

湖沼の環境水理

村岡浩爾

1. はじめに（「環境水理」の意味）

1.1 「湖沼学」からのアプローチ

湖沼学（limnology）を体系づけたのは A. Thienemann（1882～1960）である。それまでの湖沼に関する研究は、水中の生物や水の理化学的性質を調べたり、生物群集や地文学的要素を研究するところまでであったのが、湖沼のもつ無機的環境と生物群との相互作用によって生ずる現象を扱う科学を湖沼学としたのである¹⁾。湖沼とは、F.A. Forel（1841～1912）の分類によって、湖（lake）、沼（pond）、沼沢（swamp）、湿原（meadow）等に定義されており、これらを対象として湖沼学では次のような項目が研究される²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。

- (1) 湖の起源、形状、分布などに関すること
- (2) 光、熱などエネルギーに関すること
- (3) 湖流など水の運動に関すること
- (4) 湖水の溶存無機物など、水質に関すること
- (5) プランクトン、魚類など、生物に関すること
- (6) 物質の循環、生態系に関すること

1.2 「環境科学」からのアプローチ

環境とは“everything except me”であるという名言があり、環境問題は人間、生物、自然のそれぞれのシステムの相互作用を扱うものだ認識されている。環境科学は人間を主体とした環境問題の解決方法を探索する学問で、基本的には人間生態学とも言える⁶⁾。環境科学は公害問題を契機として、この20年の間に著しく発達してきた学問で、既往の自然科学、人文・社会科学の多くの知識を利用する学際的な科学である⁷⁾。

湖は人間にとって最も利用しやすい形態として存在する。飲料水源や食糧源として安定した生態系を本来構成していた⁸⁾。ところが生物や自然のシステムの中で、人間システムが突出したことによって、湖がそれまでの環境の質を変えてきた⁹⁾。それが湖に関する環境問題である。これには次のような事柄がある。

- (1) 栄養塩類の流入過多による富栄養化の速い進行
- (2) 有機物、化学物質の流入による飲料水源としての水質悪化の現象
- (3) 水利用形態の変化に伴う生態系の混乱もしくは不安定化と、漁業に及ぼす影響

(4) 開発に伴う景観、アメニティ、レクリエーション資源の悪化

(5) 自然保護としての湖沼環境の価値の評価

1.3 湖沼の環境水理

水理学は水に関する流体力学を基礎理学とし、特に境界条件を重要視して工学分野へひ応用し得るようまとめた学問分野である。これに基礎をおく現象説明は広い範囲にわたって発展してきている。密度流、土砂輸送などの現象、あるいは水文学への貢献などがそれを実証している。更に衛生工学、特に水質汚濁、大気汚染に関係する分野でも貢献している。このうち水質に関しては、単なる上水、下水の問題でなく、水界の水質に関連する論理の展開も多く、この分野では陸水学の諸現象の理解が必要である。同様にこれらの諸現象には水理学的論理が応用できるもの、あるいは必要とするものがないわけではない。

日野は、環境をささえる生態系に対して、水理学をその内面に導入することにより水理学の研究の範囲を広げる努力をした¹⁰⁾。そしてこの分野の学問を「生態水理学」(eco-hydraulics¹¹⁾、後にecohydrodynamics¹²⁾)と名づけ、試論として、水草の繁茂する流れ、河川の自浄作用、富栄養化現象、プランクトンの空間分布、風成対流、生物濃縮、物質循環、等を扱っている。また水界生態系では水理現象に係わる現象も多く、従って水理学的手法でそれらを論ずる分野も広がっている^{13) 14)}。しかしながら、全ての科学が初期においてそうであるように、現状では生態水理学が数多くのトピックスを含み、それらが完全に体系化され評価されているわけではない。すなわち、未だ生態学と水理学とが相互に理解し合っている段階で、この手法でないと生態学の一面に進展がないというような基礎理念が確立されていない。人間生態学の延長と考えられる環境科学に水理学が入り込んで、仮に環境水理学を定義したとしても同様である。環境科学は極めて多彩であり、水理学的アプローチはそのあらゆる分野で受け入れの可能性を秘めている。従って現段階では、本テキストの表題である「湖沼の環境水理」というように扱っておくのがよいと考え、その意味は、湖沼学と環境科学と水理学の接点となる部分をやや水理学的な色彩で表現すること、としておく。

2. 熱的現象

2.1 循環の型

湖沼が他の陸水と大きく異なる点は何かということ、水量のみならず、物質も水質として停滞することである。従って太陽からのエネルギー(熱、光)授受が定常的に行われ、湖沼の位置と季節によって物理的、生態的に大きく影響される。その最も指標的な現象項目は循環の型である。これには次のような型がある。

1) 非循環型：万年氷に覆われて、循環が極めて稀れなもの。

2) 寒冷単循環型：水温が4℃を越えることがない北極圏の湖に多い。夏期に水温が4℃近くまで上るため、一回だけ鉛直循環を起す。

3) 複循環型：夏に正列成層，秋に上層の水温低下による循環，冬に逆列成層，春に水温が4℃へと上昇することによる循環がある。温帯地方の湖に見られる最も一般的な循環型である。

4) 温緩単循環型：水温が4℃より下がることがない湖では，冬期に水温が下って循環を起す。

5) 多循環型：赤道付近の高地湖沼に多くみられ，一年を通じて水温変化により自由に循環し得る。

このように循環があるかないか，いつ起るかは湖の水質および生態系に大きな影響を及ぼす。我が国では多く湖では複循環型で，その熱的挙動は図1に示される。ここで注意すべきことは，循環が図に示される典型で起るには，風による直接的な混合が底部に達しない程度以上に湖が深いことが必要である。このとき湖は少くとも年一回大循環によって水質や水温のようになる時期を持つ。一般には深い湖がそれで，図2，図3に中禅寺湖の例を示す。

2.2 成層形成と破壊

水温成層の構造は水面を通じての熱の授受，水中での熱伝達によって決まる。水面で受ける熱量は次式で表わされる。

$$Q_0 = (1 - \alpha) I - R - H - LH \quad (1)$$

ここに， I ：日射量すなわち単位時間当りの放射照度， R ：有効放射量， H ：水温と大気温の差による顕熱， LH ：蒸発または凝結による潜熱である。こ

れらを具体的にどのように求めるかは水文気象学の分野に詳しい。また水理公式集にもまとめられている。

問題となるのは，このようにして受けた熱が水中をどう透過したり伝達したりして成層化して行くかである。湖沼では水表面に到達した日射量のうち，数十％は極く薄い水表面膜に吸収され，残りの部分が水中に透過して水に熱エネルギーを与える。水表面膜に吸収された熱エネルギーは，大気と熱交換するものを除いて水中に伝達されて行く。鉛直方向に流れのない水中での熱の変化を表わす基本式は，伝達始点を原点に，下方へ z 軸をとると，

