

この他、船田橋上流域を一地域として解析する場合(ケース D)には、流出率を累加雨量及び初期流量の関数として表現する方法をも使用した。⁴⁾ 図-3がこの関係を示す。図中の線は2本に分岐しているが、累加雨量40mmの点から上方へ分岐しているのが初期流量40m³/s以上の場合、下方の線がそれ以下の場合である。上流域の4支川の各流域は、流域条件が異なり、また、洪水毎の降雨分布の差の影響を受けて流出が変化するので、なるべく4支川毎に流出計算を行って、その和としての船田橋地点流量を求めるのが望ましい。しかしながら、各支川毎の流量観測所が存在しないので、図-2, 3のごとき関係を実測値から作成できないと言う欠点も存在する。

そこで、

(E) 各小流域毎に f は、常に一定であるとし、一定比損失の考えによって有効雨量を算定する。ただし、この f は、貯留関数法の k, p, T_1 と共にSDFP法で決定する、

(F) 各流域毎に 図-2 の様な関係があり、その f_1, f_2, R_{90} を貯留関数法の k, p, T_1 と共にSDFP法で決定する、
という事とした。

さてSDFP法を適用する場合の評価関数 J として

$$\text{基準 (a)} \quad J = \sum (Q - Q_c)^2 / Q$$

$$(b) \quad J = \sum (Q - Q_c)^2$$

$$(c) \quad J = \sum (Q - Q_c)^2 / Q^2$$

$$(d) \quad J = \sum (Q - Q_c)^2 / Q_{\max}$$

の4種類を考える。ここで、 Q は実測流量、 Q_c は計算流量、 $Q_{\max}$ は対応する出水の実測最大流量である。

どの評価関数が最適であるかの検定を最初に行った。この検定には4小流域に分けた場合を対象として、小洪水時について実施した。小洪水を選んだのは、

(i) 小洪水時では R_{90} を越える事が無く、 f_1 のみを考えれば良いので f 一定として取り扱え、

(ii) 後の解析でも判る通り、 k, p, T_1 も一定として取り扱う事が出来る、
ので条件が簡単となるからである。

それぞれの評価関数を使用し、20回繰返し計算した時の誤差の絶対値の和 ($\sum |Q - Q_c|$) の変化を調べた。

基準(c) の場合には、計算を繰返すと J 値が発散する事があり、採用できない。(a), (b), (d) は、何れ

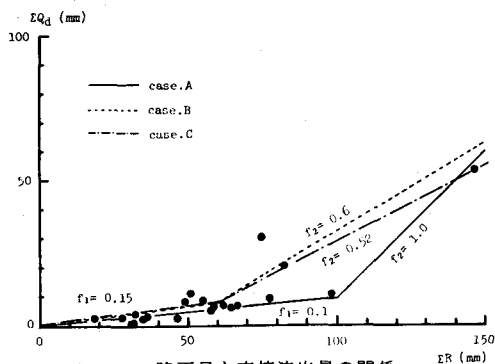


図-2 降雨量と直接流出量の関係

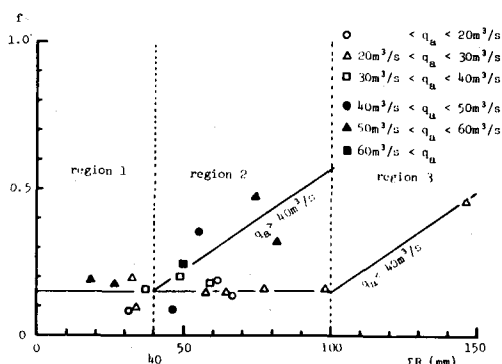


図-3 初期流量による流出率と降雨量の関係

表-1 流出率および同定された諸常数

	ケース	f 1	f 2	RSA	K	P	T 1	
一 流 域 と し た 解 析 船 田 橋 上 流 を	A	0.10	1.00	100	12.0	0.98	2.5	
	B	0.15	0.60	60	13.6	0.92	1.8	
	C	0.15	0.52	60	13.8	0.86	1.7	
	D	領域 1	0.15			12.9	0.95	3.5
