

# 博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

Terano Hiromi

氏名 寺野 ひろ実  
学位の種類 博士 (工学)  
学位記番号 博 甲 第 55 号  
学位授与 平成 29 年 2 月 23 日  
学位授与条件 学位規定第 3 条第 3 項該当  
論文題目 富栄養湖の環境整備に伴う動植物プランクトンの変化および環境再整備の提案  
論文審査委員 (主査) 教授 内田 臣一<sup>1</sup>  
(審査委員) 教授 城戸 由能<sup>1</sup> 教授 釘宮 慎一<sup>2</sup> 名誉教授 八木 明彦<sup>1</sup>

## 論文内容の要旨

### 富栄養湖の環境整備に伴う動植物プランクトンの変化および環境再整備の提案

生活排水などに含まれる窒素やリンなどの栄養塩が湖沼や海の内湾などの閉鎖性水域に流入すると、人為的な富栄養化が問題となる。わが国では 1960 年代頃から顕著になった人為的な富栄養化においては、窒素、リンを利用して増殖する植物プランクトンが大発生する。湖沼では主にアオコと呼ばれる藍藻類の大発生が起り、水道水にカビ臭がつくなどの問題を起す。

1970 年に制定された水質汚濁防止法に基づき、湖沼では汚濁負荷(栄養塩)低減のための対策を講じることが定められ、下水道整備や底泥浚渫が進められた。その結果、一部ではアオコが減少するなど、一定の効果が得られている水域があるものの、アオコの発生件数が減少しなかったり、COD(有機物量の指標)が低下しなかったりするなど、当初想定した効果が得られない水域も多い。このように湖沼の人為的な富栄養化が改善されない場合に、しばしばその説明として言及されるのが生態系レジームシフトと呼ばれる概念である。生態系レジームシフトにおいては、環境条件は緩やかに変化しているにもかかわらず不連続な変化が突然起こること、生態系の変化が非可逆的であり履歴効果を持つことが特徴である。湖沼等の閉鎖性水域の生態系においては、一度富栄養化した水域をそれ以前の状態に戻そうとすると、栄養塩の流入を減らしても、

その水域が富栄養化した際の過程を戻らないため、富栄養化に伴う問題が改善されにくく、想定した効果が得られないことが問題となる。

長野県の富栄養湖である深見池においても 1992 年に栄養塩の流入を減らすための環境整備が行われ、外部から湖内に窒素、リンがほとんど流入しなくなり 20 年以上経過した。ところが、この環境整備後にアオコの発生、透明度の大幅な増減など、想定していなかった現象が起こるようになった。そこで本研究では、深見池において、環境整備後の 2013 年から 2015 年の水質、植物プランクトンと動物プランクトンの出現状況を詳細に調査し、それ以前の環境整備前後の調査結果と比較検討した。

本論文は、以下の通り 5 章構成とする。

第 1 章では、研究背景、研究目的及び意義、論文の構成について述べた。

第 2 章では、環境整備前後の調査結果を各調査項目について比較した。水質のうち植物プランクトンが増殖時に利用する無機態窒素については、整備後の硝酸態窒素が整備前の約 1/4 に減少し、アンモニア態窒素が約 1/2 に減少した。しかし、無機態リンについてはほとんど減少しなかった。植物プランクトンの量の目安となるクロロフィル a 量については整備前と比べて整備後にやや増加した。

環境整備前後の植物プランクトンを比較すると、整備前は一年を通じて主に珪藻類が優占していたが、整備後は夏季に藍藻類が優占し、夏季以外では珪藻類や緑藻類が優占して

<sup>1</sup> 愛知工業大学 工学部 土木工学科 (豊田市)

<sup>2</sup> 愛知工業大学 工学部 応用化学科 (豊田市)

おり、種組成が変化した。一般的に藍藻類は、窒素がリンに対して相対的に乏しい状況下において他の藻類より競争力が高い種が多いことが知られている。環境整備前後の無機態窒素／無機態リンの比を比較すると、整備前に比べ整備後は比が低くなったため藍藻類が発生しやすくなったと考えられる。

