

分布型流出モデルにおける河道網特性と集中効果

CHANNELING SYSTEM AND ITS EFFECT ON RUNOFF CONCENTRATION OF DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF MODEL

陸 旻皎*・小池俊雄**・早川典生***・後藤 巖****

BY MINJIAO LU, TOSIO KOIKE, NORIO HAYAKAWA AND IWAO GOTO

Abstract

In the runoff analysis, not much attention has been paid to the process of flowing down the channeling system embedded in a basin. The existence of the channeling system in any basin all the way up to the basin divide indicates, however, this process to be an important part in the runoff analysis. The objective of this paper is to show how this process governs the concentration process of the basin runoff. A distributed rainfall-runoff model is used for this purpose in which the longitudinal distributions of channel geometry and flow resistance can be taken into account.

Firstly, the sensitivity analysis of the parameters governing the channel geometry and the flow resistance showed that the runoff model is quite stable to some of the change of the parameters. Secondly, the effects of both spatial and temporal distribution of rainfall within a basin have been investigated with this model. Finally, the propagation of flood flow along channeling system is investigated to obtain the relationship of the time of peak flow, drainage area at each channel and the rainfall intensity.

Keywords: channel system, channel flow, rainfall, distributed model, spatial and temporal scales

1 はじめに

流出の流域内での集中は流出現象の最も重要な素過程の一つであるが、流域斜面における集中だけが重要視されてきており、山地小流域において、河道集中は無視できると言われてきた。Takahashi et al.[8], Surkan[7], 日野ら[1], 宝[9], 小池[2]が観測や数値シミュレーションにより、斜面あるいは流域全体の集中過程を研究しているが、河道網に関するものは少ない。しかし、自然流域においては、かなり上流まで河道が存在し、河道流が流出の重要な集中形態であると推測される[3, 6]ので、流出現象における河道網の役割を十分考慮する必要がある。

一方では、人類活動による自然改変が急速で大規模になるにつれ、その水文環境への影響がますます大きくなってきている。このような流域水文条件の変化に対応するために、流域出口の流量だけでなく、流域を取り巻く水及びエネルギーのフラックスを捉えることが必要である。この場合に、地理情報システム及びリモートセンシング技術より得られる各種水文情報、例えばレーダー雨量計雨量、数値化された地形、地質、植生情報などを用いた分布型降雨流出モデルがきわめて有効であると思われる。また、その大気モデルとの連結も陸・大気系を考える上で欠かせることの出来ないものである。しかし、スケールの問題をはじめとす

*	正会員	工博	長岡技術科学大学助手	(940-21 新潟県長岡市上富岡1603-1)
**	正会員	工博	長岡技術科学大学助教授	(同上)
***	正会員	Ph.D	長岡技術科学大学教授	(同上)
****	正会員	工博	長岡技術科学大学教授	(同上)

る多くの問題がまだ解決されていない。その中で、流域内の各小面積の流出量の集中経路としての河道網の役割が近年再認識されつつあり、その総合的な評価が流出現象への理解を深めるだけでなく、分布型降雨流出モデルの開発やスケールの問題などにも大きく寄与すると考えられる。

本研究では、著者らによって提案された分布型流出モデル [4] 及び河道特性モデル [3] を結合して、河道の流出への影響を総合的に評価する。まず河道特性モデルのパラメーターの感度分析を行い、それらの変化に伴う流出の変化を明らかにする。次に魚野川上流域 (355km^2) を対象流域とし、極端な時空間分布をもつ降雨入力によってもたらされる流出を算出し、降雨時空間分布の流出への影響を明らかにし、流域内の河道網特性の果たす役割を示す。さらに、裏筑波試験地山口川 (3.12km^2) と魚野川に対し、洪水流の河道網内の伝播特性を調べ、その時空間スケールについて基礎的な考察を加える。

