地表排水の促進を目指した水田管理に関するシミュレーション

Simulation Study on Management of Paddy Field in order to Promote the Surface Drainage

鈴木翔* 牧山正男**

SUZUKI Sho* MAKIYAMA Masao**

(*東京農工大学大学院連合農学研究科 **茨城大学農学部)

(*United Graduate School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture and Technology **College of Agriculture, Ibaraki University)

I はじめに

水田の整備および管理を行う際に配慮すべき項目のひとつに、地表排水性の確保・促進が挙げられる。一般に水田からの地表排水は、稲刈り時のコンバイン走行に向けて田面を迅速に乾燥させるために必要である。近年では水田の大区画化が進んできているが、その場合には水田内の各点から排水路までの距離が長くなる傾向にあることから、地表排水性の向上がますます重要になってくる。さらに、水稻直播栽培の落水出芽法のような比較的新しい技術においては、秋期のみでなく春期における地表排水性も必要になる場合がある。

水田からの地表排水性には、田面の均平精度をはじめとするさまざまな事項が関係する^{注1)}。このうち均平精度については、圃場整備基準として「稲作栽培上の制約と施工上、±3.5 cmを目標とする」と記述されている¹⁾。しかしこれが示されて以降、レーザーレベラーの普及により均平整備が容易化、精緻化されてきており²⁾、さらに田面に緩傾斜を付けることの効果についても言及されてきた³⁾。そうしたことから、近未来の圃場整備計画や営農計画の構築に向けて、地表排水性を向上させるような水田管理法について、改めて検討する必要がある。

このような検討には現地調査型の研究が必須ではあるが、水田のさまざまな管理状況を設定した検討にあたってはコンピュータシミュレーションも有効である。これまでに丸山⁴⁾、山路ら⁵⁾、岩渕ら⁶⁾などによって地表排水に関するシミュレーションモデルが提案されてきたが、いずれも水田の管理方法と地表排水性との関係についての多様な議論が行われているわけではない。

以上を背景として、本研究は各種の水田管理方法と地表排水終了後の田面残留水量との関係について、コンピュータシミュレーションによって詳細に検討し、地表排水性の向上に向けた水田管理計画について提案することを目的とする。

II 研究の方法

本研究では、①水田の管理状態を模擬的に発生させ、②そこに湛水を与えた後に落水させ、落水されなかった(湛水が残留した)箇所およびその水深を把握する、③湛水残留箇所や残留水量の評価を行う、という一連の作業をコンピュータ上で行う。

1. 水田およびその管理状態の模擬発生

最初にある模擬的な水田を作成し、続いてそこに地表排水促進のためのさまざまな管理の状態を与える、という手順で行う。

模擬的な水田の作成には、丸山⁴⁾および内田ら⁷⁾の統計学的なモデルを使用する。これは長辺(排水路に垂直; y方向)と短辺(排水路に平行; x方向)の長さを与えた水田をメッシュに区切り、各メッシュに標高を与えることによって、起伏を有する長方形区画の水田を作成するモデルである。各メッシュの標高は、x, yそれぞれの方向への起伏の連続性を示す自己相関係数 ρ_x , ρ_y と、均平精度を意味する標準偏差 σ ^{注2)}をパラメータとして計算する。

メッシュ(X, Y)の標高 $h_{X,Y}$ の計算式を式 1に示す。

$$h_{X,Y} = \rho_x h_{X-1,Y} + \rho_y h_{X,Y-1} - \rho_x \rho_y h_{X-1,Y-1} + \sigma \cdot \varepsilon \sqrt{1 - \rho_x^2 - \rho_y^2} \quad \cdots \text{式 1}$$

ここで模擬的に発生させる水田の平均標高は±0 cmであり、また ε は正規乱数である。乱数を用いるため、この水田の起伏の詳細な傾向は、計算を行うたびに異なる。

そして各メッシュの標高は、短辺の中央部を仮の落水口(以下、水尻)として想定し^{注3)}、その標高が必ず負の値になるように設定した^{注4)}上で、そこを始点として行うことにする。

