特集・〈第4回環境用水の汚濁とその浄化シンポジウム〉より

ウォーターレタスによる栄養塩除去と 大規模生育実験

青井 透*・大月 伸浩*・白田 寛**

1. はじめに

利根川水系は首都圏約2,600万人の飲料水源であるが、利根川水系の上中流部に位置するほとんどの下水処理施設は、湖沼法の適用を受けておらず、そのため特に窒素、リンの除去を行っていないため、下水道の普及に伴い河川や湖沼における富栄養化（霞ヶ浦や渡良瀬貯水池などに代表される）は進行しつつあり、飲料水源としての利用に制限を加えている（例えば平成6年夏の大渇水の時、渡良瀬貯水池の水はアオコの繁殖により上水源として利用できなかった）。この富栄養化防止の方策は多数あるが、この中で水生植物を利用した栄養塩除去技術は、水面と太陽エネルギーを利用するため「エコロジーかつエコノミー」な技術である。

水生植物は、ホテイアオイのように水面に浮遊する浮漂性植物と、ヨシのように根を底土にはる抽水性植物等に分けられるが、浮漂性植物は自由水面をそのまま利用できるために、成長植物体の回収が可能であれば、水質浄化への適用としては抽水性植物の利用に比べてよりエコノミーであり、柔軟な対応が可能である。浮漂性植物の代表とされるホテイアオイについては、既に多くの研究がなされているが、いまだに実用化されていないのは、過大になる成長植物体の水域からの回収が困難であることが、大きな要因と考えられる。

著者らは、浮漂性植物による水質浄化技術に、ホテイアオイに代わる植物としてウォーターレタス（写真1に屋外連続実験時の外観を示した）を取り上げ研究を行ってきた¹⁻⁶⁾。ウォーターレタスは熱帯アフリカ原産の多年性水生植物で、繁殖茎を分離す

写真1 ウォーターレタスの外観（屋外連続実験）

ることで増殖する。この植物はホテイアオイのように成長して枝が絡んで一体化することがなく、単株で浮遊するという特徴があり、単株当たりの湿重量も最大500g程度と過大化しないために、水面からの回収が行いやすい（ラジコンボートでも回収可能）のが利点である。また、このウォーターレタスは $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_x\text{-N}$ が同時に存在する場合、 $\text{NH}_4\text{-N}$ を優先的に除去することや、梅雨期における低日照時、夏季における高温時のいずれの場合でもホテイアオイに比べて高い増殖速度を示すことが分かっている。古川らも、生活排水で汚濁した水路での生育実験で、ウォーターレタスのほうがホテイアオイより生育速度が速かったと報告している⁷⁾。

本論文では、ウォーターレタスの屋内回分実験による窒素・リン物質収支、屋外連続実験による栄養塩の除去速度、及び実際のため池を用いた大規模生育実験を行い、閉鎖性水域における実用化について検討を行ったので報告する。

2. 実験内容および方法

2.1 屋内回分実験

*群馬工業高等専門学校環境都市工学科 Toru AOI,
Nobuhiro OTSUKI

**東洋建設(株) Hiroshi USUDA

写真2 屋内回分実験装置外観

写真3 屋外連続実験装置外観

60cm熱帯魚用ガラス水槽を3基、屋内の恒温槽に設置し、一定温度・一定照度の条件で、基質とする窒素の成分を変化させ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$: 基質として NH_4Cl , KNO_3 , K_2HPO_4 を使用し微量栄養素として活性汚泥処理水を添加), ウォーターレタスの回分生育実験を行った。毎日の植物生育量を計測するとともに、水質を測定した。水中より除去されたN, P量を水質データから計算し、実験終了時に植物体に含まれるN, P量を分析して物質収支を求めた。水質分析には $\text{NH}_4\text{-N}$ (インドフェノール比色法), $\text{NO}_x\text{-N}$ (2波長紫外外部吸光度法), $\text{PO}_4\text{-P}$ (モリブデン青・アスコルビン酸法) により行った。実験装置の外観を写真2に示す。

2.2 屋外連続実験

当高専合併処理浄化槽(1,200人槽・接触曝気法)の消毒前処理水を原水とし、定量ポンプで各容量12ℓの直列36連のプランターに供給した。この実験装置全体がハウス内に設置されているので雨による影響は受けない。ウォーターレタスは旺盛な繁殖を示すので、時々余剰の植物体を間引いて管理した。写真3に屋外連続実験装置の外観を示した。水質分析方法は2.1と同様である。

