

# 水田の水収支

—とくに、水田内における地表残留水量について—

丸山利輔\*

Water Balance of Paddy Field

—Especially, on Residual Water for Surface Runoff in Paddy Field—

Toshisuke MARUYAMA

Faculty of Agriculture, Kyoto University

## I まえがき

水田水収支の研究という場合、かなり広域の水田地帯における水の時間的・空間的分布を研究対象に選ぶのが普通であろう。しかし、広域における水田地帯の水収支はきわめて大きな研究分野であり、これをとりまとめて研究的な話題を提供することは問題点の羅列に終り、十分実りのある討論を期待できないように思われる。

そこで、大変勝手ではあるが、一枚の水田を対象にし水収支を考えてみることにする(第1図)。水田への流入水量は地表取水量、地下浸水量および降水量からなり、水田からの流出水量は地表流出水量、地下流出水量および蒸発散量からなる。水田の水環境はこの流入・流出水量の時間的・空間的変動によって支配され、これが土壌の物理性に反映される。土壌の物理性はまたこの水循環に反映し、水と土壌とが相互に依存しながら土壌の物理性を規定していく。

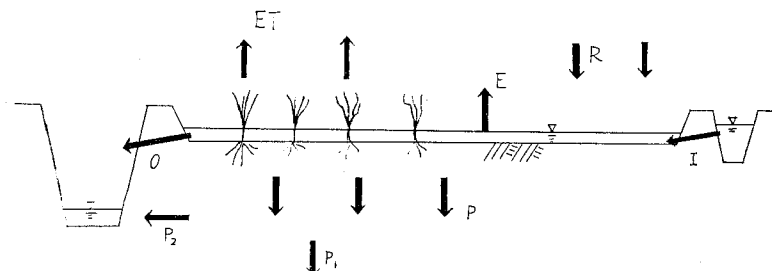
ところで、これらの水収支各項については農業気象、農業土木などそれぞれの専門分野で研究が進められてお

り、その研究内容も膨大なものになる。したがって、水収支各項を順次検討する方法も討論を散漫にするおそれがある。そこで、流出各項への水の配分を定める地表残留水量にしばって、最近の研究成果を報告し、ご批判を受けたい。

地表残留水量とは、田面の起伏、田面勾配などのために落水口から地表水としての排水が不可能な水量をさす。これが多量であると蒸発散や地下浸透によって排水しなければならない水が多く、少ないとこの反対となり、水田の水収支においては水の流出先を規定する、いわば交通整理の役割を果しているものといえる。地表残留水量は、このような重要な内容を持つものでありながら、従来あまり研究されていない。

本報告はこの点に注目し、彦根市稲枝町愛西地区の水田を例にして、水田起伏の統計的性格を明らかにし、ついで、その統計的性格を用いて水田起伏を模擬発生させ、実測では到底不可能な多数の水田について地表残留水の性格を検討したものである。

なお、われわれの分野では点の物理量の集積によって、ホ場全体というような面の物理量を推定しなければならないことが多いが、本報告で示す方法は従来の単なる平均や分散のみから面の物理性を推定する方法と異って各点の情報が支配する大きさも考慮したものであり、この観点から大いに参考にして戴けるものと思っている。



- |        |            |           |
|--------|------------|-----------|
| R 降水量  | P 浸透量      | $P_2$ 排水路 |
| ET 蒸散量 | I 取水量      | 暗キへの浸出量   |
| E 蒸発量  | $P_1$ 深部浸透 |           |

第1図 水田の水収支模式図

## II 田面起伏の統計的性格

### 1 試験田の概要および試験方法

i) 試験田の概要は下記のとお

場所：彦根市稲枝町愛西土地改良区  
 区画 30m×100m, ホ場整備済  
 ホ場整備年次 昭和40年～昭和47年  
 調査水田数 ホ場整備施工年次ごとに1～9枚,  
 合計33枚

地形・土壌 平坦, 約1/3000, 埴土～埴壤土  
 ii) 試験方法 各試験田の長辺方向に2測線, 短辺方向に2測線を選定して1mピッチで標高を測定。測定時期昭和48年11月。

