

# 沈水植物成長のための巻貝類による糸状藻類捕食増殖抑制機能 の解析評価

稲森悠平・稲森隆平（福島大学大学院・共生システム理工学研究科）

## 要 旨

本研究では、磐梯朝日国立公園に存在する湖沼群の環境保全再生を目途として、沈水植物に共生する食物連鎖機能の食う食われる関係に着目し、沈水植物の成長に影響を及ぼす付着糸状藻類の巻貝の捕食による成長抑制防止に係わる基盤的解析評価研究を行なった。成果は以下に示す通りである。1) 巻貝類のモノアラガイとサカマキガイにおいては食物源としての糸状藻類に対する選好性の異なることがわかった。2) モノアラガイは食物源とする糸状藻類に対して選好性が大きくミドロ系を好んで捕食することがわかった。3) モノアラガイの捕食能の最大化する水温は25℃付近であることがわかった。4) モノアラガイの捕食能最大化するpHは8付近であることがわかった。5) モノアラガイは糸状藻類を捕食すると水圏への大きな有機物、窒素、リンの回帰を引き起こすが、底泥の存在下、魚類、巻貝類、二枚貝類の存在する多様な条件下では窒素、リンは吸収、分解され低濃度を維持可能なことがわかった。

## I. はじめに

水環境保全再生は21世紀の重要かつ緊急に解決すべき課題とされており、特に水資源としての湖沼等の閉鎖性水域において必要不可欠とされている。この課題解決のために、生態工学技法の活用が国際的にも大きく注目を浴びている。このような点を鑑み、我が国の富栄養化防止対策の基盤とされている湖沼水質保全特別措置法（湖沼法）改正の重要課題である面源負荷削減のための流出水対策および湖沼内のアオコ等発生防止対策等に密接に関連する植生復元による湖沼の水環境回復に極めて有効な技法開発を行った。すなわち、これまで知見集積の乏しかった外来・絶滅危惧等を考慮し、遺伝子攪乱防止を踏まえ、沈水植物再生を利用した生態工学技法の確立、特に、磐梯朝日国立公園に存在する湖沼群の環境保全再生を目途とした沈水植物の付着糸状藻類と巻貝類の捕食被食関係に着目した検討を進めることとした。

沈水植物現存量の異なる湖沼間のこれまでの解析結果等から、沈水植物再生により水環境の著しい回復が可能であるという重要な研究成果が報告されてきたが、その回復に資する水生動物の存在効果等の機能解析はなされていない。また、再生手法として定着手法開発が取り組まれてきているものの、水生昆虫類等、糸状藻類等の食害、増殖抑制に係わる沈水植物の消長が評価できていないため、適正な再生が実施されてはいない。本研究開発では、河川・湖沼・池沼モデル実施サイトにおける沈水植物の有無、栄養塩負荷による沈水植物の成長・消失、環境因子に対する沈水植物および共生する食物連鎖機能の食う食われる関係に着目した巻貝類・二枚貝類・魚類等の水生動物の生育試験を導入した定量化の新しい試みの実験を行うこととした。沈水植物再生のためのパラメーターを取得でき新たなシステムを構築することによりはじめて水環境回復のための適正な沈水植物の再生手法を確立できる。

本研究開発ではこれらの点を踏まえ、持続可能な水環境回復のための沈水植物の絶滅危惧・外来種等を考慮し、湖沼、地域特性に応じたエビ類・巻貝類・二枚貝類・魚類等の捕食能・相互作用系の水生動物の共存効果の機能導入した技法を新たに確立することとしている。これらの点は、従来なされてきておらず新規性、独創性の極めて高い研究であるといえる。

更に、生態工学技法としての沈水植物再生により湖沼等の水環境を回復するには、沈水植物の再生を可能とする新たな自然共生型のシステム確立が必要とされている。これらの本研究で開発されるシステムは、我が国だけでなく、国際的にその確立が求められている。水生植物の中でも、特に抽水植物に関する研究開発は国内外や企業等でこれまで多数実施され、湖辺植生帯の保全、再生等にこれらの成果が適用されてきたが、沈水植物は水質等の影響を受けやすく衰退、消失するため、ここで着目する沈水植物再生を利用した水環境回復手法に関しては、国内外に事例がみあたらない。

