには、微生物を利用する技術として、外部で培養した微生物を汚染された場所に導入することで浄化を行う Bioaugmentation(バイオオーグメンテーション)と、栄養物質等又は酸素を加えて汚染された場所に生息している微生物を活性化することにより浄化を行う Biostimulation(バイオスティミュレーション)があるほか、植物を利用して土壌や水環境の浄化等を行う Phytoremediation(ファイトレメディエーション)がある。Phytoremediationとは植物を用いて水、大気および土壌に含まれる栄養塩類、有機物および有害化学物質を取り除き分解や無毒化する技術のことである。この方法は、すでにアメリカのEPA(United States Environmental Protection Agency)により実用化が試みられており、オレゴン州やメリーランド州ではポプラの木を植えることで、地下水等に含まれる揮発性有機化合物を除去している²⁾。

1990年代に入ってから PPCPs(Pharmaceutical and Personal Care Products)が環境中へ流出し

ていることがわかり、新たな環境汚染物質として関心がもたれるようになった。PPCPsとは、医薬品や化粧品、パーソナルケア製品に由来する化学物質のことであり、各家庭からの生活排水が主な流出源となっている。そのため、汚染源が複数存在するため、汚染の制御が困難であると同時に、水溶性の高い物質が多く、下水処理場で除去することが困難な物質が多い。これが水環境中に流出し、生態系に影響を与え、物質によっては生物濃縮によって人体に影響を及ぼすのではないかと懸念されつつある。

本総説では、植物浄化方法の特徴や汚染物質の吸着、分解メカニズムおよび実用化について概説するとともに、現在の環境問題としてもっとも関心がもたれている PCPPs の汚染実態をまとめ、植物による除去の可能性について検討する。

2. 植物による水質浄化

Phytoremediation は Bioremediation の一つで、Bioaugmentation および Biostimulation とならび、環境浄化に対して有望な方法となっている。しかし、Phytoremediation は古くから水質保全に貢献してきた方法であり、湖沼におけるアシ刈り、ため池における藻刈りやレンコン掘りなどは、植物を用いた環境浄化システムの最も古い形態で、窒素やリンなどの栄養塩類を植物に吸収させて除去することで富栄養化問題を改善するために用いられていた³⁾。

Phytoremediation を用いる際のメリットとしては、自然のエネルギーを使うため環境への負担が少なく、機械的に処理するよりも低コストで、維持管理が比較的容易なことである⁴⁾。また、浄化施設をビオトープの一部として利用することで景観をより美しくすることができる。さらに、住民にも馴染みやすい植物を用いているために、浄化施設を設置する際住民の合意を得やすい。一方、デメリットは植物の全長には限界があるので、浄化できる範囲は水中や土壌の浅い部分に限られ、植物を生育させるには光合成が必須条件となるため広大な面積を要する。また、Phytoremediation によって除去された有害物質は濃縮されるだけで無害になっていない、または濃縮後分解される場合分解物の方が毒性を増す可能性がある。また、浄化速度が機械処理よりも遅く、処理効率は土壌や天候などの環境に左右されることもある。このようにメリットだけでなく、デメリットもいくつか混在し、これを改善しつつ新たな植物による水質浄化方法が開発されている。

水質浄化に用いられている植物は、生活型から大きく分けて、陸上植物、抽水植物、浮葉植物、沈水植物および浮遊植物の5つに分けることができる³⁾ (図1)。私たちが親しんでいる植物の多くは陸上植物であるが、これを水処理のための植物として使用する際には、水耕栽培ができるようにならなければならない。また、水耕栽培に適する種であっても、幼植物体から水系に移植し、水面から10cm程度高くして植えると、空中根と水耕栽培用の根が発達し、容易に育成することができる。しかし、種類によっては水耕栽培に不適種があることにも注意しなければならない。つぎに抽水植物があり、ヨシ、マコモやガマなどがこれに属する。これらは根茎がよく発達し、酸素輸送能力が優れている。沈水植物は水底に根をはり、窒素やリンなどの栄養塩を吸収する種類が多い。ヒシ、ガガブタ、アサザなどがこれに属する。ハスやヒシなどの浮葉植物は表層で栄養塩類を吸収する場合が多いため、水を上下に循環させる必要が