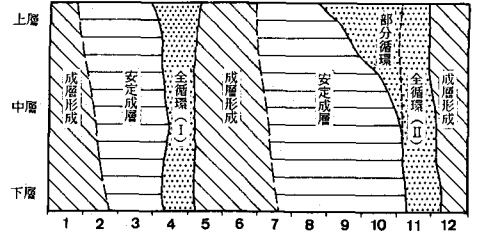


図1 複循環湖の熱的挙動

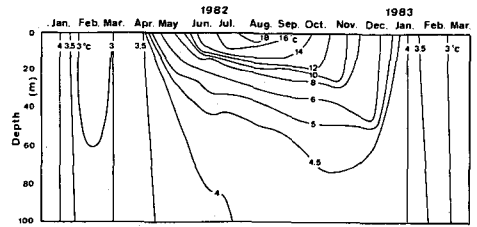


図2 中禅寺湖の等温線の季節変化

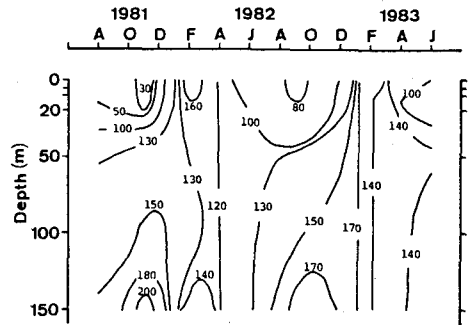


図3 中禅寺湖における硝酸態窒素 $\text{NO}_3\text{-N}$ の鉛直分布の季節変化 ($\mu\text{g/l}$)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{H_z}{\rho C} \quad (2)$$

で示される。熱伝導係数 $k = \kappa / \rho C$, κ : 水の熱伝導率, ρ : 水の密度, C : 水の比熱で与えられ, $\kappa = 6.07 \times 10^{-3}$ (J/cm.s.K, $T = 30^\circ\text{C}$) とすれば $k = 1.45 \times 10^{-3}$ cm²/s となる。右辺第1項が分子拡散レベルの熱移動を表わすのに対し, 第2項は水中に乱れがあることによる熱移動を意味するもので, ε_T は鉛直方向の過動熱拡散係数 (cm²/s) とよばれ, 乱れの程度によって値が決まるが, およその値は渦動粘性係数と同程度である。第3項は光透過によって水深 z の単位容積の水が単位時間に受ける熱量変化 H_z を温度変化に換算したものである。これを求めるには, 水面から水中に侵入する日射量を $(1 - \beta) Q_0$, ここに β は水表面膜への吸収率とすると, 水中への入射量 $\phi(z)$ は

$$\phi(z) = (1 - \beta) Q_0 e^{-az} \quad (3)$$

である。 a は熱吸収係数で, 後に示す $\alpha(\lambda)$ と同じである。これらの結果, H_z は次式で求められる。

$$H_z = - \frac{\partial \phi(z)}{\partial z} \quad (4)$$

受熱期はしばしば式(2)の右辺第2項を働かない場合として取扱い, 水面と水底での境界条件を与えて計算される¹⁵⁾。放熱による湖水の水温低下を静止状態の水で扱うと, この場合には熱伝導係数による熱伝達よりも水表面から起る熱対流による擾乱の方が時間的变化が早いとみられるので, $k \cdot \partial^2 T / \partial z^2$ の代りに $\partial (\varepsilon_T \cdot \partial T / \partial z) / \partial z$ を入れることが考えられる。しかし ε_T は乱流現象という渦現象ではなく, 対流渦による係数であるから, この値を適切に評価するのは極めて困難である。この対流渦によって, 放熱期には水面から下方へ様水温層(混合層)が進み, 図1に示した部分循環層が形成されて行く。

なお, 貯水池によく見られるように, 湖水でも水平流れがある場合には, 移流とともに水平方向の渦動熱拡散による熱移動を考慮しなければならない¹⁴⁾。

2.3 短時間の水温変化

成層形成に用いられる熱量の算定式に含まれる各種の係数(反射率, 実験定数など)は日平均量で評価される値である。従って一日の中での気温変化に伴う水温変化は数値予測が困難である。湖沼の環境においては, たとえば表層水の水温の微妙な変化がそこに住むプランクトンなどの生物変化に及ぼす影響が大きい場合がある。そこで側面, 底面を断熱状態にして, 水面からのみ熱の出入りのある水槽で測定した水温の実態を示す¹⁶⁾。

図4は3つの水槽(直径1.2 m, 深さ1.2 m およ

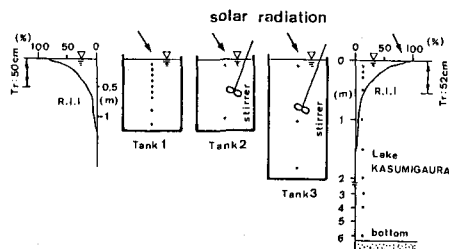


図4 断熱水槽による水温実験装置
図中の点は水温測定点, RII
は相対対照度を表わす

び2 m)で、霞ヶ浦とほぼ同じ水色と透明度($T_p \approx 0.5\text{ m}$)を持つように準備し、タンク1はそのまま、タンク2とタンク3は攪はん器で常時混合させ、水温を測定した。図5はその実験結果と霞ヶ浦(湖心)の測定値を示している。共に数日間天気が続いた安定した夏期の気候で24時間周期とみられる現象を示す期間を示している。これによって霞ヶ浦の水温はよく混合されているが、表層付近では日中水温が高まることがわかる。

2.4 特に浅い湖の水温と泥温

湖が浅いか深いかは、単なる熱や光の影響を受ける物理変化に特徴があるだけでなく、水生生物の生態や水質にも影響を及ぼすので大変重要である。湖沼学では水生植物の繁茂状態で湖か沼かをわける方法もあるが、湖沼環境をふまえて浅い湖の特徴を記すなら、次のようである。

- 1) 水平距離と水深の比が大きいため風の影響を受けやすく、一般に吹送流が卓越する。
- 2) 鉛直方向の混合に要する時間が短かいため、安定した長期の水温成層は構成され難い。
- 3) 流れ、波動によって底面に対して力学的に作用が及び、それによって水質現象にも効果が働く。

図5によって霞ヶ浦では鉛直方向によく混合されていることがわかったが、そのような状態で6年間にわたる水温の実測値を示したのが図6である¹⁷⁾。図中の曲線は実測値に合うsin曲線で、霞ヶ浦の水温の季節変化が一つのまとまりを見せている。更に水温が全リン現存量と比較的よい相関のあることなどから、浅い湖では水温の変化から、生物相の活性の変化による栄養塩濃度の傾向を大まかに把握できるのではないかと論じられている。

浅い湖の水温がこうに変われば底泥の温度も当然変化が大きい。底泥中には有機物、金属、栄養塩物質などのほかに底生生物が棲息するため、化学変化や生態系には温度が最も影響度の高い因子となる。図7は霞ヶ浦の泥温の季節変化を示したもので、深さ4 mではほぼ恒温となっている。

