

河川計画調査 (H2～)

-----雨量レーダを考えた流出モデルの検討-----

開発土木研究所 河川研究室

1. はじめに

我が国では従来より地上雨量計による降雨観測資料を用いて河川計画策定や洪水予測、渇水予測などの治水・利水計画に利用してきた。しかしながら、流域の水資源の見積もりや洪水予測を行なう場合、 100km^2 に数個の地点雨量計では流域全体の降雨量を把握するには十分でなく、高精度で水文量の推定を行なおうとするとき問題が多い。レーダー雨雪量計はこうした地点雨量計の欠点を補うために全国で整備が進められ、現在北海道では4基が計画され、道央、道南レーダーの2基が運用を開始している。道内における既設2基のレーダー雨雪量計の観測能力は、定性観測半径約200Km、定量観測半径約120Kmの範囲のエリアをカバーし、5分毎、3kmメッシュ単位での雨量強度を提供するものである。こうした高密度な情報を今後利用していくとき、流出計算手法も雨域の構造を考慮したより高度なシステムへと転換していく必要がある。

ここでは国土地理院発行による国土数値情報により流域を数値化し、土地利用状況や地質など、他の国土数値情報ともリンク可能な流出システムの構築を試みた。また、流出システムの細分化により、降雨の観測時間スケールも変化させる必要があり、対象とする流域面積と降雨観測時間との関係において周波数応答の観点から吟味を加えた。

こうした点を考慮して本編ではメッシュ単位で降雨条件を入力可能な分布型流出モデルの1つを提案し、雨域を種々変化した場合の流出形態についてシミュレーションを行ない、考察を加えた。

2. 国土数値情報を用いた流域情報の数値化

雨域を考慮した流出システムを構築するとき、流域をいかなる手法で分割するかが問題となる。つまり流域分割を人間の主観で行なうか、機械的に行なうかの違いである。一方はいわば手作業のため非常に労力を要し、他方は一定のアルゴリズムでの電算処理が可能なため、極めて短時間に処理が可能となる。また、後者の手法が合理的であれば他の流域にも容易に適用可能となり、国土数値情報で整備された種々の情報とのリンクが可能となりそのメリットは大きい。

したがってここでは国土数値情報を利用した流域情報の数値化を試み、再構築された河道網の幾何学的特性を検討する。

(1)、国土数値情報 [1] は地形、標高、土地利用、公共施設、道路、鉄道、行政界、都市計画区域等の国土に関する地理的情報を座標値やメッシュ単位で数値化し、磁気テープ等に記録したものである。特に、標高データは1/4メッシュ(約250mメッシュ)毎に整備されており、3次メッシュ(約1Kmメッシュ)内を16分割し、250mメッシュの左下隅の標高をとっている。国土数値情報は経緯度1度のメッシュから細分化しているため、北海道の様な高緯度地域ではメッシュを構成する辺は低緯度地域よりも若干短い。

