NARO 農研機構
国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

# 営農管理の違いが畑地の水収支特性に及ぼす影響—無植生圃場の管理を対象として—

| メタデータ | 言語: Japanese<br>出版者: 独立行政法人農業工学研究所<br>公開日: 2024-05-10<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 久保田, 富次郎, 増本, 隆夫, 吉田, 武郎, 田中, 正一, 古江, 広治<br>メールアドレス:<br>所属: |
| --- | --- |
| URL | https://doi.org/10.24514/0002001091 |

〔農工研技報 204
129～144，2006〕

# 営農管理の違いが畑地の水収支特性に及ぼす影響

## －無植生圃場の管理を対象として－

久保田富次郎*・増本隆夫*・吉田武郎*・田中正一**・古江広治**

目　　次

Ⅰ　緒　言 ……………………………………………… 129
Ⅱ　調査研究方法 ……………………………………… 130
　1　圃場の営農管理と水収支……………………………130
　2　農業用マルチと施設園芸面積の推移 ……… 131
　3　圃場流出試験 …………………………………… 131
Ⅲ　結果と考察 ………………………………………… 132
　1　土壌特性 ………………………………………… 132
　2　降雨と流出特性 ………………………………… 133
　3　流出率と各因子との相関分析…………………133
　4　水文モデル ……………………………………… 135
　5　営農管理が畑地の水収支に及ぼす影響 …… 137
Ⅳ　結言 ………………………………………………… 139
参考文献 ………………………………………………… 139
Summary ……………………………………………… 141
Appendix ……………………………………………… 142

## Ⅰ　緒　　言

大都市近郊では，都市域の拡大や農林地の減少等を背景として，平常時の河川流量の減少，湧水の枯渇，都市型水害の増加といった問題が顕在化している。その中で，浸透機能の回復や地表水と地下水の連続性の確保といった流域全体を視野に入れた水循環系の健全性の回復への対応が求められている。これまで，都市域における浸透域の減少がクローズアップされる一方で，農村域は水資源の涵養域として位置づけられてきた。しかし，消費者ニーズの変化への対応や天候に左右されない周年栽培の確立に伴ってプラスチックマルチやトンネル栽培，ビニールハウス等の施設園芸の普及と団地化が進む中で，農村地域においても不浸透域が拡大するなど，水循環機能の低下が懸念される。

このような状況の下で，農林水産省では平成15年12月に用水供給機能や多面的機能の発揮等を含めた「農林水産環境政策の基本方針」が決定されている。そこでは，国土の約８割を占める森林や農地の雨水貯留機能や水質浄化機能，洪水防止機能など，農林地を中心とする健全な水循環の確保と機能の維持増進が謳われるなど行政における対応も進められている。

*地域資源部水文水資源研究室
**鹿児島県農業試験場大隅支場

平成18年１月10日受理
キーワード：地表流出，農業水文，φ-インデックス，営農管理，プラスチックマルチ，水文循環

さて，これまで，農地を巡る水文・水循環の把握，定量化は，洪水流出解析や地下水涵養機能をはじめ，土壌侵食，環境負荷物質の動態など水環境や物質循環機構を解明する上でも極めて重要な要素であり，従来から様々な観点から研究が進められてきた。特に，農地を主体とする流域からの地表流出現象は，降雨特性や蒸発散量，土壌，植生，圃場傾斜角などの自然的要因の他にも，圃場整備や園芸ハウスの団地化，排水路や道路の整備（角屋,1981）などさまざまな要因が影響することが指摘さ

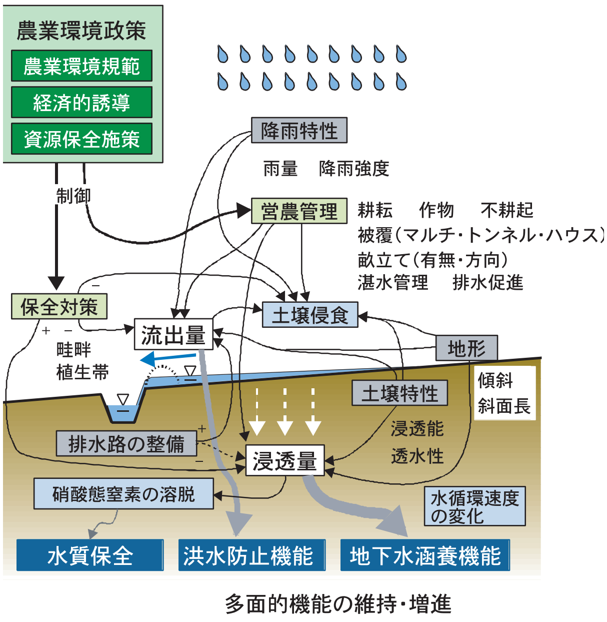



Fig.1　営農管理と農地の水循環
Farming and hydrologic cycle

れている。圃場の営農管理上の要因に絞ると，Fig.1に示すとおり，耕耘や作物被覆，畝立ての有無，プラスチックマルチなどの不透水性素材による被覆，排水促進のための溝切りなどの影響が考えられる。

金子(1978)は，シラス地帯で水田のように畑地にも畦畔が設けられていることについて，土壌浸食防止のため農家が考案した方法であり，浸透性土壌で湛水時間が短い場合に有効であるとしている。これは営農管理による水文と物質循環の制御を示す好例であろう。

石原ら(1996)は，水収支の観点から四国地域の傾斜地圃場を想定し，安山岩由来の非火山灰土壌を充填したライシメータ試験により営農管理の違いによる表面流出と浸透量への影響について検討した。その結果，耕起，中耕処理は雨水の表面流去を防止し浸透水量を増加させる効果があり,特に強雨の多い夏作期間に効果が高かった。

また，池田ら(1989)は，傾斜畑におけるポリマルチ栽培による土壌侵食防止効果の検討の一環として4～8°の傾斜圃場の黒ボク，赤黄色土，シラス土においてポリフィルムによるマルチが地表面の流出率に及ぼす影響について調べた。同様に，土壌侵食防止を念頭において，マルチ被覆や耕耘法などの地表面の管理因子が検討された研究には，他にも，山本ら(1995)，Yu et al.(2000)などがある。一方，四方田ら(1988)は，畦なしと縦畦のある開発農地における流出特性について観測結果や雨水流法を基に，縦畦の有無が洪水到達時間やピーク流出係数に及ぼす影響を検討し，畦の有無による等価粗度の違いを示した。

このように既往の研究には，土壌侵食・農地保全や開畑時の排水計画の観点からのものが多く，畑地における営農管理の違いが水収支に及ぼす影響について検討した事例は付随的なものに限られている。また，それらの中には勾配が緩やかな圃場で検討した例が少ないことから，緩傾斜の畑地圃場を対象とした地表面の営農管理因子が水収支に与える影響に関する知見は十分ではない。これは，従来，水収支，または水循環という観点からは，農地の問題と比べてより影響が顕著な都市化が中心的に検討されてきたことに加えて，営農管理による水文特性の変化が，人為の影響により１年を通じて変わり定量的に扱い難いこと，さらに，防災や施設整備の観点から，排水路等の規模決定に重要なピーク流出率の検討が先行したこと等によるものと考えられる。

以上のように，行政において水循環の健全化を進める機運が高まりを見せ，また，一方で農業環境政策が具体的に動き出す中で，今一度，農業水文と農林地流域における水循環上の問題を見直し，健全化への具体的な課題を検討することが重要と考えられる。本報では，そのような視点から，農地における営農管理が農地水文特性に与える影響について実験的に評価し，その結果を基に，それらが地表流出や地下水涵養に与える影響など，農地の水収支特性について検討する。

なお，本研究の一部は，農林水産省からの受託研究「流域圏における水循環・農林水産生態系の自然共生型管理技術の開発」（自然共生プロ，平成14～18）の一環として行った。また，圃場試験の実施にあたっては末次勇氏，新保百合子氏をはじめ鹿児島県農業試験場大隅支場の方々の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

## Ⅱ　調査研究方法

### 1　圃場の営農管理と水収支

営農管理が水循環，水収支特性に及ぼす影響について検討する際，総流出率（以下，流出率とする）$f$ は重要な因子である。水収支の検討範囲内で復帰流を考慮しなくてよい場合，裸地圃場の地表面を基準とした水収支は次式で表せる。

$$R = Q + D + E + P \quad \cdots\cdot(1)$$

ここで，$R$ :雨量(mm)，$Q$ :地表流出高(mm)，$D$ :浸透量(mm)，$E$ :土壌面蒸発量(mm)，$P$ :湛水深(mm)である。さて，降雨時および地表流出終了までの水収支を考え，蒸発と湛水の影響は無視できるものとすると，一雨毎の流出率 $f$ に影響する因子は，先行土壌水分量 $S$，浸透能 $i$，降雨強度 $r$，雨量$R$，耕耘状態$T$，耕耘からの日数 $d$，地表面被覆率$C$（=マルチなどの不透水性素材による被覆面積/圃場面積）などである。

$$f = \frac{Q}{R} = F(S,i,r,R,T,d,C,\cdots) \quad \cdots(2)$$

ここで，$F(x)$：流出率を表す関数である。

従って，以下では，いくつかの営農管理状態を想定した圃場区画において，自然降雨に対する地表流出高を観測し流出率 $f$ を算出することによって，これらの因子が水収支特性に与える影響を検討する。

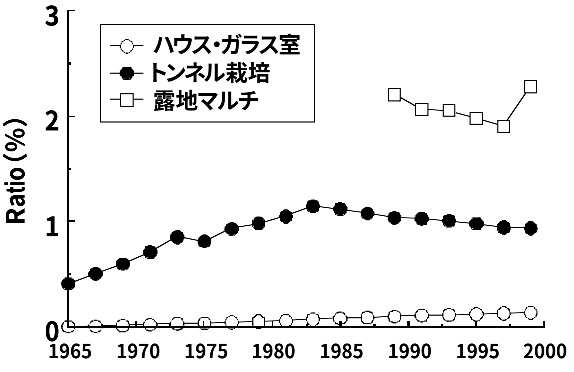



Fig.2　施設園芸，マルチ等の利用面積割合
(全耕地面積に対する比率)
Ratio of area occupied by plastic mulch or greenhouses to agricultural land

2　農業用マルチと施設園芸面積の推移

統計資料（農林水産省，2000）によると，施設園芸やマルチの利用面積は，平成11年に施設園芸用ハウスとガラス室をあわせて6,700ha，トンネル栽培が45,700ha,露地マルチが111,000haに上る。この数字は，それらを合計しても我が国における水田と畑を合わせた耕地面積478万ha(H11)のわずか3.4%に過ぎない(Fig.2)。しかし，それらの利用や立地には地域的な偏在がみられ，施設園芸団地の形成や産地間競争が進むにつれて，その傾向にさらに拍車がかかっていることが推察される。

3　圃場流出試験

圃場試験は，鹿児島県肝属郡串良町(現鹿屋市)の鹿児島県農業試験場大隅支場内の畑地圃場で実施した。試験圃場の土壌は層厚50～100cm程度の厚層多腐植質黒ボク土である。また，この地域の年平均降水量は2,619mm(アメダス鹿屋，1990-2003)と多雨地帯に位置する。

圃場流出試験は，梅雨と台風時期を含めた2004年５月29日より2004年11月1日まで実施した。2004年の本地域の梅雨入りは，５月29日，梅雨明けは７月11日であり，また，試験期間は地域の代表的な作物である甘藷栽培の時期とほぼ一致する。