本研究開発は、沈水植物再生のため、水生動物共存の有無の機能解析に基づく生態工学技法システムを構築し、国内外に適用できる沈水植物を利用した持続可能な自然共生型水環境回復技術の確立を目的とする。なお、国内各地の実態調査・情報収集と同時に湖沼モデル試験サイトとして、共同研究を実施している(独)国立環境研究所の大型実験池に沈水植物群落を定着させた実験施設における研究、湖沼モデルカラム試験、ベンチスケールの沈水植物に共生する巻貝類、二枚貝類・魚類等の水生動物による沈水植物捕食者有害ミズメイガ等の昆虫類および沈水植物の増殖を抑制する糸状藻類のコントロール機能評価試験等の研究、沈水植物再生復元および可食性水耕植物栽培フロート浄化技術導

入最適技法確立の研究を行うものであり、本研究開発により、高度・効率的な水環境再生を図ることが可能となる。

すなわち、水環境回復に資する沈水植物再生規模の算定手法、水環境適合型再生手法、再生後の維持管理手法、水生植物捕食者有害生物の制御手法等を開発し、我国に約4万ヶ所存在する適用可能な河川とつながる湖沼・池沼の沈水植物再生による水環境回復と派生バイオマスのリサイクルまでを包括した国際的に活用可能な新しい自然共生型生態工学技法活用システムを構築する上での技術開発・機能解析評価による調査・試験研究を行うことを目的として推進する(図1, 2)。



図1 沈水植物再生の水環境改善に対する効果

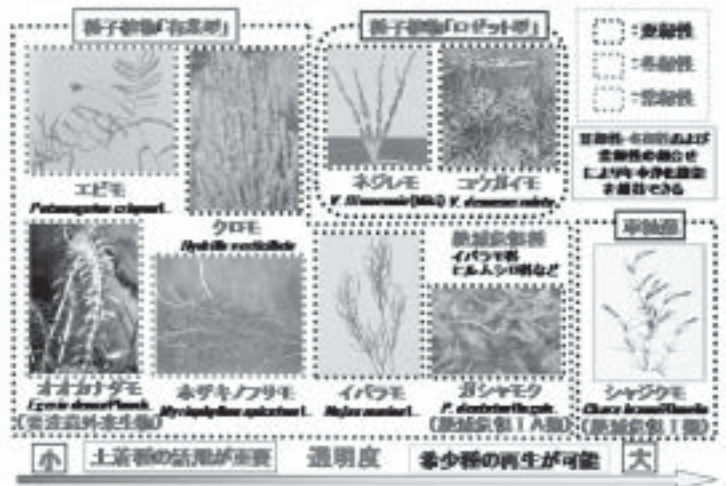


図2 環境再生のための対象沈水植物種の特性

本研究開発においては、湖沼法改正の重要課題である面源負荷削減のための流出水対策およびアオコ発生対策の効果的手法の確立に資する沈水植物生態系の食物連鎖機能の中の食う食われる関係に着目した新たな水生動物共存効果の機能を踏まえたシステム構築を目的として推進する。

これらの点を鑑みて、①湖沼、地域特性に応じた沈水植物再生維持、②沈水植物および共生する巻貝類・二枚貝類・魚類等の水生動物の水質浄化機能の定量化、③沈水植物の食害昆虫ミズメイガ等の水生動物による捕食機能解析評価、成長抑制に係わる糸状藻類の巻貝による捕食機能解析評価、④水生生物と環境因子（栄養塩光、底質等）に応じた沈水植物の消長予測のシステム構築、⑤湖沼、地域特性に応じた水生動物を中核とする食物連鎖機能に基づく生態工学技法の最適なマニュアルの開発と国内外へ適用できる水環境再生技術の構築を図ることとする。

**A：** 沈水植物再生のための水生動物の共存効果機能手法の開発として湖沼モデルシステム、水質、藻類、共生する巻貝類・二枚貝類・魚類等の水生動物、沈水植物等の中長期的な変動を比較解析し、沈水植物の水環境回復機能を定量化し、沈水植物再生による水質予測、生態系変動モデル解析に必要なパラメーターを取得してシステムを構築する。

**B：** 沈水植物の水生動物共存系再生手法の開発として、沈水植物を繁茂させた湖沼モデルシステムを用いた異なる栄養塩負荷試験による植物プランクトンや付着藻類等の一次生産者との光や栄養塩競合による成長・消失過程の解析と、環境因子（光、水温、底質等）に対する水生動物の共存の有無による沈水植物生育試験に基づく沈水植物の消長予測のためのパラメーター取得を基にしたシステムを構築すると同時に、水生動物の共存効果を踏まえた沈水植物再生マニュアルを確立する。

