

分布型流出モデルのための河道特性の評価 Consideration of Channel Characteristics in Distributed Rainfall-Runoff Model

陸 旻校*・小池俊雄**・早川典生***・益倉克成****

By Minjiao LU, Tosio KOIKE, Norio HAYAKAWA and Katsushige MASUKURA

Abstract

The objectives of this paper are (1) to show longitudinal variation of channel geometry and flow resistance of mountain rivers, (2) to incorporate this variation into distributed rainfall-runoff model already developed and (3) to apply this model to predict flood hydrographs. In two experimental basins, 28 cross-sections are surveyed for channel geometry, slope and discharge at that time. From this data, Manning's n is computed. Both channel width and Manning's n show a longitudinal variation, and are related to drainage area used as longitudinal index in this study. By taking this variation into account, the model reproduces the measured hydrographs with a good correspondance both in experimental basins and in large basins.

Keywords: distributed rainfall-runoff model, mountain river, channel geometry, flow resistance, flood forecasting

1 はじめに

流出現象の解析に関し、入力である降水量の強い時空間分布と、変換系である流域斜面の水文特性の空間分布がきわめて重要である^{1,2,3}。特に注目したいのは森林伐採や都市化などにより、流域斜面の水文特性が比較的短期間において大きく変化することがしばしば起っていることである。こういった場合に、従来より用いられている、降雨や流域斜面を流域平均的に取り扱う方法では流出現象の表現が困難となる。一方、衛星や地上レーダーによるリモートセンシングや地理情報システムの発達に伴い、入力となる雨量や変換系における各水文要素が分布情報として得られるようになってきている。そこで、分布型降雨流出モデルの必要性が生じている。著者らは既に分布型水文情報に対応する分布型降雨流出モデル⁴を提案した。

著者らのモデルでは、流域をメッシュに分割する。各メッシュにおいて、流出量が雨量から算出され、さらに、直接流出成分と基底流出成分とに分離される。後者は集中型である貯留関数法によって流出高に変換され、前者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。両者の和がハイドログラフとなる。ここで、擬河道網は流域地形情報から算出したもので、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ある。

著者らのモデルは、簡略化した水文過程に基づく実用的なモデルであり、実流域での洪水予報を念頭において開発されたものである。流域をメッシュに分割する方法は流域自然境界による分割に比べ、流出モデルと、リモートセンシングによって得られたデータ、地理情報システム、降雨予測モデルとのインターフェース

*	学生員	工修	長岡技術科学大学大学院博士課程	(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		建設省土木研究所水文研究室長	(305 茨城県つくば市大字旭1)

が簡単で、かつデータ管理が効率よく行える利点がある。著者らのモデルに対し、水の運動を記述する方程式に基づく分布型モデル、例えば SHE モデル (Système Hydrologique Européen)^{5,6)}があり、物理モデルともいわれている。しかし、数学的厳密さが増すごとに、必要とするデータも大きく増える。SHE モデルの提案者の指摘したように、モデルはモデルの目的とデータの整備状況を反映すべきである。

本研究では、現実 に即した河道特性を流出解析に取入れることを目的とし、山地小流域内に発達する河道網を調査し、その河道特性、つまり、河道幅と Manning の粗度係数の流下方向での変化を調べた。さらに、これらの変化特性を著者らの分布型流出モデルに組み込み、調査の対象流域の洪水流出解析に適用した。また、実流域に対しても同様にモデルの適用を試みた。

2 河道網調査及びその結果

本研究では、河道網調査として、二つの実験流域に対し、河道幅と Manning の粗度係数の流下方向での変化を明らかにすることを目的とする野外調査を行った。調査の対象となった山地小流域は東京大学愛知演習林白坂流域と、建設省土木研究所裏筑波試験地山口川流域で、集水面積はそれぞれ 0.88km^2 と 3.12km^2 である。これらの流域は花崗岩地域にある。白坂流域内に 13 個、山口川流域内に 15 個の河道断面を選定し、それぞれの断面について断面形、通水断面積と勾配を測量し、さらに、連続投入による塩水投入法で流量観測を行った。Fig. 1 は二つの流域の地形及び計測断面を示している。

この方法は一定濃度 ρ_s の塩水を連続投入し、投入点から完全混合が行われたと思われる距離だけ下流断面において、塩分濃度を連続測定することにより、流量を求めるものである。流量の連続式 (1) と塩分の連続式 (2)

$$Q_d = Q_u + Q_s \quad (1)$$

$$Q_d \rho_d = Q_u \rho_u + Q_s \rho_s \quad (2)$$

を連立させることによって、次式 (3) で算定できる。

$$Q_u = Q_s \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d - \rho_u} = Q_s \frac{\Delta \rho_s - \Delta \rho_d}{\Delta \rho_d} \quad (3)$$

