

# 生物利用型水質浄化システムの構築と応用に関する研究

吉澤 一家<sup>1</sup>, 高橋 一孝<sup>2</sup>, 山崎 修平<sup>3</sup>, 戸沢 一宏<sup>4</sup>, 宮崎 淳一<sup>5</sup>, 芹澤 如比古<sup>5</sup>

(<sup>1</sup>衛生環境研究所, <sup>2</sup>水産技術センター, <sup>3</sup>総合農業技術センター, <sup>4</sup>森林総合研究所, <sup>5</sup>山梨大学)

**要約** 環境負荷が少なく、エネルギー消費量が少ない生態工学的方法が、水質改善方法として湖沼・河川に用いられている。本研究ではより多様な水域で応用可能にするための手法を確立するとともに、水生植物の供給から、再利用にいたる一連のプロセスを確立することを目的として研究を進めている。2年目の2012年度は水槽内での植物栽培試験、都市公園内の池において沈水植物の植栽及びタテボシガイの飼育等の隔離水界実験を行なった。またバイオマスの利用方法について、沈水植物の成分分析、肥料としての有効性に関する実験などを行い、以下の諸点が明らかとなった。

- 1) 光質を変えて20℃、長日(16時間明期8時間暗期)、光量39 $\mu$ E/m<sup>2</sup>/sで栽培した結果、赤色光下のクロモの生長(総枝長、輪生葉段数、全長)は青色光下よりも大きくなることが分かった。
- 2) 竹炭粉末と赤土等を材料として植栽基物を作成し、これを用いた栽培試験において水生植物の成長阻害は認められず、水質へ与える影響、製作コストの面から「ビゼンソイル」を用いた基物が最適と考えられた。
- 3) 隔離水界実験において、二枚貝処理区では他の処理区に比べて吸光係数と濁度が低く、透明度と透視度が高かったため、水質浄化効果が高いことが分かった。
- 4) セキショウモ植物体のC-N比は18.3であり、小松菜を用いた栽培試験から、セキショウモは緑肥としての効果が認められた。

## Study on the Development of the Water Purification Method in Lakes and Ponds Using Ecological Techniques.

Kazuya YOSHIKAWA, Kazutaka TAKAHASHI, Shuhei YAMASAKI, Kazuhiro TOZAWA, Jun-ichi MIYAZAKI and Yukihiko SERISAWA

(<sup>1</sup>Yamanashi Institute for Public Health and Environment, <sup>2</sup>Yamanashi Prefectural Fisheries Technology Center, <sup>3</sup>Yamanashi Prefectural Agritech Center, <sup>4</sup>Yamanashi Forest Research Institute, <sup>5</sup>University of Yamanashi)

**Abstract** In this study, we are intended to suggest not only a purification method of water quality with ecological method in various ponds and lakes, but also the supply method of the aquatic macrophyte used for purification, and also the usage of the macrophyte as product. In 2012, the second year of this study, cultivation experiments of water-plants with water tank at the various conditions and cultivation experiments of bivalves and aquatic macrophyte in several mesocosms were carried out. Several facts were revealed from these experiments ; i. e.

- 1) As a result of the cultivation experiment at 20℃ under 39 $\mu$ E/m<sup>2</sup>/s light intensity of different light quality and a 16 h : 8 h light : dark (LD) cycle, the growth (total length of branches, number of stages in verticillate leaves and plant length) of *Hydrilla verticillata* was larger under the red light than under the blue light.
- 2) Comparison of the vegetation tools made with various soil or sand showed that vegetation tools made with "Bizensoil" was most suitable to vegetate the aquatic macrophyte.
- 3) The effective water purification was found in bivalves treated area because absorption coefficient and turbidity were lower and transparency and degree of transmittance were higher than in other treated area.
- 4) According to the analysis of components included in the aquatic macrophyte, *Vallisneria asiatica*, it was considered that they were usable as manure directly.

### 1. 緒言

環境負荷が少なく、エネルギー消費量が少ない生態工学的方法が、水質改善方法として湖沼・河川に用いられている。昨年度の研究ではより多様な水域で応用可能にするための手法を確立するとともに、水生植物の供給か

ら、再利用にいたる一連のプロセスを確立することを目的として、水槽内での植物栽培試験、都市公園内の池において沈水植物の植栽及びタテボシガイの飼育等の野外実験を行なった。その結果植物及び二枚貝に対する、魚類や鳥類などの既存の生物による食害の影響は予想以上に大きく、食害対策の重要性が再認識された。また30

℃を超える高水温で飼育できる二枚貝としてタテボシガイが適していることが明らかとなった。その一方で水生植物の利用方法として、含有成分の分析結果から緑肥として用いることが可能であることが明らかとなった。