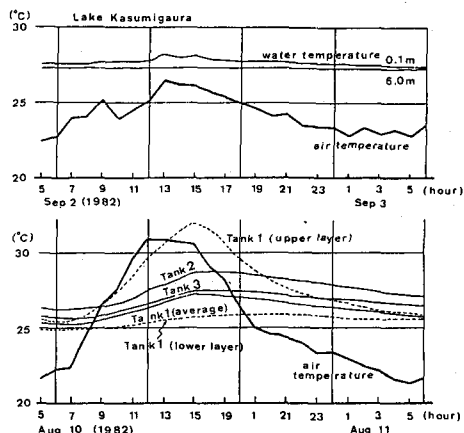


図5 霞ヶ浦(湖心、水深6.1 m)と実験水槽の水温変動

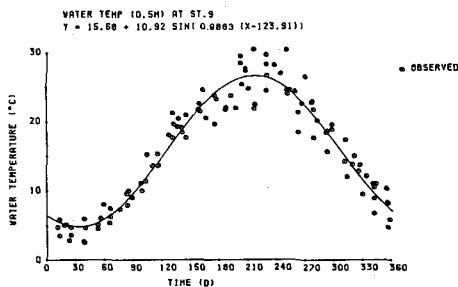
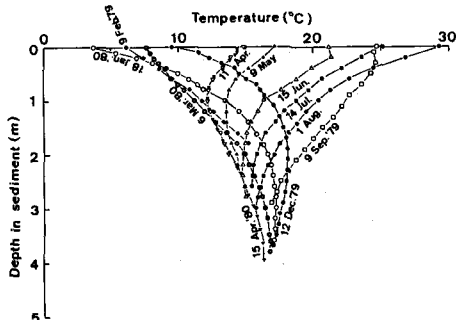


図6 霞ヶ浦の6年間の水温変化(水面下0.5 m)



3. 湖流と混合

3.1 吹送流と水平流動

湖には種々の流れがある。深い湖、浅い湖にわけて種々の流動を図示したものが図8であるが、これらは表1に記した多くの物理事象が関係している。しかし湖流と言え一般に水平流動をさし、水平流動の代表格は吹送流である。その文字が示すごとく、吹送流は風による剪断流がその主体である。このように、日本の湖の規模においては水平流動は風起因と見る場合が多く、海域のように天体潮のような

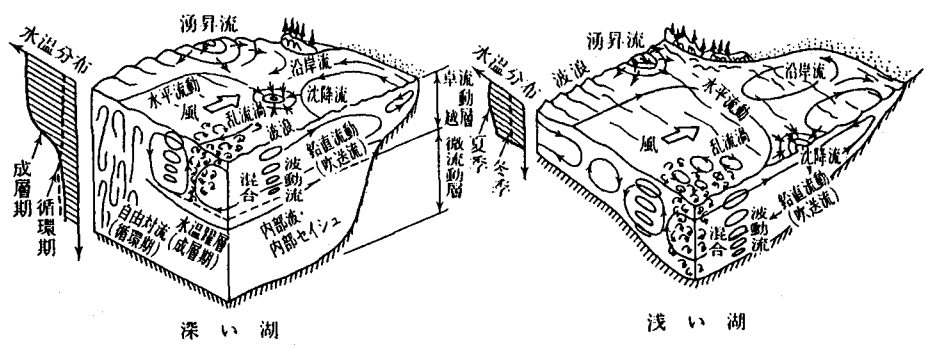


図8 湖流の種類（概念図）

表1 湖沼の物理事象とその応答

Input		Output	
〔物理事象〕	〔制御因子〕	〔機構〕	〔応答事象〕
風	風速・風向	(エネルギー伝達)	波浪、波動
	吹送時間	(せん断力)	吹送流、水平環流
	コリオリ力		沿岸流、湧昇流
河川流	湖盆形状	(応力)	乱流混合
	流量・温度		セイシュ
	湖盆形状		
熱	湖容量、土粒子	(運動量)	河口密度流
	コリオリ力		河水噴流
			プルーム(表層密度流)
緯度・経度	湖水深	(密度変化)	成層化
			表層部分熱対流
			鉛直大循環熱対流
気圧*	湖表面積	(圧力変化)	内部セイシュ
			結氷
重力*	湖表面積	(起潮力)	潮汐
	湖盆形状		

* 印は南湖沼以外は無視できる。例外として海域現象の影響を受ける湖もある。

ものはない。但し大きな湖の環流のような恒流的性格を持つ水平流れは、必ずしも風によるとは限らず、沿岸と沖合の熱の授受の違いによる熱起因の流れとする理論もある¹⁸⁾。

吹送流に関する数学モデルは水理公式集その他に詳しく、数値計算によって湖流を解く技術も進んでいる¹⁹⁾²⁰⁾。ここで注意しなければならないのは、こう言った数学モデルは確立された成果ではあるが、現象のより詳細を説明するには十分でない点も多い。土木学会水理委員会の内部組織による研究²¹⁾によると、湖面に作用する風応力に関する点だけでも、風応力が非一様とみるべき理由として、代表風速自体の非一様性、発達段階にある波浪の非一様性、湖流が閉鎖水域内で生じていることの非一様性があげられている。

3.2 鉛直流動

対流による鉛直循環は、湖内の物質の移動や混合に係わることで非常に重要である。湖沼に流入した物質および湖内の生産物による物質は、この鉛直循環によって深い湖でも年に1回は完全に混合し、新たな装いを示す。しかし、この鉛直循環の水理学的説明は必ずしも十分と言い難い。先にも述べた通り、成層破壊による部分循環に始まり、大循環に至る過程では、気候変化の非一様性、風による混合層の存在、水平流動の存在、内部セイシュによる流動や混合等が関係するからである。鉛直流動はこのほかに、沿岸付近の湧昇流、下降流などもある。またら線流ともいべきラングミュア循環は風によって起る。この結果もたらされる風方向に現われる水面の縞模様(streak)は、水中の懸濁物質、たとえば微細なゴミやプランクトンなどの集積を意味する。

3.3 内部セイシュ

振動現象には風浪、表面セイシュ、内部セイシュがある。風浪は深水波で湖水の表層付近で烈しい水の動きを示す。表面セイシュは長周期の振動流を生じ、もともと流れの規模が著しくない閉鎖性水域ではこの流れが卓越するときもある(琵琶湖、霞ヶ浦の例)。表面セイシュと内部セイシュは、風の吹き始め、風の停止など急激な外力の変化によって生ずる。内部セイシュは図9に示すパターンでゆっくりと振動する。成層状態にある湖で、風による吹送流と内部セイシュによる流れのパターンは、図10に示すように全く異なるので注意を要する。実際には両者が共存するので、どちらかが純粹に観測されるのは稀である。

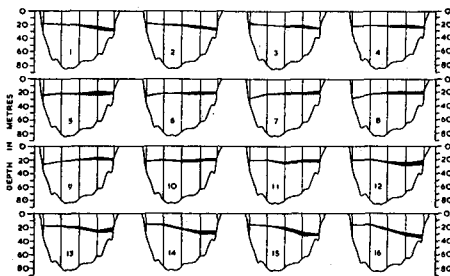


図9 内部セイシュによる界面の振動
(Mortimer より²⁰⁾)

