

水文量評価のための最適空間スケールに関する基礎的研究

A Basic Study on Suitable Spatial Scales for Evaluating Hydrologic Quantities

砂田憲吾*・木村真章**

By Kengo SUNADA and Masa-aki KIMURA

A basic study on scale effects of hydrologic cycle is presented. The interflow and overland flow model which takes into account the variable source area with high permeable surface layer was composed first. Next, the direct runoff simulations were executed for rainfall events in many different size of actual catchments considering various catchment parameters such as length, inclination and hydraulic conductivity of surface soil of slopes. Finally, the relation between catchment scale and maximum direct runoff discharge was discussed. Based on the results of the simulation, the composition of the conventional (maximum) specific discharge curve was also explained.

Keywords: scale effects, direct runoff, duration time, catchment slope

1. はじめに

リモートセンシング技術の発達、流域における水循環に関する推定や評価の方法を根本的に改善する可能性を与えている。すなわち、衛星による水文観測、レーダー雨量計、さらには数値地形などの高密度な流域水文情報の入手は、例えば、より精緻な分布型流出モデルの構成を基に精度の高い水文量の予測・推定を可能にしている。しかしながら、現状ではどれほどの時間的・空間的スケールを流域要素の基準として設定すべきかという最も基本的な問題が明らかにされていない。

基準要素流域の空間スケールが降雨-流出系の応答特性に及ぼす影響は、従来から重要な課題とされてきたが、現在のところ、その評価・判断基準そのものにも統一された考えはない。最近、Woolhiserら¹⁾は降雨強度パターンの違いが流出に及ぼす影響を調べ、降雨情報の時間細分化と流出特性との関係を実証的に論じ始めている。また、Woodら²⁾は流域浸透(総)量や直接流出(総量)率に関して、流域水文量(降雨強度、(飽和)透水係数など)の非一様性を考慮し、代表基本流域(REA: Representative Elementary Area)のスケールを検討しているが、最大流量や集水過程の組込みまでは言及していない。一方、わが国でも近年整備されつつあるレーダー雨量や数値地形などの分布型水文情報を組み合わせての、より合理的な流出モデルの基準サイズが探索されている^{3,4)}が、流域水文量の空間的分布状況の考慮にまで至っていない。

本研究では、この問題についての一般的かつ基本的な枠組みを得るために、流域のスケール効果について

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

** 正会員 日本道路公団 仙台管理局 盛岡管理事務所
(〒020 岩手県紫波郡都南村羽場11-66)

の基礎的検討を行う。水文量には、降水、浸透、流出、蒸発散など各種のものがあ、それらについてのスケール効果を統一的に議論するのは困難である。ここでは、河川水文学の立場からも重要な洪水流量に注目し、最初の試みとして最大直接流出量を対象にとり上げて考察する。

2. 最大直接流出量

2.1 本研究の方法と問題の設定

流域の空間的スケールを議論するためには、現象の時間スケールとの関連ですべきであろう。有限・特定（の範囲）の物質移動速度、伝播時間を考えればこのことは当然である。本研究では、Fig. 1 に示されるように、流域斜面の段階的な粗視化（集約化、Aggregation）によるモデルにおいて、各種時間スケールを持つ降雨イベントに対する流域諸水文パラメタの最大直接流出量への感度を調べることで、流域スケールの効果を考察しようとするものである。問題をできるだけ単純化することにより、計算の容易さのみならず結果がより簡潔な形で示され得る。降雨強度を一樣とするかなり強い仮定が用いられるが、その分、従来（例えばWoodらの研究）には考慮されなかった時間スケールとの関連が初めて議論されることになる。

2.2 中間流・地表流共用モデルの準用

流域の粗視化（集約化）を考える場合でも適用しようとする流出モデルは可能な限り現実の流出量を再現し得るものが望まれる。本研究では、すでに著者らにより提案され実流域での検証が得られている中間流・地表流共用モデル⁵⁾を準用する。このモデルではDarcy則に従うとする地表層内の中間流とそれに伴って斜面末端から形成される飽和域の変動が考慮されている。このモデルに基づいて最大流量だけに注目すれば、以下のように準解析的な取り扱いができる。この場合、降雨は継続時間内一様強度、長方形斜面、河道では一定流下速度の仮定をおく。計算は降雨条件（強度 p 、継続時間 t_r ）と斜面条件（表層飽和透水係数 K_s など）により場合分けが必要となる。ここでは、 $p > K_s$ 、 $t_r > t_c$ （到達時間）の場合を中心に結果を順次示す。

