

ダム貯水池放流水酸素不足量の河道流下に伴う回復

Recovery of Dissolved Oxygen Deficiti in River Water

Discharged from a Dam-Reservoir

財団法人 電力中央研究所 正 員 官 永 洋 一

財団法人 電力中央研究所 正 員 白 砂 孝 夫

財団法人 電力中央研究所 正 員 安 芸 周 一

1. ま え が き

生物活動が比較的活発な深いダム貯水池では、夏の停滞期に有機物の分解や底質の酸素消費によって深層部が低酸素化する。この深層水は、秋から冬にかけての循環期に表層水と混合し、酸素の供給を受ける。対流混合が底まで達すると、貯水池内のほぼ全層が飽和状態近くまで回復する。翌年の停滞期が始まり、水温成層が発達してくると、池水の鉛直混合が抑制され、再び深層部が低酸素化する。このように年周期的サイクルが繰返されるため、発電用取水口の高さが深層部に位置する場合、毎年停滞期には低酸素水が下流河川に放流されることになる。放流された低酸素水は、河道流下に伴い、曝気、自浄作用、支川流入などにより酸素不足量を回復する。その回復過程の解析においてはStreeter - Phelpsの式が基本となるが、実用上は曝気係数や自浄係数に関する情報が不足している。またこのような現象は、流域からある程度以上の汚濁負荷を受ける多くの成層型ダム貯水池に共通するものであり、その実態を把握しておくことは、河川環境の保全上も意味がある。以上の観点から、水質実態が良く把握されており、かつ低酸素水を放流しているダム貯水池を対象に、現地調査を行った。本報告はその結果について述べたものである。

2. 調 査 方 法

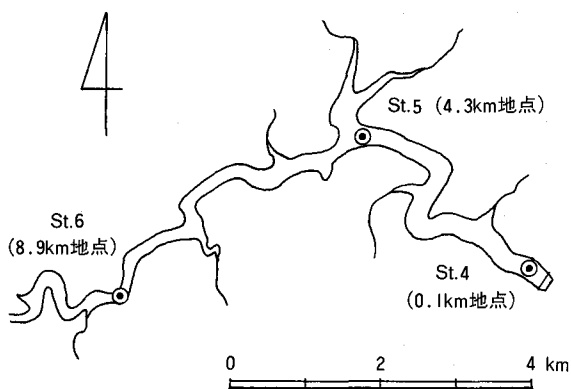
2.1 概 要

調査対象貯水池は、ダム高103 m、総容量 $127.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ の混合揚水式発電所上部池である。下流にはさらに下部池(ダム高41 m、総容量 $7.6 \times 10^6 \text{ m}^3$)および逆調整池(ダム高15.5 m、総容量 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$)があり、貯水池群を形成している。当所が昭和53年度から55年度にかけて行った水質調査(毎月1回程度)の結果によれば、例年8月から9月頃に上部池の深層部が最も低酸素化し、下部池もその影響を強く受ける。この点を考慮して、低酸素水挙動調査を昭和56年8月28日に行った。調査地点は、上部池内、各発電所放水口および逆調整池下流約10 kmの河道区間であり、午前中に貯水池調査、午後発電所放水口および河川調査を行った。

2.2 貯水池調査

図一に示す上部池内3地点において、水温、DOの鉛直分布(1~5 m間隔)および透明度を測定し、またクロロフィルaおよびTOCの分析用サンプルを採水した。

水温の測定には電気水温計を、またDOの測定には酸素電極式溶存酸素計(YSI 57型)を、それぞれ用いた。クロロフィルaサンプルの採水は、各地点毎に横断方向3箇所(水面と水深5 mで行い、それらを等量混合して各地点毎の表層サンプルとした。TOCサンプルの採水は、St.5の深層(取放水口標高)で行った。



図一 上部池平面形状と観測点位置

2.3 発電所放水口および河川調査

各発電所および河川観測点の位置を図-2に示す。河川観測点は、本川3地点(No.1~3)および支川2地点(支川1, 2)であり、逆調整池発電所放水口(No.0)と最下流のNo.3とは河道距離で約10km離れている。各観測点間の距離と残流域面積は表-1のようになる。

