

営農段階を考慮した地表排水性向上のための水田管理シミュレーション

誌名	農村計画学会誌 = Journal of Rural Planning Association
ISSN	09129731
著者	鈴木, 翔 牧山, 正男
巻/号	31巻論文特集号
掲載ページ	p. 345-350
発行年月	2012年11月

営農段階を考慮した地表排水性向上のための 水田管理シミュレーション

Simulation Study on Management of Paddy Field in Consideration of Farming 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

水田からの地表排水の促進は、収穫機械の進入および走行を担保する上で、稲作において最も重要な管理項目のひとつである。特に近年進められている大区画圃場整備においては、排水距離が長くなることから、地表排水の確保をより強く意識する必要がある。

地表排水に大きく影響するのが田面の均平精度である。これについては現地での実測のほか、コンピュータシミュレーションによる検討も行われてきており、均平精度はもとより、そこに緩傾斜や田面排水小溝（圃場内排水溝とも呼ばれる。以下、明渠）などを付与した際の排水促進効果¹⁾²⁾³⁾や排水速度⁴⁾について論じられてきた。

さて、本報で注目するのは、営農段階における地表排水促進のための配慮についてである。圃場整備基準⁵⁾には「均平面を用排水路ごとに区分し、それぞれの均平標高が同一か、排水路側を低くする」とある。これは圃場整備段階での話だが、農家は営農段階において同様の配慮、すなわち排水路側や水尻側が高くなならないように、代かきなどで運土すると考えられる。さらに農家は、状況に応じて明渠を設置する。しかし、これらに関する知見の蓄積は未だに十分であるとは言えない。

そこで本報では、水田からの地表排水終了後の残留水量を削減するためには、代かき時の運土、明渠の設置といった営農上の配慮をどのように行うことが効果的なのかについて、3次元開い込みモデル¹⁾を用いて検討する。

II 研究の方法

本研究では、コンピュータ上で以下の一連の作業を行う。①田面起伏の統計的性質を考慮しながら水田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、湛水の残留箇所およびその水深を把握する、③起伏の状態

と、その状態における残留水量 (m³) を統計的に、また湛水残留箇所を視覚的に (等水深線の利用) 評価する。

なお、②は鈴木ら³⁾と同様の方法をとるため、詳細はそちらを参照いただくこととして、本報では説明を割愛する。①については鈴木ら³⁾と異なる点のみ説明する。

1. 水田の模擬発生

(1) 部分的にメッシュ幅を変化させる模擬水田の発生法

丸山⁶⁾および内田ら⁷⁾による田面起伏モデルを使用する。これは起伏の連続性を示す自己相関係数に、均平精度を表す標準偏差と正規乱数との積をノイズとして付加するものである。ただし、鈴木ら³⁾は等間隔 (2.5 m 間隔) のメッシュを使用しているが、このメッシュ幅のまま明渠を設置すると、実際より太い明渠になる。そこで、岩瀬ら⁴⁾を参考に、部分的にメッシュの幅を変える。

この場合、メッシュ幅に応じて設定される起伏の連続性を示す自己相関係数をどう扱うかが問題となるが、通常のメッシュ幅 L に対する自己相関係数を ρ としたとき、メッシュ幅を S に変えた際の自己相関係数 ρ' を、

$$\rho' = \rho^{S/L} \quad \text{式 1}$$

で計算することにする。

なお、以下の議論では、起伏の連続性は、短辺方向に比べて長辺方向に卓越することを前提とする。なぜなら、農作業機械は主に長辺方向に走行し、代かきによる整地もその方向に行われると考えられるためである。

(2) 計算条件およびパラメータ、その他

模擬水田は長辺 (用排水路に垂直) 100 m、短辺 50 m の面積 50 a、通常のメッシュ幅を 2.5 m とし、均平精度を平均値 ± 3.5 cm (標準偏差 1.36 cm)²⁾ として作成する。

また、自己相関係数は、長辺方向を 0.85、短辺方向を 0.3 とする。この値は丸山⁶⁾に従った。ただし、丸山らのデータは 1970 年頃に観測されたものであるため、今日的

