琉球大学学術リポジトリ

畑地帯小流域における流出解析について(農業工学科)

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 吉永, 安俊, 翁長, 謙良, Yoshinaga, Anshun, Onaga, Kenryo メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/4057

畑地帯小流域における流出解析について

吉　永　安　俊*・翁　長　謙　良*

Anshun YOSHINAGA and Kenryo ONAGA : On the runoff analysis in small dry field basins.

I　は　じ　め　に

近年，沖縄県各地において，農地開発や土地改良事業が原因とみられる流亡土壌による海洋汚染が発生している。特に国頭マージ地帯において頻発の傾向がある。国頭マージは，一般に侵食に弱いといわれており，土壌流亡に対しては農地保全および環境汚染防止の立場から抜本的な対策が必要であると考える。これらの対策を考える時，その地域における降雨量と流出量の関係がとくに重要な問題となる。すなわち，流出解析の必要性が生じてくる。土壌流亡は一般に地表流出水によってもたらされ，その量と速さが侵食の影響因子となる。流出解析を行い，これらの関係を明確にすることにより合理的対策が立てられることと思われる。

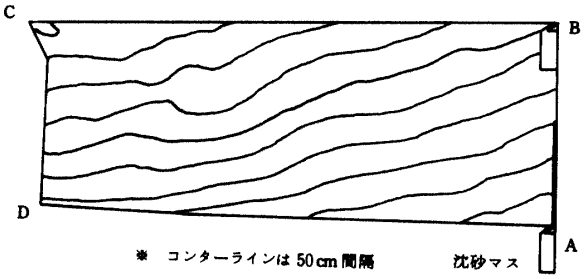
本研究は，国頭マージ土壌流域とジャーガル土壌流域の２ケ所の流域について流出解析を行い，流出率，有効雨量，無効雨量，ピーク流量およびその発生時期を明らかにしたものである。

II　流域概況および実験方法

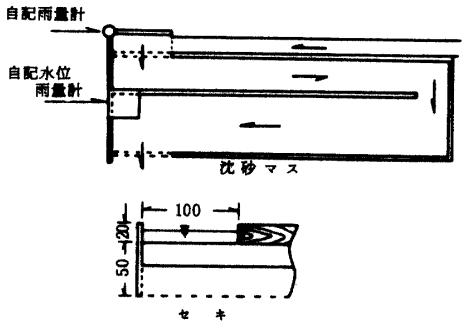
1. 流域概況

1）屋嘉流域

国頭マージ地帯の試験流域は，沖縄本島のほぼ中央部に位置する金武町屋嘉にある。流域は屋嘉岳（標高 260 m）の中腹部に位置し，昭和50年県営農地開発事業として造成された畑ホ場である。試験流域の地形概況を図－１と表－１に示す。



図－１　屋嘉流域の地形概況



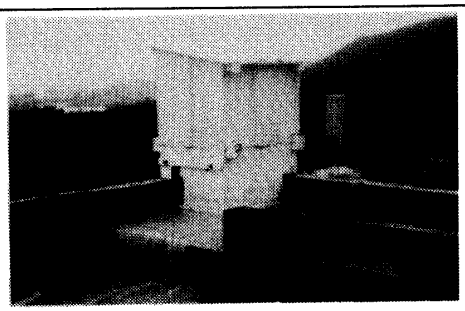
図－２　屋嘉流域の沈砂マスとセキの概況

* 琉球大学農学部農業工学科

琉球大学農学部学術報告　28 : 139 ～ 150 (1981)

表－1　屋嘉流域の概況

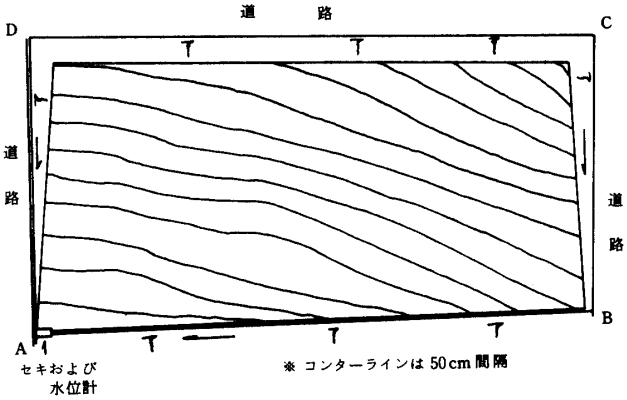
面　積	4,065 m²
最大勾配（A～B）	4.1°
最小勾配（A～D）	1.1°
平均勾配（A～C）	2.6°



