

# 湖沼における吐出し効果による アオコ浄化手法の提案及び藻類の比増殖速度に 不確実性を考慮した基礎的研究

A STUDY ON BLUE-GREEN ALGAE COUNTERMEASURES  
USING WASHOUT EFFECT CONSIDERING  
THE UNCERTAINTY OF GROWTH RATE OF ALGAE IN LAKES

柿沼 太貴<sup>1</sup>・山田 正<sup>2</sup>  
Daiki KAKINUMA and Tadashi YAMADA

<sup>1</sup> 学生会員 工修 中央大学理工学研究科都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

<sup>2</sup> フェロー会員 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

The purpose of this study is to propose the method to simply define the required volume of water in order to prevent blue-green algae from growing by flushing out them. More specifically, Considering the eutrophic environment, we propose the simple method to define the safest required volume of water to flush out them. To define it, we used the relationship between the algae's growth rate and rotation rate by adding an washout effect to the logistic equation which expresses the change of the number of individual organisms. Then, we evaluated applicability of this method by both culture experiment and field observation about the algae. Moreover, we introduce a new framework which solve as probability theory considering an uncertainty that the growth rate of the algae contains by using the relationship among Langevin equation, stochastic differential equation, and Fokker-Planck equation.

**Key Words :** Blue-Green algae, Logistic equation, Uncertainty, Stochastic differential equation, Fokker-Planck equation

## 1. はじめに

世界中の湖沼・貯水池等の閉鎖性水域における水質の問題の1つとしてアオコがある。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、腐敗時に悪臭(2MIB 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悪化を引起すことである。また、肝臓毒も有しており、世界中で家畜や人間への被害が多発している。日本で実施されているアオコ改善対策として、栄養塩類を吸収及び除去するための植生浄化、浚渫、エアレーション等や水の流れをつくりアオコが増殖するよりも早く吐出するための導水(河川水または下水再生水)等がある。導水対策において導水量を算出する方法として、一般的に、生態系モデル及び水理モデルを併用し、必要導水量を算出する方法がある。生態系モデルは生物量や物質循環量を時空間的に詳細に予測することが可能だが、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を必要とすることが難点である。本論文では、アオコを改善する対策案を提案することが目的であるため、アオコを吐出するための必要導水量を、藻類の最大比増殖速度と回転率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。加えて、藍藻類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。

結果は、本論文で提案した、藻類の最大比増殖速度と回転率の関係性により算出したアオコを吐出するための必要導水量と現地観測による当該量の実測値が異なるものとなった。上記要因として、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藻類の比増殖速度の不確実性が考えられる。数理生物学の分野において不確実性に関する研究として、例えば、寺本は、個々の個体の出生率や死亡率は、環境条件や内的生理条件などの予測困難な変動を不確実性としてとらえ、個体群の増殖を中心極限定理を用いて評価している<sup>2)</sup>。また、巖

佐は、細胞のサイズが時間と共に変化することにより成長速度が変化することを、本論文で用いる手法である確率微分方程式と Fokker-Planck 方程式の関係を利用し、個体の絶滅または爆発的に増殖する可能性について評価している<sup>3)</sup>。上記の研究を踏まえ、本論文では、アオコを改善するための必要導水量を算出する決定論的な手法に、藻類の比増殖速度における不確実性を考慮した場合の確率論的な必要導水量算定手法の提案を行った。

## 2. アオコを吐出すための必要導水量の簡易算定手法

### (1) 生態系モデルによる必要導水量算出方法

一般的に知られている生態系モデルにおける植物プランクトン量を表す Chlorophyll-a 濃度について、正の項として光合成による増殖項、負の項として、細胞外分泌、呼吸、動物プランクトンによる摂餌、枯死、沈降等で記述されている。その中で、光合成による藻類の比増殖速度は以下の式で表される。

