

分布型流出モデルのサブ流域スケールに関する一考察

Effects of Subbasin Scale with Distributed Runoff Model

早川 博*

By Hiroshi HAYAKAWA

Recently, weather radar and geographic information systems are available to forecast the runoff. It is important to establish the distributed runoff models to make effective use of these spatially variable informations. This paper discusses effects of subbasin scale with distributed runoff models. For this purpose, it is approached that (1) the formula of transmitted channel network geometry under changing map scale in a catchment and the relationship between the properties of subbasin topography and map scales are investigated analytically; (2) the distributed runoff model based on channel network properties is derived. Consequently, the relationship between peak discharge and subbasin scale is derived, and an optimum subbasin scale for hydrologic response is shown.

Keywords: subbasin scale, runoff model, channel network geometry, peak discharge

1. はじめに

近年、レーダ雨量計などの水文観測技術が進み、降雨の時・空間的な定量観測が可能になってきた。一方、降雨の受け皿となる流域の地形情報等も、地理情報システム (GIS: Geographic Information System) の整備に伴い利用し易い状況にある。水文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することによって、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が、一方で、最適なサブ流域のスケールの決定は残された重要な課題である。

流域、あるいはサブ流域のスケールの効果について、陸ら¹⁾は流出モデルに組み込んだ数値地形のメッシュサイズと流出特性の関係から、また、砂田ら⁴⁾は降雨の時間スケールと最大流量の関係から流域のスケール効果を議論している。著者らはサブ流域の流出応答特性と共にサブ流域の空間分布、すなわち河道網構造も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、サブ流域の面積・河道長が変動していることを考慮したサブ流域スケールの検討を進めてきた⁵⁾。

本論文では、ある特定な流域を河道網パターンに従ってサブ流域に分割する場合に、河道網構造が、例えば地図の縮尺に応じて特定のパターンから特定のパターンに移行する現象を理論的に示して、流出現象に寄与するサブ流域スケールの効果を考察する。併せて最適なサブ流域スケールの決定手法についても述べる。

* 正会員 北見工業大学助手 工学部土木工学科
(〒090 北海道北見市公園町165)

2. 実流域での河道網パターンの移行と流出解析

流域の河道網構造は、用いる地図の縮尺によって異なり、大縮尺の地図ほど小さな河道まで記載されて、河道網構造が複雑である。図-1はオホーツク海に注ぐ渚滑川上流部（流域面積 240km²、本川長 約45km）の国土数値情報を基に作成した模擬河道網である。ここで図中の閾値が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、水源の個数がマグニチュードである。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

ンへ移行する現象がこの図から理解できよう。しかし、河道網の骨格をなす河道が全く別なパターンに移行するわけではなく、別な見方をすると、この図は降雨時のみ発生する河道が、経時変化とともに河道網を成長させていく様子を表現しているとも言える。

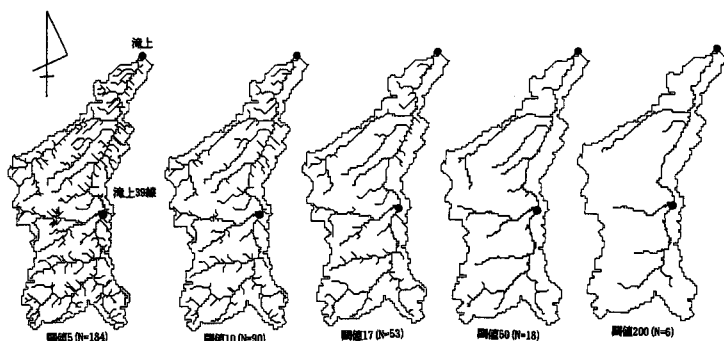


図-1 渚滑川の模擬河道網

では、この河道網パターンの移行に伴うサブ流域のスケールの変化と流出特性について、観測値と比較・検討する。解析に用いた流出モデルは、前報⁵⁾と同様に、サブ流域に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した。斜面上の流れがManning則に従う流れの場合には、次式で表現できる。

