

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¹, 高橋 一孝², 山崎 修平³, 戸沢 一宏⁴, 宮崎 淳一⁵, 芹澤 如比古⁵

(¹衛生環境研究所, ²水産技術センター, ³総合農業技術センター, ⁴森林総合研究所, ⁵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 μ E/m²/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

(¹Yamanashi Institute for Public Health and Environment, ²Yamanashi Prefectural Fisheries Technology Center, ³Yamanashi Prefectural Agritech Center, ⁴Yamanashi Forest Research Institute, ⁵University 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 μ E/m²/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

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、食害等を避け、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 μ E/m²/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 μ mol/m²/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

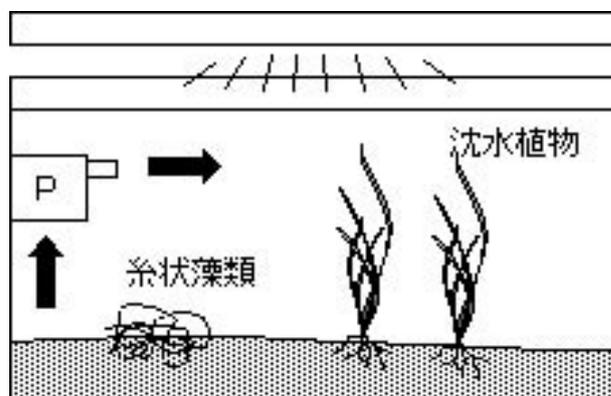


図1 水槽実験概略図

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 (NO_3^- -N)、亜硝酸態窒素 (NO_2^- -N)、アンモニア態窒素 (NH_4^+ -N)、塩化物イオン (Cl^-)、硫酸イオン (SO_4^{2-})、ナトリウムイオン (Na^+)、カリウムイオン (K^+)、マグネシウムイオン (Mg^{2+})、カルシウムイオン (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 $^{\circ}\text{C}$)
- 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_4 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 α 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

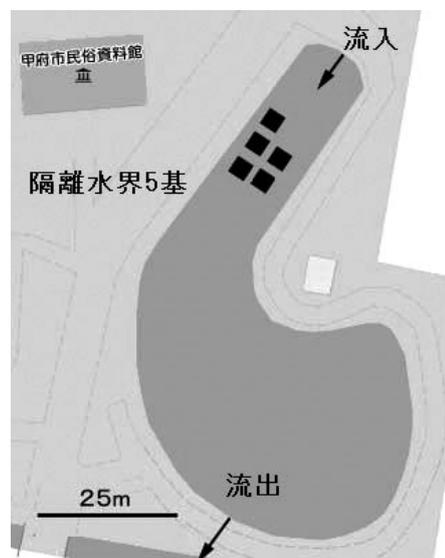


図2 玉諸公園内池の水界配置図

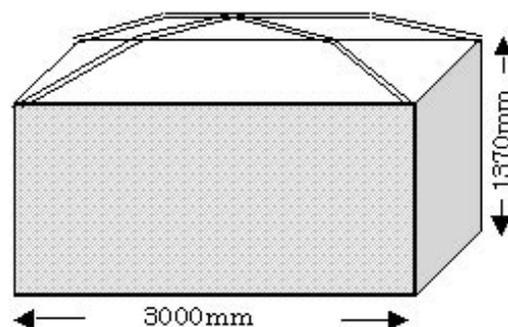


図3 隔離水界立体図

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の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、透明度はセッキー透明度板を、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。

