

降雨に伴う濁質の発生及び流出過程

Production and Transportation of Cohesive Sediment due to Rainfall

張旭紅*・首藤伸夫**・田中仁***

By Xuhong ZHANG, Nobuo SHUTO, Hitoshi TANAKA

A numerical model is developed and the results are compared with the measured. The water flow is calculated with the kinematic wave theory applied to a channel network which is constructed by using digital ground height data. Two parameters of the cohesive sediment production $q_s = \alpha \tau^b$ are determined, according to land use.

KEYWORDS: turbidity calculation, digital land information optimization, channel network,

1. はじめに

流域内特定地点での汚濁物負荷量調査の報告は数多いが、発生源から流域端までの全流出過程を対象とした研究はそれほど多くはない。ここでは、濁度に関し、その発生及び伝播過程の解明を試みる。

濁度とSSとがよい相関関係にある¹⁾ことに着目し、濁質流量をまず求めて、これを濁度に換算する。濁質流量の推定では、掃流力から流域表土侵食量を計算する^{2), 3)}。

本研究では、国土数値情報から擬河道網流域モデルを作成し、kinematic wave 法で流出解析を行う。さらに、これをもとに流域各斜面及び河道での掃流力を計算し、侵食率と土地利用及び掃流力の関係を実測データから同定する。その結果を用いて、流域内任意地点における任意時刻の濁度を計算できる事となる。

2. 流域の状況と実測の方法

研究対象流域は、北上川上流の四十四田ダム流域（面積1080.9km²）である。図-1に示す通り、対象河川は松川、赤川、丹藤川の3支川と北上本川とに大別される。赤川の源には旧松尾鉱山があり、その流出水は中和処理されてはいるが影響は残り、赤川の濁度は平水時でも高い。その河床にはシルト系の堆積物が認められる。図-1には採水地点も示してある。各支川の特徴や河川水濁度への寄与を把握でき、しかも採水に便利であるように、橋の存在する場所で採水した。表面近くの水を橋上からバケツを降ろして採取し、試料をポリ小瓶にいて保存し、原則として6時間以内に積分球式濁度計で測定した。



図-1 四十四田ダム流域

* 正会員 工博 東北大学助手 工学部附属災害制御研究センター（〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉）

** 正会員 工博 東北大学教授 工学部附属災害制御研究センター（ 同 上 ）

*** 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科（ 同 上 ）

3. 実測結果の分析

船田地点では、洪水期濁度実測が1984年から1990年までに10回行われた。流域内各地点で一斉に濁度観測が行なわれたのは表-1に示されている4回だけであった。

第一回は秋期の出水、第二回は梅雨明け時の雨、第三回は台風9007号が低気圧に変わって、もたらされた雨、第四回観測時の雨の第一ピークは台風9011号によるもの、第二ピークは1時間に集中的に降った、台風後の大気不安定による雷雨である。実測濁度の時間的変化は、図-5に表示してある。

表-1 現地観測の出水規模

No	実 測 期 間	総雨量 (mm)	船田流量 (m³/s)	船田濁度 (度)
1	1985年10月6日～8日	28.0	17～42	13～55
2	1986年7月12日～15日	25.5	22～85	8～80
3	1990年7月13日～17日	34.4	9～41	5～15
4	1990年8月10日～14日	68.3	21～152	8～295

3. 1 濁度とSSの関係

計算では、流量Qと濁質流出量Q_sとがまず得られ、これを基に、式(3.1)(3.2)によりSS(mg/l)と濁度C(度)を求める。ただし、Kは濁度とSSの換算係数で、実測値から決定する。

このKを求めるために、濁度実測時に採取した試料のSSの測定を行なった。その結果を図-2に示す。座標原点近くに点が集中しており、濁度とSS両方共に小さいデータが多い。濁度が500度以下では、線形関係がほぼ成立する。とりあえず、全体を通じ線形とし、式(3.3)で求めると、K=2.5となった。