試験は，長辺方向の長さ約13m，幅８m，平均勾配15/1000の約１aの面積を持つ５通りの異なる営農管理を想定した試験区を設けた（Table 1）。このうち，Bc, Bp, Bdは耕耘方法の違いを考慮した裸地の試験区である。Bcはロータリーを用いた標準的な耕耘（耕耘深度15cm），Bdはプラウにより30cmまで深耕したのちにロータリーにより耕耘処理（同15cm）したもの，BpはBcと同じロータリーによる耕耘後，地表面をローラーで鎮圧した。また，MsとMcは，Bcと同じ処理を行った後，地域の代表的な作物である甘藷を想定して，小型の管理機を用いて畝立てを行い，畝上に0.3mm厚の黒色ポリエチレン製マルチを敷設した。このうちMsは，主傾斜方向に沿って畝立てを行い，Mcは傾斜に直交した方向に畝立てを行ったものである。MsとMcのマルチによる被覆率はそれぞれ54%，56%であった。

これら圃場の耕耘やマルチ被覆が整った５月29日を試験開始日とした。

なお，試験期間を通じて無植生で管理し，試験区内に生えた雑草は除去した。試験区内への立ち入りは，雑草管理やマルチの補修，土壌調査などの必要最小限にとどめ,地表面の撹乱はできるだけ小さくなるよう配慮した。地表流出量の測定には圃場下流端に設けた三角堰を用いた。三角堰は頂角32°，最大設計流量は3.0(l・s$^{-1}$)である。現場設置後にキャリブレーションを行い，次の検量線を得た。

$w=0.00489(h-9.8)^{2.446}$　(for Bc,Bp,Ms,Mc)　・・・(3)

$w=0.00493(h-10.5)^{2.437}$　(for Bd)　・・・・・・・・・・・・(4)

ここで，$w$ :流量(l・s$^{-1}$), $h$ :三角堰ボックス底を基準とした水深(cm)である。

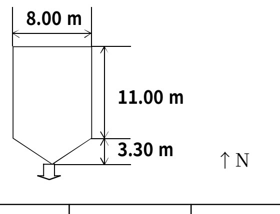
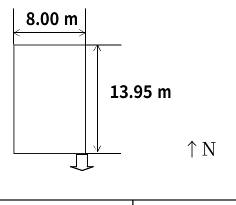
三角堰水位は自記水位計を用い，試験開始から８月４日までは，10分間隔，それ以降は基本的に５分間隔で測定した。また，雨量は，試験圃場内のほぼ中央部に設置した0.1mm転倒ます雨量計（太田計器製作所，口径直径20cm,受口高さGL+60cm）で計測し，流出量の観測と同様に８月４日までは10分間毎，それ以降は５分間隔で測定した。

試験期間は５月29日～11月１日の156日間であるが，10分間降雨強度の測定を開始した６月19日以降をここでは観測期間と呼び，その間に発生した76降雨イベントを解析対象とした。なお，本研究では，一雨降雨を１時間以上の無降雨状態（0.1mm未満/１時間）で区分し，そのうち一雨雨量が1.0mm以上のものを降雨イベントと定義した。

また，Bcで地表下12cmの作土層にADR土壌水分計(池田計器,ML2X)を設置し，10～20分間隔で土壌水分を計測した。ADR土壌水分計は，試験終了後，現地の土壌を用いて室内でキャリブレーションを行い，体積含水率と土壌飽和度に変換した。

一方，調査圃場の物理性の違いをみるために，試験開始直後の６月４日に各試験区で貫入式土壌硬度計（大起理化工業，DIK5521）により貫入抵抗を測定するとともに，試験終了後に，土壌表層と下層の不攪乱試料を100ccコアサンプラで採取した。100ccサンプラは実験室に持ち帰り，三相分布と飽和透水係数の測定を行った。

Table 1　流出試験の設計　Specifications of runoff experiment plots

| 処理区名 | Bc:標準区 | Bd:深耕区 | Bp:鎮圧区 | Ms:マルチ区Ⅰ | Mc:マルチ区Ⅱ |
|---|---|---|---|---|---|
| 処　　理 | ロータリー耕 | プラウ耕の後ロータリー耕 | ロータリー耕の後ローラで鎮圧,さらに地表面が湿潤時にローラで再転圧 | 甘藷用マルチ（縦うね・傾斜方向にうね立） | 甘藷用マルチ（横うね,傾斜と直角方向にうね立） |
| 耕耘深度 (cm) | 15cm | 30cm | 15cm | (15cm) | (15cm) |
| 区画形状 |  | | |  | |
| 長辺方向傾　斜 | 17/1000 | 17/1000 | 13/1000 | 14/1000 | 16/1000 |
| 面積（㎡） | 101 | 同左 | 同左 | 112 | 同左 |
| 流量測定法 | 三角堰(現地設置後に検定) | | | | |
| 流量計測インターバル(min) | 5～10 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |

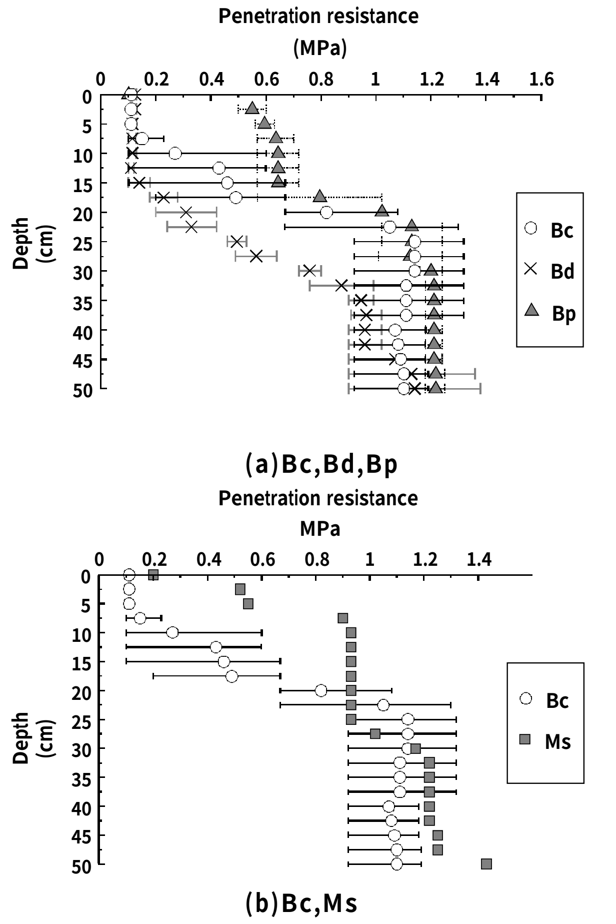



Fig.3　土壌貫入抵抗の深度プロファイル
Vertical profile of soil penetration resistance
（図中のマークは平均値，横棒は反復測定により得られた値の範囲を示す）

Table 2 試験圃場の土壌特性
Soil properties of experimental plots

| 採土位置（中心深さ） | N | 三相分布 | | | | | | 飽和透水係数 (cm/s) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 固相率 | CV (%) | 液相率 | CV (%) | 気相率 | CV (%) | 平均（対数） | 最大 | 最小 |
| Bc 上層( 5cm) | 3 | 0.211 | 6.1 | 0.377 | 7.8 | 0.412 | 10.2 | $5.0\times10^{-3}$ | $8.4\times10^{-3}$ | $2.3\times10^{-3}$ |
| Bc 下層(20cm) | 1 | 0.284 | - | 0.533 | - | 0.183 | - | $3.9\times10^{-5}$ | - | - |
| Bd 上層(5cm) | 3 | 0.213 | 6.4 | 0.392 | 6.6 | 0.395 | 9.1 | $4.0\times10^{-3}$ | $9.4\times10^{-3}$ | $9.9\times10^{-4}$ |
| Bd 下層(20cm) | 1 | 0.276 | - | 0.524 | - | 0.200 | - | $3.6\times10^{-4}$ | - | - |
| Bp 上層( 5cm) | 3 | 0.299 | 1.8 | 0.511 | 3.6 | 0.190 | 11.9 | $1.9\times10^{-4}$ | $3.8\times10^{-4}$ | $8.5\times10^{-5}$ |
| Bp 下層(20cm) | 1 | 0.266 | - | 0.609 | - | 0.125 | - | $6.5\times10^{-5}$ | - | - |
| Ms 上層( 5cm) | 3 | 0.277 | 4.3 | 0.547 | 2.8 | 0.176 | 8.3 | $1.4\times10^{-4}$ | $2.7\times10^{-4}$ | $9.6\times10^{-5}$ |
| Ms 下層(20cm) | 1 | 0.176 | - | 0.609 | - | 0.215 | - | $2.3\times10^{-3}$ | - | - |
| Mc 上層(5cm) | 3 | 0.249 | 6.8 | 0.526 | 6.3 | 0.224 | 21.0 | $5.6\times10^{-4}$ | $8.3\times10^{-4}$ | $2.5\times10^{-4}$ |
| Mc 下層(20cm) | 1 | 0.184 | - | 0.637 | - | 0.179 | - | $3.8\times10^{-4}$ | - | - |

## III　結果と考察

### 1　土壌特性

試験開始直後(6/4)の貫入抵抗の深度分布をFig.3に示す。標準区として設置したBcで，ロータリーの耕耘深度である15cmを境として表土は約0.1MPa，下層土は約1.1MPaであったのに対して，プラウで30cmまで深耕したBdおよび，地表面をローラーで鎮圧したBpでは，貫入抵抗の深度断面にそれぞれの特徴がみられる。また，Fig.3(b)のマルチ被覆区(Ms)の畝間で計測された貫入抵抗の測定結果からは，地表面から８cmの深度で0.9MPaを超えることから比較的浅い位置に緻密な層が存在することが伺われる。

また，土壌の固相率は，Bc上層と，Bd上層でそれぞれ0.211，0.213とほとんど変わらなかったが，Bp上層で，0.299，MsとMc上層では0.277，0.249と固相率が高いという相違点がみられた(Table 2)。それに対応するように，表層の飽和透水係数は，Bc，Bdで4～$5\times10^{-3}$ ($cm\cdot s^{-1}$)であったのに対して，Bpでは$2\times10^{-4}$($cm\cdot s^{-1}$)，MsとMcでは1～$6\times10^{-4}$と約１オーダー低かった。一方，下層では，Bc，Bd，Bpで固相率に顕著な違いは見られなかったのに対して，Ms,Mcでは0.176，0.184と低かった。下層の透水係数は，Bc，Bpで$10^{-5}$オーダーであったが，BdやMs，Mcでは$10^{-4}$オーダーとやや高い値であった。

以上のように試験区毎に，耕耘方法や畝立ての違いを反映して異なる土壌特性を有していることがわかった。

また，調査期間の土壌水分の推移をFig.4に示す。土壌水分は検量線を介して体積含水率に変換した後，土壌の物性値に基づいて飽和度に変換した。得られた土壌飽和度は，後に行う相関分析に際に先行土壌水分の指標として利用した。なお，土壌水分の変換には室内試験に現地条件を勘案した次式を用いた。

$$\theta = 1.070\cdot\exp(6.229\cdot(x-0.796))+0.217 \cdots(5)$$

ただし，θ:体積含水率，$x$:測定値（電圧V）である。

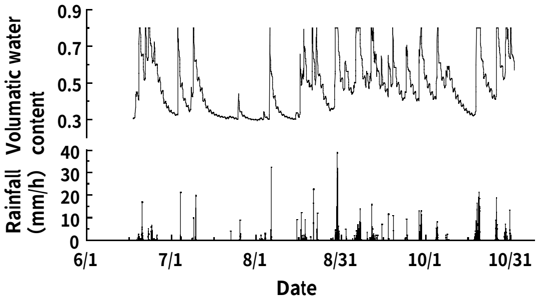



Fig.4　試験圃場(Bc)上層の体積含水率と降水量
Volumetric water content of upper soil layer of Bc and rainfall