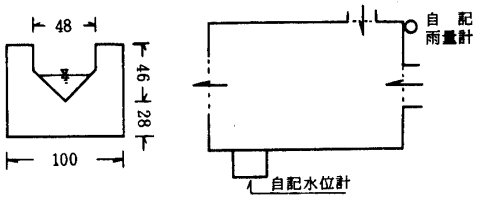
写真－1　水位計とセキ（屋嘉）

国頭マージは，一般に耐水性が小さく，容易に侵食を受け流亡が起こる。したがって，屋嘉流域のホ場には約4,000 m²に1個の割合で沈砂枡が設けられ，ホ場からの流亡土壌の貯留が図られている。沈砂枡設置の当初の目的のために，流域の流出水はすべて沈砂枡に流入するようになっており，流量測定には好都合の場所である。沈砂枡の略図を図－2に示す。沈砂枡の越流部は側溝越流タイプで約4mの幅を有していたが，越流水深の変動幅を大きくする目的で，図－2の下図のように幅1.0mのみ残し，板でかさ上げを行い，越流幅1.0m，最大越流水深20cmのセキとした。（写真－1参照）

流域の植生はパイナップルであるが，生育はきわめて悪く，枯死株が数多くみられる。植生による土壌面被覆度は小さい。また，パイナップル作は中耕，培土を行わないため土壌表面は，除草，施肥，収穫時に踏み固められ，表層密度は高くなっている（仮比重1.5前後）。



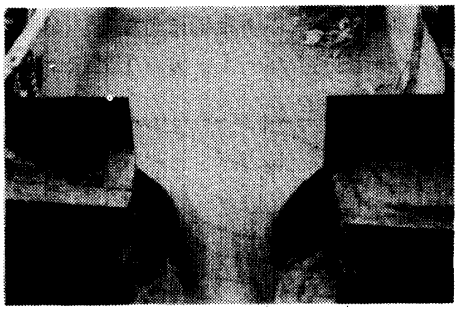
図－3　千原流域の地形概況



図－4　千原のセキの概略図

表－2　千原流域の概況

面　積	10,630 m²
最大勾配（A～D）	3.7°
最小勾配（A～B）	1.3°
平均勾配（A～C）	2.8°



写真－2　セ　キ（千原）

2）　千原流域

ジャーガル土壌地帯の試験流域を西原町千原に位置する本学農学部附属農場の一画に設けた。流域概況を図－3と表－2に示す。流域は造成4年目のホ場で，土壌面下30cm程度以下は未風化の泥岩の塊が相当の割合で混っている。ホ場の周囲には排水路がめぐらされていて，流出解析には好都合の場所であ

る。図－3に示される位置に直角三角ゼキ（上部は矩形，写真2参照）と2ケ所の流入口を有する横1.5 m，幅1.0 m，深さ0.8 mの鉄製タンクを設置し，それに水位計を取付けた（図－3参照）。流域の植生は2年株出のサトウキビである。うねはA－B排水路に平行にとられている。

2. 水位流量曲線

小流域における流出解析の精度は，流量をいかに正確に測定するかによって決まると考える。流量測定には，一般に困難が伴う場合が多い。比較的少流量の場合は，方法によっては正確な測定が可能と考えるが，流量が多くなるとなかなか困難になってくる。たとえば，河川などのような大流量の場合は正確な測定はほぼ不可能に近いと考える。一方，水位の測定は比較的簡単にしかも正確な測定が可能である。したがって，流出解析を行う場合，直接流量測定は行わず，水位と流量の関係を用いて水位記録から流量を求めるのが一般的方法である。したがって，水位と流量の関係を正確に知ることが流出解析の精度を高めることにつながる。

1）屋嘉流域のセキの検定

水位流量曲線は現場のセキで作成するのが理想的であるが，同流域は本学から約40 kmの位置にあるため，降雨による水位と流量の測定は時間的制約でできなかった。また，タンク車による給水で水位と流量の測定を試みたが，安定した流量が得られず失敗に終った。したがって，本学水利実験室において，実物大の沈砂枡とセキをベニヤ板で作成し，水理実験装置の水路から給水し，水位と流量の測定を行って水位流量曲線を作成した。これら両者の関係を図－5に示す。

