

沈水植物の食害昆虫ミズメイガ等の捕食能と 高次捕食者による抑制能の解析

稲森悠平（福島大学・共生システム理工学類）

稲森隆平（福島大学・共生システム理工学類）

要 旨

本研究においては、環境省の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藻類発生対策の効果的手法の確立に資する沈水植物生態系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した。特に、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を行った。得られた成果は以下のとおりである。1) ミズメイガ幼虫は沈水植物の種類を問わず、捕食することが明らかとなった。2) ミズメイガ幼虫は、魚類のヨシノボリ、クチボソの好適な食物源となるが、タナゴは食物源として不適な特性を有していることが明らかとなった。3) ミズメイガ幼虫は魚類非存在系では完全に消滅させる程度にまで捕食し食害を引き起こすことが明らかとなった。4) ミズメイガ幼虫は、5°C、10°Cでは魚類の捕食能が低下し障害は引き起こされないが、魚類非存在系の20°C、30°Cでは甚大なる被害の生ずることが明らかとなった。5) 沈水植物は照度が3,000~9,000Luxの自然光下においては魚類のミズメイガ幼虫の捕食溶出栄養塩類を吸収して成長し水塊の栄養塩類を上昇させることはなかったが、1,000Luxの人工光下においては光合成活性が低下したため、ミズメイガ幼虫の捕食溶出栄養塩類は再吸収が抑えられ栄養塩類の上昇することが明らかとなった。6) 沈水植物の復元再生するためには水生動物の共存による生物多様性の確保が極めて重要なことが明らかとなった。

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、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を目途として研究を実施する。

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の比較実験、栄養塩負荷による沈水植物の成長・消失試験、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

化の新しい試みにより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ができ、これ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)。

本研究においては、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。本年度は、上記の中で③についての研究開発を以下のとおり実施した。

モデル湖沼に設置した沈水植物のインバモ、クロモ等の植栽系にミズメイガ幼生体を植種し、水質、底質、生物群集(動植物プランクトン、ベントス等)、沈水植物等の動態をモニタリングし、比較解析することにより沈水植物食害と水質・生



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

態系変動を定量化し、ミズメイガ等の食害機構を解明する。また、ブルーギル等の沈水植物捕食機能を解析し、食害生物の制御のための技法の確立を図る。

上記の研究において、主として得られた成果は以下に示すとおりである。

II. 沈水植物の食害昆虫による捕食機能解析

沈水植物生態系の復元は必須の課題であるが、

この解決のために、食物連鎖機能の中の食う食われる関係の水生動物共存効果の解析研究を実施してきている。この沈水植物生態系の健全化のためには水生動物との共存が必要不可欠なことを明らかにしてきているが、沈水植物を捕食する食害生物の挙動はほとんど明らかにされていないのが現状である。沈水植物を捕食する生物として、草魚、ブルーギル等の魚類が存在するが、昆虫類のミズメイガの幼虫の捕食により大きなダメージ

ジを受けることが定性的に報告されているものの、定量的評価はなく、その解明が必要とされている。本研究では、上記の点を踏まえ、沈水植物・食害昆虫を基本として、この系に水生動物の存在する系、存在しない系の試験条件下で、水質、食害昆虫の消長等に関するモニタリング比較解析を行い、沈水植物の安定系構築のための食害防止機構を明らかにすることを目的として実験的検討を行った。

屋外実験は縦 80cm、横 50cm、高さ 50cm の水槽（湖沼底泥、黒土・腐葉土等を充填しそこにインバモ、クロモ、オオカナダモ、マツモ、ヒロハノエビモ、ササバモを植栽）において、水生動物非存在系を対照として存在系にはクチボソ 10 個体、タナゴ雄雌各 5 個体、ヨシノボリ 10 個体、ヤマトヌマエビ 10 個体、ドブガイ 8 個体、モノアラガイ 50 個体を投入して行った（図 3）。屋内実験は、蛍光灯照射下、縦 7.5cm、横 25cm、高さ 15cm の水槽に湖水およびモデル沈水植物としてオオカナダモを入れて行った（図 4）。また、屋外で屋内実験と同様の装置を用いて食害評価実験を行った。

