流出を計算する場合の山腹斜面形の単純化について*

正員　金　丸　昭　治**

ON THE SIMPLIFICATION OF THE NATURAL SHAPE OF HILL SIDE FOR RUNOFF ESTIMATION

By Akiharu Kanamaru, C.E. Member

Synopsis : The author considered the effects of the shape of hill side upon the runoff behaviours of rainwater. In this paper, the method to estimate that effects and some results obtained from its numerical examples available to the simplification of runoff-estimation are presented. This is a part of the basic research programs on the Synthetic Unit Hydrograph.

要　旨　この論文は，総合単位図に関する基礎的研究の一部として，種々の形を有する山腹斜面上の雨水流出について考察し，その取り扱いの簡易化について二，三検討した結果を示したものである。

1. 緒　言

わが国の河川における出水現象を解析する有力な方法として，単位図法が応用されるようになったのは約 10 年前からであるが，最近に至るまで，その本質的な論議は保留されたまま実用性のみを尊重して広く利用されてきた。その間，提案当初の単位図法がわが国河川の出水解析に不適当であることは，京大石原研究室において行なわれた実証的研究[1]によって明らかにされていたのであるが，降雨から流出までの複雑な過程をできるだけ簡単にまとめて表現し，それによって降雨と流出とを直結するという単位図法のすぐれた思想と簡明さには捨てがたいものがあるので，わが国の河川にも適合させるべく降雨条件の変動による単位図の変化に関する研究[2]，あるいは対象とする出水を中洪水以上に限定した研究[3]などが行なわれ，適用精度はかなり向上してきたのである。しかしながら，この種の研究の最終目的が総合単位図のような，普遍的な計算法の完成にあることを考えると，以上のような単位図の取り扱い方のみを吟味する方法論的な研究には，大きな成果は期待できないのであって，当然，単位図の内部機構と流域特性や降雨特性との関係をくわしく検討することが必要となってくるのである。このような問題に関して，わが国においては，降雨および流域特性の効果に関する研究[4]や，流出過程全体をくわしく解析した結果にもとづき，単位図法とその適用に関する基礎的研究[5]が行なわれており，他方，外国においても単位図の一般理論[6]が論議されるようになってきたのである。流出に関する研究分野のすう勢が上記のような傾向にあるということは，要求される精度の向上した現在では，河川の規模や特性のいかんにかかわらず，従来の単位図法そのままでは満足すべき結果が得られないことを指摘しているのであって，単に単位図法だけでなく，流出計算法として提案されるものは流出現象をできるだけ詳細に解析した成果にもとづいて考案され論議されるべきものであることを示しているのである。

この研究では，以上の考え方に従って，まず雨水流出過程の基礎単位である山腹斜面における雨水の流出現象をある基本条件のもとで解析し，その成果を流出計算法の総合化に役立てるために，斜面形態の違いをどのように取り扱えば目的に対して合理的かつ簡単であるか，という問題を中心にしていろいろ考察することにした。これは，流出現象をできるだけ詳細に解析しようとする場合には必ず検討しなければならない問題ではあるが，過去においては，対象とする流域がかなり大きい場合には小流域からの流出特性が平均化されるために，小流域の形その他の要素については簡単な取り扱い方がなされてきたのである。ところが，最近においては，比較的小さい流域からの流出が取り扱われるようになり，例えば，道路に隣接した山腹斜面からの流出などはその極端な場合であるが，このような流出を対象とするようになれば当然，流出に関与する各要素の影響をくわしく検討することが必要になるのであって，ここで取り上げた斜面形の影響もその問題の一つとして検討することにした。

なお，ここでは解析を容易にするために，山腹斜面上の表面流出ならびにそれに対応する有効雨量のみを取り扱うことにしたのであるが，流域の規模拡大にともなう流出の変化や損失雨量については，現在，約 0.44 km² の面積をもつ実験流域において観測した資料を整理検討中であるから，近くその結果を報告する予定である。

