

湖沼環境の水理に関する諸問題

松 尾 直 規

1. はじめに

湖沼環境と人間との関わりについての歴史的な変遷は、湖沼管理の理念、目的、方法論にも反映され、単目的から多目的へ、量的管理から量的・質的管理へ、さらには自然と人間との新たな共生を目指す環境空間の創造へと、その重点が移り変わってきている。こうした今日、湖沼管理に関し、我々に課せられた課題は極めて広範かつ高度なものとなっており、その解明は容易でない。しかしながら、それらの課題の解決を急がなければ、真に快適で健康的・文化的な生活環境と、各種産業活動のより一層の発展は望めないであろう。

湖沼は天然湖であれ人造湖（貯水池）であれ、また、水文的な性格の違いはあるにせよ、面的な広がりをもち閉鎖性水域であることに変わりはない。したがって、そこでの流れの挙動は、河川内でのそれとは異なり、大規模かつ緩慢であるとともに、流れに係する要素も多様かつ複雑である。また、そうした流体運動の特徴と関係の深い水温ならびに各種水質濃度の時間的・空間的变化についても、湖沼を取り巻く環境境界条件により種々の様相をみせるにせよ、いくつかの共通した特徴をもっており、それらに対応する生態学的特徴と合わせて湖沼の利水、環境機能と密接に関係している。

湖沼環境が治水・利水と共に湖沼機能の一つとして認識され、その重要度を増しつつある今日において、各種開発に伴う影響を緩和し、生活に潤いを与える良好な環境を保全するとともに、さらには治水・利水機能の増進をも図り得るような水工技術の開発が急務であり、そのための調査研究にこれまで以上に精力的に取り組まなければならない。

本講においては、以上に述べた湖沼及び貯水池をとりまく現状を踏まえ、その環境機能に関わる種々の技術的課題のうちから、基本となる貯留水の水理・水質機能に関するものをとり上げ、主要な課題の特徴とその取り扱いを中心に述べる。

2. 湖沼環境に関する水理・水質課題

湖沼の各種環境機能に関する技術的課題は貯留水に関するものと周辺空間に関するものがあるが、水理学で対象とするのは主として前者である。具体的には水温・濁水及び富栄養化といった水質・生態系の保全ならびに改善に関する主要な問題がそれであり、次のような内容を取り扱っている。

- (1) 水理・水質及び生物現象の実態とそれらの特徴の把握
- (2) 貯留水の流体運動の解明
- (3) 水質及び生物に関する各種変化過程の解明
- (4) 水質・生態系の保全ならびに改善対策の効果の予測

これらは、対象とする課題によって内容に若干の違いはあるが、方法論的には全く同じであり、(1)～(4)の順に進められる。すなわち、上述の水理・水質課題は、対象とする流れの場の状況に応じた流体運動とそれに伴う水質変化を、現象の時間的・空間的スケールに応じて明らかにしなければ解決され得ないものであり、またその意味で水理学の解析対象になるのである。もちろん、これらの課題は、湖沼学、水質学、生態学など他の分野における課題でもあり、可能な限りそれらの分野で得られた知見を導入し、できるだけ現実に忠実な取り扱いを進めることが肝要であることは言うまでもないであろう。

3. 湖沼環境の水理・水質特性とその表示

3. 1 水理・水文の性格

湖沼環境は貯留水と周辺空間とにより構成される統合体であり、その機能は湖沼の水理・水文の特徴ならびにそれらと相互に関連する水質・生態系の特徴と密接に関係している。特に、湖沼とその周辺空間における水及びエネルギーの循環と貯留水の運動学的挙動は、各種水質変化と生物活動に関わる物質移動及び循環過程を支配し、個々の湖沼における特徴的な水環境を形成する基本的要素であり、従来より湖沼の水理・水文の性格として分類・表示されている。

(1) 水文の性格の表示

水文の性格は、湖沼の成因による湖盆形状や規模の特徴、地理的な位置、気候条件などにより異なるが、工学的観点からみれば、1水文年における水位変動の大小や、貯留水の容量に対する流出入水量の程度が評価の対象となるのが一般的であろう。いずれにせよ、貯留量に対する水、エネルギー（熱量）及び物質循環の程度を表わすものであり、天然湖においては一般にその程度が小さく安定しているのに対し、貯水池では比較的その程度が大きく、流域内での降雨量の大小や洪水の有無などの気象条件に左右され易い傾向がある。こうした水文の性格の表示は、

$$i) \text{ 年平均回転率} = \text{年間総流入量} / \text{総貯水容量} \quad (3.1)$$

$$ii) \text{ 年平均滞留期間} = \text{総貯水容量} / \text{年平均流入流量} \quad (3.2)$$

を指標として行われることが多い。また、水位変動の大きい貯水池では、総貯水容量に代えて、その時の貯水量を使って上記の各指標を表示した方がより現実的かつ実用的な場合もある。なお、これらは1水文年における平均的な性格を表わすものであるが、貯留水の水理・水質現象との関連でみる場合には、より短い時間スケール（例えば月平均、1洪水期間など）での循環の程度が問題となることがあり、それらに対応した表示もしばしば用いられる。^{1), 2)}

(2) 水理の性格の表示

水理の性格は、上述した水文の性格と対応した貯留水の性質、流れの運動学的特徴および流れの場の特徴により表わされる。

A) 密度分布に基づく分類

貯留水の性質には、物理的（密度、粘性など）、化学的（DO、COD、栄養塩濃度など）、生物学的（優占種、藻類密度など）なものがあるが、水理学的には、流れの運動学的特徴と関係の深い密度が重要であり、実際上は、それを主として支配する水温の分布特性によって分類されるのがふつうである。このような貯留水の密度分布に基づく分類は一般に、

I. 成層型

i) 全季成層型

ii) 二季成層型

iii) 一季成層型－夏季成層型、冬季成層型

II. 中間型

III. 混合型

のようである。³⁾ 我国においては、夏季成層型、中間型、混合型のものが多く、高緯度あるいは高地の湖沼、貯水池では二季成層型となるものもある。また、夏季成層型のものについては、水温成層形成の主要因より、

a) 気象要因による成層型（成層I型）

b) 流出入要因による成層型（成層II型）

のようにさらに分けて取り扱うこともある。ただし、こうした分類は主として貯水池に適用され、天然湖沼では気象要因によるものがふつうである。

なお、密度成層の程度や安定性については次のような指標を用いて表示されている。

1) 安定性⁴⁾ S; 湖沼の密度を水深方向に一様にするのに要する単位水表面積当りの仕事量

$$S = \frac{g}{A_s} \int_0^h (z - z_0) A_z (1 - \rho_z) dz \quad (3.3)$$

で定義される。ここに、 g : 重力加速度、 A_s : 水表面積、 h : 水深、 z : 深さ、 z_0 : 湖水塊の重心までの深さ、 A_z : 深さ z での水平断面積、 ρ_z : 深さ z での密度である。

2) 平均的内部フルード数⁵⁾ F_0 ; 流出入水が密度成層に及ぼす影響を示すもので、主として貯水池で用いられ、次式で定義される。

$$F_0 = \frac{L}{H_0} \frac{Q}{V_0} \sqrt{(\rho_0 / g) / (-d\rho / dz)} \quad (3.4)$$

ここに、 L : 貯水池長、 H_0 : 平均水深、 Q : 平均流量、 V_0 : 総貯水容量、 ρ_0 : 基準密度、 $-d\rho/dz$: 平均密度こう配である。

3) リチャードソン数⁶⁾ Ri ; 風が水温成層に及ぼす影響を示すもので、湖沼形状及び躍層位置との関係で安定性が評価され、

$$Ri = \varepsilon g h_1 / u_*^2 \quad (3.5)$$

で定義される。ここに、 $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$ で、 ρ_2 , ρ_1 : 上, 下層の密度、 h_1 : 上層の水深、 u_* : 風による摩擦速度である。

B) 流体運動の特徴に基づく分類

密度分布 (水温分布) の特徴は、湖沼の幾何形状やそのスケール、ならびにそこでの流体運動の特徴と相互に関連しており、それ自体が水理的特徴を示すものであるが、流れそのものを、流れの場との対応より現象論的にみた場合には、次のような分類がされる。³⁾

- i) 一方向一層流; 水深が浅く平面的な拡がりが少ない流れの場での運動 (小規模な混合型の貯水池など)
- ii) 一方向多層流; 水深が深く比較的幅の狭い流れの場での運動 (河川型の成層型貯水池がその典型例)
- iii) 二方向一層流; 水深が浅く平面的な拡がりが大きい流れの場での運動 (霞ヶ浦、琵琶湖南湖など浅い湖、低平地の貯水池など)
- iv) 二方向多層流; 水深が深く平面的な拡がりも大きな流れの場での運動 (多くの天然湖沼や大規模な貯留型の成層型貯水池)

これらの流れの分類は、現実の場における各種水理要素の空間的一様性と比較的緩慢な時間的変化のスケールに基づくものであるが、局所的ならびにより短い時間スケールでみれば、自由対流、湧昇流、沈降流、乱流渦、局所循環流などさらに複雑な流れの挙動を示す場合があることは言うまでもない。しかしながら、湖沼環境に関連する各種水質変化や生物現象で問題となるのは、主として上述の i) ~ iv) に示したような流体運動の特徴と対応するものと考えて良い。

