

山北河川における汚濁物質の流出特性とその貯水池内への拡散、貯留について

(財)電力中央研究所 正 員 ○宮永 洋一
同 上 正 員 安芸 周一

1. ま え か き

水資源計画におけるアセスメントの対象となる貯水池の水質問題のうち、水温と濁度についてはすでに多くの調査、研究によって現象の基本的メカニズムがほぼ解明され、比較的有効な予測解析手法や対策が確立されるに至っている。最近ではこうした物理的变化だけでなく、生物、化学的变化を含む他の水質項目をも予測の対象とし、河川、湖沼、ダム貯水池などの総合的な水質管理に役立てようとする研究が活発である。

一般に、貯水池内の水質の予測解析を行なうにあたっては、移流、拡散方程式に生物、化学的变化を加えた物質収支式が基礎式となる。生物、化学的变化は厳密に扱うには複雑すぎるため、経験則にもとづいて適当な係数が導入され、比較的単純な式であらわされることが多く、その結果、係数の意味などがややあいまいとなる。このため、現象の理解が十分でないまま機械的に数値シミュレーションを行なっても、実測値と合わせるために係数を操作するだけのことになりかねない。一方、移流、拡散による変化は、生物、化学的变化に比べれば比較的正確に見積りやすく、水質変化の一部であるこの項に注目して汚濁物質の挙動を解析しておくことは、研究の第一段階として適当であろうと思われる。

著者は、上述の考え方にしたがって、まず生物、化学的变化の比較的小さいと思われる短期間の栄養塩の挙動の数値解析を試みた。入力条件に使用したデータは、電力中央研究所が昭和52年6月、同53年6月の2度にあたり現地貯水池流入河川部に於いて行なった出水時の水質連続調査によるものである。このうち昭和52年のデータを用いた解析結果についてはすでに報告した¹⁾が、資料の不足などにより十分な検討をなし得なかった。ここではまず2回の調査結果を整理して懸濁物質、栄養塩の出水時の流出特性を要約し、次に主として昭和53年のデータによるそれらの池内への拡散と貯留の数値解析結果について述べる。

2. 水質調査の概要

(1) 調査地点

対象貯水池および流域の概要を表-1、図-1に示す。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

ダム高 (m)	130
総容量 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	258
湛水面積 (km^2)	6.86
貯水池長 (km)	22
年平均総流入量/総容量	4.0
最大使用水量 (m^3/sec)	137
流域面積 (km^2)	415
流域人口 (人)	4,292
水田、畑面積 (km^2)	8.23
山林面積 (km^2)	418 (斜面)

表-1 貯水池および流域の概要

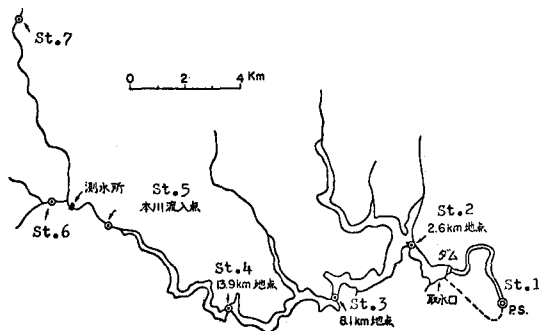


図-1 貯水池平面形状と観測点の位置

模なものであり、夏期には顕著な水温成層が発達する。選採取水設備が設けられ、濁水流入後は取水口を中層から表層に切換えて放流濁度を低減させる運用が行なわれている。流域は大部分が山林で、主要な産業は農業と林業である。池内観測は図-1のSt.2~4、流入河川部の観測はSt.5~7の各地点で行なわれた。

(2) 調査方法

観測および分析の方法を表-2に示す。

分析項目	観 測 お よ び 分 析 の 方 法
水 温	貯水池内10mおき、河川部表層表面水、貯水池内サーミスター、河川部棒状温度計
濁 度	〃 , 河川部水平3点（洪水時およびSt.5は1点）、積分球式濁度計
粒度分布	濁度25ppm以上の試料、自動粒度分布測定装置（コールター・カウンター）
全窒素	貯水池内10mおき、河川部水平3点、下水試験法3.25の2.1と海洋観測指針8.11の方法
溶存態窒素	〃 , 〃 , 〃 , 0.45μmのフィルターで濾過した試料について同上
全リン	〃 , 〃 , 〃 , 海洋観測指針8.8の方法
溶存態リン	〃 , 〃 , 〃 , 0.45μmのフィルターで濾過した試料について同上