2. 基礎方程式

地表面に供給された雨水が河川を経て海に達する複雑

* 土木学会中部支部研究発表会にて講演，昭.35.11
** 金沢大学講師　工学部土木工学教室

な過程のうち，ここでとり上げたのは山腹斜面における流出現象であるが，非常に不規則な斜面上の現象を厳密に解析することは不可能であるから，普通行なわれるように，できるだけ現象に忠実で，しかも計算に便利な仮定を設けて解析を試みることにした。すなわち，平均してみると，山腹斜面上の雨水流は斜面の巾全体に一様に分布して流下する曲面あるいは平面上の流れであり，斜面の勾配および粗度は一様であると考えて差し支えないであろう。つぎに京大石原研究室における研究結果[7),8)]によると，山腹斜面上の流れでは摩擦の効果が支配的であり，したがって，基礎方程式の組み立てにさいして，慣性項，水面勾配の影響，降雨による流入および浸透による流出や巾の変化などが流れの運動状態におよぼす影響は考慮しなくてもよいとされているから，ここでもこれらを省略することにした。また，有効雨量強度 I_0 は時間的には階段状に変化し，場所的には一様であるとする。さらに，流れが乱流で，巾に比較して水深が非常に小さいものとすれば，連続および運動方程式としてつぎの2式が与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{1}{b(x)}\cdot\frac{\partial}{\partial x}\{u\cdot h\cdot b(x)\}=I \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\sin\theta-\frac{n^2u^2}{h^{4/3}}=0 \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに，h は水深，t は時間，x は上流端からの距離，$b(x)$ は x の位置における巾，u は平均流速，$I=I_0\cos\theta$，θ は斜面の傾斜角，n は斜面の粗度係数である。(2) 式を (1) 式に代入すると，

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\left(\frac{5}{3}\frac{\sqrt{\sin\theta}}{n}h^{2/3}\right)\frac{\partial h}{\partial x}=I-\frac{\sqrt{\sin\theta}}{n}h^{5/3}\cdot\frac{1}{b(x)}\cdot\frac{db(x)}{dx} \quad \cdots\cdots(3)$$

が得られ，(3) 式から特性微分方程式として，

$$\frac{dt}{1}=\frac{dx}{\frac{5}{3}\frac{\sqrt{\sin\theta}}{n}h^{2/3}}=\frac{dh}{I-\frac{\sqrt{\sin\theta}}{n}h^{5/3}\cdot\frac{1}{b(x)}\cdot\frac{db(x)}{dx}}$$

が与えられる。この2組の方程式を解くと，つぎに示すような2つの第一積分が得られる。

$$h^{5/3}=\frac{1}{b(x)}\left\{\frac{In}{\sqrt{\sin\theta}}\int b(x)\,dx+C_1\right\} \quad \cdots\cdots(4)$$

$$t=\frac{3n}{5\sqrt{\sin\theta}}\int b(x)^{2/5}\Big/\left\{\frac{In}{\sqrt{\sin\theta}}\int b(x)\,dx+C_1\right\}^{2/5}\cdot dx+C_2 \quad \cdots\cdots(5)$$

(4)，(5) 式の関係を一般の関数関係で結んだものが，(3) 式の一般解であることは周知のとおりである。これは，(4) および (5) 式によってあらわされる2つの曲面の交線，すなわち特性曲線の軌跡として ∞ 個の曲面が与えられることを示しているのであって，この中から求める曲面を一つだけ選定するために，つぎの条件を与えることにする。

$$t=0,\ x=\xi \text{ において } h=h_0(\xi) \quad \cdots\cdots(6)$$

これは，問題とする期間の初期における状態を示すものであって，この条件をいれると求める曲面は ξ を一つのパラメーターとしてつぎのようにあらわすことができる。

$$\left.\begin{aligned}h^{5/3}&=\frac{1}{b(x)}\left\{\frac{In}{\sqrt{\sin\theta}}\int_\xi^x h(s)\,ds+b(\xi)h_0(\xi)^{5/3}\right\}\\ t&=\frac{3n}{5\sqrt{\sin\theta}}\\ &\times\int_\xi^x b(s)^{2/5}\Big/\left\{\frac{In}{\sqrt{\sin\theta}}\int_\xi^s b(s)\,ds+b(\xi)h_0(\xi)^{5/3}\right\}^{2/5}\cdot ds.\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(7)$$

あるいは，流量を $q,h_0(\xi)$ に対応する流量を $q_0(\xi)$ であらわすことにすれば，

$$\left.\begin{aligned}q&=I\int_\xi^x b(s)\,ds+q_0(\xi)\\ t&=\frac{3}{5}\left(\frac{n}{\sqrt{\sin\theta}}\right)^{3/5}\int_\xi^x b(s)^{2/5}\Big/\left\{I\int_\xi^s b(s)\,ds+q_0(\xi)\right\}^{2/5}\cdot ds.\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(7')$$