これらを受けて2012年度は都市公園内の池で、食害等を受け、水質変化をより明確に把握するために、複数の隔離水界（メソコスム）を設置し、処理方法と水質浄化効果に関する野外実験を行った。また昨年度に引き続き、水生植物の安定供給のために、栽培実験を行うとともに、収穫された植物の有効利用法に関する以下の実験を行った。

- I 水生植物の安定供給に関する研究
  - ・クロモの至適光質に関する研究
- II 応用水域の拡大に関する研究
  - ・水流による糸状藻類の発生抑制に関する研究
  - ・植栽基物を用いた沈水植物栽培試験
  - ・都市公園池における隔離水界実験
- III 発生バイオマスの有効利用に関する研究
  - ・セキショウモ植物体の成分組成に関する研究
  - ・セキショウモ植物体の保温静置培養による窒素無機化の推移に関する研究
  - ・セキショウモ植物体の緑肥利用に関する研究

## 2. 実験方法

### 2-1 クロモの至適光質に関する研究

水質浄化植物の栽培実験は、3波長LED照明付き培養庫を用いて、温度20℃、長日（16時間明期8時間暗期）、光質を赤色LEDランプのみを点灯させた赤色光、青色LEDランプのみを点灯させた青色光の2種の光質環境下で行った。

なお、光量は培養庫1の照明機器の青色光を最大とした39 $\mu$ E/m<sup>2</sup>/sに、培養庫2の照明機器の赤色光の光量を合わせた。

材料として沈水植物のクロモを使用した。実験に先立ち、クロモの先端部を5cmに切り出し、温度20℃、中日（12時間明期12時間暗期）で3日間予備栽培した。実験では痛んでいないクロモの先端部1つをロックウール栽培マット（2×2×2cm）1個に差し込み、そのロックウール栽培マット9個を3Lの透明な円筒状の容器に入れ、栽培初日（9/3）と、7日目（9/10）、15日目（9/18）、23日目（9/26）に総枝長（主軸と枝の全ての長さの和）、輪生葉段数、全長、分枝数を測定し、植物体の様子を観察した。

### 2-2 水流による糸状藻類の発生抑制に関する研究

沈水植物を栽培する場合、沈水植物と競争的に *Spirogyra* 類や *Mougeotia* 類などの糸状藻類が増殖する現象がしばしば見られる。糸状藻類が沈水植物に絡まり、覆

うようになると光が遮られ、沈水植物の成長を妨げてしまい、その結果として糸状藻類が優占もしくは独占的に底面を覆うようになる。水質浄化のために沈水植物を植栽する場合、これらの糸状藻類が植物体に付着して混入することが一因として挙げられ、藻類が全く付着していない状態にして植栽することが、糸状藻類繁茂に対する基本的な対策である。しかし沈水植物を完全に藻類フリーの状態にすることは非常に困難であるため、植栽後に糸状藻類が優占化しない技術を確認することが求められている。一般に藻類を抑制する手法として、硫酸銅などの成長抑制剤を添加する方法があるが、沈水植物の成長も抑制する可能性があるためここでは糸状藻類抑制方法として、栽培水塊に水流を生じさせることが有効であるか検討することを目的として、室内水槽実験を行った。

