

<分析・測定>

貯水池における藻増殖と窒素・リンの関係*

奥山 秀樹**・亀井 翼***・丹保 憲仁***

1. はじめに

近年の都市用水源ダム貯水池に依存する割合が極めて高くなってきている。ダム貯水によって長期間停滞する水は従来考えられなかったさまざまな変化を示すようになる。濁度の減少のような好ましい効果のある反面、河川水利用の場合には問題とならなかったような微量塩類の蓄積による藻類の発生、それに伴う臭味の障害が頻発するようになった。このような現象は湖の富栄養化現象として古くから知られているけれども、人工貯水池の設計に際して、あらかじめ集水域の制御、貯水水質の予測を必要とする事態に至ったのは近年のことである。

富栄養化現象はかくて、自然科学的に観察される現象ではなくて、水資源開発計画の一環として、管理、制御されねばならぬ工学的な対象となってきた。

河道中にダムを築設することによって造り出された最近の河道貯水池では、年間10回をも越える水の入替りがある場合が多く、天然湖沼のような極めて長年月の栄養成分の蓄積の場合と様相を異にする場合が多い¹⁾。それ故、これらの貯水池での富栄養化の議論を試みようとするれば、天然湖沼の場合と異なる単位年の内における時間スケールでの動力学的な検討をも必要とする。

そこで筆者らは、上述のような滞留時間の比較的短い累年の蓄積性の低い流れ型のダム湖を念頭において、栄養塩濃度に応じて生成してくるであろう藻類の増殖状況を容易に評価しうる試験法を検討し、その成果を用いて藻類の増殖速度と最大増殖量を栄養塩濃度(窒素とリン)の関数として表現することを試み、栄養塩の流入濃度からダム湖における藻類の増殖過程を推算する方法を提案することを目的としてこの研究を行った。

2. 実験方法

水中の栄養塩濃度レベルに応じて、どの程度の藻類が

どのような速さで発現するかを検討するために次のような試験を行った。

培養試験には、清澄な河川水または脱塩素水道水を基礎となる水として用い、藻増殖に必要なほとんどの微量成分はその中に含まれていると考え、無機栄養成分の影響を窒素とリンの二成分のみについて考えることとした。

2・1 振盪培養試験

水中の窒素、リン等の濃度レベルに応じてどの程度の藻増殖が見られるかを知るために、試水に適当な藻類を植種した後、照度や水温等の条件を一定にし、2週間の振盪培養試験(AGP試験)で評価することが広く行われている^{3,4)}。しかし、このような特定の藻類を植種して得られる結果と混合微生物が存在する自然系において生ずる現象の間に相違があるのが普通で、結論が誤ったものになる可能性も少なくない。また、時間を2週間と限定することにも問題がありそうに思われる。

そこで、筆者等は時間を2週間と限定せず、藻類の増殖の経時変化を藻類が最大増殖量に達した後まで継続することとして、次のような試験を行った。

第一に、最も普通に自然水中に存在する特定の単一種の藻を植種に用い、初期の窒素とリン濃度レベルを数水準に変化させたものをそれぞれ組み合わせた系について、在来のAGP試験とほぼ同一の装置を用いた単藻振盪培養試験を行った。この試験によって、藻類培養のパターンをできるだけ正確に表現する方法を工夫し、加えて、個々の藻類の増殖特性を比較評価しようと考えた。

第二に、窒素・リン濃度をそれぞれ上述と同様に組合せた試水に都市下水の活性汚泥処理上澄水を0.1% (体積) 加え、振盪培養を行い、混合微生物種の場合について藻類増殖のパターンを評価しようと考えた。これを以下、混合微生物植種法と称する。

* Relationship of Nitrogen and Phosphorus to Algal Growth in Reservoirs

** Hideki OKUYAMA, Hokkaido Regional Research Institute for Environmental Pollution (北海道公害防止研究所)

*** Tasuku KAMEI and Norihito TAMBO, Hokkaido University (北海道大学工学部)

表 1 藻類潜在生産力試験の実験条件

培 養 条 件	混合微生物植種法	不特定藻類植種法	特定藻類植種法
ベースとなる試水 添加した窒素 添加したリン 植種微生物および植種量	札幌市水道水, 河川水 NH ₄ Cl KH ₂ PO ₄ 活性汚泥処理上澄水 0.1% (体積)	河川水 NH ₄ Cl KH ₂ PO ₄ 多種類からなる藻類群 10 ³ /ml (細胞数)	河川水 NH ₄ Cl KH ₂ PO ₄ Anabaena sp. Selenastrum capricornutum. Microcystis aeruginosa. Scenedesmus sp. 10 ³ /ml (細胞数)
照 度	3500Lux (昼夜点灯法)	3500Lux (昼夜点灯法)	3500Lux (昼夜点灯法)
水 温	25℃	25℃	25℃
培養容器	L型培養管 (500ml)	L型培養管 (30ml)	L型培養管 (30ml, 500ml)

