技術報告

ウォーターレタスによる水質の浄化と生態系の復元

青 井 透*・臼 田 寛*

はじめに

戦後の河川改修は大河川から小川に至るまで、主として災害防除の目的で直線化・コンクリート化が図られてきたが、河川改修の結果として小河川の殆どはコンクリート護岸（三面張りが多い）が設けられ、蛍・トンボや身近な在来種淡水魚は殆ど姿を消した。これは長く受け継がれてきた豊かな水文化の消滅ともいえるものであり、機能的だが潤いのない水環境が展開された。しかし最近では所轄官庁である建設省河川局自体が『多自然型川づくり』を提唱しており、川の改修に関する認識に大幅な変換が行なわれようとしている¹⁾。ところが多自然型水辺環境の創生には水質の問題だけではなく、昆虫や魚など水生小動物の生態学的な検討に基づく住み家作りが必要であり、このような自然復元に関する技術は殆ど整理されていないのが現状である。著者等は、閉鎖性淡水域の浄化に用いられるホテイアオイの代替えになりうる浮漂性植物であるウォーターレタスの研究を最近手掛けている^{2)～7)}が、この植物を水生動物の住み家に用いて学校内の池やため池などで実際に水辺生物の復元を実験しているのでその結果を報告する。

1. ウォーターレタスに関する従来の研究

水生植物による水質の浄化については多くの研究がなされてきたが、もっとも研究された植物は浮漂性植物であるホテイアオイである。ホテイアオイについては青山⁸⁾、沖⁹⁾等による研究など国内でも多くの研究がなされてきたが、あまり実用化された様子がないのは成長個体が過大となり人力による回収が困

難、寒さに弱く冬季間枯れて沈積してしまうと汚濁源となる、回収植物体の有効利用方法に決め手がない等の要因によると推察される。Reddy 等はフロリダの湖沼でホテイアオイの研究を行ないながら水生植物の利用についてのレビューを行なっている¹⁰⁾が、水質浄化用に望まれる浮漂性植物の条件は、成長速度が速く単位面積あたりの個体量が多いことが上げられており、本論文の対象であるウォーターレタス [*Pistia stratiotes*] がホテイアオイの次に成長の速い植物として示されている。図-1 に Reddy 等による水生植物利用水質浄化の基本概念を示すが、本研究はこの概念に環境復元を追加しようとするものである。

ウォーターレタス¹¹⁾は、最近熱帯魚店で水槽内の観賞用植物として1株100円程度で販売されている浮漂性植物（直径2cm程度）であるが、浄化槽処理水などのN、Pの豊富な屋外環境で育てると直径25cm・湿重量300gと重量比で約1,000倍に成長することがわかっている。写真1に当高専合併浄化槽（1,100人槽）処理水で育てたウォーターレタスとホテイアオイの外観を示すが、ウォーターレタスの葉

AQUATIC MACROPHYTE-BASED WASTEWATER TREATMENT

CONCEPT

図-1 水生植物による水質の浄化の概念図

* 群馬工業高等専門学校環境工学専攻
Toru AOI, Hiroshi USUDA

写真1 合併浄化槽処理水で生育したウォーターレタス（左）とホテイアオイ（右）

の色は光沢のないあざやかな緑色であり景観的に落着きのある形状である。著者等の研究では、ウォーターレタスの比増殖速度はホテイアオイと同等の0.1（1/D：温暖期）で極めて高く、耐寒性もホテイアオイよりやや強くまた景観的にも優れており、繁茂した条件での植物体量は15kgWet/m²程度となるため、栄養塩除去として冬季露地使用を除いて実用になることを示している。

浮遊性植物が水質浄化に適用できる条件の一つは、余剰植物体の有効利用であるが、水面からの回収は1個体がホテイアオイほど過大に成長しないウォーターレタスに利があり、有効利用については未知数ではあるが可能性を残している（ホテイアオイの有効利用にはあまり良い方法がないとされている）。

植物全般の傾向として栄養塩欠乏環境では根の成長が著しくなるが、ウォーターレタスも同様であり庭園などによくみられる水道水を供給しているコンクリート池（貧栄養であり生物相としては不毛なケースが多い）では、この長く成長する根圏が水生小

動物の生育環境として（食料および隠れ場所として）適しており、環境復元の視点からこの植物は成長速度の速さを生かして迅速な環境作りが可能である点でも優位性があると思われる。