室内において水流の異なる4本の水槽に沈水植物を植栽し、糸状藻類を定量ずつ添加し蛍光灯下で栽培を行った（図1）。実験に用いた器具と植物は以下のとおりである。

水槽：600×300×400mm（約60L）

照明：20W直管蛍光灯（45～80 $\mu$ mol/m<sup>2</sup>/sec）

12hr./day

水流発生用ポンプ：神畑養魚株式会社製

RIO+50（吐出力 2.6L/min\*）

RIO+200（吐出力 4.0L/min）

RIO+600（吐出力 6.8L/min）

栽培用土：GEX製 水草育成用土「水草一番サンド」

植栽沈水植物：セキショウモ、クロモ  
（草丈10cm程度 2株）

添加糸状藻類：*Spirogyra* spp. *Mougeotia* sp. 混合物  
（1g湿重量）

\*実験時には水流が強すぎたため、流量調整弁により60%程度に流量を絞って使用した

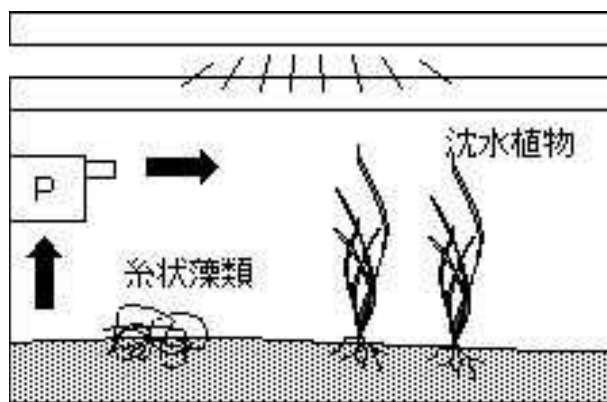


図1 水槽実験概略図

### 2-3 植栽基物を用いた沈水植物栽培試験

沈水植物を利用した水質浄化を行う場合、対象水域に負荷を与えないために植栽場所の底泥を用いる植栽方法

を先行研究で考案した。さらに都市公園などの底面がコンクリート等で底泥が採取できない場合の植栽に用いるため、種々の素材に竹炭粉を混合した基物を作成した。本実験では素材による沈水植物の生育及び水質に対する影響の差を明らかにすることを目的として、室内で水槽を用いた栽培を行った。

無植栽の水槽1本に加え、以下に示した4種の素材からなる基物で沈水植物を植栽した4本の水槽で室内栽培実験を行った。沈水植物の生育状況は目視で確認するとともに、栽培開始直後、40日後、105日後に各水槽から採水し、硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3^-$ -N)、亜硝酸態窒素 ( $\text{NO}_2^-$ -N)、アンモニア態窒素 ( $\text{NH}_4^+$ -N)、塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ )、硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ )、ナトリウムイオン ( $\text{Na}^+$ )、カリウムイオン ( $\text{K}^+$ )、マグネシウムイオン ( $\text{Mg}^{2+}$ )、カルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ )、CODを測定した。

実験に供した器具等を以下に示した。

- 基物1 (以後「赤土」と表記) : 赤土+竹炭粉末+MgO (粉状ブロック)
- 基物2 (以後「赤粒」と表記) : 赤土+竹炭粉末+MgO (粒状ブロック)
- 基物3 (以後「永土」と表記) : 永土+竹炭粉末 (粉状ブロック)
- 基物4 (以後「備前」と表記) : ビゼンソイル\*\*+竹炭粉末 (粒状ブロック)
- 水槽 : 398×254×280mm (約20L)
- 照明器具 : GEX製 フラットビーム  
オーロラ2灯 (25~30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ ) 連続照射
- 栽培用土 : 甲府市内玉諸公園内底泥
- 栽培温度 : 室温 (5~25°C)
- 沈水植物 : セキショウモ 草丈約15cm 3株
- \* (株)連代コンストラクト製 主成分は真砂土、添加物としてCaSO<sub>4</sub>等
- \*\* 山陽ロード工業製 主成分は真砂土、添加物としてセメント等

#### 2-4 都市公園池における隔離水界実験

先行研究において公園内の池において、予備的に沈水植物の植栽及び二枚貝の飼育実験を行った。その結果魚類や両生類などの動物による捕食圧が非常に高いことが明らかとなった。そのため、これらの捕食者からの影響を完全に避けることと、外部からの流入負荷をなくすことで、外部因子を極力排除し、水質に与える植物や二枚貝の効果をより比較しやすくすることを目的として、側面を完全に囲った隔離水界を公園内の池に設置して、沈水植物の植栽および二枚貝の飼育実験を行った。

実験は甲府市内にある玉諸公園内の池で、鉄製折りたたみ簡易テント (3000mm×3000mm×1500mm) をフレームに使用し、テント屋根のシートをはずした上、側面を透明ビニールシート (1mm厚) で覆った隔離水界5基

を用いて行った (図2, 3)。底面にはシートを張らないため、底泥からの溶出や逆に底泥への沈降などは行われる状態である。それぞれの隔離水界の処理内容は次のとおりとした。

- 水界1 : (以後Cont. と表記) 無処理区
- 水界2 : (以後PGA+WPと表記)  
ポリグルタミン酸による凝集処理後、沈水植物を植栽
- 水界3 : (以後PGAと表記)  
ポリグルタミン酸による凝集処理のみ
- 水界4 : (以後WPと表記) 沈水植物を植栽
- 水界5 : (以後Biv. +WPと表記)  
沈水植物の植栽に加えて二枚貝を飼育  
また次の薬品、生物を実験に用いた。

- ポリグルタミン酸 : 日本ポリグル株式会社製 PG $\alpha$ 21Ca
- 沈水植物 : セキショウモ
- 二枚貝 : タテボシガイ (滋賀県琵琶湖産)