のようにあらわすこともできる。これからわかるように ξ にある値を与えると，(7′) 式の2つの式はそれぞれ t 軸および q 軸に平行な柱面をあらわし，これら2つの柱面の交線，すなわち特性曲線に沿って両式が同時に成立する。したがって，ξ の値を変えることによって無数の特性曲線が得られ，それらが綴り合わされて形成する一つの曲面が求める曲面である。また，(7) および (7′) 式においては，I の開始時刻を時間の原点とし，以後 I は一定としているので，一連降雨を対象とした場合のように，I が階段状に変化すれば，そのつど，時間の原点が I の変化した時刻へ移動することに注意しなければならない。

なお，流出現象に関する一般的な論議は，流路をふくむ流域を対象とした場合に，一層興味深いものとなるので，次報以後にくわしく述べることにして，つぎに山腹斜面の二，三の形を仮定して雨水流出の計算例を示すことにする。

3. 計 算 例

山腹斜面の形として，平面では矩形と三角形を，曲面では円錐の側面に相当する円錐型斜面および円錐の内側の面に相当する椀型斜面とを選べば，自然の山腹斜面の形はそれらのいずれかにふくまれるであろう。以下に示す計算例では n および θ を一定としているが，これは斜面の形の違いによる流出変化を解明することを主目的としているからである。実験あるいは実測計算によると，n の値には 0.2 から 1.5 までの変化があるようであるが[9)]，このような数値の違いは山腹斜面の流れとしてどの程度の流路の流れをふくめるか，ということも関連すると考えられる。ここでは $n=0.5\,\mathrm{m}^{-1/3}\cdot\mathrm{sec}$，$\theta=30°$ の場合を対象として計算例を示すが，実河川の流域や山腹斜面を取り扱うときは，要求される精度に応じて単位の

面積を定め，その大小によって n の値を小さくし，あるいは大きくしなければならないであろう。

（1） 矩形斜面の場合

この場合は，$b(x)$ を一定として計算すればよいから (7) 式はつぎのようにあらわすことができる。

$$\left.\begin{aligned} h^{5/3} &= \frac{In}{\sqrt{\sin\theta}}(x-\xi)+h_0(\xi)^{5/3} \\ t &= \frac{3n}{5\sqrt{\sin\theta}} \\ &\times\int_\xi^x\left[\frac{In}{\sqrt{\sin\theta}}s+\left\{h_0(\xi)^{5/3}-\frac{In}{\sqrt{\sin\theta}}\xi\right\}\right]^{-2/3}\cdot ds \\ &= \frac{1}{I}\{h-h_0(\xi)\}. \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(10)$$

とくに，$I=0$ の場合は，

$$\left.\begin{aligned} h^{5/3} &= h_0(\xi)^{5/3} \\ t &= \frac{3n}{5\sqrt{\sin\theta}}\frac{(x-\xi)}{h_0(\xi)^{2/3}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(11)$$

のようになる。

もっとも簡単な場合として，$h_0(\xi)=0$，つまり I の開始時刻において各地点で水深が 0 である場合を考えると (10) 式からわかるように，

$$h=It \quad \cdots\cdots(12)$$

であって，各地点で，水深は時間に対して直線的に増加し，$x=x_1$ のところでは，

$$h^{5/3}=\frac{In}{\sqrt{\sin\theta}}\cdot x_1 \quad \cdots\cdots(13)$$

の関係を満足する水深になれば，以後は定常状態になる。この結果は，京大岩垣博士，末石助教授が得た研究成果[10] からも認められることである。

つぎに，$h_0(\xi)$ が 0 でなくても，例えば，I_1 によって定常状態になっているときに，新しく I_2 が開始された場合にも，ξ を消去することができる。すなわち，

$$h_0(\xi)^{5/3}=\frac{I_1 n}{\sqrt{\sin\theta}}\xi$$

であるから，これを (10) 式に代入すると，

$$h^{5/3}=\frac{I_2 n}{\sqrt{\sin\theta}}x-\frac{I_2-I_1}{I_1}(h-I_2t)^{5/3} \quad \cdots\cdots(14)$$