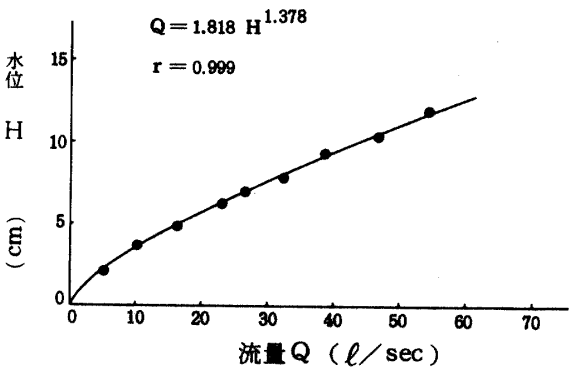
2）千原流域のセキの検定

同流域に設置したセキは図－4に示されるように，下部は直角三角ゼキで上部は矩形となっている。セキは，ホ場に設置する前に本学水利実験室において検定を行い，水位流量曲線を作成した。両者の関係を図－6に示す。

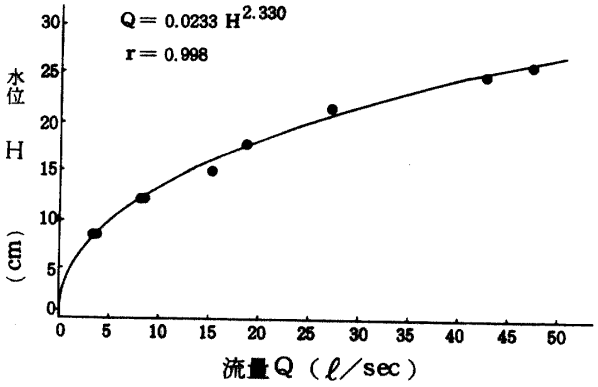
Ⅲ　実験結果および考察

1. 水位流量曲線

セキ頂における越流水深と流量との同時測定値を，越流水深（水位）を縦軸に，流量を横軸にとって描くと，だいたい放物線状の曲線になる（図－5，図－6参照）。この水位曲線の一般式は種々ある。[1,3,6] これらの式においては，一般に流量は水位の関数として表わされる。



図－5　屋嘉における水位流量曲線



図－6　千原における水位流量曲線

本研究においては，(1)式で示される公式を用いて表わし，定数は最小二乗法で求めた。

$$Q = a H^{n} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

Q：流量（ℓ／sec）
H：水位（cm）
a，n：定数

屋嘉流域および千原流域における近似式の定数を求めて，(1)式に代入すると，(2)，(3)式になる。

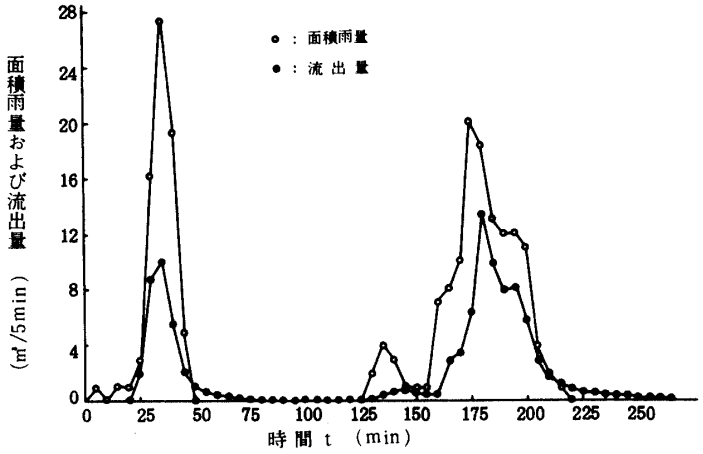
$$Q = 1.818\,H^{1.378} \quad (屋嘉) \cdots\cdots (2)$$

$$Q = 0.0233\,H^{2.330} \quad (千原) \cdots\cdots (3)$$

両式の適合度は図－5，図－6からも明らかなようにきわめて良く，相関係数がそれぞれ r＝0.999（屋嘉），r＝0.998（千原）となり，満足すべき近似式と考える。

2. 降雨継続時間とハイドログラフ

一般に，降雨による流出は，その流出経路によって，表面流出，中間流出，基底流出の三成分に分けて考えられ，ハイドログラフはこの三成分によって構成される。しかし，本流域のような小流域で，しかも畑地を対象とする場合においては基底流出はないから，表面流出と中間流出の直接流出のみを考えればよい。したがって，ハイドログラフは表面流出と中間流出の二成分で構成されることになる。