2 流出モデル及び河道特性モデルの概略

本研究で用いた流出モデルは、著者らの開発した分布型降雨流出モデルであり、魚野川上流域、利根川上流域などの流域の洪水解析 [4, 5] に適用し、よい結果が得られている。本モデルでは、流域をメッシュに分割し、各メッシュにおいて発生した流出量を、直接流出成分と基底流出成分とに分離する。基底流出成分は集中型である貯留関数法によって流出高に変換され、直接流出成分は擬河道網を介して、流域の出口まで *Kinematic Wave* 法で追跡計算される。ここで、擬河道網は流域内の各メッシュにおける流出の流域出口への集中経路を示すもので、流域地形情報から算出したものである。また、このモデルに組み込まれている河道特性モデルでは、擬河道網内のメッシュ点 i における河道の河道幅 B_i と *Manning* の粗度係数 n_i を以下のように与える。

$$\text{河道幅} \quad B_i = a A_i^b \quad \text{or} \quad B_i = B_0 \left(\frac{A_i}{A_0} \right)^b \quad (1)$$

$$\text{Manning の粗度係数} \quad n_i = c A_i^d \quad \text{or} \quad n_i = n_0 \left(\frac{A_i}{A_0} \right)^d \quad (2)$$

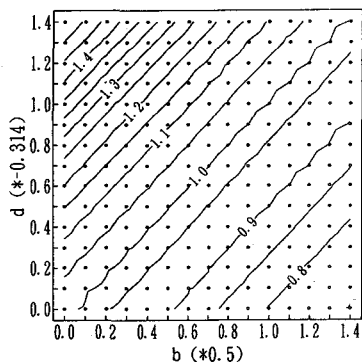
ただし、 a, b, c, d はパラメーターであり、 A_i はメッシュ点 i の河道の集水面積で、 B_0, n_0, A_0 はそれぞれ流域出口での河道幅、*Manning* の粗度係数と集水面積で、両者間に $B_0 = a A_0^b, n_0 = c A_0^d$ で変換できる。流域間の比較をする際には、 a, c を、流域内の分布を考えるとときには B_0, n_0 を用いたほうが便利であろう。なお、著者らのデータから、 b と d がそれぞれ $0.5, -0.314$ 付近にあることが示されているので、 $b = 0.5, d = -0.314$ と固定する。本研究では、モデルパラメーター B_0 と n_0 に各流域の洪水解析で得られた値を用いる。

3 河道特性の流出への影響

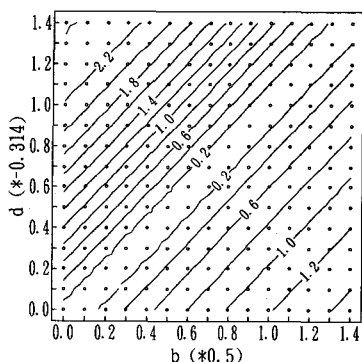
本研究は魚野川流域の 250m メッシュモデルを用いて流出計算を行い、河道特性モデルのパラメーター a (或は B_0)、 b, c (或は n_0)、 d の変化による流出の変化を以下の 4 ケースの数値シミュレーションにより調べた。

1. a, c を 5 通り、 b, d を 3 通りずつ変化させる。
2. a, c を固定し、 b, d を 15 通りずつ変化させる。
3. B_0, n_0 を固定し、 b, d を 15 通りずつ変化させる。
4. b, d を固定し、 B_0 と n_0 を 15 通りずつ変化させる。

各パラメーターの変域がまだ十分把握出来ていないために、このシミュレーションはパラメーターの感度比較というよりも、各パラメーターがどのように流出に影響を与えるかを示すものである。ケース 1 で各パラメーターの流出ハイドログラフへの影響を全般的に調べる。 a, b, c が大きくなるに連れ、洪水ピークが小さくなり、遅く現れる。一方、 d の減少 (絶対値の増加) が洪水ピークを大きくする。また、パラメーターの値