III. 沈水植物の食害昆虫による屋内外試験解析

実験水槽に $BOD_{20} 20 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $T-N 5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $T-P 0.6 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、の実際の生活排水と霞ヶ浦湖水とを混合した希釈水を水理的滞留時間（HRT）7 日間に設定して行った。なお、食害昆虫は自然発生したミズメイガの捕食機能から評価した。屋内実験装置と同様の装置にばっ気条件下、オオカナダモとミズメイガの成虫（図 5）の産卵後成長した幼虫（図 6、7）を 70 個体入れて行った。この場合、ヨシノボリ、クチボソ、タナゴを各 5 匹ずつ投入した系と無投入系を対照とした 4 系で行った。

屋内実験においては、ばっ気条件下、湖水、オオカナダモとミズメイガを 70 個体入れ、魚類を

入れる系と入れない系で行った。なお、水温は 5°C 、 13°C 、 20°C 、 30°C に制御し、魚類添加系ではヨシノボリを 5 匹ずつ投入して行った。

屋外実験、屋内実験ともに pH、DO、ORP、水温測定、水生動物・ミズメイガ幼虫の変遷を観察すると同時に、BOD、COD、TOC、T-N、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_{2+3}\text{-N}$ 、T-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の分析を行った。なお、実験開始時と終了時の沈水植物の重量からミズメイガ幼虫による捕食特性を解析評価した。

1. 屋外大型水槽沈水植物植栽系における捕食特性機能解析

沈水植物植栽系において夏季の 8 月にミズメイガの成虫が産卵して沈水植物の食害が認められたが、インバモ、クロモ、オオカナダモ、マツモ、ヒロハノエビモ、ササバモのいずれも種類を問わず、水生動物の存在しない系においては完全に捕食（図 8）され消滅することが確認された（図 9）。しかし、ヨシノボリ、クチボソ、タナゴ等の水生動物存在系においてはほとんど食害が起らないことが確認された。

2. 屋外小型水槽沈水植物植栽系における捕食特性機能解析

沈水植物としてオオカナダモをモデルとしてミズメイガ幼虫の捕食特性評価実験を行った。オオカナダモの湿重量は開始時ヨシノボリ系、クチボソ系、タナゴ系、無添加系において、各々 39, 40, 38, 39g であったが 7 日後において各々 48, 50, 24, 18g であった。このことから、魚類非存在系でミズメイガ幼虫の甚大なる捕食が引き起こされることが確認された。水生動物がミズメイガ幼虫を捕食すると栄養塩濃度の上昇が引き起こされると考えられるが、3,000~9,000Lux と高い照度の影響で溶出栄養塩類の吸収が起こったため沈水植物の成長が生じ、栄養塩類の上昇はほとんど認められなかった。なお、魚類存在系ではヨシノボリ、クチボソのミズメイガ幼虫の捕食機能が発揮され沈水植物への影響は皆無であった