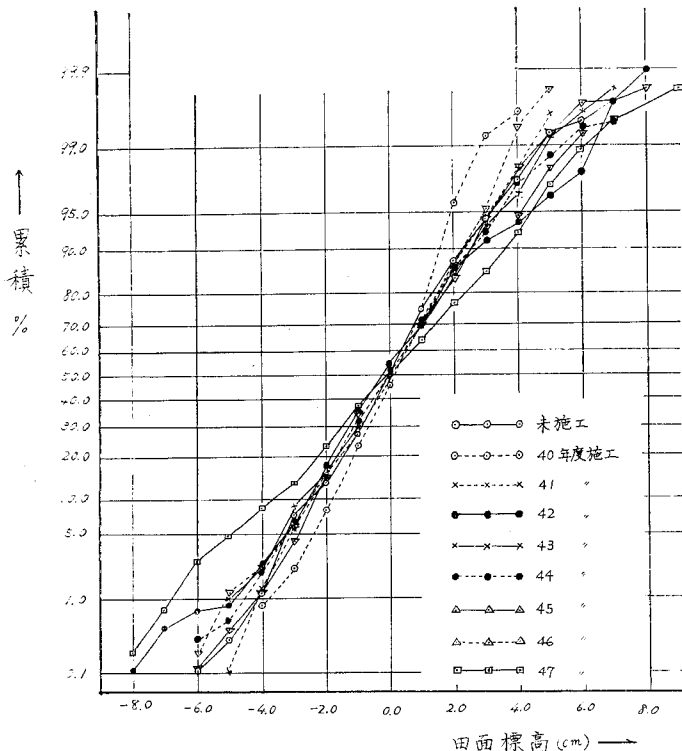
2 指標とする統計量

田面排水の難易は田面起伏の大小とその連続性によって支配される。そこで指標とする統計量として, 田面標高の平均値のまわりの頻度分布, 標準偏差および自己相関係数をとり上げる。頻度分布, 標準偏差についてはとくに説明を要しないが, 自己相関係数はつぎのように表わされる。

$$R(\tau) = \frac{1}{2XS^2} \int_{-X}^X H(x) \cdot H(x+\tau) dx \quad (1)$$

ここに,  $R(\tau)$ : 自己相関係数  
 $H(x)$  および  $H(x+\tau)$ :  $x$  および  $x+\tau$  点の田面標高  
 $S^2$ : 分散

(1)式をみれば明らかなように自己相関係数は $\tau$ だけ離



第2図 田面標高頻度分布

れた2点の相関を表わす統計的指標で, これが1に近ければ2点間の相関が大きいことを示し, 反対に0に近ければ相関が少ないことを示す。

3 田面起伏の統計的性格

i) 頻度分布 平均田面標高を規準にして, ホ場整備施工年次ごとの頻度分布を第2図に示す。この図から施工年次によって頻度分布に大差がなく, ほぼ正規分布に近い形を示すが, 頻度分布の積算値が90%をこすとS字形となり正規分布からはずれて, まれに高所が表われることを示した。

ii) 標準偏差 標準偏差をホ場整備工事の施工年次ごとに整理した(第1表)。ホ場整備一作後の昭和47年度

第1表 標準偏差(σ)

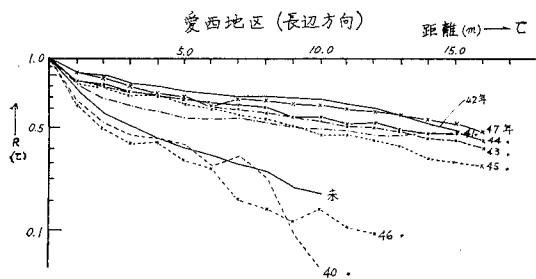
施工年次(昭和年)	未施工	40	41	42	43	44	45	46	47
σ(cm)	1.72	1.40	1.89	2.23	2.04	1.97	1.92	1.88	2.69
調査水田数	9	1	2	3	4	4	4	2	4

