

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、調査概要

1-1 調査目的

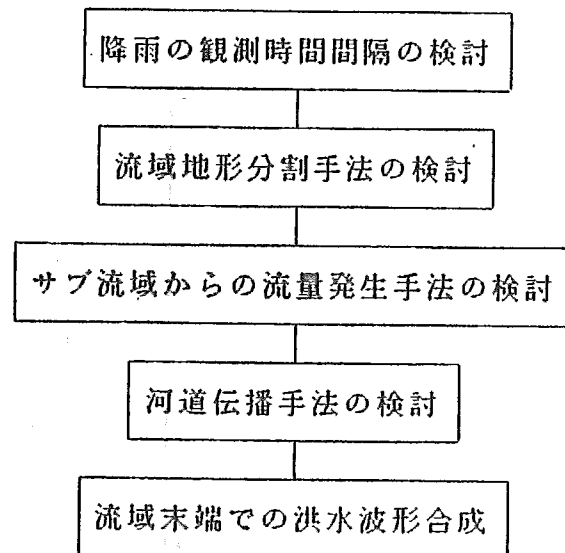
流出解析における問題点として、降雨強度が流域内で一様でないことが挙げられる。降雨現象は近年のC A P Iレーダーによる観測や山地流域における高度別総降雨量の観測結果などで前線や地形等により極めて局所的な分布を示すことが知られており、精度の高い流出解析を行うためにはこうした局所的な分布を的確にとらえる必要がある。しかしながら従来型の雨量計を用いた地点観測では100Km²に2～3点程度の密度しか得られず、しかも1時間間隔でしかデータが得られないため精密な観測が不可能であった。

近年、全国でレーダー雨量計の整備が進み、数分で非常に広範囲（半径120Km）の降雨分布データが得られるようになってきている。レーダー雨量計は雨域の移動、局所的な分布の把握が可能であり、将来多方面での利用価値が高まるものと期待されている。

ここではレーダー情報で得られるメッシュ雨量データを用いた流出モデルの開発を目的とする。

1-2 調査方針

レーダー雨量計で観測される雨量情報を流出モデルに適用するためには、流出モデルを雨域の分布に適合したいわゆる分布型流出モデルとする必要がある。ここでは分布型流出モデルの特性を定山溪ダム流域（104Km²）をモデルケースに次のフローで検討した。



2、平成2年度調査成果

2-1 調査概要

(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。

$$Kpq^{p-1} \frac{dq}{dt} + q = r(t) \quad (1)$$

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、

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

十分に時間が経過したときの(2)式の解が次の様になる。

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

図-1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。

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

図-1による高周波の入力ほど出力における減衰が大きいため、全ての周波数の入力を考慮する必要が無い。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。

$$\begin{aligned} r(t) &= A \sin(\omega t) + B \\ B &\gg A \end{aligned} \quad (9)$$

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-2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と考えられる。

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), α ; $\sqrt{i/n}$, n ; 等価粗度係数 (m, sec 単位)、 i ; 斜面勾配。

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 は次式でもとめられる。

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

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。

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

図-4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 $5(Km^2)$ 、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。

