

HYDRUS-3DによるFOEAS設置圃場の排水過程の3次元水分移動解析

池田 和弥

共生環境学専攻 農業農村工学講座

Keywords: FOEAS, 暗渠排水, 3次元土中水分移動予測, HYDRUS-3D

I はじめに

暗渠と弾丸暗渠が異なる深さで直交する地下水位制御システム FOEAS 設置圃場では、圃場全体の速やかな給排水が可能である。東日本大震災の津波被害を受けた圃場においては、FOEAS 圃場の排水機能を利用した除塩効果の実証的な実験が行われている。このような FOEAS 圃場の排水過程においては、暗渠と弾丸暗渠の近傍の3次元の水分移動の解析が重要である。3次元土中水分移動予測には汎用プログラム HYDRUS-3D が有効であるが、FOEAS 圃場への適用事例はない。

3次元の数値計算で行う計算領域の離散化における節点間隔は、対象とする現象のスケールに依存する。土への水の浸潤現象では、精度良く浸潤前線付近の計算を行うためには、1 cm 程度の小さな節点間隔が必要である。一般的な農地圃場では、縦・横の面に比べ、たとえば地下水までの深さといった計算対象の深さ方向の長さは極端に短い。そのため、深さ方向で決まる節点間隔を用いた FOEAS 圃場全体の離散化は、計算容量を超えるために不可能である。

そこで本研究では、FOEAS 圃場の3次元水分移動を解析するためにHYDRUS-3Dを適用し、排水過程における排水経路の把握と暗渠排水に対する弾丸暗渠の働きを定量的に評価することを目的とした。そのために、FOEAS 圃場から水分移動の対称性に注目して計算領域を選定し、短い計算時間で精度を保つための離散化条件の検討を行う。その上で、降雨による排水過程において下層土の透水性が、排水経路および暗渠排水に対する弾丸暗渠の働きに与える影響を検討する。

II 計算方法

縦 30 m × 横 100 m の FOEAS 圃場には、縦方向に 9 m 間隔で暗渠が、横方向に 1 m 間隔で弾丸暗渠が設置されている (図 1)。圃場における水分移動の対称性から、縦 4.5 m × 横 0.5 m × 深さ 0.8 m の計算土層 (図 2) を選定した。計算土層における横方向

x 軸において暗渠左端を $x=0$ cm, 縦方向 y 軸において手前を $y=0$ cm, 鉛直上方 z 軸において地表面を $z=0$ cm とした。0~15 cm 深を上層, 15~61 cm 深を下層, 61~80 cm 深を難透水層とし, 管径 10 cm の暗渠を 55 cm 深に, 管径 8 cm の弾丸暗渠を 26 cm 深に配置した。そして暗渠と弾丸暗渠の上は 15 cm 深まで疎水材とした。

境界条件は, 上端は 0.1 日間の降雨 (10 cm/day) 後は地表面蒸発なし, 下端は暗渠の 1 cm 下の 61 cm 深 (難透水層の上端) に地下水位を想定した一定土中水圧力 $h = 19$ cm, 暗渠は土中水圧力が正圧のときに排水が生じる浸出面, 暗渠以外の側面は水分流入出が生じないゼロフラックスをそれぞれ与えた。初期条件は, 61 cm 深の地下水位に対する平衡圧力分布を与えた。

