

ダム貯水池の水質変化と富栄養化

WATER QUALITY AND EUTROPHICATION IN RESERVOIR

合 田 健*・海老瀬 潜一**・大 島 高 志***

By Takeshi GODA, Senichi EBISE and Takashi OSHIMA

1. はじめに

水系における貯水池の存在は、その背水域だけでなく下流まで水量および水質の両面にその影響を及ぼす。とくに、最近の河川の水質汚濁化現象に伴う貯水池の富栄養化傾向の顕在化は、従来からの水温や濁水の問題だけでなく、水利用上、種々の障害をもたらしている。すなわち、植物プランクトンの異常発生（水の華の出現）や深水部での溶存酸素の枯渇やマンガンおよび鉄の溶出など、水処理において問題になることが多い。

したがって、この研究は貯水池の水質変化特性を把握し、取水や放流に伴う水質障害の軽減化はもとより、富栄養化を含む水質汚濁の制御や対策など貯水池水質管理の基礎に係るものである。そして、そのアプローチとしては、貯水池流入水あるいは流入端での水質変化と、貯水池縦断方向の数箇所における水深方向の水質変化の対応関係、さらにそれと生物量との相互関係を、周年変化の調和分析を含む経年変化の時系列解析によってその特性の把握、および水質量の収支の検討を行っている。この水質変化の時系列解析は、長期傾向 (trend) の外挿により、近い将来の予測を確率論的に行えるため、水質予知に役立つほか、水質因子間の相関関係の解析にも資するものである。

2. 貯水池の概要

対象とする兵庫県武庫川水系に属する千莉貯水池は、図一に示すように有効貯水量 11 612 000 m³、最大水深 33 m、延長約 6 km、集水面積 94.5 km² であり、流入河川として流程約 26 km の羽束川と流程約 6 km の波

豆川を有する水道専用の細長い水源池である。この両流入河川流域は、集水面積の約 90% が山林に占められる人口約 6 700 人の農山村である。また、両流入河川の合流点より約 5 km 下流の堰堤中央部に、水深方向に 9 段の取水口を有する取水塔があり、水道用原水として選択取水されるほか、高水時には越流放流される。この高水時以外はほぼ定量の定常



図一 貯水池概要図

取水により、貯水池内の水質は安定した変化を呈するのが通常である。

著者らの観測調査は、昭和 48 年 10 月から昭和 49 年 11 月までの約 1 年間に 11 回行っており、このうち生物の生産活動が活発な 4 月から 11 月まではほぼ 30 日の間隔であった。調査は、貯水池縦断方向に両流入河川合流点から堰堤前までの 5 地点について、水深方向に 1 m ごとくの水質分析を行っている。

(1) 流量および水位変化特性

この貯水池集水域における最近 7 年間の平均降水量は約 1 200 mm と少なく、全国平均の約 2/3 の量であり、この流域にはため池が多い。また、羽束川と波豆川の流入量比はおおよそ 3 : 1 であるが、水質的には人口密度の高い波豆川の汚濁が著しい。貯水池への流入水の水量および水質の変動は、貯水池内の水温変化や流入汚濁負荷

* 正会員 工博 国立公害研究所水質土壌環境部長

** 正会員 工博 京都大学助手 工学部衛生工学科

*** 工修 環境庁大気保全局

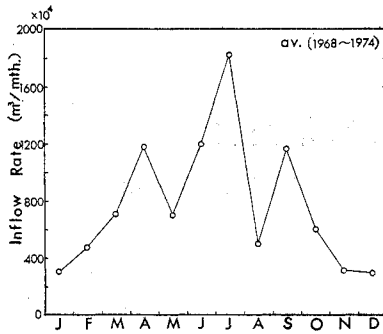


図-2 流入水量の周年変化

量に影響を及ぼす重要な因子である。その流入水量の平均的な変化は、図-2に示すように6~7月の梅雨期と9月の台風期および4月に大きく、8月および11月~3月に小さい周年変化を繰り返している。貯水池の最近7年間の平均水位は満水面下1.43mで、流入量の約50%が取水され、残りの約50%は高水時の越流量として失われ、蒸発による損失は高々1.5%以下と算定される。上記の両流入河川および貯水池周辺からの流入量より求められる平均滞留時間は約50日であるが、成層期には高水時の流入濁質の挙動から、温度密度流などにより実質滞留時間はもっと短いことがわかる。

(2) 水質変化特性

両流入河川水の水質変化は貯水池貯留水の流動状態によって程度の異なる緩衝作用を通して、その変化の程度を和らげ、かつ、ある時間遅れを伴って貯水池下流あるいは流出水に影響することになる。したがって、貯水池の水質は、さらに外的要因に基づく環境因子の温度や日射量などの1年を周期とする変化の影響を受けて、1年をサイクルとする周年変化を示すのが通例である。また最近のように、汚濁物や栄養塩の負荷量の増大は、汚濁指標や栄養塩濃度などの因子の経年変化からも明らかである。この水質の周年変化および経年変化については、後述の時系列解析で示すように過去8年間の神戸市の調査結果⁷⁾を中心として、長期傾向の統計的検定や複合調和波の各種の特性の検討によって明らかにする。

(3) 温度躍層と水質の鉛直分布特性

貯水池の水質分布を左右する水温躍層の位置は、季節によって少しずつ変化するが、貯水池の水温や他の水質の変化パターンを知るには年間を通じての平均的なものが重要である。著者らの11回の調査による水深1mごとの水温傾度(°C/m)より、昭和49年の主躍層および表層躍層の位置および強度の変化を示したのが図-3であり、躍層強度は大きく持続性も高く安定している。各水深ごとの11回の平均水温の水温差によると、主躍層は

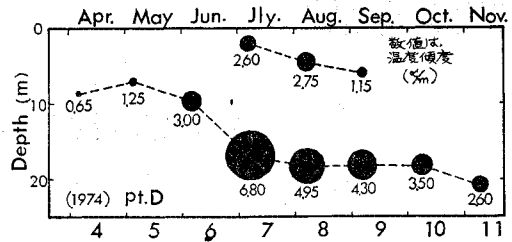


図-3 水温躍層の変化

約1.5(°C/m)の水深13~15mを中心に13~17mに存在する。そして、5月から10月頃にかけて存在する表層躍層の位置は、主躍層ほど明確ではないが、水深4~5mの11回の調査の平均値で0.65(°C/m)を中心とする3~5mに存在する。これは神戸市水道局による水深2~3m間隔の毎月の調査結果によっても支持される。したがって、この貯水池では、湖沼学における表層、変水層(躍層)、深水層という層区分とは別に、水深0~4mの表層、4~6mの表層躍層、6~13mの中層、13~17mの主躍層、17m以上の深水層、という2つの躍層を有する人工貯水池の層区分ができる。

この層区分は他の水質因子の鉛直分布からも支持される。特に、生物の活動と関連の深い溶存酸素濃度および溶存酸素飽和度、pH、および無機態窒素濃度は、水温の鉛直分布との関係が密接である。すなわち、DO飽和度は水深3~5mでの変化が大きく、11回の調査の平均値の差は3~4mで10(%/m)となり、水深13mをはさむ12~14mでも8~9(%/m)の差が見られ、成層期のみのそれはさらに顕著である。また神戸市の昭和49年の調査結果から、pHについては12か月平均値で、水深3~5mでは0.4~0.6(1/m)の差が存在し、それ以深での変化は小さいことがわかる。同様に無機態窒素濃度についても12か月平均値で水深3~5mで約0.08(ppm/m)と大きな差が認められるが、底層水を除く水深13~15m以深では水深とともに少しずつ増加する程度でその差は小さい。この両者とも成層期のみの平均値は、表層躍層の3~5mの差がいっそう顕著である。

上述のように水温を中心とし、水質の鉛直分布を加味した層区分、すなわち、層パターンの分類は、貯水池への流入水の水温および水量の変化、取水あるいは放流の水深および水量の変化と微妙なバランスを保つが、全体としては安定なものである。したがって、成層期を含む1年サイクルとしては、水深0~5mの表層、水深5~15mの中層、水深15m以上の下層、底面付近の底層の4つに分けられる。また1年のサイクルを水温等水質因子でいえば、12~2月の一様状態、3~4月の1躍層状態、5~10月の2躍層状態、10~11月の1躍層状態の変化を繰り返す。この表層は、水表面を通しての大気

や太陽光との関係から生態学的に重要である。底面付近の数 m は底層として、栄養塩の回帰や底泥との物質移動に関し注目される部分である。

この貯水池水質の鉛直（水深）方向および縦断（流下）方向分布の周年変化を見ることにより、水温変化を中心とする層形成パターンが水質変化パターンを支配している状態がさらに明確化される。そして層形成パターンあるいは流動パターンを把握することは、貯留という滞留時間における水質変化の過程、したがって、流入水と貯留水あるいは流出水との応答関係、すなわち貯留水の緩衝作用の程度を知り、水利用や水質管理につながるものである。