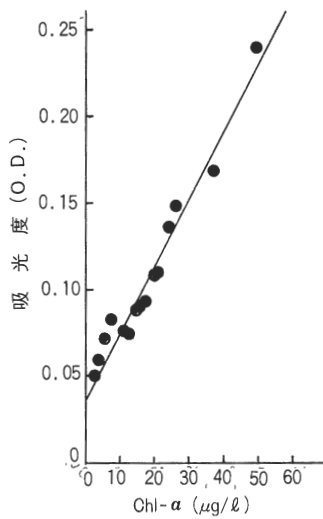


図 1 a Anabaena の濁度とクロロフィル a 濃度の相関

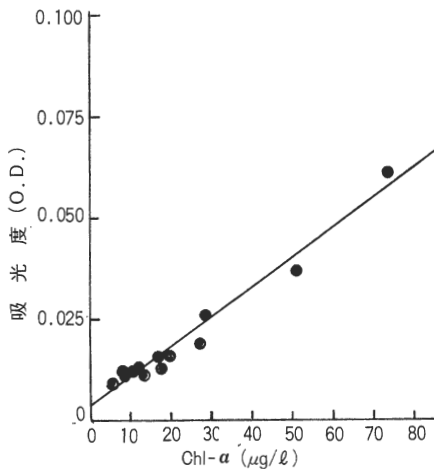


図 1 b Microcystis の濁度とクロロフィル a 濃度の相関

第三に、活性汚泥処理水を植種して行った 25 l 容量水槽での静置培養で増殖した多種の藻類を植種に用い、その初期藻類数が 10³/ml の個数濃度となるように調整して振盪培養試験を行った。目的は第二の試験とほぼ同様であり、以下、不特定藻類植種法と称する。

第二、第三の試験は、単藻系の場合と比較して、多種類の藻類が混在している場合の増殖パターンを明確にし、加えて、実際の貯水池における現象評価の基礎となりうるもっともらしい系としての動力学的諸特性を評価しようとするものである。照度を 3,500 Lux、水温を 25℃ とした。実験条件を表 1 に示す。

藻類量は、少量の試水を採取し、680 nm の波長で 1 cm セルを用いた比濁測定を行い、吸光度 (OD, Optical density) によって表示する。さらに、OD とクロロフィル a 濃度の相関を求める多数回の測定を多くの状態について行い²⁾、図 1 a ~ c に示すような OD とクロロフィル a 濃度の相関図を藻の種類別に作成し、OD 値を

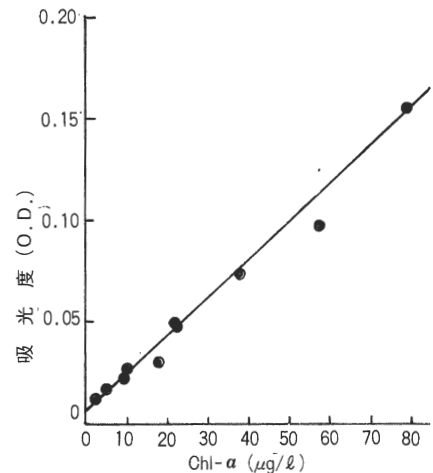


図 1 c Selenastrum の濁度とクロロフィル a 濃度の相関

クロロフィル a に変換するために用いた。

3. 結果と考察

3.1 藻最大増殖量と窒素、リン濃度の関係

一般に、藻増殖量に関係する主たる因子として窒素、リン等の栄養塩濃度、水温、照度、増殖時間等が考えられ、これらと増殖した藻類量（クロロフィル a 濃度として、 $\mu\text{g/l}$ ）との関係は次の一般式のように表現できよう。

$$\text{Chl-a} = f(N, P, T, t, \text{Lux}, \dots) \dots\dots(1)$$

ここで、 N : 窒素濃度 (mg/l)、 P : リン濃度 (mg/l)、 T : 水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 t : 増殖時間 (day)、 Lux : 照度 (ルクス)

他の条件を固定し、藻類の最大増殖量を窒素、リンの初期濃度のみの関数として表すと(1)式は(2)式のようにになる。

$$\text{Chl-a} = f(N, P, T, t, \text{Lux}, \dots) \dots\dots(1)$$

ここで、 $\text{Chl-a}_{\text{max}}$: 藻類の最大増殖量をクロロフィル a の濃度で示した数値 ($\mu\text{g/l}$)

関数形 $f(N, P)$ を初期窒素濃度 N と初期リン濃度 P のべき関数の結合形として(3)式のように表現すること

を試み、最大増殖量を定数 k, x, y の三つに集約して評価しうるか否かを次に検討してみる。

$$\text{Chl-a}_{\text{max}} = kN^x P^y \dots\dots(3)$$

振盪培養試験の種々の条件で得られた実験結果を(3)式に基づいて最小自乗法で整理し、 k, x, y の三つの定数を決定する。その結果を、代表的な淡水藻類を植種した単藻培養試験の場合について式化すると次のようになる。

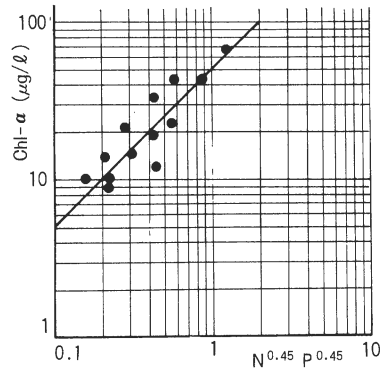


図4 初期窒素・リン濃度と最大増殖量の関係 (Selenastrum)