また、動物プランクトンについては、整備前は1年を通じてケンミジンコやゾウミジンコといった大型種が優占していたのに対し、整備後はワムシや繊毛虫といった小型種が優占し、整備前に比べ整備後の出現種のサイズは小型化した。大型の動物プランクトンは、魚からの捕食を避けるため日中は沈水植物帯などの湖岸の植生の中に逃げ込むことが知られているが、深見池では、環境整備時に湖岸に歩道を造成した際、湖岸の植生の過半を埋め立てたため、大型の動物プランクトンが魚類からの逃避場所を失った可能性がある。深見池西側には主に抽水植物を植栽し造成されたビオトープがあるが、そこで採集された動物プランクトンには、大型のミジンコ類が多く出現したことから、湖岸に植生があることは大型動物プランクトンにとって有利となると考えられる。

第3章では、深見池でもレジームシフトが起きているかどうかを検討するため、環境整備前後のクロロフィル a 量と無機態窒素・無機態リンの関係を見た。すると、レジームシフトが起きた際に見られるような顕著に不連続な関係性は認められなかった。従って、環境整備後の想定していなかった現象をレジームシフトによって説明することは難しい。

動物プランクトンと植物プランクトンの環境整備後の成層期における関係を見ると、アオコを形成する藍藻類は捕食圧の低い小型のワムシ類には捕食されにくいので、藍藻優占期間の長期化の一因となった可能性が考えられる。また、同じく環境整備後の循環期における関係を見ると、成層期から循環期に移行する際、深水層の水が表層に持ち上がったことで底層にいた繊毛虫が全層に分布し、植物プランクトンを捕食したと考えられる。環境整備前後の無機態窒素とクロロフィル a の関係をみると、整備前は無機態窒素が多くクロロフィル a が少ない傾向にあった。これは、流入する窒素量が多く植物プランクトンが増殖するものの、大型動物プランクトンが植物プランクトンを活発に捕食して減らしたため、植物プランクトンを食べた動物プランクトンの糞が分解され無機態窒素が多い状態が保たれたと考えられる。また、整備後は無機態窒素が少なくクロロフィル a が多い傾向にあった。これは、環境整備によって流入する窒素量が少なくなり、植物プランクトンの増殖は遅くなったが大型動物プランクトンが少ないため捕食されず多くが残ったためと考えられる。すなわち、環境整備前は流入する窒素量が多くても大型動物プランクトンが植物プランクトンを捕食していたためクロロフィル量が抑えられていたが、整備後は大型動物プランクトンが少ないため、窒素量が少なくても植物プラ

ンクトンが多く残るようになったと考えられる。

このように、動物プランクトンの出現状況を見ると、深見池で行われた環境整備は湖内の窒素量を減少させたがクロロフィル a 量は減少せず、栄養塩の流入削減によって通常期待される植物プランクトンを安定的に減らすことは達成できなかった。そこで、栄養塩の流入削減だけでなく、別の対策を新たに検討する必要があると考えられる。

第4章では、第2章、第3章の結果を受け、深見池の環境再整備について提案した。湖沼生態系における湖岸の植生は、窒素、リンの取り込み効果で植物プランクトンの発生を抑制し、大型動物プランクトンの魚からの逃避場所や生息場所を提供する。ところが、深見池では1992年の環境整備時に湖岸の植生の過半が失われてしまった。そこで、植物プランクトンを減らすため、それらを捕食する大型動物プランクトンを増加させる効果が期待される湖岸植生の試験創出を提案する。具体的には、まず深見池西側の抽水植物帯を掘削し、沈水植物帯を創出して湖岸の植生を豊かにするよう再整備する。他の湖における沈水植物再生事業の事例より、沈水植物を定着させるためには、光量の確保、波浪の軽減、水生動物による食害防止等の複数の条件があることがわかっているが、深見池ではそれらをおおむね満たしている。試験創出で植物プランクトン量が低減されれば透明度が上昇するため、群落もさらに拡大すると考えられる。また、この試験創出で大型動物プランクトンが増えるなどの効果が見られたならば、さらに別の場所に試験創出を検討する。