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

ここに、KとPは貯留係数、貯留指数、mとαは斜面定数、qは斜面長(m単位)、sin θは斜面勾配、nは等価粗度である。サブ流域での遅れ時間T_lは無視した。

一方、河道系は、サブ流域のハイドログラフが河道を流下・伝播する時間だけ遅らせる機能しかもたず、流下中のハイドログラフの変形を無視して合成するモデルである。伝播速度は前報⁵⁾で河道網全域を一定と仮定していたが、ここでは永井ら⁶⁾と同じく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河道の遅れを計算した。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定まるが、これらの値は河道網の全域について一様でなく、計測も容易ではない。そこで、伝播速度は、図-2に示す河道内の流水の平均流速と流量の実測値⁷⁾の関係から得られた次式を用いた。

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

図-2は神流川、利根川の観測結果であるので、他の河川にも適用出来るかを検証する必要がある。後で述べる渚滑川の解析結果から、この式がほぼ妥当であり、かなり普遍性のある式であると言える。次に、河道網におけるサブ流域からの流出量の追跡計算方法について述べる。伝播速度が一定値であると、予め河道末端から各サブ流域までの距離を求めておいて、サブ流域の流出量が河口に達する時間を計算すれば良い。しかし、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、ハイドログラフが逐次

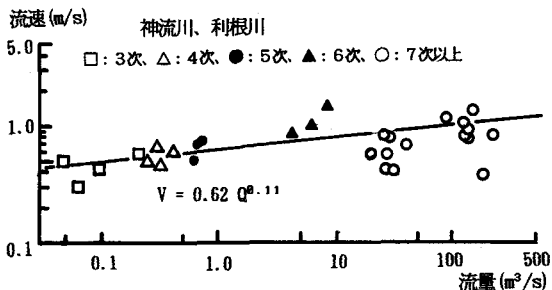


図-2 平均流速と流量の関係⁷⁾

合流する毎に伝播速度、河道の遅れ時間を計算する必要がある。問題は、その計算順序であるが、高棹ら⁸⁾は河道位数理論から最適追跡法を導き、計算に必要な記憶容量が最下流の位数の数だけ必要であることを証明している。著者はリンク-マグニチュードの河道網理論の解析において、各リンクが接続する下流のリンク番号、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ている。流出計算のために、このファイルを参照しながら逐次計算を進めるアルゴリズムを開発した。その計算順序、記憶容量は高棹らと同様な結果になった。

渚滑川（滝上）

(1989/ 8/23)