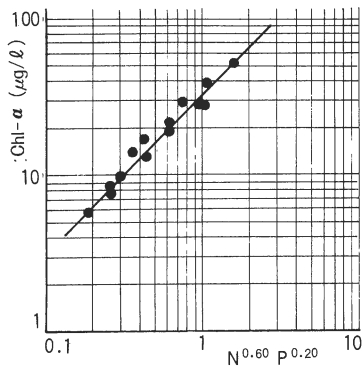


図2 初期窒素・リン濃度と最大増殖量の関係 (Anabaena)

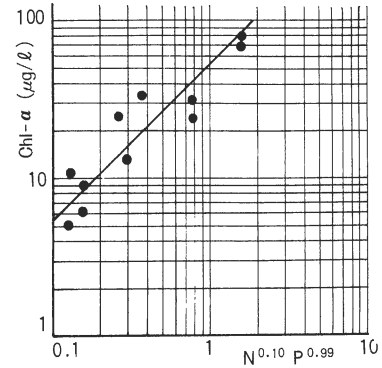


図5 初期窒素・リン濃度と最大増殖量の関係 (Scenedesmus)

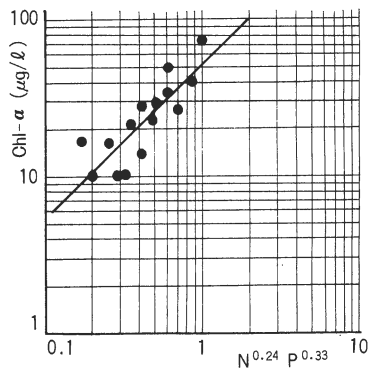


図3 初期窒素・リン濃度と最大増殖量の関係 (Microcystis)

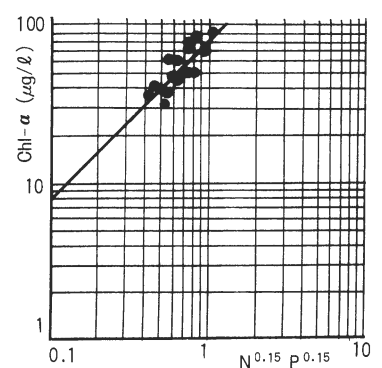


図6 初期窒素・リン濃度と最大増殖量の関係 (三種混合系)

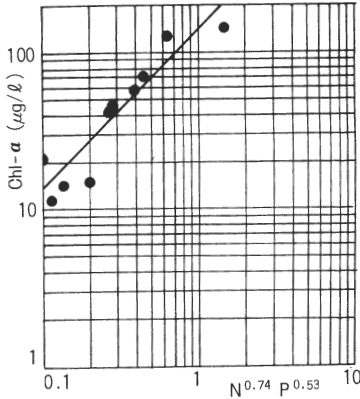


図7 初期窒素・リン濃度と最大増殖量の関係
(活性汚泥処理上澄水0.1%植種)

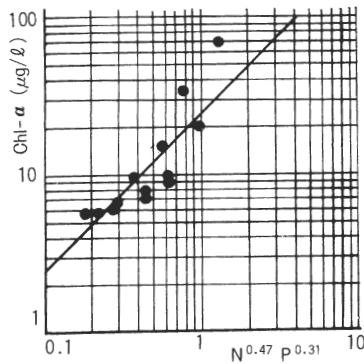


図8 初期窒素・リン濃度と最大増殖量の関係
(不特定藻類)

Anabaena sp. の場合

$$\text{Chl-}a_{\text{max}} = 33 N^{0.60} P^{0.20} \dots\dots\dots(4)$$

Selenastrum capricornutum の場合

$$\text{Chl-}a_{\text{max}} = 51 N^{0.45} P^{0.45} \dots\dots\dots(5)$$

Microcystis aeruginosa の場合

$$\text{Chl-}a_{\text{max}} = 52 N^{0.24} P^{0.33} \dots\dots\dots(6)$$

Scenedesmus sp. の場合

$$\text{Chl-}a_{\text{max}} = 52 N^{1.10} P^{0.99} \dots\dots\dots(7)$$

上述の諸単藻培養試験の実験値と特性式の適合状態を検定するために、横軸に特性式の $N^x P^y$ の項をとり、縦軸に $\text{Chl-}a_{\text{max}}$ の値をとって各藻類ごとの実験値をプロットしたものが図2～5である。これらの実験値はいずれもおおのこの藻について求めた(4)～(7)式の直線に良好な回帰を示し、特性式の有用性を証明している。それぞれの最大増殖関数はその種について固有のものと考えることができるが、いずれの藻類の場合も係数 k の値は似たような数値を示し、 N, P が 1 ppm といった高い値の場合にはいずれも 30～50 $\mu\text{g/l}$ といった程度の値になる

ことを示している。窒素とリンの濃度の指数の大きさを比較することによって、藻の最大増殖量に及ぼす両成分の重みを評価できる。

次に、混合微生物系についての実験結果をも、上述と同様の方法で検討してみる。

三種混合植種、活性汚泥処理上澄水植種、不特定藻類植種による培養試験の結果を各々最小自乗法によって整理した結果を示すと(8)～(10)式ようになる。これらの特性式と実験データの照合を行ったものが図6～8であり、いずれの場合も得られた特性式に良好な回帰を示している。