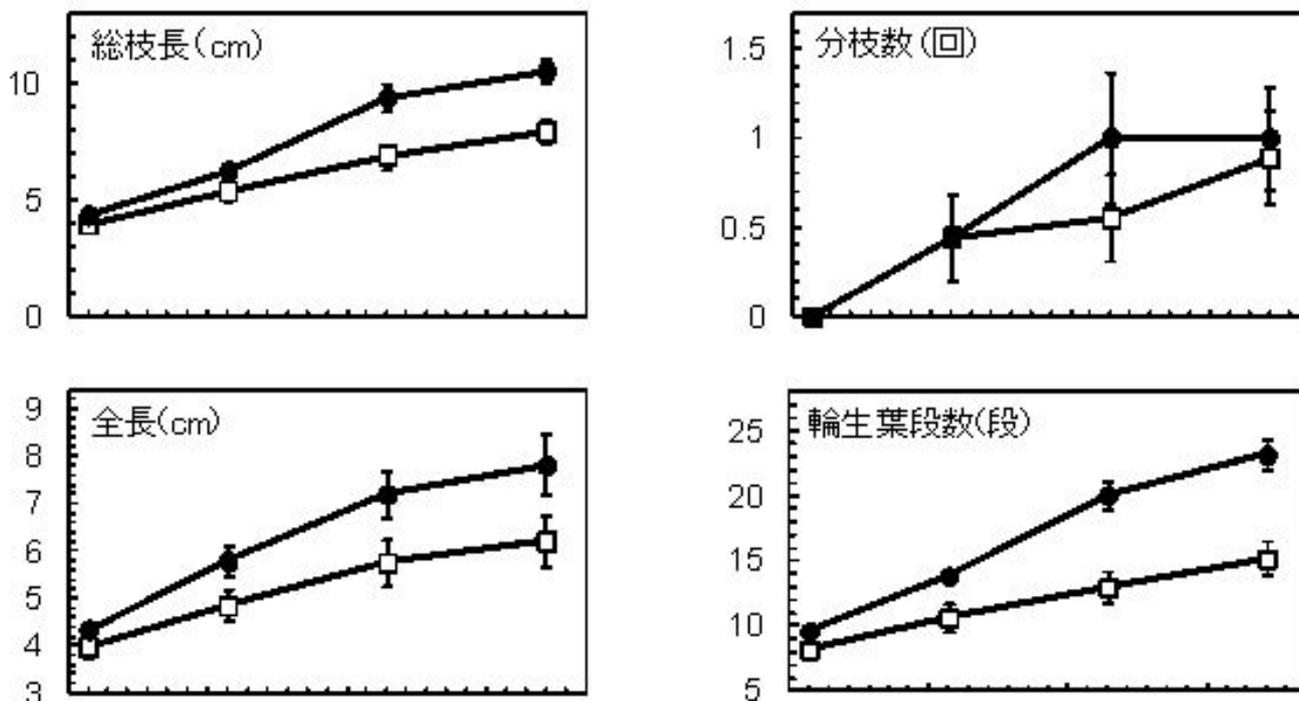


図4 赤色光および青色光で培養したクロモの生長。●：赤色光。□：青色光。エラーバー：標準誤差

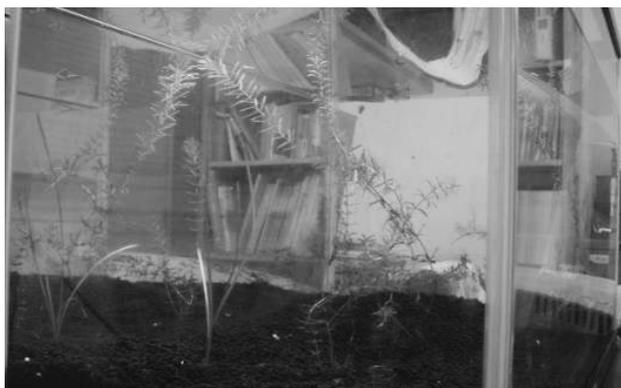


写真1 沈水植物の植栽直後の水槽

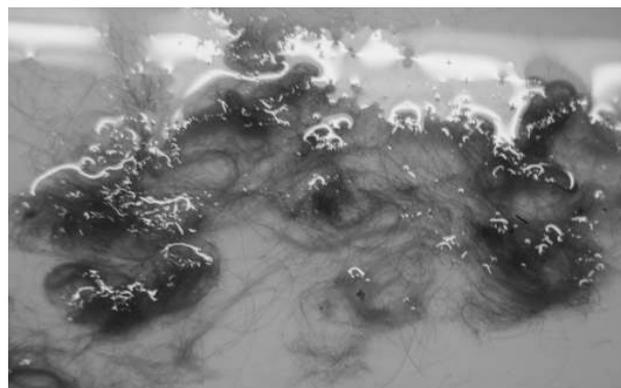


写真2 添加した糸状藻類



写真3 藻類添加3週間後（静止水槽）

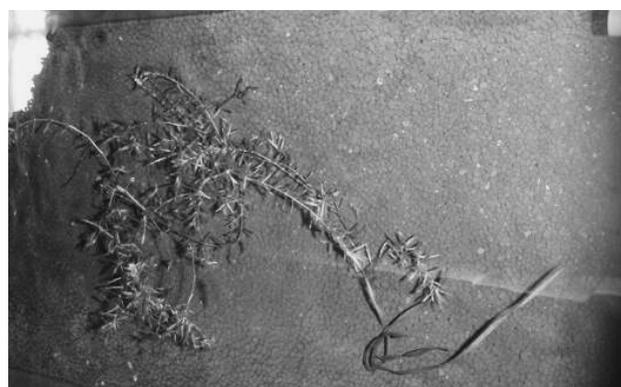


写真4 藻類添加3週間後（造流水槽6.8L/min）

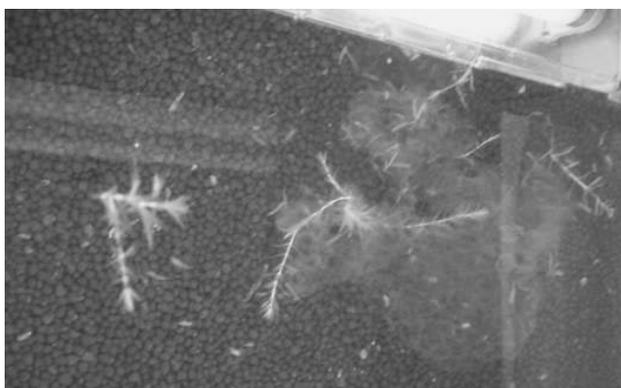


写真5 栽培6月後（静止水槽）

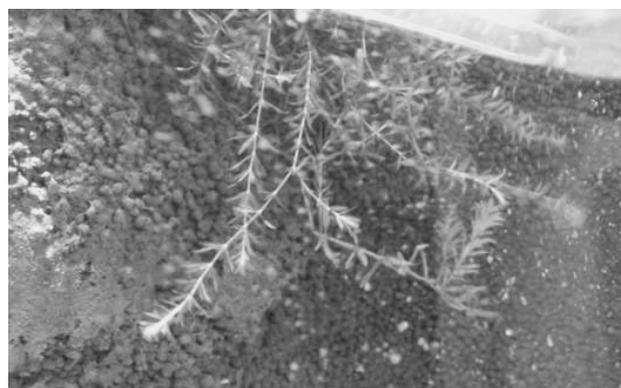


写真6 栽培6月後（造流水槽6.8L/min）



写真7 静止水槽で採取された糸状藻類

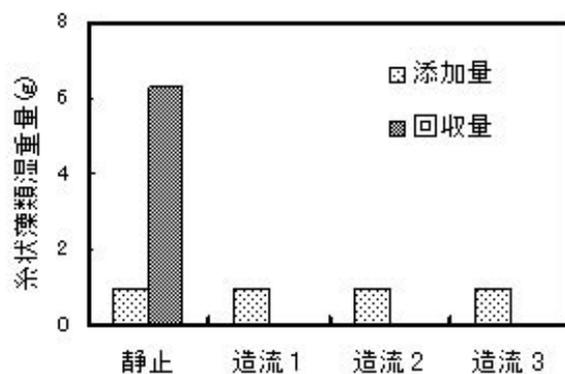


図5 回収された糸状藻類量



写真8 実験水槽



写真9-1 無植栽 (5日後)

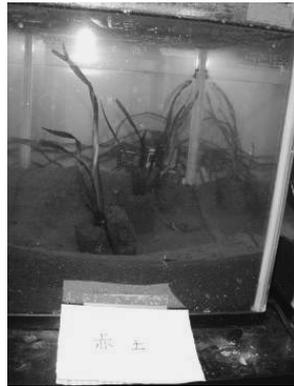


写真9-2 赤土 (5日後)



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)