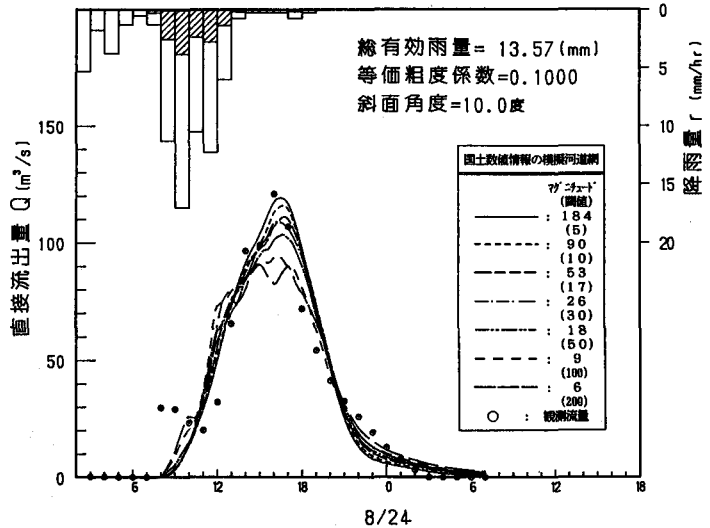


図-3 模擬河道網による渚滑川の流出計算

以上の流出モデルを図-1の渚滑川

に適用した計算例が図-3である。サブ流域のスケールの効果を調べるため、解析には閾値の変化によって容易にサブ流域スケールを変えることの出来る模擬河道網を用いた。直接流出量の変換は減水曲線の第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。サブ流域の流出パラメータは図中に示したが、この簡単なモデルが実測値を良く再現している。なお、流量の立ち上がり部で実測値の第1ピークを再現できないのは、有効雨量の算定で立ち上がり流量以前の雨量を損失と見なしているためである。計算結果を見ると、マグニチュードNが小さい方が、流量のピークが低めに計算されている。マグニチュードが大きくなり流域分割数が増えると流量のピークが次第に大きくなるが、流量のピークの生起時刻はほぼ同じである。この結果だけから、最適な流域分割数、つまりサブ流域スケールを断定することは難しい。また、この先さらに流域を分割した場合に、流出特性がどのような挙動を示すのかも興味深い。したがって、次節で河道網パターンが特定のパターンから特定のパターンへの移行する過程を理論的に表現し、流出特性の検討を試みる。

3. 河道網パターンの移行過程の理論

いま、流域が均一で、地図の精度も全ての地点で等しい条件下で、ある特定の縮尺における河道網がマグニチュードNである流域を考える。縮尺が大きくなると全てのリンクにj個のリンク（河道）が新たに出現する理想的な河道網パターンの移行過程を誘導しよう。まず、河道網パターンの定式化のために、図-4のような河道末端からi本のリンク遡った所に位置するリンク数 K_i を用いて、河道網パターンを $C_N(K_1, K_2, \dots, K_i, \dots)$ で定義する⁹⁾。この河道網の全てのリンクにj本のリンクが出現したとすると、新たに移行した河道網パターンは以下になる。

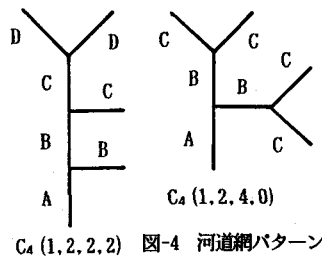


図-4 河道網パターン

元の河道網パターン	⇒	新たな河道網パターン
マグニチュード N	⇒	$N' = N + j(2N - 1)$
総リンク数 $2N - 1$	⇒	$2N' - 1 = (2j + 1)(2N - 1)$
河道網パターン $C_N(K_1, K_2, \dots, K_i, \dots)$	⇒	$C_{N'}(\underbrace{K_1, 2K_1, \dots, 2K_1}_{j\text{個}}, \underbrace{K_2, 2K_2, \dots, 2K_2}_{j\text{個}}, \dots, \underbrace{K_i, 2K_i, \dots, 2K_i}_{j\text{個}}, \dots)$

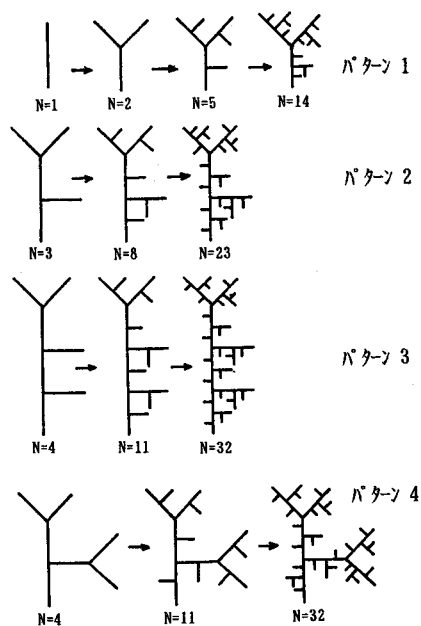


図-5 河道網パターンの移行

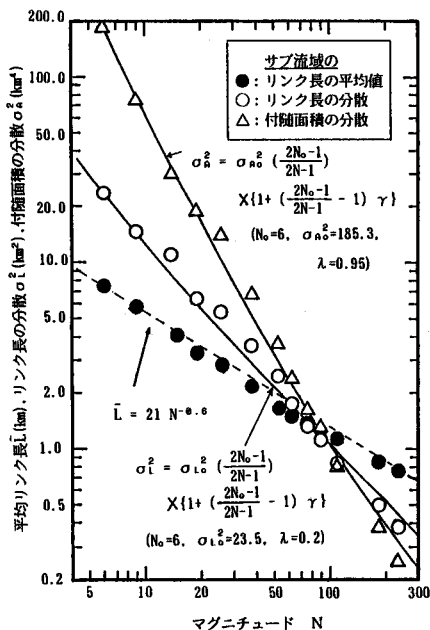


図-6 サブ流域の地形量特性 (清滑川)

