

流域の河道網構造を考慮した流出特性

Runoff Characteristics based on
Channel Network Structure

早川 博*・藤田睦博**

By Hiroshi HAYAKAWA and Mutsuhiro FUJITA

A drainage basin consists of slopes and channels. Slopes are the main fields at which rainfall input is converted into discharge. Stream-channels are the main fields at which the discharge from the subbasins is synthesized and transported to down-stream. The channel network geometry plays very important role in the above transportation process. This paper focuses on its process based on channel network geomorphology. Author presents new findings on the relationship between runoff characteristics and network magnitude.

Keywords: link-magnitude, hydrograph, geomorphology, channel network

1. はじめに

降雨-流出の応答は、降雨の時空間分布と流域の地形構造が大きく影響することが従来より指摘されている。流域は、降雨を流出量に変換する場である斜面と、斜面からの流出量を合成・運搬する場である河道からなり、これらの地形構造と流出との応答について、種々の研究がなされている。しかし、流域の地形構造を定量化し、流出特性を定量的に評価した研究は少ない。実際の流出解析においても、流域を適当なサブ流域に分割し、それからの流出量を合成する手法がよく用いられるが、この流域分割も経験によるところが大きく、明確な基準が無いのが実情であろう。一方、近年めざましい発達を遂げてきたレーダー雨量計によって降雨の時空間分布が容易に観測できるようになり、流出に及ぼす影響の解明が可能になってきている。したがって、今後は両者が複雑に干渉する流出場での現象を取り扱う必然性が生じ、流出解析を行う上での適切なサブ流域のスケールを明らかにする必要がある。

著者らはこれまで流域の河道網特性が流出現象に及ぼす影響を調べてきた^{1,2)}が、ここでは同一流域において地形図の縮尺を変化させると河道の発生・消滅が生じ、河道網構造、サブ流域のスケール、さらには流出パラメータも連動して変化することに注目し、流出特性に及ぼす流域分割の影響を調べる。さらにこの結果から、流出解析を行う上での適切なサブ流域スケールの検討を行った。

* 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)

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
(〒060 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

2. 流域の地形構造

流域は斜面と河道から構成されているが、流域の地形構造を定量的に評価する研究は、流域の河道網構造を対象としてHorton、Strahlerらの河道位数に基づく地形則の研究に端を発し、近年ではフラクタル理論による評価の試みも行われている。河道網の集水過程を定量的に評価するには、いずれも一長一短があり、ここでは、Shreveが提案したリンク-マグニチュード方式の河道網理論に基づいた河道網の定量化を行う。

リンク-マグニチュード方式の河道網理論は、流域の水源より発する河道を外部リンク、合流点間を結ぶ河道を内部リンクと区別するもので、流域内に含まれる外部リンク数をその流域のマグニチュードと呼んでいる。同一流域で地形図の縮尺を大きくしていくと谷筋が新たに河道として認められ、河道網が複雑になる。当然のこととしてマグニチュードも増加するので、流域のマグニチュードを変化させるということは、使用する地形図の縮尺を変化させることに符合する。

流出現象に関係する地形量の特異量としては、河道網パターン構造、各リンク長とそれに付随するサブ流域面積、河道勾配、斜面勾配等がある。仮に流域全体が均質であってもこれらはいずれも変動する量であり、この変動特性が流域の持つ個性を示すことになる。したがってここでは河道網パターン、リンク長、サブ流域面積の変動特性を定量化し、次節において流出特性への影響を明らかにする。

2.1 河道網パターン

河道網の集水過程を議論する上で、マグニチュードNの河道網において河道末端からJ本リンクを遡った所に位置するリンク（サブ流域）の個数で表現すると都合がよい。図-1に示す河道網配列パターンをリンク数の連と見なし、その生起確率とともに表したのが表-1である。表を縦方向に見ると河道末端からJ本リンクを遡った位置にあるリンク数の分布を示している。この確率関数を $D(N, J, K)$ と定義し、藤田³⁾が誘導した河道網パターンの生起確率 $P(i, N)$ を用いると次式のようになる¹⁾。

$$D(N, J+1, Z) = P(1, N) D(N-1, J, Z)$$

$$+ \sum_{i=2}^{N-2} P(i, N) \sum_{K=0}^Z D(i, J, K) \cdot D(N-i, J, Z-K) \cdots (1)$$

