

貯水池溶存酸素の成層化とその予測
Stratification of Dissolved Oxygen in Reservoirs

財団法人 電力中央研究所 正 員 宮 永 洋 一
財団法人 電力中央研究所 正 員 白 砂 孝 夫

1. ま え が き

湖沼における溶存酸素の成層化現象は、古くから研究対象とされてきており、その機構についても定性的にはHutchinson (1957)¹⁾ などによって詳細な説明がなされている。特定の湖沼を対象とした現地観測資料にもとづく定量的な解析例としては、Bella (1970)²⁾、Newbold & Liggett (1974)³⁾、佐藤ら (1982)⁴⁾ などの研究が挙げられる。さらに、自然湖沼に比べて水の交換が速く、水位変動の大きいダム貯水池においても、本質的には同様の現象が観測されることが、Gordon & Skelton (1977)⁵⁾、宮永(1980)⁶⁾ などによって報告されている。

従来の主として現地観測を中心とする調査・研究によって、溶存酸素の成層化現象に関し明らかにされている基本的な知見は、ほぼ次のように要約される。

- ① 水温成層との関連が深い。
- ② 生産層では過飽和現象、分解層では不飽和現象がみられる。
- ③ 分解層では、ある高さに、有機物の集中と分解によるとみられる極小値が発生することがある。
- ④ 底付近では、底泥による酸素消費の影響が大きい。

これらの知見を踏まえた上で、貯水池・湖沼の溶存酸素を数値解析モデルによって予測しようとする試みが、Markofsky & Harleman (1971)⁷⁾、Schnoor & Fruh (1979)⁸⁾ などによりなされているが、予測精度や汎用化という点では、なお検討の余地が残されている。

著者らは、溶存酸素鉛直分布の微細な構造や、日間程度の短期的な変動ではなく、過飽和層、不飽和層というような特徴的な層構造、および各層の溶存酸素の年周期的変化に着目し、タイプや流況の異なる発電用ダム貯水池の実測資料をもとに検討を加えてきた。^{6),9)} 本報告は、そうした検討結果をもとに、ダム貯水池における溶存酸素成層化の機構をモデル化し、実用性、汎用性について検討したものである。

2. 溶存酸素の成層化現象

2.1 調査対象貯水池の概要

本研究で対象としたダム貯水池の概要を表-1に示す。タイプⅠは発電専用貯水池、タイプⅡは混合揚水

表-1 調査対象貯水池の概要

貯水池タイプ 諸 元	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	
	ダ ム 式	混合揚水式上部池	純揚水式上部池	同 下 部 池
流 域 面 積 (km ²)	4 1 5	6 2 5	5. 2	1 3. 4
ダ ム 高 (m)	1 3 0	1 0 3	9 8	6 4. 5
総 容 量 (10 ⁶ m ³)	2 5 8	1 2 8	2 5. 5	1 8. 6
湛 水 面 積 (km ²)	6. 9	3. 6	0. 9	0. 9
貯 水 池 長 (km)	2 2	1 5. 6	2. 2	2. 7
年 間 交 換 率 (yr ⁻¹)	4. 1	5. 0	0. 4	1. 4
最大使用水量 (m ³ /sec)	1 3 7	4 2 4	3 7 6	
最大揚水量 (m ³ /sec)	—	2 4 0	2 8 8	

式発電所上部池，タイプⅢは純揚水式発電所上，下部池である。これらの貯水池において，昭和50年～55年の期間に，それぞれ3年間，毎月1回程度の水質調査を行った。調査の詳細については安芸ら（1982）¹⁰⁾の報告を参照されたい。