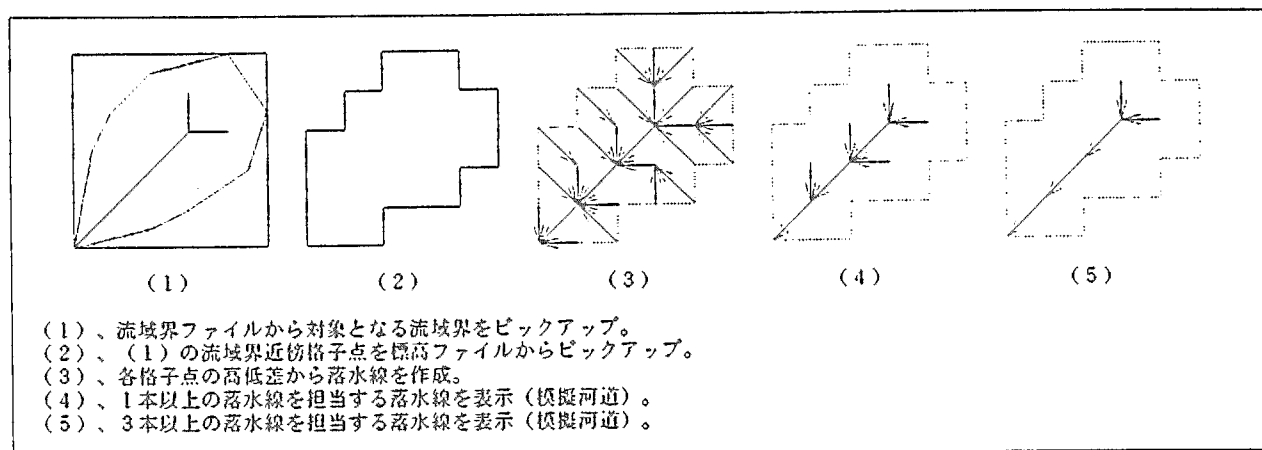


図-1 模擬河道の発生手法



図-2 国土数値情報の河道・流域界位置

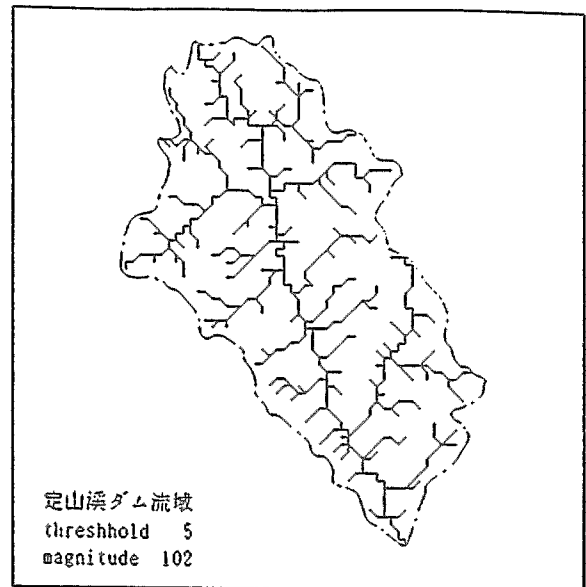


図-3 250mメッシュ模擬河道形状

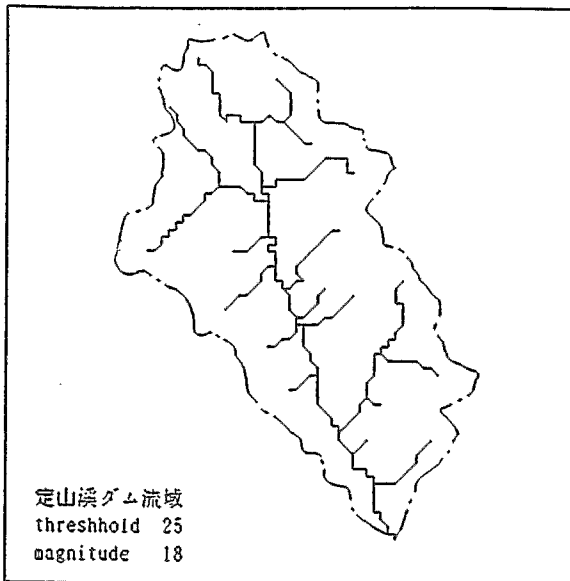


図-4 250mメッシュ模擬河道形状

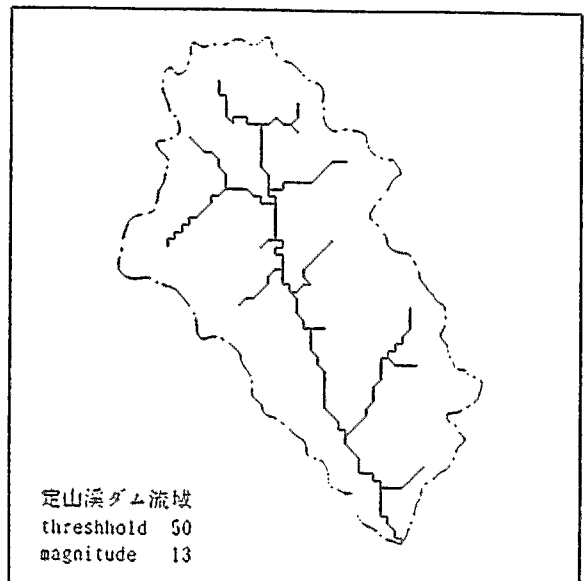


図-5 250mメッシュ模擬河道形状

表-1 実河川と模擬河道の諸元比較

河川名	北海道河川一覧		国土数値情報(誤差%)	
	A(km ²)	L(km)	A(km ²)	L(km)
留萌川	273.4	43.5	274.24(+0.31)	42.78(-1.66)
尻別川	1631.7	125.7	1606.31(-1.56)	118.44(-5.78)
後志利別川	722.9	80.1	705.15(-2.46)	75.24(-6.07)
鶴川	1240.9	135.0	1230.23(-0.86)	130.85(-3.07)
沙流川	1337.2	103.8	1325.65(-0.86)	106.03(+2.15)
渚滑川	1235.0	83.6	1245.90(+0.83)	71.14(-14.9)
湧別川	1458.1	86.7	1511.58(+3.67)	91.76(+5.84)
常呂川	1902.8	20.2	1925.78(+1.21)	121.02(+0.68)
網走川	1367.3	93.6	1386.39(+1.40)	91.27(-2.49)
釧路川	2357.6	154.1	2486.76(+5.48)	138.00(-10.5)

(2)、流域情報の分離手法の概要

- a、国土数値情報流域界データ(座標値)を用い、流域界に近い格子点で流域を分離する。
 - b、格子点間の標高差により落水線を作成する。落水線とはある格子点に落下した雨水が周りの8個の格子点のいずれかに落下するかを表わしたもので、落水線がループや交差をしないよう整理する必要がある。
 - c、一定数以上の落水線を担当する落水線を河道と定義すれば、疑似河道網を作成できる。さらに河道に連結する流域面積をリンクしているメッシュ数の合計で自動的に与れば、種々の河道網規模に応じた小流域の再配置が可能となる。
- 以上が疑似河道網の発生手法の概略である。また、概念図を図-1に示す。