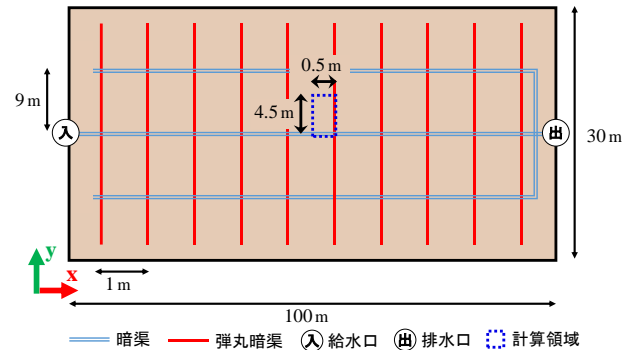


図 1 FOEAS 圃場の平面図と計算領域

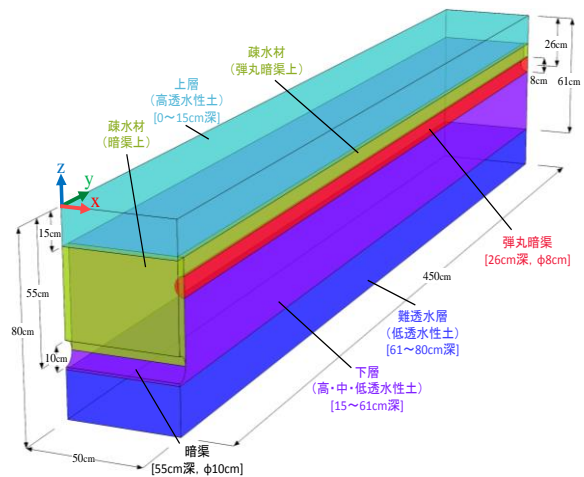


図 2 FOEAS 圃場の計算土層

図3に計算で用いた水分移動特性を示す。FOEAS圃場の実測値に基づく低透水性土に加え、高透水性土と中透水性土を定義した。弾丸暗渠には、他の土層より2オーダー以上高い飽和透水係数を仮定した。

離散化条件の検討には、3次元水分移動が顕著に生じる暗渠近傍の水分移動に注目して、計算土層の縦方向を縮小した縦1m×横0.5m×深さ0.8mの小サイズ計算土層を用いた。下層土は、低透水性土とした。離散化条件は、土層全体を1~5cmの等節点間隔、異なる土層の境界面のみを1cmでその他は2cm以上の等節点間隔（たとえば「2cm+境界1cm」と表記）とした。そして、1cmの離散化条件の計算結果を基準に計算精度を検討した。さらに、小サイズ計算土層で最適とした離散化条件を対称性から定めた縦4.5mの計算土層に適用し、その有効性の確認を行った。

排水経路を明らかにするために、縦4.5mの計算土層に対して下層土に高・低・中透水性土の3種類を与え、計算を行った。その時、弾丸暗渠と暗渠上疎水材の境界に注目し、各節点における水分フラックスに境界面積をかけて弾丸暗渠流出速度を計算することで、暗渠排水に対する弾丸暗渠の働きを評価した。

III 結果と考察

1. 離散化条件の検討

各離散化条件における節点数と計算にかかった時間の関係を図4に示す。節点間隔が小さいほど総節点数は増加し、その分計算時間が増加した。土層全体を等節点間隔で離散化した場合は、節点数と計算時間は両対数グラフ上で直線の関係であることが分かる。一方、土層境界の節点間隔を1cmにした場合は、直線関係からやや外れ、境界以外の節点間隔に関わらずおおよそ同程度の計算時間を要した。

異なる離散化条件で計算した暗渠排水速度の時間変化を図5に示す。暗渠排水速度はどの離散化条件でも同じ傾向を示し、0.5日頃と1.6~1.9日頃にピークを示した。0.5日頃の早くて大きなピークは上層から弾丸暗渠を経由した暗渠排水である。一方、後半のピークは、下層への浸透による地下水位の上昇に起因する暗渠排水である。ここでは下層は低透水性土であるため水分移動は小さく、暗渠排水速度も小さい。

各計算における、計算時間刻み Δt の変化と積算反復回数を図6に示す。生じている現象に対し計算の収束が困難な時、より精度の良い計算結果を導くために、HYDRUSでは時間刻みが自動的に小さ

くなり、各時間ステップにおける反復回数が増える。弾丸暗渠内で大きな水分移動が生じた0~0.5日は、他の時間に比べ時間刻みは小さく、反復回数は増大している。つまり、積算反復回数やそれ