また、先に述べた成層特性とともに i) ~ iv) の各特性は、対象とする個々の湖沼における水理・水質現象のモニタリング及びモデリング、すなわち現象の観測、解析、予測の各方法をも左右することになる。例えば、混合型で一方向一層の流れ場と見なされる水域と、成層型で二方向多層の流れを示す所とでは、観測点の空間的配置や観測の時間間隔を、それぞれの特性に合わせて変えていく必要がある。さらに、現象のモデル化に際しても、その方法論、基礎原理を適用する水塊 (コントロール・ボリューム) のとり方、各種関連要素との関係 (例えば流体運動と風、熱、コリオリ力、降水、河川水の流入入などとの関係) や物理的・化学的・生物学的な変化過程 (移流、拡散、沈降、対流、生成、消滅など) に関する近似の程度が異なってくる。

以上に述べたような湖沼の水理・水文的性格を明らかにしておくことは、湖沼の環境問題を取り扱う上での基本的要件であり、その意義は大きい。

3. 2 水質及び生態的特徴

個々の湖沼における水質及び生物現象の特徴は、上述した水理・水文の性格、幾何形状の特徴、湖沼を取り巻く自然的、社会経済的条件などにより異なり、一概に言えるものではない。特に、各種の生物活動は、水理・水文及び水質条件がたとえ同一であったとしても同じであることはなく、個々の水域において特有の現象がみられるのがふつうである。また、一つの湖沼についてみても、生物現象の再現性は極めて乏しく、時と場所が異なれば、それは千差万別であると言っても過言でない。

しかしながら、湖沼における水利用ならびに環境管理の立場からは、水質汚濁問題との関連においてそれらを何らかの形で評価する必要がある。そこで従来より巨視的、定性的な、あるいは総合的、統一的な観点からのいくつかの評価法が提案され、試行されている。

(1) 水質指標及び生物指標による表示

湖沼における各種水質汚濁の程度や対応する生態系の特徴を、関連する代表的な水質項目及び生物種について、それらの濃度、現存量、種構成などで表示するものである。そうした水質濃度や生物種は、水質指標及び生物指標と言われるものであり、環境基準で用いられているPH、COD、SS、DO、大腸菌群数、全窒素、全リンや、濁りの程度を表す濁度、富栄養化の評価に用いられる各種プランクトン、底生動物、魚類などがそれである。

これらの指標と各種環境汚染の程度との関係は従来より多くの研究者により調査分析され、いくつかの目安が提示されている。例えば、富栄養化に関しては、

- i) 栄養塩としての窒素、リンによる表示⁷⁾
- ii) 透明度、DO、CODなど関連水質指標による表示⁸⁾
- iii) 藻類現存量としてのクロロフィルaによる表示⁹⁾
- iv) 生物相による表示¹⁰⁾
- v) i) ~ iv) を用いた貧栄養湖と富栄養湖の分類¹¹⁾

などがある。しかしながら、これらの関係を示す指標値は表-1の例のように各研究者によりまちまちであると同時に、個々の値自体にもかなりの幅がある。また、いずれの指標でみるかによって、状態評価の結果が変わる場合がある。このため、i) ~ iii) の複数の水質指標を用いた総合評価の試みもある。^{13), 14)}

(2) T S I (Trophic Status Index) による表示

富栄養化に関する栄養状態をより普遍的かつ客観的に表示するため、複数の水質指標についてランク付けをし、それらを数量化、総合化した指標がT S Iである。これらには、

- i) Carlson指標¹⁵⁾；透明度を基準に数量化したもので、透明度とクロロフィルa濃度、全リン濃度との相関関係に基き、それぞれについて表-2のように表示されている
- ii) 修正Carlson指標¹⁶⁾；クロロフィルa濃度を基準にi)と同様の数量化を行ったもの
- iii) U S - E P AによるT S I¹⁷⁾；全リン、無機態窒素、透明度、クロロフィルa濃度、最小溶存酸素濃度、溶解性リン濃度の中央値あるいは平均値を各々得点化しその和を指標としたもの

などがある。こうしたT S Iによる評価は、富栄養化に関係する水質・生物現象の特徴を各湖沼毎に比較したり、また一つの湖沼についてその時間的変化を把握する上で有効なものと考えられている。

(3) リンの許容負荷量による表示

主要な栄養塩であるリンの流入負荷量と富栄養化の程度との間の経験的な相関関係に基き、湖沼における滞留時間、平均水深及びリン粒子の沈降速度といった水理・水文特性を考慮に入れたリンの許容限界負荷量を示すことによって、富栄養化の実態把握ならびに予測に供しようとするものである。代表的な表示はVollenweider¹⁸⁾によるものであり、数多くの湖沼に適用され、その有効性が検討されている。リンが生物生産の支配的因子である湖沼の巨視的な特徴を示すには有効であるが、定量的評価の点では、成層型の湖沼・貯水池をはじめとして信頼性に欠ける面があることは否定できない。

表-1 全リン濃度 (mg/m³) による栄養状態の判定

貧栄養	中栄養	富栄養	
5~10	10~30	30~100	Vollenweider 1967
2~20	10~30	10~90	坂本 1966
<20		>20	吉村 1937
<10	10~20	>20	US EPA 1974
<12	12~24	>24	Carlson 1977
<12.5	12.5~25	>25	Ahi & Wiederholm 1977
<10	10~20	>20	Rast & Lee 1978
<10	10~35	35~100	OECD
<15	15~25	25~100	Forsberg & Ryding 1980

表-2 Carlson のTSI

TSI	透明度 (m)	全リン (mg/m ³)	クロロフィル a (mg/m ³)
0	64	0.75	0.04
10	32	1.5	0.12
20	16	3	0.34
30	8	6	0.94
40	4	12	2.6
50	2	24	6.4
60	1	48	20
70	0.5	96	56
80	0.25	192	154
90	0.12	384	427
100	0.062	768	1,183

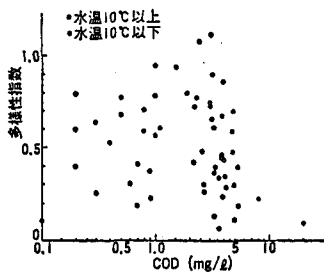


図-1 CODとDIとの関係 [岡田、1986]

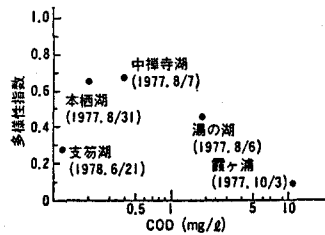


図-2 各湖沼におけるCODとDIとの関係の比較 [岡田、1986]

(4) AGP (Algal Growth Potential) による表示

AGPは湖沼における藻類生産の潜在力を藻類培養試験により求めたもので、湖沼における一次生産性の空間的分布や、流入水の影響、制限物質などを推定し、富栄養化の現状および対策効果を評価しようとするものである。¹⁹⁾対象とする湖沼の生物生産力を直接的に知るという点で有効であり、生物生産に関与する支配的要素を抽出する上でも効果的な方法であると考えられているが、藻類種の選定や測定方法に検討の余地がある。

(5) DI (多様性指数) による表示

富栄養化現象としての藻類量の増大と種構成の変化との関係を情報エントロピー概念によるDI (Diversity Index) で示し、COD濃度やAGPとの関係を通じて、湖沼の栄養状態と結びつける試みが行われている。図-1及び2は、DIとCODとの関係を示す一例であり、CODを指標とした藻類量の増大と優占種の出現に伴う藻類種の減少との対応が表されている。²⁰⁾このようにDIは、水質特性と関連する生態系の特徴を定量的に表示するものであるが、図-1にみられるように、水温や照度などの条件によってその値が左右されるため、普遍的な評価に用いるにはさらに検討を必要としている。なお、栄養状態と藻類種との関係に着目したエントロピー・モデルを用いて、多様性指数によるより現実的な評価を行っている例もある。²¹⁾

(6) 数量化理論による表示

湖沼の水質・生物現象の実態及び特徴を、水理・水文的性格や湖沼形状ならびに流域の諸条件と結びつけて総合的に評価しようという試みである。数量化理論Ⅱ類及びⅢ類を用いて、富栄養化に関係する主要因の抽出と、それらによる状態評価が行われているが、情報不足もあって定量的段階には至っていない。²²⁾

以上、種々の観点に立った水質・生態的特徴の表示について述べたが、いずれの方法も、現象の実態及び特徴を正しくかつ統一的に評価するという点では決して十分とは言えない面がある。ここで述べた富栄養化に関するものばかりでなく濁水や一般的な有機汚濁問題を含めて3・1で述べた水理・水文特性、気象条件及び流域の諸条件との関連を考慮に入れたより実用的かつ科学的な評価法の確立が望まれる。

4. 貯留水の運動とその取扱い

4. 1 基礎数学モデル

湖沼における流体運動の特徴は、3. 1の(2)で述べたように、湖沼の規模、幾何形状及び水文・気象条件などの外的要素と、相互に関連する内的要素としての密度分布とに関係している。こうした流体運動は、対象水質の移流分散過程あるいは循環混合過程を支配し、水質変化に大きく寄与することから、その取扱いは極めて重要である。

湖沼の貯留水は種々の微細な浮遊物質及び溶解性物質を含むものであるが、それらの量は水に比べると極めて小さく、それらは水の動きと一体の濃度として取り扱われる。また、貯留水の密度を支配する主要素は水温であり、各種水質物質は極めて高濃度の場合を除けば密度に寄与しないのがふつうである。したがって、種々の水質現象を伴う貯留水の運動についても、流体力学原理、すなわち質量保存則、運動量保存則及び熱力学第一法則を出発点として理論的取扱いが進められる。これらの基礎原理は、貯留水の密度に関して非圧縮性の仮定が成立し、各種水質変化は濃度収支則で記述され得ること、熱力学第一法則は水温収支則で代用され得ることを用いると、結局次のような基礎数学モデルで表示される。

1) 水の連続式；

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (4.1)$$

2) 運動量保存則；

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) (\rho \mathbf{V}) = -\nabla (\rho \Omega) - \nabla p + \nabla (\tau - \rho \overline{\mathbf{V}' \mathbf{V}'}) \quad (4.2)$$

