

徳島大学工学部 正 員 端野 道夫
徳島大学大学院 学生員 〇藤原 敏

1. まえがき： 従来水深の小さい流れ、特に急勾配粗面上の薄層流についてはあまり言及されていないように思われる。本研究ではこのような急勾配粗面上の等流および降雨実験を行い、その抵抗形態と粗面の粗度特性、斜面勾配、降雨パルスなどとの関係を考察する。

2. 粗面上の薄層流： 薄層流は、流下面が滑面であれ粗面であれ層流の抵抗形態と等しい抵抗を示すことが知られている。その抵抗特性は次式のように表わせる。(1) $f' = C/Re$ こゝに f' は開水路の摩擦損失係数、 C は定数であり滑面においては 6 であるが粗面においては勾配や粗度の種類により種々の値をとりうる。等流の粗面薄層流をとり扱う場合、水深基面の取り方が問題となるが、水深 h を図-1のように取って整理すると見かけ上 f' が大きくなり、従って C が大きくなることは明白である。既述の研究¹⁾においてもこのような整理方法が採用されている。いま粗面上の流水に關する有効な水深を h_e 、前記のような見かけの水深を h とすると、次式のように定義される補正係数 λ_e が考えられる。(2) $h_e = \lambda_e h$ (3) $\lambda_e = LBh_e/LBh = V_e/V$ こゝに L ：斜面長、 B ：斜面幅、 V ：見かけの水容積、 V_e ：有効水容積である。物理的にはこの λ_e は、(3)式で表わせるような流水に關する有効空隙率と見なせる。この有効水深 h_e を用いて求めた摩擦損失係数 f'_e は(1)式を満足するものとするれば (4) $f'_e = \lambda_e^3 f'$ となり(1)式の定数 C と有効空隙率 λ_e との間には次式の関係が成り立つ。(5) $C = 6/\lambda_e^3$ 一般に $h > h_e$ であり、(5)式より h の微かな変化に対して定数 C がかなり敏感に反応することが予想できる。同一粗面、同一勾配であつても水深の変化により有効空隙率 λ_e が変われば、 C は変化する。さて図-2中の実験ケース I は斜面勾配を固定 ($\sin \theta = 0.155$) し、種々の表面状態について定常降雨実験を行、たもので³⁾、図中「布+ステラ」とは斜面上にさらし布とステラシート(化学繊維をよせ集め一定厚に成型したもの)を、「布+ネット」とはさらし布と目が1cmの金網を、「布+ネット+ステラ」とは「布+ネット」の上にステラシートを敷いたものを意味する。

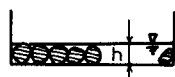


図-1

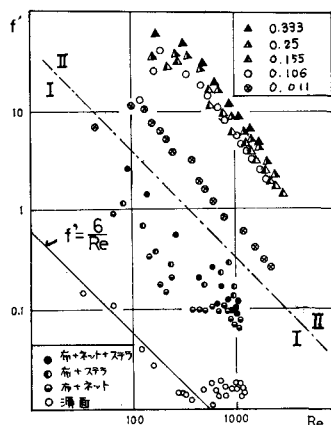


図-2

また実験ケース II では斜面の粗度を固定して、勾配と流量を変えた等流実験を示し⁴⁾、粗度要素としては平均の直径が 9mm と 14.5mm の人工軽量骨材を一層に敷きつめたものを用いている。実験ケース II の整理結果を見ると、滑面の層流抵抗特性を示す左下の直線より勾配が急なことから、定数 C となれば前述の有効空隙率 λ_e の変化をうかがうことができる。そして勾配が大きいものから小さいものへと下方に平行移動していることから、勾配が大きくなる程定数 C が増加することがわかる。さらに、層流の抵抗形態を示すレンジはかなりの高レイノルズ数まで及んでいるが、Chen-Lung Chen¹⁾らの芝生を用いた等流実験においても、勾配 0.1% で $Re = 10^4$ まで、勾配 3/3 で $Re = 10^3$ まで層流タイプの抵抗形態が示されていることから、妥当な結果といえる。図-3は実験ケース II のデータを $C \sim Re$ 関係に書き換えたもので、降雨による衝撃の影響を見るために実験ケース II と同じ条件で降雨実験した結果が黒印で追示されている。これによるとケース II のような相対粗度が大きい場合には、降雨による定数 C への影響は顕著ではない。

3. 斜面の抵抗則推定のための一手法: まず斜面上の水収支に関して次の貯留方程式が成り立つとする。(6) $\frac{d(2h)}{dt} = r(t) - g(t)$
 ここに λ : 空隙率, h : 斜面の平均水深, g : 単位面積当りの流出高。
 また運動式は、本実験のような急勾配斜面では等流速近似式を用いてよく

$$(7) \quad h = k g^P \begin{cases} \text{乱流} & k = \left(\frac{N \lambda}{\sqrt{\epsilon}}\right)^P & P = \frac{2}{3} \\ \text{層流} & k = \left(\frac{C \lambda^4}{29 I}\right)^P & P = \frac{1}{3} \\ \text{中間流} & k = \lambda / k' I & P = 1 \end{cases}$$