3. 2 濁度と流量の関係

出水時の現地観測に対し、北上本川芋田、松川古川、両川合流後の船田の3地点における実測流量Qと濁度Cの関係を描いたのが図-3である。全体的に、水位下降期(黒印)が水位上昇期(白印)より低濁度である場合が多く、濁度と流量はループ状の曲線関係を有している。古川及び船田での関係は、芋田のものに比べ、よりループ状になっている。両地点とも、上流部に河床堆積物の多い赤川が影響するが、本川の芋田はその影響外にあるからである。図中の直線は、対数目盛り上で濁度・流量関係を直線回帰して得られたものである。

4. 濁度計算

4. 1 擬河道網モデル

まず、国土数値情報の高度情報ks-110-1(250m×250m交点での高さ)に基づいて、交点を次々と結んで行くが、結んで出来上がる経路が全て流路となるわけではない。斜面を構成している場合もある。こうして作られた河道網と、流路位置データks-272にある実際の河道とを比較して、“河道”と

$$\begin{aligned} SS &= Q_s / Q & (3.1) \\ C &= SS / K & (3.2) \\ K &= \sum_{i=1}^N SS_i / \sum_{i=1}^N C_i & (3.3) \\ N &: \text{実測データの数} \end{aligned}$$

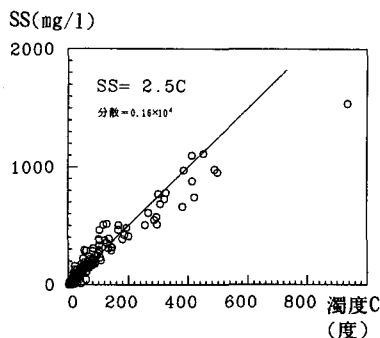


図-2 SSと濁度との関係

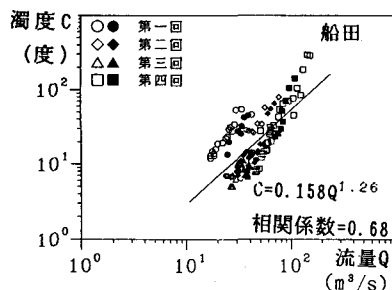
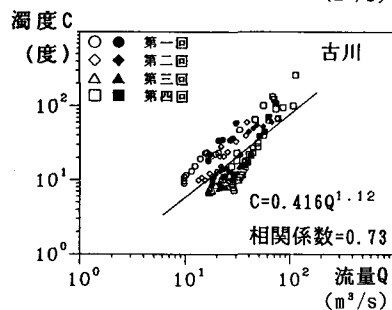
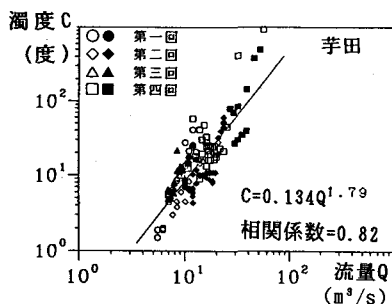


図-3 濁度と流量との関係

” 斜面” とを分類できる⁴⁾。

” 河道” と” 斜面” とでは、濁質生産の特性が異なる。また、斜面の利用状況によっても影響を受ける。この事を取り入れるために、土地利用情報ks-202を使用する。これは100m×100m面積内の土地利用状況を15種類に分けて与えている。この情報と上に述べた擬河道網とを結びつけるため、擬河道網各格子点の周囲250m×250m内における土地利用毎の面積割合を算出し、最大割合の土地利用状況をその格子点の土地利用状況とする。

各濁度実測地点の集水域における土地利用状況の面積割合を表-2に示す。流域はほとんど森林、田畑、荒地に占められており、それ以外の土地利用（例えば住宅地）はごく僅かである。これを考慮して、濁質解析を行なうにあたり、森林、荒地、田畑、河道の四種類のみを考える事とする。

