

濁質の流送過程について

On the Transport Processes of Turbidity

京都大学工学部 正員 綾 史郎

京都大学工学部 正員 岩佐 義朗

京都大学工学部 正員 松尾 直規

1. はじめに

河道には、降雨に伴ない流水とともに、多量の濁質が流入する。これらの濁質は、河川の上流域における山地の崩壊や、崩壊土砂の洗い出しなどにより生産され、河道に流入する。河道に流入後は、沈降、希釈、移流、滞留、分散等の諸作用をうけながら、河口まで運ばれていくものと考えられる。

本研究は、河川上、中流域にダム貯水池の存在する河川を対象として、このような河川に流入した濁質が貯水池、河道を流下するに伴って、どのように流送されていくかについて検討したものである。すなわち、まずはじめに、実測資料を整理することにより、貯水池流入濁度、ダム貯水池群、および、最下流貯水池より河口付近に至るまでの河道区間における濁度の変化が調べられる。つぎに、このような貯水池を有する河川における濁質流送追跡のモデルを作成し、数値シミュレーションを行ない、観測結果との比較検討より、モデルの適合性の検討がおこなわれる。最後に、濁質の流送過程に及ぼす貯水池の影響に関する検討の一例として、貯水池がないと仮定した場合の数値シミュレーションを上流側貯水池流入点より、河口まで行ない、その結果と前述のシミュレーション結果との比較により、貯水池の濁質流送に及ぼす影響について検討する。

2. N川流域における濁質の流送過程

1) 流域の概要 本研究で対象としたN川は、Fig. 1に示されるように流域面積 806 km²、総延長 116 kmの中規模河川である。河床勾配は、1/100 ~ 1/500の急勾配河川であり、図にもみられるように全川にわたって蛇行しており、左岸側から流入する支川Sをはじめとして、多くの支川流入がある。また、流域には、本川沿いのダムA、B、Cを始めとして、大小5つのダムが建設されている。A、B、C、の3つのダム貯水池の貯水容量は、各々、1390万m³、5430万m³、620万m³である。Fig. 1には、また、N川流域における主要な水理、水文、水質観測点が記入してある。A、C貯水池では、1地点で、B貯水池では、7地点で、水深方向の水質分布が測定されている。

研究の主たる対象期間は、昭和52年9月を中心とする約1か月であり、この間における流域の降雨の状況をFig. 2に示す。9月8日~9月13日の間、多量の降雨がもたらされているが、これは、台風17号の襲来によるものであり、この降雨により、本

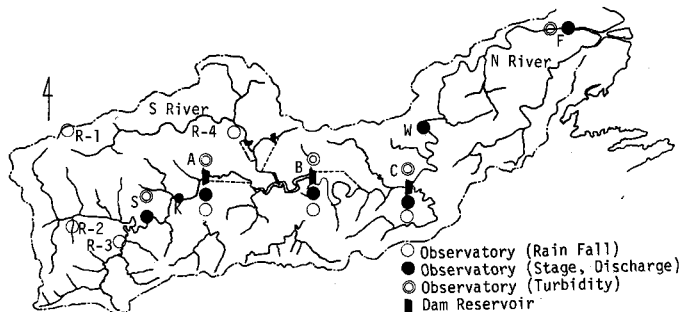


Fig. 1 N River Basin and Stations of Observatories

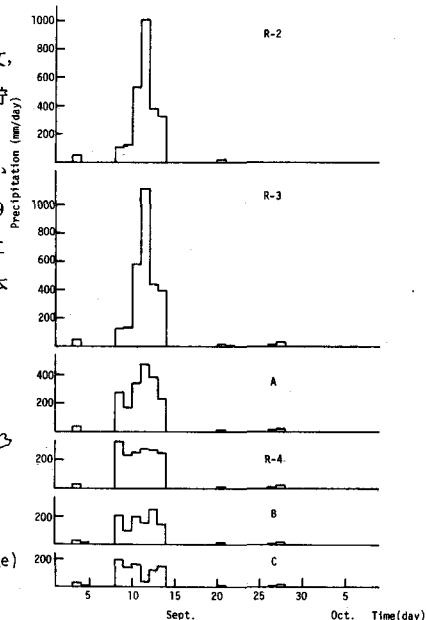


Fig. 2 Precipitation in N River Basin

川沿いでは、A貯水池上流域、および支川S川上流域で、大規模な斜面の崩壊がおり、多量の濁質が、A、B両貯水池に流入した（後述）。

2) 観測結果の整理 Fig. 3に8月23日～10月7日の間、5回にわたって観測されたA貯水池上流より、河口付近までの区間における濁度分布の図を示す。図中、黒丸は、観測断面において1点で測定された値を示しており、実線は、表層から水底まで水深方向に多点観測された値の最大値と最小値を示すものである。図は、上より、日を追って示されているが、8月23日の図は台風による出水前の状況を示すものであり、A、B両貯水池、およびF点において、20～30ppmの濁度が観測されている外、概して流れは清澄であるといえよう。9月17日は、降雨の終わった後の測定であるが、ほぼ全川にわたって、100ppm以上の高濁度となっている。9月21日、25日、29日の観測結果より、日がたつにつれて、濁度は全体に低下しているが、B貯水池において、S川流入点より下流でかなりの高濁度がつづいていることが知られる。しかし、10月7日には、B貯水池における高濁度も低下し、A貯水池より下流で、全川にわたり、20～30ppmの濁度となっている。また、これらの図より、B貯水池放流口より下流では、濁度の流れ方向の変化は小さいことが知られる。