3) 水温収支則；

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) T + \nabla (\overline{T' \mathbf{V}'}) = \frac{H}{\rho c_w} \quad (4.3)$$

4) 濃度収支則；

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) C + \nabla (\overline{C' \mathbf{V}'}) = S \quad (4.4)$$

ここに、各式は平均流に関するもので、 $\mathbf{V}$ ：流速ベクトル、 Ω ：外力のポテンシャル、 p ：圧力、 τ ：応力テンソル、 T ：水温、 H ：発生熱量、 c_w ：水の比熱、 C ：水質濃度、 S ：発生及び消滅濃度、添字'：各変数の変動分であり、密度 ρ は水温及び濃度の関数として、

$$\rho = F(T, C) \quad (4.5)$$

で求められる。

これらの基礎モデルは、対象とする現象の時空間的な変化特性と関連要素間の寄与の程度に応じて簡略化され、現実の流れの場に適用されることになる。なお、より一般的には(4.3)～(4.5)に代えて密度収支則が用いられるが、現実には、密度を直接測るのではなく水温や濁度の値より求めることから、それに合わせた表示としている。

4. 2 水理解析のためのモデル

(1) 空間的一様性に基く展開

上述の基礎数学モデルは、一般にコントロール・ボリューム法により対象とする水理要素の空間的一様性や現実の流れの場における各種環境境界条件に応じて展開され、種々の解析モデルに変形される。流れの空

間的一様性に基く展開は、3. 1の(2)に示した分類に従って行われる。²³⁾ 現実の湖沼においては、一方向一層流に分類されるものは極めて少ないことから、ふつうは次の3種のモデルが用いられる。

- i) 一方向多層モデル；貯水池の多くに適用されるもので、基礎モデルは流れ方向及び水深方向に分割して得られるコントロール・ボリュームについて展開され、結果的に幅方向の運動量保存則が省略されることになる。なお、貯水池の水温成層の解析に用いられる水平多層モデルは、²⁴⁾この特別な型と考えれば良い。
- ii) 二方向一層モデル；密度分布が水深方向にほぼ一様な浅い湖沼での潮流解析の多くに適用されるもので、各水理要素を全水深にわたって積分して得られる平均量について表示される。
- iii) 二方向多層モデル；一般の天然湖沼及び平面的拡がりの大きな大規模貯水池に適用され上述の2)のモデルをさらに水深方向にいくつかの層に分割したものである。密度分布の特徴に応じて上下2層あるいは3層に分割したモデルもこの類に入る。²⁵⁾ なお、2層、3層モデルでは層の厚さを固定したものと固定しないものとにさらに分けられる。

なお、これらのモデルにおいては、湖沼の水深と水平長との関係ならびにコントロール・ボリュームの大きさとの比較より、波動現象は考えないことにし、水深方向の運動量保存則については静水圧分布を代用している。また、実際の密度変化は極めて小さいことから Boussinesq 近似を導入している。

(2) 運動学的特徴に基く単純化

貯留水の流体運動には種々のものがあり、関連する支配的要素ならびにその寄与の程度も様々である。それらは村岡により既にまとめられているので、²⁶⁾ここでの詳しい説明は省略するが、主な流れの種類をその成因（流れを引き起こす外力）別にみると、

- a) 風による吹送流とそれに伴う水平及び鉛直循環流、セイシュとそれに伴う流れ
- b) 河川水等の流入、流出による密度流や噴流、吸い込みに伴う流れ
- c) 熱による対流、水平密度流、内部セイシュとそれに伴う流れ
- d) 気圧、重力変化によるセイシュ、潮汐とそれに伴う流れ

などがある。このうち、d)の流れは大湖沼を除けば無視して良い。また、これ以外にも局所的な湧昇流や沈降流、風波による流れ、乱流渦、Langmuir 渦、内部波などがあるが、これらも実際の解析に直接取り入れられることはほとんどない。

ところで、対象とする湖沼の水理・水質課題について、a)～c)に挙げた主な流体運動のすべてが取り扱われるわけではない。例えば回転率の小さな自然湖沼や大規模貯水池では、b)の流れは無視しても差し支えない場合も多い。一方、回転率が比較的大きな貯水池などでは、むしろb)の流れが支配的となる傾向がある。このようにa)～c)の流れは、対象とする流れの場の特徴に応じて、あるいは解析目的によって取捨選択され、基礎数学モデルの単純化が図られることになる。

こうした単純化されたモデルには各種のものがあるが、一般湖沼についてみれば、

- 1) エクマンタイプモデル
- 2) その他のモデル

に大別されよう。1)のエクマンタイプモデルは、風による流れが卓越する場において、河川水の流入出及び熱の影響を無視し、風による水面でのせん断力、底面せん断力、コリオリ力及び静水圧と運動量変化との関係を表示したものである。対象とする現象変化が極めて緩やかであることより、しばしば非定常項、慣性項が省略され、また水平方向の渦動粘性項も無視されることが多い。このような最も単純化されたモデルでは、鉛直渦動粘性係数、コリオリ係数を一定とし、基礎式が次のように表示されている。²⁷⁾

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.6)$$

$$-f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4.7)$$

$$f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (4.8)$$

$$p = \rho_0 g (\zeta - z) \quad (4.9)$$

ここでは、 $x-y$ 平面は静水面とし、 x 軸は東向き、 y 軸は北向き、 z 軸は鉛直上向きとしており、 u 、 v 、 w は各方向への流速成分、 ρ_0 ：平均密度、 A_v ：鉛直渦動粘性係数、 f ：コリオリ係数、 ζ ：水表面における z の値である。これらの各式は無次元化された後、流れ関数 ϕ を導入して、

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = a \frac{\partial \phi}{\partial x} + b \frac{\partial \phi}{\partial y} + c \quad (4.10)$$

の形に展開され、与えられた境界条件の下で解かれることになる。図-3は、その一例で、岩佐らが境界要素法を用いて解析したものである。²⁸⁾

このタイプのモデルの特徴は、水平流速 u 、 v の分布を解析的に求め、問題を2次元化している点にあるが、水深方向に水理諸量に変化する成層型潮沼ではその適用性に限界がある。また、岸での流速に関する条件に問題があり、岸付近での流速の把握が困難であるとされているが、浅い潮沼での吹送流とそれに伴う循環流の概略を、比較的簡単に求められるところに有用性が認められる。

その他のモデルは、先に述べたふつうの二方向一層モデル及び二方向多層モデルであり、静水圧近似の他にそれぞれ次のような単純化が行われる場合がある。

- イ) 流入出の影響が小さく、流れの変化が緩やかであるとき、慣性項を無視する。
- ロ) 深い潮沼で底面せん断力を無視する。
- ハ) 狭い潮沼でコリオリ力を無視する。
- ニ) 一様な風が長時間継続するときに、定常状態を仮定する。
- ホ) パロクリニックな流れについては、風のせん断力、コリオリ力等の外力を考えない。
- ヘ) 水面での熱交換その他を無視し、密度は一様であるとする。

なお、鉛直方向の熱対流については、直接取り扱うことなく、密度の逆転層が生じたときにはそれを解消するような鉛直方向の平均化操作が行われている。図-4に岩佐・井上らによる二方向一層モデルでイ)及びヘ)の単純化を行った場合の解析例を、また、図-5に同じく二方向多層モデルでパロクリニックな流れを解析した例を示しておく。²⁹⁾

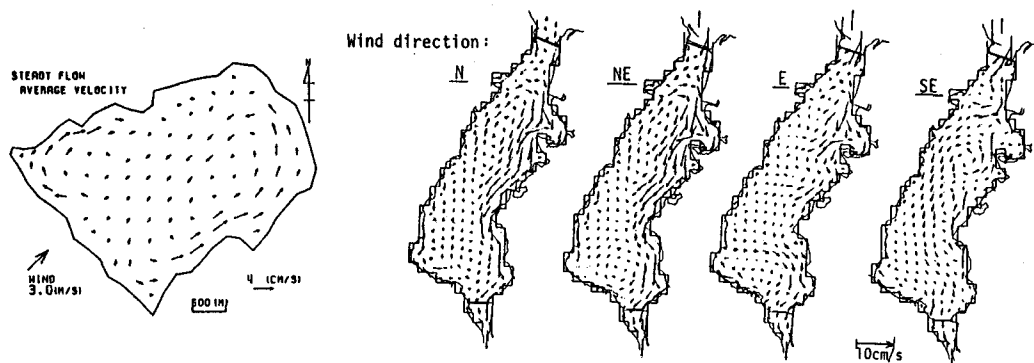


図-3 エクマンタイプモデルによる湖流解析例〔岩佐ら、1986〕

図-4 二方向一層モデルによる湖流解析例〔岩佐ら、1978〕

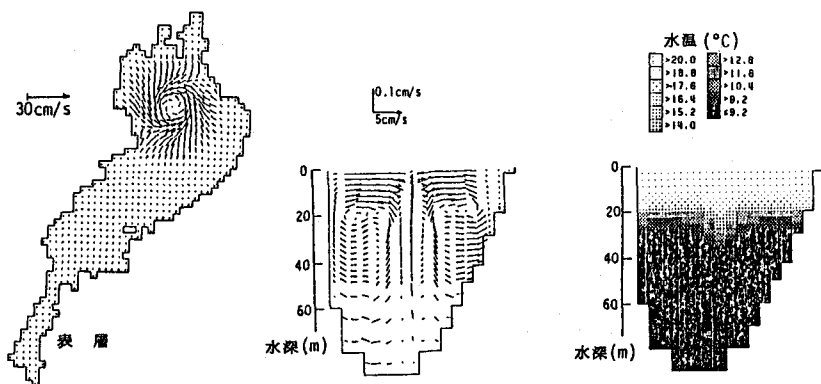


図-5 二方向多層モデルによる湖流解析例【岩佐ら、1985】

つぎに、貯水池を対象とする解析モデルについてみると、その形状的特徴ならびに流出入水による影響との比較から、風によるせん断力、底面摩擦、コリオリ力などは考慮しないことが多い。すなわち、貯水池の流れを支配する主要因は、熱、河川水の流入及び取放水であり、この観点から次のような流体運動に関する種々のモデルが用いられている。