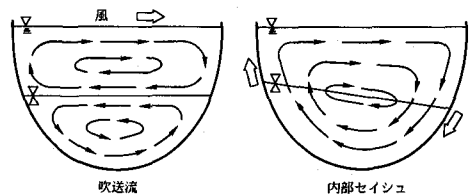


図10 2成層場の吹送流と内部セイシュによる流動の概念図(注:内部セイシュの位相が変わると流れは逆転する)

諏訪湖ではスス水という水変り現象がある。これは夏期数日間無風状態の晴天が続いたあと風が吹き出すと、風上側で低酸素状態の褐色の水が湧き上がり、養殖漁業にも被害をもたらす現象である。図 11 はその状態に近いときの観測値である²²⁾。この現象が内部セイシュによるものではないかと検討されている²³⁾。

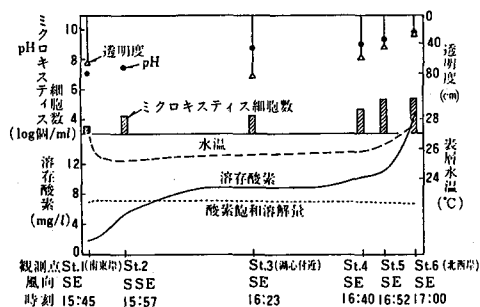


図 11 諏訪湖の表面水の水質 (1970 年 8 月 27 日, 風速 3.5 m/s, St.1 が風上側) (沖野より²²⁾)

4. 水質学的現象

4.1 湖沼の水質指標

先ず水質指標の分類のみを示す。

(1) 物理学的指標

水温, 透明度, 色度, 水中照度, 濁度, 電気伝導度, 各種のガス溶存量, 溶解物質の分子拡散係数など。一部は物理化学的な指標ともみられる。

(2) 化学的指標

自然に存在する元素の含有率は地球化学的な指標といえよう。このうち陸水に極く一般的に含まれる物質を標準化学成分といい, Ca, Mg, Na, K, CO_3 , SO_4 , Cl, SiO_2 , Fe などがある。化学的なものは, pH, アルカリ度, 酸度, 酸化還元電位, 蒸発残留物 (total solids), 浮遊物質 (SS: suspended solids), しゃく熱減量, COD, 過マンガン酸カリ消費量, BOD, TOD (total oxygen demand), TOC (total organic carbon), POC (particulate organic carbon), 塩素イオン, 油分, 硫化物, 鉄, 亜鉛, シリカなどである。一部は標準化学成分と重複する。

(3) 微量化学成分濃度指標

化学的指標ではあるが, 最近の水質問題に大きくかかわるので別に扱いたい。すなわち微量な存在量であっても, 有毒あるいは有害な元素あるいは化合物であることが多く, 重金属類, 非金属類, 合成有機化合物, 放射性物質などが対象となる。

(4) 生物学的指標

細菌の種類と量, 病原性ウィルス, 生物濃縮の特性, 毒性試験による指標, バイオアッセイによる指標, AGP (algal growth potential), 生物生産量, 生物の多様性指数, 指標生物による評価などがある。

(5) 富栄養化指標

富栄養化現象は総合的な現象であるので種々の要因に関連した指標となる。各種の栄養塩の濃度と栄養型, 一次生産者増殖制限にかかわる N/P 比, クロロフィル現存量, 富栄養化指数 (TSI: trophic state index), 物質滞留時間など。

(6) 水質行政における指標

関連法と合わせて示すと以下の通りである。公害基本対策法による公共用水域の環境基準，水質汚濁防止法による排水基準と総量規制，公示による湖沼の N, P 基準，下水道法による下水道へ排除する水質基準と下水道から水域への放流水の水質基準，水道源水基準（生活環境審議会の答申），水道法による飲料水基準などがある。

4.2 透明度と光

透明度は湖水の状態を総合的かつ感覚的に捉えるのに有意義な指標である。現在世界で最高の透明度をもつといわれる摩周湖の 40 数 m から，汚濁してわずか数 cm というような湖を，専門家は透明度から概略的に診断する。図 12 は中禅寺湖の透明度の変化で，夏期に透明度の低下が目立つことから，富栄養化の前兆であるウログレナの発生と結びつくことが調査の結果わかった。図 13 は霞ヶ浦の透明度で，湖の上流と湖心との差が縮まっているのではないかという予想が，他の水質調査の結果と合わせて当たっているらしいことがわかった。

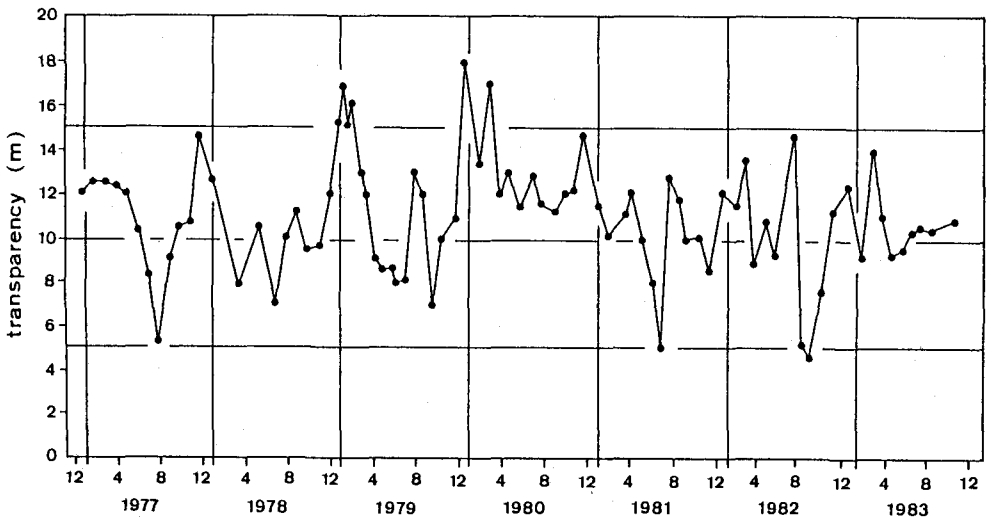


図 12 中禅寺湖の透明度

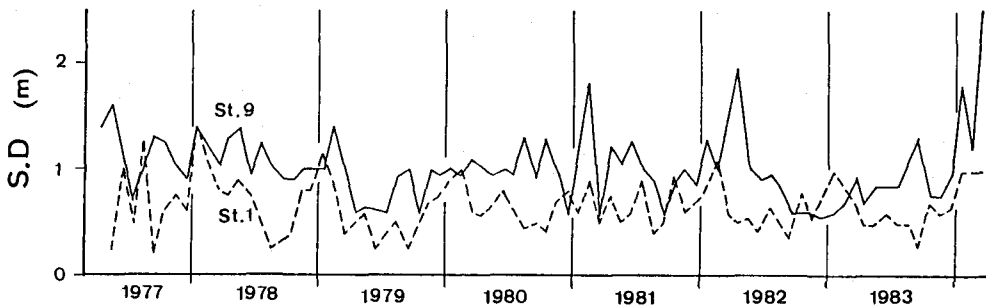


図 13 霞ヶ浦の透明度

透明度は水中に侵入した光が白色板に反射して目に映するものであるから、水面における光とその侵入現象を調べておく必要がある。日射とは太陽の放射エネルギーのうち可視光線の範囲の光を言う。これを波長 λ に分光したエネルギースペクトルが $E_A(\lambda)$ で、これを λ について積分すれば放射照度 E_A である。一方、照度は人間の標準的な眼に感ずる明るさであり、 E_A から照度 I_A への換算は、換算関数（規準視感度曲線） $V_A(\lambda)$ と次元定数 K_A を用いて

$$I_A = K_A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_A(\lambda) \cdot V_A(\lambda) d\lambda \tag{5}$$