表-2 水質分析項目とその方法

(3) 調査結果

昭和52, 53年の流量、濁度、濁質の50%粒径の観測結果を図-2に示す。

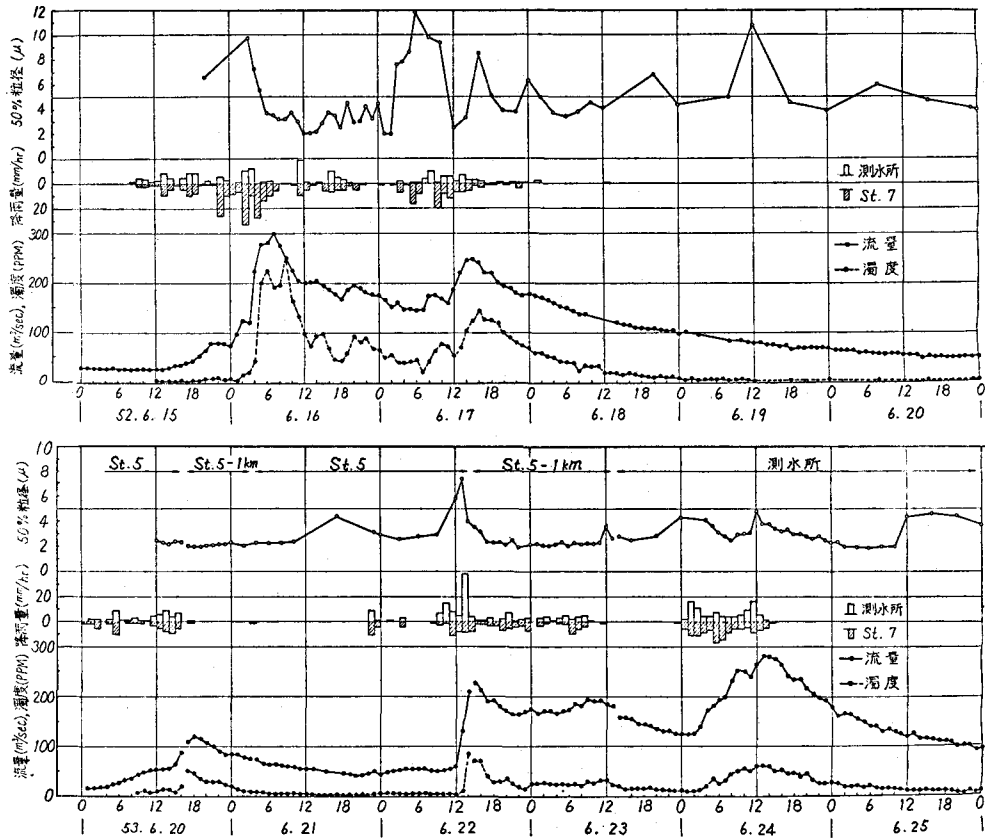


図-2 流量、濁度、濁質の50%粒径の時間変化

3. 汚濁物質の流出特性

(1) 濁度

経験的に、濁度と流量はべき乗則にしたがうことが多いとされている。本観測結果を両対数紙上にプロットしてみると、図-3に示すように比較的良好的な直線関係がみとめられるが、昭和53年は洪水波に応じて直線が分れており、才1波と才2、3波として1オーダー近い差がある。

べき乗則は経験的なもので、こうしたデータのばらつきは止むを得ないともいえるが、合理的な補正によってばらつきを縮める努力も必要である。濁度の供給が、主に斜面の侵食や崩壊によるものであると考えれば、濁度と相関の高いのは流量そのものよりもむしろ地表面侵食に関係した成分であろうと思われる。著者らはこの点を考慮して、各洪水波の希釈成分（地下水流成分）の割合が相対的に等しくなるように流量と濁度の関係を補正してみた²⁾。結果は図-4に示すとおりで、洪水波に応じたばらつきはかなりの程度修正される。