- (Ⅰ)選択取水モデル³¹⁾；基礎数学モデルを解く代わりに、二次元あるいは軸対称の線形密度場において線吸込みあるいは点吸込みがある場合のポテンシャル流に関する定常解を用いて、取放水に伴う流れを近似したものである。これらは選択取水公式とも呼ばれ、Yih,³²⁾ Debler,³³⁾ Craya,³⁴⁾ Kao,³⁵⁾ Koh,³⁶⁾ 日野・大西³⁷⁾などのものがある。流入水による流れについては、経験的に得られた流速に関するガウス分布の仮定（取放水による流れも同じ）、流入水に関する内部フルード数、流入流量等より求められる流動層厚より与えられている³¹⁾。なお、一部のものを除いて熱の影響は密度こう配に反映されることにより取り入れられる。この種のモデルは、安定な水温成層場における定常的な流れを仮定するものであり、主として水平多層の水温予測モデルに用いるが、成層が不安定な場合や、非定常性が強い時には流体運動を正しく再現し得ない。
 - (Ⅱ)一方向多層流モデル；基礎数学モデルを表-3に示すような一方向多層モデルに展開して数値的に解くもので、先に述べたように熱及び流出入水以外の外力は考えない³⁸⁾。実用上、水面こう配を無視してさらに簡略化を図る場合もある。このモデルは、流出入水の影響が大きい貯水池における流れをより忠実に再現し得るが、渦動粘性係数の推定や鉛直方向の熱対流の取扱い（前述の湖沼の場合と同様）などに問題を残している。このモデルによる水平流速の計算例を図-6に示しておく。
 - (Ⅲ)二方向多層流モデル；一般湖沼に類似した特徴をもつ大規模貯水池を対象とする場合、あるいは富栄養化解析に関してより詳細な流体運動を知りたい場合のものであるが、未だ実用化の段階には至っていない松尾らは、後者の場合について、直交曲線座標系を用いて展開したモデルを開発し³⁹⁾、図-7に示すような解析例を得てその有効性を示唆しているが、残された問題は多く、実際への適用は今後の課題である。
- なお、以上に述べた各種のモデル以外に、上昇気泡による水質改善対策効果の解析・予測に関して、気泡ブルームとそれに伴う周囲水の流体運動を取り扱ったものがある。これには、岩佐・松尾⁴⁰⁾らの円筒座標系による軸対称気泡流モデル、宮永⁴¹⁾の気泡噴流による流動モデルなどがある。前者では、半径方向及び鉛直方向の運動量保存則を密度成層場で数値的に解くことにより、上昇気泡により形成される循環流とそれに伴う各種水質変化を解析している⁴²⁾。

4. 3 流体運動に関する諸要素

ここでは、4. 2に述べた各種解析モデルを用いて現実の湖沼における流れを計算する際に必要な種々の関連要素の表示法について述べる。

表-3 貯水池における一方向多層モデル

1) 水の連続式

$$|uB|_{x_i}^{t_{i+1}} dz + |wA|_{z_n}^{t_{n+1}} + q_b = 0$$

2) 運動量保存則のx分値

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{1}{A} |uuB|_{x_i}^{t_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot dz} |uwA|_{z_n}^{t_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot dz} u_b q_b - \frac{1}{A} \left| \frac{\partial}{\partial x} B \right|_{x_i}^{t_{i+1}} \\ & + \frac{1}{A} \left| D_{mx} \frac{\partial u}{\partial x} B \right|_{x_i}^{t_{i+1}} + \frac{1}{A \cdot dz} \left| D_{mz} \frac{\partial u}{\partial z} A \right|_{z_n}^{t_{n+1}} \end{aligned}$$

3) 運動量保存則のy分値(静水圧分布)

$$p = \int_{z_i}^{z_{i+1}} \rho g dz$$

4) 水温収支則

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\frac{1}{A} |TuB|_{x_i}^{t_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot dz} |TwA|_{z_n}^{t_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot dz} T_b q_b + \frac{1}{A} \left| D_{Tx} \frac{\partial T}{\partial x} B \right|_{x_i}^{t_{i+1}} \\ & + \frac{1}{A \cdot dz} \left| D_{Tz} \frac{\partial T}{\partial z} A \right|_{z_n}^{t_{n+1}} - \frac{1}{\rho c_w A \cdot dz} |\phi A|_{z_n}^{t_{n+1}} \end{aligned}$$

5) 濁度収支則

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} = & -\frac{1}{A} |cuB|_{x_i}^{t_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot dz} |cwA|_{z_n}^{t_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot dz} c_b q_b + \frac{1}{A} \left| D_{cx} \frac{\partial c}{\partial x} B \right|_{x_i}^{t_{i+1}} \\ & + \frac{1}{A \cdot dz} \left| D_{cz} \frac{\partial c}{\partial z} A \right|_{z_n}^{t_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot dz} |cw_b A|_{z_n}^{t_{n+1}} \end{aligned}$$

ここに、 u, w : x, z 方向の流速成分、 B :貯水池幅、 A :ブロックの水平断面積、 q_b :ブロックより流出する流量、 D_{mx}, D_{mz} : x, z 方向の運動量分散係数、 p :圧力、 ρ :貯留水の密度、 g :重力加速度、 D_{Tx}, D_{Tz} : x, z 方向の温度分散係数、 ϕ :気象要因による熱フラックス、 c_w :水の比熱、 D_{cx}, D_{cz} : x, z 方向の濃度分散係数、 w_b :水質物質の沈降速度、 s :生成あるいは消滅濃度、添字 b :ブロック側面における値、添字 $i, i+1$: $x=i, x=i+1$ における値、添字 $n, n+1$: $z=n, z=n+1$ における値、 z_s :水表面における z の値

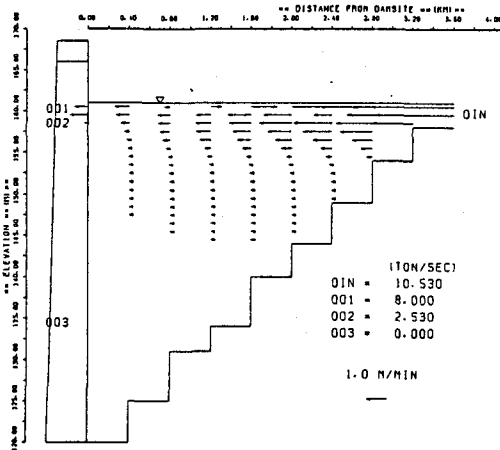


図-6 一方向多層モデルによる貯水池の流れの解析例

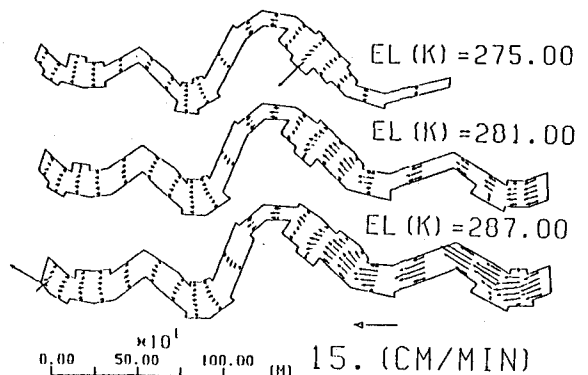


図-7 二方向多層モデルによる貯水池の流れの解析例

(1) 風によるせん断応力

吹送流で重要な風による水表面でのせん断応力 $\mathcal{T}_s$ は、経験的に、

$$\mathcal{T}_s = \rho_a \gamma_s^2 W_{10}^2 \quad (4.11)$$

で表示される。ここに、 ρ_a ：空気密度、 γ_s^2 ：風の水面摩擦係数、 W_{10} ：水面上10mの高さの風速である。 γ_s^2 は定数または W_{10} の関係として与えられ、 $1.3 \times 10^{-3} \sim 2.6 \times 10^{-3}$ 程度の値とされている。

(2) 底面せん断応力

ふつうは、(1)と同様の経験式

$$\mathcal{T}_{bx} = \rho_a \gamma_b^2 u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \mathcal{T}_{by} = \rho_a \gamma_b^2 v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4.12)$$

で表示される。ここに $\mathcal{T}_{bx}$ 、 $\mathcal{T}_{by}$ ：x、y方向の底面せん断応力、 γ_b^2 ：底面摩擦係数である。 γ_b^2 の値は通常 10^{-3} 程度の値が用いられる。

(3) コリオリ係数

コリオリ係数 f は、地球の自転の角速度 ω 、緯度 φ より、

$$f = 2 \omega \sin \varphi \quad (4.13)$$

で与えられる。 ω の値は $7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ を用いる。²⁹⁾

(4) 渦動粘性係数

この値については議論が多く、未だ統一的な見解が得られていないと言っても過言ではない。従来の解析で用いられたものを大別すると、

- a) 一定値として与える⁴³⁾
- b) 経験式より推定する⁴⁴⁾
- c) k- ϵ モデルなどの乱流モデルを用いて求める⁴⁵⁾

のいずれかである。湖沼における実際の解析では、実用上a)あるいはb)により推定されるのがふつうである。

一定値で与える場合、鉛直及び水平方向の渦動粘性係数 A_v 、 A_h の値にはかなりの幅があるが、岩佐・井上らは、琵琶湖の湖流解析にあたって $A_v = 0.001 \text{ m}^2/\text{sec}$ 、 $A_h = 30 \text{ m}^2/\text{sec}$ としておりこれらが一つの目安となるであろう。

