

流域斜面特性の分布が直接流出に及ぼす影響
Effects of Distributions of Slope Conditions
on Direct Runoff Characteristics

山梨大学工学部 正 員 砂 田 憲 吾
山梨大学大学院 学生員 洪 廷 芳

1. はじめに

最新技術によれば雨量の空間的分布情報が得られつつある。また計算機の発達により、これまでかなり大まかに扱われてきた「一様流域斜面」をより細分化した多数の斜面要素の集合として、実流域斜面により忠実な物理学的アプローチによる流出機構の解明が近づいている。一方、流出寄与域の概念は流域物理特性の空間的な分布にその本質を持つものと考えることができ、その分布の構造やそれらが及ぼす流出特性への効果が吟味される必要がある。本研究は特に直接流出に注目し流域斜面の実地形を重視しながら河道系も含めて流出場を記述し、斜面物理特性の空間的な分布と流出特性とを議論することにより流出機構解明のための基礎的検討を行うものである。本研究では、模擬斜面および試験地規模のスケール（1～数10ha）を想定しているが、単なる流量算定のためのモデル化について議論するのではなく、斜面勾配の分布、降雨強度の分布、浸透能の分布並びにその時間変化、流出寄与域の発生と変動過程などが流出現象に与える影響について系統的に検討することに最終的な目標を置いている。

2. 流域斜面への kinematic wave 理論の適用

流域斜面上および良透水性表層内の水は最急こう配に沿って流下するものとし、より複雑な流域地形にも対処するために、等高線を根拠としてFig 1上段のように、まず短冊状の斜面系に分ける。この斜面系を、それぞれ特性（こう配、浸透能、粗度）の一樣な台形斜面にさらに分割する。この台形斜面内では幅方向に流速・水深は一樣としてkinematic wave 理論の成立を仮定する。河道流も含めて基礎方程式は式(1)～(4)のようになる。

斜面流

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial (bq)}{\partial x} = r_e \\ q = \alpha h^m \end{cases}$$

河道流

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_r \\ Q = KA^p \end{cases}$$

(1)

(2)

(3)

(4)

ここに、 h ：水深、 $b=b(x)$ ：斜面幅、 q ：斜面単位幅流量、 r_e ：有効降雨強度、 A ：河道流積、 Q ：河道流量、 q_r ：河道単位長当り横流入量、 t ：時間、 x ：流下方向距離であり、 α 、 m 、 K 、 p は流れの抵抗に関する定数で以下の内容を持つ。

表面流 (Manning 型)

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\sin \theta_s} / n_s \\ m &= 5/3 \end{aligned} \right\}$$

(5)

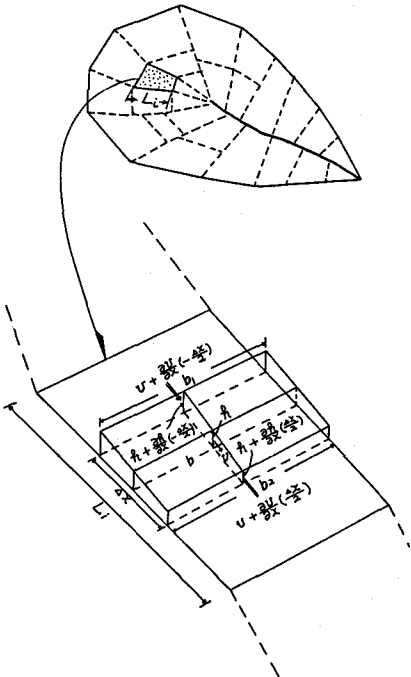


Fig.1 台形斜面（要素）

$$\text{中間流 (Darcy 型)} : \alpha = k \sin \theta_s / \lambda, \quad m = 1 \quad (6)$$

$$\text{河道流 (三角形断面 Manning 型)} : K = \sqrt{\sin \theta} / 2n, \quad p = \frac{4}{3} \quad (7)$$

ここに、 θ_s : 斜面こう配、 n_s : 斜面の等価粗度、 k : 表層土の透水係数、 λ : 有効空隙率、 n : Manning の粗度係数 (河道)、 θ : 河道こう配である。