ここに N : マニंक係数, I : 斜面勾配, λ : 斜面長, ν : 動粘性係数, k' : 透水係数である。(6), (7) 式より計算流量は(8)式のように表

わされる。(8) $\hat{g}(t) = \left[\int_0^t (r - g) ds / k \right]^{\frac{1}{P}}$ 実測の流出高 g と計算流出高 $\hat{g}$ との時刻 T までの累加平均誤差 ϵ は次式のように定義できる。(9) $\epsilon = \left[\frac{1}{T} \int_0^T \{\hat{g}(t) - g(t)\}^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}$ (8) 式を(9)式に代入すると (10) $\epsilon = \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \left(\frac{\int_0^t (r - g) ds}{k} \right)^{\frac{2}{P}} - g^2 \right\} dt \right]^{\frac{1}{2}}$ となり、時刻 T における誤差 ϵ は k, P の値により決定できる。しかも P は k の内容によって(7)式後半のように一意的に決まるから、結局 ϵ は k のみの関数となり、水深 $h = \int_0^T (r - g) dt$ と $g(t)$ は既知の値だから ϵ を最小にするには $\frac{\partial \epsilon}{\partial k} = 0$ となるような k を採ればよい。 ϵ の最小値は(7)式に示す三種類の場台について各々存在し、その時の k の値は

$$(11) \quad k^{\frac{1}{P}} = \frac{\int_0^T h^{\frac{2}{P}} dt}{\int_0^T (g \times h^{\frac{2}{P}}) dt} \quad (12) \quad \epsilon^2 = \frac{1}{T} \left[\int_0^T g(t)^2 dt - \frac{1}{k^{\frac{2}{P}}} \int_0^T h^{\frac{2}{P}} g dt \right]$$

(11) 式により得られる。また ϵ の最小値は(12)式の平方根を求めればよい。これらの式を用いて(7)式で示すそれぞれの k, P に対する三種類の ϵ の値を比較することにより斜面上の流出形態を推定できる。本実験にこの手法を適用した結果を示すと図-4, 図-5 のようである。図-5 は ϵ を最小にする定数 C を用いたハイドログラフとマニンカの N によるもの、それに実測値とを比較したもので、 C による計算結果の方が適合性

が高いことがわかる、このことは前述の層流レンジの広さから考えても妥当な結果と考えられる。図-5 では、定数 C は降雨開始後 26 秒までは一定値 9000 を取り、それ以後急に ϵ が大きくなった例である。しかも 26 秒付近のレイノルズ数から考えて、未だ抵抗形態は層流タイプをなすはずだから、これは定数 C の変化に他ならない。この時の水深は 9mm を少し超える程度で粗度要素の直径が 9mm であることから、抵抗の少ない粗度要素の上を行く流れが卓越し始めたと解釈できる。ゆえに 26 秒以後は ϵ を最小にする値として $C = 4600$ を得、これを用いて実測時まで計算した。なおいてい減部には $C = 7000$ を用いている。このように本法のような簡便法から計算された ϵ を評価することによって、もかなり流れの状態を把握することができ、実流域への応用も可能であろう。

4. あとがき: 本研究で明らかになったことは、等流速実験については、勾配が異なる程 C の値も増加し、粗度が違っても同じ傾向を示す。抵抗特性については相当な高反数まで層流タイプを呈する。降雨の影響については、相対粗度が大きいため顕著ではなかった。また本研究で提案された抵抗則推定のための手法は本実験に適用した場合も充分有効であり、流れの状態の把握に役立つことがわかった。

参考文献: 1) Cheng-lung Chen Flow Resistance in Broad Shallow Grassed Channels ASCE March 1976. 2) 筑野道夫 山地小流域の表面流れ抵抗則について, S 49, 50 年度 文部省科学研究費 自然・災害特別研究 (1) 昭和 51 年 3) 筑野道夫, 山田小流域の抵抗則に関する実験的研究, 昭和 50 年度 中部支那経済学会 4) 筑野道夫・藤原政 急勾配斜面の等流速に関する実験的研究, 昭和 51 年度 中部支那経済学会

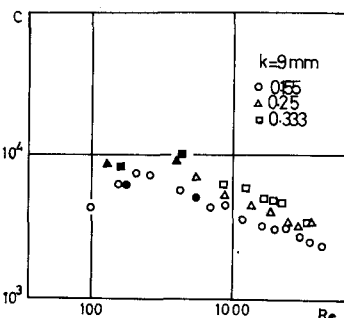


図-3

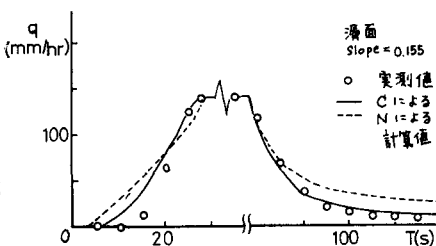


図-4

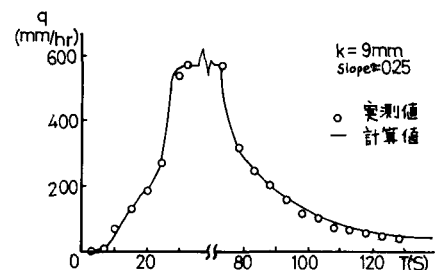


図-5