

水生植物を用いた江戸城外濠水質改善プロジェクト

(教員：山川隆)

小高章宏、佐治薫、佐野洋輔、陳秦伸、光嶋脩剛

1. 導入

1.1. プロジェクトの目的

富栄養化の進行によるアオコの発生が問題になっている江戸城外堀の水質を、植物の力を利用して改善する。

1.2. 概要

現在の東京には、かつて徳川家康が統治する江戸幕府が存在していた。その統治は約 250 年にわたって続いたが、戊辰戦争に敗れたことにより江戸幕府は終わりを迎えることとなる。その後、時代の移り変わりとともに町並みは変貌を遂げたが、現在の東京には当時の名残がいくつも残っている。

その一つが飯田橋駅から四ツ谷駅にかけて伸びる江戸城外濠（えどじょうそとぼり）である。この濠は江戸城を囲む外濠の一部であり、歴史的に重要な資料であるとともに、その周囲の市民にとって憩いの場になっている。ところが、都市開発の中で周囲が埋め立てられ周囲の川とのつながりがなくなった現在の外濠は、水の流れの滞りと大雨時に流れ込む下水が原因となり、水質の富栄養化が進行している。その結果、近年は夏にアオコが発生するようになり、景観の悪化や悪臭の発生が周囲を訪れる人に不快感を与えることが問題となっている。これに対して、環境省が機械を導入することを検討しているが、コストや継続性が問題となり未だ改善の見通しは立たない。

そこで、本プロジェクトでは低コストかつ持続的な水質浄化を実現するため、植物による水質浄化を提案する。

1.3. 江戸城外濠の水質

川村らによる調査をもとに外濠の水質におけるリンと窒素の濃度をもとめ、それをもとに千鳥ヶ淵環境再生プラン案をもとに目標値を定めた(図1)

外濠の全窒素濃度と全リン濃度はアオコの発生する夏季の間にそれぞれ、6.0mg/L,1.5mg/L にまで達する。この数値は、生息水生生物を目安にする基準において、最も汚濁した段階に分類される。本プロジェクトでは、全窒素濃度と全リン濃度をそれぞれ、0.8mg/L,0.05mg/L 以下にすることを目標とする。

	Min. Concentration (mg/L)	Max. Concentration (mg/L)	Average level (mg/L)	Target level (mg/L)
T-N	1.9	6	3.2	0.8
T-P	0.05	1.5	0.5	0.05

図 1 江戸城外堀の現在の水質と目標値

1.4 現地視察

プロジェクトを始めるにあたって、私たちはまず初めに現地の視察を行った。周囲の通りから見たところ、水が濁っていることが確認できた。またアオコによる悪臭も感じられた。視察は秋の気温が低い時期であったが、その状況でもはっきりと感じられたことから、夏はさらに強い悪臭が発生していると考えられる。

2. 利用する植物

2.1 利用植物の選定過程

水質改善に利用する植物は、①ホテイアオイ、②アカウキクサ、③ハス、④スイレン、⑤エビモの 5 種を候補植物として挙げ、この 5 種の比較により選定した。

まず、上記 5 種の植物を候補に挙げた理由を説明する。①ホテイアオイは、浄化作用の観点で著しい効果がすでに証明されているため候補に挙げた。ただし、外来種のため周辺住民が嫌う可能性が懸念された。②アカウキクサは、浄化作用がある程度期待され、さらに在来種が存在するという利点があり候補に挙げた。③ハスと④スイレンは、在来種があり日本人に親しまれていることから、周辺住民の支持を期待して候補に挙げた。⑤エビモは、近年江戸城内濠で大量発生し、人が手を加えることなく水質改善がなされたという実績から候補に挙げた。

以上の 5 種を、複数の観点から比較した。比較は、(c)浄化作用、(d)費用、(e)バイオマス利用、(f)住民への影響という 4 つの観点を、それぞれ 0 ポイントから 5 ポイントの 6 段階（点数が高いほど高評価）で評価することで行った。さらに(a)生育様式と(b)生育期間も選定の際の考慮に入れた。以下の表 1 は、5 種の評価結果を示したものである。なお、表では 0-1 ポイントを「×」、2-3 ポイントを「△」、4-5 ポイントを「○」と表記している。

表 1. 候補となった植物種の比較

植物種	(a) 生育様式	(b) 生育期間	(c) 浄化 作用	(d-1) 初期 費用	(d-2) 維持 費用	(d-3) 除去 費用	(e) バイオマ ス利用	(f) 住民へ の影響