Fig. 4は測点Sにおける流量ハイドログラフ、および濁度ポリュートグラフを示すものである。また、Fig. 5は、流量と濁度の関係を両対数紙にプロットしたものである。流量としては、A貯水池の流入流量を用いている。（両図中、濁度が500ppmの点は、それ以上の濁度のため、測定不可な事を示す。）これらの図より、今回の出水では降雨終了後も、かなりの高濁度水の流入がつづいていることが知られる。また、流量と濁度の関係は、洪水後60m³/s以下で、ほぼ流量の2乗に比例して低減していくことが知られる。通常、浮遊性物質の流出は、流量の流出に先だち、流量と濁度の関係は、右まわりのループを描くことが知られているが¹⁾、この例では、そのような傾向は明らかでない。

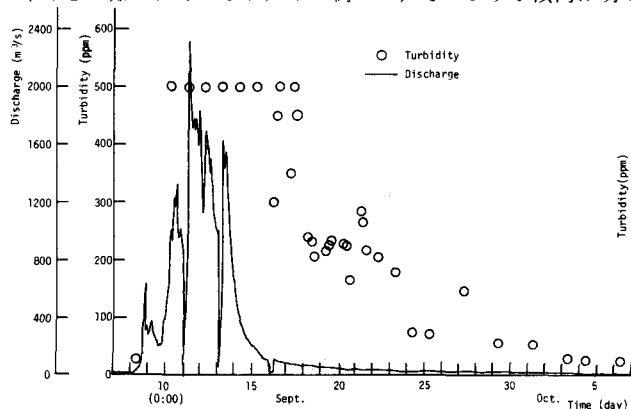


Fig. 4 Hydrograph and Turbidity Curve (St.S)

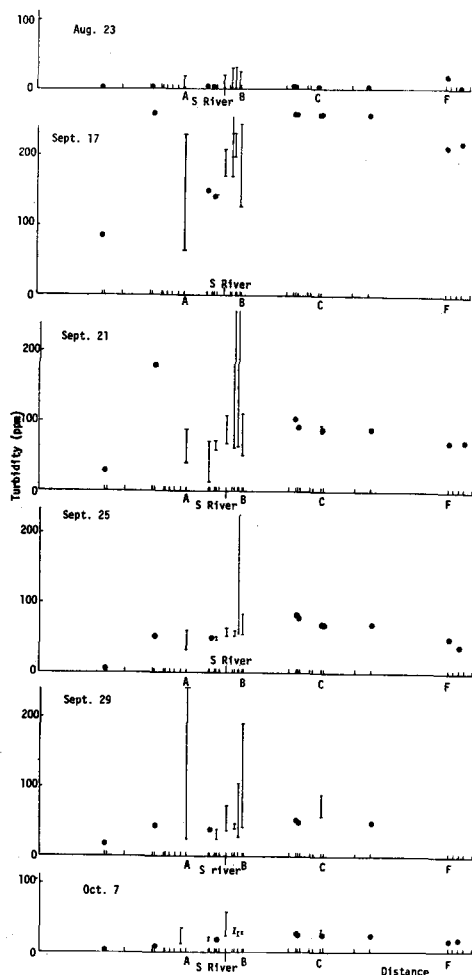


Fig. 3 Longitudinal Distribution of Turbidity

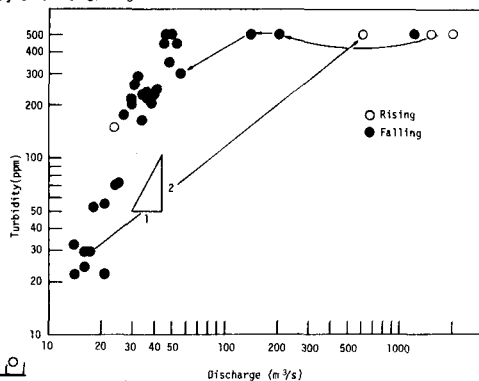


Fig. 5 Relation between Discharge and Turbidity (St.S)

Fig. 5 に示す 5 枚の図は、それぞれ、A 貯水池、B 貯水池、C 貯水池、測点 F における流量ハイドログラフ、濁度ポリユートグラフを示すものである。A、C 貯水池においては、放流流量、放流濁度を示しており、B 貯水池においては、洪水時においては、放流流量、放流濁度を、洪水時以外には、放流流量と表層濁度をプロットしている。また、F 点における流量は、不定流計算の際に用いた推定値による値を用いている（後述）。

