

水生植物による琵琶湖流入河川の浄化実験

Experimental Research into the use of Aquatic Plants for the
Improvement of Water Quality in the Main Tributary to Lake Biwa.

中 川 元 男 * 杉 本 博 之 ** 寺 井 和 弘 ***

Motoo Nakagawa * Hiroyuki Sugimoto ** Kazuhiro Terai ***

ABSTRACT: The water quality in Lake Biwa is constantly affected same levels of concentrations in COD, T-N, T-P, but algae bloom or red tide is practically an annual occurrence. So, it is often inadequate for a source of water supply. Therefore it is necessary to make improvement to the water purification capacity of the main tributary into Lake Biwa, to augment past water quality preservation measures.

This report describes the results of field experiments in water purification using aquatic plants. The water purification mechanism using aquatic plants was analyzed, and the optimum conditions for nutrients removal were determined.

The data generated by this study will be utilized for the design and operation of river water purification facilities.

KEYWORDS: Aquatic Plant, Water Improvement Work, Field Experiment, Nutrients Removal

1. はじめに

琵琶湖は、流域面積3,848km²、湖面積約670km²、貯水容量約 275億m³で、流域面積では淀川流域面積の約53%を占め、淀川牧方地点における渇水流量の約3/4を占めており、滋賀県だけでなく京阪神 1,300万人の水源として重要な位置を占めている。

滋賀県では、琵琶湖の水質を改善するために、富栄養化防止条例によるリンを含む洗剤の使用禁止をはじめとする工場や家庭から排出される汚濁負荷の削減対策、あるいは下水道の整備や合併浄化槽の普及促進など様々な水質保全対策を実施してきた。しかしながら琵琶湖の水質は、CODやN、Pなどの指標でみればかぎり横這いの状態が続いており、赤潮やアオコが依然として毎年のように発生している¹⁾。特に琵琶湖の出口となる南湖の水質は、琵琶湖の水に依存する下流府県にとっては大きな関心事であり、これまでの琵琶湖の水質保全対策に加えて、早急な南湖の水質改善対策への取り組みが望まれている。

南湖に流入する汚濁負荷量の形態は、窒素、リンとともに北湖経由負荷を除くと、流入河川経由負荷の占める比率が大きくなっており²⁾、これを削減対象とするものとした。河川経由負荷対策としては、平水時の河川水を対象に植生浄化法を採用するものとし、浄化施設の設計諸元ならびに効率的な運用方法を確立するため、それぞれパイロット実験を実施した。

今回は、植生浄化方式のパイロット実験結果から得られた知見について報告するものである。

* 滋賀県土木部河港課 River and Harbor Div., Department of Public Works, Shiga Prefectural Government

** (財)琵琶湖・淀川水質保全機構 Lake Biwa-Yodo River Water Quality Preservation Organization

*** 建設技術研究所大阪支社環境・システム部 Department of Water Environment and Information System, Osaka Office, CTI Eng. Co. Ltd.,

2. パイロット実験施設の概要

2.1 実験施設の諸元

実験施設は図-1に示すように、幅 2.0m、長さ24mの長方形の水路であり、対照水路を含めて同じ形状の水路を5本設置した。構造は素掘り水路に遮水シートを施工した後、砂質土を充填したものである。

浄化対象水は、南湖に流入する代表的な河川である葉山川の河川水を分配槽にポンプアップし、各水路に分配している。

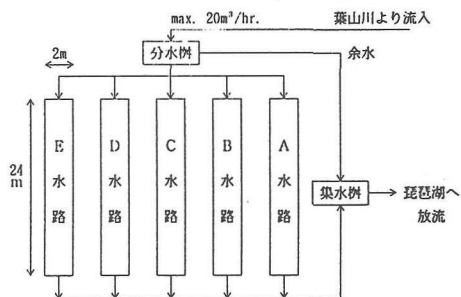


図-1 実験水路概要図

2.2 実験水路の条件設定

本実験においては、導入する植物の種類、水深、水量負荷を操作要因としてとりあげ、表-1に示す条件で約1年間四季を通じて水質浄化特性、植物体増殖特性を評価した。ここで、A水路については水生植物を植え付けない対照水路として位置付けている。