で与えられる。ここに λ_1 は可視光線の下限波長（380～400 nm）， λ_2 は上限波長（760～800 nm）である。水中のプランクトンが光合成を行うような太陽エネルギーにかかわる考察をするときは、放射照度 E_A で論ずるべきであるが、現象の簡便な解釈のためなら照度 I_A で論じても支障はない。水中の深さ D の放射照度を E とすると、

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \exp \{ - a(\lambda) \cdot D \} \tag{6}$$

なる Lambert-Beer 式が成り立つ。ここに $E_0(\lambda)$ は水面に侵入した放射照度， $a(\lambda)$ は消散係数である。水中透過照度で表わせば、水面下の照度を I_0 として

$$I = I_0 \exp (- \alpha D) \tag{7}$$

となり、 α を吸光係数という。 α の値は水の「きれいさ」によることとなり、図 14 にその例を示す²⁴⁾。

透明度を Z_t （単位：m）とすると、 Z_t と照度とは無関係でなく、相対照度 I/I_0 が12～18%（平均14.5%）の深さに相当することがわかっている。一方、水中の植物プランクトンが生長するために補償される最低の照度を持つ水深を補償深度 Z_e と言い、 I/I_0 が1%となる水深とみられている。従って Z_t と Z_e の間には

$$Z_e = k_1 \cdot Z_t \tag{8}$$

の関係があり、 $k_1 = 2.5$ がよく用いられる。補償深度 Z_e までがプランクトンの生産がある層（生産層という）で、これは透明度の2.5倍の深さとみることができる。

吸光係数 α は、もし湖が特殊な水質（例えば腐植酸性湖など）でなければ、透明度 Z_t とも関係づけられるから、次のような関係式を考えられる。

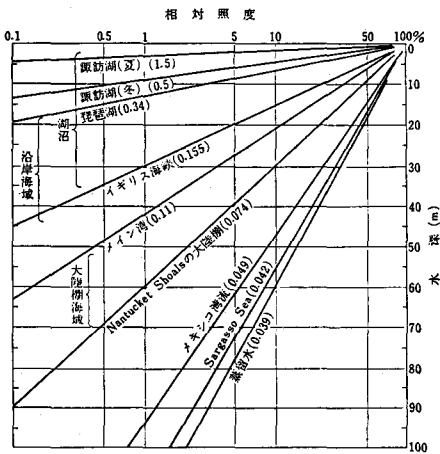


図 14 相対照度の例（カッコ内数字は吸光係数）（宝月より²⁴⁾）

$$\alpha = \frac{k_2}{Z_t} = \frac{k_1 \cdot k_2}{Z_e} \quad (9)$$

$$\alpha = k_3 [\text{SS}] + k_4 \quad (10)$$

ここに〔SS〕は浮遊懸濁物の濃度（mg/l）で、係数は $k_2 = 1.66 \sim 1.93$, $k_3 = 0.57$, $k_4 = 0.54$ が与えられている。このように調和型の湖について、特に藻類が繁殖する夏期に、多くの水質調査資料を整理すると、透明度と富栄養化関連水質との間に高い相関があることがわかった²⁵⁾。

$$\ln Z_t = 1.68 - 0.68 \cdot \ln [\text{SS}] \quad (11)$$

$$\ln Z_t = 1.817 - 0.49 \cdot \ln [\text{Chl}] \quad (12)$$

$$\ln Z_t = -0.100 - 0.701 \cdot \ln [\text{T-N}] \quad (13)$$

$$\ln Z_t = 6.80 + 0.752 \cdot \ln [\text{T-P}] \quad (14)$$

ここに〔Chl〕：クロロフィル *a* の濃度（mg/m³），〔T-N〕：全窒素の濃度（mg/l），〔T-P〕：全リンの濃度（mg/l）である。これより、湖沼の富栄養化状態を概略把握するには、分析を必要とする Chl-*a*、T-Nなどを測定せずに、透明度を調べればよいことがわかる。

4.3 水の色

湖沼の水色は、たとえ水質レベルが同じでも、微量に含まれる元素、天候や背景事物によって視覚的に異なる。フォーレルは藍色から黄色までの水の色を化学薬品によって標準色を作り、それとの比較で湖沼の水色を与えた。ウーレは黄色に続いて褐色までの標準色を作り、水中のプランクトンやその遺骸、あるいは粘土質が含まれて汚れた水の色までも規定できるようにした。表2はそれらの水色表を示している。最近では湖水の色を単なる肉眼による比色ということだけで考察することは少ないが、水色の機械的な分析による水質指標化について今後研究されてもよいと思われる。

表2 湖水の水色表

〔フォーレルの水色〕

番 号	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
色の特徴	藍 色 系				緑 色 系				黄 色 系		

〔ウーレの水色〕

番 号	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI
色の特徴	黄 色 系		黄 褐 色 系					褐 色 系			

なお、湖水以外の天然水や、上水、下水処理水の検水として用いられる色度も一つの水質指標である。これは塩化白金酸カリウム（白金にして1mg）を1ℓの水に溶した水の色を1度とし、フミン質、シルト、粘土などによる黄色系、褐色系の色の度合を表わす。我国の飲料水の基準では色度5度以下である。

4.4 濁質の挙動

色度と同じく検水や水質基準に用いられる指標として濁度がある。白陶土（カオリン）1mgを1ℓの水に混ぜたときの濁りを1度と決める。飲料水基準では2度以下である。

湖の濁りの問題は、貯水池で最近問題となる濁りの長期化と若干異なっている。貯水池では流域の開発工事等に伴う活性の高い粘土鉱物が濁質の対象となり易いが、湖ではそういった濁質は少ない。しかし洪水時の流入水では濁りは高いし、特に低平地の湖沼では種々の栄養塩も含んで流入するため、濁質の挙動は複雑となる。また湖沼では湖底に堆積した底泥の存在が、その湖沼の水質に大きくかかわってくる。浅い湖での底質の水質へのかかわり方は、以下のようにまとめられる。

(1) 生物学的関連性

底生生物の棲家であり、有機物を分解する微生物から昆虫の幼虫、底生魚類に至るまでの生物の存在は無視できない。

(2) 化学的関連性

底質には豊富な化学物質が含まれていて、溶存気体量や温度によって水質に関係する化学現象が生ずる。嫌気状態で底泥からリンが溶出してくるのもその一つである。またプランクトン等の遺骸などの堆積物が再浮上するような場合、水質関連物質の溶解などにも関係する。