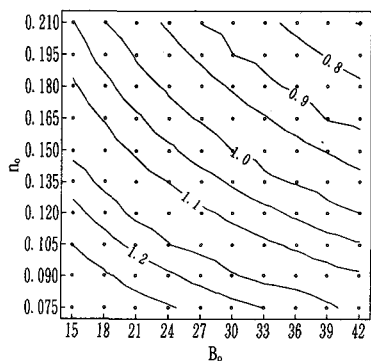


Contour map of CR_p

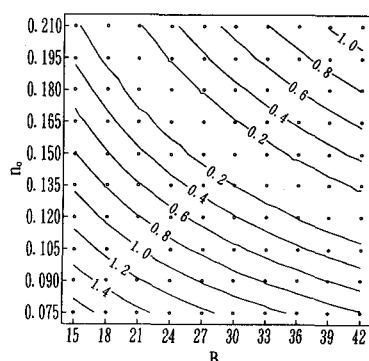


Contour map of CR_h

Fig. 1: Effects of b, d on flood peaks and hydrographs with a, c fixed.



Contour map of CR_p



Contour map of CR_h

Fig. 2: Effects of B_0, n_0 on flood peaks and hydrographs with b, d fixed.

があまり現実的なものではないが、洪水ピークを減少させる要因がいくつか重なった場合に、洪水波形が崩れ、複数個のピークをもつ波形となることもある。

ケース2とケース3とはともに b, d の流出への影響を知るために行ったものである。洪水波形の違いを定量的に扱うために、ここで、洪水ピークと洪水波形に注目し、 $b = 0.5, d = -0.314$ の場合の結果を基準に、以下の指標

$$CR_p = \frac{Q_p}{Q_{0,p}} \quad (3)$$

$$CR_h = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (Q_i - Q_{0,i})^2}}{\frac{1}{n} \sum Q_{0,i}} \quad (4)$$

を用いて、その影響を調べることにする。ただし、 Q_p はピーク流量、 Q_i は i 番目の流量値で、 n はデータ数であり、下付き添え字 0 は $b = 0.5, d = -0.314$ の場合の値を意味する。 CR_p はパラメーター変化によるピーク流量の変化を、 CR_h はハイドログラフの変化を示す指標である。Fig. 1 はケース3の等 CR_p 線図と等 CR_h 線図である。等値線が直線 $\frac{d}{-0.314} = \frac{b}{0.5}$ にほぼ平行である。これらの等値線上のどの b, d の組合せも、ほぼ同様なモデル応答特性が得られると考えられる。極端に言えば、 $b = 0, d = 0$ で得られた流域出口のハイドログラフが $b = 0.5, d = -0.314$ で得られたものとはほぼ同じである。つまり、河道幅 B と Manning の粗度係数 n を流域内一定としたモデル ($b = 0, d = 0$) でも、流域の出口において、河道特性の空間分布を考慮にいたしたモデルとほぼ同様なハイドログラフが得られる。これは初期のモデル、つまり、河道幅 B と Manning の粗度係数 n を流域内一定としたモデルがよい結果を得た理由でもある。

ケース4は b, d をそれぞれ 0.5, -0.314 とし、流域出口の河道幅 B_0 と Manning の粗度係数 n_0 を変え、その流出への影響を調べるものである。ここでも、 CR_p, CR_h を用いるが、この場合には、流域出口の河道幅 $B_0 = 30.0\text{m}$ と Manning の粗度係数 $n_0 = 0.15$ を基準とする。なお、これらの値は魚野川の洪水解析で得られたものである。Fig. 2 はケース4の等 CR_p 線図と等 CR_h 線図である。等 CR_p 線と等 CR_h 線が概ね平行であり、しかも $CR_p = 1.0$ の付近で CR_h がほぼ最小になる。また、これらの等値線が $n_0^{3/5} B_0^{2/5} = \text{const}$ にほぼ平行である。広幅矩形断面流路における洪水伝播速度が

$$\frac{dx}{dt} = \frac{5}{3} \frac{i^{3/10} Q^{2/5}}{n^{3/5} B^{2/5}} \quad (5)$$