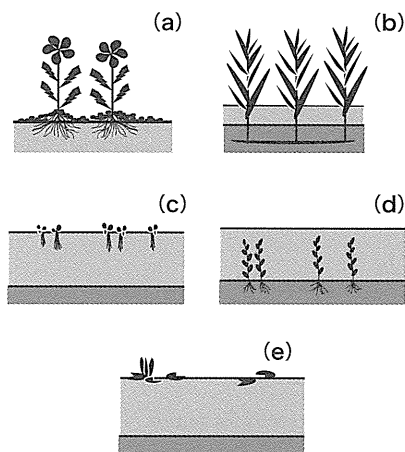


図1 植物の生活型の分類

(a) 陸上植物、(b) 抽水植物、(c) 浮葉植物、(d) 沈水植物、(e) 浮遊植物

表1 植物を用いた水処理の最近の報告例

植物名	学名	対象物質	文献
ウキクサ	<i>Lemna minor L.</i>	Acid Blue 92	6)
ホテイアオイ	<i>Eichornia crassipes</i>	As, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn	7)
ギョウギシバ	<i>Cynodon dactylon</i>	dibenzofuran	8)
ベントグラス	<i>Agrostis palustris Huds.</i>		
シバ	<i>Zoysia japonica</i>		
シロツメグサ	<i>Trifolium repens L.</i>		
ヤナギ	<i>Salix ssp</i>	Cd	9)
ヒメガマ	<i>Typhadomingensis</i>	Fe, Mn, Zn, Ni, Cd	10)
ダンチク	<i>Arundo donax</i>	P	11)
シロイヌナズナ	<i>Arabidopsis thaliana</i>	Co-PCBs	12)
ヘビノネコザ	<i>Athyrium yokoscense</i>	Cu	13)
カラシナ	<i>Brassica juncea</i>	As	14)

ある。また、栄養塩類を蓄積した植物を回収するのは難しい。沈水植物も同様、栄養塩類を吸収する性質を有するものが多いが、浮葉植物と同様吸収した後、植物を回収するのが困難である。ウキクサ類、ホテイアオイなどが代表とされる浮遊植物は、栽培が容易であり、増殖速度も速く、汚染物質を濃縮後も回収が容易である。

また、植物による浄化で重要な要素を占めるのは、植物を固定するろ床材である⁵⁾。ろ床材の役割は、根を固定するのみならず、微生物の住居となるフィルターの役割を果たし、懸濁物質や有機物をろ過蓄積し、そこに棲む微生物により分解し、植物に吸収されやすくする。また、栄養塩類を吸着したろ床材は土質改良剤としての有効利用法もある。一般に用いられているろ床材は、カチオン交換の高いゼオライト、リン吸収が優れている鹿沼土、ロックファイバー、

礫、再利用セラミックスなどがよく使用されている。

表1に植物を使った修復技術の最近の研究例を示す。ホテアオイ (*E. crassipes*)、カラシナ (*Brassica juncea*) は高い吸着能力が認められており、シロツメクサ (*Trifolium repens*) やシバ (*Zoysia japonica*) はジベンゾフランに対して除去能力があり、ホテアオイ (*E. crassipes*)、ヤナギ (*Salix*)、ヒメガマ (*Typha domingensis Pers.*) はカドミウムを除去するといわれている⁶⁻¹⁴⁾。