経験式による A_v の推定には、鉛直方向に一般とする場合に、

$$A_v = C_v \sqrt{\mathcal{T}_s / \rho_a h} \quad (4.14)$$

また、密度成層場で、鉛直方向の分布を考慮した場合には

$$A_v = A_{v0} (1 + C_1 R_i)^m \quad (4.15)$$

あるいは、

$$A_v = A_{v0} \exp(-C_2 R_i) \quad (4.16)$$

などが提案されている。^{30), 46)}ここに、 h ：水深、 R_i ：リチャードソン数、 A_{v0} は密度一様場における A_v の値、 C_v 、 C_1 、 C_2 及び m は定数である。

一方、 A_h については一般に、

$$A_h = C_h L^{4/3} \quad (4.17)$$

のように表示されている。⁴⁷⁾ここに L は水域の代表長、 C_h は定数($C_h = 0.01 \sim 0.09$)⁴⁸⁾である。

なお、実際の離散化計算では、 L をメッシュの面積の平行根とすることが多い。

上述の各式による A_v 、 A_h の推定値を求めるにあたっては、実際の解析における離散化のスケールに注意する必要がある。すなわち、計算では、メッシュの大きさより小さい流動現象は表現され得ないため、そうした影響が A_v 及び A_h に反映されることになる。

(5) 輻射熱及び水面での熱損失

水表面における熱の授受は、

$$Q_0 = (1 - \alpha) Q_1 - Q_R - Q_H - Q_L \quad (4.19)$$

で表わされる。ここに、 Q_0 : 水面で受ける熱量、 Q_1 : 日射量、 Q_R : 大気輻射熱、 Q_H : 熱伝導による顕熱、 Q_L : 蒸発散による潜熱、 α : 日射量反射係数 ($\alpha \approx 0.06$ 程度) である。このうち、 Q_1 については $(1 - \alpha) \beta Q_1$ (β は水面吸収率) が水面で吸収され、残りが水中に伝わる。このとき、水深 z での日射量は、次式で表示される。

$$Q_z = (1 - \alpha) (1 - \beta) Q_1 \exp \{-\eta (\zeta - z)\} \quad (4.20)$$

ここに、 η は、水中減衰係数である。また、 Q_R 、 Q_H 、 Q_L は経験式により求められる。なお、 β 、 η の値は場所により異なるが、 $\beta = 0.4 \sim 0.6$ 程度であり、 η は濁りの程度により $\eta = 0.3 \sim 1.5$ 程度となる。

5. 水質変化とその取り扱い

5.1 水温成層とその変形、破壊

(1) 水温変化の特徴

湖沼の水理を特徴づける水温分布の変化は、貯水池における洪水時を除くと比較的緩やかである。例えば、我国に多い夏季成層型湖沼では、受熱期の成層形成と冷却、循環期の成層消滅という季節的变化を繰り返す。また、空間的には、成層時の水深方向変化が顕著であるのに対し、水平方向には内部セイシュの生起時や貯水池における洪水流入時を除けばほぼ一様な分布を示すのがふつうである。

水温成層の安定性は、冷却期の対流混合を除くと、湖沼の形状特性と流入流出水、風に起因する乱れ、さらには内部波による熱輸送の大小に左右される。このうち、成層の変形あるいは破壊を招くような要因は、主として大洪水時の流入出水であり、その他は、水表面近傍、変温層近傍といった局所的範囲の変化に関係するにとどまるのが一般的である。とくに、流入出水の影響が大きい貯水池では、しばしば短時間のうちに変温層の低下や破壊が生じることがある。⁴⁹⁾ こうした水温成層の変形・破壊は、その後の水理特性を大きく変えるものであり、後に述べる濁水の長期滞留や富栄養化現象と密接に関係する。したがって、その実態及び生起条件を明らかにすることは重要な課題の一つである。

岩佐・松尾らは、⁴⁹⁾ 天ヶ瀬貯水池における成層破壊について、その生起条件として洪水開始時からの回転率、内部フルード数及び取水層厚の変化を調べ、実際の状況と比較・検討している。また、安芸・白砂は、²⁾ 1 洪水の総流入量と貯水容量との比が、0.5 を越えると変形が、1.0 を越えると破壊が生じ得ることを報告している。しかしながら、放流操作や洪水吐の位置、湖盆形状などのいくつかの因子が複雑に関係するため、普遍的な生起条件を示すには至っていないのが現状である。

(2) 水温予測法

上述したような種々の水温変化現象を解析・予測するモデルは、4.1 に示した水温収支則 (4.3) を、流体運動に関するものと同様に種々に展開し、また単純化することにより得られる。これらのモデルは、概ね次のようである。

- i) 熱伝導モデル⁵⁰⁾ ; 自然湖沼や流入出水の影響が小さい大規模貯水池に形成される水温成層を表現するためのもので、日射の水中への伝達と分子拡散による熱伝導のみを考え、移流など他の熱輸送過程をすべて省略している。
- ii) 乱流拡散モデル⁵¹⁾ ; i) と同じ対象場において分子拡散だけでなく乱流拡散を含めて考えたものである。乱流拡散係数は、4.3 の (4) で述べた鉛直渦動粘性係数と同様の表示が提案されている。
- iii) 流出入モデル⁵²⁾ ; i) , ii) とは逆に流入・流出に伴う移流熱量が支配的な貯水池などでの水温分布を求めるために提案されたものであり、拡散項、日射による熱供給、水面での熱損失は無視している。
- iv) 移流・分散モデル ; 基礎式 (4.3) を、水平多層モデル²⁴⁾ あるいは一方向多層モデル³¹⁾、二方向多層モデル⁴³⁾ に展開したものである。これらは、自然湖沼及び貯水池における水温成層の形成・消滅過程を再現する一般的方法であるが、水平多層モデルでは、洪水時における成層変形あるいは破壊など非定常性の強い

現象に対しては、4. 2の(2)に述べた流体運動に関する仮定の限界より適用性に欠ける面がある。

5. 2 濁水現象

(1) 濁水現象の特徴

濁水現象は、流入水量が洪水時であっても貯水量に比べると比較的小さな自然湖沼では、河川水の流入する沿岸部付近を除くと余り問題とならないが、貯水池では富栄養化とともに重要な水質問題である。

洪水時に貯水池へ流入する大量の微細な懸濁物質は、しばしば濁水塊となって流下し滞留する。その時間的变化は、洪水時には時間単位の急なものであるが、しばらくすると、移流及び沈降作用が支配的となる比較的緩やかな貯留・低減過程へと移行し、さらに時間が経過すると、微細粒子だけが残ることから変化はより緩やかとなる。一方、空間的分布については水温成層の有無、あるいは洪水流入による水温成層の変形の程度により異なってくる。図-8にはその一例を示している。成層が存在する場合には、その時の流れの特徴を反映して変温層のあたりにほぼ水平な高濁度層を形成し貯留されるのに対し、成層が無くなると濁度は水深方向に拡がり、沈降作用のために水深が深くなるほど高い値を示すようになる。

(2) 濁水予測法

こうした濁水現象の解析は、濁質に関する濃度収支式(濁度収支式)を流体運動及び水温に関するものと連立して解くことにより進められる。これらの解析には、水平多層モデルを用いた安芸・白砂、一方多層モデルによる岩佐・松尾ら、混合距離理論に基づく流速分布則を用いた芦田・江頭ら、濁水密度流を取り扱った福岡・福岡等のものがある。また、濁水現象に大きな影響を及ぼす濁質の粒度分布を考慮したものに中村・足立^{5,9)}、宮永・安芸^{5,10)}、岩佐・松尾^{5,11)}らの研究があり、沈降速度が異なる濁質濃度それぞれについてその変化を

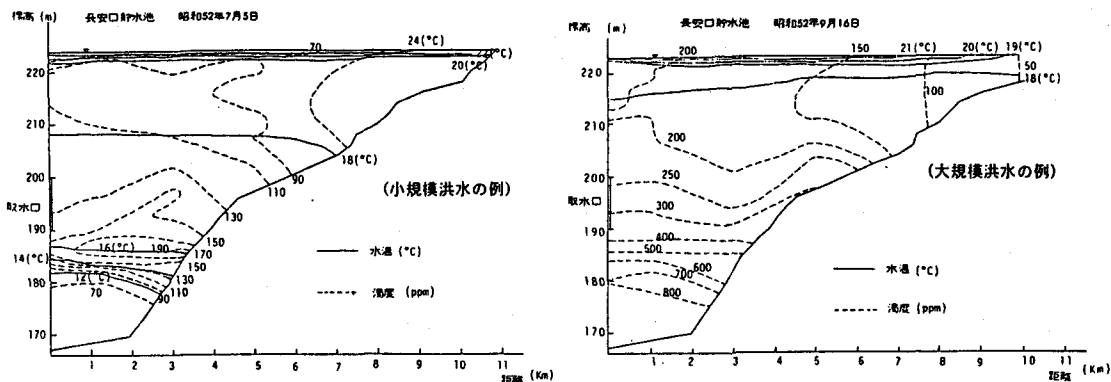


図-8 貯水池における洪水後の濁度分布例

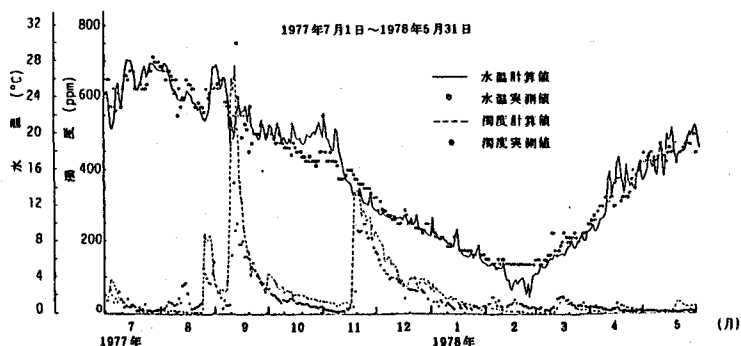


図-9 貯水池における濁度解析例

求め、それらを重ね合わせることによって精度の向上を図っている。図-9に上述したような解析の一例を示す。

貯水池内の濁水の挙動は上述したように2次元的であり、所要の解析精度を得るためには一方向多層モデルを用いるのが妥当である。より精度の向上を求めるためには、粒度分布や比重など濁質の諸特性を明らかにし、それを解析に取り入れるとともに、乱流拡散係数や流入水濁度など不確定要素に関する定量的検討を進めることが必要である。なお、自然湖沼、大規模貯水池、さらには水質の異なる大きな支川が流入するような所では、二方向多層モデルを用いた解析を考えなければならないであろう。