続いてこの水田に、地表排水を向上させられるような管理の状態を盛り込む。本研究では水尻の増設、田面排

水小溝（以下、明渠）の設置、傾斜の付与による地表排水向上の効果を検討する。それぞれ以下のように与える。

- ・水尻は、排水路側の短辺を等分するように配置する。
 なお、水尻を偶数ヵ所に設ける際には、仮の水尻と想定した短辺中央部を、水尻として用いないことになる。
- ・明渠は、まず発生させたい本数と同じ数だけ水田を短辺に垂直に等分する。そして等分したそれぞれの部分の中央に、長辺と平行に（幅50 cm、深さ5 cm）の明渠を設置する。なお、複数本を設置するときには、水尻から5 mの位置で各明渠を合流させる。
- ・傾斜は、排水路側の短辺が低くなるように、長辺に平行に与える。

以上のようにして長短辺長、均平精度、自己相関係数、均平精度を設定し、明渠などの各種の管理状態を付与して作成した水田を、以下では模擬水田と呼ぶことにする。

2. 模擬水田からの落水

模擬水田の各メッシュに水深を与えた上で、水尻から落水させる。本研究では落水に際して、山路ら⁵⁾による3次元囲い込みモデルを使用することにした。このモデルは、メッシュの標高が高い箇所（凸部）によって水尻からの連続性が断たれた箇所の湛水は、落水されずに池として残るという考え方に基づく合理的なモデルである。各標高ごとに水田を水平にスキャンして、凹部の連続性と、それを断つ凸部とを把握するという方法で行う。

このモデルでは、地表排水が完了した後の湛水残留状況、すなわち湛水が残留しているメッシュの位置およびそれらのメッシュの水深を把握することができる。

3. 残留水量および湛水残留箇所の評価

表 1 基準水田の設定
Table 1 Parameters in this simulation

パラメータ	値
水田面積	100 m×50 m (0.5 ha)
均平精度	±3.5 cm
水尻の位置	1ヵ所（短辺中央）
メッシュ幅	2.5 m×2.5 m
自己相関係数	$\rho_x=0.3$, $\rho_y=0.85$

表 2 比較する模擬水田の設定
Table 2 Parameters to compare

パラメータ	値
面積	長辺を100 mに固定； 短辺：100 m (1 ha) 200 m (2 ha)
均平精度	±3.0～1.0 cm (0.5 cm間隔)
水尻の数	2, 3, 5ヵ所
明渠の本数	1, 3, 5本
傾斜	1/5000, 1/2500 1/2000, 1/1000, 1/500

残留水量の評価

のためには、以下の2つの値を用いることにする。ひとつが平均残留水量（mm）である。模擬水田に残留している水の総量を計算し、それを水田面積で控除して求める。模擬水田の湛水残留状況を1つの数値で表現することから、状況を詳細に掌握することはできないが、模擬水田同士の比較

図 1 模擬水田の例

（左：基準水田，右：左図に傾斜1/2500・明渠3本を付与）

Fig.1 Examples of the simulated paddy fields

は簡便に行える。もうひとつが残留水深ごとのメッシュ割合の分布である。本研究では頻度分布図を使用する。

さらに湛水残留箇所を詳細に比較するときには、等水深線を付した平面図を使用する。

4. 計算条件

具体的なシミュレーションは、以下の流れで行う。

まず、基準とする模擬水田（以下、基準水田）を表 1 の設定で作成する。メッシュのサイズは2.5 m格子とした。なお、ここで自己相関係数をy方向に卓越させたのは、耕起や代かきなどの起伏の連続性に関わる農作業が一般に長辺方向に行われることを想定してである。0.3, 0.85という数値は、いささか古いデータではあるが、丸山⁴⁾を参考にした。