ここで、 Q_s , Q_u , Q_d はそれぞれ塩水投入流量、投入前後の河川流量で、 ρ_u , ρ_d は上流端河川水塩分濃度、下流端完全混合時河川水塩分濃度で、 Δ は上流端河川水に対する増分を示す。

本研究では、流量の精度を確認するために、投入した塩分が全部投入河道区間を出ることと、 $Q_u \gg Q_s$ とを仮定し、

$$Q_u = Q_s \frac{\Delta \rho_s T_d}{\Sigma \Delta \rho dt} \quad (4)$$

を導き、式 (3) とともに流量計算に用いた。ここで、 T_d は投入時間、 dt は測定の時間間隔 (約 2 秒) である。ただし、塩分濃度 ρ は計測した電気伝導度 EC を変換して得られたものである。 ρ と EC の関係については、水温が一定の場合に、低濃度域において、電気伝導度 EC と塩分濃度が線形関係にある。本調査では、前もって、河川水を採集し、キャリブレーションカーブを作り、この線形関係を確認した。その係数は水温によって変化するが、本調査では、水温の変化が小さいので、温度補正を行わずに定数として用いた。式 (3) と式 (4) で得られた流量がよく一致しており、流量計測精度が高いことが分かる。

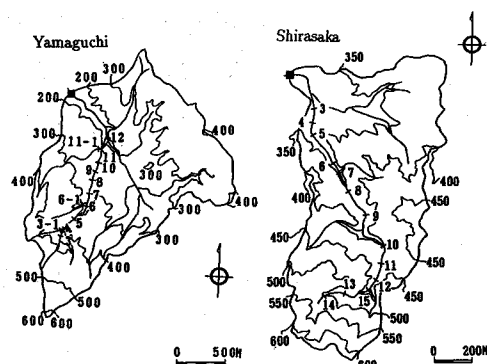


Fig. 1: Experimental basins and selected cross-sections.

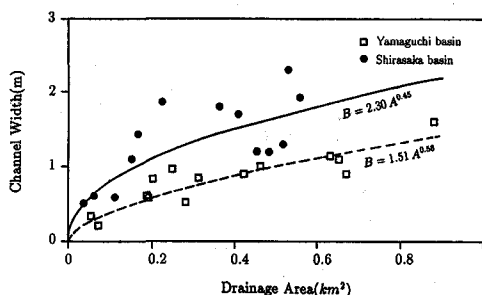


Fig. 2: Channel width versus drainage area.

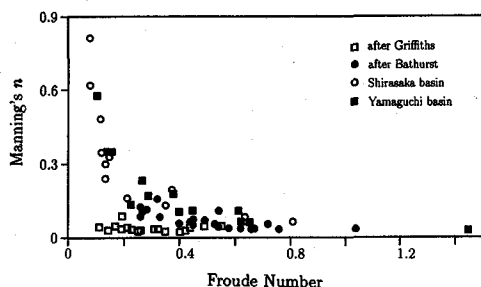


Fig. 3: Manning's n versus Froude number.

今回の調査では、さらに、断面積、河道幅、平均水深、径深、勾配、流速、Manningの粗度係数などを計算し、河道の規模や抵抗則について考察を加えた。河道断面については、水が河道いっぱい流れても、水深が河道幅よりかなり小さく、Kinematic Wave法で河道断面形を広幅矩形断面とする仮定がほぼ妥当であることを確認した。また、河道幅 B は流下方向に増加しており、Fig. 2 に示すように、

$$B = aA^b \quad (5)$$

で表すと、次の回帰式

$$B = 2.30A^{0.45} \quad \text{白坂流域}$$

$$B = 1.51A^{0.58} \quad \text{山口川流域}$$

が得られた。ここで、 B は河道幅、 A はその河道断面の集水面積である。係数 a には流域毎に差があるが、指数 b にはあまり差がない。Newson ら⁷⁾、Kellerhals⁸⁾の観測結果も同じ様な傾向にあり、ここで $b = 0.5$ として、一方係数 a の変化は流域の地質などと関係するものであると考え、流域に応じて与えるものとする。