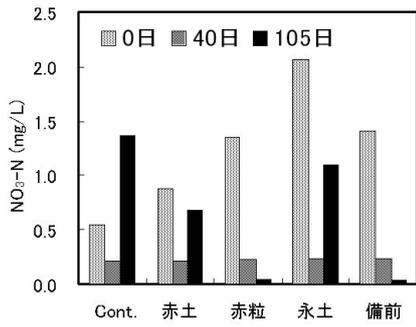


図6-1 硝酸態窒素濃度の経日変化

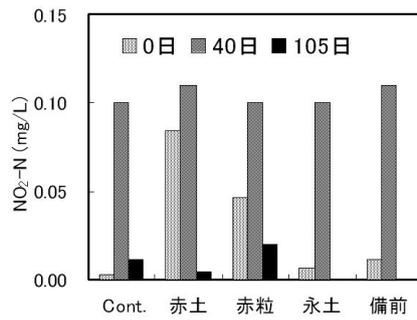


図6-2 亜硝酸態窒素濃度の経日変化

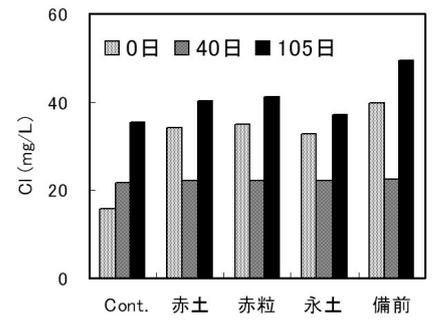


図6-3 塩化物イオン濃度の経日変化

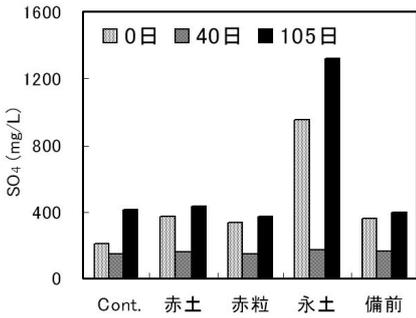


図6-4 硫酸イオン濃度の経日変化

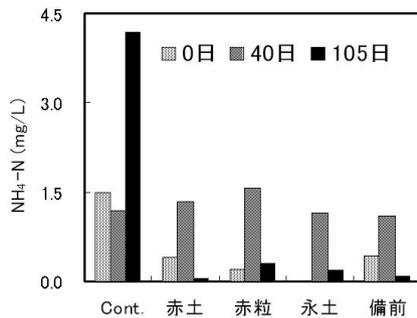


図6-5 アンモニア態窒素濃度の経日変化

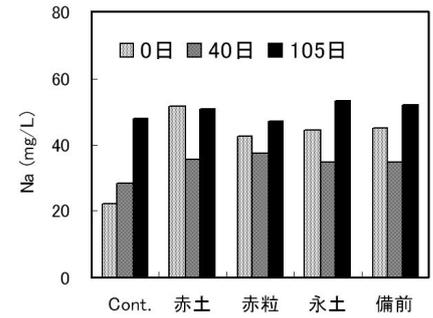


図6-6 ナトリウムイオン濃度の経日変化

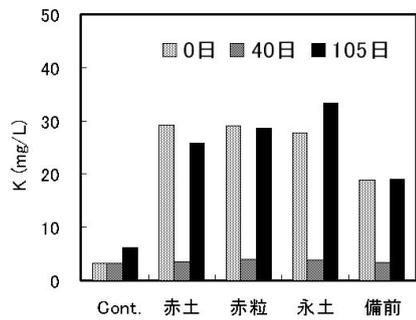


図6-7 カリウムイオン濃度の経日変化

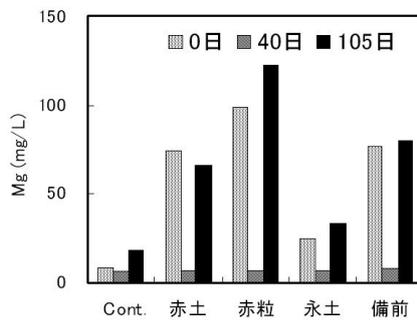


図6-8 マグネシウムイオン濃度の経日変化

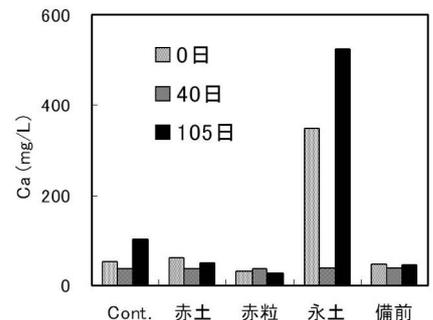


図6-9 カルシウムイオン濃度の経日変化

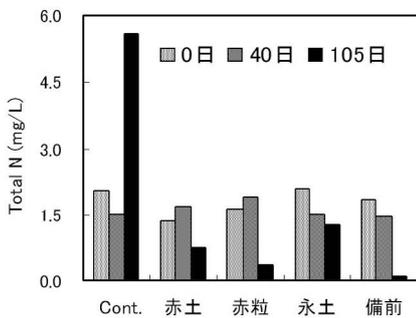


図6-10 窒素濃度合計の経日変化

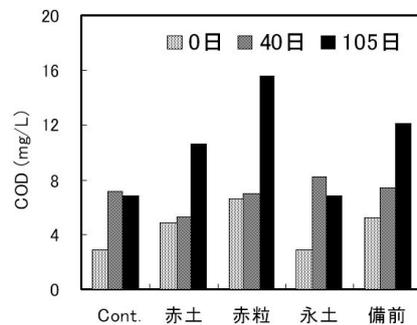


図6-11 CODの経日変化

表1 玉諸公園池の諸元

項目	測定・計算値	単位	項目	測定・計算値	単位
表面積	2300	m ²	底泥堆積厚	0.2	m
周囲	230	m	底泥堆積量	460	m ³
平均水深	0.8	m	底泥量	579.6	t
総容量	1840	m ³	底泥中窒素含有量	310	kg
流入水量	1	L/sec	底泥中りん含有量	140	kg
流出水量	1	L/sec	総光合成量	0.72	mg O ₂ /L・hr
交換率	21.3	day	一時生産量	5.1	kg C/8hr

表2 各水界での処理内容

Date	2012/7/9	2012/7/12	2012/7/17	2012/8/2	2012/8/6	2012/9/3	2012/9/11	2012/9/13
Cont.	水界新設							鳥除けネット
PG + WP	水界新設	PG2kg添加	植栽30株		植栽17株	水草確認	鳥除けネット	
PG	水界新設	PG2kg添加						鳥除けネット
WP	水界新設		植栽30株			水草確認		鳥除けネット
BIV. + WP				新設+貝100	植栽30株	水草確認		鳥除けネット

*PG：ポリグルタミン酸 (PG α 21Ca)

それぞれの水界における透明度の平均は0.4～0.8mであり、水界5 (Biv.+WP) で最も高く、次いで水界3 (PGA) であり、水界2 (PGA+WP) と水界4 (WP) は同じ値で、水界1 (Cont.) が最も低かった。透視度の平均は23.0～75.4cmであり、水界5 (Biv.+WP) で顕著に高く、次いで水界3 (PGA)、水界2 (PGA+WP) であり、水界4 (WP) がそれに続き、水界1 (Cont.) で低かった。

3-4-3 隔離水界の水質の経日変化

2012年9月～2013年2月の水質を実験処理水界別に図8-1～3に示した。それぞれの水界における水温の平均は12.5～13.3℃と測定時間による差が若干認められた。DOの平均は7.9～11.7mg/Lで、水界5 (Biv.+WP) で顕著に高く、次いで水界3 (PGA)、水界2 (PGA+WP)、水界1 (Cont.)、水界4 (WP) であった。pHは7.8～9.2で、水界5 (Biv.+WP) で顕著に高く、次いで水界2 (PGA+WP) と水界4 (WP)、水界3 (PGA) と水界1 (Cont.) であった。電気伝導率の平均は222.8～244.4μS/cm、電気伝導率の25℃換算値の平均は216.3～237.1μS/cmであり、いずれも水界3 (PGA) で最大であった。

採水試料の分析結果を図9-1～5に示した。浮遊懸濁物質濃度 (SS) は水界水界5 (Biv.+WP) と水界3

(PGA) で時間経過とともに低い値となり、透明度の変化とよく一致していた。この傾向はクロロフィルa濃度 (chl-a) 及びCODも同様であり、実験池での懸濁物質は主に植物プランクトンによるものと考えられ、CODにも影響を及ぼしていると考えられた。一方、栄養塩類では、全窒素濃度 (TN) が後期に水界5 (Biv.+WP) と水界3 (PGA) で低くなる傾向は見られたものの、全りん濃度 (TP) ではほとんど水界による差はなかった。これは底泥から窒素、りんが溶出可能なことが一因と考えられた。