三種混合培養 (*Anabaena, Microcystis* および *Selenastrum*) の場合

$$\text{Chl-}a_{\text{max}} = 83 N^{0.14} P^{0.15} \dots\dots\dots(8)$$

活性汚泥処理上澄水0.1%植種の場合

$$\text{Chl-}a_{\text{max}} = 140 N^{0.47} P^{0.53} \dots\dots\dots(9)$$

不特定藻類の場合

$$\text{Chl-}a_{\text{max}} = 24 N^{0.47} P^{0.31} \dots\dots\dots(10)$$

実際の予測に際して概略の数値を求めようとするのであれば、式(9)を用いるとかなりの程度、実用に足る推定値を得ることができよう。

3・2 藻類増殖速度と窒素・リンの関係

流れ型のダム湖では滞留時間が藻類が最大増殖量に達するに要する時間より短い場合が少なくない。このような池の中の藻類の増殖量を論じようとすれば、最大増殖量に至る過程での藻類量を時間の関数として評価しておく必要がある。そこで、流れ型の貯水池に流入してきた水塊が成層した湖の上層を栄養塩の補給を受けることなく流下し流出していくような、押し出し流れ (plug flow) 型の流況下における藻増殖速度曲線を検討することとする。

ここでは、増殖関数型として、比較的長い誘導期を持つような増殖現象を示しうる Logistic 曲線型(1)の速度式を用いて検討を試みる⁵⁾。

$$\frac{dC}{dt} = \mu C(K - C)/K \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 C : 藻類量 (クロロフィル a 表示, $\mu\text{g/l}$), t : 増殖開始後の時間 (day), K : 藻類最大増殖量 (クロロフィル a 表示, $\mu\text{g/l}$, $K = \text{Chl-}a_{\text{max}}$), μ : 比増殖速度 (day^{-1})

(1)式を積分することによって Logistic 型の藻類増殖量を与える(2)式が得られる。

$$C = \frac{K}{1 + e^{-a - \mu t}} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 a : 積分定数 (無次元), ただし藻類の最大増殖量 K が(3)式に示されるように初期窒素・リン濃度の

関数として表現されるので、 μ , a もまた窒素・リン濃度の関数となる。

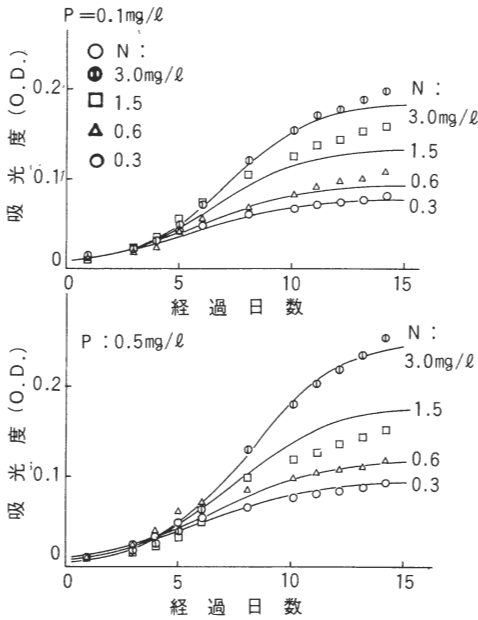


図9 Anabaena の増殖経過と増殖速度関数の照合

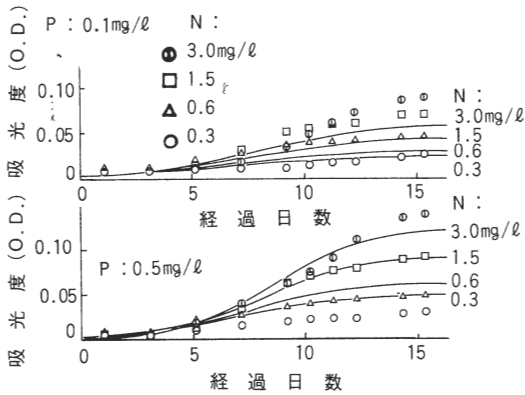


図10 Selenastrum の増殖経過と増殖速度関数の照合

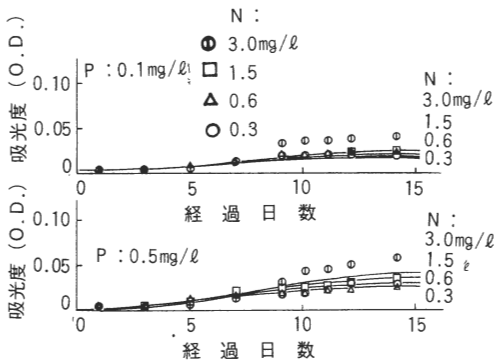


図11 Microcystis の増殖経過と増殖速度関数の照合

$$\mu = g(N, P) \dots\dots\dots (13)$$

$$a = h(N, P) \dots\dots\dots (14)$$

μ , a の値が共に窒素とリン濃度のべき関数の積で表現できると仮定すれば、

$$\mu = \gamma_1 N^{\alpha_1} P^{\beta_1} \dots\dots\dots (15)$$

$$a = \gamma_2 N^{\alpha_2} P^{\beta_2} \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 α , β , γ は共に実験係数である。