図-4の $C_4(1, 2, 2, 2)$ の河道網に $j=1$ 本のリンクが出現した場合の河道網パターンは、図-5に示す様に移行して、 C_N も以下のように変化することになる。

$C_4(1, 2, 2, 2) \Rightarrow C_{11}(1, 2, 2, 4, 2, 4, 2, 4) \Rightarrow C_{32}(1, 2, 2, 4, 2, 4, 4, 8, 2, 4, 4, 8, 2, 4, 4, 8) \Rightarrow C_{95}(1, 2, 2, 4, \dots)$
 なお、各々の河道網パターンの生起確率は、前報の確率関数 $F(S, M, K)$ を用いて導くことができる⁵⁾。

次に、リンクが新たに出現すると、元のサブ流域が3分割され、サブ流域のリンク長・面積の分布特性も変化する。この移行後のサブ流域のリンク長・面積の確率分布特性を決めるのは、元のリンクのどの地点にリンクが出現するかを定義する確率分布で、その分布は元のリンク長の条件付き確率分布になると予想される。しかし、著者らが流域の分割に伴うサブ流域のリンク長・面積の分布特性を調べた結果によると、各々の分散とマグニチュードの関係は図-6に示す式で表され、確率分布もガンマ分布でほぼ近似できる結果を得ている⁵⁾。つまり、この関係式は河道網の骨格を成す大まかな河道網パターンのマグニチュードと各々の分散の実測値、更に流域の個性を表すパラメータ γ を与えることによって、流域分割に伴って変動する分散を推定できることを示している。したがって、河道網パターンの移行に伴って変化するサブ流域のリンク長・面積の確率分布をガンマ分布に仮定し、図-6の実測結果からガンマ分布のパラメータを決定した。また、リンク長の平均値もHackの関係式から得られる本川長と支流数の期待値から推定できるが⁵⁾、清滑川の場合は流域が細長い形状をしていることから適合度がよくないので、流出計算には図-6に示す回帰式を用いた。

4. サブ流域スケールの検討

上記の理論を用いて、河道網パターンが特定パターンから特定パターンに移行することによる流出ハイドログラフの変動を調べ、サブ流域スケールの効果を明らかにする。図-1から、清滑川の骨格をなす河道網パターンは図-5のパターン3と見なせるので、このパターンからの移行を検討する。著者は既にサブ流域のリンク長と面積が確率変動しない平均値だけを用いた議論をしている⁹⁾ので、本論文では確率変動を考慮した解析を行う。まず、各々の河道網の特定パターン毎にサブ流域のリンク長・面積をガンマ分布乱数によって発生させ、模擬流域を生成する。このとき河道網の追跡計算順序を決めるための、サブ流域の接続状況を表すデータファイルも併せて作成しておく。このシミュレーションを500回繰り返し行い、各々のパターンにお

いてサブ流域の変動を考慮した流出特性を導く。流出計算に用いた流出パラメータは前節の実流域の流出解析と同じで、降雨波形は図-7の継続時間の異なる3種類の三角形波形とした。

図-8,9,10は3種類の降雨波形に対する流出ハイドログラフの期待値と分散を各特定河道網パターン毎に示している。ハイドログラフの期待値は、河道網の骨格をなすマグニチュード4のパターンと他の

パターンとは異なり、ピーク値が低く、その生起時刻も早い。これは降雨の継続時間と、サブ流域スケールとその変動特性が関係しているようで、降雨継続時間が長くなるほど変動の影響が小さくなり、ピーク値とその生起時刻の差が縮まることから推察できる。また、ハイドログラフの期待値のピーク値は、流域分割数が多くなるにつれて差が小さくなり、ピーク値の生起時刻も $N=95$ で差が最小になり、定常状態に達するようである。

