

成層化した貯水池における溶存酸素の分布

Distribution of dissolved oxygen in a stratified reservoir

(財)電力中央研究所 正員 宮永洋一

1. まえがき

水温成層の発達した貯水池では、その鉛直方向の成層化に対応した特徴的な溶存酸素（DO）の分布が観測される。すなわち、光と温度の関係から植物プランクトンは表層付近に多く発生し、その生物活動による酸素の生産の結果、表層付近のDOは過飽和となる。これに対して水温躍層下の底層では、一般に池水は停滞し、移流、拡散による酸素の供給がほとんどない上に、バクテリアによる有機物の分解や底生生物の活動によって酸素が消費されるため、底層のDOは不飽和となる。このDOの鉛直分布は冬期の大循環が起ると解消され、池内全体がほぼ一様となる。

このように、水温同様DOもまた年周期的な、鉛直方向に特徴のある変化を示すが、そのメカニズムは水温の場合のように物理学のプロセスばかりでなく、生物学のプロセスをも含んでいる。この生物学のプロセスはすでに定式化され、生態系の数学モデルのなかに組込まれている例も多い。^{1)~3)}しかし、貯水池の生態系を一度に説明しようとする数学モデルは、計算対象項目の数および各項目間の相互作用の定式化（経験式や仮定を含むものが多い）の数が多いため、計算結果の解釈がむずかしい。つまり、数学的にモデル化された水質変化の各メカニズムが、どの程度量的に寄与し、結果として正味の変化にあらわれているのかということが解りにくい。

本報告は、ダム貯水池における年周期的生物活動の指標の一つとしてDOに着目し、上述したようなメカニズムで説明されているDOの年周期的変化を実測資料にもとづいて定量的に解析したものである。

2. 対象貯水池と水質調査の概要

対象貯水池の諸元および平面形状を表-1、図-1にそれぞれ示す。この貯水池は我国の発電用貯水池としては比較的大規模なものであり、夏期には顕著な水温成層が発達する。取水口は表層と中層があり、常時は中層、濁水期間中は表層が使用される。電力中央研究所ではこの貯水池をモデル地点の一つとして選定し、昭和50年4月より53年6月までの約3年間にわたって詳細な水質調査を行なった。このうち昭和50年と51年については貯水池の年周期的な水質特性の把握という目的から、図-1のSt.1~St.5の各地点において月1回程度の継続調査を行なっている。なお、調査項目や方法の詳細については文献4)を参照されたい。

ダム高 (m)	130
総容量 ($\times 10^6 m^3$)	258
有効容量 (")	156
湛水面積 (Km^2)	6.86
貯水池長 (Km)	22
年平均総流入量 ($\times 10^6 m^3$)	1055
年平均池水交換回数	4
最大使用水量 (m^3/sec)	137
流域面積 (Km^2)	415

表-1 対象貯水池諸元

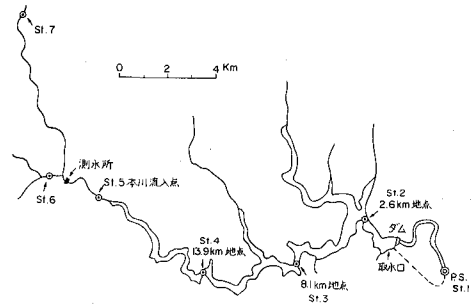


図-1 貯水池平面形状

3. DOの鉛直分布の実態

図-2は、昭和50年4月から51年1月までの貯水池内(St. 2)の水温、DO、DO飽和度および植物プランクトン個体数の鉛直分布を示したものである。この実測資料にもとづいて、本貯水池のDOの鉛直分布特性を以下に要約してみる。

3.1 池水の流動状況

水温分布の変化によって、池水の流動状況をある程度知ることができる。

まず標高140m以深の水温をみると、約9℃で年間を通じほとんど変化がない。このことからこの領域の水は、河川水温が9℃以下となる12~2月を除いてほぼ停滞したままと思われる。

水温躍層は、成層期の表面から5m程度下および取水口下の標高140~160mの領域に形成される。取水口下の2次躍層は、洪水によって低下することがあるが、昭和50年の場合には顕著な低下はみられない。この年の最大洪水は6月にあり、日平均流量で最大 $613\text{ m}^3/\text{sec}$ (6月21日)が記録されている。図-2の6月と8月の水温分布を比較すると、標高150mの水温は変わらないが、標高160mでは14℃から18℃に上昇し、流入水による混合のあったことが分る。