表-2 各観測地点流域の土地利用割合

	森林	荒地	田畑	その他	合計	総面積(km ²)
富士見橋	19.0 0.0	72.0 7.4	0.0 0.0	1.3 0.4	92.2 7.8	14.94
赤川橋	45.1 3.5	31.6 4.2	10.9 8.9	0.7 0.1	88.2 11.8	47.24
西根	51.6 4.2	10.9 1.2	25.8 5.0	1.2 0.1	89.5 10.5	227.19
松川橋	77.0 7.6	14.6 0.1	0.5 0.1	0.1 0.0	92.2 7.8	90.78
釣り橋	58.9 6.6	14.2 0.7	15.0 3.4	0.8 0.4	88.8 11.2	179.93
古川橋	54.7 5.3	12.1 0.9	21.3 4.4	1.0 0.2	89.2 10.8	412.83
沼宮内	75.0 5.5	2.8 0.1	12.4 3.4	0.7 0.1	90.9 9.1	84.73
丹藤橋	78.1 5.6	8.9 0.2	0.0 1.3	0.0 0.0	92.9 7.1	160.99
芋田	70.6 5.4	7.5 0.3	12.7 3.1	0.4 0.1	91.1 8.9	451.92
啄木	62.7 5.3	9.6 0.6	17.2 3.7	0.7 0.2	90.2 9.8	875.49
船田	61.9 5.3	9.7 0.6	17.7 3.9	0.7 0.2	90.0 10.0	909.82

* 上段は斜面、下段は河道の面積割合である。

擬河道網を用い、4回の濁度実測時を含む29回の出水に対して、流出解析を行った結果、船田流域での最適なManning粗度係数は0.1であった。雨量分布については、地上観測データをもとにThiessen法で与えた。このような流出解析結果を用いて、濁度計算を行うこととする。

4.2 濁度の計算方法

濁度計算モデルを構成するにあたり、次のような仮定を置く。

- (1) 表面流は、等流と見なせる。
- (2) 侵食率は掃流力と土地利用状況の関数として与えられる。
- (3) 濁質流量は洪水流量と共に洪水波で下流へ伝播する。

幅B、長さLの流路（図-4参照）の濁度計算を次の通りに行う。

まず、有効降雨は格子点だけに降り、格子点間の流れは広幅矩形断面のkinematic waveとして下流へ伝播するものとする。流路の勾配I、長さL、幅B、粗度nが判れば、(4.1)式で求めた流量 $Q_{i,n}(t)$ の、下流への伝播時間Tは式(4.2)で求められる。したがって、下流端の流量 $Q_{o,n}$ は式(4.3)で計算される。

上流からの濁質流量を $Q_{s,o}$ とし、流路の土地利用状況は上流格子点におけるものと同一とする。濁質生産量の計算では、まず水深を、流路始点の流量 $Q_{i,n}$ を使い、式(4.4)のように計算する。ついで、掃流力 τ が式(4.5)で、侵食率 q_e が式(4.6)で求められる。式(4.7)で流路始点の濁質流量 $Q_{s,i,n}$ を計算し、流量と共に下流へ伝播させる。下流端濁質流量 $Q_{s,o,n}$ は式(4.8)で決定される。

流出解析から求まる流量 $Q_{o,n}$ は直接流出成分であり、上の一連の計算から求まる $Q_{s,o,n}$ はこれに対応する濁質流量である。実際の流量は、これに基底流量 Q_b を加えたものであり、それに対応して、実際の濁質流量も基底部分を加えなくてはならない。そこで、基底流量に対応する基底濁質流量を $Q_{b,n}=C_b Q_b K$ として加える。このようにして、式(4.9)で濁度を求めることとなる。