5.3 富栄養化現象

(1) 富栄養化現象の特徴

富栄養化は、もともと地質年代的スケールの湖沼の自然的変化を、栄養状態と生物生産力との関係ならびに対応する生態系の特徴より説明するものであった。ところが、今日では、種々の人間活動に起因する栄養塩の流入、蓄積が急速に進んだ結果として、貯留水の一次生産力が増大し、水の華に代表されるような藻類の異常発生とそれに伴う有機汚濁化が進行する現象を富栄養化といっている。

富栄養化に関係する窒素、リン等の各種水質濃度の変化は、これまでに述べた水温、濁度とは異なり化学的・生物学的変化を伴う。もちろん、その水理学的変化過程は濁度と同様に流体運動の特徴に支配されるが、それは貯水池における洪水時を除くと一般に緩慢である。一方、化学的・生物学的変化は、しばしばより急速かつ局所的であり、そうした変化過程を反映した各種水質濃度の分布がみられることになる。例えば、水の華や淡水赤潮とそれに伴う各種水質濃度分布の特徴はその代表例である。

図-10は貯水池におけるその一例であるが、藻類量の指標であるクロロフィルa濃度と栄養塩である硝酸性窒素の分布性状は、有光層内での藻類の活発な一次生産を反映したものとになっていることがわかる。また、同図では、流入端直下流での藻類量の増大が著しいことを示しているが、これは、この貯水池における貯留水の運動特性の影響を示すものであり、貯水池ではしばしば見られる特徴の一つである。このように、富栄養化に関係する各種水質濃度の分布特性は、その物理的・化学的及び生物学的変化が、それぞれの時間的・空間的スケールに応じて複雑に組み合わさった結果であり、なかなか一概には評価し得ないものである。したがって、その実態及び特徴の表示・評価法も3.2で述べたように各種のものがあるわけで、その全体像は、それらの各種方法により様々な側面からみた姿を総合し、評価しなければならない。

(2) 富栄養化の予測法

富栄養化の予測法は、Vollenweider⁽¹⁸⁾に代表される湖沼の栄養状態に関する経験的・巨視的なモデルと、藻類を中心とする低次生態系の動的変化を取り扱う動力学的モデルの2つに大別される。ここで述べる予測法は後者についてである。富栄養化に関する動力学的モデルは、対象とする水質指標、水理学的要素としての流体運動及び水温の取扱い、生態学過程のモデリング、湖沼の分割法及び時間的変化のスケールなどにより分類される。こうしたモデルの分類・比較は津野・村松^(6,1)、村上^(6,2)、松岡及び筆者などにより行われており、詳しくはそれらの文献を参照されたいが、上述の観点より従来のモデルを概括すれば次のようである。

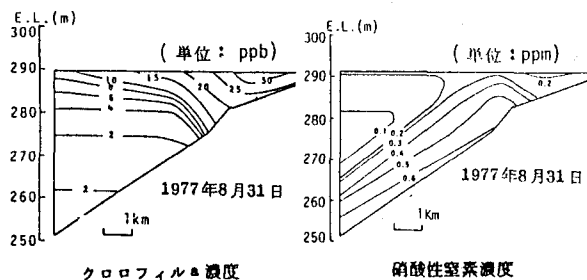


図-10 富栄養化関連水質濃度の分布例

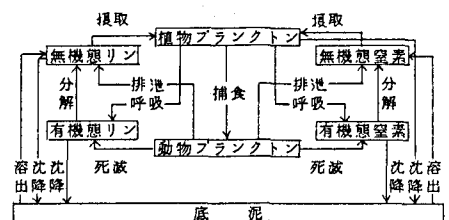


図-11 富栄養化モデルにおける生態学的過程の例

i) 水質指標；代表的な1つの指標のみを対象とするか、2つ以上のものを取り扱うかに大別されるが、後者が多い。指標としては、一次生産者である藻類、捕食者である動物プランクトン、栄養塩の3つが主なものであるが、なかにはDO, BOD, CODを取り扱うこともある。

藻類は、(a) 平均量を表すクロロフィルa濃度、(b) 優占種の現存量、(c) サイズ及び機能的特徴より藍藻類、珪藻類、その他の種類に2分あるいは3分したときの現存量（またはクロロフィルa濃度）のいずれかで表示され、(a) が最も一般的である。データの蓄積があれば(c) が実態をより忠実に表わすものと言えよう。また、動物プランクトンは、(a) 平均量としての炭素濃度、(b) 優占種の現存量、(c) 草食性、肉食性、雑食性に分類したときの各現存量で表わされている。

栄養塩は、リン及び窒素が取り上げられることが多いが、炭素や珪素を加えるものもある。リン及び窒素は無機態、有機態、ガス態（窒素）、粒子態、溶解態、さらには生体外、生体内（リン）といった存在形態（機能的特徴）で分ける場合と全リン、全窒素で取り扱う場合とがある。炭素は軟水湖において緑藻類から藍藻類への種交代を取り扱う場合に、珪素は珪藻類が優占種のとき制限因子として作用する場合に用いられるが一般的ではない。その他、魚類、底生生物、水草、有毒物質、バクテリアなどを指標に加えることもあるが、それらの有用性は特定の場に限られてくる。水質指標の数を増やすことは、湖沼内での閉鎖型生態系システムを完結することに関心がある人にとっては意義があるかも知れないが、現実には各指標間の関係に不明な点が多く、複雑さを増すだけで本質的な理解にはつながらないことが少なくない。

ii) 流体運動及び水温の取扱い；場の条件として与えられるか、各種水質濃度の収支則と連立して求められるかのいずれかであるが、後者的の方がより現実には忠実であることは疑いの余地がない。

iii) 生態学的過程のモデリング；水質指標との関係で様々であるが、i) に挙げた主な指標間の関係は図-11に示す例のように考えるのが一般的であろう。また、それらの過程に関連する諸因子の影響は図-12のように表現されることが多い。図-12に示した関係は、定性的にはともかくとして、定量的には各モデル定数に左右される。ところが、そのような定量的関係については今のところ不確定であり、解析結果の評価を難しくしている。なお、図-11の過程のモデル例を表-4に示しておく。

iv) 湖沼の分割法及び時間的変化のスケール；富栄養化に関係する各種水質濃度ならびにその変化に寄与する流体運動、水温の時間的・空間的変化のスケールに関するものであるが、いずれもそれらを把握するためのデータに乏しく、本当のところは良くわかっていない。しかしながら、図-13のMcNaught^{6,5)}が示した水域内での生態学的現象に関する時空間のダイアグラム、図-14のReckhow・Chapra^{6,6)}による解析モデルのスケールを比較してみれば、対象とする現象とそれを取り扱うための時空間分割の目安が得られるであろう。例えば、富栄養化現象の典型である藻類の異常発生は数100 m～数kmに及ぶ範囲で、数時間～数十時間に生起する現象であり、それを取り扱うためには、少なくとも2次元の取り扱いが必要であること。すなわち、これまでの分類によれば一方向多層、二方向一層、さらには二方向多層モデルを用いなければならないことを示している。こうした観点より従来の解析モデルをみると、必ずしも対象とする現象のスケールとモデル

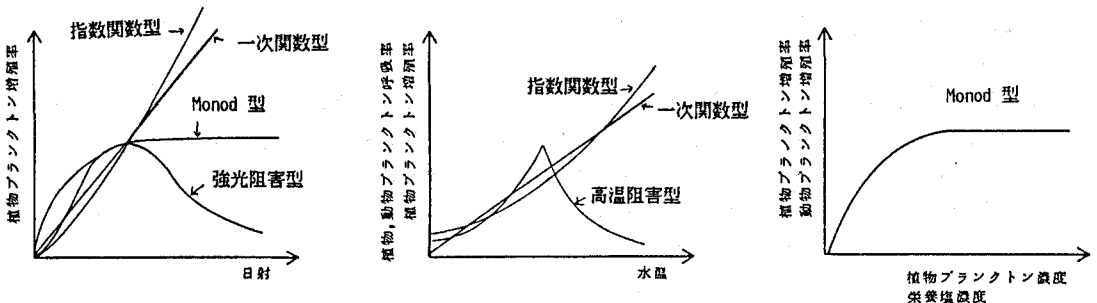


図-12 生態学的変化に関連する因子の影響のモデル表示

表-4 富栄養化関連水質濃度の収支則

・クロロフィルa濃度；

$$\frac{\partial C_P}{\partial t} = F(C_P) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} [C_P \cdot W_{C_P} \cdot A] z_{k+1} + (I_{C_P} - R_{C_P} \theta_{C_P}^{(T-20)}) C_P - Q_Z$$

