

琵琶湖富栄養化のモデルについて(Ⅱ)

— 湖内の水質 —

京都大学工学部 正員 井上頼輝

1. はしがき

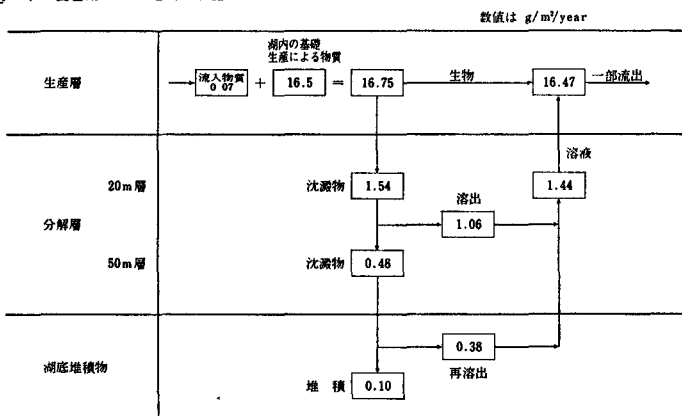
筆者は前論文⁽¹⁾において水質汚濁を7型に分類し、その各々の原因物質、影響、対策などを明らかにした後、各汚染型に対して自然現象、人間活動、汚濁発生機構、対策、水質の変化、影響の6 sectorについてSystem Diagram を示し、その中の一つである富栄養化をとり上げて、人間活動と栄養塩発生機構のモデルを明らかにした。今回は水質の変化についてモデル化を急ぐ。水質には理化学的水質と、生物学的水質とがあるが、モデル化の困難なのは後者の方である。

2. 理化学的水質

前論文において、栄養塩の琵琶湖への流入量は求められている。琵琶湖は北湖は時計廻り、反時計廻り、時計廻りの三つの渦を持ち、南湖は回流

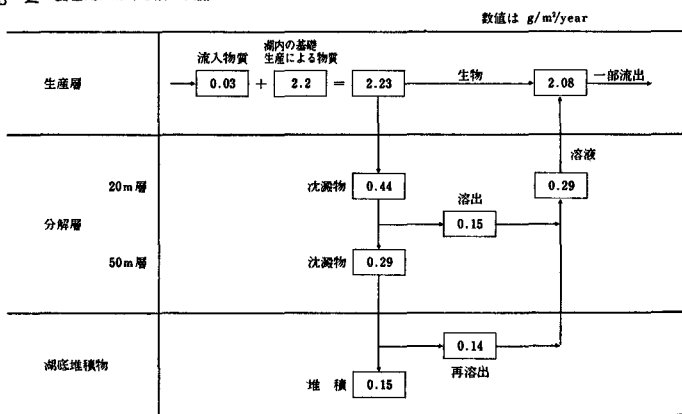
することなく、成層することなくほとんど河川のように流れている。北湖をこの渦の流れに添って三つの完全混合槽が直列に並んだものと考え、こゝでは単純に、北湖と南湖は二つの大きな完全混合槽が直列に並んだものとしておく。南湖は容積 $1.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、又北湖は容積 $2.98 \times 10^9 \text{ m}^3$ を持つ。南湖は水温の水深方向の変化はなく、上下層一体となって流れているものとみてよい。北湖琵琶湖生物資源調査⁽²⁾によれば、1, 2, 3月は循環期で上下方向の水温の変化は小さいが、他の時期には成層し

図-1 琵琶湖における窒素の代謝



注1) 琵琶湖生物資源調査報告より改変

図-2 琵琶湖における燐の代謝



注1) 琵琶湖生物資源調査報告より改変

表-1 底泥の柱状試料分析

1964. 5. 30採取

(N, P, SiO₂は乾量に対する百分率)

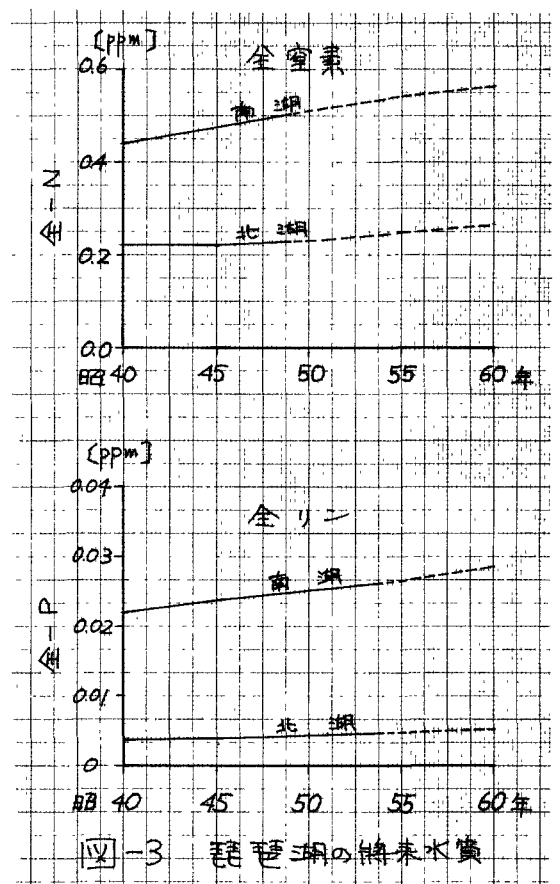
湖底表面よりの深度cm	含水量%	N	P	SiO ₂
0 - 1	79.9	0.263	0.15	59.5
1 - 2	74.6	0.205	0.12	41.9
2 - 3	74.4	0.083	0.15	43.2
3 - 4	70.2	0.085	0.16	45.7
5 - 6	68.2	0.047	0.11	58.2
7 - 8	63.4	0.051	0.08	55.2
9 - 10	63.4	0.047	—	—
11 - 12	64.2	0.051	0.08	44.9
14 - 15	60.2	0.041	—	—
17 - 18	59.5	0.042	0.11	59.2