であることから、河道幅と Manning の粗度係数が洪水伝播速度を通じて流出に影響を及ぼしていることが分かる。

4 降雨空間分布の影響について

まず、魚野川流域に対して、250mメッシュのモデルを用いて、河道幅 B と Manning の粗度係数 n が流域内一定の場合 ($b = 0, d = 0$) と、空間分布を持つ場合 ($b = 0.5, d = -0.314$) について、降雨の空間分布の流出への影響を調べた。計算では、上、中、下流部の3分の1の面積に強度 1mm/min. の直接流出を1時間与え、それによって生じた魚野川流域出口の六日町の流量を求めた。その結果、前節の数値シミュレーションで示されたように、河道特性の空間分布を考慮したモデルでも考慮しないモデルでも、ほぼ同様なハイドログラフが得られる。

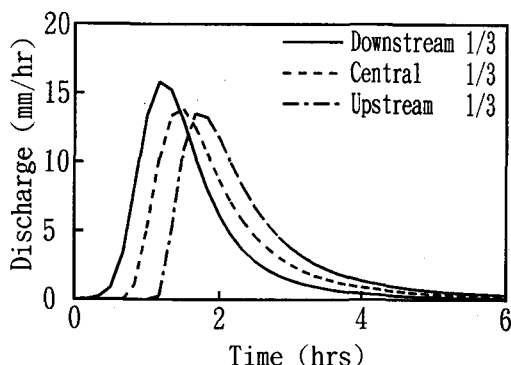


Fig. 3: Hydrographs computed from spatially distributed rainfall.

Fig. 3 が計算で得られたハイドログラフで、図から分かるように、降雨の空間分布が主にハイドログラフの時間遅れに影響を与えるが、ハイドログラフの形状やピーク流量には、顕著な影響を与えていない。降雨空間分布の流出に与える影響の物理的背景を明らかにするために、本研究では上、中、下流部の3分の1の流域面積内にあるメッシュ点の集水面積の頻度分布及び流域出口までの流路長の頻度分布を調べた。

Fig. 4 がそれぞれ3つの流域面積における各メッシュの集水面積及び流路長の累積頻度分布である。集水面積の方は集水面積の大きい部分を除いて、ほぼ同一な頻度分布を有している。集水面積が小さいほど流出に

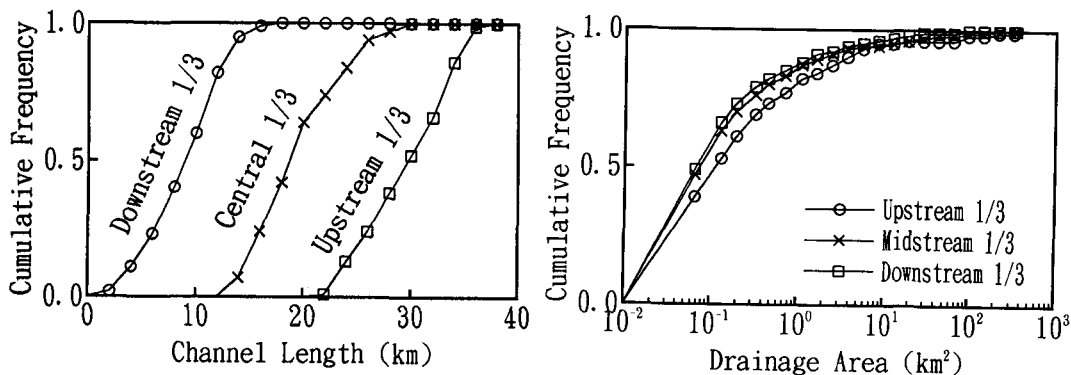


Fig. 4: Frequency distribution of channel length and drainage area of each grid node.