ウォーターレタスによる栄養塩の除去については既に報告済であるので、本論文ではウォーターレタスの根を住み家とした環境復元の可能性について検討する。

2. 実験方法

環境復元の実験は、群馬高専内にある実際の池（実験A）や、建て家屋上の池（実験B）及び富栄養化した農業用ため池（実験C）を用いて行なった。

2.1 屋外のコンクリート池を用いた実験（実験A）

当高専のコンクリート池は庭園の景観用として作られた変形の池であるが、落葉と泥が堆積しクチボソ・ドジョウ・ヨシノボリを除いて生物的に殆ど不毛の状態であったので、底泥の清掃後一部に木工沈床を設置（内部には栗石を充填）し、底面に栗石を配置し斜面部分にはセキショウ・アヤメ等の抽水植物、水面にはウォーターレタスを植栽した。本池は水道水（専用水道地下水）が供給されているので貧栄養であるため、植物の栄養源として顆粒状の化成肥料を袋に詰めて設置した。詳細を表1に示した。

2.2 実験棟屋上に水張りした人工池での実験（実験B）

実験棟はシート防水の平らな屋上をもっているのので、屋上雨水の目皿を30cm程嵩上げて池にし、N、P源として無機塩を添加して水道水で満たした。建築物であるので床面は何もさわらず、水面にウォーターレタスを植栽し10匹程度のメダカ・クチボソ及びカワニナ（20匹程度）を放流した。詳細は同じく

表1 ウォーターレタスを用いた自然復元実験設備概要

No.	実験設備の場所	使用した水	設備の諸言	備 考
A	コンクリート池 校内入り口の庭園内 (下田池と称す)	地下水 (専用水道) 常時少量メイクアップしている	巾6m×長9m長円形池 水深0.5m, 底部周囲は コンクリート, 内部に 木工沈床を設置した。 周辺に樹木あり。	実験開始は95年5月・川から栗石を搬入設置。周囲のコンクリート斜面にはセキショウ等の抽水植物を配置し、水面にはウォーターレタスを浮かべた。清掃前はヘドロのみで隠れ場所もなく生物は殆ど住んでいない。
B	実験棟屋上 (ゴムシート防水) (衛生工学実験棟)	地下水+雨水 通常補給なし	巾7m×長13m長方形池 水深0.25m, 容量22m ³ , 水面積90m ²	実験開始95年7/16・底面には何も無いまま水面にウォーターレタスを浮かべ当初N30mg/ℓ, P10mg/ℓになるよう栄養源として無機塩を添加した。蒸発した水分はときどき手導で地下水を補給。水を張る前は単なる屋上で何も無し。
C	農業用ため池 (高専敷地内但し 水の管理権は水利 組合にある)	流入する農業 用水(但し生 活雑排水で汚 濁している)	長130m×巾60m 楕円 形池, 水深1m, 面積約 5,000m ² (栽培水域はそ の内1,300m ²)	実験開始96年7/16・水面に発泡スチロールのフロートフェンスを浮かべ、あらかじめ実験Bで栽培したウォーターレタスを放流。当初の植物投影面積200m ² 。降雨時の汚濁物流入で底泥メタン発酵。コイとフナ以外の魚住めず。不毛も環境。

表1に示した。

2.3 農業用ため池での大規模実験（実験C）

本高専内には長さ130m、巾60mの農業用ため池があるが、高専近辺の市街化が進んだにもかかわらず下水道が未整備のため生活雑排水の混入が著しく、池の底は降雨時に水路の底から巻き上げられ流入した有機汚濁物沈積により嫌気性分解をしており、水質も劣化（流入 BOD 3～10mg/ℓ）している。岸辺はコンクリート及び栗石をコンクリートで固めた護岸のため、水生動物が繁殖できる場所がなく、生育しているのは僅かにコイとフナのみであり汚濁に強いクチボソも生息していない（鴨はこの池で繁殖している）。

この規模の池になると、底泥の浚渫は1,000万円単位の大工事（4年前に実施、浚渫土砂量2,800m³）となるため、人力での作業は不可能であるが、富栄養化している水面に浮漂性植物を繁茂させることは可能であり、水質の浄化と水生動物の住み家作りを兼ねて水面の一部をフロートフェンス（発泡スチロールフロート使用・栽培面積1,300m²）で仕切り、実験Bで生育したウォーターレタスを移植して実験Cを開始し、水面の状況を観察した。