のようになる。I_2 が 0 の場合は，(11) 式に代入して，

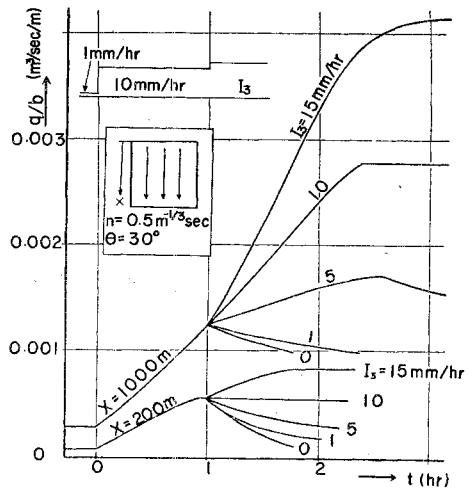
$$t=\frac{3n}{5\sqrt{\sin\theta}}\frac{1}{h^{2/3}}\left(x-h^{5/3}\Big/\frac{I_1 n}{\sqrt{\sin\theta}}\right) \quad \cdots\cdots(15)$$

が得られる。(14)，(15) 式の t は I_2 の開始時刻から後の時間である。

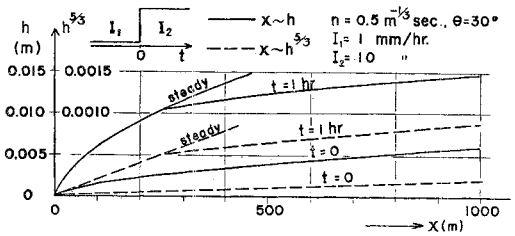
以上のように，$t=0$ における状態が特別な場合は，ξ を消去して $t\sim x\sim h$ の関係を一つの式にまとめることができるが，そのほかの場合には，ξ を一つのパラメーターとして数値計算を行なわなければならない。

斜面の形が矩形でなく，もっと複雑な形をしている場合でも，流下方向が一様であれば，流下距離の異なる細長い矩形斜面が合成されたものと考えればよく，例えば後に述べる三角形平面の場合のように，矩形の場合の計算結果を用いて簡単に流量を求めることができる。

図—1　矩形斜面における単位巾流量の計算例



図—2　$t=0$ および $t=1$ hr における矩形斜面上の水面形



図—1 は，$I_1=1$ mm/hr によって定常状態になっているときに $I_2=10$ mm/hr が開始され，それが 1 時間継続した後に I_3 に変化した場合の時間と単位巾流量との関係を，上流端からの距離 x の種々の値について (10)，(11)，(14)，(15) の各式から求めた結果の一部を示したものである。この計算を行なうためには，I_2 の開始時刻を時間の原点とすれば，$t=0$ および $t=1$ hr における x と h との関係が必要であり 図—2 はこの関係を示したものである。

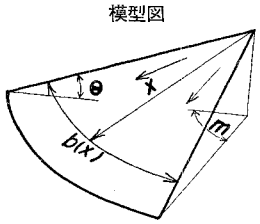
（2） 円錐型斜面の場合

これは 図—3 に示すように，円錐の外側面を流下する場合に相当し，$b(x)$ は，

$$b(x)=m\cos\theta\cdot x, \quad (\mathrm{m};\ \mathrm{radian})$$

となるから，(7′) 式は，

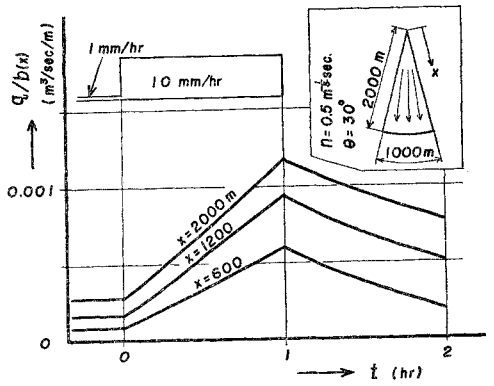
図—3　円錐形斜面の模型図



$$\left.\begin{aligned} q &= Im\cos\theta\frac{1}{2}(x^2-\xi^2)+q_0(\xi) \\ t &= \frac{3}{5}\left(\frac{n}{\sqrt{\sin\theta}}\right)^{3/5} \\ &\times\int_\xi^x s^{2/5}\Big/\left\{\frac{I}{2}(s^2-\xi^2)+q_0(\xi)/m\cos\theta\right\}^{2/5}\cdot ds \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(16)$$

