

貯水池における水理学的富栄養化対策の可能性に関する検討
Feasibility of effective hydraulic measures
for eutrophication phenomenon in reservoirs

財電力中央研究所 正 員 宮 永 洋 一

1. ま え が き

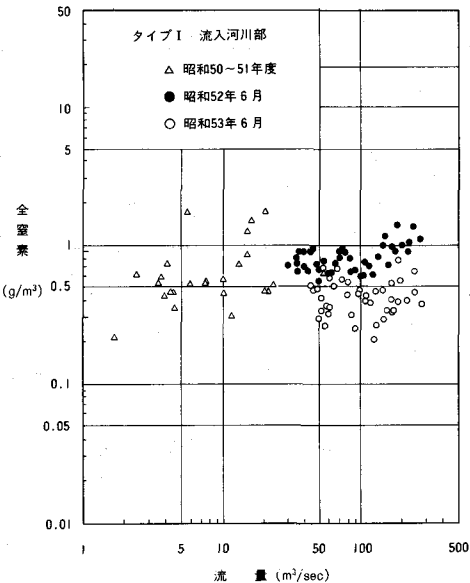
貯水池内における富栄養化対策としては、殺藻剤などの薬剤撒布、底泥の浚渫・被覆、ホテイソウなどを利用した生物学的栄養塩除去、曝気や選択取水による水理学的水質制御などが提案されている。電力用貯水池の場合、魚類影響を考えると薬剤を用いることはできず、また一般に自然湖沼に比べて水深が深く水の交換が速いために底泥からの栄養塩の溶出の寄与は無視できる場合が多い。生物学的除去についてはホテイソウなどの回収・処分方法が問題となる。現状では水理学的対策が最も実現性の高い方法と思われ、曝気については既に容量数百万 m^3 程度の水道用貯水池で実施している地点が多数ある¹⁾。最近では、相模ダムや室生ダムなどの大規模貯水池においても試験的に導入され、現地実験による検討が行われている²⁾。また、選択取水についても、下久保ダムにおいて淡水赤潮抑制効果の検討が行われるなど³⁾、実証的な研究がすすめられつつある。

本報告は、富栄養化対策上有効な貯水池運用方法を見出すため、当所がこれまで行ってきた洪水時の栄養塩収支と選択取水の関係に関する検討結果⁴⁾、および曝気を想定して鉛直混合を促進した場合の水質変化に関する検討結果⁵⁾について述べたものである。

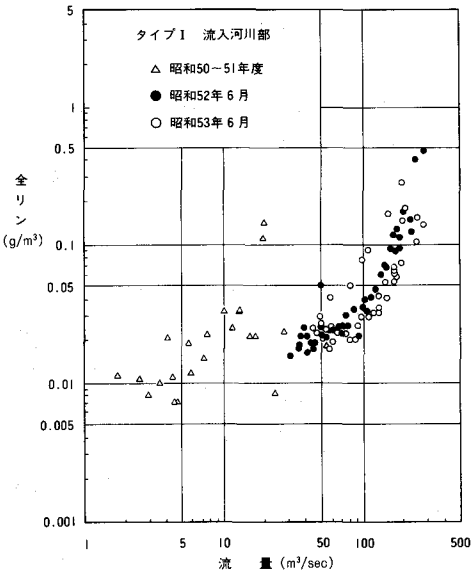
2. 選択取水による洪水時の栄養塩排出効果について

2.1 洪水時の栄養塩負荷量

図一 1、2 は、表一 1 に示す解析対象貯水池のうち、一例としてタイプ I の貯水池の流入河川部における流量と栄養塩濃度の関係を示したものである。データは昭和 5 0 年～5 1 年の毎月 1 回の平水時および昭和



図一 1 河川流量とT-Nの関係 (タイプ I)



図一 2 河川流量とT-Pの関係 (タイプ I)