表層については7月15日より30日間の表層取水による貯水池からの流出がある。

図-2には河川水流入標高として、St. 5における午前10時の水温に等しい標高を示してあるが、これによれば、成層期、河川水は大部分が表層と2次躍層の中間に流入しているものと思われる。また中層取水口からの流出もあるので、貯水池内ではこの領域の水が最も早く入れ替わる。

鉛直方向の混合については、成層期は弱く、対流期は強い。すなわち、成層期の2次躍層上の温度勾配をみると、6月の洪水による若干の混合はみとめられるが、それ以外は安定した成層が保たれている。一方対流期には2次躍層上の水温分布がほぼ一様となり、この範囲が混合していることを示している。対流混合が2次躍層付近までしか及ばなかったのは、昭和50年が暖冬だったためで、この貯水池としてはむしろ特殊なケースである。平均的な気象条件では対流混合は底まで及ぶ。

3.2 DOの鉛直分布特性

図-2によってDOの鉛直分布の年周期的変化を概観してみると、本貯水池の場合、池水の流動状況および生物活動に対応したつぎの四つの層に分けて考えるのが適当のように思われる。

① 表層

表層のDOは、植物プランクトンが著しく増加する6~9月には過飽和を示し、その他の時期はほぼ飽和している。すなわち、生物活動と曝気に強く支配されているといえる。

② 中層

ここに述べる中層とは、流動状況の考察で指摘した表層と躍層の中間の領域のことである。この領域では流入する河川水と、中層取水口より流出する水との入れ替わりがある。河川水のDOは飽和ないし過飽和の状態にあるので、これが酸素の供給源となるが、表層での生物活動が活発になると、プランクトンの死骸などを含む有機物(碎屑, detritus)が沈降してきて分解されるため、6~9月には90~70%程度の飽和度となっている。

③ 躍層

Gordon⁵⁾によれば、躍層には、その上下の層における沈降速度の違いのために碎屑がたまりやすく、結果として躍層部分のDOの相対的な落ち込みが観測されるといわれている。図-2の8~11月の分布にはこの現象が明瞭にみとめられる。

④ 底層

成層期にほとんど停滞したままの底層には酸素が供給されない。一方底生生物の活動や、上層から沈降してくる碎屑の分解によって酸素が消費されるため、4月から翌年の1月まで底層のDO飽和度は連続的に低下している。しかも対流混合が底層まで及ばなかったため、この状態のまま51年の成層期を迎えている。