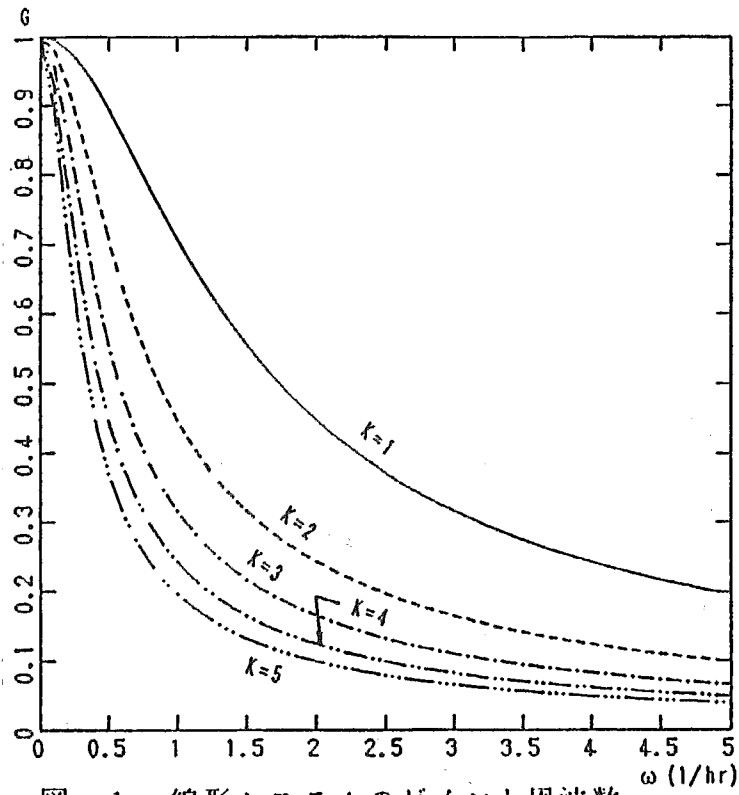


図-1 線形システムのゲインと周波数

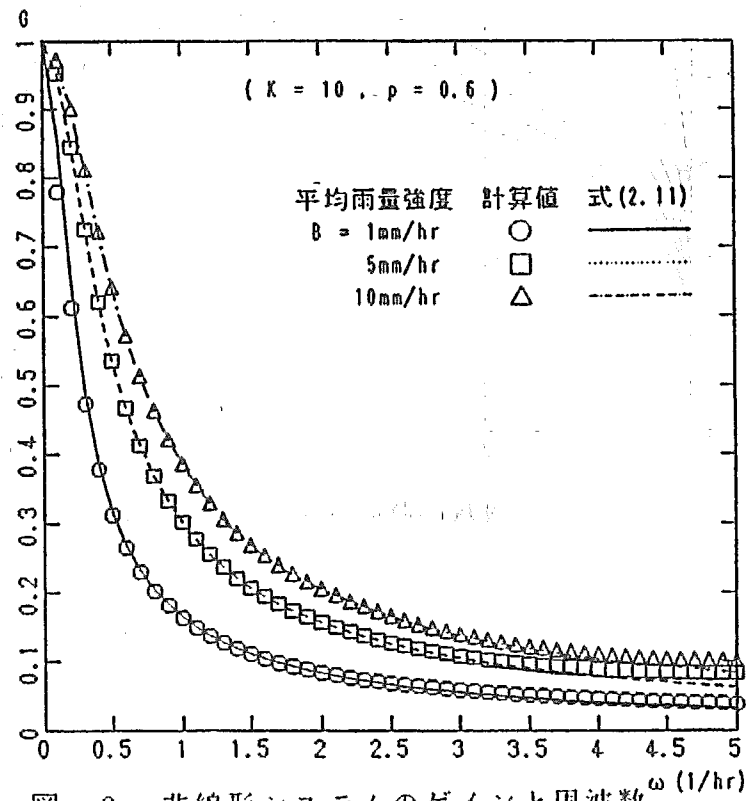


図-2 非線形システムのゲインと周波数

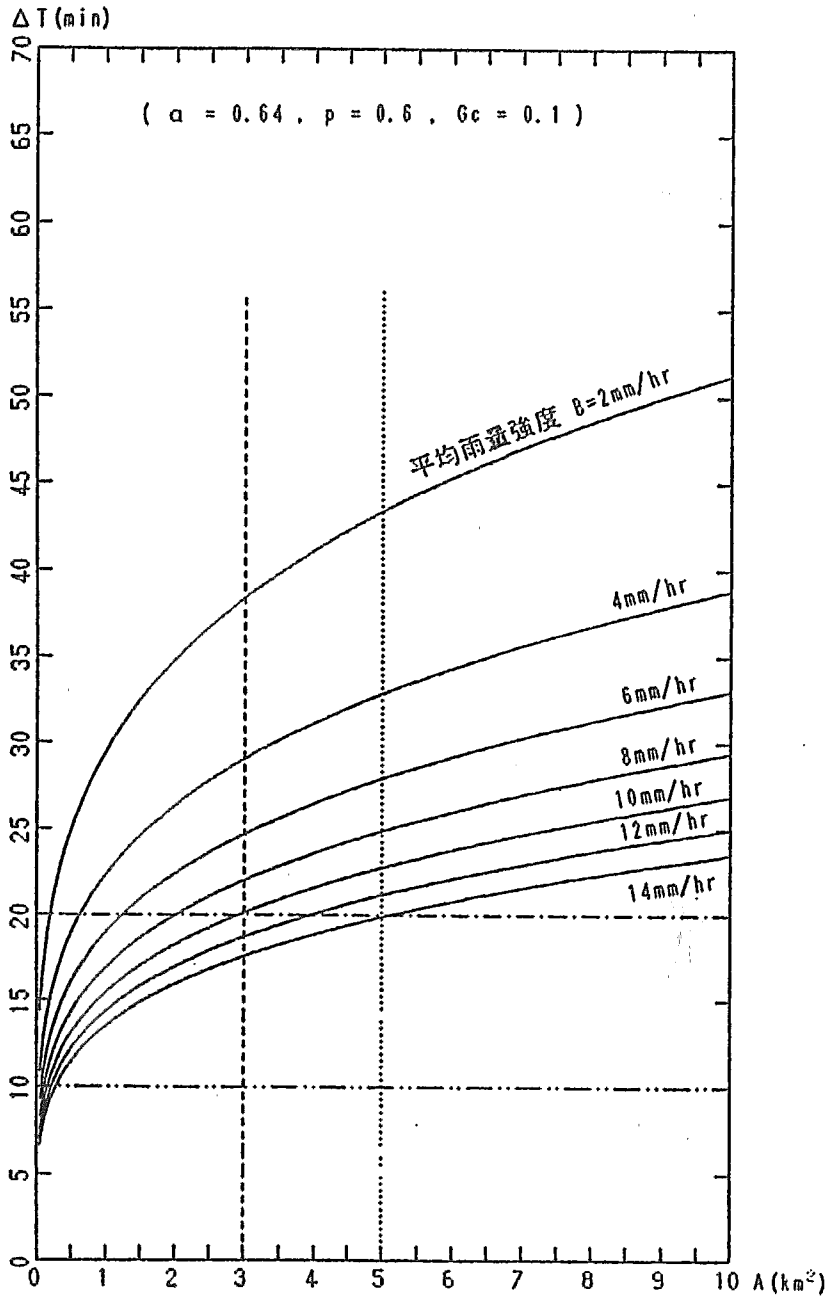


図-3 最適観測時間間隔 ΔT と流域面積 A

(2) 流域スケール

現在、国土地理院が中心となって整備された国土数値情報が一般に利用可能である。この情報のうち4分の1メッシュ(250mメッシュ)の標高データおよび流域境界位置データを用いて定山溪ダム流域を数値化することとする。まず各格子点に着目し、自分の周囲の標高点(8点)のうち、最大傾斜方向を連結し、落水線図を描く。ある落水線に着目したとき、一定数以上の落水線を担当するものを河道とみなせば疑似河道網が描ける。この一定数を域値と呼ぶ。図-4は域値が5から50までの疑似河道網を表わしている。域値が大きくなるほど地形図に近い河道形状を呈してくるようになるのが分かる。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、域値を小さく設定すると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域値が妥当かを検証しておく必要がある。サブ流域からの流出量計算手法として小流域の流出計算に良く適合する次の一般化貯留関数を採用した。

$$\begin{aligned}
 \frac{ds}{dt} &= r - q \\
 s &= k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt}(q^{p_2}) \\
 k_1 &= 2.823 f_c^{0.6} A^{0.24} \\
 k_2 &= 0.2835 k_1^2 \bar{r}^{-0.2648} \\
 p_1 &= 0.6 \\
 p_2 &= 0.4648 \\
 f_c &= n/\sqrt{i}
 \end{aligned} \tag{15}$$