表-1 水路の実験条件

水 路	植 物		水 深		流 量	
	夏 期	秋・冬期	夏 期	秋・冬期	夏 期	秋・冬期
A 水路	無(無)	無(無)	10cm	10cm	3m³/hr.	3m³/hr.
B 水路	クシ	カ-	10cm	10cm	3m³/hr.	3m³/hr.
C 水路	クシ	クシ	20cm	10cm	3m³/hr.	3m³/hr.
D 水路	ヨシ	ヨシ	20cm	10cm	3m³/hr.	1.5m³/hr.
E 水路	ヨシ	ヨシ	10cm	10cm	3m³/hr.	3m³/hr.

2.3 調査分析項目

本実験では、植生浄化水路による水質浄化特性を評価するための水質調査と汚泥や植物体の生成速度や性状分析のための浄化副産物調査を実施するとともに、得られたデータをもとに本法による水質浄化機構について評価を加えた。

(1) 水質調査

水路への流入水と流出水を対象に窒素、リンを中心とした週1回の定期調査と、窒素、リンの形態別水路内縦断分布調査を季別に実施した。

(2) 浄化副産物調査

浄化副産物として水路内に堆積する汚泥の生成量ならびにその性状分析と汚泥からの栄養塩の溶出試験を実施するとともに、植物体の草丈と生育密度を経時的に計測し植物体の増殖速度を評価するとともに、植物体の成分分析を行った。また、併せて水路内に発生する藻類及び雑草について、その種類と個体数の調査を実施した。

2.4 導入植物の概要³⁾

(1) ヨシ

ヨシは水辺に群生する多年草の植物であり、春に地下茎の節から芽を出し、夏にかけて急速に成長し、秋に開花する。地上部は晩秋から冬にかけて枯れるが、一部の地上茎は冬になっても枯れず養分を貯え活動を停止し、次の出芽に備えている。

琵琶湖岸の成長条件の良い場所では、草丈は4～5mにも達し密生したヨシ群落をつくっており、滋



賀県ではヨシ群落保全条例を制定し、地域指定及び各種保全事業を実施している。

(2) クレソン

クレソンは、生食野菜としてヨーロッパより渡来した抽水性の多年草である。低温に強く、繁殖力旺盛で冬季でも常緑である。ホテイアオイとともに高い栄養塩吸収速度で知られており、各地で水質浄化実験への適用事例がみられる。

(3) カラー

カラーはサトイモ科の植物であり、低湿地を好み、純白色の花をつけることから切り花として促成栽培されている。増殖が旺盛で地下茎が肥大し、低水温にも比較的強いこと、浄化副産物としての植物体の商品価値も高いことから、水質浄化への活用が期待される。

3. 実験結果の解析及び評価

3.1 水質浄化特性の評価

水深、水面積負荷、水温、植物体現存量と水質浄化特性の関係について、次に示す知見が得られた。

(1) 水路内水深と栄養塩除去率

春季及び夏季において、クレソンとヨシについて水深条件を10cmと20cmの2ケースで実験を行っており、この間の栄養塩除去率を表-2に示している。

春季のデータによれば、水深条件の差による栄養塩除去率の差はほとんどみられなかったが、植物の成育という観点からは、ヨシでは明らかに水深10cmの方が水深20cmより良好な成育を示した。