$N=95$ を越えるとピーク値がやや減少し、その生起時刻も更に遅れる傾向が見られる。しかし、これも降雨の継続時間が長くなると、図-10の様に違いが少なくなっている。一方、ハイドログラフの分散はハイドログラフのピーク値付近で分散が最小になり、ハイドログラフのピークを挟んだ立ち上がり部、減水部で分散がピークになっている。マグニチュードが増えると分散が減少しているが、これは

前報⁵⁾での全ての河道網パターンの変動を考えた流出特性と同じ傾向である。つまり、サブ流域のスケールの効果はハイドログラフのピーク部より立ち上がり・減水部に強く影響を与えるようである。また、図-1の模擬河道網を用いて、TYPE 2の降雨を計算してみたのが図-11である。これを渚滑川の実現値と考え図-9の期待値と比較すると、ピークの生起時刻は期待値の方がやや早くなっているが、ピーク値は良く一致している。したがって、この理論的に導いた特定パターンの移行過程が実際の特定パターンの移行にある程度うまく説明している。

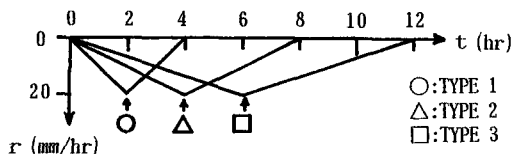


図-7 計算に用いた降雨波形

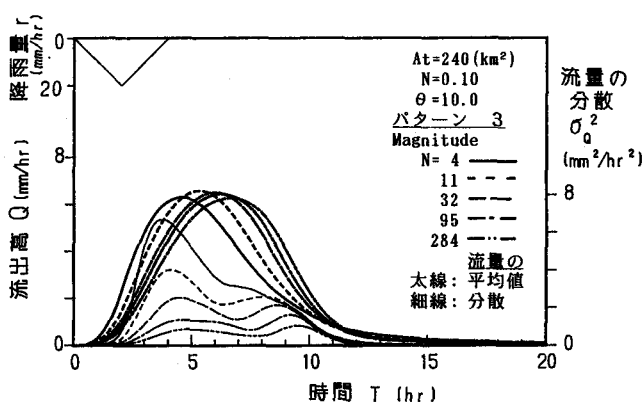


図-8 河道網パターンの移行によるハイドログラフの変動特性(降雨:TYPE 1)

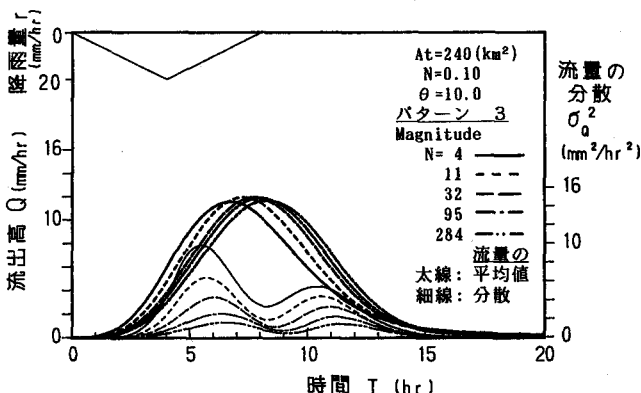


図-9 河道網パターンの移行によるハイドログラフの変動特性(降雨:TYPE 2)

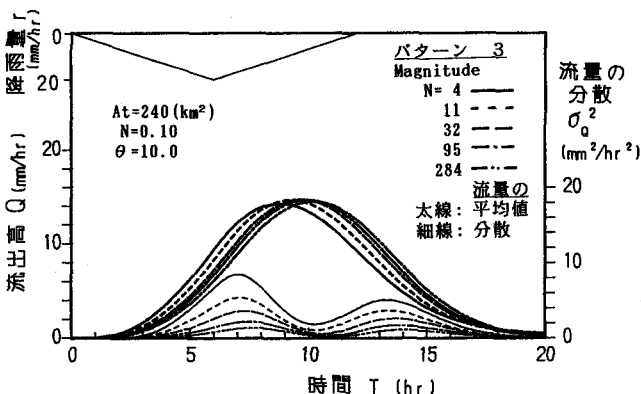


図-10 河道網パターンの移行によるハイドログラフの変動特性(降雨:TYPE 3)