$$r = r_{max} \cdot \left( \frac{N}{N + K_N} \frac{P}{P + K_P} \right) \cdot \frac{I}{I_{opt}} \exp \left( 1 - \frac{I}{I_{opt}} \right) \cdot \frac{T}{T_{opt}} \exp \left( 1 - \frac{T}{T_{opt}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $r$  は藻類の比増殖速度[day],  $r_{max}$  は藻類の最大比増殖速度[day],  $N$  は無機態窒素濃度[mg/L],  $K_N$  は窒素の半飽和定数[mg/L],  $P$  は無機態リン濃度[mg/L],  $K_P$  はリンの半飽和定数[mg/L],  $I$  は日射量[MJ/m<sup>2</sup>/day],  $I_{opt}$  は最適日射量[MJ/m<sup>2</sup>/day],  $T$  は水温[°C],  $T_{opt}$  は最適水温[°C]を示す。比増殖速度に Chlorophyll-a 濃度をかけることにより、光合成による増殖項を表現することができる。比増殖速度とは、単位時間あたりの Chlorophyll-a 濃度の増加量を、Chlorophyll-a 濃度で除したものを比増殖速度[day]という。増殖項は最大比増殖速度に栄養塩濃度（無機態窒素・無機態リン）、日射量、水温をかけ合わせることで算出できる。栄養塩濃度は Monod 型表現式の組み合わせで表現され、日射量及び水温は強光・高水温阻害を表す式形により表現されており、環境条件の増減により藻類の増殖を表現することができる。本論文では、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、1 より低い値を示す環境条件を省き、最大比増殖速度（ $r = r_{max}$ ）のみを用いた基礎的検討を行った。

### (2) 必要導水量の簡易算定手法の導出

最も安全側の対策を提案する場合、(1)式は最大比増殖速度 $r_{max}$ に Chlorophyll-a 濃度  $C$  を掛けた指数増殖型

(Malthus 型) の式となる。しかし、生物がいつまでも指数的に増殖することは不可能なので、その環境で増殖しうる最大値を示す環境収容力 $K$ を加える必要がある。最大比増殖速度 $r_{max}$ を、個体数とともに減少する関数に置き換えた式が(2)式である。これは、一般的にロジスティック方程式と呼ばれる。

$$\frac{dC}{dt} = r_{max} \left( 1 - \frac{C}{K} \right) C \quad (2)$$

ここに導水によるアオコの吐出し項を加えたものを(3)式に示す。

$$\frac{dC}{dt} = r_{max} \left( 1 - \frac{C}{K} \right) C - \frac{C Q_{in}}{V} \quad (3)$$

ここで、 $Q_{in}$ は導水量、 $V$ は貯水量である。(3)式を整理すると(4)式になりロジスティック方程式と同形になる。

$$\frac{dC}{dt} = (r_{max} - d) \left( 1 - \frac{C}{K'} \right) C \quad \left( K' = \frac{r_{max} - d}{r_{max}} K \right) \quad (4)$$

ここで、導水量 $Q_{in}$ を貯水量 $V$ で除したものが回転率 $d$ である（ここでは、最大比増殖速度と対応させるために回転速度と呼ぶ）。(4)式から、回転速度 $d$ が最大比増殖速度 $r_{max}$ より大きい場合は、増殖するよりも速く吐き出されるのでアオコが増殖できないことを示しており、小さい場合は、環境収容力 $K$ に漸近する解となる。ここは本論文で提案する式において重要な考え方である。図-1 に最大比増殖速度が回転速度より速い場合、遅い場合の個体数の変動を示す。最大比増殖速度と回転速度との関係性については、天野ら<sup>4)</sup>が指数増殖型の Malthus モデルに藻類の個体数に比例する導水項を加えた式を用い、印旛沼の導水事業の評価に触れているが、詳細な検証はされていない。そのため、本研究が提案した、必要導水量を最大比増殖速度と回転速度の関係性から簡易的に算出する(4)式を実験及び現地観測結果により検証をおこなう。

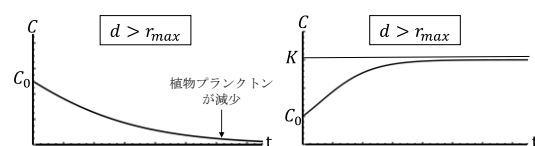


図-1 最大比増殖速度 $r_{max}$ と回転速度 $d$ の関係性。

## 3. 吐出し項を加えたロジスティック方程式における増殖速度と回転速度との関係性の考察

### (1) 藻類培養実験による検証

本節では、工藤・山田ら<sup>5)</sup>によって、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、前章にて提案した(4)式の検証

