

貯水池内における濁度および栄養塩の挙動の数値解析

Numerical analysis on the behaviour of turbidity and nutrients in a reservoir

(財)電力中央研究所 正 員 ○宮永洋一・安芸周一・秋元 保・斉藤 茂

1. まえがき

大規模貯水池の建設にともなう下流の水温変化、濁水長期化および池水の富栄養化などの水質現象が問題となっている。このうち水温・濁度については、ある程度まで水理学的現象把握がすすみ、種々の予測計算手法や水質保全対策としての貯水池の運用方法などが提案されている。

当所においても、MITの水温予測モデル¹⁾を基礎として開発された安芸・白砂の1次元モデル²⁾を各貯水池に適用し、水温変化、濁水長期化の予測に関して比較的良好な結果を得ている³⁾。さらに1次元モデルでは本質的に捉えることのできない濁水塊の移動など、水平方向に非一様性の強い濁度分布が形成される場合を対象とした2次元モデルを現在開発中である⁴⁾。また、これと並行して最近注目されつつある富栄養化現象についても、その機構解明を目的とする総合的な現地水質調査をすすめており、昭和52年6月15日～22日にはモデル地点の1つであるH貯水池流入河川において、小規模洪水時の流入水の水質の連続観測を行ない、精度の高い資料を得た。

本報告は、この調査結果にもとづき、洪水時の流入水の水質特性について述べるとともに、富栄養化現象への水理学的アプローチの1つとして2次元モデルによる貯水池内の濁度および栄養塩の挙動の数値解析を行ない、モデルの適合性、栄養塩の蓄積機構などについて検討したものである。

2. H貯水池における洪水時の流入水の水質連続調査

2.1 調査方法の概要

H貯水池は、流域面積415km²、総容量258×10⁶m³の大規模な発電専用貯水池であり、その規模・流域概況などは文献5)に述べたとおりである。

今回の調査では、降雨による流入河川の水質変化を知るため、図-1に示すように、本川流入地点(St.5)およびその上流2地点(St.6, St.7)において、昭和52年6月15日～22日の期間中、連続1時間毎に採水し、種々の項目に関する水質分析を行なった。このうち水温・濁度・濁質の粒度分布・栄養塩濃度について、観測および分析の方法を表-1に示す。

採水方法は、原則として河川の横断方向に3点(St.5のみ1点)、洪水による増水時には1点から採るものとし、採水後15分間静置した上澄みを試料とした。この操作で得られた1時間毎の試料の4時間分をまとめて1個の試料とし、測定項目別の固定・処理保存を行なったものを分析するほか、濁度・粒度分布については現地に測定器を設置し、採水後24時間以内に測定を行なった(粒度分布は濁度25ppm以上の試料のみ)。

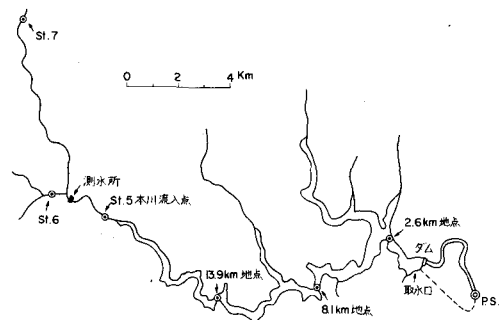


図-1 貯水池平面形状と観測点の位置

分析項目	観測および分析の方法
水 温	流心表面水、棒状温度計
濁 度	水平3点(洪水時およびSt.5は1点)、濁度計
粒度分布	" , コルターカウンター(2~40μ)
総 窒 素	" , ケルダール法と海洋観測指針8.1.1法
溶解性窒素	" , 濾過したものについて同上
総 リ ン	" , 海洋観測指針8.8法
溶解性リン	" , 濾過したものについて同上

表-1 水質分析項目とその方法

2.2 調査結果および考察

6月15日～17日の3日間に、St.7の上流で363mm、測水所では173mmの降雨があり、測水所においてピーク流量285.35m³/sec(16日7時)を記録する小規模洪水が発生した。2.1の方法にしたがって水質調査を行ない、以下の結果を得た。

