

河川における濁水現象とそのモデル化について

Dispersion of Turbidity in River Channels and Its Modelling

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

建設技術研究所 正 員 今西 靖雄

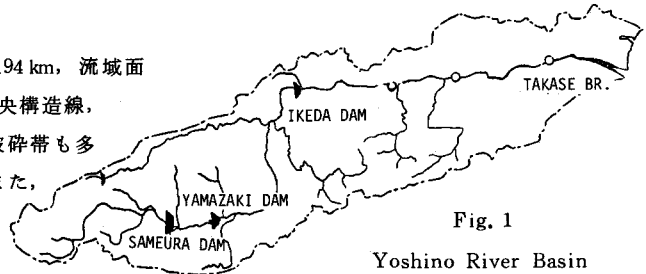
1. はじめに

河川における濁水現象は、従来、洪水時を中心とした浮遊砂や、wash loadの流送過程の研究の一部として取り扱われることが多かったようであり、洪水終了後は、濁りも速やかに解消し、社会的問題となることも少なかったようである。しかしながら、近年のダム貯水池の建設による濁水の長期化現象を契機として、貯水池—河道から構成されるような水系にあっては、河川の環境保全を考慮するうえで、濁りの問題は欠くべからざるものとなってきた。

洪水とともに生じた濁水は、貯水池において変換された後も、流入支川等の影響を受け、下流部では、貯水池放流水濁度とは、相当異なった濁度波形を呈し、河川環境の面からは、放流水濁度のみならず、中・下流部における濁度の挙動を知らねばならないことも多い。本研究は、このような濁水現象として、吉野川におけるものをとりあげ、その特性について考察するとともに、その解析法について若干の数値解析により検討を加えたものである。

2. 吉野川における濁水現象

吉野川は、Fig. 1に示すように、流路長194 km、流域面積3,759 km²の大河川であるが、流域は、中央構造線、御前鋒構造線により分割されるとともに、破碎帯も多く、地すべりや、崩壊の多発地帯である。また、水文的には、年間雨量3,000mm以上にも達する全国有数の多雨地帯を含んでいる。こ



のように本流域は、本来、河川の濁りの源を多数かかえているとともに、早明浦ダムを始めとして、大小のダムが建設されており、吉野川水系の濁水現象は複雑なものとなっている。本研究で調査の対象とされた河道部とは、早明浦ダム（吉田橋）下流より、高瀬橋付近までの約118 kmの区間である。

2.1 濁度～時間曲線

濁水現象の主因は、もちろん、降雨とそれに伴う濁水の河道への流入にあるわけで、その規模と継続時間等は、降雨および流域の特性に左右されるものであり、また、本流域のように大規模な貯水池が含まれる場合には、貯水池の成層状態、放流状況等にもよるものと考えられるが、本研究で興味の対象とされるような上流端において観測される濁度～時間曲線の変形過程としてとらえるとき、吉野川の濁水現象は、つぎの3種に分類することができる。

- ① 早明浦ダム直下流（吉田橋）の濁度に比較して、下流において観測される濁度が著しく低下する場合（Fig. 2-(a)）
- ② 早明浦ダムの放流水濁度が低いにもかかわらず、下流で高濁度が観測される場合（Fig. 2-(b)）
- ③ ①②の両者が混在する場合（Fig. 2-(c)）

このような3種の変化パターンが生じるのは、Fig. 1にも示されているように、早明浦ダムが本川の上流部に位置し、ダム下流部において、多くの支川の流入があり、支川からの濁水を含んだ流入水に伴う濁水化、あるいは逆に流入水による希釈によるものと推定され（後出のFig. 6に示されるように、早明浦ダム放流流量に比べ、池田地点の流量は、相当大きなものとなっている）、水系全体にわたる濁水現象を把握するためには、単に早明浦貯水池の放流水濁度の把握のみならず、支川の流量、ならびに濁度の把握が極めて重