・炭素濃度（動物プランクトン個体密度）；

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = F(Z) + \alpha_{N_Z} (I_Z - R_Z \theta_Z^{(T-20)})$$

・無機態炭素濃度；

$$\frac{\partial N_L}{\partial t} = F(N_L) - \beta_N (I_{C_P} + R_N \theta_N^{(T-20)}) (N_0 - \beta_N (I_P - r_N Z)) + \beta_N (1 - a_Z) (I_Z + \frac{E_{N_L}}{\Delta z})$$

・有機態炭素濃度；

$$\frac{\partial N_O}{\partial t} = F(N_O) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} [(N_0 - r_N Z) \cdot W_{N_O} \cdot A] z_{k+1} + \beta_N \theta_{N_O}^{(T-20)} (N_0 - \beta_N C_P - r_N Z) - \beta_N (1 - a_Z) Q_Z$$

・無機態リン濃度；

$$\frac{\partial P_L}{\partial t} = F(P_L) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} [P_L \cdot W_{P_L} \cdot A] z_{k+1} - \beta_P (I_{C_P} + R_P \theta_P^{(T-20)}) (P_0 - \beta_P C_P - r_P Z) + \beta_P (1 - a_Z) Q_Z + \frac{E_{P_L}}{\Delta z}$$

・有機態リン濃度；

$$\frac{\partial P_O}{\partial t} = F(P_O) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} [(P_0 - r_P Z) \cdot W_{P_O} \cdot A] z_{k+1} + \beta_P \theta_{P_O}^{(T-20)} (P_0 - \beta_P C_P - r_P Z) - \beta_P (1 - a_Z) Q_Z$$

・COD濃度；

$$\frac{\partial C_O}{\partial t} = F(C_O) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} [C_O \cdot W_{C_O} \cdot A] z_{k+1} + (I_P - I_{C_P}) + I_{C_P} C_O + \frac{E_{C_O}}{\Delta z}$$

ここに、

$$Q_{C_P} = S_P \cdot R_0 \cdot \theta_G^{(T-20)} \frac{I_Z}{I_S} \exp(1 - \frac{I_Z}{I_S}) \cdot \frac{N_L}{K_{N_L} + N_L} \cdot \frac{P_L}{K_{P_L} + P_L} \cdot C_P$$

$$Q_Z = d \cdot \frac{K_{C_P}}{K_{C_P} + C_P} \cdot C_P \cdot Z$$

$$S_P = \exp(-\mu_0 C_P), \quad I_{Z_k} = I_0 \exp[-\eta(z_k - z_k)], \quad \eta = \eta_0 + \mu_4 C_P$$

式中の記号は、 Q_{C_P} ：植物プランクトンの増殖による C_P の生成率、 Q_Z ：動物プランクトンの捕食による C_P の消滅率、 T ：水温、 $R_0, R_{C_P}, R_Z, R_N, R_P$ ；それぞれ $T=20^\circ\text{C}$ における C_P の生成率係数、同じく呼吸率（死滅率）係数、 Z の死滅率係数、炭素及びリンの無機化（分解）係数、 $\theta_{C_P}, \theta_{C_P}, \theta_Z, \theta_N, \theta_P$ ；それぞれ $R_0, R_{C_P}, R_Z, R_N, R_P$ に対する温度補正係数、 $K_{N_L}, K_{P_L}, K_{C_P}, N_L, P_L, C_P$ に関するMichaelis定数、 d ：捕食係数、 S_P ：スペース効果係数、 a_Z ：同化係数、 α ：植物プランクトン中の炭素量とクロロフィルa量との比、 β_N, β_P ：植物プランクトン中のクロロフィルa量と窒素量、リン量との比、 r_N, r_P ：動物プランクトン中の炭素量と窒素量、リン量との比、 $E_{N_L}, E_{C_P}, E_{C_O}, N_L, P_L, C_O$ の流出フラックス、 $W_{C_P}, W_{N_O}, W_{P_L}, W_{P_O}, W_{C_O}$ ； C_P, N_O, P_L, P_O, C_O に関する沈降速度、 I_{Z_k} ：標高 Z_k における日射量、 I_S ：最適日射量、 I_0 ：水表面における日射量、 η ：日射の水中減衰係数、 μ_0, μ_4 ：比例定数、 I_P ：クロロフィルaのCOD換算係数、 I_{C_P} ：CODの分解係数、 A ：分割要素の水平断面積、 Δz ：分割要素の厚さ、 B ：貯水池幅、 x, z ：流下方向及び水深方向距離、 u, w ； x, z 方向の流速成分、 D_{C_X}, D_{C_Z} ； x, z 方向の濃度分散係数、 x_1, x_{1+1} ； $x = x_1, x_{1+1}$ における値を示す、 z_1, z_{k+1} ； $z = z_1, z = z_{k+1}$ における値を示す、 z_S ：水表面における標高である。

また、 $F(C_P), F(Z), F(N_L), F(N_O), F(P_L), F(P_O), F(C_O)$ は各水質濃度に関する移流項及び分散項を示す

のそれとが一致しているわけではないが、湖沼を1ボックスとするものから二方向多層モデルによるもの（現実に適用された例は極めて少ない）まで一応は取り揃っている。

以上、富栄養化の予測法について述べたが、最後に表-4に示した水質モデルを一方向多層流モデルと組み合わせで解析した例を図-15に示しておく。

6. おわりに

本講では、湖沼環境に関する水理・水質問題の背景を述べた後に、その主要課題である水温、濁水及び富栄養化現象の取り扱いについて、湖沼の定性的性格、貯留水の流体運動及び各水質現象の記述、ならびにその解析のためのモデルを概説した。与えられた課題が広範な内容を含むものであるため、従来の研究のレビューに終始し突っ込み不足の感があるが、それぞれの詳細とより深い議論については各文献に参照されたい。また、紙面の都合上、数値解析法や水質改善対策についても触れていないが、それらも該当する文献に詳しいので興味がある方はそれを見て頂きたい。

最後に、湖沼環境の水理に関する今後の研究課題について簡単に触れておく。まず第1は、流体運動及び

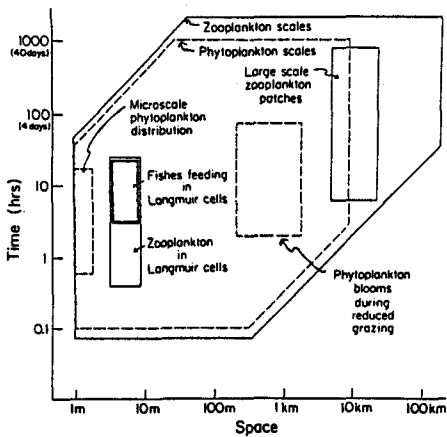


図-13 生態学的現象に関する時空間ダイアグラム
[McNaught, 1979]

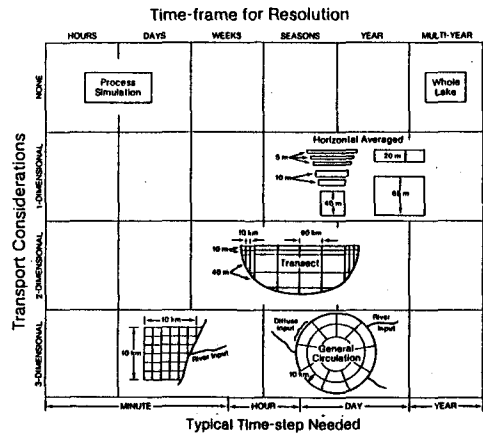


図-14 各種解析モデルと時空間スケールとの関係
[Reckhow ら, 1983]

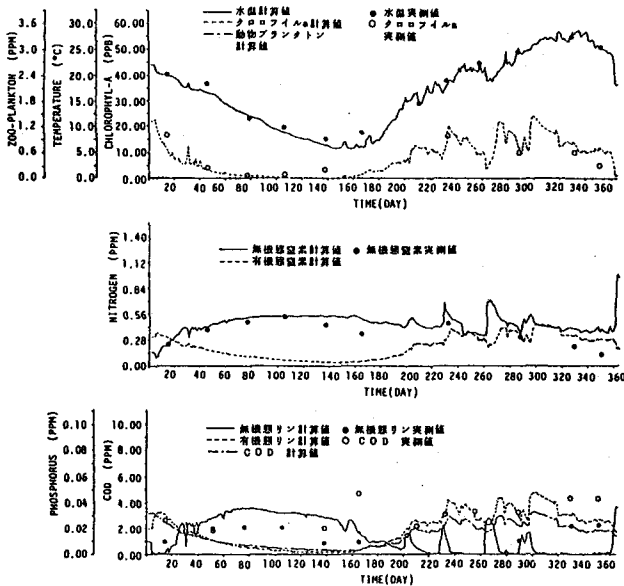


図-15 貯水池における富栄養化現象の解析例

各種水質現象に関する観測システムの確立とそれによる資料の系統的収集・整備である。第2は、そうした資料に基づく現象特性の把握とその表示・評価法の確立であり、とくに水質・生態系に関しての必要性が高い。第3は、やはり資料整備に関係するものであるが、関連事象、例えば流入水の温度、濃度や粒度分布、存在形態など水質を構成する成分の諸特性の把握、水質の化学的・生物学的変化過程に関する定量的な解明、底泥からの巻き上げ、溶出による濁質量や栄養塩量の評価などである。第4は、解析目的及び対象事象の時間的・空間的スケールに基く解析、例えば藻類の異常発生に関する二方向多層流モデルの開発及び適用と、その結果に基く湖沼環境の管理のための巨視的かつ実用的モデルや方法論の開発などである。最後は、環境機能の保全、向上に関する水質改善対策手段の開発と各種対策案に関する最適化であり、そのためには対策効果の予測・評価手法やシステム解析手法の確立が必要である。