をおこなう。

#### a) 実験概要

実験概要を簡単に以下に示す。培養実験には実際のダム貯水池での藻類増殖をより近い形で表現するため、照度 2000Lx の白色蛍光灯の光、20℃の水温、供給栄養塩濃度及び供給速度の 4 条件を一定にした完全混合系のケモスタット型連続培養法を用いた。また、実験に供した植物プランクトンは、ダム貯水池等におけるカビ臭の原因藻類である藍藻類の一種 *Phormidium* とした。培養器内はエアープンプ及びエアーストーンによる混合状態とした。図-2 に連続培養実験の概要を示す。滞留時間は、時間あたりの培養液の供給量で調節を行った。培養時間と培養器内の対数増殖期における Chlorophyll-a 濃度[μg/L]の関係性から比増殖速度  $r$  を求めた。

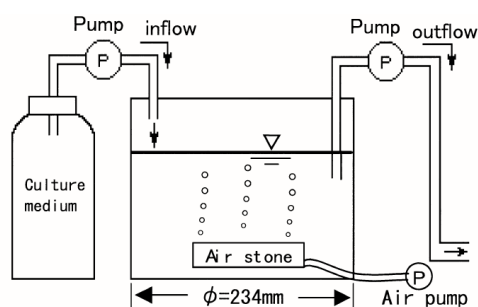


図-2 連続培養実験の概要。

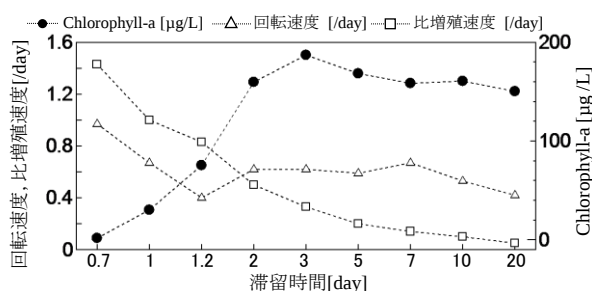


図-3 連続培養実験における滞留時間、Chlorophyll-a 濃度、比増殖速度及び回転速度を示す。

#### b) 実験結果

図-3 に実験により得られた各滞留時間における回転速度、Chlorophyll-a 濃度から算出した比増殖速度及び Chlorophyll-a 濃度の関係性を示す。回転速度が比増殖速度を上回る 0.7, 1, 1.2 day の場合 ( $d > r$ ) は、Chlorophyll-a 濃度が低く、藻類が増殖しにくい状況といえる。一方で、回転速度が増殖速度を下回る 2 から 20 day の場合 ( $d < r$ ) は Chlorophyll-a 濃度が高い値を示している。よって、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することがわかった。以上の実験により、比増殖速度と回転速度の有意な関係性が示された。