3. 水質の年平均値の鉛直分布

貯水池では、河川と比較して水深が大きく、流入から流出までの滞留時間が長いこと、湖沼と比較して流入・流出に伴う流動性に富み、水位変化の大きいことが、貯水池内での水質変化を特色づける基因となっている。したがって、貯水池の水質変化については、水質の分布変化の特性が重要であり、水質の水深（鉛直）方向分布の時間的変化および流下方向の変化が問題となる。貯水池の水質変化を1年サイクルの変化として把握する場合には、水量および水質の一時的な入力変化の影響がよく反映される流下方向変化より、定常的な周期変化である季節変化あるいは周年変化が重要である。全般的な水質変化の把握や、各地点間および他の貯水池との水質比較、また水質の経年変化の検討などには、夏季の成層状態や冬季の一樣状態とは別に、毎月観測など等間隔測定による年平均値が1つの目安となる。貯水池水質の年平均値による鉛直分布の例として、著者らの調査および神戸市水道局の資料によって千苅貯水池の重要な水質因子の昭和49年の毎月観測値の年平均値を図-4~7に示す。

貯水池の水質特性をこうした年平均値から概観するならば、まず図-4の水温の鉛直分布から、温度躍層の強度と持続性の大きさが認められる。主躍層は明確であるが、表層躍層は年平均値のため持続期間が短く読み取り難いことがわかる。同図の溶存酸素飽和度の鉛直分布は、表層では植物プランクトンによる光合成作用のため過飽和、温度躍層以深では生物の呼吸・分解等による減少を意味していると認められる。図-5のpHの鉛直分布から表層での光合成作用による上昇の状態がわかる。同図の無機態窒素 ($\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NO}_2^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}$) の鉛直分布の傾きは、表層での植物プランクトンによる栄養塩摂取および深層でのDO不足による $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ の蓄積によるものと解される。図-6の KMnO_4 消費量は、温度躍層およびその直下で減少し、底面付近で高濃

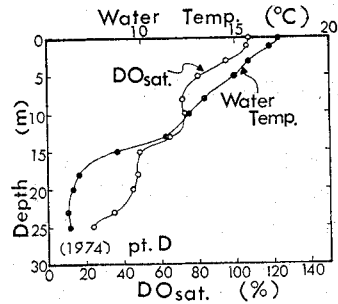


図-4 水温と $\text{DO}_{\text{sat.}}$ の鉛直分布

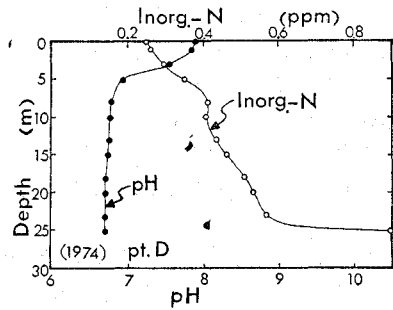


図-5 pHと無機態窒素の鉛直分布

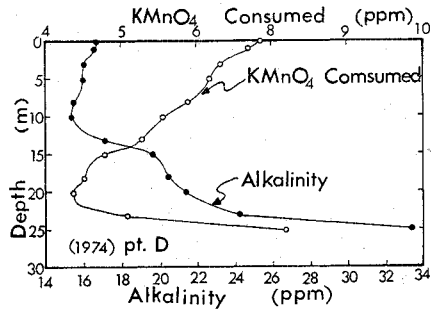


図-6 KMnO_4 消費量とアルカリ度の鉛直分布

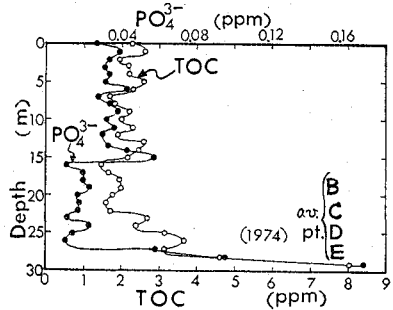


図-7 PO_4^{3-} と TOC の鉛直分布

度となる。同図のアルカリ度は、pHと CO_2 濃度に左右されるために中層で少し低い値となり、温度躍層以深では増加傾向にあり底面付近で最高濃度に達する。図-7の PO_4^{3-} および TOC はいずれも11回の平均値であるが、両者とも水深5~6mおよび15mの温度躍層位置と底層で高濃度となり、これらの部分に保留されや

すいことがわかる。

4. 水質変化の時系列解析

毎月1回8年間の水質変化の観測値を水質時系列の標本とし、その母集団である確率過程(系列)の特性を見出し、将来の予測を確率的に行うことを試みる。この水質時系列の変動には、測定や観測方法に依存する因子のほかに偶然に支配される因子も含まれるが、貯水池の各地点、各水深の水質は相互に独立ではなく依存関係が強い。したがって、季節変化および経年変化を含む貯水池の水質変動を複合調和波を含む時系列として自己相関係数によって分析してみる。すなわち、時系列の平均値、分散、系列相関係数を求め、その長期傾向(trend)成分の有無を吟味の上、定常化された時系列について循環(周期)変動成分を調和分析により調和波の結合として表わす^{2),3)}。

貯水池の水質汚濁や富栄養化の傾向は、それぞれと関連する水質因子について、時系列の長期傾向の有無で従来の経年変化として定量的に把握されるほか、長期傾向のあるものは傾向線のあてはめによる外挿法で将来の予測が可能となる。また周期的な水質変化機構の解明には、全変動成分中の12か月周期変動成分の強さ、その振幅の大きさ、位相角に基づくピークや谷の出現時期などの諸特性に関して、各水質因子間、各地点間および各水深間での相違の比較検討が重要である。この解析による水質変化の複合調和波による近似表現は、水質因子と植物プランクトンの関係の生態学的シミュレーション解析に利用することもできる。

なお、解析手法は、 N 個の観測値 $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)$ を x_1, \dots, x_N として、以下の計算式を用いた。

$$\text{系列平均値: } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\text{系列分散: } S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \bar{x}^2$$

系列相関係数:

$$r_k = \frac{1}{S_1 \cdot S_2} \left\{ \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x}_1)(x_{i+k} - \bar{x}_2) \right\}$$

$$= \frac{1}{S_1 \cdot S_2} \left\{ \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x_i \cdot x_{i+k} - \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \right\}$$

$$x_1 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x_i, \quad x_2 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=k+1}^N x_i,$$

$$S_1^2 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x}_1)^2,$$

$$S_2^2 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=k+1}^N (x_i - \bar{x}_2)^2,$$

傾向直線で定常化ののち、 $x_r(t)$ を残差として、有意な M 個の調和波によって、 x の変化 $x(t)$ は次式で表わ

せる。

$$x(t) = \bar{x} + \sum_{i=1}^M C_i \cdot \cos(\omega_i t - \theta_i) + x_r(t)$$

$$= \bar{x} + \sum_{i=1}^M (A_i \cdot \sin \omega_i t + B_i \cdot \cos \omega_i t) + x_r(t)$$

$$A_i = C_i \cdot \cos \theta_i = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x(t) \cdot \sin \omega_i t,$$

$$B_i = C_i \cdot \sin \theta_i = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x(t) \cdot \cos \omega_i t$$

$$C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}, \quad \theta_i = \tan^{-1}(A_i/B_i),$$

i 番目の調和波の平均値 \bar{x} のまわりの分散 S_i^2 は、

$$S_i^2 = C_i^2/2 \quad \left(i < \frac{N}{2}\right), \quad S_i^2 = C_i^2 \quad \left(i = \frac{N}{2}\right)$$

となり、 S_i^2 の全体の分散 S に対する比 $C_i^2/2 S^2 (i < N/2)$, $C_i^2/S^2 (i = N/2)$, が求まり、 i 番目の調和波の全体の変動に対するウェイトの目安とすることができる。

用いたデータは過去7あるいは8年間1か月ごとの84あるいは96個であり、12か月ごとの平均値と分散による定常性の F 検定(有意水準1%)を行い、長期傾向の有無を判定する。長期傾向のあるものについては、最小二乗法により傾向直線を求めて、それにより長期傾向を除去したもの(定常化したもの)についてコロログラムによってその周期性を確認の後、調和分析を主とする解析を行った。

また、残差について、観測誤差と採水時の特異現象の出現などによるものと考えられ、その大きさは各水質因子の変化の安定性の度合に帰因するものと思われる。千苜貯水池については、昭和45年春の植物プランクトンの大発生、昭和47年夏から秋の流入河川上流のゴルフ場造成工事に伴う高濁水の流入、昭和48年夏の濁水の影響などが一時的な変化として大きいと考えられる。

(1) 流入水の水質変化

千苜貯水池の集水域は、約10%の耕地・宅地・道路のほかは山林であり、降雨量の少なさを補うために大数多くのかんがい用ため池が散在する。流域内での栄養塩や汚濁物の負荷源の変化としては、昭和44年秋の羽東川上流の牧場の出現、昭和47年の羽東川上流でのゴルフ場造成工事がある。その他、一般的傾向としての生活排水の質的悪化、かんがい用ため池の養魚池化、施肥量増加による水質悪化があげられる。また、羽東川と波豆川の両流入河川の流域特性としては、羽東川は長い河川沿いに集落が散在し、人口は約4600人であり、波豆川は4つの支川に分れるが、集落は比較的集中し、人口は約2100人である。以下、両河川水の水質汚濁因子の変化と、その流達負荷量(推定値)の変化の解析結果を順に示すことにする。

a) 無機態窒素($\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N}$): C_N

栄養塩として重要な水質指標であり、その変化は、

$$\begin{aligned} \text{波豆川: } C_N(\text{ppm}) = & (0.263 + 0.00122 \cdot t) + (0.102 + 0.00135 \cdot t) \cdot \left\{ 0.683 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot t - 5.588\right) \right. \\ & \left. + 0.095 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot t - 3.212\right) + 0.273 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t - 1.819\right) + 0.346 \cdot \cos\left(\frac{2}{3} \pi \cdot t - 3.555\right) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{羽束川: } C_N(\text{ppm}) = & (0.276 + 0.00264 \cdot t) + (0.103 + 0.00060 \cdot t) \cdot \left\{ 0.794 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot t - 5.691\right) \right. \\ & \left. + 0.144 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot t - 5.031\right) + 0.131 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t - 0.848\right) + 0.224 \cdot \cos\left(\frac{2}{3} \pi \cdot t - 5.657\right) \right\} \end{aligned}$$

