

II-44

降雨の空間分布を加味したサブ流域スケールの取扱い

北見工業大学工学部 正会員 早川 博
北見工業大学工学部 正会員 内島邦秀
北見工業大学工学部 学生員 田中裕樹

1. はじめに

近年、レーダ雨量計などの水文観測技術の進歩や地理情報システム (GIS:Geographic Information System) の整備に伴い、流出解析においてもこの種の情報を積極的に取り入れた流出モデルの開発が望まれ、幾つかの分布型流出モデルが提案されている^{1)~3)}。分布型流出モデルは、流域を適当なサブ流域に分割して解析することにより、降雨や流域の空間的な変動諸特性を流出現象に反映させることができるという利点を有するが、残された課題としてこの最適なサブ流域のスケールの取扱いがある。著者らはサブ流域の空間分布、すなわち河道網構造が流域の流出特性にとって重要であるとの観点から、河道網パターンやサブ流域の面積・河道長の変動特性を考慮して、最適なサブ流域スケールの検討を進めてきた^{4)~6)}。しかし、これらの検討では降雨の空間分布を無視し、流域全域に一律な降雨を仮定している。そこで本論文では、流出特性、特にピーク流量の形成に及ぼすサブ流域スケールの効果が、降雨の空間分布特性によってどの様な影響を受けるのか明らかにしたい。

2. 流出特性に及ぼすサブ流域スケールの効果

流域の河道網構造は、用いる地図の縮尺によって異なり、大縮尺の地図になるほど小さな河道まで記載され、河道網構造が複雑になる。図-1は渚滑川最上流部の滝上観測所流域 (流域面積 240km², 本川長 45km)、図-2は支川の立牛川流域 (流域面積 160km², 本川長 26km) の国土数値情報から作成した模擬河道網である。

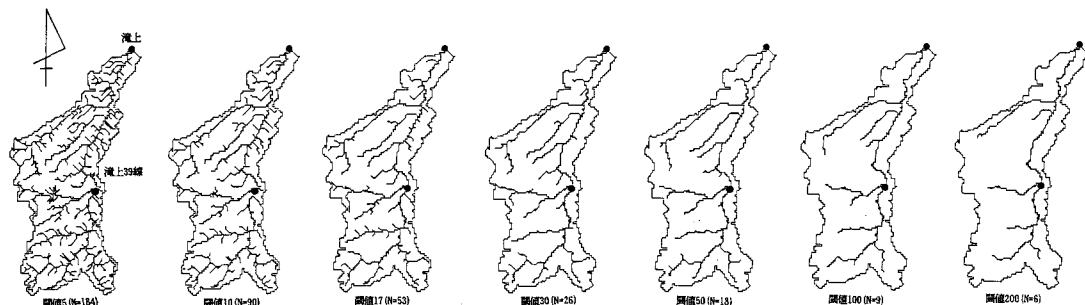


図-1 渚滑川滝上流域の模擬河道網

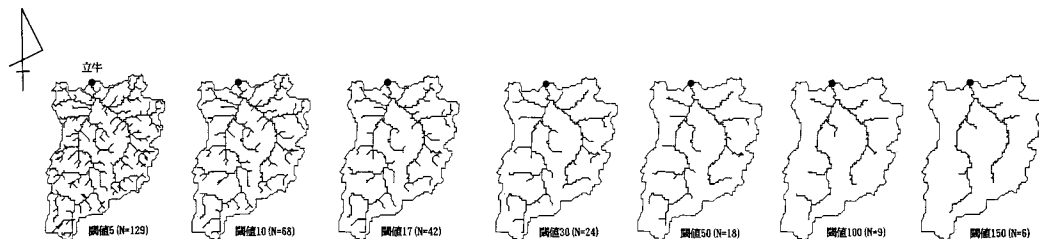


図-2 渚滑川支川立牛川流域の模擬河道網

Effects of Subbasin Scale based on Spatial Variations of Precipitation
by Hiroshi HAYAKAWA, Kunihide UCHIJIMA and Yuuki TANAKA