$$N \geq 4, \quad 2 \leq J \leq N-1, \quad [] : \text{ガウス記号}$$

$$D(N, 1, 1) = 1, D(N, 2, 2) = 1, D(N, N, 2) = P(1, N)$$

ここで、 $P(i, N)$ は河道網の最下流の合流点で河道を2つに分割し、各々の河道網のマグニチュードが $i, N-i$ となる河道網パターンの生起確率である³⁾。また、 $D(N, J, K)$ の期待値 $C(N, J)$ は平均的な河道網パターンを表し、次式の様になる。

$$C(N, J) = \frac{2^{J-1} J (N-1)! (2N-J-1)!}{(2N-2)! (N-J)!} \cdots (2)$$

図-2はマグニチュード $N=10$ の場合の $D(N, J, K)$ と $C(N, J)$ を示している。この図は河道末端からのリンク数を流域の本川長と考えると、 $C(N, J)$ が

表-1 リンク数の配列パターン

N	No.	河道末端からのリンク数 J	生起確率 P_N
4	1	1 2 2 2	4/6
	2	1 2 4 0	1/6
5	1	1 2 2 2 2	4/7
	2	1 2 2 4 0	1/7
	3	1 2 4 2 0	2/7
6	1	1 2 2 2 2 2	8/21
	2	1 2 2 2 4 0	2/21
	3	1 2 2 4 2 0	4/21
	4	1 2 4 2 2 0	4/21
	5	1 2 4 4 0 0	1/21
	6	1 2 4 4 0 0	2/21

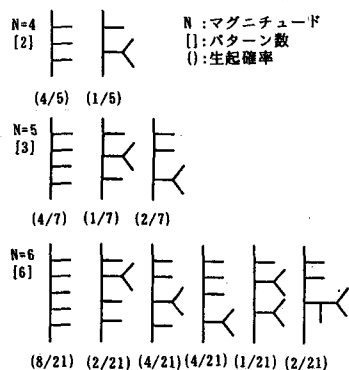


図-1 河道網配列パターン

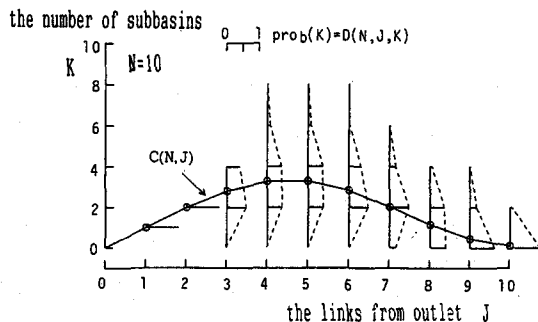


図-2 $D(N, J, K)$ と $C(N, J)$

流域の面積集中図に相当し、 $D(N, J, K)$ がその変動を示している。

一方、河道網パターン構造は次の条件を満たす必要がある。

条件 1: 河道網の総リンク数は $2N-1$ 本である。

条件 2: 河道末端から J 番目のリンク数 K の取り得る範囲は、 $J-1$ 番目のリンク数 M と J 番目から上流にあるリンクの総数 S とによって定まる。

$$0 \leq K \leq \min\{2M, S\}$$

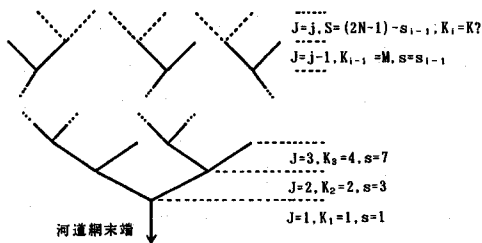


図-3 河道網パターンの模式図

$D(N, J, K)$ は J に関して独立な分布であるので、必ずしもこの条件を満足していない。そこで表-1に示したリンク数の配列パターンによって、河道網パターンを定量化することを考える。

図-3に示すような河道網パターンを考えると、 $j-1$ 番目に位置するリンク数 M と j 番目から上流にあるリンクの総数 S が与えられたときに、 j 番目のリンク数が K となる確率分布 $F(S, M, K)$ を定義すると、任意のリンク数の配列パターンの生起確率を求めることが出来る。この分布を求めると、マグニチュード N や河道末端から選ったリンク数 J に関係なく、次式のように表される。

$$F(S, M, K) = \frac{(M+S)K}{M \cdot S} \cdot \left(\frac{S}{(S-K)/2} \right) \cdot \left(\frac{M}{K/2} \right) / \left(\frac{M+S}{S/2} \right) \dots (3)$$