		領域 2	0.15			6.6	0.62	2.9
		領域 3	0.15+0.007(Σ t-40)			33.4	0.99	3.3
	領域 3	0.15+0.007(Σ t-100)			28.21	0.40	1.8	
四 小 流 域 に 分 割 し た 解 析 船 田 橋 上 流 を	E	赤 川	0.45		15.1	0.30	2.9	
		松 川	0.39		15.3	0.32	3.8	
		北上川	0.04		21.3	0.35	3.1	
		丹那川	0.25		17.9	0.32	3.1	
	F	赤 川	0.30	0.61	40.4	16.7	0.79	2.9
		松 川	0.34	0.46	30.6	14.1	0.60	2.9
		北上川	0.01	0.10	35.8	29.5	0.38	4.2
		丹那川	0.10	0.52	62.4	23.1	0.52	3.9

も2回目以降
の変化は少な

いが、特に
(d) が良好な
結果を与えた。

以上の評価
関数で、モデ
ル定数を求め、
流出解析をお
こなった結果、
大出水時でも、
小出水時でも、
小流域に分割した方が、一般的に合致度が良かった。

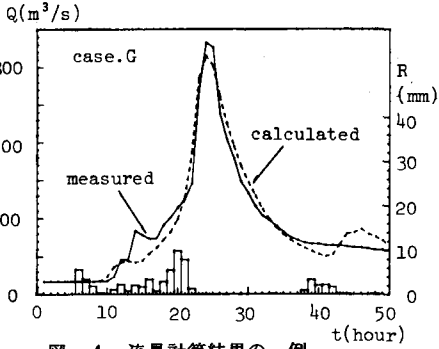


図-4 流量計算結果の一例

20洪水全体に対して合致度を改良する為に、

(G)小流域の f_1, f_2, R_{so} は流域毎に異なる常数、 k, p, T_1 は流域毎に洪水規模毎に変化する常数、と考える。中小洪水の境界の流量 Q_1 、中大洪水の境界 Q_2 もSDFP法で定める、という方法をも採用した。これで得られた諸常数を表-2に示す。

ケースG による流量計算結果の一例を図-4に示す。前の諸法に比べ、改善された結果となった。

さて、20洪水全体についての、各方法の良否を検討する為、計算誤差の比較を行った。E1として誤差の絶対値の総和、E2として各洪水の実測ピークで規格化した誤差の絶対値の総和を採用する。その結果を表-3に示す。全体としてケースGのE2が最小となり、最も良い合致度を与える事が判る。

4. 濁度の現地観測結果

船田橋地点では出水時の濁度現地観測を昭和59年、60年に於て合計8回実施した。上流各支川毎の濁度現地観測は60年に2出水、平常時には40回以上行っている。

図-5に、船田橋地点での流量Qと濁質負荷量 Q_s との関係を示す。各出水毎の両者に、 $Q_s=C_sQ^m$ の関係を想定すると、 C_s は 10^{-6} から 10^{-2} の範囲、 m は2.4から6迄の範囲にばらつき、しかも出水によっては、水位上昇期と減衰期とは別の曲線となるループを描く。これらを無視し全観測値を平均した回帰式を求めると、

$$Q_s=4.53 \times 10^{-2} \times Q^{2.52} \dots\dots\dots (3)$$

と表す事が出来る。こうした平均的な式を用いると、最大の誤差は5倍以上となる事がある。

図-6は赤川、松川、北上川（北上川と丹藤川合流後）の三支川について $Q-Q_s$ 関係を示したものである。各支川に対応する流量の実測値は存在しないので、合流後の船田橋で観測