ている。表水層の水温層は10~20mのところに存在し、その容積は $4.9 \times 10^9 \text{ m}^3$ である。南湖の水深は最大7.5mであり、従って北湖の表水層の水が南湖に流入すると見てよい。そして、年間一回、あるいは二回、鉛直混合が起り上下の水質は均一化するものと考えられる。しかし、成層期に於ける窒素およびリンの鉛直分布に於いて大きな差はなく、通常言われているように成層期に栄養塩が沈殿して、下層に栄養塩の高い水塊が出来、これが上層の水と混合される結果、生産層である上層の栄養塩濃度が上昇するという現象はあまり顕著でないようである。そこで、北湖も南湖も水平ばかりでなく、鉛直方向にも完全混合されているとしておく。水質の変化を年間単位で追う場合、一年に少くとも一回は上下の水の循環があるから、このように仮定しても大きな誤差は生じないと考えられる。

湖中に入った栄養塩の一部は、表層で植物プランクトンに利用されて、植物プランクトンの藻体となる。これが死滅すると一部は直ちに水中に溶出するか、もしくは沈殿物となって湖底に堆積し、分解者である細菌の働きにより無機化する。無機化した栄養塩の一部は、堆積物中を上方に拡散して再び湖水中に入るが、多くは永久的堆積物として湖底に残る。このように、湖水中に存在する栄養塩のうち、湖底に堆積するものの割合がわかれば湖水中栄養塩濃度も推定することが出来る。この値は極めて推定困難であるが、琵琶湖生物資源調査団物質循環班は次のような興味ある方法により、直接推定することを試みている²⁾。即ち、まず湖底泥の柱状試料を昭和39年5月30日に採取し、その窒素、リン及び珪酸の含有率を表1のように求める。窒素およびリンは主として有機物として沈殿し、底泥中で無機化して一部は湖水中に溶出するか、珪酸は一度沈殿すれば湖水中に再溶出し

ない。琵琶湖の一年間の新生沈殿物量から、その中の珪酸を定量して、珪酸の沈殿量 $101.5 \text{ g/m}^2/\text{year}$ を求めこれで見積りの柱状試料厚さ1cm当りの珪酸量を除することにより、堆積に要した時間(年)を求める。表層から1cmの堆積には14年、6cmまでに約100年、18cmの柱状試料全体では約230年かかっているものと推定される。柱状試料中の珪藻の種類組成が年代と共に殆ど変っていないところから、生物生産の年代変化はあまりなかったと推定し、新生沈殿物中の窒素 $0.48 \text{ g/m}^2/\text{year}$ 、リン $0.29 \text{ g/m}^2/\text{year}$ を知って、各年代別に底泥に残っている窒素、リンの量と比較することにより、堆積物より再溶出するのは窒素 $0.38 \text{ g/m}^2/\text{year}$ 、リン $0.14 \text{ g/m}^2/\text{year}$ であり、湖底堆積物として半永久的に残るのは、窒素 $0.10 \text{ g/m}^2/\text{year}$ 、リン $0.15 \text{ g/m}^2/\text{year}$ であることを知った。(図-1、図-2 参照)

この結果から、生産された有機物中の窒素のうち、分解層に還するものは13%程度であり、湖底に堆積物として半永久的に残るものはわずかに1%にすぎぬことを指摘している。しかし、図-1、-2で明らかなように、すでにこの段階で収支が合っていない。沈殿堆積物中に永久に残る栄養塩の量を推定することは、極めて困難なことである。そこで、簡単な水質モデルを作り、過去の水質データに合致するように沈殿率 α を定め、これを将来に外挿すること



にする。湖を北湖と南湖にわけ、北湖を添字a、南湖を添字b、流出河川である瀬田川を添字cで示す。湖の体積を V (km³)、流量 Q (km³/年)、流入負荷は窒素を N (ton/年)、リンを P (ton/年) 湖中栄養塩濃度は窒素を C_N (ppb)、リンを C_P (ppb) で示す。湖底に半永久的に沈降する栄養塩の割合は、窒素は α_N (1/年) リンは α_P (1/年) で示す。たとえば V_a は北湖の体積、 Q_{ab} は北湖から南湖への水の移動量、 α_{pb} は南湖の沈降率である。北湖の濃度は完全混合と仮定すれば

$$C_{Na1} = \frac{1 - \alpha_{Na}}{V_a + Q_{ab}} (C_{Na0} V_a + N_{a1}) \quad (1)$$

$$C_{Pa1} = \frac{1 - \alpha_{Pa}}{V_a + Q_{ab}} (C_{Pa0} V_a + P_{a1}) \quad (2)$$

が得られる。ここに、添字0は基準年、添字1は次年度を示す。南湖は河川の模相が強いので北からの栄養塩移入量 $Q_{ab} C_{Na}$ と、直接流入する負荷 N_b の和から、沈降により除去される $\alpha_{Nb} N_b$ を引いたものを、流量 Q_c で除して求める。すなわち

$$C_{Nb} = \frac{Q_{ab} C_{Na} + N_b - \alpha_{Nb} N_b}{Q_c} \quad (3)$$

$$C_{Pb} = \frac{Q_{ab} C_{Pa} + P_b - \alpha_{Pb} P_b}{Q_c} \quad (4)$$

上式に実際の数値をあてはめ、過去および現在に実測された濃度 C の値に合うように α を仮定して、外挿により将来水質を求めると、図-3-30ようになる。

3. 生物学的水質

3.1 はじめに

ある湖沼において、その中に含まれる栄養塩が変化した場合、どのように生物相が変化することを知るのには極めて困難であるが、アプロ-4の仕方として以下の三つの方法があるかと考えられる。すなわち、