これらの図より、A、B 貯水池間において多量の支川流入があったこと、および、それに伴って高濁度の流入があったことが推測される。この区間における主要な流入支川である S 川に関する観測資料は乏しいので、本文には、のせていないが、洪水後の 9 月 21 日以降において、500ppm 以上の濁度が S 川において観測されており、洪水時においてもかなりの濁度の流入が推定される。また、B 貯水池と C 貯水池の図を比較することにより、この区間における濁度の変化の小さいことが知られる。

つぎに、A、B、C 各貯水池内部の濁度、水温が、洪水によりどのように変化したかについて述べる。

周知のように、貯水池の水理、水文性格は、貯水池の濁質伝播特性に大きな影響を与えるが、A、B、C 各貯水池を成層の型で分類すれば、A、B 両貯水池は受熱期に取水口標高付近に流出入要因による二次躍層が形成され、水表面付近には、気象要因による一次躍層が形成される成層型貯水池に分類される。しかしながら、両貯水池とも、8 月～9 月の洪水期に洪水によって成層が破壊される場合には、成層は再び形成されることなく循環期へ移行する。一方、C 貯水池は、年間を通じて水温成層は形成されず、水深方向にはほぼ様な水温分布を有する混合型貯水池である。このような各貯水池の性格を考慮して、51 年 9 月の洪水前後における各貯水池の濁度変化の特徴を水温変化と対応させて調べる。