図－7　屋嘉におけるハイドログラフ

図－7は屋嘉流域におけるハイドログラフの一例を示す。図における降雨量および流出量は5分単位で表わしてある。両者の関係は小流域であるがゆえに，降雨と流出はきわめて敏感な反応を示す。降雨中断に伴う流出量の減衰は著しく，降雨中断からほぼ1時間から1時間半程度で表面流出は終るものと推測される。図－7のハイドログラフからも明らかなように，表面流出に対する中間流出の割合はきわめて小さく，無視できる程度と考える。したがって，同流域における降雨は1時間半から2時間程度の降雨中断があると別降雨とみなすことができると考える。また，千原流域においても降雨と流出の関係は，

屋嘉流域同様敏感な反応を示すが，ハイドログラフにおける流量の減衰は若干鈍い傾向がみられる。この原因は，千原流域の面積が屋嘉流域面積の約2倍あることと，うね間タン水が認められることにあると考える。したがって，千原流域における降雨は，降雨中断が2～3時間継続すると別降雨とみなした。

3. 流出率

流出率とは，ある一定期間内における流出量の降水量に対する割合である。

流出率は流域の地形条件，降雨条件，土壌条件および植生条件等により影響を受けて変動する値であり，画一的に求めることは困難である。

降雨量と流出量の関係を単純に表現すると次式で示される。

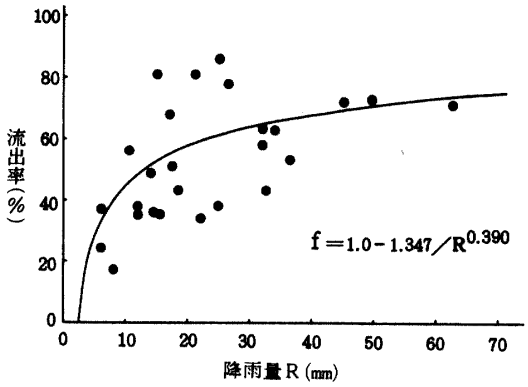
$$A\int_0^{t_1} r(t)\,dt = \int_0^{t_2} Q(t)\,dt + A\int_0^{t_2} I(t)\,dt \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

変形すると，

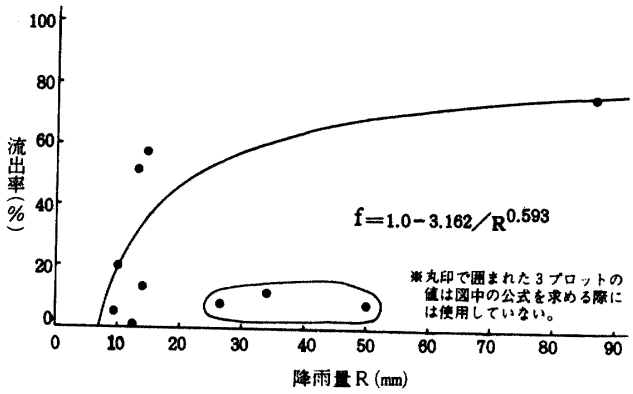
$$\int_0^{t_2} Q(t)\,dt = A\int_0^{t_1} r(t)\,dt - A\int_0^{t_2} I(t)\,dt \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

$r(t)$：時刻 t における降雨強度
$Q(t)$：　〃　　流出強度
$I(t)$：時刻 t における浸入強度
t_1：降雨終了時間
t_2：流出終了時間
A：流域面積

なお，上式は他流域からの流入がなく，植物のシャ断量および蒸散量，土壌面蒸発量を無視したとき成立つ。



図－8　屋嘉における降雨量と流出率の関係



図－9　千原における降雨量と流出率の関係

小流域において，(5)式の3つの因子のうち，比較的簡単正確に測定できるものは降雨量 $\int_0^{t_1} r(t)\,dt$ であり，他の2因子は測定困難な場合が多い。特に，浸入量 $\int_0^{t_2} I(t)\,dt$ の測定は，特別の装置（例えば，ライシメーター等）がなければ一般流域ではほとんど不可能である。したがって，浸入量は降雨量と流出量の関係から間接的に求めるのが一般的である。浸入量は流出解析においては無効雨量として扱われる。