実験期間中は定期的に各処理水界および外界で光環境及び水質の測定を行った。光環境項目としては、光量、透明度、透視度、濁度の測定を、水質項目として



図2 玉諸公園内池の水界配置図

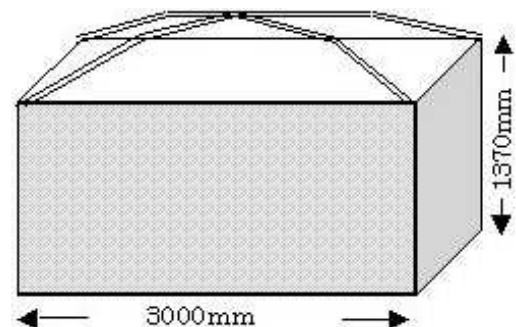


図3 隔離水界立体図



は、水温、導電率 (EC)、pH、溶存酸素濃度 (DO) を現場測定し、浮遊懸濁物質濃度 (SS)、クロロフィルa (chl-a)、全窒素濃度 (TN)、全りん濃度 (TP)、COD を採水試料で分析した。

また実験に供したタテボシガイを定期的に取り出し、殻長、殻高、殻幅、湿重量を測定し成長状況を把握した。

#### 2-5 セキショウモ植物体の成分組成に関する研究

水草バイオマス資源再利用の方法を検討するため、セキショウモ植物体の成分組成を調査した。セキショウモ植物体試料は、2012年7月31日、8月7日、14日、21日、28日に水深より長く伸びた葉を刈り取り供試した。分析した成分は全窒素、全炭素、全リン酸、カリウム、マグネシウム、カルシウム、銅、亜鉛であった。各成分の分析は堆肥等有機物分析法 (財団法人日本土壌協会、2010) によった。すなわち、含水率は加熱減量法で、全窒素はケルダール法で、全炭素はチューリン法で、リンおよび金属元素は乾式灰化法により灰化および試料液調整を行い、リンはバナドモリブデン発色・吸光光度法で、金属元素は原子吸光光度法でそれぞれ行った。

#### 2-6 セキショウモ植物体の保温静置培養による窒素無機化の推移に関する研究

セキショウモ植物体を緑肥作物のように畑にすき込んだ場合の分解過程と窒素供給能を明らかにするため、保温静置培養法により窒素無機化量の推移を調査した。セキショウモ植物体は新鮮物および乾燥物として供試した。植物体供試量は窒素として5mgに相当する量、すなわち新鮮物は5.4g相当、乾燥物は0.43g相当であった。供試土壌は県内に広く分布する黒ボク土壌を乾土換算で30g用いた。培養水分条件は供試土壌の最大容水量の60%に調整し、全暗、25℃であった。また、実験にはセキショウモ植物体を添加しない処理区を設け、添加した処理区から無機態窒素量を差し引くことで、セキショウモ植物体からの無機化量とした。

#### 2-7 セキショウモ植物体の緑肥利用に関する研究

セキショウモ植物体の緑肥的利用による窒素肥料効果と生育抑制効果をコマツナのポット栽培により検証した。栽培は山梨県総合農業技術センター内雨よけハウスで行った。実験処理はガス害などを回避するための施用から播種までの期間について5水準 (4週、3週、2週、1週、1日)、セキショウモ植物体の施用量検討のために3水準 (新鮮物として0.5t/10a、2.0t/10a、4.0t/10a) 設定した。化学肥料は緑肥施用した処理区では、リン酸20kg/10a、カリ20kg/10aを施用し、窒素を無施用とした。また、対象として緑肥を無施用とし、コマツナの基準量である窒素20kg/10a、リン酸20kg/10a、カリ20kg/10aを施用した処理と、リン酸・カリのみを施用

した処理を設けた。耕種概要は次の通りであった。緑肥施用日は2012年7月31日、8月7日、14日、21日、28日、化学肥料施用日は2012年8月28日、播種日は2012年8月29日、収穫調査日は2012年9月26日であった。

### 3. 結果

#### 3-1 クロモの至適光質に関する研究

クロモの伸長生長に対する光質の影響を図4に示した。赤色光下で栽培したクロモは青光下で栽培したものとは比べ総枝長、輪生葉段数、全長ともに大きく生長したが、両者の分枝数には大きな違いは見られなかった。赤色光下で栽培したクロモは栽培開始時に比べ23日間で総枝長と輪生葉段数は2.4倍、全長は1.8倍に生長した。一方、青色光で栽培したクロモは栽培開始時に比べ23日間で総枝長は2.0倍、輪生葉段数は1.9倍、全長は1.6倍に生長した。