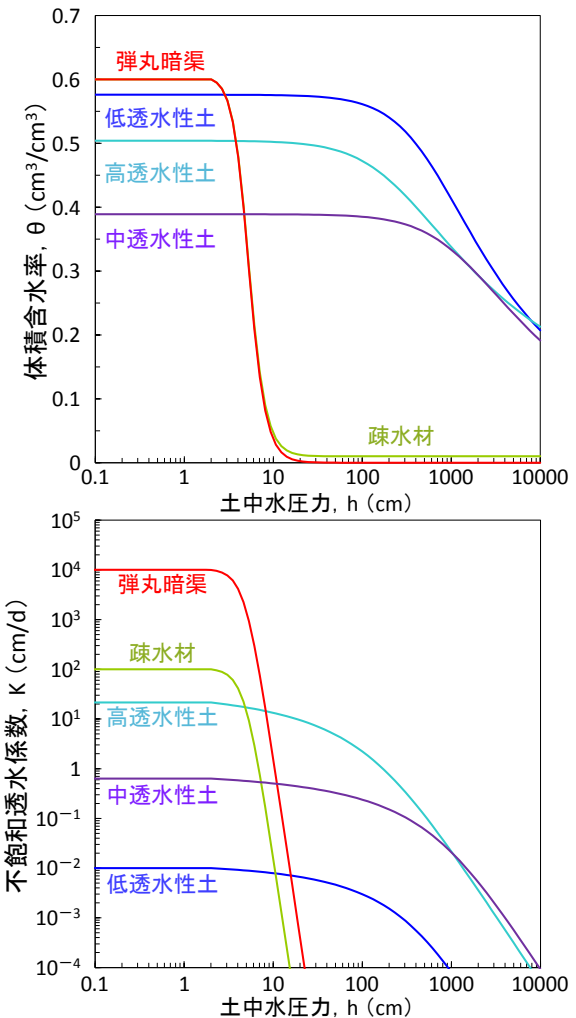


図3 計算で用いた水分移動特性

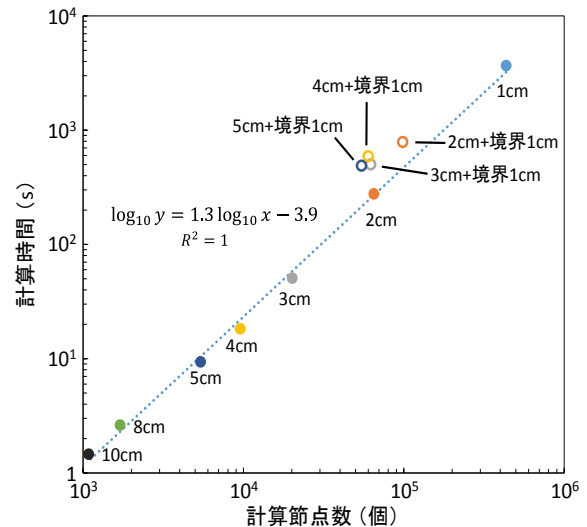


図4 異なる離散化条件における節点数と計算時間

にともなう計算にかかる時間は、弾丸暗渠内の計算に主に影響を受けると言える。

各離散化条件による暗渠排水速度の計算結果を比較すると、下層への浸透による後半のピークには大きな違いが見られなかった。一方、弾丸暗渠を經由する前半のピークに大きな違いが見られ、基準とする節点間隔 1 cm に比べ、2 cm と 3 cm の離散化条件では暗渠排水速度の最大値を 0.2 L/day 以上過大評価した (図 5)。一方、土層境界の節点間隔のみを 1 cm とした場合、全体の節点間隔 1 cm の計算結果とよく一致した。このことから、土層境界面の節点間隔を 1 cm とし、その他の間隔を 2 cm もしくは 3 cm とすることで、計算精度を保ち、また総節点数を少なく、そして計算時間を短くすることができると思われる。