ここで、 $()$ は2項係数を意味し、 S, M は常に偶数である。リンク数の配列パターンの生起確率は P_c 、河道末端からリンクを1本選る毎に各リンク数の生起確率 $F(S, M, K)$ を求め、最終的にこの各々の確率の積として得られる。また、表-1で $N=6$ の場合、No.5とNo.6のリンク数の配列パターンは、図-1の河道網配列パターンが異なっているにもかかわらず同じパターンになるが、今回流量を算出する上で、洪水波形の伝播速度を一定と仮定する場合には同じパターンと見なすことができる。したがって、次節で述べる流量の変動特性は、この生起確率に基づくシミュレーションによって発生したリンク数の配列パターンの、各々に対して計算した流量の変動を議論することとなる。

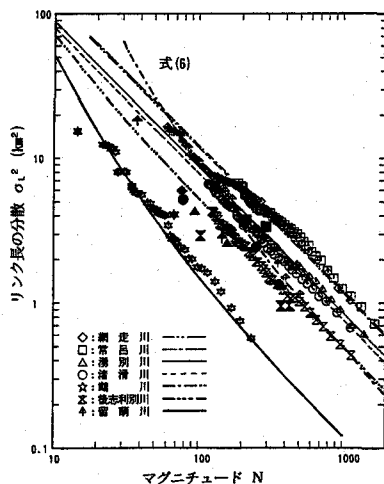


図-4 マグニチュードとリンク長の分散

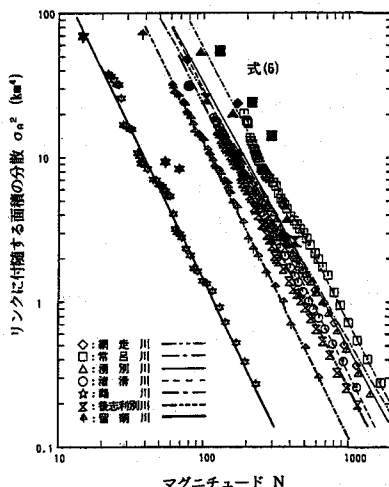


図-5 マグニチュードとサブ流域の面積の分散

2.2 リンク長とサブ流域の面積

河道網のリンク長は洪水波の到達時間に、リンクに付随するサブ流域面積はサブ流域からの流出特性に影響を与えと考えられる。リンク長の期待値 $\bar{L}$ は、河道網パターンの生起確率から求めた支流数の期待値 M_n を用いて(4)式で、サブ流域の面積の期待値 $\bar{A}$ は(5)式となり、いずれも流域面積 At とマグニチュード N だけから算出することができる²⁾。

$$\bar{L} = \frac{1.273 At^{0.6}}{1 + M_n} \dots (4) \quad \bar{A} = \frac{At}{2N-1} \dots (5)$$

同一流域を2万5千、5万、20万分の1の地図を用いて計測した結果と比較するとかなり良く一致することが確かめられた。ただし、地図上の河道の定義は地形図の水線記号を採用している。

一方、もし流域面積とマグニチュードが同規模である流域同

士は、同じ地形構造であると見なされてしまい、実際には各々の分散が流域の個性を示すものと考えられる。図-4.5はマグニチュードに対するリンク長とサブ流域面積の分散の実測結果である。計測した流域は北海道の一般河川7河川で、黒印は地形図を、白抜き印は国土数値情報から任意の閾値で発生させた模擬河道を計測したものである。河川によっては両者の差が大きいものもあるが、概ねマグニチュードの変化に対して両者は同様の傾向は示している。また、図中の線群はリンク長、サブ流域面積の分散とマグニチュードの関係を理論的に誘導した次式を図示したものである。

$$\sigma_{N1}^2 = \sigma_N^2 \left(\frac{2N-1}{2N_1-1} \right) \left\{ 1 + \left(\frac{2N-1}{2N_1-1} - 1 \right) \gamma \right\} \dots (6)$$

