

閉鎖性水域における藻類増殖能力に内在する不確実性を考慮した  
押し出し効果によるアオコ浄化手法に関する研究  
A STUDY ON BLUE-GREEN ALGAE COUNTERMEASURES USING  
WASHOUT EFFECT CONSIDERING THE UNCERTAINTY OF ALGAE  
GROWTH POTENTIAL IN CLOSED WATER AREA

都市環境学専攻 柿沼太貴

Daiki KAKINUMA

## 1. 研究背景と目的

閉鎖性水域とは、水の出入りが不活発な湾や湖沼等の水域を指す。閉鎖性水域は貴重な親水空間であるが、その特性故に窒素やリン等の栄養塩類が蓄積されやすく、水質汚濁の代表的な原因である富栄養化になりやすい問題を抱えている。富栄養化により引起される問題として、世界中の湖沼・貯水池等の閉鎖性水域において発生するアオコの問題がある。アオコは藍藻類やシアノバクテリアにより引き起こされ、主に、餌となる栄養塩類が豊富に存在し、水の流れが遅い水域に発生する。アオコの問題点は、悪臭（2-MIB やジオスミン）を発生させることや、ライトブルーに変色し景観の阻害や、水道水源となる湖沼・貯水池で大発生した場合、浄水過程におけるろ過障害等を引起すこと等がある。我が国において実施されているアオコ問題を改善する対策の一つに導水事業がある。この導水量を算出する方法は、生態系モデルと水理モデルを併用するのが一般的であるが、生態系モデルは、モデル構造が複雑になるほど多数の変数及び入力パラメータが必要となり、パラメータの最適値を得るためには、時空間的に密な現地観測や室内実験を実施する必要があるとともに専門的な知識を要するといった難点がある。

以上を背景に、本研究では、閉鎖性水域におけるアオコを除去するための必要導水量を簡易かつ精密に算出する手法の提案を目的とし、藻類の増殖速度と対象水域の回転速度の関係性に着目した算出手法を提案した。更に、藻類の増殖能力に内在する不確実性を考慮することで、確率論的に必要導水量を算出する枠組みを示した

## 2. 研究手法と結果

本論文はアオコを浄化するための必要導水量を簡易かつ精密に算出する手法として、生物増殖を表すロジスティック方程式に押し出し項を加えることで表現する。そして、アオコを用いた室内培養実験及び現地観測により、提案した手法の適用可能性を検証した。加えて、提案した基礎式の確率微分方程式としての記述、確率微分方程式と Fokker-Planck 方程式の対応関係を用いて、藻類現存量に関する確率密度関数の時間発展を求めることで、藻類増殖能力に内在する不確実性を考慮したアオコを浄化するための必要導水量を確率論的に算出する手法の理論的な枠組みを示すものである。

### (1) 押し出し効果によるアオコ浄化対策の提案および検証

アオコを押し出すための必要導水量を、生態数理学の観点から、藻類の比増殖速度と回転速度の関

係性により安全側の必要導水量の簡易な算定手法を提案した。具体的には、最悪な水質環境（富栄養化した環境）の場合に対する最も安全側の対策提案を考え、沈降や呼吸などの藻類現存量に関して負の項を省き、水温・日射・栄養塩が最大値 1 をとる場合を考えた場合、(1)式を得る。

$$\frac{dC}{dt} = (r_{max} - d) \left(1 - \frac{C}{k'}\right) C \quad \left(k' = \frac{r_{max} - d}{r_{max}} k\right) \quad (1)$$

ここに、 $C$ は藻類濃度、 $r_{max}$ は藻類の最大増殖速度、 $k$ は環境収容力、 $d$ は導水量を貯水量  $V$  で除した回転速度である。式の解釈として、導水による回転速度が最大比増殖速度より大きい場合は、増殖するよりも速く押出されるのでアオコが増殖できないことを示している（図-1）。

アオコを用いた室内培養実験及び現地観測により、提案した手法の適用可能性を検証した。室内実験においては、工藤・山田ら（2004）によって得られていた、ダム貯水池の滞留時間と藻類増殖に関する植物プランクトンを使用した連続培養実験のデータを、藻類の比増殖速度及び回転速度の観点から再分析し、提案した新式の検証を行った。結果として藻類が増加する量よりも系から藻類が流出して減少する量が卓越するため滞留時間が短いほど藻類の現在量は減少し、比増殖速度と回転速度の有意な関係性を示したことから、新式の妥当性を検証した。