#### 3-2 水流による糸状藻類の発生抑制に関する研究

栽培試験は2012年9月13日から2013年3月21日まで約6ヶ月間行った。実験水槽4本に水草育成用土を約5cm敷詰め、水道水を60L入れ1日放置した後、沈水植物を植栽した (写真1)。植栽1週間後、湿重量1gの糸状藻類をそれぞれの水槽に添加し (写真2)、吐出能力の異なる3種の水中ポンプを1基ずつ、異なる3本の水槽に設置し、水の循環を開始した。残る1本の水槽はポンプを設置せず、静止状態とした。栽培は室温条件化 (10℃~23℃) で行い、目視による観察を定期的に行ったが、流速については水槽が小型のため複雑な水流となることと、低流速であったことにより測定は不可能であった。

糸状藻類添加後2週間程度はいずれの水槽でも藻類を確認できたが、3週間後には造流水槽では糸状藻類を確認できなくなった (写真3、4)。栽培6ヵ月後においても同様に静止水槽のみで糸状藻類が確認できた (図5、6)。各水槽中の糸状藻類を取り出し、湿重量を求めた結果を図5に示したが、静止水槽のみ添加時の約6倍の6.3gの糸状藻類が回収された (写真7)。

#### 3-3 植栽基物を用いた沈水植物栽培試験

玉諸公園内池の水および水道水を各水槽に8Lずつ入れ、2013年6月12日から2013年3月21日まで栽培実験を行った (写真8)。実験開始5日後には基物3「永土」の水槽において白濁が発生したが、1週間ほどで消失した (写真9)。同じく40日後には無植栽の水槽でプランクトンの増殖で濁度が上がる現象が見られ3週間ほど継続した (写真10)。一方、植栽した全ての水槽ではガラス面に付着藻が発生するのが見られたのみで、濁度は上昇することはなかった。その後、植栽したセキショウモはランナーを伸ばして成長し、各種の基物が植物の成長を妨

げることではないことが確認された(写真11, 12).

この間の各水槽内の水質測定結果を図6-1から11までに示した. ナトリウム, 塩化物イオン濃度は無植栽系と植栽系との間で大きな差がないが, アンモニア態窒素, カリウムイオン濃度では差が見られ, 特にアンモニア態窒素は無植栽系で高濃度であった. その結果硝酸態窒素, 亜硝酸態窒素, アンモニア態窒素濃度の総和は105日後には無植栽系でのみ高濃度であった. これは沈水植物の成長に伴う窒素の取込みにより, 植栽系では水中の窒素濃度が減少したことによるものと考えられた.

植栽に用いた基物の素材により, 水質に与える影響も異なっており, 「永土」では硫酸イオンとカルシウムイオンがともに高濃度であった. これは「永土」には硫酸カルシウムが添加されているためで, 栽培開始5日後に「永土」系で白濁が生じた原因もこれによるものと考えられた. またマグネシウムイオンは「赤土」, 「赤粒」, 「備前」で濃度が高かった. 「赤土」と「赤粒」では基物製作時に固化剤として酸化マグネシウムを質量比で25%添加していることが原因と考えられたが, 「備前」については不明であった. COD濃度は無植栽系と「永土」では40日から105日の間で大きな変化を示さなかったが, 他の植栽系では時間経過とともに上昇しており, 内部生産が継続して進行していることが伺えた.

### 3-4 都市公園池における隔離水界実験

#### 3-4-1 実験池の概要

甲府市向町に位置する玉諸公園は甲府市民俗資料館を

有する都市公園である. 公園内にある池の水深は深い場所でも80cm以下で, 浮泥の堆積により多くが50cm程度と浅く, 常時茶色く濁っており, 夏季にはアオコも発生する. 表1に玉諸公園池の諸元を示した. なお一次生産量は2012年10月15日の測定データにより算出した. 各水界の作業内容は表2に示した.

#### 3-4-2 隔離水界の光環境の経日変化

光量については, 光量子計2組を用いて, 空中光量と同時に水深10cm, 50cmで水中光量を約20秒間の平均値として求め, 相対光量(水中光量/空中光量×100)を求めた. また, 相対光量水深曲線を対数回帰して吸光係数を算出した. その他の測定項目は透明度, 透視度, 濁度, 導電率, DO(溶存酸素濃度), pH, 水温である. なお, 透明度はセッキ-透明度板を, 透視度は透視度センサを, 濁度は非対称投下散乱光方式の濁度計を, 導電率は電導度メーターを, pHはpHメーターを, DOは隔膜形ガルバニ電池式DOメーターを, 水温はペッテンコーヘル水温計を用いて測定した.