第5章では、各章で得られた研究成果をまとめた。富栄養湖である深見池において、水質だけでなく、植物プランクトンとそれらを捕食する動物プランクトンを、環境整備の前後で比較した。その結果から、大型動物プランクトンを増やすことを目指し、湖岸の植生を造成するという環境再整備について提案した。本研究で得られた知見は、栄養塩の流入を減らしても富栄養化に伴う問題が改善されないことに悩んでいる他の湖に対しても、その対策を考える上で有用となると考えられる。

#### 論文審査結果の要旨

生活排水などに含まれる窒素やリンなどの栄養塩が湖沼や海の内湾などの閉鎖性水域に流入すると、人為的な富栄養化が問題となる。わが国では1960年代頃から顕著になった人為的な富栄養化においては、窒素、リンを利用して増殖する植物プランクトンが大発生する。湖沼では主にアオコと呼ばれる藍藻類の大発生が起り、水道水にカビ臭がつくなどの問題を起す。

1970年に制定された水質汚濁防止法に基づき、湖沼では

汚濁負荷(栄養塩)低減のための対策を講じることが定められ、下水道整備や底泥浚渫が進められた。その結果、一部ではアオコが減少するなど、一定の効果が得られている水域があるものの、アオコの発生件数が減少しなかったり、COD(有機物量の指標)が低下しなかったりするなど、当初想定した効果が得られない水域も多い。このように湖沼の人為的な富栄養化が改善されない場合に、しばしばその説明として言及されるのが生態系レジームシフトと呼ばれる概念である。生態系レジームシフトにおいては、環境条件は緩やかに変化しているにもかかわらず不連続な変化が突然起こること、生態系の変化が非可逆的であり履歴効果を持つことが特徴である。湖沼等の閉鎖性水域の生態系においては、一度富栄養化した水域をそれ以前の状態に戻そうとすると、栄養塩の流入を減らしても、その水域が富栄養化した際の過程を戻らないため、富栄養化に伴う問題が改善されにくく、想定した効果が得られないことが問題となる。

長野県の富栄養湖である深見池においても1992年に栄養塩の流入を減らすための環境整備が行われ、外部から湖内に窒素、リンがほとんど流入しなくなり20年以上経過した。ところが、この環境整備後にアオコの発生、透明度の大幅な増減など、想定していなかった現象が起こるようになった。そこで本研究では、深見池において、環境整備後の2013年から2015年の水質、植物プランクトンと動物プランクトンの出現状況を詳細に調査し、それ以前の環境整備前後の調査結果と比較検討している。

本論文は、以下の通り5章構成となっている。

第1章では、研究背景、研究目的及び意義、論文の構成について述べている。

第2章では、環境整備前後の調査結果を各調査項目について比較している。水質のうち植物プランクトンが増殖時に利用する無機態窒素については、整備後の硝酸態窒素が整備前の約1/4に減少し、アンモニア態窒素が約1/2に減少した。しかし、無機態リンについてはほとんど減少しなかった。植物プランクトンの量の目安となるクロロフィル a 量については整備前と比べて整備後にやや増加した。

環境整備前後の植物プランクトンを比較すると、整備前は一年を通じて主に珪藻類が優占していたが、整備後は夏季に藍藻類が優占し、夏季以外では珪藻類や緑藻類が優占しており、種組成が変化した。一般的に藍藻類は、窒素がリンに対して相対的に乏しい状況下において他の藻類より競争力が高い種が多いことが知られている。環境整備前後の無機態窒素/無機態リンの比を比較すると、整備前に比べ整備後は比が低くなったため藍藻類が発生しやすくなったと考えられている。

また、動物プランクトンについては、整備前は1年を通じて

ケンミジンコやゾウミジンコといった大型種が優占していたのに対し、整備後はワムシや繊毛虫といった小型種が優占し、整備前に比べ整備後の出現種のサイズは小型化した。大型の動物プランクトンは、魚からの捕食を避けるため日中は沈水植物帯などの湖岸の植生の中に逃げ込むことが知られているが、深見池では、環境整備時に湖岸に歩道を造成した際、湖岸の植生の過半を埋め立てたため、大型の動物プランクトンが魚類からの逃避場所を失った可能性がある。深見池西側には主に抽水植物を植栽し造成されたビオトープがあるが、そこで採集された動物プランクトンには、大型のミジンコ類が多く出現したことから、湖岸に植生があることは大型動物プランクトンにとって有利となると考えている。