3. 実験結果

3.1 屋外のコンクリート池（実験A）

コンクリート池でのウォーターレタス生育の時系列変化を写真2、写真3に示した。開始後1ヵ月後にはウォーターレタスは水面の1/3を占めるよう

写真2 実験A開始から1ヵ月後の外観（栗石は1/2のみ設置、対岸の枠が木工沈床）

写真3 実験A開始から4ヵ月後の外観（全面をウォーターレタスが覆い稚魚の隠れ場所となる）

表2 自然復元のための操作とその結果

No.	自然復元のための操作	そ の 結 果
A	木工沈床による生物の住み家造り 栗石配置による生物の住み家造り コンクリート斜面にセキショウ、ショウブなどの抽水植物を配置し根を張ることを期待 水面にウォーターレタスを浮かべ生物の隠れ場所を作る	ザリガニ・メダカ・ドジョウが繁殖（1年後の観察） カワニナは一部定着するが泥が堆積し嫌気化したところには何も住まない ウォーターレタスは増殖し8月末には全表面を覆う、鉄分不足のため葉の色は黄色っぽい メダカの稚魚はウォーターレタスを隠れ場として繁殖。 ヤゴは僅かしか生息しない（1年後の観察） 抽水植物の定着には時間がかかる。セキショウのみ定着（1年後の観察） 洪水がないため汚濁負荷は少ないが、落葉や枯れたウォーターレタスが沈積し嫌気化（1年後の観察）、1年後の清掃不可欠
B	水面に昆虫・稚魚などが隠れる場所をつくるためにウォーターレタスを浮かべる。足場を兼ねてビールケースを5個配置。ウォーターレタス繁殖用に当初N30mg/ℓ、P10mg/ℓを添加、クチボソ、メダカ、カワニナを放流	7月中から実験を開始したが、9月中にはウォーターレタスが全水面を覆う。アメンボ・ゲンゴロウ等の昆虫が飛んできて生息開始。トンボが産卵し1月後にはヤゴが羽化する。96年4月水を抜いて清掃。底部にはウォーターレタスの根が腐って嫌気化。そのためカワニナは全滅。清掃時の生息数は次のとおり【クチボソ145匹、メダカ56匹、ヤゴ130(80%以上はヤンマ)】で著しく繁殖】簡単な構造ながら自然復元には有効。但し、沈積した植物由来汚泥の定期的な排出が必要。
C	水面の約1/4にウォーターレタスフェンスを張ってウォーターレタスを放流(栽培水域は1,300m ²)。当初植物投影面積は200m ² 。	B実験の1年後の7月中から実験を開始した。当初植物投影面積200m ² 。半月後にはウォーターレタスがほぼ水面全域を覆う。この期間は梅雨明けで高温・晴天多い。朝コイがウォーターレタスを食べにくる。定着している鴨もウォーターレタスを食べる。メダカの稚魚が観察される。 冬の前に、ウォーターレタスを刈り入れて地上に回収予定。

になり4ヵ月後には全表面がウォーターレタスで埋まり、今まで観察されなかったメダカの稚魚が葉のすきまから観察されるようになり繁殖していることが確認された。写真4には実験Aで生育したウォーターレタスの外観を示す。鉄分の不足のためか全体的に黄ばんでおり、栄養不足のため根が著しく長い。

今年4月に排水し清掃を行なったがザリガニ・メダカ・ドジョウとごく僅かのヤゴが観察された。詳細を表2に示した。

本来この池はホタルの発生を目的としてカワニナも放流したのだが、露地のために冬季間にウォーターレタスが枯れて沈積した底泥は嫌気化しており、移動速度の遅いカワニナの繁殖は本実験では困難であった。底泥が嫌気化する前に除去することが今後の課題である。

3.2 実験棟屋上の人工池（実験B）

7月から実験を開始したことも影響するかもしれないが、立ち上がりにはまずゲンゴロウ・アメンボが飛来して住み着き始めた。短時間でヤゴが発生し毎日トンボが羽化することが観察された。写真5、写真6に水面の様子を示すが、富栄養の環境（初発濃度N30mg/l, P10mg/l）のため、葉の生育は旺盛で根の長さは実験Aに比べて短かった。今年4月に排水し清掃をした結果、放流時に比べて極めて多くの各生物個体（但しカワニナは死滅・酸欠のため）が観察された。ヤゴは130匹が生息していたがその殆どはヤンマの幼虫であった。表2に詳細を示したが、底部には何もないシート防水の池でも、水面を浮漂性植物が覆い餌と住み家ができれば、ごく短時間に生態系の復元がなされることがわかった。

3.3 農業用ため池での実験（実験C）

本実験の開始は、実験Bから1年後である。2年目で早い時期から開始した実験Bでのウォーターレタスの生育は今年も良好で、7月時点で全水面積がウォーターレタスで覆われたため、そのほぼ全量を農業用ため池のフロートフェンスで囲んだ栽培水域（1,300m²）に放流することから実験Cを開始した。ウォーターレタスの自然流水域での大規模生育実験は初めてである（昨年度も試みたが、大雨・台風時にフロートフェンスの強度が不足し大部分のウォーターレタスが流失したために実験は失敗した）が、梅雨明けからの好天と高温にも恵まれ、非常に速い速度で水面が被覆されることがわかった。写真7は栽培水域がほぼ被覆されている状況を示している。