続いて、地表排水の促進を意図したさまざまな条件や管理状態（表 2）を基準水田に付与して、新たな模擬水田を作成する（図 1）。

そしてそれぞれの模擬水田に対して、水深を与えた後に落水させる。その残留水量をまずは平均残留水量と比較し、さらに詳細に見る際には、残留水深の頻度分布図と平面図（等水深線図）とを用いる。

本研究では、それぞれの設定条件ごとに、起伏の傾向が異なる50通りずつの模擬水田を用意し、それらに対してシミュレーションを行う。平均残留水量と残留水深の頻度分布については、50回のシミュレーションの平均を用いて比較検討を行う。平面図は、50回のうち一般的な結果と考えられるものを使用する。また以下の計算では、スキャンは0.1 cm間隔、最初に与える水深は20 mmとし、減水深はないものとして扱う。

III 地表残留水量に関するシミュレーション

1. 水田面積の拡大による地表残留水量の変化

図2に水田面積と平均残留水量との関係を示す。水田の面積を拡大していくほど平均残留水量も増加した。その増加率は、0.5 ha : 1 ha : 2 ha = 1.0 : 1.2 : 1.3であった。

図3に水田面積ごとの残留水深の割合の頻度分布を示す。水田の面積を拡大すると、落水が完了して露出するメッシュの割合は減少し、湛水が残留しているメッシュの割合が増加する。

図2 水田面積と平均残留水量との関係
Fig.2 Relation between the size of paddy field and the mean of remaining water volume

図3 水田面積と残留水深の分布との関係
Fig.3 Relation between the size of paddy field and the distribution of remaining water depth

図4 それぞれの水田管理法における平均残留水量の変化
Fig.4 The mean of remaining water volume in various management of paddy fields

この排水性の違いは、短辺を延長して水田を拡大したために、各メッシュから水尻までの排水距離が長くなり、田面の起伏による地表排水の阻害を受けやすくなったからだと考えられる。そこで各水田の平均排水距離（各メッシュから最も近い水尻までの距離の平均）を求めたところ、0.5 ha : 1 ha : 2 ha = 52 m : 58 m : 76 mとなった。

2. 地表残留水量減少のための水田管理シミュレーション

各水田管理法ごとにパラメータをかえた際の平均残留水量の変化を図4に示す。

(1) 均平精度の向上

均平精度の向上が平均残留水量の減少にもたらす効果は大きい。たとえば、均平精度を±3.5 cmから±2.5 cmに向上させると、平均残留水量が約3割減少した。

(2) 水尻の増設

一方、水尻を増設したことによっても平均残留水量は減少するものの、均平精度に比べてその効果は小さかった。ここで水尻の数と平均排水距離との関係を計算したところ、水尻1カ所 : 2カ所 : 3カ所 : 5カ所 = 52.0 m : 50.0 m : 49.4 m : 49.2 mと、抜本的な改善にはつながっていなかった。0.5 ha水田では水尻の増設による平均排水距離の短縮効果が小さいため、平均残留水量の減少も小さかったのだと考えられる。

(3) 明渠の設置

明渠が平均残留水量に及ぼす影響は大きかった。たとえば基準水田（明渠0本）に比べて、明渠3本設置した模擬水田では、平均残留水量を約6割減少させた。3次元囲い込みモデルの考え方の都合上、湛水が明渠に流入した時点で水尻に到達した（水田から排水された）のと同等の扱いになるため、現実よりも明渠の効果を過大評価していることも否めないが、それを差し引いても明渠の設置は簡便かつ有効な地表排水の促進手段だと考えられる。

ここで平均排水距離を見ると、明渠0本 : 1本 : 3本 : 5本 = 52 m : 13 m : 4.6 m : 2.6 mと、大幅に短縮されている。だが平均残留水量はこれほどまでには減少していない。これは、地表排水の良否は、排水距離だけでなく、他の要因（起伏の連続性など）も関係するためである。