ここで、 r : 降雨量、 q : 流出高(mm/h)、 A : 流域面積(km²)、 \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 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。流域分割の域値による影響が流出ハイドログラフに与える影響を検討するために次の場合について流出計算を行った。

- a) 流域分割せず
- b) 上中下流域に3分割
- c) 国土数値情報に基づく分割(域値を変化させる)

降雨は総降雨量を 100mm とし、表-1 に示す時間的空間的分布を与えた。

図-5 に流域分割をしない場合と流域3分割の場合の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。流域分割をしない場合はピーク流出量が小さく、減衰部が長くなる。また、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、ピーク流出量で最大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。

次に域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までの域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-6 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)にともない増大する。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。この場合の平均単位流域面積は約3 Km²となる。

次に降雨の空間変動別に、降雨ピークの発生時間を変えた場合について、域値が5、25、50の場合の模擬河道と無分割および3分割の場合のハイドログラフを計算し、一例を図-7 に示す。ハイドログラフの形状は模擬河道網を用いると鋭く立ち上がることが分かる。また、ダブルピークのハイドログラフも見られる場合もある。

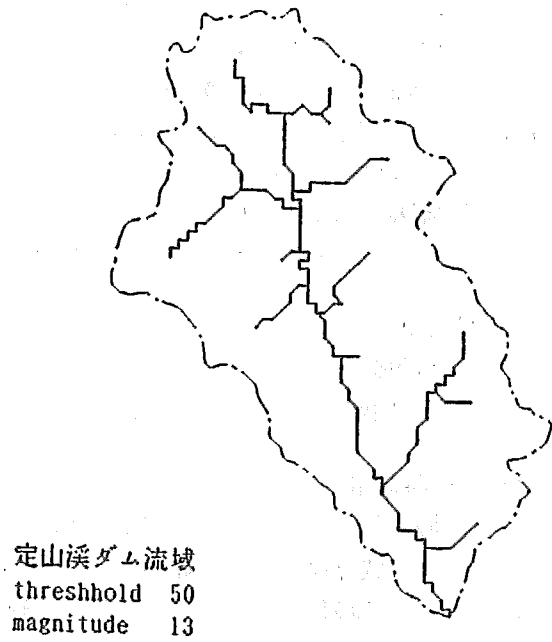
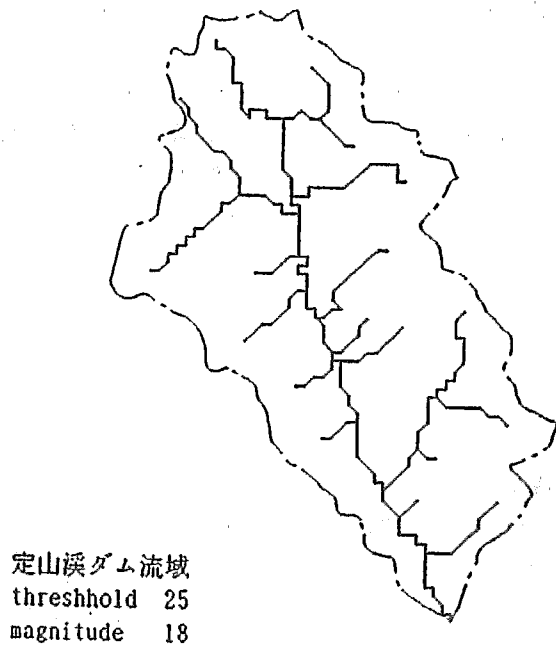
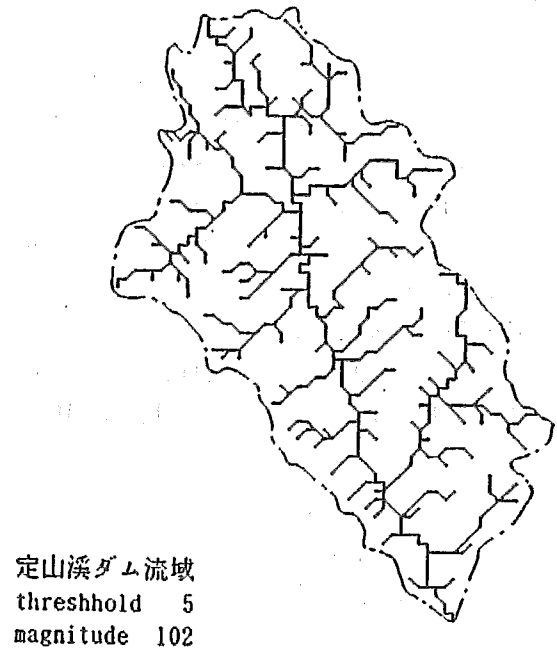
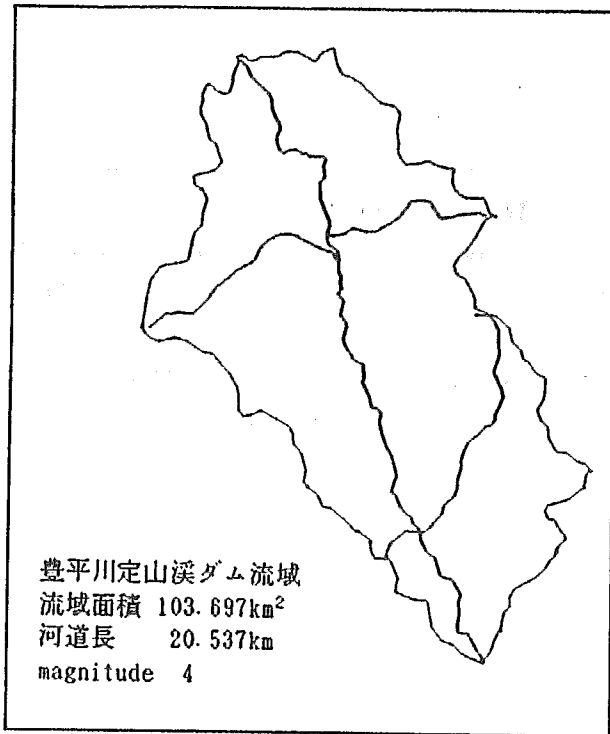


