

II-27 貯水池の水質管理—N, P量と藻類量の関数関係について

北海道大学工学部 正会員 丹保 憲仁
 北海道公害防止研究所 正会員 奥山 秀樹
 北海道大学工学部 正会員 亀井 翼

1. はじめに

貯水池の建設なしに水資源の開発が考えにくい現状である。貯水池水の利用のいくつかの問題点のうち、最も複雑な対応を要するものが富栄養化の制御である。水中にある濃度レベル以上の栄養塩類(Ca, Mg, Na, K, N, P, C, Fe, その他)が存在すると独立栄養的微生物(無機物のみを栄養源とし光合成により増殖できる藻類など)の著しい増殖をみる。通常の陸水ではNとPがあるレベルに達すれば藻類等の増殖が盛んになることから、従来一般にN, P以外の成分はほぼ微生物増殖の必要量と満ちていると考えられている。そこで富栄養化が生ずるレベルを湖沼では $N > 0.15 \sim 0.20 \text{ (mg/L)}$, $P > 0.02 \text{ (mg/L)}$ としている例が多い。

上述のような富栄養化レベルと考えられている栄養塩濃縮レベルになると、水温と照度が藻増殖に適した状態であれば、貯水の表層に多量の藻類が発生し、いわゆる水の華となる。このような藻類の大増殖が起こると(1)藻類に由来する毒性の出現¹⁾、(2)藻類の分解による臭気²⁾の発生、(3)分解による溶存酸素の欠乏、(4)水域の景観の阻害等の好ましくない障害を引き起こす。

このような富栄養化による障害の発生は天然湖沼のような水の入れ替わりがきわめてゆるやかにしか行なわれない場が顕著に発現する。すなわち微量ながら年々、湖沼に流入する栄養塩が夏期、藻類として固定され沈積して蓄積し、春、秋の循環期に再浮上して再び生物増殖に寄与し蓄積をくり返す。

それに対して、現今の河中にダムを築造することによって造り出された河道貯水池を対象に現象と考える場合には年間10日に及ぶ水の入れ替わりがあるのが普通で、従来の天然湖沼と同じ扱いとするわけにはいかない。特に北海道のような融雪時の半月足らずのうちに貯水池水がほぼ完全に何回か入れ替わるような場合には、累年の蓄積は天然湖沼に比べてきわめて小さい。従って単年度収支を中心にしたよりきめの細い動力学的な検討としておこななければならない、ただ単にP, Nの間値を挙げて富栄養化を論ずるといったようなことはできない。

従って筆者等は(1)富栄養化による障害が生ずるレベルの判定と容易に行うための試験法の検討、(2)藻類の増殖速度と最大増殖量を栄養塩濃度(特にNとP)の関数として表現すること、(3)その結果を用いて実貯水の藻類増殖量との対比による検討を行い、計画中の貯水池に対する予測を試みることを目的としてこの研究を行った。

1)丹保:水論誌422号, pp 37-44 (昭和44)

2. 試水の藻類潜在生産力試験

水中の窒素、リンの濃度レベルによって、どの程度の藻類量が発現するかということは、通常試水に適當な藻類を接種したのち照度、水温などの条件を一定にして藻類が最大増殖量に達するまで培養と行って評価している。しかしながら、この方法は①どのような藻類を接種すべきか、②あるいは特定の藻類を接種して得られる結果と、混合微生物が存在する自然系の場合とどの程度異なるかという問題点の他、③あらかじめ各種の藻類と培養準備しておく必要もあり、簡単かつ確率的な試験方法とはいえない。

そこで試水に活性汚泥処理法による下水処理場の最終沈殿池上澄水と1% (体積)加えるという非常に簡単な方法³⁾(これを混合微生物接種法と称することとする)を併用しどの程度、試水の藻類潜在生産力を評価し得るかということと通常の特定藻類を用いた試験法と比較検討することとした。2)丹保:水自浄能力調査報告書, 坪学, pp147-146 (1975)