① 現地における実測 現地における水質と生物相を常に実測して、その関係を把握しておく。もし現地の水質が、その湖の将来水質と異なる場合は、近い条件の他の湖について実測し、比較する。この方法は最も確実な情報を与えるが、多くの現地実測を必要とし、かつ適当な条件を備えた他の類似の湖沼を発見することが困難な場合が多い。

② 模型 (Microcosm) 実験による方法 できるだけ現地の条件に合わせた湖沼の模型 (Microcosm) を作り、その中の水質を将来水質に合わせて、生物相の変化を追うものである。比較的实验はやりやすく、まとめたデータが得られるが、模型の相似率に関しては理論的解析がなされておらず、相似性の不確かさが大きな欠点となる。相似性を向上させるために、原型湖の一部を仕切って模型としたり、ビニール袋で湖底までの水柱を作り、その中の湖水の水質を変化させて生物相を調べる等の方法がとられる。

③ 数理模型による方法 生物と水質との関係を数式的にとらえ、そのダイナミクスを研究するもので、生物は数式では正確にとらえきれない特別な挙動をするから、相似性は②の場合よりまた悪い。しかし、環境条件の変化に生物がどのように応答するかを定量的に知るためには有力な手段となる。

以上3つの方法は、それぞれ得失を持つが、ここでは③により数理模型を作成し、②によりモデルの同定を試みる。

3.2 数理モデル 理化学的水質 (栄養塩濃度) と生物を結びつけるものに2つの方法がある。1つは Chlo- α などで示される植物プランクトン量や、生物生産性と栄養塩濃度を結びつけようとするものであり、1つは生産者である植物プランクトンと捕食者である動物プランクトンの消長を Volterra-Lotka の式を

用いて説明しようとするものである。前者は年変化のような長期的な生物学的水質の推移を見るにすぐれ、また後者は季節的あるいは週単位の生物相の移行をみるのにすぐれている。T. Ahr⁷⁾は、主としてスエーデンの湖について窒素の負荷 N ($g/m^2/year$) と、リンの負荷 P ($g/m^2/year$) と夏期における $Chlorophyll-a$ との間に

$$Chl-a = 3.51 N^{0.324} P^{0.338} \quad (5)$$

の関係があることを明らかにした。これに従えば、北湖および南湖の夏期の $Chlorophyll-a$ の濃度は図-4のようになることが予想される。

3.2.1 栄養塩と植物プランクトン 動物プランクトンと植物プランクトンの関係を示した研究として有名な

Volterra-Lotka⁽⁵⁾ の式がある。栄養塩があると植物プランクトンが成長するが、動物プランクトンが現れてこれを捕食するためにその成長は阻止され、植物プランクトンが減少すると、それら食料としている動物プランクトンも減少する。動物プランクトンが減少すれば植物プランクトンが増加し、ついで動物プランクトンも増加する。動物および植物プランクトンはこのような振動をくり返すとするものである。植物プランクトンの濃度を A (mg/l)、動物プランクトンの濃度を Z (mg/l) で示し、植物プランクトンの成長率を G_A [$1/day$]、死亡率を D_A [$1/day$]、動物プランクトンの成長率を G_Z [$1/day$]、死亡率を D_Z [$1/day$] とする。

植物プランクトン濃度 A の時間的变化は

$$\frac{dA}{dt} = (G_A - D_A) A \quad (6)$$

で示す。動物プランクトンによる捕食に原因する植物プランクトンの減少も死亡率 D_A に含めておく。植物プランクトンの増殖率 G_A に関する因子としては、水温 T ($^{\circ}C$)、太陽照度 I ($kcal/cm^2 \cdot day$)、栄養塩濃度 P (mg/l) などがある。温度に関しては成長率 G_A が水温に比例することから、Di Toro⁽⁶⁾ がとにより表-2、図-5のように従来の多くの文献から集約されて示されている。その比例定数は

$$K_1 = 0.10 \pm 0.025 \quad (1/day, ^{\circ}C) \quad (7)$$

である。あまり高温になると、植物プランクトンの生長率にはふり 比例関係は $25^{\circ}C$ までしかあてはまらないといわれるが、琵琶湖の水温はこれ以上にあまり上らないから、式(7)は適用できる。

光強度はあまり強いと生長を阻害することが知られているが⁷⁾、この現象は水のごく表面で紫外線の作用により起るものであり、生産層全体ではあまり問題にならない。生長率は入射光のエネルギー I に比例するものとみてよい。中西⁸⁾も琵琶湖湖津湾における1971年7月から1973年6月にわたる調査において、光合成の強光阻害は1972年2月、5月の大型植物プランクトンで見られただけであつたと報じている。入射光エネルギーの転換効率⁹⁾は、入射エネルギーとして琵琶湖東岸彦根地方の年間全日射量を用い、その46%が光合成有効日射量として、固定された炭素 $1g$ が $10Kcal$ に相当すると仮定して、総生産量に対する効率を求めると、中西は1971~1972年で0.62%、1972~1973年で0.25%であつたと報告している。

栄養塩と成長率との関係に関して、種々のことが云われているが Monod の式に従うとするのが一般的である。栄養塩濃度が適当であれば、光と温度の条件下で成長率は飽和値をとる。しかし、栄養塩濃度が低いと濃度