第3章では、深見池でもレジームシフトが起きているかどうかを検討するため、環境整備前後のクロロフィル a 量と無機態窒素・無機態リンの関係を見ている。すると、レジームシフトが起きた際に見られるような顕著に不連続な関係性は認められなかった。従って、環境整備後の想定していなかった現象をレジームシフトによって説明することは難しいと考えている。

動物プランクトンと植物プランクトンの環境整備後の成層期における関係を見ると、アオコを形成する藍藻類は捕食圧の低い小型のワムシ類には捕食されにくいので、藍藻優占期間の長期化の一因となった可能性を考えている。また、同じく環境整備後の循環期における関係を見ると、成層期から循環期に移行する際、深水層の水が表層に持ち上がったことで底層にいた繊毛虫が全層に分布し、植物プランクトンを捕食したと考えている。環境整備前後の無機態窒素とクロロフィル a の関係をみると、整備前は無機態窒素が多くクロロフィル a が少ない傾向にあった。これは、流入する窒素量が多く植物プランクトンが増殖するものの、大型動物プランクトンが植物プランクトンを活発に捕食して減らしたため、植物プランクトンを食べた動物プランクトンの糞が分解され無機態窒素が多い状態が保たれたと考えている。また、整備後は無機態窒素が少なくクロロフィル a が多い傾向にあった。これは、環境整備によって流入する窒素量が少なくなり、植物プランクトンの増殖は遅くなったが大型動物プランクトンが少ないため捕食されず多くが残ったためと考えている。すなわち、環境整備前は流入する窒素量が多くても大型動物プランクトンが植物プランクトンを捕食していたためクロロフィル量が抑えられていたが、整備後は大型動物プランクトンが少ないため、窒素量が少なくても植物プランクトンが多く残るようになったと考えている。

このように、動植物プランクトンの出現状況を見ると、深見池で行われた環境整備は湖内の窒素量を減少させたがクロロフィル a 量は減少せず、栄養塩の流入削減によって通常期待される植物プランクトンを安定的に減らすことは達成できなかった。そこで、栄養塩の流入削減だけでなく、別の対策を新たに

検討する必要があると考えている。

第4章では、第2章、第3章の結果を受け、深見池の環境再整備について提案している。湖沼生態系における湖岸の植生は、窒素、リンの取り込み効果で植物プランクトンの発生を抑制し、大型動物プランクトンの魚からの逃避場所や生息場所を提供する。ところが、深見池では1992年の環境整備時に湖岸の植生の過半が失われてしまった。そこで、植物プランクトンを減らすため、それらを捕食する大型動物プランクトンを増加させる効果が期待される湖岸植生の試験創出を提案している。具体的には、まず深見池西側の抽水植物帯を掘削し、沈水植物帯を創出して湖岸の植生を豊かにするよう再整備する。他の湖における沈水植物再生事業の事例より、沈水植物を定着させるためには、光量の確保、波浪の軽減、水生動物による食害防止等の複数の条件があることがわかっているが、深見池ではそれらをおおむね満たしている。試験創出で植物プランクトン量が低減されれば透明度が上昇するため、群落もさらに拡大すると考えている。また、この試験創出で大型動物プランクトンが増えるなどの効果が見られたならば、さらに別の場所に試験創出を検討している。

第5章では、各章で得られた研究成果をまとめている。富栄養湖である深見池において、水質だけでなく、植物プランクトンとそれらを捕食する動物プランクトンを、環境整備の前後で比較している。その結果から、大型動物プランクトンを増やすことを目指し、湖岸の植生を造成するという環境再整備について提案している。

本研究で得られた知見は、栄養塩の流入を減らしても富栄養化に伴う問題が改善されないことに悩んでいる他の湖に対しても、その対策を考える上で有用となると考えられ、土木工学における生態系管理の分野への大きな貢献と考えられる。以上のことから、本論文は工学研究科 生産建設工学専攻の博士論文の水準に十分に達していると判定される。