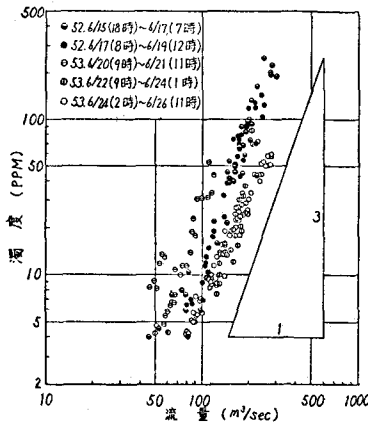


図-3 濁度と流量の関係

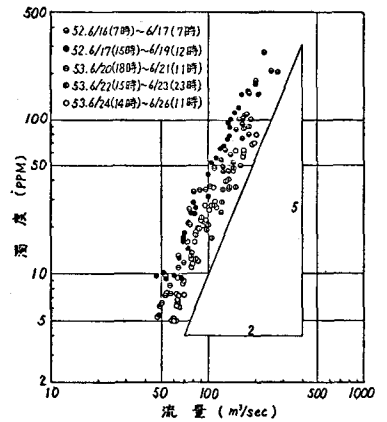


図-4 補正された濁度と流量の関係

(2) 栄養塩濃度

栄養塩濃度と流量との関係を図-5、6に示す。リンの場合、ピーク時には低流量時の数十倍もの濃度に達し、濁度同様流量との相関は良好である。これに対し窒素の場合は流量との相関はほとんどないといってよい。

しかし、栄養塩濃度が流量と相関をもつ必然性はないわけでは、その発生源を念頭に置いた考察が必要と思われる。河川水の栄養塩濃度への主たる寄与として考えられるものは、

- ① 雨水に含まれる成分
- ② 流出する懸濁物質に含まれる成分
- ③ 土壌中からの溶出
- ④ 生活排水などである。

このうち④については昭和53年に観測を行っており、表-

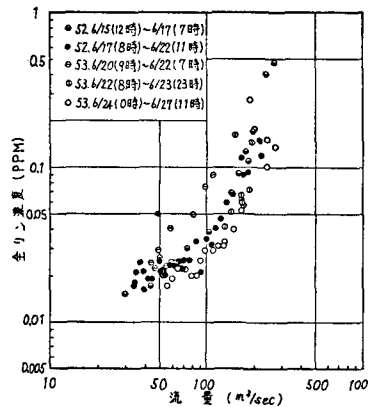


図-5 リン濃度と流量の関係

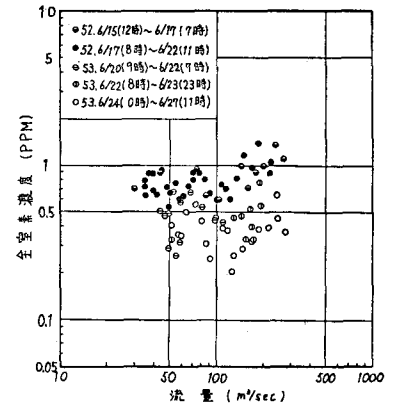


図-6 窒素濃度と流量の関係

日 時		9/20 9時~19時	9/22 18時~21時	9/22 20時~9/23 10時	9/23 22時~9/24 14時
洪水波		才1波初期	才2波初期	才2波後期	才3波初期
雨水	雨量(mm)	26.7	102.6	39.0	91.4
	T-N(ppm)	0.218	0.214	0.193	0.138
	T-P(%)	0.030	0.006	0.005	0.008
河川水 (5/5)	DT-N(%)	0.229	0.282	0.309	0.288
	DT-P(%)	0.027	0.033	0.030	0.034