写真4 実験Aでのウォーターレタスの外観
(鉄分不足のためか黄色ばんでおり栄養不足のため根が著しく長い)

写真5 実験B開始から2ヵ月後の外観（ほぼ全面をウォーターレタスが覆う、突起物は実験室の排気塔）

写真6 実験Bでのウォーターレタスの外観
(N, Pを与えているため濃い緑色を示す)

写真7 実験C農業用ため池での大規模生育実験開始から半月後の外観（生育面積は1,300m²）

写真8 実験Cでのウォーターレタスの外観(実験Bとほぼ同様に富栄養化している水域のため濃い緑色を示す)

写真8はウォーターレタスの生育状況を示すが、実験Bとほぼ同様の形態である。

朝の調査では、いつもコイが盛んにウォーターレタスを食べているのが観察されている。生態系の復元までには多くの時間を要し底泥の対策等も必要であるが、ウォーターレタスの繁殖により閉鎖性水域での窒素・リン濃度の低下はほぼ確実であり、生息場所の供給とともに生態系の復元は進んで行くものと推察される。引続き実験を継続中である。

まとめ

晩夏には水たまりに2匹つながったトンボが産卵する光景をよく目にするが、多くのコンクリート池(汚濁していない池でも)で殆どトンボが発生していないことは周知の事実であり、このことは産卵された卵を孵化するためには水質だけではない別の点でも環境作りが不可欠であることを示している。本研究は、高専の庭園内にある飲料水を供給しているコンクリート池と実験棟のシート防水屋上(水と肥料とウォーターレタス以外には何も加えていない)及び農業用ため池を実験場所に用いて、水生動物の生態系の復元を図り年間を通して行なった実験であるが、適切に計画・実行すれば予想を越えた短期間に多生物型環境を作ることができることのひな形を示すことができたと考えている。

群馬県は豊富な水と傾斜地に恵まれ多くの湧水があり、豊かな水環境の恩恵に浴していたはずであるが、現在の水環境の荒廃は首都圏と同等代るところ

はない。地下水を含めた水資源の灌養・水の循環利用技術の開発と共に多生物型河川環境の創生のための基本的な技術開発を今後とも進めていく予定である。

(注記)本実験は屋外でのかなり規模の大きな実験であり、池の清掃、栗石の搬入・設置、フロートフェンスの設置、生物の回収と計量、日常管理等には多くの労力を要したが、これらの労力は当高専土木工学科衛生工学研究室の4, 5年学生諸君及び同専攻科環境工学専攻の専攻科1, 2年学生諸君の協力によるものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 関 正和(1994) 大地の川(甦れ、日本のふるさと川の川), (樹草思社)
- 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) 白田 寛, 青井 透(1996) ウォーターレタスとホテイアオイの生育及び窒素除去特性の検討, 第30回日本水環境学会年会講演集, p213
- 4) 青井 透(1996) 新しい浮漂性植物(ウォーターレタス)の栄養塩除去特性, 第3回北海道大学衛生工学シンポジウム論文集, pp48-53
- 5) Aoi, T. and Hayashi, T. (1995) Nutrient Removal by Water Lettuce [*Pistia stratiotes*], 18th Biennial Conference of IAWQ (Singapore), Preprint Book 4, pp80-85
- 6) Aoi, T. and Ooba, E. (1995) Rates of Nutrient Removal and Growth of the Water Lettuce [*Pistia stratiotes*]. 6th International Conference on the Conservation and Management of Lakes-Kasumigaura'95, pp430-433
- 7) 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からのN, P除去, 第32回下水道研究発表会講演集, pp25-27
- 8) 青山 薫(1982) 水生生物を利用した水質改善, 用水と廃水, Vol.24, No.1 pp87-94
- 9) 沖 陽子(1980) 水生雑草ホテイアオイをめぐる諸問題, 農業技術, Vol.35, pp491-501
- 10) Reddy, K. R. and DeBusk, T. A. (1987) State-of-the-art utilization of aquatic plants in water pollution control, Wat. Sci. Tech. Vol. 19, No.10, pp61-79
- 11) 古川憲治, 重村浩之, 藤田正憲(1996) エコテクノロジーを活用する汚濁河川の直接浄化, 第30回日本水環境学会年会講演集, p77