2. 1. 藻類潜在生産力試験の実験方法 混合微生物接種法と特定藻類接種法の両試験とも表1に示した諸条件で窒素、リンの濃度と様々な組み合わせで培養実験を行った。混合微生物接種法においては、300 mL容

量のフラスコと 5l 容量びん, 特定藻類試験

表1 藻類潜在生産力試験の実験条件

法	混合微生物植種法	特定藻類植種法
法においては 30ml 容量のしす管等培養容器として用いた。なお, 特定藻類試験の場合には窒素, リンを添加した試水とオートクレーブで滅菌したのち, 表1に示したような各種の藻を植種した。	バースの試水に添加: 窒素 添加: リン 添加微生物	河川水(流流川上流) NH_4Cl KH_2PO_4 Anabaena Sp. Selenastrum capricornutum Microcystis aeruginosa $50 \times 10^3/ml$ (細胞数) 3,500 Lux (昼夜点灯法) 25°C
藻類量は一量量の試水と 0.45um のメンブレンフィルターで分別後, 乳びちり粉砕し, 90% アセトンで抽出を行い, 蛍光光度法によってクロロフィルaとして表示した。ただし, 特定藻類試験の場合は 680nm における吸光度を測定し, 別に作成した吸光度(680nm)とクロロフィルaの換算表からクロロフィルa濃度を読みとった。	下水放流水 1% (体積) 3,500 Lux (昼夜点灯法) 25°C	

3. 藻類増殖量の等濃度線表示

野水池, 自然の湖沼においては窒素, リンは複合して存在しており, 単独の成分個々に考えられる閾値以上であっても, 両成分の効果と合成した際に藻増殖に至り得ない場合が多くある。従って, 前述の藻類潜在生産力試験の結果を総合的に把握するために, 初期リン濃度と初期窒素濃度と X-Y 軸にとる 2 次元平面上で, 藻類増殖量を示すクロロフィルaの等濃度線と描いて考察することにした。その一例として混合微生物植種法による藻類増殖試験の結果(45日目)の等濃度線と図1に示す。図から, リンと窒素がそれぞれ相互に影響しあう藻類増殖量を定める領域と一方のみの不足が他の濃度に関係なく藻増殖を制御するといふレベルが存在することがわかる。

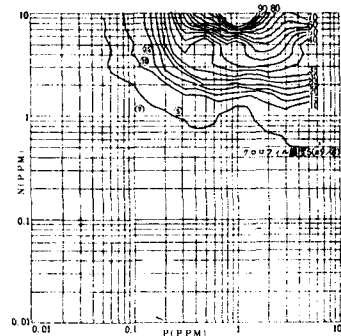


図1 45日後のクロロフィルaの発現濃度(μg/l)とN,P濃度との関係

従来, 窒素 0.2(mg/l), リン 0.02(mg/l)程度を富栄養化の閾値とする例が多かった。図からこれらの数値は, 窒素, リンがそれぞれ独立の要素として藻増殖を抑制する数値とみることができ。従って, 各々が限界値以上であっても複合的な効果と考えると, リンが 0.1(mg/l) で窒素が 1(mg/l) 以下の濃度である場合とか, 窒素が 5(mg/l) であってもリンが 0.05(mg/l) 以下の場合には藻類増殖が強く抑制されることになる。

4. 藻類最大増殖量と N, P 量との関数表示

一般に藻類増殖量(クロロフィルa量)に関係する因子として, 窒素, リン等の栄養塩の他に水温, 照度, 滞留時間などが考えられ, 藻類量(クロロフィルa量表示)を次式のような形で一般式として表現できよう。

$$Chl. - a = f(N, P, T, t, Lux) \quad (1)$$

ここで, N: 窒素, P: リン, T: 水温, t: 滞留時間, Lux: 照度

他の条件を固定して, 藻類最大増殖量と窒素, リンの初期濃度の関数で表わすならば式(2)のようになる。しばしば用いられるように関数型と指数関数の結合で表現して, 増殖の特性値とその反変数係数, 指数 x, y として表現することと試る。