図-4 地形図の河道網と模擬河道網の比較

以上、国土数値情報 250m メッシュ標高値から流出量を求め、ダム地点でのハイドログラフを求めた。この方法により降雨の空間的・時間的分布の影響が計算可能となった。この結果、定山溪ダム流域では、上流部に豪雨があった場合にピーク流量が増大する傾向があり、これは流域形状に起因するものと考えられる。図-8は横軸に下流端からの河道距離(km)、縦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。ここでは比較のため、豊平峡ダム流域、徳富川南幌加橋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していたことが考えられる。

3、今後の課題

(1)、降雨の時間観測を流出モデルのゲインから解析的に求めたが、今回採用した一般化貯留関数のゲインも求めておく必要がある。

(2)、単位流域からの洪水波形の伝播速度を一律1.5m/sとしたが、河道勾配や河道幅の関数として表現する必要がある。

(3)、国土数値情報の標高値は250mメッシュが最小であるが、今後さらに分解能の高い情報で検討を行う必要がある。

参考文献

- [1] 藤田、道口、榎；小流域における降雨流出の時間特性、土木学会第46回年次学術講演会2、1991
- [2] 藤田 睦博；斜面長の変動を考慮した貯留関数法、土木学会論文報告集、vol.314、1981
- [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

表-1 計算に用いた降雨の空間・時間分布

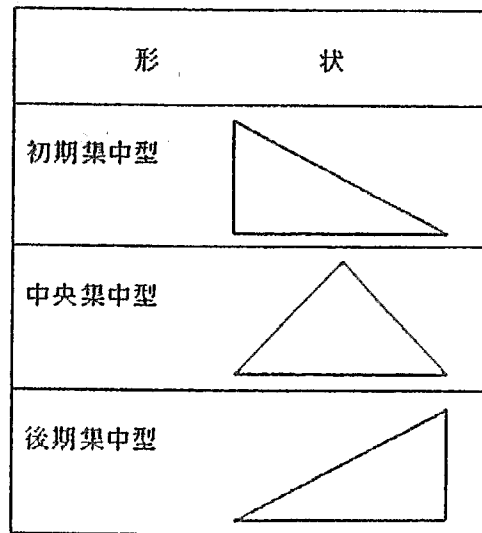
降雨パターン（空間的変動）雨量強度一覧

位置	流域分割無	パターン I 全流域一様	パターン II 上流域集中	パターン III 中流域集中	パターン IV 下流域集中	面積 (km ²)	支配率 (%)
上流域		Rp	2*Rp	Rp/2	Rp/2	24.95	0.24
中流域		〃	Rp	2*Rp	Rp	51.97	0.50
下流域		〃	Rp/2	Rp	2*Rp	26.78	0.26

※ Rp:流域平均ピーク雨量(mm/hr)

降雨ケース（時間的変動）一覧

ケース	形状	ピーク時刻Tp
I	全域初期集中	0.0hr
II	全域中央集中	2.5hr
III	全域後期集中	5.0hr
IV	上流域 初期 中流域 中央 下流域 後期	0.0hr 2.5hr 5.0hr
V	上流域 後期 中流域 初期 下流域 中央	5.0hr 0.0hr 2.5hr
VI	上流域 中央 中流域 後期 下流域 初期	2.5hr 5.0hr 0.0hr