Fig. 7 は、各貯水池の水温、濁度の分布

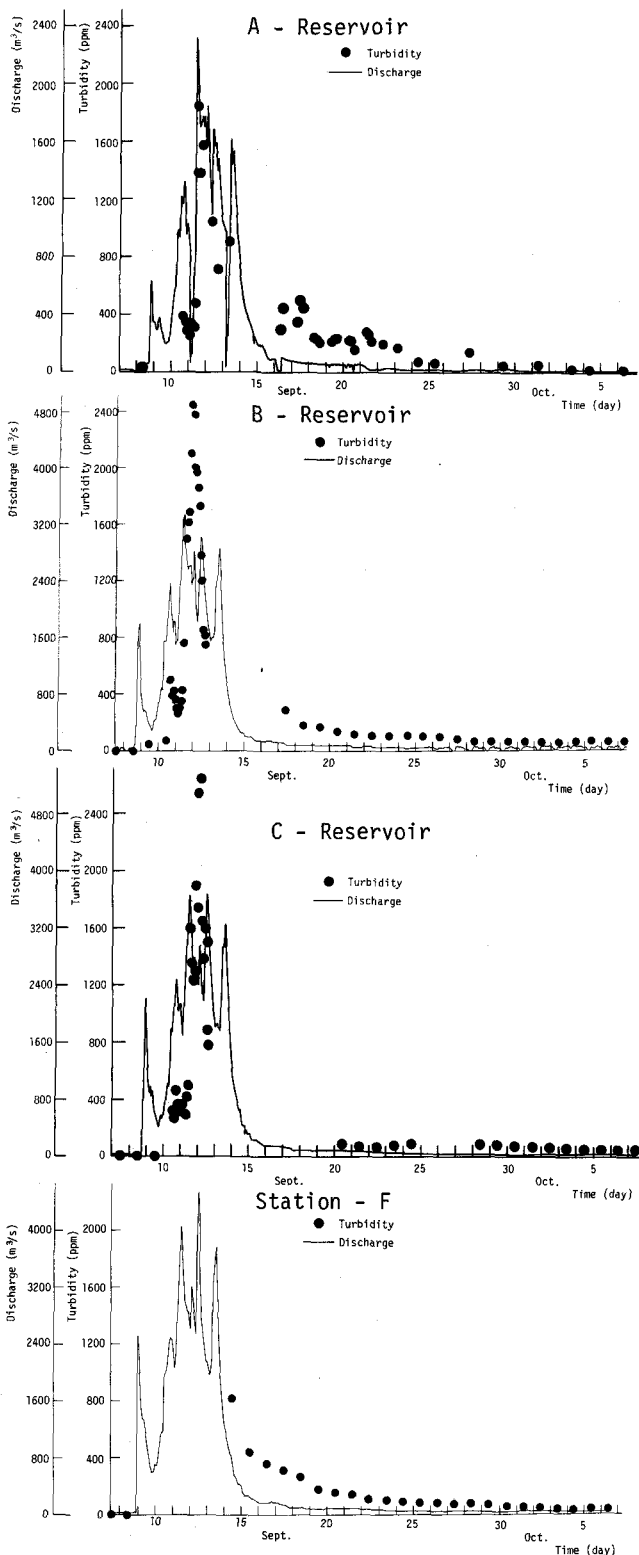


Fig. 6 Hydrographs and Turbidity Curves

の変化を示したものである。A貯水池についてみると、8月23日に形成されていた水温成層は、洪水の流入により破壊され、水温分布は、水深方向にほぼ一様となり、そのまま循環期へ移行する。一方濁度は、9月17日において、放流口付近に高濁度層がみられるが、これは、余水放流のためと考えられる。しかし、時間の経過とともに、流入濁度が低減し、粒子の沈降が進むにつれて、濁度分布は、水深方向に一様化する傾向を示しながら低減している。つぎに、B貯水池についてみると、洪水前に形成されていた成層はA貯水池同様、洪水により破壊され、9月17日の観測結果では、高濁度水が貯水池全体にほぼ一様に拡がっている。その後は、流入水濁度の減少、粒子の沈降に伴ない、濁度は減少していくが、9月25日の観測結果からわかるように、取水口へ向う流れのため、取水口上方に濁水塊が形成される。しかし、この濁水塊も10月7日には、消滅し、貯水池全体に一様な濁度となっている。つづいて、C貯水池についてみると、洪水前後を通じて、水温、濁度分布は、水深方向にほぼ一様な状態で変化する。9月17日にみられる表層の高濁度は、表層からの余水放流の影響と考えられる。このように、C貯水池は、貯水池規模も小さく、貯水池としての機能は小さいと考えられ、前述のことを裏付けている。

このように、9月洪水後においては、成層型貯水池であるA、B両貯水池とも、成層破壊により、C貯水池同様、混合型貯水池の水理的性格を有するようになる。したがって、各貯水池とも、洪水後は、取水による流れが貯水池全層に及び、それに伴う攪乱のため、微細粒子の沈降が阻害され、濁度の低減は、主として、流入水による希釈と、取水口からの排水に支配され、放流濁度の低減は緩慢になると考えられる。