< $p > K_s$ の場合 >

(a) 飽和領域長 (ℓ)

Fig.2を参照して式(1)で与えられる。

$$\ell = (L - d \cdot \sin \beta) (1 - \exp(-2K_s t / \lambda d)) \quad (1)$$

ここに、 L : 斜面長、 d : 表層厚、 λ : 空隙率 である。

(b) 斜面地表流最大流量（単位幅当り: $q_{\max}$ ）

・ $t_r > t_c$ のとき: 上端から飽和域までと飽和域から末端までの到達時間 t_0 , t_1 は次式で与えられる。

$$\exp(-2K_s t_0 / \lambda d) (L - d \sin \beta) + d \cdot \sin \beta = \frac{\alpha}{p} (p \cdot t_0)^n \quad (2)$$

$$t_1 = \frac{1}{p} \left[\left\{ \frac{p}{\alpha} \ell (t_0) + (p \cdot t_0)^n \right\}^{1/n} - p \cdot t_0 \right] \quad (3)$$

ここに、 $p = p - K_s$ である。

$t = t_r$ で 末端水深は最大 (h_1) で、Fig.3を参照して、

$$L - \ell(t_{u0}) = \frac{\alpha}{p} (p \cdot t_{u0} - p \cdot t_u)^n \quad (4)$$

$$t_r - t_{u0} = \frac{1}{p} \left[\left\{ \frac{p}{\alpha} \ell(t_{u0}) + (p \cdot (t_{u0} - t_u))^n \right\}^{1/n} - p \cdot (t_{u0} - t_u) \right] \quad (5)$$

$$\text{より、} h_1 = p \cdot (t_{u0} - t_u) + p(t_r - t_{u0}) \quad (6)$$

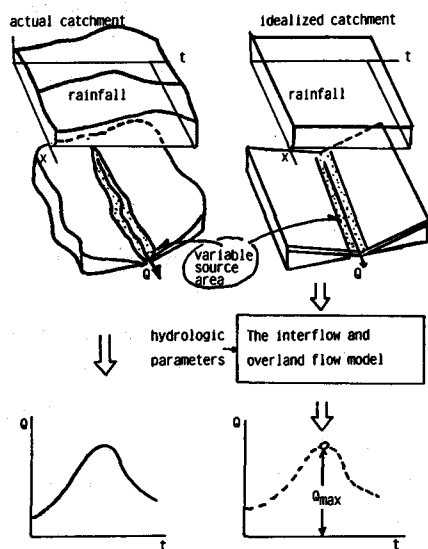


Fig.1 モデル化による最大直接流出量

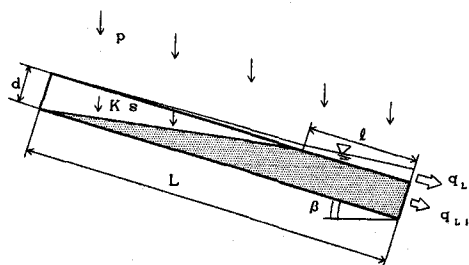


Fig.2 中間流・地表流共用モデル

・ $t_r < t_c$ のとき:

$$L - \ell(t_{so}) - x_s = \frac{\alpha}{p} (p \cdot t_{so})^m \quad (7)$$

$$t_r - t_s = \frac{1}{p} \left[\left\{ \frac{p}{\alpha} \ell(t_{so}) + (p \cdot t_{so})^m \right\}^{1/m} - p \cdot t_{so} \right] \quad (8)$$

上式(7),(8)を連立して t_{so} , x_s を求めて

$$h_L = p \cdot t_{so} + p(t_r - t_{so}) \quad (9)$$

< $p < K_s$ の場合 >

不飽和領域で $p=0$, $K_s=p$ を考慮して、

$$\ell(t_r - t_s) = \frac{\alpha}{p} (p \cdot t_s)^m \quad (10) \text{ このとき、} h_L = p \cdot t_s \quad (11)$$

$$\text{以上より、} q_{\max} = q_L + q_{Li} = \alpha \cdot h_L^m + K_s \cdot d \cdot \sin \beta \quad (12)$$