ここで、図中の閾値は地図の縮尺に対応し、閾値が小さいほど大縮尺となる。河道網の水源と合流点、あるいは合流点間を結ぶ河道をリンクと呼び、このリンク単位の流域をサブ流域とする。また、水源を持つリンク数がマグニチュードと定義され、サブ流域スケールの指標となり得る。河道網パターンは縮尺に応じて特定のパターンから特定のパターンへ移行しているが、河道網の骨格をなす河道は全く別なパターンに移行するわけではなく、別な見方をする、この図は降雨時にのみ発生する河道の成長の様子を表現しているとも言えよう。また、河道網パターンの移行はサブ流域のスケールを変化させることになり、分布型流出モデルを用いた流出解析ではこの最適なサブ流域スケールを如何に決定するかが重要である。

まず、最初にサブ流域スケールの変化によるこの両流域の流出特性を実測値と比較して、サブスケールの効果を検討する。解析に用いた流出モデルは、既報^{4)~6)}と同じく、サブ流域においては流域を矩形近似し、Kinematic Wave法を置換した貯留関数法を適用する。斜面上の流れをManning則に従う流れと仮定すると、流出パラメータは次式となる。

$$K = \frac{m}{m+1} \left\{ \frac{1000^{m-2} \ell}{3.6 \alpha} \right\}^P, \quad P=1/m, \quad m=5/3, \quad \alpha = \sqrt{\sin \theta} / n \quad \cdots (1)$$

ここに、KとPは貯留係数、貯留指数、mと α は斜面定数、 ℓ は斜面長(m単位)、 $\sin \theta$ は斜面勾配、nは等価粗度である。サブ流域における流出の遅れ時間T₁は無視した。一方、河道系は、サブ流域の流出ハイドログラフが河道を下流・伝播する時間だけ遅らせる機能しかもたず、下流中のハイドログラフの変形を無視してハイドログラフを合成する図-3に示した永井ら⁷⁾のモデルを用いた。河道の遅れは河道の上流端に流入するピーク流量の伝播速度を用いて計算する。ピーク流量Q_pと伝播速度Vの関係は、河道の横断面形状、河道幅、河道勾配や粗度係数によって決まるが、河道の条件が河道網全域にわたって一様でなく、実測も簡単ではない。そこで、伝播速度は、図-4に示す河道内の流水の平均流速と流量の実測値⁸⁾の関係から得られた次式を用いた。

$$V = (5/3) \times 0.62 \times Q_p^{0.11}, \quad V: (m/s), \quad Q_p: (m^3/s) \quad \cdots (2)$$

図-4は神流川、利根川の実測結果で、他の河川にも適用可能かを検証する必要があるが、後の解析結果を見ると、かなり普遍性があるようである。また、流出ハイドログラフの合成計算は、伝播速度が各サブ流域の上流から流入する流量によって定義されるので、上流から下流方向に合流点毎に逐次計算を進める必要がある。その計算順序は、予め各リンクが接続する下流側のリンク番号、マグニチュード、位数、河道長や付随面積を記載したデータファイルを作成し、このファイルを参照して逐次計算を進めた。

上記の流出モデルを両流域に適用した計算結果が図-5.6である。ここに、直接流出量の変分は減水曲線の第2変曲点による方法、有効雨量の算定は一定比損失雨量法である。サブ流域の斜面パラメータは図中に示した通りで、パラメータの最適同定をしていないにも係わらず、この簡単なモデルでも実測値を良く再現出来ることがわかる。計算結果を見ると、マグニチュードが小さいときは、ピーク流量が低く、ハイドログラフの減水部が長く尾を引いている。マグニチュードが大きくなるに従い、ピーク流量が徐々に大きくなり、