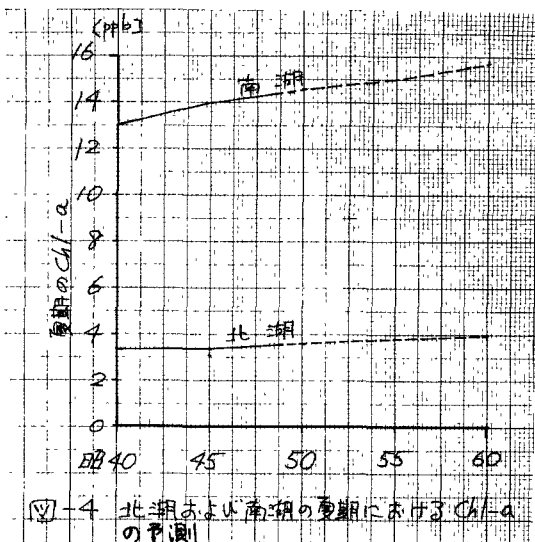


図-4 北湖および南湖の夏期における $Chl-a$ の予測

に比例して成長するのを見られる。ところで栄養塩のうち、琵琶湖では何が重要であるか考えよう。津田⁹⁾によれば植物プランクトンの平均組成は $G_{26}H_{180}O_{45}N_{10}P_1$ であり、窒素/リンがおおよそ10/1より大きければリン、小さければ窒素が限定栄養素となるという。琵琶湖ではこの比が10より大きいので、リンが限定栄養素とみてよい。リンの水中濃度を P [mg/l] としたとき成長率は $\frac{P}{K_m + P}$ に比例する。ここに K_m は Michaelis-Menton の定数であり、成長率が飽和成長率の半になるような P の値で、Di Toro は多くの文献の集約として 10 mg P/l を与えている。後等の手えに値を表す、図6に示す。

植物プランクトンの成長率に対する水温 T ($^{\circ}\text{C}$) 日射の入射エネルギー I ($\text{Kcal/cm}^2 \cdot \text{day}$) 栄養塩濃度 P (mg/l) の影響がその積で表わされるとすると

$$G_A = K T \left(\frac{T}{T_0} \right) \left(\frac{P}{0.01 + P} \right) \quad (8)$$

K は比例定数であり、 I_0 は標準の日照度である。この式で現れないような現象もやはり観測されている。中西は植物プランクトン量とクロロフィル量、日照度の関係と調べて、大型植物プランクトンの総生産量は植物プランクトン濃度に比例するが、小型プランクトンにあっては現存量よりむしろ光合成能の季節的变化に左右されることを報じている⁸⁾。

K の値も推定してみよう。1972年7月における水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ は平均 $P = 0.00116 \text{ mg/l}$ であり¹⁰⁾ 純生産量は

$$\frac{dP}{dt} = 36 \text{ g Carbon/m}^2 \cdot \text{month} = 1.2 \text{ g C/m}^2 \cdot \text{day}$$

である。水温は 27°C ¹¹⁾、日照は $I_0 = 676 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{day}$ であると推定される。植物プランクトン濃度 A は

$$A = 150 \text{ mg chl. a/m}^2 \times \frac{0.0453 \text{ g Carbon}}{\text{mg chl. a}} = 6.8 \frac{\text{g Carbon}}{\text{m}^2} \quad (9)$$

(1 mg Chlorophyll-a は 45.3 mg Carbon に相当する¹²⁾)

この値を式(8)に代入すると

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1.2 \text{ g C}}{\text{m}^2 \cdot \text{day}} = \frac{6.795 \text{ g C}}{\text{m}^2} \times K \times (27^{\circ}\text{C}) \times 0.1 \times \left(\frac{0.001167}{0.01 + 0.001167} \right)$$

これより

$$K = 0.0626 \text{ (l/day} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{mg)} \quad (10)$$

えらう。

植物プランクトンの死亡率に関係する要因としては

- ① 自家呼吸率
- ② 動物プランクトンによる捕食
- ③ 自然死

などがあるが、③の自然死したプランクトンは死骸として系外にあると思われるので、3.2の栄養塩濃度の計算に含まれる。

表-2 植物プランクトン飽和成長率と水温の関係

植物プランクトン	水温($^{\circ}\text{C}$)	飽和成長率(1/day)
Chlorella cilipoides	25	3.14
(green alga) (緑藻)	15	1.2
Nannochloris alomus	20	2.16
(海のバク毛虫)	10	1.54
Nitzschia closterium	27	1.75
(海の珪藻)	19	1.55
	15.5	1.19
	10	0.67
Natural association	4	0.63
	2.6	0.51
Chlorella pyrenoidosa	25	1.96
Scenedesmus quadricauda	25	2.02
Chlorella pyrenoidosa	25	2.15
Chlorella vulgaris	25	1.8
Scenedesmus obliquus	25	1.52
Chlamydomonas reinhardtii	25	2.64
Chlorella pyrenoidosa	10	0.2
(synchronized culture)	15	1.1
(高温)	20	2.4
	25	3.9

図-5 植物プランクトン飽和成長率と水温の関係

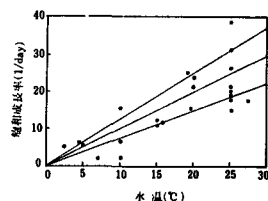
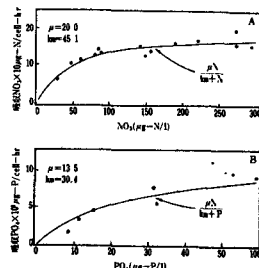


表-3 窒素または磷に対するミカエリス定数

植物プランクトン	栄養塩	Michaelis-Menton 定数 $\mu\text{g/g N}$ 又は P
Chloctoceros gracilis (海の珪藻)	PO_4	25
Scenedesmus gracile	total N	150
	total P	10
Natural association	PO_4	6*
Microcystis aeruginosa (5人藻)	PO_4	10*
Phaeodactylum tricornutum	PO_4	10
Oceanic species	NO_3	1.4-7.0
Oceanic species	NH_4	1.4-5.6
Neritic diatoms	NO_3	6.3-28
Neritic diatoms	NH_4	7.0-120
Neritic or littoral	NO_3	8.4-130
Flagellates	NH_4	7.0-77
Natural association	NO_3	2.8
Oligotrophic	NH_4	1.4-8.4
Natural association	NO_3	14
Eutrophic	NH_4	18