調査手順は以下のとおりである。揚水式発電所放水口(St.3)および下部池発電所放水口(St.1)では、貯水池調査終了後に放流水表層部を採水し、水温、DOを測定した。また河川観測点では、表-2に示す時間帯に、水温、DOの連続測定およびクロロフィルa、BODの分析用サンプル採水を行った。測定に用いた計器は貯水池調査に用いたものと同一機種である。

このほか、観測点間の河川の平均流速を知るため、各観測点で浮子(直径3cm、長さ18cmの円筒型)を投入し、その流下時間を測定した。また残流域からの流入量を把握するため、支川1, 2の2地点において流量測定を行った。流速分布の測定にはOTT型流速計を用いた。

表-1 河川観測点の区間距離と残流域面積

区 間	河道距離 (km)	流域または残流域 面 積 (km ²)
下部池ダム~No.0	5.9	78.6
支 川 1	—	10.1
No.0 ~ No.1	2.3	16.5
No.1 ~ No.2	3.2	4.4
支 川 2	—	82.1
No.2 ~ No.3	4.9	90.0

表-2 河川観測点の測定および採水時刻

観測点	水温・DO測定時刻	クロロフィル BOD採 水 時 刻
No.0	14:00~15:00(10分毎)	14:30*
支川1	14:30	14:30*
No.1	14:50~16:00(10分毎)	15:30
No.2	15:30~17:00(15分毎)	16:20
支川2	16:35	16:35*
No.3	16:45~18:00(15分毎)	17:30*