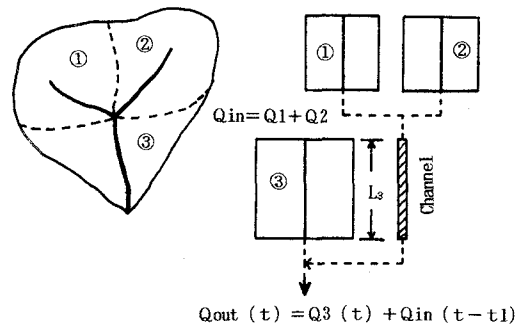


図-3 河道系の流量合成の概念図⁷⁾

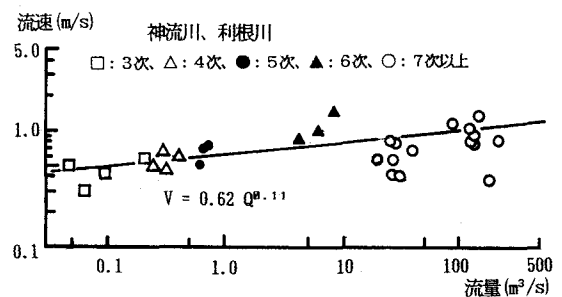


図-4 平均流速と流量の関係⁸⁾

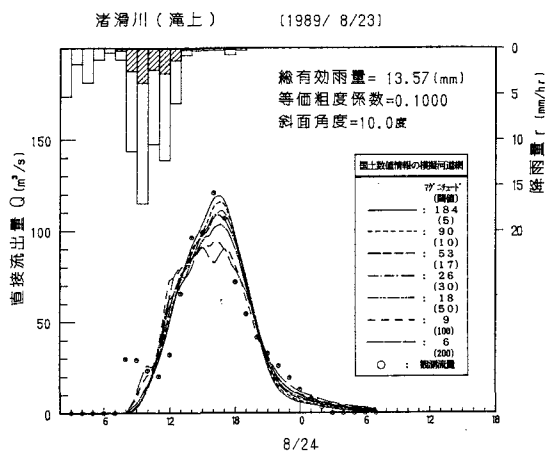


図-5 模擬河道網による清渭川滝上流域のハイドログラフ

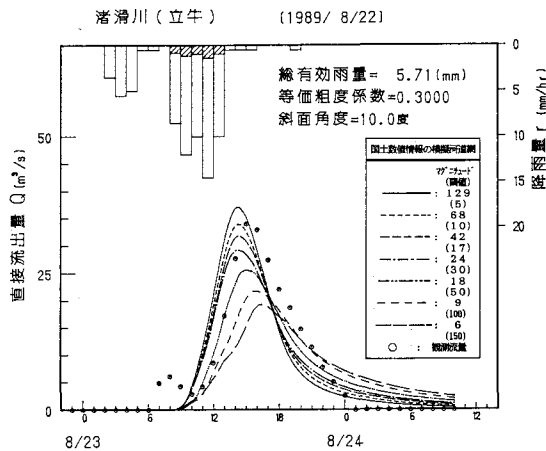


図-6 模擬河道網による立牛川流域のハイドログラフ

マグニチュードがある程度以上になると平衡に達する傾向が見られる。ピーク流量の生起時刻をみると、立牛川流域は次第に早くなり、やがて平衡状態になるが、滝上流域はほとんど変化していない。減水部の低減も次第に早くなっている。図-7はピーク流量だけに着目して、マグニチュードに対する変化を調べたものである。立牛川流域は、今回の解析範囲ではマグニチュードが大きくなってもピーク流量がなかなか平衡状態に達せず、サブ流域スケールを小さくした効果が明確でない。これは両流域の河道網構造の違いによるもので、立牛川流域は流量の集中し易い河道網パターンであることが影響していると思われる。つまり、サブ流域のスケールはサブ流域の流出応答に関係し、スケールが小さいほど流出応答が早くなるが、逆に河道網が複雑になるので、流出特性に及ぼす河道網構造の効果が卓越してくるためであろう。したがって、この両者の関係から最適サブ流域スケールを決定することになる。なお、立牛川流域はピーク流量の生起時刻が実測値より早く、伝播速度を算定した

