

流出応答特性の評価に与える流域要素スケールの効果について

EFFECT OF CHANNEL ELEMENT SCALE ON RUNOFF RESPONSE OF A CATCHMENT MODEL

福井 史応¹・砂田 憲吾²

Shio FUKUI and Kengo SUNADA

¹ 正会員 工修 (株)アイ・エヌ・エー 河川計画部(〒112 文京区関口 1-44-10)

² 正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科(〒400 甲府市武田 4-3-11)

In order to get an appropriate method for reproducing stream channel calculated from the digital map with 250m lattice size, various definition of stream source and connection are examined at first. The major indices of topographic feature on the stream order defined by Strahler, bifurcation ratio, length ratio, area ratio and slope ratio are measured at four stages of lattice sizes in the next. And, changes of the indices due to aggregation of channel network obtained from the four lattice sizes are discussed. At last, in order to get surface runoff response characteristics of distribution of the concentration time calculated from those lattice sizes are discussed.

Key words : runoff response, DEM(Digital Elevation Model), channel-network, scale up

1. はじめに

洪水や土石流災害防止と水資源確保のために、流域地形と水文条件の関わりを考慮した河川流出の評価が必要である。最近レーダー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り、気象系との相互作用を考慮に入れた流出系の分析が試みられている。一方流域の地形情報等も地理情報システムの整備に伴い充実してきた。DEM は河道網を定量的に評価し複雑な現象をモデル化するのに有効であり、DEM を利用した地形解析・流出モデルや土砂動態モデルの開発に関する研究が多数行われている¹⁾。DEM により再現できる河道モデルの必要性は、流出現象評価のためといえるが、水文解析への適用が可能かを検討する必要がある。高埴らはDEMに基づく落水線・

擬河道網を解析する水文地形解析システム(GM 法)を提示し、多数の流域を対象として国土数値情報(標高データファイル・流路位置ファイル・流域界・非集水線位置ファイル)の水文地形解析への適用の可能性を明らかにした²⁾。DEM を用いた手法は流域地形の解析のみならず、流出解析にも応用されつつある。河川流域の水文条件の変化に対応するために地理情報システムや各種水文情報を用いた分布型流出モデルは有用であり、分布型流出解析モデルに関する研究も多数行われている。陸ら³⁾は、流出解析への適用を念頭に置いたグリッド型 DEM 作成法を改良するためのアルゴリズムの開発を行い、さらに DEM から擬河道網そして分布型モデルを構築した。なお、DEM に基づく方法はメッシュの間隔の大きさ(メッシュスケール)が解析結果に及ぼす影響を考慮する必要がある。流出解析を行う際、上流側から