次に、最大流量だけに注目して整理したのが図-12である。最大流量の期待値はマグニチュードに関係なくほぼ同じで、マグニチュードが大きくなるとやや減少する傾向を示している。ハイドログラフの期待値がマグニチュードとともに増加する傾向を示すのに対して、異なる結果の様に思える。しかし、これはハイドログラフの期待値が同時刻の流量の変動をみており、最大流量はその生起時刻に関係なく考えているためである。最大流量の期待値だけをみると、サブ流域のスケールの影響は小さいようであるが、最大流量の変動係数はマグニチュードの増加によって減少し、降雨の継続時間が長いほど変動が小さくなる傾向がみられる。つまり、信頼性の高い最大流量を得るためには、サブ流域をより細分化すべきである。また、最大流量とハイドログラフの変動特性とを併せて考えると、特に降雨の継続時間が短い場合に、より流域を分割する必要性が伺える。以上の結果から総合的に判断すると、この流域の最適なサブ流域スケールと考えられるのは $N=100$ 以上、すなわちサブ流域の平均流域面積にすると約 $1 \sim 2$ (km^2)である。

5. 結論

本研究は、流域の河道網パターンが地図の縮尺によって特定のパターンから特定のパターンへの移行を理論的に取扱い、流出特性の変動からサブ流域のスケールの効果について考察した。その結果、

サブ流域スケールは最大流量の変動特性に強く寄与し、変動の少ない精度の高い計算結果を得るためにはサブ流域をかなり小さくする必要があること、また、ハイドログラフの形成に対するサブ流域スケールの効果は、ハイドログラフの立ち上がり、減水部にその効果が顕著に現れるが、サブ流域スケールを小さくすることによってハイドログラフの変動を少なくできることが明らかになった。また、本手法は、骨格を成す河道網の地形量特性だけから、サブ流域スケールの検討が可能であることを示した。

【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) 砂田・木村：水文評価のための最適空間スケールに関する基礎研究，水工学論文集，第35巻，pp.675-678，1991。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 高埜・椎葉：河川流域の地形構造を考慮した出水系モデルに関する研究，土木学会論文報告集，第248号，pp.69-82，1976。
- 9) 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。

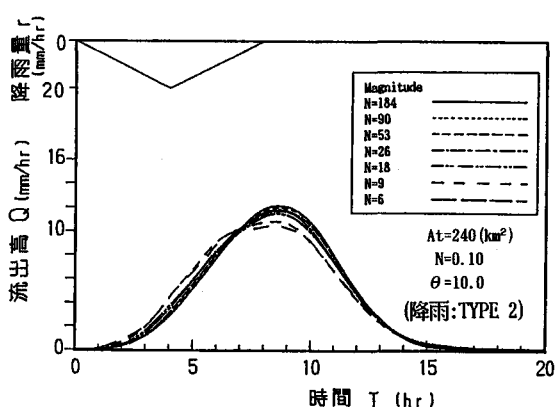


図-11 渚滑川の模擬河道網によるハイドログラフ

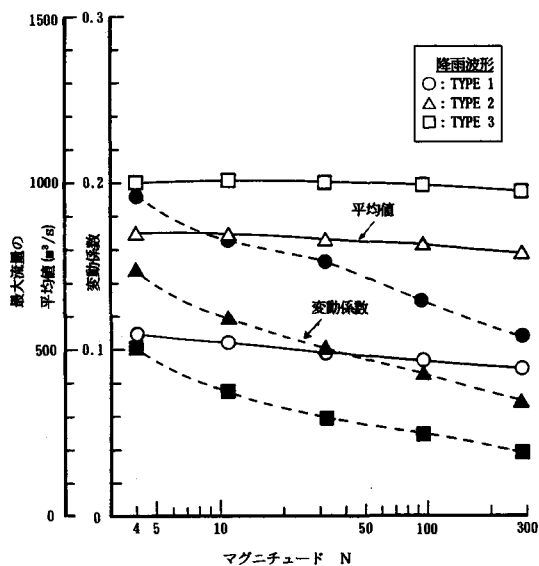


図-12 最大流量の期待値と変動係数