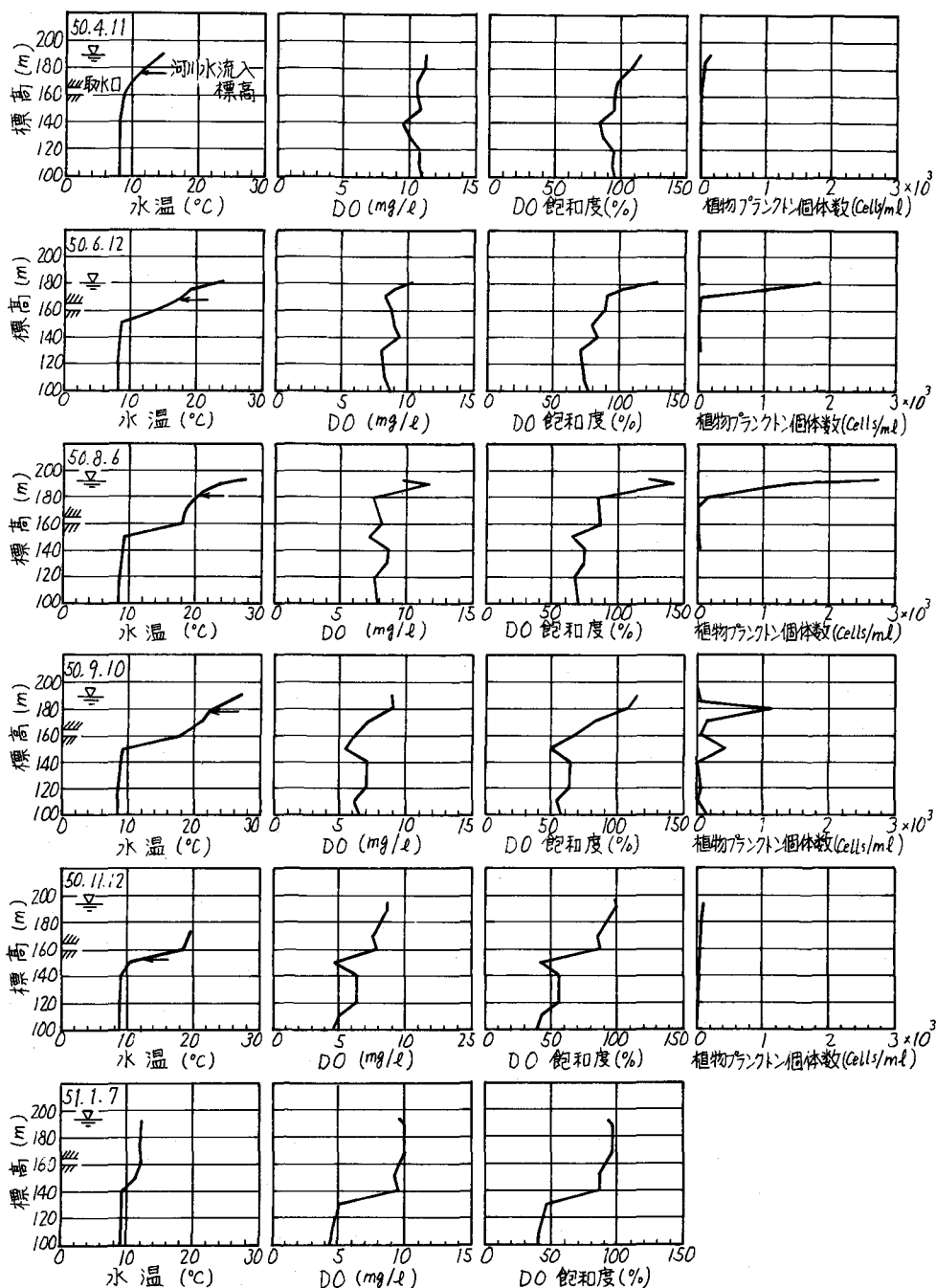


図-2 水温, DO, DO飽和度, 植物プランクトン個体数の鉛直分布 (St. 2)

4. DOの年周期的変化の解析

すでに述べたように、DOの変化の定性的な説明はなされているが、予測に結びつけるためにはさらに定量的な把握が必要となる。この章では、昭和50年と51年のデータを用いて、DOの年周期的変化を各メカニズム別に解析し、数学的に定式化した場合の各項の寄与の程度を検討してみる。

4.1 解析方法

まず貯水池を3.2に述べた四つの層に分割する。分割方法は、やや便宜的ではあるが表-2のように定義した(取水口位置などは図-2参照)。

表層	水面下10mまでの範囲
中層	表層と躍層の間
躍層	E.L. 135~155m
底層	E.L. 135m以深の範囲

表-2 層分割の定義

つぎに各層の平均の水温、DOを求める。St. 2~4のデータを比較すると、水温については水平方向の一樣性がほぼ満足されている。DOについてはやや問題があるが、この点は次第で述べる。この平均操作は、データに含まれる誤差や場所的な偏りを平滑化し、現象の本質を見失なうことなく、解析すべきデータの数を減らすことを目的としたものである。

層内のDOの変化を一般的に書けばつぎのようになる。ただし拡散項は省略している。

$$1/V \cdot dCV/dt = \sum_j (q_{ij} C_{ij} - q_{oj} C) + K_r (C_s - C) + P + R \dots\dots\dots (1)$$

全変化率

移流

曝気

生産消費

ここに、C:DO、C_{ij}:流入水DO、C_s:DO飽和値、V:層の体積、q_{ij}:層への流入量、q_{oj}:層からの流出量、K_r:再曝気係数、P:DO生産速度、R:DO消費速度、t:時間、である。

(1)式の各項の大きさをつぎのようにして求める。

左辺の全変化率は、各層のDO平均値の変化量を時間で割ることによって得られる。時間間隔は1カ月のオーダーである。したがって、他の各項の見積りにについてもすべてこの時間スケールが基準となる。