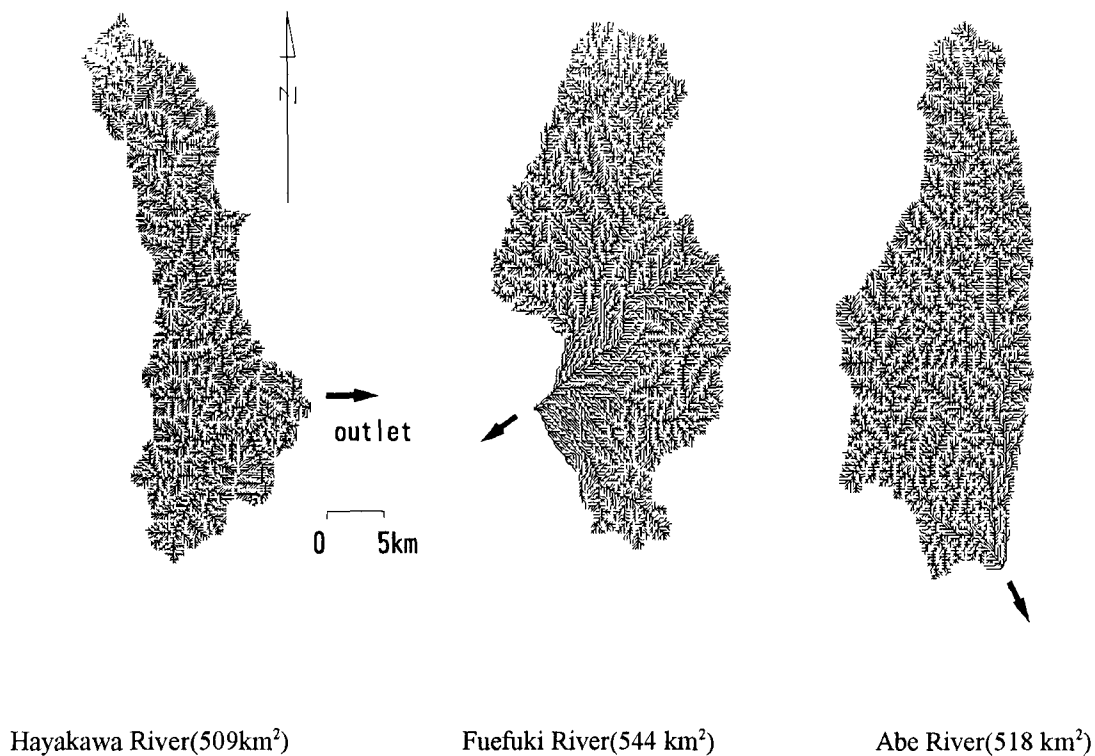


Fig. 1 Channel network of 250m grid spacing – source 1

河道に従い順次追跡計算しなければならず、対象流域が大きくなると計算時間を要し実用的ではない。また、気象系との分析スケールと歩調を合わせるには流出モデルのスケールアップが必要であり、高棹⁴⁾は降雨流出モデルのスケールアップに注目している。

河川流域は山腹斜面と、斜面からの流出を合成・運搬する河道から構成されており、本研究ではこれらの地形構造をモデル化することから始める。また、より広域な流域を対象とすることを目指し、合理的に計算を行うために流域地形モデルのスケールアップの方法を提案したい。スケールアップにより地形特性がどのように保存されるか、また地形特性と流出の応答について検討する。

2. 流域の地形特性

(1) 流域地形のモデル化

直交するメッシュの交点の標高を配列した数値標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)に基づき、流域に落ちた雨水を周囲のメッシュ点 8 方向のうち最急勾配方向に追跡することでメッシュ点間を結ぶ追跡線(落水線)を決定する。落水線を流域内の全

てのメッシュ点から流域出口まで辿ることにより擬河道網が算出される。次に、メッシュ点に設定される通過回数に河道のソースを設け、通過回数 1, 2, 3 …のメッシュ点から河道が始まる、と定義してできる河道網を順に source1, 2, 3…として粗視化する。対象流域は富士川支川の早川流域(509 km²)、笛吹川流域(544 km²)、そして安倍川流域(518 km²)の3カ所の山地流域とした(Fig. 1)。3次元で表すと、早川流域は Fig. 2 のようになる。