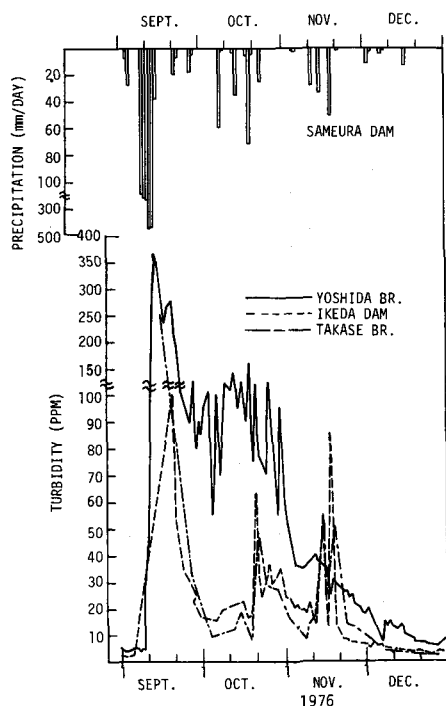


Fig. 2(a)

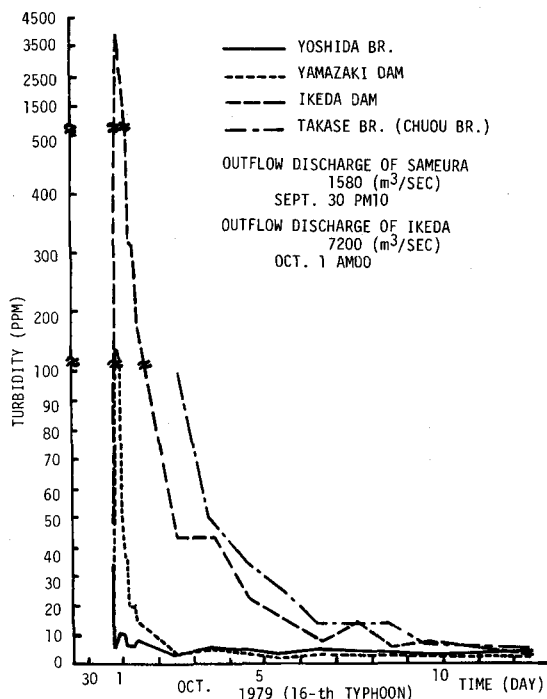


Fig. 2(b)

要となることが推定される。

2.2 流入濁度

早明浦ダムより下流において流入する支川は、流域面積 20 km^2 以上のものを数えると22であり、主要なものは、池田ダム上流で流入する祖谷川、銅山川である。これらのうち、6つの支川で流入濁度の測定がなされている。流量と濁度の関係については、近年、雨水の流出機構¹⁾や斜面の侵食機構²⁾と結びつけて解析しようとする試みが、なされているが、濁度の測定も1日1回程度と少なく、流量の測定もされていないので、従来より用いられている濁度と流量の両対数紙上の相関を調べることにした。流量は、本川の流量観測所における日平均流量を用いて流域換算して求めている。Fig. 3は、1977年9月1日～9月30日における、このようにして求められた濁度と比流量を両対数紙上にプロットしたものの一部である。比較的、粗い流量の推定にもかかわらず、両者は高い相関を有しているのがみられる。回帰式は、従来の式を若干変更して

$$C = \alpha (Q - Q_0)^\beta \quad (1)$$

とする方が適合性が高いようである。定数 α , β , Q_0 は、支川流域の植生、地質、裸地面積等によって当然異なってくるが、本例では $0.17 < \alpha < 42$, $0.4 < \beta < 1.5$, $0.31 < Q_0 (\text{m}^3/\text{s}) < 8.05$ 程度の値となった。