調査結果にもとづく各貯水池の水質概況を表-2に示す。水温分布特性については，タイプⅢの下部池を除き，いずれも顕著な2次躍層が発電取水口付近に形成される。ただし，タイプⅡでは，取水口が比較的深部に位置するため，2次躍層下の水温の年間変動幅が大きく，特に揚水量の多い年には2次躍層が形成されないことがある。N/P比はいずれも30以上あり，リンが植物プランクトン増殖の制限因子と考えられる。全リン濃度で栄養レベルを比較すると，タイプⅡ>Ⅰ>Ⅲの順となる。一方，夏季平均透明度を比較すると，タイプⅠ<Ⅱ<Ⅲとなっており，タイプⅠ，Ⅱの関係は栄養レベルと逆である。タイプⅠは微細な粘土鉱物によって濁水化しやすい貯水池であり，明らかに濁水時とみられる透明度のデータは平均計算の対象外としているが，それでも濁質の影響を完全には除去できていない可能性がある。底質による酸素消費の重要な指標と考えられる底生動物量は，タイプⅡ>Ⅰ>Ⅲの順となり，栄養レベルに対応している。

表-2 各貯水池の水質概況

貯水池タイプ 項 目		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	
				上 部 池	下 部 池
調 査 年 度		1975～77	1978～80	1977～79	
水 温	1次躍層形成時期（月）	3～11	4～10	4～9	3～10
	2次躍層形成時期（月）	5～2	7～11	5～2	形成されず
	底層水温年間変動（℃）	8～10	6～19	6～11	7～23
栄 養 塩	T-N池内平均値（ppb）	629	753	641	645
	T-P池内平均値（ppb）	16	22	7	8
	T-N/T-P	39	34	92	81
透 明 度	最大値（m）	7.2	5.1	6.9	6.5
	濁水時除く6～8月平均値（m）	2.5	2.7	4.1	4.5
底生動物	優 占 種	Tubificidae	同 左	同 左	同 左
	現存量平均値（inds/m ² ）	5×10 ³	2×10 ⁴	5×10 ²	1×10 ³

2.2 溶存酸素成層化現象の観測例

水質調査の結果，水温成層の発達するタイプⅠ，ⅡおよびⅢの上部池において，溶存酸素の成層化がみられた。

図-1～3は，各貯水池の夏季における水温，溶存酸素の典型的な鉛直分布を示したものである。タイプⅠ，Ⅱは，表層過飽和，深層不飽和の層構造となっており，特に栄養レベルの高いタイプⅡにおいて深層の不飽和の程度が著しい。不飽和の程度は流況にも影響され，池水交換の遅い渇水年ほど顕著であった。⁹⁾これらの溶存酸素の成層は，放熱期の対流混合によって表層から消滅していき，大循環によって底までほぼ一様な分布となる。

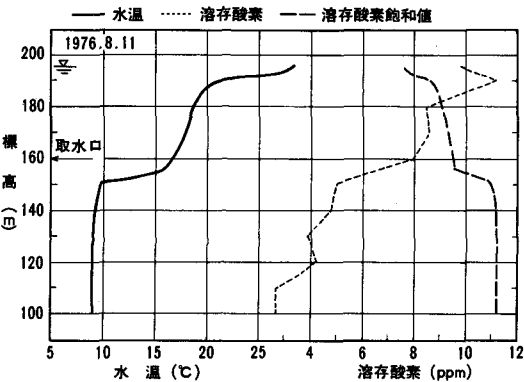


図-1 水温，溶存酸素の鉛直分布（タイプⅠ）

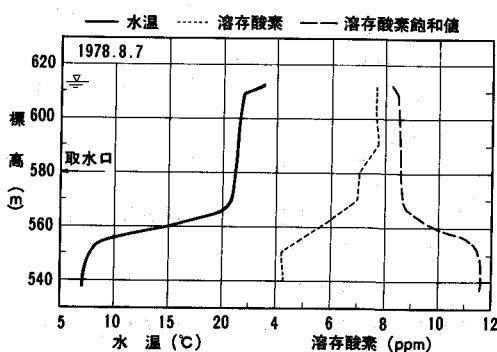
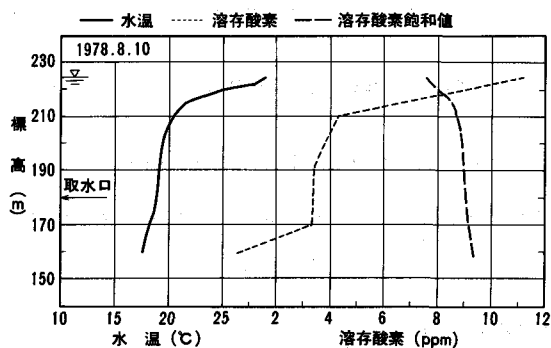