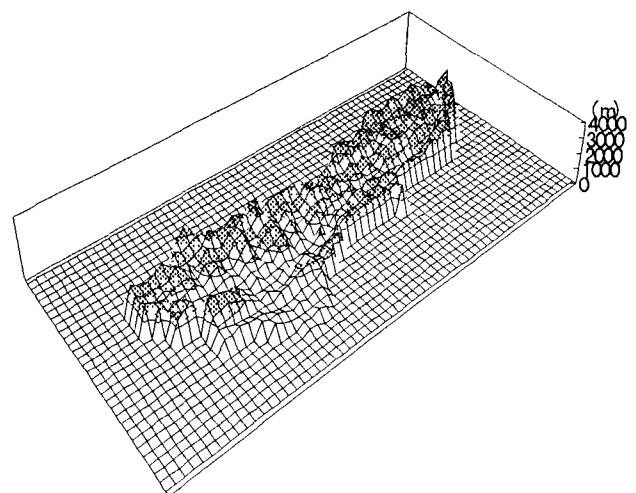
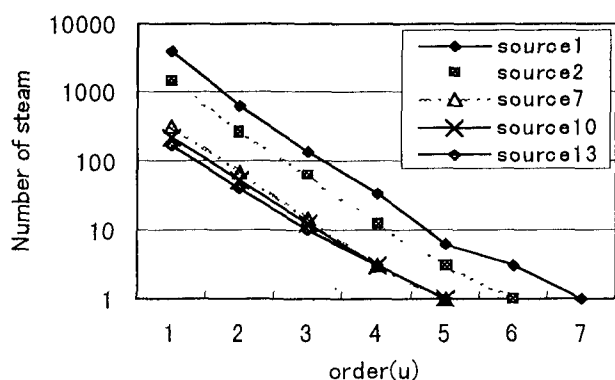
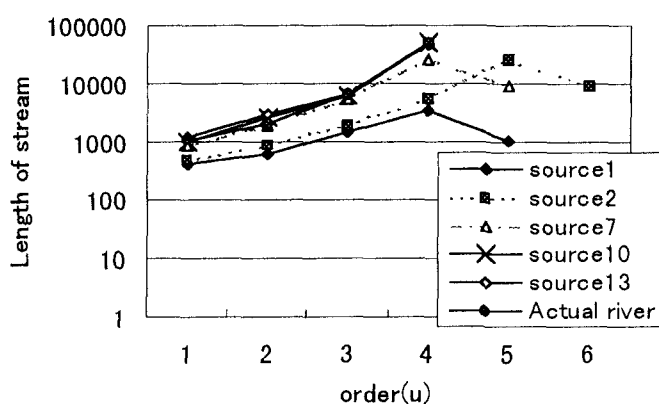


Fig.2 Hayakawa River(1000m mesh)

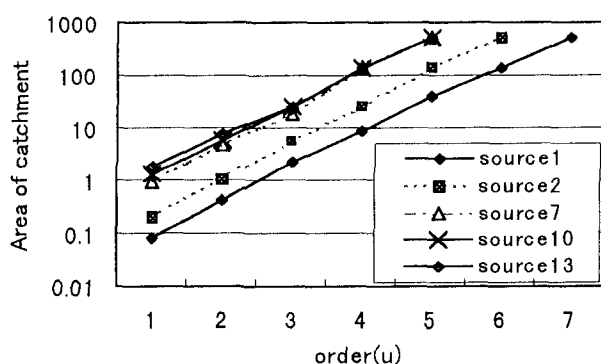


(a)Abe River(250m grid spacing)



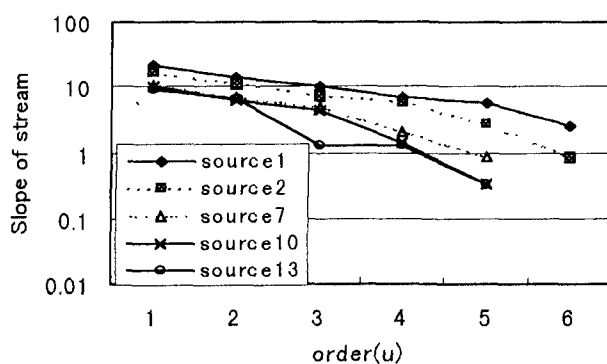
(b) Hayakawa River(250m grid spacing)

Fig. 3 Topographical characteristics ; Number of stream



Abe River(250m grid spacing)

Fig. 4 Topographical characteristics ; Area of stream



Fuefuki River(250m grid spacing)

Fig. 5 Topographical characteristics ; Slope of stream

(2)地形特性量の算定

Strahler の位数理論による河道数則・河道長則・流域面積則・河道勾配則を地形特性量とする。上記のグラフは結果の一部で、河道数・流域面積・河道勾配と位数の関係を片対数グラフに表したものである (Fig.3～5)。Fig.3 の場合グラフの傾きが分岐比の対数を表している。河道数・流域面積については、グラフの傾きがほぼ一定であることから粗視化によって地形特性量は変化しないことが分かる。河道長、河道勾配については、はっきりした傾向が見られないことが分かった。また、実河川データ (1/25000 地形図に青色実線で示されている部分をデジタイザーで計測) の得られている早川流域では河道モデルとして、250m メッシュでは source 10, 500m メッシュでは source3 が実河川の地形的性質をより忠実に再現し得る。