な農作業を鑑みれば、これについてはもう少し多様な視点から検討する必要があると思われる。そのことについては、III章4節で補足的に考察する。

その上で、明渠部分を設置する際には、明渠部分のメッシュ幅は0.5 mとし、田面起伏を発生させた後に、明渠部分を平均値-5 cmの深さに掘削する。そして明渠は必ず水尻と連結させる。そして水尻は、排水路側短辺の端部付近（排水路の下流側に設置する旨が圃場整備基準⁸⁾に記述されている）に設置する。

地表排水終了後の残留水量は、各メッシュの残留水深とメッシュの面積との積を加算することによって求める。ただし、明渠を掘削した場合には、このままの計算法だと明渠の容積分の水量を過剰に計算してしまうため、明渠の長さが異なると単純に比較が行えない。そこで式 2 によって、まず明渠以外の田面における残留水量を計算し、それを水田面積50 aあたりに換算した値を求めて、それを用いて比較することにした。

$$\begin{aligned} & \text{明渠設置時の残留水量} \\ &= \frac{\text{明渠以外の田面の残留水量}}{\text{明渠以外の田面の面積}} \times 50a \quad \text{式 2} \end{aligned}$$

模擬水田は、正規乱数を用いるため、作成するたびに起伏の傾向が異なる。今回は各設定ごとに350通りの異なる起伏の傾向を持つ模擬水田を作成し、それぞれに対して20 mmの湛水を与えた後に、3次元囲い込みモデルによって落水させる。なお、このモデルは時間経過の概念を含まないことから、減水深は考慮しないこととする。

以上の計算を、Microsoft社のExcel 2010のVisual Basic for Applicationsを用いて行う。また、統計学的検定にはSSRI社のExcel統計2010を用いる。

2. 評価項目

本報で検討するのは、営農段階で農家が行うであろう水尻近くが低くなるような運土および明渠の設置による

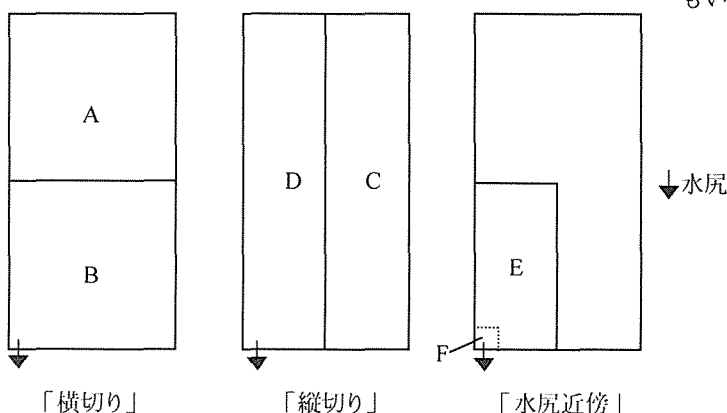


図 1 運土の効果についての評価を行う際の模擬水田の分割方法

Fig.1 Means to partition of simulated paddy field in order to evaluate effect of reducing the remaining water volume by moving the soil

地表排水促進効果についてである。

(1) 排水路側・水尻側を低く運土する効果の検討

I章で述べた圃場整備基準⁵⁾の記述内容について、その効果を確認するためには、模擬的に作成した水田（以下、模擬水田）を長辺（用排水路に垂直な辺）の中央から垂直に用水路側・排水路側に2等分し、用水路側をA、排水路側をBと呼んだとき（図 1左）に、Aの平均標高 \bar{h}_A とBの平均標高 \bar{h}_B とを比較して、

$$\bar{h}_A > \bar{h}_B \quad \text{式 3}$$

となったときの地表残留水量が、

$$\bar{h}_A \leq \bar{h}_B \quad \text{式 4}$$

のときのそれより少なくなっているか否かを見ればよい。

次に、長辺に平行な方向への標高について考える。ここで長利²⁾は計算により、圃場の傾斜を短辺方向につけると効果的だとしている。この記述は重要な示唆に富んでいる。というのも、短辺方向に傾斜を付けることについては、①一般に圃区が等高線に平行になるように圃場整備されていること、②農家が独自に圃場に傾斜を付与することは技術的に容易ではないこと、から、営農段階に注目する本報では傾斜をそのまま用いた議論は意味を持たない。しかし、高低差を生じさせる程度の運土なら代かきにより可能だと考えられる。すなわち、模擬水田を短辺中央から垂直に2等分したときの水尻を含まない側をC、水尻を含む側をDとしたとき（図 1中）、それぞれの平均標高 \bar{h}_C 、 \bar{h}_D とを、