図-2は豊平川上流小樽内川の流域界と流路位置を国土数値情報を用い、上記の手法により表示したものである。上記a,b,cの手順を経て作成された疑似河道網(図-3、4、5)は現実のそれに極めて近似しているといえる。

表-1は藤田[2]らによって全道10河川を対象として実施された、国土数値情報を元に再構築された模擬河川流域と実河川流域との諸元の比較である。一部、湖沼を通過する河川の再現性が若干悪いほか、その他については再現性は実用上充分である。

以上の成果を踏まえ、国土数値情報による河川流域の再現はほぼ可能であると考えられる。

2、流域スケールと降雨観測時間

1級河川流域の様な大きな流域を対象としてみると、降雨現象は短時間の変化が大きいかかわらず、流出現象そのものは比較的穏やかであり、一種のローパスフィルターと見なすことができる。しかし流域を細分化する場合、つまり、扱う流域が小さくなればほど、降雨変化の流出に与える影響が無視できなくなる恐れがある。ここでは流出システムを貯留関数として表現し、流域スケールと降雨観測スケールの関係を概略検討した。

(1) 時間スケール

サブ流域からの流出を貯留関数法で求める場合を考える。

$$K' p q^{p-1} \frac{dq}{dt} + q = r(t) \quad (1)$$

ここで、 K' ; 貯留係数、 p ; 貯留係数、 q ; 流出高、 r ; 雨量、 t ; 時間

今、式(1)を簡素化して $p=1$ とすると、式(1)は線形微分方程式になり、貯留係数 K' は時定数に一致する。

$$K \frac{dq}{dt} + q = r(t) \quad (2)$$

式(2)の周波数特性(ゲイン~周波数)は容易に求まり、次式で与えられる。

$$G = \frac{1}{(1 + K^2 \omega^2)^{0.5}} \quad (3)$$

G はゲイン(利得)を表わしている。式(3)の意味するところは、降雨量 $r(t)$ に次の周期関数を(2)式に与えたとき、

$$r(t) = A \sin(\omega t) \quad (4)$$

となる。また十分に時間が経過したときの(2)式の解が次の様になり、入力と出力の比が G となることを表わしている。

$$q(t) = A' \sin(\omega t + \phi) \quad (5)$$

図-6は時定数 K を変化させて $G \sim \omega$ の関係をプロットしたものである。 G は ω の関数となっている。実際の降雨が種々の降雨成分から構成されているものとして次式を仮定し、時定数 K は既知とする。