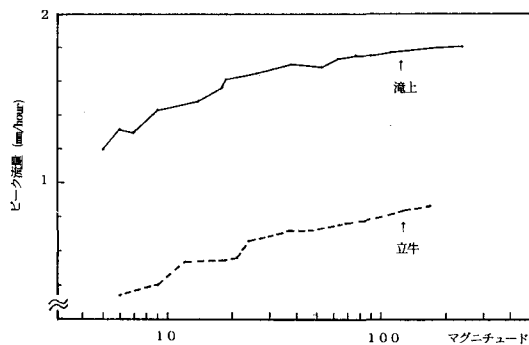


図-7 ピーク流量とマグニチュードの関係

3. 降雨の空間分布とサブ流域スケール

前節の解析において、降雨の空間的な分布特性は考慮せずに流域一様の降雨を考えてきた。図-1の滝上流域には2箇所の雨量観測所（滝上、滝上39線）があるので、この2箇所の降雨の空間分布を考慮した解析を行い、サブ流域スケールの効果を検討する。各々の雨量観測所の支配領域は図-8に示す一点鎖線で2分され、上・下流域の面積割合率は各々59%、41%である。降雨の空間分布を考慮した解析結果が図-9の太線で表示され、比較のために平均雨量を用いた結果を細線で示す。両者の違いは僅かで、やや降雨の空間分布を考慮した方がピーク流量が大きく、早くピークに達する傾向にある。また、雨量と流量データの対応から、流量の第一ピークは滝上39線で観測された上流域に降った雨によるものと考えられる。そこで立ち上がり流量以前の雨量を損失雨量とせずに解析を試みたが、うまく再現出来なかった。これは流域固有の流出特性を考慮せずに、斜面域の流れをManning則に従う流れとの仮

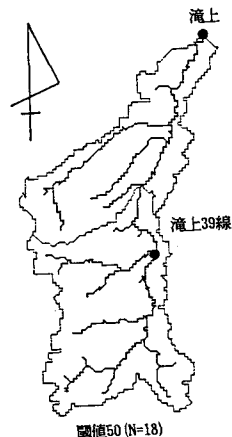


図-8 滝上流域

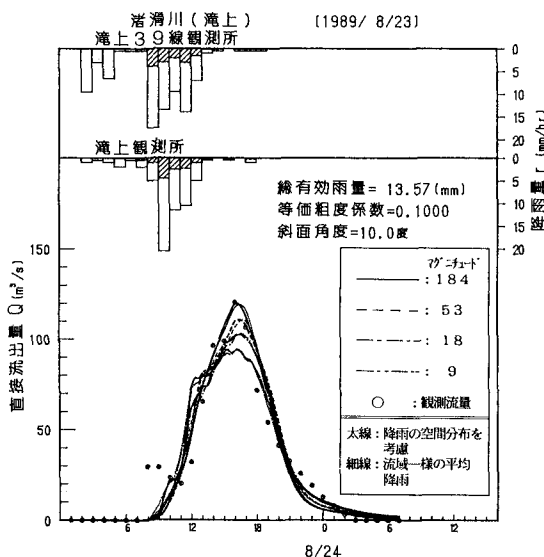


図-9 降雨の空間分布を考慮したハイドログラフ (滝上)

表-1 降雨波形の計算条件

	上流域	中流域	下流域
降雨条件	Rp(1) (mm/hr)	Rp(2) (mm/hr)	Rp(3) (mm/hr)
case 0	20.0	20.0	20.0
case 1	28.1	20.0	8.0
case 2	12.0	20.0	31.8
case 3	20.0	27.9	8.0
case 4	20.0	12.0	32.2
case 5	30.3	10.0	20.0
case 6	10.0	29.7	20.0
面積寄与率	37%	38%	25%
降雨波形			

定し、流域の地形量だけから流出パラメータを導く本流出モデルの弱点でもある。

実測雨量の空間分布を考慮した流出解析では、サブ流域スケールの効果を明瞭にすることが出来なかった。そこで次に空間分布を持った降雨波形を与えることによって、流出特性に及ぼすサブ流域スケールの効果を議論する。解析対象流域は滝上流域で、図-10に示すように流域を上・中・下流域に3分割し、各々に表-1に示す降雨の継続時間、降雨のピーク生起時刻が同じでピーク降雨強度だけが平面分布する三角形降雨波形を与えた。case 0は流域全域に様な降雨の場合で、他の6ケースは平均降雨量がcase 0と一致する様に各々の面積寄与率を考慮して決定した。サブ流域の斜面パラメータは実測雨量の解析と同じ値を用いている。