施工区は他の水田よりも大きな値を示したが, 他の値には大きな差がみられなかった。これは, ホ場整備によって生じた大きな田面起伏は, 一作後では消えないが, 二作以後では大体消えることを示すものである。とくに, 二作以後ではホ場整備の行なわれていない未施工区との間にも大きな差はみられない。

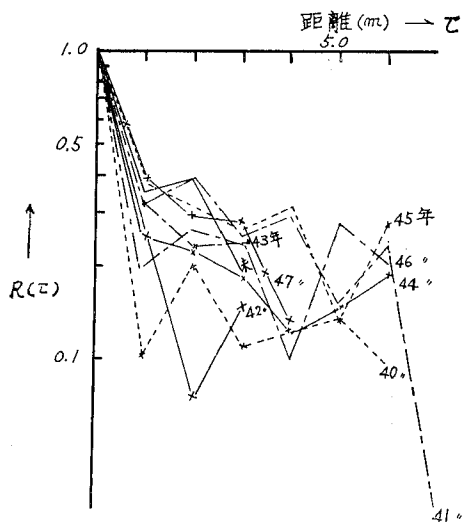
iii) 自己相関係数 ホ場整備の施工年次ごとの自己相関係数の平均値を示す(第3図)。これから長辺方向の自己相関係数はかなり遠方まで大きな値を示すのに対し, 短辺方向の値は少し離れると急速に小さくなること, 長短辺方向とも, 特別な卓越波長がみられず,  $\tau$ の増加に従って, 指数関数的に減少し, 単純マルコフに近い性質を持っていること, ホ場整備後の経過年数によって自己相関係数に大きな差がないことがわかる。

III 田面起伏の模擬発生

水田における地表残留水量の問題を検討するためには, 多数の水田の田面起伏を知らなければならない。しかし, この測量は労力的にはほとんど不可能である。例えば筆者等が実施した33枚の水田における長辺方向2測線, 短辺方向2測線1m間隔の田面標高の測定でも, 長辺100m, 短辺30mの水田では約33×(100+30)×2=8,580点となり, 測量には延



第3図(1) 自己相関関数



第3図(2) 愛西地区(短辺方向)

20人を要している。1枚の水田の田面状況を1mメッシュで知ろうとすれば、 $100 \times 30 = 3,000$ 点となり、各種の条件下における残留水量を統計的に検討しようとするれば、後述するように少なくとも1,400枚程度の田面状況が必要となる。そこで、電子計算機内でこれを模擬発生させることにした。

田面起伏の模擬発生を行なった例はないが、いままでに研究された模擬発生理論を用いると、田面起伏の頻度分布は次のように求めることができる。以下簡単のために、結論のみ述べる。

田面起伏を発生させるには、まず一様乱数 $Z$ と正規乱数 $\epsilon$ との関係

$$Z = \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{s^2}{2}} ds \quad (2)$$

から $\epsilon$ を求めて、つぎの(3)式に代入して $Z_{x,y}$ を求める。

$$Z_{x,y} = \rho_x Z_{x-1,y} + \rho_y Z_{x,y-1} + \epsilon \sqrt{1 - \rho_x^2 - \rho_y^2} \quad (3)^*$$

この $Z_{x,y}$ は $x, y$ 点における基準化された高さであり、隣接する $Z_{x-1,y}$ および $Z_{x,y-1}$ 点と $\rho_x$ および $\rho_y$ なる相関係数を持った値である。

つぎに、

$$P_{ea} = \int e^{-\frac{Z_{xy}^2}{2}} \cdot dZ_{xy} \quad (4)$$

を用いて $Z_{xy}$ を一様乱数 $Pea$ に変換し、さらに(5)式

$$P_{ea} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_h^{\infty} f(h) dh \quad (5)$$