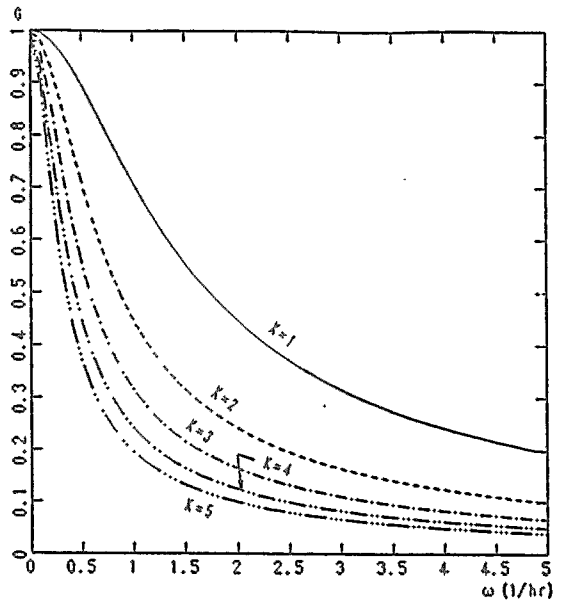


図-6 線形システムのゲインと周波数

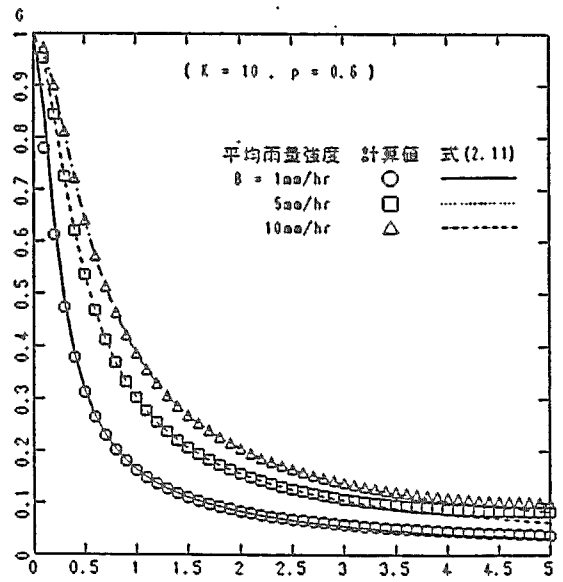


図-7 非線形システムのゲインと周波数 ω (1/hr)

$$r(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \sin(\omega_i t) \quad (6)$$

図-7による高周波の入力ほど出力における減衰が大きいので、全ての周波数の入力を考える必要が無い。例えば、考慮すべき限界のゲインを G_c とすると、これに対応する周波数(カットオフ周波数) ω_c は式(3)より次のようになる。

$$\omega_c = \frac{1}{KG_c} (1 - G_c^2)^{0.5} \quad (7)$$

したがって、 $\omega \geq \omega_c$ なる周波数帯の降雨成分は考慮する必要が無いことになる。逆に言えば、入力波である降雨の測定時間間隔は Δt を次式の様にすると良く、これより短い測定時間は無意味となる。

$$\Delta t = \frac{\pi}{\omega_c} \quad (8)$$

実流域においては一般に貯留指数 $p \neq 1$ であり、直接式(3)を用いることができない。 $p \neq 1$ のとき、式(1)は非線形微分方程式となるので、線形微分方程式の場合と異なり解析的に周波数特性を求められない。そこで $r(t)$ を次の様におく。

$$r(t) = A \sin(\omega t) + B \quad (9)$$

$B \gg A$

ここで B は $r(t) \geq 0$ であるような定数である。式(1)の解を次式の様に仮定する。

$$q(t) = A' \sin(\omega t + \phi) + B' \quad (10)$$

式(9)、(10)を式(1)に代入し、微少項を省略して次式を得る。

$$G = \frac{A'}{A} = \frac{1}{(1 + (Kp\omega B^{p-1})^2)^{0.5}} \quad (11)$$

式(11)は近似式であり、その適合度を検討した。(1)式と(9)式の K, p, A, B, ω を設定し、数値計算により $q(t)$ を求め、定常となった時点で(10)式の A' を求める。 K, p, A, B を固定したまま ω を変化させると数値計算で A/A' を求めることができる。図-8はこの結果と式(11)をプロットしたものである。図では式(11)の適合度は十分である。一方、式(11)は K, ω の他に p, B の関数になっているのが特徴であり、 $p=1$ とすれば式(3)に一致する。 $p \neq 1$ のとき、ゲイン G は B の関数になっていることは周波数特性が降雨の平均値にも関与していることを示唆している。