図-2 水温、溶存酸素の鉛直分布(タイプII) 図-3 水温、溶存酸素の鉛直分布(タイプIII上部池)

3. 溶存酸素の予測モデル

3.1 現象のモデル化

前章でみたように、溶存酸素の鉛直分布には特徴的な層構造が存在する。ここでは、その形成と消滅を説明しうるような現象のモデル化を試みる。

貯水池内における溶存酸素の生産・消費に関与する素過程としては、①植物プランクトンの光合成、②動物プランクトンの呼吸、③有機物の分解、④底質による消費、の四つを考慮する。また、外部との収支としては、河川流入、発電・ゲート放流、大気圏との収支を考慮する。

溶存酸素の鉛直方向の層構造に着目しているので、水平方向に平均化した1次元解析の取扱いが適当と思われる。また、これらの層構造の年周期的な変化を対象にしているので、時間スケールとしては、日間～週間程度のオーダーの平均を考える。

3.2 基礎方程式

貯水池を水平な層に分割し、層内で日間～週間程度に平均化された溶存酸素濃度を O とすると、その収支は次のように表わされる。

$$\frac{1}{V} \frac{dOV}{dt} = \sigma_{OY} (G_Y - R_Y) Y - \sigma_{OZ} R_Z Z - \sigma_{OC} K_C C - K_b \frac{A_b}{V} + K_g \frac{A_s}{V} (O_s - O) + F(O) \quad (1)$$

ここに、 V ：層体積、 t ：時間、 Y ：植物プランクトン量、 Z ：動物プランクトン量、 C ：有機炭素濃度、 A_b ：貯水池底との接触水平面積、 A_s ：大気との接触水平面積、 O_s ：溶存酸素飽和値、 G ：増殖率、 R ：呼吸率、 σ ：単位換算係数、 K ：係数、である。ただし、 K_g は表層以外は0とする。

また、 F は、移流、拡散を表わす次のような関数である。

$$F(X) = \frac{1}{V} \sum_j (Q_{ij} X_{ij} - Q_{oj} X) - \frac{1}{V} (q_{xu} A_u - q_{xd} A_d) \quad (2)$$

ここに、 X ：水質項目、 X_{ij} ： j 番目の側面からの流入水の水質、 Q_{ij} 、 Q_{oj} ： j 番目の側面からの流入量、流出量、 q_{xu} 、 q_{xd} ：鉛直方向の拡散による上層からの流入フラックス、下層への流出フラックス、 A ：水平面積、である。

プランクトン、無機リン濃度、有機炭素濃度については、Di Toro et. al. (1971)¹¹⁾に代表されるダイナミックモデルを基礎に、以下のような収支式を用いて計算する。この場合の各水質項目は、溶存酸素と同様の時間、空間スケールで平均化されたものを考える。

$$\frac{1}{V} \frac{dYV}{dt} = (G_Y - R_Y - D_Y) Y + \frac{A_u w_o}{V} (Y_u - Y) + F(Y) \quad (3)$$

$$\frac{1}{V} \frac{dZV}{dt} = (G_Z - R_Z - D_Z) Z + F(Z) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{1}{V} \frac{dPV}{dt} = \sigma_{PY} [\beta_Y (D_Y (1 - f_Y) + R_Y) - G_Y] Y + \sigma_{PZ} \beta_Z (R_Z + D_Z) Z + F(P) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{1}{V} \frac{dCV}{dt} = \sigma_{CY} [D_Y (1 - f_Y) + R_Y] Y + \sigma_{CZ} (R_Z + D_Z) - K_C C + F(C) \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、D：死滅率、 w_o ：沈降速度、 Y_u ：上層の植物プランクトン量、 β ：栄養塩回帰率、 f_Y ：動物プランクトンの増殖効率、である。