①ホテイアオイ	浮遊植物	夏	○	○	△	○	○	△
②アカウキクサ	浮遊植物	夏	△	○	△	○	○	×
③ハス	抽水植物	春夏秋	×	×	○	×	△	○
④スイレン	抽水植物	春夏秋	×	×	○	×	△	○
⑤エビモ	沈水植物	秋冬春	○	○	○	△	○	△

表を見ると、①ホテイアオイと⑤エビモの2種は、欠点（「×」）がなく、総じて評価が高い。また、(a)生育様式に着目すると、この2種は生育する水深が異なるため、共生しやすいと思われる。さらに、(b)生育期間が異なるため、この2種を用いれば年間を通じた水質改善が期待できる。

一方、②アカウキクサは、(d)費用や(e)バイオマス利用のポイントは高いが、生長しても花を咲かせることはなく、外濠水面を赤茶色の植物体で覆ってしまうため、周辺住民の評価は非常に低いと思われる。また、④ハスと⑤スイレンは、逆に周辺住民の評価は期待できるものの、最重要課題である(c)浄化作用が低い。

以上のように、候補に挙げた5種を比較した結果、①ホテイアオイと⑤エビモの2種を併用することに決定した。この2種を併用することが、「バイオマス利用により費用を抑えて外濠の水質改善を達成する」という本プロジェクトの目的に最も適うと判断した。

1.4. 利用植物の概要

・ホテイアオイの概要

南アメリカ原産の単子葉植物ミズアオイ科に属する浮遊植物の一種。春から夏の終わりにかけて生育し青紫の花を咲かせて、冬には枯れる。実際に外濠で良好な生育を示し、過去の事例などから高い浄化作用が期待できる。また、非常に旺盛な栄養生殖により次々と数を増やすことが知られる。一方で、外来種であることなどから生態系への影響が懸念されるが、外濠は閉鎖的な空間であるため問題はないと考えられる。

本プロジェクトにおいては、枯れる前に回収することで水中の栄養分を回収し、また回収した植物体をバイオエタノールに変換して利用することを提案する。

・エビモの概要

日本を含むアジア、北アメリカ、オーストラリア、ヨーロッパ、アフリカ原産のヒルムシロ科に属する沈水植物の一種。ユニークな性質をもち、止水域においては秋から冬にかけて成長し夏に徒長枝を形成して枯れるが、流水域では一年中旺盛な生育を示す。

内濠での良好な生育を示し水質を大きく改善した例があり、水質浄化能力は高いとされている。

回収が困難で含水量が高く、また有効な利用方法が分かっていないことから本プロジェクトでは回収はせず水中で維持する。

2. プロジェクトの提案

2.1. 方法

互換性の問題により別紙参照

2.2. 水質改善効果

Wuら(2009)、Davidら(1996)による研究をもとに各植物の水質浄化能力を算出し、これを上記の水質状況・目標時(図1)と照らし合わせて、目標値を達成するのに必要な各植物の栽培面積を求めた。以下にその結果を示す(図2)。