$b \neq 1$ とする式 (1)、(2) の適用はこれまで何人かの研究者により検討されている。たとえば、金丸¹⁾ は一定こう配で幅の変化をもつ円錐面の収束型・発散型斜面で表面流のみについて解析し、singh²⁾ も類似な検討を行っている。高棹・椎葉^{3, 4)} は円錐面を一般化して中間流も組込んで扱い、定こう配斜面形状を指標化して地形効果の集約化を議論している。なお、角屋・福島・佐合⁵⁾ は表面流・中間流の複合モデルを長方形分割斜面に適用している。

流域分割の影響、河道の伸長、土地利用の変化などの検討にも将来対処し得るよう、いわばパーツ (要素) 交換可能な形で議論し易くするために、ここでは特性曲線法を用いて数値計算する。基礎方程式 (1)、(2) における特性微分方程式は式 (8) で与えられる。

$$\frac{dx}{dt} = \alpha m h^{m-1}, \quad \frac{dh}{dt} = r_e + \alpha c h^m \quad (8)$$

ここに、 $c = \frac{-1}{b} \frac{db}{dx}$

であり、式 (8) 第 2 式右边第 2 項は斜面幅変化に伴う水深変化の効果を表わす。

3. 模擬流域への適用

台形斜面による近似と計算方法の基本的な check のために、金丸¹⁾ による円錐型斜面、椀型斜面における表面流出の解析解 (陰形式) との比較を行った。

Fig. 2 の破線、一点鎖線はそれぞれ金丸の解析に用いられた模擬流域とほぼ同一規模・条件における台形平面斜面の組合せによる収束型、発散型流域の場合の末端流量計算結果である。初期の弱降雨の条件や流域形状 (面積、斜面こう配) を完全には対応させ得ないこと

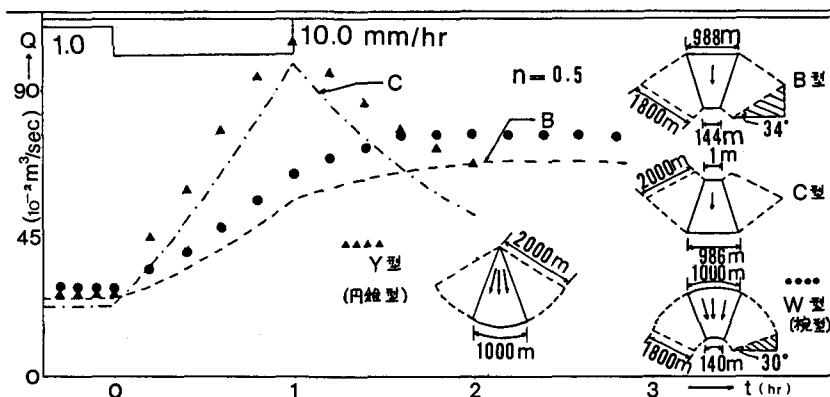


Fig. 2 金丸¹⁾による解析結果との比較

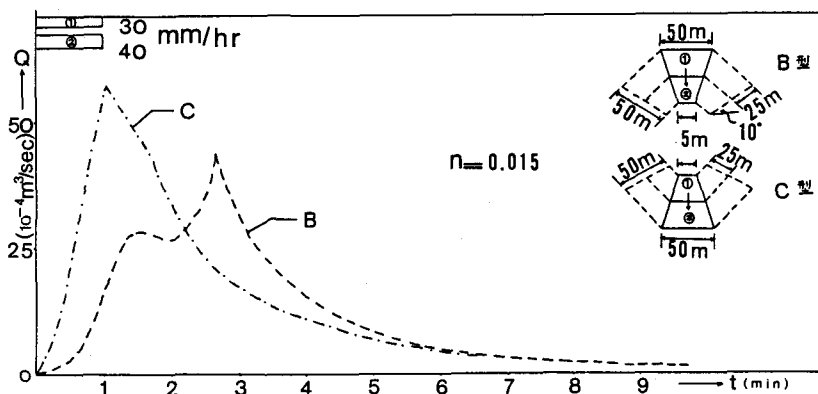


Fig. 3 有効降雨の分布による流出の変化

もあり、流量 Q の絶対値には若干の不一致もみられる。しかしながら、両流域形状の場合ともハイドログラフの全体の傾向、 $Q_{\max}$ の生起時間など台形斜面近似により解析解によく類似した結果を示すことがわかる。