3. 流出応答特性

(1)定常降雨による到達時間

定常降雨という仮定のもとで、流出応答の代表的性質を示す到達時間を算出し、擬河道網のスケールアップに伴う到達時間の変化を考察する。全ての単位河道で到達時間を計算し、任意点から流域出口まで連続する単位河道を追跡し順次、到達時間を加算する。山地斜面と河道から構成される河川流域において、河道のみを流域出口まで追跡する Method I と河道始点で斜面による遅れ時間を考慮し河道を流域出口まで追跡する Method II の 2 通りの方法で計算する。

(a) Method I

日野・砂田の式⁷⁾で単位河道毎に到達時間を算出し (式(1)), 流域出口まで連続する単位河道の到達時間 t_{ej} を加算してメッシュ点から流域出口までの到達時間 T_e を求める。式(1)は建設省で収集された各種流域の遅

れ時間とそれを表す経験式との比較に基づいて妥当性が得られている式である。

$$t_{cy} = C \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0.5} \quad (1)$$

ここに、 t_{cy} ：単位河道の到達時間、 L ：単位流路長、 I ：単位河道勾配、 $C \approx 0.0116$ （経験値）である。

(b) Method II

Method II では河道を流下する到達時間に加えて、追跡をはじめるメッシュ点において斜面による遅れ時間を考慮する。メッシュサイズの異なる河道モデルで斜面による遅れ時間が到達時間に与える影響を考察する。

・斜面による遅れ時間：

斜面による遅れ時間 t_{cn} は(1)式に従う。この場合、 L ：要素斜面長 ($L=l/2$; l は単位グリッドスケール)、 I ：要素斜面勾配である。

・単位河道の到達時間：

河道流の基礎方程式は、

$$Q = KA^p \quad (2) \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3)$$

である。ここに、 Q ：流量、 A ：河道の断面積、 q ：側方流入量、 K ：定数である。(3)式で $q=0$ とおき、kinematic wave 法でマンニングの抵抗則を用いるとによれば、 p は $5/3$ になる。河道の到達時間は以下の(4)式で与えられる。

$$t_{cy} = \frac{L}{w} \quad (4)$$

$$w = pv = p \frac{1}{n} \left(h^{2/3} i^{1/2} \right) = p \frac{1}{n} \left(\frac{np_0 a}{B\sqrt{i}} \right)^{2/5} i^{1/2}$$

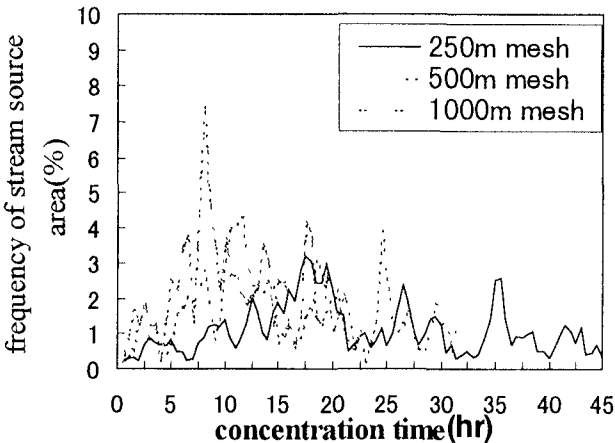
ここに、 t_{cy} ：単位河道の到達時間、 w ：伝播速度、 L ：単位流路長、 p_0 ：降雨強度、 i ：河道勾配である。流域出口までの到達時間は斜面による遅れ時間と流域出口まで連続する単位河道を順次加算する。マンニングの粗度係数は山地斜面において 0.2、流域出口においておよそ 0.03 と仮定し集水面積により決まる値とし(5)式)、河幅は陸ら³⁾による推定式(6)式)を用いる。