$$Chl. - a, \max = f(N, P) \quad (2)$$

$$Chl. - a, \max = f N^x P^y \quad (3)$$

N, P の各濃度レベルの組み合わせ実験で得られた結果を最小二乗法により整理し, f, x, y を決定すると混合微生物植種法の場合には式(4)のようになる。

$$Chl. - a, \max (\mu g/l) = 150 N^{0.3} (mg/l) \cdot P^{1.3} (mg/l) \quad (4)$$

同様にして特定藻類を植種する単藻培養法の場合には, 富栄養化現象でよく問題となる代表的な藻について次

のような関係が成立した。

$$\text{Anabaena sp. の場合, } \text{Chl-a, max}(\mu\text{g/l}) = 33 N^{0.6} P^{0.2} \quad (5)$$

$$\text{Selenastrum capricornutum の場合, } \text{Chl-a, max}(\mu\text{g/l}) = 51 N^{0.45} P^{0.45} \quad (6)$$

$$\text{Microcystis aeruginosa の場合, } \text{Chl-a, max}(\mu\text{g/l}) = 52 N^{0.24} P^{0.33} \quad (7)$$

混合微生物培養法によって得られた式(4)と特定藻類培養法(単藻培養)法によって得られた式(5)~(7)を比較することにより、自然系に近い前者ではリンが制御因子としての重みが大きく、後者の特定藻類培養法では、リンの指数は窒素と同等近く、それより低い値であることを知る。従って特定藻類培養法で得られた結果から混合微生物系である実際の貯水池、湖沼等における藻類増殖量とN、Pの関係を結びつけるに際しては、扱いを慎重にしなければならない。

5. 藻類増殖速度とN、Pの関数表示

貯水池の平均滞留時間が藻類最大増殖に至る時間より短いような系では、池内での藻類の発生を論ずるに際して増殖時間と増殖量の関係を評価する必要がある。中途で栄養塩の補給のないような押し出し流れ型の反応における藻増殖のパターンを考えると、次式のような形の Logistic 曲線型の速度式を仮定することができよう。

$$\frac{dC}{dt} = \mu C (K - C) \quad (8)$$

ここで、C: 藻類量(クロロフィルa表示)、t: 時間(日)、K: 藻類の最大増殖量、 μ : 比増殖速度
(8)式を積分すると(9)式が得られる。

$$C = \frac{K}{1 + e^{-\mu t}} \quad (9)$$

ここで、 α : 積分定数

α は積分定数ではあるが、 μ 及びKと同様に窒素、リンの2つの変数値によって支配されると考えると、

$$\alpha = g(N, P) \quad (10)$$

$$\mu = h(N, P) \quad (11)$$

α , μ もベキ関数で表現できると仮定すれば、

$$\alpha = \gamma_1 N^{\alpha_1} P^{\beta_1} \quad (12)$$

$$\mu = \gamma_2 N^{\alpha_2} P^{\beta_2} \quad (13)$$

ここで、 α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , γ_1 , γ_2 : 係数

以上の仮定が実際の現象までの程度表現しうるかということも特定の藻類を用いた増殖実験結果を例として確認してみよう。

Anabaena sp.を用いた培養実験結果を図2~5に、Selenastrum capricornutumを用いた結果を図6~8に、Microcystis aeruginosaを用いた結果を図9~11に示す。以上のような培養実験のデータにより式(12), (13)の諸係数を最小二乗法

によって決定すると

$$\text{Anabaena の場合, } \alpha = 1.32 N^{0.3} P^{0.4 \times 10^{-3}} \quad (14)$$