一方、Kinematic Wave モデルより理論的に導出した貯留係数 K は次の様に与えられる。

$$K = \frac{1}{1+p} \{353.6 * 1000^{1/p-2} A^{0.6} / \alpha\}^p \quad (12)$$

ここで、 A : 流域面積 (Km^2), $\alpha: \sqrt{i}/n$, n : 等価粗度係数 (m, sec 単位), i : 斜面勾配。

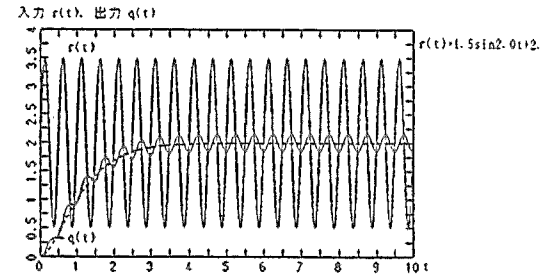
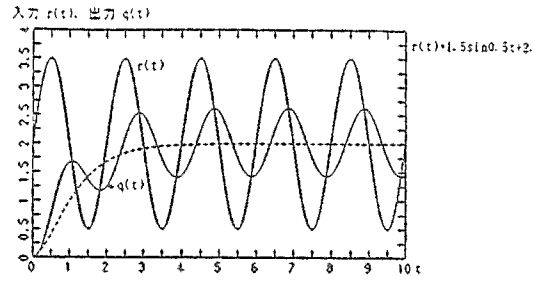


図-8 貯留関数モデルによる非線形システム応答 ($\tau=10, p=0.6$)

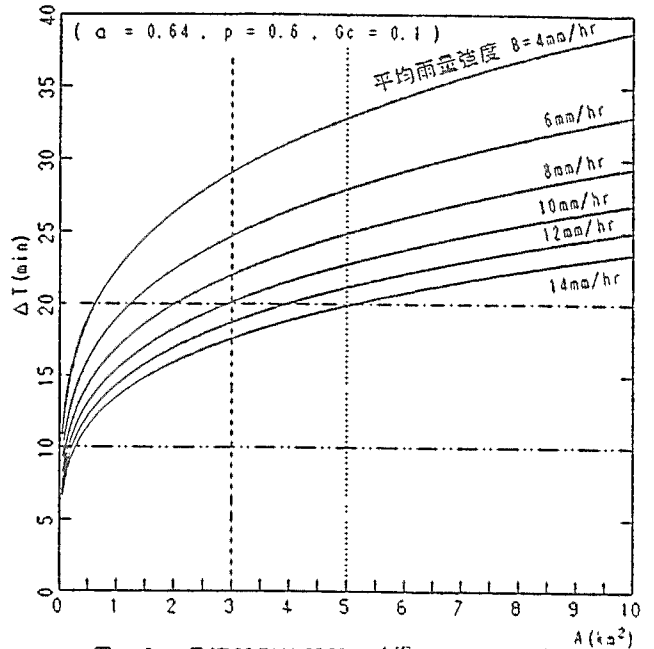


図-9 最適観測時間間隔 ΔT と流域面積 A

式(11)において限界の G_c を求めると、カットオフ周波数 ω_c は次式で求められる。

$$\omega_c = \frac{1}{K_p B^{p-1}} \left(\frac{1}{G_c^2} - 1 \right)^{0.5} \quad (13)$$

また、式(8)を用いると最適の降雨測定時間間隔は次式で与えられる。

$$\Delta t = \frac{\pi K_p B^{p-1} G_c}{(1 - G_c^2)^{0.5}} \quad (14)$$

図-9は代表的な値 $\alpha = 0.64, p = 0.6, G_c = 0.1$ を用いて式(14)を図示したものである。例えばサブ流域の面積が $3(km^2)$ 、平均降雨強度が $10(mm/h)$ ならば、降雨量の観測時間間隔は20分程度にしなければならないことを示している。

3. 分布型流出モデル

一定数以上の落水線を含む領域はサブ流域と見なせるから、個々のサブ流域に降雨を与え、河道で伝播させることにより、流出計算が可能となる。しかし、Threshold値を小さく設定するとサブ流域が増大し、計算時間がかかりすぎる懸念がある。したがってどの程度のThreshold値が妥当なのか検証しておく必要がある。ここではサブ流域からの流出量計算手法として、星[3]によって提案されている次の一般化貯留関数を採用した。それぞれのサブ流域に降雨入力を与え、発生したハイドログラフを河道で伝播させ、合成すれば降雨分布を考慮した流出シミュレーションが実施できる。