また、本流域のように多数の崩壊地を含むような場合、

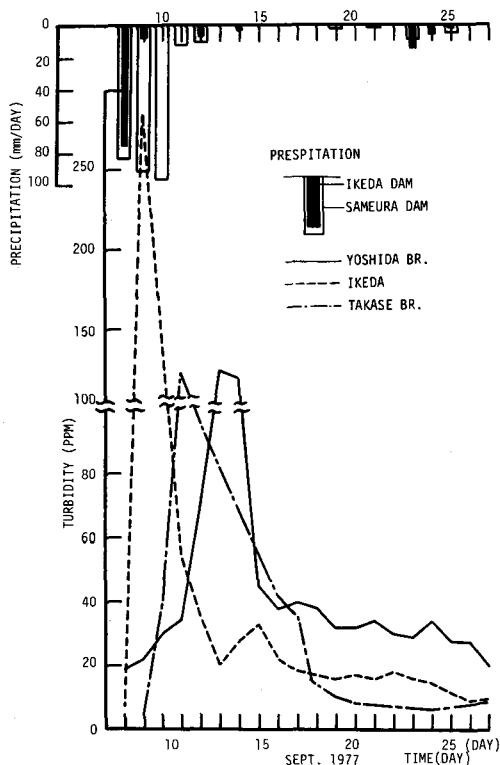


Fig. 2(c)

Turbidity-Time Curves

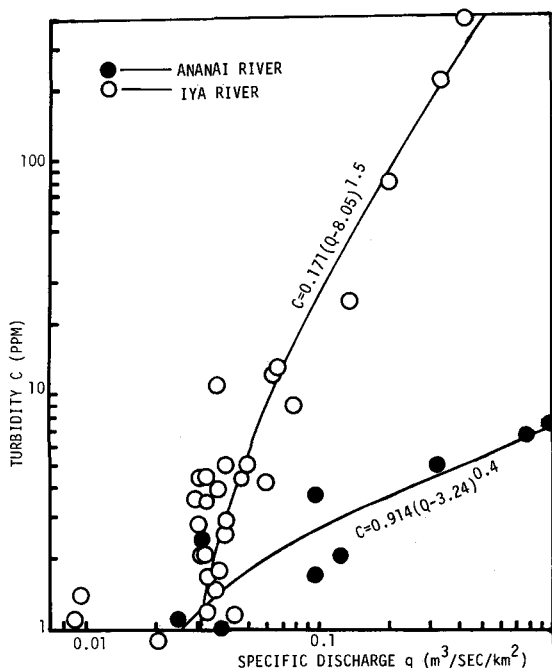


Fig. 3 Relation between Turbidity and Discharge

これらの値は、同一の支川流域でも定数とみることはできない場合もある。Fig. 4 は、吉野川流域と同様に、多数の崩壊地を有する那賀川上流部における濁度と流量の関係を示す観測値より両対数上にプロットしたものであるが、回帰式は右方より左方へ移動し、また右方へ戻っていくという経年変化がみられ³⁾、崩壊地の安定度を考慮する必要があるであろう。

3. 濁水現象のシュミュレーションモデル

本研究で対象としている河川における流下方向の変化、伝播過程を考察するのに用いられる基礎方程式系は、一次元解析法によって得られるエネルギー式、連続式、及び濁度物質の保存則としての濁度に関する移流分散方程式である。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\alpha}{g} v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (2)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3)$$

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (AD \frac{\partial C}{\partial x}) + C'q \quad (4)$$

ここに、 v ：断面平均流速、 h ：水深、 S_0 ：河床勾配、 S_f ：摩擦勾配、 g ：重力加速度、 α ：エネルギー係数、 A ：流積、 q ：単位長さ当りの横流出入量（流入を正）、 C ：濁度、 D ：移流分散係数、 C' ：横流出入水の濁度である。(2)～(4)式は、現在、開水路流れにおける保存物質の挙動を示すもっとも汎用的で詳細な数学モデルであるが、河道形状や、境界条件が複雑に変化するため、数値計算によらざるを得ず、濁水現象のような大きな距離、時間スケールを有する現象に適用する場合、電子計算機の発達した今日でもなお、かなりの時間と手間を有する。