(1) 濁度・粒度分布

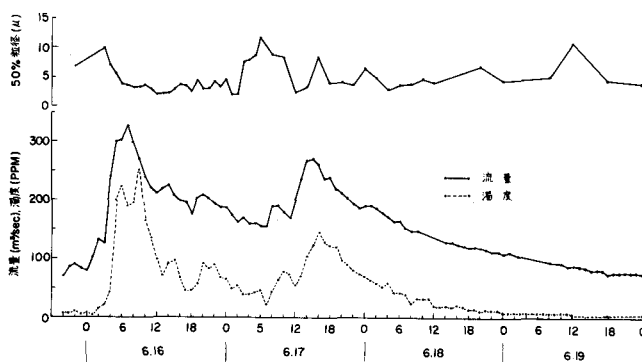


図-2 流量・濁度・濁質の50%粒径の時間変化(St.5)

図-2にSt.5における洪水時の流量・濁度・濁質の50%粒径の時間変化を示す。流量は測水所の観測値を流域換算したものである。

濁度 C (ppm)と流量 Q (m³/sec)は非常に良く似た変化を示し、両対数グラフ上でほぼ直線関係となるので $C = KQ^n$ が成り立つ。 n の値はSt.5, St.6, St.7ともにほぼ同じで3.4, K の値はそれぞれ 1.1×10^{-6} , 6.3×10^{-6} , 41.8×10^{-6} となるが、図-3に示すように比流量 q (m³/sec/km²)との関係でみるとほぼ統一されて $C/q^{3.4}$ の値は20~80程度となる。

濁質の50%粒径 $d_{50}(\mu)$ と濁度の関係をみると、濁度が増加し始める16日3時過ぎから d_{50} は小さくなっていき、洪水ピークの5時間後の16日12時には最小値1.98 μ となる。以後は濁度の減少につれて徐々に大きくなり、17日午後の2つ目のピークに対しても同じような変化を示している。図-4には16日のピーク前後の粒度分布の変化を示した。高濁水の出水とともに微粒子の割合が増加し、その割合も時間的にかなり変動していることがわかる。

(2) 栄養塩濃度

図-5に全窒素・全リン濃度の時間変化を示す。どちらも洪水時には増大しており、表-2による過去の平均流入濃度と比較すると、ピーク時には全窒素で数倍、全リンで数十倍もの濃度となる。

	50年度	51年度
全窒素(ppm)	0.646	0.533
全リン(ppm)	0.030	0.615

表-2 栄養塩の平均濃度(St.5)

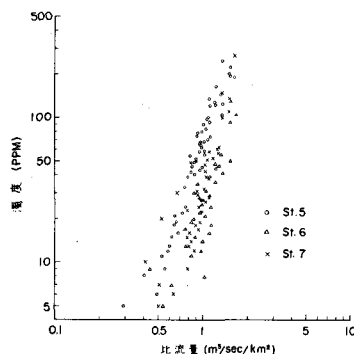


図-3 濁度と比流量の関係

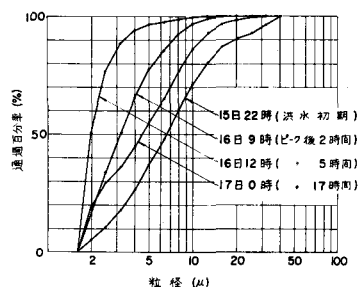


図-4 洪水時の粒度分布の変化

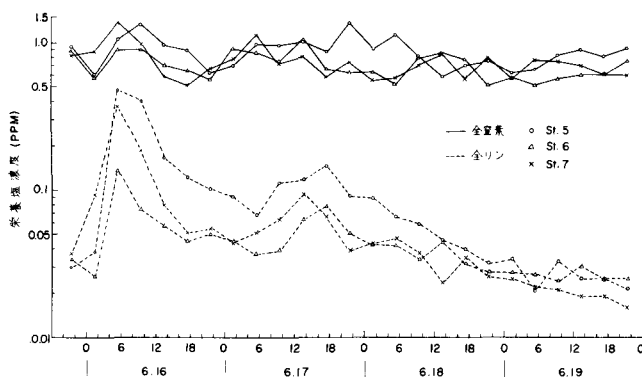


図-5 全窒素・全リン濃度の時間変化

図-5によれば、全リンの変化は濁度の変化と良く似ているが、栄養塩濃度の溶解性、非溶解性成分と濁度との関係を示したものが図-6, 7である。窒素・リンとも非溶解性成分の方が濁度との相関が高く、溶解性成分は濁度に対してあまり変化しない。この傾向は特にリンの場合に明確