この流達負荷量は、その後の流入河川調査でほぼ流量に比例するという結果を得ていることから、毎日の流量観測値と毎月の水質観測値を用いて、

$$(\text{当月流達負荷量}) = (\text{当日流達負荷量}) \times (\text{当月総流量} / \text{当日流量})$$

とした1か月負荷量(推定値)の変化は次式となり、濃度変化と同様に経年的に増加傾向にある。

$$\begin{aligned} \text{負荷量: } W_N(t/\text{月}) = & (2.428 + 0.01296 \cdot t) + (2.689 + 0.01025 \cdot t) \cdot \left\{ 0.638 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot t - 0.638\right) \right. \\ & \left. + 0.052 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot t - 5.925\right) + 0.239 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t - 2.771\right) + 0.443 \cdot \cos\left(\frac{2}{3} \pi \cdot t - 5.505\right) \right\} \end{aligned}$$

ここで、 t は月単位であり、 $t=0$ を昭和43年1月とする。

b) リン酸イオン (PO_4^{3-})

栄養塩として窒素と同様に、あるいはそれ以上に重要な水質指標である。 PO_4^{3-} に関するデータの蓄積はなく、昭和49年1年間の12個のデータによる調和分析となり、データ数の不足から水質変化の近似式となる。この水質量以降の時系列解析結果も、a)と同様の式表示となるが、表-1にその系列平均値 $m(t) = at + b$ 、系列分散 $\sigma(t) = at + \beta$ 、および各調和波の振幅と初期位相角の各数値だけを一括して示すことにする。負荷量についても、a)と同様の解析によって求められ、表-1に示される。

c) BOD

有機性の水質汚濁指標として重要であるBODについては、b)と同様に昭和49年1年間12個のデータによる調和分析となり、水質量、負荷量とも表-1に示される。

d) 過マンガン酸カリウム消費量

上水の水質試験項目として有機性汚濁の指標でもある KMnO_4 消費量は、その値に0.2531を乗ずることによって COD_{Mn} となる重要な指標である。水質濃度の変化では12か月周期変化が優勢で、年々増加の傾向を示している。また KMnO_4 消費量を COD_{Mn} に換算して、a)と同様の流量比例による COD_{Mn} 流達負荷量(推定値)変化の時系列解析結果も表-1に示され、濃度変化と同様に経年的に上昇傾向にある。

e) アルカリ度

表-1 流入水の時系列解析結果

	流入河川	$m(t) = at + b$		$\sigma(t) = at + \beta$		12か月周期		6か月周期		4か月周期		3か月周期	
		a	b	α	β	振幅	初期位相角(rad.)	振幅	初期位相角(rad.)	振幅	初期位相角(rad.)	振幅	初期位相角(rad.)
無機態窒素濃度(ppm)	波豆川	0.00122	0.263	0.00135	0.102	0.683	5.588	0.095	3.212	0.273	1.819	0.346	3.555
	羽束川	0.00264	0.276	0.00060	0.103	0.794	5.691	0.144	5.031	0.131	0.848	0.224	5.657
無機態窒素負荷量(t/月)	全流入水	0.01296	2.428	0.01025	2.689	0.638	0.638	0.052	5.925	0.239	2.771	0.443	5.505
リン酸イオン濃度(ppm)*	波豆川	—	0.105	—	—	0.065	1.837	0.108	0.141	0.026	4.335	0.041	0.806
	羽束川	—	0.018	—	—	0.010	1.552	0.003	5.526	0.004	5.093	0.004	5.121
リン酸イオン負荷量(t/月)*	全流入水	—	0.381	—	—	0.410	1.793	0.186	3.573	0.343	4.863	0.350	0.047
BOD 濃度(ppm)*	波豆川	—	1.140	—	—	0.280	0.062	0.497	1.943	0.300	1.330	0.194	2.687
	羽束川	—	0.680	—	—	0.161	0.589	0.397	2.182	0.045	3.440	0.034	1.301
BOD 負荷量(t/月)*	全流入水	—	5.01	—	—	3.00	1.388	1.17	2.854	3.02	5.054	2.29	0.242
KMnO_4 消費量(ppm)	波豆川	0.0402	6.68	0.0244	1.42	0.985	2.018	0.041	6.033	0.266	3.201	0.098	3.544
	羽束川	0.00709	6.17	0.00732	2.05	1.023	2.050	0.213	3.192	0.183	3.223	0.086	2.109
COD_{Mn} 負荷量(t/月)	全流入水	0.00133	13.82	0.0263	14.03	0.834	3.031	0.125	0.155	0.153	2.959	0.442	5.576
アルカリ度(ppm)	波豆川	0.151	14.06	0.123	1.23	0.760	3.484	0.678	5.190	0.513	4.841	0.454	6.079
	羽束川	0.0671	14.82	0.0508	2.78	0.871	2.993	0.341	5.202	0.254	4.253	0.370	0.430

備考: $t=0$ を1968年1月とする。ただし、*印については、1974年1月を $t=0$ とする。

アルカリ度は、水質汚濁の指標ともなり、光合成作用を通じてpHやCO₂濃度と関係が深い。その変化の時系列解析結果は、表-1に示され、経年的に増加傾向にあることがわかる。

(2) 貯留水の水質変化

貯留水の水質変化は、流入水の水質変化に加えて、貯水池内での生物・物理・化学的作用の差異による分布変化を示す。図-1に示すように、流下方向にA地点（流入両河川の合流点、堰堤より約5 km）、B地点（堰堤より約4 km上流）、C地点（同、約3 km上流）、D地点（同、約2 km上流）、E地点（堰堤前、取水塔前）の5地点について、流動や水深の差に起因する特性が見られる。しかし5地点の水平方向の変化は、時間差（位相差）の変化の程度に多少の相違があるものの、いずれもほぼ同様の変化パターンを呈している^{4)~6)}。したがって、時系列解析の結果としては、主躍層の安定度が大きく、流入や流出による影響が比較的小さく、かつ安定した水質変化を示すD地点の例を示すことにする。流下方向や水深方向の水質分布特性については後で検討することとし、ここでは表層の例を示し、底層の例は(3)で示す。

a) 水温

水温変化のコロログラムは図-8に示されるように、その周期性が明瞭である。時系列解析結果は、(1)と同様に表-2にまとめて示す。図-9に観測値と計算値のプロットを示すが、定常的な周期変化が顕著である。

b) 溶存酸素飽和度 (DO_{sat})

溶存酸素飽和度のコロログラムを示したものが図-10であり、その周期性は明らかであるが、水温ほどスムーズではない。溶存酸素飽和度を酸素飽和百分率(%)として表わし、時系列解析を行った結果、定常的な周期変化が認められ、図-11に観測値と計算値が示され、時系列解析結果の諸数値は表-2に示す。