右辺第1項の移流による変化量は、流量資料を各層別に配分し、C_{ij}、Cの実測値を与えることによって計算できる。配分方法は、流出量の場合、次式を用いて流出による流動層厚を求め、流速分布が層内でGauss分布にしたがうものと仮定して計算するものである。

$$\delta_o = (Q_o / G \theta \sqrt{\epsilon g})^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、δ_o:流出による流動層厚、Q_o:流出量、G:軸対称流の内部フルード数、θ:取水口唇口の開口角、ε:密度勾配(-1/ρ・dρ/dy)、g:重力加速度、である。Gの値は白砂の実験結果より、表層取水時0.324、中層取水時0.134を与える⁶⁾。この値については、(2)式を用いた貯水池水温のシミュレーションがほぼ良好な結果を与えることから、比較的信頼性の高いものといえる。また流入量の配分については、やや便宜的ではあるがつぎのように行なった。St. 5における流入水温と貯水池内の水温分布を比較し、流入標高を求める。これらの実測値は約1カ月おきに与えられているので、その間の流入水は、前後の流入標高の範囲内にある層に流入するものとした。層が複数の場合は断面積の比によって配分した。

右辺第2項の曝気による変化は表層の場合のみ考慮する。再曝気係数K_rについては、河川の場合Dobbins⁸⁾の式が有名であるが、式を導出する際の仮定が貯水池には当てはまらないように思われる。ここでは文献1)に挙げられている次式を用いるものとする。

$$K_r = (A_s / V_s) \{ D / (200 - 60 \sqrt{W}) \times 10^{-6} \} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、A_s:水面積(m²)、V_s:表層体積(m³)、W:風速(m/sec)、D:分子拡散係数(2.037 × (1.037)^{T-20} × 10⁻⁹ m²/sec)、T:水温(℃)である。K_g=K_r V_s / A_sはガス交換係数と呼ばれる。さしあたりK_gは定数と考えて、計算では1.53 m/dayを与えた。

右辺第3項の植物プランクトンによる生産については表層のみ考慮する。生産層内のDO生産速度は文献5)によれば次式で計算される。

$$P=0.063\alpha(1.0718)^{T-20} \tag{3}$$

ここに、P：DO生産速度（mg/ℓ/day），α：クロロフィルa濃度（μg/ℓ），T：水温（℃），である。クロロフィルa濃度は昭和50年，51年とも実測値がない。しかし52年と53年については実測されているので，クロロフィルa濃度と植物プランクトン個体数の関係をプロットしてみたものが図-3である。これによれば，かなりのばらつきはあるが，プランクトンの種類別にべき乗曲線を当てはめることができそうである。このべき乗曲線を用いて昭和50年，51年のクロロフィルa濃度を測定し，(3)式を用いて生産速度を見積るものとした。なお，50年と51年の優先種は珪藻類であり，使用した曲線もこの種類に対応したものである。

右辺第4項の消費には，生物の呼吸，有機物の分解，硝化などが含まれる。この第4項の大きさは，左辺の変化率から移流，曝気，生産の各項を差引くことによって得られる。このうち動植物プランクトンの呼吸による消費速度は文献5)によれば次式で計算される。

$$R_p=(0.024\alpha+0.001176Z_1+0.000435Z_2+0.0000435Z_3)(1.0718)^{T-20} \tag{4}$$

ここに、R_p：動植物プランクトンの呼吸によるDO消費速度（mg/ℓ/day），Z₁：Copepoda（ケンミジンコ）個体数（inds/ℓ），Z₂：Cladocera（ミジンコ）個体数（inds/ℓ），Z₃：Rotifer（ワムシ）その他個体数（inds/ℓ），である。有機物の分解や硝化などについては明確な係数値を得られなかった。そこで，第4項から(4)式で計算される消費速度を差引いたものが，仮にすべて有機炭素（TOC）の分解によっているものと考えた場合の消費係数K₀=ΔC/Δt/TOCを計算してみた。

なお，対流期の鉛直混合による変化量の計算は省略した。

4.2 解析結果

各層のDO平均値およびDO飽和度の時間変化を図-4，5に，それぞれ示す。各層の平均値は，すでに説明したようなパターンの変化を示しているが，全体的な変化の傾向からみて不自然と思われる点もある。