山地河川の抵抗則に関しては、多数の流速公式⁹⁾が提案されており、その多くがDarcy-Weisbachの抵抗係数を、河床の代表粒径、例えば d_{84} と径深などと関連付けるものであるが、粗度などの流下方向の変化に視点を置いていない。また、対象河川のほとんどが白坂流域と山口川流域よりも大きい河川である。今回の調査では、粒径観測を行っていないので、これらの式の結果と直接比較することはできないが、Manningの粗度係数を比較してみると (Fig. 3)、白坂と山口の方がBathurst¹⁰⁾のデータとGriffiths¹¹⁾のデータより大きくなっていることが分かる。

今回の調査で得られたManningの粗度係数は、きわめて大きく、局所的な要因によって大きく変化していると考えられ、また、調査した流域においては、流下方向に明確な傾向を示していない (Fig. 4)。これは支川の流入などによって、砂利の粒径や河床形態、そして粗度係数 n が流下方向に不連続に変化するためである¹²⁾。そこで、本研究ではよりマクロ的に、Manningの粗度係数と集水面積との関係を調べることにした。その結果がFig. 5に示されている。図の中に、白丸は建設省のデータで、洪水痕跡から逆算して得られた逆算粗度であり、黒四角はKellerhals⁸⁾の論文から計算したもので、年最大洪水時の粗度係数に相当するものである。黒丸と白四角は今回の調査で得られた白坂と山口のデータで低水時の粗度係数である。図から解るように、集水面積が大きくなるに連れ、Manningの粗度係数が小さくなっている。そこで、式

$$n = cA^d \quad (6)$$

を当てはめると、 $c = 0.306$, $d = -0.314$ が得られた。ただし、 n はManningの粗度係数である。データのソースからも分かるように、その算定手法がまちまちで、また地質などの条件によりどのように変動するかを検

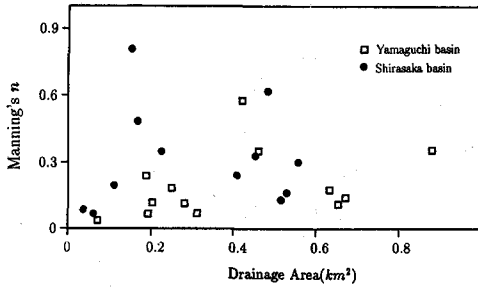


Fig. 4: Longitudinal change of Manning's n in experimental basins.

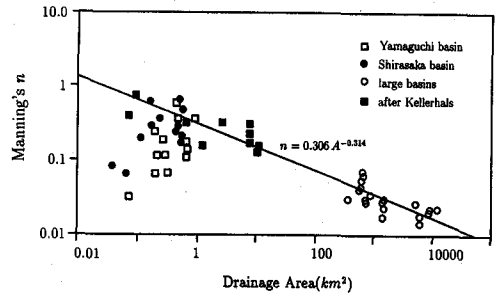


Fig. 5: Relation between Manning's n and drainage area.

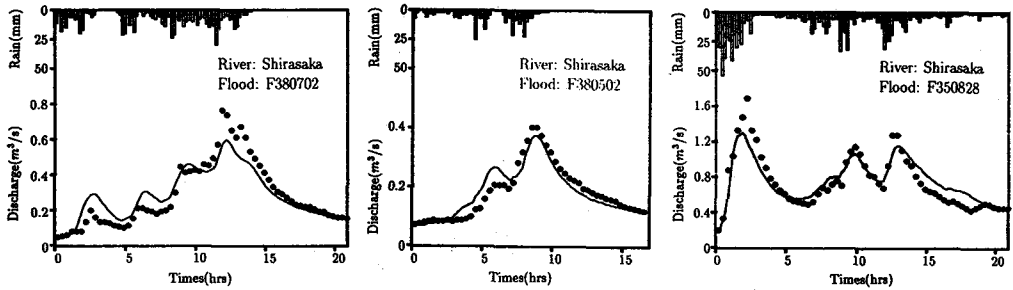


Fig. 6: Observed and predicted hydrographs of Shirasaka basin, dot: observed, line: predicted.