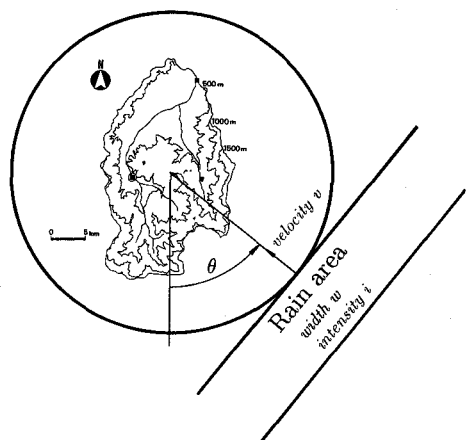


Fig. 5: Definition of rainfall area passing through the basin.

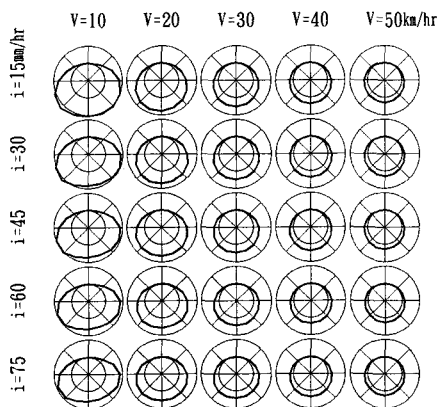


Fig. 6: Ratio of peak flow to its minimum for moving storm($b=0.5$, $d=-0.314$; inside circle: 1, outside circle: 2).

対する抵抗が大きいことから、河道幅及び Manning の粗度係数の空間分布を考慮する場合も考慮しない場合も、3つの流域面積の流出がほぼ同程度な流れ抵抗を受けていると考えられる。一方、流路長の方は、3つの流域面積に顕著な違いが現れている。上流部3分の1の方が、全体的に長く、下流部3分の1の方が、全体的に短くなっている。ハイドログラフの違いは集水面積よりも流路長の頻度分布の違いによるものと思われる。

5 雨域移動の影響について

雨域移動の流出への影響を調べるために、本研究では、Fig. 5のように、無限の長さを持つ幅 w 、降雨強度 i の雨域を移動方向 θ に速度 v で移動させて、流域を通過する時の流域出口での流量を求めた。このシミュレーションはすべてのメッシュ点に雨が一時間降るように $w = v$ と固定し、250m メッシュのモデルを用いて、河道特性の空間分布を考慮しない場合と考慮する場合の2ケースに分けて行った。考慮する場合には、移動方向 θ を 10° 間隔で、時速 v を5段階、降雨強度 i を5段階変えて計算を行った。一方、河道特性の空間分布を考慮しない場合には、考慮する場合と同じ条件で計算するが、移動方向 θ による変化がゆるやかなので、計算時間を短縮するために、方向 θ を 22.5° 間隔で計算を行った。ここでも、両ケースではほぼ同様な結果が得られた。河道特性の空間分布を考慮した場合の結果だけを Fig. 6 に示し、計算で得られたピーク流量と一周の内の最小ピーク流量との比の、 θ , v , i との関係を表している。内側の円が1、外側の円が2を表わす。

図から分かるように一つの降雨強度 i と雨域移動速度 v の組合せに対し、雨域が本川魚野川とほぼ同一方向に移動するときに、ピークが最も大きく、また、主要支川登川に沿って移動するときにもピークが大きくなっている。一周の内に最大ピーク流量と最小ピーク流量の比が2を超える場合もある。これは雨域が河川に入った流出と同じ方向に進み、各メッシュの流出の集中時期を同じくし、河川流量を増幅させている為である。雨域移動速度が河道網における河川水の平均的な速度と同じになるときに、洪水ピークが最も大きくなると考えられる。一方、雨域が河川の流れの逆方向に移動する場合に洪水ピークが小さくなっている。これは、雨域の移動が各メッシュの流出の集中時期を分散させ、洪水波形を引き延ばすように働くからである。また、最大ピークと最小ピークの違いが雨域移動速度 v と雨域降雨強度 i の組合せによって大きく変化する。