2.3 ため池での大規模生育実験

本校には長さ約130m, 幅約60m, 水面積7850㎡の農業用ため池があるので、このため池で大規模生育実験を行った。このため池(HRT 2—4日)は、高専周辺の市街化が進んだにもかかわらず市街化調整区域に位置するため、下水道が未整備で生活雑排水の混入が著しく、池の底には降雨時に水路の底から巻上げられ流入した有機汚濁物がヘドロ状に沈積し嫌氣的分解をしている。池水の浄化をはかるため、

ため池水面の一部をフロートフェンス(発砲スチロール使用, 面積1500㎡)で仕切り、別な場所で育成したウォーターレタスを移送して成長状況を観察した。また湖岸に50mm塩ビ管を接続し底部に金網を張った浮揚性のフレーム(幅1m×長さ1.5m&2m)を複数製作し、そのなかでウォーターレタスとホテイアオイを一定株数育成して増殖速度の観察を行った。

3. 結果および考察

3.1 屋内回分実験における栄養塩の物質収支

物質収支を求める屋内回分実験の実験条件一覧を表1に示す。3系列の実験を同時にスタートしたが、窒素の基質としては窒素濃度は同一とし、 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の3種類を使用した。開始時の窒素濃度は40mg/ℓ, リン濃度は5mg/ℓとした。照明には2灯式の植物生育用蛍光灯を2基使用し終日照明とした。水温は恒温槽で20℃に保った。図-1には、屋内回分実験での植物湿重量の経日変化を示した。最も速く成長したのは $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ を窒素源に用いたもの、次に $\text{NH}_4\text{-N}$ を用いたもので、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を用いたものの成長が最も遅かった。

表1 物質収支を求める屋内回分実験条件一覧

基 質	濃 度	RUN 1	RUN 2	RUN 3
$\text{NH}_4\text{-N}$	mg/ℓ	40	0	20
$\text{NO}_3\text{-N}$	mg/ℓ	0	40	20
$\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$	mg/ℓ	40	40	40
$\text{PO}_4\text{-P}$	mg/ℓ	5	5	5

注記: $T_w = 20^\circ\text{C}$, 照度4,300Lx

微量栄養素として活性汚泥処理水を各500ml添加

図一 屋内回分実験での植物量の経日変化

図二 屋内回分実験での各態窒素の経日変化

表2 水からの除去量と、植物による回収量の比較

	単位	RUN 1 (NH ₄ -N)		RUN 2 (NO _x -N)		RUN 3 (NH+N _x)	
		N	P	N	P	N	P
植物中の含有量	%	3.68	0.27	2.90	0.26	2.99	0.27
水から除去された量	g	1.07	0.04	0.78	0.01	1.05	0.06
レタスに含まれる量	g	0.53	0.04	0.34	0.03	0.63	0.06
回収率	%	50	97	43	529	60	101

図一2には同回分実験での各水槽内の各態窒素の濃度変化を示した。NH₄-Nを用いた実験ではNH₄-Nの減少とNO₃-Nの増加が観察され、植物の根に付着した微生物による硝化が起こっているものと思われる。実験終了後、生育した植物を乾燥させ、含まれている窒素・リン・カリの分析を行った。この数値と実験終了時の植物重量から除去されたN、P量が計算できる。また水系からの窒素・リンの除去量も計算できるので物質収支の検討を行った。表2にこれらの結果を示した。リンについては水系から除去された量と植物が回収した量はほぼ等量であるが、窒素については水系からの減少量に対して植物に固定された量は43~60%であり、植物に固定された量とほぼ同量が脱窒素により除去されているものと想定される。ウォーターレタスが繁殖したときに根周辺のDOは大幅に低下することも、脱窒素が起こっていることを示唆している。