傾斜も平均残留水量の削減に

(4) 傾斜の付与

傾斜も平均残留水量の削減に

は効果的であった。たとえば傾斜1/2500の模擬水田の平均残留水量は、基準水田（傾斜なし）の約6割に減少した。

図5は、基準水田およびそれに1/2500の傾斜を付けたもの（したがって基準水田と類似した起伏の連続性の傾向を有している）の地表残留水の等水深線である。排水路から遠いメッシュほど、傾斜によって残留水が減少している一方で、水尻付近の残留水は逆に増えている。このことについて、排水路側から長辺方向に各水田を4等分し、それぞれの箇所の平均残留水量を計算すると、図6のようにその傾向が明らかに見られた。このように、単に傾斜を付けるだけでは水尻付近を乾燥させづらいので、水尻付近に短辺と平行な明渠を設置するなどの管理を別途行う必要がある。

(5) 他の管理法との比較

ところで図4を見ると、平均残留水量は、均平精度±2.5 cm、明渠1本、傾斜1/2500のときにほぼ同等の約4 mmであり、同じく均平精度±1.0 cm、明渠3本、傾斜1/1000のときに約2 mmで同程度である。より詳しく見るべく、これらの残留水深の頻度分布を図7に示す。

図5 傾斜の付与による残留水の変化
(左：傾斜なし、右：傾斜1/2500)

Fig.5 Change of remaining water when inclination was provided

図6 排水路からの距離と平均残留水量との関係の比較
(傾斜なし、および傾斜1/2500)

Fig.6 Relation between distance from drainage canal and the mean of remaining water volume

図7 平均残留水量を同程度に削減する効果を持つ水田管理法における残留水深の分布の比較

Fig.7 Comparison of distribution of remaining water depth in various management of paddy field that can reduce on the mean remaining water volume almost equally

これを見ると両者ともに、均平精度と明渠および傾斜との間に異なる傾向が見られた。均平精度における水深分布は、露出メッシュの割合は低いものの、水深10 mm未満のメッシュの割合が高く、水深20 mm以上のメッシュの割合が低い傾向にあった。それに対して明渠と傾斜については、露出メッシュの割合は高いものの、水深20 mm以上のメッシュの割合も高い傾向にあった。換言すれば、平均残留水量は同等であったとしても、明渠や傾斜は地表排水終了後の湛水残留状況が不均質であるのに対し、均平精度を向上させた場合には、多くのメッシュがある水深の範囲に収まっており、湛水残留状況が均質になっている。つまり地表排水終了後の田面の乾燥

図8 起伏の連続性を長辺方向および短辺方向に卓越させた2 ha模擬水田の例（上：縦卓越、下：横卓越）

Fig.8 Examples of simulated large-sized paddy fields where continuous ruggedness are vertically different

表 3 起伏の連続性が異なる大区画水田における平均残留水量の比較

Table 3 Comparison of the mean of remaining water volume in simulated large-sized paddy fields where continuous ruggedness are vertically different

	(基本) ±3.5 cm 明渠なし 傾斜なし	均平精度を向上 ±2.5 cm 明渠なし 傾斜なし	明渠を設置 ±3.5 cm 明渠 3本 傾斜なし	傾斜を付与 ±3.5 cm 明渠なし 傾斜 1/2500	3者の複合 ±2.5 cm 明渠 3本 傾斜 1/2500
縦卓越 ($\rho_x=0.3$, $\rho_y=0.85$)	<縦卓越2 ha> 7.0 mm (1.00)	4.9 mm (0.70)	4.3 mm (0.61)	4.1 mm (0.58)	1.9 mm (0.27)
横卓越 ($\rho_x=0.85$, $\rho_y=0.30$)	<横卓越2 ha> 6.1 mm (0.87)	4.5 mm (0.64)	3.4 mm (0.48)	4.3 mm (0.62)	2.2 mm (0.31)