**C：** 適正手法の開発として絶滅危惧・外来種等を考慮した水生動物共存下の持続可能な水環境回復のための維持管理手法を確立する。

## II. 沈水植物成長抑制に係わる糸状藻類の増殖特性と巻貝類による捕食機能解析

本研究では、以下のとおり年度計画を基に実施することとした。

①水植物の成長を抑制する糸状藻類の種特性を解析する。②沈水植物の成長を抑制する糸状藻類の捕食者水生動物の沈水植物内での動態を解析する。③糸状藻類としてのアオミドロ、ヒビミドロ、シオグサ等のモノアラガイ、サカマキガイ等の捕食特性を解析する。④動物プランクトン、共生する巻貝類・二枚貝類・魚類等の水生動物の浄化速度試験と浄化原単位を算出する。⑤糸状藻類の捕食者水生動物の機能を導入したシステムを確立化する。⑥沈水植物・水生植物・食害昆虫の存在の有無の実験装置でのモニタリング比較解析により沈水植物再生水質および生態系の変動と食害防止機構を解明する。⑦高栄養塩および低栄養塩池沼の動態を比較し、栄養塩濃度差による沈水植物生態系の水質および水生動物の動態を解析する。⑧沈水植物の食害昆虫の捕食の可否を組み込んだ浄化機構解明に必要なパラメーターを取得、解析しシステムを構築し、システムを検証する。⑨フロート式水耕植物と沈水植物の組み合わせ系の浄化機能効果を解析する。⑩沈水植物の成長・消長予測に必要なパラメーターを解析し、沈水植物再生による水質予測モデルを構築し、水環境回復に要する沈水植物再生算定手法を確立する。

## III. 沈水植物浄化システムにおける水生動物貝類の糸状藻類の捕食機能解析法

沈水植物は湖岸植生生態系の中でも生活史の大部分が水中にあることから、栄養塩の



湖底、底泥の再巻上げ抑制、魚からの隠れ家となることに由来する植物プランクトンの捕食速度が大きい大型の動物プランクトンの増加再生産の場創り、特に浅い湖沼では水質や湖沼生態系を回復する機能が大きいといわれている。しかし、沈水植物による水質浄化や生態系の修復機能について定量的な評価手法は確立しておらず、沈水植物を含めた湖沼生態の保全・復元計画を適切に設定できていないのが現状である。本研究では、上記の点を踏まえ、沈水植物再生を図る上で重要な沈水植物の生存成長と密接に関係すると考えられる藻類と捕食者巻貝の捕食特性に及ぼす環境因子の影響および浄化機能に係わる解析を行った。

沈水植物植栽系における巻貝類モノアラガイの環境因子を変動させた条件下の実験装置としては、1 Lのプラスチック容器および200 Lの大型水槽を用いた。プラスチック容器は沈水植物オオカナダモの存在する系、大型水槽にはオオカナダモ、ササバモ、コカナダモ、コウガイモ、センニンモ、等を植栽する系とした。これらの実験系に巻貝類二枚貝を導入して捕食特性および浄化機能解析を行った。

プラスチック容器は500 mL~1 Lのものをを用い、オオカナダモを沈水植物として導入してここにサヤミドロ等の糸状藻類を食物源として添加し、更に捕食者として巻貝類モノアラガイを用いた。なお、サカマキガイを対象として用いた。モノアラガイは、0.2~2 gの大きさの異なる個体捕食能等、水温、pHの環境因子の異なる条件下の捕食能等を検討した。大型水槽は底層部に湖沼底泥と腐葉土・黒土を充填してここに各種の沈水植物を植栽し、更に巻貝類モノアラガイ等を導入し、水生動物存在下における糸状藻類の成長能、水質浄化特性等について検討した(図 3, 4)。