流出率は，降雨量とそれに伴う流出量の割合であるから次式で表わすことができる。

$$f=\frac{\int_0^{t_2}Q(t)dt}{\int_0^{t_1}r(t)dt\cdot A}\quad\cdots\cdots(6)$$

f ：流出率

A ：流域面積

4. 流出率と降雨量

流出率と降雨量の関係を，縦軸に流出率を，横軸に降雨量の位をとると一般に双曲線で表わされる（図－8と図－9）。

川上[2]は両者の関係を(7)式で表わしている。

$$f=1.0-\frac{a}{R^n}\quad\cdots\cdots(7)$$

f ：流出率

R ：降雨量

a，n ：定数

図－8は6式を用いて計算した屋嘉流域における流出率と降雨量の関係を示し，図－9は千原流域における関係を示す。両図において，降雨量に対する流出率のバラツキは大きい。これは土壌条件，降雨条件による損失雨量の多少による結果である。すなわち，流域における浸入量の変動による結果である。両流域のような畑地流域の場合，人為的作用による土壌条件の変化によって，流出率は著しい影響を受ける。例えば，千原流域の図－9において，丸印で囲んだ3プロットの値がその影響を受けた結果である。これらはトラクターによる中耕直後とそれから20日以内に発生した降雨量と流出率の関係である。サトウキビの枯葉をすき込んだホ場は空隙率が高く，保水量がきわめて大きい。したがって，損失雨量（浸入量）が大きくなり，流出率は著しい低下を示す。中耕直後においては，50mm（平均降雨強度18.8 mm／hr）の強雨にもかかわらずそれの流出率は8％にすぎない。中耕後の3つのデータを除いて，(7)式によって，最小二乗法で回帰曲線を求めると(8)式が得られる。この回帰式を用いて前記50mmの降雨に対する流出率を求めると69％の流出率となる。つまり，中耕が行われなかったならば，同降雨量での流出率は69％程度になったであろうと推測される。(9)式は屋嘉流域における回帰式である。

$$f=1.0-\frac{3.162}{R^{0.593}}\quad（千原）\cdots\cdots(8)$$

$$f=1.0-\frac{1.347}{R^{0.390}}\quad（屋嘉）\cdots\cdots(9)$$

本研究におけるような畑地を対象とした小流域においては，流域への人為的作用による流出率の変動は著しく，(8)，(9)式で示される降雨量と流出率の関係は，山地一般流域のような安定したものではない。したがって，畑地帯小流域における流出解析はホ場への人為的作用を十分考慮したものでなければなら

ない。

5. 有効雨量

流出解析において有効雨量とは，直接流出に寄与した雨量であり，総流出量を流域面積で割った値に等しい。すなわち，

$$r_e = \int_0^{t_2} Q(t)\,dt / A \quad \cdots\cdots (10)$$

(6)式を変形して(10)式に代入すると

$$\int_0^{t_2} Q(t)\,dt = \int_0^{t_1} r(t)\,dt \cdot A \cdot f$$

$$r_e = \int_0^{t_1} r(t)\,dt \cdot A \cdot f \cdot / A = \int_0^{t_1} r(t)\,dt \cdot f$$

$$r_e = R \cdot f \quad \cdots\cdots (11)$$

r_e ：有効雨量

R ：総雨量，$R = \int_0^{t_1} r(t)\,dt$

となる。

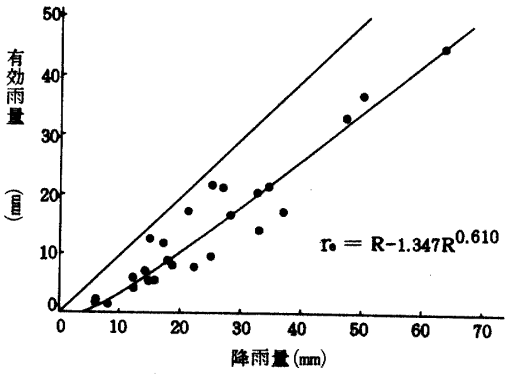
(7)式と(11)式とから(12)式が得られる。

$$r_e = R \cdot \left(1 - \frac{a}{R^n}\right) = R - \frac{a}{R^{n-1}} \quad \cdots\cdots (12)$$

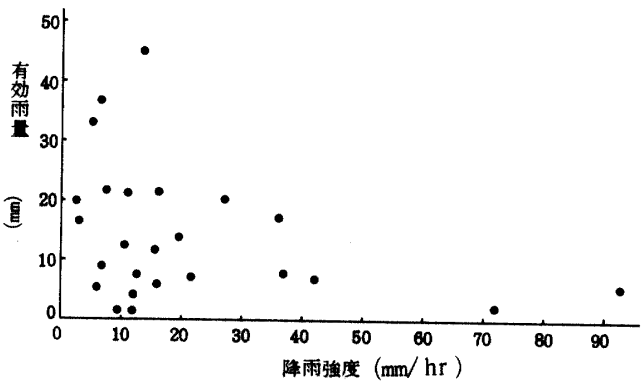
(9)式の定数a．n の値を(12)式に代入して

$$r_e = R - 1.347\,R^{0.610} \quad \cdots\cdots (13)$$

が得られる。(13)式は屋嘉流域における降雨量と有効雨量の関係を示し，図－10における曲線の近似式である。図－10の直線は流出率 100 %の値，すなわち，全降雨量が有効雨量になった時の関係を表わす。