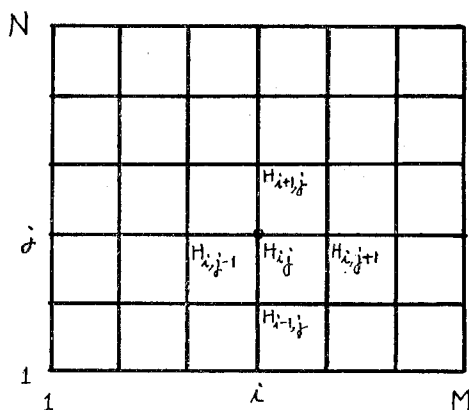
により、田面標高 $h$ に変換する。ただし、 $f(h)$ の関数形は実測により求めた田面標高の頻度分布を用いる。

#### IV 田面残留水の計算法

水田において落水口を開いた場合、地表排水は普通2~3時間で完了する。これに対し、蒸発散量や地下浸透などによる田面残留水の排除には数日を要する。したがって、ホ場排水の観点から地表残留水の総量が問題であるか、その時間的経過はさしあたり重要ではない。そこで、本論では地表排水の完了した時点での地表残留水量を問題にすることとする。

今、第4図のように水田を $i=1 \dots N, j=1 \dots M$ なるメッシュで区切り $i, j$ 点の水位を $H_{ij}$ 、田面標高を $GH_{ij}$ 、 $ij$ 点とする。

すると、 $i, j$ 点の水位によって $i+1, j$ 点の水位は次のように表わせる。



第4図 残留水計算記号

\* 基準化標高 $Z_{xy}$ は隣接点 $Z_{x-1,y}$ および $Z_{x,y-1}$ によって定まる部分と変動部分 $\epsilon$ との和で表わされる。

$$Z_{x,y} = \rho_x \cdot Z_{x-1,y} + \rho_y \cdot Z_{x,y-1} + \epsilon'$$

上式の左辺と右辺の2乗和の期待値は等しくなければならないことを利用すると

$$\epsilon' = \epsilon \sqrt{1 - \rho_x^2 - \rho_y^2}$$

となり(3)式が得られる。

$$\left. \begin{aligned}
 &1) \ H_{ij} < H_{i+1,j} \text{ の場合 } H_{i+1,j} = H_{ij} \\
 &\text{ただし } H_{i+1,j} < GH_{i+1,j} \text{ ならば } H_{i+1,j} \\
 &\quad = GH_{i+1,j} \\
 &H_{ij} \geq H_{i+1,j} \text{ の場合 } H_{i+1,j} = H_{i+1,j}
 \end{aligned} \right\} (6)$$

以下、 $H_{ij}$  に隣接する  $H_{i,j+1}$ ,  $H_{i,j-1}$ ,  $H_{i-1,j}$  についても同じ。

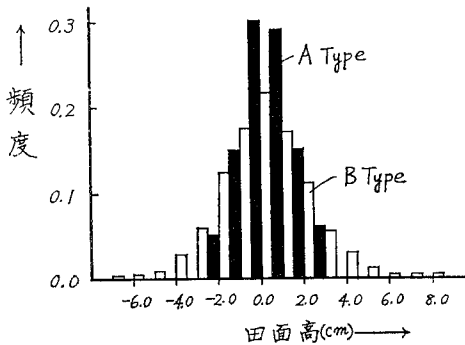
田面残留水量を求めるために、まず一定の水量  $D$  を全田面に与え、次に落水口の水位をその点の田面標高に等しいとして(6)式を水田の全交点に適用した。

また、残留率  $R$  は次式によって求めた。

$$R = \frac{1}{D \cdot N \cdot M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (H_{ij} - GH_{ij}) \quad (7)$$

### V 各種水場排水方式と地表残留水量

この問題を具体的に検討するにあたって、比較的田面の均平が図られている滋賀県蒲生郡安土町の小中之湖干拓地内で実測した田面標高分布と、前述の愛西地区内で実測した田面標高分布(第5図)を用いる。前者は15a区画の水田から得られたものでA-Typeと称し、後者は30a区画の水田から得られたものでB-Typeと称する。A-Typeは平均田面を中心として-3.0cm~3.0cmの間に分布し、B-Typeは-7.0cm~+8.0cmに分布している。なおこの数値実験は、原則として30m×100mの水田を



第5図 田面標高分布(平均田面基準)