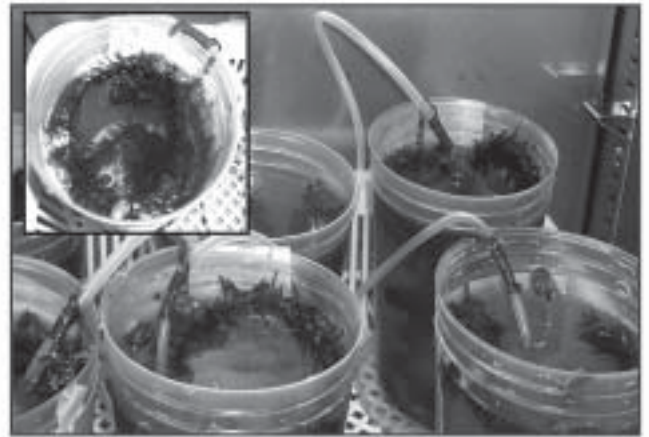


図 3 モノアラガイの糸状藻類捕食機能評価装置

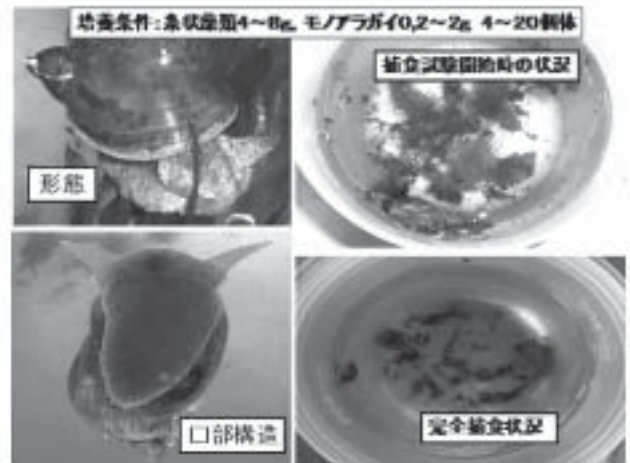


図 4 モノアラガイの形態・捕食特性

分析項目として BOD, COD, TOC, T-N, T-P 等を下水試験方法に準じて測定した。また、照度、水温、pH, ORP, DO の測定を行った。

#### IV.水生動物としての貝類の糸状藻類に対する捕食機能評価

##### 1) 糸状藻類の違いとモノアラガイの捕食機能の解析評価

沈水植物の生息する水圏生態系においては、各種の糸状藻類の生息することが知られている。湖水を原水として流入させたカラム、水路系において確認されたアオミドロ、サヤミドロ、ホシミドロ、シオグサ等を供給して捕食機能を解析した。その結果、細胞壁の柔らかいアオミドロ、サヤミドロは効果的に捕

食され、捕食速度はミドロ系で  $50 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$  であったのに対しシオグサ系では  $3 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$  と極めて低く食物源に対する大きな選好性のあることがわかった (図 5, 6)。

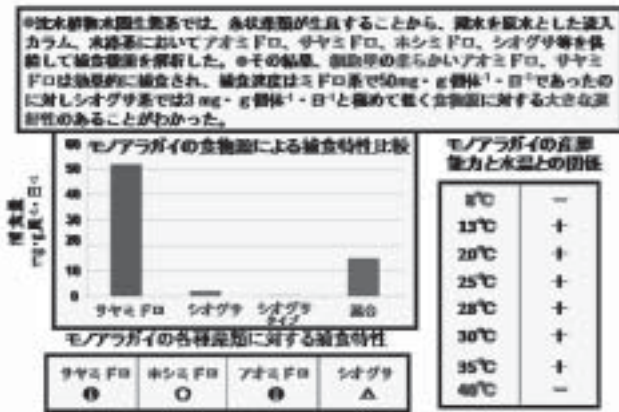


図 5 糸状藻類の違いとモノアラガイの捕食機能の解析評価

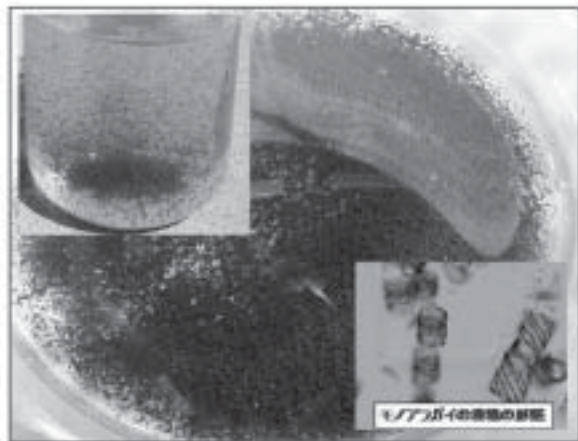


図 6 モノアラガイの糸状藻類の捕食状況と消滅機能

## 2) モノアラガイとサカマキガイの捕食機能の解析評価

生物学的水質汚濁指標として強腐水性に近いサカマキガイと貧腐水性に近いモノアラガイの糸状藻類の捕食特性に対して食物源として有効なミドロを用いて捕食機能を比較解析した。その結果、モノアラガイは、 $50 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$  であったのに対し、サカマキガイは  $20 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$  程度