(12), (15), (16) 式の仮定がどの程度実際の現象を表現する上で有用であるかを、種々の単藻培養試験、三種類の藻の混合培養試験、不特定藻類を用いた混合培養試験等の結果を用いて検討する。

図9~11はそれぞれ *Anabaena*, *Selenastrum*, *Microcystis* を用いた単藻培養試験の例である。

これらの振盪培養試験の結果を用いて Logistic 関数の諸係数を決定するには、まず、最大増殖量 $K (= \text{Chl-}a_{\text{max}})$ を(4)~(6)式を用いて予め求め、ついで最小自乗法を用いて各々の実験条件に対する a , μ を求める。得られた a , μ の値をその条件の窒素・リン濃度の関数 [(15), (16) 式として整理し、最小自乗法によって α , β , γ を定める。

得られた結果を列挙すると次のようである。

Anabaena sp. の場合

$$\mu = 0.45 N^{0.13} P^{-0.002} \dots\dots\dots (17)$$

$$a = 3.3 N^{0.26} P^{0.08} \dots\dots\dots (18)$$

Selenastrum capricornutum の場合

$$\mu = 0.55 N^{0.10} P^{0.20} \dots\dots\dots (19)$$

$$a = 4.3 N^{0.20} P^{0.24} \dots\dots\dots (20)$$

Microcystis aeruginosa の場合

$$\mu = 0.50 N^{0.07} P^{0.17} \dots\dots\dots (21)$$

$$a = 3.6 N^{0.20} P^{0.24} \dots\dots\dots (22)$$

このようにして得られた k , μ , a の三関数を用いてそれぞれの実験条件に対応する Logistic 曲線を計算すると図9~11中の実線のようになり、実験値と可成り良い適

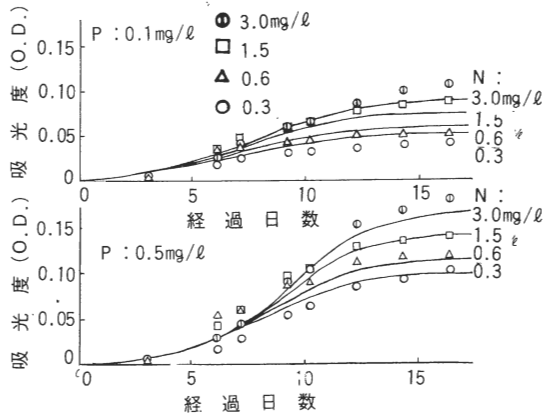


図12 三種混合系の増殖経過と増殖速度関数の照合

合を示す。

ついで、混合藻類培養系の場合についても同様な表現が可能か否かを検討する。

Anabaena, *Selenastrum*, *Microcystis* の三種混合の場合について、

$$\mu = 0.57 N^{0.30} P^{0.10} \dots\dots\dots (24)$$

$$a = 5.2 N^{0.10} P^{0.20} \dots\dots\dots (25)$$

不特定藻類を対象とした混合培養の場合について、

$$\mu = 0.44 N^{0.16} P^{-0.02} \dots\dots\dots (26)$$

$$a = 3.4 N^{0.20} P^{-0.01} \dots\dots\dots (27)$$

実験結果と得られた係数を用いて計算した Logistic 曲線を対比して示すと図12, 13のとおりである。図から、混合培養系の場合についても単藻培養系の場合と同様に、得られた Logistic 曲線が実験値を良く表現し、初

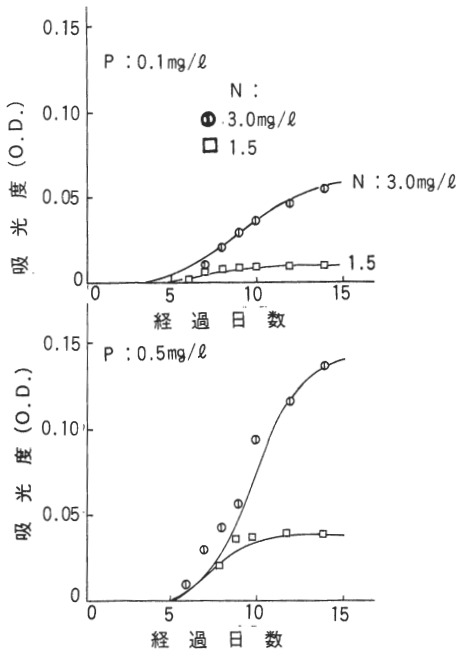


図13 不特定藻類の増殖経過と増殖速度関数の照合

期窒素, リン濃度を用いた上述の動力的表現の有用性を示している。

前述のような最大増殖量, 増殖過程を記述する関数の特性を規定する諸係数がどの程度環境要因によって変化するものか知っておく必要がある。筆者らは、主要な因子と考えられる温度と照明条件について若干の検討を加え、その結果最大増殖量は25℃付近に極大を有し、これ以下の15~25℃の区間においては温度と増殖量の関係が正の相関を持ち、最大増殖量に及ぼす温度効果を指数式で表現し得ることを、また、照明条件については、自然条件のように12時間毎に明暗を繰り返す場合と、本実験のような連続照明の場合の両条件の増殖曲線には極端に大きな差がないことを確認している⁶⁾。