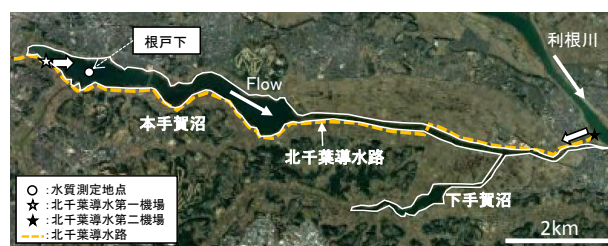


図-4 手賀沼の概要及び観測地点。

#### (2) 手賀沼における北千葉導水路事業を例とした理論的考察

手賀沼における導水事業による、藍藻類の減少を例として、(4)式の理論的考察を行う。本手賀沼と下手賀沼からなる手賀沼の概要を図-4 に示す。本論文はアオコによる水質悪化の問題が発生していた本手賀沼を取り扱う。面積は 6.5km<sup>2</sup>、平均水深は 0.86m、貯水量は 560 万 m<sup>3</sup> である。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た<sup>9)</sup>。滞留時間は、導水事業により、事業前の 13.9 日（回転速度 0.07 /day, 1993 年度推定値）から事業後の 8.1 日（回転速度 0.12 /day, 2000 から 2003 年度推定値）に変化した。根戸下地点において、千葉県により計測された各藻類量（藍藻類、クリプト藻類、渦鞭毛藻類、珪藻・黄金色藻、ユーグレナ藻類、緑藻類、その他）の 1998 年 4 月から 2009 年 4 月までのデータ及び日導水量に基底流量を図-5 に示す。ただし、日導水量及び第一排水機場からの日排水量が測られている平成 12 年度のみである<sup>9)</sup>。導水事業開始後に藍藻類（優占種：Microcystis 属）が減少していることがわかる。2001 年に藍藻類が一時的に上昇しているが、これは台風による内水氾濫及び灌漑期のため導水が停止したため増加したと推察される。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。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。アオコの問題となる藍藻類は高水温・強光といった過酷な状況にも適応する能力は長けているが、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<sup>7)</sup>。（藍藻類（Microcystis 属）の最適水温 25 から 30℃における最大比増殖速度は従前の室内実験の文献から 1.8 /day、珪藻類（Skeletonema 属）は最適水温 20 から 25℃において 2.42 /day である<sup>89)</sup>。）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吐出されたため減少したことが推察される。上記仮設をロジスティック方程式に吐出し効果を加えた式より検討する。

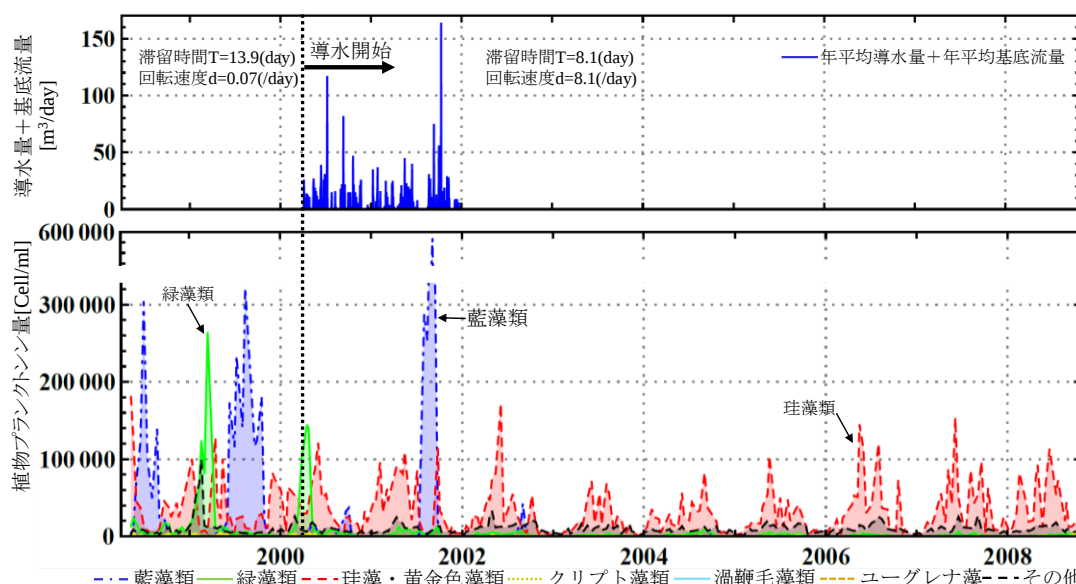


図-5 手賀沼（根戸下地点）における各藻類の時系列データ。1998年4月から2009年4月。2000年4月より導水を開始し、導水開始後、藍藻類が減少し発生していないのがわかる。一方で、珪藻類は導水前後で変化はみられない。