表-3 雨水および河川水の窒素、リン濃度

3に示すような結果が得られている。これによれば雨水の栄養塩濃度は平均的には河川水の栄養塩濃度の下限値程度である。すなわち出水時に急激な増加を示すリン濃度の変動に対する雨水の影響は小さいとみてよい。窒素については表-3に示したように、初期の洪水波の、表面流出が卓越すると思われる時期の河川水のDT-N(容存態窒素)と雨水のT-Nとはほぼ近い値となり、洪水初期の雨水の影響が大きいことを示している。

②の成かを検討するため、栄養塩濃度を溶存態(Dissolved)と懸濁態(Particulate)とに分け、濁度との関係をプロットしたものが図-7~10である。リンの場合、懸濁成分と濁度との相関が非常に高く、溶存成分と比較すれば、出水時のリン濃度の急増は懸濁物質に付着している成分によるものであることは明らかである。一方窒素の場合には懸濁成分のばらつきが非常に大きく、懸濁物質への付着の程度がまちまちであることを示している。全窒素と流量に相関がないのも、この懸濁成分のばらつきが大きく影響している。

③については明確なことは言えない。④の影響は、昭和52年11月の渇水時(流量3~9 m³/sec程度、無降雨で生活排水の影響が比較的あらわれやすい条件)に別途行なった3日間の連続調査の結果によればSt.5のT-Nが0.3~0.5 ppm、T-Pが0.01~0.02 ppm程度で、洪水時の流量比を考えると無視しう程度である。

要約すれば、出水時に窒素濃度はあまり変らず、リン濃度は急増し、その大部分は懸濁成分の増加によっている。したがって、特にリンの流入負荷量の把握にあつては出水時の観測が不可欠であるといえる。