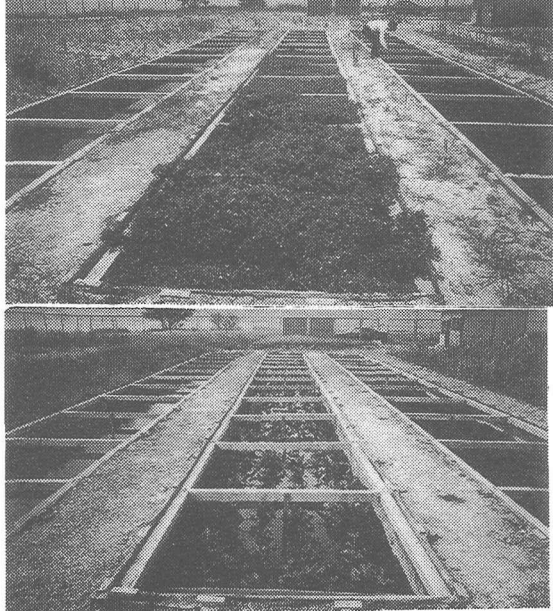
一方、夏季のデータを比較すると、ヨシ、クレソンともに水深20cmの栄養塩除去率が劣っている結果となった。夏季における水深20cmの水路は水路内の発生物（主にウキクサ）が著しく、SSの除去率に示されるように、流出SSも大きくなったものと考えられる。また、クレソン水路については、水深20cmの水路後半部でクレソンが枯死してしまったが、この原因としてもウキクサとの栄養塩や光、酸素をめぐる競合によるものと考えられる。

表-2 水深と栄養塩除去率

水路条件		SS除去率(%)		T-N除去率(%)		T-P除去率(%)	
		春季	夏季	春季	夏季	春季	夏季
畦川	h=10cm	44.4	71.3	21.7	15.7	13.4	14.5
	h=20cm	53.9	85.8	32.7	41.2	38.1	45.2
ヨシ	h=10cm	50.6	56.8	33.5	26.6	36.5	29.2
	h=20cm	53.4	62.9	22.7	41.7	28.6	38.1
クレソン	h=10cm	48.3	49.7	24.9	27.2	32.2	28.7
	h=20cm						

(2) 水量負荷と栄養塩除去率

本実験水路は通水断面積が2.0m(B)×0.1~0.2m(h)であるのに対し、流下距離が24.0mと細長い形状となっており、流速は極めて小さいことから、水の流れは層流で押し出し流れと考えられる。そこで、水路流下方向にポイントを変えて採水し、水質を比較することにより、水量負荷と栄養塩除去率の関係を評価することができる。



春季に実施した詳細観測結果をもとに、水路流下距離別の栄養塩除去率を算出し、水面積負荷との関係を図-2に示した。

なお、他の水路や季節においても同様の傾向が得られている。

同図より、水質項目や水路の条件に係わらず、栄養塩の除去率は水面積負荷($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)を大きくとるほど低下することがわかる。

40%程度の栄養塩除去率を得るためには、水面積負荷としては $1.5 \sim 2.0 \text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 程度に設定する必要がある。

(3) 水温と水質浄化特性

植生浄化水路内の水温と栄養塩除去率の関係を評価した。これらのうち、水温と栄養塩除去率に一定の傾向がみられるのはT-Nに関するクレソン水路とヨシ水路のデータ(図-3参照)であり、水温が高いほど高い栄養塩除去率となる傾向を示している。

これに対して、T-Pについては各水路ともこれらの指標間に一定の傾向はみられず、T-P除去率に関して水温は大きな制限要因とはならないと考えられる。

一方、T-N除去率と水温の関係については、窒素の浄化機構の1つとして、水路内の硝化・脱窒反応を考えることにより説明されよう。

すなわち、水温の高い時期ほどこれらの反応に係わる微生物の活性が増大することから、植物による吸収や捕捉作用に上乗せする形で硝化・脱窒反応が進行し、水温の高い時期のT-N除去率を上昇させたものと考えられる。

(4) 植物体の現存量と水質浄化特性

植物体の現存量として水路内の乾燥重量をとり、栄養塩除去率との関係を評価した。

カラー及びクソレンについては、T-N、T-Pともに植物体の現存量とその除去率の間に正の相関がみられるが(図-4参照)、ヨシについては、両指標間で明確な関係はみられない。このことから、ヨシについては、その浄化機構は沈殿による部分が卓越し、その除去率は水中下にある茎や根の部分の密度に規定され、植生全体の現存量との関係は少ないと考えられる。

