

第8章 総括、今後の課題および展望

8-1 総括

本論文は、微小動物の捕食作用を利用して富栄養化水域の藍藻 *Microcystis* 属の増殖抑制を図る新たなバイオマニピュレーションを開発するための基盤を確立することを目的として研究を行ったものである。

本論文は、第1章から第8章で構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的および内容を述べた。

第2章では、①藍藻 *Microcystis* 属の大発生は、水利用を困難にさせ人々の生活に安全面、経済面で大きなリスクを追わせる。②*Microcystis* 属の産生毒 microcystin は、人々の生活を直接脅かすだけでなく、動物から魚類、動物プランクトンに至るまで大きな悪影響を与え、生態系を不健全化に導く危険性が高い。などの問題点を挙げ、窒素、リンなどの栄養塩が存在する現状でも、*Microcystis* 属の増殖を抑制できる手法開発が必要であることを明確にした。

つぎに、本研究で着目した食物連鎖の人為的操作（バイオマニピュレーション）による一次生産者（藻類）のバイオマス制御に関わる従来までの知見を整理し、微小動物の藻類に対する捕食作用を利用して *Microcystis* 属の増殖を抑制するためのバイオマニピュレーションは新たな試みであることを示した。

Microcystis 属の増殖抑制に適用できる可能性の高い微小動物として、*Microcystis* 属捕食性の *M.guttula*、*P.erythrophthalma*、*A.hemprichi* を挙げた。しかし、このなかで *M.guttula* と *Microcystis* 属との捕食・被食の相互関係については未解明な点が多い。そこで、まず *Microcystis* 属が存在する水域での *M.guttula* の動態特性や *Microcystis* 属に対する *M.guttula* の捕食と増殖特性を調べる必要がある。さらに、各微小動物を捕食の場に導入し、*Microcystis* 属の分解促進を図る上で、各微小動物を単独で利用するか、あるいは、共存させるかについて検討する必要がある。そして、微小動物のリアクター（捕食の場）への定着化を実現し、そのリアクターが *Microcystis* 属の増殖抑制に効果的に作用するか否かを検証し、定量的に解析する必要があるなど、本研究を展開する上での必要事項を示した。

第 3 章では、*M.guttula* に着目し、*Microcystis* 属の消滅に果たす捕食分解作用を明らかにするための検討を行った。*M.guttula* は、富栄養化湖沼の霞ヶ浦で *Microcystis* 属が急速に減少する時期に出現し、*Microcystis* 属の細胞を捕食しているところが観察されているが、その現象に関する詳細な知見がないことから、秋季の *Microcystis* 属の消滅期を大型淡水モデル池沼でシミュレートし、*Microcystis* 属に対する *M.guttula* 捕食作用を確認した。

まず最初に、霞ヶ浦で増殖した群体状の *Microcystis* 属を用いて、秋季の *Microcystis* 属の消滅期を *M.guttula* の出現と *Microcystis* 属に対する捕食を確認した。その結果、*Microcystis* 属の群体の単独細胞化、さらに分散し単独の細胞になった *Microcystis* 属の *M.guttula* による捕食が観察され、*Microcystis* 属の消滅過程と *M.guttula* の動態は、秋季の霞ヶ浦における *Microcystis* 属の消滅現象と類似した現象が認められ、*Microcystis* 属の群体が分散化することによって *M.guttula* の捕食圧が急速にかかることと予想された。