したがって、通常自然水域で問題となる窒素・リン濃度の範囲では、連続照明による試験結果を用いて議論を進めて大きな誤りはないと考えられる。

4. 貯水池の富栄養化予測への応用

ダム貯水池における富栄養化を考える場合に、栄養塩の様々な移動経路における平衡と速度について検討する必要がある。

ダム湖への栄養塩の負荷は、主として農地、牧野、林地などからの面的な流出によるものであり、これについて具体的制御手段はない。このような場合には湖中で藻類の増殖を見るに至る栄養塩と藻類の湖内での動きと湖外への流出経路を明らかにし、自然湖沼に比して一般にはるかに短い滞留時間と操作性の高い貯留であることを利用した湖水の流動状態や滞留時間制御を積極的に行わなければならない。そこで、制御された水流下における水質変化のパターンについての理解が富栄養化の予測のため必要である。

人工湖における栄養塩のフローを大略描いてみると図14のようになる。そこで、富栄養化の予測を行うとすれば①成層の生成を含めて貯水池の混合状態、滞留時間等

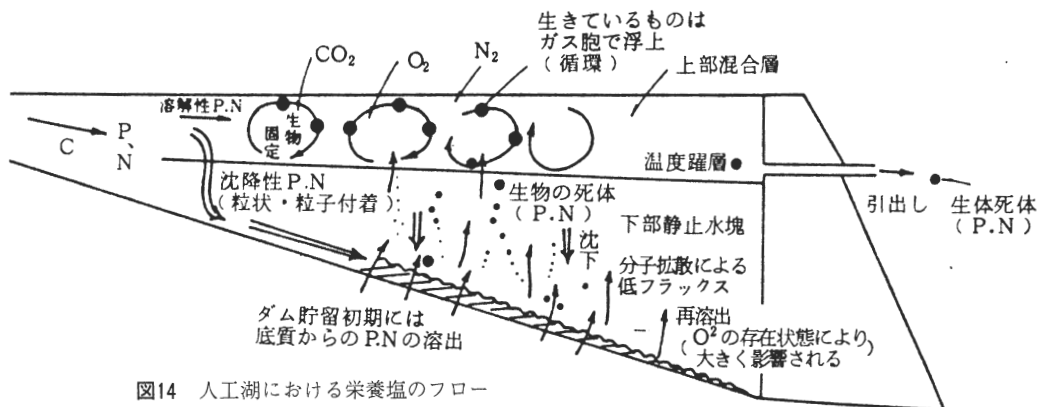


図14 人工湖における栄養塩のフロー

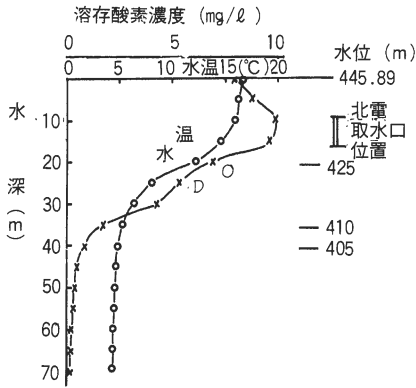


図15 豊平峡ダム貯水池水温、DO濃度、垂直分布測定地点、薄別流入点直上河心部 (St. 1) 貯水位 445.89 測定日時 昭和54年 9月13日 11時~12時

の水利状態の把握。②流入してくるリン、窒素の量と形態。③池内へ流入したリン、窒素等の初期挙動の推定で、まず、溶解性のリン・窒素については生物への取り込み速度(生物の増殖量との関連)と、沈降性のリン、窒素については沈降して底層へ移動し無効化する分と途中で溶出して利用される成分の評価。④底部に沈積した生物の死体および底泥からの栄養塩の再溶出と拡散上昇速度。⑤その外に懸濁生物体の沈降速度、再溶解速度などの検討が必要となる。

前述のように、河道貯水池では水の入れ替りが多く、とくに、積雪地帯では融雪期の半月足らずの期間に、貯水池の水がほぼ全面的に何回か入れ替る。また、台風による大出水の場合にも同様な貯水の入替りの現象が西部日本の諸貯水池に見られる。これによって、貯水池の

表2 水質試験結果

調査日 昭和54年 9月13日

測定項目	採水地点	St. 1				
	水深(m)	5	10	15	20	底泥
採水時間 (時・分)						
水温 (°C)		16.8	14.6	8.2		
濁度 (度)		3.6	1.5	1.7	1.6	
色度 (度)		4.	6	6	5	
pH 値		7.0	6.9	6.8	6.4	
溶解酸素 (mg/l)		8.8	9.8	9.6	6.9	
酸素飽和率 (%)		90.0	96.0	81.0	55.6	
アンモニア性窒素 (mg/l)		0.00	0.00	0.00	0.07	
亜硝酸性窒素 (mg/l)		0.000	0.000	0.000	0.000	
硝酸性窒素 (mg/l)		0.02	0.03	0.03	0.07	
KMnO ₄ 消費量 (mg/l)		3.6	3.9	3.9	3.3	
電気伝導率 (μS/cm)		73.	75	74	63	
総鉄 (mg/l)		0.87	0.29	0.25	0.22	2.20
溶解鉄 (mg/l)		0.08	0.10	0.09	0.07	
総マンガン (mg/l)		0.03	0.02	0.04	0.08	0.60
溶解マンガン (mg/l)		0.02	0.01	0.03	0.07	
リン酸イオン (mg/l)		0.015	0.009	0.008	0.009	
一般細菌 (個/ml)		7	5	12	10	
大腸菌群 (MPN/100ml)		0	23	33	33	
微生物数 (1ml中)		208	701	76	83	