ここに、Manning則で $\alpha = \sqrt{\sin \beta} / n$ 、 $m=5/3$, n : 等価粗度 である。

(c) 流域最大流量: 斜面の特性とスケール効果の把握にまず重点をおき、河道では単純にこう配のみに依存する線形河道(流速一定(経験則: Rzihaの式))を仮定して、河道に沿って斜面流出量($q_L + q_{Li}$)を合成し、流域末端の最大流量を求めた。

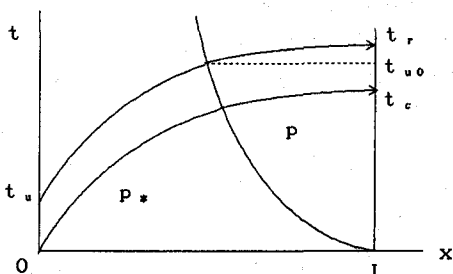


Fig.3 斜面での到達時間の算定(例)

3. 最大流量のシミュレーションとその条件

実際の地形形状に即した流域スケールの影響を調べるために、長方形に近似しうる斜面流域を千曲川流域から17ヵ所選定した(面積: 2.16~233.2km²)。傾向の抽出に重点をおき単一斜面で置き直すには明らかに広い面積も含めている。流域水文特性パラメタとして項目により次のように与えた。各近似流域で、斜面長、斜面勾配、河道長および河道勾配を計測し、従来の知見をもとに空間率($\lambda=0.4$)、等価粗度係数($n=0.15$)は一定とする。不確定な表層厚、透水係数についてはこれまでに得られているモデルの厳密な適用による最適値($d=14\text{cm}$, $K_s=1.0\text{cm/sec}$)⁵⁾を標準に、 $d=5, 10, 20, 40\text{cm}$, $K_s=0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.8\text{cm/sec}$ の組合せ20ケースを各斜面で設定する。

降雨の時間スケールを導入するために降雨継続時間を考える。継続時間強度式には適合度が高いとされ石黒⁵⁾による100年確率強度式 $p=583/(\sqrt{t_r}+0.49)$ を用い、上記のそれぞれのケースについて、降雨継続時間 $t_r=30, 60, 120, 240, 480\text{min}$ を与えて最大流量のシミュレーションを実行した。

4. 最大流量と流域面積・降雨継続時間

シミュレーションの結果による最大流量を比流量の形で表し、結果の例を示せば Fig.4のようになる。各流域において、斜面条件設定の組合せにより算定される最大流量はばらつき、それらの平均値(○印)に対する標準偏差および変動係数は Fig.5に示される。これらの図より、流域水文パラメタの違いが最大比流量に及ぼす影響の度合が、

流域面積、継続時間により異なっていることが分かる。他の計算結果とも総合すると、継続時間の短い強い降雨の場合は斜面飽和領域の伸長と直接深い関係があり、それを規定する表層厚、透水係数の見積りが重要となるこ

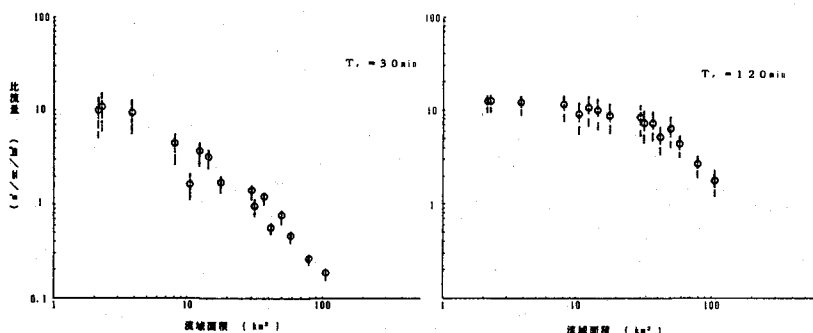


Fig.4 各流域におけるシミュレーションによる最大流量(比流量)

とが理解される。逆に、長い弱い降雨では、小流域では定常に近い流出状態が生じ流域特性パラメタの影響は少なく、河道集水過程に変化を与える大流域でのパラメタの見積りが重要となる。継続時間ごとに標準偏差が最大を示す流域面積を判読して整理すれば Fig.6 のようになる。同図は、対象とする降雨・洪水の時間スケールに応じて、流域特性の見積りの sensitivity を与えるものであり、より高精度な特性量の推定が要求される流域スケールの大きさの程度を示している。