* BODのみ

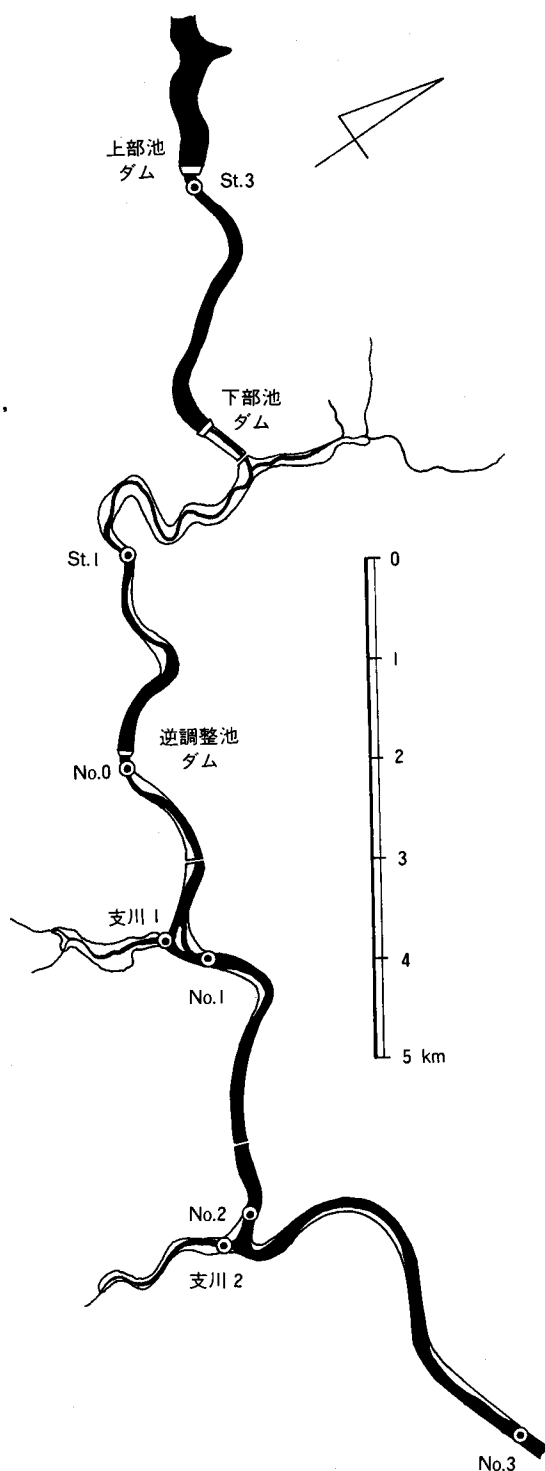


図-2 発電所および河川観測点位置

3. 調査結果と解析

3.1 貯水池内の溶存酸素

図-3, 4は、上部池内の水温分布、D O分布の測定結果である。水温分布は水平方向にほぼ一様で、水面下5 m付近に弱い1次躍層、標高165 m付近に強い2次躍層が形成されている。D O分布は水温分布ほど鉛直1次元性が強くないが、表層の2~3 mが過飽和となり、さらにその下数mに極小値が現れ、底付近で無酸素状態に近くなるという点が流下方向に共通している。表層のクロロフィルaの値は表-3に示すように比較的高く、光合成による酸素生産の寄与が大きい。水深5~6 m付近にD Oの極小値が現れるのは、透明度の値から考えてこの位置が補償深度の下になり、また発電取放水による混合も及ばないため、生産層から沈降してきた植物プランクトンや有機物による酸素消費が集中した結果と思われる。底付近が無酸素状態に近くなる現象は、例年観測されており、底質による酸素吸収が寄与しているものと考えられる。

図-5は、St.4における昭和53年~55年のDO分布観測結果と今回の結果とを比較したものである。これによれば、53年と56年に深層の酸素低下が大きく、54年と55年は相対的にあまり低下していない。流況からみると、53年と56年の停滞期は渇水年であり、揚水による貯留水の繰返し利用が多かったのに対し、54年と55年は相対的に流入量が多く、揚水量が少なかった。したがって、今回の放流水D O調査は、酸素不足という点では比較的厳しい条件下で行われたものといえる。

表-3 上部池における測定結果

項目 観測点	透明度 (m)	クロロ フィルa (ppb)	T O C (ppm)
St.4	2.5	17.86	—
St.5	2.7	14.68	0.8
St.6	2.1	14.48	—

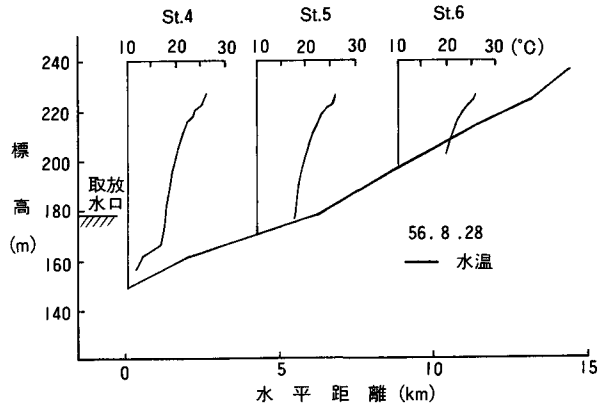


図-3 上部池内水温分布

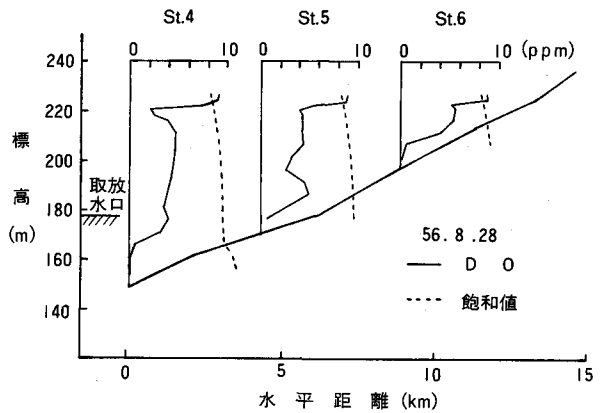


図-4 上部池内D O分布

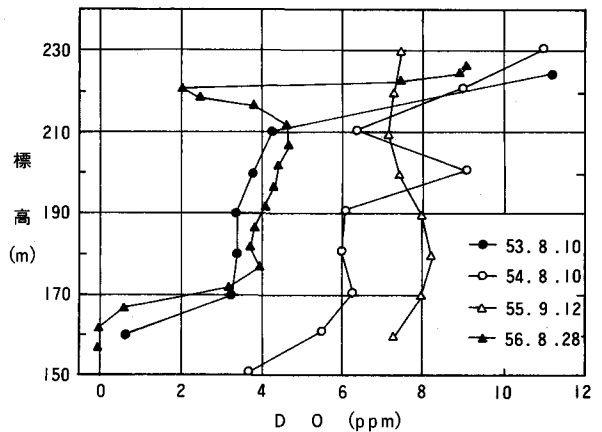


図-5 過去のD O観測結果との比較 (St.4)