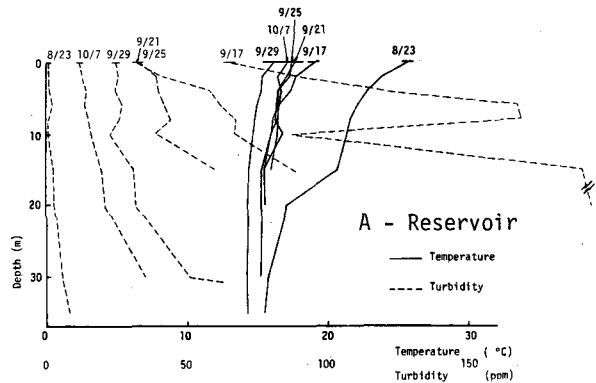


Fig. 7 (a) Distribution of Turbidity and Temperature

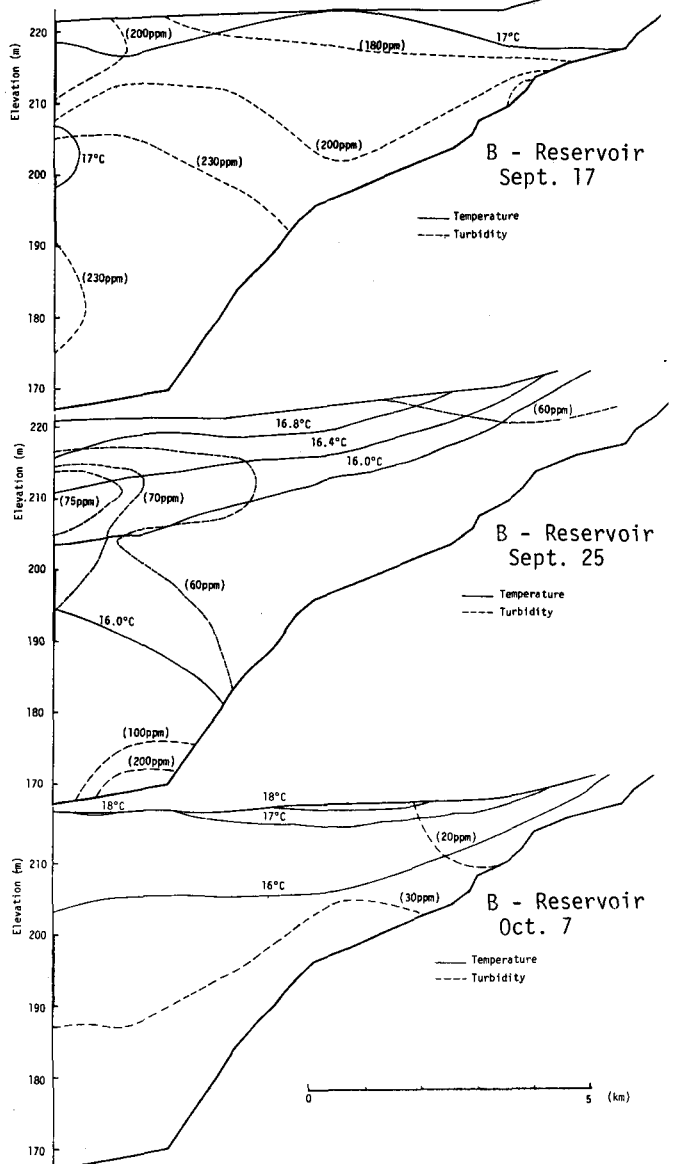


Fig. 7 (b) Distribution of Turbidity and Temperature

3. 濁質追跡のモデル

N川流域のような貯水池を有する河川における濁質を追跡するモデルとして、つぎのようなものを考えた。すなわち、河川を水深方向の変化の著しい貯水池部と、そうではない河道部とにわけ、貯水池部においては、水平方向と鉛直方向の2次元のモデルを適用し、河道部においては、流下方向の変化のみを考慮した一次元モデルを適用するものとする。N川では、本川沿いに三つの貯水池が直列に配置されている。C貯水池は、貯水池としての機能は小さいが、ここでは、C貯水池も貯水池部として取り扱い、貯水池モデルを全貯水池に適用し、最下流のC貯水池より下流部について、一次元の河道モデルを適用することとした。

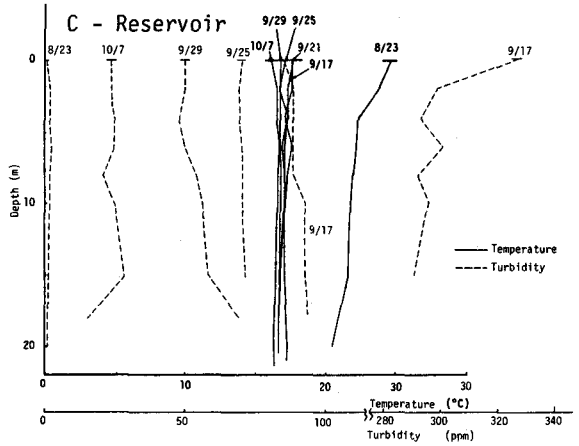


Fig. 7(c) Distribution of Turbidity and Temperature

1) 貯水池における濁度追跡の基礎方程式系と数値計算法 貯水池における諸量の変化は、貯水池幅方向には、小さく無視できるものと考えられるので、水平方向、鉛直方向の運動量保存の関係、連続式、熱量の収支則、濁質の収支則を適用するものとし、これらの関係式を Fig. 8 に示す水平要素をコントロールボリュームとして積分し、静水圧分布を仮定すれば、次式を得る。

・流下方向の運動量保存の関係

$$\frac{\partial U_y}{\partial t} + \frac{1}{V_0} [A_x U_x^2]_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{V_0} [A_y V_y U_y]_{y_n}^{y_{n+1}} = \frac{1}{V_0} \frac{1}{\rho_0} [A_x p]_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{V_0} [A_x D_{Mx} \frac{\partial U_x}{\partial x}]_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{V_0} [A_y D_{My} \frac{\partial U_y}{\partial y}]_{y_n}^{y_{n+1}} (1)$$

・静水圧分布

$$p = \int_0^h \rho g dy \quad (2)$$

・連続式

$$[A_x U_x]_{x_i}^{x_{i+1}} + [A_y V_y]_{y_n}^{y_{n+1}} = 0 \quad (3)$$

・熱量の保存式

$$\frac{\partial T_y}{\partial t} + \frac{1}{V_0} [A_x U_x T_x]_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{V_0} [A_y V_y T_y]_{y_n}^{y_{n+1}} = \frac{1}{V_0} [A_x D_{Tx} \frac{\partial T_x}{\partial x}]_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{V_0} [A_y D_{Ty} \frac{\partial T_y}{\partial y}]_{y_n}^{y_{n+1}} - \frac{1}{V_0 \rho_0 C_w} [A_y \phi_y]_{y_n}^{y_{n+1}} \quad (4)$$

・濁度の保存式

$$\frac{\partial C_y}{\partial t} + \frac{1}{V_0} [A_x U_x C_x]_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{V_0} [A_y (V_y - V_c) C_y]_{y_n}^{y_{n+1}} = \frac{1}{V_0} [A_x D_{Cx} \frac{\partial C_x}{\partial x}]_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{V_0} [A_y D_{Cy} \frac{\partial C_y}{\partial y}]_{y_n}^{y_{n+1}} \quad (5)$$

また、最上層においては、1つの水平要素として扱い、連続式はつぎのようになる。

$$\frac{\partial h_m}{\partial t} + \frac{1}{A_s} [A_x U_x]_{x=0}^{x=\ell} + \frac{1}{A_s} \cdot A_y V_y |_{y=s-1} = 0$$

ここに、 U_j 、 V_j ；水平方向、鉛直方向の平均流速、 T_j ；平均温度、 C_j ；平均濁度（添字 j は、コントロールボリューム（ $j=v_0$ ）、および j 軸に垂直なコントロールボリュームの境界面における平均値