この式はあるマグニチュードNにおける分散(リンク長、面積等)が既知のとき、任意のマグニチュードN₁における分散を推定する関係式で、パラメータγを平均するとサブ流域の面積がγ=0.7、リンク長がγ=0.0の値となっている。この値を本研究の解析対象とする流域面積が150km²以下程度の実測結果に適用したのが図-6.7である。流域面積が150km²と100km²を比較すると、100km²の方がリンク長、サブ流域面積とも分散が小さくなることから分かる。しかし、各流域毎の変動がリンク長の場合、かなり大きい。式(6)は実測結果を良く表現していると言えよう。したがって、リンク長とサブ流域の面積の確率分布関数としてガンマ分布を仮定すると、形状・縮尺パラメータが上記の期待値と分散から決定されることになる。

3. 流出モデル

本研究の目的は、サブ流域の適切なスケール場を調べることにあり、定量化した地形構造を取り入れることができるモデルであることが望ましい。

斜面系に用いた流出モデルは、藤田⁴⁾のKinematic Wave法を置換した貯留関数法で、流域の地形構造を考慮することができ、計算も容易である。斜面上の流れがManning則に従う場合には、貯留指数P、貯留係数Kは次式で表される。

$$K = \frac{m}{m+1} \left\{ \frac{1000^{m-2} g}{3.6 \alpha} \right\}, \quad P=1/m, \quad m=5/3, \quad \alpha = \sqrt{\sin \theta} / n \quad \dots (7)$$

ここに、mとαは斜面定数、gは斜面長(m単位)、sinθは斜面勾配、nは等価粗度である。遅れ時間T₁は、斜面系での降雨-流出の応答を考える上では、無視できるものとした。サブ流域内の斜面長gは対数正規分布やガンマ分布で近似できると言われている^{4,5)}が、ここでは斜面を矩形に置換し、g=Ai/2Li(Li, Ai:サブ流域のリンク長と面積)から求めた平均斜面長とし、サブ流域内の斜面長の変動までは考えていない。斜面定数αは斜面勾配と等価粗度によって各サブ流域毎に変動する量であると考えられるが、ここでは山地流域の一般的な斜面勾配(θ=10°)と等価粗度(n=0.15)の一定値を与えた。従って、今回のサブ流域からの流出量q_i(t)はAi, Li, gの変動の影響を考慮したことになる。また、矩形波形降雨に対してKinematic Waveモデルは理論

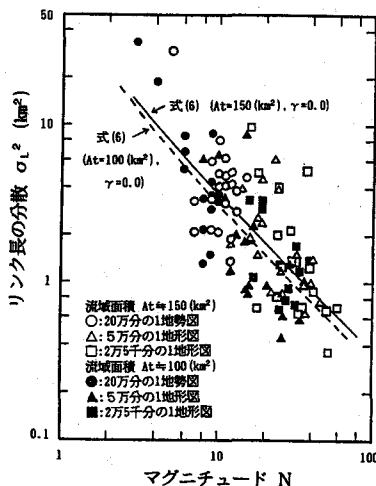


図-6 マグニチュードとリンク長の分散

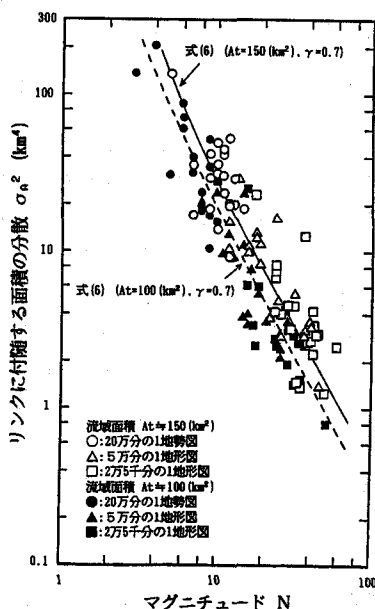


図-7 マグニチュードとサブ流域の面積の分散

解が得られている⁹⁾ので、貯留関数法との比較検討も行った。

一方、河道系は、斜面からの流出波形を一定速度で流下・伝播させ、河道網パターンに応じて線形重ね合わせることによって河道末端における流量を合成するモデルである。このモデルは、すでに小葉竹ら⁷⁾によって洪水波がKinematic Waveとして特性づけられる比較的急峻な中小流域に、十分適用できるモデルであることが検証されている。したがって、河道末端における流量 $Q(t)$ (m^3/s)は次式ようになる。