図－10　降雨量と有効雨量の関係（屋嘉）



図－11　屋嘉における一雨降雨強度と有効雨量の関係

図－11は屋嘉流域における一雨平均降雨強度と有効雨量の関係を示す。図中の両関係のバラツキは大きいが，一般的な傾向として，降雨強度の増加に伴って有効雨量は減少する。これは降雨特性に起因するものと考えられ，すなわち，一般に降雨強度の大きい雨は降雨時間が短く，雨量も比較的少ない傾向がある。したがって，流出量（有効雨量）が小さい。一方，降雨強度の小さな雨は，一般に降雨時間が長くて大雨量の場合と，降雨時間が短かく少雨量の場合の2つケースが考えられ，前者の場合は流出量（有効雨量）は大きく，後者の場合は小さいと考える。したがって，図－11において，小降雨強度域においてバラツキがが大きいのは上記理由に原因しているものと考える。

6. 損失雨量

いわゆる総降雨量から有効雨量を差引いた雨量であり，流域における浸入量である。この値には畑地カンガイの立場からは有効雨量とみなせる部分がある。畑地帯における流出解析において，損失雨量を知ることは，土壌中への浸入量を知ることになるから，土壌の持つその時点の保水容量を知れば，土壌中に貯留される水分量の推定が可能になる。すなわち，カンガイにおける有効雨量の推定が可能となる。

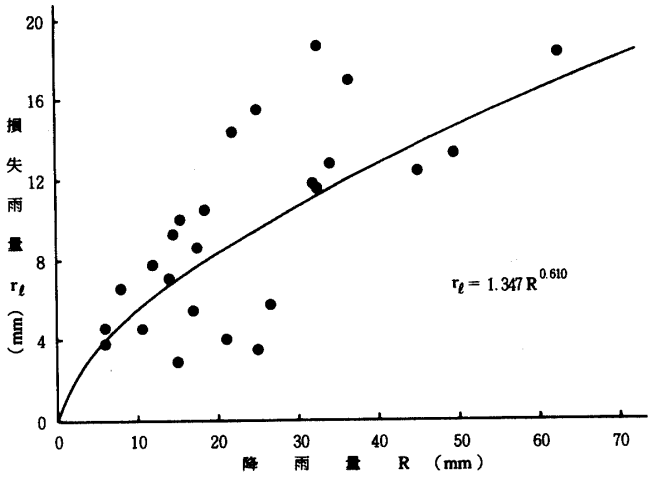
損失雨量は $r_\ell = R - r_e$ の関係にあるから，(12)式との関係から(14)式が得られる。