のようになる。とくに，I_1 によって定常状態になってい

図—4　円錐型斜面における単位巾流量の計算例



るときに急に I_2 に変化した場合を考え，I_2 の開始時刻を時間の原点にとれば，(16) 式はつぎのようになる。

$$\left.\begin{aligned} q&=\frac{m\cos\theta}{2}\{I_2x^2-(I_2-I_1)\xi^2\}\\ t&=\frac{3}{5}\left(\frac{n}{\sqrt{\sin\theta}}\right)^{3/5}\int_\xi^x\left\{\frac{2s}{I_2s^2-(I_2-I_1)\xi^2}\right\}^{2/5}\cdot ds \end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(17)$$

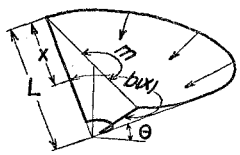
また，I が急に0となった場合は，I が0となった時刻を時間の原点にとると，

$$\left.\begin{aligned} q&=q_0(\xi)\\ t&=\frac{3}{7}\left(\frac{n}{\sqrt{\sin\theta}}\right)^{3/5}\cdot\left(\frac{m\cos\theta}{q_0(\xi)}\right)^{2/5}\cdot(x^{7/5}-\xi^{7/5}) \end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(18)$$

のようにあらわすことができる。**図—4** は (17), (18) 式によって計算した場合の例を示したものである。

（3）　椀型斜面の場合

図—5　椀型斜面の模型図



これは (2) の場合の逆の形をしていると考えればよく，**図—5** からわかるように，

$$b(x)=m\cos\theta\cdot(L-x)$$

であるから，(7′) 式は

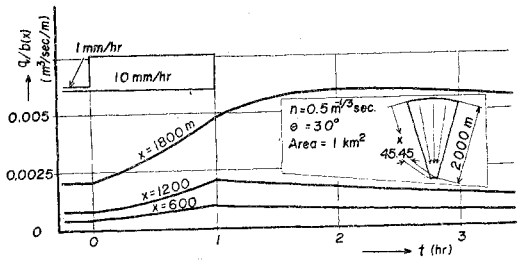
$$\left.\begin{aligned} q&=\frac{Im\cos\theta}{2}\{2L(x-\xi)-(x^2-\xi^2)\}+q_0(\xi)\\ t&=\frac{3}{5}\left(\frac{n}{\sqrt{\sin\theta}}\right)^{3/5}(m\cos\theta)^{2/5}\\ &\quad\times\int_\xi^x(L-S)^{2/5}\Big/\left[\frac{Im\cos\theta}{2}\right.\\ &\quad\left.\times\{2L(s-\xi)-(s^2-\xi^2)\}+q_0(\xi)\right]^{2/5}\cdot ds \end{aligned}\right\} \cdots(19)$$

のようになり，相当複雑な式であるから，前の降雨によって定常状態になっているときの値を $q_0(\xi)$ に与えても簡単にはならない。I が急に0となった場合は，I が0となった時刻を時間の原点にとれば，

$$\left.\begin{aligned} q&=q_0(\xi)\\ t&=\frac{3}{7}\left(\frac{n}{\sqrt{\sin\theta}}\right)^{3/5}\frac{(m\cdot\cos\theta)^{2/5}}{q_0(\xi)^{2/5}}\{(L-\xi)^{7/5}-(L-x)^{7/5}\} \end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(20)$$