2. 下層土の透水性が排水経路に与える影響

計算は 2 cm + 境界 1 cm の離散化条件で行った。計算開始から 0.35 日後 (降雨終了から 0.25 日後) における $y = 0, 50, 100$ cm の xz 断面の土中水圧力の等値線図を図 7 に示す。また、暗渠排水速度と弾丸暗渠流出速度の時間変化と、3 日間のそれぞれの流量および流量の割合を図 8 に示す。

下層が高透水性土の場合、暗渠を含む下層のほとんどが水分飽和状態であり、暗渠上部の疎水材や弾丸暗渠はほとんど水分量が上昇していないことが分かる (図 7)。これは、降雨で上層に侵入した水は、乾燥状態では不飽和透水係数が小さい弾丸暗渠や疎水材 (図 3) には流入せず、透水性の良い下層へ浸透したことを示している。そして難透水層上に溜まり、地下水位が上昇した。暗渠排水速度は降雨開始直後から大きな値を示したが、弾丸暗渠流出速度は小さく、90% 以上の排水は上昇した地下水が暗渠へ流入することで生じたことを示している (図 8)。

下層が低透水性土の場合、上層と下層の境界の水分量が上昇し、また弾丸暗渠下部の土中水圧力が増加した (図 7)。特に弾丸暗渠近傍の暗渠上疎水材で、土中水圧力の増加が見られた。この時、下層土の水分上昇はほとんど見られなかった。これは、透水性の悪い下層へはほとんど浸透せず、上層と下層の境界に溜まった水が弾丸暗渠に流入し、暗渠へ流れていることを示している。図 8 から、3 日間で生じた暗渠排水量の 69% が弾丸暗渠を通して生じていることが分かる。この時、弾丸暗渠からの流出は約 0.1 日後から生じているのに対し、暗渠排水が約 0.3 日後から生じたのは、暗渠上の疎水材中に水が溜まった後に排水が生じたためである。

下層が中透水性土の場合、下層のほとんどが正圧となった (図 7)。一方で、暗渠は下半分および

弾丸暗渠近傍のみで正圧となった。これは、地下水位の上昇にともなう暗渠排水と、弾丸暗渠を經由した暗渠排水が同時に生じていることを示している。暗渠排水は約 0.02 日から少量であるが生じ、約 0.3 日後に急増した (図 8)。また弾丸暗渠流出は約 0.1 日後から生じているため、0.3 日までの小さな排水は地下水位の増加によるものであり、