討もできないが、式(6)は粗度係数のマクロ的な変化特性を表していると考え、式(5)と共に、河道特性の分布モデルとした。

3 河道特性のモデルへの組み込みと実験流域での洪水解析

著者らのモデルでは、擬河道網を介して、Kinematic Wave法で直接流出成分を流域の出口まで追跡計算している。擬河道網内の各擬河道は河道幅 B とManningの粗度係数 n によって特徴付けられる。上記の河道特性の流下方向の変化を著者らの分布型流出モデルに組み込み、その影響を調べるために、本研究では二つの実験流域に対し、20mメッシュの分布型モデルを作成し、過去に起こった洪水に対し、洪水解析を試みた。20mメッシュデジタルマップは地形図から等高線データをデジタイザーで読み込み、線形補間で必要とする各緯線方向の標高プロファイルを求め、そのプロファイルを同じく線形補間で、その緯線方向における全てのメッシュ点の標高を算出する方法で作成した。

河道幅とManningの粗度係数については、それぞれの(5)、(6)式を用い、 $b = 0.5$, $d = -0.314$ とした。 a については、それぞれの流域の河道データから求めた。 c はモデルパラメーターとした。それを同定することによって、個々の流域の特徴を反映させることが出来る。

本研究では、白坂に対し、3洪水、山口川に対し、6洪水の洪水解析を行った。Fig. 6は白坂の3洪水の解析結果で、Fig. 7は山口川の3つの解析例である。解析に用いたモデルパラメーターはTable 1とTable 2に示す。いずれの流域においても、良好な結果が得られた。

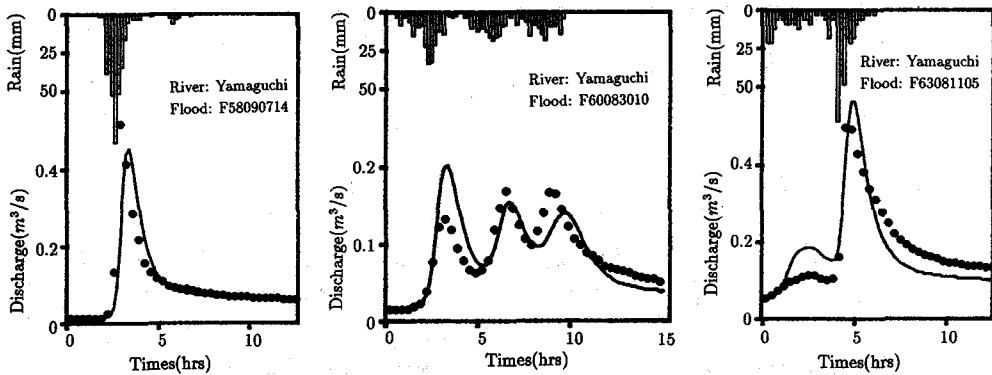


Fig. 7: Observed and predicted hydrographs of Yamaguchi basin, dot: observed, line: predicted.

Table 1: Model parameters for Shirasaka Basin

Basin	Flood No.	α_p	α_s
Shirasaka $0.88km^2$ $a_u = 0.017$	F350828	0.432	0.690
	F380702	0.487	0.780
	F380502	0.628	0.768
$B = 2.51A^{0.5}$, $n = 0.865A^{-0.314}$			

Table 2: Model parameters for Yamaguchi Basin

Basin	Flood No.	α_p	α_s
Yamaguchi $3.22km^2$ $a_u = 0.003$	F58090714	0.814	0.079
	F60083010	0.361	0.169
	F63081105	0.591	0.154
$B = 1.42A^{0.5}$, $n = 0.866A^{-0.314}$			

4 実流域での洪水解析

本研究では、さらにモデルを利根川上流のA地点とB地点に適用してみた。A地点の集水面積は $536.3km^2$ であり、B地点はA地点の上流にあり、集水面積が $156.6km^2$ である。実流域では、流域内の河道分布が未知であるため、係数 a もモデルパラメータにした。入力は一レーダーアメダス時間雨量を使用した。試行錯誤により、 a, c を同定し、 $a = 2.16, c = 0.72$ を得た。算出したハイドログラフはFig. 8に示す。ただし、流出計算に関するパラメーターは文献13を参照されたい。ここで、B地点の計算結果はA地点で得られたパラメーターを用いて算出したものである。また、A,B両地点のデータを用いて、独立に同定した2組のパラメーターがほとんど同一である。これはモデルに組み込んだ河道特性の正当性を裏付けるものと考えられる。

5 結論

本研究では、現地調査などにより、河道幅とManningの粗度係数の流下方向でのマクロ的変動特性を明らかにした。これらを著者らの分布型降雨流出モデルに組み込むことにより、河道特性を考慮した洪水流出解析が可能となった。数平方キロの実験流域から数百平方キロの実流域にモデルを適用し、洪水流出解析を行った結果、本モデルが広範囲にわたって、実測ハイドログラフを再現できることが分かった。