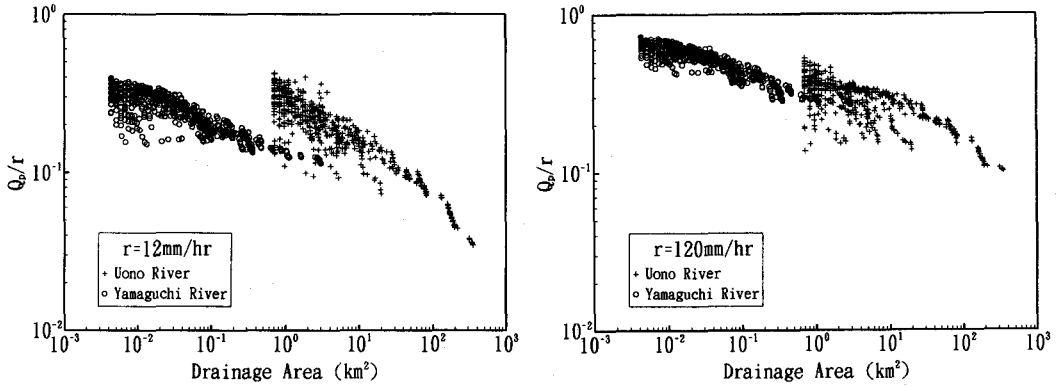


Fig. 7: Relation between peak flow and drainage area in Uono river and Yamaguchi river.

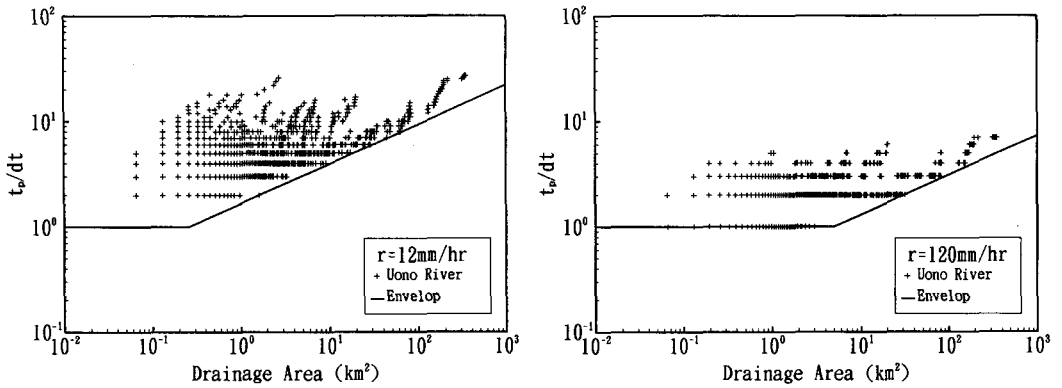


Fig. 8: Relation between time to peak and drainage area in Uono river.

6 河道網内の洪水伝播特性

河川の洪水流量、特にピーク流量はその上流域の降雨の時空間分布特性と流域特性、つまり斜面と河道の特性との総合作用によるものであるが、冒頭でも述べたように、河道の効果に関する研究が少ない。本研究では、魚野川と山口川に対し、降雨強度 $r_e = 12 \times k \text{ (mm/hr)}$, ($k = 1, 2, \dots, 10$) の有効降雨を 10 分間与え、流域内各メッシュでのハイドログラフを時間ステップ $dt = 10 \text{ min.}$ の分布型流出モデルで求め、洪水のピーク流量と到達時間に着目して洪水の伝播特性を調べる。

Fig. 7 は流域内各河道末端でのピーク流出高と有効降雨強度の比とその集水面積の関係を示すものである。図からピーク流出高が集水面積の増加に伴って大きく減少することが分かる。さらに、有効降雨強度が大きくなるにつれて、減少が遅くなる。洪水ピークの空間分布等を論じる際に、斜面特性と降雨の時空間分布特性だけでなく、河道集束の効果を考慮する必要性を示唆するものと考えられる。