		支川名	K	P	T1	f1	表-2		
小洪水		赤川	10.42	0.53	4.02	0.20	g ケース 諸常数		
		松川	7.78	0.69	4.10	0.20			
		丹藤川	10.60	0.45	3.10	0.10			
		北上川	11.05	0.43	4.03	0.15			
		支川名	K	P	T1	Rsa1	f2	Q1	
中洪水		赤川	9.61	0.47	3.28	33.30	0.32	0.26	
		松川	7.63	0.66	1.81	43.68	0.28	0.51	
		丹藤川	13.38	0.55	3.10	34.34	0.13	0.10	
		北上川	12.25	0.48	3.66	32.53	0.17	0.17	
		支川名	K	P	T1	Rsa2	f3	Q2	
大洪水		赤川	9.23	0.75	3.18	57.00	0.60	1.16	
		松川	7.47	0.84	1.78	77.00	0.45	1.13	
		丹藤川	17.78	0.88	3.10	76.07	0.49	0.42	
		北上川	14.17	0.71	3.66	68.42	0.40	0.52	

表-2
G ケース
諸常数

表-3 計算誤差の比較

CASE	条件	誤差	
	入力(降雨)	E1	E2
A	全流域の 平均値 (つまり、 流域を一つ と見なして いる。)	127.8557	0.4529
B		127.0498	0.6644
C		122.1884	0.5621
D		102.6311	0.3315
E	4支川に 分離した値	109.8082	0.3265
F	(つまり、 流域を四つ に分けて いる。)	94.9685	0.3026
G		90.8157	0.2740

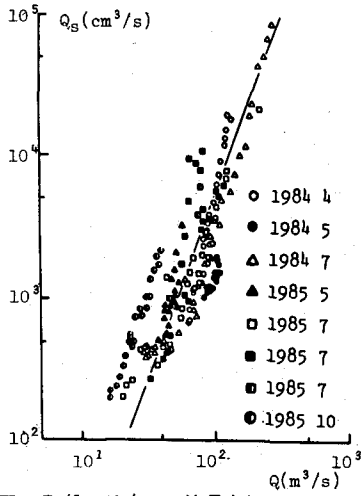


図-5 船田地点での流量と濁質負荷量の関係

された流量を流域面積で配分して使用した。大出水時には支川毎の流出が大きく違う場合も有り得るが、平常時の観測値が主であり、又他に良い手段も無い為、やむをえず上記の様な処置を取った。この図から明らかな様に、赤川は他の2支川と趣を異にする。特に、 $17\text{m}^3/\text{s}$ 以下に於て赤川の濁度が極めて大きい。それ以上の流量については、資料数が少ない事もあって、他2川との差が明確ではない。図中の直線がそれぞれに対する回帰式であり、次の様に与えられる。

$$\begin{array}{lll} \text{北上川・丹藤川} & Q_s = 0.015Q^{3.25} & \cdots \cdots (4) \\ \text{松川} & Q_s = 0.020Q^{3.80} & \cdots \cdots (5) \\ \text{赤川} & Q_s = 0.145Q^{2.25} & Q > 17\text{m}^3/\text{s} \\ & = 12Q & Q < 17\text{m}^3/\text{s} \\ & & \cdots \cdots (6) \end{array}$$

平常時の赤川は、肉眼でも他支川との差が明らかである。河床の際に付着した微細土粒子の量が多く、赤川松川合流点では、両川の濁度に大きな差の在る事が認められる。

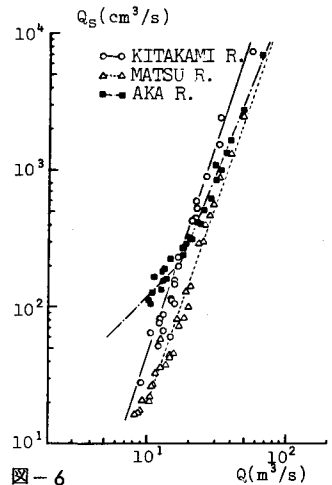


図-6 三支川の流量と濁質負荷量の関係

5. 濁度の解析

濁度解析に当たり、3節で行った流出解析の結果を使用するが、最も実測値を良く表し得たケースCの手法を使用する事とする。これによれば、他支川と性質の異なる赤川の特性を考慮する事も容易である。