3.3 各項の計算式

基礎方程式に含まれる各動力学係数を以下のような関数で表わす。

$$G_Y = G_{Y_{max}20} \theta^{T-20} f_I f_P \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$G_Z = \sigma_{ZY} f_Y C_{g20} \theta^{T-20} Y \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$R = R_{20} \theta^{T-20} \text{ (動物, 植物共通)} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$D_Y = C_{g20} \theta^{T-20} Z \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$K_C = K_{C20} \theta^{T-20} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$K_b = (K_{bo} + \sigma_{OB} B f_O) \theta^{T-20} \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$K_g = \alpha_m / (L_f f_W) \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここに、 θ ：温度係数、T：水温、 f ：効率関数、I：照度または日射量、 C_g ：動物プランクトン濾水速度、B：底生動物現存量、 α_m ：溶存酸素の分子拡散係数、 L_f ：水面フィルム厚、W：風速、である。

各効率関数は、既往の実験や現地観測の知見にもとづき、次のように与える。

$$f_I = \frac{I}{I_s} \exp \left(1 - \frac{I}{I_s} \right) \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$f_P = P / (k_P + P) \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$f_Y = a k_Y / (k_Y + Y) \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$f_O = 1 - \exp (-k_B O) \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$f_W = \begin{cases} (W/W_o)^{-2} & (W \geq W_o) \\ 1 & (W \leq W_o) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(18)$$

式14は、Steele (1965)¹²⁾により提案された関数形で、 I_s は最適照度または日射量である。式15はいわゆる Monod の式で、 k_P は半飽和定数と呼ばれる。式16は、文献11)によるもので、 a は最大同化率、 k_Y は半飽和定数である。式17は、McDonnell & Hall (1969)¹³⁾による実験式で、底生生物の活動による酸素消費率が、底質直上水の溶存酸素濃度に依存する関係を表わしたものである。前述した既往の溶存酸素予測モデルにおいて、底質による酸素消費項に式12、17のような関数形を導入した例はなく、本研究では、タイプや栄養レベルの異なるダム貯水池の溶存酸素成層化現象を統一的に説明するために導入した。式18は、水面でのフィルム厚の風速依存性を、Downing & Truesdale (1955)¹⁴⁾、Kamwisher (1963)¹⁵⁾の実験値より定式化したもので、水面上10cmの風速を用いれば、 $W_o = 2m/sec$ 、 $L_f = 440 \mu m$ となる。

貯水池内の流動の計算には、安芸・白砂 (1975)¹⁶⁾のモデルを用いる。これは、水温成層の存在する貯水池内を、水平な流動層と停滞層とに分け、流量と水温分布から流動層の流れを計算するモデルである。発

電取水によって貯水池から流出する流動層厚を δ_o 、河川流入による流動層を δ_i とすると、

$$\delta_o = (Q_o / G \theta \sqrt{\varepsilon g})^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (19)$$

$$\delta_i = (Q_i / F B_i \sqrt{\varepsilon g})^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (20)$$

ここに、 Q_o, Q_i ：流出量，流入量， G, F ：軸対称流，2次元流の内部フルード数， θ, B_i ：発電取水口開口角度，流入部貯水池幅， ε ：密度勾配（ $-d\rho / dy / \rho$ ）， g ：重力加速度，である。なお，計算方法の詳細は文献10)，16)を参照されたい。

3.4 パラメーターの同定

プランクトンの計算に用いる諸パラメーターの値については、当面は文献11)をはじめ、宗宮ら(1978)¹⁷⁾、岩佐ら(1981)¹⁸⁾などによる我国の湖沼、貯水池を対象としたシミュレーションの事例を参考とし、実測資料をほぼ説明しうる値の組合せを与えるものとする。一方、溶存酸素の消費に関する式(11)、(12)中のパラメーターの値については、やや情報が不足しており、特に、式(12)のような何らかの関数関係の導入によって、異なる貯水池の溶存酸素消費機構を統一的に説明しようとした研究例は少ない。そこで、本研究においては、前章に述べた貯水池の実測資料をもとに、パ