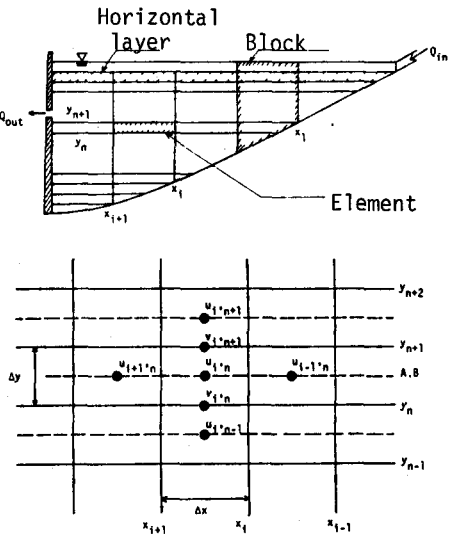


Fig. 8 Model of Reservoir and Computation Scheme

($j = x, y$) を示す。 A_j ; 境界面積, D_{Mj} , D_{Tj} , D_{Cj} ; 運動量, 温度, 濁度の分散係数, V_o ; コントロールボリュームの体積, ρ ; 密度, p ; 圧力, g ; 重力加速度, h ; 水深, C_w ; 水の比熱, ϕ_y ; 気象要因による受熱量, V_c ; 濁質の沈降速度, x, y ; 各々, 流下方向, 鉛直方向の座標軸, t ; 時間である。

数値計算の方法は、差分に似た方法を用い、Fig.8 に示されるスキームで計算することとし²⁾、境界面における平均量は、体積平均量 (U_v, T_v, C_v) で近似している。また、水面勾配、圧力項は、計算時間の関係から省略している。

2) 河道における濁質追跡の基礎方程式系と数値計算法 本節でいう河道とは、前述のように、流下方向の変化が卓越するような区間を意味しており、適用される方程式は、一次元解析法により求められた、エネルギー式、連続式、濁度の保存式である。すなわち、

・エネルギー式

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\alpha}{g} u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = S_o - S_f \quad (7)$$

・連続式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (8)$$

・濁度に関する移流分散方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{A} (C' - C) q \quad (9)$$

ここに、 u ; 平均流速, h ; 水深, S_o ; 河床勾配, S_f ; 摩擦勾配 (Manning 式を用いるものとすれば、 $n^2 u^2 / R^{4/3}$, g ; 重力加速度, α ; エネルギー係数, A ; 流積, Q ; 流量, q ; 単位幅当りの横流入出流量 (流入を正), C ; 濁度, D_L ; 移流分散係数, C' ; 横流入出水の濁度, x ; 距離, t ; 時間である。

数値計算法は、流れについては、特性曲線法によるものとし、すなわち、(7), (8) を特性曲線表示し、

$$\zeta \pm \frac{dx}{dt} = \frac{\alpha + 1}{2} u \pm c \text{ 上で} \quad \frac{1}{B} \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) + \left(\frac{\alpha - 1}{2} v \pm c \right) \left\{ \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{cu^2}{2g} + h + z \right) + S_f \right\} = 0 \quad (10)$$

ここに、 c ; 伝播速度, z ; 河床高さ, B ; 河幅

(10) 式を固定格子点による差分法を用いて解いた。³⁾

また、移流分散方程式 (9) については、差分法を用いて解いた。⁴⁾ (Fig.9 参照)

3) N 川の濁質流送の数値シミュレーション 上述の数値計算法を A 貯水池流入点を K 点とし、下流側を F 点とする区間に適用した。すなわち、 A, B, C 各貯水池に貯水池モデルを、 C 貯水池放流口より、

F 点までを河道モデルを用いて、数値計算した。 K 点における、流量、濁度の境界条件を Fig.10 に示す。また、支川からの流入流量は、各貯水池からの放流流量を下流側貯水池の流入流量および流域面積比の関係から推定した値を用いた。分散係数、沈降速度等については、妥当な範囲内で、試行錯誤的に実測データと最も適合するように定めた。

数値計算の結果からは、このようなパラメータのうちでは、貯水池モデルにおいては、沈降

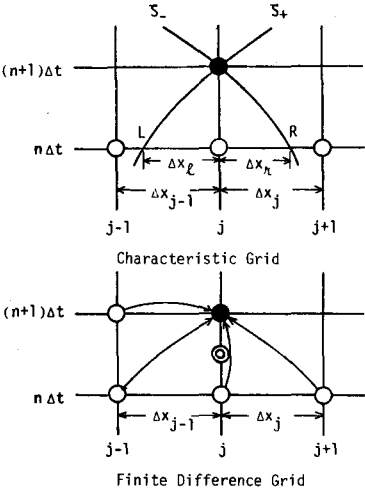


Fig.9 Computation Scheme

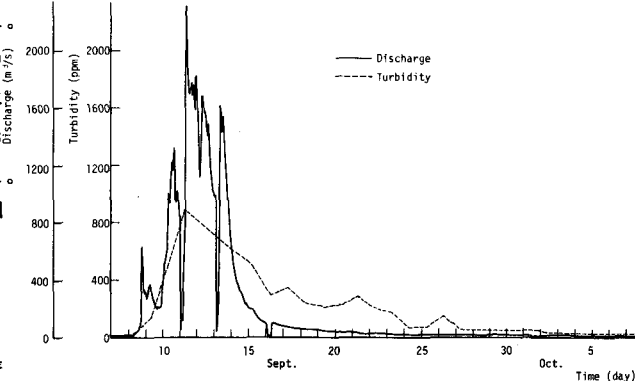


Fig.10 Boundary Condition (St.K)