と食物源に対する選好性の量なることがわかった。沈水植物は清水性の特性を有することが知られていることから、このような場に順応したといえるモノアラガイが捕食に対して有利な条件を得たと考えられる。

## 3) 水温の違いとモノアラガイの捕食機能の解析評価

水圏生態系では四季により水温が  $5^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$  程度の間で変化することを踏まえ、水温の変動のモノアラガイの捕食機能の解析をした。水温は  $7^\circ\text{C}$ ,  $13^\circ\text{C}$ ,  $17^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  に変化させミドロ系を食物源として行った。その結果、 $7^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  と極めて低水温・高水温系においては全く捕食が認められなかった。また、 $13^\circ\text{C}$  では  $10 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$ ,  $17^\circ\text{C}$  で  $35 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$ ,  $20^\circ\text{C}$  では  $50 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$ ,  $25^\circ\text{C}$  で  $65 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$ ,  $30^\circ\text{C}$  で  $60 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$  程度であり、 $25^\circ\text{C}$  において最大の捕食能になることが明らかとなった (図 7)。

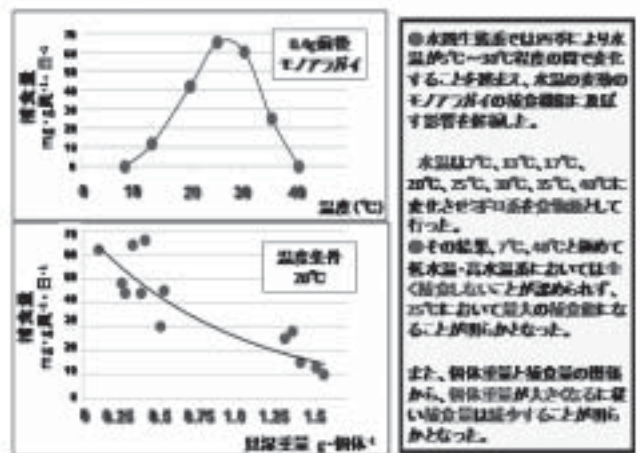


図 7 水温・個体重量の違いとモノアラガイの捕食機能の解析評価

## 4) pHの違いとモノアラガイの捕食機能の解析評価

水圏生態系は四季により藻類等の光合成活性の違いにより pH が大きく変動することが知られていることを踏まえ、pH の変動のモノアラガイの捕食機能に及ぼす影響を解析した。pH8, 9, 10, 11, 12 に変化させミドロ

系を食物源として行った。その結果、pH8では $50 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$ 、pH9では $35 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$ 、pH10では $15 \text{ mg} \cdot \text{g} \text{ 個体}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$ 、pH11, 12ではほとんど捕食が認められなかった。なお、最適 pH 値は 8 であることがわかった。

#### 5) モノアラガイによる糸状藻類捕食系における水質特性の解析評価

モノアラガイによる糸状藻類の捕食による水圏生態系の TOC, D-N, D-P の回帰特性を検討したところ、湖水の TOC, D-N, D-P が  $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.044 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ であったのに対し、捕食後は  $\text{TOC}137.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{D-N}10.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{D-P}4.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と捕食による代謝産物が多量に水系へ回帰することがわかった。

#### 6) 大型水槽における水生動物巻貝類モノアラガイ等の存在と糸状藻類の成長・水質に及ぼす解析評価

大型水槽における沈水植物ササバモを植栽した系を代表として糸状藻類の増殖および水質特性について水生動物の存在の有無において検討を行った。その結果、水生動物存在系ではモノアラガイの捕食により糸状藻類はほとんど消失したのに対し、水生動物の存在しない系ではミドロ系、シオグサ系が大量に糸状藻類の表面で増殖し景観は極めて悪化することがわかった (図 8)。