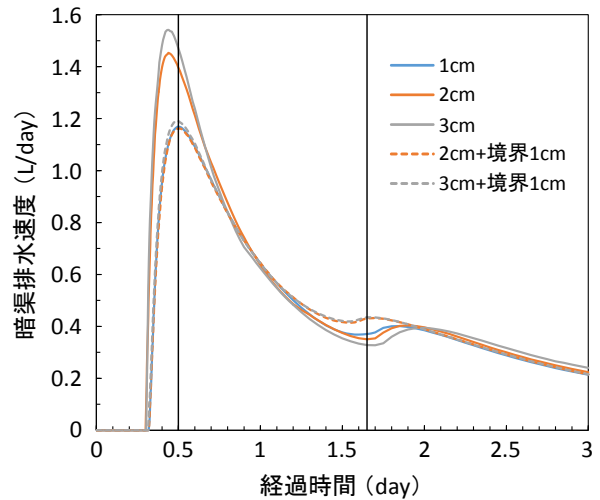


図 5 異なる離散化条件における暗渠排水速度の時間変化

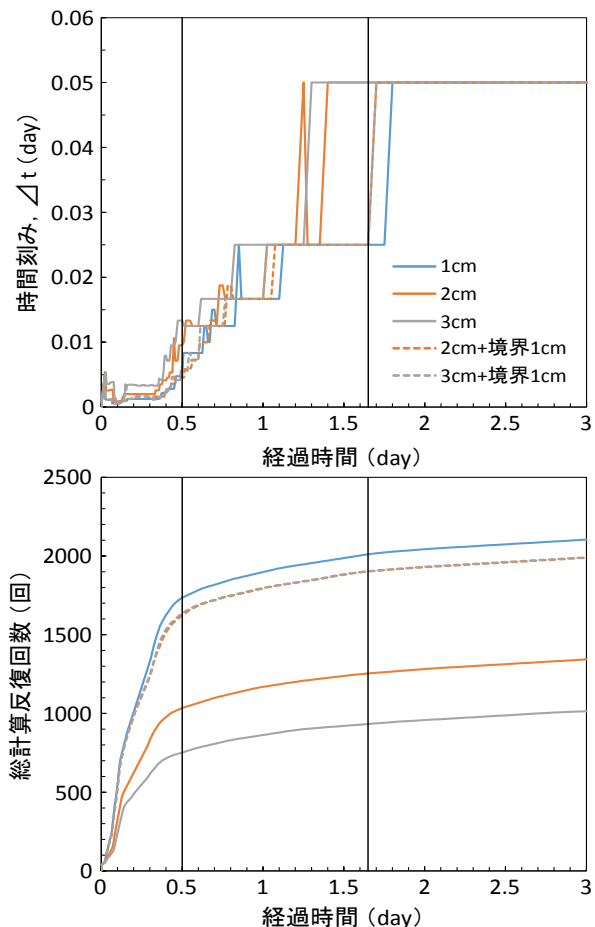


図 6 異なる離散化条件における計算時間刻みの時間変化と積算反復回数

それ以降の大きな排水は弾丸暗渠弾丸暗渠を經由したものであると言える。

IV まとめ

FOEAS 設置圃場における排水過程の3次元水分移動を解析するために HYDRUS-3D を適用し、離散化条件について検討を行った。そして、土層境界面の節点間隔を 1 cm とし、その他の間隔を 2 cm もしくは 3 cm とすることで、計算精度を保ち、また総節点数を少なく、そして計算時間を短くすることができることを明