5-1 実測により得られた回帰式の使用

まず、流量を算出し、得られた各地点の流量の時間的変化を、回帰式を使用して濁質負荷量の時間的変化に変換し、これを濁度の時間的変化に換算する。図-7に船田橋における実測値と計算値との比較を示す。船田橋の濁度を求めるには、ケースCによってえられた各支川流量の和として船田橋の流量を定め、船田橋の回帰式に基づいて、同地点の濁度にする方法（図中点線）と、各支川の計算流量に対し各支川の濁質負荷量を算出しこれの和として与えられる船田橋地点の濁質負荷量を濁度に換算する方法（図中実線）とを採用した。図-7によると何

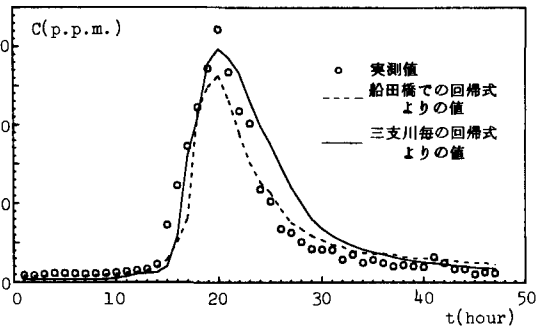


図-7 回帰式による結果

（図中実線）とを採用した。図-7によると何れの方法でも実測値と大差の無い結果が得られるが、ピーク付近では、実線が、それ以降は点線がよく実測値とあっており、必ずしも各支川毎の濁度を考慮したものが良い結果を与えているとは限らない。

5-2 土地利用形態及び地形を考慮した解析⁵⁾

降雨時に流出する濁質は、河床堆積物の侵食、流域の表面侵食等が主な発生源と考えられる。流出初期には河床堆積物からの発生が重要であろう。特に対象とした流域中、赤川筋の河床際には大量の微粒土粒子が付着して居り、これが洪水初期に洗い流され

表-4 土地利用形態別面積比 (%)

	住宅地	田 畑	森 林	荒地
赤川	1.3	36.7	57.0	5.0
松川	2.8	19.7	68.8	8.7
北上川	1.7	17.7	79.4	1.2
丹藤川	0.6	6.6	84.9	7.9

て主要な発生源となる事が予想される。しかし、その後は流域全体からの発生の方が主となり、土地の勾配、土質や地質、利用形態等により、発生量が支配されるに違いない。

今、上流4支川の土地利用形態、それぞれの面積率を調べると、表－4の通りであった。使用した地形図等の縮尺は20万分の1である。何れの地域においても、森林の占める割合が50%以上となっている。濁質負荷量の発生に最も関係があると思われるのは、田畑と荒地であるが、この両者の和は赤川流域で大きく、他流域よりも10%以上大きい割合となっている。

こうした状況を、濁質発生量の推定に取り入れる為に、次の様な仮定を置く。

- (i) 表面流は等流と見なせる。
- (ii) 侵食量は剪断力及び植生の関数で与えられるが、その大きさは各小流域毎に異なる。

有効雨量frが付け加わる事により、斜面の下流に行くほど、流量は増加する。すなわち連続の式は

$$\frac{\partial (hv)}{\partial x} = fr$$

である。ここで、hは水深、vは流速である。この積分を行う際に、仮定(i)によりシェージーの式が成立するとして、流速を水深で表現する。等流状態での剪断力は斜面勾配Iを使用し、更に上記積分の結果を代入して、次の様に与えられる。

$$\tau = whI = w(fr x / CI^{-1/2})^{2/3} I = C' (fr I x)^{2/3} = C' (q_D I x)^{2/3}$$