Fig. 8 は魚野川における洪水到達時間、つまり雨の降り初めから流量ピークまでの時間と集水面積との関係を示すものである。但し、縦軸は流出モデルの時間ステップ dt で無次元化してある。本研究では、早い洪水到達時間に注目し、データの下方に包絡線を引き、それについて検討する。全ての有効降雨強度に対し、包絡線が次のような関数形

$$t_p/dt = \begin{cases} \left(\frac{A}{A_c}\right)^d & A > A_c \\ 1 & A \leq A_c \end{cases} \quad (6)$$

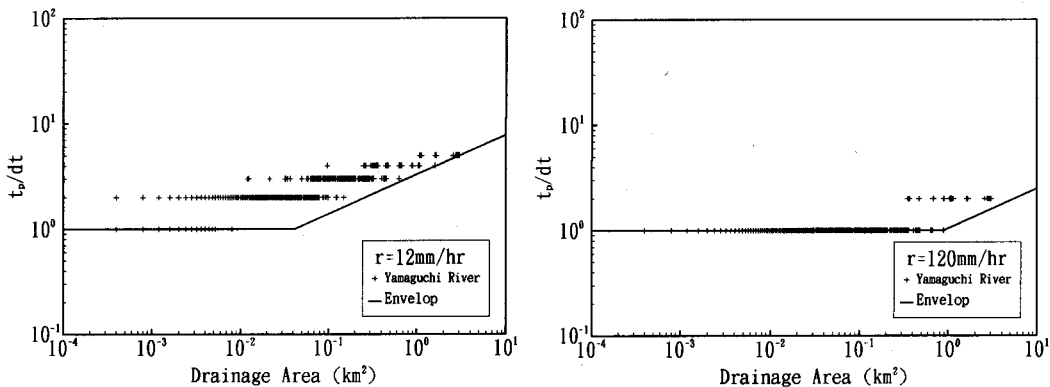


Fig. 9: Relation between time to peak and drainage area in Yamaguchi river.

を有する。ここで d が包絡線の勾配で、 A_c が包絡線の折れ曲がり点の集水面積である。図中の実線が包絡線である。流域面積が A_c 以下の場合に、 $t_p = dt$ で洪水ピークが dt 以内に到達してしまうことを意味し、その内部の集水過程を表現することが不可能となる。逆に面積 A_c の流域内部の集水過程を表現しようとすると、 dt を $1/2$ あるいは $1/3$ 以下にしなければならない。そういう意味で A_c が河道流の時空間スケールの問題を論じるときの重要な物理量と考えられる。魚野川については、 $d = 0.375$ とすることができ、 A_c は有効降雨強度に従って変化する。Fig. 9 は山口川での結果であり、有効降雨強度が大きい時に、 t_p の大きい点が少なく、 d の決定が困難であるが、有効降雨強度の小さいときに d が 0.375 に近い。本研究では $d = 0.375$ とする。 A_c については魚野川と同様、有効降雨強度に従って変化する。

Fig. 10 が魚野川及び山口川の A_c と有効降雨強度 r_e との関係を示すもので、両対数で回帰し、次の回帰式

$$\text{魚野川} \quad A_c = 0.0103 r_e^{1.317} \quad (7)$$

$$\text{山口川} \quad A_c = 0.00245 r_e^{1.230} \quad (8)$$

を得る。この図から有効降雨強度が大きくなれば、 A_c が大きくなり、つまり同じ dt でも内部集水過程の見えない面積が大きくなる。言い換えれば、短い dt が必要となる。本研究では、 $t_p = dt$ に対応する A_c について検討してきたが、実際の洪水を表現する際に $dt \leq t_p/3$ が必要となろう。この場合に、 $t_p/dt = 3, 4$ 等に対応する A_c を検討すればよい。以上を総合すると、洪水到達時間と集水面積と有効降雨強度の間の関係が

$$t_p = p A^q r_e^{-s} \quad (9)$$

で表現できると考えられる。

7 おわりに

本研究では、河道特性の空間分布を規定するモデルパラメーター a, b, c, d の流出への影響が示され、河道特性が主に洪水伝播速度を通じて流出に影響を与えることが明らかになった。また、降雨の時空間分布の流