図-6 栄養塩濃度と植物プランクトン濃度



自家呼吸は植物プランクトンが光合成により作成した有機物を呼吸により酸化させ自家消費するもので、Di Toro は Riley⁽¹³⁾ の研究により、これが水温 $T(^{\circ}\text{C})$ に比例することを表4 図7のように示した。

$$\text{呼吸率} = K_2 T$$

$$K_2 = 0.005 \pm 0.001 \text{ [1/day]}$$

動物プランクトンはまわりの水をろ過して、その中の植物プランクトンを捕食している。単位重量の動物プランクトンが1日にろ過する水量 $G_g \text{ [l/mg Carbon} \cdot \text{day]}$ は Di Toro⁽⁶⁾ 算により表5のように与えられている。ここでは

$G_g = 0.13 \text{ l/mgC} \cdot \text{day}$ にとっておく。捕食による植物プランクトンの減少は $G_g Z A$ で示される。結局、植物プランクトンの死亡率は

$$D_A = 0.005 T + 1.3 Z \quad (13)$$

ところで中西の data⁽⁸⁾ によれば、塩津湾の1972年7月における

$D_A = 10 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{month} = 0.33 \text{ g Carbon/m}^2 \cdot \text{day}$ となっている。式(13)の2.0としてここで明らかにしたように

$$A = 6.795 \text{ gC/m}^2 \text{ であるから}$$

$$D_A = \frac{0.33}{6.795} = 0.0490 \text{ [1/day]} \quad (14)$$

一方、 $T = 27^{\circ}\text{C}$ (水深37mとする) $Z = 4.38 \text{ m}^2$
 $= 2.15 \text{ gC/m}^2 = 57.0 \text{ mgC/m}^3 = 0.057 \text{ mgC/l}$
 であるから式(13)より D_A を求める

$$D_A = 0.005 \left[\frac{1}{0.057 \text{ day}} \right] \times 27^{\circ}\text{C} + 0.13 \left[\frac{\text{l}}{\text{mgC} \cdot \text{day}} \right] \times 0.057 \left[\frac{\text{mgC}}{\text{l}} \right]$$

$$= 0.142 \text{ [1/day]} \quad (15)$$

となる。この値は、式(14)の値の1.3倍であるが Order 的には一致する。なお捕食率は正しいとして温度定数と修正すると

$$D_A = 0.0035 T + 1.3 Z \quad (16)$$

3.2.2 動物プランクトン 動物プランクトンの濃度 Z は

$$\frac{dZ}{dt} = (G_2 - D_2) Z \quad (17)$$

動物プランクトンは、植物プランクトンを捕食する食植性(herbivorous)のものも、動物プランクトンも食する食肉性(carnivorous)とあるが、後者は数が少ないので無視する。一般に生態系では、階級が植物プランクトン→食植性動物プランクトン→食肉性動物プランクトンと上るに従って、現存量が1/10になるので二段まで考えれば十分である。植物プランクトンが動物プランクトンにより捕食される割合はすでに3.2.1で $G_g Z A$ で与えられることを示した。しかし、捕食された植物プランクトンが全部動物プランクトンになるわけではなく、そこには効率が存在する。この効率は一定でなく、植物プランクトン濃度が高いと、捕食されたものの一部は不消化、あるいは半消化のまま放たれるという。そこでその効率は

表-4 植物プランクトンの自家呼吸率

植物プランクトン	水温($^{\circ}\text{C}$)	自家呼吸率(1/day)
Nitzschia closterium	6	0.035
	35	0.170
Nitzschia closterium	20	0.08
Coscinodiscus eccentricus	16	0.075
	16	0.11
Natural association	2	0.03
	18	0.12
	2.0	0.024 ± 0.012
	17.9	0.110 ± 0.007

図-7 植物プランクトンの自家呼吸率と水温

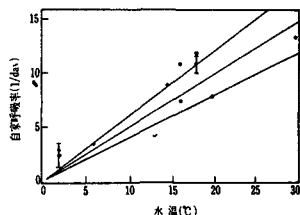
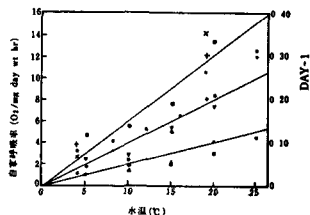


表-5 動物プランクトンの捕食率

動物プランクトン	捕食率	捕食率 l/mg dry wt-day	参考文献
Rotifer (ワムシ)			
Brachionus calyciflorus	0.05-0.12 ^a	0.6-1.5	3.24
Copepod (撓脚類)			
Calanus sp	67-208 ^b	0.67-2.0	3.6
Calanus finmarchicus	27 ^a	0.05	3.25
Rhincalanus nasutus	98-670 ^a	0.3-2.2	3.26
Contropages hamatus		0.67-1.6	3.27
Cladocera			
Daphnia sp.		1.06	3.28
Daphnia sp.		0.2-1.6	3.29
Daphnia magna	81 ^a	0.74	3.30
Daphnia magna	57-82 ^a	0.2-0.3	3.31
Natural Association (自然の集団)			
Georges Bank	80-110 ^b	0.8-1.10	3.6

a: ml/animal dry
b: ml/mg wet wt-day

図-8 動物プランクトンの自家呼吸率と水温



$$Q_{2A} = \frac{K_{mA}}{K_{mA} + A}$$

で示され G_2 は

$$G_2 = Q_{2A} \left(\frac{K_{mA}}{K_{mA} + A} \right) C_{gA} \quad (18)$$

の形で示される。

ここに Q_{2A} は $\frac{\text{生産された動物プランクトンの有機炭素}}{\text{消費された植物プランクトンの有機炭素}}$

で Di Toro⁶⁾ によると26の実験結果からみれば、この値は0.63であり、偏差は20%であるという。 K_{mA} は成長率 G_2 が最大生長率の1/2になるような生長率であり、0.25 ~ 0.55 mg dry wt (植物プランクトン)/ℓ であると考えられる。