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{2N-1} q_i(t - \frac{L M_i \times 10^3}{V}) \quad \dots\dots (8)$$

ここで、 $q_i(t)$ (m^3/s)は i 番目のサブ流域からの流出量、 $L M_i$ (km)は河道末端から i 番目のサブ流域の出口までの河道長、 V (m/s)は流出波形の流下する伝播速度である。

4. 流出特性とサブ流域のスケール

同一流域を細分化していくと、河道網の構造、サブ流域のリンク長、面積、斜面長や斜面勾配が変化することになる。もし、流域のマグニチュードが与えられると、幾つかの河道網のパターンが考えられるが、実河川の河道網はその中の一つの実現値であると言えよう。したがって、各々の河道網パターンによって、河道末端で合成されるハイドログラフが異なることから、普遍的な流域分割基準、すなわちサブ流域のスケール場は、単にサブ流域の大きさだけでなく、河道網の全てのパターン、さらには河道網を構成するリンク長、サブ流域面積の変動をも考慮した流出特性から考察する必要がある。

解析方法は、シミュレーションによるものとする。具体的には、河道網パターン、リンク長、サブ流域面積が2.節で述べたような確率分布に従うものとして、各諸量をシミュレーションによって発生し、一組の模擬流域を生成する。サブ流域の面積のシミュレーションには、その総和が流域面積に一致するとの条件を付加する。この模擬流域を、3.節の流出モデルに従ってハイドログラフを計算し、これを繰り返し行うことで流量の変動特性を求めた。流量の計算には式(8)の $L M_i$ を、河道網パターンとリンク長から求めるのであるが、河道網パターンとしてリンク数の配列パターンを用いた場合、リンク同士の接続状態まで正確に把握できないので、ここでは $L M_i$ を構成するリンク数だけ発生させたリンク長の和を $L M_i$ とした。また、シミュレーション回数を1,000回としたが、マグニチュードが大きくなると、表-2のように河道網のパターン数がこれ以上になり、シミュレーション回数を増やす必要がある。しかし、その点について検証したところ、結論を変えるほどの影響はないようである。また、マグニチュードは同一流域における流域細分化の指標とみなせるので、これを介して流出特性を議論する。

表-2 河道網のパターン数

マグニチュード N	パターン数
5	3
10	98
20	293,547
30	1.4068×10^9
50	5.1501×10^{10}

計算条件は、流域面積が $A_t=100$ と $150 km^2$ 、降雨は矩形波と三角形波の2種類で、継続時間 $T_r=10$ (hr)、ピーク降雨強度 $R_p=20$ (mm/hr)、また、各サブ流域からの流出量の伝播速度は $V=2$ (m/s)と一定速度とした。

図-8, 9は、貯留関数法によって $A_t=150 km^2$ の場合の流量の期待値と分散を求めた結果を示す。両図とも流量の期待値はマグニチュードが大き

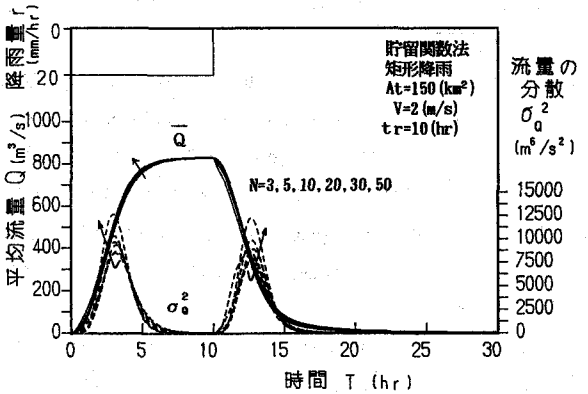


図-8 マグニチュードに対する流量の期待値と分散

見ると、矩形降雨の場合、降雨の降り初めと停止直後の流出量の時間変化が大きいことが影響して、分散が大きくなっている。一方、実際の降雨に近い三角形降雨の場合も分散は矩形降雨と同じく流量のピークの前後でピーク値が生じ、流量のピーク時に極小値を示している。この流量のピーク時に分散が減少するのは、降雨のピーク時間、継続時間等の関係によって一概には言えず、図は載せていないが降雨継続時間が短い集中豪雨タイプの降雨では、流量ピーク時に分散が最大となる場合もある。また、 $At=100\text{km}^2$ の場合も同様な傾向を示していた。