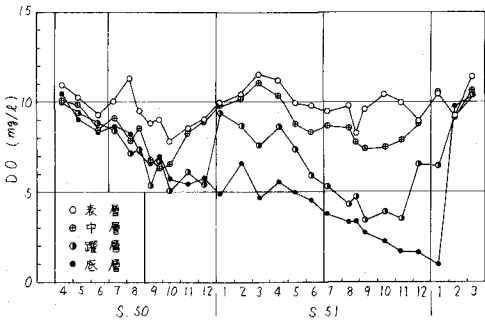


図-4 各層のDO平均値

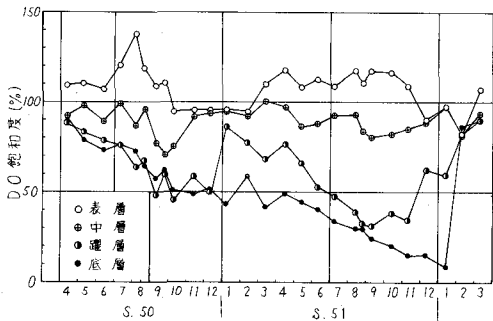


図-5 各層のDO飽和度

図-4, 5に示した平均値のなかには、貯水池内3地点ではなく、1地点(St. 2)のみのデータから計算したものが含まれており、よく調べてみると、前後とのつながりが不自然なのはこれらの点であることが多い。ということは、実際のD Oの水平方向の非一様性を考慮するかどうかによって、変化率の計算結果にかなりの違いが出てくることになる。そこで、これらの、他と比べて質の悪いデータは除外して解析を行なった。除外したのは昭和50年8, 9月, 51年8月のそれぞれ一部と、1~3月の対流期のデータである。

各層の項目別の変化率の計算結果を図-6に示す。これよりつぎのようなことがいえる。

① 表 層(図-6(a))
 表層の移流による変化率をみると、表層取水を約1カ月程度行なっている昭和50年7~8月, 51年8, 10月に負の寄与が大きく、他の期間は目立った寄与がない。曝気による変化率は、成層期、表層が過飽和となるために負の値を示し、それも全変化率と同じオーダーで寄与している。生物活動によるD O生産率は、全変化率と移流、曝気による変化率との差としてみると、やはり成層期には全変化率と同じオーダーの寄与をしていることが分る。

② 中 層(図-6(b))
 中層は年間を通じて移流による正の寄与が大きい。全変化率もほぼこれに対応した変化を示すが、負の側に平行移動したような形を示している。この差は生物活動によるD Oの消費であろうと思われる。

③ 躍 層(図-6(c))
 躍層に流入があったのは、昭和50年10~12月, 51年9月, 11~12月である。このうち51年9月はこの年の最大洪水(9月12日, 日平均最大1779 m^3 /sec)が流入している。これらの流入水に