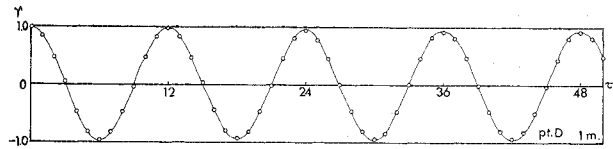


図-8 水温変化のコロログラム

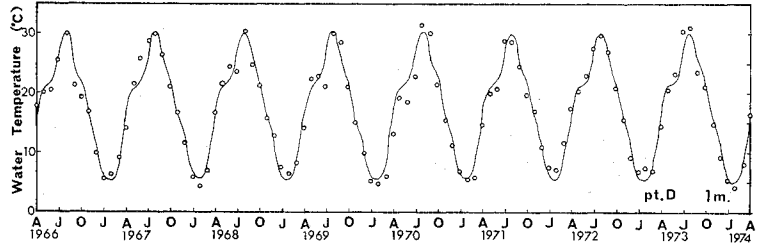


図-9 水温変化の時系列解析結果

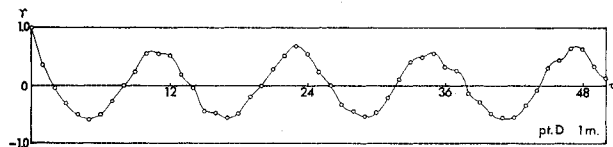


図-10 DO_{sat} 変化のコロログラム

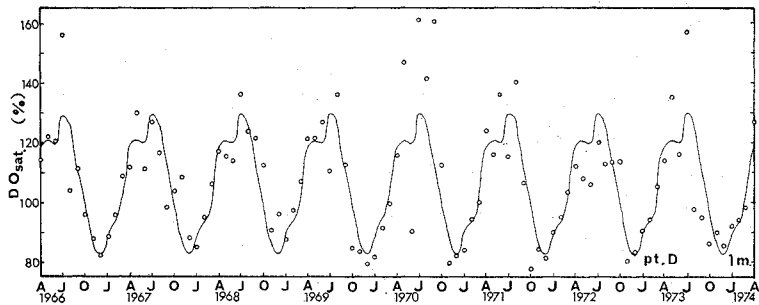


図-11 DO_{sat} 変化の時系列解析結果

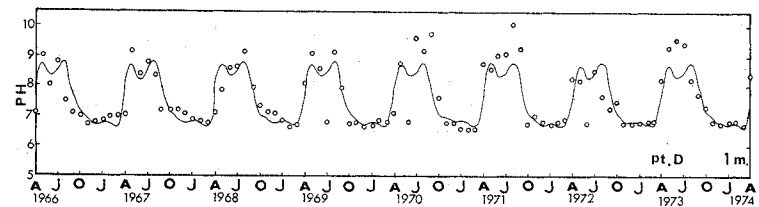


図-12 pH 変化の時系列解析結果

c) pH

pHの時系列解析結果の諸特性値は表-2に示し、観測値と計算値のプロットを図-12に示す。定常的な周期変化を主としたものと見ることができる。

d) 無機態窒素, KMnO₄ 消費量, アルカリ度

貯留水の無機態窒素濃度, KMnO₄ 消費量, アルカリ度のいずれも流入水と同様に経年的に増加傾向が認められる。時系列解析結果の諸特性値は表-2にまとめて示し、それぞれの観測値と計算値のプロットは図-13, 14, 15に示す。この長期傾向の認められた3つの水質因子

表-2 貯留水(表層)の時系列解析結果

	$m(t)=at+b$		$\sigma(t)=\alpha t+\beta$		12か月周期		6か月周期		4か月周期		3か月周期	
	a	b	α	β	振幅	初期位相角(rad.)	振幅	初期位相角(rad.)	振幅	初期位相角(rad.)	振幅	初期位相角(rad.)
水温(°C)	—	17.00	—	—	10.91	1.293	0.719	6.264	1.289	0.365	0.845	1.698
DO _{sat} (%)	—	106.8	—	—	21.4	1.235	3.4	4.703	2.5	0.125	2.6	0.544
pH	—	7.54	—	—	1.05	1.420	0.13	4.703	0.27	0.829	0.20	1.761
無機態窒素(ppm)	0.00231	0.150	0.00097	0.071	0.958	5.025	0.067	2.065	0.248	4.043	0.197	5.010
KMnO ₄ 消費量(ppm)	0.00903	6.05	0.00125	1.45	1.04	1.884	0.15	3.697	0.17	2.597	0.09	4.686
アルカリ度(ppm)	0.0567	13.33	0.00444	3.22	0.918	4.118	0.163	3.305	0.142	4.043	0.197	2.475
PO ₄ ³⁻ (ppm)*	—	0.024	—	—	0.009	1.382	0.012	3.551	0.011	5.274	0.009	0.409
TOC(ppm)*	—	2.46	—	—	0.563	3.303	1.46	3.018	0.184	4.322	0.070	5.277

備考: t=0を, 4月とするが, 長期傾向のある3つの水質は1966年4月とする.

*: 1974のみ

は, 増加傾向に若干の差はあるが, 流入水の濃度や負荷の長期的変化に対応していることがわかる.

e) リン酸イオン, TOC

PO₄³⁻とTOCに関する資料の蓄積はなく, 昭和48年10月から昭和49年11月までの11回の調査結果をもとに, 内挿などにより12か月の1サイクルとして, B, C, D, Eの4地点の平均値として表わした調和分析による水質変化の近似式となる. その諸特性値は表-2に示される.

(3) 貯水池底層の水質変化

ダム貯水池でも千苜貯水池のような例は, 河川的な性質と湖沼的性格とをあわせて備えており, 流入水質も, 貯水池内の成層・循環などの流動状態によっては, 流入から流出まで一過的でなく, 一部が貯留され, 水質によっては逐次蓄積されたり, 新たな作用を受けて変化したりする. したがって, 死水域となる水深約25m以深の貯水池底層付近の水質変化は, 成層化現象に伴う溶存酸素の欠乏状態と有機物の分解, マンガンや鉄の溶出・沈着問題, さらに栄養塩の蓄積・回帰などと密接に関連するものである. 底層水の場合も, (2)と同様にD地点での観測値について時系列解析を行った結果を以下に示す. これより, 好気・嫌気状態によるピーク値出現時期の差異が明確化され, 秋季後半の全循環の前後における変化が著しいことがわかる.

a) 溶存酸素, マンガン

底層水の最深部の溶存酸素, マンガンとも長期傾向がなく, 定常的な周年変化を示す. 時系列解析結果の諸特

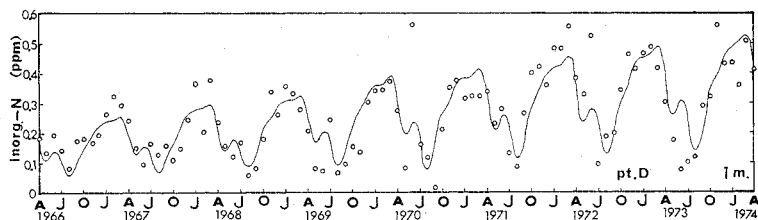


図-13 無機態窒素変化の時系列解析結果

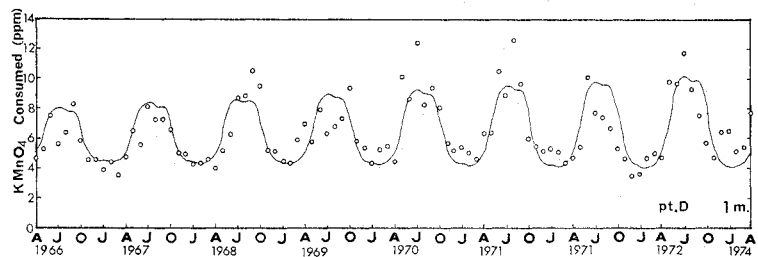


図-14 KMnO₄消費量変化の時系列解析結果

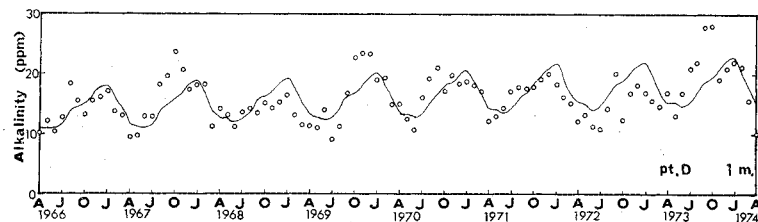


図-15 アルカリ度変化の時系列解析結果

性値を表-3にまとめて示し, 観測値と計算値のプロットをそれぞれ, 図-16, 17に示す.

b) 硝酸態窒素, アンモニア態窒素

NO₃⁻-N, NH₄⁺-Nとも長期傾向があり, 経年変化と周年変化が見られる. 底層の最深部ではNO₂⁻-Nはほとんど検出されず, 検出されてもその値はNO₃⁻-NやNH₄⁺-Nに比べて小さいため, これら三者の総和である無機態窒素の経年的な増加傾向が確認され, 富栄養化の進行がうかがわれる. 時系列解析結果の諸特性値は表-3に示し, 観測値と計算値のプロットを 図-18, 19に示す.

表-3 貯留水（底層）の時系列解析結果

	$m(t)=at+b$		$\sigma(t)=\alpha t+\beta$		12か月周期		6か月周期		4か月周期		3か月周期	
	a	b	α	β	振幅	初期位相角 (rad.)	振幅	初期位相角 (rad.)	振幅	初期位相角 (rad.)	振幅	初期位相角 (rad.)
DO (ppm)	—	4.05	—	—	4.99	5.635	1.46	4.261	0.81	2.256	0.32	0.183
全Mn (ppm)	—	0.96	—	—	1.01	3.143	0.35	0.652	0.23	5.528	0.17	2.877
NO ₃ -N (ppm)	0.00145	0.197	0.00088	0.094	1.007	0.440	0.237	2.845	0.343	2.918	0.167	5.212
NH ₄ ⁺ -N (ppm)	0.00217	0.240	0.00320	0.210	0.885	3.371	0.373	1.318	0.387	5.291	0.065	3.448

備考：DO，全Mnはt=0を4月とするが，NO₃-N，NH₄⁺-Nは1966年4月をt=0とする(1966~1974)。

(4) 流出水の水質変化

貯水池の流出水は，高水時の越流放流を除けば，水利用上，水質的に良好かつ安定した層からの選択取水が行われるので，取水塔前（堰堤前）の中層水質がほぼ流出水質に対応する。このことは，取水し，利用される2浄水場3系統での原水としての定期的水質検査の結果によって裏付けられており，その化学的・物理的性質，および出現プランクトンの種類と濃度などから明らかである。この選択取水のために取水水深の変化もあり，取水水質の年平均値からは(1),(2),(3)と同等の精度での詳細にわたる定量的な検討はできない。