以上の結果から、水草の植栽に加え二枚貝を飼育した水界5及びPGA処理をした水界3では、透明度などの改善に効果が見られた。

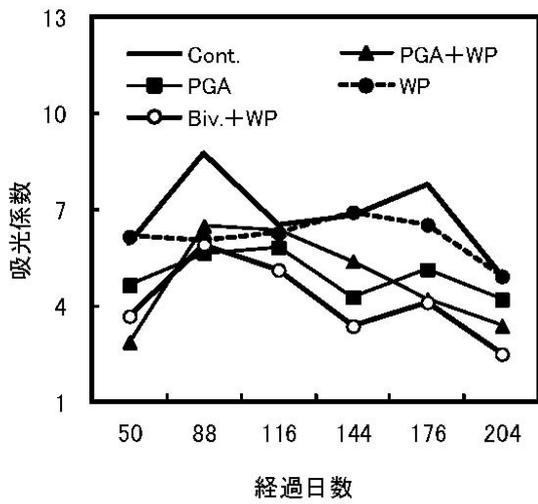


図7-1 吸光係数の経日変化

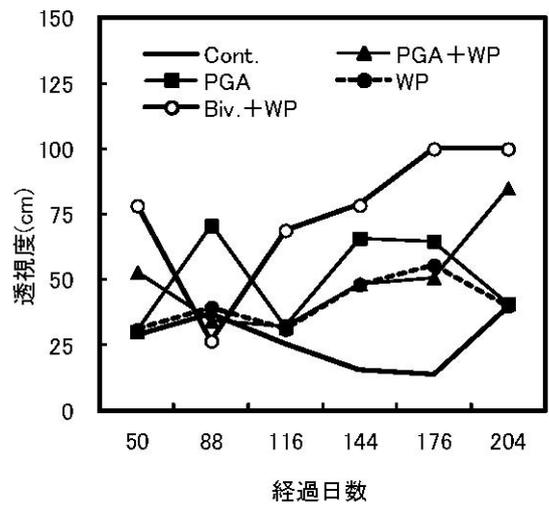


図7-2 透明度の経日変化

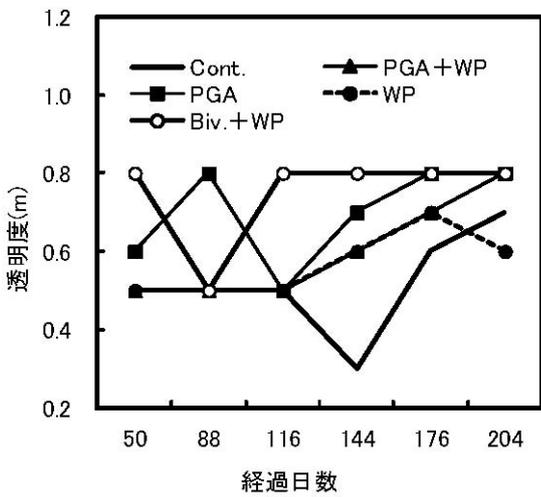


図7-3 濁度の経日変化

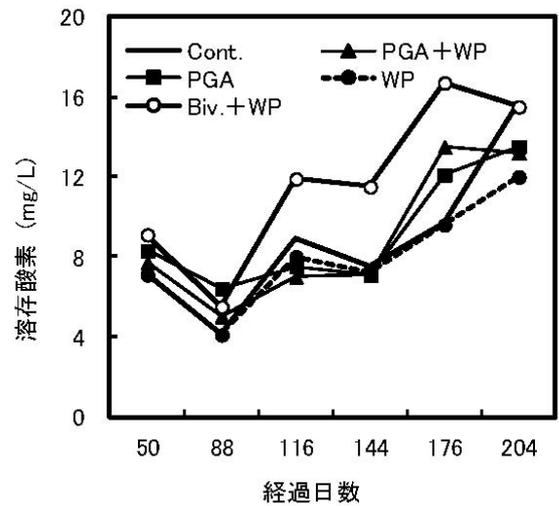


図7-4 透視度の経日変化

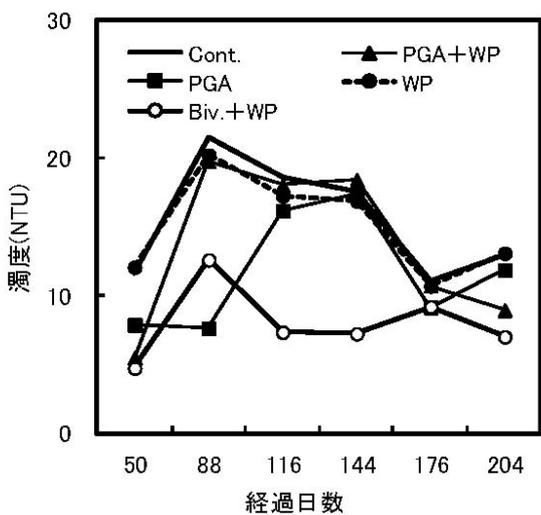


図8-1 溶存酸素の経日変化

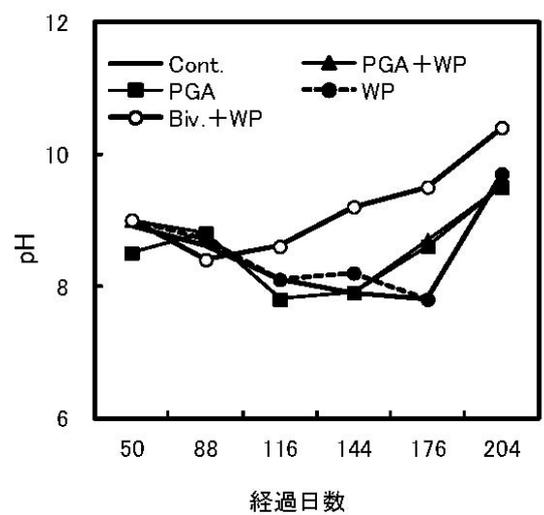


図8-2 pHの経日変化

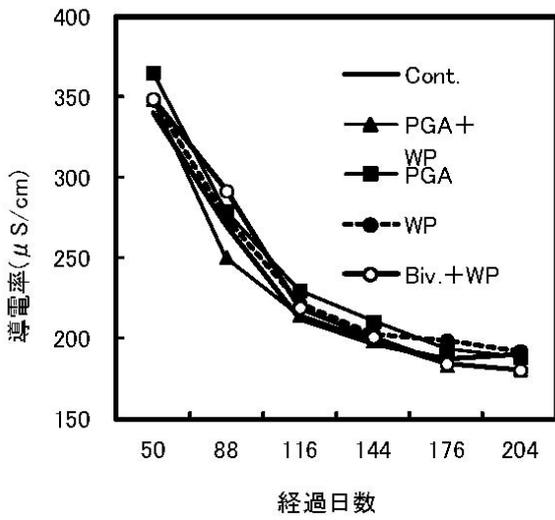


図8-3 導電率の経日変化

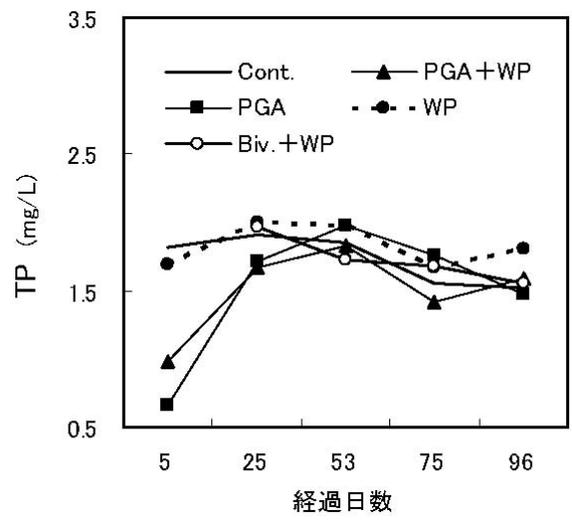


図9-1 SSの経日変化

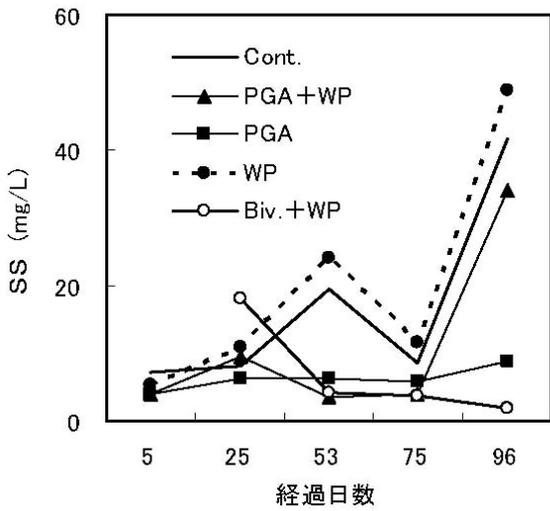


図9-2 TNの経日変化

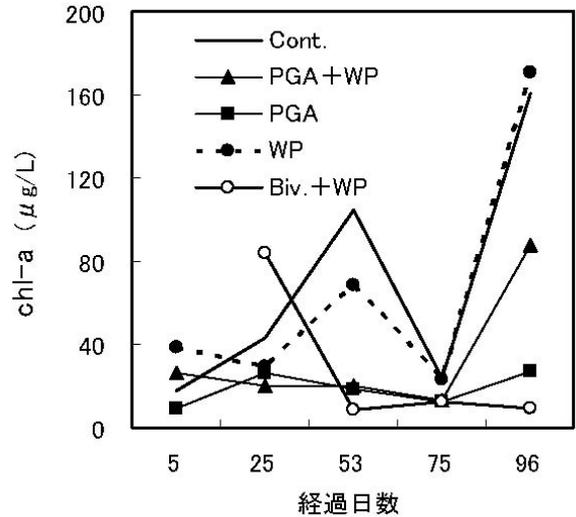


図9-3 TPの経日変化

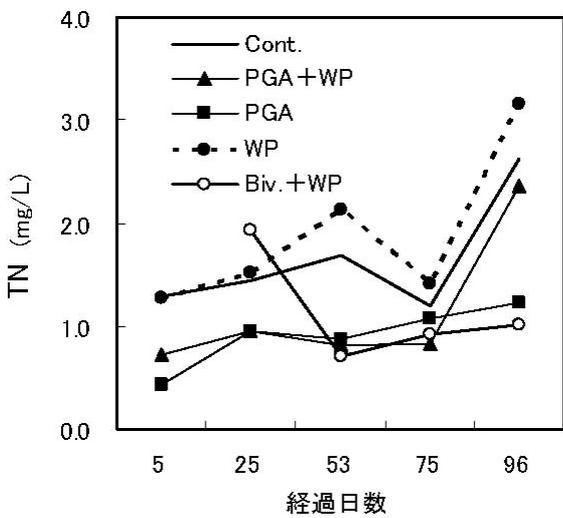


図9-4 chl-aの経日変化

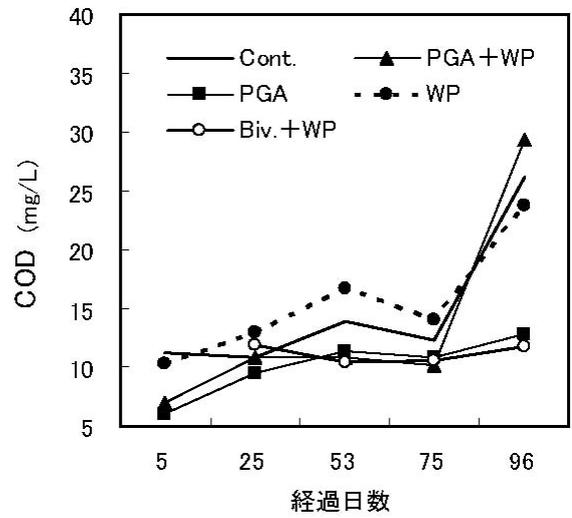


図9-5 CODの経日変化

3-4-4 二枚貝の公園内の池への設置及び成長量の測定

予備調査としてタテボシガイを予備調査用の隔離水界内で2011年11月4日から飼育を始めた。その後、本実験期間を含めて、2012年2月3日、2012年5月7日、2012年8月2日、2012年11月12日（約3カ月毎）に殻長、殻高、殻幅、湿重量を測定した。

平均殻長は2011年11月、2012年2月、5月、8月、11月でそれぞれ49.2、49.3、50.0、50.4、50.7mmであり、特に2012年2月から5月にかけて増加した（図10-1）。平均殻高はそれぞれ24.9、25.0、26.2、26.6、26.7mmであり、特に2012年2月から5月にかけて増加した（図10-2）。平均殻幅はそれぞれ18.4、18.7、19.0、19.1、19.3mmであり、ほぼ同じ割合で増加した（図10-3）。平均湿重量はそれぞれ16.1、16.5、17.3、17.4、17.8gであり、特に2011年11月から2012年5月にかけて及び8月から11月にかけて増加した（図10-4）。