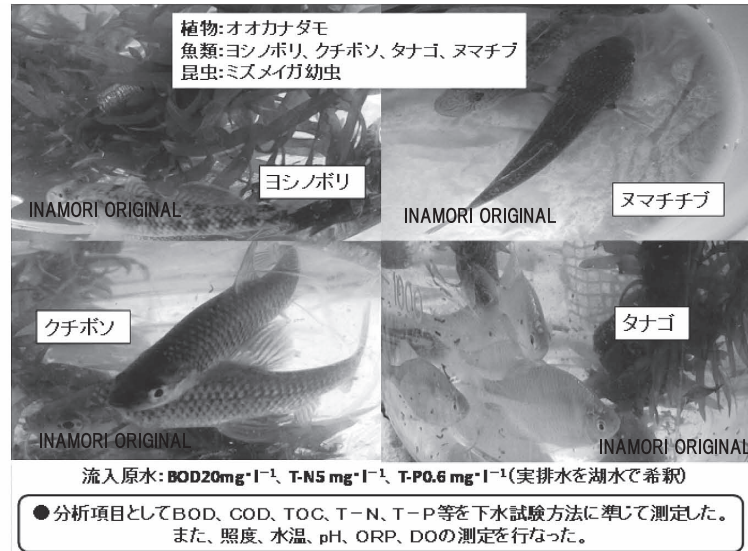


図3 食害昆虫に対する捕食者としての魚類の形態

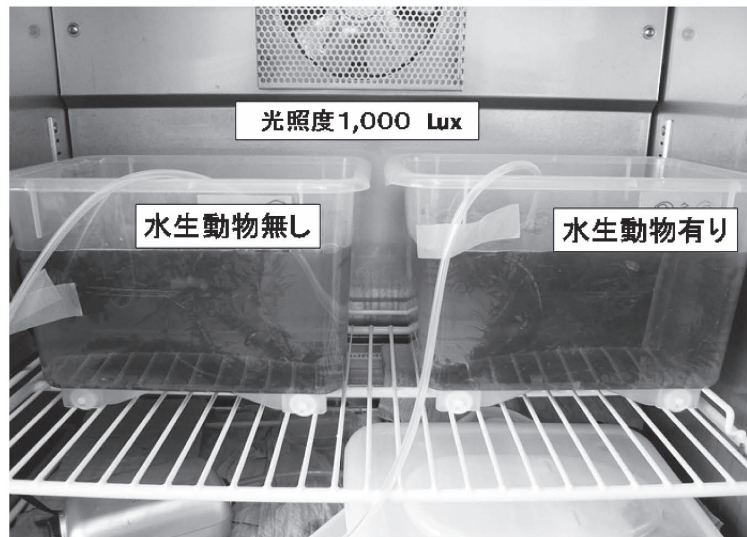


図4 ミズメイガの捕食能評価実験装置

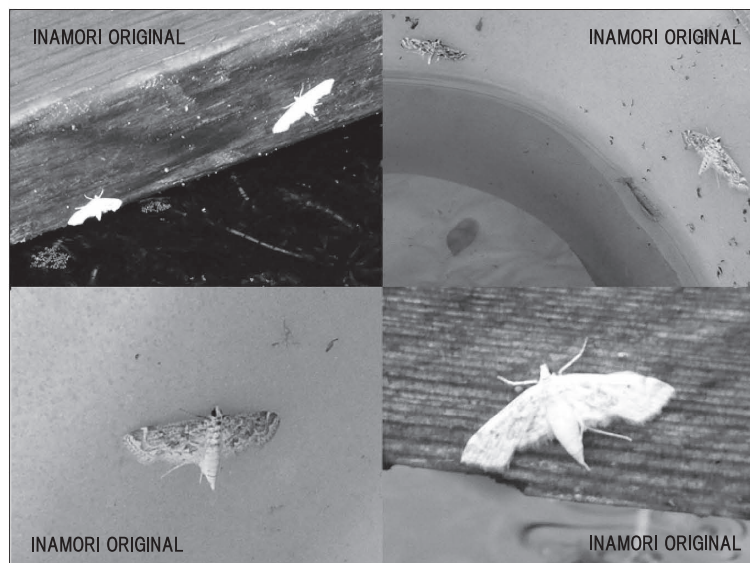


図5 ミズメイガの成虫

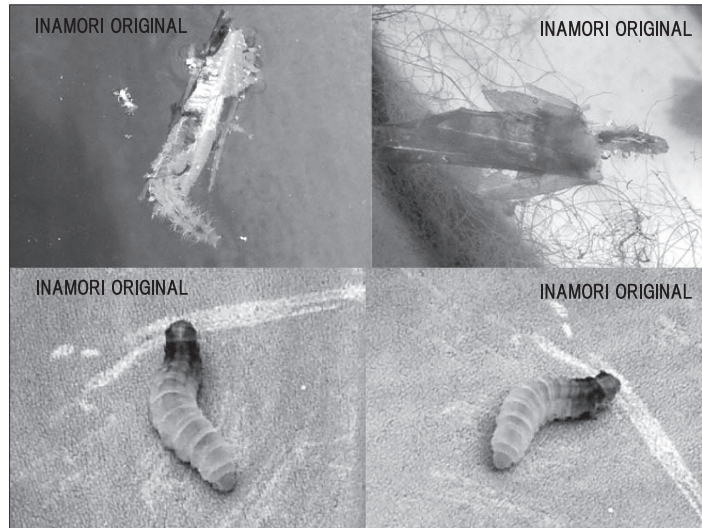


図6 ミズメイガの幼虫