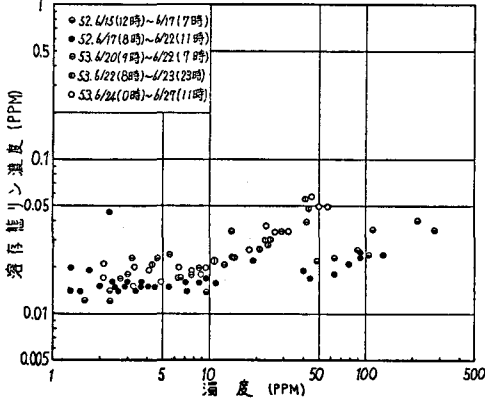


図-7 溶存態リン濃度と濁度の関係

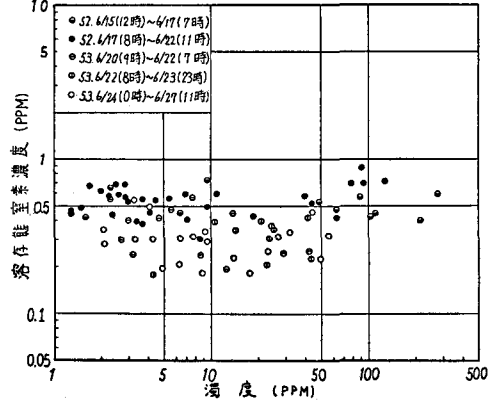


図-8 溶存態窒素濃度と濁度の関係

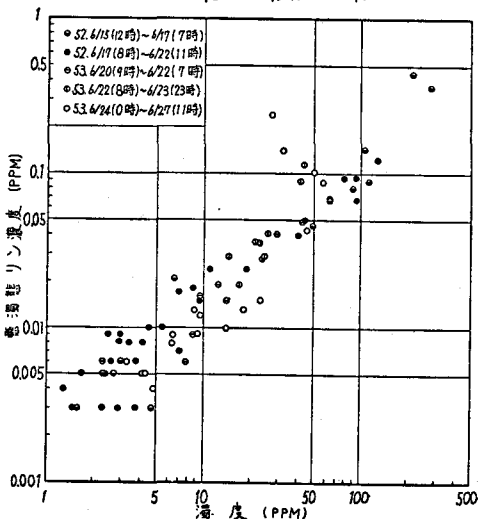


図-9 懸濁態リン濃度と濁度の関係

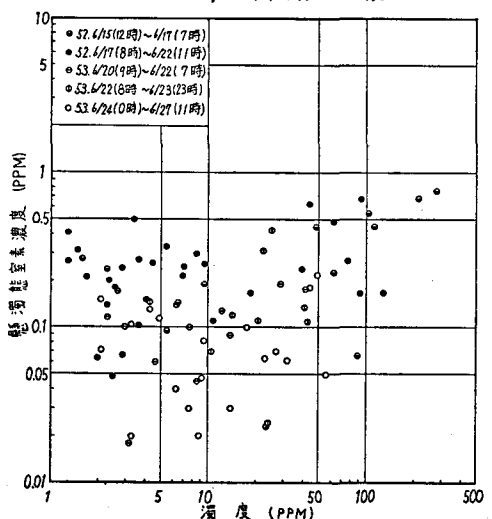


図-10 懸濁態窒素濃度と濁度の関係

4. 汚濁物質の挙動の数値シミュレーション

(1) モデルの概要

シミュレーションに使用したモデルは、貯水池を図-11に示すように2次元要素に分割し、各要素に關する物質収支を計算するものである。汚濁物質の輸送は、潮流、拡散、沈降、対流混合によるものとする、基礎方程式は次の2式となる。

流量の連続条件：

$$\frac{\partial uB}{\partial x} + \frac{\partial vB}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

ここに、

$u(x, y, t)$: 水平流速

$v(y, t)$: 鉛直流速

$B(x, y)$: 貯水池幅

汚濁物質の連続条件：

$$B \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CBu}{\partial x} + \frac{\partial CBv}{\partial y} - \frac{\partial CBw_0}{\partial y} + Cw_0 \frac{\partial B}{\partial y} - (\alpha_c + D_c) \frac{\partial}{\partial y} \left(B \frac{\partial C}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

ここに、

$C(x, y, t)$: 汚濁物質濃度

$w_0(y, t)$: 沈降速度

α_c, D_c : 分子、渦動拡散係数

潮流項の計算には水温分布（密度分布）の知識が不可欠である。水温分布は安芸・白砂の1次元モデルを用いて計算する。このモデルでは貯水池は流動層と停滞層に分けられ、流動層は内部フルード数によって決定される。本モデルも同様の考え方にしたいが、上、下流端の流動層の流速分布（正規分布を仮定）を境界条件として与え、内部の流れを(1)式の差分式で計算する。水温分布、流動層の計算方法などは文献4)に詳しいので省略する。

(2) シミュレーションの方法

まえがきに述べたように、汚濁物質の挙動を潮流、拡散方程式で完全に説明することはできない。しかし生物、化学的变化を考慮するための諸係数を導入する前に、この項の見積りを行なっておくことは重要と思われる。方法は、栄養塩として窒素、リンを計算項目に加え、これらを溶存態と懸濁態とに分け、懸濁態のものは濁度に付着して沈降するが、溶存態のものは沈降しないとして扱うもので、すでにこの考え方による昭和52年のデータを用いた計算結果については報告したが、排水後の池内の窒素、リンの観測値がなかったため、検討が不十分になった。以下は主に昭和53年のデータによるシミュレーション（表-4）結果について述べる。

計算項目	モデル	要素分割	計算期間	入力条件	諸定数など
水温	1次元	$\Delta y = 2 \text{ m}$	53.6.18	St.5	拡散係数0, 連行係数0.2
濁度	2次元	$\Delta x = 2 \text{ km},$ $\Delta y = 2 \text{ m}$	~ 6.28	実測値	拡散係数0, 濁度平均粒径 2.5μ
栄養塩					溶存態は沈降せず, 懸濁態は濁度に付着