速度の評価が重要であり、貯水池、河道いづれにおいても、移流分散項の影響の小さいことがわかった。

Fig. 11は、このようにして行なわれた数値計算の結果の一部を示すものである。Fig. 11(a)は、A貯水池における洪水前後の水温、濁度分布について、数値計算結果と実測値とを日平均値と比較したものであるが、9月17日、21日の計算濁度が実測値より大きいこと、計算された表層水温が小さいことを除いて、概してよく一致している。Fig. 11(b)は、流下に伴う水温の変化を各貯水池について、計算値と実測値とを、日平均値と比較したものであり、必ずしも良好な一致を示しているとは言えないが、洪水流入および成層破壊に伴う混合による水温の低下は、よくあらわれている。また、Fig. 11(c)は、同じく、流下に伴う濁度変化について、計算値と実測値とを、日平均値と比較したものである。B貯水池における水表面濁度が若干低いことを除いて、良好一致を示している。

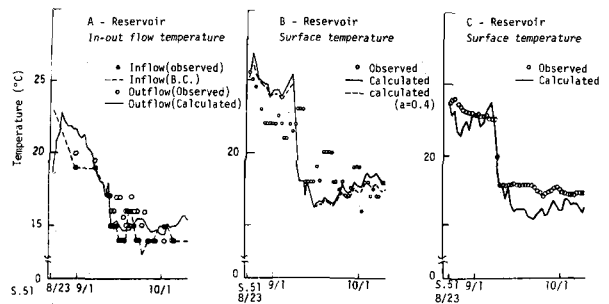
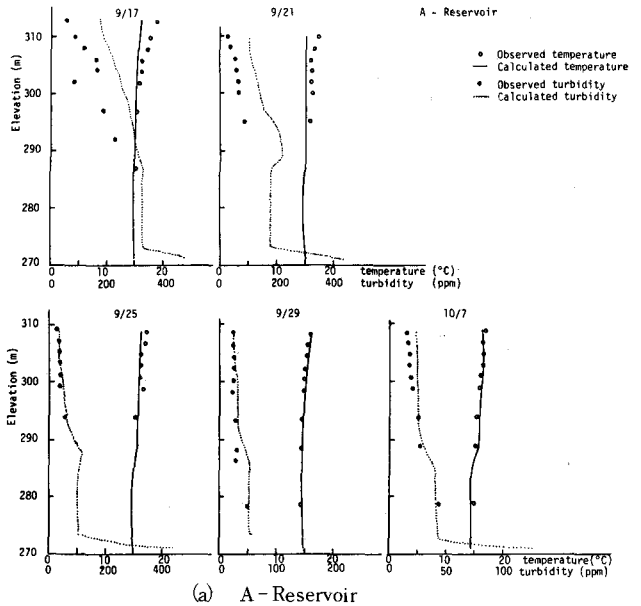
以上のことから、上述のモデルは、細部において、観測値と若干の不一致があるが、これらは、入力資料の不整備が主因と考えられ、シミュレーションモデルとしての適用性は高いものと考えられる。

4. 濁質流送に及ぼす貯水池群の影響に関する一考察

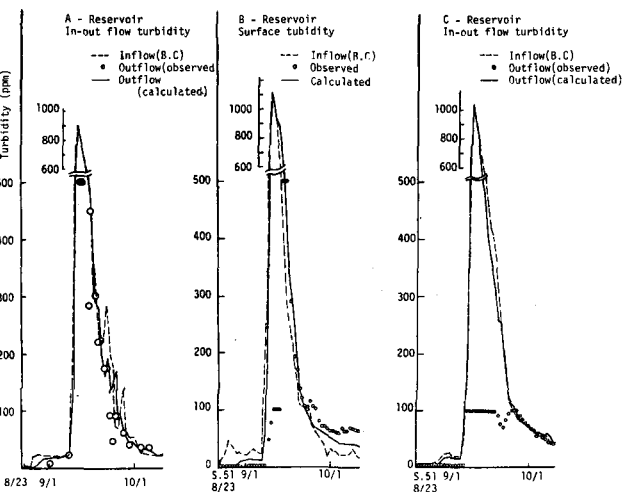
濁質流送に貯水池群がどのような影響を及ぼすかについての考察の一つとして、3.で述べた計算例と同一の境界条件のもとで、三つの貯水池がないと仮定して、K点よりF点まで、河道モデルを適用して数値計算を行なった。