(3) 物理学的関連性

沈降物質の挙動、堆積速度、堆積の状態、洗掘あるいは巻き上げ等の力学的考察が必要である。水質に関係して、一年間に沈降したものの何％が何回巻き上げられるかと言った浮上成分の分離まで考えねばならない。

(4) 地形学的関連性

長期的にみれば湖は堆積が進んで行く一方であり、この観点からの堆積状態の研究も必要である。

浅い湖は通常富栄養化状態であることが多く、底泥の含有栄養物質も豊富である。その底泥が風による吹送流で浮上し、栄養塩が水中に回帰する現象は重視する必要があるが、直接、浮上状態を実測した例は少ない。図15は霞ヶ浦の測定例であり、水深2.5mの地点で、底面から0.3mの位置でSSを測っている²⁶⁾。

湖内物質循環の解明には懸濁物質の沈降量の観測が重要で、通常 sediment trap によって沈殿物を採取する。しかしその沈降物が自生性のものか、底泥の巻き上げによるものかを分離する必要がある。霞ヶ浦の例では、自生性の沈殿物にはクロロフィルaを、底泥起因のものはチタンをトレーサーとして分離が試みられた²⁷⁾。

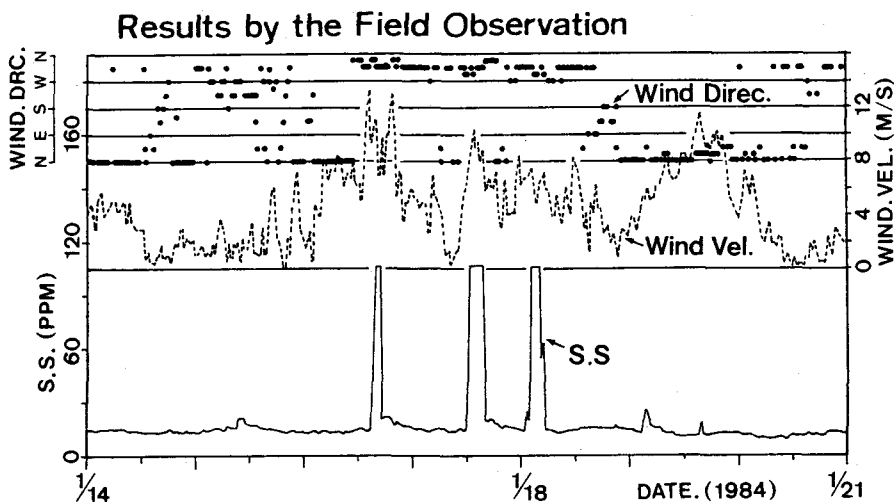


図 15 霞ヶ浦で観測した水中の濁りと風速・風向

5. 生物学的現象

5.1 光合成反応と生物増殖

生物学的方法というのは生物をその棲息する環境の中でとらえ、生理的構造と機能を観察することに始まるから、水理学をやる人々にとっては記述的な論述が多い。しかし湖沼が周囲の陸地と違って閉鎖的な環境を持っていることから、Forbes (1887) がこれを microcosm (小宇宙) と呼んだように、湖沼の中の生物学的現象のいくつかを水理学と関連

づけたり観点を合わせたりできる数式記述があってもよい位、湖沼は多彩である。これらはしばしば数理モデルと呼ばれていて、湖沼の ecosystem を考える上では必要な論述である。

図 16 は湖沼で生じている物質の流れを示したもので、無機物的環境を囲んで三者がリンクを組んでいる。湖水で最初に生物を生産するのが生産者で、簡潔に言えば植物プランクトンである。その量を P とすると、

$$\frac{dP}{dt} = \mu_g \cdot P \quad (15)$$

という増殖の仕方をする。ここに μ_g は増殖係数で、増殖に必要なエネルギー (光) E_1 、栄養塩類 E_2 、そして増殖に関係する環境 E_3 に関係する。 E_2 と E_3 は十分な条件下と考え、 E_1 だけを考えた増殖式を光合成反応モデルと言う。このとき増殖係数は、 I を照度として、

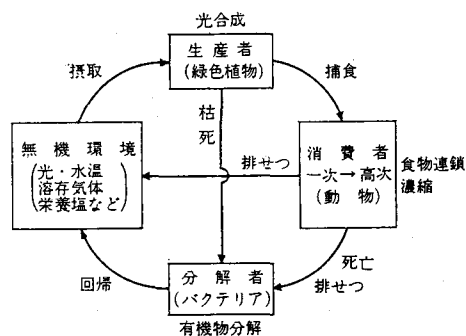


図 16 湖内の物質循環図

$$\mu_g = \mu_{g \max} \cdot f(I),$$

たとえば,

$$f(I) = \frac{I}{I_k + I}$$

$$f(I) = \frac{I}{I_k} \exp \left(1 - \frac{I}{I_k} \right)$$

(16)

などが提案されており、これらの関係を図示したのが図17である。光が強いと光阻害によって増殖率は悪くなることがわかる。次に E_1 と E_2 を十分な条件とし、 E_3 として水温 T を考えると、 μ_g と T の間にも何か関係式が実験などによって得られるであろう。このように増殖係数は対象とする生物種が増殖するための必要な因子によって変ってくるが、多くの因子群についてまとめてみると、およそ次のような増殖モデルにまとめることができる。

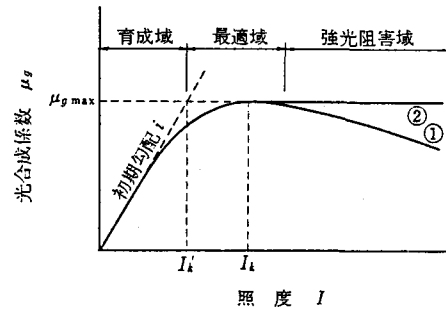


図17 光合成係数と照度との関係

$$\mu_g = \mu_0 \quad (\text{一定}) \quad (17)$$

$$\mu_g = \mu_0 \frac{X}{X_k}, \quad (X < X_k) \quad (18)$$

$$\mu_g = \frac{X}{X_k + X} \quad (\text{Monod 式}) \quad (19)$$

$$\mu_g = \mu_0 \frac{(X - X_0)}{X_k + (X - X_0)} \quad (\text{Paasche 式}) \quad (20)$$

$$\mu_g = \mu_0 \prod_i \frac{X_i}{X_{k_i} + X_i} \quad (\text{Di Toro 式}) \quad (21)$$

$$\mu_g = \mu_0 \frac{X/P}{X_k + X/P} \quad (\text{Contois・日野式}) \quad (22)$$

$$\mu_g = \mu_0 \left(1 - \frac{P}{P_*} \right), \quad P_* : \text{定数} \quad (23)$$

ここに X は増殖にかかわる因子の中で最も注目すべき因子であり、式(21)においてはそれが複数ある場合である。式(22)と式(23)は増殖する生物の生物量 P 自身に増殖係数がかかわるというモデルである。特に式(23)は1830年代後半に Verhulst によって最初に研究され、その後1920年代に Pearl