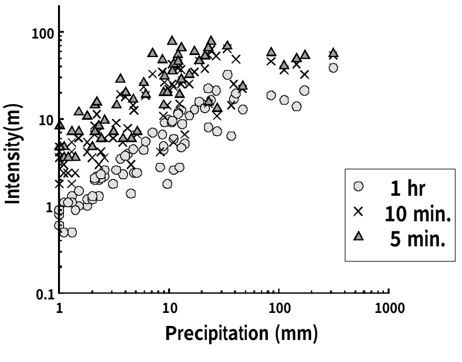



Fig.5　一雨雨量と降雨強度の関係
Relationship between precipitation and intensity

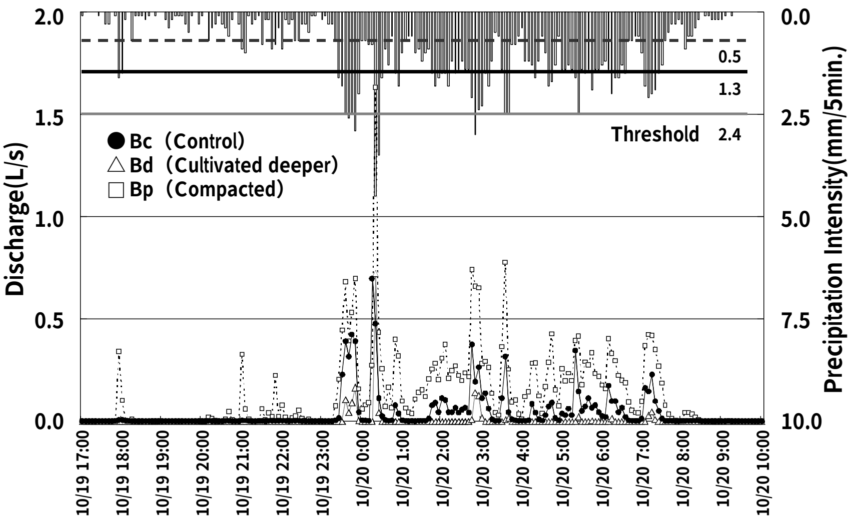



Fig.6　調査圃場のハイドログラフ(2004.10.19-20)
Hydrograph and hyetograph of experimental plots

2　降雨と流出特性

観測期間中における総降水量は1539mmであり，このうち，一雨雨量が1mm以上の降雨イベント76回の総降水量は1522mmであった。一雨雨量の最大値は313.1mm (8/29-30), 最大降雨強度は，1時間，10分，5分でそれぞれ38.8, 64.2, 78.0 (mm・h$^{-1}$)であった(Fig.5)。

解析対象とした76降雨イベントのうち，流出データが観測され，流出率が算定されたイベントの割合は，Bc, Bd, Bp, Ms, Mcでそれぞれ100, 75, 97, 75, 36%であった(AppendixのTableを参照)。欠測が生じた原因は，土壌侵食の発生に伴う三角堰の埋没，下流側排水路の湛水に伴う三角堰の水没，そして水位計の不具合等である。

Fig.6に観測された典型的なハイドログラフを示す。ハイドログラフを見ると，降雨強度がある閾値を超えたときに地表流出が生じていることがわかる。図では，Bcで1.3(mm・5min.$^{-1}$)を超えたときに流出が生じており，その直後に降雨強度が1.3(mm・5min.$^{-1}$)を下回るとハイドログラフは速やかに減衰している。同様に，BdとBpではそれぞれ2.4, 0.5(mm・5min.$^{-1}$)を閾値としている。このように試験圃場では，降雨強度の増減に対応して流出量が短時間の間に増減する特徴を持つHorton型地表流が観測された。Horton型地表流は，降雨強度が浸透能を上回ったときに流出が生じるとされている。これは，試験圃場が透水性の高いシラス台地上に立地しているため，復帰流や中間流出が生じにくく，観測される流出量は，地表流出成分に限られたためと考えられる。

次に，一雨雨量と雨水保留量の関係について雨水保留量曲線を用いて示す。雨水保留量は，降雨期間中の蒸発と湛水を無視すると土壌浸透量に相当する。

Fig.7を見ると，裸地圃場であるBc, Bd, Bpに対して一雨雨量の最大値である313mmの降雨（イベントNo.36,　Appendix参照　以下同じ）や146mmの降雨（No.41）ではほとんどが浸透するのに対して，41mm（No.12), 7mm（No.52）, 112mm（No.70）, 172mm（No.71）, 85mm (No.72)の降雨では，Bpを中心にある程度の地表流出が生じている。このように裸地圃場で標準的な耕耘状態(Bc, Bd)では，雨水のほとんどが浸透する。そして，地表面を鎮圧すると地表流出が生じるが(Bp)，得られたデータからは明瞭な雨水保留量関係をみることはできなかった。このことは，地表流出特性が一雨雨量だけでなく，他の因子が影響していることを強く示唆している。

さらに，マルチ被覆を施した試験区においても，雨水保留量関係(Fig.7(b))には大きなばらつきがみられ，その関係は判然としなかった。

3　流出率と各因子との相関分析

式(2)に示したように，流出率とそれに対応する一雨雨量や最大降雨強度，降雨継続時間，試験開始日からの日数，積算雨量，降雨発生時の土壌飽和度の各因子の関係について相関分析を行った。

その結果をTable 3に示す。まず，相関が高いものから見ていくと，流出率と降雨強度との関係が目につく。例えば，Ms,Mcでは，5分間降雨強度で0.82～0.93, 10分間降雨強度で0.81～0.85と高い相関を示した。しかし，1時間降雨強度では，0.69～0.78とやや低い値となった。この傾向は，残りの3つの処理区でも同様であり，全般的に流出率は5分＞10分＞1時間の順で降雨強度との相関が高い傾向が認められた。

Table 3　相関分析結果 Results of correlation analysis

| | | R | 1h | 10min | 5min | RT | d | Σ R | S | Bc | Bd | Bp | Ms | Mc |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 一雨雨量 | R | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 最大降雨強度 | 1h | 0.72 | 1 | | | | | | | | | | | |
| | 10min | 0.48 | 0.89 | 1 | | | | | | | | | | |
| | 5min | 0.41 | 0.79 | 0.95 | 1 | | | | | | | | | |
| 降雨継続時間 | RT | 0.81 | 0.48 | 0.32 | 0.26 | 1 | | | | | | | | |
| 日数 | d | 0.12 | 0.00 | 0.05 | -0.11 | 0.11 | 1 | | | | | | | |
| 積算雨量 | Σ R | 0.17 | 0.02 | 0.03 | -0.10 | 0.19 | 0.95 | 1 | | | | | | |
| 土壌飽和度 | S | 0.05 | -0.07 | -0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.33 | 0.41 | 1 | | | | | |
| 流出率 | Bc | 0.21 | 0.34 | 0.47 | 0.53 | 0.16 | 0.36 | 0.40 | 0.23 | 1 | | | | |
| | Bd | 0.13 | 0.28 | 0.43 | 0.44 | 0.14 | 0.19 | 0.23 | 0.18 | 0.83 | 1 | | | |
| | Bp | 0.32 | 0.52 | 0.57 | 0.54 | 0.26 | 0.46 | 0.52 | 0.25 | 0.85 | 0.65 | 1 | | |
| | Ms | 0.60 | 0.78 | 0.85 | 0.82 | 0.01 | 0.25 | 0.26 | 0.21 | 0.52 | 0.41 | 0.70 | 1 | |
| | Mc | 0.49 | 0.69 | 0.81 | 0.93 | 0.10 | 0.19 | 0.22 | 0.17 | 0.91 | 0.98 | 0.93 | 0.94 | 1 |

一重下線：5% 水準で有意
二重下線：1% 水準で有意

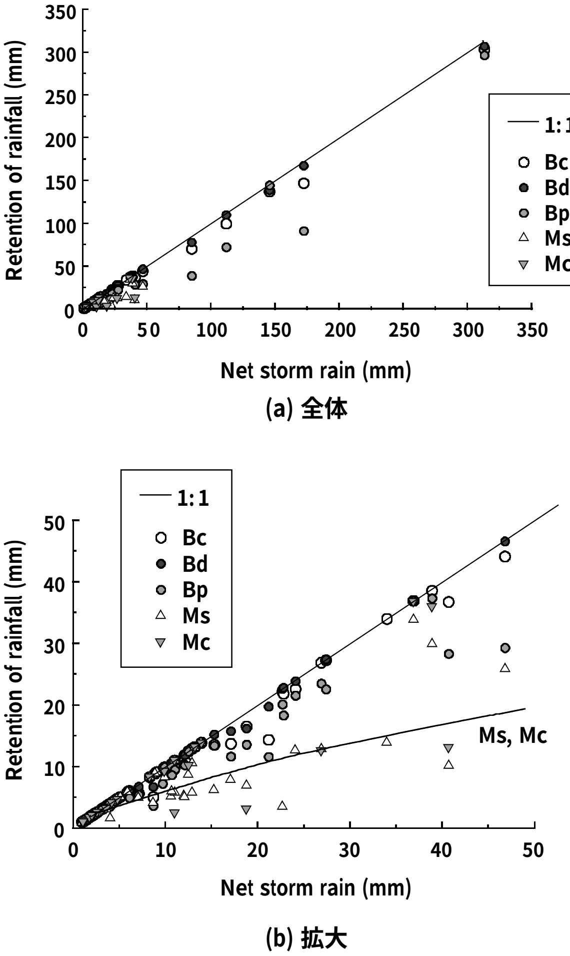



Fig.7　雨水保留量曲線
Rainfall retention curve

また，処理の違いをみると，前述のとおり，マルチ被覆区で高かったのに対して，裸地圃場(Bc, Bd, Bp)では相対的に低く，最も低かったBdでは，5分間降雨強度で0.44，1時間降雨強度で0.28であった。処理区全体をみるとMs　Mc＞Bp＞Bc＞Bdの順に高かった。

一方，一雨雨量と流出率の相関は，マルチ被覆区で0.49～0.60と高く，続いてBp: 0.32, Bc: 0.21, Bd: 0.13と正の相関は認められるものの降雨強度との相関ほど高くなかった。

また，全体的に試験開始日からの日数($d$)や積算雨量（$\Sigma R$）とのやや弱い相関が見られ，例えば，$\Sigma R$との相関でBp (0.52)，Bc (0.40)ではやや高かった。このことより試験開始から時間が経つに従って流出率が増加する傾向にあることが示唆された。

さらに，降雨前の土壌飽和度（試験では土壌飽和度をBcのみで観測しているため，実際には各処理区に対する土壌の乾湿を表す相対的な指標としての意味合いを持つ）と流出率の関係をみると，0.17～0.25とすべての処理区で弱い相関が認められた。このことは，流出率が圃場の水分状態，言い換えると先行土壌水分の影響があまり大きくないことを示すものと考えられる。

以上のように，流出率には降雨強度との高い相関が認められたので，次に，この関係についてもう少し詳しくみることにする。Fig.8に試験期間の前半と後半に分けて流出率と最大10分間降雨強度の関係をプロットした。試験期間の前半(～8/31)の図(Fig.8(a))をみると，マルチ被覆区では，10分間降雨強度（$r_{10}$）で約10 (mm·h$^{-1}$)までは流出がみられないが，それを超えると流出率が急速に上昇し，$r_{10}$が60 (mm·h$^{-1}$)で約80%まで上昇する。また，Bpでは，約20 (mm·h$^{-1}$)を超えると流出が始まり，およそ60 (mm·h$^{-1}$)で30%弱に上昇，Bcでは約30 (mm·h$^{-1}$)を超えると流出が始まり，およそ60 (mm·h$^{-1}$)で10%弱となる。一方，Bdでは，試験期間前半に欠測が多いこともあるが，地表流出はほとんどみられなかった。

これが試験期間の後半(9/1～11/1)になると，図に示すように直線の傾きがそれぞれ大きくなるとともに，流出が発生する最大降雨強度も小さくなる。例えば，マルチ被覆区では，約6(mm·h$^{-1}$)を超えて流出が始まり，40(mm·h$^{-1}$)で約80%まで増加する。また，試験期間前