### (3) 導水量の計算値と実測値の比較

手賀沼の水質浄化のための導水量は、月別標準導水量（年平均 $5.75 \text{ m}^3/\text{s}$ ）に年平均稼働率77%（2002から20014年の平均）を乗じて年平均導水量  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  とした。また、第一排水機場からの排水量から導水量を引くことで基底流量を算出する。月別排水量が測られている2011年度のデータより年平均基底流量は  $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$  である。つまり、降雨量によって基底流量は変動するが、年平均導水量＋年平均基底流量約  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  で藍藻類（*Microcystis* 属）が吐出されたということである。次に、吐出し項を加えたロジスティック方程式を用いて藍藻類（*Microcystis* 属）を吐出するための導水量を算出する。*Microcystis* 属の最大比増殖速度は0.2から1.8/dayであり、その平均値0.8/dayの場合、藍藻類（*Microcystis* 属）を吐出するためには約  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  の導水量が必要である。実際の手賀沼における流量は、約  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  であることから、計算値と異なる結果となった。上記要因として、藻類におけ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する。計算結果について、計算に使用した比増殖速度は最大値であることから、最も安全側の藍藻類（*Microcystis* 属）を吐出す必要導水量を算出しているの、約  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  より少量の場合でも吐出せる可能性がありうることに注意が必要である。

## 4. 確率過程論の生態系モデルへの導入

本章では、3章にておこなった、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。不確実な物理現象について、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、山田らによって、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<sup>10)</sup>。本論文では、その手法を生態数理学の分野に導入し、第2章で提案した決定論的な手法に適用し、比増殖速度の不確実性を考慮した場合におけるアオコを吐出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提示する。

### (1) 藻類の比増殖速度における不確実性

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、寺本・巖佐が示すように、藻類はその場の光、水温等の外的要因や、藻類のサイズや細胞の状態による内的要因による不確実性が存在するからである<sup>23)</sup>。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。図-6に過去に行われてきた藻類の室内培養実験により求められた*Microcystis* 属の水温  $25^\circ\text{C}$  から  $35^\circ\text{C}$  における比増殖速度の

一覧を示す<sup>79)</sup>。同じ属であっても比増殖速度にばらつきがあるのが分かる。藻類が増殖しやすい理想状態を形成している室内培養実験でもこれだけのばらつきがあり、様々な内・外関係が絡み合う自然状態における複雑さは言うまでもない。次節では、このような複雑で不確実性に富む生態環境を念頭に、藻類の比増殖速度における不確実性を伊藤の確立微分方程式と Fokker-Planck 方程式の対応関係を用いて、アオコを吐出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提示する。

## (2) 吐出し項を加えたロジスティック方程式による必要導水量算出手法と確率微分方程式の関係

比増殖速度を様々な内・外関係が絡み合う自然状態に変動され、複雑な時間変化を伴っていると考え、(4)式は、Chlorophyll-a 濃度  $C$  に関する一階の常微分方程式であり、差分形式で表現すると以下ようになる。

$$dC = (r(t) - d) \left(1 - \frac{C}{K'}\right) C dt \quad (5)$$

ここで、入力比増殖速度  $r(t)$  が、各時刻において、ある平均値とその平均値周りにホワイトノイズとして微小な乱れ成分  $r'(t)$  が分布していると仮定して、

$$r(t) = \bar{r}(t) + r'(t) \quad (6)$$

(6) 式で比増殖速度を与えられるとすると、(5)式は以下ようになる。

$$dC = C(t)(\bar{r}(t) - d) \left(1 - \frac{C(t)}{R'}\right) dt + C(t) \left(1 - \frac{C(t)}{K}\right) r'(t) dt, \left(R' = \frac{\bar{r}(t) - d}{\bar{r}(t)} K\right) \quad (7)$$

と表される。ここで、(7)式を確率微分方程式の形に読み替えれば、以下に示す Chlorophyll-a 濃度に関する確率微分方程式を得る。

$$dC = C(t)(\bar{r}(t) - d) \left(1 - \frac{C(t)}{R'}\right) dt + C(t) \left(1 - \frac{C(t)}{K}\right) \sigma_{r'} \sqrt{T_L} dw \quad (8)$$

ここに、右辺第一項が決定論的な項、右辺第二項が確率論的な項を表しており、 $dw$  は Wiener 過程に従う時系列  $w(t)$  の微小時間変化量であり、 $N(0, \sqrt{dt})$  の正規分布に従う。 $\sigma_{r'}$  は  $r'(t)$  の標準偏差である。ここで、藻類の比増殖速度の不確実性を表す項  $r'(t)dt$  を  $\sigma_{r'} \sqrt{T_L} dw$  として表現できるのは、(4) 式と Langevin 方程式の比較及び G.I.Taylor の拡散理論から説明することができる。詳細は吉見・山田らの論文を参考されたい<sup>9)</sup>。比増殖速度に不