つぎに、培養株の分散状 *Microcystis* 属を用いて、日周期、静止水塊という条件で *M.guttula* の捕食作用を検討した。その結果、*M.guttula* の増殖に不利な pH10 という条件と分散状 *Microcystis* 属の密度が高い条件が同時に重なった場合、とくに暗期で *M.guttula* の捕食と増殖が進行し、それに伴い pH も中性化されるといふ *M.guttula* の増殖に有利な環境条件に変化し、結局、実験開始時点に比べて 95%以上の *Microcystis* 属を 3 日間で捕食することがわかった。しかし、培養株の群体状 *Microcystis* 属を用いて、同様の条件下で *M.guttula* の捕食作用を検討した結果、*M.guttula* は急速に減少し、この要因として、*Microcystis* 属の群体形成と光合成による高 pH 化が挙げられた。このように、*M.guttula* は分散状 *Microcystis* 属を効率よく捕食することがわかったので、その捕食による分解特性を調べるために、有毒種の *M.viridis* (分散状) に対する *M.guttula* の捕食作用を 20~30℃の温度で検討した結果、*M.viridis* をほぼ完全に捕食し有毒物質 microcystin も完全に分解できることが明らかとなった。また、*M.guttula* と *Microcystis* 属の捕食被食関係の数値モデル解析の結果から *M.guttula* の捕食により *Microcystis* 属の分解が進行する過程で、*M.guttula* の死亡率を高める物質が蓄積し、*M.guttula* 自身の増殖が抑制され、*Microcystis* 属の分解率が低下することが推定された。本章では、

M.guttula の捕食分解特性を調べ、*Microcystis* 属を削減可能な微小動物として、*M.guttula* の有用性を明らかにした。*M.guttula* の捕食圧を高めるためには *Microcystis* 属の群体の単独細胞化を促進させるための操作方法を見出し、さらに、その操作方法と *M.guttula* の捕食との組み合わせで *Microcystis* 属が削減可能か否かを検証していく必要があると考えられた。

第 4 章では、分散状および群体状 *Microcystis* 属の培養株を用い、*M.guttula*、*P.erythrophthalma* および *A.hemprichi* の単独と組み合わせで捕食実験を行い、各微小動物の動態と *Microcystis* 属に対する分解作用を検討し、さらに、群体状 *Microcystis* 属の自然株を用い、各微小動物の捕食による *Microcystis* 属の分解促進効果を検討した。その結果、分散状 *Microcystis* 属（培養株）に対する捕食は *A.hemprichi* や *P.erythrophthalma* より *M.guttula* が有利となったが、群体状 *Microcystis* 属（培養株）に対しては *M.guttula* はほとんど捕食できなかった。しかし、*M.guttula* と *A.hemprichi* が共存することによって群体状 *Microcystis* 属の分解が促進されることがわかった。群体状 *Microcystis* 属の自然株に対する各種微小動物の捕食作用を検討した結果は、*A.hemprichi* を接種した系で、*A.hemprichi* の増殖とともに、湖水中の *M.guttula* が増殖し、*Microcystis* 属の分解が促進された。群体の捕食および分散化を促進する *A.hemprichi* と分散化した単独の細胞を迅速に捕食する *M.guttula* の共存環境を構築し、水域に導入することができれば *Microcystis* 属の増殖抑制が可能と考えられた。これを具体化させるためには、現場水域を想定した上で、*M.guttula* および *A.hemprichi* のバイオマスを高めるための検討を行っていく必要があると考えられた。

第 5 章では、*M.guttula* と *A.hemprichi* の共存環境を構築する場として微小動物定着型リアクターを考案し、そのリアクターで *Microcystis* 属の増殖抑制が可能か否かを *Microcystis* 属の増殖する水域をシミュレートしたモデル池沼と連結させ、モデル池沼水をリアクターで処理し、その処理水をモデル池沼に返送するシステムを検討した。その結果、リアクターに *M.guttula* と *A.hemprichi* を定着させることに成功し、リアクター内の *M.guttula* と *A.hemprichi* の捕食作用によって、クロロフィル *a* (*M.aeruginosa* のバイオマス) を HRT4hr で 51%、HRT8hr で 56% 分解除去することができた。さらに、リアクターでモデル池沼内のクロロフィル

a を pH8.4、リアクターの HRT4hr から 8hr の条件下で実験開始時の $1,000\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ から $650\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ に 13 日間で減少させることができ、リアクターでモデル池沼内の *Microcystis* の増殖抑制を図ることが可能であることを実証した。