3.2 発電所放水口の溶存酸素

各発電所放水口における水温、DOの測定結果を表一4に示す。上流(St.3)から下流(No.0)にかけて酸素不足量の回復がみられるが、この間河道を流下する部分はないため、主として湛水池表面での酸素供給と残流域からの流入による回復と思われる。この点を概略の計算によって以下に検討してみる。図一6に示すように、発電所の運転は、逆調整池を除いて日間の変動が大きく、定常的とはいえないが、いま平均的にみて流入量と流出量が一定で等しく、湛水池内は一様に混合しているものと仮定すると、酸素の収支関係より定常状態のDO濃度 C_{∞} は次式で与えられる。

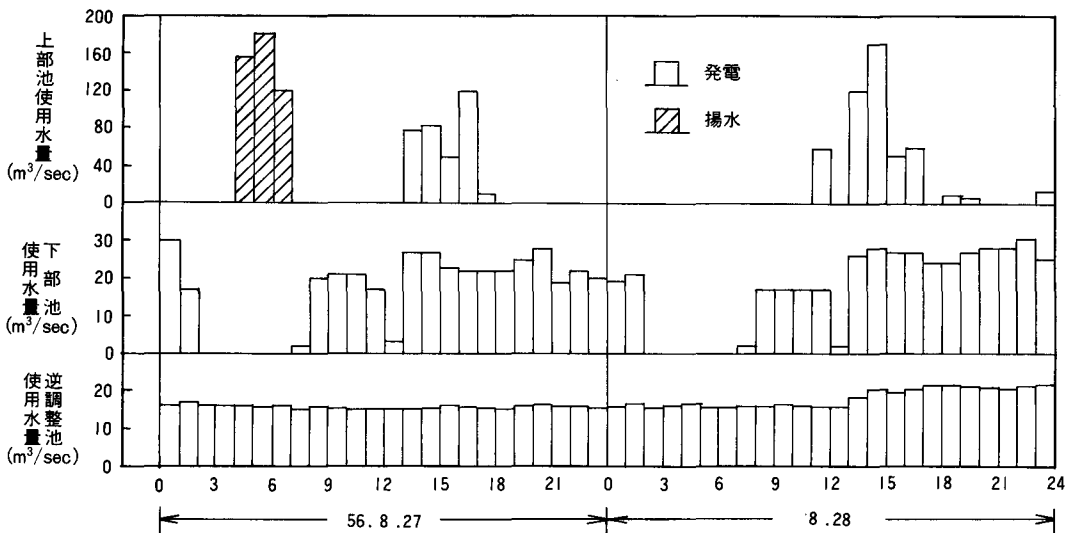
$$C_{\infty} = (C_p Q_p + C_r Q_r + C_s K_g A) / (Q_p + Q_r + K_g A) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 C_p ：上流の発電所放水口DO濃度、 C_r ：残流のDO濃度、 C_s ：飽和DO濃度、 Q_p ：上流の発電所放流量、 Q_r ：残流量、 K_g ：ガス交換係数、 A ：湛水面積、である。

下部池および逆調整池を対象に式(1)で計算した C_{∞} を放水口DOの推定値として表一4に示した。入力条件のうち C_p は表一4の測定値、 C_r は後述する支川の測定値を与えた。また K_g については湛水池水面のフィルム厚を600 μm として計算した。このような単純化された条件にもかかわらず、推定値は対応する測定値を比較的良く説明している。計算ではSt.3～St.1の回復のうち大気からの供給が88%、St.1～No.0の回復のうち残流からの寄与が69%となった。

表一4 発電所放水口における測定結果とDOの推定値

発電所	観測点	時刻	測定値		推定値 DO (ppm)
			水温 (℃)	DO (ppm)	
揚水式	St.3	13:30	18.7	4.5	—
下部池	St.1	13:50	18.6	4.7	4.9
逆調整池	No.0	14:00～15:00	19.6 ± 0.1	5.7 ± 0.05	5.4