を一律的に管理することができることから、コンバインの進入や収穫作業を計画しやすいと捉えることができる。

3. 大区画水田における起伏の卓越方向を考慮した地表排水シミュレーション

ここで起伏の連続性に注目する。これまではそれを長辺（排水路に垂直）方向に卓越させてきたが、一般に水田の大区画化は短辺（排水路に平行）方向に行われるため、長辺よりも短辺の方が長くなる。その場合、代かきなどの農作業を長い方の辺である短辺方向に行うため、起伏の連続性もその方向に卓越する。そこで、これまでのように起伏の連続性を長辺方向に卓越させたものを以下では縦卓越と呼び、これとは別に短辺方向に起伏の連続性を卓越させたもの（自己相関係数を縦卓越とは逆の $\rho_x=0.85$, $\rho_y=0.30$ とする）を横卓越と呼ぶことにして、両者について2 ha（長辺100 m, 短辺200 m）の模擬水田を用意して（図 8）、これらの地表排水性を比較することにする。

具体的には、まず、縦卓越、横卓越ともに2 haかつ均平精度±3.5 cmで作成し、それらを縦卓越2 ha, 横卓越2 haと名付ける。そして、これらに均平精度の向上（±2.5 cm）、明渠の設置（3本）、傾斜の付与（1/2500）、そしてこれら3者すべてを複合して施したときに、地表排水後の平均残留水量がどのように変化するかを見る。

結果を表 3に示す。（）内は縦卓越2 haの平均残留水量を1.00としたときの各平均残留水量の指数である。

まず縦卓越2 haと横卓越2 haとを比較すると、後者の平均残留水量が約1割少ない。これは長い辺の方向に起伏が卓越していることから、遠くのメッシュからの排水が起伏に阻害されにくくなったためである。また、両者の均平精度を向上させると、縦卓越で起伏による地表排水阻害の影響が小さくなったため、両者の差が縮まった。

明渠を設置した場合、横卓越の方が明渠に水が流れ込みやすいため、平均残留水量の削減効果が大きかった。

これらに対して傾斜は、縦卓越の方が良い排水性を示した。これは、横卓越は起伏の連続性が傾斜の向きと垂

直であり、傾斜による水の流れを阻害するためである。

そして3者を複合して施したものは、傾斜の影響を強く受けるために、縦卓越の方が排水性がよかった。

以上のように、地表排水を促進するための各種の管理は、起伏の連続性、すなわち耕起や代かきの作業方向と連動して考える必要がある。中でも傾斜については、起伏の連続性との関係を考慮しないと効果が十分に発現されない可能性がある。

IV 水田の面積に適合した均平精度基準の試算

さて、計画基準¹⁾における均平精度の基準「平均値±3.5 cm」は、水田の面積に依らず一律に示されているものである。しかし、水田が拡大されれば地表排水性が低下する。したがってこれまでに見て来たとおり、地表排水に大きく寄与する均平精度については、面積に応じて基準を使い分けられることが理想だと考えられる。このことについてこれまでの結果を応用して考えてみたい。

0.5 ha, 均平精度±3.5 cmの模擬水田（基準水田）における平均残留水量5.67 mmを確保するために、それぞれの面積でどれだけの均平精度が必要なのかについて計算した。その回帰曲線（式 1）を図 9に破線で示す。

図 9 それぞれの水田面積のときに特定の平均残留水量を確保するために必要な均平精度

Fig.9 Leveling accuracy of the paddy field necessary to obtain the certain mean of remaining water volume

$$y = 1.62e^{-1.30x} + 2.68 \quad (R^2 = 0.99) \quad \cdots \text{式 2}$$

ここで x は水田面積 (ha), y は平均残留水量 5.67 mm を満たす均平精度 ($\pm$ cm) である。この式から, たとえば 3 ha 水田でこの平均残留水量にしたいときには, 均平精度を ± 2.7 cm にすれば良いということになる。なお, その均平精度で地表排水のシミュレーションを行った結果, 平均残留水量は 5.58 mm だった。実際のレーザーレベラーでの均平整備の限界は ± 2.5 cm とされる (機械メーカーからの聞き取りより) ことから, 大区画圃場整備を行う際の均平精度基準として, この程度の数値を設定してもよいのではないかと考えられる。