動物プランクトンの死亡率は 自家呼吸率と高次の動物プランクトンによる捕食である。

自家呼吸率は

$$\text{自家呼吸率} = K_3 T \quad T: \text{水温 } ^\circ\text{C} \quad (19)$$

$$K_3 = 0.2 \pm 0.1 \text{ [1/day} \cdot ^\circ\text{C]}]$$

この関係を図8に示す。

高次の動物プランクトンによる捕食はあまり大きくなく、これを定数 K_4 で示しておく。

$$D_2 = K_3 T + K_4 \quad \text{ただし } K_4 = 0.1 \text{ (次の階級に捕食されるのは } 1/10 \text{)} \quad (20)$$

かくして

$$\frac{dz}{dt} = (G_2 - D_2) z = \left(Q_{2A} \cdot C_{gA} \cdot K_{mA} \cdot \frac{A}{K_{mA} + A} - K_3 T - K_4 \right) z \quad (21)$$

$$Q_{2A} = 0.63 \quad C_{gA} = 0.13 \frac{\text{g}}{\text{mgC} \cdot \text{day}} \quad K_{mA} = 0.25 \sim 0.55 \text{ (mg/ℓ)} \quad K_3 = 0.2 \text{ [1/day} \cdot ^\circ\text{C]}, K_4 = 0.1$$

とする。

3.3 実験的検討

3.2 で示した数理モデルを同定するために、模倣実験を行った。

3.3.1 模倣実験の相似性⁽¹⁴⁾ 湖沼中の生物の遷移を Microcosm と知ろうとする時、水理模型が流速、流向、拡散といった水理的特性を原型と合わせなければならないのに、その上に生物相の相似を達成する必要がある。水理模型が曲がりなりにも相似率に拘る理論を導くのに対し、Microcosm の相似性に対する理論はまだ無いといってよい。Microcosm は ① 原型の池沼と同じ水質を保持 ② 生産者である植物プランクトンの生産量を相似させる。③ 消費者を含めた生物相を相似させる。もちろん長期向——時には数週間以上——にわたり達成させる必要がある。このうち③の植物プランクトンの生産性については、つぎのような方法が考えられる。

W.J. Oswald⁽¹⁴⁾ は酸化池に於いて、湖面に入射する光のエネルギー E_s [Kcal/m²·day] と、そのうち光合成に利用されるエネルギー H [Kcal/m²·day] との間に

$$H = F \cdot E_s \quad (22)$$

なる比例関係があることを示した。ここに F は総括光合成効率 (Overall photosynthetic efficiency) とよばれるものである。植物プランクトンの生産性を一致させるには、原型と模倣型の H が等しくなければならぬ。原型に g 、模倣型に m の添字をつければ

$$F_g E_{sg} = F_m E_{sm} \quad (23)$$

従ってもし模倣型に入射する光を調節することにより、生産力に相似性を持たせようとするとき、

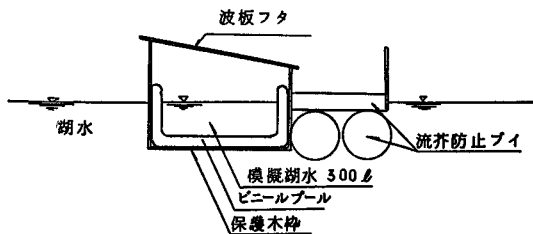
$$E_{sm} = E_{sq} (F_g / F_m) \quad \text{となければならぬ}$$

Ⅳ-9

マイクロコスモ施設の構造

E_{sq} は琵琶湖とは曇りの影響も入れて $E_{sq} = 2700$
 $[kcal/m^2 \cdot day]$ としとてある。転換効率 F は C_{smax} によれば

$$F = \frac{\sqrt{F_L^2 + F_D^2 + F_P^2 + F_{BOD}^2}}{4}$$



であり、 F_L , F_D , F_P , F_{BOD} を求める図表も示して113.

それらに従って計算すると、 $E_{sm} = 2760 kcal/m^2 \cdot day$ となり、入射光のエネルギーは原型、構型ともほとんど同じ値にせねばならぬことがわかる。

3.3.2 構型実験 Ⅳ-9に示すように、7個の内容積300Lのビニール製プールを用い、木製保護枠をつけ、浮機橋に結びつけることにより湖面に浮置した。プールの中には南湖の水と、下水処理水とを表-6に示す割合で混合して入れた。また底棲生物についても分析するために、 $10cm \times 10cm$ のアクリル樹脂製プレートも多数決めた。採水は2,3日ごとに行って、理化学試験、 $chl-a$ の定量、生物相の同定を行った。結果を表-7に示し、また $chl-a$ 、窒素、溶性リン、生物相の時間的変化を示したものが図-10である。外側の湖水に比べて コスムの中に入れた湖水は水質、生物相ともに相異を見せる。理化学的水質は 外側の湖水に較べて、コスムの中は外からの栄養塩の補給がないので、現態による浄化が顕著なことは当然であるが生物相においても栄養塩が少いためか コスム中の生物数は外側に比し減少する(ただし *Benthos* は計算に入れていない)。これに対し、下水処理水を加えたコスム実験(4)は、溶性リンの生物による急速な除去が見られ、