図一6 発電所使用水量の時系列資料

3.3 河川の溶存酸素

河川観測点における水温、DO、クロロフィルa、BODの測定結果を表一5に示す。上流(No.0)から下流(No.3)にかけて酸素不足量の回復がみられるが、特にNo.0～No.1間の回復が急激で、No.2までの

表一五 河川観測点における測定結果

観 測 点	水 温 (℃)	D O (ppm)	D O 飽 和 度 (%)	クロロフィル a (ppb)	B O D (ppm)
No.0	19.6 ± 0.1	5.7 ± 0.05	62 ± 1	—	0.8
支川1	22.4	8.2	94	—	1.2
No.1	19.8 ± 0.1	7.1 ± 0.35	77 ± 4	2.31	1.8
No.2	20.1 ± 0.1	8.2 ± 0.20	89 ± 2	1.80	1.4
支川2	22.8	8.1	93	—	2.1
No.3	20.5 ± 0.2	8.5 ± 0.10	93 ± 1	—	1.3

5.5 kmの流下で支川とほぼ同レベルの飽和度90%に達し、No.3では完全に支川と同じ飽和度まで回復している。この間のBODの変化をみると、全体的に値は小さいが、逆調整池発電所放水口(No.0)で特に小さく、むしろ支川の方が高い。支川の流域には水田などがあるのに対し、貯水池群を通過してくる水は分解や沈殿によって有機物が除去されている。したがって、今回観測された事例は、低酸素化はしているが有機物の少ない水が発電所から放流され、河道を流下するにつれて主に曝気と支川流入とによって酸素不足量を回復する過程であったといえる。この過程をStreeter-Phelps型の式で解析する場合の係数値などに関する検討結果を以下に示す。

各観測点でのD Oの測定値はある程度の時間変動を示したが、傾向的なものはなく、また下流になるほど変動が小さい。そこで現象はほぼ定常的と考え、また分散を無視すると、流下方向(x方向)のD O濃度C、BOD濃度Lの変化は次式で表わされる。

$$U \frac{dC}{dx} = K_2 (C_s - C) + q_r (C_r - C) + P - K_1 L \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$U \frac{dL}{dx} = q_r (L_r - L) - K_1 L \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、U：平均流速、K₂：再曝気係数、q_r：流水の単位体積当りの流量増加率、P：光合成による単位体積当りの酸素生産率、K₁：BODの分解速度定数、L_r：残流のBOD濃度、である。

C、L以外の量を一定とみなせる区間での解は、まず式(3)より、

$$L = L_o \exp \left\{ -(K_1 + q_r) \frac{x}{U} \right\} + \frac{q_r L_r}{K_1 + q_r} \left[1 - \exp \left\{ -(K_1 + q_r) \frac{x}{U} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり、式(4)を式(2)に代入して解くことにより、

$$C = C_o \exp \left\{ -(K_2 + q_r) \frac{x}{U} \right\} + C_* \left[1 - \exp \left\{ -(K_2 + q_r) \frac{x}{U} \right\} \right] + \frac{K_1}{K_2 - K_1} \left(L_o - \frac{q_r L_r}{K_1 + q_r} \right) \left[\exp \left\{ -(K_2 + q_r) \frac{x}{U} \right\} - \exp \left\{ -(K_1 + q_r) \frac{x}{U} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここにL_o、C_oはx=0における初期濃度である。C_{*}は次式で与えられる。

$$C_* = \frac{K_2 C_s + q_r C_r + P}{K_2 + q_r} - \frac{K_1 q_r L_r}{(K_1 + q_r)(K_2 + q_r)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