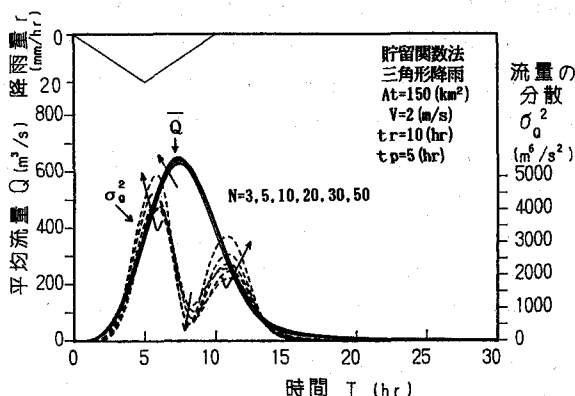


図-9 ヲグニチュートに対する流量の期待値と分散

次に、流域を分割したことが流量の変動にどう影響するかを見るために、図-10に流量の分散の最大値とマグニチュードの関係を示した。 $At=150\text{km}^2$ の場合、マグニチュードが $N=5$ 付近で極小となり、その後マグニチュードが増加するにつれて分散も増大している。この傾向はKinematic Waveモデルでも同様であり、モデルの違いの影響は少ないようである。一方、 $At=100\text{km}^2$ の場合、マグニチュードの増加による分散の増加の割合が小さく、矩形降雨は $At=150\text{km}^2$ の三角形降雨と同程度、実際の降雨に近い三角形降雨では $N=20$ 以上では一定となっている。この傾向はマグニチュードが大きくなると、河道網パターンは分散が大きくなり、リンク長、サブ流域の面積の分散は減少するので、あるマグニチュードで流量の分散が極小値をとるためと考えることができる。したがって、流出解析を行う上で最適なサブ流域のスケール場としては、流域をマグニチュード $N=5$ 程度、すなわち流域を10分割程度に分割すると、流量の変動が小さく、河道網パターンを意識しなくても良いことが分かる。それ以上に分割する場合には、河道網パターンを考慮しなければおかしいハイドログラフを計算する可能性が高く、注意すべきことが指摘できる。また、流域のスケールの比較から、流域面積が大きい場合に、流域内の河道網構造が流出特性に強く影響しており、サブ流域の面積だけでサブ流域の最適なスケールを決定できないようである。

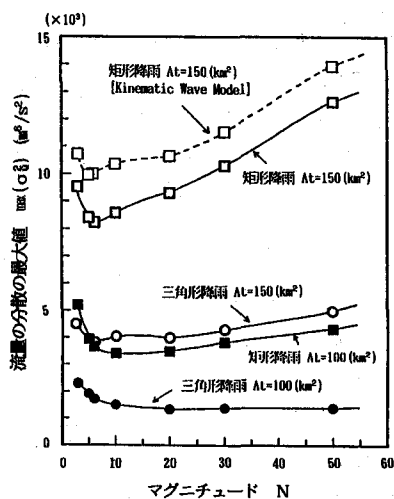


図-10 ヲグニチュートと流量の分散の最大値の関係

【参考文献】

- 1) HAYAKAWA, H AND FUJITA, M : STUDY ON HYDROLOGIC RESPONSE VIA CHANNEL NETWORK GEOMORPHOLOGY, Proceedings of the 1990 National Conference, Hydraulic Engineering Vol.1, 1990.
- 2) 館谷 清・藤田睦博：河道網特性と貯留関数法に関する研究，水文・水資源学会誌，Vol.2, No.2, 1989.
- 3) 藤田睦博：河道網における支流の分布特性に関する研究，土木学会論文報告集，Vol.246, 1976.
- 4) 藤田睦博：斜面長の変動を考慮した貯留関数法に関する研究，土木学会論文報告集，Vol.314, 1981.
- 5) 角屋睦・福島辰・佐合純造：丘陵山地流域モデルと洪水流出モデル，京都大学防災研究所年報，第27号，B-2, 1978.
- 6) Eagleson, P. S.: Dynamic Hydrology, McGraw-Hill Book Company, 1970.
- 7) 小葉竹重機・石原安雄：タンクモデルおよび集中面積図を利用した洪水流出モデルの総合化，土木学会論文報告集，Vol.337, 1983.