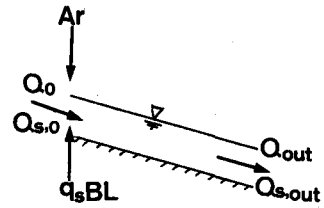


図-4 一本流路での濁度計算

$$Q_{i,n} = Q_b + Ar \frac{0.001}{3600} \quad (4.1)$$

$$T = \frac{3 n^{0.6} B^{0.4}}{5 I^{0.5} Q_{i,n}^{0.4}} L \quad (4.2)$$

$$Q_{o,n}(t+T) = Q_{i,n}(t) \quad (4.3)$$

$$h = \left(\frac{n Q_{i,n}}{B I^{0.5}} \right)^{0.6} \quad (4.4)$$

$$\tau = WhI \quad (4.5)$$

$$q_e = a \tau^b \quad (4.6)$$

$$Q_{s,i,n} = Q_{s,o} + q_e B L \quad (4.7)$$

$$Q_{s,o,n}(t+T) = Q_{s,i,n}(t) \quad (4.8)$$

$$C = \frac{Q_{s,i,n} + C_b Q_b K}{K(Q_{i,n})} \quad (4.9)$$

t: 時間(s)
r: 有効雨量(mm/hr)
A: 1格子面積(m²)
 $Q_{i,n}, Q_{o,n}$: 流入, 流出流量(m³/s)
 $Q_{s,i,n}, Q_{s,o,n}$: 流入, 流出濁質流量(g/s)
B, L, I: 流路の幅(m), 長さ(m)と勾配
n: Manning粗度係数
h: 水深(m)
W: 水の単位体積重量(kg m⁻³ s⁻²)
 τ : 掃流力(N/m²)
 q_e : 侵食率(g s⁻¹ m⁻²)
C: 濁度(度)

5. 侵食率について

侵食率は式(4.6)で求められるが、そのためには侵食係数a, 侵食指数bの値を必要とする。実測濁度と計算濁度とが良好一致を示すように、aとbを以下の方法により同定する。

5. 1 侵食指数bの決め方

bは濁度の波形を決めるパラメーターである。値が小さすぎると、計算濁度はピークを過ぎても、なかなか減衰しない。また、これが大きければ大きいほど計算濁度ピークが尖って来る。

(1) 理論的なbの範囲

幅B, 長さLの流路内で、流れが等流状態で、濁度が平衡状態に達した時、流量と濁質流量は式(5.1)と式(5.2)で与えられる。それ故、濁度と水深の関係は式(5.3)のようになるから、Cがhの増加と共に増大するためには、 $b > 5/3$ でなくてはならない。

(2) 実測から見るbの範囲

実測濁度Cと実測流量Qの関係を式(5.4)の形で表すと、bと β の関係は式(5.5)で与えられる。図-3の回帰分析結果から、 β の値は1.12~1.79であり、対応するbは3.53~4.65である。

理論的考察と実測結果とから、bは $5/3 \sim 4.65$ の間で探するのが妥当であろう。

5. 2 侵食係数aの決め方

侵食係数aは、実測濁度のピーク C_{max} （発生時刻は t_{max} ）の値を用いて、次のように決定する。

森林、荒地、田畑及び河道の侵食係数aをベクトル $a=(a_1, a_2, a_3, a_4)$ とおき、ある地点における、ある洪水に対して、ピーク値が次の四種類の合計として与えられるものとする。すなわち、

- 1) 森林からの濁度だけの計算： $a=(1, 0, 0, 0)$ とした時、 t_{max} 時刻の濁度C1が得られる。
- 2) 荒地からの濁度だけを計算： $a=(0, 1, 0, 0)$ とした時、 t_{max} 時刻の濁度C2が得られる。
- 3) 田畑からの濁度だけを計算： $a=(0, 0, 1, 0)$ とした時、 t_{max} 時刻の濁度C3が得られる。
- 4) 河道からの濁度だけを計算： $a=(0, 0, 0, 1)$ とした時、 t_{max} 時刻の濁度C4が得られる。

実測濁度ピーク値 C_{max} は、この四種類の土地利用の寄与分の合計であり、式(5.6)となる。

更に、 $\theta_1 = \frac{C_1}{C_{max}}$, $\theta_2 = \frac{C_2}{C_{max}}$, $\theta_3 = \frac{C_3}{C_{max}}$, $\theta_4 = \frac{C_4}{C_{max}}$ と置くと、式(5.6)は式(5.7)と表現される。

流域内のM箇所でN回出水の濁度観測データがある場合、式(5.7)を $(M \times N)$ 本作ることが出来る。未知数は a_1, a_2, a_3, a_4 の4つしかないので、最小自乗法で式(5.8)のFを最小にするような解を求める。