$$n = 0.200 - 3.34 \times 10^{-4} a \quad (5) \quad B = ma^{0.5} \quad (6)$$

ここに、 a ：集水面積 (km²)とする。対象流域は早川流域のみである。

(c) 解析結果

(a) Method I



(b) Method II

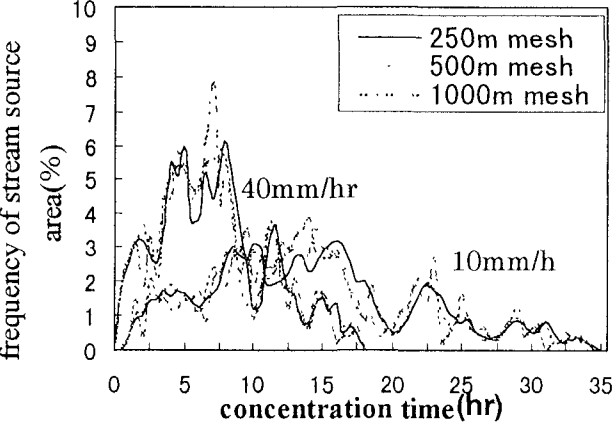


Fig. 6 Method II

流域内の全てのメッシュ点からの到達時間を算出し、到達時間分布を示したのが Fig. 6 である。Method I では 擬河道網の粗視化に伴い到達時間は短縮する。ところが Method II では粗視化によらず、降雨強度 10mm/hr、40mm/hr のどちらの場合も到達時間分布は同じ傾向を示す。つまり、河道と斜面とにより到達時間をまとめて考慮するとスケールの効果が出にくくなることを示している。また、流量一定という線形流出の仮定ではパラメータのスケール依存性は弱いと考えられる。

(2) 流出解析

山地斜面系および擬河道網系からなる流域全体で表面流出をモデル化し、任意のメッシュ点におけるハイドログラフを算出する流出モデルを開発する。次に示す仮定のもと、斜面と河道それぞれに対して kinematic wave モデルを適用し所与の降雨に対する流出量を算定する。

・流れ方向は擬河道網の最急勾配方向で、メッシュ間

の流路は幅広矩形断面とする。

・流路への側方流入は 10m 間隔とし、メッシュ点及び 10m 毎に斜面からの直接流入分と上流からの流入を合成する。

(a) 斜面流出

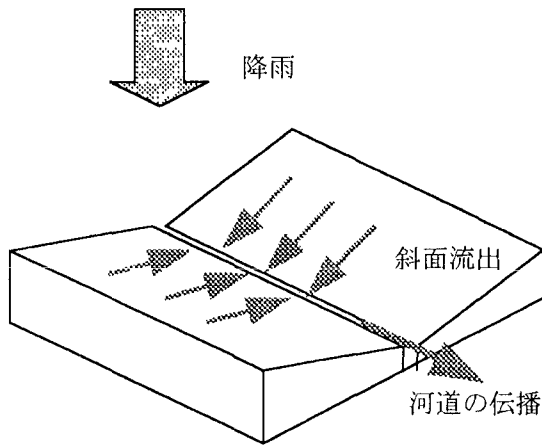


Fig. 7 斜面流出と河道の伝播

斜面から河道への直接流出 q_l は、

$$q_l = \alpha y_l^m \quad (7)$$

ここに、 y_l :水深、 $m=5/3$ 、 $\alpha=\sqrt{\sin \theta}/n_s$ 、 θ :勾配、 n_s :斜面部のマンニングの粗度係数(≈ 0.2)