図7 ミノムシ状に生息するミズメイガの幼虫

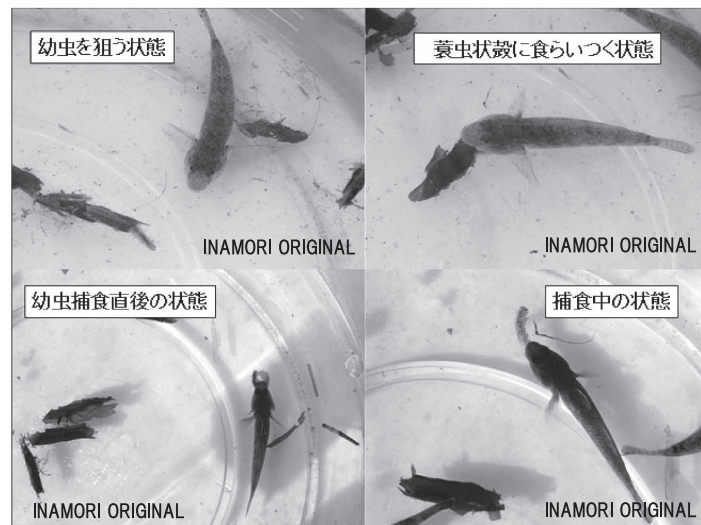


図8 ミノムシ状ミズメイガ幼虫の魚類ヨシノボリによる捕食状況

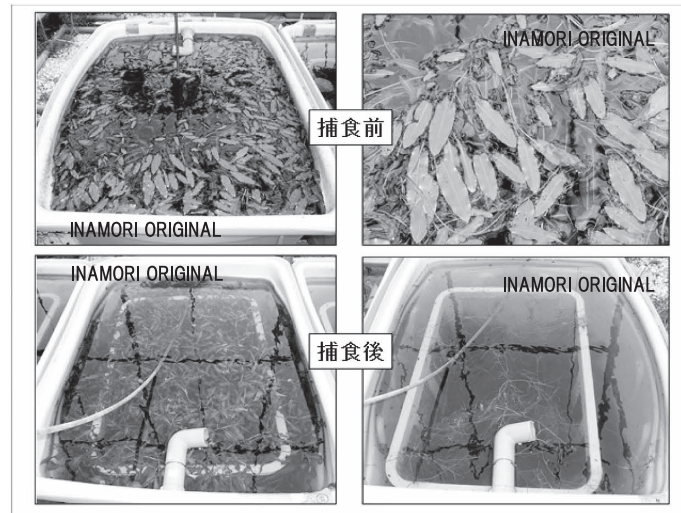


図9 有害昆虫ミズメイガの捕食前後の沈水植物の状態

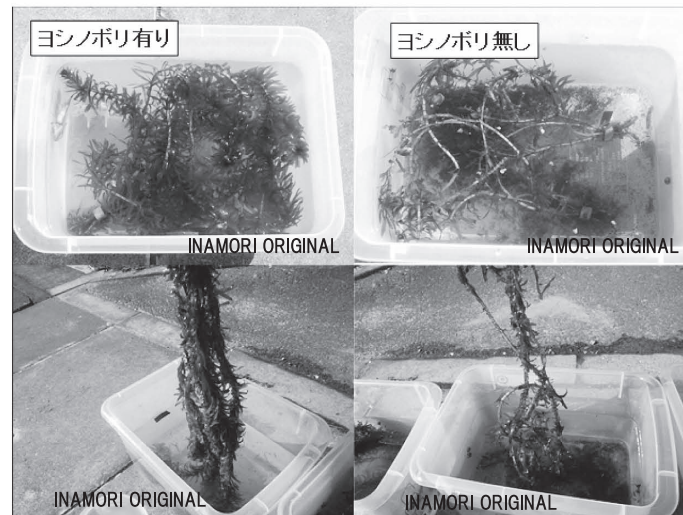


図10 ミズメイガによる捕食特性(30°C)