Fig 3は同じく表面流出について、流域の上流部・下流部で有効降雨（浸透能分布）が異なる場合の計算結果の例である。収束型流域（B）では下流部での水深増加に伴う伝播速度が大きく、降雨終了後に一時的な流量減少を示す。そののち面積の大きい上流部からの流出が支配的となり、ここでの条件の場合、2つの流量ピークをとるようになる。発散型（C）では当初支配的な下流部からの流出が生じ、やがて上流部からの弱い遅い流出が生じ、これらは滑らかな流量の減少となって表われている。

4. 実流域での検討

以上の基礎的な考察に続いて、kinematic wave モデルの実流域への適用と検討を進める。試験地を含む多くの実流域での流量観測値は種々の地形形状をもつ多数の斜面からの流出の合成・流下過程の結果として得られている。このとき斜面から河道への流入量の分布が存在することになり、この点を現実により近い形で考慮された流出量の算定が必要となる。

ところで、実際の山地斜面流域では表面流はほとんど発生しないか、発生しても水みち、踏み跡、露岩部分などごく一部の地域にしか生じないことが指摘されている。この点を背景に石原・高棹¹⁾は早くから表層土壌内の中間流の挙動の重要性を認めて、主として斜面下流部での表面流発生領域を検討し、その後の“variable source area”の概念⁷⁾を先に説明している。本研究の立場は流域実地形に重点をおいて、分布して配置された斜面からの流出について、表面流のみ・部分表面流・中間流のみ、の扱いにより観測流量を説明し得るか否かをいわば白紙の状態から検討しようとするものである。このため、流出ハイドログラフを単に“合わせる”ことは第二義的に考え、むしろその特徴（立ち上り、降雨への応答性、ピーク生起時間など）に注目する。

Fig.4は流域面積 0.184 km²の荒川試験地⁸⁾に対する台形斜面流域への分割を示す。分割数は27とし、ひとまず各斜面系に1つずつの斜面要素を配置している。要素の斜面長は50～150 m程度であり、斜面要素の上下流端は平行辺で近似する。雨量・流量資料は1分間隔で得られており、計算時間間隔は $\Delta t = 10 \text{ sec}$ としその1分間内は平均の降雨強度を基本として用いた。

観測された流量のうち、流量減水部こう急急変点に基づく分離により直接流出を仮定し、直接流出率(f)を決める。表面流、中間流の考慮ではこの直接流出の分離の方法によって特に減水部観測値が異なって与えられることになるが、一応上記のように扱い、計算値と観測値の比較ではこの点を考慮に入れて吟味する。

(1) 表面流出のみとする場合

Fig.5の▲印は1971年9月出水による仮定直接流出量を示し、この場合の f は0.16程度である。 f

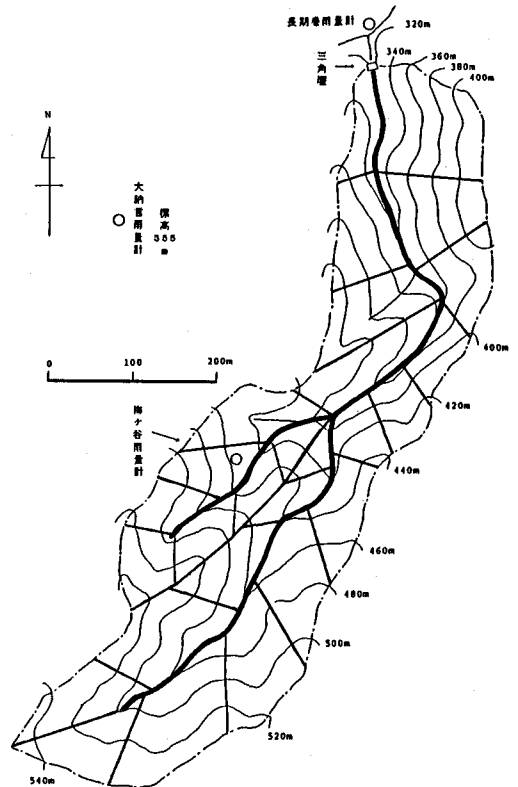


Fig. 4 流域斜面の分割
(荒川試験地 0.184 km²)⁸⁾

から逆算される浸透能(f_t)を全流域に分布させ、結果的に全流域に弱い一様有効降雨が生じたとする場合の表面流出を調べてみる。まず、河道のパラメータを未知として、一定の流下速度 w を考え、各種の w に対して流量観測点での流量を示せばFig.5中の3本の曲線になる。計算値はいずれの場合も、流量の立ち上り、ピーク付近の形状とも観測値とかけ離れている。なお、等価粗度 n_s の値は自然流域表面流モデル単独適用時としてかなり大きな値を与えている。