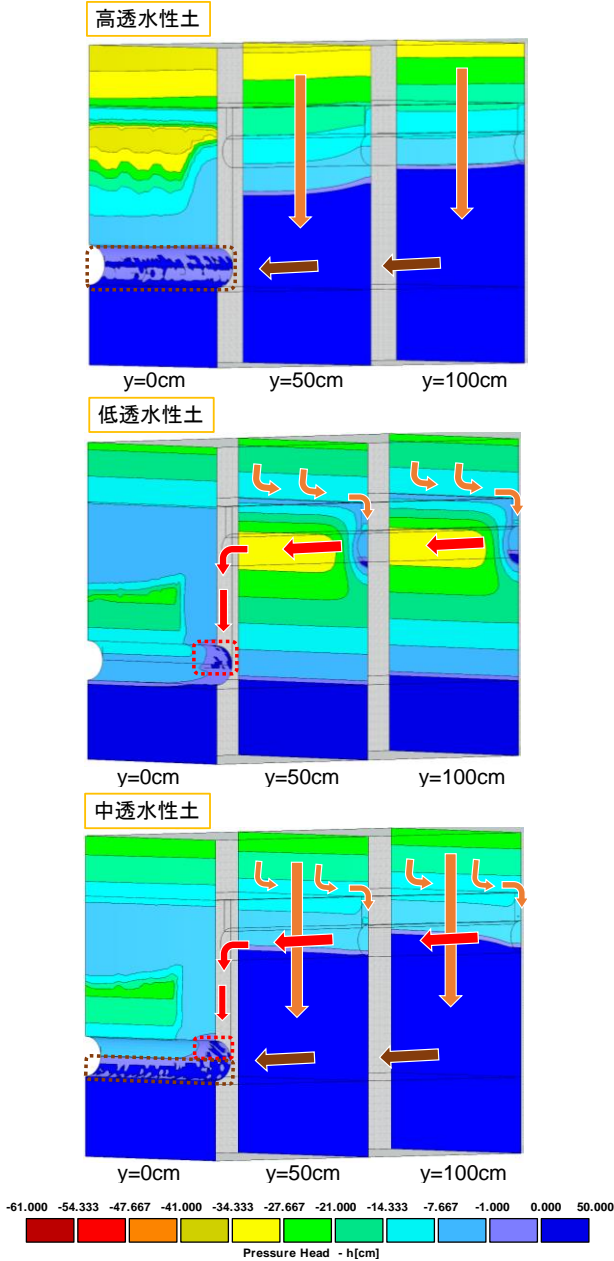


図7 異なる下層土における0.35日目の土中水圧力分布と推定される排水経路

らかにした。また、下層土の透水性が排水経路および暗渠排水に対する弾丸暗渠の働きに与える影響について定量的な評価を行った。下層土の透水性によって排水経路は異なり、下層へ多くの水が浸透する場合は地下水位の上昇にともない暗渠への排水が生じ、逆に下層に浸透しにくい場合は、主に弾丸暗渠を經由した排水が生じた。このような場合、測定が困難な弾丸暗渠の透水性と保水性が計算結果に大きく影響する可能性があるため、水分移動特性の詳細な検討が今後の課題である。

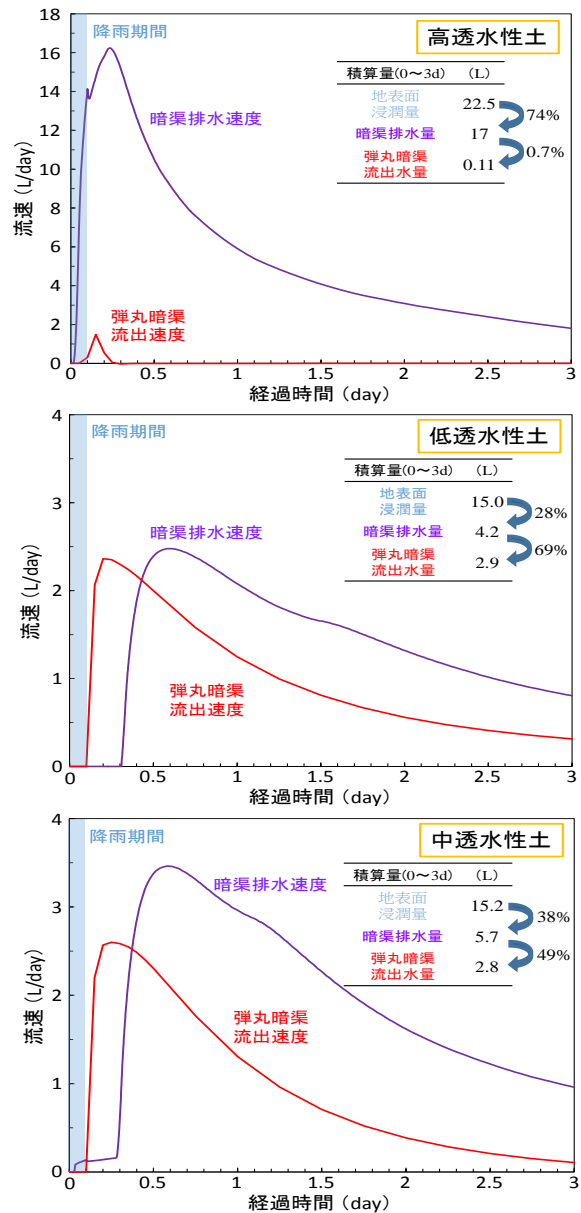


図8 異なる下層土における暗渠排水速度と弾丸暗渠流出速度、および3日間の流量の割合