表-4 シミュレーションの方法

(3) シミュレーション結果と考察

貯水池内の水温分布、濁度分布、栄養塩濃度分布の計算結果を図-12～15に、流入、流出濁度の計算結果を図-16に、それぞれ示す。

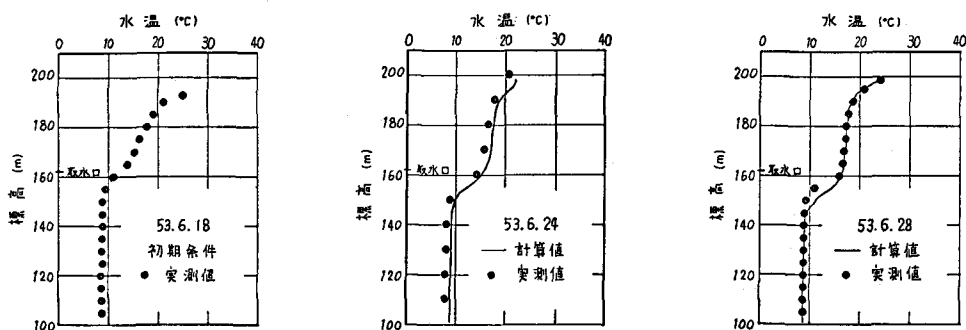


図-12 水温分布

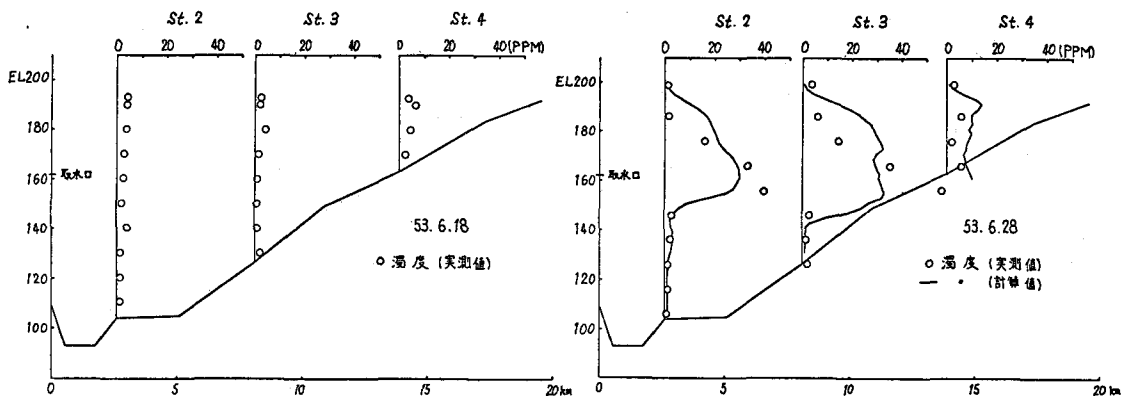


図-13 濁度分布

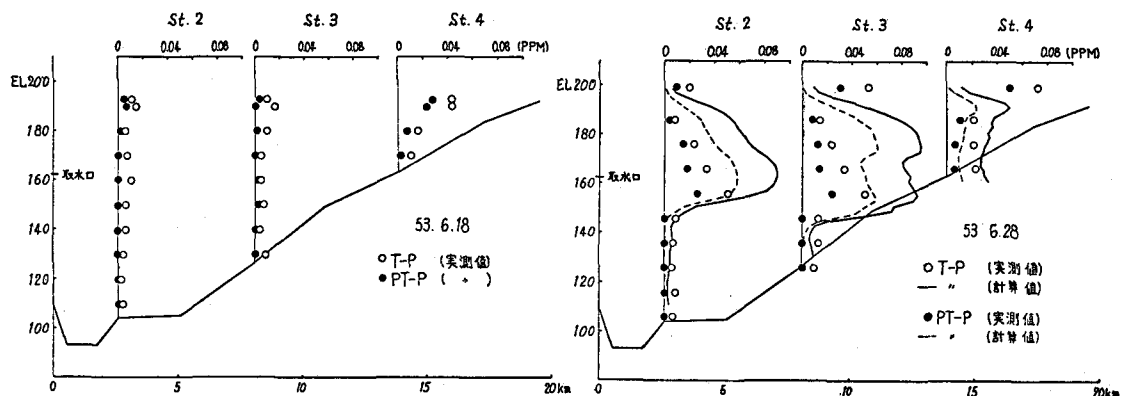


図-14 リン濃度分布

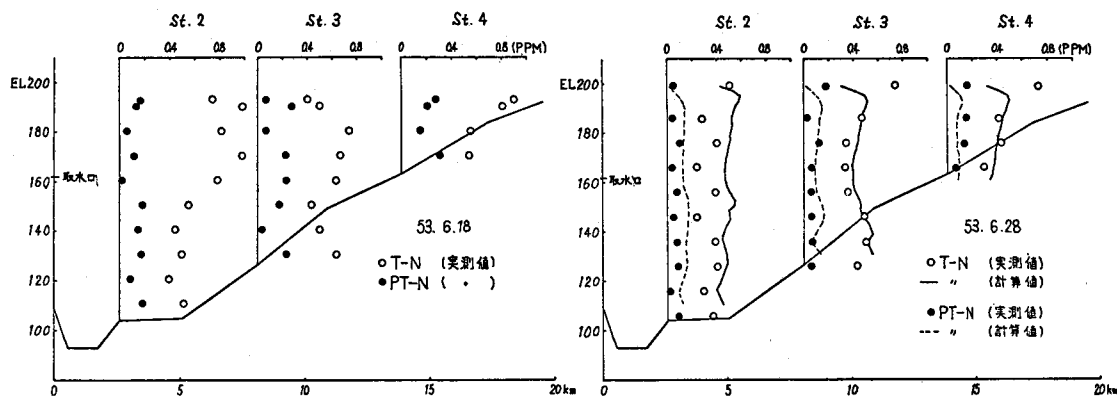


図-15 窒素濃度分布

水温のシミュレーションについては図-12に示すとおり非常に良好な結果が得られた。実測値によれば、洪水の流入によって2次躍層の位置が約5m程度低下し、その上の領域の水温勾配が緩くなって混合のあったこと分かるが、計算値はこれらの模様を的確に捉えている。

濁度のシミュレーションについても図-13をみると、拡散範囲や洪水末期の上流側 (St. 4) からの清澄化などはよく模擬されている。