流域の特性を見ると、赤川の富士見橋流域では荒れ地が81%、松川の松川橋流域では森林が85%を占める。この2地点とも田畑や河道の割合が少ないので、 a_1 と a_2 をこの2地点の観測資料から求める。その後、この値は他地点にも適用できると仮定し、他地点の観測データから a_3 と a_4 を求めるものとした。ここでは、 a_3 と a_4 が同じであると仮定して同定した。

5. 3 侵食係数aと侵食指数bの同定結果

b=2.3, 4.5と置き、上述の方法でaを求め、表-3にまとめた。

どのbの結果が良いかを判断する為に、式(5.9)と式(5.10)に示されている誤差基準 J_1 と J_2 を設けることとする。ただし、 J_1 を計算するにあたり、赤川の特長性を考慮して、同川で出水初期に生ずる最初の濁度ピークは除外してある。その発生機構が

$$\begin{aligned} \text{流量: } Q &= B h^{5/3} I^{1/2} / n & (5.1) \\ \text{濁質流量: } Q_s &= a (W h I)^b B L & (5.2) \\ \text{濁度: } C &= a W^b I^{b-0.5} \text{Ln} K^{-1} h^{b-5/3} & (5.3) \\ C &= \alpha Q^\beta & (5.4) \\ b &= \frac{5(1+\beta)}{3} & (5.5) \\ a_1 C_1 + a_2 C_2 + a_3 C_3 + a_4 C_4 &= C_{max} & (5.6) \\ a_1 \theta_1 + a_2 \theta_2 + a_3 \theta_3 + a_4 \theta_4 &= 1 & (5.7) \\ F &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (a_1 \theta_{1j} + a_2 \theta_{2j} + a_3 \theta_{3j} + a_4 \theta_{4j} - 1)^2 & (5.8) \\ J_1 &= \left\{ \sum_{j=1}^N (C_{e, max} / C_{max}) \right\} / N_1 & (5.9) \\ J_2 &= \left\{ \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^M C_{e,i} / \sum_{i=1}^M C_i \right) \right\} / N_1 & (5.10) \end{aligned}$$

C, C_{max} : 実測濁度及びそのピーク値
 $C_e, C_{e, max}$: 計算濁度及びそのピーク値
 N_j : 観測された濁度波形の総数, $N_1=39$
 N_i : 各濁度波形の時間長さ

表-3 最適化の結果

	森林 a_1 (10^{-7})	荒地 a_2 (10^{-7})	田畑 a_3 (10^{-7})	河道 a_4 (10^{-7})	J_1	J_2
2	0.30	11.8	0.33	0.67	0.67	1.2
3	0.032	2.20	0.006	0.96	0.96	1.1
4	0.008	0.17	0.00003	0.94	0.94	1.4
5	0.00068	0.0075	4.7×10^{-8}	0.76	0.76	1.1

そのほかのものと大きく異なるからである。 J_1 は計算濁度と実測濁度ピークが合っているかどうかを表すパラメーターで、 J_2 は計算濁質の流出総量が実測総量とどのくらい合うかを評価するパラメーターである。表-3にはそれらの数値も表示してある。この二つの誤差基準が1に近付けば近付くほど、計算値が実測値に近いのであるが、完全には一致しない。試した範囲内では、 $b=3$ の場合に最も良い結果が得られた。

図-5(a)~(d)は、 $b=3$ として、それに対応する最適な侵食係数で再現した濁度の計算結果である。図中の矢印は、流れの方向にしたがって記されており、濁度実測地点の上下流位置関係を示したものである。

第一回観測では、松川筋の松川橋とつり橋とで計算値が実測値を上回り、逆に赤川流域の富士見橋、赤川橋、西根の三地点では計算濁度が実測濁度の三分之一でしかない。本川最上流の沼宮内でも計算値は極めて小さい。このため下流の芋田地点の計算値も小さく、さらに松川との合流後にまで影響が及んでいる。

第二回観測では全体的に比較的良好で、赤川の西根、松川のつり橋及び合流後の古川橋の計算結果が良い。ただし、本川最上流の沼宮内の計算値は依然小さい。田畑の a_3 が主な原因であると考えられる。