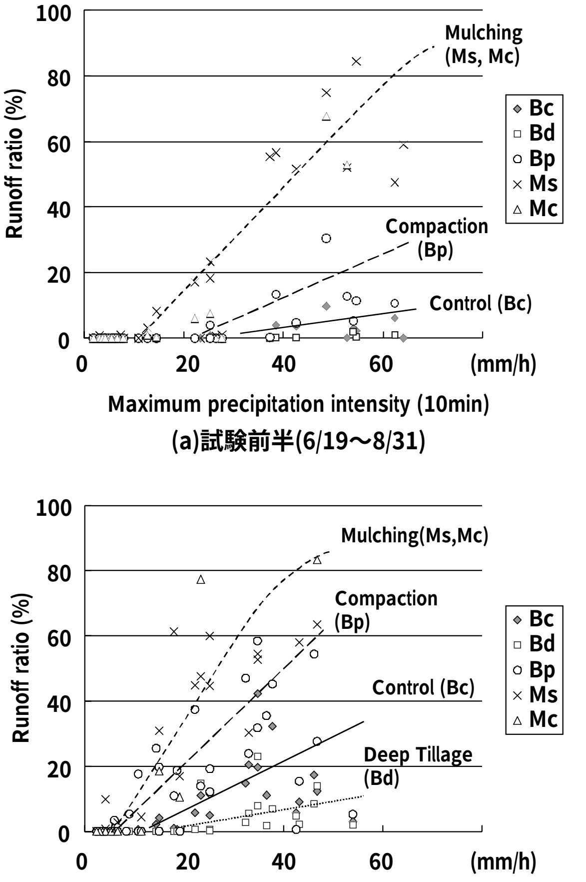



Fig.8　最大10分間降雨強度と流出率の関係
Relationship between maximum 10min. rainfall intensity and runoff ratio

半でほとんど流出がみられなかったBdでも地表流出が生じている。

以上のように，営農管理の違いにより降雨イベント毎の流出率には差が見られるとともに，試験期間の前後半の違いによる差異が確認された。試験期間の前半の流出率は　Ms　Mc＞＞Bp＞Bc＞Bd　0であったが，後半は全体的に高くなり，Ms　Mc＞Bp＞Bc＞Bdの順となった。

なお，特にMcにおいて欠測によりデータが少ないことと，上述のようにMsとMcの流出特性が類似していることから，以下では，MsとMcをマルチ被覆区として一括して扱う。

## ４　水文モデル

### ア　流出特性の変化とクラストの形成

相関分析やFig.8より，流出特性は時期により変化していることは明らかであるが，これは，地表面にクラストが形成されたことによるものと考えられる。クラストは，裸地状態の圃場で，雨滴の運動エネルギーによって分散した土粒子が，地表面の間隙を充填圧密することによって形成される地表面の緊密な層である。クラストが形成されると透水性は低下し，地表流が増大する（例えば，坂西ら(1997)）。

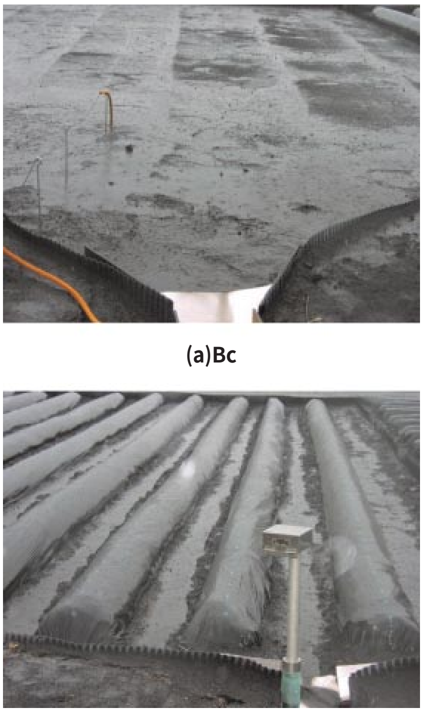

(a)Bc
(b)Ms

Fig.9　地表流出時の圃場の様子
Photos of experimental plots when runoff occurs

西村ら(1990, 1993)は黒ボク土を充填した小型ライシメータと降雨発生装置を用いてクラストの形成が地表流出や浸透に及ぼす影響について検討した。その中で，クラスト(層厚3mm)と表層5cmにおける透水係数が降雨の継続により低減していく様子を計算から明らかにした。

調査圃場では，試験終了後(11月５日)に圃場表面にクラストが形成していることを確認している。試験期間中は，地表流出に伴って土壌侵食が生じていたが，試験後の観察では裸地圃場の地表面には，リルやガリなどの明瞭な土壌侵食痕は認められなかった。これは，傾斜が0.9°と緩傾斜であることから面的に表面流出や侵食が生じたためと考えられる(Fig.9)。そして裸地圃場のうち，Bpを除いた２区で地表面にクラストの形成が認められた。Bcでは，表面のみが硬く緻密な厚さ12mmのクラストが観察され，そのクラストの下部には団粒上の土壌が付着していた。また，Bdでは厚さ12～15mm程度の比較的柔らかいクラストが観察されたが，Bpでは土壌が全体的に硬く，地表面付近に明瞭なクラストは確認されなかった。また，MsとMcでは，畝間に厚さ4mm程度の硬く緻密な板状のクラスト形成が確認された。

以上のように圃場で観察されたクラストが浸透能に変化を及ぼし，地表流出特性に影響したことが推察された。

### イ　地表流出モデルとφの変化

次に，得られた観測結果や既往の知見を元に，圃場における長期の流出／浸透特性を算定するモデルについて検討する。

さて，Horton型地表流のように流域の透水性がよく，流出が降雨強度の影響を強く受ける水文現象を表すモデルのひとつとしてφ-index法がある(ASCE, 1949)。φ-index法は，浸透能 $i$ と類似の一定値φを想定し，$r_k > \phi$ のときのみ，流出高$q_k = r_k - \phi$が生じるとする方法である。得られたデータは，Fig.6で示したとおり，ある閾値（φ）を境に地表流出が生じると見なせることから，この仮定により現象を表せるものと考えた。このようにφは実質上，圃場の平均的な浸透能を表し，降雨強度(単位：mm･5min.$^{-1}$)等と同じ単位を持つ。

φの算定にあたっては，対象とする降雨イベントを，一雨雨量が10mmを超えるものとし，1mm以上の地表流出高が観測された試験区の流出ハイドログラフに対して適用した。一つの降雨イベント期間内のφは一定として，各々の降雨イベントと試験区に対してφを求めた。算定されたφの数は，Bc, Bd, Bp, Ms, Mcでそれぞれ13,11,18,17, 5個であった。これにより得られた代表的なハイドログラフをAppendix Ⅱに示す。

さて，前述のとおり，時間の経過とともにクラスト形成により浸透特性が低下することによって流出特性が規定されるのであれば，クラストの形成要因と浸透能を表すφとはなんらかの関係で表せるはずである。そこで，ここでは，クラストの形成要因として積算降雨エネルギ

ーを取り上げることとした。単位降雨の運動エネルギー$KE$(J・m$^{2}$ $^{-1}$・mm$^{-1}$)はWischmeier et al.(1958)に準じて取り扱い，積算降雨エネルギーΣE(J・m$^{2}$ $^{-1}$)は次のように計算した。

$$KE = a + b \cdot \log_{10} r_5 \qquad \cdots\cdots(6)$$

$$E_5 = R_5 \cdot KE \qquad \cdots\cdots(7)$$

$$\sum E = \sum_{d=0}^{t} E_5 \qquad \cdots\cdots(8)$$

ここで，$a,b$:定数，$r_5$:5分間降雨強度(mm・h$^{-1}$)，$R_5$:5分間雨量(mm・5min.$^{-1}$)，$E_5$: 5分間降雨エネルギー(J・m$^{2}$ $^{-1}$・mm$^{-1}$・5min.$^{-1}$)，$t$ :積算時間，である。本報では，試験地と比較的類似の気象条件を持つ沖縄の気象条件を反映した $a$ =9.81, $b$=10.6（翁長ら，1991）を用いた。計算で得られたφと積算降雨エネルギーの関係をFig.10に示す。Fig.10では，時間の経過とともに，φが低減していく傾向が確認できた。そこで，グラフから読みとることができるように，φが積算降雨エネルギーの増加とともに一定値に向けて漸減する指数関数で置き，５分間流出高$q_5$(mm・5min.$^{-1}$)が次式で表されるものとした。

$$q_5 = R_5 - \{ l \cdot \exp(m \cdot \sum E) + n \} \qquad \cdots\cdots(9)$$

$$\text{ただし，} R_5 > \{ l \cdot \exp(m \cdot \sum E) + n \}$$

ここで，$l,m,n$ は定数である。なお，$l,m,n$ は試行錯誤によるカーブフィッティングで値を求めた(Fig.10)。

Table 4　式(9)に用いたパラメータ
Parameters for equation (9)

| | Bc | Bd | Bp | Ms,Mc |
|---|---|---|---|---|
| $l$ | 8.0 | 10.0 | 6.0 | 3.5 |
| $m$ | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.13 |
| $n$ | 0.8 | 1.7 | 0.25 | 0.25 |

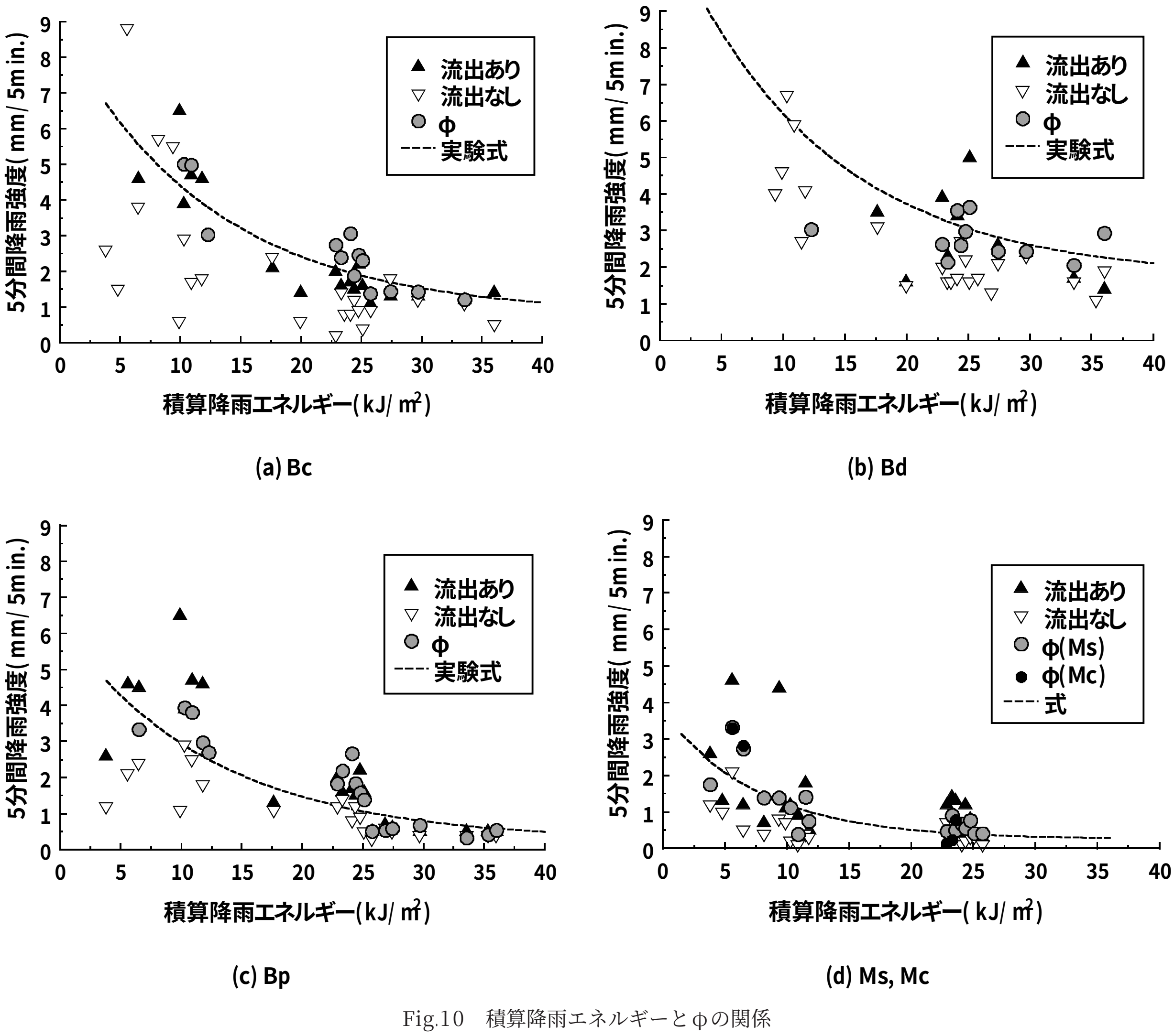



Fig.10　積算降雨エネルギーとφの関係
Relationship between cumulative rainfall energy and φ
図中の「流出あり」,「流出なし」はそれぞれ，φを算定できなかった降雨(一部)において，流出が発生した時の最小の５分間降雨強度および流出が発生しなかった時の最大の５分間降雨強度を示している。