表-6 実験条件

マイクロコスモ番号	下水処理水 (L)	湖水 (L)	比率
1	0	300	0:1
2	0	300	0:1
3	19	281	1:15.2
4	35	265	1:7.6
5	63	237	1:3.8
6	63	237	1:3.8
7	300	0	1:0
8	外側の湖水		

表-7 実験結果

番号(処理水:湖水)		P (外側の湖水)								2 (0.1)								4 (1.76)											
経過日数	日	0	2	6	9	13	16	26	0	2	6	9	13	16	26	0	2	6	9	13	16	26	0	2	6	9	13	16	26
水温	°C	26.0	25.5	26.0	26.0	27.5	28.3	22.5	26.0	26.2	26.2	26.0	27.5	28.0	22.0	26.0	26.2	26.0	26.0	27.0	28.7	22.5							
D	ppm	6.6	6.9	7.2	7.2	8.2	7.1	7.5	6.6	8.0	7.7	6.7	6.9	7.0	7.8	6.3	7.9	5.9	4.9	6.7	6.6	7.2							
BOD	ppm	1.6	1.9		1.5		0.9	1.0	1.6	2.0		1.0		1.2	1.3	1.5	3.3	9.9		1.3	2.2								
NO ₂ -N	"	0.01	0.008	0.006	0.008	0.012	0.010	0.002	0.010	0.002	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
NO ₃ -N	"	0.11	0.13	0.08	0.22	0.06	0.05	0.11	0.11	0.08	0.00	0.17	0.03	0.04	0.01	0.77	0.71	0.39	0.22	0.03	0.05	0.02							
NH ₃ -N	"	0.15	0.06	0.05	0.01	0.00	0.09	0.09	0.15	0.05	0.01	0.06	0.02	0.02	0.01	0.27	0.08	0.05	0.01	0.01	0.01	0.02							
Org-N	"	0.26	0.20	0.21	0.24	0.17	0.25	0.49	0.26	0.23	0.15	0.22	0.26	0.17	0.68	0.93	0.90	0.69	0.49	0.51	0.43	0.65							
Total-N	"	0.53	0.40	0.35	0.48	0.24	0.40	0.67	0.53	0.36	0.16	0.45	0.31	0.23	0.66	1.97	0.21	1.05	0.68	0.55	0.99	0.69							
PO ₄	"	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Total-PO ₄	ppm	0.09	0.09	0.09	0.03	0.09	0.07	0.26	0.09	0.08	0.04	0.02	0.04	0.04	0.05	0.23	0.16	0.08	0.09	0.07	0.05	0.09							
Chl-a	ppb	3.2	5.2	4.1	7.1	7.0	3.0	8.7	3.2	1.9	2.0	2.0	1.0	2.2	2.2	2.9	6.5	1.6	2.6	1.8	1.6	1.1							
生	藍藻類	12枚	180	400	940	1160	2080	3700	1200	180	420	20			20		140	180	60		4700	8,220	20						
	珪藻類	"	5700	11,820	12,240	15,360	197,860	87,300	546,700	40,180	80,460	27,880	26,380	76,480	63,900	31,160	51,880	2,148,100	3,020	19,180	1,080	20,160	38,180						
	Malosira gran	"	5700	11,820	12,240	15,360	197,860	87,300	546,700	40,180	80,460	27,880	26,380	76,480	63,900	31,160	51,880	2,148,100	3,020	19,180	1,080	20,160	38,180						
	Synedra acus	"	500	480	460	600	580	140	400	280	3,400	21,200	7340	1800	2420	5360	580	1,400	460	1120	300	1,580	8,680						
	S rumpens	"	140	700	260	80	40			20	2420	700	1680	1080	4020	7920													
物	S spp	"	1960	2800	4500	3140	2700	3860	880	560	520	4860	16500	22,580	51180	17020	880	700	1300	1360	520	6440	10,460						
	緑藻類	"	3760	2960	4260	3400	5360	5500	11,500	5100	21560	15,940	3220	4660	4000	4700	22,740	7780	39,680	18,840	9160	17,480							
	Actinostrium	"	880	620	900	340	680	480	100	980	10,740	7060	2860	3860	1200		1320	17,820	5560	7700	340	2000							
	Codogonium	"	1580	20		100		420	8200	2360	8040	1820	140	680	2600		2040	1520	1200	31560	18,320	5420	1360						
	藻類	"	20	40	20	80	20	200				40	140	180		20	100	160	160	5540	8900	20							
験	鞭毛虫類	"	20	40	80	100		20		120	120	1160	2460	4000	1520	880	60	20	880	20,400	5780	24,240	2040						
	根足虫類	"			40	20						40					160		40	40	100	120	40						
	纖毛虫類	"	20	40	20	60				20	20	20		160	620	40			60	540	80	40							
	輪虫類	"	20	60	300	260		180	20	300	100	20				40	20	260	10,580	1420	600	1120	2680						
	Polychaeta	"								40	20						40		8260	260		60	40						
生物総数	"	61060	119,360	188,160	158,800	206,360	96,580	680,300	45,880	102,200	43,200	32,720	45,040	70,280	32,380	57,060	21,490	26,880	42,880	51,320	102,880	12,740							

富栄養化の限定栄養素がリンであることを思わせる。栄養塩濃度は減少を見せるが、BODの減少は見られない。生物相についてみると、まず珪藻が2〜5日大発生し、ついで緑藻、鞭藻が現われる。動物プランクトンは植物プランクトンより1週間〜2週間おくらせて増殖し、これに従って植物プランクトンの数が減少するのは、定性的に数値モデルの示す通りである。植物プランクトンの中の葉緑素を示すChl-aも、藻類生体数とほぼ同じ傾向を示す。