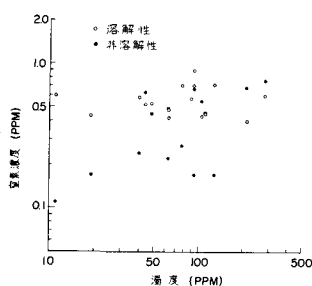


図-6 窒素と濁度の関係

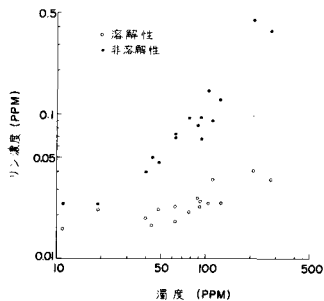


図-7 リンと濁度の関係

にあらわれており、洪水時に流入する栄養塩のうち非溶解性成分の多くは濁質に付着しているものと考えられる。

3. H貯水池における濁度および栄養塩の挙動の数値解析

3.1 計算方法の概要

解析には当所で開発中の2次元モデルを用いた。計算方法の概要は文献4)に述べたとおりであり、ここでは栄養塩濃度の計算方法について説明する。

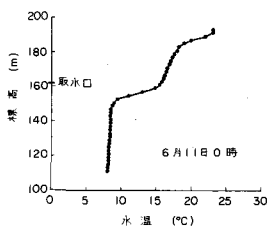
基礎式は濁度の計算式と同じであるが、窒素・リンともに溶解性成分と非溶解性成分とに分けて考え、前者は水中に溶解しているので沈降しないものとし、また後者は濁質に付着しているので濁質と同じ沈降速度を与えた。なおこのモデルでは移流・拡散・沈降・沈殿による水理学的変化のみを対象とし、生物化学的变化は考慮していない。

3.2 計算結果および考察

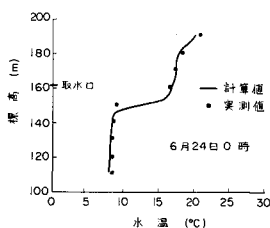
差分計算における貯水池の要素分割は、鉛直方向に $\Delta y = 2\text{ m}$ 、水平方向に $\Delta x = 2\text{ km}$ とし、6月11日のH貯水池内の水温・濁度・栄養塩濃度の実測分布を初期条件として6月27日まで計算した。流入水温・濁度・栄養塩濃度はSt.5の実測値を与えるが、貯水池内に長期間浮遊する濁質は粒径数 μ 程度のものが主であるから、流入濁度には 15μ 以上の成分を除いたものを与えた。沈降速度を計算するための濁質の代表粒径は 15μ 以下の成分の50%粒径を平均して 3.5μ とした。

(1) 水温分布

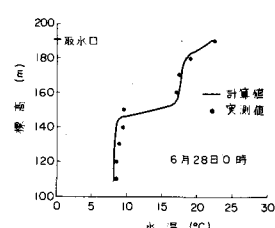
水温分布は1次元モデルによって計算する。図-8は水温分布の計算値と実測値を比較したものである。これによると計算値は2次躍層の位置を実測値より5m程度低く見積っているが、流入水の流動範囲は計算上標高160m～表層であるから、これは主として取水による流動層の推定がやや適当でなかったためと思われる。全体としてみれば計算値は実測値と比較的に良く一致した。



(a) 初期条件



(b) ピーク後8日



(c) ピーク後12日

図-8 水温分布の計算値と実測値

(2) 濁度・栄養塩濃度分布

図-9, 11, 13に流出濁度・栄養塩濃度を, 図-10, 12, 14に貯水池内の濁度・栄養塩濃度の分布を, それぞれ示す。実測は濁度についてのみ行なわれており, 流出濁度は発電所放水口における定時(9時)観測資料を, 貯水池内の分布(縦断方向約3 kmおき, 鉛直方向10 mおき)は6月24日と28日の実測値を, それぞれ用いて計算値と比較した。