3.2 屋外連続実験による栄養塩除去特性

今回行った屋外連続実験の概要を表3に示す。表3には、概略の窒素除去速度も示した。図一3に示した実験装置では、右手前の水槽に流入した原水が36本のプランター（水深は約20cm）を経由して流出するが、その間でN、Pの除去が行われるので、ウォーターレタスの外観・色は入口と出口では大幅に変化していることが分かる。図一3には、屋外連続実験各RUNでのN、P濃度の経日変化を示した。実験は夏季に行ったので、日照・水温ともに十分な条件であり最大除去速度で除去が行われる環境である。図一3のRUN3では、滞留時間が70時間と長いためにほぼ半分の時間（1.5日）でほぼ全量の窒素が除去されている。このときの植物量は概ね15kg Wet/m²であり、ほぼ飽和の状態であった。次のRUN4は滞留時間を33時間に短縮して行ったが、この実験を行う4日前に植物を50%程度間引いたために見かけ上の窒素除去速度は5mg/ℓ/日と低下しているが、この後行ったRUN5では再び植物量が飽和状態に回復したために、窒素除去速度は10mg/ℓ/日となっている。このようにN、Pともにほぼ直線的に除去されており、その除去速度はN (as NO₃-N) 10mg/ℓ/日、P 2mg/ℓ/日程度であり、植物による処理としては非常に高

表3 屋外連続実験概要

略号	実験日	植物量	窒素($\text{NO}_x\text{-N}$)除去速度
RUN 1	1996.6/4	植物がプランター内飽和状態	
RUN 2	1996.6/7	植物がプランター内飽和状態	8 mg/ℓ/day
RUN 3	1996.8/12	植物がプランター内飽和状態	10mg/ℓ/day
RUN 4	1996.8/19	植物を約1/2に間引いた状態	5 mg/ℓ/day
RUN 5	1996.8/26	RUN 2後成長し飽和に近い状態	10mg/ℓ/day

図-3 屋外連続各RUNでのN, P濃度の経日変化

い除去速度と良好な再現性を示した。

従来植物による水質浄化は、「よりまし技術(ないよりましの技術)」と言われてきたが、ウォーターレタスによる水質の浄化は再現性があり、十分に装置化の検討が可能である。実験のほとんどは夏休み期間となったため、合併浄化槽の流入負荷が低く、接触曝気槽内でNH₄-Nはほぼ完全に硝化されており、窒素の除去速度はNO_x-Nの条件しか検討できなかったが、NH₄-Nの場合にはさらに除去速度は増加すると思われる。一般的な生活排水処理施設処理水の窒素濃度は20-30mg/ℓ、リンは2-3 mg/ℓで

あるので、この連続実験のような装置で2日程度滞留させれば、特に高度処理を行わなくても、処理水中のN, Pはそのほとんどを除去することが可能である。

3.3 たため池を用いた大規模生育実験

大規模生育実験でウォーターレタスが水面をほぼ被覆した時点の外観を写真4に示す。実験開始時に約150m²に過ぎなかったウォーターレタスは、夏期の高湿と日照に恵まれ、非常に高い速度で水面を被覆してゆき、約2週間でフェンス内はほとんど覆い尽くされた(写真4(a) [正面], (b) [裏面])。写真4(c)は生育しているウォーターレタスの拡大写真である。放流して2週間程度しか経過していないために、植物の単株はそれほど大きくなっておらず二次元的に成長しており、開水面が2-3割観察される。その後、局地的な夕立の降雨によりフェンス内ウォーターレタスの2/3が流出してしまったが、残った植物が生育を続け再び2週間後には全面を被覆した。図-4に大規模生育実験での水面被覆経過の一例を示す。著者らによる過去の回分実験結果では、比増殖速度は最高で0.11 (1/d)であったが、比増殖速度が0.1ということは10日間で倍の重量になる計算であり、栽培水域を完全に被覆するまでには約一ヵ月を要するはずである。しかし予想に反して約2週間で水面を完全に被覆したことは、この植物が成長途中でまず横方向に成長するため、比増殖速度で計算したよりも高い速度で水面を被覆したものと思われる。

また湖岸に設置した塩ビフレーム内では、ウォーターレタスとホテイアオイとの成長状況を比較するために、写真5(a)に示すように8月初めに両植物を7株ずつ放流した。その後観察を続けたが、14日後ウォーターレタスはフレーム内を完全に被覆したがホテイアオイは9月中旬ようやく全面を被覆した。全面被覆後のフレームの状況を写真5(b)に示したが、ウォーターレタスのほうが成長は旺盛であっ

(a)

(b)

(c)

写真4 大規模生育実験でのレタスの成長
(放流から2週間後(a), (b), (c))