3. 水質浄化のメカニズム

植物における水質浄化機能から分類すると、図2に示すように Phytoextraction (ファイトエクストラクション)、Phytoaccumulation (ファイトアキュミュレーション)、Phytodegradation (ファイトディグラデーション)、Phytotransformation (ファイトトランスフォーメーション)、Phytovolatilization (ファイトボラタリゼーション)、Phytostabilization (ファイトスタビリゼーション)、Rhizofiltration (ライゾフィルトレーション)、Rhizodegradation (ライゾディグラデーション) の8つに分類することができる^{3-4,15)} (図2)。Phytoextraction は、植物が土壌や水中から汚染物質を除去することであり、その汚染物質を植物体内で蓄積することを Phytoaccumulation、植物体内で分解することを Phytodegradation という。アブラナ科やトウダイグサ科などの植物は、金属類を他の植物よりも10~500倍も蓄積することができ、Hyperaccumulator (ハイパーアキュミュレーター：金属高蓄積植物) と呼ばれている。他には、スミレ科、イイギリ科、アカネ科、ナデシコ科、キク科、ヒルガオ科、シソ科、ゴマノハグサ科、マメ科、シダ植物なども Hyperaccumulator に該当する。植物が汚染物質を取り込み、体内の防御機構である植物酵素や酵素補因子によって汚染物質を不活性化させる Phytotransformation や植物が土壌または水中の汚染物質を吸収し体内で還元して揮発性物質に

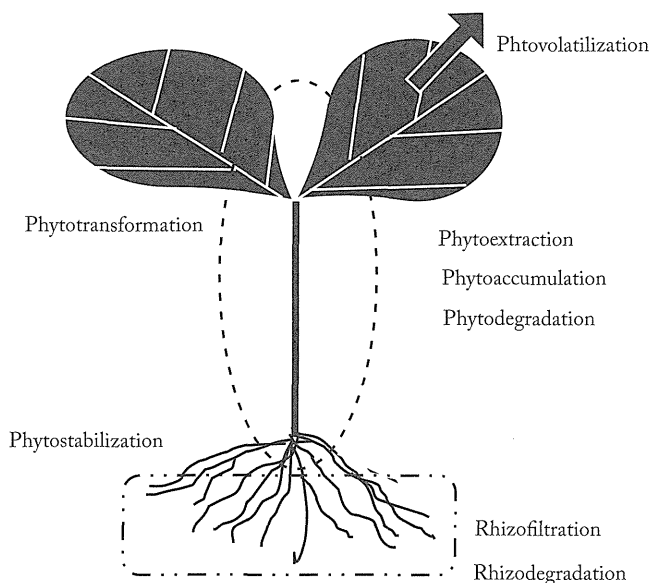


図2 植物浄化のメカニズム

変換させ、葉などから大気中に揮散させる Phytovolatilization という除去法がある。Phytotransformation は、塩素化合物を脱ハロゲン酵素で、フェノール化合物をペルオキシターゼで、爆薬やニトロ化合物をニトロ還元酵素で、シアン芳香族をニトリラーゼで、有機リン系農薬をホスファターゼで物質を転換することをいう。さらに、植物の根圏には微生物、細菌や菌類などが多量に存在しているため根圏部でも汚染物質の処理が盛んである。根圏の微生物、細菌、菌類が汚染物質を分解し、植物の栄養素である窒素やリンを供給して、土壤中に酸素を送る役割を担っている。土壤中の汚染物質を根滲出液のリン酸塩などで pH や水分含量などの土壤環境を改良し、汚染物質の拡散を防ぐ Phytostabilization、植物の根部の濾過効果で水中の汚染物質を取り込み、植物体内に蓄積させる Rhizofiltration、植物の根に由来する細菌や菌類、酵素の作用で汚染物質を分解・無毒化する Rhizodegradation という処理方法がある。Phytostabilization は、利用する植物を適切に選択し維持管理すれば土壤中の汚染物質を安定化させることができ、適切な土壤改良へと結びつけることができ、生物利用効率を減らすことができる。Rhizofiltration は、水生植物によく見られるろ過吸収処理であり、これらの浄化機能がお互い働きあい、対象物質の抽出、分解除去が行われている。