のようにあらわされる。**図—6** は (3) の場合の計算例を

図—6　椀型斜面における単位巾流量の計算例

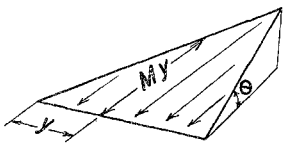


示したものである。

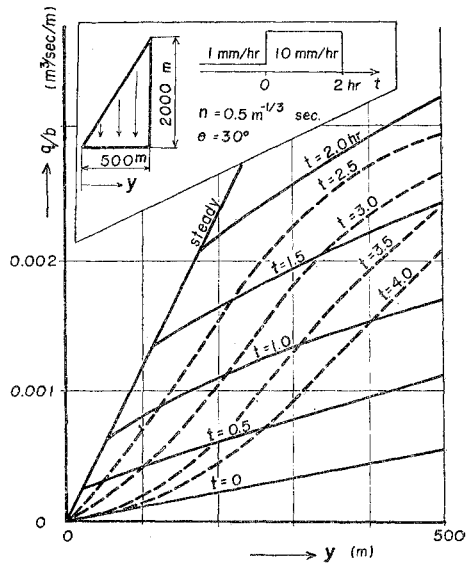
（4）　三角形斜面の場合

これは **図—7** に示すように，斜面上における雨水の流下方向が同一で，斜面の形が三角形をしている場合である。下流端の一方の端から下流端に沿ってはかった距離を y とし，y の位置に流下してくる雨水の最大流下距離が $M\cdot y$ であらわされるものとする。さらに，この場合の特性として，流下方向以外の方向に水位差が生じてもその方向には流れないものと考える。このような場合には，矩形斜面に対する計算結果をそのまま利用することができる。すなわち，下流端に沿う直線上で y の位置に対する $t\sim q$ 曲線は，(10) 式における x の値として $M\cdot y$ を用いれば求めることができるわけであって，矩形の場合の計算結果を利用して，y の値置における流量変化を簡単に求めることができる。**図—8** は，$M=4$ の場合を $y=500$ m まで計算した結果の一部を示したものである。矩形，円錐型および椀型の斜面においては，一般に下流端に沿う流量変化はないのであるが，ここで取り上げた三角形斜面のように，

図—7　三角形斜面の模型図



図—8　三角形斜面の下流端に沿う単位巾流量の計算例



下流端の各位置に流達する雨水の最大流下距離が異なるときは，下流端に沿う流量変化はかなり顕著である。

4. 山腹斜面の形の違いによる流出変化

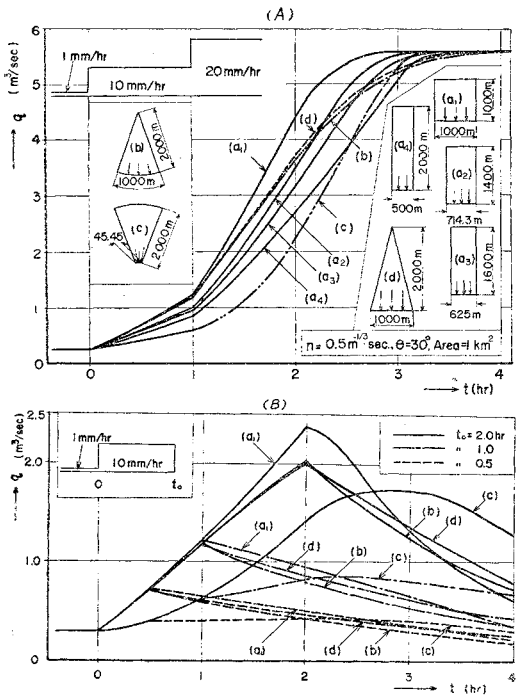
以上に示した計算例は，山腹斜面の代表的な形と思われるものを取り上げて算定したものであるが，自然状態にある山腹斜面の大半は以上の形のいずれかに該当するものと思われるので，これらの形について斜面の粗度，傾斜角，面積および降雨条件を同一とした場合の計算結果を比較検討すれば，斜面の形の違いによる流出変化の一般的傾向が把握できるものと考えられる。

まず，下流端巾の等しい場合を考えると，面積が同一であるから椀型斜面（以後記号 (c) であらわす）の流下距離がもっとも短かくなり，これが大きな影響を与えるために流出は早く，変化も急激である。つぎに矩形斜面 (a)，円錐形斜面 (b) の順で逐次流出が緩慢となる。単位巾流量の下流端に沿う場所的変化があるのは三角形斜面 (d) の場合だけであって，下流端の任意の位置における単位巾流量の時間的変化は (a) の場合と同様であるから (a) にふくめて考えればよいが，単位巾流量を下流端に沿って積分した流量の時間的変化は (b) の場合とほとんど一致する。

つぎに最大流下距離の等しい場合を考えてみると，面積が同一であるから斜面の形によって下流端の巾が違うことになる。したがって，この場合に下流端における単位巾流量を比較の対象として斜面の形の影響を検討することは不適当であるから，単位巾流量を下流端に沿って積分した流量の時間的変化を比較の対象とした。図—9 (a) はこのような場合の計算例を示したものであるが，この中で最大流下距離の等しいものは (a_4), (b), (c) および (d) である。これらを比較してみると，下流端の巾を等しくした場合とは逆に，(d), (b) からの流出が早く (a_4), (c) の順で流出がおくれてくる。