(b) 河道の伝播

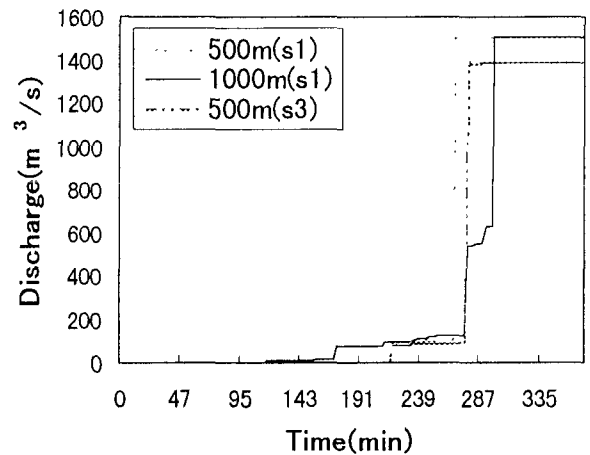
モデルは山地斜面系と擬河道網系から構成され、後続の流量が大きいために次のメッシュ点に到達する前に先行する流れを追い越すことを避けるため、10m 毎に追跡計算をする。斜面からの直接流入量に、上流からの流入量を加えて 10m 毎の流量を算出する。メッシュ交点で合流河道が存在する場合、合流河道の流入量を加算する。このとき、合流点において流量は保存されるとする。以上の方法で流域内の全てのメッシュ点からの流出を流域出口まで追跡計算する。

(c) 解析結果

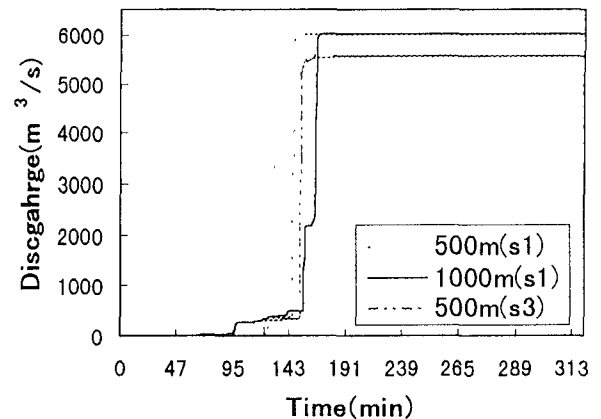
メッシュサイズおよび河道のソースが異なる擬河道網の流出応答特性の相違を検討するため、500m メッシュ及び 1000m メッシュの source1, 500m メッシュ擬河道網の source3 でシミュレーションを行った。それぞれの擬河道網で最大流量に多少の違いが見られるが、これは擬河道網作成時に本川データを地形図から読み取り、河道長をデジタイザーで計測するため、メッシュサイズによる河道長の測定誤差だと考えられる。最大流量は

流域面積に依存するが、本計算では斜面からの流出は斜面長と河道長の積に相当する斜面からの流出を河道に沿って計算する手法をとっている。流域面積約 509km² の早川流域に 10mm/hr の降雨があった場合の流量は、以下のようになり Fig.8 はほぼ妥当である。

$$\frac{0.01}{3600} (m/s) \times 509 \times 10^6 (m^2) \approx 1420 (m^3/s)$$



(a) 降雨強度 10mm/hr の場合



(b) 降雨強度 40mm/hr の場合

Fig. 8 流域末端のハイドログラフ

また、Fig.9 には各擬河道網について到達時間を斜面部と河道部に分けて示した。降雨強度 10mm/hr の場合、流域要素スケールの拡大に伴い到達時間の短縮が見られる。ところが降雨強度 40mm/hr の場合、流域要素スケールによる応答時間の差異が小さくなる。流域要素スケールが過大になれば、流出応答特性の評価が困難になると考えられるが、流域出口における応答特性に 500m メッシュと 1000m メッシュで見掛け上は著しい相違は見られない。到達時間を斜面流出と河道の