4. 水質浄化の実用例

植生浄化療法として、湿地法、浮遊法、水路法および沈水・浮葉植物法がある¹⁶⁾。湿地法とは、植物が生えている湿地帯に水を通して除去する方法である。湿地法における水の流し方については、汚水が湛水状態で流れる表面流方式と伏流方式がある（図3）。伏流式には汚水を地表面に散布して垂直方向に浸透させる好気的な縦型と浅い地下水として水平向きに流す嫌気的な横型がある。浮遊法はアンカーフロントフェンスを用いて、浮遊植物や抽水植物を水面に浮かべる場合と、人工浮島を設置する浮島浄化方式がある。水路で浄化を行う水路法という方法もあり、植物単体で用いる水耕栽培法とろ床材を併用する植栽ろ床法がある。また、沈水植物や浮葉植物の育成地を流す沈水・浮葉植物法がある。

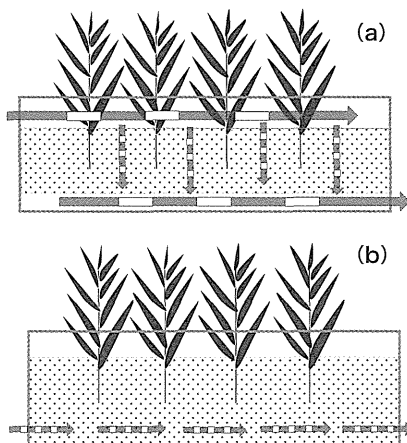


図3 湿式法による2種類の方式
(a) 縦型、(b) 横型

表2 植物を用いた水処理の実用化例

使用植物	対象水	浄化法	施設	面積 (m ²)	文献
ホテイアオイ	農業排水	浮遊植物法	生態系活用水質浄化施設	91	(17)
ホテイアオイ、ボタンウキクサ	河川水	浮遊植物法	生活排水汚濁水路浄化施設	20	(18)
ホテイアオイ	湖沼水	浮遊植物法	ホテイアオイの植栽実験	7,000	(19)
クレソン	湖沼水	ビオパーク方式	水と緑のふれあいパーク	1,260,000	(20)
マコモ	湖沼水	湿地法	環境保全型給餌地システム	4,800	(21)
ヨシ、マコモ	河川水	湿地法	山王川植生浄化施設	約5,600	(22)
ヨシ	生活雑排水	湿地法	ヨシ人工湿地	12,000	(23)
トマト、モロヘイヤ、ケナフ、 バックブン、クワイ、パピルス等	浄化槽二次処理水	植栽ろ床法	バイオジオフィルター	7.8	(24)
スベア・ミント、インパチェンス	浄化槽二次処理水	水耕栽培法	花卉の水耕栽培による除去	16	(25)
シュロガヤツリ、カラー、ミント、 キシヨウブ、スイレン他	下水二次処理水	水耕栽培法、 浮葉植物法	洞海ビオパーク	240以上	(26)
ハス	湖沼水	浮葉植物法	ハスによる水質改善	6,100	(27)
ミズアオイ	湖沼水	浮遊植物法	ミズアオイの池の汚水浄化	2,500	(28)

植物を用いた浄化施設を用いて水質浄化を実用化している施設は日本では数十か所ある。そのいくつかを表2に示す¹⁷⁻²⁸⁾。対象水としては、湖沼水が多く、対象物質は、窒素やリンが多い。今後、植物の遺伝子を組み換えることで、金属や特定の有害物質を選択的に吸収、分解、または耐久性および耐塩性を有する植物の開発や、浄化施設の構造の発展により、湖沼のみではなく河川や閉鎖的な海域を対象として有害物質に汚染された水を改善する施設が実用化されることになるであろう。次の章からは、具体例として環境分野で今問題となっている PPCPs の汚染の現状と、現在基礎研究段階であるが植物を用いての PPCPs の除去について記載する。