が、タナゴはミズメイガ幼虫が食物源として好適でないと考えられ食害が認められた。対照系では甚大なる捕食による障害が生じたことから、魚類の存在は、食害昆虫ミズメイガの食害を防止する極めて大きな機能を有していることが明らかとなった(図10)。

3. 屋内小型水槽沈水植物植栽系における捕食特性機能解析

沈水植物としてオオカナダモをモデルとしてミズメイガ幼虫のクチボソ存在の有無による捕食特性評価実験を行った。オオカナダモの湿重量は開始時クチボソ非存在系、存在系で各々5°Cに

おいて 33, 37g、10°Cにおいて 35, 32g、20°Cにおいて 33, 32g、30°Cにおいて 34, 33g であり、11 日後の終了時において各々5°Cにおいて 33, 44g、10°Cにおいて 38, 35g、20°Cにおいて 20, 35g、30°Cにおいて 13, 34g であった。屋外実験と同様に魚類の存在しない系においてはミズメイガ幼虫の甚大なる捕食による食害が引き起こされることがわかった。なお、5°C、10°Cでは魚類の捕食活性、ミズメイガの活性が著しく低下するためか沈水植物への影響はほとんど認められることはなく、食害は 20°C、30°Cと高水温になるほど魚類非存在系で著しく高まることが明らかとなった(図11、12、13)。なお、屋内実験系

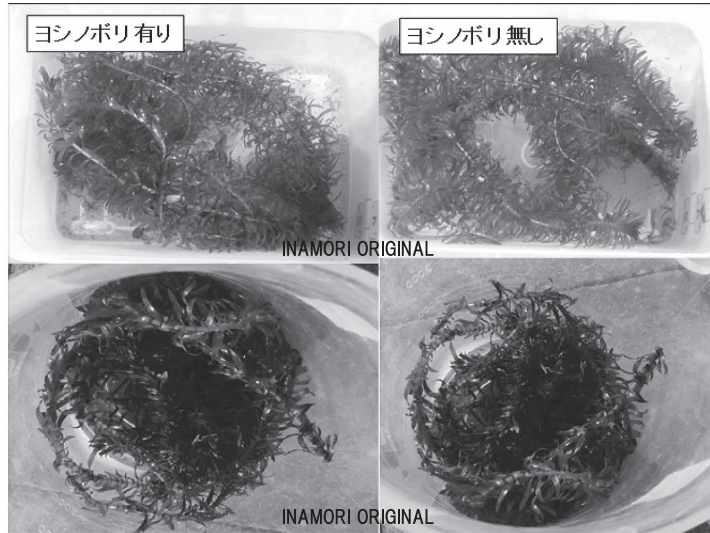


図 11 ミズメイガによる捕食特性(13°C)