$$\mu = 0.41 N^{0.2} P^{0.02} \quad (15)$$

$$\text{Selenastrum の場合, } \alpha = 6.2 N^{0.38} P^{0.024} \quad (16)$$

$$\mu = 0.64 N^{0.064} P^{0.051} \quad (17)$$

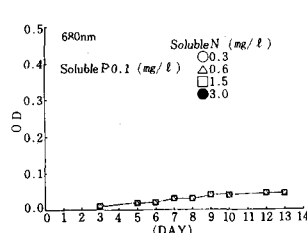


図2 リン初濃度0.01mg/lの場合の濃度の推移

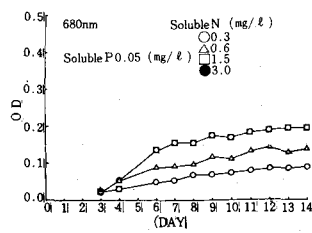


図3 リン初濃度0.05mg/lの場合の濃度の推移

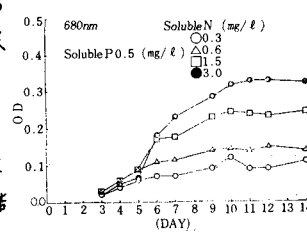


図4 リン初濃度0.1mg/lの場合の濃度の推移

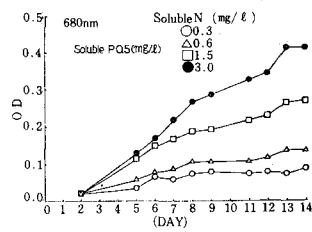


図5 リン初濃度0.5mg/lの場合の濃度の推移

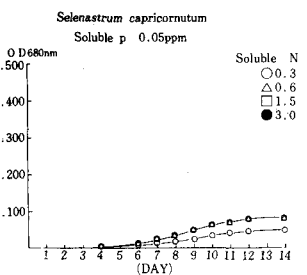


図6 リン初濃度0.05mg/lの場合の濃度の推移

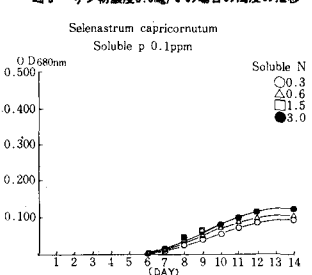


図7 リン初濃度0.1mg/lの場合の濃度の推移

Microcystis の場合,

$$a = 7.0 N^{0.0097} P^{4.3 \times 10^{-4}} \quad (18)$$

$$\mu = 0.73 N^{0.065} P^{3.2 \times 10^{-3}} \quad (19)$$

以上のようなべき関数を含む(9)式で示される

Logistic 曲線と実験値を照合したところ、図12に示すように指数関数による速度式の係数表示が可能なのが明らかとなった。

これらの a , μ の値を用いて(9)式より、藻類増殖過程を計算した結果を図13-18に示す。図から明らかなように実験値と計算値は良好な適合を示し、先に述べた平衡状態の場合と同様に、増殖過程を窒素、リン濃度を指標とする動力学式により表現し得ることとなった。このようにして池へ流入する時点の窒素、リン濃度を既知であれば、池底との物質交換を無視しうような野水池では(成層期のほとんどの場合)も主野水池の平均滞留時間と考へ、任意の平均滞留時間における藻類量を推定することが可能である。

6. 野水池における藻類増殖量予測への応用

ダム野水池における富栄養化(9)式 $\log \left(\frac{K}{C} - 1 \right) = a - \mu t$ を変形して $\log \left(\frac{K}{C} - 1 \right) = a - \mu t$ とした場合について、各培養時間における $\log \left(\frac{K}{C} - 1 \right)$ をプロットしたものである。実験はそれぞれの栄養リン濃度における a , μ の値を式(9)に代入して算出して求めた同値直線である。図から、実験値と計算値とが良く適合していることがわかる。(注) 直線の傾きは μ 、Y軸との切片 ($t=0$) は a の値となるが、X軸は $t=5-12$ の間のみをとっている。

塩の様々な移動経路における平衡と速度について検証する必要がある。産業廃水、都市廃水による栄養塩の水塩への負荷は水処理によって、流出過程で制御することが可能である。しかし、農地、牧野、林地などからの面的な流出について