3-5 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各成分は各採取日による変動が少なく推移した（表3）。平均値は水分が92.9%、窒素が3.0%、炭素が55.6%、C/Nが18.3、リンが0.2%、カルシウムが0.7%、マグネシウムが0.5%、カリウムが6.2%であった。

3-6 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

新鮮物と乾物では異なる分解過程を示した。新鮮物では培養開始5～7日目にアンモニアのピークが認められた後、硝酸が急激に増加する傾向であった（図11、12）。一方、乾物では培養開始7日目までアンモニアの減少が認められた後、14日目にわずかにアンモニアの増加に転じたが、その後再び減少し、硝酸は培養開始3日目から濃度の減少が見られ14日目まで低く推移し、その後急激に上昇する結果であった（図11、12）。培養後のアンモニア態窒素量と硝酸態窒素量を合計し、添加窒素量で除した値を窒素無機化率とすると、新鮮物は培養開始直後に負の値をとり、わずかに有機化が起こっていたが、その後は直線的に無機化率が上昇し、培養開始14日頃に頭打ちになった（図13）。培養開始28日目の無機化率は12.3%であった。乾物を供試した処理では培養開始後、急激に有機化が進行し、7日目に無機化率が-18.3%となった。その後、直線的に無機化率が上昇したが培養終了時の無機化率は-4.5%であった。

3-7 セキショウモ植物体の緑肥利用に関する研究

約1ヶ月の栽培期間でのコマツナ乾物収量を表4に示した。セキショウモ植物体の施用から播種までの期間について乾物収量を比較すると、いずれの施用量において

も、短ければ短いほどコマツナの生育が良好であった。セキショウモ植物体の施用量について乾物収量を比較すると、いずれの施用時期においても、4.0t/10a施用が良好であった。施用したセキショウモ植物体の窒素含有量から窒素投入量を算出し、コマツナの窒素吸収量から除して窒素利用率を求めると、播種1日前・4t/10aの施用で約13.7%であった。

4. 考 察

4-1 クロモの至適光質に関する研究

先行研究によりクロモを25℃の長日（16時間明期、8時間暗期）、光量30 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ で電球型蛍光灯にセロハンフィルムを用いて光質を変えて栽培した実験から、クロモは赤色光下で栽培すると分枝数が多くなり、緑色光下では伸長生長が大きく、生物量は赤色光と青色光下で大きいことが報告されている（Van et al. 1977）。また、昨年度今回と同様に光質にLED電球を用いて光量44 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 、15℃、長日（14時間明期10時間暗期）で行った栽培実験から、クロモと外部形態的に共通点の多いコカナダモでも同様に赤色光下で分枝数が顕著であり、生物量も最大となることが確認されている（吉澤ら2012）。