第 6 章では、前章のシステムと、リアクターの前段に物理的作用による群体分散化プロセスを導入したシステムで、群体状 *Microcystis* 属の増殖抑制を検討した。その結果、両システムにおいて、*M.guttula* と *A.hemprichi* はリアクターに定着し、それぞれの捕食作用および共存効果により群体状の *M.aeruginosa* を分解除去できることが示され、群体分散化プロセスを導入することで、各微小動物の定着密度は高められ、リアクターでの群体状 *Microcystis* 属の分解効果は、さらに向上することがわかった。群体分散化プロセスを組み込んだリアクターによってモデル池沼の群体状 *Microcystis* 属の増殖を抑制できることが明らかとなった。

第 7 章では、富栄養化水域を模擬した屋外の開放型の実験池で *Microcystis* 属を優占化させ、その池においてリアクターおよび前段に群体分散化プロセスを導入したリアクターシステムによる *Microcystis* 属の増殖抑制を検討した。その結果、群体分散化プロセスを導入したリアクターシステム (0.5m^3 、滞留時間約 3 時間、*Microcystis* 属の平均分解率 50%) により、対照系に比べて実験池 (30m^3) の *Microcystis* 属の増殖量はクロロフィル *a* 量の評価で約 $2/3$ に、また、*Microcystis* 属の細胞数密度で約 $1/2$ にまで減少した。さらに、リアクターの影響により池内の生態系自身に変化することによる、間接的な増殖抑制作用のあることが推定された。実験結果の解析から *Microcystis* 属の減少速度定数(k)として 0.049day^{-1} が得られた。この減少速度から推定した場合、例えば、 $10,000\text{m}^3$ のアオコ発生水域に対して、約 200m^3 サイズのリアクターを用いれば、約 1 ヶ月でアオコを半減させることが可能であることを示した。

以上のように、微小動物の捕食作用をリアクターで利用し、*Microcystis* 属の増殖抑制を図る新たなバイオマニピュレーションの概念を実証し、実用化に際しての基本原則を築くことができた。

8-2 課題および展望

水域生態系におけるバイオマニピュレーションは、水域に、ある種の生物を附加したり、あるいは排除することによって、目的とする生物種の密度を変化させ、生態系の食物連鎖の構造を制御する技術である。第2章で述べたように、従来より欧米において行われてきたバイオマニピュレーションのほとんどは、外来魚を水域に放流したり、あるいは目的とする魚類を殺魚剤を用いて死滅させ、その後新たな魚類を放流し、その魚類の捕食作用で藻類捕食性の動物プランクトンのバイオマスを制御し、藻類のバイオマスの削減を図るという間接的な効果を狙いとしている。また、このバイオマニピュレーションが成功するか否かについて、事前予測するための数理モデルによる解析も行われている¹⁰⁴⁾⁻¹⁰⁷⁾。確かにこれらの試みのいくつかは、栄養度を変えことなく食物連鎖の構造を変え、結果として藻類のバイオマスの削減に成功している。しかし、バイオマニピュレーションの効果を持続させるためには放流した魚類の捕食量を制御することが必要である¹⁰⁸⁾。あいにく、魚類によるバイオマニピュレーションは、捕食量を機械的に制御することができない。したがって、捕食量を調節する上では、水域における動物プランクトンや魚類および藻類の分布を的確に調べ、その状況に応じて、目的の魚類を捕獲し系外排除するか、初期に放流した魚類を再度放流するか、あるいは、その魚類を放流する前に目的の魚類を再び殺魚剤で死滅させるか、などのいずれかの方法をとらざるを得ないであろう。