参考文献

- 1) 小林正典・岩佐義朗・松尾直規：わが国多目的貯水池の水理・水文的特徴とその評価，第24回水理講演会論文集，1980年
- 2) 安芸周一・白砂孝夫：貯水池濁水現象の調査と解析（その1），電力中央研究所報告74505，1974年
- 3) 岩佐義朗他：貯水池・湖沼における水質変化過程の比較研究，比較河川学の研究，文部省科学研究費特定研究(1) 報告書，1986年
- 4) 村岡浩爾：水界水質のダイナミックス，水質環境科学，第5章，丸善，1985年
- 5) W. R. E. Inc. : Mathematical Model for the Prediction of Thermal Energy Changes in Impoundments, 1969年
- 6) Spiegel, R. H. and Imberger, J. : The Classification of Mixedlayer Dynamics in Lakes of Small to Medium Size, Jour. Phys. Oceanogr. , 10, 1980年
- 7) 例えば，赤沢賢：湖沼の富栄養化，1978年度水工研修会講義集，A-3，1978年
- 8) 例えば，吉村信吉：湖沼学，三省堂，1937年
- 9) 例えば，岡田光正：富栄養化現象，富栄養化対策総合資料集，第4節，サイエンスフォーラム，1983年
- 10) 例えば，Hutchinson, G. E. : A Treatise on Limnology, Vol.2, 1967年
- 11) 例えば，津田松苗：汚水生物学，北隆館，1964年
- 12) 建設省近畿地建木津川上流工事事務所：木津川上流水質保全対策検討業務報告書，1986年
- 13) OECD: Eutrophication of Waters-Monitoring, Assessment and Control, 1982年
- 14) 安芸周一他：貯水池水質の調査と解析，電力中央研究所報告，総合報告No.302，1982年
- 15) Carlson, R. E. : A Trophic State Index for Lakes, Limnol Oceanogr. , 22, 1977年
- 16) 相崎守弘他：修正カル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連，国立公害研究所研究報告，第23号，1981年
- 17) U. S. EPA: An Approach to a Relative Trophic Index System for Classifying Lakes and Impoundments, National Eutrophication Survey Working Paper No.24, 1974年
- 18) Vollenwider : Advances in Defining Critical Loading Levels for Phosphorus in Lake Eutrophication, Mem. Ist. Ital. Idrobiol. , Vol.33, 1976年
- 19) 須藤隆一他：藻類の培養試験法によるAGPの測定，陸水域の富栄養化に関する総合研究(X)，国立公害研究所研究報告，No.26，1981年
- 20) 岡田光正：富栄養化指標，水環境指標，合田健編，5，思考社，1986年
- 21) 田井慎吾：エントロピーによる水質の評価と管理に関する研究，京都大学学位論文，1979年
- 22) 建設省関東地建川治ダム工事事務所，国土開発技術研究センター：ダム貯水池富栄養化調査報告書，1980年
- 23) 岩佐義朗：貯水池・湖沼における水質変化過程の比較研究，比較河川学の研究，文部省科学研究費特定研究(1) 報告書，1985年
- 24) 例えば，Huber, W. C, Harleman, D. R. F. and Ryan, P. J: Temperature Prediction in Stratified Reservoirs, Jour. Hydraulics Division, ASCE, Vol.98, HY-4, 1972年
- 25) 例えば，富所五郎：閉鎖水域における風成流の解析，1984年度水工学に関する夏期研修会講義集，A-7，1984年
- 26) 村岡浩爾：湖沼の環境水理，1986年度水工学に関する夏期研修会講義集，A-8，1986年
- 27) Liggett, J. A. and Hadjithodoran, C. : Circulation in Shallow Homogenous Lak-

- es, Jour. Hydraulics Divisin, A S C E, HY-2, 1969年
- 28) 岩佐義朗・多田彰秀・泊宏:境界要素法を適用した諏訪湖の湖流に関する数値解析, 京都大学防災研究所年報, 第29号B-2, 1986年
- 29) 岩佐義朗・井上和也・足立敏之:琵琶湖南湖の湖流と拡散に関する数値シミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第21号B-2, 1978年
- 30) 岩佐義朗・井上和也・松岡隆之:三次元解析法による琵琶湖湖流に関する二, 三の検討, 第29回水理講演会論文集, 1985年
- 31) 例えば, 安芸周一・白砂孝夫:貯水池流動形態のシミュレーション解析, その1, 発電水力, No.134, 1975年
- 32) Yih, C. S. : On the Flow of a Stratified Fluid, Proc. 3rd U. S. Nat. Cong. Appl. Mech, 1958年
- 33) Debler, W. R. : Stratified Flow into a Line Sink, Jour. Engineering Mech. Div. A S C E, Vol.85, EM3, 1959年
- 34) Craya, A. : Theoretical Resrch on the Flow of Nonhomogeneous Fluids, Laitouille Blanche, Jan-Feb, 1949年
- 35) Kao, T. W. : A Free-Streamline Solution for Stratified Flow into a Line Sink, Jour. Fluid Mech. Vol.21, Part3, 1965年
- 36) Brooks, N. H. and Koh, R. C. H: Selective Withdrawal from Density-Stratified Reservoirs, Jour. Hydraulics Div. A S C E, Vol.95, HY-4, 1969年
- 37) 日野幹雄・大西外明:密度成層流に及ぼすpoint sinkの高さの効果, 土木学会論文報告集, No.163, 1969年
- 38) 岩佐義朗・松尾直規:貯水池水理の解析モデルとその水温予測への適用, 土木学会論文報告集, 第308号, 1976年
- 39) 岩佐義朗・松尾直規・他2名:2方向多層モデルによる貯水池水理に関する数値解析的研究, 土木学会関西支部年講概要, 1989年
- 40) 岩佐義朗・松尾直規:気泡ブルームによる流れ及び水質変化のシミュレーション, 第5回混相流シンポジウム論文集, 1986年
- 41) 宮永洋一:貯水池富栄養化現象の予測と気泡噴流による水質改善に関する基礎的研究, 東京工業大学学位論文, 1988年
- 42) 松尾直規・岩佐義朗・若林伸幸:曝気循環に伴う水質変化の数値解析, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, 1988年
- 43) 例えば, 岩佐義朗・井上和也, 他2名:琵琶湖湖流の三次元的な解析, 京都大学防災研究所年報第26号, B-2, 1983年
- 44) 例えば, 余越正一朗・富所五郎:風による諏訪湖の流動特性, 土木学会論文報告集, 1978年
- 45) 例えば, 岩佐義朗・細田尚・伊藤邦展:乱流モデルによるBuoyant Surface Jetの数値解析, 京都大学防災研究所年報第30号B-2, 1987年
- 46) Leendertse, J. J. and Liu, S. K. : A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas, Rand, 1975年
- 47) 土木学会編:水理公式集, 6. 拡散, 1985年
- 48) 玉井信行:密度流の水理, 技報堂出版, 1980年
- 49) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭:洪水時における貯水池の成層破壊について, 京都大学防災研究所年報,

第20号-B, 1977年

50) Dake, J. M. K. and Harleman, D. R. F. : Thermal Stratification in Lakes; Analytical and Laboratory Studies, Water Resour. Res. , Vol.5, No.2, 1969年

51) McCormick, M. J. and Scavia, D. : Calculation of Vertical Profiles of Lake-averaged Temperature and Diffusivity in Lakes Ontario and Washington, Water Resour. Res. , Vol.17, No.2, 1981年

52) 岩佐義朗・井上和也・野口正人: ダム貯水池の成層化過程, 京都大学防災研究所年報, 第16号-B, 1973年

53) 松尾直規・岩佐義朗・その他2名: 貯水池水理の空間的スケールからみた解析法の考察, 第25回水理講演会論文集, 1981年

54) 安芸周一・白砂孝夫: 貯水池濁水現象の調査と解析(その2) 一成層型貯水池の流動形態と選択取水の数値解析, 電力中央研究所報告74506, 1974年

55) 岩佐義朗・松尾直規・井上素行: 貯水池における濁度解析について, 京都大学防災研究所年報, 第21号B-2, 1978年

56) 芦田和男・江頭進治・古谷健: 密度躍層のある場における濁水の挙動に関する研究(4), 京都大学防災研究所年報, 第22号B-2, 1979年

57) 福岡捷二・福嶋祐介: 成層化した二次元貯水池中で分岐する密度流の解析的研究, 土木学会論文報告集, No.294, 1980年

58) 中村俊六・足立昭平: 濁水化貯水池における濁質粒度の変動, 土木学会論文報告集, No.279, 1978年

59) 宮永洋一・安芸周一: 濁質粒度が貯水池濁水現象に及ぼす影響について, 土木学会論文報告集, No.296, 1980年

60) 津野洋: 微生物による基質の摂取・代謝の動力学モデル化に関する研究, 京都大学学位論文, 1977年

61) 村松晃: 二次汚濁の影響予測実例, 環境創造, 1977年

62) 村上健: 富栄養化による有機性汚濁のモデリング, 1979年度水工学に関する夏期研修会講義集, A-8, 1979年

63) 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, 1984年

64) 松尾直規: 貯水池における水温・濁度ならびに富栄養化指標の予測に関する水理学的研究, 京都大学博士論文, 1982年

65) McNaught, D. C. : Consideration of Scales in Modeling Large Aquatic Ecosystems, Perspectives on Lake Ecosystem Modeling, Ann Arbor Science, 1979年

66) Reckhow, K. H. and Chapra, S. C. : Engineering Approches for Lake Management Vol.2; Mechanistic Modeling, Ann Arbor Science, 1983年