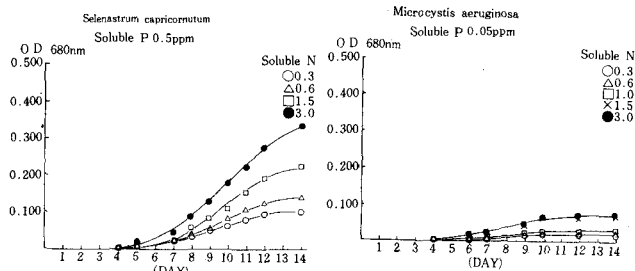


図8 リン初濃度0.5mg/lの場合の増殖の推移

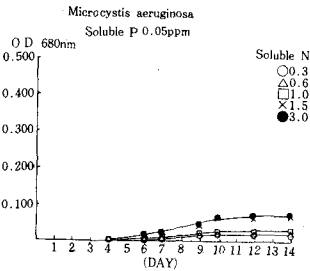


図9 リン初濃度0.05mg/lの場合の増殖の推移

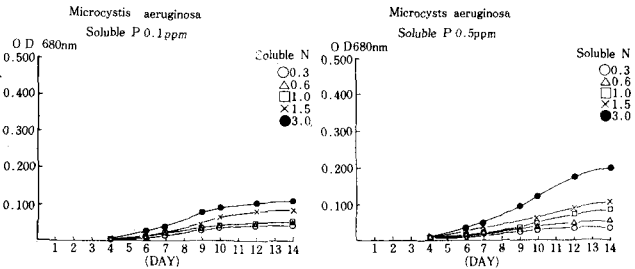


図10 リン初濃度0.1/lの場合の増殖の推移

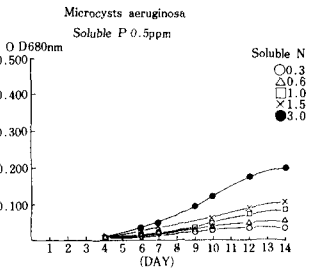


図11 リン初濃度0.5mg/lの場合の増殖の推移

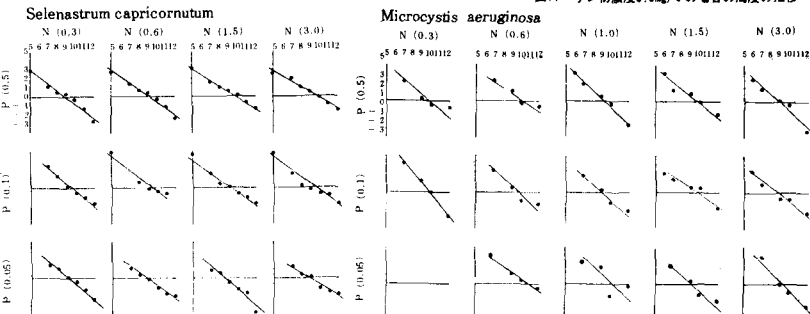


図12 式(9) $\log \left(\frac{K}{C} - 1 \right) = a - \mu t$ を変形して $\log \left(\frac{K}{C} - 1 \right) = a - \mu t$ とした場合について、各培養時間における $\log \left(\frac{K}{C} - 1 \right)$ をプロットしたものである。実験はそれぞれの栄養リン濃度における a , μ の値を式(9)に代入して算出して求めた同値直線である。図から、実験値と計算値とが良く適合していることがわかる。(注) 直線の傾きは μ 、Y軸との切片 ($t=0$) は a の値となるが、X軸は $t=5-12$ の間のみをとっている。