2012年9月~2013年2月の光環境を実験処理水界別に図7-1~4に示した. それぞれの水界における吸光係数の平均は4.1~7.0であり, 水界5(Biv.+WP)で最も低く, 次いで水界2(PGA+WP), 水界3(PGA), 水界4(WP)であり, 水界1(Cont.)で高かった. また, 濁度の平均は8.0~23.4NTUであり, 水界5(Biv.+WP)で顕著に低く, 次いで水界3(PGA), 水界2(PGA+WP), 水界4(WP)であり, 水界1(Cont.)で最も高かった.

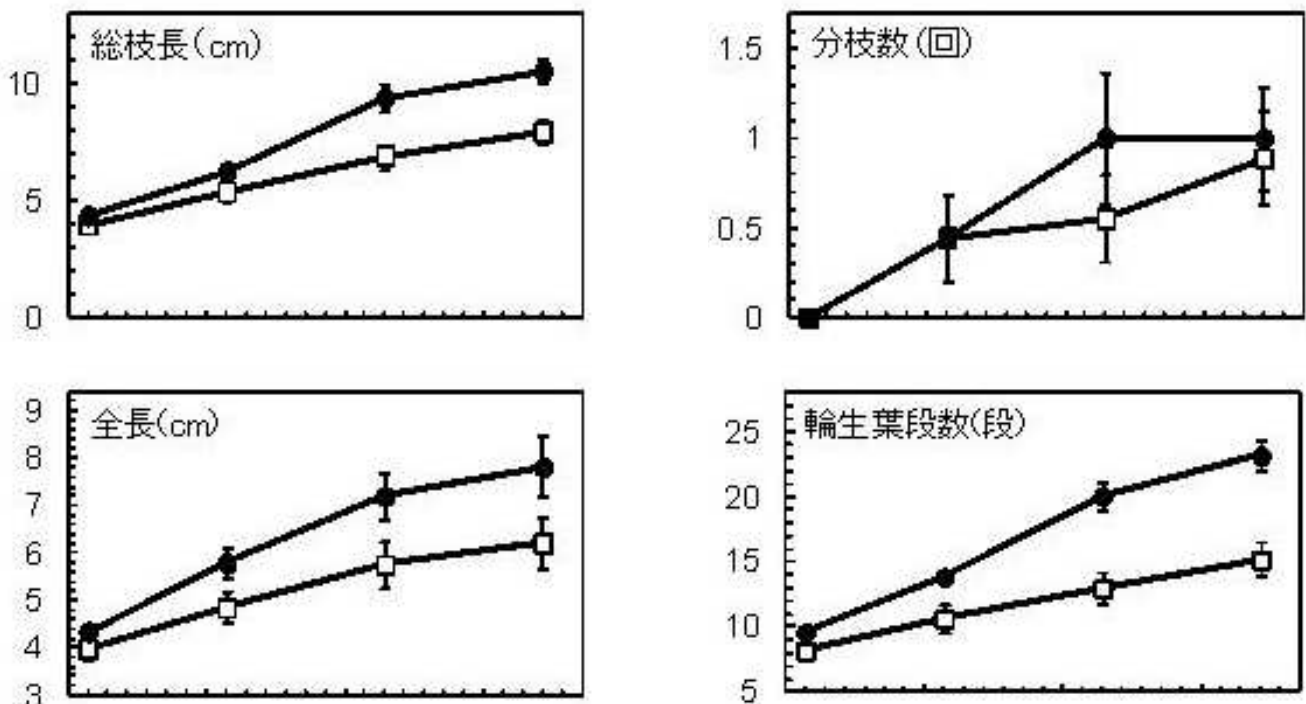


図4 赤色光および青色光で培養したクロモの生長. ●: 赤色光. □: 青色光. エラーバー: 標準誤差



写真1 沈水植物の植栽直後の水槽

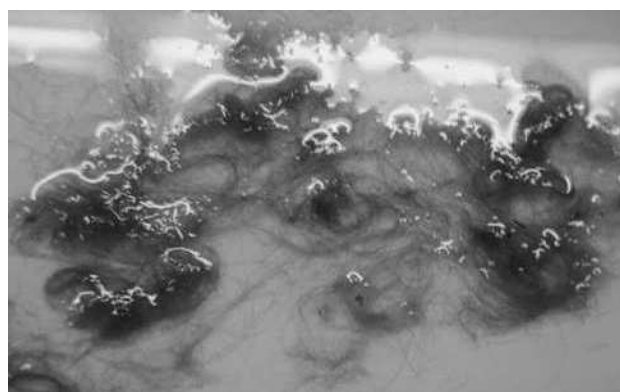


写真2 添加した糸状藻類



写真3 藻類添加3週間後（静止水槽）



写真4 藻類添加3週間後（造流水槽6.8L/min）