※Davidらによる研究はクロモに関するデータである。エビモに関するデータがなかったため、本プロジェクトでは同じ沈水植物であるクロモを参照した

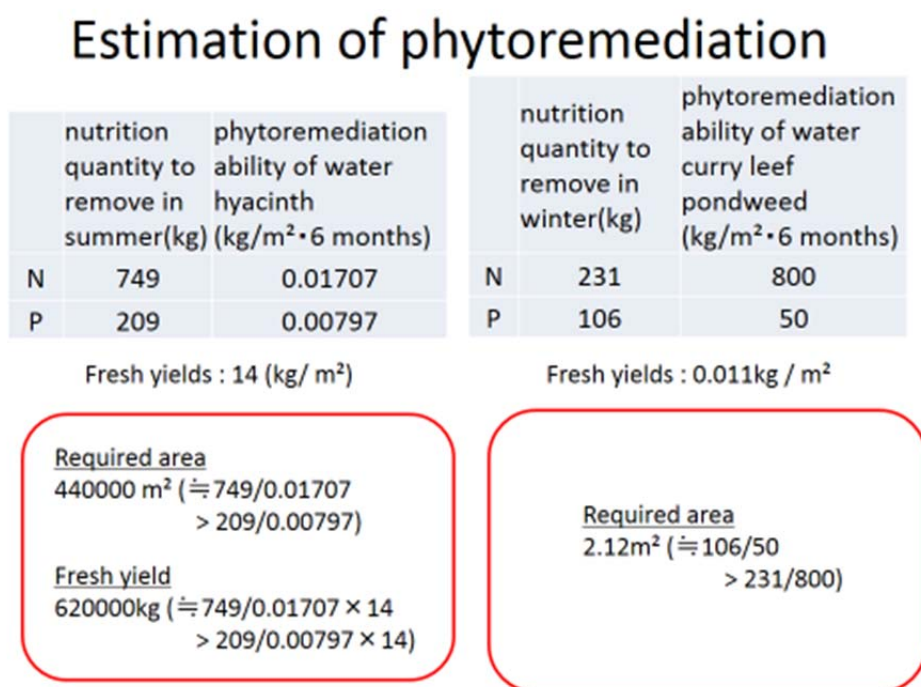


図2：各植物における水質浄化効果

この結果から、夏季においては全体の約3分の1にあたる面積にホテイアオイを生育させることで十分な水質浄化が達成できるとわかった。一方で冬季においては、わずか2 m²にエビモを生育させるだけで目標値を達成できる結果となった。

しかし、エビモの値は常識から考えると必要な面積が過小であると考えられる。この原因は、論文の筆者らによる分析方法が影響していると思われる。ホテイアオイの場合、水中で生育させた植物体内の各栄養素の増加量を分析している。一方でエビモの場合は、クロモを生育させた水槽の水質変化から算出している。そのため、Davidらの研究における水質改善効果には植物による影響以外の要素も関わっている、もしくは栄養素が沈殿した

可能性が考えられ、それがこのようなデータに表れたと思われる。

また、ホテイアオイにおいても、わずか約3分の1にあたる面積で浄化可能という算出となったが、こちらも現実的とは言えないだろう。このような結果となったのは、Wuらによる実験は水槽中に常に栄養分を流し続けた環境で行われており、植物が栄養分を吸収するには最適の環境であったため、解析したデータが植物の栄養吸収量のほぼ最大値を示していることが原因であると考えられる。もし、外濠で実証を行ったとすると、水の対流の弱さや密集による競争などから Wu よりも低い吸収量となり、同様の面積であっても数年かかると考えられる。

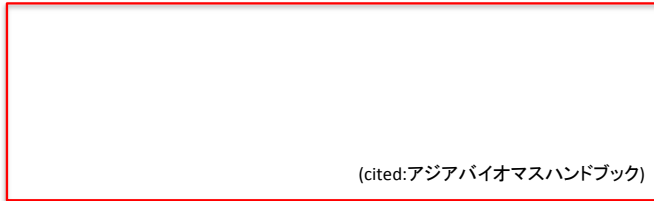
以上、季節ごとに水質浄化に必要な各植物の栽培面積に関して、現実的ではないという考察をした。しかし、これらの植物が高い水質浄化能力を持っていることは確かであり、算出したほどではないにしても数年にわたって浄化を行えば見違えるほど水質は改善されることが考えられる。

2.3. バイオマス利用

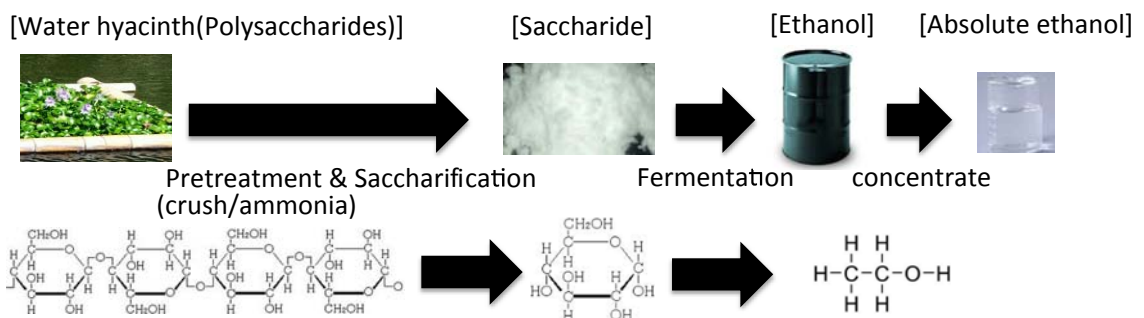
[ホテイアオイを用いたエタノール生産について]

バイオエタノールは植物由来の多糖であるセルロースやヘミセルロースを単糖に分解する糖化、単糖をエタノールに変換する発酵という行程を経て生産される。糖化効率を左右することから、このとき重要なのは原料の化学成分である。本実験で用いたホテイアオイは草本系の植物と成分が近く、セルロース(16.2%)やリグニン(6.1%)が非常に少なく、ヘミセルロース(55.5%)が多いのが特徴であり、参考にした草本系のエタノール生産プロセスによって比較的容易に生産できると考えられる。まず原料を細かく砕き、アンモニアによって膨潤させ、酵素による分解を促す。その後、酵母を用いて発酵し、濃縮する。