したがって、対象とする現象、および求めたい解の精度に応じて、より簡略化されたモデルが考えられる。そのもっとも単純化されたモデルは、(2)式の示す流れの力学的挙動の変化を無視し、(3)、(4)式のみをある任意の距離について積分し、その区間内で濁度が全く一様であるとし、かつ現象の定常性を仮定するモデルであり、このとき、(3)、(4)式を変形することにより、

$$Q_0 - Q_i = \sum_j Q_{y_j} \quad (5) \quad C_0 Q_0 - C_i Q_i = \sum_j C_{y_j} Q_{y_j} \quad (6)$$

である。ここに、下添字 0 は、コントロールボリュームとしての河道区間から、下流側の河道区間への流出を、

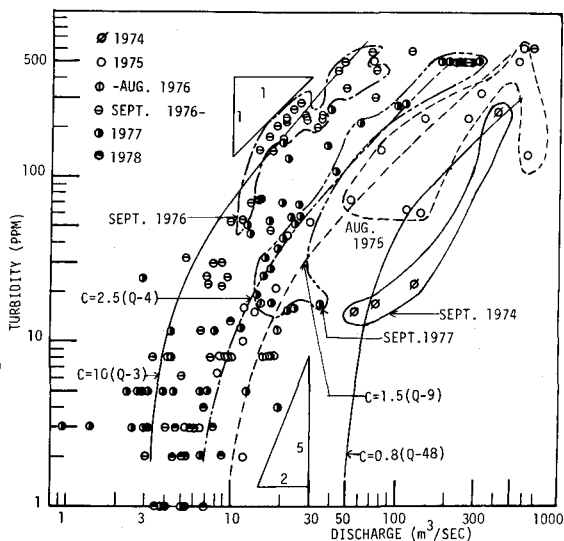


Fig. 4 Relation between Turbidity and Discharge in Naka River

i は、上流側からの流入を、 y は、河道区間外とコントロールボリュームとしての河道区間との流入出を示している (Fig. 5)。 (5) 式を導くにあたっては、流れの力学的特性の変化を考えないから、 (4) 式の移流分散項は、省略されている。 (5)、 (6) 式より濁度を求めるには、求めたい解の精度に応じて、コントロールボリュームの大きさを変え、上流側より C_i を与え、順次解を求めればよい。また、非定常現象であっても、流下の時間スケールに比較して、時間変化の割合が緩慢であれば、定常現象の積み重ねとして解析することも可能であろう。以下本研究では (2)~(4) 式から構成されるモデルを移流分散モデル、 (5)、 (6) 式から構成されるものを完全混合モデルと呼び、実際の濁水現象へ適用し、その差異を検討する。

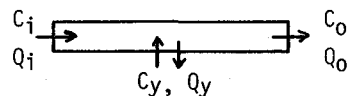


Fig. 5 Mixing Model

4. 濁水現象への適用

Fig. 2(c) に示された 1977 年 9 月における濁水現象を対象として数値シミュレーションを行なった。対象区間は、早明浦ダム下流より、高瀬橋までの 118 km である。この間における各主要観測点で測定された濁度～時間曲線が、Fig. 2(c) に日降水量とともに示されているが、5 日間の降雨に対して、高瀬橋では、10 ppm 程度の濁度が 20 日以上続いている。主要流量観測点における流量ハイドログラフは、Fig. 6 に示すとおりであるが、Fig. 2(c) とともにみればわかるように、早明浦ダムにより、ダム上流部の出水は、貯留されてしまい、濁水が放水口に達するまでに、4~5 日かかり、9 月 13 日に 120 ppm のピーク値となってあらわれる。一方、池田地点においては、Fig. 6 に示されるように、早明浦ダム～池田ダム間の支川流入により、流量が著しく増加するとともに、9 月 9 日に、第 1 の濁度のピーク値 (300 ppm) の出現となり、9 月 15 日に、早明浦ダムよりの濁水が到達し、第 2 のピーク (30 ppm) の出現となっている。また、高瀬橋においては、第 1 のピークが池田ダムでの出現に 2 日遅れて、9 月 11 日に 120 ppm のピークの出現となっている (第 2 のピークは、観測値の欠落のためか、明らかではない)。