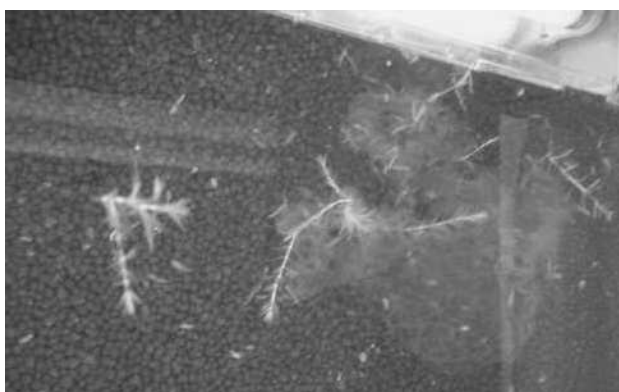


写真5 栽培6月後（静止水槽）

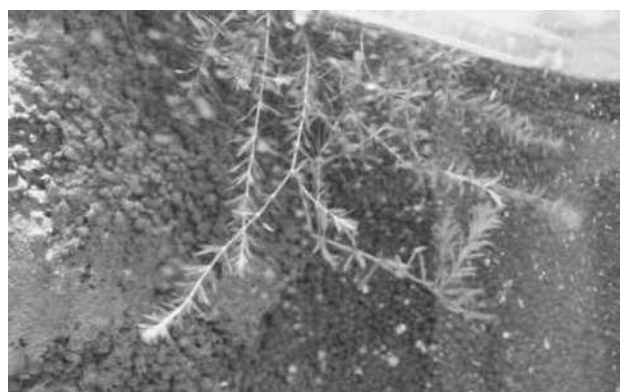


写真6 栽培6月後（造流水槽6.8L/min）



写真7 静止水槽で採取された糸状藻類

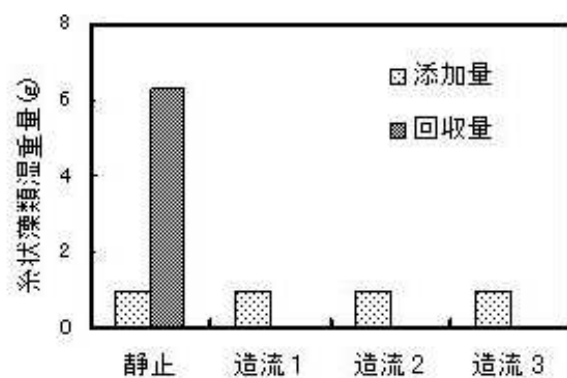


図5 回収された糸状藻類量





写真8 実験水槽



写真9-1 無植栽 (5日後)

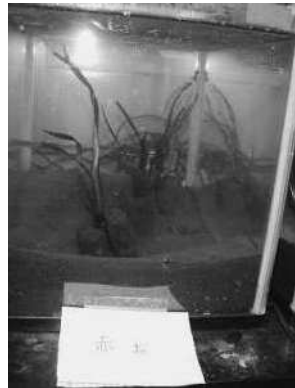


写真9-2 赤土 (5日後)



写真9-3 赤粒 (5日後)



写真9-4 永土 (5日後)



写真9-5 備前 (5日後)



写真10-1 無植栽 (40日後)



写真10-2 赤土 (40日後)



写真11-1 無植栽 (47日後)



写真11-2 赤粒 (47日後)



写真12-1 無植栽 (67日後)



写真12-2 赤粒 (67日後)