表一 1 解析対象貯水池の概要

貯水池タイプ 諸 元	I	II	III		IV
	ダ ム 式	混合揚水式上部池	純揚水式上部池	同 下 部 池	混合揚水式上部池
流域面積 (km ²)	415	625	5.2	13.4	159.8
ダ ム 高 (m)	130	103	98	64.5	133
総 容 量 (10 ⁶ m ³)	258	128	25.5	18.6	41.8
湛水面積 (km ²)	6.9	3.6	0.9	0.9	1.1
貯水池長 (km)	22	15.6	2.2	2.7	4.1
年間交換率 (yr ⁻¹)	4.1	5.0	0.4	1.4	7.0
最大使用水量 (m ³ /sec)	137	424	376		300
最大揚水量 (m ³ /sec)	—	240	288		300

52年6月、53年6月の洪水時の調査によるものである。これによれば、T-Pと流量の間には強い相関があり、洪水時には負荷量が急増する。文献4)で指摘したように、この増加の大部分は懸濁成分であり、洪水時に濁質とともに栄養塩が流出してくることが分る。T-Nについては流量との相関が弱い、これは相対的に溶存成分が多く懸濁成分が少ないためで、懸濁成分のみについてみればやはり洪水時に増加を示している。

図一1、2より次のような回帰式を作り、タイプIの貯水池の昭和52年度の年間の栄養塩負荷量を計算した。

$$T-N = 0.586 q^{0.035} \dots\dots\dots (1)$$

$$T-P = \begin{cases} 0.015 & (q < 0.2) \\ 0.108 q^{1.176} & (q \geq 0.2) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、q：比流量 (m³/sec/km²)である。

結果は表一2に示すとおりで、T-Pについては洪水時の負荷量が全体の約80%と非常に大きな割合を占めることが分る。

このような栄養塩負荷の流出特性は、表一1の各貯水池に共通してみられる。したがって、特にリンについては洪水時の負荷を把握しておくことが重要と思われる。

表一 2 年間の栄養塩負荷量の計算結果
(タイプI、昭和52年度)

負 荷 量 の 区 分	T-N	T-P
① 年間負荷量 (ton/年)	570	38
② 100 m ³ /sec 以上の洪水時負荷量 (ton/年)	287	30
② ÷ ① × 100 (%)	50	79

2.2 貯水池における栄養塩収支のシミュレーション

洪水とともに貯水池に大量に流入する懸濁態の栄養塩は、一部が池内に堆積し、一部が発電取水や洪水放流によって下流に放流される。この洪水時の栄養塩収支について、当所の貯水池濁度数値解析モデルを用いてシミュレーションを行った。

数値解析モデルは、貯水池を流下方向、鉛直方向に要素分割し、各要素についての濁質の収支を基礎式とする2次元モデルである⁶⁾。基礎式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial w_0 C}{\partial y} = \frac{D}{B} \frac{\partial}{\partial y} \left(B \frac{\partial C}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、C：濁質または栄養塩の濃度、t：時間、x：流下方向座標、y：鉛直方向座標、u：水平流速、v：鉛直流速、w₀：濁質または栄養塩の沈降速度、D：鉛直拡散係数、B：貯水池幅、である。

流速成分は水温分布（密度分布）より当所の分離流動層モデルにしたがって計算される。ここに水温分布は鉛直1次元モデルで計算する。⁶⁾

以上のモデルを用いて、水温、濁質濃度、T-N、T-Pを計算する。栄養塩については溶存態と懸濁態に分け、後者は濁質とともに沈降し、前者は沈降しないものとして扱う。

シミュレーションの対象としたのは表-1のタイプⅠ、Ⅱ、Ⅳの各貯水池である。計算条件の概要を表-3に示す。栄養塩のシミュレーション結果の一例は図-3～8のようになり、これにもとづく栄養塩収支の計算結果は表-4のようになった。