図-9によれば, 洪水のピークから4日目の6月20日に流出濁度の急激な増大がみられ, 貯水池内を移動した濁水塊が, この時点で取水口に到達したことを示している。6月16日以降発電所は100m³/sec前後の取水量で24時間運転を続けたため濁水塊の移動が速く, ダム下流の濁水期間の制約にしたがって6月27日に取水口的位置を中層から表層に切替えるまでかなりの量の濁質を排出できたものと思われる。2次元モデルによる計算値はこの模様を良く捉えており, 濁水塊の移動を考慮することのできない1次元モデルによる計算値に比べて流出濁度の予測精度が向上していることがわかる。

濁水塊の分布形状を図-10でみると, 6月24日の計算値と実測値は比較的良好な一致を示している。6月28日の分布では, 実測によると濁質がかなり排出されているのに対して計算上はまだ大きな濁水塊が残っており, この点はうまく表現されなかった。計算値の濁度がやや高く, また鉛直方向に拡がりすぎた理由として, 洪水時のような非定常性の強い流入による流動層の正確な見積りが困難なこと, 支川や残流による流入濁度をSt.5の実測値で仮定したことなどが挙げられる。濁質が実測値にくらべてあまり排出されていない点については, 水温分布の計算値が2次躍層の位置をやや低く見積ったために濁水が実測より深いところまで入り, これが取水による流動層の下に沈降して取残されたこと, 実測値と計算値の時間のずれなどが考えられる。なおこの場合拡散係数は0として計算した。

栄養塩濃度については実測されていないが, 濁度の場合と比較してみると, 非溶解性成分を多く含む濁度との相関も高いリンの方が, 流出濃度・貯水池内の分布とも窒素にくらべて濁度と良く似た変化を示している。なお6月23日以降の流入栄養塩濃度は実測値がないため, 図-11, 13に示すように6月22日の実測値を仮定した。

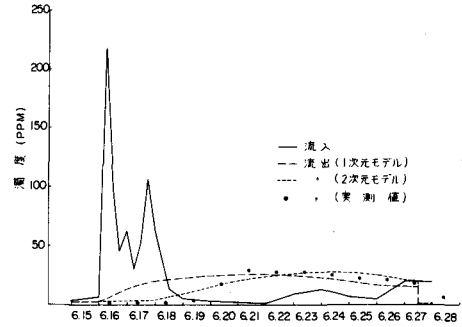
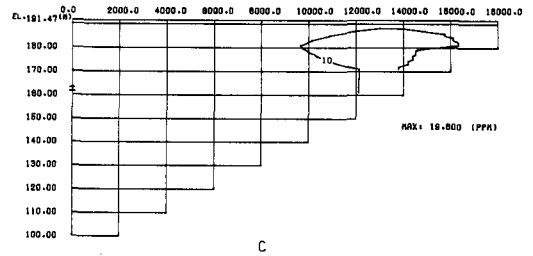
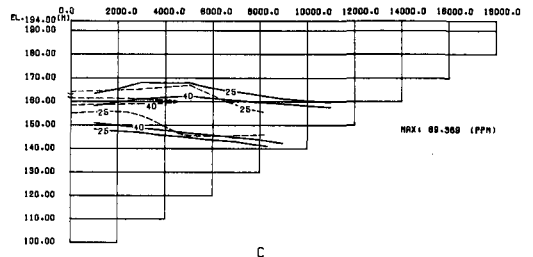


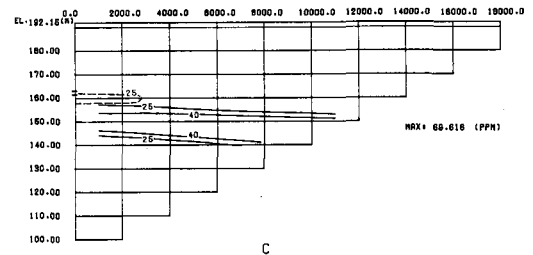
図-9 流出濁度の計算値と実測値



(a) 初期条件



(b) ピーク後8日



(c) ピーク後12日

図-10 濁度分布の計算値(実線)と実測値(破線)