$$\bar{h}_C > \bar{h}_D \quad \text{式 5}$$

としたときの方が、そうでないときより地表残留水が減るはずだという仮説が立てられる。

さらに、農家によっては、整地用具（俗にトンボと呼ばれるものなど）を用いて水尻の近くをより低くする人もいる。そこで、長辺方向・短辺方向に2等分した結果として生じる、水尻付近で全体の4分の1の面積に相当する部分をE、水尻近傍の10 m四方の部分をFとして、それぞれの平均標高を \bar{h}_E 、 \bar{h}_F としたときに、

$$\bar{h}_E > \bar{h}_F \quad \text{式 6}$$

となるときに、そうでないときに比べて地表残留水量が減少するか否かについても見ておきたい。

これらを踏まえて、以下では模擬水田を長辺に垂直に2等分したときに式 3を満たす水田を横切り○、長辺に平行に2等分したときに式 5を満たす水田を縦切り○と呼ぶことにする。さらに式 3、

式 5 ともに満たす場合を両方◎と呼ぶ。また式 6 を満たすときを水尻近傍○と呼ぶ。

(2) 明渠の効果の検討

長利²⁾は、短辺方向への傾斜と同時に、長辺に平行に明渠を設置することについて計算し、その設置間隔を狭くするほど残留水排除の効果は上がるが、その効果は頭打ちになり、またつぶれ地が増える旨を指摘している。一方で鈴木³⁾は、明渠を設置する際には田面起伏の連続性が卓越する方向（以下、起伏の卓越方向）との連結が重要ではないかと指摘している。

これらの示唆を踏まえながら、本報では起伏の卓越方向である長辺方向に垂直に明渠を設置することが、果たして本当に効果があるのかについての確認を行う。

III 結果と考察

1. 運土による残留水量削減効果の検討

まず、350通りの異なる起伏の傾向を持つ模擬水田全てにおける地表排水終了後の残留水量を求め、それらの平均、標準偏差を求める。次に、350通りの水田のうち、横切り○の水田を抽出したところ、233通りが該当したので、それらの残留水量のみの平均、標準偏差を求める。同様に縦切り○は205通り、両方◎は135通りが該当したので、それらについても同様に求める。

それらの結果を図 2 で比較する。残留水量の平均が、横切り○、縦切り○、両方◎の順に、徐々に低下しており、また標準偏差もわずかに減少していることがわかる。

ここで、それぞれの状態における残留水量の平均について、相互間の有意差検定を Wilcoxon の順位和検定により行った（表 1）。その結果、横切り○、縦切り○ともに、残留水量を有意に減少させていることがわかる。

圃場整備基準に記述されている横切り○には、確かに地表残留水量を減らせる効果があった。しかし、もともと起伏の卓越方向が長辺方向であり、その方向には水みちがしやすい。その方向に段差を付けても、すでにある水みちの機能を促進する程度の意味しかない。それに比べて縦切り○は、水みちができにくい短辺方向に流れを生じさせることから、わずかにではあるが、湛水残留箇所からの新たな水みちを形成する。そのことが残留水量の減少に影響するのだと考えられる。

また、両方◎については、縦切り○の地表排水の削減効果と有意な差が見られな

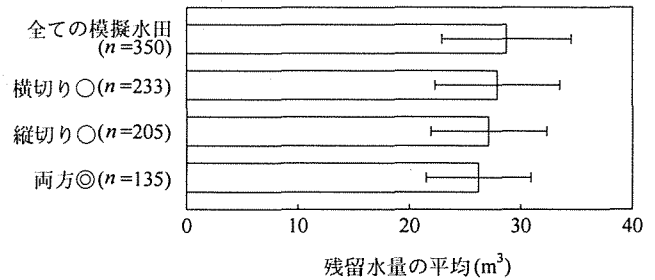


図 2 運土による残留水量の削減効果

Fig.2 Effects of reducing the remaining water volume by moving the soil
注) 図中のエラーバーは、残留水量の標準偏差を示す。