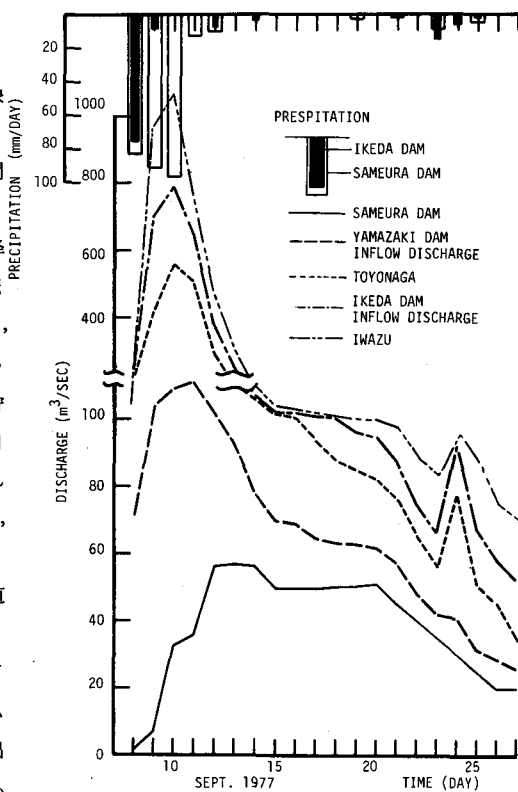


Fig. 6 Discharge Hydrograph

濁水の伝播過程の詳細をみれば以上のようなのであるが、Fig. 6 を見れば明らかなように、支川からの流入量が濁水の挙動に大きな影響を及ぼしていることが推定されるが、支川流量の観測はされていないので、以下のシミュレーションでは、前述のように、本川における流量観測所の流量より流域換算して求めた。また支川水の濁度については、観測値の豊富な支川については、観測値を用い、資料のない支川については、前述の濁度～流量の関係式を与えている。

また、用いた水理資料は、濁度の測定が 1 日 1 回ということより、すべて日平均値を 12 時の値として与えている。

5. 移流分散モデルによる数値シミュレーションと結果の考察

水理量の計算には、(2)、(3) 式に特性曲線法⁴⁾を用い、得られた A 、 v より、(4) 式を Stone-Brian 法⁵⁾により差分化して、濁度を求めた。(4) 式中のパラメータである移流分散係数については、先に、著者らが、室内実験水路、および、河川における観測結果を次元解析して求めた結果⁶⁾より

$$\frac{D}{du_*} = 5.0 \left(\frac{v}{u_*} \right)^{-0.5} \left(\frac{B}{d} \right)^{1.5} \quad (7)$$

を用いている。(7)式は Fig. 7 に示されるように、パラツキがあるのは否めないが、室内実験水路、河川において共通な表示となっている。

計算結果の一例を Fig. 8(a)(b)(c) に示す。Fig. 8(a) は、分散係数を(7)式、および、その10倍の値で与えた場合の相違を示したものである。10倍の値を与えることにより、第1のピーク値は下がり、第2のピーク値は上がっている。これは、分散項が、支川からの流入濁度の影響を緩和する作用、すなわち、第1のピークにあっては、支川からの高濁水を分散させ、第2の