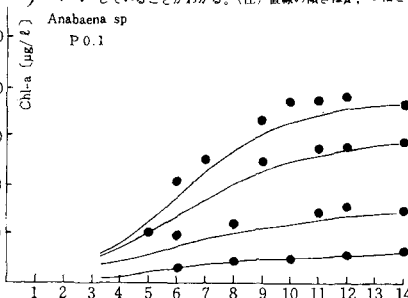


図13 リン初濃度0.1mg/lの場合のLogistic曲線と実測値の関係

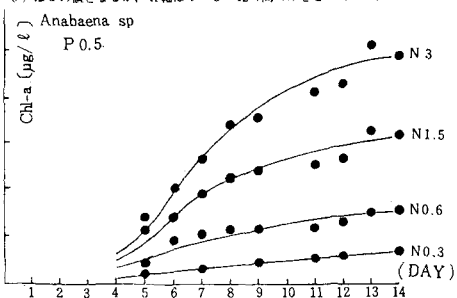


図14 リン初濃度0.5mg/lの場合のLogistic曲線と実測値の関係

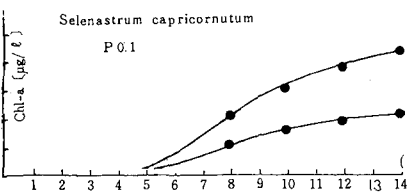


図15 リン初濃度0.1mg/lの場合のLogistic曲線と実測値の関係

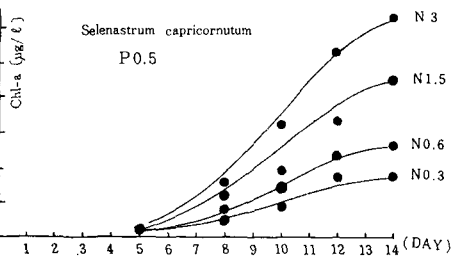


図16 リン初濃度0.5mg/lの場合のLogistic曲線と実測値の関係

ては具体的な判

断手段がない。

このような場合

には人工湖の中

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底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に必要である。

6. 1. 栄養塩のフロー

人工湖にお

ける栄養塩のフローを大略描いてみると図19

のようになる。そこで、富栄養化の予測を行う

とすれば、①成層の生成を含めた貯水池の混合状態、

滞留時間等の水理状態の把握、②流入してくるリン、

窒素の量と形態、③貯水池へ流入したリン、窒素の内、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再利用される成分の割合、④底部に沈積死滅した微

生物および底泥からの栄養塩の再溶出と拡散上昇速度、⑤その外に懸濁微生物体の沈降速度、再溶解速度などの

検討が必要となる。しかしながら、実際の貯水池の形状、操作法によっては上述の各項の重みの軽度も大きく異

ってくる。特に藻増殖量に影響を与える因子は表2に示すように、①貯

水池の水深と②貯水池の平均滞留時間である。すなわち貯水池流入水質

に対する底質からのリンの寄与の程度は貯水池の水深が深い場合は好気

層が厚いので、嫌氣的条件下で底質から溶出するリンは随伴する鉄、マンガンが空気層に触れて再び凝析する際

に同時に凝集し、再び底質に戻り上層部に存在する藻類に利用されない。また、藻類が最大増殖量に達する時間

よりも貯水池の平均滞留時間が短い場合には実際の藻類増殖量は少ないことになる。そこで以下のように貯水池

の流れ状態の検討が必要である。

6. 2. 貯水池の流水状態の検討

貯水池の水理状態を判断する指標として次のようなものが考えられて

いる。

$$\alpha = \frac{\text{貯水池年間総流入量}}{\text{貯水池総容量}}$$

この α 値は貯水池における温度成層の発生の有無に関す

るもので、 $\alpha < 10$ 程度であると安定した成層を作り、 $\alpha > 20$ 程度であると上下方向に全層混合していることにな

る。成層を発生する形の交換回数小さな貯水池であっても、一洪水で貯水全量が入れ替わるような場合で、しか

も濁度が高く成層下部に流入水が滞り込むと、成層が破壊されて全層混合を生ずる。しかし、洪水流入量がダム

貯水量よりもはるかに少ない場合には、流入してくる高濃度の洪水は貯水池底に匍ふく流入して池の成層に影響を

与えない。このような場合、成層の発生の有無は次のような β 値で判定される。 $\beta = \frac{\text{一洪水総流入量}}{\text{貯水池総容量}}$