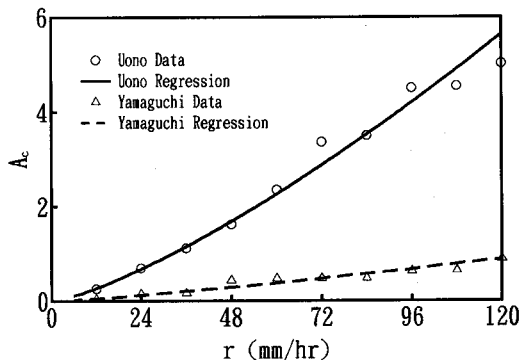


Fig. 10: Relation between A_c and rainfall intensity.

出に与える影響が、魚野川流域を対象流域とする数値シミュレーションによって明らかにされ、河道網特性との関連が示された。降雨の空間分布は雨域内流路長の空間分布の違いにより主にハイドログラフの時間遅れに影響を与える。一方、雨域の移動は降雨強度と雨域の速度ベクトルの組合せによりピーク流量を大きく変化させることがある。

さらに、洪水の流域内の伝播特性を調べることににより、ピーク流出高の低減への河道集中の影響が明らかにされた。河道網において、ピーク流出高が集水面積の増加に伴って大きく減少することが明かになり、洪水ピークの空間分布等を論じる際に、斜面特性と降雨の時空間分布特性だけでなく、河道集中の効果を考慮する必要性が示唆された。一方、洪水波のもう一つの特性値、洪水到達時間に関しては、集水面積と有効降雨強度とに依存することが明らかにされ、現象の性質となる有効降雨強度と河道網特性によって規定される洪水流の時間スケールと空間スケールの初歩的な関係が示された。

参考文献

- [1] 日野幹雄、砂田憲吾：周期変動降雨に対する表面流出の応答特性に関する基礎的研究，土木学会論文集，第262号，pp. 55-66, 1977.
- [2] 小池俊雄：洪水流出に及ぼす降雨分布の影響，昭和61年度文部省科学研究費補助金（自然災害）研究成果報告書—1986年台風10号による関東・東北地方の災害に関する調査（代表：高橋裕），pp. 136-142, 1987.
- [3] 陸 旻皎・小池俊雄・早川典生：分布型流出モデルの開発のための河道特性の評価、水工学論文集第35巻，pp.161-166, 1991.
- [4] 陸 旻皎・小池俊雄・早川典生：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.
- [5] 陸 旻皎・小池俊雄・早川典生：デジタルマップとレーダー雨量を用いた流出解析(2)、—実流域への適用—、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、1990.
- [6] Newson, M.D. and Harrison, J.G.: Channel studies in the Plynlmon experimental catchments, Institute of hydrology, report No. 47, 1978.
- [7] Surkan, A.J.: Simulation of storm velocity effects on flow from distributed channel networks, Water Resources Research, Vol. 10, No. 6, pp. 1149-1160, 1974.
- [8] Takahasi, Y., Mushiake, K. and Hashimoto, T.: Effects of movement of precipitation area upon runoff phenomena, System Approach to Hydrology, Proc. the First Bilateral U.S.-Japan Seminar in Hydrology, pp. 279-293, 1971.
- [9] 宝馨：豪雨特性が洪水流出に及ぼす影響に関する数値実験的検討，昭和61年度文部省科学研究費補助金（自然災害(1)）研究成果報告書—豪雨域の強度、規模・移動方向洪水流出に及ぼす効果に関する研究（代表：小尻利治），pp. 151-164, 1987.