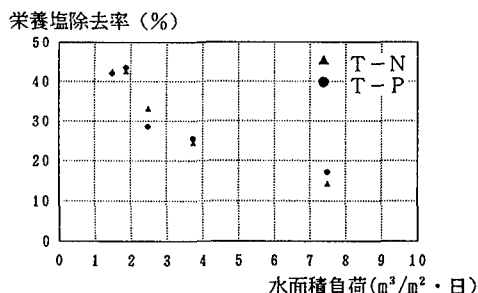


図-2 栄養塩除去率と水面積負荷の関係

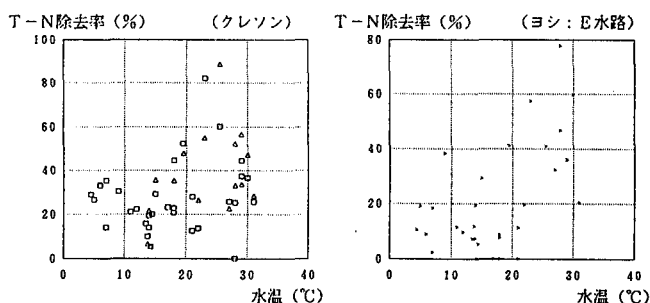


図-3 水温とT-N除去率の関係

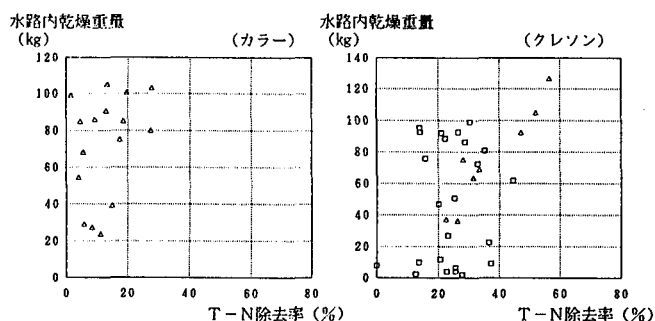


図-4 植物体現存量とT-N除去率の関係

(5) 窒素・リンの形態変化と水質浄化特性

窒素・リンの形態別含有量を流入水と処理水で比較して、図-5～6に示している。

1) 窒素の形態変化と水質浄化特性

通水後30日経過後のT-N除去率が良好な時点での窒素の流入・流出での形態変化をみると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少が目立っている。これは、ケルダールN(有機態窒素+ $\text{NH}_4\text{-N}$)の減少という捉え方をすれば、流下過程で窒素の硝酸化が進行していることを意味する。

一方、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ については硝酸化が進行しているにもかかわらず減少しており、生成した硝酸が植物体に吸収されるか、あるいは脱窒されて N_2 ガスとして大気中へ放散することにより、T-Nの減少をもたらしているものと考えられる。

これに対し、通水後150日経過した底泥の堆積が進行した時点では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度に大きな変化はなく、流入水の有機態Nと $\text{NO}_3\text{-N}$ の1部が減少するにとどまっている。これは、硝化過程は進行しているが底泥からの溶出等により、表流水中へ $\text{NH}_4\text{-N}$ が回帰していることが考えられる。

2) リンの形態変化と水質浄化特性

通水後30日経過した時点でのT-Pの減少は、流入水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 及び $\text{PO}_4\text{-P}$ 以外のリンの減少によるものである。 $\text{PO}_4\text{-P}$ の減少は植物体による吸収によるものであり、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 以外のリンの減少は粒子性リンの沈殿分離及び有機態Pの無機化によるものと考えられる。また、通水後150日経過した時点での観測結果では、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が流入でほとんど検出されていないにも係わらず、流出水で増加しており、水路内からの再溶出(堆積泥や枯死した植物)が生じていたものと考えられる。