～Water hyacinth for bioethanol～



～Process of bioethanol production～ (ex. Herbaceous plant)



[cited: バイオ燃料開発の取組について(平成25年度概算要求事業等) 平成24年12月資源エネルギー庁新エネルギー対策課、Google 画像]

図3：ホテイアオイをバイオエタノールに変換するプロセス

[バイオエタノール生産にかかるコスト]

バイオエタノール生産は NEDO 千葉発酵工場に委託した場合を想定している。我々が回収したホテイアオイは乾燥重量で 31,000kg であり、1kg から 0.3L の濃縮エタノールが生産できる設備なので合計で 9,300L のエタノールが生産できる。その際にかかるコストはそれぞれ以下の通りであり、合計利益は 5,039,000 円である。この我々のプロジェクトの利益は非常に高いと考える。例えば、北海道で農林水産省によって行なわれた廃棄米を用いたプロジェクトと比較すると、同規模でおよそ 100 倍以上の利益があった。これは恐らく、本プロジェクトは委託しており設備投資がかからないことや、人件費や運営費等の項目において様々な文献を用いて本プロジェクトの条件に当てはめた為と考えられる。

～Cost of bioethanol production～

Water hyacinth (dry) 122,500kg
(=36,750L)

1kg Water hyacinth
= 0.3L Absolute ethanol (95度、1級)

Items	Productive cost of 1L Absolute ethanol	In this time
Materials	27円/L	36,777円
Collect Carrytransport		1,080,000円/年 <small>[cited: 以上、バイオ燃料開発の取組について、平成25年度概算要求事業等 平成24年12月 資源エネルギー庁新エネルギー対策課]</small>
Pretreatment Fermentation Concentration	40円/L	1,470,000円 <small>[cited: バイオ燃料技術計画 平成20年3月バイオ燃料技術革新協議会]</small>
Enzyme	44円/L	16,171,000
Consignment (委託販売)	20円/L	730,000円 <small>(cited: NEDOの販売するアルコールの価格表)</small>
Selling price (販売価格)	789円/L	28,995,750円
Total benefit		9,507,973円

2014/01/09

25

図4：ホテイアオイによるバイオエタノール生産の収支

2.4. 住民への影響

2.4.1 パブリック・アクセプタンス

- ・パブリック・アクセプタンス推測のための前提

仮に我々が素晴らしいプロジェクト案を作ったとしても、パブリック・アクセプタンスが得られなければプロジェクトを実施することはできない。そこで、本プロジェクトを、外濠に関係をもつ人びとが支持する見込みがあるのかを検討してみる必要がある。

外濠に関わりをもつ人びとが本プロジェクトを支持するかどうかは、大量の質問票調査などによって人々からの声を直接集めるという方法が好ましいと思われる。しかしながら、外濠に関わりをもつ人々と言っても、観光客などを含めると多岐にわたる。そのため、実際に質問票調査を実施するのは時間的・金銭的に困難である。よって、ここでは本プロジェクトの内実を見返すことで、外濠に関わる人びとが本プロジェクトに対してどのような印象を抱くかを考えてみる。なお、外濠に関わる人は、周辺住民、千代田区役所職員、新宿区役所職員や観光客など多様であるが、直接に大きな影響を受けるとされる周辺住民を想定してパブリック・アクセプタンスについて検討する。

2.4.2 外濠の2つの変化と周辺住民の反応

周辺住民は、どのような観点から我々のプロジェクトに対して支持や不支持を表明するであろうか。住民の支持・不支持は、本プロジェクトの結果生じる外濠の変化に関わる。もし本プロジェクトによって生じた外濠の変化を住民が好ましいと感じるならば、本プロジェクトはパブリック・アクセプタンスを得ることができるはずである。そこで、本プロジェクトによる外濠の変化を考えてみよう。

本プロジェクトを通じて、外濠は 2 つの点で大きく変化する。一つ目は、水質改善である。そして、水質改善はアオコの大量発生を防ぎ、結果的に外濠の水が発する悪臭を減らす。水質改善を通じた悪臭減少により、住民は利益を得ることはあっても不利益を被ることはないはずである。したがって、一つ目の変化について住民の支持を得られることは疑いない。

二つ目の変化は、外濠の景観変化である。本プロジェクトではファイトメディエーションの植物としてホテイアオイを採用したが、夏になるとホテイアオイの青紫の花々が咲き乱れ、外濠の水面全体を覆うはずである。¹水面に植物がほとんど見られない現在の景観と比較すると、外濠の景観は大きく変容する。このホテイアオイの開花による景観変化を、住民は肯定的にも否定的にも評価する可能性がある。なぜなら、ホテイアオイの導入は景観植物として人びとを楽しませるとも、史跡として認定されている外濠の歴史ある景観を破壊するとも考えうるからである。以下で詳しく検討してみよう。