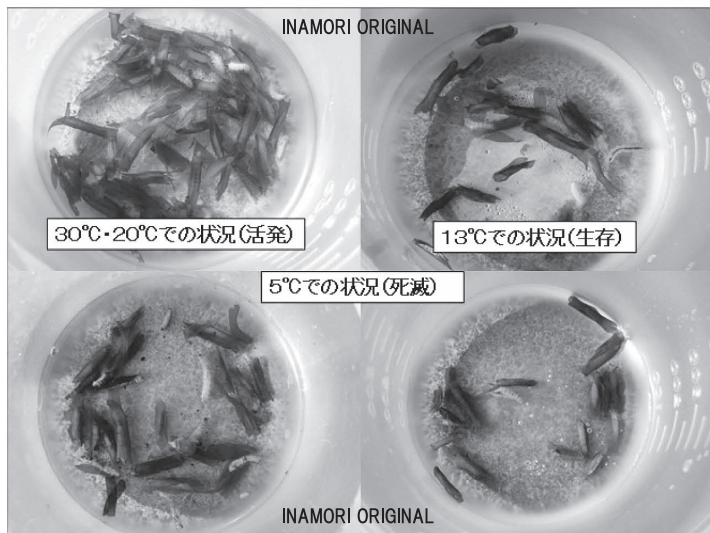


図 12 ミズメイガの温度と生存との関係

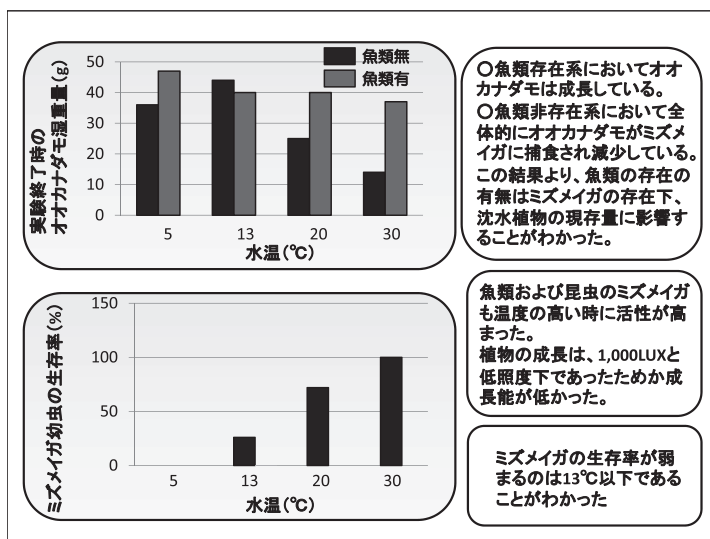


図 13 魚類の共存の有無と各水温でのミズメイガ捕食・死亡率との関係

では蛍光灯照射下 1,000Lux の条件で行い沈水植物の光合成活性が低かったためか沈水植物の成長はほとんど認められず魚類捕食により排出された栄養塩類の吸収能が低下したことから、栄養塩類の値が上昇し、照度は水質浄化の大きな要因となることが明らかとなった。

IV. まとめ

本研究で得られた成果をまとめると、以下のとおりである。

1) ミズメイガ幼虫は沈水植物の種類を問わず、捕食することが明らかとなった。

2) ミズメイガ幼虫は、魚類のヨシノボリ、クチボソの好適な食物源となるが、タナゴは食物源として不適な特性を有していることが明らかとなった。

3) ミズメイガ幼虫は魚類非存在系では完全に消滅させる程度にまで捕食し食害を引き起こすことが明らかとなった。

4) ミズメイガ幼虫は、5°C、10°Cでは魚類の捕食能が低下し障害は引き起こされないが、魚類非存在系の 20°C、30°Cでは甚大なる被害の生ずることが明らかとなった。

5) 沈水植物は照度が 3,000~9,000Lux の自然光下においては魚類のミズメイガ幼虫の捕食溶出栄養塩類を吸収して成長し水塊の栄養塩類を上昇させることはなかったが、1,000Lux の人工光下においては光合成活性が低下したため、ミズメイガ幼虫の捕食溶出栄養塩類は再吸収が抑えられ栄養塩類の上昇することが明らかとなった。

6) 沈水植物の復元再生するためには水生動物の共存による生物多様性の確保が極めて重要なことが明らかとなった。

引用文献

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.

Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C., & Walker, B. (2001) Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591-596.

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.

林 薫・深水英司・裏戸秀幸 (2009) 埋土種子を用いた沈水植物再生の技術的検討. *河川技術論文集*, 15, 119-123.

Coops, H., Hoesper, S. H. (2002) Water-level management as a tool for the restoration of shallow lakes in the Netherlands. *Lake and Reservoir Management*, 18, 293-298.

Barko, J.W., Gunnison, D., Carpenter, S.R. (1991) Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics. *Aquatic Botany*, 41, 41-65.

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ク.

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. (共著), The Industrial Water Institute Co., Ltd., Tokyo.

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ク

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.