と Reed によって再発見されたというロジスティック理論の典型例である。すなわち、生態系において一つの生物種が条件がよい時には無限に増殖し得るだろうか、という命題に対し、自己の個体群密度によって自己の生長の速度を制御するという働きのある現象をモデル化したものである²⁸⁾。式(23)を式(15)に代入して解くと、 $t = 0$ で $M = M_0$ のもとで

$$P = \frac{P_*}{1 + \left(\frac{P_*}{P_0} - 1 \right) e^{\mu_0 t}} \quad (24)$$

が求まり、 P は時間とともに頭打ち状態となる。

5.2 増残にかかわる種々のモデル

生物は増殖のみするわけでもなく、死滅もすれば被食もされる。ある閉じた系(一つの湖沼)でのある種の生物の増加量(すなわち純生産量)を P_n とすると、

$$P_n = P_g - R - D - G \quad (25)$$

の関係にある。ここに P_g : 総生産量, R : 呼吸量, D : 枯死量, G : 高次の生物による被食量である。そしてそれぞれの量に対して増殖増度 μ_g に相当する μ_R , μ_D , μ_G が定義できる。これらをそれぞれ詳しく論じて行くと以下のような種々のモデルが考えられる^{29) 30)}。

(1) 捕食-被食モデル

サメとサメに食べられる小魚、キツネと穴ウサギなどの生態系で考えられたが、植物プランクトンとそれを食べる動物プランクトンとの間のモデルにも応用できる。この結果、一つのモデル解として両者が周期的に増えたり減ったりして、平衡した生態系が得られる。このモデルにロジスティック概念を取り入れてより複雑に扱ったモデルに Lotka-Volterra のモデルがある。(共に独立して1920年代に誘導された。

(2) 物質濃度モデル

食物連鎖を通じて、対象とする物質(栄養塩類や有害物質)がどのような量で存在するかを見るモデルである。簡単には P , Q という捕食-被食の関係にある生物と、それが存在する環境 W (湖水) を合わせて3つのコンパートメントとし、吸収速度あるいは捕食・被食速度を与えてそれぞれのコンパートメントの物質濃度を追跡して行くモデルである。多元コンパートメントに拡張することもできる。

(3) 生物濃縮モデル

水域環境 W から生物体 P へ物質が一定の吸収速度で吸収されて平衡状態になったとき、両者の濃度の比を以って濃縮係数という。生物によって係数値は異なる。

5.3 物質循環モデル

湖内の生態循環、物質の流入出等を通じて、考えようとする物質がどう循環しているかというモデルである。これを解析するには生態循環、すなわち食物連鎖等を通じて生ずる物質の移動機構、および物

質の化学的挙動について、かなりの知識が得られていなければならない。またこのモデルを通じて得られることは、湖沼環境の詳細がわかるだけでなく、その環境を改善したり、より深く理解するための問題提起にも役に立つ。このような背景で検討されているモデルは次のようなものである。

(1) 炭素の循環モデル

炭素は有機物の重要元素の一つで、光合成に始まる生物体へのとりこみと、食物連鎖、分解による移動がある。湖沼の生物環境を理解するのに重要な物質でもあり、多くの湖沼で炭素の現存量が測定され、生産速度など活性度の評価がなされている。

(2) 窒素の循環モデル

炭素よりは循環に関して安定度の高い元素である。リンとともに自然水界ではその存在量は多くないため、一次生産の制限因子になりやすく、富栄養化現象の解明にも重要な物質である。窒素の循環機構は、窒素形態と存在量調査も広く行われていて、その様子は図 18 に見られるように比較的明確である²⁴⁾。

(3) リンの循環モデル

リンも藻類発生の制限因子になりやすい物質である。岩石圏では通常そう多くない上に、吸着し易いため、自然水としては湖沼への流入は少ないが、人為的な原因で湖沼へ流入する。リンはガス化はしないが底泥に堆積して、悪い条件では溶解リンとして湖水に回帰するため、その移動を調べるのは重要である。

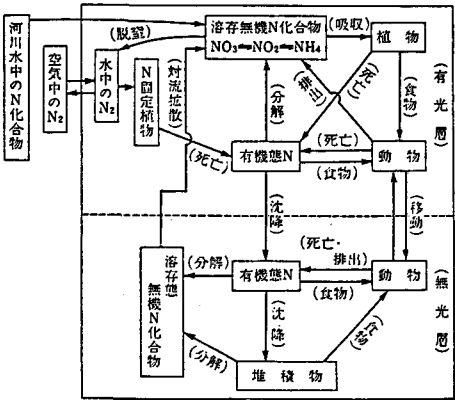


図 18 湖内の窒素循環図 (宝月より²⁴⁾)

5.4 湖沼生態システムモデル

このモデルは湖沼に関するあらゆる知識と情報を駆使して、湖沼の社会的環境問題を解決する材料にしようとするものである。最近の湖沼問題ではやはり水質汚濁がその最たるもので、特に社会活動のインパクトを受けて湖内の一次生産量が増える富栄養化問題が多くの湖で問題となっている。このモデルの構造は図 19 に示すようになっている。即ち環境水としての湖沼に外部から作用するものは、外力因子 (太陽エネルギー、風、蒸発など) と系外因子 (河川からの流入物、漁業、用水など) である。これを受けて湖内では系内因子として、植物プランクトン、動物プランクトン、魚類というような生物種、および環境水自身の物質保有量などで構成したコンパートメント群の動きを追求して行くものである。各コンパートメントに作用する外力因子とのかかわり合