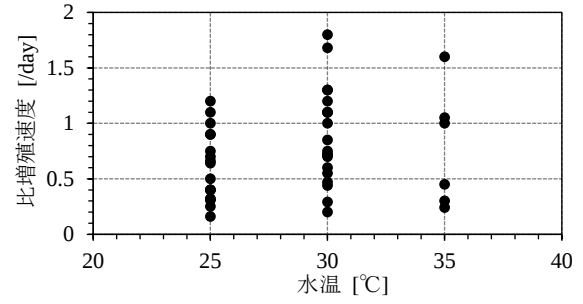


図-6 室内実験により求められた水温 25-35°C における Microcystis 属の比増殖速度。

確実性を考慮した確率微分方程式を示したが、ここで、現在の Chlorophyll-a 濃度に比例する不確実性があると仮定すると以下の様に表せる。

$$dC = C(t)(\bar{r}(t) - d) \left(1 - \frac{C(t)}{R'}\right) dt + C(t) \sigma_{r'} \sqrt{T_L} dw \quad (9)$$

(9)式に対応する Chlorophyll-a 濃度の確率密度関数の時間発展  $p(C, t)$  を記述する Fokker-Planck 方程式は、

$$\frac{\partial p(C, t)}{\partial t} = - \frac{\partial \left\{ C(\bar{r}(t) - d) \left(1 - \frac{C}{R'}\right) \right\} p(C, t)}{\partial C} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 (C \sigma_{r'} \sqrt{T_L})^2 p(C, t)}{\partial C^2} \quad (10)$$

となる。この方程式を解析的、もしくは数値的に解くことにより、Chlorophyll-a 濃度の確率微分方程式を求めることが可能となる。

## (3) Fokker-Planck 方程式を満たす Chlorophyll-a 濃度に関する確率密度関数の定常分布

次に定常状態を考え、Chlorophyll-a 濃度  $C$  に関する Fokker-Planck 方程式の解析解を導出する。(10)式において定常状態を考えると、

$$\frac{\partial \left\{ C(\bar{r}(t) - d) \left(1 - \frac{C}{R'}\right) \right\} p(C, t)}{\partial C} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 (C \sigma_{r'} \sqrt{T_L})^2 p(C, t)}{\partial C^2} \quad (11)$$

となる。(11)式を積分し整理すると、以下に示す Chlorophyll-a 濃度  $C$  の確率密度関数を得る。

$$p(C) = p_0 \frac{2}{(C \sigma_{r'} \sqrt{T_L})^2} C^{\frac{2(\bar{r}(t) - d)}{\sigma_{r'}^2 T_L}} \exp \left[ - \frac{2C(\bar{r}(t) - d)}{R' \sigma_{r'}^2 T_L} \right] \quad (12)$$

ここに、 $p_0$  は規格化定数である。これが、(4)式を藍藻類を吐出するための必要導水量を求める基礎式とした場合の定常状態の Chlorophyll-a 濃度  $C$  に関する確率密度関数である。式形が Gamma 分布に酷似しているのがわかる。

#### (4) 不確実性を考慮した必要導水量の算出方法

定常状態において，Fokker-Planck 方程式から Chlorophyll-a 濃度  $C$  の確率密度関数を(12)式に得た．(12)式における Chlorophyll-a 濃度  $C$  の指数部分が 0 より大きくなければ以下の条件を満たさず解をもたない．