※ 各ケースとも降雨継続時間(Tr)は5hr
各ケース毎に流域平均雨量Rpを10, 20, 30 mm/hrの三種類

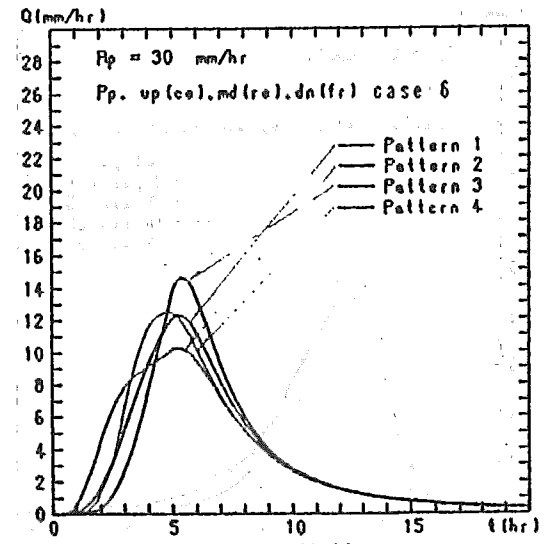
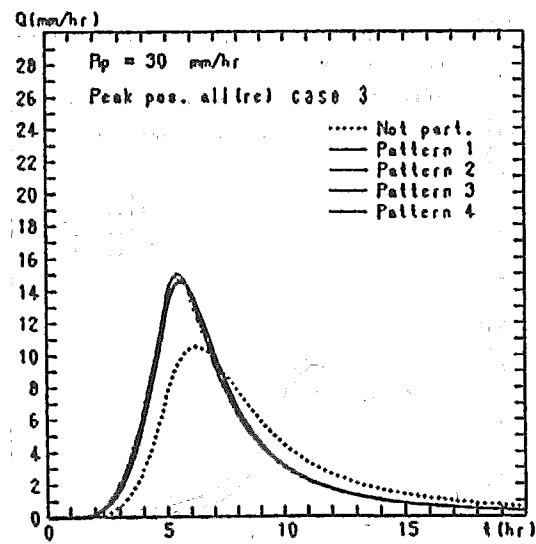
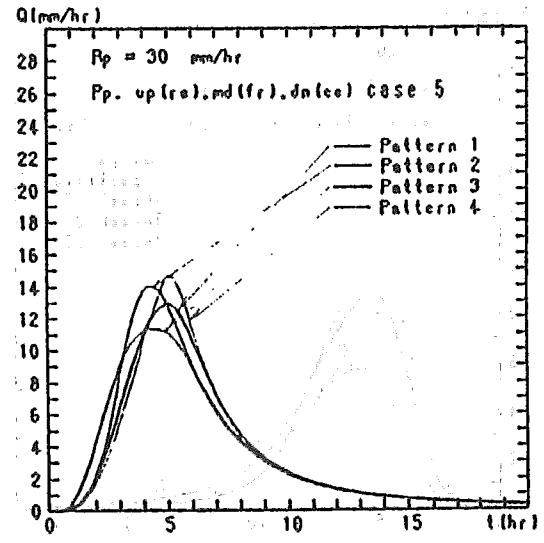
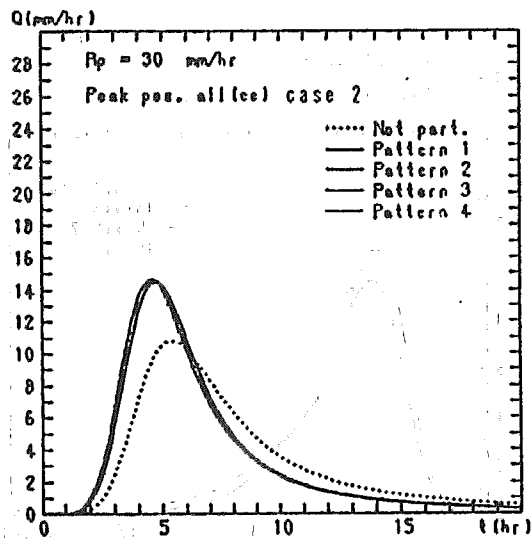
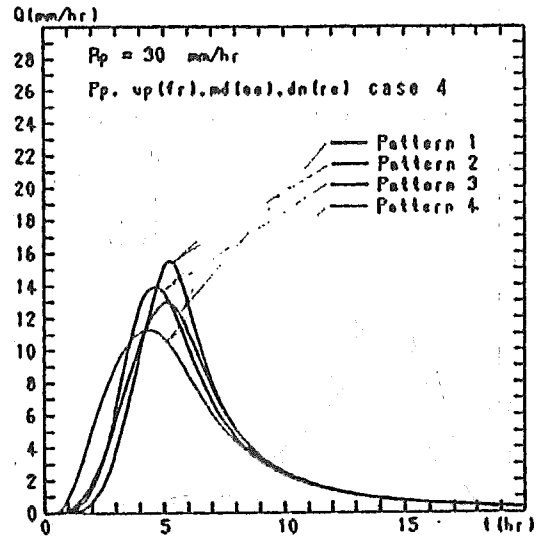
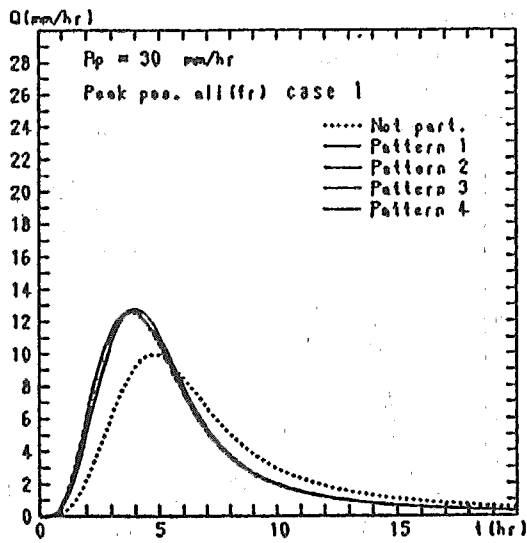