た(中央右側がホテイアオイ, 両端はウォーターレタス)。この実験の結果から, 本ため池のような環境(本実験中の水質の一例は, 全窒素 $2.6\text{mg}/\ell$ ($\text{NO}_x\text{-N } 1.4\text{mg}/\ell$, $\text{NH}_4\text{-N } 1.2\text{mg}/\ell$) 全リン $0.6\text{mg}/\ell$ であった)において, ウォーターレタスはホテイアオイに比べ, やや高い速度で成長することが確認された。

図-4 大規模生育実験での水面被覆経過図

(a)

(b)

写真5 栽培フレームでの生育実験(放流時(a)と生育後(b))

写真6には最大繁殖時の外観を示す。ウォーターレタスの色は鮮やかな緑色であり, ホテイアオイの深緑色よりも景観的には明るくて優れていると思われる。大規模生育実験での植物量は最大成長時で単位面積当たり $15\text{kg Wet}/\text{m}^2$ 程度であり, 株当たりの

写真6 水面被覆後のレタスの最大成長

最大湿重量は350g程度であった。この数値は、より高い窒素・リン濃度の浄化槽処理水を用いた連続実験で生育したウォーターレタスの単位面積湿重量・個体湿重量とほぼ同等であった。この植物はホテイアオイのように枝が絡み合わず単独株で生育するために回収が容易であることが確認された。

4. ま と め

以上に示したようなウォーターレタスの各栽培実験より、ウォーターレタスの優れた水質浄化能力、極めて高い増殖速度、幅広い適用可能性が明らかとなった。特に、農業用ため池での夏季大規模生育実験で非常に高い水面被覆速度を示したことは、日光遮断によりアオコの増殖を防止できる可能性を示唆している。この植物は熱帯原産のために冬季の低温では生育できない（最低温度15°C）が、生活排水処

理水は冬季でも環境水よりも高い水温をもっており、太陽熱やプロセス内排熱（いわゆるソフトエネルギー）を有効に活用できれば、冬季間の生育も不可能ではない。かりに冬季間の生育が困難としても4月から12月まではこの植物の利用は可能であり、浄化に用いられる植物の中では汎用性が高いと思われる。

今後は、ため池を用いて水面からの回収システムの開発と回収植物体の堆肥化について、引き続き検討を進めて行きたい。

参 考 文 献

- 1) 大庭栄次, 青井 透 (1995) 水草 (ウォーターレタス) を用いた合併処理浄化槽処理水からのN, P除去, 第32回下水道研究発表会講演集, pp646-648
- 2) 大島秀則, 青井 透, 林 俱子 (1996) ウォーターレタスとホテイアオイ植物体の有効成分組成の検討, 第30回日本水環境学会年会講演集, p88
- 3) 臼田 寛, 青井 透 (1996) ウォーターレタスによる環境水浄化の実用化の検討, 第33回土木学会環境工学研究フォーラム講演集, pp39-41
- 4) Aoi, T., Hayashi, T. (1996) Nutrient Removal by Water Lettuce [*Pistia stratiotes*], Wat. Sci. Tech. 34, No. 7-8, pp407-412
- 5) 青井 透, 臼田 寛 (1996) ウォーターレタスによる水質の浄化と生態系の復元, 環境技術, 25, pp536-536
- 6) 大月伸浩, 青井 透 (1997) 水質浄化に用いたウォーターレタスの堆肥化の検討, 第31回日本水環境学会年会講演集 p428
- 7) 古川憲治, 藤田正憲, 重村浩之, 平群町役場生活環境課 (1997) 各種接触坦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, No. 3, pp161-170

ニュース

ダイオキシンに関する 自主基準を発表

——感染性廃棄物処理に関する自主基準
の改訂迫られる——

去る10月23日開催の(財)全国産業廃棄物連合理事会において、かねてより中間処理部会で検討中の「ダイオキシン類発生抑制対策のための産業廃棄物焼却自主基準」が正式に決定し、①燃焼を良くし、未燃成分を少なくする②煤塵量を低減する③生成温度域の滞留時間を短縮するの三点について具体的な対策

を定め、焼却における燃焼管理を適正におこなうことによって、ダイオキシン類の発生を抑制することになっている。

尚感染性廃棄物の処理は、現在9割近くが焼却処分されているので、再三述べられているように「感染性廃棄物処理に関する自主基準」も、当然改訂が迫られ、10月29日開催される医療廃棄物部会運営委員会において取り上げ、部会内に小委員会を設け具体的な検討に入る予定である。

(財)全国産業廃棄物連合会