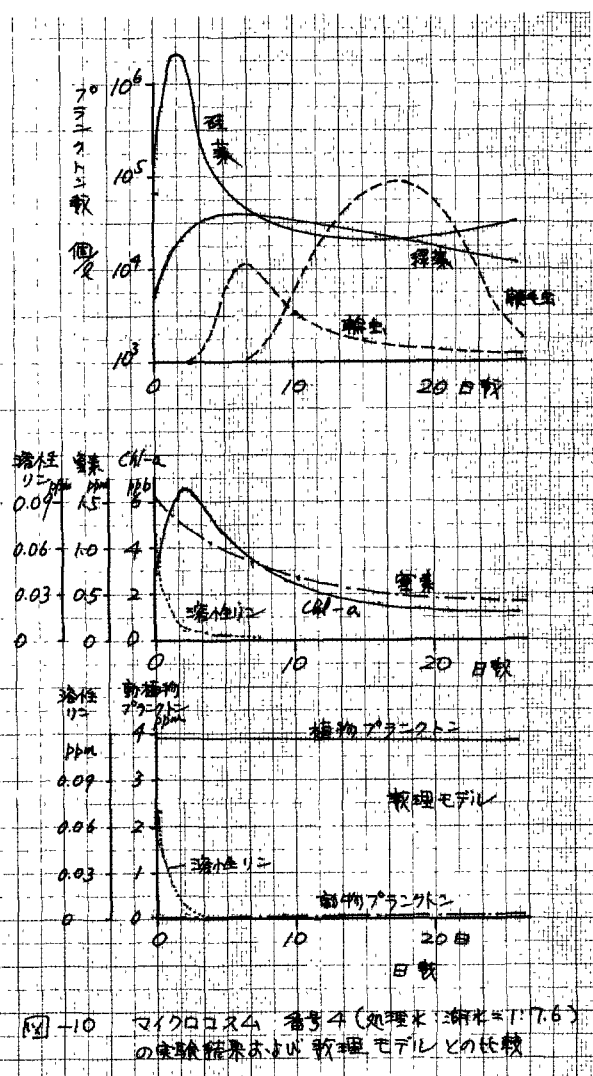
3.3.3. 数値モデルとの比較 実験番号4(処理水:湖水=1:7.6)の場合について、3.2で求めた数値モデルおよびその係数、表-6の栄養塩濃度を用いて、電算機により数値解を求めた結果を図-10の下部に示す。栄養塩濃度Pは実験とさきめてよく一致する。これに対し植物プランクトン、動物プランクトンの消長が実験に比し数値モデルは極めて遅い週期で変化する値を与える。このことは3.2で採用した諸係数に誤りがあることを示しており、なお検討を続けている。

4. まとめ

前回の人間活動、栄養塩発生機構のモデル化に引き続き、富栄養化の中心とも言うべき、湖水中における生物の変化についてモデル化を試みた。まず琵琶湖における栄養塩の将来水質を推定し、次いでVolterra-Lotkaの式を中心として式中の係数を検討し、また琵琶湖について実測された諸数値を用いて係数値を求めることにより数値モデルを得た。これに対し、300ℓのビニールプールで模型水槽を作り、その中に下水処理水を湛えし、湖水を混ぜて理化学的水質、生物相の変化を観測した。その結果、数値モデルと模型実験とは栄養塩濃度の変化は一致するが、植物プランクトン、動物プランクトンの消長の週期が異なると分かった。この点について現在検討を続けており、完成してから発表すべきであるが、諸氏の所教を賜うべく、本討論会に投稿した次第である。

本実験にあたり、大阪市水道局水質試験所、八木正一所長に水質試験について助力を受けた。謝意を表す。

計算は京都大学大型計算機センターのFACOM 230-60を使用した。



参考文献

- 1) 井上 頼輝 琵琶湖富栄養化のモデルについて(I) — 人間活動と栄養塩発生機構 — 土木学会水工環境問題シンポジウム講演集, 昭和49年8月 土木学会
- 2) びわ湖生物資源調査団中間報告書, 昭和42年2月, 建設省近畿地方建設局
- 3) 土木学会琵琶湖の将来水質予測 琵琶湖の将来水質に関する調査報告書 昭和44~47年版, 土木学会
- 4) Ahl, T., Effects of Man-induced and Natural Loading of Phosphores and Nitrogen on the Large Swedish Lakes
水工環境問題国際セミナー, 昭和49年9月 滋賀県
- 5) Lotka, A.J.; Elements of Mathematical Biology, Dover Pub. Inc., N.Y. (1956)
- 6) Di Toro, D.M., D.J.O'Conner and R.V. Thomann, "A Dynamic Model of the Phytoplankton Population in the Sacramento-San Joaquin Delta", Series 106, Advances in Chemistry Series, American Chemical Society (1971)
- 7) 文献 6) の 141 頁
- 8) 中西 正己 植物プランクトンによる基礎生産力, IBP 報告書 琵琶湖生物群集の生産力, 16~19頁
昭和49年3月
- 9) 津田松苗 文献 3) の昭和45年版
- 10) 箕田 冠一, 村長 義雄, 塩津 孝冲帯の水質, IBP 報告書 琵琶湖生物群集の生産力, 12~13頁
昭和49年3月
- 11) 森 圭一, 沖部生態系の窒素循環, IBP 報告書 琵琶湖生物群集の生産力 2P~31頁, 昭和49年3月
- 12) 滋賀県厚生部, 琵琶湖水質調査結果報告, 昭和47年3月 滋賀県
- 13) Riley, G. A., "Mathematical Model of Regional Variations in Plankton", Limnology and Oceanography Vol 10
Supplementary R 202-R 215 (1965)
- 14) 井上 頼輝 富栄養化の機構, 特定研究 環境汚染制御水処理システム研究会シンポジウム, 昭和49年12月 滋賀県庁
- 15) Oswald, W.J. カリフォルニア大学における講義ノート