謝辞 本研究を進めるに当たり、貴重なデータを提供して頂いた建設省と気象庁の関係各位に心より感謝の意を表す。また、現地調査に多大な協力を下さった東京大学農学部愛知演習林及び建設省土木研究所の方々に深く感謝する。また、白坂流域洪水データについては、文献14より引用させていただき、北海道開発局開発土木研究所水工部長星清氏から等価粗度に関する資料を提供して頂いた。さらに、電気伝導度の測定について、ご協力いただいた(株)CTIサイエンスシステム社に謝意を表す。

参考文献

- 1) Takahasi, Y., Musiaki, K. and Hasimoto, T.: Effects of movement of precipitation area upon runoff phenomena,

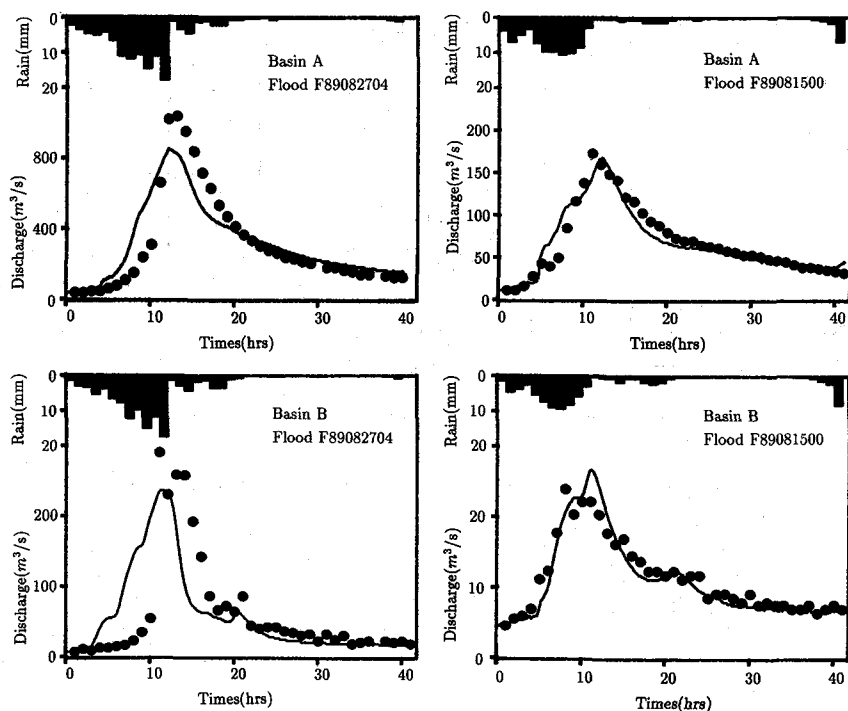


Fig. 8: Observed and predicted hydrographs of Upper Tone basins, dot: observed, line: predicted.

System Approach to Hydrology, Proc. the First Bilateral U.S.-Japan Seminar in Hydrology, pp. 279-293, 1971.

- 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: レーダー雨量情報に対応する分布型流出モデルの検討, 土木学会第 33 回水理講演会論文集, pp. 91-96, 1989.
- 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) Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J.: An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, 'SHE', 1: history and philosophy of a physically-based distributed modelling system, J. Hydrol., 87, pp. 45-59, 1986.
- 6) Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J.: An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, 'SHE', 2: structure of a physically-based distributed modelling system, J. Hydrol., 87, pp. 61-77, 1986.
- 7) Newson, M.D. and Harrison, J.G.: Channel studies in the Plynlmon experimental catchments, Institute of hydrology, Report No. 47, 1978.
- 8) Kellerhals, R.: Runoff routing through steep natural channels, ASCE, Vol. 96, No. HY11, pp. 2201-2217, 1970.
- 9) 長谷川和義: 山地河川の形態と流れ, 1988 年土木学会水工学に関する夏期研修会テキスト, 88-A-8, pp. 1-22, 1988.
- 10) Bathurst, J.C.: Flow resistance estimation in mountain rivers, ASCE, Vol. 111, No. HY4, pp. 625-643, 1985.
- 11) Griffiths, G.A.: Flow resistance in coarse gravel bed rivers, ASCE, Vol. 107, No. HY7, pp. 899-918, 1981.
- 12) Shimazu, H.: Segmentation of mountain rivers based on longitudinal change in gravel size of riverbeds in Tohoku District, Northeastern Japan, Geographical Review of Japan 63A-8, pp. 487-507, 1990.
- 13) 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), 土木学会第 45 回年次学術講演会, pp. 150-151, 1990.
- 14) Shibano, H.: Hydrological processes in headwater areas(I),—An analysis of the hydrological processes—, Bulletin of the Tokyo University Forests, No. 78, 1988.