提案した理論を適用する例として、江戸城外濠（以下、外濠）を選定した。外濠は歴史的、空間的にも重要な場所であるが、アオコやスカムの発生による悪臭や景観阻害が深刻な問題となっている。本研究では、約 3 年間に亘る現地観測データ及び室内実験によって得られた知見から、外濠における水・底質汚濁機構を明らかにするとともに、各水質項目の分析によりアオコ発生の制限要因の推定及びアオコによる各水質項目への影響率を明らかにした。そして、新式を用いた外濠における水質改善対策の提案を行った。

次に、現地観測による新式の検証は、導水事業によりアオコの改善が見られた手賀沼の例を用いて理論的考察を行った。手賀沼は 1974 年から 2001 年までの 27 年間連続で全国の湖沼で水質ワースト 1 であったが、各種の水質対策や、利根川の河川水を利用した北千葉導水路の完成もあって、1990 年代までの汚濁レベルからは改善が見られ、滞留時間は、導水事業により、事業前の 13.9 日から 8.1 日に減少し、導水事業開始後にはアオコの原因種である藍藻類（優占種：*Microcystis* 属）の発生がみられなくなった。一方で、冬季から春季にかけて発生する珪藻類（優占種：*Skeletonema* 属）は導水前後での変化はみられなかった。

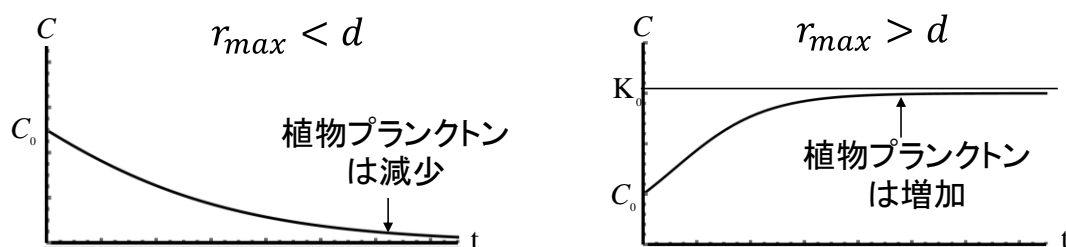


図-1 最大比増殖速度  $r_{max}$  と回転速度  $d$  の関係性。

上記理由の一つとして上記 2 種の増殖速度の違いが挙げられる。アオコは他藻類と比べ、増殖速度が遅い種であることは知られている。したがって、導水後に藍藻類が減少し、珪藻類は変化していない要因として、藍藻類が珪藻類よりも増殖速度が遅いため、増殖するよりも速く押出されたため減少したことが推察される。上記仮設を新式より検討した結果、計算値が手賀沼における現導水量を大きく上回る結果となった。上記要因として、藻類増殖能力に内在する不確実性が考えられる。次章で藻類における不確実性について検討した。

## (2) 藻類増殖能力に内在する不確実性を考慮した必要導水量の算定手法の提案

必要導水量の計算値と実測値が異なっていた要因として考えられる藻類の不確実性について議論する。藻類の比増殖速度の真値は明確に示すことは出来ない。なぜなら、例えば寺本 (1997)・巖佐 (2008) が示すように、藻類の成長環境である光、水温等の外的な影響要素や、藻類のサイズや成長段階等の細胞の状態による内的な影響要素による不確実性が存在するからである。加えて、上記自然現象の観測データには、観測や分析による誤差が内包されているのが常であり、現在の観測技術をもってしても、非常に複雑で変化に富んでいる生態系メカニズムを正確に知る事は不可能である。不確実な物理現象については、伊藤清 (1941) によって、不確実性を有する物理システムの時間発展を記述する確率微分方程式に関する理論を、数学的に厳密に提案されている。確率微分方程式が確率経路の各標本の軌跡を表現するのに対して、対応する Fokker-Planck 方程式は無限個の標本点を集積した確率密度関数の時間発展を記述する偏微分方程式である。この Fokker-Planck 方程式と伊藤の確立微分方程式は数学的に厳密に等価であることが証明されている。上記関係性は、吉見・山田ら (2016) によって、水文学の分野において、降雨流出解析に適用されており、降雨の不確実性の影響による流出高の確率密度関数の時間発展の支配方程式を厳密に提案している。本研究では、その手法を生態数理学の分野に導入し、提案した決定論的な手法に適用し、藻類増殖能力に内在する不確実性を考慮した場合におけるアオコを押出すための必要導水量を確率論的に算出する手法の理論的な枠組みを提示した。