参考までに, 平均残留水量を 5.67 mm の半分の 2.84 mm にするのであれば, 図 9 に一点鎖線で示した回帰式;

$$y' = 0.81e^{-1.32x} + 1.35 \quad (R^2 = 0.99) \quad \cdots \text{式 3}$$

のようになる (ただし y' は平均残留水量 2.84 mm を満たす均平精度 ($\pm$ cm))。3 ha なら均平精度 ± 1.3 cm である。

V おわりに

本研究では水田からの地表排水が終了した後の田面残留水量について, 各種の水田管理法との関係をコンピュータシミュレーションを用いて検討した。結果として以下を得た: ①均平精度の向上による地表排水の促進は, 明渠や傾斜によるものに比べて, 水田内の残留状況を均質にすること, ②明渠や傾斜による地表排水の促進には, 田面起伏の連続性の方向を考慮することが重要であること。さらに大区画圃場整備時の均平精度基準についても言及した。

なお, 本研究は地表排水が終了した直後の状態に関するものであって, 経過時間ごとの残留水量の変化については検討していない。その点は今後の検討課題である。

注釈

注1) 田淵⁸⁾はこれらを合わせて微地形と表現している。

注2) σ は, 山路⁹⁾に従って, 想定する均平精度のレンジを 99% 信頼区間として計算した。

注3) 計画基準¹⁰⁾には「1か所の場合は辺の下流側に設ける」と記述されているが, 今回のシミュレーションでは地表排水を最も効率よく行えるように短辺の中央に設置した。

注4) 短辺中央部の標高は $-|e \times \sigma|$ とした。

引用文献

- 1) 農林水産省構造改善局 (2000): 『土地改良事業計画設計基準 ほ場整備 (水田)』, 農業土木学会, 東京, p.258.
- 2) 藤森新作 (2001): 高生産性水田の管理技術 (高生産性水田農業と基盤整備編集委員会, 『高生産性水田農業と基盤整備=その事例と展望』), 農業土木学会, 東京, p.22.
- 3) 若杉晃介・藤森新作 (2008): 圃場面傾斜化が田面排水や地表灌漑に及ぼす影響, 農業農村工学会論文集, 255, 51-56.
- 4) 丸山利輔 (1975): 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—, 土壌の物理性, 32, 11-15.
- 5) 山路永司・富田正彦・竹中肇・岩淵吉博 (1981): 3次元囲い込みモデルによる地表残留状況の検討, 農土論集, 94, 16-22.
- 6) 岩淵善彦・藤森新作・長利洋 (2001): 田面凹凸を考慮した差分法による圃場用排水解析手法の開発, 農土論集, 212, 145-150.
- 7) 内田晴夫・丸山利輔・小林慎太郎 (1984): 三次元空間系列を対象とした地形起伏のシミュレーションに関する基礎的研究, 農土論集, 114, 1-6.
- 8) 田淵俊雄 (1966): 粘土質の水田の排水に関する研究 (1) 粘土質水田の排水に関する問題点と仮説, 農土論集, 18, 7-11.
- 9) 山路永司 (1989): 大区画水田の均平, 農上誌, 57(3), 17-22.
- 10) 前掲1), p.192.

Summary: In this study, we compared water volume remaining on paddy fields after surface drainage, managed under various conditions using a computer simulation. The results were as follows: i) distribution of remaining water volume became almost homogeneous by improving leveling accuracy. This tendency was different from distribution of water remaining in case of open canal drainage or when an inclination was provided, ii) it is necessary to consider the direction of continuous ruggedness for open canal drainage or the inclination provided to decrease the remaining water volume, iii) in addition, appropriate leveling accuracy corresponding to the size of the paddy field was preferred.

Key Words: 1) Simulation, 2) Management of Paddy Field, 3) Surface Drainage, 4) Remaining Water Volume, 5) Leveling Accuracy

(2011年5月21日 受付)

(2011年9月17日 受理)