貯水池は図-1に示すように2本の大きな支川をもっており、この流入を把握していないことや、濁度粒度の考慮⁵⁾を簡易化 (平均粒径で与える) していることなど、入力条件、計算方法に簡便さを欠くところがあるため、水温と同程度の精度で濁度を模擬することはなかなか難しい。実用的な立場からいえば、洪水時のシミュレーションについては濁水の拡散範囲とその池内伝播および流出濁度などが適切に把握できればよい。流出濁度は図-16に示すように6月25日から増加を始めており、この時点で濁水が下流端の取水口に到達したこと分かる。計算によるこの濁水の伝播の模擬はほぼ良好である。

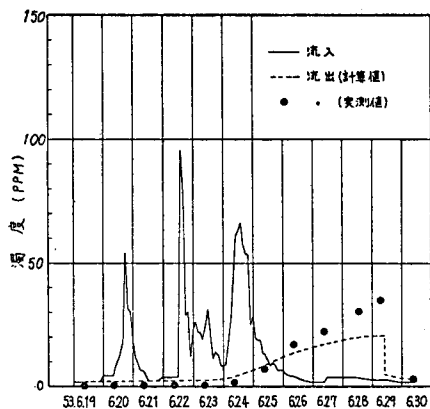


図-16 流出濁度

リン濃度の池内分布は図-14によれば濁度の場合とよく似ている。すでに考察したように、洪水時に流出してくるリンの大半は濁質に付着した懸濁成分であるからこの結果は納得できる。問題は St. 2, 3 で計算値が実測値のほぼ倍程度になってしまったことで、この差は生物、化学的变化というよりむしろ支川からの流入負荷量を把握していないことによるものであろうと思われる。St. 5 (本川流入部) の流量と、その下流の支川流入量、残流量の合計値はほぼ同じくらいで、両者のリン濃度の違いはシミュレーション結果に大きく影響する。