ウ　モデルへの斜面勾配の影響について

(9)式では，農地の斜面勾配は考えられていないが，勾配の影響を考慮する必要はないのだろうか。

Miyazaki(1993)は，傾斜地の浸透能は一般に浸透の初期段階において平坦地の浸透能より高いことを示している。

また，坂西ら(1986)は，可変勾配ライシメータを用いてローム土及びマサ土を対象として流出・侵食試験を行った。その結果，雨水の浸入強度は，マサ土で傾斜角が3～4°，ローム土で10°位までは傾斜角に依存せず，それを超えて傾斜角が増加すると浸入強度も増加することを示した。さらに，マサ土を対象として，傾斜角1～4°における浸入強度は，傾斜角に依存せず降雨強度のみに支配されることを示し，他方，傾斜角5～25°の範囲では説明変数に傾斜角の正弦値を加えると相関係数の高い浸入強度式が得られたとしている（坂西(1997)）。

従って，今回の試験条件では傾斜角が1°に満たないことから，傾斜角の違いが浸透能に及ぼす影響は無視でき，また，傾斜角が十分小さい範囲で(9)式は成立するものと考えられる。

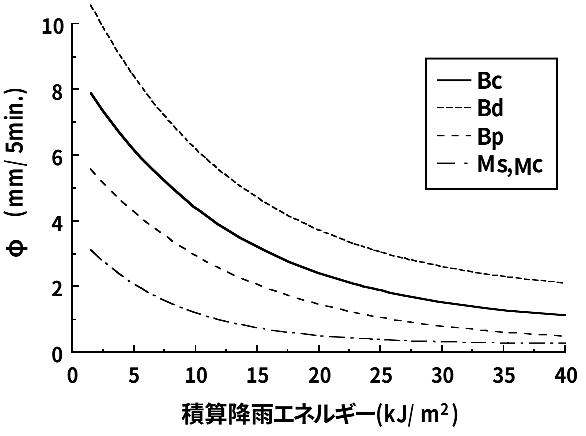



Fig.11　営農管理とφの変化
Changes of φ by farming management and cumulative rainfall energy

５　営農管理が畑地の水収支に及ぼす影響

ア　圃場浸透能の変化特性

前節でみたように，φの長期的な変化は，圃場の浸透能の変化を表していると考えられる。Fig.11はFig.10から曲線を抜き出したものであるが，この図から，無植生圃場における耕耘やマルチの利用が畑地の浸透能に与える影響の違いは一目瞭然である。一方で，長期的な浸透能の低下傾向の違いも明らかである。

畑地圃場では，耕耘直後は浸透能が高く，ほとんど地表流出はみられない。しかし，前述のように裸地条件ではクラストの形成により，圃場レベルで浸透能が徐々に低下し，それぞれの処理区毎にある値に収束する傾向が認められた。この値は，Table 4の$n$で表され，マルチ被覆区と比較して，Bcでは，3.2倍，Bdでは，6.8倍と，マルチ被覆区において被覆により浸透に寄与しない面積分を差し引いてもマルチ被覆区の値は小さかった。

また，Table 4の$m$はφの積算降雨エネルギーに対する低下の感度を表しており，$m$の値が大きいほど積算降雨エネルギーの増加に対して，より早くφが低下することを示す。$m$の値はマルチ被覆区で0.13と他に比べてやや高いことから，マルチ被覆区においては，浸透能が早く低下することが分かった。

イ　水収支の試算条件

４で示したモデルを利用して，営農管理が農地水文に与える影響について試算を行った。試算にあたっては，水収支期間を，ほぼ圃場試験期間と合わせた2004/6/19～2004/11/1の136日間と，2004/6/19～2005/6/18の１年間の２通りとし，式(1)の湛水深$P$を除く水文要素を考慮した。対象とした１年間の総雨量は2540mmで，この地域の年平均降水量と大差ない。降雨の入力値は，対象圃場における５分間雨量の実測値とし，５分間雨量を観測していない期間(2004/6/19～8/4)については，10分間雨量を按分した。また，圃場試験期間内で水収支の試算期間に含まれていない21日間(2004/5/29～2004/6/18)は，５分および10分間雨量がなかったため，この間の積算降雨エネルギーは，調査圃場から約300m離れた位置にある鹿児島県農業試験場大隅支場の気象観測露場における１時間雨量を用いて算定した。この21日間の総雨量は202.0mm，積算降雨エネルギーは3.62kJ・$m^{2-1}$であった。試算に際してはこの間の降雨の影響を反映したが，水収支の試算期間からは除いた。一方，地表面蒸発量は，Penman法で鹿児島地方気象台の平年値を用いて算定したポテンシャル蒸発散量に，実蒸発散比(0.8 for Bc, Bd, Bp, 0.5 for Ms, Mc)を乗じて求めた。

また，試算条件として，Table 5に示す４パターンについて計算した。Case 0は，圃場試験期間の水収支，Case 1は，Case 0の条件で１年間の水収支を算定したもの，Case 2では，11月末に圃場を再度耕耘し，初期状態に戻すことを想定したもの，Case 3はマルチ被覆区について，11月末にマルチ被覆を取り払い，標準的なロータリー耕耘(Bcの条件)を行うことを想定したものである。

なお，地形条件は試験地のように復帰流や中間流出を考慮しなくてよく，降雨が一旦地面に浸透したら，蒸発するもの以外はすべて地下水涵養に費やされるものとした。さらに，この試算では地表面に一度形成したクラストが壊れるなどで浸透能が回復することはないものと考えた。

１年間の試算では，前半と後半での水収支の違いをみるために，便宜上，約半年間(6/19-1/31と2/1-6/18)で分けて流出率を示した。

Table 5　試算条件 Conditions of simulation

| | 算定条件 |
|---|---|
| Case 0 | 圃場試験における観測期間(2004/6/19-11/1)の水収支を算定する。 |
| Case 1 | 圃場試験の条件で１年間(2004/6/19-2005/6/18)の水収支を算定する。計算上，観測期間(11/1まで)以降も(9)式が引き続き成立するものと仮定する。 |
| Case 2 | 圃場試験の条件で2004/6/19 より計算を開始し，2004/11/30 に圃場を再度耕耘する（マルチ被覆区では，耕耘の上，再度マルチ被覆を行う）条件で，水収支を算定する。計算上は，11/30 に積算降雨エネルギーを一旦０に戻す。 |
| Case 3 | マルチ被覆区で，圃場試験の条件で2004/6/19より計算を開始し，2004/11/30 にマルチ被覆を除去し，ロータリーで耕耘する(Bc)条件で水収支を算定する。計算上は，11/30 に積算降雨エネルギーを一旦，0 に戻すとともに，パラメータ$l,m,n$をそれぞれBcの条件(Table 4)に変更する。 |

ウ　水収支の試算結果

試算結果をTable 6に示す。

詳細をみる前に，試算の妥当性を検証するために，実測値と試算値とを比較する(Fig.12)。なお，ここでの実測値には，一部に生じた欠測を補間式で補っている（久保田ら，2005）。欠測がなかったBcでは，観測期間中の総地表流出高が83mmであったが，試算では同期間で101mmとなり18mmの差であった。また，Bdでは，一部に推定値を含んだ実測値48mmに対して，試算値は21.3mm，Bpでは，同様に294mmに対して，293.3mmであった。Fig.12にみられるようにMcでは，試算値と実測値の差がみられるが，Mcでは前述のように欠測が多いという問題があった。

以上のように総地表流出高の比較では，概ね試算値が実測値に近い値を示していることが確認された。

次に試算結果の内容についてみる。まず，Case 0では，期間降水量1539.4mmのうち，裸地圃場で1～19%が流出したのに対して，マルチ被覆区では45%と地表面の管理によって流出率に大きな差が生じた。特に，地表流出がほとんど生じなかったBd　(21mm)に対してMs, Mcでは，地表流出高が692mmと大きな違いが確認された。

同様にCase 1では，地表流出高が，Bdの69mmからMs, Mcの1138mmまで大きな差が生じた。地下水涵養量では，Bdの1652mmに対してMs, Mcでは890mmと約760mm少なかった。さらに１年間の流出率ではBdが3%，Bcが9%であったのに対して，Ms, Mcでは45%であった。

また，Case 1で流出率は，すべての処理区で前半より後半で高くなっていることが分かる。

一方，Case 2, 3の結果から，期間途中で耕耘することにより，地表流出が減少し地下水涵養量が増加することが確認できた。Case 2では，地表流出高は裸地区で42～278mm減少し，逆に地下水涵養量はその分増加する。また，マルチ被覆区では，Case 2とCase 3でそれぞれ301, 401mm減少し，その分，地下水涵養量が増加した。

Case 2において，流出率を前後半別にみると，期間後半で流出率の減少が著しい。Bcでは，Case 1で15.9%であったものが，Case 2では0.2%まで減少した。同様にBdで5.6%→0.0%，Bpで36.8%→2.7%，Ms，Mcでは，47.3%→14.7%と明らかな減少がみられた。

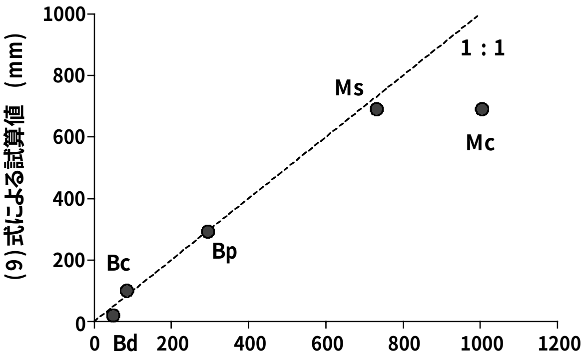



Fig.12　観測期間の総地表流出高における実測値(一部推定値を含む)と(9)式を用いた試算値の比較

A comparison of the total amount of surface runoff based on observation and calculation for the observation period