(5) 解析結果の検討

貯水池の水質変化が水温成層状態によって大きな影響を受けることを年平均値などによって指摘したが，ここでの貯留水および流入水の各水質因子の8年間の観測値の時系列解析の結果，その変動の諸特性から経年変化の有無と季節変化の内容の検討ができる。すなわち，長期傾向の有無の統計的検定とその大きさから経年変化としての富栄養化や水質悪化の傾向の定量的把握と将来水質の予測ができる。また，定常的な形での周年変化（季節変化としての12か月周期変動成分の全変動に対して占める割合（寄与率）や，その諸特性値に基づく変化パターン（ピークの出現時期やその大きさなど）の定量的な把握や，その各水質因子の変化特性の相似性による分類が可能となるほか，流下方向および水深方向分布の変化特性を明らかにすることができる。

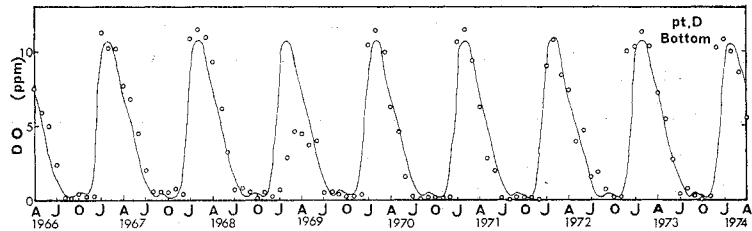


図-16 DO 変化の時系列解析結果

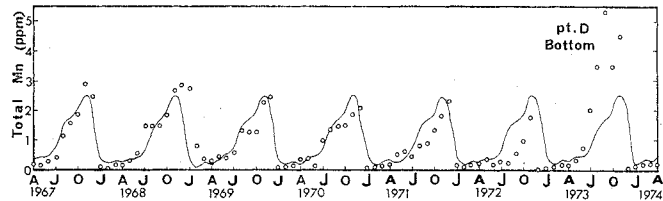


図-17 マンガン変化の時系列解析結果

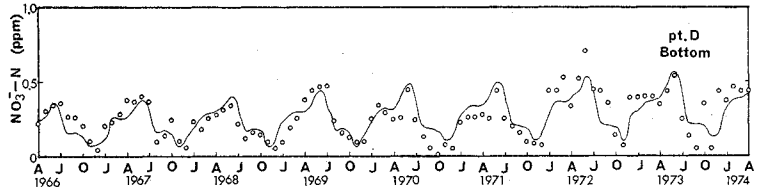


図-18 NO₃-N 変化の時系列解析結果

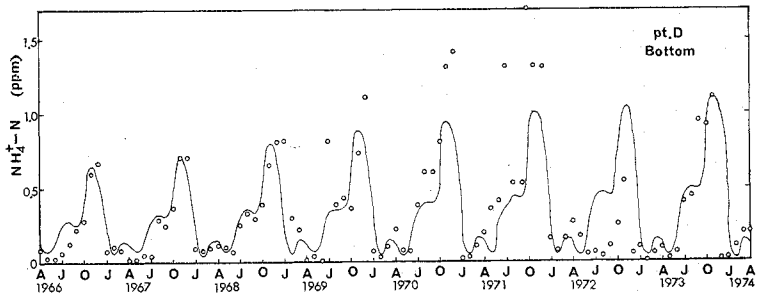


図-19 NH₄⁺-N 変化の時系列解析結果

特に，全変動に対する12か月周期変動成分の寄与率が大きい水温と溶存酸素飽和度については後で詳述する。

a) 長期傾向（経年的増加）のあるもの

無機態窒素（さらに詳細には，NO₃-N，NH₄⁺-N），KMnO₄消費量，アルカリ度

これらの水質因子は栄養塩および汚濁の度合を示す指標であり，富栄養化および水質悪化の傾向が認められ

表-4 無機態窒素濃度変化の傾向指数

地点	水深				表層平均
	0 m	1 m	3 m	5 m	
流入水	波豆川: 0.0263		羽東川: 0.0589		
A地点(合流点)	0.0244	0.0270	0.0380	0.448	0.335
C地点	0.0265	0.0274	0.0299	0.0349	0.0297
D地点	0.0270	0.0277	0.0298	0.0358	0.0301
E地点(堰堤前)	0.0260	0.0275	0.0288	0.0358	0.0288
水深平均	0.0260	0.0274	0.0316	0.0371	0.0305

(単位: ppm/年)

表-5 COD_{Mn} 変化の傾向指数

地点	水深				表層平均
	0 m	1 m	3 m	5 m	
流入水	波豆川: 0.0122		羽東川: 0.0215		
A地点(合流点)	0.0401	0.0364	0.0381	0.0450	0.0399
C地点	0.0387	0.0303	0.0347	0.0157	0.0299
D地点	0.0228	0.0274	0.0279	0.0228	0.0252
E地点(堰堤前)	0.0077	0.0112	0.0176	0.0124	0.0122
水深平均	0.0273	0.0264	0.0296	0.0240	0.0268

る。この長期傾向を有する水質因子の経年変化の程度を時系列解析における傾向直線の勾配で表わすことを考える。栄養塩濃度の変化については、富栄養化の進行度合を示す傾向指数として1年当りの濃度変化量を、前述の傾向直線の勾配より求めることにする。同様に、有機性汚濁の進行度合を示す傾向指数として、COD_{Mn}などの1年当りの濃度変化をその傾向直線の勾配から求める。

表-4と表-5に無機態窒素濃度とKMnO₄消費量の変化の傾向指数を表層について示す。無機態窒素濃度については、表層でおよそ0.03 (ppm/年)の変化となり、底層水の0.04 (ppm/年)に比べて少し小さいが、表層躍層の下辺、水深5mでは底層水に近い値となる。流下方向には若干の減少傾向が見られる。KMnO₄消費量は0.2531を掛けることによってCOD_{Mn}となるが、KMnO₄消費量の変化としては、流下方向および躍層部分を除いた水深方向に減少する傾向が見られる。底層水の変化はD地点での0.011 (ppm/年)の値のように表層水に比べて小さい。

これらの増加の長期傾向を示す水質因子の変化は、その系列分散も同様に増加の長期傾向を示すものがほとんどで、経年変化の一時期だけを取り上げて見れば、全体としてさらに大きな変化を示すことになる。

時系列解析では、従来から現時点までの傾向の定量的把握のほか、同様の傾向の維持を前提とした外挿法による将来予測ができる。たとえば、D地点の表層の水深1mについては、昭和55年4月の値として、無機態窒素は0.577 ppm (昭和41年4月の約2.6倍)、KMnO₄消費量は14.7 ppm (同じく約2.2倍)、アルカリ度は37.0 ppm (同じく約2.0倍)になると予測される。特

に、無機態窒素とKMnO₄消費量については、その表層・底層の濃度および流達負荷量の増加傾向が認められた。

b) 水質変化パターン

12か月周期変動成分の全変動に対する寄与率は、水温が90%前後と群を抜いて高く、溶存酸素飽和度とpHが約60%、KMnO₄消費量は平均で約55%、無機態窒素は約50%前後、アルカリ度は約45%であった。6か月周期変動成分のそれはいずれも数%以下と小さかった。また、昭和48年10月から昭和49年11月までの11回の測定値をもとに調和分析を行ったTOCとPO₄³⁻については、水深0~5mの表層平均で12か月周期変動成分の全変動に対する寄与率はそれぞれ約12%、約30%と小さく、6か月周期変動成分のそれは約78%、約48%と大きかった。これは植物プランクトンの春、秋2回の大発生の影響が表われていると考えられる。

この12か月周期変動成分の大きい表層(水深0~5m)を中心に、各水質因子のピークの出現時期やその大きさ、すなわち、水質変化パターンの相似性(相関の強さ)などの変化特性による水質因子のグループ分けを行うことができる。

- (a) 植物プランクトンの生産活動との対応関係が強いもの
溶存酸素飽和度、pH……………(光合成活動)
- (b) 河川からの流入特性に支配されやすいもの
KMnO₄消費量、アルカリ度……………(水質汚濁)
- (c) (a)、(b)両方の性格を有するもの
無機態窒素、PO₄³⁻……………(栄養塩)

全体的に見て、ピーク値の出現時期は、たとえば表層の水深1mについてみると、春から夏にかけて、まず溶存酸素飽和度、わずかに遅れてpH、夏の7月頃にKMnO₄消費量と水温、冬の12月にアルカリ度、2月に無機態窒素の順となる。

c) 水深方向の変化

表層については、大気と水体の境界面を通しての熱、光および溶存ガスの出入があり、植物プランクトンの光合成活動の最も活発な層で、(2)の(a)と(c)の水質因子の分布に特徴がある。中層は変水層にあたり、水温だけでなく水質変化の激しい層である。中層は主躍層の上部で、ほぼ取水水深にもあたり、流入・流出の流動の影響が大きい層である。主躍層部には表層・中層から下層への沈殿物などが一時貯留されて水質の悪化が見られる。下層は深水層の上部にあたり、溶存酸素の不足状態にある。底層は底面付近で、嫌気的な状態が長く続き、底質との間に溶出・浮上・沈殿・吸着などの物質移動があり、NH₄⁺-N、KMnO₄消費量、アルカリ度、Mnが高濃度となって最も水質が劣っている。

d) 流下方向の変化

全循環期には温度密度流により逆行流も見られるが⁷⁾、全体的には上流から下流に向う流入流出形態が維持されるので、河川の流入特性に支配されやすい水質因子(2)の(b)と(c)は、上流側から下流側へとある時間遅れ(time lag)を伴って変化が伝播することになる。したがって、滞留時間も1つの支配因子となる。一般にKMnO₄消費量とNH₄⁺-Nについては、その流下方向への減少が見られ、有機物の分解に伴う浄化および形態変化によるものと考えられる。