(2) 部分飽和域のみからの表面流出の場合

直接流出率 f に見合う一定飽和流出域を河道周辺(片側15m)に設定し、他の斜面区間では全て深層に浸透し考慮時間内では流出しないとする場合の飽和域からの表面流出はFig.6のようになる。計算値は観測値により近くなる。前述の通り、観測値は表面流出のみでなく、立ち上りが遅く、減水部もより緩やかな形状を示す。しかしピーク流量生起時間やその附近での強降雨に対する流出応答は比較的良好に再現し得るようである。

(3) 中間流のみによる流出の場合

表層での中間流のみによる流出の場合の計算結果はFig.7のようになる。ただ

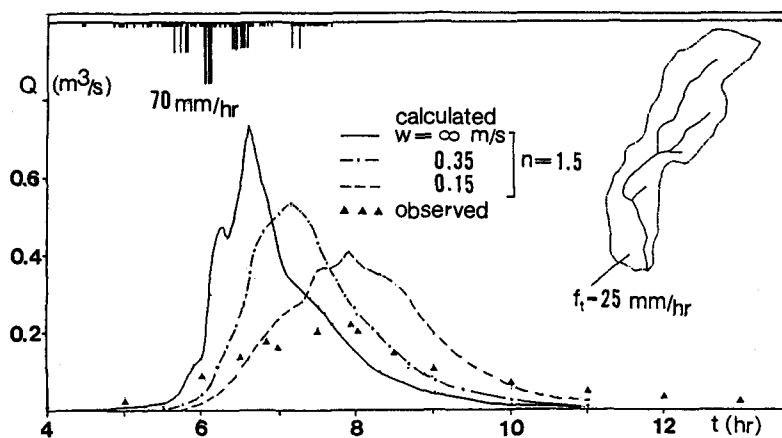


Fig. 5 流域に一様な有効降雨による全流域表面流出

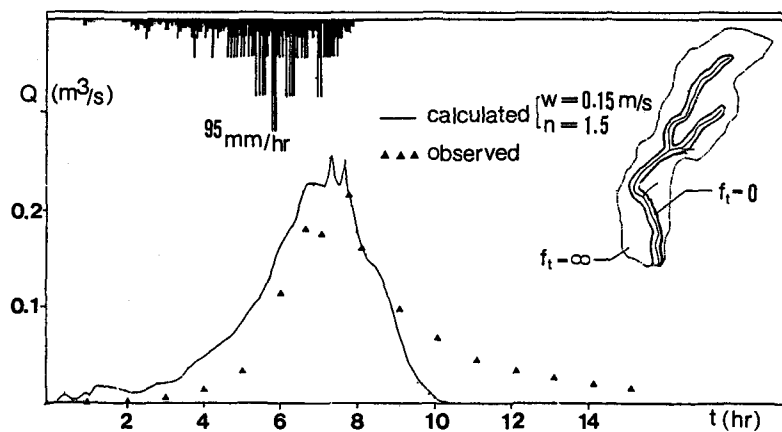


Fig. 6 河道周辺の飽和域のみからの表面流出

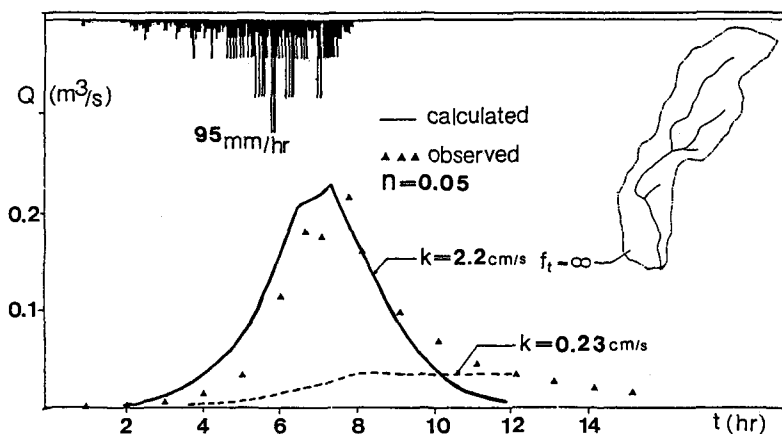


Fig. 7 表層中間流のみによる流出

し、この場合は河道流も三角形断面 ($n=0.05$) のもとで基礎式 (3)、(4) を解いている。透水係数 k 、表層厚 d も不明であるが、同一流域小洪水の椎葉の解析⁴⁾ (全流域を円錐面一定こう配を仮定)、角屋らの解析⁵⁾ を参考にして $k=0.23, 2.2$ (cm/sec) を与えている。表層厚については大きな値を仮定し、直接流出率 f に対応する中間流出量のみが図示されている。表層内初期流量をほぼ 0 とし計算結果が得られているが観測ハイドログラフの形状を基本的に再現し得る。特に立ち上り部の時間変化はより最適な k の値によって高精度に表わされよう。一方、減水部の不一致は初期流量もしくは基底流量で補正され得ると考えられるが、ピーク流量附近の流出応答が鈍いのは中間流のみでは改善されないものと考えられる。