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= r - q \\ s &= k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \\ k_1 &= 2.823 f_c^{0.6} A^{0.24} \\ k_2 &= 0.2835 k_1^2 \bar{r}^{-0.2643} \\ p_1 &= 0.6 \\ p_2 &= 0.4648 \\ f_c &= n/\sqrt{i} \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 r ; 降雨量、 q ; 流出高(mm/h)、 A ; 流域面積(km^2)、 \bar{r} ; 流域平均雨量(mm/h)、 n ; 等価粗度係数(m, sec 単位)、 i ; 斜面勾配。

上式中、等価粗度・斜面勾配の関数である f_c 値は唯一測定困難なパラメータであるが、全道小流域の洪水解析例から平均値 $f_c = 1.564$ が得られており、これを用いる。また、各サブ流域からの流出量の伝播速度は本来、河道勾配や川幅により異なるはずである。しかし、ここでは検討の簡単のため山地流域での実測による伝播速度である $1.5(m/s)$ を与えた。降雨は流域総降雨量を $100mm$ とし、流域を上流域、中流域、下流域に分割し、それぞれに時間的・空間的降雨分布を与えた。

図-10に降雨を空間的に変動させた場合のハイドログラフの一例を示す。降雨の時間的変動に関しては、各流域毎に降雨のピーク発生時刻をずらせると、ピーク流出量が最大30%程度の差と、ピーク生起時刻で1時間程度の差が生じることが分かる。

次にThreshold値によるハイドログラフの変化を見るため、降雨波形が全流域で中央集中型、ピーク雨量を $20(mm/h)$ とし、5~50までのThreshold値毎の模擬河道網によるハイドログラフを計算し、一例を図-11に示す。流出量のピーク発生時刻の変化は少ないが、ピーク流出量は分割数の増加(域値の小さいほど)に伴い増大する。しかし、域値が25を超えると計算結果に大きな差は無くなる。この場合のサブ流域の平均面積は約 $3 km^2$ となる。

図-12は横軸に下流端からの河道距離(km)、横軸にその面積を示している。この図は洪水の河道伝播速度が一定であるという条件で考えれば、流域下流端での洪水到達集中図といえる。ここでは、豊平峡ダム流域を併せて示している。これによれば定山溪流域は $10km$ と $20km$ 付近に集中度が高く、特に上流側の集中度が高い。定山溪ダム流域で上流側に降雨の集中があった場合、ピーク流量が増大する計算結果はこうした地形的要因が関与することが考えられる。

4. おわりに

以上、国土数値情報を用いた分布型流出モデルについて述べてきた。モデル条件の設定にまだ不十分な点もあり、今後、用いるパラメータの精度の高い見積もりと、実観測によるフィードバックが必要である。また、流出システムの応答特性から、サブ流域を小さく設定する場合、降雨観測時間ステップも小さくする必要があり、実務上どの程度まで設定するか、今後検討していく必要がある。また、今回提案したモデルは国土数値情報を応用した模擬河道網は他のデータ(表層地質、植生、土地利用等)とのリンクが可能であり、河道網自体の構造を自動的に追跡し、流域全体の幾何学的特性を調査することが可能なため、今後その応用が期待される。