第三回観測では、全体的に計算値が実測値を上回り、芋田、啄木、船田での計算濁度ピークの遅れがやや目立っている。この遅れは流出解析における流量ピークの遅れに大きく影響されたものである。

第四回観測では、赤川流域の濁度がよく合っている。ただし、第一ピークの実測値が欠けているため、不確かさが残る。

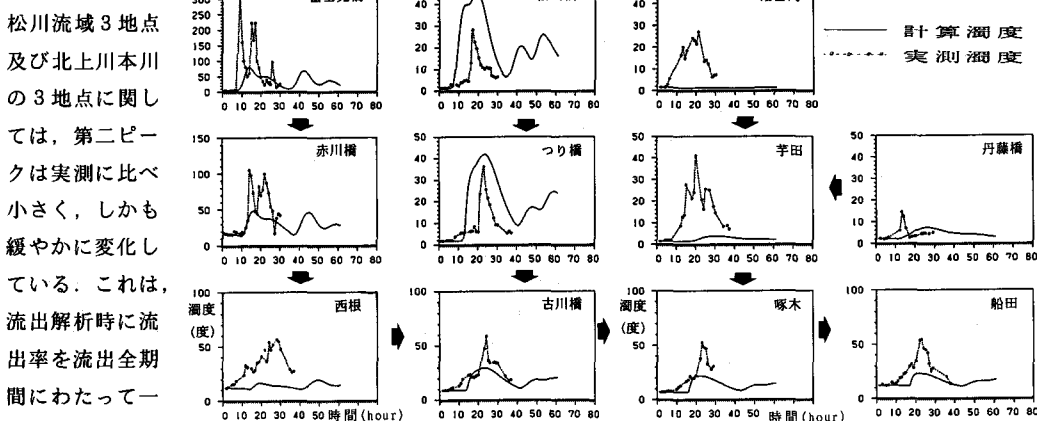


図-5(a) 最適 n と a での濁度の再現結果(第一回観測)

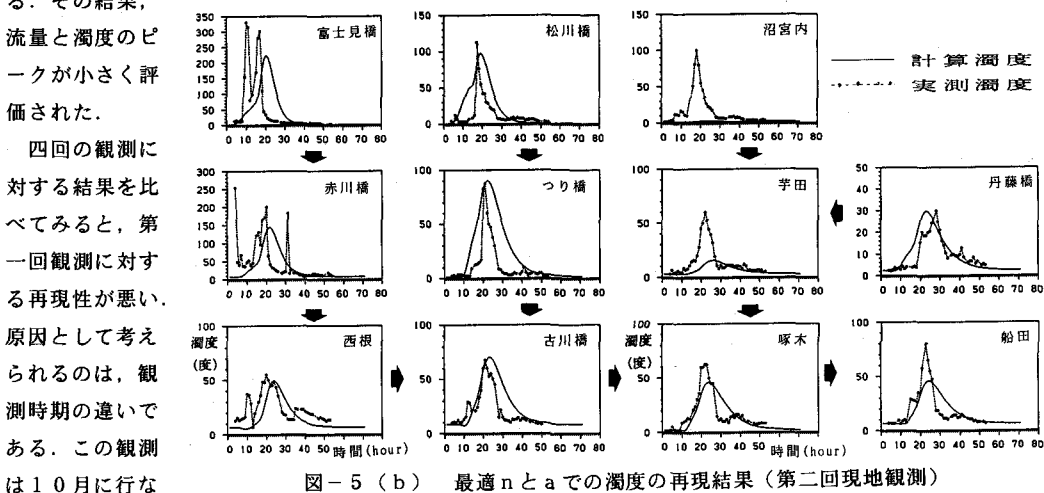


図-5(b) 最適 n と a での濁度の再現結果(第二回現地観測)

われており、他は7月或は8月の出水期である。夏期の出水前は梅雨によって流域が湿潤されるという特徴があるのに対し、秋期の出水前流域は乾燥し、斜面が夏期より風化されている可能性がある。この違いをモデルに取り入れていないので誤差が大きくなったものと考えられる。言い替えると、aの値には土地利用状況の他に、気候状況が影響するということであろう。