(4) 表面流・中間流の組み合わせと変動流出域

以上の検討を総合すれば、表面流と中間流とを組み合わせたモデル構成によってより厳密な直接流出の議論が可能になることが期待される。この種の解析は理想斜面での扱いや長方形分割のもとで行われている^{4, 5)}が、本論文での扱いのような実流域

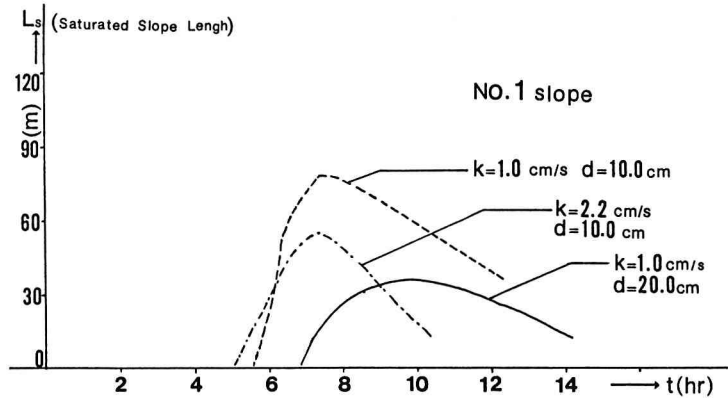


Fig.8 斜面飽和域の時間変化 (収束型、No.1 斜面)

斜面の地形により忠実な分割によれば、地形効果を直接反映した形で流出形態の分布構造が明らかになる。

斜面幅の変化項 (収束・発散) により、表面流発生域 (飽和域) では無降雨でも表層中間流からの水の補給を受け (収束斜面)、かなりの強雨でも発散斜面では飽和域は発生しない。表面流・中間流の組合わせによる式 (1)、(2) の計算は飽和域発生境界点附近の処理を中心に複雑さが数段増す。計算方法の具体的な手順は別の機会に報告することとして、得られた飽和域の時間的な変化 (変動 (表面) 流出域) の結果を考察する。

Fig.8 は No.1 斜面における飽和域の時間変化を示す。透水係数 k と表層厚 d とにより種々の変化をとるが、 k 、 d の減少と共に最大飽和域が増大する傾向にある。ただし、 k の増加はより早期に飽和域を生じさせる。降雨中は式 (8) 右辺からも知れるように降雨強度の影響を受けて微妙な変化も示すが、降雨終了後は滑らかに減少 (d によってはさらに増大してから減少) する。

Fig.9 は全分割斜面における飽和域の変動の分布の一例である。 k 、 d は図中の値によるもので全斜面でそれぞれ同一の値を用いている。 k 、 d の値や組合わせは最適値として与えられたものではなく、結果は定性的に評価されるべきものであるが、多くの興味深い