表 1 運土による残留水量の削減効果に関する Wilcoxon の順位和検定

Table 1 The Wilcoxon rank sum test in effects of reducing the remaining water volume by moving the soil

	全水田	横切り○	縦切り○	両方◎
全水田	-	*	**	**
横切り○	-	-	*	**
縦切り○	-	-	-	[]
両方◎	-	-	-	-

*p<0.05, **p<0.01, [] 有意差なし

い。縦切り○に加えて起伏の卓越方向に向けて水がより流れやすくなったはずだが、排水路側まで水が到達しても、そこから水尻までの水みちがないからであろう。しかしながら、両方◎は縦切り○に比べて標準偏差がわずかながら小さくなっている（Ansari-Bradley検定でp<0.05）。すなわち、両方◎となるように運土することは、農家にとっては労力に見合うほどの残留水量の削減効果は得られないが、リスク回避の点で多少の意味がある。

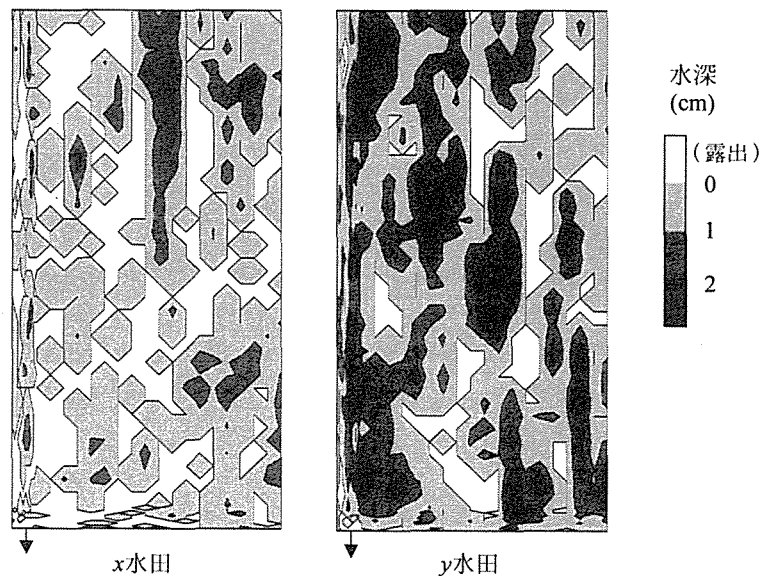


図 3 水尻近傍の起伏の違いと地表残留水量との関係

Fig.3 Relation between tendency of ruggedness in the vicinity of outlet and the remaining water volume

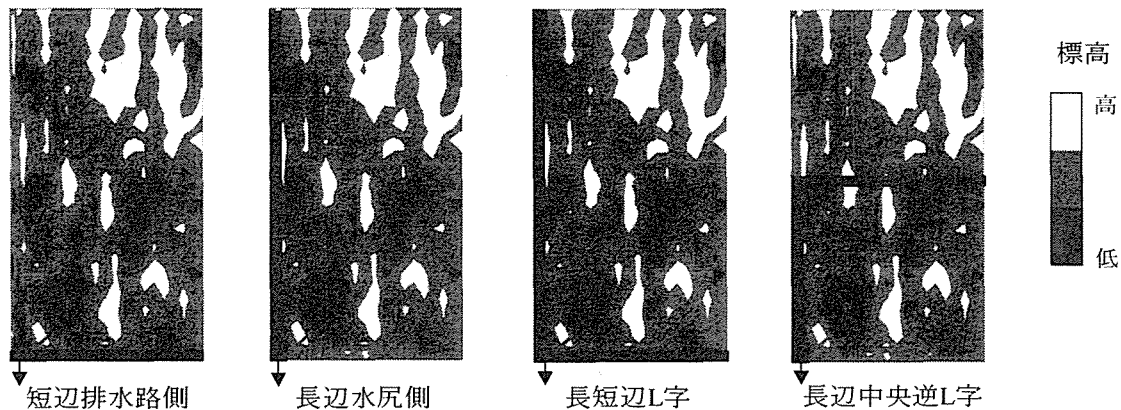


図4 田面起伏の例とシミュレーションに用いる明渠の設置方法

Fig.4 A sample of ruggedness on surface of paddy field and creating direction of the open-ditch drainage for the simulation