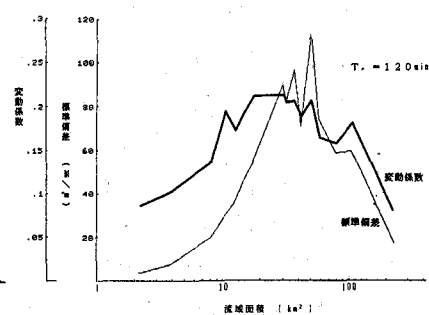
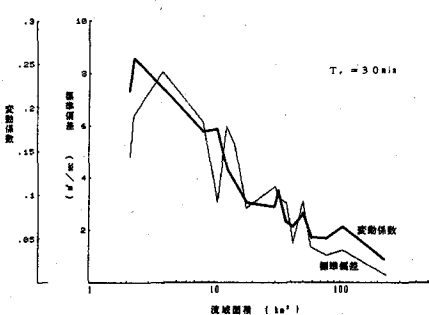


Fig.5 最大流量の標準偏差・変動係数

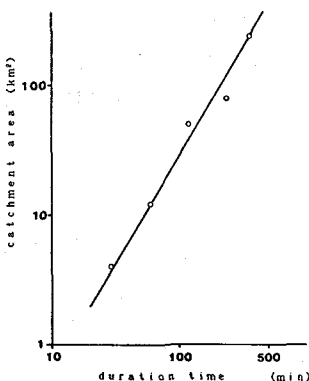


Fig.6 流域面積と降雨継続時間

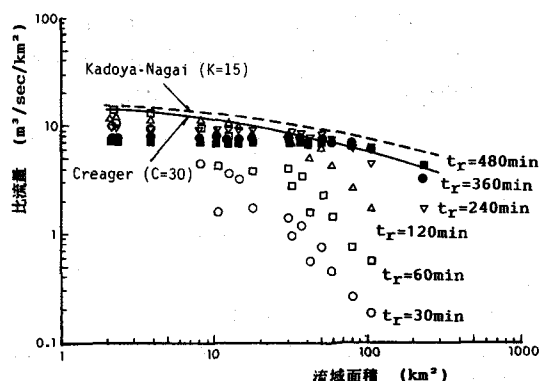


Fig.7 比流量と流域面積

各継続時間ごとに各流域での20組のシミュレーション結果の単純平均をとって Creager 曲線 ($C=30$) および角屋⁷⁾による提案曲線 ($K=15$) と比較すれば Fig.7 のようになる。プロット群の包絡線は提案されている比流量曲線に良く一致している。これより、降雨時間に応じて(最大)比流量に貢献する流域スケールが理解され、経験的な比流量曲線の成り立ちが物理的に説明される。

5. おわりに

水文量の評価のための流域スケールに関する基礎的検討として、流域面積・降雨継続時間と最大流量との関係について考察し、一様降雨のもとで、明確な特性量与えられるべき流域スケールが示された。付随的に得られた比流量曲線は絶対値で従来の経験式に一致することから、本研究の大枠での妥当性も得られたと考えている。しかしながら、実際上は降雨の方の空間変動スケールも同時に考慮する必要があり、問題はさらに複雑になる。より小スケールについても注目しながら今後も検討を重ねたいと考えている。

参考文献

- 1) Woolhiser, D.A. and D.C. Goodrich: Effects of storm rainfall patterns on surface runoff, Journal of Hydrology, 102(1-4), pp.335-354, 1988
- 2) Wood, E.F. et al.: Effects of spatial variability and scale with implication to hydrologic modeling, Journal of Hydrology, 102(1-4), pp.29-47, 1988.
- 3) 嶋田・山田・藤田: 降雨流出におけるランピングスケールの効果に関する研究, 第33回水理講演会論文集, pp.133-138, 1989.
- 4) 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, 411/II-12, pp.135-142, 1989.
- 5) Sunada, K. and T.F. Hong: Effects of slope conditions on direct runoff characteristics by the interflow and overland flow model, Journal of Hydrology, 102(1-4), pp.323-334, 1988.
- 6) 岩井・石黒: 応用水文統計学, pp.156-158, 1970.
- 7) 角屋・永井: 洪水比流量曲線へのアプローチ, 京大防災研究所年報, 第22号 B-2, pp.195-208, 1979.