$\beta < 1$ の場合は成層に影響せず、 $\beta > 1$ となると全層混合を生ずる。水温、照度が藻増殖に十分な夏期の貯水池

について、 α 、 β 値を計算し、成層の有無を判定し、平均滞留時間を藻類の増殖日数としてその水域の平均水質

から藻類の増殖量の予測を行うこととする。より具体的には池内水流をコンピューターシミュレーションによ

って求め、上述の速度式と合成して藻増殖量も求めると良いがここでは略算について論ずるに止める。

6. 3. 貯水池における藻類発生量予測

藻類発生量予測の例として、日高沙流川水系に建設予定である

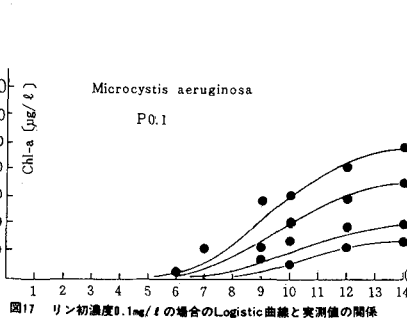


図17 リン初濃度0.1mg/lの場合のLogistic曲線と実測値の関係

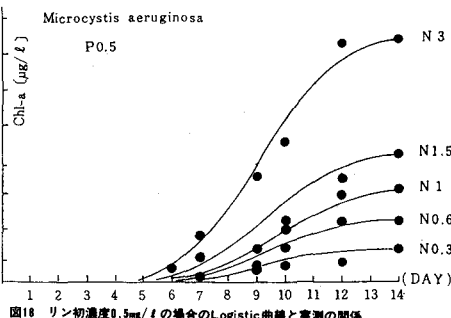


図18 リン初濃度0.5mg/lの場合のLogistic曲線と実測値の関係

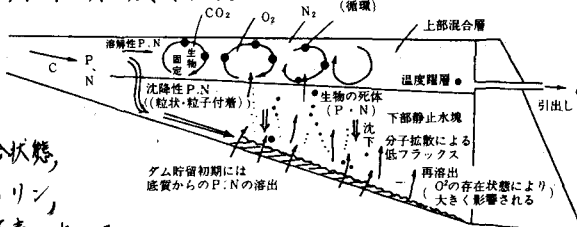


図19 人工湖における栄養塩のフロー

	貯水池の水深	貯水池の平均滞留時間
藻増殖量大	浅い	長い
藻増殖量小	深い	短い

二風谷ダムと早取ダム、及び既に貯水されている札幌豊平峡ダムについて考えてみる。10年間のデータに基づいて沙流川ダム調査事業所が計算した結果によると、二風谷ダムの α 値は平均で約60, 最大73, 最小46で表3に示すように混合型の貯水池と考えることができ、成層を形成することなく通年にわたって全層混合状態にある貯水池と考えることができる。そして、その平均滞留時間は満水年で1週間程度である。一方、早取ダムの α 値は10年平均で約5, 最大6.5, 最小4.1であり成層を生ずる貯水池である。また、1976年までの34年の合計7回の洪水について β 値を求めたところ、二風谷ダムでは $\beta=2\sim8$, 早取ダムは $\beta=0.2\sim0.5$ であった。従って、二風谷ダムは α 値, β 値両方から見て常に全層混合を受けているダムと考えるべきであり、早取ダムは α 値, β 値の両方から見て成層型の貯水池と見るべきであり、図20に示すようにダム貯水の成層上部を押し出し流れと見て平均滞留時間を計算してよい。また、いずれの貯水池においても底質からの栄養塩、とりわけリンの溶出が上層部の藻類増殖に与える影響は小さいと考えられる⁴⁾。両ダム立地点での溶解性リン、窒素の値は表4に示すようである。懸濁性リン、窒素の濃度は低く、かつ溶解性リンへの転換率は好条件下でもわずかであるので、表に示した数値を用いて藻類予想発生量を算出することとする。二風谷ダムの場合には、増殖日数として満水時の最長平均滞留時間の7日ととり、計算してみる。発生する藻類を *Anabaena* として式(14), (15) より α と μ を求めると、 $\alpha=0.67$, $\mu=0.28$ となる。次に式(15)より最大増殖量 K を求めると $K=4.0$ となる。これらの値を式(9)に代入すると、 $C = Chl.-a = 3.1 (\mu g/l)$ この値は単藻培養の実験結果から導いた式より求めるものであり、諸条件が藻類増殖に最も適している場合の藻増殖量であると考えることができる。早取ダムの場合、最大80日程度の滞留時間を考える必要があるので藻の増殖量は最大増殖量で評価する。可能な