ここで、図2の結果のうち、標準偏差について、図3を用いて説明する。これらは、縦切りも横切りも○でない水田のうち、残留水量が少ない水田(図3左、以下、x水田)と残留水量が多い水田(図3右、以下、y水田)の、それぞれ地表排水終了後の等水深線図である。

x水田は、田面全体に露出部分が現れており、残留水深も目立って深いところがなく、浅い水深で広がっている。それに比べてy水田は、露出した部分が少なく、x水田に比べて水深が深い箇所が目立つ。すなわち、y水田で多くの水が残留した原因は、水尻付近(水尻から数mの範囲)に起伏の凸部が集中していたことから、水尻からの水みちの連続性が断られたためである。

そのことについて、水尻近傍の標高を下げることを効果を見ておく。両方○(135通り)の模擬水田を対象に、式6を満たす水尻近傍○の水田を抽出したところ、107通りが該当した。これらの残留水量の平均を比較したところ、両方○だと平均25.9 m³(標準偏差4.7 m³)であるのに対し、水尻近傍○の水田では平均25.4 m³(標準偏差4.2 m³)であった。Wilcoxonの順位和検定でも、Ansari-Bradley検定でも、いずれも両者の間に有意な差は見られなかった。おそらくは水尻近傍が低くなるように配慮しても、そこに至るまでの水みちの連続性が大幅に改善される場合は多くないのだと考えられる。

2. 明渠の設置による残留水量削減効果の検討

起伏の卓越方向が長辺方向である場合、鈴木ら³⁾に従えば、明渠はそれに垂直である短辺と平行に設置したときにその効果を発揮する。そこで図4のように、短辺排水路側に設置した場合、長利²⁾が示している長辺水尻側に設置した場合、それらを合わせて長短辺に沿ってL字に設置した場合(以下、長短辺L字)とで、明渠の効果を比較する。

さらに、明渠を短辺に平行に設置するのであれば、排

水路付近よりも水田の中央部に設置した方がより効果的である。田面中央につぶれ地ができることは気になるが、地表排水効率をより高めるためには検討しておきたい明渠の設置法である。水尻まで連結する必要があるため、形状としては逆L字になる(以下、長辺中央逆L字)。これについても合わせて検討する。

シミュレーション結果(残留水量の平均および標準偏差)を図5に示す。

まず、明渠がない場合に比べて、長辺水尻側に明渠を設置した場合、残留水量は9割程度に減少する。起伏の卓越方向からすると短辺方向にはあまり水みちができないが、それでも平均排水距離(各メッシュから水尻または明渠への距離の平均)が22 mと、明渠なしの56 mに比べて大幅に短縮される効果が大いなのだと考えられる。

これよりも排水促進効果が高いのが、短辺排水路側に明渠を設置したときである。明渠なしに比べて残留水量を8割程度に削減させる効果がある。平均排水距離は48 mとそれほど短縮させられるわけではないが、起伏の卓越方向に沿って排水路側に流れてきた水をこの明渠によって水尻に送り、水深が浅くなることによってさらなる水が排水路側に流れてくるという仕組みになっている。

長短辺L字に明渠を設けた場合、平均排水距離を短縮

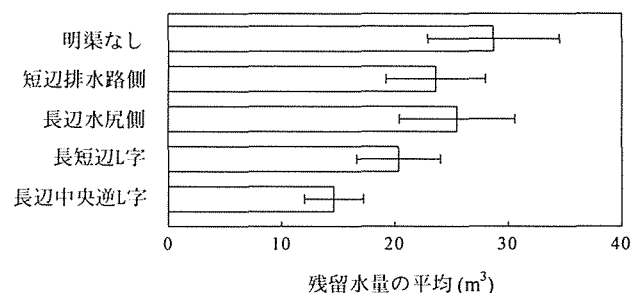


図5 明渠の設置による残留水量の削減効果

Fig.5 Effects of reducing remaining water volume by creating the open-ditch drainage

注)図中のエラーバーは、残留水量の標準偏差を示す。

表 2 運土および明渠の設置による残留水量削減効果

Table 2 Effects of reducing the remaining water volume by moving the soil and creating the open-ditch drainage