図-5 流域無分割、3分割のハイドログラフ比較

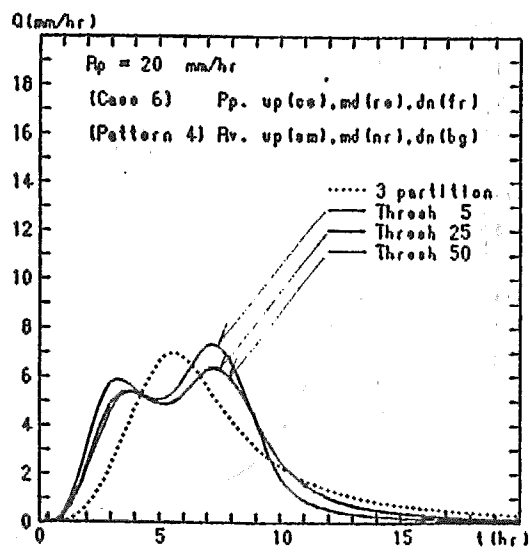
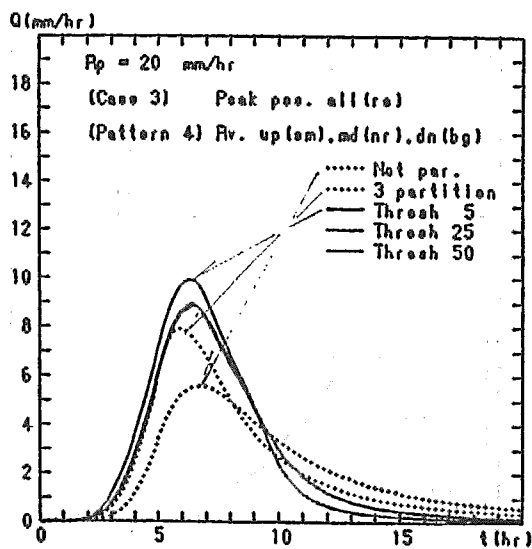
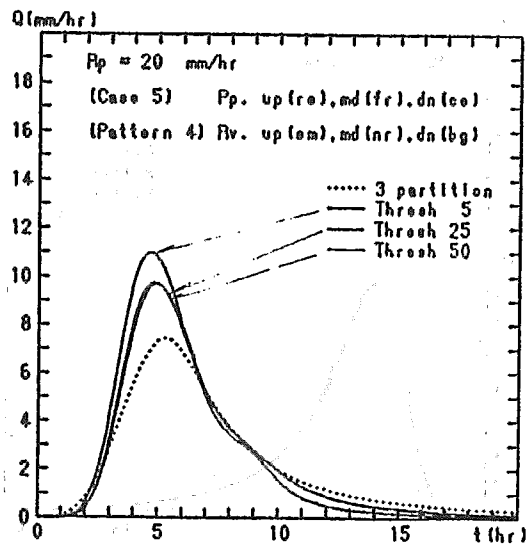
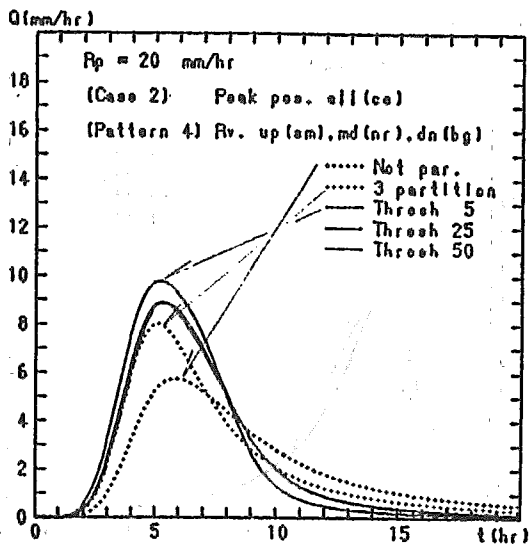
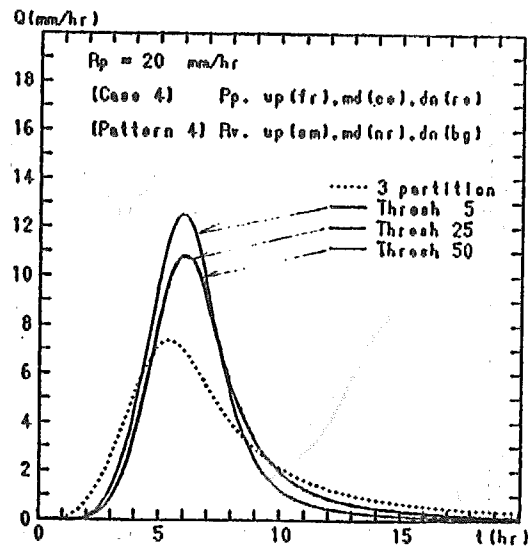
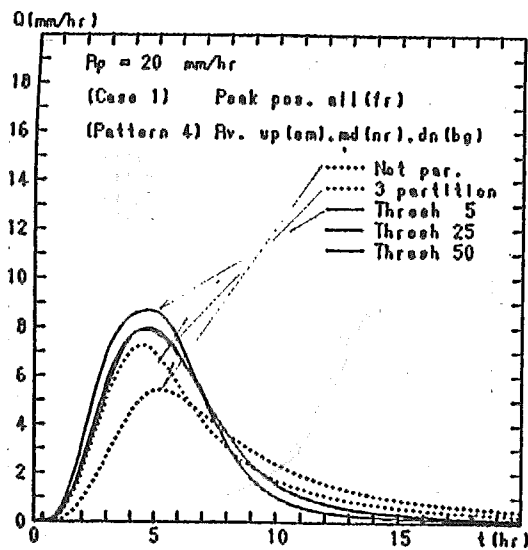
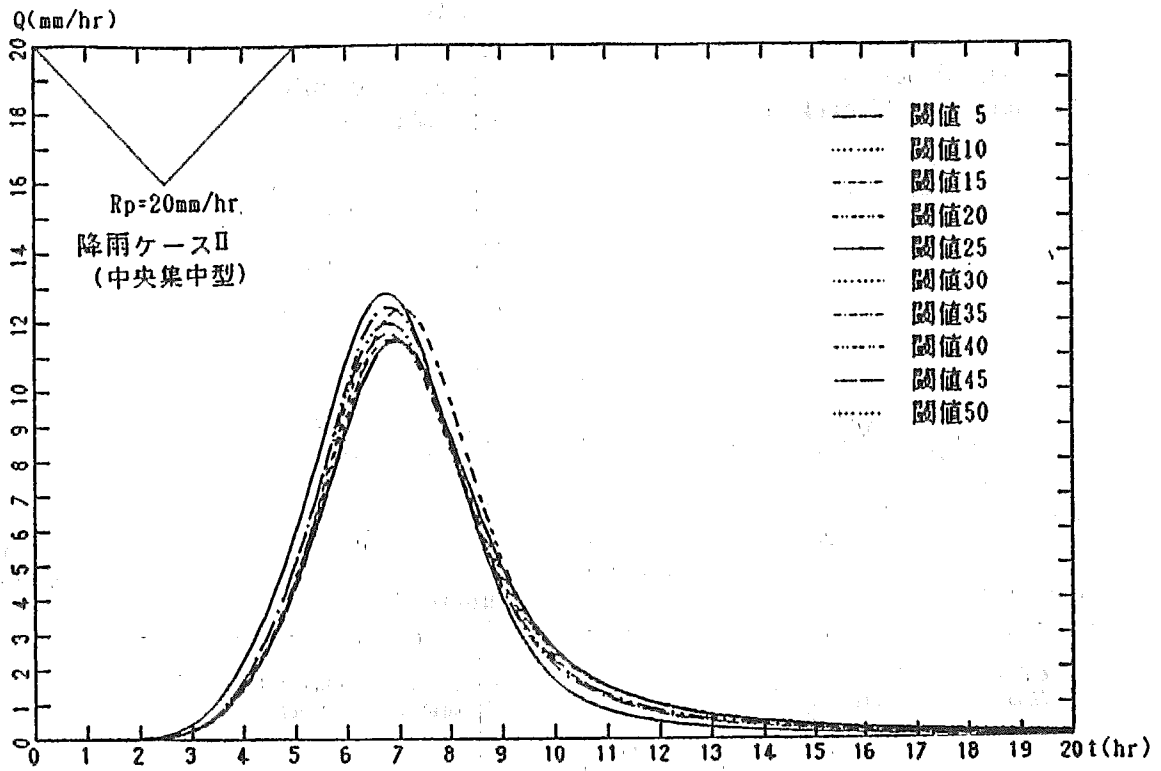
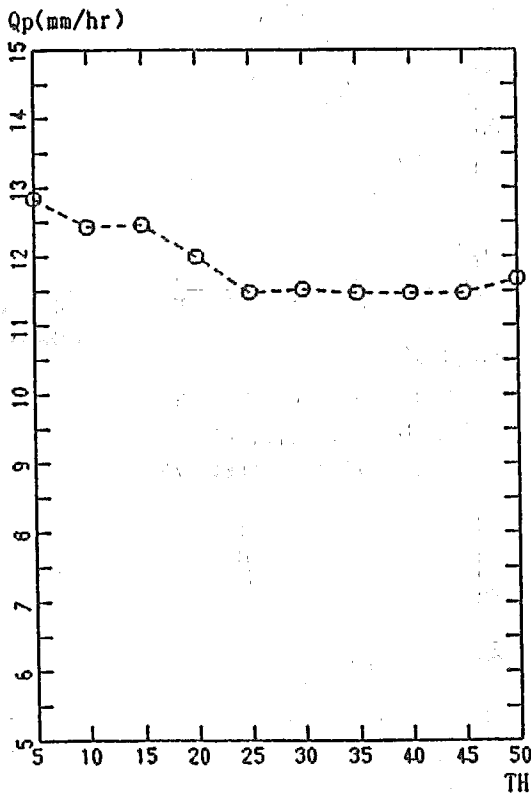