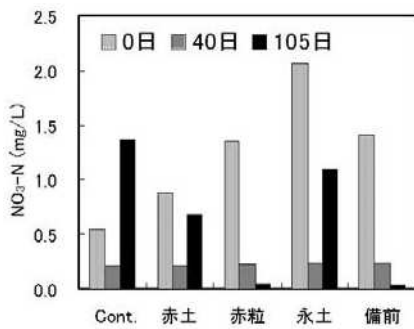


図6-1 硝酸態窒素濃度の経日変化

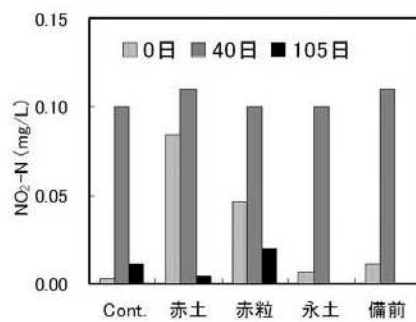


図6-2 亜硝酸態窒素濃度の経日変化

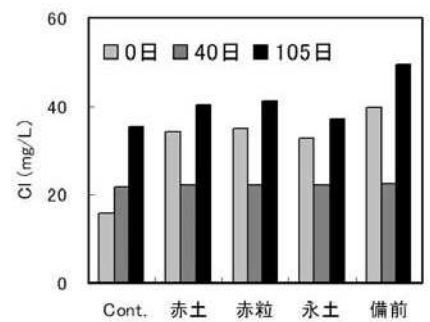


図6-3 塩化物イオン濃度の経日変化

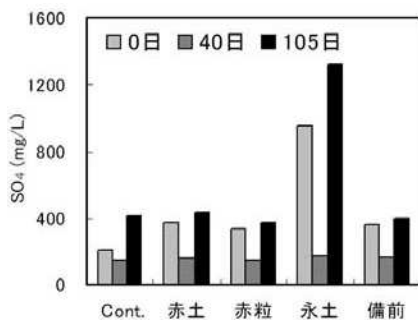


図6-4 硫酸イオン濃度の経日変化

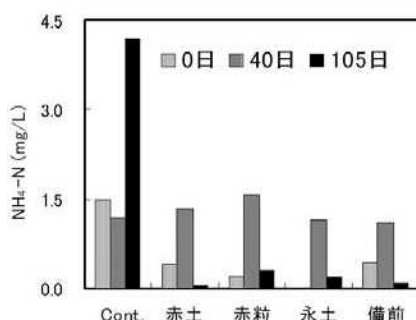


図6-5 アンモニア態窒素濃度の経日変化

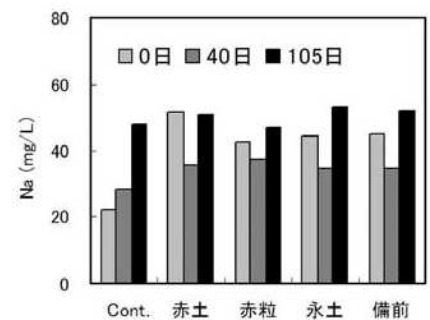


図6-6 ナトリウムイオン濃度の経日変化

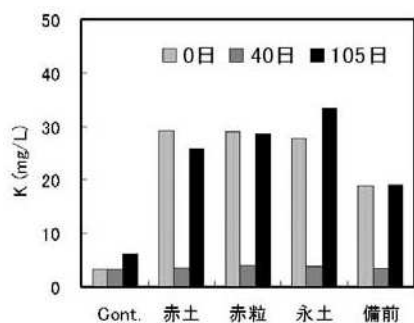


図6-7 カリウムイオン濃度の経日変化

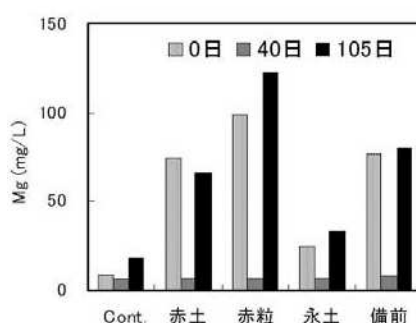


図6-8 マグネシウムイオン濃度の経日変化

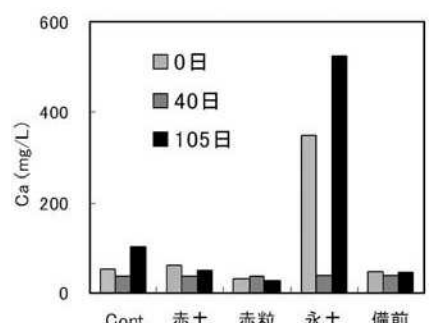


図6-9 カルシウムイオン濃度の経日変化

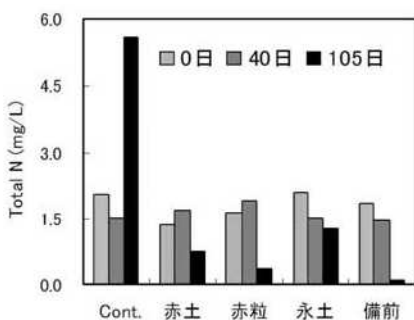


図6-10 窒素濃度合計の経日変化

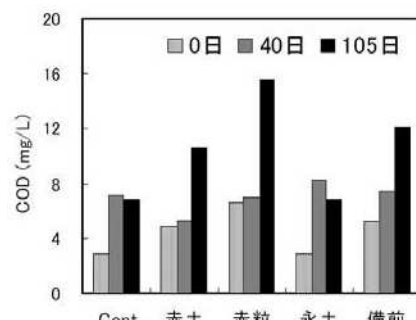


図6-11 CODの経日変化