表-3 洪水時栄養塩収支計算条件の概要

貯水池	計 算 期 間	日平均ピーク流入量(m^3/sec)	要 素 分 割 (m)	濁質平均粒径(μm)
Ⅰ	52. 6. 11～6. 27	266.7	$\Delta x = 2,000$	3.5
	53. 6. 18～6. 30	367.0	$\Delta y = 2$	2.5
Ⅱ	55. 5. 10～6. 10	190.3	$\Delta x = 2,000$	6.5
	55. 6. 10～7. 20	160.6	$\Delta y = 2$	
Ⅳ	55. 6. 24～7. 13	90.4	$\Delta x = 350, \Delta y = 2.5$	6

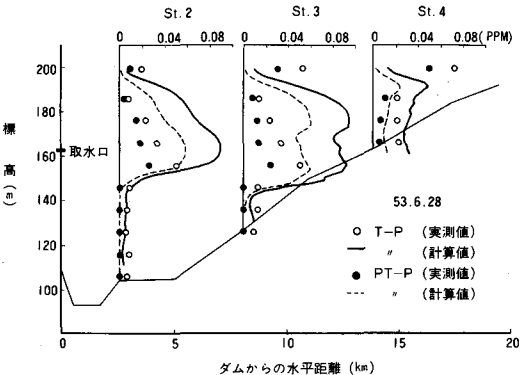
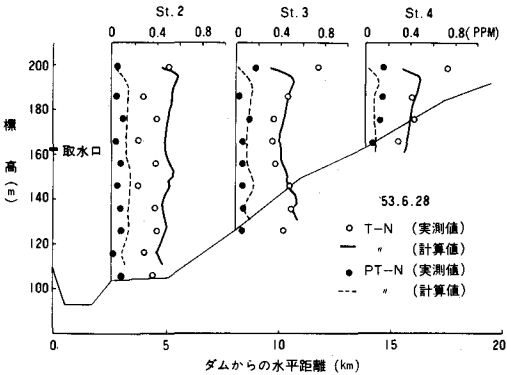


図-3 T-Nのシミュレーション結果（タイプⅠ） 図-4 T-Pのシミュレーション結果（タイプⅠ）

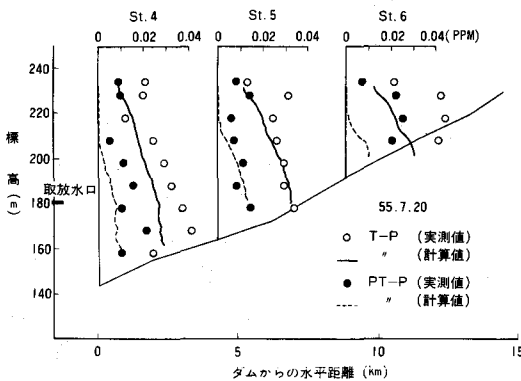
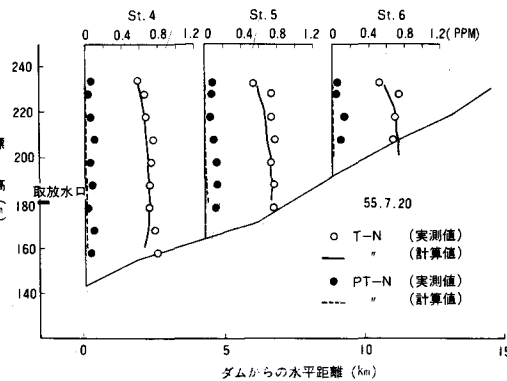
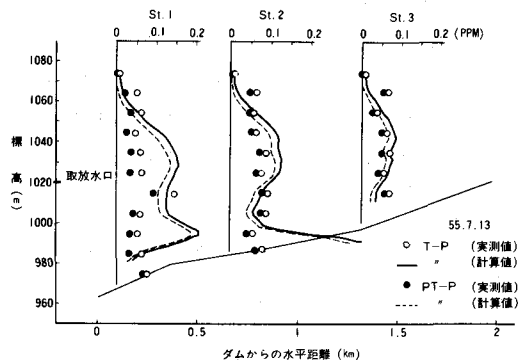
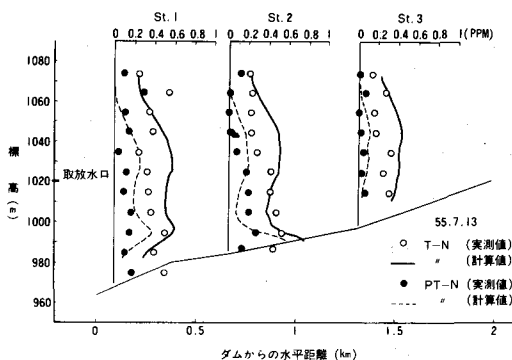