3.2 浄化副産物特性の評価

(1) 底泥堆積量の評価

夏季実験終了時に実施した底泥堆積厚調査結果をもとに、各水路に堆積した底泥の量を推算するとともに、底泥堆積速度ならびに流入SSの底泥への転換率について評価を加えた。

各水路の底泥堆積量を評価すると、水深20cmの水路で $2.2\sim 2.5\text{m}^3$ 、水深10cmの水路で $2.0\sim 2.4\text{m}^3$ 程度の堆積量であった。

一方、春季と夏季の平均流入SS濃度及び平均SS除去率、堆積物濃度から、次式により理論堆積量を推定できる。

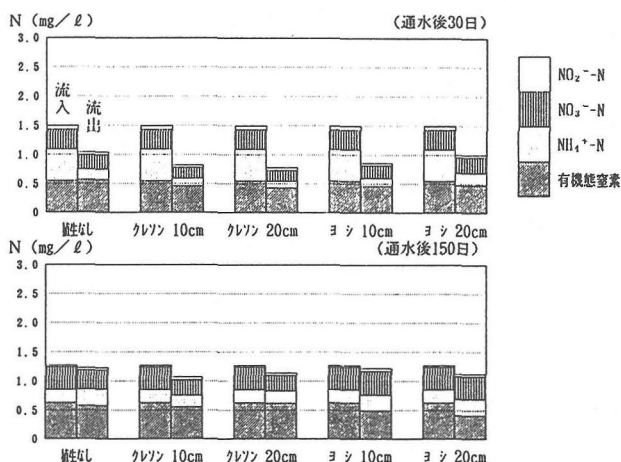


図-5 植生浄化水路による窒素の形態変化

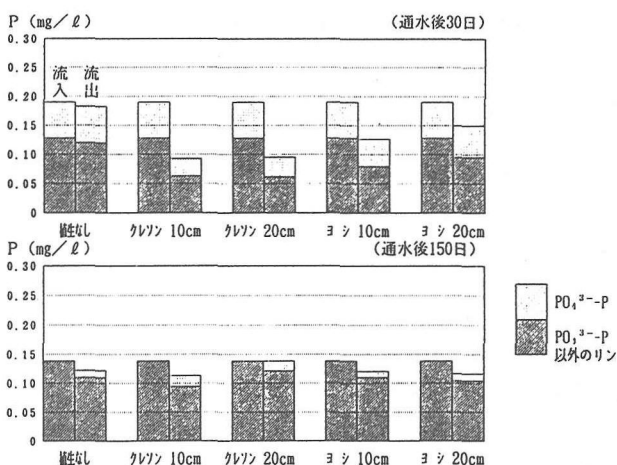


図-6 植生浄化水路によるリンの形態変化

$$V_2 = \frac{24 \times q \times C \times R \times d}{S_c \times 10^6} \quad (\text{m}^3)$$

q : 浄化水量 $(\text{m}^3/\text{hr.})$ S_c : 堆積物濃度 (kg/ℓ)
 FC : 流入水SS濃度 (mg/ℓ) d : 貯留日数 (日)
 R : SS除去率

算定結果を堆積厚から算定した実測値と比較して、表-3に示す。また、同表中には、汚泥生成速度を併記している。

同表によれば、各水路とも理論堆積量の方が実測値より低く算定されており、その差は水深10cmの水路より水深20cmの水路の方が大きくなっている。これは、流入SS起源で生成した汚泥以外に内部生産による生成物の堆積によるものと考えられる。この内部生産量は水路内滞留時間が長いほど大きくなると考えられ、水深の深い水路で理論堆積量と実測堆積量の差が大きいことが説明できる。