$$r_\ell = \frac{a}{R^{n-1}} \quad \cdots\cdots (14)$$

(9)式で得た定数a，nの値を代入すると(15)式が得られる。

$$r_\ell = 1.347\,R^{0.610} \quad \cdots\cdots (15)$$

図－12は屋嘉流域における降雨量と損失雨量の関係を示す。図中の曲線は(15)式で表わされる。

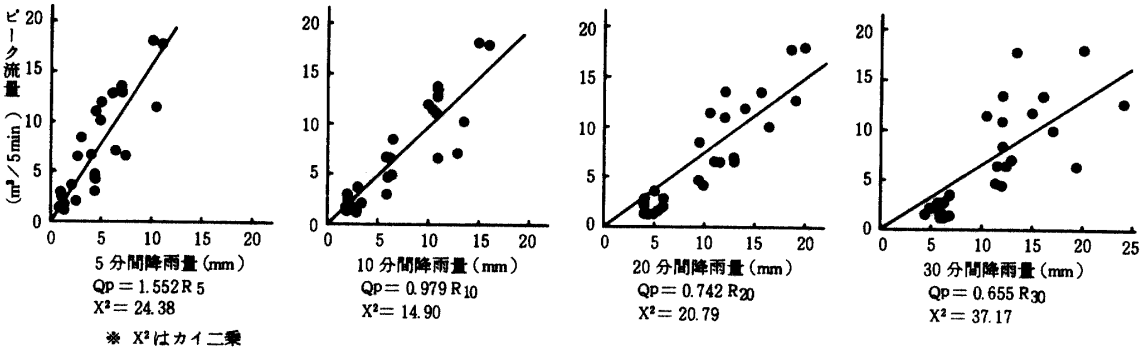


図－12　屋嘉における降雨量と損失雨量の関係

7. ピーク流量

ピーク流量は，ハイドログラフにおける最大値で表わされ，流域の防災を考える場合，きわめて重要な因子である。防災的立場においては，ピーク流量が降雨のどの部分で構成され，また，いつ発生するかを解明することが流出解析を行う主たる目的だと考える。林・佐藤[5,7]は到達時間を降雨ピークから流量ピークまでの時間と定義し，この値は同一流域においても流量によって変化し，$t = a\,Q^{-b}$ なる関係が存在することを明らかにしている。ここで，t：到達時間，Q：ピーク流量，a，b：定数。

到達時間を林・佐藤の定義に従って，屋嘉流域について調査すると，ピーク流量のみではなく，降雨強度にも影響を受けていることがわかる。到達時間は最大20分から最小0分まで変動がある。自記紙を5分単位で読み取っているため，ピーク流量と到達時間の関係は明確ではなく，大半が5分と10分の関係にある。



図－13　ピーク流量と任意時間降雨量との関係

図－13は屋嘉流域におけるピーク流量とそれを起点として5分，10分，20分，30分以前に降った雨量との関係を示す。各グラフの直線は最小二乗法で求めた両者の回帰線である。回帰線と定測値との適合度をカイニ乗検定[4]で調べると，10分間降雨量において最も適合度が良く，したがって，この結果から，ピーク流量は，10分間雨量に最も関係が深いことが明らかになった。この流域におけるピーク流量 Q_p は(16)式で求められる。

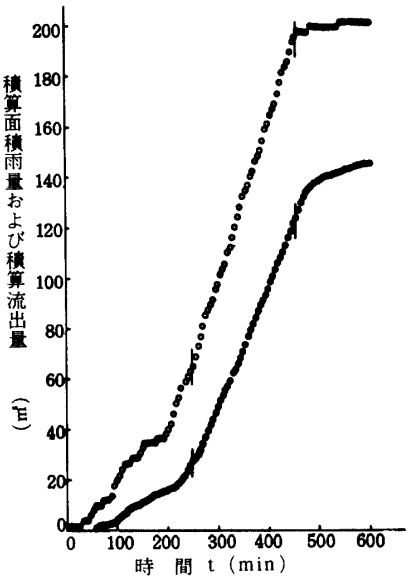
$$Q_p = 0.979\,R_{10} \quad \cdots\cdots (16)$$

Q_p ：ピーク流量（m^3／5 min）
R_{10} ：10分間最大降雨量 (mm)

図－14は屋嘉流域に昭和56年3月19日に起った降雨の雨量と流量それぞれの積算量の経時変化を示す。図から明らかなように，直線部分の約4時間にわたって，約9.3 mm／hr の同一強度の降雨が続き，それに伴って，ほぼ一定した量の流出がみられる。これはきわめてまれな降雨現象と思われる。図において，両者の直線部分，とりわけ降雨開始後250分から450分までの200分間に着目して，それぞれを平行移動し，原点を通る関係にすると，両直線の式は(17)式で表わされる。

$$\left.\begin{aligned} Ra &= b_1 \cdot t \\ Q &= b_2 \cdot t \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (17)$$

Ra：面積雨量（m^3）
Q ：流出量（m^3）
t ：時間（5分単位）
b_1, b_2：係数



図－14　屋嘉における積算面積雨量および積算流出量の経時変化

図－13で250分～450分までの面積雨量 Ra＝126 m³ と流出量 Q＝97m³ を求め，t＝200／5＝40とおいて，(17)式で係数 b_1，b_2 を求めると，

$$126 = b_1 \cdot 40 \qquad \therefore\ b_1 = \frac{126}{40}$$

$$97 = b_2 \cdot 40 \qquad \therefore\ b_2 = \frac{97}{40}$$

(17)式により流出率を求めると

$$f = \frac{Q}{Ra} = \frac{b_2 \cdot t}{b_1 \cdot t} = \frac{b_2}{b_1} = \frac{97}{126} = 0.77 \quad \cdots\cdots\cdots(18)$$

したがって，流出率は，(17)式における直線の勾配の比で表わされ，f＝0.77となる。すなわち，降雨開始後250分から450分までの200分間の平均流出率は約77％になる。これは降雨強度9.3 mm／hrにおける流出率であるから，同地域における散水カンガイ計画における散水強度を決定する際には考慮すべき値であると考える。