図-5 T-Nのシミュレーション結果（タイプⅡ） 図-6 T-Pのシミュレーション結果（タイプⅡ）



図一7 T-Nのシミュレーション結果（タイプⅣ） 図一8 T-Pのシミュレーション結果（タイプⅣ）

表一4 洪水時栄養塩収支の計算結果

栄養塩	貯水池	計 算 期 間	河川流入量 (ton)	揚水流入量 (ton)	流 出 量 (ton)	貯 留 量 (ton)	貯 留 率 (%)
T-N	Ⅰ	52.6.15～6.27	107.50	—	91.20	16.30	15
		53.6.19～6.30	70.60	—	90.80	-20.20	29
	Ⅱ	55.5.10～6.10	93.99	4.55	84.66	13.88	15
		55.6.10～7.20	120.69	1.65	110.42	11.92	10
	Ⅳ	55.6.24～7.13	18.33	0.02	8.57	9.78	53
T-P	Ⅰ	52.6.15～6.27	10.20	—	5.30	4.90	48
		53.6.19～6.30	12.70	—	2.70	10.00	79
	Ⅱ	55.5.10～6.10	5.27	0.09	2.60	2.76	52
		55.6.10～7.20	6.17	0.04	3.37	2.84	46
	Ⅳ	55.6.24～7.13	4.27	0.02	1.72	2.57	60

2.3 貯水池運用と栄養塩排出効果の検討

表一4の栄養塩貯留率（貯留量／河川流入量）をみると、T-NについてはタイプⅣを除いてほぼ10％程度かあるいは負の値を示しているのに対し、T-Pは50％程度かあるいはそれ以上の値を示している。すなわち、相対的に懸濁成分を多く含むリンの方が窒素に比べて貯留されやすい傾向にあることが明確にあらわれている。タイプⅣのT-Nの貯留率が53％と高いのは、他の貯水池に比べて懸濁成分の割合が大きいためである。揚水発電による下部池からの寄与の影響は相対的に小さく、タイプⅠとⅡ、Ⅳとで貯留率の傾向的な違いはみられない。

タイプⅠの貯水池では、濁水対策として選択取水が行われている。常時は中層の取水口が使用され、洪水の流入があった場合には、一定期間経過後、表層の取水口に切替えるという基準で運用される。表一4の計算期間は、いずれも洪水流入開始から取水口を表層に切替えるまでの期間に相当しており、最終日に取水口が中層から表層に切換えられている。ほぼ同程度の洪水でありながら、全リンの貯留率が52年は48％、53年は79％となったのは、この間の発電所の運転状況の違いによるところが大きい。すなわち、52年は洪水流入後9日間のピーク運転を続けることによって極力濁質を排出したのに対し、53年は3日間しかピーク運転を行わず、このような栄養塩排出効果の違いとなってあらわれたものと考えられる。