参考文献

[1] 国土数値情報、国土情報シリーズ2、1987

[2] 藤田ら、国土数値情報の水文地形解析への適用について、土木学会北海道支部論、pp.305-310、1989

[3] 星 清；実用的な洪水流出計算法、北海道開発局土木試験所河川研究室、1987

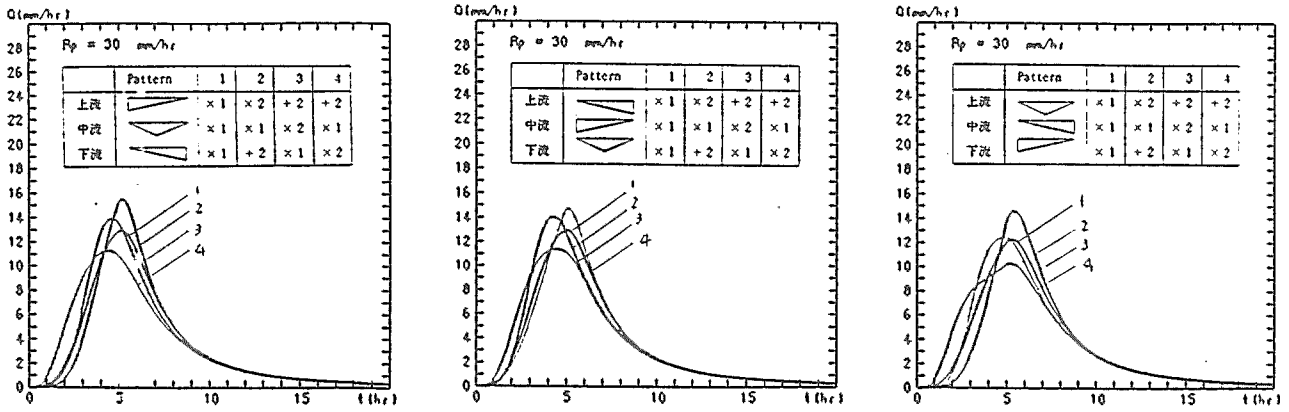


図-10 降雨の空間分布を変化させた場合の流出パターン

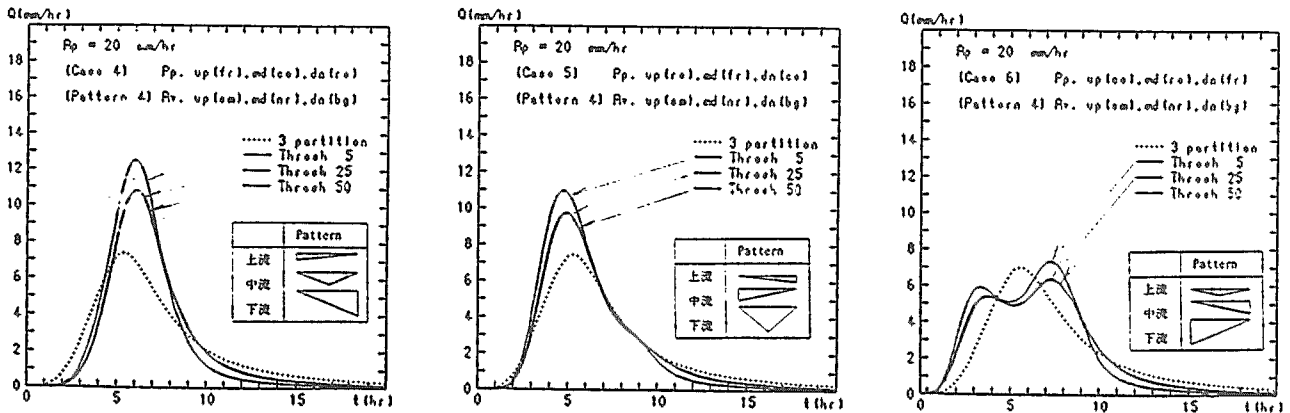


図-11 Threshold値を変化させたときの流出パターン

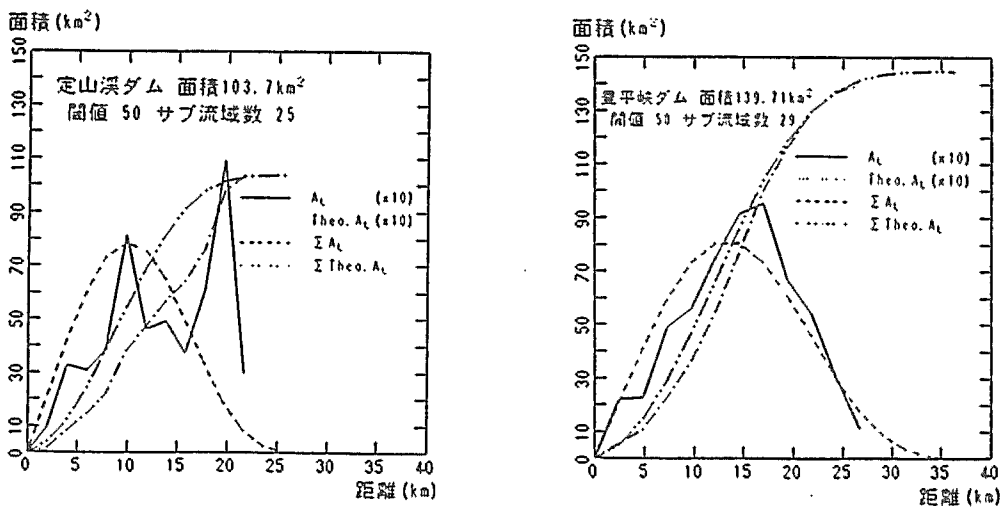


図-12 洪水到達集中面積図