図-11~17は、各々の降雨条件毎について河道網のマグニチュードを変化させた解析結果である。case 1 (図-12) とcase 5 (図-16) は上流域に、case 3 (図-14) とcase 6 (図-17) は中流域に、case 2 (図-13) とcase 4 (図-15) は下流域に最大降雨がある場合である。各々のグループ毎にハイドログラフの変動をみると、下流域に強い雨

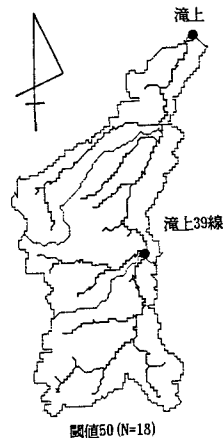


図-10 滝上流域

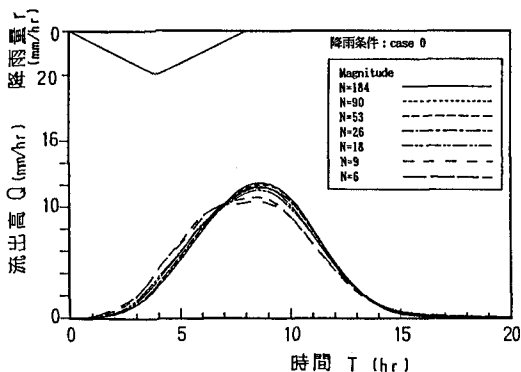


図-11 降雨の空間分布を考慮したハイドログラフ (case 0)

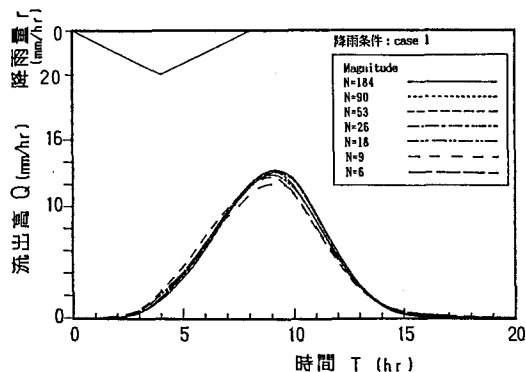


図-12 降雨の空間分布を考慮したハイドログラフ (case 1)

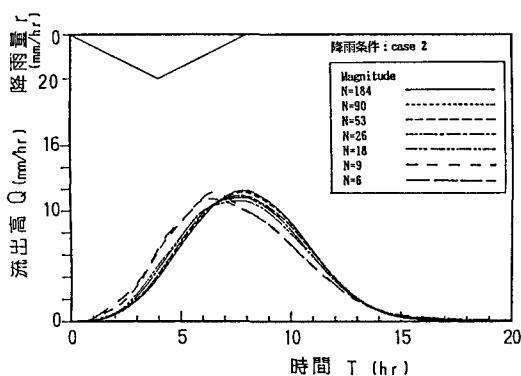


図-13 降雨の空間分布を考慮したハイドログラフ (case 2)

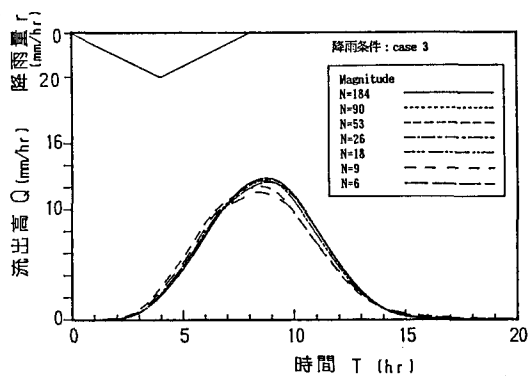


図-14 降雨の空間分布を考慮したハイドログラフ (case 3)