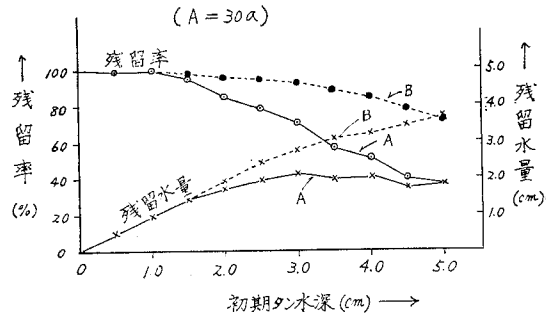
1.0mメッシュで区切り、短辺の中央に落水口があるものとして20枚の水田を対象に実施したものである。

#### 1 降水量と地表残留水の関係(第6図)

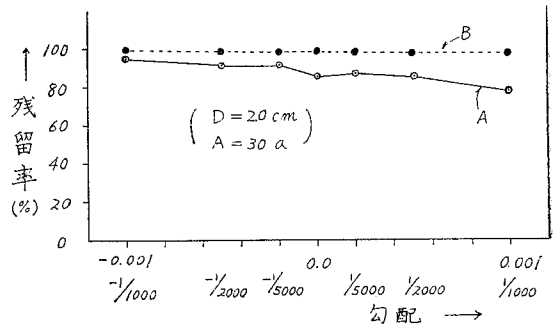
この図から明らかなようにA-Typeの場合は雨量が2.0cmより増加すると残留率が減少するのに対し、B-Typeでは3.0cmを越した頃からかまんに減少する。残留水量はA-Typeの場合は2.0cm附近が上限になるのに対し、B-Typeの場合は5.0cmでもまだ上限に至らないことがわかる。

#### 2 田面勾配と地表残留水の関係(第7図)

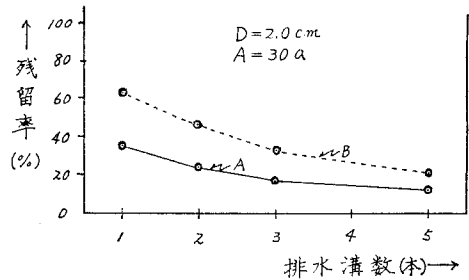
本例は初期タン水深  $D=2.0$ m の場合であるがこの図



第6図 降水量と地表残留水の関係(A=30a)



第7図 田面勾配と地表残留水の関係

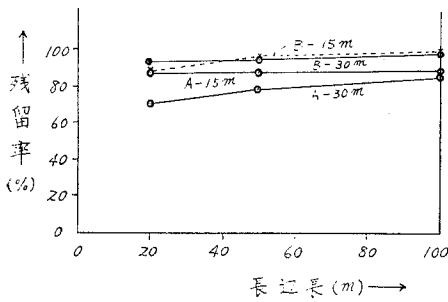


第8図 地表排水溝と地表残留水の関係

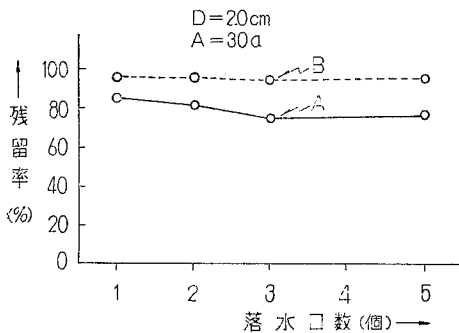
から明らかなように、A-Type B-Typeとも田面勾配をつけても残留率はあまり減少しない。しかし、均平度の進んだA-Typeで1/1000程度の勾配をつければ、残留率が若干減少することが期待できる。この図から判断する限り、現在広く行なわれている水場整備時に1/1000程度の田面勾配をつけることは、地表排水の上からはあまり効果的でないと推察される。しかし、初期タン水量が大きいほど、均平化が進んでいるほど残留率は小さくなり、勾配の効果が大きくなる。