5. PPCPs による汚染実態

PPCPs とは、医薬品や化粧品等のパーソナルケア製品に由来する化学物質のことをいう。PPCPs のほとんどが水溶性であり、難分解性であるため下水処理場から環境中に流出している。そのため、下水処理場から公共用水域中に PPCPs が流出することによって生態系への何らかの影響があると考えられており、生物濃縮によって人体に対する影響の可能性があると考えられる。表層水で検出されたおもな PPCPs 濃度を表3-1と表3-2に示す。アメリカのミシシッピ川やポンシャルトレイン川及びそれが流れ込む湖ではナプロキセン²⁹⁾が検出された。また、カナダのデトロイト川ではナプロキセンに加えてクロフィブリン酸²⁹⁾が検出された。アメリカのオーリアンズ運河、ロンドン運河、ペユーセントジョーンズ川でもナプロキセン、イブプロフェン、トリコサンが検出された³⁰⁾。韓国の一川では17種³¹⁾、スペインのリオブレガット川では6種類³²⁾、ドイツのコログン川では5種類³³⁾、ブラジルのパリバズサ川では3種類の PPCPs³⁴⁾が存在していたことがわかった。また、日本でも、相模川ではオキシテトラサイクリン、アセトアミノフェン、イブプロフェン、ナプロキセン、ジエチルトルアミド (DEET)、フェ

表3-1 表層水からの PPCPs の検出例

採水地点	年	対象物質	濃度 (ng/L)	文献
Pariitba do Sul R., Brazil	1996	Clofibric acid	20-30	34)
		Diclofenac	20-60	
		Naproxen	20-50	
Mississippi R., USA	2001	Naproxen	37-65	29)
Lake Pontchartrain R., USA	2001	Naproxen	22-107	
Detroit R., Canada	2002	Naproxen Clofibric acid	63 103	
Orleanscanal, USA	2003	Naproxen	1.6-93	30)
		Ibuprofen	21-85	
		Tricosan	15.2-29	
London canal, USA	2003	Naproxen	5.0-93	
		Ibuprofen	16.6-674	
		Tricosan	2.8-29	
Bayou St. John, USA	2003	Naproxen	2.1-4.8	
	Lake Pontchartrain, USA	2003	Naproxen Ibuprofen Tricosan	
Mississippi R., USA	2003	Naproxen	2.4-12.4	
		Tricosan	1.6-3.1	
Liobregat R., Spain	2003	Diclofenac	1200 (mean)	32)
		Clofibric acid	44 (mean)	
		Acetylsalicylic acid	41 (mean)	
	2004	Diclofenac	86 (mean)	
		Ibuprofen	65 (mean)	
Tricosan	45 (mean)			
Cologne, Germany	2004	Clofibric acid	37-70	33)
		Ibuprofen	20-63	
		Gemfibrozil	22	
		Fenoprofen	14-15	
		Diclofenac	11-15033	

表3-2 表層水からの PPCPs の検出例

採水地点	年	対象物質	濃度 (ng/L)	文献
Sagami R., Japan	2007	Oxytetracycline	10-150	35)
		Acetaminophen	20-100	
		Ibuprofen	30	
		Indomethacin	20	
		Naproxen	10-30	
		DEET	30	
		Fexofenadine hydrochloride	10	
		Chlotamiton	10-30	
		Chlorhexidine Gluconate	10	
		Triclosan	10-60	
Hani R., South, Korea	2008	Iopromide	33-1800	31)
		Atenolol	2.4-150	
		Naproxen	5.3-100	
		DEET	1.5-88	
		Carbamazepine	8.4-68	
		Ibuprofen	1.2-51	
		Sulfamethoxazole	0.25-61	
		Dichlofenac	0.87-30	
		Tricosan	1.0-29	
		Trimethoprim	0.54-17	
		Dilantin	1.8-17	
		Gemfibrozil	0.25-13	
		Atrovastatin	<0.5-5.6	
		Fluoxetine	<0.5-1.5	
Primidone	<0.5-1.4			
Diazepam	<0.25-0.65			
Meprobamate	<0.25-0.65			