具体的には、提案した新式 (決定論) が確率微分方程式として記述できることを示し、藻類現存量に関する Fokker-Planck 方程式より得られた確率密度関数から、比増殖速度と回転速度に拡散係数が加わるとともに、拡散係数が比増殖速度を小さくすることが新たにわかった。このことから、藻類の増殖能力に不確実性を考慮した場合、決定論的に算出した導水量より、確率論的に算出した導水量のほうが低い値となる。そして、藻類現存量に関する確率密度分布を得られたことにより、ある値以上をアオコが発生するとした場合、ある導水量の一度の試行において、アオコが押出され増殖できず減少する成功率またはアオコが発生してしまう失敗率が算出可能となった。つまり、アオコの増殖リスクを考慮した必要導水量を算出することが可能となった。外濠を例に説明する。図-2 に外濠における増殖リスクを考慮した場合の導水量と成功率の関係と、導水量を変化させた場合における決定論的に算出した結果を示す。決定論的に算出した場合、外濠ではアオコ押出して除去するには  $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$  の導水量が必要であるが、例えば、費用面からみて  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  の水量を確保できた場合、40%の確立でアオコを除去できるといえる。本研究の成果により、当該確率分布をどこ

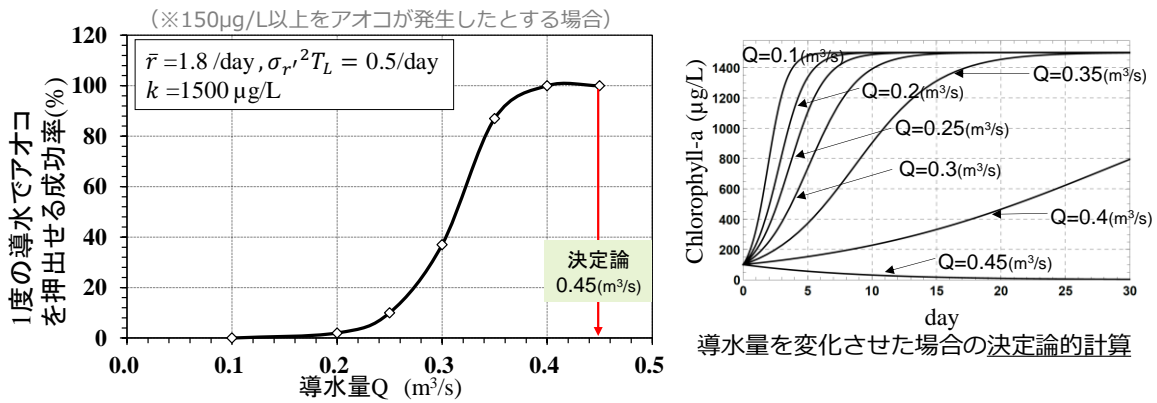


図-2 外濠における増殖リスクを考慮した場合の導水量と成功率の関係を示す。右図には、導水量を変化させた場合の決定論的に算出した結果を示す。

まで議論するかによって、政策提案の際のアオコのリスクを検討することができ、費用対効果についても検証することが可能になった。

### 3. まとめ

本研究において、アオコの浄化手法の提案を目的とし、藻類の最大比増殖速度と回転速度の関係からアオコを押出すための安全側の必要導水量を簡易に算出できる手法を提案し、室内実験及び手賀沼の導水事例による新式の理論的検証を行った。更に、藻類増殖能力に内在する不確実性に着目し、提案した新式が確率微分方程式として表現できることを示し、藻類現存量に関する Fokker-Planck 方程式より得られた確率密度関数から、不確実性を考慮した場合におけるアオコを押出すための必要導水量を確率的に算出する手法の理論的な枠組みを示した。加えて、本研究が構築した不確実性を考慮したアオコ浄化手法は、アオコによる水質障害の生起リスクを確率分布という形で定量化可能とするものである。すなわち、本研究の成果により、当該確率分布をどこまで議論するかによって、水質管理政策におけるリスクを表現することができる。

### 参考文献

- 1) 工藤勝弘, 河上智行, 山田正: ダム貯水池の滞留時間と藻類増殖に関する実験的考察, 水文・水資源学会誌, Vol.17, No.6, pp. 607-617, 2004.
- 2) 寺本英: 数理生態学, 朝倉書店出版, pp.43-54, 1997.
- 3) 巖佐庸: 数理生物学入門, 共立出版社株式会社出版, pp.89-92, 132-133, 2008.
- 4) 伊藤清, 1953: 確率論【現代数学(14)】, 岩波書店.
- 5) 吉見 和紘, WANG Chao-Wen, 山田 正, 山田 朋人: 確率過程論に基づいた降雨流出過程における不確実性評価の理論的枠組の提示, 土木学会論文集 B 1 (水工学) 72(4), I\_1225-I\_1230, 2016.