表-3 理論堆積量と実測堆積量の比較

植 生 ・ 水 深	植生なし	クレソン10cm	クレソン20cm	ヨシ 20cm	ヨシ 10cm
平均流入SS (mg/ℓ)	30	30	30	30	30
平均除去率 $(-)$	0.60	0.73	0.53	0.49	0.60
堆積物濃度 (kg/ℓ)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
貯 留 日 数 (日)	150	150	150	150	150
理論底泥量 (m^3)	0.648	0.788	0.572	0.529	0.648
実測底泥量 (m^3)	2.322	1.990	2.116	2.482	2.392
汚泥生成速度 $(\ell/\text{m}^2 \cdot \text{日})$	理 論 値	0.090	0.109	0.079	0.071
	実 測 値	0.322	0.276	0.294	0.332

(2) 植物の成育速度と栄養塩除去速度

各水路における植物体現存量の推定結果をもとに、季節の成育速度ならびに栄養塩除去速度を次式により求めて表-4～5に示している。

季節別成育速度 : $(B_{t+1} - B_t) / \Delta t / A \quad (\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{日})$

季節別栄養塩除去速度1 : $(L_{in} - L_{out}) / (B_{t+1} + B_t) / 2 \quad (\text{mg}/\text{g}/\text{日})$

季節別栄養塩除去速度2 : $(L_{in} - L_{out}) / A \quad (\text{mg}/\text{m}^2/\text{日})$

ここに B_t : ある時期のBiomass (g 乾重)
 A : 植生浄化ヤード面積 (m^2)
 L_{in} : 流入栄養塩負荷 $(\text{mg}/\text{日})$
 L_{out} : 流出栄養塩負荷 $(\text{mg}/\text{日})$

植物の成育速度は夏季のヨシで $95.8\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 、秋季のクレソンで $41.2\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ と増殖が著しいものとなった。春季の現存量のデータはないが、ヨシ、クレソンともその成育は良好であった。また、冬季は各植物とも減少を示したが、その速度は小さいものであった。

一方、栄養塩の除去速度については、T-Nについて $0.1 \sim 1.5\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 、T-Pについて $0.01 \sim 0.3\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ と季節や植生によって異なる値を示したが、おおむね夏季に大きく秋季に小さい値を示した。また、冬季に栄養塩除去速度が大きな値を示しているのは、流入水の栄養塩濃度が高かったことから、みかけ上、除去速度を大きく算出されたものである。

3.3 実験結果の総括

(1) 植生浄化水路における水質浄化特性

1) 水深条件

水深の差による栄養塩除去率の差はほとんどみられなかったが、植物の育成の観点からは、ヨシ、クレソンともに10cm程度が望ましい。

2) 水面積負荷

水質項目や水路の条件に係わらず、栄養塩の除去率は水面積負荷($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)を大きくとるほど低下した。所定の除去率を得るためには、水面積負荷として $1.5 \sim 2.0 \text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 程度が望ましい。

3) 水温

T-N除去率は水温が高いほど大きくなる傾向を示し、硝化・脱窒作用の関与が予想されるが、T-Pについてはその除去率に対して水温は大きな制限要因とはならない。

4) 植物体現存量

カラー、クレソンでは、植物体現存量と栄養塩除去率の間に正の相関がみられるが、ヨシについては両指標間に明確な関係はみられなかった。

5) N、Pの形態変化に関して

窒素については、流下過程における硝酸化とその植物体による吸収及び脱窒作用によりT-Nは減少する。T-N除去率が低いケースは、植物や底泥からの回帰が大きいものと考えられる。

リンについては、粒子性リンの沈殿及び粒子性リンの無機化とその植物による吸収により除去されている。

(2) 堆積汚泥特性

春から夏にかけての5ヶ月間(150日)の通水期間で水路内に堆積した汚泥は $2.0 \sim 2.5 \text{m}^3$ 程度であった。

流入SSとその除去率から算定した理論堆積量と実測値を比較すると、実測値の方が大きくなり、内部生産による生成物の堆積があるものと考えられる。

(3) 植物体増殖速度

植物の育成速度は夏季のヨシ、秋のクレソンで大きく、夏季のクレソン、秋、冬のヨシで減少速度が大きかった。また、栄養塩除去速度を算定した結果、夏季で大きく、秋季では小さい値となった。