キソフェナジン塩酸塩、グルコン酸クロロヘキサジンおよびトリコサンが数十 ng/L レベルで存在していた³⁵⁾。淀川では63種類の PPCPs が検出され、強心剤のカフェイン、鎮痛剤のクロタミトン、消化性潰瘍用剤のスルピリド、抗生物質のクラリスロマイシンの濃度が高かった³⁶⁾。これら河川水への主な汚染源は下水処理場からの放流水であることから、下水処理過程の最後の段階で Phytoremediation を組み入れる等で、処理場の適切な処理が望まれる。

6. 植物による PPCPs 水質浄化への可能性

PPCPs より河川水は広範囲に汚染されていることがわかったが、これを処理する方法は、これまで報告されていない。そこで、現在実験段階ではあるが、植物を用いた水中に含まれる PPCPs 浄化の試みを紹介したい。アリッサム (*Lobularia maritima*)、ペパーミント (*Mentha x piperita* L.)、ボンボンデージー (*Bellis perennis*)、ユリオプスデージー (*Euryops pectinatus*)、キンセンカ (*Calendula officinalis*) を用いてアセトアミノフェンの水からの除去を検討した³⁷⁾。アセトアミノフェン濃度を10mg/L に調製した水中にこれらの植物を水耕栽培し、1週間後にアセトアミノフェンの濃度を測定した。ペパーミント、ボンボンデージー、ユリオプスデージー、

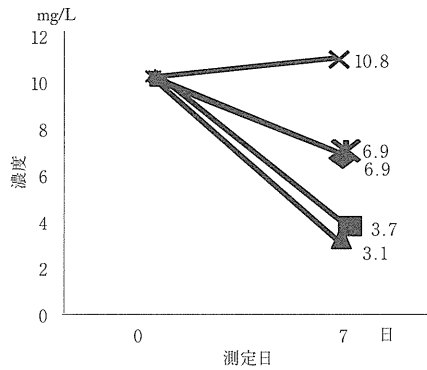


図4 5種類の植物によるアセトアミノフェンの除去

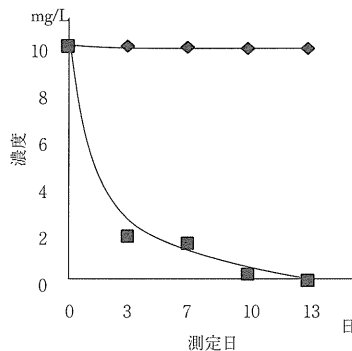
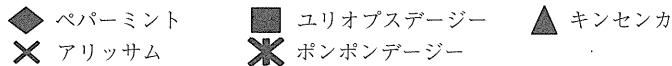


図5 ユリオプスデージーによるアセトアミノフェンの除去



キンセンカのアセトアミノフェン濃度は、各々6.9mg/L、6.9mg/L、3.7mg/L、3.1mg/Lへ減少したが、アリッサムをいれた水中の濃度変化はみられなかった（図4）。濃度の減少が顕著であり腐植しなかったユリオプスデージーに焦点をしぼり、経日ごとに濃度の変化をみた（図5）。3日後には急激な減少がみられ、この植物はアセトアミノフェンの水中からの除去に有望であることがわかった。

7. まとめ

植物による浄化方法は、古くから試みられ、有機物や金属類の除去にはすでに実用化されている。しかし、今回具体例として取り上げたPPCPsや環境ホルモン様物質、有機塩素系化合物に代表されるような難分解性有機化合物などを除去、分解する植物はほとんど見つけられていない。開発途上国のように、低コストで省エネルギーの技術支援を求めている側にとっては、ろ過膜処理技術のようなものよりも Phytoremediation が必要とされるのは間違いない。地球上には水生植物、陸上植物など多種多様に存在し、汚染の浄化に有効な植物は数限りなく存在する可能性があるため、まだまだ研究の余地は残されている。自然由来なので環境にやさし