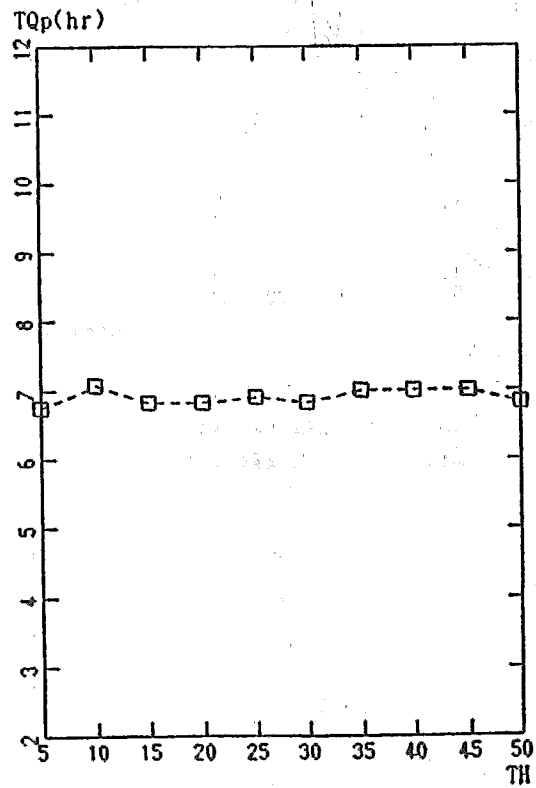
図-6 域値の違いと降雨の空間分布を変化させた場合のハイドログラフ比較



貯流関数法のハイドログラフ (降雨パターンII 上流集中 (上流・強、中流・中、下流・弱))



閾値 TH と ピーク流出高 Qp(mm/hr)



閾値 TH と ピーク発生時刻 TQp(hr)