ホテイアオイ導入による景観の変化に対し、人びとがどのような印象を抱くかは、二つの側面で分けて考えることができる。環境的な側面と文化的な側面である。

まず、環境的な側面から考えてみよう。ホテイアオイは非常に旺盛な繁殖力で水面を覆いつくし、ときに様々な問題を引き起こすために、「青い悪魔」と呼ばれ恐れられている。さらに、ホテイアオイは在来種を排除してしまうこともあり、IUCN によって「世界の侵略的外来種ワースト 100」にも選ばれている。このようなホテイアオイの性質から、外濠の自然環境破壊を恐れてホテイアオイ導入を周辺住民が嫌う可能性がある。しかしながら、水質汚染のためか、現在外濠の水面にはほとんど植物が見られない。したがって、ホテイアオイが外濠という閉鎖水域において他の植物の生存を脅かすことはない。むしろ、ホテイアオイの導入は水質改善によって新たに多様な植物や生物が繁茂する環境を生み出す可能性がある。この点が周辺住民に理解され、さらに我々がファイトリメディエーションに利用する植物を適切に管理できることが示せるのであれば、環境的な側面から考えれば住民は本プロジェクトを支持すると思われる。

次に文化的な側面について考えてみよう。国指定の史跡である江戸城外濠は、元々敵の江戸城への侵入を防ぐために造成されたものであり、水面全体が見渡せるように水面は大きな植物がない状態に保たれてきた。したがって、ホテイアオイは外濠の伝統的な水面景観を破壊するものとして、周辺住民に嫌われる可能性がある。この点が、本プロジェクト

¹一方、本プロジェクトで採用した二種目の植物であるエビモは、沈水植物であり植物体は基本的に水中におさまっているため、外濠の景観にはあまり影響を及ぼさない。

がパブリック・アクセプタンスを得るための一番の懸念事項である。しかしながら、ホテイアオイは人びとを楽しませる景観植物でもある。例えば、奈良県橿原市ではホテイアオイが休耕田に景観植物として植えられ、毎年夏の開花時期になると多くの人びとが満開のホテイアオイを見るために集まる。

外濠でも、ホテイアオイが景観植物として受け入れられる余地は大きい。2008年に法政大学で行われた外濠の将来を考える学生ワークショップにおいては、四季を感じることができる景観創出の必要性が確認された(榊, 2008:2-3)。現在、外濠の土手には無数の桜が植えられており、東京を代表する花見スポットとして春には多くの人びとが桜を楽しむ。しかしながら、この桜のほとんどは1976年以降に「東京飯田橋ライオンズクラブ」によって集中的に植栽されたものである。この桜の導入事例から、たとえ景観を大きく変容させるとしても、その景観形成が人びとの望みに適うものであれば、伝統的景観の変容も周辺住民から支持されうるということがわかる。したがって、本プロジェクトのホテイアオイ導入も、景観植物としてホテイアオイをアピールすることで、周辺住民の支持を得られる可能性は十分にある。

3. 総合考察

本プロジェクトでは、富栄養化によるアオコの発生が問題視される江戸城外濠に対して、生育期間の異なる二種類の植物を用いることによる通年の水質浄化方法を提案した。

その水質浄化能力やバイオエタノール生産量に関する見積もりには疑問の残る部分も多く、実際に実施しなければ正確な値はわからないと考えられる。

しかし、水質浄化のみならず景観植物としての側面を持つホテイアオイ、そして回収する必要のないエビモを用いた水質浄化を行う利点は大いにある。また本レポートで提案した施工方法であれば、ホテイアオイを効率的に栽培し回収することができる。今後より詳細な研究を行うことにより、このプロジェクトが実現されることを願う。

4. 参考文献

Phytoremediation facilitates removal of nitrogen and phosphorus from eutrophicated water and release from sediment (Wu Xiang et al ., 2009)

Analysis of interstitial water during culture of *Hydrilla verticillata* with controlled release fertilizers (David L. Sutton et al ., 1996)

都市河川感潮域における水質の水平・鉛直分布特性に関する現地観測

<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00061/2008/35-02-0109.pdf>

IUCN ホームページ「世界の侵略的外来種ワースト 100」

<http://www.iucn.jp/protection/species/worst100.html>

榊俊文(2008)「学生ワークショップから考える外濠の再生について」千代田区ホームページ