3. 鉛直混合による水質制御について

3.1 水質の成層化

水温成層の形成に伴って、水質の成層化が起こる。溶存酸素を例にとれば、夏季の表層では過飽和、深層では不飽和というような特徴的な成層が観測される。水温成層の形成は、一般に貯水池内に流動層と停滞層が形成されたことを意味し、停滞層では河川流入水との水の交換がほとんどなくなるために水質が悪化しやすい。たとえば深層の停滞層では酸欠化とそれに伴う栄養塩や重金属の溶出、表層の停滞層ではプランクトンの異常発生などが起こりやすくなる。

鉛直混合によって水温成層を破壊すると、単に水質の鉛直分布が一様化するというだけでなく、深層が好気的条件になって栄養塩の溶出が抑制されたり、表層の植物プランクトンが光の届かない深層に引込まれて増殖が抑制されるなどの効果が期待される。¹⁾ 溶出抑制の効果については、実際に曝気を実施している貯水池において実証的なデータが得られているようであるが、プランクトンの増殖抑制効果については不明な点も多く、検討の余地が残されている。

3.2 揚水式発電所貯水池水質のシミュレーション

近年の大規模揚水式発電所貯水池においては、短期間に数十m程度の大きな水位変動があることから、発電所の運転条件によっては表層付近の鉛直混合がかなり促進されるものと思われる。著者は、溶存酸素の成層化機構の把握という観点から、表-1のタイプⅢの貯水池を対象に水質と生物の数値シミュレーションを行った。⁷⁾ 使用したモデルは当初の貯水池水温予測モデルおよびDi Toro et al.(1971)⁸⁾のプランクトン動態モデルを基礎とするものであり、詳細は文献7)を参照されたい。

図-9は、上部池表層

におけるクロロフィルa、リン酸態リンのシミュレーション結果である。また図-10は、計算期間中の揚水式発電所の使用水量を示したものである。

図-9によれば、クロロフィルaは5月～6月にピークに達し、このときリン酸態リンの値は初期の4月の値の1/4～1/2にまで低下している。7月以降は再びリンの値が増加するが、クロロフィルaはあまり増加していない。図-10をみると、5月～6月は比較的使用水量が少なく、7月～8月に多くなっており、揚水発電の頻繁な時期に表層のクロロフィルaの増殖が抑制されているものとみられる。

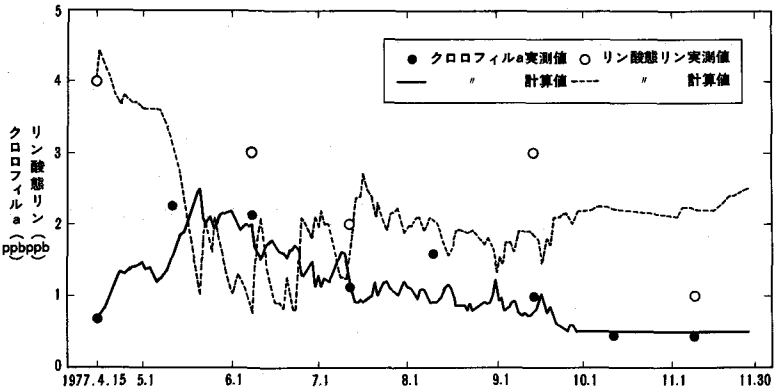


図-9 タイプⅢ上部池表層のシミュレーション結果

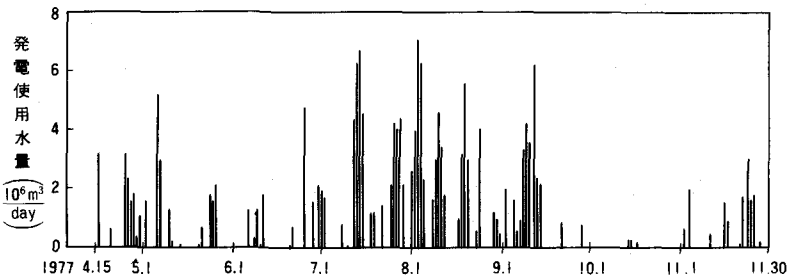


図-10 揚水式発電所の運転実績

3.3 鉛直混合と水質変化に関する考察

鉛直混合による植物プランクトンへの影響を考察すると、光の弱い深層に引き込むこと、および表層水温の低下は増殖を抑制する効果がある反面、深層からの栄養塩の供給は増殖を促進する因子となる。