表－3 酸素消費に関するパラメーターの値

パラメーター	数 値	根 拠
θ	1.0 7	文 献 13)
K_{C20} (d^{-1})	0.0 1	タイプⅠ，Ⅱ実測資料
K_{b_o} ($g O_2 / m^2 / d$)	0.5	同 上
σ_{OC} ($g O_2 / g C$)	3	文 献 3)
$\sigma_{OB} (g O_2 / 10^4 \text{ inds})$	1	文 献 13)
k_B ($m^3 / g O_2$)	0.3 9	同 上

ラメーターの同定を行った。すなわち、タイプⅠとⅡの貯水池におけるそれぞれ2年間の成層期の溶存酸素の変化を、物理項と生物化学項とに分離し、式(11)、(12)などの関数形の妥当性について検証した上で、生物化学項を全体的に説明しうるパラメーターの値を求めた。この方法の概要は、文献6)，9)で述べたが、それ以後の検討を含む内容の詳細については別途に報告することにして、ここでは結果のみを表－3に示す。

3.5 モデルの汎用性の検討

文献11)，17)，18)などによれば、プランクトンと栄養塩の動力学モデルは、現在のところ関数形やパラメーターを水域によって修正する必要がある、これらを統一的に説明する段階には至っていない。一方、文献10)，16)などによれば、貯水池内の流動と水温の予測モデルは、実用性、汎用性の点でほぼ満足できるものである。本報告に示した溶存酸素の予測モデルは、両者を基礎としたものであるが、前者の汎用性については今後の検討課題として、ここでは新たに導入された式(11)、(12)、(17)および表－3に求められたパラメーター値の汎用性について検討を行う。

表－4 シミュレーションに用いたパラメーターの値

既に述べたように、表－3のパラメーターの値は表－1のタイプⅠ，Ⅱ両貯水池のそれぞれ2年間の溶存酸素の変化をほぼ統一的に説明するものとして求められた。したがって、これらの値を修正することなく、さらにタイプの異なる貯水池へのモデルの適合性を検討しておくことは有意義と思われる。

このため、タイプⅢの貯水池を対象とする溶存酸素成層化現象の数値シミュレーションを行った。計算期間は昭和52年4月～12月、層分割は $\Delta y = 5m$ とし、水温、クロロフィ

パラメーター	数 値	パラメーター	数 値
G_{Ymax20} (d^{-1})	1.8	R_{Z20} (d^{-1})	0.0 5
I_s (l_y / d)	3 0 0	D_z (d^{-1})	0
k_P ($\mu g P / l$)	4	β_Y, β_Z	0.5
R_{Y20} (d^{-1})	0.0 8	$\sigma_{ZY} (mg C / \mu g Chl)$	0.0 5
w_o (m / d)	0.1	$\sigma_{PY} (\mu g P / \mu g Chl)$	1
$C_{g20} (l / mg C / d)$	1.2	$\sigma_{PZ} (\mu g P / mg C)$	2 0
a	0.7	$\sigma_{CY} (mg C / \mu g Chl)$	0.0 5
$k_Y (\mu g Chl / l)$	6 0	$\sigma_{CZ} (mg C / mg C)$	1

ル a, 動物プランクトン, リン酸態リン, 有機炭素, 溶存酸素の 6 項目を同時計算した。計算方法は, 水温については文献 16), 他の項目については式(1), (3)~(6)を差分化し, Runge-Kutta-Gill 法によった。時間差分 $\Delta t = 0.1$ day とした。

プランクトンおよび栄養塩のシミュレーションでは, クロロフィル a の実測資料との整合性に重点を置いて各パラメーターの値を修正し, 最終的に表-4 のような組合せを与えた。この条件での上部池表層のシミュレーション結果を図-4 に示す。オーダーおよびピークの発生時期はほぼ的確に表わされているといえる。

水温, 溶存酸素鉛直分布の計算結果は図-5, 6 のようになり, 上部池では, 発電取水口(標高 580m)下に形成される水温 2 次躍層の上下での溶存酸素の成層化が, ある程度までは模擬されている。下部池においては, 溶存酸素の成層