Table 6　営農管理の違いによる水文水収支の試算結果

Calculated water budget by different farming management

| Case 0　R=1539.4mm | | Bc | Bd | Bp | Ms, Mc |
|---|---|---|---|---|---|
| 地表流出高(mm) | | 101.2 | 21.3 | 293.3 | 692.1 |
| 流出率(%) | | 6.6 | 1.4 | 19.1 | 45.0 |
| Case 1　R=2540.3mm | | Bc | Bd | Bp | Ms, Mc |
| 水 | 地表流出高(mm) | 232.0 | 68.5 | 613.8 | 1137.7 |
| 収 | 土壌浸透量(mm) | 2308.3 | 2471.8 | 1926.5 | 1402.6 |
| 支 | 地下水涵養量(mm) | 1488.2 | 1651.7 | 1106.4 | 890.1 |
| 流 | 全期間(%) | 9.1 | 2.7 | 24.2 | 44.8 |
| 出 | 6/19-1/31(%) | 6.8 | 1.7 | 19.7 | 43.9 |
| 率 | 2/1-6/18(%) | 15.9 | 5.6 | 36.8 | 47.3 |
| Case 2　R=2540.3mm | | Bc | Bd | Bp | Ms, Mc |
| 水 | 地表流出高(mm) | 113.3 | 26.8 | 336.2 | 836.8 |
| 収 | 土壌浸透量(mm) | 2427.0 | 2513.5 | 2204.1 | 1703.5 |
| 支 | 地下水涵養量(mm) | 1606.9 | 1693.4 | 1384.0 | 1191.0 |
| 流 | 全期間(%) | 4.5 | 1.0 | 13.2 | 32.9 |
| 出 | 6/19-1/31(%) | 6.0 | 1.4 | 16.9 | 39.4 |
| 率 | 2/1-6/18(%) | 0.2 | 0.0 | 2.7 | 14.7 |
| Case 3　R=2540.3mm | | Ms　→　Bc | | | |
| 水 | 地表流出高(mm) | 736.8 | | | |
| 収 | 土壌浸透量(mm) | 1803.5 | | | |
| 支 | 地下水涵養量(mm) | 1291.0 | | | |
| 流 | 全期間(%) | 29.0 | | | |
| 出 | 6/19-1/31(%) | 39.2 | | | |
| 率 | 2/1-6/18(%) | 0.2 | | | |
| 備考 | 地表面蒸発量は，Penman法で算出したポテンシャル蒸発散量(1025.1mm，使用データ：鹿児島地方気象台)に実蒸発散比(0.8)を乗じて算定(820.1mm)。なお，Ms, McおよびCase3 についてはマルチ被覆による蒸発量の減少を考慮し，実蒸発散比を0.5（512.6mm）として算定した。 | | | | |

これらの結果から，地下水涵養量はFig.13に示すように，農地表面の管理によって，Bcで8%, Bdで3%増加するのに対して(Case 2)，Bpで25%，Ms,Mcで34% (Case 2)および44% (Case 3)増えることが分かった。このように，地表面の浸透能がなんらかの要因により抑制的に管理されている圃場で，営農管理上の対策によって地下水涵養量が増加する余地が高いことが明らかになった。

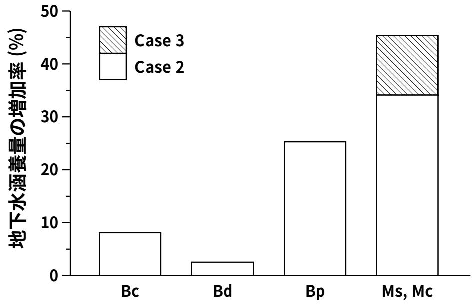



Fig.13　営農管理による地下水涵養量の増加割合
The increase rate of amount of groundwater recharge by different farm treatment

エ　今後の課題

残された課題として，まず，モデルの汎用化と検証性の向上が指摘される。今回提示した農地の浸透能の長期変化を考慮するモデルは経験式であり，土壌や降雨特性など諸要素との関連づけも十分でないと考えられる。また，モデルの検証も残された課題である。

また，圃場試験では，諸条件から無植生圃場を対象としたが，今後は作物栽培を行う条件で評価を行う必要がある。さらに，水収支特性の検討にあたっては，実際の畑地圃場に存在する畦や畔，微地形，圃場の凹凸等により生じる湛水の影響も考慮する必要があろう。

一方，多雨地帯の畑地圃場において，５分または10分間という短時間降雨強度が強く圃場の流出特性，ひいては地域の水収支・水循環特性に影響を及ぼしていることが分かった。このことは，営農管理の変化が地域の水収支に与える影響を評価，検討するためには，短時間降雨強度のデータが不可欠であることを示している。しかし，短時間降雨強度のデータは容易に入手できるものではない。特に５分間降雨強度のデータはほとんど入手困難であろう。このような状況の中で，今後，面的な展開を図ることを考えると，降雨強度の取り扱いは検討すべき課題の一つである。

最後に，畑地を巡る水文・水循環について課題を提示したい。それは，水循環の健全性とは何かということである。これまで水田はともかく，畑地ではそのような議論はほとんどされてこなかったのではないだろうか。地下水涵養をどこまで増やすことが望ましいのか。ビニールハウス等の集中的な立地が水文的にどの程度，河川や地下水に影響を及ぼすのか。このようなことを現地の問題に即しつつ，概念的に整理する必要があろう。

## Ⅳ　結　言

本報では，無植生圃場における営農管理の違いが畑地の水収支特性に与える影響について，緩傾斜畑地圃場において実施した流出試験と，モデルを用いた試算により考察した。結果をまとめると次の通りである。

i) 試験は，耕耘方法やマルチ被覆の影響を考慮した５通りの営農管理を想定した試験区で行った。試験終了後に行った土壌調査により，それぞれの試験区が耕耘方法や畝立て作業の違いを反映して異なる土壌特性を有していることがわかった。

ii) 試験圃場では，降雨強度の増減に対応して流出量が短時間の間に増減する特徴を持つHorton型地表流が観測された。これは，試験圃場が透水性の高い火山灰土壌の台地に立地しているため，復帰流や中間流出がなく，観測される流出量は，地表流出成分に限られたためと考えられる。

iii) 流出率と関係が深いと考えられる因子（一雨雨量や最大降雨強度，降雨継続時間，試験開始日からの日数，積算雨量，降雨発生時の土壌飽和度）の関係について相関分析を行った結果，流出率は５分または10分降雨強度との相関が高いことがわかった。マルチ被覆区では，５分間降雨強度で0.82～0.93, 10分間降雨強度で0.81～0.85と高い相関関係を示した。

iv) 調査後圃場では地表面にクラストが観察された。クラストの形成により浸透能が低減し，地表流出が生じやすくなったことが推察された。

v）φ-index法を個々のハイドログラフに適用したところ，良好な結果を得た。その結果を受けてφの長期的な変化を考慮できる数理モデルを作成した。

vi）モデルを用いて，営農管理の違いによる水収支特性を検討した。その結果，圃場試験期間の流出率が，裸地圃場で1～19%，マルチ被覆区で45%と，農地地表面の管理によって流出率に大きな差が生じることがわかった。調査地における１年間の水収支では，地表流出高が70mm～1140mm，地下水涵養量が，890～1650mmとなり，農家の営農管理によって，農地の水収支特性が大きく異なることが示唆された。

vii）地表面の浸透能がマルチや鎮圧などの要因により抑制的に管理されている圃場で，営農管理上の対策によって地下水涵養量が増加する余地が高いことが明らかになった。

## 参考文献


1）ASCE(1949): *Hydrology Handbook*, 45
2）坂西研二・澁谷勤治郎(1986):可変勾配ライシメータによるローム土およびマサ土の流出・侵食試験，農土試技報，170(WM-7), 1-13
3）坂西研二(1997):裸地斜面におけるクラストの形成

とその侵食への影響に関する研究，農業環境技術研究所報告，第14号，49-95
4）池田健一郎・後藤忍(1989):傾斜畑，ポリマルチ栽培畑等の土壌侵食防止技術，土肥誌60(5), 466-469
5）石原暁・花野義雄・山本真也(1996):傾斜畑地における水移動メカニズムの解明，農林業における水保全・管理機能の高度化に関する総合研究，農林水産技術会議事務局，研究成果308，57-58
6）金子良(1978):　都市化進行流域における浸透域，貯留域の役割，農土誌46(2)，64-66
7）角屋睦(1981)：流出解析手法（その15・最終講），農土誌49(6)，59-64
8）久保田富次郎・増本隆夫・吉田武郎・田中正一・古江広治（2005）：地表面管理の違いが農地水文特性に及ぼす影響，応用水文，18，57-66
9）西村拓・中野政詩・宮崎毅(1990)：室内人工降雨装置による土壌クラストの形成と侵食の関連性，農土論集，146, 101-107
10）西村拓・中野政詩・宮崎毅(1993)：クラスト形成土層における水の定常浸透と層序特性について，農土論集，167，29-35
11）農林水産省食品流通局野菜振興課編(2000):園芸用ガラス室ハウス等の設置状況, (社)日本施設園芸協会発行
12）翁長謙良・呉屋昭・松村輝久(1991):沖縄県北部赤黄色土の土壌侵食の評価と対策，土壌の物理性63, 19-34
13）T,Miyazaki(1993): *Water flow in soils*, 144-146
14）Wischmeier W H, D D Smith(1958): Rainfall energy and its relationship to soil losses., *Transactions of the American Geophysical Union* 39, 285-291
15）山本博・遅澤省子・石原暁・花野義雄(1995)：四国の急傾斜畑地におけるマルチングの土壌侵食防止効果(1995)，土壌の物理性，71, 41-46
16）四方田穆・奥谷順彦(1988):開発農地の流出特性一表面流モデルによる縦畦の影響の検討一，農土誌56(4), 39-44
17）B. Yu, S. Sombatpanit, C.W. Rose, C.A.A. Ciesiolka, K.J. Coughlan (2000): Characteristics and modeling on runoff hydrographs for different tillage treatments, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1763-1770

# Influence on Water Balance of Farming Management in Upland Field

## - A study for plots without vegetation -

KUBOTA Tomijiro, MASUMOTO Takao, YOSHIDA Takeo, TANAKA Shoichi, FURUE Koji

## Summary

It is necessary to study a way for fostering an environmentally sound water cycle while actualizing problems of a decrease in the streamflow and the dryness of spring water, etc. The number of cases which are quantitatively evaluated is small although it had been pointed out since before that are hydrological characteristics of farmland like the surface runoff rate and the infiltration capacity etc. are changed by the increase of utilization rate of plastic mulch or green houses in the farmlands. Then, a field experiment was conducted to evaluate the influence on hydrological characteristics by ground surface management in the farmland. As a result, using plastic mulch causes the rise of runoff ratio up to 45% while the ratio by the differences of plowing was the range of 1% to 19%.