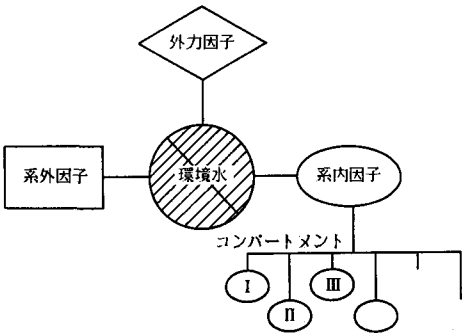


図 19 湖沼生態システムモデルの骨組

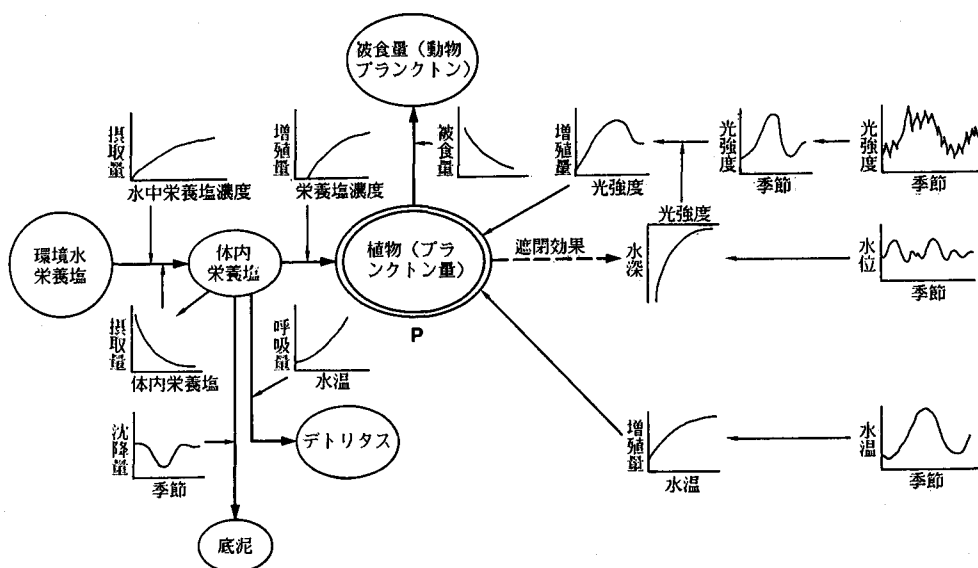


図 20 各コンパートメント変数の外力因子とのかかわり合い

いを図に示したのが図 20 で、これを数式化するのは式 (15) の反応関数を複雑にしたものを用いることに過ぎない。

このような湖沼生態システムモデルから得られる具体的な成果物は、モデルの検定、モデル定数の決定を経て、モデル実験、現象の再現と予測などで、これを通じて湖沼環境保全のためにとるべき施策を講ずる資料とする。霞ヶ浦の富栄養化現象についてのモデルでは、いくつかの具体的な施策の提言をすることができた³¹⁾。

6. おわりに (湖沼環境の今後)

湖沼が湖沼学者だけでなく、広い分野の専門家の興味をひく時代になった。それは湖沼が水資源を含め、総合的な価値が高まってきたためと思われる。この多くの価値を包含する湖沼を、私は「環境資源」の一つと見たい。森林や地下水もその一つであろう。

環境資源としての湖沼は、現在、水質汚濁の面で大きな打撃を受けている。水質の環境基準の達成率は(その基準が適正かどうかは別として)、海域が 80 %、河川が 65 %であるのに対し湖沼(貯水池を含む)は 40 %に過ぎない。これから私たちの湖の汚し方(?)は単純なものではなかったろうし、湖自身の反応も複雑なものでなければこうも汚濁状態が改善しないはずはない。すなわち湖沼は単なる水資源(主として用水を対象とした)であるという単目的的な概念では通用しなくなったのではあるまいか。漁業の場でありレクリエーションの場であり、かつ自然の生物が育っている場でもある。私達もこうした複合的な目的で湖に接している筈であるから、湖にかかわる科学者や施政者も互いの分野を理解し合い、コンセンサスを得て行かなければこの環境資源の価値の回復や保存はないであろう。そのた

めに生物学, 化学などのほかに, 湖沼に対して水理学的なアプローチや取組みも必要である。

参 考 文 献

- 1) 吉村信吉: 湖沼学(増補版), 生産技術センター, 1976.
- 2) Hutchinson, G.E.: A Treatise on Limnology, Willey-Interscience,
Vol. I, Part 1 — Geography and Physics of Lakes (1975),
Vol. I, Part 2 — Chemistry of Lakes (1975),
Vol. II, — Introduction to Lake Biology and Limnoplankton (1966),
Vol. III, — Limnological Botany (1975).
- 3) Wetzel, R.G.: Limnology, W.B. Saunders Co., 1975.
- 4) Cole, G.A.: Textbook of Limnology (3rd ed.), The C.V. Mosby Co., 1983.
- 5) A. レルマン編(奥田節夫・半田暢彦監訳): 湖沼の科学—化学, 地質学, 物理学, 古今書院,
1984.
- 6) 沼田 真編著: 環境科学の方法と体系, 環境情報科学情報センター, 1975.
- 7) 近藤次郎: 環境科学読本, 東洋経済新報社, 1984.
- 8) 沼田 真監訳: ワット—環境科学 — 理論と実際, 東海大学出版会, 1975.
- 9) 日本化学会訳編: 環境科学と技術の進歩 1, 丸善, 1973.
- 10) 日野幹雄: 生態学と水理学, 水工学シリーズ, 78-A-4, 土木学会水理委員会, 1978.
- 11) Hino, M.: Eco-Hydraulics— An Attempt, The 17th Congress of IAHR, Barden-Barden,
1977.
- 12) Hino, M.: Eco-hydrodynamics, Advances in Hydrosience, Vol. 12, Academic Press
Inc., pp.143 ~ 193, 1981.
- 13) 大久保明: 生態学と拡散, 筑地書館, 1975.
- 14) 合田 健: 水質環境科学, 丸善, 1985.
- 15) Carslaw, H.S. and Goldman, C.S.: Hypolimnetic Heating in Castle Lake, Limnol. Oceanogr., Vol. 10, No. 2, pp. 50 ~ 92, 1965.
- 16) Muraoka, K. and Goda, T.: Budgets of Water and Materials in a shallow Lake, Proc.
of The 3rd Japan-Brazil Symp. on Sci. and Tech., Tokyo, Japan, pp. 257 ~ 274, Oct.,
1982.
- 17) 大槻 晃・岩熊敏夫・河合崇欣・相崎守弘: 霞ヶ浦における富栄養化現象の傾向, 国立公害研究
所研究報告, 第51号, pp. 1 ~ 10, 1984.
- 18) 大久保賢治・村本嘉雄: 湖の加熱成層過程と環境, 第27回水理講演会論文集, pp. 185 ~ 190,
1983.

- 19) 村岡浩爾・福島武彦：霞ヶ浦（西浦）の湖流，国立公害研究所研究報告，第19号，1981.
- 20) Graf W. H. and Mortimer (ed.) : Hydrodynamics of Lakes, Development in Water Science 11, Elsevier, 1979.
- 21) 石川忠晴・鶴谷広一・富所五郎・福島武彦：湖面に作用する風応力の検討（中間報告），第30回水理講演会論文集，pp.763～768，1986.
- 22) 山岸 宏・沖野外輝夫：湖沼の汚染，筑地書館，1974.
- 23) 平田健正・村岡浩爾：諏訪湖のスス水に関する密度流の一考察，日本陸水学会第50回大会講演要旨集，滋賀，1985.
- 24) 宝月欣二：水界生態系，生態学講座3，共立出版，1978.
- 25) 相崎守弘他：修正カールソン富栄養化状態指標の日本湖沼への適用と他の水質項目との関係，国立公害研究所研究報告，第23号，pp.13～31，1981.
- 26) 大坪国順・村岡浩爾：霞ヶ浦における底泥の再浮上に関する現地観測およびシミュレーション，第29回水理講演会論文集，pp.13～31，1981.
- 27) 福島武彦・相崎守弘・村岡浩爾：霞ヶ浦高浜入における沈殿量とその特性について，国立公害研究所研究報告，第51号，pp.89～101，1984.
- 28) R. パーマン（稲垣宣生訳）：個体群成長の数学モデル，現代数学社，1981.
- 29) 島津康男：システム生態学，生態学講座，36，共立出版，1973.
- 30) 山県 登：生物濃縮 — 環境科学特論，産業図書，1978.
- 31) 松岡 譲：霞ヶ浦の富栄養化モデル，国立公害研究所研究報告，第54号，pp.53～242，1984.