タイプⅢの上部池について、鉛直拡散係数 D をパラメーターとする計算によって検討してみたものが図-11である。 D の増加に伴ってクロロフィル a は減少しており、この場合は増殖抑制効果の方が卓越する。

図-12は、同じ計算による上部池水温、 DO の鉛直分布を示したものであるが、 $D = 10 \text{ ml/day}$ 程度になると、水温躍層、酸欠層がほぼ消滅することが分る。

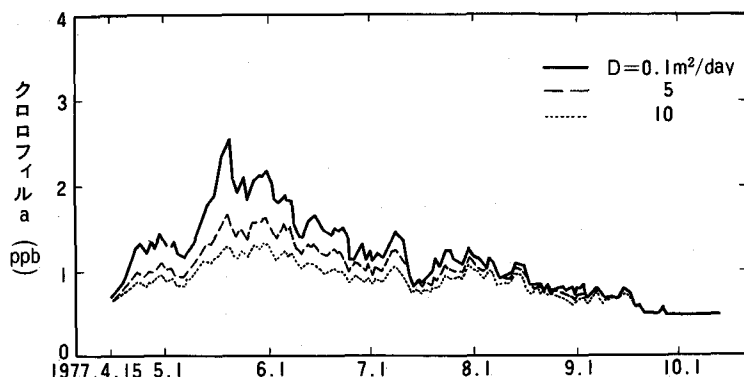


図-11 拡散係数による上部池表層クロロフィル a の変化

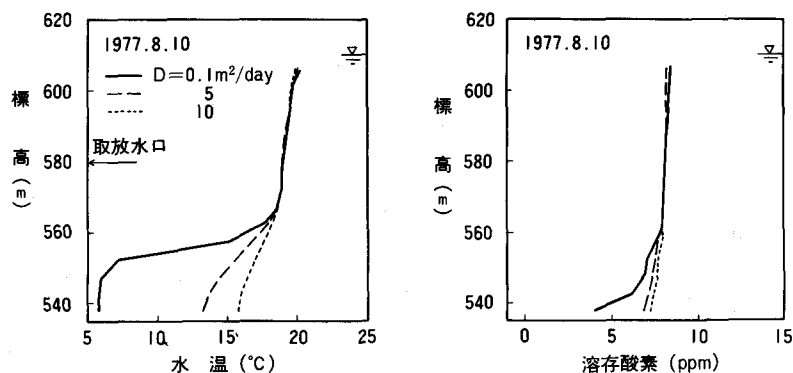


図-12 拡散係数による上部池水温、 DO 鉛直分布の変化

4. あとがき

貯水池への栄養塩負荷量に占める洪水時の寄与は大きく、特にリンはその大部分が懸濁成分である。これらの栄養塩の貯水池内への蓄積は、ダムにおける取水、放流の量と方法に強く影響される。濁水対策としての選択取水方式を栄養塩排除という観点から有効に利用するための検討が必要であろう。

鉛直混合による水質制御の生物への効果については実証的なデータが不足しており、今後この観点からの調査、研究が望まれる。

参考文献

- 1) 小島：産業公害，Vol. 18, No.9, 1982.
- 2) 西村・中尾：ヘドロ，No.26, 1983.
- 3) 高田：水資源開発公団第13回技研発表会資料，1979.
- 4) 宮永・安芸：第7回環境問題シンポジウム，1979.
- 5) 宮永・白砂：第38回年講，1983.
- 6) 宮永ほか：電研研究報告，No.378022, 1979.
- 7) 宮永・白砂：第27回水講，1983.