		運土			
		なし	横切り○	縦切り○	両方◎
明渠	なし	28.7 m ³ (±5.8 m ³) (n = 350) <1.00>	27.9 m ³ (±5.6 m ³) (n = 233) <0.97>	26.9 m ³ (±5.2 m ³) (n = 205) <0.94>	25.9 m ³ (±4.7 m ³) (n = 135) <0.90>
	短辺排水路側	23.6 m ³ (±4.4 m ³) (n = 350) <0.82>	22.8 m ³ (±3.9 m ³) (n = 224) <0.79>	23.0 m ³ (±4.1 m ³) (n = 199) <0.80>	22.1 m ³ (±3.9 m ³) (n = 122) <0.77>

凡例：上欄は平均（±標準偏差）。< >内は縦切り・横切りが○でなく、明渠もない状態での残留水量平均を1.00としたときの指標。

(18 m)させた上で、起伏の卓越方向に沿って流れてくる水を増やせるという、両者の複合的な効果が得られるため、残留水量は明渠なしに比べて6割程度まで減らせる。長利が指摘しているように、明渠を増やすことにより生じるつぶれ地の面積が気になるが、畦畔際である場合にはそれほど問題にならない。

そして、長辺中央逆L字については、平均排水距離を15 mにまで短縮させることができ、起伏の卓越方向にも適切に対応することから、明渠なしに比べて約4割まで残留水量を削減できた。この結果から、以下のことが示唆される。すなわち、もしも水田を耕区間の畦畔を取り払うことによって大区画化させ、短辺長が長辺長よりも長くなったときには、機械が短辺方向に走行することになり、したがって起伏の卓越方向も短辺方向になる。そのとき、短辺に垂直に明渠を数本設置すると、つぶれ地は増えるものの、地表排水は大幅に促進される。

3. 運土および明渠による残留水量削減効果の比較

ここまで検討してきた運土および明渠について、運土は縦切り○、横切り○、両方◎を、また明渠は短辺排水路側のみとし、それらを模擬水田に複合的に付与しながら、その効果に関する総合的な検討を行う。

結果を表 2 に示す。まず、概して言えることとして、明渠を設置することによる地表排水改良の効果は、運土に比べて明らかに大きい。また、明渠を設置しないときの運土による残留水量の削減効果に比べて、明渠を設置したときの運土の効果はそれほど顕著には見られない。以下、いくつかの点を見ていく。

明渠を設置しない場合には、縦切り○の方が横切り○より残留水量削減の効果はやや大きかった。だがこれに短辺排水路側に明渠を付与すると、横切り○の排水量が縦切り○に概ね追いつく（表 3 より、Wilcoxon の順位和検定で有意差なし）結果になった。横切り○によって起伏の卓越方向に沿って排水路側に水がさらに流れやすくなり、それを明渠で水尻に流すことができたためである。

表 3 運土と明渠による残留水量の削減効果に関する Wilcoxon の順位和検定

Table 3 The Wilcoxon rank sum test in effects of reducing remaining water volume by moving the soil and creating the open-ditch drainage

	短辺排水路側明渠	横切り○+明渠	縦切り○+明渠	両方◎+明渠
短辺排水路側明渠	-	*	*	**
横切り○+明渠	-	-	[]	*
縦切り○+明渠	-	-	-	*
両方◎+明渠	-	-	-	-

*p<0.05, **p<0.01, [] 有意差なし

一方で、明渠を設置しないときには両方◎にすることによる残留水量の削減効果は明らかに大きかったが（1.00→0.90, 9.8%低下）、明渠を設置した上で両方◎にしても、そこまで削減できなかった（0.82→0.77, 6.3%低下。ただし有意差は見られる）。先述のとおり、起伏の卓越方向に沿う排水路側への水の流れが、まずは明渠によって促進されるためである。

以上から、営農段階における残留水量削減に向けた対応としては、運土の効果もあることはあるが、運土に比べて手間も技術も要さない明渠の方が効果は明らかに大きい。したがって、毎年明渠の設置を行いつつ、数年に1回の割合で運土を行うのが合理的だと考えられる。