今回、クロモを温度20℃、長日（16時間明期8時間暗期）、光量39 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ の赤色光と青色光で栽培した実験から、赤色光で栽培した方が総枝長、輪生葉段数、全長の生長が大きいことが明らかになった。しかし、分枝数は赤色光と青色光で大きな差は見られなかった。先行研究では赤色光下で分枝数が多くなったが（Van et al. 1977）、これは今回使用したLED電球が蛍光灯に比べエネルギーが限られた波長域に集中していることや、水温が5℃違うことも影響しているのかもしれない。いずれにしても赤色光下でクロモの分枝が誘導されるかどうかは、今後、温度や光量を変えて再度実験を繰り返して検証する必要がある。

4-2 水流による糸状藻類の発生抑制に関する研究

水槽実験の結果から、水流を発生させることは水槽内での糸状藻類の抑制に有効である可能性が示唆された。McIntireは付着性珪藻などが流速の早い河川に優占する一方で、*Oedogonium*などの糸状藻類は流速の遅い環境中に優占すると報告しており、流速により付着藻類の組成に差があるとしている。これは本実験の結果を支持するものと考えられた。一方でWhitford, L. A., and G. J. Schumacher. は、流速が早いほど*Oedogonium*などの生理活性が高まるとしており、今回の結果と一致しなかった。本実験でも造流ポンプの吸引によるろ過効果により糸状藻類がトラップされた可能性がある。また実験時の光量も通常の太陽光の1/10～1/20と低かったため、沈

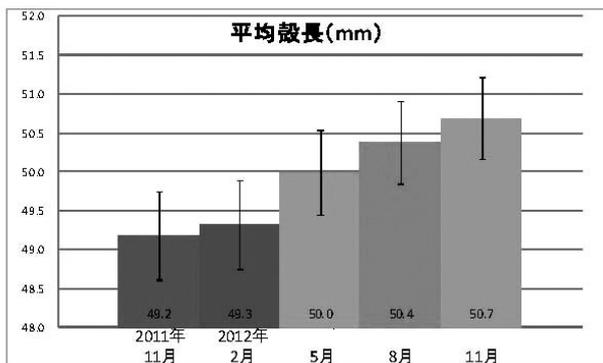


図10-1 平均殻長の経月変化

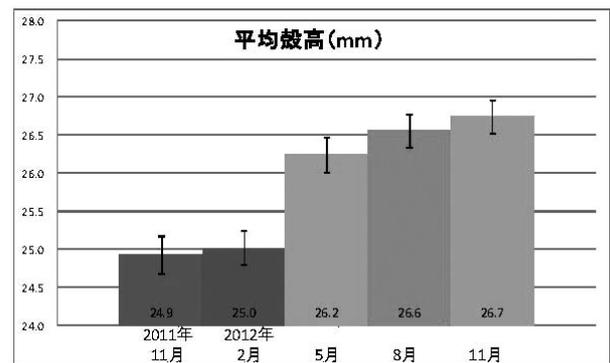


図10-2 平均殻高の経月変化

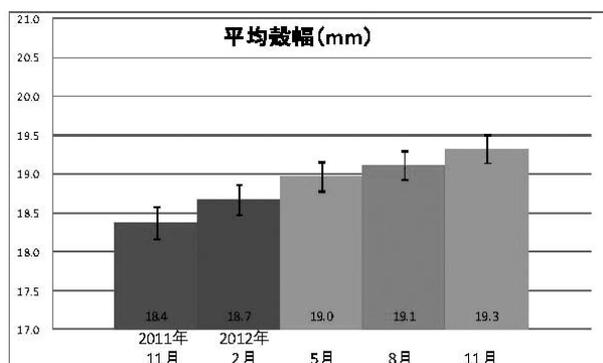


図10-3 平均殻幅の経月変化

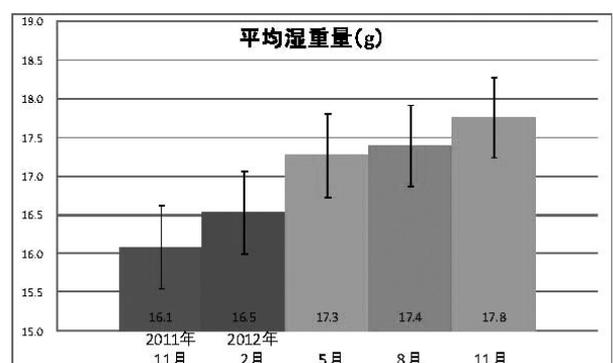


図10-4 平均湿重量の経月変化

縦軸はそれぞれ殻長 (mm), 殻高 (mm), 殻幅 (mm), 湿重量 (g) を, 横軸は測定月を, バーは標準誤差を示す

表3 セキシウム植物体の成分組成

	水分率	窒素(%)	炭素(%)	C/N	リン(%)	Ca(%)	Mg(%)	K(%)
7月31日	92.7	2.8	56.7	20.1	0.23	0.65	0.52	6.32
8月7日	93.0	3.0	56.5	18.8	0.23	0.58	0.52	6.05
8月14日	92.8	3.1	54.9	17.8	0.26	0.77	0.55	6.67
8月21日	93.3	3.2	57.0	17.9	0.27	0.79	0.53	5.93
8月28日	92.8	3.1	53.1	17.3	0.25	0.85	0.55	6.24
平均	92.9	3.0	55.6	18.3	0.25	0.73	0.53	6.24

表4 セキシウム植物体施用によるコマツナ乾物収量への影響

セキシウム施用量	乾物収量(kg/10a)				
	4週	3週	2週	1週	1日
4t/10a	55	39	115	101	139
2t/10a	14	12	16	34	76
0.5t/10a	4	3	6	18	17
化学肥料	—	—	—	—	359
無窒素	—	—	—	—	13

水植物、糸状藻類ともに成長速度が十分に確保できなかった可能性もある。さらに光源の波長域も太陽光とは異なるため、屋外での栽培時には適応できない可能性も残されている。これらをふまえて今後は野外での大型水槽を用いて、水質浄化のための植栽時により近い条件化で実験を行う予定である。

4-3 植栽基物を用いた沈水植物栽培試験

水槽実験の結果から、今回実験に供した素材を用いた植栽基物は沈水植物の成長を阻害することはなく、実際の池などでの使用が可能であることが明らかとなった。また素材の選択に際しては、水質に与える影響や、添加物の有無、作成の容易さ、材料のコストを考慮する必要がある。表5でそれぞれの項目について比較を行った。「永土」は白濁を生じる期間があるため、景観影響面で問題があると判断した。水質影響はカルシウムイオン、マグネシウムイオン、硫酸イオンの濃度を上昇させる程度に応じて判断した。また製造工程は作業工程数と所要時間を判断基準とした。総合的に判断すると、「備前」系が最も植栽基物として適していると考えられた。

表5 素材別基物の比較表

素材	景観影響	水質影響	製造工程	材料コスト
赤土	○	×	○	230円/kg
赤粒	○	×	×	230円/kg
永土	×	×	△	150円/kg
備前	○	△	△	100円/kg