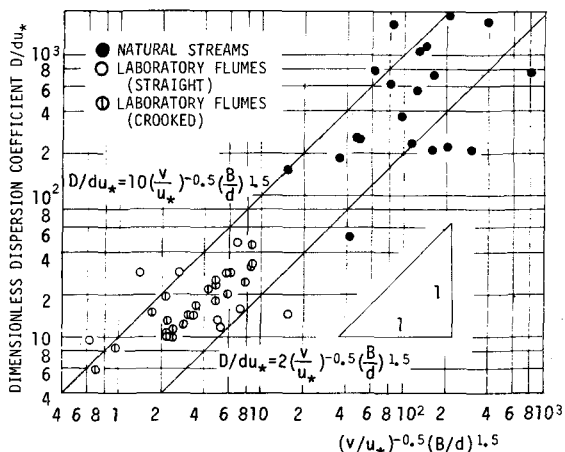


Fig. 7 Dispersion Coefficient

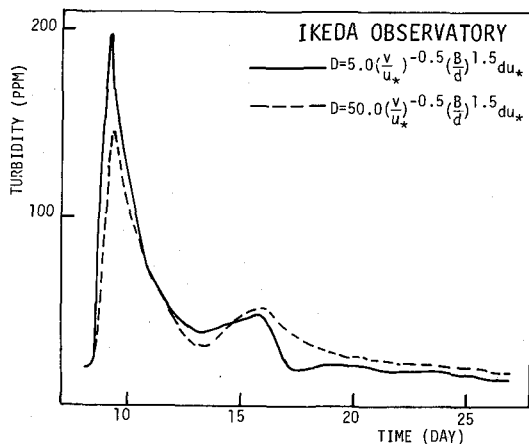


Fig. 8(a) Results of Simulation

ピークにあっては、支川からの清水を分散させているためと考えられる。Fig. 8(b) は、支川濁度の影響をみるために、銅山川の濁度を、祖谷川の濁度～流量の関係で与えてみたものであるが、支川からの流入の影響が最も

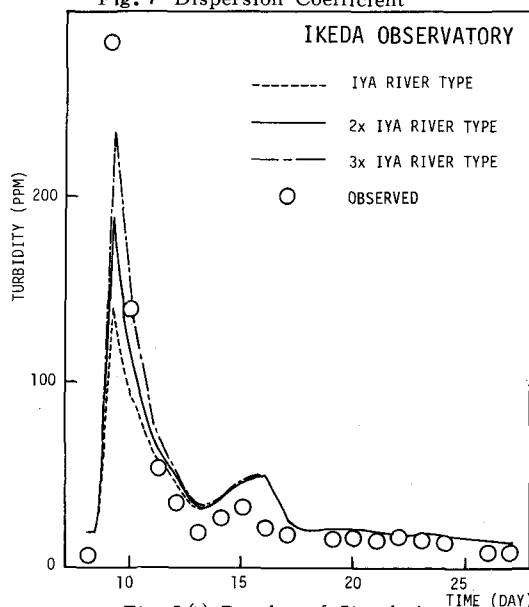


Fig. 8(b) Results of Simulation

大きい9月8日～9月15日には、相当大きな濁度の違いとなっており、それ以降は、ほとんど影響を及ぼしていないことが知れる。Fig. 8(c) は、9月8日12時より、9月9日20時までの濁度の縦断方向の変化を示したものであるが、本川濁度が支川流入の影響を受けて高濁度化していく様子を示している。また、縦断変化は、不連続な階段状を呈していることも示している。

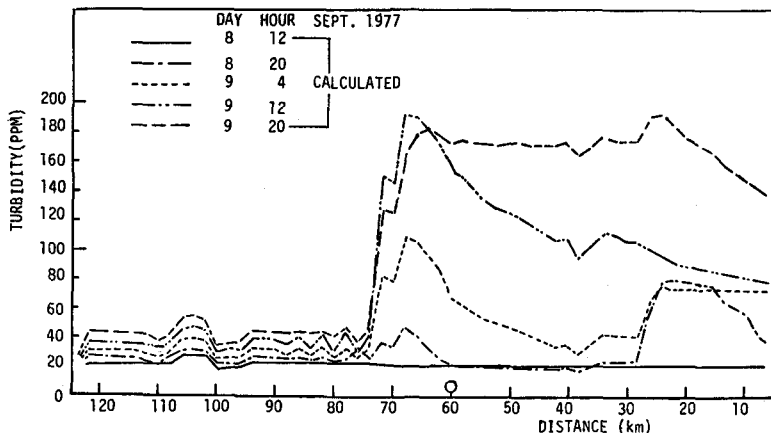


Fig. 8(c) Results of Simulation

Fig. 9(a)(b)は、前述の完全混合モデルによる計算結果と、移流分散モデルによる計算結果を実測値とあわせて濁度～時間曲線として示したものである。Fig. 9