4. 補遺～起伏の卓越性について

本報では長辺方向の自己相関係数0.85、短辺方向0.3と、起伏の連続性が長辺方向に強く卓越するように模擬水田を作成した。最後に参考までに、それぞれを0.7, 0.45と、長辺方向への連続性を低くしたときと、0.9, 0.25と、それをやや高くしたときとで、残留水量がどう変化するかについて、明渠設置（短辺排水路側、長辺水尻側）の効果为例に見ておきたい。

結果を図 6 に示す。短辺方向の起伏の連続性が高くなると、長辺水尻側に明渠を設置することによる残留水量

削減の効果はわずかながら上昇している。その反面、短辺排水路側の効果はわずかに低下している。一方で、長辺方向の起伏の連続性を高くすると、短辺排水路側に明渠を設置することの残留水削減効果がわずかに上昇するが、長辺水尻側は効果が低下する。

このことからわかるように、起伏の卓越方向や、その連続性の大小は、地表排水の促進について考える上で欠かせない要素である。本報は運土と明渠に特化したため、これについての議論は行わなかったが、過去から論じられてきている均平精度や緩傾斜などに加えて、水田からの地表排水について検討する上での新たな検討課題として指摘しておきたい。

IV まとめ

本報では水田からの地表排水促進のための運土、明渠の設置といった営農作業について、シミュレーションによりその効果を検証した。田面起伏の連続性が長辺方向に卓越していることを前提とすれば、検討結果は以下のように摘要される：①運土は長辺方向に平行に水田を二分した際に水尻側が低くなるように行うことが効果的である。②明渠を起伏の卓越方向に直行するように設置することも効果的であり、その残留水量削減効果は運土より大きい。③ただし、起伏の卓越方向やその連続性の大きさについては、さらなる検討が必要である。

注

注1)実際には、営農段階においてはより高い均平精度になるものと思われる。たとえば文献9)では、文献10)を引用しながら、熟田での均平精度が ± 2.0 cm程度になるとしている。それを踏まえた上で、本報ではシミュレーション結果の比較をより明瞭に行うために、営農段階においてはやや低精度であることを認めつつも、 ± 3.5 cmを用いることとした。

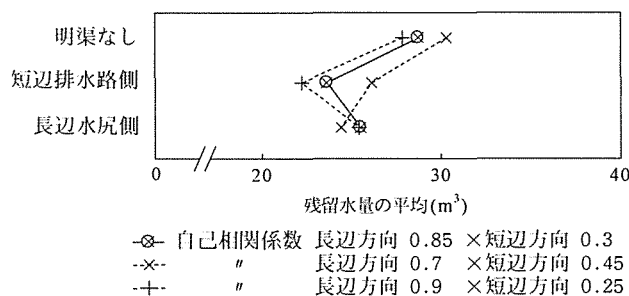


図 6 田面起伏の連続性を変えたときの明渠設置の効果
Fig.6 Effect of the open-ditch drainage when continuous of tendency in ruggedness change of the paddy field

引用文献

- 1)山路永司・富田正彦・竹中肇・岩淵吉博(1981):3次元開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.
- 2)長利洋(1987):圃場内排水溝による残留水の排除効果, 農土誌, 55(4), 13-18.
- 3)鈴木翔・牧山正男(2011):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, 農村計画学会誌, 30巻論文特集号, 333-338.
- 4)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.
- 5)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.259.
- 6)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.
- 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)前掲5), p.192.
- 9)長利洋(1985):傾斜面を基準とする圃場面均平の評価法, 農土誌, 53(12), 5-10.
- 10)岩手大学農地造成研究会(1980):傾斜地水田の圃場整備施工法について, 1980年度東北支部研修会テキスト, p.30.

Summary: Farmers must manage paddy fields for maximum reduction in the water volume that remains after surface drainage. Using computer simulation, we compared two methods for accomplishing this purpose: moving the soil to reduce the altitude on the outlet side and creating an open-ditch drainage. We found that 1) lowering the outlet side reduced the remaining water volume, 2) creating an open-ditch drainage further reduced the water volume, and 3) the effects of these methods depended on the direction of surface roughness of the paddy field.

キーワード (Keywords): 水田からの地表排水 (Surface Drainage from Paddy Field), 残留水量 (Remaining Water Volume), コンピュータ・シミュレーション (Computer Simulation), 運土 (Moving the Soil), 明渠 (Open-ditch drainage)

(2012年5月20日 受付)

(2012年7月 1日 受理)