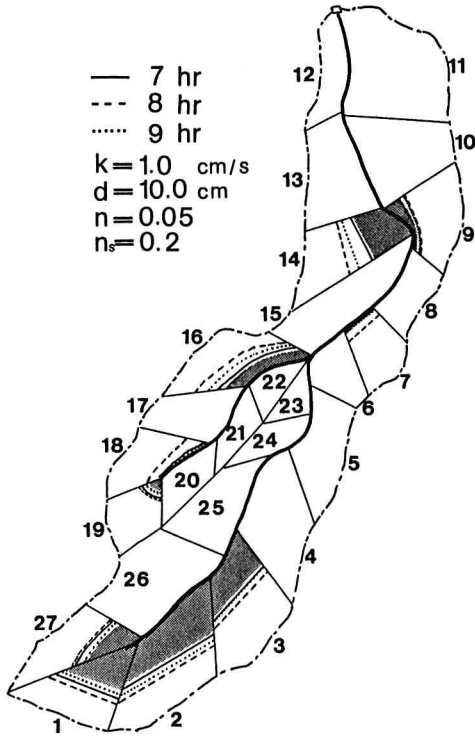


Fig.9 変動飽和域の分布

傾向を示している。まず、発散型の斜面には飽和域は発生せず、収束型斜面においても斜面長が短い場合は発生しにくい。このことは、例えばDunneら⁷⁾の報告とも一致する。また、長時間大規模な飽和域を形成するのは河道上流端附近であることも従来の認識と一致し、この区間は実際では水みち流やパイプ流なども発生し易い領域でもあろう。さらに興味深いことは、中、下流部で微小河道を無視して斜面にとったNo.14、No.16 斜面では周辺にはないかなり規模の大きい飽和域が生じていることである。これらの結果を定量的に把握するためには、 k 、 d の分布や斜面長・形状を考慮したさらに詳細な議論が必要である。

5. おわりに

本研究では、流域地形をより忠実に表現するために台形分割斜面を要素としてkinematic wave理論を適用し、流域条件の分布が及ぼす直接流出への効果と、直接流出の構造そのものについて検討した。その結果、有効降雨に対する地形（収束・発散）効果はピーク流量生起時間に大きく影響すること、中間流を基本にピーク流量の一部を表面流が受持つ流出寄与域の概念が追認されることなどが得られ、飽和流出域の時間変動の流域内分布が例示された。構成された数値モデルは流域条件の時間・空間分布に対応できるより一般的なものであるので、今後さらに詳細かつ系統的な検討を重ねていく積りである。

最後に、貴重な荒川試験地水文観測資料をご提供頂きました京都大学防災研究所石原安雄教授に心から感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 金丸：流出を計算する場合の山腹斜面形の単純化について、土木学会論文集、No.73、PP. 7-12、1961.
- (2) Singh, V. P. : A Distributed Overland Flow Model , 1. Mathematical Solutions , Water Resour. Res. , Vol. 12, No.5, PP. 889-896, 1976. ほか.
- (3) 高棹・椎葉：Kinematic Wave法への集水効果の導入、京大防災研究所年報、No.24(B-2)、PP. 159-170、1981.
- (4) 椎葉：流出系のモデル化と予測に関する基礎的研究、京都大学学位論文、1983.
- (5) 角屋・福島・佐台：丘陵山地流域モデルと洪水流出モデル、京大防災研究所年報、No.21(B-2)、PP. 219-233、1978.
- (6) 石原・高棹：中間流出現象とそれが流出過程におよぼす影響について、土木学会論文集、No.79、PP. 15-21、1962.
- (7) たとえば、Dunne, T. and Black, R.D. : Partial Area Contribution to Storm Runoff in a Small New England Watershed, Water Resour. Res. , Vol. 6, No.5, PP. 1296-1311、1970.
- (8) 京都大学防災研究所：荒川試験地水文観測資料、1976.
- (9) 砂田・洪：流域実地形を考慮した表面流の数値モデルについて、第4回自然災害講演会要旨集、PP. 128-129、1985.
- (10) 砂田・洪：流域実地形を考慮した表面流数値モデル、第2回比較河川学シンポジウム講演論文集、PP. 71-72、1985.