成層下部の成分もほとんど流出して、極めて限られたポケット部以外は単年度で水質の変化を考えれば良いであろう。したがって、ダム湖においては栄養塩の累年にわたる蓄積によって生じる現象は、流入水が悪化せず、運用に誤りがなければ、富栄養化による障害の発現に寄与するに至るまでには長年月を要することになる。

このような前提で、水温、照度が藻増殖に充分な時期の貯水池について、成層が形成される状況下では、池底と成層上部との物質交換が無視し得るとして、池に流入してくる水塊が栄養塩の補給を受けずに押し出し流れで流下し、ダムから流出するという沈況を考えて、ダム流入水の窒素、リン平均濃度を使用し、平均滞留時間を藻類の増殖日数として、藻類発生量の予測を行うこととする。

その例として、北海道豊平川水系の豊平峡ダムについて考えてみる。

図15は豊平峡ダムの垂直方向の水質変化を1979年9月13日に調査した時の、湖の中央部薄別川流入点の河心部の水温と溶解酸素の分布図である。図からわかるように成層下部は無酸素状態になっており、底質からのリンの溶出を許しやすい条件になっている。水質の分布は、表2に示すように、上層までは再溶出の影響が及ばず、プランクトンの増殖もみられず、クロロフィルaの濃度は0.5 μg/lであった。表3は1978年10月13日に行った水深方向の水質調査である。溶解酸素を失った成層下部では、鉄、マンガン、アンモニアが高めの値になっているが、上層への影響は僅かと見て良いであろう。水温は6月~9月にかけて15°C程度である。平均滞留時間を求めたグラフが図16である。図から見ると、平均滞留時間は6月~9月にかけて最大で70日となっている。したがって、藻類の増殖は最大増殖量として検討しなくてはならない。豊平峡ダムへ流入する水塊の水質は、溶解性リンで0.015 mg/l、溶解性窒素で0.05 mg/lとなる。これらの値を式(9)に代入すると、Chl-a_{max} = 3.6 μg/lとなる。ダム湖水の成層上部の水温は、実験条件のそれよりも低いので、この値は至適条件下での予想値と考えて良い。

次に、成層上部の水温が、藻類の増殖が活発に行われる時期に20°C以上に達するようなダム湖について検討を行った。

その例として、宮城県環境部および佐賀県保健環境部のデータを借用し、大倉ダム、漆沢ダム、および北山ダムについて藻類発生量を推算した。

大倉ダム(宮城県)は名取川水系広瀬川との合流点から約4 km上流の大倉川に築造された多目的ダムである。6月~10月初旬には安定した成層状態を示し、湖の平均滞留時間は20~60日である。55年8月のダムサイ

表 3 豊平峡ダム水質試験結果

調査日 昭和53年10月13日 天候 雪 ダム水位 453.24 m

測定項目	採水地点														
	St. 1 (薄別川流入点直上流湖心)					St. 2 (ダム直上流)									
採水時間(時分)	0	5	10	15	20	25	30	32	0	5	10	15	20	30	40
水温(℃)	10:45 11.9	10:50 12.3	10:55 12.0	11:00 11.6	11:05 11.0	11:10 8.3	11:15 5.3	11:20 4.8	11:35 12.5	12:05 12.0	11:40 11.8	12:10 11.5	11:50 10.9	11:55 7.0	12:00 4.7
濁度(度)	1.1	1.5	1.7	1.3	2.0	1.9	7.1	23	1.8	1.7	1.3	2.1	3.0	3.5	23
色(度)	4	4	4	4	4	4	8	14	4	4	4	4	5	5	80
PH値	7.1	7.1	7.1	7.1	7.0	6.9	6.6	6.3	7.1	7.1	7.1	7.0	7.0	6.7	6.8
溶存酸素率(%)	8.9	9.3	9.2	8.9	9.0	9.2	4.5	2.7	9.0	9.1	9.0	8.7	8.4	6.8	1.8
酸素飽和率(%)	85.2	89.8	88.2	84.5	84.3	80.8	36.6	21.7	87.3	87.2	85.9	82.5	78.5	57.8	14.4
アソモニア性窒素(μg/l)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82
亜硝酸性窒素(μg/l)	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
硝酸性窒素(μg/l)	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.10	0.09	0.04	0.03	0.05	0.04	0.06	0.11	0.10
KMnO ₄ 消費量(μg/l)	4.2	4.8	5.7	6.6	7.5	4.8	8.4	16.3	5.7	4.8	5.7	5.7	7.5	5.7	24.0
導電率(μS/cm)	76	76	76	76	77	77	68	73	77	78	77	77	75	63	114
総鉄(μg/l)	0.18	0.13	0.13	0.11	0.17	0.18	0.45	0.53	0.13	0.14	0.11	0.15	0.21	0.22	0.45
総マンガン(μg/l)	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.30	0.70	0.07	0.03	0.06	0.04	0.05	0.14	4.00
溶解性マンガン(μg/l)	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.26	0.66	0.01	0.02	0.04	0.03	0.05	0.13	3.50
リン酸イオン(μg/l)	0.002	0.012	0.004	0.024	0.018	0.019	0.013	0.041	0.013	0.019	0.007	0.015	0.019	0.011	0.009
一般細菌数(個/ml)	6	17	9	8	17	11	16	8	12	12	18	21	24	26	7
大腸菌群(MPN/100ml)	0	5	31	17	23	13	7	2	13	13	13	13	220	110	22
微生物数(1ml中)	45	67	57	66	111	51	19	69	56	61	55	30	95	81	23