く、経済的にも比較的安価で、非枯渇性資源である植物による浄化は、持続可能な社会の開発に対する有効な浄化方法の手段になると思われる。さらに、ビオトープなどの景観形成にも役立ち、次世代を担う子供たちへの環境教育にも活用できるので、今後 Phytoremediation は大いに期待できる浄化技術といえる。

参考文献

- 1) B. R. Glick, 2010, Using soil bacteria to facilitate phytoremediation, *Biotechnology Advances*, 28, 367-374
- 2) <http://www.epa.gov/superfund/accomp/news/phyto.htm>
- 3) 藤田正憲, 池道彦, 2006, バイオ環境工学, シーエムシー出版, pp. 52-67
- 4) S. Susarla, V. F. Medina, S. C. McCutcheon, 2002, Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination, *Ecological Engineering*, 18, 647-658
- 5) 大阪大学: <http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/wb/home/database/gainen.htm>
- 6) A. R. Khataee, A. Movafeghi, S. Torbati, S. Y. Salehi Lisar, M. Zarei, 2012, Phytoremediation potential of duckweed (*Lemna minor L.*) in degradation of C. I. Acid Blue 92: Artificial neural network modeling, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 80, 291-298
- 7) F. O. Agunbiade, B. I. Olu-Owolabi, K. O. Adebowale, 2009, Phytoremediation potential of *Eichornia crassipes* in metal-contaminated coastal water, *Bioresource Technology*, 100, 4521-4526
- 8) Y. Wang, H. Oyaizu, 2009, Evaluation of the phytoremediation potential of four plant species for dibenzofuran-contaminated soil, *Journal of Hazardous Materials*, 168, 2-3, 760-764
- 9) I. Lewandowski, U. Schmidt, M. Londo, A. Faaij, 2006, The economic value of the phytoremediation function—Assessed by the example of cadmium remediation by willow (*Salix ssp.*), *Agricultural Systems*, 89, 68-89
- 10) A. Mojiri, 2012, Phytoremediation of heavy metals from municipal wastewater by *Typhadomingensis*, *African Journal of Microbiology Research*, 6, 643-647
- 11) M. Sagehashi, A. Kawazoe, T. Fujii, H.-Y. Hu, A. Sakoda, 2009, Analysis of Phosphorus Behavior in the Giant Reed for Phytoremediation and the Biomass Production System, *Water and Environment Technology*, 7, 143-154
- 12) K. Asai, K. Takagi, M. Shimokawa, T. Sue, A. Hibi, T. Hiruta, S. Fujiihiro, H. Nagasaka, S. Hisamatsu, S. Sonoki, 2002, Phytoaccumulation of coplanar PCBs by *Arabidopsis thaliana*, *Environmental Pollution*, 120, 509-511
- 13) 村田勝夫, 白石奈那, 2008, シダ植物“ヘビノネゴサ”の phytoremediation 効果と銅の分析の研究, 23, 293-303
- 14) 井上和幸, 深山敏明, 岡田真規子, 橋本潤子, 植物を用いた汚染土壌の環境修復に関する研究(第2報), 一ファイトレメデイエーションによる鉛及びヒ素の吸収効率について—, 2011, 石川県保健環境センター研究報告書, 48, 14-18
- 15) M. A. Rahman, H. Hasegawa, 2011, Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes, *Chemosphere*, 83, 633-646
- 16) http://reed-net.com/pdf/DairyJapan_2010.pdf
- 17) http://www4.city.kanazawa.lg.jp/data/open/cnt/3/7892/1/houkoku_siryouhen.pdf
- 18) 古川憲治, 藤田正憲, 重村浩之, 平郡町役場生活環境課, 1997, 各種接触担体と水生植物の組み合わせによる生活排水汚濁水路浄化施設の処理特性, *日本水処理生物学会誌*, 33, 161-170
- 19) 奥田惟精, 佐藤正春, 1983, ホテイアオイによる栄養塩吸収 手賀沼における植栽実験から, 公害と対策, 19, 1, 77-83
- 20) 石川県 <http://www.pref.ishikawa.lg.jp/kasen/kiba/index.html>
- 21) 江成敬次郎, 鈴木淳, 杉山智洋, 1996, 水生植物(マコモ)を利用した水質改善の試み—伊豆沼の事例,