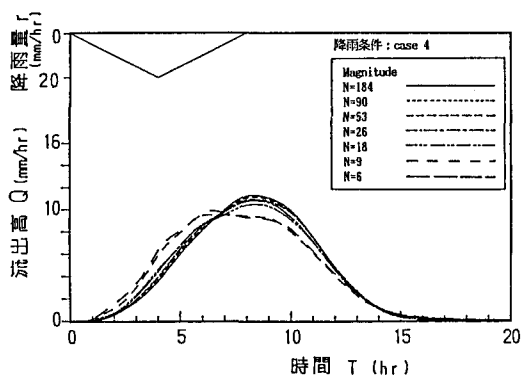


図-15 降雨の空間分布を考慮したハイドログラフ (case 4)

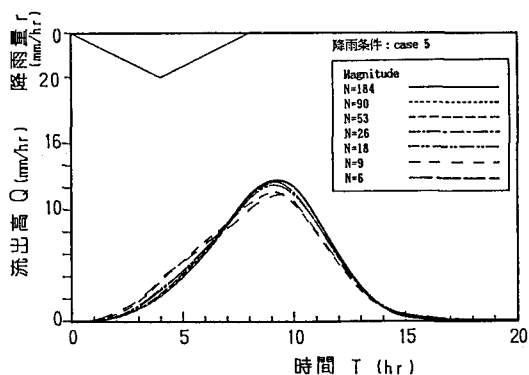


図-16 降雨の空間分布を考慮したハイドログラフ (case 5)

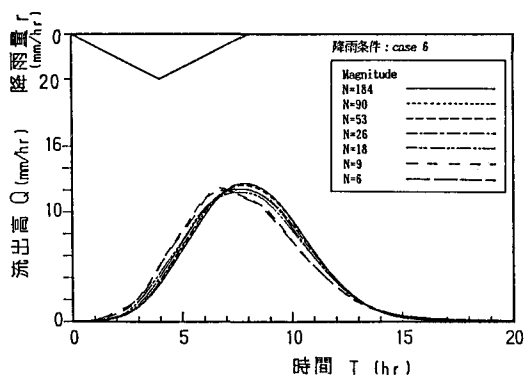


図-17 降雨の空間分布を考慮したハイドログラフ (case 6)

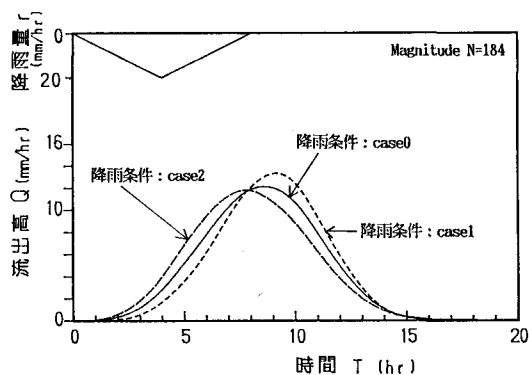


図-18 降雨の空間分布を考慮したハイドログラフ (case 0, 1, 2)

が降る場合にピーク流量の変動が大きく、マグニチュードが小さいとピーク流量の生起時刻が早くなっている。上流域に強い雨が降るとピーク流量の変動も小さく、その生起時刻の変動も小さい。次に、降雨量が上流から下流へと減少していく case 1 と、逆に増加していく case 2 について考察する。図-18 はマグニチュードが $N=184$ の河道網についてのハイドログラフで、流域一様降雨の case 0 も併せて示した。case 2 のように下流域に強い雨が偏って降っても、ピーク流量は流域一様降雨の場合と比較してそれほど極端に低下する訳でなく、ピーク流量の生起時刻が早くなり、ハイドログラフがやや偏平化するだけである。上流域に雨が偏って