5. 水温および溶存酸素飽和度の変化特性

(1) 水温

貯水池の水質変化において支配的な要因となる水温変化は、夏季から秋季にかけて山、冬季を谷とする正弦関数形状の変化を示すのが通常である。したがって、過去何年かの各水深についての水温変化の資料の蓄積がある場合には、水温の周年変化の調和分析によって水温変化パターンの特性を統計的に明らかにすることができる。千苅貯水池の場合、水位変動はあまり大きくなく、水温変化は安定しており、主躍層部以浅では水温変動の90%強が12か月周期の調和波で表現できる。各水深の水温変化を系列平均値と系列分散、12か月周期調和波の振幅と初期位相角に注目して、図-20~23および表-6のように水深および流下方向の分布特性を求めることがで

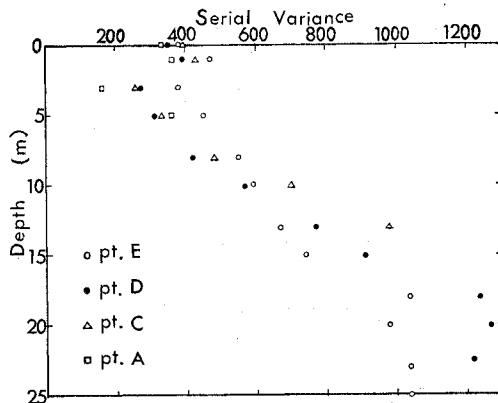


図-21 水温の系列分散の鉛直分布

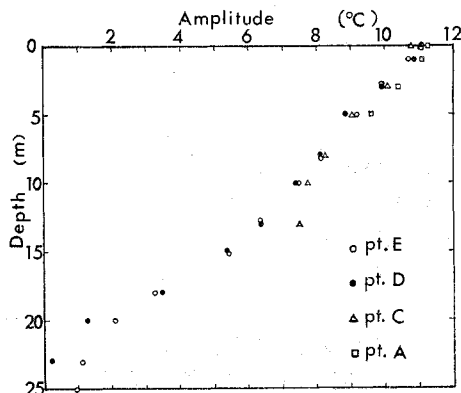


図-22 水温の振幅の鉛直分布

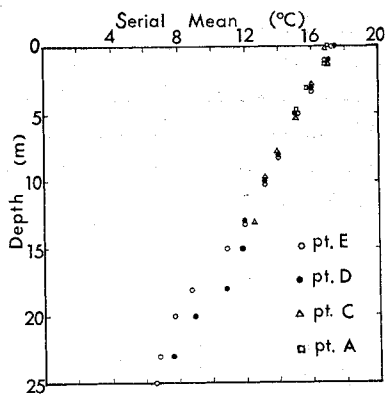


図-20 水温の系列平均値の鉛直分布

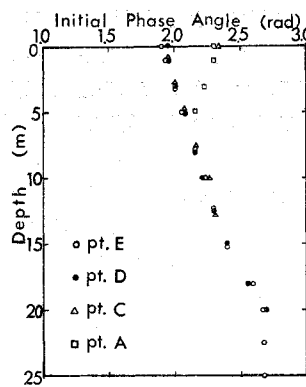


図-23 水温の初期位相角の鉛直分布

表-6 水温変化の鉛直分布特性

	系列平均値 $m(z)$ (°C)	系列分散 $S^2(z)$	12か月周期の振幅 $A(z)$ (%)	12か月周期の初期位相角 $\theta(z)$ (rad.)
E地点(堰堤前)	$m(z) = -0.45 \cdot z + 17.4$	$S^2(z) = -2.70 \cdot z + 61.2$	$A(z) = -0.42 \cdot z + 11.4$	$\theta(z) = 0.03 \cdot z + 1.89$
D地点	$m(z) = -0.39 \cdot z + 17.3$	$S^2(z) = -2.58 \cdot z + 61.5$	$A(z) = -0.46 \cdot z + 11.6$	$\theta(z) = 0.03 \cdot z + 1.87$
C地点	$m(z) = -0.36 \cdot z + 17.0$	$S^2(z) = -2.57 \cdot z + 61.6$	$A(z) = -0.28 \cdot z + 10.8$	$\theta(z) = 0.01 \cdot z + 2.06$
A地点(合流点)	$m(z) = -0.42 \cdot z + 17.1$	$S^2(z) = -3.70 \cdot z + 69.5$	$A(z) = -0.34 \cdot z + 11.3$	$\theta(z) = -0.02 \cdot z + 2.29$
4地点平均	$m(z) = -0.42 \cdot z + 17.3$	$S^2(z) = -2.76 \cdot z + 63.2$	$A(z) = -0.43 \cdot z + 11.5$	$\theta(z) = -0.03 \cdot z + 1.99$

(z: 水深 (m))

きる。

8年間 96 か月のデータの系列平均値と系列分散、および 12 か月周期調和波の振幅と初期位相角とも、水深に関しての直線回帰の相関係数は各地点および 4 地点全部の値についてほとんど 0.97 以上と高い。ただ初期位相角に関しては、C 地点では水表面の値のズレが大きく、最も浅い A 地点（合流点）では逆勾配になっており、4 地点全部の値についての相関係数も 0.88 と低くなっている。A 地点での逆勾配は流入水の流動に伴う影響が考えられる。また、主躍層以深での直線回帰式からのズレは、12 か月周期変動成分の全変動に対する寄与率の低下と、主躍層部での水温急変に伴う測定誤差、内部波による変動の影響などが原因と考えられる。

(2) 溶存酸素飽和度

溶存酸素は他の水質因子との相関が強く、各種の反応を左右する。溶存酸素飽和度の 8 年間 96 か月のデータの系列平均値と系列分散は、ともに回帰直線にのりにくい。特に系列分散の相関係数は低い。これらの解析結果は 図-24~27 および 表-7 に示す。全変動に対して平均で 65% 前後の寄与率を有する 12 か月周期調和波の振幅と初期位相角については、振幅の水表面から底層までの回帰直線は上記 2 特性と同様の傾向が認められるが、初期位相角は水深 5 m 付近で正負逆勾配の 2 つの直線で回帰させる必要があると考えられる。