- 用水と廃水, 38, 647-655
- 22) 野村武史, 江頭信一, 松本博文, 橋口茂, 2002, 自然水質浄化機能を活用した実験施設の計画・設計について, こうえいフォーラム, 10, 45-50
 - 23) 細見正明, 1991, 湿地による生活排水の浄化, 水質汚濁研究, 14, 674-681
 - 24) 藤田正憲, 森本和花, 河野宏樹, Silvana Perdomo, 森一博, 池道彦, 山口克人, 忽田訓, 2000, 水質浄化に利用可能な植物データベースの構築, 環境科学学会誌, 14, 1-13
 - 25) 平野浩二, 1995, 花卉の水耕栽培による団地浄化槽二次処理水中の栄養塩除去, 資源環境対策, 31, 1041-1050
 - 26) 竹中昭博, 吉田俊幸, 鍋島豊, 1999, 植生浄化による処理水のせせらぎ利用, 下水道研究発表会講演集, 36, 1-3
 - 27) 福島忠雄, 岩田雄三, 1989, 生活雑排水が混入する溜池の植生(ハス)による水質改善効果について, 農業土木学会論文集, 142, 99-105
 - 28) 池田弘子, 森栄, 1960, ミズアオイの池の汚水浄化, 奈良女子大学生物学会誌, 10, 146-148
 - 29) G. R. Boyd, H. Reemtsma, D. A. Grimm, S. Mitra, 2003, Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in surface and treated waters of Louisiana, USA and Ontario, Canada, Science of The Total Environment, 311, 135-149
 - 30) G. R. Boyd, J. M. Palmeri, S. Zhang, D. A. Grimm, 2004, Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and endocrine disrupting chemicals (EDCs) in stormwater canals and Bayou St. John in New Orleans, Louisiana, USA, Science of the Total Environment, 333, 137-148
 - 31) Y. Yoon, J. Ryu, J. Oh, B. G. Choi, S. A. Snyder, 2010, Occurrence of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals, and personal care products in the Han River (Seoul, South Korea), Science of the Total Environment, 408, 636-643
 - 32) M. Kuster, Maria José López de Alda, M. D. Hernando, M. Petrovic, J. Martín-Alonso, D. Barceló, 2008, Analysis and occurrence of pharmaceuticals, estrogens, progestogens and polar pesticides in sewage treatment plant effluents, river water and drinking water in the Llobregat river basin (Barcelona, Spain), Journal of Hydrology, 358, 112-123
 - 33) U. Jux, R. M. Baginski, H. G. Arnold, M. Krönke, P. N. Seng, 2002, Detection of pharmaceutical contaminations of river, pond, and tap water from Cologne (Germany) and surroundings, International Journal of Hygiene and Environmental Health, 205, 393-398
 - 34) M. Stumpf, T. A. Ternes, R. D. Wilken, S. V. Rodrigues, W. Baumann, 1999, Polar drug residues in sewage end natural waters in the state of Rio de Janeiro, The Science of the Total Environment, 225, 135-141
 - 35) 上村仁, 2007, 相模川水系河川水中の医薬品類の分布, 神奈川県衛生研究所研究報告, 37, 60-64
 - 36) 杉下寛樹, 山下尚之, 田中宏明, 田中周平, 藤井滋穂, 宝輪勲, 小西千絵, 2007, 淀川流域の下水処理場放流水と支川における医薬品の存在実態, 環境工学研究論文集, 44, 307-312
 - 37) 長谷川有紀, 酒井万里奈, 山尾千晶, 張野宏也, 2013, 植物によるアセトアミノフェンの浄化効率の最適化, 日本水環境学会年会 講演集, 47, 628

(原稿受理日 2013年9月30日)