上に述べた2つの場合を総合してみると，斜面の重心から下流端までの距離の大小が流出変化に決定的な影響を与え，斜面巾の変化状態は流出変化が比較的急激となる時期を左右するようである。例えば，図—9 (a) において，(b) および (d) と (a_2) とは重心から下流端までの距離はほぼ同じであり，流出変化も総体的には同様とみて差し支えないが，斜面巾の影響によって，初期においては (b) および (d) からの流出がわずかに早く，急激であって，ある程度時間が経過するとこの傾向は逆になる。図—9 (b) は，降雨継続時間が変化した場合でも，また降雨終了後においても大体以上の傾向がうかがわれることを示したものである。

図—9　流出流量の時間的変化に対する斜面形の効果

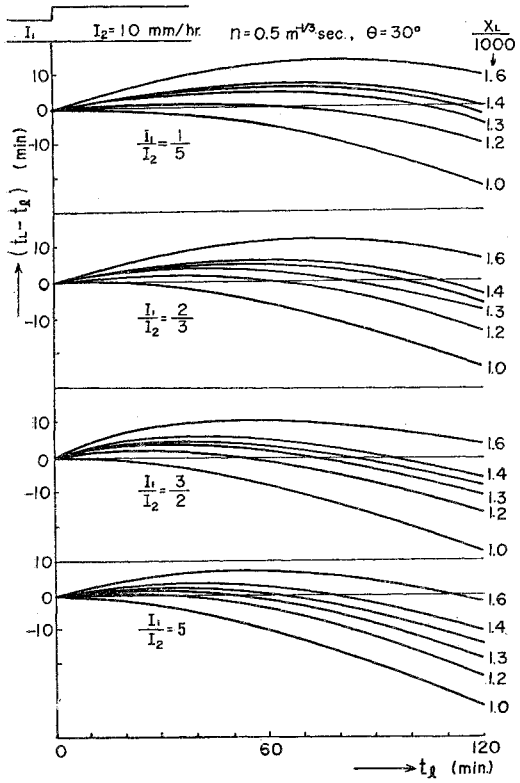


5. 山腹斜面形の取り扱い方について

以上の結果からわかるように，個々の斜面からの流出状態をくわしく知る必要のある場合には，その斜面形態に忠実な流出計算を行なわなければならない。計算例では，計算に便利な基本的な形を取り上げたのであるが，任意の形を有する場合でも同じ要領で数値計算を行えばよい。一方，かなり大きな範囲におよぶ斜面からの流出を問題とするような場合，例えば道路に隣接している一連の山腹斜面からの流出を算定して側溝の規模を決定するような場合には，個々の斜面について上記のような計算を行なうことは非常に繁雑であり，また流出流量を下流端に沿って積分した流量の時間的変化がわかれば十分その目的を果たすことができると思われるので，このような場合にはもっと簡単な計算法を採用することが望ましい。ここで考えられる方法は任意形斜面を計算の簡単な矩形斜面に置き換えることである。そこで矩形に置き換えられるとすればどのような矩形が合理的かつ簡単であるかという問題について考えてみる。一例として円錐形斜面に I_1 の供給が続いて，定常状態になっているときに新しく I_2 の供給が開始された場合を採用してみよう。いま円錐形斜面の頂点から下流端までの距離を x_l，矩形の長さを x_L とし，両斜面からの流量が等しくなる時間を計算してそれぞれ t_l, t_L であらわすことにすると両者の差は

$$t_L-t_l=\frac{3}{5}\left(\frac{1}{I_2}\right)^{2/5}\left(\frac{n}{\sqrt{\sin\theta}}\right)^{3/5}\times\int_{\xi}^{x_l}\left\{s^2\div\left(\frac{I_1}{I_2}-1\right)\xi^2\right\}^{-2/5}\times\left\{2\left(\frac{x_L}{x_l^2}\right)^{3/5}\cdot s-(2s)^{2/5}\right\}ds\cdots\cdots(21)$$