(4) 水路内発生物

水路内に発生した微生物で優先種となったのは、緑藻類のアオミドロであった。また、ヨシ水路内に混入した雑草ではカヤツリグサが30%、イネ科の雑草が10%であり、ヨシの占める比率は50%であった。

(5) 植生浄化水路による水質浄化機構

各水路における季節別の栄養塩収支をとった結果、植生浄化水路では植物体の増殖がみられない時期においても沈殿作用等により、栄養塩除去が行われていることがわかった。また、植物体の枯死や堆積泥からの溶出、水路内の再生産も収支上、無視できない量で存在することが判明した。

4. 今後の課題と展望

植生浄化方式による水質浄化実験を4季にわたり実施してきた結果、その水質浄化特性に影響を及ぼす要因や水質浄化機構については、かなりの知見が集積されたと考える。

今後、植生浄化型の河川浄化施設を事業化するにあたっての課題は次の2点である。

表-4 植物体 育成 速度

項 目	B 水路 (ヨシ・クレソン)	C 水路 (クレソン)	D 水路 (ヨシ)	E 水路 (ヨシ)
夏季 育成速度($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)	-26.8	-15.5	16.4	95.8
秋季 育成速度($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)	29.7	41.2	-30.6	-158.2
冬季 育成速度($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)	-11.3	-4.9	-6.1	-22.1

表-5 栄養塩 除去 速度

項 目	T-N				T-P			
	B水路 (ヨシ・クレソン)	C水路 (クレソン)	D水路 (ヨシ)	E水路 (ヨシ)	B水路 (ヨシ・クレソン)	C水路 (クレソン)	D水路 (ヨシ)	E水路 (ヨシ)
夏 除去速度 ($\text{mg}/\text{g} \cdot \text{日}$)	0.78	1.14	0.85	0.29	0.12	0.18	0.13	0.04
秋 除去速度 ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)	1.32	0.86	0.87	1.34	0.20	0.13	0.13	0.17
冬 除去速度 ($\text{mg}/\text{g} \cdot \text{日}$)	0.30	0.66	0.36	0.03	0.02	0.05	0.02	0.002
春 除去速度 ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)	0.36	0.68	0.53	0.15	0.03	0.05	0.03	0.01
夏 除去速度 ($\text{mg}/\text{g} \cdot \text{日}$)	0.50	0.91	3.92	0.58	0.13	0.19	0.83	0.16
秋 除去速度 ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)	0.90	1.51	1.47	0.91	0.24	0.31	0.31	0.25

① 浄化副産物としての植物体と汚泥の処理・処分方策の検討

② 栄養塩除去効率の向上のための検討

(1) 浄化副産物の処理・処分

植生浄化水路からの浄化副産物としては堆積泥と植物体がある。今回の実験では、浄化効率の維持の観点からの浄化副産物の系外への引き抜きが行われておらず、今後はこうした観点からの実験的検討が必要である。また、定期的に引き抜かれた副産物については、有効利用を目的の可能性について調査・検討が必要である。

(2) 栄養塩除去効率向上のための実験的検討

1) 他の生活形態をもつ水生植物の導入

抽水植物のみならず、浮漂植物、沈水植物、糸状藻類等の中から、水質浄化能力が高く、植物体の回収・有効利用の可能性等の面で有望な種を検討する。

2) 植生の組み合わせによる水質浄化能の安定化

各種の植物を同一水路内で住み分けを行わせ、季節や水温、気象、流入水の汚濁レベル等に対し、安定的に浄化を行えるような植生の組み合わせを検討する。

3) 吸着剤併用実験

砂質土の代わりに $\text{PO}_4\text{-P}$ や $\text{NH}_4\text{-N}$ に対する選択的吸着能を有する材料を敷きつめ、その上に植生を植え付けた高効率浄化実験を検討する。

〈参考文献〉

- 1) 「滋賀県環境白書」 平成6年版
- 2) 「南湖水質改善対策事業について -提言-」 平成4年3月
- 3) 大滝 末男「水生植物図鑑」 (1980)