Keywords : surface runoff, farmland hydrology, φ-index, farming management, plastic mulch, hydrologic cycle

Appendix I

Table Runoff coefficient and factors

| Event No. | DFS | Date | Rainfall | Maximum rainfall intensity | | | Rainfall duration | Average rainfall intensity | Σ E | Sd | TI | Runoff coefficient | | | | | Remarks |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 1h | 10min. | 5min. | | | | | | Bc | Bd | Bp | Ms | Mc | |
| | (day) | | (mm) | (mm/h) | (mm/h) | (mm/h) | (min.) | (mm/h) | ($kJ/m^2$) | (%) | (min.) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | |
| 1 | 21 | 6/19 7:00 | 11.0 | 2.6 | 5.4 | — | 600 | 1.1 | 3.62 | 40 | 10 | 0.0 | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 2 | 21 | 6/19 18:50 | 2.3 | 1.3 | 3.0 | — | 230 | 0.6 | 3.76 | 56 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 3 | 22 | 6/20 3:20 | 1.3 | 0.5 | 1.8 | — | 230 | 0.3 | 3.79 | 57 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 4 | 22 | 6/20 18:00 | 38.9 | 16.9 | 25.2 | — | 490 | 4.8 | 3.80 | 53 | ↑ | 0.9 | — | 4.0 | 23.3 | 7.5 | TY6 |
| 5 | 25 | 6/23 1:40 | 13.9 | 5.2 | 6.6 | — | 310 | 2.7 | 4.56 | 68 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 6 | 26 | 6/24 4:40 | 36.9 | 6.4 | 14.4 | — | 540 | 4.1 | 4.79 | 83 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 8.2 | 0.3 | |
| 7 | 28 | 6/26 3:30 | 4.8 | 2.4 | 12.6 | — | 130 | 2.2 | 5.47 | 80 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 3.2 | 0.8 | |
| 8 | 36 | 7/4 15:30 | 26.9 | 21.2 | 52.8 | — | 310 | 5.2 | 5.57 | 42 | ↑ | 0.1 | — | 12.7 | 52.2 | 52.9 | |
| 9 | 36 | 7/4 21:40 | 1.8 | 1.0 | 4.2 | — | 70 | 1.5 | 6.20 | 91 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 10 | 41 | 7/9 10:00 | 9.9 | 9.9 | 22.2 | — | 60 | 9.9 | 6.25 | 46 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 17.1 | 6.0 | |
| 11 | 42 | 7/10 1:30 | 1.3 | 1.3 | 5.4 | — | 20 | 3.9 | 6.46 | 55 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 12 | 42 | 7/10 3:10 | 40.7 | 19.7 | 48.6 | — | 330 | 7.4 | 6.48 | 58 | ↑ | 9.7 | — | 30.4 | 75.0 | 67.8 | |
| 13 | 54 | 7/22 17:30 | 4.2 | 4.0 | 7.8 | — | 140 | 1.8 | 7.48 | 40 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 14 | 58 | 7/26 4:00 | 13.2 | 8.8 | 27.6 | — | 180 | 4.4 | 7.56 | 39 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 1.1 | 0.0 | |
| 15 | 65 | 8/2 4:20 | 1.0 | 0.6 | 1.8 | — | 130 | 0.5 | 7.83 | 39 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 16 | 65 | 8/2 16:40 | 2.6 | 2.2 | 3.6 | — | 100 | 1.6 | 7.84 | 39 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 17 | 67 | 8/4 1:20 | 8.3 | 2.8 | 4.2 | — | 300 | 1.7 | 7.88 | 39 | ↑ | 0.0 | — | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 18 | 69 | 8/6 5:25 | 5.9 | 4.4 | 23.4 | 26.4 | 90 | 3.9 | 7.99 | 39 | 5 (10 for Bd) | 0.0 | — | — | 0.0 | — | |
| 19 | 69 | 8/6 10:05 | 34.0 | 32.4 | 64.2 | 68.4 | 135 | 15.1 | 8.12 | 42 | | 0.0 | — | — | 59.2 | — | |
| 20 | 78 | 8/15 16:15 | 9.1 | 9.1 | 26.4 | 31.2 | 40 | 13.7 | 9.03 | 39 | | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.7 | — | |
| 21 | 79 | 8/16 23:55 | 4.7 | 4.5 | 14.4 | 16.8 | 75 | 3.8 | 9.25 | 41 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | |
| 22 | 80 | 8/17 5:55 | 12.9 | 12.6 | 37.2 | 66.0 | 85 | 9.1 | 9.35 | 44 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 55.4 | — | |
| 23 | 80 | 8/17 9:50 | 2.3 | 2.0 | 7.2 | 8.4 | 75 | 1.8 | 9.69 | 71 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | — | |
| 24 | 80 | 8/17 18:40 | 5.1 | 2.4 | 6.6 | 7.2 | 390 | 0.8 | 9.73 | 63 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | |
| 25 | 81 | 8/18 7:50 | 2.4 | 2.1 | 4.2 | 6.0 | 75 | 1.9 | 9.81 | 68 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | |
| 26 | 81 | 8/18 12:00 | 2.6 | 2.6 | 6.0 | 9.6 | 50 | 3.1 | 9.84 | 70 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | |
| 27 | 81 | 8/18 13:50 | 10.6 | 9.2 | 42.6 | 78.0 | 45 | 14.1 | 9.90 | 74 | ↑ | 3.6 | 0.2 | 4.6 | 51.8 | — | |
| 28 | 81 | 8/18 18:15 | 4.5 | 1.4 | 3.0 | 6.0 | 295 | 0.9 | 10.17 | 86 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.9 | — | |
| 29 | 83 | 8/20 12:20 | 1.5 | 1.5 | 6.0 | 7.2 | 15 | 6.0 | 10.24 | 62 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | |
| 30 | 84 | 8/21 12:30 | 24.1 | 16.5 | 62.4 | 78.0 | 70 | 20.7 | 10.27 | 59 | ↑ | 6.2 | 0.9 | 10.6 | 47.6 | — | |
| 31 | 84 | 8/21 15:55 | 22.7 | 22.6 | 54.6 | 66.0 | 60 | 22.7 | 10.80 | 93 | ↑ | 2.3 | 0.4 | 11.4 | 84.5 | — | |
| 32 | 85 | 8/22 19:45 | 12.9 | 4.7 | 25.2 | 28.8 | 160 | 4.8 | 11.49 | 64 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 18.3 | — | |
| 33 | 86 | 8/23 0:00 | 12.0 | 11.9 | 38.4 | 55.2 | 65 | 11.1 | 11.77 | 91 | ↑ | 3.9 | 0.2 | 13.4 | 56.7 | — | |
| 34 | 91 | 8/28 11:10 | 1.0 | 0.9 | 4.8 | 8.4 | 70 | 0.9 | 12.07 | 47 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | |
| 35 | 92 | 8/29 9:00 | 8.9 | 4.4 | 10.8 | 20.4 | 315 | 1.7 | 12.09 | 47 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | |
| 36 | 92 | 8/29 15:50 | 313.1 | 38.8 | 54.0 | 56.4 | 1590 | 11.8 | 12.25 | 62 | ↑ | 3.1 | 1.9 | 5.2 | — | — | TY16 |
| 37 | 96 | 9/2 4:55 | 8.9 | 4.9 | 10.8 | 14.4 | 375 | 1.4 | 19.68 | 61 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | — | |
| 38 | 99 | 9/5 6:40 | 2.1 | 2.0 | 8.4 | 14.4 | 75 | 1.7 | 19.84 | 58 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | — | |
| 39 | 99 | 9/5 11:55 | 1.0 | 0.8 | 3.6 | 4.8 | 30 | 2.0 | 19.88 | 61 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | — | |
| 40 | 99 | 9/5 14:55 | 1.5 | 1.0 | 6.0 | 12.0 | 15 | 6.0 | 19.90 | 62 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | — | |
| 41 | 100 | 9/6 0:00 | 145.5 | 13.9 | 42.6 | 49.2 | 2355 | 3.7 | 19.93 | 65 | ↑ | 5.6 | 4.7 | 0.6 | — | — | TY18 |
| 42 | 103 | 9/9 20:05 | 3.6 | 3.5 | 19.2 | 28.8 | 65 | 3.3 | 22.71 | 62 | 5(for all) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 16.9 | 10.5 | |
| 43 | 104 | 9/10 20:25 | 1.3 | 1.1 | 4.2 | 7.2 | 65 | 1.2 | 22.80 | 61 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 44 | 105 | 9/11 1:30 | 1.8 | 1.2 | 5.4 | 10.8 | 125 | 0.9 | 22.82 | 65 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 45 | 105 | 9/11 11:50 | 18.8 | 15.8 | 46.8 | 46.8 | 185 | 6.1 | 22.87 | 66 | ↑ | 12.3 | 13.9 | 27.6 | 63.5 | 83.3 | |
| 46 | 105 | 9/11 17:25 | 11.0 | 5.9 | 23.4 | 43.2 | 100 | 6.6 | 23.31 | 97 | ↑ | 11.0 | 14.7 | 13.9 | 47.6 | 77.3 | |
| 47 | 105 | 9/11 22:05 | 12.5 | 2.8 | 15.0 | 19.2 | 625 | 1.2 | 23.57 | 96 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 30.9 | 18.5 | |
| 48 | 106 | 9/12 12:25 | 1.1 | 0.5 | 3.0 | 4.8 | 115 | 0.6 | 23.80 | 85 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 49 | 106 | 9/12 22:25 | 2.2 | 2.2 | 11.4 | 15.6 | 15 | 8.8 | 23.82 | 79 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4.4 | 0.0 | |
| 50 | 107 | 9/13 7:20 | 1.1 | 1.1 | 2.4 | 3.6 | 40 | 1.7 | 23.87 | 81 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 51 | 107 | 9/13 15:10 | 2.1 | 2.1 | 6.6 | 7.2 | 30 | 4.2 | 23.88 | 69 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.7 | 0.0 | |
| 52 | 109 | 9/15 5:35 | 7.1 | 7.0 | 33.0 | 56.4 | 75 | 5.7 | 23.92 | 85 | ↑ | 20.4 | 5.5 | 23.9 | 30.3 | — | |
| 53 | 111 | 9/17 14:05 | 12.1 | 11.5 | 43.2 | 45.6 | 105 | 6.9 | 24.09 | 55 | ↑ | 9.0 | 2.1 | 15.4 | 58.0 | — | |
| 54 | 113 | 9/19 5:30 | 15.3 | 10.9 | 25.2 | 32.4 | 100 | 9.2 | 24.38 | 64 | ↑ | 11.4 | 0.7 | 12.2 | 59.9 | — | |
| 55 | 117 | 9/23 12:10 | 1.4 | 0.9 | 2.4 | 3.6 | 90 | 0.9 | 24.74 | 54 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | |
| 56 | 117 | 9/23 15:15 | 1.2 | 1.1 | 2.4 | 3.6 | 55 | 1.3 | 24.76 | 56 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | |
| 57 | 118 | 9/24 1:25 | 10.7 | 9.5 | 25.2 | 36.0 | 45 | 14.3 | 24.77 | 58 | ↑ | 5.0 | 0.2 | 19.2 | 44.6 | — | |
| 58 | 118 | 9/24 4:10 | 1.0 | 0.9 | 4.2 | 4.8 | 55 | 1.1 | 25.02 | 84 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 9.8 | — | |
| 59 | 118 | 9/24 7:05 | 2.4 | 2.3 | 4.2 | 6.0 | 65 | 2.2 | 25.04 | 84 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.7 | — | |
| 60 | 122 | 9/28 12:10 | 17.1 | 12.9 | 34.8 | 60.0 | 145 | 7.1 | 25.08 | 52 | ↑ | 19.7 | 7.9 | 31.8 | 54.4 | — | |

— ：missing data, ↑ ：same as above

DFS: Days from start of the experiment, Σ E: Cumulative rainfall kinetic energy just before the event (from 29th May),

Sd: Saturation degree just before the event, TI: Observation time interval of water level gauge, TY: Typhoon