図—10　各種矩形と円錐型斜面との等流量発生時刻差



であらわされる。ただし，両斜面の面積，粗度係数および勾配が等しい場合である。(21) 式の値が常に0となるような x_L を見出すことができればそれによってあらわされる矩形が求めんとする矩形であって，両斜面からの流出流量が等しく，かつその発生時間も等しいということになる。しかしながら，このような矩形は到底望むことはできないので，できるだけそれに近いものを求めることになる。**図—10** は x_1=2 000 m の場合の例であるが，I_2 が開始されて後短い時間だけを対象すれば，x_L=1 000～1 200 m の矩形が理想的なようであるが，かなり長時間の現象を対象とするときには，たとえ供給が I_2 から I_3 に変化したとしても，I_2 による影響がほとんどなくなるまでの時間を対象として置き換えすべき矩形を定めなければならない。しかし，この時間は非常に多くの要素によって左右されるので容易に算定することはできない。そこで，ここで取り上げた場合について多くの計算結果から推定してみると，大体2時間程度でいろいろな変化が終了に近づくから，この時間を対象とすべき時間と考えて検討してみることにした。このようにして**図—10** の各場合を通じて置き換えしてもよいと思われる矩形を求めてみると，x_L=1 300～1 400 m の場合が適当なようである。これは，重心の位置が等しい矩形に置きかえれば大差なく流出計算を行なうことができることを示すのであって，このことは**図—9** (a) に示した各場合にもいえることである。例えば，**図—9** (a) において，(b) と (c) とはかなり異なった流出変化をするのであるが，これらを横につなぎ合わせた合成斜面からの流出はこの合成斜面と面積および重心から下流端までの距離が等しい矩形斜面（**図—9** (a) では (a_3) と (a_4) の中間の斜面を2つだけ横につなぎあわせたもの）からの流出とほとんど変わらない。このようによほど特異な形態をしていないかぎり矩形に置き換えて山腹斜面からの流出を計算することは可能である。

6. 結　語

この論文では，4種類の模型斜面からの流出を中心として，斜面の形の違いによる影響を定性的に検討し，流出を計算する場合の斜面形の取り扱い方について考察したのであるが，これらをまとめてみるとつぎのようである。

まず，区分された個々の斜面からの流出を詳細に検討しなければならないときは，以上にその例を示したように，それぞれの条件に適合した計算式によって流出計算を行なうことが必要である。

つぎに，ある程度広範囲の山腹斜面からの流出を取り扱う場合，例えば道路に隣接している一連の山腹斜面から道路線上に流出してくる雨水の流量変化，あるいは河川流域内で区分された個々の斜面かの流出のように，個々の斜面からの流出を厳密に計算しなくてもよい場合には，それぞれ面積の重心から下流端までの距離が等しい矩形斜面におきかえて計算すれば計算が簡単になり，しかもかなり高い精度の結果が期待できる。以上の結果は最近の流出に関する理論的研究には非常に有益な結果であって，今後この方面の発展に寄与するものと思う。

最後にこの研究を行なうに当って，終始御指導を賜わった京都大学 石原藤次郎教授に感謝するとともに，この研究は文部省科学研究費による研究であることを付記して謝意を表する。

参考文献

1) 石原藤次郎・田中要三・金丸昭治：わが国における単位図の特性について，土木学会誌，第41巻，第3号，昭31.3.
2) 石原藤次郎・金丸昭治：降雨条件の変動による単位図の変化について，土木学会論文集，第32号，昭31.3.
3) 立神弘洋：洪水流出の新解析法，昭30.3.
4) 岩垣雄一・高棹琢馬：降雨および流域特性が流出関係に及ぼす効果について，京大防災研究所創立5周年紀念論文集，昭31.11.
5) 石原藤次郎・高棹琢馬：単位図法とその適用に関する基礎的研究，土木学会論文集，第60号，別冊3-3，昭.34.3.
6) James, C.I. Dooge : A General Theory of Unit Hydrograph, Journal of Geophysical Research, Vol.64, No.1, Jan. 1959.
7) 末石富太郎：特性曲線法による出水解析について，土木学会論文集，第29号，昭31.2.
8) 前出の論文 5).
9) 〃 5).
10) 岩垣雄一・末石富太郎：横から一様な流入のある開水路の不定流について，土木学会誌，第39巻，第11号，昭29.11.

（原稿受付：1960.7.22
〃　：1961.1.5）