#### 3 地表排水溝と地表残留水の関係(第8図)

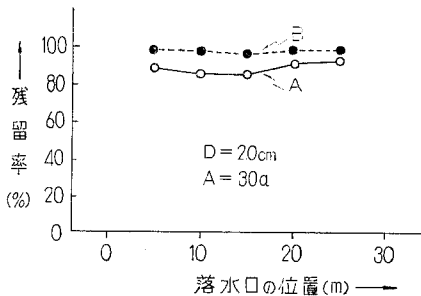
この図は長辺に平行な地表排水溝を1~5本設けた場合の残留率の変化を調べたものである。地表排水溝1本とは水田の短辺に直角に短辺の中央、すなわち15m地点に排水溝を設けた場合であり、2本とは10mおよび20m



第9図 長辺長と地表残留水の関係 ( $D=2.0\text{cm}$ )



第10図 落水口数と地表残留水の関係



第11図 落水口数の位置と地表残留水の関係

地点に同様の排水溝を設けた場合である。また、3本とは5 m, 15 m, 25 m 点に、5本とは5, 10, 15, 20, 25 m 点に同様の排水溝を設けた場合である。この図から残留率を減少させるためには排水溝が非常に有利であること、古くから農民技術としてこの種の排水工法が行なわれている意義がわかる。

4 長辺長と地表残留水の関係 (第9図)

この図は短辺(排水路沿いの長さ)30 m および短辺15 m の水田に対し、長辺を100 m, 50 m, 20 m と変化させた場合の残留率を調べたものである。初期タン水量が2.0 cm の場合に A-Type では若干の効果が期待できるのに対し、B-Type ではあまり効果が期待できないことがわかる。長辺長の効果は田面勾配の効果と同様で、初期タン水深が大きいほど、田面の均平が進んでいるほど大

きい。しかし、排水路までの距離を短くしても筆者が予想していたほど残留率は減少しない。

5 落水口の数と地表残留水の関係 (第10図)

落水口の数を1, 2, 3, 5ヶ所と増加させた場合、A-Type では落水口の増加に伴って残留率が若干減少するのに対し、B-Type ではほとんど変化しない。しかし、いずれにしても落水口の数を増加させることはあまり排水上有効な方法ではないと予想される。ただし、排水時間を短くする効果は期待できる。

6 落水口の位置と地表残留水の関係 (第11図)

落水口の位置を短辺に沿って5, 10, 15, 20, 25 m 地点と変化させた場合の残留率はあまり変化しない。しかし、中央に設けた方が若干有利なことが予想される。一般に水田の下流端に落水口を設けている例が多いが、排水路水位と特別の関係のない場合は短辺の中央に設けるのがよいと判断される。

VI あとがき

ホ場の科学と総称されるホ場内でのかんがい排水、農地工学などの分野では面的情報(たとえば、土壌水分、浸透量、地耐力などの土壌物理性、高低などの微地形)が必要なことが非常に多い。このため、従来から数多くの研究が行なわれているが、これを大別すると面情報を直接得ようとする方法と、点情報を線情報、面情報に拡大しようとする方法とがある。前者には最近問題となっている Remote Sensing があるが、これは、ホ場内の情報を直接得るためには質的にもスケールのにもまだ検討の余地が多く、実用には供されていない。したがって、後者の方法が主力となるが、現段階では点情報の平均値、分散を用いて線情報、面情報を推定している程度で、面情報のスケールを推定するまでには至っていない。ところが、土壌水分、地耐力、浸透量、高低などはそのスケールが問題となることが多い。

本論は、このような点情報を面情報に拡大するための問題を、田面残留水の問題を例にとり上げて検討したものであって、単にこの問題のみに適用し得る考え方はないことをとくに記しておきたい。

なお、本研究に基本的役割を果たした田面標高の測定には研究室全員の協力を得た。また、データの整理、検討は本学大学院生田中寿君によった。ここに記して深謝の意を表する。

参考文献

- 1 角屋睦・福島晟・丈達俊夫：日雨量系列の模倣発生と内水排除への適用—山科川下流部の内水(4)—京大防災研究所年報第13号B, P1~11 (1970)
- 2 丸山利輔・富田正彦：転換畑のウネ間残留水について 農業土木学会論文集59号 (1975)