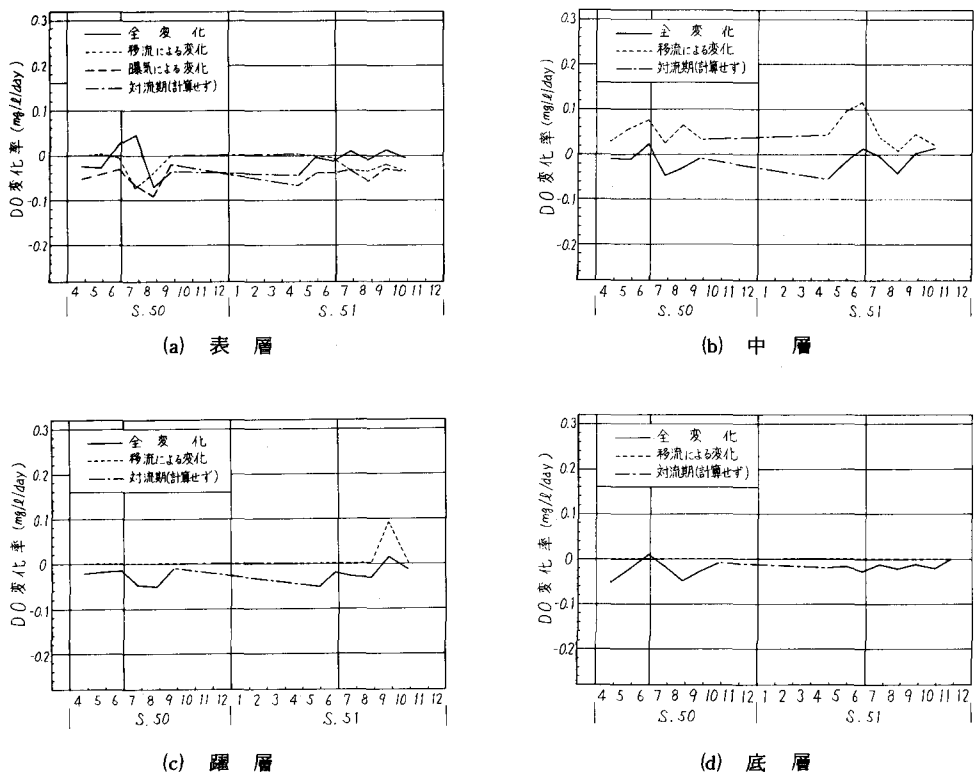


図-6 各層の項目別の変化率

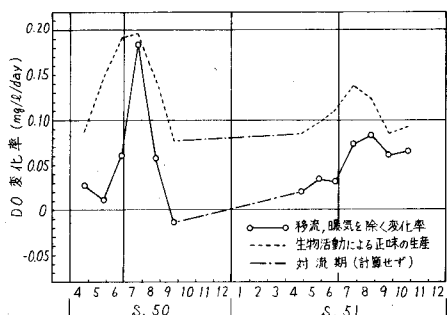


図-7 生物活動によるDO生産速度

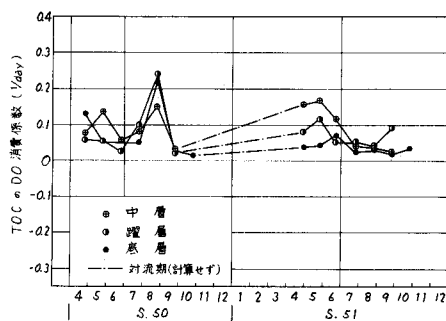


図-8 有機炭素のDO消費係数

よる酸素の供給があったときには全変化率は正となるが、他の期間は負となる。

④ 底層(図-6(d))

対流期の計算を除外しているため、底層は移流項が0となる。しかし昭和50年6～7月の全変化率が正になっているのをみると、あるいは3.1で述べた6月の洪水の一部が底層に流入したことも考えられる。生データによれば、6月と7月とで底層内の一番上(標高130m)のDO値が若干上昇しており、こうした部分的な流入まで精度よく見積るのは、本報告で示したような解析方法ではなかなかむずかしい。

表層の生物活動による正味のDO生産率の計算値(3)、(4)式と実測値の比較を図-7に示す。昭和51年が数値的な一致は良くないが変化のパターンを捉えており、また50年については比較的良好な結果であることから、(3)、(4)式は、若干の修正を加えれば、予測解析に役立ちそうである。

有機炭素によるDO消費係数の計算結果(温度係数1.05とし、20℃に換置した値)は図-8に示すとおりである。これによれば係数のばらつきは比較的小さく、平均的に0.1/day程度が適当といえる。

5. 結 語

生物活動による水質変化を定式化していく段階で、ややあいまいな仮定や係数を導入することは避けられない。重要なことはそれらの信頼性、精度を個々に検討し、適用範囲を確認しておくことであろうと著者は考えている。本報告では、従来説明されているようなDOの年周期的変化のメカニズムを定量的に明らかにし、予測に結びつけるための2、3の式や係数について検討を加えた。さらに栄養塩とプランクトン増殖率の関係を導入することによって、入力条件から貯水池内の水質変化を計算するモデルの基本的枠組みができる。今後はこの点について検討を加えるつもりである。なお、本報告の計算にあたっては、千葉工業大学土木学科4年、近藤誠一郎君の協力を得た。ここに謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Chen, C.W. and Orlob, G.T.: Water Resources Engineers, Inc., 1972
- 2) Anderson, D.R., et al : Jour. WPCF, Vol. 48, No. 1, p.p. 134-146, 1976
- 3) 佛原ほか: 第34回年講, p.p. 237-238, 1979
- 4) 安芸ほか: 電力土木, No. 159, p.p. 3-19, 1979
- 5) Gordon, J.A.: Water Resources Res. Center, Res. Rep. No. 63, 1978
- 6) 白砂: 電力中央研究所報告, No. 73509, 1973
- 7) 白砂・安芸: 第21回水講, p.p. 45-50, 1977
- 8) Dobbins, W.E.: Proc. ASCE, Vol. 90, SA3, 1964