4-4 都市公園池における隔離水界実験

4-4-1 処理方法による隔離水界の光・水質環境

二枚貝を入れた水界5では他の処理区や、コントロール、外界に比べて顕著に吸光係数と濁度が低く、透明度、透視度が高かった(図7-1~4)。したがって、今回試行した処理の中では透明度の上昇をもって水質浄化とするならば、二枚貝を入れる処理が最も水質浄化効果が高いと考えられた。また、二枚貝を入れた水界5ではDOとpHについても上昇していた(図8-1~3)。通常、DOとpHの上昇は植物プランクトンの増加を意味する。しかし、それらは二枚貝の餌料になってしまうはずであり、事実、植物プランクトンなどを二枚貝が過剰摂食したため、水界5で透明度が高くなっていったと考えられた。しかしその水界5でDOとpHが高い値を示したことは興味深い。今回は沈水植物を植栽した水界2, 4, 5での水草の現存量を確認できなかったため、各水界の光合成量に対する沈水植物の寄与率が把握できなかったが、水界5では、沈水植物の光合成によりDOとpHが高くなった可能性がある。また水界5では沈水植物体に加え、二枚貝設置のためのメッシュパネルも水界中に吊り下げ

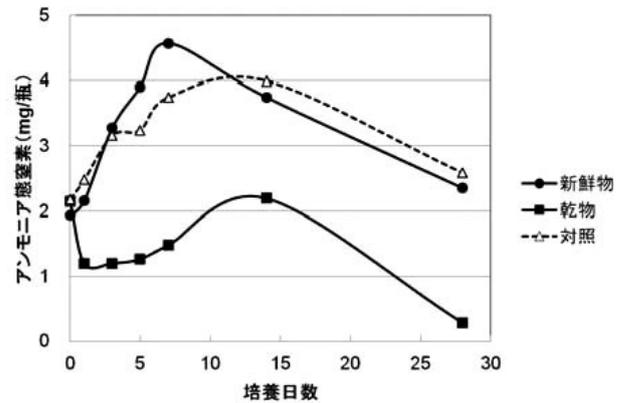


図11 保温静置培養法によるアンモニア態窒素の推移

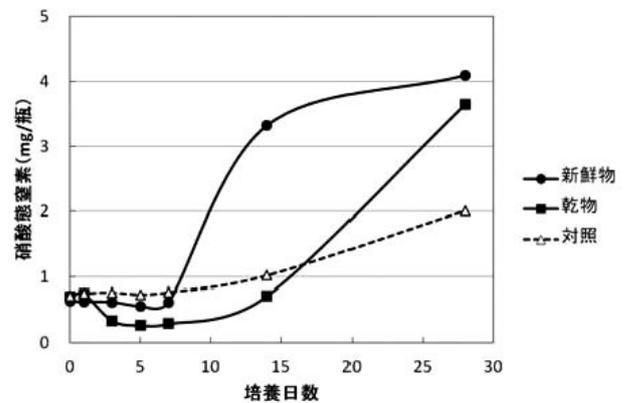


図12 保温静置培養法による硝酸態窒素の推移

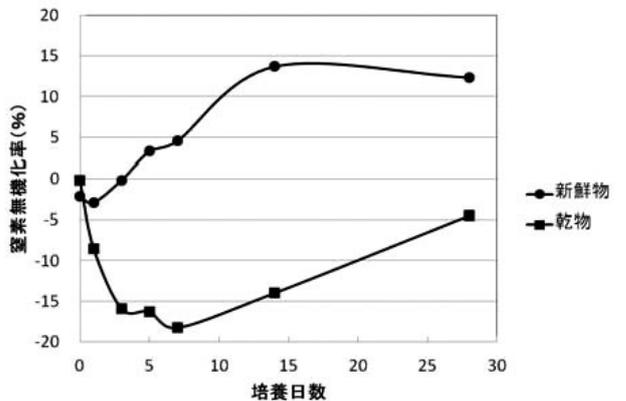


図13 保温静置培養法による窒素無機化率の推移

られており、付着藻類のハビタットが他の水界よりも豊富であったことが考えられ、付着藻類の光合成量が多かった可能性も考えられた。また濾過摂食されないような小型の植物プランクトンが増殖している可能性もあり、今後は他の水界とのプランクトン相の比較を行う予定である。

4-4-2 二枚貝の移植について

メッシュパネルに取り付けたネットに二枚貝を入れて設置したのは、二枚貝をある程度成長させてから回収す

必要があるからである(図14)。移植して成長させた後に回収することで、自然水系から有機物を除去し、水質浄化を適切に行うことができる。定期的に回収しなければ、単に水質悪化の原因となる有機物を投入したことになる。玉諸公園内の池に二枚貝を移植した際に、初めに移植した個体のいくらかが次の調査時に死亡していた。本来二枚貝は砂泥に潜って底生生活を行うので、ネットを使った場合死亡率が高くなる可能性があり、今後さらに設置法を工夫する必要がある。青木ら(2011)は真珠養殖に用いられるアコヤガイの成熟状態を把握する方法を確立するため、閉殻力とタンパク質量、グリコーゲン量、筋肉量の関係を調査した。閉殻力とタンパク質量及びグリコーゲン量との間に有意な正の相関があり、閉殻力を調べることで、二枚貝の生理・栄養状態を把握することができると考えられる。この方法によって二枚貝を選定し、より健康なものを移植することによって死亡率を下げるができると思われる。

Kamermans (1994) は堆積物摂食及び懸濁物摂食を行う海産二枚貝の食物競争について明らかにするため、両者の胃内藻類と環境要因との関係を調査した。堆積物摂食及び懸濁物摂食を行う二枚貝の濾過と潮汐周期との間には有意な相関があり、潮汐によって引き起こされる速い水流は二枚貝の摂餌に負の影響を及ぼすと報告している。Stuart, Eversole and Brune (2001) は淡水魚を養殖する際に発生する緑藻及び藍藻の除去法を確立するため、*Elliptio complanata* の濾過率を異なる流量で測定した。二枚貝の濾過率は流量2.5l/minまでは増加したものの、3.0l/minでは減少した。そのため、自然環境において流量が大きく濾過摂食の障害となる場合には、玉諸公園内の池に設置したように人工的な閉鎖水系を作り、二枚貝を移植することで、濾過率を高い状態に保つ必要がある。

二枚貝を移植するには移植する時期にも配慮する必要がある。自然水系内の懸濁物質を取り除くには、成長率の高い時期に二枚貝を移植するのが効果的であると思われる。本研究で玉諸公園内に移植したタテボシガイの平均殻長は2月から5月に増加した(図10-1)。近藤(1992)は京都市内の水路において、タテボシガイ(*Unio douglasiae biwae*)の亜種のイシガイ(*Unio douglasiae nipponensis*)の殻長の季節的变化を明らかにした。イシガイの殻長の平均的な成長は、1987年7月から10月まで0.94mm、10月から11月まで0.58mm、11月から1988年2月まで0.13mm、2月から3月まで0.05mm、3月から5月まで0.06mm、5月から7月まで0.13mm、7月から9月まで0.13mmであり、1987年と1988年のほぼ同じ時期で異なるように見える。また、本研究で用いたタテボシガイとも成長時期が異なる。これは、得たエネルギーを生殖に用いる時期と成長に用いる時期が、地域で、また年によって異なる可能性を示している。一方、二枚貝の成長を