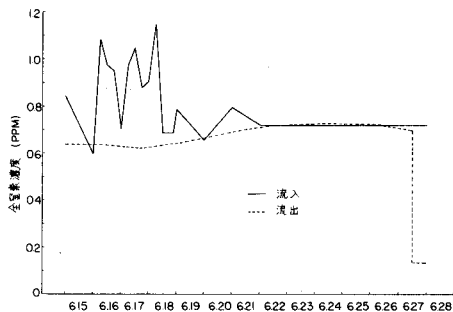


図-11 流出全窒素濃度の計算値

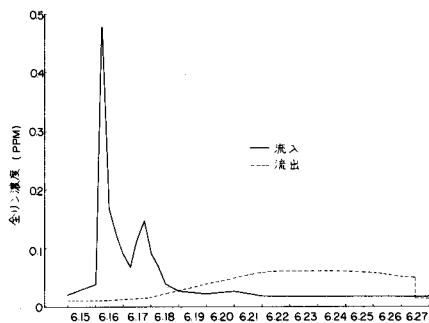
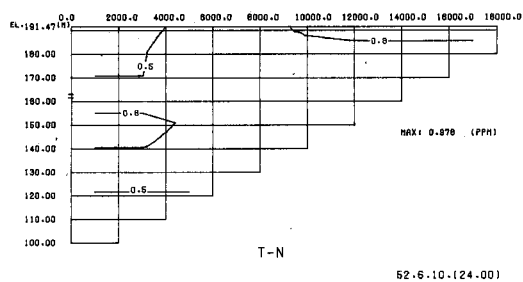
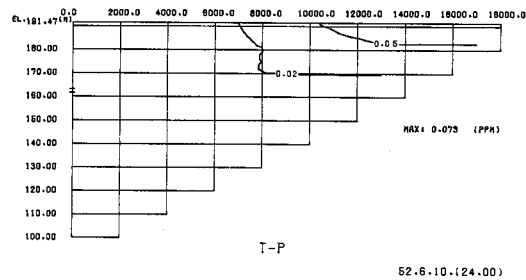