この諸特性値の鉛直分布は、表層付近では植物プランクトンの光合成活動の影響、温度躍層を含む中層以深で

は有機物の微生物による分解や形態変化を含む化学反応との関係、および供給量あるいは他からの補給量の差異

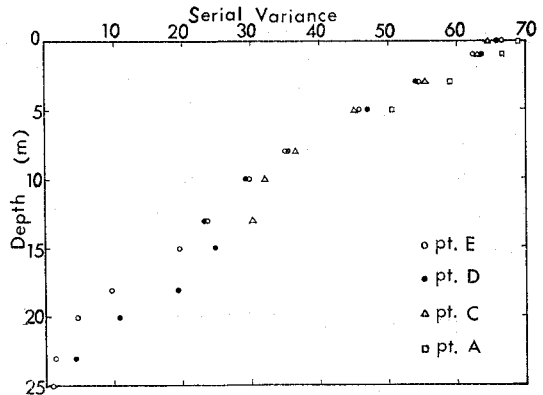


図-25 DO_{sat.} の系列分散の鉛直分布

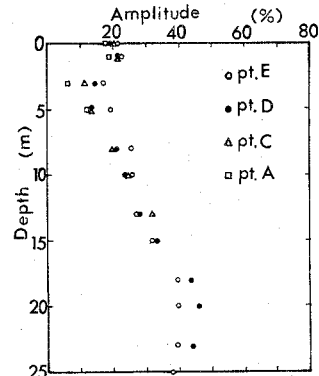


図-26 DO_{sat.} の振幅の鉛直分布

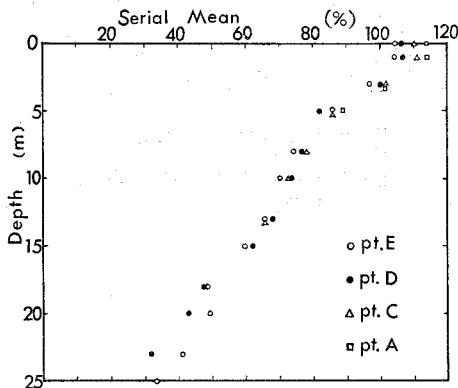


図-24 DO_{sat.} の系列平均値の鉛直分布

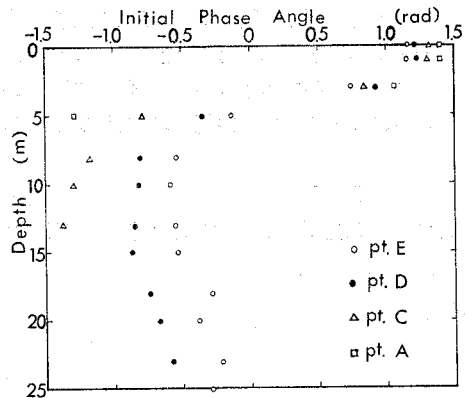


図-27 DO_{sat.} の初期位相角の鉛直分布

表-7 溶存酸素飽和度変化の鉛直分布特性

	系列平均値 $m(z)$ (%)	系列分散 $S^2(z)$	12 か月周期の振幅 $A(z)$ (%)	12 か月周期の初期位相角 $\theta(z)$ (rad.)
E 地点(堰堤前)	$m(z) = -2.8 \cdot z + 102.7$	$S^2(z) = 29.8 \cdot z + 343$	$A(z) = 0.9 \cdot z + 18.1$	$\theta(z) = -0.20 \cdot z + 1.20$
D 地点	$m(z) = -3.1 \cdot z + 106.5$	$S^2(z) = 47.9 \cdot z + 197$	$A(z) = 1.3 \cdot z + 13.4$	$\theta(z) = -0.24 \cdot z + 1.32$
C 地点	$m(z) = -3.7 \cdot z + 110.3$	$S^2(z) = 43.3 \cdot z + 262$	$A(z) = 0.9 \cdot z + 15.2$	$\theta(z) = -0.30 \cdot z + 1.38$
A 地点	$m(z) = -4.6 \cdot z + 113.8$	$S^2(z) = -5.5 \cdot z + 315$	$A(z) = -1.8 \cdot z + 17.5$	$\theta(z) = -0.51 \cdot z + 1.80$
4 地点平均	$m(z) = -3.0 \cdot z + 106.7$	$S^2(z) = 38.1 \cdot z + 269$	$A(z) = 1.1 \cdot z + 14.5$	$\theta(z) = -0.26 \cdot z + 1.33$

(z: 水深 (m))

などによって定まってくる。したがって、植物プランクトン濃度と水温条件のいかにかなり支配されるという結果が示されているわけである。この表層付近での逆勾配、とくに浅いA地点（合流点）とC地点でこの傾向が強いが、地点による差異は流入による流動の影響が大きいと考えられる。一方、表層での植物プランクトンの影響の小さい貧栄養型の貯水池では直線への回帰性は高いはずである。さらに底層部を含む深水層下部での溶存酸素枯渇によるゼロ値への収束も直線回帰を弱くする原因であると考えられる。

6. 栄養塩および有機汚濁量の収支

貯水池の富栄養化や水質汚濁の機構を明らかにするには、貯水池へ流入した物質が流入から取水（あるいは放流）されるまでの滞留期間に、どのような経路あるいは変化過程を経るかを捕えることが重要である。したがって、富栄養化に関しては栄養塩としての無機態窒素量、水質汚濁指標としては $KMnO_4$ 消費量より換算した COD_{Mn} について、流入量、流出量（取水量+越流放流量）および貯留量から貯水池としてのマクロな物質収支を考察してみる。

i 月の総流入水量を Q_{Ii} , i 月の総取水量を Q_{Wi} , i 月の総越流放流量を Q_{Di} , i 月の平均貯水量を Q_{Si} , i 月の流入水流入端濃度を C_{Ii} , i 月の貯水池取水口濃度を C_{Wi} , i 月の堰堤前表面水濃度を C_{Di} , i 月の貯留水平均濃度を C_{Si} とする。これらから注目する水質量について、 i 月の流入量 ($I_i = Q_{Ii} \cdot C_{Ii}$), i 月の流出量 ($O_i = Q_{Wi} \cdot C_{Wi} + Q_{Di} \cdot C_{Di}$), i 月の貯留量 ($S_i = Q_{Si} \cdot C_{Si}$), となる。さらに、 i 月の生物・物理・化学的作用による増減量 F_i が加わってマクロな物質収支式が成立する。すなわち、

$$S_{i-1} + (I_i - O_i) = S_i + F_i \quad (F_i: \text{増加を} +)$$

ここで、流入量 I_i については、各流入水系別に流入水量と流入水濃度の積で求めた和を用いるべきである。また、 F_i は流水中での変化分 F_{1i} , 底質による寄与分 F_{2i} , 水質によっては、大気と水体との間での移動量 F_{3i} とに分けることができる。 F_{1i} には、生物化学的作用による分解・減少や、生物体による摂取が考えられ、 F_{2i} には、底質への沈殿・吸着や、底質からの溶出・浮上などが考えられる。また F_{3i} には、溶存酸素、炭酸ガス、 NH_3 , N_2 などの気体の水表面を通しての移動量が考えられる。

この各月ごとの計算例を千苅貯水池の昭和 43 年から昭和 49 年までの 7 年間について、7 年間の経年変化と昭和 49 年 1 年間の周年変化を 図-28~31 に示す。貯水池貯水量、流入水量、取水量、越流放流量は毎日

のデータからの算出値であり、水質濃度は毎月 1 回の観測値である。流入量については、両流入河川と周辺流入水についての和を用い、取水口を複数使用の場合はそれぞれの取水口水深の平均水質濃度を用いた。貯留水の平均水質濃度は、A 地点（合流点）、C 地点、D 地点、E 地点（堰堤前）の 4 地点の水深方向に 2~3 m 間隔で測定された全観測値約 40 個の平均である。水質濃度は 1 か月 1 回の観測値であるが、貯水池の滞留時間がおよそ 50 日前後であり、水質が安定した周期変化を繰り返していることを考えれば、この近似計算は許容しうる程度のものである。

F_i の項に生物体と水体との間の摂取量や代謝・排洩物量、底質と水体との間の物質移動量、大気と水体との間の気体の移動量、などを考慮することにすれば、マクロな物質収支式を次のようにして、 F_i の大きさを検討すればよい。

$$F_i = S_{i-1} + (I_i - O_i) - S_i$$

上式による F_i の大きさと内容の検討は、貯水池内での蓄積量や自浄効果の評価を与えることになる。

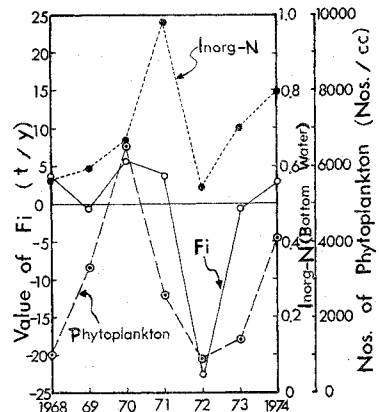


図-28 無機態窒素についての F_i 値の経年変化

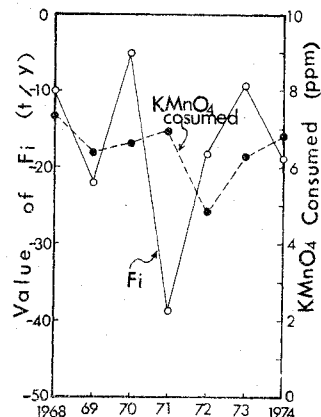


図-29 COD_{Mn} についての F_i 値の経年変化

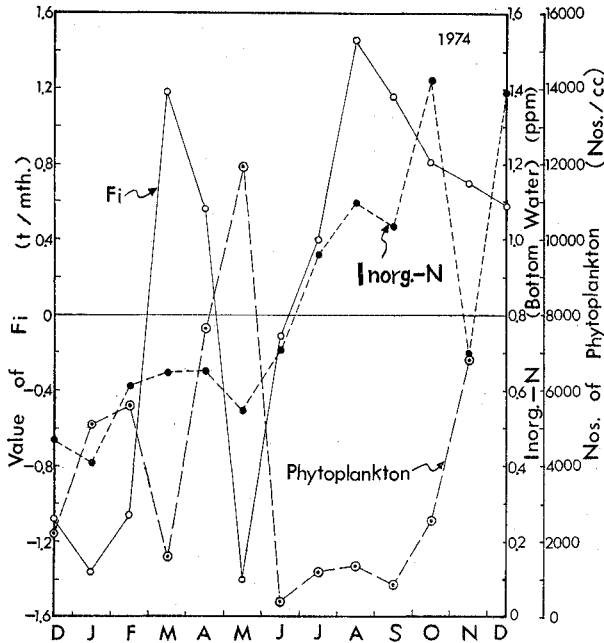


図-30 無機態窒素についての F_i 値の周年変化

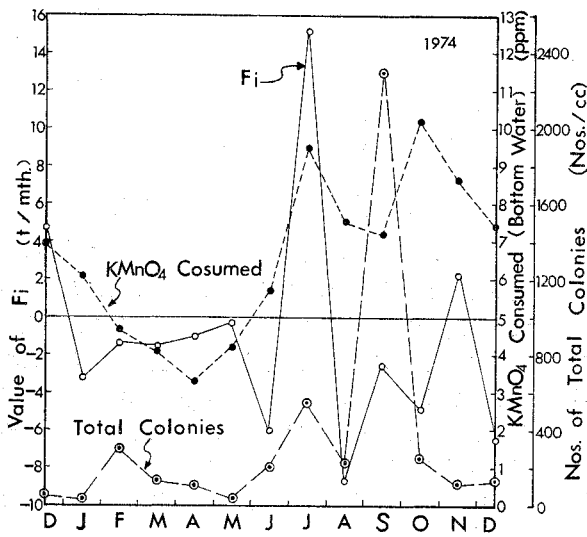


図-31 COD_{Mn} についての F_i 値の周年変化

図-30 の昭和 49 年の無機態窒素量の変化より、春の 5 月および冬の 12 月～2 月に F_i の値は負になる。5 月の場合は植物プランクトンの大発生時と一致する。また他の年の春季の植物プランクトン大発生時の F_i の変化の傾向も考慮すると、大発生した植物プランクトンの栄養塩摂取に伴う水体から生物体への窒素の移行が F_i の負の値をもたらすと考えられる。また、秋の終りの全循環 (overturn) 混合による底質と水体との間の物質移動の結果として、底質が好氣的となり、窒素量に対してそれまでと異なった寄与をするが、12 月～2 月頃には