6. 結論

国土数値情報から得られる擬河道網を用いた濁度計算モデルを作成した。流出解析結果を踏まえ、流量計算と同時に各流路の掃流力 τ を計算した。さらに、侵食率 $q_s = a\tau^b$ と置き、実測濁度と計算濁度が合うように侵食係数aと侵食指数bを同定した結果、 $b=3$ であり、aは土地利用別に違い、次のような値となっている。

森林	$a_1 = 0.032 \times 10^{-7}$
荒地	$a_2 = 2.20 \times 10^{-7}$
河道と田畑	$a_3 = 0.006 \times 10^{-7}$

しかし、秋期を対象とした計算結果は実測値との差が大きかった。これは、土地の湿潤状況の差を考慮しなかったことによるものと考えられる。また、流出率を一定としたことによる影響もある。今後、これらの点を改善する必要がある。

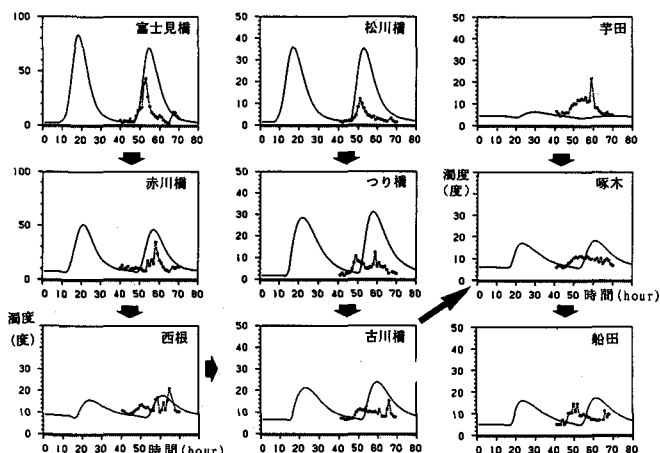


図-5(c) 最適nとaでの濁度の再現結果
(第三回観測、沼宮内、丹藤橋欠測)

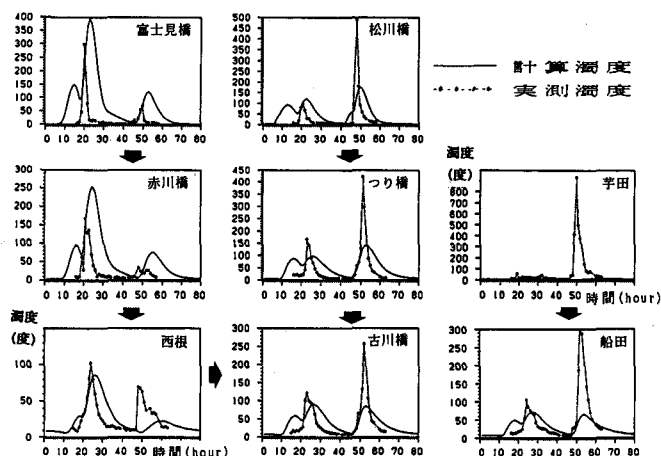


図-5(d) 最適nとaでの濁度の再現結果(第四回観測)
(第三回観測、沼宮内、丹藤橋、啄木欠測)

謝辞：本論文の公表に際し、小川基金の補助を受けた。流量と雨量データは北上ダム統合管理事務所に提供して頂いた。ここに記して深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 長沢徹明他：濁度計による河川浮遊土砂量の推定，農業土木学会論文集，Vol. 125, pp. 81~87, 1986.
- 2) 芦田和男・江頭進治・金屋敷忠儀：斜面侵食による濁度物質の生産・流出機構に関する研究，第24回水理講演会論文集，pp. 134~141, 1980.
- 3) 田村廣文・首藤伸夫：北上川上流域における流出と濁質発生量の解析，第31回水理講演会論文集，pp. 179~184, 1987.
- 4) 張旭紅・首藤伸夫・石川忠晴：国土数値情報を用いる流出及び濁質発生量の解析，水工学論文集，第36巻，pp. 665~670, 1992.