表3 藻類増殖量予測に用いた貯水池の成層状態と平均滞留時間

時間	建設予定のダム		既存のダム
	二風谷ダム	早取ダム	豊平峡ダム
成層状態	全層混合	成層形成	成層形成
平均滞留時間	1週間	最大80日	最大70日

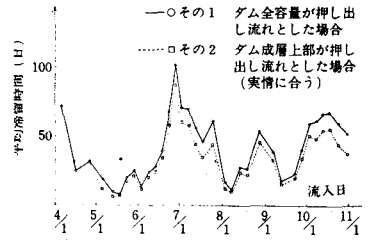


図20 Case1における早取ダムへある日に流入した水塊の平均滞留時間

表4 二風谷ダム, 早取ダム立地点におけるN, P濃度

	溶解性N(mg/L)	溶解性P(mg/L)
二風谷ダム流入水	0.018	0.11
早取ダム流入水	0.010 ~ 0.020	0.10

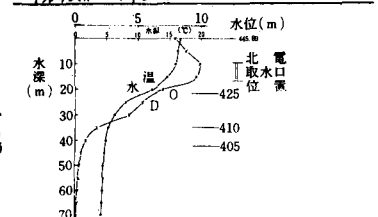


図21 二風谷ダム貯水池 水温、DO濃度、垂直分布
測定地点 導流入点直上河心部(St.1)貯水位44.88
測定日時 昭和54年8月12日 11時~12時
使用計器 総合水科学研究所製DOメーター(コード100m)

表5 水質試験結果 調査日 1979.9.13

測定項目	水深(m)	5	10	15	20
水温(℃)		16.8	14.6	8.2	6.2
溶解性P(mg/L)		8.8	4.8	9.6	6.9
無機性窒素(mg/L)		0.02	0.03	0.03	0.14
リノール酸(mg/L)		0.015	0.009	0.008	0.009

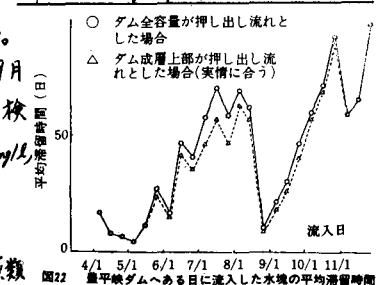


図22 二風谷ダムへある日に流入した水塊の平均滞留時間

次に美瑛のダムの場合にあってはめて予測するため、豊平川水系豊平峡ダムを例にとる。図21は9月中旬における豊平峡ダムの垂直方向における水温と溶解性窒素の分布図である。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。しかしながら前述のように上層部の好気層の存在のために表5に札幌市水道局との合同調査の結果が示すように上層までは再溶出の影響が及んでいない。図22は平均滞留時間のグラフである。図からみ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。従って藻類の増殖は最大増殖量として検討してはならない。豊平峡ダムの夏の平均的な水質は溶解性リンで $0.015 (\mu g/l)$, 溶解性窒素で $0.05 (\mu g/l)$ である。これらを式(4)に代入すると、 $Chl.-a_{max} = 0.3 (\mu g/l)$ となり実測値の $0.5 (\mu g/l)$ と良い適合を示している。

7. 結論 単藻培養実験、及び簡単な混合微生物培養実験により藻類の最大増殖量を N , P のべき関数で表現できることを明らかにした。また、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好一致を示し、Logistic式の諸係数を N , P の関数として表現できることが明らかとなった。この結果に基づいて、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実際の貯水池における藻増殖量を推測し、実測値と良好一致を示した。③参考文献: 貯水池流動状態のシミュレーション, 水質汚濁, 40巻, 4号, 1994。④奥山, 豊平, 丹保: 道庁研究所報告, pp100~121(1980)