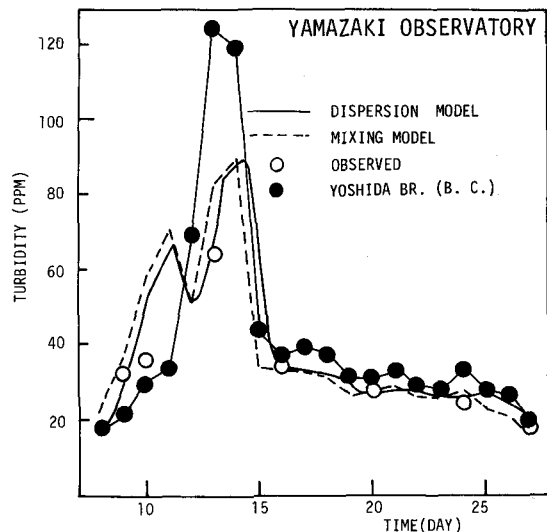


Fig. 9(a) Comparison of Results

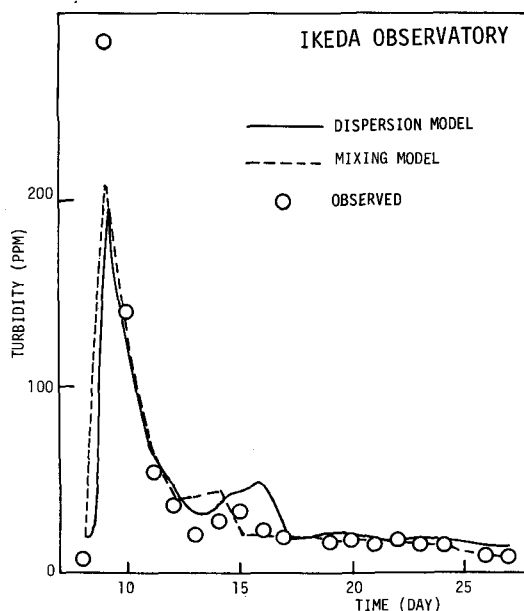


Fig. 9(b) Comparison of Results

(a)では、実測濁度と二つのモデルによる計算結果と比較すると、さほど有意な差はみられないが、Fig. 9(b)では、第2のピークの生起時刻に約1日の差が生じている。これは、早明浦ダムから、池田ダムまで濁質が約1日かかって輸送されるのに対して完全混合モデルでは、瞬時に伝わりと仮定することになっているからであるが、時間の遅れを除けば、その傾向は、両者ともよく一致しているものと言えよう。Fig. 8(c)にみられるように、濁度の縦断分布が階段状を呈しているとき、コントロールポリウムを適切に選ぶことにより、完全混合モデルのような単純なモデルでも、その目的により有用であると考えられる。

5. おわりに

吉野川を例に、貯水池一河道よりなる水系における濁水現象を解析するとともに、そのモデル化について考察した。濁水現象の把握には、上流端境界条件としての、貯水池放流流量、濁度のみならず、支川流量、濁度の把握の重要性が指摘されよう。

最後に、本研究を進めるにあたって資料の提供を頂いた建設省四国地方建設局の関係各位に深甚なる謝意を表すとともに、計算を手伝って頂いた元京都大学大学院生（現新日鉄）小門武氏、元京都大学学生（現国鉄）国広敏彦氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 宮永洋一他：第23回水理講演会論文集，1979.
- 2) 金屋敷忠義他：第24回水理講演会論文集，1980.
- 3) 岩佐義朗他：第16回自然災害科学総合シンポジウム論文集，1979.
- 4) 岩佐義朗他：京都大学防災研究所会報第19号B-2，1976.
- 5) Daily, J. E. et al : Ralph M. Parsons Laboratory Report No. 158, MIT, 1972.
- 6) Iwasa, Y, et al : Proc. 3 Int'l Symposium on Stochastic Hydraulics, 1980.