一方、本研究で検討した微小動物定着型リアクターを用いたバイオマニピュレーションの場合、捕食者（微小動物）の増殖は *Microcystis* 属の群体の分散化による食物源としての適正化と微小動物の生息の場としてのリアクターの運転という因子に依存している。このことから、捕食量の調節は、群体の分散化とリアクターの運転条件（HRT、担体充填量など）を操作することで達成できると考えられる。ただし、現段階では、実水域に適用するために、リアクターの *Microcystis* 属の増殖抑制機能をさらに向上させる検討が必要である。この検討を行う場合、自然水域には *Microcystis* 属以外にも利水障害を引き起こす藍藻、すなわち、異臭味物質を発する *Phormidium* 属、*Oscillatoria* 属などや *Microcystis* 属と同様に有

毒物質を産生する *Anabaena* 属、*Aphanizomenon* 属、*Oscillatoria* 属などが存在することを留意しておく必要がある。つまり、*Microcystis* 属を選択的に抑制した後に、これらの藍藻が優占することも考えられるからである。したがって、上記の点を十分に加味した上で今後検討すべき課題を以下に述べる。

- 1) 現場型の *Microcystis* 属の群体分散化プロセスを構築するにあたっては、大量の水を連続的にリアクターに供給することが予想されるので、短時間で分散効率がよく、しかも小型化された群体分散化装置を開発する必要がある。
- 2) ダム湖などの実際の水域は、さらに大きなスケールとなるので、リアクターの分解率の向上による小型化や高性能化は必須である。第 7 章の結果から *Microcystis* 属の分解除去率として最大で約 80% の効果を得ている。したがって、リアクターの改良を行うことにより、実際の水域で増殖した *Microcystis* 属に対してもこの分解率に達することが可能であると考えられる。本研究では、*Microcystis* 属の増殖抑制を実証するために、実験に都合の良いデザインでリアクターを作成し使用した。しかし、今後は、実用化にあたり、性能とコストの両面を考慮しデザインしていく必要がある。
- 3) 本リアクターシステムで、実際の水域で多量の *Microcystis* 属の分解を行った場合、高濃度の硝酸態窒素（リアクター内で硝化が進行しない場合はアンモニア態窒素）が水域に回帰し、再び *Microcystis* 属あるいはその他の藻類の栄養源となりうる。したがって、*Microcystis* 属をはじめ、水利用の障害となる藻類の異常増殖を効果的に抑制していくためには、リアクターの処理水の硝酸態窒素の除去プロセスを確立することが必要となる。
- 4) 実際の水域生態系は、緑藻をはじめ珪藻、藍藻、水草などの一次生産者、さらには細菌類、動物プランクトン、魚類など様々な分解者、消費者が存在し、相互しあって営まれている。*Microcystis* 属が増殖抑制された後に、それに代わって別種の有害藻類が増殖する可能性もある。したがって、リアクターによるバイオマニピュレーションが、生態系にどのような影響を与えるかについて、長期的にリアクターの運転を行い検討を加え、リアクターの最適運転条件を確立していく必要がある。

以上に述べたように、リアクターの機能を正しく評価していくためには、リアクターを単なる *Microcystis* 属の分解処理装置というだけの側面を考えるだけでなく、水域生態系との相互作用のなかで浄化機能を考える必要がある。つまり、リアクターのなかの微小動物がアオコ形成藍藻のみならず珪藻や緑藻類、水生植物、さらに、他の動物プランクトンなどの間の相互作用に与える効果を考慮することが極めて重要である。このような観点からリアクターの浄化機能を解析・評価し、生態学的に最適な操作条件を確立できれば、より小型高性能で高機能な浄化システムの開発につながるものと期待できる。さらに、微小動物の捕食の場をリアクターのような人工構造物として提供するという考えだけではなく、自然由来の構造、例えば、水生植物の根圏を捕食の場、すなわち、微小動物のハビタートとして利用し、その前段に群体分散化プロセスを設け *Microcystis* 属の増殖抑制を図る、というような自然構造利用型の浄化システムへと展開していくことも、今後、水辺環境の保全と水質の保全を両立させていく上で重要であると考えられる。