ここで、qDは直接流出となる有効雨量である。単位面積当りの侵食量qSは仮定(ii)により

$$q_s = a \tau^n$$

1 斜面当りの侵食総量Qsはこれに斜面幅B(x)を掛けて斜面長lだけ積分すれば良い。その結果、

$$Q_s = aA(q_D I l)^{2n/3}$$

の様に面積A、勾配I、斜面長l、有効雨量qDによって表す事が出来よう。ここで、aはこれから決める常数である。

実測値からも明らかな様に、流量の増大期と減少期とでは濁質負荷量の生産に差が存在する。これを表現する為に、減少期における侵食総量は減衰常数Xを使用して次の様に与える。

$$Q_s = aXA(q_D I l)^{2n/3}$$

ある小流域からの全侵食総量は、ある有効雨量qDに対し、上昇期には

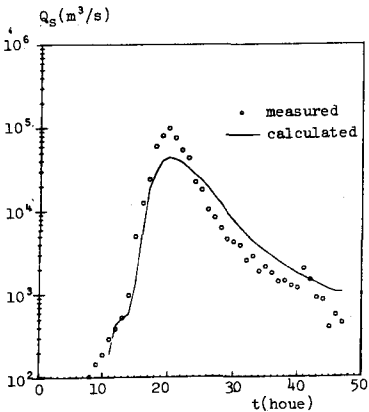
$$Q_s = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{m_i} a_i (q_D I_{ij} l_j)^{n_i} A_j$$

で与えられる。ここで、iに関する和は4種類の土地利用形態の別により、異なった常数となる事に対応し、jに関する和はその小流域内での面積素子数m_iに関する和を意味している。

ここで、a_i, n_iが未定の常数であるが、減少期には更に減衰係数X_iが付け加わる。これらの常数は、最適化法SDFP法によって求める事とした。得られた結果を表－5に示す。こうして得られた常数の利用形態毎の差はそれほど大きくは無いが、田畑や荒地が大きい値を持つという傾向はあり、比較的実現象に対応して居る様である。計算結果と実測値の比較を図－8に示す。回帰式を使用した結果よりは

表－5 同定された土地利用モデルの諸常数

	住宅地	田 畑	森 林	荒地地
a	0.050	0.058	0.055	0.057
n	1.50	1.81	1.70	1.76
X	0.60	0.57	0.60	0.60



図－8 土地利用モデルによる結果

全体的に改善されたものの、ピーク以後の減水期における一致度があまり良くなく、減衰係数 X_i を入れた効果が十分では無かったと考えられる。

6. おわりに

対象とした地域は、ほぼ似通った流域面積を有する4支川より成り立っている。奥羽山系から2支川、北上山系から2支川が流入している。この両山系は、地質的にはかなり異なっており、流出する土砂量や濁度に大きな差があると云われている。奥羽山系から流入する赤川はこの中でも特殊とされる。このような状況に対し、降雨による流出も、それに伴う濁質発生も、各支川毎に異なるとして推定する方法を検討した。

流出解析としては、4流域に分割し、流域毎洪水規模毎に貯留関数法の常数 k, p, T_i を変化せしめる方法Gが良い結果をあたえた。濁質の発生については、土地利用形態を取り入れたモデルを想定した。ここで決定すべき常数は、比例常数 a 、指数 n 、減衰期の減衰常数 X である。

諸常数はSDFP法により決定した。

濁度発生に関係する常数は、土地利用形態による差はそれ程大きく現れなかったが、田畑、荒れ地、森林、住宅地の順となった。

謝辞

実測に当たり東北大学土木工学科河川水理研究室の諸君の協力を得た。資料に関しては、建設省北上川ダム統合管理事務所の御好意を頂いた。又、数値計算にあたり、後藤智明博士（現運輸省港湾技術研究所）の指導を頂いた。以上、ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省水文研究会編 「流出計算例題集2」
- 2) 永井明博・角屋 睦：流出モデル定数の最適化手法，京大防災研年報 22B-2, PP. 219-224 (1979)
- 3) 角屋 睦・永井明博：流出解析手法（その11），農業土木学会誌 第48巻 第11号
- 4) 日野幹雄・長谷部正彦：流出率と潤滑指標としての洪水直前流量，土木学会論文報告集 第328号
- 5) ミロス・ホリー著 「侵食」