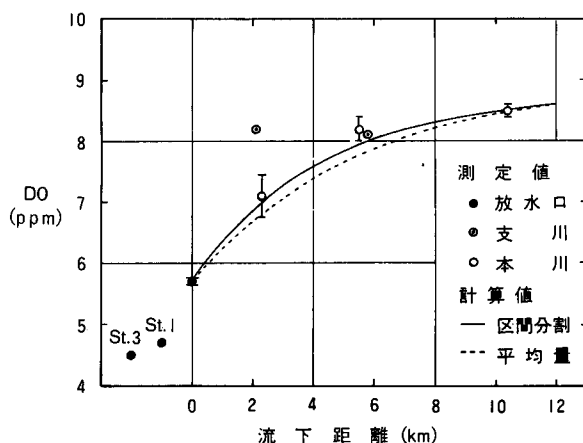
式(5)でK₂をDobbinsの式から求め、またK₁ = 0.01 h_r⁻¹と仮定し、他の量に実測値を与えて計算した結果が表-6、図-7である。計算は、No.0～No.3の河道区間を5分割し、各区間毎の水理量や係数を与える方法と、全区間を平均量で与える方法の二通りで行った。表-6は分割法による計算結果を示したものである。表中の平均流速は、浮子による表面流速の測定結果から、流速分布を1/7乗則と仮定してその9割を与えた。平均水深は、粗度係数を0.04としてManningの式より求めた。また流量については2箇所の支川での

表－6 Streeter－Phelps 型モデルによる河川の D O の計算結果

計算対象地点	区間距離 (km)	区間勾配	平均流速 (m/sec)	平均水深 (m)	流 量 (m^3/sec)	q_r (hr^{-1})	K_2 (hr^{-1})	D O 計算結 値 (ppm)
No. 0					20.6			5.70
No. 1	2.3	1/316	0.75	0.39	21.7	0.061	0.50	7.00
4.7 km 地点 *	2.4	1/317	0.76	0.40	21.9	0.010	0.49	7.78
No. 2	0.8	1/274	0.92	0.48	22.0	0.019	0.47	7.93
6.4 km 地点 *	0.9	1/284	0.93	0.50	27.6	0.845	0.45	8.10
No. 3	4.0	1/345	0.87	0.52	28.1	0.014	0.37	8.49

*No.0 を基準とする。

測定結果より平均比流量を $0.068 m^3/sec/km^2$ とし、流域換算によって求めた。光合成による酸素生産速度は、Bain(1968)²⁾ の計算方法にしたがい、照度、栄養塩の制約がないものと仮定して河川の平均クロロフィル量 2.1 ppb より $P = 0.021 ppm/hr$ を与えた。一方全区間を平均量で計算する場合の条件としては、勾配 1/318、平均流速 $0.83 m/sec$ 、平均水深 $0.46 m$ 、 $q_r = 0.088 hr^{-1}$ 、 $K_2 = 0.44 hr^{-1}$ を与えた。図一 7 によれば、平均量による計算でも No.3 における回復はほぼ適切に推定されているが、分割計算を行うことにより、放流直後の水深の浅い区間や、中間部の急勾配で流速の速い区間でより大きな曝気効果が考慮される結果、推定精度が向上することが分る。



図一 7 河川の D O の計算値と測定値の比較

4. 結 語

停滞期に低酸素化した深層水を放流している揚水式発電所下流河川の D O 調査を行い、その実態を把握した。下部池発電所から逆調整池発電所を経た放流水の D O 飽和度は約 60 % であり、河道部 5.5 km の流下によって 89 % まで、10.4 km の流下によって 93 % まで回復する。これはダムのない支川の飽和度と同じ値である。発電所放流水の B O D は支川より低く、河道に放流されると曝気と支川流入によって急速に酸素不足量を回復する。この過程は Streeter-Phelps 型モデルの定常解である式(5)によってほぼ良好に推定できる。その際の曝気係数は Dobbins の式より $0.4 \sim 0.5 hr^{-1}$ となり、また B O D の分解速度定数については $0.01 hr^{-1}$ を仮定した。地形効果を考慮するために河道区間を分割して計算を行った方が推定精度は向上する。残流による希釈効果についても式(2)、(3)のような取扱いが妥当であることが確認された。

本調査は電力中央研究所河川環境研究室、磯部明久、福原華一、五十嵐由雄、河西基、下垣久諸氏の協力を得て行われた。ここに謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：水理公式集，昭和 46 年改訂版。
- 2) Bain, R. C. : J. Sani. Engrg. Div., Proc. ASCE, vol.94, SA 5, 1968.