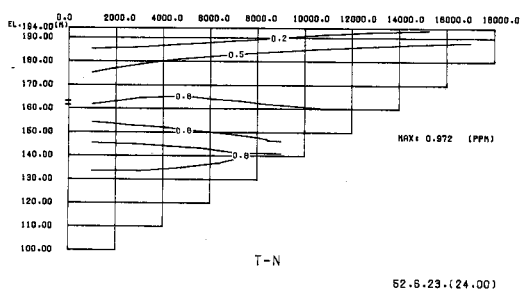
図-13 流出全リン濃度の計算値



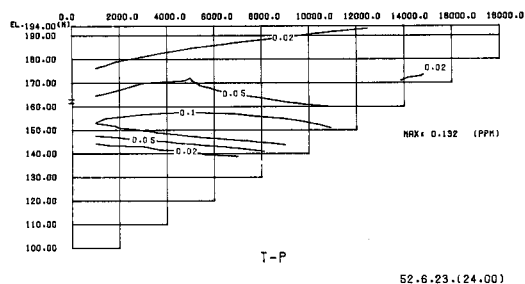
(a) 初期条件



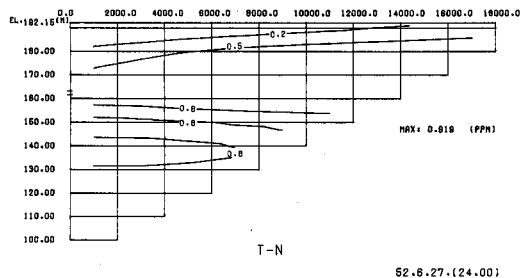
(a) 初期条件



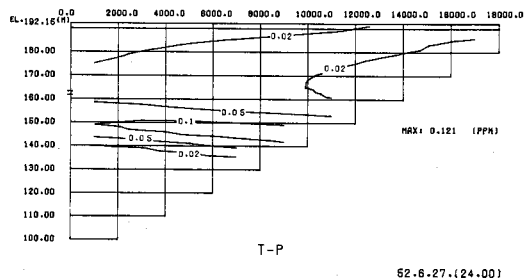
(b) ピーク後8日



(b) ピーク後8日



(c) ピーク後12日



(c) ピーク後12日

図-12 全窒素濃度分布の計算値

図-14 全リン濃度分布の計算値

(3) 貯水池の運用と濁度・栄養塩の蓄積との関係

図-15は、6月15日～27日間の貯水池内における栄養塩蓄積量の変化を示したものである。洪水による栄養塩の流入量が流出量を上回る18日まで増加を示し、以後は発電所のフル運転による流出量の方が上回って減少するが、特に濁水塊が取水口に到達する20日以降は顕著に減少しており、高濃度の濁水とともに多量の栄養塩が排出されるものと思われる。実測値による6月15日～27日間の総流入量は全窒素108t、全リン10.2tに対し、計算結果による総流出量は全窒素91t、全リン5.6tであった。

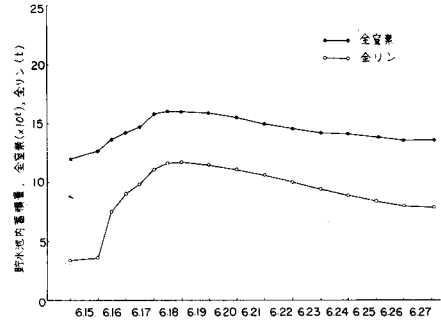


図-15 貯水池内の栄養塩蓄積量の変化

常時は中層取水により躍層を深部につくって洪水時の濁水の中層に引込み、許容期間中になるべく多量の濁質を放流した上で表層取水に切換えるという運用方法は、成層型貯水池の濁水対策として提案されている方法の1つである⁶⁾が、栄養塩についても貯水池内への蓄積量がある程度まで減少させることがわかる。実際には生物化学的变化が加わるので単純に議論はできないが、水理学的変化が主であると思われる短期間の洪水による水質変化などの場合にはここに示した解析方法を用いて栄養塩を効果的に排出する運用方法を検討することも可能であろう。

4. 結 語

H貯水池流入河川における昭和52年6月15日～22日の水質連続観測の結果、洪水時に高濃度の栄養塩が観測され、降雨によって流域から供給される汚濁物質を定量的に把握することができた。特に全リンはピーク時に年平均の数十倍の値となっており、月1回程度の観測では捉えにくい洪水時の水質変化が無視できないことを示している。

2次元モデルを用いて貯水池内の濁度・栄養塩の挙動を解析した結果では、濁水塊の移動・分布形状において計算値と実測値は比較的良く一致し、1次元モデルに比べて流出濁度の予測精度を向上させることができた。また濁水対策としての貯水池の選択取水によって、洪水時に流入した多量の栄養塩のかかなりの部分を排出できることが予想され、富栄養化対策を検討する上で有意義な知見を得た。さらに現地観測資料の集積や室内実験による検証によってモデルの不備を改善し、現場における実用性を高めていくつもりである。

参 考 文 献

- 1) Ryan, P.J. and D.F. Harleman: Prediction of the annual cycle of temperature changes in a stratified lake or reservoir, M.I.T. Report, №137, 1971
- 2) 安芸周一・白砂孝夫: 貯水池流動形態のシミュレーション解析-その1, 発電水力, №134, p.p.37-50, 1975
- 3) 白砂孝夫・安芸周一: 貯水池水温, 濁度の予測手法とその適用例, 第21回水理講演会論文集, p.p.45-50, 1977
- 4) 白砂孝夫・宮永洋一: 貯水池内の濁度の二次元解析, 第32回年次学術講演会講演概要集, p.p.336-337, 1977
- 5) 安芸周一・秋元 保・志賀陽一・下田 修: 貯水池水質の総合調査, 第21回水理講演会論文集, p.p.9-13, 1977
- 6) 安芸周一: 既設貯水池の濁水現象, 第16回発電水力講習会テキスト, p.p.78-92, 1974