Ⅳ　摘　　要

本研究は，畑地帯の小流域2ケ所を対象に流出解析を行ったものである。

対象流域は，国頭マージ地帯の金武町屋嘉のパイナップル畑（約4000m²）とジャーガル地帯の本学附属農場のサトウキビ畑（約10,000 m²）である。以下解析結果を述べる。

1.　1雨降雨の継続時間

屋嘉流域においては，ハイドログラフの流量減衰状態から判断して，1時間半から2時間程度の降雨中断があると別降雨とみなせる。

千原流域においては，流域面積のちがいや，うね間タン水の存在があるため，2～3時間程度の降雨中断があると別降雨とみなせる。

2.　流 出 率

降雨量と流出率は図－8（屋嘉）と図－9（千原）に示される関係にあり，それぞれ次式で示される。

$$f = 1.0 - \frac{1.347}{R^{0.390}} \qquad \text{（屋嘉）}$$

$$f = 1.0 - \frac{3.162}{R^{0.593}} \qquad \text{（千原）}$$

3.　有 効 雨 量

屋嘉流域における総降雨量と有効雨量は図－9に示される関係になる。両者の関係は次式で示される。

$$r_e = R - 1.347\,R^{0.610}$$

4. 損失雨量

屋嘉流域における降雨量と損失雨量は図－11に示される関係になり，次式で表わされる。

$$r_l = 1.347 R^{0.610}$$

5. ピーク流量

屋嘉流域におけるピーク流量は，10分間降雨量に最も影響を受ける。したがって，10分間降雨量の最大の所にピーク流量が現われる。10分間降雨量からピーク流量は次式で求められる。

$$Q_p = 0.979 R_{10}$$

終りに，本研究を行う際に協力頂いた近藤三明君，ならびに本研究をまとめる際に貴重な御助言を下さった山城三郎助教授に謝意を表します。なお，本研究は，昭和55年度科学研究費（代表　翁長謙良）の補助で行なわれたことを附記します。

引　用　文　献

1. 石橋豊・他３名　1970　農業水文，P 150～151，東京，コロナ社
2. 川上謙太郎　1962　河川洪水のピーク流量に関する研究，土木学会論文集　37：1～14
3. 川畑幸夫　1968　水文気象学，P 187～194，東京，地人書館
4. 岸根卓郎　1972　理論・応用統計学，P 358～360，東京，養賢堂
5. 佐藤晃三・林弘宜　1961　山地小流域における流出機構の調査研究（II），岩手大農報　6：135～141
6. 西畑勇夫　1973　河川工学，P 105～107，東京，技報堂
7. 林弘宜・佐藤晃三　1960　山地小流域における流出機構の調査研究（I），岩手大農報　5：48～56

Summary

The purpose of this study is to investigate the properties of runoff on an unit field. Two experimental fields have been selected for a runoff research. One is located at Yaka, Kin-cho which excel Kunigami Maaji soil and the other is located at Senbaru, Nishihara-cho which excel Jaagaru soil.

The crops cultivated in the two fields are pineapple in Yaka field and sugar cane in Senbaru field. The watershed area of the two fields are about 4000m² and 10000m² respectively.

The results of the investigation are as follows.

1. If a rain storm comes to a half for 1 to 2 hours in case of Yaka field and for 2 to 3 hours in case of Senbaru field, the following rain storm may be regarded as separated one for the runoff analysis.
2. The relationships between rainfall and runoff coefficient of the two fields are illustrated in Figs. 8(Yaka field) and 9(Senbaru field) and are also expressed by the following equations.

$$f=1.0-1.347R^{-0.390} \text{ (Yaka field)}$$
$$f=1.0-3.162R^{-0.593} \text{ (Senbaru field)}$$

where f is runoff coefficient and R is rainfall in millimeters.

3. Runoff factors obtained in this investigation at Yaka field are effective rainfall, water losses and peak runoff as well as rainfall itself. The relationships between rainfall and effective rainfall, water losses and peak runoff are expressed by the following equation. The relationships between rainfall and effective rainfall and water losses are also illustrated in Figs10 and 12, respectively.

$$r_e=R-1.347R^{0.610}$$
$$r_l=1.347R^{0.610}$$
$$Q_p=0.979R_{10}$$

where r_e is effective rainfall in mm., r_l is water losses in mm., Q_p is peak runoff in cubic meter per 5 min., R_{10} is max. 10 min. rainfall intensity and is rainfall in mm..