$$\int_0^{\infty} p(C) dC = 1 \quad (13)$$

よって，確率密度関数(12)式から以下の関係式が得られる．

$$\frac{2(\bar{r}(t) - d)}{\sigma_r'^2 T_L} > -2 \quad (14)$$

$$(\bar{r}(t) - \sigma_r'^2 T_L) - d > 0 \quad (15)$$

(15)式が 0 より大きい場合には十分時間が経った定常時に個体数がある平均値の近くで揺れ動く状態になる．一方で，(14)式が 0 に近づくほど，個体数は 0 に寄る形となり，最終的に 0 より小さくなると藻類が増殖できず，減少することを意味している．図-8 に  $(\bar{r}(t) - \sigma_r'^2 T_L) - d$  を変化させた確率密度関数を示す．この結果から，ある導水量においてアオコが発生する割合及び吐出され増殖できず減少する割合が算出可能である．(15)式は比増殖速度と回転速度に拡散係数を加えた式形になっており，拡散係数が見かけ上，比増殖速度を小さくしているのがわかる．どの程度比増殖速度が減少するかは拡散係数分小さくなる．拡散係数の物理的な解釈として，分子の熱運動の場合，拡散係数とランダム外力の関係は揺動散逸定理から厳密的に求めることができるが，藻類の場合は，内・外的要因や観測手段による不確実性両方が混在しているため，観測値により求めた値を実現に適用するのは困難である．よって，実測値からの逆算をおこなう．手賀沼の事例において，導水量が約 10 m<sup>3</sup>/s の時アオコが減少しているので，仮に比増殖速度を 0.8/day とした場合，拡散係数は 0.6/day より大きな値となる．

## 7. まとめ

ロジスティック方程式に吐出し項を加えることで，藻類の最大比増殖速度と湖沼の回転速度の関係から湖沼におけるアオコを浄化するための安全側の必要導水量を簡易に算出できる手法を示し，室内実験及び手賀沼の導水事例による新式の検証をおこなった．更に，藻類の比増殖速度の不確実性に着目し，提案した簡易的に必要導水量を求める手法が，確率微分方程式として表現できることを示した．また，確率微分方程式と Fokker-Planck 方程

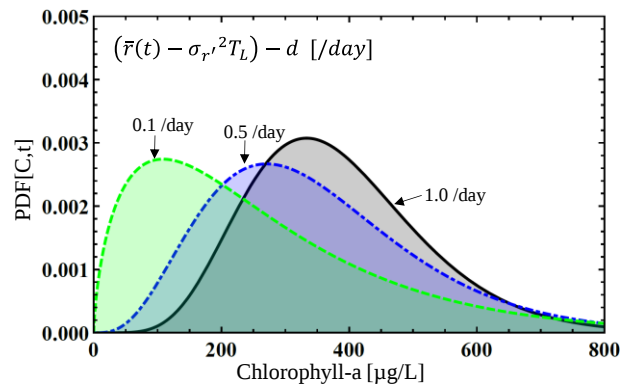


図-8 Chlorophyll-a 濃度に比例する不確実性を加えた場合の，Chlorophyll-a 濃度に関する確率密度関数  $p(C)$  を示す．

式の関係から，決定論では必要導水量を最大比増殖速度と回転速度との関係から算出することが可能であることを示したが，不確実性を考慮した場合においては，上記関係性に拡散係数が加わるとともに，拡散係数が見かけ上，比増殖速度を小さくすることが新たにわかり，比増殖速度の不確実性を考慮した場合におけるアオコを吐出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した．

## 参考文献

- 1) 宗宮功，津野洋：水環境基礎科学，コロナ社出版，p150,1997.
- 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) 天野 邦彦，中西 哲：富栄養化の進んだ湖沼における導水等による水質改善に関する考察—印旛沼を事例にして—，水工学論文集，第 52 巻，pp.1267-1272, 2008.
- 5) 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.
- 6) 国土交通省関東地方整備局：北千葉導水路定期報告書平成，pp.4-6, 2009.
- 7) 合田健，村岡浩爾，福島武彦，中杉修身，松岡譲：霞ヶ浦の富栄養化現象のモデル化，国立公害研究所研究報告第 54 号，pp.93-104, 1984.
- 8) 例えば，高橋正征，市村俊英：霞ヶ浦の湖水の栄養特性と「アオコ」の大量発生，「環境科学」研究報告集，B93-R12-2, pp.107-113, 1981.
- 9) 例えば，岡田光正，竹下俊二，須藤隆一：マイクロコズムを用いた水の華の発生機構とその制御に関する研究，水質汚濁研究，Vol.11, No.6, pp.371-380, 354, 1981.
- 10) 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.

(2018.4.3 受付)