沈殿する浮遊物質への吸着や好酸化された底質中への拡散浸透などの trap 現象が F_i の負の値をもたらしたものと考えられる^{8),9)}。経年的な変化としては無機態窒素の一部貯留蓄積が見うけられる。

春先の 3 月と夏から秋にかけての 8～9 月のピークと、冬季の 1 月と春季の 5 月を谷とする F_i 値の周年変化と、それとはおよそ 2～3 か月違いのピークを有する植物プランクトン数の周年変化との対応関係が重要である。これより、植物プランクトン量が減少し、窒素量の水体への移行によって、貯水池内に貯留される無機態窒素が増加傾向となり、次に植物プランクトンが増殖するための潜在ポテンシャルを高めていることがわかる。貯水池内での無機態窒素濃度の鉛直分布の変化、植物プランクトン量の変化、および F_i 値の変化は、成層による停滞や循環による混合を含む貯水池内での流動変化の特性との関連で、一定の時間的なズレを伴った機構であることが理解される。

図-31 の昭和 49 年の COD_{Mn} 量の周年変化から、梅雨による出水かつ成層期の 7 月を除くと 1 年を通してほぼ減少傾向にあり、マイクロには多くの複雑な作用がかかっているものの、包括していえば、貯水池内での生物、化学および物理的浄化作用として評価できる。しかし、 COD_{Mn} 量の減少に伴う分解産物は栄養塩として貯水池内の生態系を通して利用され、貯留水および底質の栄養塩濃度の変化をもたらし、前述の窒素の挙動の一端を担うことになる。夏季成層期の 7 月に見られる F_i 値の増加は、植物プランクトンの増殖による有機物の合成や、底層水の嫌気状態化に伴う底質から水体への負荷の移行によるものと考えられる。秋季の 11 月の F_i 値の増加は、全循環直前までの底層水の悪化、すなわち、底質から底層水への負荷の移行によるものと考えられる。

これらのことから、有機性汚濁物質量は貯留期間中に減少し、一部栄養塩として、植物プランクトンなどの生物体や底質と水体との間を移動し、貯水池内に貯留あるいは蓄積されることになる。

ダム貯水池における有機物などの沈殿・吸着・堆積による新底質の形成は、水質量の水体から底質への移行をもたらす。特に、高水時の無機性の濁質粒子の沈殿・堆積に伴う旧底質の被覆および新底質表面の形成は、旧底質からの栄養塩、鉄、マンガンなどの溶出や、有機性沈殿物の浮上を抑制することになり、貯水池自身は堆砂による容量減少によってその寿命および能力を縮小することになる。千苜貯水池では、昭和 47 年梅雨期以降の羽

東川上流のゴルフ場造成工事による高濁質の流入および滞留が、植物プランクトンなどの生物を窒息させ、従来からの栄養塩や有機物などの堆積物あるいは蓄積物を底質深部に内包するという結果をもたらし、底層付近の水質は一時的に回復した形となった。これは 図-28 と 図-29 から確認することができる。ダム貯水池の富栄養化は、このような要因がプレーキとなり、流入栄養分のかなりの部分が流出してしまうこととも併せて、湖沼などの富栄養化と対比して捕えることができる。

このように貯水池の水質変化機構を、流入量、流出量貯留量に加えて、水体と底質や生物体との間の水質量の移動としてマクロな物質収支で捕えることも重要である。水質量は流入変化としては季節的にかなり差のある変化を示すが、流出量とのバランスや滞留時間の大きさを考慮に入れると、貯留水全体の変化として取り扱い、夏季の成層状態、冬季の水質一様分布状態およびその遷移状態を通じて、水質量の偏在化あるいは一様化という現象とは別に、水質量の減衰あるいは貯留（蓄積）という形で貯水池の水質変化機構を捕えることが必要である。

7. 結 語

ダム貯水池の水質変化の解析を千苅貯水池を対象として行った。水質の年平均値の鉛直分布から、水温躍層が流動のみならず水質の成層化に及ぼす影響の大きさを指摘し、水質の鉛直分布特性から水深方向の層分割を試みた。過去8年間の水質観測値について、調和分析を含む時系列解析による水質予測と水質変化特性の検討、および水質量のマクロな物質収支の検討を行った。

一般的には、主躍層は躍層強度や持続性の大きさから安定した存在であるのに対して、表層躍層の水質への影響度はその持続性や安定度の弱さのために小さいものである。しかし、表層は植物プランクトンの光合成活動や再ばっ気の影響が大きく、水質変化に特色がある。底層は好気・嫌気状態の変化に伴う底質と水体との間の物質移動から栄養塩の蓄積・回帰と関連して重要であり、水質的には劣っている。中層は変水層の一部として水温だけでなく水質の変化も著しい層であり、流入・流出の流動に伴う影響が大きい。

時系列解析およびマクロな物質収支の検討より得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 時系列解析により、長期傾向としての経年変化と定期的な周期変化としての周年（季節）変化に分けた水質変化の定量的な把握ができる。

(2) データの蓄積により、時系列解析による水質の将来予測がかなり確実に行える。

(3) 富栄養化や有機汚濁化の程度と速度を、時系列解析の長期傾向の傾向直線の勾配によって定量的に把握できる。

(4) 各水質因子の周年変化の周期変動特性によって、表層から中層水については植物プランクトンの光合成活動に支配されるもの、河川からの流入特性に支配されるもの、およびその両者に支配されるもの、に分けられる。

(5) 水温および溶存酸素飽和度の系列平均値、系列分散、12か月周期変動成分の振幅と初期位相角の水深方向変化は、直線回帰式による表示ができる。

(6) 水質量についての、流入量、流出量、貯留量、および生物・物理・化学的作用による変化量としてのマクロな物質収支によって、水質変化機構を捕えることができる。

(7) マクロな物質収支の検討により、貯水池の自浄機能による有機汚濁物の減少や、汚濁物の分解や流入による栄養塩の一部貯留蓄積のあることが指摘できた。

(8) 貯水池の夏季の成層状態、冬季の水質一様分布状態、およびその遷移状態を通じて、水質量の偏在化あるいは一様化、減衰あるいは貯留（蓄積）として水質変化を評価することの必要性を示した。

(9) 生物・物理・化学的作用による変化量としては、水体と、底質および生物体、あるいは大気との間の水質量の移動が考えられ、その内容の定量化にはさらにミクロな解析が必要とされる。

以上の結果に加えて、底質の分析や、植物プランクトンの生産活動や微生物による有機物の分解作用など食物連鎖を含めた詳細にわたる検討が必要である。また富栄養化に関しては、窒素だけでなくリンなど他の栄養塩についても同様の解析による裏付けが必要であり、藻類の種別の多様性（diversity）による評価やAGPによる評価など、さらに総合的でかつ詳細にわたる別の見方や解析も重要である。

現在、千苅貯水池および流入河川水質は一時的な水質の改善の兆しも見られるが、昭和41年のベースに戻ったわけではない。時系列解析による水質予測は、さらにこの新しいデータを加えて精度の向上をはかることが必要である。ここで得られた栄養塩濃度、溶存酸素飽和度、pH、アルカリ度および水温についての時系列解析結果は、水質変化の動力学的解析に利用し、さらに日照量および日照時間などの因子を加えた植物プランクトン量の生態学的シミュレーション解析に供している。

最後に、水質調査にご協力いただき、貴重な資料を提供していただいた神戸市水道局の皆様方に深く謝意を表す。さらに当時大学院生で調査や分析に協力していただいた勝部利之君に謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 神戸市水道局：水質試験成績，第1集～第9集，1967～1975.
- 2) 吉川和広：土木計画とOR, pp. 115～129, 丸善, (1969).
- 3) 鈴木榮一：気象統計学, 地人書館, pp. 121～168, (1968).
- 4) 合田・海老瀬：貯水池の流動と水質との関係について, 第18回水理講演会講演集, pp. 193～198, (1974).
- 5) 合田・海老瀬・大島：貯水池の水質変化と富栄養化, 土木学会第29回年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 472～473, (1974).
- 6) 合田・海老瀬・大島：貯水池における各種水質の変化パターン, 土木学会第30回年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 588～589, (1975).
- 7) Goda, T. : Density Currents in an Impounding Reservoir., I.A.H.R. 8-th Congress (Montreal), (1959).
- 8) Mortimer, C.H. : Chemical Exchanges between Sediments and Water in the Great Lakes, *Lim. & Oceanogr.* Vol. 16, No. 2, pp. 387～404, (1971).
- 9) Mortimer, C.H. : The Exchange of Dissolved Substances between Mud and Water in Lakes, *J. of Ecol.* Vol. 29, pp. 280～329, (1943).

(1976.4.15・受付)