降る場合は、ハイドログラフが鋭敏化する傾向にある。図-19は、ピーク流量と、降雨のピークと流出のピークとの時間遅れを示している。マグニチュードが10以下ではピーク流量も流出の遅れ時間も変動が大きい。マグニチュードが10以上でピーク流量が平衡に達するのは、下流域に強い降雨がある場合に約 $N=100$ でそれ以外は約 $N=20$ 程度である。つまり、下流域に雨が集中するときには、流域をかなり細分化しなければならないことを指摘できる。流出の時間遅れは $N=10$ 以上ではほとんど一定値である。最後に、全体を通してしてみると、マグニチュードが $N=10$ 以下の、サブ流域スケールが大きい場合にハイドログラフは降雨の空間分布の影響を強く受けるようである。

4. 結論

分布型流出モデルにおいて、サブ流域のスケールは流出解析結果に与える影響が大きい。サブ流域スケールを小さくしていくに従ってピーク流量が大きくなり、やがて平衡状態に達する傾向にあることが実流域の河道網を用いた解析結果から理解できた。しかし、サブ流域スケールが小さくなると、サブ流域の流出応答が早くなるが、一方で河道網パターンが複雑になるために、流出特性に及ぼす河道網構造の効果が卓越してくる。したがって、最適なサブ流域スケールを求めるために、実流域の河道網をその都度用いるという実証的な手法によらず、文献(6)に示した理論的な手法でサブ流域スケールを評価する必要がある。

また、本論文では降雨の空間分布がサブ流域スケールの効果にどの程度影響するのかを検討した。今回は降雨強度が平面分布する場合の検討だけであったが、下流域に強い雨が偏って降る場合に、サブ流域を細分化しなければ、ピーク流量が過小に評価されることを指摘した。なお、降雨の空間分布には、雨域の移動や降雨強度の標高変化等も考えられ、今後更に検討を進めていく必要がある。

最後に、図・表等の作成等に対して、本学4年生の中嶋貴士君と浜嶋直道君の協力を得たことを付記し、謝意の意を表す。

《参考文献》

- 1) 陸・小池・早川：分布型水文情報に対応する流出モデルの開発，土木学会論文集，第411号/II-12，pp.135-142，1989.
- 2) 吉野・吉谷・堀内：分布型流出モデルの開発と実流域への適用，土木技術資料，Vol.32，No.10，1990.
- 3) 宇治橋・高瀬：メッシュタンクモデルによる融雪流出解析，水文・水資源学会1991年研究発表会要旨集，pp.22-25，1991.
- 4) 早川・藤田：流域の河道網構造を考慮した流出特性，水工学論文集，第35巻，pp.155-160，1991.
- 5) 早川：流出におよぼすサブ流域スケール，水文・水資源学会1991年研究発表会要旨集，pp.214-217，1991.
- 6) 早川：分布型流出モデルのサブ流域スケールに関する一考察，水工学論文集，第36巻投稿中，1992.
- 7) 永井・角屋：洪水流出モデルの最適定数，京都大学防災研究所年報，第24号B-2，pp.183-196，1981.
- 8) 山辺：水流の水理幾何についての一考察，水温の研究，第15巻，第2号，pp.31-37，1971.

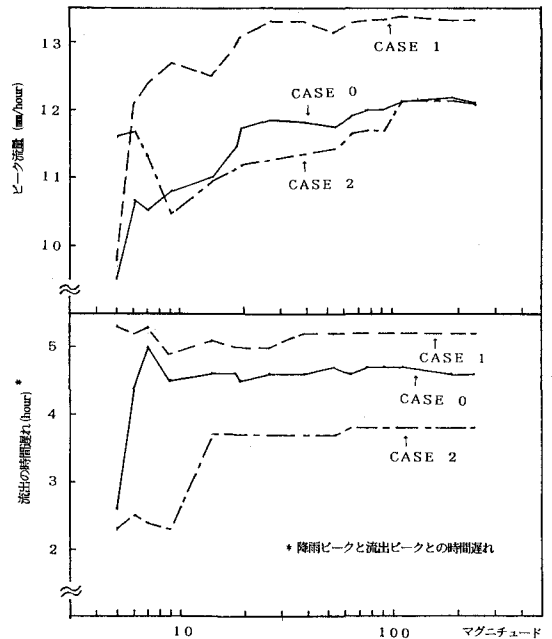


図-19 マグニチュードに対するピーク流量と流出の時間遅れの関係