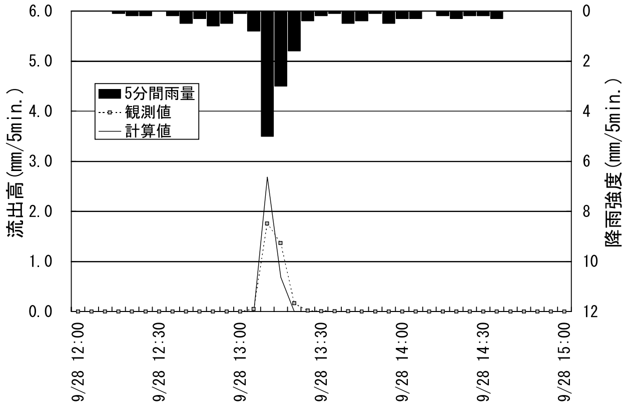
Table Runoff coefficient and factors(continued)

| Event No. | DFS | Date | Rainfall | Maximum rainfall intensity | | | Rainfall duration | Average rainfall intensity | ΣE | Sd | TI | Runoff coefficient | | | | | Remarks |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 1h | 10min. | 5min. | | | | | | Bc | Bd | Bp | Ms | Mc | |
| | (day) | | (mm) | (mm/h) | (mm/h) | (mm/h) | (min.) | (mm/h) | (kJ/m$^2$) | (%) | (min.) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | |
| 61 | 122 | 9/28 15:40 | 4.0 | 3.8 | 18.0 | 20.4 | 50 | 4.8 | 25.46 | 79 | 5 | 0.9 | 0.0 | 10.9 | 61.2 | ― | |
| 62 | 122 | 9/28 21:20 | 8.7 | 6.6 | 34.8 | 48.0 | 160 | 3.3 | 25.55 | 84 | ↑ | 42.3 | 23.0 | 58.4 | 52.6 | ― | |
| 63 | 123 | 9/29 2:50 | 46.8 | 12.9 | 22.2 | 24.0 | 500 | 5.6 | 25.74 | 91 | ↑ | 5.7 | 0.5 | 37.4 | 44.8 | ― | TY21 |
| 64 | 128 | 10/4 15:40 | 6.1 | 5.5 | 18.6 | 19.2 | 125 | 2.9 | 26.69 | 54 | ↑ | 0.5 | 0.0 | 18.7 | ― | ― | |
| 65 | 128 | 10/4 19:40 | 2.0 | 1.2 | 3.6 | 4.8 | 100 | 1.2 | 26.82 | 64 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | ― | ― | |
| 66 | 128 | 10/4 23:30 | 22.8 | 8.1 | 15.0 | 15.6 | 465 | 2.9 | 26.85 | 68 | ↑ | 4.2 | 0.0 | 19.7 | ― | ― | |
| 67 | 132 | 10/8 2:05 | 3.8 | 2.3 | 5.4 | 6.0 | 270 | 0.8 | 27.25 | 63 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | ― | ― | |
| 68 | 132 | 10/8 16:25 | 3.3 | 2.6 | 9.0 | 14.4 | 180 | 1.1 | 27.30 | 69 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 5.3 | ― | ― | |
| 69 | 142 | 10/18 13:20 | 2.0 | 1.3 | 3.6 | 4.8 | 105 | 1.1 | 27.37 | 43 | ↑ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | ― | ― | |
| 70 | 142 | 10/18 17:15 | 111.9 | 16.5 | 36.6 | 40.8 | 1355 | 5.0 | 27.40 | 44 | ↑ | 11.1 | 1.8 | 35.5 | ― | ― | TY23 |
| 71 | 143 | 10/19 16:55 | 172.2 | 21.2 | 32.4 | 54.0 | 985 | 10.5 | 29.68 | 100 | ↑ | 14.7 | 2.8 | 47.0 | ― | ― | TY23 |
| 72 | 149 | 10/25 23:50 | 85.0 | 18.7 | 46.2 | 57.6 | 1080 | 4.7 | 33.56 | 54 | ↑ | 17.3 | 8.4 | 54.4 | ― | ― | TY24 |
| 73 | 153 | 10/29 6:30 | 27.4 | 7.2 | 10.8 | 13.2 | 705 | 2.3 | 35.33 | 68 | ↑ | 0.5 | 0.0 | 17.6 | ― | ― | |
| 74 | 153 | 10/29 19:40 | 9.7 | 1.8 | 14.4 | 20.4 | 185 | 3.1 | 35.79 | 100 | ↑ | 2.2 | 0.0 | 25.5 | ― | ― | |
| 75 | 154 | 10/30 4:40 | 3.1 | 1.8 | 6.0 | 7.2 | 130 | 1.4 | 35.97 | 95 | ↑ | 0.2 | 0.0 | 3.4 | ― | ― | |
| 76 | 155 | 10/31 4:30 | 21.2 | 13.4 | 37.8 | 52.8 | 195 | 6.5 | 36.02 | 82 | ↑ | 32.2 | 6.9 | 45.2 | ― | ― | |

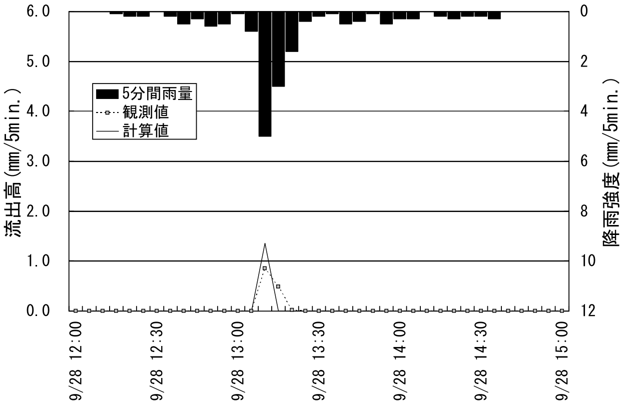
―：missing data, ↑：same as above
DFS: Days from start of the experiment, ΣE: Cumulative rainfall kinetic energy just before the event (from 29th May),
Sd: Saturation degree just before the event, TI: Observation time interval of water level gauge, TY: Typhoon

## Appendix II φ-index法により得られた流出ハイドログラフと観測値

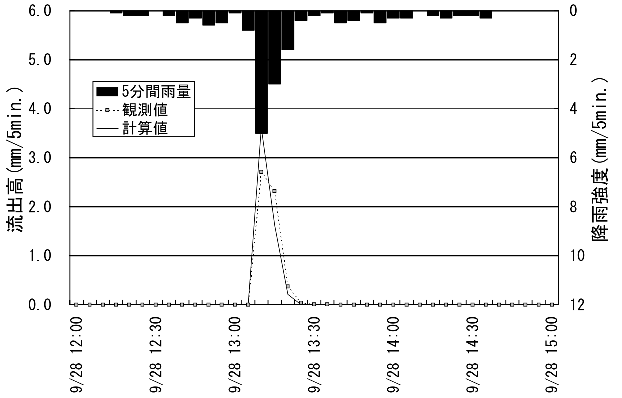
Runoff hydrograph obtained by φ-index method and observation



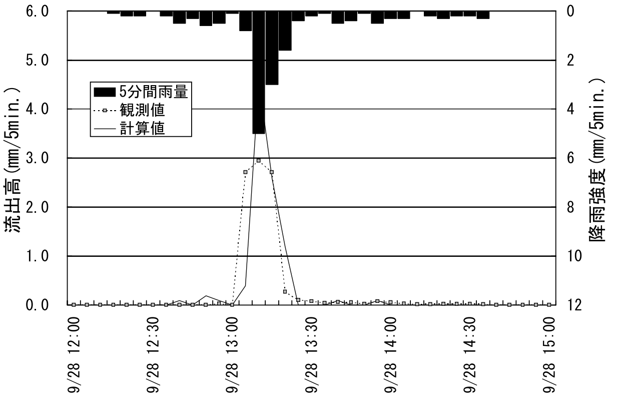

(a) Bc φ=2.31




(b) Bd φ=3.64

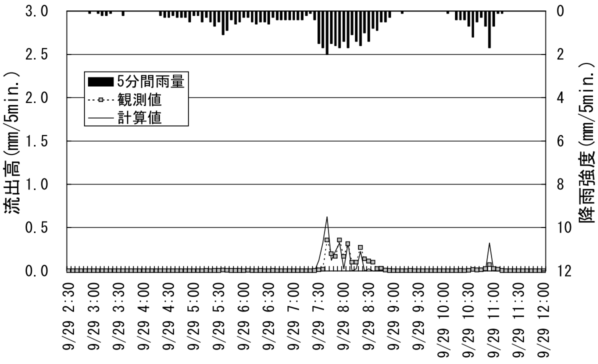



(c) Bp φ=1.39

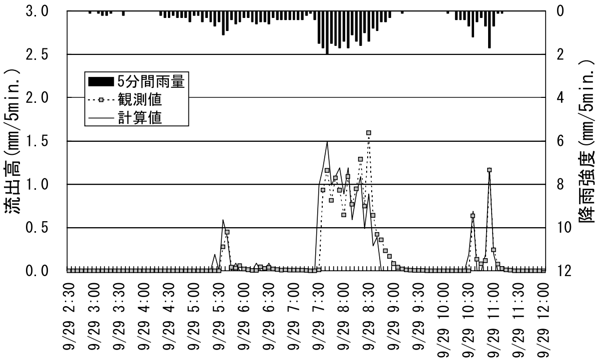



(d) Ms φ=0.41

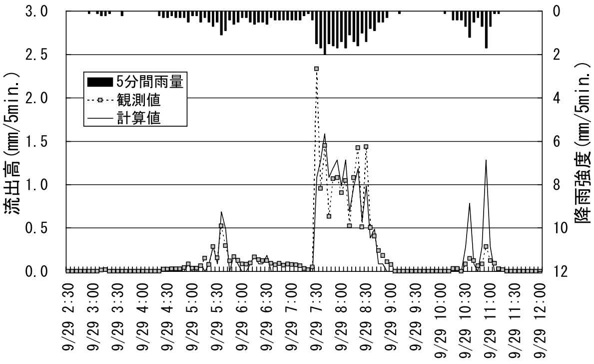
Fig.a 小規模出水に対するハイドログラフへの適用例 (event No.60, 総降水量=17.1mm)
A case of small-scale flood (event No.60, R=17.1mm)




(a) Bc $\phi$=1.38



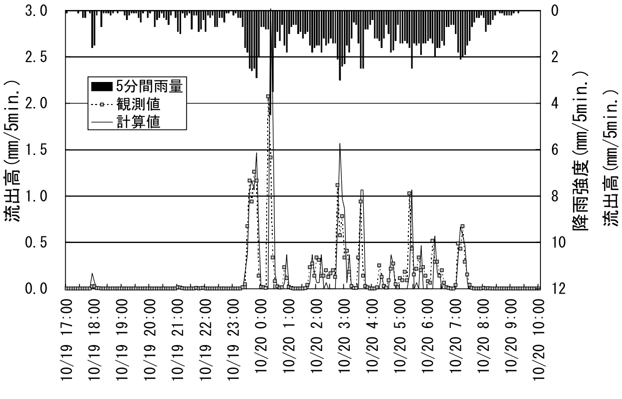

(b) Bp $\phi$=0.51



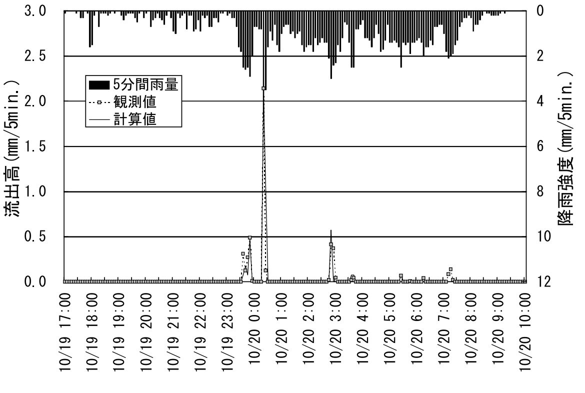

(c) Ms $\phi$=0.41

A case of medium-scale flood (event No.63, R= 46.8mm)

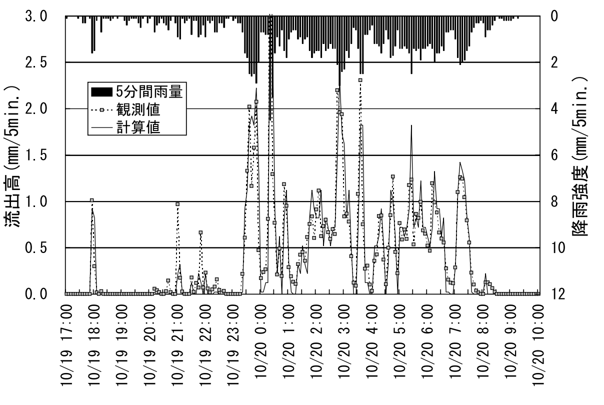
Fig.b 中規模出水に対するハイドログラフへの適用例 (event No.63, 総降水量=46.8mm)




(a) Bc $\phi$=1.43




(b) Bd $\phi$=2.43




(c) Bp $\phi$=0.68

A case of large-scale flood (event No.71, R=172.2mm)

Fig.c 大規模出水に対するハイドログラフへの適用例 (event No.71, 総降水量=172.2mm)