双方の数値計算結果を、下流端F点において比較したものが、Fig. 12, 13である。Fig. 12より、流量についてみれば、洪水のピーク流量、およびピークの生起時刻に若干の違いがみられるものの、波形の変形は、ほとんどみられず、流量の伝播に与える貯水池群の影響は、ほとんどないとみてよいであろう。

一方、濁度について見れば、双方共に、



(b) Temperature Curves (A, B, C-Reservoir)



(c) Turbidity Curves (A, B, C-Reservoir)

Fig. 11 Comparison of Observed Data and Calculated Result

洪水終了後も、高濁度水の流出がつづくものの、貯水池がないと仮定した場合の方が、より速やかに低減していることが知られる。Fig. 13はこの結果を、流量と濁度との関係でみたものであるが、貯水池群がないと仮定した場合には、同じ、10月7日時点で、20ppm程度まで下がっているのに比較して、現状の場合では、50ppm程度の濁度の流出が続いていることが知られる。

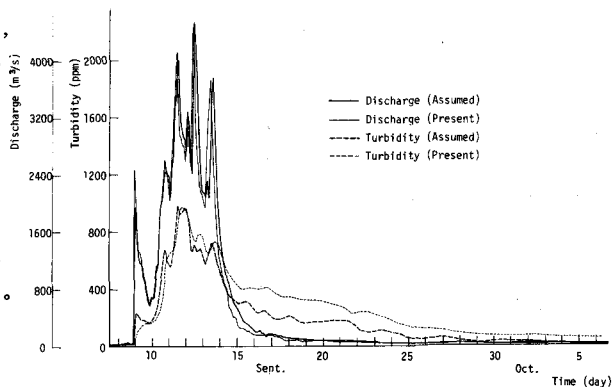


Fig. 12 Comparison of Result (Hydrographs and Turbidity Curves)

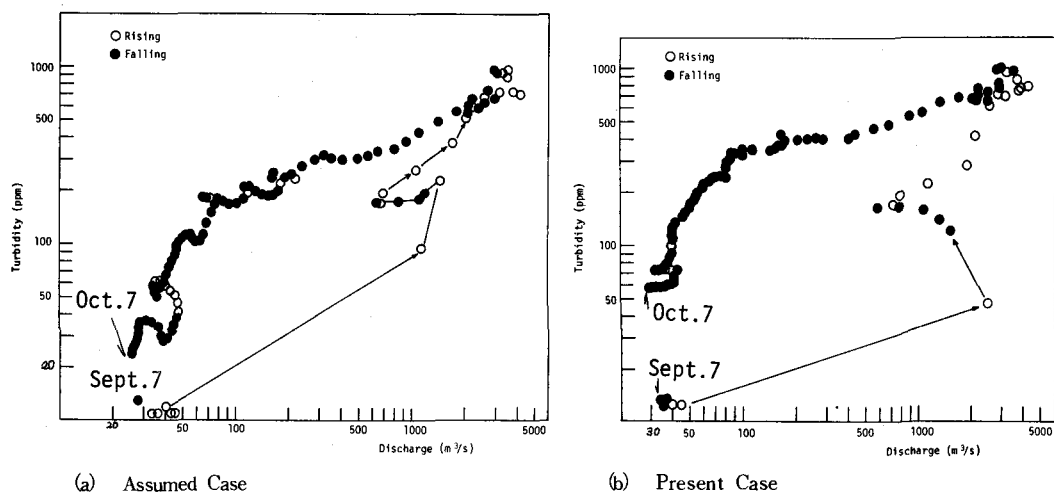


Fig. 13 Comparison of Result (Relation between Discharge and Turbidity)

5. 結 語

N川流域を対象として濁質の流送過程について研究した。対象とした51年9月の台風による出水では、降雨後も極めて高濁度の水が河川に流入していること、貯水池はこの洪水により、すべて、混合型となり、洪水後の濁度の低減は緩慢であることがわかった。また、本論文で述べた濁度追跡モデルは、きわめて適合性の高いものであること、また、このモデルでは、沈降速度の評価が重要であることもわかった。濁度～時間曲線の波形の変形は、本計算例では、貯水池による滞留が主因であると推定されるが、より多くの計算例によって他の諸作用の影響について調べる必要がある。

最後に、貴重な資料の提供を頂いた関係各位に深甚の謝意を表するとともに、数値計算に際して御助力頂いた京都大学工学部井上和也助教授、ならびに、資料の整理を手伝って頂いた同河川工学研究室の学生諸氏に謝意を表します。

参考文献

1. Graf, W.H.; Hydraulics of Sediment Transport, McGraw-Hill, 1971
2. 松尾, 岩佐, 遠藤; 洪水による貯水池の成層変化とその予測, 土木学会第32回年講概要集, 1977
3. 岩佐, 井上, 片山; 開水路非定常流の数値計算法について, 京都大学防災研究所年報第19号-B, 1976
4. 愈, 岩佐, 綾; 河道における濁度の挙動, 土木学会第32回年講概要集, 1977