判断する上では湿重量に注目する方が妥当であると思われる。

本研究で玉諸公園内に移植したタテボシガイの平均湿重量は2011年11月から2012年5月及び2012年8月から11月(すなわち5月から8月を除いて)に顕著に増加した。近藤(1987)は祇園川において、淡水二枚貝の幼生であるグロキディウムが付着する魚類を採集し、イシガイ類7種のグロキディウムの放出時期を明らかにした。これによるとイシガイのグロキディウム放出時期は4~8月であった。これより、繁殖期はそれより少し前から始まると思われる。繁殖期がタテボシガイでも同様であるとすれば、本研究でタテボシガイの湿重量の増加が少なかった春季から夏季は繁殖期であり、この時期には濾過摂食により得たエネルギーが生殖に使われたと考えられる。それゆえ、その時期を避けてタテボシガイを移植するのが効果的である。

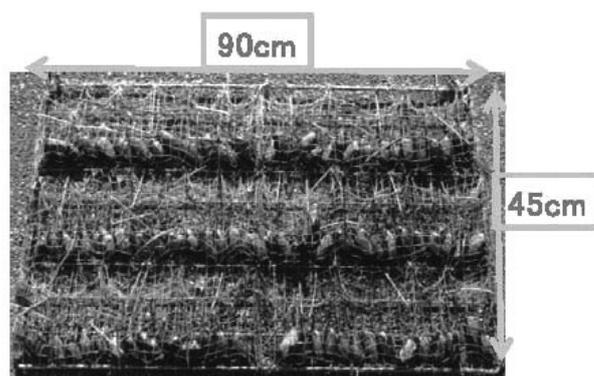


図14 二枚貝のメッシュパネルによる飼育

4-5 セキシウム植物体の成分組成に関する研究

セキシウム植物体のC-N比は18.3であり、マメ科やアブラナ科などの緑肥作物と同程度であったことから、セキシウム植物体はそのまま圃場にすき込む緑肥的な利用法をとることで肥料効果が期待できると考えられた。また、セキシウム自体の水分率は約93%であったが、実際に湖沼などから回収されることを想定した場合、付着している水分も相当多いことが予想されることから、堆肥化するには大量の水分調整用副資材が必要になる。水分調整用副資材にオガクズやモミガラ、ワラ類など炭素率の高い資材を利用する場合、堆肥化を促進するための窒素源もあわせて配合する必要がある。このようなことからセキシウム植物体の再利用法としては堆肥化より緑肥の利用が有効であると考えられた。

4-6 セキシウム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

セキシウム植物体のC-N比は20以下であるため、比較的早く分解することが予想され、新鮮物の保温静置培

養法による窒素無機化率の推移は予想を裏付ける結果であった。培養初期の有機化量は小さく、すぐに無機化に転じているため有機化に伴う窒素飢餓の可能性も少ないと思われた。

一方、乾物では培養初期の有機化と無機化の遅延が認められた。還元糖とアミノ化合物（アミノ酸、ペプチド及びタンパク質）を加熱したときなどに褐色物質（メラノイジン）を生み出す反応としてメイラード反応が知られている（加藤・倉田，1999；片山・田辺，2003）。また、有機質肥料に温度処理をすると窒素の無機化が遅延するという報告がある（長坂，2006）。今回用いた乾物試料は、60℃設定の通風乾燥機で処理した物であり報告より温度は低かったものの、一昼夜の乾燥処理を行ったためメラノイジンが生成されて無機化の遅延につながったのではないかと考えられた。

4-7 セキショウモ植物体の緑肥利用に関する研究

有機質肥料を使用する際、施用直後には土壤中の無機態窒素の有機化による窒素飢餓や亜硝酸等のガス害のおそれがあるため、施用直後の播種は避けることが一般的であるが、本実験の結果は施用と播種の間隔が短いほど生育が良好であった。保温静置培養の結果より有機化に伴う窒素飢餓の恐れは少ないと予想されたが、ガス害についても有機質肥料ほど窒素濃度が高くないので発生しなかったと考えられた。また、緑肥を畑地に施用した場合、植物体が急激に分解する時に土壤糸状菌とくにピシウム菌も爆発的に増殖し、立枯症などの障害を引き起こすことが知られている（沢田，1969；東條ら，2010）。本実験ではこのような立枯症状も確認することはなかった。これは用いた土壤が市販の園芸培土であったため、製造段階で滅菌処理が行われていたためであると推察され、実際の圃場などに施用する場合には、施用からは種までは2～3週間の間隔をとる必要があると考えられた。

5. 結 語

生物を利用し様々な水域で水質浄化を行うための手法を確立することを目的として、利用する生物の供給から、発生するバイオマスの活用方法までを研究対象として水槽実験、野外実験を行ってきた。

水生植物の供給についてはクロモおよびセキショウモの栽培実験を行い、栽培時の光質は水生植物の生育に影響を与え、赤色光の有効性が明らかとなった。一方で二枚貝についての飼育及び増養殖の方法については未検討に終わった。

これら生物を利用しての、都市公園での隔離水界実験では、沈水植物と二枚貝を用いることにより、透明度などの改善効果が認められた。実験に供したタテボシガイについては、生育可能な水温域が幅広いことから、野外

での実用が可能であることが昨年度の研究で明らかとなったが、効果的に利用するにはその飼育方法や設置時期を適性に行う必要性が認められた。

また水質浄化に用いた水生植物は、根を残して葉体を刈り取ることで、水域から窒素、りんを取出すことが可能であるが、刈り取られた葉体の利用方法として、セキショウモでは、植物体のC-N比は18.3であることが明らかとなり、小松菜を用いた栽培試験から、緑肥としての効果が認められた。しかし施用時期に関しては、播種の直前が最も肥料としての効果が高く、施用方法に注意が必要であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Van TK, Haller WT, Bowes G, Garrard L.A., *Journal of Aquatic Plant Management* 15, 29-31 (1977)
- 2) 吉澤一家, 堀内雅人, 佐々木裕也, 高橋一孝, 山崎修平, 戸沢一宏, 宮崎淳一, 芹澤如此古, 山梨県総理研報, 7, 63-74. (2012)
- 3) Whitford, L. A., and G. J. Schumacher, *Ecology* 45, 168-170 (1964)
- 4) C. David McIntire, *Hydrobiologia*, 27, 559-570 (1966)
- 5) 青木秀夫, 藤原孝之, 石川卓, 渥美貴史, 阿部久代, 神谷直明, 古丸明, 三重県水研報, 20, 1-7 (2011)
- 6) Kamermans, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 104, 63-75 (1994)
- 7) 近藤高貴, *VENUS*, 46, 227-236 (1987)
- 8) 近藤高貴, *VENUS*, 51, 219-224 (1992)
- 9) Stuart K. R., A. G. Eversole, and D. E. Brune, *Journal of the World Aquaculture Society*, 32, 105-111 (2001)
- 10) 片山 修, 田島 真, 食品と色, 光琳, 東京, P.111.
- 11) 加藤博通, 倉田忠男, 食品保蔵学, 文永堂出版, 東京, P.109-123.
- 12) 長坂克彦, 山梨県総合農試研究報告, 18, 21-23.
- 13) 沢田泰男, 北海道農試報告, 76, 1-62.
- 14) 堆肥等有機物分析法 (2010年版), (財)日本土壌協会
- 15) 東條元昭, 中山佳代子, 三村浩子, 農業および園芸, 85, 183-189

成果発表状況

学会発表

中沢公士ら：淡水二枚貝を用いた水質浄化方法の検討、平成24年度 日本動物学会 中部支部大会、松本、2012

学会誌等発表

中沢公士ら：. 淡水二枚貝を用いた水質浄化方法の検討
(予報), 山梨大学教育人間科学部紀要14 : 7-18, 2013