図-7 閾値の違いによるハイドログラフ比較

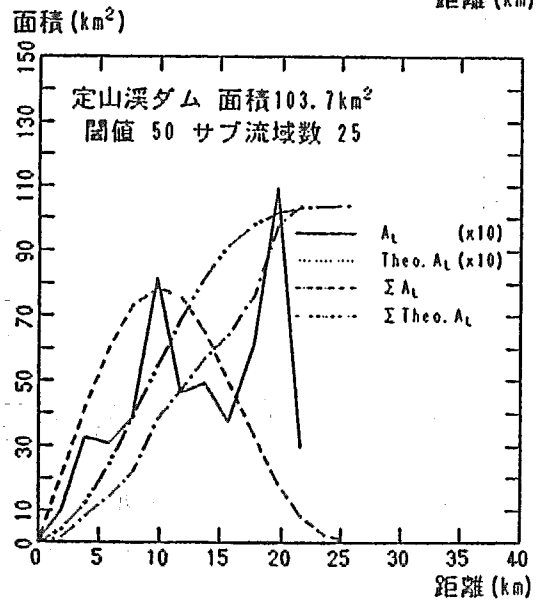
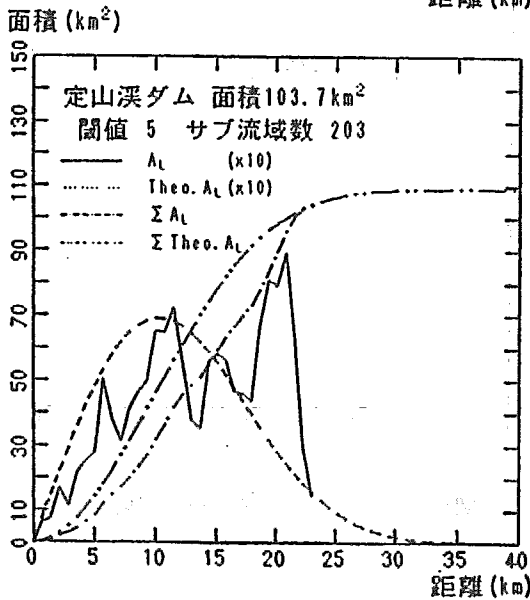
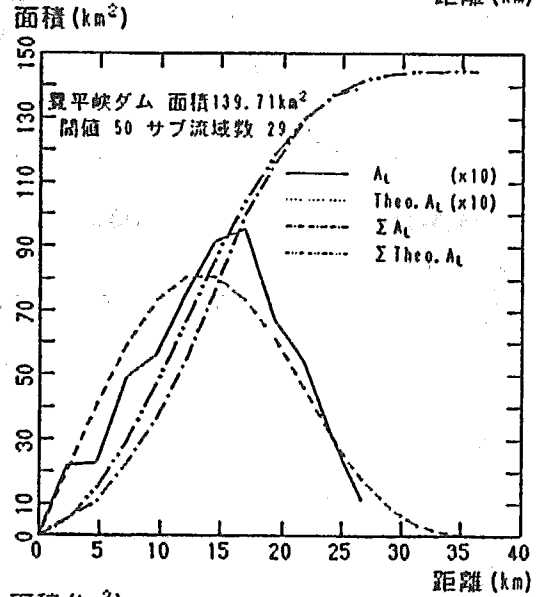
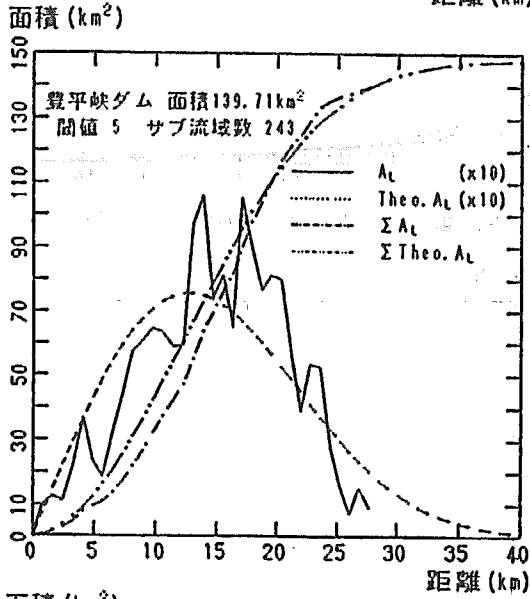
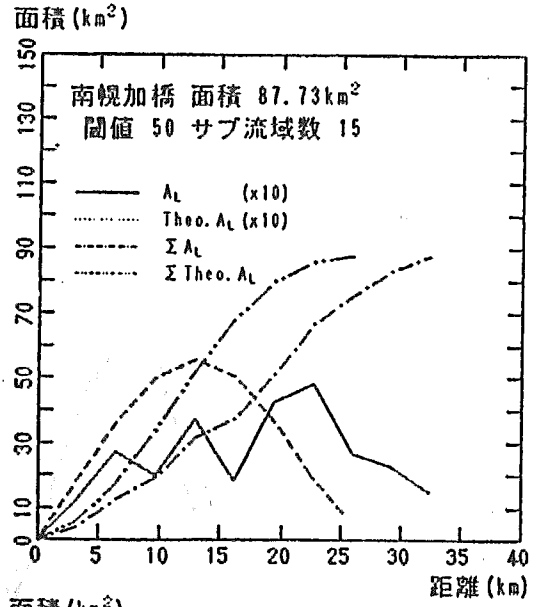
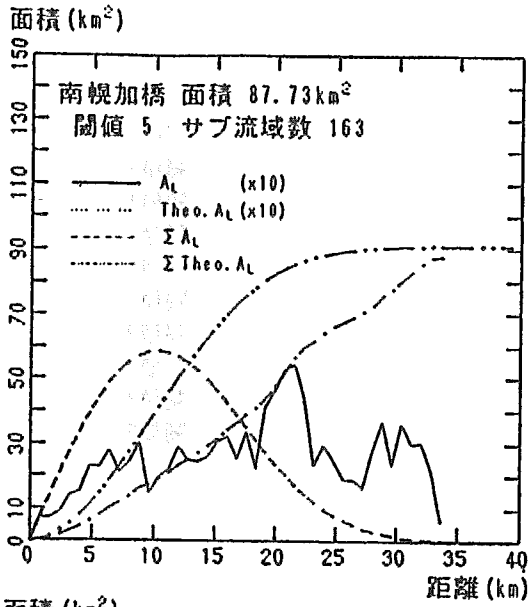


図-8 流域出口からの面積集中図