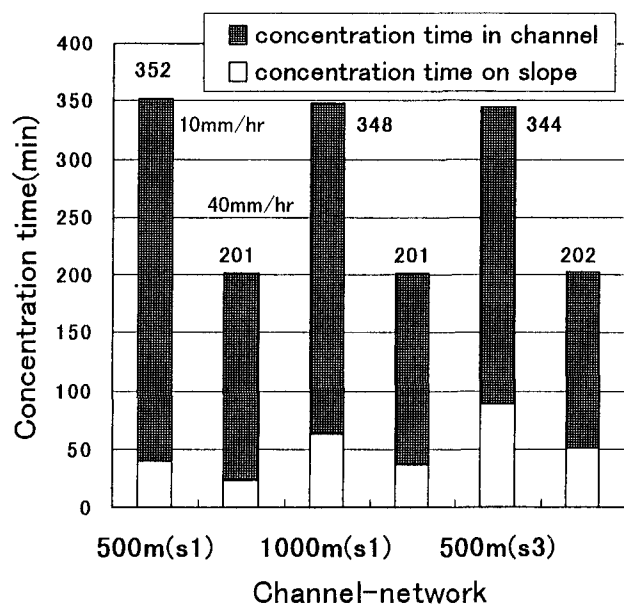


Fig. 9 Distribution of concentration time

伝播に分けて見ると、降雨強度 10mm/hr の場合も 40mm/hr の場合も、要素流域スケールの拡大に伴い、斜面流出は長く河道の伝播時間は短縮する傾向が見られるが、降雨強度 10mm/hr の場合の方がより、はっきりその傾向が現れている。河川流域は斜面と河道の集合体であり、斜面流出による遅れ時間と河道の伝達時間が示す流出応答特性が、流域の地形条件および降雨などの水文条件を反映したものであるために、適切な要素流域スケールを選ぶ必要がある。

4. おわりに

本研究は、計算値を実測値と比較して直接的にモデルの向上を進めるという立場ではなく、表面流出に関する山地河川での標準的なモデルパラメータを基準として、流出応答に及ぼす要素スケールの影響の検討を目指したものである。本研究で得られた結果をまとめると、流出シミュレーションから次のことが分かる。①モデルの要素流域スケールの拡大に伴い、斜面流出の到達時間が長くなるのに対し河道を伝播する時間は短縮されることをシミュレーションにより確認した。②500m メッシュと 1000m メッシュの流域全体の応答特性が見掛け上同等になる場合においても、斜面流の時間遅れと河道の伝達時間が物理的に妥当になるような要素スケールを選ぶ必要がある。③流域要素スケールにより流出応答特性は異なるが、より強降雨の条件のもとではその差異が

小さくなる。本研究で、山腹斜面系、擬河道網系からなる全域表面流出モデルを開発し、任意降雨に対する全河道地点での流出シミュレーションを可能にした。今後の課題として、笛吹川流域・安倍川流域でシミュレーションを行い、モデルを改良することが望まれる。

謝辞: 本研究の一部は平成 7, 8, 9 年度の文部省科学研究費(課題番号 07650593)の補助を受けて行われた。記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 砂田憲吾・長谷川登: 国土数値情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み, 土木学会論文集, No.485/II-26, pp.37-44, 1994.2
- 2) 高埴琢馬・宝馨・溝渕伸一・杉原宏章: 国土数値情報を用いた水文地形解析に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, vol.32/B-2, pp.435-454, 1989.1
- 3) 陸旻蛟・小池俊雄・早川典夫: 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, vol.411/II-12, pp.135-142, 1989.11
- 4) 高埴琢馬・椎葉充晴・市川温: 分布型流出モデルのスケールアップ, 水工学論文集, vol.38, pp.809-812, 1994.2
- 5) 福島晟: 河道網系の評価に及ぼす Scale Effects, 農業土木学会論文集, vol.156, pp.41-50, 1991
- 6) 福井史忠・砂田憲吾: 流域擬河道網の粗視化と地形特性量変化に関する検討, 土木学会年次講演会概要集, 2-A/II-55, pp.110-111, 1995.9
- 7) 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, No.262, pp.56-66/1977.6
- 8) S.Fukui and K.Sunada: Study on Dependence of Runoff Model Parameters on the Scale of Catchment Element, International Conference on Water Resources & Environment Research, vol. I, pp.293-300, 1996.10

(1997.9.30 受付)