化現象はみられないが, 上部池中層の水が発電によって流入するため, 成層期の溶存酸素は不飽和状態にある。図-6 の結果はこの状況をほぼ的確に表わしているといえる。

このときの溶存酸素変化率に占める式(1)各項の寄与率の計算結果の一例を図-7 に示す。植物プ

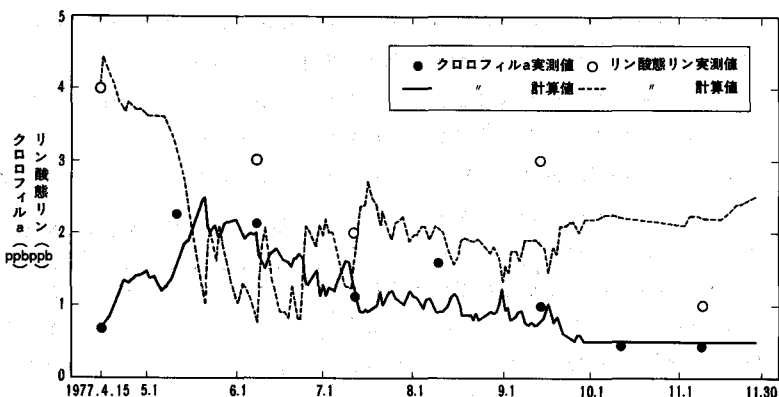


図-4 上部池表層クロロフィル a, リン酸態リンのシミュレーション結果

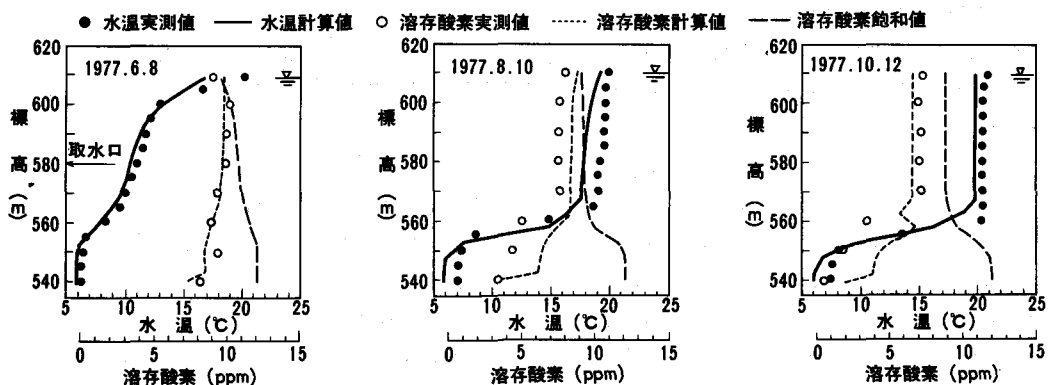


図-5 上部池水温, 溶存酸素鉛直分布のシミュレーション結果

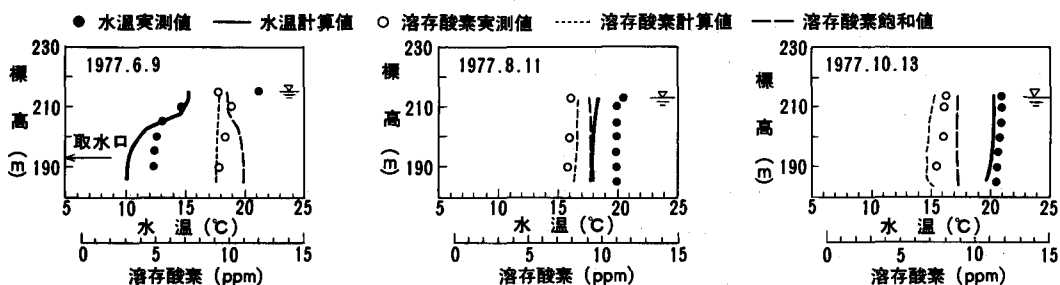


図-6 下部池水温, 溶存酸素鉛直分布のシミュレーション結果

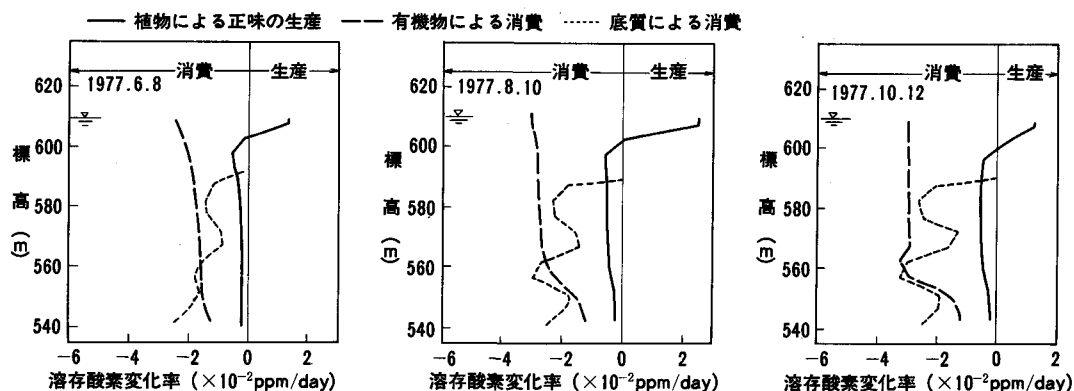


図-7 溶存酸素変化率における各項の寄与(上部池計算値)

ランクトンの光合成による酸素の生産は、表層のごく狭い範囲に限定されており、また深部ほど底質による酸素の消費が相対的に大きく寄与していることが分る。この点は、文献3)などで指摘されている傾向とも一致している。

4. 結 語

貯水池流動モデルとプランクトン動力学モデルを基礎とする溶存酸素予測モデルを作成し、水質レベルや運用形態の異なる発電用貯水池における溶存酸素の成層化現象をある程度まで統一的に説明できることを示した。これはモデルの汎用化を図る上で有意義な知見であり、今後さらに実測資料による検証を加え、モデルの実用性を高めていくつもりである。

参 考 文 献

- 1) Hutchinson, G. E. : A Treatise on Limnology, Vol.1, John Wiley & Sons, Inc., 1957.
- 2) Bella, D. A. : Proc. ASCE, Vol. 96, No. SA5, 1970.