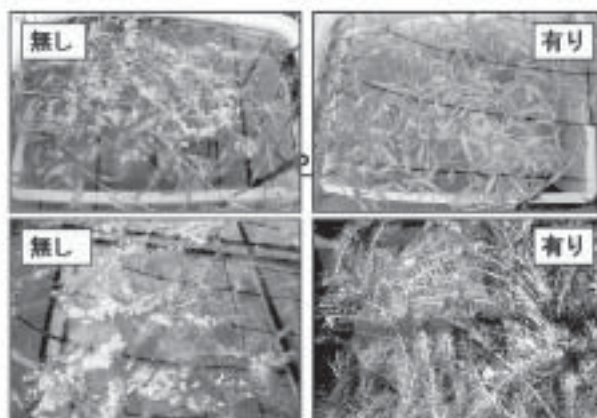


図 8 モノアラガイの存在の有無と糸状藻類の発生状況

また、水質についてみると水生動物存在系で  $\text{TOC}10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{D-N}1.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{D-P}0.059 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、水生動物非存在系で  $\text{TOC}10.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{D-N}0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{D-P}0.028 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ であり、水生動物存在系で窒素、リン濃度のわずかに上昇することがわかった。しかし、モノアラガイの捕食により著しい有機炭素、窒素、リンの増加が認められたのに対し、底泥存在で魚類、巻貝類、二枚貝類の存在する系では生物間相互作用が有効に機能して有機炭素、窒素、リンを低減化する機能の働くことが明らかとなった。

## V. 総括

本研究の成果をまとめると以下に示す通りである。

1) モノアラガイとサカマキガイにおいては食物源としての糸状藻類に対する選好性の異なることがわかった。2) モノアラガイは食物源とする糸状藻類に対して選好性が大きくミドロ系を好んで捕食することがわかった。3) モノアラガイの捕食能の最大化する水温は  $25^{\circ}\text{C}$  付近であることがわかった。4) モノアラガイの捕食能最大化する pH は 8 付近であることがわかった。5) モノアラガイは糸状藻類を捕食すると水圏への大きな有機物、窒素、リンの回帰を引き起こすが、底泥の存在下、魚類、巻貝類、二枚貝類の存在する多様な条件下では窒素、リンは吸収、分解され低濃度を維持可能なことがわかった。

本研究開発では、湖沼水質保全特別措置法 (湖沼法) 改正において、国土交通省・環境省・農林水産省に共通する課題である面源負荷削減のために位置づけられた流出水対策の重要施策としての植生復元を効果的に図る上での問題の解決に大きく資する成果が得られた<sup>7), 8), 9), 10)</sup>。なお、残された課題としては、絶滅危惧・外来種等および自然共生型の水生動物・植物の土着型を考慮した沈水



植物の再生・定着・浄化手法のみならず，派生残渣の資源化としての刈り取り沈水植物の緑肥をはじめとする水田，畑等での利用方策の確立がある．これらを解決することで，最適な沈水植物復元による利用活用方策の確立されたバイオエコタウンが構築できるものと考えられる．

### 参考文献

- (1)浜端悦治(2005)琵琶湖の沈水植物群落．琵琶湖研究所記念誌(所報 22号) 105-119.
- (2)Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C., Walker, B. (2001) "Catastrophic shifts in ecosystem": Nature, **413**(11), 591-596.
- (3)香川尚徳・四方政樹・木田真由美・下田路子(2008)柑橘園地域のための池において水草の豊さんに及ぼす水質の影響．陸水学雑誌, **69**, 1-23.
- (4)林 薫・深水英司(2009)埋土種子を用いた沈水植物再生の技術的検討．裏戸秀幸:河川技術論文集, **15**, 119-123.
- (5)Coops, H., Hoesper, S. H. (2002) Water-level Management as a Tool for the Restoration of Shallow Lakes in the Netherlands. Lake and Reservoir Manage, **18**, 293-298.
- (6)Barko, J. W., Gunnison, D. G., Carpenter, S. R. (1991) Sediment Interactions With Submersed Macrophyte Growth and Community Dynamics. Aquat. Bot., **41** (1/3), 41-65.
- (7)稲森悠平編(2008)最新環境浄化のための微生物学．講談社サイエンティフィック.
- (8)Inamori, Y., Jin, X., Park, J. D., Xu, K. (2008) Guideline on the Management for Establishment of Eco-Sound Watershed Environment of Lakes and Marshes. The Industrial Water Institute Co., Ltd., Tokyo.
- (9)須藤隆一編(2000)環境修復のための生態工学．講談社サイエンティフィック.
- (10)須藤隆一・稲森悠平(1983)生物相からみた処理機能の診断．産業用水調査会.