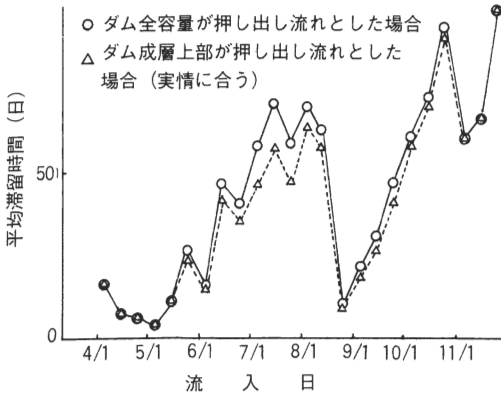


図16 豊平峡ダムへある日に流入した水塊の平均滞留時間

ト上層のクロロフィル a は $10 \mu\text{g/l}$ となっている。流入河川の水質を滝の上地点で見ると、6月～9月にかけて $\text{PO}_4\text{-P}$ は $0.004 \sim 0.010 \text{ mg/l}$ 、 T-P は $0.008 \sim 0.013 \text{ mg/l}$ 、無機態窒素は $0.154 \sim 0.240 \text{ mg/l}$ である。8月の濃度、 P 0.01 mg/l 、 N 0.24 mg/l を式(9)に代入すると、 $\text{Chl-a}_{\text{max}} = 7.1$ となる。

漆沢ダム（宮城県）は鳴瀬川をせき止めて築造された多目的ダムである。6月～8月に成層の状態を示し、平均滞留時間は10～40日である。流入河川水中の T-P 濃度が高いにもかかわらず、湖水のクロロフィル a 濃度は $10 \mu\text{g/l}$ 以下の値を示すとしている。そこで、流入河川水の栄養塩濃度として N 0.04 mg/l 、 P 0.05 mg/l を式(9)に代入すると、 $\text{Chl-a}_{\text{max}} = 6.3 \mu\text{g/l}$ を得る。

次に、佐賀県の北山ダムの例を推算してみる。

北山ダムは嘉瀬川上流に築造された多目的ダムである。例年5月頃、下流で取水する佐賀市水道水にかび臭の問題が発生している。春から秋にかけて安定した成層状態を示し、平均滞留時間は30～60日（58年5月～8月）となっている。九電取水口前の地点で、表層（0～5m）のクロロフィル a 濃度は、昭和56年5月26日に $5.7 \sim 12.0 \mu\text{g/l}$ 、56年8月25日に $7.6 \sim 10.3 \mu\text{g/l}$ 、57年5月17日に $4.4 \mu\text{g/l}$ （深さ0m）、57年6月23日に $7.0 \mu\text{g/l}$ （深さ0m）となっている。

主要な流入河川は嘉瀬川と初瀬川であり、その水質は58年の平均で、嘉瀬川の場合、無機態窒素 0.195 mg/l 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 0.026 mg/l 、 T-P 0.030 mg/l である。また、初瀬川の場合は、無機態窒素 0.081 mg/l 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 0.020 mg/l 、 T-P 0.020 mg/l となっている。Nとして 0.195 mg/l 、Pとして 0.026 mg/l を使用し、(9)式に代入すると、 $\text{Chl-a}_{\text{max}} = 9.3 \mu\text{g/l}$ を得る。

5. 結 語

混合培養系および単藻培養系について最大増殖量をべき関数で表現した。

また、藻増殖速度を Logistic 曲線型の増殖と仮定し計算した結果、実験値と良い一致をみた。

この結果にもとづいて、藻類の増殖日数をダムの平均滞留時間とし、平均水質から藻類の増殖量を推測して富栄養化の予測を試みた。

この手法は富栄養化を論ずる場合、一つの手法と成り得るであろう。

—引用文献—

- 1) 安芸周一：貯水池水質の挙動と予測、「大ダム」、Vol. 21, No. 83, p. 64, 1978.
- 2) 西條八東：クロロフィルの測定法、陸水学雑誌、Vol. 36, No. 3, p. 103, 1975.
- 3) Environmental Protection Agency (U. S.) : "Algal Assay Procedure Bottle Test", 1971.
- 4) 須藤隆一、森忠洋、大竹久夫、合葉修一：都市下水の2次処理水が示す藻類の潜在能力、下水道協会誌、Vol. 12, No. 6, p. 34, 1975.
- 5) 館稔：「人口分析の方法」、p. 86, 古今書院、東京、1963.
- 6) 丹保憲仁、奥山秀樹、亀井翼：藻増殖関数の研究、水道協会誌、No. 570, pp. 13-14, 1982.