- 3) Newbold, J. D. & Liggett, J. A. : Proc. ASCE, Vol. 100, No. EE1, 1974.
- 4) 佐藤ほか：第18回衛講論文集，土木学会，1982.
- 5) Gordon, J. A. & Skelton, B. A. : Proc. ASCE, Vol. 103, No. EE6, 1977.
- 6) 宮永：第24回水構論文集，土木学会，1980.
- 7) Markofsky, M. & Harleman, D. R. F. : Wat. Pollut. Control. Res. Series, 16130DJH, 1971.
- 8) Schnoor, J. L. & Fruh, E. G. : Wat. Resour. Bull., Vol. 15, No. 2, 1979.
- 9) 宮永ほか：第35回年講概要集，第2部，土木学会，1980.
- 10) 安芸ほか：電力中央研究所報告，総合報告No. 302，1982.
- 11) Di Toro, D. M. et al. : Advan. Chem. Series, No. 106, 1971.
- 12) Steele, J. H. : Mem. Inst. Idrobiol., Univ. of Calif. Press, 1965.
- 13) McDonnell, A. J. & Hall, S. D. : J. WPCF, Vol. 41, No. 8, Part 2, 1969.
- 14) Downing, A. L. & Truesdale, G. A. : J. Appl. Chem., Vol. 5, Oct., 1955.
- 15) Kanwisher, J. : Deep Sea Res., Vol. 10, 1963.
- 16) 安芸・白砂：発電水力，No. 134，1975.
- 17) 宗宮ほか：衛生工学研究シンポ論文集，京大衛生工学科，1978.
- 18) 岩佐ほか：京大防災研年報，No. 24B-2，1981.