窒素濃度のシミュレーション結果は図-15に示すように、リンとは対称的に非常に良好であった。このことからつぎのように考えてもよいものと思われる。すなわち、河川の窒素濃度は洪水時と平水時とであまり変らず、図-5, 6でみたようにリンに比べれば変動範囲は小さい。したがって、それだけ支川や残流からの流入負荷量の推定誤差が小さくて済んだであろう。窒素についてこのような結果を得たことは、極流、拡散方程式を基礎に水質変化の解析をすすめていく上で有益といえる。またリンについての結果は流入負荷量の正確な把握を怠ると、極流、拡散項の計算においてすら大きな誤差を生じてしまうことを示唆している。

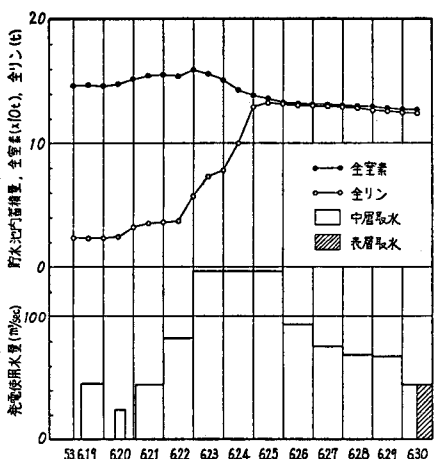


図-17 栄養塩蓄積量(昭和53年)

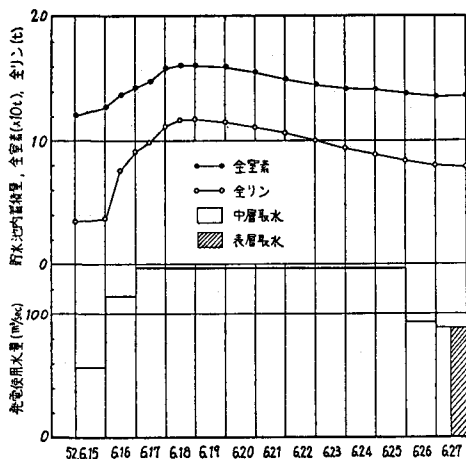


図-18 栄養塩蓄積量(昭和52年)

図-17はシミュレーション結果にもとづいて栄養塩の貯水池内蓄積量および発電使用水量の時間変化をプロットしたものである。リンの場合、才2波、才3波の流入(6月22日～24日)で池内蓄積量が急増し、12日間で全体では総流入量12.7t、総流出量2.8t、正味の蓄積量9.9tとなったのに対し、窒素の場合は発電所がピーク運転を行なった6月23日～25日に比較的に顕著な減少を示し、全体では総流入量70.6t、総流出量90.8t、正味の蓄積量-20.2tとなっている。

栄養塩の池内への貯留をなるべく抑制するという意味では、排水流入後、ピーク運転を継続して濁水の早期排出をはかることが特にリンの場合効果を期待できる。比較のため図-18に昭和52年のシミュレーション結果による栄養塩蓄積量と発電使用水量の推移を示したが、これによれば昭和52年は排水流入後、9日間のピーク運転を継続したことによって流入したリンの約55%を排出しているのに対し、昭和53年では取水口を表層に切換えるまでに流入量の約20%しか排出できなかった。

5. あとがき

山形河川における出水時の汚濁物質の流出特性およびその貯水池内への拡散と貯留について、実測資料をもとに検討を加えた。出水時には懸濁態のリンが急増する(平水時の数十倍)のに対し、窒素濃度の変動はあまりない。したがって場所的、時間的な入力条件の誤差はリンの場合の方が大きくなりやすい。生物、化学的変化の項を加えていくにせよ、入力条件を十分正確に把握しておかなければ、移流、拡散項の累積の段階で必ず大きな予測誤差を生じてしまうことがあるということに注意しなければならない。

参考文献

- 1) 宮永ほか：貯水池内における濁度および栄養塩の挙動の数値解析，才22回水講演文集，1978
- 2) 宮永ほか：貯水池流入河川における水質・濁度の現地観測および予測，才23回水講演文集，1979
- 3) 白砂・宮永：貯水池内の濁度の二次元解析，才32回年議概要集，1977
- 4) 安井・白砂：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，1975
- 5) 宮永ほか：粒度分布を考慮した成層型貯水池内の濁水の挙動に関する研究，才34回年議概要集，1979